

Жарықтың кванттық табиғаты. Фотондар

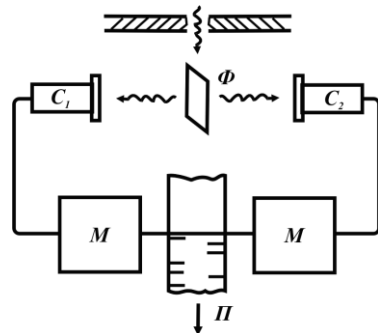
- Фотондар. Боте тәжірибесі
- Фотозффект
- Рентгендік спектрдің қысқа толқындық шекарасы
- Комптон эффекті
- Жарықтың корпускулалық – толқындық дуализмі

1. 1900 жылы М.Планк қара дененің жылулық сәуле спектріндегі энергияның үлестірілуін түсіндіру үшін қара дене электромагниттік сәулені үздіксіз емес, дискретті түрде үлестермен (кванттармен) шығарады, ал сәуле **энергиясы квантының** шамасы:

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$$

деген постулат ұсынды, мұндағы $\omega = 2\pi\nu$ - электромагниттік сәуле жиілігі, $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – Планк тұрақтысы.

Планктың кванттық гипотезасын дамыта келе А.Эйнштейн 1905 жылы **жарық кванты** жайындағы гипотеза ұсынды. Осы гипотезаға сәйкес жарық **кванттар түрінде жұтылады және де кеңістікте кванттар түрінде таралады**. Эйнштейннің гипотезасы кейіннен көптеген тәжірибелерде расталды. Фотондар деп кейіннен аталған жарық кванттарының болатындығы неміс физигі



1-сурет

В.Боте (1891–1957) тәжірибесінде тікелей расталды (1924). Тәжірибе схемасы 1-суретте келтірілген. Φ жұқа метал (Fe немесе Cu) фольга екі газразрядты C_1 және C_2 санауыштар аралығына орналастырылған. Фольга рентген сәулелерінің әлсіз шоғымен жарықтандырылады, мұның әсерінен фольганың өзі сипаттауыш рентген сәулесінің көзіне айналады. Осы құбылыс рентгендік флуоресценция деп аталады. Бастапқы шоқ интенсивтілігі әлсіз болуы себепті, фольга шығаратын квант саны да көп болмайды. Фольгаға рентген сәулелері түскен кезде санауыш бірден ($<0,001$ с)

іске қосылады да, ол өзі M арнаулы тетікті іске қосады; ол қозғалып тұрған таспаға белгі (сызық) соғады. Егерде шығарылатын сәуле энергиясы барлық бағытта бірдей таралатын болса, онда санауыштың екеуі де бір мезгілде іске қосылуы тиіс еді де, таспадағы белгілер біреуі екіншісіне дәл тұспа-тұс келген болар еді. Шындығында, белгілердің тіпті ретсіз, қалай болса солай орналасуы байқалады. Мұны сәуле шығарудың жеке актыларында біресе бір бағытта, біресе басқа бағытта ұшып шығатын жарық бөлшектері пайда болады деп қана түсіндіруге болады.

Сонымен, ерекше жарық бөлшектері–фотондардың бар екендігі тәжірибеде расталды (**фотозэффект, қара дене сәулесі**).

Фотондар. Қарастырылған тәжірибелерде Эйнштейннің жарық кванттары – фотондар жайындағы гипотезасы сенімді расталды.

Эйнштейннің гипотезасы бойынша жиілігі ω жарық – бұл шын мәнінде энергиясы $\varepsilon = \hbar\omega$ фотондар ағыны. Жарық вакуумда c жарық жылдамдығымен таралады. Демек осындай жылдамдықпен фотондар да таралады. Салыстырмалық теориясы бойынша v жылдамдықпен қозғалатын кезкелген бөлшектің толық энергиясы E былай анықталады:

$$E = m \cdot c^2 / \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} . \quad (1)$$

Фотон жағдайында $v=c$, сонда осы өрнектің бөлімі нөлге айналады. Энергиясы шектеулі фотон үшін, бұл $m=0$ болатын жағдайда ғана мүмкін болады.

Сонымен, біз тыныштық массасы нөлге тең бөлшекпен істес боламыз. Қозғалыстағы бөлшектің E энергиясы мен p импульсы арасындағы байланысты:

$$E^2 - p^2 \cdot c^2 = m^2 \cdot c^4 \quad (2)$$

пайдаланып, фотонның ($m=0$) $E = \hbar \cdot \omega$ энергиясы ғана емес,

$$p = \hbar \cdot \omega / c = \hbar \cdot k \quad (3)$$

импульсы да бар деген қорытындыға келеміз, өйткені $\omega / c = 2\pi\nu / c = 2\pi / \lambda = k$, мұндағы k – толқындық сан.

Сонымен, фотон бөлшек ретінде энергияға және импульсқа ие. Импульсты векторлық түрде жазып, фотонның энергиясы мен импульсы үшін мына өрнектерді аламыз:

$$\varepsilon = \hbar\omega, \quad \vec{p} = \hbar\vec{k} \quad (4)$$

мұндағы \vec{k} – толқындық вектор, оның модулі $k=2\pi/\lambda$.

2. Фотоэффект. Жарықтың корпускулалық қасиеттері жөніндегі гипотеза классикалық электромагниттік теория тұрғысынан мүлдем түсініксіз болған фотоэффект бойынша эксперимент нәтижелерін түсіндіруге мүмкіндік береді. Енді осы мәселеге тоқталайық. Фотоэффект деп жарықтың әсерінен заттың электрондарды шығаруын айтады. Фотоэффектің үш негізгі заңдылығы тағайындалған:

1. Фотоэлектрондардың ең үлкен бастапқы жылдамдығы жарық жиілігімен анықталады, жарық интенсивтігіне тәуелді емес.

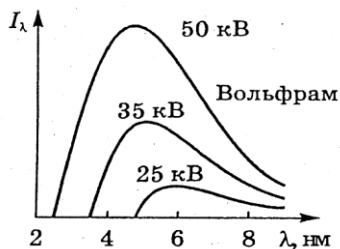
2. Әрбір зат үшін фотоэффектің қызыл шекарасы болады, яғни сыртқы фотоэффекті әлі де мүмкін ете алатын жарықтаң ең кіші ω_0 жиілігі (ең үлкен λ_0 толқын ұзындығы) болады.

3. Қанығу фототогы түсетін жарық ағынына пропорционал, яғни жарықтың әрбір секундта жұлып шығаратын электрон саны түсетін жарық қуатына пропорционал болады.

Жарықтың электромагниттік теориясына сүйеніп фотоэффект құбылысы қасиеттерін ұғыну мүмкін емес (қызыл шекараның болуы, фотоэффектің лезде білінетін инерциясыздығы).

Фотоэффект заңдылықтарын түсіндірудегі қиындықтардың бәрі, егер фотоэффекті жарық кванттары жайындағы Эйнштейннің гипотезасы негізінде қарастырса, онда жойылады. Осы гипотезаға сәйкес катод бетіне түсетін жиілігі ω монохроматты сәуле энергиялары $\varepsilon = \hbar\omega$ жарық кванттары – фотондар ағыны ретінде қарастырылады, фотон жұтылғанда оның энергиясы бір электронға бүтіндей беріледі. Сонымен, электрон кинетикалық энергияны біртіндеп емес, лезде қабылдайды. Бұл фотоэффектің инерциясыздығын түсіндіреді.

Эйнштейн формуласы. Электрон қабылдаған $\hbar\omega$ энергияның бір бөлігі оның металдан шығуына жұмсалады. Ал қалған бөлігі металдан ұшып шыққан фотоэлектронның кинетикалық энергиясына айналады. Электронның металдан босап шығуы үшін қажетті ең аз энергияны, яғни потенциалдық



2-сурет

тосқауылды жеңу үшін энергияны, **A шығу жұмысы** деп атайды. Демек, кинетикалық энергиясы ең үлкен фотоэлектрондар үшін фотонның элементар жұтылу актысындағы энергияның сақталу заңын былай жазуға болады :

$$\hbar\omega = h\nu = A + K_{\max} \quad (5)$$

Осы формула **фотоэффект үшін Эйнштейн теңдеуі** деп аталады.

Фотоэффект заңдарының кванттық теория негізінде түсіндірілуі.

1.Эйнштейн теңдеуі бойынша фотоэлектронның K_{\max} кинетикалық энергиясы мынаған тең

$$K_{\max} = m\nu^2 / 2 = h\nu - A$$

Демек, K_{\max} энергия түсетін сәуленің ν жиілігі өскенде сызықты түрде өседі және ол сәуле интенсивтігіне тәуелді емес, өйткені A-да ν -де жарық интенсивтігіне тәуелді емес.

2.Егер түсетін фотон энергиясы $h\nu$ электронның металдан A шығу жұмысына тең $A = h\nu$, онда фотоэлектронның кинетикалық энергиясы $K = m\nu^2 / 2 = 0$ болады. Бұл жағдайда фотоэффект құбылысы байқалмайды. Демек, жиілігі $\nu = \nu_{\min}$ — *нен* кем жарық фотоэффект құбылысын қоздыра алмайды. Ендеше, $\nu_{\min} = A/h$ жиілік фотоэффектің «қызыл шекарасы» болады.

Кванттық теорияғы сәйкес әрбір фотонды тек бір электрон жұтады, сондықтан жұлынып шығарылған фотоэлектрондар саны жарық интенсивтігіне пропорционал болуға тиіс.

3. Тежеулік рентген сәулесі спектрінің қысқа толқындық шекарасы.

Егер $\hbar\omega$ энергия кванты A шығу жұмысынан әлдеқайда басым болса, онда (5) Эйнштейн теңдеуі мына түрге келеді :

$$\hbar\omega = K_{\max}. \quad (6)$$

Осы өрнекті басқаша мағыналауға да болады: жарық кванты энергиясының электронның кинетикалық энергиясына ауысуы емес, керісінше, U потенциалдар айырымымен үдетілген электрондардың кинетикалық энергиясының электрондар металда шұғыл тежелгенде пайда болатын кванттар энергиясына айналуы ретінде деп, сонда

$$K = eU = \hbar\omega. \quad (4)$$

Дәл осындай процесс рентгендік түтікшеде өтеді. Ол токпен қыздырылатын катоды (термоэлектрондар көзі) және оған қарама-қарсы орналастырылған аноды (антикатод деп аталатын) бар вакуумдық баллон. Электрондардың үдетілуі катод пен антикатод арасына түсірілетін U жоғары кернеумен іске асырылады.

U кернеудің әсерінен электрондар eU энергияға дейін үдетіледі. Металл антикатодқа түсіп, электрондар шұғыл тежеледі, осының салдарынан **тежеулік рентген сәулесі** деп аталатын сәуле пайда болады.

Толқын ұзындық бойынша жіктелгенде осы сәуленің спектрі, көрінетін ақ жарықтың спектрі сияқты, тұтас болып шығады. Және осы **спектрдің қысқа толқынды шекарасы** болатындығы тағайындалған (2-сурет). Классикалық электромагниттік теория тұрғысынан қысқа толқынды шекара жалпы болмауы тиіс. Ал корпускулалық тұрғыдан қысқа толқынды шекараның болуы өте оңай түсіндіріледі. Шынында да, егер сәуле электрон тежелгенде оның жоғалтатын энергиясы есебінен пайда болатын болса, онда $\hbar\omega$ квант шамасы электронның eU энергиясынан үлкен болуы мүмкін емес. Осыдан сәуленің ω жиілігі $\omega_{\max} = eU/\hbar$ мәнінен үлкен бола алмайды. Демек, шығарылған сәуленің толқын ұзындығы:

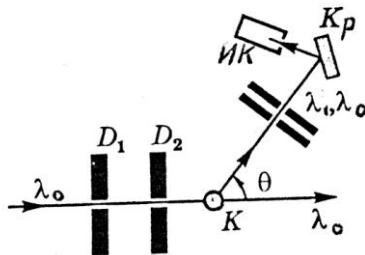
$$\lambda_{\min} = \frac{2\pi\hbar c}{e \cdot U} = \frac{1,24}{U} \quad (8)$$

мәнінен кіші бола алмайды (мұнда U , кВ, ал λ_{\min} , нм).

Қысқа толқынды шекараның болуы рентген сәулесінің кванттық қасиеттерінің ең бір айқын білінуі болып табылады.

4. Комптон эффекті.

Электромагниттік сәуленің заттың еркін және әлсіз байланысқан электрондарында серпімді шашырауында орын алады және бұл бастапқы сәуленің λ_0 толқын ұзындығымен салыстырғанда шашыраған



3-сурет

сәуленің λ толқын ұзындығының өсуінде білінеді.Эффект рентгендік($\lambda \sim 0,1\text{нм}$) және гамма-сәулесі ($\lambda < 0,1\text{нм}$) үшін байқалады.Америка физигі Комптон қатаң рентген сәулесінің жеңіл атомдардан тұратын графит, парафин сияқты және т.б. зат үлгілерінен шашырауын зерттеу (3-сурет) нәтижесінде ашқан(1922 ж).

Комптон шашыраған сәуле спектрінің құрамында толқын ұзындығы λ_0 бастапқы сызықтан басқа, толқын ұзындығы $\lambda > \lambda_0$, ығысқан сызық пайда болатынын байқады. Бұл **комптондық ығысу** деп, ал құбылыстың өзі **Комптон эффекті** деп аталады.

Тәжірибеде бақыланатын $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ комптондық ығысудың - шашыратушы зат үлгісінің материалына (затына) және түсетін сәуленің λ_0 толқын ұзындығына тәуелді болмайтындығын, тек шашыраған және бастапқы түсетін сәулелердің бағыттары арасындағы θ бұрышпен анықталатындығын көрсетті:

$$\Delta\lambda = \Lambda(1 - \cos\theta) = 2\Lambda\sin^2\frac{\theta}{2}, \quad (9)$$

мұндағы $\Lambda = \frac{2\pi\hbar}{mc} = 2,43 \text{ пм}$ - электронның комптондық толқын ұзындығы, m-электрон массасы.

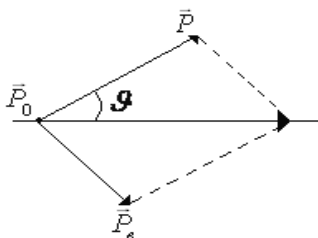
Классикалық толқындық теория негізінде комптондық шашыраудың заңдылықтары және ең алдымен ығысқан құраушының қалай пайда болатындығы түсіндірілмейді. Осы теорияға сәйкес шашырау механизмі түсетін толқынның электромагниттік өрісінің электрондарды «тербеліске» түсіруімен түсіндіріледі. Осы жағдайда шашыраған сәуленің жиілігі түсетін сәуленің жиілігімен дәл келуі тиіс, яғни толқын ұзындығы өзгермеуі тиіс. Бұлар тек кванттық теория негізінде түсіндірілді.

Кванттық теорияда рентген квантының толқын ұзындығы өзгеріп шашырауын оның электронмен жеке соқтығысу актысының нәтижесі ретінде қарастырылады. Сонда Комптон эффекті тыныштықта тұрған еркін электроннан фотонның серпімді шашырауы ретінде қарастырылады. Фотон электронмен соқтығысып, оған өзінің энергиясы мен импульсының бір бөлігін береді және қозғалыс бағытын өзгертеді (шашырайды). Фотон энергиясының кемуі шашыраған сәуленің толқын ұзындығының өскендігін білдіреді.

Тәжірибеде қолданылған заттарда электронның атоммен байланыс энергиясы ($\sim 5-10\text{эВ}$) рентген квантының (фотонның)

электронмен соқтығысқанда оған беретін энергиясымен ($\sim 10^3$ эВ) салыстырғанда өте кіші болады. Бұл шашырау бұрышы неғұрлым үлкен болса, соғұрлым жақсы орындалады. Осыдан жеңіл атомдардағы электронның байланыс энергиясын атом ішінде барлық шашырау бұрыштарында ескермеуге, яғни электрондарды еркін деп санауға болады. Сонда $(\lambda - \lambda_0) = \Delta\lambda$ комптондық ығысудың барлық заттар үшін бірдей болатындығы бірден түсінікті болады. Бірақ бұл жеңіл атомдар үшін ғана дұрыс. Ауыр атомдардың ішкі электрондары үшін осындай көрініс жарамайды.

Фотонның еркін электронмен соқтығысуын қарастырайық (4-сурет). Сонда энергияның және импульстың сақталу заңдары орындалуы тиіс екендігін ескереміз. Соқтығысу нәтижесінде электрон релятивті болып шығуы мүмкін. Сондықтан осы процесс релятивтік динамика негізінде қарастырылады.



4-сурет

Алғашында тыныштықта тұрған тыныштық энергиясы $E_{0e} = mc^2$, импульсы $p_{e0} = 0$ еркін электронға энергиясы $\epsilon_0 = \hbar\omega_0$ және импульсы $p_0 = \epsilon_0/c$ фотон келіп соқтығысатын болсын. Соқтығысқаннан кейін фотонның энергиясы $\epsilon = \hbar\omega$, ал серпілген электронның энергиясы мен импульсы E_e және p_e болады. Фотон-электрон жүйесінің

энергиясы мен импульсының сақталу заңдарына сәйкес соқтығысқанға дейін және соқтығысқаннан кейін мына теңдіктерді жазамыз:

$$E_{0e} + \epsilon_0 = E_e + \epsilon; \\ mc^2 + \hbar\omega_0 = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4} + \hbar\omega, \quad 0 + \overline{p_0} = \overline{p_e} + \overline{p}; \quad p_0^2 = p_e^2 + p^2 - 2p_0 p \cos \theta. \quad (10)$$

Энергияның сақталу $mc^2 + \hbar\omega_0 = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4} + \hbar\omega$ және импульстың сақталу ($p_0^2 = p_e^2 + p^2 - 2p_0 p \cos \theta$) заңдарынан (косинустар теоремасын пайдаланып, 4-суретті кара)

$p_0 = \hbar\omega_0/c$; $p = \hbar\omega/c$; $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$; $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ формулалары ескерілгенде комптондық ығысу үшін (9) формула алынады.

Шашыраған сәуледе ығыспаған сызықтың пайда болуына, шашыратушы зат атомдарының ішкі электрондары себепші болады. Осы электрондардың байланыс энергиясы, әсіресе ауыр атомдағы, рентген фотондарының энергияларымен шамалас, демек, мұндай электрондарды енді еркін деп санауға болмайды. Осы жағдайда рентген фотоны атомның өзімен соқтығысып, онымен энергия және импульсымен алмасады. Ал атом массасы электрон массасынан өте үлкен болатындықтан, атомнан шашырағанда атомға фотон энергиясының болмашы аз бөлігі беріледі. Сондықтан осы жағдайда шашыраған сәуленің λ толқын ұзындығы іс жүзінде түсетін сәуленің λ_0 толқын ұзындығымен бірдей болады.

5. Қара дененің сәуле шығаруы, Комптон эффекті, фотоэффект сияқты құбылыстарды жарық бөлшектер (кванттар–фотондар) ағыны ретінде қарастырылғанда түсіндіруге болады. Ал жарықтың интерференция, дифракция және поляризация құбылыстары жарықты электромагниттік толқын деп қарастырғанда ғана түсіндіріледі.

Жарықтың қысымы және сынуы толқындық теория бойынша да, кванттық теория бойынша да түсіндіріледі.

Сонымен, жарықтың **корпускулалық–толқындық дуализмі** (екі жақтылығы) байқалады: бір құбылыстарда оның толқындық табиғаты білінеді де, ол өзін электромагниттік толқын сияқты көрсетеді, басқа құбылыстарда жарықтың корпускулалық (кванттық) табиғаты білінеді де, ол өзін фотондар (кванттар) ағыны ретінде көрсетеді.

Сұрақтар

1. Боте тәжірибесінің мәнісі неде? Тәжірибе нәтижесін толқындық және кванттық теориялар тұрғысынан талдап беріңіз?
2. Фотонның электроннан өзгешелігі неде ?
3. Эйнштейн теңдеуі көмегімен фотоэффект заңдарын қалай түсіндіруге болады?
4. Тежеулік рентген сәулесі спектрінің қысқа толқынды шекарасының болуы қалай түсіндіріледі?
5. Фотоэффект және Комптон эффекті. Бұлардағы фотон мен электронның әсерлесу сипатындағы ерекшелік неде?
6. Заттан шашыраған рентген сәулесі құрамында екі құраушының болуы неліктен ?