

Jiří Králík

Počátky moderní éry poznávání mikrosvěta

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 52 (2007), No. 1, 59--74

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141343>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2007

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

• Časopis:

- [3] Dissertatio Cvm Nvncio Sidereo III, Pragae MMVI 12. VIII. – 25. VIII. Official newspaper of the IAU General Assembly 2006.
No. 3, str. 3–5: Materiály komise pro definici planet — návrh rezoluce.
No. 6, str. 3: Dialog o navržené rezoluci k definici planety.
No. 9, str. 9: Konečná verze rezoluce k definici planety.
No. 10, str. 1: Výsledky hlasování o konečné verzi k definici planety.
Viz též <http://astro.cas.cz/nuncius/>, <http://pluto.jhuapl.edu/>

Počátky moderní éry poznávání mikrosvětů

Jiří Králík, Ústí nad Labem

Tento článek stručně mapuje historii počátků fyzikálního výzkumu mikrosvětů od objevu elektronu k představě neutrina — pokrývá tak zhruba období od konce 19. století po práh II. světové války a shoduje se s dobou aktivní vědecké činnosti Ernesta Rutherforda. Příspěvek je komentovaným přehledem hlavních událostí fyziky částic v tomto období.

Pokud bychom se zajímali o původ částicové fyziky, asi bychom jejím otcem nazvali Novozélandana Ernesta Rutherforda (1871–1937) a její matkou Cavendish Laboratory (založena 1874, první ředitel James Clerk Maxwell), což svého času byla nejvyhlášenější laboratoř experimentální fyziky na světě. Rutherford dlouhá léta (1919–1937) tuto laboratoř vedl a učinil zde mnoho významných objevů. Než se však těmito objevy budeme zabývat, je slušné se nejprve zmínit o objeviteli první elementární částice.

První krůčky

V roce 1897 tehdejší šéf Cavendishovy laboratoře a Rutherfordův učitel Joseph John Thomson (1856–1940) zkoumal povahu záhadného katodového záření, vyskytujícího

Mgr. JIŘÍ KRÁLÍK (1975), katedra fyziky, Přírodovědecká fakulta Univerzity Jana Evangelisty Purkyně, Ústí nad Labem, e-mail: jkralik@physics.ujep.cz

se v evakuovaných skleněných trubicích, kterými protékal elektrický proud. Po sérii důmyslných pokusů nabyt přesvědčení, že vlastnosti záření odpovídají vlastnostem spršky částic mnohem lehčích ($\approx 2000\times$), než je nejlehčí z atomů — vodík. To, že poměr mezi elektrickým nábojem a hmotností (měrný náboj) nově objevených částic nezávisel na látce, ze které byla katoda vyrobena, naznačovalo spolu s několika dalšími pozorováními,¹⁾ že tyto částice jsou součástí atomů všech prvků. Thomson ještě v tom samém roce vystoupil se svou představou struktury atomu.²⁾ Světlo světa tak spatřil známý pudingový model (plum-pudding), který ve své původní podobě zobrazoval atom jako kouli kladně nabitého nehmotného fluida (puding), v němž se (jako rozinky) vznášely tisíce jím objevených částic, kterým se postupně začalo říkat elektrony.³⁾ Thomson tuto představu nadále vylepšoval a mimo jiné ji podpořil složitými výpočty mechanické a radiační stability (1904). Jeho model atomu se pak v druhé polovině první dekády dvacátého století prosadil mezi alternativními modely atomu, a to nejen u fyziků, ale i u chemiků. Pudingový model však nebyl v porovnání s kvantitativními měřeními nijak zvlášť úspěšný, a i když se udržel poměrně dlouho (zejména v chemických kruzích), postupně ztrácel na síle. Nejznámějším, ovšem zdaleka ne jediným důvodem k jeho opuštění byla měření rozptylu heliových jader (tzv. částic alfa) na zlatých fóliích.⁴⁾

¹⁾ Například částice vylétující z kovů při fotoelektrickém jevu nebo jedna složka záření vycházející z radioaktivních látek měly stále týž měrný náboj jako částice Thomsonovy.

²⁾ Zde dochází k zajímavému paradoxu. Zatímco Thomson a další vědci (mezi jinými například Hendrik Lorentz, Max Born a samozřejmě Rutherford) již přemýšleli nad vnitřní strukturou atomů, významná část fyziků a chemiků té doby jejich samotnou existenci stále popírala — asi největší advokát představy o atomové povaze hmoty Ludwig Boltzmann si dokonce v návalu deprese způsobené mimo jiné i frustrací ze subjektivního pocitu vědecké izolace vzal ještě v roce 1906 život. Možnost přímého experimentálního důkazu existence atomů vyplývala z teoretické práce Mariana Smoluchwského (1904) a ještě markantněji z práce Alberta Einsteina (1905) o Brownově pohybu. Rozhodující experimenty, přesvědčující i největší odpůrce atomové hypotézy, provedl až v roce 1908 Jean Perrin. Další silné důkazy záhy přinesla Wilsonova mlžná komora (Charles Wilson 1911, viz též níže) a Laueův dvojnásobný úspěch při kvantitativním vysvětlení rozptylu rentgenových paprsků, o jejichž původ se do té doby vedly vášnivé spory, na krystalech pomocí představy dopadu vlnění na pravidelně prostorově uspořádané bodové objekty (Max von Laue 1912). (Jediný Ernst Mach zůstal nepřesvědčen až do své smrti v roce 1916.)

³⁾ Termín „elektron“ se poprvé objevil v souvislosti s předpokladem „atomární struktury elektriny“ v článku G. J. Stoneyho *On the „elektron“ or atom of electricity* uveřejněném ve *Philosophical Magazine* v roce 1884 (ἤλεκτρον = řec. směs zlata a stříbra nebo též jantar). Sám Thomson nejprve nazýval jím objevené částice „korpuskule“ a název elektron přijal až později. I když tedy představa elementárního elektrického náboje vznikla již před Thomsonovými měřeními, byl Thomson první, kdo tento náboj přisoudil částici s danou hmotností ([26], str. 22). Thomsonova měření *elektrického náboje* elektronů velmi zpřesnil Robert Andrew Millikan (1868–1953) v letech 1906–1913.

⁴⁾ Někomu může připadat divné, že za otce částicové fyziky je obecně považován Rutherford a ne Thomson. Přestože Thomson objevil první elementární částici, Rutherford pro zrod a první krůčky této vědní disciplíny udělal přece jen o něco více. Snad k tomu přispívá i názor, že „pravým“ otcem není z mužů ten, kdo se účastní početí, ale ten, kdo nejvíce pomáhá při výchově.

Objev atomového jádra

Röntgenův objev nového druhu záření (1895) indukoval objev tzv. uranových paprsků (Henri Becquerel 1896), který otevřel obsáhlou oblast výzkumu radioaktivity a měl na budoucnost částicové fyziky zcela zásadní vliv. V roce 1898 Rutherford dokázal, že radioaktivní látky vysílají minimálně dva druhy záření — označil je α a β .⁵⁾ Již několik měsíců po Rutherfordově pozorování bylo několika vědci nezávisle potvrzeno, že záření β je tvořeno tokem stejných částic, jaké objevil Thomson, tedy elektronů (Becquerel, Pierre a Marie Curieovi, Wilhelm Wien). Povahu záření α definitivně objasnili Rutherford se svým asistentem Thomasem Roydsem v roce 1908 — jde o proud héliových atomů — když předtím ve stejném roce dospěl s jiným svým asistentem Hansem Geigerem k přesvědčení, že α -částice s sebou nesou kladný elektrický náboj stejné velikosti, jako byl dvojnásobek náboje Thomsonem nalezeného elektronu.

Důkladný výzkum α -částic umožnil Rutherfordovi ve spolupráci s Hansem Geigerem (asistent) a Ernestem Marsdenem (student) další důležitý objev — objev atomového jádra. Z původně zamýšleného cvičení na ověření Thomsonova modelu atomu nakonec vyplynulo, že aby se vysvětlily výsledky těchto tzv. rozptylových experimentů (Geiger, Marsden 1909), měly by atomy v sobě obsahovat nesmírně malé (v porovnání s rozměry atomu) a přitom těžké (v porovnání s hmotností atomu) hrudky. Princip rozptylových experimentů je široce užíván i v současnosti. Jeho podstatou je fyzikální analýza produktů srážky (nebo dostatečného přiblížení) studovaných kousků hmoty. Ve zmiňovaných experimentech z roku 1909 šlo o rozptyl částic α na atomech zlata, přičemž se měřily úhly, pod kterými se α -částice po průchodu tenkou zlatou fólií odchylovaly od původního směru letu. Důkladnou analýzou situace Rutherford ukázal, že Thomsonův model není schopen vysvětlit naměřené velké odchylky, a v roce 1911 přišel s návrhem svého jaderného modelu atomu.

Od počátku bylo zřejmé, že experimentální důkaz atomového jádra vytváří pro klasickou fyziku silný problém. Jakákoli konkrétnější představa totiž vedla na nějakou obdobu planetárního modelu atomu, který, jak bylo ukázáno již dříve, musí být díky elektromagnetickému vyzařování *pohybujících se* elektronů nestabilní.⁶⁾ Nutnost vyzařování pro planetární model jednoznačně plyne ze spojení Newtonovy mechaniky a Maxwellovy teorie elektromagnetického pole — elektrony musely rychle ($\approx 10^{-9}$ s) spadnout na jádro. Rutherford záměrně otázku stability jím navrženého modelu neřešil, pro něj byl tento model jen dočasnou hypotézou vysvětlující rozptylové experimenty. „Záchrana“ přišla z řad teoretických fyziků, které Rutherford prý neměl příliš v lásce.

⁵⁾ V roce 1900 byla Paulem Villardem zaznamenána existence ještě třetí složky, která byla nazvána zářením γ — její vlnovou povahu dokázal Rutherford v roce 1914.

⁶⁾ Například v roce 1903 Hantaro Nagaoka navrhl model, v němž kolem těžkého kladně nabitého centra obíhají elektrony v útvech podobných Saturnovým prstencům. Svůj „důkaz“ stability této soustavy Nagaoka opřel o Maxwellovo vyšetřování gravitační stability prstenců kolem planety Saturn a další úvahy obecného charakteru. Tento model však záhy sklídl ostrou kritiku vědecké komunity pro svou nekonzistenci.

Odbočka k teorii

Vycházejí z výsledků spektroskopie a starších myšlenek Maxe Plancka (1858–1947) a Alberta Einsteina (1879–1955),⁷⁾ našel v roce 1913 jisté řešení problému struktury atomů dánský teoretický fyzik Niels Bohr (1885–1962), který tou dobou byl u Rutherforda na stáži.⁸⁾ Jeho model struktury atomu na jednu stranu zachoval názornost planetární soustavy (kladně nabitě malé, těžké jádro a kolem obíhající elektrony), ale zároveň do něj vnesl i představy klasickému náhledu úplně cizí. V Bohrově modelu atomu se energie systému „jádro + elektrony“ nemůže měnit spojitě, ale pouze skokem a vázané elektrony se mohou nacházet jen na soustředných kružnicích (tzv. orbitách) obklopujících jádro s diskrétní sadou poloměrů a nikde jinde. Přitom nebylo vůbec jasné, proč elektron ve stejně excitovaném atomu „padá“ na nižší orbity nepravidelně, jednou například na základní a podruhé třeba na pátou, tedy podle čeho se vybírá konečná stanice elektronu. S tímto problémem se družila i představa, že při excitaci mění atomový elektron orbitu, a to tak, že na jedné zmizí a na další se objeví (jinak by při pádu v coulombovském poli jádra musel měnit energii spojitě). Vzato do důsledku, Bohrov model zachránil stabilitu planetárního modelu tím, že bez hlubšího důvodu prohlásil, že elektrony na povolených orbitách prostě nevyzařují.

Velikým úspěchem však bylo, že Bohr byl díky svému modelu schopen velmi dobře teoreticky vysvětlit strukturu spektroskopických měření látek tvořených atomy s jedním elektronem (H, He⁺, Li⁺⁺, ...), přičemž mnohé empirické konstanty,

⁷⁾ Planck byl na přelomu 19. a 20. století experimentálními výsledky doslova dotlačen k předpokladu kvantování energie. Spektrální charakteristiky elektromagnetického záření, které se nachází v termodynamické rovnováze se stěnami (absolutně) černého tělesa, se mu podařilo popsat pouze za předpokladu, že výměna energie mezi elektromagnetickým polem a černým tělesem není spojitá, ale že v závislosti na kmitočtu ν je pohlcována a vyzařována jen po balíčcích o velikosti $h\nu$. Planckův, klasické fyzice naprosto cizí předpoklad začal brát vážně až o pět let později Einstein, který na jeho základě vysvětlil několik do té doby záhadných jevů (z nichž asi nejznámější jsou (vnější) fotoelektrický jev a závislost měrného tepla krystalů na teplotě). Sám Planck nebyl žádný revolucionář a svůj předpoklad, nutný k vysvětlení tvaru spektrální křivky, považoval spíše za matematický trik než za nový přírodní zákon. Dnes se tedy má spíše za to, že ten, kdo prosadil Planckovo kvantování energie jako novou plodnou fyzikální myšlenku, byl až Albert Einstein a nikoli Planck (o tom svědčí více Planckových prohlášení, z nichž nejznámější je nejspíše z června 1913, kdy při podávání oficiálního návrhu na volbu Einsteina za řádného člena berlínské Akademie věd sice obecně Einsteina velmi chválí, ale také se zmiňuje, že „ve svých spekulacích občas přestřelí, jako například ve své hypotéze světelných kvant,“ viz [9], str. 44).

⁸⁾ Bohr jako teoretik měl u Rutherforda čestnou výjimku přízně — prý proto, že hrál dobře fotbal. Mimochodem, Bohr byl na stáži nejprve u Thomsona, ale s ním si příliš nerozuměl, částečně díky údajné Thomsonově škrobenosti a částečně snad i díky ne právě povedenému prvnímu setkání obou mužů (viz např. [9], str. 69). Z Bohrových dopisů z tohoto období však vyzařuje silný obdiv k Thomsonovi a sám pobyt v Cambridge nepovažuje za ztracený ([19], str. 39). Rutherford se pro Bohra stal nejdůležitější vědeckou postavou jeho života a byl pro něj „téměř jako druhý otec“ ([16], str. 18).

kteřé do té doby ve spektroskopických vztazích figurovaly, uměl nahradit z modelu přirozeně vyplývající kombinací základních fyzikálních konstant (c , e , h , m_e , ...). Díky Bohrovým představám a jejich dalšímu rozvinutí (např. zavedením eliptických trajektorií a představ speciální teorie relativity nezávisle Williamem Wilsonem, Arnoldem Sommerfeldem a Jun Ishiwarou v roce 1915) bylo vysvětleno například štěpení spektrálních čar v elektrickém poli (J. Stark 1913), byly objasněny výsledky měření Henryho Moseleyho s rentgenovými spektry jednotlivých prvků (1913–14), experimenty Jamese Francka a Gustava Hertze s kvantováním energie atomů (1914) a bylo podáno základní vysvětlení struktury periodické tabulky prvků.⁹⁾ Zřejmě největším přínosem Bohrova modelu však bylo udání směru výzkumu určeného jeho kritikou.¹⁰⁾ Tento směr po více než desetiletém intenzivním úsilí nejlepších fyziků té doby vedl nakonec k vytvoření moderní kvantové teorie, která se stala základem pro naše zatím nejdůkladnější pochopení struktury mikrosvěta.

Další postup teorie bude zmíněn jen ve stručnosti výčtem nejvěhlasnějších vědců a jejich příspěvků, podílejících se na konečné podobě kvantové mechaniky. V roce 1923 přišel mladý francouzský fyzik Louis de Broglie (1892–1987), ve snaze zachovat symetrii mezi chováním elektromagnetického pole a chováním částic látky, s přiřazením vlnových vlastností částicím¹¹⁾; v létě roku 1925 přišel Werner Heisenberg (1901 až 1976) s první — tzv. maticovou — formulací kvantové mechaniky, která byla do konce roku důkladněji propracována ve spolupráci s Maxem Bornem a Pascuaelem Jordanem a nezávisle Paulem Diracem (1902–1984); v zimě a na jaře roku 1926 Erwin Schrödinger (1887–1961) formuloval tzv. vlnovou mechaniku a podal důkaz její ekvivalence s mechanikou maticovou; na začátku léta 1926 předložil Max Born (1882–1970) statistickou interpretaci významu Schrödingerem zavedené vlnové funkce a na konci léta téhož roku Dirac zobecnil formulaci kvantové mechaniky ve své teorii

⁹⁾ Z Bohrovy podmínky, určující vztah mezi kmitočtem ν elektromagnetického záření absorbovaného nebo emitovaného atomem při přechodu elektronu z jedné hladiny energie na druhou a těmito hladinami ($E_2 - E_1 = h\nu$), byl Albert Einstein v roce 1916 schopen znovu jinou cestou odvodit Planckův vyzařovací zákon černého tělesa. Navíc v této práci byla vůbec poprvé uvažována i tzv. indukovaná emise atomů, jejíž poznání o zhruba čtyřicet let později umožnilo sestrojít první MASERY a poté i LASERY. Einstein touto prací rovněž zavedl do fyziky elementárních procesů (tj. netýkajících se velkého souboru částic) statistický popis a tím vypustil džina z láhve, kterého pak sám později (po vzniku kvantové mechaniky) nebyl ochoten akceptovat.

¹⁰⁾ Přestože Bohřův model má mnoho nedostatků zásadního charakteru (úplné selhání jeho aplikace na jemnou strukturu atomových spekter, víceelektronové atomy a kovalentní vazby, neschopnost vysvětlit intenzity spektrálních čar aj.), představa atomu jako slunečního systému s určitými trajektoriemi elektronů zřejmě pro svou názornost a snad i velkou historickou hodnotu přetrvávala v mnohých učebnicích do poslední čtvrtiny 20. století.

¹¹⁾ Na experimentálním potvrzení této hypotézy (1927) se významně podílel i G. P. Thomson (nezávisle na práci C. J. Davissona a L. H. Germera), syn J. J. Thomsona. Vznikla tak jedna z nejpozoruhodnějších situací historie fyziky: syn dostal Nobelovu cenu za potvrzení vlnové povahy elektronů, jejichž částicové chování objevil jeho otec třicet let předtím.

reprezentací — maticová a vlnová mechanika se tak staly speciálními případy této formulace.¹²⁾

Kvantová teorie změnila naše chápání světa daleko zásadnějším způsobem než další myšlenkový převrat dvacátého století — speciální (Einstein 1905) a poté obecná (Einstein 1915) teorie relativity. Z deterministických preludů klasického světa nás přivedla do pravděpodobnostní reality — nadále již obecně nelze předpokládat, že měřitelné fyzikální veličiny (poloha, hybnost, energie apod.) sdružené s pohybem (mikro)objektů mají mezi měřeními svou určitou hodnotu, jak tomu bylo v klasické fyzice. Z dnešního pohledu to vypadá, že v jistých stavech nemají *žádnou* hodnotu, dokud se někdo (nebo něco) nepokusí takovou veličinu změřit makroskopickým přístrojem!

Další zvláštností je struktura pravděpodobnosti užívaná v kvantové fyzice — existuje-li například jistá pravděpodobnost \wp_1 , že nějaký jev (například dopad elektronu do detektoru) nastane jedním způsobem, a existuje-li navíc další pravděpodobnost \wp_2 , že stejný jev nastane jiným způsobem, neplatí obecně, jak by se dalo očekávat, že celková pravděpodobnost výskytu onoho jevu bude rovna $\wp_1 + \wp_2$.¹³⁾

Ze zvláštních předpokladů kvantové teorie pak vyplývají i zvláštní důsledky (které jsou i po více než třičtvrté století intenzivního testování v naprostém souhlasu se všemi experimenty): tunelový jev, interferenci podléhající pohyb elementárních částic, atomů i molekul, možnosti naprosto bezpečného (kvantového) kódování a velkého urychlení výpočtu některých matematických problémů pomocí kvantových počítačů a mnoho dalšího. Tato teorie je schopna popsat i ohromné množství „obyčejnějších“ jevů — stabilitu a strukturu atomů a molekul a spletitosti jejich spekter, radioaktivitu, feromagnetismus, různé typy vodivosti v látkách (zejména pro dnešní počítačový svět nepostradatelných polovodičů) včetně supravodivosti, supratekutost, principy laserů atd. Kvantová teorie stojí prakticky za vším, co se v moderní fyzice (a zejména v té jaderné a částicové) děje.

Důležitý spin

Je zajímavé, že vylučovací princip, objevený Wolfgangem Paulim (1900–1958) koncem roku 1924 na základě empirických zkušeností, spatřil světlo světa ještě před zavedením nového stupně volnosti elektronu — spinu (Samuel Goudsmidt a George Uhlenbeck

¹²⁾ Snad je vhodné na tomto místě zmínit objev principu neurčitosti W. Heisenbergem (březen 1927), který má jistě svou nespornou historickou hodnotu. Nicméně v současné době je chápán spíše jen jako *důsledek* rozhodnutí popisovat fyzikální veličiny pomocí operátorů a stav systémů pomocí vlnové funkce (paprskem v Hilbertově prostoru), tj. nejde o *princip*. Matematické vyjádření Heisenbergova principu — relace neurčitosti — jsou kvantitativním měřítkem omezenosti aplikovatelnosti z klasického světa vycházejících pojmů a představ na mikrosvět.

¹³⁾ Pravděpodobnosti jevů počítané v kvantové fyzice jsou například schopny interference! Z tohoto důvodu kvantová mechanika neoperuje přímo s pravděpodobnostmi \wp , ale s tzv. amplitudami pravděpodobnosti ψ , kterým se také, poněkud nevhodně, říká vlnové funkce a které mají s pravděpodobnostmi samými podobný vztah jako intenzita elektromagnetického záření a intenzita elektrického pole v elektromagnetické vlně, tj. $\wp \sim |\psi|^2$.

1925).¹⁴⁾ Měření průmětu spinu na libovolnou osu dává pouze diskrétní hodnoty (experimenty Otto Sterna a Walthera Gerlacha s kvantováním magnetického momentu atomů 1921), podobně jako kvantový moment hybnosti spojený s orbitálním pohybem elektronu v atomu v Bohrově teorii. Spin také společně s orbitálním momentem hybnosti splňuje zákon zachování.

Z klasického pohledu popisuje spin záhadnou vlastnost příslušnou všem částicím (jsou ovšem i částice s nulovým spinem). Jeho původní interpretace (v rámci Bohrova modelu) jako momentu hybnosti odpovídajícímu rotaci částic-kuliček kolem vlastní osy souměrnosti se ukázala jako neudržitelná. Takovéto pojmání spinu poskytuje například zcela nesprávnou hodnotu magnetického momentu elektronu, klasické představy také vedou k rotaci bodů na povrchu elektronu (kulička) s nadsvětelnou rychlostí a energie elektronu ukrytá ve vlastním magnetickém poli by převyšovala jeho kinetickou energii.¹⁵⁾ Dnes považujeme existenci spinu za čistě kvantový jev, který sice s momentem hybnosti úzce souvisí (přes zákon zachování), ale nemá jeho vektorový charakter (jde o tzv. spinor). Existenci spinu odůvodnila až relativistická kvantová mechanika a ještě hlouběji teorie kvantových polí (viz dále).

Souvislost vylučovacího principu a spinu není náhodná — spin, který je pro každý druh částic charakteristický podobně jako její elektrický náboj či její hmotnost, má totiž zásadní vliv na jejich „sociální“ chování. V roce 1924 Einstein zobecnil práci Satyendry Nath Boseho (1894–1974) a vyjádřil obecný vztah pro střední počet *nerozlišitelných* částic v termodynamicky rovnovážném systému, mají-li tyto částice určitou hodnotu energie, tzv. Boseho-Einsteinovu statistiku. Tato statistika popisuje systémy identických částic, které jsou „družné“ a mají tendenci se dostávat do stejného stavu.¹⁶⁾ V únoru 1926 navrhl Enrico Fermi (1901–1954) statistiku pro rodinu částic, které se řídí vylučovacím principem, a tedy jsou „nesnášenlivé“. Se stejným návrhem přišel v srpnu 1926 nezávisle Dirac a navíc ukázal, že systém podléhající Boseho-Einsteinově statistice je nutné popisovat symetrickou vlnovou (stavovou) funkcí a systém podléhající Fermiho-Diracově statistice antisymetrickou vlnovou funkcí. Brzy se poznalo, že těmto dvěma druhům statistiky přísluší částice lišící se spinem. Částice, jejichž průmět spinu nabývá celočíselných hodnot Planckovy konstanty, podléhají

¹⁴⁾ Historie objevu vylučovacího principu a následně spinu je zajímavá, ale poněkud zapeklitá. S podrobnostmi se lze seznámit např. v [14], str. 652–709, či v [26], str. 194–196, a na populární úrovni v [17], str. 236–243.

¹⁵⁾ Pauli v souvislosti s čtvrtým kvantovým číslem, které dnes chápeme jako hodnotu průmětu spinu na nějakou přímkou, hovořil o „neklasické dvouhodnotovosti“ a po zavedení spinu jako rotace elektronu byl zásadně proti této klasické představě. Když se ho ale v pozdějších letech náš významný teoretický fyzik Jozef Kvasnica zeptal, jak si spin představuje on, prý „s ironií jemu vlastní odpověděl: přirozeně jako rotaci, mohu si to však dovolit, poněvadž vím, jaký je to nesmysl.“ [12]

¹⁶⁾ Bose zaslal Einsteinovi článek, ve kterém objevil nový způsob odvození Planckova vztahu pro vyzařování černého tělesa bez použití představ klasické fyziky (Planckovo původní odvození nebylo konzistentní). V tomto článku předpokládal, že nelze rozlišovat stavy obsazené kvanty elektromagnetického pole (fotony) se stejnou frekvencí, tj. stavy lišící se pouze záměnou takových kvant Bose považoval za stav jediný. Mimochodem, název „foton“ pro kvantum elektromagnetické energie zavedl chemik Gilbert Newton Lewis (1875–1946) až v roce 1926.

Boseho-Einsteinově statistice a říkáme jim bosony. Tyto částice by samy o sobě nebyly schopné vytvořit tak různorodou směs látek, jakou v přírodě pozorujeme. „Naštěstí“ existují i částice s poločíselným průmětem spinu, které podléhají Fermiho-Diracově statistice a rády se nemají. Takové částice nazýváme fermiony¹⁷⁾, a protože elektrony jsou také představitelé fermionů, vděčíme jejich nesnášenlivosti za rozmanitost přírody. Tato empirická souvislost mezi spinem a statistikou byla teoreticky zdůvodněna Paulim v roce 1940 v rámci teorie kvantových polí.

Další vývoj jaderné a částicové fyziky

Rutherford byl především experimentální fyzik. Proto se nevrhl do víru hledání chyb a vylepšování Bohrových myšlenek a místo toho se snažil dál pomocí rozptylových experimentů zjistit co nejvíce o struktuře jím objevených jader.

Již na počátku roku 1914 bylo známo, že sídlem veškeré radioaktivity je jádro, a bylo zřejmé, že jádro vodíku, které bylo často nazýváno H-částicí,¹⁸⁾ je zvlášť důležité. Na jaře 1914 přišel Rutherford s představou (spekulativní) jádra s hmotovým číslem A a nábojem Z (což byli přímí předchůdci nukleonového a protonového čísla) jako směsi A kladných elektronů (H-částic) a $(A-Z)$ elektronů (A bylo bráno jako přirozené číslo).

První světová válka (1914–1918) sice znamenala zdržení (ne však zastavení) výzkumu, ale hned po ní přišel Rutherford s dalším fenomenálním objevem (1919): ostřeloval plynný dusík částicemi α a po určité době zjistil, že tu a tam se v nádobě s dusíkem vyskytl kyslík a navíc vylétala částice, o které se časem zjistilo, že tvoří jádro atomu vodíku. Tuto částici Rutherford nyní začal nazývat protonem ($\pi\rho\omega\tau\omicron\varsigma$ = řec. první, přední).¹⁹⁾ Výše uvedenou kolizi si fyzikové zvykli zapisovat takto:



Tato reakce je první zaznamenanou umělou přeměnou jedné látky (dusík) na jinou (kyslík) a představuje tak vlastně splnění dávného snu alchymistů (i když ti usilovali především o zlato). K registraci částic se tehdy užívalo počítání záblesků z dopadů na fluorescenční stínítko nebo mlžné komory.²⁰⁾

K velkému posunu v tomto směru došlo právě zdokonalením mlžné komory (Patrick Blackett u Rutherforda 1923) — její pomocí byl pořízen první vizuální záznam celého jaderného procesu. V roce 1925 Walther Bothe a Hans Geiger svou koincidenční

¹⁷⁾ Termíny „fermion“ a „boson“ byly zavedeny až v roce 1945 Diracem.

¹⁸⁾ Tento termín zavedl Rutherfordův (v té době již) asistent Marsden, Rutherford tuto částici také nazýval „kladným elektronem“ (positive electron).

¹⁹⁾ Dokonce navrhoval název „prouton“ na počest Williama Prouta, který již v roce 1815 přišel s hypotézou, že všechny prvky jsou složené z vodíku ([8], str. 387).

²⁰⁾ Mlžná komora je zhruba řečeno nádoba, ve které se nacházejí páry nějaké látky v tzv. podchlazeném stavu — vlétne-li do ní nabitá částice, vzniknou kolem trajektorie jejího pohybu kondenzační jádra, na kterých se sráží kapičky této látky. Takto vzniklá mlha je pak pozorovatelná. (Podobný proces nastává u letadel letících za slunečného počasí ve větších výškách.)

metodou dokázali zákon zachování energie v atomárních procesech za účasti kvant elektromagnetického pole (fotonů). Tento a známý Comptonův experiment z roku 1922 přesvědčil i největší odpůrce o reálné existenci fotonů.²¹⁾ Velký posun fyziky jádra rovněž znamenalo vysvětlení radioaktivního rozpadu kvantovou teorií (George Gamow pomocí tunelového jevu 1928).

První urychlovače

Ohromné rozdíly mezi mikrosvětlem a makrosvětlem nepanují pouze v hmotnostní a rozměrové škále, ale i ve škále energií. Upustíme-li například 10 dag salámu z výšky 1 m na zem, ztratíme přibližně 1 J jeho mechanické energie. Naproti tomu energiové schody v elektronových obalech atomů disponují přibližně energií pouhých $(1 \text{ až } 1000) \cdot 10^{-19} \text{ J}$ a excitační energie atomových jader se pohybují v řádu $\sim 1\,000\,000 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, což je více než bilionkrát méně než u zmíněného salámu. Protože při umělém dodávání energie nabitým částicím velmi často pracujeme s elektrickým polem, vžila se jednotka elektronvolt (eV), což je energie, kterou získá částice nabitá elementárním nábojem ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) při průletu potenciálovým rozdílem (napětím) 1 V. Průletem elektrodami, mezi kterými je napětí U , tak elementární částice získá energii $\{eU\}$ joulu a $\{U\}$ elektronvoltů.

Ve světě nízkých teplot, ve kterém žijeme, jsou běžná jádra většiny atomů neobyčejně stabilními útvarů, a abychom mohli zkoumat jejich vnitřní strukturu, potřebujeme velmi účinné projektily. Přírodní radioaktivní zdroje brzy přestaly stačit a Rutherford i ostatní si uvědomovali, že je potřeba zařízení, která budou produkovat částice s vyšší energií.²²⁾ V roce 1932 bylo Johnem Cockroftem a Ernestem Waltonem (v Cavendish Laboratory u Rutherforda) sestrojeno vysokonapěťové zařízení (800 000 V) pohánějící protony získané z plynného vodíku v slouhu urychlovací trubici vstříc lithiovému terči. Rozbor výsledků takových srážek ukázal, že docházelo k přeměně lithia na hélium (díky tunelovému jevu), což znamenalo, že toto zařízení bylo schopno uměle rozbít atom. Navíc šlo o první zcela uměle řízenou jadernou transformaci. Zdokonalené verze takovýchto zařízení (jsou to vlastně obrovské Van de Graaffovy generátory) byly schopny urychlovat částice na energie několika milionů elektronvoltů.

Ještě vyšších energií bylo možno dosáhnout pomocí tzv. lineárního vysokofrekvenčního urychlovače (Rolf Wideröe 1928), v němž se částice neurychlují naráz, ale prochází řadou postupně se prodlužujících trubicevých elektrod připojených na vysokofrekvenční napětí konstantní frekvence.²³⁾

²¹⁾ Diskuse o tom, co je to „reálná existence fotonů“, by vydala přinejmenším na samostatný článek, proto raději tento výraz přenechávám intuitivnímu chápání. Mimochodem, je zajímavé, že do tohoto „klubu posledních nevěřících“ patřil i Niels Bohr.

²²⁾ Rutherford byl ovšem přesvědčen, že je možné dále vystačit s jednoduchými levnými zařízeními a že větších investic není třeba (nevěřil v praktickou hodnotu jaderné fyziky). I díky tomuto omylu přešla vedoucí úloha v této oblasti výzkumu na dlouhou dobu do zámoří.

²³⁾ Částice jsou urychlovány v mezerách mezi elektrodami, které se tak musí prodlužovat úměrně vzrůstající rychlosti částic.

V roce 1930 Ernest Orlando Lawrence (1901–1958) vynalezl zařízení, v němž se pro urychlení použilo opět vysokofrekvenční napětí, ale částice se v něm pohybovaly po spirálovitých trajektoriích, na nichž byly udržovány silným magnetickým polem. Tento urychlovač, nazvaný cyklotron, našel pro svou jednoduchost a prostorovou nenáročnost uplatnění zejména v medicíně (urychloval i částice poprvé užitě při ozařování zhoubných nádorů), pro částicovou fyziku se nakonec jeho zhruba 20 MeV maximálně dosažitelné energie ukázalo příliš omezující.²⁴⁾

Velmi důležitým zdrojem urychlených částic se ve třicátých letech stalo tzv. kosmické záření. Pečlivými experimenty bylo změřeno, že na Zemi dopadá odkudsi z kosmu velmi pronikavé záření (definitivní důkaz existence kosmického záření byl proveden v srpnu 1912 Viktorem F. Hessem při výstupu v balónu vypuštěnému u Ústí nad Labem). Dnes víme, že se toto záření skládá převážně z protonů o různých energiích, nicméně původ všech jeho složek dosud neznáme.

Důležitý střípek do skládanky

Už v roce 1920 Rutherford navrhl pro vysvětlení existence izotopů²⁵⁾ hypotézu, podle které se v atomovém jádře kromě protonů a elektronů nacházejí ještě neutrální částice s hmotností podobnou protonu — nazval je předběžně neutrony. Tuto domněnku se však vytrvale nedařilo dokázat — jeho asistent James Chadwick se o to pokoušel prakticky celá dvacátá léta. Úspěch se dostavil až po dlouhých dvanácti letech v roce 1932.²⁶⁾ Do tohoto objevu byl všeobecně přijímán model jádra složeného pouze z protonů a z elektronů (Rutherford 1914), tato představa ale trpěla značnými problémy. Po nalezení neutronů Dmitrij Ivaněnko ukázal, že nahradíme-li jimi jaderné elektrony, většina problémů vymizí. První ucelenější teorii atomového jádra složeného z protonů a neutronů sestavil Werner Heisenberg (1932). Tak byl v hrubých rysech dokončen moderní obraz původu a vlastností periodické soustavy prvků — počet protonů v atomech prvku určuje jeho pozici v periodické soustavě, přičemž tomuto místu zpravidla přísluší různý počet neutronů, který pak rozlišuje různé izotopy tohoto prvku. Veškerých chemických reakcí se účastní pouze elektrony z obalu atomového jádra, struktura obalu tak odpovídá za všechny chemické vlastnosti látek.

²⁴⁾ Za to, že cyklotrony ve své původní podobě nebyly schopné dosáhnout vyšších energií urychlovaných částic, může relativistické „vzrůstání hmotnosti“ částic při vyšších rychlostech. Teorie relativity se tak nejspíš poprvé dostala z předmětu vědeckého výzkumu na místo inženýrské praxe. Při konstrukci silnějších urychlovačů s ní bylo a je nutno nadále počítat.

²⁵⁾ Jev izotopie byl nepřímo dokázán zejména v pracích Fredericka Soddyho z roku 1911 (výraz „isotope“ pochází od něho) u několika radioaktivních prvků a Soddym předvídaní i u neradioaktivních, první přímý důkaz (svou metodou parabol) provedl v letech 1912–1913 J. J. Thomson u neonu.

²⁶⁾ Chadwick našel neutron při studiu reakce ${}^9\text{Be} + {}^4\text{He} \longrightarrow {}^{12}\text{C} + \text{n}$. Zajímavé je, že tato reakce byla již před Chadwickovým objevem nezávisle studována dvěma velmi zkušenými týmy (Bothe + Becker a Frédéric + Irène Joliot-Curieovi), těm se však, naštěstí pro Chadwicka, podstatu záření vycházejícího z beryllia bombardovaného α -částicemi prokázat nepodařilo.

Téměř idylický obraz mikrosvěta poněkud narušovala částice, kterou v roce 1930 předpověděl Wolfgang Pauli kvůli zajištění zákona zachování energie a momentu hybnosti (spinu) při radioaktivním β -rozpadu jader. Tato částice, později nazvaná neutrino,²⁷⁾ měla mít téměř duchařské vlastnosti — nulový elektrický náboj, nulovou nebo téměř nulovou hmotnost a velmi malou schopnost být zachycena „normální“ hmotou. Přímý důkaz existence neutrina byl podán až více než osm let po druhé světové válce.

Teorie před experimentem aneb první pozdrav z antisvěta

Přestože kvantová mechanika chrlila jeden fundamentální výsledek za druhým,²⁸⁾ byla stále nerelativistickou teorií²⁹⁾ — snaha o její relativistickou formulaci znamenala významný úspěch v roce 1928, kdy Dirac formuloval kvantovou relativistickou rovnici, která, jak se později ukázalo, velmi dobře popisuje pohyb fermionů. Z Diracovy rovnice mimo jiné přímo vyplývala existence spinu pro částice, které se jí řídí (tenkrát byly uvažovány pouze elektrony, které mají spin $\hbar/2$).³⁰⁾ Zpočátku se zdálo, že Diracova rovnice trpí vážnými nedostatky, vyplývalo z ní například, že volným elektronům může příslušet i záporná celková energie. Dirac tento neduh své teorie řešil aplikací Pauliho vylučovacího principu na elektrony a předpokladem, že všechny záporné energiové stavy ve vakuu jsou již zaplněny (1930),³¹⁾ a pokud se objeví místo (díra) v těchto záporných stavech, projeví se zvnějšku jako částice se stejným spinem a hmotností jako elektron, ale s kladnou energií a kladným elektrickým nábojem (květen 1931). Předpověď ovšem vyvolala silnou kritiku.³²⁾ Velká změna kurzu nastala, když na konci roku 1931 (aniž by

²⁷⁾ Pauli nejprve nazval svou částici „neutronem“, ale když došlo na porovnání jeho a Chadwickova neutronu, prohlásil údajně Fermi: „Ne, Pauliho neutron je mnohem menší. Je to takové neutrino (v italštině by znělo asi jako neutronek).“ (Viz [7], str. 46.) Název se ujal a už této fantómové částici zůstal.

²⁸⁾ Tomuto období se také říká „zlatý věk teoretické fyziky“, protože podle Paula Diraca to byla doba, kdy i druhořadí fyzikové dosahovali prvotřídních výsledků ([4], str. 7, citováno v [11]).

²⁹⁾ Schrödinger nejprve odvodil rovnici splňující požadavky speciální teorie relativity, ale protože její řešení nesouhlasila s experimentálními výsledky jemné energiové struktury vodíku, zavrhl ji. Později v roce 1926 byla nezávisle znovuobjevena O. Kleinem, W. Gordonem, V. Fockem, J. Kudarem, Th. de Donderem a H. F. van den Dungenem. A až několik let nato se ukázalo, že tato rovnice popisuje pohyb bosonů (Pauli a Viktor Weisskopf 1934).

³⁰⁾ Zde zkracuji, jak je v literatuře obvyklé, přesnější vyjádření „částice se spinem o velikosti $s = \sqrt{1/2(1/2 + 1)} \hbar$ “. Průmět tohoto spinu na libovolnou osu může být pouze $+\hbar/2$ nebo $-\hbar/2$. Je zajímavé si uvědomit, že kdyby byla Diracova rovnice objevena v roce 1924, což se v principu mohlo stát, *předpovídala* by existenci elektronového spinu.

³¹⁾ Tato představa byla posléze nazvána „Diracovo moře“.

³²⁾ Například v jednom z největších teoretických fyziků 20. století Lvu Landauovi (1908 až 1968) prý Diracova rovnice vzbuzovala takový odpor, že ji „zavěsil na tabuli hanby, mezi fotografie pranýřovaných lajdáků, opilců a podobných individuí...“ ([13], str. 92).

o Diracově předpovědi věděl) objevil Carl Anderson při výzkumu složení kosmického záření v mlžných komorách stopy částic, které zanechávaly stejné otisky jako elektrony, ale v magnetickém poli uhýbaly „na nesprávnou stranu“ — takto byly experimentálně nalezeny pozitrony (pojmenování pochází od Andersona),³³⁾ první částice z antisvěta.³⁴⁾

Po pravdě řečeno, přestože Diracova teorie dávala správný magnetický moment elektronu, jemnou energiovou strukturu vodíku a předpověď existence spinu elektronu, byla kritizována i po objevu pozitronu, například velmi uznávaný fyzikální arbitr Pauli, nazývaný pro svou kritičnost svědomím fyziky, v roce 1933 Diracovi napsal: „Nevěřím vaší představě „děr“, dokonce i když byla existence „anti-elektronu“ dokázána.“ A ještě v roce 1936 tvrdil: „Vypadá to, že úspěch je spíše na straně Diraca než logiky“ ([16], str. 60). Problémy této teorie vyřešila až teorie kvantových polí (viz níže).

Během následujících desítek let byla objevena velká řada dalších částic a k nim příslušných antičástic (existují ovšem i částice jako například fotony nebo mezony π^0 , které jsou samy svými antičásticemi) a kromě elektrického náboje a spinu bylo zavedeno několik dalších nábojů, resp. kvantových čísel,³⁵⁾ z nichž některé splňují striktní či méně striktní zákony zachování při reakcích. Antičástice se oproti odpovídajícím částicím vyznačují opačnými kvantovými čísly³⁶⁾ a při interakci se svými protějšky mohou navzájem zaniknout (anihilovat) za vzniku (krece) jiných částic či antičástic, které již některá z těchto kvantových čísel mají vynulovaná. Na tomto místě je nutné zdůraznit, že anihilace není přeměna hmoty na energii, jak se někdy uvádí. Jako každá zatím známá fyzikální reakce splňuje i anihilace zákon zachování energie, jde tedy jen o přeměnu jednoho druhu hmoty na jiný. Pravdou ovšem je, že energie ukrytá v klidové hmotnosti částic není ke konání (makroskopické) práce přímo využitelná, na rozdíl od energie, kterou s sebou nesou částice s klidovou hmotností nulovou nebo malou.³⁷⁾

Chceme-li spočítat energii, která se „uvolní“ anihilací částice a antičástice, z nichž každá má (klidovou) hmotnost m , musíme použít variaci nejslavnějšího fyzikálního vztahu na světě $E = 2mc^2$. Z jednoho gramu látky a stejného množství antilátky bychom tedy mohli „získat“³⁸⁾ přibližně 2×90 milionů MJ (≈ 50 milionů kWh), což je teplo, které by v mžiku dokázalo ohřát přes 400 tisíc tun vody (tj. asi 130

³³⁾ Pozitrony byly díky této vlastnosti také nějakou dobu nazývány „oslovské částice“.

³⁴⁾ Termín „antisvět“ má spíše romantický nádech — antičástice jsou samozřejmě důležitou součástí našeho světa (jen stále pořádně nerozumíme tomu, proč je jich o tolik méně než částic, které jsou pro nás „normální“).

³⁵⁾ Jde např. o baryonový a leptonový náboj či známě znějící (ale tím poněkud zavádějící) kvantová čísla podivnost, půvab, krásu nebo pravdu.

³⁶⁾ Ne všechny charakteristiky antičástic jsou opačné, například hmotnost, velikost spinu, doba života a izospin nejsou.

³⁷⁾ Jde spíše o obecný argument, protože na druhé straně například využitelnost energie neutrin, která mají dostatečně malou hmotnost, je vzhledem k jejich neochotě s čímkoli interagovat nesrovnatelně nižší než u těžších částic.

³⁸⁾ V souladu s tím, co bylo uvedeno výše, jsou zde uvozovky proto, že se energie v pravém slova smyslu nezískává, ale přeměňuje na využitelnější formu.

padesátimetrových bazénů) z 0°C na 100°C .³⁹⁾ Hmotnosti samotných částic nejsou tak velké, proto odpovídající energie není tak ohromující — elektronu přísluší asi $0,5\text{ MeV}$ ($\approx 8 \times 10^{-14}\text{ J}$) a protonu a neutronu přibližně 940 MeV ($\approx 1,5 \times 10^{-10}\text{ J}$).

Nové pole kvantových představ

Kvantitativně nejvyšší shody experimentálních výsledků a teoretických výpočtů je dnes dosahováno v koncepčním rámci tzv. kvantové teorie polí, resp. výstižněji v teoriích kvantových polí [24], což je zobecnění základních představ kvantové mechaniky na systémy s nekonečným počtem stupňů volnosti.⁴⁰⁾ Z pohledu této teorie byly pohnutky, které Diraca dovedly k jeho přepracování vlnové mechaniky tak, aby byla v souladu se speciální relativitou a jeho teorií reprezentací [3], koncepčně chybné. Podobně jako poloklasická Bohrova teorie atomu vodíku dávala některé výsledky v naprosté shodě s pozdější kvantovou mechanikou, poskytla Diracova teorie stejné výsledky jako kvantová teorie pole pro děje týkající se pouze elektronů, pozitronů a fotonů i přesto, že vznikla na základě nesprávných představ. Daleko mocnějším prostředkem ke sloučení kvantových principů a speciální teorie relativity tedy není relativistická varianta Schrödingerovy mechaniky, ale obecnější formalismus teorie kvantových polí, předložený Heisenbergem a Paulim v r. 1929, viz [21]. Kvantová teorie pole popisuje i procesy jako například jaderný rozpad beta (Fermi 1934, viz dále), které Diracovou teorií nebylo možno popsat. Toto schéma vůbec nepotřebuje úvahy o obsazování stavů se zápornými energiemi, které Dirac navrhoval.⁴¹⁾

Dirac rovněž bývá považován za zakladatele kvantové elektrodynamiky, tj. teorie elektromagnetického kvantového pole. V jedné ze svých prací z roku 1927 úspěšně použil i dnes značně populární metodu zvanou druhé kvantování,⁴²⁾ což bylo formální nahrazení vlnové funkce funkcí operátorovou, na klasické Maxwellovo elektromagnetické pole. Nicméně kvantová (operátorová) pole nejsou kvantované vlnové funkce (amplitudy pravděpodobnosti), proto je tento název přinejmenším zavádějící (viz např. [15], [22], [24]). Základní v podstatě správné představy o elektromagnetickém

³⁹⁾ Kdybychom chtěli spojit gramové kuličky hmoty a antihmoty s tím, aby se úplně anihilovaly, narazili bychom na obdobu Leidenfrostova jevu. Mohutný tok energie vznikající u povrchu kuliček by při jejich setkání zbytky kuliček od sebe vzdálil tak, že by k objemové anihilaci nemohlo dojít. Zřejmě by bylo nutné kuličky nejprve nadrobit a nebo je srazit velmi rychle.

⁴⁰⁾ Pro upřesnění použiji slova Gerarda 't Hoofta, podle něhož je kvantová teorie pole odpovědí na otázku „Jak by měla být smířena kvantová mechanika se speciální relativitou?“ (viz <http://www.phys.uu.nl/~thoof/lectures/basisqft.pdf>).

⁴¹⁾ Přestože standardní model mikrosvětla založený na teoriích kvantových polí dodnes trpí mnoha nedostatky, je to dosud nejlepší *fyzikální* teorie, kterou máme a kdy jsme měli. Alternativním teoriím typu teorie superstrun se zatím nepovedl úplný přechod z matematických výšin do fyzikálního světa.

⁴²⁾ Metoda druhého kvantování nebyla poprvé objevena Diracem, jak se často uvádí (viz např. [5]), ale vyskytla se již dříve v člancích Pascuala Jordana (viz např. [20] nebo [23]). Název této metody ovšem pochází od Diraca.

kvantovém poli se objevily už ve významné „práci tří mužů“ [1] z konce roku 1925 (Born, Heisenberg, Jordan).

Popis fyzikálních systémů pomocí kvantových polí sjednocuje pohled na přírodu — tato koncepce zamítá vlnově-částicový dualismus bohrovského (kodaňského) popisu mikrosvětla a považuje za primární objekty (kvantová) pole.⁴³⁾ Částicové vlastnosti hmoty se projevují jako kvanta (excitace) těchto polí a z popisu též zcela automaticky plynou takové vlastnosti těchto kvant, jako je nerozlišitelnost, a dvě alternativy jejich popisu pomocí symetrických a antisymetrických stavových (vlnových) funkcí (viz např. [15], str. 27, či [25]). V rámci teorie kvantových polí je tedy vzájemné působení elektronů nahrazeno představou interakce elektronových polí, které se děje prostřednictvím fotonového pole. Nicméně v průběhu třicátých let se v této teorii objevily výpočty (první zřejmě v práci J. R. Oppenheimera z r. 1930), během kterých se naráželo na nekonečna (tzv. ultrafialové divergence), která se vytrvale nedařilo zkrotit. Proto vůči kvantové teorii polí vznikly silné pochybnosti, jež byly překonány až po druhé světové válce pomocí teorie renormalizace.⁴⁴⁾

Nové síly

Již delší dobu se vědělo, že na udržení kladně nabitých protonů v malém objemu jádra je zapotřebí jiných sil než již dávno známých gravitační či elektromagnetické.⁴⁵⁾ Protože přitažlivá gravitační síla protonů je proti jejich odpudivé elektrostatické síle neuvěřitelně slabá ($\approx 10^{37}$ krát), bylo nutné předpokládat existenci nové síly, která by byla schopna nad elektrickou zvítězit. Tato síla dostala přiléhavý název „silná jaderná síla“. První úspěšnější kvantově mechanickou teorií této síly (interakce) byla teorie japonského fyzika Hidekiho Yukawy (říjen 1934), který se pokusil popsat krátkodosahové přitažlivé síly mezi protony a neutrony pomocí výměny další, zatím neznámé

⁴³⁾ Mimochodem, používání spojení „vlnově-částicový *dualismus*“ není zcela vhodné ani v rámci standardní kvantové *mechaniky*, protože vlnový a částicový charakter mikroobjektů není rovnocenný ani zde — při snaze takový objekt lokalizovat (detekovat polohu) se vždy setkáme s prostorově velmi úzce ohraničeným záznamem, vlnový charakter se odráží pouze v *rozdělení pravděpodobnosti* míst dopadu do detektorů polohy. Kvantová stavová funkce však nepopisuje nějaký zvláštní druh klasického vlnění (už jen proto, že jde o funkci v prostoru *konfiguračním* a nikoli reálném).

⁴⁴⁾ Renormalizace je velmi stručně řečeno procedura, při níž se v průběhu (poruchových) výpočtů redefinují některé parametry (např. hmotnost a náboj elektronu). Nekonečna se během této operace kompenzují a kvantová teorie pole pak poskytuje (konečné) výsledky v až překvapivě přesném souladu s experimenty. Zajímavé je, že např. Richard P. Feynman (1918–1988), který se na záchraně koncepcí kvantové teorie pole (konkrétně kvantové elektrodynamiky) významně podílel (zejména spolu s Sin-itiro Tomonagou, Julianem S. Schwingerem a Freemanem J. Dysonem), ještě několik málo let před svou smrtí nazval renormalizaci „potrhlou procedurou“ ([6], str. 129), v podobném duchu se až do své smrti vyjadřoval i Dirac (viz např. [3]).

⁴⁵⁾ Tento postřeh publikovali již v roce 1921 James Chadwick a Étienne Bieler, když ve svých experimentech zjistili, že výsledky rozptylu α -částic na vodíku nelze vysvětlit pomocí Coulombova zákona.

částice.⁴⁶⁾ Aby výpočty souhlasily se skutečností, bylo nutné předpokládat, že její hmotnost je zhruba 200krát větší než hmotnost elektronu a její spin je nulový.

V roce 1937 byla Carlem Andersonem a Sethem Neddermeyerem nalezena částice, jejíž hmotnost byla blízká Yukawově předpovědi. Protože její hmotnost ležela mezi hmotnostmi elektronu a hmotností protonu, dostala název mezon ($\mu\epsilon\sigma\sigma$ = řec. střední) a označení μ . Dnes mezi mezony řadíme pouze částice, které mají celočíselný spin a jsou „citlivé“ na silnou interakci, tuto „definici“ však nově objevená částice nesplňovala, a proto nemohla být onou Yukawovou částicí.⁴⁷⁾ Předpovězená částice byla objevena až po válce (Cecil Powel 1947) a dostala název mezon π .

Několik měsíců před Yukawovou předpovědí (prosinec 1934) zkonstruoval Enrico Fermi relativistickou kvantovou teorii pole (podobnou kvantové elektrodynamice), která postulovala nový typ sil, tzv. slabé jaderné síly. Účinkem těchto sil (nebo lépe interakcí) byl vysvětlen rozpad neutronu, β -radioaktivita jader a některé další jemné efekty. Protože Fermiho teorie byla neobvykle úspěšná a neutrino v ní přitom hrála podstatnou roli, získaly tyto pronikavé částice mezi fyziky daleko větší respekt, než jaký měly do té doby.

Konec počátků

Během třicátých let byla učiněna řada důležitých objevů z fyziky atomového jádra, které nakonec vedly nejen k sestrojení atomové bomby, ale také k jaderným reaktorům. Krátce po válce vyvrcholila snaha o obecný popis kvantových polí a byla rozvinuta zejména kvantová teorie elektromagnetického pole. Dále bylo nalezeno větší množství nových technik urychlování částic a metod jejich detekce, což zapříčinilo objev mnoha dalších částic a zrod nových teorií. Tento stručný výlet do počátků historie objevování zákonitostí mikrosvětla však zakončíme datem úmrtí „otce atomové fyziky“ Ernesta Rutherforda — 19. října 1937.⁴⁸⁾

L i t e r a t u r a

- [1] BORN, M., HEISENBERG, W., JORDAN, P.: *Zur Quantenmechanik II*. Zeitschrift für Physik 35 (1926), 557–615.
- [2] BROWN, M. L., PAIS, A., PIPPARD, B. (ed.): *Twentieth Century Physics (vol. I)*. IOP Publishing & AIP Press, Bristol 1995.

⁴⁶⁾ V článkách o svém modelu jádra z roku 1932 přišel Werner Heisenberg s myšlenkou, že jádro drží pohromadě tzv. výměnná síla, která vzniká proto, že si protony a neutrony neustále vyměňují svoje role prostřednictvím elektronů.

⁴⁷⁾ Stále poněkud záhadná částice μ je dnes nazývána mion nebo lepton μ , protože nepatří do rodiny mezonů, ale do rodiny leptonů ($\lambda\epsilon\pi\tau\sigma$ = řec. tenký, jemný, drobný), v níž je například s elektrony a neutryny.

⁴⁸⁾ Rutherford zemřel jako lord Rutherford of Nelson na oddalování operace jeho částečně uskřínuté pupeční kýly. Když v roce 1940 zemřel J. J. Thomson, byl pohřben v těsné blízkosti Rutherfordova hrobu ve Westminsterském opatství, kde leží například i Isaac Newton a William Thomson (lord Kelvin).

- [3] DIRAC, P. A. M.: *Relativitická vlnová teorie elektronu*. PMFA 49 (2004), 289–99.
- [4] DIRAC, P. A. M., HORA, H. (ed.), SHEPANSKY, J. R. (ed.): *Directions in Physics*. John Wiley & Sons Inc, London 1978.
- [5] EZHELA, V. V.: *Particle Physics. One Hundred Years of Discoveries*. Springer-Verlag, New York 1996.
- [6] FEYNMAN, R. P.: *Neobyčejná teorie světla a látky*. Aurora, Praha 2001.
- [7] FRASER, G., LILLESTÖL, E., SELLEVÅG, I.: *Hledání nekonečna*. Columbus, Praha 1996.
- [8] HOLTON, G., BRUSH, S. G.: *Physics, the Human Adventure*. Rutgers University Press, London 2001.
- [9] JAMMER, M.: *The Conceptual Development of Mechanics*. McGraw-Hill, New York 1966.
- [10] KRAGH, H.: *Quantum generations*. Princeton University Press 1999.
- [11] GRIBBIN J.: *Pátování po Schrödingerově kočce*. Columbus, Praha 1998.
- [12] KVASNICA, J.: *Kvantová fyzika* (skriptum). Pedagogická fakulta, Ústí nad Labem 1984.
- [13] KVASNICA, J.: *Priekopníci modernej fyziky*. SÚV SZM, SZM, Bratislava 1987.
- [14] MEHRA, J., RECHENBERG, H.: *The Historical Development of Quantum Theory (vol. 1, part 2)*. Springer, Berlin 1982.
- [15] NEWTON, R. G.: *Quantum Physics*. Springer, New York 2002.
- [16] PAIS, A.: *The Genius of Science*. Oxford University Press, Oxford 2000.
- [17] PIŠŮT, J., ZAJAC, R.: *O atómech a kvantovaní*. Alfa, Bratislava 1988.
- [18] PRACH, V.: *Řecko-český slovník*. Vyšehrad 1998.
- [19] ROZENTAL, S. (ed.): *Niels Bohr*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1968.
- [20] SCHWEBER, S. S.: *QED and the Men*. Princeton University Press, Princeton 1994.
- [21] WEINBERG, S.: *Snění o finální teorii*. Hynek 1996.
- [22] WEINBERG, S.: *The Quantum Theory of Fields (vol. I, Foundations)*. Cambridge University Press, Cambridge 1995.
- [23] WEINBERG, S.: *Physics & history*. Daedalus 134 (2005), 31–39.
- [24] WEINBERG, S.: *What is quantum field theory, what did we think it was?* Článek v CAO, T. Y. (ed.): *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory*. Cambridge University Press, Cambridge 1999.
- [25] WILCZEK, F.: *Quantum Field Theory*. Rev. Mod. Phys. 71 (1999), 85–95.
- [26] ZAJAC, R., PIŠŮT, J., ŠEBESTA, J.: *Historické pramene súčasnej fyziky 2*. Komenského, Bratislava 1997.