

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Rudolf Zajac

Albert Einstein a fyzika 20. storočia

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 24 (1979), No. 2, 61--77

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137927>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1979

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>

## Albert Einstein a fyzika 20. storočia

*Rudolf Zajac, Bratislava*

Pred 100 rokmi, 14. marca 1879 sa narodil v švábskom Ulme pri Dunaji Albert Einstein ako syn priemerného, bodrého meštana, nie veľmi schopného obchodníka s elektrotechnickými potrebami a skromnej, tichej ženy s vytríbeným zmyslom pre hudbu. Nik do roku 1905 netušil, že títo rodičia dali svetu génia, veď chlapec do štyroch rokov nevedel riadne hovoriť, neskončil strednú školu a na prvý raz nezložil prijímaciu skúšku na vysokú školu.

A predsa Albert Einstein sa stal mysliteľom, ktorý vzbudil záujem, pozornosť a úctu filozofov, historikov, spisovateľov a širokej verejnosti. Ale predovšetkým bol mysliteľom — fyzikom. Preto dokázal o základných filozofických kategóriách, o hmote, priestore a čase vysloviť súdy, ktoré sú matematicky formulované a experimentálne overené. A preto aj zrevolucionizoval fyziku, vyslovil v jednoduchých, ale prevratných postulátoch tvrdenia, ktoré sa iní neodvážili vysloviť, dovidel tam, kam iní nedovideli, zmenil fyzikálny obraz sveta.

### Prípravné roky

Einstein nadobudol vysokoškolské vzdelanie v rokoch 1896–1900 na jednej z popredných európskych vysokých škôl, na Konfederálnej vysokej škole technickej v Zürichu, kde vyštudoval pedagogickú fakultu a dosiahol aprobáciu stredoškolského učiteľa.

Medzi jeho učiteľmi boli vynikajúci matematici ako ADOLF HURWITZ a HERMANN MINKOWSKI, Hilbertov spolupracovník, ktorý v roku 1908 zaviedol štvorrozmerný pseudoeuclidovský priestor do špeciálnej teórie relativity. Pokiaľ ide o fyziku, najmä teoretickú fyziku, pomery v Zürichu odrážali vtedajšie rozpaky a ťažkosti takým spôsobom, že sa vôbec neprednášali moderné partie, ako Maxwellova teória elektromagnetického poľa a Boltzmannova kinetická teória plynov. Inštitucionalizovaná teoretická fyzika v posledných rokoch minulého storočia sa obmedzovala predovšetkým na klasickú mechaniku a riešenie zložitých úloh v jej rámci, hoci mechanicizmus vtedy už zďaleka neposkytoval všeobšiahlu teóriu fyzikálnych javov a dozrel čas, keď bolo treba

vytvoriť nový fyzikálny obraz sveta. A na túto úlohu sa podujal Albert Einstein, sotva prekročiac dvadsiaty rok svojho života.

Počas vysokoškolského obdobia sa na svoju budúcu úlohu vyzbrojil individuálnym štúdiom KIRCHHOFFOVÝCH, HELMHOLTZOVÝCH, MAXWELLOVÝCH, BOLTZMANNOVÝCH a LORENTZOVÝCH spisov. S LUDWIGOM BOLTZMANNOM si dopisoval, u LORENTZA ho zaujala elektrodynamika pohybujúcich sa telies. Mladý Einstein bol obdarený schopnosťou vystihnúť, ktoré problémy vo fyzike sú špičkové z hľadiska jej ďalšieho rozvoja a ktorí autori sú preňho rozhodujúci — a to aj za cenu diskrepancií so svojím učiteľom teoretickej fyziky HEINRICHOM WEBEROM, v dôsledku ktorých mu po ukončení štúdia odmietli poskytnúť voľné asistentské miesto na zürišskej technike, a tak po dvoch rokoch improvizácie, provizória a strádania prijal miesto úradníka tretej triedy Konfederálneho patentného úradu v Berne.

Ak si vybral iných autorov ako na škole odporúčaných, tak predovšetkým preto, aby riešil problémy, ktoré ostali v ich prácach nedoriešené alebo otvorené. Poprední fyzici na prelome storočí nedospeli k uspokojivej fyzikálnej interpretácii rovníc a vzťahov, ktoré sami objavili. A nové rovnice a vzťahy bez fyzikálnej interpretácie nie sú ešte úplnou fyzikálnou teóriou. Albert Einstein si na rozdiel od svojich predchodcov, BOLTZMANNNA, LORENTZA a PLANCKA, vytýčil program vybudovať nové fyzikálne teórie v tomto úplnom zmysle.

Roky 1900—1904 slúžili Einsteinovi ako príprava na splnenie tohto programu vo viacerých oblastiach fyziky. V tomto období nedbajúc na existenčné ťažkosti, bežné problémy, ktoré vznikajú mladému človeku po založení rodiny, na stiesnené bytové pomery a núdzu, napísal niekoľko statí, ktorými chcel na seba upozorniť popredných fyzikov a ktoré z retrospektívneho pohľadu tvorili prípravu k veľkým revolučným objavom v roku 1905.

Svoju prvú prácu napísal Einstein v roku 1900 po promócií. Poslal ju WILHELMOVI OSTWALDOVI do Lipska, KAMERLINGHOVI ONNESOVI do Leydenu so žiadosťou o asistentské miesto a súčasne do *Annalen der Physik*. Prvý ani druhý z renomovaných vedcov autorovi neodpovedal, článok vyšiel ako prvá Einsteinova publikácia pod titulom „*Dôsledky z kapilárnych javov*“ (*Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen*, *Ann. Phys.* 1901, 4, 513—523).

Vo svojej prvej práci Einstein na základe termodynamických úvah dokazuje, že povrchová energia má čiste potenciálový charakter, čo núti skúmať molekulové príťažlivé sily. Tieto sily nezávisia od teploty a od chemickej väzby. Analýza molekulárnych síl v kvapalinách a roztokoch (druhú prácu uverejnil v roku 1902) podnietila Einsteina k napísaniu ďalších troch prác zásadného charakteru, uverejnených v rokoch 1902 až 1904. Nadväzujúc na dielo LUDWIGA BOLTZMANNNA vybuďoval v nich štatistickú mechaniku rovnovážnych stavov na princípe kánonického rozdelenia nezávisle od Josiaha Willarda Gibbsa. \*) Ak je v súčasnosti táto skutočnosť iba historickou kuriozitou, pre samého Einsteina mali spomínané štúdie o štatistickej termodynamike rozhodujúci

---

\*) V poznámke uverejnenej v r. 1911 (*Ann. Phys.* 34, 175—176) sa Einstein vracia k týmto svojim prácam a uvádza, že by sa bol obmedzil na niektoré čiastkové otázky, keby bol poznal Gibbsovo dielo.

význam pre napísanie dvoch z troch prác v roku 1905, ktoré ho neskoršie preslávili. Máme na mysli prácu o fotoelektrickom jave a o Brownovom pohybe.\*)

## Brownov pohyb

V roku 1905 boli o Boltzmannovu molekulárnokinetickú teóriu tepla ešte veľké spory. Zatiaľ čo sa na univerzitetnej pôde diskutovalo, často vášnivo a dramaticky, poslal neznámy úradník bernského patentného úradu Albert Einstein do *Annalen der Physik* prácu, ktorej cieľom bolo rozriešiť tento spor. Práca mala názov *O pohybe suspendovaných častíc v kľudných kvapalinách, postulovanom molekulárnokinetickou teóriou tepla* (*Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*; *Ann. Phys.* 1905, 17, 549 – 560). V úvode svojej práce Einstein píše: „V tejto práci ukážeme, že podľa molekulárnokinetickej teórie tepla musia telesá mikroskopických rozmerov, suspendované v kvapalinách v dôsledku molekulárnotepelného pohybu, uskutočňovať pohyby takých rozmerov, ktoré možno ľahko pozorovať pod mikroskopom. Je možné, že uvažovaný pohyb je totožný s tzv. brownovským molekulárnym pohybom... Ak sa bude uvažovaný pohyb.. skutočne pozorovať, nemožno považovať klasickú termodynamiku za úplne platnú pre mikroskopicky rozlíšiteľné oblasti a vtedy možno presne určiť skutočné rozmery atómov. Ak sa naopak nepotvrdí predpoklad tohto pohybu, bude to pádny argument proti molekulárnokinetickej predstave o teple“.

Einsteinove výpočty sa potvrdili s takou presnosťou (J. PERRIN, 1908), že definitívne rozhodli o molekulárno-kinetickej predstave tepla. Najväčší protivník tejto teórie, WILHELM OSTWALD, ktorý ešte v roku 1908 tvrdil, že teplo je práve taká forma energie, pri ktorej všetok pohyb prestáva, stal sa od roku 1909 zástancom atómovej teórie. Iba ERNST MACH zostal so svojimi názormi osamotený.

Einsteinov myšlienkový postup sa vyznačoval jednoduchosťou, charakteristickou pre geniálne objavy. Spočíval v týchto krokoch:

1. Ak je molekulárnokinetická teória správna, nemožno rozlíšiť správanie sa suspendovaných (pod mikroskopom viditeľných) častíc od rozpustených molekúl. Musia sa teda prejavíť osmotickým tlakom, spĺňajúcim za vhodných podmienok zákony ideálneho plynu.

2. Pri nerovnomernej hustote suspendovaných častíc spôsobuje priestorová premenlivosť osmotického tlaku difúziu častíc, ktorú možno určiť zo známych zákonov o pohybe častíc v kvapaline. Einstein uvažoval jednorozmerný prípad (v dobrom priblížení častice suspendované s nerovnomernou hustotou v kvapaline vo valci o jednotkovej základni kolmej na os  $x$ ). Podmienka rovnováhy je

---

\*) Tretia slávna Einsteinova práca z roku 1905 otvorila relativistickú éru vo fyzike. V tom istom roku napísal A. Einstein aj svoju dizertačnú prácu *Nové určenie rozmerov molekúl* (*Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*; Bern, Buchdruck. K. J. Wyss.), za ktorú dosiahol (ie bez prietahov titul doktora filozofie na zürišskej univerzite. Túto prácu možno považovať za prípravnú štúdiu k stati o Brownovom pohybe.

$$(1) \quad -Kv + \frac{RT}{N} \frac{\partial v}{\partial x} = 0,$$

kde  $K$  je sila (závisiaca len od súradnice  $x$ ) pôsobiaca na každú časticu,  $v$  je počet častíc v objemovej jednotke,  $R$  plynová konštanta,  $N$  Avogadrovo číslo ( $R/N = k_B$  je Boltzmannova konštanta),  $T$  absolútna teplota. Vzhľadom na stavovú rovnicu ideálnych plynov pre jednotkový objem, tlak  $p$  a teplotu  $T$

$$p = vk_B T$$

možno rovnicu (1) prepísať do tvaru

$$(1a) \quad Kv - \frac{\partial p}{\partial x} = 0,$$

z ktorého je zrejmé: v dynamickej rovnováhe sila pôsobiaca na častice v jednotkovom objeme kolmo na jednotkovú plochu rovná sa gradientu tlaku.

Pri guľovom tvare suspendovaných častíc je dynamická rovnováha vyjadrená vzťahom

$$(2) \quad \frac{vK}{6\pi k P} - D \frac{\partial v}{\partial x} = 0.$$

Z hydrodynamiky je totiž známe, že rýchlosť guľovej častice, ak na ňu pôsobí sila  $K$ , je  $K/6\pi k P$ , kde  $k$  je koeficient trenia kvapaliny,  $P$  polomer guľovej častice. Prvý člen v rovnici (2) určuje teda počet častíc, ktoré prejdú cez jednotkový prierez valca za jednotku času. Ten istý počet častíc pomocou koeficientu difúzie  $D$  určuje druhý člen.

Zo vzťahov (1) a (2) koeficient difúzie

$$(3) \quad D = \frac{RT}{N} \frac{1}{6\pi k P}.$$

3. Z druhej strany možno pohyb častíc ponímať ako výsledok ich neusporiadaného premiestňovania pod vplyvom tepelného pohybu molekúl. Všetky predošlé pokusy určiť rýchlosť suspendovaných častíc (alebo ich strednú rýchlosť) boli vopred odsúdené na neúspech, lebo jemný, kľukatý pohyb častice nevytvára hladkú krivku, ktorá by mala v každom bode dotyčnicu. Einstein neuvažoval rýchlosť, ale výsledné premiestnenie častice  $\Delta$  za čas  $\tau$ . Zaviedol rozdeľovaciu funkciu  $\varphi(\Delta)$ , o ktorej prijal prirodzený predpoklad  $\varphi(\Delta) = \varphi(-\Delta)$ , lebo pravdepodobnosti kladnej a zápornej výchyľky sú rovnaké. Označiac počet častíc v jednotke objemu  $v = f(x, t)$ , kde  $t$  je čas, dostal na základe jednoduchých výpočtov

$$(4) \quad \frac{\partial f}{\partial t} = D \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}.$$

Pri tom

$$(5) \quad D = \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Delta^2}{2} \varphi(\Delta) d\Delta .$$

Riešením rovnice (4), ktorá sa zhoduje formálne s najjednoduchším tvarom diferenciálnej rovnice vedenia tepla, je Gaussova rozdeľovacia funkcia

$$(6) \quad f(x, t) = \frac{n}{\sqrt{4\pi D}} \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)}{\sqrt{t}},$$

kde  $n = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t) dx$  je počet častíc.

Z Gaussovej krivky (6) možno okamžite určiť strednú kvadratickú odchýlku výchylky  $\lambda_x$ .

$$(7) \quad \lambda_x = \sqrt{\overline{x^2}} = \sqrt{2Dt}$$

Určenie veličiny  $\lambda_x$  je prvým výpočtom fluktuáčnej veličiny v dejinách. Už BOLTZMANN a GIBBS stotožnili termodynamické veličiny so štatistickými strednými hodnotami príslušných fyzikálnych veličín a predpokladali ich fluktuácie, ktoré pri malom počte častíc nie sú zanedbateľné. Einstein prvý ukázal, že gradient tlaku je dôsledkom fluktuácie a že tento náhodne meniaci sa tlak alebo počet nárazov molekúl kvapaliny na suspendované mikroskopické častice spôsobuje ich neusporiadaný pohyb typu „náhodného kráčania“.

### Fotoelektrický jav, „stará“ kvantová teória

Svoju prácu o fotoelektrickom jave, ktorá vyšla v *Ann. Phys.* 17 (1905) na str. 132 až 148, označil sám Einstein v liste priateľovi za revolučnú. V tejto práci nešlo ani tak o teóriu fotoefektu ako o založenie novej fyzikálnej teórie svetla, inkompatibilnej s klasickou Maxwellovou elektrodynamikou. O tom svedčí už názov práce: *O jednom heuristickom aspekte týkajúcom sa vzniku a premeny svetla (Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt)*. O skutočnej revolučnosti tejto práce (za ktorú udelili Einsteinovi za rok 1921 Nobelovu cenu — nie za teóriu relativity) sa presvedčíme, ak porovnáme Einsteinov myšlienkový postup s Planckovým.

MAX PLANCK sa v rokoch 1897—1900 pokúšal na základe termodynamických úvah a pomocou Maxwellovej elektrodynamiky odvodiť Wienov zákon rozdelenia hustoty energie  $\varrho$ , čierneho rovnovážneho žiarenia podľa frekvencií  $\nu$  emitovaného svetla

$$(8) \quad \varrho = \alpha \nu^3 e^{-\beta\nu/T} .$$

Vo vzťahu (8)  $\alpha$ ,  $\beta$  sú konštanty,  $T$  absolútna teplota.

Uvažoval pritom termodynamickú rovnovahu rezonátorov (lineárnych harmonických oscilátorov simulujúcich steny dutiny) a dutinového žiarenia. Medzi strednou energiou rezonátorov  $u$  danej frekvencie  $\nu$  a ich entropiou  $S$  našiel vzťah

$$(9) \quad \frac{d^2 S}{du^2} = -\frac{a}{u},$$

kde  $a$  je kladná konštanta. Vzťah (9) spolu s Wienovým posunovacím zákonom

$$(10) \quad \varrho(\nu, T) = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right),$$

kde  $f(\nu/T)$  je ľubovoľná funkcia, integráciou a použitím známej termodynamickej rovnosti, platnej pri konštantnom objeme

$$(11) \quad \frac{dS}{du} = \frac{1}{T}$$

vedie na Wienov rozdeľovací zákon (8).

Po napísaní týchto úvah sa dozvedel o presnejších meraniach, ktoré pre nízke frekvencie dávajú

$$(12) \quad \varrho = \text{konst. } T,$$

čo by zodpovedalo vzťahu

$$(13) \quad \frac{d^2 S}{du^2} = -\frac{b}{u^2},$$

v ktorom  $b$  je konštanta.

Interpoláciou vzťahov (9) a (13) dostal Planck

$$(14) \quad \frac{d^2 S}{du^2} = -\frac{\alpha}{u(\beta + u)},$$

v ktorom  $\alpha, \beta$  sú konštanty. Zo vzťahu (14) pomocou (10) a (11) dostal Max Planck svoj rozdeľovací zákon

$$(15) \quad \varrho_\nu = \frac{\alpha \nu^3}{e^{(\beta\nu/T)} - 1}.$$

Do tých čias Planck neprijal Boltzmannovu štatistickú interpretáciu entropie, ale považoval všetky termodynamické veličiny za absolútne. Až pri teoretickom zdôvodnení svojho vzťahu (15) v októbri až decembri 1900 použil Boltzmannovu definíciu entropie

$$(16) \quad S = k_B \ln W, *$$

\*) V tomto tvare ju prvý raz napísal MAX PLANCK, pričom Boltzmannovu maximálnu váhu konfigurácie pre rovnovážny stav  $W_{\max}$  nahradil súčtom všetkých možných váh konfigurácií  $\sum_i W_i$ .

kde váha konfigurácie  $W$  je úmerná pravdepodobnosti stavu systému. Keďže štatistické úvahy možno robiť len s konečným počtom diskretných elementov, musel Planck energiu rezonátorov danej frekvencie rozdeliť na konečný počet diskretných kvant  $\varepsilon$ , pričom z Wienovho posunovacieho zákona vyplýva úmernosť týchto kvant  $\varepsilon$  frekvencii  $\nu$  s univerzálnou konštantou úmernosti  $h$ , ktorú Planck tiež vyčíslil.

Napokon dostal Planckov rozdeľovací zákon tvar

$$(17) \quad \varrho_\nu d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{e^{(h\nu/kT)} - 1},$$

pričom  $c$  je rýchlosť svetla.

Vzťah (17) sa skvele potvrdil mnohými ďalšími experimentami a priniesol novú ideu do fyziky – kvantovanie energie. Planck sa s touto ideou len ťažko zmieroval, prijal ju – stojac pod Damoklovým mečom experimentu – len ako akýsi doplnok ku klasickej elektrodynamike; pripisoval látke schopnosť vyžarovať a pohlcovať svetlo po kvantách, zatiaľ čo samotné svetlo podliehalo zákonom klasickej elektrodynamiky.

Einstein naopak vo svojej stati vyšiel z predpokladu, že na rozdiel od postulátov klasickej elektrodynamiky svetelná energia „nie je rozložená v priestore spojite, ale pozostáva z konečného počtu v priestore bodove lokalizovaných energetických kvánt, ktoré sa pohybujú bez toho, že by sa delili a ktoré môžu byť pohltené a vyžiarené len ako celky“. Einstein sa pri odôvodnení tohto svojho predpokladu dôsledne vyhýba klasickej elektrodynamike, používa iba metódy termodynamiky a štatistickej fyziky. Teda nielen fyzikálne postavenie problému, ale aj metódy výpočtu sa líšia od Planckovho postupu.

V tom čase neexistovala ešte Boseho štatistika. Zrejme to bola podobnosť Wienovho rozdeľovacieho zákona (8) s Boltzmannovým rozdelením molekúl ideálneho plynu podľa energie, ktorá priviedla Einsteina na myšlienku obmedziť svoje úvahy na oblasť platnosti Wienovho rozdeľovacieho zákona (t. j. na vysoké frekvencie). K tejto domnienke nás oprávňujú Einsteinove retrospektívne úvahy v roku 1917.

Zo vzťahu (8) priamo vyplýva

$$(18) \quad \frac{1}{T} = - \frac{1}{\beta\nu} \ln \frac{\varrho}{\alpha\nu^3}.$$

Vzhľadom na všeobecnú platnosť termodynamického vzťahu (11) integrovaním dostaneme

$$(19) \quad \varphi(\varrho, \nu) = - \frac{\varrho}{\beta\nu} \left\{ \ln \frac{\varrho}{\alpha\nu^3} - 1 \right\},$$

kde  $\varphi(\nu)$  je spektrálna hustota entropie.

Nech  $V$  v objeme je takmer monochromatické žiarenie z intervalu  $(\nu, \nu + d\nu)$ . Entropia tohto žiarenia je

$$(20) \quad S = V\varphi(\varrho, \nu) d\nu = - \frac{E}{\beta\nu} \left\{ \ln \frac{E}{V\alpha\nu^3 d\nu} - 1 \right\}.$$



Ak by celé žiarenie bolo v menšom objeme  $V_0$ , príslušná „fluktuačná“ entropia by klesla na  $S_0$ , takže

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta v} \ln \left( \frac{V}{V_0} \right).$$

Posledný vzťah možno prepísať do tvaru

$$(21) \quad S - S_0 = \frac{R}{N} \ln \left[ \left( \frac{V}{V_0} \right)^{\frac{N}{R} \frac{E}{\beta v}} \right].$$

Ak by  $n$  molekúl ideálneho plynu namiesto pôvodného objemu  $V$  zaujalo objem  $V_0$ , platilo by

$$(22) \quad S - S_0 = \frac{R}{N} \ln \left( \frac{V}{V_0} \right)^n$$

Porovnaním vzťahov (21) a (22), ak  $E$  je energia celého fotónového plynu\*) a  $\varepsilon$  energia jedného fotónu  $n = E/\varepsilon$ , takže energia fotónu je  $\varepsilon = R\beta/N$  v. Číselné hodnoty dávajú  $R\beta/N = h$ , kde  $h$  je Planckova konštanta.\*\*)

To bola hlavná myšlienka Einsteinovej práce, onen heuristický aspekt, spomínaný v titule. Vývody o fotoelektrickom efekte, fluorescencii a fotoionizácii a príslušné experimenty mali len podporiť jeho tvrdenie.

Pre fotoefekt z Einsteinovej teórie vyplýva: energia elektrónu uvoľneného dopadajúcim svetelným lúčom z kovu bude nezávislá od intenzity svetla, bude však lineárne závisieť od frekvencie svetla podľa vzorca

$$(23) \quad E = h\nu - \Phi.$$

Vo vzťahu (23)  $\Phi$  je výstupná práca, potrebná na vyrazenie elektrónu z kovu,  $E$  je energia uvoľneného elektrónu,  $\nu$  frekvencia dopadajúceho svetla.

MILLIKANOVE pokusy skvele potvrdili platnosť rovnice (23), ale tvrdenie o reálnej existencii fotónov sa len pomaly presadilo vo fyzike. Planck ešte v roku 1913 písal, že Einstein v tejto otázke prestrelil ponad cieľ. Aj R. A. Millikan vychádzal z toho, že Einsteinova interpretácia rovnice (23) nie je vo všeobecnosti prijatá.

Naproti tomu Einstein v stati *K teórii emisie a pohlcovania svetla (Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorbtion, Ann. Phys. 20, 199–206)* revidoval už v roku 1906 svoje stanovisko k Planckovmu zákonu žiarenia (17) a ukázal, že Planckova práca

\*) Pojem fotón zaviedol A. H. COMPTON v roku 1923. Einstein hovoril o energetických kvantách, neskôršie aj o svetelných kvantách.

\*\*) Na Einsteinove myšlienky z roku 1905 nadviazal bangladéžsky fyzik BOSE v roku 1924, keď dutinové žiarenie nahradil fotónovým plynom. Ibaže na rozdiel od Einsteina nepoužil Boltzmannovu štatistiku, ale kvantovú štatistiku (častice v nej sú nerozlišiteľné, rozlíšiť možno len stavy obsadené bez obmedzenia rôznym počtom častíc). Zatiaľ čo Boltzmannova štatistika, aplikovaná na fotóny energie  $h\nu$  vedie na Wienov rozdeľovací zákon, Boseho štatistika vedie na Planckov rozdeľovací zákon (17). Einstein privítal Boseho stať, odporúčal jej uverejnenie a nadviazal na ňu zavedením štatistiky pre bozony s nenulovou kludovou hmotnosťou.

z roku 1900 vlastne implicitne využíva teóriu svetelných kvánt. Štatistické úvahy vedú k vzťahu (17) len za predpokladu, že energia lineárneho harmonického oscilátora (elementárneho rezonátora) môže nadobúdať celočíselné násobky veličiny  $h\nu^*$ ). Za tohto predpokladu možno – ako ukázal Einstein – odvodiť vzťah (17) z kánonického rozdelenia a Planckov zákon žiarenia implicitne predpokladá svetelné kvantá, ktoré sú v rovnováhe s diskretnými stavmi oscilátora.

Teória svetelných kvánt (fotónov) je prvým prevratným dôsledkom kvantovania energetických hladín lineárneho harmonického oscilátora. Einstein už v roku 1907 upozornil v práci *Planckova teória žiarenia a teória merného tepla* (*Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme*, Ann.Phys.22, 180–190) na jeho druhý, nie menej významný dôsledok: molekuly alebo ióny látky môžu existovať v menšom počte stavov, ako predpokladala klasická fyzika, lebo ich energia je kvantovaná. Zatiaľ čo stredná energia klasického lineárneho oscilátora je podľa ekvipartičného teorému  $RT/N$ , stredná energia Planckovho oscilátora je

$$\bar{E} = \frac{0 + A\varepsilon e^{-(N/RT)\varepsilon} + A2\varepsilon e^{-(N/RT)2\varepsilon} + \dots}{A + A e^{-(N/RT)\varepsilon} + A e^{-(N/RT)2\varepsilon} + \dots} = \frac{\varepsilon}{e^{(N/RT)\varepsilon} - 1},$$

čo sa zhoduje s hodnotou, implicitne obsiahnutou vo vzťahu (17) pre  $\varepsilon = h\nu$ ,  $R/N = k_B$ . ( $A$  je normovacia konštanta).

Teplný pohyb v tuhých telesách si môžeme najjednoduchšie predstaviť ako harmonické oscilácie atómov okolo ich rovnovážnej polohy. Vzhľadom na to, že každý atóm má tri stupne voľnosti, dáva klasická teória pre mólové teplo

$$C_v = \frac{dE}{dT} = 3R,$$

čo je v zhode s Dulongovými a Petitovými meraniami pre izbové teploty, kvantová teória dáva derivovaním vzťahu pre  $\bar{E}$  podľa teploty a násobením tromi

$$C_v = 3R \frac{\left(\frac{\beta\nu}{T}\right)^2 e^{\beta\nu/T}}{e^{(\beta\nu/T)} - 1}.$$

(V tomto Einsteinovom označení  $\beta = h/k_B$ .) Einsteinov vzorec bol v dobrom súlade s nameranými hodnotami mólového tepla pre diamant pri nízkych teplotách a pri vysokých teplotách prechádza v klasický Dulongov-Petitov zákon. Einstein upozornil, že jeho vzorec zodpovedá len jedinej vlastnej frekvencii kmitajúcich atómov v kryštalickej tuhej látke (za predpokladu, že tuhá látka má celé spektrum vlastných hodnôt vypracoval DEBYE v roku 1912 teóriu, ktorá bola v dobrom priblížení v súlade s experimentom).

Maxovi Planckovi nemožno odoprieť zásluhu, že v roku 1900 zaviedol do fyziky

\*) Kvantová mechanika spresnila teóriu Planckovho oscilátora. Zo vzťahu neurčitosti vyplýva, že minimálna energia oscilátora je  $E_0 = h\nu/2$ , takže  $E_n = h\nu(n + \frac{1}{2})$  (pre  $n = 0, 1, 2, \dots$ )

novú univerzálnu konštantu, elementárne kvantum účinku, s ktorou je spätá celá súčasná fyzika. Jeho práca však zostala takmer nepovšimnutá, veď ešte v roku 1905 uverejnili RAYLEIGH a JEANS svoj klasický vzorec pre čierne žiarenie, ktorý P. EHRENFEST označil ako ultrafialovú katastrofu (nie je v súlade s experimentom pre malé vlnové dĺžky a celková energia žiarenia by dosiahla nekonečné hodnoty). V tom istom roku začal Albert Einstein so sériou prác, ktorými petrifikoval kvantovú teóriu. V nasledujúcich rokoch si ju osvojili poprední fyzici (i keď mnohí pochybovali o existencii fotónov). Kvantovej teórii boli venované SOLVAYOVE kongresy. Na prvom z nich v roku 1911 predniesol A. Einstein referát, ktorý vypracoval počas svojho účinkovania v Prahe *K súčasnému stavu problému merného tepla*.

V rokoch 1905–1925 napísal Einstein vyše 20 prác k problémom kvantovej teórie. Z nich najvýznamnejšia je stať *Ku kvantovej teórii žiarenia (Zur Quantentheorie der Strahlung, Phys. Z. 18 (1917), 121)*, a to z viacerých hľadísk. Po prvé nachádzame v tejto práci nové, originálne odvodenie Planckovho zákona žiarenia; po druhé, podnietila A. H. COMPTONA k teórii aj experimentálnemu overeniu efektu, nazvaného po ňom; po tretie nadväzujúc na svoju predošlú prácu Einstein tu zaviedol pojem pravdepodobnosti prechodu elektrónu v atóme z vyššej energetickej hladiny na nižšiu a napokon táto stať sa oprávnenne považuje za východisko k teórii laserov.

Spomínaná stať nadväzuje na Bohrovu teóriu atómových spektier, ktorú Einstein neskoršie označil za najvyššiu muzikálnosť v oblasti myslenia. Einstein uvažuje dutinu, v ktorej sú molekuly ideálneho plynu v rovnováhe s čiernym žiarením pri teplote  $T$ . Vzájomné pôsobenie molekúl a žiarenia nenaruša Maxwelllove rozdelenie molekúl podľa rýchlostí. Podľa kvantovej teórie môže molekula plynu, odhliadnuc od postupného pohybu, nadobúdať len diskkrétne hodnoty energie  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n, \dots$ , pričom kánonické rozdelenie určuje pravdepodobnosť  $W_n$ , že molekula bude v stave s energiou  $\varepsilon_n$

$$(24) \quad W_n = p_n e^{-\varepsilon_n/kT}.$$

Vo vzťahu (24)  $p_n$  je štatistická váha stavu,  $k$  Boltzmannova konštant a  $T$  absolútna teplota. Pri prechode z  $m$ -tej do  $n$ -tej energetickej hladiny ( $m > n$ ) vyžiari molekula energiu  $\varepsilon_m - \varepsilon_n$ . Toto vyžiarenie (Ausstrahlung) za čas  $dt$  nastáva spontánne (bez prítomnosti vonkajšieho žiarivého poľa) ako z Hertzovho rezonátora s pravdepodobnosťou

$$(A) \quad dW = A_m^n dt$$

Pritom  $A_m^n$  je konštant a, nazvaná koeficient spontánnej emisie.

Ak sa takýto rezonátor nachádza v žiarivom poli, prenáša elektromagnetické pole naň prácu, ktorá môže byť kladná alebo záporná podľa toho, v akej fáze je rezonátor a oscilujúce pole. Tento proces (Einstrahlung) v prípade kladnej práce sa prejaví ako absorbcia žiarenia  $\varepsilon_m - \varepsilon_n$ , v prípade zápornej práce ako vynútená (indukovaná) emisia svetla energie  $\varepsilon_m - \varepsilon_n$ . Príslušné pravdepodobnosti musia byť úmerné intenzite žiarenia  $\varrho$ , času  $dt$  a v prípade absorpcie koeficientu absorpcie  $B_n^m$ , v prípade vynútenej emisie príslušnému koeficientu  $B_m^n$ , takže

$$(B) \quad dW = B_n^m \varrho dt,$$

$$(B') \quad dW = B_m^n \varrho dt.$$

Rozdeľovacia funkcia energie žiarenia musí mať taký tvar, aby sa v rovnováhe nenarušilo rozdelenie molekúl podľa energie. To je možné vtedy a len vtedy, ak za jednotku času nastane rovnaký počet elementárnych procesov typu B ako typu A a B' spolu. To vedie na podmienku

$$p_n e^{-\varepsilon_n/kT} B_n^m \varrho = p_m e^{-\varepsilon_m/kT} (B_m^n \varrho + A_m^n).$$

Vzhľadom na to, že pre teploty rastúce do nekonečna musí rásť aj  $\varrho(v)$  do nekonečna, platí

$$p_n B_n^m = p_m B_m^n,$$

takže

$$(25) \quad \varrho = \frac{A_m^n / B_m^n}{e^{(\varepsilon_m - \varepsilon_n)/kT} - 1}.$$

Z Wienovho posunovacieho zákona (10) okamžite dostaneme

$$A_m^n / B_m^n = \alpha v^3.$$

Vzhľadom na to, že pre  $h\nu/kT \ll 1$  platí Rayleighov vzťah  $\varrho = (8\pi\nu^2/c^3) kT$ , vychádza  $\alpha = 8\pi h/c^3$  a ďalej

$$(26) \quad \varepsilon_m - \varepsilon_n = h,$$

čo sa zhoduje s Bohrovým postulátom. Ak dosadíme do (25) takto určené veličiny, dostaneme Planckov zákon žiarenia v tvare (17).

Ťažiskom Einsteinovej práce bol výpočet hybnosti atómu, ktorú získa pri absorpcii alebo emisii svetelného kvanta.

Einstein ukázal, že v poli rovnovážneho žiarenia zostane rozdelenie molekúl rovnovážne (Maxwellovo) v súlade s experimentom za dvoch predpokladov, ktoré sú v rozpore s klasickou teóriou. Po prvé brzdiaca sila žiarivého poľa nespôsobí úplné zastavenie pohybu ľubovoľnej molekuly, a to v dôsledku fluktuácií tohto poľa. Po druhé aj pri spontánnej emisii z bodového zdroja je hybnosť zdroja pri elementárnom procese nenulová a má náhodný smer (podľa klasickej teórie bodový zdroj vyslal guľovú vlnu, takže vzhľadom na izotropnosť priestoru výsledná hybnosť zdroja by bola nulová). Náhodný je aj časový okamžik, v ktorom nastane elementárny proces.

## Teória relativity

Einstein vošiel do vedomia širšej verejnosti predovšetkým ako tvorca teórie relativity. Je to pochopiteľné, lebo popri nesčíselných dôsledkoch pre samu fyziku, priniesla nový pohľad na svet nás obklopujúci, objavila nové vlastnosti a súvislosti priestoru, času a hmoty. Prvá Einsteinova stať o teórii relativity vyšla na 30 stranách časopisu *Annalen*

der Physik v roku 1905 pod nenáročným titulom *K elektrodynamike pohybujúcich sa telies* (*Zur Elektrodynamik der bewegten Körper*, An. Phys. 17, 891). Nezvyklá je aj jej forma a štýl. Neobsahuje nijaké odvolávky na literatúru, ani na Michelsonove experimenty, iba v závere je poďakovanie priateľovi MICHALANGELOVI BESSOVI.

Špeciálna teória relativity mala podobne ako fotónová teória svojich predchodcov, najmä v J. LARMOROVI a H. A. LORENTZOVI, najďalej sa dopracoval H. POINCARÉ. Títo fyzici ukázali, že Maxwellove rovnice nie sú kovariantné voči Galileiho transformáciám

$$(27) \quad x' = x - vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t$$

v prípade, že sa nová (čiarkovaná) vzťažná sústava pohybuje v kladnom smere osi  $x$  konštantnou rýchlosťou.

Našli rovnice

$$(28) \quad x' = (x - vt) / \sqrt{1 - v^2/c^2}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

ktoré dostali názov Lorentzove transformácie, a Poincaré tiež ukázal, že tvoria grupu.

Ale sám Lorentz týmto transformáciám neprispevoval patričný fyzikálny význam. Čas  $t'$  považoval za pomocnú matematickú veličinu, skutočný čas bol iba absolútny čas  $t$ . Skracovanie dĺžok, vyplývajúce z rovníc (28), vysvetľoval Lorentz pôsobením éteru na pohybujúce sa telesá. Zdanlivá dilatácia času a spomínané skrátenie dĺžok spôsobujú, že v inerciálnych vzťažných sústavách je rýchlosť svetla konštantná bez ohľadu na ich vzájomný priamočiary, rovnomerný pohyb, ako o tom svedčí Michelsonov pokus. „Skutočné“ vo fyzikálnom zmysle ostali Galileiho transformácie (27). Keďže rovnice elektrodynamiky nie sú kovariantné voči nim, musí existovať privilegovaná absolútna súradná sústava, spojená s nehybným éterom. H. Poincaré (v roku 1906) šiel oveľa ďalej ako Lorentz, keď zaviedol princíp relativity a dokonca uvažoval o možnosti relativnosti súčasnosti. Podľa DE BROGLIEHO nechýbalo veľa, aby Henri Poincaré a nie Albert Einstein ako prvý vypracoval teóriu relativity v celej jej všeobecnosti, čím by česť tohto objavu pripadla francúzskej vede. Že sa tak nestalo, pripisuje Louis de Broglie jednak na vrub Poincarého konvencionalizmu, jednak tomu, že bol viac matematikom ako fyzikom. Pri inej príležitosti de Broglie napísal, že Einsteinov objav v roku 1905 zažiaril na tmavom nebi ako svietiaci raketa.

Východiskom Einsteinovho článku je princíp relativity, t. j. rovnoprávnosť inerciálnych systémov pre všetky fyzikálne procesy a princíp konštantnosti rýchlosti svetla. Princíp relativity odôvodňuje konštatovaním, že v elektrodynamike nemožno rozlíšiť účinky relatívneho pohybu dvoch telies, napríklad magnetu a vodiča, cez ktorý prechádza prúd\*) a ďalej negatívnymi výsledkami pokusov, ktoré mali registrovať pohyb Zeme voči éteru. Toľko možno vyčítať z Einsteinovho prvého článku. Vo svojich spomienkach uvádza, že od šestnásteho roku života ho zaujal a trápil tento problém: pozorovateľ, ktorý by sa pohyboval rýchlosťou svetelnej vlny, registroval by priestorove

\*) Nad týmto problémom uvažoval A. Einstein už ako 16ročný; napísal aj prácu, ktorú poslal svojmu strýkovi CÉSAROVÍ KOCHOVI.

oscilujúce elektromagnetické pole v kľude. Pre tohto pozorovateľa by neplatili Maxwellove rovnice, ale nejaké iné vzťahy. Ak sa však podľa princípu relativity v inerciálnych sústavách nemá meniť tvar fyzikálnych zákonov, vyplýva z Maxwellových rovníc, že rýchlosť svetla je hraničná a z toho zase, že je vo vákuu v inerciálnej sústave konštantná bez ohľadu na rovnomerný pohyb svetelného zdroja.

Lorentzove transformácie, zachovávajúce kovariantnosť Maxwellových rovníc, transformujú formálne aj čas, vyplýva z nich dilatácia času a kontrakcia dĺžok a napokon z nich vyplýva vzťah

$$(29) \quad x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = (x')^2 + (y')^2 + (z')^2 - c^2 (t')^2.$$

Zo vzťahu (29) okamžite možno vyčítať (ľavá i pravá strana určujú rovnice čela guľovej vlny postupujúcej rýchlosťou  $c$  v dvoch voči sebe sa pohybujúcich inerciálnych sústavách) konštantnosť rýchlosti svetla vo vákuu.

Albert Einstein postavil problém z hlavy na nohy: začína s definíciou súčasnosti (synchronizácia hodín v danej vzťažnej sústave) a potom z princípu relativity a konštantnej rýchlosti svetla odvodí celú relativistickú kinematiku: Lorentzove transformácie, dilatáciu času, kontrakciu dĺžok a relativistické skladanie rýchlostí. Iba v druhej časti prechádza na špeciálne problémy elektrodynamiky, medzi nimi na relativistický Dopplerov efekt. Uvažuje rovinnú vlnu, ktorá sa v „kludovej“ vzťažnej sústave šíri rovno-bežne s rovinou  $xy$  a ktorej vlnový vektor zvierá s osou  $x$  uhol  $\varphi$ . V čiarkovanej sústave, ktorá sa pohybuje rýchlosťou  $v$  oproti „kludovej“ v kladnom smere osi  $x$ , mení sa smer vlnového vektora i frekvencia svetla.

$$(30) \quad v' = v \frac{1 - (v/c) \cos \varphi}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Pre aberáciu svetla v pohybujúcej sa sústave potom platí

$$\cos \varphi' = \frac{\cos \varphi - (v/c)}{1 - (v/c) \cos \varphi}.$$

Napokon sa zaoberá dynamikou pomaly sa pohybujúceho elektrónu a nájde pre kinetickú energiu elektrónu výraz

$$(31) \quad W = \mu c^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right\},$$

kde  $\mu$  je hmotnosť elektrónu.

V nasledujúcej stati, pod názvom *Závisí zotrvačnosť telesa od obsahu jeho energie?* (*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* Ann. Phys. 1905, 18, 639 – 641) Einstein nadväzuje na vzťah (30) a ukazuje, že platí aj pre energiu vyžiareného svetla  $L'$  v pohybujúcej sa sústave a  $L$  v pokojovej sústave

$$(32) \quad \frac{L'}{2} = \frac{L}{2} \frac{1 - (v/c) \cos \varphi}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}} \quad \text{v kladnom smere}$$

a

$$\frac{L'}{2} = \frac{L}{2} \frac{1 + (v/c) \cos \varphi}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}} \quad \text{v opačnom smere.}$$

Ak teleso energie  $E_0$  vyžiari v obidvoch smeroch svetlo energie  $L/2 + L/2$ , zmenší sa jeho energia na  $E_1$  a z hľadiska čiarkovanej sústavy energia  $H_0$  na  $H_1$ . Jednoduchý výpočet dáva

$$(33) \quad (H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}} - 1 \right\}.$$

Ľavá strana (33) je úbytok kinetickej energie z hľadiska čiarkovanej sústavy  $K_0 - K_1$ . Ak zanedbáme veličny štvrtého rádu na pravej strane,

$$K_0 - K_1 = \frac{L}{c^2} \frac{v^2}{2}.$$

Ak teda teleso vyžiari energiu  $L$ , zmenší sa jeho hmotnosť o  $L/c^2$ , pritom je nepodstatné, že teleso stratilo energiu v dôsledku žiarenia. Každá zmena energie telesa je sprevádzaná úbytkom jeho hmotnosti, pričom

$$m = \frac{L}{c^2} \text{ *).$$

Už v prvých dvoch článkoch o špeciálnej teórii relativity z roku 1905 nachádzame charakteristickú črtu všetkých Einsteinových epochálnych prác: Einstein prináša novú, prevratnú interpretáciu fyzikálnej problematiky. Ale táto interpretácia nie je samoučelná, vysvetľuje doteraz nevysvetlené javy a predpovedá nové javy, ktoré čakajú na experimentálne overenie. V ďalších prácach potom Einstein dopracoval relativistickú dynamiku a na teórii relativity začali pracovať ďalší fyzici, M. PLANCK, M. LAUE, J. LAUB a iní.

Ešte špeciálna teória relativity nedostala svoju konečnú podobu (stalo sa tak v rokoch 1907 a 1908, keď ju H. MINKOWSKI preformuloval do geometrickej reči) a Albert Einstein už začal pracovať na všeobecnej teórii relativity. V práci *O princípe relativity a jeho dôsledkoch* (*Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*; Jahrb. d. Radioaktivität u. Elektronik, 1907, 4, 411–462) v záverečnej kapitole, opierajúc sa o ekvivalentnosť gravitačnej a zotrvačnej hmotnosti, rozširuje princíp relativity na vzájomne sústavy pohybujúce sa voči sebe s rovnomerným zrýchlením. Postu-

---

\* Je známe, aké obrovské množstvá energie sa získavajú z hmotnostného defektu pri jadrových reakciách. Menej je známe, že počas návštevy A. Einsteina v Prahe v roku 1921 navštívil ho „vynálezca“ s návrhom na využitie energie uvoľnenej pri hmotnostnom defekte. Einstein odmietol diskusiu, takže onen vynálezca i jeho vynález zostali v anonymite.

luje ekvivalentnosť homogénneho gravitačného poľa, ktoré udeľuje všetkým telesám zrýchlenie  $-\gamma$ , s neinerciálnou vzťažnou sústavou pohybujúcou sa s konštantným zrýchlením  $\gamma$ . Už v tejto stati zdôvodnil zakrivenie svetelného lúča v blízkosti gravitačných polí a vypočítal, že v prípade lúča smerujúceho kolmo na smer gravitácie odkloní sa na jednotku dĺžky o veličinu  $\gamma/c^2$ , kde  $\gamma$  je gravitačné zrýchlenie. (Výsledky z roku 1916 berúce do úvahy krivosť priestoru dávajú dvojnásobné hodnoty.) Einstein bol presvedčený, že pri zatmení Slnka možno toto zakrivenie sledovať, a preto s veľkým zanietením podporil podujatie astronóma ERWINA FREUNDLICHU-FINLAYA uskutočniť meranie v lete r. 1914 na Kryme. Vypuknutie prvej svetovej vojny však prekázalo činnosť Freundlichovej expedície.

Počas svojho účinkovania v Prahe v rokoch 1911–1912 a po návrate do Zürichu Einstein študoval teóriu invariantov a absolútny diferenciálny kalkul Christoffela, Ricciho, Levi-Civita a iných. Ukázalo sa totiž, že základná požiadavka špeciálnej teórie relativity, kovariantnosť fyzikálnych zákonov voči Lorentzovým transformáciám, nestačí na riešenie problému gravitácie, že treba postulovať kovariantnosť zákonov aj voči nelineárnym transformáciám.

Vcelku osem rokov pracoval Einstein na tomto probléme čiastočne za pomoci svojho kolegu zo študentských čias, matematika MARCELA GROSSMANNA.

Zovšeobecnením vzťahu (29) bol výraz pre priestorový interval

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - dx_4^2$$

a ďalším zovšeobecnením pre prípad pohybu častice v gravitačnom poli

$$ds^2 = \sum_{i,k=1}^4 g_{ik} dx_i dx_k.$$

Svetočiarou častice je teraz geodetická čiara v neeuclidovskom priestoročase. Hmotný bod sa bude pohybovať po geodetickej línii v zakrivenom, štvorrozmernom pseudo-riemanovskom priestore.

V roku 1915 vyšiel Einsteinov článok *Vysvetlenie pohybu perihelia Merkura zo všeobecnej teórie relativity* (*Erklärung der Perihelbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss., 1915, 47, 2, 831–839). Napokon zavŕšil svoje výskumy o všeobecnej teórii relativity vyše päťdesiatstránkovým článkom *Základy všeobecnej teórie relativity* (*Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, Ann. Phys. 1916, 49, 769–822). Merania zakrivenia svetelného lúča pri zatmení Slnka v máji 1919 pod vedením A. S. EDDINGTONA (a aj ďalšie merania) potvrdili Einsteinove výpočty z roku 1916.\*) Tie rozhodli o tom, že všeobecná teória relativity bola všeobecne prijatá. Stala sa tiež základom pre súčasnú kozmológiu. Prvý kozmologický model konečného a neohraničeného vesmíru pochádza od Einsteina.

---

\*) R. V. POUND a G. A. REBKA využijúc Mössbauerov efekt, zmerali dokonca vplyv gravitácie na svetlo v pozemských podmienkach.



## Einsteinov vplyv na súčasnú fyziku

Einstein stál pri kolíske všetkých disciplín súčasnej fyziky. Spomenuli sme už, že začiatky kvantovej fyziky, kvantovej teórie svetla — včítane teórie laserov, fyziky pevných látok a rozvoj štatistickej fyziky, najmä fluktuálnych javov a kvantovej štatistiky vychádzajú najmä z Einsteinových objavov.

Špeciálnu teóriu relativity nemožno ponímať ako osobitnú fyzikálnu disciplínu, prenikla do všetkých oblastí fyziky. V elektrodynamike má svoj zdroj a svoje stále miesto. Mechanika, termodynamika, štatistická fyzika musia siahnúť k relativistickému kalkulu v čoraz väčšom počte praktických aplikácií.

V súvislosti so súčasnou kvantovou mechanikou sa často spomínajú Einsteinove diskusie s NIELSOM BOHRM o interpretácii kvantovej mechaniky. Einstein neprijal štatistickú interpretáciu kvantovej mechaniky, neveril, že by „milý pánboh“ hral v kocky. Tieto diskusie — nehovoriac o ich mimoriadnej atraktivnosti pre čitateľa, sledujúceho duel dvoch fyzikálnych titanov — mali veľký význam pre pochopenie základov kvantovej mechaniky. Einstein nedosiahol, že by sa bola zavrhla pravdepodobnostná interpretácia vlnovej funkcie, ale rozhodne prispel k tomu, že sa táto interpretácia v podaní BOHRA, HEISENBERGA a iných prívržencov kodanskej školy očistila od nominalistickej tradície, od prílišného empirizmu a subjektivismu. Einsteinov vplyv na kvantovú mechaniku sa neobmedzuje na túto stránku. Teória relativity a iné Einsteinove idey zohrali významnú heuristickú úlohu pri jej rozvoji v dvadsiatych a tridsiatych rokoch. A. SOMMERFELD vytvoril teóriu jemnej štruktúry vďaka relativistickej dynamike. Na Einsteinovu emisnú a absorbnú teóriu priamo nadväzovali výpočty pravdepodobnosti prechodu a určenie výberových pravidiel ešte v rámci starej kvantovej teórie.

DE BROGLIEHO práce z rokov 1923—1924 vychádzajú z relativistických rovníc. Na ne nadviazal E. SCHRÖDINGER. Ako spomína P. DIRAC, Schrödinger mu za druhej svetovej vojny potvrdil, že svoju vlnovú mechaniku formuloval v nerelativistickom priblížení len potom, čo sa mu relativistické riešenie nepodarilo. Napokon priekopnícke obdobie kvantovej mechaniky bolo završené Diracovou rovnicou.

Veľký bol aj Einsteinov osobný vplyv na významných fyzikov. Snáď niet význačného fyzika, ktorý by vo svojich spomienkach neuvádzal úlohu Einsteinových myšlienok pre rozvoj fyziky. Z mnohých spomienok vyberám Heisenbergove. Dozvedáme sa z nich, že pod priamym vplyvom svojho prvého rozhovoru s A. Einsteinom pristúpil k odvodeniu vzťahu neurčitosti, ktorý kvantovomechanickému formalizmu — nekomutatívnej algebre — dáva hlboký fyzikálny význam.

Pravda mnohé problémy, ktoré nastolil A. Einstein, ostali otvorené. Niet jednotnej teórie poľa, o ktorú sa Einstein usiloval dlhé roky. Súčasný stav kvantovej elektrodynamiky, teórie elementárnych častíc a teórie gravitácie nepodávajú ani uspokojivý ani jednotný fyzikálny obraz sveta.

Einstein rozhodujúcou mierou prispel k tomu, že fyzika na prelome storočí prestala byť uzavretou, jednotnou stavbou ako Mendelejevova sústava prvkov, z ktorej snáď niekoľko prvkov ešte nie je objavených. Einstein neobjavil iba nové prvky daného sveta, ale objavil nové svety, megasvet a mikrosvet. Nepokoj, ktorý vštepil fyzike, z nej zrejme už nikdy nevymizne.

## Literatúra

- [1] EINSTEIN, A.: *Sobranie naučných trudov, I—IV*. Nauka, Moskva 1965—1967.
- [2] HAAR, D., TER: *Quantentheorie, Einführung und Originaltexte*. Akademie-Verlag, Berlin 1969.
- [3] ĀAPKIN, A. A., ed.: *Princip otноситel'nosti*. Atomizdat, Moskva 1973.
- [4] FRANKFURT, U. I., ed.: *Einsteinovskij sbornik 1974*. Nauka, Moskva 1976.
- [5] SCHLIPP, P. A., ed.: *Albert Einstein: Philosopher — Scientist*. Tudor Publishing Company, New York 1951.
- [6] WEINER, C., ed.: *History of Twentieth Century Physics*. Academic Press, New York, London 1977.
- [7] KUZNECOV, B. G.: *Od Galileiho po Einsteina*. Pravda, Bratislava 1975.
- [8] KUZNECOV, B. G.: *Einstein*. Izdatel'stvo akademii nauk SSSR, Moskva 1963.
- [9] SEELIG, C.: *Albert Einstein*. Atomizdat, Moskva 1966.
- [10] CLARK, R. W.: *Albert Einstein*. Bechtle-Verlag, Esslingen 1974.

# Dirichletova úloha a Keldyšova vĕta

*Ivan Netuka, Jiří Veselý, Praha*

Zprávy o úmrtí vynikajících vědeckých pracovníků nezabírají zpravidla v denním tisku mnoho místa a často přinášejí jenom základní informace. Když se proto loňského roku těsně před prázdninami objevila v novinách zpráva „V sobotu zemřel akademik Mstislav Keldyš, vynikající vědec a jeden z předních organizátorů sovětské vědy, člen ÚV KSSS, poslanec Nejvyššího sovětu SSSR, člen prezidia Akademie věd SSSR, ředitel Ústavu aplikované matematiky Akademie věd SSSR, trojnásobný hrdina socialistické práce a laureát Leninovy ceny a četných státních cen“, jen málo lidí si skutečně uvědomilo, jak velická ztráta tímto úmrtím pro sovětskou matematiku vznikla. Přinést zasvěcený a podrobný rozbor Keldyšovy celoživotní práce, její hodnocení a vliv na vývoj moderní matematiky není možno provést v článku tohoto typu; zájemce odkazujeme na [9]. Chceme se však pokusit přiblížit čtenáři problematiku, ve které Keldyš dosáhl několika vynikajících výsledků a kde jeho práce dodnes tvoří živnou půdu dalšího intenzivního výzkumu.

Mstislav Vsevolodovič Keldyš se narodil 10. února 1911 v Rize v rodině stavebního inženýra. Jako dvacetiletý (!) ukončil v roce 1931 studia na moskevské univerzitě a začal pracovat v oblasti aplikované matematiky v Institutu aerohydrodynamiky N. E. Žukovského. V této disciplíně dosáhl výborných výsledků N. E. ŽUKOVSKÝ a S. A. ČAPLYGIN, kteří zpracovali problematiku obtékání těles při rychlostech menších než rychlost zvuku. Keldyš byl jejich důstojným nástupcem — rozšířil jejich výsledky i pro stlačitelné kapaliny, zabýval se nárazem těles na kapalinu, řešil nestacionární pohyb křídla, věnoval se