

100 let od vzniku speciální teorie relativity

zpracoval: Jiří Svršek ¹

podle článku Romana Ya. Kezerashviliho

Abstract

V roce 2005 uplynulo 100 let od zformulování speciální teorie relativity, jejímž autorem je Albert Einstein.

¹e-mail: natura@baf.cz, WWW: <http://natura.baf.cz>

References

- [1] **Roman Ya. Kezerashvili: The Hundredth Anniversary of Einstein's Annus Mirabilis.** New York City College of Technology, The City University of New York 300 Jay Street, Brooklyn, NY 11201
arXiv:physics/0504157, April 2005, Los Alamos National Laboratory.
<http://xxx.lanl.gov/abs/physics/0504157>
- [2] **Martin Šolc, Jiří Švestka, Vladimír Vanýsek: Fyzika hvězd a vesmíru.** Učebnice pro gymnázia. Státní pedagogické nakladatelství, národní podnik. Praha, 1983.
- [3] Teorie elementárních částic (3). Natura 2/1995.
<http://natura.baf.cz/natura/1995/2/9502-xx.html>

0 Úvodem

"I want to know how God created this world.

I am not interested in this or that phenomenon, in the spectrum of this or that element.

I want to know His thoughts; the rest are details."

Albert Einstein

Rok 2000 byl ve Spolkové republice Německo vyhlášen Rokem fyziky na počest 100. výročí oznámení **Maxe Plancka**, že se mu podařilo úspěšně provést zvláštní modifikaci klasického výpočtu a vysvětlit tak jednu z největších záhad fyziky konce 19. století - rozdělení monochromatického jasu záření dokonale černého tělesa při dané teplotě.

Při běžných teplotách vidíme předmět díky světlu, které se odráží od jeho povrchu. Kromě toho však každý předmět sám září do okolí. Toto záření při normálních teplotách nevnímáme a nazýváme je infračervené záření. Nezávisí na barvě předmětu, ale na jeho teplotě. Při dostatečně vysoké teplotě neviditelné infračervené záření přechází ve viditelné červené, pak žluté, zelené, modré a fialové, které dohromady vytvářejí bílý žár. Pozorovaná barva je vždy směsí těchto základních barev. Absolutně černé těleso je takové těleso, které září do okolí a neodráží žádné dopadající záření. Takovým tělesem je například Slunce. Záření vyzařované absolutně černým tělesem závisí pouze na jeho teplotě.

Byly odvozeny dva zákony, předpovídající jak má rovnovážné záření absolutně černého tělesa záviset na jeho teplotě. Pro záření dlouhých vlnových délek platí zákon Rayleighův - Jeansův, který však je v rozporu s měřením při krátkých vlnových délkách. Naopak Wienův zákon platí pouze pro krátké vlnové délky, avšak nesouhlasí při dlouhých. Oba zákony byly vyjádřeny matematickými vztahy, které udávaly zcela rozdílné závislosti vyzařovaného spektra na teplotě. V roce 1900 se **Maxu Planckovi** (1858 - 1947) podařilo zahrnout oba zákony do jediného vztahu, který se dnes nazývá *Planckův zákon*.

Max Planck vyjádřil závislost monochromatického jasu $B_\nu(T)$ absolutně černého tělesa vztahem

$$B_\nu(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \quad (1)$$

kde ν je frekvence monochromatického záření, c je rychlost světla ve vakuu, h je Planckova konstanta, k je Boltzmannova konstanta a T je termodynamická teplota. [2] Celkový jas $B(T)$ je pak roven

$$B(T) = \int_0^{+\infty} B_\nu(T) d\nu \quad (2)$$

Do té doby se považovalo za samozřejmé, že výměna energie s okolím může probíhat po libovolně malých množstvích. **Max Planck** však rozborem výše uvedených vztahů (1), (2) zjistil, že je nutné se této myšlenky vzdát, protože jejich použitím přes celé spojité spektrum záření od nejkratších po nejdélsí vlnové délky vycházelo, že absolutně černé těleso vždy vyzařuje nekonečně mnoho energie. Proto učinil neobvyklý předpoklad, že energie záření emitovaná a absorbovaná absolutně černým tělesem není spojitá, ale že záření se šíří pouze po *kvantech*. Planck dále zjistil, že velikost energie kvanta záření je úměrná

$$E = h\nu \quad (3)$$

kde ν je frekvence záření a h je Planckova konstanta. Hodnotu konstanty h určil z experimentálně získaných dat. Tato konstanta neměla žádnou souvislost s klasickou fyzikou.

Evropská fyzikální společnost (*the European Physical Society*), která byla inspirována rokem 2000, navrhla, aby rok 2005 byl prohlášen Světovým rokem fyziky. Tuto myšlenku podpořily Mezinárodní unie čisté a aplikované fyziky (*the International Union of Pure and Applied Physics*), Organizace Spojených národů pro vzdělání, kulturu a vědu UNESCO, kongres Spojených států amerických a konečně Valné shromáždění Organizace spojených národů, které oficiálně vyhlásilo rok 2005 za Světový rok fyziky.

1 Proč rok 2005

V roce 2005 uplynulo 100 let od průkopnického úspěchu **Alberta Einsteina** v moderní fyzice. Jeho speciální teorie relativity hluboce ovlivnila fyziku 20. století. Právem je rok 1905 označován za Einsteinův "*Annus Mirabilis*" - význačný rok.

V roce 1905 **Albert Einstein** publikoval krátce po sobě pět klíčových článků, které od základů změnily fyzikální obraz světa. V prvním článku Einstein tvrdil, že světlo se chová jako proud částic s diskretními energiemi, tedy že má kvantovou povahu. Další dva články nabídly experimentální test teorie tepla a důkaz existence atomů jako základu struktury hmoty. Čtvrtý článek řešil velkou záhadu, souvislost mezi teorií elektromagnetického pole a běžným pohybem. V článku byl zformulován "princip relativity". Pátý článek ukázal, že hmota a energie jsou dvě stránky stejné podstaty, hmoty-energie. Tyto články představovaly skutečnou revoluci ve fyzice, změnily historii lidstva a vývoj naší civilizace.

2 Kvantová myšlenka

Planckův zásadní předpoklad kvantování energie, který plyne ze vztahu (3), byl považován za matematický trik a nebyl obecně oceněn do doby, než **Albert Einstein** použil podobnou myšlenku pro fotoelektrický jev a tvrdil, že kvantování je fundamentální vlastností elektromagnetického záření. 17. března 1905 v předním německém fyzikálním časopise *Annalen der Physik* **Albert Einstein** publikoval článek "*O heuristickém hledisku týkajícím se vzniku a transformace světla*", v němž použil Planckovu hypotézu kvantování energie na vysvětlení fotoelektrického jevu. Podal tak kvantitativní teorii tohoto záhadného jevu.

Počátkem 18. století **Isaac Newton**, který prováděl důležité experimenty se světlem, navrhol, že světlo se skládá z malých částic, korpuskulí. O asi sto let později však **Thomas Young** svým známým experimentem s dvojštěrbínou dokázal, že světlo má vlnovou podstatu. Vlnovou podstatu světla podpořil v roce 1862 **James Clerk Maxwell** hypotézou, že světlo se přenáší prostřednictvím oscilujících elektrických a magnetických polí elektromagnetických vln. Četné experimenty interference, difrakce a rozptylu světla vlnovou podstatu světla potvrdily. **Heinrich Hertz** potvrdil vlnovou podstatu světla experimentálně v roce 1887, osm let po Maxwellově smrti. Proto musíme ocenit Einsteinovu odvalu, když v roce 1905 začal vlnovou teorii světla zpochybňovat. Einstein tvrdil, že světlo při interakci s hmotou se nechová jako vlny, ale jako malé částice, které byly později nazvány fotony.

Fotoelektrický jev byl vědeckou záhadou od roku 1887, kdy jej objevil **Heinrich Hertz**. **Heinrich Hertz** prováděl experimenty, které měly dokázat existenci elektromagnetických vln. Náhodně však zjistil, že světlo dopadající na určitý kovový povrch z tohoto povrchu uvolňuje elektrony a v kovu vzniká elektrický proud. Podrobný výzkum tohoto jevu koncem 19. století ukázal, že fotoelektrický jev se vyskytuje u různých materiálů, avšak pouze tehdy, pokud vlnová délka λ dopadajícího záření je dostatečně krátká. Fialové světlo a ultrafialové záření, které dopadá na povrch kovu, je schopno z něj uvolňovat elektrony. Světlo s delšími vlnovými délkami bez ohledu na jeho intenzitu

však žádné elektrony neuvolňuje. Fotoelektrický jev vzniká jen u světla s vlnovou délkou λ kratší než určitá mez, která souvisí s materiálem. Uvolňování elektronů závisí pouze na vlnové délce λ (frekvenci ν) světla a nikoliv na jeho intenzitě. Skutečnost, že velmi intenzivní světlo delších vlnových délek žádný fotoelektrický jev nevyvolává, se stala jednou z velkých vědeckých záhad.

Albert Einstein vysvětlil, že elektrony v kovu jsou uvolňovány "částicemi světla" s dostatečnou energií, která je přímo úměrná frekvenci ν (vlnové délce λ) světla. Existuje určité minimální množství energie závislé na materiálu, které je potřebné pro uvolnění elektronu z povrchu kovu nebo jiné pevné látky. Pokud je energie fotonu vyšší než tato minimální energie, pak dojde k uvolnění elektronu z povrchu kovu. Einstein předpokládal, že foton s energií danou rovnicí (3) předá elektronu celé kvantum své energie. Část této energie se spotřebuje na uvolnění elektronu z kovu a zbytek se přemění na kinetickou energii elektronu. Platí tedy Einsteinova fotoelektrická rovnice

$$E_{k(max)} = h\nu - W \quad (4)$$

Veličina W představuje minimální energii, která je potřebná pro vznik fotoelektrického jevu. $E_{k(max)}$ je maximální kinetická energie emitovaného elektronu, h je Planckova konstanta a ν je frekvence fotonu.

Einsteinova fotoelektrická rovnice představovala zásadní přelom, protože do té doby nikdo neočekával, že Planckova konstanta h ze vztahu (1) pro záření dokonale černého tělesa může mít nějaké další využití. Experimentální ověření Einsteinovy teorie bylo obtížné. Příslušné experimenty provedl **Robert Millikan**, který své první výsledky oznámil v roce 1914 a ještě přesnější výsledky pak v roce 1916. Experimenty prokázaly, že Einsteinova fotoelektrická rovnice je správná a měření Planckovy konstanty bylo v souladu s hodnotou, již změřil **Max Planck**. V roce 1923 **Robert Millikan** obdržel Nobelovu cenu za svoji práci o elementárním elektrickém náboji a za fotoelektrický jev.

Kvantovou strukturu elektromagnetického záření objevil v podstatě již **Max Planck**. Planck však tímto způsobem neuvažoval a svůj předpoklad považoval spíše za matematický trik pro získání správného výsledku. Význam svého matematického triku považoval za další záhadu. Planckův vztah (3) přetrvával několik let. Avšak protože se neopíral o žádný fyzikální základ, nikdo ho nemohl brát vážně. **Albert Einstein** však učinil další krok, když použil Planckovu hypotézu zcela novým způsobem. Světlo se nechová jako spojité vlny, ale jako jednotlivé částice, fotony, jejichž energie je úměrná frekvenci světla.

3 Existence atomů

11. května 1905 v německém fyzikálním časopise *Annalen der Physik* **Albert Einstein** publikoval článek "O pohybu částic rozptýlených ve stacionární kapalině, jak požaduje molekulárně kinetická teorie tepla". Tento článek se zabýval Brownovým pohybem, pojmenovaném po britském botanikovi **Robertu Brownovi**, který tento pohyb objevil roku 1827. Když Brown pod mikroskopem pozoroval drobná pylová zrnka v kapalině, povšiml si, že se tato zrnka neustále náhodně pohybují, přestože kapalina samotná byla v klidu. Brownův pohyb snadno vysvětlila atomová teorie, podle níž hmota je složena z atomů a atomy jsou v neustálém pohybu. Brownův pohyb pylových zrnků byl způsoben pohybem molekul vody. **Albert Einstein** použil statistický postup a studoval Brownův pohyb z teoretického hlediska. Odvodil předpovědi pro posunutí mikroskopických částic rozptýlených v kapalině. Pokud jsou takové částice rozptýleny v kapalině, pak nepravidelné srážky neviditelných atomů kapaliny způsobují náhodný pohyb těchto částic. V dalších dvou článcích z roku 1906 **Albert Einstein** rozšířil svoji analýzu Brownova pohybu na rotační pohyb rozptýlených částic v kapalině a z dostupných experimentálních měření odhadl přibližnou velikost a hmotnost

molekul. Průměr typického atomu Einstein odhadl na 10^{-10} metru. Toto odvození bylo po řadu let nejcitovanější prací. Einstein nejen dokázal existenci molekul a atomů, ale také předpověděl jejich velikost. Francouzský vědec **Jean Baptiste Perrin** provedl řadu experimentů, jimiž Einsteinovy předpovědi o Brownově pohybu potvrdil. Za svoji práci byl v roce 1926 oceněn Nobelovou cenou.

4 Speciální teorie relativity

30. června 1905 **Albert Einstein** publikoval svůj první článek o speciální teorii relativity "*K elektrodynamice pohybujících se těles*". Tento článek znamenal skutečnou revoluci v moderní fyzice. Speciální teorie relativity se zabývá vztahy mezi jevy a fyzikálními veličinami v různých inerciálních vztažných soustavách. Inerciální vztažné soustavy se navzájem pohybují rovnoměrně přímočarým pohybem bez zrychlení.

Speciální teorie relativity je odvozena ze dvou postulátů, které Einstein navrhl. První postulát vychází z estetického hlediska, z přírodní filozofie a také z experimentální rovnocennosti všech inerciálních vztažných soustav. Tento postulát tvrdí:

- Všechny fundamentální zákony fyziky musí být stejné ve všech inerciálních vztažných soustavách.

Druhý postulát vychází ze všech dřívějších a současných měření rychlosti světla a také z předpovědi rychlosti světla Maxwellovou teorií elektromagnetického pole. Tento postulát tvrdí:

- Rychlost světla ve vakuu má stejnou numerickou hodnotu c v libovolné inerciální vztažné soustavě nezávisle na pohybu zdroje světla a pozorovatele.

Tento druhý postulát je v rozporu s naší intuitivní představou o skládání rychlostí. Tvrdí, že rychlost světla ve vakuu je stejná bez ohledu na rychlosti pozorovatele nebo zdroje. Proto pozorovatel, který se pohybuje směrem ke zdroji, změří stejnou rychlost světla jako pozorovatel, který se pohybuje směrem od tohoto zdroje. To je však v rozporu s naší běžnou zkušeností, kdy se rychlosti dvou pohybujících objektů sčítají nebo odčítají.

Relativita v klasické Newtonově fyzice byla založena na určitých nedokazatelných předpokladech, které vycházely z naší běžné zkušenosti. Newtonova fyzika předpokládala, že délka objektů je ve všech vztažných soustavách stejná, a že čas plyne ve všech vztažných soustavách stejně. Prostor a časové intervaly jsou považovány za absolutní a jejich měření nijak nezávisí na změně vztažné soustavy. Einsteinova speciální teorie relativity toto chápání prostoru a času od základů změnila. Nelze rozumně hovořit o nějakém bodu v prostoru bez udání času. Všechny fyzikální jevy probíhají v prostorčase. Pro tělesa pohybující se rychlostí blízkou rychlosti světla čas plyne pomaleji, délka předmětů se ve směru pohybu zkracuje a hmotnost je spojena s energií.

Na základě těchto postulátů Einstein odvodil transformace souřadnic, při nichž Maxwellovy rovnice elektromagnetického pole jsou invariantní ve všech inerciálních vztažných soustavách:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (5)$$

Jestliže položíme

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

pak lze tuto **Lorentzovu transformaci** zapsat v maticovém tvaru:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta & 0 & 0 & \beta \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\beta v/c & 0 & 0 & \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix} \quad (6)$$

Výše uvedenou transformaci jako první navrhl v nepatrně jiném tvaru **Hendrik Lorentz** v roce 1904, když se snažil vysvětlit negativní výsledek Michelsonova-Morleyova experimentu. Na rozdíl od Lorentze Einstein použil Lorentzovu transformaci pro vysvětlení konstantní rychlosti světla - invariance, která porušuje Galileovy transformace souřadnic. Podle Einsteina jsou zákony fyziky invariantní vzhledem k Lorentzově transformaci mezi inerciálními vztažnými soustavami.

Jedním z důležitých důsledků speciální teorie relativity bylo, že čas přestal být absolutní fyzikální veličinou. Nikdo nepochybuje, že čas plyne jedním směrem a nikdy se nevrací zpět. Avšak časový interval mezi dvěma jevy, které se vyskytnou ve stejné vztažné soustavě, závisí na vztažné soustavě pozorovatele. Časový interval $\Delta\tau_0$ měřený mezi dvěma jevy v určité vztažné soustavě je vždy kratší než časový interval $\Delta\tau$ mezi těmito jevy měřený v jiné vztažné soustavě, v níž se tyto jevy vyskytly v jiném místě. Tento obecný výsledek speciální teorie relativity se označuje jako dilatace času. Vztah mezi časovými intervaly je roven

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (7)$$

Δt_0 je časový interval ve vztažné soustavě, v níž jsou hodiny v klidu. Δt je časový interval ve vztažné soustavě, která se pohybuje vůči klidové vztažné soustavě rychlostí v . Pohybující se hodiny tedy měří čas pomaleji než stejné hodiny v klidu. Dilataci času je nutné například uvažovat v elektronických zařízeních satelitů Globálního pozičního systému (*the Global Positioning System*).

Nejen časové intervaly jsou v různých vztažných soustavách různé. Také prostorové intervaly se podle speciální teorie relativity mění. Délka tyče L_0 v klidu se zkrátí na délku L , pokud se tyč pohybuje vůči pozorovateli rychlostí v :

$$L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (8)$$

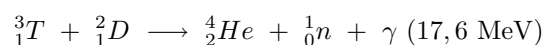
Uvedenou kontrakci délek jako první navrhl **George FitzGerald** a matematicky ji vyjádřil **Hendrik Lorentz** ještě před tím, než Einstein publikoval svůj článek. Zatímco tito fyzikové se domnívali, že hmota se ve směru pohybu zkracuje, aby vysvětlili negativní výsledek Michelsonova-Morleyova pokusu, **Albert Einstein** tvrdil, že se zkracuje samotný prostor. Uvedený fyzikální jev se přesto dnes nazývá *Lorentzova-Fitzgeraldova kontrakce*. Ke zkrácení délky předmětu dochází pouze ve směru relativního pohybu.

Albert Einstein však nespojil pouze prostor a čas, ale také hmotnost a energii. Každá hmota bez ohledu na to, zda se pohybuje nebo je v pohybu, a bez ohledu na to, zda interaguje s jinou hmotou, nese v sobě určitou energii. Tato energie se označuje jako klidová energie. Její velikost je rovna

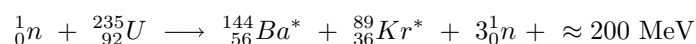
$$E = mc^2 \quad (9)$$

Uvedený známý vztah **Albert Einstein** publikoval v roce 1905 ve svém článku "*Závisí hýbnost tělesa na jeho obsahu energie?*". Einstein tvrdil, že tento vztah má také praktický význam, protože hmotu lze přeměnit na jiné formy energie a naopak. Tato hypotéza byla později potvrzena experimentálně. K přeměně hmoty na energii a naopak dochází v jaderné fyzice a ve fyzice vysokých

energií a elementárních částic. Zářivá energie Slunce pochází právě z přeměny hmoty. Gravitace stlačuje jádro Slunce a proto v něm probíhají termonukleární reakce, jako např.



Součet hmotností jádra atomu hélia He a neutronu n je asi o tisícínu menší než součet hmotností deuteria D a tritia T . Sluneční záření ve formě fotonů γ různých vlnových délek (energií) je tedy důsledkem přeměny malého množství hmoty v zářivou energii. Hmotnost Slunce se vyzařováním světla pomalu zmenšuje. Podobně energie jaderných elektráren je důsledkem ztráty klidové hmotnosti jader atomů uranu během procesu jaderného štěpení na lehčí atomová jádra



Hmotnost jádra atomu uranu U je významně vyšší než hmotnost lehčích jader Ba , Kr a neutronů. Vzniklá jádra jsou v excitovaném stavu a zároveň uvolňují tři nové neutrony.

5 Závěrem

Albert Einstein v roce 1905 prožil svůj "*Annus Mirabilis*". Ukázal, že atomy jsou skutečné a nikoliv pouze spornou hypotézou, položil základy kvantové mechaniky a vypracoval svoji speciální teorii relativity. V roce 1921 byl oceněn "za své služby teoretické fyzice a vysvětlení fotoelektrického jevu" Nobelovu cenu. V roce 1915 vypracoval obecnou teorii relativity jako teorii gravitační interakce. Tato teorie se stala základem moderní kosmologie. V roce 1955 **Albert Einstein** zemřel.