

# KVANTOVÁ TEORIE VE SVĚTLE SVÍČKY

Arthur Zajonc

Zaskočím k někomu domů, tam jasně hoří a svítí svíce.  
Přemýšlím o ní, jak šťastně, se žlutavou mlžnou září  
zadržuje tmavou všeobjímající černí noci, nebo jak něžné,  
neúnavné tenké paprsky světla nenápadně vstupují do oka.  
— *Svíce v pokoji*, Gerard Manley Hopkins

Večer 21. října 1929 zažila Amerika opět jeden z velkých okamžiků v historii světla. Toho večera kráčeli Thomas Alva Edison, Henry Ford a prezident Hoover společně po Greenfield Village, hlavní ulici nového parku, jenž vstoupil do živé historie města, k Edisonově staré laboratoři (kterou sem Ford přestěhoval z Menlo Park v New Jersey). Edison, roztřesený věkem a plný dojetí, se posadil na starou laboratorní lavici a chystal se na závěrečné okamžiky padesát let trvajících budování zářivého elektrického světla. Stovky nových radiových stanic vysílaly tuto událost miliónům posluchačů a Ford je požádal, aby na její počest vypnuli všechna elektrická světla. Toho večera celá Greenfield Village a velká část Spojených států očekávala Edisonův vynález při svíčkách. Edison zapnul vypínač, který směřoval elektrický proud do křehkého uhlíkového vlákna jeho žárovky. Když slabý svit vlákna ozářil jeho starý obličej, Spojené státy unisono zmáčkly vypínače napájející okruhy v Greenfield Village a zhasla světla v domovech na celém kontinentě. Světlo celé lidské minulosti bylo na několik minut opět oživeno, aby mohlo být obřadně zhasnuto v triumfálním okamžiku bravurního technického kousku.

V současné době je svíčka ještě větším anachronismem než v roce 1929, ale možná právě proto si drží posvátné významy. My stejně jako mnoho lidí před námi stavíme její malé světlo na oltáře, vedle našich postelí nebo s trochou odvahy na větve našich vánočních stromků. Díváme se na ně, a jak to vyjádřil Gerard Manley Hopkins, „přemýšlíme o tom, jak žije, jak šťastně, se žlutavou mlžnou září zadržuje tmavou všeobjímající černí noci“.

Zdá se však, že plamen svíčky nám dává mnohem více než světlo. V době, kdy se vše řídí prospěšností, je svíčka spíše symbolem než technologií pro domácnost. A stejně jako duha i ona je cestou k porozumění světlu.

Po třicet pět let Michael Faraday každé Vánoce přednášel „pro mladé posluchačstvo“ a tyto přednášky se rychle staly velmi oblíbenými. Naposledy pro mladé posluchače přednášel o Vánocích 1860 ve velké síni Královského institutu na téma *Chemická historie svíčky*. Jeho přednášky se staly klasickou součástí historie vědy. Ačkoliv mu bylo sedmdesát, promlouval hlasem mládí. „Dožaduji se práva mluvit k mladým, protože se sám považuji za mladého,“ řekl a bylo to tak, jeho radost a nadšení popíraly padesát let služby, kterou pro Královský institut vykonal. Knihařský učeň se stal nej významnějším a nejmilovanějším učencem Anglie. Faraday vyzval mladé posluchače, aby se připojili k jeho výzkumům, a řekl jim: „Neexistuje lepší a schůdnější cesta ke vstupu do studia přírodní filosofie než přemýšlení o fyzikálním fenoménu svíce.“ Zapalte svíčku a začněte tím, že budete pozorovat dokonalou miskou pod plamenem, v níž se hromadí rozpuštěný vosk. Plamen, sahající dolů ke knotu, rozpouští vosk ve středu svíčky, zatímco proud vzduchu tvořící se kolem svíčky udržuje její okraj chladný a vysoký, a vytváří tak nádobku dokonale uzpůsobenou k udržení roztavené hmoty. Tekutina uvnitř stoupá knotem nahoru stejnou silou, jakou stoupá míza stromem nebo rostlinou: kapilárním pohybem. Avšak tekutý vosk nevyživuje listy a květiny, nýbrž se v tmavé části plamene nejbliže ke knotu vypařuje, mísí se se vzduchem a živí plamen. V případě některých plamenů už proces dál nepokračuje a svíčka poskytuje slabé světlo. Ten jasný žlutý kužel, od něhož se šíří jemná záře, vzniká díky nepatrným svítícím řeřavým kouskům nespáleného uhlíku, z nichž se tvoří saze, když je knot příliš dlouhý. Studené saze jsou tou nejčernější hmotou; jsou-li však horké, nádherně se rozzáří.

Pro poetický zrak Gastona Bachelarda je plamen svíčky modelovým fenoménem. V něm „hmota, nade vše prostá, vytváří světlo. Očišťuje se ve svém aktu, který dává světlo... A tak se zlo stává živitelem dobra. V plameni se filosof setkává s *modelem-fenoménem*, fenoménem kosmu, se vzorem zlidštění.“ Jako modelový fenomén je plamen svíčky symbolický a obsahuje jak morální, tak i fyzikální aspekt. Hrubý materiál se očišťuje v plameni, který se stává světlem. Když se díval do plamene, podívoval se Kvantová teorie ve světle svíčky

Paul Claudel přeměně, kterou způsobuje: „Odkud se hmota vznesse, aby na křídlech odletěla do říše božského?“ Pro básníka je plamen svíčky modelem zlidštění, pro vědce nerozluštěnou hádankou, ale ať už je čímkoliv, plamen svíčky nás přitahuje jako můry.

Ve svých vánočních přednáškách o svíčce Faraday opomněl ukázat svým malým posluchačům jeden rys, který v sobě více než ostatní vlastnosti nese zárodek revoluce ve fyzice a který nás přivádí k naprosto novému pojetí našeho fyzického světa. Tím opomenutým rysem byla barva svíčky.

Podívejte se na plamen svíčky. Chvěje se, vlní a pulsuje, svítící, žlutá, nehmotná forma. Teď se na něj podívejte hranolem a známý pohled spektra se objeví jako krásné, plaménkové paprsky duhových barev. Uvnitř té delikátní barevné formy je skryto zcela nové chápání přírody. „V plameni lampy jsou všechny přírodní síly aktivní,“ napsal Novalis. Mírumilovný plamen svíčky nabízí, jak nám sdělil Faraday, tu nejlepší bránu k poznání. Musíme jí projít, abychom se vydali na cestu ke kvantové teorii světla.

## SVĚTLO Z ŽÁRU

Světlo je duchem procesu hoření.

Světlo dělá oheň.

— Novalis

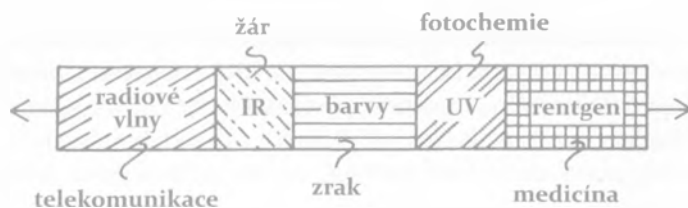
Jakákoliv zahřátá látka, pevná nebo tekutá, ať už je to hlína v hrnčívově peci nebo vlákno v rozsvícené lampě, žhne úplně stejně jako saze v plameni svíčky. To je univerzální zákon platící pro všechny zahřívání látky. Horká hmota vždy poskytuje světlo a poskytuje ho vždy stejným způsobem.

Tento zákon zná každý hrnčív, sklář a slévač. Barvy zahřátých zářících látek, s nimiž pracují, se mění pravidelně s teplotou. Při nízkých teplotách má kovářovo železo stejně tmavou rudou barvu jako hrnčívova hlína. Čím jsou železo i hlína teplejší, tím výraznější barvou, oranžovější a poté jasnější žlutou materiál září. Každá teplota má svou jedinečnou barvu (takzvanou barevnou teplotu). To je základ optických metod měření teploty, často užívaných v dílnách, kde se pracuje se sklem a kovem. V astronomii umožňuje vědcům určit, že teplota povrchu Slunce činí asi 5500 stupňů Celsia. Teplota a barva světla jsou propojené.

Každý, kdo se zajímá o světlo svíčky nebo slunce, může samozřejmě nechat procházet jejich světlo hranolem, aby prozkoumal vzniklé spektrum. Právě takové pokusy se s překvapivými výsledky konaly v devatenáctém století v Anglii a Německu. Anglický astronom Herschel zkoumal sluneční spektrum a díky těmto výzkumům vynalezl řadu teploměrů. Nebyl v tom první, ale všiml si něčeho, co jiným uniklo. Teploměry, které náhodou měřily teplotu za viditelným okrajem spektra, zaregistrovaly významný vzestup teploty. Tam, kde nebylo nic vidět, stále působil tepelný účinek. Podobná pozorování prováděli ve stejné době i jiní vědci, ale na opačném konci spektra, za jeho halovým okrajem. V těchto případech však účinky přirozeně nebyly tepelné, ale chemické. Nerosty měnily barvu nebo zářily, když se octly za halovou hranicí spektra. Tito výzkumníci objevili to, co teď nazýváme infračervené a ultrahalové záření. Sálavé teplo, které cítíme ze železných kamen, je jedním příkladem neviditelného infračerveného záření. Na druhém konci spektra mění v ultrahalovém záření barvu nejen nerosty, ale také my. Naše opálení do značné míry záleží na ultrahalovém světle, stejně jako je tomu u fotosyntézy rostlin.

Zjistilo se, že tyto formy záření se v každém směru chovají stejně jako viditelné světlo, s výjimkou toho, že naše oči na ně nereagují. Podobně jako psi slyší zvuky mimo dosah lidského sluchu, existují také tvorové, kteří určitě vidí tyto části spektra. My jsme na rozdíl od nich závislí na méně přímých důkazech o jejich existenci. Objev „neviditelných forem světla“ mimořádně rozšířil pojetí světla ve fyzice. Dnešní představa o světle zahrnuje celý rozsah od rádiových vln po gama paprsky. Spektrum světla svíčky je daleko širší než to, co vidí naše oči.

Mnoho pokusů se světlem vydávaným horkými zářícími tělesy bylo prováděno v posledních letech devatenáctého století v Berlíně. Složitost plamene svíčky s jeho rozmanitými podmínkami spalování a teplotními oblastmi vedla berlínské vědce Rubense, Lummera a Pringsheima k vynálezu zdroje světla, na němž se vztah mezi barvou a teplotou dal studovat



Elektromagnetické spektrum

do hloubky. Proto také v devatenáctém století tito vědci přišli s nejpřesnější spektrální analýzou světla vysílaného horkými tělesy. Z technických důvodů byla nazvána výzkumem „záření černého tělesa“. Z pojmového hlediska tento výzkum prostě kvantifikoval to, co oči viděly přes hranol, zahrnoval však také celou neviditelnou infračervenou část spektra.

Při určité teplotě vidíme velmi specifické spektrum, v němž barvy plynule přecházejí jedna v druhou. Když například rozpálený kov připadá našim očím oranžový, pak je nejjasnější barvou spektra oranžová s barvami po obou stranách (rudou na jedné a žluto-zeleno-modrou na straně druhé), které postupně ztrácejí na intenzitě. Rubens a další vědci v Berlíně podrobně měřili specifickou podobu distribuce barevné intenzity v jednotlivých barvách. Otázkou bylo, jak ji chápat, tedy jak rozumět barvám svíčky.

Jak jsme viděli, komunita fyziků devatenáctého století si byla jistá, že Newtonova mechanika, Maxwellova elektromagnetická teorie a skvělá věda o termodynamice může vysvětlit cokoliv. Jediné, co člověk potřeboval, měly být náročnější výpočty — pak vyřeší všechny problémy. Ovšemže skromné světlo krásné Faradayovy svíčky bylo dětskou hrou a pro kolektivní moudrost vědců tří předchozích století nemělo být těžkým oříškem. A tak se nejlepší vědci jak v Německu, tak v Anglii rozhodli, že začnou objasněním vzniku barev světla svíčky. Jenže neuspěli! V roce 1899 nedokázali vědci vysvětlit barvy svíčky!

## BEZÚHONNÝ MUŽ

Výzkum světla přinesl výsledky v pronikavosti, představivosti a důvtipu, jakých nebylo dosaženo na žádném jiném poli duchovní činnosti; to mimo jiné ukazuje lépe než jakákoliv jiná oblast fyziky, jak krůtě vratké mohou být teorie.  
— sir J. J. Thomson, 1925

Během posledních let devatenáctého století začal na Berlínské (dnes Humboldtově) univerzitě pracovat jeden pilný teoretický fyzik. Jeho jméno, které dnes neodmyslitelně patří ke zrodu kvantové mechaniky, znělo Max Plaňek.241 Potomek generací pastorů, učenců a právníků zdědil po svých předcích konzervativní a bezúhonné způsoby, kterých se držel po celý život. Jeho předkové ztělesňovali tradiční osvícenské hodnoty racionality a tolerance, spojené se silným ekumenickým protestantským přesvědčením. Max Plaňek následoval jejich příkladu a svým vrstevníkům se jevil jako vzor klasických morálních zásad, stejně jako člověk mistrně ovládající výtěžky klasické fyziky. Ale život je složitý. Průšácké pojetí loajality jej později vedlo k nechutným kompromisům s nacistickou vědou. Teď však, v roce 1900, začal Plaňek díky své houževnaté inteligenci váhavě překračovat hranice dosavadních poznatků na cestě k nové představě o světle.

Na radu jednoho přítele zakotvil Plaňek u teoretické analýzy světla s pevným přesvědčením, že klasická fyzika bude pro tento úkol zcela dostačující. Časem však zjistil, že ať se snaží sebevíc, žádné z jeho úsilí nepřináší uspokojivé plody. Stejně jako ostatní vědci začal Plaňek předpokladem, že zářící tělesa mohou být modelována jako souboratomárních oscilátorů, vibrujících na rozdílných frekvencích. Všechna vysvětlení založená na tomto modelu, včetně těch Planckových, byla v katastrofálním rozporu s naměřenými údaji. V roce 1899, po čtyřech dlouhých letech neúspěchů, učinil Plaňek zdánlivě malý, ve skutečnosti však velmi významný ústupek. Ve své teorii záření černých těles se uchytil ke zjevně neospravedlnitelné matematické lži, jejíž skutečný význam nejasně pociťoval, ale ani tehdy, ani v následujících letech ho plně nedocenil.

Zamysleme se nad rozhoupanou hmotou hodinového kyvadla. Frekvence jeho kmitů je určena, jak objevil Galileo, délkou kyvadla. Jeho rozkmit (tedy to, jak daleko kmitá) je určen pouze tím, jak je uvedeno do pohybu, energií předanou kyvadlu. Jakkoliv se to zdá být divné, Plaňek musel učinit nezvyklý předpoklad, že na kvantové úrovni je takový popis pohybu kyvadla nesprávný. Ve skutečnosti nejsou povoleny všechny rozkmity. To znamená, že nemůžeme vysunout kyvadlo do libovolné, nýbrž pouze do určité počáteční výšky. Energie kyvadla tedy nemůže nabývat všech hodnot. Právě naopak, možný je pouze omezený počet takových rozkmitů a energií. Ty jsou dány Planckovým známým vztahem:  $E = nhv$ . Tedy: energie oscilátorů, jakým je například kyvadlo, může nabývat pouze hodnot, které jsou celými násobky  $h$  (Planckova konstanta, *velmi* malé číslo) násobené počtem kmitů  $v$  (počet tiknutí za vteřinu). Tento jednoduchý předpoklad všechno mění. Energie může být kyvadlu udělena nebo odebrána pouze v určitých přírůstcích. Jako když stoupáte do schodů, také nemůžete při jednom kroku postoupit o půlku schodu. A pro vysokofrekvenční oscilátory (kterým odpovídá modré světlo) jsou schody vyšší než pro nízkofrekvenční (červené světlo). Navíc při nízkých teplotách nemáme dostatek energie, abychom rozkmitali modré oscilátory, jinými slovy, abychom vystoupali po jejich vysokých  $h$  schodech. Ale jiné oscilátory se spokojí s menšími „červenými“ schody, po nichž se stoupá snadněji. Plaňek na základě této úvahy předpověděl, že při nízkých teplotách budou červené oscilátory samy o sobě aktivnější v přijímání a vydávání energie. Z toho vyplývá, že spektrum svíčky (nízká teplota) bude převážně červené a že chybějící modrá část spektra se objeví pouze při jevech s vyšší teplotou.

Energie získávaná nebo vysílaná oscilátory je v podstatě elektromagnetická, tedy světelná. Takže, vezmeme-li to doslova, Planckův předpoklad naznačoval, že samotné světlo by mohlo být kvantované, mohlo by existovat pouze v nespojitých jednotkách. Plaňek si nejprve myslel, že jeho předpoklad je pouhým matematickým trikem usnadňujícím výpočty a že jednoho dne zmizí. Anglický fyzik James Jeans s tím souhlasil a navrhl, aby  $h$  bylo v určité fázi výpočtů převedeno na nulu, a vše bude zase v pořádku. Jenže Planckova konstanta zrušení odmítala. Pandořina skříňka kvantové mechaniky se otevřela a všechny dílčí potíže vyplývající z Planckovy analýzy už nebylo možné zahnat zpátky do úhledné ohrady fyziky devatenáctého století. V Herschelově „krabici světla“ zjevně nastal zmatek. Z tohoto dilematu vyvstalo světelné kvantum. Kolosální důsledky Planckova skromného předpokladu si uvědomovalo jen několik málo jeho vrstevníků. Od té doby bude energie, která je světlem, kvantovaná.

S tímto jediným předpokladem byl Plaňek schopný odvodit matematický vzorec, který docela dobře odpovídal údajům, jež měl při ruce. Aby svou teorii otestoval ještě lépe, pozval Plaňek Rubense na čaj k sobě domů mimo Berlín. Rubens přinesl výsledky svých nejnovějších měření. Plaňek mu na oplátku ukázal svůj nový vzorec pro rozložení četností záření černého tělesa. Teorie poprvé zcela odpovídala výsledkům pokusů. Celý úspěch měl základ v Planckově bizarním předpokladu o nespojitém pohybu kyvadla.

Plaňek musel intuitivně chápat obrovský význam tohoto okamžiku, protože v nadšení nad tímto úspěchem vzal svého milovaného syna Erwina na dlouhý a památný výlet po Grunewaldském leseu Berlína. Erwin, kterému tehdy bylo pouhých sedm let, věděl, že se jeho otec dlouho zabývá analýzou světla. Na výletě se otec svěřil synovi s pocitem, že jeho objev bude mít stejný význam jako objevy Koperníkovy a Newtonovy a že jde o převratnou záležitost. Tato smělá prorocká slova pronesl bezúhonný, opatrný muž, bylo to kacířství vyslovené jen před synem, a přesto to byla pravda. Paradoxní nároky, které Planckova teorie světla kladla na lidskou představivost, o století později stále zaznívají ve formě korpuskulárně- vlnové duality.

Samotný Plaňek váhal s uznáním světelného kvanta, které objevil, a neustále bojoval s nutností přijmout ho. Jedním z několika málo lidí, kteří převzali důsledky Planckovy analýzy světla svíčky, byl v té době neznámý fyzik Albert Einstein.

## NEÚNAVNÉ KVANTUM

Když podle zde rozebíraného předpokladu světelný paprsek vychází z určitého bodu, energie se nepřenáší jednotně, ale skládá se z konečného počtu energických kvant, která jsou umístěna v prostoru, pohybují se nepřetržitě a mohou být pohlcována nebo vysílána v celku. — Albert Einstein, 1905

Einsteinovy největší úspěchy spadají do pozoruhodného období mezi lety 1902 a 1908, kdy zastával nepříliš prestižní práci technika patentového úřadu. V několika hodinách mezi zaměstnáním a domácími povinnostmi psal tento neznámý velíkán jeden výjimečný vědecký článek za druhým. V tomto období Einstein, vždy smělý a jasnozřivý myslitel, odvážně překonal Plancka a v roce 1905 navrhl, aby světlo bylo chápáno jako soubor oddělených částic energie. Tuto hypotézu Einstein dále rozvíjel, aby vysvětlil jiné nedávné pokusy, které pro klasickou vlnovou teorii světla také představovaly nepřekonatelné potíže. Bezprostřední reakcí na jeho myšlenky, jež měly oporu ve výpočtech a předpovědích, bylo mlčení. Částice světla? Ta myšlenka byla děsivá. Byla plivnutím do tváře vlnové teorie, pokládané po celé století za

správnou. Huygens, Euler, Fresnel, Faraday, Maxwell — cožpak jejich úsilí nakonec nevyvrcholilo mimořádně úspěšným pohledem na světlo jako na elektromagnetickou vlnu? Podporovaly ho nejen pokusy s interferencí viditelného světla, ale také pokusy s mnohem delšími vlnovými délkami, včetně nově objevených infračervených a rádiových vln. Einstein se nezalekl a jak sám napsal, „neustále se zabýval neuvěřitelně důležitou a obtížnou“ otázkou složení světla. Jeho zkoumání ho vedlo k přesvědčení, že „další fáze vývoje teoretické fyziky nám přinese teorii světla interpretovaného jako druh syntézy vlnové a emisní [částicové] teorie“.



**Albert Einstein dostává v roce 1929 od Maxe Plancka Planckovu medaili.**

Tehdy na začátku jeden z největších amerických výzkumníků, Robert A. Millikan, studoval emisi elektronů z kovových povrchů ozářených světlem. Detaily tohoto jevu představovaly silný, i když ne zcela přesvědčivý argument na podporu Einsteinova názoru na částice. Přesto byla představa světla jako částic Millikanovi velmi nepříjemná — tak nepříjemná, že ji i ve světle svých vlastních výzkumů nazval „smělou, neřkuli bezohlednou hypotézou.“ Bylo trapné, že zrovna taková hypotéza by mohla objasnit jeho údaje, zvláště když ji nikdo nebral vážně. Dokonce i samotný Plaňek, který se po roce 1905 seznámil s Einsteinem a vážil si ho za jiné vědecké příspěvky, byl k pojetí světla prosazovaného Einsteinem velmi kritický. Názorným příkladem rozruchu, který doprovázel uvedení světelných kvant, byl Einsteinův proslov na osmdesátém prvním setkání německých fyziků v Salzburgu v roce 1909. Zúčastnil se ho Plaňek, Rubens, Stark a další fyzikové. Einstein přednesl mistrovský přehled situace, v níž se nacházelo bádání o světle,

předpokládaném éteru a nutnosti světelných kvant. Na základě pronikavé analýzy klíčových experimentů trval na tom, že „naše současné základy radiační teorie musí být opuštěny“. Pokračoval otázkou, kterou si kladli všichni. Nebylo by možné navázat na Planckovy výsledky a vysvětlit klíčové pokusy bez „strašlivě vypadající hypotézy světelných kvant“, jak to nazýval? Nemohli bychom zachovat alespoň klasickou krásu Maxwellových elektromagnetických polí při šíření světla volným prostorem a jiným způsobem zacházet pouze s materiálním procesem vysílání a pohlcování? Einsteinovou odpovědí bylo jednoznačné ne. Pokračoval zdůvodněním, že takové východisko je nemožné, přičemž v úvodu použil Planckovy vlastní výsledky. Prohlásil, že podrobné výsledky pokusů se zářením černých těles nutí člověka přijmout myšlenku světelných kvant.

Prvním, kdo v diskusi na přednášce vystoupil, byl samotný Plaňek. Byl ochoten uznat, že existuje kvantová diskontinuita, ale byl prostě přesvědčen, že ta může a musí být způsobena pouze chováním atomů v hmotě a že ji nelze připsat světlu. Jak by mohly světelné částice poskytovat takovou šíří interferenčních efektů, které je vlnová optika schopna tak dobře vysvětlit? Jak by mohla částice interferovat sama se sebou? To přece byla logická absurdita!

Einstein odpověděl myšlenkou, že světelná kvanta nemusí nutně interferovat sama se sebou, ale mohou, jak cestují, interferovat s jinými kvanty. Brilantní odpověď; tehdy ovšem nevěděl, že tudy cesta také nevede! Jestliže kvanta existovala, bylo jejich chování dokonce ještě více šokující, než si uvědomoval. Ve skutečnosti Einstein nutil celou komunitu fyziků přijmout kvantovou teorii světla, teorii, kterou později ve svém životě jednoznačně zavrhl. Fotony, světelná kvanta, o nichž poprvé uvažoval Einstein, spolu opravdu interferují, jak později uvidíme. V sázce bylo mnohem více, než si nejspíše mýslitel své doby představoval. Dokonce i Einsteinův pohled na světlo jako na kvanta energií se ukázal nesprávný. Planckova opatrnost byla opravdu namístě. Jak prorocky řekl svému synovi, byla to revoluce v myšlení, k jaké nedošlo od dob Koperníka a Newtona, a její důsledky naháněly hrůzu.

Do bitvy mezi Einsteinem a Planckem zasáhla ještě jedna strana. Současně s nadšeným zkoumáním povahy světla probíhalo velmi podobné a právě tak významné zkoumání povahy hmoty. Jednou z klíčových postav tohoto výzkumu byl charismatický dánský fyzik Niels Bohr. Jeho pronikavé studie hmoty ho přivedly nejprve nepřímo, pak přímo, k debatě o světle. Teoretické diskuse, jichž se Bohr účastnil, se zdají být vzdálené naší obecné zkušenosti se světlem, ale ve skutečnosti tomu tak není. V tomto případě není spojnící světlo svíčky, ale blesk a polární záře.

## NOČNÍ OBLOHA A NEÓNOVÉ NÁPISY

Blesk je otcem světla.

— Franz von Baader

Pro přírodního filosofa devatenáctého století Franze von Baadera se světlo zrodilo z pochvy temnoty, přesně tak jako dítě vychází z matčina lůna. Ve světle se rozkládá Boží království a stvořitelova láska, v temnotě sídlí stvořitelův hněv. Síla Boha, který osvobozuje světlo z temnoty, je silou ohně a šířením tohoto světla je Duch svátý. Jediná a nedělitelná božská bytost se navěky projevuje v obou krajích, nahoře jako blahodárné světlo a dole v hrozivé formě blesku.

Světlo se vždycky objeví rychle, ať už z jiskry vykřesané úderem pazourku na ocel nebo v zapáleném knotu svíčky. Světlo se rychle rodí z temnoty ohrožené zánikem. Pro von Baadera byl blesk znamením geneze světla, byl to otec světla. Nic nevytváří větší kontrast vůči záblesku, který roz- čísne vzduch, než klidné světlo svíčky. Jestliže je, jak říká von Baader, blesk otcem světla, pak zapálená svíce musí být jeho matkou. Avšak blesk nepředstavuje jen symbolické pravdy, ale také pravdy vědecké.

Můžeme začít stejně jako při studiu plamene svíčky pozorováním barevného spektra blesku. Je to velmi jednoduché, protože před hranolem nepotřebujeme žádnou šterbinu; záblesk sám už spoutává světlo do úzké, i když nepravidelné dráhy. Rozptýlené světlo blesku vypadá úplně jinak než světlo plamene svíčky. Namísto pásu jemně přecházejících barev se objeví ostré barevné linie, jedna oddělená od druhé zjevně nepravidelným způsobem. Jsou to „spektrální emisní linie“ prvků, které tvoří naši atmosféru. Jak mocný náraz elektřiny rychle prochází kanálem blesku, každý prvek — dusík, kyslík atd. — je donucen vysílat světlo, jehož barva je charakteristická jen pro něj. Univerzální spektrum černého tělesa, které na zahřátý materiál nereaguje, zde není. Místo něj vidíme světlo jedinečně spojené s jednotlivými prvky, které tvoří naši atmosféru. Není to spektrum charakteristické pro zahřívání tělesa, ale spektrum vytvořené proudem

elektřiny procházející plynem. Podobné jevy — a jejich laboratorní napodobeniny — zaujaly Bohrova pozornost v Kodani. To ony mohou za to, že byl zahájen druhý útok na elektromagnetickou koncepci světla, sešikovanou tehdy k bitvě.

Blesk není jediným přírodním jevem, na němž se projevuje spektrum čar. Své spektrální barvy vystavuje také jiný, mnohem tišší jev, spojený s polární nocí, a také on má historii bohatou na symbolické významy. Když pozorujeme polární oblasti Země z vesmíru ze vzdálenosti několika tisíc kilometrů, vidíme zde zvláštní ovál světla o průměru mnoha stovek nebo dokonce tisíců kilometrů. Na severu je středem tohoto oválu severozápadní výběžek Grónska.

Tyto světelné prsteny se roztahují a smršťují, mění barvu a tvar stejně jako velikost. Člověku stojícímu na zemi se tento světelný ovál jeví jako závoje nebo závěsy jemné, povlávající, delikátně zářící barvy, která může trvat několik hodin a táhne se přes celou noční oblohu. Tato světla, rostoucí, hasnoucí, vlnící se, mají naprosto jedinečnou morfologii a v průběhu tisíciletí vyvolávala údiv a podněcovala všemožné spekulace. Od časů starověkých Řeků se jim říkalo *aurora borealis*, což znamená „severní úsvit“. (Na jižní polokouli existuje také *aurora australis* čili jižní úsvit.)

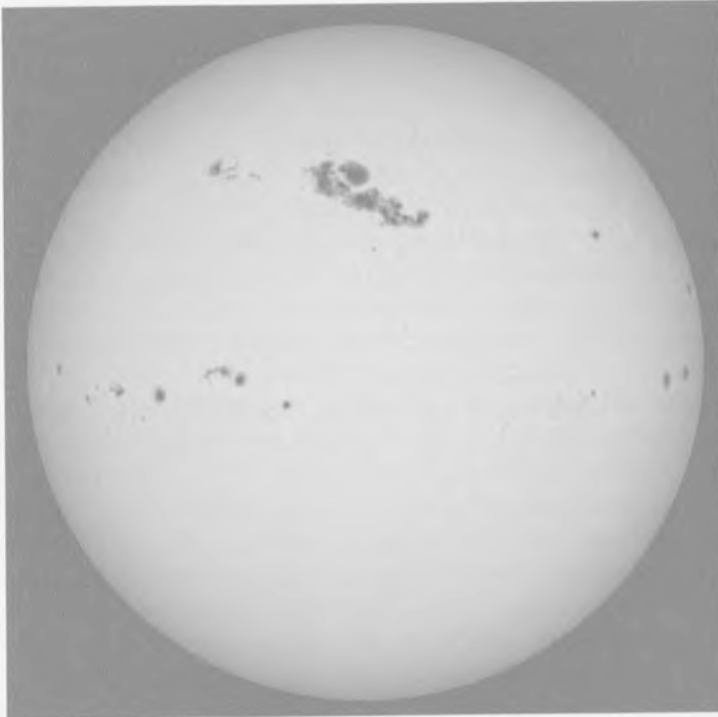
Možností je nekonečné množství, ale typická polární záře se vyvíjí přibližně tímto způsobem: noc je bezměsíčná, tmavá, chladná a jasná. Člověk na severní obloze nejdříve uvidí jednoduchý široký bílý oblouk s hladkým dolním okrajem, jehož konce se nikdy nedotknou země. Na dolním okraji se pak objeví záhyby a vlny a následně se ukáží barvy a tichou září promění z bílé na žlutou, zelenou nebo červenou. Klidný oblouk začne pulsovat a nabývá nepravidelného tvaru. S trochou štěstí může pozorovatel, teď už naprosto okouzlený, uvidět nádhernou „korunu“, která se objeví jako proud světelných vln šířících se z jednoho středu vysoko nad hlavou.

Ve starověku popsal Aristoteles na noční obloze výskyt takových „propastí, brázd a krvavě rudých barev“. Později Plutarchos zaznamenal zprávy o polární záři z počátku 5. století před naším letopočtem, která byla v Řecku viditelná po sedmdesát pět nocí. Ve Středomoří lze takové jevy pozorovat jen zřídka, ale v některých oblastech na dalekém severu (nebo jihu) je možné vidět představení polární záře každou bezměsíční noc bez mraků. Zvláště v těchto oblastech je folklór o polární záři bohatý a tajemný a připomíná sílu, s jakou člověka okouzila duha.

Eskymáci spojují polární záři s dušemi mrtvých. Ti, kteří zemřeli dobrovolnou nebo násilnou smrtí, překračují úzký a nebezpečný mosta dírou vstupují do nebe. Když tam přijdou, hrají si spolu a jejich hra se na zemi projevuje jako polární záře. Eskymácký výraz pro polární záři je *aksartirg*, což znamená hráč s míčem. Eskymáci na severu Kanady nazývají polární záři „tanec smrti“, zatímco v Grónsku se říká, že mrtvě nebo předčasně narozené děti si v nebi po své předčasné smrti hrají, a tak vzniká polární záře. V severní Evropě si Finové vyprávějí pohádku o Repuovi, lišákovi, který svým ocasem zažehává oheň, jenž nehřeje — polární září. Označení polární záře v moderní finštině má svůj původ v pohádce o Repuovi; *revontuli* znamená „liščí ocas“.

Polární záře je také prorockým znamením. Byla, zvláště když měla nezvykle dramatický tvar, téměř univerzálně vykládána jako znamení války nebo neštěstí. Platí to dokonce ve dvacátém století; výklad zázraku Panny Marie z Fátimy, kde se 13. května 1917 Panna Marie zjevila třem dětem, je spojen s polární září. Panna Marie řekla dětem: „Když uvidíte noc ozářenou neznámým světlem, vězte, že svět bude potrestán.“ 25. ledna 1938 se objevila neobvykle jasná polární záře, což bylo mnohými lidmi chápáno jako předpověď Hitlerovy invaze do Rakouska, k níž došlo o dva měsíce později.

Když si Finové mysleli, že Repuův ocas zažehl jasné světlo, ale nikoliv teplo, přiliš se nemýlili. Na rozdíl od světla z plamene svíce nebo jiných zářících zdrojů nepatří světlo polární záře k záři hřejícího tělesa, ale je světlem „studeným“, podobným mnohem více světlu, které vydává neonový nápis nebo Galileova solární houba, než světlu svíčky. Stejně jako v případech



Sluneční skvrny, nevzhledné nedokonalosti  
objevené Galileem.

blesku můžeme také světlo polární záře pozorovat škvírou a hranolem, abychom vytvořili spektra. Také polární záře nám ukazuje oddělené zářící čáry, podobné těm ve spektru blesku. Obě tato spektra zkoumali Kirchhoff a Bunsen.

Fyzika dokonalého rudého světla neónového nápisu nám pomůže pochopit světlo blesku a polární záře. V obou případech vytváří světlo elektřina procházející řídkými plyny atmosféry. Při průchodu světla mají různé plyny rozdílné barvy, když jimi prochází elektřina, a jak dokázali Kirchhoff a Bunsen, spektrum každého z nich je jedinečné. Zdroj elektřiny pro neónový nápis je jasný; jestliže se mu však polární záře a blesk podobají, kde jsou dynamo, která je pohánějí?

Kdyby Galileo vedle svých pozorování skvrn na Slunci současně zkoumal noční oblohu v Norsku, všiml by si, že je tu souvislost. Intenzita polární záře odpovídá s dvoudenním zpožděním aktivitě slunečních skvrn. Skvrny na Slunci jsou obrovské erupce, které vysílají proud velmi rychle se pohybujících nabitých částic směrem k zemi.

Magnetické pole země usměřuje tento proud k pólům a polární záře se rozsvítí, když tmavý solární proud udeří do horní atmosféry země. Neviditelné magnetické síly země stahují dolů sluneční vítr a dlouhou polární noc osvětlují liščím ohněm.

Pouze Planckova autoritativní analýza světla, dokonce s hypotézou kvantované světelné energie, nestačí pro vysvětlení světla blesku nebo polární záře. Je potřeba ještě něčeho, a to nové teorie hmoty. Polární záře klade nové otázky týkající se struktury atomu a toho, jak vytváří světlo. Pro odpovědi se obrátíme k Nielsu Bohrovi.



Bohr se narodil v Dánsku v roce 1885 a v roce 1911, ihned po získání doktorátu, odjel z Kodaně do Anglie. Nejdříve pracoval se sirem J. J. Thomsonem (objevitelem elektronu) v Cavendishově laboratoři v Cambridge a pak pokračoval se Sirem Ernestem Rutherfordem v jeho laboratoři v Manchesteru. Rutherford se tehdy intenzivně zabýval svými proslulými pokusy s alfa-částicemi, které ho přivedly k obrazu „nukleárního“ atomu, v němž je většina hmoty atomu koncentrována do středu, do pozitivně nabitého jádra. Inspirován spoluprací s těmito muži se Bohr vrátil v roce 1913 domů a krátce nato obrátil svou pozornost od struktury atomu k problému světla.

V roce 1913 byl výzkum čárového spektra prvků velmi živou oblastí bádání, nazývanou spektroskopie. Tisíce čar plnily spektroskopické tabulky, ale nebyl v nich žádný řád. Jednoho dne se v běžném rozhovoru s kolegou Bohr dozvěděl, že fyzik Rydberg objevil matematický vzorec, který předpovídal mnoho důležitých spektrálních čar, ale tento vzorec postrádal jakýkoliv teoretický základ. V té hromadě neuspořádaných výsledků objevil určitý vzorec, pro který však neexistovala žádná příčina. Bohr rychle pochopil, že kombinací Rutherfordova nukleárního atomu s Planckovou hypotézou diskontinuity by mohl Rydbergův vzorec odvodit a vysvětlit tak do detailů taková čárová spektra, která se objevují v polární záři nebo blesku. Narazil však na stejný problém jako Plaňek: toto odvození se dalo provést jedině na úkor předpokladů fyziky devatenáctého století. Bohrov atom měl fungovat jako planetární systém s elektrony obíhajícími kolem jádra v soustředných drahách. O tom se dalo uvažovat tradičním způsobem. Jenže přechody z jedné dráhy do druhé se nutně musely odehrávat diskontinuálně jako „kvantové skoky“. S každým kvantovým skokem bylo vyzářeno určité kvantum světla neboli fotonů. Jeho barva a frekvence nemohly být žádným způsobem popsány klasickou analýzou atomárního pohybu, nýbrž známým Planckovým vztahem:  $E = h\nu$ .

Fyzikové v Anglii a Německu reagovali na Bohrovy návrhy s nedůvěrou, ale jak poznamenal ke svým kolegům James Jeans, ačkoliv nic dalšího pro tuto myšlenku nehovořilo, měla v sobě „pádny příslib úspěchu“. Planckovo kvantum se nedalo zkritizovat. Tady se nabízela celá nová sféra působnosti pro uplatnění této myšlenky. S Bohrovou teorií se toho dalo vysvětlit o hodně více, i když ještě neexistovala žádná do detailů rozpracovaná matematická teorie. Když mladý Werner Heisenberg z Mnichova později v rozvoji takové teorie uspěl, Bohrovy planetární elektronické dráhy zmizely z atomu, který se tak stal ještě podivnějším. Zdálo se, že z tradičního mechanistického pojetí světa toho moc nezůstalo. Koneckonců atomy byly základními kameny veškeré hmoty, a přesto téměř každý jejich poznatelný rys zmizel, než mohl být pečlivě prozkoumán. Elektrony neměly žádné dráhy, žádnou skutečnou pozici v atomu; světlo vyzařuje v přetržitých kvantových skocích; jak si měl člověk takový svět představit? Zdálo se to nemožné!

Když Einstein poprvé slyšel Heisenberga prezentovat na známých berlínských přednáškách pořádaných Planckem novou teorii kvantové mechaniky, otfásl to s ním. Později pozval slavný muž Heisenberga k sobě domů, aby si s ním pohovořil. A hned si postěžoval, že z Heisenbergovy představy vypadla koncepce „elektronové dráhy“! Heisenberg, který si pečlivě přečetl Einsteinovu práci o relativitě, ho ve své odpovědi citoval a zdůraznil, že nemůžeme-li ve skutečnosti nikdy takovou cestu pozorovat, nemá žádný smysl uvádět její koncepci do své teorie. (Když Einstein postupně seznamoval fyziky se svou teorií relativity, používal podobné argumenty.) K Heisenbergovu překvapení Einstein odpověděl: „Možná, že jsem takovou filosofii dříve používal a také jsem to napsal, ale pořád je to všechno nesmysl.“ Einstein považoval vyloučení dráhy pro elektron z teorie za špatnou věc, avšak pojetí kvantového skoku pro něj bylo ještě horší. Zdálo se mu, že pro pochopení Heisenbergovy kvantové teorie neexistuje ve fyzice žádná opodstatnění. Z hlediska formalizace a předvídání to byla silná teorie, ale neměla žádnou obvyklou vysvětlivači hodnotu. Po zbytek svého života se proti ní bouřil. Nejsmělejší myslitel desetiletí se zalekl, jakmile se vyjevily dalekosáhlé důsledky kvantové teorie, kterou sám pomáhal vytvářet. Naproti tomu Bohr začal opatrně, ale soustavně zaujímat stále radikálnější názory, opřené o experimenty.

Bohr byl Einsteinovým vrstevníkem a mužem mimořádného šarmu a osobního kouzla. Když se s ním Einstein v roce 1920 konečně setkal, sám pocítil sílu Bohrovy osobnosti: „Nestalo se v mém životě příliš často, že by mi lidská bytost svou pouhou přítomností působila takovou radost...“ Fyzikovi Ehrenfestovi pak řekl: „Mám ho rád právě tak jako vy. Je jako mimořádně citlivé dítě, které pobíhá po světě tak trochu v transu.“ Stejně jako Plaňek se také Bohr zdráhal vyměnit nádheru klasické teorie pole za atomistické pojetí světla. Po dvacet let Bohr odolával koncepci částicového světla, používal k tomu každou zbraň svého arzenálu, dokonce se vzdal posvátného pojmu kauzality a zachování energie a pohybové energie v jednotlivých událostech, jen aby nemusel přijmout koncepci světelných kvant. Podobně jako Plaňek i on namítal, že jádrem problému není světlo, ale hmota. Upravovat se nemá nádherný chrám elektromagnetické teorie, ale spíše naše koncepce hmoty. Tento postoj se dá vyčíst ze všech jeho názorů uvedených ve známém článku z roku 1913.

Tvrdil, že to, co člověk odhaluje jako zrnitost světla, není vlastností světla, ale pouze známkou jeho původu. Objasnili to na příkladu. Existuje krásná, i když legrační fotografie Einsteina, pořízená v době jeho cesty na americký Jihozápad. V širokém sombreru a ponču na ní stojí před chatrčí z vepřovic obklopený domorodými indiány Jihozápadu. Rozpustile se usmívá, rozčuchané bílé vlasy mu lezou zpod klobouku a oči mu svítí. Byl na Jihozápadě, ale ať ho obléknete do čokoliv, ať se pohybuje v jakékoliv společnosti, je to pořád Einstein. Se světlem je to podobné, pokračoval Bohr ve své argumentaci. Když vyzařuje z nějaké látky, nese s sebou šaty svého původu. Například spektrální čáry uspořádáním svých barev jasně odhalují jednotlivé prvky, z nichž byly vyzářeny. Člověk by si však neměl

plést šaty, které na nich právě vidí, s podstatou volně se pohybujícího světla. Existence světla může mít otisk nebo podpis svého zdroje, ale světlo ponechané samo sobě je nepřetržitou vlnou. Podle Bohrova názoru, který se úspěšně udržel dodneška,<sup>251</sup> je hmota atomární a kvantovaná, avšak Bohr trval na tom, že světlo, které cestuje mezi vysílačem a detektorem, tedy světlo ponechané samo sobě, je čistě elektromagnetickou vlnou.

Situace se vyostrila, když byl v roce 1922 podán skutečně přesvědčivý experimentální důkaz existence světelných kvant. A. H. Compton rozptýlil z původního směru vysokoenergetické světlo ve formě rentgenových paprsků srážkou s volnými elektrony. Výsledek byl naprosto jasný, pokud si člověk představil srážku světla a elektronu jako srážku dvou kulečnickových koulí, z nichž jedna je elektronem a druhá kvantem světla. Zdálo se, že vlnová teorie nemůže žádným způsobem tento výsledek vysvětlit. Bylo zřejmé, že situace se obrátila, a atomární pojetí světla začalo získávat půdu pod nohama. Vyjádřeno slovy vynikajícího fyzika Arnolda Sommerfelda, Comptonův objev „zazvonil vlnové teorii vyzařování umíráček“. Ale Bohr pořád odolával. Spolu s Kramersem a čerstvým absolventem Harvardu Slaterem přišli s teorií Comptonova efektu, která zachraňovala světlo jako vlnu. Avšak Bohr učinil pro zachování vlnové teorie obrovský ústupek. Vzdal se přísné kauzality, stejně jako zachování energie a pohybové energie při jednotlivých kvantových událostech. K zachování energie mělo docházet jen v průměru, statisticky, kauzalita měla platit jen obecně. Šlo o mimořádný, vědomý kompromis, proti kterému Einstein, jakmile o něm uslyšel, bouřlivě protestoval. Kauzalita byla nedotknutelná po staletí, jak by tedy vůbec mohla být z nějakého důvodu odhozena? A tato námitka platila i o zachování energie.

Bohrova, Kramersova a Slaterova teorie mohla být ověřena zdokonalením Comptonova experimentu, ve kterém byly rentgenové paprsky rozptýleny elektrony — a pokus se nezdařil. Ačkoliv se mu nepodařilo svou teorii prokázat, odvážil se Bohr zpochybnit základy klasických koncepcí kauzality a zachování energie. Jakmile tyto pochybnosti zazněly, už nebylo možné je odbýt. Je svět od začátku do konce kauzálním řetězem, anebo vyžaduje kvantová teorie volnější koncepci nutnosti? V prvních desetiletích dvacátého století byly tyto otázky předmětem diskuzí nejrůznějších kruhů, daleko za hranicemi fyzikálních laboratoří.