

Jiří Podolský

$E = mc^2$ aneb dovětek o Einsteinově dovětku

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 50 (2005), No. 2, 119--126

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141260>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2005

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>

L i t e r a t u r a

V textu jsem se z Einsteinova života zaměřil na období a okolnosti, související s jeho prvním „zázračným rokem“. Záměrně jsem však nechal stranou pozdější rozvinutí teorie relativity do obecné podoby zahrnující gravitaci; k její oslavě bude lepší příležitost v r. 2015 (a k připomenutí její pražské inspirace v r. 2011). Využíval jsem především následujících publikací, z nichž hlavně kniha Alberta Fölsinga je velmi ucelenou, vyváženou a pečlivě zpracovanou biografií. Překlady citátů jsou uvedeny v uvozovkách, ty delší navíc kurzívou. Pokud možno jsem je korigoval, doplňoval nebo přímo překládal z originální verze, publikované v souboru *The Collected Papers of Albert Einstein*.

- [1] FÖLSING, A.: *Albert Einstein*. Volvox Globator, Praha 2001.
- [2] LEVENSON, T.: *Einstein v Berlíně*. Práh, Praha 2004.
- [3] PAIS, A.: *Subtle is the Lord*. Oxford University Press, Oxford & New York 1982.
- [4] *The Collected Papers of Albert Einstein*, postupně vydávaný soubor všech prací a zachované korespondence A. Einsteina, souběžně v originální německé verzi a v anglickém překladu, 1. díl vyšel v r. 1987 (Princeton University Press, New Jersey).

$E = mc^2$ aneb dovětek o Einsteinově dovětku

Jiří Podolský, Praha

Jak bylo popsáno v předchozím obsáhlém příspěvku kolegy O. Semeráka, v květnu a červnu roku 1905 Albert Einstein sepsal svůj fundamentální článek [1] nazvaný *O elektrodynamice pohybujících se těles* a dne 30.6.1905 ho zaslal k publikaci do časopisu *Annalen der Physik*, kde vyšel 26. září. Zřetelně v něm artikuloval *speciální teorii relativity*, ucelený teoreticko-fyzikální koncept, který překonal klasické newtonovské představy o povaze prostoru, času a dějů v nich probíhajících. Byly tím položeny nové a pevné základy fyzikálního bádání. Význam, obsah a důsledky tohoto revolučního kroku učiněného právě před sto lety byly popsány v bezpočtu knih, učebnic i odborných článků (z dostupné literatury uvedme například [2]–[5]).

Je zajímavé zdůraznit, že Einsteinův zřejmě nejznámější vztah $E = mc^2$ však v práci [1] *nenajdeme*. Teprve během léta roku 1905 si Einstein uvědomil tento další důsledek své právě dokončené teorie. Jako dovětek své zásadní práce [1] proto sepsal třístránkový článek [6] s názvem *Závisí setrvačnost tělesa na jeho energetickém obsahu?* Byl odeslán 27. září rovněž do časopisu *Annalen der Physik*, kde vyšel 21. listopadu. Rozborem vztahu mezi energií hmotného objektu a vyzářené elektromagnetické

Doc. RNDr. JIŘÍ PODOLSKÝ, CSc. (1963), Ústav teoretické fyziky, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: Jiri.Podolsky@mff.cuni.cz

vlny odvodil ekvivalenci energie se setrvačnou hmotností. Slavný vzorec v článku ovšem v dnešní podobě explicitně uveden není, nový objev je popsán víceméně jen slovy v závěrečných odstavcích:

Jestliže těleso vydá energii L ve formě záření, jeho hmotnost se zmenší o L/V^2 Hmotnost tělesa je mírou jeho energetického obsahu; jestliže se jeho energie změní o L , pak se hmotnost změní ve stejném smyslu o $L/9 \cdot 10^{20}$, když energii měříme v ergch a hmotnost v gramech.

Předposlední odstavec se přitom ještě prorocky zmiňuje o radioaktivitě jako o možném poli uplatnění této ekvivalence hmoty a energie:

Snad bude možné ověřit tuto teorii užitím těles, jejichž energetický obsah se ve velkém rozsahu mění (kupříkladu solí radia).

V následných článcích [7]–[9] z let 1906 až 1907 Einstein své úvahy a výpočty dále upřesnil a zprůhlednil. V přehledové práci [9] *O principu relativity a důsledcích z něj plynoucích* v § 11 již nacházíme i kvantitativní rozbor radioaktivního rozpadu atomu:

Jestliže M je atomová hmotnost rozpadajícího se atomu a m_1, m_2, \dots jsou atomové hmotnosti konečných produktů radioaktivního rozpadu, pak musí být

$$M - \sum m_i = \frac{E}{c^2},$$

kde E označuje energii produkovanou během rozpadu ... V případě radia platí ... přibližně

$$\frac{M - \sum m_i}{M} = 0,00012.$$

Byl-li poločas rozpadu radia stanoven s dostatečnou přesností, mohli bychom tudíž ověřit náš vztah za předpokladu změření příslušných atomových hmotností na pět platných cifer. To je samozřejmě nemožné. Je však možné, že budou nalezeny radioaktivní procesy, při nichž bude podstatně větší procento hmotnosti původního atomu přeměněno na energii různých druhů záření, než je tomu v případě radia.

Rovnice $E = mc^2$ tak byla zformulována ve své dnešní podobě. Einsteinovy úvahy a výpočty navíc předznamenal cestu do nitra atomu, korunovanou objevem atomového jádra a uvolněním energie v něm vázané. Uvážíme-li, že první nahlédnutí do subatomárního světa lidstvo provedlo teprve na samém sklonku 19. století (objev přirozené radioaktivity: Becquerel 1896, Curie a Skłodowska 1898; objev elektronu: Thomson 1898), jeví se Einsteinova jasnozřivost ještě podivuhodnější.

Einsteinem nalezený vztah má nadto velkou výhodu: přes svůj dalekosáhlý význam, který uplatňuje jak zde na Zemi, tak i na nebi, je jednoduchý a srozumitelný. Je to prostá algebraická rovnice, ve které nejsložitější matematickou operací je násobení. Právě tato unikátní kombinace hlubokého významu s jednoduchostí je příčinou, proč je $E = mc^2$ asi nejznámější fyzikální rovnicí všech dob.

Každému, kdo by se chtěl dozvědět více o jejím zrození i důsledcích, doporučujeme knihu [10]. David Bodanis v ní čtivě podává životopis rovnice. Začíná historií „předků“, jednotlivých symbolů v rovnici vystupujících. Zmiňuje genezi pojmu energie E a cestu

k formulaci zákona zachování energie, který je spojen se jmény Mayer, Joule, Helmholtz, Faraday či Maxwell. Na druhé straně rovnice stojí hmotnost m , materiální obsah vesmíru, pro který byl zásluhou Newtona, Lavoisiera a dalších také nalezen zákon zachování. Symbol c označuje rychlost světla (je odvozen z latinského „celeritas“, značícího „rychlost“) a i v tomto případě je historie jejího hledání roubena jmény nejslavnějšími: Galileo, Römer, Maxwell, Einstein. Svůj pozoruhodný osud má taktéž druhá mocnina rychlosti v rovnici vystupující, neboť bezprostředně souvisí se sporem dvou velikánů, Newtona a Leibnize. Ti se přeli o to, zdali je mírou pohybu veličina mv nebo mv^2 . Byly to až experimenty 's Gravesanda a důvtip madame du Châtelet, které daly do souvislosti energii a kvadrát rychlosti tělesa. A konečně i typografický symbol „=“, vyjadřující matematickou rovnost, má své osobité dějiny.

Koncem 19. století tak vedle sebe existovaly dva významné fyzikální pojmy, energie a hmotnost. Přestože obě veličiny mohly v přírodě nabývat mnoha různých konkrétních podob (energie může být kinetická, potenciální, tepelná, rozprostřená v elektromagnetickém poli atd., hmota se také může přeměňovat řadou mechanických či chemických procesů do různých forem látky), vždy se zdálo jejich celkové množství zachovávat, a to odděleně. Byly zformulovány dva na sobě nezávislé zákony: zachování energie a zachování hmoty.

Do této situace přichází v roce 1905 Albert Einstein se svým objevem, totiž že oba klíčové přírodní zákony ve skutečnosti *odděleně* neplatí, neboť existuje propojení mezi „světem hmoty“ a „světem energií“. Množství hmoty, které se ztratí, je přitom vždy vyváženo množstvím energie, která se získá, a naopak. Převodní koeficient mezi m a E je ovšem nesmírně velký, kvadrát rychlosti světla, neboli $c^2 = 9 \times 10^{16} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$. Znamená to, že 1 gram kterékoliv látky je ekvivalentní zhruba 100 miliardám kJ energie, což pro srovnání je množství dodané do sítě průměrnou elektrárnou za několik dní a které by například stačilo k uvaření miliardy šálků čaje. Přejde-li setrvačná hmotnost po „mostovce“ v rovnici $E = mc^2$ zprava doleva, dojde k jejímu nesmírnému znásobení faktorem c^2 . Ale také naopak: energie může přejít zleva doprava a přeměnit se na hmotnost. Při energiích, které kolem sebe v běžném životě pozorujeme, je ovšem odpovídající změna hmotnosti těles neměřitelně malá. Navíc v obvyklých procesech (například chemických), kde hraje roli čistě elektromagnetická interakce, se klidová hmotnost tělesa prakticky nemění. Aby se otevřela i tato Pandořina skříňka energie dřímající v každé hmotě, je zapotřebí realizovat procesy, v nichž se uplatňují jaderné síly mezi elementárními částicemi, což je ovšem technicky obtížné. To je důvod, proč pozoruhodná ekvivalence E a mc^2 zůstala lidem po celá dlouhá staletí utajena.

Uvolnění jaderné energie

K uvolnění nukleární energie bylo zapotřebí proniknout do hlubin atomů, objevit jejich jádra, probádat je a využít jejich specifických vlastností. Historie této bezprecedentní změny v poznání samé podstaty světa je obecně známa [11]–[13]. Připomeňme zde jen některá fakta.

Zásadní byl objev *štěpení uranu* koncem roku 1938 (Meitnerová, Hahn, Strassmann a Frisch). Na jaře 1939 byla objevena možnost řetězové reakce (von Halban, Kowarski, Joliot a nezávisle Fermi a Szilard) a skutečnost, že ji udržuje jen izotop ^{235}U (Bohr a Wheeler). Jejich souhrnný článek o mechanismu jaderného štěpení uranu byl publikován 1. září 1939, v den vypuknutí 2. světové války. Epochální objev byl tak bohužel učiněn v nejhorší myslitelný okamžik. Další sled událostí byl proto hnán vpřed neúprosnou logikou světových dějin (podrobné informace lze nalézt například v [14]–[19]). Nacistické Německo mělo zpočátku v jaderném výzkumu náskok. Již v dubnu 1939 se konala tajná konference, která vyústila v zahájení systematického výzkumného programu, v jehož čele stanul Heisenberg. Ten v únoru 1940 předložil ucelenou zprávu o možné výrobě jaderné bomby. Soustředil kolem sebe skupinu předních vědců (von Laue, Hahn, Strassmann, Geiger, von Weizsäcker a další), kteří měli zájem vynikajících inženýrů a techniků, k těžké a nebezpečné práci s radioaktivním materiálem pak vězně z koncentračních táborů. Německo mělo i výhodu materiální: tuny uranu ze zabraného československého Jáchymova a z Belgického Konga i deuteria produkovaného v norském Vemorku. Pokusy s reaktorem probíhaly souběžně v Lipsku a Berlíně. Naštěstí pro svět se ale Němcům do konce války nepodařilo docílit udržení řetězové reakce.

Na straně Spojenců hrála zprvu vůdčí roli Anglie. Na jaře 1940 vypracovali Frisch a Peierls tajné „Memorandum o vlastnostech radioaktivní superbomby“. Šlo o první důkladnou vědeckou analýzu problému včetně teoretických výpočtů kritické hmotnosti nutné pro spuštění řetězové reakce, technického návrhu separace ^{235}U , odhadu mohutnosti exploze i popisu radioaktivních účinků bomby. Práce zapůsobila jako katalyzátor: v červenci 1941 byla ustavena britská komise MAUD s cílem koordinovat konstrukci uranové a plutoniové bomby. V důsledku válečných událostí byl společný britsko-francouzský jaderný výzkum přesunut do Kanady (Chalk River u Ottawy), kde byl koordinován s americkým projektem.

Již v srpnu 1939 adresoval Albert Einstein prezidentu Rooseveltovi známý dopis (koncipovaný Szilardem), ve kterém upozornil americkou administrativu na nové závažné fyzikální objevy i na probíhající nacistický jaderný výzkum. Odezva na dopis však byla poměrně rozpačitá. Až po japonském útoku na Pearl Harbor dostal americký projekt atomové bomby jasnou strukturu, cíl a podporu. V čele obrovského administrativně-vojenského projektu s krycím názvem „Projekt Manhattan“ stál generál Groves, vědeckým šéfem byl jmenován mladý teoretický fyzik Jacob Robert Oppenheimer. První úspěch se dostavil 2. prosince 1942: Enrico Fermi se svými spolupracovníky uskutečnili *první řízenou řetězovou reakci*. Stalo se tak pod tribunou stadionu Chicagské univerzity ve slavném milíři-reaktoru CP-1 tvořeném přírodním uranem, grafitovým moderátorem a kadmiovými řídicími tyčemi.

Vlastní návrh a konstrukce bomb probíhaly (od dubna 1943) v přísně tajném výzkumném centru v Los Alamos (stát Nové Mexiko). Zde se nacházelo také teoretické oddělení, které vedl uprchlík před nacisty Hans Bethe. V jeho skupině se sešel výkvět fyziky 20. století, včetně řady stávajících či budoucích nositelů Nobelovy ceny: Bohr, Feynman, Fermi, Weisskopf, Chadwick, Teller, Serber, Peierls, Frisch, von Neumann a další. V Los Alamos paralelně probíhala konstrukce dvou odlišných typů bomb,

uranové a plutoniové. Každá z nich měla své specifické problémy, které bylo nutno překonat.

Hlavním problémem první bomby bylo získat dostatečné množství štěpitelného uranu, tedy separovat alespoň 25 kg izotopu ^{235}U . Za tímto účelem vyrostly v Oak Ridge (stát Tennessee) obří továrny využívající různé metody separace. Celý proces byl přesto zoufale neúčinný. Koncem války bylo k dispozici materiálu jen na jednu až dvě bomby. Samotná konstrukce bomby byla ale v principu snadná, neboť stačilo přiblížit k sobě dvě podkritická množství uranu, aby se řetězová reakce sama spustila.

Materiál pro plutoniovou bombu byl získáván ve třech reaktorech (vybudovaných v Hanfordu, stát Washington) transmutací uranu ^{238}U záchytem neutronů. Od ledna 1945 byla produkce plutonia hojná. Obrovské problémy ale působila vlastní konstrukce bomby, neboť bylo těžké udržet řetězovou reakci po dostatečně dlouhou dobu. Bomba se nakonec skládala z duté plutoniové koule, která byla donucena implodovat dokonale synchronizovaným výbuchem náloží klasické trhaviny umístěné po jejím obvodu. Vzhledem ke konstrukčním nesnázím padlo rozhodnutí učinit nejprve pokusný výbuch. Byl úspěšný: dne 16. července 1945 v 5.29 na odlehlém místě zvaném Trinity Site poblíž Alamogordo v Novém Mexiku explodovalo první lidmi vyrobené jaderné zařízení v historii. Výbuch byl mohutný, ekvivalentní explozi 18 600 tun TNT. Oslivý záblesk, který bylo možné spatřit až v El Pasu či Santa Fe vzdálených více než 300 km, zvěstoval, že lidstvo vstoupilo do atomového věku. Přes odpor řady vědců padlo politické rozhodnutí použít obě vyvinuté jaderné bomby proti Japonsku. A tak 6. srpna 1945 svrhl bombardér B-29 uranovou bombu na Hirošimu, o tři dny později 9. srpna explodovala plutoniová bomba nad Nagasaki.

Energie hvězd a vznik prvků

Souběžně s výzkumem štěpných jaderných reakcí koncem 30. let a s následným válečným i poválečným úsilím o konstrukci jaderných bomb probíhal ovšem ještě jiný vědecký výzkum. Zčásti se na něm podíleli stejní aktéři, avšak tentokrát byla předmětem jejich zájmu záležitost mírumilovnější a v obecném smyslu dokonce zajímavější. Šlo o nalezení správných odpovědí na tak zásadní astronomické otázky jako: Proč září hvězdy? Co je zdrojem jejich energie? Jak se vyvíjejí a z čeho se skládají? Jak vůbec vznikly různé chemické prvky?

Koncem 19. století vyslovili Helmholtz, Kelvin a Jeans hypotézu, že zdrojem energie hvězdy je její gravitační kontrakce: zmenšuje se a příslušný úbytek potenciální energie se vyzařuje. Takový mechanismus by ale vystačil jen na pár milionů let existence hvězdy. Mezi roky 1916 až 1925 publikoval Arthur Stanley Eddington více než tucet článků o fyzikální povaze hvězd [20]. Předložil jasné argumenty, že jsou to velké koule plynu s centrálním zdrojem energie, která se přenáší na povrch zářením, čímž se udržuje rovnováha [21]. Již v roce 1919 Eddington navrhl, že hledaným zdrojem energie mohou být jaderné procesy, konkrétně *slučování vodíku na helium*. Z rozdílu hmotností čtyř vodíkových jader a jádra helia lze s pomocí Einsteinovy rovnice $\Delta E = \Delta m c^2$ snadno spočítat, že při takovém procesu se uvolní 28 MeV energie. To je

zcela úžasné množství, které (v přepočtu na jeden nukleon) několikanásobně přesahuje dokonce i energii vznikající při štěpení uranových jader. V Eddingtonových spisech lze nalézt větu: „Jestliže opravdu je uvolněná subatomová energie užívána ve hvězdách k udržování jejich žhnoucích niter, pak jsme zřejmě blíže naplnění našeho snu o využití této skryté síly pro dobro lidstva — anebo pro jeho sebevraždu.“

Eddington měl opravdu výtečnou intuici, ale k detailnímu pochopení jaderných procesů uvnitř hvězd bylo zapotřebí ještě ohromného množství fyzikálních pokusů, úvah a konkrétních výpočtů. Uvědomme si, že v té době dosud nebyla dobudována kvantová mechanika a že teprve v roce 1928 provedl George Gamow první výpočty pravděpodobnosti průniku α -částice do jádra. Kvantová teorie pole se rodila až ve třicátých a čtyřicátých letech. Bylo také nutno provést bezpočet experimentů, především změřit účinné průřezy nukleárních reakcí. Až v roce 1932 byl objeven neutron, pozitron, deuterium . . . Konkrétní pochopení procesů termonukleární syntézy jader helia ve hvězdách proto přinesla až 30. léta. Za toto poznání vděčíme dvěma dvojicím badatelů: první dvojici tvoří Robert Atkinson a Fritz Houtermans, druhou pak Hans Bethe a Carl Friedrich von Weizsäcker.

Atkinson s Houtermansem ještě jako studenti na univerzitě v Göttingenu učinili v roce 1929 první pokus o vypracování teorie uvolňování jaderné energie ve hvězdách. Aplikací Gamowovy teorie zjistili, že nejefektivnější jsou procesy s lehkými jádry, protože jejich elektrické odpuzování je menší. V roce 1931 pak Atkinson publikoval dva podrobné články, v nichž ukazoval, že jádra těžších prvků mohou vznikat z vodíku zachytem protonů. V roce 1936 poznal, že základní jadernou reakcí ve hvězdách je srážka dvou protonů, tj. proces, při němž z vodíku vzniká deuterium. Reakce tvoří první článek řetězu syntézy helia a dalších, těžších prvků. Tomuto procesu syntézy jednoho jádra He ze čtyř jader H se říká *proton-protonový řetězec* (viz např. [22]).

Pozoruhodné ovšem je, že to není jediný možný proces, jímž hvězdy syntetizují helium z vodíku! V roce 1938 Bethe a nezávisle na něm von Weizsäcker učinili významný objev tzv. *CNO cyklu*. Jde o netriviální řetězec reakcí, při kterém postupně v šesti krocích za teplot zhruba 20 mil. K probíhá syntéza helia z vodíku za přítomnosti jádra uhlíku ^{12}C jako katalyzátoru. Později pak Epstein (1950) a Salpeter (1952) ujasnili, že CNO cyklus je hlavním jaderným procesem ve všech hvězdách na hlavní posloupnosti hmotnějších než 1,7 Slunce, zatímco pp-řetězec probíhá v lehčích hvězdách.

Přes tyto významné objevy zůstávala ve 40. letech nadále otevřená otázka, kde a jak ve vesmíru vznikají prvky těžší než helium, mezi nimi uhlík, kyslík, křemík a ostatní prvky, na nichž závisí život na Zemi. Gamow propagoval ideu, že prvky vznikly termonukleárními reakcemi hned na počátku vesmíru. Rozpracoval myšlenku kosmologické nukleosyntézy, jež postupně probíhala v prvních třech minutách po velkém třesku. Teorie byla shrnuta v díle z roku 1948 od Alpher, Betheho a Gamowa. Dva roky nato ale Fermi s Turkevichem ukázali, že po velkém třesku ve skutečnosti vznikl jen vodík (cca 75 %) a helium (cca 25 %), trocha deuteria, lithia a jen nepatrně ostatních prvků. Důvodem je, že s rychlým rozpínáním vesmíru původně vysoké hustoty a teploty prudce poklesly a následné jaderné reakce proto ustaly.

Jestliže těžké prvky nestačily na počátku vesmíru vzniknout, musely se syntetizovat až později, a to jadernými reakcemi ve hvězdách. Klíčovou roli při tom hrají *červení*

obří, staré a velké hvězdy, ve kterých již byly v zásadě vyčerpány centrální zásoby vodíku vhodného k syntéze helia. Na svém povrchu mají červení obří teplotu nižší, než má Slunce, avšak v jejich jádře jsou teploty vyšší než 100 milionů K. Panují tam podmínky, v nichž může docházet k syntéze těžších jader. Helium, které bylo „popel“ předchozí reakce slučování vodíku, se nyní může stát novým palivem.

Problém představuje skutečnost, že neexistuje stabilní prvek s atomovou hmotností 5, takže těžší prvky nemohou vzniknout prostým zachytem protonu na heliu. Řešení našli až v 50. letech Ernst Opik a Edwin Salpeter: jádro uhlíku může být syntetizováno ze *tří* jader helia prostřednictvím nestabilního berylia. Kvalitativně popsali i vznik ještě těžších prvků dalšími zachyty heliového jádra, a to při stále vyšších teplotách v nitru červeného obra. Syntéza končí při centrálních teplotách 3,5 miliardy K u železa. To má ze všech jader téměř největší vazbovou energii, takže další syntéza je energeticky nevýhodná.

Celá síť jaderných reakcí probíhajících během čím dál rychlejšího vývoje rudého obra je dosti složitá, řada procesů se navíc odehrává paralelně v různých vrstvách obrovské hvězdy, kde panují odlišné teploty. Řetězec reakcí byl popsán a shrnut v rozsáhlé práci, kterou v roce 1957 publikovali Margaret a Geoffrey Burbidgeovi, William Fowler a Fred Hoyle. Nezávisle na nich popsal stelární nukleosyntézu v témž roce Alastair Cameron, který doplnil i poslední kamínek do mozaiky: ukázal, že prvky *těžší než železo* vznikají na samém konci života hvězd. V rázových vlnách při *explozi supernov* je dosaženo teplot až 200 miliard K, během nichž se syntetizují jádra i těch nejtěžších prvků. I když některé detaily vzniku těžkých prvků řeší jaderní fyzikové a astrofyzikové dodnes, celkový obraz nukleosyntézy prvků ve vesmíru byl tak koncem 50. let v zásadních rysech dokončen (více podrobností lze nalézt v [20]–[27]).

Závěrem

Vztah $E = mc^2$ se stal ikonou moderní přírodovědy. Symbolizuje hned několik zásadních revolucí, které fyzika ve 20. století prodělala. Je dítětem teorie relativity. Svě největší uplatnění ale našel v mikrosvětě, ovládaném kvantovými jevy. Sehrává klíčovou roli při interakcích elementárních částic, umožňuje dokonce jejich kreace a anihilace. Spoluurčuje vlastnosti atomových jader a jejich vzájemné přeměny. Díky tomu zprostředkovaně ovládá i vesmír těch největších měřítek, neboť právě termonukleární reakce jsou zdrojem téměř nevyčerpatelné energie hvězd. Jsou také odpovědné za vznik celé známé plejády chemických prvků, které v přírodě nacházíme. Lze proto bez nadsázky říci, že bez „blahodárného“ působení procesů, které rovnice $E = mc^2$ popisuje, by ve vesmíru neexistovaly žádné složitější struktury, a tedy ani my sami.

L i t e r a t u r a

- [1] EINSTEIN, A.: *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Annalen der Physik 17 (1905), 891–921.
- [2] FÖLSING, A.: *Albert Einstein*. Volvox Globator, Praha 2001.

- [3] EINSTEIN, A., INFELD, L.: *Fyzika jako dobrodružství poznání*. Aurora, Praha 2000.
- [4] DVOŘÁK, L.: *Obecná teorie relativity a moderní fyzikální obraz vesmíru*. Skripta SPN, Praha 1984.
- [5] MISNER, C., THORNE, K., WHEELER, J.: *Gravitation*. Freeman, New York 1973.
- [6] EINSTEIN, A.: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* Annalen der Physik 18 (1905), 639–641.
- [7] EINSTEIN, A.: *Das Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie*. Annalen der Physik 20 (1906), 627–633.
- [8] EINSTEIN, A.: *Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie*. Annalen der Physik 23 (1907), 371–384.
- [9] EINSTEIN, A.: *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*. In: Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4 (1907), 411–462.
- [10] BODANIS, D.: *$E = mc^2$: Životopis nejslavnější rovnice na světě*. Dokořán, Praha 2002.
- [11] MACKINTOSH, R., AL-KHALILI, J., JONSON, B., PEŇA, T.: *Jádro: Cesta do srdce hmoty*. Academia, Praha 2003.
- [12] MALÍŠEK, V.: *Co víte o dějinách fyziky?* Horizont, Praha 1986.
- [13] BÜHRKE, T.: *Převratné objevy fyziky: Od Galileiho k Lise Meitnerové*. Academia, Praha 1999.
- [14] DEWOLF SMYTH, H.: *Atomic Energy for Military Purposes: The Official Report on the Development of the Atomic Bomb under the Auspices of the United States Government, 1940–1945*. Princeton University Press, Princeton 1946.
- [15] JUNGK, R.: *Jasnější než tisíc sluncí*. Máj, Praha 1965.
- [16] GROUEFF, S.: *Manhattan Project: The Untold Story of the Making of the Atomic Bomb*. Collins, London 1967.
- [17] GOWING, M., ARNOLD, L.: *The Atomic Bomb*. Butterworths, London 1979.
- [18] SERBER, R.: *The Los Alamos Primer: The First Lectures on How To Build An Atomic Bomb*. University of California Press, Berkeley 1992.
- [19] HODDESON, L., HENRIKSEN, P., MEADE, R., WESTFALL, C.: *Critical Assembly: A Technical History of Los Alamos during the Oppenheimer Years, 1943–1945*. Cambridge University Press, Cambridge 1993.
- [20] *A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1975*. Edited by K. R. LANG and O. GINGERICH, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts 1979.
- [21] KLECZEK, J.: *Nitro hvězd*. Nakladatelství čs. akademie věd, Praha 1957.
- [22] KLECZEK, J.: *Vesmír kolem nás*. Albatros, Praha 1986.
- [23] KLECZEK, J.: *Velká encyklopedie vesmíru*. Academia, Praha 2002.
- [24] WEINBERG, S.: *První tři minuty*. Mladá fronta, Praha 1982.
- [25] PEEBLES, P.: *Principles of physical cosmology*. Princeton Univ. Press, Princeton 1993.
- [26] GREENWOOD, N. N., EARNSHAW, A.: *Chemie prvků*. Informatorium, Praha 1993.
- [27] CHOWN, M.: *The Magic Furnace: The Search for the Origins of Atoms*. Oxford University Press, Oxford 2001.