

Статистическа интерпретация на квантовата механика*

Макс БОРН

Нобелова лекция, 11 декември 1954 г.

Превод: Иля Петров

Софийски Университет Св. Климент Охридски,
Физически факултет, София 1164, бул. Джеймс Баучър 5

Работата, за която имам честта да бъда удостоен с Нобеловата награда за 1954 г., не е за откритие, а по-скоро за поставяне на основите на нов начин за осмисляне на природните явления. Тovo ново мислене е навлязло до такава степен в експерименталната и теоретичната физика, че е трудно да се каже нещо повече от това, което е вече казано за него. Все пак има няколко въпроса, които бих искал да дискутирам в тази специална за мен лекция. Първият е приносът на школата в Гьотинген, която ръководех по онова време (1926-1927), за излизане от интелектуалната криза, в която бе изпаднала науката след откриването на кванта на действието от Планк през 1900 г. Днес физиката е в подобна криза – нямам предвид обвързването ѝ с политиката и икономиката в резултат на овладяването на една нова и мощна Сила, а логическите и епистемологичните въпроси, които постави ядрената физика. В такива времена е, може би добре, да си припомним какво е ставало в подобни ситуации, особено ако събитията не са били лишени от известен драматизъм.

Вторият пункт, който искам да изясня, е: когато казах, че физиците възприеха нашите идеи и интерпретация, не бях изцяло коректен. Има доста важни изключения, особено между самите учени, допринесли най-много за създаването на квантовата теория. Планк, например, остана скептик до края на живота си. Айнщайн, Дьо Бройл и Шрьодингер постоянно посочваха неудовлетворителните страни на квантовата механика и настояваха за връщане към постулатите на класическата Нютонова физика, предлагайки как това може да се направи без да се противоречи на експерименталните факти. Подобни сериозни мнения не може да бъдат игнорирани. Нилс Бор положи огромни усилия да обор-

*С настоящата работа редакцията на списанието открива нова рубрика. Целта е да са запознае аудиторията с идеите и вижданията за развитието на физиката на учените, трасирали хоризонта на съвременната физика. За да се запази автентичността, предлаганите материали са преводни на статии или лекции, които се публикуват за първи път на български език.

ва възраженията. Аз също съм разсъждавал по тези въпроси и мисля, че също съм допринесъл за изясняването им. Темата е обща за физиката и философията, така че в моята лекция по физика ще включва елементи от историята и философията, за което ви моля за извинение.

Преди всичко ще обясня как възникна квантовата механика и статистическата ѝ интерпретация. В началото на второто десетилетие мисля, че всеки физик бе убеден във верността на квантовата хипотеза. Според теорията на Планк за осцилаторни процеси (например за светлинни вълни) с дадена честота ν енергията се проявява чрез крайни кванти с големина $h\nu$. Огромен брой експерименти бяха обяснени по този начин и те винаги възпроизвеждаха една съща стойност за константата на Планк h . От друга страна, твърдението на Айнщайн, че светлинният квант притежава импулс $h\nu/c$ (тук c е скоростта на светлината) бе също експериментално потвърдено (ефект на Комптон). Това означаваше възраждане на корпускуларната теория за светлината за определена група явления. Вълновата теория оставаше приложима за другите процеси. Постепенно физиците привикнаха с тази *дуалност* и се научиха как да я прилагат.

През 1913 г. Нилс Бор реши загадката на линейните спектри с помощта на квантовата теория и обясни в общи линии удивителната стабилност на атомите, структурата на електронните им обвивки и периодичната таблица на химическите елементи. Най-важното предположение в неговото учение се състоеше в следното: една атомна система не може да съществува във всички възможни според механиката състояния – формиращи континуум, а в набор дискретни “стационарни” състояния. При преминаването от едно в друго състояние разликата в енергиите $E_m - E_n$ се излъчва или поглъща във вид на светлинен квант $h\nu_{mn}$ (в зависимост от това, дали E_m е по-голямо или по-малко от E_n). Това е фундаменталният закон на спектроскопията, открит няколко години по-рано от В. Риц (W. Ritz), но интерпретиран в термини на енергия. Картината става ясна, ако енергетичните нива на стационарните състояния се напишат два пъти – хоризонтално и вертикално. Получава се квадратен масив

	E_1	E_2	E_3	\dots
E_1	11	12	13	\dots
E_2	21	22	23	\dots
E_3	31	32	33	\dots
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

в който елементите по диагонала съответстват на състояния, а недиагоналните – на преходи.

На Бор му бе ясно, че така формулираният закон противоречи на

принципите на механиката и следователно използването на енергетичното представяне е проблематично в този смисъл. Той обоснова този смел синтез на старо и ново с неговия принцип на съответствие. Смишълът му се изразява в очевидното изискване – обикновената класическа механика остава приложима с голяма степен на достоверност в граничния случай, когато номерата на стационарните състояния – така наречените квантови числа, са много големи (с други думи, много надясно и много надолу на горната схема) и разликите в енергията са относително малки – на практика енергията става отново непрекъснатата величина.

През следващите десет години теоретичната физика бе съсредоточена върху тази концепция. Задачата бе: да се опише хармоничното трептене, което, освен честота, има и амплитуда, т.е. на всеки преход трябва да се съпостави и съответна амплитуда (интензитет). Въпросът е как да я получим на базата на принципа на съответствието. Това означаваше да намерим нещо, което е неизвестно, ползвайки информацията, получена в граничния случай. Значителен успех бе постигнат от самия Бор, както и от Крамерс, Зомерфелд, Епстайн и много други. Но решителната стъпка бе направена от Епстайн, който предложи нов извод на радиационната формула на Планк и показа ясно, че класическото разбиране за интензитета на лъчението трябва да се замени със статистическата идея за *вероятност на даден преход*. Към всеки елемент от нашата схема трябва да се добави (заедно с честотата $\nu_{mn} = (E_n - E_m)/h$) определена вероятност за преход, описваща излъчване или поглъщане.

В Гьотинген ние също участвахме в разработването на неизвестната механика на атома на базата на експерименталните резултати. Все ясно се отчетваха логическите трудности. Изследванията по разсейване и дисперсия на светлината показаха, че идеята на Айнщайн за вероятността за преход като мярка на осцилаторната сила не работи в този случай, а концепцията, че на всеки преход трябва да се припише амплитуда на трептене, стана неизбежна. В тази връзка си струва да споменем работите на Ладенбург [1], Крамерс [2], Хайзенберг [3], Йордан и моя милост [4]. Изкуството да се отгатнат верните формули, отличаващи се от класическите, но свеждащи се до тях в граничния случай, бе доведено до перфектност. Една моя статия, в която мисля за първи път бе въведено понятието *квантова механика* (в заглавието ѝ), съдържа твърде неясна формула (валидна и днес) за взаимното взаимодействие в атомните системи.

Хайзенберг, който по това време бе мой асистент, сложи неочаквано край на този период [5]. Той разряза Гордиевия възел с помощта на философски принцип, като замени догадките с математично правило. Той

постулира, че идеи и представи, които не съответстват на реално наблюдаеми факти, не трябва да се използват в теорията. Айнщайн приложи същия подход при създаването на теорията на относителността, отказвайки се от концепциите за абсолютност на скоростта на движещо се тяло и едновременността на събития, случили се в различни пространствени точки. Хайзенберг отхвърли картината на електронните орбити с определени радиуси и периоди, тъй като тези характеристики са ненаблюдаеми, и декларира, че теорията трябва да се гради с помощта на гореописаните масиви. Вместо да описва движението чрез определяне на дадена координата като функция на времето, $x(t)$, трябва да се дефинира масив от амплитуди на преход x_{mn} . За мен важното в неговата работа бе изискването да се дефинира правилото, според което от даден масив

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots \\ x_{21} & x_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

се получава масив на квадратите на елементите

$$\begin{bmatrix} (x^2)_{11} & (x^2)_{12} & \cdots \\ (x^2)_{21} & (x^2)_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

(или по-общо казано, *законът за умножение* на подобни масиви).

След като проучи известните примери, решени по метода на догадките, той откри правилото и го приложи успешно за прости системи, такива като хармоничен и анхармоничен осцилатор.

Това стана през лятото на 1925 г. Хайзенберг, страдащ от сенна хрема, си взе отпуск, за да се лекува на морето, и ми даде статията си да я публикувам, ако сметна, че си заслужава.

Много бързо оцених идеята и изпратих манускрипта в *Zeitschrift für Physik*. Не можех да мисля за нищо друго освен за правилото за умножение на Хайзенберг и след седмица анализи и опити изведнъж се сетих за една алгебрична теория, на която ме бе учил проф. Розанес – моят учител от Бреслау. Подобни квадратни масиви са добре познати на математиците и заедно със специфичното им правило за умножение се наричат матрици. Приложих това правило към квантовото условие на Хайзенберг и открих, че то води до същите диагонални членове. Беше лесно да предположа какви трябва да са останалите – нули; и пред очите ми изплува формулата

$$pq - qp = h/2\pi i .$$

Това означаваше, че координатите q и импулсите p не могат да се представят с числени стойности, а със символи, чието произведение зависи от реда на умножение, т.е. те са “некомутиращи”.

Бях толкова възбуден от резултата – както моряк, който след дълго плаване вижда земя на хоризонта – и съжалявах, че Хайзенберг не е с мен. Бях убеден, че сме тръгнали по верния път. Все пак повечето бе само интуитивно усещане, в частност изчезването на недиагоналните елементи в горенаписания израз. За решаването на задачата ми помогна моят ученик Паскал Йордан и след няколко дена ние успяхме да покажем, че интуицията ми не ме е подвела. Съвместната ни статия с Йордан [6] съдържа най-важните принципи на квантовата механика, включително разширението ѝ към електродинамиката. Последва период на трескава работа, малко затруднен от отсъствието на Хайзенберг. Имаше размяна на чудесни писма. За съжаление моят принос е безвъзвратно загубен поради политическия хаос. Резултатът бе статия от три автора [7], която формализира изследванията в строг вид. Но преди да излезе от печат, дойде *първата драматична изненада* – статията на Пол Дирак по същата тема [8]. Вдъхновен от лекцията на Хайзенберг в Кеймбридж, той бе получил подобни на нашите резултати с изключение на това, че не се позоваваше на известната на математиците теория на матриците, а бе открил инструмента за работа с некомутиращи символи самостоятелно.

Първото нетривиално и физически значимо приложение на квантовата механика бе направено скоро след това от В. Паули [9], който пресметна стойностите на енергията на стационарните състояния за *водороден атом* с матричния метод и получи пълно съвпадение с формулите на Бор. От този момент нямаше вече никакви съмнения, че теорията е коректна.

Но какъв бе смисълът на този формализъм изобщо не бе ясно. Математиката, както често се случва, е по-мъдра от интерпретацията. Докато ние все още дискутирахме този момент, дойде *втората драматична изненада* – отпечатването на прочутите статии на Шрьодингер [10]. Той бе избрал доста по-различен подход, основаващ се на работите на Дьо Бройл [11]. Няколко години по-рано Дьо Бройл бе изказал смелото твърдение, подкрепено с брилянтен теоретичен анализ, че дуалността вълна-корпускула – добре позната на физиците при светлината, е валидна и за електроните. Към всеки свободно движещ се електрон се добавя плоска вълна с дължина на вълната, определена от константата на Планк и масата. В Гьотинген тази интересна дисертация бе добре позната. Един ден през 1925 г. получих писмо от К.Дж. Дейвисън, съобщаващ ми за странни резултати при отражение на електрони от метална повър-

хност. Аз и колегата ми от експерименталния отдел Джеймс Франк почти веднага заподозряхме, че кривите на Дейвисън са спектри на кристалната решетка на електронните вълни на Дьо Бройл и ние наредихме на един от нашите ученици – Елзасер, да проучи въпроса. Неговата работа [12] бе първото предварително потвърждение на идеята на Дьо Бройл, която по-късно бе доказана със систематичните експерименти, проведени от Дейвисън и Джърмър [13] и независимо от тях от Дж.П. Томсън [14].

Запознаването с подхода на Дьо Бройл обаче не ни накара да се опитаме да го приложим към електронната структура на атома. Това направи Шрьодингер. Той обобщи вълновото уравнение на Дьо Бройл, което се отнасяше за свободно движение, за случай, когато се отчита действието на сила, и даде точна формулировка на изказаните от Дьо Бройл *допълнителни условия* за вълновата функция ψ , т.е., че тя трябва да е еднозначна в пространството и времето. Той успя също да получи стационарните състояния на водородния атом от онези монохроматични решения на неговото вълново уравнение, които се нулират на безкрайност.

За кратко време в началото на 1926 г. изглеждаше като че ли има две самодостатъчни, но твърде различни системи за обяснение: матричната механика и вълновата механика. Скоро обаче самият Шрьодингер показа, че те са напълно еквивалентни.

Вълновата механика се радаваше на много по-широк прием в сравнение с гьотингенската или кеймбриджската версия на квантовата механика. Тя оперира с вълнова функция ψ , която в случай на една частица може да се представи графично в пространството и, освен това, се използва математическият апарат на частните диференциални уравнения, с който физиците са свикнали да работят. Шрьодингер се надяваше, че неговата вълнова теория ще позволи да се върнем към класическата детерминистична физика. Той предложи (а наскоро и обнови апела [15]) да се откажем от представянето с частици и вместо да говорим за електроните като за частици да ги разглеждаме като плътност на разпределение $|\psi|^2$ (или плътност на заряда $e|\psi|^2$).

За нас в Гьотинген подобна интерпретация изглеждаше неприемлива, отчитайки здраво установените експериментални факти. По онова време вече можехме да броим частици посредством сцинтилациите или с Гайгеров брояч или да фотографираме техните траектории с Уилсонова камера.

Беше ми ясно, че не е възможно да постигнем коректна интерпретация на ψ -функцията, когато разглеждаме свързани електрони. И още към края на 1925 г. се опитах да обобща матричния подход, който оче-

видно описваше само осцилаторни процеси, така, че да стане приложим и за аperiодичните процеси. По това време бях гост на Масачузетския технологичен институт (МИТ) в САЩ и там в лицето на Норберт Винер открих чудесен сътрудник. В общата ни работа [16] ние заменихме матрицата с по-общото понятие оператор и успяхме да опишем аperiодични процеси. Независимо от това ние отново пропуснахме точната формулировка. Това направи Шрьодингер и аз веднага възприех неговия метод, тъй като той водеше към правилното разбиране на ψ -функцията. И пак една идея на Айнщайн ми помогна. Той бе опитал да направи дуалността – частици (светлинни кванти или фотони) и вълни – по-разбираема, интерпретирайки квадрата на амплитудата на оптичната вълна като плътност на вероятността за фотон. Тази идея може да се приложи директно за ψ -функцията: $|\psi|^2$ трябва да е плътността на вероятността за електрон (или друг тип частица). Лесно е да каже, но как да се докаже?

Най-обещаващи изглеждаха процесите при сбъскването с атоми. Поток електрони, представен като налитаща вълна, с известен интензитет (например $|\psi|^2$) се удря в някакво препятствие, да речем атом. По същия начин, по който вълна, породена от кораб, поражда вторична кръгова вълна, когато срещне колоната на кея, налитащата електронна вълна частично се преобразува във вторична сферична вълна с амплитуда ψ , различна в различните направления. На голямо разстояние от центъра на разсейване квадратът на амплитудата на тази вълна определя вероятността за расейване в дадена посока. Нещо повече, ако расейващият атом може да бъде в различни стационарни състояния, вълновото уравнение на Шрьодингер дава автоматично вероятността за възбуждане в тези състояния, т.е. електронът се расейва, като губи енергия, или, с други думи, расейването е нееластично. Така бихме могли теоретично да обосновем [17] допусканията в теорията на Бор, експериментално потвърдена от Франк и Херц. Скоро Венцел [18] успя на базата на моята теория да изведе прочутата формула на Ръдърфорд за расейване на α -частици.

Все пак една статия на Хайзенберг [19], съдържаща неговото знаменито неравенство за неопределеността, допринесе много повече за бързото приемане на статистическата интерпретация на ψ -функцията. Именно чрез тази статия стана ясно, че новата концепция има революционен характер. Тя показва, че трябва да се откажем не само от детерминизма на класическата физика, но и от наивната представа да гледаме на частиците в атомната физика като на пещчинки. Във всеки момент пещчинката има строго определено положение и скорост. Но това не е вярно за елек-

трона. Колкото по-точно определяме неговото положение, толкова по-малка става възможността да оценим скоростта му и обратно. Ще се върна на този проблем отново, когато ще го дискутирам в по-широк смисъл. Сега, първо бих искал да кажа няколко думи за теорията на разсейването. Математическото приближение, което ползвах, бе доста примитивно и скоро то бе значително подобро. От работите, чийто брой нарасна толкова много, че самият аз не мога вече всичко да следя, искам да отбележа само няколко от пионерите, на които теорията дължи много за своето развитие: Факсен (Faxén) от Швеция и Холтсмарк (Holtmark) от Норвегия [20], Бете (Bethe) от Германия [21], Мот (Mott) и Маси (Massey) от Англия [22].

Днес теорията на разсейването е отделна наука със собствени големи и солидни учебници, която се развива изцяло без мое участие. Разбира се, всички съвременни дисциплини на физиката – квантовата електродинамика, мезонната теория, теорията на ядрото, космическите лъчи, елементарните частици и техните трансформации, в крайна сметка са подвластни на тези идеи и, когато ги обсъждаме, не може да им поставяме граници.

Бих искал също отбележа, че през 1926 и 1927 г. заедно с руския физик Фок пробвах и още един подход в подкрепа на статистическата концепция на квантовата механика [23]. В посочената работа има глава, в която се предполага функция на Шрьодингер $\psi(x)$, но тя не се разглежда като функция в пространството, а като функция ψ_n от дискретен индекс $n = 1, 2, \dots$, номериращ стационарните състояния. Ако на системата действа сила, която зависи от времето, ψ_n стават също време-зависими, а $|\psi_n(t)|^2$ дава вероятността за състояние n в момента t . От някакво начално разпределение, съдържащо само едно състояние, се получават вероятностите за преход, чиито свойства могат да се изследват. В частност, това, от което се интересувах по онова време, бе какво става в адиабатно приближение, т.е. при много бавно променящо се действие. Успяхме да покажем, както се и очакваше, че вероятността за преход става още по-малка. Теорията на вероятностите за преход бе разработена по независим път също от Дирак. Може да се каже, че цялата атомна и ядрена физика се основават на тази система идеи, особено в елегантната форма, предложена от Дирак [24]. Почти всички експерименти водят до оценки за относителните честоти на събитията, дори когато те са скрити под такива термини като сечения или други подобни.

Как стана така, че велики учени като Айнщайн, Шрьодингер и Дьо Бройл са недоволни от съществуващото положение? Рабира се, всички тези възражения се повдигат не срещу верността на формулите, а сре-

щу интерпретацията им. Необходимо е да се разграничат двете тясно свързани гледни точки: въпросът за детерминизма и въпросът за физическата реалност.

Нютоновата механика е детерминистична в следния смисъл:

Ако началното състояние на дадена система (положенията и скоростите на всички частици) е известно с абсолютна точност, състоянието ѝ в произволен друг момент може да се пресметне съгласно със законите на механиката. Останалите клонове на физиката са изградени, следвайки този модел. Механичният детерминизъм постепенно се е превърнал в нещо като вяра: светът е машина, автомат. Доколкото ми е известно, подобно мислене няма предшественици в древната или в средновековната философия. То е резултат на небивалия успех на Нютоновата механика, особено в астрономията. През 19-ти век тя става основен философски принцип за всички точни науки. Питал съм се дали това е наистина оправдано. Може ли да се направят абсолютно точни предсказания за всеки момент на базата на класическите уравнения за движение? Лесно се вижда – с прости примери, че това е вярно единствено в случай, когато предполагаме, че е възможно абсолютно точно да измерим положението, скоростта или други величини. Да си представим една частица, движеща се без триене по права линия между две точки (стени), от които тя се отразява еластично. Частицата се движи напред-назад с постоянна скорост, равна на началната ѝ скорост v_0 , и може точно да се каже къде се намира в даден момент, ако скоростта v_0 е известна с абсолютна точност. Но, ако допуснем малка неточност Δv_0 , неточността, с която предсказваме положението ѝ в момента t , е $t\Delta v_0$, която нараства с t . Ако почакаме достатъчно дълго – до момента $t_c = l/\Delta v_0$, където l е разстоянието между стените, неточността Δx ще стане равна на цялото разстояние l . Няма да може да предскажем нищо за положението на частицата за кой да е момент време след t_c . Следователно детерминизмът се трансформира в индетерминизъм, ако имаме и най-малката грешка в данните за скоростта. Има ли смисъл – аз имам предвид физичен смисъл, не метафизичен – да се говори за точни данни? Има ли смисъл в твърдението, че координатата $x = \pi$ cm, където $\pi = 3,1415\dots$ е познатото трансцендентно число, дефиниращо отношението на обиколката на дадена окръжност спрямо нейния радиус? Като математическо средство дефиницията за реално число, представено като безкрайна десетична дроб е изключително важна и ползотворна. Като мярка във физиката е безмислица. Ако вземем π с точност до 20-ия или 25-ия знак, двете числа са неразличими както едно от друго, така и от истинската стойност на π , получена чрез измерване. Следвайки евристичният принцип, използван от Айн-

щайн в теорията на относителността и Хайзенберг в квантовата механика, понятие, което отговаря на невъзможно наблюдение, трябва да се елиминира от физиката. Принципът е приложим без никакви трудности и към нашия случай. Достатъчно е само да заменим твърдения от типа $x = \pi$ cm с: вероятностното разпределение на стойностите x има остър максимум при $x = \pi$ cm; и, ако искаме да бъдем още по-акуратни, да добавим с такава и такава дисперсия. Накратко, обикновената механика трябва също да се формулира статистически. Аз се занимавам с този проблем отскоро, но установих, че той е решим без големи трудности. Тук не му е мястото да навлизам по-дълбоко в материята. Искам само да кажа, че детерминизмът на класическата физика се оказва илюзия, породена от надценени математико-логически концепции. Той е идол, а не идеал за науката и следователно не може да се използва като възражение срещу съществено недетерминистичната интерпретация на квантовата механика.

Възражението, свързано с реалността, създава доста по-сериозни трудности. Понятието частица, т.е. песъчинка, явно съдържа разбирането, че тя е в определена позиция и има определено движение. Но според квантовата механика не е възможно едновременно да се определят положението и скоростта \dot{y} (по-точно импулсът, т.е. масата по скоростта) с произволна точност. Тук се крият два въпроса: какво ни пречи независимо от теоретичното твърдение да измерим двете величини с произволна точност, като подобряваме експеримента? Второ, ако това изискване е вярно, т.е., че подобен експеримент е неосъществим, то обосновано ли е да прилагаме към електрона понятието частица и свързаните с него разглеждания? Що се отнася до първия въпрос, ясно е, че, ако теорията е коректна, а ние имаме сериозни основания да вярваме в това, възражението, свързано с едновременното измерване на позиция и движение (както и на другите подобни двойки – т.нар. спрегнати величини) е в прерогативите на законите на самата квантова механика. И това наистина е така. Все пак нещата не са толкова прости. Самият Нилс Бор трябваше да преодолее доста трудности и хитри капани [25], разработвайки теория на измерването, за да изясни нещата и да отговори на най-префинените и лукави атаки от страна на Айнщайн, който непрекъснато измисляше нови и нови методи за измерване, чрез които положението и движението биха могли да се определят едновременно и точно. Стана ясно следното: за да се измерят координатите в пространството и моментите време, са необходими стабилни измервателни линии и часовници. От друга страна, за да се измерят импулси и енергии, са необходими уреди с подвижни части, които да абсорбират въздействието

на пробното тяло и да покажат големината на неговия импулс. Вземайки под внимание факта, че квантовата механика знае как да отчита взаимодействието на обекта с прибора, изглежда не съществува постановка, която да удовлетвори и двете изисквания едновременно. Следователно съществуват допълващи се, взаимно изключващи се експерименти, които само взети като цяло могат да обхванат всичко, което характеризира даден обект.

Днес за повечето физици тази идея за *допълнителност* е ключът за разбирането на квантовите процеси. Бор я обобщи и приложи към доста по-различни области на познанието, например за връзката между съзнание и мозък, за свободния избор и други фундаментални въпроси на философията. А сега стигам до последния въпрос: може ли да наречем обект, който не може да се опише с термините за място или движение по обичайния начин, нещо или частица? И, ако не, каква е действителността, за чието описание нашата теория бе създадена?

Отговорът вече не е от сферата на физиката, а принадлежи на философията и да се заема сериозно с него би означавало да отида далече над целите на тази лекция. От друга страна, вече съм писал за моето виждане по въпроса [26]. Тук само ще отбележа, че аз определено съм да се запази понятието частица. Естествено необходимо е да се предефинира смисълът му. За целта съществува добре разработен апарат, който в математиката е познат като трансформационни инварианти. Всеки обект има безброй характеристики. Самото разбиране за обект се изразява чрез запазването на тези характеристики. В този смисъл днешната понятийна система, в която частиците и вълните присъстват едновременно, трябва да се допълни и уточни.

Последните изследвания в ядрената физика и елементарните частици ни разкриват нови граници, зад които системата ни от понятия изглежда недостатъчна. Поуката, която трябва да извлечем от онова, което разказах за раждането на квантовата механика, е, че, за да получим удовлетворяваща ни теория, няма да е достатъчно само да се подобри математичният апарат, а по-скоро някъде в нашата доктрина е скрито необосновано от опита ни понятие, която трябва да отстраним, за да открием пътя.

Литература

- [1] R. Ladenburg, *Z. Physik* **4** (1921) 451; R. Ladenburg and F. Reiche, *Naturwiss.* **11** (1923) 584.
- [2] H.A. Kramers, *Nature* **113** (1924) 673.
- [3] H.A. Kramers and W. Heisenberg, *Z. Physik* **31** (1925) 681.

- [4] M. Born, *textit*Z. Physik **26** (1924) 379; M. Born and P. Jordan, *Z. Physik* **33** (1925) 479.
- [5] W. Heisenberg, *Z. Physik* **33** (1925) 879.
- [6] M. Born and P. Jordan, *Z. Physik* **34** (1925) 858.
- [7] M. Born, W. Heisenberg, and P. Jordan, *Z. Physik* **35** (1926) 557.
- [8] P.A.M. Dirac, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A 109** (1925) 642.
- [9] W. Pauli, *Z. Physik* **36** (1926) 336.
- [10] E. Schrödinger, *Ann. Physik* **79** (1926) 361, 489, 734; **80** (1926) 437; **81** (1926) 109.
- [11] L. de Broglie, *Thesis Paris* 1924; *Ann. Phys. (Paris)* **3** (1925) 22.
- [12] W. Elasser, *Naturwiss.* **13** (1925) 711.
- [13] C. J. Davisson and L. H. Germer, *Phys. Rev.* **30** (1927) 707.
- [14] G. P. Thomson and A. Reid, *Nature* **119** (1927) 890; G. P. Thomson, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A117** (1928) 600.
- [15] E. Schrödinger, *Brit. J. Phil. Sci.* **3** (1952) 109, 233.
- [16] M. Born and N. Wiener, *Z. Physik* **36** (1926) 174.
- [17] M. Born, *Z. Physik* **37** (1926) 863; **38** (1926) 803; *Göttinger Nachr. Math. Phys. Kl.* (1926) 146.
- [18] . G. Wentzel, *Z. Physik* **40** (1926) 590.
- [19] W. Heisenberg, *Z. Physik* **43** (1927) 172.
- [20] H. Faxén and J. Holtsmark, *Z. Physik* **45** (1927) 307.
- [21] H. Bethe, *Ann. Physik* **5** (1930) 325.
- [22] N. F. Mott, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A 124** (1929) 422, 425; *Proc. Cambridge Phil. Soc.* **25** (1929) 304.
- [23] M. Born, *Z. Physik* **40** (1926) 167; M. Born and V. Fock, *Z. Physik* **51** (1928) 165.
- [24] P. A. M. Dirac, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A 109** (1925) 642; **110** (1926) 561; **111** (1926) 281; **112** (26) 674.
- [25] N. Bohr, *Naturwiss.* **16** (1928) 245; **17** (1929) 483; **21** (1933) 13; “Kausalität und Komplementarität” (Causality and Complementarity), *Die Erkenntnis* **6** (1936) 293.
- [26] M. Born, *Phil. Quart.* **3** (1953) 134; *Physik. Bl.* **10** (1954) 49.

The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics

Max Born

The Nobel lecture given on December 11, 1954 is translated in Bulgarian.