

## Пол Дирак – най-чистата душа във физиката<sup>1</sup>

М. Бери

Всеки ден аз вървя по улицата, на която Пол Адриен Морис Дирак е живял като дете. Удоволствие е да имаш дори тази малка връзка с един от най-великите интелекти на 20. век. Пол Дирак е роден на 8 август 1902 г. в Бристол, 15 Monk Road в Bishopston и учи в близкото начално училище на Bishop Road. По-късно семейството се премества на Cotham Road, близо до университета на Бристол, и през 1914 г. младият Дирак учи в Cotham Grammar School.

Между 1918 г. и 1923 г. Дирак е студент в Бристолския университет – първоначално по електроинженерство, а после по приложна математика. Много по-късно той казва: «Аз дължа много на моето инженерско обучение, тъй като то ме научи да приемам приближенията. Преди това аз мислех, че...човек трябва да се занимава изцяло само с точни уравнения. След това обаче разбрах, че всички наши уравнения са само приближения по отношение на реалния свят. Ние трябва да се стремим към все по-голяма и по-голяма точност. И въпреки, че уравненията са приблизителни, те могат да бъдат красиви.»

Тъй като Дирак бе скромнен човек, наистина пословично скромнен, той не е добре известен извън средата на физиците. Тази ситуация обаче напоследък се променя. През 1995 г. бе открита посветена на него паметна плоча в Уестминстерското абатство в Лондон<sup>2</sup>, а през 1997 г. Institute of Physics Publishing нарече своята нова сграда Dirak House.

Поради това, че работите на Дирак са предимно математически, трудно е в една не специализирана статия като тази да се разкаже за неговите постижения. Веднъж той казва: «Огромната част от моята работа е просто игра с уравнения и наблюдаване какво те дават.»

### Ранни години

Когато Дирак отива в Кеймбридж през 1923 г., физиката на веществото в най-малки мащаби – по онова време това е физиката на атома, е в процес на ферментация. Повече от десетилетие е изминало, откак стана ясно, че старата механика на Нютон – “класическата механика”, както се нарича, е неприложима в микроскопичния свят. В частност изследванията на излъчената от атомите светлина показват, че някои величини, които в класическата механика могат да вземат произволни стойности, в действителност са ограничени до една съвкупност от специфични стойности: те се “квантуват”. Една такава величина е енергията на електроните в атома. Това бе странно и шокиращо. Представете си да ви твърдят, че когато колата ви се ускорява от 0 до 70 km/h, тя прави това чрез серия от скокове от една скорост към друга (със стъпка примерно от 0,001 km/h), като промеждутъчните стойности на скоростта просто не съществуват. Въпреки че това е безсмислено, изглежда, че резултатите от наблюденията изискват тъкмо такова тълкуване.

В своите първи опити за теоретично обяснение физиците опитват да намерят общи правила за налагане на тези ограничения върху класическата механика, т.е. правилата за квантуване. Изглеждаше, че за да се квантува, е необходимо първо да се установят онези величини, които не се променят, когато средата около системата се изменя бавно. Така например, ако бавно скъсяваме едно махало, и амплитудата, и честотата му се увеличават, но това става така, че отношението между неговата енергия

<sup>1</sup> Превод от *Physics World*, 1998 г. Статията е писана по повод 70 годишнината от публикуването на първата статия на Дирак за квантовата теория на електрона. (Бел. прев.)

<sup>2</sup> Тази паметна плоча е на пода току пред импозантния вертикален паметник на Нютон – място, запазено за най-великите представители на британската наука. (Бел. прев.)

и неговата честота остава постоянно. Тези правила дават резултат при простите атоми и молекули, но не и за по-сложните.

Дирак навлиза във физиката в края на този бароков период. Една от неговите първи публикации представлява опит за създаване на обща теория на тези не променящи се величини. Това е един деликатен проблем на класическата механика, който не е решен и до днес. Удивително е да се чете днес тази публикация. По своята математическа същност тя не прилича на нито една от по-късните работи на Дирак (така например той докарва нещата до тънката разлика между рационални и ирационални числа) и изпреварващо изобретява техники, развити от други хора десетилетия по-късно. (Казвам “изпреварващо”, защото доскоро тази статия на Дирак бе забравена.)

По това време положението в атомната физика напомня онова от края на 16. век, когато под напора на резултатите от по-точните наблюдения старата геоцентрична система трябва да се усъвършенства. Трудностите и на 16. век, и на 20. век бяха решени по един и същ начин: чрез пълна промяна на начина на мислене. С откриване на квантовата механика от Хайзенберг през 1925 г. в атомната физика този процес протича мигновено. Изглеждаше, че това напълно отхвърля класическата механика, въпреки че новата механика бе изградена така, че да осигури съгласие с познатия опит при явленията в макросвета. Старите правила на квантуване сега се получаваха автоматично, но от една особена математическа схема. Тя, например, включва действие умножение, при което резултатът зависи от реда на множителите. При нея излиза, че  $2$  по  $3$  е различно от  $3$  по  $2$ . Хайзенберг смята, че това е противно и незадоволително. Дирак не се съгласява и само няколко месеца след Хайзенберг публикува първата от серия статии, в които квантовата механика придобива формата, в която я използваме и днес.

Основната идея е, че за умножаваните обекти – за обектите, които представляват подлежащите на измерване променливи, трябва да си мислим като за операции. Един експеримент, разбира се, представлява операция, въпреки че резултатът от него може да бъде едно число. При тази интерпретация не е изненадващо, че има значение редът на операциите: всички знаят, че резултатът от обуването първо на чорапите и след това на обувките е различен от резултата, който бихме получили, ако първо обуюем обувките и след това – чорапите. Дирак намира единственото просто правила, по което  $a$ , умножено с  $b$ , се различава от  $b$ , умножено с  $a$ , от което следва цялата квантова механика.

Скоро бе намерена подобна унификация, която включва и начина, по който и Шрьодингер прави квантова механика. При него състоянието на една система се представя чрез една вълна, чиято амплитуда определя вероятността за различни възможни резултати от измервания върху системата. Поначало това изглежда напълно различно от схемата, използвана от Хайзенберг, но бързо бе осъзнато, че в действителност двете схеми само по различен начин представят Дираковите оператори. Това изглеждаше свръхестествено.

### Уравнението на Дирак

Макар и брилянтно – по думите на Айнщайн “най-перфектното от гледна точка на логиката представяне на квантовата механика” – всичко направено от Дирак до тук бе преформулирано на физика, която вече бе открита. Най-важният принос на Дирак идва няколко години по-късно, когато (все още в средата на своето трето десетилетие) той прави своето най-велико откритие.

Преди квантовата механика във физиката протече друга революция, когато Айнщайн през 1905 г. открива, че механиката на Нютон не дава правилни резултати,

когато скоростта на едно тяло доближава скоростта на светлината. За да бъде всичко последователно, времето не следва повече да се разглежда като абсолютно: понятията “преди” и “след”, които характеризират последователността на явленията във времето, трябва да играят в теорията същата роля, каквато играят понятията “наляво” – “надясно”, “напред” – “назад” и “нагоре” – “надолу” по отношение положението на телата в пространството. С други думи, времето трябва да се разглежда като четвърта координата, подобна на трите пространствени координати. Точно както ляво и дясно или напред и назад се променят, когато се завъртим, така и времето се оказва зависимо от другите три координати, когато се движим бързо.

Сега, през 20-те години на века, дойде квантовата механика, която показва друга област, в която Нютоновата механика не дава правилни резултати: в областта на микросвета. Тогава възникна въпросът: каква е физиката на частиците, които са едновременно и малки, и се движат бързо?

Това бе един практически въпрос: електроните в атомите са малки и се движат достатъчно бързо, за да доведат до забележими неточности в резултатите на новата квантова механика, която бе създадена така, че в случая на макроскопичните тела да преминава в механиката на Нютон, а не в механиката на Айнщайн. В началото учените опитват да създадат теория, съвместима със специалната теория на относителността, но не успяват да преодолеят техническите препятствия: по-специално опитите им водят до вероятности, които са отрицателни числа – нещо безсмислено, поне в обикновения смисъл на понятието вероятност. Въпросът бе сведен до това: кои са правилните видове квантови вълни, описващи електроните? И кое е вълновото уравнение, описващо динамиката на тези вълни, което, удовлетворявайки изискванията на теорията на относителността, дава разумни физични предсказания?

Дираковата конструкция на неговото вълново уравнение за електрона, публикувано в две статии в *Proceedings of the Royal Society* (Лондон) през февруари и март 1928 г., съдържа един от онези страхотни скокове на въображението, които съпровождат всички велики достижения на мисълта. Той показа, че най-простата вълна, която удовлетворява всички изисквания, се характеризира не с едно число, а притежава четири компоненти. На пръв поглед това изглежда като усложнение, особено за умовете, все още замаяни от необичайността на “обикновената” квантова механика. Четири компоненти! От къде на къде трябва Дираковата теория да се взема на сериозно?

Първо, и преди всичко за Дирак, логиката, довела до теорията, бе, макар и твърде сложна, в известен смисъл чаровно проста. Много по-късно, когато някой го попитал (както мнозина трябва да са правили това преди): “Как намерихте уравнението на Дирак?”, казват, че бил отговорил: “Намерих го прекрасно.”. второ, то е в съответствие с прецизните измервания на енергиите на излъчената от атомите светлина и в частност там, където те се разминават с резултатите от обикновената (нерелативистична) квантова механика.

Съществуват две допълнителни причини, поради които уравнението на Дирак господства като коректно описание на електроните. За да се разбере това, е необходимо да се осъзнае, че всяка велика физична теория, дава много повече, отколкото е вложено в нея, в смисъл, че наред с решаване на проблемите, довели до нейното конструиране, тя обяснява повече и предсказва нови неща. Преди уравнението на Дирак бе известно, че електронът притежава собствен механичен момент на въртене – спин. За всекидневните ни мащаби стойността на спина е малка, но е постоянна и играе основна роля при квантово-механичното обяснение на правилата на химията и на структурата на веществото. Спинът се разглеждаше като свойство на електрона, подобно на неговата маса и електричен заряд, чието съществуване трябва да се приеме

предварително, преди да се приложи квантовата механика. В уравнението на Дирак не е необходимо спинът да се внася предварително: той, заедно с магнетизма на електрона, възниква при решаването му като неизбежно свойство на един електрон, когато той се разглежда едновременно и като квантова, и като релативистична частица.

И така, спинът бе третата причина, поради която трябва да се върва на вдъхновеното от математични съображения уравнение на Дирак. Четвъртата се дължи на едно следствие на уравнението, което в началните няколко години изглежда загадъчно. Наличието на четири компоненти води до факта, че на всяко решение, в което електронът притежава положителна енергия, съответства и решение с отрицателна енергия. Постепенно става ясно, че тези допълнителни решения може да бъдат интерпретирани като съответстващи на една нова частица, подобна на електрона, но с положителен електричен заряд. Дирак нарича тази частица “антиелектрон”, но тя скоро стана известна като позитрон. Дирак предсказа, че ако електрон срещне позитрон, техните заряди ще се компенсират и двойката ще анихилира, като общата им маса ще се превърне в лъчение в съответствие с най-възхваляваната формула на Айнщайн  $E = mc^2$ . По този начин бе предсказано съществуването на антивеществото. Когато през 1932 г. Андерсън откри позитрона, безсмъртието на Дирак вече бе осигурено. Дирак и Шрьодингер споделят Нобеловата награда за физика за 1933 г.

Днес позитроните се използват всекидневно в медицината – чрез позитронната емисионна томография се сканират точка по точка области от мозъка, които могат да интересуват лекарите (например местата, където наркотиците са химически активни). Това става чрез детектиране на радиацията, получена при анихилиране на излъчени от радиоактивни ядра позитрони с намиращи се наблизо електрони.

### Други постижения

След като обясни спина, за Дирак бе естествено да опита да обясни електричния заряд и, в частност, мистериозния факт, че той се квантува: всички наблюдавани в природата заряди са целочислено кратни на заряда на електрона. В класическата електродинамика няма място за подобно нещо: зарядите би трябвало да имат произволни стойности.

През 1931 г. Дирак дава решение на този проблем в едно приложение на квантовата механика, което е толкова оригинално и поразяващо, че ни кара да го четем и днес. Той комбинира електричеството с магнетизма, като се връща към една идея от 18. век, според която всеки магнит е комбинация от северен и южен полюс (магнитни заряди), по същия начин, по който заредените тела съдържат положителни и отрицателни електрични заряди. Тази симетрия между електричеството и магнетизма бе загубена през 19. век след откритията на Оерстед, Ампер и Фарадей и след кулминацията, достигната в Максвеловия синтез на всички електромагнитни и – друг пример за получаване на повече от това, което сте вложили – оптични явления. На тяхно място се получи една по-проста схема: съществуват само електрични заряди, чието движение поражда магнетизъм (а заедно с това и движещи сили за голямата част от техническите постижения на нашата цивилизация). Липсата на изолирани магнитни полюси – магнитни монополи – бе вградена в класическата електродинамика, а също така и в квантовата механика, която израсна от нея.

Дирак си задава въпроса дали има начин магнитните монополи да се внесат в квантовата физика, без да се разруши всичко онова, което е създадено в нея, при предположение, че те съществуват. Той откри, че това може да бъде направено, но само при предположение, че големината на монопола (“магнитния заряд”) е свързана с големината на елементарния електричен заряд и ако и двата заряда са квантувани. Това решава първоначалния проблем: за самосъгласуваността на квантовата механика би

било достатъчно някъде във Вселената да съществува поне един монопол и този факт би довел до необходимостта електричният заряд да се квантува. Изводът е задължителен: за да обясним квантуването на електричния заряд, трябва да съществуват магнитни монополи. Заради това по-късно Паули нарича Дирак “Монополеон”.

Уви, магнитни монополи не са наблюдавани нито веднъж! Вероятно те не съществуват, а може би (и за това в теорията има намеци) положителните и отрицателните монополи са толкова тясно свързани помежду си, че не е било възможно да бъдат разделени. Много по-късно Дирак споменава тези теории като “просто едно разочарование”. Математиката обаче, която той разви, за да изследва монополите, комбинирайки геометрията с анализа, днес образува основата на модерните теории на фундаменталните частици.

Съществуват и още два плодотворни приноса към физиката от онези ранни години. Тук има място само за споменаването им. Дирак приложи квантовата механика за изследване начина, по който светлината взаимодейства с веществото. При това той осъзнава, че е необходимо да се квантуват не само частиците, но и самото електромагнитно поле и достига до първата последователна теория на фотоните (които бяха открити няколко десетилетия по-рано, в началото на квантовата механика). Това в края на краищата доведе до днешните процъфтяващи квантово-полеви теории.

Дирак показва също начина, по който трябва да се конструират квантовите вълни за система от много електрони, така че да се отчете интересният от философска гледна точка факт, че всеки две от тези частици са абсолютно еднакви и следователно не могат да бъдат различени по никакъв начин. Това доведе до окончателно разбиране на установените преди правила, чрез които квантовата механика обяснява Периодичната система на елементите и осигури основа за теорията на металите и за обясняване на процесите във вътрешността на звездите.

Като всички учени от най-високо равнище и Дирак не се бои да слезе от върховете на науката и да обсъжда много по-обикновени проблеми. Ето два примера. Огромната част от нашето познание се дължи на разсейването на светлината от веществото; в частност, на това се основава зрението ни. Дирак осъзнава, че квантовата симетрия между светлинните вълни и вълните на частиците предполага също така възможност частиците да се разсейват от светлина – една призрачна за онова време вероятност, на която той указва през 1933 г. в съвместна с Пьотр Капица статия. За пръв път подобно явление бе наблюдавано преди около десетина години и днес третирането на атоми с лазерни лъчи представлява една преуспяваща област на приложната квантова механика – факт, получил признание с присъждането на Нобелова награда за физика през 1997 г.

Втори пример е неговата дейност по време на Втората световна война. В проекта “Манхатън” по разработването на първата ядрена бомба бе необходимо да се разделят изотопите на урана. Един клас методи за постигане на това използва центробежни ефекти в потоци на флуиди. Дирак поставя теорията на тези техники на солидна основа и неговата работа в тази област се описва като наистина плодотворна.

### **Дираковски истории**

Нямам намерение да пиша за това, що за личност бе Дирак. Но аз трябва да спомена жанра “дираковски истории”. Той бе толкова необикновен в своята логичност и прецизност при взаимодействията си със света, както във, така и извън физиката, че историите за това са вече станали неотделими от него и са придобили свой собствен живот. Предполагам, че за историите има значение дали те са истински или фалшиви

(или, както Норман Майлер ги нарича, “фактоиди”), но за нас те имат по-дълбок резонанс, който надхвърля фактите.

Подобно на много учени, и Дирак бе известен с това, че спи по време на лекциите на другите, но често се буди и внезапно прави проникателни бележки. Веднъж, например, един лектор спира, почесва се по главата и обявява: “Тук се получи минус, но трябва да бъде плюс. Изглежда съм направил грешка в знака.” Дирак отвори едно око и казал: “Или нечетен брой грешки.”

Друг път по време на среща, провеждана в манастир, един от гостите отбелязал, че една от стаите е обитавана от духове: точно посред нощ в нея се появявал призрак. В своето единствено регистрирано публично изказано отношение към паранормалните явления Дирак попитал: “Среднощ по Гринуич или според лятното часово време?”

Написаното от Дирак се слави със своята яснота и простота. Всеки физик познава неговата книга *Принципи на квантовата механика*, която е толкова съвършено и пълно резюме на възгледите му, че през следващите години неговите лекции се свеждали просто до четене от нея.

Разказва се, че веднъж Дирак присъствал, когато Бор пишел научна статия – както обикновено, с много колебания и поправки. По едно време Бор спрял и казал: “Не знам как да завърша това изречение!”. Дирак отговорил: “Мен в училище са ме учили никога да не започвам едно изречение, ако не знам как да го завърша.”

Много физици говореха за Дирак с благоговение. Джон Уилър, изказвайки се за остротата на неговия интелект, казва: “Дирак не хвърля полусянка.” Нилс Бор отбелязва: “Измежду всички физици Дирак притежава най-чистата душа.” Говори се, че той е казал още “Дирак няма дори една обикновена кост в тялото си.”

Математикът Марк Кац дели гениите на два типа. Има обикновени гении, чиито приноси по принцип може да бъдат направени и от други хор, макар и с цената на необикновено големи усилия и с помощта на малка късмет. Има обаче и чародеи, чиито открития са така поразителни, толкова противоречащи на цялата човешка интуиция, че е трудно да си представим как някой друг би могъл да ги направи. Дирак бе чародей.