

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Paul Dirac

Elektrony a vakuum

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 4 (1959), No. 3, 309--317

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139825>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1959

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>

ELEKTRONY A VAKUUM

PAUL DIRAC

Tento článek je překladem stenogramu ruského překladu přednášky profesora fyziky na Cambridžské universitě, člena Anglické královské společnosti Paula Diraca, přednesené v Ústředním klubu Věsvazové společnosti pro šíření politických a vědeckých znalostí v Moskvě 9. října 1956.)*

Přeložil Gojko Lončar.

Jsem rád, že jsem navštívil Sovětský svaz a že jsem se setkal se sovětskými fyziky, s kterými se dobře znám a jejichž dosažené úspěchy vysoce oceňuji.

Chtěl bych vám něco povědět o současném stavu teoretické fyziky a o základních problémech, které nyní před ní stojí. Na těchto problémech pracujeme. Budu mluvit v zásadě o elektronech — o částicích, jež známe lépe než jiné, přestože i v případě elektronů existuje řada otázek, které nejsou dosud zcela vyjasněny.

Někteří z vás by se mohli zeptat: co je to elektron? Je možné pokusit se odpovědět na tuto otázku: elektron je částice, která nese nejmenší množství elektřiny. Avšak taková odpověď ihned vyvolá novou otázku: co je to elektřina? Jediná odpověď na druhou otázku: elektřina je to, co se přenáší elektronem.

Je přirozené, že by nebylo možné dosáhnout pokroku, kdybychom se snažili získat na takové přímé otázky odpovědi. Ve skutečnosti problém spočívá v tom, jak se pohybuje elektron a jaká je jeho interakce s ostatními částicemi.

Fysikové také pracují na vysvětlení pohybových zákonů elektronů a jejich vzájemné interakce s jinými částicemi. Kdybychom mohli odpovědět na otázku, jaké jsou tyto zákony, pak bychom k pochopení chování elektronů už nic víc nepotřebovali.

Zdá se mi, že je užitečné provést analogii mezi problémy, na nichž pracují fyzikové, a šachovou hrou. Různé částice, s nimiž se fyzikové setkávají, lze připodobnit různým šachovým figurám. Je zcela přirozené, že je přitom vedlejší, z čeho jsou šachové figury vyrobeny. Může to být kousek dřeva, slonové kosti anebo symbol na papíře — v tom to nevězí, důležité je však podle jakých pravidel se musí figury pohybovat.

Abychom mohli sledovat šachovou hru a pochopit šachové situace, je zcela postačující znát jen pravidla o pohybu figur. Stejně tak, všechno, co musíme znát v atomové fyzice, jsou zákony, podle nichž se pohybují atomy. Budeme-li je znát, můžeme předpovědět i následující chování částic.

Je možné položit jinou otázku; jaký je rozdíl mezi tím, čím se zabývají experimentální fyzikové a teoretičtí fyzikové? Řekli byste, že experimentální fyzici provádějí pokusy a z výsledků se snaží získat informace o tom, jak se chovají částice.

Avšak můžete mít mylnou představu o tom, jak pracují teoretičtí fyzici. Je možné, aby se spoléhali pouze na to, že pomocí papíru a tužky získají informace o přírodních zákonech?

Teoretičtí fyzikové používají různé pracovní metody. Jedna z nich spočívá v tom, že vycházejí z experimentálních výsledků. Tyto výsledky teoretikové zpracovávají a snaží se z nich vyvodit obecné zákony o pohybu částic. Tento

*) Поль Дирак, Электроны и вакуум, Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний, серия VIII, No 37, Изд. „Знание“, Москва 1957.

způsob si můžeme snadno představit. Avšak většina velikých objevů nebyla dosažena tímto způsobem. Přírodní zákony vyžadují pro svou formulaci použití vyšší matematiky. Metoda matematických hypotéz nabývá s vývojem vědy stále větší a větší platnost.

Nedomnívám se, že je možno klást si otázku, proč je to tak, avšak zřejmě je náš vesmír založen na matematických základech. Lidé, kteří mnoho pracují s matematikou, získávají nakonec smysl pro matematickou eleganci používaných prostředků, stanou se schopnými pocítovat matematickou krásu teorie. Je přirozené, že není snadno získat takovou vytrřbenost. Jsou to spíš emoce, dobře známé těm, kteří je pocítili.

Ukazuje se, že obecným přírodním zákonům, jsou-li vyjádřeny v matematické formě, je vlastní velmi vysoký stupeň matematické krásy. Toto dává teoretickému fyzikovi mocnou metodu, kterou se řídí ve své činnosti. Jestliže zjistí, že některé části jeho teorie nemají požadovanou matematickou krásu, předpokládá, že zejména tyto části jsou nesprávné, takže na ně musí soustředit svou pozornost; nemůže je ignorovat, ale tím méně může pro ně vytvářet umělou „krásu“, jelikož je příroda může vyvrátit a odhalit.

Tento způsob získání matematické jemnosti je z mého stanoviska pro teoretiky nejpodstatnější. V tomto smyslu je méně podstatné vycházet z experimentálních údajů i když ovšem je třeba nakonec teoretické závěry porovnat s experimentem, abychom se přesvědčili, že jdeme správnou cestou. Pro teoretického fyzika není tedy modelová představa tak podstatná, jako matematické hypotézy a metody výpočtu. Experiment má však rozhodující úlohu v uznání matematické teorie.

Abych názorně ukázal tuto metodu, uvedu jeden z největších objevů 20. století — vytvoření Einsteinovy gravitační teorie. Einstein neměl k dispozici žádné nové experimentální údaje. Všechny experimentální údaje, jimiž disponoval, byly známy už Newtonovi. Základním vodítkem byla snaha vyjádřit gravitační zákon v nejobecnější matematické formě. Právě tato snaha ho přivedla k představě o zakřivení prostoru, která je podstatná pro gravitační teorii.

Jak je známo, Einsteinova gravitační teorie byla později potvrzena novými experimentálními údaji, avšak podle mého názoru základní síla Einsteinovy gravitační teorie spočívá v její zvláštní matematické krásě.

Nechci však tím říci, že požadavek elegance teorie představuje jediný princip, na jehož základě lze dosáhnout fyzikálních objevů.

Různí fyzikové pracují rozličnými metodami, což vede k úspěšnějšímu rozvoji vědy, avšak matematické metody zaujímají vedoucí postavení v teoretické fyzice, kdežto experiment si zachovává rozhodující význam při důkazu správnosti teorie.

Nyní přistoupím k výkladu současné situace v atomové fyzice.

Pro částice, s nimiž pracuje atomistika, nelze použít Newtonovy zákony mechaniky. Řídí se vlastní mechanikou, tak zvanou kvantovou mechanikou, jež byla objevena současně dvěma fyziky — Heisenbergem a Schrödingerem. K svým objevům šli různými cestami, ale dospěli ke stejným konečným výsledkům, ovšem v různé formě; později se však ukázalo, že obě formy jsou rovnocenné.

Heisenberg postupoval takto: znal velmi dobře existující experimentální údaje o atomových spektrech. Jeho snaha spočívala v tom, aby vložil skutečné

údaje do nejelegantnější matematické formy, jež pak dostala název kvantová mechanika.

Schrödinger postupoval jinak: neměl rozsáhlé znalosti o atomových spektrech. Jeho cesta byla do značné míry ryze matematická. Vedoucí myšlenka Schrödingera spočívala v tom, že musí existovat určité rovnice vlastních kmitů. Schrödinger se rovněž domníval, že povede-li se mu odvodit rovnici, může z ní pak získat potřebný výsledek.

Tímto způsobem pracoval Schrödinger mnoho let. Pomohly mu de Broglieho ideje, podle nichž jsou s pohybem částic spojeny jisté fyzikální vlastnosti. Ideje de Broglieho byly postačující k tomu, aby daly Schrödingerovi správnou vůdčí myšlenku.

Schrödinger pracoval tímto způsobem řadu let a nakonec mu přišla na mysl rovnice, jejíž krásu ihned pocítil. Jelikož tím byl velmi vzrušen, chtěl si pokud možno co nejrychleji dokázat, zda je možno odtud získat správné výsledky, jež by se shodovaly s experimentem. Cesta, k níž se fyzikové v takových případech uchylují, je tato: vezmou nejjednodušší případ a hledají, jak by z něho nejjednodušším způsobem získali konečné výsledky a potom je srovnávají s experimentem. Jako příklad zvolil si Schrödinger atom vodíku, jenž má proton s jediným elektronem. Jádro lze považovat za nehybné vzhledem k elektronu a v tomto případě se problém stává reálným, ale i nejjednodušším. Avšak věc je zkomplikována tím, že elektron se v atomu vodíku pohybuje tak značnou rychlostí, že zákony obvyklé newtonovské mechaniky se pro něj stávají nepřesnými, takže je nutno použít Einsteinovy mechaniky, jež je založena na teorii relativity a používá se při rychlostech, které jsou srovnatelné s rychlostí světla.

Schrödinger chtěl, aby jeho teorie byla co možno nejlepší a proto vycházel z relativistické mechaniky; sestavil odpovídající rovnici a odvodil z ní zákony o pohybu elektronu ve vodíkovém atomu. Přitom však zjistil, že výsledky získané tímto způsobem se ukázaly nesprávnými a že odporují existujícím údajům o spektru vodíkového atomu. Je přirozené, že Schrödinger byl neobyčejně zklamán tím, že jeho elegantní teorie vede k nesprávným výsledkům. Domníval se, že celá jeho teorie je nesprávná a zbytečná. Byl zklamán do té míry, že přerušil dokonce i studium v tomto oboru a přešel k jiným problémům.

Uplynulo několik měsíců než se Schrödinger znovu vrátil ke své rovnici. Místo exaktní Einsteinovy mechaniky použil jednodušší newtonskou mechaniku, která není tak exaktní, avšak přesto se může do jisté míry přiblížit k pravdě.

Schrödinger nanovo rozvinul celou teorii a jako výsledek znovu získal energetické hladiny vodíku a zjistil, že výsledky získané tímto způsobem se dobře shodují s experimentem s přesností, při níž se zanedbávají relativistické efekty související s teorií relativity. V této méně exaktní nerelativistické formě uveřejnil tehdy svou práci a tak se Schrödingerova rovnice objevila před veřejností.

Nyní již víme, proč byla nesprávná původní varianta Schrödingerovy teorie. Tato nepřesnost souvisí s tím, že elektrony mají tak zvaný spin. V době kdy Schrödinger přistoupil ke své práci, nebyl ještě spin znám. Schrödinger nemohl tedy vyjít z toho, že existuje spin. Nyní víme, že pro částice, které nemá spin, by byl výsledek Schrödingerovy teorie správný. Přidáme-li do původní relativistické Schrödingerovy rovnice spin, pak můžeme získat výsledky, které se shodují s experimentálními údaji.

Takové byly cesty, jimiž oba fyzikové dospěli k objevu kvantové mechaniky. Jejich výsledky byly zprvu vyjádřeny ve dvou různých formách — ve tvaru kvantové mechaniky a vlnové mechaniky, ale obě tyto formy, jak se ukázalo později, jsou zcela rovnocenné. Vidíme tedy, že vytvoření kvantové mechaniky vedlo najednou k řadě úspěchů, zejména když byla použita na elektrony jako částice o minimální hmotě. Obzvláště pro ně je vliv kvantové mechaniky mnohem důležitější, než pro jiné částice, které mají větší hmotu.

Kvantová mechanika měla podíl na velikých úspěších, zejména ve spektroskopii. První dojem byl takový, že kvantová mechanika může dát správnou odpověď na všechny otázky souvisící s atomovými jevy. Avšak časem se ukázalo, že se všechno nedaří a že jsou i problémy, které se nedají vyřešit.

První z těchto problémů spočíval v tom, jak spojit kvantovou mechaniku s einsteinovskou mechanikou. Základní potíž spočívala v tom, že Einsteinův výraz má druhou odmocninu, a když tato existuje, pak je vždy možno použít dvojí znaménko plus nebo minus. Podle kvantové mechaniky může tedy mít částice obě znaménka. Je přirozené, že se nevyskytují částice se zápornou energií. Kdybychom předpokládali, že takové částice existují, došli bychom k nesmyslům. Proto tedy bylo nutné vymyslet jakýsi princip, podle něhož by byla jejich existence v přírodě vyloučena.

Pokud zůstáváme na půdě klasické mechaniky, všechny charakteristiky pohybu mají spojitý průběh. To zejména platí pro energii. Vycházíme-li proto z klasické mechaniky, bylo by postačující předpokládat, že od okamžiku vzniku světa mají všechny částice kladnou energii; potom tedy budou vždy mít kladnou energii. V klasické mechanice existoval tedy jednoduchý způsob, jak vyloučit záporné energie. Avšak v kvantové mechanice by tato metoda nebyla správná, jelikož v kvantové mechanice nemusí mít takové veličiny, jako je energie, spojitý průběh, ale mohou se měnit skokem od jedné hodnoty ke druhé.

A tak předpokládáme-li, že elektrony začaly svou existenci se zápornou energií, dospěli bychom k výsledkům, které odporují experimentu, jelikož částice se zápornou energií neexistují v přírodě.

Můžeme se pokusit najít východisko ze situace pomocí Pauliho principu. podle něhož se dvě částice nemohou nacházet v témže stavu. Je-li stav obsazen jednou částicí, pak druhá částice nemůže nabýt toho stavu. Předpokládejme nyní, že všechny stavy se zápornými energiemi jsou obsazeny elektrony. V takové situaci, máme-li určité množství elektronů ve stavu s kladnou energií, pak nemohou přejít do stavů se zápornými energiemi, pokud jsou již všechny obsazeny. Elektron s kladnou energií se bude chovat jako obyčejný elektron, který nikdy nepřejde do stavu se zápornou energií. Odtud docházíme k základní myšlence, která nám pomůže pochopit, proč se elektrony vždy nacházejí ve stavu s kladnou energií. Tato myšlenka vede dále ke zcela nové představě o vakuovém prázdnu — o prázdném prostoru.

Ukazuje se, že vakuum není prostě prázdno, ale objem naplněný ohromným množstvím elektronů ve stavu záporné energie. V takovéto situaci můžeme podrobit vakuum vnějšímu působení a přinutit některé z elektronů, nacházejících se ve stavu záporné energie, aby přešly do stavu kladné energie. Výsledek toho bude jeden elektron s kladnou energií. Bude se chovat jako obyčejný elektron a kromě něho se objeví se ještě díra, tj. neobsazený stav se zápornou energií.

Dokud jsou všechny elektrony ve stavu záporné energie, jeví se tento souhrn elektronů jako něco nepozorovatelného, je-li dokonale rovnoměrně rozložen.

Avšak jakmile se vytvořila jedna díra, vznikne jisté narušení homogenity, takže máme důvod očekávat, že toto narušení homogenity povede k jistému těžko pozorovatelnému jevu. Vcelku to představuje nový fyzikální jev.

Přirozené se to vše vcelku bude chovat jako něco, co má tolik kladné energie, kolik chybí záporné energie, jelikož nedostatek záporné energie je kladná energie. Celek se bude chovat jako částice s kladnou energií a zároveň s kladným nábojem, pokud je to místo, odkud byl odstraněn záporný náboj. Bude to částice s kladným nábojem, za předpokladu, že elektron má záporný náboj a že znaménko díry bude opačné než je náboj elektronu; bude mít hmotu elektronu. Taková částice byla objevena experimentálně a je známa pod názvem positron.

Problém spojení kvantové mechaniky s teorií relativity vedl k předpovědi existence positronu a poskytl základ pro vytvoření teorie positronu.

Podle této teorie mohou současně s positrony vznikat elektrony, jinak řečeno, vytvářejí se dvojice positron—elektron, vzniká tedy jedna částice s kladnou energií a jedna díra, tj. částice s kladným nábojem.

Může ovšem nastat i opačný proces, při němž elektron s kladnou energií zabírá volné místo, v důsledku čehož jakoby se ztrácel v moři elektronů se zápornou energií, a obě částice mizí nebo, jak se říká, anihilují.

Pokusím se popsat novou představu o fyzikálním vakuu. Podle této nové představy vakuum není prázdnotou, ve které není nic. Je zaplněno obrovským množstvím elektronů, nacházejících se ve stavu záporné energie, na něž lze pohlížet jako na jakýsi oceán. Tento oceán je zaplněn elektrony bez omezení velikosti záporné energie, a proto neexistuje nic podobného dnu v tomto oceánu elektronů. Ty jevy, které nás zajímají, jsou jevy, které probíhají na povrchu tohoto oceánu, a to co se děje v hloubce jednak není pozorovatelné a jednak nás nezajímá. Do té doby, pokud je oceán homogenní a pokud jeho povrch je rovinný, není pozorovatelný. Avšak vezmeme-li hrst vody z oceánu odebereme ji, pak vzniklé narušení homogenity bude podobné tomu, co lze pozorovat jako elektrony. Odebraná hrst vody znázorňuje v tomto obraze elektrony a na jejím místě zůstala díra, to jest positrony.

Když jsem poprvé před dvaceti lety vyslovil myšlenku o takovém elektronovém moři, předpokládal jsem, že díky jeho homogenitě není pozorovatelné, takže pouze snaha odchýlit se od homogenity je vlastně to, co lze pozorovat v přírodě. Je zcela rozumný předpoklad, že homogenní rozdělení není pozorovatelné. Avšak takovýto předpoklad není zcela přesný. Existují zákony kvantové mechaniky, které lze aplikovat na tento elektronový oceán a vypočítat jeho hustotu. Při takovémto použití zákonů kvantové mechaniky se dá ukázat, že jeho hustota není konstantní a že velmi rychle a mocně osciluje kolem jisté střední hodnoty. Současně s těmito intenzivními fluktuacemi elektronové hustoty vznikají stejně intenzivní fluktuace pole.

Na první pohled by se mohlo zdát, že teorie, která vede k těmto intenzivním kmitům hustoty, nemůže být považována za správnou. Ve skutečnosti tomu tak není, jelikož tyto fluktuace mohou skutečně existovat, jestliže máme dostatečně silné zdroje energie. Ovšem neexistují-li takové zdroje, pak nemohou rovněž vznikat ani fluktuace. K ilustraci této situace považuji za vhodné použít analogie s obyčejným atomem. Jak je známo, každý atom může se nacházet v základním stavu, to je ve stavu nejmenší energie. V tomto stavu se s ním nic nemůže stát, dokud nedostane od vnějšího zdroje dostatečnou energii. Avšak tento stav nikterak nepředstavuje klidový stav. Uvnitř atomu

se značnými rychlostmi pohybují elektrony, jejichž pohyb lze popsat pomocí zákonů kvantové mechaniky. Tento pohyb není pozorovatelný, protože atom nemá energii, pomocí níž by se mohl projevit navenek.

Vakuum si lze představit v jistém smyslu analogickým způsobem. Je to stav, v němž existuje značný intenzivní pohyb, avšak je to rovněž stav s nejmenší energií, jež je možná pro prázdný prostor, a proto vnější projevy takového vakua nejsou pozorovatelné.

Předložil jsem tuto představu o vakuu v případě elektronů. Tuto představu je zapotřebí přijmout, jelikož vede k anihilaci elektronů a positronů, kterou lze skutečně experimentálně pozorovat.

Tento souhlas teorie s experimentem nás utvrzuje v přesvědčení, že jsme na správné cestě. Je možné, že se vyskytnou ještě obtíže, ale přesto můžeme počítat s tím, že jdeme správným směrem. Naskytá se otázka, jak je to s takovými částicemi, jako je proton a neutron, u kterých je rovněž třeba použít kvantové mechaniky a teorie relativity, když se pohybují velkými rychlostmi? Nebude se snad také na ně vztahovat představa o vakuu? V tomto případě je třeba vzít v úvahu, že všechny částice existující v přírodě lze rozdělit do dvou skupin. Do jedné z těchto skupin patří částice, které se řídí tak zvaným vylučovacím Pauliho principem, o němž jsme už mluvili. Podle tohoto principu v jednom a téže stavu nemůže být více než jedna částice. Takovéto částice se nazývají fermiony. Zároveň s nimi existují částice jiného druhu, jež se nazývají bozony, které se vyznačují tím, že libovolný počet částic tohoto druhu může být současně v tomtéž stavu.

Pokud jde o fermiony, lze na ně použít stejných úvah jako na elektrony. Takovýmto způsobem je tedy možno zbavit se potíží, souvisejících se zápornými stavy, pro všechny ty částice, na něž se vztahuje Pauliho princip, to jest pro všechny částice, jež patří do skupiny fermionů. Co se týče bozonů, nelze na ně bezprostředně použít těchto metod, a je zapotřebí jiných, mnohem složitějších způsobů, s nimiž se nyní nechci zdržovat.

Pokud jde o fermiony, můžeme si představit, že pro každý druh částic, které patří do této kategorie, existuje vlastní oceán, zaplněný těmito částicemi, které jsou ve stavu záporné energie, tj. existuje řada oceánů pro každý druh částic zvlášť a všechny tyto oceány se navzájem překrývají. Pro každý druh těchto částic platí, že kteroukoli částici lze z odpovídajícího oceánu dostat do stavu kladné energie a tímto způsobem vznikne pozorovatelná částice a na uprázdněném místě díra, kterou lze pozorovat jako částici, v jistém smyslu neznámou, a která může být antičásticí. To znamená, že pro každý druh fermionů existují jemu odpovídající antičástice. Do skupiny fermionů patří protony a tudíž, podle těchto představ, zároveň s protony musí existovat antiprotony, jež představují vlastně „díru“ v moři protonů se zápornými energiemi.

Přibližně před rokem byl skutečně experimentálně objeven antiproton, což tedy potvrzuje správnost koncepce.

Důvod, proč antiproton byl objeven až za značně dlouhou dobu po objevu positronu a protonu, spočívá v tom, že pro vytvoření antiprotonové dvojice je zapotřebí mnohem větší energie, než pro vytvoření dvojice positron—elektron. Velmi vysokou energii, které bylo zapotřebí, aby byl vytvořen antiproton, bylo možno získat na velkém urychlovači na Kalifornské universitě v Berkeley. Energie, která byla získána na tomto urychlovači, stačila k tomu, aby byly vytvořeny antiprotony, ale jenom v malém množství. V Berkeley jsou experi-

mentátoři, kteří si vědí rady i s tímto množstvím částic. Ve vaší zemi v oblasti Volhy je vybudováno v současné době zařízení, které dává mnohem vyšší energie; proto doufáme, že pomocí tohoto zařízení bude možno získat anti-protony ve značně větších množstvích, čímž bude velmi usnadněn úkol experimentátorů, kteří zkoumají vlastnosti těchto částic.

Do kategorie fermionů patří i neutrony. Proto je možno očekávat, že i pro ně musí existovat odpovídající antičástice — antineutrony. A skutečně před nedávnem jsme dostali zprávu, že pomocí velkého urychlovače v Berkeley byly objeveny antineutrony.

Existuje teorie positronů, s jejíž pomocí lze vypočítat teoreticky proces vytváření párů elektronů a positronů. Výsledky výpočtu získané podle této teorie shodují se s experimentálními výsledky. Odpovídající řešení v případě protonů není tak uspokojivé. Proton není tak jednoduchý jako elektron. Na jeho chování má vliv řada složitých okolností, souvisejících s mesony. Právě pro tyto složité okolnosti nemůžeme teoreticky dospět k výsledkům, které byly experimentálně získány v Berkeley. Tyto údaje nemohou se získat pomocí obvyklé teorie.

Můžeme tedy říci, že v současné době se v teorii elektronů došlo mnohem dále než v teorii jiných částic. V teorii elektronů můžeme vypočítat všechny jevy s velkou přesností, což není možné u jiných částic, jejichž stav je nejasný, a tudíž v této oblasti jsou zapotřebí jakési nové základní myšlenky.

Mluvil jsem o tom, že teorie elektronů a positronů se jeví jako správná teorie. Avšak neřikal jsem, že je ideální teorií. Pokud bychom se dosáhli větší matematické přesnosti, narazíme na značné množství otázek, které zůstávají ještě nejasné. Je možné, že tyto potíže v teorii elektronů souvisí jakýmsi neznámým způsobem s jinými částicemi. Mnozí teoretičtí fyzikové sdílejí tento názor. Avšak já se domnívám, že potíže v teorii elektronů představují specifické potíže pro samu teorii a že nesouvisí s částicemi jiných druhů.

Dějiny vývoje vědy ukazují, že čas od času, když ten nebo onen vědec najde jistou ideu, je možno pomocí ní vysvětlit celou řadu faktů. Avšak vždy zůstávají kategorie jiných faktů, které nemohou být vysvětleny pomocí této ideje a pro jejichž vysvětlení je zapotřebí jakési nová idea. Obdobná byla situace při vytvoření kvantové mechaniky, jež vysvětlila celou řadu jevů, takže fyzikové doufali, že pomocí ní bude možno popsat všechny atomové jevy. Avšak brzy nastalo rozčarování, když se ukázalo, že existuje celá řada jevů, které nemohou být popsány pomocí kvantové mechaniky.

V poslední době soustředil jsem pozornost na teorii elektronů v naději, že se mi zde podaří postoupit kupředu, zejména na problém vakua. V současné době existují základní potíže s popisem fyzikálního vakua. Již jsem se zmiňoval o intenzivní fluktuaci elektronů. Ukazovat jsem, že snad tyto fluktuace nebudou dělat potíže, jež by se mohly vyskytnout, pokud jejich existence by vyžadovala vnější zdroje energie, a jestliže takový zdroj není, pak by se ani neobjevily. Potíž však spočívá v něčem jiném. Jde o to, že za všech podmínek stav fyzikálního vakua je základní stav prázdnoty, tj. stav s nejmenší energií. Základním stavem vakua má být stacionární stav, jenž nezávisí na čase. Stacionární stav v kvantové mechanice nemůže existovat, musí být popsán tím nebo jiným odpovídajícím řešením Schrödingerovy rovnice. Dosud se nikomu nepodařilo najít takové řešení této rovnice, které by umožnilo popsat stav fyzikálního vakua.

V poslední době se mi podařilo dosáhnout v tomto směru jistého úspěchu, zejména popsat fyzikální vakuum s poněkud větší přesností než se to dělalo dosud. Avšak zůstává zde ještě dlouhá cesta, po níž je třeba jít. Podle mého názoru otázka popsaní vakua představuje základní problém, jenž je v současné době před fyziky. Ve skutečnosti, nejste-li schopni správně popsat vakuum, jak se potom můžete domnívat, že můžete správně popsat cokoli složitějšího? Základní metoda při řešení tohoto problému má být podle mého názoru ryze matematická a vůdčím principem má být princip, podle něhož je třeba vytvořit teorii s takovou matematickou elegancí, jak je to jen možné.

Pokud s vakuem není možno provádět experimenty, nelze ani očekávat, že se objeví experimentální údaje, jež by nám pomohly, abychom v tomto směru postoupili kupředu.

Vakuum tedy představuje základní problém současné fyziky. Existují ještě i další problémy při zkoumání částic a snažíme-li se přesně popsat soustavu pomocí vlnových rovnic kvantové mechaniky. V teorii elektronů je další potíž v tom, že v současné době nemáme k dispozici vhodné schéma bodových elektronů. V blízkosti takového náboje budou magnetická pole nekonečně velká a spolu s tím bude v magnetickém poli asociovaná velká hmota. Je tedy model bodového elektronu spjat s velkými potížemi. Je možné, že bude zapotřebí vyjít z Lorentzova modelu, podle něhož je elektron rozložen uvnitř nějaké velké oblasti. Avšak představa o roztažitelnosti elektronu vede k značným obtížím, chceme-li jí dát matematickou formu.

Všechny úspěchy bodové teorie dosažené v současné době souvisí s modelem bodového elektronu. Potíže, které vznikají při použití této metody, obcházejí fyzikové zavedením nekonečně velké záporné hmoty, která se musí odečíst od kladné hmoty tak, aby konečný rozdíl souhlasil s experimentálně zjištěnou hmotou elektronu.

Tato metoda se velmi rozšířila a v současné době přispěla ke vzniku nové oblasti teoretické fyziky, kterou lze nazvat odečítací fyzikou.

V poslední době toto nové odvětví teoretické fyziky umožnilo provádět výpočty fyzikálních jevů s vysokým stupněm přesnosti. Tak na příklad, experimentálně zjištěná hodnota energie vodíkového atomu se zcela nepatrně liší od hodnoty, ke které vede obyčejná kvantová teorie, založená na Schrödingerově rovnici, do níž byl zaveden spin. Tento nepatrný nesouhlas se dá skvěle vysvětlit pomocí soudobé odečítací fyziky. Chtěl bych podotknout, že tento nesouhlas je neobyčejně málo prokazatelný a že je zapotřebí velmi vysokého stupně experimentální přesnosti a experimentální techniky, aby bylo možno zjistit tyto jevy.

Výsledky, ke kterým vede odečítací fyzika, se zdají úplně přesné dokonce i při tak těžko prokazatelném zmíněném celkovém jevu.

Odečítací fyzika není dostatečně korektní logickou teorií, pokud zavádí nekonečno jen k tomu, aby ho potom vyloučila umělým zavedením jiného nekonečna. Další vývoj teorie jen zostril kritiku odečítací fyziky. Fyzikové se tedy ocitli v takové situaci, že sice mají návod pro výpočet vzniklého jevu s velmi značným stupněm přesnosti, avšak v tomto návodu scházejí prvky logiky a rovněž není zcela jasná podstata fyzikálních jevů, které tvoří základ této metody.

Tak podivná je situace, v níž se ocitla v současné době odečítací fyzika, která v případě elektronů dává dobré výsledky. To má za následek, že v případě

jiných částic nemůžeme předvídat příslušné jevy, jelikož v těchto případech odečítací fyzika vede k nesprávným výsledkům.

Chtl bych se zmínit ještě o jednom podstatném problému, který je před fyziky: proč elektrony mají zcela určitý elektrický náboj? Vždyt všechny ostatní náboje, s nimiž se setkáváme jak v teorii, tak v praxi, vždy představují celistvý násobek tohoto elementárního elektrického náboje. Stojíme tedy před fyzikálním principem, jehož vysvětlení v současné době ještě neznáme. Domnívám se, že budoucí fyzikální teorie musí rozřešit i tento problém a umožnit výpočet elektronového náboje. Domnívám se, že pokud nebude vyřešen tento problém, elektronová teorie nebude úplná.

Tím i končím. Doufám, že jsem vám dal představu o tom, že v současné době existuje teorie elektronů a s ní související teorie vakua a pozitronů. Avšak, zvyšujeme-li požadavky na matematickou přesnost, narážíme na nové fundamentální potíže, k jejichž překonání je zapotřebí zavést do experimentální fyziky nové ideje.