

Viktor Trkal
Padesát let kvantové fyziky
Půl století moderního atomismu

Předneseno v slavnostní schůzi České akademie věd a umění 8. prosince 1950 u příležitosti padesátého výročí vzniku teorie kvant.

Za šest dní, dne 14. prosince t.r. dovrší se padesát let od té doby, co vznikla kvantová fyzika. Toho dne před padesáti lety ohlásil Max Planck veřejnosti svůj objev nové universální konstanty fysikální

$$h = 6,624 \times 10^{-27} \text{ erg.sec,}$$

která dostala po něm své jméno - Planckova konstanta.

Vylíčiti aspoň v hlavních rysech vývoj kvantové fyziky za těch právě dovršených padesát let je úkol nadmíru obtížný, zejména v tak krátkém čase, který je této přednášce vyměřen. Způsob, jak se o to pokusit, může být různý. Avšak vzhledem k tomu, že padesát let kvantové teorie lze rozdělit ve dvě zhruba stejné části, bude snad nejlépe promluvit poněkud obsírněji o prvním čtvrtstoletí (které je nezbytnou průpravou k druhému), neboť druhé čtvrtstoletí není ještě zdaleka u konce s definitivní úpravou teorie; problémy, které se tu vyskytly, čekají namnoze ještě na své řešení.

* * *

Ke konci minulého století byla v popředí zájmu přesná měření energie záření dokonale černého tělesa. Podle klasické fyziky měl by příspěvek spektrálního oboru, jehož kmitočet leží v mezích ν a $\nu + d\nu$, k hustotě energie černého záření podle vzorce Rayleigh-Jeansova stále růst *ceteris paribus* se čtvercem kmitočtu ν . Ve skutečnosti však, jak ukázali O. Lummer a E. Pringsheim přesnými měřeními vykonanými ve Physikalische Reichsanstalt, Charlottenburg, v r. 1900, tato hustota s počátku vzrůstá s rostoucím kmitočtem ν , nabývá maxima a pak klesá. V r. 1896 dospěl W. Wien k jinému zákonu, který také nedává maximum, ale souhlasí s pokusy v oboru velikých frekvencí. Rozdíl proti Rayleighovu-Jeansovu zákonu, jenž platí v oboru malých frekvencí, je podstatný: při odvozování svého zákona Wien porušil zásady klasické fyziky. Planck pak spojil oba zákony v jediný, ovšem také za cenu opuštění zásad klasické fyziky, ale zato v úplné shodě s experimentem. Při odvozování tohoto zákona Planck narazil na novou, do té doby úplně neznámou universální konstantu h . Planckovo odvození trpí však jistými nedostatky, které bylo nutno odstranit. Tak vznikla velká řada pozdějších odvození Planckova zákona, jež lze rozdělit ve dvě skupiny. Do první z nich patří všechny ty, které budí zdání, že neobsahují nic odchylného od fyziky 19. století, a do druhé všechny ostatní, které stojí přímo na půdě teorie kvant, t. j. na stanovisku, že se energie nemění spojitě, nýbrž po kvantech velikosti $nh\nu$, kde $n = 0, 1, 2, \dots$. Avšak práce první skupiny, pokud se v nich podařilo dospět k žádoucímu výsledku zdánlivě na základě klasické fyziky, obsahují vždy (třeba skrytě) ve svých předpokladech (bez nichž se žádná teorie neobejde) něco, co není v souhlasu s klasickou fyzikou; proto jsou bez ceny. Tedy zbývá jediné druhé skupině; práce sem náležející lze rozdělit opět ve dvě třídy. Do první patří všechna odvození Planckova vzorce, která podobně jako Planck vycházejí z rovnováhy mezi zářením a hmotou, a do druhé zbývající odvození Planckova vzorce, která do svých úvah vůbec nezavádějí vzájemné působení mezi hmotou a zářením. Typickým příkladem pro 1. třídu je odvození Einsteinovo (1917), pro 2. třídu odvození jednak Debyeovo (1910), jednak

Boseovo (1924). Indický fyzik S. N. Bose podal však odvození v moderní fyzice nejdůležitější.

Žádné odvození Planckova vzorce se však neobejde bez statistických úvah. A tak vznikla kvantová statistika. Zvláště elegantní metodu, která má proti starším metodám mnoho předností, uveřejnili C. G. Darwin a R. H. Fowler ve společných pracích, z nichž první pochází z r. 1922.

Aby i laik, jenž dosud nikdy o fyzikálních statistikách neslyšel, pochopil, o čem jde, uvedu s malou obměnou jednoduché podobenství pocházející od Schrödingera. Tři žáci, Jan, Karel a Václav si zaslouží za svůj prospěch ve škole zvláštní odměny. Jejich učitel má mezi ně rozdělit dvě ceny. Dříve než to učiní, uvažuje, kolik rozdílných rozdělení je vůbec možno. To je jediná otázka, kterou zde zkoumáme - pro co se učitel nakonec rozhodne, nás nezajímá. Běží o statistickou otázku: spočítati, kolik je rozličných možností, jak ceny rozdělit. Odpověď záleží na tom, jaké jsou to ceny, které mají být rozděleny. Tři různé druhy cen mají nám znázornit tři druhy statistik.

a) Dvě ceny, které mají být uděleny, jsou dvě medaile, jedna s obrazem Smetanovým, druhá s obrazem Jiráskovým. Učitel může dát „Smetanu“ buď Janovi nebo Karlovi anebo Václavovi a „Jirásku“ buď Janovi nebo Karlovi anebo Václavovi. To dává třikrát tři, tedy 9 rozdělení (klasická statistika Boltzmannova).

b) Ty dvě ceny jsou dvě pamětní stříbrné stokoruny, ražené u příležitosti 600letého trvání University Karlovy. Mohou být uděleny dvěma různým žákům, při čemž třetí, buď Jan, nebo Karel anebo Václav vyjde na prázdno. Vedle těchto tří možností existují ještě tři další: buď Jan, nebo Karel anebo Václav obdrží obě stoko runy. Tedy celkem jest 6 různých rozdělení (Bose-Einsteinova statistika),

c) Ty dvě ceny záleží v tomto: v jedenáctce mužstva školní kopané scházejí dva hráči. Na jejich místa mohou nastoupit dva z uvedených tří žáků, třetí vyjde na prázdno. Tedy celkem jsou 3 různá rozdělení (Fermi-Diracova statistika). Ceny znamenají částice, zde tedy dvě částice téhož druhu; žáci představují stavy, v nichž se částice může nacházeti. „Smetana“ byl udělen Janovi značí tedy: částice „Smetana“ má stav Jan.

Experimentálně je zjištěno, že statistický počet možností u elementárních částic se nikdy nepočítá podle a), nýbrž vždy buď podle b), nebo c); u „pravých“ částic, na př. elektronů, vždy podle c), u fotonů vždy podle b).

Planckova kvanta energie jsou počátkem veškeré kvantové teorie; cestou přes ně dostal se do fyziky pojem kvantového stavu a také Planckova konstanta h , viditelné znamení kvantové fyziky, našla ve fyzice své místo. Ale později se ukázalo, že kvanta energie jsou cosi sekundárního, že dominantní úlohu ve fyzice hraje akční kvantum h , jak to poznal již sám Planck r. 1906 při kvantování energie harmonického oscilátoru. Planckův překvapující výsledek stál ve fyzice s počátku zcela osaměle. O několik let později ukázal Einstein na mnohostranné užití kvantové teorie. Především to byla světelná kvanta o energii $h\nu$ a hybnosti $h\nu/c$, která Einstein zavedl do fyziky r. 1905, a dále vysvětlení odchylek od pravidla Dulong-Petitova pro atomové teplo prvků pevného skupenství r. 1907.

Všimněme si blíže Einsteinových světelných kvant. Einstein poukázal v r. 1905 na to, že existují především theoretické důvody k představě o korpuskulární povaze světla. Výsledkem jeho řešení problému fluktuace hustoty záření bylo zjištění, že záření libovolné vlnové délky má dva aspekty: korpuskulární a vlnový. První se projevuje zvláště silně v krátkovlnné části spektra, druhý v dlouhovlnné. Ani jeden z obou aspektů sám o sobě nedává úplného obrazu o povaze světla; pouze souhrn obou nám dovoluje porozumět všem zjevům světelným. Zjevy, u nichž se projevuje vlnový aspekt povahy světla, jsou na př. interference a ohyb světla; jsou to klasické části optiky. K zjevům, u nichž se jeví korpuskulární vlastnosti světla, patří především uvolňování elektronů z kovu působením světla, t. j. fotoelektrický zjev. Ten záleží v podstatě v tomto: osvětlíme-li lesklou kovovou destičku ultrafialovým světlem, nabije se destička kladnou elektřinou; to proto, že z ní unikají elektrony. Rychlost těchto vypuzených elektronů je zcela nezávislá na intenzitě dopadajícího světla; se stoupající intenzitou roste počet vystupujících elektronů, nikoli jejich rychlost, která roste toliko tehdy, zvyšujeme-li frekvenci dopadajícího světla; pak rychlost elektronů stoupá lineárně se vzrůstající frekvencí. To je s hlediska vlnové teorie světla zcela nepochopitelné - podle ní bychom očekávali, že rychlost elektronů závisí na intenzitě záření, čemuž však tak není. Tato a jiné ještě ob-

tíže zmizí úplně, budeme-li světlo považovati za proud fotonů o energii $h\nu$, jak to učinil Einstein, tj. postavíme-li se na korpuskulární stanovisko: foton je pohlcen elektronem, při čemž mu odevzdá svou energii; je-li tato energie dostatečná k tomu, aby elektron vyprostila z vazby, elektron vyletí z kovu ven. Pravděpodobnost, že by jeden elektron pohltil současně dva fotony, je velmi malá; proto každý uvolněný elektron získá svou energii od jednoho fotonu (ale ovšem každý pohlcený foton neuvolní nějaký elektron). Proto počet uvolněných elektronů je úměrný počtu pohlcených fotonů, t. j. úměrný intenzitě světla. Ale energie elektronu závisí pouze na energii pohlceného fotonu.

Jiný takový zjev, jehož výklad vyžaduje korpuskulární teorii světla, je zjev Comptonův (1922): dopadem svazku Roentgenových paprsků na hmotu sestávající z lehkých atomů se frekvence záření Roentgenova snižuje, a za to se z hmoty uvolní elektrony. Comptonův zjev lze snadno vyložití nárazem letícího fotonu na klidný elektron. při této srážce elektron převezme část energie fotonu a dá se do pohybu. Energie fotonu ztrativšího část energie musí být zase rovna součinu Planckovy konstanty h a frekvence, tudíž frekvence záření po srážce je nutně menší než před srážkou. Teorii tohoto zjevu na základě zachování energie a hybnosti podal sám Compton a nezávisle na něm Debye. Pokusy ji potvrdily kvantitativně. To byl jistě skvělý úspěch představy o atomistické struktuře světla. Ale přes všechny tyto úspěchy fotonová teorie sama nestačí. Ohybové zjevy a interference světla vyžadují představy o vlnách a kromě toho kvantové vztahy: energie $= h\nu$, hybnost $= h\nu/c$, kde c je rychlost světla, předpokládajíc existenci frekvence ν . Tudíž nutno zavést netoliko korpuskule, nýbrž i vlny.

Vlnová teorie světla, kterou založil Huygens, vypracoval Fresnel a kterou potom Maxwell proměnil v elektromagnetickou teorii světla, nestačí k porozumění všech optických zjevů, ačkoli obsahuje velkou část pravdy. A tak, jak jsme viděli, Einstein se vrátil - ovšem jen do jisté míry - k staré představě Newtonových světelných tělísek, která již dávno upadla v zapomenutí. O 19 let později připadl francouzský teoretik Louis de Broglie (1924) na myšlenku doplnit korpuskulární teorii hmoty, jak ji vypracovala fyzika v předcházejících stoletích, novou - do té doby zcela neznámou - vlnovou teorií hmoty podle vzoru optiky. Při tom se řídil vzorci pro energii E a hybnost p fotonu, totiž $E = h\nu$, $p = E/c = h\nu/c = h/\lambda$, a přiřadil úhrnné energii E hmotné částice frekvenci $\nu = E/h$ a tím též délku vlny $\lambda = h/p = h/mv$. Tak položil základ k t. zv. vlnové mechanice, jež se stala zásluhou Schrödingerovou znamenitou pomůckou pro teorii atomů a molekul, jakož i spekter jednoduchých i složitějších látek.

Hypothesa de Broglieova byla velmi brzo skvěle potvrzena experimentálně. Ukázalo se, že svazky elektronů, protonů a dokonce celých atomů interferují docela tak jako světlo nebo paprsky Roentgenovy. Z toho je vidno, že tyto „částice“ jako elektrony, protony a dokonce celé atomy jeví povahu „vlnovou“. Setkáváme se tu opět s dvojakostí podobně jako u světla. V prvních dobách vývoje kvantové mechaniky byl učiněn svůdný pokus rozřešit protiklad vlny – částice - tím, že bychom považovali částice za vlnová klubka. Ale bližší rozbor této myšlenky ukázal, že by se takováto klubka nemohla udržeti pohromadě, že by se rozplynula a zmizela, což odporuje nejzákladnějším pozorováním. Proto bylo nutno tuto myšlenku opustit a hledati jiný výklad, o němž však bude řeč později.

Třináct let před hypothesou de Broglieovou byl učiněn experimentální objev veliké důležitosti pro další rozvoj theorie kvant, která by bez něho zůstala v plenkách jako zcela izolovaná kuriosní kapitola fyziky přes skvělý začátek Planckův a ne méně zdařilé pokračování Einsteinovo. V r. 1911 Rutherford ze svých pokusů s částicemi α , jimiž ostřeloval tenké kovové folie, usoudil, že atom prvku se skládá z jádra kladně nabitého s velikou hmotou soustředěnou na malinký objem (poloměr řádu 10^{-13} cm), které způsobuje kolem sebe neobyčejně silné elektrické pole, a ze záporných elektronů, které obíhají kolem jádra jako planety kolem Slunce. Ale tento experimentální výsledek vedl k poznání, že představy klasické fyziky nemohou sloužit za základ pro porozumění nejpodstatnějších vlastností atomu. A tak bylo nutno poohlédnouti se po tom, jak by bylo třeba formulovati principy kvantové teorie, aby vyhovovaly požadavkům, které klade pozorování na teorii, jednak co se stability atomové stavby týče, jednak co se týká záření atomy vysílaného. V červenci r. 1913 navrhl dánský fyzik Niels Bohr dva postuláty, které postavil v čelo kvantové teorie struktury atomu.

První z nich zní takto: Atomy a atomové soustavy mohou setrvávat jen v určitých, t. zv. stacionárních stavech, v nichž ani nevyzařují, ani nepohlcují energii, bez ohledu na pohyby nabitých částic, z nichž sestávají. V těchto stavech atomové soustavy mají energie, které tvoří nekonečnou posloupnost zcela určitých hodnot $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n, \dots$. Tyto stavy se vyznačují svou stálostí; každá změna energie v důsledku vyzáření nebo pohlcení elektromagnetického záření anebo v důsledku srážky může nastat pouze při úplném přechodu skokem z jednoho stavu do druhého.

Druhý postulát: při přechodu z jednoho stacionárního stavu do druhého atomy vyzařují nebo pohlcují záření zcela určitého kmitočtu. Záření vysílané nebo přijímané při přechodu ze stavu charakterizovaného energií E_m do stavu energie E_n je monochromatické a jeho kmitočet je určen podmínkou $h\nu = E_m - E_n$. Oba dva postuláty jsou v příkrém sporu s požadavky klasické elektrodynamiky.

Bohr ověřil své postuláty na Rutherfordově modelu atomu vodíku za předpokladu, že elektron obíhající kolem jádra opisuje kružnici, jejíž poloměr musí vyhovovat požadavku, aby součin z hybnosti elektronu a obvodu kružnice, v níž elektron obíhá, byl roven celistvému násobku Planckovy konstanty. Bohrovi tak přísluší zásluha, že první theoreticky odvodil vzorec pro kmitočty vodíkových spektrálních čar $H_\alpha, H_\beta, H_\gamma, H_\delta$ atd., který empiricky našel Balmer již r. 1885. Bohr odvodil též podobné vzorce pro ostatní spektrální série vodíku, z nichž některé byly experimentálně objeveny a proměřeny teprve později. Tím byl položen solidní základ k teorii struktury atomu. Hlavně Sommerfeld přispěl k zobecnění Bohrova kvantového předpisu na případ podmíněně periodických pohybů soustav o více stupních volnosti. Zvláště pak parciální rovnice diferenciální Hamilton-Jacobiova došla zde velkého uplatnění. Stručně lze shrnout tyto kvantové předpisy, jak se mi podařilo ukázat v r. 1921, v jediný variační princip, že totiž rozdíl mezi součtem celistvého počtu kvant a časovým středem kinetického potencionálu má být co možno nejmenší. Rozšíření tohoto principu podal J. H. van Vleck. Bohrova theorie dala podnět k četným pracím experimentálním z nichž, na prvním místě sluší uvést slavné pokusy J. Franckovy a G. Hertzovy, jimiž bylo možno experimentálně stanovit ionizační potenciály veliké řady prvků; v tom tehdejší fyzika spatřovala přímé potvrzení postulátů Bohrovy theorie. V této době největšího rozkvětu Bohrovy theorie byly theoreticky odvozeny zákonitosti štěpení spektrálních čar v magnetickém poli (zjev Zeemanův) a v elektrickém poli (zjev Starkův), jakož i detailní struktura spektrálních čar (vzorec Sommerfeldův); nelze tu uvádět než nejhlavnější výsledky obrovského počtu prací věnovaných aplikacím Bohrovy theorie na nejrůznější zvláštní problémy.

Ale vedle těchto velikých kladů měla Bohrova theorie podstatné nedostatky, které byly ostatně jasně patrné od počátku. Theorie Bohrova nebyla ani důsledně klasická ani důsledně kvantová. Mimo to tato theorie dovedla sice vypočísti kmitočet spektrálních čar - aspoň v jednoduchých případech - ale nedovedla již vypočítati intensitu těchto čar a proto se musela utíkat k principu korespondence a konec konců i ke klasické elektrodynamice. Ale nejtěžším jejím neúspěchem byly její marné pokusy podat teorii neutrálního heliového atomu (problém tří těles v atomové dynamice). Bylo tudíž zřejmé, že Bohrova theorie je přes své skvělé úspěchy toliko přechodnou etapou v úsilí podat důslednou teorii atomových zjevů.

Je zajímavé, že de Broglieova myšlenka, zavést vlnovou délku $\lambda = h/p$, vede k požadavku, aby obvod Bohrovy kružnice, v níž se má elektron pohybovat, obsahoval celý počet vlnových délek λ , čímž je odvozena Bohrova kvantová podmínka pro kružnici. Vskutku E. Schrödinger (1926), opíraje se o myšlenku de Broglieovu, ukázal, že celá čísla, která byla nutno dogmaticky vkládati v Bohrově teorii do klasických počtů pomocí kvantových předpisů, vyplynou sama sebou jako matematický důsledek theorie, která vznikne z klasické funkce Hamiltonovy, v níž čísla, značící kartézské souřadnice a k nim příslušné hybnosti, nahradíme operátory působícími na vlnovou funkci závisující na čase a kartézských souřadnicích. Operátory nahrazující hybnosti jsou parciální derivace podle sdružených k nim souřadnic, násobené Planckovou konstantou h a dělené číslem $2\pi\sqrt{-1}$; operátor nahrazující funkci Hamiltonovu samu je záporná parciální derivace podle času, násobená číslem h a dělená číslem $2\pi\sqrt{-1}$. Jestliže vlnová funkce, na kterou tyto operátory působí, má být v čase periodická, všude jednoznačná, spojitá a všude konečná, jsou možná jen

taková řešení takto vzniklé rovnice Schrödingerovy, kdy energie nabývá zcela určitých, t. zv. charakteristických hodnot, které závisejí na číslech přirozené řady číselné 0, 1, 2, 3 ...

Výsledky, které byly takto nalezeny, souhlasí s experimentem i tam, kde starší Bohrova teorie dávala výsledky od skutečnosti odlišné. Na př. pro neutrální atom helia, kde Bohrova teorie selhala, dala Schrödingerova rovnice výsledky správné. To samo již posílilo důvěru ve vlnovou mechaniku, jak se této teorii Schrödingerově začalo říkat po příkladu L. de Broglieově, jenž své původní myšlenky, zde částečně reprodukováné, nazval undulační mechanikou. Tyto veliké úspěchy vlnové mechaniky byly však vykoupeny za cenu ztráty názornosti nové důsledné teorie, jak se to aspoň na počátku vývoje teorie s jistou dávkou lítosti všeobecně pociťovalo. Pokusy, interpretovati vlnovou funkci Schrödingerovu podle vzoru klasické fyziky, podobně jako je tomu na př. v rovnici pro šíření elektromagnetických vln, ztroskotaly úplně. Po začátečních nejasnostech, jak vyložiti Schrödingerovu vlnovou funkci, byla její interpretace nalezena; v případě jediné částice v konservativním silovém poli součin čtverce absolutní hodnoty Schrödingerovy vlnové funkce s objemovým elementem značí pravděpodobnost, že částici nalezneme v tomto objemovém elementu. Tato interpretace se úplně osvědčila. O něco málo dříve než Schrödinger uveřejnil své první pojednání o kvantisaci jakožto problému charakteristických hodnot W. Heisenberg. Roku 1925 publikoval počátky své *kvantové* mechaniky, která vypadá sice na první pohled jinak (užívá matic a nekomunikativní algebry), ale je úplně ekvivalentní s vlnovou mechanikou Schrödingerovou, jak již 1926 ukázal sám Schrödinger. Pro snadnější způsob početní je však snadnější mechanika Schrödingerova než mechanika Heisenbergova.

Schrödingerova mechanika je teorie nerelativistická; je jen aproximací - často úplně postačující - teorie relativistické, kterou bylo třeba vybudovati jak z důvodů čistě formálních, tak i pro aplikace. Po různých nezdařených pokusech o relativistickou teorii elektronu našel konečně P. A. M. Dirac (1928) hledanou rovnici elektronu, která je invariantní vůči Lorentzově transformaci a která automaticky vykládá t. zv. *spin* elektronu. Také vzorec Sommerfeldův pro detailní strukturu spektrálních čar plyne z Diracovy rovnice ještě dokonaleji než ze starší teorie Bohr-Sommerfeldovy. Pozoruhodné je to, že z této rovnice mohl Dirac předpovědět existenci pozitronu, který byl vskutku po čtyřech letech (1932) experimentálně zjištěn Andersonem v Americe a pak potvrzen Blackettem a Occhialinim v Anglii (Cambridge). Z Diracovy relativistické rovnice pro elektron plyne pak Schrödingerova nerelativistická rovnice jako její první aproximace.

Schrödingerova rovnice je jedním ze základů kvantové mechaniky; její význam pro atomistiku je asi takový jako význam pohybových rovnic v mechanice. O nerelativistické teorii Schrödingerově lze říci, že je logicky uzavřena; naproti tomu dosavadní kvantová teorie relativistická obsahuje pouze zlomky teorie relativistické.

První čtvrtstoletí kvantové teorie tedy na svém sklonku ukázalo nutnost pozměnití pojem částice. Při tom nejzávažnější úlohu hraje Heisenbergův vztah, vyjadřující elementární neostrost v současném určení polohy a rychlosti (elektronu). Podle klasické mechaniky k popisu okamžitého stavu částice je nutné a postačí znáti dva na sobě nezávislé údaje, totiž polohu částice a její rychlost. V nové teorii potřebujeme a máme méně. Pokud nám nezáleží na rychlosti (poloze) částice, můžeme její polohu (rychlost) udati s libovolnou přesností; ale obě dohromady zásadně nelze zjistiti s úplnou přesností. Ba ani si nesmíme představovati, že poloha i rychlost částice mají v témž okamžiku zcela ostré hodnoty; je to tak, jako by se vzájemně „rozmazávaly“. Součin velikosti obou neostrostí nemůže klesnouti pod jistou pevnou mez. Pro elektron činí tato mez zhruba jedničku, měříme-li délku v centimetrech, čas v sekundách a hmotu v gramech. To znamená, že známe-li rychlost elektronu s přesností jednoho centimetru za sekundu, je jeho poloha „rozmazána“ v kouli o poloměru aspoň jednoho centimetru. Příčinu toho můžeme si objasniti takto. Chceme-li experimentálně stanoviti polohu elektronu, potřebujeme k tomu nezbytně světlo. To se však skládá z jednotlivých fotonů a ty při srážkách s elektronem vyvolají zjev Comptonův, t. j. elektron změní svou rychlost. A tato změna je tím větší, čím větší je kmitočet světla, jímž je elektron osvětlen, tedy čím je toto světlo „fialovější“. Chceme-li tuto změnu zmenšiti, musíme užítí světla, jehož kmitočet je menší, tedy světla „červenějšího“. Ale z optiky je známo, že polohu mikroskopické částice můžeme

určiti pouze s přesností, která řádově nepřesahuje hodnotu vlnové délky světla, jímž je osvětlena. Chceme-li tedy pokud možno přesně změřiti polohu elektronu, musíme užívatí světla o krátké vlnové délce, t. j. o velikém kmitočtu, krátce světla „fialového“. Tím však pozbýváme možnosti současně určití pokud možno přesně rychlost elektronu. Čím přesněji změříme jednu z obou fyzikálních veličin (poloha a rychlost), tím nepřesněji změříme druhou z nich. Foton má energii $h\nu$ a hybnost $h\nu/c = h/\lambda$, změna hybnosti $p = mv$ elektronu při srážce s fotonem, t.j. δp , je podle Comptonova zjevu úměrná hybnosti h/λ narazivšího fotonu. Přesnost δq v určení polohy q je podle optiky úměrná vlnové délce λ . Součin obou nepřesností $\delta p \cdot \delta q$ je tedy úměrný Planckově konstantě h ; jak podrobnější úvaha ukazuje, je součin $\delta p \cdot \delta q$ roven nebo větší h , což je vztah Heisenbergův vyjadřující elementární neostrost v současném určení polohy a rychlosti elementární částice.

* * *

Schrödinger udal v r. 1926 metodu pro řešení problému mnoha částic, která užívá vln v mnohorozměrném prostoru, t. zv. konfiguračním prostoru; jde-li o n částic, je to prostor mající $3n$ rozměrů. Vlnová funkce i vlnová rovnice se vztahují k tomuto mnohorozměrnému prostoru. Jde-li o soustavu stejných částic, je nutno Schrödingerovu rovnici doplniti předpisem, že hledané řešení, t.j. stavová funkce, musí býti buď symetrická, nebo antisymetrická v proměnných, příslušných jednotlivým hmotným bodům. Tento předpis vede k Bose-Einsteinově resp. Fermi-Diracově statistice v souboru velkého počtu částic.

Vlnová mechanika řeší úlohu, jak zobecněním klasického modelu hmoty lze dospěti od korpuskulárního obrazu k obranu vlnovému.

V theorii světla nebo záření vůbec je situace jiná než v theorii hmotných částic. Klasickým modelem světla nebyla soustava hmotných bodů, nýbrž vlnové elektromagnetické pole. Úlohou kvantové teorie bylo, zobecněním klasického obrazu záření, dospěti k světelným kvantům. Bylo by na snadě, pokusiti se o interpretaci elektromagnetických vln v trojrozměrném prostoru ve smyslu Schrödingerovy vlnové mechaniky jako stavové funkce jakési částice - fotonu - a pro popis souboru n fotonů použití metody vln ve $3n$ -rozměrném prostoru. Ukázalo se však, že tato myšlenka je neproveditelná. Především Maxwellova teorie elektromagnetického pole je teorie relativistická a nerelativistická aproximace nemá pro popis záření vůbec smyslu. Z vlnových funkcí Maxwellova pole není však možno - jak se ukázalo - sestaviti invariantní a pozitivně definitní výraz pro pravděpodobnost výskytu fotonu v daném objemovém elementu. Kromě toho zkušenost učí, že fotony - na rozdíl od částic, jako jsou na př. elektrony - nejsou permanentní, nýbrž že mohou vznikat a zanikat. To byla další potíž, hlavně pro metodu konfiguračního prostoru.

Cestu z tohoto dilematu našel opět Dirac (1927). Navázal v podstatě na starší Planckovu metodu kvantování záření, která je založena na klasické větě o formální ekvivalenci volného záření v dutině se soustavou nekonečně mnoha lineárních oscilátorů. Kvantování oscilátorů neprovedl ovšem podle Plancka, nýbrž metodou nové kvantové mechaniky. Prohlásil tedy souřadnice oscilátorů za operátory formálně téhož druhu, jako jsou operátory souřadnic v kvantové mechanice hmotných bodů. Diracovy fotony jsou kvanta energie jednotlivých oscilátorů; jsou tedy na první pohled něco zcela jiného než „hmotné body“ vlnové mechaniky. Dirac však nezůstal u tohoto obrazu kvantovaných oscilátorů, jejichž souřadnice jsou v podstatě reálné amplitudy rovinných vln, na něž si rozkládáme elektromagnetické pole; zavedl místo těchto souřadnic a hybností, s těmito souřadnicemi kanonicky sdružených, nové veličiny, jejichž reálná část je souřadnice a imaginární část je příslušná hybnost násobená činitelem $\pm\sqrt{-1}$. Tím obdržel tolik nových komplexních veličin, kolik je souřadnic a rovněž tolik s nimi komplexně sdružených veličin. O těchto nových veličinách (operátorech) Dirac ukázal, že charakteristické hodnoty čtverců jejich absolutních hodnot jsou toliko čísla 0,1,2,3, ... a ta odpovídají počtu energetických a také impulsových kvant (fotonů) obsažených v jednotlivých rovinných elektromagnetických vlnách. Dále pak ukázal, že tyto nové veličiny lze zobraziti operátory, působícími na funkce proměnných, nabývajících pouze celých kladných hodnot. Takových funkcí lze tedy použiti k definici určitého

kvantového stavu elektromagnetického pole (rozloženého na rovinné vlny). Lze definovat speciální stavy, v nichž počty fotonů v jednotlivých vlnách jsou zcela určité; tyto stavy jsou pak dány charakteristickými funkcemi, na něž působí právě zmíněné operátory tak, že zvyšují (zmenšují) o *jedničku* počet fotonů v příslušné vlně.

Diracova teorie elektromagnetického záření je tedy formálně teorií vektorového pole v třírozměrném prostoru, popsaného vlnovými funkcemi, jejichž „hodnoty“ v jednotlivých bodech prostoru a času nejsou *čísla*, nýbrž *operátory*. Takovéto zobecnění klasické teorie pole dnes označujeme jako „kvantovou teorii (vlnového) pole“, na rozdíl od kvantové (nebo vlnové) mechaniky, která je zobecněním klasické mechaniky soustavy hmotných bodů. Vztah mezi naměřenými hodnotami intenzit pole a jiných fyzikálních veličin na straně jedné a mezi příslušnými operátory na straně druhé je v zásadě stejný jako v kvantové mechanice a je zprostředkován stavovým funkcíonálem pole.

Podle toho, co bylo dosud řečeno, se stále zdá, že je podstatný rozdíl mezi fotony (světelnými kvanty) na jedné a hmotnými částicemi ve smyslu vlnové mechaniky na druhé straně. Ale tento rozdíl je pouze zdánlivý.

Řada autorů, mezi nimi zvláště sovětský fyzik Vladimír Alexandrovič Fock, člen Akademie nauk SSSR (1932), ukázala, že místo prve zmíněné metody konfiguračního prostoru (teorie vln v prostoru $3n$ -rozměrném pomocí Schrödingerovy rovnice) lze ke kvantově mechanickému popisu soustavy složené z identických částic použít i metodu zcela analogické Diracově metodě kvantovaného pole v prostoru třírozměrném. Toto vlnové pole v třírozměrném prostoru vyhovuje vlnové rovnici, která je formálně identická se Schrödingerovou rovnicí pro stavovou funkci jediné částice. Avšak hodnoty této funkce v jednotlivých bodech prostoru již nejsou obyčejná čísla, nýbrž operátory, které splňují zcela určité zaměňovací relace. Volíme-li vhodně tyto zaměňovací relace a rozvineme-li vlnovou funkci na př. v rovinné vlny, lze docílit, že charakteristickými hodnotami čtverců absolutních hodnot amplitud těchto vln jsou buď pouze čísla 0 a 1 anebo čísla 0, 1, 2, ... Tato čísla lze interpretovat jako počet Schrödingerových částic v příslušné parciální vlně. Z toho je již patrné, že v prvním případě teorie kvantovaného pole odpovídá (a je vskutku ekvivalentní) metodě konfiguračního prostoru s antisymetrickými stavovými funkcemi, v případě druhém se symetrickými.

Metoda kvantovaného (třírozměrného Schrödingerova) vlnového pole má však proti metodě konfiguračního prostoru i značné přednosti, neboť lze jí použít i v případech, kdy počet částic je neurčitý nebo proměnlivý. S počátku se ovšem zdálo, že tato přednost metody kvantovaného pole, tkvící v její větší obecnosti, je spíše akademické povahy, neboť počet hmotných částic (jako jsou na př. elektrony) se zdál *de facto* neproměnný. Ale i to se ukázalo jako neúplnost empirie. Dnes víme, že částice všech druhů mohou vznikat a zanikat. V tomto ohledu tedy není podstatného rozdílu mezi fotony a ostatními druhy částic. Známe dnes mnoho druhů rozličných procesů, při nichž částice určitého druhu zanikají a částice jiného druhu vznikají. Prvním takovým známým procesem byla proměna fotonu ve dvojici kladného a záporného elektronu. Pro formulaci zákonů, jimiž se takové děje řídí, byla by metoda konfiguračního prostoru elektronů zcela nepříhodná. Užitím metody kvantovaného pole lze je však popsati zcela přirozeně a snadno.

Dnešní kvantová teorie hmoty a záření má formu teorie soustavy vzájemně na sebe působících kvantovaných vlnových polí. Pro zatím je tolik druhů rozličných vlnových polí, kolik je rozličných druhů fundamentálních částic. Jsou ovšem též příbuzné druhy částic (jako na př. kladné a záporné elektrony, lišící se pouze nábojem), které jsou popsány jediným druhem kvantovaného pole. U elektronů a pozitronů je to vlnové pole popsané vlnovými funkcemi splňujícími Diracovy rovnice, podobně jako u fotonů je to pole popsané vlnovými funkcemi splňujícími rovnice Maxwellovy. Samostatná kvantovaná pole Diracova typu (spinorová) přísluší též částicím, jako jsou protony, neutrony, neutrina a mesony μ . Naproti tomu ještě jiné částice, jako na př. mesony π a neutrální mesony π^0 , jsou popisovány kvantovaným vlnovým polem typu Schrödingerova (skalárním či pseudoskalárním) nebo polem podobným poli Maxwellovu. (Procovo pole vektorové či pseudovektorové).

Je ovšem jasné, že tento dnešní stav teorie není zdaleka ideální. Neznáme dosud všechny druhy fundamentálních částic a je pravděpodobné, že počet známých druhů v brzké době ještě značně vzroste. Úkolem teorie proto bude objeviti v soustavě fundamentálních částic nějaký řád. Cílem budoucí teorie musí býti popis co největšího počtu druhů částic co nejmenším množstvím rozličných odrůd vlnových polí. V tomto směru mohly zatím býti učiněny pouze první nesmělé krůčky.

Teorie má však před sebou ještě také problémy jiné povahy. Soustava rovnic vzájemně na sebe působících vlnových polí různých druhů je totiž taková, že ji nedovedeme obecně a přesně řešiti. Vypomáháme si proto methodou postupných aproximací, vycházejíce od t. zv. nulté aproximace, v níž zanedbáváme vliv vzájemného působení polí různého druhu. V této aproximaci soustava rovnic vlnových polí se rozpadne na *isoloované* menší soustavy rovnic pro jednotlivé druhy polí. Tyto jednodušší soustavy rovnic již dovedeme řešiti. Vycházejíce z tohoto řešení nulté aproximace dovedeme ještě poměrně snadno určití řešení v první aproximaci ve smyslu poruchové teorie. Toto řešení podává jen malé korekce k řešení nulté aproximace a poskytuje dobrý popis velké řady rozličných zjevů. V mnoha případech je tento popis v kvantitativním souhlasu se zkušeností, u jiných však jen v kvalitativním. To je pochopitelné, neboť první aproximace není ještě řešení přesné. Pokoušíme-li se však naléztí řešení v druhé aproximaci, narážíme na veliké obtíže. Místo toho, abychom dostali pouze další malé korekce k řešení první aproximace, dostáváme vesměs příspěvky, které divergují. Tak na př. setrvačné hmoty, po př. náboje a magnetické momenty částic vycházejí nekonečně veliké, pravděpodobnosti všech procesů, které byly v první aproximaci od nuly různé (ale konečné a v kvantitativním nebo aspoň kvalitativním souhlasu s experimentem), vycházejí nyní nekonečně veliké atd. Bylo vymyšleno mnoho rozličných method a úskoků, jak tuto obtíž odstraniti nebo obejítí. Avšak přes značné pokroky, jichž se i tu docílilo, nelze pokládati dnešní stav teorie v tomto ohledu za uspokojivý. Ani není známo, jsou-li tyto potíže povahy čistě matematické, t. j. jsou-li spjaty s methodou, které se tu užívá k řešení rovnic pole, nebo jsou-li povahy fyzikální, t. j. jsou-li základní rovnice samy vadné. Obojí je možné; pravděpodobnější je však případ druhý, že totiž základní rovnice dnešní teorie nejsou exaktně řešitelné. To by ovšem znamenalo, že problémy řešení rovnic a jeho interpretace jsou nerozlučně spojeny s problémy formulace jednotného zákona ovládajícího úplnou soustavu všech fundamentálních částic. Snad se ukáže, že teprve tato úplná soustava základních rovnic, v níž (na rozdíl od dnešní soustavy), každý druh částic bude mít své přirozené místo a žádný nebude zbytečný nebo logicky postradatelný, bude soustavou řešitelnou.

Ale i s tohoto kritického hlediska a snad právě s tohoto stanoviska je i dnešní teorie teorií podivuhodnou.

* * *

Můj výklad se schýlil ke konci. Vracím se znovu k názvu přednášky: „Padesát let teorie kvant“. - Opravdu jen padesát? Podle Schrödingera je to 2400 let - tak aspoň zní název jeho stati uveřejněné v *Annalen der Physik* (1948). Míni tím ovšem učení starořeckého filosofa *Leukippa*, že všechny atomy sestávají z téhož materiálu, což je ve shodě i s dnešními názory. Ať je tomu jakkoli, je letošní rok na svém sklonku jubilejním rokem atomistiky. A k tomuto jubileu přeji kvantové teorii plno dalších úspěchů do budoucna.

ČESKÁ AKADEMIE VĚD A UMĚNÍ
A
JEDNOTA ČESKOSLOVENSKÝCH MATEMATIKŮ A FYSIKŮ

zvou

k slavnostní přednášce, kterou u příležitosti 50. výročí vzniku teorie kvant

prosloví člen České akademie věd a umění

DR VIKTOR TRKAL,

profesor university Karlovy,

na thema

PADESÁT LET KVANTOVÉ FYSIKY

(Půl století moderního atomismu)

v pátek dne 8. prosince 1950 v 17 hodin v přednáškové síni

ČESKÉ AKADEMIE VĚD A UMĚNÍ V PRAZE I, NÁRODNÍ TŘ. Č. 5 (II. POSCHODÍ)

Vstup volný — Hosté vítáni

Pozvánka na slavnostní přednášku prof. Trkala k 50. výročí vzniku kvantové teorie.