

ФИЗИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕР МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
MODELING OF PHYSICAL PROCESSES AND MECHANICAL SYSTEMS

ГТАХР 29.05.15

10.51889/2959-5894.2024.86.2.008

Т.Б. Қоштыбаев¹, М. Е. Алиева^{2*}, А.М. Татенов¹

¹Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: moldir-2008@mail.ru

КВАНТТЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕМЕСІ

Аңдатпа

Мақалада жарықтың толқындық және бөлшектік қасиеттеріне жауапты параметрлердің (физикалық шамалардың) мағыналары мен ролі кеңінен баяндалып, олардың арасындағы байланыстар жүйеленіп көрсетілген. Есептеулерді жүргізу ыңғайлы болу үшін және формулаларды ықшамдап жазу мақсатында қосымша тұрақтылар енгізілген. Электромагниттік сәулелер мен олардың фотондары үшін бөлшектік және толқындық параметрлердің сандық мәндері есептеліп, параметрлер арасындағы байланыстар енгізілген жаңа тұрақтылар арқылы жазылып көрсетілген. Жарыққа бөлшектік-толқындық принциптің классикалық үлгісі тұрғысынан қарай отырып оған классикалық электромагниттік толқындар түрінде тарайтын фотондар ағыны деп баға берілген. Толқындық және бөлшектік қасиеттердің бір-бірін толықтыратынының дәлелі ретінде фотонның бөлшектік қасиетіне сәйкес келетін шама оның толқындық қасиетін көрсететін шама арқылы анықталатын тұстары көрсетілген. Жарық табиғатының екі жақтылық қасиеттерінің қалыптасу, бәсекелестік және теория ретінде өмір сүру кезеңдері туралы да айтылған. Кванттық механикалық жүйелердің корпускулалық және толқындық концепциясы арқылы микробөлшектер әлеміндегі құбылыстардың идеялық мазмұны айқындала түседі. Ол кванттық және толқындық қасиетке жауапты параметрлерінің Планк тұрақтысы арқылы байланысқан қатынастар арқылы іске асырылады. Бұлардың ішіндегі басты шама энергия мен жиілік арасындағы байланыс.

Түйін сөздер: корпускула, масса, энергия, жарық, жиілік, импульс, фотон, толқын.

Т.Б. Қоштыбаев¹, М. Е. Алиева², А.М. Татенов¹

¹Казахский национальный женский педагогический университет, г. Алматы, Казахстан

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г. Алматы, Казахстаны

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОСНОВА КВАНТОВОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация

В данной статье изложены смысл и роль, а так же системная связь параметров (физических величин) ответственных за волновые и корпускулярные свойства света. Для удобства вычислений и упрощения записей формул введены дополнительные постоянные. Вычислены численные значения волновых и корпускулярных параметров для электромагнитных излучений и их фотонов, показаны связь этих параметров с применением новых постоянных. С точки зрения классической позиций корпускулярно-волнового принципа свет – это поток фотонов распространяющихся в виде электромагнитных волн. В доказательство, что оба свойства света взаимно дополняют друг-друга, показаны соотношения, где корпускулярные величины определяются через величины, соответствующих волновому свойству фотона. Изложены периоды формирования, конкурирования и существования его как теория. Благодаря корпускулярной и волновой концепции квантово-механических систем становится яснее

идейное содержание явлений в мире микрочастиц. Он реализуется через отношения, связанные постоянной Планка параметров, ответственных за квантовое и волновое свойство. Главной величиной среди них является связь между энергией и частотой.

Ключевые слова: корпускула, масса, энергия, частота, импульс, фотон, волна.

T. Koshtybayev², M. Aliyeva², A. Tatenov¹

¹Kazakh National Women's Teacher Training University, Almaty, Kazakhstan

²Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Kazakhstan

MATHEMATICAL BASIS OF QUANTUM MECHANICAL SYSTEMS

Abstract

This article outlines the meaning and role, as well as the systemic relationship of parameters (physical quantities) responsible for the wave and corpuscular properties of light. For convenience of calculations and simplification of formula entries, additional constants have been introduced. Numerical values of wave and corpuscular parameters for electromagnetic radiation and their photons are calculated, and the relationship of these parameters with the use of new constants is shown. From the point of view of the classical position of the particle-wave principle, light is a stream of photons propagating in the form of electromagnetic waves. To prove that both properties of light complement each other, the relations are shown, where the corpuscular quantities are determined through the quantities corresponding to the wave property of the photon. The periods of its formation, competition and existence as a theory are described. Thanks to the corpuscular and wave concepts of quantum mechanical systems, the ideological content of phenomena in the world of microparticles becomes clearer. It is implemented through relations related to the Planck constant of the parameters responsible for the quantum and wave properties. The main value among them is the relationship between energy and frequency.

Keywords: corpuscle, mass, energy, frequency, pulse, photon, wave.

Негізгі ережелер

Кванттық-механикалық жүйелерді қарастыру барысындағы басты ұстаным ретінде қарастырылатын нысанның екі жақтылық қасиет көрсетуінде болып отыр. Кванттық бөлшектердің сипаттамалары да осындай екі топқа бөлінгенімен, олардың арасын байланыстыратын белгі бір тұрақтылар бар. Осылармен бірге, кванттық жүйелердегі бөлшектің күйі белгілі бір толқындық функциялармен сипатталып, оның модулінің квадраты амплитуда рөлін атқарады. Бұл деген сөз бөлшектің кеңістіктік жағдайы ықтималдылықтар теориясына негізделетінін білдіреді.

Кіріспе

Жарықтың табиғаты туралы ең алғашқы түсініктер мен ұғымдар ежелгі грек ойшылдары мен египеттік зерттеушілердің жазбаларында бар болатын. Параболалық айна, микроскоп, көру түтіктері сияқты оптикалық құралдардың пайда болуы мен олардың жетілдірілуі жарық табиғат жөніндегі пікірлердің ауқымы кеңейе түсті. XVII ғасырда жарықтың табиғаты жөніндегі өзара кереғар екі теория қатар өмір сүрді. Оның бірі Пьер Гассенди мен Исаак Ньютон ұсынған *корпускулалық (бөлшектік)* теория болса, екіншісі – Христиан Гюйгенс ұсынған *толқындық* теория. Алғашқы теория бойынша жарық жарқырап тұрған денелерден ұсақ бөлшектер (корпускулалар) түрінде жан-жақ тарайды және мұндай корпускулалардың қозғалысы механика заңдарына бағынады деген идеяны ұстанды. Жарықтың шағылуына серпімді шардың жазық беттен кері ыршып серпілуі секілді деп қараса, жарықтың сынуы бір ортадан екінші бір ортаға өткен корпускулалар жылдамдықтарының өзгерісімен түсіндірілді [1-3]. Екінші теория жарыққа механикалық толқындар деп қарады. Жарық табиғатының бір-біріне ұқсамайтын екі теориясы XVIII ғасырдың басынан аяғына дейін өзара тартыста (қайшылықты) өмір сүрді. Алайда, XIX ғасырдың бас кезеңінде әлемдік ғылыми орта жарықтың корпускулалық теориясынан бас тартқан еді, осының салдарынан толқындық теория үстемдік құра бастады. Оның дәлелі ретінде ағылшын физигі Т. Юнг пен француздық физик О. Френель ашқан интерференция және дифракция құбылыстарын келтіруге болады.

Бұл құбылыстар тек толқындық теориямен ғана түсіндіріле алатын еді. Ж. Фуко мен А. Физо жарықтың судағы жылдамдығын өлшеу арқылы толқындық теорияның басымдылығын арттыра түсті. XIX ғасырдың 60-жылдары Максвелл электромагниттік өрістің жалпылама заңдылықтарын бекіте келе жарықты *электромагниттік толқындар* деп атады. Г. Герцтің тәжірибелерінен кейін жарықтың электромагниттік табиғатының беделі одан сайын арта түскен болса, XX ғасырдың бас кезінде П. Лебедев жарық қысымын өлшеу арқылы оның айғақтылығын (шыншылдығын) мойындатты. Бірақ, XX ғасырда пайда болған жарықтың қысымы, фотоэффект, Комптон эффекті, жылулық сәуле шығару секілді құбылыстарды түсіндіруге жарықтың толқындық теориясы қауқарсыз болды. Керісінше, аталған құбылыстардың табиғаты жарықтың корпускулалық теориясымен жақсы түсіндірілді. Осыдан кейін жарық бөлшектерінің беделінің артқаны сонша Макс Планк оларды *жарық кванттары*, ал Альберт Эйнштейн – *фотондар* деп атады. Осылайша жарық құбылыстарының бір тобы толқындық теориямен, ал екінші бір тобы фотондық теориямен түсіндіріліп жүрді. Ғалымдар өзара қайшылықтағы екі теорияның қайсысы басымдақта екендігін шеше алмайтын жағдайға тап болды. Бұл даулы мәселенің шешімін кванттық физика ғана таба білді, яғни ол жарықтың табиғатына арналған екі теорияға бір-бірін теріске шығарушы көзқарасында емес, керісінше бірін-бірі толықтырушылар ретінде қарау керектігін ұсынды. 1924 жылы француз физигі Луи де Бройль материяның кез-келген түрі корпускулалық және толқындақ қасиетке ие болады деген табиғаттың жалпы заңын аша отырып толқындық механиканы жасаушылардың бірі ретінде физика тарихында қалды. Ол өзінің «Жарық және материя» атты еңбегінде толқындық және корпускулалық қасиеттер жарыққа ғана емес барлық материяға (электрондар, протондар, атомдар, молекулалар, барлық макроденелер) қатысты деген болжамын ұсынған болатын. 1926 жылы австриялық физик Э. Шредингер материя толқынына арналған теңдеуді тапқан болса, ағылшын физигі П. Дирак оны жалпылама түрде жазып көрсетті [4-7]. Материя толқындарын неміс физигі М. Борн «Ықтималдылықтар толқыны» деп атады. 1927 жылы американдық физиктер К. Дэвисон мен Л. Джермер электрондардың дифракциясын бақылады және бұл жағдай Луи де Бройль болжамының дәлелдемесі ретінде қабылданды. 1678 жылы голландия физигі Христиан Гюйгенс толқындық процеске қатысып жатқан әрбір кеңістік нүктесі сфералық толқын көзінің рөлін атқарады деген принцип ұсынды. Ал 1815 жылы француз физигі Огюстен Жан Френель ұсақ толқындардың когеренттілігі мен интерференциясын енгізу арқылы Гюйгенс принципін толықтырды.

Зерттеудің өзектілігі. Материяның бір көрінісі ретінде қалыптасып қалған жарық пен кез-келген бөлшектік нысанның бір мезгілде екі түрлі қасиет көрсетуі жағдайын математикалық есептеулер арқылы дәлелдеу жолы ұсынылған. Есептеулер кезінде жеке-жеке қолданылып жүрген жарық жылдамдығы мен Планк тұрақтысын басқа бір тұрақтыға біріктірілген. Бұл қалыптасып қалған формулаларды ықшамды түрде қолдануға мүмкіндік жасайды. Толқындық және бөлшектік параметрлердің динамикасын арнайы сандық жүйеде кестелер арқылы көрсету жолы ұсынылған. Мақалада келтірілген барлық есептеу нәтижелері мен әдістері кванттық физика мен кванттық механика үшін алғашқы алғашарттар болып табылады. Толқындық және бөлшектік параметрлер арасындағы байланыстарды жүйелеу мәселесі әрқилы тәсілдермен іске асырылып келе жатыр, осыған байланысты мақаладағы келтірілген тұжырымдамаларды аталған мәселенің өзектілігіне қатысы бар деп қабылдауға болады.

Материалдар мен әдістер. Материялық микроскоптық нысандар бірдей жағдайларда классикалық толқын қасиетін, ал өзара бірдей жағдайларда—классикалық бөлшек қасиетін көрсете алу мүмкін. Корпускулалық—толқындық екі жақтылық қасиет көрсете алатын нысанның мысалы ретінде электрондар мен жарықты алуға болады. Бұл принцип аса ірі көлемді нысандар үшін де орындала береді десек те, нысанның массасы артқан сайын оның толқындық қасиетінің көріну ықтималдылығы азая беретінін ескерген жөн. Корпускулалық—толқындық екі жақтылық идеясы кванттық механика теориясында микроәлемденгі

құбылыстардың мағыналарын классикалық концепциялар қырынан қарау үшін қажет болды. Бұл идея дами келе өрістердің кванттық теориясына ұласты.

Негізгі ойлар. де Бройль ұсынған идеяға сәйкес кез-келген микроскоптық нысанның корпускулалық сипаттамаларына оның энергиясы мен импульсін алсақ, ал толқындық сипаттамаларына жиілігі мен толқын ұзындығы жатқызамыз. Аталған принциптің нақты, әрі тыңғылықты түрдегі көрінісін Шредингердің толқындық механикасы арқылы көрсетуге болады. Бұл механика кейіннен кванттық механика деп аталып кетті. Электромагниттік толқын деп қарастырылып жүрген жарық– корпускулалар (фотондар) ағыны, ал дифракция және интерференция құбылыстары кезінде жарық өзін толқын түрінде көрсетті. Қосарланған саңылаулардан өткен жекедара фотондар экранда интерференциялық көрініс береді. Алайда, көптеген тәжірибелер фотонның электромагниттік сәуленің қысқа ғана импульстері емес екендігін дәлелдеп берді. Ол атом ядроларынан шығатын және соларда жұтылатын электрон секілді нүктелік бөлшек болып табылады. Электромагниттік сәуленің толқын ұзындығы аз болған сайын фотонның энергиясы мен импульсі көп бола береді де, оның толқындық қасиетінің біліну деңгейі төмендей беретін болады.

Зерттеудің әдіснамасы

Зерттеу кезінде дәстүрлі қолданылып келген Планк тұрақтысы мен жарық жылдамдығының көбейтіндісі мен қатынасын жаңа бір тұрақтыларға айналдырылып, осы арқылы есептеу жұмыстарының жеңілдеуі мен кванттық-механикалық формулалардың жазылу үлгісінің ықшамдалуына жол ашылды. Әрбір заңдылық сандық көрсеткіштер арқылы сипатталып, сәйкес кестелер арқылы түсіндірілді. Ең бастысы кванттық бөлшектің екі жақтылық қасиеттері жан-жақты ашылып көрсетілді.

Зерттеу нәтижелері

Кванттық-механикалық жүйелердің математикалық негіздемесі жүйенің толқындық-бөлшектік екіжақтылық сипатына құрылған физикалық тұрақтылар мен кванттық шамалар арасындағы тәуелділік заңдылықтары арқылы көрсетілді. Жиіліктер мен толқын ұзындықтардың, жылдамдықтың, энергия мен импульстің заңдылықтары жаңа тұрақтылар арқылы жазылды. Әрбір сәуленің түріне қарай сандық өлшемдер көрсетілді. Кванттық механикалық жүйелердің корпускулалық және толқындық концепциясы арқылы микробөлшектер әлеміндегі құбылыстардың идеялық мазмұны шамаладрыңшамаларың сан мәндері мен өлшем бірліктері арқылы айқындала түсті.

Негізгі бөлім. Гюйгенс жарықты көлденең монохроматты электромагниттік толқындар жиынтығы деп көрсетсе, Максвелл бұл тұжырымның теориялық дәлелін келтірді. Электромагниттік сәулелердің (толқындардың) ν ГЦ – тербеліс жиіліктері (1 секундта жасалатын тербелістер саны) және T с. ішінде жасалған 1 тербелістің λ м ұзындықтары (толқын ұзындықтары) 1-кестеде келтірілген. t секунд ішінде N тербеліс жасалуы үшін 1 секундта ν тербеліс жасалуы тиіс:

$$\nu = \frac{N}{t} \quad (1)$$

1 тербеліс жасалған T с уақыт тербеліс периоды деп аталады. ν және λ шамалары өзара кері байланыста: $\lambda \sim \frac{1}{\nu}$, яғни 1 с ішінде жасалатын тербелістер саны (ν) көп болған сайын 1 тербелістің ұзындығы (λ) аз болады (қысқа толқынды сәулелер). Керісінше 1 секундтағы тербелістер саны аз болса, онда әрбір тербелістің ұзындығы көп болады (ұзын толқынды сәулелер). Қысқа толқынды сәулелердің 1 тербелісіне де аз уақыт жұмсалады (кіші периодты толқындар), ал 1 тербелістің ұзындығы көп болған сайын оған жұмсалатын уақыт та ұзағырақ болады (үлкен периодты толқындар). Олай болса, сәуленің (толқынның) периоды мен толқын

ұзындығы оның жиілігіне тікелей байланысты болады екен: $(T, \lambda) \sim \frac{1}{\nu}$. Электромагниттік сәулелердің таралу жылдамдығы вакуумде $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$ немесе $c = 300000 \frac{км}{с}$ (жарық жылдамдығы):

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2)$$

Макс Планк жылулық сәулелер кванттар (энергияның ең аз порциясы) түрінде шығарылады және жұтылады деп болжау арқылы жарықтың қосарланған толқындық–кванттық (бөлшектік) түр-сипатын белгілеп берді. Әрбір квант энергиясын таситын әрі толқын түрінде таралатын бөлшек фотон (жарық бөлшегі) деп аталады. Фотон зарядталған бөлшектердің үдемелі қозғалысынан, зарядталған бөлшектердің тежелісінен, атомдар мен молекулалардың үлкен энергиялық (қоздырылған) күйден кіші энергиялық (стационар) күйге өтуі кезінде пайда болады.

Кванттық механика (фотондардың қозғалыс теориясы) жасалған тұста жарықтың қос қасиеттілігі мен микроәлемді классикалық көзқарастар тұрғысымен байланыстыра қарастыру идеясы микробөлшектерге арналған Э. Шредингердің теңдеуінде көрініс тапты [8-10]. Бұл теңдеудің классикалық механикадағы Ньютонның 2-ші заңы мен электромагниттік толқындарға арналған Максвелл теңдеулері сияқты өзіндік алатын орны (маңызы) бар. Алайда, кванттық объектілер классикалық толқындарға да, бөлшектерге де ұқсамайды. Олар де Бройль толқындары түрінде таралады. Фотон–бір жағынан импульсі P , энергиясы E , массасы m және жылдамдығы c болатын бөлшек болса, екінші жағынан ол жиілігі ν Гц және бір тербелісінің ұзындығы λ м болатын толқын. Олай болса, P , E және m шамалары жарықтың кванттық қасиеттерін сипаттаушы параметрлер, ал ν , λ шамалары толқындық қасиеттеріне тән параметрлер болып табылады екен. Алайда, бұлар бір объектіге (жарыққа) тиісті (қатысты) болғандықтан, екі табиғатты параметрлердің арасында міндетті түрде байланыстар болуы тиіс. Бұл мәселені неміс физигі Макс Планк $h = 6,67 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ коэффициентін енгізу арқылы шешті, яғни Планк тұрақтысы деп аталатын бұл коэффициент кванттық және толқындық параметрлерді байланыстырушы рөлін атқаратын болады. Төмендегі 1-кестеде электромагниттік сәулелердің таралу жылдамдықтары мен олардың фотондарының қозғалу жылдамдықтары көрсетілген, яғни оларды бір ұғым деп қарау керек.

Кесте 1. Электромагниттік сәулелердің жиіліктері мен толқын ұзындықтары

Электромагниттік сәулелер	Жиілігі ν , Гц	Толқын ұзындығы λ , м
Радиотолқындар	$3 \cdot 10^7$	10
Инфрақызыл сәулелер	$2 \cdot 10^{13}$	$15 \cdot 10^{-6}$
Көрінетін жарық	$4 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$
Ультракүлгін сәулелер	$6 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{-8}$
α -сәулелері	$3 \cdot 10^{16}$	$10 \cdot 10^{-9}$
Рентген сәулелері	$2 \cdot 10^{19}$	$15 \cdot 10^{-12}$

Электромагниттік сәулелер мен олардың фотондарының (2)-формула бойынша анықталған жылдамдық мәндері төмендегі 2-кесте арқылы көрсетілген.

Планк тұрақтысы жарықтың бөлшектік және толқындық параметрлерінің арасын байланыстырушы екендігі айтылды. Бұл жағдайдың қалай іске асатынына тоқталайық.

Кесте 2. Электромагниттік сәуле бөлшектерінің таралу жылдамдықтары

Электромагниттік сәулелер бөлігі (фотоны)	Электромагниттік сәулелердің таралу (олардың фотондарының қозғалыс) жылдамдығы: $c = \lambda \nu \left(\frac{m}{c} \right)$
Радиотолқындар фотоны	$c = 10 \cdot 3 \cdot 10^7 = 3 \cdot 10^8$
Инфрақызыл сәулелер фотоны	$c = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{13} = 3 \cdot 10^8$
Көрінетін жарық фотоны	$c = 0,75 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{14} = 3 \cdot 10^8$
Ультракүлгін сәулелер фотоны	$c = 5 \cdot 10^{-8} \cdot 0,6 \cdot 10^{16} = 3 \cdot 10^8$
α -сәулелер фотоны	$c = 10 \cdot 10^{-9} \cdot 0,3 \cdot 10^{17} = 3 \cdot 10^8$
Рентген сәулелер фотоны	$c = 15 \cdot 10^{-12} \cdot 0,2 \cdot 10^{20} = 3 \cdot 10^8$

Фотонның E Дж энергиясын ν мен λ арқылы анықтау мәселесіне келгенде Планк тұрақтысы–жарық толқынының ν Гц жиілігінің әрбір герціне келетін энергия болып табылады:

$$h = 6,67 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot c = 6,67 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Дж}}{\text{Гц}} = 6,67 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Дж}}{\frac{1}{c}}$$

ν Гц жиілікпен тербелетін фотонның энергиясы

$$h \frac{\text{Дж}}{\text{Гц}} \cdot \nu \text{ Гц} = E \text{ Дж} \quad (3)$$

Өлшем бірліктері қысқарғаннан кейінгі түрі

$$E = h\nu \quad (3A)$$

1 с ішінде көп тербеліс жасайтын (ν –көп) фотонның энергиясы да үлкен болады және керісінше фотон 1 с ішінде аз тербелістер жасаса (ν –аз), онда мұндай фотонның энергиясы да аз болады. 3-кестеде электромагниттік сәулелер фотондарының энергиясын оның жиілігі арқылы есептеу нәтижелері көрсетілген. (2)-теңдіктен:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

сонда (3)-пропорция мынадай формада жазылады:

$$h \frac{\text{Дж}}{\text{Гц}} \cdot \frac{c}{\lambda} \text{ Гц} = \frac{hc}{\lambda} \text{ Дж} = E \text{ Дж}$$

осыдан

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (4)$$

Бұл бір тербелісінің ұзындығы λ м болатын фотонның энергиясы. Көріп отырғанымыздай, фотонның энергиясы оның толқын ұзындығына кері тәуелді, яғни бір тербелісінің ұзындығы.

Кесте 3. Электромагниттік сәулелер бөліктерінің энергиясының жиілік арқылы анықталған мәндері

Электромагниттік сәулелер бөлігі (фотоны)	Электромагниттік сәулелер фотондарының энергиясы: $E = h\nu$ (Дж)
Радиотолқындар фотоны	$E = 6,67 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^7 = 20,01 \cdot 10^{-27}$
Инфрақызыл сәулелер фотоны	$E = 6,67 \cdot 10^{-34} \cdot 2 \cdot 10^{13} = 13,34 \cdot 10^{-21}$
Көрінетін жарық фотоны	$E = 6,67 \cdot 10^{-34} \cdot 4 \cdot 10^{14} = 26,68 \cdot 10^{-20}$
Ультракүлгін сәулелер фотоны	$E = 6,67 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{15} = 40,02 \cdot 10^{-19}$
α -сәулелер фотоны	$E = 6,67 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{16} = 20,01 \cdot 10^{-18}$
Рентген сәулелер фотоны	$E = 6,67 \cdot 10^{-34} \cdot 2 \cdot 10^{19} = 13,34 \cdot 10^{-15}$ Дж

(λ) көп фотонның энергиясы аз, ал λ -сы аз фотон көп энергияға ие болады. (4)-формуламен есептеулер жүргізген кезде h пен c тұрақтыларының мәндерін жеке-жеке қоймас үшін екеуінің m көбейтіндісінен жаңа θ тұрақтысына ауысамыз:

$$\theta = hc = 6,67 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 = 20,01 \cdot 10^{-26} \approx 2 \cdot 10^{-25} \text{ Дж} \cdot \text{м}$$

(4)-қатынасты осы жаңа тұрақты арқылы жазсақ:

$$E = \frac{\theta}{\lambda} \tag{4A}$$

За-кестеде (4A)-қатынасын қолданып фотонның энергиясын толқын ұзындығы арқылы анықтау үшін жасалған есептеулер ұсынылған.

Кесте 3а. Электромагниттік сәуле бөліктерінің энергиясының толқын ұзындығы арқылы есептелінген мәндері

Электромагниттік сәулелердің бөлігі (фотоны)	Электромагниттік сәулелер фотондарының энергиясы: $E = \frac{\theta}{\lambda}$ (Дж)
Радиотолқындар фотоны	$E = \frac{2 \cdot 10^{-25}}{10} \approx 20 \cdot 10^{-27}$
Инфрақызыл сәулелер фотоны	$E = \frac{2 \cdot 10^{-25}}{1,5 \cdot 10^{-5}} \approx 13 \cdot 10^{-20}$
Көрінетін жарық фотоны	$E = \frac{2 \cdot 10^{-25}}{0,75 \cdot 10^{-6}} \approx 26 \cdot 10^{-20}$
Ультракүлгін сәулелер фотоны	$E = \frac{2 \cdot 10^{-25}}{5 \cdot 10^{-8}} \approx 40 \cdot 10^{-19}$
α -сәулелер фотоны	$E = \frac{2 \cdot 10^{-25}}{10 \cdot 10^{-9}} \approx 20 \cdot 10^{-18}$
Рентген сәулелер фотоны	$E = \frac{2 \cdot 10^{-25}}{15 \cdot 10^{-12}} \approx 13 \cdot 10^{-15}$

Классикалық механикада массасы m кг және жылдамдығы $v \frac{M}{c}$ материялық (немесе макробөлшектің) толық энергиясы $W = mv^2$. Осыны фотон үшін жазсақ: $E = mc^2$. Классикалық бөлшектің P импульсі

$$P = mv = \frac{mvv}{v} = \frac{mv^2}{v} = \frac{W}{v} \quad (5)$$

Осыдан мынадай тұжырым шығады: бөлшектің импульсі – оның $v \frac{M}{c}$ жылдамдығының әрбір $1 \frac{M}{c}$ -не келетін P Дж энергия:

$$W \text{ Дж} = P \frac{\text{Дж}}{\frac{M}{c}} \cdot v \frac{M}{c} = P \cdot v \text{ Дж}$$

(5)-импульстің өрнегін фотон үшін жазайық:

$$P = \frac{E}{c} \quad (6)$$

осыдан

$$E = P \cdot c \quad (6A)$$

немесе

$$\text{Дж} = P \frac{\text{Дж}}{\frac{M}{c}} \cdot c \frac{M}{c} = P \cdot c = P \cdot c \text{ Дж}$$

Бұл импульсі $P \frac{\text{Дж}}{\frac{M}{c}}$ фотонның энергиясы немесе $3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ жылдамдықпен қозғалатын фотонда $(P \cdot c)$ Дж -ға тең энергия бар деп есептеледі. Олай болса, (6A)-теңдігінен мынадай тұжырым жасауға болады екен: фотонның $3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ жылдамдығының әрбір $1 \frac{M}{c}$ -не келетін энергия көп (P көп) болса, онда фотонның толық E энергиясы да көп болады. (6)-ға (3A)-теңдігін қолдансақ, онда ν Гц жиілікпен тербелетін фотонның импульсі $(1 \frac{M}{c})$ жылдамдыққа келетін энергиясы):

$$P = \frac{h\nu}{c} \quad (7)$$

Осы теңдіктен мынадай қорытынды жасауға болады: фотонның 1 секунд ішінде жасайтын тербелістері көп болған сайын (ν көп) әрбір 1 м/с жылдамдыққа келетін энергия аз (P аз) болады. (7)-формуласымен есептеулер жүргізген кезде h пен c тұрақтыларын жеке-жеке қоя бермес үшін екеуінің $(\frac{h}{c})$ қатынасынан жаңа ψ тұрақтысына өтеміз:

$$\psi = \frac{h}{c} = \frac{6,67 \cdot 10^{-34}}{3 \cdot 10^8} = 2,2233 \cdot 10^{-42} \approx 2 \cdot 10^{-42} \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$$

(7)-қатынасты осы жаңа тұрақты арқылы жазсақ:

$$P = \psi \cdot \nu \quad (7A)$$

4-кестеде электромагниттік сәулелер фотондарының импульстерін (7A)-формуласының көмегімен жүргізген есептеулерінің нәтижелері көрсетілген.

Кесте 4. Электромагниттік сәуле фотонының импульсінің жиілік арқылы анықталған сандық мәндері

Электромагниттік сәулелердің бөлішегі (фотоны)	Электромагниттік сәулелер фотондарының импульсі: $P = \psi \nu \left(\frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right)$
Радиотолқындар фотоны	$P = 2 \cdot 10^{-42} \cdot 3 \cdot 10^7 \approx 6 \cdot 10^{-35}$
Инфрақызыл сәулелер фотоны	$P = 2 \cdot 10^{-42} \cdot 2 \cdot 10^{13} \approx 4 \cdot 10^{-29}$
Көрінетін жарық фотоны	$P = 2 \cdot 10^{-42} \cdot 4 \cdot 10^{14} \approx 8 \cdot 10^{-28}$
Ультракүлгін сәулелер фотоны	$P = 2 \cdot 10^{-42} \cdot 6 \cdot 10^{15} \approx 12 \cdot 10^{-27}$
α -сәулелер фотоны	$P = 2 \cdot 10^{-42} \cdot 3 \cdot 10^{16} \approx 6 \cdot 10^{-26}$
Рентген сәулелер фотоны	$P = 2 \cdot 10^{-42} \cdot 2 \cdot 10^{19} \approx 4 \cdot 10^{-23}$

Егер, (6)-ға (4)-формуланы қолдансақ, нәтижеде бір тербелісі λ м болатын фотонның импульсін аламыз:

$$P = \frac{h}{\lambda} \square \frac{1}{\lambda} \quad (8)$$

Бұл теңдіктен мынадай қорытынды шығады: фотонның бір тербелісі неғұрлым ұзын болған сайын (λ көп) әрбір 1 м/с жылдамдыққа келетін энергия аз (P аз) болады. 4а-кестеде электромагниттік сәулелер фотондарының импульстерін (8)-формуламен жүргізген есептеулерінің нәтижелері ұсынылған.

Кесте 4а. Электромагниттік сәуле фотонының импульсінің толқын ұзындығы арқылы анықталған сандық мәндері

Электромагниттік сәулелердің бөлішегі (фотоны)	Электромагниттік сәулелер фотондарының импульсі: $P = \frac{h}{\lambda} \left(\frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right)$
Радиотолқындар фотоны	$P = \frac{6,67 \cdot 10^{-34}}{10} \approx 7 \cdot 10^{-35}$
Инфрақызыл сәулелер фотоны	$P = \frac{6,67 \cdot 10^{-34}}{15 \cdot 10^{-6}} \approx 4 \cdot 10^{-29}$
Көрінетін жарық фотоны	$P = \frac{6,67 \cdot 10^{-34}}{7,5 \cdot 10^{-7}} \approx 9 \cdot 10^{-28}$
Ультракүлгін сәулелер фотоны	$P = \frac{6,67 \cdot 10^{-34}}{5 \cdot 10^{-8}} \approx 13 \cdot 10^{-27}$
α -сәулелер фотоны	$P = \frac{6,67 \cdot 10^{-34}}{10 \cdot 10^{-9}} \approx 7 \cdot 10^{-26}$

(5)-теңдікпен берілген классикалық бөлшектің $P = mv$ импульсін фотон үшін жазайық: $P = mc$. Осыны (7)-ге қойсақ:

$$mc = \frac{h\nu}{c}$$

осыдан ν жиілікпен тербелетін фотонның массасы

$$m = \frac{h\nu}{c^2} \quad (9)$$

Осы өрнекті түрлендіре отырып ψ тұрақтысы арқылы жазамыз:

$$m = \frac{h}{c} \cdot \frac{\nu}{c} = \frac{\psi\nu}{c} \quad (9A)$$

5-кестеде электромагниттік сәулелер фотондарының массаларын (9A)-формуласымен есептеудің нәтижелері көрсетілген. $P = mc$ теңдігін (8)-ге қойсақ: $mc = \frac{h}{\lambda}$ осыдан бір тербелісінің ұзындығы λ болатын фотонның массасы:

$$m = \frac{h}{\lambda c} \quad (10)$$

Бұл теңдікті ψ арқылы жазсақ:

$$m = \frac{\psi}{\lambda} \quad (10A)$$

Кесте 5. Электромагниттік сәуле фотонының массасын бөлшектің жиілігі арқылы анықтау нәтижелері

Электромагниттік сәулелердің бөлігі (фотоны)	Электромагниттік сәулелер фотондарының массасы: $m = \frac{\psi\nu}{c}$ (кг)
Радиотолқындар фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42} \cdot 3 \cdot 10^7}{3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^{-43}$
Инфрақызыл сәулелер фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42} \cdot 2 \cdot 10^{13}}{3 \cdot 10^8} = 1,3 \cdot 10^{-37}$
Көрінетін жарық фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42} \cdot 4 \cdot 10^{14}}{3 \cdot 10^8} = 2,7 \cdot 10^{-36}$
Ультракүлгін сәулелер фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42} \cdot 6 \cdot 10^{15}}{3 \cdot 10^8} = 4 \cdot 10^{-35}$
α -сәулелер фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42} \cdot 3 \cdot 10^{16}}{3 \cdot 10^8} = 2 \cdot 10^{-34}$
Рентген сәулелер фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42} \cdot 2 \cdot 10^{19}}{3 \cdot 10^8} = 1,3 \cdot 10^{-31}$

6-кестеде электромагниттік сәулелер фотондарының массаларын (10A)-формуласымен есептеудің нәтижелері берілген. (9)-өрнектен фотонның массасы тербеліс жиілігіне тура тәуелді болатынын байқауға болады, яғни жиілігі көп (периоды аз) фотондардың массасы үлкен болады.

Кесте 6. Электромагниттік сәуле фотонының массасын бөлшектің толқын ұзындығы арқылы анықтау нәтижелері

Электромагниттік сәулелердің бөлігі (фотоны)	Электромагниттік сәулелер фотондарының массасы : $m = \frac{\psi}{\lambda}$ (кг)
Радиотолқындар фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42}}{10} = 2 \cdot 10^{-43}$
Инфрақызыл сәулелер фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42}}{15 \cdot 10^{-6}} = 1,3 \cdot 10^{-37}$
Көрінетін жарық фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42}}{7,5 \cdot 10^{-7}} = 2,7 \cdot 10^{-36}$
Ультракүлгін сәулелер фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42}}{5 \cdot 10^{-8}} = 4 \cdot 10^{-35}$
α -сәулелер фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42}}{10 \cdot 10^{-9}} = 2 \cdot 10^{-34}$
Рентген сәулелер фотоны	$m = \frac{2 \cdot 10^{-42}}{15 \cdot 10^{-12}} = 1,3 \cdot 10^{-31}$

Ал (10А)-қатынасында фотонның массасы толқын ұзындығына кері тәуелді болады, яғни қысқа толқынды (λ аз) фотондардың массасы көп, ал ұзын толқынды (λ көп) фотондардың массасы аз болып келеді. Сонымен, фотонның бөлшектік қасиетіне жауапты P , E , m және c параметрлерінің өзара байланысын көрсететін теңдіктер жүйесін тағы бір жазып өтейік:

$$E = mc^2, \quad E = P \cdot c, \quad E = P \cdot c, \quad P = mc, \quad c = \lambda \nu$$

Осыған дейін біз бұл параметрлердің толқындық параметрлер (ν мен λ) арқылы анықталуын қарастырдық. Ендігі жерде біз кері байланыстың іске асырылуына тоқталмақпыз.

Нақты айтар болсақ, фотонның толқындық қасиеттеріне жауапты ν және λ шамалары P , E , m және c параметрлері арқылы қалай анықталатынын көрсетеміз. (2)-теңдіктен

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad \nu = \frac{c}{\lambda}$$

(3А)-теңдіктен: $\nu = \frac{E}{h}$, ал (4А)-теңдігінен: $\lambda = \frac{\theta}{E}$. (7А)-өрнегінен: $\nu = \frac{P}{\psi}$, ал (8)-

формуладан: $\lambda = \frac{h}{P}$. (9А)-теңдігінен:

$$\nu = \frac{mc}{\psi}$$

(10А)-теңдігінен:

$$\lambda = \frac{\psi}{m}$$

Осы келтірілген қатынастар 7-кестеде жүйеленіп көрсетілген.

Кесте 7. Фотонның корпускулалық және толқындық параметрлерінің арасындағы байланыстарды көрсететін қатынастар

	ν	λ	m	P	E
E	$h\nu$	$\frac{\theta}{\lambda}$	mc^2	Pc	
P	$\psi\nu$	$\frac{h}{\lambda}$	mc		$\frac{E}{c}$
m	$\frac{\psi\nu}{c}$	$\frac{\psi}{\lambda}$		$\frac{P}{c}$	$\frac{E}{c^2}$
ν		$\frac{c}{\lambda}$	$\frac{mc}{\psi}$	$\frac{P}{\psi}$	$\frac{E}{h}$
λ	$\frac{c}{\nu}$		$\frac{\psi}{m}$	$\frac{h}{P}$	$\frac{\theta}{E}$

Дискуссия

Осы кезге дейін өзектілігін жоймаған кванттық-механикалық жүйелердің қос қасиеттілігін ашып көрсететін математикалық аппаратта Планк тұрақтысы мен жарық жылдамдығы бір мезгілде қолданылып келді. Практикалық есептеулер кезінде олардың әрқайсысының сан мәні жеке-жеке қойылатын. Осы зерттеуімізде олардың көбейтіндісі мен қатынасы жаңа бір тұрақтыларға айналып, есептеу жұмыстарын жеңілдетуге мүмкіндік жасалды. Осы жаңа тұрақтылар арқылы фотонның бөлшектік және толқындық қасиеттерін сипаттайтын заңдылықтар да жаңа, әрі ықшамды сипатқа енді. Бұл айтылғандар кванттық теорияның математикалық аппаратын ұтымды қолдануға жағдай жасайды.

Қорытынды

Бөлшектік-толқындық принциптің классикалық үлгісі тұрғысынан қарағанда жарықты өздерін классикалық электромагниттік толқындар сияқты сезінетін бөлшектер (фотондар) ағыны деуге болады. Дифракция және интерференция құбылыстарында жарық толқындық қасиет көрсетеді. Жалғыз фотонның өзі қосарланған саңылаудан өткенде экраннан интерференциялық бейнені көруге болады, бұл жағдай Максвелл теңдеулері арқылы анықталады. Егер фотонды өзінің толқын ұзындығынан әлде қайда аз болатын нысандар (мысалы атом ядросы) шығаратын (жұтатын) болса, онда оны бөлшек ретінде қарастыруға болады. Электромагниттік сәуленің толқын ұзындығы неғұрлым азайған сайын фотонның энергиясы мен импульсі соғұрлым көбейе түседі де ((4),(8)) бұл сәуленің бөлшектік қасиетін байқау қиындай береді.

Пайдаланылған дереккөздер тізімі

- [1] Stephane A., Florence B. *Electron Mass Predicted From Substructure Stability in Electrodynamical Model* // *Frontiers in Physics*. – 2020. – 8. DOI 10.3389/fphy. 2020.00213
- [2] Ольчак А.С. *О связи квантовой неопределенности и классических сил.* // *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2021. № 6. С. 505-508. <https://doi.org/10.56304/S2304487X21060079>
- [3] Давыдов А.П., Злыднева Т.П. *Интерференция электромагнитных волн с точки зрения волновой функции фотона в координатном представлении.* // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2018. № 8. С. 27-40. DOI: 10.18127/j15604128-201808-04
- [4] Белинский А.В. *Квантовая неопределенность и контрпример нелокального классического "реализма".* // *Оптика и спектроскопия*. 2017. № 3. С. 393-399. DOI: 10.7868/S0030403417090070
- [5] Лошак Ж. *Геометризация физики.* – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2019. – 280 с.

[6] Лантухов А.И. Электродинамика фотона и его структура как сгустка одного из многих возможных состояний электромагнитного поля. // Журнал технической физики. 2017. № 10. С. 1466-1474. <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.10.44988.2204>

[7] Журавлев В.М. Принцип материальности пространства и фундаментальные поля. // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2020. № 3. С. 37-57. DOI: 10.17238/issn2226-8812.2020.3.37-57

[8] Krasovsky V.L. Calculation of the electron distribution function in a weakly ionized plasma in an electric field / V. L. Krasovsky // Doklady Physics. – 2020. – 65. – No. 4. – P. 136-141. doi:10.1134/s1028335820040072

[9] Лукашевия С.А., Садовский А.А. Определение фундаментальных понятий физики через законы. // Эпохи науки. 2020. № 22. С. 56–61. DOI 10.24411/2409–3203–2020–12274.

[10] Карканица И.А. Фотон как основа материального мира. // General question of world science. 2017. С. 5-20. DOI:10.18411/GQ-30-11-2017-01

References

[1] Stephane, A. (2020) Electron Mass Predicted From Substructure Stability in Electrodinamical Model. *Frontiers in Physics*. № 8. DOI 10.3389/fphy. 2020.00213

[2] Ol'chak A.S. (2021) O svyazi kvantovoj neopredelennosti i klassicheskikh sil [On the connection between quantum uncertainty and classical forces]. *Vestnik nacional'nogo issledovatel'skogo jadernogo universiteta Moskovskij inzhenerno-fizicheskij institut*. № 6, 505-508. (In Russian) <https://doi.org/10.56304/S2304487X21060079>

[3] Davydov A.P., Zlydneva T.P. (2018) Interferenciya jelektromagnitnyh voln s tochki zrenija volnovoju funkcii fotona v koordinatnom predstavlenii [Interference of electromagnetic waves from the point of view of the photon wave function in the coordinate representation]. *Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy*. №8, 27-40. (In Russian) DOI: 10.18127/j15604128-201808-04

[4] Belinskij A.V. (2017) Kvantovaja neopredelennost' i kontrprimer nelokal'nogo klassicheskogo "realizma" [Quantum uncertainty and a counterexample of non-local classical "realism"]. *Optika i spektroskopija*. №3, 393-399. (In Russian) DOI: 10.7868/S0030403417090070

[5] Loshak Zh. (2019) Geometrizacion fiziki [Geometrization of physics]. M.: Izhevsk: NIC «Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika», 280. (In Russian)

[6] Laptuhov A.I. (2017) Jelektrodinamika fotona i ego struktura kak sgustka odnogo iz mnogih vozmozhnyh sostojanij jelektromagnitnogo polja [The electrodynamics of a photon and its structure as a cluster of one of the many possible states of the electromagnetic field]. *Zhurnal tehnicheckoj fiziki*. № 10, 1466-1474. (In Russian) <https://doi.org/10.21883/JTF.2017.10.44988.2204>

[7] Zhuravlev V.M. (2020) Princip material'nosti prostranstva i fundamental'nye polja [The principle of the materiality of space and fundamental fields]. *Prostranstvo, vremja i fundamental'nye vzaimodejstvija*. № 3, 37-57. (In Russian) DOI: 10.17238/issn2226-8812.2020.3.37-57

[8] Krasovsky V.L. (2020). Calculation of the electron distribution function in a weakly ionized plasma in an electric field. *Doklady Physics*, 65, 4, 136-141. doi:10.1134/s1028335820040072

[9] Lukashevija S.A., Sadovskij A.A. (2020) Opredelenie fundamental'nyh ponjatij fiziki cherez zakony [Defining fundamental concepts of physics through laws]. *Jepohi nauki*, № 22, 56–61. DOI 10.24411/2409–3203–2020–12274. (in Russian)

[10] Karkanica I.A. (2017) Foton kak osnova material'nogo mira [The photon as the basis of the material world.]. // General question of world science. 5-20. DOI:10.18411/GQ-30-11-2017-01 (in Russian)