



ՀՏԴ 373.167.1:53(075.3)
ԳՄԴ 22.3y72
Ֆ 520

Հաստատված է ՀՀ կրթության և գիտության
նախարարության կողմից

Խմբագրությամբ՝ պրոֆեսորներ
Ալբերտ Կիրակոսյանի և
Էդուարդ Ղազարյանի

Ֆ 520 **Ֆիզիկա-12:** Ավագ դպրոցի 12-րդ դասարանի դասագիրք
ընդհանուր և բնագիտամաթեմատիկական հոսքերի համար /
Է. Ղազարյան, Ա. Կիրակոսյան, Գ. Մելիքյան և այլք. — Եր.:
«Էդիթ Պրինտ», 2011. — 264 էջ:

ՀՏԴ 373.167.1:53(075.3)
ԳՄԴ 22.3y72

ISBN 978-9939-52-379-8

© «Էդիթ Պրինտ», 2011
© Ղազարյան Է., Կիրակոսյան Ա., Մելիքյան Գ.,
Մամյան Ա., Մաիլյան Ս., 2011

ԷԴՈՒԱՐԴ ՂԱԶԱՐՅԱՆ
ԱԼԲԵՐՏ ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ
ԳԱԳԻԿ ՄԵԼԻՔՅԱՆ
ԱՐՏԱՎԱԶԴ ՄԱՍՅԱՆ
ՍՈՍ ՄԱԻԼՅԱՆ

ՖԻԶԻԿԱ

Ավագ դպրոցի 12-րդ դասարանի
դասագիրքը ընդհանուր
և բնագիտամաթեմատիկական
հոսքերի համար

12

ԵՐԵՎԱՆ
ԷԴԻՐ ՊՐԻՆՏ
2011

Սիրելի բարեկամ

«Ֆիզիկա-12» դասագիրքը երրորդն է ավագ դպրոցի ֆիզիկայի դասագրքերից, որոնք նախատեսված են ընդհանուր և խորացված ուսուցմամբ հոսքերի համար: Դասագրքում շարադրված նյութը համապատասխանում է ՀՀ ԿԳ նախարարության հաստատած չափորոշիչներին և ծրագրերին («Ֆիզիկա». Հանրակրթական ավագ դպրոցի չափորոշիչներ և ծրագրեր, Երևան, 2009):

Հեղինակները փորձել են մեկ միասնական գրքի շրջանակում ներկայացնել ինչպես ընդհանուր, այնպես էլ խորացված ուսուցմամբ հոսքերի համար նախատեսված ծրագրային նյութը: Որպես հիմք վերցված է ընդհանուր հոսքի ծրագիրը, որտեղ ընդգրկված թեմաները լրացված են խորացված ուսուցմամբ հոսքերի ծրագրից: Հատուկ ընդգծված են առանձին պարագրաֆների վերջում տրված լրացուցիչ նյութը և դրան վերաբերող հարցերը, առաջադրանքները և խնդիրների լուծման օրինակները: Ընդգծված են նաև այն պարագրաֆները, որոնք նախատեսված են միայն խորացված ուսուցմամբ հոսքերի համար:

Շարադրանքի միասնականությունը պահպանելու նպատակով որոշ թեմաների մատուցման հերթականությունը համապատասխանեցված է ընդհանուր հոսքի ծրագրին:

Ինչպես և ավագ դպրոցի ներկայումս օգտագործվող դասագրքերում, նյութի մատուցումը հստակեցնելու և յուրացումը հեշտացնելու նպատակով պարագրաֆները բաժանվել են առանձին մասերի՝ յուրաքանչյուր մասի բովանդակությունը բացահայտող ենթավերնագրով: Պահպանվել է նաև լաբորատոր աշխատանքներն ընդհանուր շարադրանքում ներկայացնելու օգտակար ձևը:

Ինքնուրույն լուծման համար նախատեսված խնդիրները և դրանց պատասխանները տրված են դասագրքի վերջում՝ ըստ նյութի շարադրման հերթականության:

Հեղինակներ

ՆԵՐԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

Բնության մասին տեղեկությունների մեծ մասը մարդն ստանում է լույսի առաջացրած տեսողական զգացողության միջոցով: Լույսն օգնում է մարդուն ոչ միայն կողմնորոշվել տարածության մեջ և դիտել տեղի ունեցող պատահարները, այլ նաև բազմակողմանիորեն ուսումնասիրել բնության երևույթները: Լուսատու մարմինների ճառագայթման ուսումնասիրությունը հաճախ հնարավորություն է տալիս որոշելու դրանց ջերմաստիճանը, կազմությունը և քիմիական բաղադրությունը: Ուսումնասիրելով հեռավոր աստղերից եկող լույսը՝ կարելի է որոշել դրանց հեռավորությունը Երկրից, շարժման արագությունը և այլն: Ուստի ֆիզիկայի պատմության մեջ հատուկ նշանակություն է ունեցել լույսի բնույթի ուսումնասիրությունը:

Ֆիզիկայի այն բաժինը, որն ուսումնասիրում է լուսային երևույթները, կոչվում է օպտիկա (հունարեն «օպտիկոս»՝ տեսողական բառից), այդ պատճառով լուսային երևույթները հաճախ անվանում են նաև օպտիկական:

Լույսի մասին պատկերացումները զարգացել են՝ կրելով փորձարարական տվյալների հավաքման և մշակման, նոր ֆիզիկական գաղափարների առաջացման և զարգացման հետ կապված փոփոխություններ: Ստորև համառոտակի ներկայացվում է լույսի մասին գիտական գաղափարների զարգացման պատմությունը:

Ինչպես հայտնի է, ֆիզիկայում փոխազդեցությունը մարմինների միջև իրականացվում է կամ նյութի փոխանակությամբ, կամ միջավայրի վիճակը փոփոխելու միջոցով (առանց նյութի տեղափոխության): Փոխազդեցության այս երկու եղանակներին համապատասխան՝ 17-րդ դարում առաջացան լույսի բնույթի մասին երկու միանգամայն տարբեր՝ **մասնիկային** և **ալիքային** տեսություններ:

1672 թվականին Իսահակ Նյուտոնն առաջ քաշեց վարկած լույսի մասնիկային բնույթի վերաբերյալ, որի համաձայն՝ լույսը մասնիկների հոսք է (նյութի տեղափոխություն), որոնք արձակվում են լույսի աղբյուրից և շարժվում դասական մեխանիկայի օրենքների համաձայն: Լույսի մասնիկային տեսությունն ակնառու և պարզ բացատրեց օպտիկայի՝ փորձից հայտնի օրենքները:

Մասնիկային տեսության հետ գրեթե միաժամանակ հոլանդացի ֆիզիկոս Բրիստիան Հյույգենսը լույսի բնույթի վերաբերյալ առաջ քաշեց այլ վարկած, համաձայն որի՝ լույսն ամբողջ տարածությունը լցնող հատուկ, ամենաթափանցիկ մատերիայում՝ եթերում տարածվող երկայնական ալիք է: Լույսի ալիքային տեսությունն էլ բացատրում էր այն ժամանակ հայտնի օպտիկական երևույթները, սակայն այս տեսությունից հետևում էր, որ ավելի խիտ միջավայր անցնելիս լույսի արագությունը նվազում է: Սա հակասում էր մասնիկային տեսությունից ստացված արդյունքին:

Լույսի բնույթի վերաբերյալ այս անորոշ վիճակը շարունակվեց մինչև 19-րդ դարի սկիզբը, երբ հայտնաբերվեցին լույսի դիֆրակցիայի և ինտերֆերենցի

երևույթները, որոնք հատուկ են բացառապես ալիքային շարժմանը: Մասնիկային տեսությամբ դրանք հնարավոր չէր բացատրել:

19-րդ դարի կեսին Ջեմս Մաքսվելը տեսականորեն ցույց տվեց, որ էլեկտրամագնիսական ալիքները վակուումում տարածվում են լույսի արագությամբ՝ $c = 3 \cdot 10^8$ մ/վ, իսկ Հայնրիխ Հերցը, փորձում ստանալով էլեկտրամագնիսական ալիքներ և ուսումնասիրելով դրանց հատկությունները, բացահայտեց էլեկտրամագնիսական և լույսի ալիքների համանմանությունը: Կարճալիք (մի քանի միլիմետր ալիքի երկարությամբ) էլեկտրամագնիսական ճառագայթման հետ կատարված հետազոտությունները վերջնականապես հաստատեցին այն միտքը, որ լույսի ալիքներն էլեկտրամագնիսական ալիքներ են: Իսկ երբ 1862 թվականին Արման Ֆիզոն ջրում լույսի տարածման արագության համար ստացավ վակուումում լույսի տարածման արագությունից փոքր արժեք, թվում էր, թե ալիքային տեսությունը վերջնական ու լիակատար հաղթանակ է տարել, և լույսի մասնիկային տեսությունը երկար ժամանակ մոռացության մատնվեց:

Սակայն 20-րդ դարի սկզբին լույսի բնույթի մասին պատկերացումներն սկսեցին արմատապես փոխվել: Նոր փորձարարական տվյալների ստացումը և ուսումնասիրությունը գիտնականներին բերեցին այն հետևության, որ ալիքային հատկությունների հետ մեկտեղ լույսն օժտված է նաև մասնիկային հատկություններով (այլ կերպ ասած՝ առաջ քաշվեց լույսի քվանտի գաղափարը, Մաքս Պլանկ): Անսպասելիորեն պարզվեց, որ հերքված մասնիկային տեսությունը, այնուամենայնիվ, կապ ունի իրականության հետ: Մասնավորապես, ճառագայթման ու կլանման ժամանակ, ինչպես նաև տարածվելիս լույսը դրսևորում է մասնիկային հատկություններ:

Ժամանակակից օպտիկան ուսումնասիրում է օպտիկական ճառագայթման բնույթը, առաքման և կլանման օրինաչափությունները, նրա տարածումը տարբեր միջավայրերում և փոխազդեցությունը նյութի հետ:

Օպտիկայում կատարվող հետազոտություններն ունեն հիմնարար նշանակություն և լայնորեն կիրառվում են ամենատարբեր ոլորտներում (հեռուստատեսություն, կապի օպտիկական համակարգեր, տիեզերական հետազոտություններ, բժշկություն և այլն):

ԵՐԿՐԱՀԱՓԱԿԱՆ ՕՊՏԻԿԱ

§ 1. ԵՐԿՐԱՀԱՓԱԿԱՆ ՕՊՏԻԿԱՅԻ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՕՐԵՆՔՆԵՐԸ: ԼՈՒՅՍԻ ՈՒՂՂԱԳԻԾ ՏԱՐԱԾՈՒՄԸ

Երկրաչափական օպտիկան ուսումնասիրում է թափանցիկ միջավայրերում լույսի տարածման օրենքները և օպտիկական համակարգերով լույսի անցնելու ժամանակ առաջացած պատկերների կառուցման սկզբունքները՝ առանց հաշվի առնելու լույսի ալիքային հատկությունները: Երկրաչափական օպտիկայի հիմնական գաղափարը լույսի ճառագայթի գաղափարն է:

Լույսի ճառագայթի մասին պատկերացում կարելի է կազմել հետևյալ պարզ փորձի օգնությամբ: Եթե լույսի աղբյուրից լույսի փունջն ուղղենք փոքր անցք ունեցող անթափանց էկրանին, ապա նրանից հետո կստացվի լույսի մեղ, զուգահեռ փունջ: Եթե փոքրացնենք անցքի տրամագիծը, ապա անցած փնջի տրամագիծը նույնպես կփոքրանա: Հնարավոր ամենամեղ փունջը, որը կարելի է պատկերացնել, կլինի պարզապես երկրաչափական գիծ: Այդպիսի երևակայական լույսի մեղ փունջն անվանում են լույսի ճառագայթ:

Բնության մեջ կարելի է հանդիպել լույսի փնջերի, սակայն «առանձին լույսի ճառագայթ» հասկացությունը վերացարկում է. այն սահմանվել է լույսի շատ մեղ փնջերի պատկերման համար: Լույսի ճառագայթն այն գիծն է, որի երկայնքով տարածվում է լուսային էներգիան:

Լույսի ճառագայթի գաղափարը հնարավորություն է տալիս լույսի տարածումը նկարագրելու երկրաչափական մեթոդներով:

Երկրաչափական օպտիկայի հիմքում ընկած են մի շարք օրենքներ, որոնք ստացվել են որպես փորձերի ընդհանրացման արդյունք.

1. լույսի ուղղագիծ տարածման օրենք,
2. լույսի ճառագայթների անկախ տարածման օրենք,
3. լույսի անդրադարձման օրենք,
4. լույսի բեկման օրենք,
5. լույսի ճառագայթի շրջելիության օրենք:

Այս օրենքները ճիշտ են, եթե միջավայրի անհամասեռությունների d բնութագրական չափը (օրինակ՝ անթափանց էկրանին բացված անցքի տրամագիծը, որով անցնում է լույսը կամ նրա ճանապարհին առկա արգելքի չափը) շատ մեծ է լույսի ալիքի λ երկարությունից՝ $\lambda \ll d$: Այլ կերպ ասած՝ **երկրաչափական օպտիկայում անտեսվում են լույսի ալիքային հատկությունները:**

Լույսի ուղղագիծ տարածումը: Դիտումները ցույց են տալիս, որ թափանցիկ, համասեռ* միջավայրում լույսը տարածվում է ուղղագիծ:

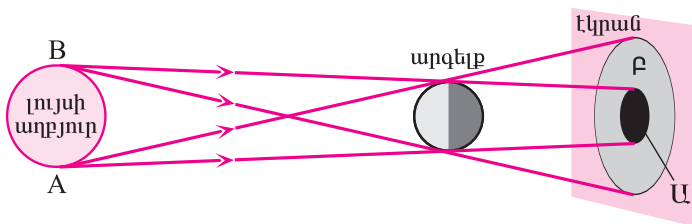
* Ավելի ճիշտ՝ օպտիկապես համասեռ (տե՛ս §6):

Այս օրենքը կոչվում է **լույսի ուղղագիծ տարածման օրենք**:

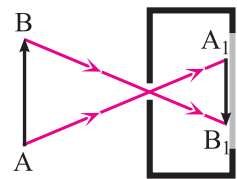
Լույսի ուղղագիծ տարածման երևույթին առնչվում ենք առօրյա կյանքում, երբ լույսն անցնում է ծխի, մառախուղի միջով կամ կիսաստվերի դռան արանքով: Լույսի ուղղագիծ տարածման հետևանք է ստվերի և կիսաստվերի առաջացումը (նկ.1):

Էկրանի Ա ստվերի տիրույթ լույսի ոչ մի ճառագայթ չի ընկնում, իսկ Բ կիսաստվերի տիրույթ ընկնում է լույսի աղբյուրի ճառագայթների մի մասը:

Լույսի ուղղագիծ տարածմամբ են պայմանավորված Արեգակի և Լուսնի խավարումները: Որ լույսը տարածվում է ուղղագիծ, կարելի է համոզվել սենյակի պատուհանները փակելով սև վարագույրով կամ ստվարաթղթով: Այնուհետև փոքր, կլոր անցք բացելով ստվարաթղթի վրա՝ մութ սենյակում կտեսնենք արևի լույսի փունջ, որը, տարածվելով սենյակով, անցքի դիմացի պատին կառաջացնի կլոր բիծ:



Նկ. 1. Ստվերի և կիսաստվերի առաջացումը



Նկ. 2. Առարկայի պատկերի ստացումը

Լույսի ուղղագիծ տարածմամբ է բացատրվում առարկայի պատկերի ստացումը մթնախցիկում (նկ. 2): Մթնախցիկի առջև դրված է լուսավորված AB առարկան: Եթե մթնախցիկի անցքի տրամագիծը փոքր է (ասենք՝ $1\div 2$ մմ), ապա մթնախցիկի հետին պատին դրված կաթնապակու վրա ստացվում է AB առարկայի շրջված և փոքրացված A_1B_1 պատկերը, որը վկայում է լույսի՝ անցքով ուղղագիծ տարածվելու մասին: Սկսենք փոքրացնել մթնախցիկի անցքի տրամագիծը և հետևենք առարկայի պատկերին: Կնկատենք, որ սկզբում պատկերի հստակությունը մեծանում է, միաժամանակ թուլանում է նրա պայծառությունը, քանի որ փոքրանում է մթնախցիկ մտնող լուսային էներգիան: Սակայն երբ անցքի տրամագիծը դառնում է 10^{-5} մ-ի կարգի, պատկերը լողովում է, իսկ երբ այն դառնում է 10^{-6} մ և ավելի փոքր, ապա պատկերն անհետանում է, և կաթնապակին լուսավորվում է թույլ և հավասարաչափ: Անցքի փոքրացմանը զուգընթաց պատկերի լողզումը և հետագա անհետացումն ապացույցում են, որ լույսի ուղղագիծ տարածման օրենքը խախտվում է: Իրոք, լույսի ալիքի երկարությունը՝ $\lambda \sim (4\div 8) \cdot 10^{-7}$ մ է, ուստի՝ երբ անցքի տրամագիծը՝ $d \sim 10^{-7}$ մ, խախտվում է երկրաչափական օպտիկայի կիրառելիության $\lambda \ll d$ պայմանը, և դրսևորվում են լույսի ալիքային հատկությունները:

Լույսի ճառագայթների անկախ տարածման օրենք: Երկրաչափական օպտիկայի այս օրենքի համաձայն՝ լույսի ճառագայթները տարածվում են միմյանցից անկախ, այսինքն՝ ճառագայթները միմյանց վրա չեն ազդում, և յուրաքանչյուր ճառագայթ տարածվում է այնպես, ինչպես կտարածվեր մյուս ճառագայթների բացակայության դեպքում:

Լույսի ճառագայթի շրջելիության օրենք: Այս օրենքը անդրում է, որ որոշակի հետագծով մի ուղղությամբ տարածվող ճառագայթը ճշգրիտ կրկնում է իր ընթացքը հակադիր ուղղությամբ տարածվելիս:

Երկրաչափական օպտիկայի մյուս՝ անդրադարձման և բեկման օրենքներին մանրամասն կծանոթանանք հաջորդ պարագրաֆներում:



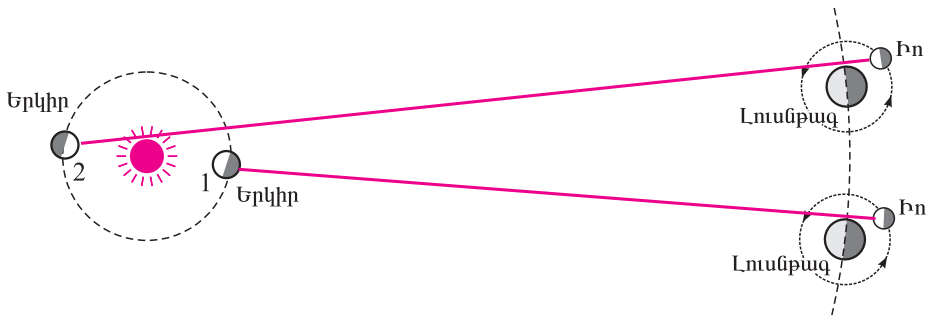
Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ է Լույսի ճառագայթը: 2. Որո՞նք են երկրաչափական օպտիկայի հիմնական օրենքները: 3. Ե՞րբ են ճիշտ երկրաչափական օպտիկայի օրենքները: 4. Ձևակերպեք Լույսի ուղղագիծ տարածման օրենքը: 5. Բերե՛ք համասեռ միջավայրում Լույսի ուղղագիծ տարածումը հաստատող որևէ օրինակ: 6. 1-ին նկարում A կետից փարեք երկու ճառագայթ, որոնցից մեկն ընկնում է կիսասփյուռի փրփույթ, իսկ մյուսը կլանում է արգելքը և չի հասնում սփյուռի փրփույթ: 7. Ինչպե՞ս են առաջանում Արեգակի և Լուսնի խավարումները: 8. Հայտնի են Արեգակի լրիվ և օղակաձև խավարումները: Երկրորդ դեպքում Լուսնի սկավառակի շուրջը դիտվում է արեգակնային օղակը: Ինչպե՞ս է առաջանում նման խավարումը: 9. Ձևակերպեք Լույսի ճառագայթների անկախ տարածման օրենքը: 10. Ձևակերպեք Լույսի ճառագայթի շրջելիության օրենքը:

§2. ԼՈՒՅՍԻ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Լույսի արագության չափման Ռյոմերի աստղագիտական մեթոդը: 17-րդ դարում դեռևս հայտնի չէր՝ լույսը տարածվում է անվերջ մեծ, թե՞ վերջավոր արագությամբ: Գալիլեյը փորձել է գտնել այդ հարցի պատասխանը, սակայն նրա փորձում Լույսի տարածման հեռավորությունն այնքան փոքր էր, որ նա չի կարողացել լուծել այդ խնդիրը:

Առաջին անգամ Լույսի արագությունը որոշել է դանիացի աստղագետ Օլե Ռյոմերը 1676 թ.: Լույսի արագության որոշման աստղագիտական մեթոդի հիմքում ընկած են Լուսնթագի արբանյակների խավարումների դիտումները: Լուսնթագի արբանյակներից մոլորակին ամենամոտն Իոն է, որը, ըստ դիտումների, պտտվում է մոլորակի շուրջը և, որոշ ժամանակ մնալով մոլորակի ստվերում, խավարում է ու մորից հայտնվում, ինչպես ակնթարթորեն բռնկվող լապտեր (նկ. 3): Ռյոմերից առաջ հայտնի էր, որ երկու բռնկումների միջև ժամանակամիջոցը 42 ժամ 28 րոպե է, որն էլ փաստորեն արբանյակի՝ Լուսնթագի շուրջը պտտման պարբերությունն է:

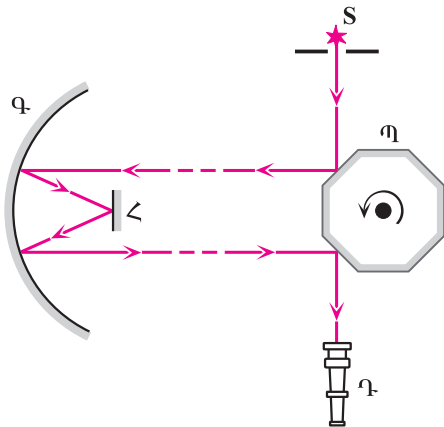


Նկ. 3. Իոյի նկատմամբ Երկրի դիրքերը՝ 6 ամսվա տարբերությամբ

Իոյի խավարումներ դիտել էին տարվա տարբեր ամիսների, և հայտնի էր, որ երբ Երկիրը Լուսնթագի ամենահեռու դիրքում է, բռնկումները դիտվում են 22 րոպեով ավելի ուշ այն բռնկումների դիտման ժամանակի համեմատ, երբ Երկիրը Լուսնթագի ամենամոտ հեռավորությամբ դիրքում է: Ույմերը ենթադրել է, որ բռնկումների միջև ժամանակամիջոցների այդ տարբերությունը պայմանավորված է Երկրի (1) և (2) դիրքերի հեռավորությունների տարբերությամբ:

Այսպիսով՝ 22 րոպեում լույսը մինչև (2) դիրքում Երկրին հասնելն անցնում է լրացուցիչ ճանապարհ, որը մոտավորապես հավասար է նրա ուղեծրի տրամագծին: Ըստ Ույմերի հաշվարկների՝ լույսի արագությունը 227000 կմ/վ է: Հետագայում Իո արբանյակի խավարումների ավելի ճշգրիտ չափումներ կատարելով՝ Հյույզենը լույսի արագության համար ստացել է մոտավորապես 300000 կմ/վ արժեքը, որն այսօր ընդունված է որպես վակուումում լույսի տարածման մոտավոր արագություն:

Մայքելսոնի փորձը: Լույսի արագության առավել ճշգրիտ չափումներ է կատարել ամերիկացի ֆիզիկոս Ալբերտ Մայքելսոնը 1927 թ.: Մայքելսոնի փորձում լույսի Տ աղբյուրը, պտտվող ութանիստ հայելային Պ պրիզման և Գ դիտակը դրված էին նույն լեռնագագաթին, իսկ նրանից $L \approx 35,5$ կմ հեռավորությամբ մյուս լեռնագագաթին՝ Գ գնդային և Հ հարթ հայելիներից կազմված մի համակարգ (նկ. 4):



Նկ. 4. Մայքելսոնի փորձի սխեման

Ութանիստ պրիզմայի անշարժ վիճակում սարքն այնպես էր հարմարեցված, որ լույսը, անդրադառնալով պրիզմայի մի նիստից, հասնում էր լեռնագագաթին դրված հայելիների համակարգին, որից անդրադառնալով և հասնելով առաջին լեռնագագաթին դրված պրիզմայի մեկ այլ նիստի, նորից անդրադառնում էր՝ ընկնելով դիտորդի աչքին: Երբ պրիզման սկսում էր պտտվել, Հ հարթ հայելուց անդրադարձած լույսը, հասնելով նրա նիստին, անդրադառնում էր 45°-ից տարբեր անկյունով, և դիտորդն այն չէր տեսնում: Փորձում աստիճանաբար մեծացնելով պրիզմայի

պտտման հաճախությունը՝ Մայքելսոնը պարզել է, որ պտտման $n = 528$ վ⁻¹ հաճախության դեպքում դիտորդը նորից անընդհատ տեսնում է լույսի Տ աղբյուրը: Դա նշանակում է, որ ութանիստ պրիզման 45°-ով պտտվելու համար պահանջվող $T/8$ ժամանակամիջոցում, որտեղ T -ն պրիզմայի պտտման պարբերությունն է, լույսն անցնում է $2L \approx 71$ կմ ճանապարհ, հետևաբար՝ լույսի արագությունը՝ $c = 2L/(T/8) = 16Ln$: Փորձերի հիման վրա Մայքելսոնը լույսի արագության համար ստացել է 299920 կմ/վ արժեքը: Հետագայում ճշգրիտ չափումներով վակուումում լույսի արագության համար ստացվել է $299792458 \pm 1,2$ մ/վ արժեքը:

Լույսի արագությունը վակուումում կարևոր նշանակություն ունի ֆիզիկայում, քանի որ ոչ մի ֆիզիկական մարմին դրանից ավելի մեծ արագություն չի կարող

ունենալ (այդ մասին կխոսենք հարաբերականության հատուկ տեսության մեջ): **Լույսի արագությունը վակուումում ֆիզիկայի հիմնարար հաստատուններից է:**

Լույսի արագությունը չափել են մասնատարր միջավայրերում, և պարզվել է, որ դրանցից յուրաքանչյուրում այն ավելի փոքր է, քան վակուումում: Օրինակ՝ լույսի արագությունը ջրում 1,33 անգամ ավելի փոքր է, քան վակուումում:

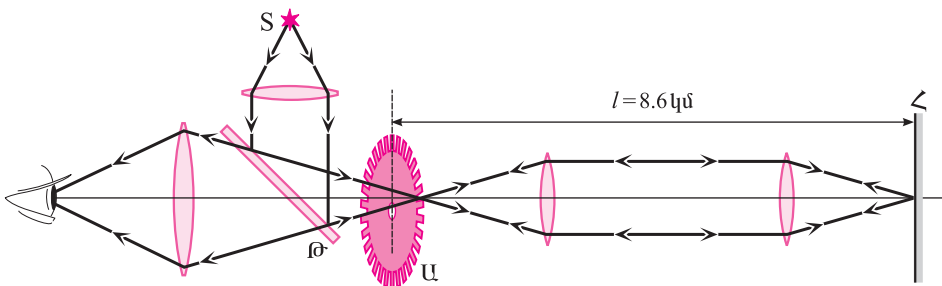
Լույսի արագությունն այնքան մեծ է, որ մեզ թվում է, թե այն տարածվում է ակնթարթորեն: Սակայն տիեզերական հեռավորություններում զգացվում է լույսի արագության վերջավոր լինելը: Օրինակ՝ լույսն Արեգակից Երկիր է հասնում մոտավորապես 8 րոպեում: Գալակտիկական հեռավորությունները գնահատելու համար հաճախ օգտագործում են երկարության մոտ միավոր՝ **լուսատարի**, հեռավորություն, որը լույսն անցնում է 1 տարում: Մեր Գալակտիկայի տրամագիծը մոտ 100000 լուսատարի է, այսինքն՝ Գալակտիկայի մի ծայրից մյուսը լույսն անցնում է 100000 տարվա ընթացքում: Լույսի տարածման վերջավոր արագությամբ է պայմանավորված այն փաստը, որ երկնքի ինչ-որ մասում հայտնաբերում ենք մոտ աստղի բռնկում, որն իրականում տեղի է ունեցել հազարավոր տարիներ առաջ: Կամ այսօր դիտում ենք աստղեր, որոնք, հնարավոր է, արդեն գոյություն չունեն:

Խորացված

Ֆիզոյի մեթոդը: Լույսի արագությունը լաբորատոր եղանակով առաջին անգամ որոշել է ֆրանսիացի գիտնական Արման Ֆիզոն 1849 թ.: Ֆիզոյի փորձում Տ աղբյուրից եկող լույսը, անցնելով ռափնյակի միջով, ընկնում էր կիսաքափանցիկ **Թ** թիթեղի վրա (նկ. 5): Թիթեղից անդրադառնալուց հետո լույսն ընկնում էր պտտվող Ա ատամնանիվի եզրամասին: Անցնելով ատամների միջով՝ լույսը հասնում էր անիվից մի քանի կիլոմետր հեռավորությամբ դրված Հ հայելուն, անդրադառնում և կրկին ընկնում ատամնանիվի վրա: Երբ անիվը դանդաղ էր պտտվում, լույսն անցնում էր ատամների միջով և ընկնում դիտորդի աչքին: Պտտման արագությունը մեծացնելիս լույսն աստիճանաբար անհետանում էր: Եթե սկավառակի ատամներն ու կտրվածքներն ունենան մույն լայնությունը, ապա դա տեղի կունենա, եթե լույսի ճառագայթը սկավառակից Հ հայելուն հասնելու և վերադառնալու ժամանակում, կտրվածքի տեղը զբաղեցնի հարևան ատամը և փակի լույսի ճանապարհը: Սկավառակից մինչև հայելի և հայելուց մինչև սկավառակ ճանապարհը լույսն անցնում է

$$t = \frac{2l}{c} \quad (1.1)$$

ժամանակում, որտեղ l -ը սկավառակի հեռավորությունն է հայելուց:



Նկ. 5. Ֆիզոյի փորձի սխեման

Այդ ընթացքում սկավառակը պտտվում է $2\pi/2N$ անկյունով, որի համար պահանջվող ժամանակը $T/2N$ է (N -ը ատամների թիվն է, T -ն՝ սկավառակի պտտման պարբերությունը): Հետևաբար՝

$$\frac{2I}{c} = \frac{T}{2N}, \quad (1.2)$$

որտեղից

$$c = \frac{4NI}{T}: \quad (1.3)$$

Այս մեթոդով Ֆիզոն լույսի տարածման արագության համար ստացել է 313000 կմ/վ արժեքը, որն այնքան էլ վատ չէ իր ժամանակաշրջանի համար:



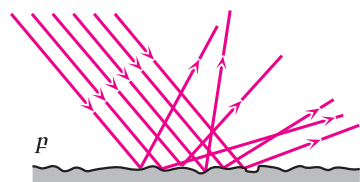
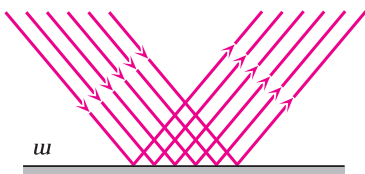
Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Բացարժեք Մայքելսոնի փորձի սխեման: 2. Պրիզմայի պրիզման ի՞նչ հաճախությունների դեպքում դիֆրակցիոն անընդհատ կրեմնի լույսի S աղբյուրը: 3. Ինչո՞ւ են ասֆերիկ հեռավորություններն արտահայտում լուսավարով: 4. Հաշվե՞ք, թե քանի՞ կիլոմետր է մեկ լուսավարին: 5. Որքա՞ն է լույսի արագության մոտավոր արժեքը վակուումում: 6. Բացարժեք Ֆիզոյի փորձի սխեման:

§3. ԼՈՒՅՍԻ ԱՆՊՐԱՂԱՐՁՈՒՄԸ

Լույսի ճառագայթն ուղղագիծ է տարածվում միայն համասեռ միջավայրում: Լույսը, հասնելով երկու տարբեր միջավայրերի բաժանման սահմանին, փոխում է իր տարածման ուղղությունը՝ ամբողջությամբ կամ մասամբ մնալով նույն միջավայրում: Այս երևույթը կոչվում է **լույսի անդրադարձում**:

Կախված միջավայրերի բաժանման սահմանի հատկություններից՝ անդրադարձման բնույթը կարող է տարբեր լինել: Եթե բաժանման հարթ մակերևույթի անհարթությունների բնորոշ l չափը շատ փոքր է լույսի ալիքի λ երկարությունից՝ $l \ll \lambda$, ապա մակերևույթին ընկնող լույսի զուգահեռ ճառագայթներն անդրադարձնալույց հետո տարածվում են իրար զուգահեռ (նկ. 6, ա): Այդպիսի անդրադարձումը կոչվում է **հայելային**, իսկ մակերևույթը՝ **հարթ հայելի**:

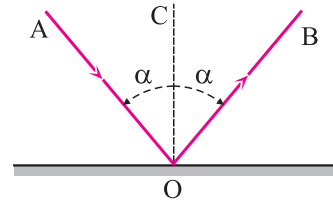


Նկ. 6. Լույսի անդրադարձումը.
ա. հայելային, բ. ցրիվ

Եթե միջավայրերի բաժանման մակերևույթի անհարթությունների բնորոշ l չափը նույն կարգի է կամ մեծ լույսի ալիքի λ երկարությունից՝ $l \geq \lambda$, մակերևույթին ընկնող զուգահեռ ճառագայթները ցրվում են տարբեր ուղղություններով (նկ. 6, բ): Այդպիսի անդրադարձումը կոչվում է **ցրիվ (դիֆուզ) անդրադարձում**: Ցրիվ անդրադարձման շնորհիվ մեզ տեսանելի են այն առարկաները, որոնք լույս չեն արձակում:

Եթե միջավայրերի բաժանման մակերևույթի անհարթությունների բնորոշ l չափը նույն կարգի է կամ մեծ լույսի ալիքի λ երկարությունից՝ $l \geq \lambda$, մակերևույթին ընկնող զուգահեռ ճառագայթները ցրվում են տարբեր ուղղություններով (նկ. 6, բ): Այդպիսի անդրադարձումը կոչվում է **ցրիվ (դիֆուզ) անդրադարձում**: Ցրիվ անդրադարձման շնորհիվ մեզ տեսանելի են այն առարկաները, որոնք լույս չեն արձակում:

Բազմաթիվ դիտումներն ու փորձերը ցույց են տվել, որ լույսի անդրադարձման երևույթը ենթարկվում է որոշակի օրինաչափությունների, որոնց հիման վրա ձևակերպվում է անդրադարձման օրենքը: Դիցուք՝ AO -ն երկու միջավայրերի բաժանման սահմանի O կետում ընկնող ճառագայթն է (նկ. 7), OB -ն՝ անդրադարձած ճառագայթը, իսկ OC -ն՝ անկման կետում երկու միջավայրերի սահմանին տարված ուղղահայացը: Ընկնող ճառագայթի և այդ ուղղահայացի կազմած անկյունն անվանում են **անկման անկյուն**, իսկ նույն ուղղահայացի և անդրադարձած ճառագայթի կազմած անկյունը՝ **անդրադարձման անկյուն**: Օգտվելով այս հասկացություններից՝ կարող ենք ձևակերպել լույսի անդրադարձման օրենքը.



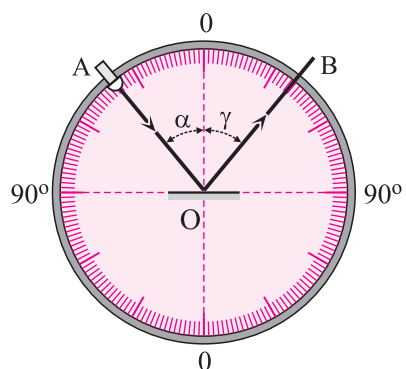
Նկ. 7. Լույսի ճառագայթի անդրադարձումը

1. ընկնող ճառագայթը, անդրադարձած ճառագայթը և անկման կետում երկու միջավայրերի բաժանման սահմանին տարված ուղղահայացը նույն հարթության մեջ են,

2. անկման անկյան կամայական արժեքի դեպքում անդրադարձման անկյունը հավասար է անկման անկյանը:

Լույսի անդրադարձման օրենքը կարելի է ստուգել օպտիկական սկավառակի օգնությամբ, որին ծանոթ եք 9-րդ դասարանի ֆիզիկայի դասընթացից (նկ. 8): Այն աստիճանավորված եզրով սկավառակ է, որի կենտրոնում կարելի է ամրացնել հարթ հայելի: Սկավառակի եզրագծով տեղաշարժվող լուսավորման հատուկ հարմարանքից լույսի նեղ փունջը տարբեր անկյուններով ուղղվում է հայելու մակերևույթի O կենտրոնին: Փոփոխելով ճառագայթի անկման անկյունը $0 \div 90^\circ$ տիրույթում՝ ամեն անգամ կարող ենք համոզվել, որ ընկնող և անդրադարձած ճառագայթները սկավառակի հարթության մեջ են, և անդրադարձման γ անկյունը հավասար է անկման α անկյանը:

Լույսի ճառագայթի շրջելիության օրենքից հետևում է, որ եթե 8-րդ նկարում պատկերված երկու միջավայրերի բաժանման սահմանին ճառագայթն ուղղենք BO ուղղությամբ, ապա այն կանդրադառնա OA ուղղությամբ: Փորձում լույսի աղբյուրից ճառագայթն ուղղելով O կետին BO ուղղությամբ, կհամոզվենք, որ անդրադարձած ճառագայթը գնում է OA ուղղությամբ, որն էլ հաստատում է լույսի ճառագայթի շրջելիության օրենքը:



Նկ. 8. Անդրադարձման օրենքի ստուգումը փորձով

Դեռևս մ.թ. 1-ին դարում Հերոն Ալեքսանդրացին ենթադրել է, որ հարթ հայելուց անդրադառնալիս աղբյուրից մինչև դիտման կետ հասնելը լույսի ճառագայթն ընտրում է այնպիսի ուղղություն, որ նրա անցած ճանապարհը լինի փոքրագույնը: Այս ենթադրությունը, որն ընդունվել է նաև որպես սկզբունք, կարելի է ապացույցել լույսի անդրադարձման օրենքի օգնությամբ:

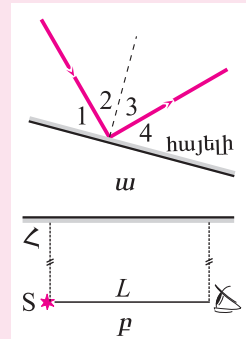
Նշենք նաև, որ անդրադարձած լույսի ուժգնությունը կախված է միջավայրերի բաժանման սահմանի ֆիզիկական հատկություններից: Գոյություն ունեն մակերևութներ, որոնք ամբողջովին կլանում են լուսային էներգիան, և այն չեն անդրադարձնում: Այդպիսի մակերևութները կոչվում են սև:

Անդրադարձման օրենքը ճիշտ է ոչ միայն լույսի, այլև բոլոր էլեկտրամագնիսական ալիքների համար:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր երևույթն է կոչվում լույսի անդրադարձում: 2. Ձևակերպեք լույսի անդրադարձման օրենքը: 3. Ի՞նչ պայմանի դեպքում է անդրադարձումը հայելային: 4. Ի՞նչ պայմանի դեպքում է անդրադարձումը ցրիվ: 5. Նկարում ո՞րն է անկման անկյունը և ո՞րը անդրադարձման անկյունը (ա նկար): 6. Ի՞նչ են հասկանում «ճառագայթի շրջելիություն» ասելով: 7. Հայրնի է, որ լույսի S աղբյուրը և աչքը $\angle$ հարթ հայելուց ունեն նույն, իսկ միմյանցից՝ L հեռավորությունը (բ նկար): S աղբյուրից հարթ հայելու վրա ընկած ո՞ր ճառագայթը կընկնի աչքի մեջ: Կարելի է օգտվել $\angle$ երրոն Ալեքսանդրացու սկզբունքից: Պատասխանը հիմնավորեք:



§ 4. ԱՌԱՐԿԱՅԻ ՊԱՏԿԵՐ: ՊԱՏԿԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ ՀԱՐԹ ՀԱՅԵԼՈՒՄ

Օպտիկայում **առարկա** են անվանում լույսի աղբյուրը: Լույսի աղբյուր են տարբեր տեսակի էներգիաները տեսանելի էլեկտրամագնիսական ճառագայթման փոխարկող բնական և արհեստական լուսատու մարմինները: Լույսի բնական աղբյուրներ են Արեգակը, աստղերը, կայծակը, լուսատտիկը, իսկ արհեստական աղբյուրներ են էլեկտրական լամպը, շիկացած մարմինները, կրակի բոցը, կայծալին պարպումը, լազերը և այլն:

Լույսի աղբյուր կարող են լինել ոչ միայն լուսատու մարմինները, այլ նաև սեփական ճառագայթումից զուրկ մարմինները, որոնք անդրադարձնում են իրենց վրա ընկած լույսը: Օրինակ՝ Լուսինն անդրադարձնում է Արեգակի լույսը և լուսնկա գիշերներին լուսավորում Երկիրը, մեր շրջապատի առարկաները տեսանելի են շնորհիվ նրանց վրա ընկնող լույսի անդրադարձման և այլն:

Եթե լույսի աղբյուրի չափերը շատ փոքր են դիտարկվող հեռավորությունների համեմատությամբ, ապա այն անվանում են **լույսի կետային աղբյուր**:

Մաքրավորումը (հայելի, ոսպնյակ, աչք, մանրադիտակ, տեսախցիկ և այլն), որի օգնությամբ լույսի ճառագայթները փոխակերպվում են, անվանում են **օպտիկական համակարգ**: Առարկայից համակարգ գնացող ճառագայթները կոչվում են **ընկնող ճառագայթներ**: Օպտիկական համակարգում փոխակերպվելուց հետո ստացված ճառագայթները կոչվում են **դուրս եկող ճառագայթներ**:

Օպտիկական համակարգը կոչվում է **իդեալական**, եթե նրա վրա ընկնող յուրաքանչյուր ճառագայթին համապատասխանում է մեկ դուրս եկող ճառագայթ: Ըստ որում՝ լույսի կետային աղբյուրից ելնող բոլոր ճառագայթները համակարգից դուրս գալուց հետո տարածվում են այնպես, որ կամ հատվում են մի կետում,

կամ էլ տարամիտվում այնպես, որ նրանց շարունակություններն են հատվում մի կետում: Համակարգից դուրս եկող գուգամիտող ճառագայթների հատման կետը կոչվում է լույսի կետային աղբյուրի **իրական պատկեր**: Համակարգից դուրս եկող տարամիտող ճառագայթների շարունակությունների հատման կետը կոչվում է լույսի կետային աղբյուրի **կեղծ պատկեր**:

Իդեալական համակարգում կետի պատկերը կառուցելու համար բավական է պատկերել այդ կետից ելնող երկու կամայական ճառագայթների ընթացքը:

Առարկայի պատկեր կոչվում է նրա կետերի պատկերների բազմությունը:

Պատկերի կառուցումը հարթ հայելում: Ամեն մի ուղորկ, հարթ մակերևույթ հարթ հայելի է: Յույց տանք, որ լույսի կետային աղբյուրից հայելու վրա ընկնող բոլոր ճառագայթները հայելուց անդրադառնալուց հետո տարամիտվում են այնպես, որ նրանց շարունակությունները հատվում են մի կետում:

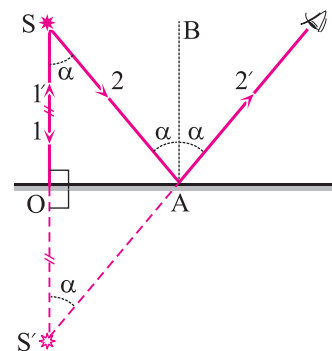
9-րդ նկարում պատկերված է S կետային աղբյուրից հայելուն ուղղահայաց ընկնող (1) և կամայական α անկյունով ընկնող (2) ճառագայթների ընթացքը: Անդրադարձած (1') և (2') ճառագայթները հատվում են S' կետում: Որոշենք OS' հեռավորությունը:

Ինչպես երևում է նկարից, $\angle OSA = \alpha'$ որպես SO և AB գուգահեռ ուղիղները երրորդ ուղղով հատելուց առաջացած ներքին խաչադիր անկյուններ, իսկ $\angle OS'A = \alpha'$ որպես համապատասխան անկյուններ: Հետևաբար՝ SAS' եռանկյունը հավասարասրուն է: AO -ն այդ եռանկյան բարձրությունն է, ուստի այն միաժամանակ միջնագիծ է և անկյան կիսորդ: Ուրեմն՝ $OS' = SO$: Այսինքն՝ S' կետն S կետի հայելային համաչափ կետն է*:

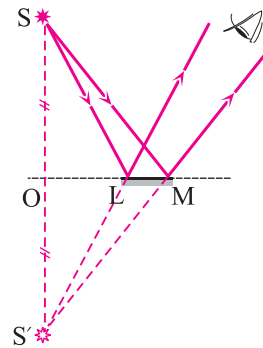
Այսպիսով՝ լույսի S կետային աղբյուրից դուրս եկող SA ճառագայթը հայելուց անդրադառնում է այնպես, որ նրա շարունակությունն անցնում է աղբյուրի հայելային համաչափ S' կետով: Քանի որ SA -ն կամայական ճառագայթ է, ապա այդ կետով կանցնեն հայելուց անդրադարձած բոլոր ճառագայթների շարունակությունները: Իսկ սա նշանակում է, որ հարթ հայելին իդեալական օպտիկական համակարգ է, և S' -ն S -ի կեղծ պատկերն է:

Լույսի կետային աղբյուրի պատկերը հարթ հայելում կեղծ է և ընկած է աղբյուրի հայելային համաչափ կետում:

Աղբյուրի պատկերը հայելային համաչափ կետում է մույնիսկ այն դեպքում, երբ հայելին ունի վերջավոր չափեր և առարկայի ու նրա պատկերի միջև չէ (նկ. 10):

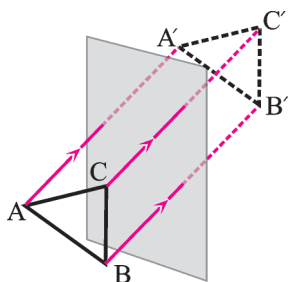


Նկ. 9. Լուսատու կետի պատկերի կառուցումը հարթ հայելում



Նկ. 10. Լուսատու կետի պատկերի կառուցումը վերջավոր չափերով հայելում

* S կետի հայելային համաչափ կետ հարթության նկատմամբ կոչվում է այն S' կետը, որը S կետից հարթության իջեցրած ուղղահայացի շարունակության վրա է և հարթությունից ունի մույն հեռավորությունը, ինչ որ S կետը:



Նկ.11. Առարկայի պատկերի կառուցումը հարթ հայելում

Այս դեպքում առարկայի պատկերը տեսանելի է սահմանափակ տիրույթից: Այդ տիրույթը որոշելու համար նախ պետք է կառուցել աղբյուրի պատկերը, այնուհետև տանել հայելու եզրերով անցնող ճառագայթները: Եթե աղբյուրն Արեգակն է, ապա այդ տիրույթում ստացվում է հայելույ անդրադարձած արևի ցուլը:

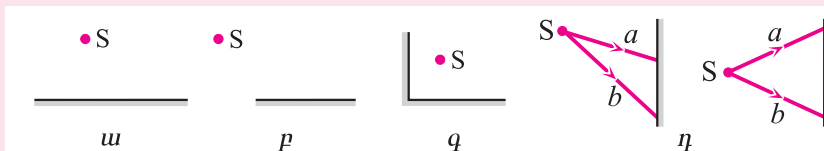
Վերջավոր չափեր ունեցող առարկայի պատկերը կառուցվում է որպես նրա բոլոր կետերի պատկերների բազմություն: Կառուցենք, օրինակ, ABC եռանկյան պատկերը հարթ հայելում (նկ. 11): Ճառագայթներն այժմ կարելի է չկառուցել. գիտենք, որ հայելում յուրաքանչյուր կետի համար պատկեր կլինի հայելային համաչափ կետը: $A'B'C'$ պատկերը կեղծ է, ունի նույն չափերը, ինչ առարկան, ուղիղ է, բայց հայելային համաչափ, այսինքն՝ առարկայի ձախ մասի անդրադարձումը պատկերի աջ մասն է: Դրանում

դուք կհամոզվեք՝ նայելով հայելում ձեր պատկերին: Եթե ձախ ձեռքին ժամացույց եք կրում, ապա այն կտեսնեք ձեր պատկերի աջ ձեռքին:



Հարցեր և առաջադրանքներ

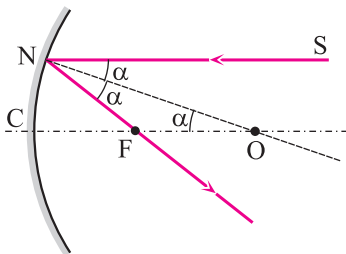
1. Տարբերվում են արդյոք հարթ հայելում պարկերի չափերն առարկայի չափերից:
2. Կառուցեք S կետի պարկերը հարթ հայելում (ա նկար):
3. Հարթ հայելույ ի՞նչ հեռավորությամբ, որպե՞ղ և ինչպիսի՞ն է ստացվում լույսի կետային աղբյուրի պարկերը:
4. Կառուցեք S կետի պարկերը հարթ հայելում (բ նկար):
5. Քանի՞ ճառագայթ կարող է ընկնել հայելու վրա մի կետում նույն անկյան տակ:
6. Նշեք լույսի կետային S աղբյուրի (առաջին) պարկերները երկու փոխուղղահայաց հայելիներում (գ նկար):
7. Շարունակեք նկարներում պարկերված a և b ճառագայթների ընթացքը և ստացեք կետի պարկերը հարթ հայելում (դ նկար): Կե՞ղծ է այն, թե՞ իրական:



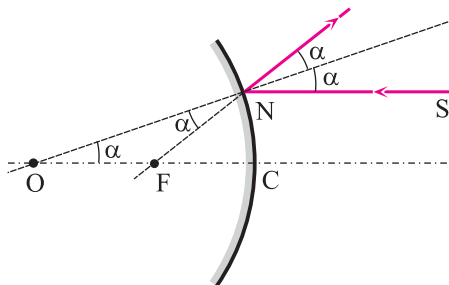
ԳՆԴԱՁԵՎ ԸԱՅԵԼԻ:

§5. ՊԱՏԿԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ ԳՆԴԱՁԵՎ ԸԱՅԵԼՈՒՄ: ԳՆԴԱՁԵՎ ԸԱՅԵԼՈՒ ԲԱՆԱՁԵՎԸ

Հարթ հայելույ բացի՝ կան տարբեր հայելիներ, որոնց անդրադարձնող մակերևույթը ոչ թե հարթության, այլ կոր մակերևույթի մաս է: Դիտարկենք այն կոր հայելիները, որոնց ողորկ մակերևույթը գնդաձևի արտաքին կամ ներքին մաս է: Եթե լույսն անդրադառնում է գնդաձևի ներքին մակերևույթից, ապա հայելին անվանում են **գոգավոր** կամ **հավաքող** (նկ.12), իսկ եթե արտաքին մակերևույթից՝ **ուռույցիկ** կամ **ցրող** (նկ.13): Հայելու C միջմակետը կոչվում է **բևեռ**: Գնդաձևի O կենտրոնը կոչվում է հայելու **օպտիկական կենտրոն**: Օպտիկական կենտրոնով անցնող կամայական ուղիղ կոչ-



Նկ.12. Ճառագայթի ընթացքը գոգավոր հայելում



Նկ.13. Ճառագայթի ընթացքը ուռուցիկ հայելում

վում է հայելու **օպտիկական առանցք**: Հայելու C բևեռով անցնող օպտիկական առանցքը կոչվում է **գլխավոր օպտիկական առանցք**: Մնացած օպտիկական առանցքները կոչվում են **երկրորդային**: Գլխավոր օպտիկական առանցքին մոտ ճառագայթները կոչվում են **մերձառանցքային** (ստորև ենթադրվում է, որ օգտագործվող ճառագայթներն այդպիսին են):

Դիցուք՝ գոգավոր հայելու N կետում ընկնում է գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ ճառագայթ: $R = NO$ -ն շառավիղ է, հետևաբար՝ ուղղահայաց է մակերևույթին: Կառուցելով անկման անկյանը հավասար անդրադարձման անկյունը՝ կստանանք անդրադարձման NF ճառագայթը: α անկման և NOF անկյունները հավասար են որպես զուգահեռ ուղիղների և հատողի կազմած ներքին խաչադիր անկյուններ: Հետևաբար՝ NFO եռանկյունը հավասարասրուն է, և $NF = FO$:

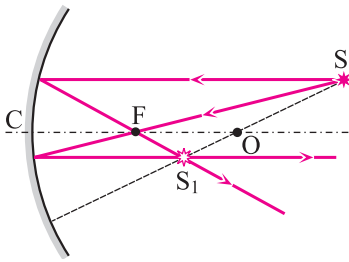
Մերձառանցքային ճառագայթների համար կարելի է ընդունել, որ $CF = NF$: Այդ դեպքում $CF = FO$, այսինքն՝ F կետը բոլոր մերձառանցքային ճառագայթների համար CO շառավղի մեջտեղում է: Այդ կետը կոչվում է **հայելու գլխավոր կիզակետ**: Մնացած բոլոր օպտիկական առանցքների վրա՝ շառավղի մեջտեղում՝ **երկրորդային կիզակետում**, հատվում են այդ առանցքներին զուգահեռ ճառագայթները:

Համանման դատողություններով և կառույցումներով կհանգենք ուռուցիկ հայելու կեղծ կիզակետի գաղափարին (նկ. 13), որն ուռուցիկ հայելուց անդրադարձած ճառագայթների շարունակությունների հատման կետն է:

Հայելու բևեռից մինչև գլխավոր կիզակետ հեռավորությունը կոչվում է **կիզակետային հեռավորություն** և նշանակվում է նույն՝ F տառով: Այն հավասար է հայելու շառավղի կեսին՝

$$F = \frac{R}{2} : \quad (1.4)$$

Լուսատու կետի պատկերը գնդաձև հայելում կառուցելու համար բավական է տանել երկու կամայական ճառագայթներ, սակայն հարմար է օգտվել այն ճառագայթներից, որոնց ընթացքը նախապես հայտնի է: Այսպես՝ գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ ճառագայթը հայելուց անդրադարձնալուց հետո կանցնի գլխավոր կիզակետով (կամ անդրադարձած ճառագայթի շարունակությունը կանցնի գլխավոր կիզակետով՝ ուռուցիկ հայելու համար):



Նկ. 14. Լուսատու կետի պատկերի կառուցումը գոգավոր հայելում

Շրջելիության օրենքի համաձայն՝ գլխավոր կիզակետով անցած ճառագայթը հայելուց անդրադառնալուց հետո կգնա գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ: Վերջապես, օպտիկական կենտրոնով անցնող ճառագայթը կանդրադառնա նույն ուղղով:

Գոգավոր հայելում կետի պատկերը կառուցելիս (նկ. 14) նշում են O, F, C կետերը, այնուհետև կառուցում են հայտնի ընթացք ունեցող ճառագայթներից կամայական երկուսը: Անդրադարձած ճառագայթների հատ-

ման S_1 կետով կանցնեն մնացած բոլոր անդրադարձած ճառագայթները. այն S կետի իրական պատկերն է: Ուռույիկ հայելում պատկերների կառուցումը կատարվում է համանման ձևով:

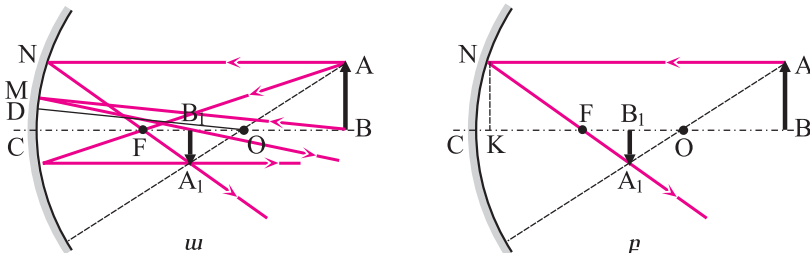
Այժմ կառուցենք առարկայի պատկերը գոգավոր հայելում: Որպես առարկա վերցնենք AB սլաքը, որը դրված է կիզակետից դեպի աջ (նկ. 15): A կետի պատկերը գտնում ենք ինչպես 15,ա նկարում: Գլխավոր օպտիկական առանցքի B կետի պատկերը կառուցելու համար տանում ենք BM կամայական ճառագայթը և նրան զուգահեռ համապատասխան երկրորդային OD առանցքը: OD հատվածի մեջտեղում երկրորդական F_1 կիզակետն է, որով անցնում է M կետից անդրադարձած ճառագայթը (նկ. 15,ա): Որպես երկրորդ ճառագայթ՝ հարմար է ընտրել գլխավոր օպտիկական առանցքով գնացող ճառագայթը: Երկու անդրադարձած ճառագայթների հատման կետը կլինի B-ի պատկերը՝ B_1 կետը: Այն կարելի էր ստանալ նաև A_1 կետից գլխավոր օպտիկական առանցքին ուղղահայաց իջեցնելով (նկ. 15,բ): Ստացված պատկերն իրական է, շրջված, խոշորացված:

Նշանակենք հայելու մինչև առարկա հեռավորությունը d տառով, հայելու մինչև պատկեր հեռավորությունը՝ f -ով, կիզակետային հեռավորությունը՝ F -ով: A_1B_1F և NKF եռանկյունների մմանությունից հետևում է, որ

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{f - F}{F}, \quad (1.5)$$

իսկ A_1B_1O և ABO եռանկյունների մմանությունից՝

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{2F - f}{d - 2F}: \quad (1.6)$$



Նկ. 15. Առարկայի պատկերի կառուցումը գոգավոր հայելում

(1.5) և (1.6) առնչություններից կստանանք՝

$$\frac{f - F}{F} = \frac{2F - f}{d - 2F}, \text{ որտեղից } fF + Fd = fd:$$

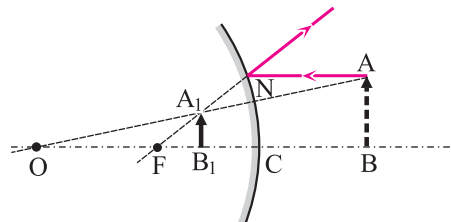
Ստացված հավասարության երկու մասերը բաժանելով Ffd -ի՝ կստանանք.

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}: \quad (1.7)$$

Եթե առարկան լինի գլխավոր կիզակետի և հայելու միջև ($d < F$), ապա առարկայի պատկերը կլինի կեղծ, իսկ առարկայի, նրա պատկերի ու կիզակետային հեռավորությունների կապը կարտահայտվի այսպես՝

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F}: \quad (1.8)$$

Ուռույիկ հայելու համար համանման կառուցումը (նկ. 16) ցույց է տալիս, որ հայելու առջև դրված առարկայի պատկերն ստացվում է հայելու մյուս կողմում, միշտ կեղծ է, ուղիղ, փոքրացված, իսկ առարկայի, նրա պատկերի ու կիզակետային հեռավորությունների կապն արտահայտվում է հետևյալ բանաձևով՝



Նկ. 16. Առարկայի պատկերի կառուցումը ուռույիկ հայելում

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}: \quad (1.9)$$

Ընդհանրացնելով (1.7)-(1.9) բանաձևերը՝ ստանում ենք գնդաձև հայելու բանաձևը՝

$$\frac{1}{d} ! \frac{1}{f} = ! \frac{1}{F}: \quad (1.10)$$

Գնդաձև հայելու բանաձևում վերցվում է $+1/f$, եթե պատկերն իրական է, $-1/f$ ՝ եթե կեղծ է, $+1/F$ ՝ եթե հայելին հավաքող է, և $-1/F$ ՝ եթե ցրող է:

Պատկերի և առարկայի զծային չափերի հարաբերությունը կոչվում է հայելու **գծային խոշորացում**.

$$\Gamma = \frac{A_1B_1}{AB}: \quad (1.11)$$

NKF և FA_1B_1 (նկ.15) եռանկյունների մասնությունից և (1.7) բանաձևից հետևում է, որ

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{f - F}{F} = f \frac{1}{F} - 1 = f_c \frac{1}{d} + \frac{1}{f} - 1 = \frac{f}{d} + 1 - 1 = \frac{f}{d},$$

հետևաբար՝ գծային խոշորացումը՝

$$\Gamma = \frac{f}{d}: \quad (1.12)$$

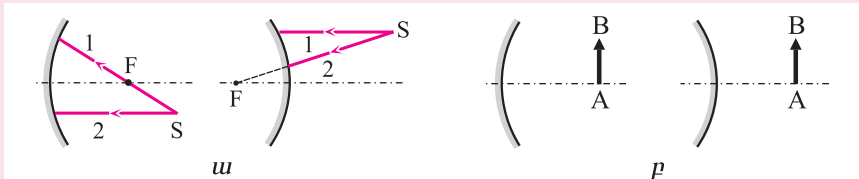
Գոգավոր հայելիները լայնորեն կիրառվում են տեխնիկայում: Դրանց օգնությամբ, օրինակ, Արեգակի էներգիան կենտրոնացնում են արևով տաքացվող սարքավորումներում, դրանք օգտագործում են հեռադիտակներում, լուսարձակներում, լապտերներում, ջեռույցիչներում և այլն՝ որպես ցուլարձակներ (անդրադարձույցիչներ): Հաճախ օգտագործվում են նաև ոչ գնդաձև գոգավոր հայելիներ:

Ուռույցիկ հայելիները կիրառվում են տրանսպորտում հետևի տեսադաշտը դիտելու համար:



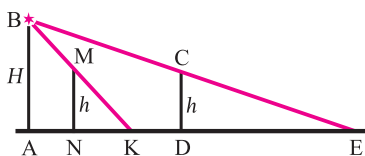
Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր գնդաձև հայելին է կոչվում՝ ա) հավաքող, բ) ցրող: 2. Ի՞նչն են անվանում գնդաձև հայելու՝ ա) բևեռ, բ) օպտիկական կենտրոն, գ) օպտիկական առանցք, դ) գլխավոր օպտիկական առանցք: 3. Ի՞նչն են անվանում գնդաձև հայելու՝ ա) կիզակետ, բ) գլխավոր կիզակետ: 4. Ի՞նչն են անվանում գնդաձև հայելու կիզակետային հեռավորություն: Որքա՞ն է այն: 5. Գրեք գնդաձև հայելու բանաձևը և պարզաբանեք բանաձևի մեջ մտնող մեծությունների նշանները: 6. Կառույցեք (1) և (2) ճառագայթների ընթացքը գնդաձև հայելիներում (ա նկար): 7. Կառույցեք AB առարկայի պատկերը գոգավոր և ուռույցիկ հայելիներում ու պարզեք, թե ինչպիսի՞ն է նրա պատկերը (իրական, թե՞ կեղծ, ուղի՞ղ, թե՞ շրջված, խոշորացված, թե՞ փոքրացված) հետևյալ դեպքերում՝ ա) $d > 2F$, բ) $d = 2F$, գ) $F < d < 2F$, դ) $d = F$, ե) $d < F$ (բ նկար):



Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. $h = 1,7$ մ հասակ ունեցող մարդը $v = 1$ մ/վ արագությամբ մոտենում է փողոցի լապտերին: Որոշակի պահի մարդու ստվերի երկարությունը՝ $l_1 = 1,8$ մ, իսկ $t = 2$ վ անց՝ $l_2 = 1,3$ մ: Որոշել լապտերի H բարձրությունը:



Լուծում: Այն պահին, երբ մարդու ստվերի երկարությունը l_1 է (D դիրք), $\triangle ABE$ -ի և $\triangle DCE$ -ի նմանությունից հետևում է, որ

$$\frac{H}{h} = \frac{AE}{DE} = \frac{AE}{l_1}:$$

t վայրկյան անց մարդն ավելի մոտ է լամպին (N դիրք): $\triangle ABK$ -ի և $\triangle NMK$ -ի նմանությունից հետևում է, որ $H/h = AK/NK = AK/l_2$:

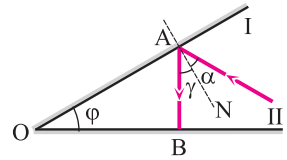
Գծագրից ակնհայտ է, որ $AE = AD + DE = AN + ND + DE = AK - NK + ND + DE = AK + l_1 - l_2 + vt$: Վերջին արտահայտության մեջ տեղադրելով $AE = l_1 H/h$ և $AK = l_2 H/h$ առնչությունները, կստանանք՝

$$\frac{H}{h} l_1 = \frac{H}{h} l_2 + h - l_2 + vt, \text{ որտեղից } H = h \frac{l_1 - l_2 + vt}{l_1 - l_2} = 8,5 \text{ մ:}$$

Պատասխան՝ 8,5 մ:

2. Երկու հարթ հայելիներ միմյանց հետ կազմում են $\varphi = 30^\circ$ անկյուն: Առաջին հայելուց անդրադարձած ճառագայթը երկրորդի վրա ընկնում է նրան ուղղահայաց: Ի՞նչ անկյունով է այդ ճառագայթն ընկնում առաջին հայելու վրա:

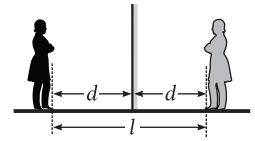
Լուծում: Քանի որ $AB \perp OB$ (ըստ պայմանի) և $AN \perp OA$ (AN -ն առաջին հայելու հարթությանը տարված ուղղահայացն է), ապա $\angle AOB = \angle NAB$, այսինքն՝ հայելիների կազմած φ անկյունը հավասար է առաջին հայելուց ճառագայթի անդրադարձման γ անկյանը՝ $\varphi = \gamma$: Իսկ անդրադարձման օրենքից $\gamma = \alpha$: Այսինքն՝ $\alpha = \varphi = 30^\circ$:



Պատասխան՝ 30° :

3. Մարդը կանգնած էր ուղղաձիգ հարթ հայելու դիմաց, այնուհետև հայելուց հեռ քաշվեց $\Delta d = 2$ մ-ով: Ինչքանով մեծացավ հեռավորությունը մարդու և նրա պատկերի միջև:

Լուծում: Քանի որ հարթ հայելում մարդը և նրա պատկերը համաչափ են հայելու նկատմամբ, ապա սկզբում նրանց միջև հեռավորությունը՝ $l_1 = 2d_1$, որտեղ d_1 -ը մարդու հեռավորությունն էր հայելուց: Հայելուց մինչև d_2 հեռավորություն հեռ քաշվելուց հետո մարդու և նրա պատկերի հեռավորությունը՝ $l_2 = 2d_2$, հետևաբար՝

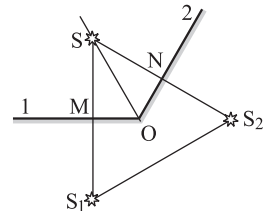


$$\Delta l = l_2 - l_1 = 2d_2 - 2d_1 = 2(d_2 - d_1) = 2\Delta d = 4 \text{ մ:}$$

Պատասխան՝ 4 մ:

4. Լույսի S կետային աղբյուրն ու (1) և (2) հարթ հայելիներում նրա S_1 և S_2 պատկերները հավասարակողմ եռանկյան գագաթներում են: Որոշել աղբյուրի նկատմամբ հայելիների դասավորությունը և նրանց կազմած անկյունը:

Լուծում: Ըստ պայմանի՝ SS_1S_2 եռանկյունը հավասարակողմ է, ուրեմն՝ $\angle MSN = \pi/3$: $SM \perp MO$ և $SN \perp NO$, ուստի՝ $\angle OMS = \angle ONS = \pi/2$: Քանի որ կամայական քառանկյան ներքին անկյունների գումարը 2π է, ապա



$$\angle MSN + \angle OMS + \angle ONS + \angle MON = 2\pi,$$

որտեղից

$$+ \angle MON = 2\pi - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3} = \frac{2\pi}{3} = 120^\circ:$$

SM -ը և SN -ը հավասար են հավասարակողմ եռանկյան կողմի կեսին, ուրեմն՝ լույսի աղբյուրը հավասարապես է հեռացված հայելիներից, այսինքն՝ հայելիների կազմած հարթ անկյան կիսորդի վրա է:

Պատասխան՝ լույսի աղբյուրը MON անկյան կիսորդի վրա է, 120° :

Խորացված

5. Գոգավոր հայելում ստացվում է առարկայի 3 անգամ փոքրացված պատկերը: Եթե առարկան $\Delta d = 6$ սմ-ով մոտեցվի հայելուն, ապա պատկերը կլինի 2 անգամ փոքրացված: Որոշել հայելու գլխավոր կիզակետային հեռավորությունը:

Լուծում: Առարկայի պատկերը գոգավոր հայելում ստացվում է փոքրացված այն դեպքում, երբ $d > 2F$, որտեղ d -ն առարկայի հեռավորությունն է հայելու բևեռից, իսկ F -ը՝ հայելու գլխավոր կիզակետային հեռավորությունը: Այդ դեպքում առարկայի և նրա պատկերի հեռավորությունների կապն արտահայտվում է (1.7) բանաձևով,

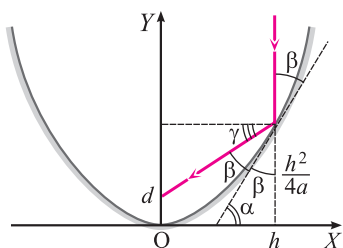
որտեղից պատկերի f հեռավորության համար կունենանք՝ $f = Fd/(d - F)$: Տեղադրելով f -ի արժեքը հայելու խոշորացման (1.12) բանաձևի մեջ՝ կստանանք՝ $\Gamma = F/(d - F)$: Կիրառելով ստացված բանաձևն առարկայի սկզբնական և վերջնական դիրքերի համար՝ կստանանք հավասարումների հետևյալ համակարգը.

$$\frac{F}{d - F} = \frac{1}{3}, \quad \frac{F}{d - \Delta d - F} = \frac{1}{2}:$$

Լուծելով հավասարումների համակարգը՝ կստանանք՝ $F = \Delta d = 6$ սմ:

Պատասխան՝ 6 սմ:

6. Ապացույցել, որ պարաբոլային հայելու առանցքին զուգահեռ բոլոր ճառագայթները գոգավոր հայելու մանրադառնալույս հետո անցնում են հայելու նույն կետով (պարաբոլի կիզակետով):



Լուծում: Ենթադրենք՝ OY առանցքին զուգահեռ տարածվող լույսի ճառագայթն անդրադարձնում է $y = x^2/4a$ պարաբոլից: Անդրադարձման օրենքից հետևում է, որ ընկնող և անդրադարձող ճառագայթների կազմած անկյունները պարաբոլին տարված շոշափողի հետ իրար հավասար են, ուստի՝ գծագրում այդ անկյունները նշանակված են նույն՝ β տառով: Ինչպես երևում է գծագրից՝

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\frac{h^2}{4a} - d}{h}, \quad \gamma = \frac{\pi}{2} - 2\beta, \quad \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha,$$

որտեղ h -ն ընկնող ճառագայթի հեռավորությունն է OY առանցքից, d -ն՝ այդ առանցքի հետ անդրադարձած ճառագայթի հատման կետի հեռավորությունը պարաբոլի գագաթից: Հետևաբար՝

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{ctg} 2\beta = \frac{\operatorname{ctg}^2 \beta - 1}{2 \operatorname{ctg} \beta} = \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{tg} \alpha}:$$

Մաթեմատիկայի դասընթացից հայտնի է, որ կամայական կետում ֆունկցիայի գրաֆիկին տարված շոշափողի՝ OX առանցքի հետ կազմած α անկյան տանգենսը հավասար է այդ կետում ֆունկցիայի ածանցյալին, որը տվյալ դեպքում հավասար է $h/2a$: Հավասարեցնելով $\operatorname{tg} \gamma$ -ի վերը նշված երկու արտահայտությունները և տեղադրելով $\operatorname{tg} \alpha = h/2a$, կստանանք՝

$$\frac{\frac{h^2}{4a} - d}{h} = \frac{\left(\frac{h}{2a}\right)^2 - 1}{2 \frac{h}{2a}},$$

որտեղից

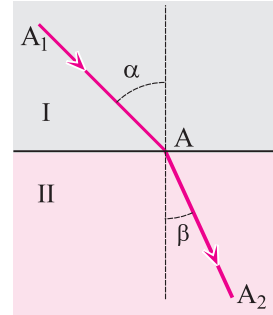
$$d = a:$$

Նշանակում է՝ d -ն կախված չէ h -ից, այսինքն՝ պարաբոլի վրա OY առանցքին զուգահեռ ընկնող բոլոր ճառագայթները պարաբոլից անդրադառնալույս հետո հավաքվում են նույն կետում: Այդ կետը կոչվում է պարաբոլի կիզակետ:

Եթե պարաբոլը պտտենք OY առանցքի շուրջը և ստացված մարմնի ներքին մակերևույթը հայելապատենք, կստանանք պարաբոլային հայելի: Ի տարբերություն գնդաձև հայելիների, որոնց կիզակետում հավաքվում են միայն մերձառանցքային ճառագայթները, պարաբոլային հայելիների կիզակետում հավաքվում են OY առանցքին զուգահեռ բոլոր ճառագայթները՝ անկախ առանցքից ունեցած հեռավորությունից:

6. ԼՈՒՅՍԻ ԲԵԿՈՒՄԸ: ԲԵԿՄԱՆ ՕՐԵՆՔԸ: ԲԵԿՄԱՆ ՑՈՒՑԻՉ

Լույսի փունջը, հասնելով երկու միջավայրերի բաժանման սահմանին, անդրադարձնում է՝ իր հետ տանելով լուսային էներգիայի մի մասը: Եթե երկրորդ միջավայրը թափանցիկ է, ապա լուսային էներգիայի որոշ մաս անցնում է երկրորդ միջավայր՝ սահմանով անցնելիս, որպես կանոն, կարուկ փոխելով տարածման ուղղությունը: Այդ երևույթը կոչվում է **լույսի բեկումն**: 17-րդ դարում A_1A -ն երկու միջավայրերի բաժանման սահմանին **ընկնող ճառագայթն** է, իսկ AA_2 -ը՝ **բեկված ճառագայթը**: Անկման կետում միջավայրերի բաժանման սահմանին տարված ուղղահայացի և ընկնող ճառագայթի կազմած անկյունը կոչվում է **անկման անկյուն**, իսկ նույն ուղղահայացի և բեկված ճառագայթի կազմած անկյունը՝ **բեկման անկյուն**:



Նկ. 17. Լույսի ճառագայթի բեկումը

Բեկման օրենքը հայտնաբերել է հոլանդացի գիտնական Վիլերբորդ Սնելիուսը 1621 թ.: Այն ձևակերպվում է հետևյալ կերպ՝

1. **ընկնող ճառագայթը, բեկված ճառագայթը և անկման կետում միջավայրերի բաժանման սահմանին տարված ուղղահայացը նույն հարթության մեջ են,**

2. **անկման անկյան կամայական արժեքի դեպքում անկման անկյան սինուսի հարաբերությունը բեկման անկյան սինուսին հաստատուն մեծություն է տվյալ երկու միջավայրերի համար:**

Եթե անկման անկյունը նշանակենք α -ով, իսկ բեկման անկյունը՝ β -ով, ապա, համաձայն բեկման օրենքի,

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.13)$$

n_1 (n_2) մեծությունը կոչվում է առաջին (երկրորդ) միջավայրի **բեկման ցուցիչ**:

Միջավայրի բեկման ցուցիչ անվանում են վակուումում և տվյալ միջավայրում լույսի արագությունների հարաբերությունը: Եթե միջավայրում լույսի տարածման արագությունը նշանակենք v -ով, ապա, սահմանման համաձայն,

$$n = \frac{c}{v}: \quad (1.14)$$

Եթե միջավայրի բեկման ցուցիչը հաստատուն մեծություն է, ապա միջավայրն անվանում են **օպտիկապես համասեռ**:

Քանի որ լույսի արագությունը միջավայրում միշտ փոքր է վակուումում լույսի արագությունից, ապա (1.14) սահմանումից հետևում է, որ $n \geq 1$ (հավասարման նշանը համապատասխանում է վակուումին): (1.13) և (1.14) արտահայտություններից՝ անկման և բեկման անկյունները կապված են երկու միջավայրերում լույսի արագությունների հետ՝

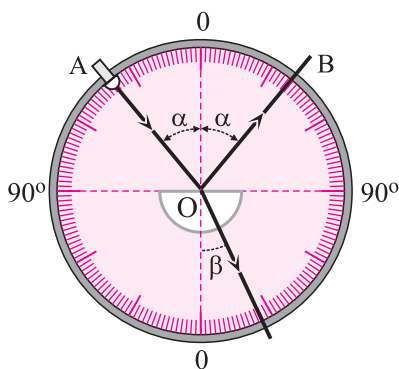
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}: \quad (1.15)$$

Հատկապես ուշագրավ է մակերևութին ուղղահայաց ընկնող ճառագայթի դեպքը, երբ $\alpha = 0$: Այս դեպքում բեկման անկյունը նույնպես զրո է, քանի որ, համաձայն (1.13) բանաձևի,

$$\sin \beta = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha = 0, \quad \beta = 0:$$

Ընդունված է ավելի փոքր բեկման ցուցիչ ունեցող միջավայրն անվանել **օպտիկապես նոսր**, իսկ ավելի մեծ բեկման ցուցիչ ունեցողը՝ **օպտիկապես խիտ միջավայր**: Այսպիսով՝ եթե լույսն անցնում է օպտիկապես նոսր միջավայրից օպտիկապես խիտ միջավայր, այսինքն՝ $n_2 > n_1$, ապա $\sin \beta < \sin \alpha$ և $\beta < \alpha$, այսինքն՝ բեկման անկյունը փոքր է անկման անկյունից: Դիտարկված դեպքը համապատասխանում է լույսի անցմանը, օրինակ, վակուումից կամ օդից ապակու կամ ջրի մեջ: Հակառակ դեպքում, երբ լույսն օպտիկապես խիտ միջավայրից անցնում է օպտիկապես նոսր միջավայր, այսինքն՝ $n_2 < n_1$, ապա $\sin \beta > \sin \alpha$ և $\beta > \alpha$, այսինքն՝ բեկման անկյունը մեծ է անկման անկյունից:

Միջավայրի բեկման ցուցիչը կախված չէ անկման կամ բեկման անկյուններից*, այն կախված է միջավայրի նյութի խտությունից, ջերմաստիճանից, ագրեգատային վիճակից և այլ ֆիզիկական պարամետրերից: Բեկման ցուցիչը կախված է նաև լույսի գույնից (ալիքի հաճախությունից): Տեսանելի ճառագայթման տիրույթում կարմիր լույսի համար այն ամենափոքրն է, մանուշակագույն լույսի համար՝ ամենամեծը: Օդի բեկման ցուցիչը շատ քիչ է տարբերվում 1-ից, ուստի հաշվարկներում այն սովորաբար փոխարինվում է 1-ով:



Նկ. 18. Բեկման օրենքի ստուգումը փորձով

Բեկման օրենքը նույնպես կարելի է ստուգել օպտիկական սկավառակի միջոցով: Դրա համար թափանցիկ կիսազլանն ամրացնում են սկավառակի վրա այնպես, որ կիսազլանի հարթ մակերևութի միջին մասը համընկնի սկավառակի O կենտրոնի հետ (նկ. 18): Լույսի նեղ փունջը, ընկնելով կիսազլանի հարթ մակերևութի O կետին, բեկվում է և անցնում կիսազլանի լայնական հատույթի շառավղի երկայնքով: Կիսազլանի մակերևութին այն ընկնում է 0° անկման անկյունով և առանց բեկվելու դուրս է գալիս կիսազլանից, այնպես որ բեկման β անկյունը հեշտությամբ որոշվում է փորձից:

Փոփոխելով անկման α անկյունը և որոշելով համապատասխան բեկման անկյունները՝ եռանկյունաչափական աղյուսակի կամ հաշվիչի օգնությամբ հեշտ է համոզվել, որ անկման անկյան սինուսի և բեկման անկյան սինուսի հարաբերությունը հաստատուն մեծություն է: Բեկման օրենքի օգնությամբ կարելի է ապացույցել, որ ընկնող և բեկված ճառագայթները նույնպես փոխադարձաբար շրջելի են: Եթե լույսի ճառագայթը II միջավայրից β անկյունով գցենք միջավայրերի բաժանման սահմանին, ապա բեկման օրենքից կհետևի, որ այն I միջավայր կանցնի՝

* Ենթադրվում է, որ միջավայրն իզոտրոպ է:

բեկվելով α անկյունով (նկ. 18): Այս փաստը նույնպես կարելի է ստուգել օպտիկական սկավառակի օգնությամբ:

1-ին աղյուսակում տրված են որոշ նյութերի բեկման ցուցիչները (նորմալ պայմաններում և $\lambda = 589,3$ նմ ալիքի երկարության համար):

Աղյուսակ 1

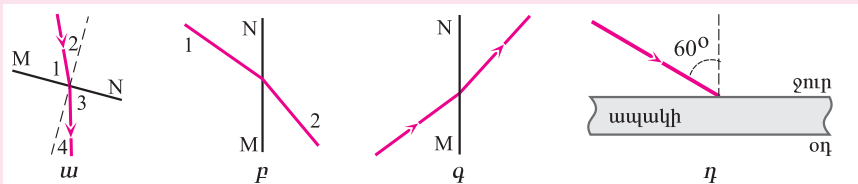
Նյութ	n	Նյութ	n	Նյութ	n
Ազոտ	1,000297	Հեղուկ ազոտ	1,197	Ալմաստ	2,417
Զրի գոլորշի	1,000252	Զուր	1,333	Սառույց	1,31
Հելիում	1,000035	Եթեր	1,354	Ապակի	1,5÷1,8

Այս տվյալներից հետևում է, որ գազերի բեկման ցուցիչը գործնականում չի տարբերվում 1-ից: Հեղուկներում նրա արժեքը $1,2 \div 1,9$ է, իսկ բազմաթիվ պինդ մարմիններում՝ $1,3 \div 4,0$:

Վերջում նշենք, որ ինչպես և անդրադարձման օրենքը, բեկման օրենքը ճիշտ է ոչ միայն լույսի, այլև բոլոր էլեկտրամագնիսական ալիքների համար:

Հարցեր և առաջադրանքներ

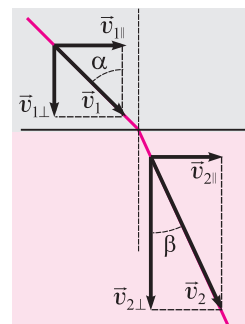
1. Ո՞ր երևույթն են անվանում լույսի բեկում: 2. Ո՞ր մեծությունն է կոչվում միջավայրի բեկման ցուցիչ: 3. Ձևակերպեք լույսի բեկման օրենքը: 4. Ի՞նչ բանաձևով է տրվում բեկման օրենքը: 5. Որքա՞ն է բեկման անկյունը, եթե լույսի ճառագայթն ընկնում է երկու միջավայրերի բաժանման սահմանին ուղղահայաց: 6. Կարո՞ղ է արդյոք միջավայրի բեկման ցուցիչը 1-ից փոքր լինել: Պարասխանը հիմնավորեք: 7. ա նկարում ցույց տվեք անկման և բեկման անկյունները: 8. բ նկարում բերված է լույսի ճառագայթի անցումն օդից ապակի: Ո՞ր միջավայրն է ապակին: 9. գ նկարում բերված դեպքում ի՞նչ կարելի է ասել բեկման ցուցիչների հարաբերության մասին՝ այն 1-ից մեծ է, թե՞ փոքր: 10. Կառույցե՞ք դ նկարում պատկերված ճառագայթի ընթացքն ապակում և օդում: 11. Ինչո՞ւ բեկման օրենքն ստուգելիս օպտիկական սկավառակի կենտրոնում թափանցիկ կիսագլան է դրվում:



Հետաքրքիր է իմանալ

Բեկման օրենքն առաջին անգամ սահմանել է Ռընե Դեկարտը՝ օգտագործելով սխալ պատկերացումն այն մասին, որ նուր միջավայրից խիտ միջավայր անցնելիս լույսի արագությունն աճում է: Բնականաբար, դրա հետևանքով նա ստացել է բեկման օրենքի սխալ արտահայտություն:

Լույսի մասնիկային տեսության հիման վրա նույն սխալ արդյունքին է հանգել նաև Նյուտոնը: Ըստ Նյուտոնի՝ նուր միջավայրից խիտ միջավայր անցնելիս արագության՝ մակերևույթին զուգահեռ բաղադրիչը չի փոխվի (շոշափողի ուղղությամբ ուժեր չեն ազդում), իսկ այդ մակերևույթին ուղղահայաց բաղադրիչը գրավիտացիոն ձգողության արդյու-



նարար ուժի ազդեցությամբ կմնծանա, ուստի՝ կմնծանա նաև լույսի արագությունը: Այս տեսակետը հաստատել կամ հերքել հնարավոր չէր, քանի որ այն ժամանակ հնարավոր չէր չափել լույսի արագությունը տարբեր միջավայրերում:

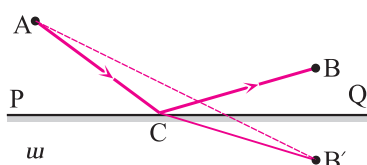
Ինչպես երևում է նկարից, $\sin \alpha = v_{III}/v_I$, $\sin \beta = v_{2II}/v_2$: Քանի որ $v_{III} = v_{2II}$, ապա $\sin \alpha / \sin \beta = v_2 / v_I$: Համեմատելով այս արտահայտությունը բեկման օրենքի (1.15) արտահայտության հետ՝ կհամոզվենք, որ, իրոք, արդյունքը սխալ է:

§ 7. ՖԵՐՄԱՅԻ ՍԿԶԲՈՒՆՔԸ

Ինչպես նշել ենք §3-ում, հույն գիտնական Հերոն Ալեքսանդրացին ձևակերպել է մի սկզբունք, համաձայն որի՝ առարկայից դուրս եկող ճառագայթն անդրադառնում է հայելային մակերևույթից և ընկնում մեր աչքին այնպես, որ նրա անցած ճանապարհը լինի նվազագույնը: 1662 թ. ֆրանսիացի մաթեմատիկոս Պիեռ Ֆերման ձևակերպել է երկրաչափական օպտիկայի հիմնական սկզբունքը, որն ունի լույսի տարածման առավել ընդհանուր օրենքի իմաստ: Այդ սկզբունքից բխում էին երկրաչափական օպտիկայի՝ այն ժամանակ հայտնի լույսի ուղղագիծ տարածման, անդրադարձման և բեկման օրենքները: Չմանրամասնելով Ֆերմայի սկզբունքի առավել ճշգրիտ ձևակերպումը՝ սահմանենք դրա պարզագույն տարբերակը. **տարածության մի կետից մյուսը լույսը տարածվում է այնպիսի ճանապարհով, որն անցնելու ժամանակը նվազագույնն է:**

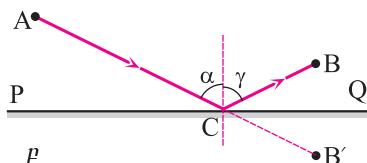
Այս սկզբունքից անմիջապես բխում է, որ համասեռ միջավայրում լույսը տարածվում է ուղիղ գծով, որովհետև երկու կետերի ամենամոտ հեռավորությունն ուղիղ գիծն է: Յույց տանք, որ Ֆերմայի սկզբունքից բխում են նաև լույսի անդրադարձման և բեկման օրենքները:

Եթե A կետից B կետ հասած ճառագայթն անդրադարձել է հայելու C կետից (նկ. 19, ա), ապա նրա անցած ճանապարհը՝



$$S = AC + CB: \quad (1.16)$$

C կետը միացնենք B կետի հայելային համաչափ B' կետին: PQ-ն BB' հատվածի միջնորդահայացն է, ուստի՝ $CB' = CB$, հետևաբար՝



$$S = AC + CB': \quad (1.17)$$

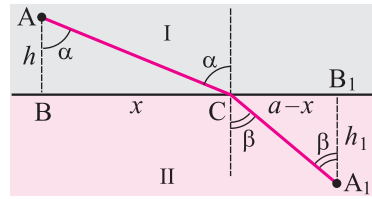
Բայց կամայական C կետի համար $AC + CB' \geq AB'$: Ուրեմն՝ ճանապարհը կլինի նվազագույնն այն ճառագայթի համար, որն ընկնում է հայելու վրա AB' ուղղի երկայնքով (նկ. 19, բ): Այդ ճառագայթի համար $\angle ACP = \angle B'CQ$ (որպես հակադիր անկյուններ), $\angle B'CQ = \angle BCQ$ (PQ-ն BCB' անկյան կիսորդն է): Ինչպես երևում է 19, բ նկարից, անդրադարձման անկյունը՝

Նկ. 19. Անդրադարձման օրենքի ապացույցումը՝ ըստ Ֆերմայի սկզբունքի

նկարից, անդրադարձման անկյունը՝

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \angle BCQ = \frac{\pi}{2} - \angle ACP = \alpha:$$

Այժմ դիտարկենք այն դեպքը, երբ լույսի ճառագայթը n_1 բեկման ցուցիչով I միջավայրի A կետից հասնում է n_2 բեկման ցուցիչով II միջավայրի A_1 կետը (նկ.20): Դրա համար պահանջվող ժամանակը կախված կլինի B կետից միջավայրերի բաժանման սահմանի հետ լույսի ճառագայթի հատման C կետի x հեռավորությունից հետևյալ կերպ՝



Նկ.20. Բեկման օրենքի ապացույցը՝ ըստ Ֆերմախի սկզբունքի

$$t(x) = \frac{AC}{v_1} + \frac{CA_1}{v_2} = \frac{\sqrt{h^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{h_1^2 + (a - x)^2}}{v_2}, \quad (1.18)$$

որտեղ v_1 -ը և v_2 -ը լույսի տարածման արագություններն են, համապատասխանաբար, I և II միջավայրերում, իսկ a -ն՝ հեռավորությունը B և B_1 կետերի միջև: Ժամանակը նվազագույնը լինելու պայմանից հետևում է, որ (1.15) արտահայտության ածանցյալն ըստ x -ի զրո է, այսինքն՝

$$\frac{x}{v_1 \sqrt{h^2 + x^2}} - \frac{a - x}{v_2 \sqrt{h_1^2 + (a - x)^2}} = 0:$$

Բայց $x/\sqrt{h^2 + x^2}$ հարաբերությունն անկման անկյան սինուսն է, իսկ $(a - x)/\sqrt{h_1^2 + (a - x)^2}$ -ն՝ բեկման, հետևաբար՝

$$\frac{\sin \alpha}{v_1} = \frac{\sin \beta}{v_2} \quad \text{կամ} \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}:$$



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ձևակերպեք Հերոն Ալեքսանդրացու սկզբունքը:
2. Ի՞նչ ուղղում մտցրեց Ֆերման Հերոն Ալեքսանդրացու սկզբունքի մեջ:

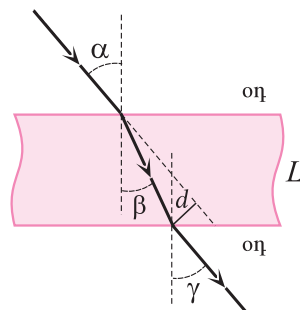
§ 8. ՃԱՌԱԳԱՅԹՆԵՐԻ ԸՆԹԱՑՔԸ ՀԱՐԹ-ՉՈՒԳԱՆԵՐԻ ԹԻԹԵՂՈՒՄ ԵՎ ԵՌԱՆԿՅՈՒՆ ՊՐԻՉՄԱՅՈՒՄ

Ճառագայթների ընթացքը հարթ-գուգահեռ քիթելում: Ենթադրենք՝ լույսի ճառագայթն օդից ընկնում է հարթ քիթելի վերին մակերևույթին α անկյունով և բեկվում: Բեկման անկյունը կորոշվի բեկման օրենքից՝

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n}, \quad (1.19)$$

որտեղ n -ը քիթելի նյութի բեկման ցուցիչն է (նկ. 21):

Տարածվելով քիթելում և հասնելով քիթելի ստորին մակերևույթին՝ ճառագայթը նորից կբեկվի, ընդ որում՝ բեկման օրենքի բանաձևից՝



Նկ.21. Ճառագայթի ընթացքը քիթելում

$$\sin \gamma = n \sin \beta = n \frac{\sin \alpha}{n} = \sin \alpha,$$

այսինքն՝ $\gamma = \alpha$:

Այսպիսով՝ կրկնակի բեկված ճառագայթը հարթ-գուգահեռ քիթեղից դուրս է գալիս ընկնող ճառագայթին գուգահեռ, սակայն սկզբնական ուղղությունից d չափով շեղված, ընդ որում՝ շեղման չափը կախված է քիթեղի L հաստությունից, անկման α անկյունից և քիթեղի նյութի n բեկման ցուցչից: Անկման փոքր անկյունների համար, երբ $\sin \alpha \approx \alpha$, այն կարտահայտվի հետևյալ կերպ՝

$$d = \alpha L \cdot 1 - \frac{1}{n} j: \quad (1.20)$$

Եթե $\alpha = 0$ կամ $n = 1$, ապա $d = 0$, այսինքն՝ ճառագայթը չի շեղվում սկզբնական ուղղությունից: $\alpha = 0$ դեպքում դա հետևանք է այն բանի, որ միջավայրերի բաժանման սահմանին ուղղահայաց ընկնող ճառագայթը չի բեկվում, իսկ $n = 1$ դեպքում միջավայրն օպտիկապես համասեռ է, որտեղ, ինչպես գիտեք, ճառագայթները տարածվում են ուղղագիծ:

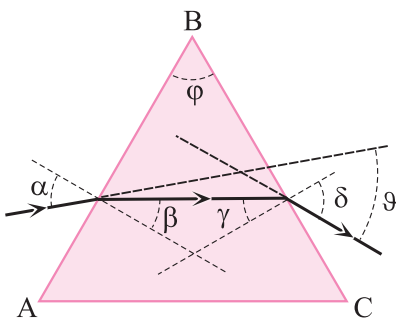
Ըստ (1.20) բանաձևի՝ $d \rightarrow 0$ մաս այն դեպքում, երբ $L \rightarrow 0$, որը գործնականում նշանակում է՝ հարթ-գուգահեռ և բարակ քիթեղով անցնող ճառագայթը չի բեկվում: Դրանով է բացատրվում այն փաստը, որ բարակ ոսպնյակի կենտրոնին ընկնող ճառագայթներն անցնում են ոսպնյակով՝ առանց փոխելու իրենց տարածման ուղղությունը (տես § 12):

Ճառագայթների ընթացքը եռանկյուն պրիզմայում: Ճառագայթը, օղից ընկնելով n բեկման ցուցչով եռանկյուն պրիզմայի AB միստին (22-րդ նկարում պատկերված է եռանկյուն պրիզմայի հատույթը, φ -ն պրիզմայի **բեկող անկյունն** է), բեկվում է՝ շեղվելով դեպի պրիզմայի հիմքը, ընդ որում՝ բեկման անկյան սինուսը տրվում է (1.19) առնչությամբ:

Երկրորդ անգամ բեկվելով BC միստի վրա՝ ճառագայթը նորից շեղվում է դեպի պրիզմայի հիմքը: Բեկման անկյունը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$\sin \delta = n \sin(\varphi - \beta):$$

Պրիզմայի վրա ընկնող ճառագայթով և նրանից դուրս եկած ճառագայթի շարունակությամբ կազմված ϑ անկյունը կոչվում է **ճառագայթի շեղման անկյուն**:



Նկ. 22. Ճառագայթի ընթացքը եռանկյուն պրիզմայում

Այն կախված է պրիզմայի φ բեկող անկյունից, պրիզմայի n բեկման ցուցչից (եթե պրիզման օդում է) և անկման α անկյունից: 22-րդ նկարից երևում է, որ $\vartheta = (\alpha - \beta) + (\delta - \gamma)$, քանի որ եռանկյան երկու անկյունների գումարը հավասար է երրորդ անկյանը կից արտաքին անկյանը: Նույն հիմնավորմամբ $\beta + \gamma = \varphi$, հետևաբար՝ $\vartheta = \alpha + \delta - \varphi$: Պրիզմայի փոքր բեկող անկյան ($\varphi \ll 1$) և անկման փոքր անկյան ($\alpha \ll 1$) դեպքում $\vartheta = (n - 1)\varphi$: Ստացված արտահայտության մեջ $(n - 1)$ արտադրիչի

առկայությունը, ինչպես և հարթ-գուգահեռ փթեղում d շեղման (1.20) բանաձևում, պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ $n = 1$ դեպքում ճառագայթը չի բեկվում, և ϑ -ն զրո է: $\varphi \rightarrow 0$ դեպքում պրիզման վերածվում է բարակ հարթ-գուգահեռ փթեղի, ուստի՝ այս դեպքում էլ շեղման անկյունը՝ $\vartheta \rightarrow 0$:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Գծեք ճառագայթի ընթացքն ապակում հարթ-գուգահեռ օդային շերտով անցնելիս:
2. Գծեք ճառագայթի ընթացքն ապակում օդային պրիզմայով անցնելիս:

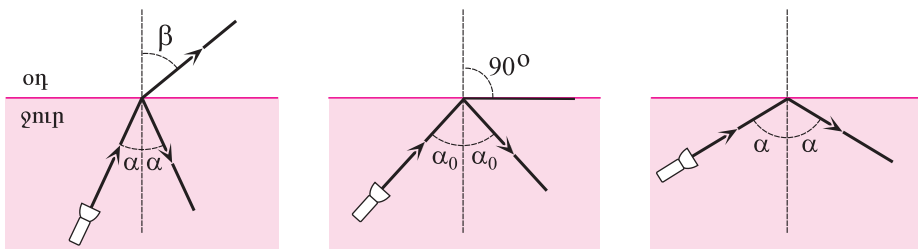
§ 9. ԼՈՒՅՍԻ ԼՐԻԿ ԱՆԴՐԱԴԱՐՁՈՒՄԸ: ԼՐԻԿ ԱՆԴՐԱԴԱՐՁՄԱՆ ՍԱՀՄԱՆԱՅԻՆ ԱՆԿՅՈՒՆ

Լույսի լրիվ անդրադարձման երևույթը: Ջրով լի ապակե անոթի մեջ տեղադրենք լույսի աղբյուր, որն արձակում է լույսի նեղ փունջ (նկ.23): Ջուր-օդ սահմանին լույսը մասամբ կանդրադառնա և մասամբ կբեկվի, ընդ որում՝ բեկման անկյունն անկման անկյունից մեծ կլինի, քանի որ օպտիկապես խիտ միջավայրից (ջրից) լույսն անցնում է օպտիկապես նոսր միջավայր (օդ): Ըստ բեկման օրենքի՝

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{n} \quad \text{կամ} \quad \sin \beta = n \sin \alpha: \quad (1.21)$$

Քանի որ ջրի բեկման ցուցիչը՝ $n = 1,33$, ապա $\beta > \alpha$:

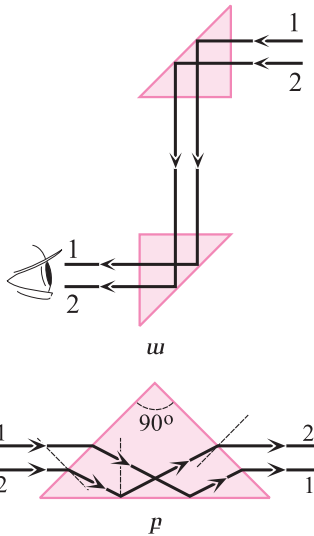
Անկման α անկյան մեծացմանը զուգընթաց մեծանում է նաև բեկման անկյունը, ընդ որում՝ բեկված փնջի էներգիան նվազում է, անդրադարձած փնջինը՝ աճում: Երբ α անկյունը ձգտում է որոշակի α_0 անկյան, բեկման β անկյունը ձգտում է 90° -ի, իսկ բեկված փնջի էներգիան ձգտում է զրոյի (այսինքն՝ սահմանային դեպքում բեկված փունջ չկա): Անկման ավելի մեծ անկյունների դեպքում լույսը չի բեկվում. այն անդրադառնում է՝ իր հետ տանելով ընկնող լույսի փնջի ողջ էներգիան: Այդ երևույթը կոչվում է **լույսի լրիվ անդրադարձում**:



Նկ. 23. Լույսի փնջի ընթացքը «ջուր-օդ» սահմանին ընկնելիս

Այն ամենափոքր անկման անկյունը, որի դեպքում տեղի է ունենում լույսի լրիվ անդրադարձում, կոչվում է **լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյուն**: Այդ անկյունը կարելի է գտնել լույսի բեկման օրենքից՝ բանաձևում տեղադրելով $\beta = 90^\circ$, այսինքն՝

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}: \quad (1.22)$$

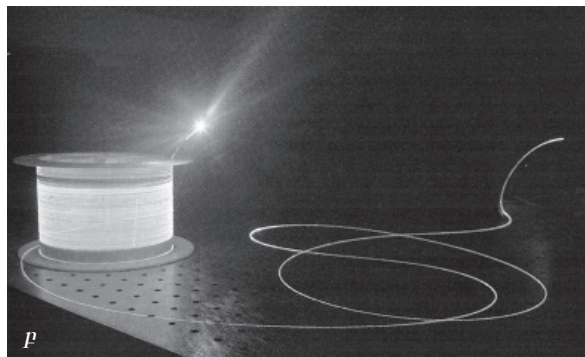
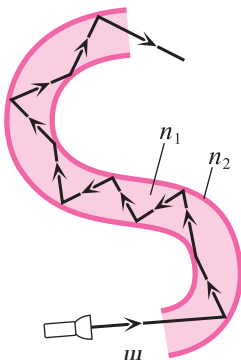


Նկ. 24. Ճառագայթների ընթացքն ապակե ուղղանկյուն պրիզմայում

տին $\alpha = 0$ անկյունով և, առանց փոխելու տարածման ուղղությունը, թափանցում պրիզմայի մեջ: Այնուհետև ճառագայթներն ընկնում են պրիզմայի մյուս նիստին (նկարում՝ եռանկյան ներքնաձիգին) 45° անկյունով, և, քանի որ ապակու լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյունը՝ $\alpha_0 \approx 42^\circ$, և փոքր է 45° -ից, լույսը լրիվ անդրադառնում է: Անդրադարձման անկյունը՝ $\gamma = \alpha = 45^\circ$, ուստի՝ լույսի ճառագայթներն ընկնում են պրիզմայի երրորդ նիստին 0° անկյան տակ և, առանց փոխելու տարածման ուղղությունը, անցնում օդային միջավայր: Դրա հետևանքով ճառագայթները շրջվում են 90° -ով: Այնուհետև մույնը տեղի է ունենում 2-րդ պրիզմայում: Սուզանավում դիտորդը մնան ձևով տեսնում է, թե ինչ է կատարվում ջրի մակերևույթին:

Լույսի լրիվ անդրադարձումը հնարավորություն է տալիս նաև շրջելու պատկերը (փոխելու ճառագայթների տեղերը), ինչպես ցույց է տրված 24,բ նկարում:

Թելքային օպտիկա: Լրիվ անդրադարձման երևույթի մյուս կիրառությունը, որը հեղաշրջում է առաջացրել կապի բնագավառում, թելքային օպտիկան է:



Նկ. 25. Լույսի տարածումը լուսատարում

Թելքային օպտիկայում լույսը կարելի է հաղորդել լուսատարներով՝ օգտագործելով լրիվ անդրադարձման երևույթը: Լուսատարն ապակե գլանաձև թելք է, որը պատված է թելքի բեկման ցուցչից փոքր բեկման ցուցիչ ունեցող թափանցիկ նյութի թաղանթով: Բազմիցս անդրադարձնալով՝ լույսը տարածվում է լուսատարով, անկախ այն բանից՝ լուսատարն ուղի՞ղ է, թե՞ կոր (նկ. 25,ա):

Ժամանակակից լուսատարներն ունեն շատ փոքր տրամագիծ (նկ. 25,բ): Այդ լուսատարներից խուրձ են կազմում՝ նրա մեջ ընդգրկելով տասնյակ հազարավոր լուսատարներ: Խրձում յուրաքանչյուր լուսատարով հաղորդվում է պատկերի մի տարր, իսկ խուրձը հաղորդում է ամբողջական պատկերը:

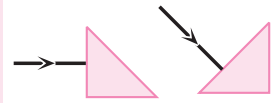
Ներկայումս հեռուստատեսային կապի զգալի մասն իրականացվում է լուսատարներով. պատկերները հաղորդում են լույսի միջոցով:

Թելքային օպտիկան նորանոր կիրառություններ է գտնում տեխնիկայում և բժշկության մեջ: Մարդու ներքին օրգանների, մասնավորապես ստամոքսի հետազոտման համար օգտագործում են թելքային ստամոքսադիտակ՝ բաղկացած երկու լուսատարից: Լուսատարները կերակրափողով իջեցվում են ստամոքս. մի լուսատարով լուսավորում են ստամոքսը, մյուսով՝ դիտում այն:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր երևույթն է կոչվում լույսի լրիվ անդրադարձում: 2. Ո՞ր անկյունն է կոչվում լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյուն: 3. Ի՞նչ բանաձևով են որոշում լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյունը: 4. Հնարավո՞ր է արդյոք լրիվ անդրադարձում, երբ լույսն օպտիկապես նոսր միջավայրից ընկնում է այն օպտիկապես խիտ միջավայրից բաժանող սահմանին: Պարասխանը հիմնավորե՛ք: 5. Գծե՛ք հավասարասրուն ուղղանկյուն եռանկյուն ապակե պրիզմայի նիստին ուղղահայաց ընկնող ճառագայթի ընթացքը, եթե ապակի-միջավայր սահմանին լույսի լրիվ անդրադարձման անկյունը 42° է: Դիտարկե՛ք երկու դեպք (տես նկարը):



§ 10. ՃԱՌԱԳԱՅԹՆԵՐԻ ԸՆԹԱՑՔՆ ԱՆԸՆԴՀԱՆ ՓՈԽՎՈՂ ԲԵԿՄԱՆ ՑՈՒՑՉՈՎ ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՒՄ: ՕՂԱՏԵՍԻԼ

Համասեռ միջավայրում լույսը տարածվում է ուղղագիծ, իսկ երկու համասեռ միջավայրերի սահմանագծով անցնելիս բեկվում է՝ կտրուկ փոխելով տարածման ուղղությունը: Եթե լույսը տարածվում է անհամասեռ միջավայրում, որի բեկման ցուցիչը կետից կետ անընդհատ փոփոխվում է, ապա լույսի ճառագայթներն այդ միջավայրում սահուն կերպով կտրանում են: Այս երևույթը կոչվում է լույսի ռեֆրակցիա* (լատիներեն «ռեֆրակտիո»՝ բեկում բառից): Անընդհատ փոփոխվող բեկման ցուցչով միջավայրի օրինակ է Երկրի մթնոլորտը: Բեկման ցուցչի արժեքը տվյալ կետում կախված է մթնոլորտի օդի

* Լայն իմաստով ռեֆրակցիա կամ բեկում կոչվում է լույսի ճառագայթների տարածման ուղղության փոփոխությունը միջավայրի բեկման ցուցչի փոփոխման հետևանքով. պարզապես ընդունված է ուղղության կտրուկ փոփոխությունն անվանել բեկում, իսկ անընդհատ փոփոխությունը՝ ռեֆրակցիա:

ջերմաստիճանից, ընդ որում՝ որքան բարձր է ջերմաստիճանը, այնքան փոքր է օդի խտությունը, օպտիկական ավելի մոտ է միջավայրը և փոքր է բեկման ցուցիչը: Եթե գետնից վեր բարձրանալուն զուգընթաց մթնոլորտի օդի ջերմաստիճանը շեշտակի աճում է, ապա Երկրի մակերևույթից դեպի վեր բարձրացող լույսի ճառագայթը (նկ.26) մթնոլորտում անցնում է այնպես, ինչպես բարակ զուգահեռ շերտերով, որոնցից յուրաքանչյուրի բեկման ցուցիչը փոքրանում է շերտի բարձրության աճին զուգընթաց: Այդպիսի զույգ շերտերի սահմանին լույսի ճառագայթը բեկվում է և, աստիճանաբար կորանալով, վերադառնում է դեպի Երկրի մակերևույթ (տեղի է ունենում լույսի լրիվ անդրադարձում): Հակառակ դեպքում, երբ բարձրության աճին զուգընթաց ջերմաստիճանը կտրուկ նվազում է, դեպի Երկրի մակերևույթ տարածվող ճառագայթը, աստիճանաբար կորանալով, հեռանում է Երկրի մակերևույթից (նկ.27): Երկու դեպքում էլ օդի տաք շերտերն անդրադարձնում են լույսի ճառագայթները:



Նկ.26. Բարձրության աճին զուգընթաց ջերմաստիճանն աճում է:



Նկ.27. Բարձրության աճին զուգընթաց ջերմաստիճանը նվազում է:

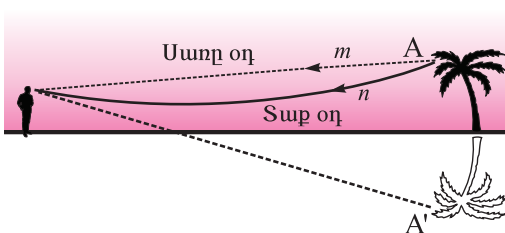
Կտրուկ տարբերվող ջերմաստիճաններով օդի շերտերի սահմանից լույսի անդրադարձման երևույթը կոչվում է օդատեսիլ:

Այս երևույթի հետևանքով դիտորդը հեռավոր մարմնից բացի՝ միաժամանակ տեսնում է մարմնի դիրքից շեղված նրա կեղծ պատկերը: Եթե մարմինը հորիզոնից ցածր է, երևում է միայն նրա կեղծ պատկերը:

Մթնոլորտային օդատեսիլները բաժանվում են երեք հիմնական խմբի՝ **ստորին** (կամ լճային), **վերին** (կամ հեռահար) և **կողային**:

Ստորին օդատեսիլ: Մարմնի տակ երևացող օդատեսիլը կոչվում է ստորին: Այն առաջանում է ընդարձակ և հարթ վայրերում, որտեղ Երկրի մակերևույթը բավական տաք է, և օդի ստորին շերտերի ջերմաստիճանն զգալիորեն բարձր է վերին շերտերի ջերմաստիճանից: Այսպիսի իրավիճակներ հանդիպում են անապատներում, ասֆալտապատ մայրուղիներում և այլուր:

28-րդ նկարում պատկերված է, թե ինչպես է առաջանում ծառի կեղծ պատկերը շոգ անապատում: Լույսի m ճառագայթն A կետից ավելի սառն օդի միջով ընկնում է դիտորդի աչքին: Իսկ n ճառագայթն ընկնում է դիտորդի աչքին օդի տաք շերտից անդրադարձման շնորհիվ: Ուստի՝ դիտորդը, A կետից



Նկ.28. Ստորին օդատեսիլ անապատում

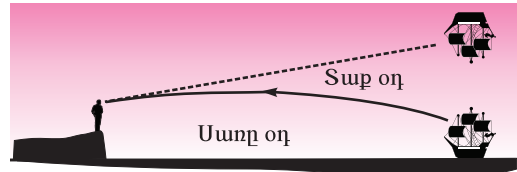


Նկ.29. Ստորին օդատեսիլ խճուղու վրա

բացի, միաժամանակ տեսնում է նրա հայելային պատկերը: Նրան թվում է, թե առարկայի տակ ջրային մակերևույթ է, որտեղ էլ երևում է ծառի կեղծ պատկերը: Իրականում դա երկնքի արտացոլումն է «օդային հայելում», որը հաճախ լճի տպավորություն է թողնում:

Տաք օրերին ասֆալտապատ խճուղին հեռվում թափ է երևում (նկ. 29): Սա մույնպես ստորին օդատեսիլ է: Մեծ անկյունով ընկնող ճառագայթներն անդրադառնում են Երկրի մակերևույթին մոտ տաք օդի շերտից և ճանապարհին նման պատկեր են ստեղծում:

Վերին օդատեսիլ: Մարմնի վերևում երևացող օդատեսիլը կոչվում է **վերին**: Վերին օդատեսիլ առաջանում է, օրինակ՝ ծովում, երբ ջրի մակերևույթին մոտ օդի սառը շերտերն են, իսկ դրանից վերև՝ տաք շերտերը: Այս դեպքում, հեռվում լողացող նավից «դուրս եկող» ճառագայթները, անդրադառնալով օդի տաք շերտերից, ստեղծում են նավի կեղծ պատկեր երկնքում (նկ.30):



Նկ.30. Վերին օդատեսիլ ծովում

Կողային օդատեսիլ: Օդատեսիլի այս տեսակը կարող է առաջանալ այն դեպքում, երբ մթնոլորտի՝ մույն խտությամբ օդի շերտերը դասավորված են ոչ թե հորիզոնական, ինչպես սովորաբար լինում է, այլ ուղղահիգ (կամ թեք): Այս դեպքում ճառագայթը կորանում է հորիզոնական հարթության մեջ: Այդպիսի պայմաններ առաջանում են ամռանը՝ ծովի կամ լճի ժայռոտ ափերին, երբ արևի ճառագայթներն արդեն տաքացրել են ափը, իսկ ջուրն ու օդը դեռ սառն են: Կողային օդատեսիլներ բազմիցս երևացել են Ժնևի լճի ափին: Ափին մոտեցող նավակի կողքին շատերն են տեսել ճիշտ մույնպիսի մի նավակ, որը հեռանում է ափից:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչպե՞ս է տարածվում լույսի ճառագայթն անհամասեռ միջավայրում, որի բեկման ցուցիչը կերպից կերպ անընդհար փոխվում է:
2. Ո՞ր երևույթն է կոչվում լույսի ռեֆրակցիա:
3. Ո՞ր երևույթն է կոչվում օդադեսիլ:
4. Թվարկե՛ք օդադեսիլի հիմնական տեսակները:
5. Ո՞ր օդադեսիլն են անվանում վերին:
6. Ի՞նչ պայմանների դեպքում է առաջանում կողային օդադեսիլ:

1. Ֆատա Մորգանա: Ֆատա Մորգանան մի քանի տեսակի օդատեսիլներից կազմված օպտիկական բարդ երևույթ է, որի ժամանակ առարկաները երևում են բազմակի՝ զանազան աղավաղումներով: Ֆատա Մորգանա առաջանում է, երբ մթնոլորտում տարբեր խտությամբ օդի մի քանի շերտ հաջորդում

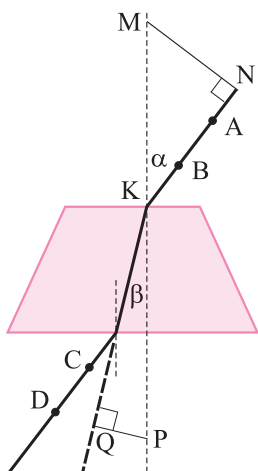


են միմյանց: Դառազայքների բազմակի անդրադարձման ու բեկման հետևանքով առարկաներն առաջացնում են մի քանի պատկեր, որոնք ժամանակի ընթացքում փոփոխվում են՝ ստեղծելով հիասքանչ տեսարան: Ամենահայտնի տեղերից մեկը, որտեղ կարելի է տեսնել գեղեցիկ օդատեսիլներ, Սիյիլիան է: Հաճախ Մեսինա քաղաքի պատկերը հայտնվում է երկնքում և քաղաքի դղյակները, կարծես, լողում են օդում: Իտալացիներն այս օդատեսիլների անվանումը կապում են հեքիաթի հերոսուհի Ֆատա Մորգանայի անվան հետ, որը քարզանաբար նշանակում է Մորգանա փերի:

2. Աստղերի առկայծումը: Մթնոլորտային ռեֆրակցիայի մշտապես դիտվող օրինակ է աստղերի առկայծումը: Մթնոլորտում օդի հոսանքների պատճառով Երկրի մակերևույթից դիտվող աստղի ռեֆրակցիայի անկյունը ժամանակի ընթացքում որոշ չափով փոփոխվում է: Դրա հետևանքով երկրային դիտորդին թվում է, թե աստղն առկայծում է (թարթում է): Ավելի նկատելի է այն աստղերի առկայծումը, որոնք առավել մոտ են հորիզոնի գծին: Դա պայմանավորված է նրանով, որ այդ աստղերին նայում ենք մթնոլորտի ավելի հաստ շերտի միջով: Տիեզերագնացները, բնականաբար, աստղերի առկայծում չեն տեսնում:

§ 11. ԼՍԲՈՐԱՏՈՐ ԱՃԽԱՏԱՆԸ 1

Ապակու բեկման ցուցչի որոշումը



Աշխատանքի նպատակը. որոշել ապակու բեկման ցուցչի արժեքը:

Չափամիջոցներ. եռանկյուն քանոն, միլիմետրական բաժանումներով քանոն (50 սմ երկարությամբ):

Նյութեր և սարքեր. ապակե թիթեղ (1 սմ×5 սմ×10 սմ), ստվարաթուղթ, գրելու թուղթ, մեծ գնդաստեղ (4 հատ):

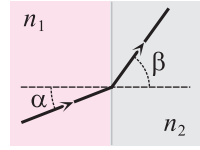
Փորձի կատարման ընթացքը

1. Ստվարաթղթի վրա դրեք գրելու թուղթը, իսկ նրա վրա՝ ապակե հարթ թիթեղը:
2. Ապակե թիթեղի մի կողմում ուղղաձիգ դիրքով ամրացրեք A և B գնդաստեղները:
3. C և D գնդաստեղներն ապակու մյուս կողմում դասավորեք այնպես, որ D կետից նայելիս բոլոր գնդաստեղները երևան մի ուղղի վրա:
4. Մտախտով գծեք ապակե թիթեղի եզրագիծը և նշեք գնդաստեղների ամրացման A, B, C, D կետերը:
5. Թղթի վրայից հանեք ապակե թիթեղն ու գնդաստեղները, ապա քանոնով ու եռանկյուն քանոնով կառույցեք բերված գծագիրը, որտեղ $MK = KP$:
6. Օգտվելով $n = \sin \alpha / \sin \beta$ բանաձևից՝ հաշվեք ապակու բեկման ցուցիչը: Այդ նպատակով MNK եռանկյունից գտեք $\sin \alpha = MN / MK$, իսկ ΔKPQ -ից՝ $\sin \beta = PQ / KP$, այնուհետև բաժանեք իրար՝

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = \frac{MN}{MK} \cdot \frac{KP}{QP} = \frac{MN}{QP}:$$

Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. Լույսի ճառագայթը մի միջավայրից մյուսն անցնելիս փոխում է իր տարածման ուղղությունը՝ ինչպես ցույց է տրված նկարում: Ո՞ր միջավայրն է օպտիկապես ավելի խիտ:



Լուծում: Համաձայն (1.13) բանաձևի՝

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1},$$

որտեղ n_1 -ը և n_2 -ը, համապատասխանաբար, 1-ին և 2-րդ միջավայրերի բեկման ցուցիչներն են, α -ն ճառագայթի անկման անկյունն է, իսկ β -ն՝ բեկման:

Ինչպես երևում է նկարից, $\alpha < \beta$, հետևաբար՝ $\sin \alpha < \sin \beta$ և $n_2 < n_1$:

Պատասխան՝ 1-ին միջավայրն օպտիկապես ավելի խիտ է, քան 2-րդը:

2. Քանի՞ անգամ է ջրամբարի իրական խորությունը մեծ նրա թվացող խորությունից, եթե նայենք ուղղաձիգ ներքև:

Լուծում: Կառուցենք ջրամբարի հատակի S կետից դուրս եկող և դիտորդի աչքի մեջ ընկնող ճառագայթների ընթացքը (տե՛ս նկարը): Ուղղաձիգով նայելիս հարմար է որպես մի ճառագայթ ընտրել ջրի մակերևույթին ուղղահայաց SA -ն, իսկ մյուսը՝ SB -ն, որն ուղղահայացի հետ կազմում է փոքր α անկյուն: Դիտորդին կթվա, թե այդ երկու ճառագայթները դուրս են գալիս S_1 կետից, որն S կետի կեղծ պատկերն է: $\angle BS_1A = \beta$, իսկ ABS և ABS_1 եռանկյուններից հեշտությամբ կարող ենք գտնել, որ $AB = H \tan \alpha = h \tan \beta$, $H = SA$, $h = S_1A$, որտեղից

$$\frac{H}{h} = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}:$$

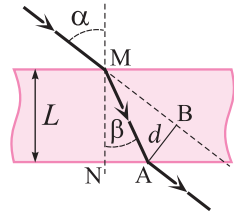
Քանի որ α և β անկյունները փոքր են (ուղղաձիգ ներքև նայելիս $\alpha \rightarrow 0$, $\beta \rightarrow 0$), ապա

$$\frac{H}{h} = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n \quad \text{կամ} \quad H = nh:$$

Այսպիսով՝ ջրամբարի իրական H խորությունը թվացող h խորությունից մեծ է $n = 1,33$ անգամ, որտեղ n -ը ջրի բեկման ցուցիչն է:

Պատասխան՝ 1,33 անգամ:

3. Լույսի ճառագայթը $\alpha = 60^\circ$ անկյունով ընկնում է ապակե հարթ-գուգահեռ թիթեղի վրա: Որքա՞ն է թիթեղի L հաստությունը, եթե ճառագայթը թիթեղից դուրս է գալիս սկզբնական ուղղությունից $d = 1$ սմ-ով շեղված: Ապակու բեկման ցուցիչը՝ $n = 1,5$:



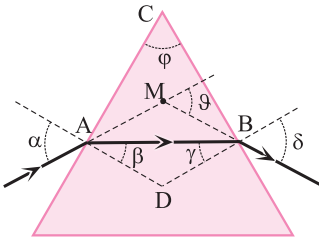
Լուծում: Բեկման օրենքից՝ $\sin \beta = \sin \alpha / n$, ուրեմն՝ $\cos \beta = \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} / n$: Ինչպես երևում է նկարից, $\angle AMB = \alpha - \beta$, ուստի՝ $\triangle MBA$ -ից $MA = d / \sin(\alpha - \beta)$: Թիթեղի L հաստությունը կորոշենք $\triangle MNA$ -ից.

$$L = MA \sin \beta = \frac{d \cos \beta}{\sin(\alpha - \beta)} = \frac{d \cos \beta}{\sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta} = \frac{d \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\sin \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \alpha \sin \alpha}:$$

Տեղադրելով մեծությունների թվային արժեքները, կստանանք՝ $L \approx 2$ սմ:

Պատասխան՝ 2 սմ:

4. Լույսի ճառագայթը տարածվում է $\varphi = 60^\circ$ բեկող անկյուն և $n = 1,7$ բեկման ցուցիչ ունեցող եռանիստ ապակե պրիզմայի ներսում՝ նրա հիմքին զուգահեռ: Որոշեք ճառագայթի շեղման անկյունը: Պրիզմայի լայնական հատույթը հավասարա-սրուն եռանկյուն է:



Լուծում: Քանի որ պրիզմայի լայնական հատույթը հավասարասրուն եռանկյուն է, և AB-ն զուգահեռ է պրիզմայի հիմքին, ապա ACB եռանկյունը նույնպես հավասարասրուն է: Ուրեմն՝ $\angle CAB = \angle CBA = (\pi - \varphi)/2$: AD-ն և BD-ն պրիզմայի բեկող նիստերին տարված ուղահայացներն են, ուստի՝ $\beta = \gamma = \pi/2 - (\pi - \varphi)/2 = \varphi/2$: Բեկման օրենքից $\sin \alpha = n \sin \beta$ և $\sin \delta = n \sin \gamma$, հետևաբար՝ $\delta = \alpha$: Զ-ն AMB եռանկյան արտաքին անկյուն

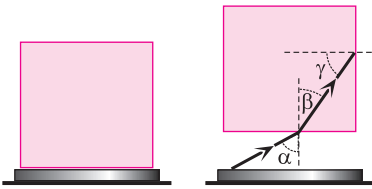
է, ուստի այն հավասար է իրեն ոչ կից՝ MAB և MBA ներքին անկյունների գումարին. $\theta = \angle MAB + \angle MBA = \alpha - \beta + \delta - \gamma = 2(\alpha - \beta)$: $\sin \alpha = n \sin \beta$ պայմանից՝ $\sin \alpha = 1,7 \cdot 0,5 = 0,85$, ուստի՝ $\alpha = \arcsin 0,85 = 58^\circ$, հետևաբար՝

$$\theta = 2(58^\circ - 30^\circ) = 56^\circ:$$

Պատասխան՝ 56° :

Խորացված

5. Նկարում պատկերված է ապակե ուղղանկյունանիստ, որը դրված է մետաղադրամի վրա: Կարելի՞ է արդյոք ուղղանկյունանիստի կողմնային նիստի միջով տեսնել մետաղադրամը:



Լուծում: Նկարում ցույց է տրված ճառագայթներից մեկը, որը դուրս է գալիս մետաղադրամից: Քանի որ $\sin \beta = \sin \alpha / n$ և $\sin \gamma = \cos \beta$, ապա $\sin \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha / n^2}$, որտեղ n-ն ապակու բեկման ցուցիչն է:

Նկարում պատկերված ճառագայթը ուղղանկյունանիստի կողմնային նիստից դուրս կգա միայն $\sin \gamma < 1/n$ պայմանի դեպքում (հակառակ դեպքում տեղի կունենա լրիվ անդրադարձում): Հետևաբար՝ անհրաժեշտ է հետևյալ անհավասարությունը՝

$$\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}} < \frac{1}{n},$$

որտեղից՝ $\sin^2 \alpha > n^2 - 1$, կամ $n^2 < 2$, այսինքն՝ $n < \sqrt{2} = 1,41$: Քանի որ ապակու բեկման ցուցիչը մեծ է այս մեծությունից, ապա ուղղանկյունանիստի կողմնային նիստի միջով անհնար է տեսնել մետաղադրամը:

Պատասխան՝ չի կարելի:

§ 12. ՈՍՊՆՅԱԿՆԵՐ: ՃԱՌԱԳԱՅԹՆԵՐԻ ԸՆԹԱՑԸ ՈՍՊՆՅԱԿՆԵՐՈՒՄ

Ոսպնյակներ: Ոսպնյակները թափանցիկ, գնդային մակերևույթներով սահմանափակված մարմիններ են, որոնց միջոցով կարելի է կառավարել լույսի փնջերը: Դրանք կիրառվում են այնպիսի սարքերում, ինչպիսիք են խոշորացույցը, լուսարձակը, հեռադիտակը, մանրադիտակը, լուսանկարչական ապարատը և այլն:

Ոսպնյակներին ծանոթ եք ֆիզիկայի 9-րդ դասարանի դասընթացից, ուստի ստորև միայն հակիրճ կնկարագրենք ոսպնյակների հիմնական հատկությունները:

Ոսպնյակները լինում են հավաքող և ցրող՝ կախված այն բանից, թե ճառագայթների զուգահեռ փունջը ոսպնյակից դուրս գալուց հետո զուգամիտում է, թե՞ տարամիտում: Հավաքող ոսպնյակ է, օրինակ, երկուռույցիկ ոսպնյակը, իսկ ցրող՝ երկգոգավոր ոսպնյակը, եթե դրանց բեկման ցուցիչը մեծ է միջավայրի բեկման ցուցիչից:

Ոսպնյակը սահմանափակող գնդային մակերևույթների կենտրոններով անցնող ուղիղը կոչվում է ոսպնյակի **գլխավոր օպտիկական առանցք**: Ոսպնյակի կենտրոնի՝ գլխավոր օպտիկական առանցքին պատկանող կետը կոչվում է **ոսպնյակի օպտիկական կենտրոն**: Գլխավոր օպտիկական առանցքի այն կետը, որտեղ հավաքվում են գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ փնջի բոլոր ճառագայթները ոսպնյակում բեկվելուց հետո, կոչվում է հավաքող ոսպնյակի **գլխավոր կիզակետ**: Իսկ ոսպնյակից մինչև կիզակետ հեռավորությունը կոչվում է **կիզակետային հեռավորություն**:

Յրոդ ոսպնյակի կիզակետում հավաքվում են ոչ թե ոսպնյակն անցած ճառագայթները, որոնք ոսպնյակից դուրս տարամիտում են, այլ դրանց շարունակությունները: Այդ պատճառով ցրող ոսպնյակի կիզակետն անվանում են «կեղծ», իսկ կիզակետային հեռավորությունը համարում բացասական: Հավաքող ոսպնյակն ունի երկու իրական կիզակետ, ցրող ոսպնյակը՝ երկու կեղծ կիզակետ:

Ոսպնյակի օպտիկական կենտրոնով անցնող մյուս ուղիղները կոչվում են **երկրորդային օպտիկական առանցքներ**: Հավաքող ոսպնյակի օպտիկական առանցքներին զուգահեռ ճառագայթները ոսպնյակով անցնելուց հետո հավաքվում են **կիզակետային հարթության** մեջ, որն անցնում է գլխավոր կիզակետով և ուղղահայաց է գլխավոր օպտիկական առանցքին:

Ոսպնյակի օպտիկական հատկությունները բնութագրելու համար օգտագործում են **օպտիկական ուժ** մեծությունը: **Ոսպնյակի օպտիկական ուժը կիզակետային հեռավորության հակադարձ մեծությունն է՝**

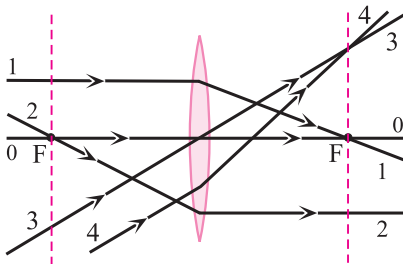
$$D = \frac{1}{F} : \quad (1.23)$$

Օպտիկական ուժի միավորն անվանում են դիօպտրա՝ 1 դպտր = 1 մ⁻¹:

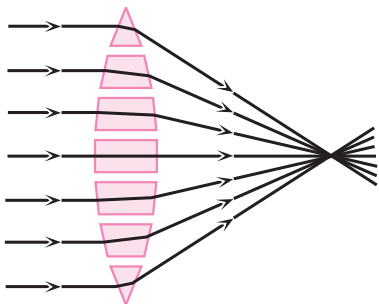
Հավաքող ոսպնյակի օպտիկական ուժը դրական մեծություն է՝ $D > 0$, քանի որ $F > 0$, իսկ ցրող ոսպնյակինը՝ բացասական՝ $D < 0$:

Ճառագայթների ընթացքը բարակ ոսպնյակում: Դիտարկենք մի քանի հայտնի ճառագայթների ընթացքը բարակ ոսպնյակում: **Բարակ ոսպնյակ** է համարվում այն ոսպնյակը, որի հաստությունը կարելի է անտեսել գնդային մակերևույթների շառավիղների համեմատությամբ: Եթե ճառագայթն ընկնում է ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքի երկայնքով, ապա այն, առանց փոխելու իր ուղղությունը, անցնում է ոսպնյակով (ճառագայթ 0, նկ. 3.1):

Ճառագայթների ընթացքը ոսպնյակում նկարագրելու համար ոսպնյակը կարելի է պատկերել պրիզմաների տեսքով՝ եռանկյուն, քառանկյուն և ուղղանկյուն լայնական հատույթներով (նկ. 3.2): Պրիզմաներից յուրաքանչյուրը, բացի ուղղանկյուն հատույթով կենտրոնականից, ճառագայթների զուգահեռ փունջը

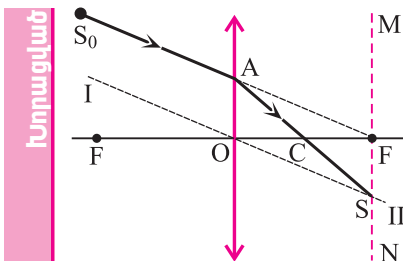


Նկ. 31. Մի քանի հայտնի ճառագայթների ընթացքը



Նկ. 32. Ոսպնյակը որպես պրիզմաների հավաքածու

այլ մի փոքր կշեղվի: Բայց քանի որ ոսպնյակը բարակ է, այդ շեղումը կարելի է անտեսել (տե՛ս §8): Այսպիսով՝ բարակ ոսպնյակի կենտրոնին ընկնող յուրաքանչյուր ճառագայթ ոսպնյակով անցնելույց հետո պահպանում է իր ուղղությունը (ճառագայթ 3, նկ. 31):



Նկ. 33. Ոսպնյակի կիզակետի ուղղությամբ ընկնող ճառագայթի ընթացքը

ճառագայթը: OAFS-ը գուգահեռագիծ է ($AF \parallel OS$ և $AO \parallel FS$), ուստի նրա անկյունագծերը հատման կետում կիսվում են՝

$$OC = CF = \frac{F}{2}:$$

Գլխավոր կիզակետի ուղղությամբ հավաքող բարակ ոսպնյակի վրա ընկնող լույսի ճառագայթը բեկվելույց հետո ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքը հատում է կիզակետային հեռավորության միջնակետում:

շեղում է դեպի իր մեծ հիմքը, ընդ որում՝ որքան ճառագայթը հեռու է գլխավոր օպտիկական առանցքից, այնքան մեծ է նրա շեղման անկյունը, քանի որ այդ ճառագայթի համար մեծ է ինչպես պրիզմայի բեկող անկյունը, այնպես էլ անկման անկյունը: Սա է պատճառը, որ գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ ճառագայթները ոսպնյակով անցնելույց հետո հավաքվում են մեկ կետում՝ ոսպնյակի կիզակետում (ճառագայթ 1, նկ. 31):

Ճառագայթների շրջելիության հատկությունից հետևում է, որ ոսպնյակի կիզակետով անցնող ճառագայթը ոսպնյակով անցնելույց հետո կուղղվի նրա գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ (ճառագայթ 2, նկ. 31):

Այժմ դիտարկենք երկրորդային օպտիկական առանցքով անցնող ճառագայթի ընթացքը ոսպնյակում: Քանի որ ոսպնյակի կենտրոնական մասը մեծ է զուգահեռ մակերևույթներով հարթ թիթեղի, ապա ճառագայթը, անցնելով թիթեղով, իր ուղղությունը չի փոխի,

Դիտարկենք ևս մի ճառագայթի ընթացքը բարակ ոսպնյակում: Խոսքն S_0A ճառագայթի մասին է, որն ընկնում է ոսպնյակի վրա այնպես, որ նրա շարունակությունն անցնի ոսպնյակի կիզակետով (նկ. 33): Տանենք լույսի S_0A ճառագայթին զուգահեռ I-II երկրորդային օպտիկական առանցքը: Այնուհետև կառույց ենք ոսպնյակի աջ գլխավոր կիզակետային MN հարթությունը: Այդ հարթության և I-II երկրորդային օպտիկական առանցքի հատման S կետով էլ պետք է անցնի բեկված լույսի AS

Բարակ ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը: Հաշվարկները ցույց են տալիս, որ բարակ ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը որոշվում է

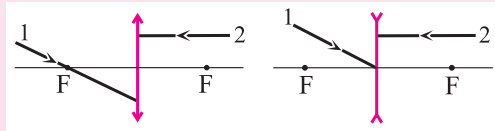
$$\frac{1}{F} = \frac{n}{n_0} - 1j \cdot \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} m$$

բանաձևով, որտեղ n -ը ոսպնյակի բեկման ցուցիչն է, n_0 -ն՝ միջավայրի, իսկ R_1 -ը և R_2 -ը ոսպնակը սահմանափակող գնդային մակերևույթների կորության շառավիղներն են: Այս բանաձևում կորության շառավղի հակադարձ մեծության առջև դրվում է «+» նշան, եթե մակերևույթն ուռուցիկ է, և «-» նշան, եթե գոգավոր է: Ուռուցիկ ոսպնյակի դեպքում բանաձևում երկրորդ փակագծերի արժեքը դրական է, գոգավորի դեպքում՝ բացասական: Հետևաբար՝ եթե ուռուցիկ ոսպնյակն օպտիկապես ավելի մոտ միջավայրում է՝ $n > n_0$, ապա այն հավաքող է, հակառակ դեպքում մույն ոսպնյակը ցրող է:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ է ոսպնյակը: 2. Ո՞ր ոսպնյակն է կոչվում բարակ: 3. Ո՞ր ոսպնյակն է կոչվում հավաքող: 4. Ո՞ր ոսպնյակն է կոչվում ցրող: 5. Հավաքող ոսպնյակների համար ո՞ր կետերն են կոչվում գլխավոր կիզակետեր: 6. Ցրող ոսպնյակի համար ո՞ր կետերն են կոչվում գլխավոր կիզակետեր: 7. Ինչու՞ են ցրող ոսպնյակի կիզակետերն անվանում «կեղծ»: 8. Ո՞ր հարթությունն են անվանում կիզակետային: 9. Ո՞ր մեծությունն են անվանում ոսպնյակի օպտիկական ուժ: 10. Ի՞նչ նշան ունի ոսպնյակի օպտիկական ուժը հավաքող և ցրող ոսպնյակների համար: 11. Ո՞րն է ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը և որը՝ կիզակետային հարթությունը: 12. Սահմանե՛ք ոսպնյակի «գլխավոր օպտիկական առանցք», «երկրորդային օպտիկական առանցք» հասկացությունները: 13. Ճառագայթը դուրս է եկել հավաքող ոսպնյակի կիզակետից: Ի՞նչ ուղղություն կունենա ճառագայթը ոսպնյակն անցնելուց հետո: 14. Կառույցե՛ք նկարում պարկերված (1) և (2) ճառագայթների ընթացքը բարակ հավաքող ոսպնյակն անցնելուց հետո: 15. Կառույցե՛ք նկարում պարկերված (1) և (2) ճառագայթների ընթացքը բարակ ցրող ոսպնյակն անցնելուց հետո: 16. Ինչպե՞ս է փարածվում գլխավոր օպտիկական առանցքի ուղղությամբ բարակ ոսպնյակի վրա ընկնող ճառագայթը:

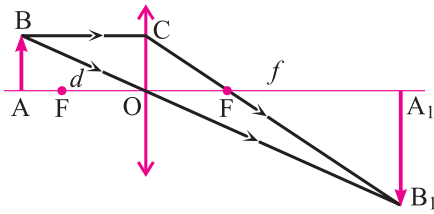


ՊԱՏԿԵՐԻ ԿԱՌՈՒՅՈՒՄԸ ՈՍՊՆՅԱԿՆԵՐՈՒՄ:

§ 13. ԲԱՐԱԿ ՈՍՊՆՅԱԿԻ ԲԱՆԱԶԵՎԸ: ՈՍՊՆՅԱԿԻ ԽՈՇՈՐԱՅՈՒՄ

Պատկերի կառուցումը ոսպնյակներում: Իմանալով ճառագայթների ընթացքը ոսպնյակում՝ կարելի է կառույցել առարկայի պատկերը ոսպնյակում: Կետի պատկերը ոսպնյակում կարելի է կառույցել կետից դուրս եկող և ոսպնյակի վրա ընկնող երկու կամայական ճառագայթներով: Օգտվելով այս փաստից՝ պատկերը կարելի է կառույցել այն ճառագայթներով, որոնց ընթացքը մախօրոք հայտնի է:

Գլխավոր օպտիկական առանցքին ուղղահայաց առարկայի պատկերը: Դիտարկենք այն դեպքը, երբ առարկան (սլաքի տեսքով) դրված է հավաքող ոսպնյակի կիզակետից դուրս: Սլաքի հիմքը (A կետը) գլխավոր օպտիկական



Նկ.34. Առարկայի պատկերը
հավաքող ոսպնյակում

առանցքի վրա է, ուստի նրա պատկերը
նույնպես կլինի այդ առանցքի վրա՝ ոսպ-
նյակի հակառակ կողմում: B կետի պատ-
կերը կառուցելու համար բավական է
դիտարկել երկու ճառագայթ, 1-ինը՝ ոսպ-
նյակի օպտիկական կենտրոնով անցնող,
2-րդը՝ գլխավոր օպտիկական առանցքին
զուգահեռ: Ոսպնյակի կենտրոնով անցնող

ճառագայթը չի փոխում իր ուղղությունը, իսկ գլխավոր օպտիկական առանցքին
զուգահեռ ճառագայթը, ոսպնյակն անցնելուց հետո փոխելով իր ուղղությունը,
անցնում է ոսպնյակի կիզակետով և ինչ-որ կետում հատվում 1-ին ճառագայթի
հետ: Այդ կետում էլ ստացվում է պարբի B ծայրի B₁ պատկերը: Այդ կետից իջեց-
նելով ուղղահայաց մինչև գլխավոր օպտիկական առանցքի հետ հատվելը՝ կստա-
նանք AB առարկայի A₁B₁ պատկերը հավաքող ոսպնյակում (նկ. 34):

Այժմ պարզենք, թե տրված F կիզակետային հեռավորությամբ ոսպնյակում
որտե՞ղ կստացվի առարկայի պատկերը, եթե հայտնի է առարկայի հեռավորու-
թյունը ոսպնյակից: Առարկայի հեռավորությունը ոսպնյակից նշանակենք d-ով,
իսկ պատկերի հեռավորությունը ոսպնյակից՝ f-ով: Պարզվում է, որ այդ հեռավո-
րությունները և ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը կապված են մի առն-
չությամբ, որը կարելի է հեշտությամբ ստանալ բարակ ոսպնյակի դեպքում:

Բարակ ոսպնյակի բանաձևը: d, f և F մեծությունների կապը գտնենք եռան-
կյունների նմանության պայմանից (նկ. 34): ABO և A₁B₁O ուղղանկյուն եռանկյուն-
ները նման են, քանի որ $\angle AOB = \angle A_1OB_1$, հետևաբար՝

$$\frac{AB}{d} = \frac{A_1B_1}{f}: \quad (1.24)$$

A₁B₁F և OCF ուղղանկյուն եռանկյունների նմանությունից հետևում է

$$\frac{OC}{F} = \frac{A_1B_1}{f - F} \quad (1.25)$$

առնչությունը: AB = OC, ուստի, (1.24) արտահայտությունը բաժանելով (1.25)-ին,
կստանանք՝

$$\frac{F}{d} = \frac{f - F}{f}: \quad (1.26)$$

Չնափոխենք այս արտահայտությունը՝

$$Ff = df - dF, \text{ կամ } Ff + dF = df:$$

Հավասարության երկու կողմն էլ բաժանելով dfF արտադրյալին, կստանանք՝

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}: \quad (1.27)$$

d, f և F մեծությունների կապն արտահայտող այս բանաձևը կոչվում է **բա-
րակ ոսպնյակի բանաձև**: Այն ճիշտ է և՛ հավաքող, և՛ ցրող ոսպնյակների համար:

Ոսպնյակից պատկերի f հեռավորության համար (1.24) բանաձևից ստաց-
վում է հետևյալ արտահայտությունը՝

$$f = \frac{dF}{d - F} \quad (1.28)$$

Առարկայի պատկերը համարվում է իրական, եթե այն ստացվում է ոսպնյակի մյուս կողմում, որտեղ հատվում են առարկայից ոսպնյակի վրա ընկնող և նրանով անցած ճառագայթները: Իրական պատկերի դեպքում $f > 0$:

Դիտարկենք այս բանաձևի մի բանի մասնավոր դեպքեր հավաքող ոսպնյակի համար:

1. Եթե առարկան հավաքող ոսպնյակից անվերջ հեռու է՝ $d = \infty$, ապա $f = F$, այսինքն՝ առարկայի պատկերը ստացվում է ոսպնյակի կիզակետում:

2. Եթե առարկայի հեռավորությունը ոսպնյակից $d = 2F$ է, ապա պատկերը ստացվում է ոսպնյակի մյուս կողմում, նույն $f = 2F$ հեռավորությամբ դիրքում:

3. Եթե առարկան հավաքող ոսպնյակի կիզակետում է՝ $d = F$, ապա $f = \infty$, այսինքն՝ պատկերն ստացվում է ոսպնյակից անվերջ հեռու (փաստորեն պատկեր չի առաջանում):

4. Եթե առարկան հավաքող ոսպնյակի և կիզակետի միջև է՝ $d < F$, ապա $f < 0$, նշանակում է՝ առարկայի պատկերը նույն կողմում է, որտեղ առարկան է, այսինքն՝ պատկերը կեղծ է:

Ցրող ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը բացասական է՝ $F < 0$, ուստի (1.28) բանաձևի փոխարեն ստանում ենք

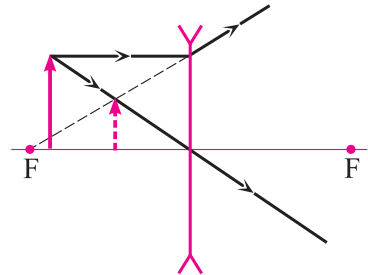
$$f = - \frac{d|F|}{d + |F|}, \quad (1.29)$$

արտահայտությունը, որի համաձայն ցրող ոսպնյակում առարկայի պատկերը միշտ կեղծ է՝ $f < 0$ (նկ. 35):

Ոսպնյակում ստացված պատկերի չափերը, որպես կանոն, տարբերվում են առարկայի համապատասխան չափերից: Ոսպնյակի գծային խոշորացում են անվանում պատկերի գծային չափի (H) և առարկայի գծային չափի (h) հարաբերությունը: (1.24) և (1.28) բանաձևերից Γ գծային խոշորացման համար կստանանք՝

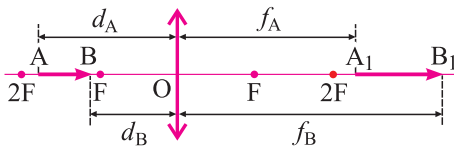
$$\Gamma = \frac{A_1 B_1}{AB} = \frac{H}{h} = \frac{f}{d} = \frac{F}{d - F} \quad (1.30)$$

Այս բանաձևից հետևում է, որ հավաքող ոսպնյակի գծային խոշորացումը՝ $\Gamma \leq 1$, եթե առարկան կրկնակի կիզակետային հեռավորությունից դուրս է՝ $d \geq 2F$, և $|\Gamma| > 1$, եթե առարկան կրկնակի կիզակետի և ոսպնյակի միջև է՝ $0 < d < 2F$: Ցրող ոսպնյակում, ըստ (1.28) և (1.30) բանաձևերի, միշտ ստացվում է առարկայի փոքրացված պատկերը՝ $|\Gamma| < 1$:



Նկ.35. Առարկայի պատկերը ցրող ոսպնյակում

Գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ առարկայի պատկերը: Եթե առարկան տեղադրված է ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքին ուղղահայաց, ապա նրա պատկերի հատկությունները բնութագրվում են միայն գծային խոշորացմամբ, որը նույնն է առարկայի երկու կամայական կետերի միջակա հատվածների համար:



Նկ. 36. Գլխավոր օպտիկական առանցքի վրա տեղադրված առարկայի պատկերը

Այժմ դիտարկենք այն դեպքը, երբ AB առարկան տեղադրված է հավաքող բարակ ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքի երկայնքով (նկ. 36):

Ի տարբերություն վերը քննարկված դեպքի՝ այժմ առարկայի տարրեր կետեր ոսպնյակից տարրեր հեռավորություններ ունեն, և, հետևաբար, տարրեր են մաս պատկերի տարրեր կետերի հեռավորությունները ոսպնյակից: Ինչ վերաբերում է ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքի նկատմամբ պատկերի դիրքին, ապա այն մույնպես ստացվում է գլխավոր օպտիկական առանցքի երկայնքով: Այս դեպքում պատկերը բնութագրվում է երկայնական խոշորացմամբ, որը սահմանվում է որպես ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքի երկայնքով տեղադրված առարկայի պատկերի և առարկայի գծային չափերի հարաբերություն: Եթե երկայնական խոշորացումը նշանակենք β -ով, ապա, ըստ սահմանման,

$$\beta = \frac{A_1B_1}{AB}, \quad (1.31)$$

որտեղ A_1B_1 -ը պատկերի, իսկ AB -ն՝ առարկայի գծային չափերն են:

36-րդ նկարից հետևում է, որ

$$A_1B_1 = f_B - f_A, \quad AB = d_A - d_B, \quad (1.32)$$

ուստի՝

$$\beta = \frac{f_B - f_A}{d_A - d_B}: \quad (1.33)$$

Գրենք բարակ ոսպնյակի բանաձևն AB առարկայի սկզբնակետի և վերջնակետի համար.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_A} + \frac{1}{f_A}, \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{d_B} + \frac{1}{f_B}: \quad (1.34)$$

Հավասարեցնելով այս առնչությունների աջ մասերը՝ կստանանք՝

$$\frac{d_A - d_B}{d_A d_B} = \frac{f_B - f_A}{f_A f_B}, \quad \text{կամ} \quad \frac{f_B - f_A}{d_A - d_B} = \frac{f_A f_B}{d_A d_B}: \quad (1.35)$$

Հաշվի առնելով, որ $f_A/d_A = \Gamma_A$ և $f_B/d_B = \Gamma_B$, (1.33) և (1.35) բանաձևերից կստանանք՝

$$\beta = \Gamma_A \Gamma_B: \quad (1.36)$$

Այսպիսով՝ բարակ ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքի երկայնքով տեղադրված AB առարկայի պատկերի երկայնական խոշորացումը հավասար է առարկայի պատկերների գծային խոշորացումների արտադրյալին, եթե առարկան տեղադրվեր ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքին ուղղահայաց՝ AB առարկայի ծայրակետերում:

Հեշտ է համոզվել, որ երբ AB առարկայի A կամ B ծայրակետը համընկնում է ոսպնյակի կրկնակի կիզակետին, այսինքն՝ $d_A = 2F$ կամ $d_B = 2F$, ապա $\Gamma_A = 1$, կամ $\Gamma_B = 1$: Այս դեպքում՝

$$\beta = \Gamma_B \quad (\Gamma_A = 1) \quad \text{և} \quad \beta = \Gamma_A \quad (\Gamma_B = 1), \quad (1.37)$$

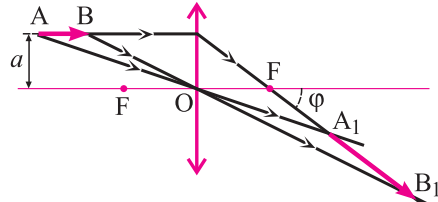
այսինքն՝ առարկայի պատկերի երկայնական խոշորացումը հավասար է պատկերի այն գծային խոշորացմանը, որն ունի պատկերը, երբ առարկան տեղադրված է ուսանյակի գլխավոր օպտիկական առանցքին ուղղահայաց և առարկայի՝ ուսանյակի կրկնակի կիզակետին չհամընկնող ծայրակետին համապատասխանող կետում:

Ուշագրավ է այն դեպքը, երբ AB առարկան տեղադրված է հավաքող բարակ ուսանյակի գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ՝ նրանից a հեռավորությամբ (նկ. 37): Այս դեպքը յուրահատուկ է նրանով, որ առարկայի պատկերն ստացվում է ոչ թե գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ, այլ նրա նկատմամբ որոշակի φ անկյունով: Ինչպես երևում է նկարից, արված ուսանյակի համար այդ անկյան մեծությունը կախված է միայն a հեռավորությունից՝ $\text{tg} \varphi = a/F$:

Դժվար չէ ապացույցել, որ այս դեպքում β -ն արվում է

$$\beta = \Gamma_A \Gamma_B \sqrt{1 + \left(\frac{a}{F}\right)^2} \quad (1.38)$$

բանաձևով, որից (1.36) բանաձևն ստացվում է $a = 0$ դեպքում:

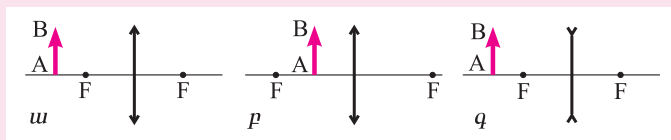


Նկ. 37. Գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ առարկայի պատկերը



Հարցեր և առաջադրանքներ

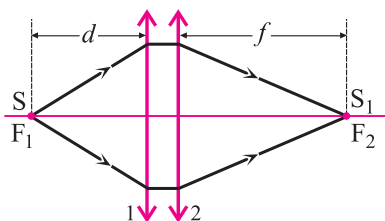
1. Գրեք բարակ ուսանյակի բանաձևը:
2. Ո՞ր մեծությունն են անվանում ուսանյակի գծային խոշորացում:
3. Հավաքող ուսանյակի առարկայի ի՞նչ հեռավորությունների դեպքում է ստացվում նրա կեղծ պատկերը:
4. Ցրող ուսանյակի առարկայի ի՞նչ հեռավորությունների դեպքում է ստացվում նրա կեղծ պատկերը:
5. Կառույցը AB առարկայի պատկերը հավաքող ուսանյակում (ա նկար) և նշեք, թե ինչպիսին է այն (իրական, թե՞ կեղծ, ուղի՞ղ, թե՞ շրջված, մեծացված, թե՞ փոքրացված):
6. Կառույցը AB առարկայի պատկերը հավաքող ուսանյակում (բ նկար) և նշեք, թե ինչպիսին է այն (իրական, թե՞ կեղծ, ուղի՞ղ, թե՞ շրջված, մեծացված, թե՞ փոքրացված):
7. Կառույցը AB առարկայի պատկերը ցրող ուսանյակում (գ նկար) և նշեք, թե ինչպիսին է այն (իրական, թե՞ կեղծ, ուղի՞ղ, թե՞ շրջված, մեծացված, թե՞ փոքրացված):
8. Ո՞ր մեծությունն են անվանում երկայնական խոշորացում:
9. Ի՞նչ կապ կա պատկերի երկայնական խոշորացման և գծային խոշորացումների միջև:
10. Կառույցը բարակ ուսանյակի գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ և նրանից a հեռավորությամբ առարկայի պատկերը՝ ա. հավաքող ուսանյակում, բ. ցրող ուսանյակում:



§ 14. ՊԱՏԿԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ ԿԵՆՏՐՈՆԱՎՈՐԿԱՆ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐՈՒՄ

Ուսումնասիրենք լույսի ճառագայթների ընթացքը և պատկերների առաջացումն օպտիկական համակարգերում, որոնք կազմված են բարակ ոսպնյակներից ու հարթ հայելիներից:

Սկզբում դիտարկենք այն դեպքը, երբ օպտիկական համակարգը կազմված է կիսա տեղադրված F_1 և F_2 կիզակետային հեռավորությամբ երկու հավաքող բարակ ոսպնյակներից (նկ. 38): Ոսպնյակները դասավորված են այնպես, որ նրանց բեկող մակերևույթների կորության կենտրոնները և գագաթները մի ուղղի վրա են: Այս հատկությամբ օժտված օպտիկական համակարգերն



Նկ. 38. Երկու հավաքող ոսպնյակներից կազմված համակարգ

անվանում են **կենտրոնավորված**: Իսկ այն ուղիղը, որի վրա դասավորված են բեկող (և անդրադարձնող) մակերևույթների կորության կենտրոնները և գագաթները, անվանում են համակարգի **գլխավոր օպտիկական առանցք**:

Համակարգի գլխավոր օպտիկական առանցքի վրա վերցնենք որևէ առարկա և, օգտվելով ոսպնյակի բանաձևից, որոշենք

համակարգի առաջին ոսպնյակում ստացված նրա պատկերի տեղը և չափերը: Այնուհետև այդ պատկերը դիտարկելով որպես առարկա (իրական կամ կեղծ) երկրորդ ոսպնյակի համար՝ նույն եղանակով որոշենք նրա մեջ ստացված պատկերի տեղը և չափերը: Եթե համակարգում կան այլ ոսպնյակներ, ապա այս նույն գործողությունը հաջորդաբար կատարում են համակարգի յուրաքանչյուր ոսպնյակի համար՝ մինչև համակարգից ճառագայթների դուրս գալը:

Որոշենք երկու ոսպնյակից կազմված համակարգի F կիզակետային հեռավորությունը, D օպտիկական ուժը և առարկայի պատկերի Γ գծային խոշորացումը: Դրա համար ընդունենք, որ լույսի S կետային աղբյուրը տեղադրված է առաջին ոսպնյակի F_1 կիզակետում: Աղբյուրից դուրս եկող ճառագայթներն առաջին ոսպնյակում բեկվելուց հետո կանցնեն նրա գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ և երկրորդ ոսպնյակում բեկվելուց հետո կհավաքվեն նրա F_2 կիզակետում (նկ. 38):

Ըստ բարակ ոսպնյակի բանաձևի՝

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}: \quad (1.39)$$

Հաշվի առնելով, որ $d = F_1$ և $f = F_2$, կստանանք՝

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2}, \quad (1.40)$$

որտեղից

$$F = \frac{F_1 F_2}{F_1 + F_2}: \quad (1.41)$$

Հեշտ է համոզվել, որ տրված օպտիկական համակարգի F կիզակետային հեռավորությունը փոքր է համակարգի մեջ մտնող յուրաքանչյուր ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունից՝ $F < F_1$ և $F < F_2$: Մասնավորապես, եթե $F_1 = F_2$, ապա $F = F_1/2$:

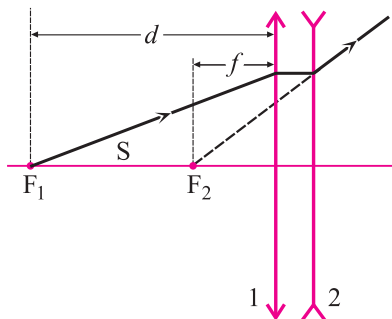
Ոսպնյակների համակարգի օպտիկական ուժը սահմանվում է ճիշտ այնպես, ինչպես առանձին ոսպնյակի դեպքում.

$$D = \frac{1}{F} : \quad (1.42)$$

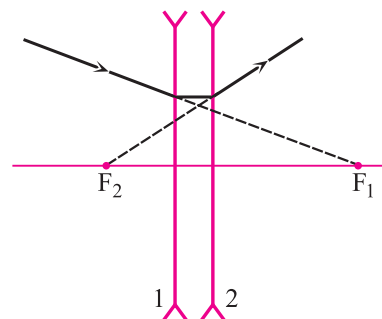
Հաշվի առնելով նաև, որ $D_1 = 1/F_1$ և $D_2 = 1/F_2$, (1.40) բանաձևից կստանանք՝

$$D = D_1 + D_2 : \quad (1.43)$$

Եթե օպտիկական համակարգը կազմված է հավաքող և ցրող (նկ.39) կամ երկու ցրող (նկ. 40) բարակ ոսպնյակներից, որոնք տեղադրված են կիսի և այնպես, որ դրանց գլխավոր օպտիկական առանցքները համընկնում են, ապա համակարգի F կիզակետային հեռավորությունը և D օպտիկական ուժը դարձյալ որոշվում են (1.41) և (1.43) բանաձևերով:



Նկ. 39. Հավաքող և ցրող ոսպնյակներից կազմված համակարգ



Նկ. 40. Երկու ցրող ոսպնյակներից կազմված համակարգ

(1.43) բանաձևից հետևում է, որ համակարգի օպտիկական ուժը հավասար է նրա մեջ մտնող ոսպնյակների օպտիկական ուժերի հանրահաշվական գումարին: Այս պնդումից հետևում է, որ նման օպտիկական համակարգը կարելի է փոխարինել մեկ՝ համարժեք ոսպնյակով:

Հավաքող և ցրող ոսպնյակներից կազմված օպտիկական համակարգում ցրող ոսպնյակը թուլացնում է հավաքող ոսպնյակի՝ լույսի ճառագայթներ կիզակետելու (հավաքելու) ունակությունը կամ էլ, հակառակը, հավաքող ոսպնյակը թուլացնում է ցրող ոսպնյակի՝ լույսի ճառագայթներ ցրելու ունակությունը (եթե ցրող ոսպնյակը տեղադրված է հավաքողի առջևում): Եթե հավաքող և ցրող ոսպնյակների կիզակետային հեռավորություններն իրար հավասար են՝ $|F_2| = F_1$, ապա համակարգի D օպտիկական ուժը զրո է: Այս դեպքում օպտիկական համակարգը կորցնում է ճառագայթներ հավաքելու կամ ցրելու ունակությունը՝ վերածվելով հարթ-գուգահեռ թիթեղի:

Տրված օպտիկական համակարգում առարկայի պատկերի գծային խոշորացումը սահմանվում է ճիշտ այնպես, ինչպես առանձին ոսպնյակի դեպքում, և պայմանավորված է այն բանով, թե ինչպիսին է համարժեք ոսպնյակը (հավաքող, թե՞ ցրող), և ինչպիսին է առարկայի՝ տրված օպտիկական համակարգում ստացված պատկերը (իրական, թե՞ կեղծ): Զննարկենք այդ դեպքերն առանձին-առանձին:

ա) Եթե համարժեք ոսպնյակը հավաքող է, իսկ նրա մեջ ստացված պատկերը՝ իրական, այսինքն՝ $d > F$, ապա

$$\Gamma = \frac{F}{d - F}, \quad (1.44)$$

որտեղ F -ը համակարգի կիզակետային հեռավորությունն է, իսկ d -ն՝ առարկայի հեռավորությունը ոսպնյակից: (1.41) և (1.44) բանաձևերից կստանանք՝

$$\Gamma = \frac{F_1 F_2}{d(F_1 + F_2) - F_1 F_2}: \quad (1.45)$$

Մասնավորապես, եթե $F_1 = F_2$, ապա

$$\Gamma = \frac{F_1}{2d - F_1} = \frac{F_2}{2d - F_2}: \quad (1.46)$$

բ) Եթե համարժեք ոսպնյակը հավաքող է, իսկ նրա մեջ ստացված պատկերը՝ կեղծ, այսինքն՝ $d < F$, ապա

$$\Gamma = \frac{F}{F - d} = \frac{F_1 F_2}{F_1 F_2 - d(F_1 + F_2)}: \quad (1.47)$$

Մասնավորապես, եթե $F_1 = F_2$, ապա

$$\Gamma = \frac{F_1}{F_1 - 2d} = \frac{F_2}{F_2 - 2d}: \quad (1.48)$$

գ) Եթե համարժեք ոսպնյակը ցրող է ($F < 0$), ապա նրա մեջ ստացված պատկերի գծային խոշորացումը որոշվում է (1.30) բանաձևով՝

$$|\Gamma| = \frac{|F|}{|F| + d}: \quad (1.49)$$

Ստացված արդյունքները կարելի է ընդհանրացնել այնպիսի օպտիկական համակարգերի համար, որոնք կազմված են կիպ տեղադրված կամայական թվով հավաքող բարակ ոսպնյակներից: Այս դեպքում F -ը, D -ն և Γ -ն կորոշվեն, համապատասխանաբար, հետևյալ բանաձևերով՝

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} + \dots + \frac{1}{F_n}, \quad D = D_1 + D_2 + \dots + D_n, \quad (1.50)$$

$$\Gamma = \frac{F}{F - d}, \quad \text{երբ } d < F \quad \text{և} \quad \Gamma = \frac{F}{d - F}, \quad \text{երբ } d > F: \quad (1.51)$$

Մասնավորապես, երբ $D_1 = D_2 = \dots = D_n$, ապա

$$D = nD_1: \quad (1.52)$$

Այժմ դիտարկենք օպտիկական համակարգեր, որոնք կազմված են բարակ ոսպնյակից և հարթ հայելուց: Դիցուք՝ F_1 կիզակետային հեռավորու-

քյամբ բարակ հավաքող ոսպնյակին կիպ տեղադրված է հարթ հայելի (նկ. 41):

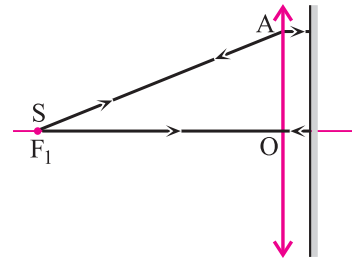
Որոշենք այս համակարգի F կիզակետային հեռավորությունը: Ենթադրենք, որ լույսի S կետային աղբյուրը ոսպնյակի կիզակետում է: Նրանից դուրս եկող SA ճառագայթը ոսպնյակում բեկվելուց հետո կգնա նրա գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ և, հետևաբար, հայելու մակերևույթին կընկնի նրան ուղահայաց ուղղությամբ: Անդրադառնալով հարթ հայելուց հակառակ ուղղությամբ և ոսպնյակում բեկվելուց հետո այն կրկին կանցնի նրա կիզակետով (հավաքող ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ լույսի ճառագայթը ոսպնյակում բեկվելուց հետո անցնում է նրա կիզակետով): S աղբյուրից դուրս եկող լույսի մյուս՝ SO ճառագայթն ուղղենք ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքով: Այն ոսպնյակում չի բեկվում և, հարթ հայելուց անդրադառնալով, կրկին անցնում է ոսպնյակի կիզակետով: Այսպիսով՝ հարթ հայելուց անդրադարձած և ոսպնյակում բեկված ճառագայթները հատվում են ոսպնյակի կիզակետում, որն էլ S լուսատու կետի իրական պատկերն է:

Հաշվի առնելով, որ $d = F_1$, $f = F_1$, և օգտվելով բարակ ոսպնյակի բանաձևից՝ օպտիկական ուժի համար կստանանք՝

$$D = \frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} = \frac{2}{F_1} = 2D_1: \quad (1.53)$$

Այսպիսով՝ այս օպտիկական համակարգը համարժեք է մի հավաքող ոսպնյակի, որի կիզակետային հեռավորությունը $F_1/2$ է, իսկ օպտիկական ուժը՝ $2D_1$: Առարկայի պատկերի խոշորացումը որոշվում է (1.44) բանաձևով, երբ $d > F$, և (1.47) բանաձևով, երբ $d < F$:

Նույն դատողությունների հիման վրա կարելի է ցույց տալ, որ երբ ցրող բարակ ոսպնյակին կիպ տեղադրված է հարթ հայելի, ապա այդ համակարգը համարժեք է մի ցրող ոսպնյակի, որի կիզակետային հեռավորությունը $F_1/2$ է ($F_1 < 0$), իսկ օպտիկական ուժը՝ $2D_1$ ($D_1 < 0$): Այս դեպքում առարկայի պատկերի խոշորացումը որոշվում է (1.49) բանաձևով:



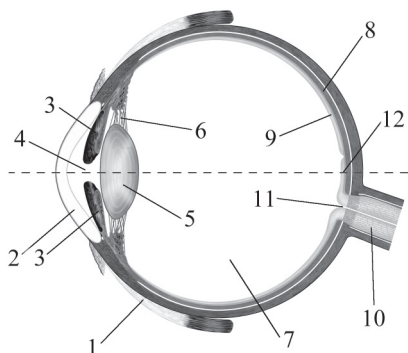
Նկ. 41. Ոսպնյակից և հարթ հայելուց կազմված համակարգ



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր օպտիկական համակարգերն են կոչվում կենտրոնավորված:
2. Ինչպե՞ս են որոշում առարկայի պատկերը կենտրոնավորված օպտիկական համակարգում:
3. Ո՞ր ոսպնյակն է համարժեք կիպ դասավորված երկու բարակ ոսպնյակներին:
4. Համակարգը կազմված է բարակ ոսպնյակից և հարթ հայելուց: Որքա՞ն է համակարգի օպտիկական ուժը:

§ 15. ԱՋԵՐ ՈՐՊԵՍ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳ



Նկ. 42. Աչքի կառուցվածքը

1. սպիտակապտյան, 2. եղջերաթաղանթ,
3. ծիածանաթաղանթ, 4. բիբ,
5. ակնաբյուրեղ, 6. մկանային կապան,
7. ապակենման մարմին, 8. անոթաթաղանթ,
9. ցանցթաղանթ, 10. տեսողական նյարդ,
11. «կույր բիծ», 12. դեղին բիծ

(1) **սպիտակապտյանով** (կարծրաթաղանթով), որն աչքի առաջնային մասում վերածվում է թափանցիկ (2) **եղջերաթաղանթի**: Աչքի այլ օպտիկական տարրերից եղջերաթաղանթն ունի ամենամեծ բեկման ցուցիչը՝ 1,376: Եղջերաթաղանթի հետևում (3) **ծիածանաթաղանթն** է, որի կենտրոնում կա կլոր անցք՝ (4) **բիբը**: Ծիածանաթաղանթը դիաֆրագմայի դեր է կատարում: Երբ առարկաները թույլ են լուսավորված, ծիածանաթաղանթը բացվում է, իսկ ուժեղ լուսավորվածության դեպքում՝ փակվում, և լայնացնելով ու նեղացնելով բիբը՝ կարգավորում աչքի մեջ ընկնող լուսային հոսքը: Ծիածանաթաղանթի հետևում (5) թափանցիկ **ակնաբյուրեղն** է, որն իր ձևով նման է հավաքող ոսպնյակի: Ակնաբյուրեղի արտաքին տիրույթից դեպի ներքին տիրույթ բեկման ցուցիչը փոխվում է 1,386-ից մինչև 1,406: Ակնաբյուրեղը (6) **մկանային կապանով** միացած է **թարթիչային մկանին**, որը լայն օղակով տեղադրված է ծիածանաթաղանթի հետևում: Այդ մկանի օգնությամբ ակնաբյուրեղը կարող է փոխել իր ձևը և, հետևաբար, նաև օպտիկական ուժը:

Եղջերաթաղանթի և ծիածանաթաղանթի, ինչպես նաև ծիածանաթաղանթի և ակնաբյուրեղի միջև կան ոչ մեծ տարածություններ՝ խցիկներ, որոնք պարունակում են 1,336 բեկման ցուցիչով թափանցիկ հեղուկ: Ակնաբյուրեղի հետևում ակնախոռոչը լցված է թափանցիկ դոմոդանման զանգվածով՝ (7) **ապակենման մարմնով**, որի բեկման ցուցիչը 1,337 է:

Եղջերաթաղանթը, թափանցիկ հեղուկը, ակնաբյուրեղը և ապակենման մարմինը կազմում են օպտիկական համակարգ, որի կիզակետային հեռավորությունը $F = 17,2$ մմ ($D = 58,5$ դպտր): Համակարգի օպտիկական կենտրոնի հեռավորությունը եղջերաթաղանթից 5 մմ է, իսկ գլխավոր օպտիկական առանցքը 41-րդ նկարում պատկերված է կետագծով:

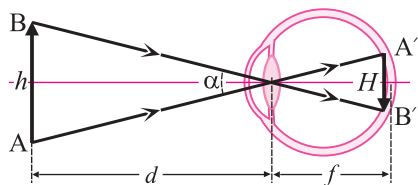
Արտաքին աշխարհի մասին տեղեկություններ հիմնականում ստանում ենք լույսի միջոցով: Իսկ լուսային գրգիռներն ընկալող տեսողության օրգանն աչքն է: Այն ձևավորվել է երկարատև կենսաբանական զարգացման պրոցեսում և բարդ, միաժամանակ կատարյալ օպտիկական համակարգ է: Աչքը գրեթե զնդածն է: Գլխավոր օպտիկական առանցքի ուղղությամբ նրա չափը 24 մմ է, իսկ առանցքին ուղղահայաց ուղղությամբ՝ 22 մմ: Այս պատճառով ընդունված է աչքն անվանել նաև ակնագունդ: Աչքի կառուցվածքը պատկերված է 42-րդ նկարում: Արտաքինից ակնագունդը ծածկված է սպիտակ անթափանց հյուսվածքով՝

Աչքի ներքին մակերևույթը ծածկված է բարակ, խիստ բարդ կառուցվածք ունեցող կիսագնդաձև թաղանթով՝ (9) **ցանցաթաղանթով**, որը կապված է (8) **անոթաթաղանթին**: Դրա վրա ստացվում է առարկայի իրական, փոքրացված և շրջված պատկերը: Մակայն ուղեղը, վերլուծելով ստացված տեսողական տեղեկատվությունը, պատկերն ընկալում է որպես ուղիղ:

Ցանցաթաղանթը պարունակում է լուսազգայուն ընկալիչ բջիջներ, որոնք գլանաձև կամ կոնաձև են և, համապատասխանաբար, անվանվում են **ցուպիկներ** (կամ ձողիկներ) և **շիկներ** (կամ սրվակիկներ): Ցանցաթաղանթում հաշվվում են մոտ 7 մլն շիկ և 120 մլն ցուպիկ: Այդ բջիջներից դուրս եկող նյարդաթելերը հավաքվում են օպտիկական առանցքի մոտ և կազմում (10) **տեսողական նյարդը**, որն ուղղվում է դեպի գլխուղեղ: Այս տիրույթում լուսազգայուն բջիջներ չկան, ուստի այստեղ առաջանում է (11) «**կույր բիծ**». եթե առարկայի պատկերը կամ նրա մի մասն ստացվում է այդ տիրույթում, ապա դիտորդն այն չի տեսնում: Ցանցաթաղանթի կենտրոնական հատվածում, օպտիկական առանցքի վրա տեսողության առավելագույն սրության (12) տիրույթն է, որը կոչվում է **դեղին բիծ**: Այստեղ է կենտրոնացված լուսազգայուն շիկների հիմնական զանգվածը, որոնք ապահովում են ցերեկային տեսողությունը և մասնակցում են առարկայի ձևի, գույնի և մանրամասների ճշգրիտ ընկալմանը: Կենտրոնից հեռանալուն գույզներից այդ բջիջների քանակը նվազում է, իսկ ցուպիկներինը՝ ավելանում: Ցանցաթաղանթի ծայրամասերում կան միայն ցուպիկներ, որոնք օժտված են շատ բարձր լուսազգայնությամբ (մոտ 100 անգամ ավելի, քան շիկները) և ապահովում են մթնշաղային կամ գիշերային տեսողությունը:

Գունային տեսողություն: Շրջակա միջավայրի գունային բազմազանությունն ընկալելու մարդու ունակությունն անվանում են գունային տեսողություն կամ գունազգացողություն: Այն իրականանում է ցանցաթաղանթի երեք տեսակի շիկների օգնությամբ, որոնցից յուրաքանչյուրն առավել զգայուն է երեք հիմնական գույներից (կարմիր, կանաչ, կապույտ) մեկի նկատմամբ: Մնացած գույներն ու երանգներն ստացվում են այդ գույների խառնուրդից: Ցերեկային լույսը հավասարապես գրգռում է բոլոր շիկները, ուստի այն սպիտակ գույնի զգացողություն է առաջացնում: Նույն պատճառով կուրացնող սպիտակ գույնի զգացողություն է առաջացնում նաև շատ ուժեղ, օրինակ՝ կայծակի արձակած լույսը: Որևէ տեսակի շիկի ֆունկցիայի բնածին կամ ձեռքբերովի խանգարումները բերում են գունային տեսողության խանգարումների: Դա արտահայտվում է գույների նկատմամբ զգայնության իջեցմամբ կամ բացակայությամբ, որի հետևանքով առաջանում է շրջապատող աշխարհի գունապատկերի աղավաղված ընկալում: Բնածին խանգարումը կոչվում է **դալտոնիզմ**:

Տեսողության սրություն: Միմյանցից նվազագույն հեռավորությամբ երկու կետերն իրարից զանազանելու աչքի ունակությունն անվանում են տեսողության սրություն: Տեսողության սրության չափ է համարվում այդ երկու կետերից եկող ճառագայթների կազմած $\alpha_{\min}$ անկյան մեծությունը (նկ. 43):



Նկ. 43. Տետողության սրության անկյունը

Հիմնական պարամետրերը հեռավորությունը՝ $f = 17,1$ մմ: Քանի որ $H_{\min} \ll f$, ապա $\alpha_{\min} \approx H_{\min} / f = 1'$ (յոպե): Լուսավորվածության թուլացմանը զուգընթաց տետողության սրությունն ընկնում է:

Աչքի հարմարում (ակոմոդացիա): Օպտիկական համակարգի կենտրոնից մինչև ցանցաթաղանթի վրա առարկայի պատկերի f հեռավորությունը հաստատուն մեծություն է: Հետևաբար՝ աչքից տարբեր d հեռավորություններով առարկաները հստակ տեսնելու միակ ճանապարհը ոսպնյակի օպտիկական ուժը փոփոխելն է: Երբ որևէ հեռավորությամբ առարկային մայելուց հետո հայացքը տեղափոխում ենք այլ հեռավորությամբ առարկայի վրա, թարթիչային մկանի օգնությամբ ակնաբյուրեղն ինքնաբերաբար փոխում է իր ձևը, ուստի՝ մակ օպտիկական ուժն այնպես, որ ցանցաթաղանթի վրա ստացվում է վերջինիս հստակ պատկերը: Աչքի այս հատկությունն անվանում են **հարմարում** կամ **ակոմոդացիա** (լատիներեն «ակոմոդատիո»՝ հարմարում բառից):

Աչքի օպտիկական ուժը նվազագույն է, երբ թարթիչային մկանը լրիվ թուլացած է: Այդ դեպքում ցանցաթաղանթի վրա հստակ պատկեր առաջացնող առարկայի հեռավորությունն աչքից առավելագույնն է, և այն կարող ենք որոշել բարակ ոսպնյակի բանաձևից.

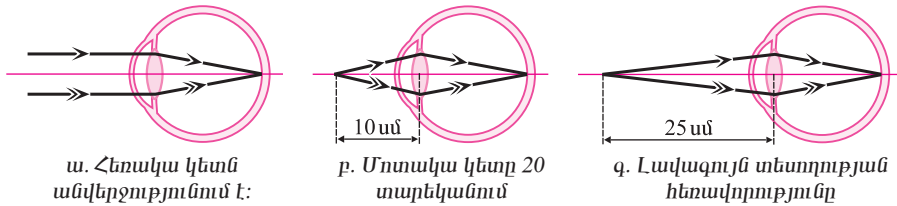
$$D_{\min} = \frac{1}{d_{\min}} + \frac{1}{f} : \quad (1.54)$$

Աչքից ամենահեռու կետը, որտեղ դրված մարմնի պատկերը ցանցաթաղանթի վրա հստակ է ստացվում, կոչվում է **հեռակա կետ**: Նորմալ աչքի հեռակա կետն անվերջ հեռու է աչքից ($d_{\min} \rightarrow \infty$): Ուստի նրա կիզակետային հեռավորությունը հավասար է աչքի օպտիկական կենտրոնից մինչև ցանցաթաղանթ հեռավորությանը (նկ. 44, ա), և աչքի վրա ընկնող ճառագայթների զուգահեռ փունջը կիզակետվում է ցանցաթաղանթի վրա, իսկ նվազագույն օպտիկական ուժը՝

$$D_{\min} = \frac{1}{f} = \frac{1}{17,1 \cdot 10^{-3} \text{ մ}} = 58,5 \text{ դպտր} : \quad (1.55)$$

Աչքի օպտիկական ուժն առավելագույնն է թարթիչային մկանի առավելագույն լարվածության դեպքում: Այս դեպքում հստակ երևացող առարկայի հեռավորությունը նվազագույնն է: Աչքին ամենամոտ կետը, որտեղ դրված առարկան հստակ է երևում, կոչվում է **մոտակա կետ** (նկ. 44, բ): Մոտակա կետի դիրքը և դրան համապատասխան առավելագույն օպտիկական ուժը նորմալ աչքի համար տարիքից կախված բերված է 2-րդ աղյուսակում:

Տարիքը, տարի	10	20	30	40	50	60	70
Մոտակա կետը, սմ	7	10	14	22	40	200	400
D_{max} , դպտր	72,8	68,5	65,6	63	61	59	58,8



Նկ. 44. Աչքի հարմարումը

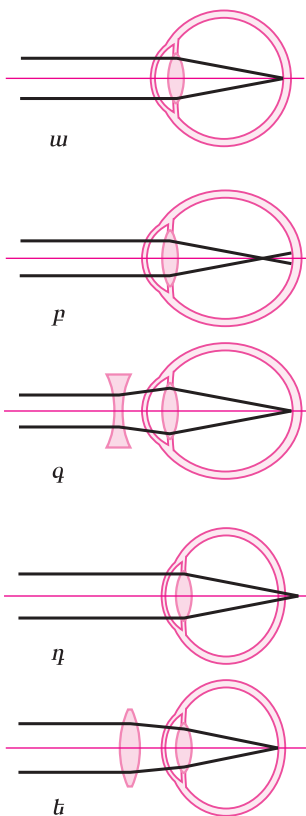
Տարիքի հետ մոտակա կետի հեռավորության աճը պայմանավորված է քարքիչային մկանի կծկման հատկության թուլացմամբ:

Մոտակա կետում տեղադրված առարկան երևում է ամենամեծ անկյան տակ ու առավել մանրամասնությամբ: Մակայն այդ կետում տեղադրված առարկան դիտելիս քարքիչային մկանները լարված են առավելագույն չափով, ուստի աչքն արագ հոգնում է: Տեսական դիտման համար առարկան պահում են այնպիսի հեռավորությունում, որի դեպքում քարքիչային մկանը նվազագույն ճիգով է սեղմում ակնաբյուրեղը: Այդ հեռավորությունն անվանում են **լավագույն տեսողության հեռավորություն**: Նորմալ աչքի համար լավագույն տեսողության հեռավորություն համարվում է 25 սմ-ը: Դրա համար պահանջվում է 62,5 դպտր օպտիկական ուժ (նկ. 44, գ):

Տարածական տեսողություն: Առարկան երկու աչքով դիտելիս նրա պատկերներն ընկնում են ցանցաթաղանթների նույնական կետերի վրա և, մարդն առարկան տեսնում է ոչ երկատված: Երկու աչքով բնական տեսողությունն անվանում են **երկաչյա** կամ **տարածական**: Այն հնարավորություն է տալիս առարկան տեսնելու տարբեր կողմերից, ապահովում է դիտվող առարկայի պարզորոշ ծավալային ընկալումը և հնարավորություն է տալիս որոշելու նրա չափերն ու տեղադրությունը տարածության մեջ: Առարկայի հեռավորության մասին պատկերացում կազմում ենք շնորհիվ այն բանի, որ երկու աչքերը դեպի առարկան ուղղելու համար աչքի մկանները, որոշակի ճիգ գործադրելով, դրանք պտտում են այնպես, որ նրանց օպտիկական առանցքները հաստվեն առարկայի վրա: Այդ առանցքների կազմած անկյունը կոչվում է **գուգամիտման անկյուն**: Աչքերի բբերի միջև b հեռավորությունը 5 սմ է, իսկ մինչև առարկա d հեռավորությունը մեծ է 25 սմ-ից, հետևաբար՝ գուգամիտման $\alpha \approx b/d$ անկյունը փոփոխվում է 0-ից (հեռակա կետ) մինչև 10° (մոտակա կետ): Միաժամանակյա ինքնաբերաբար հարմարումը և գուգամիտումը պատկերացում են տալիս առարկայի հեռավորության ու չափերի մասին:

Փորձով ապացույցված է, որ մեկ աչքով նայելիս 10 մ հեռավորությամբ պատկերն արդեն թվում է հարթ: Նայելով երկու աչքով՝ պատկերը հարթ տեսնում 500 մետր հեռավորությունում:

Կարճատեսություն և հեռատեսություն: Ինչպես ամեն ինչ աշխարհում, նույնիսկ բնության այնպիսի կատարյալ ստեղծագործություն, ինչպիսին



Նկ. 45. Լույսի ճառագայթների ընթացքը նորմալ, հեռատես և կարճատես աչքերում

աչքն է, գերծ չէ թերությունից: Տարիքի հետ տեսողությունը թուլանում է, իսկ մոտակա կետի հեռավորությունը՝ աճում: Երբ մոտակա կետի հեռավորությունը գերազանցում է լավագույն տեսողության հեռավորությունը, այն շտկելու անհրաժեշտություն է առաջանում: Այսպես՝ 50 տարեկանում մոտակա կետի հեռավորությունը մոտ 40 սմ է ($D = 61$ դպտր): Ինչպես նշվեց վերևում, լավագույն տեսողությանը համապատասխանում է 62,5 դպտր օպտիկական ուժ: Հետևաբար՝ տեսողությունը շտկելու համար պետք է կրել $D_0 = 1,5$ դպտր օպտիկական ուժով հավաքող ոսպնյակ:

Տարիների ընթացքում հնարավոր է առաջանան աչքի որոշ թերություններ, օրինակ՝ աչքի երկարության, կամ ակնաբյուրեղի կորության շառավղի շեղումներ նորմալից: Ի տարբերություն նորմալ աչքի, որը քարթիչային մկանի լրիվ թուլացված վիճակում գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ ճառագայթների փունջը կիզակետում է ցանցաթաղանթի վրա (նկ. 45, ա), թերություններով աչքը ճառագայթների զուգահեռ փունջը կիզակետում է ցանցաթաղանթից դուրս:

Եթե, օրինակ, ինչ-որ պատճառով աչքը երկարում է (կամ ակնաբյուրեղն է շատ կորանում), ապա ճառագայթների զուգահեռ փունջը կիզակետվում է ոչ թե ցանցաթաղանթի վրա, այլ նրա առջևում (նկ. 45, բ): Այս դեպքում դիտվող առարկան

կան պարզ տեսանելի է միայն մոտիկից, ուստի՝ տեսողության այս խանգարումը կոչվում է **կարճատեսություն**: Կարճատեսության աստիճանը որոշվում է ոսպնյակի օպտիկական ուժով, որն աչքին ընկնող զուգահեռ ճառագայթների ուղղությունը փոխում է այնպես, որ դրանք հատվում են ցանցաթաղանթի վրա (նկ. 45, գ): Կարճատես աչքի օպտիկական ուժը մեծ է նորմալ աչքի օպտիկական ուժից, հետևաբար՝ կարճատեսությունը շտկող ոսպնյակը ցրող է:

Հակառակ դեպքում, երբ աչքը կարճանում է (կամ ակնաբյուրեղի կորությունն է փոքրանում), ճառագայթների զուգահեռ փունջը կիզակետվում է ցանցաթաղանթի հետևում (նկ. 45, դ): Այս դեպքում դիտվող առարկան պարզ տեսանելի է փոքր-ինչ հեռվից, ուստի տեսողության այս խանգարումը կոչվում է **հեռատեսություն**: Հեռատեսությունը կարող է շտկվել հավաքող ոսպնյակի օգնությամբ (նկ. 45, ե):



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Նկարագրեք աչքի կառուցվածքը և դրա առանձին փրորների նշանակությունը:
2. Ի՞նչն են անվանում գունազգացողություն: Ինչպե՞ս է այն իրականանում: 3. Ի՞նչն է հնարավորություն է փալիս որոշել մարմնի չափերն ու դիրքը տարածության մեջ:
4. Ո՞րն է կոչվում է զուգամիտման անկյուն: 5. Ի՞նչն է համարվում տեսողության սրության չափ: 6. Ի՞նչն են անվանում աչքի հարմարում: Ինչպե՞ս է այն իրականանում:
7. Սահմանեք մոտակա և հեռակա կետերը: 8. Ո՞րն են համարում լավագույն տեսողության հեռավորություն: 9. Ինչու՞ է փարիքի առաջացման հետ մեծանում մոտակա կետի հեռավորությունը: 10. Թվարկեք աչքի ամենահաճախ հանդիպող արավորները և նշեք դրանք շրկելու ձևերը:

ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՍԱՐՔԵՐ

§ 16. (ԽՈՇՈՐԱՅՈՒՅՑ, ՄԱՆՐԱԴԻՏԱԿ, ՀԵՌԱԴԻՏԱԿ, ԼՈՒՍԱՆԿԱՐՉԱԿԱՆ ԱՊԱՐԱՏ)

Եթե առարկայի պատկերն ամբողջությամբ տեղավորվում է մեկ լուսազգայուն բջժի՝ ցուպիկի կամ շշիկի վրա, ապա չզինված աչքով չենք կարողանա տեսնել այն: Դա տեղի է ունենում երկու դեպքում. երբ առարկան շատ փոքր է կամ շատ հեռու է: Առարկան տեսանելի դարձնելու համար երկու դեպքում էլ պետք է, համապատասխան օպտիկական սարքի միջոցով, այնքան մեծացնել առարկայից եկող եզրային ճառագայթներով կազմված տեսողության անկյունը, որ այն գերազանցի տեսողության սրության $\alpha_{\min}$ անկյունը: Առաջին դեպքում աչքը պետք է զինել խոշորացույցով կամ մանրադիտակով, երկրորդում՝ հեռադիտակով: Տեսողության անկյան փոփոխությունը բնութագրելու համար սահմանվել է օպտիկական սարքի «անկյունային խոշորացում» հասկացությունը.

$$\Gamma_{\alpha} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \quad (1.56)$$

որտեղ α_1 -ը՝ առարկայի, իսկ α_2 -ը նրա պատկերի տեսողության անկյունն է:

Անկյունային խոշորացումը ցույց է տալիս, թե քանի անգամ է պատկերի տեսողության անկյունը մեծ այն տեսողության անկյունից, որով երևում է առարկան, երբ համապատասխան օպտիկական սարքը բացակայում է:

Խոշորացույց: Փոքր առարկաները, օրինակ, ձեռքի ժամացույցի մեխանիկական մասերը, մանրատառ գրառումները, դրոշմանիշները և այլն, որպես կանոն, դիտում են խոշորացույցով: Խոշորացույցը հավաքող ոսպնյակ է՝ տեղադրված այնպես, որ առարկան լինի ոսպնյակի և գլխավոր կիզակետի միջև՝ կիզակետի անմիջական հարևանությամբ: Այսպիսի դասավորության դեպքում աչքերի մկանների լարվածությունը նվազագույն է, դիտելը՝ հարմար:

43-րդ նկարից երևում է, որ եթե անգեն աչքով փոքր h բարձրությամբ առարկան դիտում ենք լավագույն տեսողության d_h հեռավորությունում, ապա այն երևում է $\alpha_h \approx h/d_h$ անկյունով: F կիզակետային հեռավորությամբ խոշորացույցի կիզակետին մոտ առարկան կերևա $\alpha_F \approx h/F$ անկյունով: Հենց այս

անկյունների հարաբերությունն էլ ընդունում են որպես խոշորացույցի $\Gamma_{\text{խ}}$ անկյունային խոշորացում:

$$\Gamma_{\text{խ}} = \frac{\alpha_{\text{խ}}}{\alpha_n} = \frac{d_n}{F} = d_n D, \quad (1.57)$$

որտեղ D -ն խոշորացույցի օպտիկական ուժն է:

Խոշորացույցի անկյունային խոշորացումն ուղիղ համեմատական է նրա օպտիկական ուժին:

Թվում է, թե փոքրացնելով խոշորացույցի կիզակետային հեռավորությունը, կարելի է ինչքան ասես մեծացնել նրա անկյունային խոշորացումը: Բայց կիզակետային հեռավորության նվազմանը զուգընթաց առաջանում են պատկերի աղավաղումներ, ուստի՝ գործնականում խոշորացույցի կիզակետային հեռավորությունը չի կարող փոքր լինել $F = 2$ սմ-ից: Սա նշանակում է, որ $\Gamma_{\text{խ}}$ -ի առավելագույն արժեքը 10-ի կարգի է: Ավելի մեծ խոշորացում կարելի է ստանալ մի քանի ոսպյակի միջոցով:

Մանրադիտակ: Երկու փոքր կիզակետային հեռավորությամբ ոսպյակներից կազմված ժամանակակից օպտիկական մանրադիտակների խոշորացումը հասնում է մինչև երկու հազարի և սահմանափակվում է միայն պատկերի աղավաղումներով: Այդ ոսպյակներից մեկը տեղադրված է առարկային մոտ և կոչվում է **օբյեկտիվ**, իսկ մյուսը՝ դիտորդի աչքի մոտ և կոչվում է **օկուլյար** (նկ. 46):

Առարկան տեղադրում են օբյեկտիվի կիզակետի և կրկնակիզակետի միջև: Օկուլյարը տեղադրում են այնպես, որ օբյեկտիվում ստացված իրական, շրջված և խոշորացված պատկերն ստացվի օբյեկտիվի և նրա կիզակետի միջև՝ ինչպես խոշորացույցում: (1.30) բանաձևից այդ պատկերի բարձրությունը՝

$$H \cdot h \frac{f_1}{F_1}: \quad (1.58)$$

Օկուլյարում ստացվում է առարկայի կեղծ, ուղիղ, խոշորացված պատկերը:

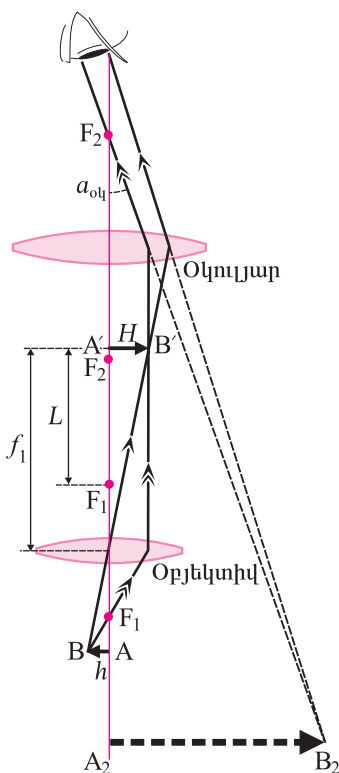
Այժմ որոշենք մանրադիտակի անկյունային խոշորացումը: Օկուլյարում առարկայի պատկերը երևում է $\alpha_{\text{օկ}} \approx H/F_2$ անկյունով, իսկ $\alpha_n \approx h/d_n$, ուստի՝ անկյունային խոշորացման համար կստանանք՝

$$\Gamma_{\text{մ}} = \frac{\alpha_{\text{օկ}}}{\alpha_n} = \frac{H}{F_2} \frac{d_n}{h} \cdot \frac{d_n f_1}{F_1 F_2}, \quad (1.59)$$

որտեղ, ինչպես երևում է 46-րդ նկարից,

$$f_1 \cdot L + F_1 \cdot L, \quad (1.60)$$

իսկ L -ն օբյեկտիվի և օկուլյարի կիզակետերի



Նկ. 46. Ճառագայթների ընթացքը մանրադիտակում

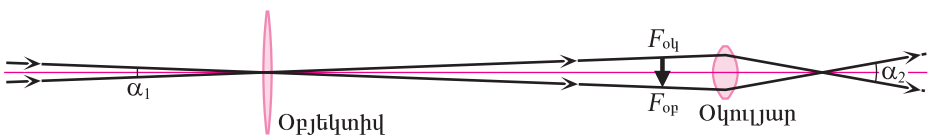
նվազագույն հեռավորությունն է: Այն շատ մեծ է F_1 և F_2 կիզակետային հեռավորություններից: Դրանից է կախված մանրադիտակի չափը:

(1.59) և (1.60) բանաձևերից մանրադիտակի անկյունային խոշորացման համար կստանանք.

$$\Gamma_{\text{ս}} = D_1 D_2 d_n L: \quad (1.61)$$

Մանրադիտակի խոշորացումն ուղիղ համեմատական է օբյեկտիվի և օկուլյարի օպտիկական ուժերին:

Հեռադիտակ: Եթե դիտորդին մոտ շատ փոքր առականերն ուսումնասիրում են մանրադիտակով, ապա դա հնարավոր չէ անել վերը նշված երկրորդ դեպքում, երբ առական շատ հեռու է: Այս դեպքում օգտագործվում է հեռադիտակ-ռեֆրակտոր (Կեպլերի խողովակ), որը բաղկացած է երկարակիզակետ օբյեկտիվից և կարճակիզակետ օկուլյարից (նկ. 47): Օբյեկտիվի հետին կիզակետը գործնականում համընկնում է օկուլյարի առաջին կիզակետի հետ: Հեռավոր աղբյուրը, օրինակ, Արեգակնային համակարգի մոլորակը, երևում է α_1 անկյունով, իսկ նրա պատկերը ստացվում է համարյա կիզակետում, փոքրացված, շրջված, իրական: Այն օկուլյարի համար ծառայում է որպես առարկա: Օկուլյարի կիզակետային հարթության մեջ տեղավորված նրա կետերից եկող ճառագայթները ցրվում են՝ կրկնակի բեկումնից հետո գնալով համապատասխան երկրորդային առանցքներին զուգահեռ: Այդ պատկերի եզրային կետերով անցնող երկրորդային առանցքների միջև անկյունը հեռադիտակում մոլորակի պատկերի տեսողության α_2 անկյունն է: Օկուլյարից դուրս եկած զուգահեռ ճառագայթներն աչքի ակնաբյուրեղի միջոցով հավաքվում են ցանցաթաղանթի մեկ կետում, ամբողջ մոլորակի պատկերը խոշորացվում է, որը և հնարավորություն է տալիս տեսնել շատ մանրամասնություններ: Այն, որ հեռադիտակում պատկերը շրջված է, էական չէ, միայն մոլորակների քարտեզում հյուսիսը տեղավորվում է ներքևում, իսկ հարավը՝ վերևում՝ համաձայն հեռադիտակում ստացված պատկերի:



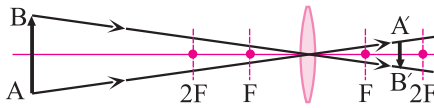
Նկ. 47. Ճառագայթների ընթացքը հեռադիտակում

Կեպլերի խողովակի անկյունային խոշորացումը մոտավորապես հավասար է օբյեկտիվի և օկուլյարի կիզակետային հեռավորությունների (օպտիկական ուժերի) հարաբերությանը.

$$\Gamma_h = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{F_{\text{op}}}{F_{\text{ol}}} = \frac{D_{\text{ol}}}{D_{\text{op}}}$$

և հասնում է մի քանի տասնյակի:

Լուսանկարչական ապարատ: Լուսանկարչական ապարատն օպտիկական սարք է, որի միջոցով գրանցվում և վերարտադրվում է իրական



Նկ. 48. Ճառագայթների ընթացքը լուսանկարչական ապարատում

առարկայի պատկերը, որն ստացվում է նրա լուսազգայուն տարրի վրա: Բազմազան լուսանկարչական ապարատների աշխատանքի սկզբունքը նույնն է. դրանք տարբերվում են միայն լուսազգայուն տարրի վրա ստացված

պատկերի գրանցման և վերարտադրման եղանակով: Ավանդական լուսանկարչական ապարատներում լուսազգայուն տարրը լուսանկարչական քիթեղը կամ ժապավենն է: Դրանց վրա առարկայի պատկերի գրանցումը և վերարտադրումը բարդ է և պահանջում է մասնագիտական հմտություններ: Իսկ ժամանակակից թվային ֆոտոապարատներում լուսազգայուն տարրն էլեկտրոնային մատրիցն է, որից ստացված ազդանշանն ավտոմատորեն թվայնացվում և գրանցվում է օպերատիվ հիշողության սարքում կամ այլ կրիչի վրա: Պատկերը կարող է միանգամից փոխանցվել նաև համակարգչին:

Բոլոր լուսանկարչական ապարատների հիմնական մասը հավաքող ոսպնյակների համակարգն է՝ օբյեկտիվը: Լուսանկարման ժամանակ առարկան տեղավորվում է կրկնակի կիզակետային հեռավորությունից դուրս, այդ պատճառով պատկերը ստացվում է կիզակետի և կրկնակիզակետի միջև, իրական, փոքրացված, շրջված (նկ. 48):

Որակյալ պատկեր ստանալու համար մեծ նշանակություն ունի «կտրուկության բերումը»՝ պատկերի և լուսազգայուն տարրի համընկնեցումը: Դրա համար հին լուսանկարչական ապարատներում հետին պատը շարժական էր արվում, լուսազգայուն քիթեղի փոխարեն դրվում էր փայլատ ապակի. վերջինը շարժելով՝ աչքաշափով ստանում էին «կտրուկ» պատկեր: Հետո ապակե քիթեղը փոխարինում էին լուսազգայունով և լուսանկարում:

Նոր լուսանկարչական ապարատներում «կտրուկության» բերելու համար օգտագործվում է հեռաչափի հետ կապված շարժական օբյեկտիվ, որի միջոցով փոփոխվում է օբյեկտիվից մինչև քիթեղ հեռավորությունն այնքան, մինչև որ այն համընկնի f -ի հետ: «Կտրուկության խորության», այսինքն՝ գլխավոր առանցքի ուղղությամբ այն հեռավորության մեծացման համար, որից առարկաները «կտրուկ» են պատկերվում, օբյեկտիվի անցքը փոքրացնում են: Բայց դա փոքրացնում է ապարատի մեջ ընկնող լույսի քանակը և, հետևաբար, մեծացնում լուսակայման ժամանակը:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր դեպքում չզիմված աչքը չի կարող տեսնել առարկան:
2. Ո՞ր ոսպնյակն են անվանում խոշորացույց: Ի՞նչն են անվանում խոշորացույցի անկյունային խոշորացում, ինչպե՞ս է այն կախված խոշորացույցի օպտիկական ուժից:
3. Ի՞նչ տարրերից է կազմված մանրադիտակը: Ո՞րն է օբյեկտիվի և օկուլյարի դերը:
4. Նկարագրեք ճառագայթների ընթացքը մանրադիտակում:
5. Որքա՞ն է մանրադիտակի անկյունային խոշորացումը:
6. Ի՞նչ տարրերից է կազմված հեռադիտակը:
7. Որքա՞ն է հեռադիտակի անկյունային խոշորացումը:
8. Ո՞րն է լուսանկարչական ապարատի հիմնական մասը:
9. Ի՞նչ է նշանակում սարքը «կտրուկության բերել»:

§17. ԼԱԲՈՐԱՏՈՐ ԱՇԽԱՏԱՆՔ 2

Հավաքող ոսպնյակի կիզակետային հեռավորության որոշումը

Աշխատանքի նպատակը. որոշել հավաքող ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը:

Չափամիջոցներ. չափերիզ (150 սմ երկարությամբ):

Նյութեր և սարքեր. հավաքող ոսպնյակ (10÷20 սմ կիզակետային հեռավորությամբ), լույսի աղբյուր (մոմ կամ էլեկտրական), էկրան:

Փորձի կատարման ընթացքը

1. Լույսի աղբյուրը, հավաքող ոսպնյակը և էկրանը դասավորեք սեղանի վրա և տեղաշարժեք իրար նկատմամբ այնպես, որ էկրանին ստացվի լույսի աղբյուրի հստակ պատկերը:
2. Նշեք սարքերի դիրքերը և չափեք d_1 -ն ու f_1 -ը:
3. Լույսի աղբյուրն ու էկրանը թողեք անշարժ և տեղաշարժեք ոսպնյակը, մինչև որ նորից ստացվի լույսի աղբյուրի հստակ պատկեր:
4. Նորից չափեք d_2 -ը և f_2 -ը: Պարզվում է, որ $f_1 = d_2$ և $d_1 = f_2$:
5. Օգտվելով ստացված տվյալներից և (1.27) բանաձևից՝ հաշվեք ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը:

Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. Որքա՞ն է առարկայի d հեռավորությունը ոսպնյակից, եթե նրա իրական պատկերը խոշորացված է $\Gamma = 10$ անգամ: Ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը՝ $F = 10$ սմ:

Լուծում: Ոսպնյակի խոշորացումը՝ $\Gamma = f/d$, որտեղից առարկայի պատկերի f հեռավորությունը՝ $f = \Gamma d$: Օգտվենք բարակ ոսպնյակի բանաձևից.

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{\Gamma d} = \frac{1 + \Gamma}{\Gamma d}$$

որտեղից

$$d = \frac{1 + \Gamma}{\Gamma} F = 11 \text{ սմ}$$

Պատասխան՝ 11 սմ:

2. Նկարում պատկերված է ոսպնյակի O_1O_2 գլխավոր օպտիկական առանցքը: A լուսատու կետի պատկերն այդ ոսպնյակում ստացվում է B կետում: Կառուցման միջոցով գտեք ոսպնյակի օպտիկական կենտրոնի և նրա գլխավոր կիզակետերի դիրքերը:

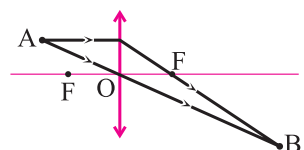
A.

O_1

O_2

B.

Լուծում: Քանի որ առարկան և նրա պատկերը ոսպնյակի տարբեր կողմերում են, ապա ոսպնյակը հավաքող է, իսկ պատկերը՝ իրական: Ոսպնյակի օպտիկական կենտրոնով անցնող ճառագայթը չի բեկվում, ուստի՝ այն գլխավոր օպտիկական առանցքի և AB ուղղի հատման O կետն է: O կետում տանելով ուղղահայաց O_1O_2 ուղղին՝ կգտնենք ոսպնյակի դիրքը:



Ոսպնյակի կիզակետերի դիրքերը գտնելու համար A կետից տանենք գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ ճառագայթ: Ինչպես ոսպնյակով անցած կամայական ճառագայթ, սա նույնպես կանցնի B կետով: Բայց գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ ճառագայթը բեկվում է այնպես, որ անցնում է ոսպնյակի գլխավոր կիզակետով: Ուրեմն՝ այդ ճառագայթի և գլխավոր օպտիկական առանցքի հատման F կետը ոսպնյակի գլխավոր կիզակետն է: Մյուս գլխավոր կիզակետը ոսպնյակի նկատմամբ առաջինի համաչափ կետն է:

3. Առարկան և էկրանը դրված են միմյանցից L հեռավորությամբ: Առարկայի ի՞նչ հեռավորությամբ պետք է տեղադրել հավաքող ոսպնյակը, որպեսզի էկրանին ստացվի առարկայի հստակ պատկերը:

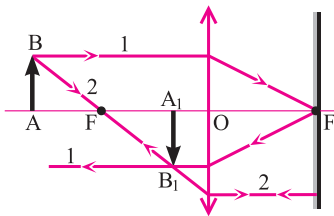
Լուծում: Առարկայի հեռավորությունը ոսպնյակից նշանակենք d -ով, այդ դեպքում ոսպնյակից առարկայի պատկերի հեռավորությունը՝ $f = L - d$: Բարակ ոսպնյակի $1/d + 1/(L - d) = 1/F$ բանաձևից d -ի համար կստանանք՝ $d^2 - Ld + FL = 0$:

Այս հավասարումից և $d + f = L$ պայմանից d -ի և f -ի համար կստանանք՝

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{L}{2} + \sqrt{\frac{L^2}{4} - FL}, & f_1 &= \frac{L}{2} - \sqrt{\frac{L^2}{4} - FL}, \\ d_2 &= \frac{L}{2} - \sqrt{\frac{L^2}{4} - FL}, & f_2 &= \frac{L}{2} + \sqrt{\frac{L^2}{4} - FL}, \\ & & \frac{L^2}{4} - FL &\geq 0, \quad F \neq \frac{L}{4}: \end{aligned}$$

Ինչպես տեսնում ենք, ոսպնյակը կարելի է տեղադրել երկու դիրքում, և երկու դեպքում էլ առարկայի պատկերն էկրանին կստացվի հստակ: Ընդ որում՝ այդ երկու դիրքերի գոյությունը պայմանավորված է ճառագայթների շրջելիության հատկությամբ: Մի դեպքում առարկայի պատկերը լինում է խոշորացված, մյուս դեպքում՝ փոքրացված:

4. Առարկան $F = 0,12$ մ կիզակետային հեռավորությամբ ոսպնյակից հեռու է $d = 0,18$ մ: Հարթ հայելին տեղադրված է ոսպնյակի կիզակետային հարթության մեջ: Ոսպնյակից ի՞նչ հեռավորությամբ կստացվի առարկայի պատկերը: Որքա՞ն է պատկերի խոշորացումը:



Լուծում: B կետից դուրս եկող (1) և (2) ճառագայթների ընթացքը պատկերված է նկարում: Այդ ճառագայթները, անդրադառնալով հայելուց, հատվում են B₁ կետում, հետևաբար՝ առարկայի պատկերն իրական է: Ինչպես երևում է նկարից, A₁B₁ = AB, հետևաբար՝ ABF և A₁B₁F եռանկյուններն իրար հավասար են: Եռանկյունների հավասարությունից բխում է, որ AF = A₁F: Բայց AF = d - F, իսկ A₁F = F - f, որտեղ f-ը առարկայի պատկերի հեռավորությունն է ոսպնյակից: Ուրեմն՝ d - F = F - f, որտեղից՝ f = 2F - d = 0,06 մ:

Պատկերի խոշորացումը՝ $\Gamma = A_1B_1/AB = 1$:

Պատասխան՝ 1:

5. Ուռույիկ-գոգավոր ոսպնյակի մակերևութների կորությունների շառավիղները, համապատասխանաբար, հավասար են. $R_1 = 1$ մ և $R_2 = 12$ սմ, ոսպնյակի ապակու բեկման ցուցիչը՝ $n = 1,52$: Որքա՞ն է ոսպնյակի օպտիկական ուժն օդում և ջրում:

Ինչպե՞ս կփոխվի ոսպնյակի օպտիկական ուժը, եթե այն տեղադրվի հորիզոնական դիրքով և լցվի ջրով: Ջրի բեկման ցուցիչը $n_0 = 1,32$:



Լուծում: Հաշվի առնելով, որ օդի բեկման ցուցիչը մոտ է 1-ին, (1.21) բանաձևից օդում ոսպնյակի օպտիկական ուժի համար կունենանք՝

$$D_1 = (n - 1)c \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = (1,52 - 1)c1 - \frac{1}{0,12} \text{ մ}^{-1} = -3,9 \text{ դպտր:}$$

Նույն բանաձևից հետևում է, որ ջրում ոսպնյակի օպտիկական ուժը՝

$$D_0 = \frac{n}{n_0} - 1)c \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = (1,32 - 1)c1 - \frac{1}{0,12} \text{ մ}^{-1} = -1,1 \text{ դպտր}$$

Ոսպնյակի գոգավոր մակերևույթի մեջ լցված ջուրն առաջացնում է հարթ-ուռուցիկ ոսպնյակ, որի օպտիկական ուժը՝

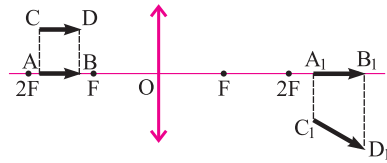
$$D_2 = \frac{n_0 - 1}{R_2} = \frac{1,32 - 1}{0,12 \text{ մ}} = 2,7 \text{ դպտր:}$$

Ջրի ոսպնյակից և ապակե ոսպնյակից կազմված համակարգի D օպտիկական ուժը, համաձայն (1.40) բանաձևի, հավասար է այդ ոսպնյակների օպտիկական ուժերի գումարին.

$$D = D_1 + D_2 = \frac{n - 1}{R_1} - \frac{n - n_0}{R_2} = -1,2 \text{ դպտր:}$$

Պատասխան՝ $-1,2$ դպտր:

6. F կիզակետային հեռավորությամբ հավաքող ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքի վրա ընկած AB հատվածը գլխավոր օպտիկական առանցքին ուղղահայաց ուղղությամբ տեղափոխում են CD դիրք: Որոշել AB հատվածի տեղաշարժի մեծությունը, եթե CD հատվածի պատկերի երկարությունը k անգամ մեծ է AB հատվածի պատկերի երկարությունից:



Լուծում: Ըստ (1.35) բանաձևի՝

$$\frac{C_1 D_1}{CD} = \beta \sqrt{1 + \frac{a^2}{F^2}}$$

Մյուս կողմից՝ $\beta = A_1 B_1 / AB$: Հաշվի առնելով, որ $k = C_1 D_1 / A_1 B_1$ և $AB = CD$, կստանանք՝ $a = F \sqrt{k^2 - 1}$:

Պատասխան՝ $F \sqrt{k^2 - 1}$:

7. Մանրադիտակի օբյեկտիվի կիզակետային հեռավորությունը 2 մմ է, օկուլյարինը՝ 15 մմ: Օկուլյարի և օբյեկտիվի միջև հեռավորությունը՝ $l = 20,7$ սմ: Որքա՞ն է մանրադիտակի խոշորացումը նորմալ աչքի համար:

Լուծում: Օգտվենք (1.60) բանաձևից, որտեղ $d_n = 25$ սմ մեծությունը լավագույն տեսողության հեռավորությունն է, $L = l - F_1 - F_2$ -ը՝ օբյեկտիվի հետևի կիզակետի և օկուլյարի առջևի կիզակետի հեռավորությունը: (1.61) բանաձևից մանրադիտակի խոշորացումը՝

$$\Gamma_d = D_1 D_2 d_n L = \frac{d_n (l - F_1 - F_2)}{F_1 F_2} = \frac{250 \cdot 190}{2 \cdot 15} = 1583$$

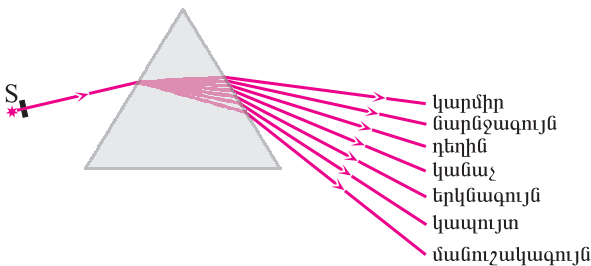
Պատասխան՝ 1583:

§ 18. ԼՈՒՅՍԻ ԴԻՍՊԵՐՍԻԱՆ

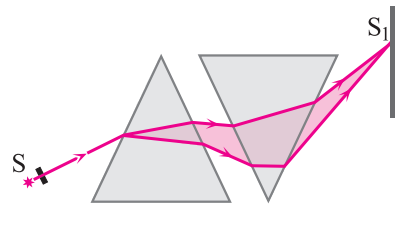
Բոլորն են նկատել ծիածանի գույներով երանգավորված պատկերներ՝ անձրևից հետո ծիածանը, նավթոտ կամ յուղոտ ջրի մակերևույթին գույնզգույն հարավոփոխ շերտերը կամ օպտիկական սարքերի (ակնոց, պրիզմա, օբյեկտիվ) եզրերի գունավորումը և այլն: Այս ամենը ֆիզիկական մի երևույթի դրսևորումներ են, որը կոչվում է **լույսի դիսպերսիա**:

Այս երևույթը հայտնաբերել է Նյուտոնը 1666 թ.: Աստղադիտակի օբյեկտիվի առաջացրած պատկերի եզրերն ուսումնասիրելիս Նյուտոնն ուշադրություն է դարձրել դրանց գունավորմանը: Նման պատկեր էր ստացվում նաև պրիզմայով լույսի տարածման ժամանակ: Նյուտոնը կռահել է, որ պրիզմայից հետո հստակ պատկեր ստանալու համար անհրաժեշտ է պրիզմայի վրա ուղղել փոքր լայնական հատույթով լույսի փունջ: Նման փունջ ստանալու համար նա սենյակի լուսամուտը փակել է սև պաստառով և նրա վրա բացել մեղ ճեղք: Այդ ճեղքից դուրս եկած լույսի փունջն ուղղելով եռանկյուն պրիզմայի վրա՝ Նյուտոնը լուսամուտի դիմացի պատին նկատել է ճեղքի լայնացած ու գունավոր պատկերը, որի գույները կարմիրից աստիճանաբար փոխվում էին մինչև մանուշակագույնը (նկ. 49): Նա գույների այդ անընդհատ հաջորդականությունը, ավանդույթի համաձայն, բաժանել է ծիածանի 7 գույների՝ կարմիր, նարնջագույն, դեղին, կանաչ, երկնագույն, կապույտ և մանուշակագույն: Պատին ստացված պատկերը Նյուտոնն անվանել է **սպեկտր** (լատիներեն «սպեկտրում»՝ տեսիլք բառից):

Լուսամուտի ճեղքը ծածկելով կարմիր գույնի ապակիով (լուսազտիչով)՝ Նյուտոնը պատին հայտնաբերել է միայն ճեղքի կարմիր պատկերը, իսկ կապույտ ապակիով ծածկելով՝ կապույտ պատկերը և այդպես շարունակ: Այսպիսով՝ նա ցույց է տվել, որ սպիտակ լույսը բաղկացած է տարբեր գույնի լույսի փնջերից: Պրիզման պարզապես սպիտակ լույսի փունջը տարրալուծում է տարբեր գույնի փնջերի:



Նկ. 49. Սպիտակ լույսի տարրալուծումը տարբեր գույնի լույսի փնջերի



Նկ. 50. Տարրալուծված լույսից սպիտակ լույսի ստացումը

Այդ երևույթի մեկ այլ ապացույց է այն փաստը, որ տարրալուծված լույսը կարելի է միավորել՝ ստանալով սպիտակ լույս: Իսկապես, եթե առաջին պրիզմայի նկատմամբ 180° -ով շրջված երկրորդ պրիզման տեղավորենք տարրալուծված լուսային փնջերի ճանապարհին, ապա գումավոր փնջերը, անցնելով երկրորդ պրիզմայի միջով և վերադարձվելով, կտան S ճեղքի S_1 սպիտակ պատկերը (նկ. 50):

Այսպիսով՝ Նյուտոնը փորձնականորեն ապացույցել է, որ սպիտակ լույսն ունի բարդ կառուցվածք. այն տարբեր գույնի, այսինքն՝ տարբեր հաճախություններ ունեցող լուսային փնջերի միավորում է: Պրիզմայի միջոցով սպիտակ լույսի վերածումը սպեկտրի կարելի է բացատրել հետևյալ կերպ:

Պրիզմայով անցնելիս տարբեր գույնի լույսի ճառագայթները շեղվում են տարբեր անկյուններով: Ճառագայթի θ շեղման անկյունը կախված է պրիզմայի նյութի բեկման ցուցչից, ճառագայթի անկման α անկյունից և պրիզմայի φ բեկող անկյունից (տես § 8): Պրիզմայի վրա ընկնող սպիտակ լույսի բոլոր ճառագայթների համար α և φ անկյունները նույնն են, հետևաբար՝ տարբեր գույնի ճառագայթների շեղման անկյունների տարբերությունը պայմանավորված է միայն այդ ճառագայթների համար պրիզմայի բեկման ցուցչի տարբեր արժեքներով: Այսպիսով՝ պրիզմայի նյութի բեկման ցուցչի արժեքը կախված է պրիզմայով անցնող լույսի գույնից՝ նրա հաճախությունից: **Միջավայրի բեկման ցուցչի կախումը լույսի հաճախությունից կոչվում է դիսպերսիա** (լատիներեն «դիսպերսիո»՝ սլացում բառից):

Սպիտակ լույսի բարդ կառուցվածքով է բացատրվում շրջապատի առարկաների գունավորումը: Կանաչ խոտը կամ ծառի տերևը կլանում են լույսի բոլոր ճառագայթները՝ բացառությամբ կանաչի, որոնք, անդրադառնալով և ընկնելով մեր աչքի մեջ, կանաչ գույնի տպավորություն են ստեղծում: Սպիտակ թուղթը, ի տարբերություն տերևի, անդրադարձնում է լույսի բոլոր գույնի ճառագայթները, և այն մեզ թվում է սպիտակ: Եթե թուղթը ներկենք, օրինակ՝ կապույտ, ապա այն կանդրադարձնի միայն կապույտ գույնի ճառագայթները, և թուղթը կտեսնենք կապույտ: Սև մարմինը կլանում է լույսի բոլոր ճառագայթները, և ոչ մի ճառագայթ չի անդրադարձնում, այսինքն՝ մեր աչքին ոչ մի գույնի անդրադարձած ճառագայթ չի ընկնում, ուստի այն մեզ թվում է սև: Այսպիսով՝ առարկայի գույնը տվյալ առարկայի՝ լույսի կլանման հատկության դրսևորում է:

Խորացված

Դիսպերսիայի էլեկտրոնային տեսությունը: Դիսպերսիայի տեսությունը դասական էլեկտրոնային տեսության հիման վրա 20-րդ դարի սկզբին ստեղծել է հոլանդացի հռչակավոր ֆիզիկոս Հենդրիկ Լորենցը:

Վակուումում բոլոր էլեկտրամագնիսական ալիքները, անկախ հաճախությունից, տարածվում են միևնույն արագությամբ: Դիսպերսիա առաջանում է միայն միջավայրում, հետևաբար՝ դիսպերսիայի պատճառը պետք է փնտրել միջավայրի նյութի կառուցվածքում: Պարզենք, թե միջավայրի n -ը բնութագրիչ է կախված բեկման ցուցիչը:

Մաքսվելը ցույց է տվել, որ դիէլեկտրական միջավայրում էլեկտրամագնիսական ալիքների տարածման արագությունը՝ $v = c/\sqrt{\epsilon\mu}$, որտեղ ϵ -ը և μ -ն, համապատասխանաբար, միջավայրի դիէլեկտրական և մագնիսական բախանցելիություններն են: Հաշվի առնելով, որ բոլոր նյութերի (բացի ֆեռո-

մագնիսներից) մագնիսական թափանցելիությունները գործնականորեն չեն տարբերվում 1-ից, դիէլեկտրական միջավայրում լույսի արագության համար կատանանք՝ $v = c/\sqrt{\epsilon}$: (1.14) բանաձևի համաձայն, միջավայրի բեկման ցուցիչը՝ $n = c/v$, ուստի՝

$$n = \sqrt{\epsilon}: \quad (2.1)$$

Այստեղից եզրակացնում ենք, որ ալիքի հաճախությունից կախված է միջավայրի դիէլեկտրական թափանցելիությունը: Պարզենք թե ինչպես:

Դիէլեկտրական թափանցելիությունը կախված է միջավայրի բևեռացումից, որի էությունը, ինչպես գիտենք, հետևյալն է. արտաքին էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ միջավայրի մոլեկուլները (կամ ատոմները) ձեռք են բերում դաշտի ուժագծերով ուղղված էլեկտրական մոմենտ:

Նկատենք, որ բևեռային մոլեկուլներին բնորոշ կողմնորոշային բևեռացումը (տե՛ս «Ֆիզիկա 11», § 60) տեղի է ունենում միայն էլեկտրաստատիկ և ցածր հաճախությամբ փոփոխվող էլեկտրական դաշտերում: Իսկ բարձր հաճախությամբ փոփոխվող էլեկտրական դաշտում երկբևեռ մոլեկուլները չեն հասցնում կողմնորոշվել էլեկտրական դաշտի ուժագծերի երկայնքով: Այս դեպքում միջավայրը բևեռանում է միայն էլեկտրոնային ամպի դեֆորմացիայի հետևանքով: Ուրեմն՝ հաճախությունների օպտիկական տիրույթում, անկախ այն բանից՝ մոլեկուլները երկբևեռային էլեկտրական մոմենտ ունեն, թե ոչ, դիէլեկտրիկի բևեռացումը բացառապես դեֆորմացիոն է: Ուստի, համաձայն «Ֆիզիկա 11» դասագրքի (7.70) բանաձևի, ոչ բևեռային դիէլեկտրիկի բևեռացման վեկտորը՝

$$\vec{P}_E = n_0 \vec{p}_e, \quad (2.2)$$

որտեղ n_0 -ն մոլեկուլների կոնցենտրացիան է դիէլեկտրիկում, $\vec{p}_e$ -ն՝ դեֆորմացված մոլեկուլի (ատոմի) էլեկտրական մոմենտը, որի մոդուլը համեմատական է էլեկտրական դաշտի լարվածությանը:

Եթե լույսի ալիքում էլեկտրական դաշտի լարվածությունը փոփոխվում է $E = E_0 \cos \omega t$ օրենքով, ապա ժամանակի ընթացքում փոփոխվող էլեկտրական $F = eE = eE_0 \cos \omega t$ ուժի ազդեցությամբ էլեկտրոնը կկատարի հարկադրական տատանումներ: Համաձայն «Ֆիզիկա 10» դասագրքի (10.23) և (10.27) բանաձևերի՝ էլեկտրոնի հարկադրական տատանումները կնկարագրվեն

$$l = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t = \frac{e}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} E \quad (2.3)$$

օրենքով, որտեղ ω_0 -ն էլեկտրոնի սեփական տատանումների շրջանային հաճախությունն է, իսկ l -ը՝ հավասարակշռության դիրքից նրա շեղումը: Նույն օրենքով կփոփոխվի նաև դիէլեկտրիկի բևեռացման վեկտորի մոդուլը.

$$P_E = n_0 p_e = n_0 e l = \frac{n_0 e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} E \quad (2.4)$$

Քանի որ բևեռացման վեկտորի մոդուլը համեմատական է էլեկտրական դաշտի լարվածության մոդուլին, ապա միջավայրի դիէլեկտրական թափանցելիությունը՝

$$\varepsilon = 1 + \frac{P_E}{\varepsilon_0 E} = 1 + \frac{n_0 p_e}{\varepsilon_0 E} = 1 + \frac{n_0 e^2}{m \varepsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (2.5)$$

որտեղ ε_0 -ն էլեկտրական հաստատունն է: Միջավայրի բեկման ցույցի համար (2.1) և (2.5) բանաձևերից կստանանք՝

$$n = \sqrt{1 + \frac{n_0 e^2}{m \varepsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2)}}: \quad (2.6)$$

Ստացված արտահայտությունը հնարավորություն է տալիս բացատրելու դիսպերսիայի երևույթը՝ բեկման ցույցի կախումը լույսի ալիքի տատանումների հաճախությունից, և կոչվում է **դիսպերսիայի օրենք**:

Նշենք, որ դիսպերսիայի (2.6) օրենքը մեծ ճշտությամբ նկարագրում է բեկման ցույցի կախումը լույսի ալիքի ω հաճախությունից, եթե ω -ն էապես տարբերվում է էլեկտրոնի ω_0 սեփական տատանումների հաճախությունից: Ուեգոնանասային հաճախությունների դեպքում ($\omega \approx \omega_0$) արդյունքն առավել ճշգրիտ է, եթե հաշվի է առնվում տատանումների մարումը:

Դիսպերսիան և կլանումը: Փորձը ցույց է տալիս, որ բեկման ցույցի դիսպերսիայի հետ տեղի է ունենում նաև կլանման դիսպերսիա, այսինքն՝ կլանումը նույնպես կախված է լույսի ալիքի հաճախությունից: Ընդ որում՝ առավելապես կլանվում են ռեզոնանսային հաճախությանը մոտ հաճախությամբ ալիքները: Այս երևույթը հարկադրական տատանումներին բնորոշ հատկության հետևանք է. համակարգն առավելագույն հզորություն կլանում է ռեզոնանսի դեպքում:

Ատոմներն ու մոլեկուլներն ունեն տատանումների ոչ թե մեկ սեփական հաճախություն, այլ սեփական հաճախությունների հավաքածու (սպեկտր): Այդ հաճախություններին մոտ տիրույթներում կլանման գործակիցը կարուկ աճում է: Պիմը մարմիններում ու հեղուկներում, մոլեկուլների ուժեղ փոխազդեցության հետևանքով, այդ տիրույթները լայնանում և դառնում են կլանման շերտեր, իսկ դրանց միջև առաջանում են հաճախությունների շերտեր, որոնց համապատասխան հաճախությամբ էլեկտրամագնիսական ալիքները գրեթե չեն կլանվում: Այս հանգամանքն ընկած է լուսազտիչների գործողության հիմքում: Դրանք հատուկ նյութերով պատված ապակե թիթեղներ են, որոնցով անցնում են միայն հաճախությունների որոշակի տիրույթի լույսի ալիքներ, իսկ մնացածները կլանվում են: Չափելով կլանումը՝ կարելի է գտնել նյութի սեփական հաճախությունները:



Հարցեր և առաջադրանքներ

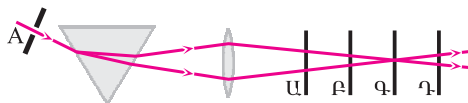
1. Ո՞ր երևույթն են անվանում լույսի դիսպերսիա: 2. Ի՞նչ է սպիտակ լույսը: 3. Ո՞ր համարով է նշված այն լույսի ճառագայթի գույնը, որն ապակե պրիզմայով անցնելիս բոլորից քիչ է շեղվում՝ 1. կանաչ, 2. կարմիր, 3. կապույտ, 4. մանուշակագույն, 5. դեղին: 4. Ապակե պրիզմայով անցնելիս սպիտակ լույսն ինչու՞ է տրոհվում տարբեր գույնի լույսի ճառագայթների: 5. Ո՞ր համարով է նշված այն լույսի ճառագայթի գույնը, որի բեկման ցույցիչը փոխալ միջավայրում ամենամեծն է՝ 1. կանաչ, 2. կարմիր, 3. կապույտ, 4. մանուշակագույն, 5. դեղին: 6. Ո՞ր համարով է նշված այն լույսի ճառագայթի գույնը, որի բեկման ցույցիչը փոխալ միջավայրում ամենափոքրն է՝

1. կանաչ, 2. կարմիր, 3. կապույտ, 4. մանուշակագույն, 5. դեղին: **7.** Ի՞նչ գույնի կերևա կանաչ խտրել, եթե այն դիտենք կարմիր ապակու միջով: Պատասխանը հիմնավորեք: **8.** Ինչի՞ց է կախված է միջավայրի դիֆրակցիոնական թափանցելիությունը: **9.** Ո՞ր դաշտերում է առաջանում միջավայրի կողմնորոշային բևեռացումը: **10.** Ի՞նչ պայմաններում է առաջանում միջավայրի դեֆորմացիոն բևեռացում: **11.** Ի՞նչ է դիսպերսիայի օրենքը: **12.** Ի՞նչ է կլանման դիսպերսիան:

1. Լույսի դիսպերսիայի ուսումնասիրման Նյուտոնի մի փորձի մասին

Լույսի սպեկտրը և տարրալուծված լույսի միավորումը կարելի է դիտել պրիզմայի և հավաքող ոսպնյակի միջոցով:

Արևի ճառագայթների փունջը նախ անցնում է ապակե պրիզմայի, այնուհետև՝ ոսպնյակի միջով (տես նկարը): Դիտորդը ոսպնյակի միջով անցած ճառագայթների փնջին ուղղահայաց սպիտակ թերթ է տեղադրում: Եթե նկարում Ա դիրքից այն հաջորդաբար տեղաշարժենք Բ, Գ և Դ դիրքերը, դիտորդը կտեսնի, որ սկզբում գույներն աստիճանաբար միախառնվում են: Գ դիրքում հավաքվելով մի կետում՝ դրանք «անհետանում» են՝ առաջացնելով սպիտակ լույս: Այնուհետև նորից ցրվում և առանձնանում են՝ ըստ գույների հակառակ հերթականությամբ:



2. Ճի՞շտ է արդյոք այն պնդումը, որ կարելի է ստանալ կամայական գույնի ճառագայթ, համապատասխան համամասնություններով կարմիր, կապույտ և կանաչ ճառագայթներ խառնելով:

Սպեկտրի կամայական գույնի համապատասխանում է վակուումում տարածվող որոշակի հաճախության մեներանգ լույսի ալիք: Տարբեր հաճախության լույսի ալիքներ խառնելով՝ հնարավոր չէ ստանալ մեներանգ ալիք: Ուստի, խիստ ասած, նշված պնդումը սխալ է:

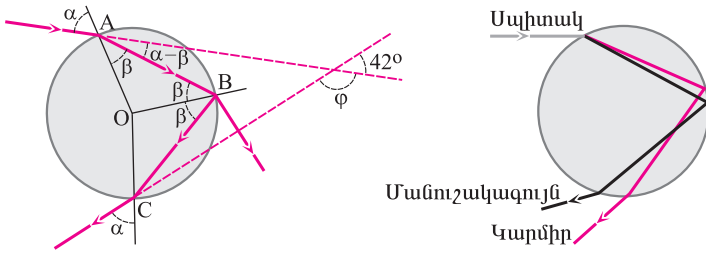
Սակայն գույնի ընկալումը պայմանավորված է տեսողության ֆիզիոլոգիայով: Մարդու աչքը լույսի այնպիսի կատարյալ վերլուծիչ չէ, ինչպես, օրինակ, սպեկտրալիտակը: Ցանցաթաղանթի վրա տեղակայված երեք տեսակի «գունազգայուն» ընկալիչներից յուրաքանչյուրն առավել զգայուն է կարմիր, կապույտ և կանաչ գույներից մեկի նկատմամբ: Ուղեղը գույնի զգացողությունը ձևավորում է լուսազգայուն ընկալիչներից ստացվող նյարդային ազդակների ուժգնությունները համեմատելով: Դա իրոք հնարավորություն է տալիս կամայական գույնի տպավորություն ստեղծել՝ համապատասխան համամասնություններով երեք գույները խառնելով, որն արվում է, օրինակ, գունավոր հեռուստատեսության մեջ: Եթե «հեռուստատեսային» դեղին լույսի ճառագայթն անցկացնենք պրիզմայի միջով, ապա այն կտարրալուծվի կարմիր և կանաչ ճառագայթների, միջոցով սպեկտրի $5,2 \cdot 10^{14}$ Հց հաճախությամբ «մաքուր» դեղին լույսը նույն պայմաններում չի տարրալուծվում: Ուրեմն՝ դրանք տարբեր ճառագայթներ են, բայց այդ տարբերությունը աչքը չի զանազանում:

Այսպիսով՝ ֆիզիկայի տեսանկյունից պնդումը սխալ է: Բայց, տեսողության ֆիզիոլոգիայի տեսանկյունից, այն կարելի է ճիշտ համարել:

3. Ծիածան

Դժվար թե լինի որևէ մարդ, որ երբևէ չի հիացել ծիածանով: Հայտնվելով երկնակամարում՝ այն ինքնաբերաբար գրավում է բոլորի ուշադրությունը: Պատահական չէ, որ տարբեր ժողովուրդների բանահյուսություններում բազմաթիվ լեգենդներ ու ավանդազրույցներ կան բնության այդ զարմանահրաշ երևույթի մասին:

Ծիածանի գիտական բացատրությունն առաջին անգամ տվել է Ռ-ընե Դեկարտը 1637թ.: Նա ծիածանի առաջացումը բացատրել է տեղացող անձրևի կաթիլների մեջ



Արեգակի ճառագայթների բեկման և անդրադարձման օրենքների հիման վրա: Այն ժամանակ դեռևս բացահայտված չէր դիսպերսիայի երևույթը, ուստի Դեկարտի ծիածանն «անգույն» էր:

Երեսույն տարի անց, ուսումնասիրելով դիսպերսիայի երևույթը, Իսահակ Նյուտոնը լրացրել է Դեկարտի տեսությունը՝ բացատրելով, թե ինչպես են բեկվում գունալին ճառագայթները անձրևի կաթիլների մեջ: Ամերիկացի գիտնական Ալիստեր Ֆրեյզերը, որն արդեն մեր ժամանակներում մի շարք հետաքրքիր ուսումնասիրություններ է կատարել ծիածանի վերաբերյալ, այսպես է բնութագրել. «Դեկարտը երկնականաբար միշտ տեղում կախեց ծիածանը, իսկ Նյուտոնը գունավորեց այն սպեկտրի բոլոր գույներով»:

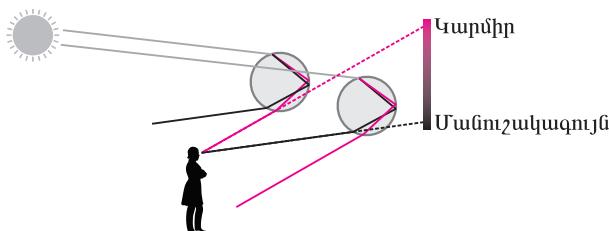
Չնայած դեկարտ-նյուտոնյան տեսությունն ստեղծվել է ավելի քան 300 տարի առաջ, այն ճիշտ է մեկնաբանում ծիածանի հիմնական առանձնահատկությունները՝ գլխավոր աղեղների դիրքերը, դրանց անկյունային չափերը, ծիածանի մեջ գույների հերթականությունը: Ծանոթանանք այդ տեսությանը:

Դիցուք՝ Արեգակի ճառագայթների գուգահեռ փունջն ընկնում է կաթիլի վրա: Քանի որ կաթիլի մակերևույթը կոր է, ապա տարբեր ճառագայթներ անկման տարբեր անկյուններ կունենան: Դրանք փոխվում են $0-90^\circ$ -ով: Հետևենք A կետում α անկյունով ընկնող ճառագայթի ընթացքին: Բեկվելով β անկյունով՝ ճառագայթը մտնում է կաթիլի մեջ և հասնում մինչև B կետը: Այդ կետում լուսային էներգիայի մի մասը, բեկվելով, դուրս է գալիս կաթիլից, իսկ մյուս մասն անդրադառնում կաթիլի մեջ: Նույնը տեղի է ունենում նաև C կետում: Սկզբունքորեն ճառագայթը կարող է բազմիցս անդրադառնալ, բայց բեկվել միայն երկու անգամ՝ կաթիլի մեջ մտնելու և նրանից դուրս գալու ժամանակ:

Դժվար չէ տեսնել, որ C կետից դուրս եկած ճառագայթի՝ սկզբնական ուղղության հետ կազմած անկյունը՝

$$\varphi = \pi + 2(\alpha - 2\beta):$$

Կաթիլի վրա ընկնող ճառագայթների գուգահեռ փունջը նրանից դուրս գալիս ցրվում է: Միայն նվազագույն շեղում ունեցող և նրան շատ մոտ ճառագայթներն ունեն բավականաչափ ուժգնություն, որպեսզի ծիածան առաջացնեն: Քանի որ կարմիր ճառագայթների բեկման ցուցիչն ամենափոքրն է, ապա հենց նրանք էլ կունենան նվազագույն շեղում: Այլ գույների ճառագայթների ուժգնությունն այնքան ավելի մեծ է, որքան նրանք մոտ են նվազագույն շեղում ունեցող կարմիր ճառագայթին, որի ընթացքը նկարում պատկերված է կետագծերով: Այդ ճառագայթը դիտորդի մոտից երևում է $42^\circ 30'$ անկյունով: Իսկ ամենակարճ՝ մանուշակագույն ճառագայթների



կազմած անկյունը $40^{\circ}40'$ է: Մյուս գունավոր ճառագայթները նրանց միջև միջանկյալ դիրք են զբաղեցնում:

Բնչու՞ է ծիածանը կոր: Բանն այն է, որ նկարագրված ճանապարհը կաթիլից դուրս գալիս անցնում է ոչ միայն նվազագույն շեղում ունեցող այն ճառագայթը, որի ընթացքին հետևում էինք, այլ գլանային մակերևույթ կազմող բոլոր այն ճառագայթներ, որոնք այդ նույն անկյունով են ընկնում կաթիլի վրա: Կաթիլով անցնելու և նրա մեջ բեկվելու հետևանքով սպիտակ ճառագայթների գլանը ձևափոխվում է իրար մեջ դրված գունային ձագարների շարքի: Արտաքին աղեղը կարմիր է, նրան հաջորդում է նարնջագույնը, ապա՝ դեղինը, կանաչը, և այս շարքը ավարտվում է մանուշակագույնով:

Այսպիսով՝ ամեն մի կաթիլ առանձին մի ամբողջ ծիածան է ձևավորում, որն իհարկե, շատ բույլ է, և բնության մեջ հնարավոր չէ դրանք առանձին-առանձին տեսնել: Ծիածանը, որը տեսնում ենք երկնակամարում, խճանկարային է. այն ձևավորվում է կաթիլների շարքերով: Ամեն մի կաթիլ ստեղծում է իրար մեջ դրված գունային ձագարների շարք: Բայց ամեն մի առանձին կաթիլից ծիածանի վրա ընկնում է միայն մեկ գունային ճառագայթ: Դիտորդի աչքն այն ընդհանուր կետն է դառնում, որի մեջ հատվում են բազմաթիվ կաթիլներից առաջացած գունային ճառագայթները: Օրինակ՝ բոլոր կարմիր ճառագայթները, որոնք դուրս են եկել տարբեր կաթիլներից, բայց միևնույն անկյունով են ընկնում դիտորդի աչքի մեջ, ձևավորում են ծիածանի կարմիր աղեղը, այսպես՝ նաև նարնջագույն և մյուս գունային ճառագայթները: Այդ է պատճառը, որ ծիածանը կոր է:

Չնայած բվում է, թե ծիածանը մի հարթության մեջ է, բայց դա խաբկանք է: Իրականում այն հսկայական խորություն ունի: Ծիածանը կարելի է պատկերացնել որպես սնամեջ կոն, որի գագաթում դիտորդն է: Կոնի առանցքն Արեգակը դիտորդին միացնող ուղիղն է: Դիտորդը, կարծես, նայում է այդ կոնի մակերևույթով: Արևածագին և մայրամուտին, երբ կոնի առանցքը հորիզոնական է, ծիածանը երևում է կիսաշրջանի տեսքով: Երբ Արեգակը բարձրանում է հորիզոնից, ծիածանի աղեղը փոքրանում է, իսկ 42° -ից մեծ բարձրությունների դեպքում այն անհետանում է: Եթե ծիածանը դիտենք մեծ բարձրությունից, կարելի է տեսնել կիսաշրջանից մեծ աղեղ, իսկ շատ մեծ բարձրությունից, օրինակ՝ ինքնաթիռից կարելի է տեսնել ծիածանի ամբողջ շրջանը (նկարը տես՝ շապիկի 4-րդ էջում):

Մենք պարզաբանեցինք, թե ինչպես է ձևավորվում առաջին՝ առավել շատ հանդիպող ծիածանը՝ վառ արտաքին կարմիր եզրերով և ներքին մանուշակագույնով: Երբեմն գլխավոր ծիածանից բարձր, մոտ 51° -ի անկյունով երևում է ավելի բույլ՝ երկրորդային ծիածան (նկարը տես՝ շապիկի 4-րդ էջում): Երկրորդային ծիածանում գույները դասավորված են հակառակ հերթականությամբ: Երկրորդային ծիածանն առաջանում է կաթիլում կրկնակի անդրադարձումից հետո ցրված ճառագայթներով:

Ծիածաններ կարելի է տեսնել նաև ջրվեժների, շատրվանների շրջակայքում, թափվող կաթիլների ֆոնի վրա: Կարելի է ինքնուրույն ստեղծել կաթիլային միջավայր և մեջքով դեպի Արեգակը կանգնելով՝ տեսնել սեփական ձեռքերով ստեղծած ծիածանը:

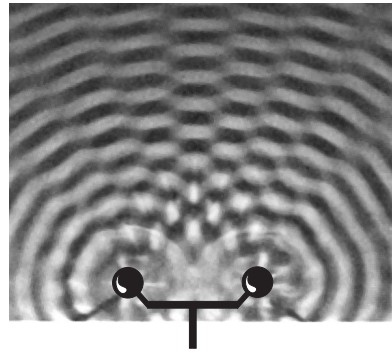
§ 19. ԻՆՏԵՐՖԵՐԵՆՑԻ ԵՐԵՎՈՒՅԹԸ

Ալիքների վերադրումը: Եթե միջավայրում առկա է ալիքների մի քանի աղբյուր, օրինակ՝ սենյակում զրույցում են մարդիկ, կամ նվագում է նվագախումբը, ապա ալիքները տարածվում են միմյանցից անկախ և **վերադրվում են:** Պարզելու համար, թե ի՞նչ է կատարվում ալիքների վերադրման ժամանակ, կատարենք հետևյալ փորձը:

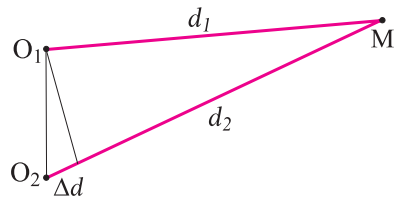
Ջրի մակերևույթին գրգռենք երկու մակերևութային ալիքներ և հետևենք դրանց տարածմանը: Ալիքներից յուրաքանչյուրը տարածվում է մյուսից անկախ, անցնում է մյուսի միջով և շարունակում տարածվել: Եթե ուշադիր նայենք մակերևույթի այն տեղերին, որտեղ ալիքները վերադարձվում են, ապա կնկատենք, որ մակերևույթի որոշ տեղամասեր ալեկոծված են, որոշ տեղամասեր՝ ոչ, որոշ տեղամասերում էլ ալեկոծությունն ուժեղացել է:

Ալեկոծությունն առավել ուժեղանում է մակերևույթի այն տեղամասերում, որտեղ ալիքները հանդիպում են ալեկատարներով: Իսկ եթե մի ալիքի կատարը հանդիպում է մյուս ալիքի փոսին, ապա ջրի մակերևույթի այդ տեղամասերում ալեկոծություն չի դիտվում:

Այս պատկերը շատ արագ մարում է: Կայուն պատկեր ստանալու համար անհրաժեշտ է անընդհատ գրգռել ալիքներ, այսինքն՝ աղբյուրները պետք է անընդհատ ալիքներ առաջացնեն:



Նկ. 51. Ներդաշնակ տատանումներ կատարող ձողին ամրացված գնդիկների գրգռած ալիքները



Նկ. 52. Ալիքների ընթացքի տարբերությունը

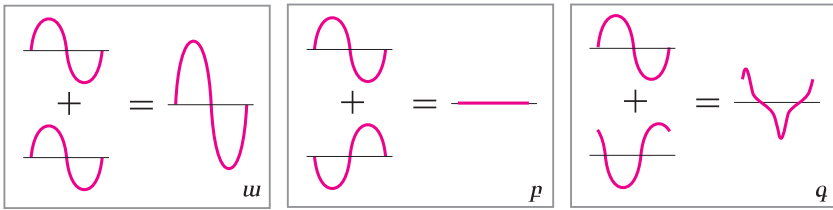
Մեխանիկական ալիքների ինտերֆերենս: Ալիքների վերադրման ժամանակ նրանց ուժեղացման և թուլացման երևույթն ուսումնասիրելու նպատակով 51-րդ նկարում պատկերված սարքում միաժամանակ գրգռենք երկու շրջանային ալիքներ՝ երկու գնդիկի միջոցով, որոնք ամրացված են ներդաշնակ տատանումներ կատարող ձողին: Պարզենք, թե ի՞նչ կլինի, երբ, տարածվելով, այդ ալիքները հանդիպեն որևէ M կետում (նկ. 52): Մինչև M կետ հասնելն ալիքներն անցնում են տարբեր ճանապարհներ՝ d_1 և d_2 , որոնց Δd տարբերությունն անվանում են **ընթացքի տարբերություն**: M կետ հասած ալիքների վերադրման արդյունքը կախված է այն բանից, թե ալիքներն այդ կետում ինչ շեղումներ ունեն: Հնարավոր է երեք դեպք:

Առաջին դեպքում ալիքներն M կետում հանդիպում են՝ ունենալով 53, ա նկարում ներկայացված պատկերները և, վերադարձվելով, ուժեղանում են: Նման դեպք հնարավոր է, եթե Δd երկարությամբ հատվածում տեղավորվում է ամբողջ թվով ալիք: Այսպիսով՝ միջավայրի տվյալ կետում արդյունաբար տատանումների լայնույթը կլինի առավելագույնը, եթե այդ կետում տատանումներ գրգռող երկու ալիքների ընթացքի տարբերությունը հավասար է ամբողջ թվով ալիքի երկարության՝

$$\Delta d = k\lambda, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (2.7)$$

որտեղ λ -ն ալիքի երկարությունն է:

Երկրորդ դեպքում ալիքներն M կետում հանդիպում են՝ ունենալով 53, բ նկարում ներկայացված պատկերները և, վերադարձվելով, միմյանց մարում են: Նման դեպք հնարավոր է, եթե Δd երկարությամբ հատվածում տեղավորվում է կենտ թվով



Նկ. 53. Ալիքների վերադրման երեք դեպք

կիսաալիք: Այսպիսով՝ միջավայրի տվյալ կետում արդյունաբար տատանման լայնույթը կլինի նվազագույնը, եթե այդ կետում տատանումներ առաջացնող երկու ալիքների ընթացքի տարբերությունը՝

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, ! 1, ! 2 \dots: \quad (2.8)$$

Եթե O_1 և O_2 աղբյուրներն առաքում են մույն լայնությով ալիքներ, և կարելի է ալիքների մարումը d_1 և d_2 ճանապարհներին անտեսել, ապա նվազագույն լայնույթը հավասարվում է գրոյի:

Երրորդ դեպքում ալիքներն M կետ են հասնում՝ ունենալով 53,գ նկարում ներկայացված պատկերները: Այդ դեպքում վերադրման հետևանքով արդյունաբար տատանումների լայնույթը հավասարվում է նվազագույնի և առավելագույնի միջև ընկած որևէ միջանկյալ արժեքի:



Նկ. 54. Ջրի մակերևույթին առաջացած ինտերֆերենցային պատկերի լուսանկար

Այսպիսով՝ ալիքները, O_1 և O_2 կետերից տարածվելով և հանդիպելով, տարածության որոշ կետերում ուժեղանում են, որոշակի կետերում՝ մարում, մյուսներում տատանումների լայնույթն ընդունում է միջանկյալ արժեքներ: Ամենակարևորն այն է, որ եթե որևէ կետում առաջանում է ալիքների ուժեղացում, ապա այն ժամանակի ընթացքում չի փոխվում, այսինքն՝ այդ կետում արդյունաբար տատանման լայնույթը մնում է հաստատուն: Նույնը՝ մարման կետերում և ամենուրեք: **Տարածության մեջ ալիքների վերադրումը, որի հետևանքով առաջանում է արդյունաբար տատանումների լայնության**

ժամանակի ընթացքում անփոփոխ բաշխում, կոչվում է ինտերֆերենց: 54-րդ նկարում պատկերված է երկու աղբյուրից տարածվող շրջանային ալիքների՝ ջրի մակերևույթին առաջացրած լայնության որոշակի, ժամանակի ընթացքում անփոփոխ բաշխման **ինտերֆերենցային պատկերի** լուսանկարը: Ալիքների վերադրման մասում սպիտակ տեղամասերը համապատասխանում են տատանումների լայնության առավելագույն, իսկ մութ տեղամասերը՝ նվազագույն արժեքներին:

Կոհերենտ ալիքներ: Ինտերֆերենցային պատկեր ստանալու համար անհրաժեշտ է երկու պայման: Նախ՝ ալիքները պետք է ունենան մույն հաճախությունը: Այդպիսի ալիքներն անվանում են **մեներանգ:** Երկրորդ՝ նրանց տատանումների փուլերի տարբերությունը ժամանակի ընթացքում չպետք է փոխվի: (Վերը նկարագրված փորձում երկու գնդիկների գրգռած տատանումների փուլերի տար-

բերությունը հաստատում էր և հավասար գրոյի:) Այս պայմանները բավարարող ալիքները կոչվում են **կոհերենտ**: Միայն կոհերենտ ալիքների վերադրման ժամանակ է գոյանում **ինտերֆերենցային պատկեր**:

Լույսի ինտերֆերենցը: Մեխանիկական ալիքների մման լույսի ալիքներն էլ կարող են առաջացնել ինտերֆերենցային պատկեր: Դրա համար բավական է, որ վերադրվեն լույսի կոհերենտ ալիքներ, այսինքն՝ մեներանգ ալիքներ, որոնց տատանումների փուլերի տարբերությունն ինտերֆերենցային պատկերը դիտելու համար անհրաժեշտ ժամանակահատվածում մնա անփոփոխ: Գոյություն ունեցող դիտման եղանակները (աչք, ֆոտոթիթեղ և այլն) 10^{-3} վ և ավելի ժամանակ են պահանջում: Իսկ լույսի աղբյուրներում տարբերատոմների լուսարձակման պայմանները քառասյանորեն ու շատ արագ են փոխվում: Այդ պատճառով լույսի երկու անկախ աղբյուրներից ստացված մի ինտերֆերենցային պատկերը շատ կարճ (10^{-8} վ-ից պակաս) ժամանակ հետո փոխարինվում է ուրիշով, որտեղ ինտերֆերենցային մաքսիմումներն ու մինիմումներն այլ դասավորություն ունեն: Այսպիսով՝ պատկերի դիտման և գրանցման համար անհրաժեշտ ժամանակահատվածում ինտերֆերենցային պատկերը հասցնում է փոփոխվել միլիոնավոր անգամ, ուստի իրականում տեսնում ենք այդ պատկերների վերադրումը: Հասկանալի է, որ դա լողոզում է պատկերը՝ ջնջելով ինտերֆերենցային մաքսիմումների ու մինիմումների հետքերը: Ահա թե ինչու, երբ սենյակում երկու լամպ է վառվում, մի լամպի լույսն ամենուրեք ուժեղացնում է մյուսի ստեղծած լուսավորվածությունը, և ինտերֆերենցային պատկեր չի դիտվում:

Լույսի ինտերֆերենցը դիտելու համար օգտագործում են մեկ աղբյուր, որի առաքած լույսի ալիքները բաժանում են իրար նկատմամբ կոհերենտ երկու մասի՝ ճեղքերի կամ երկու մակերևույթներից անդրադարձման միջոցով: Այդ մասերի վերադրման հետևանքով ստացվում է ինտերֆերենցային պատկեր: Որպես օրինակ՝ դիտարկենք անգլիացի գիտնական Թոմաս Յունգի նշանավոր փորձը (նկ. 55):

Նեղ ճեղքի տեսք ունեցող լույսի S աղբյուրից լույսն ընկնում է S₁ և S₂ նեղ ճեղքեր ունեցող E₁ անթափանց էկրանին: Դրանք աղբյուրից էկրանին ընկնող փունջը ճեղքում են երկու կոհերենտ փնջերի, որոնք վերադրվում են E₂ էկրանին՝ առաջացնելով իրար հաջորդող լուսավոր և մութ շերտեր:

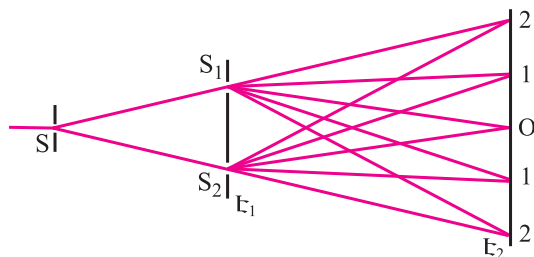
Դիտարկենք ճեղքերից անցած լույսի ալիքների վերադրման պատկերը E₂ էկրանին: Էկրանի



Թոմաս Յունգ

1773-1829

Անգլիացի նշանավոր գիտնական: Յունգի գլխավոր ծառայությունը լույսի ինտերֆերենցի հայտնագործումն է և դիֆրակցիայի երևույթի բացատրությունն ալիքային տեսության հիման վրա: Յունգն առաջինն է չափել լույսի ալիքի երկարությունը:



Նկ. 55. Յունգի նշանավոր փորձի սխեման

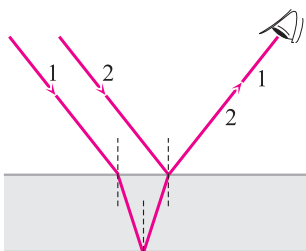
Օ կետում, որը հավասարապես է հեռացված երկու ճեղքից, ալիքների ընթացքի տարբերությունը զրո է, ուրեմն՝ այդ կետում միմյանց հանդիպելիս կգումարվեն ալիքների լայնությունները, այսինքն՝ ալիքներն իրար կուծեղացնեն: Նույն երևույթը կդիտվի նաև (2) կետերում, եթե ալիքների ընթացքի տարբերությունը հավասար է ամբողջ թվով ալիքի երկարության: (1) կետերում, ընդհակառակը, ալիքներն իրար թուլացնում և մարում են, որովհետև դրանց ընթացքի տարբերությունը հավասար է կենտ թվով կիսաալիքի երկարության: Լույսի ուժեղացումն էկրանին կերևա լուսավոր, իսկ թուլացումը՝ մութ շերտերի տեսքով:

Լույսի ինտերֆերենցիայի բարակ թաղանթներում: Լույսի ինտերֆերենցիայի կարելի է դիտել նաև կենցաղում: Ինտերֆերենցիային պատկեր են տեսել նրանք, ովքեր զվարճացել են օճառի պղպջակներ արձակելով: Օճառի պղպջակը գունավորվում է լույսի տարբեր գույներով: Սա լույսի ինտերֆերենցիայի հետևանք է: Ինտերֆերենցիայի երևույթ է դիտվում նաև ջրի մակերևույթին տարածված կերոսինի կամ նավթի բարակ թաղանթի վրա՝ ծիածանագույն երանգավորման տեսքով:

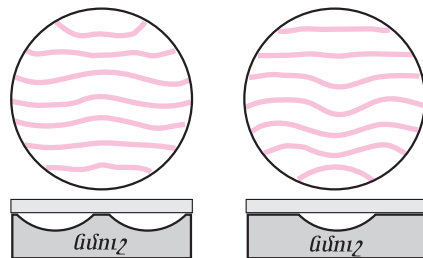
Յունգը բացատրել է այդ երևույթը: Ենթադրենք՝ լույսի աղբյուրից ալիքն ընկնում է բարակ թաղանթի վրա: Ալիքի մի մասն անդրադառնում է թաղանթի արտաքին մակերևույթից, իսկ մյուսը, բեկվելով և անցնելով թաղանթի մեջ, անդրադառնում է նրա ներքին մակերևույթից (նկ.56): Մակերևույթի վրա տեղի է ունենում լույսի ալիքի տարբեր, իրար նկատմամբ կոհերենտ մասերի վերադարձում և ինտերֆերենցիա, որի հետևանքով մակերևույթի տարբեր կետերում դիտվում է լույսի ուժեղացում և թուլացում: Արդյունաբար տատանումների ուժեղացումը կամ թուլացումը կախված է թաղանթի վրա լույսի անկյան անկյունից, թաղանթի հաստությունից և բեկման ցուցիչից, ինչպես նաև լույսի ալիքի երկարությունից:

Յունգը բացատրել է նաև օճառի պղպջակի գունավորման պատճառը: Եթե ենթադրենք, որ անկյան անկյունը չի փոխվում, ապա թվում է, թե ինտերֆերենցիայի երևույթը պետք է տեղի ունենար միայն մի ալիքի երկարության համար, այսինքն՝ որևէ գույնի լույսի համար: Մակայն փոխվում է ինչպես պղպջակի պատի հաստությունը, այնպես էլ նրա տարբեր կետերում ալիքի անկյան անկյունը: Այդ պատճառով էլ թաղանթի տարբեր մասերում տարբեր ալիքի երկարությամբ լույսի ալիքներ են բավարարում ինտերֆերենցիայի ուժեղացման կամ թուլացման պայմաններին, և օճառի պղպջակը գունավորվում է տարբեր գույներով:

Ինտերֆերենցիայի մի կիրառության մասին: Լույսի ինտերֆերենցիայի երևույթի կիրառություններից մեկն արտադրանքի մակերևույթի մշակման որակի գնահատումն է:



Նկ.56. Լույսի փնջի անդրադարձումը բարակ թաղանթից



Նկ.57. Արտադրանքի մակերևույթի մշակման ճշգրտության գնահատումը

տումն է մինչև $0,1\lambda \sim 10^{-8}$ մ ճշգրտությամբ: Դրա համար պետք է արտադրանքի ստուգվող մակերևույթին տեղադրել հարթ չափանմուշային ապակե թիթեղ, լույսը գցել թիթեղի վրա և դիտել ստուգվող մակերևույթից և չափանմուշային թիթեղի ստորին նիստից անդրադարձող լույսի ալիքների ինտերֆերենցը: Եթե մակերևույթի անհարթությունները 10^{-8} մ կարգի են կամ ավելի մեծ, ապա դրանք կառաջացնեն ինտերֆերենցային պատկերի նկատելի կորացումներ (նկ. 57): 10^{-8} մ-ից փոքր անհարթությունները լույսի ինտերֆերենցային պատկերի վրա էական ազդեցություն չեն բողմում, ուստի այդ անհարթությունները հնարավոր չէ չափել:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ է ալիքների ինտերֆերենցը:
2. Ո՞ր ալիքներն են կոչվում կոհերենս:
3. Ինչպե՞ս կարելի է ստանալ կոհերենս լուսային ալիքներ:
4. Ո՞րն է լույսի ինտերֆերենցի երևույթը:
5. Ի՞նչ պայմանի դեպքում կոհերենս ալիքների արդյունաբար տարանման լայնությամբ միջավայրի փվյալ կետում կլինի՝ ա) առավելագույնը, բ) նվազագույնը:
6. Լույսի ինտերֆերենցի ի՞նչ դրսևորումներ եք դիտել կենցաղում:
7. Ի՞նչ կիրառություններ ունի լույսի ինտերֆերենցը:

§20. ԴԻՖՐԱԿՑԻԱՅԻ ԵՐԵՎՈՒՅԹԸ

Ալիքների դիֆրակցիան: Ալիքների դիֆրակցիայի երևույթը դիտվում է այն դեպքերում, երբ ալիքների ճանապարհին հանդիպում են արգելքներ՝ պատմեշ, ձող կամ ճեղք: Ալիքների դիֆրակցիան հեշտ է նկատել ջրի մակերևույթին, երբ ալիքի ճանապարհին տեղադրված է որևէ արգելք, որի չափերն ալիքի երկարության կարգի են՝ $d \sim \lambda$: Արգելքը կարծես ալիքը ճեղքում է երկու մասի, որոնք, ի վերջո, նորից միանում և տարածվում են մի ալիքի տեսքով: Նման երևույթ է դիտվում նաև այն դեպքում, երբ ջրի մակերևույթին՝ հարթ ալիքի ճանապարհին, տեղադրում են ալիքի երկարության կարգի ճեղք (նկ. 58): Ալիքները շրջանցում են ճեղքը սահմանափակող եզրերը և հայտնվում պատմեշի հետևում:



Նկ. 58. Ալիքների դիֆրակցիան ջրի մակերևույթին

Ալիքների շեղվելը տարածման սկզբնական ուղղությունից, և դրա հետևանքով արգելքների շրջանցման երևույթը կոչվում է դիֆրակցիա (լատիներեն «դիֆրակտուս»՝ ջարդված բառից):

Դիֆրակցիայի երևույթը բացատրելու համար նախ ծանոթանանք ալիքային մակերևույթի գաղափարին: **Ալիքային մակերևույթ** են անվանում այն կետերի երկրաչափական տեղը, որոնք ժամանակի տվյալ պահին ունեն տատանումների միևնույն փուլը: Պարզագույն դեպքում ալիքային մակերևույթները միմյանց զուգահեռ հարթություններն են կամ համակենտրոն գնդային մակերևույթների համախումբ են: Դրանց համապատասխան ալիքներն անվանում են հարթ կամ գնդային: Ալիքային մակերևույթներից մեկը, որը միջավայրի զրգոված մասը բաժանում է դե-



Քրիստիան Հյույգենս

1629 - 1695

Հոլանդացի մշամավոր ֆիզիկոս և մաթեմատիկոս, լույսի ալիքային տեսության հեղինակը: Հյույգենսն առաջինն է օգտագործել ճոճանակը՝ ժամացույցի կանոնավոր ընթացքն ապահովելու համար և արտածել է մաթեմատիկական ու ֆիզիկական ճոճանակների տարանջատված պարբերության բանաձևը:

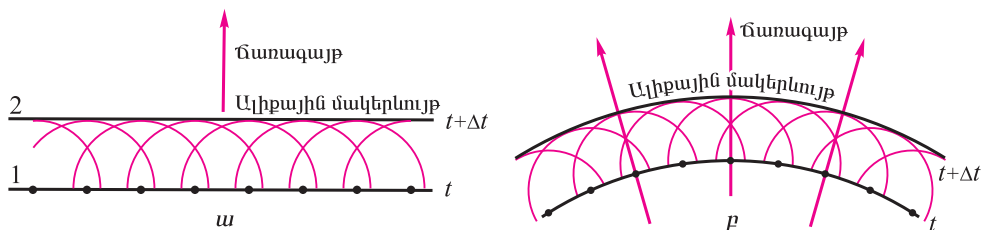
ռևա չգրգռված մասից, անվանում են **ալիքի ճակատ**: Ալիքի ճակատը տեղափոխվում է ալիքի տարածման արագությամբ: Ալիքի բոլոր ճակատներին տարված ուղղահայաց ուղիղը **ճառագայթ** է: Ճառագայթի ուղղությամբ էլ, ինչպես գիտեք, տեղի է ունենում էներգիայի տեղափոխությունը:

1690 թ. հոլանդացի ֆիզիկոս Քրիստիան Հյույգենսը ձևակերպել է մի սկզբունք, որը հնարավորություն է տալիս ժամանակի կամայական պահի որոշելու ալիքային մակերևույթի դիրքը և և գտնելու ճառագայթների ընթացքը տարբեր միջավայրերում:

Համաձայն Հյույգենսի սկզբունքի՝ **միջավայրի կամայական կետ, որին տվյալ պահին հասել է ալիքային մակերևույթը, ինքն է դառնում աղբյուր երկրորդային ալիքների, որոնց պարուրիչը (բոլոր երկրորդային ալիքները շոշափող մակերևույթը) որոշում է ալիքային մակերևույթի (ճակատի) դիրքը ժամանակի հաջորդ պահերին**:

Գիտենալով ալիքային մակերևույթի դիրքը ժամանակի t պահին՝ Հյույգենսի սկզբունքի օգնությամբ կարելի է երկրաչափական կառուցման միջոցով գտնել ալիքային մակերևույթի դիրքը $t + \Delta t$ պահին, եթե հայտնի է ալիքի տարածման արագությունը: t պահից սկսած մակերևույթի կամայական կետ դառնում է երկրորդային ալիքի աղբյուր (նկ. 59, ա): Ժամանակի $t + \Delta t$ պահի համար կառուցելով երկրորդային ալիքների պարուրիչը՝ կստանանք ալիքային մակերևույթն այդ պահին, որին տարված ուղղահայացն էլ կլինի նկարում պատկերված ճառագայթը: Այսպիսով՝ ալիքը տարածվում է ճառագայթի ուղղությամբ: 59, բ նկարում պատկերված են գնդային ալիքի մակերևույթներն ու ճառագայթները t և $t + \Delta t$ պահերին:

Լույսի դիֆրակցիան: Մութ սենյակում լույսի կետային աղբյուրի դիմաց տեղադրենք ճեղք ունեցող անթափանց արգելք, որի ճեղքի չափերը կարելի է փոփոխել: Արգելքի հետևում տեղադրենք էկրան: Եթե ճեղքի լայնությունը 1-2 մմ է, ապա էկրանին նկատվում է հստակ եզրերով լուսավոր շերտ (նկ. 60, ա): Փոքրացնելով ճեղքի լայնությունը՝ կնկատենք, որ լուսավոր պատկերը փոքրանում է, բայց միաժամանակ պատկերի եզրերն սկսում են աղոտանալ (նկ. 60, բ): Դեղքի լայնու-



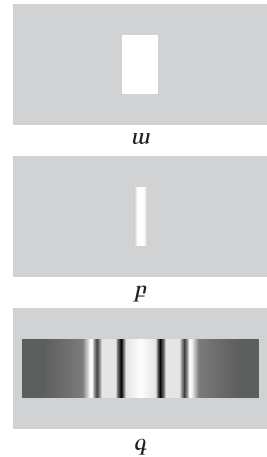
Նկ. 59. Հարթ և գնդային ալիքների մակերևույթներն ու ճառագայթները t և $t + \Delta t$ պահերին

թյան հետագա փոքրացմանը զուգընթաց լուսավոր շերտի աջ և ձախ կողմերում ի հայտ են գալիս թույլ լուսավորված ծիածանագույն շերտեր, որոնք ցույց են տալիս, որ լույսը շրջանցում է ճեղքի անթափանց եզրերը և լուսավորում է էկրանի ստվերի տիրույթը, այսինքն՝ տեղի է ունենում լույսի դիֆրակցիա (նկ. 60, գ):

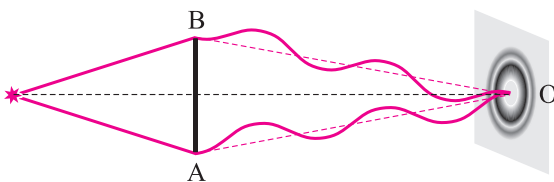
Լույսի դիֆրակցիայի երևույթը բացատրելու համար կատարենք մեկ այլ փորձ: Լույսի կետային աղբյուրի առջև տեղադրենք փոքր, անթափանց սկավառակ, իսկ սկավառակի հետևում՝ էկրան (նկ. 61): Էկրանի վրա, ուղիղ սկավառակի դիմաց ստվերի տիրույթում կնկատենք **դիֆրակտային պատկեր**, այն է՝ լուսավոր բիծ, իսկ նրա շուրջը՝ մութ և լուսավոր շրջաններ:

Բացատրենք այս երևույթը: Երբ լույսը հասնում է սկավառակի եզրերին, ապա, ըստ Հյույգենսի սկզբունքի, այդ կետերը դառնում են նոր՝ երկրորդային ալիքների աղբյուրներ, որոնցից լույսը տարածվում է՝ հասնելով էկրանին: Այդպիսի երկու աղբյուր են 61-րդ նկարում պատկերված A և B կետերը: Ի դեպ, այդ աղբյուրները կոհերենտ են, քանի որ ծագում են նույն կետային աղբյուրից: A և B աղբյուրների ալիքները կհասնեն էկրանին և կվերադարձվեն, այսինքն՝ տեղի կունենա ալիքների ինտերֆերենց: Քանի որ $AO = BO$, ապա այդ երկու ալիքների ընթացքի տարբերությունը զրո է, ուստի՝ O կետում կդիտվի լույսի ուժեղացում: A և B աղբյուրների արձակած ալիքները (1) շերտում մարում են միմյանց, քանի որ դրանց ընթացքի տարբերությունը հավասար է կես ալիքի: (2) շերտում A և B աղբյուրների ալիքներն ուժեղացնում են միմյանց. այս դեպքում դրանց ընթացքի տարբերությունը հավասար է մեկ ամբողջ ալիքի երկարության: Նույն կերպ առաջանում են հաջորդ մութ և լուսավոր շերտերը:

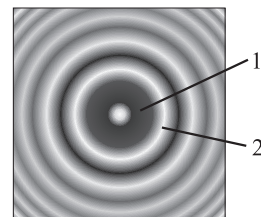
Դիֆրակտային ցանց: Դեղքով փորձում դիֆրակտային պատկերն այնքան էլ հստակ չէ, քանի որ մեկ ճեղքով քիչ լույս է անցնում, և, բացի այդ, ինտերֆերենցային շերտերը բավականաչափ լայն են, հետևաբար՝ թույլ լուսավորված: Հստակ դիֆրակտային պատկերներ ստանալու համար օգտագործում են **դիֆրակտային ցանց**, որը լավ հղկված ապակի է, և որի վրա իրարից նույն հեռավորությամբ տարված են բարակ նրբագծեր (խազեր): Նրբագծերի թիվը 1 մմ-ում կարող է լինել 100, 300, 1000 և այլն (նկ. 62): Լույսն անցնում է նրբագծերի արանքներով և չի անցնում նրբագծերով:

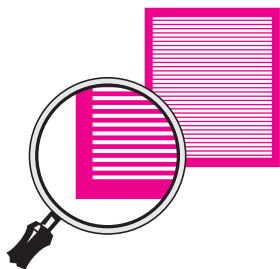


Նկ. 60. Լույսի դիֆրակցիան մեկ ճեղքից

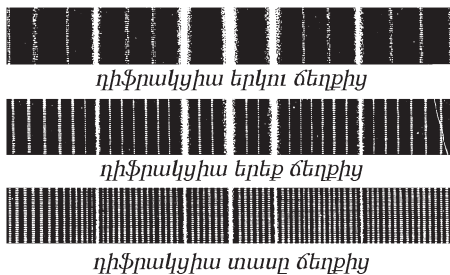


Նկ. 61. Սկավառակից ստացվող դիֆրակտային պատկերը





Նկ. 62. Ապակե դիֆրակտային ցանց

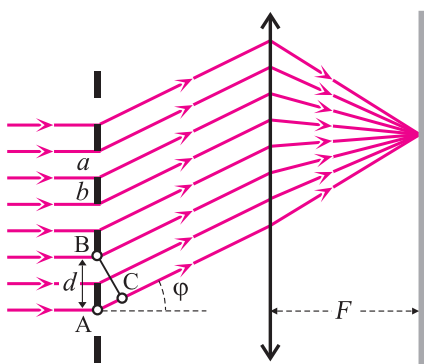


Նկ. 63. Դիֆրակտային պատկերներ տարբեր քվերով ճեղքերից

Եթե դիֆրակտային ցանցը լուսավորենք մեներանգ լույսով, ապա էկրանին կնկատենք հստակ դիֆրակտային պատկեր՝ կենտրոնական շերտ և նրա շուրջը հավասարահեռ նեղ շերտեր (նկ. 63):

Թափանցիկ ճեղքերի լայնությունը նշանակենք a -ով, իսկ անթափանց նրբագծերի լայնությունը՝ b -ով: $d = a + b$ մեծությունն անվանում են **ցանցի պարբերություն** կամ **հաստատուն**: Ենթադրենք՝ ցանցի վրա ընկնում է λ ալիքի երկարությամբ հարթ մեներանգ ալիք: Դեղքերի բոլոր կետերը, որպես երկրորդային ալիքների աղբյուրներ, բոլոր ուղղություններով առաքում են ալիքներ:

Դիտարկենք այդ ալիքների տարածումն անկման ուղղության նկատմամբ



Նկ. 64. Ալիքների տարածումն անկման ուղղության նկատմամբ φ անկյունով

φ անկյունով և որոշենք այն պայմանը, որի դեպքում ալիքներն ուժեղացնում են միմյանց (նկ. 64): Հարևան ճեղքերի եզրերից եկող ալիքների ընթացքի տարբերությունը հավասար է AC հատվածի երկարությանը: Եթե այդ հատվածի վրա տեղավորվում է ամբողջ թվով ալիքի երկարություն, ապա բոլոր ճեղքերից եկող ալիքները, վերադարձվելով, կուժեղացնեն իրար: ABC եռանկյունից՝ $AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$: Մաքսիմումները կդիտվեն

$$d \sin \varphi = k \lambda \quad (2.9)$$

պայմանից որոշվող φ անկյունների դեպքում, որտեղ $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$: (2.9) առնչությունը կոչվում է **դիֆրակտային մաքսիմումների պայման**:

Տարբեր ճեղքերից տվյալ ուղղությամբ անցած ալիքների վերադարձան նպատակով ցանցի հետևում դրվում է դրա չափերից շատ մեծ չափերով հավաքող ոսպնյակ, որի կիզակետային հարթության մեջ տեղադրված է էկրանը: Ոսպնյակը գուգահեռ ընկնող ճառագայթները կիզակետում է էկրանի մի կետում, որտեղ էլ ալիքների վերադարձում են և փոխադարձ ուժեղացնում իրար: Մաքսիմումների դիրքն էկրանին ստացվում է դիֆրակցիայի պայմանը բավարարող, այսինքն՝ k -ի տարբեր արժեքներին համապատասխանող անկյունների դեպքում: Ի՞նչ կտեսնենք էկրանին:

Եթե $k = 0$, ապա $\varphi = 0$, այսինքն՝ փնջի անկման ուղղությամբ տարածվող ալիքները «համափուլ» կհասնեն էկրանին, և կդիտվի զրոյական մաքսիմում:

$k = \pm 1$ արժեքներին համապատասխանում են գրոյական մաքսիմումից որոշակի φ_1 անկյունով և տարբեր կողմեր շեղված առաջին կարգի մաքսիմումները, ընդ որում φ_1 անկյունը որոշվում է (2.9) պայմանից:

Դիֆրակտային մաքսիմումներն իրարից բաժանված են լուսավորվածության մինիմումներով (մութ շերտերով): Որքան մեծ է ճեղքերի թիվը, այնքան ավելի չափազանց են երևում մաքսիմումները և այնքան ավելի լայն մինիմումներով են դրանք բաժանված իրարից: Եթե հայտնի է դիֆրակտային ցանցի d հաստատունը, ապա փորձում չափելով φ_1 անկյունը, $d \sin \varphi_1 = \lambda$ պայմանից կարելի է որոշել ալիքի երկարությունը: Այս եղանակով է Յունգը չափել լույսի ալիքի երկարությունը: Կարելի է նաև որոշել ցանցի հաստատունը, եթե հայտնի է ալիքի երկարությունը:

Վերոհիշյալ բոլոր դատողությունները վերաբերում էին մեներանգ լույսին: Եթե ցանցի վրա ընկնում է սպիտակ լույս, ապա պատկերն էապես փոխվում է հետևյալ պատճառով: $\varphi = 0$ ուղղությամբ դիտվում է բոլոր երկարություններով ալիքների մաքսիմումը, ուստի՝ ոսպնյակի կիզակետային հարթության մեջտեղում ստացվում է սպիտակ շերտ: Այնուհետև դրա երկու կողմերում դիտվում են մինիմումներ: $k = 1$ դեպքում (2.9) պայմանը բավարարում են մի շարք անկյուններ, որոնց տակ երևում են տարբեր գույների ալիքների մաքսիմումները: Դրանք անընդհատ անցնելով մեկը մյուսին՝ ստեղծում են **առաջին կարգի սպեկտր** ($k = \pm 1$), ընդ որում՝ փոքր անկյուններին համապատասխանում են այն գույները, որոնց ալիքի երկարությունը փոքր է, այսինքն՝ ծիածանի գույները՝ հակառակ հերթականությամբ (մանուշակագույն, կապույտ, երկնագույն և այլն): Անցնելով առաջին կարգի բոլոր մաքսիմումները՝ φ անկյան հետագա մեծացմանը գույնաբանական փոփոխություններ են առաջանում մի շարք մինիմումների, և ապա՝ երկրորդ կարգի մաքսիմումների ($k = \pm 2$)՝ գույների նույնափափակ դասավորությամբ: Այսպիսով՝ ստացվում է **դիֆրակտային սպեկտր**, որը բնութագրում է ընկնող լույսի բաղադրությունը:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ է դիֆրակցիան: 2. Բերեք մեխանիկական ալիքների դիֆրակցիայի օրինակներ:
3. Ձևակերպեք Հյույգենսի սկզբունքը: 4. Ի՞նչ է ալիքի ձակարը: 5. Ի՞նչ է ալիքային մակերևույթը: 6. Ինչպե՞ս է առաջանում լույսի ալիքների դիֆրակցիան: 7. Ինչու՞ ռադիոալիքները կարող են շրջանցել շինությունները, իսկ լույսի ալիքները, լինելով նույնպես էլեկտրամագնիսական, չեն կարող:
8. Ի՞նչ է դիֆրակտային ցանցը: 9. Ո՞րն է դիֆրակցիայի պայմանը:

§21. ԼԱԲՈՐԱՏՈՐ ԱՇԽԱՏԱՆԵ 3.

Լույսի ալիքի երկարության որոշումը

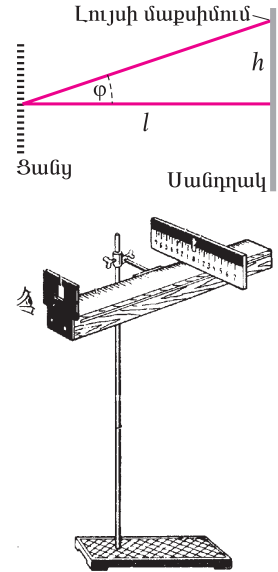
Աշխատանքի նպատակը. որոշել լույսի ալիքի երկարությունը դիֆրակտային ցանցի օգնությամբ:

Չափամիջոցներ. սարք՝ լույսի ալիքի երկարությունը որոշելու համար:

Նյութեր և սարքեր. դիֆրակտային ցանց (100 նրբագիծ 1 մմ-ում), բարձրա-վող սեղանիկի պատվանդան կամ ամրակալան, FOC-115 պրոյեկցիոն ապարատ կամ ստվերային պրոյեկցիոն լուսատար և լուսագոյիչներ:

Փորձի կատարման ընթացքը

1. Յույատրական սեղանի վրա տեղադրեք FOC-115 ապարատը՝ կոնդենստրով դեպի դասարանը: Կոնդենստրին կից տեղադրեք դիաֆոգիտիվների շրջանակը: Նրա մեջ տեղադրեք 5 մմ լայնությամբ, 50÷60 մմ երկարությամբ ճեղքով և մոմաթղթով կամ ծխախոտի թղթով փակված ստվարաթղթի շրջանակը:
2. FOC-115 ապարատից 4÷6 մ հեռավորությամբ տեղադրեք ալիքի երկարությունը որոշող սարքը: Սարքի մեջ տեղադրեք դիֆրակտային ցանցը և այն ուղղեք դեպի լույսի ճեղքն այնպես, որ ցանցի միջով դիտելիս այն համընկնի սանդղակի Օ բաժանման (ճեղքի) հետ:
3. Դիտեք առաջին կարգի դիֆրակտային սպեկտրը ($k = 1$), սանդղակով որոշեք սպեկտրում որևէ գույնի ճառագայթների տեղը, ինչպես Օ-ից աջ, այնպես էլ ձախ կողմում և չափումների արդյունքները (h) գրանցեք աղյուսակում:
4. Չափեք ցանցից մինչև սանդղակ / հեռավորությունը (մմ) և գրանցեք աղյուսակում:
5. Որոշեք φ անկյան տանգենսը՝ $\operatorname{tg} \varphi = h/l$: Քանի որ φ անկյունն այս չափումների ժամանակ չի գերազանցում 4° -ը, ապա $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$:
6. Օգտվելով (2.9) բանաձևից՝ 1 մմ-ում 100 նրբագիծ ունեցող դիֆրակտային ցանցի ($d = 10^{-5}$ մ) համար որոշեք կարմիր և մանուշակագույն ճառագայթների ալիքի երկարությունները և արդյունքները գրանցեք աղյուսակում:
7. Դիտելով երկրորդ կարգի սպեկտրը ($k = 2$)՝ կատարեք համանման չափումներ ու հաշվումներ, արդյունքները գրանցեք աղյուսակում:
8. Մեծաքերեք կամ փոքրաքերեք ցանցից մինչև սանդղակ հեռավորությունը, կատարեք համանման չափումներ ու հաշվումներ և արդյունքները գրանցեք աղյուսակում:



Փորձի համարը	k	h	l	λ

9. Որոշեք կարմիր և մանուշակագույն ճառագայթների ալիքի երկարության միջին արժեքը և ստացված արդյունքները համեմատեք աղյուսակային արժեքների հետ:

§ 22. ՄՊԵԿՏՐԱԴԻՏԱԿ: ԿԼԱՆՄԱՆ ԵՎ ԱՐՁԱԿՄԱՆ ՄՊԵԿՏՐՆԵՐ: ՄՊԵԿՏՐԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅՈՒՆ

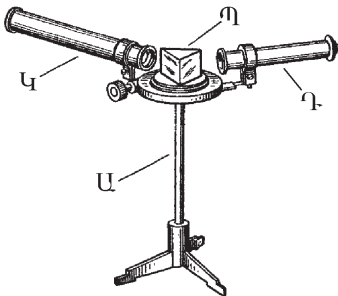
Սպեկտրադիտակ: Լույսի ալիքների դիսպերսիայի և դիֆրակցիայի երևույթներն ուսումնասիրելիս մեներանգ ալիքների՝ ըստ հաճախության կարգավորված համախումբը, որն առաջանում էր լույսի տարրալուծման հետևանքով, անվանեցինք լույսի **սպեկտր**: Սպեկտրների ուսումնասիրումը որոշիչ դեր է խաղացել տիեզերքի ճանաչման գործում, հնարավորություն է տվել հասկանալու ոչ միայն աստղների ու մոլեկուլների կառուցվածքը, այլ նաև զանազան աստղաֆիզիկական օբյեկտների՝ Արեգակի, Լուսնի, մոլորակների ու աստղերի կառուցվածքը, մանրակրկիտ տեղեկություններ ստանալու այդ օբյեկտների շարժումների վերաբերյալ:

Տարբեր աղբյուրների արձակած լույսի սպեկտրները դիտողական եղանակով ուսումնասիրելու սարքը կոչվում է **սպեկտրադիտակ**: Եթե սպեկտրը գրանցվում է ֆոտոթիթեղի վրա, ապա սարքը կոչվում է **սպեկտրագրիչ**: Աղբյուրի լույսի տարրալուծումը սպեկտրի իրականացվում է դիֆրակտային ցանցի կամ պրիզմայի միջոցով:

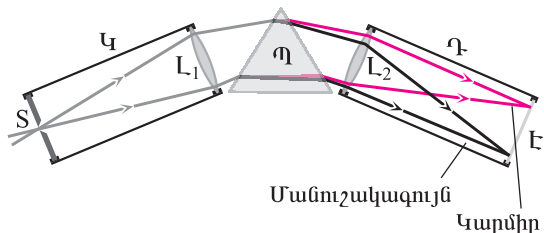
Պարզագույն սպեկտրադիտակը (նկ. 65) կազմված է Ա տակդիրին ամրացված Կ կոլիմատորային խողովակից, Պ ապակե պրիզմայից (կամ դիֆրակտային ցանցից) և Դ դիտափողից:

66-րդ նկարում Կ խողովակի մուտքի մոտ կա կառավարվող ճեղք (Տ), որից հետո տեղադրված է հավաքող L_1 ոսպնյակն այնպես, որ դրա կիզակետը համընկնում է ճեղքի դիրքի, իսկ գլխավոր օպտիկական առանցքը՝ խողովակի առանցքի հետ: Լույսի աղբյուրի՝ ճեղքից ընկնող տարամխավոր ճառագայթները՝ անցնելով ոսպնյակի միջով, տարածվում են խողովակի երկանյքով՝ ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ:

Լույսի ճառագայթների զուգահեռ փունջը, անցնելով ապակե Պ պրիզմայի միջով, դիսպերսիայի հետևանքով բաժանվում է մեներանգ ճառագայթների զուգահեռ փնջերի (նկ. 66): Քանի որ տարբեր հաճախությամբ ճառագայթները զուգահեռ են դիտափողի L_2 ոսպնյակի տարբեր երկրորդային առանցքներին, ապա դրանք առաջացնում են ճեղքի պատկեր այդ ոսպնյակի կիզակետային հարթության տարբեր տեղերում: Արդյունքում դիտափողի ոսպնյակի F կիզակետային հարթության մեջ ստացվում է ճեղքի պատկերների (սպեկտրի



Նկ. 65. Պարզագույն սպեկտրադիտակ



Նկ. 66. Սպեկտրադիտակի կառուցվածքը. S. կոլիմատորի ճեղք, Կ. կոլիմատորային խողովակ, L_1 և L_2 . հավաքող ոսպնյակներ, Պ. պրիզմա, Դ. դիտափող, F. կարճապակի

գույնգգույն գծերի) համախումբ, որոնցից յուրաքանչյուրը համապատասխանում է որոշակի հաճախության ակիբի: Ուրեմն՝ սպեկտրի տվյալ գծի հաճախությունը որոշվում է սպեկտրում իր տեղով, որը որոշվում է մեծ ճշգրտությամբ, այլ ոչ թե սուբյեկտիվ ընկալումով՝ գույնով:

Ստացված սպեկտրն է կաթնապակու վրա կարելի է դիտել օկուլյարի միջով կամ գրանցել ֆոտոթիթեղի վրա: Եթե կոլիմատորի Տ ճեղքից (նկ.66) ընկնող լույսը մի քանի մեներանգ փնջերի խառնուրդ է, ապա նրա սպեկտրը կազմված է ճեղքի առանձին պատկերներից, այսինքն՝ մութ շերտերով միմյանցից բաժանված համապատասխան հաճախության առանձին գծերից (տե՛ս շապիկի 4-րդ էջի (2), (3) և (4) սպեկտրները): Եթե ճեղքից սպիտակ լույս է ընկնում, ապա սպեկտրային գծերը միախառնվում են իրար՝ առաջացնելով գույնգգույն շերտ (տե՛ս շապիկի 4-րդ էջի (1) սպեկտրը):

Փորձը ցույց է տալիս, որ լույսի զանազան աղբյուրներից ստացվող սպեկտրները տարբեր են: Դրանք բաժանվում են երկու հիմնական դասի՝ **արձակման սպեկտրներ և կլանման սպեկտրներ**: Յուրաքանչյուր դաս իր հերթին բաժանվում է երեք տեսակի՝ անընդհատ, գծային և շերտավոր:

Անընդհատ կոչվում են այն սպեկտրները, որոնց մեջ մեներանգ ճառագայթներն անընդհատ հաջորդում են միմյանց: Այդպիսի սպեկտրը կարելի է պատկերել որպես ճեղքի բազմաթիվ մեներանգ, թեթևակիորեն տեղաշարժված պատկերների վերադրման հետևանք: Դրանց մեջ առկա են բոլոր հաճախությունների գծերը, և մի հաճախությունից մյուսին անցումը կատարվում է անընդհատ: Անընդհատ սպեկտրի օրինակ է սպիտակ լույսի սպեկտրը (տե՛ս շապիկի 4-րդ էջի (1) սպեկտրը): Փորձը ցույց է տալիս, որ այդպիսի սպեկտր արձակում են պինդ մարմինները, հեղուկները և խիտ գազերը: Անընդհատ սպեկտր ստանալու համար մարմինը պետք է տաքացնել: Անընդհատ սպեկտրի բնույթը և դրա գոյության փաստը որոշվում են ոչ միայն ճառագայթող ատոմների հատկություններով, այլ մեծապես կախված են նաև միջատոմային փոխազդեցություններից: Անընդհատ սպեկտր արձակում է նաև բարձր ջերմաստիճանային պլազման՝ հիմնականում էլեկտրոնների և իոնների բախումների հետևանքով:

Գծային սպեկտրներ: Եթե զազայրիչի գունատ բույսի մեջ ավելացնենք կերակրի աղի լուծույթով թրջված ասբեստի կտոր և կրակը մոտեցնենք սպեկտրադիտակի ճեղքին, ապա հագիվ նկատելի անընդհատ սպեկտրի ֆոնի վրա կհայտնվի պայծառ դեղին գիծ (շապիկի 4-րդ էջի (2) սպեկտրը): Այդ հաճախության լույս արձակում են նատրիումի գոլորշիները, որոնք առաջանում են կրակի բույսում՝ աղի մոլեկուլների տրոհման հետևանքով: Նկարում պատկերված են նաև ջրածնի և հելիումի սպեկտրները (շապիկի 4-րդ էջի (3) և (4) սպեկտրները): Դրանցից յուրաքանչյուրը տարբեր պայծառության գունավոր գծերի համախումբ է, որոնք բաժանված են մութ շերտերով: Այդպիսի սպեկտրները կոչվում են **գծային**: Գծային սպեկտրը վկայում է այն մասին, որ տվյալ նյութն առաքում է միայն որոշակի հաճախությունների շատ նեղ տիրույթի ակիբներներ:

Գծային սպեկտրներ առաջացնում են ատոմական (բայց ոչ մոլեկուլային) կառույցվածք ունեցող նյութերը՝ գազային վիճակում, երբ ճառագայթում

են գործնականորեն միմյանց հետ չփոխազդող ատոմները: Առանձնացված ատոմներն արձակում են խիստ որոշակի հաճախության ալիքներ, այսինքն՝ առաջացնում են վառ արտահայտված գծային սպեկտրներ: Սա սպեկտրների հիմնական ու ամենահիմնարար տեսակն է, որովհետև յուրաքանչյուր տարրի ատոմ արձակում է միայն իրեն բնորոշ հաճախություններով էլեկտրամագնիսական ալիքներ:

Սովորաբար գծային սպեկտրներ դիտելու համար օգտագործում են կրակի բոցում նյութի գոլորշիների լուսարձակումը կամ գազային պարպման լուսարձակումը, երբ խողովակը լցված է ուսումնասիրվող գազով:

Գազի խտության մեծացմանը զուգընթաց սպեկտրի գծերը լայնանում են, իսկ մեծ ճնշումների դեպքում, երբ ատոմների փոխազդեցությունը զգալի է դառնում, այդ գծերը ծածկում են միմյանց՝ առաջացնելով անընդհատ սպեկտր:

Շերտավոր սպեկտրները կազմված են առանձին շերտերից, որոնք բաժանված են մութ տիրույթներով: Այդ շերտերն իրենց հերթին կազմված են մեծ թվով կիպ դասավորված գծերից: Ի տարբերություն գծային սպեկտրների՝ շերտավոր սպեկտրներ առաջացնում են ոչ թե ատոմները, այլ առանձնացված կամ միմյանց հետ թույլ փոխազդող մոլեկուլները:

Կլանման սպեկտրներ: Երբ սպիտակ լույսն անցնում է թափանցիկ նյութի միջով, նրա սպեկտրում գույների մի մասն անհետանում է, և անընդհատ սպեկտրի ֆոնին հայտնվում են մութ գծեր կամ շերտեր (տե՛ս շապիկի 4-րդ էջի (5)-(8) սպեկտրները): Նշանակում է՝ համապատասխան հաճախության ճառագայթները կլանել է այդ նյութը, ուստի այդպիսի սպեկտրը կոչվում է **կլանման սպեկտր**: Նոսր գազերի կլանման սպեկտրների ուսումնասիրությունն առավել ուշագրավ է, որովհետև դրանք գծային են և բնութագրական տվյալ նյութի ատոմի համար: Իսկ այն հարցը, թե գազի միջով անցնող սպիտակ լույսի հատկապես ո՞ր ճառագայթներն են կլանվում, առաջին անգամ մանրակրկիտ ուսումնասիրել է գերմանացի նշանավոր ֆիզիկոս Գուստավ Կիրխոֆը: Փորձերի արդյունքում նա հայտնաբերել է, որ կլանման գծերը ճշգրտորեն համընկնում են արձակման գծերի հետ (տե՛ս շապիկի 4-րդ էջի (2), (3), (4) արձակման և համապատասխան (6), (7), (8) կլանման սպեկտրները): Ստացված կապն արտահայտում է **Կիրխոֆի օրենքը. կամայական նյութ հիմնականում կլանում է այն ճառագայթները, որոնք ինքը կարող է արձակել**, այսինքն՝ ավելի քիչ տաքացած տարրի ատոմներն անընդհատ սպեկտրից կլանում են հենց այն հաճախությունները, որոնք նրանք այլ պայմաններում արձակում են: Հետևաբար՝ կլանման սպեկտրի միջոցով նույնպես կարելի է գաղափար կազմել կլանող նյութի բաղադրության մասին:

Սպեկտրային վերլուծություն: Քանի որ յուրաքանչյուր քիմիական տարրի ատոմի արձակման (կլանման) սպեկտրում կան գծեր, որոնք բնորոշ են միայն տվյալ ատոմին, ապա անհայտ նյութի գոլորշիների գծային սպեկտրով կարելի է որոշել, թե ինչ քիմիական տարրեր կան դրա բաղադրության մեջ: Նյութի քիմիական բաղադրության որոշման այս եղանակը կոչվում է **որակական սպեկտրային վերլուծություն**: Այն քիմիական վերլուծության

նկատմամբ ունի էական առավելություններ. զգայուն է և հնարավորություն է տալիս տվյալ միացության մեջ հայտնաբերելու քիմիական տարրի չնչին՝ մինչև 10^{-8} գ քանակությունը, կատարվում է ժամանակի, նյութերի ու միջոցների նվազագույն ծախսով:

Ներկայումս մշակված են նաև **քանակական սպեկտրային վերլուծության** մեթոդներ, որոնք հնարավորություն են տալիս քիմիական տարրի սպեկտրի գծի պայծառությամբ (ուժգնությամբ) որոշել դրա տոկոսային բաղադրությունը նմուշում:

Նյութի որակական և քանակական բաղադրության որոշման մեթոդը նրա սպեկտրի միջոցով կոչվում է **սպեկտրային վերլուծություն**:

Սպեկտրային վերլուծություն կատարելու համար նախապես պետք է իմանալ սպեկտրում յուրաքանչյուր քիմիական տարրի գծերի դասավորությունը կամ դրանց համապատասխան ալիքների հաճախությունները: Դրանց համար կազմվում են հատուկ աղյուսակներ կամ սպեկտրային գծերի ատլասներ: Այդ ատլասներում ուսումնասիրվող նյութի սպեկտրային գծերի բացակայությունը դարձել է նոր տարրերի հայտնաբերման պատճառ: Այդպես են հայտնաբերվել, օրինակ, ռուբինիումը, ցեզիումը, ինդիումը, թալիումը և այլ տարրեր:

Սպեկտրային վերլուծությունը լայն կիրառություն ունի տարբեր բնագավառներում: Օգտակար հանածոներ որոնելիս հիմնականում սպեկտրային վերլուծության միջոցով են որոշում հանքանյութի քիմիական բաղադրությունը: Արդյունաբերության մեջ սպեկտրային վերլուծությունը հնարավորություն է տալիս վերահսկելու համաձուլվածքների և խառնուրդների քանակը մետաղներում՝ անհրաժեշտ հատկություններով նյութեր ստանալու համար: Սպեկտրային վերլուծության մեթոդով է որոշվում Երկրից միլիարդավոր լուսատարի հեռավորությամբ երկնային մարմինների քիմիական բաղադրությունը: Մոլորակների ու աստղերի մթնոլորտի, միջաստղային տարածության սառը գազի կլանման սպեկտրի վերլուծությամբ է որոշվում դրանց քիմիական բաղադրությունը: Սպեկտրային գծերի շեղումով կարելի է որոշել երկնային մարմնի շարժման արագությունը:

Ներկայումս դիֆրակտային ցանցերով սպեկտրադիտակները զանազանում են սպեկտրային գծեր, որոնց ալիքի երկարությունների տարբերությունը չի գերազանցում 10^{-12} մ-ը. պրիզմային սպեկտրադիտակներն այդպիսի ճշգրտություն ապահովել չեն կարողանում: Դիֆրակտային ցանցերով սպեկտրադիտակներն ունեն նաև մի առավելություն. դրանք աշխատում են սպեկտրի ոչ միայն տեսանելի, այլ նաև ենթակարմիր և անդրամանուշակագույն տիրույթներում:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞րն է սպեկտրադիտակի և սպեկտրագրիչի փոքրերությունը, ի՞նչ երևույթների վրա է հիմնված դրանց գործողության սկզբունքը:
2. Ի՞նչ հիմնական դասերի են բաժանվում սպեկտրները:
3. Ո՞ր սպեկտրն է կոչվում անընդհատ:
4. Ո՞ր նյութերն են առաջացնում գծային սպեկտր:
5. Ինչո՞վ է պայմանավորված շերտավոր սպեկտրների առաջացումը:
6. Ձևակերպեք Կիրխոֆի օրենքը:
7. Ո՞րն է որակական և քանակական սպեկտրային վերլուծությունների փոքրերությունը:

Հելիումի հայտնագործման պատմությունը

Արեգակի մակերևութային շերտը կազմված է խիտ գազից, որի ջերմաստիճանը $\approx 6000^\circ\text{C}$ է: Այդ պայմաններում գազն արձակում է անընդհատ սպեկտր: Բայց 1814 թ. Արեգակի սպեկտրում հայտնաբերվել են մութ գծեր: Ինչպե՞ս բացատրել դրանց առաջացումը:

Բանն այն է, որ Արեգակի մթնոլորտի ջերմաստիճանը 3-4 հազար աստիճանով ցածր է նրա մակերևույթի ջերմաստիճանից, և մակերևույթից արձակված անընդհատ սպեկտրի որոշ հաճախություններով ճառագայթումը կլանում է Արեգակի մթնոլորտը, ուստի՝ Երկրի վրա ընդունում են Արեգակի կլանման սպեկտրը: Այդ սպեկտրի մանրակրկիտ ուսումնասիրության հետևանքով մեկը մյուսի հետևից Արեգակի վրա հայտնաբերվել են «երկրային» տարրեր, բայց, այնուհանդերձ, մնացել էին երկրային ոչ մի տարրի չպատկանող մի բանի գիծ (1868 թ.): Այդպես հայտնաբերվել է նոր տարր, որն անվանել են հելիում (հունարեն «հելիոս»՝ արև բառից): Իսկ Երկրի վրա, որտեղ այն բավականաչափ շատ է, հելիումը հայտնաբերվել է միայն 26 տարի անց՝ 1894 թ.:

§ 23. ՀՅՈՒՅԳԵՆԱ-ՖՐԵՆԵԼԻ ՍԿԶՐՈՒՆԵՐ

Հյույգենսի սկզբունքը հաջողությամբ լուծում է օպտիկայի շատ խնդիրներ, հստակ բացատրում երկրաչափական օպտիկայի բոլոր հիմնական օրենքները, սակայն այն ավելի շատ մնան է երկրաչափական կանոնի և զուրկ է ֆիզիկական բովանդակությունից: Երկրորդային ալիքների ազդեցության արդյունքը որոշվում է երկրաչափական կառուցումով՝ երկրորդային ալիքները շոշափող մակերևույթ տանելով: Ուստի այն կասկածներ ու շատ հարցեր է առաջացնում: Օրինակ՝ ինչու՞ երկրորդային ալիքները հետադարձ ալիք չեն առաջացնում (չէ՞ որ դրանք գնդային ալիքներ են գրգռում), ինչու՞ են ձայնային ալիքները հայտնվում երկրաչափական ստվերում, իսկ լույսի ճառագայթները՝ ոչ: Ինչպե՞ս է 60, գ նկարի դիֆրակտային պատկերի կենտրոնում՝ ուղիղ լույսի աղբյուրի դիմաց, առաջանում մութ շերտ:

Այս և շատ այլ հարցերի պատասխաններ տվել է ֆրանսիացի ֆիզիկոս Օգյուստեն Ֆրենելը: Նա Հյույգենսի սկզբունքին հավելել է դրույթ՝ երկրորդային ալիքների կոհերենտության և ինտերֆերենցի մասին: Դա Հյույգենսի սկզբունքին ֆիզիկական բովանդակություն հաղորդեց, հնարավորություն տվեց ուսումնասիրելու շատ դիֆրակտային երևույթներ, լուծելու մի շարք նոր խնդիրներ:

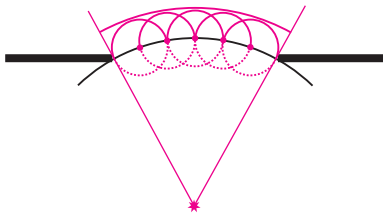
Հյույգենս-Ֆրենելի սկզբունքը կազմված է երկու մասից: Առաջին մասը **Հյույգենսի սկզբունքն է**. միջավայրի կամայական կետ, որին տվյալ պահին հասել է ալիքային մակերևույթը, դառնում է երկրորդային ալիքների աղբյուր,



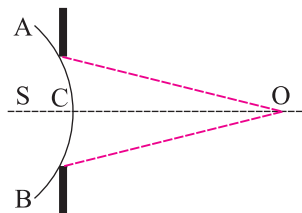
Օգյուստեն Ֆրենել

1788-1827

Ֆրանսիացի նշանավոր ֆիզիկոս, ֆիզիկական օպտիկայի հիմնադիրներից: Մշակել է լույսի դիֆրակցիայի տեսությունը, ապացույցել լույսի ալիքների լայնականությունը:



Նկ. 67. Ալիքի ճակատի կառուցումը երկրաչափական մեթոդով



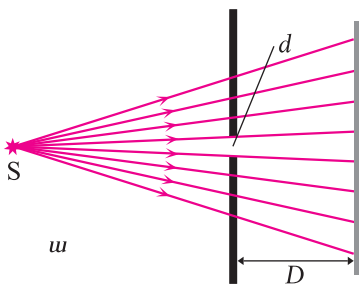
Նկ. 68. Ալիքի ճակատը՝ որպես երկրորդային ալիքների վերադրման արդյունք

որոնց պարուրիչը որոշում է ալիքային մակերևույթի դիրքը ժամանակի հաշուով պահերին (նկ. 67), ընդ որում՝ կետագծերով պատկերված հետադարձ ալիքները հաշվի չեն առնվում:

Երկրորդ մասը կոչվում է **Ֆրենելի սկզբունք** (լրացում). ալիքային ճակատի յուրաքանչյուր տարր զրգռում է գնդային ալիք, իսկ տարածության կամայական O կետում (նկ. 68) արդյունաբար լուսային դաշտը որոշվում է այդ ալիքների ինտերֆերենցով:

Կարող է թվալ, որ եթե երկրորդային ալիքները գնդային են, ապա ալիքի տարածման ուղղությունը կփոխվի, և լույսի ալիքը կցրվի տարբեր ուղղություններով: Սակայն եթե հաշվի առնենք այդ ալիքների ինտերֆերենցը, կպարզվի, որ ալիքի տարածմանն ուղղահայաց ուղղությամբ այդ ալիքները միմյանց մարում են, իսկ միայն սկզբնական ուղղությամբ՝ միմյանց ուժեղացնում: Այդ պատճառով է, որ լույսը համասեռ միջավայրում տարածվում է միայն սկզբնական ուղղությամբ, այսինքն՝ ուղղագիծ: Սակայն եթե միջավայրն անհամասեռ է կամ կազմված է տարբեր միջավայրերից (օրինակ՝ եթե օդում կա հայելի, ոսպնյակ, էկրան և այլն), ապա լույսը ցրվում է տարբեր ուղղություններով, անդրադառնում կամ բեկվում է:

Այսպիսով՝ երկրաչափական օպտիկայի բոլոր հիմնական օրենքները հնարավոր եղավ բացատրել Հյույգենս-Ֆրենելի սկզբունքի միջոցով, և, որ ավելի կարևոր է, պարզել, թե ինչպես են ընթանում օպտիկական երևույթներն այն պայմաններում, երբ խախտվում են երկրաչափական օպտիկայի օրենքները:



Նկ. 69. Կլոր անցքի տրամագծի տարբեր արժեքների դեպքում էկրանին ստացվող պատկերները

Այսպես՝ երկրաչափական օպտիկայի կանոններով կետային աղբյուրից եկող լույսն անթափանց պատի վրա բացված d տրամագծով կլոր անցքով անցնելիս (նկ. 69,ա) էկրանին պետք է առաջացնի հստակ եզրերով լուսավոր շրջան (նկ. 69,բ): Հենց այդպիսի պատկեր է դիտվում փորձի սովորական պայմաններում: Բայց եթե անցքի տրամագիծը մի քանի հազար անգամ փոքր է անցքից մինչև էկրան հեռավորությունից, ապա էկրանին հայտնվում են համակենտրոն լուսավոր և մութ օղակներ (նկ. 69,գ): Անցքից մինչև էկրան հեռավորու-

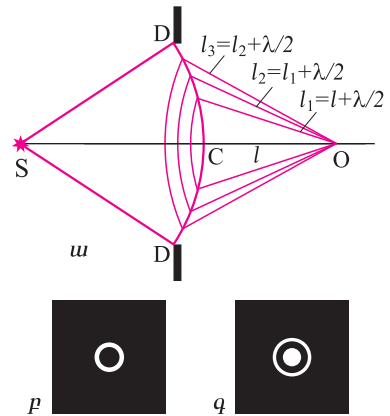
թյան և ճեղքի տրամագծի այլ հարաբերակցության դեպքում պատկերի կենտրոնում կարող է առաջանալ մութ օղակ, որը ոչ մի կերպ հնարավոր չէ բացատրել երկրաչափական օպտիկայի օրենքներով: Մինչդեռ դրան պարզ բացատրություն կարելի է տալ Հյույգենս-Ֆրենելի սկզբունքի հիման վրա:

Եթե միջավայրը համասեռ է, իսկ լույսի կետային աղբյուրը՝ մեներանգ, ապա դրա արձակած լույսի ալիքի ճակատը ժամանակի կամայական պահի գնդային մակերևույթ է (նկ. 70, ա): Այդ մակերևույթի կետերը երկրորդային ալիքների կոհերենտ աղբյուրներ են: Տարածության կամայական O կետում տատանումները կարելի է որոշել՝ գումարելով այդ ալիքների տատանումները: Քանի որ ալիքի ճակատի կետերի հեռավորություններն O կետից տարբեր են, ապա դրանցից O կետ հասած տատանումների փուլերը տարբեր են: Երկրորդային ալիքների ինտերֆերենցի արդյունքն O կետում գտնելու համար Ֆրենելն առաջարկել է ալիքային ճակատը գոտիների տրոհելու մեթոդ:

O կետից տանենք կոնային մակերևույթներ՝ մինչև DCD գնդային մակերևույթի հետ հասնելը: Կոների ծնիչներն ընտրենք այնպես, որ բավարարվեն հետևյալ պայմանները. $l_1 = l + \lambda/2$, $l_2 = l_1 + \lambda/2$, $l_3 = l_2 + \lambda/2$ և այլն, որտեղ l -ն ալիքի ճակատի ամենամոտ C կետի հեռավորությունն է O կետից: Ալիքի DCD մակերևույթը կտրոհվի հավասար մակերեսներով օղակաձև գոտիների, որոնք կոչվում են **Ֆրենելի գոտիներ**: Առաջին և երկրորդ գոտիներից O կետ հասած երկրորդային ալիքների ընթացքի տարբերությունը $\lambda/2$ է, ուստի դրանք, հասնելով O կետ, կթուլացնեն միմյանց, այնպես որ O կետում II գոտու ազդեցությունը գործնականորեն չեզոքացնում է I-ի ազդեցությունը: Նույն դատողությունները ցույց կտան, որ III գոտու ազդեցությունը չեզոքացնում է II-ի ազդեցությունը, VI-ը՝ III-ի և այլն: Եթե DD անցքն այնպիսին է, որ նրա մեջ տեղավորվում է ընդամենը երկու գոտի, O կետում գրեթե լույս չի լինի: Լույսի մեծ մասը բաշխված կլինի O կետի շուրջը՝ այնպես, որ էկրանին կերևա մութ շրջան՝ շրջապատված լուսավոր օղակով (նկ. 70, բ): Եթե անցքի տրամագծի մեջ երեք գոտի է տեղավորվում, II և III գոտիների ազդեցությունները միմյանց չեզոքացնում են, իսկ I գոտին O կետում առաջացնում է լուսավոր շրջան, դրա շուրջը՝ սև օղակ, որին հետևում է լուսավոր օղակ (նկ. 70, գ):

Ընդհանրապես, եթե գոտիների թիվը գույշ է, կենտրոնում մութ շրջան է լինում, շուրջը՝ միմյանց հաջորդող լուսավոր և մութ օղակներ: Եթե գոտիների թիվը կենտ է, օղակների կենտրոնում առաջանում է լուսավոր շրջան:

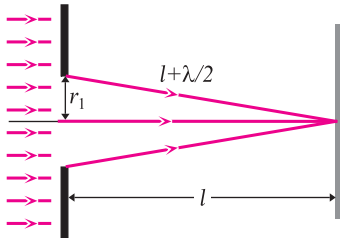
Որքան մեծ է անցքի տրամագիծը, այնքան փոքր են օղակների լայնությունները: Այնպես որ մեծ տրամագծի դեպքում դրանք այնքան հաճախ են հաջորդում իրար, որ չենք կարողանում տարբերել դրանք, և գործնականում դիֆրակցիան չի նկատվում:



Նկ. 70. Ֆրենելի գոտիների կառուցումը

Համանման ձևով կարելի է բացատրել այլ՝ ավելի բարդ դիֆրակտային պատկերներ: Քանի որ Ֆրենելի գոտիների հաշվարկը կախված է լույսի ալիքի երկարությունից, դիֆրակտային պատկերը նույնպես կախված է ալիքի երկարությունից: Փորձը լիովին հաստատում է այս եզրակացությունը: Մասնավորապես սպիտակ լույսի դիֆրակտային պատկերում օղակները գունավոր են:

Երկրաչափական օպտիկայի կիրառելիության պահմանը: Օգտվելով Ֆրենելի գոտիների մեթոդից, ստանանք երկրաչափական օպտիկայի կիրառելիության պայմանը: Եթե անցքի տրամագիծն այնպիսին է, որ այնտեղ տեղավորվում են մեծ թվով Ֆրենելի գոտիներ, ապա պետք է հաշվի առնել, որ որքան այդ գոտիները հեռու են կենտրոնականից, այնքան փոքր է դրանց ստեղծած լուսային դաշտի ուժգնությունը: Կարելի է ցույց տալ, որ այս դեպքում ալիքի ուժգնությունը որոշվում է առաջին և վերջին գոտիների ազդեցությամբ: Գոտիների մեծ թվի դեպքում վերջին գոտու ազդեցությունն այնքան փոքր է լինում առաջինի ազդեցության համեմատությամբ, որ այն կարելի է անտեսել: Արդյունքում՝ ալիքը մի կետից մյուսը տարածվում է առա-



Նկ. 71. Ֆրենելի առաջին գոտու շառավղի որոշումը

ջին գոտու տրամագծից էլ փոքր տրամագծով գլանի միջով, որն էլ կարելի է դիտարկել որպես լույսի ճառագայթ: Ուրեմն՝ երկրաչափական օպտիկայի օրենքները կիրառելի են, եթե անցքի d տրամագիծն այնպիսին է, որ այնտեղ տեղավորվում են մեծ թվով Ֆրենելի գոտիներ, այսինքն՝ $d \gg r_1$, որտեղ r_1 -ը Ֆրենելի առաջին գոտու շառավիղն է: Ինչպես երևում է 71-րդ նկարից, հարթ ալիքի դեպքում

$$r_1 = \sqrt{cl + \frac{\lambda^2}{2} - l^2} \approx \sqrt{\lambda l},$$

հետևաբար՝ երկրաչափական օպտիկայի օրենքների կիրառելիության պայմանը կարտահայտվի հետևյալ կերպ.

$$d \gg \sqrt{\lambda l}: \quad (2.10)$$

Այսպիսով՝ անցքի d տրամագծի արժեքը, որի դեպքում կիրառելի են երկրաչափական օպտիկայի օրենքները, կախված է ոչ միայն ալիքի երկարությունից, այլ նաև անցքից մինչև էկրան հեռավորությունից: l -ի մեծացմանը զուգընթաց Ֆրենելի առաջին գոտու շառավիղը մեծանում է, ուստի դիֆրակցիայի և ինտերֆերենցի երևույթները կարող են դիտվել նաև անցքի տրամագծի և մինչև էկրան հեռավորության մեծ արժեքների դեպքում:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ դրույթ ավելացրեց Ֆրենելը Հյույգենսի սկզբունքին:
2. Ի՞նչ է ցույց տալիս փարբեր փրամագծով անցքերից էկրանին ընկած լույսի դիֆուզիան:
3. Ինչպե՞ս են կառուցվում Ֆրենելի գոտիները:
4. Ինչպե՞ս է բացատրվում լույսի ուղղագիծ փրամածան օրենքը Ֆրենելի գոտիների մեթոդով:
5. Ի՞նչ պայմանի դեպքում են կիրառելի երկրաչափական օպտիկայի օրենքները:

§24. ԼՈՒՅՍԻ ԲԵՎԵՌԱՑՈՒՄԸ: ԼՈՒՅՍԻ ԱԼԻԲՆԵՐԻ ԼԱՅՆԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Լույսի անցումը տուրմալինով: Լույսի ալիքային բնույթը հիմնավորող ինտերֆերենցի ու դիֆրակցիայի երևույթները դեռևս ամբողջական պատկերացում չեն տալիս լույսի ալիքների բնույթի մասին: Մանավորապես՝ դրանք չեն պարզաբանում՝ երկայնակա՞ն, թե՞ լայնական են լույսի ալիքները:

Երկար ժամանակ ալիքային օպտիկայի հիմնադիրները՝ Թոմաս Յունգը և Օգյուստեն Ֆրենելը, լույսի ալիքները ձայնի ալիքների նման երկայնական էին համարում: Այն ժամանակ լույսի ալիքները դիտվում էին որպես տարածությունը լցնող և բոլոր մարմինների մեջ թափանցող եթերի մեջ տարածվող առաձգական ալիքներ: Թվում էր, թե այդպիսի ալիքները չէին կարող լինել լայնական, քանի որ լայնական ալիքներ կարող են գոյություն ունենալ միայն պինդ մարմնում: Բայց մարմիններն ինչպե՞ս կարող են շարժվել պինդ եթերի մեջ՝ առանց դիմադրության հանդիպելու: Չէ՞ որ եթերը չպետք է խոչընդոտի մարմինների շարժմանը: Հակառակ դեպքում իներցիայի օրենքը ճիշտ չէր լինի:

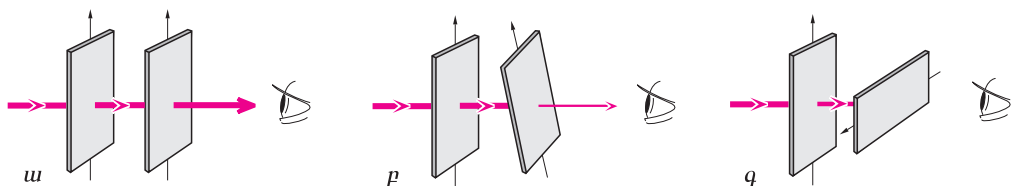
Սակայն աստիճանաբար կուտակվեցին փորձնական փաստեր, որոնք մեկնաբանել ոչ մի կերպ չէր հաջողվում, քանի որ լույսի ալիքները համարում էին երկայնական:

Այժմ բազմաթիվ գիտափորձերով ապացույված է, որ լույսի ալիքները լայնական են: Քննարկենք դրանցից մեկը՝ տուրմալինի վառ կանաչ գույնի թափանցիկ բյուրեղներով արված փորձը:

Տուրմալինը քիմիական բարդ միացության միաբյուրեղ է, որն ունի **օպտիկական առանցք** կոչվող համաչափության առանցք:

Վերցնենք տուրմալինի միատեսակ ուղղանկյուն թիթեղներ, որոնց միատերից մեկը գուգահեռ է բյուրեղի օպտիկական առանցքին: Թիթեղները դնենք իրար վրա այնպես, որ նրանց օպտիկական առանցքները գուգահեռ լինեն: Եթե թիթեղներից կազմված համակարգի վրա օպտիկական առանցքին ուղղահայաց էլեկտրական լամպի կամ արևի ճառագայթների նեղ փունջ է ընկնում, ապա էկրանին տեսնում ենք մուգ կանաչ գույնի շրջան (նկ. 72, ա):

Եթե թիթեղներից մեկն անշարժ թողնելով մյուսը պտտենք փնջի շուրջը (նկ. 72, բ), ապա կնկատենք, որ շրջանի պայծառությունը թուլանում է, իսկ երբ թիթեղը պտտում ենք 90° -ով, այն լրիվ անհետանում է (նկ. 72, գ): Եթե շարունակենք պտտել թիթեղը, շրջանի պայծառությունը կրկին կաճի, և երբ այն պտտվի 180° -ով ու թիթեղների օպտիկական առանցքները նորից գուգահեռ լինեն, շրջանը կլինի նույն պայծառության, ինչպիսին սկզբում էր:



Նկ.72. Տուրմալինի բյուրեղներով արված փորձի սխեման

Այսպիսով՝ քիթերը 360° -ով պտտելիս անցած փնջի ուժգնությունը երկու անգամ հասնում է մաքսիմումի, ընդ որում՝ անկախ այն բանից, թե քիթեղներից որն է պտտվում, դրանք հավում են իրար, թե հեռու են միմյանցից, արդյունքը նույնն է: Ուրեմն՝ համակարգով անցած փնջի ուժգնությունը փոխվում է, եթե փոխվում է քիթեղների օպտիկական առանցքների կազմած անկյունը: Բայց եթե քիթեղներից մեկը հեռացնենք, իսկ մյուսը պտտենք փնջի շուրջը, ապա քիթեղով անցած փնջի ուժգնությունը կմնա անփոփոխ: Նշանակում է, որ քիթեղի միջով անցած լույսի ալիքը նոր հատկություններ է ձեռք բերել:

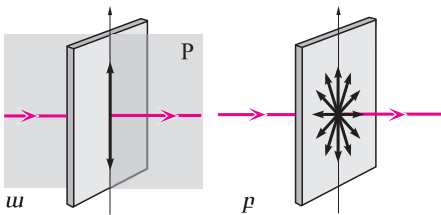
Նկարագրված փորձը վկայում է, որ՝

ա) լույսի ալիքը համաչափ է իր տարածման ուղղության նկատմամբ (քիթեղը փնջի շուրջը պտտելիս նրա միջով անցած փնջի ուժգնությունը մնում էր անփոփոխ),

բ) առաջին քիթեղից դուրս եկած ալիքն առանցքային համաչափություն չունի (երկրորդ քիթեղը փնջի շուրջը պտտելիս անցած լույսի ուժգնությունը փոփոխվում է կախված անկյունից):

Փորձից ստացված արդյունքները կարելի է բացատրել՝ երեք ենթադրություն անելով:

1. Լույսի ալիքում տատանումները տեղի են ունենում լույսի տարածմանն ուղղահայաց ուղղությամբ (լույսի ալիքները լայնական են):



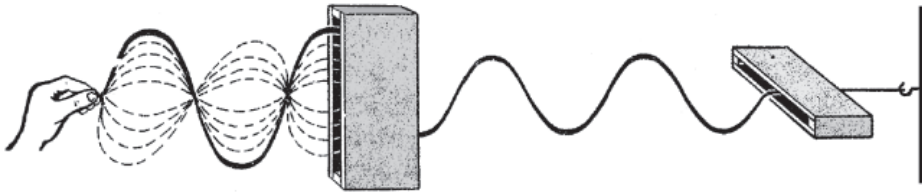
Նկ.73. ա. Տուրմալինը թափանցիկ է միայն P հարթության մեջ կատարվող տատանումներով լույսի ալիքների համար:
բ. Լույսի ալիքների տատանումները բնական լույսում

2. Տուրմալինը թափանցիկ է միայն մի որոշակի հարթության մեջ (73,ա նկարում՝ P հարթությունը) կատարվող տատանումներով լույսի ալիքների համար:

3. Էլեկտրական լամպի (արևի) լույսի մեջ առկա են դրա տարածմանն ուղղահայաց կամայական ուղղությամբ տեղի ունեցող տատանումներ (նկ. 73,բ), ընդ որում՝ հավասար բաժիններով: Այդպիսի լույսը կոչվում է **բնական**: Այս անունն արդարացված է, քանի որ սովորական պայմաններում լույսի աղբյուրները հենց այդպիսի լույս են արձակում:

Երրորդ ենթադրությունը բացատրում է, թե քիթեղի կամայական կողմնորոշման դեպքում ինչու՞ է բնական լույսը միատեսակ անցնում նրա միջով, չնայած, համաձայն երկրորդ ենթադրության, տուրմալինն անցկացնում է միայն որոշակի ուղղության լույսի տատանումներ: Իրոք, ինչպես էլ կողմնորոշված լինի քիթեղը, բնական լույսի մեջ միշտ կան տատանումներ, որոնք տեղի են ունենում օպտիկական առանցքի ուղղությամբ: Ուստի, տուրմալինով անցած փնջում կլինեն միայն մեկ օպտիկական առանցքի ուղղությամբ լայնական տատանումներ: Այդպիսի լույսը կոչվում է **հարթ-բևեռացած**, իսկ տատանումների ուղղությամբ ու փնջի առանցքով անցնող հարթությունը՝ **բևեռացման հարթություն**:

Այս ենթադրությունները լիովին բացատրում են փորձի արդյունքները: Առաջին բյուրեղից դուրս է գալիս հարթ-բևեռացած ալիք: Խաչադիր օպտիկական առանցքների (առանցքների միջև 90° անկյան) դեպքում այն չի անցնում երկրորդ



Նկ. 74. Տուրմալինի երկու փեթեղներով լուսային ալիքների տարածման երևույթի մեխանիկական մոդելը

բյուրեղի միջով: Եթե առանցքները 90° -ից տարբեր անկյուն են կազմում, ապա երկրորդ բյուրեղով անցնում են այն տատանումները, որոնց լայնույթը հավասար է առաջին բյուրեղի միջով անցած ալիքի լայնույթի պրոյեկցիային՝ երկրորդ բյուրեղի առանցքի ուղղության վրա:

Տուրմալինով կատարած փորձերի մեխանիկական մոդելը: Դժվար չէ կառույցել բննարկվող երևույթի պարզ, պատկերավոր մեխանիկական մոդելը: Կարելի է ռետինե քուղով այնպիսի լայնական ալիք առաջացնել, որ տատանումներն արագ-արագ փոխեն իրենց ուղղությունը տարածության մեջ: Սա կլինի բնական լույսի ալիքի նմանօրինակը: Այժմ քուղն անցկացնենք փայտե նեղ արկղի միջով (նկ. 74): Բոլոր հնարավոր ուղղություններով կատարվող տատանումներից արկղն «ընտրում» է մի որոշակի հարթության մեջ կատարվող տատանումները: Ուստի՝ արկղից դուրս է գալիս բևեռացած ալիք: Եթե նրա ճանապարհին ճիշտ այդպիսի մի ուրիշ արկղ էլ կա, որն առաջինի նկատմամբ շրջված է 90° անկյունով, ապա տատանումները նրա միջով չեն անցնի: Ալիքն ամբողջովին կմարի:

Բևեռիչներ: Լույսը կարելի է բևեռացնել ոչ միայն տուրմալինի բյուրեղների, այլև բարակ թաղանթների միջոցով, որոնց անվանում են **բևեռիչներ**: Այդպիսի թաղանթ է ցելուլոզի կամ ապակե փեթեղի վրա նստեցրած գերապատիտի բյուրեղի բարակ ($0,1$ մմ հաստությամբ) շերտը: Եթե լույսն անցկացնենք նման երկու թաղանթների միջով, ապա, կախված նրանց բևեռացման առանցքների հարաբերական դիրքից, կունենանք լույսի անցում, մարում կամ մասնակի թուլացում:

Բևեռիչներն ունեն գանազան գործնական կիրառություններ: Օրինակ՝ նկարներ և ապակե իրեր լուսանկարելիս հայելային անդրադարձած լույսի «շողքերի» մարման նպատակով լուսանկարչական սարքի օբյեկտիվի վրա հազցնում են բևեռիչ: Որոշ նյութերի լուծույթներ օժտված են անցնող բևեռացված լույսի բևեռացման հարթությունը պտտելու ունակությամբ: Բևեռացման հարթության պտույտի անկյունը համեմատական է լուծույթում առկա խառնուրդի կոնցենտրացիային (այդպիսի նյութերը կոչվում են օպտիկապես ակտիվ): Չափելով բևեռացման հարթության պտույտի անկյունը՝ կարելի է որոշել խառնուրդի կոնցենտրացիան:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Երկայնակա՞ն, թե՞ լայնական է լույսի ալիքը: 2. Ինչո՞վ է փարբերվում բնական լույսը բևեռացածից: 3. Ի՞նչ է բևեռացույցիչը: 4. Բնական լույսն ընկնում է հաջորդաբար փեղադրված երկու բևեռիչների վրա, որոնք կողմնորոշված են այնպես, որ լույսը նրանց միջով բոլորովին չի անցնում: Կանցնի՞ր արդյոք լույսը, եթե նրանց միջև փեղադրվի երրորդ բևեռիչը:

Ծանոթանալով մարմինների ծավալային (եռաչափ կամ 3D) պատկեր ստանալու մեթոդին, որն այսօր բուռն զարգացում է ապրում և ունի բազմաթիվ գիտական, տեխնիկական, գեղագիտական և այլ կիրառություններ: Այդ մեթոդը կոչվում է օպտիկական **հոլոգրաֆիա** (հունարեն «հոլոս»՝ ամբողջ և «գրաֆո»՝ գրում եմ բառերից): Այն հիմնված է ինտերֆերենցի և դիֆրակցիայի երևույթների վրա:

Մինչ հոլոգրաֆիայի սկզբունքներին ծանոթանալը՝ համառոտ լուսանկարչության մասին:

Չլուսարձակող առարկաները լուսանկարելու համար դրանք նախ լուսավորում են, ապա, առարկայից անդրադարձած լույսը փոխարկելով, օպտիկական համակարգերի (ոսպնյակներ, հայելիներ) միջոցով ֆոտոթիթեղի, ժապավենի կամ այլ տարրի վրա գրանցում են դրանց իրական պատկերը: Լուսանկարչական տեխնիկան այսօր բարձր մակարդակի է հասել: Անշուշտ, այն կապահպանի իր գիտական ու գործնական նշանակությունը մասնապագայում՝ որպես տեսանելի տեղեկատվության գրանցման հրաշալի ու պարզ միջոց: Սակայն լուսանկարչության հնարավորությունները սահմանափակ են:

Առաջին հերթին դա պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ եռաչափ առարկայի պատկերն ստացվում է հարթ մակերևույթի վրա, որը հնարավորություն չի տալիս առարկան դիտելու տարբեր կողմերից, ինչպես անմիջական դիտման ժամանակ: Գրանցող տարրի յուրաքանչյուր տեղամասում տեղեկատվություն է պահվում առարկայի միայն որոշակի կետերի մասին: Մի տարրի վրա հնարավոր չի լինում գրանցել իրար ծածկող մի քանի առարկաների պատկերներ:

Իսկ որքանով է լուսանկարը հնարավորություն տալիս պահպանելու առարկայի մասին տեղեկատվությունը, որը գալիս է նրանից անդրադարձած լույսի հետ: Գրանցող տարրի վրա առարկայի պատկերն ստացվում է շնորհիվ նրա մակերևույթի անհավասար լուսավորվածության: Լուսավորվածությունը չափվում է մակերևույթին ընկնող լույսի ալիքի ուժգնությամբ, որն իր հերթին կախված է ճառագայթների անկման կետում ալիքի էլեկտրական դաշտի լարվածության և մագնիսական դաշտի ինդուկցիայի տատանումների լայնությունից: Ուրեմն՝ եթե պատկերի տարբեր կետերում տատանումների լայնություններն իրար հավասար են, ապա նրանք միատեսակ են լուսավորվում: Բայց չէ՞ որ տատանումները բնութագրվում են ոչ միայն լայնությամբ, այլ նաև փուլով, որը կախված է առարկայի կետերի և համապատասխան պատկերների հեռավորություններից: Ուրեմն՝ լուսանկարում «կորչում» է տարածության մեջ առարկայի կետերի դիրքերի մասին տեղեկատվությունը:

Հոլոգրաֆիայի խնդիրը մարմնի անդրադարձրած լույսի ալիքներում նրա մասին առկա տեղեկատվության գրանցումն ու վերարտադրումն է:

Եթե առարկան լուսավորվում է բնական լույսով, ապա պատկերի վրա ստացվում է տատանումների փուլերի քառսային բաշխում, որն առարկայի

մասին ոչ մի լրացուցիչ տեղեկատվություն չի տալիս: Իսկ երբ առարկան լուսավորվում է կոհերենտ լույսով, ապա առարկայի հեռավոր կետերից անդրադարձած ալիքների տատանումների փուլերը հետ են մնում ավելի մոտ կետերից անդրադարձած ալիքների տատանումների փուլերից: Հետևաբար՝ պատկերի հարթության մեջ դրանք առաջացնում են փուլերի տարբեր բաշխումներ, որոնք էլ կարող են օգտագործվել առարկայի եռաչափ պատկեր ստանալու համար:

Հոլոգրաֆիայի գաղափարներն ու սկզբունքները ձևակերպել է հունգար ֆիզիկոս Դենիս Գաբորը ղեռնա 1948 թ., սակայն հոլոգրաֆիայի բուռն զարգացումն սկսվել է միայն 1960 թ. լազերի հայտնագործումից հետո: Լազերային ճառագայթման կարևորագույն հատկության՝ կոհերենտության վրա էլ հիմնված է տեղեկատվության գրանցման հոլոգրաֆիական մեթոդը:

Առարկայի հոլոգրաֆիական պատկերի ստացումն իրականացվում է երկու փուլով:

Առաջին փուլն առարկայից անդրադարձած ալիքային դաշտի լայնությանին և փուլային բնութագրերի գրանցումն ու պահպանումն է, որն իրականացվում է երկու կոհերենտ փնջերով (նկ.75): Դրանցից մեկն անդրադառնում է առարկայից (ազդանշանային փունջ) և ընկնում ֆոտոթիթեղի վրա, իսկ մյուսը (հենարանային փունջ) նույն ֆոտոթիթեղի վրա ընկնում է հայելուց անդրադառնալուց հետո: Քանի որ հենարանային և ազդանշանային ալիքները կոհերենտ են, ապա դրանք ֆոտոթիթեղի վրա ստեղծում են կայուն ինտերֆերենցային պատկեր: Ֆոտոթիթեղի երևակումից հետո դրա այն տեղամասերը, որտեղ առարկայական և հենարանային ալիքների փուլերը համընկել են, կլինեն ամենալուսավորը, իսկ հակափուլերով ալիքների վերադրման տեղամասերը ընդհանրապես լուսավորված չեն լինի: Ստացված մութ ու լուսավոր տիրույթներից կազմված ինտերֆերենցային պատկերն անվանում են **հոլոգրամ**: Եթե հոլոգրամը դիտենք մանրադիտակի տակ, ապա կտեսնենք միմյանց հաջորդող լուսավոր և մութ շերտերից կազմված պատկեր: Պարզագույն դեպքում, երբ ազդանշանային և հենարանային ալիքները հարթ են, հոլոգրամն ստացվում է սովորական դիֆրակտային ցանցի տեսքով:

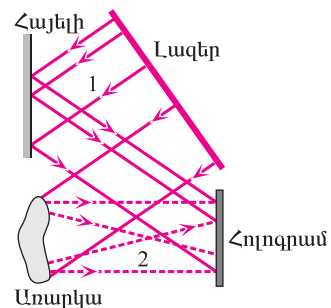
Հոլոգրաֆիական պատկերի ստացման **երկրորդ փուլը** առարկայի պատկերի վերականգնումն է: Դրա համար հոլոգրամը լուսավորում են հե-



Դենիս Գաբոր

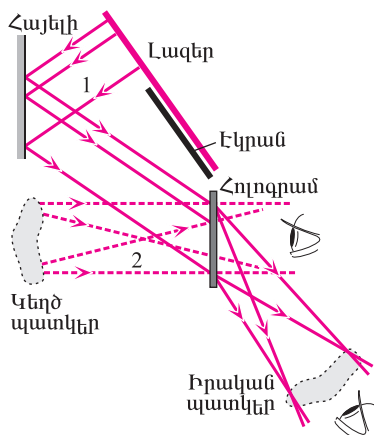
1900 -1979

Հունգար ճարտարագեղ-ֆիզիկոս: Աշխարհաբները վերաբերում են էլեկտրոնային օպտիկային: Ստեղծել է ալիքի ձևակերպող գրանցման և վերարտադրման նոր մեթոդ, որն անվանել է հոլոգրաֆիա: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1971 թ.):



Նկ.75. Հոլոգրամի ստացման սխեման.

1. հենարանային փունջ,
2. ազդանշանային փունջ



Նկ. 76. Հոլոգրամից առարկայի պատկերի վերականգնման սխեման

պատկերը՝ ճիշտ նույն տեղում, որտեղ առարկան էր հոլոգրամի ստացման ժամանակ։ Այդ պատկերն այնքան իրական է թվում, որ շատերն են ցանկություն ունենում ձեռք տալու դրան։ Այս դեպքում, բացի կեղծ պատկերից, ստացվում է նաև առարկայի իրական պատկերը, որի ռելիեֆը հակադիր է առարկայի ռելիեֆին, այսինքն՝ առարկայի ուռուցիկ մասերը ստացվում են գոգավոր և հակառակը։

Իր բոլոր առավելություններով հանդերձ՝ հոլոգրամի ստացման այս եղանակն ուներ մի թերություն։ Այս մեթոդով ստացված հոլոգրամները վերականգնվում էին միայն կոհերենտ լույսով, իսկ գույնը համապատասխանում էր վերականգնող լազերի գույնին։

Խորհրդային գիտնական Յուրի Դենիսյուկի 1962թ. մշակած եղանակում լազերն օգտագործվում է միայն հոլոգրամի գրանցման ժամանակ, իսկ գրանցված տեղեկատվությունը վերականգնվում է լույսի սովորական աղբյուրներով։

Դենիսյուկի մեթոդի հիմքում ընկած է այն հանգամանքը, որ ազդանշանային և հեմարանային փնջերի ինտերֆերենցային պատկերը բաշխված է ոչ թե հարթության (ֆոտոթիթեղի), այլ տարածության մեջ՝ փնջերի վերադրման ամբողջ տիրույթում։ Ընտրելով համապատասխան լուսազգայուն նյութեր՝ կարելի է գրանցել այդ եռաչափ ինտերֆերենցային պատկերը։ Այդ նպատակով օգտագործում են ապակե ֆոտոթիթեղներ, որոնց միջև լցված է թափանցիկ լուսազգայուն նյութ։ Այդ նյութի շերտի հաստությունը, որտեղ էլ ստացվում է եռաչափ հոլոգրամը, բավական մեծ է լազերի արձակած լույսի ալիքի երկարությունից։ Շերտի այն կետերում, որտեղ ազդանշանային և հեմարանային ալիքների փուլերը համընկնում են, արծաթ է անջատվում, և երևակումից հետո ինտերֆերենցային պատկերին համապատասխան բարդ կառուցվածքով հայելային մակերևույթ է առաջանում։

Սովորական ոչ կոնկրետ աղբյուրից ստացված հոլոգրամի վրա ընկնող լույսը, անդրադառնալով հայելային մակերևույթից, ստեղծում է ճիշտ այնպի-

նարանային կոհերենտ լույսով (Նկ. 76)։ Հոլոգրամի թափանցիկ տեղերում հեմարանային փունջը երկրորդային աղբյուրների տատանումներ է գրգռում։ Այդ տատանումների լայնություններն ուղիղ համեմատական են նույն տեղերում ընկած ազդանշանային ալիքների լայնություններին, իսկ դրանց փուլերը համընկնում են։ Հյույգենս-Ֆրենելի սկզբունքին համապատասխան՝ երկրորդային աղբյուրները տարածության մեջ ստեղծում են ալիքային դաշտի այնպիսի պատկեր, ինչպիսին եղել է ազդանշանային ալիքում։ Արդյունքում դրանք ստեղծում են իրենց բնորոշ բոլոր հատկություններով օժտված առարկայի ծավալային կեղծ

սի ալիքային դաշտ, ինչպիսին է առարկայից անդրադարձած լույսի ալիքային դաշտը:

Եթե հոլոգրամը պատրաստելիս առարկան լուսավորվի տեսանելի լույսի երեք կոհերենտ աղբյուրներից, որոնք ունեն ալիքի տարբեր երկարություններ, ապա սպիտակ լույսով վերականգնված հոլոգրամը կլինի գունավոր՝ ճիշտ նույն երանգներով, ինչպիսին առարկան է:

Հոլոգրամների հատկությունները: Հոլոգրաֆիայի կիրառությունները: Հոլոգրամներն ունեն զարմանահրաշ առանձնահատկություններ: Օրինակ՝ եթե սովորական լուսանկարի մի մասը տեղեկատվություն է պարունակում առարկայի միայն մի հատվածի մասին, ապա հոլոգրամի կամայական փոքր մասից կարելի է ստանալ առարկայի լրիվ պատկերը՝ թեկուզ և ավելի ցածր որակի, քան ամբողջ հոլոգրամից ստացված պատկերինը:

Արվեստի ինքնատիպ գործերի հոլոգրաֆիական պատկերները հնարավորություն են տալիս, որ դրանք միաժամանակ շատ վայրերում տեսնելի լինեն շատ մարդկանց: Այժմ արդեն կինոթատրոններում հոլոգրաֆիական ֆիլմեր են ցուցադրվում:

Հոլոգրամը կարելի է վերականգնել կոհերենտ լույսով, որն ունի ավելի մեծ ալիքի երկարություն, քան լույսը, որի օգնությամբ ստացվել է հոլոգրամը: Այս դեպքում պատկերի չափերն առարկայի չափերից մեծ են ստացվում: Դրա վրա է հիմնված հոլոգրաֆիական մանրադիտակի աշխատանքի սկզբունքը:



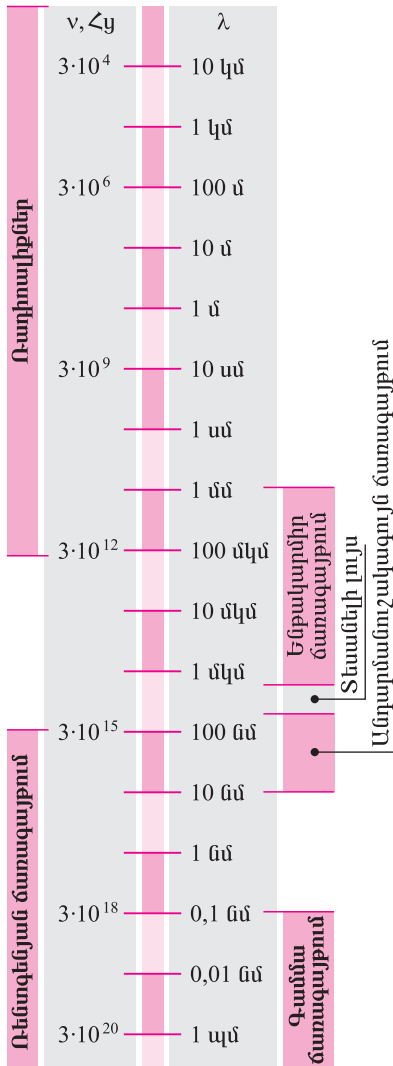
Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞րն է փոփոխությունը գրանցման հոլոգրաֆիական և լուսանկարչական մեթոդների տարբերությունը: 2. Հոլոգրամների ո՞ր հատկությունների վրա է հիմնված դրանց կիրառությունը: 3. Հոլոգրամների տարածված և հեռանակարային ի՞նչ եղանակներ են ձեռք հայտնի:

§26. ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ՍԱՆԴՂԱԿ

Էլեկտրամագնիսական ալիքներն սկզբունքորեն կարող են ունենալ կամայական երկարություն: Կան էլեկտրամագնիսական ալիքներ, որոնց երկարությունը մի քանի հազար կիլոմետրի կարգի է, և կան էլեկտրամագնիսական ալիքներ, որոնց երկարությունը 10^{-12} մ-ի կարգի է:

Լույսի էլեկտրամագնիսական բնույթի պարզաբանումը հնարավորություն է տվել բոլոր տիպի էլեկտրամագնիսական ճառագայթումները դասակարգելու և միավորելու **էլեկտրամագնիսական ալիքների սանդղակում**: Ընդունված է էլեկտրամագնիսական ալիքները բաժանել **ցածրհաճախային ճառագայթման, ռադիոալիքների, ենթակարմիր ճառագայթման, տեսանելի ճառագայթման (լույսի), անդրամանուշակագույն ճառագայթման, ռենտգենյան ճառագայթման և գամմա-ճառագայթման**: Ճառագայթումների սանդղակի տարբեր տիրույթների սահմանները պայմանական են: Վակուումում կամայական ալիքի երկարությամբ էլեկտրամագնիսական ճառագայթում տարածվում է 300000 կմ/վ արագությամբ:



Նկ. 77. Էլեկտրամագնիսական ալիքների սանդղակ

Տարբեր ալիքի երկարությամբ ճառագայթումները միմյանցից տարբերվում են ստացման եղանակով (ռադիոճառագայթում, ջերմային ճառագայթում, ատոմի, միջուկի ճառագայթում և այլն) և գրանցման մեթոդով: Ճառագայթումները միմյանցից տարբերվում են նաև նյութի մեջ կլանվելու հատկությամբ: Օրինակ՝ կարծալիք ճառագայթումները (ռենտգենյան և գամմա-ճառագայթում) թույլ են կլանվում միջավայրերում, ենթակարմիր ալիքները, ընկնելով մարդու մարմնի վրա, տաքացնում են այն, իսկ անդրամանուշակագույն ալիքները կարծրացնում են մաշկը:

Էլեկտրամագնիսական ալիքների կլանման, անդրադարձման և այլ հատկություններն էապես կախված են ալիքի երկարությունից: Զննարկենք Էլեկտրամագնիսական ալիքների հիմնական խմբերը՝ այս տեսանկյունից:

Ցածրհաճախային ճառագայթում: Այս Էլեկտրամագնիսական ալիքները գրգռվում են մեծ ինդուկտիվությամբ և Էլեկտրադինամիկությամբ սարքերում: Օրինակ՝ 50 Հց հաճախությամբ փոփոխական հոսանքի գեներատորներում ստեղծվում են $6 \cdot 10^6$ մ երկարությամբ ալիքներ, որոնք գործնականում չեն ճառագայթվում և արագորեն մարում են:

Ռադիոալիքներ: Ռադիոալիքներն առաջանում են բաց տատանողական կոնտուրներում: Ըստ երկարության՝ ռադիոալիքները լինում են **երկար** ($3 \cdot 10^3$ մ < λ < $3 \cdot 10^4$ մ), **միջին** ($3 \cdot 10^2$ մ-ից մինչև $3 \cdot 10^3$ մ), **կարճ** (10 մ-ից մինչև $3 \cdot 10^2$ մ) և **գերկարճ** (λ < 10 մ): Որքան ալիք

քը երկար է, այնքան նրա՝ Երկրի մակերևույթը շրջանցելու հատկությունն ուժեղ է արտահայտված: Այդ պատճառով մեծ հեռավորությամբ վայրերի միջև ռադիոկապը հնարավոր է միայն միջին և երկար ալիքների միջոցով: Դրա հետ մեկտեղ՝ Երկրի մակերևութային շերտերում և **իոնոլորտում** երկար ալիքները զգալիորեն կլանվում են: Իոնոլորտը Երկրի մակերևույթից 100÷300 կմ բարձրությամբ մթնոլորտի վերին մասերի իոնացված գազի շերտն է, որտեղ օդն իոնանում է Արեգակի ճառագայթման և տարբեր մասնիկների հոսքերի ազդեցությամբ:

Կարճ ալիքները մեծ հեռավորություններ են անցնում միայն իոնոլորտից և Երկրի մակերևույթից բազմապատիկ անդրադարձման շնորհիվ: Հենց կարճ ալիքների միջոցով է իրականացվում ռադիոկապը Երկրի՝ կամայական հեռավորությամբ ռադիոկայանների միջև:

Գերկարճ ռադիոալիքները թափանցում են իոնոլորտի միջով՝ առանց անդրադարձման: Այդ պատճառով նրանք օգտագործվում են ուղիղ գծով տեսանելիության սահմաններում կետերի միջև ռադիոկապի, ինչպես նաև տիեզերանավերի հետ կապ պահպանելու համար:

Ենթակարմիր ճառագայթում: Ամեն մի տաք մարմին արձակում է էլեկտրամագնիսական ալիքներ, այդ թվում՝ նաև **ենթակարմիր ալիքներ**: Ենթակարմիր ալիքներ են արձակում վառվող վառարանը, բնակարանի ջեռույման մարտկոցները և այլն: Այդ ալիքները, կլանվելով, նկատելիորեն տաքացնում են շրջապատի մարմինները: Այդ պատճառով ենթակարմիր ալիքները հաճախ անվանում են ջերմային ալիքներ: Ենթակարմիր ճառագայթման բնական աղբյուրներ են Արեգակը, աստղերը և մոլորակները: Երկիր հասնող արեգակնային ճառագայթման էներգիայի մոտ 50%-ը բաժին է ընկնում ենթակարմիր ճառագայթմանը:

Ենթակարմիր ալիքները մեծ կիրառություններ ունեն. դրանք օգտագործվում են լաքի և ներկի ծածկույթներ, մրգեր և բանջարեղեն չորացնելու համար: Հայտնի են ենթակարմիր ճառագայթային դիտակները, որոնք գիշերը տեսանելի են դարձնում շրջապատի առարկաները՝ նրանց առաքած ենթակարմիր ճառագայթումը վերածելով տեսանելի ճառագայթման:

Ենթակարմիր ճառագայթներն օգտագործվում են նաև թույլ մառախուղի ժամանակ լուսանկարելիս, երբ սովորական լուսանկարչական ապարատներով ստացվում են ոչ հստակ լուսանկարներ: Բանն այն է, որ ենթակարմիր ճառագայթները քիչ են ցրվում, ուստի՝ հեռավոր առարկաների պատկերներն ստացվում են ավելի հստակ:

Տեսանելի ճառագայթում (լույս): Լույսն էլեկտրամագնիսական ալիքների սանդղակում զբաղեցնում է չափազանց նեղ տիրույթ: Նրա ալիքի երկարությունը փոփոխվում է $7,6 \cdot 10^{-7}$ մ-ից (կարմիր լույս) մինչև $3,8 \cdot 10^{-7}$ մ (մանուշակագույն լույս): Շիկացման լամպի էներգիայի միայն 3-4 %-ն է վերածվում լույսի, մնացածը վերածվում է ենթակարմիր ճառագայթման:

Անդրամանուշակագույն ճառագայթում: Այս ճառագայթման բնական աղբյուրներ են Արեգակը, աստղերը, միզամածությունները: Արեգակնային ճառագայթման էներգիայի մոտ 10%-ը անդրամանուշակագույն ճառագայթումն է:

Անդրամանուշակագույն ճառագայթումը կարելի է նկատել լյումինեսցենց առաջացնող նյութով պատած էկրանի օգնությամբ: Էկրանի այն մասը, որի վրա ընկնում է անդրամանուշակագույն ճառագայթում, սկսում է լուսարձակել:

Անդրամանուշակագույն, ինչպես և ենթակարմիր ճառագայթումները աչքի համար անտեսանելի են: Դրանք համեմատաբար քիչ են կլանվում մթնոլորտի վերին շերտերում, այդ պատճառով լեռներում դրանց զգալի ուժգնությունը վտանգավոր է մաշկի և աչքերի համար: Երկար ժամանակ բարձր վայրերում, օրինակ, Սևանա լճի ափին, առանց հագուստի մնալու դեպքում մարդու մաշկը վնասվում է անդրամանուշակագույն ճառագայթման ազդեցությունից: Սակայն փոքր քանակով անդրամանուշակագույն ճառագայթումը բուժիչ ներգործություն ունի մարդու օրգանիզմի համար: Չափավոր կերպով արևի տակ մնալն օգտակար է հատկապես փոքր հասակում. անդրամանուշակագույն ճառագայթումը նպաստում է երեխայի օրգանիզմի աճին և ամրացմանը:



Վիլիսլեմ Ռենտգեն

1845-1923

Գերմանացի նշանավոր ֆիզիկոս, 1895 թ. հայտնագործել է ռենտգենյան ճառագայթները, որը հսկայական նշանակություն է ունեցել ֆիզիկայի և, հատկապես բժշկության զարգացման համար, և մասնավորապես, հանգեցրել է ճառագայթակիրիվության հայտնագործմանը: Արժանացել է ֆիզիկայի բնագավառում առաջին մոբեյան մրցանակին (1901):

Անդրամանուշակագույն ճառագայթումն օգտագործվում է մահ բժշկության մեջ՝ մանրէներ ոչնչացնելու համար, քրեագիտության մեջ, ինչպես մահ կերպարվեստի ստեղծագործությունների իսկությունն ստուգելու համար:

Ռենտգենյան ճառագայթում: Ռենտգենյան ճառագայթները հայտնագործել է գերմանացի նշանավոր ֆիզիկոս Վիլիսլեմ Ռենտգենը 1895 թ., երբ ուսումնասիրում էր գազապարպիչ խողովակում կաթոդի արձակած ճառագայթումը, որն այն ժամանակ հայտնի էր «կաթոդային ճառագայթներ» անվամբ: Ռենտգենը նկատել է, որ խողովակի մոտ լուսանկարչական փթեղը ճառագայթահարվում է, ընդ որում՝ մույնիսկ այն դեպքում, երբ փաթաթված է սև թղթով: Երբ մա ձեռքը դնում էր խողովակի և փթեղի միջև, փթեղը երևակելույ հետո նրա վրա նկատում էր իր ձեռքի ոսկորների մութ ստվերը:

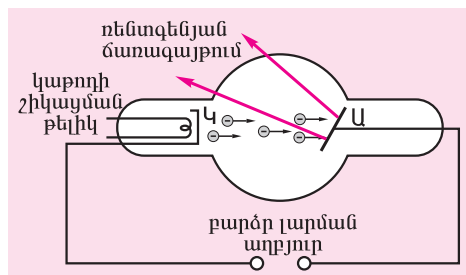
Այս փորձերի արդյունքում Ռենտգենը եզրակացրել է, որ պարզման ընթացքում նկատվում է ինչ-որ ճառագայթում, որն ուժեղ թափանցելու հատկություն ունի: Այդ անհայտ ճառագայթները մա

անվանեց **X-ճառագայթներ:** Հետագայում դրանք անվանել են «**ռենտգենյան ճառագայթներ**»:

Ռենտգենը նկատել է, որ մոր ճառագայթումը հայտնվում է այնտեղ, որտեղ կաթոդային ճառագայթները (որոնք արագընթաց էլեկտրոններ են) բախվում են խողովակի ապակե պատին: Հետագա փորձերը ցույց են տվել, որ X-ճառագայթները ծագում են արագընթաց էլեկտրոնները կամայական խոչընդոտով, մասնավորապես՝ մետաղե էլեկտրոդով արգելակելիս:

78-րդ նկարում պատկերված է ռենտգենյան խողովակ, որտեղ էլեկտրոնները, պոկվելով շիկացած Կ կաթոդից, հարվածում են Ա անոդին, որն էլ արձակում է ռենտգենյան ճառագայթում:

Ռենտգենյան ճառագայթումը ներգործում է լուսանկարչական փթեղի վրա, նյութից նկատելիորեն չի անդրադառնում, խոնացնում է օդը: Ռենտգենյան ճառագայթման ալիքի երկարությունը շատ փոքր է՝ $10^{-8} \div 10^{-12}$ մ, ընդ որում՝ այն



Նկ. 78. Ռենտգենյան խողովակ

այնքան փոքր է, որքան մեծ է արգելքին բախվող էլեկտրոնների էներգիան: Ռենտգենյան ճառագայթման մեծ թափանցելիությունը պայմանավորված է նրա փոքր ալիքի երկարությամբ:

Ռենտգենյան ճառագայթները մեծ կիրառություն ունեն բժշկության մեջ հիվանդությունները ճիշտ ախտորոշելու, ոսկորների կոտրվածքները նկարելու,

ինչպես մաս քաղցկեղային հիվանդությունները բուժելու համար: Հյուսվածքները և ոսկորները տարբեր չափով են կլանում ռենտգենյան ճառագայթները, որի հետևանքով լուսանկարչական քիթի վրա ստացվում են մութ և լուսավոր տեղեր (նկ. 79):



Նկ. 79. Ձեռքի «ռենտգեն» լուսանկար

Ռենտգենյան ճառագայթները լայնորեն կիրառվում են տարբեր նյութերի քիմիական բարդ մոլեկուլների և միացությունների բաղադրության և կառուցվածքի հետազոտություններում: Մասնավորապես, մարդու ԴՆԹ-ի կառուցվածքը («կրկնակի պարույր») հայտնաբերվել է հիմնականում ռենտգենյան ճառագայթների միջոցով:

Ռենտգենյան ճառագայթների կիրառության մեկ այլ բնագավառ է ռենտգենյան աստղագիտությունը: Պարզվում է, որ տիեզերքում կան աստղեր, որոնք լույսի փոխարեն արձակում են ռենտգենյան ալիքներ: Հայտնաբերվել են 500-ից ավելի նման աստղեր:

Ավելի փոքր ալիքի երկարություն ունի գամմա-ճառագայթումը: Այդ ճառագայթմանը կծանոթանաք 6-րդ գլխում:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ ռադիոալիքներ գիտեք:
2. Ի՞նչ ռադիոալիքներ են օգտագործվում արհեստական արբանյակի հետ ուղիղ կապ հաստատելու համար:
3. Ենթակարմիր ճառագայթման ի՞նչ աղբյուրներ գիտեք:
4. Ինչու՞ պարուհանի ապակու միջով անցած Արեգակի լույսն արևայրուկ չի առաջացնում:
5. Անդրամանուշակագույն ճառագայթման ի՞նչ աղբյուրներ գիտեք:
6. Ի՞նչ ալիքի երկարություն ունեն ռենտգենյան ճառագայթները:
7. Ի՞նչ բնույթ ունի ռենտգենյան ճառագայթումը:
8. Ի՞նչ կիրառություններ ունի ռենտգենյան ճառագայթումը:

Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. Ջրի մակերևույթին ընկնում են $\lambda = 7 \cdot 10^{-7}$ մ ալիքի երկարությամբ լույսի կարմիր ճառագայթներ: Որոշե՛ք այդ ճառագայթների ալիքի երկարությունը ջրում, եթե ջրի բեկման ցուցիչը՝ $n = 1,33$: Ի՞նչ գույնի ճառագայթներ կտեսնի մարդը ջրի տակ:

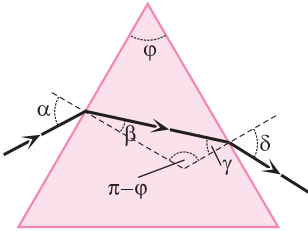
Լուծում: Վակուումում ալիքի հաճախությունը՝ $\nu = c/\lambda$: Մի միջավայրից մյուսն անցնելիս ալիքի հաճախությունը մնում է անփոփոխ, փոխվում են ալիքի տարածման v արագությունը և ալիքի երկարությունը: Ջրում ալիքի երկարությունը՝ $\lambda_2 = v/\nu$: Քանի որ $v = c/n$, ապա

$$\lambda_2 = \frac{c\lambda}{nc} = \frac{\lambda}{n} = 5,3 \cdot 10^{-7} \text{ մ:}$$

Վակուումում ալիքի այսպիսի երկարություն ունի կանաչ լույսը: Բայց քանի որ մարդը գույներն ընկալում է ոչ թե ըստ ալիքի երկարության, այլ ըստ հաճախության, ապա մա, այնուամենայնիվ, կարմիր լույս կտեսնի:

Պատասխան՝ $5,3 \cdot 10^{-7}$ մ, կարմիր:

2. Սպիտակ լույսի ճառագայթը $\alpha = 30^\circ$ անկյունով ընկնում է $\varphi = 45^\circ$ բեկող անկյունով պրիզմայի վրա: Պրիզմայի ապակու բեկման ցուցիչը կարմիր լույսի համար՝ $n_{\text{կ}} = 1,62$, իսկ մանուշակագույնի համար՝ $n_{\text{մ}} = 1,67$: Պրիզմայի h° ն R հեռավորությամբ պետք է տեղադրել $a = 10$ սմ լայնությամբ էկրանը, որպեսզի նրա վրա ստացվի տեսանելի սպեկտրի ամբողջական պատկերը:



Լուծում: Պարզենք, թե որքան է բեկման δ անկյունը, երբ ճառագայթը դուրս է գալիս պրիզմայից: Բեկման օրենքից $\sin \alpha = n \sin \beta$ և $\sin \delta = n \sin \gamma$: Դժվար չէ տեսնել, որ $\gamma = \pi - \beta - (\pi - \varphi) = \varphi - \beta$, հետևաբար՝ $\sin \delta = n \sin(\varphi - \beta) = n(\sin \varphi \cos \beta - \sin \beta \cos \varphi)$: Հաշվի առնելով, որ $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$, կստանանք՝

$$\sin \delta = \sin \varphi \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \sin \alpha \cos \varphi:$$

Այս արտահայտության մեջ տեղադրելով նախ $n_{\text{կ}}$ -ի, ապա $n_{\text{մ}}$ -ի արժեքները՝ կգտնենք սպեկտրի եզրային՝ կարմիր և մանուշակագույն ճառագայթների բեկման անկյունները. $\delta_{\text{կ}} = 47,4^\circ$, $\delta_{\text{մ}} = 50,6^\circ$: Ուրեմն՝ պրիզմայից դուրս եկող տարբեր գույնի ճառագայթների փունջը ցրվում է $\vartheta = \delta_{\text{կ}} - \delta_{\text{մ}} = 3,2^\circ = 0,056$ ռադ. փոքր անկյունով: Եթե այդ փնջի լայնությունը պրիզմայի նիստին անտեսենք, ապա այն կհավասարվի a -ի ելքից $R_0 = a/\vartheta = 1,8$ մ հեռավորությունում: Հետևաբար՝ էկրանին տեսանելի սպեկտրի ամբողջական պատկեր կստացվի, եթե այն տեղադրվի փնջին ուղղահայաց՝ ճառագայթների ելքից $R \leq R_0$ հեռավորությամբ:

Պատասխան՝ 1,8 մ:

3. Տարածության ինչ-որ կետում վերադրվում են $3,8 \cdot 10^{-7}$ մ ալիքի երկարությամբ լույսի երկու կոհերենտ ալիքներ: Ի՞նչ կոիտվի այդ կետում՝ լույսի ուժեղացում, թե՞ թուլացում, եթե մինչև վերադրման կետ ալիքների ընթացքի տարբերությունը $1,235 \cdot 10^{-5}$ մ է:

Լուծում: Տարածության այդ կետում ստուգենք լույսի ուժեղացման և թուլացման պայմանները: Այդ նպատակով ընթացքի Δd տարբերությունը բաժանենք λ ալիքի երկարությանը՝

$$\frac{\Delta d}{\lambda} = \frac{1,235 \cdot 10^{-5}}{3,8 \cdot 10^{-7}} = 32,5 \text{ կամ } \Delta d = 65 \frac{\lambda}{2}:$$

Այսպիսով՝ ընթացքի Δd տարբերության մեջ տեղավորվում է կենտ թվով կես ալիք, ուրեմն՝ տարածության այդ կետում ալիքները միմյանց թուլացնում են:

Պատասխան՝ թուլացում:

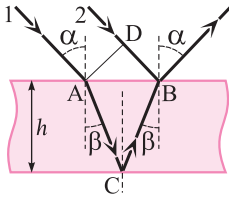
4. Ինտերֆերենցային պատկերի ինչ-որ կետում համընկել են $6,6 \cdot 10^{-7}$ մ ալիքի երկարությամբ կոհերենտ ալիքների չորրորդ կարգի մաքսիմումը և այլ երկարությամբ կոհերենտ ալիքների հինգերորդ կարգի մինիմումը: Որոշեք անհայտ ալիքի երկարությունը:

Լուծում: Եթե տվյալ կետում դիտվել է λ_1 երկարությամբ կոհերենտ ալիքների չորրորդ կարգի ($k_1 = 4$) մաքսիմում, ապա ալիքների ընթացքի Δd տարբերությունը, համաձայն (2.7) պայմանի, կլինի՝ $\Delta d = k_1 \lambda_1$: Համաձայն (2.8) պայմանի՝ նույն ընթացքի տարբերության դեպքում այդ կետում կոիտվի անհայտ՝ λ_2 երկարությամբ կոհերենտ ալիքների հինգերորդ կարգի մինիմում, եթե $\Delta d = (2k_2 + 1)\lambda_2/2$, որտեղ $k_2 = 5$: Հետևաբար՝ $k_1 \lambda_1 = (2k_2 + 1)\lambda_2/2$, որտեղից

$$\lambda_2 = \frac{2k_1\lambda_1}{2k_2 + 1} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 6,6 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 5 + 1} \text{ մ} = 4,8 \cdot 10^{-7} \text{ մ}:$$

Պատասխան՝ $4,8 \cdot 10^{-7} \text{ մ}$:

5. $n = 1,4$ բեկման ցուցով թափանցիկ քիթեղն $\alpha = 60^\circ$ անկյունով ընկնող սպիտակ լույսով լուսավորելիս կանաչ է երևում: Գտեք քիթեղի h նվազագույն հաստությունը: Կանաչ լույսի ալիքի երկարությունը՝ $\lambda = 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ մ}$:



Լուծում: Թիթեղի գունավորումը պայմանավորված է լույսի ճառագայթների ինտերֆերենցիայով, որոնք անդրադառնում են քիթեղի ստորին և վերին մակերևույթներից (տե՛ս նկարը): Թիթեղը կանաչ կերևա, եթե (1) և (2) ճառագայթների ընթացքի Δd տարբերությունը բավարարի ինտերֆերենցային մաքսիմումի պայմանը՝ $\Delta d = k\lambda$, որտեղ λ -ն կանաչ լույսի ալիքի երկարությունն է, իսկ $k = \pm 1, \pm 2, \dots$: Դառագայթների ընթացքի օպտիկական տարբերությունը՝ $\Delta d = n(AC + CB) + \lambda/2 - DB$: Այս արտահայտության մեջ n արտադրիչի առկայությունը հետևանք է այն բանի, որ միջավայրում լույսի արագությունն n անգամ փոքր է, քան վակուումում: Այսպես՝ Δt ժամանակամիջոցում միջավայրում ալիքի տատանումների փուլի փոփոխությունը՝ $\Delta \varphi = \omega \Delta t = \omega S/v = \omega nS/c$, որտեղ S -ն այդ ընթացքում ալիքի անցած ճանապարհն է միջավայրում: Նշանակում է՝ միջավայրում S ճանապարհ անցնելիս առաջանում է փուլի նույնքան փոփոխություն, որքան վակուումում՝ nS ճանապարհ անցնելիս: $\lambda/2$ գումարելին հաշվի է առնում այն հանգամանքը, որ քիթեղի ստորին մակերևույթից անդրադառնալիս ալիքի փուլը փոխվում է հակադիր ($\Delta \varphi = \pi$), այսինքն՝ առաջանում է փուլի ճիշտ այնպիսի փոփոխություն, ինչպիսին կառաջանար $\lambda/2$ ճանապարհ անցնելիս: Հաշվի առնելով, որ $AC = BC = h/\cos \beta$, $DB = AB \sin \alpha$, և օգտագործելով լույսի բեկման օրենքը՝ $\sin \alpha = n \sin \beta$, կստանանք՝

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} + \frac{2h(n - \sin \alpha \sin \beta)}{\cos \beta} = \frac{\lambda}{2} + 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}:$$

Այսպիսով՝ ինտերֆերենցային մաքսիմումի պայմանը կարտահայտվի այսպես՝

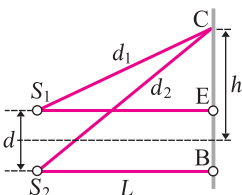
$$k - \frac{1}{2} \lambda = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}, \text{ որտեղից՝ } h = \frac{(2k - 1)\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}:$$

Թիթեղի h հաստությունը կլինի նվազագույնը, եթե $k = 1$: Տեղադրելով ֆիզիկական մեծությունների արժեքները՝ կստանանք՝

$$h_{\min} = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ մ} = 12 \text{ մկմ}:$$

Պատասխան՝ 12 մկմ:

6. Դիֆրակցիայի Յունգի փորձում երկու ճեղքերի միջև հեռավորությունը՝ $d = 0,07 \text{ մմ}$, իսկ դրանց հեռավորությունն էկրանից՝ $L = 2 \text{ մ}$: Երբ սարքը լուսավորում են կանաչ լույսով, հարևան լուսավոր դիֆրակտային շերտերի հեռավորությունը՝ $\Delta h = 16 \text{ մմ}$: Որոշեք ալիքի երկարությունը:



Լուծում: Էկրանի C կետում կոիտվի լուսավորվածության մաքսիմում, եթե $d_2 - d_1 = k\lambda$, որտեղ $k = 0, 1, 2, \dots$: S_1CE և S_2CB եռանկյունների նկատմամբ կիրառենք Պյութագորասի թեորեմը. $d_2^2 = L^2 + (h_k + d/2)^2$, $d_1^2 = L^2 + (h_k - d/2)^2$: Անդամ առ անդամ առաջին հավասարությունից հանելով երկրորդը՝ կստանանք՝

$$d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d \text{ կամ } (d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_k d:$$

Քանի որ $d \ll L$, ապա $d_1 + d_2 \approx 2L$, հետևաբար՝ $d_2 - d_1 \approx h_k d/L$: Հաշվի առնելով, որ $d_2 - d_1 = k\lambda$, կարող ենք գրել՝ $k\lambda = h_k d/L$ և $h_k = k\lambda L/d$: Հարևան շերտերի Δh հեռավորությունը՝ $\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \lambda L/d$, ուստի՝

$$\lambda \cdot \frac{d\Delta h}{L} \cdot 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ սմ}$$

Պատասխան՝ $5,6 \cdot 10^{-5}$ սմ:

7. Որոշեք լույսի ալիքի երկարությունը, եթե հայտնի է, որ դիֆրակտային առաջին շերտի հեռավորությունը կենտրոնական շերտից՝ $h = 0,12$ մ, իսկ դիֆրակտային պատկերի հեռավորությունը դիֆրակտային ցանցից՝ $L = 2$ մ: Դիֆրակտային ցանցը 1 մմ -ում ունի 100 նրբագիծ:

Լուծում: Լույսի ալիքի երկարությունը կորոշենք դիֆրակտային մաքսիմումի պայմանից՝ $d \sin \varphi = k\lambda$, որտեղ k -ն դիֆրակտային պատկերի համապատասխան շերտի համարն է, φ -ն՝ այն անկյունը, որով երևում է այդ շերտը, d -ն՝ դիֆրակտային ցանցի պարբերությունը ($d = 1 \text{ մմ}/100 = 10^{-5}$ մ): h -ը դիֆրակտային պատկերի առաջին շերտի հեռավորությունն է կենտրոնական շերտից, ուստի՝ $k = 1$: Հաշվենք φ անկյունը: Քանի որ h -ը շատ փոքր է L հեռավորությունից, ապա անկյունը փոքր է, հետևաբար՝ $\sin \varphi \approx \tan \varphi = h/L$: Տեղադրելով ստացված մեծությունները $d \sin \varphi = k\lambda$ բանաձևում՝ կստանանք՝

$$\lambda = \frac{d}{k} \sin \varphi \approx d \frac{h}{L} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ մ:}$$

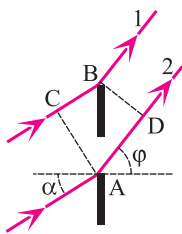
Պատասխան՝ $6 \cdot 10^{-7}$ մ:

8. 1 մմ-ում վրա 500 նրբագիծ ունեցող դիֆրակտային ցանցի վրա, նրա մակերևույթին ուղղահայաց ընկնում է հարթ մեներանգ լույսի ալիք ($\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ մ): Որոշել սպեկտրի ամենամեծ k կարգը, որը կարելի է դիտել:

Լուծում: Դիֆրակտային մաքսիմումի՝ $d \sin \varphi = k\lambda$ պայմանից k -ն կլինի ամենամեծը, եթե $\sin \varphi = 1$: Հետևաբար՝ $k = d/\lambda = 4$:

Պատասխան՝ 4:

9. Ինչպես կփոխվի դիֆրակտային մաքսիմումի (2.9) պայմանը, եթե մեներանգ լույսի ալիքն ընկնի դիֆրակտային ցանցի վրա α անկյունով:



Լուծում: Լույսի թեք անկման դեպքում հարևան ճեղքերի եզրերից եկող ալիքների ընթացքի տարբերությունը հավասար է AD և CB հատվածների երկարությունների տարբերությանը: Ինչպես երևում է նկարից, $AD = AB \sin \varphi$, $CB = AB \sin \alpha$, հետևաբար՝

$$\Delta d = AD - CB = AB \sin \varphi - AB \sin \alpha = d(\sin \varphi - \sin \alpha),$$

որտեղ d -ն դիֆրակտային ցանցի պարբերությունն է: Ուրեմն՝ դիֆրակտային մաքսիմումի (2.9) պայմանը կարտահայտվի այսպես՝

$$d(\sin \varphi - \sin \alpha) = k\lambda:$$

$k = 0$ դեպքը համապատասխանում է $\varphi_0 = \alpha$ անկյանը, այսինքն՝ զրոյական մաքսիմումն է կրանին դիտվում է α անկյունով:

Պատասխան՝ $d(\sin \varphi - \sin \alpha) = k\lambda$, որտեղ $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

ՀԱՐԱԲԵՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՏՈՒԿ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԻԵՐԸ

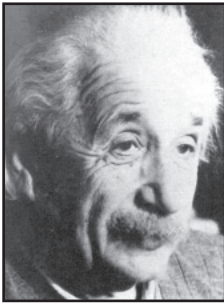
§ 27. ՀԱՐԱԲԵՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՏՈՒԿ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ԿԱՆԽԱԴՐՈՒՅԹՆԵՐԸ

Դասական կամ նյութաբանական մեխանիկայի հիմքում ընկած է **Գալիլեյի հարաբերականության սկզբունքը**, որի համաձայն՝ **հաշվարկման բոլոր իներցիալ համակարգերում մեխանիկական երևույթներն ընթանում են միատեսակ**: Համաձայն դասական պատկերացումների՝ ժամանակը հաշվարկման բոլոր իներցիալ համակարգերում ընթանում է նույն ձևով, իսկ տարածության կամայական երկու կետերի միջև հեռավորությունը բոլոր համակարգերում նույնն է՝ անկախ համակարգերի՝ իրար նկատմամբ շարժման արագությունից:

Ըստ արագությունների գումարման դասական օրենքի՝ անշարժ կոորդինատային համակարգում մարմնի շարժման $\vec{v}$ արագությունը մի այլ իներցիալ համակարգում նրա շարժման $\vec{v}'$ արագության հետ կապված է $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{U}$ առնչությամբ, որտեղ $\vec{U}$ -ն շարժվող համակարգի արագությունն է անշարժ համակարգի նկատմամբ: Եթե արագությունների գումարման դասական օրենքը կիրառենք լույսի արագության համար, ապա լույսի աղբյուրի նկատմամբ $\vec{U}$ արագությամբ շարժվող հաշվարկման համակարգում լույսի արագությունը՝ $\vec{c}' = \vec{c} - \vec{U}$:

Եթե, իրոք, լույսի (էլեկտրամագնիսական ալիքի) արագությունը հաշվարկման տարբեր համակարգերում լիներ տարբեր, ապա էլեկտրադինամիկայի և օպտիկայի օրենքները հաշվարկման տարբեր իներցիալ համակարգերում անփոփոխ (ինվարիանտ) տեսք չէին ունենա: Նման պնդման պատճառն այն է, որ էլեկտրադինամիկայի հիմքում ընկած Մաքսվելի հավասարումներում առկա է էլեկտրամագնիսական ալիքի տարածման արագությունը: Եթե այդ արագությունը հաշվարկման տարբեր իներցիալ համակարգերում ընդունի տարբեր արժեքներ, ապա Մաքսվելի հավասարումները մի իներցիալ համակարգից մյուսին անցնելիս կփոխվեն:

Եթե այս վերջին պնդումը ճշմարիտ է, ապա հարց է ծագում՝ ո՞ր համակարգում է լույսի արագությունը հավասար C -ի: Այլ կերպ ասած՝ ո՞ր համակարգում են Մաքսվելի հավասարումները ճիշտ: Հարցին պատասխանելու համար ենթադրվել է, որ լույսն ունի $C = 3 \cdot 10^8$ մ/վ արագություն՝ տիեզերքի կենտրոնի հետ կապված մի անշարժ «լուսային միջավայրում», որն անվանել են «եթեր»: Որպես այդ ենթադրության հետևանք՝ «եթերի» նկատմամբ շարժվող համակարգում լույսի արագությունը պետք է տարբերվեր C արժեքից: Այս հետևությունը ստուգելու համար 1887 թ. Ալբերտ Մայքելսոնը և Էդուարդ Մորլին կատարել են իրենց հայտնի փորձը՝ պարզելու համար, թե փոխվու՞մ է արդյոք լույսի արագությունը Երկրի հետ կապված հաշվարկման համակարգում՝ պայմանավորված նրա ուղեծրային շարժմամբ:



Ալբերտ Այնշտայն

1879 - 1955

Հրեա մեծ ֆիզիկոս: Արեղծել է հարաբերականության հատուկ տեսությունը: Այդ տեսությունն ընդհանրացնելով ոչ իներցիալ համակարգերի համար՝ կառուցել է հարաբերականության ընդհանուր տեսությունը: Առաջարկել է ֆոտոնի գաղափարը: Կառուցել է բրոունյան շարժման տեսությունը, որը նպաստել է նյութի կառուցվածքի մոլեկուլային-կինետիկ տեսության վերջնական հաղթանակին:

Եթե լույսի արագությունը Երկրի հետ կապված հաշվարկման համակարգում, որն Արեգակի նկատմամբ շարժվում է 30 կմ/վ արագությամբ, ունենար այլ՝ Ը-ից տարբեր արժեք, ապա դրանով կապացույցվեր «Եթերի» և նրա հետ կապված բացարձակ հաշվարկման համակարգի գոյությունը:

Մայքելսոնը և Մորլին փորձով ապացույցել են, որ լույսի արագության արժեքը կախված չէ Երկրի շարժումից: (19-րդ դարի ամենանշանավոր և գիտության մեջ հեղափոխական նշանակություն ունեցող այս փորձի համար Մայքելսոնը 1907թ. արժանացել է Նոբելյան մրցանակի): Հաշվարկման համակարգի ընտրությունից լույսի արագության անկախության իրողությունը ստիպեց էապես վերանայել ժամանակի և տարածության վերաբերյալ դասական պատկերացումները:

Առաջինն Ալբերտ Այնշտայնն է հրաժարվել դասական պատկերացումներից և ստեղծել ժամանակի, տարածության և շարժման վերաբերյալ նոր տեսություն՝ **հարաբերականության հատուկ տեսությունը**, որի հիմքում դրել է երկու կանխադրույթ (կանխադրույթը ֆիզիկայում չապացույցվող պնդում է, ինչ-

պես մաթեմատիկայում՝ աքսիոմը): Այս տեսության գաղափարների հիմնավորման և զարգացման համար մեծ դեր են խաղացել հռչակավոր ֆիզիկոսներ Անրի Պուանկարեն, Հենդրիկ Լորենցը և Հերման Մինկովսկին:

Առաջին կանխադրույթը **Այնշտայնի հարաբերականության սկզբունքն** է, որի համաձայն՝ **միևնույն պայմաններում բոլոր ֆիզիկական երևույթները հաշվարկման բոլոր իներցիալ համակարգերում ընթանում են միևնույն ձևով:**

Այսպիսով՝ Այնշտայնի հարաբերականության սկզբունքը Գալիլեյի հարաբերականության սկզբունքի ընդհանրացումն ու տարածումն է բնության բոլոր երևույթների վրա:

Այս կանխադրույթից հետևում է, որ՝

1. հաշվարկման իներցիալ համակարգում կատարված ոչ մի փորձով (մեխանիկական, էլեկտրամագնիսական, օպտիկական) հնարավոր չէ պարզել՝ համակարգն արդյոք դադարի վիճակում է, թե՞ շարժվում է,

2. մի իներցիալ համակարգից մյուսին անցնելիս ֆիզիկայի օրենքների մաթեմատիկական ձևակերպումները չպետք է փոխվեն:

Նշվածը պարզաբանենք հետևյալ օրինակով: Դիցուք՝ երկու ֆիզիկոս, մեկը՝ Երկրի վրա անշարժ լաբորատորիայում, իսկ մյուսը շարժվող գնացքում տեղակայված լաբորատորիայում անհրաժեշտ սարքավորումներով ուսումնասիրում են բնության այս կամ այն երևույթը: (Հիշենք, որ Երկրի հետ կապված հաշվարկման համակարգը մեծ ճշտությամբ կարելի է համարել իներցիալ:) Համաձայն Այնշտայնի հարաբերականության սկզբունքի՝ եթե գնացքը շարժվում է հավասար-

րաչափ՝ առանց ցնցումների, ապա միննույն սկզբնական պայմանների դեպքում երկու ֆիզիկոսներն էլ կհայտնաբերեն տվյալ երևույթը նկարագրող նույն օրինաչափություններն ու օրենքները: Դա նշանակում է, որ ինչպես Նյուտոնի, այնպես էլ էլեկտրադինամիկայի կամ ֆիզիկայի մեկ այլ բաժնի օրենքներն արտահայտող հավասարումները տարբեր հաշվարկման ինտերյիալ համակարգերում պետք է ունենան նույն տեսքը:

Ըստ Այնշտայնի երկրորդ կանխադրույթի՝ վակուումում լույսի արագությունը նույնն է հաշվարկման բոլոր ինտերյիալ համակարգերում և կախված չէ ո՛չ լույսի աղբյուրի, ո՛չ էլ լույսը գրանցող սարքի արագությունից:

Այս կանխադրույթը, բացի Մայքելսոն-Մորլիի փորձից, հետազայում ստուգել են բազմաթիվ այլ փորձերով: Օրինակ՝ 1956 թ. Ալեքսեյ Բոնչ-Բրունկիչը և Վիկտոր Մոլչանովը չափել են Արեգակի հակադիր եզրերից դեպի Երկիր արձակված լույսի արագությունները: Արդյունքները ցույց են տվել, որ չնայած իր առանցքի շուրջ Արեգակի պտտման հետևանքով տվյալ պահին նրա մի եզրը 2,3 կմ/վ արագությամբ մոտենում է Երկրին, իսկ մյուս եզրը՝ նույն արագությամբ հեռանում, սակայն երկու եզրերից էլ լույսը դեպի Երկիր տարածվում է նույն արագությամբ:

Այսպիսով՝ լույսի արագությունն առանձնահատուկ դեր է խաղում ֆիզիկայում. այն բնության հիմնարար հաստատումներից է: Ավելին, ինչպես բխում է Այնշտայնի կանխադրույթներից, **լույսի արագությունը վակուումում՝ $c = 3 \cdot 10^8$ մ/վ մեծությունը, բնության մեջ բոլոր փոխազդեցությունների տարածման հնարավոր ամենամեծ արագությունն է:**



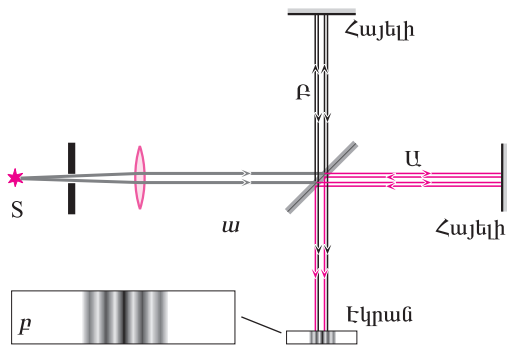
Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ պնդումներ են ընկած հարաբերականության հատուկ տեսության հիմքում:
2. Հարաբերականության հատուկ տեսության առաջին կանխադրույթն ինչո՞վ է տարբերվում Գալիլեյի հարաբերականության սկզբունքից:
3. Ինչպե՞ս է փոխվում լույսի արագությունը հաշվարկման մի ինտերյիալ համակարգից մյուսին անցնելիս:
4. Ի՞նչ փորձերով է հաստատվում հարաբերականության հատուկ տեսության երկրորդ կանխադրույթը:
5. Շարժվող վագոնի պարուհանից բաց թողած գնդիկը ուղևորի նկատմամբ շարժվում է ուղիղ գծով, իսկ գետնին կանգնած դիտորդի նկատմամբ՝ պարաբոլով: Չի՞ հակասում արդյոք այս փաստը հարաբերականության հատուկ տեսության առաջին կանխադրույթին:

§28. ՄԱՅՔԵԼՍՈՆ-ՄՈՐԼԻԻ ՓՈՐՁԸ

Հարաբերականության հատուկ տեսության երկրորդ կանխադրույթի ապացույցներից է 1887 թ. Մայքելսոնի և Մորլիի իրականացրած փորձը, որով ժխտվել է այն պնդումը, որ լույսի արագությունը $c = 3 \cdot 10^8$ մ/վ է միայն այսպես կոչված եթերի հետ կապված հաշվարկման համակարգում, իսկ նրա նկատմամբ շարժվող այլ համակարգերում լույսի տարածման արագությունը կարող է տարբեր լինել:

Մայքելսոն-Մորլիի փորձի նպատակը եթերի գոյությունը հաստատելը կամ ժխտելն էր: Փորձի սխեման պատկերված է 80-րդ նկարում: Սնդիկում լողացող զանգվածեղ քարն սալի վրա տեղադրված է ինտերֆերաչափ՝ սարք,



Նկ. 80. Մայքելսոն-Մորլիի փորձարարական սարքի սխեման

Դրա հետևանքով ստացվում են լույսի երկու կոհերենտ փնջեր. Ա փունջն անցնում է քիթեղով և շարունակում շարժվել նախկին ուղղությամբ, իսկ Բ փունջն անդրադառնում է քիթեղից և շարժվում նախնական ուղղությանն ուղղահայաց: Երկու փնջերն էլ, անդրադառնալով քիթեղից որոշակի հեռավորությամբ տեղադրված հայելիներից, վերադառնում են դեպի կիսաթափանցիկ քիթեղ, որից հետո, միավորվելով, էկրանին առաջացնում են ինտերֆերենցային պատկեր (նկ. 80,բ):

Փորձում նախ սարքը տեղադրում են այնպես, որ մի փունջը (Ա) տարածվում է Արեգակի շուրջ Երկրի ուղեծրային շարժման ուղղությամբ, իսկ մյուսը՝ նրան ուղղահայաց: Եթե լույսի արագությունը միայն եթերի հետ կապված հաշվարկման համակարգում հավասար լիներ C -ի, ապա Երկրի շարժման ուղղությամբ լույսի արագությունը պետք է փոխվեր: Այնպես, ինչպես օդի նկատմամբ շարժվող համակարգում քամի է առաջանում, եթերի նկատմամբ շարժվելիս նույնպես պետք է «եթերային քամի» նկատվեր: Եթե մի ուղղությամբ լույսը տարածվում է ավելի մեծ արագությամբ, ապա ամբողջ սարքը 90° -ով պտտելիս պետք է փոխվի ինտերֆերենցային շերտերի դասավորությունը:

Երկարատև փորձերը կրկնելով օրվա տարբեր ժամերին, ինչպես նաև գարնանը և աշմանը, երբ Երկիրը փոխում է Արեգակի շուրջ պտտման ուղեծրային արագության ուղղությունը, Մայքելսոնը և Մորլին ինտերֆերենցային պատկերի ոչ մի փոփոխություն չեն նկատել:

Այսպիսով՝ Մայքելսոն-Մորլիի փորձի արդյունքում ժխտվել է եթերի և նրա հետ կապված բացարձակ հաշվարկման համակարգի գոյությունը և ցույց տրվել, որ հաշվարկման բոլոր համակարգերում լույսի արագությունը հաստատուն մեծություն է և կախված չէ դիտորդի նկատմամբ լույսի աղբյուրի շարժման արագությունից:

որով կատարում են ճշգրիտ չափումներ, օգտագործելով ինտերֆերենցի երևույթը: Մեներանգ լույսի S աղբյուրից լույսի զուգահեռ ճառագայթների փունջն ընկնում է կիսաթափանցիկ ապակե քիթեղի վրա և բաժանվում երկու մասի: Ապակե քիթեղի մի մակերևույթն արժապատված է այնքան, որ ընկնող լույսի մի մասը բաց է թողնում, իսկ մյուս մասը՝ հայելու պես անդրադարձնում:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Հարաբերականության հատուկ տեսության n° ր կանխադրույթն է հիմնավորում Մայքելսոն-Մորլիի փորձը:
2. Նկարագրեք Մայքելսոն-Մորլիի փորձարարական սարքը:
3. Ինչու՞ էր Մայքելսոն-Մորլիի փորձում սարքը տեղակայված սնդիկում լողացող քարե զանգվածով սալի վրա:
4. Հիմնավորեք, որ Մայքելսոն-Մորլիի փորձը ժխտել է եթերի գոյությունը:

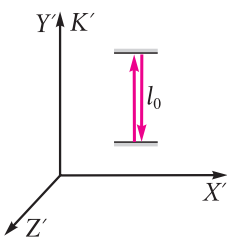
ԺԱՄԱՆԱԿԱՄԻՋՈՑՆԵՐԻ §29. ԵՎ ՇԵՌԱՎՈՐՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆԸ

Հարաբերականության հատուկ տեսության կանխադրույթներից բխում են մի շարք հետևանքներ, որոնք նկարագրում են տարածության և ժամանակի կարևորագույն հատկությունները: Դրանցից է ժամանակամիջոցների և հեռավորությունների հարաբերականությունը:

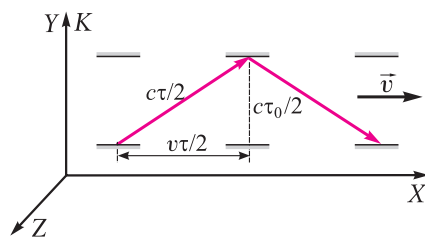
Ժամանակամիջոցների հարաբերականությունը: Դասական ֆիզիկայում ընդունվել է, որ հաշվարկման բոլոր համակարգերում ժամանակն ընթանում է միևնույն ձևով, և երկու պատահարների միջև ընկած ժամանակահատվածը մի ինտրինսիկ հաշվարկման համակարգից մյուսին անցնելիս չի փոխվում՝ $\Delta t = \Delta t'$:

Այնչափանի հարաբերականության տեսության երկրորդ կանխադրույթից, որպես հետևանք, բխում է այլ արդյունք՝ ժամանակամիջոցների հարաբերականությունը: Դիցուք՝ հաշվարկման որևէ K' իներչիալ համակարգում երկու պատահար տեղի են ունենում տարածության միևնույն կետում, և դրանց միջև ընկած ժամանակամիջոցն այդ համակարգի ժամացույցով τ_0 է: Այն անվանում են **սեփական ժամանակ**: Իսկ որքա՞ն կլինի այդ երկու պատահարների միջև ժամանակամիջոցը, եթե այն չափենք հաշվարկման մեկ այլ՝ K համակարգի ժամացույցով, որի նկատմամբ K' համակարգը շարժվում է v արագությամբ:

Հարցին պատասխանելու համար դիտարկենք հետևյալ փորձը: Դիցուք՝ աղբյուրից լույսի կարճատև ազդանշանը, տարածվելով ուղղաձիգ դեպի վեր, անդրադառնում է հայելուց և գրանցվում աղբյուրի մոտ դրված ընդունիչով: Փորձարարական սարքի հետ կապված K' հաշվարկման համակարգում անշարժ դիտորդը կգրանցի լույսի ազդանշանի ուղղաձիգ դեպի վեր և վար շարժման $\tau_0 = 2l_0/c$ ժամանակամիջոցը, որտեղ l_0 -ն լույսի աղբյուրի և հայելու միջև հեռավորությունն է (նկ. 81):



Նկ. 81. Ազդանշանի տարածումը սարքի հետ կապված K' համակարգում անշարժ դիտորդի տեսանկյունից



Նկ. 82. Ազդանշանի տարածումը K համակարգում դիտորդի տեսանկյունից

K հաշվարկման համակարգում, որի նկատմամբ սարքը շարժվում է v արագությամբ, պատկերն այլ է. դիտարկվող պատահարները տեղի են ունենում տարածության տարբեր կետերում: Մինչ առաքված ազդանշանը, հասնելով հայելուն, անդրադառնում և գրանցվում է, հայելին և ընդունիչը որոշ չափով տեղաշարժվում են դեպի աջ (նկ. 82): Եթե համապատասխան ժամանակամիջոցը նշանակենք τ -ով, ապա, ինչպես հետևում է 82-րդ նկարից, $c\tau/2$ և $c\tau_0/2$ հատվածները, հետևաբար՝ τ

և τ_0 ժամանակամիջոցները միմյանցից տարբեր են: τ -ի և τ_0 -ի կապը գտնենք՝ օգտվելով Պյութագորասի թեորեմից՝ $(c\tau/2)^2 = (c\tau_0/2)^2 + (v\tau/2)^2$, որտեղից

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}: \quad (3.1)$$

(3.1) առնչությունից հետևում է, որ երկու պատահարների միջև ժամանակամիջոցը կախված է հաշվարկման համակարգից, այսինքն՝ հարաբերական մեծություն է: Քանի որ զրոյից տարբեր կամայական v արագության դեպքում $\tau > \tau_0$, ապա սեփական ժամանակը միշտ փոքր է, քան մեկ այլ հաշվարկման համակարգում չափված ժամանակը: Սա **ժամանակի դանդաղման երևույթն է**:

Եթե $v \ll c$, ապա (3.1) բանաձևում v^2/c^2 անդամն անտեսելով 1-ի նկատմամբ՝ կստանանք՝ $\tau = \tau_0$, այսինքն՝ ժամանակի դանդաղումը $v \ll c$ դեպքում կարելի է հաշվի չառնել: Դա է պատճառը, որ առօրյա կյանքում չենք նկատում ժամանակի դանդաղման երևույթը, որն զգալի է միայն լույսի արագությամբ մոտ արագությունների դեպքում:

Ժամանակի դանդաղման երևույթի ակնառու ապացույցն է հետևյալ փորձնական փաստը: Հայտնի է, որ Երկրից մոտ 10 կմ բարձրությունում տիեզերական ճառագայթման ազդեցությամբ ծնվում են տարրական մասնիկներ՝ մյուոններ (դրանց մասին դուք կիմանաք 7-րդ գլխում), որոնք, հասնելով Երկրի մակերևույթին, գրանցվում են համապատասխան սարքերով: Հայտնի է, որ մյուոնի կյանքի տևողությունը՝ $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$ վ, այսինքն՝ այդքան ժամանակ անց այն վերածվում է տարրական այլ մասնիկների: Եթե ճիշտ չլիներ ժամանակի դանդաղման երևույթը, ապա, շարժվելով $v = 299640$ կմ/վ արագությամբ, մյուոնը կանցներ ընդամենը $l_0 = v\tau_0 \approx 0,66$ կմ ճանապարհի և չէր հասնի Երկրի մակերևույթին, որը չի համապատասխանում իրականությանը: Իսկ եթե օգտվենք (3.1) բանաձևից, ապա անցած ճանապարհի համար կստանանք՝ $l = v\tau \approx 13,4$ կմ: Սա ժամանակի դանդաղման երևույթի ճշմարտացիության լավագույն ապացույցն է:

Հեռավորությունների հարաբերականությունը: Հարաբերական է նաև հեռավորությունը: Պարզվում է, որ մարմնի չափերը (նրա որոշակի կետերի միջև հեռավորությունը) կախված է տվյալ հաշվարկման համակարգի նկատմամբ մարմնի շարժման արագությունից:

l_0 -ով նշանակենք ձողի երկարությունը K' հաշվարկման համակարգում, որի նկատմամբ ձողը դադարի վիճակում է: K հաշվարկման համակարգում, որի նկատմամբ ձողը շարժվում է իր երկայնքով ուղղված v արագությամբ, այդ նույն ձողի երկարությունը, համաձայն հարաբերականության հատուկ տեսության, որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}: \quad (3.2)$$

Ինչպես երևում է այս բանաձևից՝ $l < l_0$: Այլ կերպ ասած՝ շարժվող հաշվարկման համակարգում ձողի երկարությունը շարժման ուղղությամբ կրճատվում է:

Նշանակում է՝ եթե ձողի երկարությունը չափեն երկու դիտորդներ, որոնցից մեկը K համակարգում է, որի նկատմամբ ձողը շարժվում է, իսկ մյուսը՝ ձողի հետ

կապված K' համակարգում, ապա առաջինի չափած / արժեքը փոքր կլինի երկրորդի ստացած I_0 արժեքից: Այս երևույթն անվանում են **լորենցյան կրճատում**, որն, ի դեպ, գուտ կինեմատիկական երևույթ է, քանի որ ձողում չի ծագում մեխանիկական դեֆորմացիա առաջացնող որևէ մեխանիկական լարում:

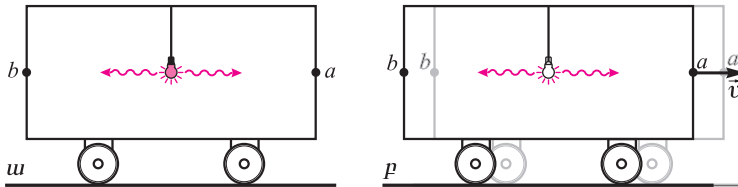
Ինչպես ժամանակամիջոցի, այնպես էլ հեռավորության հարաբերականության երևույթը զգալի է միայն լույսի արագությանը մոտ արագությունների դեպքում:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Գրեք ժամանակի դանդաղման երևույթն արտահայտող բանաձևը և պարզաբանեք դրա ֆիզիկական իմաստը: 2. Բերեք ժամանակի դանդաղման երևույթի օրինակներ: 3. Ինչու՞ առօրյա կյանքում չենք նկատում ժամանակի դանդաղման երևույթը: 4. Քանոնի երկարությունը նրա հետ կապված հաշվարկման համակարգում I_0 է: Որքա՞ն կլինի նրա երկարությունն այն հաշվարկման համակարգում, որի նկատմամբ քանոնը շարժվում է իր երկայնքով ուղղված v արագությամբ:

1. Համաձայն հարաբերականության հատուկ տեսության՝ հարաբերական է ոչ միայն ժամանակը, այլև երկու պատահարների միաժամանակությունը: Դա նշանակում է, որ եթե որևէ հաշվարկման համակարգի տարբեր կետերում միաժամանակ տեղի է ունենում երկու պատահար, ապա չի նշանակում, որ այդ նույն պատահարները միաժամանակ են տեղի ունենում նաև այլ հաշվարկման համակարգի դիտորդի տեսանկյունից: Նշվածը պարզաբանենք հետևյալ օրինակով:



Դիցուք՝ v արագությամբ շարժվող վագոնի մեջտեղում կախված լամպի կարճատև բռնկման հետևանքով առաքված լույսը հասնում է վագոնի առջևի և հետևի պատերի a և b կետերին և գրանցվում համապատասխան սարքերով: Վագոնում անշարժ դիտորդը կպնդի, որ լուսային ազդանշանն a և b կետերին հասնում և գրանցվում է միաժամանակ, քանի որ երկու ուղղությամբ էլ լույսը տարածվում է նույն արագությամբ և անցնում է միևնույն ճանապարհը (նկ. ա): Այդ երևույթին այլ մեկնաբանություն կտա գետինի կանգնած դիտորդը: Նա կպնդի, որ լույսը b կետին հասնում է ավելի շուտ, քան a կետին, քանի որ չնայած երկու ուղղություններով լույսը տարածվում է նույն արագությամբ, սակայն վագոնի շարժման շնորհիվ b կետը մոտենում է լուսային ազդանշանին, իսկ a կետը հեռանում է նրանից (նկ. բ): Այսպիսով՝ a և b կետերում լուսային ազդանշանի գրանցումը հաշվարկման մի համակարգում տեղի է ունենում միաժամանակ, իսկ մեկ այլ համակարգում՝ ժամանակի տարբեր պահերին:

2. **Երկվորյակների պարադոքսը:** Արամը և Վահեն երկվորյակներ են: Պատկերացնենք՝ Արամը մնում է Երկրի վրա, իսկ Վահեն $0,8c$ արագությամբ սլացող տիեզերանավով մեկնում է ճանապարհորդության և որոշ ժամանակ անց վերադառնում է Երկիր: Երկվորյակներից յուրաքանչյուրը ժամանակը չափում է իր ժամացույցով: Արամի ժամացույցն անշարժ է Երկրի նկատմամբ, իսկ Վահեինը՝ տիեզերանավի:

Արամի համակարգում Վահեի ժամացույցը շարժվում է, ուստի, համաձայն $\Delta t = \Delta t' / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ բանաձևի, որտեղ Δt -ն ճամփորդության տևողությունն է՝ ըստ

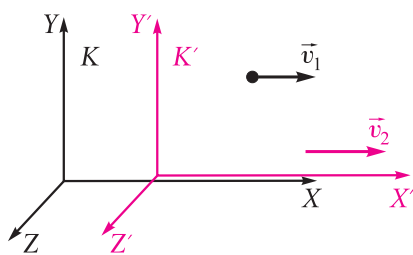
Արամի ժամացույցի, իսկ $\Delta t'$ -ը՝ ըստ Վահեի ժամացույցի, այդ ժամացույցի ընթացքը դանդաղում է, և Երկիր վերադառնալու պահին հետ ընկած է լինում: Տեղադրելով $v = 0,8c$ ստանում ենք՝ $\Delta t' = 0,6\Delta t$, որը նշանակում է, որ Վահեն Արամից ավելի քիչ է ծերացել: Եթե, օրինակ, ըստ Երկրային ժամացույցի, ճամփորդությունը տևել է 10 տարի, ապա ըստ Վահեի ժամացույցի՝ այն տևել է ընդամենը 6 տարի, այսինքն՝ վերադարձի պահին Վահեն 4 տարով ավելի երիտասարդ է լինում, քան Արամը:

Վահեի տեսակետից, ընդհակառակը, շարժվում է Արամի ժամացույցը, ուստի՝ վերադարձի պահին հետ ընկած կլինի նրա ժամացույցը, այսինքն՝ Արամը 4 տարով Վահեից երիտասարդ կլինի:

Կարծես քե ստացանք հակասություն՝ պարադոքս (հարակարծություն, տար-ըմբռնում): Իրականում, սակայն, ճանապարհորդ եղորդ՝ Վահեի դատողություններում թաքնված միակ կա: Իրոք, համաձայն Այնշտայնի առաջին կանխադրույթի՝ համար-ծեք են միայն հաշվարկի ինտերցիալ համակարգերը, մինչդեռ տիեզերանավին կապ-ված հաշվարկման համակարգն ինտերցիալ չէ: Չէ՞ որ, օրինակ, Երկրից մեկնելիս տիեզերանավը շարժվում է արագացումով, Երկիր վերադառնալու համար տիեզերա-նավը պետք է հետ շրջվի, որի համար նրան դարձյալ պետք է հաղորդվի արագացում:

Համաձայն **հարաբերականության ընդհանուր տեսության**՝ արագա-յամբ շարժվող հաշվարկման համակարգում ժամանակը, իրոք, դանդաղում է: Ուս-տի, բնականաբար, հետ կընկնի տիեզերանավի ժամացույցը, այլ կերպ ասած՝ երի-տասարդ կմնա ճանապարհորդ երկվորյակը՝ Վահեն:

§30. ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԳՈՒՄԱՐՍԱՆ ՈՒՆՅԱՏԻՎԻՍԱԿԱՆ ՕՐԵՆՔԸ



Նկ. 83. Հաշվարկման K' համակարգը v_2 արագությամբ շարժվում է K համակարգի նկատմամբ:

Դիցուք՝ մարմինը K' հաշվարկման համակարգի X' առանցքի երկայնքով շարժվում է v_1 արագությամբ, իսկ K' հա-մակարգն էլ, իր հերթին, v_2 արագությամբ շարժվում է K անշարժ հաշվարկման հա-մակարգի նկատմամբ՝ X առանցքի ուղ-ղությամբ (նկ. 83): Շարժման ընթացքում X և X' կոորդինատային առանցքները համընկնում են, իսկ Y և Y' , Z և Z' կոորդինատային առանցքները մնում են

միմյանց գուցահետ: Այդ դեպքում, համաձայն արագությունների գումարման դասական օրենքի, K համակարգի նկատմամբ մարմնի արագությունը՝

$$v = v_1 + v_2: \quad (3.3)$$

Այս պնդումն ակնհայտորեն հակասում է հարաբերականության հատուկ տեսության երկրորդ կանխադրույթին: Իրոք, եթե լույսի աղբյուրի հետ կապ-ված K' հաշվարկման համակարգում լույսի արագությունը c է, իսկ աղբյուրը հաշվարկման որևէ K համակարգի նկատմամբ շարժվում է u արագությամբ, ապա այդ համակարգում աղբյուրի շարժման ուղղությամբ լույսի արագու-թյունը կլինի՝ $c' = c + u > c$: Սա նշանակում է, որ շարժվող վագոնում գնացքի շարժման ուղղությամբ լամպի առաքած լույսը գետնի հետ կապված հաշ-վարկման համակարգում պետք է տարածվի ավելի մեծ արագությամբ, քան

վագոնի հետ կապված հաշվարկման համակարգում: Մինչդեռ, համաձայն հարաբերականության հատուկ տեսության երկրորդ կանխադրույթի, լույսի արագությունը հաշվարկման բոլոր համակարգերում նույնն է:

Հարաբերականության հատուկ տեսության մեջ ցույց է տրվում, որ մարմնի v արագությունը K անշարժ համակարգում որոշվում է հետևյալ բանաձևով.

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}: \quad (3.4)$$

Այս բանաձևն արտահայտում է **արագությունների գումարման ռեկյատիվիստական օրենքը**: (Ռեկյատիվիստական են կոչվում այն օրենքները, որոնք ճիշտ են կամայական, այդ թվում՝ նաև լույսի արագությանը մոտ արագությունների դեպքում): (3.4) բանաձևը բավարարում է հարաբերականության հատուկ տեսության բոլոր պայմանները: Հարկ է նորից նշել, որ (3.4) բանաձևը կիրառելի է այն դեպքում, երբ $\vec{v}_1$ և $\vec{v}_2$ վեկտորներն ուղղված են միևնույն ուղղի երկայնքով: Եթե $\vec{v}_1$ և $\vec{v}_2$ վեկտորները հակուղղված են, ապա (3.4) բանաձևում պետք է v_2 -ից անցնել $-v_2$ -ի:

(3.4) բանաձևից հետևում է, որ եթե $v_1 = c$, ապա v արագությունը նույնպես c է.

$$v = \frac{c + v_2}{1 + \frac{v_2}{c}} = c: \quad (3.5)$$

(3.4) բանաձևից բխող մյուս հետևությունն այն է, որ կամայական $v_1 < c$ և $v_2 < c$ արագությունների դեպքում արդյունարար արագությունը չի գերազանցում c -ն՝ $v < c$:

Արագությունների գումարման ռեկյատիվիստական օրենքն արտահայտում է այն իրողությունը, որ վակուումում լույսի արագությունը բնության մեջ հանդիպող արագությունների վերին սահմանն է: Ավելի մեծ արագություն, որով շարժվում է նյութական մասնիկը կամ դաշտը, գոյություն չունի:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ապացույցեք, որ արագությունների գումարման դասական օրենքը հակասում է հարաբերականության հատուկ տեսության երկրորդ կանխադրույթին: **2.** Գրեք արագությունների գումարման ռեկյատիվիստական օրենքը: **3.** Ի՞նչ պայմանների դեպքում է արագությունների գումարման ռեկյատիվիստական օրենքից ստացվում արագությունների գումարման դասական օրենքը: **4.** (3.4) բանաձևում տեղադրեք $v_1 = v_2 = c$ և մեկնաբանեք ստացված արդյունքը:

§31. ՌԵԼԱՏԻՎԻՍՏԱԿԱՆ ԴԻՆԱՄԻԿԱ

Ըստ Այնշտայնի հարաբերականության հատուկ տեսության՝ ոչ մի մարմին չի կարող ունենալ վակուումում լույսի արագությունից մեծ արագություն: Սակայն Նյուտոնի երկրորդ օրենքն արտահայտող $\vec{F} = m\vec{a}$ առնչությունը հակասում է այս պնդմանը: Իրոք, համաձայն դասական մեխանիկայի օրենք-

ների՝ դադարի վիճակից մարմինը հաստատուն ուժի ազդեցությամբ ձեռք է բերում $\vec{a} = \vec{F}/m$ արագացում, և t ժամանակ անց նրա արագությունը դառնում է $\vec{v} = \vec{a}t = \vec{F}t/m$: Այսինքն՝ մարմնի արագությունն ուղիղ համեմատական է ժամանակին և բավականաչափ մեծ ժամանակ անց այն կարող է գերազանցել վակուումում լույսի c արագությունը:

Միաժամանակ, Նյուտոնի երկրորդ օրենքից անմիջապես հրաժարվել չենք կարող, քանի որ այն հաստատվել է ահռելի քանակությամբ փորձնական փաստերով: Նշենք սակայն, որ այդ փաստերը վերաբերում են առօրյա իրավիճակներին, երբ մարմնի արագությունը շատ փոքր է լույսի արագությունից:

Նշվածից հետևում է, որ Նյուտոնի երկրորդ օրենքը պետք է ձևափոխվի այնպես, որ նրա հիման վրա ստացված արդյունքները չհակասեն հարաբերականության հատուկ տեսությանը, և, միաժամանակ, փոքր արագությունների դեպքում այն ընդունի իր դասական տեսքը:

Դասական մեխանիկայում Նյուտոնի երկրորդ օրենքն արտահայտող $\vec{F} = m\Delta\vec{v}/\Delta t$ բանաձևը կարելի է ներկայացնել նաև հետևյալ կերպ՝ $\vec{F} = \Delta(m\vec{v})/\Delta t$, և արտահայտել իմպուլսի միջոցով.

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t}: \quad (3.6)$$

Նշենք, որ Նյուտոնը գերադասում էր օգտվել իր օրենքի գրառման հենց (3.6) արտահայտությունից:

Հարաբերականության հատուկ տեսության մեջ ցույց է տրվում, որ մարմնի շարժումը նկարագրող (3.6) հավասարումը պահպանում է իր տեսքը, սակայն, ի տարբերություն դասական սահմանման, իմպուլսն արտահայտվում է

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.7)$$

բանաձևով, որտեղ m -ը մարմնի զանգվածն է, իսկ $\vec{v}$ -ն՝ արագությունը: Այս մեծությունը կոչվում է մարմնի **ռելյատիվիստական իմպուլս**:

Նշենք, որ դասական մեխանիկայի այն պնդումը, որ մարմնի իմպուլսի փոփոխությունը հավասար է նրա վրա ազդող ուժի իմպուլսին՝ $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$, պահպանվում է նաև ռելյատիվիստական մեխանիկայում, որտեղ սակայն իմպուլսն արտահայտվում է (3.7) բանաձևով:

Հեշտ է նկատել, որ լույսի արագությունից շատ փոքր արագությունների դեպքում, երբ $v^2/c^2 \ll 1$, ռելյատիվիստական իմպուլսի (3.7) բանաձևը հանգում է դասական մեխանիկայում իմպուլսի $\vec{p} = m\vec{v}$ հայտնի բանաձևին:

Այժմ համոզվենք, որ (3.6) և (3.7) բանաձևերից իրոք հետևում է, որ հաստատուն ուժի ազդեցությամբ մարմնի արագությունը չի կարող հավասարվել վակուումում լույսի արագությանը: Դիցուք՝ ժամանակի սկզբնական պահին դադարի վիճակում m զանգվածով մարմնի վրա ազդում է հաստատուն $\vec{F}$ ուժ: (3.6) հավասարումից՝ $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$, որտեղից հետևում է, որ հաստատուն $\vec{F}$ ուժի դեպքում $\vec{p} = \vec{F}t$: Ստացված արտահայտությունը տեղադրելով (3.6) բանաձևի մեջ՝ կստանանք՝

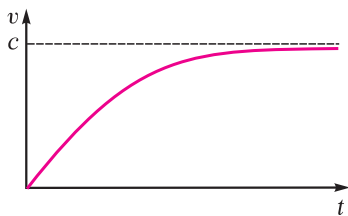
որտեղից

$$\vec{F}t = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (3.8)$$

$$\vec{v} = \frac{\vec{F}t}{m\sqrt{1 + \frac{F^2 t^2}{m^2 c^2}}}: \quad (3.9)$$

Դիտարկենք ստացված արտահայտության մի քանի մասնավոր դեպքեր: t ժամանակի փոքր արժեքների համար, երբ $Ft/mc \ll 1$, մարմնի արագությունը դեռևս փոքր է, (3.9) բանաձևում արմատատակ արտահայտության մեջ անտեսելով Ft/mc անդամը մեկի նկատմամբ՝ կստանանք արագության դասական հայտանի բանաձևը՝

$$\vec{v} = \frac{\vec{F}t}{m}: \quad (3.10)$$



Նկ. 84. Մարմնի արագության կախումը ժամանակից, երբ $F = \text{const}$:

Եթե $Ft/mc \gg 1$, ապա արմատատակ արտահայտության մեջ կարելի է անտեսել 1-ը: Այդ դեպքում մարմնի արագությունը ձգտում է c -ի՝ միշտ փոքր մնալով նրանից: Ժամանակից արագության կախումն արտահայտող գրաֆիկը $F = \text{const}$ դեպքում պատկերված է 84-րդ նկարում:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչու՞ հարաբերականության հատկություններից մեկը Նյուտոնի երկրորդ օրենքը կիրառելի չէ: 2. Ի՞նչ բանաձևով է արտահայտվում Նյուտոնի երկրորդ օրենքը ռելյատիվիստական մեխանիկայում: 3. Ի՞նչ բանաձևով է որոշվում մարմնի իմպուլսը ռելյատիվիստական մեխանիկայում: 4. Գրեք ռելյատիվիստական իմպուլսի բանաձևը և ցույց տվեք, որ լույսի արագությունից շար փոքր արագությունների դեպքում այն հանգում է իմպուլսի՝ դասական մեխանիկայում հայրնի բանաձևին: 5. Սեկնաբանեք 5-րդ նկարում պատկերված գրաֆիկը: 6. Հավասարաչափ արագացրո՞ղ է արդյոք հաստատվում ուժի ազդեցությամբ մարմնի ռելյատիվիստական շարժումը:

§32. ԶԱՆԳՎԱԾԻ ԵՎ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԿԱՊԸ

Մարմնի m զանգվածի և E էներգիայի կապը հարաբերականության հատուկ տեսության մեջ տրվում է Այնշտայնի հայտանի

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.11)$$

բանաձևով, որը ֆիզիկայի հիմնարար առնչություններից է: Այն էներգիայի բանական չափը բնութագրող առավել ընդհանուր բանաձևն է:

Եթե (3.11) բանաձևում տեղադրենք $v = 0$, այսինքն՝ ենթադրենք, որ մարմինը հանգստի վիճակում է, ապա կստանանք՝

$$E_0 = mc^2: \quad (3.12):$$

Այսպիսով՝ յուրաքանչյուր մարմին միայն իր գոյությամբ իսկ օժտված է էներգիայով, որը հավասար է նրա զանգվածի և վակուումում լույսի արագության քառակուսու արտադրյալին: Այդ էներգիան անվանում են մարմնի **հանգստի էներգիա**:

(3.12) բանաձևից հետևում է, որ մարմնի հանգստի էներգիայի փոփոխությամբ համապատասխանում է զանգվածի փոփոխություն, որը որոշվում է հետևյալ բանաձևով՝

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}: \quad (3.13)$$

Նշենք, որ զանգվածի փոփոխությունը կախված չէ հանգստի էներգիայի փոփոխության բնույթից: Օրինակ՝ զսպանակի զանգվածը կարող է մեծանալ ինչպես նրան ջերմաքանակ հաղորդելիս, այնպես էլ այն դեֆորմացնելիս: Նշված երկու դեպքում էլ փոխվում է մարմնի հանգստի էներգիան, որն ուղեկցվում է նրա զանգվածի համապատասխան փոփոխությամբ:

Այդ դեպքում հարց է առաջանում՝ ինչու՞ նման փորձերում չենք նկատում զանգվածի փոփոխությունը: Պատճառն այն է, որ (3.13) բանաձևում $1/c^2$ գործակցի շատ փոքր լինելու պատճառով Δm -ն այնքան փոքր է, որ հնարավոր չէ ոչ մի զգայուն սարքով չափել այն: Օրինակ՝ մեկ լիտր ծավալով ջուրը 0-ից 100°C տաքացնելիս նրա զանգվածը փոխվում է ընդամենը $5 \cdot 10^{-9}$ գրամով: Միայն ատոմների միջուկների և տարրական մասնիկների փոխակերպումների ժամանակ է հնարավոր նկատել այդ փոփոխությունը: Ջրածնային ռումբի պայթյունի ժամանակ անջատվում է վիթխարի էներգիա՝ մոտ 10^{17} Ջ: Այդ էներգիան գերազանցում է Երկրի վրա մի քանի օր շարունակ արտադրվող ամբողջ էլեկտրաէներգիան: Այդ դեպքում զանգվածի փոփոխությունը հնարավոր է լինում նկատել (այդ մասին կխոսենք 6-րդ գլխում):

Մարմնի հանգստի էներգիան կարող է փոխարկվել էներգիայի այլ տեսակների: Օրինակ՝ տարրական մասնիկների հատկություններն ուսումնասիրելիս կոնսենք, որ էլեկտրոնը և պոզիտրոնը միանալով՝ վերափոխվում են γ -ճառագայթման: Այդ դեպքում էլեկտրոնի և պոզիտրոնի հանգստի «թաքնված» էներգիան փոխակերպվում է էներգիայի դրսևորման այլ ձևի, որը կարելի է անմիջականորեն օգտագործել: Նկարագրված երևույթը հանգստի էներգիայի գոյության ակնառու փորձարարական ապացույցն է:

Երբ մարմինը շարժվում է, ապա այն, հանգստի էներգիայի հետ մեկտեղ, օժտված է նաև կինետիկ էներգիայով: Հարաբերականության հատուկ տեսության մեջ մարմնի կինետիկ էներգիան սահմանվում է որպես շարժվող մարմնի $mc^2/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ լրիվ էներգիայի և նրա mc^2 հանգստի էներգիայի տարբերություն.

$$E_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right): \quad (3.14)$$

Կինետիկ էներգիայի ոչ ռելյատիվիստական $mv^2/2$ բանաձևը հետևում է (3.14) բանաձևից՝ $v \ll c$ սահմանային դեպքում:

Իմպուլսի և էներգիայի կապը: (3.7) և (3.11) բանաձևերում մարմնի իմպուլսն ու էներգիան արտահայտում են նրա զանգվածով և արագությամբ՝

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}: \quad (3.15)$$

Այս երկու հավասարումների փոխարեն շատ հաճախ օգտագործում են երկու այլ հավասարումներ: (3.15) հավասարումները բաժանելով իրար՝ կստանանք՝

$$\vec{p} = \frac{E}{c^2} \vec{v}, \quad (3.16)$$

իսկ դրանցից արտաքսելով v -ն՝ կստանանք մարմնի իմպուլսի և էներգիայի կապն արտահայտող հետևյալ հավասարումը՝

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4: \quad (3.17)$$

(3.16) և (3.17) բանաձևերն առավել ընդհանուր են և, ի տարբերություն, (3.15) բանաձևերի, իրենց իմաստը չեն կորցնում մասնիկն ընդհանուր դեպքում, երբ մասնիկը շարժվում է վակուումում լույսի C արագությամբ:

Քանի որ լույսի մասնիկը՝ ֆոտոնը, հաշվարկման բոլոր իներչիալ համակարգերում շարժվում է լույսի արագությամբ՝ $v = c$, ապա, ըստ (3.16) բանաձևի, ֆոտոնի էներգիան՝

$$E = pc: \quad (3.18)$$

Այս արտահայտությունը տեղադրելով (3.17) բանաձևի մեջ՝ կստանանք, որ ֆոտոնի զանգվածը՝ $m = 0$: Իրոք, ֆոտոնին՝ նրա իներտության չափը բնութագրող զանգված վերագրելն անիմաստ է, քանի որ այն չի կարելի ո՛չ արագացնել, ո՛չ դանդաղեցնել. ֆոտոնը միշտ շարժվում է C արագությամբ կամ ընդհանրապես գոյություն չունի:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Գրեք մարմնի զանգվածի և էներգիայի փոխադարձ կապն արտահայտող բանաձևը:
2. Ո՞ր էներգիան են անվանում հանգստի էներգիա, և ի՞նչ բանաձևով է այն որոշվում:
3. Ի՞նչ բանաձևով կարելի է հաշվել մարմնի զանգվածի փոփոխությունը, եթե հայտնի է նրա հանգստի էներգիայի փոփոխությունը:
4. Փոխվում է արդյոք մարմնի զանգվածը տարբերակալի: Պատասխանը հիմնավորեք:
5. Ինչո՞ւ առօրյա կյանքում մենք չենք զգում տարբերություններ մարմնի զանգվածի աճը:
6. Գրեք մարմնի իմպուլսի և էներգիայի կապն արտահայտող հավասարումը:
7. Կարելի՞ է արդյոք արագացնել կամ դանդաղեցնել լույսի մասնիկը:

ՆՅՈՒՏՈՆՅԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱՆ ՈՐՊԵՍ ՌԵԼԱՏԻՎԻՍՏԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԿԱՅԻ ՍԱՐԱՆԱՅԻՆ ԴԵՊԵ

§ 33.

Նյութոնյան մեխանիկայի օրենքները մեծ ճշգրտությամբ բացատրում են շարժման օրինաչափությունները միայն այն դեպքում, երբ մարմնի արագությունը շատ փոքր է վակուումում լույսի արագությունից: Լույսի արագությանը մոտ արագությունների դեպքում տարածության և ժամանակի մասին դասական պատկերացումները և դրանց վրա հիմնված օրենքները հակասում են փորձարարական տվյալներին:

Հարաբերականության հատուկ տեսությունն արմատապես փոխեց դասական պատկերացումները ժամանակի և տարածության մասին, բացահայտեց հեռավորությունների և ժամանակամիջոցների հարաբերականությունը, էներգիայի և զանգվածի միջև նախկինում անհայտ կապը: Այդ տեսության շրջանակներում հնարավոր եղավ բացատրել շարժման օրինաչափությունները մարմնի կամայական հնարավոր արագությունների դեպքում:

Թեև հարաբերականության հատուկ տեսության շրջանակներում հայտնաբերված օրենքներն էապես տարբերվում են նյութոնյան մեխանիկայի օրենքներից, սակայն փոքր արագությունների դեպքում դրանք տալիս են նույն արդյունքները, ինչ դասական մեխանիկան: Այս փաստն արտահայտում է ժամանակակից գիտության մեջ կիրառվող, այսպես կոչված **համապատասխանության սկզբունքի** էությունը:

Համաձայն այս սկզբունքի՝ յուրաքանչյուր նոր տեսություն, որը հավակնում է բնության երևույթների առավել խոր նկարագրության և կիրառության ավելի լայն շրջանակների, պետք է ներառի նախկին տեսության արդյունքները: Այսինքն՝ նոր տեսությունն ամբողջովին չի ժխտում նախկին տեսությունը. լինելով առավել խոր և ընդհանրական՝ այն ցուցադրում է նախկին տեսության կիրառելիության սահմանները և, որպես մասնավոր (սահմանային) դեպք, ներառում է նախկինում ստացված արդյունքները:

Հարաբերականության հատուկ տեսությունն իրոք բավարարում է համապատասխանության սկզբունքը: Այդ տեսության բոլոր բանաձևերը լույսի արագությունից շատ փոքր արագությունների ($v \ll c$) դեպքում փոխակերպվում են դասական ֆիզիկայի համապատասխան բանաձևերի: Իրոք, եթե արագությունների գումարման ռելյատիվիստական (3.4) բանաձևում $v_1 \ll c$ և $v_2 \ll c$, ապա նրա հայտարարում $v_1 v_2 / c^2$ անդամը կարելի է անտեսել 1-ի համեմատությամբ, և կստանանք $v = v_1 + v_2$, որն արագությունների գումարման դասական օրենքն է: Անօրյա կյանքում առնչվում ենք արագությունների գումարման դասական օրենքին, քանի որ Երկրի վրա մակրոսկոպական մարմինների հնարավոր առավելագույն արագությունները 7–11 կմ/վ կարգի են և շատ փոքր են լույսի արագությունից: Այսպիսի (այսինքն՝ $v \ll c$) արագությունների դեպքում դասական մեխանիկան ճշգրտորեն նկարագրում է մարմինների մեխանիկական շարժումը: Ուստի՝ մարմնի արագության վրա դրվող պայմանը

ռելյատիվիստական մեխանիկայի մասնավոր դեպքի՝ **դասական մեխանիկայի կիրառելիության չափանիշն է:**

Նմանապես, տարբեր իներցիալ հաշվարկման համակարգերում ժամանակամիջոցների և հեռավորությունների կապերն արտահայտող (3.1) և (3.2) բանաձևերում անտեսելով v^2/c^2 անդամը՝ կստանանք՝ $l = l_0$ և $\tau = \tau_0$, այսինքն՝ կհանգենք տարածության և ժամանակի դասական պատկերացումներին, համաձայն որի՝ հաշվարկման բոլոր իներցիալ համակարգերում երկու կետերի միջև հեռավորությունը նույն է, իսկ ժամանակն ընթանում է միևնույն ձևով:

Յույց տանք նաև, որ դիտարկվող մոտավորությամբ կինետիկ էներգիայի ռելյատիվիստական բանաձևից ստացվում է դասական մեխանիկայի համապատասխան բանաձևը: Հարաբերականության հատուկ տեսության մեջ մարմնի կինետիկ էներգիան արտահայտվում է (3.14) բանաձևով՝

$$E_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) :$$

Օգտվենք մաթեմատիկայում հայտնի հետևյալ մոտավոր բանաձևից՝

$$\frac{1}{\sqrt{1 - x}} \approx 1 + \frac{x}{2}, \text{ եթե } 0 < x \ll 1: \quad (3.19)$$

(Դրանում կարելի է համոզվել՝ (3.19) հավասարման երկու մասերը քառակուսի բարձրացնելով և անտեսելով x^2 անդամը:) Կինետիկ էներգիայի (3.17) բանաձևում նշանակելով $x = v^2/c^2$ և կիրառելով (3.19) բանաձևը՝ կստանանք՝

$$E_k = mc^2 c_1 + \frac{v^2}{2c^2} - 1 \approx \frac{mv^2}{2}, \quad (3.20)$$

որն էլ մարմնի կինետիկ էներգիայի արտահայտությունն է դասական մեխանիկայում:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր դեպքում են ճիշտ դասական ֆիզիկայի օրենքները:
2. Ձևակերպեք համապատասխանության սկզբունքը:
3. Բերեք օրինակներ, որոնք ապացուցում են, որ հարաբերականության հատուկ տեսությունը ենթարկվում է համապատասխանության սկզբունքին:
4. Ի՞նչ արդյունքների կհանգեցնեն հարաբերականության հատուկ տեսությունը, եթե լույսի արագությունը լիներ անվերջ մեծ:

Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. Քանոնը տվյալ հաշվարկման համակարգում շարժվում է իր երկայնքով ուղիված այնպիսի արագությամբ, որ նրա լրիվ էներգիան երկու անգամ գերազանցում է հանգստի էներգիան: Ի՞նչ երկարություն կունենա քանոնն այդ համակարգում, եթե դադարի վիճակում նրա երկարությունը 1 մ է:

Լուծում: Քանի որ քանոնի լրիվ էներգիան՝ $E = mc^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, իսկ հանգստի էներգիան՝ $E_0 = mc^2$, ապա $E = 2E_0$ պայմանից կստանանք՝

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = 2mc^2,$$

որտեղից $v^2/c^2 = 3/4$: Տեղադրելով այն երկարության $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ բանաձևի մեջ, կստանանք՝ $l = 0,5$ մ:

Պատասխան՝ 0,5 մ:

2. Որքա՞ն ժամանակ է անցնում Երկրի վրա, եթե նրա նկատմամբ 0,95C արագությամբ շարժվող հրթիռում անցել է 8 տարի:

Լուծում: Երկրի վրա անցած ժամանակը որոշվում է $\tau = \tau_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ բանաձևով, որտեղ τ_0 -ն հրթիռում գրանցված ժամանակն է, այսինքն՝ $\tau_0 = 8$ տարի, իսկ v -ն՝ հրթիռի արագությունը: Այսպիսով՝ τ ժամանակի համար կստանանք՝

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{0,95c^2}{c^2}}} \cdot 26,5 \text{ տարի:}$$

Պատասխան՝ 26,5 տարի:

3. Արագարարում պրոտոնները ձեռք են բերում $7 \cdot 10^{10}$ էՎ կինետիկ էներգիա: Ի՞նչ արագությամբ են շարժվում պրոտոնները:

Լուծում: Համաձայն կինետիկ էներգիայի սահմանման՝

$$E_k = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1m, \quad \text{որտեղից} \quad v = c \sqrt{1 - \frac{mc^2}{mc^2 + E_k}}:$$

Հաշվի առնելով, որ պրոտոնի զանգվածը՝ $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ կգ, իսկ 1 էՎ $= 1,6 \cdot 10^{-19}$ Ջ, կստանանք՝ $v = 2,46 \cdot 10^8$ մ/վ:

Պատասխան՝ $2,46 \cdot 10^8$ մ/վ:

4. Մասնիկի լրիվ էներգիան 1500 Ջ է, իսկ իմպուլսը՝ $4 \cdot 10^{-6}$ կգմ/վ: Որքա՞ն են նրա արագությունը, զանգվածը և կինետիկ էներգիան:

Լուծում: Օգտվենք հարաբերականության տեսության

$$p = \frac{E}{c^2} v \quad (1) \quad \text{և} \quad E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 \quad (2)$$

հավասարումներից: (1) հավասարումից կստանանք՝ $v = pc^2/E = 2,4 \cdot 10^8$ մ/վ, իսկ (2) հավասարումից՝ $m = \sqrt{E^2 - p^2 c^2}/c^2 = 10^{-14}$ կգ: Մասնիկի կինետիկ էներգիան՝ $E_k = E - mc^2 = 600$ Ջ:

Պատասխան՝ $2,4 \cdot 10^8$ մ/վ, 10^{-14} կգ, 600 Ջ:

ՆԵՐԱԾՈՒԹՅՈՒՆ

19-րդ դարի վերջին դասական ֆիզիկական հասել էր զարգացման բարձր մակարդակի և հաջողությամբ բացատրում էր գրեթե բոլոր ֆիզիկական երևույթները:

Ավելի քան 200 տարի արդեն հայտնի նյութոնյան (դասական) մեխանիկայի օրենքները և գրավիտացիոն ձգողության տեսությունը բացատրում էին մարմինների մեխանիկական շարժման օրինաչափություններն ինչպես Երկրի վրա, այնպես էլ Արեգակնային համակարգում:

Ավարտուն տեսքի էր բերվել ջերմադինամիկան, որը բացատրում էր ջերմային երևույթները և ուներ բազմապիսի կիրառություններ:

Մոլեկուլային-կինետիկ տեսության հիման վրա, որը զարգացման բարձր մակարդակի հասավ շնորհիվ Լյուդվիգ Բոլցմանի և Ջեմս Մաքսվելի հետազոտությունների, վերջնականապես ձևավորվեց վիճակագրական ֆիզիկան, որը հիմնավորեց ինչպես ջերմադինամիկայի փորձարարական օրենքները, այնպես էլ բացատրեց տարբեր ագրեգատային վիճակներում նյութի ջերմային հատկությունները:

Փայլուն հաջողությունների էր հասել էլեկտրական և մագնիսական երևույթների միասնական տեսությունը՝ դասական էլեկտրադինամիկան, որի հիմքում դրված էին Մաքսվելի հավասարումները:

Հայտնաբերվել էին էներգիայի, իմպուլսի և լիցքի պահպանման հիմնարար օրենքները:

Այս հաջողությունները շատ ֆիզիկոսների մեջ ձևավորել էին այն պատկերացումը, որ բնության հիմնական օրինաչափություններն արդեն բացահայտվել են, և ֆիզիկայի զարգացումը մոտենում է ավարտին: Բավական է նշել 1900 թվականին նոր՝ 20-րդ դարի առթիվ լորդ Կելվինի ելույթը, որտեղ նա ավստոսանք է հայտնել ֆիզիկոսների գալիք սերունդներին, որոնց մնում էր միայն մանր շտկումներ կատարել ֆիզիկայի՝ հիմնականում կառուցված ամրույուն: Սակայն նույն ելույթում նա նշել է նաև «ֆիզիկայի մաքուր և պարզ երկնակամարում» մնացած երկու «ամպիկի» մասին, որոնցից մեկը վերաբերում էր Մայքելսոն-Մորլիի փորձի բացատրությանը, մյուսը՝ ջերմային ճառագայթման տեսությանը:

Կային նաև այլ չլուծված խնդիրներ, որոնք, ժամանակակից ֆիզիկոսների կարծիքով, շուտով կստանային իրենց լուծումը հայտնի տեսությունների շրջանակներում:

Սակայն պարզվեց, որ այդ խնդիրներն անլուծելի են դասական ֆիզիկայի համար և պահանջում են ժամանակի, տարածության, նյութի, դաշտի և շարժման մասին պատկերացումների հիմնովին վերանայում:

Ինչպես արդեն գիտեք, էլեկտրամագնիսականության տեսության և Գալիլեյի հարաբերականության սկզբունքի միջև հակասությունը լուծվեց հարաբերակա-

նության հատուկ տեսության շրջանակներում: Այն բացատրեց Մայքելսոն-Մորլիի փորձի արդյունքը՝ դրանով իսկ փոխելով մեր պատկերացումները ժամանակի և տարածության մասին:

Աստիճանաբար պարզ դարձավ, որ դասական ֆիզիկայի հասկացությունները և սկզբունքները, որոնք ծագել են մակրոսկոպական օբյեկտների ուսումնասիրությունների հիման վրա, կիրառելի չեն (կամ մասամբ են կիրառելի) ատոմային և ենթատոմային մասշտաբներում: Այս բնագավառում պահանջվում էին նոր պատկերացումներ և նոր օրենքներ:

Կաթոլային ճառագայթների, մարմինների ճառագայթման սպեկտրների, լույսի կլանման և արձակման, ֆոտոէֆեկտի և այլ փորձարարական ուսումնասիրությունների հիմքի վրա ծագեց և զարգացավ միկրոաշխարհի երևույթները և պրոցեսները նկարագրող նոր՝ քվանտային տեսությունը:

Նոր տեսության կայացումն ընթացել է երկու ուղղությամբ: Առաջինը կապված էր ջերմային ճառագայթման խնդրի լուծման հետ և վերածվեց քվանտային տեսության Մաքս Պլանկի (1900 թ.) և Ալբերտ Այնշտայնի (1905 թ.) աշխատանքների շնորհիվ:

Այս ուղղության շրջանակներում ի հայտ եկան էներգիայի քվանտի, ֆոտոնի, հարկադրական ճառագայթման, ինչպես նաև լույսի ալիքամասնիկային հատկությունների վերաբերյալ նոր հասկացություններն ու գաղափարները:

Մյուս ուղղությունը կապված էր ատոմների կառուցվածքի և ատոմական սպեկտրների ուսումնասիրման հետ: Այս ուղղության շնորհիվ ֆիզիկայում սահմանվեցին քվանտային վիճակների, քվանտային անցումների, քվանտային թվերի և այլ նոր գաղափարներ: Այս երկու ուղղությունները միավորվեցին 20-րդ դարի 25-30-ական թվականներին՝ որպես մեկ միասնական տեսություն՝ քվանտային ֆիզիկա:

Ներկայումս քվանտային տեսությունը միավորում է էլեկտրամագնիսական ճառագայթման, միկրոմասնիկների (տարրական մասնիկներ, ատոմներ, մոլեկուլներ) ալիքային և մասնիկային հատկությունները մեկ միասնական հիմքի վրա:

Քվանտային տեսությունն ստեղծեցին ֆիզիկոսները, սակայն նրա կառուցումը կապված էր ֆիզիկական, քիմիական, մաթեմատիկական, փիլիսոփայական և տրամաբանական խնդիրների ողջ համալիրի լուծման հետ: Նրա ստեղծումն ազդեց ոչ միայն գիտության և տեխնիկայի, այլ որոշ իմաստով՝ նաև համաշխարհային մշակույթի վրա:

Քվանտային տեսության կամ ոչ դասական ֆիզիկայի ստեղծման դժվար ճանապարհի պատմությունը մարդու՝ բնության ճանաչման պատմության փայլուն էջերից է:

§ 34. ԲՎԱՆՏԱՅԻՆ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ԾԱԳՈՒՄԸ

Ջերմային ճառագայթում: Պատմականորեն քվանտային տեսության գաղափարներն սկսել են ձևավորվել ջերմային ճառագայթման օրինաչափությունների տեսական հիմնավորման պրոցեսում:

Ջերմային են անվանում այն էլեկտրամագնիսական ճառագայթումը, որն արձակում է մարմինը՝ ի հաշիվ իր ներքին էներգիայի: Այն ճառագայթում են նյութի մասնիկները:

Ջերմային ճառագայթում արձակում են և՛ բարձր, և՛ ցածր ջերմաստիճանով մարմինները: Տարբերությունը միայն այն է, որ մարմնի ջերմաստիճանը նվազելիս ճառագայթման ուժգնությունը փոքրանում է, ինչպես նաև փոխվում է նրա սպեկտրային բաղադրությունը:

Պլանկի վարկածը: Ջերմային ճառագայթման երևույթը դասական ֆիզիկայում երկար ժամանակ անբացատրելի էր: Ավելին, դասական ֆիզիկայի գաղափարների հետևողական կիրառումը ջերմային ճառագայթման օրինաչափությունները բացատրելիս հանգեցնում էր էներգիայի պահպանման օրենքի խախտման: Ըստ դասական պատկերացումների՝ մարմնի ատոմները ջերմային տատանումների հետևանքով պետք անընդհատ ճառագայթեն: Ճառագայթմանը զուգընթաց՝ ատոմներն անընդհատ պետք է կորցնեն տատանումների էներգիան՝ մինչև կանգ առնելը, այսինքն՝ մարմնի ջերմաստիճանը պետք է, ի վերջո, հավասարվի բացարձակ զրոյի, մի բան, որն իրականում երբեք տեղի չի ունենում:

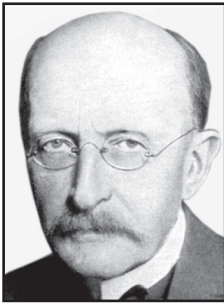
Դասական ֆիզիկայի շրջանակներում առաջացող այս հակասությունը շրջանցելու համար գերմանացի հանճարեղ ֆիզիկոս Մաքս Պլանկը ենթադրել է, որ ատոմներն էլեկտրամագնիսական էներգիան ճառագայթում են ոչ թե անընդհատ, այլ ընդհատ, որոշակի քանակներով՝ քվանտներով (լատիներեն «քվանտում»՝ քանակ, բաժին բառից): Այս ենթադրությունը հայտնի է որպես Պլանկի վարկած:

Պլանկը ենթադրել է, որ քվանտի էներգիան ուղիղ համեմատական է ճառագայթման ν հաճախությանը՝

$$E = h\nu: \quad (4.3)$$

Համեմատականության h գործակիցն անվանում են **Պլանկի հաստատուն**, այն բնության հիմնարար հաստատուններից է: Ջերմային ճառագայթման և մի շարք այլ փորձերից Պլանկի հաստատունի համար ստացվել է հետևյալ արժեքը՝

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Զ}\cdot\text{վ}: \quad (4.4)$$



Պլանկ Մաքս

1858 - 1947

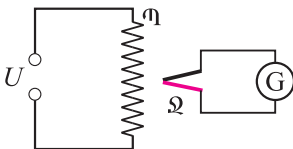
Գերմանացի հանձարեղ ֆիզիկոս, ժամանակակից քվանտային տեսության հիմնադիրը: 1900 թ. ենթադրել է, որ տեսական էներգիա է արձակվում առանձին բաժիններով՝ քվանտներով: Աշխարհաքննարկ վերաբերում են ջերմադինամիկային, ջերմային ճառագայթման տեսությանը, հարաբերականության տեսությանը և ֆիզիկայի պատմությանը: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1918):

Ըստ Պլանկի վարկածի ժամանակակից մեկնաբանման՝ ատոմի կամ մոլեկուլի տատանումների էներգիան կարող է ունենալ $h\nu$, $2h\nu$, ..., $nh\nu$ արժեքներ, սակայն չեն կարող գոյություն ունենալ «ոչ ամբողջ թիվ» անգամ $h\nu$ էներգիայով տատանումներ: Նշանակում է, որ էներգիան անընդհատորեն փոփոխվող ֆիզիկական մեծություն չէ, ինչպես դասական ֆիզիկայում է: Այն քվանտացած է, այսինքն՝ կարող է գոյություն ունենալ միայն խիստ որոշակի՝ ընդհատ բաժիններով: Էներգիայի յուրաքանչյուր բաժին անվանում են էներգիայի քվանտ:

Քվանտային վարկածի հիման վրա Պլանկը հաջողությամբ բացատրել է ջերմային ճառագայթման օրինաչափությունները: Սակայն մինչև Այնշտայնի՝ ֆոտոէֆեկտի բացատրությունը, այս վարկածը ֆիզիկոսները թերահավատորեն էին ընդունում: Իրականում Պլանկի վարկածը ֆիզիկայի զարգացման համար ունեցել է կարևորագույն նշանակություն: Դրա հիման վրա ստեղծվել և զարգացել է ֆիզիկայի մի նոր ուղղություն՝ միկրոաշխարհի ֆիզիկան կամ քվանտային ֆիզիկան, որը վերջնականորեն ձևավորվել է 1925-26 թվականներին՝ նշանավոր ֆիզիկոսներ Էրվին

Շրյոդինգերի, Վեռներ Հայզենբերգի, Պոլ Դիրակի և այլ ականավոր ֆիզիկոսների աշխատանքների հիման վրա:

Խորացված

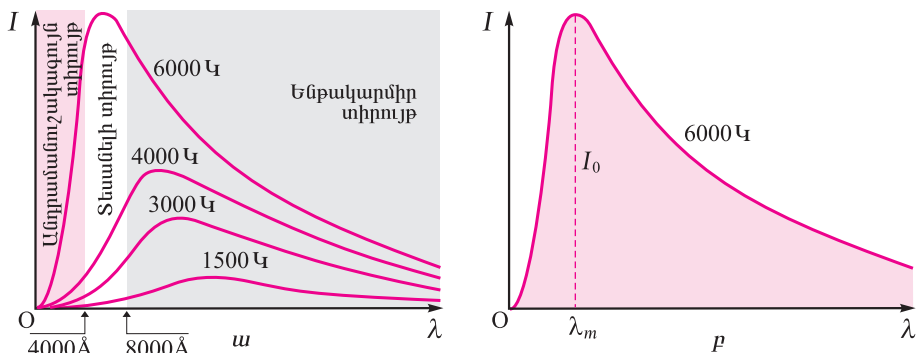


Նկ. 85. Ջերմային ճառագայթում գրանցող սարքի սխեման

Ջերմային ճառագայթումն ուսումնասիրենք հետևյալ փորձի օգնությամբ (նկ. 85): Պ պարույրը միացնենք կարգավորվող U լարման աղբյուրին: Լարման փոքր արժեքների դեպքում արտաքինից պարույրի ոչ մի փոփոխություն չենք նկատի: Սակայն եթե զգայուն G գալվանաչափին միացված Ω ջերմազույգը մոտեցնենք պարույրին, ապա գալվանաչափի սլաքը կշեղվի՝

ցույց տալով որոշակի հոսանք: Նշանակում է՝ պարույրը ճառագայթում է էներգիա, և ջերմազույգը, կլանելով այն՝ վերածում է էլեկտրական հոսանքի էներգիայի: Պարույրի՝ համեմատաբար ցածր ջերմաստիճաններում ջերմային ճառագայթման ալիքի երկարություններն ընկած են սպեկտրի ենթակարմիր տիրույթում, ուստի ճառագայթումը տեսանելի չէ: Ենթակարմիր ճառագայթման աղբյուր են, օրինակ, տաք արդուկը, ջեռույցիչը:

Պարույրի ծայրերին կիրառված լարումը մեծացնելիս պարույրի ջերմաստիճանը բարձրանում է, և դրա հետ մեկտեղ մեծանում է ջերմային ճառագայթման ուժգնությունը: Մոտ 1000 Կ ջերմաստիճանում պարույրն սկսում է կարմիր լույս արձակել: Ջերմաստիճանի հետագա բարձրացմանը զուգընթաց ճառագայթման ուժգնությունն ավելի է մեծանում, իսկ արձակվող



Նկ. 86. Տարբեր ջերմաստիճաններում ջերմային ճառագայթման ուժգնության կախումն ալիքի երկարությունից (λ), I_0 լրիվ ուժգնությանը համապատասխանող մակերեսը $T = 6000$ K ջերմաստիճանում (ν)

լույսի գույնն աստիճանաբար փոխվում է՝ սկզբում դառնալով նարնջագույն, հետո՝ դեղին, և ի վերջո՝ սպիտակ։ Այլ կերպ ասած՝ շիկացած պարույրն արձակում է լույսի լրիվ սպեկտրը։

Պարզվում է, որ ավելի բարձր ջերմաստիճաններում մարմնի ջերմային ճառագայթման մեջ զգալի է անդրամանուշակագույն էլեկտրամագնիսական ալիքների ներդրումը։ Ջերմային ճառագայթումն ընդգրկում է սպեկտրի ամբողջ տիրույթի էլեկտրամագնիսական ալիքները։

Փորձը ցույց է տալիս, որ λ ալիքի երկարությունից ջերմային ճառագայթման ուժգնության կախումն արտահայտվում է 86-րդ նկարում պատկերված կորերով։ Տվյալ ջերմաստիճանում ճառագայթման I_0 լրիվ ուժգնությունը թվապես հավասար է ալիքի երկարությունից ուժգնության կախման կորով սահմանափակված պատկերի մակերեսին (նկ. 86,բ)։

Ճառագայթման լրիվ ուժգնությունն ուղիղ համեմատական է բացարձակ ջերմաստիճանի չորրորդ աստիճանին.

$$I_0 = \sigma T^4: \quad (4.1)$$

Այս պնդումն անվանում են Ստեֆան-Բոլցմանի օրենք։ (4.1) հավասարման մեջ համեմատականության գործակիցը՝ $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Վտ/(մ²Կ⁴) և կոչվում է Ստեֆան-Բոլցմանի հաստատուն։

86-րդ նկարում պատկերված կորերից հետևում է, որ տրված ջերմաստիճանում ճառագայթման ուժգնությունն ընդունում է իր առավելագույն արժեքը որոշակի λ_m ալիքի երկարության դեպքում, ընդ որում, ջերմաստիճանի աճին գույքընթաց այն տեղաշարժվում է դեպի անդրամանուշակագույն տիրույթ։

Նշված կորերի վերլուծության արդյունքում գերմանացի ֆիզիկոս Վիլհելմ Վինը ստացել է T ջերմաստիճանից λ_m -ի հետևյալ պարզ կախումը.

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (4.2)$$

որտեղ $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ մ·Կ մեծությունը կոչվում է Վինի հաստատուն։ (4.2) բանաձևն արտահայտում է **Վինի շեղման օրենքը**։ Այս օրենքն ունի գործնական մեծ նշանակություն, քանի որ հնարավորություն է տալիս ճառագայթման

հայտնի սպեկտրների օգնությամբ որոշելու ճառագայթում արձակող մարմնի ջերմաստիճանը: Այս մեթոդը հատկապես օգտակար է այն դեպքերում, երբ մարմնի ջերմաստիճանն անմիջականորեն հնարավոր չէ չափել: Օրինակ՝ Արեգակի ճառագայթման սպեկտրի վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ նրա համար $\lambda_m = 470$ նմ, հետևաբար, օգտվելով Վիենի շեղման (4.2) բանաձևից, կարող ենք գնահատել Արեգակի արտաքին շերտերի ջերմաստիճանը, որը մոտավորապես 6000 Կ է:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր ճառագայթումն է կոչվում ջերմային: 2. Ո՞րն է Պլանկի վարկածը: 3. Ի՞նչ բանաձևով է որոշվում ν հաճախությամբ ճառագայթման քվանտի էներգիան: 4. Որքա՞ն է Պլանկի հաստատված: 5. Ո՞ր գույնի լույսի քվանտի էներգիան է ավելի մեծ՝ կապույտ, կարմիր, մանուշակագույն, թե՞ դեղին: 6. Ինչպե՞ս է փոխվում ճառագայթման սպեկտրում էներգիայի բաշխման կորը ջերմաստիճանը բարձրացնելիս: 7. Սահմանեք Ստեֆան-Բոլցմանի օրենքը և գրեք այն արտահայտող բանաձևը: 8. Սահմանեք Վիենի շեղման օրենքը:

§35. ՖՈՏՈՆ: ՖՈՏՈՆԻ ԷՆԵՐԳԻԱՆ ԵՎ ԻՄՊՈՒԼՍԸ

1905 թ. Այնշտայնը զարգացրել է Պլանկի վարկածը: Նա ենթադրել է, որ քվանտներն իրականում գոյություն ունեցող մասնիկներ են, որոնք ոչ միայն արձակվում և կլանվում են, այլև տարածվում են՝ պահպանելով իրենց ամբողջականությունը: Կլանվել կարող է միայն *h* ν քվանտն ամբողջությամբ: Այս ենթադրությունը հնարավորություն է ընձեռել բացատրելու ֆոտոէֆեկտի երևույթը, որին կծանոթանաք հաջորդ պարագրաֆում: Լույսի քվանտն ավելի ուշ անվանել են ֆոտոն (հունարեն «ֆոտոս»՝ լույս բառից. «ոն» վերջածանցը նշանակում է «մասնիկ»):

Ֆոտոնը լույսի մասնիկ է, որը կարող է արձակել և կլանել ատոմը: Այն էլեկտրամագնիսական դաշտի հատկությունները կրող տարրական մասնիկ է: Արձակման, տարածման և կլանման երևույթներում լույսը դրսևորում է մասնիկային հատկություններ: Ֆոտոնի էներգիան՝

$$E = h\nu: \quad (4.5)$$

Ի տարբերություն տարրական այլ մասնիկների՝ հանգստի վիճակում ֆոտոն գոյություն չունի: Ֆոտոնի արագությունը հնարավոր չէ փոփոխել: Ծնվելիս ֆոտոնը միշտ շարժվում է վակուումում լույսի *c* արագությամբ, իսկ կլանվելիս դադարում է գոյություն ունենալուց:

Հարաբերականության հատուկ տեսության մեջ ֆոտոնի *E* էներգիան և *p* իմպուլսը կապված են $E = pc$ առնչությամբ (տե՛ս (3.18) բանաձևը), հետևաբար՝ ֆոտոնի իմպուլսը՝

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad (4.6)$$

որտեղ λ -ն լույսի ալիքի երկարությունն է: Ֆոտոնի իմպուլսն ունի լույսի տարածման ուղղությունը:

Այսպիսով՝ ֆոտոնի էներգիան և իմպուլսը կախված են լույսի հաճախությունից, որքան մեծ է հաճախությունը, այնքան մեծ են նշված մեծությունները, և ավելի ցածր են դրսևորվում լույսի մասնիկային հատկությունները:

Առօրյա կյանքում հանդիպող մասնիկների էներգիայի և իմպուլսի համեմատությամբ ֆոտոնի էներգիան և իմպուլսն ունեն շատ փոքր արժեքներ, քանի որ Պլանկի հաստատունը չափազանց փոքր է: Օրինակ՝ կարմիր լույսի ալիքի երկարությունը՝ $\lambda = 0,7$ մկմ, ուստի՝ դրան համապատասխանող ֆոտոններն ունեն $E = 3 \cdot 10^{-19}$ Ջ էներգիա և $p = 10^{-27}$ կգ մ/վ իմպուլս: Իմպուլսի այս փոքր արժեքն է պատճառը, որ առօրյա կյանքում չենք զգում լույսի ճնշումը:

Քվանտային տեսության շրջանակներում լույսը դիտարկելով որպես առանձին մասնիկների՝ ֆոտոնների հոսք, կարծես վերադարձ ենք կատարում Նյուտոնի առաջ քաշած լույսի կորպուսկուլային տեսությանը: Նշենք սակայն, որ լույսը դիտարկելով որպես մասնիկների՝ կորպուսկուլների հոսք, Նյուտոնը ենթադրում էր, որ այդ մասնիկները ենթարկվում են դասական մեխանիկայի օրենքներին և դրանց հիման վրա փորձում էր բացատրել օպտիկական երևույթները: Մինչդեռ, համաձայն լույսի քվանտային տեսության, ի տարբերություն դասական մասնիկների, լույսի մասնիկները՝ ֆոտոնները, ենթարկվում են այլ օրինաչափությունների. ֆոտոններն օժտված են մասնիկային հատկություններով:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչպե՞ս են կոչվում լույսի քվանտները:
2. Ի՞նչ բանաձևով է որոշվում ν հաճախությամբ ֆոտոնի իմպուլսը:
3. Ի՞նչ առնչությամբ են կապված լույսի ալիքի երկարությունը և ֆոտոնի իմպուլսը:
4. Գրե՞ք ֆոտոնի էներգիայի և իմպուլսի կապն արտահայտող բանաձևը:
5. Փոխվու՞մ է արդյոք ֆոտոնի էներգիան մի միջավայրից մյուսն անցնելիս:

Լույսի քվանտային բնույթն ակնառու դրսևորվել է ռուս ֆիզիկոս Սերգեյ Վավիլովի իրականացրած հետևյալ նուրբ փորձում: Նա ուսումնասիրել է կանաչ լույսով ստացվող ինտերֆերենցիային պատկերի առավելագույն և նվազագույն ուժգնություն ունեցող հարևան տեղամասերը: Երբ մա լույսի ուժգնությունը փոքրացնում էր մինչև որոշակի նվազագույն (շեմային) արժեքը, աչքն այլևս չէր ընկալում լույսը: Հաշվարկները ցույց են տվել, որ այդ դեպքում 1 վայրկյանում աչքի մեջ ընկնում է $N_{min} = 20-25$ ֆոտոն:

Փորձի ժամանակ մութ շերտերը միշտ մնում էին մութ, իսկ լուսավոր շերտերով տեղամասերը մերթընդմերթ առկայծում էին, երբեմն՝ հանգչում, բայց իսկույն դարձյալ լուսավորվում:

Ուշագրավ է, որ լույսի ինտերֆերենցիան, որը միշտ համարվել է դասական երևույթ, վերը նկարագրված փորձում բացատրվում է միայն լույսի քվանտային հատկություններով: Իրոք, այն դեպքերում, երբ լույսի փնջում ֆոտոնների թվի պատահական փոփոխությունների (ֆլուկտուացիաներ) շնորհիվ ինտերֆերենցիային մաքսիմումներին համապատասխանող տեղամասերում ընկնում է ավելի շատ ֆոտոն, քան N_{min} -ն է, կամ ավելի քիչ, ապա այդ տեղամասերի լուսավորվածությունը մերթ ուժգնանում է (երբ ֆոտոնների թիվը փոքր-ինչ գերազանցում է N_{min} -ը), մերթ՝ մաքրում (երբ ֆոտոնների թիվը փոքր է, քան N_{min} -ը): Այն դեպքում, երբ լույսի ուժգնությունը շատ մեծ է շեմային արժեքից, աչքը չի զանազանում ֆոտոնների թվի պատահական փոփոխությունները:

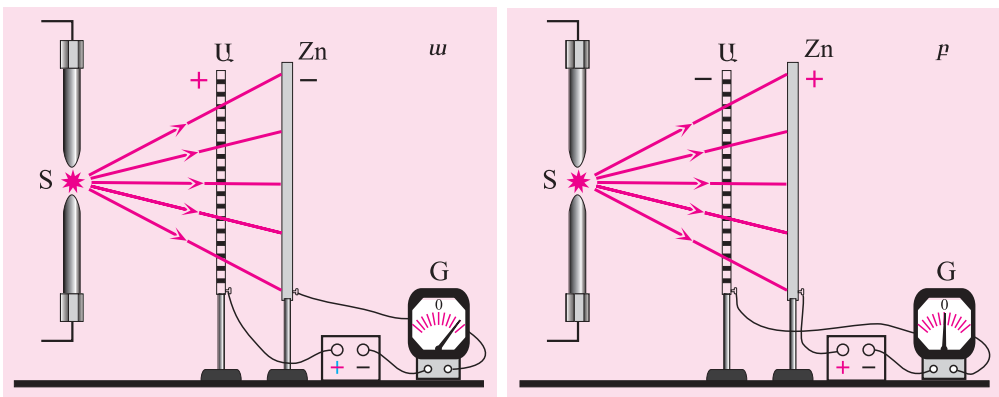
§ 36. ՖՈՏՈԷԼԵԿՏ: ՖՈՏՈԷԼԵԿՏԻ ՕՐԵՆՔՆԵՐԸ

Ֆոտոէլեկտի հայտնագործումը: Լույսի քվանտային բնույթը հաստատող երևույթներից է ֆոտոէլեկտը, որը հայտնագործել է Հայնրիխ Հերցը 1887թ.: Այս երևույթը բացատրելիս առավել լավ տարվում է դրսևորվել դասական ֆիզիկայի սահմանափակությունը:

Լույսի ազդեցությամբ նյութից էլեկտրոններ պոկվելու երևույթը կոչվում է ֆոտոէլեկտ: Ֆոտոէլեկտի հետևանքով առաջացող հոսանքն անվանում են **ֆոտոհոսանք**, իսկ պոկված էլեկտրոնները՝ **ֆոտոէլեկտրոններ**:

Ֆոտոէլեկտն ուսումնասիրել են մի շարք ֆիզիկոսներ (Ֆիլիպ Լենարդ, Ալեքսանդր Ստոլետով): Ֆոտոէլեկտի ուսումնասիրման Ստոլետովի փորձի սխեման պատկերված է 87-րդ նկարում: Էլեկտրական շղթան կազմված է կոնդենստորից, հոսանքի աղբյուրից և գալվանաչափից: Կոնդենստորի առաջին շրջադիրը պղնձ է, իսկ երկրորդ շրջադիրը՝ չինկի թիթեղը: Ֆոտոէլեկտը դիտելու համար չինկի թիթեղը լուսավորում են լույսի S աղբյուրով: Աղբյուրից ճառագայթները չանցի միջով թիթեղի վրա ուղղելիս շղթայում միացված G գալվանաչափի սլաքը շեղվում է, այսինքն՝ շղթայում հոսանք է առաջանում մուլ-նիսկ այն դեպքում, երբ շղթայում հոսանքի աղբյուր չկա: Դիտվող երևույթը կարելի է բացատրել հետևյալ կերպ. չինկի թիթեղից լույսի ազդեցությամբ պոկվում են լիցքավորված մասնիկներ, որոնք, հասնելով U լայնացման, փակում են շղթան՝ առաջացնելով հոսանք:

Լույսի ազդեցությամբ չինկի թիթեղից պոկված մասնիկների լիցքի նշանը որոշելու համար շղթային միացնենք հոսանքի աղբյուր: Եթե հոսանքի աղբյուրի բացասական բևեռը միացվում է չինկի թիթեղին (նկ. 87, ա), ապա գալվանաչափով անցնող հոսանքի ուժը մեծանում է: Այստեղից կարելի է եզրակացնել, որ չինկի թիթեղից պոկված մասնիկներն ունեն բացասական լիցք, ուստի՝ վանվելով բացասական լիցքավորված թիթեղից, հասնում են U թիթեղին և մեծացնում հոսանքի ուժը շղթայում: Նշենք, որ երբ Ստոլետովը կատարում էր այս փորձը, էլեկտրոնը



Նկ. 87. Ֆոտոէլեկտի դիտման սարքի սխեման: Չինկի թիթեղը հոսանքի աղբյուրի բացասական բևեռին միացնելիս (ա) հոսանքի ուժը շղթայում մեծանում է, իսկ դրական բևեռին միացնելիս (բ)՝ նվազում:

դեռևս հայտնագործված չէր: Միայն հետագայում Լենարդը և Թոմսոնը, էլեկտրական և մագնիսական դաշտերում չափելով այդ մասնիկների տեսակարար լիցքը (e/m), համոզվեցին, որ դրանք էլեկտրոններ են:

Փորձում ցինկի թիթեղը հոսանքի աղբյուրի դրական բևեռին միացնելիս (նկ. 87, բ), լարման մեծացմանը զուգընթաց, հոսանքի ուժը նվազում է՝ հավասարվելով զրոյի: Պատճառն այն է, որ այս դեպքում ցինկի թիթեղը ձգում է իրենից պոկված էլեկտրոնները և, լարման որոշակի արժեքից սկսած, այլևս ոչ մի էլեկտրոն չի հասնում Ա ցանցին:

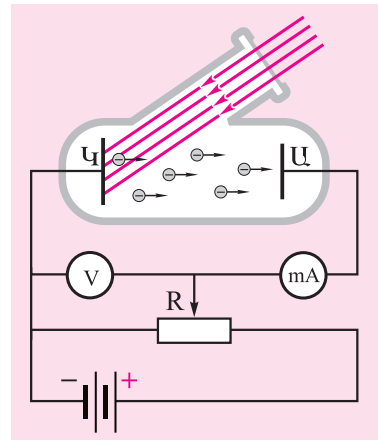
Նշված փորձում լույսի աղբյուրի և ցինկի թիթեղի միջև ապակու շերտ տեղադրելիս ֆոտոէֆեկտ չի դիտվում: Հայտնի է, որ ապակին կլանում է անդրամանուշակագույն ճառագայթները, հետևաբար՝ կարելի է եզրակացնել, որ ցինկից էլեկտրոնները պոկվում են հենց անդրամանուշակագույն ճառագայթների ազդեցությամբ:

Ֆոտոէֆեկտի ուսումնասիրությունը: Ֆոտոէֆեկտի օրինաչափություններն ուսումնասիրելու համար օգտվում են 88-րդ նկարում պատկերված սարքից:

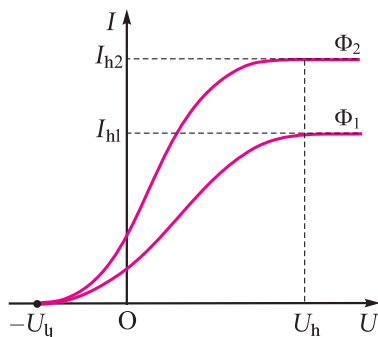
Ապակե բալոնի մեջ, որից օդը հանված է, տեղադրում են երկու էլեկտրոդ՝ Ա և Կ: Բալոնի լուսամուտը փակված է քվարցե ապակով, որը թափանցիկ է ոչ միայն լույսի, այլև անդրամանուշակագույն ճառագայթման համար: Էլեկտրոդները միացնում են հոսանքի աղբյուրին՝ ըստ 88-րդ նկարում պատկերված սխեմայի: Էլեկտրոդներին տրվող լարումը կարգավորվում է R ռեոստատով և չափվում V վոլտաչափով, իսկ հոսանքի ուժը՝ mA միլիամպերաչափով:

Սարքի միջոցով, որպես Կ էլեկտրոդ օգտագործելով տարբեր մետաղներից պատրաստված թիթեղներ, կարելի է ստանալ ֆոտոէֆեկտի վոլտամպերային բնութագիծը՝ I ֆոտոհոսանքի ուժի կախումն էլեկտրոդներին կիրառված U լարումից՝ Կ կաթոդի վրա ընկնող լուսային փնջի տարբեր Φ ուժգնությունների դեպքում: 89-րդ նկարում պատկերված է I ֆոտոհոսանքի ուժի կախումն U լարումից լույսի երկու տարբեր ուժգնությունների ($\Phi_2 > \Phi_1$) և նույն կաթոդի դեպքում: Փորձում ստացված այս կորերից կարելի է հանգել հետևյալ եզրակացություններին:

1. Երբ էլեկտրոդներին կիրառված լարումը՝ $U = 0$, ֆոտոհոսանքի ուժը տարբերվում է զրոյից՝ $I \neq 0$: Նշանակում է՝ կաթոդից լույսի ազդեցությամբ պոկված էլեկտրոններն ունեն կինետիկ էներգիա, որի շնորհիվ հասնում են անոդին՝ շղթայում ստեղծելով հոսանք:



Նկ. 88. Ֆոտոէֆեկտի ուսումնասիրության սարքի սխեման



Նկ. 89. Ֆոտոէֆեկտի վոլտամպերային բնութագծերը $\Phi_2 > \Phi_1$ դեպքում

2. Էլեկտրոդներին կիրառված լարումը մեծացնելիս ֆոտոհոսանքի ուժը մեծանում է, սակայն որոշակի U_h արժեքից մեծ լարումների դեպքում ֆոտոհոսանքի ուժն այլևս չի աճում և մնում է հաստատուն: Այս լարմանը համապատասխանող հոսանքի ուժի I_h արժեքն անվանում են **հագեցման հոսանքի ուժ**: Հագեցումը պայմանավորված է նրանով, որ կաթոդից պոկված բոլոր էլեկտրոնները հասնում են անոդին: Հետևաբար, փորձում չափելով հագեցման հոսանքի $I_h = eN_e$ ուժը, կարող ենք որոշել 1 վայրկյանում կաթոդից պոկված էլեկտրոնների N_e թիվը:

3. Որոշակի U_k կասեցնող լարման դեպքում ֆոտոհոսանքի ուժը դառնում է զրո՝ անկախ Φ էլեկտրոդին ընկնող լույսի ուժգնությունից (89-րդ նկարում երկու կորերն էլ սկսվում են միևնույն՝ $-U_k$ կետից): Նշանակում է՝ Φ էլեկտրոդից պոկված ոչ մի էլեկտրոն չի հասնում Ա էլեկտրոդին: Այդ դեպքում էլեկտրոդների միջև էլեկտրական դաշտն արգելակում է էլեկտրոնների շարժումը դեպի Ա էլեկտրոդ: Հետևաբար՝ փորձում չափելով U_k կասեցնող լարումը, կորոշենք էլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիան:

$$\frac{mv^2}{2} = eU_k: \quad (4.7)$$

Ֆոտոէֆեկտի օրենքները: Վերը նկարագրված փորձերի արդյունքում ձևակերպվել են ֆոտոէֆեկտի հետևյալ երեք օրենքները:

1. Հագեցման ֆոտոհոսանքի ուժն ուղիղ համեմատական է ընկնող լույսի ուժգնությանը:

$$I_h \sim \Phi: \quad (4.8)$$

2. Ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիան կախված չէ ընկնող լույսի ուժգնությունից, իսկ հաճախության մեծացման հետ այն աճում է գծային օրենքով:

3. Յուրաքանչյուր նյութի համար գոյություն ունի հաճախության որոշակի ν_{min} արժեք, որից փոքր հաճախությունների դեպքում ֆոտոէֆեկտ չի դիտվում: ν_{min} հաճախությունը կոչվում է ֆոտոէֆեկտի կարմիր սահման:

Բացի նշվածից՝ փորձերը ցույց են տալիս, որ ֆոտոէֆեկտը ոչ իներցիոն երևույթ է: Մետաղը ճառագայթահարելուց մինչև էլեկտրոնների պոկվելն անցած ժամանակամիջոցը փոքր է 10^{-9} վայրկյանից:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր երևույթն են անվանում ֆոտոէֆեկտ: 2. Երկու միապեսակ թիթեղներից առաջինը լիցքավորված է դրական լիցքով, իսկ երկրորդը՝ բացասական: Անդրամանուշակագույն ճառագայթների ազդեցությամբ ո՞ր թիթեղն ավելի շուրջ կլիցքաթափվի: 3. Գծեք ֆոտոէֆեկտի վոլտամպերային բնութագիծը: 4. Գրեք ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիայի և կասեցնող լարման կապն արտահայտող բանաձևը: 5. Ինչու՞ է ֆոտոհոսանքը հագեցնում: Ինչու՞ լարման բացակայությամբ ֆոտոհոսանքի ուժը զրո է: 6. Սահմանեք ֆոտոէֆեկտի երեք օրենքները: 7. Ինչու՞ են ասում, որ ֆոտոէֆեկտը ոչ իներցիոն երևույթ է:

§37. ՖՈՏՈՆԵՖԵԿՏԻ ՏԵՍՈՒԹՅՈՒՆԸ: ԱՅՆՇՏԱՅՆԻ ԲԱՆԱԶԵԿԸ ՖՈՏՈՆԵՖԵԿՏԻ ՐԱՄԱՐ

Ֆոտոնեֆեկտը դասական ֆիզիկայի շրջանակներում բացատրելու բոլոր փորձերն անհաջող էին: Ըստ դասական ֆիզիկայի՝ էլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիան պետք է կախված լինի լույսի ուժգնությունից, քանի որ որքան մեծ է լույսի ուժգնությունը, այնքան մեծ ուժով է լույսի ալիքի էլեկտրական դաշտն ազդում էլեկտրոնի վրա, և այնքան մեծ է էլեկտրոնի ձեռք բերած կինետիկ էներգիան: Իրականում վերը նշված փորձերը ցույց տվեցին, որ էլեկտրոնի կինետիկ էներգիան կախված չէ լույսի ուժգնությունից: Բացի այդ, ըստ դասական ֆիզիկայի, պարզ չէ, թե ինչու անդրամանուշակագույն ճառագայթումը պետք է էլեկտրոն պոկի, իսկ ենթակարմիր կամ տեսանելի ճառագայթումը՝ ոչ: Ըստ դասական ֆիզիկայի՝ ֆոտոնեֆեկտում էական դեր պետք է խաղա լույսի ուժգնությունը և ոչ թե հաճախությունը:

Ֆոտոնեֆեկտի բացատրությունը տվել է Ալբերտ Այնշտայնը՝ այդ երևույթի հայտնագործումից մոտ 20 տարի անց՝ 1905 թ.: Նա ենթադրել է, որ լույսը ոչ միայն արձակվում է և կլանվում, այլև տարածվում է առանձին բաժիններով: Ուրեմն՝ **լույսը բաղկացած է մասնիկներից՝ ֆոտոններից. այն ֆոտոնների հոսք է:** Էլեկտրոնը, կլանելով ֆոտոն, դուրս է թռչում նյութից:

Այն նվազագույն աշխատանքը, որն անհրաժեշտ է էլեկտրոնը նյութից պոկելու համար, կոչվում է ելքի աշխատանք:

Եթե ֆոտոնի $h\nu$ էներգիան մեծ է ելքի աշխատանքից, ապա կլանված ֆոտոնի էներգիայի մի մասը ծախսվում է էլեկտրոնը մետաղից պոկելու համար, իսկ մնացած մասի հաշվին էլեկտրոնը ձեռք է բերում կինետիկ էներգիա: Այսպիսով՝ յուրաքանչյուր կլանված ֆոտոն նյութից պոկում է մեկ էլեկտրոն: Համաձայն էներգիայի պահպանման օրենքի՝

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}, \quad (4.9)$$

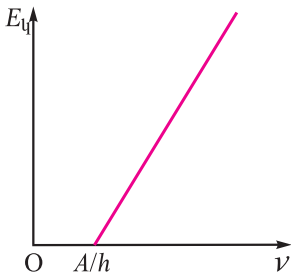
որտեղ A -ն ելքի աշխատանքն է: (4.9) առնչությունն Այնշտայնի հավասարումն է ֆոտոնեֆեկտի համար, որի հիման վրա բացատրվում են ֆոտոնեֆեկտի բոլոր օրենքները:

Այսպես՝ քանի որ մեկ ֆոտոնը նյութից պոկում է մեկ էլեկտրոն, ապա 1 վայրկյանում պոկված էլեկտրոնների N_e թիվը համեմատական է այդ նույն ժամանակամիջոցում նյութի մակերևույթին ընկած ֆոտոնների N_Φ թվին՝ $N_e \sim N_\Phi$: Մյուս կողմից՝ լույսի ուժգնությունը՝ $\Phi \sim N_\Phi$, ուստի հագեցման ֆոտոհոսանքի ուժի համար կստանանք՝

$$I_h + N_e + N_\Phi + \Phi, \quad (4.10)$$

որը ֆոտոնեֆեկտի 1-ին օրենքն է:

Ըստ (4.9) բանաձևի՝ էլեկտրոնի առավելագույն կինետիկ էներգիան կախված է լույսի հաճախությունից, բայց ոչ նրա ուժգնությունից: Հաճախությունից կախված՝ այն փոփոխվում է գծային օրենքով: Այդ կախումը պատկերված է 90-րդ նկարում: Այս պնդումը ֆոտոնեֆեկտի 2-րդ օրենքն է:



Նկ. 90. Ֆոտոէլեկտրոնի առավելագույն կինետիկ էներգիայի կախումը ընկնող ճառագայթման հաճախությունից

Ֆոտոէլեկտ տեղի ունենալու համար անհրաժեշտ է, որ քվանտի $h\nu$ էներգիան մեծ լինի A ելքի աշխատանքից: Պարզ է, որ փոքրացնելով ν հաճախությունը՝ կհասնենք մի ν_{min} արժեքի, որից փոքր հաճախությունների դեպքում ֆոտոէլեկտ չի դիտվի (ֆոտոնի $h\nu$ էներգիան դառնում է փոքր ելքի աշխատանքից): ν_{min} հաճախությունը, որն անվանեցինք ֆոտոէլեկտի կարմիր սահման, որոշվում է

$$\nu_{min} = \frac{A}{h} \quad (4.11)$$

բանաձևով, որն արտահայտում է ֆոտոէլեկտի 3-րդ օրենքը:

Հաշվի առնելով ճառագայթման հաճախության և ալիքի երկարության $\lambda = c/\nu$ կապը՝ (4.11) բանաձևից կստանանք՝

$$\lambda_{max} = \frac{c}{\nu_{min}} = \frac{hc}{A}: \quad (4.12)$$

Տվյալ նյութի (այսինքն՝ տվյալ A -ի) համար ֆոտոէլեկտ կդիտվի միայն այն դեպքում, երբ ընկնող ճառագայթման ալիքի երկարությունը՝ $\lambda < \lambda_{max}$:

Այսպիսով՝ Այնշտայնի բանաձևը հնարավորություն է տալիս բացատրելու ֆոտոէլեկտի բոլոր օրենքները:

Իսկ ի՞նչ կարելի է ասել ելքի աշխատանքի մասին:

Ելքի աշխատանքը կախված է նյութի տեսակից: Այն տարբեր նյութերի համար տարբեր է, ուստի՝ տարբեր է նաև ֆոտոէլեկտի «կարմիր սահմանը»: Ելքի աշխատանքն արտահայտելու համար օգտվում են քվանտային ֆիզիկայում ընդունված էներգիայի (աշխատանքի) 1 էՎ (էլեկտրոնվոլտ) միավորից: **1 էՎ-ն այն էներգիան է, որը ձեռք է բերում $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Կլ տարրական լիցք կրող մասնիկը՝ անցնելով 1 էՎ պոտենցիալների տարբերություն. 1 էՎ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Ջ:** Յինկի համար ելքի աշխատանքը 4,2 էՎ է, ուստի՝ ֆոտոէլեկտի «կարմիր սահմանին» համապատասխանող ալիքի երկարությունը՝ $\lambda_{max} = 0,3$ մկմ, որն ընկած է լույսի անդրամանուշակագույն տիրույթում: Ալյումինի կամ երկաթի ելքի աշխատանքն ավելի մեծ է, քան ցինկինը, հետևաբար՝ ֆոտոէլեկտի համար անհրաժեշտ են ավելի մեծ հաճախությամբ (էներգիայով) ֆոտոններ: Ալկալիական մետաղների ելքի աշխատանքն ունի ավելի փոքր արժեքներ: Օրինակ՝ ցեզիումի (Cs) ելքի աշխատանքը 1,9 էՎ է, հետևաբար՝ «կարմիր սահմանին» համապատասխանող հաճախությունը՝ $\nu_{min} = 4,6 \cdot 10^{14}$ Հց, որը համապատասխանում է կարմիր լույսին:

Նշենք, որ «կարմիր սահմանի» հասկացությունը կիրառելի է ոչ շատ հզոր լույսի աղբյուրների համար: Երբ նյութի վրա ընկնում է մեծ ուժգնությամբ լազերային ճառագայթում, ապա այդ դեպքում հնարավոր է դառնում երկու կամ ավելի ֆոտոնների միաժամանակյա կլանումը: Տվյալ դեպքում թեև մեկ ֆոտոնի էներգիան փոքր է ելքի աշխատանքից, այնուամենայնիվ, երկու ֆոտոնների միաժամանակյա կլանման հետևանքով դիտվում է ֆոտոէլեկտ:

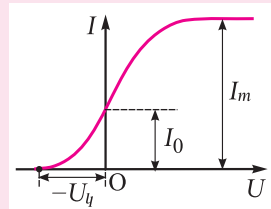
Քննարկված բոլոր դեպքերում ֆոտոէլեկտի հետևանքով էլեկտրոնը դուրս էր բռնում նյութից: Այդ պատճառով այն սովորաբար անվանում են **արտաքին ֆոտոէլեկտ**՝ տարանջատելու ֆոտոէլեկտի դրսևորման մեկ այլ ձևից՝ **ներքին ֆոտոէլեկտ**:

Ֆեկտից: Վերջինիս դեպքում լույսի ազդեցությամբ էլեկտրոնը պոկվում է ատոմից, սակայն մնում է նյութում: Այդ էլեկտրոնները, ազատորեն շարժվելով նյութում, էապես մեծացնում են նրա հաղորդականությունը: Ներքին ֆոտոէֆեկտի շնորհիվ է, որ կիսահաղորդիչ նյութերի (գերմանիում, սիլիցիում) էլեկտրահաղորդականությունն էապես կախված է լուսավորվածությունից:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Գրեք Այնշտայնի բանաձևը ֆոտոէֆեկտի համար: 2. Ի՞նչն են անվանում ֆոտոէֆեկտի «կարմիր սահման»: 3. Ի՞նչն են անվանում ելքի աշխատանք: 4. Ինչու՞ ֆոտոէֆեկտը դիտվում է միայն ընկնող լույսի որոշակի հաճախությունից մեծ հաճախությունների դեպքում: 5. Ինչպե՞ս կփոխվի ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիան, եթե ընկնող լույսի հաճախությունը մեծացվի երկու անգամ: 6. Մեարդի վրա ընկնող մեներանգ լույսի ուժգնությունը մեծացավ 10 անգամ: Ինչպե՞ս այդ դեպքում փոխվեց՝ ա) հազեցման հոսանքի ուժը, բ) ֆոտոէլեկտրոնների արագությունը: 7. Սկսարում պարկերված է լարումից ֆոտոհոսանքի կախման գրաֆիկը: Փոխվու՞մ են արդյոք $U_{\text{կ}}$, I_0 և I_m մեծությունները լույսի ուժգնությունը փոփոխելիս: 8. γ հաճախությամբ լույսի ազդեցությամբ մեարդից պոկված էլեկտրոնի կինետիկ էներգիան հավասար է ֆոտոնի էներգիայի կեսին: Որքա՞մ է ֆոտոէֆեկտի կարմիր սահմանն այդ մեարդի համար:



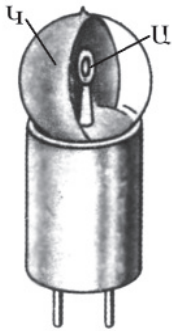
Ինչու՞ մետաղներում ազատորեն շարժվող էլեկտրոնները դիֆուզիայի հետևանքով չեն հեռանում մետաղից կամ, ասենք, չեն «թափվում» ներքև, երբ, օրինակ, մետաղն ձողը թափահարում ենք: Ի՞նչ ուժեր են էլեկտրոնները պահում մետաղում:

Մետաղի ներսում էլեկտրոնները գործնականում շարժվում են առանց խոչընդոտների, քանի որ նրանց վրա բյուրեղացանցի դրական իոնների ազդող ուժերը համակշռված են: Սակայն մետաղի մակերևութամերձ շերտում, որի հաստությունը բյուրեղացանցի հաստատունի կարգի է՝ $a \sim 10^{-8}$ սմ, այդ ուժերի հավասարակշռությունը խախտվում է. առաջացած համագոր ուժը խոչընդոտում է էլեկտրոնին՝ դուրս գալու մետաղի մակերևույթից: Եթե նույնիսկ էլեկտրոնն իր կինետիկ էներգիայի շնորհիվ, այնուամենայնիվ, դուրս է գալիս մետաղից, վերջինս ձեռք է բերում դրական լիցք և սկսում է դեպի իրեն ձգել էլեկտրոնը: Այդ ուժի ազդեցությամբ էլեկտրոնի արագությունն սկսում է նվազել: Փոքր կինետիկ էներգիայի դեպքում մետաղից որոշ X_0 հեռավորությունում էլեկտրոնի արագությունը դառնում է 0, որից հետո այն վերադառնում է մետաղ: Այս երևույթի հետևանքով մետաղից դուրս՝ նրա մակերևութամերձ նեղ շերտում, միշտ առկա է էլեկտրոնների որոշակի քանակություն: Այդ շերտը ձեռք է բերում բացասական լիցք, իսկ մետաղի ներսի մակերևութամերձ շերտը՝ դրական լիցք: Երկու շերտերը միասին կազմում են այսպես կոչված կրկնակի լիցքավորված շերտ, որտեղ շարժվելիս էլեկտրոնի վրա ազդում է դեպի մետաղ ուղղված ուժ: Կրկնակի շերտից դուրս էլեկտրոնի վրա ազդում է մեկ այլ բնույթի ուժ, որը ծագում է շնորհիվ այն բանի, որ կրկնակի շերտից դուրս եկած էլեկտրոնը էլեկտրաստատիկ մակածման հետևանքով մետաղի մակերևույթին ստեղծում է հակառակ նշանի լիցք:

Այսպիսով՝ էլեկտրոնը մետաղից հեռացնելու համար անհրաժեշտ է կատարել աշխատանք ինչպես կրկնակի շերտում էլեկտրոնի վրա ազդող ուժի, այնպես էլ էլեկտրաստատիկ մակածման հետևանքով մետաղում առաջացած լիցքի ձգողության ուժի դեմ: Հենց այդ ընդհանուր աշխատանքն է, որ անվանում են ելքի աշխատանք: Ֆոտոէֆեկտի դեպքում ելքի աշխատանքը կատարվում է ֆոտոնի կլանման հետևանքով էլեկտրոնի ձեռք բերած կինետիկ էներգիայի հաշվին:

§ 38. ՖՈՏՈԷԼԵԿՏԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Ֆոտոէլեկտի հիման վրա ստեղծվել են բազմազան սարքեր, որոնք ներկայումս լայն կիրառություն ունեն տեխնիկայում և կենցաղում: Ֆոտոէլեկտի շնորհիվ «համր» կիմոն դարձավ «խոտող», հնարավոր դարձավ պատկերների հաղորդումը հեռուստատեսությամբ: Ֆոտոէլեկտի վրա հիմնված սարքերը ժամանակին միացնում և անջատում են փարոսները, փողոցների լուսավորությունը, լուսացույցները: Դրանք օգտագործում են մետրոյում:



Նկ. 91. Ֆոտոտարր

Ֆոտոէլեկտի հիման վրա աշխատող սարքերի կարևորագույն մասը **ֆոտոտարրն** է: Արտաքին ֆոտոէլեկտի հիման վրա աշխատող ֆոտոտարրը մի ապակե անոթ է, որից օդը հանված է: Անոթի ներքին մակերևույթի մի մասը պատված է փոքր ելքի աշխատանք ունեցող մետաղի բարակ շերտով, որը ծառայում է որպես կաթոդ (նկ. 91):

Լույսը պատուհանից թափանցում է անոթի մեջ և ֆոտոէլեկտի հետևանքով կաթոդից պոկում էլեկտրոններ, որոնք շարժվում են դեպի անոթի կենտրոնում տեղադրված օղակաձև Ա անոդը: Անոդը միացվում է մարտկոցի դրական բևեռին և, հետևաբար, դեպի իրեն է ձգում ֆոտոէլեկտրոններ՝ շղթայում առաջացնելով էլեկտրական հոսանք: Քանի որ հոսանքի ուժը համեմատական է լույսի ուժգնությանը, ապա կաթոդի լուսավորվածության փոփոխությունն առաջ է բերում շղթայում հոսանքի ուժի համապատասխան փոփոխություն: Նկարագրված ֆոտոտարրն անվանում են **ֆոտոդիոդ**՝ լույսով աշխատող երկէլեկտրոդ էլեկտրոնային լամպ:

Վակուումային ֆոտոտարրում հոսանքի ուժը փոքր է: Այն ուժեղացնելու համար ֆոտոտարրի անոթը լցնում են 1-ից մինչև 10 Պա ճնշմամբ իներտ գազով (ավելի հաճախ՝ արգոնով): Էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ արագացված ֆոտոէլեկտրոնների հարվածների հետևանքով տեղի է ունենում գազի ատոմների իոնացում, որի պատճառով հոսանքի ուժը տասնյակ անգամ աճում է: Վակուումային ֆոտոտարրերը կիրառում են ազդանշանային սխեմաներում, կինոյում՝ կինոժապավենի վրա գրված ձայնը վերարտադրելու համար:

Ֆոտոտարրը ֆոտոռեզիստի կարևոր բաղադրիչն է: Ֆոտոտարրի վրա լույսը նկնելիս շղթայում առաջանում է հոսանք, որը միացնում կամ անջատում է ռելեն: Օրինակ՝ նման ռելե է օգտագործվում մետրոյի ավտոմատ սարքում, որը մարդու առաջ չի փակում արգելափակույթ, եթե նախօրոք նրա մեջ ժետոն է գցված:

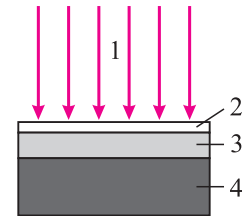
Ներկայումս առավել լայն տարածում ունեն **կիսահաղորդչային ֆոտոտարրերը**, որոնք աշխատում են ներքին ֆոտոէլեկտի հիման վրա:

Դուք արդեն գիտեք, որ լուսավորվածության շնորհիվ կարող է էապես մեծանալ կիսահաղորդչի էլեկտրահաղորդականությունը: Եթե կլանված ֆոտոնի էներգիան բավարար է կիսահաղորդչում էլեկտրոնն ատոմից պոկելու համար (ներքին ֆոտոէլեկտ), ապա լույսի ազդեցությամբ էապես մեծանում է ազատ լիցքակիր-

ների՝ էլեկտրոնների և խոռոչների թիվը: Այս երևույթը կիրառվում է **ֆոտոդիմադրատարր** կոչվող սարքում: Ճառագայթահարելիս նրա մեջ ազատ լիցքակիրների կոնցենտրացիան մեծանում է, հետևաբար՝ փոքրանում է նրա դիմադրությունը: Որքան մեծ է ճառագայթման ուժգնությունը, այնքան փոքր է դիմադրությունը և մեծ է հոսանքի ուժը ֆոտոդիմադրատարր պարունակող շղթայում: Գոյություն ունեն լուսազգայուն կիսահաղորդչային նյութեր, որոնց մեջ ներքին ֆոտոէֆեկտը տեղի է ունենում ճառագայթման բավականաչափ փոքր, ենթակարմիր տիրույթին պատկանող հաճախությունների դեպքում: Այդպիսի նյութերից պատրաստված ֆոտոտարրի և հոսանքի ուժեղարարի օգնությամբ հնարավոր է հայտնաբերել նույնիսկ թույլ տաքացած մարմինները, եթե անգամ դրանք շատ հեռվում են:

Ներքին ֆոտոէֆեկտի կիրառության կարևոր օրինակ է նաև **փակող շերտով ֆոտոտարրը**, որի կառուցվածքը պատկերված է 92-րդ նկարում: Այն բաղկացած է իրար միացված ρ -տիպի կիսահաղորդչի և մետաղի շերտերից: Ազատ լիցքակիրների դիֆուզիայի հետևանքով «կիսահաղորդիչ-մետաղ» բաժանման սահմանին առաջանում է փակող շերտ (էլեկտրական դաշտ): Կիսահաղորդիչը լուսավորելիս ներքին ֆոտոէֆեկտի հետևանքով նրա մեջ մեծանում է էլեկտրոնների և խոռոչների թիվը: Փակող շերտի էլեկտրական դաշտը, խոչընդոտելով խոռոչների շարժումը, միայն էլեկտրոններին է հնարավորություն տալիս անցնել կիսահաղորդչից մետաղ: Դրա հետևանքով կիսահաղորդչում առաջանում է խոռոչների, իսկ մետաղում՝ էլեկտրոնների ավելցուկ: Այսպիսով՝ երկու շերտերի միջև հաստատվում է պոտենցիալների տարբերություն՝ **ֆոտոէլշու**, որի մեծությունը համեմատական է կիսահաղորդչի լուսավորվածությամբ: Փակող շերտով ֆոտոտարրերը լույսի էներգիան փոխակերպում են էլեկտրական էներգիայի:

Այս սկզբունքով աշխատող ֆոտոտարրերն օգտագործում են լուսավորվածությունը չափելու համար: Նույն սկզբունքի վրա է հիմնված արևային մարտկոցների աշխատանքը, որոնք տեղադրվում են բոլոր տիեզերանավերի վրա:



Նկ. 92. Փակող շերտով ֆոտոտարրի կառուցվածքը.
1. լույսի փունջ,
2. քափանցիկ շերտ,
3. կիսահաղորդիչ, 4. մետաղ



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ կիրառություններ ունի ֆոտոէֆեկտը:
2. Նկարագրեք ֆոտոտարրի կառուցվածքը:
3. Ինչո՞ւ է տարբերվում ներքին ֆոտոէֆեկտն արտաքին ֆոտոէֆեկտից:
4. Ինչո՞ւ լուսավորելիս ֆոտոդիմադրատարրի դիմադրությունը փոքրանում է:
5. Ինչպե՞ս է աշխատում փակող շերտով ֆոտոտարրը:
6. Որտե՞ղ են օգտագործվում արտաքին ֆոտոէֆեկտի հիման վրա աշխատող սարքերը:

§39. ԼԱԲՈՐԱՏՈՐ ԱՇԽԱՏԱՆԵ 4

Պլանկի հաստատունի որոշումը

Աշխատանքի նպատակը. փորձով դիտել ֆոտոէֆեկտը և որոշել Պլանկի հաստատունի արժեքը:

Չափամիջոցներ. զգայուն գալվանաչափ կամ միկրոամպերաչափ, վոլտաչափ ($0 \div 1,5$ Վ), ռեոստատ:

Նյութեր և սարքեր. ֆոտոտարր, լույսի աղբյուր, հոսանքի աղբյուր, ուժեղարար:

Փորձի կատարման ընթացքը

1. Հավաքեք գծագրում բերված շղթան՝ օգտագործելով ֆոտոտարրը, լույսի աղբյուրը, գալվանաչափը, վոլտաչափը, ռեոստատը, հոսանքի աղբյուրը, ուժեղարարը:
2. Անջատեք մարտկոցը, լամպի առջև տեղադրեք նարնջագույն լուսազտիչ և լուսավորեք ֆոտոտարրի կաթոդը: Համոզվեք, որ գալվանաչափի սլաքը շեղվում է, այսինքն՝ շղթայում ֆոտոէֆեկտի հետևանքով էլեկտրական հոսանք է առաջանում: Ըստ Այնշտայնի բանաձևի՝

$$h\nu_1 = A + \frac{mv_1^2}{2},$$

որտեղ ν_1 -ը նարնջագույն լույսի հաճախությունն է, A -ն՝ ելքի աշխատանքը, $mv_1^2/2$ -ը՝ էլեկտրոնի առավելագույն կինետիկ էներգիան:

3. Մարտկոցը միացրեք և ռեոստատի միջոցով լարումը մեծացրեք այնքան, մինչև շղթայում հոսանքը դադարի: Չափեք կասեցնող լարումը՝ $U_{կ1}$: Ըստ (4.1) բանաձևի՝ $eU_{կ1} = mv_1^2/2$:
4. Փորձը կրկնեք կապույտ լուսազտիչի օգնությամբ: Չափեք կասեցնող լարումը՝ $U_{կ2}$ -ը: Ըստ Այնշտայնի բանաձևի՝

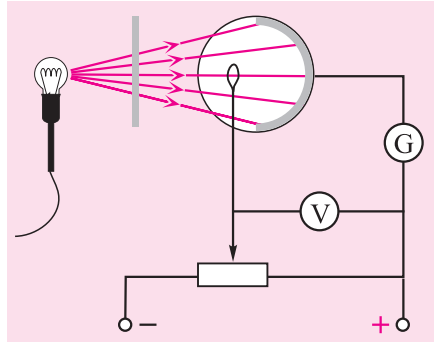
$$h\nu_2 = A + \frac{mv_2^2}{2}, \quad \frac{mv_2^2}{2} = eU_{կ2},$$

որտեղ ν_2 -ը կապույտ լույսի հաճախությունն է:

5. Ստացված արտահայտություններից արտաքսելով A -ն՝ h -ի համար կստանանք՝

$$h = e \frac{U_{կ2} - U_{կ1}}{\nu_2 - \nu_1}:$$

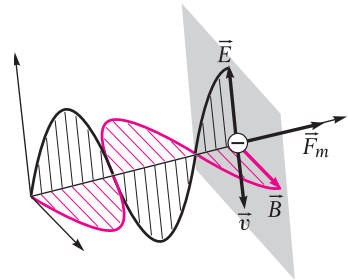
Տեղադրելով ν_1 -ի և ν_2 -ի արժեքները ($\nu_1 = 5 \cdot 10^{14}$ Հց, $\nu_2 = 6 \cdot 10^{14}$ Հց), ինչպես նաև փորձում չափված $U_{կ1}$, $U_{կ2}$ մեծությունները, կստանաք h -ի արժեքը:



Լույսի ճնշման ալիքային տեսությունը: Այն գաղափարը, որ լույսը պետք է ճնշում գործադրի լուսավորվող մարմինների վրա, արտահայտել է Յոհան Կեպլերը: Լույսի ճնշմամբ նա փորձում էր բացատրել գիսավորների պոչի առկայությունը: Լույսի ճնշման երևույթի բացատրությունը տվել է Մաքսվելը՝ ելնելով լույսի էլեկտրամագնիսական տեսությունից:

Դիցուք՝ լույսի ալիքն ուղղահայաց ընկնում է մետաղե թիթեղի վրա (նկ. 93): Այդ դեպքում լույսի ալիքի էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ մետաղի էլեկտրոնները ձեռք են բերում էլեկտրական դաշտի $\vec{E}$ լարվածությանը հակառակ ուղղված արագություն: Շարժվող էլեկտրոնների վրա ալիքի մագնիսական դաշտն ազդում է Լորենցի ուժով:

93-րդ նկարից երևում է, որ այդ ուժն ուղղված է ալիքի տարածման ուղղությամբ: Պետք է նկատի ունենալ, որ լույսի ալիքի ազդեցությամբ էլեկտրոնները մեծ տեղաշարժեր չեն կարող կատարել. նրանք տատանվում են հավասարակշռության դիրքերի շուրջը, որովհետև էլեկտրական դաշտն արագ փոփոխվում է լույսի հաճախությամբ: Չնայած յուրաքանչյուր կես պարբերություն հետո ալիքի $\vec{E}$ լարվածության և մագնիսական ինդուկցիայի $\vec{B}$ վեկտորների ուղղությունները փոխվում են հակառակի, փոխվում է նաև էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ էլեկտրոնների ձեռք բերած $\vec{v}$ արագության ուղղությամբ, սակայն, օգտվելով ձախ ձեռքի կանոնից, հեշտ է համոզվել, որ Լորենցի ուժի ուղղությունը չի փոխվում. այն միշտ ուղղված է մետաղի մակերևույթին ուղղահայաց: Մակերևույթի էլեկտրոնների վրա ազդող Լորենցի ուժերի համագործի միջին արժեքը հենց լույսի ճնշման ուժն է, իսկ նրա հարաբերությունը մակերևույթի մակերեսին՝ լույսի ճնշումը:



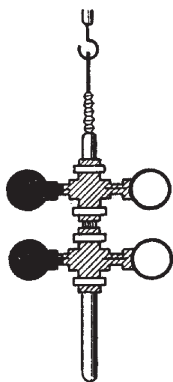
Նկ. 93. Լույսի ալիքի ճնշումը թիթեղի մակերևույթին

Մաքսվելը տեսականորեն ցույց է տվել, որ էլեկտրամագնիսական ալիքի ճնշումը որոշվում է

$$P = (1+R)W_{\text{միջ}} \quad (4.13)$$

բանաձևով, որտեղ R -ը լույսի անդրադարձման գործակիցն է, որը հավասար է անդրադարձող և ընկնող ալիքների ուժգնությունների հարաբերությանը, իսկ $W_{\text{միջ}}$ -ը՝ ընկնող ալիքի էներգիայի խտության միջին արժեքը: Հայելային անդրադարձման դեպքում $R = 1$, հետևաբար՝ $P = 2W_{\text{միջ}}$, իսկ սև մակերևույթի դեպքում, երբ ամբողջ լույսը կլանվում է, $R = 0$, հետևաբար՝ $P = W_{\text{միջ}}$:

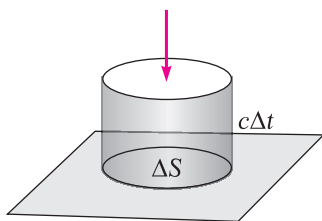
Լեբեդկի փորձը: Լույսի ճնշման ալիքային տեսությունը կարիք ուներ փորձնական հիմնավորման: Լույսի ճնշումը փորձով հայտնաբերել և առաջին անգամ չափել է ռուս նշանավոր ֆիզիկոս Պյոտր Լեբեդկը 1890 թ.: Լեբեդկի սարքը շատ զգայուն ոլորակշեռք էր, որի թելիկին ամրացված թեթև



Նկ. 94. Լեքեղևի փորձարարական սարքը

շրջանակին ստանձված էին շատ բարակ, 0,1-0,01 մմ հաս-
տությամբ փայլուն և սև թևիկներ (նկ. 94): Ամբողջ սարքը
տեղադրվում էր փակ անոթի մեջ, որից օդը հանված էր:
Քանի որ սև թևիկների վրա լույսի ճնշումն ավելի փոքր է,
քան փայլուն թևիկի վրա, ապա համակարգի վրա ազդում
է պատող մոմենտ, որը կարելի է չափել թելիկի պտտման
անկյունով: Լույսի էներգիայի խտությունը Լեքեղևը չա-
փում էր հատուկ այդ նպատակով պատրաստված փոքր
կալորաչափով՝ որոշակի ժամանակամիջոցում նրա մեջ
ուղղելով լույսի փունջը և գրանցելով ջերմաստիճանի աճը:
Լույսի փոքր ճնշումը թելադրում էր փորձի մեծ ճշտություն,
սարքի վրա կողմնակի գործոնների հնարավորինս բացա-
ռում: Փորձի դժվարությունների և պահանջվող ճշտության
մասին պատկերացում կազմելու համար նշենք, որ պայծառ
եղանակին մեկ քառակուսի մետրի վրա Արեգակի ճառագայթներն ազդում են
ընդամենը $4 \cdot 10^{-8}$ Ն ուժով, որը մոտավորապես հավասար է $4 \cdot 10^{-9}$ կգ զանգ-
վածով մարմնի ծանրության ուժին: Չնայած իր ժամանակի փորձարարական
տեխնիկայի ցածր մակարդակին՝ Լեքեղևը, հաղթահարելով բոլոր դժվարու-
թյունները, չափել է լույսի ճնշումը և ցույց տվել, որ փորձի սխալի սահման-
ներում այն համապատասխանում է Մաքսվելի ստացած (4.12) բանաձևով
հաշվարկված արժեքին:

Լեքեղևի փորձը ֆիզիկայի պատմության մեջ է մտել որպես բացառիկ
նուրբ գիտափորձի օրինակ: Իհարկե, ներկա պայմաններում, երբ հնարավոր
է ստանալ բարձր վակուում, որտեղ օդը գործնականում բացակայում է, իսկ
որպես լույսի աղբյուր օգտագործել լազերային ճառագայթում, որի ուժգնու-
թյունը միլիոնավոր անգամ գերազանցում է Արեգակի ճառագայթման ուժգ-
նությունը, լույսի ճնշումը կարելի է չափել շատ ավելի մեծ ճշտությամբ:



Նկ. 95. Δt ժամանակամիջոցում ΔS մակերևույթին հասնում են $c\Delta t$ ծնողողով զլանում եղած ֆոտոնները:

Լույսի ճնշման քվանտային տեսություն: Լույսի ճնշման գոյությունը առավել պարզ
բացատրելի է լույսի քվանտային տեսության
շրջանակներում, համաձայն որի՝ լույսը $E = h\nu$
էներգիայով և $p = E/c = h\nu/c = h/\lambda$ իմպուլսով
մասնիկների՝ ֆոտոնների հոսք է:

Դիցուք՝ մարմնի ΔS մակերեսով մակե-
րևույթի վրա նրան ուղղահայաց ընկնում է լույս
(նկ. 95): Ենթադրենք՝ լույսի փնջի միավոր ծա-
վալում ֆոտոնների թիվը n է: Δt ժամանակում
մակերևույթին կհասնեն հիմքի ΔS մակերեսով և $c\Delta t$ ծնողողով զլանում եղած
ֆոտոնները, որոնց թիվը՝ $\Delta N = n\Delta S c\Delta t$: Այդ ֆոտոնների մի մասը կլանում է
մարմինը: Դրանցից յուրաքանչյուրը մարմնին հաղորդում է $p = h\nu/c$ իմպուլս:
Մնացած մասն անդրադառնում է մակերևույթից և շարժվում հակառակ ուղ-
ությամբ: Անդրադարձած ֆոտոններից յուրաքանչյուրը մարմնին հաղորդում
է $\Delta p = p - (-p) = 2p = 2h\nu/c$ իմպուլս: Եթե լույսի անդրադարձման գործակիցը

R է, ապա անդրադարձած ֆոտոնների թիվը կլինի $R\Delta N$, իսկ կլանվածների թիվը՝ $(1-R)\Delta N$, հետևաբար՝ Δt ժամանակում մարմնին հաղորդված իմպուլսը՝

$$\Delta p = R\Delta N \frac{2h\nu}{c} + (1-R)\Delta N \frac{h\nu}{c} = (1+R)\Delta N \frac{h\nu}{c} = (1+R)nh\nu\Delta S\Delta t: (4.14)$$

Նյութոնի 2-րդ օրենքի համաձայն՝ մարմնի վրա ազդող ուժը հավասար է միավոր ժամանակում մարմնի իմպուլսի փոփոխությունը՝ $F = \Delta p/\Delta t$, իսկ ճնշումը հավասար է միավոր մակերեսի վրա ազդող ճնշման ուժին՝ $P = F/\Delta S$: (4.14) առնչությունից լույսի ճնշման համար կստանանք հետևյալ բանաձևը՝

$$P = (1+R)nh\nu: (4.15)$$

(4.15) հավասարման մեջ միավոր ծավալում ֆոտոնների n թվի և մեկ ֆոտոնի $h\nu$ -ն էներգիայի $nh\nu$ արտադրյալը լուսային փնջի էներգիայի միջին խտությունն է: Վերջինս նշանակելով $W_{\text{միջ}}$ -ով՝ վերջնականապես կստանանք՝

$$P = (1+R)W_{\text{միջ}}, (4.16)$$

որը համընկնում է Մաքսվելի ստացած (4.13) բանաձևի հետ:

Թեև լույսի ճնշումը սովորական պայմաններում շատ փոքր է, սակայն բնության որոշ երևույթներում այն էական դեր է կատարում: Օրինակ՝ աստղերի ներսում, որտեղ ջերմաստիճանը հասնում է տասնյակ միլիոն կելվինի, էլեկտրամագնիսական ճառագայթման ճնշումն ընդունում է վիթխարի արժեքներ: Աստղի ներսում լույսի ճնշման և գրավիտացիոն ձգողության ուժերի փոխհարաբերակցությամբ է պայմանավորված աստղի կայուն վիճակը:



Հարցեր և առաջադրանքներ

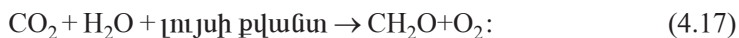
1. Ինչպե՞ս է բացատրվում լույսի ճնշումը Մաքսվելի էլեկտրամագնիսական տեսության շրջանակներում:
2. Նկարագրե՛ք լույսի ճնշման չափման Լեբեդևի փորձը:
3. Քվանտային տեսության հիման վրա բացատրե՛ք լույսի ճնշման առաջացման մեխանիզմը:
4. Ինչու՞ միևնույն ուժգնության դեպքում լույսի ճնշումը սև մակերևույթի վրա ավելի փոքր է, քան սպիտակ մակերևույթի վրա:

§41. ԼՈՒՅՍԻ ՔԻՄԻԱԿԱՆ ԱՋԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Լույսի ազդեցությամբ ընթանում են մի շարք քիմիական ռեակցիաներ, որոնք լույսի բացակայությամբ չեն կարող տեղի են ունենալ: Այդպիսի ռեակցիաները կոչվում են **ֆոտոքիմիական ռեակցիաներ**: Օրինակ՝ քլորի (Cl_2) և ջրածնի (H_2) մոլեկուլները մթության մեջ չեն փոխազդում, իսկ լույսի ազդեցությամբ նրանց միջև տեղի է ունենում քիմիական ռեակցիա, որի արգասիքը քլորաջրածինն է (HCl): Լույսի ազդեցությամբ ջրածնի մոլեկուլը տրոհվում է առանձին ատոմների:

Ֆոտոքիմիական ռեակցիաները բազմազան են և կարևոր դեր են խաղում բնության մեջ ու տեխնիկայում:

Ֆոտոսինթեզ: Բնության մեջ հայտնի կարևորագույն ֆոտոքիմիական ռեակցիան բույսերի կանաչ զանգվածում լույսի ազդեցությամբ ընթացող ֆոտոսինթեզն է, որի ժամանակ ծառերի տերևներն օդից կլանում են ածխաթթու գազ և լույսի ազդեցությամբ այն բաժանում ածխածնի ատոմի ու թթվածնի մոլեկուլի: Այնուհետև ածխածինը միանում է բույսի արմատների և բնի միջով տերև հասած ջրին՝ սինթեզելով ածխաջուր: Ֆոտոսինթեզի ռեակցիան կարելի է ներկայացնել հետևյալ հավասարումով.

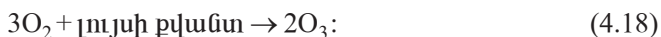


Այս ռեակցիան բացառիկ կարևոր նշանակություն ունի Երկրի վրա կյանքի պահպանման համար, քանի որ դրա միջոցով բույսերն արտադրում են թթվածին և ածխաջրեր ($\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n$ տիպի միացություններ), որոնց հետագա փոխակերպումների արդյունքում ստացվում են բույսերի համար անհրաժեշտ օրգանական միացություններ:

Մարդկանց և կենդանիների կենսագործունեության (շնչառության) հետևանքով անընդհատ արտադրվում է ածխաթթու գազ, և եթե չլինեք այս ռեակցիան, որի շնորհիվ տեղի է ունենում ածխաթթու գազի մոլեկուլների ճեղքում և թթվածնի անջատում, ապա անհնար կլինեք կյանքի գոյությունը Երկրի վրա: Համաձայն ժամանակակից պատկերացումների՝ Երկրի մթնոլորտի թթվածնի գրեթե ողջ քանակն առաջացել և պահպանվում է ֆոտոսինթեզի շնորհիվ: Այլ մոլորակների, օրինակ, Արուսյակի և Հրատի մթնոլորտում թթվածինը բացակայում է, որի պատճառով այդ մոլորակների վրա բուսականություն գոյություն չունի:

Ֆոտոսինթեզի շնորհիվ Երկրի վրա տարեկան սինթեզվում է ավելի քան 100 միլիարդ տոննա օրգանական նյութ: Արեգակի էներգիայի այն մասը, որն օգտագործվում է ֆոտոսինթեզի համար, մի քանի անգամ գերազանցում է Երկրի վրա արտադրվող էլեկտրաէներգիան:

Ֆոտոսինթեզի ռեակցիայի մեկ այլ օրինակ է անդրամանուշակագույն ճառագայթման ազդեցությամբ օզոնի առաջացման ռեակցիան.



Լուսանկարչություն: Ֆոտոքիմիական ռեակցիայի հաջորդ օրինակը լույսի ազդեցությամբ որոշ մոլեկուլների ճեղքումն է առանձին ատոմների: Մասնավորապես, լուսանկարչության հիմքում ընկած է արծաթի բրոմիդի (AgBr) ֆոտոտրոհման ռեակցիան՝



Լուսանկարչական ժապավենի (լուսանկարչական փթեղի) լուսագրայուն շերտը բաղկացած է ժելատինից, որի մեջ կան արծաթի բրոմիդի մանր հատիկներ: Լուսանկարման ժամանակ ժապավենի այն տիրույթներում, որտեղ լույս է ընկնում, ֆոտոտրոհման հետևանքով AgBr -ից անջատվում է արծաթ, որը հանգեցնում է այդ տիրույթների սևացման: Արծաթի անջատումը, հետևաբար՝ մասնավորապես ժապավենի սևացումը, կախված են ընկնող լույսի ուժգնությունից: Որտեղ այն մեծ է, այնտեղ ավելի շատ արծաթ է անջատվում, և այնքան շատ է այդ մասը սևանում: Ժապավենի այն մասերում, որտեղ լույս չի ընկնում, արծաթ չի անջատվում և այդ մասերը



ա



բ

Նկ. 96. Առարկայի նեգատիվ (ա) և պոզիտիվ (բ) պատկերները

մնում են սպիտակ: Դրա հետևանքով ժապավենի վրա առաջանում է առարկայի իրական պատկերի հակառակ պատկերը՝ **նեգատիվը** (նկ. 96, ա):

Ակնհայտ է, որ այդ վիճակում ժապավենը չի կարելի դիտել լույսի տակ, քանի որ լույսի ազդեցության չենթարկված մասերում կսկսվի AgBr-ի քայքայումը, և ամբողջ ժապավենը կսևանա: Այդ պատճառով ժապավենը նախ երևակում են: Ժապավենի **երևակումը** նկարված պատկերի երևան հանելու գործողությունն է: Այդ նպատակով ժապավենը մտցնում են քիմիական հատուկ լուծույթի մեջ, որի ազդեցությամբ այն տեղերում, որտեղ AgBr-ի մոլեկուլը քայքայվել էր, շարունակվում է մնացած մոլեկուլների քայքայումը: Առաջանում են արծաթի բազմաթիվ մոլորատոմներ, և ժապավենի վրա ստացվում է աչքի համար լավ տեսանելի **նեգատիվ** պատկեր:

Դրանից հետո կատարվում է ժապավենի **սևեռակումը**, որի ժամանակ լուսազգայուն շերտից հեռացնում են այն մասերում մնացած մոլեկուլները, որոնց վրա նկարելիս լույս չի ընկել: Դրա համար ժապավենը մտցնում են հատուկ լուծույթի (սևեռակիչի) մեջ, որտեղ դեռևս չքայքայված մոլեկուլներն անջատվում են ժապավենից: Վերջում ժապավենը վաճառում են ջրով: Միայն այս գործողություններից հետո ժապավենը կարելի է նայել լույսի տակ:

Ժապավենից պատկերը լուսանկարչական թղթի վրա տեղափոխելու համար կատարվում են նույն գործողությունները: Արդյունքում թղթի վրա ստացվում է առարկայի իրական պատկերը՝ **պոզիտիվը** (նկ. 96, բ): Լուսանկարչական այս գործողությունները կատարում են կարմիր լույսի տակ, քանի որ այդ դեպքում AgBr-ի մոլեկուլները չեն քայքայվում:

Լուսանկարչությունը, բացի կենցաղային կիրառություններից, օգտագործվում է նաև որպես հետազոտական մեթոդ, օրինակ, տիեզերքն ուսումնասիրելու, մոլորակները հայտնաբերելու համար: Այդ նպատակով լուսանկարչական ապարատի օբյեկտիվն ուղղվում է դեպի երկնքի ուսումնասիրվող մասը, որը նկարահանվում է ոչ քան 1-2 վայրկյան, այլ շատ ավելի երկար ժամանակ: Այն աստղը, որից մեզ

հասնող լույսը շատ թույլ է և աչքի համար նշմարելի չէ, նկարահանվում է երկար ժամանակ, և լուսանկարչական թիթեղի վրա ստացվում է նրա տեսանելի պատկերը:

Ֆոտոքիմիական երևույթների բացատրությունը: Դասական ֆիզիկայի օրենքները չեն կարող բացատրել ֆոտոքիմիական ռեակցաների՝ փորձով հայտնաբերված օրինաչափությունները: Այդ օրինաչափությունները բացատրվում են քվանտային ֆիզիկայում՝ լույսի քվանտային տեսության շրջանակներում:

Լույսի ազդեցությամբ մոլեկուլն առանձին մասերի տրոհելու (ատոմների միջև կապերը քանդելու) համար անհրաժեշտ է նրան հաղորդել որոշակի էներգիա: Ֆոտոքիմիական ռեակցիայում մոլեկուլի տրոհումը կատարվում է կլանված ֆոտոնի էներգիայի հաշվին: Եթե լույսի հաճախությունը փոքր է որոշակի սահմանային ν_0 արժեքից, այսինքն՝ նրա մեկ ֆոտոնի էներգիան բավարար չէ միջատոմական կապերը քանդելու համար, ապա տրոհման ռեակցիա տեղի չի ունենում: Նշվածից հետևում է, որ ֆոտոքիմիական երևույթը նույնպես ունի ռեակցիայի «կարմիր սահման»: Տարբեր ֆոտոքիմիական ռեակցաների համար կարմիր սահմանը տարբեր է: Լույսի քվանտային տեսությամբ է բացատրվում նաև փորձում դիտվող այն օրինաչափությունը, ըստ որի՝ ֆոտոքիմիական ռեակցիային մասնակցած նյութի զանգվածն ուղիղ համեմատական է կլանված լուսային էներգիային: Իրոք, քանի որ տրոհումն ուղեկցվում է ֆոտոնի կլանմամբ, ապա տրոհված ատոմների թվը պետք է հավասար լինի կլանված ֆոտոնների թվին, հետևաբար՝ կլանված լուսային էներգիային:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր ռեակցիան է կոչվում ֆոտոքիմիական: 2. Ի՞նչ երևույթով է պայմանավորված երկրի մթնոլորտում թթվածնի գոյությունը: 3. Գրեք արծաթի բրոմիդի ֆոտոգրոհման ռեակցիան: Որտե՞ղ է այն կիրառվում: 4. Համառոտ նկարագրեք լուսանկարի ստացման փուլերը: 5. Ո՞ր մեծությունն են անվանում ֆոտոքիմիական ռեակցիայի «կարմիր սահման»:

§ 42. ԷԼԵԿՏՐԱՍԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ԵՐԿԱԿԻ ԲՆՈՒՅԹԸ

Լույսի քվանտային տեսության շրջանակներում դիտարկեցինք մի շարք երևույթներ, որոնք վկայում են, որ էլեկտրամագնիսական ճառագայթումը (այդ թվում՝ նաև լույսը), արձակվում, տարածվում և նյութում կլանվում է քվանտներով, այսինքն՝ մասնիկների՝ ֆոտոնների հոսք է: Յույց տրվեց, որ այնպիսի երևույթներ, ինչպիսիք են ջերմային ճառագայթումը, ֆոտոէֆեկտը, լույսի քիմիական ազդեցությունը, հնարավոր չէ բացատրել՝ մնալով դասական էլեկտրադինամիկայի սահմաններում:

Մյուս կողմից՝ գիտենք, որ լույսը որոշ երևույթներում (ինտերֆերենց, դիֆրակցիա, դիսպերսիա, բևեռացում) դրսևորում է ալիքային հատկություններ: Այդ երևույթները բացատրելու համար լույսը դիտարկվում է որպես էլեկտրամագնիսական ալիք, որը բնութագրվում է ալիքի երկարությամբ և հաճախությամբ:

Նշենք նաև, որ մի շարք երևույթներ, ինչպիսիք են լույսի ուղղագիծ տարածումը, անդրադարձումը, ճնշումը, նույն հաջողությամբ կարելի է բացատրել ինչպես դասական (ալիքային), այնպես էլ քվանտային տեսության շրջանակներում: Այդ դեպքում հարց է առաջանում. ի՞նչ է լույսը, մասնիկների հոսք, թե՞ ալիք, ո՞րն է նրա իրական բնույթը:

Այս հարցերի պատասխանները տալիս է քվանտային ֆիզիկան՝ նյութի կառուցվածքի և ճառագայթման մասին ժամանակակից տեսությունը: Համաձայն այդ տեսության՝ էլեկտրամագնիսական ճառագայթումը (այդ թվում՝ լույսը), իրոք, կազմված է մասնիկներից՝ ֆոտոններից, սակայն դրանց վարքը հնարավոր չէ նկարագրել դասական ֆիզիկայի օրենքներով: Ի տարբերություն դասական մասնիկների՝ ֆոտոնները կարող են դրսևորել և՛ ալիքային, և՛ մասնիկային հատկություններ. դրանք ունեն երկակի բնույթ՝ նրանց հատուկ է **ալիքամասնիկային երկվությունը**:

Մասնիկային և ալիքային հատկությունների միասնությունն արտացոլվել է ֆոտոնի էներգիայի և իմպուլսի հայտնի բանաձևերում.

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h\nu}{c}, \quad (4.20)$$

որոնք ապացույցում են, որ լույսը մասնիկների հոսք է, որոնցից յուրաքանչյուրն օժտված է որոշակի E էներգիայով և p իմպուլսով: Սակայն, ի տարբերություն դասական մասնիկի, ֆոտոնի էներգիան և իմպուլսը որոշվում են միանգամայն այլ բանաձևերով: (4.20) բանաձևերում ν հաճախությունը բնութագրում է այդ մասնիկների ալիքային հատկությունները:

Էլեկտրամագնիսական ճառագայթման ալիքային և մասնիկային հատկությունները ոչ թե բացառում, այլ լրացնում են իրար: Դրանց դրսևորումն էականորեն կախված է ճառագայթման ալիքի երկարությունից: Մեծ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման, օրինակ, ռադիոալիքների համար ալիքային հատկություններն ավելի վառ են արտահայտված: Ալիքի երկարության փոքրացմանը զուգընթաց սկսում են ի հայտ գալ էլեկտրամագնիսական ճառագայթման մասնիկային (քվանտային) հատկությունները: Ենթակարմիր, տեսանելի, անդրամանուշակագույն ճառագայթումների համար դիտվում են և՛ ալիքային, և՛ մասնիկային հատկությունները: Է՛լ ավելի փոքրացնելով ալիքի երկարությունը՝ հասնում ենք γ -ճառագայթման տիրույթին, որտեղ արդեն գերիշխողը մասնիկային հատկություններն են: Նշվածը բնորոշ օրինակ է այն բանի, թե ինչպես բնության մեջ քանակական փոփոխությունները բերում են որակական փոփոխությունների:

Դասընթացի հետագա ուսումնասիրման ընթացքում դուք կիմանաք, որ ալիքամասնիկային երկվությունը հատուկ է ոչ միայն ֆոտոններին, այլև էլեկտրոններին, պրոտոններին և, ընդհանրապես, բոլոր մասնիկներին:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Նշեք երևույթներ, որտեղ դրսևորվում են լույսի մասնիկային հատկություններ:
2. Նշեք երևույթներ, որոնք կարելի է բացատրել լույսի ինչպես ալիքային, այնպես էլ մասնիկային տեսությամբ:
3. Ի՞նչ է լույսը՝ էլեկտրամագնիսական ալիք, թե՞ մասնիկների հոսք:
4. Ֆոտոնի էներգիայի և իմպուլսի (4.19) բանաձևերն ինչո՞վ են տարբերվում նյութոնյան մեխանիկայում մասնիկի համապատասխան բանաձևերից:

ԽՆՈՒՆՈՒՄԻ ԼՈՒԾՄԱՆ ՕՐԻՆԱԿՆԵՐ

1. Որոշեք այն ֆոտոնի ալիքի երկարությունը, որի էներգիան հավասար է էլեկտրոնի հանգստի էներգիային:

Լուծում: Ֆոտոնի էներգիան, արտահայտված նրա ալիքի երկարությամբ, որովայն է $E = hc/\lambda$ բանաձևով, իսկ էլեկտրոնի հանգստի էներգիան՝ $E_0 = m_e c^2$: Ըստ խնդրի պայմանի՝ այդ էներգիաները միմյանց հավասար են.

$$\frac{hc}{\lambda} = m_e c^2, \text{ որտեղից } \lambda = \frac{h}{m_e c} = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ մ:}$$

Պատասխան՝ $2,4 \cdot 10^{-12}$ մ:

2. Տվյալ մետաղի համար ֆոտոէֆեկտի կարմիր սահմանը՝ $\lambda_0 = 700$ նմ: Մետաղը նախ լուսավորում են $\lambda_1 = 600$ նմ ալիքի երկարությամբ լույսով, ապա անհայտ ալիքի λ_2 երկարությամբ լույսով: Նշված դեպքերում ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն արագությունների հարաբերությունը՝ $v_1/v_2 = 3/4$: Որքա՞ն է λ_2 -ը:

Լուծում: Հաշվի առնելով $v = c/\lambda$ առնչությունը և կիրառելով ֆոտոէֆեկտի համար Այնշտայնի բանաձևը, կստանանք՝

$$\frac{mv_1^2}{2} = \frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_0}, \quad \frac{mv_2^2}{2} = \frac{hc}{\lambda_2} - \frac{hc}{\lambda_0}:$$

Այս հավասարումների աջ և ձախ մասերը բաժանելով իրար և հաշվի առնելով, որ $v_1/v_2 = 3/4$, կստանանք՝

$$\lambda_2 = \frac{9\lambda_1\lambda_0}{16\lambda_0 - 7\lambda_1} = 540 \text{ նմ:}$$

Պատասխան՝ 540 նմ:

Խորացված

3. $\Delta t = 0,1$ վայրկյանում մարմնի $\Delta S = 1$ սմ² մակերեսով հարթ մակերևույթին ուղղահայաց ընկնում է 500 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթման $N = 10^{10}$ ֆոտոն և լրիվ կլանվում: Որքա՞ն է ճառագայթման ճնշումը մակերևույթին:

Լուծում: Յուրաքանչյուր ֆոտոն մակերևույթին հաղորդում է h/λ իմպուլս: Δt ժամանակամիջոցում N ֆոտոնների հաղորդած իմպուլսը՝ $\Delta p = Nh/\lambda$: Համաձայն Նյուտոնի երկրորդ օրենքի՝ մարմնի վրա ազդող ուժը՝ $F = \Delta p/\Delta t = Nh/\lambda \Delta t$, իսկ ճնշումը՝ $P = F/\Delta S = Nh/\lambda \Delta t \Delta S = 1,33 \cdot 10^{-12}$ Պա:

Պատասխան՝ $1,33 \cdot 10^{-12}$ Պա:

4. Արեգակի ճառագայթման ուժգնության առավելագույն արժեքը համապատասխանում է $\lambda_m = 470$ նմ ալիքի երկարությանը: Արեգակի տրամագիծը՝ $d = 1,4 \cdot 10^9$ մ: Հաշվեք, քե ճառագայթման հետևանքով որքանո՞վ է փոքրանում Արեգակի զանգվածը մեկ տարում:

Լուծում: Օգտվելով Վիլի շեդման օրենքից՝ հաշվենք Արեգակի մակերևույթի ջերմաստիճանը. նկատի ունենալով Վիլի հաստատունի արժեքը՝ $b = 2,9 \cdot 10^{-3}$ մ⁴·Կ, կստանանք՝

$$T = \frac{b}{\lambda_m} = 6,2 \cdot 10^3 \text{ Կ:}$$

Արեգակի 1 մ² մակերեսով մակերևույթից 1 վայրկյանում առաքված էներգիան որոշենք Ստեֆան-Բոլցմանի օրենքով՝

$$I_0 = \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (6,2 \cdot 10^3)^4 \text{ Վտ/մ}^2 = 8,38 \cdot 10^7 \text{ Վտ/մ}^2:$$

Մեկ տարում Արեգակի $S = \pi d^2$ մակերեսով մակերևութից առաքված էներգիան՝

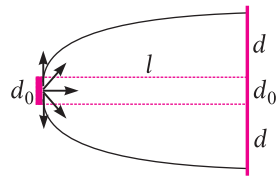
$$E = I_0 St = I_0 \pi d^2 t = 8,38 \cdot 10^7 \cdot 3,14 \cdot (1,4 \cdot 10^9)^2 \cdot 3,16 \cdot 10^7 \text{ Ջ} = 1,63 \cdot 10^{34} \text{ Ջ}:$$

Չանգվածի կորուստը մեկ տարում՝ $\Delta m = E/c^2 = 1,63 \cdot 10^{34} / 9 \cdot 10^{16} = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ կգ}:$

Պատասխան՝ $1,8 \cdot 10^{17} \text{ կգ}:$

5. $\lambda = 500 \text{ նմ}$ ալիքի երկարությամբ արգոնային լազերի ճառագայթը ֆոտոկաթոդի վրա ունի $d_0 = 0,1 \text{ մմ}$ տրամագիծ: Ֆոտոկաթոդից էլեկտրոնների ելքի աշխատանքը՝ $A = 2 \text{ էՎ}$: Կաթոդի և նրանից $l = 3 \text{ մմ}$ հեռավորությամբ հարթ անոդի միջև կիրառված է ֆոտոէլեկտրոններն արագացնող $U = 4 \text{ կՎ}$ լարում, որի դեպքում ֆոտոհոսանքը հազենում է: Անոդը զուգահեռ է կաթոդի մակերևութին: Որքա՞ն է անոդի վրա ֆոտոէլեկտրոնների փնջի տրամագիծը:

Լուծում: Լույսի ազդեցությամբ կաթոդից էլեկտրոնները դուրս են թռչում բոլոր հնարավոր ուղղություններով: Անոդի կենտրոնից առավել հեռու կրկնեն այն էլեկտրոնները, որոնք կաթոդից դուրս են թռչում նրան զուգահեռ ուղղված արագությամբ (տե՛ս նկարը): Այդ արագությունը որոշենք Այնշտայնի բանաձևից՝



$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A, \quad v_0 = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot \frac{hc}{\lambda} - A} \cdot \frac{1}{c}:$$

Էլեկտրոնի վրա արագացնող դաշտն ազդում է eU/l ուժով, հետևաբար՝ նրա արագացումը՝ $a = eU/ml$: Անոդի և կաթոդի միջև հեռավորությունն էլեկտրոնն անցնում է $t = (2l/a)^{1/2} = l(2m/eU)^{1/2}$ ժամանակամիջոցում: Այդ ընթացքում էլեկտրոնն անոդին զուգահեռ տեղափոխվում է $d = v_0 t$ չափով: Անոդի վրա էլեկտրոնների փնջի տրամագիծը՝

$$D = d_0 + 2d = d_0 + 4l \sqrt{\frac{1}{eU} \cdot \frac{hc}{\lambda} - A} \cdot \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,3 \text{ մմ}:$$

Պատասխան՝ $1,3 \text{ մմ}:$

§ 43. ԱՏՈՄԻ ԲԱՐԴ ԿԱՌՈՒՅՎԱԾԵՐ ԸԱՍՏԱՏՈՂ ՓՈՐՁԵՐ ԵՎ ԵՐԵՎՈՒՅԹՆԵՐ

Ինչպես գիտեք հիմնական դպրոցից, 19-րդ դարում հայտնաբերվել են երևույթներ, որոնք հակասում էին նյութի կառուցվածքի մասին հայտնի շատ դրույթների, այդ թվում՝ ատոմի անբաժանելիության մասին դրույթին: Առաջին փորձնական վկայությունն այն բանի, որ ատոմը բաժանելի է, էլեկտրոլիզի վերաբերյալ Ֆարադեյի հետազոտությունների արդյունքներն էին: Այդ հետազոտություններից Ֆարադեյը եկել է այն համոզման, որ թեև ատոմն ամբողջությամբ էլեկտրաչեզոք է, այդուհանդերձ՝ պարունակում է տարբեր նշանի և բացարձակ արժեքով հավասար լիցքեր: Որևէ նշանի լիցքի պակասից կամ ավելցուկից առաջանում է լիցքավորված ատոմ՝ իոն: 11-րդ դասարանում էլեկտրոլիզի երևույթի ուսումնասիրությունից դուք գիտեք, որ լիցքն ունի «հատիկային» բնույթ: Ուրեմն՝ ատոմի ներսում առկա այս կամ այն նշանի q լիցքը բազմապատիկ է լիցքի «հատիկին», այն է՝ տարրական e լիցքին՝ $q = \pm Ne$ (N -ը բնական թիվ է, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Կլ): Հետևաբար՝ ատոմը պետք է բաղկացած լինի ինչպես դրական, այնպես էլ բացասական լիցք ունեցող մասնիկներից: Իսկ թե ի՞նչ մասնիկներ էին դրանք, պարզ դարձավ միայն շատ տարիներ անց:

1896 թ. ֆրանսիացի ֆիզիկոս Անրի Բեկերելը հայտնաբերել է բնական ճառագայթաակտիվության երևույթը, որը պայմանավորված է որոշ նյութերի՝ ինքնակամորեն, առանց արտաքին գործոնների ազդեցության, ճառագայթելու հատկությամբ: 1902 թվականին անգլիացի ֆիզիկոսներ Էռնեստ Ռեզերֆորդը և Ֆրեդերիկ Սոդին ենթադրել են, որ ճառագայթաակտիվության պատճառը ճառագայթաակտիվ նյութի ատոմների փոխակերպումներն են այլ ատոմների: Ճառագայթաակտիվ նյութերի գոյությունը վկայում է, որ ատոմներն, իրոք, բաժանելի են:

1897 թ., հետազոտելով նոսր գազերում էլեկտրական պարպման երևույթը, անգլիացի ֆիզիկոս Ջոզեֆ Ջոն Թոմսոնը նկատել է, որ կաթոդից արձակված ճառագայթումը շեղվում է էլեկտրական և մագնիսական դաշտերում: Դրանից նա եզրակացրել է, որ այդ ճառագայթումը բացասական լիցքավորված մասնիկների հոսք է: Չափելով հետազոտվող մասնիկների տեսակարար լիցքը՝ q/m հարաբերությունը, Թոմսոնը ստացել է $q/m = -1,76 \cdot 10^{11}$ Կլ/կգ արժեքը: Ուսումնասիրելով այդ մասնիկների հատկությունները՝ նա եկել է այն համոզման, որ դրանք ատոմների բաղկացուցիչ մասեր են: Նրա առաջարկությամբ էլ այդ մասնիկներն անվանել են էլեկտրոններ: Այլևս ոչ ոք չէր կասկածում, որ ատոմը բաժանելի է: Բայց այդ դեպքում ինչի՞ էր մնան ատոմը, ինչպե՞ս էր այն կառուցված: Թեև հայտնի էր, որ սովորական վիճակում ատոմն էլեկտրաչեզոք համակարգ է, ընդ որում՝ էլեկտրոն-

ներն ունեն չնչին (ատոմի հետ համեմատած) զանգված, և ատոմի զանգվածի գերակշիռ մասը կապված է դրական լիցքի հետ, բայց դեռ պարզ չէր, թե տարբեր նշանի լիցքերն ինչպե՞ս են բաշխված ատոմում:

Եվ շատ շուտով կուտակված փորձարարական տվյալները հնարավորություն ընձեռեցին պատասխանելու նշված հարցերին և, բացի այդ, ստեղծելու ատոմի որոշակի մոդելներ:

Ատոմի մոդելը՝ ըստ Թոմսոնի: 1903 թ.՝ էլեկտրոնի հայտնագործումից մի քանի տարի անց, Թոմսոնն առաջարկել է ատոմի առաջին մոդելը, որի համաձայն՝ ատոմը համասեռ գունդ է, ընդ որում՝ դրական լիցքը հավասարաչափ բաշխված է գնդի ամբողջ ծավալով մեկ, իսկ ներսում տեղ-տեղ «ամրացված» են բացասական լիցքով մասնիկները՝ էլեկտրոնները (նկ. 97): Մասնավորապես, ջրածնի ատոմը, որ պարզագույնն է, դրականապես լիցքավորված գունդ է, որի կենտրոնում (երբ ատոմը հավասարակշռության վիճակում է) էլեկտրոնն է:

Գնահատումների համաձայն՝ Թոմսոնի ատոմի տրամագիծը 0,1 նմ կարգի մեծություն է (տե՛ս Խնդիրների լուծման օրինակներ, Խնդիր 1, էջ 146):

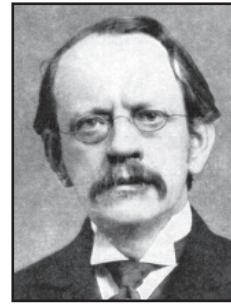
Երբ էլեկտրոնները տատանվում են իրենց հավասարակշռության դիրքերի շուրջը, ատոմն արձակում է էլեկտրամագնիսական ալիքներ:

Թոմսոնի ատոմը հիշեցնում էր չամչով լցոնված կարկանդակ, միայն թե չամչի հատիկների դերում էլեկտրոններն էին: Այդ պատճառով էլ ատոմի Թոմսոնի մոդելը հաճախ անվանում էին մաս «չամչով կարկանդակի» մոդել:

α -մասնիկների ցրման Ռեզերֆորդի փորձերը: Ինչպե՞ս համոզվել՝ որքանո՞վ է ատոմի Թոմսոնի մոդելը համապատասխանում իրականությանը:

Ատոմի կառուցվածքն ուսումնասիրելու համար անհրաժեշտ է որևէ կերպ թափանցել ատոմի մեջ՝ որպես «գունդ» օգտագործելով նրանից փոքր մասնիկներ: Հետազոտվող ատոմները, ինչպես «թիրախները», ռմբակոծում են յուրօրինակ «արկերով»՝ գունդ-մասնիկներով, որոնց արագությունը բավարար է ատոմի մեջ թափանցելու և ներատոմային մասնիկների հետ փոխազդելու համար:

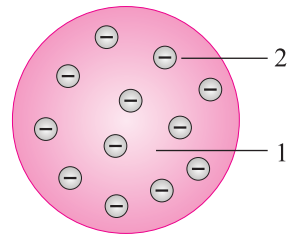
Նյութի ատոմների կառուցվածքն ուսումնասիրելու նպատակով Ռեզերֆորդը որպես «գունդ» օգտագործեց α -մասնիկները, որոնք արձակում էր ռադիումի պատրաստուկը: α -մասնիկների զանգվածը մոտավորապես 7400 անգամ գերազանցում է էլեկտրոնինը՝ $m_{\alpha} \approx 7400 m_e$, իսկ լիցքը, որը դրական է, տարրական լիցքի կրկնապատիկն է՝ $q_{\alpha} = 2e$: Այլ կերպ ասած՝ α -մասնիկը հելիումի ատոմ է, որը կորցրել է իր երկու էլեկտրոնները: Փորձում ռադիումի պատրաստուկի արձակված α -մասնիկների արագությունը շատ մեծ է՝ $v_{\alpha} = 20000$ կմ/վ:



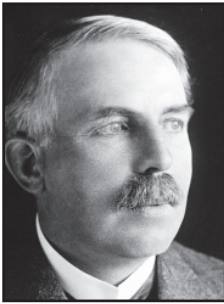
Ջոզեֆ Ջոն Թոմսոն

1856-1940

Անգլիացի մեծ ֆիզիկոս:
Հայրնագործել է էլեկտրոնը:
Հայրնաբերել է ջերմաէլեկտրոնային առաքման երևույթը:
Առաջարկել է ատոմի առաջին մոդելը: Մեքաղների դասական էլեկտրոնային տեսության սրբեղծողներից է: Արժանապե՛լ է Նոբելյան մրցանակի (1906):



Նկ. 97. Ատոմի մոդելը՝ ըստ Թոմսոնի. 1. դրական լիցքավորված նյութ, 2. էլեկտրոն



Էռնեստ Ռեզերֆորդ

1871-1937

Անգլիացի աշխարհահռչակ ֆիզիկոս, միջուկային ֆիզիկայի հիմնադիրը:
Հայտնաբերել է α - և β -մասնիկները, ստեղծել ճառագայթաակտիվության տեսությունը: Առաջարկել է պոլոնի մոլորակային մոդելը: Իրականացրել է առաջին արհեստական միջուկային ռեակցիան: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի քիմիայի բնագավառում (1908):

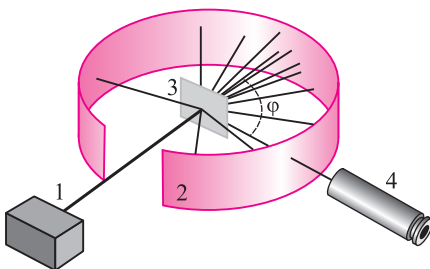
Ռեզերֆորդն α -մասնիկներով ռմբակոծում էր ծանր տարրերի (ոսկի, արծաթ, պղինձ և այլն) ատոմները: Ատոմում էլեկտրոնները, ունենալով փոքր զանգված, չեն կարող նկատելիորեն փոխել α -մասնիկների շարժման հետագիծը: α -մասնիկները կարող էին ցրվել, այսինքն՝ փոխել իրենց շարժման ուղղությունը՝ միայն բախվելով ատոմի՝ դրական լիցք ունեցող ավելի ծանր մասին: Այսպիսով՝ α -մասնիկների ցրմամբ կարելի էր որոշել, թե ատոմի ներսում ինչպես են բաշխված դրական լիցքը և զանգվածը:

Ռեզերֆորդի փորձի սխեման պատկերված է 98-րդ նկարում: Ռադիումի պատրաստուկի արձակած α -մասնիկների նեղ փունջն ուղղվում էր դեպի ոսկե բարակ նրբաթիթեղը: Յրվելուց հետո α -մասնիկներն ընկնում էին ցինկի սուլֆիդի (ZnS) շերտով պատված էկրանին: α -մասնիկների հարվածներից էկրանին առաջանում էին **առկայծումներ**, որոնք դիտում էին մանրադիտակի օգնությամբ: Ռեզերֆորդի փորձում կարելի էր գրանցել փնջի սկզբնական ուղղության նկատմամբ տարբեր անկյուններով ցրված α -մասնիկներ:

Դժվար չէ գնահատել, որ փորձում օգտագործված ոսկե բարակ նրբաթիթեղի $d = 0,4$ մկմ հաստությամբ տեղավորված ոսկու ատոմների թիվը շուրջ 1600 է:

Փորձերի ընթացքում պարզվել է, որ α -մասնիկների մեծ մասը նրբաթիթեղով անցնելիս շեղվում է միայն աննշան չափով: Այսինքն՝ յուրաքանչյուր α -մասնիկ, գրեթե առանց շեղվելու, անցնում է 1600 ատոմների միջով: Նշանակում է՝ ատոմի զբաղեցրած ծավալը մեծ մասամբ դատարկ է:

Սակայն Ռեզերֆորդը և փորձին մասնակից նրա աշխատակիցները նկատել են, որ նրբաթիթեղով անցնող սակավաթիվ α -մասնիկներ սկզբնական ուղղությու-



Նկ. 98. α -մասնիկների ցրման Ռեզերֆորդի փորձի սխեման. 1. ռադիումի պատրաստուկ պարունակող կապարե արկղ, 2. ցինկի սուլֆիդով պատված էկրան, 3. ոսկե նրբաթիթեղ, 4. մանրադիտակ

նից շեղվում են նկատելի անկյուններով: Այսպես, օրինակ, մոտավորապես 20000 ցրված մասնիկից մեկը շեղվում էր 90° -ին մոտ անկյունով, 40000-ից մեկը՝ 120° -ից քիչ տարբերվող անկյունով և 70000 մասնիկից մեկը՝ շուրջ 150° -ով: Այս փաստն անսպասելի էր Ռեզերֆորդի համար, քանի որ դրական լիցքը, հավասարաչափ բաշխված լինելով Թոմսոնի ատոմում, չի կարող ստեղծել այնպիսի էլեկտրական դաշտ, որը հետ շարտի α -մասնիկները: Այստեղից հետևում է, որ ատոմի Թոմսոնի մոդելն իրականությանը չի համապատասխանում:

Համոզվենք, որ իրոք, Թոմսոնի ատոմի դրական լիցքի էլեկտրական դաշտը չի կարող α -մասնիկները ցրել 90° -ից մեծ անկյուններով: Իսկապես, հայտնի է, որ հավասարաչափ լիցքավորված գնդի էլեկտրական դաշտը գնդից դուրս այնպիսին է, ինչպիսին գնդի կենտրոնում գետեղված կետային լիցքինը: Գնդի ներսում կենտրոնին մոտենալիս էլեկտրական դաշտի լարվածությունը նվազում է մինչև զրո: Այստեղից հետևում է, որ էլեկտրական դաշտի լարվածությունն առավելագույնն է գնդի մակերևույթին:

Համաձայն Կուլոնի օրենքի՝ այդ առավելագույն արժեքը՝

$$E_{\max} = k \frac{q}{R^2} \quad (5.1)$$

որտեղ R -ը գնդի (Թոմսոնի ատոմի) շառավիղն է, q -ն՝ գնդի դրական լիցքը: (5.1) բանաձևում տեղադրելով $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Ն} \cdot \text{մ}^2 / \text{Կլ}^2$, $q = Ze = 1,26 \cdot 10^{-17} \text{ Կլ}$ ($Z = 79$ -ը ոսկու կարգաթիվն է Մենդելևի պարբերական աղյուսակում), $R = 10^{-10} \text{ մ}$, կստանանք՝ $E_{\max} \sim 10^{13} \text{ Վ/մ}$:

Հաշվարկը հեշտապես իր համար ենթադրենք, որ էլեկտրական դաշտը համասեռ է ու հավասար է $E_{\max}$ -ի, և α -մասնիկն արգելակվում է այդպիսի դաշտում: Այդ դեպքում, Նյուտոնի 2-րդ օրենքի համաձայն, կարող ենք գրել՝

$$q_{\alpha} E_{\max} = m_{\alpha} a, \quad (5.2)$$

որտեղ a -ն α -մասնիկի արագացումն է, q_{α} -ն՝ լիցքը՝ $q_{\alpha} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Կլ}$, իսկ m_{α} -ն՝ զանգվածը՝ $m_{\alpha} = 4 \text{ Գ.ա.մ.} \approx 7 \cdot 10^{-27} \text{ կգ}$: Կինեմատիկայից հայտնի է, որ $a = v_{\alpha}^2 / 2l$, որտեղ v_{α} -ն α -մասնիկի սկզբնական արագությունն է՝ $v_{\alpha} = 2 \cdot 10^7 \text{ մ/վ}$, l -ը՝ արգելակման ճանապարհը: a -ի արտահայտությունը տեղադրելով (5.2) հավասարման մեջ՝ l -ի համար կստանանք՝

$$l = \frac{m_{\alpha} v_{\alpha}^2}{2 q_{\alpha} E_{\max}} = \frac{7 \cdot 10^{-27} \cdot 4 \cdot 10^{14}}{2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{13}} \text{ մ} = 0,4 \text{ մկմ}: \quad (5.3)$$

Այսինքն՝ α -մասնիկի արգելակման ճանապարհը մոյն կարգի է, ինչ ոսկե նրբաթիթեղի հաստությունը: Այլ կերպ ասած՝ α -մասնիկը պետք է անցնի նրբաթիթեղով, այսինքն՝ Թոմսոնի ատոմի դրական լիցքի էլեկտրական դաշտը բավական թույլ է α -մասնիկներն սկզբնական ուղղությամբ 90° -ից մեծ անկյուններով շեղելու համար: Իսկ դա նշանակում է, որ, իրոք, ատոմի Թոմսոնի մոդելն իրականությանը չի համապատասխանում:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ երևույթներ են հակասում արոմի անբաժանելիության մասին դրույթին:
2. Դիցուք՝ արոմը կորցրել է իր բոլոր էլեկտրոնները: Ինչպե՞ս կփոխվի արոմի զանգվածը՝ ա. կնվազի աննշան չափով, բ. զգալիորեն կնվազի:
3. Ինչպիսի՞ն է արոմը՝ ըստ Թոմսոնի առաջարկած մոդելի: Ինչպե՞ս է Թոմսոնի արոմն արձակում էլեկտրամագնիսական ալիքներ:
4. Ո՞րն է «գոնդերի» միջոցով արոմի կառուցվածքի հեռագոյման եղբղոնը:
5. Ի՞նչ է α -մասնիկը: Որքա՞ն են α -մասնիկի լիցքը, զանգվածը:
6. Նկարագրեք α -մասնիկների ցրման Ռեզերֆորդի փորձը: Ինչպե՞ս էին գրանցում ցրված α -մասնիկները:
7. Որքա՞ն էր Ռեզերֆորդի փորձում օգտագործվող ոսկե նրբաթիթեղի հաստությունը: Գնահատեք, թե ոսկու քանի՞ արոմ է րեղավորվում այդ հաստությամբ:

8. Շեղվում էին արդյոք սկզբնական ուղղությունից α -մասնիկները ոսկե նրբաթիթեղով անցնելուց հետո: α -մասնիկների ո՞ր մասն էր շեղվում 90° -ից մեծ անկյուններով:
9. Որքա՞ն է Թոմսոնի ատոմի դրական լիցքի էլեկտրական դաշտի առավելագույն լարվածությունը: Կատարելով հաշվարկ՝ ցույց տվեք, որ այդպիսի լարվածությամբ էլեկտրական դաշտը չի կարող α -մասնիկը ցրել 90° -ից մեծ անկյունով:

§ 44. ԱՏՈՄԻ ՄՈԼՈՐԱԿԱՅԻՆ ՄՈՂԵԼԸ

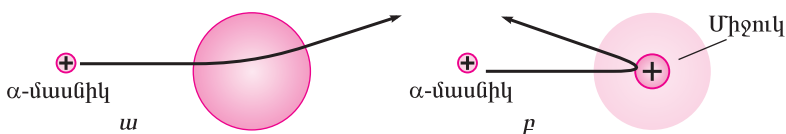
Ատոմի մոլորակային մոդելը: Քանի որ ատոմի ծավալը հիմնականում դատարկ է, ապա մնում է ենթադրել, որ ատոմի զանգվածը զբաղեցնում է ատոմի ծավալի չնչին մասը: Իսկ 90° -ից մեծ անկյուններով ցրումների առկայությունից հետևում է, որ ցրող կենտրոնն ունի դրական լիցք: Հաշվարկները ցույց են տալիս, որ α -մասնիկը հետ է «շարտվում» միայն այն դեպքում, երբ ատոմի՝ դրական լիցք պարունակող տիրույթի չափը մոտավորապես $10^{-15} \div 10^{-14}$ մ է, որը մի քանի տասնյակ հազար անգամ փոքր է ատոմի շառավղից:

Այսպիսով, համաձայն Ռեզերֆորդի փորձի արդյունքների, ատոմի ամբողջ դրական լիցքը և գրեթե ամբողջ զանգվածը կրում է մի մասնիկ, որի տրամագիծը 10^{-15} մ-ի կարգի է: Այդ մասնիկը Ռեզերֆորդն անվանել է **ատոմային միջուկ**:

Փորձենք պատկերացնել, որ ատոմի միջուկն ունի 1 մմ տրամագծով գնդիկի տեսք (մոտավորապես բորոսի գլխիկի չափի): Այդ դեպքում ատոմը կունենա $10 \div 100$ մ տրամագծով գնդի տեսք:

Ատոմն ամբողջությամբ էլեկտրաչեզոք է, ուստի՝ ատոմի էլեկտրոնները, որոնց թիվը հավասար է Մենդելեևի պարբերական աղյուսակում տվյալ տարրի կարգաթվին, ունեն մոդուլով միջուկի լիցքին հավասար բացասական լիցք: Բնական է, որ ատոմի ներսում էլեկտրոնները չեն կարող լինել անշարժ վիճակում. չէ՞ որ այդ դեպքում կրճկներին միջուկի վրա: Ուրեմն՝ էլեկտրոնները պետք է շարժվեն միջուկի շուրջն այնպես, ինչպես մոլորակները Արեգակի շուրջը: Այդ պատճառով էլ Ռեզերֆորդի առաջարկած ատոմի կառուցվածքի միջուկային մոդելն անվանում են նաև **ատոմի մոլորակային մոդել**:

Ատոմի մոլորակային մոդելը հնարավորություն է տալիս բացատրելու Ռեզերֆորդի փորձի արդյունքները: Իրոք, ատոմը հիմնականում դատարկ է, ուստի՝ α -մասնիկների մեծ մասը մետաղե նրբաթիթեղով անցնում է առանց ցրվելու: Երբ α -մասնիկը շարժվում է ատոմի միջուկի մոտով, նրա վրա ազդում է միջուկի ուժեղ էլեկտրական դաշտը՝ ստիպելով α -մասնիկին շեղվել սկզբնական ուղղությունից: 99-րդ նկարը լուսաբանում է α -մասնիկի ցրումը Թոմսոնի ատոմում (w) և Ռեզերֆորդի ատոմում (p) ատոմներում:



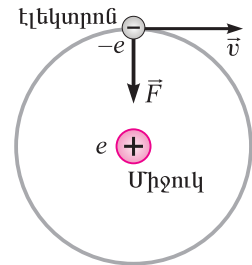
Նկ. 99. α -մասնիկի ցրումը Թոմսոնի ատոմում (w), Ռեզերֆորդի ատոմում (p)

Մոլորակային մոդելի և դասական ֆիզիկայի հակասությունը: Ատոմի մոլորակային մոդելը հակասության մեջ է դասական ֆիզիկայի օրենքների հետ: Իրոք, միջուկի շուրջը շարժվելով փակ ուղեծրերով՝ էլեկտրոնը միջուկի կուլոնյան ուժի ազդեցությամբ ձեռք է բերում կենտրոնաձիգ արագացում (նկ.100): 11-րդ դասարանի ֆիզիկայի դասընթացից գիտեք, որ արագացումով շարժվող լիցքավորված մասնիկներն արձակում են էլեկտրամագնիսական ալիքներ (էլեկտրամագնիսական ճառագայթում): Միջուկի շուրջը պտտվող էլեկտրոնն արձակում է էլեկտրամագնիսական ալիքներ, որոնց հաճախությունը հավասար է միջուկի շուրջն էլեկտրոնի պտտման հաճախությանը:

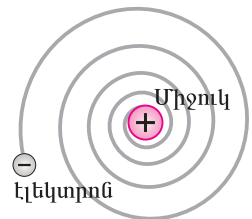
Նշանակում է՝ էլեկտրոնը, պտտվելով միջուկի շուրջը, անընդհատ պետք է արձակի էլեկտրամագնիսական ալիքներ: Բայց այդ դեպքում էլեկտրոնը շարունակ էներգիա է կորցնում: Իսկ էներգիա կորցնելով՝ էլեկտրոնն անընդհատ կմոտենա միջուկին և ի վերջո, շատ կարճ ժամանակ ($\tau \sim 10^{-8}$ վ) անց, կընկնի միջուկի վրա (նկ.101), և ատոմը կդադարի գոյություն ունենալուց:

Իրականում, սակայն, նման բան տեղի չի ունենում: Ատոմները, ինչպես գիտեք, կայուն են, և այն վիճակում, երբ նրանց էներգիան նվազագույնն է, կարող են մնալ անսահման երկար ժամանակ՝ չճառագայթելով էլեկտրամագնիսական ալիքներ:

Ասվածից հետևում է, որ ատոմների և ներատոմային մասնիկների շարժումները և փոխազդեցությունները ընդհանրապես հնարավոր չէ նկարագրել դասական ֆիզիկայի օրենքներով: Սակայն դասական ֆիզիկան, ճշմարիտ լինելով մակրոմարմինների համար, չի կարող նշել այն սահմանները, որոնց ներսում ճիշտ են դասական ֆիզիկայի օրենքները: Այդ սահմանները կարող է մատնանշել միայն ավելի ընդգրկուն տեսություն, որն է քվանտային ֆիզիկան: Այլ կերպ ասած՝ միկրոսկոպական օբյեկտների համար ճշմարիտ են քվանտային ֆիզիկայի օրենքները:



Նկ.100. Ջրածնի ատոմը. էլեկտրոնը միջուկի շուրջը շարժվում է $\vec{F}$ կուլոնյան ուժի ազդեցությամբ:



Նկ.101. Էլեկտրոնի շարժումը պարույրագծով ջրածնի միջուկի՝ պրոտոնի շուրջը



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչպե՞ս են Մեդեյևսկի պարբերական աղյուսակի օգնությամբ որոշում արոմի դրական լիցքը: Հաշվե՞ք ոսկու, արծաթի, պղնձի արոմների դրական լիցքերը:
2. Ինչպիսի՞ն էր արոմի մոդելը՝ ըստ Ռեզերֆորդի: Ինչո՞ւ են այդ մոդելն անվանում մոլորակային:
3. Որքա՞ն է արոմային միջուկի չափը՝ ըստ մոլորակային մոդելի:
4. Ինչո՞ւ արոմում էլեկտրոնները չեն կարող անշարժ լինել:
5. Բացառելով Ռեզերֆորդի փորձի արդյունքները՝ ըստ արոմի մոլորակային մոդելի:
6. Ինչո՞ւ հնարավոր չէ միջուկի շուրջ էլեկտրոնների շարժումը կայուն ուղեծրերով:
7. Ըստ դասական էլեկտրադինամիկայի՝ մոտավորապես որքա՞ն ժամանակում է էլեկտրոնն ընկնում միջուկի վրա:
8. Ո՞ր օրենքներն են ձիշտ միկրոաշխարհի համար:

Մի անգամ երեկոյան Ռեզերֆորդը մտավ լաբորատորիա: Թեև ուշ էր, բայց այնտեղ սարքերի վրա հակված էր նրա աշակերտներից մեկը:

- Ի՞նչ եք անում այսքան ուշ, – հարցրեց Ռեզերֆորդը:
 - Աշխատում եմ, – հետևեց պատասխանը:
 - Իսկ ցերեկն ի՞նչ եք անում:
 - Աշխատում եմ, իհարկե, – եղավ պատասխանը:
 - Առավոտյան վաղ նույնպե՞ս աշխատում եք:
 - Այո, պրոֆեսոր, – հաստատեց աշակերտը՝ հույս ունենալով հայտնի գիտնականի շուրթերից լսել գովեստի խոսքեր:
- Ռեզերֆորդը մոայլվեց և գայրապսած հարցրեց.
- Լսե՛ք, իսկ ե՞րբ եք մտածում:

Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. Գնահատեք Թոմսոնի ատոմի տրամագիծը:

Լուծում: Թոմսոնի ատոմի՝ որպես գնդի, տրամագիծը գնահատելու համար դիտարկենք պինդ կամ հեղուկ մարմին և պատկերացնենք, որ նրա ատոմների ծավալների գումարը նույն կարգի է, ինչ ամբողջ մարմնի ծավալը:

Նյութի մեկ մոլի ծավալը՝ $V_M = M/\rho$, որտեղ ρ -ն մարմնի խտությունն է, M -ը՝ մոլային զանգվածը: Նշանակում է՝ մեկ ատոմին բաժին ընկնող գնդի ծավալը՝ $V_1 = V_M/N_A = M/(\rho N_A) = \pi a^3/6$, որտեղ N_A -ն Ավոգադրոյի հաստատումն է, իսկ a -ն՝ ատոմի տրամագիծը: Գրված առնչությունից կստանանք՝

$$a = \sqrt[3]{\frac{6M}{\pi \rho N_A}}:$$

Օրինակ՝ հեղուկ ջրածնի համար ($T = 20$ Կ, $M = 1,008 \cdot 10^{-3}$ կգ/մոլ, $\rho = 70,8$ կգ/մ³), կստանանք՝ $a = 3,2 \cdot 10^{-10}$ մ = $3,2$ Ա: Մնացած տարրերի համար հաշվարկները տալիս են նույն կարգի արժեքներ: Հետևաբար՝ կարելի է եզրակացնել, որ բոլոր ատոմները սովորական վիճակում ունեն մի քանի անգուստրեմի կարգի տրամագիծ:

Պատասխան՝ մի քանի Ա:

2. Ի՞նչ նվազագույն հեռավորության կհասնի $v = 2 \cdot 10^7$ մ/վ արագությամբ α -մասնիկը՝ մոտենալով ոսկու ատոմի միջուկին, եթե շարժվում է միջուկի կենտրոնով անցնող ուղղով: α -մասնիկի զանգվածը՝ $m_\alpha = 7 \cdot 10^{-27}$ կգ, լիցքը՝ $q_\alpha = 3,2 \cdot 10^{-19}$ Կլ, ոսկու միջուկի լիցքը՝ $q = 1,3 \cdot 10^{-17}$ Կլ:

Լուծում: Միջուկին մոտենալիս α -մասնիկի կինետիկ էներգիան միջուկի վանողության ուժի ազդեցությամբ նվազում է՝ փոխակերպվելով պոտենցիալ էներգիայի: Միջուկի կենտրոնից R հեռավորությամբ կետում α -մասնիկի կինետիկ էներգիան դառնում է զրո. այն կանգ է առնում: Համաձայն էներգիայի պահպանման օրենքի՝ միջուկից շատ հեռու α -մասնիկի $m_\alpha v^2/2$ կինետիկ էներգիան պետք է հավասար լինի R հեռավորությամբ կետում նրա և միջուկի փոխազդեցության $kq_\alpha q/R$ պոտենցիալ էներգիային (էլեկտրական հաստատումը՝ $k = 9 \cdot 10^9$ Ն·մ²/Կլ).

$$\frac{m_\alpha v^2}{2} = k \frac{q_\alpha q}{R}, \text{ որտեղից } R = \frac{2kq_\alpha q}{m_\alpha v^2}:$$

Տեղադրելով թվային տվյալները՝ կստանանք՝ $R = 2,6 \cdot 10^{-14}$ մ:

Պատասխան՝ $2,6 \cdot 10^{-14}$ մ:

Ինչպես տեսանք, դասական մեխանիկան և էլեկտրադինամիկան չեն կարող նկարագրել ատոմի հատկությունները, քանի որ, ըստ դասական ֆիզիկայի պատկերացումների, ատոմները կայուն մասնիկներ չեն: Բացի այդ՝ փորձերը ցույց են տալիս նաև, որ ատոմները լուսարձակում են միայն որոշակի պայմաններում (օրինակ՝ զազերը լուսարձակում են՝ նրանցով էլեկտրական հոսանք անցնելիս, պինդ մարմինները՝ մինչև բարձր ջերմաստիճաններ տաքացնելիս): Ինչպե՞ս բացատրել այս երևույթները՝ հիմնվելով ատոմի մոլորակային մոդելի վրա:

Դանիայի ֆիզիկոս Նիլս Բորը, աշխատելով Ռեզերֆորդի լաբորատորիայում, եկել է այն համոզման, որ Ռեզերֆորդի առաջարկած ատոմի մոլորակային մոդելի և փորձի անհամապատասխանությունը հետևանք է ոչ թե այն բանի, որ այդ մոդելը ճիշտ չէ, այլ որ ատոմների և ներատոմային մասնիկների շարժումն օժտված է մի շարք առանձնահատկություններով, որոնք բնորոշ չեն մակրոաշխարհի մարմիններին: Ուրեմն՝ միջուկի շուրջն էլեկտրոնի շարժումը հարկավոր է նկարագրել՝ հրաժարվելով դասական ֆիզիկայի որոշ պատկերացումներից: Պլանկի վարկածն այն մասին, որ ատոմներն էներգիան ճառագայթում են առանձին բաժիններով (քվանտներով), Բորին հուշեց, որ ատոմի էներգիան նույնպես չի կարող փոփոխվել անընդհատորեն:

Բացատրելու համար ատոմների կայունությունը և լույսի (էլեկտրամագնիսական ճառագայթման) արձակումն ու կլանումը, հրաժարվելով դասական էլեկտրադինամիկայի որոշ պատկերացումներից, 1913 թ. Բորն ստեղծել է մի տեսություն՝ հիմնված երկու կանխադրույթի վրա:

1. Կանխադրույթ ստացիոնար վիճակների մասին. ատոմում էլեկտրոնը միջուկի շուրջը կարող է շարժվել միայն որոշակի՝ «թույլատրված» շրջանագծային ուղեծրերով: Այդ ուղեծրերով շարժվելիս էլեկտրոնն էներգիա չի առաքում, նշանակում է՝ էլեկտրոնի «թույլատրված» ուղեծրերը կայուն են, որի պատճառով էլ Բորն այդ ուղեծրերն անվանել է **ստացիոնար**:

Էլեկտրոնի ստացիոնար ուղեծրերին համապատասխանում են ատոմի **ստացիոնար վիճակներ (մակարդակներ)**: Բորի առաջին կանխադրույթից հետևում է, որ ատոմը կարող է լինել միայն **ստացիոնար վիճակներում**: Ատոմի էներգիայի ամեն մի փոփոխություն՝ պայմանավորված էլեկտրամագնիսական ալիքների արձակմամբ կամ կլանմամբ, հետևանք է միայն մի ստացիոնար վիճակից մյուսն ատոմի թռիչքաձև անցման:



Նիլս Բոր

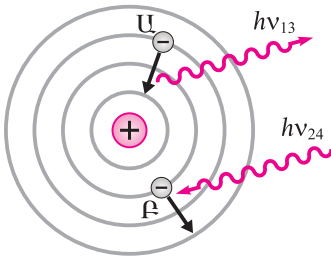
1885-1962

Դանիայի հռչակավոր ֆիզիկոս: Ստեղծել է ջրածնի ատոմի քվանտային տեսությունը: Բացահայտել է ատոմների էլեկտրոնային թաղանթների և սպեկտրային գծերի վերաբերյալ հիմնական օրենքները, բացատրել է Մենդելևի պարբերական աղյուսակի մի շարք առանձնահատկություններ: Արոմային միջուկի բարդ կառուցվածքի և նրա փրոման տեսության ստեղծողներից է: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1922):

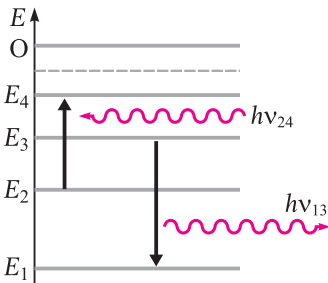
Բորի առաջին կանխադրույթն ակնհայտորեն հակասում է դասական ֆիզիկայի պատկերացումներին: Նախ՝ ատոմում էլեկտրոնի էներգիան կարող է ընդունել միայն ընդհատ (կամ, ինչպես մասնատում են, **քվանտացված**) արժեքներ, որը նշանակում է՝ ատոմի էներգիան մույնպես քվանտացված է: Այնուհետև՝ ստացիոնար ուղեծրերով շարժվելիս, չնայած արագացմանը, էլեկտրոնն էլեկտրամագնիսական ալիքներ չի արձակում, այլ կերպ ասած՝ ստացիոնար վիճակում ատոմը չի ճառագայթում:

2. Կանխադրույթ հաճախությունների մասին. ատոմը մի ստացիոնար վիճակից մյուսը թռիչքաձև անցնելիս արձակում կամ կլանում է էներգիայի քվանտ, որի հաճախությունը որոշվում է այդ ստացիոնար վիճակների էներգիաների տարբերությամբ՝

$$\nu_{mn} = \frac{E_n - E_m}{h} \quad \text{կամ} \quad h\nu_{mn} = E_n - E_m: \quad (5.4)$$



Նկ. 102. Էլեկտրոնների թռիչքաձև անցումները ֆոտոն արձակելիս և կլանելիս. Ա էլեկտրոնը 3-րդ ուղեծրից անցնում է 1-ին ուղեծիր՝ արձակելով $h\nu_{13}$ էներգիայով ֆոտոն, Բ էլեկտրոնը, կլանելով $h\nu_{24}$ էներգիայով ֆոտոն, 2-րդ ուղեծրից անցնում է 4-րդ ուղեծիր:



Նկ. 103. Ատոմը 3-րդ էներգիական մակարդակից 1-ին մակարդակ «իջնելիս» արձակում է $h\nu_{13} = E_3 - E_1$ էներգիայով ֆոտոն, իսկ $h\nu_{24} = E_4 - E_2$ էներգիայով ֆոտոն կլանելիս 2-րդ մակարդակից «բարձրանում» է 4-րդ մակարդակ:

E_n էներգիայով n -րդ ստացիոնար մակարդակից ավելի փոքր E_m էներգիայով m -րդ ստացիոնար մակարդակ ($E_n > E_m$) անցնելիս ատոմն արձակում է $h\nu_{mn}$ էներգիայով ֆոտոն, ընդ որում՝ $h\nu_{mn} = E_n - E_m$: Ատոմն ավելի փոքր էներգիայով մակարդակից ավելի մեծ էներգիայով մակարդակ «բարձրանալու» համար պետք է կլանի $E_n - E_m$ տարբերությանը հավասար էներգիա:

Այսպիսով՝ ատոմի ճառագայթելու կամ կլանելու հատկությունը կապված է նրա՝ մի ստացիոնար վիճակից մյուսն անցնելու հետ:

Բորի երկրորդ կանխադրույթը մույնպես հակասում է դասական էլեկտրադինամիկայի օրենքներին, քանի որ արձակված ֆոտոնի (ճառագայթման) հաճախությունը, ինչպես հետևում է (5.4) բանաձևից, որոշվում է միայն ատոմի էներգիայի փոփոխությամբ և բոլորովին կախված չէ միջուկի շուրջն էլեկտրոնի պարբերական շարժման հաճախությունից:

Որպես կանոն՝ մեզ հետաքրքրում է ոչ թե ատոմում էլեկտրոնների ուղեծրերի ձևը կամ շառավիղը, այլ ատոմի էներգիան և էներգիայի փոփոխությունները: Ուստի՝ թվային առանցքի վրա (սովորաբար՝ ուղղաձիգ) նշում են ատոմի էներգիայի $E_1, E_2, E_3, \dots$ արժեքներն այն դեպքերում, երբ էլեկտրոնը շարժվում է, համապատասխանաբար, առաջին, երկրորդ, երրորդ և այլ ուղեծրերով: Երբ էլեկտրոնը թռիչքով անցնում է 3-րդից 1-ին ուղեծիր (նկ. 102), ատոմի էներգիան նվազում է $(E_3 - E_1)$ -ով (նկ. 103), իսկ 2-րդից

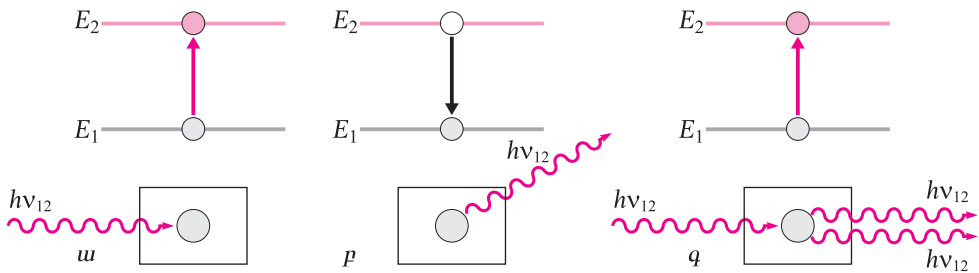
4-րդ ուղեծիր անցնելիս ($h\nu_{24}$ էներգիայով ֆոտոն կլանելու հետևանքով (նկ. 102))՝ էներգիան աճում է ($E_4 - E_2$)-ով (նկ. 103):

Այն գծագրերը, որտեղ թվային առանցքի վրա պատկերված են ատոմի էներգիայի արժեքները, ինչպես նաև մի էներգիական վիճակից (մակարդակից) մյուսին կատարվող անցումները, անվանում են **ատոմի էներգիական մակարդակների դիագրամ**:

Այժմ ծանոթանանք ճառագայթման երկու նոր տեսակների:

Դիցուք՝ ունենք «երևակայական» գազ, որի յուրաքանչյուր ատոմ ունի էներգիայի միայն երկու արժեք՝ E_1 և E_2 , ընդ որում՝ $E_2 > E_1$: Երբ դիտարկվող գազը տրված ջերմաստիճանում ջերմային հավասարակշռության մեջ է, ապա նրա ատոմները բաշխվում են այնպես, որ ամենաշատը լինեն E_1 էներգիայով ատոմները, իսկ ավելի քիչ՝ E_2 էներգիա ունեցողները:

Ի՞նչ երևույթներ տեղի կունենան, երբ դիտարկվող «երևակայական» գազը ճառագայթահարենք ֆոտոններով, որոնցից յուրաքանչյուրի էներգիան $h\nu_{12} = E_2 - E_1$ է, իսկ հաճախությունը՝ $\nu_{12} = (E_2 - E_1)/h$: Համաձայն Այնշտայնի՝ հնարավոր են հետևյալ երեք պրոցեսները:



Նկ. 104. ա. ճառագայթման կլանում, բ. ինքնակամ ճառագայթում, գ. հարկադրական ճառագայթում

ա. Ճառագայթման կլանում: E_1 էներգիայով ատոմը, $E_2 - E_1$ էներգիայով ֆոտոն կլանելով, անցնում է E_2 ավելի մեծ էներգիայով մակարդակ (նկ. 104, ա): Գազային միջավայրով անցնող ֆոտոնների թիվը, բնականաբար, պակասում է, այսինքն՝ միջավայրով տարածվող էլեկտրամագնիսական ճառագայթումը մասամբ կլանվում է:

բ. Ինքնակամ ճառագայթում: Եթե ատոմը E_2 էներգիայով մակարդակում է, այն չի կարող ֆոտոն կլանել, բայց կարող է, օրինակ, **ինքնակամորեն** վերադառնալ E_1 էներգիայով մակարդակ՝ արձակելով ֆոտոն, որի էներգիան՝ $h\nu_{12} = E_2 - E_1$ (նկ. 104, բ): $E_2 \rightarrow E_1$ անցումն առանց արտաքին ազդեցության անվանում են **ինքնակամ կամ ինքնաբերական ճառագայթում**: Ինքնակամորեն արձակված ֆոտոնի տարածման ուղղությունը կամայական է:

գ. Հարկադրական ճառագայթում: E_2 էներգիայով ատոմը կարող է վերադառնալ E_1 էներգիայով մակարդակ նաև ֆոտոնի ազդեցությամբ: Այդպիսի անցման ժամանակ կարծակվի նույնպիսի՝ $h\nu_{12} = E_2 - E_1$ էներգիայով մեկ ուրիշ ֆոտոն (նկ. 104, գ): Այդօրինակ պրոցեսում ևս ատոմը ճառագայթում է, որն էլ անվանում են **հարկադրական ճառագայթում**: Արձակված նոր՝ **երկրորդային** ֆոտոն

սկզբնական՝ **առաջնային** ֆոտոնի ճշգրիտ պատճենն է. երկու ֆոտոններն էլ ունեն ոչ միայն միևնույն էներգիան, այլ նաև շարժման միևնույն ուղղությունը:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ե՞րբ են նյութի ատոմները լուսարձակում: 2. Ձևակերպեք Բորի առաջին կանխադրույթը: Ո՞ր ուղեծրերն են անվանում ստացիոնար: 3. Որո՞նք են Բորի առաջին կանխադրույթի և դասական ֆիզիկայի պարկերապումների հակասությունները: 4. Ձևակերպեք Բորի երկրորդ կանխադրույթը: Ինչպե՞ս է էլեկտրոնը ցածր ուղեծրից անցնում բարձր ուղեծիր: 5. Ո՞ր պրոցեսով է պայմանավորված ատոմների՝ ճառագայթելու կամ կլանելու հարկությունը: 6. Բացարեք, թե ինչ է նյութում ճառագայթման կլանումը: Ատոմների ինչպիսի՞ անցումներով է պայմանավորված կլանման երևույթը: 7. Ի՞նչ է ինքնակամ ճառագայթումը: Միևնու՞յն են արդյոք արձակված ֆոտոնների շարժման ուղղությունները: 8. Ի՞նչ է հարկադրական ճառագայթումը: Ինչպե՞ս է ատոմը հարկադրաբար ֆոտոն արձակում:

§ 46. ՋՐԱԾՆԻ ԱՏՈՄԻ ԲՈՐԻ ՏԵՍՈՒԹՅՈՒՆԸ

Կիրառենք Բորի քվանտային կանխադրույթները՝ հաշվարկելու համար ջրածնի ատոմում էլեկտրոնի ստացիոնար ուղեծրերի շառավիղները և էներգիայի արժեքները: Ջրածնի ատոմի միջուկը, ինչպես հայտնի է, բաղկացած է մեկ պրոտոնից, որի շուրջը, համաձայն Բորի ենթադրության, շրջանագծային ստացիոնար ուղեծրերից մեկով շարժվում է ատոմի միակ էլեկտրոնը:

Բորի քվանտացման պայմանը: Բորի առաջին կանխադրույթը ենթադրում է ստացիոնար շրջանագծային ուղեծրերի գոյությունն ատոմներում: Իսկ ինչպե՞ս են որոշվում այդ ուղեծրերի շառավիղները: Բորը ենթադրել է, որ հնարավոր են միայն այնպիսի ուղեծրեր, որոնցով շարժվելիս էլեկտրոնի $m_e v$ իմպուլսի և ուղեծրի r շառավիղի արտադրյալը բազմապատիկ է Պլանկի h հաստատունին՝ բաժանած 2π -ի՝ $m_e v r = n(h/2\pi)$ որտեղ $n = 1, 2, 3, \dots$: Նշանակելով $h/2\pi = \hbar$ (կարդում են՝ «հաշ գծիկով»)՝ նշված պայմանը կարող ենք արտահայտել

$$m_e v r_n = n \hbar \quad (5.5)$$

առնչությամբ, որտեղ r_n -ը n -րդ ուղեծրի շառավիղն է: (5.5) առնչությունն անվանում են **Բորի քվանտացման պայման**:

Ստացիոնար ուղեծրի շառավիղների հաշվարկը: Համաձայն Նյուտոնի երկրորդ օրենքի՝ կուլոնյան ուժը շրջանային ուղեծրով շարժվող էլեկտրոնին հաղորդում է $a = v^2/r$ կենտրոնաձիգ արագացում՝

$$\frac{m_e v^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2} \quad \text{կամ} \quad m_e v r = \frac{k e^2}{v}, \quad (5.6)$$

որտեղ r -ն էլեկտրոնի ուղեծրի շառավիղն է, իսկ v -ն՝ արագությունը, և որոնք կարող են ընդունել կամայական արժեքներ: Որպեսզի շառավիղի հնարավոր արժեքներից կարողանանք ընտրել «թույլատրվածները», անհրաժեշտ է համատեղ լուծել (5.6) և (5.5) հավասարումների համակարգը: Այդ համակարգից ստանում ենք՝

$$v_n = \frac{ke^2}{\hbar n} : \quad (5.7)$$

(5.7) բանաձևով որոշվում է էլեկտրոնի արագության արժեքը ստացիոնար ուղեծրերով շարժվելիս: (5.5) բանաձևից որոշելով v -ն և նկատի ունենալով (5.7) բանաձևը՝ կստանանք՝

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{k m_e e^2} \quad (5.8)$$

արտահայտությունը, որը որոշում է ստացիոնար ուղեծրերի շառավիղները:

Ֆիզիկայում հաճախ մասնիկի v արագությունն արտահայտում են վակուումում լույսի c արագության մասերով: Նշանակենք ջրածնի ատոմի առաջին ուղեծրով ($n=1$) շարժվող էլեկտրոնի v_1 արագության հարաբերությունը լույսի c արագությանը α -ով՝

$$\alpha = \frac{v_1}{c} = \frac{ke^2}{c\hbar} : \quad (5.9)$$

Պարզ է, որ α -ն չափագործի հաստատուն մեծություն է և, բացի այդ, կախված չէ միավորների համակարգի ընտրությունից: Տեղադրելով k , e , c և $\hbar$ մեծությունների արժեքները (5.9) արտահայտության մեջ՝ ստանում ենք՝ $\alpha \approx 1/137$, այսինքն՝ ջրածնի ատոմի առաջին ստացիոնար ուղեծրով շարժվող էլեկտրոնի արագությունը մոտավորապես 137 անգամ փոքր է լույսի արագությունից՝ $v_1 = \alpha c \approx c/137$: Հետևաբար՝ ատոմի էլեկտրոններին վերաբերող հաշվարկներ կատարելիս հարաբերականության տեսությունից օգտվելու անհրաժեշտություն չկա:

α մեծությունն անվանում են **նուրբ կառուցվածքի հաստատուն**:

Ատոմային ֆիզիկայի շատ բանաձևեր ստանում են ավելի պարզ տեսք, երբ դրանք արտահայտվում են α -ի միջոցով: Օրինակ՝ (5.7) և (5.8) բանաձևերը կարող ենք գրել ավելի պարզ տեսքով, եթե նկատի ունենանք (5.9) արտահայտությունը՝

$$v_n = \frac{c\alpha}{n}, \quad (5.10)$$

$$r_n = \frac{1}{\alpha} \frac{\hbar}{m_e c} n^2 : \quad (5.11)$$

(5.8) կամ (5.11) արտահայտության մեջ տեղադրելով $n=1$, $n=2$ և այլն, կարող ենք հաշվել ջրածնի ատոմի առաջին, երկրորդ և մնացած ստացիոնար ուղեծրերի շառավիղները: Առաջին ստացիոնար ուղեծրի շառավիղը կոչվում է **Բորի շառավիղ** և նշանակվում է a -ով՝

$$r_1 = a = \frac{\hbar^2}{k m_e e^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\hbar}{m_e c} = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ մ} = 0,0529 \text{ նմ} :$$

(5.8) բանաձևը կարելի է արտահայտել մաս Բորի շառավղի միջոցով՝

$$r_n = a n^2, \quad n = 1, 2, \dots : \quad (5.12)$$

Ստացիոնար ուղեծրերում էլեկտրոնի էներգիայի արժեքների հաշվարկը: Այժմ որոշենք ջրածնի ատոմի ստացիոնար վիճակներին համա-

պատասխանող էներգիայի արժեքները: Դրա համար հաշվարկենք էլեկտրոնի լրիվ էներգիան, երբ այն շարժվում է ստացիոնար ուղեծրով:

Էլեկտրոնի ($q_e = -e$) և միջուկի ($q_p = e$) փոխազդեցության պոտենցիալ էներգիան, ինչպես գիտենք, որոշվում է

$$E_{\text{պ}} = k \frac{q_e q_p}{r} = -k \frac{e^2}{r} \quad (5.13)$$

բանաձևով, երբ պոտենցիալ էներգիայի գրոյական կետն անվերջ հեռվում է:

Ջրածնի ատոմի լրիվ մեխանիկական էներգիան պրոտոնի էլեկտրական դաշտում էլեկտրոնի կինետիկ և պոտենցիալ էներգիաների գումարն է՝

$$E = E_{\text{կ}} + E_{\text{պ}} = \frac{m_e v^2}{2} - k \frac{e^2}{r} \quad (5.14)$$

(5.3) առնչությունից՝

$$v^2 = \frac{ke^2}{m_e r}, \quad (5.15)$$

որը տեղադրելով (5.14) արտահայտության մեջ՝ ստանում ենք՝

$$E = -\frac{ke^2}{2r} \quad (5.16)$$

Նկատի ունենալով ստացիոնար ուղեծրի շառավղի որոշման (5.8) բանաձևը՝ ջրածնի ատոմի լրիվ մեխանիկական էներգիան կարող ենք արտահայտել հետևյալ առնչությամբ՝

$$E_n = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2 n^2} \quad (5.17)$$

(5.9) և (5.17) բանաձևերից հետևում է, որ

$$E_n = -\frac{\alpha^2 m_e c^2}{2 n^2} \quad (5.18)$$

կամ

$$E_n = -\frac{ke^2}{2an^2} \quad (5.19)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ ամբողջ թիվն անվանում են **գլխավոր քվանտային թիվ**:

Ջրածնի ատոմի էներգիան ամենափոքրն է, երբ $n = 1$: Ամենափոքր էներգիայով ստացիոնար վիճակն անվանում են **հիմնական վիճակ**, իսկ մնացածները՝ **ոչ հիմնական** կամ **գրգռված**: Հիմնական վիճակում ատոմը կարող է մնալ որքան ասես երկար, մինչդեռ ոչ հիմնական վիճակներում ($n = 2, 3, \dots$) ատոմի կյանքի տևողությունը շատ կարճ է, մոտավորապես 10^{-8} վ: Այդուհանդերձ, այդ ընթացքում էլեկտրոնը հասցնում է միջուկի շուրջը կատարել շուրջ հարյուր միլիոն պտույտ: Ջրածնի ատոմի հիմնական վիճակի էներգիան՝

$$E_1 = -\frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} = -\frac{ke^2}{2a} = -13,6 \text{ էՎ}: \quad (5.20)$$

(5.19) բանաձևը ցույց է տալիս, որ ատոմի էներգիան, իրոք, ընդունում է միայն տարբեր բնական թվերին համապատասխանող ընդհատ արժեք-

ներ, ընդ որում՝ ատոմի էներգիական մակարդակի (կամ էլեկտրոնի ստացիոնար ուղեծրի) համարը որոշվում է n գլխավոր քվանտային թվով: n -ի աճին զուգընթաց ատոմի էներգիան, մնալով բացասական, մոյնպես աճում է: Բոլոր վիճակները՝ սկսած $n = 1$ -ից կապված վիճակներ են, քանի որ էլեկտրոնը չի հեռանում միջուկից: $n = \infty$ դեպքում ատոմի էներգիան՝ $E_{\infty} = 0$, այսինքն՝ էլեկտրոնը, ունենալով անգամ չնչին դրական էներգիա, կարող է հեռանալ միջուկից, որի հետևանքով ատոմը կվերածվի իոնի:

Ուրեմն՝ հիմնական վիճակում ջրածնի ատոմն իոնացնելու համար անհրաժեշտ է ատոմին հաղորդել առնվազն $E_{\infty} - E_1 = 0 - E_1 = 13,6$ էՎ էներգիա, որն անվանում են **իոնացման էներգիա**: (5.17) բանաձևը կարելի է արտահայտել իոնացման էներգիայի միջոցով՝

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} = - \frac{13,6}{n^2} \text{ (էՎ):} \quad (5.21)$$

Ջրածնի ատոմի արձակած կամ կլանած ճառագայթման հաճախության հաշվարկը: Համաձայն Բորի երկրորդ կանխադրույթի և (5.17) բանաձևի՝ ջրածնի ատոմի արձակած ճառագայթման հնարավոր հաճախությունները որոշվում են

$$\nu_{mn} = \frac{E_n - E_m}{2\pi\hbar} = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3} c \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} = \frac{m_e c^2}{4\pi\hbar} \alpha^2 c \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \quad (5.22)$$

բանաձևով, որտեղ

$$R = \frac{k^2 m_e e^4}{4\pi\hbar^3} = \frac{m_e c^2}{4\pi\hbar} \alpha^2 = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Հց} \quad (5.23)$$

մեծությունն անվանում են Ռիդբերգի հաստատուն՝ ի պատիվ շվեդ ֆիզիկոս Յոհաննես Ռիդբերգի: (5.22) բանաձևում m -ը և n -ը բնական թվեր են, ընդ որում՝ $n > m$:

Ճառագայթման (մասնավորապես՝ լույսի) կլանումը մի պրոցես է, որը հակառակ է ճառագայթման արձակմանը: Ատոմը, կլանելով ճառագայթում, ստորին՝ ցածր էներգիայով վիճակից անցնում է վերին՝ բարձր էներգիայով վիճակ: Կլանված ճառագայթման հաճախությունը համընկնում է այն ճառագայթման հաճախության հետ, որն ատոմն արձակում է բարձր էներգիայով վիճակից ցածրին անցնելիս:

Բորի տեսության դժվարությունները: Բորի տեսության հիման վրա ստեղծված ատոմի մոդելը հնարավորություն է տալիս բացատրելու, թե ինչու է ատոմն էներգիան առաքում առանձին բաժիններով կամ քվանտներով, հաշվարկելու ջրածնի ատոմի ճառագայթման հաճախությունը, բացատրելու ճառագայթման կլանման երևույթը: Բորի տեսությամբ հասկանալի դարձավ, թե ինչու է ատոմը կայուն համակարգ: Իրոք, ատոմում գոյություն չունի ավելի ցածր էներգիական մակարդակ, քան հիմնականն է, ուստի՝ հիմնական մակարդակում ատոմը կարող է մնալ որքան ասես երկար: Եվ, վերջապես, Բորի տեսությամբ ճշգրիտ հաշվարկվել է ջրածնի ատոմի իոնացման էներգիայի արժեքը՝ 13,6 էՎ:

Այդուհանդերձ, Բորի տեսությունն ունի էական թերություններ: Նախ՝ այն կիսադասական, կիսաքվանտային տեսություն է, որտեղ քվանտային պայմանի հետ օգտագործվում է մասն դասական մեխանիկայի հիմնական՝ Նյուտոնի 2-րդ օրենքը: Այդ տեսակետից Բորի տեսությունը, կարելի է ասել, անհետևողական է: Օրինակ՝ ատոմում էլեկտրոնի շարժումը բնութագրվում է «էլեկտրոնի շարժման ուղեծիր» դասական հասկացությամբ, մինչդեռ ատոմի քվանտային տեսության մեջ «ուղեծիրը» միկրոմասնիկների շարժման բնութագիր չէ: Բացի այդ՝ ատոմի էներգիան հաշվարկելիս Բորը հիմնվել է և՛ դասական մեխանիկայի, և՛ էլեկտրադինամիկայի վրա: Բանն այն է, որ մեխանիկայի մեթոդներով կարելի է լուծել երկու փոխազդող մարմինների, ինչպես, օրինակ՝ ջրածնի, ատոմի միջուկի և էլեկտրոնի շարժման խնդիրը: Մինչդեռ երեք և ավելի փոխազդող մարմինների (օրինակ՝ միջուկի և մի քանի էլեկտրոնի) շարժման խնդիրն ընդհանուր տեսքով, լուծված չէ: Ուստի՝ Բորին այդպես էլ չի հաջողվել հաշվարկել մույնիսկ հելիումի ատոմի էներգիական մակարդակները: Հելիումի և ավելի բարդ ատոմների վերաբերյալ Բորի տեսությամբ հնարավոր է միայն որակական բնույթի եզրահանգումներ անել:

Քվանտային մեխանիկան և քվանտային էլեկտրադինամիկան ատոմների վերաբերյալ ճշմարիտ տեսություններ են: Այնտեղ Բորի կանխադրույթները, որ միանգամայն ճշգրիտ են, արդեն հանդես են գալիս ոչ թե որպես կանխադրույթներ, այլ որպես այդ տեսությունների հիմնական սկզբունքներից բխող հետևանքներ:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞րն է Բորի քվանտային պայմանը: **2.** Ի՞նչ բանաձևով են արտահայտվում n -րդ ստացիոնար ուղեծրով շարժվող էլեկտրոնի արագությունը և ուղեծրի շառավիղը: **3.** Ո՞ր մեծությունն են անվանում նուրբ կառուցվածքի հաստատուն, ի՞նչ ֆիզիկական իմաստ է արտահայտում այն, և որքա՞ն է նրա թվային արժեքը: **4.** n -րդ ստացիոնար ուղեծրով շարժվող էլեկտրոնի արագությունը և այդ ուղեծրի շառավիղն արտահայտեք նուրբ կառուցվածքի հաստատունի միջոցով: **5.** Ի՞նչ է Բորի շառավիղը: Ի՞նչ բանաձևով է այն արտահայտվում: Որքա՞ն է Բորի շառավիղի արժեքը: **6.** n -րդ ստացիոնար ուղեծրի շառավիղն արտահայտեք Բորի շառավիղի միջոցով: **7.** Ի՞նչ բանաձևով է արտահայտվում n -րդ ստացիոնար վիճակում ջրածնի ատոմի էներգիան: Այդ էներգիան արտահայտեք՝ ա) նուրբ կառուցվածքի հաստատունի միջոցով, բ) Բորի շառավիղի միջոցով: **8.** Ատոմի ռ՞որ վիճակն են անվանում հիմնական, և ռ՞որ վիճակները՝ գրգռված: Որքա՞ն է հիմնական վիճակում ջրածնի ատոմի էներգիան: **9.** Ո՞ր վիճակում է ատոմի էներգիան ավելի մեծ՝ հիմնական, թե՞ գրգռված: **10.** Ինչպե՞ս կփոխվի ջրածնի ատոմում էլեկտրոնի՝ ա) կինետիկ էներգիան, բ) պոտենցիալ էներգիան, գ) լրիվ էներգիան, եթե այդ էլեկտրոնի ուղեծրի շառավիղը փոքրացնենք: **11.** Ինչու՞ է ստացիոնար ուղեծրի շառավիղը փոքրանում, երբ այդ ուղեծրով շարժվող էլեկտրոնը ձառագայթում է: **12.** Ի՞նչ է ատոմի իոնացման էներգիան: Ջրածնի ատոմի n -րդ ստացիոնար վիճակի էներգիան արտահայտեք հիմնական վիճակի էներգիայի միջոցով: **13.** Ի՞նչ բանաձևով է արտահայտվում ջրածնի ատոմի արձակած էլեկտրամագնիսական ձառագայթման հաճախությունը, երբ ատոմն n -րդ մակարդակից անցնում է m -րդ մակարդակ ($n > m$): Գրեք Ռիդբերգի հաստատունի արտահայտությունը և արժեքը: **14.** Ինչու՞ է Բորի տեսությունն անհետևողական: Ինչու՞ այդ տեսությունը չկարողացավ բացատրել հելիումի ատոմում էլեկտրոնների շարժման խնդիրը: Ո՞ր տեսությունների հիման վրա են բացատրում միկրոաշխարհի մասնիկների շարժման և փոխազդեցության խնդիրները:

Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. Երբ ջրածնի ատոմը 3-րդ էներգիական մակարդակի «իջնում է» 1-ին էներգիական մակարդակ, արձակում է 100 նմ, իսկ 2-րդից 1-ին մակարդակ «իջնելիս»՝ 120 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթում: Ի՞նչ ալիքի երկարությամբ ճառագայթում է արձակվում, երբ ատոմը 3-րդ էներգիական մակարդակից անցնում է 2-րդ էներգիական մակարդակ:

Լուծում: Ըստ Բորի 2-րդ կանխադրույթի՝ $E_3 - E_1 = h\nu_{13}$ և $E_2 - E_1 = h\nu_{12}$, որտեղ E_n -ը ($n = 1, 2, 3$) n -րդ ստացիոնար մակարդակի էներգիան է, $h\nu_{nm}$ -ը՝ m -րդ մակարդակից n -րդ մակարդակ անցնելիս արձակված քվանտի էներգիան: 3-րդ մակարդակից 2-րդ մակարդակ անցնելիս ատոմի ճառագայթած քվանտի էներգիան՝

$$h\nu_{23} = E_3 - E_2 = (E_3 - E_1) - (E_2 - E_1) = h\nu_{13} - h\nu_{12}$$

Հաճախությունից անցնելով ալիքի երկարության՝ կստանանք՝

$$\frac{c}{\lambda_{23}} = \frac{c}{\lambda_{13}} - \frac{c}{\lambda_{12}} \quad \text{կամ} \quad \lambda_{23} = \frac{\lambda_{13}\lambda_{12}}{\lambda_{12} - \lambda_{13}} = 600 \text{ նմ:}$$

Պատասխան՝ 600 նմ:

2. Ջրածնի ատոմի n° ուղեծրում է էլեկտրոնի արագությունը 734 կմ/վ:

Լուծում: Բորի քվանտայնման պայմանից կարող ենք որոշել որոնելի ուղեծրի շառավիղը՝ $r_n = n\hbar / m_e v$: Մյուս կողմից՝ (5.3) բանաձևից՝ $r_n = ke^2 / m_e v^2$: Այս երկու արտահայտություններից որոնելի ուղեծրի համարը՝

$$n = \frac{ke^2}{v\hbar}:$$

Տեղադրելով՝ $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Նմ}^2/\text{Կլ}^2$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Կլ}$, $v_n = 734 \cdot 10^3 \text{ մ/վ}$, $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Ջ\cdotվ}$, ստանում ենք՝ $n = 3$:

Պատասխան՝ $n = 3$:

3. Ապացուցել, որ ջրածնի ատոմում ստացիոնար ուղեծրերի երկայնքով տեղավորվում է ամբողջ թվով Դ-ը Բորյի ալիքի երկարություն: Հաշվել առաջին և երրորդ ստացիոնար ուղեծրերում էլեկտրոնի Դ-ը Բորյի ալիքի երկարությունները:

Լուծում: Համաձայն Բորի քվանտայնման պայմանի՝ $m_e v_n r_n = n\hbar$, որտեղ v_n -ը n -րդ ուղեծրում էլեկտրոնի շարժման արագությունն է: Դ-ը Բորյի $\lambda = 2\pi\hbar / m_e v_n$ բանաձևից՝ $m_e v_n = 2\pi\hbar / \lambda$, որը տեղադրելով քվանտայնման պայմանի մեջ, ստանում ենք՝

$$\frac{2\pi\hbar}{\lambda} r_n = n\hbar \quad \text{կամ} \quad 2\pi r_n = n\lambda:$$

$2\pi r_n$ -ը n -րդ ուղեծրի երկարությունն է, ուստի՝ ստացված արտահայտությունից եզրակացնում ենք, որ ստացիոնար ուղեծրի երկայնքով տեղավորվում է ամբողջ թվով դիբրոյլյան ալիքի երկարություն: Նկատի ունենալով, որ $r_n = an^2$ (a -ն Բորի շառավիղն է), Դ-ը Բորյի ալիքի երկարության համար կունենանք՝ $\lambda = 2\pi an$: Հետևաբար՝ երբ $n = 1$ և $n = 3$ Դ-ը Բորյի ալիքի երկարությունները կլինեն՝ $\lambda_1 = 0,333 \text{ նմ}$, $\lambda_3 = 0,999 \text{ նմ}$:

Պատասխան՝ 0,333 նմ, 0,999 նմ:

4. Ի՞նչ նվազագույն էներգիա է անհրաժեշտ հաղորդել ջրածնի ատոմին այն իոնացնելու համար, եթե էլեկտրոնը երկրորդ ուղեծրում է:

Լուծում: Որպեսզի ջրածնի ատոմի էլեկտրոնը m -րդ ստացիոնար ուղեծրից անցնի n -րդը ($m < n$), նրան հարկավոր է հաղորդել

$$\varepsilon_{mn} = h\nu_{mn} = hR_C \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} m$$

Էներգիա: Այստեղից հետևում է, որ ջրածնի ատոմն իոնացնելու համար պահանջվող նվազագույն էներգիան, երբ էլեկտրոնը 2-րդ ուղեծրում է ($m=2, n=\infty$), հավասար է՝

$$\varepsilon_{2,\infty} = \frac{hR}{4} = \frac{1}{4} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,29 \cdot 10^{15} \text{ Ջ} = 5,45 \cdot 10^{-19} \text{ Ջ} = 3,4 \text{ էՎ} :$$

Պատասխան՝ 3,4 էՎ:

§ 47. ՄԻԿՐՈՍԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԱԼԻՔԱՅԻՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ: ԴՆ ԲՐՈՅԼԻ ՎԱՐԿԱԾԸ

Ինչպես գիտեք, լույսի ալիքային բնույթը հաստատվել էր դեռևս 19-րդ դարի սկզբներին՝ Թոմաս Յունգի և Օգյուստեն Ֆրենելի՝ լույսի ինտերֆերենցիայի և դիֆրակցիայի ցուցադրող փորձերով: Լույսի բնույթի բացահայտման ուղղությամբ արված կարևորագույն քայլ էր Ջեմս Մաքսվելի ստեղծած էլեկտրամագնիսական դաշտի տեսությունը, որից մասնավորապես հետևում էր, որ լույսը տարածության մեջ տեղափոխվող էլեկտրամագնիսական դաշտ է, այսինքն՝ էլեկտրամագնիսական ալիք:

Ֆոտոէֆեկտի օրինաչափությունները բացատրելու համար Ալբերտ Այնշտայնը 1905 թ. առաջ է քաշել մի վարկած, համաձայն որի՝ էլեկտրամագնիսական ճառագայթման (մասնավորապես՝ լույսի) էներգիան տարածության մեջ բաշխված է ոչ անընդհատորեն, և այդ ճառագայթմանը համապատասխանեցրել է յուրատեսակ մասնիկների՝ ֆոտոնների համախումբ: Վերջիններս, բացի էներգիայից, օժտված են նաև իմպուլսով: Երբ ճառագայթումը փոխազդում է նյութի հետ, ամեն մի ֆոտոն իրեն պահում է որպես մեկ ամբողջություն: Տրված ν հաճախությամբ և λ ալիքի երկարությամբ բնութագրվող մեներանգ ճառագայթմանը համապատասխանում է ε էներգիայով և $\vec{p}$ իմպուլսով ֆոտոն, ընդ որում՝

$$\varepsilon = h\nu \quad (5.24)$$

իսկ

$$p = h/\lambda, \quad (5.25)$$

որտեղ p -ն ֆոտոնի իմպուլսի մոդուլն է, h -ը՝ Պլանկի հաստատունը:

Բացի ֆոտոէֆեկտից՝ էլեկտրամագնիսական ճառագայթման մասնիկային հատկությունները դրսևորվում են նաև նյութի և լույսի փոխազդեցությամբ պայմանավորված այնպիսի երևույթներում, ինչպիսիք են լույսի քիմիական ազդեցությունը, լույսի ճնշումը և այլն: (5.24) և (5.25) բանաձևերը ցույց են տալիս, որ ֆոտոնի էներգիան և իմպուլսը որոշվում են համապատասխանաբար ճառագայթման հաճախությամբ և ալիքի երկարությամբ: Նշանակում է՝ ֆոտոնները դասական մասնիկներ չեն (ինչպես, օրինակ, փոշու մասնիկը), այլ ոչ դասական օբյեկտներ, որոնք օժտված են ինչպես ալիքային, այնպես էլ

մասնիկային հատկություններով, ընդ որում՝ այդ հատկություններն իրարից **անբաժանելի են**:

Իսկ ե՞րբ են դրսևորվում ճառագայթման (ֆոտոնների) ալիքային և ե՞րբ՝ մասնիկային հատկությունները:

Փորձերը և դիտումները ցույց են տալիս, որ այն դեպքերում, երբ գրանցում ենք նյութի հետ ճառագայթման փոխազդեցության միջինացված արդյունքները համեմատաբար երկար ժամանակամիջոցների ընթացքում, լույսի հոսքի «հատիկայնությունը» չենք նկատում. լույսն այդ ժամանակ կարծես նյութի հետ փոխազդող ալիք լինի: Աչքով կամ լուսանկարչական ապարատով որպես ալիքի և նյութի փոխազդեցության արդյունք ենք գրանցում, օրինակ, մեծ ուժգնությամբ լույսի փնջերի առաջացրած ինտերֆերենցային պատկերները: Դա նման է այն բանին, որ մակրոաշխարհում մեզ համար անտեսանելի է նյութի «հատիկային» կառուցվածքը: Չէ՞ որ, օրինակ, մեխանիկան ուսումնասիրելիս պինդ մարմինները, հեղուկները և գազերը համարում են հոծ, այսինքն՝ հաշվի չեն առնում, որ դրանք կազմված են առանձին «հատիկներից»՝ մոլեկուլներից և ատոմներից:

Բայց երբ գրանցվում են ճառագայթման և միկրոմասնիկների փոխազդեցության առանձին դեպքեր, այսինքն՝ երբ ֆոտոնը փոխազդում է առանձին միկրոմասնիկի հետ, ապա լույսը դրսևորում է իր այն հատկությունները, որոնք բնորոշ են մասնիկներին: Այդպիսի դեպքեր են գրանցվում, օրինակ, այն ժամանակ, երբ ֆոտոնները փոխազդում են էլեկտրոնների (ֆոտոէֆեկտ), կամ՝ առանձին մոլեկուլների հետ (ֆոտոքիմիական ռեակցիա):

Այսպիսով՝ 20-րդ դարի սկզբին էլեկտրամագնիսական ճառագայթման բնույթի վերաբերյալ ստեղծվել է այսպես կոչված **ալիքամասնիկային երկվության հայեցակարգը**, ըստ որի՝ **ճառագայթումն ունի երկակի բնույթ. այն դրսևորում է մերթ ալիքային, մերթ մասնիկային հատկություններ**:

Ֆրանսիացի ֆիզիկոս Լուի դը Բրոյլը, հարցին մոտենալով հակառակ կողմից, արտահայտել է այն միտքը, որ եթե էլեկտրամագնիսական ճառագայթումը (մասնավորապես՝ լույսի ալիքը) իրեն պահում է ինչպես մասնիկ, ապա ինչու՞ էլեկտրոնը (կամ որևէ այլ միկրոմասնիկ) չի կարող դրսևորել ճառագայթմանը բնորոշ ալիքային հատկություններ:

Դը Բրոյլն այդ մտքին հանգել է՝ ելնելով հետևյալ նկատառումներից: 19-րդ դարի սկզբին իռլանդացի ֆիզիկոս և մաթեմատիկոս Ուիլյամ Համիլտոնը ուշադրություն է դարձրել երկրաչափական օպտիկայի և մեխանիկայի համանմանությանը: Սակայն, ինչպես գիտենք, երկրաչափական օպտիկան լուսային բոլոր երևույթները բացատրել չի կարող: Օրինակ՝ լույսի ինտեր-



Լուի դը Բրոյլ

1892 - 1987

Ֆրանսիացի անվանի ֆիզիկոս, քվանտային մեխանիկայի ստեղծողներից: Առաջարկել է ալիքամասնիկային երկվության հայեցակարգը: Աշխատանքները նվիրված են քվանտային մեխանիկային, քվանտային էլեկտրադինամիկային և ֆիզիկայի պատմությանը: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1929):

Ֆերենցը, դիֆրակցիան, դիսպերսիան և բևեռացումը հնարավոր է բացատրել՝ օգտվելով ալիքային օպտիկայից: Կարելի է նույնիսկ ասել, որ ալիքային օպտիկայի օրենքներից, որպես մասնավոր հետևանքներ, բխում են երկրաչափական օպտիկայի բոլոր օրենքները և օրինաչափությունները: Նույնը կարելի է ասել մեխանիկայի մասին: Այն նույնպես ունի սահմանափակ կիրառելիություն (օրինակ՝ նյութոնյան մեխանիկան ի գործում չէ բացատրելու, թե ինչու ատոմի էներգիան կարող է ունենալ միայն ընդհատ արժեքներ): Դը Բրոյլը շարունակել է օպտիկայի և մեխանիկայի միջև համամասնությունների համադրումը՝ **ալիքային օպտիկան** համադրելով հետազոտվող հարցերի ավելի լայն շրջանակ ընդգրկող, այսպես կոչված **ալիքային մեխանիկայի հետ**, որի օրենքները նկարագրում են միկրոաշխարհի երևույթները, մասնավորապես՝ միկրոմասնիկների (էլեկտրոններ, ատոմներ և այլն) շարժումները:

1924 թ. Դը Բրոյլն առաջ է քաշել մի վարկած, ըստ որի՝ նյութի մասնիկները պետք է օժտված լինեն ալիքներին բնորոշ հատկանիշներով, այլ կերպ ասած՝ յուրաքանչյուր շարժվող մասնիկի համապատասխանում է որոշակի ալիք, որը հետագայում ստացել է «Դը Բրոյլի ալիք» անվանումը: Դրանով Դը Բրոյլը նյութին վերագրել է այնպիսի հատկություններ, որոնք մինչ այդ բնորոշ էին միայն ալիքներին: «Լույսի մասնիկներ» անվանման հետ մեկտեղ ֆիզիկա մուտք գործեց նաև «նյութի ալիքներ» հասկացությունը, որը, բնականաբար, պետք է բնութագրվեր ալիքային մեծություններով՝ հաճախությամբ և ալիքի երկարությամբ: Այսպիսով՝ Դը Բրոյլը «ալիք-մասնիկ» երկվության հայեցակարգը տարածեց նաև նյութի մասնիկների վրա: Այլ կերպ ասած՝ երկվությունը (և՛ ալիքային, և՛ մասնիկային հատկություններ ունենալը) միայն էլեկտրամագնիսական ճառագայթմանը չէ, որ բնորոշ է. այն հատուկ է նաև նյութի մասնիկներին: Կախված արտաքին պայմաններից՝ միկրոմասնիկը (էլեկտրոնը, ատոմը և այլն) դրսևորում է իր մասնիկային կամ ալիքային հատկությունները: Ինչպես նշում է ռուս ֆիզիկոս Սերգեյ Վալիլովը՝ «մատերիան (նյութը և ճառագայթումը) միաժամանակ օժտված է և՛ ալիքներին, և՛ մասնիկներին բնորոշ հատկություններով, բայց ամբողջությամբ ո՛չ ալիք է, ո՛չ մասնիկ և ո՛չ էլ՝ դրանց խառնուրդ»:



Շարքեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ բանաձևերով են որոշվում ֆոտոնի էներգիան և իմպուլսը: 2. Ե՞րբ են դրսևորվում ճառագայթման ալիքային և ե՞րբ՝ մասնիկային հատկությունները: 3. Ի՞նչ է ճառագայթման ալիքամասնիկային երկվությունը: 4. Ո՞րն է Դը Բրոյլի վարկածի էությունը:

§ 48. ԴԸ ԲՐՈՅԼԻ ԱՆԻՔՆԵՐ

Համաձայն Դը Բրոյլի տրամաբանության՝ եթե մենք անգ էլեկտրամագնիսական ճառագայթմանը համապատասխանող մասնիկի՝ ֆոտոնի իմպուլսը կապված է ճառագայթման ալիքի երկարության հետ (5.25) առնչությամբ, ապա ճիշտ նույնպիսի առնչությամբ էլ պետք է կապված լինեն մասնիկի (օրի-

նակ՝ էլեկտրոնի) p իմպուլսը և այդ մասնիկին համապատասխանող ալիքի (Դը Բրոյլի ալիքի) λ երկարությունը՝

$$\lambda = \frac{h}{p} : \quad (5.26)$$

Եթե մասնիկի արագությունը՝ $v \ll c$, ապա $p = mv$, և (5.26) բանաձևից հետևում է, որ

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (5.27)$$

այսինքն՝ որքան մեծ են մասնիկի m զանգվածը և արագությունը, այնքան փոքր է այդ մասնիկին համապատասխանող դըբրոյլյան ալիքի երկարությունը: Օրինակ՝ $m = 1$ գ զանգված և $v = 1$ մ/վ արագություն ունեցող մասնիկի դըբրոյլյան ալիքի երկարությունը՝ $\lambda \approx 10^{-30}$ մ, որն այնքան փոքր է, որ հնարավոր չէ նույնիսկ չափել: Ուստի՝ այդ մասնիկի ալիքային հատկությունները ոչ մի կերպ չեն դրսևորվում, և այն կարելի է համարել դասական (ոչ քվանտային) մասնիկ:

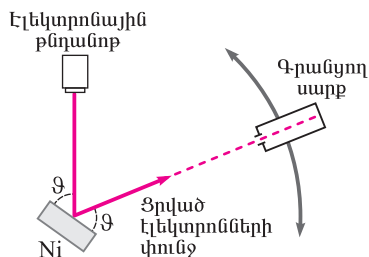
Երբեմն օգտակար է Դը Բրոյլի ալիքի երկարությունն արտահայտել մասնիկի էներգիայի միջոցով:

Դասական՝ ոչ ռելյատիվիստական մեխանիկայում, օրինակ, համարվում է, որ ազատ մասնիկի արագությունը շատ փոքր է լույսի արագությունից՝ $v \ll c$, և նրա էներգիան՝ $E = E_0 = mv^2/2 = p^2/2m$, որտեղից $p = \sqrt{2mE}$: Հետևաբար՝ (5.26) բանաձևից կստանանք՝

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} : \quad (5.28)$$

Ժամանակակից արագաբարձրում մասնիկները ձեռք են բերում էներգիաներ, որոնք շատ մեծ են նրանց հանգստի E_0 էներգիայից՝ $E \gg E_0 = mc^2$, այլ կերպ ասած՝ շարժվում են շատ մեծ՝ $v \sim c$ արագություններով: Այդ պատճառով էներգիայի $E^2 = E_0^2 + p^2c^2$ բանաձևի մեջ E_0^2 անդամը կարելի է հաշվի չառնել: Այդ դեպքում մասնիկի էներգիան՝ $E = pc$, ուստի՝ $p = E/c$, և Դը Բրոյլի (5.26) բանաձևը կարելի է արտահայտել էներգիայով՝

$$\lambda = \frac{hc}{E} : \quad (5.29)$$



Նկ.105. Դեկտրոնի և Ջերմերի փոքրի սխեման

1927 թ. ամերիկացի ֆիզիկոսներ Բլինտոն Դեկտրոնը և Լեստեր Ջերմերը, մենէներգիական էլեկտրոններով «ռմբակոծելով» նիկելի միաբյուրեղի մակերևույթը և գրանցելով տարբեր անկյուններով անդրադարձած էլեկտրոնները (նկ. 105), նկատել են, որ անդրադարձած էլեկտրոնների փնջերի ուժգնությունները կախված են փնջի և բյուրեղի մակերևույթի կազմած θ անկյունից: Մասնավորապես, երբ յուրաքանչյուր էլեկտրոնի

Լներգիան 54 էՎ էր, այսինքն՝ Էլեկտրոնի Դը Բրոյլի ալիքի երկարությունը՝ $\lambda = 0,167$ նմ, ապա անդրադարձած Էլեկտրոնների փնջի ուժգնությունն ունենում էր սուր մաքսիմում նիկելի մակերևույթի նկատմամբ $\vartheta = 50^\circ$ անկյան համար: Այդ նույն բյուրեղից $0,167$ նմ ալիքի երկարությամբ ռենտգենյան ճառագայթների ինտերֆերենցի ժամանակ ուժգնության մաքսիմում դիտվում էր, երբ ռենտգենյան ճառագայթներն անդրադառնում էին նույն մակերևույթի նկատմամբ $\vartheta = 50^\circ$ անկյունով: Դըբրոյլյան և ռենտգենյան դիֆրակտային մաքսիմումներին համապատասխանող ալիքի երկարությունների համընկումը Դը Բրոյլի վարկածի փորձնական ապացույցն է:

Էլեկտրոնների դիֆրակցիայի փորձերը վերլուծելիս կարող է այն տալավորությունը ստեղծվել, որ ալիքային հատկությունները հատուկ են միայն բազմաթիվ էլեկտրոններից կազմված համակարգերին և պայմանավորված են միջէլեկտրոնային փոխազդեցությամբ: Այս վարկածը ստուգելու համար ռուս ֆիզիկոսներ Լեոնիդ Բիբերմանը, Նիկոլայ Սուշկինը և Վալենտին Ֆարիկանտը Էլեկտրոնների դիֆրակցիայի փորձերում օգտագործել են էլեկտրոնների խիստ նոսր փնջեր, այնպես որ փնջերում էլեկտրոնների փոխազդեցությունը ոչ մի էական դեր չէր խաղում: Այդուամենայնիվ, երկար պահաժամի դեպքում ֆոտոթիթեղի վրա ստացվում էր նույնալիսի դիֆրակտային պատկեր, ինչպիսին խիտ էլեկտրոնային փնջեր օգտագործելիս: Այս փաստը փորձնական ապացույցներից է այն բանի, որ **յուրաքանչյուր առանձին մասնիկ օժտված է ալիքային հատկություններով:**

Այսպիսով՝ դիտարկված փորձերը մեզ համոզում են, որ ալիք-մասնիկ երկվությունն ամեն մի միկրոմասնիկի բնորոշ հատկանիշն է:

Այն հանգամանքը, որ գոյություն ունի լիցքի նվազագույն քանակ (լիցքի քվանտ), որը հավասար է էլեկտրոնի լիցքի բացարձակ արժեքին, մեզ հուշում է, որ էլեկտրոնն անբաժանելի է: Ֆոտոէֆեկտի օրենքներից կարելի է եզրակացնել, որ ν հաճախությամբ մեներանգ լույսը նյութի ատոմներում կլանվելիս վերջիններիս է հաղորդում $Nh\nu$ էներգիա, որտեղ $h\nu$ -ն մեկ ֆոտոնի էներգիան է, $N = 1, 2, 3, \dots$: Ուրեմն՝ ֆոտոնն էլ է անբաժանելի: Անբաժանելի լինելը՝ առանձին մասերի **չտրոհվելը, մասնիկներին բնորոշ հիմնական հատկություններից է:**

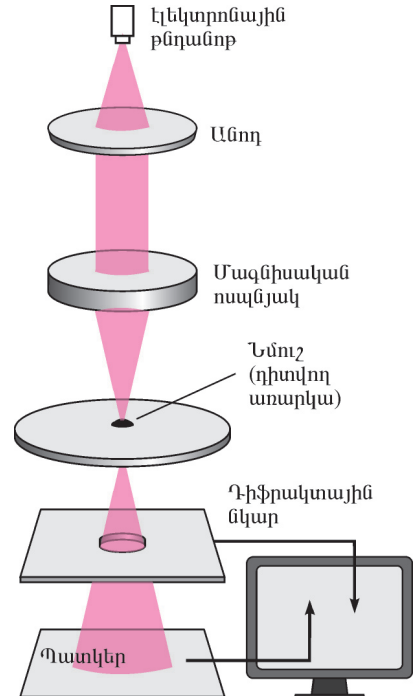
Ալիքները, սակայն, օժտված չեն անբաժանելիության հատկությամբ: Նշանակում է՝ «դը Բրոյլի ալիք» ասելով՝ չպետք է ուղղակիորեն հասկանալ որևէ իրական (մեխանիկական կամ էլեկտրամագնիսական) ալիք: Դիշտ է, Դը Բրոյլի ալիքները նկարագրում են միկրոմասնիկների ալիքային հատկությունները, բայց չեն վկայում, որ այդ մասնիկներն ալիքներ են: Ինչպես արդեն նշել ենք, բոլոր միկրոմասնիկներին (էլեկտրոններ, նեյտրոններ, պրոտոններ, մեզոններ, ատոմներ և այլն) բնորոշ են թե՛ մասնիկային և թե՛ ալիքային հատկություններ, ուստի՝ այդ օբյեկտներից և ոչ մեկը չի կարելի համարել ո՛չ մասնիկ և ո՛չ էլ ալիք (դասական իմաստով):

Էլեկտրոնի ալիքային հատկությունների կիրառությունները: Էլեկտրոնային մանրադիտակ: Միկրոմասնիկների ալիքային հատկությունները կիրառվել են նաև գործնականում, օրինակ, էլեկտրոնային մանրադիտակ

ստեղծելիս: 106-րդ նկարում պատկերված է այդպիսի մանրադիտակի սխեման: Էլեկտրոնային մանրադիտակի խոշորացումը շատ ավելի մեծ է, քան սովորական (օպտիկական) մանրադիտակինը: Ինչպես գիտեք, օպտիկական մանրադիտակի խոշորացումը մի քանի տասնյակից մինչև 2000 անգամ է և ավելի մեծ լինել չի կարող, որը պայմանավորված է լույսի դիֆրակցիայով: Դիֆրակցիան սահմանափակում է մանրադիտակի հնարավորությունը՝ առանձին-առանձին տեսնելու դիտվող առարկայի երկու՝ իրար շատ մոտ կետերը, որոնց պատկերները, «լողզվածությամբ» պատճառով, կարող են միաձուլվել և իրարից չտարբերվել: Ընդ որում՝ որքան փոքր է ալիքի երկարությունը, այնքան փոքր է նաև «լողզվածության» չափը, և մեծ է մանրադիտակի խոշորացումը: Էլեկտրոնին համապատասխանող Դը Բրոյլի ալիքի երկարությունը զգալիորեն փոքր է լույսի ալիքի երկարությունից: Հետևաբար՝ դիֆրակցիայով պայմանավորված երևույթները (պատկերի «լողզվածություն», խոշորացման սահմանափակում և այլն) էլեկտրոնային մանրադիտակում էական չեն: Այդ պատճառով էլ էլեկտրոնային մանրադիտակը խոշորացում է գրեթե միլիոն անգամ:

Էլեկտրոնային մանրադիտակներում որպես օբյեկտիվ և օկուլյար ծառայում են մագնիսական «ոսպնյակները»՝ հոսանքակիր կոճերի ստեղծած մագնիսական դաշտերը:

Էլեկտրոնների աղբյուրից՝ էլեկտրոնային թնդանոթից արձակված էլեկտրոնները, որոնք արագացվում են մինչև 100 կՎ պոտենցիալների տարբերությամբ էլեկտրական դաշտում, ձեռք են բերում մինչև $E = 100$ կէՎ = $= 1,6 \cdot 10^{-14}$ Ջ էներգիա: Համաձայն (5.28) բանաձևի՝ այդպիսի էներգիային համապատասխանող դիբրոյլյան ալիքի երկարությունը՝ $\lambda \approx 0,004$ նմ, գրեթե 125000 անգամ ավելի կարճ է, քան կանաչ լույսի ալիքի երկարությունը ($\lambda_{կանաչ} = 500$ նմ):



Նկ. 106. Էլեկտրոնային մանրադիտակ: Մագնիսական «ոսպնյակը» էլեկտրոնների փունջն ուղղում է նմուշի (դիտվող առարկայի) վրա, որը դրվում է «ոսպնյակի» կիզակետում: Առարկայի պատկերը դիտվում են մոնիտորի էկրանին:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ է Դը Բրոյլի ալիքը: Ո՞ր բանաձևով է որոշվում Դը Բրոյլի ալիքի երկարությունը:
2. Գրեք Դը Բրոյլի ալիքի երկարության բանաձևը՝ արտահայտված մասնիկի էներգիայով:
3. Ի՞նչ փորձով հաստատվեց էլեկտրոնների՝ ալիքային հատկություններով

օժտված լինելը: **4.** Ալիքային հատկությունները բնորոշ են էլեկտրոնների փնջին, թե՞ յուրաքանչյուր առանձին էլեկտրոնի: Ի՞նչ փորձով կարելի է դրանում համոզվել: **5.** Դը Բրոյլի ալիքները վկայում են արդյոք, որ միկրոմասնիկներն ալիքներ են, թե՞ ոչ: Ինչու: **6.** Նկարագրեք էլեկտրոնային մանրադիտակի կառուցվածքը: Ի՞նչ առավելություն ունի էլեկտրոնային մանրադիտակն օպտիկականի համեմատությամբ:

1. Դը Բրոյլի վարկածի մասին

Ահա թե ինչ է ասել ֆրանսիացի հայտնի ֆիզիկոս Պոլ Լանժմվենը իր վաղեմի ընկերոջը՝ Էռնեստ Ռեզերֆորդին, Դը Բրոյլի ատենախոսության մասին. «Հայցորդի գաղափարներն, ինչ խոսք, անհեթեթություններ են, բայց զարգացված են այնպիսի նրբագեղությամբ և շուրջով, որ ես ատենախոսությունն ընդունեցի պաշտպանությամբ»:

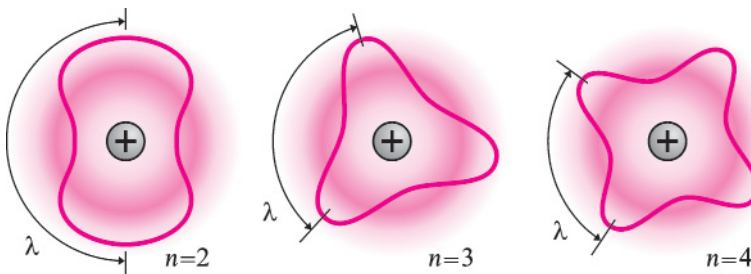
1925թ. Ա. Այնշտայնը գերմանացի նշանավոր ֆիզիկոս Մաքս Բոռնին առաջարկել է ծանոթանալ Դը Բրոյլի ատենախոսությանը՝ ասելով. «Կարդացե՛ք այն: Թեև այն կարող է թվալ խելահեղ, բայց այնտեղ ամեն ինչ հիմնավորված է պատշաճ ձևով»:

Ե՛վ Պ. Լանժմվենը, և՛ Ա. Այնշտայնը, այնուամենայնիվ, Դը Բրոյլի ատենախոսության մեջ ինչ-որ թաքնված, բայց ճշմարիտ բան էին նկատել...

Ուշագրավ է, որ հենց ատենախոսության պաշտպանության ժամանակ խորհրդի անդամ, ականավոր ֆիզիկոս Ժան Պեռենը հարցրել է. «Հնարավո՞ր է արդյոք ատենախոսի գաղափարները փորձով ապացույցել», որին Լուի դը Բրոյլը պարզ և հստակ պատասխանել է. «Էլեկտրոնային ալիքները, անցնելով բյուրեղի միջով, պետք է առաջացնեն այնպիսի դիֆրակտային պատկեր, ինչպիսին առաջացնում են ռենտգենյան ճառագայթները»:

2. Բորի քվանտացման պայմանը

Եթե էլեկտրոնին կապված է ալիք, ինչպես դատում էր Դը Բրոյլը, ապա, օրինակ, ջրածնի ատոմում, միջուկի շուրջը շարժվելիս, էլեկտրոնի ստացիոնար ուղեծրի երկայնքով պետք է տեղավորվեն ամբողջ թվով ալիքի երկարություններ (նկար): Այսպիսով՝ Դը Բրոյլը կարծում էր, որ պետք է տեղի ունենա $2\pi r n = n\lambda$ պայմանը, որտեղ λ -ն դըբրոյլյան ալիքի երկարությունն է: Նկատի ունենալով (5.26) բանաձևը՝ ստանում ենք՝ $n h p = n \hbar$ կամ $m_e v r_n = n \hbar$ առնչությունը, որն էլ Բորի քվանտացման պայմանն է:



Յուրաքանչյուր ստացիոնար ուղեծրի երկայնքով «տեղավորվում» է ամբողջ թիվ անգամ Դը Բրոյլի ալիքի երկարություն:

Էլեկտրոնների և այլ մասնիկների՝ ալիքային հատկություններ ունենալու փորձնական ապացույցները հանգեցրել են այն եզրակացության, որ նման հատկություններով օժտված լիները բնորոշ է բոլոր միկրոմասնիկներին (ինչպես էլեկտրամագնիսական ճառագայթման քվանտներին՝ ֆոտոններին, այնպես էլ նյութի «հատիկներին»՝ մոլեկուլներին, ատոմներին, էլեկտրոններին և այլն): Մակրոմասնիկների դեբբոյլյան ալիքի երկարությունները, սակայն, այնքան փոքր են, որ դրանց ալիքային հատկությունները հայտնաբերելը գործնականում անհնար է:

Հետևաբար, նյութի ալիքների մասին դեբբոյլի վարկածն առաջ քաշելուց հետո անհրաժեշտություն է ծագել ստեղծելու այնպիսի տեսություն, որը կարտացուլեր նյութական օբյեկտների երկու՝ իրար փոխադարձաբար լրացնող մասնիկային և ալիքային հատկությունները:

1926 թվականին ավստրիացի ֆիզիկոս Էրվին Շրյոդինգերը և գերմանացի ֆիզիկոս Վեռներ Հայզենբերգը, միմյանցից անկախ, ստեղծել են միկրոաշխարհի երևույթները նկարագրող նոր տեսությունը՝ **քվանտային մեխանիկան**: Այն ընդհանուր տեսություն էր և ընդգրկում էր բոլոր այն հարցերը, որոնք վերաբերում էին ատոմների և մոլեկուլների կառուցվածքին, արտաքին ուժային դաշտերում (օրինակ՝ միջուկի կուլոնյան դաշտում) էլեկտրոնների շարժմանը, ջերմային ճառագայթմանը և այլ երևույթների: Քվանտային մեխանիկան կարողացավ բացատրել միկրոաշխարհին վերաբերող բազում հարցեր: Քվանտային մեխանիկայի կանխատեսումների հիման վրա ստեղծվեցին գործնական կիրառություն ունեցող բազմաթիվ սարքեր:

Քվանտային մեխանիկան ծնունդ է առել նյութի ալիքային բնույթի վերաբերյալ պատկերացումներից և սկզբնապես այն կոչվում էր նաև ալիքային մեխանիկա: Քվանտային մեխանիկայի ստեղծման հիմքը նյութի միանգամայն նոր հատկության բացահայտումն էր, այսինքն՝ այն փաստը, որ յուրաքանչյուր մասնիկ օժտված է ալիքներին բնորոշ հատկություններով, և հակառակը՝ էլեկտրամագնիսական ալիքներն ունեն մասնիկներին բնորոշ հատկություններ: Ուստի հասկանալի է, թե ինչու է քվանտային մեխանիկայի հիմքում դրվել մի հավասարում, որի լուծումը հնարավորություն էր տալիս նկարագրելու միկրոօբյեկտների երկակի՝ մասնիկային և ալիքային բնույթը: Այդ հավասարումն անվանել են **Շրյոդինգերի հավասարում**, իսկ այն ֆունկցիան, որն



Էրվին Շրյոդինգեր

1887-1961

Ավստրիացի մեծ ֆիզիկոս, քվանտային մեխանիկայի ստեղծողներից: Նրա առաջարկած հավասարումը միկրոաշխարհում խաղում է նույն դերը, ինչ Նյուտոնի օրենքները՝ դասական մեխանիկայում: Աշխարհաքննություններում են նաև ջերմադինամիկային, ոչ գծային էլեկտրադինամիկային, ընդհանուր հարաբերականության տեսությանը: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1933):

այդ հավասարման լուծումն է և կախված է կոորդինատներից և ժամանակից՝ $\Psi(x, y, z, t)$ -ն՝ **ալիքային ֆունկցիա** կամ Ψ -**ֆունկցիա** (փսի-ֆունկցիա):

Ալիքային ֆունկցիան արտացոլում է միկրոմասնիկների ալիքային բնույթը: Նրա միջոցով կարելի է նկարագրել, օրինակ, էլեկտրոնների դիֆրակցիայի կամ ինտերֆերենցի երևույթները: Կարելի է ասել, որ Ψ -ֆունկցիան նկարագրում է միկրոմասնիկի այն վիճակը, որտեղ միկրոմասնիկը դրսևորում է ալիքներին բնորոշ հատկություններ:

Ալիքային ֆունկցիան արտացոլում է նաև միկրոօբյեկտների մասնիկային բնույթը: $|\Psi(x, y, z, t)|^2 \Delta V$ արտահայտությունն այն բանի հավանականությունն է, որ միկրոմասնիկը ժամանակի t պահին կհայտնաբերենք (x, y, z) կետն ընդգրկող ΔV տարրական ծավալով տիրություն:

Սա արդեն նշանակում է հրաժարում միկրոմասնիկի վարքի նկարագրման դասական մոտեցումից, այն է՝ միկրոմասնիկի վիճակն այլևս չի կարելի ներկայացնել կոորդինատների և իմպուլսի պոյնկցիաների՝ ժամանակից կախված ֆունկցիաների միջոցով: Այդպիսի ֆունկցիայի գոյությունը կնշանակեր, օրինակ, էլեկտրոնի կամ այլ տարրական մասնիկի շարժում որոշակի հետագծով, այլ կերպ ասած՝ էլեկտրոնը կլիներ միայն դասական մասնիկ ամեն պարագայում և, հետևաբար, անբնական կլիներ կարծել, որ էլեկտրոնների փունջը կառաջացներ ինտերֆերենց կամ դիֆրակցիա, կամ կդրսևորեր մասնիկին ոչ բնորոշ այլ հատկանիշներ:

Ուրեմն՝ միկրոաշխարհում մասնիկների վիճակը հնարավոր է նկարագրել միայն Ψ ալիքային ֆունկցիայով, ընդ որում, երբ մասնիկն ազատ է, Ψ -ն նկարագրում է Դը Բրոյի ալիքը:

Ալիքային ֆունկցիան հնարավորություն է տալիս բացատրելու միկրոմասնիկների մասնակցությամբ ընթացող այնպիսի երևույթներ, որոնք դասական ֆիզիկայում բացատրվում են միայն ալիքներին բնորոշ հատկությունների և օրինաչափությունների հիման վրա: Մասնավորապես, էլեկտրոնների ինտերֆերենցի երևույթը մեկնաբանվեց դրբրոյյան ալիքների օգնությամբ: Սակայն գոյություն ունեն մի շարք երևույթներ, որտեղ միաժամանակ դրսևորվում են միկրոմասնիկների թե՛ ալիքային և թե՛ մասնիկային հատկանիշները: Ալիքային պատկերացումների հիման վրա նման երևույթներ նկարագրել, առավել ևս՝ բացատրել, հնարավոր չէ: Սակայն, ինչպես նշվեց, հավանականությունների լեզվով հնարավոր է նկարագրել նաև մմանօրինակ երևույթները: Կարելի է ասել, որ էլեկտրոնների (և այլ միկրոօբյեկտների) ինտերֆերենցը և դիֆրակցիան, վերջին հաշվով, ոչ թե էլեկտրոնների ալիքային հատկությունների, այլ նրանց վիճակագրական բնույթի հետևանք են:

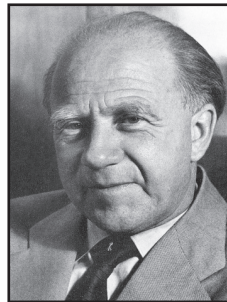
Այսպիսով՝ միկրոօբյեկտի վիճակը հայտնի է, եթե հայտնի է այդ վիճակի ալիքային ֆունկցիան: Հետևաբար՝ կարելի է ասել, որ **քվանտային մեխանիկայի հիմնական խնդիրը միկրոմասնիկի ալիքային ֆունկցիան գտնելն է, երբ միկրոմասնիկը շարժվում է այս կամ այն ուժային դաշտում:**

Քվանտային մեխանիկայում միկրոօբյեկտի որևէ բնութագրի չափման արդյունքները, որպես կանոն, կրում են պատահական բնույթ: Բայց դրա

պատճառը, իհարկե, այն չէ, որ ոչինչ չգիտենք միկրոօբյեկտի մասին այն պահին, երբ կատարվում է չափումը:

Դիցուք՝ չափում ենք երկու միատեսակ միկրոմասնիկների մույն բնութագիրը՝ միևնույն պայմաններում: Համաձայն քվանտային մեխանիկայի՝ չափման արդյունքները կլինեն տարբեր: Բնական հարց է ծագում՝ իսկ ինչի՞ է ունակ քվանտային մեխանիկան, եթե չի կարողանում կանխատեսել չափման արդյունքը: **Քվանտային մեխանիկան կարող է հաշվել չափման տարբեր պատահական արդյունքների հավանականությունները:** Այդ հավանականությունները հնարավորություն են տալիս նյութի մակրոբնութագրերը (օրինակ՝ ջերմունակություն, էլեկտրական դիմադրություն և այլն) չափելիս ստանալու որոշակի, ոչ պատահական արդյունքներ:

Նշենք նաև, որ այն մասնավոր դեպքերում, երբ կարելի է Պլանկի h հաստատունը համարել անվերջ փոքր մեծություն, քվանտային մեխանիկան հանգում է դասական մեխանիկային:



Վեռներ Հայզենբերգ

1901-1976

Գերմանացի հռչակավոր ֆիզիկոս, քվանտային մեխանիկայի ստեղծողներից: Ձևակերպել է անորոշությունների առնչությունները: Աշխատանքները վերաբերում են քվանտային էլեկտրադինամիկային և դաշտի տեսությանը, ատոմային միջուկի տեսությանը, մագնիսականությանը, տարրական մասնիկների տեսությանը, բնագիտության փիլիսոփայությանը: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1932):



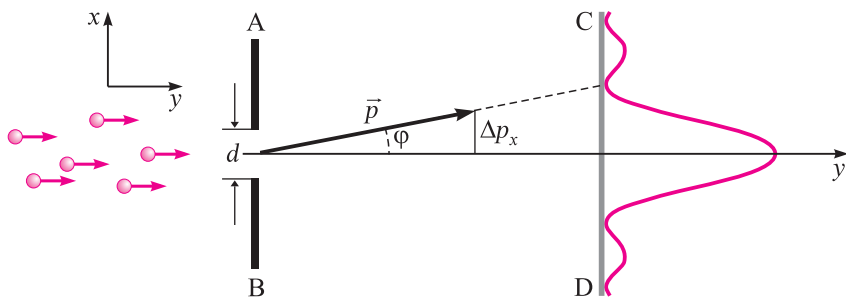
Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչպե՞ս են մեկնաբանում միկրոմասնիկների ալիքային հատկությունները՝ ըստ քվանտային տեսության պարկերացումների:
2. Ի՞նչ է միկրոմասնիկի վիճակը նկարագրող Ψ ալիքային ֆունկցիան: Ինչպե՞ս է մեկնաբանվում ալիքային ֆունկցիան:
3. Ֆիզիկական իմաստ ունի ալիքային ֆունկցիա՞ն, թե՞ ալիքային ֆունկցիայի մոդուլի քառակուսին: Ի՞նչ է սույն պալիս $|\Psi(x,y,z,t)|^2 \Delta V$ -ն:
4. Ո՞րն է քվանտային մեխանիկայի հիմնական խնդիրը:

§50. ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱՈՆՉՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Էլեկտրոնների փնջի՝ մեկ ճեղքից դիֆրակցիայի օրինակով փորձենք հասկանալ, թե ինչի է հանգեցնում այն իրողությունը, որ միկրոմասնիկն ունի թե՛ ալիքային և թե՛ մասնիկային հատկություններ:

Էլեկտրոնների դիֆրակցիայի սխեման պատկերված է 107-րդ նկարում: γ առանցքի երկայնքով շարժվող էլեկտրոնները, որոնք ունեն մույն արագությունը, անցնելով այդ առանցքին ուղղահայաց AB միջնորմի d լայնությամբ ճեղքով, ընկնում են CD էկրանին՝ առաջացնելով առկայծումներ, որոնք էլ հնարավորություն են տալիս գրանցելու ճեղքով անցած էլեկտրոնները: Օժտված լինելով ալիքային հատկությամբ՝ էլեկտրոնների փունջն էկրանին առաջացնում է դիֆրակտային պատկեր: Էլեկտրոնները հիմնականում



Նկ. 107. Էլեկտրոնների դիֆրակցիան մեկ ճեղքից

ընկնում են էկրանի այն մասի վրա, որը նրանց Դը Բրոյլի ալիքների դիֆրակտային պատկերի կենտրոնական մաքսիմումի շուրջն է՝ երկու առաջին մինիմումների միջև: Երկրորդային մաքսիմումների դերն էական չէ, և դրանց առկայությունը ստորև հաշվի չենք առնի: Այլ կերպ ասած՝ էլեկտրոնը, ճեղքով անցնելուց հետո, հիմնականում շարժվում է 2φ անկյունով սահմանափակված տիրույթում, որտեղ φ -ն էլեկտրոնների փնջի՝ γ առանցքի նկատմամբ այն անկյունն է, որը համապատասխանում է առաջին դիֆրակտային մինիմումի պայմանին՝

$$d \sin \varphi = \lambda: \quad (5.30)$$

Մինչև ճեղքով անցնելն էլեկտրոնի իմպուլսի p_x պրոյեկցիան ունի ճշգրիտ արժեք, որը զրո է, այնպես որ p_x -ի չափման անորոշությունը (քայարձակ սխալանքը)՝ $p_x = 0$: Բայց x կոորդինատի արժեքը լրիվ անորոշ է: Ճեղքով անցնելու պահին էլեկտրոնի x կոորդինատն արդեն որոշվում է $\Delta x = d$ անորոշությամբ, իսկ նրա իմպուլսի պրոյեկցիան՝ Δp_x անորոշությամբ:

Օգտվելով (5.26) բանաձևից՝ (5.30) պայմանը կարող ենք ներկայացնել

$$d \sin \varphi = \frac{h}{p} \quad (5.31)$$

առնչությամբ: Դիֆրակցիայի հետևանքով էլեկտրոնի իմպուլսի p_x պրոյեկցիայի փոփոխությունը՝

$$\Delta p_x = p \sin \varphi: \quad (5.32)$$

(5.31) և (5.32) բանաձևերի համաձայն՝

$$d \cdot \Delta p_x \approx h: \quad (5.33)$$

Այսպիսով՝ էլեկտրոնի իմպուլսի Δp_x և կոորդինատի Δx անորոշությունները կապված են հետևյալ առնչությամբ՝

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h: \quad (5.34)$$

Ճշգրիտ հաշվարկը ցույց է տալիս, որ

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar: \quad (5.35)$$

(5.35) անհավասարությունը Հայզենբերգի անորոշությունների առնչության մաթեմատիկական արտահայտությունն է:

Անորոշությունների առնչության ֆիզիկական իմաստն այն է, որ **եթե միկրոմասնիկի շարժման վիճակը բնութագրենք այնպիսի ֆիզիկական մեծություններով, որոնցով նյութաբանական մեխանիկայում բնութագրում ենք նյութական կետի (մասնիկի) վիճակը, ապա այդ մեծությունները որոշվում են այս կամ այն չափի անորոշությամբ: Մասնավորապես, որքան ճշգրիտ է որոշվում միկրոմասնիկի կոորդինատը (այսինքն՝ որքան փոքր է Δx -ը), այնքան ավելի պակաս ճշտությամբ է որոշվում նրա իմպուլսի համապատասխան պրոյեկցիան (այսինքն՝ այնքան ավելի մեծ է Δp_x -ը):**

Երբեմն պնդում են, թե իբրև անորոշությունների (5.35) առնչությունը հետևանք է չափման սխալի (այսինքն՝ պայմանավորված է չափիչ սարքի անկատարությամբ): Այսպիսի մեկնաբանության դեպքում կարելի է եզրակացնել, թե կատարյալ չափիչ սարքերով չափումներ կատարելիս կարող ենք միաժամանակ ճշգրտորեն որոշել միկրոմասնիկի և՛ կոորդինատը, և՛ իմպուլսի համապատասխան պրոյեկցիան: Այստեղից էլ կհետևի, որ միկրոմասնիկը նույն դասական մասնիկն է, միայն թե մենք ենք կարծես «մեղավոր», որ չենք կարողանում ճշգրտորեն որոշել, թե ինչ հետագծով է այն շարժվում: Այդ պատճառով էլ ստիպված ենք այդ միանգամայն դասական մասնիկին վերագրել այնպիսի հատկություններ, որոնցով մասնիկն օժտված չէ՝ բացատրելու համար, թե ինչու այդ մասնիկներն իրենց «դասական» ձևով չեն դրսևորվում:

Իրականում, սակայն, չափման արդյունքը կախված է ոչ միայն չափիչ սարքի, այլ նաև հետազոտվող օբյեկտի հատկություններից: Հետևաբար՝ եթե նույնիսկ չափումներ կատարենք իդեալական սարքերով, ապա, միևնույն է, միկրոմասնիկի կոորդինատը և համապատասխան իմպուլսը միաժամանակ որոշել չենք կարող: Եթե միկրոմասնիկի վիճակն այնպիսին է, որ նրա X կոորդինատն ունի ճշգրիտ արժեք, ապա միկրոմասնիկի իմպուլսի p_x պրոյեկցիան, որպես վիճակի ֆիզիկական բնութագիր, գրկվում է իմաստից: Իսկ եթե որևէ վիճակում միկրոմասնիկն ունի միանգամայն որոշակի իմպուլսի p_x պրոյեկցիա, ապա անորոշ է նրա X կոորդինատը:

Նիլս Բորը ցույց է տվել, որ (5.35) անհավասարությանը նման առնչությամբ իրար հետ կապված են նաև այլ ֆիզիկական մեծությունների անորոշություններ: Այսպես, օրինակ, միկրոմասնիկի էներգիայի ΔE անորոշությունը և էներգիայի չափման պրոցեսի Δt տևողությունը կապված են

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar \quad (5.36)$$

անհավասարությամբ, որն անվանում են **Բորի անորոշությունների առնչություն**:

Համոզվելու համար, որ (5.36) առնչությունը ճիշտ է, ենթադրենք, թե չափում ենք որևէ միկրոմասնիկի X կոորդինատը՝ դեպի մասնիկն առաքելով ֆոտոններ և, այնուհետև, գրանցելով այդ մասնիկից անդրադարձած ֆոտոնները: Ակներև է, որ միկրոմասնիկի կոորդինատի չափման անորոշությունը ֆոտոնի ալիքի երկարության կարգի մեծություն է՝ $\Delta x \approx \lambda$: Կոորդինատի անորոշությանը հավասար երկարությամբ տեղամասը ֆոտոնն անցնում է $\Delta t = \Delta x/c \approx \lambda/c$ ժամանակում: Ուստի՝ Δt անորոշությամբ էլ կարող ենք չափել ժամանակի այն պահը, երբ միկրոմասնիկն X կոորդինատով դիրքում է:

Քանի որ միկրոմասնիկն ազատ է, ապա ֆոտոնը, բախվելով, նրան կարող է հաղորդել իր էներգիան, հետևաբար՝ միկրոմասնիկի էներգիան կարելի է չափել $\Delta E = h\nu = hc/\lambda \approx h/\Delta t$ անորոշությամբ: Այստեղից հետևում է, որ $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$: Առավել ճշգրիտ հաշվարկի արդյունքում ստացվում է (5.36) առնչությունը:

(5.36) անհավասարությունը, տեսքով նման լինելով (5.35) առնչությանը, այդուհանդերձ, ունի փոքր-ինչ այլ իմաստ: (5.36) առնչության մեջ Δt -ն, որպես կանոն, բնութագրում է էներգիայի չափման պրոցեսի տևողությունը, իսկ ΔE -ն՝ այդ ընթացքում էներգիայի չափման անորոշությունն է: Նշանակում է՝ որքան մեծ է չափման պրոցեսի Δt տևողությունը (որքան դանդաղ ենք էներգիան չափում), այնքան ավելի փոքր է էներգիայի ΔE անորոշությունը (էներգիայի չափված արժեքն ավելի ճշգրիտ է):

Մասնավորապես, (5.36) առնչությունից հետևում է, որ հիմնական վիճակում, որտեղ ատոմը կարող է մնալ անվերջ երկար ժամանակ՝ $\Delta t = \infty$, նրա էներգիան որոշվում է ճշգրիտ՝ $\Delta E = 0$: Իսկ գրգռված վիճակում ատոմի էներգիայի անորոշությունը կախված է այդ վիճակում ատոմի «կյանքի տևողությունից» τ -ից, և $\Delta E \sim \hbar/\tau$ կարգի մեծություն է:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Նկարագրեք մեկ ձեռքից էլեկտրոնների դիֆրակցիայի երևույթը: Ի՞նչ բանաձևով է որոշվում դիֆրակցիային մաքսիմումի պայմանը:
2. Բացատրեք, թե ինչ են նշանակում միկրոմասնիկի ա) կոորդինատի անորոշությունը, բ) իմպուլսի անորոշությունը:
3. Դիֆրակցիայի փորձից սրապեք անորոշությունների առնչությունը: Ի՞նչ ֆիզիկական իմաստ է արտահայտում այդ առնչությունը:
4. Անորոշությունների առնչությունից հետևում է, որ մասնիկի՝ ա) կոորդինատը, բ) իմպուլսը հնարավոր չէ որոշել ճշգրտորեն:
5. Ճի՞շտ են արդյոք անորոշությունների առնչություններն իդեալական չափիչ սարքերի դեպքում: Ինչու՞:
6. Գրեք անորոշությունների առնչությունն էներգիայի և ժամանակի համար: Ի՞նչ իմաստ են արտահայտում էներգիայի և ժամանակի անորոշությունները:

§51. ԱՆՈՐՈՇՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱՆՆՉՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Անորոշությունների առնչությունները հնարավորություն են տալիս մի շարք դեպքերում առավել դյուրությամբ գնահատելու «միկրոաշխարհը» բնութագրող ֆիզիկական մեծությունները, բացատրելու որոշ երևույթներ: Քննարկենք մի քանի օրինակ:

1. Ինչու՞ էլեկտրոնը չի ընկնում միջուկի վրա: Բորի տեսությունը չկարողացավ բացատրել, թե ինչու էլեկտրոնը, շարժվելով ստացիոնար «ուղեծրով», էներգիա չի ճառագայթում և, հետևապես, չի ընկնում միջուկի վրա: Բացատրենք այս փաստն անորոշությունների առնչության օգնությամբ: Ենթադրենք՝ էլեկտրոնը միջուկի մեջ է: Այդ դեպքում էլեկտրոնի կոորդինատի անորոշությունը՝ $\Delta x \approx R$, որտեղ R -ը միջուկի շառավիղն է: Համարելով, որ միջուկում տեղափակված էլեկտրոնի իմպուլսի անորոշությունը նրա իմպուլսի կարգի է՝ $\Delta p \approx p$, համաձայն անորոշությունների առնչության, կարող ենք գրել՝

$pR \approx \hbar$, որտեղից $p \approx \hbar/R \approx 6,63 \cdot 10^{-20}$ կգ·մ/վ: Հարաբերականության տեսությունից գիտենք, որ p իմպուլսով մասնիկի էներգիան որոշվում է

$$E = c\sqrt{p^2 + m_e^2 c^2} = pc\sqrt{1 + m_e^2 c^2 / p^2}$$

բանաձևով: Ենթարմատային արտահայտության երկրորդ գումարելին՝

$$\frac{m_e c}{p} = e^{\frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8}{6,63 \cdot 10^{-20}}} = 17 \cdot 10^{-6} \ll 1,$$

հետևաբար՝ $E \approx pc \approx 6,63 \cdot 10^{-20} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ Ջ} \approx 1,2 \cdot 10^8 \text{ էՎ} = 120 \text{ ՄէՎ}$: Միջուկի ներսում ունենալով այդպիսի մեծ կինետիկ էներգիա՝ էլեկտրոնը հեշտությամբ կարող է հաղթահարել միջուկից դուրս գալուն խոչընդոտող էլեկտրական ձգողության ուժերը և դուրս թռչել այնտեղից:

2. Գնահատենք ջրածնի ատոմի չափերը և այդ ատոմում էլեկտրոնի հնարավոր նվազագույն էներգիան՝ օգտվելով անորոշությունների առնչությունից: Ջրածնի ատոմում էլեկտրոնի էներգիան՝

$$E = \frac{p^2}{2m_e} - \frac{ke^2}{r}, \quad (5.37)$$

որտեղ m_e -ն էլեկտրոնի զանգվածն է, e -ն՝ նրա լիցքի մոդուլը:

Միջուկից r հեռավորությամբ էլեկտրոնի կոորդինատի անորոշությունը կարելի է համարել r , այսինքն՝ $\Delta x = r$, իսկ իմպուլսի պրոյեկցիայի անորոշությունը՝ $\Delta p_x = p$: Հետևաբար՝ (5.35) առնչության հիման վրա կարող ենք գրել՝

$$rp \approx \hbar: \quad (5.38)$$

(5.37) և (5.38) առնչություններից արտաքսելով r -ը՝ կստանանք՝

$$E = \frac{p^2}{2m_e} - \frac{ke^2}{\hbar} p = \frac{1}{2m_e} cp - \frac{km_e e^2}{\hbar} p - \frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2} p^2 - \frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2},$$

որտեղից հետևում է, որ էներգիայի նվազագույն արժեքը՝

$$E_{\min} = - \frac{k^2 m_e e^4}{2\hbar^2}: \quad (5.39)$$

$E_{\min}$ մեծությունը կարելի է դիտել որպես ջրածնի ատոմի հիմնական վիճակի էներգիայի արժեք: Քանի որ $E = E_{\min}$, երբ $p = km_e e^2 / \hbar$, ապա, (5.38) բանաձևի համաձայն,

$$r_{\min} = \frac{\hbar^2}{km_e e^2}, \quad (5.40)$$

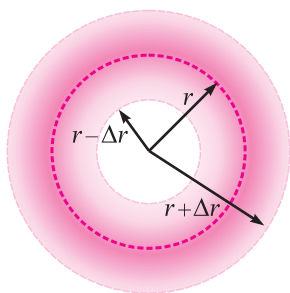
որն էլ կարելի է համարել ջրածնի ատոմի շառավղի գնահատական:

(5.39) և (5.40) բանաձևերը նույնն են, ինչ Բորի տեսությամբ համապատասխան մեծությունների համար ստացված արտահայտությունները:

3. Ինչու՞ էլեկտրոնը չի կարող շարժվել ուղեծրով: Համաձայն Բորի կանխադրույթների՝ էլեկտրոնն ատոմային միջուկի շուրջը կարող է շարժվել միայն ստացիոնար «ուղեծրերով»: Բայց այդ դեպքում միաժամանակ

որոշակի են էլեկտրոնի թե՛ կոորդինատը, թե՛ իմպուլսը, որը հակասում է անորոշությունների առնչությանը: Ուրեմն $\hbar^2$ -ը միջին սխալ են Բորի կանխադրությոները: Իհարկե, ոչ: Միայն թե հարկավոր է պարզել, թե $\hbar^2$ ենք հասկանում «էլեկտրոնի ուղեծիր» ասելով: Ակներև է, որ ատոմում էլեկտրոնի դիրքը կարելի է նշել միայն այնպիսի ճշգրտությամբ, որը որոշվում է ատոմի չափերով: Նշանակում է՝ էլեկտրոնի կոորդինատի անորոշությունը $\Delta x = \Delta r \approx \approx 10^{-10}$ մ: Հետևաբար՝ իմպուլսի անորոշությունը՝ $\Delta p \approx \hbar / \Delta x \approx 1,05 \cdot 10^{-24}$ կգ·մ/վ, իսկ արագության անորոշությունը՝ $\Delta v \approx \Delta p / m_e \approx 1,1 \cdot 10^6$ մ/վ:

Ինչպես գիտեք, էլեկտրոնի արագությունն ատոմում կարելի է որոշել $v_n = \alpha c / n$ բանաձևով: Առաջին «ուղեծրով» շարժվելիս $v_1 = \alpha c \approx 2,2 \cdot 10^6$ մ/վ: Այսինքն՝ էլեկտրոնի արագության Δv անորոշությունը նույն կարգի է, ինչ v_1 արագությունը: Բայց ուղեծրով (հետագծով) շարժման ժամանակ էլեկտրոնի



Նկ.108. Միջուկից r հեռավորությամբ «ուղեծրի» կետերում էլեկտրոնը հայտնաբերելու հավանականությունն ամենամեծն է:

արագությունը պետք է խիստ որոշակի լինի: Այստեղից եզրակացնում ենք, որ «ուղեծիր» և «հետագիծ» հասկացությունները դասական իմաստով կիրառելի չեն էլեկտրոնի համար:

Համաձայն բվանտային պատկերացումների՝ միջուկի շուրջը էլեկտրոնի շարժման վիճակը նկարագրվում է $\Psi(r, t)$ ալիքային ֆունկցիայով: Այդպիսի նկարագրի դեպքում $|\Psi(r, t)|^2 \cdot \Delta r$ -ն այն բանի հավանականությունն է, որ էլեկտրոնը ժամանակի t պահին կարելի է հայտնաբերել միջուկից $(r, r \pm \Delta r)$ լայնությամբ «օղակաձև» տիրույթի ներսում, ընդ որում՝ առավելագույն հավանականությամբ՝ r հեռավորությամբ «ուղեծրի» վրա (նկ. 108): Այսպիսով՝ Բորի կանխադրությոներում «ուղեծիր» հասկացությունը հարկավոր է հասկանալ հենց այս իմաստով:

Այլ բան է, երբ դիտարկում ենք էլեկտրոնի շարժումը, օրինակ՝ հեռուստացույցի կինեսկոպում կամ ֆոտոէֆեկտի ժամանակ: Կինեսկոպում նրա առանցքի երկայնքով էլեկտրոնի իմպուլսը՝ $p = \sqrt{2m_e eU}$, որտեղ U -ն արագացնող լարումն է: Եթե էլեկտրոնների փնջի հատույթի տրամագիծը d է, ապա, համաձայն անորոշությունների (5.37) առնչության, փնջի առանցքին ուղղահայաց ուղղությամբ իմպուլսի անորոշությունը՝ $\Delta p \approx \hbar / d$: Նշանակում է՝ էլեկտրոնը կարող է շեղվել փնջի առանցքից ամենաշատը $\vartheta \approx \Delta p / p \approx \hbar / pd$ անկյունով: Դիցուք՝ l -ը էլեկտրոնի անցած ճանապարհի երկարությունն է կինեսկոպում: Այդ դեպքում էկրանին էլեկտրոնի հարվածի տեղը փնջի առանցքից շեղված կլինի $\Delta x \approx l D \vartheta \approx \hbar l / (pd)$ չափով: Համարելով $U = 20$ կՎ, $d = 10^{-5}$ մ, $l = 0,2$ մ, ստանում ենք՝ $\Delta x \approx 10^{-7}$ մ, որը փոքր է փնջի տրամագծից: Պարզ է, ուրեմն, որ կինեսկոպում էլեկտրոնը կարելի է դիտարկել որպես դասական մասնիկ, որի համար արդեն դասական իմաստով կիրառելի է «հետագիծ» հասկացությունը:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչու՞ էլեկտրոնը չի կարող ընկնել միջուկի վրա: 2. Արտածեք էլեկտրոնի նվազագույն էներգիայի և «ուղեծրի» շառավղի բանաձևերը՝ ելնելով անորոշությունների առնչությունից: 3. Ինչու՞ չենք կարող էլեկտրոնի շարժման «ուղեծիր» հասկացությունը կիրառել դասական իմաստով: Ի՞նչ պետք է հասկանալ՝ ասելով «էլեկտրոնի սփառված ուղեծիր»: 4. Ի՞նչ պայմաններում է էլեկտրոնի «հեքիազիծ» հասկացությունը ընկալելի դասական իմաստով:

§ 52. ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՈՒԺԵՂԱՅՈՒՄԸ ՄԻՋԱԿԱՅՐՈՎ ԱՆՑՆԵԼԻՄ: ԻՆՔՆԱԿԱՍ ԵՎ ՀԱՐԿԱՂՐԱԿԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՈՒՄ

Եթե § 45-ում դիտարկված «երևակայական» գազում E_1 էներգիայով ատոմների թիվը նշանակենք N_1 -ով, իսկ E_2 էներգիայով ատոմների թիվը՝ N_2 -ով, ապա գազի ատոմները, ըստ էներգիական մակարդակների, բաշխվում են հետևյալ կերպ՝

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}}, \quad (5.41)$$

որտեղ $N_1 + N_2 = N_0$ -ն գազում ատոմների ընդհանուր թիվն է, T -ն՝ գազի բացարձակ ջերմաստիճանը, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Ջ/Կ-ը՝ Բոլցմանի հաստատունը, $e \approx 2,72$ թիվը՝ բնական լոգարիթմների հիմքը: (5.41) առնչությունն անվանում են Բոլցմանի բանաձև:

Դիցուք՝ «երևակայական» գազում տարածվում է $\nu_{1,2} = (E_2 - E_1)/h$ հաճախությամբ մեներանգ ճառագայթում: Ինչպես արդեն գիտեք, այդ դեպքում հնարավոր է, որ միաժամանակ տեղի ունենան հետևյալ երեք պրոցեսները՝ ճառագայթման կլանում, ինքնակամ ճառագայթում և հարկադրական ճառագայթում: Այդպիսի եզրակացության առաջինը հանգել է Ալբերտ Այնշտայնը 1916 թ.:

Համաձայն Այնշտայնի՝ կլանման ժամանակ միավոր ժամանակում $E_1 \rightarrow E_2$ անցումներ կատարող ատոմների թիվը՝ $\Delta N_1 / \Delta t$ -ն, հետևաբար՝ ատոմների կլանած ճառագայթման ուժգնությունը, համեմատական է E_1 էներգիայով ատոմների N_1 թվին ու գազային միջավայրով տարածվող և տարածման ուղղությանն ուղղահայաց միավոր մակերեսով հարթակով անցնող ֆոտոնների թվին, այլ կերպ ասած՝ $\nu_{1,2}$ հաճախությամբ էլեկտրամագնիսական ճառագայթման ուժգնությանը:

$E_2 \rightarrow E_1$ ինքնակամ անցման ժամանակ վերին՝ E_2 էներգիայով մակարդակում ատոմների թվի փոքրացման արագությունը համեմատական է N_2 -ին:

Եվ, վերջապես, հարկադրաբար $E_2 \rightarrow E_1$ անցումներ կատարող ատոմների թվի նվազման արագությունը համեմատական է ինչպես E_2 էներգիայով ատոմների N_2 թվին, այնպես էլ այդ ատոմներից կազմված միջավայրով տարածվող $\nu_{1,2}$ հաճախությամբ էլեկտրամագնիսական ճառագայթման ուժգնությանը:

Այժմ պատկերացնենք, թե առաջնային ֆոտոնի ազդեցությամբ բազմաթիվ ատոմներ E_2 էներգիայով մակարդակից անմիջապես «իջնում» են E_1 էներգիայով մակարդակ: Այդպիսի անցումների հետևանքով արդեն կույնենանք ոչ թե մեկ, այլ բազմաթիվ այդպիսի ֆոտոններ, այլ կերպ ասած՝ «ֆոտոնների հեղեղ»: Այդ բոլոր ֆոտոններն էլ կույնենան մույն էներգիան և կշարժվեն մույն ուղղությամբ, որով շարժվում է առաջնային ֆոտոնը:

Այսպիսով՝ գոյություն ունի ատոմների ճառագայթման (մասնավորապես՝ լույսի) արձակման երկու պրոցես՝ ինքնակամ արձակում և հարկադրական արձակում: Առաջին դեպքում երկրորդային ֆոտոնի «ծնվելու պահը» պատահական է: Պատահական է նաև «ծնված» ֆոտոնի շարժման ուղղությունը: Երկրորդ դեպքում ատոմի $E_2 \rightarrow E_1$ անցումը կատարվում է առաջնային ֆոտոնի ազդեցությամբ, որի շարժման ուղղությունն էլ ունի «ծնված» ֆոտոնը: Հետևաբար՝ հարկադրական անցմամբ արձակված բոլոր երկրորդային ֆոտոններն էլ «համեքաշխորեն» շարժվում են միևնույն (առաջնային ֆոտոնի շարժման) ուղղությամբ: Բացի այդ՝ երկրորդային ֆոտոնները պահպանում են առաջնայինի ն հաճախությունը, ն՝ փուլը, ն՝ տատանումների հարթությունը: Այլ կերպ ասած՝ **հարկադրաբար արձակված էլեկտրամագնիսական ալիքները մեներանգ են, կոհերենտ և քնեռացված:**



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Գրեք E_1 և E_2 ($E_1 < E_2$) էներգիաներով երկմակարդակ ատոմներից բաղկացած համակարգում ատոմների N_1 և N_2 թվերի հարաբերությունն արտահայտող բանաձևը: **2.** Ինչի՞ց է կախված սրորին (E_1) մակարդակից վերին (E_2) մակարդակ անցնող ատոմների թիվը միավոր ժամանակում: **3.** Ինչի՞ց է կախված ինքնակամորեն ֆոտոն արձակող ատոմների թվի նվազման արագությունը: **4.** Դիցուք՝ E_1 և E_2 էներգիաներով մի քանի երկմակարդակ ատոմներ ինքնակամորեն արձակում են ֆոտոններ: ա. Նու՞յն, թե՞ տարբեր պատերի են արձակվում այդ ֆոտոնները: բ. Նու՞յն են արդյոք արձակված ֆոտոնների էներգիաները, հաճախությունները, շարժման ուղղությունները, դրանց համապատասխանող էլեկտրամագնիսական ալիքների տատանումների փուլերը: գ. Միավորում են արդյոք քնեռացված այդ ալիքները: **5.** Ինչի՞ց է կախված հարկադրաբար անցումներ կատարող ատոմների թվի նվազման արագությունը: **6.** Դիցուք՝ E_1 և E_2 էներգիաներով մի քանի ատոմ հարկադրաբար ֆոտոններ են արձակում: Նու՞յն են արդյոք առաջնային և երկրորդային ֆոտոնների էներգիաները, հաճախությունները, շարժման ուղղությունները, դրանց համապատասխանող ճառագայթումների տատանումների փուլերը: Միավորում են արդյոք քնեռացված այդ ճառագայթումները:

§53. ԼԱՅԵՐ

Ձերմային հավասարակշռության վիճակում §45-ում դիտարկված «երևակայական» զազում E_1 նվազագույն էներգիայով ատոմների N_1 թիվը մեծ է E_2 էներգիայով ($E_2 > E_1$) զրգոված ատոմների N_2 թվից: Այդ զազում $\nu_{1,2} = (E_2 - E_1)/h$ հաճախությամբ էլեկտրամագնիսական ալիք տարածվելիս ծազում են ինչպես կլանմամբ ($E_1 \rightarrow E_2$) և ինքնակամ ճառագայթման, այնպես էլ հարկադրական ճառագայթման ($E_2 \rightarrow E_1$) ուղեկցվող անցումներ: Քանի դեռ $N_1 > N_2$, կլանմամբ ուղեկցվող անցումները գերակշռում են արձակմամբ ուղեկցվող անցումները,

ճառագայթման քվանտների (ֆոտոնների) որոշ մասն այդ միջավայրը կլանում է. կլանված ֆոտոնների էներգիան փոխակերպվում է միջավայրի ներքին էներգիայի: Հետևաբար՝ ճառագայթման ուժգնությունը նվազում է:

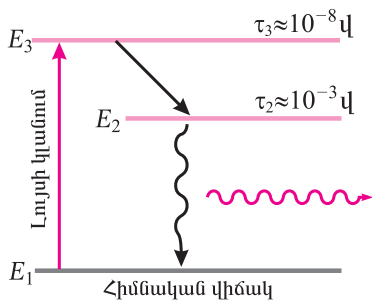
Իսկ հնարավոր է, որ դիտարկվող գազը ոչ թե թուլացնի, այլ ուժեղացնի ճառագայթումը: Դա հնարավոր է, եթե $N_2 > N_1$ այսինքն՝ գրգռված E_2 էներգիայով մակարդակում ատոմների թիվը մեծ է այն ատոմների թվից, որոնք հիմնական՝ E_1 էներգիայով մակարդակում են: Դիտարկվող գազի (ընդհանրապես՝ կամայական միջավայրի) այդպիսի վիճակն անվանում են **շրջուն բնակեցվածության վիճակ**: Այն միջավայրը, որի ատոմները շրջուն բնակեցվածության վիճակում են, անվանում են **ակտիվ միջավայր**:

Այսպիսով՝ որպեսզի միջավայրով անցնելիս ճառագայթման (մասնավորապես՝ լույսի) ուժգնությունը մեծանա, անհրաժեշտ է այն դարձնել ակտիվ և, այնուհետև, այդ վիճակը պահպանել: Դա կարելի է անել, օրինակ, միջավայրի ատոմները նախապես «ռմբակոծելով» արտաքին էլեկտրամագնիսական ճառագայթման հաճախությամբ քվանտներով: Այդ դեպքում ճառագայթման քվանտների և միջավայրի ատոմների ոչ առաձգական բախումների հետևանքով E_1 էներգիայով ատոմների զգալի մասը «կբարձրանա» E_2 էներգիայով մակարդակ, և N_2 -ը կդառնա մեծ N_1 -ից: Հետևաբար՝ միջավայրով անցնող ճառագայթման և միջավայրի ատոմների փոխազդեցության հետևանքով ավելի շատ ֆոտոններ կարձակվեն, քան կկլանվեն: Ուրեմն՝ արձակված ճառագայթման ուժգնությունն ավելի մեծ է, քան կլանվածինը: Դիտարկվող միջավայրը (ատոմների համակարգը) դարձյալ կվերադառնա այնպիսի վիճակի, որտեղ $N_1 > N_2$: Նշանակում է՝ ճառագայթման հետագա ուժեղացման համար անհրաժեշտ է, որ ատոմների արձակված էլեկտրամագնիսական ալիքների (սկզբնական ֆոտոնների «կրկնօրինակների») մի մասը նորից հետ վերադառնա միջավայր՝ դարձյալ «ստիպելու», որ գրգռված ատոմները կատարեն հարկադրական ճառագայթմամբ ուղեկցվող անցումներ:

Այսպիսով՝ միջավայրը, որի ատոմների զգալի մասը E_1 էներգիայով հիմնական մակարդակից նախապես բերված է E_2 էներգիայով գրգռված մակարդակի, շնորհիվ հարկադրական արձակմամբ ուղեկցվող անցումների, կարող է ուժգնացնել նրանով անցնող $\nu_{1,2} = (E_2 - E_1)/h$ հաճախությամբ ճառագայթումը կամ դառնալ այդ նույն հաճախությամբ ճառագայթման աղբյուր: Այն սարքը, որն օգտագործում է այդպիսի միջավայրն օպտիկական, մասնավորապես տեսանելի տիրույթի մեներանգ ճառագայթման ուժեղացման կամ արձակման համար, անվանում են **լազեր** («Լազեր» անվանումն անգլերեն «լույսի ուժեղացում հարկադրական ճառագայթման արձակմամբ» արտահայտության առաջին տառերից կազմված հապավում է): Առաջին լազերը, որ տեսանելի ճառագայթում (լույս) արձակող գեներատոր էր, 1954 թվականին ստեղծել են ամերիկացի ֆիզիկոս Չառլզ Թաունսը և, նրանից անկախ, ռուս ֆիզիկոսներ Նիկոլայ Բասովն ու Ալեքսանդր Դրոլտոնովը:

Ի՞նչ սկզբունքով է աշխատում լազերը: Լազերի կարևորագույն մասերից է նրա **ակտիվ միջավայրը** կամ, ինչպես ասում են, **ակտիվ տարրը**: Ակտիվ տարրում բազմաթիվ ատոմների ստիպում են անցնել շրջուն բնակեցվածությամբ վիճակի, որտեղ նրանց «կյանքի տևողությունը» բավականաչափ երկար է՝ մոտավոր-

րապես 10^{-3} վ, որը հարյուր հազար անգամ մեծ է գրգռված այլ վիճակում ատոմի կյանքի տևողությունից: Այդպիսի վիճակները (կամ մակարդակները) կոչվում են **մետաստաբիլ**:



Նկ. 109. Ատոմի էներգիայի եռ-մակարդակ համակարգ. նշված են E_2 և E_3 մակարդակներում ատոմի «կյանքի տևողությունները»: Լազերային ճառագայթումը միայն $E_2 \rightarrow E_1$ անցումների հետևանք է:

($\tau_2 = 10^{-3}$ վ): Հզոր մղման շնորհիվ ստեղծվում է շրջուն բնակեցվածության վիճակ՝ $N_2 > N_1$, որն էլ անհրաժեշտ պայման է լազերային ճառագայթում ստանալու համար:

$\nu_{1,2} = (E_2 - E_1)/h$ հաճախությամբ արտաքին էլեկտրամագնիսական ճառագայթման քվանտների ազդեցությամբ սուտակի ատոմները կատարում են հարկադրական արձակմամբ ուղեկցվող $E_2 \rightarrow E_1$ անցումներ: Այդպիսի անցումներ կատարելուն կարող են ստիպել նաև $E_2 \rightarrow E_1$ ինքնակամ «ցատկերը»: Այդ ամենի հետևանքով հարկադրական արձակմամբ ուղեկցվող անցումների թիվը գերազանցում է կլանմամբ ուղեկցվող $E_1 \rightarrow E_2$ անցումների թիվը:

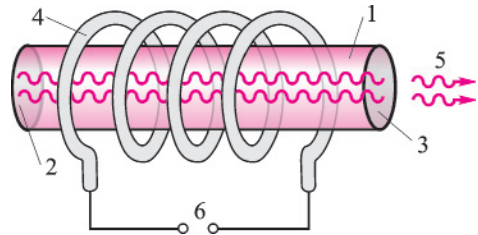
Ատոմի երեք էներգիական մակարդակների օգտագործմամբ հարկադրական ճառագայթման ստացման նկարագրված եղանակը (այսպես կոչված ատոմի էներգիայի եռամակարդակ համակարգը) դրված է լազերի աշխատանքի հիմքում:

Սուտակային լազերի կառուցվածքը: Սուտակային լազերի կառուցվածքի սխեման պատկերված է 110-րդ նկարում:

Սուտակե գլանաձև ձողի հարթ և զուգահեռ հիմքերն արծաթագոծված են և ծառայում են որպես հայելիներ, ընդ որում՝ մեկը գրեթե իդեալական անդրադարձնող է, մյուսը՝ կիսաթափանց: Մղման գազապարպումային լամպը, որ ունի պարույրի ձև, բռնկվելիս առաջացնում է կապտականաչավուն լույս, որի քվանտներից յուրաքանչյուրի էներգիան հավասար է $E_1 \rightarrow E_3$ կլանման համար անհրաժեշտ էներգիային: Ուստի՝ քրոմի ատոմները «բարձրանում են» E_3 գրգռված մակարդակ (նկ. 109), որից հետո, ինքնակամորեն «իջնելով» E_2 մետաստաբիլ մակարդակ՝ «բնակեցնում» այն: $E_3 \rightarrow E_2$ անցմամբ անջատված էներգիան չի արձակվում ճառագայթման տեսքով, այլ, հաղորդվելով սուտակի բյուրեղաչանցին, փոխակերպվում է ներքին էներգիայի:

Մետաստաբիլ վիճակներ ունեցող նյութերից է, օրինակ, սուտակը, որն ալյումինի օքսիդի (Al_2O_3) բյուրեղ է, որտեղ ալյումինի ատոմների 0,05 %-ը տեղակալված է քրոմի (Cr) ատոմներով: Քրոմի ատոմները բռնկման հզոր լամպի արձակած $\lambda_{1,3} = 550$ նմ ալիքի երկարությամբ կապտականաչավուն լույսի ֆոտոնների ազդեցությամբ E_1 էներգիայով մակարդակից բարձրանում են E_3 էներգիայով մակարդակ (նկ. 109): Այդ պրոցեսն անվանում են **օպտիկական մղում**: E_3 մակարդակում ատոմների կյանքի միջին տևողությունը շատ կարճ է՝ $\tau_3 = 10^{-8}$ վ, ուստի՝ ատոմներն այդ մակարդակից կամ վերադառնում են հիմնական՝ E_1 էներգիայով մակարդակ կամ անցնում E_2 էներգիայով մետաստաբիլ մակարդակ

$\nu_{1,2} = (E_2 - E_1)/h$ հաճախությամբ և սուտակեն ձողի առանցքի երկայնքով տարածվող արտաքին էլեկտրամագնիսական ճառագայթման քվանտները խթանում են քրոմի ատոմներին՝ կատարելու $E_2 \rightarrow E_1$ հարկադրական անցումներ, որոնք ուղեկցվում են ձողի առանցքի երկայնքով տարածվող ֆոտոններով: Այդպիսի ֆոտոնների առաջացմանը խթանում են նաև $E_2 \rightarrow E_1$ ինքնակամ անցմամբ պայմանավորված այն ֆոտոնները, որոնք տարածվում են սուտակեն ձողի առանցքի երկայնքով: Այդ դեպքում արձակված ֆոտոնների թիվը կարուկ մեծանում է: ($E_2 \rightarrow E_1$ ինքնակամ անցմանն ուղեկցող այն ֆոտոնները, որոնք տարածվում են սուտակեն ձողի առանցքի նկատմամբ անկյան տակ, դուրս են գալիս բյուրեղից՝ հետագայում որևէ դեր չխաղալով լազերային ճառագայթման արձակման պրոցեսում): Հասնելով իդեալական հայելուն՝ այդ ֆոտոններն անդրադառնում են, և կրկին տարածվելով սուտակեն ձողի երկայնքով՝ առաջ են բերում նոր հարկադրական անցումներ, և դրանց հետևանքով արձակված նոր ֆոտոններ: Ուժեղացված լույսի նեղ փունջը, հասնելով կիսաթափանց հայելուն, մասամբ դուրս է գալիս՝ առաջացնելով լազերային ճառագայթում, մասամբ անդրադառնալով՝ դարձյալ վերադառնում ձողի ներսը: Դրանից հետո պրոցեսը կրկնվում է:



Նկ. 110. Սուտակային լազերի կառուցվածքի սխեման. 1՝ սուտակեն ձող, 2. սուտակեն ձողի արծաթագոծված հիմք (հայելի), 3. սուտակեն ձողի բոլոր արծաթագոծված հիմք (կիսաթափանց հայելի), 4. միմյան գազապարպումային լամպ, 5. լազերային փունջ, 6. հոսանքի աղբյուր

Լազերային ճառագայթման հատկությունները: Սուտակային լազերից ճառագայթումն արձակվում է շատ կարճ ժամանակի ընթացքում: Դա բացատրվում է նրանով, որ հարկադրական անցումները, որոնցով պայմանավորված է այդ ճառագայթումը, մույնպես կարճատև են:

Լազերային ճառագայթումը պայմանավորված է միայն այն ֆոտոններով, որոնք տարածվում են սուտակեն ձողի առանցքի երկայնքով, ուստի լազերային ճառագայթների փունջն օժտված է չնչին տարամխտմամբ, այսինքն՝ սուտակեն ձողի առանցքից լազերային ճառագայթների շեղման անկյունն աննշան է՝ մոտավորապես 10^{-5} ռադիան: Երկրից արձակված ճառագայթների այդպիսի փունջը, օրինակ, Լուսնի մակերևույթին առաջացնում է կլոր բիծ՝ ընդամենը 3 կմ տրամագծով:

Լազերային ճառագայթումը, ի տարբերություն սովորական աղբյուրների ճառագայթումների, գրեթե մեներանգ է և, բացի դրանից, կոհերենտ: Չէ՞ որ լազերային ճառագայթումը պայմանավորված է ատոմների հարկադրաբար անցումներով, որոնք կատարվում են արտաքին ֆոտոնների ազդեցությամբ՝ խիստ համաձայնեցված կերպով:

Լազերային ճառագայթումը բավականաչափ հզոր է: Օրինակ՝ որոշ լազերների ճառագայթման ուժգնությունը հասնում է մինչև 10^{18} Վտ/մ², իսկ արձակված էլեկտրամագնիսական ալիքի էլեկտրական դաշտի լարվածությունն ավելի մեծ է, քան ատոմի ներսում էլեկտրական դաշտի լարվածությունը: Լազերային ճառագայթման ալիքի երկարությունների տիրույթը շատ նեղ է՝ $\Delta\lambda \approx 10$ նմ:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչպե՞ս է բացատրվում նյութական միջավայրում փարածվող էլեկտրամագնիսական ճառագայթման ուժգնության նվազումը: 2. Միջավայրի ո՞ր վիճակն են անվանում շրջուն բնակեցվածության վիճակ: Ո՞ր միջավայրն են անվանում ակտիվ: 3. Ի՞նչ է լազերը: 4. Արոմի ո՞ր էներգիական մակարդակն են անվանում մերաստաբիլ: Համեմատեք արոմի մերաստաբիլ և սովորական գրգռված վիճակներում արոմի «կյանքի միջին փոփոխությունները»: 5. Ի՞նչ է օպտիկական մղումը: Նկարագրեք, թե ինչպես են սուրակային լազերում առաջացնում արոմների շրջուն բնակեցվածության վիճակ: 6. Ի՞նչ կառուցվածք ունի սուրակային լազերը: 7. Ակտիվ միջավայրով փարածվող ո՞ր ֆոտոններն են կարևոր լազերային ճառագայթման համար: 8. Թվարկեք լազերային ճառագայթման հատկությունները: Ինչո՞ւ է լազերից դուրս գալիս ճառագայթների գրեթե զուգահեռ փունջ: Ինչո՞ւ է լազերային ճառագայթումը կոհերենտ: 9. Համեմատելի՞ են արդյոք լազերային ճառագայթման էլեկտրական դաշտի և արոմի ներսում էլեկտրական դաշտի լարվածությունները:

§54. ԼԱԶԵՐՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ ՄԵՋ ԵՎ ՏԵԽՆԻԿԱՅՈՒՄ

Լազերային ճառագայթումն ունի մի շարք հատկություններ, որոնցով էականորեն տարբերվում է այլ աղբյուրների արձակած ճառագայթումներից: Նախ՝ այն մեներանգ է ու կոհերենտ: Այսինքն՝ լազերն արձակում է ճառագայթների գրեթե զուգահեռ փունջ: Այնուհետև՝ լազերային ճառագայթումն օժտված է շատ մեծ հզորությամբ (մինչև մի քանի մեգավատտ): Այդ պատճառով էլ ժամանակակից գիտության մեջ և տեխնիկայում լազերները խաղում են կարևորագույն դեր:

Լազերային ճառագայթների կոհերենտ և գրեթե զուգահեռ լինելը թույլ է տալիս այդ ճառագայթների փունջն օգտագործել կապի ասպարեզում՝ տեղեկատվություն հաղորդելու համար: Լազերային ճառագայթման կիրառմամբ կարելի է շատ ճշգրտորեն որոշել հեռավորությունները, այլ կերպ ասած՝ լազերն անփոխարինելի տեղորոշիչ է, որն անվանում են **լուսատեղորոշիչ**:

Լազերային ճառագայթման սաստիկ մեծ ուժգնությունն օգտագործում են գերալիմ դարմիններում (օրինակ՝ ալմաստում) անցքեր բացելու, դժվարահալ մետաղների ջերմամշակման, վակուումում նյութերի գոլորշիացման և այլ նպատակների համար: Լազերային հզոր ճառագայթման նեղ փնջի օգնությամբ պատրաստում են միկրոսխեմաներ, կատարում այսպես կոչված կետային կամ լազերային եռակցում (օրինակ՝ ոչ հաստ մետաղե մասերի միացման համար): Բժշկության մեջ լազերներն օգտագործում են կենդանի հյուսվածքների կտրման, կցակարման և մանրէազերծման համար:

Լազերների երևան գալով ծնունդ առան նաև գիտության մի շարք նոր բաժիններ, օրինակ, լազերային քիմիան: Լազերային ճառագայթմամբ հնարավոր է խթանել քիմիական ռեակցիաներ, որոնք սովորական պայմաններում չեն ընթանում: Չէ՞ որ ֆոտոններ կլանելու հետևանքով ռեակցիային մասնակցող ատոմների և մոլեկուլների էներգիաներն արդեն կարող են դառնալ ավելի մեծ, քան տվյալ քիմիական ռեակցիայի ակտիվացման էներգիան է: (Ակտի-

վաչման էներգիան այն նվազագույն ավելցուկային էներգիան է (ջերմային շարժման միջին կինետիկ էներգիայից զատ), որով պետք է օժտված լինեն քիմիական ռեակցիային մասնակցող ատոմները և մոլեկուլները, որպեսզի ընթանա այդ ռեակցիան: Ակտիվացման էներգիան սովորաբար մի քանի էլեկտրոնվոլտ է:)

Անգնահատելի են լազերների կիրառությունները հենց օպտիկայում, մասնավորապես՝ սպեկտրաչափության մեջ: Լազերային ճառագայթման օգնությամբ հնարավոր են դառնում, օրինակ, ատոմների և մոլեկուլների հարկադրական քվանտային անցումները միանգամայն որոշակի էներգիական մակարդակների միջև: Հնարավոր չէ այդպիսի ընտրովի անցումներ իրականացնելը լույսի ոչ լազերային աղբյուրների օգտագործմամբ:

Օպտիկական պարպում գազերում: Լազերային ճառագայթման օգնությամբ գազերում հնարավոր է առաջացնել այսպես կոչված օպտիկական պարպում:

11-րդ դասարանի ֆիզիկայի դասընթացից գիտեք, որ երբ օդում երկու էլեկտրոդների միջև կիրառված լարումը մեծ է ծակման կամ բռնկման լարումից, օդում առաջանում է ինքնուրույն էլեկտրական պարպում:

Իսկ ինչպե՞ս է օդն իոնանում լազերային ճառագայթմամբ:

Ինչպես գիտեք, էլեկտրոնն ատոմից «պոկելու» համար հարկավոր է էլեկտրոնին հաղորդել այնքան էներգիա, որը գերազանցում է ատոմի իոնացման էներգիան (օրինակ՝ ջրածնի ատոմի համար այդ էներգիան 13,6 էՎ է, թթվածնի մոլեկուլի համար՝ 12,5 էՎ, ազոտի մոլեկուլի համար՝ 15,8 էՎ և այլն): Լազերային ճառագայթման քվանտի էներգիան մի քանի էլեկտրոնվոլտի կարգի է, օրինակ, սուտակային լազերի ճառագայթման (կարմիր լույսի) քվանտի էներգիան 2 էՎ է: Հետևաբար՝ որպեսզի օդն իոնանա, անհրաժեշտ է, որ, օրինակ, թթվածնի մոլեկուլի արտաքին թաղանթի էլեկտրոններից մեկը միաժամանակ կլանի նվազագույնը յոթ ֆոտոն: Թույլ լուսային փնջերի դեպքում այդպիսի պրոցեսի հավանականությունը գրեթե զրո է: Սակայն պրոցեսը դառնում է հավանական մեծ հզորությամբ լույսի փնջերի առկայությամբ, այսինքն՝ երբ լույսի փնջում ֆոտոնների կոնցենտրացիան շատ մեծ է: Այդպիսի պրոցեսն անվանում են **բազմաֆոտոնային իոնացում** (կամ **բազմաֆոտոնային կլանում**):

Օպտիկական պարպման մյուս եղանակը, որը մեծ ճնշումների դեպքում ավելի հաճախ է դրսևորվում, հետևյալն է:

Օդում միշտ առկա են որոշակի քանակով ազատ էլեկտրոններ, որոնք իրենց ատոմներից և մոլեկուլներից «պոկվել» են տիեզերական ճառագայթների ազդեցությամբ կամ վերը նշված բազմաֆոտոնային պրոցեսների հետևանքով: Ազատ էլեկտրոնները լազերային ճառագայթման փոփոխական էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ սկսում են տատանվել: Ազատ էլեկտրոնի հարկադրական տատանումները վերադրվում են նրա քառասային (ջերմային) շարժմանը: Բայց լազերային ճառագայթումը դադարեցնում է տոտ էլեկտրոնի հարկադրական տատանումները նույնպես դադարում են: Էլեկտ-

րոնն անցնում է իր սովորական «ռեժիմին»՝ կատարելով միայն քառասյին շարժումներ: Այստեղից կարելի է եզրակացնել, որ ազատ էլեկտրոնը ֆոտոն (այսինքն՝ էլեկտրամագնիսական ճառագայթում) կլանել չի կարող:

Սակայն վիճակը փոխվում է, երբ տատանումների ընթացքում էլեկտրոնը բախվում է օդի (գազի) ատոմների կամ իոնների հետ: Բախումների ժամանակ էլեկտրոնն այլևս ազատ չէ, ուրեմն՝ կարող է կլանել իր վրա ընկնող լազերային ճառագայթման (ֆոտոնների) էներգիան: Հետևաբար՝ ճառագայթումը դադարելուց հետո էլեկտրոնի ջերմային շարժման էներգիան կլինի ավելի մեծ, քան առաջ էր:

Դրանից հետո միայն, բախվելով գազի ատոմների հետ, էլեկտրոնը կարող է դրանք իոնացնել: Ատոմներից պոկված երկրորդային էլեկտրոնները, մույն կերպ մեծացնելով իրենց էներգիան մինչև իոնացման էներգիայի արժեքը, առաջացնում են նոր ազատ էլեկտրոններ, և այդպես շարունակ: Այս պրոցեսների հետևանքով առաջանում է էլեկտրոնների տարափ, որն էլ իր հերթին կարող է առաջ բերել գազի ինքնուրույն պարպում, որն էլ հենց օպտիկական պարպումն է:

Ներկայումս լազերների կիրառություններն այնքան բազմաթիվ են, որ դրանք թվարկել հնարավոր չէ:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ առանձնահատկություններով է տարբերվում լազերային ճառագայթումը սովորական աղբյուրների արձակած ճառագայթումից: 2. Նշեք լազերային ճառագայթման կիրառությունների օրինակներ գիտության մեջ և տեխնիկայում: 3. Մը երևոյթն են անվանում բազմաֆոտոնային կլանում: 4. Ի՞նչ է օպտիկական պարպումը գազերում: Բացատրեք, թե ինչպես են գազերն իոնանում լազերային ճառագայթմամբ՝ ա. բազմաֆոտոնային կլանման հետևանքով, բ. ազատ էլեկտրոնների և ատոմների բախումների միջոցով:

§ 55. ԳԱՂԱՓԱՐ ՈՉ ԳԾԱՅԻՆ ՕՊՏԻԿԱՅԻ ՄԱՍԻՆ

Մինչև լազերի հայտնագործումը համարել են, որ լույսի ազդեցությամբ միջավայրի օպտիկական բնութագրերը, որոնց թվում՝ բեկման ցուցիչը, կախված չեն այդ միջավայրում տարածվող լույսի ուժգնությունից: Սակայն լազերի երևան գալուց հետո պարզվել է, որ մեր ունեցած պատկերացումները միջավայրի բնութագրերի անփոփոխ լինելու վերաբերյալ ճշմարիտ են, եթե միջավայրով անցնող լույսի փնջերի ուժգնությունը փոքր է: Բանն այն է, որ լազերային հզոր ճառագայթումը կարող է փոխել միջավայրի օպտիկական բնութագրերը, որոնք այսուհետև դառնում են կախված այդ ճառագայթման էլեկտրական դաշտի լարվածությունից: Իրոք, լազերի հզոր ճառագայթման էլեկտրական դաշտի լարվածությունը մույն կարգի է, ինչ նյութի ատոմներում և մոլեկուլներում էլեկտրական դաշտի լարվածությունը: Նշանակում է՝ այդպիսի ճառագայթման ազդեցությամբ կարող է փոփոխվել ատոմի էլեկտրոնի, հետևաբար՝ նաև ատոմի և ատոմներից կազմված համակարգի՝ նյութի

վիճակը: Բայց այդ փոփոխությունները շրջելի են. լազերային լուսարձակումը դադարելուց հետո միջավայրի բնութագրերը «վերականգնում են» իրենց նախկին արժեքները:

Ոչ գծային օպտիկական ֆիզիկայի այն բաժինն է, որն ուսումնասիրում է այնպիսի երևույթներ, որոնք առաջանում են միջավայրում հզոր լուսային փնջեր տարածվելիս:

Դիտարկենք այդ երևույթներից մի բանիսը:

Միջավայրի վճիտացում: Ոչ գծային օպտիկական երևույթ առաջին անգամ հայտնաբերել են ռուս գիտնականներ Սերգեյ Վավիլովը և Վադիմ Լյովշինը 1925 թվականին: Նրանք պարզել են, որ ուրանի աղեր պարունակող ապակու միջոցով անցնող լույսի ուժգնությունը երեք անգամ մեծացնելիս կլանումը նվազում է 1,5%-ով: Հետագայում՝ լազերի հայտնագործումից հետո, երբ հնարավոր է դարձել ստանալ ավելի հզոր լուսային փնջեր, նկատել են, որ սովորական լույսի համար անթափանց միջավայրը լազերային ճառագայթների ազդեցությամբ դառնում է թափանցիկ: Այդ երևույթը, որն այժմ անվանում են **միջավայրի վճիտացում**, բացատրվում է հետևյալ կերպ:

Դիցուք՝ միջավայրը կլանում է $\nu_{1,2}$ հաճախությամբ հզոր լազերային լույս, և ատոմներն անցնում են E_1 էներգիայով մակարդակից E_2 էներգիայով մակարդակ՝ $h\nu_{1,2} = E_2 - E_1$: Բայց հենց ատոմների թիվը երկու մակարդակներում դառնում է նույնը, միջավայրն ամբողջությամբ վճիտանում է, այսինքն՝ դադարում է կլանել նրա վրա ընկնող լազերային լույսը: Չէ՞ որ այժմ $E_1 \rightarrow E_2$ անցումների թիվը միավոր ժամանակում դառնում է հավասար հակառակ՝ անցումների թվին, այլ կերպ ասած՝ որքան $h\nu_{1,2}$ էներգիայով ֆոտոն պակասում է (կլանվում է) լույսի փնջից, նույնքան էլ ավելանում է ի հաշիվ հարկադրական անցումների: Լազերային լուսարձակումը դադարեցնելիս միջավայրի ատոմներն ինքնակամորեն E_2 մակարդակից «ցատկում» են E_1 մակարդակ, և միջավայրը նորից դառնում է անթափանց (այսինքն՝ ունակ՝ դարձյալ կլանելու $\nu_{1,2}$ հաճախությամբ լույս):

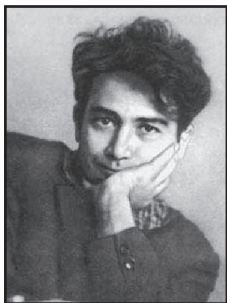
Միջավայրի մթագնման երևույթը նույնպես բացատրվում է պարզ ձևով: Դիցուք՝ ատոմի երկու էներգիական մակարդակների հեռավորությունը՝ $E_2 - E_1 = 2h\nu_{1,2}$ է: Այդպիսի ատոմները չեն կարող կլանել $h\nu_{1,2}$ էներգիայով ֆոտոններ, այսինքն՝ միջավայրը թափանցիկ է $\nu_{1,2}$ հաճախությամբ ճառագայթման համար: Բայց, ինչպես արդեն գիտեք, լազերային ճառագայթումը մեծացնում է երկֆոտոնային կլանման հավանականությունը, իսկ երկու ֆոտոնի գումարային էներգիան արդեն հավասար է $E_2 - E_1$, ուստի՝ միջավայրի թափանցիկությունը նվազում է (միջավայրը մթագնում է): Որքան մեծ է լազերային ճառագայթման ուժգնությունը, այնքան մեծ է երկֆոտոնային կլանման հավանականությունը, և այնքան ավելի շատ է մթագնում միջավայրը:

Ոչ գծային (բազմաֆոտոնային) ֆոտոէֆեկտ: Ինչպես գիտեք (տե՛ս § 54), լազերային ճառագայթման հզոր փնջերի օգնությամբ միջավայրի (օրինակ՝ մետաղի) էլեկտրոնին միաժամանակ կարող է հաղորդվել ոչ թե մեկ, այլ

մի քանի ֆոտոնների էներգիան: Այդ դեպքում ֆոտոէֆեկտի համար Այնշտայնի $h\nu = A + mv^2/2$ հայտնի հավասարման փոխարեն կունենանք

$$N h \nu = A + \frac{mv^2}{2} \quad (5.42)$$

հավասարումը (A -ն ելքի աշխատանքն է, $mv^2/2$ -ը՝ ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիան, N -ը՝ էլեկտրոնի միաժամանակ կլանած ֆոտոնների թիվը): (5.42) հավասարումից հետևում է, որ N -ը մեծացնելիս (մետաղին ընկնող լույսի ուժգնությունն աճելիս) մեծանում է ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիան, մինչդեռ, համաձայն ֆոտոէֆեկտի օրենքների, ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիան կախված պետք է լինի միայն մետաղին ընկնող լույսի հաճախությունից և ոչ թե լույսի ուժգնությունից: Բացի այդ՝ ֆոտոէֆեկտի կարմիր սահմանին համապատասխանող $\nu_{\min} = A/Nh$ հաճախությունը շեղվում է դեպի փոքր հաճախությունների տիրույթը և կարող է նույնիսկ դուրս գալ տեսանելի տիրույթից:



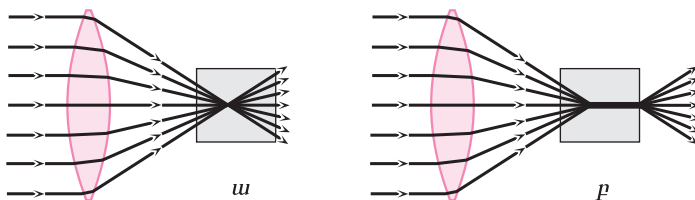
Գուրգեն Ասկարյան

1928 - 1997

Հայ ականավոր ֆիզիկոս, ոչ գծային օպտիկայի, պլազմայի ֆիզիկայի և քվանտային էլեկտրոնիկայի բնագավառի խոշորագույն մասնագետ: Հայրնագործել է էլեկտրամագնիսական և ձայնային ճառագայթների ինքնակիզակերման երևույթը:

Լազերային ճառագայթների ինքնակիզակետում: Այս ոչ գծային օպտիկական երևույթը կանխատեսել է հայ ականավոր ֆիզիկոս Գուրգեն Ասկարյանը 1962 թվականին, իսկ երեք տարի անց այն հաստատվել է փորձով: Երևույթը հետևյալն է:

Սովորական լույսի զուգահեռ ճառագայթների փունջը, ուսպնակով անցնելուց հետո, զուգամիտվում է կիզակետում: Այնուհետև փնջի ճառագայթները տարամիտվում են (նկ. 111, ա): Մեծ հզորությամբ (մի քանի կիլովատտ) լազերային լույսի ճառագայթները, կիզակետով անցնելուց հետո, ընդհակառակը, տարածվում են շատ մեղ անցուղով (նկ. 111, բ): Այս երևույթը, որն անվանում են ճառագայթների ինքնակիզակետում, բացատրվում է նրանով, որ լազերային հզոր ճառագայթման էլեկտրական դաշտի ազդեցությամբ մեծանում է միջավայրի բեկման ցուցիչը: Ուսպնակի կիզակետում միջավայրի բեկման ցուցիչը դառնում է շատ մեծ, որը հանգեցնում է լույսի լրիվ ներքին



Նկ. 111. Ինքնակիզակետման երևույթը. ա. սովորական աղբյուրի արձակած լույսի փունջ, բ. լազերային հզոր լույսի փունջ

անդրադարձման: Դրա հետևանքով ճառագայթները շեղվում են դեպի օպտիկական առանցքի կողմը (որտեղ բեկման ցուցիչը մեծ է), և կիզակետից հետո լույսը տարածվում է նեղ անցուղով, որը, կարծես, բոլորովին այլ նյութից է՝ բեկման ցուցիչ մեծ արժեքով:

Նշենք, որ լազերային ֆիզիկայի, մասնավորապես ոչ գծային օպտիկայի բնագավառում մեծ ներդրում ունեն նաև Հայաստանի Հանրապետության գիտնականները:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ է ոչ գծային օպտիկան: Ո՞րն է ոչ գծային օպտիկայի և սովորական օպտիկայի հիմնական տարբերությունը: 2. Ի՞նչ երևույթ է միջավայրի վճիռապայման: Բացատրե՞ք այդ երևույթը քվանտային պատկերացումների հիման վրա: 3. Ո՞ր երևույթն են անվանում միջավայրի մթազնույթ: Բացատրե՞ք այդ երևույթի մեխանիզմը: 4. Ի՞նչ է ոչ գծային ֆոտոէֆեկտը: Գրե՞ք Այնշտայնի հավասարումը ոչ գծային ֆոտոէֆեկտի համար: Բնութագրվո՞ւմ է արդյոք ոչ գծային ֆոտոէֆեկտը «կարմիր սահմանով»: Ինչո՞ւ: 5. Ինչպե՞ս է առաջանում լույսի ճառագայթների ինքնակիզակետման երևույթը: Ինչո՞ւ ոչ հզոր լույսի փնջերի համար այդ երևույթը չի դիտվում:

Խնդիրների լուծման օրինակներ

Խորացված

1. Էլեկտրոնը, ընկնելով էլեկտրական դաշտ, անցնում է U պոտենցիալների տարբերությամբ բնութագրվող հեռավորություն: Որոշե՛ք արագացված էլեկտրոնի Դր Բրոյլի ալիքի երկարությունը, եթե էլեկտրոնի սկզբնական արագությունը զրո է:

Լուծում: Համաձայն կինետիկ էներգիայի թեորեմի՝ $eU = E_k - E_{k0} = E_k$, քանի որ էլեկտրոնի սկզբնական կինետիկ էներգիան $E_{k0} = 0$: Հարաբերականության տեսությունից հայտնի է, որ $E_k = (\gamma - 1)mc^2$, որտեղ $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, ուստի՝ $eU = (\gamma - 1)mc^2$, որտեղից՝ $\gamma = (mc^2 + eU)/mc^2$ կամ՝

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{mc^2 + eU}{mc^2}:$$

Որոշ ձևափոխություններից հետո ստանում ենք էլեկտրոնի արագությունը U պոտենցիալների տարբերությամբ բնութագրվող հեռավորություն անցնելուց հետո՝

$$v = \frac{c\sqrt{eU(2mc^2 + eU)}}{mc^2 + eU}:$$

Հետևաբար՝ էլեկտրոնի Դր Բրոյլի ալիքի երկարությունը՝

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\gamma mv} = \frac{hc}{\sqrt{eU(2mc^2 + eU)}}:$$

2. Բյուրեղապանքի հանգույցներում ատոմները (կամ իոնները) քառասային ձևով տատանվում են իրենց հավասարակշռության դիրքերի շուրջը, ընդ որում՝ որքան ցածր է ջերմաստիճանը, այնքան փոքր է տատանումների էներգիան: Բացարձակ զրո ջերմաստիճանում այդ տատանումները, համաձայն դասական ֆիզիկայի, պետք է դադարեն, այսինքն՝ ատոմները պետք է կանգ առնեն: Հնարավո՞ր է արդյոք դա ըստ քվանտային պատկերացումների:

Լուծում: Նշանակելով ատոմի շեղումը հավասարակշռության դիրքից x -ով, կարող ենք ատոմի վրա ազդող ուժը ներկայացնել $F_x = -kx$ բանաձևով (k -ն ատոմի՝

որպես ներդաշնակ տատանակի քվադրիկոշտությունն է): Հետևաբար՝ ատոմի պոտենցիալ էներգիան՝ $E_{պ} = kx^2/2 = m\omega^2 x^2/2$, որտեղ $\omega = \sqrt{k/m}$ -ը տատանումների շրջանային հաճախությունն է: Ատոմի տատանումների կինետիկ էներգիան՝ $E_{կ} = p_x^2/2m$ և, համապատասխանորեն, լրիվ էներգիան՝

$$E = E_{կ} + E_{պ} = \frac{p_x^2}{2m} + \frac{m\omega^2 x^2}{2}:$$

x -ը և p_x -ը դիտելով որպես տատանվող միկրոմասնիկի՝ ատոմի կոորդինատի և իմպուլսի անորոշություններ՝ $\Delta x = x$, $\Delta p_x = p_x$, անորոշությունների $\Delta x \Delta p_x \approx \hbar$ առնչությունից կստանանք՝ $x p_x \approx \hbar$, որտեղից $p_x \approx \hbar/x$: Օգտվելով երկու՝ a և b դրական թվերի թվաբանական և երկրաչափական միջինների կապն արտահայտող $(a + b)/2 \geq \sqrt{ab}$ անհավասարությունից՝ լրիվ էներգիայի համար կարող ենք գրել՝

$$E(x) = \frac{\hbar^2}{2mx^2} + \frac{m\omega^2 x^2}{2} \geq 2\sqrt{\frac{\hbar^2}{2mx^2} \cdot \frac{m\omega^2 x^2}{2}} = \hbar\omega:$$

Այստեղից հետևում է, որ $E(x)$ ֆունկցիայի նվազագույն արժեքը՝ $E_{min} = \hbar\omega$, այսինքն՝ ատոմի տատանումների էներգիան, ի տարբերություն դասական տատանակի (օրինակ՝ զսպանակավոր ճոճանակի) էներգիայի, զրո լինել չի կարող: Նույնիսկ բացարձակ զրո ջերմաստիճանում ատոմները կատարում են տատանումներ (որոնք կոչվում են **զրոյական տատանումներ**), որոնց էներգիան E_{min} է: Նշենք, որ E_{min} -ի համար մեր ստացած գնահատականը զրոյական տատանումների էներգիայի ճշգրիտ արտահայտությունից տարբերվում է միայն $1/2$ գործակցով:

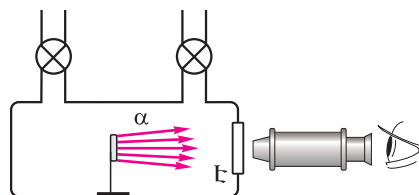
§56. ՄԻՋՈՒԿԻ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾԸ

Համաձայն ատոմի մոլորակային մոդելի՝ ատոմը բաղկացած է միջուկից և նրա շուրջը պտտվող էլեկտրոններից: Միջուկն ունի դրական Ze լիցք, որտեղ Z -ն ատոմի կարգաթիվն է, e -ն՝ տարրական լիցքը: Միջուկի չափերը շատ փոքր են՝ $10^{-15} \div 10^{-14}$ մ: Ամենավոքը՝ $Z = 1$ կարգաթիվ ունի ջրածնի ատոմը, որի միջուկն ունի e լիցք, և նրա զանգվածը մոտ 1836 անգամ մեծ է էլեկտրոնի զանգվածից:

Պրոտոնի հայտնագործումը: 1919 թ. Ռեզերֆորդը, ազոտի ատոմներն α -մասնիկներով ռմբակոծելիս հայտնագործել է նոր մասնիկ: Ռեզերֆորդն օգտագործել է օդով լցված խցիկ, որտեղ տեղադրված էր α -մասնիկների աղբյուր (նկ. 112): Խցիկի մի պատին հարմարեցված էր ցինկի սուլֆիդով պատված էկրան, որը լիցքավորված մասնիկների հարվածներից լուսարձակում էր:

Ռեզերֆորդն α -մասնիկների աղբյուրն էկրանից հեռացրել է այնքան, որ այն դադարել է լուսարձակելուց: Լուսարձակման դադարի պատճառն օդի առկայությունն էր խցիկում, որի հետևանքով α -մասնիկները կլանվում էին օդում՝ չհասնելով էկրանին: Այնուհետև նա օդի փոխարեն խցիկը լցրել է ազոտով, որից հետո էկրանը նորից լուսարձակել է: Քանի որ էլեկտրոնները չեն կարող ցինկի սուլֆիդում առաջացնել մանրադիտակում տեսանելի առկայծումներ, ապա Ռեզերֆորդը ենթադրել է, որ α -մասնիկները, ռմբակոծելով ազոտի ատոմները, նրանցից պոկում են այլ լիցքավորված մասնիկներ, որոնց հարվածներից էկրանը լուսարձակում է:

Ռեզերֆորդը փորձը կրկնել է՝ օգտագործելով լիցքավորված մասնիկներ զրանցող սարք՝ Վիլսոնի խցիկը: Խցիկում, ազոտից բացի, կային նաև ջրի և սպիրտի հազեցած գոլորշիներ: Երբ Վիլսոնի խցիկ էր մտնում α -մասնիկ, այն իր շարժման հետագծի երկայնքով իոնացնում էր ազոտի մոլեկուլները, որոնց վրա ջրի գոլորշին խտանում էր՝ առաջացնելով մառախուղատիպ հետք, որը նման է մթնոլորտի վերին շերտերում ռեակտիվ ինքնաթիռի բռնած հետքին:



Նկ. 112. Ռեզերֆորդի փորձի սխեման



Նկ. 113. Որոշ հետքեր երկատվում են:

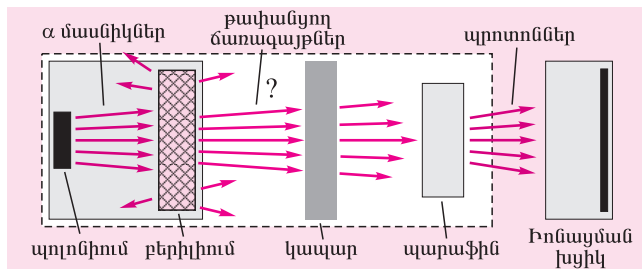
α -մասնիկների հետքերի լուսանկարները ցույց են տվել, որ կան հետքեր, որոնք երկատվում են (հետագիծը վերածվում է երկու գծի, նկ. 113): Դա նշանակում է, որ այդ կետում α -մասնիկի և ազոտի հանդիպումից առաջանում է նոր մասնիկ: Երբ Վիլսոնի խցիկը տեղադրել են մագնիսական դաշտում, նոր մասնիկը շեղվել է այնպես, ինչպես կշեղվեր e դրական լիցքով մասնիկը: Հետագծի կոորդյատը որոշելով e/m հարաբերությունը և գիտենալով e լիցքի արժեքը, կարելի էր որոշել անհայտ մասնիկի զանգվածը: Գնահատումները ցույց են տվել, որ այդ մասնիկն ունի ջրածնի միջուկի զանգվածին հավասար զանգված: Ջրածնի ատոմի հարաբերական ատոմային զանգվածը՝ $M_H \approx 1,0073$, բազմապատկելով զանգվածի ատոմային միավորով (1 գ.ա.մ.), որը, ինչպես գիտեք, $1,6606 \cdot 10^{-27}$ կգ է, կստանանք ջրածնի ատոմի զանգվածը՝ $m_H = M_H \cdot 1 \text{ գ.ա.մ.} \approx 1,6726 \cdot 10^{-27}$ կգ: Այսպիսով՝ անհայտ մասնիկը, որը Ռեզերֆորդն անվանել է **պրոտոն** (հունարեն «պրոտե»՝ սկզբնական բառից), ուներ $q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Կլ լիցք և $m_p \approx m_H \approx 1,6726 \cdot 10^{-27}$ կգ զանգված:

Տարբեր տարրերով կատարած փորձերով Ռեզերֆորդը պարզել է, որ դրանց ատոմների միջուկները α -մասնիկներով ռմբակոծելիս արձակում են պրոտոններ: Հետևաբար՝ կարելի է ենթադրել, որ բոլոր տարրերի ատոմների միջուկները պարունակում են պրոտոններ:

Սակայն ինչպե՞ս կարող են դրական լիցքավորված պրոտոնները կազմել կայուն միջուկ, չէ՞ որ պրոտոնները վանում են միմյանց էլեկտրաստատիկ փոխազդեցության ուժերով: Միջուկում 10^{-15} մ և ավելի փոքր հեռավորությամբ պրոտոնների միջև այդ ուժերը կարող են հասնել հարյուրավոր նյութոնների: Բացի այդ՝ կար նաև մեկ այլ դժվարություն: Իրոք, եթե միջուկը բաղկացած լիներ միայն պրոտոններից, ապա նրա Zm_p զանգվածը պետք է ատոմի զանգվածից տարբերվեր չնչին՝ էլեկտրոնների Zm_e զանգվածի չափով, այնինչ ատոմի զանգվածը (բացի ջրածնի ատոմից) միշտ մեծ է միջուկի Zm_p զանգվածից:

Սկզբնական շրջանում ֆիզիկոսները ենթադրել են, որ միջուկում պրոտոններից բացի կան նաև էլեկտրոններ. օրինակ՝ α -մասնիկը բաղկացած է 4 պրոտոնից և 2 էլեկտրոնից՝ $2e$ գումարային լիցքով: Սակայն միջուկի այս մոդելն արագորեն հերքվել է, քանի որ, ըստ քվանտային մեխանիկայի, էլեկտրոնը չի կարող լինել միջուկում՝ որպես նրա բաղկացուցիչ մաս:

Նեյտրոնի հայտնագործումը: α -մասնիկներով ռմբակոծելով ֆտորի, նատրիումի, ալյումինի և այլ տարրերի ատոմներ՝ ֆիզիկոսները հայտնաբերել են միջուկների այլ փոխակերպումներ, որոնք նույնպես ուղեկցվել են պրոտոններ-



Նկ. 114. Նեյտրոնների հայտնաբերման փորձի սխեման

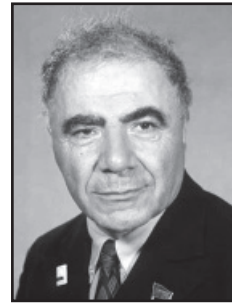
րի արձակմամբ: Սակայն հերթական փորձերից մեկի ժամանակ, երբ թիրախ էր ընտրվել բերիլիումը, ի հայտ են եկել մասնիկներ, որոնք, ի տարբերություն պրոտոնների, ներթափանցման մեծ ունակություն ունեին: Դրանք անարգել անցնում էին կապարի $10 \div 20$ սմ հաստությամբ շերտի միջով: Երբ այդ մասնիկների ճանապարհին տեղադրել են պարաֆինի շերտ, պարզվել է, որ նրանից դուրս են թռչում մեծ քանակությամբ պրոտոններ (նկ.114): Պրոտոնների էներգիաների չափումները ցույց են տվել, որ անհայտ մասնիկի զանգվածը փոքր-ինչ մեծ է պրոտոնի զանգվածից: Պարզվել է նաև, որ այդ մասնիկներն անմիջականորեն գազը չեն իոնացնում:

Այս փաստերի հիման վրա 1932 թ. Ռեզերֆորդի աշխատակից Ջեմս Զեդլիկը ենթադրել է, որ այդ մասնիկները նոր տարրական մասնիկներ են: Բանի որ դրանք գազը չեն իոնացնում և ներթափանցման մեծ ունակություն ունեն, ապա դրանք չեզոք մասնիկներ են ($q_n = 0$): Նոր մասնիկը կոչվել է **նեյտրոն** (լատիներեն «նեուտեր»՝ ոչ այս, ոչ այն, այսինքն՝ չեզոք բառից): Ճշգրիտ չափումների համաձայն՝ նեյտրոնի զանգվածը՝ $m_n = 1,00867$ գ.ա.մ. = $1,6749 \cdot 10^{-27}$ կգ:

Պարզվել է, որ ազատ, այսինքն՝ միջուկից դուրս, նեյտրոնն ունի կյանքի վերջավոր տևողություն, որը մոտ 15 րոպե է: Միջինում այդքան ժամանակ «ապրելուց» հետո նեյտրոնը վերածվում է պրոտոնի, էլեկտրոնի և հսկանեյտրինոյի (նեյտրինոյի և հսկանեյտրինոյի մասին կիմանաք 7-րդ գլխում):

Միջուկի կառուցվածքը: Նեյտրոնի հայտնագործումից անմիջապես հետո առաջարկվել է միջուկի կառուցվածքը: Ատոմի միջուկը կազմված է պրոտոններից և նեյտրոններից, որոնց անվանում են **նուկլոն** (լատիներեն «նուկլեոս»՝ կորիզ՝ միջուկ բառից, այսինքն՝ միջուկի մասնիկ): Պրոտոնների թիվը միջուկում հավասար է ատոմի կարգաթվին՝ Z -ին: **Միջուկի պրոտոն-նեյտրոնային մոդելի** հեղինակներն են հայ գիտնական Վիկտոր Համբարձումյանը, ռուս ֆիզիկոս Դմիտրի Իվանենկոն և գերմանացի ֆիզիկոս Վեռներ Հայզենբերգը: Ի դեպ, չեզոք մասնիկի գոյությունը միջուկում դեռևս 1920 թ. կանխատեսել էր Ռեզերֆորդը՝ բացատրելու համար միջուկի և ատոմի զանգվածների տարբերությունը:

Բանի որ պրոտոնի և նեյտրոնի զանգվածները գրեթե հավասար են՝ $m_n \approx m_p$, ապա միջուկի զանգվածը կարելի է ներկայացնել հետևյալ կերպ՝



Վիկտոր Համբարձումյան

1908-1996

Հայ խոշորագույն աստղաֆիզիկոս, ֆիզիկոս, մաթեմատիկոս, ակադեմիկոս, պրոֆեսոր, ԽՍՀՄ-ի պրոֆոն-նեյտրոնային մոդելի համահեղինակ: Աշխատանքները վերաբերում են տեսական աստղաֆիզիկայի, աստղերի և գալակտիկաների էվոլյուցիայի հարցերին: Բյուրականի աստղադիֆարանի հիմնադիր (1946 թ.):



Դմիտրի Իվանենկո

1904-1994

Ռուս նշանավոր ֆիզիկոս: Աշխատանքները վերաբերում են դաշտի քվանտային տեսությանը, միջուկի ֆիզիկային, գրավիտացիայի և դաշտի միասնական տեսություններին: Կանխատեսել է սինքրոտրոնային ճառագայթումը և մշակել դրա տեսությունը: Զբաղվել է նաև ֆիզիկայի պատմությամբ:

$$m_{\delta} \approx Zm_p + Nm_n \approx Am_p, \quad (6.1)$$

որտեղ A մեծությունը նեյտրոնների N թվի և պրոտոնների Z թվի գումարն է՝

$$A = Z + N \quad (6.2)$$

և կոչվում է միջուկի **զանգվածային թիվ**։ Չանգվածային թիվը հավասար է M հարաբերական ատոմային զանգվածին մոտ ամբողջ արժեքին։ Միջուկային ֆիզիկայում միջուկների զանգվածները ներկայացվում են զանգվածի ատոմային միավորով։ Ընդունված է քիմիական տարրը պատկերել իր X պայմանանշանով՝ ձախ կողմից վերևում նշելով տարրի A զանգվածային թիվը, իսկ ներքևում՝ Z կարգաթիվը՝ ${}_Z^AX$ ։

Իզոտոպներ։ Հայտնի է, որ մի շարք քիմիական տարրերի հարաբերական ատոմային զանգվածները տարբերվում են ամբողջ թվերից։ Օրինակ՝ քլորի հարաբերական ատոմային զանգվածը 35,5 է, իսկ բարիումինը՝ 137,34։ Պարզվել է, որ քիմիական նույն տարրի ատոմները կարող են ունենալ տարբեր զանգվածներ։ Օրինակ՝ քլորի ($Z = 17$) ատոմներն ունեն 35 և 37 հարաբերական զանգվածներ, ուրանի ատոմները ($Z = 92$)՝ 228-ից մինչև 239 հարաբերական զանգվածներ։ Այս ատոմներն ունեն նույն քիմիական հատկությունները, այսինքն՝ նույն էլեկտրոնային կառույցվածքը, միջուկի նույն լիցքը և, հետևաբար, հավասար քանակությամբ պրոտոններ։ **Նույն քիմիական հատկություններն ունեցող, բայց տարբեր զանգվածներով ատոմներն անվանում են իզոտոպներ** (հունարեն «իզոս»՝ նույն, և «տոպոս»՝ տեղ, բառերից. իզոտոպները Մենդելեևի պարբերական աղյուսակի նույն տեղը զբաղեցնող ատոմներն են)։

Նույն տարրի իզոտոպները միմյանցից տարբերվում են միջուկներում պարունակվող նեյտրոնների թվով։

Ջրածնի ատոմն ունի 3 իզոտոպ (1, 2 և 3 հարաբերական ատոմային զանգվածներով)։ 2 հարաբերական ատոմային զանգվածով իզոտոպը (${}_1^2\text{H}$) կոչվում է **դեյտերիում**։ Այն կայուն ատոմ է, բնության մեջ հանդիպում է փոքր քանակությամբ։ Ջրածնի 3 հարաբերական ատոմային զանգվածով իզոտոպը (${}_1^3\text{H}$) կոչվում է **տրիտիում**։ Այն կայուն չէ և տրոհվում է՝ արձակելով էլեկտրոններ։

Իզոպլան

Ատոմի միջուկի չափերը։ Բազմաթիվ փորձերից բխում է, որ միջուկներն ունեն գնդային ձև մոտ δ և, ուստի՝ միջուկի ծավալը՝ $V \sim R^3$, որտեղ R -ը միջուկի շառավիղն է։ Մյուս կողմից՝ որքան մեծ է միջուկի A զանգվածային թիվը, այնքան մեծ է նրա ծավալը, ուստի՝ $V \sim A$, և, հետևաբար՝ $R^3 \sim A$ ։ Մոտավոր հաշվարկների համաձայն՝ $R = r_0 A^{1/3}$, որտեղ $r_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-15}$ մ։



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչպե՞ս է հայրնագործվել պրոպոնը։
2. Ի՞նչ դժվարությունների է բերում միջուկում պրոպոնների առկայության փաստը։
3. Ինչպե՞ս է հայրնագործվել նեյտրոնը։
4. Ի՞նչ մասնիկներից է կազմված ադոնի միջուկը։
5. Որքա՞ն է N նեյտրոնից և Z պրոպոնից կազմված միջուկի լիցքը։
6. Ո՞ր մեծություն են անվանում միջուկի զանգվածային թիվ։
7. Ի՞նչ է իզոպոպը։
8. Ինչո՞վ են տարբերվում իրարից նույն տարրի իզոպոպները։
9. Ո՞ր մասնիկներն են անվանում մոլեկուլներ։
10. Ի՞նչ կապ կա միջուկում պրոպոնների և նեյտրոնների թվերի միջև։
11. Քանի՞ նեյտրոն կա ${}^{17}_8\text{O}$ իզոպոպում։
12. Ի՞նչ կապ կա միջուկի շառավիղի և միջուկի զանգվածային թվի միջև։

Ջրածնի իզոտոպները

Ջրածնի ^1H , ^2H և ^3H իզոտոպները միմյանցից էապես տարբերվում են զանգվածներով, իսկ դրանց ատոմները մյուս ատոմների համեմատությամբ զգալիորեն տարբերվում են ֆիզիկական և անգամ քիմիական հատկություններով:

^1H իզոտոպը, որը կազմում է բնության մեջ ջրածնի հիմնական մասը, անվանում են պրոտիում:

^2H իզոտոպը, որի պարունակությունը ջրածնի բնական խառնուրդում 0,015% է, ինչպես գիտեք, անվանում են դեյտերիում և նշանակում D տառով (օգտագործում են նաև «ծանր ջրածին» անվանումը): «Սովորական» ջրի մոլեկուլի բանաձևը H_2O -ն է, իսկ «ծանր ջրի» մոլեկուլը, որի բաղադրության մեջ մտնում է ^2H իզոտոպը, D_2O -ն է: Ծանր ջրի խտությունը 1108 կգ/մ³ է, այն սառչում է 3,82°C-ում, իսկ եռում՝ 101,42°C ջերմաստիճանում, այսինքն՝ զգալիորեն տարբերվում է սովորական ջրից:

Ջրածնի ^3H իզոտոպ տրիտիումի նշանը T -ն է: Այն անվանում են նաև նաև «գերծանր ջրածին»: «Գերծանր ջրի» մոլեկուլի բանաձևը T_2O -ն է: Ի տարբերություն սովորական ջրածնի և դեյտերիումի՝ տրիտիումը ճառագայթաակտիվ է: Այն օգտագործվում է ջերմամիջուկային սարքերում, մասնավորապես՝ ջրածնային բոմբում:

§57. ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՈՒԺԵՐ: ԱՏՈՄԻ ՄԻՋՈՒԿԻ ԿԱՊԻ ԷՆԵՐԳԻԱՆ

Միջուկային ուժեր: Ատոմի միջուկը կազմված է պրոտոններից և նեյտրոններից՝ նուկլոններից: Պրոտոնները կուլոնյան ուժերով վանվում են միմյանցից, մինչդեռ ատոմի միջուկները շատ կայուն են, որի վկայությունն է այն փաստը, որ մեզ շրջապատող իրերի հետ երկար ժամանակ ոչինչ չի պատահում: Այստեղից հետևում է, որ նուկլոնները պետք է փոխազդեն նաև ոչ էլեկտրական բնույթի ձգողության ուժերով, որոնք նուկլոնները պահում են միջուկում: Այդ ուժերն անվանել են **միջուկային ուժեր**:

Միջուկային ուժերն ունեն հետևյալ հատկությունները:

1. Լիքքային անկախություն: Սա նշանակում է, որ երկու պրոտոնի միջուկային փոխազդեցության ուժը (f_{pp}) հավասար է երկու նեյտրոնի (f_{nn}) կամ պրոտոնի ու նեյտրոնի փոխազդեցության (f_{np}) ուժին՝

$$f_{pp} = f_{nn} = f_{np}: \quad (6.3)$$

2. Կարճազդեցություն: Միջուկային ուժերը գործում են շատ փոքր հեռավորություններում՝ $r \leq 2 \cdot 10^{-15}$ մ: Այդպիսի չափերով տիրություն երկու պրոտոնների միջուկային փոխազդեցության ուժը մոտ 100 անգամ գերազանցում է կուլոնյան փոխազդեցության ուժը: Սակայն 10^{-14} մ-ից ավելի մեծ հեռավորություններում միջուկային փոխազդեցությունը գործնականորեն բացակայում է:

3. Հագեցնալու հատկություն: Սա նշանակում է, որ միջուկում յուրաքանչյուր նուկլոն գործնականում փոխազդում է միայն իր անմիջական շրջապատի նուկլոնների հետ:

Միջուկային փոխազդեցության մոդել է առաջարկել ճապոնացի նշանավոր ֆիզիկոս Հիդեկի Յուկավան 1934 թ.: Ըստ այդ մոդելի՝ նուկլոնները միմյանց հետ



Հոգեկի Յուկավա

1907-1981

Ճապոնացի նշանավոր ֆիզիկոս: Աշխատանքները վերաբերում են քվանտային մեխանիկային, միջուկային ֆիզիկային, մեզոնային ֆիզիկային և տարրական մասնիկների տեսությանը: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1949):

կապվում են (փոխազդում են) նոր տիպի մասնիկների միջոցով, որոնք կոչվում են **պի-մեզոնոններ**: Մեզոնը տարրական մասնիկ է, ունի էլեկտրոնի զանգվածից մի քանի հարյուր անգամ մեծ զանգված (պի-մեզոնը փորձնականորեն հայտնագործվել է 1947 թ.): Պատկերավոր լինելու համար ասենք, որ մուկլոնները և նրանց փոխազդեցությունն ապահովող մեզոնը կարելի է համեմատել թենիսիստների և թենիսի գնդակի հետ: Թենիսիստները միմյանց հետ խաղում են («փոխազդում են»)՝ միմյանց փոխանցելով թենիսի գնդակը: Նույն կերպ մուկլոնները «միմյանց մեզոններ են փոխանցում»: Յուկավան հայտնաբերել է նաև միջուկային ուժերի կախումը մուկլոնների միջև հեռավորությունից. այդ ուժերը փոքր հեռավորություններում զգալի են, իսկ մեծ հեռավորություններում՝ աննշան:

Ատոմի միջուկի կապի էներգիան: Քանի որ մուկլոններն իրար մոտ պահող միջուկային ուժերը մոտ 100 անգամ մեծ են կուլոնյան ուժերից, ապա միջուկից

նեյտրոն կամ պրոտոն պոկելու համար անհրաժեշտ է որոշակի էներգիա ծախսել: Այն նվազագույն էներգիան, որն անհրաժեշտ է միջուկն առանձին (իրար հետ չփոխազդող) պրոտոնների և նեյտրոնների բաժանելու համար, կոչվում է **միջուկի կապի էներգիա**:

Միջուկի կապի էներգիան տեսականորեն որոշել հնարավոր չէ, քանի որ դեռևս կառուցված չէ միջուկային ուժերի ավարտուն տեսությունը: Սակայն այն կարելի է հաշվարկել՝ օգտագործելով հանգստի էներգիայի և զանգվածի կապն արտահայտող Այնշտայնի բանաձևը՝

$$E_0 = mc^2: \quad (6.4)$$

Ատոմային միջուկների զանգվածների ճշգրիտ չափումները ցույց են տալիս, որ յուրաքանչյուր տարրի միջուկի զանգվածը միշտ փոքր է այդ միջուկի պրոտոնների և նեյտրոնների զանգվածների գումարից՝

$$m_{\delta} < Zm_p + Nm_n: \quad (6.5)$$

Նշանակում է՝ միջուկի հանգստի էներգիան փոքր է նրա բաղադրամասերի հանգստի էներգիաների գումարից՝

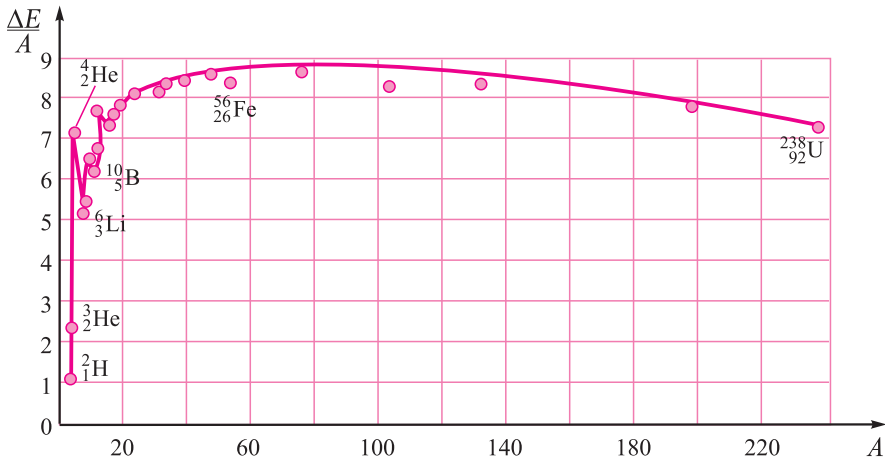
$$m_{\delta}c^2 < (Zm_p + Nm_n)c^2, \quad (6.6)$$

ուստի՝ միջուկն առանձին մուկլոնների բաժանելու համար նրան պետք է հաղորդել որոշակի էներգիա՝

$$\Delta E = (Zm_p + Nm_n - m_{\delta})c^2 = \Delta mc^2: \quad (6.7)$$

Այս բանաձևում առկա

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_{\delta} \quad (6.8)$$



Նկ. 115. Կապի տեսակարար էներգիայի կախումը միջուկի զանգվածային թվից

մեծությունը կոչվում է միջուկի **զանգվածի պակասորդ**: Օրինակ՝ հելիումի ատոմի համար $\Delta m \approx 0,03$ գ.ա.մ. (տե՛ս 198-րդ էջի 2-րդ խնդիրը):

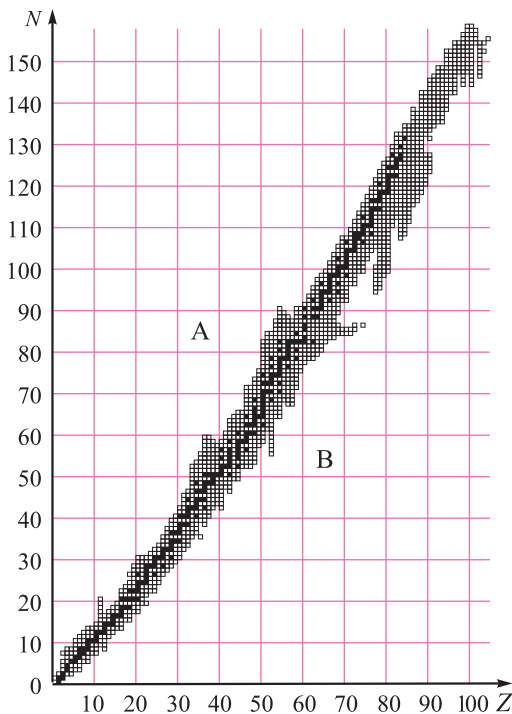
Հարց է առաջանում՝ իսկ ի՞նչ է լինում այդ լրացուցիչ էներգիան, երբ նուկլոնները միանում են՝ կազմելով միջուկ: Նուկլոնները միջուկային ուժերի ազդեցությամբ արագ մոտենում են միմյանց՝ արծակելով γ -քվանտներ, որոնք էլ տանում են այդ «հավելուրդային» էներգիան, որը, համաձայն էներգիայի պահպանման օրենքի, հավասար է ΔE կապի էներգիային:

Նուկլոնների թվի մեծացմանը զուգընթաց միջուկի կապի էներգիան մեծանում է: Միջուկի կայունության տեսակետից կարևոր է իմանալ մեկ նուկլոնին բաժին ընկնող կապի էներգիան՝ $\Delta E / A$ մեծությունը, որն անվանում են **կապի տեսակարար էներգիա**: Դա այն էներգիան է, որն անհրաժեշտ է միջուկից մեկ նուկլոն հեռացնելու համար: 115-րդ նկարում պատկերված է կապի տեսակարար էներգիայի կախումը զանգվածային թվից: Չանգվածային թվի մեծացմանը զուգընթաց այն արագ աճում է՝ հասնելով մոտավորապես 8,6 ՄէՎ առավելագույն արժեքի, այնուհետև դանդաղ նվազում է: Ամենամեծ կապի տեսակարար էներգիաներ ունեն 50-ից 60 զանգվածային թվով միջուկները, որոնք ամենակայունն են:

Խորացված

Միջուկների կայունությունը: Բնության մեջ հանդիպող միջուկների մեծ մասը կայուն է: Կայուն միջուկում նուկլոնները զբաղեցնում են հնարավոր նվազագույն էներգիայով վիճակներ: Այդպիսի միջուկները չեն կարող ինքնաբերաբար նուկլոններ արծակել կամ տրոհվել: Կայուն միջուկից նուկլոն կամ նուկլոնների խումբ առանձնացնելու համար պահանջվում է որոշակի էներգիա:

Չանգվածային A թվի տրված արժեքի դեպքում առավել կայուն են այնպիսի Z կարգաթվով միջուկները, որոնց լրիվ էներգիան նվազագույնն է: Որոշ տեսական հաշվարկների համաձայն՝ թեթև ($A \leq 50$) կայուն միջուկներում $Z \approx A/2$: Այս արդյունքը հաստատում է փորձից հայտնի այն պնդումը, որ առավել կայուն են հավասար թվով պրոտոններ և նեյտրոններ պարունակող միջուկները:



Նկ. 116. Կայուն միջուկներում նեյտրոնների և պրոտոնների թվերը. սև բառակուսիները համապատասխանում են կայուն, իսկ մնացածները՝ բնական և արհեստական ճառագայթասկսիվ տարրերին:

նեյտրոնների ավելցուկ, ուստի տրոհվում են՝ արծակելով էլեկտրոններ, իսկ մեծ N -երի դեպքում՝ անգամ նեյտրոններ: Կայունության հովտից ներքև (B) տիրույթի միջուկներն ունեն պրոտոնների ավելցուկ, ուստի տրոհվում են՝ արծակելով պոզիտրոններ (տե՛ս 7-րդ գլուխ), իսկ մեծ Z -երի դեպքում՝ անգամ պրոտոններ:

Ջանգվածային թվի մեծացմանը զուգընթաց ծանր տարրերի միջուկների կապի էներգիայի նվազումը և դրանց անկայուն դառնալը $A=210$ արժեքի մոտ հետևանք են մի շարք գործոնների, մասնավորապես նուկլոնների միջև գործող միջուկային ուժերի կարճազորու բնույթի և պրոտոնների միջև գործող կուլոնյան հեռազորու վանողության ուժերի:

Կարճազորության հետևանքով միջուկային ձգողության ուժերով փոխազդում են միայն տվյալ նուկլոնը և նրա անմիջական հարևանները: Մինչդեռ տվյալ պրոտոնը կուլոնյան հեռազորու վանողության ուժերով փոխազդում է միջուկի բոլոր պրոտոնների հետ: Կարգաթվի մեծացմանը զուգընթաց միջուկում վանողության ուժերը մեծանում են և կարող են գերազանցել միջուկային ձգողության ուժերը: Ուրեմն՝ պետք է գոյություն ունենա սահման, որից հետո նոր պրոտոն ավելացնելիս (Z -ը մեծացնելիս) այլևս չի կարող առաջանալ կայուն միջուկ: Եվ իրոք, գոյություն չունեն 83 և ավելի մեծ կարգաթվով կայուն միջուկներ:

116-րդ նկարում պատկերված են բոլոր կայուն միջուկների նեյտրոնների և պրոտոնների թվերը: Հոծ գիծը համապատասխանում է հավասար թվով նեյտրոններ և պրոտոններ ունեցող միջուկներին: Գրաֆիկի վրա փոքրիկ վանդակների թիվը, որը մոտավորապես 1600 է, համապատասխանում է բոլոր հայտնի իզոտոպներին, որոնցից 330-ը հանդիպում է Երկրի վրա, իսկ մնացածները ստեղծվել են արհեստական ճանապարհով:

Գրաֆիկից հետևում է, որ մինչև $Z \approx 20$ կարգաթվով կայուն միջուկներն ունեն հավասար թվով նեյտրոններ և պրոտոններ՝ $Z = N$: $Z > 20$ կարգաթվով կայուն միջուկներում N/Z հարաբերությունն աճում է: Կայուն միջուկները զբաղեցնում են $N-Z$ արժեքներով նեղ տիրույթը, որն անվանում են **կայունության հովիտ**: Նրանից վեր (A) տիրույթի միջուկներն ունեն

Միջուկային ուժերի կարճազդեցության, կուլոնյան ուժերի հեռազդեցության և այլ սահմանափակումների հետևանքով կամայական չափով մեծ, կայուն միջուկներ չեն կարող գոյություն ունենալ: Իրոք, ինչպես արդեն նշվեց, $A > 210$ զանգվածային թվով բոլոր միջուկները, ինչպես նաև ավելի փոքր զանգվածային թվով շատ միջուկներ անկայուն են: Այդ անկայունությունը կարող է պայմանավորված լինել վերը նշված տարրեր պատճառներով:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր մասնիկներն են փոխազդում միջուկային ուժերով: 2. Ինչո՞ւ միջուկի պրոտոնների էլեկտրական վանողության ուժերի ազդեցությամբ միջուկը չի փրոփվում: 3. Ի՞նչ հեռավորություններում են գործում միջուկային ուժերը: 4. Ինչո՞վ են տարբերվում իրարից միջուկային և էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության ուժերը: 5. Սահմանե՞ք միջուկի կապի էներգիան: 6. Ի՞նչն են անվանում զանգվածի պակասորդ: 7. Սահմանե՞ք միջուկի կապի տեսակարար էներգիան: 8. Ի՞նչ կապ կա միջուկի կայունության և կապի տեսակարար էներգիայի միջև: 9. Գրե՞ք Z պրոտոնից և N նեյտրոնից կազմված M , զանգվածով միջուկի կապի տեսակարար էներգիայի արտահայտությունը: 10. Ինչո՞վ են բնութագրվում կայուն թեթև միջուկները: 11. Ի՞նչ է կայունության հովիտը: 12. Ինչպիսի՞ փրոփումներ են բնորոշ 116-րդ նկարում A և B տիրույթներին: 13. Ի՞նչ գործոններով է պայմանավորված մեծ զանգվածային թվով միջուկների անկայունությունը:

117-րդ տարրի հայտնագործումը

2010 թվականին Դուբնայի (ՌԴ) միջուկային հետազոտությունների միացյալ ինստիտուտի ֆիզիկոսներն առաջինը սինթեզեցին Մենդելևի պարբերական աղյուսակի 117-րդ տարրը: Մինչ այդ՝ գիտնականների խումբը Յուրի Զովիանինսկիի ղեկավարությամբ սինթեզել էր $Z = 112 \div 116$ և 118 կարգաթվերով տարրերը: $Z = 117$ կարգաթվով տարրի երկու իզոտոպներն ստացվել են բերկլիում-249 իզոտոպի միջուկներն կայցիում-48 իզոտոպի իոններով ռմբակոծելիս:

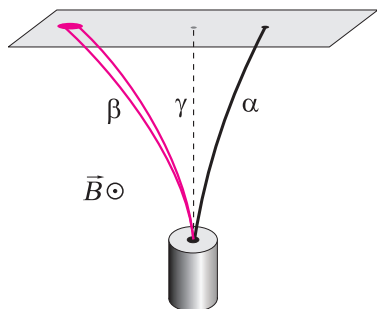
Գիտափորձի ընթացքում խումբը համագործակցել է ԱՄՆ-ի գիտնականների հետ, որոնք էլ տրամադրել են բերկլիումի թիրախը՝ ընդամենը 22 միլիգրամ: Նոր՝ $Z = 117$ կարգաթվով տարրն արձանագրվել է 70 օր տևած երկու գիտափորձում: Արհեստականորեն ստացված անդրուրանային (Մենդելևի պարբերական աղյուսակում ուրանից հետո եկող) տարրերից շատերի նման, նոր տարրը չափազանց անկայուն է. նրա կիսատրոհման պարբերությունը մոտավորապես 0,08 վայրկյան է: Առայժմ ֆիզիկոսներին հաջողվել է ստանալ 117-րդ տարրի ընդամենը... 6 ատոմ: Իր պայմանական անվանումը նոր տարրը կստանա, երբ նրա գոյությունը հաստատվի աշխարհի այլ լաբորատորիաներում:

Ստացված տարրի առաջին հատկությունները հույս են ներշնչում, որ Մենդելևի պարբերական աղյուսակում ավելի ծանր տարրերի շրջապատում «կայունության կղզյակի» գոյությունը, այնուամենայնիվ, կհաստատվի:

§ 58. ՃԱՌԱԳԱՅԹԱԱԿՏԻՎՈՒԹՅՈՒՆ

Ճառագայթաակտիվության հայտնագործումը: Միջուկի բարդ կառուցվածքն ապացույցող երևույթներից է ճառագայթաակտիվությունը, որը 1896 թվականին հայտնագործել է ֆրանսիացի ֆիզիկոս Անրի Բեկերելը: Բեկերելի փորձերից հետևում էր, որ ուրանի աղերն ինքնակամ ճառագայթում են: Պարզվել է, որ ինքնակամ ճառագայթում են ոչ միայն ուրանի աղերը, այլև ուրան պարունակող

քիմիական բոլոր միացությունները: Հետագայում Կյուրի ամուսինները հայտնաբերել են ճառագայթող այլ նյութեր՝ թորիում, պոլոնիում, ռադիում և այլն: **Ինքնակամ ճառագայթման երևույթն անվանվել է ճառագայթաակտիվություն:** $Z = 83$ և ավելի մեծ կարգաթվով տարրերի միջուկները ճառագայթաակտիվ են:



Նկ. 117. α -, β - և γ -
ճառագայթումների բաժանումը
մագնիսական դաշտում

Ճառագայթաակտիվության երևույթն ուղեկցվում է էներգիայի անջատմամբ: 1 գ ռադիումը 1 ժամում արձակում է մոտ 600 Ջ էներգիա: Այս փաստն առաջին անգամ 1903 թ. նկատել են Պիեռ Կյուրին և Ալբերտ Լաբորդը. ռադիումի աղի կտորը միշտ ավելի բարձր ջերմաստիճան ունի, քան շրջապատի մարմինները:

Ծանր միջուկների փոխակերպումների հետևանքով ի հայտ է գալիս երեք տիպի ճառագայթում՝ α -ճառագայթում, β -ճառագայթում և γ -ճառագայթում, որոնք կարելի է իրարից բաժանել արտաքին մագնիսական կամ էլեկտրական դաշտի օգնությամբ (նկ. 117):

Ալֆա-ճառագայթում: Որոշ ծանր տարրերի միջուկներ արձակում են հելիումի միջուկ՝ կազմված 2 պրոտոնից և 2 նեյտրոնից: Պատմականորեն նման ռեակցիան կոչվել է α -տրոհում, իսկ ճառագայթումը՝ α -ճառագայթում: Նյութում α -մասնիկը շատ փոքր ճանապարհ է անցնում՝ իր էներգիան ծախսելով նյութի ատոմների իոնայման համար: Օրինակ՝ 4 ՄէՎ էներգիայով α -մասնիկն օդում անցնում է մոտ 2 սմ, իսկ ջրում՝ մի քանի հարյուրերորդական մմ: α -մասնիկի ինքնությունը պարզել է Ռեզերֆորդը: Ուսումնասիրելով մագնիսական դաշտում α -մասնիկի շեղումը և առանձին փորձում չափելով դրա լիցքը՝ նա ցույց է տվել, որ α -մասնիկը հելիումի լրիվ իոնացված ատոմ է, այսինքն՝ հելիումի միջուկ:

Երբ միջուկն արձակում է α -մասնիկ, նրա կարգաթիվը նվազում է 2-ով, իսկ զանգվածային թիվը՝ 4-ով: α -տրոհման օրինակ է ռադիում-226-ի տրոհումը, որն ուսումնասիրել են Կյուրի ամուսինները՝



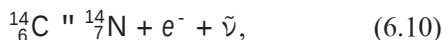
α -տրոհման պատճառն այն է, որ ծանր միջուկներն ունեն ավելի մեծ չափեր, քան թեթևները: Քանի որ միջուկային ուժերը կարճազորու են, ապա մեծ միջուկների սահմանին (10^{-14} մ) դրանք շատ փոքր են, այնինչ պրոտոնների կոլոնյան փոխազդեցության հեռազորու ուժերը գործում են գրեթե առանց փոփոխության: Դրանք մեծացնում են միջուկի էներգիան, և այն դառնում է անկայուն: Միջուկի անկայունության է հանգեցնում նաև նեյտրոնների և պրոտոնների թվի տարբերության մեծանալը, քանի որ նեյտրոնի հանգստի զանգվածն ավելի մեծ է, քան պրոտոնինը: Միջուկից դուրս թռչելուց հետո α -մասնիկն արագանում է միջուկի էլեկտրաստատիկ դաշտում՝ ձեռք բերելով $4 \div 9$ ՄէՎ կինետիկ էներգիա: Եթե տրոհվելուց հետո փոխակերպված միջուկը դեռևս ճառագայթաակտիվ է, ապա այն շարունակում է տրոհվել մինչև կայուն միջուկի փոխակերպվելը:

Բետա-ճառագայթում: Միջուկի փոխակերպումն այլ միջուկի կարող է ուղեկցվել էլեկտրոնի արձակմամբ: Պատմականորեն այդ ռեակցիան կոչվել է β -տրոհում, իսկ ճառագայթումը՝ β -ճառագայթում: β -մասնիկի ինքնությունը պարզել է Բեկերելը: Ուսումնասիրելով մագնիսական դաշտում β -մասնիկի շեղումը՝ նա ցույց է տվել, որ այն մեծ արագությամբ շարժվող էլեկտրոն է:

β -տրոհումը հանելուկային էր թվում երկու պատճառով: Նախ՝ միջուկից դուրս էր թռչում էլեկտրոն, որն այնտեղ ի սկզբանե չկար: Երկրորդ՝ փորձը ցույց էր տալիս, որ միևնույն միջուկից դուրս են թռչում տարբեր էներգիաներով էլեկտրոններ: Դրանց էներգիաները բաշխված էին անընդհատ՝ առավելագույն էներգիայից (այն է՝ սկզբնական և վերջնական միջուկների զանգվածների տարբերությունը՝ բազմապատկած c^2 -ով) մինչև էլեկտրոնի հանգստի էներգիան: Սա նշանակում էր, որ β -տրոհման պրոցեսում խախտվում է էներգիայի պահպանման օրենքը: Շվեյցարիացի հռչակավոր ֆիզիկոս Վոլֆգանգ Պաուլին ենթադրել է, որ β -տրոհման պրոցեսում, բացի պրոտոնից և էլեկտրոնից, ծնվում է նաև մի նոր մասնիկ՝ **նեյտրինո**, որն իր հետ տանում է «կորած» էներգիան: Հետագայում նեյտրինոյի գոյությունը հաստատվել է տարբեր տեսական փաստարկներով, ինչպես նաև փորձնականորեն:

Այսպիսով՝ որոշակի պայմաններում միջուկի ներսում նեյտրոնը տրոհվում է պրոտոնի, էլեկտրոնի և հականեյտրինոյի: Վերջիններս դուրս են թռչում միջուկից: Այս տրոհումը տեղի է ունենում մեծ թվով նեյտրոններ պարունակող միջուկներում: Հականեյտրինոն չեզոք տարրական մասնիկ է, ուստի ունի ներթափանցման մեծ ունակություն:

Բնության մեջ β -ճառագայթման հաճախ հանդիպող ռեակցիա է ածխածնի իզոտոպի փոխակերպումն ազոտի $^{14}_7\text{N}$ իզոտոպի՝



որտեղ $\bar{\nu}$ -ն հականեյտրինոն է:

Ծանր ճառագայթաակտիվ տարրերի միջուկները տրոհվում են՝ արձակելով α -կամ β -մասնիկ՝ հերթագայելով միմյանց: Եթե α -տրոհման հետևանքով զանգվածային թիվը փոքրանում է 4-ով, կարգաթիվը՝ 2-ով, ապա β -տրոհումը կարգաթիվը մեծացնում է 1-ով, իսկ զանգվածային թիվը չի փոխում: Այդ փոխարկումները



Պիեռ Կյուրի

1859 - 1906

Ֆրանսիացի նշանավոր ֆիզիկոս: Աշխատանքները վերաբերում են բյուրեղների ֆիզիկային, մագնիսականությանը: Ճառագայթաակտիվության տեսության հիմնադիրներից է: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1903):



Մարի Կյուրի-Սկլադովսկա

1867 - 1934

Լեհ և ֆրանսիացի նշանավոր ֆիզիկոս և քիմիկոս: Աշխատանքները վերաբերում են ճառագայթաակտիվությանը և նրա կիրառմանը: Պ. Կյուրիի հետ հայտնագործել է պոլոնիում և ռադիում քիմիական տարրերը: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի ֆիզիկայի (1903) և քիմիայի (1911) բնագավառներում:

շարունակվում են այնքան, մինչև ստացվում է կապարի (Pb) կամ բիսմութի (Bi) որևէ կայուն իզոտոպ: Այդպիսի շարքերն անվանում են **ճառագայթաակտիվ ընտանիքներ**: Նրանցից մեկն սկսվում է $^{238}_{92}\text{U}$ -ից և ավարտվում կապարի $^{206}_{82}\text{Pb}$ իզոտոպով:



Վալֆգանգ Պաուլի

1900-1958

Շվեյցարացի հռչակավոր ֆիզիկոս: Աշխատանքները վերաբերում են քվանտային մեխանիկային, հարաբերականության տեսությանը, պինդ մարմնի ֆիզիկային, միջուկային ֆիզիկային և Կարրական մասնիկների ֆիզիկային: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1945):

միջավայրի տեսակից: Օրինակ՝ 5U^{238} էներգիայով γ -քվանտների հոսքը 10 անգամ փոքրանում է 36 սմ հաստությամբ բետոնի շերտով կամ 4,7 սմ հաստությամբ կապարի շերտով անցնելիս:

γ -ճառագայթման հետևանքով չի փոխվում ո՛չ միջուկի լիցքը և ո՛չ էլ զանգվածը. այն գրգռված վիճակից անցնում է հիմնական վիճակի՝

$$^A_Z\text{X}^* \rightarrow ^A_Z\text{X} + \gamma: \quad (6.11)$$

Տարրի նշանի վերևում դրված աստղանիշը (*) ցույց է տալիս, որ միջուկը գրգռված վիճակում է:

Կան նաև այնպիսի ճառագայթաակտիվ տրոհումներ, որոնց ընթացքում միաժամանակ արձակվում են β -մասնիկներ (էլեկտրոններ) և γ -քվանտներ: Այդպիսի տրոհման օրինակ է ճառագայթաակտիվ նատրիումի տրոհումը՝



Ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքը: Միջուկների փոխակերպումները տեղի են ունենում միմյանցից անկախ, սակայն երբեք չի կարելի կռահել, թե երբ կարողվի այս կամ այն միջուկը: Այն ժամանակամիջոցը, որի ընթացքում տրոհվում է ճառագայթաակտիվ միջուկների կեսը, կոչվում է կիսատրոհման պարբերություն:

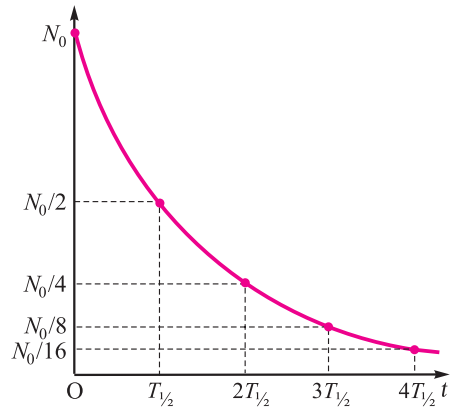
Տրոհման հետևանքով ճառագայթաակտիվ միջուկների քանակը նյութում անընդհատ նվազում է, որի պատճառով ընկնում է նյութի **ակտիվությունը**՝ մեկ վայրկյանում տրոհումների թիվը: Ռադոնի հետ գործ ունեցող ֆիզիկոսները պարզել են, որ, օրինակ, ամեն րոպեից հետո նրա ճառագայթման ուժգնությունը նվազում է 2 անգամ: Անհամեմատ դանդաղ է նվազում թորիումի, ռադիումի և հատկապես ուրանի ակտիվությունը:

Կիսատրոհման պարբերությունը նշանակում են $T_{1/2}$: Ճառագայթաակտիվ նյութի ակտիվությունը $T_{1/2}$ ժամանակ անց փոքրանում է երկու անգամ:

Այժմ մաթեմատիկորեն ձևակերպենք ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքը: Ժամանակի սկզբնական ($t = 0$) պահին ճառագայթաակտիվ միջուկների թիվը նշանակենք N_0 -ով: $T_{1/2}$ ժամանակ անց դրանց թիվը կդառնա $N_0/2$: $2T_{1/2}$ ժամանակամիջոցից հետո ճառագայթաակտիվ միջուկների թիվը կդառնա $N_0/4 = N_0/2^2$, $3T_{1/2}$ -ից հետո՝ $N_0/2^3$ և այլն: $t = nT_{1/2}$ ժամանակամիջոցում տրոհված միջուկների թիվը՝

$$N = \frac{N_0}{2^n} = N_0 \cdot 2^{-n} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}, \quad (6.13)$$

որը ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքի մաթեմատիկական արտահայտությունն է: 118-րդ նկարում գրաֆիկորեն պատկերված է ճառագայթաակտիվ տրոհման պրոցեսում տրոհված միջուկների թվի կախումը ժամանակից:



Նկ. 118. Ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքի գրաֆիկը

Կիսատրոհման պարբերությունը ճառագայթաակտիվ տրոհման արագությունը բնութագրող հիմնական մեծությունն է: Չանագան նյութերի կիսատրոհման պարբերությունները տարբեր են: Ռադոնի կիսատրոհման պարբերությունը՝ $T_{1/2} = 1$ րոպե, ռադիումինը՝ 1600 տարի, իսկ ուրանինը՝ 4,5 միլիարդ տարի: Դա է պատճառը, որ ռադոնը շատ արագ է «հանգչում», իսկ ուրանը «մշտապես» ճառագայթաակտիվ վիճակում է:

Պարզ է, որ որքան փոքր է կիսատրոհման պարբերությունը, այնքան շատ միջուկներ են տրոհվում միավոր ժամանակում, և այնքան նյութը ճառագայթաակտիվ է: Այդ պատճառով էլ որպես մեծ ակտիվություն ունեցող, բայց և շուտ «չհանգչող» ճառագայթաակտիվ աղբյուր Ռեզերֆորդն օգտագործում էր ռադիումը:

Ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքի (6.13) բանաձևից կարելի է ստանալ արտահայտություն ակտիվության համար՝

$$a = N\lambda = \ln 2 \cdot \frac{N}{T_{1/2}} = N \cdot \frac{0,693}{T_{1/2}}, \quad (6.14)$$

որտեղ $\lambda = 0,693/T_{1/2}$ մեծությունն անվանում են **տրոհման հաստատուն**: (6.14) բանաձևի համաձայն՝ ճառագայթաակտիվ նյութի ակտիվությունը համեմատական է տվյալ պահին միջուկների թվին և հակադարձ համեմատական՝ կիսատրոհման պարբերությանը:

Միավորների միջազգային համակարգում (ՄՀ) ակտիվությունը չափվում է բեկերելով (Բկ): 1 Բկ-ն այն ակտիվությունն է, որին համապատասխանում է 1 վայրկյանում 1 տրոհում: Գործնականում ակտիվության հաճախ օգտագործվող միավորն է կյուրին (1 Կի).

$$1 \text{ Կի} = 3,7 \cdot 10^{10} \frac{\text{տրոհում}}{\text{վ}} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Բկ}:$$



Ֆրեդերիկ ժոլիո-Կյուրի

1900-1958

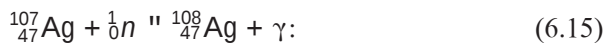
Ֆրանսիացի նշանավոր ֆիզիկոս: Աշխարհաքննորդ վերաբերում են միջուկային ֆիզիկային, միջուկային քիմիային և միջուկային տեխնիկային: Իռեն ժոլիո-Կյուրիի հետ հայտնագործել է արհեստական ճառագայթակրիվության երևույթը: Արժանացել է Սոբելյան մրցանակի քիմիայի բնագավառում (1935):

Արհեստական ճառագայթակտիվություն: Այն նյութերը, որոնք առանց արտաքին գործոնների ազդեցության արձակում են α -, β - կամ γ -մասնիկներ, կոչվում են բնական ճառագայթակտիվ նյութեր: Այդպիսիք են ռադոնը, թորիումը, ռադիումը, ուրանը և այլն:

1934 թ. Իռեն և Ֆրեդերիկ ժոլիո-Կյուրիները հայտնագործել են արհեստական ճառագայթակտիվության երևույթը, որի էությունը հետևյալն է. որոշ ոչ ճառագայթակտիվ նյութեր տարբեր մասնիկներով (նեյտրոններ, α -մասնիկներ և այլն) ռմբահարելու հետևանքով վերածվում են մոր՝ ճառագայթակտիվ նյութերի:

Արհեստական ճառագայթակտիվ նյութեր կարող են առաջանալ նաև տարբեր միջուկային ռեակցիաներում: Փորձերից մեկում արծաթի թիթեղ մի քանի բուլբ ռմբակոծել են դանդաղ նեյտրոններով և մոտեցրել Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչին: Պարզվել է, որ թիթեղն արձակում է էլեկտրոններ, այսինքն՝ այն դարձել է β -ճառագայթակտիվ: Այս փորձը բացատրելու համար նկատենք, որ արծաթի միջուկները հեշտորեն

կլանում են դանդաղ նեյտրոնները (β) և առաջացնում $^{108}_{47}\text{Ag}$ ճառագայթակտիվ իզոտոպ, ինչպես նաև արձակվում են γ -քվանտներ.



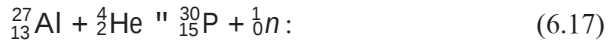
$^{108}_{47}\text{Ag}$ իզոտոպը տրոհվում է՝ արձակելով էլեկտրոն և փոխակերպվում է կադմիումի կայուն իզոտոպի՝



Արհեստական ճառագայթակտիվությունը տարածված երևույթ է: Ներկայումս ստացվել են մի քանի արհեստական-ճառագայթակտիվ իզոտոպներ Մենդելեևի պարբերական աղյուսակի բոլոր տարրերի համար:

Ինչպես և բնական ճառագայթակտիվ նյութերը, արհեստական ճառագայթակտիվ նյութերն արձակում են α -, β - և γ -մասնիկներ: Սակայն նրանց մեջ հնարավոր են պոզիտրոնի արձակմամբ տրոհումներ՝ այսպես կոչված պոզիտրոնային կամ β^+ -տրոհումներ:

Որպես օրինակ դիտարկենք Ժուլիո-Կյուրիի հայտնաբերած ռեակցիան, երբ $^{27}_{13}\text{Al}$ իզոտոպն α -մասնիկներով ռմբակոծելիս առաջանում է ֆոսֆորի ճառագայթաակտիվ իզոտոպ և արձակվում են նեյտրոններ՝



Ֆոսֆորի $^{30}_{15}\text{P}$ ճառագայթաակտիվ իզոտոպը տրոհվում է՝ արձակելով պոզիտրոն (e^+)՝



և առաջանում է $^{30}_{14}\text{Si}$ -ը՝ սիլիցիումի կայուն իզոտոպը:

Ինչպես արդեն նշել ենք, էլեկտրոնային β -տրոհման նկատմամբ անկայուն են այն իզոտոպները, որոնց միջուկներում նեյտրոնների թիվը նկատելիորեն մեծ է պրոտոնների թվից: Հակառակ դեպքում իզոտոպներն անկայուն են պոզիտրոնային β -տրոհման նկատմամբ:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր երևույթն են անվանում ճառագայթաակտիվություն: **2.** Ի՞նչ է α -մասնիկը: **3.** Ի՞նչ է β -մասնիկը: **4.** Ի՞նչ է γ -մասնիկը: **5.** α -, β - և γ -մասնիկներից ո՞րն է օժտված նյութի մեջ առավելագույն ներթափանցման ունակությամբ: **6.** Ինչպե՞ս են փոխվում միջուկի կարգաթիվը և զանգվածային թիվը α -տրոհման հետևանքով: **7.** Ինչպե՞ս են փոխվում միջուկի կարգաթիվը և զանգվածի թիվը β -տրոհման հետևանքով: **8.** Ինչպե՞ս են փոխվում միջուկի կարգաթիվը և զանգվածի թիվը γ -տրոհման հետևանքով: **9.** Սահմանեք կիսապրոտիման պարբերությունը: **10.** Ի՞նչ է ճառագայթաակտիվ նյութի ակտիվությունը: **11.** Գրեք ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքը: **12.** Սահմանեք ակտիվության միավորները՝ 1 Բկ-ը և 1 Կի-ն: **13.** Ի՞նչ է արհեստական ճառագայթաակտիվությունը: **14.** Ո՞րն է դանդաղ նեյտրոններով ռմբակոծված $^{107}_{47}\text{Ag}$ -ի միջուկում ընթացող պրոցեսի վերջնական արդյունքը: **15.** Գրեք Ժուլիո-Կյուրիի հայտնաբերած ռեակցիան: **16.** Ինչո՞վ է տարբերվում արհեստական ճառագայթաակտիվությունը բնական ճառագայթաակտիվությունից:

1. Ինչու՞ է տաք Երկրի ընդերքը

Հայտնի է, որ Երկրագնդի ներքին տիրույթները բավականաչափ տաք են: Մակերևույթից դեպի կենտրոն խորանալիս երկրակեղևում ջերմաստիճանը յուրաքանչյուր կիլոմետրից հետո աճում է միջին հաշվով 30 Կ-ով: 1000 կմ խորությունում, որոշ գնահատումների համաձայն, այն հասնում է 3000 Կ-ի:

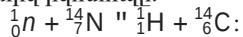
Իսկ ինչու՞ է Երկրի ընդերքը տաք, ի՞նչ է ներգիայի հաշվին է այն տաքանում:

Երկար ժամանակ գիտությանը հայտնի չէր Երկրի ներքին էներգիայի աղբյուրը: Մակայն ճառագայթաակտիվության երևույթի հայտնագործումից և երկրակեղևում ճառագայթաակտիվ տարրերի պարունակությունները որոշելուց հետո պարզ դարձավ, որ Երկրի ներքին էներգիայի հիմնական աղբյուրներից է ուրանի, թորիումի և այլ ծանր տարրերի ճառագայթաակտիվ տրոհումը:

Մայրցամաքների շարժումը, լեռնակազմավորման պրոցեսները, հրաբուխների ժայթքումները և երկրաշարժերը կապված են Երկրի ներքին տաք շերտերի առկայության հետ: Ուրեմն՝ բնության այս հզոր երևույթները վերջին հաշվով պայմանավորված են երկրային ապարների բնական ճառագայթաակտիվությամբ:

2. Ածխածնային թվագրում

Երկրի մթնոլորտում տիեզերական ճառագայթման ազդեցությամբ ծնված նեյտրոնները փոխազդում են ազոտի միջուկների հետ, որի հետևանքով առաջանում է ածխածնի $^{14}_6\text{C}$ ճառագայթաակտիվ իզոտոպը.



Այնուհետև այն օքսիդանում է՝ փոխարինվելով ճառագայթաակտիվ ածխաթթու գազի, (CO_2), որը խառնվում է մթնոլորտի սովորական $^{12}_6\text{C}$ կայուն իզոտոպով ածխաթթու գազին:

Ածխաթթու գազի հետ $^{14}_6\text{C}$ իզոտոպն անցնում է բույսերին, իսկ նրանց միջոցով՝ նաև կենդանի օրգանիզմներին: Օրգանական հյուսվածքներում $^{14}_6\text{C}$ իզոտոպի կոնցենտրացիան ունի որոշակի արժեք, որը ժամանակի ընթացքում գործնականորեն չի փոփոխվում: Երբ օրգանիզմը մահանում է, նրա մեջ նյութափոխանակության պրոցեսները դադարում են, և $^{14}_6\text{C}$ -ի պաշարը դրսից այլևս չի լրացվում, ուստի՝ նրա քանակն օրգանիզմում նվազում է ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքով ($^{14}_6\text{C}$ -ի կիսատրոհման պարբերությունը 5730 տարի է): Հետևաբար՝ որքան շատ ժամանակ է անցնում օրգանիզմի մահվանից, այնքան նրա մեջ նվազում է $^{14}_6\text{C}$ ճառագայթաակտիվ իզոտոպի քանակը: Չափելով այն՝ կարելի է ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքից որոշել օրգանիզմի մահվան մոտավոր ժամանակը:

Այս մեթոդով, որը հայտնի է որպես ածխածնային թվագրման մեթոդ, հնագետները կարողանում են որոշել 1000-ից մինչև 50000 տարի գետնի տակ մնացած առարկաների տարիքը՝ մինչև 100 տարի ճշտությամբ:

Եզիպտական որոշ հնությունների, մասնավորապես՝ մումիաների տարիքի որոշման արդյունքները, որոնք ստացվել են ածխածնային թվագրման մեթոդով, բավարար ճշտությամբ համընկնում են ժամանակագրական հուսալի տվյալների հետ:

Ածխածնային թվագրման մեթոդով հնարավոր եղավ պարզել, որ Հյուսիսային և Հարավային Ամերիկայում և Անգլիայում առաջին մարդը հայտնվել է շուրջ 10000 տարի առաջ, այսինքն՝ վերջին սառցային շրջանից անմիջապես հետո:

Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. Ի՞նչ էներգիա է համապատասխանում 1 գ.ա.մ.-ին՝ զանգվածի ատոմական միավորին:

Լուծում: Այնշտայնի (6.4) բանաձևի համաձայն՝ $E_1 = 1 \text{ գ.ա.մ.} \cdot c^2$: Քանի որ $1 \text{ գ.ա.մ.} = 1,660566 \cdot 10^{-27} \text{ կգ}$, իսկ լույսի արագությունը վակուումում՝ $c = 3 \cdot 10^8 \text{ մ/վ}$, ապա $E_1 = 1,660566 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ Ջ} = 1,660566 \cdot 9 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{19} / 1,6 \text{ էՎ} = 931,481 \text{ ՄէՎ}$: Օգտվելով ստացված բանաձևից՝ կարելի է 1 գ.ա.մ.-ն արտահայտել ՄէՎ/ c^2 միավորով՝

$$1 \text{ գ.ա.մ.} = 931,481 \text{ ՄէՎ}/c^2:$$

Պատասխան՝ 931,481 ՄէՎ:

2. Որոշել հելիումի միջուկի կապի էներգիան:

Լուծում: Ճշգրիտ չափումների համաձայն՝ հելիումի միջուկի զանգվածը՝ $m_{\text{He}} = 4,002603 \text{ գ.ա.մ.}$: Այն բաղկացած է 2 պրոտոնից և 2 նեյտրոնից, ուստի զանգվածի պակասորդի համար կստանանք՝ $\Delta m = 2m_p + 2m_n - m_{\text{He}}$: Քանի որ $m_p = 1,008665 \text{ գ.ա.մ.}$, $m_n = 1,007825 \text{ գ.ա.մ.}$, ապա $\Delta m = 0,03038 \text{ գ.ա.մ.}$: Հելիումի միջուկի կապի էներգիան՝

$$\Delta E = \Delta m c^2 = 0,03038 \text{ գ.ա.մ.} \cdot c^2 = 0,03038 \cdot 931,481 \text{ ՄէՎ}$$

(տե՛ս 1-ին խնդիրը): Այսպիսով՝ $\Delta E = 28,298393 \text{ ՄէՎ} \approx 28,3 \text{ ՄէՎ}$:

Պատասխան՝ 28,3 ՄէՎ:

3. Ճառագայթաակտիվ նյութի միջուկների սկզբնական քանակության n° մասը կմնա $t_1 = 10T$ ժամանակ անց (T -ն ճառագայթաակտիվ նյութի կիսատրոհման պարբերությունն է):

Լուծում: Համաձայն ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքի՝ մինչև t պահը չտրոհված միջուկների թիվը՝

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T},$$

որտեղ N_0 -ն միջուկների թիվն է սկզբնական ($t = 0$) պահին: Բանաձևում տեղադրելով t_1 -ի արտահայտությունը, կստանանք չտրոհված միջուկների N_1 թիվը, հետևաբար՝

$$\frac{N_1}{N_0} = 2^{-t_1/T} = 2^{-10} \cdot 10^{-3}:$$

Պատասխան՝ 0,001 մասը:

Խորացված

4. Ուրան-238 իզոտոպի կիսատրոհման պարբերությունը՝ $T_1 = 4,51 \cdot 10^9$ տարի, իսկ ուրան-235 իզոտոպինը՝ $T_2 = 0,71 \cdot 10^8$ տարի: Գիտենալով դրանց հարաբերական տարածվածությունը ($^{238}_{82}\text{U}$ ՝ 99,2739%, $^{235}_{82}\text{U}$ ՝ 0,7205%) և ընդունելով, որ Երկիրն ստեղծվելու պահին դրանց քանակները հավասար են եղել, գնահատել Երկրի տարիքը:

Լուծում: Համաձայն ճառագայթաակտիվ տրոհման օրենքի՝ ժամանակի t պահին իզոտոպների չտրոհված միջուկների թվերը՝

$$N_1 = N_{01} \cdot 2^{-t/T_1} \text{ և } N_2 = N_{02} \cdot 2^{-t/T_2}, \quad (1)$$

որտեղ N_{01} -ը և N_{02} -ը, համապատասխանաբար, ուրան-238 և ուրան-235 իզոտոպների չտրոհված միջուկների թվերն են Երկիրն ստեղծվելու ($t=0$) պահին: Ըստ խնդրի պայմանի՝ $N_{01} = N_{02}$ (2): Նկատի ունենալով նաև, որ հարաբերական տարածվածությունների հարաբերությունը հավասար է N_1/N_2 մեծությանը՝ (1) և (2) բանաձևերից կստանանք՝

$$\frac{N_1}{N_2} = 2^{-t \cdot \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = \frac{99,2779}{0,7205} \cdot 137,78: \quad (3)$$

(3) առնչությունից t -ի համար կստանանք՝

$$t = 10^9 \frac{\lg 137,79}{1,1867 \lg 2} \text{ տարի} \cdot 6 \cdot 10^9 \text{ տարի:}$$

Պատասխան՝ $6 \cdot 10^9$ տարի:

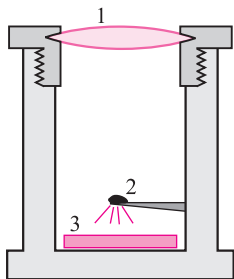
Խորացված

§59. ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԳՐԱՆՑՄԱՆ ՓՈՐՁԱՐԱՐԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԸ

Ատոմային միջուկի և տարրական մասնիկների ֆիզիկայի ստեղծմանը և զարգացմանը էապես նպաստել են տարբեր փորձարարական սարքեր: Դրանց միջոցով գրանցվում և ուսումնասիրվում են միջուկների, տարրական մասնիկների բախումները և փոխակերպումները, որոնք անհրաժեշտ տեղեկություններ են տալիս միկրոաշխարհում տեղի ունեցող պատահարների մասին:

Հայտնի են մասնիկների գրանցման զանազան մեթոդներ: Ծանոթանանք դրանցից մի քանիսին:

Առկայծումների մեթոդ: Այս մեթոդը կիրառվել է դեռևս միջուկային ֆիզիկայի ձևավորման փուլում. հիշեք ատոմի կառուցվածքի ուսումնասիրման Ռեզերֆորդի փորձերը (§43):



Նկ. 119. Կայծադիտակի կառուցվածքը. 1. խոշորացույց, 2. ճառագայթաակտիվ պատրաստուկ, 3. ցինկի սուլֆիդով պատված էկրան

Առկայծումը լույսի բռնկում է, որն առաջանում է որոշ նյութերի հետ լիցքավորված մասնիկի (α -մասնիկ, էլեկտրոն) փոխազդեցության հետևանքով:

Առկայծումների օգտագործմամբ առաջին սարքը՝ կայծադիտակը (սպինթարիսկոպ) հայտնագործել է անգլիացի ֆիզիկոս Ուիլյամ Կրուքսը 1903թ. (նկ. 119.) Այն փոքր, գլանաձև խցիկ է, որի հատակը պատված է առկայծող նյութով՝ ցինկի սուլֆիդով և ծառայում է որպես էկրան: Դրանից $1 \div 2$ մմ հեռավորությամբ տեղադրում են ճառագայթաակտիվ նյութի պատրաստուկը, որի արձակված մասնիկները, բախվելով էկրանին, առաջացնում են առկայ-

ծումներ: Այդ առկայծումները դիտում են ոսպնյակի միջոցով:

Ներկայումս կայծադիտակները չեն կիրառում, սակայն առկայծումների մեթոդը տեխնիկապես կատարելագործվել և լայնորեն օգտագործվում է գիտության մեջ: Առկայծումներն այժմ հաշվում են հատուկ սարքերի միջոցով, որոնք կոչվում են **առկայծումնային հաշվիչներ**: Այս սարքերի հիմնական մասը ֆոտոէլեկտրոնային բազմապատկիչն է, որի օգնությամբ բյուրեղում առաջացած թույլ առկայծումը ֆոտոէֆեկտի շնորհիվ փոխարկվում է էլեկտրական հոսանքի իմպուլսի, որն այնուհետև ուժեղացվում է $10^5 \div 10^8$ անգամ և գրանցվում:

Քանի որ առկայծման ուժգնությունը համեմատական է այն առաջացնող մասնիկի էներգիային, ապա առկայծումնային հաշվիչները կարող են գնահատել գրանցվող մասնիկների էներգիաները:

Հաստաշերտ ֆոտոէմուլսիաների մեթոդ: Ֆոտոէմուլսիայի վրա իոնացնող ճառագայթման ազդեցությունն առաջին անգամ դիտվել է Բեկերելի փորձերում: Այս մեթոդում օգտագործվող միջուկային ֆոտոէմուլսիաները տարբերվում են լուսանկարչական ֆոտոէմուլսիաներից: Դրանց հաստությունը $0,5 \div 1$ մմ է, լուսանկարչական ժապավենի շերտինը՝ $0,01$ մմ: Բացի այդ՝ միջուկային ֆոտոէմուլսիաներն ունեն էապես մեծ զգայնություն:

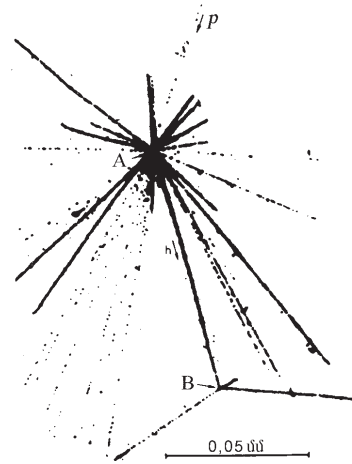
Մեծ կինեմիկ էներգիայով լիցքավորված մասնիկը ֆոտոէմուլսիայի շերտում իոնացման շնորհիվ, իր շարժման հետագծի երկայնքով ստեղծում է իոնացման թաքնված կետերոններ: Ֆոտոթիթեղի երևակումից հետո ի հայտ են գալիս սկզբնական մասնիկի և միջուկային բախումներում ծնված մոտ լիցքավորված մասնիկների հետքերը: Մասնիկի հետքի տեսքով, երկարությամբ և հաստությամբ, ինչպես նաև ֆոտոէմուլսիայի սկսյալ հատիկների խտությամբ և այլ տվյալներով կարելի է որոշել մասնիկի տեսակը, նրա էներգիան, արագությունը, շարժման ուղղությունը և այլ բնութագրեր:

Այս մեթոդի հիմնական առավելությունն այն է, որ մասնիկների հետքերը ֆոտոտեմուլսիայում ժամանակի ընթացքում չեն վերանում և կարող են ուսումնասիրվել նաև հետագայում: Բացի այդ՝ հնարավոր է ստանալ նաև լուսակայման ժամանակ ֆոտոտեմուլսիայով անցած բոլոր լիցքավորված և մեծ էներգիաներով մասնիկների հետքերը: Այս մեթոդով հնարավոր է հայտնաբերել միկրոաշխարհում տեղի ունեցող հազվադեպ պատահարներ: 120-րդ նկարում պատկերված է պրոտոնի բախումը ֆոտոտեմուլսիայի միջուկներից մեկի հետ, որի հետևանքով ծնվում են երկրորդային մասնիկներ՝ մեզոններ, պրոտոններ, α -մասնիկներ:

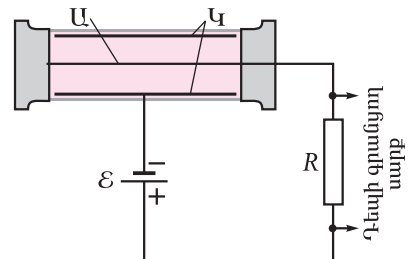
Մեթոդի թերությունը ֆոտոթիթեղների քիմիական մշակման բարդությունն է և այն, որ հնարավոր չէ որոշել լիցքավորված մասնիկի՝ ֆոտոտեմուլսիայի շերտ մտնելու պահը:

Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչ: Արագ շարժող լիցքավորված մասնիկների և γ -քվանտների գրանցման համար օգտագործվող սարքերից է Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչը (նկ. 121): Այն բաղկացած է ապակե գլանաձև խողովակից, որի ներքին մակերևույթը պատված է բարակ մետաղական շերտով, որը ծառայում է որպես կաթոդ: Գլանի առանցքով ձգված բարակ մետաղական լարը կատարում է անոդի դեր: Խողովակը լցվում է գազով, հիմնականում՝ արգոնով: Հաշվիչի գործողության հիմքում ընկած է հարվածային իոնացման երևույթը: Լիցքավորված մասնիկը, անցնելով հաշվիչով, իոնացնում է գազի ատոմները՝ ստեղծելով ազատ էլեկտրոններ և դրական իոններ: Անոդի և կաթոդի միջև ստեղծված ուժեղ էլեկտրական դաշտն արագացնում է էլեկտրոնները՝ նրանց հաղորդելով հարվածային իոնացման համար անհրաժեշտ էներգիա: Առաջանում է հեղեղային պարպում, և հաշվիչով անցնում է կարճատև հոսանք: Այն R դիմադրության վրա ստեղծում է լարման իմպուլս, որը տրվում է լիցքավորված մասնիկները գրանցող և հաշվող սարքին:

Որպեսզի հաշվիչը կարողանա գրանցել անցնող ամեն մի մասնիկ, անհրաժեշտ է ժամանակին մարել հեղեղային պարպումը: Սովորաբար դա արվում է R դիմադրության ընտրությամբ: Եթե այն բավականաչափ մեծ է (ասենք՝ 10^9 Օմի կարգի),



Նկ. 120. Միջուկային տրոհման միկրոլուսանկարը ֆոտոտեմուլսիայում. p պրոտոնը A կետում ծնում է երկրորդային մասնիկներ, որոնցից մեկը B կետում առաջացրել է միջուկային տրոհում:

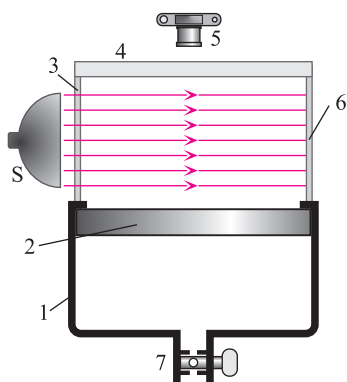


Նկ. 121. Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչի սխեման. U . անոդ (բարակ մետաղական լար), U_1 կաթոդ (մետաղի բարակ շերտ), E . հոսանքի աղբյուր, R . դիմադրատարր

ապա նրանով հոսանք անցնելիս առաջանում է $V_R = IR$ լարում: Անոդի ու կաթոդի միջև $V_{\text{կկ}} = \mathcal{E} - V_R$ լարումը ($\mathcal{E}$ -ն աղբյուրի ԷԼՇՈՒ-ն է) կտրուկ նվազում է, և պարպումը մարում է: Անոդի և կաթոդի միջև վերականգնվում է $V_{\text{կկ}} = \mathcal{E}$ սկզբնական լարումը, ուստի հաշվիչը կարող է նոր մասնիկ գրանցել:

Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչներն օգտագործվում են հիմնականում էլեկտրոններ և γ -քվանտներ գրանցելու համար: Քանի որ γ -քվանտներն անմիջականորեն գազի ատոմները չեն իոնացնում, ապա դրանք գրանցելու համար գլանի ներքին մակերևույթը պատում են այնպիսի նյութով, որի γ -քվանտներն էլեկտրոններ են «սկսում», որոնք էլ արագացվում են էլեկտրական դաշտում՝ ստեղծելով հեղեղային պարպում:

Վիլսոնի խցիկ: Լիցքավորված մասնիկների գրանցման այս սարքը (նկ. 122) հայտնագործել է անգլիացի ֆիզիկոս Չառլզ Վիլսոնը 1912 թ.: Հերմետիկ (1) գլանը վերևից փակված է ապակե (4) կափարիչով: (2) մխույր խցիկի



Նկ.122. Վիլսոնի խցիկի կառուցվածքը.

1. գլան, 2. մխույր, 3. պատուհան,
4. կափարիչ, 5. լուսանկարչական ապարատ, 6. մասնիկների մուտքի պատուհան, 7. փական, S. լույսի աղբյուր

ծավալը բաժանում է երկու մասի՝ աշխատանքային ծավալ (մխույցի վեր) և օժանդակ ծավալ (մխույցի տակ): Խցիկի պատին ապակով փակված (3) պատուհանից լույսի S աղբյուրը լուսավորում է աշխատանքային ծավալը: Լիցքավորված մասնիկները խցիկ են թափանցում (6) պատուհանից: Խցիկի աշխատանքային ծավալը լցվում է գազով (օդ կամ արգոն), որը պարունակում է ջրի կամ սպիրտի հագեցած գոլորշի:

Եթե (7) փականի միջոցով օդն արագ հեռացվի օժանդակ ծավալից, ապա (2) մխույցն արագ կիջնի, և աշխատանքային ծավալում գազն աղիաբատորեն ընդարձակվելով՝ կհովանա: Հովացած գոլորշին կդառնա գերհագեցած: Եթե այդ ժամանակ աշխատանքային ծավալով անցնի լիցքավորված մասնիկ, ապա այն իր հետագծի երկայնքով կիոնացնի գազի

մոլեկուլները, որոնք դառնում են խտացման կենտրոններ: Նրանց շուրջ հավաքվում են հեղուկի մանրագույն կաթիլներ, որոնք տեսանելի են դարձնում մասնիկի հետքը խցիկում: Այն կարելի է դիտել, ինչպես և լուսանկարել (5) ապարատով: Նկարահանումից հետո մխույր վերադարձվում է սկզբնական դիրք, իսկ խցիկի ներսում ստեղծում են էլեկտրական դաշտ, որն աշխատանքային ծավալից հեռացնում է բոլոր իոնները: Դրանից հետո սարքը կարող է նոր գրանցում կատարել: Աշխատանքային վիճակը վերականգնելու ժամանակը՝ սարքի արագագործությունը, կախված է խցիկի չափերից և կարող է փոփոխվել մի քանի վայրկյանից մինչև տասնյակ րոպեներ:

Վիլսոնի խցիկում լիցքավորված մասնիկի գրանցված հետքերը հնարավորություն են տալիս որոշելու մասնիկը բնութագրող մեծությունները և շարժման բնութագրերը: Այսպես, օրինակ, հետքի երկարությամբ կարելի է որոշել

մասնիկի էներգիան (եթե հետքը լրիվ տեղավորվում է խցիկի աշխատանքային ծավալում): Հետքում խոնապման կենտրոնների խտությամբ կարելի է դատել մասնիկի արագության մասին:

Ուսս ֆիզիկոսներ Պյոտր Կապիցան և Դմիտրի Սկոբելցիկն առաջարկել են Վիլսոնի խցիկը տեղադրել համասեռ մագնիսական դաշտում և ստանալ լրացուցիչ տեղեկատվություն լիցքավորված մասնիկի բնութագրերի մասին: Ինչպես գիտեք, մագնիսական դաշտը շարժվող լիցքի վրա ազդում է Լորենցի ուժով՝ կորացնելով մասնիկի հետագիծը: Մագնիսական դաշտում մասնիկի շեղման միջոցով կարելի է որոշել նրա լիցքի նշանը, իսկ կորության շառավղով՝ մասնիկի տեսակարար լիցքը՝ q/m հարաբերությունը: Եթե հայտնի է մասնիկի լիցքը, ապա կարելի է որոշել նրա իմպուլսը և զանգվածը:

Վիլսոնի խցիկի աշխատանքային ծավալը լցված է փոքր խտությամբ նյութով՝ գազով, ուստի՝ մեծ էներգիաներով մասնիկների վազքի երկարությունը գերազանցում է այդ ծավալի չափերը, որը հնարավորություն չի տալիս գրանցելու այդպիսի մասնիկներ:

Պղպջակային խցիկ: Մեծ էներգիաներով մասնիկների գրանցման համար ամերիկացի ֆիզիկոս Դոնալդ Գլեզերը 1952 թ. ստեղծել է նոր սարք՝ պղպջակային խցիկը: Այս սարքի գործողությունը հիմնված է այն երևույթի վրա, որ մաքուր հեղուկը մեծ ճնշման տակ կարող է չեռալ անգամ եռման ջերաստիճանից բարձր ջերմաստիճաններում (գերտաք հեղուկ):

Խցիկի աշխատանքային ծավալը լցվում է գրեթե մինչև եռման ջերմաստիճան տաքացված և մեծ ճնշմամբ հեղուկ ջրածնով կամ պրոպանով: Կտրուկ փոքրացնելով ճնշումը՝ հեղուկը բերվում է գերտաք վիճակի: Եթե հեղուկով անցնի լիցքավորված մասնիկ, այն իր հետագծի երկայնքով կստեղծի խոնների «շղթա»: Խոնները դառնում են եռման կենտրոններ, և մասնիկի անցած տեղերում հեղուկը կտրուկ եռում է՝ հետագծի երկայնքով առաջացնելով գոլորշու փոքրիկ (մինչև 0,1 մմ տրամագծով) պղպջակներ: Դրանք էլ կազմում են մասնիկի հետքը: Մասնիկների հետքերը նկարահանում և ուսումնասիրում են: Նշենք, որ պղպջակային խցիկում օգտագործվող հեղուկը պետք է լինի թափանցիկ, որպեսզի հնարավոր լինի նկարահանել նրա մեջ մասնիկների հետքերը:

Խցիկի տեղադրումը մագնիսական դաշտում զգալիորեն ընդլայնում է նրա չափիչ հնարավորությունները:

Ի տարբերություն Վիլսոնի խցիկի՝ պղպջակային խցիկով կարելի է գրանցել մեծ էներգիաներով մասնիկներ, քանի որ նրա մեջ օգտագործվում է



Նկ. 123. Մեծ էներգիայով մասնիկի հետքը պղպջակային խցիկում. գրանցվող մասնիկի հետագծի երկայնքով առաջանում են գոլորշու պղպջակներ, որոնք էլ տեսանելի են դարձնում մասնիկի հետքը:

հեղուկ, որի խտությունը շատ ավելի մեծ է, քան գազինը: Ուստի՝ մասնիկների հեռաբերը խցիկում կարճ են և դուրս չեն գալիս սարքից: Դա հնարավորություն է տալիս դիտելու մասնիկների հաջորդական փոխակերպումները և առաջացրած ռեակցիաները (նկ. 123): Բացի այդ՝ պղպջակային խցիկն օժտված է ավելի մեծ արագագործությամբ, քան Վիլսոնի խցիկը:

Վերը նկարագրված բոլոր գրանցման մեթոդները կիրառվում են լիցքավորված մասնիկների դեպքում:

Չեզոք մասնիկների գրանցումները կատարվում են հետևյալ սկզբունքով. նյութի հետ փոխազդելով՝ չեզոք մասնիկն ստեղծում է լիցքավորված մասնիկներ, որոնք արդեն գրանցվում են: Այսպիսի երկաստիճանության պատճառով չեզոք մասնիկներ գրանցելն էապես դժվար է, քան լիցքավորված մասնիկներ գրանցելը: Օրինակ՝ Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչով կարելի է գրանցել նաև γ -քվանտներ: Սակայն եթե էլեկտրոններ գրանցելիս հաշվիչի արդյունավետությունը 100% է, այսինքն՝ հաշվիչը գրանցում է անցած բոլոր էլեկտրոնները, ապա γ -քվանտների դեպքում այն $1 \div 3\%$ է:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչպե՞ս են գործում առկայծումային հաշվիչները:
2. Ինչպե՞ս են գրանցվում լիցքավորված մասնիկները հաստաշերտ ֆոտոէմուլսիայում:
3. Ի՞նչ առավելություններ ունի հաստաշերտ ֆոտոէմուլսիաների մեթոդը մասնիկների գրանցման մյուս մեթոդների նկատմամբ:
4. Ի՞նչ կառուցվածք ունի Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչը:
5. Ո՞րն է Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչի գործողության սկզբունքը:
6. Ինչո՞ւ են Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչում օգտագործում մեծ դիամդրություններ:
7. Ի՞նչ մասնիկներ կարելի է գրանցել Գայգեր-Մյուլերի հաշվիչով:
8. Ի՞նչ կառուցվածք ունի Վիլսոնի խցիկը:
9. Ինչպե՞ս է գրանցվում մասնիկը Վիլսոնի խցիկում:
10. Ինչպե՞ս են որոշում մասնիկների բնութագրերը Վիլսոնի խցիկում սրացված հետքերի օգնությամբ:
11. Ի՞նչ լրացուցիչ տեղեկություն կարելի է ստանալ, եթե Վիլսոնի խցիկը տեղադրվի մագնիսական դաշտում:
12. Ի՞նչ կառուցվածք ունի պղպջակային խցիկը:
13. Ինչպե՞ս են գրանցվում մասնիկները պղպջակային խցիկում:
14. Ի՞նչ առավելություններ ունի պղպջակային խցիկը Վիլսոնի խցիկի նկատմամբ:
15. Ո՞րն է Վիլսոնի խցիկի և պղպջակային խցիկի առավելությունը հաշվիչների նկատմամբ:
16. Ինչպե՞ս են գրանցում չեզոք մասնիկները:

§ 60. ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐ

Ատոմային միջուկներում տեղի են ունենում պրոցեսներ, որոնք ընթանում են միջուկները տարբեր մասնիկներով (օրինակ՝ պրոտոններով, նեյտրոններով, γ -քվանտներով), ինչպես նաև մասնիկների խմբերով (օրինակ՝ α -մասնիկներով, դեյտերիումի միջուկներով) ռմբակոծելիս: **Ատոմային միջուկների փոխակերպումներն անվանում են միջուկային ռեակցիաներ:**

Միջուկային ռեակցիայում նախնական միջուկը, փոխազդելով որևէ մասնիկի հետ, վերածվում է նոր՝ նախնականից տարբեր միջուկի: Ռեակցիայի արդյունքում կարող են արձակվել տարբեր մասնիկներ, ինչպես նաև γ -քվանտներ:

Օգտագործելով միջուկների պայմանաճանճները՝ այդ փոխակերպումները հարմար է ներկայացնել քիմիական ռեակցիաների նմանությամբ:

Այսպես, օրինակ, պատմականորեն առաջին միջուկային ռեակցիան, որ իրականացրել է Ռեզերֆորդը ազոտի ատոմներն α -մասնիկներով ռմբակոծելիս, և որի արդյունքում առաջանում են պրոտոն և թթվածին, կարելի է գրառել հետևյալ կերպ՝



Միջուկային ռեակցիայի մեկ այլ օրինակ է նեյտրոնների հայտնագործման ռեակցիան, որի ժամանակ α -մասնիկներով ռմբակոծվում են բերիլիումի միջուկները.



որտեղ 1_0n -ն նեյտրոնն է ($q_n = 0$, $A_n = 1$):

Միջուկային ռեակցիաներում գործում են էներգիայի, իմպուլսի, էլեկտրական լիցքի պահպանման օրենքները, ինչպես նաև միջուկային ֆիզիկայում հայտնի նուկլոնների թվի և մի շարք այլ պահպանման օրենքներ: Օրինակ՝ դժվար չէ համոզվել, որ (6.19) և (6.20) ռեակցիաներում պահպանվում է ինչպես էլեկտրական լիցքը (ստորին ցուցիչների գումարը ձախ և աջ մասերում նույնն է), այսպես էլ նուկլոնների թիվը (վերին ցուցիչների գումարը ձախ և աջ մասերում):

Իմպուլսի պահպանման օրենքը հնարավորություն է տալիս ռմբակոծող մասնիկի և թիրախ-միջուկի հայտնի իմպուլսների միջոցով որոշել, թե ինչպես է ռեակցիայի էներգիան բաշխվում ռեակցիայի արգասիքների միջև:

Ինչպես և կապի էներգիան հաշվարկելիս, միջուկային ռեակցիայում զանգվածի (և հանգստի էներգիայի) հաշվեկշիռը կարելի է որոշել՝ համեմատելով միջուկի և ռմբակոծող մասնիկի զանգվածների գումարը առաջացած նոր միջուկի և արձակված մասնիկի զանգվածների գումարի հետ: Օրինակ՝ (6.19) ռեակցիայի ելանյութերի զանգվածը՝ $m_1 = m^{14}_7\text{N} + m^{4}_2\text{He} = 18,005677$ գ.ա.մ., իսկ արգասիքների զանգվածը՝ $m_2 = m^{17}_8\text{O} + m^1_1\text{H} = 18,006958$ գ.ա.մ., ուստի զանգվածների տարբերությամբ՝ $\Delta m = m_1 - m_2 = -0,001281$ գ.ա.մ.: Այս տարբերությամբ համապատասխանում է $\Delta E = \Delta mc^2 = -1,93$ ՄէՎ էներգիա: Քանի որ $m_1 < m_2$ ($\Delta E < 0$) ապա ռեակցիան ընթանալու համար անհրաժեշտ է ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N}$ համակարգին հաղորդել առնվազն $1,93$ ՄէՎ էներգիա: Սակայն իրականում (6.19) ռեակցիայի ընթանալու համար անհրաժեշտ է հաղորդել զգալիորեն մեծ էներգիա, որպեսզի α -մասնիկը կարողանա ներթափանցել միջուկ՝ հաղթահարելով միջուկի կուլոնյան վանողությունը: Սա է պատճառը, որ միջուկային ռեակցիաներն առավել արդյունավետ են ընթանում միջուկները նեյտրոններով ռմբակոծելիս: Ի տարբերություն α -մասնիկի՝ նեյտրոնն էլեկտրական լիցք չունի, միջուկին մոտենալիս նրա վրա կուլոնյան վանողության ուժեր չեն ազդում, և այն հեշտությամբ ներթափանցում է միջուկ՝ առաջ բերելով միջուկային ռեակցիաներ:

Եթե $\Delta m = m_1 - m_2 > 0$, ապա միջուկային ռեակցիայի արդյունքում անջատվում է Δmc^2 էներգիա: Օրինակ՝

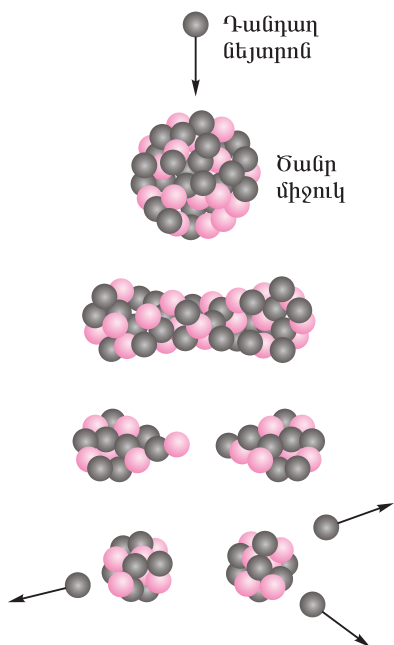


ռեակցիայում, որտեղ ${}^2_1\text{H}$ -ը ջրածնի իզոտոպ դեյտերիումն է, անջատվում է $\Delta E = 2,224$ ՄէՎ էներգիա:

Միջուկային ռեակցիայի ընթացքում անջատված էներգիան անվանում են **միջուկային ռեակցիայի արդյունք (ելք)**: Սովորաբար այն ընդունում է մի քանի ՄԷՎ-ից մինչև հարյուրավոր ՄԷՎ արժեքներ, որը միլիոն անգամ գերազանցում է քիմիական ռեակցիաներում անջատվող էներգիաները:

Բաժանման ռեակցիա: Բաժանման ռեակցիա են անվանում միջուկի տրոհման պրոցեսը մասերի, որը տեղի է ունենում ինքնաբերաբար կամ մասնիկներով ռմբակոծելու հետևանքով: Նախնական միջուկի բաժանումից առաջացած նոր միջուկներն անվանում են **բաժանման բեկորներ** կամ **բեկոր-միջուկներ**:

Բաժանվելու ունակ են միայն որոշ ծանր տարրերի միջուկներ: Նեյտրոնների ազդեցությամբ բաժանվում են ուրանի, թորիումի, պրոտակտինիումի և Մենդելեևի պարբերական աղյուսակում ուրանից հետո ընկած (անդրուրանյան)



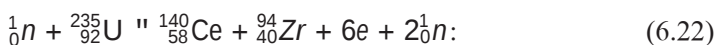
Նկ.124. Ուրանի միջուկի բաժանման ռեակցիայի ընթացքը և արգասիքները

տարրերի միջուկները: Միջուկների բաժանման ռեակցիայում արձակվում է 2-3 նեյտրոն և γ -ճառագայթում (նկ. 124): Էներգիայի անջատումը բաժանման ռեակցիայում հետևանք է այն բանի, որ բաժանվող ծանր միջուկի զանգվածը զգալիորեն գերազանցում է Մենդելեևի պարբերական աղյուսակի միջին մասի քիմիական տարրեր ներկայացնող բեկորների զանգվածների գումարը: Բաժանման ռեակցիայի արգասիք բեկորները, կուլոնյան վանողության ուժերի ազդեցությամբ, շարժվում են մեծ մոտավորապես 0,7C արագությամբ:

Նեյտրոններով ռմբակոծելիս ուրանի միջուկների բաժանման ռեակցիան հայտնագործել են գերմանացի գիտնականներ Օտտո Հանը և Ֆրից Շտրասմանը 1938 թ., իսկ երևույթը բացատրել են ավստրիացի ֆիզիկոս Լիզե Մայտները և անգլիացի ֆիզիկոս Օտտո Ֆրիշը 1939 թ.: Ուսս ֆիզիկոսներ Գեորգի Ֆլյորովը և Կոնստանտին Պետրժակը 1940 թ. հայտնագործել են ուրանի միջուկների ինքնաբերաբար բաժանման երևույթը:

Ծանր միջուկների ինքնաբերաբար բաժանման երևույթը կարելի է բացատրել՝ օգտվելով կապի տեսակարար էներգիայի՝ միջուկի զանգվածային թվից կախման գրաֆիկից (նկ. 115): Գրաֆիկից երևում է, որ Մենդելեևի պարբերական աղյուսակի վերջում ընկած տարրերի կապի տեսակար էներգիաները մոտավորապես 1 ՄԷՎ-ով փոքր են աղյուսակի միջին մասի տարրերի կապի տեսակարար էներգիաներից: Հետևաբար՝ էներգիապես ձեռնաստու է ծանր միջուկների տրոհման պրոցեսը միջին զանգվածային թվերով տարրերի միջուկների:

Ուրանի $^{235}_{92}\text{U}$ իզոտոպի միջուկի՝ նեյտրոնների մասնակցությամբ ընթացող բաժանման ռեակցիաներից է հետևյալ ռեակցիան՝



Այս ռեակցիայում զանգվածի տարբերությունը $\Delta m = 0,223$ գ.ա.մ. է, որին համապատասխանում է $\Delta E = 208$ ՄէՎ անջատված էներգիա: Այս էներգիան ահռելի է միջուկային մասշտաբներով: Դրա մեծությունը պատկերացնելու համար ենթադրենք, որ միջուկային ռեակցիայի ընթացքում ճեղքվել է 1 գ ուրան: Այս ճեղքման հետևանքով անջատված էներգիան մոտավորապես 20 ՄՎտ-ժ է, որը համարժեք է 2,5 տոննա քարածխի այրումից առաջացած էներգիային: Ցերիումի (Ce) և չիրկոնիումի (Zr) միջուկների փոխարեն ուրանի ճեղքումից առաջանում են նաև այլ միջուկներ: Հայտնի են շուրջ 40 նմանատիպ ռեակցիաներ:

Սինթեզի ռեակցիա: 115-րդ նկարում պատկերված կապի տեսակարար էներգիայի կորից բխում է, որ միջուկային էներգիա կարելի է ստանալ ոչ միայն ծանր միջուկների բաժանման, այլև թեթև տարրերի (օրինակ՝ տրիտիումի, հելիումի և լիթիումի) միջուկների սինթեզի ռեակցիաներում: Իրոք, սինթեզի ռեակցիայում առաջացած միջուկի զանգվածն ավելի փոքր է, քան ելքային միջուկների զանգվածների գումարը:

Որպես օրինակ դիտարկենք դեյտերիումի երկու միջուկից հելիումի միջուկի սինթեզի ռեակցիան՝



Դեյտերիումի միջուկի զանգվածը՝ $m_1^2\text{H} = 2,0146$ գ.ա.մ., ուստի՝ ռեակցիայի ելանյութերի զանգվածը՝ $m_1 = 2m_1^2\text{H} = 4,0292$ գ.ա.մ., իսկ արգասիքի զանգվածը՝ $m_2 = m_2^4\text{He} = 4,0038$ գ.ա.մ.:

Չանգվածների տարբերությունը՝ $\Delta m = m_1 - m_2 = 0,0254$ գ.ա.մ., որին համապատասխանում է $\Delta E \approx 25$ ՄէՎ էներգիա: Եթե նկատի ունենանք, որ 1 գ դեյտերիումում կա շուրջ $3 \cdot 10^{23}$ ատոմ, ապա (6.23) ռեակցիայում կանջատվի մոտավորապես 10^{13} Ջ էներգիա, որը համարժեք է 250 տ դիզելային վառելանյութի այրումից ստացված էներգիային:

Արեգակի ընդերքում մույնպես տեղի են ունենում միջուկային ռեակցիաներ: Արեգակը հիմնականում կազմված է ջրածնից, որն «այրվում» է՝ վերածվելով հելիումի՝



Այս ռեակցիայի արդյունքում անջատվում է 28 ՄէՎ էներգիա և 2 ֆոտոն, որոնցով էլ պայմանավորված է Արեգակի և մյուս աստղերի լուսատվությունը:

Ինչպես տեսնում եք, սինթեզի ժամանակ մույնպես արձակվում է հսկայական էներգիա, որի կիրառության մասին կխոսենք ստորև:



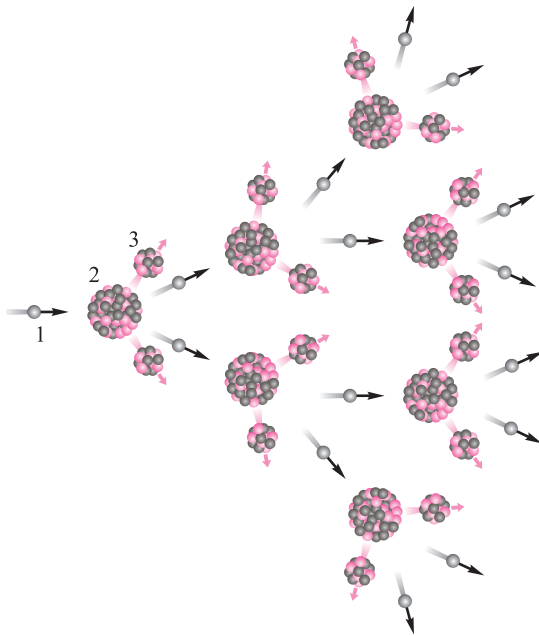
Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ է միջուկային ռեակցիան:
2. Ինչո՞ւ են տարբերվում միջուկային ռեակցիաները ճառագայթաակտիվ քիմիականներից:
3. Ինչու՞ անգամ չնչին կինետիկ էներգիայով նեյտրոնը կարող է առաջացնել միջուկային ռեակցիա, իսկ պրոտոնը կամ α -մասնիկը՝ միայն մեծ կինետիկ էներգիայով օժտված լինելու դեպքում:
4. Ի՞նչ ռեակցիաների են մասնակցում ծանր միջուկները:
5. Ի՞նչ ռեակցիաների են մասնակցում թեթև միջուկները:
6. Գրեք ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + ?$ միջուկային ռեակցիայի երկրորդ արգասիքը:
7. Ի՞նչ է միջուկային ռեակցիայի արդյունքը:
8. Ինչպե՞ս են հաշվում միջուկային ռեակցիա-

յի արդյունքը: **9.** Ձեզ հայտնի ի՞նչ պահպանման օրենքներ են գործում միջուկային ռեակցիաներում: **10.** Ի՞նչ է բաժանման ռեակցիան: **11.** Ինչու՞ են ծանր միջուկները բաժանվում: **12.** Ինչու՞ են բաժանման ռեակցիայի արգասիքներն օժտված մեծ կինե-տիկ էներգիաներով: **13.** Ի՞նչ է սինթեզի ռեակցիան: **14.** Գնահատե՛ք 5 գ դեյտերիումի սինթեզի ռեակցիայում անջատված էներգիան: **15.** Գրե՛ք Արեգակում ընթացող սինթեզի ձեզ հայտնի ռեակցիան:

§ 61. ԶԵՐԱՅԱԿԱՆ ՌԵԱԿՑԻԱ: ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՌԵԱԿՏՈՐ

Շղթայական ռեակցիա: §60-ում ներկայացված գնահատումների համա-ձայն՝ 1 գ ուրան-235-ի տրոհման պրոցեսում անջատված էներգիան միլիոնավոր անգամներ գերազանցում է սովորական վառելիքի այրումից առաջացած էներ-գիան: Միջուկային էներգիայի մեծ մասը կինետիկ էներգիայի տեսքով տանում են տրոհված միջուկների բեկորները: Այս պարագրաֆում կխոսենք այդ էներգիան խաղաղ նպատակներով օգտագործելու մասին:



Նկ. 125. Ուրանի միջուկների բաժանման շղթայական ռեակցիայի պատկերը. 1. դանդաղ նեյտրոն, 2. ուրան-235, 3. տրոհման բեկորներ

պայթյուն՝ շատ կարճ ժամանակամիջոցում չափազանց մեծ էներգիայի անջա-տում (նկ. 125):

Իրականում ոչ բոլոր նեյտրոններն են կլանվում միջուկներում և պատճառ դառնում դրանց ճեղքման: Դեղքումից առաջացած նեյտրոնն ունի մեծ արագու-թյուն և կարող է շատ արագ դուրս թռչել ուրանի այն կտորից, որտեղ տեղի է ու-նենում միջուկային ռեակցիան կամ կլանվել այլ, օրինակ, բնական ուրան-238-ի մի-ջուկում: Այսպիսով՝ որպեսզի շղթայական ռեակցիան ընթանա, մախ անհրաժեշտ

Ինչպես գիտեք, ուրանի ճեղք-ման պրոցեսում, էներգիայի անջա-տումից բացի, առաջանում է 2 կամ 3 նեյտրոն, այսինքն՝ եթե ռեակ-ցիայից առաջ կար մեկ նեյտրոն, ապա ռեակցիայից հետո նեյտ-րոնների թիվն առնվազն կրկնա-պատկվում է: Բայց չէ՞ որ այդ մոթ նեյտրոնները մոթից կարող են կլանվել արդեն ուրան-235-ի երկու միջուկում, որի հետևանքով կան-ջատվի երկու անգամ մեծ էներգիա, և կառաջանա արդեն 4 նեյտրոն, որոնք մոթից կմտնեն ռեակցիա-յի մեջ՝ անջատելով չորս անգամ մեծ էներգիա, և 8 նեյտրոն, և այդ-պես շարունակ: Նման դեպքերում ասում են, որ տեղի է ունենում մի-ջուկների բաժանման **շղթայական ռեակցիա**: Եթե այս պրոցեսը չկա-ռավարվի, ապա տեղի կունենա

է, որ ուրանի $^{235}_{92}\text{U}$ իզոտոպի միջուկների թիվը մեծ լինի: Բնական ուրանի կտորի 99,3%-ը բնական ուրանի ուրան-238 իզոտոպն է և միայն 0,7%-ը՝ ուրան-235 իզոտոպը: Ուրանի այդպիսի կտորը շոթայական ռեակցիայի իրականացման համար պիտանի չէ: Այդ պատճառով օգտագործում են ուրան-235 իզոտոպով մինչև 5% հարստացված նմուշ: Մյուս կողմից՝ նմուշի չափերն այնպիսին պետք է լինեն, որ նեյտրոնին, մինչև նմուշից դուրս գալը, կլանի որևէ իզոտոպ: **Ուրանի կտորի այն նվազագույն զանգվածը, որի դեպքում հնարավոր է շոթայական ռեակցիա, կոչվում է կրիտիկական զանգված:**

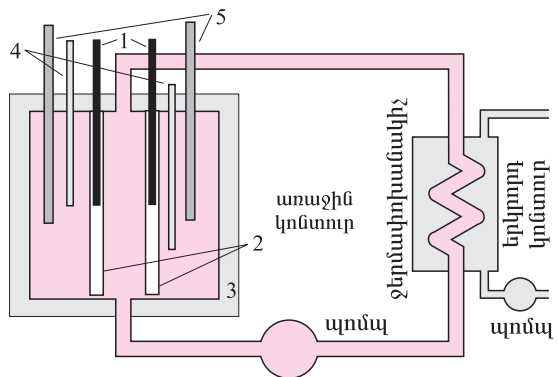
Այսպիսով՝ եթե հարստացված ուրանի կտորի զանգվածը փոքր է կրիտիկական զանգվածից, ապա միջուկային ռեակցիան շոթայական բնույթ չի կրում: Եթե ուրանի զանգվածը մեծ է կրիտիկական զանգվածից, տեղի է ունենում շոթայական ռեակցիա, որը վերածվում է պայթյունի: Այս սկզբունքի վրա է հիմնված **ատոմային ռումբի** գործողությունը: Ուրանի երկու կտորները, որոնց զանգվածներն առանձին-առանձին փոքր են կրիտիկական զանգվածից, պահվում են միմյանցից որոշ հեռավորությամբ: Ռումբը զցեկիս դրանք միանում են, գումարային զանգվածը դառնում է կրիտիկականից մեծ, և տեղի է ունենում պայթյուն: Անջատվում է հսկայական ջերմային էներգիա, առաջանում է հարվածային հզոր ալիք և նեյտրոնների ու γ -ճառագայթման ուժգին հոսք:

Միջուկային ռեակտոր: Ատոմային էներգիան խաղաղ նպատակներով օգտագործելու համար անհրաժեշտ է շոթայական ռեակցիան կառավարել, այսինքն՝ այնպես անել, որ նեյտրոնների քանակը միջավայրում անընդհատ մնա մույնը, որպեսզի շոթայական ռեակցիան պայթյունի չվերածվի: **Այն սարքը, որտեղ տեղի է ունենում ծանր միջուկների բաժանման կառավարվող շոթայական ռեակցիան, կոչվում է միջուկային (կամ ատոմային) ռեակտոր:**

Գոյություն ունեն երկու տիպի՝ դանդաղ և արագ նեյտրոններով աշխատող միջուկային ռեակտորներ: Դանդաղ կամ ջերմային կոչվում են այն նեյտրոնները, որոնց էներգիաները $0,005 \div 0,1$ էՎ տիրույթում են: Արագ անվանում են $10^5 \div 10^8$ էՎ էներգիաներով նեյտրոնները:

Դանդաղ նեյտրոններով աշխատող միջուկային ռեակտոր: Այդ ռեակտորում՝ որպես էներգիայի աղբյուր (վառելիք), օգտագործվում է մինչև 5% հարստացված ուրան-235 իզոտոպը:

126-րդ նկարում պատկերված է միջուկային ռեակտորի սկզբունքային սխեման: Ռեակտորում՝ ջրում տեղադրված հերմետիկ խողովակների մեջ, կարող են իջեցվել ուրանի (1) ձողերը, որոնց զանգվածներն առանձին-առանձին փոքր են



Նկ. 126. Միջուկային ռեակտորի սկզբունքային սխեման. 1. ուրանի ձողեր, 2. մետաղե խողովակներ, 3. ռեակտորի պատերը (պատված բերիլիումով), 4. նեյտրոններ կլանող ձողեր, 5. վերարային ձողեր



Էգրիկո Ֆերմի

1901-1954

Իտալացի հռչակավոր ֆիզիկոս, արոմային և միջուկային ֆիզիկայի, վիճակագրական ֆիզիկայի և աստղաֆիզիկայի բնագավառների խոշորագույն մասնագետ, նեյտրոնային ֆիզիկայի հիմնադիր: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1938):



Իզոր Կուրչատով

1903-1960

Ռուս նշանավոր ֆիզիկոս: Հիմնական աշխատանքները վերաբերում են միջուկային ֆիզիկային: Արեղծել է առաջին միջուկային ռեակտորը Եվրոպայում (1946), խորհրդային առաջին արոմային ռումբը (1949) և աշխարհում առաջին արոմային էլեկտրակայանը:

Այսպիսով՝ միջուկների ճեղքումը ռեակտորում տեղի է ունենում հաստատուն արագությամբ, այսինքն՝ ժամանակի ընթացքում ճեղքումների թիվը չի փոփոխվում: Ճեղքման հետևանքով ուրանը տրոհվում է բեկորների, որոնք թռչում են մեծ արագություններով: Բախվելով ջրի մոլեկուլներին՝ նրանք իրենց էներգիայի մեծ մասը փոխանցում են նրանց, որի հետևանքով ջուրը խիստ տաքանում է: Ջու-

կրիտիկական զանգվածից: Եթե բոլոր ձողերը միասին իջեցվեն ռեակտորում տեղավորված մետաղե (2) խողովակների մեջ, ապա ուրանի գումարային զանգվածը կդառնա կրիտիկականից մեծ (ռեակտորում ուրանի կրիտիկական զանգվածը մոտավորապես 250 գ է): Բայց եթե անգամ բոլոր ձողերը միասին իջեցվեն ռեակտորի մեջ, շոթայական ռեակցիա չի սկսվի, քանի որ նեյտրոնների թիվը բավարար չէ մման ռեակցիայի համար: Ուրանի բաժանումից առաջացած նեյտրոններն ունեն մեծ արագություններ, ուստի՝ նախ՝ դժվար են կլանվում ուրանի իզոտոպում, մյուս կողմից՝ շատ արագ հեռանում են ակտիվ միջավայրից: Ուրան-235-ի՝ նեյտրոն կլանելու հավանականությունը մեծանում է վերջինիս արագության նվազմանը զուգընթաց, ուստի՝ նեյտրոնները նախապես դանդաղեցվում են: Դանդաղեցման համար ռեակտորի մեջ ջուր են լցնում (ավելի լավ է՝ ծանր ջուր) կամ տեղավորում են գրաֆիտ, որոնց մոլեկուլներին հարվածելիս նեյտրոններն իրենց կիներտիկ էներգիայի մեծ մասը հաղորդում են նրանց՝ փոքրացնելով իրենց արագությունը: Ջուրն այդ ընթացքում խիստ տաքանում է: Այս ճանապարհով ապահովվում է նեյտրոնների կլանումն ուրանի իզոտոպում: Բացի այդ՝ ռեակտորի (3) պատերը պատում են հատուկ նյութերով (օրինակ՝ բերիլիում), որոնք անդրադարձնում են նեյտրոնները:

Նման պայմաններում շոթայական ռեակցիայի համար նեյտրոնների քանակը ռեակտորում դառնում է բավարար: Սակայն նեյտրոնների այդ քանակն այլևս չպետք է ավելանա, որպեսզի շոթայական ռեակցիան չվերածվի պայթյունի: Դա կատարվում է բորի (B) կամ կադմիումի (Cd) հատուկ (4) ձողերի միջոցով, որոնք իջեցվում են ռեակտորի մեջ՝ «ավելորդ» նեյտրոնները կլանելու համար: Այսպիսով՝ իջեցնելով կամ բարձրացնելով այդ ձողերը՝ կարելի է կառավարել ռեակտորում միջուկների բաժանման պրոցեսը: Եթե ինչ-որ պատճառով ռեակցիայի պրոցեսն արագանա, վթարային (5) ձողերը կիջնեն ռեակտորի մեջ՝ դադարեցնելով շոթայական ռեակցիան:

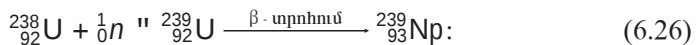
ըը, կատարելով շրջանառություն, սառնեցման տարայում իր ներքին էներգիան հաղորդում է երկրորդ կոնտուրով հոսող ջրին: Երկրորդ կոնտուրի ջուրը ստացված ջերմաքանակի հաշվին վերածվում է գոլորշու, որն էլ ատոմային կայանքում կատարում է բանող մարմնի դեր. այն աշխատեցնում է էլեկտրակայանի հոսանք արտադրող գեներատորն այնպես, ինչպես դա տեղի է ունենում ջերմաէլեկտրակայաններում: Ջերմաէլեկտրակայաններում ջուրը վերածվում է գոլորշու վառելանյութի այրման, իսկ ատոմային էլեկտրակայաններում՝ միջուկային ռեակցիայում անջատված էներգիայի շնորհիվ:

Առաջին անգամ ուրանի ճեղքման շղթայական ռեակցիան իրականացվել է 1942 թ., ԱՄՆ-ում՝ իտալացի ֆիզիկոս Էմիլիո Ֆերմիի ղեկավարությամբ: Աշխարհում առաջին ատոմային էլեկտրակայանը կառուցվել է 1954 թ., Ռուսաստանի Օբինիսկ քաղաքում՝ ռուս ֆիզիկոս Իգոր Կուրչատովի ղեկավարությամբ:

Դանդաղ նեյտրոններով ռեակտոր է տեղադրված Մեծամորում կառուցված և 1979 թ. շահագործման հանձնված Հայկական ատոմակայանում, որի հզորությունը 440 ՄՎտ է:

Կողմակցում

Արագ նեյտրոններով ռեակտոր: Եթե որպես միջուկային վառելանյութ օգտագործվում է հարստացված ուրան, որի մեջ ուրան-235-ի պարունակությունը զգալիորեն մեծացվել է, ապա միջուկային ռեակտորը կարող է աշխատել առանց բաժանման ռեակցիայում առաջացող արագ նեյտրոնների դանդաղեցուցչի օգտագործման: Այդպիսի ռեակտորում արագ նեյտրոնների ավելի քան 1/3-ը կլանվում է ուրան-238 իզոտոպի միջուկներում, որի հետևանքով առաջանում են ուրան-239 իզոտոպի միջուկներ: Այդ միջուկները ճառագայթաակտիվ են և β -տրոհման արդյունքում (տրոհման կիսապարբերությունը՝ $T_{1/2} = 23,5$ րոպե) փոխակերպվում են $Z = 93$ կարգաթվով նեպտունիում (Np) տարրի միջուկների՝



Նեպտունիումի միջուկը նույնպես բետա-տրոհման հետևանքով (տրոհման կիսապարբերությունը՝ $T_{1/2} = 2,35$ օր) փոխակերպվում է $Z = 94$ կարգաթվով պլուտոնիում (Pu) տարրի միջուկի՝



Այսպիսով՝ ուրան-238-ի միջուկն արագ նեյտրոն կլանելով՝ փոխակերպվում է պլուտոնիում-239-ի միջուկի: Պլուտոնիում-239-ի կիսատրոհման պարբերությունը բավական մեծ է՝ 24360 տարի, այնպես որ այն կարելի է բաժանել ուրանից և կուտակել զգալի քանակություններով:

Պլուտոնիում-239-ի միջուկը նեյտրոն կլանելիս, ինչպես և ուրան-235-ի միջուկը, բաժանվում է՝ արձակելով միջին հաշվով 3 նեյտրոն, որոնք կարող են ապահովել շղթայական ռեակցիայի ընթացքը:

Ուրեմն՝ արագ նեյտրոններով ռեակտորը ոչ միայն ուրան-235 իզոտոպում միջուկային ռեակցիա է իրականացնում, այլև միաժամանակ համեմատաբար էժան և տարածված ուրան-238 իզոտոպից նոր միջուկային վառելանյութ՝ պլուտոնիում-239 ստանալու հնարավորություն է տալիս:

Արագ նեյտրոններով ռեակտորում 1 կգ ուրան-235-ից ստացվում է 1 կգ-ից ավելի պլուտոնիում-239, որը կարելի է օգտագործել շրթայական ռեակցիայի իրականացման և ուրան-238-ից պլուտոնիումի նոր քանակությամբ ստանալու համար: Այսպիսով՝ արագ նեյտրոններով ռեակտորը միաժամանակ և՛ էներգիա է արտադրում, և՛ միջուկային վառելանյութի ռեակտոր-բազմացնող է, որի միջոցով կարելի է միջուկային էներգիա ստանալ ուրան-238 իզոտոպից, որը կազմում է բնության մեջ հանդիպող ուրանի մոտավորապես 99,3%-ը:



Շարքեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞ր ռեակցիան է կոչվում շրթայական 2. Ի՞նչ է կրիտիկական զանգվածը: 3. Ինչո՞ւ են ռեակտորում նեյտրոնները դանդաղեցվում: 4. 1 կգ մագնիսի այրումից անջատվում է $4 \cdot 10^4$ կՋ էներգիա: Այդ էներգիան համեմատեք 1 կգ ուրան-235-ի բաժանման պրոցեսում անջատված էներգիայի հետ: 5. Ո՞ր սարքն է կոչվում միջուկային ռեակտոր: 6. Ի՞նչ հիմնական մասերից է կազմված միջուկային ռեակտորը: 7. Ո՞րն է դանդաղեցուչի դերը ռեակտորում: 8. Ի՞նչ նյութերից են պարարաստում ռեակտորի կառավարող ձողերը: 9. Ի՞նչ միջուկային վառելիք է օգտագործվում դանդաղ նեյտրոններով աշխատող ռեակտորում: 10. Ի՞նչ միջուկային վառելիք է օգտագործվում արագ նեյտրոններով աշխատող ռեակտորում: 11. Ինչո՞ւ են արագ նեյտրոններով աշխատող ռեակտորներն ավելի հեռանկարային:

Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. Որոշել, թե ի՞նչ մասնիկներով ռմբակոծելիս է իրականանում հետևյալ միջուկային ռեակցիան.

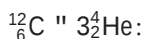


Լուծում: Անհայտ մասնիկը նշանակենք ${}^A_Z\text{X}$ -ով: Համաձայն էլեկտրական լիցքի պահպանման օրենքի՝ $Z + 5 = 3 + 2$, որտեղից $Z = 0$, իսկ համաձայն նուկլոնների թվի պահպանման օրենքի՝ $A + 10 = 7 + 4$, որտեղից $A = 1$: Այսինքն՝ անհայտ մասնիկը նեյտրոն է՝ ${}^1_0\text{n}$:

Պատասխան՝ նեյտրոններով:

2. Որքա՞ն էներգիա է անհրաժեշտ ${}^{12}_6\text{C}$ միջուկը երեք α -մասնիկի բաժանելու համար:

Լուծում: Գրենք բաժանման ռեակցիան.

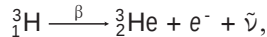


Ռեակցիայի ելանյութի զանգվածը՝ $m_1 = m({}^{12}_6\text{C}) = 12,007809$ գ.ա.մ., իսկ արգասիքների զանգվածը՝ $m_2 = 3m({}^4_2\text{He}) = 3 \cdot 4,002603$ գ.ա.մ.: Չանգվածների տարբերությունը՝ $\Delta m = m_1 - m_2 = -0,007809$ գ.ա.մ., որին համապատասխանում է $\Delta E = \Delta mc^2 = -7,29$ ՄէՎ էներգիա («-» նշանը ցույց է տալիս, որ ${}^{12}_6\text{C}$ միջուկին պետք է էներգիա հաղորդել):

Պատասխան՝ անհրաժեշտ է 7,29 ՄէՎ:

3. Գ-նահատեք տրիտիումի β -տրոհման պրոցեսում արձակված էլեկտրոնի առավելագույն էներգիան:

Լուծում: Գ-րենք տրիտիումի β -տրոհման ռեակցիան.



որտեղ ${}^3_2\text{He}$ -ը հելիումի իզոտոպն է, e^- -ն՝ էլեկտրոնը, $\bar{\nu}$ -ն՝ հակաՆեյտրինոն: Էլեկտրոնի էներգիան կլինի առավելագույնը, եթե ռեակցիայում անջատված ամբողջ էներգիան հաղորդվի էլեկտրոնին (իրականում սա նշանակում է, որ էլեկտրոնի էներգիան շատ մեծ է և՛ ${}^3_2\text{He}$ -ի, և՛ $\bar{\nu}$ -ի ստացած էներգիաներից): Նկատի ունենալով, որ $m_1 = m({}^3_1\text{H}) = 3,016050$ գ.ա.մ., $m_2 = m({}^3_2\text{He}) = 3,016030$ գ.ա.մ., էլեկտրոնի առավելագույն էներգիայի համար կստանանք՝

$$E_{\max}^e = \Delta mc^2 = 0,00002 \cdot 931,481 \text{ ՄէՎ} = 18,62 \text{ կէՎ}:$$

Պատասխան՝ 18,62 կէՎ:

4. ${}^7_3\text{Li}$ միջուկը զավթում է դանդաղ նեյտրոն և արձակում մեկ γ -քվանտ: Որքա՞ն է γ -քվանտի էներգիան:

Լուծում: Գ-րենք դանդաղ նեյտրոնի զավթման ռեակցիան.



Դանդաղ նեյտրոնի կինետիկ կինետիկ էներգիան էլեկտրոնվոլտի մասեր է կազմում, ուստի՝ այն կարելի է անտեսել γ -քվանտի էներգիայի նկատմամբ: Հաշվենք զանգվածների տարբերությունը՝ $\Delta m = m_1 - m_2 = m({}^1_0n) + m({}^7_3\text{Li}) - m({}^8_3\text{Li}) = (1,008655 + 7,016004 - 8,022487)$ գ.ա.մ. $= 0,002172$ գ.ա.մ.: γ -քվանտի էներգիան՝ $E_\gamma = \Delta mc^2 = 0,002172 \cdot 931,481 \text{ ՄէՎ} = 2,02 \text{ ՄէՎ}:$

Պատասխան՝ 2,02 ՄէՎ:

5. Որքա՞ն էներգիա է անջատվում ${}^{235}_{92}\text{U}$ միջուկի տրոհման հետևյալ ռեակցիայում՝



եթե $m_{\text{U}} = 235,0439$ գ.ա.մ., $m_{\text{Ce}} = 139,9054$ գ.ա.մ., $m_{\text{Zr}} = 93,9036$ գ.ա.մ., $m_e = 0,00055$ գ.ա.մ.:

Լուծում: Չանգվածի պակասորդը՝

$$\Delta m = m_1 - m_2 = (m_{\text{U}} + m_n) - (m_{\text{Ce}} + m_{\text{Zr}} + 2m_n + 6m_e) = 0,223 \text{ գ.ա.մ.},$$

ուստի անջատված էներգիան՝ $\Delta E = \Delta mc^2 = 208 \text{ ՄէՎ}:$

Պատասխան՝ 208 ՄէՎ:

6. Ռադիումի (${}^{226}_{88}\text{Ra}$, $m({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 226,0253$ գ.ա.մ.) արձակած α -մասնիկի կինետիկ էներգիան՝ $E_1 = 4,78 \text{ ՄէՎ}$, իսկ ռեակցիայում առաջացող ռադոնի ($Z = 86$) միջուկինը՝ $E_2 = 0,09 \text{ ՄէՎ}$: Որքա՞ն է ռադոնի ատոմային զանգվածը:

Լուծում: Գ-րենք այդ միջուկային ռեակցիայի հավասարումը.



$$m_1 = m({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 226,02536 \text{ գ.ա.մ.}, \quad m_2 = m({}^4_2\text{He}) + m({}^{222}_{86}\text{Rn}):$$

Համաձայն էներգիայի պահպանման օրենքի՝

$$\Delta E = \Delta mc^2 = m_1 - 6m({}^4_2\text{He}) + m({}^{222}_{86}\text{Rn}), \quad c^2 = E_1 + E_2,$$

որտեղից

$$m^{222}_{86}\text{Rn}h = m_1 - m^{4}_{2}\text{He}h - E_1 + E_2/c^2:$$

Նկատի ունենալով, որ

$$(E_1+E_2)/c^2 = 4,87 \text{ ՄէՎ}/c^2 = (4,87/931,481) \text{ գ.ա.մ.} \approx 0,0052 \text{ գ.ա.մ.},$$

կստանանք՝

$$m(^{222}_{86}\text{Rn}) = (226,0253 - 4,0026 - 0,0052) \text{ գ.ա.մ.} = 222,0175 \text{ գ.ա.մ.}:$$

Պատասխան՝ 222,0175 գ.ա.մ.:

§ 62. ԶԵՐՄԱՍԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՌԵԱԿՑԻԱՆԵՐ



Անդրեյ Սախարով

1921-1989

Ռուս խոշորագույն ֆիզիկոս-տեսաբան, ջերմամիջուկային սինթեզի, փորձական մաս-նիկների ֆիզիկայի և գրավի-տային բնագավառների խոշորագույն մասնագետ, ջրածնային ռումբի ստեղծող: Խաղաղության Նոբելյան մրցանակի դափնեկիր (1975):

Նախորդ պարագրաֆում ցույց տրվեց, որ թեթև տարրերի սինթեզի ռեակցիայում մույնպես պետք է անջատվի զգալի էներգիա: Այսպես՝ եթե ուրանի միջուկի ճեղքման ժամանակ անջատվում է 208 ՄէՎ էներգիա, մեկ մուկլոնի հաշվարկով՝ 0,9 ՄէՎ, ապա թեթև տարրերի սինթեզի (6.28) ռեակցիայում անջատ-վում է 26 ՄէՎ էներգիա կամ մեկ մուկլոնի հաշվար-կով՝ 6,5 ՄէՎ: Այլ կերպ ասած՝ սինթեզի ռեակցիան էներգիական տեսանկյունից ավելի շահավետ է:

Սինթեզի ռեակցիա իրականացնելու համար անհրաժեշտ է թեթև տարրերի միջուկները մոտեցնել միմյանց մինչև 10^{-15} մ՝ հաղթահարելով դրանց էլեկտ-րաստատիկ վանողության առեղծվածը: Դրան կարելի է հասնել մոտ 10^8 Կ ջերմաստիճանում, երբ միջուկնե-րի կինետիկ էներգիան բավարար է էլեկտրաստա-տիկ վանողությամբ պայմանավորված էներգիական արգելքը հաղթահարելու և միջուկներն ընդհուպ իրար մոտեցնելու համար: **Շատ բարձր ջերմաստիճաննե-րում ընթացող թեթև տարրերի միջուկների սինթեզի**

ռեակցիաներն անվանում են ջերմամիջուկային ռեակցիաներ:

Առաջին անգամ պրակտիկայում մեծ ջերմաստիճաններ և ջերմամիջուկա-յին ռեակցիաներ ստացվել են միջուկային պայթեցումների ընթացքում: Այդպիսի բարձր ջերմաստիճաններ ստանալու համար միջուկային ռումբում նախ տեղի է ունենում ատոմային պայթյուն, որի հետևանքով էլ իրականացվում է ջերմամիջու-կային պայթյունը:

Միջուկային ռումբերում կիրառվում է ջրածնի իզոտոպների՝ դեյտերիումի և տրիտիումի սինթեզի ռեակցիան՝



Միջուկային զեմքն ստեղծել է ռուս ֆիզիկոս Անդրեյ Սախարովը: Ատոմա-յին և ջերմամիջուկային զեմքի համակարգի խոշոր մասնագետ, մեծ ֆիզիկոս և ճարտարագետ Սամվել Քոչարյանցի գիտական գործունեությունը, հան-

գամանքների բերումով, անհայտ է մնացել լայն հասարակությանը:

Ջերմամիջուկային ռեակցիաները կարևոր դեր են խաղում տիեզերքում: Պարզվում է, որ աստղերը, այդ թվում՝ Արեգակը, կազմված են ջրածնից, որի ատոմները, բարձր ջերմաստիճաններում միանալով, վերածվում են հելիումի: Այլ կերպ ասած՝ աստղերի արձակած էներգիան ջերմամիջուկային ծագում ունի: Հետազայում հելիումի միջուկների միացումից առաջանում են ավելի ծանր տարրեր: Այս ճանապարհով է առաջանում տիեզերական նյութը:

Կառավարվող ջերմամիջուկային ռեակցիաներ: Հաշվի առնելով ջերմամիջուկային ռեակցիաների ժամանակ առաջացող էներգիայի ահռելիությունը և այն փաստը, որ այս ռեակցիաների ընթացքում միջուկային ճառագայթում տեղի չի ունենում, շատ գայթակղիչ է դառնում այդ ռեակցիաները կառավարելի դարձնելու հեռանկարը:

Ջերմամիջուկային ռեակցիաները կառավարելի դարձնելու համար անհրաժեշտ է, ինչպես նշել ենք, մախ ստանալ 10^8 Կ ջերմաստիճան և այն պահպանել երկար ժամանակ: Այդպիսի ջերմաստիճաններ կարելի է ստանալ պլազմայում հզոր էլեկտրական պարպումների միջոցով: Բայց այստեղ առաջանում է երկրորդ խնդիրը. ինչպես պահել պլազման տվյալ ծավալում, որպեսզի այն չհալվի անոթի պատերին: Հակառակ դեպքում պատերն անմիջապես կգոլորշիանան: Ուսումնասիրվող հնարավորություններից մեկն այսօր շատ ուժեղ մագնիսական դաշտերի միջոցով բարձրջերմաստիճանային պլազման սահմանափակելու ճանապարհն է:

Ներկայումս կատարվում են լայնածավալ հետազոտություններ ջերմամիջուկային ռեակտոր ստեղծելու ուղղությամբ: Բանն այն է, որ երկրագնդի ջրածնի պաշարները գործնականորեն անսպառ են, ուստի՝ եթե հնարավոր լիներ իրականացնել կառավարվող ջերմամիջուկային ռեակցիա, ապա մարդկությունն ընդմիշտ ապահովված կլիներ էներգիայի անսպառ աղբյուրով:



Սամվել Քոչարյանց

1909-1993

Հայ խոշորագույն գիտնական, ջերմամիջուկային և հրթիռամիջուկային զենքերի համակարգերի սրբեղծողներից, գլխավոր կոնսպիրուկոր

Խորագրված

Ջերմամիջուկային սինթեզի իրականացման ճանապարհները: Իսկ ի՞նչ է անհրաժեշտ կառավարվող ջերմամիջուկային սինթեզի իրականացման համար:

Երկու դրական լիցքավորված միջուկներ միացնելու համար անհրաժեշտ է հաղթահարել նրանց միջև գործող կուլոնյան հզոր վանողության ուժը, որը համեմատաբար թույլ է, երբ փոխազդող միջուկների կարգաթվերը փոքր են, ուստի՝ միջուկային սինթեզ հնարավոր է իրականացնել առաջին հերթին ջրածնի ($Z = 1$) իզոտոպների միջոցով:

Միջուկային ռեակցիան դեյտերիումի (${}^2_1\text{H}$) երկու միջուկների միջև կընթանա, եթե դրանք մոտենան մինչև $r_0 \approx 10^{-14}$ մ: Դա հնարավոր կլինի, եթե նրանց ջերմային շարժման $\bar{E}$ միջին կինետիկ էներգիան, որը որոշվում է գազի ջերմաստիճանով ($\bar{E} = 3k_B T / 2$, k_B -ն Բոլցմանի հաստատունն է), լինի

առնվազն հավասար երկու պրոտոնների կուլոնյան փոխազդեցության էներգիային: Այս պայմանից կարելի է գնահատել անհրաժեշտ ջերմաստիճանը՝

$$T = \frac{2}{3} \frac{e^2}{r_0 k_B} \cdot 10^9 \text{ Կ:}$$

Իրականում դեյտերիումի երկու միջուկների միջև ռեակցիան կարող է ընթանալ մոտ 10^9 Կ-ից էապես ցածր, ընդհուպ միջև 10^7 Կ ջերմաստիճաններում: Հետևաբար՝ ջերմամիջուկային ռեակցիաները կառավարելի դարձնելու համար անհրաժեշտ է նախ ստանալ $10^7 \div 10^8$ Կ ջերմաստիճան և այն պահպանել որոշ ժամանակ: Այսպիսի ջերմաստիճաններ կարելի է ստանալ պլազմայում՝ այն տաքացնելով էլեկտրական հոսանքով:

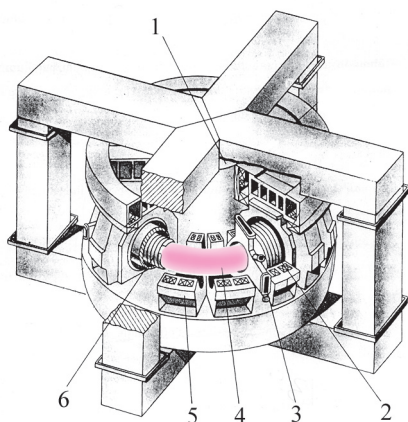
Ներկայումս բարձրջերմաստիճանային պլազման պահելու նպատակով օգտագործում են այսպես կոչված «մագնիսական թակարդներ», որոնք ստեղծվում են ուժեղ մագնիսական դաշտերի կիրառմամբ: Մագնիսական դաշտի զբաղեցրած ծավալը պետք է համեմատաբար փոքր լինի (մի քանի մ³), այլապես ռեակտորն էներգիայի մեծ ծախսերի պատճառով կլինի տնտեսապես ոչ շահավետ:

Ռուսաստանում ստեղծված «Տոկամակ-10» փորձարարական ռեակտորում (նկ. 127) հաջողվել է ստանալ $1,3 \cdot 10^7$ Կ ջերմաստիճան:

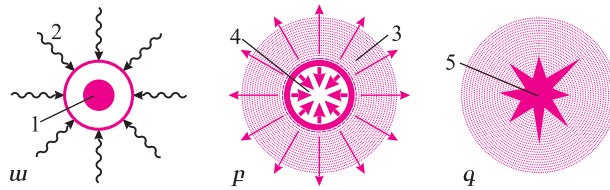
Կառավարվող ջերմամիջուկային սինթեզի իրականացման երկրորդ հնարավոր ճանապարհը ջրածնի տաքացումն է լազերային ճառագայթման օգնությամբ:

Այդ նպատակով մի քանի հզոր լազերային փնջեր կիզակետվում են թիրախի վրա, որը 0,1-ից մինչև 1 մմ տրամագծով և 0,001 մմ հաստությամբ պատերով ապակե կամ մետաղե գնդիկ է

(նկ. 128, ա): Այն լցնում են դեյտերիումի և տրիտիումի խառնուրդով, որտեղ ճնշումը մի քանի տասնյակ մթնոլորտ է: Ուժեղ ճառագայթման ազդեցությամբ թիրախի թաղանթը բուռն կերպով գոլորշիանում է: Առաջացած նոսր, տաք պլազմայում՝ «պսակում» (նկ. 128, բ) ձևավորվում է թիրախի ներքին մասը սեղմող ճնշում, որի ազդեցությամբ խառնուրդը սեղմվում և տաքանում է: Թիրախի կենտրոնական մասում սկսվում են սինթեզի ռեակցիաներ, որտեղ անջատվող էներգիան էլ ավելի է տաքացնում խառնուրդը: Տեղի է ունենում կարճատև ջերմամիջուկային միկրոպայթյուն (նկ. 128, գ): Ջերմամիջուկային ռեակցիայում անջատվող էներգիան օգտագործելու համար պետք է կարողանալ կառավարել նրա ընթացքը:



Նկ. 127. «Տոկամակ-10» փորձարարական ռեակտորի կառուցվածքի սխեման. 1. մագնիսի միջուկ, 2. արտաքին խցիկ, 3. աշխատանքային գազի մուտքը, 4. պլազմա, 5. տորոիդային մագնիսական դաշտ ստեղծող կոճեր, 6. ներքին խցիկ



Նկ. 128. Լազերային ճառագայթման ազդեցությունը ջերմամիջուկային քիրախի վրա.

1. քիրախ, 2. լազերային ճառագայթում, 3. պսակ,
4. սեղմված ջերմամիջուկային պլազմա, 5. միկրոպայթյուն

Կառավարվող ջերմամիջուկային ռեակցիան բնապահպանական տեսակետից մաքուր և գործնականորեն անսպառ էներգիայի աղբյուր է, ուստի՝ ջերմամիջուկային ռեակտորի ստեղծման նպատակով ներկայումս կատարվում են լայնածավալ հետազոտություններ:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ է ջերմամիջուկային ռեակցիան: 2. Ինչու՞ թեթև փարերի միջուկների սինթեզի ռեակցիաներն ընթանում են միայն շար բարձր ջերմաստիճաններում: 3. Գրե՞ք ջերմամիջուկային ռեակցիայի՝ ձեզ հայրնի հավասարումները: 4. Ի՞նչ եղանակով է պահվում բարձր ջերմաստիճանային պլազման: 5. Գնահատե՞ք ջերմամիջուկային ռեակցիայի համար պահանջվող ջերմաստիճանը: 6. Ի՞նչ կառուցվածք ունի «Տոկամակ-10» փորձարարական ռեակտորը: 7. Ինչպե՞ս կարելի է իրականացնել ջերմամիջուկային սինթեզ լազերների միջոցով:

§ 63. ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՈՒՄՆԵՐԻ ԿԵՆՍԱԲԱՆԱԿԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ

Կենդանի բջիջը բարդ մեխանիզմ է, որը չի կարող բնականոն գործել նույնիսկ փոքր վնասվածքների դեպքում: Բջիջներին էական վնասվածք կարող է հասցնել միջուկային ճառագայթումը, որի ազդեցությամբ կենդանի օրգանիզմն ստանում է ճառագայթային հիվանդություն: Ճառագայթման մեծ ուժգնության դեպքում կենդանի օրգանիզմները ոչնչանում են:

Միջուկային ճառագայթումն իոնացնում է կենսաբանական օբյեկտների ատոմները և մոլեկուլները, որի հետևանքով փոխվում է դրանց քիմիական ակտիվությունը: Ճառագայթումների նկատմամբ ավելի զգայուն են բջիջների, հատկապես՝ արագ բաժանվող բջիջների միջուկները: Այդ պատճառով ճառագայթումն առաջին հերթին ազդում է ողնուղեղի վրա՝ խախտելով նրա արյունաստեղծ ֆունկցիան:

Ճառագայթահարումը մեծ ազդեցություն է ունենում ժառանգականության վրա՝ վնասելով քրոմոսոմների գեները:

Ճառագայթման կենսաբանական ազդեցությունը բնութագրող մեծությունները: Միջուկային ճառագայթման ազդեցության բնույթը կախված է ճառագայթման տեսակից և նրա կլանված բաժնաչափից (դոզայից):

Ճառագայթման կլանված բաժնաչափը ճառագայթման էներգիայի հարաբերությունն է ճառագայթահարվող մարմնի զանգվածին՝

$$D = \frac{E}{m}: \quad (6.29)$$

Միավորների միջազգային համակարգում ($ՄՀ$) կլանված ճառագայթման բաժնաչափի միավորը կոչվում է գրեյ ($Գր$)։

$$1 \text{ Գր} = 1 \frac{\mathcal{D}}{\text{կգ}}:$$

Ճառագայթման բնական ֆոնը (տիեզերական ճառագայթումը, շրջապատող միջավայրի՝ այդ թվում Երկրի ընդերքի, ավարների, երկաթբետոնի ճառագայթակախվածությունը) մեկ մարդու համար տարեկան $0,002 \text{ Գր}$ է։ Ճառագայթման հետ գործ ունեցող մարդկանց համար տարեկան առավելագույն բաժնաչափը սահմանվել է $0,05 \text{ Գր}$ ։ Կարճ ժամանակամիջոցում ստացած $3 \div 10 \text{ Գր}$ բաժնաչափը մահացու է մարդու համար։

Ճառագայթման ենթարկվածության բաժնաչափն իոնայման հետևանքով առաջացած լիցքերի հարաբերությունն է ճառագայթահարված մարմնի զանգվածին։

Գործնականում լայնորեն կիրառվում է ճառագայթման ենթարկվածության բաժնաչափի արտահամակարգային միավորը՝ ռենտգենը (կրճատ՝ Ռ)։ Այն ռենտգենյան և γ -ճառագայթման իոնացնող հատկության չափի միավորն է։ Ճառագայթման բաժնաչափը հավասար է 1 Ռ-ի , եթե 1 սմ^3 չոր օդում նորմալ պայմաններում (0°C ջերմաստիճան և $760 \text{ մմ սնդ. սյան ճնշում}$) առաջանում է այնքան իոն, որ դրանց գումարային դրական կամ բացասական լիցքը կազմում է $3 \cdot 10^{-10} \text{ Կլ}$ ։ Այդ դեպքում ստացվում է մոտավորապես $2 \cdot 10^9$ զույգ իոն։ Առաջացած իոնների բանակը կախված է նյութի կլանած էներգիայից։ Գործնականում 1 Ռ-ը մոտավորապես հավասար է $0,01 \text{ Գր}$ ճառագայթման կլանված բաժնաչափի։

Կենդանի օրգանիզմների վրա ճառագայթահարման ազդեցությունը կախված է ճառագայթման տեսակից։ Ընդունված է տարբեր ճառագայթումների կենսաբանական ազդեցությունը համեմատել ռենտգենյան և γ -ճառագայթման կենսաբանական ազդեցության հետ։ Եթե վերջինիս ազդեցության գործակիցը համարենք 1 , ապա պարզվում է, որ դանդաղ նեյտրոնների կենսաբանական ազդեցությունը 3 է, արագ նեյտրոններինը, պրոտոններինը և α -մասնիկներինը՝ 10 ։

Միջուկային ճառագայթման ազդեցությունը մարդու վրա։ Միջուկային ճառագայթման ազդեցությունը մարդու վրա կախված է ոչ միայն ճառագայթման տեսակից և ճառագայթման բաժնաչափից, այլև դրա ընդունման ժամանակից։ Տարբեր ժամանակներում մարդու ստացած նույն բաժնաչափը տարբեր ձևերով է ազդում նրա վրա։ 3 -րդ աղյուսակում բերված են միջուկային ճառագայթման տարբեր բաժնաչափերի ազդեցությունները մարդու օրգանիզմի վրա։

Ճառագայթահարումից առաջին հերթին վնասվում են մոլեկուլները, որը հանգեցնում է բջիջների ոչնչացման։ Միջուկային ճառագայթումը խախտում է բջիջների բաժանման պրոցեսը։ Մարդու օրգանիզմում ճառագայթման նկատմամբ առավել զգայուն են ողնուղեղը, փայծաղը, գեղձերը և ստամոքսը։ Մեծ բաժնաչափերի դեպքում մարդու մահը վրա է հասնում ստամոքսի կամ ողնուղեղի վնասումից։

Բաժնաչափ, Ռ-	Ազդեցությունը
0÷25	Ազդեցության ակնհայտ հայտանիշի բացակայություն
25÷50	Արյան կազմության փոփոխության հնարավորություն
50÷100	Արյան կազմության փոփոխություն
100÷200	Աշխատունակության կորստի հնարավորություն
200÷400	Անաշխատունակություն: Հնարավոր է մահ:
400÷600	Մահվան հավանականությունը 50 % է:
600-ից բարձր	Մահացու բաժնաչափ

Օրգանիզմի պաշտպանությունը ճառագայթումից: Ճառագայթման ամեն մի աղբյուրի (ճառագայթաակտիվ իզոտոպներ, ռեակտորներ և այլն) հետ գործ ունենալիս անհրաժեշտ է միջոցներ ձեռնարկել այն մարդկանց ճառագայթային պաշտպանության համար, ովքեր կարող են հայտնվել ճառագայթման ազդեցության գոտում:

Պաշտպանության ամենապարզ միջոցը սպասարկող անձնակազմին ճառագայթման աղբյուրից բավականաչափ հեռացնելն է: Ոչ մի դեպքում չի կարելի ճառագայթաակտիվ մմուշը վերցնել ձեռքերով. անհրաժեշտ է օգտվել երկար ունեղիներից: Այն դեպքերում, երբ ճառագայթման աղբյուրից բավականաչափ հեռանալ հնարավոր չէ, ճառագայթումից պաշտպանվելու համար օգտագործում են կլանող նյութից միջնորմներ:

Ամենահեշտը α -մասնիկներից պաշտպանվելն է, քանի որ ճառագայթաակտիվ նյութից մի քանի սանտիմետր հեռավորությամբ դրանք կլանվում են օդում կամ հագուստում: Ավելի դժվար է β -ճառագայթումից պաշտպանվելը, քանի որ դրանք օդում անցնում են մինչև 5 մ հեռավորություն: Այդ պատճառով β -ակտիվ մմուշները պահում են հատուկ տուփերում:

Ամենադժվարը γ -ճառագայթներից և նեյտրոններից պաշտպանվելն է՝ դրանց ներթափանցման մեծ ունակության պատճառով: γ -ճառագայթներն առավել լավ կլանում է 10 սմ և ավելի հաստությամբ կապարը: Դանդաղ նեյտրոնները լավ են կլանվում բորում և կադմիումում: Արագ նեյտրոնները նախապես դանդաղեցվում են գրաֆիտով:

Չեռնոբիլի ատոմակայանի (Ուկրաինա, 1986 թ.) և Ֆուկուսիմայի ատոմակայանի երկրորդ բլոկի (Ճապոնիա, 2011 թ.) վթարները ցույց տվեցին ճառագայթաակտիվության ահավոր վտանգավորությունը: Բոլոր մարդիկ պետք է պատկերացում ունենան այդ վտանգի և դրանից պաշտպանվելու միջոցների մասին:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ինչու՞ է կենսաբանորեն վրանգավոր ճառագայթաակտիվ ճառագայթումը:
2. Ո՞ր մեծություններն են բնութագրում ճառագայթման կենսաբանական ազդեցությունը:
3. Ինչպե՞ս է սահմանվում 1Ռ-ն (ռենտգենը):
4. Ինչպե՞ս են ազդում ճառագայթահարման փոքր բաժանաչափերը մարդու օրգանիզմի վրա:
5. Համեմատե՛ք α -, β - և γ -ճառագայթումներից պաշտպանվելու հնարավորությունները:

§ 64. ՏԱՐՐԱԿԱՆ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐ

Մարդը միշտ ձգտել է շրջակա աշխարհի աներևակայելի բազմազանությունը և բարդությունը բացատրել՝ ներկայացնելով այն ավելի պարզ, նախնական օբյեկտների՝ այսպես կոչված «տարրական մասնիկների» միջոցով:

Ըստ իմաստի՝ «տարրական մասնիկներ» տերմինը նշանակում է պարզագույն, ավելի մանր մասերի այլևս չբաժանվող մասնիկներ, որոնցից էլ կազմված է մատերիան:

Գիտության զարգացման ընթացքում «տարրական» և «անբաժանելի» հասկացությունները մի օբյեկտից անցել են մյուսին: Այսպես, Հին Հունաստանի գիտնականները համարում էին, որ նյութական աշխարհը կառուցված է չորս հիմնական և անփոփոխ էություններից՝ հողից, ջրից, օդից և կրակից, որոնք էլ կատարում էին բնության «տարրական» մասնիկների դերը: Ավելի ուշ Դեմոկրիտը սահմանել է պարզագույն, անփոփոխ և անբաժանելի մասնիկների՝ ատոմների հասկացությունը, որոնցից կազմված են բոլոր մարմինները:

Շուրջ 2000 տարի ատոմները համարվում էին տարրական մասնիկներ, և միայն 19-րդ դարի վերջին փորձնականորեն ապացույցվեց, որ ատոմն ունի բարդ կառուցվածք. այն բաժանելի է և կազմված է ավելի փոքր մասնիկներից:

Դուք արդեն ծանոթ եք մի քանի մասնիկի, որոնց ֆիզիկայում անվանում են տարրական մասնիկներ: Դրանք են էլեկտրոնը, պրոտոնը, նեյտրոնը, ֆոտոնը, ինչպես նաև բեռտա-տրոհման պրոցեսում ի հայտ եկող նեյտրինոն:

20-րդ դարի 30-ական թվականների սկզբին, երբ հայտնի էին միայն էլեկտրոնը, պրոտոնը, նեյտրոնը և γ -քվանտը, հիմքեր կային դրանք անվանելու տարրական մասնիկներ, քանի որ թվում էր, թե դրանցով կարելի է կառուցել ամբողջ մատերիան՝ ատոմները, նրանց միջուկները, ինչպես նաև էլեկտրամագնիսական դաշտը:

Երկար ժամանակ համարվել է, որ տարրական մասնիկներն անփոփոխ են և չեն տրոհվում: Սակայն փորձը ցույց է տվել, որ դրանց մեծ մասն անկայուն է և աստիճանաբար փոխակերպվում է ավելի թեթև տարրական մասնիկների:

Առաջինը փորձում դիտվել է նեյտրոնի տրոհումը: Ազատ, այսինքն՝ միջուկի մեջ չմտնող նեյտրոնի «կյանքի տևողությունը» մոտավորապես 15 րոպե է: Այն տրոհվում է՝ վերածվելով պրոտոնի (p), էլեկտրոնի (e^-) և հականեյտրինոյի ($\bar{\nu}$)՝

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} : \quad (7.1)$$

Հետագայում պարզվել է, որ որոշ տարրերի միջուկներում կարող է փոխակերպվել նաև պրոտոնը՝ վերածվելով նեյտրոնի, պոզիտրոնի (e^+) և նեյտրինոյի (ν)՝

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu : \quad (7.2)$$

(7.1) և (7.2) պրոցեսները վկայում են, որ տարրական մասնիկների անբաժանելիության պահանջը բացահայտորեն խախտված է: Սակայն, միաժամանակ, չի կարելի նաև պնդել, որ տարրական մասնիկները բաղկացած են իրենց տրոհման հետևանքով առաջացած մասնիկներից: Դրանք ծնվում են հենց տրոհման պահին: Նշենք նաև, որ նույն տարրական մասնիկը կարող է տրոհվել տարբեր վերջնական տարրական մասնիկների:

Այժմ մի քանի խոսք նեյտրինոյի (խալերեն՝ «փոքրիկ նեյտրոն») մասին: Նեյտրինոն չունի էլեկտրական լիցք, նրա զանգվածը զրո է համարվում (թեև հարյը դեռևս վերջնականապես պարզված չէ), կայուն մասնիկ է: Նեյտրինոն այնքան բույլ է փոխազդում նյութի հետ, որ մնում է գրեթե անտեսանելի: Այսպես՝ եթե ենթադրենք, որ Երկրի վրա ընկնում է մեկ տրիլիոն (10^{12}) նեյտրինո, ապա դրանք բոլորը, բացի մեկից, կծակեն-կանցնեն երկրագունդը՝ առանց որևէ հետևանքի: Այսուհանդերձ, նեյտրինոյի գոյությունն ապացույցվել է փորձով (1956 թ.):

Ստորև կծանոթանանք տարրական մասնիկների բազմաթիվ այլ փոխարկումների:

Տարրական մասնիկների թիվը շատ ավելի մեծ է, քան արդեն թվարկվածներինը: Բազմաթիվ նոր տարրական մասնիկներ են հայտնաբերվել տիեզերական ճառագայթներում: Դրանցից առաջինը **մյուոնն** է, որն իր հատկություններով մնան է էլեկտրոնին, սակայն վերջինիս զանգվածից մոտ 200 անգամ մեծ զանգված ունի:

Տարրական մասնիկների ֆիզիկայի կայացմանը էապես նպաստել է Արագած լեռան լանջին՝ մոտ 3500 մետր բարձրությունում Ալիխանյան եղբայրների հիմնադրած (1942 թ.) տիեզերական ճառագայթների հետազոտման կայանը:

Տարրական մասնիկների ֆիզիկայի բուռն զարգացումը սերտորեն կապված է արագարարների ստեղծման հետ, որոնք ֆիզիկոսների, ճարտարագետների և նյութաբանների համատեղ աշխատանքով են կառուցվում և օգտագործվում: Ժամանակից արագարարներում մասնիկները ձեռք են բերում մեծ էներգիաներ՝ գիգաէլեկտրոնվոլտից ($1 \text{ ԳէՎ} = 10^9 \text{ էՎ}$) մինչև տերաէլեկտրոնվոլտ ($1 \text{ ՏէՎ} = 10^{12} \text{ էՎ}$): Այդպիսի մասնիկների փոխազդեցության հետևանքով ծնվում են տարբեր տարրական մասնիկներ:



Արամհամ Ալիխանով

1904 - 1970

Հայ խոշորագույն ֆիզիկոս: Աշխատանքները վերաբերում են միջուկային ֆիզիկային, տիեզերական ճառագայթների և տարրական մասնիկների ֆիզիկային: Խորհրդային առաջին միջուկային ռեակտորի ստեղծողներից է: Եղբոր՝ Ա. Ալիխանյանի հետ հիմնել է Արագածի տիեզերական կայանը (1942) և Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտը:



Արտեմ Ալիխանյան

1908 - 1978

Հայ խոշորագույն ֆիզիկոս: Աշխատանքները վերաբերում են միջուկային ֆիզիկային, տիեզերական ճառագայթների և տարրական մասնիկների ֆիզիկային: Եղբոր՝ Ա. Ալիխանովի հետ հիմնել է Արագածի տիեզերական կայանը (1942): Դեկավարել է Երևանի էլեկտրոնային արագարարի նախագծումն ու գործարկումը:

Ներկայումս հայտնի մասնիկների ընտանիքներ են՝ **պի-մեզոնները**, երեք տեսակի նեյտրինոները (էլեկտրոնային՝ ν_e , մյուոնային՝ ν_μ և τ -նեյտրինոն՝ ν_τ) «տարօրինակ» մասնիկները՝ **կա-մեզոնները** և **հիպերոնները**, որոնց զանգվածները գերազանցում են մուկլոնների զանգվածը, էլ ավելի մեծ զանգվածով «**հմայված**» **մասնիկները** և այսպես կոչված **ռեզոնանսները**, որոնց կյանքի տևողությունը չափազանց փոքր է՝ $10^{-24} \div 10^{-22}$ վ, և որոնց թիվը գերազանցում է 300-ը:

Տարրական մասնիկների մեծ քանակը կասկածի տակ է դրել տարրական մասնիկների տարրական լինելու գաղափարը: Առաջարկվել են նոր՝ փոքր թվով «խսկական» տարրական մասնիկներ, որոնցից էլ բաղկացած են թվարկված բազմաթիվ «տարրական» մասնիկները:

Ներկայումս տարրական են անվանում այն մասնիկները, որոնք ֆիզիկայի զարգացման ժամանակակից մակարդակում չի կարելի համարել ավելի «պարզ» մասնիկների միացություն: Որպես կանոն՝ տարրական մասնիկներ են համարվում մատերիայի բոլոր մանրագույն մասնիկները, ինչպես նաև ջրածնի ատոմի միջուկը՝ պրոտոնը:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ տարրական մասնիկներ գիտեք:
2. Կարելի՞ է արդյոք ասել, որ նեյտրոնը կազմված է պրոտոնից, էլեկտրոնից և հականեյտրինոյից:
3. Ինչպիսի՞ հատկություններ ունի նեյտրինոն:
4. Գրե՞ք որոշ տարրերի միջուկներում պրոտոնի՝ նեյտրոնի փոխարկվելու ռեակցիան:
5. Ի՞նչ է մյուոնը:
6. Տարրական մասնիկների ի՞նչ ընտանիքներ գիտեք:
7. Ի՞նչն են անվանում տարրական մասնիկ:

§ 65. ՊՈԶԻՏՐՈՆ: ԸԱԿԱՍԱՍՆԻԿՆԵՐ

Պոզիտրոն: Պոզիտրոնը հայտնագործվել է, ինչպես ասում են, գրչի ծայրին: 1928թ. անգլիացի նշանավոր ֆիզիկոս Պոլ Դիրակն ստեղծել է էլեկտրոնի ռելյատիվիստական տեսությունը: Այդ տեսությունից բխում էր նոր մասնիկի գոյության հնարավորությունը, որն ուներ էլեկտրոնի զանգվածին հավասար զանգված և մոդուլով էլեկտրոնի լիցքին հավասար դրական լիցք: Այդ ենթադրյալ մասնիկն էլեկտրոնի «հակապատկերն» էր կամ, ինչպես հետագայում անվանվեց, հակամասնիկը: Տեսականորեն կանխագուշակված այդ մասնիկը հայտնագործել է ամերիկացի ֆիզիկոս Կառլ Անդերսոնը 1932 թ., երբ ուսումնասիրում էր տիեզերական ճառագայթների հետքերը Վիլսոնի խցիկում: Փորձում ստացված լուսանկարներից մեկում նա նկատել է մի հետք, որը պատկանում էր էլեկտրոնի զանգվածով և $+e$ դրական լիցքով մասնիկի: Դա էլեկտրոնի հակամասնիկն էր, որն Անդերսոնն անվանել է **պոզիտրոն** (լատիներեն «պոզիտիվուս»՝ դրական բառից): Այս հայտնագործությունը շատ անսպասելի էր ֆիզիկոսների համար:

Էլեկտրոն-պոզիտրոնային գույգի ծնունդը և անհիիլացումը: Պոզիտրոնի հայտնագործումից հետո ֆիզիկոսներն սկսել են այդ մասնիկը փնտրել նաև այլ տարրական պրոցեսներում: 1933թ. Անդերսոնը և այլ գիտնականներ հայտնագործել են էլեկտրոն-պոզիտրոնային գույգի ծնման երևույթը, որը տեղի է ունե-

նում նյութում ատոմի միջուկի (A) հետ γ -քվանտների փոխազդեցության հետևանքով՝

$$\gamma + A \rightarrow e^+ + e^- + A: \quad (7.3)$$

Էլեկտրոն-պոզիտրոնային գույգի ծնունդը պատկերված է 129-րդ նկարում, որն ստացվել է մագնիսական դաշտում տեղադրված Վիլսոնի խցիկում: Նկարում, կարծես ոչնչից, ծնվում է երկու մասնիկ, որոնք մագնիսական դաշտի ազդեցությամբ տարբեր ուղղություններով են շարժվում, քանի որ ունեն մոդուլով հավասար և հակառակ նշանի լիցքեր: Իրականում ծնման կետում γ -քվանտը, որը լիցք չունենալու պատճառով հետք չի թողնում Վիլսոնի խցիկում, վերածվում է էլեկտրոնի և պոզիտրոնի:

Էլեկտրոն-պոզիտրոնային գույգի ծնման (7.3) ռեակցիայում գործում են ֆիզիկայում հայտնի բոլոր պահպանման օրենքները: Օրինակ՝ լիցքի պահպանման օրենքը. մինչև ռեակցիան լիցքը զրո է (γ -քվանտը լիցք չունի), ռեակցիայից հետո էլեկտրոնի և պոզիտրոնի լիցքերի գումարը նույնպես զրո է:

Էլեկտրոն-պոզիտրոնային գույգի ծնման պրոցեսում իմպուլսի պահպանման օրենքը փորձնական ճանապարհով ասպարույցել են Ալիխանյան եղբայրները և ռուս գիտնական Լև Արցիմովիչը:

Իմպուլսի պահպանման օրենքի հետևանք է, որ (7.3) ռեակցիային, բացի γ -քվանտից, մասնակցում է նաև այլ մասնիկ՝ A միջուկը, այսինքն՝ ռեակցիան վակուումում տեղի ունենալ չի կարող: Իսկ էներգիայի պահպանման օրենքից բխում է, որ γ -քվանտի էներգիան չի կարող ավելի փոքր լինել, քան էլեկտրոն-պոզիտրոնային գույգի գոմարային հանգստի էներգիան, այսինքն՝

$$E_\gamma \geq m_e c^2 + m_e c^2 = 2m_e c^2: \quad (7.4)$$

$2m_e c^2$ -ն այն նվազագույն կամ **շեմային էներգիան** է, որից փոքր էներգիայով γ -քվանտը չի կարող էլեկտրոն-պոզիտրոնային գույգ ծնել:

Դիրակի կանխագուշակումներից մեկն էլ այն էր, որ պոզիտրոնը և էլեկտրոնը, բախվելով միմյանց, ոչնչանում են: 1933թ. ֆրանսիացի նշանավոր ֆիզիկոս Ֆրեդերիկ Ժոլիո-Կյուրին փորձով հաստատել է նաև այս կանխագուշակումը: Ապացույցվել է, որ բախման (փոխազդեցության) հետևանքով ոչնչացած կամ անհիլացված (լատիներեն «*նիհիլ*»՝ ոչինչ բառից) էլեկտրոնի և պոզիտրոնի փոխաբեն ծնվում է երկու (կամ ավելի) γ -քվանտ՝

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma: \quad (7.5)$$



Պոլ Դիրակ

1902 - 1984

Անգլիացի հռչակավոր ֆիզիկոս, քվանտային մեխանիկայի սրբողծողներից: Սրբողծել է էլեկտրոնի շարժման ռելյատիվիստական տեսությունը և կանխատեսել պոզիտրոնի գոյությունը: Աշխատանքները վերաբերում են քվանտային էլեկտրոդինամիկային, վիճակագրական ֆիզիկային և գրավիտացիային: Արժանացել է Նոբելյան մրցանակի (1933):



Նկ. 129. Էլեկտրոն-պոզիտրոնային գույգի ծնունդը

Անհիիլացման երևույթի պատճառով Երկրի վրա չկան պոզիտրոններ: Որևէ պրոցեսում ծնված պոզիտրոնն անմիջապես հանդիպում է էլեկտրոնի, և նրանք ոչնչացնում են միմյանց. անհիիլացվում են:

Պոզիտրոնի հայտնագործումը հանգեցրեց ֆիզիկայում նոր՝ **հակամասնիկի** գաղափարին: Ապացույվել է, որ բոլոր տարրական մասնիկներն ունեն իրենց հակամասնիկները: Պարզվել է նաև, որ բոլոր լիցքավորված մասնիկները գոյություն ունեն գույգերով: Հետագայում փորձով հայտնագործվել են **հակապրոտոնը** (1955թ.), **հականեյտրոնը** (1956թ.) և այլ հակամասնիկներ:

Կան նաև իսկական չեզոք մասնիկներ, որոնք լրիվ համընկնում են իրենց հակամասնիկի հետ: Այդպիսի տարրական մասնիկի օրինակ է γ -քվանտը՝ ֆոտոնը:

Հակամասնիկների գոյության փաստից հետևում է հականյութի գոյության հնարավորությունը: Եթե սովորական նյութը կազմված է մասնիկներից՝ էլեկտրոններից, պրոտոններից և նեյտրոններից, ապա հականյութը կազմված է հակամասնիկներից՝ պոզիտրոններից, հակապրոտոններից և հականեյտրոններից: 1969թ. փորձով հայտնագործվել է առաջին հականյութը՝ **հակահելիումը**:

Հականյութի և նյութի անհիիլացման պրոցեսում հանգստի էներգիան վերածվում է ծնված γ -քվանտների էներգիայի: Հանգստի էներգիան էներգիայի ամենահսկայական պաշարն է տիեզերքում: Անհիիլացման ժամանակ այն կարող է անջատվել՝ վերածվելով էներգիայի այլ տեսակների:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ի՞նչ մասնիկ է պոզիտրոնը: Ինչո՞վ է այն տարբերվում էլեկտրոնից:
2. Ո՞ր երևույթն է կոչվում էլեկտրոն-պոզիտրոնային զույգի անհիիլացում:
3. Ինչո՞վ են տարբերվում մագնիսական դաշտում տեղադրված Վիլսոնի խցիկում էլեկտրոնի և պոզիտրոնի հետքերը:
4. Ինչո՞ւ γ -քվանտը վախուռում չի կարող ծնել էլեկտրոն-պոզիտրոնային զույգ:
5. Որքա՞ն է էլեկտրոն-պոզիտրոնային զույգի ծնման շեմային էներգիան:
6. Ի՞նչ է հակամասնիկը:
7. Ի՞նչ է հականյութը:

§ 66. ՏԱՐՐԱԿԱՆ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԴԱՍԱԿԱՐԳՈՒՄԸ

Մեծ թվով տարրական մասնիկների հայտնագործումը հանգեցրել է դրանց դասակարգման անհրաժեշտության՝ ըստ որոշակի խմբերի: Դասակարգումը կատարվել է տարրական մասնիկների որոշակի բնութագրերի հիման վրա: Հարկ է նշել, որ զանգվածի, էլեկտրական լիցքի և այլ բնութագրերի հետ մեկտեղ տարրական մասնիկի կարևոր բնութագիր է նրա սեփական մեխանիկական մոմենտը կամ **սպինը** (անգլերեն «*սփին*»՝ պտտվել բառից): Սպինն ընդունում է ամբողջ (0, 1, 2, ...) և կիսամբողջ ($1/2$, $3/2$, $5/2$, ...) թիվ անգամ $\hbar$ արժեքներ: Հաճախ սպինը դասականորեն մեկնաբանվում է որպես սեփական առանցքի շուրջ մասնիկի պտտման հետևանք: Սակայն այս մոտեցումը, լինելով պատկերավոր, այնուհանդերձ հակասում է ժամանակակից ֆիզիկայի որոշ հիմնարար հասկացությունների: Սպինը տարրական մասնիկի ներքին հատկություն է և նույնքան կարևոր բնութագիր, որքան զանգվածը և լիցքը:

Տարրական մասնիկների երկու հիմնական խմբերը կազմում են **լեպտոնները** և **հադրոնները**:

Լեպտոններ

Մասնիկի անվանումը	Նշանակում		Զանգված	Սպին	Էլեկտրական լիցք	Կյանքի տևողություն
	Մասնիկ	Հակամասնիկ				
Էլեկտրոն	e^-	e^+	m_e	$\hbar/2$	$-e \ e$	∞ (կայուն է)
Մյուոն	μ^-	μ^+	$207m_e$	$\hbar/2$	$-e \ e$	$2,2 \cdot 10^{-6}$ վ
Տաու-լեպտոն	τ^-	τ^+	$3492m_e$	$\hbar/2$	$-e \ e$	$1,46 \cdot 10^{-12}$ վ
Էլեկտրոնային նեյտրինո	ν_e	$\tilde{\nu}_e$	0	$\hbar/2$	0	∞
Մյուոնային նեյտրինո	ν_μ	$\tilde{\nu}_\mu$	0	$\hbar/2$	0	∞
Տաու-նեյտրինո	ν_τ	$\tilde{\nu}_\tau$	0	$\hbar/2$	0	∞

Հադրոններ

Մասնիկի անվանումը	Նշանակում		Զանգ-ված	Սպին	Էլեկտ-րական լիցք	Կյանքի տևողություն
	Մասնիկ	Հակա-մասնիկ				
Մեզոններ						
Պի-մեզոններ (պիոններ)	π^0		$264,1 m_e$	0	0	$1,83 \cdot 10^{-16}$ վ
	π^+	π^-	$273,1 m_e$	0	$e \ -e$	$2,6 \cdot 10^{-8}$ վ
Կա-մեզոններ (կաոններ)	K^+	K^-	$966,4 m_e$	0	$e \ -e$	$1,2 \cdot 10^{-8}$ վ
	K^0	$\tilde{K}^0$	$974,1 m_e$	0	0	$K_S^0 \ 8,9 \cdot 10^{-11}$ վ
						$K_L^0 \ 5,2 \cdot 10^{-8}$ վ
Էտա-զրո-մեզոն	η^0		$1072 m_e$	0	0	$2,4 \cdot 10^{-19}$ վ
Նուկլոններ						
Պրոտոն	p	$\tilde{p}$	$1836 m_e$	$\hbar/2$	$e \ -e$	∞
Նեյտրոն	n	$\tilde{n}$	$1838,6 m_e$	$\hbar/2$	0	$\sim 10^3$ վ
Հիպերոններ						
Լամբդա-հիպերոն	Λ^0	Λ^0	$2183,1 m_e$	$\hbar/2$	0	$2,63 \cdot 10^{-10}$ վ
Սիգմա-հիպերոններ	Σ^+	$\tilde{\Sigma}^+$	$2327,6 m_e$	$\hbar/2$	$e \ -e$	$8 \cdot 10^{-11}$ վ
	Σ^0	$\tilde{\Sigma}^0$	$2333,6 m_e$	$\hbar/2$	0	$5,8 \cdot 10^{-20}$ վ
	Σ^-	$\tilde{\Sigma}^-$	$2343,1 m_e$	$\hbar/2$	$-e \ e$	$1,48 \cdot 10^{-10}$ վ
Քսի-հիպերոններ	Ξ^0	$\tilde{\Xi}^0$	$2572,8 m_e$	$\hbar/2$	0	$2,9 \cdot 10^{-10}$ վ
	Ξ^-	$\tilde{\Xi}^-$	$2585,6 m_e$	$\hbar/2$	$-e \ e$	$1,64 \cdot 10^{-10}$ վ
Օմեգա-մինուս-հիպերոն	Ω^-	$\tilde{\Omega}^-$	$3273 \ m_e$	$3\hbar/2$	$-e \ e$	$8,2 \cdot 10^{-11}$ վ

Լեպտոններ են կոչվում այն տարրական մասնիկները, որոնք չեն մասնակցում ուժեղ (միջուկային) փոխազդեցություններին, ունեն $\hbar/2$ սպին և փոքր կամ զրոյի հավասար զանգված (հունարեն «լեպտոս»՝ թեթև բառից): Լեպտոնների խմբում են էլեկտրոնը, նեյտրինոները, մյուոնը, տաու-լեպտոնը (տ-լեպտոն) և դրանց հակամասնիկները: 4-րդ աղյուսակում ներկայացված են լեպտոնների որոշ հիմնական բնութագրեր՝ զանգվածը, սպինը, էլեկտրական լիցքը և կյանքի տևողությունը: Էլեկտրոնի և մյուոնի զանգվածները փոքր են մյուս տարրական մասնիկների զանգվածներից, սակայն 1975 թ. հայտնաբերված տաու-լեպտոնի (տաուն) զանգվածը գրեթե երկու անգամ գերազանցում է պրոտոնի զանգվածը: Այս փաստը շեշտում է, որ կարևորը ոչ թե զանգվածի մեծությունն է, այլ մասնիկի փոխազդեցության բնույթը:

Ներկայումս չկան տեսական կամ փորձարարական տվյալներ, որոնք վկայում են լեպտոնների ներքին կառուցվածքի գոյությունը: Մինչև անգամ արագարարներում մի քանի տասնյակ և հարյուրավոր ԳԷՎ էներգիաներով մասնիկների բախումներում լեպտոնները մասնակցում են որպես ամբողջական՝ անբաժան օբյեկտներ: Այս պատճառով բոլոր լեպտոնները և նրանց հակամասնիկները կոչվում են իսկական տարրական մասնիկներ:

Տարրական մասնիկների ամենամեծ խումբը կազմում են **հադրոնները** (հունարեն «հադրոս»՝ մեծ, ուժեղ բառից), որոնք մասնակցում են բոլոր հիմնարար փոխազդեցություններին: Բայց պրոտոնից, որն ազատ վիճակում կայուն մասնիկ է, մնացած բոլոր հադրոնները տրոհվում են: Եթե տրոհումը տեղի է ունենում էլեկտրամագնիսական կամ թույլ փոխազդեցության միջոցով, ապա հադրոնի կյանքի տևողությունը գերազանցում է 10^{-20} վայրկյանը: Այդպիսի հադրոններն ընդունված է անվանել կայուն: Ուժեղ փոխազդեցության միջոցով տրոհվելիս հադրոնի կյանքի տևողությունը $10^{-24} \pm 10^{-22}$ վ կարգի է: Այդպիսի հադրոնները պատկանում են քվադիկայուն հադրոնների դասին և, ինչպես գիտեք, կոչվում են **ռեզոնանսներ**:

Հադրոնները բաժանվում են երկու դասի՝ **մեզոններ**, որոնք ունեն զրոյական կամ ամբողջաթիվ սպին ($0, \hbar, 2\hbar, \dots$), և **բարիոններ**, որոնք ունեն կիսամբողջ սպին ($\hbar/2, 3\hbar/2, 5\hbar/2, \dots$):

Նուկլոնները և հիպերոնները պատկանում են բարիոնների ընտանիքին: Յուրաքանչյուր հադրոն ունի իր հակամասնիկը, սակայն հայտնի են մասնիկներ (օրինակ՝ Լտա-զրո-մեզոնը), որոնք լիովին համընկնում են իրենց հակամասնիկների հետ: 5-րդ աղյուսակում տրված են կայուն հադրոնների որոշ հիմնական բնութագրեր:

Նշված խմբերին չի պատկանում **ֆոտոնը**, որն իսկական տարրական մասնիկ է զրո զանգվածով, զրո լիցքով, ինչպես նաև $\hbar$ սպինով:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Որո՞նք են փարրական մասնիկների հիմնական խմբերը:
2. Ի՞նչ է լեպտոնը:
3. Ի՞նչ է հադրոնը:
4. Ո՞ր փարրական մասնիկներն են կազմում լեպտոնների խումբը:
5. Ի՞նչո՞ւ են լեպտոններն անվանում իսկական փարրական մասնիկներ:
6. Ի՞նչպիսի՞ դասերի են բաժանվում հադրոնները:
7. Ո՞ր հադրոններն են անվանում կայուն:
8. Ո՞ր հադրոններն են կոչվում ռեզոնանսներ:
9. Ի՞նչո՞վ են փարբերվում բարիոնները և մեզոնները:
10. Ի՞նչպիսի՞ փարրական մասնիկ է ֆոտոնը:

Ֆիզիկայի դասընթացի ձեռնարկի են բնության մեջ մարմինների միջև փոխազդեցության բազմաթիվ ուժեր՝ գրավիտացիոն, առաձգականության, շփման, կուլոնյան, Ամպերի, Լորենցի և այլն:

Մոլեկուլային փոխազդեցության ուժերի շնորհիվ ատոմներից կազմվում են մոլեկուլներ, միջուկային ուժերի շնորհիվ առաջանում են ատոմների միջուկները:

Սակայն թվարկված ոչ բոլոր փոխազդեցություններն են հիմնարար: Իրոք, կուլոնյան և Լորենցի ուժերը էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության դրսևորումներ են տարբեր հաշվարկման համակարգերում, մոլեկուլներում ատոմների միջև կապը հետևանք է ատոմների արժեքական էլեկտրոնների էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության: Առաձգականության և շփման ուժերը հետևանք են դեֆորմացված մարմինների մոլեկուլների և ատոմների միջև փոխազդեցության ուժերի, որոնք էլեկտրամագնիսական բնույթ ունեն, ուստի չեն կարող համարվել հիմնարար:

Հիմնարար են կոչվում այն փոխազդեցությունները, որոնք չեն հանգեցվում ավելի պարզ փոխազդեցությունների: Ժամանակակից ֆիզիկայում հայտնի և բնության մեջ գործող բոլոր փոխազդեցության ուժերը չորս տեսակի փոխազդեցությունների դրսևորումներ են:

Առաջինը **գրավիտացիոն** փոխազդեցությունն է, որը գործում է կամայական մարմինների, այդ թվում՝ նաև բոլոր տարրական մասնիկների միջև: Գրավիտացիոն փոխազդեցության ուժը ձգողական է և հեռագույ, այսինքն՝ այդ ուժով իրար հետ փոխազդող մարմինների հեռավորությունը որքան ասես մեծ կարող է լինել: Գրավիտացիոն ուժերը որոշիչ դեր են խաղում տիեզերքում, որտեղ փոխազդող մարմիններն օժտված են հսկայական զանգվածներով: Այս փոխազդեցությամբ է պայմանավորված մասնավորապես Արեգակնային համակարգի գոյությունը: Տարրական մասնիկների միջև գրավիտացիոն փոխազդեցության ուժը չնչին է դրանց փոքր զանգվածների պատճառով:

Հաջորդ՝ **էլեկտրամագնիսական փոխազդեցությունը** գործում է լիցքավորված մասնիկների միջև, նույնպես հեռագույ է և, կախված լիցքերի նշաններից, կարող է լինել և՛ ձգողական, և՛ վանողական: Այս փոխազդեցությամբ է պայմանավորված, օրինակ, ատոմի գոյությունը: Լիցքավորված մասնիկների էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության ուժերն անհամեմատ մեծ են դրանց գրավիտացիոն փոխազդեցության ուժերից: Օրինակ՝ տրված հեռավորությամբ երկու պրոտոնների կուլոնյան փոխազդեցության ուժը մոտավորապես 10^{36} անգամ գերազանցում է դրանց գրավիտացիոն փոխազդեցության ուժը:

Փոխազդեցության մյուս տեսակն **ուժեղ փոխազդեցությունն** է, որն անվանում են նաև **միջուկային**, քանի որ հենց այս փոխազդեցությամբ է պայմանավորված միջուկի գոյությունը:

Ուժեղ փոխազդեցության ուժերը գործում են 10^{-15} մ և ավելի փոքր հեռավորություններում, և այս տիրույթում գրեթե հարյուր անգամ զերազանցում են կուլոնյան ուժերը: Ավելի մեծ հեռավորություններում այդ ուժերը շատ արագ ձգտում են զրոյի, այսինքն՝ դրանք կարճագույն են: Բոլոր հաղորդները փոխազդում են ուժեղ փոխազդեցության ուժերով:

Չորրորդ տեսակի փոխազդեցությունն անվանում են **թույլ փոխազդեցություն**: Այն ավելի կարճագույն է, քան ուժեղ փոխազդեցությունը և գործում է 10^{-18} մ և ավելի փոքր հեռավորություններում: Այս փոխազդեցությամբ են պայմանավորված մի խումբ տարրական մասնիկների միջև ռեակցիաները և փոխակերպումները (հիմնականում՝ տրոհումները): Թույլ փոխազդեցությամբ փոխազդում են բոլոր տարրական մասնիկները՝ բացի ֆոտոններից: Այս փոխազդեցության օրինակ է ազատ նեյտրոնի տրոհումը (§ 64): 6-րդ աղյուսակում ներկայացված են որոշ տարրական մասնիկների միջև չորս հիմնարար փոխազդեցությունների հարաբերական մեծությունները, երբ նրանց միջև հեռավորությանը 10^{-15} մ է:

Աղյուսակ 6

Փոխազդեցության տեսակը	Հարաբերական մեծությունը			
	$e-\nu$	$e-p$	$p-p$	$p-n, n-n$
Ուժեղ	0	0	1	1
Էլեկտրամագնիսական	0	10^{-2}	10^{-2}	0
Գրավիտացիոն	0	10^{-41}	10^{-38}	10^{-38}
Թույլ	10^{-13}	10^{-13}	10^{-13}	10^{-13}

Համաձայն քվանտային պատկերացումների՝ հիմնարար փոխազդեցության յուրաքանչյուր տեսակ իրականացվում է փոխազդող մասնիկների միջև յուրահատուկ և միայն տվյալ փոխազդեցությամբ բնորոշ մասնիկների փոխանակությամբ: Այսպես կոչված **փոխանակային փոխազդեցության** գաղափարն առաջարկել են Վիկտոր Համբարձումյանը և Դմիտրի Իվանենկոն դեռևս 1928 թ.:

Այսպես, օրինակ, էլեկտրամագնիսական փոխազդեցությունը հետևանք է այն բանի, որ լիցքավորված մասնիկները միմյանց հետ ֆոտոններ են փոխանակում: Ուժեղ փոխազդեցության ուժերով փոխազդող նուկլոնները փոխանակում են պի-մեզոններ, իսկ թույլ փոխազդեցությունն իրականացվում է տարրական մասնիկների միջև բավականաչափ մեծ զանգվածով W^+ , W^- և Z^0 մասնիկների փոխանակությամբ:

Փոխանակային փոխազդեցության տեսության համաձայն՝ գրավիտացիոն փոխազդեցությունն էլ պետք է լինի փոխազդող մարմինների միջև նոր տիպի մասնիկների՝ **գրավիտոնների** փոխանակության հետևանք: Տեսությունից բխում է, որ գրավիտոնները զրո զանգվածով և $2\hbar$ սպինով մասնիկներ են, որոնք դեռևս փորձով հայտնաբերված չեն:

Իսկ ինչպե՞ս է իրականացվում փոխանակային փոխազդեցությունը: Հարցը պարզաբանենք էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության օրինակով:

Ինչպես գիտեք, անշարժ կամ ուղղագիծ հավասարաչափ շարժվող լիցքավորված մասնիկը չի արձակում և չի կլանում էլեկտրամագնիսական ճառագայթում, այսինքն՝ ֆոտոններ։ Ուստի անհասկանալի է, թե ինչպես կարող են այդ լիցքավորված մասնիկները ֆոտոններ փոխանակել։ Սակայն քվանտային մեխանիկայում ֆոտոնների արձակման և կլանման պրոցեսի հնարավորությունը բխում է էներգիայի և ժամանակի համար անորոշությունների առնչությունից, որին ծանոթացել եք § 50-ում.

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar : \quad (7.6)$$

Պարզվում է, որ էլեկտրոնն իր հանգստի էներգիայի հաշվին կարող է շատ կարճ, օրինակ՝ $\Delta t \approx 10^{-15}$ վայրկյանում արձակել ֆոտոն, որի էներգիան, համաձայն (7.6) առնչության, կլինի՝ $E_\gamma = \Delta E \sim \hbar / \Delta t \approx 10^{-34} \cdot 10^{15} \text{ Ջ} = 10^{-19} \text{ Ջ}$ ։ Այնուհետև էլեկտրոնը կարող է այդպիսի մի ֆոտոն կլանել շրջակա էլեկտրամագնիսական դաշտից՝ վերականգնելով իր էներգիան։ Էլեկտրոնի հետ փոխազդող մեկ այլ էլեկտրոն նույնպես արձակում և ամփջապես կլանում է ֆոտոն։ Այսպիսով՝ էլեկտրոնները շրջապատող էլեկտրամագնիսական դաշտ են արձակում և կլանում այսպես կոչված **վիրտուալ ֆոտոններ** (լատիներեն «վիրտուալիս»՝ հնարավոր բառից), որոնք էլ իրականացնում են փոխազդեցությունը էլեկտրոնների միջև։

Վիրտուալ ֆոտոններն «ապրում» են շատ կարճ՝ $\Delta t \sim \hbar / \Delta E$ ժամանակ՝ ի տարբերություն «իսկական» ֆոտոնների, որոնք կարող են գոյատևել անվերջ, եթե չեն կլանվում նյութում։

Քվանտային մեխանիկայում մասնիկի իմպուլսի և կոորդինատի անորոշությունների $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$ հայտնի առնչության օգնությամբ (տե՛ս § 50) կարելի գնահատել նաև փոխանակային փոխազդեցությունն իրականացնող մասնիկների զանգվածները։

Որպես օրինակ դիտարկենք միջուկային ուժերը։ Ինչպես գիտեք, միջուկում նուկլոնների միջև հեռավորությունը՝ $r_0 \approx 10^{-15}$ մ կարգի է, ուստի՝ փոխանակային փոխազդեցությունն իրականացնող մասնիկի (պի-մեզոնի) կոորդինատի անորոշությունը՝ $\Delta x \approx r_0$ ։ Ռելյատիվիստական մասնիկ պի-մեզոնի իմպուլսի անորոշությունը՝ $\Delta p_x \sim \Delta p \sim m_\pi c$, որտեղ c -ն լույսի արագությունն է վակուումում, m_π -ն՝ պի-մեզոնի զանգվածը։ Անորոշությունների առնչությունից $\Delta p_x \cdot \Delta x \approx m_\pi c r_0 \geq \hbar$, հետևաբար՝

$$m_\pi \cdot \frac{\hbar}{r_0 c} + \frac{10^{-34}}{10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8} \text{ կգ} \cdot 3 \cdot 10^{-28} \text{ կգ} \cdot 300 m_e, \quad (7.7)$$

որտեղ m_e -ն էլեկտրոնի զանգվածն է։ Պի-մեզոնի զանգվածի այս գնահատումը բավականաչափ մոտ է պիոնների (π^0 , $\pi^\pm$) զանգվածների՝ փորձում ստացված արժեքներին (տե՛ս 5-րդ աղյուսակը)։

Նման ձևով կարելի է գնահատել թույլ փոխազդեցությունն իրականացնող $W^\pm$ և Z^0 մասնիկների զանգվածները։ Իրոք, քանի որ թույլ փոխազդեցության գործողության շառավիղը՝ $R \approx 10^{-18}$ մ, ապա (7.7) բանաձևում r_0 -ի փոխարեն տեղադրելով R -ը, կստանանք՝

$$m_{W^{\pm}, Z^0} \cdot \frac{\hbar}{Rc} \cdot 3 \cdot 10^5 m_e, \quad (7.8)$$

որը փորձում ստացված $m_{W^{\pm}}, m_{Z^0}$ արժեքներից տարբերվում է գրեթե երկու անգամ, որը կարելի է բավարար համարել:

Մյուս կողմից՝ եթե հայտնի է փոխազդեցությունն իրականացնող մասնիկի զանգվածը, ապա (7.7) բանաձևով կարելի է գնահատել փոխազդեցության ուժի գործողության շառավիղը՝

$$R = r_0 = \frac{\hbar}{mc}: \quad (7.9)$$

Եթե այժմ նկատի ունենանք, որ ֆոտոնի զանգվածը զրո, է ապա (7.9) բանաձևից կհետևի, որ էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության գործողության շառավիղը՝ $R = \infty$, այսինքն՝ փոխազդեցությունը հեռագրու է: Նույն եզրակացությունը ճիշտ է նաև գրավիտացիոն փոխազդեցության համար, քանի որ այն իրականացնող վարկածային գրավիտոն մասնիկի զանգվածը նույնպես զրո է:

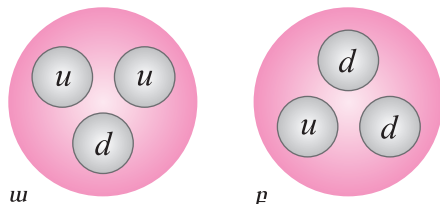


Հարցեր և առաջադրանքներ

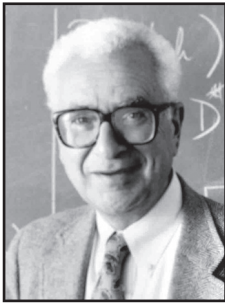
1. Ի՞նչ է հիմնարար փոխազդեցությունը: Ի՞նչ հիմնարար փոխազդեցություններ գիտենք:
2. Ո՞ր տարրական մասնիկներն են մասնակցում տարբեր հիմնարար փոխազդեցություններում:
3. Որքա՞ն են հիմնարար փոխազդեցությունների գործողության շառավիղները:
4. Ինչպիսի՞ն են հիմնարար փոխազդեցությունների հարաբերական մեծությունները:
5. Ինչպե՞ս են իրականացվում հիմնարար փոխազդեցությունները՝ ըստ քվանտային պարկերացումների:
6. Ո՞ր մասնիկներն են իրականացնում փոխանակային փոխազդեցությունները՝ ըստ հիմնարար փոխազդեցությունների տեսակների:
7. Ի՞նչ է վիրտուալ մասնիկը (օրինակ՝ վիրտուալ ֆոտոնը) և ինչո՞վ է տարբերվում իսկական մասնիկից (ֆոտոնից):
8. Ինչպե՞ս են գնահատվում հիմնարար փոխազդեցություն իրականացնող մասնիկի զանգվածը:
9. Ինչպե՞ս են գնահատվում հիմնարար փոխազդեցության գործողության շառավիղը:

§ 68. Քվարկներ

1964թ. ամերիկացի ֆիզիկոսներ Մյուրեյ Գել-Մանը և Ջորջ Յվեյզը առաջարկել են մի վարկած, որի համաձայն՝ ուժեղ փոխազդող մասնիկները, այդ թվում՝ նուկլոնները, բաղկացած են այլ մասնիկներից՝ **քվարկներից**: Քվարկները միմյանցից տարբերվում են էլեկտրական լիցքով: Այսպես կոչված **u-քվարկն** ունի $2e/3$ լիցք, **d-քվարկը**՝ $-e/3$ լիցք, իսկ **s-քվարկը**՝ $-e/3$ լիցքը: Ըստ քվարկային վարկածի՝ պրոտոնը բաղկացած է երկու u-քվարկից և մեկ d-քվարկից (նկ.130, ա), ուստի նրա լիցքը հավասար է նրա մեջ մտնող քվարկների լիցքերի գումարին՝ $2e/3 + 2e/3 - e/3 = e$: Նեյտրոնը բաղկացած է մեկ u-քվարկից և երկու d-քվարկից, ուստի նրա լիցքը զրո է



Նկ. 130. Պրոտոնի (ա) և նեյտրոնի (բ) քվարկային կառուցվածքը



Մյուրեյ Գել-Ման

(1929)

Ամերիկացի նշանավոր
ֆիզիկոս: Աշխատանքները
նվիրված են դաշտի
քվանտային տեսությանը,
միջուկային ֆիզիկային և
տարրական մասնիկների
ֆիզիկային: Արժանացել է
Նոբելյան մրցանակի (1969):

($2e/3 - e/3 - e/3 = 0$) (նկ.130, p): Մեզոնները կազմված են քվարկից և հակաքվարկից: Օրինակ՝ կա-զրո-մեզոնը (K^0 -մեզոն) բաղկացած է d -քվարկից և $\bar{s}$ -հակաքվարկից: Գնահատումների համաձայն՝ քվարկների չափերը չեն գերազանցում 10^{-18} մետրը, այսինքն՝ պրոտոնից փոքր են մոտավորապես 1000 անգամ:

Մինչև այժմ չի հաջողվել հայտնաբերել ազատ քվարկ: Ներկայումս ընդունված պատկերացումների համաձայն՝ քվարկները տարրական մասնիկի (օրինակ՝ պրոտոնի) ներսում պահվում են շատ հզոր ուժերով, որոնք քվարկներին իրարից առանձնանալու հնարավորություն չեն տալիս: Այդ ուժերը պայմանավորված են հատուկ մասնիկներով, որոնք կոչվում են **գլյուոններ** (անգլերեն «գլյու»՝ սոսինձ բառից):

Ներկայումս կան փորձնական ապացույցներ, որ պրոտոնի ներսում դրական լիքքը բաշխված է անհամասեռ, առանձին խտացումների տեսքով, որոնց կարելի է համադրել քվարկներ: Պրոտոնների ներքին

կառուցվածքն ուսումնասիրելու նպատակով դրանք ռմբակոծել են 20 ԳԷՎ էներգիայով էլեկտրոններով: Այս փորձը Ռեգերֆորդի՝ ատոմի կառուցվածքը պարզելու հայտնի փորձի նմանակն է. այնտեղ ատոմների փոխարեն պրոտոններն են, իսկ α -մասնիկների փոխարեն՝ հսկայական էներգիայով օժտված էլեկտրոնները: Մեծ էներգիայի շնորհիվ էլեկտրոնները թափանցում են պրոտոնի մեջ և հաճախ ցրվում նաև մեծ անկյուններով, որը բնորոշ է մույնամուն լիքքերի բախմանը: Սա նշանակում է, որ էլեկտրոնները պրոտոնի ներսում բախվում են բացասական լիքքի կուտակումների: Փորձի արդյունքները վկայում են այն մասին, որ պրոտոնում կան $2e/3$, $2e/3$ և $-e/3$ լիքքերով մասնիկներ: Կատարվել են նաև փորձեր, որտեղ ուսումնասիրվել են մեծ էներգիաներով էլեկտրոնների ցրումները նեյտրոնների վրա և ստացվել են մույնալիսի արդյունքներ:

Այսպիսով՝ կարելի է քվարկների գոյությունը փորձնականորեն ապացույցված համարել:

Քանի որ բոլոր հաղորդները՝ մեզոնները և բարիոնները կազմված են քվարկներից, ապա կարելի է պնդել, որ իսկական տարրական մասնիկներ են միայն քվարկները, լեպտոնները և ֆոտոնը:

Խորագրված

Սկզբնական շրջանում թվում էր, թե տարրական մասնիկների՝ քվարկներից կազմված լինելը կարելի է բացատրել առանց դժվարության: Իրոք, բոլոր բարիոնները կարելի էր պատկերել կազմված երեք քվարկից, իսկ բոլոր մեզոնները՝ մեկ քվարկից և հակաքվարկից: Սակայն երեք քվարկով չհաջողվեց «կառույցել» բոլոր հաղորդները: Հայտնաբերվեցին նոր հաղորդներ, և փորձնականորեն ստացված որոշ արդյունքներ բացատրելու համար հարկ եղավ ենթադրել ևս երեք՝ **c-**, **b-** և **t-քվարկների** գոյությունը: 7-րդ աղյուսակում ներկայացված են քվարկների որոշ հիմնական բնութագրեր:

Անվանումը	Նշանակումը	Սպին	Էլեկտրական լիցք
Քվարկներ	$u \ c \ t$	$\hbar/2$	$2e/3$
	$d \ s \ b$	$\hbar/2$	$-e/3$
Հակաքվարկներ	$\bar{u} \ \bar{c} \ \bar{t}$	$\hbar/2$	$-2e/3$
	$\bar{d} \ \bar{s} \ \bar{b}$	$\hbar/2$	$e/3$

Օգտվելով 7-րդ աղյուսակում բերված տվյալներից, կարելի է տեսնել, որ, օրինակ, պի-պլյուս-մեզոնը (π^+) կազմված է u -քվարկից և $\bar{d}$ -հակաքվարկից՝ $u\bar{d}$, որի լիցքը հավասար է $2e/3 + e/3 = e$: Պի-մինուս-մեզոնը (π^-)՝ $\bar{u}$ -հակաքվարկից և d -քվարկից՝ $\bar{u}d$ ($-2e/3 - e/3 = -e$), իսկ օմեգա-մինուս-հիպերոնը (Ω^-)՝ երեք s -քվարկից՝ $(3(-e/3) = -e)$: Սակայն այսպիսի մոտեցումը հանգեցնում է նոր դժվարության:

Պաուլիի սկզբունքը: Քվանտային մեխանիկայից հայտնի է, որ ատոմների, միջուկների և տարրական մասնիկների համակարգերում գործում է ֆիզիկայի հիմնարար օրենքներից մեկը՝ **Պաուլիի սկզբունքը**, համաձայն որի՝ **կիսասամբողջ սպինով մասնիկների համակարգում չեն կարող գոյություն ունենալ երկու կամ ավելի մասնիկ նույնական բնութագրերով**: Վերը հիշատակված դժվարությունը պայմանավորված է այն հանգամանքով, որ բոլոր քվարկներն ունեն $\hbar/2$ սպին, ուստի՝ ենթարկվում են Պաուլիի սկզբունքին: Սակայն որոշ տարրական մասնիկներ պարունակում են երկու և ավելի միատեսակ քվարկներ, օրինակ՝ Ω^- -հիպերոնը կազմված է երեք s -քվարկից: Ուրեմն՝ Պաուլիի սկզբունքին չհակասելու համար մնում է ենթադրել, որ այդ երեք s -քվարկները միմյանցից տարբերվում են ինչ-որ հատկությամբ, որը դեռևս հայտնի չէ ֆիզիկայում:

Այս նոր՝ դեռևս անհայտ հատկությունն անվանել են «գունային լիցք» կամ պարզապես քվարկի «գույն»: Պարզվել է, որ կա այդպիսի երեք գույն: Իհարկե, այդ «գույները» ոչ մի կապ չունեն օպտիկական գույների հետ և արտահայտում են միմիայն երեք յուրահատուկ «լիցքերի» գոյությունը քվարկներում:

Քվարկների գունային լիցքերն անվանում են կարմիր, կապույտ և դեղին: Հակաքվարկներն օժտված են հակակարմիր, հակակապույտ և հակադեղին գույներով: Ինչպես օպտիկայում հավասար քանակություններով կարմիր, կապույտ և դեղին գույները խառնելիս ստացվում է սպիտակ գույն, այնպես էլ քվարկների գույները վերադրվելիս չեզոքացնում են իրար: Միմյանց չեզոքացնում են նաև քվարկների գույները և հակագույները, ճիշտ այնպես, ինչպես մոդուլով հավասար և տարանուն էլեկտրական լիցքերը:

Այս է պատճառը, որ բոլոր հաղորդներն «անգույն» են կամ, ինչպես ընդունված է ասել, «սպիտակ» են: Իսկ սա փաստորեն նշանակում է, որ քվարկների միջև «գունային» լիցքերի միջոցով փոխազդեցությունը տեղի է ունենում միայն հաղորդների ներսում, և նրանցից դուրս այն ի հայտ չի գալիս:

Գլյուտոններ: Հաղորդումների «հավաքումը» քվարկներից առաջացնում է հետևյալ հարյը՝ ի՞նչ ուժեր են քվարկները պահում 10^{-15} մետրից փոքր հեռավորություններում, մասնավորապես, եթե քվարկներն ունեն նույնաճանգի ելեկտրական լիցքեր: Հիշենք, որ նման հարց ծագել է, երբ պարզվել է, որ միջուկը կազմված է պրոտոններից և նեյտրոններից (§56):

Պարզվել է, որ քվարկների փոխազդեցության (ձգողության) մեջ սկզբունքային դեր ունի քվարկի գունային լիցքը, որն ուժեղ փոխազդեցություններում խաղում է նույն դերը, ինչ էլեկտրական լիցքը՝ էլեկտրամագնիսական փոխազդեցություններում: Քվարկներն ուժեղ փոխազդում են միմյանց հետ գլյուտոնների միջոցով:

Գլյուտոնները, ունենալով գունային լիցք, նույնպես ուժեղ փոխազդում են իրար հետ:

Քվարկների և գլյուտոնների փոխազդեցությունները նկարագրող տեսությունն անվանում են **քվանտային քրոմոդինամիկա** (հունարեն «քրոմոս»՝ գույն բառից): Եթե էլեկտրամագնիսական փոխազդեցություններում մասնակցում են էլեկտրական լիցք ունեցող մասնիկները, ապա ուժեղ փոխազդեցություններում մասնակցում են գունային («ուժեղ») լիցքով օժտված քվարկները:

Քվանտային քրոմոդինամիկայում ուժեղ փոխազդեցությունը քվարկների միջև հետևանք է գլյուտոնների փոխանակության: Գլյուտոնները չունեն զանգված և էլեկտրական լիցք, սակայն ունեն $\hbar$ սպին և գունային լիցք: Ժամանակակից պատկերացումների համաձայն՝ գոյություն ունի 8 գլյուտոն, որոնցից յուրաքանչյուրը կրում է «գույն» և «հակագույն»: Գլյուտոն արձակելիս կամ կլանելիս քվարկը փոխում է իր գույնը, որն էլ ապահովում է ձգողություն քվարկների միջև: Սա նման է էլեկտրական լիցքերի փոխազդեցությանը, որն իրականացվում է վիրտուալ ֆոտոնների փոխանակությամբ:

Համաձայն քվանտային քրոմոդինամիկայի՝ միջուկում ուժեղ փոխազդեցությունը նուկլոնների միջև իրականացնում են ոչ թե վիրտուալ պի-մեզոնները, որոնք կազմված են քվարկից և հակաքվարկից, այլ քվարկները, որոնք միմյանց հետ գլյուտոններ են փոխանակում:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞րն է քվարկային վարկածի էությունը:
2. Ինչպիսի՞ քվարկներ կան: Ի՞նչ լիցք ունեն դրանք:
3. Ինչպիսի՞ն են պրոտոնի և նեյտրոնի կառուցվածքները՝ ըստ քվարկային վարկածի:
4. Ի՞նչ չափեր ունեն քվարկները:
5. Ի՞նչ մասնիկներով է պայմանավորված քվարկների փոխազդեցությունը:
6. Ինչպե՞ս է պարզվել պրոտոնի ներքին կառուցվածքը:
7. Ո՞ր տարրական մասնիկներն են իսկական:
8. Ի՞նչ նոր քվարկներ են մասնակցում որոշ հաղորդումներում:
9. Ի՞նչ է քվարկի գույնը և ինչու՞ է այն ներմուծվել:
10. Ինչու՞ են բոլոր հաղորդումներն «անգույն» («սպիտակ»):
11. Ի՞նչ է գլյուտոնը: Ի՞նչ բնութագրեր ունի այն:
12. Ի՞նչ է ուսումնասիրում քվանտային քրոմոդինամիկան:

Մեծ հաղորձային կոլաշեր

Աշխարհի ամենահզոր արագարարը՝ մեծ հաղորձային կոլաշերը, կառուցվել է Միջուկային հետազոտությունների եվրոպական կենտրոնում: Այն շուրջ 27 կմ երկարությամբ օղակաձև կայանք է՝ տեղադրված $50 \div 175$ մ խորությամբ ստորերկրյա թունելում: Արագարարում ստեղծվում են հակադիր ուղղություններով արագացված և գրեթե լույսի արագությամբ շարժվող երկու պրոտոնային փնջեր, որոնց ուղղորդում և կիզակենտում են սարքի շուրջ 7000 մագնիսները:

Արագարարը լրիվ հզորությամբ գործարկվելու դեպքում փնջերում յուրաքանչյուր պրոտոն կունենա շուրջ 7 ՏէՎ ($7 \cdot 10^{12} \text{ էՎ}$) էներգիա, իսկ փունջն օժտված կլինի էներգիայով, որը համարժեք է 900 ավտոմեքենայի գումարային կինետիկ էներգիային, երբ դրանք շարժվում են 100 կմ/ժ արագությամբ:

Կոլաշերում պրոտոնները կշարժվեն շուրջ 300 թանձրուկների տեսքով, որոնցից յուրաքանչյուրը կպարունակի 100 միլիարդ պրոտոն և բախման պահին կունենա մի բանի սանտիմետր երկարություն և 16 միկրոմետր տրամագիծ: Այդ ինքնատիպ «ստեղծերը», բախվելով իրար հատուկ տեղադրված դետեկտորներում, կառաջացնեն մասնիկների ավելի քան 600 միլիոն բախում 1 վայրկյանում:

Կոլաշերն ունի չորս հսկայական դետեկտորներ, որոնցից ամենախոշորը կարող է զբաղեցնել Փարիզի աստվածամոր տաճարի կեսը, իսկ ամենածանր ավելի շատ մետաղ է պարունակում, քան Էյֆելյան աշտարակը: Այդ դետեկտորները յուրաքանչյուր բախումից հետո միաժամանակ կարող են չափել 1000 մասնիկի պարամետրերը:

Աշխատանքի պրոյեկտում կոլաշերի սնույցման համակարգերն օգտագործում են 180 ՄՎտ հզորություն:

Կոլաշերը գիտական համագործակցության եզակի օրինակ է: Նախատեսված աշխատանքներին մասնակցում է 20 պետություն՝ դիտորդի կարգավիճակով՝ ԱՄՆ, Կանադա, ՌԴ, Չինաստան, Ճապոնիա և այլն, և աշխարհի շուրջ 10 հազար ֆիզիկոս:

2010 թվականին հաջողվել է կոլաշերում ստանալ պրոտոնների կայուն «սեղմված» փունջ $3,5 \text{ ՏէՎ}$ էներգիայով պրոտոններով, գրանցվել է W տարրական մասնիկը, մյուոններ, պոզիտրոններ:

Ֆիզիկոսներն այժմ փորձում են փնջերում պրոտոնների էներգիան հասցնել 7 ՏէՎ -ի և համոզված են, որ կհաջողվի փորձնականորեն հաստատել բազմաթիվ կանխատեսումներ, ինչպես նաև կատարել նոր հայտնագործություններ, որոնք անգամ կանխագուշակված չեն:

§ 69. ԴԱՇՏԻ ՄԻԱՍՆԱԿԱՆ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՄՏԵՂՈՄԱՆ ՀԵՌԱՆԿԱՐՆԵՐԸ

Ֆիզիկայի հիմնական խնդիրը զարգացման բոլոր փուլերում բնության երևույթների և բազմազան պրոյեկտների բացատրությունն է միասնական տեսանկյունից՝ մի բանի պարզ սկզբունքների հիման վրա:

Մեզ հայտնի չորս հիմնարար փոխազդեցությունները միմյանցից էապես տարբերվում են ինչպես բնույթով, այնպես էլ ուժգնությամբ (տե՛ս 6-րդ Աղյուսակը): Այս փոխազդեցություններն իրարից անկախ են, սակայն բնական է, որ ֆիզիկոսները փորձում են դրանք միավորել այնպես, ինչպես Մաքսվելը միավորեց էլեկտրական և մագնիսական ուժերը: Մաքսվելի տեսությունը փայլուն օրինակ է ցուցադրելու, թե ինչպես պետք է հասկանալ միասնական փոխազդեցությունը: Միավորման դեպքում տարբեր հիմնարար փոխազդե-

յությունները չեն բխում մեկը մյուսից, այլ ավելի ընդհանուր՝ միացյալ տեսության շրջանակներում հանդես են գալիս հավասար «իրավունքներով»։ Առաջին հայացքից տարաբնույթ փոխազդեցությունները ներկայացնում են միևնույն փոխազդեցությունը տարբեր ֆիզիկական իրադրություններում։ Օրինակ՝ էլեկտրաստատիկ փոխազդեցությունը միասնական էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության դրսևորումն է, երբ փոխազդող լիցքերն անշարժ են, իսկ մագնիսական փոխազդեցությունը էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության դրսևորումն է, երբ այդ լիցքերը շարժվում են։

Հիմնարար փոխազդեցությունների միավորման հաջորդ քայլն արվել է 20-րդ դարի 60-ական թվականների վերջին։ Ստիվեն Վայներբերգը, Շելդոն Գլեշոուն և Աբդուս Սալամը միավորել են էլեկտրամագնիսական և թույլ փոխազդեցությունները, ստեղծելով **էլեկտրաթույլ փոխազդեցության** միասնական տեսությունը։

Այն Մաքսվելի տեսության շարունակությունն է փոքր հեռավորություններում կամ, որ նույն է, մեծ (~ 100 ԳէՎ և ավելի մեծ) էներգիաների տիրույթում։ Էլեկտրաթույլ փոխազդեցության տեսություն մեջ փոխազդում են ոչ միայն լիցքավորված մասնիկները. փոխազդում են, օրինակ, պրոտոնը և նեյտրոնը, երկու նեյտրոնները, նեյտրինոն և նուկլոնները։ Էլեկտրաթույլ դաշտի քվանտներն են ֆոտոնը, W^+ , W^- և Z^0 մասնիկները, որոնք իրականացնում են տարրական մասնիկների փոխանակային փոխազդեցությունը։

Այս տեսության որոշ արդյունքներ փորձնականորեն հաստատվել են 70-ական թվականների սկզբին, իսկ 1979 թ. Վայներբերգին, Գլեշոունին և Սալամին շնորհվել է Նոբելյան մրցանակ։ Էլեկտրաթույլ փոխազդեցության տեսության մեծագույն նվաճումը Միջուկային հետազոտությունների եվրոպական կենտրոնում 1983 թ. հայտնագործված W^+ , W^- և Z^0 մասնիկներն էին, որոնց գոյությունը կանխատեսված էր տեսականորեն։ Կառլո Ռուբիայի և Սիմոն վան դեր Մերվեի ղեկավարությամբ կատարված փորձերում հայտնաբերված նոր մասնիկների զանգվածները մեծ ճշտությամբ համընկել են տեսության կանխատեսած տվյալներին։ 1984թ. այս գիտնականներին շնորհվել է Նոբելյան մրցանակ։

Այս հաջողությունները ֆիզիկոսներին մղեցին քվանտային քրոմոդինամիկայի ստեղծմանը։ Ինչպես և էլեկտրաթույլ փոխազդեցության տեսությունը, քվանտային քրոմոդինամիկան էլ կարելի է համարել փորձնականորեն հաստատված։

Վայներբերգ-Գլեշոուն-Սալամի տեսության տպավորիչ հաջողությունները և նրա որոշ առնչությունները քվանտային քրոմոդինամիկայի հետ հրատապ դարձրին միկրոաշխարհի ֆիզիկայի կարևորագույն խնդիրներից մեկը՝ էլեկտրաթույլ և ուժեղ փոխազդեցությունների միավորումը։

Այս տեսություններն էապես տարբերվում են իրարից, սակայն դրանք, այնուամենայնիվ, հնարավոր է միավորել մեկ միասնական տեսության շրջանակներում։ Երեք հիմնարար (էլեկտրամագնիսական, թույլ և ուժեղ) փոխազդեցությունները միավորող տեսություններն անվանում են Մեծ միավորման տեսություններ։ Դրանց կանխատեսումները դեռևս փորձնականորեն

րեն չեն հաստատվել, սակայն հիմնական գաղափարներն այնքան գրավիչ են, որ շատ ֆիզիկոսներ համոզված են, որ այդ տեսությունների որևէ տարբերակ իրոք ճշմարիտ կլինի, և կունենանք ուժեղ, թույլ և էլեկտրամագնիսական փոխազդեցությունների միասնական նկարագրման հնարավորություն:

Մեծ միավորման տեսություններում գրավիտացիոն ուժերը չեն մասնակցում: Ուստի բնական հարց է ծագում՝ հնարավոր¹ է արդյոք միավորել Մեծ միավորման տեսությունը և գրավիտացիայի տեսությունը: Հարցին պատասխանելու համար հիշենք, որ էլեկտրամագնիսական փոխազդեցությունը նկարագրելու համար պահանջվել է մեկ մասնիկ՝ ֆոտոնը, էլեկտրաթույլ փոխազդեցությունների դեպքում՝ չորս մասնիկ՝ ֆոտոնը, $W^\pm$ -ները և Z^0 -ն, իսկ ուժեղ փոխազդեցությունների դեպքում՝ ութ մասնիկ՝ գլյուոնները:

Ըստ որոշ տեսական կանխատեսումների՝ դաշտի միասնական տեսության մեջ, որը կմիավորի բոլոր՝ էլեկտրամագնիսական, ուժեղ, թույլ և գրավիտացիոն փոխազդեցությունները, ի հայտ կգան նոր լրացուցիչ մասնիկներ, որոնց միջոցով էլ կիրականացվեն տարրական մասնիկների փոխազդեցությունները:

Դաշտի միասնական տեսության ստեղծումը հնարավորություն կտա լուծելու տարրական մասնիկների տեսության և ընդհանրապես ամբողջ ֆիզիկայի հիմնական խնդիրը, այն է՝ ստանալ տարրական մասնիկների զանգվածները և պարզել, թե ինչու² են որոշվում էլեկտրական լիցքի և փոխազդեցության մյուս հաստատումների արժեքները:



Հարցեր և առաջադրանքներ

1. Ո՞րն է միասնական տեսության հիմնական հատկանիշը:
2. Միասնական տեսության ի՞նչ օրինակներ գիտեք:
3. Ինչո՞ւ է էլեկտրաթույլ փոխազդեցությունը տարբերվում էլեկտրամագնիսական փոխազդեցությունից:
4. Որո՞նք են էլեկտրաթույլ դաշտի թվանշանները:
5. Ի՞նչ է Մեծ միավորման տեսությունը:
6. Ի՞նչ է դաշտի միասնական տեսությունը:

Խնդիրների լուծման օրինակներ

1. Ապացույեք, որ վակուումում, անգամ $2m_e c^2$ շեմային էներգիայից մեծ էներգիայով ֆոտոնը չի կարող ծնել էլեկտրոն-պոզիտրոնային զույգ:

Լուծում: Ենթադրենք, որ էլեկտրոն-պոզիտրոնային զույգը ծնվում է, և ֆոտոնը փոխակերպվում է $\vec{p}_e$ իմպուլսով էլեկտրոնի և $\vec{p}_e$ իմպուլսով պոզիտրոնի, ընդ որում՝ $|\vec{p}_e| = |\vec{p}_e| = p_e$: Այս պայմանից հետևում է էլեկտրոնի և պոզիտրոնի էներգիաների հավասարությունը՝

$$E_e = E_{\bar{e}} = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1)$$

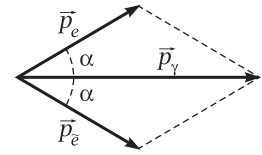
որտեղ v -ն էլեկտրոնի (պոզիտրոնի) արագության մոդուլն է:

Այժմ գրենք էներգիայի և իմպուլսի պահպանման օրենքները զույգի ծնման պրոցեսում.

$$E_\gamma = E_e + E_{\bar{e}} = \frac{2m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (2)$$

$$p_\gamma = p_e \cos \alpha + p_{\bar{e}} \cos \alpha = \frac{2m_e v \cos \alpha}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (3)$$

որտեղ E_γ -ն ֆոտոնի էներգիան է, իսկ $p_\gamma = E_\gamma/c$ -ն՝ նրա իմպուլսը: (2) հավասարումը բաժանելով (3) հավասարմանը, կստանանք՝ $c = c^2/v \cos \alpha$, կամ $v = c/\cos \alpha \geq c$, որը հնարավոր չէ, քանի որ վակուումում միշտ $v < c$: Այսինքն՝ լուծման սկզբում արված ենթադրությունը սխալ է:



Չույգի ծնունդ հնարավոր է, օրինակ, միջուկի դաշտում (տե՛ս (7.3) ռեակցիան), քանի որ ֆոտոնի իմպուլսի և էներգիայի մի մասը փոխանցվում է միջուկին, ուստի՝ (2) և (3) հավասարումների աջ մասերում ավելանում են, համապատասխանաբար, միջուկի ստացած էներգիան և միջուկի ստացած իմպուլսը:

2. Էլեկտրոն-պոզիտրոնային զույգի անհիիլացումից ծնվեց երկու γ -քվանտ: Մինչև անհիիլացումը մասնիկները շարժվում էին իրար ընդառաջ, շատ փոքր արագություններով: Ապացույցեք, որ առաջացած γ -քվանտներն ունեն նույն էներգիան և գտեք դրա արժեքը:



Լուծում: Քանի որ մասնիկները շարժվում են շատ փոքր արագություններով ($v \ll c$), ապա նրանց էներգիաները գործնականում հավասար են հանգստի էներգիաներին: Հետևաբար, ըստ էներգիայի պահպանման օրենքի,

$$E_e + E_{\bar{e}} = m_e c^2 + m_{\bar{e}} c^2 = 2m_e c^2 = E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2}, \quad (1)$$

որտեղ $E_{\gamma 1}$ -ը և $E_{\gamma 2}$ -ը առաջին և երկրորդ ֆոտոնների էներգիաներն են: Մյուս կողմից, ըստ իմպուլսի պահպանման օրենքի,

$$\vec{p}_e + \vec{p}_{\bar{e}} = 0 = \vec{p}_{\gamma 1} + \vec{p}_{\gamma 2}, \quad (1)$$

որի համաձայն՝ ֆոտոններն ունեն մոդուլով հավասար իմպուլսներ՝ $|\vec{p}_{\gamma 1}| = |\vec{p}_{\gamma 2}|$, որտեղից հետևում է ֆոտոնների էներգիաների հավասարությունը.

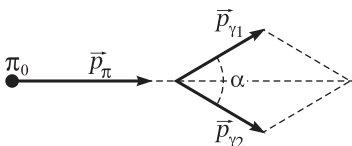
$$E_{\gamma 1} = c|\vec{p}_{\gamma 1}| = c|\vec{p}_{\gamma 2}| = E_{\gamma 2}: \quad (3)$$

(1) և (2) առնչություններից կստանանք՝ $2m_e c^2 = 2E_{\gamma 1}$ և

$$E_{\gamma 1} = m_e c^2 = 0,511 \text{ ՄէՎ}:$$

Պատասխան՝ 0,511 ՄէՎ:

3. Պի-զրո-մեզոնը տրոհվում է երկու միատեսակ ֆոտոնների, որոնք թռչում են իրար նկատմամբ 60° անկյունով: Գտեք յուրաքանչյուր ֆոտոնի էներգիան և պի-մեզոնի էներգիան մինչև տրոհումը:



Լուծում: Նշանակենք π^0 -մեզոնի իմպուլսը $\vec{p}_\pi$ -ով, էներգիան մինչև տրոհումը՝ E_π -ով, ֆոտոնների իմպուլսները՝ $\vec{p}_{\gamma 1}$ -ով և $\vec{p}_{\gamma 2}$ -ով: Խնդրի պայմանի համաձայն՝ $|\vec{p}_{\gamma 1}| = |\vec{p}_{\gamma 2}| = E_\gamma/c$, որտեղ E_γ -ն ֆոտոնի էներգիան է: Ըստ իմպուլսի պահպանման օրենքի՝

$$p_\pi = |\vec{p}_{\gamma 1}| \cos \frac{\alpha}{2} + |\vec{p}_{\gamma 2}| \cos \frac{\alpha}{2} = 2 \frac{E_\gamma}{c} \cos \frac{\alpha}{2}: \quad (1)$$

π^0 -մեզոնի էներգիան արտահայտվում է $E_\pi = \sqrt{p_\pi^2 c^2 + m_\pi^2 c^4}$ բանաձևով, ուստի՝ էներգիայի պահպանման օրենքի համաձայն,

$$E_{\pi} = \sqrt{p_{\pi}^2 c^2 + m_{\pi}^2 c^4} = 2E_{\gamma} \quad (2)$$

(1) և (2) արտահայտություններից կստանանք՝

$$p_{\pi}^2 c^2 + m_{\pi}^2 c^4 = c^2 \frac{E_{\gamma}^2}{c^2} \cos^2 \frac{\alpha}{2} + m_{\pi}^2 c^4 = 4E_{\gamma}^2,$$

կամ

$$m_{\pi}^2 c^4 = 4E_{\gamma}^2 \cdot 1 - \cos^2 \frac{\alpha}{2} = 4E_{\gamma}^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2},$$

որտեղից

$$E_{\gamma} = \frac{m_{\pi} c^2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = m_{\pi} c^2 \cdot 135 \text{ ՄէՎ:}$$

(2) բանաձևից՝ $E_{\pi} = 2E_{\gamma} = 270 \text{ ՄէՎ:}$

Պատասխան՝ 130 ՄէՎ, 270 ՄէՎ:

4. Գադարի վիճակում տաու-լեպտոնը տրոհվում է էլեկտրոնի և երկու նեյտրինոյի, ընդ որում՝ էլեկտրոնը թռչում է մի ուղղությամբ, իսկ նեյտրինոները՝ հակառակ ուղղությամբ: Գտեք էլեկտրոնի կինետիկ էներգիան և երկու նեյտրինոների էներգիան:

Լուծում: Գրենք տաու-լեպտոնի տրոհման ռեակցիան՝

$$\tau^{-} \rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_e + \nu_{\tau}:$$

Իմպուլսի պահպանման օրենքի համաձայն՝

$$\vec{p}_{\tau^{-}} = \vec{p}_e + \vec{p}_{\bar{\nu}_e} + \vec{p}_{\nu_{\tau}}:$$

Ըստ խնդրի պայմանի՝ $\vec{p}_{\tau^{-}} = 0$ և $\vec{p}_e \cdot \vec{p}_{\bar{\nu}_e} + \vec{p}_{\nu_{\tau}} = 0$, ուստի՝

$$p_e = p_{\bar{\nu}_e} + p_{\nu_{\tau}} \quad (1)$$

Էներգիայի պահպանման օրենքից և (1) բանաձևից հետևում է էլեկտրոնի լրիվ էներգիայի արտահայտությունը.

$$E_e = E_{0\tau} - (E_{\bar{\nu}_e} + E_{\nu_{\tau}}) = E_{0\tau} - c(p_{\bar{\nu}_e} + p_{\nu_{\tau}}) = E_{0\tau} - cp_e \quad (2)$$

(2) արտահայտության մեջ օգտագործեցինք $m_{\bar{\nu}_e} = m_{\nu_{\tau}} = 0$ պայմանը, որոնցից հետևում են $E_{\bar{\nu}_e} = cp_{\bar{\nu}_e}$ և $E_{\nu_{\tau}} = cp_{\nu_{\tau}}$ արտահայտությունները: Մյուս կողմից, համաձայն էլեկտրոնի լրիվ էներգիայի ռելյատիվիստական բանաձևի և (2) բանաձևի,

$$E_e = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4} = E_{0\tau} - cp_e, \quad (3)$$

կամ

$$E_e^2 = p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4 = (E_{0\tau} - E_e)^2 + E_{0e}^2, \quad (E_{0e} = m_e c^2),$$

որտեղից

$$E_e = \frac{E_{0e}^2 + E_{0\tau}^2}{2E_{0\tau}} = \frac{E_{0\tau}}{2} \cdot 1 + c \frac{E_{0e}}{E_{0\tau}} E \quad (4)$$

Համաձայն 4-րդ աղյուսակի տվյալի՝ $E_{0\tau} = 3492 m_e c^2 = 3492 E_{0e} = 1782 \text{ ՄէՎ}$, ուստի՝ 2-րդ գումարելին, որը $(1/3492)^2 \sim 10^{-8}$ կարգի մեծություն է, կարելի է անտեսել 1-ի նկատմամբ: Այսպիսով՝

$$E_e \approx \frac{1}{2} E_{0\tau} = 892 \text{ ՄէՎ:}$$

(2) բանաձևից նեյտրինոների գումարային էներգիան՝

$$E_{\bar{\nu}_e} + E_{\nu_{\tau}} = E_{0\tau} - E_e = E_{0\tau} - \frac{1}{2} E_{0\tau} = \frac{1}{2} E_{0\tau} = 892 \text{ ՄէՎ:}$$

Հարկ է նշել, որ նեյտրինոների էներգիաներն առանձին-առանձին որոշել հնարավոր չէ: Էլեկտրոնի կինետիկ էներգիան՝

$$E_{\text{կին}} = E_e - E_{0e} \approx E_e, \text{ քանի որ } E_{0e} \approx 0,511 \text{ ՄէՎ} \ll E_e = 892 \text{ ՄէՎ:}$$

Պատասխան՝ 892 ՄէՎ, 892 ՄէՎ:

Խորացված

5. Հանգստի վիճակում պրոտոնն արձակում է 1 ՄէՎ էներգիայով վիրտուալ ֆոտոն: Որքա՞ն կգոյատևի այդ ֆոտոնը: Ի՞նչ ճանապարհ կանցնի այն: Կհասնի՞ արդյոք միջուկում հարևան պրոտոնին:

Լուծում: Ըստ էներգիայի և ժամանակի համար անորոշությունների առնչության՝

$$\Delta t \cdot \frac{\hbar}{\Delta E} \cdot \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{վ} \cdot 0,66 \cdot 10^{-21} \text{վ:}$$

Այս ժամանակամիջոցում վիրտուալ ֆոտոնը կանցնի $\Delta r = c\Delta t = 3 \cdot 10^8 \cdot 0,66 \cdot 10^{-21} \approx 2 \cdot 10^{-13}$ մ ճանապարհ: Միջուկի չափերը 10^{-13} մ կարգի են, ուստի՝ ֆոտոնը կհասնի հարևան պրոտոնին:

Պատասխան՝ $0,66 \cdot 10^{-21}$ վ, $2 \cdot 10^{-13}$ մ:

Խորացված

§70. ԱՇԽԱՐՀԻ ԺԱՄԱՆԱԿԱԿԻՑ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՊԱՏԿԵՐԸ

Աշխարհի ֆիզիկական պատկեր են անվանում բնության վերաբերյալ մեր ունեցած այն պատկերացումների ամբողջությունը, որոնց հիմքում ֆիզիկայի համընդհանուր օրենքներն են:

Ինչպես գիտեք, մինչև 19-րդ դարի երկրորդ կեսն ընդունված էր աշխարհի մեխանիկական պատկերը, համաձայն որի՝ բնության բոլոր երևույթները հնարավոր է բացատրել մեխանիկայի օրենքների հիման վրա: Սակայն էլեկտրական և մագնիսական փոխազդեցությունները նկարագրող օրենքների հայտնագործումից և, անշուշտ, Մաքսվելի՝ էլեկտրամագնիսական դաշտի հավասարումների ձևակերպումից հետո ստեղծվել է աշխարհի նոր՝ էլեկտրամագնիսական պատկերը, որն ընդգրկել է պատկերացումները բնության բոլոր այն երևույթների մասին, որոնք կարելի էր նկարագրել մեխանիկական և էլեկտրամագնիսական փոխազդեցությունների միջոցով:

19-րդ դարի վերջին հայտնաբերվել են մի շարք երևույթներ, բացահայտվել են փորձնական փաստեր, որոնք հնարավոր չէր բացատրել մնալով միայն աշխարհի էլեկտրադինամիկական պատկերի շրջանակներում: Դրանք էին, մասնավորապես, ատոմների կայունությունը, ճառագայթաակտիվությունը, ջերմային ճառագայթման արձակման և կլանման փորձնական օրինաչափությունները: Այս երևույթների անբացատրելիությունը մեխանիկայի և էլեկտրադինամիկայի օրենքների հիման վրա հանգեցրել է այն բանին, որ աշխարհի էլեկտրադինամիկական պատկերին փոխարինելու է եկել աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պատկերը՝ հիմնված քվանտային ֆիզիկայի օրենքների վրա, որը բացատրել է բնության բոլոր երևույթները՝ տարրական մասնիկների փոխակերպումներից մինչև գերմոր աստղերի բռնկումները և տիեզերքի ընդարձակումը: Այլ կերպ ասած՝ աշխարհի ժամանակակից ֆի-

գիկական պատկերի շրջանակներում հնարավոր եղավ նկարագրել ինչպես միկրո-, այնպես էլ մակրո- և մեզաաշխարհի երևույթները:

Աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պատկերի ստեղծման առաջին քայլը, ինչպես արդեն գիտեք, կատարել է Մաքս Պլանկը՝ 1900 թ. ձևակերպելով քվանտների վերաբերյալ վարկածը. ատոմները ճառագայթումը (մասնավորապես՝ լույսը) արձակում և կլանում են առանձին բաժիններով՝ քվանտներով: Ավելի ուշ՝ 1905 թ., Ալբերտ Այնշտայնը ենթադրել է, որ ճառագայթումը նաև տարածվում է առանձին քվանտներով, որոնք հետագայում անվանել են ֆոտոններ: 1913 թ. Նիլս Բորը հիմնավորել է, թե ինչու են ատոմները կայուն՝ առաջարկելով ձեռք հայտնի այն կանխադրույթները, համաձայն որոնց՝ ներատոմային էլեկտրոնները միջուկի շուրջը շարժվում են կայուն՝ ստացիոնար ուղեծրերով և էներգիայի քվանտներ արձակում կամ կլանում են միայն մի ստացիոնար ուղեծրից մյուսն անցնելիս: 1924 թ. Լուի դը Բրոյլն առաջարկել է **ալիքամասնիկային երկվորյան սկզբունքը**, համաձայն որի՝ յուրաքանչյուր ալիքի բնորոշ են նաև մասնիկային հատկություններ, և հակառակը՝ ամեն մի շարժվող մասնիկ կարող է դրսևորել ալիքներին բնորոշ հատկություններ: Այս սկզբունքը շուտով փորձնականորեն հաստատում ստացավ և դրվեց քվանտային մեխանիկայի հիմքում:

Ատոմային միջուկի կառուցվածքն ուսումնասիրելիս պարզվել է, որ ներմիջուկային մասնիկներն իրար հետ փոխազդում են բնության ամենահզոր ուժերով, որոնք բնութագրում են **ուժեղ կամ միջուկային փոխազդեցությունը**, որը երրորդ հիմնարար փոխազդեցությունն է: Այս բացահայտումը հնարավորություն է տվել աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պատկերի շրջանակներում բացատրելու միջուկի կազմությունը և հատկությունները, հաշվարկելու միջուկային ռեակցիաների արդյունքում ստացվող էներգիան, հասկանալու ճառագայթաակտիվ տրոհման պատճառները և այլն: Միջուկային փոխազդեցությունը նկարագրող տեսության յուրօրինակ հաղթանակ կարելի է համարել այդ փոխազդեցությունն իրականացնող տարրական մասնիկների՝ π -մեզոնների հայտնաբերումը 1947 թ.:

Անցյալ դարի 60-ական թվականների վերջին հայտնաբերվել է հիմնարար փոխազդեցություններից 4-րդը՝ **թույլ փոխազդեցությունը**: Այդ փոխազդեցությամբ են պայմանավորված β -տրոհումը և մի շարք այլ համամասն երևույթներ: Որոշ ժամանակ անց փորձնականորեն հայտնաբերվել են նաև **թույլ փոխազդեցության փոխանակային մասնիկները**:

Փոխվել են պատկերացումները տարրական մասնիկների մասին: Այն, ինչ համարվում էր տարրական, պարզվել է, որ այդպիսին չէ: Մասնավորապես, մինչև 1970-ական թթ. տարրական էր համարվում էլեկտրոնի կամ պրոտոնի լիցքը: Բայց ապացույցվել է, որ, չնչին բացառությամբ, բոլոր «տարրական» անվանվող մասնիկները՝ **հաղորդները (մեզոններ և բարիոններ)** կազմված են **քվարկներից**, ընդ որում՝ յուրաքանչյուր մեզոն՝ քվարկից և հակաքվարկից, իսկ յուրաքանչյուր բարիոն՝ երեք քվարկից: Քվարկների լիցքը, ի տարբերություն էլեկտրոնի լիցքի, արտահայտվում է տարրական լիցքի մասերով՝ $\pm 2e/3$ և $\pm e/3$:

Ժամանակակից գիտատեխնիկական առաջընթացին բնորոշ է գիտությունների ինտեգրումը: Օրինակ՝ տարրական մասնիկների ֆիզիկայի, միջուկային ֆիզիկայի և աստղագիտության ինտեգրումը հանգեցրել է աստղաֆիզիկայի՝ երկնային մարմինների, նրանց մեջ ընթացող երևույթների, ինչպես նաև աստղերի ու տիեզերքի էվոլյուցիայի օրինաչափություններն ուսումնասիրող գիտության զարգացմանը:

Այսպիսով՝ կարելի է ասել, որ աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պատկերի կայացումն ազդարարել է դասական ֆիզիկայի ու նրան հատուկ մտածողության դարաշրջանի ավարտը և «ոչ դասական» կամ «քվանտային» մտածելակերպի ձևավորման շրջանը: Բվանտային ֆիզիկայի հետագա զարգացմանը զուգընթաց «ոչ դասական» պատկերացումները բնության երևույթների վերաբերյալ ավելի են խորացել: Այդ նոր պատկերացումների հիման վրա ստեղծվել են այնպիսի գիտություններ, ինչպիսիք են քվանտային քիմիան, դաշտի քվանտային տեսությունը, մանոէլեկտրոնիկան:

Համեմատած դասական ֆիզիկայի հետ՝ քվանտային ֆիզիկան նյութն ուսումնասիրում է ավելի խոր մակարդակում, որին բնորոշ է վիճակագրական մոտեցմամբ նկարագրել ոչ միայն մասնիկների համախմբի, այլ նաև առանձին մասնիկի վարքը: Այդ է պատճառը, որ, իր տարբերություն դասական ֆիզիկային բնորոշ **դինամիկական** օրենքների, քվանտային ֆիզիկային հատուկ են բնության երևույթների նկարագրման **վիճակագրական** կամ **հավանականային** օրենքները:

Աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պատկերում և՛ նյութը, և՛ դաշտը բաղկացած են տարրական մասնիկներից: Բացակայում է անջրպետը նյութի և դաշտի միջև, որոնք արդեն կազմում են **նյութ-դաշտ երկմիասնություն**, որը նաև նշանակում է, որ նյութը և դաշտը կարող են փոխադարձաբար փոխակերպվել մեկը մյուսին: Անջրպետված չեն նաև նյութ-դաշտը և վակուումը. վերջինս կազմված է **վիրտուալ** մասնիկներից:

Աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պատկերի մասին հայեցակարգն ընդգրկում է նաև ժամանակակից տիեզերաբանությունը (կոսմոլոգիա), որը գիտություն է մեզաաշխարհի՝ տիեզերքի ծագման, զարգացման և ապագայի վերաբերյալ:

9-րդ դասարանի աստղագիտության դասընթացի ձեզ հայտնի է, որ, համաձայն ժամանակակից տիեզերաբանական մոդելի՝ տիեզերքն առաջացել է այսպես կոչված Մեծ պայթյունից, որի հետևանքով էլ դիտելի տիեզերքը ներկայումս ընդարձակվում է: Ընդ որում՝ որքան հեռու են գալակտիկաները, այնքան մեծ է նրանց՝ մեզանից հեռանալու արագությունը: Այդ փաստն արտահայտվում է Հաբլի օրենքով, ըստ որի՝ գալակտիկայի հեռանալու v տեսագծային արագությունը համեմատական է մեզնից այդ գալակտիկայի ունեցած r հեռավորությանը՝ $v = Hr$ (Հաբլի հաստատումը՝ $H = 75 \text{ կմ} \cdot \text{վ}^{-1} \cdot \text{Մպկ}^{-1}$, 1 Մպկ (մեգապարսեկ) $\approx 3,1 \cdot 10^{19} \text{ կմ}$): Սակայն դեռևս պարզ չէ՝ տիեզերքի ընդարձակումը կշարունակվի^օ, թե^օ կփոխարինվի հետագա սեղմմամբ: Ամեն ինչ կախված է նրանից, թե որքան է տիեզերքի միջին խտությունը (որն առայժմ հնարավոր չէ մույնիսկ գնահատել), մե^օ է այն այսպես կոչված **կրիտիկա-**

կան խտությունից, քե՞ ոչ: Առաջին դեպքում տիեզերքի ընդարձակումը կդանդաղի, և մի որոշ ժամանակ անց այն կսկսի սեղմվել: Երկրորդ դեպքում տիեզերքն անվերջորեն պետք է ընդարձակվի: Ուրեմն՝ տիեզերաբանությունն ավարտուն գիտություն չի կարելի համարել, քանի որ կան բազմաթիվ տիեզերաբանական խնդիրներ, որոնք սպասում են իրենց լուծմանը:

Ավարտուն գիտություն չէ նաև ժամանակակից ֆիզիկան, հետևաբար՝ ավարտուն չէ նաև աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պատկերը: Օրինակ՝ ֆիզիկայի դասընթացից գիտեք, որ էլեկտրական և մագնիսական երևույթների միջև առկա է անհամաչափություն (գոյություն չունեն մագնիսական լիցքեր, ինչպես որ էլեկտրական լիցքերն են), մինչդեռ բնության բոլոր երևույթներում դիտվում է համաչափության այս կամ այն ձևը:

Ներկայումս վերջնական պատասխան չի ստացել այն հարցը, քե տարրական են արդյոք քվարկները և լեպտոնները (էլեկտրոն, նեյտրինո, մյուոն, տաոն): Ճիշտ է, 1996 թ. ստացվել են փորձարարական տվյալներ, համաձայն որոնց՝ ենթադրել են, քե քվարկներն ունեն ներքին բարդ կառուցվածք և կազմված են ավելի տարրական մասնիկներից, բայց այդ ենթադրությունը հիմնավորելու համար անհրաժեշտ է իրականացնել նոր, բազմաբնույթ ու մեծ քվոկ փորձարարական հետազոտություններ:

Այսպիսով՝ որևէ կասկած չի հարույցում այն միտքը, որ բնությունը շատ ավելի հարուստ է ու բազմաթիվ առեղծվածներ է պարունակում և դեռևս բազմաթիվ հարցերի պատասխաններ է փաթցնում մեզնից: Այսօր էլ ոչ մի հիմք չկա կարծելու, քե բնությունը «սիրահոժար» կցուցադրի իր բոլոր գաղտնիքները, և «գիտության նավը, ի վերջո, կհանգրվանի իմացության վերջին նավահանգստում»:

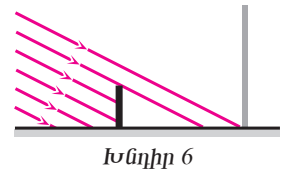


Շարքեր և առաջադրանքներ

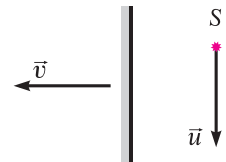
1. Ի՞նչ է աշխարհի ֆիզիկական պարկերը: **2.** Ո՞ր օրենքների վրա էին հիմնված աշխարհի մեխանիկական և էլեկտրամագնիսական պարկերները: **3.** Որո՞նք էին այն երևույթներն ու փաստերը, որոնք հնարավոր չէր բացատրել աշխարհի էլեկտրամագնիսական պարկերի շրջանակներում, բայց բացատրվում էին աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պարկերի հիման վրա: **4.** Ի՞նչ օրենքներ են ընկած աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պարկերի հիմքում: **5.** Ո՞րն է ալիքամասնիկային երկվության հայեցակարգի էությունը: **6.** Թվարկեք երևույթներ, որոնք պայմանավորված են՝ ա) ուժեղ փոխազդեցությամբ, բ) թույլ փոխազդեցությամբ: **7.** Ի՞նչ ամենավորքը լիցք կարող են ունենալ փարրական մասնիկները՝ ա) ազատ վիճակում, բ) կապված վիճակում: **8.** Ինչպիսի՞ օրենքներ են բնորոշ՝ ա) դասական ֆիզիկային, բ) քվանտային ֆիզիկային: **9.** Որո՞նք են նյութի և դաշտի նմանություններն ու տարբերությունները համաձայն՝ ա) աշխարհի էլեկտրամագնիսական պարկերի, բ) աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պարկերի: **10.** Տիեզերքը սրացիոնա՞ր վիճակում է, թե՞ ընդարձակվում է: Ինչպե՞ս կարող եք հիմնավորել ձեր պատասխանը: **11.** Ավարտուն, թե՞ շարունակ զարգացող գիտություն է ժամանակակից ֆիզիկան: Ինչու՞:

ՉԼՈՒՄ I ԵՐԿՐԱԶՈՓԱԿԱՆ ՕՊՏԻԿԱ

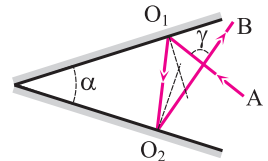
1. Փողոցային լապտերի մոտ ուղղաձիգ տեղադրված ձողը, որի բարձրությունը 1 մ է, գցում է 1 մ երկարությամբ ստվեր: Եթե ձողը ստվերի ուղղությամբ 1 մ-ով հեռացվի լապտերից, ապա նրա ստվերի երկարությունը կդառնա 2 մ: Որքա՞ն է լապտերի բարձրությունը:
2. Լույսի ճառագայթն ընկնում է հարթ հայելու վրա: Քանի՞ աստիճանով կփոխվի ընկնող և անդրադարձած ճառագայթներով կազմված անկյունը, եթե հայելու՝ ճառագայթի հետ կազմած անկյունը մեծացվի 10° -ով:
3. Լույսի ճառագայթը սեղանի հորիզոնական հարթության հետ կազմում է $\alpha = 52^\circ$ անկյուն: Ինչպե՞ս պետք է տեղադրել հարթ հայելին՝ անդրադարձած ճառագայթի ուղղությունը հորիզոնական դարձնելու համար:
4. Երկու հարթ հայելիներ իրար հետ կազմում են 30° անկյուն: Առաջին հայելուց անդրադարձած ճառագայթը երկրորդի վրա ընկնում է նրան ուղղահայաց: Ի՞նչ անկյունով է այդ ճառագայթն ընկնում առաջին հայելու վրա:
5. Հորիզոնական սեղանին դրված է մի գունդ: Սեղանի հարթության նկատմամբ ի՞նչ անկյունով պետք է տեղադրվի հարթ հայելին, որպեսզի դեպի հայելին շարժվող գնդի պատկերը հայելում շարժվի ուղղաձիգ ուղղությամբ:
6. Հարթ հորիզոնական հայելու վրա որոշակի անկյունով ընկնող ճառագայթների փունջը, անդրադառնալով, ընկնում է ուղղաձիգ էկրանին (տե՛ս նկարը): Ի՞նչ երկարության ստվեր կգցի էկրանին հայելու վրա ուղղաձիգ տեղադրված H բարձրությամբ անբախանց փթեղը:
7. Հարթ հայելին շարժվում է $v = 3$ մ/վ արագությամբ, իսկ լույսի S կետային աղբյուրը՝ $u = 3$ մ/վ արագությամբ (տե՛ս նկարը): Գետնի նկատմամբ ի՞նչ արագությամբ է շարժվում աղբյուրի պատկերը հայելում:
8. Որոշե՛ք ընկնող AO_1 և անդրադարձած O_2B ճառագայթներով կազմված γ անկյունը, եթե հարթ հայելիների կազմած երկնիստ անկյունը՝ $\alpha = 47^\circ$ (տե՛ս նկարը): Դճառագայթների հարթությունն ուղղահայաց է հայելիների հարթությունների հատման գծին:
9. Լույսի աղբյուրը երկու հարթ հայելիների միջև է, որոնք միմյանց հետ կազմում են 30° անկյուն: Աղբյուրը հայելիների հատման գծից հեռացված է 0,06 մետրով և հայելիներից մեկին ավելի մոտ է: Որոշե՛ք հայելիներում ստացվող աղբյուրի կեղծ պատկերների միջև հեռավորությունը:
10. Որոշե՛ք օդապարիկի h բարձրությունը ջրի մակերևույթից, եթե H բարձրությամբ աշտարակից այն երևում է հորիզոնից վերև α անկյան տակ, իսկ նրա պատկերը լճում երևում է հորիզոնից ներքև β անկյան տակ (տե՛ս նկարը):



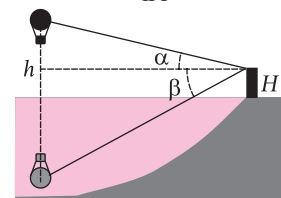
Խնդիր 6



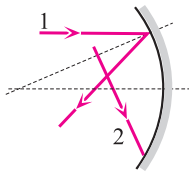
Խնդիր 7



Խնդիր 8



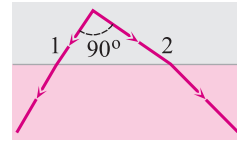
Խնդիր 10



Խնդիր 13



Խնդիր 14

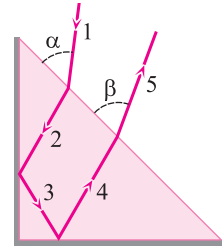


Խնդիր 19

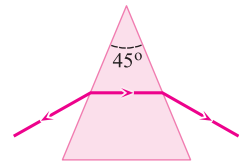
- 11.* Լուսատու կետի հեռավորությունն ուռույցիկ հայելուց 1 մ է, իսկ նրա պատկերը կիսում է օպտիկական առանցքի այն հատվածը, որը հայելու բևեռի և կիզակետի միջև է: Գտեք հայելու կորության շառավիղը:
12. Գոգավոր հայելիում ստացվում է առարկայի 4 անգամ փոքրացված պատկերը: Եթե առարկան 5 սմ-ով մոտեցվի հայելուն, ապա պատկերը կլինի 2 անգամ փոքրացած: Գտեք հայելու գլխավոր կիզակետային հեռավորությունը:
13. Նկարում պատկերված են գոգավոր հայելին և (1) ճառագայթի ընթացքը: Կառույցը (2) ճառագայթի ընթացքն այդ հայելիում:
14. Նկարում պատկերված են գնդային հայելու MN օպտիկական առանցքի, S լուսատու կետի և նրա S_1 պատկերի դիրքերը երկու դեպքում: Կառույցման եղանակով գտեք հայելու գագաթի և նրա կենտրոնի դիրքերը:
15. Որոշեք թափանցիկ դիելեկտրիկի բեկման ցուցիչը, եթե վակուումից նրա մակերևութին 45° անկյունով ընկնող ճառագայթը բեկվում է 30° անկյունով:
16. Ճառագայթն օդից 45° անկյունով ընկնում է թափանցիկ դիելեկտրիկի մակերևութին: Որոշեք բեկման անկյունը, եթե դիելեկտրիկի բեկման ցուցիչը 1,4 է:
17. Ճառագայթն օդից անցնում է 1,4 բեկման ցուցիչով թափանցիկ դիելեկտրիկի մեջ: Անկման անկյունը 45° է: Բեկման հետևանքով ի՞նչ անկյամբ է շեղվում ճառագայթն իր տարածման սկզբնական ուղղությունից:
18. Լույսի ճառագայթն օդից անցնում է էթիլային սպիրտի մեջ, որի բեկման ցուցիչը 1,37 է: Որոշեք ճառագայթի բեկման անկյունը, եթե անդրադարձած և բեկված ճառագայթների միջև անկյունը 120° է:
19. Փոխողահայաց (1) և (2) ճառագայթներն օդից մտնում են հեղուկի մեջ (տե՛ս նկարը): 1-ին ճառագայթի բեկման անկյունը 30° է, իսկ 2-ինը՝ 45° : Գտեք հեղուկի բեկման ցուցիչը:
20. Ի՞նչ անկյունով պետք է ճառագայթն ընկնի n բեկման ցուցիչով ապակու վրա, որպեսզի բեկված ճառագայթն ուղղահայաց լինի անդրադարձած ճառագայթին:
21. Ի՞նչ անկյունով պետք է լույսի ճառագայթն ընկնի երկու միջավայրերի բաժանման սահմանին, որպեսզի առաջին միջավայր անդրադարձած ճառագայթն ուղղահայաց լինի բեկված ճառագայթին: Առաջին միջավայրի բեկման ցուցիչը 1,1 է, երկրորդինը՝ 1,87:
22. Լույսի կետային աղբյուրը տեղադրված է օդում՝ ջրի մակերևույթից 1,5 մ բարձրությամբ: Ի՞նչ բարձրությունում կստացվի աղբյուրի պատկերը դիտորդի համար, որը նստած է ջրում՝ աղբյուրի տակ:
23. Ջրում 40 սմ խորասուզված դիտորդը տեսնում է իր գլխավերևում կախված լամպը, ընդ որում, նրան թվում է, թե լամպն իրենից հեռու է 2,4 մ: Որոշեք լամպի իրական հեռավորությունը ջրի մակերևույթից:

* Գունավոր թվերով նշված են խորացված հոսքի համար նախատեսված խնդիրները:

24. Տղան ցանկանում է փայտով դիպչել առվակի հատակին երևացող փոքր քարին: Նշան բռնելով քարի վրա՝ նա փայտը պահում է 45° անկյունով: Քարից ի՞նչ հեռավորությամբ փայտը կդիպչի հատակին, եթե առվակի խորությունը 32 սմ է:
25. 2 մ խորությամբ ջրամբարի հատակին խրված ցլի գագաթը 0,75 մ-ով բարձր է ջրի մակերևույթից: Գտեք ցլի ստվերի երկարությունը ջրի մակերևույթին և ջրամբարի հատակին, եթե Արեգակի բարձրությունը հորիզոնից 45° է:
26. Հավասարասրուն ուղղանկյուն եռանկյան ձև ունեցող պրիզմայի երկու էջ-նիստերն արժաքապատված են: Ճառագայթն ընկնում է երրորդ նիստին α անկյունով և դուրս է գալիս նույն նիստից β անկյունով (տե՛ս նկարը): Որոշեք β անկյունը, եթե α անկյունը հայտնի է:
27. Լույսի ճառագայթը եռանկյուն պրիզմայից դուրս է գալիս նույն անկյունով, ինչ անկյունով մտնում է նրա մեջ: Պրիզմայի բեկող անկյունը 45° է, իսկ ճառագայթի շեղումն իր տարածման սկզբնական ուղղությունից՝ 30° (տե՛ս նկարը): Որոշեք պրիզմայի նյութի բեկման ցուցիչը:
28. Լույսի ճառագայթն ընկնում է ապակե եռանկյուն պրիզմայի նիստին՝ նրան ուղղահայաց ուղղությամբ: Որոշեք ճառագայթի շեղման անկյունը, եթե պրիզմայի բեկող անկյունը 30° է:
29. Լույսի ճառագայթն ընկնում է $n=1,57$ բեկման ցուցիչով ապակե պրիզմայի նիստին՝ նրան ուղղահայաց: Որոշեք ճառագայթի շեղման անկյունը, եթե պրիզմայի բեկող անկյունը 60° է: Ապակու բեկման ցուցիչը $\sqrt{2}$ է:
30. Լույսի ճառագայթը 36° անկման անկյունով ընկնում է $n=1,54$ բեկման ցուցիչով քվարցե ապակույց պատրաստված եռանկյուն պրիզմայի վրա: Պրիզմայի բեկող անկյունը 40° է: Ի՞նչ անկյունով ճառագայթը դուրս կգա պրիզմայից, և ի՞նչ անկյունով այն շեղված կլինի իր տարածման սկզբնական ուղղությունից:
31. Լույսի ճառագայթը 60° անկման անկյունով ընկնում է 1 սմ հաստությամբ հարթ գուգահեռ փթեղի վրա և դուրս գալիս նրանից՝ փթեղում բեկվելով 30° անկյամբ: Ի՞նչ հեռավորությամբ է ճառագայթը շեղվում իր տարածման սկզբնական ուղղությունից:
32. Որոշեք հարթ-գուգահեռ փթեղի հաստությունը, եթե նրա վրա 50° անկման անկյունով ընկնող ճառագայթը փթեղով անցնելիս իր տարածման սկզբնական ուղղությունից շեղվում է 2 սմ-ով: Թփեղի նյութի բեկման ցուցիչը 1,7 է:
33. Որոշեք լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյունը, երբ ճառագայթն ընկնում է հեղուկ-վակուում սահմանի վրա: Հեղուկի բեկման ցուցիչը 2 է:
34. Լույսի ճառագայթը հեղուկ դիէլեկտրիկից անցնում է օդ: Լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյունն այդ ճառագայթի համար 45° է: Որոշեք այդ դիէլեկտրիկում լույսի տարածման արագությունը:
35. Գտեք վակուումի հետ սահմանակցող միջավայրի լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյունը, եթե այդ միջավայրում լույսի տարածման արագությունը $1,5 \cdot 10^8$ մ/վ է:



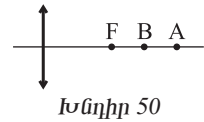
Խնդիր 26



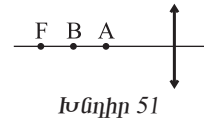
Խնդիր 27

36. Լույսի կետային աղբյուրը ջրում է՝ 1,5 մ խորությունում: Ինչքա՞ն է ջրի մակերևույթին այն շրջանի շառավիղը, որի սահմաններում հնարավոր է ճառագայթների ելքը դեպի օդ: Համարեք, որ ջրի բեկման ցուցիչը 1,25 է:
37. Անկման մույն անկյունների դեպքում առաջին միջավայրից երկրորդն անցնելիս ճառագայթի բեկման անկյունը 45° է, իսկ առաջինից երրորդ միջավայր անցնելիս՝ 30° : Գտեք երրորդ միջավայրից երկրորդն անցնող ճառագայթի լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյունը:
38. Ջուր-օդ համակարգի համար լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյունը 49° է, իսկ ապակի-օդ համակարգի համար՝ 42° : Գտեք լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյունն ապակի-ջուր համակարգի համար:
39. Լույսի ճառագայթն անցնում է $n = 1,57$ բեկման ցուցիչով ապակույց դեպի ջուր: Ճառագայթի անկման անկյունը միջավայրերի բաժանման սահմանին 40° է: Որոշեք ճառագայթի բեկման անկյունը և լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյունը:
40. Որոշեք հավաքող ոսպնյակի օպտիկական ուժը, եթե նրանից 0,15 մ հեռավորությամբ տեղադրված առարկայի իրական պատկերն ստացվում է ոսպնյակից 0,3 մ հեռավորությունում:
41. Յրող ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը՝ $|F| = 0,12$ մ, իսկ առարկայի պատկերի հեռավորությունը ոսպնյակից՝ $|f| = 0,09$ մ: Գտեք առարկայից մինչև ոսպնյակ հեռավորությունը:
42. Հավաքող ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը 3 մ է: Գտեք առարկայի հեռավորությունը ոսպնյակից, եթե այն 2 անգամ փոքր է, քան առարկայի պատկերի հեռավորությունը ոսպնյակից: Դիտարկեք $d > F$ և $d < F$ դեպքերը:
43. Մոմի հեռավորությունը ոսպնյակից 3 մ է, իսկ նրա իրական պատկերի հեռավորությունը ոսպնյակից՝ 2 մ: Ոսպնյակից ի՞նչ հեռավորությունում կստացվի պատկերը, եթե մոմը մոտեցնենք ոսպնյակին 1,5 մ-ով:
44. 0,5 մ բարձրությամբ առարկան -2 մ կիզակետային հեռավորությամբ ոսպնյակի օպտիկական կենտրոնից հեռու է 3 մ: Գտեք առարկայի պատկերի բարձրությունը:
45. Առարկան ցրող ոսպնյակի և նրա կիզակետի միջև է՝ կիզակետից 0,3 մ հեռավորությունում: Առարկայի կեղծ պատկերի հեռավորությունը մույն կիզակետից 0,54 մ է: Որոշեք ոսպնյակի կիզակետային հեռավորության մոդուլը:
46. Ի՞նչ հեռավորությունում պետք է տեղադրվի առարկան -2 դպտր օպտիկական ուժ ունեցող ոսպնյակի առջև, որպեսզի նրա կեղծ պատկերն ստացվի ոսպնյակի և նրա կեղծ կիզակետի մեջտեղում:
47. Հավաքող ոսպնյակի կիզակետից մինչև առարկա հեռավորությունը 0,05 մ է, իսկ իրական պատկերից մինչև մյուս կիզակետը՝ 0,45 մ: Որոշեք ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը:
48. Առարկայի հեռավորությունը հավաքող ոսպնյակից 4 անգամ մեծ է նրա կիզակետային հեռավորությունից: Որոշեք ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը, եթե առարկայի պատկերն ստացվում է ոսպնյակից 8 մ հեռավորությունում:
49. Առարկայի իրական պատկերի հեռավորությունը ոսպնյակից 1,5 անգամ մեծ է առարկայի՝ ոսպնյակից ունեցած հեռավորությունից: Որոշեք պատկերի հեռավորությունը ոսպնյակից, եթե նրա կիզակետային հեռավորությունը 0,6 մ է:

50. Երբ առարկան A կետում է, ոսպնյակի խոշորացումը՝ $\Gamma=2$, իսկ երբ առարկան B կետում է, խոշորացումը՝ $\Gamma=3$ (տե՛ս նկարը): Ինչպիսի՞ն կլինի ոսպնյակի խոշորացումը, եթե առարկան տեղադրվի AB հատվածի միջնակետում:



51. Երբ առարկան A կետում է, ոսպնյակի խոշորացումը 2 է, իսկ երբ B կետում է՝ 3 (տե՛ս նկարը): Քանի՞ անգամ է AB հատվածի պատկերի երկարությունը մեծ AB հատվածի երկարությունից:



52. Առարկայի հեռավորությունը ոսպնյակից 12 մ է, իսկ նրա իրական պատկերինը ոսպնյակից 0,8 մ: Ոսպնյակից ի՞նչ հեռավորությունում կստացվի պատկերը, եթե առարկան մոտեցնենք ոսպնյակին 3,75 մ-ով:

53. Առարկան տեղադրված է 0,3 մ կիզակետային հեռավորությամբ հավաքող ոսպնյակի առջև այնպես, որ նրա իրական պատկերից մինչև ոսպնյակ հեռավորության հարաբերությունը ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությանը 1,2 է: Գտե՛ք առարկայի հեռավորությունը ոսպնյակից:

54. 0,35 մ կիզակետային հեռավորությամբ ոսպնյակում առարկայի և նրա պատկերի բարձրությունները նույնն են: Որոշե՛ք պատկերի հեռավորությունը ոսպնյակից:

55. Առարկան տեղադրված է հավաքող ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքին ուղղահայաց՝ ոսպնյակից $F/2$ հեռավորությունում: Որոշե՛ք գծային խոշորացումը:

56. Առարկայի և էկրանի միջև հեռավորությունը 0,5 մ է: Նրանց միջև տեղադրված է 0,12 մ կիզակետային հեռավորությամբ ոսպնյակ, որի երկու դիրքերում էկրանին ստացվում է առարկայի հստակ պատկերը: Որոշե՛ք ոսպնյակի այդ երկու դիրքերի միջև հեռավորությունը:

57. Որոշե՛ք հավաքող ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը, եթե առարկայի և նրա իրական պատկերի միջև հեռավորությունը 2,5 մ է, իսկ գծային խոշորացումը՝ 1,5:

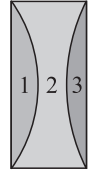
58. Ոսպնյակից 0,125 մ հեռավորությամբ տեղադրված սանդղակի միլիմետրա՜նոց բաժանքի պատկերն էկրանին ունի 24 մ բարձրություն: Որոշե՛ք ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը:

59. Հավաքող ոսպնյակից 1 մ հեռու՝ նրա հարթությանը զուգահեռ, դրված է լուսավորվող առարկան: Առարկայի պատկերի մակերեսն էկրանին 400 սմ² է: Եթե ոսպնյակը 30 սմ-ով հեռացվի առարկայից, ապա նրա նոր, հստակ պատկերի մակերեսը կդառնա հավասար առարկայի մակերեսի 9/16-ին: Որոշե՛ք առարկայի մակերեսը և ոսպնյակի օպտիկական ուժը:

60. Առարկայի և էկրանի միջև անփոփոխ հեռավորության դեպքում առարկայի և էկրանի միջև հավաքող ոսպնյակի երկու դիրքերում էկրանին ստացվում են առարկայի H_1 և H_2 բարձրությամբ պատկերները: Որոշե՛ք առարկայի բարձրությունը:

61. / երկարությամբ հատվածի տեսք ունեցող առարկան տեղադրված է F կիզակետային հեռավորությամբ հավաքող ոսպնյակի գլխավոր օպտիկական առանցքի երկայնքով: Հատվածի միջնակետի հեռավորությունը ոսպնյակից $/$ է, և ոսպնյակում ստացվում է առարկայի բոլոր կետերի իրական պատկերը: Որոշե՛ք առարկայի պատկերի երկայնական խոշորացումը:

62. 5 սմ տրամագծով ճառագայթների գլանաձև փունջն ընկնում է ցրող ոսպնյակի վրա՝ նրա գլխավոր օպտիկական առանցքին զուգահեռ ուղղությամբ: Ոսպնյակից դուրս եկած փունջն էկրանին առաջացնում է 7 սմ տրամագծով լուսավոր շրջան: Ինչքա՞ն է կլինի լուսավոր շրջանի տրամագիծը, եթե ցրող ոսպնյակը փոխարինվի նույն մոդուլով կիզակետային հեռավորությամբ հավաքող ոսպնյակով:



Խնդիր 63

63. Ապակե հարթ-զուգահեռ թիթեղից պատրաստել են երեք ոսպնյակ (տե՛ս նկարը): (1, 2) ոսպնյակների համակարգի օպտիկական ուժը -2 դպտր է, իսկ (2, 3) համակարգինը՝ -3 դպտր: Գտե՛ք (2) ոսպնյակի օպտիկական ուժը:

64. 0,4 մ կիզակետային հեռավորությամբ հավաքող ոսպնյակի հեռավորությունը ցրող ոսպնյակից 0,3 մ է: Ինչքա՞ն է ցրող ոսպնյակի կիզակետային հեռավորության մոդուլը, եթե համակարգի վրա ընկնող զուգահեռ ճառագայթների փունջը նրանից դուրս գալիս կրկին մնում է զուգահեռ:

65. Երկու միատեսակ հավաքող ոսպնյակներ՝ յուրաքանչյուրը 4 դպտր օպտիկական ուժով, տեղադրված են այնպես, որ համակարգի վրա ընկնող զուգահեռ ճառագայթների փունջը նրանից դուրս գալիս կրկին մնում է զուգահեռ: Որոշե՛ք ոսպնյակների միջև հեռավորությունը:

66. Առարկայի հեռավորությունը 0,12 մ կիզակետային հեռավորությամբ հավաքող ոսպնյակից 0,18 մ է: Ոսպնյակի կիզակետային հարթության մեջ տեղադրված է հարթ հայելի: Ոսպնյակից ի՞նչ հեռավորությունում կստացվի առարկայի պատկերը:

67. d_1 հեռավորությունից լուսանկարված առարկայի պատկերի բարձրությունը ժապավենի վրա h_1 է, իսկ d_2 հեռավորությունից լուսանկարելու դեպքում՝ h_2 : Գտե՛ք օբյեկտիվի օպտիկական ուժը:

68. Լույսի կետային աղբյուրը տեղադրված է ցրող ոսպնյակի կիզակետում: Այդ ոսպնյակին ընդհուպ մոտ տեղադրված է հավաքող ոսպնյակ, որն իր վրա ընկնող ճառագայթների տարամիտող փունջը դարձնում է զուգահեռ: Որոշե՛ք ցրող ոսպնյակի կիզակետային հեռավորության մոդուլի հարաբերությունը հավաքող ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությանը:

69. 5 դպտր և 2,5 դպտր օպտիկական ուժերով ոսպնյակների միջև հեռավորությունը 0,9 մ է: Ի՞նչ պատկեր կտա այդ համակարգը, եթե առարկան տեղադրվի առաջին ոսպնյակի առջև՝ նրանից 30 սմ հեռավորությունում:

70. 40 սմ և 80 սմ կիզակետային հեռավորություններով երկու հավաքող ոսպնյակներ տեղադրված են իրարից 20 սմ հեռավորությամբ այնպես, որ նրանց գլխավոր օպտիկական առանցքները համընկնում են: Առարկան տեղադրված է առաջին ոսպնյակի առջև՝ նրանից 60 սմ հեռավորությունում: Երկրորդ ոսպնյակից ի՞նչ հեռավորությունում կստացվի առարկայի պատկերը:

71. Միմյանց կիպ հավող գոգավոր հայելու և հավաքող ոսպնյակի կոորդյան շառավիղները նույնն են: Ոսպնյակի բացակայությամբ առարկայի իրական պատկերն ստացվում է հայելուց 50 սմ հեռավորությունում, իսկ ոսպնյակի առկայությամբ պատկերի հեռավորությունը 10 սմ է: Որոշե՛ք ոսպնյակի կիզակետային հեռավորությունը:

72. 20 սմ և 15 սմ կիզակետային հեռավորություններով 2 բարակ ոսպնյակներ, կիպ հավելով իրար, էկրանին տալիս են առարկայի հստակ պատկերը, եթե առարկայի հեռավորությունը առաջին ոսպնյակից 15 սմ է: Որքա՞ն պետք է տեղափոխել էկրանը՝ նոր հստակ պատկեր ստանալու համար, եթե երկրորդ ոսպնյակն առաջինից հեռացվի 5 սմ-ով:

- 73.** Էլեկտրամագնիսական ալիքի հաճախությունը վակուումում $3 \cdot 10^8$ Հց է: Քանի՞ ալիքի երկարություն կտեղավորվի 3 մ-ում:
- 74.** Ի՞նչ հաճախությունների են համապատասխանում Արեգակի լույսի եզրային կարմիր ($\lambda = 7,5 \cdot 10^{-7}$ մ) և եզրային մանուշակագույն ($\lambda = 4 \cdot 10^{-7}$ մ) ճառագայթները:
- 75.** Որոշեք այն հատվածի երկարությունը, որտեղ վակուումում տեղավորվում է մեներանգ լույսի ճիշտ այնքան ալիքի երկարություն, որքան տեղավորվում է ջրում՝ 0,4 մ երկարությամբ հատվածում:
- 76.** Ինչպե՞ս են փոխվում լույսի ալիքի երկարությունը և հաճախությունը, երբ այն վակուումից անցնում է մեկ այլ միջավայր:
- 77.** Ջրի մակերևույթը լուսավորվում է դեղին լույսով: Ի՞նչ գույնի լույս է տեսնում ջրի մեջ սուզված մարդը: Պատասխանը հիմնավորեք:
- 78.** Պրիզմայի միջով նայում են մեծ սպիտակ պատին: Այդ պատը գունավորված կլիմի՞ արդյոք սպեկտրի գույներով: Պատասխանը հիմնավորեք:
- 79.** 45° բեկող անկյունով պրիզմայի վրա 30° անկյունով ընկնում է սպիտակ լույսի ճառագայթ: Առաջացող սպեկտրի եզրային ճառագայթների համար պրիզմայի նյութի բեկման ցուցիչի արժեքները, համապատասխանաբար, 1,52 և 1,67 են: Որոշեք այդ եզրային ճառագայթներով կազմված անկյունը:
- 80.** Լույսի ալիքի երկարությունը որոշելու համար օգտագործվել է դիֆրակտային ցանց, որի 1 մմ-ում կա 100 նրբագիծ: Ցանցից 2 մ հեռավորությամբ էկրանին առաջին դիֆրակտային պատկերը ստացվում է կենտրոնականից 15,2 սմ հեռու: Որոշեք լույսի ալիքի երկարությունը:
- 81.** Երկու կոհերենտ ալիքներ, որոնց ընթացքի տարբերությունը $2 \cdot 10^{-6}$ մ է, վերադարձվում են էկրանի վրա՝ տալով հինգերորդ կարգի մաքսիմում: Ի՞նչ ընթացքի տարբերություն պետք է ունենան մույն ալիքները, որպեսզի նրանց վերադարձան արդյունքում էկրանին ստացվի մույն կարգի մինիմում:
- 82.** Երկու կոհերենտ ալիքների ընթացքի տարբերությունը $2,1 \cdot 10^{-6}$ մ է: Վերադարձվելով էկրանի ինչ-որ կետում՝ այդ ալիքները տալիս են երրորդ կարգի մինիմում: Որոշեք ալիքի երկարությունը:
- 83.** Տարածության ինչ-որ կետում վերադարձվում են $1,2 \cdot 10^{-6}$ մ ընթացքի տարբերությամբ երկու կոհերենտ ալիքներ, որոնց ալիքի երկարությունը $6 \cdot 10^{-7}$ մ է: Ի՞նչ տեղի կունենա վերադարձան կետում, եթե՝ ա) լույսը տարածվում է օդում, բ) լույսը տարածվում է ջրում, գ) լույսը տարածվում է 1,5 բեկման ցուցչով ապակում:
- 84.** Պրոյեկցիոն լապտերի լույսը, անցնելով կապույտ ապակով փակված փոքր անցքով, ընկնում է իրարից 1 մմ հեռավորությամբ երկու անցքով էկրանին: Անցնելով այդ անցքերով՝ լույսն ընկնում է երկրորդ էկրանին, որի հեռավորությունն անցքերից 1,7 մ է: Այդ էկրանին ինտերֆերենտային շերտերի միջև հեռավորությունը 0,8 մմ է: Գտեք լույսի ալիքի երկարությունը:
- 85.** Գտեք կանաչ լույսի ($5,5 \cdot 10^{-7}$ մ) համար սպեկտրի առավելագույն կարգը, եթե դիֆրակտային ցանցի պարբերությունը $3,3 \cdot 10^{-6}$ մ է:
- 86.** Ֆիզիկայի դպրոցական լաբորատորիաներում կան դիֆրակտային ցանցեր, որոնք 1 մմ-ում ունեն 50 և 100 նրբագիծ: Ցանցերից ո՞րն էկրանին կտա ավելի լայն սպեկտր՝ այլ հավասար պայմանների դեպքում:

87. $5 \cdot 10^{-7}$ մ ալիքի երկարությամբ լույսի փունջն ընկնում է դիֆրակտային ցանցի վրա՝ նրա նորմալի ուղղությամբ: Որոշեք ցանցի պարբերությունը, եթե երկրորդ կարգի մաքսիմումը դիտվում է սկզբնական ուղղության նկատմամբ 30° անկյունով:
88. Դիֆրակտային ցանցը 1 մմ-ում ունի 120 նրբագիծ: Գտեք ցանցի վրա ընկնող լույսի ալիքի երկարությունը, եթե դեպի առաջին կարգի երկու մաքսիմումները գնացող ճառագայթների կազմած անկյունը 8° է:
89. Երկու կոհերենտ աղբյուրներից ելնող ալիքների ինտերֆերենցն օդում դիտելիս էկրանին երևում են միմյանց հաջորդող մութ և լուսավոր շերտերը: Ի՞նչ տեղի կունենա այդ շերտերի հետ, եթե, պահպանելով բոլոր մնացած պայմանները, ինտերֆերենցը դիտենք ջրում:
90. Երկու նեղ ճեղքերի շատ մոտ լինելու դեպքում դժվար է անմիջական չափումներով որոշել նրանց միջև հեռավորությունը: Ընդերքը $5 \cdot 10^{-7}$ մ ալիքի երկարությամբ լույսով լուսավորելիս նրանից 4 մ հեռավորությամբ էկրանին ստացվում է ինտերֆերենտային պատկեր, որի լուսավոր շերտերի միջև հեռավորությունը 2 սմ է: Որոշեք ճեղքերի հեռավորությունն իրարից:
91. Լույսի ալիքի երկարությունը որոշելու համար օգտագործվել է դիֆրակտային ցանց, որի 1 մմ-ում կա 100 նրբագիծ: Ցանցից 2 մ հեռավորությամբ էկրանին առաջին դիֆրակտային պատկերն ստացվում է կենտրոնականից 12 սմ հեռավորությունում: Որոշեք լույսի ալիքի երկարությունը:
92. Դիֆրակտային ցանցը լուսավորվում է $6,56 \cdot 10^{-7}$ մ երկարությամբ մեներանգ լույսի փնջով: Ստացվող պատկերի երկրորդ կարգի մաքսիմումը երևում է ցանցին տարված ուղղահայացի նկատմամբ 15° անկյունով: Որոշեք դիֆրակտային ցանցի հաստատունը:
93. Երկրորդ կարգի դիֆրակտային սպեկտրում կարմիր գիծը ($7 \cdot 10^{-7}$ մ) դիտելու համար դիտափողը դրվեց ցանցի հարթության նորմալի նկատմամբ 30° անկյունով: Որոշեք դիֆրակտային ցանցի հաստատունը և ցանցի 1 սմ-ում նրբագծերի թիվը: Լույսի փունջը ցանցի վրա է ընկնում նրան ուղղահայաց ուղղությամբ:
94. Քանի՞ նրբագիծ է պարունակում դիֆրակտային ցանցի յուրաքանչյուր 0,1 մ-ը, եթե $6 \cdot 10^{-7}$ մ երկարությամբ ալիքի համար հինգերորդ կարգի մաքսիմումը դիտվում է ցանցի վրա ուղղահայաց ընկնող ճառագայթների ուղղության նկատմամբ 18° անկյունով:
95. $6 \cdot 10^{-7}$ մ ալիքի երկարությամբ մեներանգ լույսը նորմալի ուղղությամբ ընկնում է դիֆրակտային ցանցի վրա, որի 1 մմ-ը պարունակում է 400 նրբագիծ: Գտեք այդ ալիքի համար ցանցի տված դիֆրակտային մաքսիմումների ընդհանուր թիվը:
96. Դիֆրակտային ցանցն ուղղահայաց ընկնող սպիտակ լույսով լուսավորելիս երկրորդ և երրորդ կարգի սպեկտրները մասամբ իրար ծածկում են: Որոշեք երկրորդ կարգի սպեկտրի այն ալիքի երկարությունը, որը ծածկվում է երրորդ կարգի սպեկտրի $4 \cdot 10^{-7}$ մ ալիքի երկարությամբ մանուշակագույն գծով:
97. Անդրադարձած լույսի փայլի պատճառով լճակի հատակը չի երևում: Ինչպե՞ս կարելի է մարել անդրադարձումը և տեսանելի դարձնել հատակը:
98. Ջրի մակերևույթից անդրադարձած լույսը մասնակի բևեռացած է: Ինչպե՞ս կարելի է դրանում համոզվել, եթե ունեք բևեռիչ:
99. Բնական լույսն ընկնում է հաջորդաբար տեղադրված երկու բևեռիչների վրա, որոնք կողմնորոշված են այնպես, որ լույսը նրանցով բոլորովին չի անցնում:

Կանցնի՞ր արդյոք լույսը, եթե նրանց միջև տեղադրվի երրորդ բևեռիչը: Պատասխանը հիմնավորեք:

ԳԼՈՒԽ III

ՀԱՐԱԲԵՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՏՈՒԿ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԵՐԸ

- 100.** Հաշվարկման իներցիալ համակարգում S_1 լույսի աղբյուրը դադարի վիճակում է, իսկ S_2 աղբյուրը շարժվում է v արագությամբ: Որքա՞ն է աղբյուրների առաքած լույսի արագությունը հաշվարկման այդ համակարգի նկատմամբ:
- 101.** Ի՞նչ արագությամբ պետք է շարժվի տիեզերանավը Երկրի նկատմամբ, որպեսզի ժամանակի ընթացքը տիեզերանավում երկու անգամ ավելի դանդաղ լինի, քան Երկրի վրա անշարժ դիտորդի համար:
- 102.** Շարժվող գնացքում նստած դիտորդի տեսակետից կայծակի հարվածները գետնին A կետում (գնացքի առջևում) և B կետում (գնացքի հետևում) տեղի են ունենում միաժամանակ: Գետնին կանգնած դիտորդի տեսանկյունից ո՞ր կայծակն է ավելի շուտ խփել գետնին:
- 103.** Հաշվարկման իներցիալ համակարգում մասնիկը $c/\sqrt{2}$ արագությամբ ($C=3\cdot 10^8$ մ/վ) անցավ 300 մ ճանապարհ: Որքա՞ն է շարժման տևողությունը մասնիկի հետ կապված հաշվարկման համակարգում:
- 104.** Անշարժ ձողի երկարությունը 0,9 մ է: Որքա՞ն է ձողի երկարությունը այն դիտորդի համար, որի նկատմամբ ձողն իր երկայնքի ուղղությամբ շարժվում է 0,8C արագությամբ:
- 105.** Ի՞նչ արագությամբ պետք է շարժվի մարմինը, որպեսզի անշարժ դիտորդի համար մարմնի երկայնական չափերը (շարժման ուղղությամբ) փոքրանան 1 %-ով:
- 106.** Ենթադրենք՝ Երկրից 0,75C արագությամբ հեռացող տիեզերանավից վերջինիս նկատմամբ 0,75C արագությամբ նույն ուղղությամբ արձակում են հրթիռը: Որքա՞ն է հրթիռի արագությունը Երկրի նկատմամբ:
- 107.** Որքա՞ն է երկու իներցիալ հաշվարկման համակարգերի հարաբերական արագությունը, եթե դրանցից մեկում մասնիկի արագությունը $C/3$ է, իսկ մյուսում՝ $C/2$:
- 108.** Հաշվարկման K և K' իներցիալ համակարգերի հարաբերական արագությունը $C/4$ է: Ի՞նչ արագությամբ պետք է շարժվի մասնիկը K համակարգի նկատմամբ, որպեսզի K' համակարգի նկատմամբ նրա արագությունը լինի $C/2$:
- 109.** Մարմնի ներքին էներգիան փոխվեց 1 Ջ-ով: Որքա՞ն է նրա զանգվածի փոփոխությունը:
- 110.** Յուրաքանչյուր վայրկյանում Արեգակը ճառագայթում է $3,78\cdot 10^{26}$ Ջ էներգիա: Որքա՞ն է նվազում Արեգակի զանգվածը 1 ր-ում:
- 111.** Որքա՞ն է էլեկտրակայանի հզորությունը, եթե մեկ տարում նրա արտադրած էլեկտրաէներգիան հավասար է 1440 գ զանգվածով մարմնի հանգստի էներգիային:
- 112.** Ինչու՞ է կինետիկ էներգիայի դասական $E_k=mv^2/2$ բանաձևը հակասում հարաբերականության հատուկ տեսությանը:
- 113.** Ի՞նչ արագության դեպքում m զանգվածով ռելյատիվիստական մասնիկի կինետիկ էներգիան կդառնա $mc^2/2$:
- 114.** Որքա՞ն է մարմնի արագությունը, եթե նրա կինետիկ էներգիան հավասար է հանգստի էներգիային:

115. Պոտենցիալների ի՞նչ տարբերություն անցնելով էլեկտրոնը ձեռք կրերի 0,8C արագություն, եթե այն սկզբում դադարի վիճակում է:
116. Որոշեք $1,8 \cdot 10^8$ մ/վ արագությամբ շարժվող էլեկտրոնի իմպուլսը:
117. Էլեկտրոնը շարժվում է $2,4 \cdot 10^8$ մ/վ արագությամբ: Որոշեք էլեկտրոնի՝ ա) հանգստի էներգիան, բ) լրիվ էներգիան, գ) կինետիկ էներգիան:

ԳԼՈՒԽ IV ԼՈՒՅՍԻ ԶԿԱՆՏԱՅԻՆ ՇԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՆԵՐ

118. Որքա՞ն է 0,663 մկմ ալիքի երկարությամբ ֆոտոնի էներգիան:
119. Որքա՞ն է 0,3 մկմ ալիքի երկարությամբ ֆոտոնի իմպուլսը:
120. Ֆոտոնի էներգիան $5 \cdot 10^{-19}$ Ջ է: Որքա՞ն է նրա իմպուլսը:
121. Քանի՞ ֆոտոն է արձակում 1 վ-ում 100 Վտ հզորությամբ լամպը, եթե նրա ճառագայթած մեներանգ լույսի ալիքի երկարությունը $6 \cdot 10^{-7}$ մ է, և լույսի տեսքով ճառագայթվում է լամպի հզորության 3,3%-ը:
122. Որքա՞ն է ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն արագությունը, եթե կասեցնող լարումը 2 Վ է:
123. Որոշեք այն ֆոտոնի հաճախությունը, որը $3,2 \cdot 10^{-19}$ Ջ էլքի աշխատանք ունեցող մետաղից պոկում է $3,4 \cdot 10^{-19}$ Ջ առավելագույն կինետիկ էներգիայով էլեկտրոն:
124. Որքա՞ն է ֆոտոէֆեկտի կարմիր սահմանը (ν_{min}), եթե մետաղի էլքի աշխատանքը $3,3 \cdot 10^{-19}$ Ջ է:
125. Որքա՞ն է ֆոտոէֆեկտի կարմիր սահմանը (λ_{max}) լիթիումի համար, եթե վերջինիս էլքի աշխատանքը 2,38 էՎ է:
126. Մետաղից, որի էլքի աշխատանքը $3,2 \cdot 10^{-19}$ Ջ է, ֆոտոնը պոկում է $3,8 \cdot 10^{-19}$ Ջ առավելագույն կինետիկ էներգիայով էլեկտրոն: Որքա՞ն է ֆոտոնի էներգիան:
127. Մետաղը լուսավորում են 550 նմ ալիքի երկարությամբ մեներանգ լույսով: Որքա՞ն է ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիան և արագությունը, եթե մետաղի էլքի աշխատանքը 1,2 էՎ է:
128. Ցեզիումի կատոդը լուսավորում են 600 նմ ալիքի երկարությամբ մեներանգ լույսով: Որքա՞ն է այդ դեպքում կասեցնող լարման արժեքը, եթե ցեզիումի էլքի աշխատանքը 1,8 էՎ է:
129. Մետաղե թիթեղի վրա ընկնում է $3 \cdot 10^{-7}$ մ ալիքի երկարությամբ ճառագայթում: Էլեկտրոնների հոսքը թիթեղից լրիվ արգելակվում է, երբ կասեցնող լարումը հավասարվում է 1 Վ-ի: Որքա՞ն է մետաղի էլքի աշխատանքը:
130. $2 \cdot 10^{-7}$ մ ալիքի երկարությամբ մեներանգ ճառագայթման հզորությունը 0,18 Վտ է: Ենթադրելով, որ յուրաքանչյուր տասներորդ ֆոտոնը մետաղի մակերևույթից պոկում է մեկ էլեկտրոն, որոշեք հագեցման հոսանքի ուժը:
131. Կառույցե ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն կինետիկ էներգիայի՝ ընկնող լույսի հաճախությունից կախումն արտահայտող գրաֆիկը:
132. Որքա՞ն է ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն արագությունը մետաղը $7 \cdot 10^{14}$ Հց հաճախությամբ լույսով ճառագայթելիս: Մետաղի էլքի աշխատանքը $3,8 \cdot 10^{-19}$ Ջ է:

- 133.** Տվյալ մետաղի մակերևույթը հերթով $\lambda_1 = 0,35$ մկմ և $\lambda_2 = 0,54$ մկմ ալիքի երկարությամբ լույսով լուսավորելիս պարզվեց, որ ֆոտոէլեկտրոնների առավելագույն արագություններն իրարից տարբերվում են 2 անգամ: Որքա՞ն է այդ մետաղի ելքի աշխատանքը:
- 134.** $\nu_1 = 1,5 \cdot 10^{15}$ Հց հաճախությամբ ճառագայթման ազդեցությամբ մետաղից պոկված ֆոտոէլեկտրոնները լրիվ արգելակվում են $U_1 = 5$ Վ լարման դեպքում, իսկ $\nu_2 = 3,5 \cdot 10^{15}$ Հց հաճախությամբ ճառագայթման ազդեցությամբ՝ $U_2 = 13$ Վ լարման դեպքում: Այս տվյալներով որոշե՛ք Պլանկի հաստատումը:
- 135.** Որքա՞ն է ցինկի համար ֆոտոէֆեկտի կարմիր սահմանը, եթե 262 նմ ալիքի երկարությամբ ճառագայթմամբ նրանից պոկված ֆոտոէլեկտրոններն արգելակող լարումը 1,5 Վ է:
- 136.** Մետաղը 450 նմ ալիքի երկարությամբ լույսով լուսավորելիս ֆոտոնի էներգիայի 2/5-ը ծախսվում է ֆոտոէլեկտրոնին կինետիկ էներգիա հաղորդելու համար: Որքա՞ն է այդ մետաղի համար ֆոտոէֆեկտի կարմիր սահմանը:
- 137.** 20 սմ² մակերեսով մակերևույթի վրա 1 վայրկյանում մակերևույթին ուղղահայաց ընկնում է 10^{20} ֆոտոն: Լույսի ալիքի երկարությունը 480 նմ է: Որքա՞ն է լույսի ճնշումն այդ մակերևույթին, եթե բոլոր ֆոտոնները կլանվում են:
- 138.** Լույսի ճնշումը հայելային մակերևույթին 1 մՊա է: Որոշե՛ք 1 վայրկյանում 1 մ² մակերեսով մակերևույթին ուղղահայաց ընկնող ֆոտոնների թիվը, եթե լույսի ալիքի երկարությունը 0,6 մկմ է:
- 139.** Որոշե՛ք աստղի ջերմաստիճանը, եթե նրա ճառագայթման ուժգնության առավելագույն արժեքը դիտվում է $\lambda_{max} = 300$ նմ ալիքի երկարության դեպքում:
- 140.** Հալման վառարանի ջերմաստիճանն աճեց 600°C-ից մինչև 1200°C: Քանի՞ անգամ մեծացավ նրա ճառագայթման ուժգնությունը:
- 141.** Էլեկտրական լամպի շիկայման թելիկի ջերմաստիճանը 1727°C է: Ալիքի ի՞նչ երկարության դեպքում է նրա ճառագայթման ուժգնությունն ընդունում իր առավելագույն արժեքը:

ԳԼՈՒԽ V ԱՏՈՄԻ ՖԻԶԻԿԱ

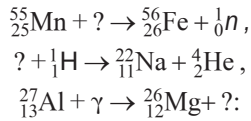
- 142.** Որոշե՛ք էլեկտրոնի արագությունը և արագացումը ջրածնի ատոմի առաջին ստացիոնար ուղեծրով շարժվելիս: Ուղեծրի շառավիղը 0,05 նմ է:
- 143.** Երբ ջրածնի ատոմում էլեկտրոնը 3-րդ ստացիոնար ուղեծրից անցնում է 2-րդ ուղեծիր, արձակվում է $3 \cdot 10^{-19}$ Ջ էներգիայով ֆոտոն: Որոշե՛ք այդ անցմանը համապատասխանող ճառագայթման ալիքի երկարությունը:
- 144.** Ատոմը 5-րդ էներգիական մակարդակից 3-րդն անցնելիս արձակվում է 300 նմ, իսկ 3-րդից 1-ին «իջնելիս»՝ 100 նմ ալիքի երկարությամբ էլեկտրամագնիսական ալիք: Ի՞նչ երկարությամբ էլեկտրամագնիսական ալիք կարձակվի, երբ ատոմը 5-րդ մակարդակից «իջնի» 1-ին:
- 145.** Սնդիկի գոլորշու ատոմներն էլեկտրոններով ռմբակոծելիս սնդիկի ատոմի էներգիան մեծանում է 4,9 էՎ-ով: Հիմնական վիճակ անցնելիս ի՞նչ երկարությամբ էլեկտրամագնիսական ալիք են արձակում սնդիկի ատոմները:
- 146.** Ապացույցե՛ք, որ ջրածնի ատոմի էլեկտրոնի՝ $(n+1)$ -րդ ստացիոնար ուղեծրից n -րդն անցնելիս արձակված ֆոտոնի $\nu_{n,n+1}$ հաճախությունը, երբ n -ն անվերջ մեծ է, ձգտում է n -րդ ուղեծրով շարժվելիս էլեկտրոնի ν_n պտտման հաճախությանը:

- 147.** Որքա՞ն է էլեկտրական դաշտի լարվածությունը ջրածնի ատոմի առաջին և չորրորդ ստացիոնար ուղեծրերում:
- 148.** Ի՞նչ նվազագույն էներգիայով ֆոտոն է արձակում ջրածնի ատոմը, երբ ազատ էլեկտրոնն «ընկնում» է երկրորդ ստացիոնար ուղեծիր:
- 149.** Քանի՞ անգամ կմեծանա ջրածնի ատոմի էլեկտրոնի ստացիոնար ուղեծրի շառավիղը, եթե ատոմը հիմնական մակարդակից «բարձրանա» $-1,51$ էՎ էներգիայով գրգռված մակարդակ:
- 150.** Որքա՞ն է այն նվազագույն էներգիայով ֆոտոնի ալիքի երկարությունը, որն արձակում է ջրածնի ատոմը երկրորդ էներգիական մակարդակ անցնելիս:
- 151.** Ջրածնի ատոմի՝ երկրորդ ստացիոնար ուղեծրով շարժվող էլեկտրոնը, կլանելով ֆոտոն, ատոմից հեռանում է $6 \cdot 10^5$ մ/վ արագությամբ: Որքա՞ն էր ֆոտոնի հաճախությունը:
- 152.** m զանգվածով ազատ մասնիկի E էներգիան արտահայտեք այդ մասնիկի Γ -ը Բրոյլի λ ալիքի երկարությամբ:
- 153.** Որոշեք ջրածնի ատոմի երկրորդ ստացիոնար ուղեծրով շարժվող էլեկտրոնի Γ -ը Բրոյլի ալիքի երկարությունը:
- 154.** Որքա՞ն է α -մասնիկի Γ -ը Բրոյլի ալիքի երկարությունը, եթե այն շարժվում է 27°C ջերմաստիճանին համապատասխանող միջին քառակուսային արագությամբ:
- 155.** Էլեկտրոնն անցավ 510 կՎ լարմամբ արագացնող էլեկտրական դաշտով: Որոշեք էլեկտրոնի Γ -ը Բրոյլի ալիքի երկարությունը:
- 156.** Օգտվելով Բորի մոդելից՝ հաշվեք, թե ի՞նչ շառավիղ կունենար այն ստացիոնար ուղեծիրը, որով էլեկտրոնը կշարժվեր մեյտրոնի շուրջը:

ԳԼՈՒԽ VI ԱՏՈՄԻ ՄԻՋՈՒԿԻ ՖԻԶԻԿԱ

- 157.** Որոշեք 1 էՎ կինետիկ էներգիայով α -մասնիկի արագությունը:
- 158.** Ըստ բաղադրության՝ ինչո՞վ են տարբերվում $^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$, $^{35}_{17}\text{Cl}$, $^{37}_{17}\text{Cl}$ իզոտոպները:
- 159.** Քլորի ատոմային զանգվածը $35,5$ է: Քլորն ունի երկու իզոտոպ՝ $^{37}_{17}\text{Cl}$ և $^{35}_{17}\text{Cl}$: Գտեք դրանց տոկոսային հարաբերությունը:
- 160.** Ելնելով այն բանից, որ միջուկի շառավիղը բավականաչափ ճշգրիտ նկարագրվում է $R = 1,5 \cdot 10^{-15} A^{1/3}$ մ առնչությամբ, որտեղ A -ն միջուկի զանգվածային թիվն է, գնահատեք միջուկային ճյուղի խտությունը և միջուկում նուկլոնների կոնցենտրացիան:
- 161.** Հաշվեք ^7_3Li իզոտոպի զանգվածի պակասորդը և կապի էներգիան:
- 162.** Տրիտիումի կապի էներգիան $8,49$ ՄէՎ է, իսկ հելիումի ^3_2He իզոտոպինը՝ $7,72$ ՄէՎ: Համարելով, որ կապի էներգիաների տարբերությունը հետևանք է հելիումի իզոտոպում պրոտոնների վանողության, գնահատեք դրանց միջև հեռավորությունը:
- 163.** Հաշվեք դեյտերիումի ատոմի միջուկի կապի էներգիան:
- 164.** Հաշվեք հելիումի ատոմի (^4_2He) միջուկում նուկլոնների կապի տեսակարար էներգիան:

- 165.** Հաշվեք ուրանի $^{238}_{92}\text{U}$ իզոտոպի ատոմի միջուկի կապի տեսակարար էներգիան:
- 166.** Գտեք ^4_2Be միջուկի զանգվածի պակասորդը, եթե դրա բոլոր նեյտրոններին բաժին ընկնող կապի էներգիան $4 \cdot 10^{-12}$ Ջ է:
- 167.** Պոլոնիումի մնուլը յուրաքանչյուր 1 վայրկյանում ճառագայթում է $5 \cdot 10^9$ α -մասնիկ, որոնցից յուրաքանչյուրն օժտված է $8 \cdot 10^{-13}$ Ջ էներգիայով: Նմուշը դնում են 4 Ձ/Կ ջերմունակությամբ կալորաչափի մեջ: Որքանով կբարձրանա կալորաչափի ջերմաստիճանը 1 ժամում: Այդ ընթացքում ջերմային կորուստներն անտեսեք:
- 168.** Ջրածնի ^3_1H ճառագայթաակտիվ իզոտոպի տրոհման կիսապարբերությունը 12,3 տարի է: Իզոտոպի մեկ միլիոն միջուկներից քանի՞սը կտրոհվի 24,6 տարում:
- 169.** Կալիումի $^{40}_{19}\text{K}$ ճառագայթաակտիվ իզոտոպը β -տրոհման հետևանքով փոխակերպվում է $^{40}_{20}\text{Ca}$ իզոտոպի: $^{40}_{19}\text{K}$ իզոտոպի կիսատրոհման պարբերությունը $1,24 \cdot 10^9$ տարի է: $5 \cdot 10^9$ տարում կալիումի միջուկների ո՞ր մասը կփոխակերպվի կալիումի միջուկների:
- 170.** Յոդի $^{131}_{53}\text{I}$ իզոտոպի միջուկների տրոհման կիսապարբերությունը 8 օր է: Այդ միջուկներից քանի՞սը կմնա մնուշում 80 օր անց, եթե մնուշի սկզբնական զանգվածը 40 գ է:
- 171.** Մարդու օրգանիզմի բաղադրության 0,19%-ը, ըստ զանգվածի, կալիում է: Իզոտոպների բնական խառնուրդում $^{40}_{19}\text{K}$ ճառագայթաակտիվ իզոտոպը, որի կիսատրոհման պարբերությունը $1,24 \cdot 10^9$ տարի է, 0,012% է: $^{40}_{19}\text{K}$ իզոտոպի քանի՞ միջուկ է տրոհվում 50 կգ զանգվածով մարդու օրգանիզմի հյուսվածքներում 1 վայրկյանում:
- 172.** Ճառագայթաակտիվ $^{14}_6\text{C}$ իզոտոպի միջուկների տրոհման հետևանքով բուսական կամ կենդանական ծագումով 1 գ ածխածինը 1 րոպեում արձակում է միջին հաշվով 15,3 β -մասնիկ: Ենթադրելով, որ $^{14}_6\text{C}$ իզոտոպի քանակը կազմում է ածխածնի բոլոր իզոտոպների քանակի $1,5 \cdot 10^{-12}$ մասը, որոշեք $^{14}_6\text{C}$ իզոտոպի կիսատրոհման պարբերությունը:
- 173.** Ժամանակի որոշակի պահին $^{18}_9\text{F}$ փորձանմուշի մոտ տեղադրված հաշվիչը գրանցեց 100 տրոհում 1 վայրկյանում: 22 րոպե անց հաշվիչը գրանցեց արդեն 87 տրոհում 1 վայրկյանում: Որոշեք $^{18}_9\text{F}$ -ի տրոհման կիսապարբերությունը:
- 174.** Հնագույն փայտե իրերում ածխածնի $^{14}_6\text{C}$ իզոտոպի ակտիվությունը նոր կտրված ծառերում այդ իզոտոպի ակտիվության $4/5$ -ն է: $^{14}_6\text{C}$ -ի կիսատրոհման պարբերությունը 5730 տարի է: Որոշեք հնագույն իրերի տարիքը:
- 175.** Ճառագայթաակտիվ տարրի ակտիվությունը 8 օրվա ընթացքում նվազեց 4 անգամ: Որոշեք կիսատրոհման պարբերությունը:
- 176.** Ի՞նչ ճառագայթաակտիվ տրոհման հետևանքով է $^{239}_{94}\text{Pu}$ -ը փոխակերպվում $^{235}_{92}\text{U}$ -ի:
- 177.** Բորի $^{10}_5\text{B}$ իզոտոպը նեյտրոններով ռմբակոծելիս առաջացած միջուկից դուրս են թռչում α -մասնիկներ: Գրեք ռեակցիան:
- 178.** Հեռակալ միջուկային ռեակցիաներում գրեք բաց թողնված տարրերը.
- $$^{27}_{13}\text{Al} + ^1_0n \rightarrow ? + ^4_2\text{He},$$



179. Ի՞նչ միջուկ է առաջանում ուրանի ${}^{234}_{92}\text{U}$ իզոտոպի միջուկի α -տրոհման հետևանքով:
180. Ի՞նչ միջուկ է առաջանում ջրածնի ${}^3_1\text{H}$ իզոտոպի β -տրոհման հետևանքով: Գրեք տրոհման ռեակցիան:
181. Հաշվեք ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^1_1\text{H}$ ռեակցիայի էլքը:
182. Հաշվարկեք ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0n$ ռեակցիայի էլքը: Տրիտիումի ատոմի զանգվածը 3,01605 գ.ա.մ., մեյտրոնինը՝ 1,008665 գ.ա.մ., դեյտերիումինը՝ 2,014102 գ.ա.մ., հելիումինը՝ 4,002604 գ.ա.մ.:
183. Պրոտոնի հետ բախվելիս E_0 կինետիկ էներգիայով մեյտրոնը, կախված բախման բնույթից (ճակատային, ոչ ճակատային), միջին հաշվով կորցնում է իր էներգիայի կեսը: Գտեք մեյտրոնի միջին էներգիան պրոտոնների հետ n բախումից հետո:
184. Ի՞նչ նվազագույն էներգիա պետք է ունենա α -մասնիկը ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$ ռեակցիան իրականացնելու համար:
185. Որոշեք γ -քվանտի նվազագույն էներգիան, որն անհրաժեշտ է ${}^2_1\text{H} + \gamma \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_0n$ ռեակցիան իրականացնելու համար:
186. Ուրանի ${}^{235}_{92}\text{U}$ իզոտոպի տրոհման հետևանքով անջատվում է 200 ՄէՎ էներգիա, որի 84%-ը բաժին է ընկնում բեկոր-միջուկներին: Ենթադրելով, որ այդ բեկորները ${}^{137}_{56}\text{Ba}$ -ի և ${}^{84}_{36}\text{Kr}$ -ի միջուկներն են, և որ դրանց իմպուլսները մոդուլով հավասար են, որոշեք բեկորների կինետիկ էներգիաները:
187. ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ միջուկը դադարի վիճակում տրոհվում է ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ չզրգոված միջուկի և մի մասնիկի: Գրեք տրոհման ռեակցիան: Որոշեք ռեակցիայի արգասիքների կինետիկ էներգիաները և իմպուլսները, եթե տրոհման ժամանակ անջատվում է 4,88 ՄէՎ էներգիա:
188. Ուրանի ${}^{235}_{92}\text{U}$ իզոտոպի միջուկը տրոհվելիս առաջանում են 96 և 138 զանգվածային թվերով բեկորներ: Քանի՞ մեյտրոն է առաջանում այդ ռեակցիայում: Ենթադրելով, որ բեկորների ընդհանուր կինետիկ էներգիան 158 ՄէՎ է, որոշեք նրանցից յուրաքանչյուրի կինետիկ էներգիան: Նեյտրոնների կինետիկ էներգիան անտեսեք:
189. Պրոտոններով ռմբակոծելիս ${}^7_3\text{Li}$ միջուկը փոխակերպվում է ${}^4_2\text{He}$ միջուկի: Որոշեք 1 գ լիթիումի ռմբակոծումից առաջացած հելիումի ծավալը, եթե փորձի վերջում ջերմաստիճանը 30°C է, իսկ ճնշումը՝ $9,3 \cdot 10^4$ Պ:
190. Ուրանի մեկ միջուկը տրոհվելիս արձակում է միջին հաշվով 2,5 երկրորդային մեյտրոն: Ատոմակայանի ռեակտորում այդ մեյտրոնների 50%-ի կլանումը չի ուղեկցվում տրոհմամբ: Երկրորդային մեյտրոնների քանի՞ տոկոսն է դուրս թռչում ռեակտորից, եթե ռեակտորի հզորությունը հաստատուն է:
191. Գտեք ռեակտորի հզորությունը, որտեղ 1 գ ${}^{235}_{92}\text{U}$ -ը տրոհվում է 1 օրում: Ընդունեք, որ մեկ միջուկի տրոհման լրիվ էներգիան 185 ՄէՎ է:
192. Մեկ սերնդի մեյտրոնների կյանքի միջին տևողությունը ռեակտորում 0,1 վայրկյան է, իսկ բազմապատկման գործակիցը՝ $k = 1,005$: Որոշեք այն ժամանակը, որի ընթացքում ռեակտորի հզորությունը 10^{-6} Վտ-ից կհասնի 10^6 Վտ-ի:

- 193.** Ատոմային ռեակտորի հզորությունը 90 ՄՎտ է: Որքա՞ն ուրան է ռեակտորն «այրում» 1 տարի անընդհատ աշխատելիս: Որքա՞ն քարածուխ կպահանջվեր նույն էներգիան ստանալու համար: Մեկ միջուկի տրոհման հետևանքով առաջանում է 200 ՄեՎ էներգիա: Քարածխի այրման տեսակարար ջերմությունը $2,7 \cdot 10^7$ Ջ/կգ է:
- 194.** Իր էներգիայի քանի՞ տոկոսն է կորցնում մեյարոնը անշարժ պրոտոնի, դեյտրոնի, ածխածնի միջուկի և կապարի միջուկի հետ ճակատային հարվածի դեպքում: Հարվածը համարեք բացարձակ առաձգական:
- 195.** Որոշեք ${}^1_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \gamma$ ջերմամիջուկային ռեակցիայում ծնված γ -քվանտի հաճախությունը, եթե α -մասնիկի էներգիան 19,7 ՄեՎ է:
- 196.** Քանի՞ կիլոգրամ հելիում է առաջացել ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ ջերմամիջուկային ռեակցիայում, եթե դրա ընթացքում անջատվել է $5,4 \cdot 10^{11}$ Ջ էներգիա:
- 197.** Մարդու ճառագայթահարման թույլատրելի բաժնաչափը γ -ճառագայթմամբ կամ β -մասնիկներով մեկ տարում 0,05 Գ-ր է: Որքա՞ն է ընդհանուր ճառագայթահարման թույլատրելի բաժնաչափի հզորությունը 1 տարվա ընթացքում մարդու վրա ճառագայթահարման անընդհատ ազդեցության դեպքում:

ԳԼՈՒԽ VII ՏԱՐՐԱԿԱՆ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐ

- 198.** Մյուտոն տարրական մասնիկի կյանքի տևողությունը $2,2 \cdot 10^{-6}$ վ է: Որքա՞ն ժամանակից հետո կտրոհվի մյուտոնների 75%-ը:
- 199.** Ի՞նչ չափեր պետք է ունենա պղպջակային խցիկը, որպեսզի խցիկի կենտրոնում ծնված լիցքավորված պի-մեզոնների 3/4-ը տրոհվի խցիկի ներսում: Ընդունեք, որ պի-մեզոնների արագությունը 0,1c է, ուստի դրանք ոչ ռելատիվիստական մասնիկներ են:
- 200.** Էլեկտրոնի և պոզիտրոնի անհիլացումից ծնվում է երկու γ -քվանտ: Ենթադրելով, որ էլեկտրոնի և պոզիտրոնի կինետիկ էներգիաները մինչև անհիլացումը կարելի է անտեսել, որոշեք γ -քվանտի ալիքի երկարությունը:
- 201.** Պի-զրո-մեզոն (π^0) տարրական մասնիկը տրոհվում է երկու γ -քվանտի: Մասնիկի զանգվածը $264,3 m_e$ է (m_e -ն էլեկտրոնի զանգվածն է): Որոշեք γ -քվանտի հաճախությունը:
- 202.** Պի-զրո-մեզոնը տրոհվում է երկու միատեսակ ֆոտոնների, որոնք թռչում են իրար նկատմամբ 60° անկյան տակ: Որոշեք յուրաքանչյուր ֆոտոնի էներգիան և պի-մեզոնի էներգիան մինչև տրոհումը:
- 203.** Դադարի վիճակում լիցքավորված պիոնը տրոհվում է մյուոնի և մեյտրիոնի: Որոշեք ծնված մասնիկների իմպուլսները և էներգիաները:
- 204.** Պոզիտրոնը կանգ է առնում մյուրում և անհիլացվում էլեկտրոնի հետ: Ենթադրելով, որ այդ պրոցեսում ծնվում է 3 ֆոտոն, որոշեք յուրաքանչյուր ֆոտոնի էներգիան և ծնման կետից իրար նկատմամբ շարժման ուղղությունները:
- 205.** Դադարի վիճակում ρ - $\bar{\rho}$ անհիլացման ռեակցիայում ծնվում է չորս պի-զրո-մեզոն՝ նույն էներգիայով: Որքա՞ն է յուրաքանչյուր պի-զրո-մեզոնի կինետիկ էներգիան:
- 206.** Հաշվեք $\rho + \gamma \rightarrow n + \pi^+$ ռեակցիայում պի-մեզոն ծնելու համար ֆոտոնի նվազագույն էներգիան: Օգտվեք միայն էներգիայի պահպանման օրենքից՝

անտեսելով այն հանգամանքը, որ իմպուլսի պահպանման համար իրականում պահանջվում է ավելի մեծ էներգիա:

207. Որքա՞ն է դադարի վիճակում սիզմա-գրո-հիպերոնի $\Sigma^0 \rightarrow p + \pi^-$ տրոհման ռեակցիայի արգասիք-մասնիկների կինետիկ էներգիան:

208. Որոշե՞ք դադարի վիճակում մեյտրոնի β -տրոհման պրոցեսում էլեկտրոնի առավելագույն էներգիան:

209. Լիցքավորված պիոնի կյանքի տևողությունը $2,6 \cdot 10^{-8}$ վ է, չեզոք պիոնինը՝ $1,8 \cdot 10^{-16}$ վ: Լիցքավորված պիոնը տրոհվում է թույլ փոխազդեցության շնորհիվ, չեզոք պիոնը՝ էլեկտրամագնիսական փոխազդեցության: Գնահատե՞ք՝ ո՞ր փոխազդեցությունն է ուժեղ և քանի՞ անգամ:

210. Որոշակի վիճակում $^{10}_5\text{B}$ միջուկը տրոհվում է՝ արձակելով γ -քվանտներ: Տրոհման կիսապարբերությունը $6,7 \cdot 10^{-10}$ վ է: Գնահատե՞ք արձակված γ -քվանտի էներգիայի ամորոշությունը:

Որոշ տարրերի ատոմային զանգվածները (զ.ա.մ.), կայուն իզոտոպների տարածվածությունը և որոշ ճառագայթաակտիվ իզոտոպների տրոհման կիսապարբերությունները

Իզոտոպ	Ատոմային զանգված (M)	Պարունակությունը բնական խառնուրդում (%)	Տրոհման կիսապարբերությունը ($T_{1/2}$)	Իզոտոպ	Ատոմային զանգված (M)	Պարունակությունը բնական խառնուրդում (%)	Տրոհման կիսապարբերությունը ($T_{1/2}$)
^1_1H	1,007825	99,985	∞ (կայուն է)	$^{23}_{11}\text{Na}$	22,989771	100	∞
^2_1H	2,014102	0,015	∞	$^{27}_{13}\text{Al}$	26,981539	100	∞
^3_1H	3,016050	—	12,26 տարի	$^{30}_{14}\text{Si}$	29,973763	3,1	∞
^3_2He	3,016030	$1,3 \cdot 10^{-4}$	∞	$^{40}_{19}\text{K}$	39,964000	0,0118	$1,27 \cdot 10^9$ տարի
^4_2He	4,002604	~ 100	∞	$^{40}_{20}\text{K}$	39,962592	96,97	∞
^6_3Li	6,015143	7,42	∞	$^{59}_{27}\text{Co}$	58,933188	100	∞
^7_3Li	7,016005	92,58	∞	$^{60}_{27}\text{Co}$	59,933811	—	5,26 տարի
^7_4Be	7,016929	—	53,3 օր	$^{222}_{86}\text{Rn}$	222,017605	—	3,82 օր
^9_4Be	9,012186	100	∞	$^{226}_{88}\text{Ra}$	226,025433	—	1620 տարի
$^{12}_6\text{C}$	12,000000	98,892	∞	$^{234}_{92}\text{U}$	234,040971	0,0055	$2,48 \cdot 10^5$ տարի
$^{13}_6\text{C}$	13,003355	1,108	∞	$^{235}_{92}\text{U}$	235,043941	0,7205	$7,13 \cdot 10^8$ տարի
$^{14}_6\text{C}$	14,003242	—	5730 տարի	$^{238}_{92}\text{U}$	238,050812	99,274	$4,51 \cdot 10^9$ տարի
$^{14}_7\text{N}$	14,003074	99,635	∞	$^{239}_{94}\text{Pu}$	239,051223	—	10^{16} տարի
$^{15}_7\text{N}$	15,000109	0,365	∞				
$^{16}_8\text{O}$	15,994915	99,7590	∞	p	1,007276	1 զ.ա.մ. = 931,5 ՄէՎ	
$^{17}_8\text{O}$	16,999133	0,0373	∞	n	1,008665		
$^{18}_8\text{O}$	17,999160	0,2037	∞	e	0,000550		

ԳԼՈՒԽ I

1. 2 մ:
2. 20° -ով:
3. Սեղանի հարթության նկատմամբ 26° և 64° անկյան տակ:
4. 30° :
5. 45° :
6. $2H$:
7. 6,71 մ/վ:
8. 94° :
9. 0,06 մ:
10. $H(\operatorname{tg}\beta + \operatorname{tg}\alpha)/(\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\alpha)$:
11. 2 մ:
12. 0,025 մ:
15. 1,4:
16. 30° :
17. 15° :
18. 25° :
19. 1,15:
20. $\operatorname{arctg} n$:
21. 60° :
22. 2,0 մ:
23. 1,5 մ:
24. 12 սմ:
25. 0,75 մ, 2 մ:
26. $\beta = \alpha$:
27. 1,59:
28. $21,7^\circ$:
29. 60° :
30. $27,7^\circ$, $23,7^\circ$:
31. 0,006 մ:
32. 4,5 սմ:
33. 30° :
34. $2,12 \cdot 10^8$ մ/վ:
35. 30° :
36. 2 մ:
37. 45° :
38. $62,4^\circ$:
39. 50° ; 58° :
40. 10 դպար:
41. 0,36 մ:
42. 4,5 մ; 1,5 մ:
43. 6 մ:
44. 0,2 մ:
45. 0,9 մ:

46. 0,5 մ:
47. 0,15 մ:
48. 6 մ:
49. 1,5 մ:
50. 2,4:
51. 6:
52. 0,825 մ:
53. 1,8 մ:
54. 0,7 մ:
55. 2:
56. 0,1 մ:
57. 0,6 մ:
58. 0,12 մ:
59. 256 սմ^2 ; 1,8 դպար:
60. $h = \sqrt{H_1 H_2}$:
61. $\Gamma = \frac{4F^2}{4(I - F)^2 - I^2}$:
62. 3 սմ:
63. -5 դպար:
64. 0,1 մ:
65. 0,5 մ:
66. 0,06 մ:
67. $(h_1 - h_2)/(d_1 h_1 - d_2 h_2)$:
68. 2:
69. Կեղծ, ութապատիկ խոշորացված, շրջված:
70. Երկրորդից 44,4 սմ հեռավորությամբ:
71. 25 սմ:
72. 4,5 սմ-ով հեռացնել երկրորդ ոսպնյակից:

ԳԼՈՒԽ II

73. 3:
74. $4 \cdot 10^{14}$ Հց, $7,5 \cdot 10^{14}$ Հց:
75. 0,532 մ:
76. Ալիքի երկարությունը փոքրանում է, հաճախությունը չի փոխվում:
77. Դեղին:
78. Ոչ:
79. $9,23^\circ$:
80. $7,6 \cdot 10^{-7}$ մ:
81. $2,2 \cdot 10^{-6}$ մ:

82. $6 \cdot 10^{-7}$ մ:
83. ա) մաքսիմում, բ) մի-նիմում, գ) մաքսիմում:
84. $4,7 \cdot 10^{-7}$ մ:
85. 6:
86. Որն ունի 100 նրբագիծ:
87. $2 \cdot 10^{-6}$ մ:
88. $5,8 \cdot 10^{-7}$ մ:
89. Շերտերի լայնությունները կփոքրանան 1,33 անգամ:
90. 10^{-4} մ:
91. $6 \cdot 10^{-7}$ մ:
92. $5 \cdot 10^{-6}$ մ:
93. $2,8 \cdot 10^{-6}$ մ; 3571 սմ $^{-1}$:
94. 10300:
95. 9:
96. $6 \cdot 10^{-7}$ մ:
97. Բևեռիչի միջով նայելով:
99. Կանցնի:

ԳԼՈՒԽ III

100. $C_1 = C_2 = C$:
101. $\sqrt{3} c/2$:
102. B կետում
103. 10^{-6} վ:
104. 0,54 մ
105. 0,14c
106. 0,96C
107. $C/5$:
108. $2C/3$:
109. $1,1 \cdot 10^{-17}$ կգ:
110. $2,52 \cdot 10^{11}$ կգ:
111. $4,1 \cdot 10^9$ Վտ
112. Մարմնի վրա կատարված որոշակի աշխատանքի դեպքում նրա արագությունը կարող է գերազանցել լույսի տարածման արագությունը:
113. $\sqrt{5} c/3$
114. $\sqrt{3} c/2$
115. $3,4 \cdot 10^5$ Վ

- 116.** $2 \cdot 10^{-22}$ կգմ/վ
117. $8,2 \cdot 10^{-14}$ Ջ,
 $1,4 \cdot 10^{-13}$ Ջ,
 $5,5 \cdot 10^{-14}$ Ջ:

ՉԼՈՒԽ IV

- 118.** $3 \cdot 10^{-19}$ Ջ:
119. $2,21 \cdot 10^{-27}$ կգմ/վ:
120. $1,67 \cdot 10^{-27}$ կգմ/վ:
121. 10^{19} :
122. $8,4 \cdot 10^5$ մ/վ:
123. 10^{15} Հյ:
124. $5 \cdot 10^{14}$ Հյ:
125. 522 նմ:
126. $7 \cdot 10^{-19}$ Ջ:
127. $1,7 \cdot 10^{-19}$ Ջ, $6,1 \cdot 10^5$ մ/վ
128. 0,27 Վ:
129. $5 \cdot 10^{-19}$ Ջ:
130. $2,9 \cdot 10^{-3}$ Ա:
132. 430 կմ/վ:
133. $3 \cdot 10^{-19}$ Ջ:
134. $6,4 \cdot 10^{-34}$ Ջվ:
135. 383 նմ:
136. 750 նմ
137. 0,07 մՊա
138. $4,5 \cdot 10^{23}$
139. 9666 Կ:
140. 8,1:
141. 1,45 մկմ:

ՉԼՈՒԽ V

- 142.** $2,2 \cdot 10^6$ մ/վ, 10^{23} մ/վ²:
143. 660 նմ:
144. 75 նմ:
145. 250 նմ:
146. Ցուցում: (5.22) բա-
նաձևից որոշեք $\nu_{n,n+1}$
հաճախությունը և
դիտարկեք այդ դեպ-
քը, երբ $n \gg 1$: Այնու-
հետև հաշվեք էլեկտ-
րոնի՝ n -րդ ուղեծրով
պտտման հաճախու-

թյունը՝
 $\nu_n = v/(2\pi r_n)$, և (5.10)
և (5.11) բանաձևերից
տեղադրեք v -ի և r_n -ի
արտահայտություն-
ները:

- 147.** 500 ԳՎ/մ, 2 ԳՎ/մ:
148. 3,4 էՎ:
149. 9 անգամ:
150. 656,6 նմ:
151. $1,1 \cdot 10^9$ ՄՀյ:
152. $E = \hbar^2/(2m\lambda^2)$
153. 0,665 նմ:
154. 0,073 նմ:
155. 0,0014 նմ:
156. $r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{Gm_e^2 m_n} =$
 $= 1,2 \cdot 10^{29} n^2$ (մ):

ՉԼՈՒԽ VI

- 157.** 6940 մ/վ:
159. 25%, 75%:
160. 10^{17} կգ/մ³, 10^{44} մ⁻³:
161. 0,04186 գ.ա.մ, 39
ՄէՎ:
162. $1,9 \cdot 10^{-15}$ մ:
163. 2,22 ՄէՎ:
164. 7,074 ՄէՎ/նուկլոն:
165. 7,57 ՄէՎ/նուկլոն:
166. $8 \cdot 10^{-29}$ կգ:
167. 3,6 Կ:
168. 750000:
169. 0,94:
170. $1,8 \cdot 10^{20}$:
171. $3,1 \cdot 10^3$ տրոհում/վ:
172. 5546 տարի:
173. 110 րոպե:
174. 1845 տարի:
175. 4 օր:
176. ${}^{239}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^{235}_{92}\text{U} + {}^4_2\text{He}$:
177. ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^7_3\text{Li}$:
179. ${}^{230}_{90}\text{Th}$:

- 181.** -2,38 ՄէՎ:
182. 17,6 ՄէՎ:
183. $E_0/2^n$:
184. Ռեակցիան կընթանա,
եթե սկզբնական
համակարգին տրվի
1,193 ՄէՎ էներգիա:
185. 2,23 ՄէՎ:
186. 64 ՄէՎ, 104 ՄէՎ:
187. 0,09 ՄէՎ, 4,79 ՄէՎ,
 $10,1 \cdot 10^{-20}$ կգմ/վ:
188. 1 նեյտրոն, 93,2 ՄէՎ,
64,8 ՄէՎ:
189. $7,7 \cdot 10^{-3}$ մ³:
190. 0,25:
191. 877 կՎա:
192. 554 վ:
193. 35 կգ, 10^5 ա:
194. 100%, 88,9%, 22,6%,
1,9%:
195. $2,75 \cdot 10^{19}$ Հյ:
196. 0,001 կգ:
197. 5,7 մկգ-ր/ժ:

ՉԼՈՒԽ VII

- 198.** $3,1 \cdot 10^{-6}$ վ:
199. 1,2 մ:
200. $2,4 \cdot 10^{-12}$ մ:
201. $1,63 \cdot 10^{22}$ Հյ:
202. 135 ՄէՎ, 270 ՄէՎ:
203. $1,58 \cdot 10^{-20}$ կգմ/վ, 29,7
ՄէՎ, 110 ՄէՎ:
204. 0,34 ՄէՎ, 120°:
205. 335 ՄէՎ:
206. 14,1 ՄէՎ:
207. 114,7 ՄէՎ:
208. 0,74 ՄէՎ:
209. $\sim 10^8$ անգամ:
210. $0,94 \cdot 10^{-6}$ էՎ:

ՕՊՏԻԿԱ

Ներածություն

5

ԳԼՈՒԽ I

ԵՐԿՐԱԶՈՓԱԿԱՆ ՕՊՏԻԿԱ

§ 1. Երկրաչափական օպտիկայի փորձարարական օրենքները: Լույսի ուղղագիծ տարածումը	7
§ 2. Լույսի արագության դրոշումը	9
§ 3. Լույսի անդրադարձումը	12
§ 4. Առարկայի պատկեր: Պատկերի կառույցումը հարթ հայելում	14
§ 5. Գնդաձև հայելի: Պատկերի կառույցումը գնդաձև հայելում: Գնդաձև հայելու բանաձևը Խնդիրների լուծման օրինակներ	16 20
§ 6. Լույսի բեկումը: Բեկման օրենքը: Բեկման ցուցիչ	23
§ 7. Ֆերմայի սկզբունքը	26
§ 8. Ճառագայթների ընթացքը հարթ-գուգահեռ թիթեղում և եռանկյուն պրիզմայում	27
§ 9. Լույսի լրիվ անդրադարձումը: Լրիվ անդրադարձման սահմանային անկյուն	29
§ 10. Ճառագայթների ընթացքն անընդհատ փոխվող բեկման ցուցչով միջավայրում: Օդատեսիլ	31
§ 11. Լաբորատոր աշխատանք 1 Խնդիրների լուծման օրինակներ	34 35
§ 12. Ոսպնյակներ: Ճառագայթների ընթացքը ոսպնյակներում	36
§ 13. Պատկերի կառույցումը ոսպնյակներում: Բարակ ոսպնյակի բանաձևը: Ոսպնյակի խոշորացում	39
§ 14. Պատկերի կառույցումը կենտրոնավորված օպտիկական համակարգերում	44
§ 15. Աչքը որպես օպտիկական համակարգ	48
§ 16. Օպտիկական սարքեր (խոշորացույց, մանրադիտակ, հեռադիտակ, լուսանկարչական ապարատ)	53
§ 17. Լաբորատոր աշխատանք 2 Խնդիրների լուծման օրինակներ	57 57

ԳԼՈՒԽ II

ԱԼԻԶԱՅԻՆ ՕՊՏԻԿԱ

§ 18. Լույսի դիսպերսիան	60
§ 19. Ինտերֆերենցի երևույթը	66
§ 20. Դիֆրակցիայի երևույթը	71
§ 21. Լաբորատոր աշխատանք 3	75
§ 22. Սպեկտրադիտակ: Կլանման և արձակման սպեկտրներ: Սպեկտրային վերլուծություն	77
§ 23. Հյույգենս-Ֆրենելի սկզբունքը	81
§ 24. Լույսի բևեռացումը: Լույսի ալիքների լայնականությունը	85
§ 25. Հոլոգրաֆիայի սկզբունքները	88

§ 26. Էլեկտրամագնիսական ալիքների սանդղակ	91
Խնդիրների լուծման օրինակներ	95

ԳԼՈՒԽ III

ՀԱՐԱԲԵՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՏՈՒԿ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԵՐԸ

§ 27. Հարաբերականության հատուկ տեսության կանխադրույթները	99
§ 28. Մայքելսոն-Մորլիի փորձը	101
§ 29. Ժամանակամիջոցների և հեռավորությունների հարաբերականությունը	103
§ 30. Արագությունների գումարման ռելյատիվիստական օրենքը	106
§ 31. Ռելյատիվիստական դիմամիկա	107
§ 32. Ջանգվածի և էներգիայի կապը	109
§ 33. Նյուտոնյան մեխանիկան որպես ռելյատիվիստական մեխանիկայի սահմանային դեպք	112
Խնդիրների լուծման օրինակներ	113

ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ՖԻԶԻԿԱ

Ներածություն	115
--------------	-----

ԳԼՈՒԽ IV

ԼՈՒՅՍԻ ՔՎԱՆՏԱՅԻՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

§ 34. Քվանտային տեսության ծագումը	117
§ 35. Ֆոտոն: Ֆոտոնի էներգիան և իմպուլսը	120
§ 36. Ֆոտոէֆեկտ: Ֆոտոէֆեկտի օրենքները	122
§ 37. Ֆոտոէֆեկտի տեսությունը: Այնշտայնի բանաձևը ֆոտոէֆեկտի համար	125
§ 38. Ֆոտոէֆեկտի կիրառությունները	128
§ 39. Լաբորատոր աշխատանք 4	130
§ 40. Լույսի ճնշումը	131
§ 41. Լույսի քիմիական ազդեցությունները	133
§ 42. Էլեկտրամագնիսական ալիքների երկակի բնույթը	136
Խնդիրների լուծման օրինակներ	138

ԳԼՈՒԽ V

ԱՏՈՄԻ ՖԻԶԻԿԱ

§ 43. Ատոմի բարդ կառուցվածքը հաստատող փորձեր և երևույթներ	140
§ 44. Ատոմի մոլորակային մոդելը	144
Խնդիրների լուծման օրինակներ	146
§ 45. Բորի քվանտային կանխադրույթները:	147
§ 46. Ջրածնի ատոմի Բորի տեսությունը	150
Խնդիրների լուծման օրինակներ	155
§ 47. Միկրոմասնիկների ալիքային հատկությունները: Դը Բրոյլի վարկածը	156
§ 48. Դը Բրոյլի ալիքներ	158
§ 49. Գաղափար քվանտային մեխանիկայի մասին	163
§ 50. Անոթոշությունների առնչությունները	165
§ 51. Անոթոշությունների առնչությունների կիրառությունները	168

§ 52. Դառագայթման ուժեղացումը միջավայրով անցնելիս: Ինքնակամ և հարկադրական ճառագայթում	171
§ 53. Լազեր	172
§ 54. Լազերների կիրառությունները գիտության մեջ և տեխնիկայում	176
§ 55. Գաղափար ոչ գծային օպտիկայի մասին Խնդիրների լուծման օրինակներ	178 181

ԳԼՈՒԽ VI ԱՏՈՄԻ ՄԻՋՈՒԿԻ ՖԻԶԻԿԱ

§ 56. Միջուկի կառուցվածքը	183
§ 57. Միջուկային ուժեր: Ատոմի միջուկի կապի էներգիան	187
§ 58. Դառագայթաակտիվություն Խնդիրների լուծման օրինակներ	191 198
§ 59. Մասնիկների գրանցման փորձարարական մեթոդները	199
§ 60. Միջուկային ռեակցիաներ	204
§ 61. Շրթայական ռեակցիա: Միջուկային ռեակտոր Խնդիրների լուծման օրինակներ	208 212
§ 62. Ջերմամիջուկային ռեակցիաներ	214
§ 63. Միջուկային ճառագայթումների կենսաբանական ազդեցությունը	217

ԳԼՈՒԽ VII ՏԱՐՐԱԿԱՆ ՄԱՍՆԻԿՆԵՐ

§ 64. Տարրական մասնիկներ	220
§ 65. Պոզիտրոն: Հակամասնիկներ	222
§ 66. Տարրական մասնիկների դասակարգումը	224
§ 67. Հիմնարար փոխազդեցություններ	227
§ 68. Քվարկներ	230
§ 69. Դաշտի միասնական տեսության ստեղծման հեռանկարները Խնդիրների լուծման օրինակներ	234 236
§ 70. Աշխարհի ժամանակակից ֆիզիկական պատկերը ԽՆԴԻՐՆԵՐ	239 243
Որոշ տարրերի ատոմային զանգվածները (գ.ա.մ.), կայուն իզոտոպների տարածվածությունը և որոշ ճառագայթաակտիվ իզոտոպների տրոհման կիսապարբերությունները	258
ԽՆԴԻՐՆԵՐԻ ՊԱՏԱՍԽԱՆՆԵՐ	259

Հաստատված է
ՀՀ կրթության և գիտության նախարարության կողմից

ԷՂՈՒԱՐԴ ՂԱԶԱՐՅԱՆ
ԱԼԲԵՐՏ ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ
ԳԱԳԻԿ ՄԵԼԻՔՅԱՆ
ԱՐՏԱՎԱԶԴ ՄԱՍՅԱՆ
ՍՈՍ ՄԱԽԼՅԱՆ

ՖԻԶԻԿԱ - 12

Հանրակրթական դպրոցի 12-րդ դասարանի դասագիրք
ընդհանուր և բնագիտամաթեմատիկական հոսքերի համար

Ձևավորումը, էջադրումը, նկարները՝
Արթուր Հարությունյանի



ԷՂԻԹ ՊՐԻՆՏ
իրատարակչություն

Թումանյան 12
(37410) 520848
(37410) 560841

Տպագրված է «Էդիթ Պրինտ» ՍՊԸ տպարանում:
Թուղթը՝ օֆսեթ: Չափսը՝ 70x100 1/16:
Տպագրական 16.5 մամուլ:
Տպաքանակը՝ 34336: