

Sto let kvantové fyziky

Jan Zatloukal

K největším vědeckým úspěchům 20. století bezesporu patří speciální a obecná teorie relativity, kvantová mechanika, teorie Velkého třesku vzniku vesmíru, rozluštění genetického kódu, evoluční biologie a řada dalších objevů a technických vynálezů. Kvantová fyzika ale mezi všemi vědeckými objevy zaujímá poněkud zvláštní postavení.

Kvantová fyzika donutila fyziky radikálním způsobem změnit představy o fyzikální realitě a jevech na její nejhlubší úrovni. Změnila klasický koncept polohy, rychlosti, energie a dalších fyzikálních veličin a zavedla do popisu jistých fyzikálních jevů neurčitost a pravděpodobnost.

Ačkoliv kvantová mechanika vznikla jako nástroj pro popis abstraktního světa atomů vzdáleného každodenní zkušenosti, její dopad na naše životy neustále roste. Bez kvantové mechaniky by zřejmě nedošlo k ohromnému rozvoji chemie, biologie a medicíny. Bez kvantové mechaniky by neexistovala globální ekonomie, která využívá výsledků revoluce v elektronice a ve výpočetní technice. Vznik kvantové mechaniky od základů změnil náš svět se všemi přínosy a riziky vědecké revoluce.

Na rozdíl od obecné teorie relativity, která brilantním způsobem vysvětlila spojení gravitace a geometrie prostoročasu, nebo na rozdíl od rozluštění genetického kódu, které odhalilo zcela nový svět v biologii, kvantová mechanika se rodila obtížně. Byla vytvořena malou skupinou fyziků v záblesku jejich génia, který se čas od času v historii lidstva objevuje.

Po dvaceti letech od prvních kvantových představ, které byly natolik rozporné, že představovaly jen malý základ dalšího pokroku, ti mladí fyzikové vytvořili kvantovou mechaniku během tří bouřlivých let. Jedinečnost kvantové teorie spočívá v tom, že se stala nejpřesněji testovanou a dosud neúspěšnější teorií v historii vědy. Na druhé straně již její někteří tvůrci byli nespokojeni s jejími základy a interpretací, ačkoliv mnohokrát prokázala svoji vysokou vypovídací schopnost.

V roce 2000 uplynulo sto let od okamžiku, kdy **Max Planck** vytvořil koncept kvanta. Ve svém článku o tepelném záření Planck vyslovil hypotézu, že se celková energie vibrujícího systému nemůže měnit spojitě. Naopak, energie se může měnit pouze v diskretních krocích, v kvantech energie. Představa kvanta energie byla tak radikální, že Planck již svoji hypotézu dále nerozvíjel.

V roce 1905 **Albert Einstein** použil tuto hypotézu na kvantování světla. Tato hypotéza byla pro ostatní fyziky natolik bizarní, že v následujících dvaceti letech nebyla rozvíjena. Teprve mladá generace fyziků na jejím základě vytvořila moderní kvantovou teorii. Abychom pochopili naprosto revoluční dopad kvantové fyziky, musíme se vrátit do období před jejím vznikem.

V letech 1890 až 1900 byly časopisy fyziky plné článků o spektrech atomů a ostatních měřitelných vlastnostech hmoty, jako je viskozita, elektrická a tepelná vodivost, index lomu a index termooelastivity. Poháněno pracovní etikou viktoriánské doby a rozvojem jednoduchých experimentálních metod vědecké poznání narůstalo neuvěřitelným způsobem. Co však pro dnešního fyzika může být nepochopitelné je skutečnost, že veškerý popis vlastností hmoty byl čistě empirický. Tisíce článků o spektrech atomů obsahovalo přesné hodnoty vlnových délek spektrálních čar různých chemických prvků. Nikdo se ale nepokoušel zdůvodnit, proč se právě takové spektrální čary objevují. Tepelná a elektrická vodivost byly interpretovány modely, které souhlasily jen asi s polovinou pozorovaných faktů. Existovala celá řada empirických zákonů, které však nebyly teoreticky uspokojivé. Například zákon Dulongův a Petitův definoval jednoduchý vztah mezi specifickým teplem a atomovou hmotou materiálu. Většinou fungoval, ale čas od času nepochopitelně selhával. Hmotnosti stejných objemů plynů byly násobky celých čísel - většinou. Mendělejevova periodická tabulka prvků sice poskytovala klíčový organizační princip chemie, ale neměla žádné teoretické zdůvodnění.

Kvantová mechanika jako první poskytla kvantitativní teorii hmoty. Dnes detailně rozumíme strukturu atomu a periodická tabulka má jednoduché a přirozené vysvětlení. Ohromné množství spektrálních dat zapadá do elegantního teoretického rámce. Kvantová teorie umožnila kvantitativní popis molekul, pevných látek a kapalin, vodičů a polovodičů. Vysvětluje takové jevy jako jsou supravodivost a supratekutost, exotické formy hmoty jako jsou neutronové hvězdy nebo Boseovy-Einsteinovy kondenzáty, v nichž se všechny atomy plynu chovají jako jediný "supervelký" atom. Konečně se kvantová mechanika stala základním nástrojem všech ostatních věd a pokročilé technologie.

Dnešní kvantová fyzika pokrývá dvě rozsáhlé oblasti. První je teorie hmoty na atomové úrovni, tedy kvantová mechanika. Druhá je kvantová teorie pole, která hraje zcela odlišnou roli ve fyzice než kvantová mechanika.

Kvantová mechanika

Podněty ke vzniku kvantové mechaniky nepocházely ze studia hmoty, ale z problému záření, konkrétně z problému, jak vysvětlit spektrum záření emitovaného horkými tělesy - záření absolutně černého tělesa. Čím je těleso teplejší, tím kratší vlnové délky má emitované záření. S rostoucí teplotou těleso září nejprve infračerveně, pak červeně a při velmi vysokých teplotách modře. Všechny snahy vysvětlit tento jev pomocí termodynamiky a teorie elektromagnetického pole byly neúspěšné. Za předpokladu, že energie vibrujících elektronů vyzařujících světlo je kvantována, Max Planck získal výraz, který souhlasil s experimenty. Jak později uvedl, svoji teorii zpočátku považoval za fyzikálně absurdní.

Max Planck použil svoji kvantovou hypotézu na energii vibrací ve stěnách zářícího tělesa. Kvantová fyzika zde mohla svůj vývoj ukončit, pokud by v roce 1905 mladý **Albert Einstein** nedošel k závěru, že pokud je vibrační energie kvantována, pak energie elektromagnetického pole, tedy světla, musí být také kvantována. Einstein postuloval, že světlo je tvořeno částicemi v rozporu s Maxwellovou teorií elektromagnetického pole, již potvrzovaly mimo jiné experimenty, které prokázaly vlnovou povahu světla. Albert Einstein ale vysvětlil do té doby záhadný fotoelektrický jev teorií, že energie musí být absorbovat po kvantech a světlo proto musí mít také částicovou povahu. Duální povaha světla, tedy vlnová a částicová, závisí na tom, co chceme pozorovat. Tato dualita zůstala teoretickou hádankou na dalších dvacet let.

Záhadná dualita světla a problém záření byly prvním krokem na cestě ke kvantové teorii. Druhým krokem byla záhada hmoty. V té době již bylo známo, že atomy jsou tvořeny kladně a záporně nabitými částicemi. Podle teorie elektromagnetického pole by elektron měl rotovat kolem jádra atomu po spirále a kvůli změnám hybnosti vyzařovat světlo různých vlnových délek až do okamžiku, kdy dopadne na jádro. V roce 1913 přišel mladý **Niels Bohr** s radikální hypotézou, podle níž elektrony v atomu existují pouze v určitých stabilních stavech a existuje určitý základní stav. Elektrony mohou svoji energii měnit ve skocích mezi stabilními stavy emisí nebo absorbcí světla, jehož vlnová délka závisí na rozdílu energií těchto stavů. Niels Bohr svoji hypotézou vysvětlil problém stability atomu a poskytl kvantitativní popis spektra atomu vodíku. Přes svůj úspěch se netajil závažnými nedostatky svého modelu. Jeho vize se brzy naplnila později nástupem nové generace mladých fyziků.

Zpočátku snahy rozšířit Bohrovy kvantové představy, tzv. starou kvantovou teorii, narážely na nepřekonatelné problémy. Pak ale další vývoj od základů změnil způsob myšlení. V roce 1923 Louis de Broglie ve své doktorské práci navrhl, že částicové chování světla má svůj protějšek ve vlnovém chování částic. Navrhl vztah mezi vlnovou délkou a hybností částice. Čím větší je

hybnost částice, tím kratší je její vlnová délka. Tato myšlenka byla úchvatná, ale nikdo nevěděl, jaký význam může mít vlnová podstata částic a jakou souvislost má se strukturou atomu. Přesto se de Broglieova hypotéza brzy stala důležitým mezníkem dalších událostí.

V zimě roku 1924 **Setyendrath N. Bose** navrhl naprosto novou myšlenku, jak vysvětlit Planckův zákon záření absolutně černého tělesa. Světlo považoval za plyn nehmotných částic (fotonů), které se nepodřizují Boltzmannovu statistickému rozdělení, ale podřizují se rozdělení založeném na jejich nerozlišitelnosti. Albert Einstein záhy použil Boseovu myšlenku na reálné plyny hmotných částic a získal nový zákon, který je dnes znám jako Boseovo-Einsteinovo rozdělení, popisující rozdělení energie mezi částicemi v plynu. Za normálních okolností nová a stará teorie vedly ke stejnému chování atomů v plynu. Albert Einstein se dále o problém nezajímal a více než deset let na jeho výsledek nikdo nenavázal. Klíčová myšlenka nerozlišitelnosti částic se ale brzy stala velice důležitá.

V krátkém období od ledna 1925 do ledna 1928 došlo k celé řadě událostí, které vyústily ve vědeckou revoluci.

Wolfgang Pauli navrhl vylučovací princip pro elektrony v atomu, který se stal teoretickým základem periodické tabulky chemických prvků. Podle tohoto principu v atomu nemohou existovat dva elektrony ve stejném kvantovém stavu. Proto elektrony musí zaujímat v atomu různé stavy, které jsou charakterizovány několika kvantovými čísly elektronu.

Werner Heisenberg společně s **Maxem Bornem** a **Pascuaelem Jordanem** vyvinul maticovou mechaniku jako první verzi kvantové mechaniky. Bylo dosaženo historického mezníku, kdy díky popisu chování elektronů v atomu vznikla systematická teoretická metoda pro vysvětlení pozorovaných spektrálních čar atomů.

Erwin Schrödinger vyvinul vlnovou mechaniku jako druhou verzi kvantové mechaniky. Stav systému popsal vlnovou funkcí, která je řešením Schrödingerovy vlnové rovnice. Bylo dokázáno, že zdánlivě nekompatibilní maticová mechanika a vlnová mechanika jsou zcela ekvivalentní.

Všechny elektrony se podřizují Fermiho-Diracovu statistickému rozdělení. Záhy bylo ukázáno, že všechny částice se podřizují buď Fermiho-Diracové statistice (fermiony) nebo Boseově-Einsteinově statistice (bosony). Tyto dvě třídy částic mají fundamentálně odlišné vlastnosti.

Werner Heisenberg vyslovil svůj princip neurčitosti, podle něhož nelze určit polohu a hybnost částice se stejnou přesností. Čím přesněji určíme polohu částice, tím nepřesněji určíme její hybnost a naopak.

Paul A.M. Dirac vytvořil relativistickou vlnovou rovnici elektronu, pomocí níž vysvětlil spin elektronu a předpověděl antičástici elektronu - pozitron.

Paul A.M. Dirac dále položil základy kvantové teorie pole jako kvantový popis elektromagnetického pole.

Niels Bohr vyslovil princip komplementarity, filozofický princip, který pomohl vyřešit zdánlivé paradoxy kvantové teorie jako vlnově-částicovou dualitu.

Hlavní tvůrci kvantové teorie byli velmi mladí. V roce 1925 měl **Wolfgang Pauli** 25 let, **Werner Heisenberg** 24 let, **Paul Dirac** 23 let, **Pascual Jordan** 23 let, **Enrico Fermi** 24 let a **Erwin Schrödinger** měl 36 let. Starší než Schrödinger byli jen **Max Born** a **Niels Bohr**, jejichž názory byly velmi respektovány. Radikální podstata těchto intelektuálních výsledků vyvolala odpor Alberta Einsteina. Přestože Einstein poskytl klíčové myšlenky ke vzniku kvantové teorie, sám ji odmítl. Jeho práce o Boseově-Einsteinově statistice byla posledním příspěvkem k mladé kvantové mechanice a jeho posledním velkým příspěvkem ve fyzice. Proč vznik kvantové mechaniky vyžadoval novou generaci fyziků může být překvapením. Dobře to však vysvětlil Lord Kelvin, který ve svém dopise blahopřál Bohrovi za jeho článek o atomu vodíku. Kelvin napsal, že sice Bohr má pravdu, ale on už ji nedokáže přijmout a plně pochopit. Kelvin dále uvedl, že radikálně nová fyzika bude vyžadovat ničím nezatíženou mysl.

V roce 1928 revoluce byla završena a základy kvantové mechaniky byly prakticky kompletní. Její vývoj provázely někdy komické příběhy. Například v roce 1925 koncept spinu elektronu navrhli **Samuel Goudsmit** a **George Uhlenbeck**. Niels Bohr byl ale hluboce skeptický. V prosinci 1925 cestoval do Leidenu, kde se zúčastnil oslavy jubilea doktorátu Hendrika A. Lorentze. Wolfgang Pauli se s ním setkal ve vlaku na cestě do Hamburгу, aby se ho zeptal na jeho názor na možnost spinu elektronu. Bohr myšlenku vyslechl a prohlásil svoji známou odmítavou frází "velmi, velmi zajímavé". Později v Leidenu se Albert Einstein a **Paul Ehrenfest** setkali s Bohrem. Bohr jim vysvětlil své námitky, ale Einstein nakonec Bohra přesvědčil, aby myšlenku spinu přijal. Na své zpáteční cestě z Leidenu se Niels Bohr setkal s dalšími fyziky. Když vlak zastavil v Göttingenu, na nádraží na něj čekali Werner Heisenberg a Pascual Jordan, aby se ho zeptali na názor. V Berlíně na něj znovu čekal Wolfgang Pauli, který kvůli tomu přicestoval z Hamburгу. Niels Bohr již plně přesvědčen prohlásil, že objev spinu elektronu má zásadní význam.

Vznik kvantové mechaniky se stal vědeckým zlatým dolem. Kromě jiného Werner Heisenberg položil základy teorie struktury atomu, když přibližným řešením Schrödingerovy rovnice popsal v roce 1927 atom hélia. Obecnou metodu výpočtu o něco později vyvinuli **John Slater**, **Douglas Raynes Hartree** a **Vladimír Fock**.

Strukturu molekuly vodíku popsalí **Fritz London** a **Walter Heitler**. **Linus Pauling** na základě jejich výsledků položil základy teoretické chemie. Arnold Sommerfeld a Wolfgang Pauli položili základy teorie elektronů v kovech. **Felix Bloch** položil základy teorie chemické vazby. Werner Heisenberg vysvětlil podstatu ferromagnetismu. Velkou záhadu náhodného radioaktivního rozpadu provázeného emisí alfa částic vysvětlil v roce 1928 **George Gamow** pomocí kvantové mechanického tunelování. V roce 1929 položil základy fyziky atomového jádra **Hans Bethe**, který vysvětlil podstatu zdroje energie hvězd. Rozvojem atomové, molekulární, jaderné fyziky a fyziky pevných látek svět vstoupil do moderní doby.

Rozpory a problémy

Přes veškerý neuvěřitelný pokrok kvantová mechanika na druhé straně rozpoutala vášnivé debaty o své interpretaci a platnosti. Hlavními protagonisty této debaty byli velcí obhájci nové teorie **Niels Bohr** a **Werner Heisenberg** a její odpůrci **Albert Einstein** a **Erwin Schrödinger**. Abychom pochopili podstatu celého sporu, je nezbytné porozumět klíčovým vlastnostem kvantové teorie. Pro jednoduchost se budeme zabývat Schrödingerovou verzí kvantové mechaniky, která se často označuje jako vlnová mechanika.

* Fundamentální popis: vlnová funkce

Chování každého kvantového systému je popsáno Schrödingerovou rovnicí. Řešení Schrödingerovy rovnice se nazývají vlnové funkce. Vlnová funkce popisuje úplnou informaci o kvantovém systému. Pomocí vlnové funkce lze vypočítat všechny možné hodnoty každé pozorovatelné veličiny. Druhá mocnina absolutní hodnoty vlnové funkce je úměrná pravděpodobnosti, že se částice nachází v dané části objemu. Poloha částice je "rozprostřena" v celém objemu vlnové funkce. Hybnost částice závisí na "sklonu" vlnové funkce. Čím větší má funkce sklon, tím větší je hybnost. Protože se sklon vlnové funkce mění bod od bodu, hybnost je také "rozprostřena" v celém objemu. Klasická představa, kde polohu a rychlost lze určit s libovolnou přesností, je v kvantové teorii nahrazena pravděpodobnostmi, že tyto veličiny v jistém objemu nabývají určité hodnoty.

Měření provedená v identických systémech za identických podmínek nemusí vést k identickým výsledkům. Získané výsledky budou rozptýleny v rozmezí daném vlnovou funkcí. Proto představa, že elektron má určitou polohu a hybnost, ztrácí svoje opodstatnění. Podle principu neurčitosti čím přesněji se snažíme určit polohu částice, tím ostřejší vrchol musí mít vlnová funkce (je méně rozprostřená) a proto tím nepřesněji jsme schopni určit hybnost částice. Čím přesněji se snažíme určit hybnost, tím je sklon vlnové funkce nižší a tím nepřesněji jsme schopni určit polohu částice.

* Interference vlnových funkcí

Vlnové funkce se sčítají nebo odečítají v závislosti na jejich relativní fázi. Když mají jejich amplitudy stejnou fázi, pak se sčítají, když mají opačnou fázi, pak se odečítají. Pokud vlna prochází několika dráhami od zdroje k přijímači, jako světlo procházející dvěma blízkými štěrbinami, dochází k interferenci, kdy pozorujeme světlé a tmavé proužky. Částice, které se řídí vlnovou rovnicí, se chovají podobně jako při difrakci elektronů. Tato analogie je rozumná, pokud se nezabýváme podstatou vlny. Vlna je obecně chápána jako porucha šířící se určitým médiem. V kvantové mechanice ale žádné médium neexistuje. V určitém smyslu tedy neexistují ani žádné vlny, přestože vlnová funkce představuje fundamentální informaci o vlnovém systému.

* Symetrie a identita

Atom hélia se skládá z jádra a dvou elektronů. Vlnová funkce popisuje polohu obou elektronů. Přitom neexistuje žádný způsob, jak elektrony od sebe navzájem odlišit. Pokud elektrony vzájemně zaměníme, musí systém vypadat zcela stejně a pravděpodobnost polohy elektronů se nezmění. Jenže tato pravděpodobnost je určena druhou mocninou absolutní hodnoty vlnové funkce. Vlnová funkce vzájemně zaměněných částic může být identická jako původní vlnová funkce, nebo může mít opačné znaménko.

Jedním z největších objevů kvantové mechaniky je, že pro elektrony vlnová funkce musí vždy změnit znaménko. Důsledky jsou dramatické. Pokud by dva elektrony byly ve stejném kvantovém stavu, pak vlnová funkce se vlnová funkce musí změnit v opačnou vlnovou funkci. Pravděpodobnost nalezení dvou elektronů ve stejném kvantovém stavu je proto nulová. Toto je formulace Pauliho vylučovacího principu. Všechny částice s poločíselným spinem, jako jsou elektrony, se chovají tímto způsobem a označují se jako fermiony. Pro částice s celočíselným spinem, jako jsou fotony, vlnová funkce nemění znaménko. Tyto částice se označují jako bosony. Elektrony v atomech jsou proto na základě Pauliho vylučovacího principu uspořádány ve slupkách. Fotony v paprsku laseru mají stejný kvantový stav. V 90. letech 20. století byly objeveny Boseovy-Einsteinovy kondenzáty, ochlazené atomy plynu ve stejném kvantovém stavu. Takový systém může emitovat velmi intenzivní paprsek hmoty a chovat se jako atomový laser.

Neidentické částice musí mít různé vlnové funkce. Aby se částice mohly chovat jako fermiony nebo bosony, musí být nutně identické. Absolutní identita částic je jedním z nezáhadnějších aspektů kvantové mechaniky a jedním z cílů kvantové teorie pole je tuto záhadu vysvětlit.

* Význam základních pojmů kvantové mechaniky

Otázky, co "ve skutečnosti" je vlnová funkce, nebo co znamená "provést měření" byly v počátcích kvantové mechaniky předmětem intenzivních diskusí. V roce 1930 Niels Bohr a jeho kolegové vyvinuli tzv. Kodaňskou interpretaci kvantové mechaniky. Tato interpretace vychází z pravděpodobnostního popisu hmoty a jevů, z duality vlnové a částicové povahy hmoty a z Bohrova principu komplementarity. **Albert Einstein** kvantovou mechaniku nikdy nepřijal a až do své smrti v roce 1955 vedl s **Nielssem Bohrem** o jejích principech diskusi.

Ústředním bodem těchto debat o kvantové mechanice byla otázka, zda vlnová funkce obsahuje skutečně veškerou možnou informaci o kvantovém systému, nebo zda existují nějaké skryté proměnné, které ovlivňují výsledné měření. V polovině 60. let 20. století John S. Bell ukázal, že pokud takové skryté proměnné existují, pak experimentálně pozorované pravděpodobnosti musí splňovat tzv. Bellovy nerovnosti. Mnoho výzkumných skupin, jako skupina Alaina Aspecta, pak provedlo celou řadu experimentů, které dokázaly, že Bellovy nerovnosti nejsou splněny. Získaná měření jednoznačně hovořila proti možnosti nějakých skrytých proměnných. Pro většinu vědců je tento výsledek jednoznačným potvrzením kvantové teorie.

Podstata kvantové teorie neustále přitahuje pozornost díky některým svým vlastnostem, které někteří označují za "kvantové přišery". Jednou z takových "záhadných" vlastností je kvantové propletení stavů. Příkladem je kvantový systém jako atom, který může nejen existovat ve svých stacionárních stavech, ale také v superpozici těchto stavů. Pokud pak měříme například energii takového atomu, získáme obecně různé výsledky.

Lze vytvořit také dvouatomový kvantový systém v propleteném stavu, v němž kvantové vlastnosti těchto atomů jsou navzájem sdíleny. Pokud jsou tyto atomy od sebe odděleny, informace o stavu prvního atomu jsou stále sdíleny druhým atomem. Takové chování nelze vysvětlit jinak než pomocí kvantové mechaniky. Kvantově propletené stavy je nejen předmětem teoretického studia, ale zřejmě naleznou brzy své praktické uplatnění v komunikačních kvantových systémech, v kvantové kryptografii a v kvantových počítačích.

Druhá revoluce

V polovině 20. let 20. století, kdy vznikala kvantová mechanika, byly položeny základy ještě další revoluce, druhé oblasti kvantové fyziky, již je kvantová teorie pole. Na rozdíl od kvantové mechaniky, která je produktem krátkého období, během něhož byla prakticky dokončena, kvantová teorie pole má klikatou historii, která pokračuje dodnes. Přes veškeré problémy jsou předpovědi kvantové teorie pole nejpřesnější ze všech oblastí fyziky. Kvantová teorie pole vytváří paradigma pro některé klíčové oblasti teoretické fyziky.

Základní problém, který motivoval kvantovou teorii pole, spočíval v otázce, jak atom vyzařuje světlo a jak elektrony "přeskakují" z excitovaných stavů do základního stavu. V roce 1916 **Albert Einstein** navrhl proces spontánní emise, ale nebyl schopen vypočítat jeho rychlost. Řešení tohoto problému vedlo k vývoji relativistické kvantové teorie elektromagnetického pole a kvantové teorie světla. Kvantová mechanika je teorií hmoty. Kvantová teorie pole je teorií polí, nejen elektromagnetického pole, ale také všech ostatních polí, která byla později objevena.

První myšlenky teorie světla publikovali v roce 1925 **Max Born, Werner Heisenberg a Pascual Jordan**, ale konečné kroky učinil mladý a tehdy neznámý fyzik pracující v ústraní - **Paul Dirac**. V roce 1926 publikoval svoji teorii světla, která ale měla řadu problémů: značnou výpočetní složitost, předpověď nekonečných veličin a porušení principu korespondence. Teprve koncem 40. let 20. století došlo v kvantové teorii pole k posunu, když **Richard Feynman, Julian Schwinger a Sin-itiro Tomonaga** vyvinuli kvantovou elektrodynamiku (*QED, Quantum Electrodynamics*). Nekonečné veličiny odstranili metodou renormalizace, která v podstatě od sebe odečítá nekonečné veličiny tak, aby vznikly konečné veličiny. Protože nelze získat

přesná řešení složitých rovnic této teorie, k dispozici jsou pouze aproximace ve formě nekonečných řad členů, které lze stále obtížněji vypočítat. Tyto členy nejprve klesají k nule a od určitého bodu začínají růst a tím vyznačují "bod zlomu" příslušné aproximace. Kvantová elektrodynamika je jednou z nejuspěšnějších teorií v historii fyziky. Například její předpověď interakce mezi elektronem a magnetickým polem byla experimentálně potvrzena s přesností $2 \cdot 10^{12}$.

Podle této teorie vakuum není prázdné, ale je vyplněno slabými elektromagnetickými poli, pomocí nichž lze vysvětlit spontánní emisi. Tato pole vytvářejí malé ale měřitelné posuvy energií atomů a nepatrné změny určitých vlastností částic jako je elektron. Tyto jevy byly později některými přesnými experimenty potvrzeny.

Při nízkých energiích je kvantová mechanika neuvěřitelně přesná. Avšak při vysokých energiích, kdy do hry vstupují relativistické jevy, je třeba obecnějšího přístupu. Kvantová teorie pole vznikla právě proto, aby dala do souladu kvantovou mechaniku se speciální teorií relativity.

Klíčová role kvantové teorie pole ve fyzice vyplývá také z toho, že poskytuje odpovědi na určité závažné otázky o podstatě hmoty. Kvantová teorie pole vysvětluje, proč existují dvě třídy částic - fermiony a bosony - a jak jejich vlastnosti souvisí s jejich vnitřním spinem. Popisuje, jak vznikají a zanikají částice, a to nejen fotony, ale také elektrony a pozitrony. Vysvětluje příčinu identity částic v kvantové mechanice. Tyto částice jsou identické, protože vznikají ze stejných polí. Kvantová elektrodynamika popisuje nejen vlastnosti elektronu, ale všech leptonů, mezi něž patří mion, tauon, elektronové neutrino, mionové neutrino a tauonové neutrino a jejich antičástice.

Kvantová elektrodynamika jako teorie leptonů ale nepopisuje vlastnosti hadronů, které se dělí na mesony a baryony, přičemž mezi baryony patří také nukleony jako je proton a neutron. Proto vznikla kvantová chromodynamika QCD (*Quantum Chromodynamics*). Mezi kvantovou elektrodynamikou a kvantovou chromodynamikou lze najít několik analogií. Elektromagnetická interakce mezi leptony je zprostředkována fotony. Silná interakce mezi hadrony je zprostředkována gluony. Na rozdíl od leptonů a fotonů jsou kvarky a gluony trvale uvězněny v hadronech a nelze je proto studovat izolovaně.

Kvantová elektrodynamika a kvantová chromodynamika se staly stavebními kameny standardního modelu elementárních částic. Přesto je řada fyziků s tímto modelem nespokojena, protože model nepředpovídá hmotnosti, náboje a další kvantové veličiny částic.

Hledání nehlubší podstaty hmoty je dnes předmětem intenzivní vědecké práce, která je pokračováním bouřlivých dní, v nichž vznikala kvantová mechanika. Jistým problémem je kvantový popis gravitace. Procedura kvantování elektromagnetického pole, která skvěle funguje v kvantové elektrodynamice, je pro popis gravitace nepoužitelná. Pokud jsou obecná teorie relativity a kvantová mechanika správné, pak musí poskytovat úplný a konzistentní popis stejných fyzikálních jevů. Žádný rozpor neexistuje v našem světě, kde gravitace je ve srovnání s elektromagnetickou interakcí velmi slabá. Ve velkých měřítcích, kde uvažujeme působení gravitace, jsou kvantové jevy zanedbatelné. Naopak, v malých měřítcích, kde uvažujeme působení silné, slabé a elektromagnetické interakce, je gravitace zanedbatelná. Avšak v černých děrách, kde gravitační interakce je velmi silná, nejsme schopni správně předpovědět kvantové chování.

Ještě před sto lety byl fyzikální popis světa empirický. Kvantová fyzika jako teorie hmoty a polí od základu naše poznání změnila a stala se základem přírodních věd a řady moderních technologií včetně laserů a výpočetní techniky. Fyzika na prahu 21. století se ale přesto podobá fyzice na prahu 20. století. Ve své nehlubší podstatě je fyzika empirická. Nedokážeme plně předpovědět vlastnosti elementárních stavebních kamenů hmoty, ale musíme je měřit. Snad teorie superstringů, zobecnění kvantové teorie pole, která odstraňuje všechna nekonečna náhradou bodů za struny nebo membrány, tento velký problém vyřeší. Sen o finální teorii, která poskytne úplný obraz fyzikálního světa, je mocným popudem k dalšímu poznávání a pochopení světa. Za dalších 100 let se snad ukáže, zda naše představy byly správné.

Použitá literatura

- D. Kleppner, R. Jackiw: One hundred years of quantum physics
- www.natura.baf.cz
- www.energyweb.cz
- Doc. Ing. Ivan Štoll, CSc.: Objevitelé přírodních zákonů
- www.diderot.cz
- Technický Naučný Slovník