

$$E = mc^2$$

K. Veselský\*, D. Skoupil\*\*

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

\*k.veselsky@gmail.com, \*\*d.skoupil@seznam.cz

#### Abstrakt

Práce představuje objevování fyzikálních veličin energie, hmotnosti a rychlosti světla. Popisuje vznik rovnice  $E = mc^2$ , zabývá se dále jejími důsledky na další vývoj fyziky a také praktickými výsledky, jež z této rovnice mohou plynout.

## 1 Úvod

Rovnice  $E = mc^2$  je známa širokému okruhu lidské společnosti. Je jí přezdíváno jako tzv. „Maskot moderní složité vědy“, protože jen málokdo z lidí, kteří ji mají ve svém povědomí, chápe její význam. V naší práci se tedy pokoušíme sepsat „životopis“ této rovnice, uvést, co všechno vedlo k jejímu objevení, jak byla objevena a nakonec také vysvětlit její význam.

## 2 Před vznikem rovnice

V naší rovnici se vyskytují tři důležité fyzikální veličiny, a to energie  $E$ , hmotnost  $m$  a rychlost světla  $c$ . Než se začneme zabývat vznikem rovnice, bylo by dobré něco málo povědět i o objevování těchto veličin.

Energie byla původně brána jako skrytá síla působící pod povrchem vesmíru. Až v 19. století Michael Faraday objevil vztah mezi elektrickou energií a magnetismem, což následně vedlo k tomu, že všechny zdánlivě nesouvisející síly byly vzájemně propojovány, až došlo ke vzniku zákona zachování energie.

Veličina hmotnost byla dlouhou dobu chápána stejně nejasně jako energie. Nebylo jasné, jaký je vztah mezi hmotnými substancemi, vyskytujícími se všude kolem, a zda vůbec nějaký je. Důležitou osobností zde byl Antoine-Laurent Lavoisier – účetní, který se ve volných chvílích věnoval vědě. Konkrétně pozoroval kov, jak hoří či rezne a chtěl zjistit, jak se změní jeho hmotnost. Výsledkem jeho měření bylo, že hmotnost kovu se zvětšila – o hmotnost nepatrného množství kyslíku. V roce 1774 tak zformuloval zákon zachování hmoty.

S rychlostí světla to zprvu bylo stejně jako s předchozími dvěma veličinami. Dlouho dobu bylo její měření pokládáno za nemožné a rychlost světla pokládána za nekonečnou. Prvním, kdo rychlost světla zkoumal, byl Galileo Galilei, avšak výsledky jeho práce nepřinesly nic nového. Určení rychlosti světla se povedlo až díky pozorování měsíců Jupitera, konkrétně měsíce Io. Ten měl kolem své planety obíhat jednou za 42,5 hodiny, ale zdálo se toto nikdy přesně nedodrhuje – buď byl v předstihu nebo ve zpoždění. Tento fakt byl všemi interpretován jako problém v pohybu měsíce Io. Až Ole Römer zjistil, že tomu tak není a problém nastává u pohybu Země. Ta totiž mění svou vzdálenost od Jupitera, a tak například v době, kdy je Země Jupiteru blíže, bude dráha světla od Io k Zemi kratší a obraz Io, tak na Zem dorazí dříve. Ole Römer tak již mohl určit rychlost světla a tím i horní mez pohybů hmotných těles.

## 3 Vznik rovnice

Rovnice  $E = mc^2$  se byla publikována v roce 1905 v dodatku Speciální teorie relativity. Zprvu ovšem byla tato rovnice bez povšimnutí, zájem o ni rostl až postupem času. Svět se totiž v době, kdy byla rovnice zveřejněna nezajímal tolik o teoretickou fyziku, ale spíše o účelovou (výstavby železnic, hutnictví...), navíc Einsteinova práce nebyla podpořena žádnými experimentálními výsledky. Co bylo neslýchané, je také to že Einstein vydal práce bez odkazu na jiné předchozí práce.

Zajímavostí je, že již o rok dříve měl francouzský fyzik a matematik Henri Poincaré na téma „teorie relativity“ přednášku v St. Louis. Nebyl však schopen rozbít představu o toku času, a tak teorii dále nerozvíjel.

## 4 Experimentální důkazy

Jak již bylo poznamenáno, Einsteinova práce nebyla ověřena žádnými experimentálními výsledky. Jako první ji tedy začal ověřovat Ernest Rutherford, který při svém zkoumání pozměnil chápání atomu jako homogenní koule kladně nabitě hmoty s vnořenými elektrony a objevil planetární model atomu. Dalším krokem byl objev Rutherfordova asistenta Jamese Chadwicka, který objevil uvnitř jádra další částici – neutron. Řada radioaktivních látek vyzařuje neutrony, a tak se je vědci rozhodli použít k proniknutí do jádra atomu.

To se povedlo až v roce 1934 Enrico Fermimu, který rychle letící neutrony zpomaloval srážkami s molekulami vody. Neutrony tak nabyly takové rychlosti, že již jádrem neprolétávaly, ale zachycovaly se v něm. Avšak stále nebylo vše jasné – potenciál Einsteinovy rovnice se stále neobjevoval.

Zásadní objev učinili až Otto Hahn a Lisa Meitnerová v roce 1938. Uvažovali, co by se stalo, pokud by rozkmitali jádro uranu, velkého a přehřátého protony a neutrony, vstřelením dalšího neutronu. Výpočty došli k závěru, že z jádra jednoho vzniknou jádra dvě. Ovšem ty budou v součtu lehčí než původní jádro uranu – o přibližně 1/5 hmotnosti protonu. Podle  $E = mc^2$  by se tato „mizející“ hmotnost měla přeměnit na energii, konkrétně 200 MeV. Tím byla platnost rovnice ověřena.

## 5 Využití

Prvním použitím Einsteinovy rovnice v praxi byla neřízená reakce v atomové bombě. Ta se obvykle skládá ze dvou oddělených podkritických množství štěpného materiálu, jež v součtu dávají množství nadkritické. Jako štěpný materiál byl použit obohacený uran (později i plutonium), ve kterém byl zvýšen obsah izotopu  $^{235}\text{U}$  až na 95%. Obě části štěpného materiálu jsou proti sobě vystřelena výbuchem klasické výbušniny. Síla výbuchu zajistí, že nebudou obě části od sebe během prvních několika milisekund odhozeny teplem počínající neřízené řetězové reakce a tlakem vylétávajících neutronů. Řetězová reakce pak uvolňuje obrovské množství energie – výbuch atomové bomby obvykle odpovídá výbuchu několika tisícům či milionům tun výbušniny TNT.

Další využití je dnes zejména v jaderných elektrárnách, které využívají vznikajícího tepla k pohonu turbín generátorů. Současné jaderné elektrárny využívají jako palivo převážně obohacený uran, ve kterém obsah izotopu  $^{235}\text{U}$  činí 2-5 %. K největším jaderným elektrárnám patří Fukušima v Japonsku s výkonem 8815 MW nebo německá jaderná elektrárna v Gundremmingenu s výkonem asi 2500 MW. Za zmínku stojí též výkon Temelína 2000 kWh.

Využití  $E = mc^2$  je také v detektorech kouře, které získávají ke své činnosti příkon využitím přeměny radioaktivního americia. V nemocnicích je využívána v zobrazovacích zařízeních PET, kdy pacient vdechne radioaktivní izotop kyslíku, díky němuž lze pak získávat přesné údaje a např. lokalizovat nádory v těle.

Pro archeologii je důležitý izotop uhlíku  $^{14}\text{C}$ , jehož obsah v látkách klesá podle zákonitostí rozpadu nestabilních atomových jader (poločas rozpadu  $^{14}\text{C}$  je 5715 let), díky čemuž lze spolehlivě určit stáří látek.

## Reference

[1] D. Bodanis,  *$E=mc^2$  Životopis nejslavnější rovnice na světě*, nakladatelství Dokořán, Praha, 2002

[2] kol. autorů, *Encyklopedie Universum*,