

Kapitola 2

Svítání

Roky následující po průkopnickém návrhu Maxe Plancka byly pro fyziku obdobím zmatků a temnoty. Světlo jsou vlny, světlo jsou částice. Znepokojivě úspěšné modely, jako Bohrovův atom, slibovaly, že nová fyzikální teorie je už za dveřmi, ale z nedokonalých základů těchto kvantových přístaveb na troskách klasické fyziky bylo jasné, že konzistentní obraz se může zrodit jen hlubší analýzou. Když se konečně objevilo světlo, stalo se tak s náhlostí tropického svítání.

V plně rozvinuté formě kvantová teorie povstala v letech 1925 a 1926. Tyto *anni mirabiles* (zázračné roky) jsou v povědomí společenství teoretických fyziků zaznamenány jako období nejvyššího významu a i dnes se o nich hovoří s úctou, přestože paměť žijících současníků již do těchto heroických časů nesahá. Když se dnes probírají fundamentální aspekty teoretické fyziky, lidé někdy říkají: „Mám pocit, že tady opět máme rok 1925.“ V této poznámce se dá postřehnout jistý toužebný podtón. Wordsworth řekl o francouzské revoluci: „Žít v tom čase svítání bylo požehnáním, ale být navíc mladý znamenalo opravdový ráj!“ Ač posledních 75 let přineslo mnoho důležitých pokroků, další radikální revize fyzikálních principů – srovnatelná s tou, která provázela vznik kvantové teorie – se dosud neodehrála.

Kvantovou revoluci odstartovaly překvapivé ideje, nezávisle a téměř současně zformulované dvěma lidmi.



A. PICCARD, E. HENRIOT, P. EHRENFEST, Ed. HERZEN, Th. de DONDER, E. SCHRÖDINGER, E. VERSCHAFFELT, W. PAULI, W. HEISENBERG, R. H. FOWLER, L. BRILLOUIN, P. DEBYE, M. KNUDSEN, W. L. BRAGG, H. A. KRAMMERS, P. A. M. DIRAC, A. H. COMPTON, L. de BROGLIE, M. BORN, N. BOHR, I. LANGMUIR, M. PLANCK, Mme CURIE, H. A. LORENTZ, A. EINSTEIN, P. LANGEVIN, Ch. E. GUYE, C. T. R. WILSON, O. W. RICHARDSON

Obr. 2. Zakladatelé a velíkáni kvantové teorie: Solvayská konference 1927.

Maticová mechanika

Jedním z nich byl mladý německý teoretik Werner Heisenberg, který se v té době pokoušel porozumět struktuře atomových spekter. Spektroskopie sehrála v rozvoji moderní fyziky velmi důležitou roli. Hlavním důvodem byla skutečnost, že experimentální techniky měření frekvencí spektrálních čar doznaly značného zdokonalení, takže teoretikům poskytovaly přesná data a jasně zformulované úlohy k vyřešení. Již jsme se seznámili s jednoduchým příkladem spektra atomu vodíku, s Balmerovou formulí a jejím vysvětlením pomocí Bohrova modelu atomu. Od té doby se situace zkomplikovala a Heisenberg se pokoušel o mnohem širší a ambicióznější teorii atomových spekter, která měla mít obecnou formu. Svůj velký objev učinil, když se na ostrově Heligoland v Severním moři zotavoval z vážného záchvatu senné rýmy. Výpočty se zprvu zdály dost komplikované, ale když se prach usadil, bylo jasné, že ve hře jsou matematické entity zvané matice (jedná se o jakési tabulky čísel, které se celé dají určitým způsobem vzájemně násobit). Proto Heisenbergova teorie vstoupila ve známost pod názvem „maticová mechanika“. Její základní myšlenka se později objeví v ještě obecnější podobě, v tomto okamžiku se proto spokojme jen s konstatováním, že matice se liší od obyčejných čísel především tím, že maticové násobení není komutativní. To znamená, že jsou-li A a B dvě matice, pak součin $A \times B$ není v obecném případě to samé jako součin $B \times A$. Na pořadí obou matic při násobení záleží (narozdíl od obyčejných čísel, pro něž se například 2×3 a 3×2 oboje rovná 6). Ukázalo se, že tato specifická matematická vlastnost matic má závažné fyzikální důsledky pro určení, jaké z fyzikálních veličin mohou být měřeny současně a jaké ne. [Viz dodatek 4, kde je ukázáno další matematické zobecnění, které se pro rozvoj kvantové teorie stalo nezbytným.]

V roce 1925 byly matice pro průměrného teoretického fyzika podobně exotickým matematickým zbožím, jako jsou asi dnes pro průměrného laického čtenáře této knihy. Mnohem známější pro fyziky té doby byla matematika spojená s teorií vln (tj. parciální diferenciální rovnice). Ta používala prostředky běžné v klasické fyzice Maxwellova typu. Bezprostředně po Heisenbergově objevu přišla na první pohled zcela odlišná verze kvantové mechaniky, která byly založena na tehdy známější matematice vlnových rovnic.

Vlnová mechanika

Tato „přátelštější“ podoba kvantové teorie nese přílehlavý název vlnová mechanika. Ačkoliv její precizní formulace byla vypracována rakouským fyzikem Erwinem Schrödingerem, první krok správným směrem učinil již o něco dříve mladý francouzský šlechtic, princ Louis de Broglie [5]. Vyslovil následující smělou hypotézu: vykazují-li světelné vlny jisté částicové vlastnosti, lze snad očekávat, že částice jako elektrony mají naopak jisté vlnové vlastnosti. De Brogliemu se zobecněním Planckovy formule podařilo dát této myšlence kvantitativní formu, která spojuje ve vzájemné úměrnosti frekvenci, tedy veličinu charakterizující vlny, s energií, veličinou vlastní částicím. De Broglie navrhl, že další částicová charakteristika, hybnost (důležitá veličina určující míru a směr pohybu částice), je analogicky spojena s vlnovou délkou. Koeficientem úměrnosti je opět Planckova univerzální konstanta. Tyto relace se staly jakýmsi minislovníčkem mezi vlnovým a částicovým jazykem. De Broglie tyto myšlenky zformuloval ve své doktorské disertaci z roku 1924. Autoritám Pařížské univerzity se bludařsky znějící vývody práce zdály dosti podezřelé, ale naštěstí byl o konzultaci požádán Einstein. Ten rozeznal génia mladého fyzika a titul byl de Brogliemu udělen. Za několik let experimenty Davissona

a Germera (ve Spojených státech) a George Thomsona (v Anglii) prokázaly existenci interferenčních jevů při odrazu svazku elektronů od krystalové mřížky, čímž bylo vlnové chování elektronů potvrzeno a Luis de Broglie dostal v roce 1929 Nobelovu cenu za fyziku. (George Thomson byl synem J. J. Thomsona. Jak se často připomíná, otcí byla Nobelova cena udělena za objev elektronu coby částice, zatímco syn stejnou cenu získal za důkaz toho, že elektron je vlnou.)

Myšlenky de Broglieho byly založeny na analýze vlastností volně se pohybujících částic. K formulaci úplné dynamické teorie bylo zapotřebí zobecnění zohledňující také vzájemné interakce částic. Právě při řešení tohoto problému dosáhl úspěchu Schrödinger. Na začátku roku 1926 publikoval slavnou rovnici, která nyní nese jeho jméno [6]. K jejímu objevu ho přivedla analogie s optikou.

Fyzikové 19. století sice pokládali světlo za vlnění, ve svých analýzách optických jevů však ne vždy využívali plný výpočetní arzenál vlnové dynamiky. Pokud je totiž vlnová délka světla mnohem menší než charakteristické rozměry definující zadaný problém, je možné použít mnohem jednodušší metody. Tento přístup je rozvinut v geometrické optice, která světlo nahrazuje přímočarými paprsky podléhajícími jednoduchým pravidlům lomu a odrazu. Školní výpočty elementárních soustav čoček a zrcadel jsou dodnes prováděny právě těmito metodami, aniž by se kdokoliv trápil se všemi složitostmi vlnové dynamiky. Jednoduchost paprskové optiky připomíná kreslení trajektorií v částicové mechanice. Protože ta se nyní ukázala být aproximací kvantové vlnové mechaniky, Schrödinger se rozhodl obrátit argumenty vedoucí od vlnové ke geometrické optice. Právě tímto způsobem odvodil svou rovnici.

Schrödinger své myšlenky publikoval jen několik měsíců poté, co Heisenberg představil teorii maticové mechaniky. V té době bylo Schrödingerovi 38 let, takže jeho objev vyvracel tvrzení (často opakované laiky), že teoretičtí fyzi-

kové zpravidla přicházejí se svými originálními pracemi ve věku pod 25 let. Schrödingerova rovnice je fundamentální dynamickou rovnicí kvantové teorie; jedná se o jednoduchý typ parciální diferenciální rovnice, dobře známý fyzikům té doby, pro který existuje celá škála metod řešení. Použití Schrödingerovy rovnice bylo mnohem jednodušší než aplikace Heisenbergových nově vypracovaných postupů. Najednou tu tedy byla teorie, která se dala použít na širokou třídu fyzikálních problémů. Schrödinger sám ze své rovnice odvodil Balmerovu formuli pro vodíkové spektrum. Tento výpočet demonstroval, jak blízko pravdě a zároveň jak daleko od ní byl Bohr a jeho stará kvantová teorie. (Moment hybnosti se sice ukázal být podstatný, ale ne přesně v tom smyslu, jak navrhoval Bohr.)

Kvantová mechanika

Bylo jasné, že Heisenberg a Schrödinger dosáhli významných úspěchů. Nicméně způsoby, kterými prezentovali své nové ideje, se na první pohled zdály velmi odlišné. Nebylo jasné, zda oba učinili stejný objev, jen různě vyjádřený, či zda se jedná o dvě zcela neslučitelné konkurenční teorie [viz diskusi v dodatku 10]. Důležité práce poskytující potřebné vyjasnění však následovaly vzápětí. Zvláště důležitou úlohu v této etapě sehráli Max Born z Göttingenu a Paul Dirac z Cambridge. Na základě těchto prací se stalo nezvratně jasné, že existuje jediná teorie, založená na společných obecných principech, jejíž konkrétní matematická artikulace může nabývat mnoha různých podob. Tyto obecné principy byly jasné zformulovány v Diracově knize *The Principles of Quantum Mechanics*, poprvé publikované v roce 1930, která se řadí k zásadním fyzikálním dílům 20. století. Předmluva k prvnímu vydání začíná prostým tvrže-

ním: „Metody teoretické fyziky prošly v tomto století podstatnou změnou.“ Musíme teď blíže prozkoumat nový obraz přírody, který z této změny vyzrál.

Osobně jsem navštěvoval slavný kurs přednášek o kvantové teorii, který Dirac vedl v Cambridge v průběhu více než 30 let. Publikum tvořili jen studenti posledních magisterských ročníků, jakým jsem byl tehdy já, ale často také vědci, kteří si nenechali ujít příležitost poslechnout si znovu příběh kvantové teorie – jakkoliv dobře jej již znali – přímo z úst jednoho z jeho výjimečných protagonistů. Přednášky sledovaly osnovu Diracovy knihy. Podivuhodná byla naprostá absence důrazu na osobnost přednášejícího a jeho vlastní přínos k probíraným tématům. Už v předmluvě jsem Diraca nazval vědeckým světcem, zmínil jsem se o čistotě jeho mysli a prostotě cílů. Diracovy přednášky posluchače uhranuly svou jasností a vznešenou jednoduchostí argumentů, jejich stavba byla podobně uspokojivá a zdánlivě nezměnitelná jako kompozice Bachovy fugy. Ač se Dirac zcela obešel bez rétorických triků jakéhokoliv druhu, brzy po zahájení kursu si dovilil jedno malé teatrální gesto.

Vzal křídou a rozlomil ji na dva kousky. Jeden kousek položil na pravý konec katedry, druhý na levý a řekl, že z klasického hlediska existuje fyzikální stav, kdy křída je „tady“, a stav, kdy křída je „tam“. Jiné klasické možnosti neexistují. Nahradte ale křídou elektronem a zjistíte, že kvantový svět nepřipouští jen stavy „tady“ a „tam“, ale také celou škálu dalších stavů, jež jsou jejich směsí – trochu „tady“ a zároveň trochu „tam“, obě možnosti spojené dohromady. Kvantová teorie dovoluje vzájemné mísení i takových stavů, které se z klasického hlediska zcela vylučují. A právě tato možnost odlišuje kvantový svět od klasického světa každodenní zkušenosti [7]. V kvantové terminologii se tato podivuhodná skutečnost označuje jako *princip superpozice*.