

Stručná teorie elementárních částic

Z čeho je složen svět? Existují nejmenší částice hmoty? Platí pro ně zákony podobné zákonům makrosvěta? Tyto otázky náležejí k nejstarším, jaké kdy člověka zajímaly a vzrušovaly. Kladli si je před více než 25 stoletími ve starověkém Řecku a klade si je moderní přírodověda i dnes. Atom současné fyziky není ovšem totožný s atomem starověkých filozofů. Člověk poznal jeho stavbu a zjistil v něm neobyčejně pevné a rozměrově nepatrné jádro, složené z protonů a neutronů.

V chápání základní struktury hmoty dosáhla fyzika v posledních letech velkého pokroku. Proton, neutron a asi dalších tři sta příbuzných objektů bylo klasifikováno na základě teorie symetrie, což umožnilo předpovědět dosud neznámé objekty a jejich vlastnosti. Fyzikové studují síly mezi těmito objekty a na tomto základě je budována jednotná teorie silových interakcí.

Za své úspěchy vděčí fyzika mikrosvěta dokonalému přístrojovému vybavení, urychlovačům částic, detekčním registračním aparaturám a počítačům. Na jejich parametry jsou kladeny vysoké nároky na přesnost a výkon.

Mikrosvět ovšem není pouze zmenšený svět a nedostaneme se do něj pouhým zmenšováním vlastních rozměrů. Běžně pozorované vlastnosti makrokosmu v něm ztrácejí svůj původní význam. Lze pochybovat, zda má smysl vůbec pojem rozměrů, polohy, vzdálenosti, rychlosti nebo energie objektu. Lze pochybovat o tom, zda sledovaný děj se podobá letu kuličky v prostoru nebo vlnění na vodní hladině. Mnoho pojmů a vlastností, které v makrosvětě považujeme za nesporné a nepostradatelné, v mikrosvětě ztrácí zcela svůj smysl. Na druhé straně se objevují nové zákony, jejichž účinek v makrosvětě není vůbec patrný, jako je zákon zachování izospinu nebo podivnosti.

Řečtí atomisté geniálním způsobem předpověděli to, co po více než dvou tisíciletích objevila moderní přírodověda. Přesto je mezi poznáním řeckých atomistů a poznáním moderní přírodovědy zásadní rozdíl. Tento rozdíl spočívá v metodách studia přírody. Moderní přírodověda došla k existenci molekul, atomů a elementárních částic experimentem. Chemie od 18. století prováděla slučování prvků v sloučeniny a rozklad těchto sloučenin na jednotlivé prvky. Přitom se zjistilo, že slučování probíhá jen v určitých hmotnostních poměrech. Dané množství kyslíkového plynu bylo schopno přijmout jen určité množství vodíkového plynu k tomu, aby vznikla voda. Pokud dodáme vodíku více, zbude nevyužit, pokud ho dodáme méně, zbude nevyužitý kyslík. Tento přesvědčivý argument o atomární struktuře hmoty byl následován řadou dalších, které vyvrcholily v bouřlivém rozvoji chemie v 19. století. O struktuře samotných atomů vypovídaly pokusy fyziků ve 20. století. Spočívaly především v ostřelování atomů elektricky nabitými částicemi a elektromagnetickým zářením.

Uměle vyvolané srážky iontů, atomových jader, protonů a elektronů mají ovšem mnohem zajímavější cíl, než pouhé rozbíjení hmoty. Jsou v podstatě jediným způsobem, jak lze tyto objekty studovat. Na cestě do mikrokosmu se setkáváme se stále menšími objekty, z nichž každý se zpočátku jeví jako jednoduchý a dále nedělitelný. Při podrobnějším pohledu za použití vyšší energie se však projeví jako složitý komplex menších objektů.

V 18. století chemie začala dělit molekuly na atomy a ty opět sdružovat v jiné molekuly. Později přírodovědci začali rozbíjet atom. Zbavovali jeho obal jednotlivých elektronů. V roce 1910 Ernest Rutherford zjistil, že téměř všechna hmota je soustředěna v jádře atomu. Vznikla fyzika atomu. Ale samo jádro začalo vykazovat strukturu. Vznikla jaderná fyzika. Studium částic, z nichž je jádro složeno, dalo vznik subnukleární fyzice - fyzice elementárních částic. Začaly se objevovat nové, pro atom jakoby nepotřebné částice. Dokonce byly předpovídány teorie. Zpočátku jednotlivě, později po celých skupinách. Trojice elektron, neutron a proton, která tak dobře vysvětlovala strukturu atomu a atomového jádra, se ukázala z teoretického

hlediska velmi neúplná. Ucelenost teoretického obrazu vyžadovala existenci dalších částic, které měly nejen neobvyklé, ale pro teorii i nepříjemné vlastnosti, neboť nutily fyziky k opuštění vžitých představ o světě. Připomeňme například pozitron, očekávaný od r.1928 a objevený r.1932, neutrino, předpovězené v r.1930 a objevené v r.1956, které je téměř nepozorovatelné, neboť prochází vrstvami o tloušťce několika tisíc zeměkouli téměř bez překážek.

Začněme tedy studovat neobyčejné vlastnosti elementárních částic. Nejprve budeme stručně charakterizovat vlastnosti základních částic v atomu: elektronu, protonu a neutronu.

Elektrony jsou lehké záporně nabitě objekty, které vytvářejí kolem těžkého kladně nabitého jádra elektronový obal. Elektronový obal má zásadní význam pro chemické vlastnosti atomu, protože určuje jeho vazebné schopnosti pro vytváření molekul. Hmotnost elektronu je $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg a jeho záporný elektrický náboj je $-1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Počet elektronů určuje chemické vlastnosti atomu. V kovech se elektrony pohybují poměrně volně a protože jsou nositeli elektrického náboje, jsou schopny přenášet elektrický náboj z místa na místo, což se projevuje jako elektrická vodivost.

Proton je poměrně těžká částice s hmotností $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Má kladný náboj, stejně velký jako má elektron. Proton a elektron se díky opačným elektrickým nábojům přitahují a jsou schopny vytvářet stabilní atom - atom vodíku.

Neutron je částice bez náboje, o necelé dvě promile těžší než proton.

Elektron a proton jsou částice stabilní. Jako volné částice existují po neomezeně dlouhou dobu. Stabilita těchto částic je základní podmínkou stability atomu a tedy i stability hmoty ve vesmíru. Je nutné připomenout, že v poslední době se vážně připouští možnost rozpadu protonu, ale průměrná doba rozpadu by měla přesahovat délku trvání našeho vesmíru.

Volný neutron se rozpadá asi po 15,25 minuty. Rozpadá se na tři stabilní částice, a to na proton, elektron a elektronové antineutrino.

Elementární částice lze klasifikovat podle nejrůznějších fyzikálních veličin, jako je hmotnost a elektrický náboj. Mnohem důležitější jsou však tzv. kvantová čísla, která nemají žádnou obdobu v makrosvětě: především spin, leptonové číslo, baryonové číslo a schopnost interakce. Každé kvantové číslo nějak vystihuje chování částic při jejich vzájemné interakci, tedy při jejich chování ve vzájemném působení.

Snaha o klasifikaci částic tedy vede k problému základních silových interakcí, které působí mezi částicemi a které jsou původci nejrozmanitějších vzájemných působení pozorovaných v přírodě.

Nejjednodušší konfigurace magnetického náboje je těsná dvojice magnetických nábojů (magnetický dipól). Toto je výrazná asymetrie mezi elektrickými a magnetickými silami.

Zásadní změna nastane, jestliže se elektricky nabitá tělesa vzájemně pohybují. Elektrické náboje začnou vytvářet nejen elektrické pole, ale také pole magnetické, které je tím silnější, čím rychleji se elektricky nabitá tělesa vzájemně pohybují. Jestliže pohyb ustane, zmizí magnetické pole a zůstane jen pole elektrické. Stejně je tomu i naopak. Pokud máme magnet v klidu, vytváří se kolem něj magnetické pole. Jestliže tento magnet uvedeme do pohybu,

kromě magnetického pole vznikne i pole elektrické, takže pokud bude někde nablízku vodič, vznikne v tomto vodiči elektrický proud.

V roce 1831 objevil Michael Faraday (1791 - 1867) elektromagnetickou indukci a ve snaze vysvětlit si nečekané vzájemné ovlivňování magnetů a elektrických vodičů vytvořil si vlastní, velmi konkrétní představy o silovém působení v prostředí mezi magnety a vodiči. Tím založil ve vývoji názorů o elektríně a magnetismu nový způsob myšlení, který umožnil Jamesi Clerkovi Maxwellovi (1831 - 1879) vytvořit jednotnou teorii elektrických a magnetických jevů. Podle Faradayových představ je elektromagnetické působení mezi tělesy zprostředkováno silovým polem, které kolem sebe vytváří každý náboj a které existuje nezávisle na tom, zda jsou v okolí tohoto náboje jiná tělesa, na něž by náboj mohl působit (podobnou vlastnost jsme viděli u gravitačního pole). Toto elektromagnetické pole vyplňuje celý prostor.

Experimentálně bylo zjištěno, že elektromagnetické vzruchy se šíří konečnou rychlostí. Jestliže umístíme do prostoru náboj, šíří se kolem něj elektrické pole. Pokud ovšem náboj náhle odstraníme, toto pole dále existuje a informace o jeho zániku se šíří konečnou rychlostí. Pole tedy může mít samostatnou existenci. Popsaný pokus je ovšem mnohem složitější. Odstraněním náboje jsme tímto nábojem pohybovali, proto se vytvoří i silné pole magnetické. Mění se elektrické pole tedy indukuje pole magnetické a naopak, mění se magnetické pole indukuje pole elektrické.

Nyní se vraťme k elektromagnetickému poli. Již víme, že toto pole je nositelem hybnosti a energie. Podle výše uvedených zákonů je tedy možné, aby pole působilo na těleso a naopak. Vlny tedy mají vlastnosti jako pevná tělesa, mají hybnost, hmotnost, setrvačnost. Navíc jsou schopny se přeměňovat v částice, z nichž je složeno látkové prostředí.

Elementární částice mají ještě jednu formu momentu hybnosti, která není přímo spojena s rotací částice a přísluší i částici v klidu. Jmenuje se spin a charakterizuje množství otáčivého pohybu, protože má všechny podstatné znaky momentu hybnosti.

Vznik nových částic srážkou mezi atomy, jádry nebo částicemi neodporuje žádným fyzikálním zákonům. Při vzniku nových částic se energie spotřebuje, při jejich zániku se energie naopak uvolní. Tato skutečnost nasvědčuje tomu, že každá částice obsahuje klidovou energii, která je ekvivalentní součinu její klidové hmotnosti s druhou mocninou rychlosti světla ve vakuu.

Základní schéma těchto pokusů je obdobné. Ze zdroje vychází svazek elektromagnetických vln nebo částic, které dopadají na zkoumané těleso. Část vln nebo částic tělesem prochází, část se jich odchyluje různými směry, část se vrací zpět. Těleso je obklopeno, pokud možno ze všech stran, detektory, nejčastěji registračními jednotkami reagujícími na to, zda částice daným bodem prošla.

Komplikované fyzikální úvahy o povaze elektronu dovedl ke zdárnému konci Louis de Broglie (1892 - ?) v sérii prací začínající rokem 1922, tedy devět let po zrodu Bohrova modelu. Proč elektron může v atomu nabývat pouze určitých hodnot energie a určitých hodnot momentu hybnosti? De Broglie si všiml, že spíše než planetu obíhající Slunce si lze elektron představit jako stojaté vlnění, které je prostorově omezeno na bezprostřední okolí kladně nabitého jádra. Jestliže je vlnění vázáno na určitý omezený prostor, nemůže kmitat s libovolnou frekvencí (tj. nemůže mít libovolnou vlnovou délku). Houslistům je dobře známo, že při pevně dané délce struny lze vytvořit jen určitou sérii flažoletových tónů. Jde o jednorozměrné vlnění podél struny a omezujícím prostorem je délka struny. V atomu je elektron poután k jádru elektrickou silou a elektronová vlna, která podle de Broglieho

elektronu přísluší, je tím omezena na bezprostřední okolí jádra. Vzniká stojaté vlnění, přitom tvar a velikost atomu, v němž je elektron vázán, určuje přípustné kmitové stavy (tedy příslušné frekvence). Tyto přípustné frekvence vypočetl Erwin Schrödinger v roce 1926. Je-li elektronová vlna v určitém kmitovém stavu, elektron nevyzařuje elektromagnetické vlnění. Pouze při přechodu z nějakého vyššího kmitového stavu do nižšího elektron vyše elektromagnetické záření.

V této otázce vyslovil Erwin Schrodinger již v roce 1926 myšlenku, že elektron je sám jakousi "hmotnou vlnou" v tom smyslu, že spojitě vyplňuje celý prostor, který zaujímá vlna vypočtená řešením Schrodingerovy rovnice. Podle této teorie elektron nemá definovaný tvar, ale přijímá takový tvar, jaký vymezuje působící silové pole (v tomto konkrétním případě je jím elektrické pole kladně nabitého jádra). Proti této "hmotné" interpretaci se postavil Max Born (1882 - 1970) svojí interpretací "pravděpodobnostní". Podle ní stojatá elektronová vlna určuje pouze pravděpodobnost výskytu elektronu v daném místě. Nemá smysl se ptát, kde se elektron nachází v daném okamžiku, ale lze určit pouze pravděpodobnost jeho výskytu v určitém objemovém elementu. Bornova interpretace připouští i bodový charakter elektronu, ale na otázky po jeho tvaru, poloze a dalších vlastnostech mezi dvěma měřeními nemůže dát jednoznačnou odpověď. Vlna v Bornově pojetí poskytuje pouze pravděpodobnost výsledku měření, ne však stav objektu nezávisle na měření. K pochopení tohoto jemného, ale podstatného rozdílu je třeba si uvědomit, že každé měření znamená určitý zásah do zkoumaného objektu.

Zkoumání elektronových stavů v atomu potvrdilo intuitivní názor, že při popisu elektronových stavů nevystačíme s představou bodového náboje nebo kuličky, pokud nezavedeme současně pojem elektronové vlny. De Broglie postuloval, že vlnová délka příslušející letícímu elektronu je určena jeho hybností. Vlnová délka je rovna podílu Planckovy konstanty a hybnosti. Planckova konstanta je rovna $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s. Tato de Broglieho hypotéza, že každé částici přísluší vlna, která má frekvenci tím vyšší, čím vyšší je její hmotnost a rychlost, je v podstatě výrokem o duální povaze všech částic - povaze částicové (korpuskulární) a povaze vlnové. Hypotéza byla potvrzena celou řadou experimentů. Řada dříve nevysvětlitelných jevů začala zapadat do jednotného řádu.