

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Jaroslav Vávra

Experimentální prověření závislosti hmoty na rychlosti

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 11 (1966), No. 3, 160--167

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138606>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1966

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>

formačné vlastnosti fyzikálnych veličín aj pri nespojitých transformáciách. Pre spojité transformácie to urobil E. S. POST v [8]. Z tohoto dôvodu túto sústavu jednotiek považujeme za fyzikálne najviac odôvodnenú.

M. A. Leontovič: Vestnik AN SSSR 34 (0964) No 6, 123 kritizuje sústavu SI, že v nej sú rôzne rozmery vektorov  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{B}$ . V knihe [8] POST fyzikálne odôvodňuje túto rôznosť rozmerov na základe princípu rozmerovej individuality súradníc. V tejto knihe, podobne ako v kybernetike, pracuje sa vektormi a tenzormi, ktorých jednotlivé zložky majú vo všeobecnosti rôzne rozmery.

### Literatúra

- [1] JACKSON J. D.: *Classical electrodynamics*, New-York London 1962.
- [2] SOMMERFELD A.: *Elektrodynamik*, Leipzig 1949.
- [3] BECKER R.: *Theorie der Elektrizität*, Leipzig 1957–1959.
- [4] MARX GY.: *Fizikai Szemle 11* (1961), 67.
- [5] HORVÁTH J.: *Fizikai Szemle 11* (1961), 295.
- [6] IOPIŠ JU. I.: *UFN 85* (1965), 186.
- [7] KAPLAN E. S.: *Izvestija vyššich učebnych zavedenij-Fizika 1964*, No 2, 39.
- [8] POST E. S.: *Formal structure of electromagnetism*, Amsterdam 1962.
- [9] REGO G. B.: *Electromagnetics theory and Antennas II*, Oxford 1963, 997.

## EXPERIMENTÁLNÍ PROVĚŘENÍ ZÁVISLOSTI HMOTY NA RYCHLOSTI

JAROSLAV VÁVRA, Praha

### ÚVOD

Některým fyzikům se jeví dosud opodstatněné položit otázku o přesnosti, s jakou popisuje teorie relativity fyzikální jevy při vysokých rychlostech. Tak např. FARAGÓ a JANOSSY [1] přišli k závěru, že relativistické vztahy se při obvyklých experimentech potvrzují v daleko menší míře, než se většinou předpokládá. Vedl je k tomu rozbor pokusů s elektrony, při nichž rozdíl mezi experimentálními a teoretickými výsledky leží v mezích od 2 do 10 % [1].

Proto byla navržena a provedena řada experimentů, jejichž cílem bylo co možná nejpřesnější ověření zákona

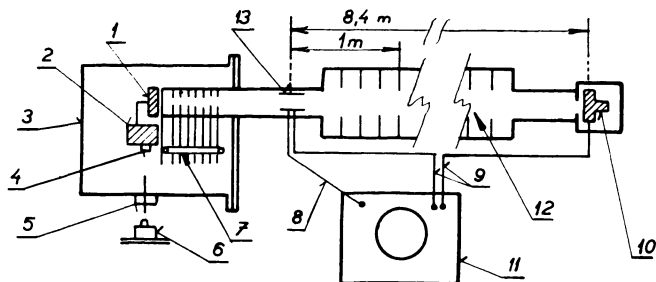
$$(1) \quad m = m_0(1 - (v/c)^2)^{-1/2} .$$

Uvedeme z nich alespoň tři. Liší se od sebe po experimentální stránce, avšak všechny dávají výsledky, které v rámci daných experimentálních chyb jsou v soulase s relativistickým zákonem vzrůstu hmoty s její rychlostí.

## PROVĚŘENÍ ZÁVISLOSTI HMOTY NA JEJÍ RYCHLOSTI MĚŘENÍM RYCHLOSTI A ENERGIE ELEKTRONŮ

Tento pokus byl proveden Williamem BERTOZZIM v Cambridge [2]. K urychlení elektronů bylo použito Van de Graaffova generátoru s lineární urychlovací trubicí typu „Linac“. Elektrony v tomto zařízení získávaly energii od 0,5 do 15 MeV. Rychlost elektronů byla určena přímou metodou, tj. změřením času potřebného k tomu, aby elektrony proletěly danou vzdálenost 8,4 m. Kinetická energie byla měřena taktéž přímo pomocí speciálních kalorimetrů.

Aparatura použitá k měření rychlosti je schematicky znázorněna na obr. 1. Thyatronový pulsovač (2) u vysokonapěťového konce Van de Graaffova generátoru zapíná elektronové dělo (1), které vypouští elektrony do urychlovače v pulzech trvajících okolo



Obr. 1.

$3 \cdot 10^{-9}$  sec s frekvencí 120 Hz. Pulsovač je spouštěn fotočlánkem (4). Mezi Van de Graaffovým generátorem a lineárním urychlovačem (12) je umístěna kovová signalizační trubice (13) asi 10 cm dlouhá, která sbírá část elektronů při jednotlivých pulzech. Takto vytvořený signál je odváděn kabelem (9) k osciloskopu (11). Na konci „Linacu“ jsou elektrony zastaveny na hliníkovém disku (10), čímž je vytvořen druhý signál. Oba signály jsou přenášeny dvěma kabely o stejných přenosových časech. Jako osciloskopu je použito typu Tektronix 581.

Číselné hodnoty získané z průběhu těchto signálů na obrazovce osciloskopu jsou uvedeny v tab. I, která zachycuje měření délky signálů a doby potřebné k tomu, aby elektrony překonaly vzdálenost 8,4 m (1 cm odpovídá  $0,98 \cdot 10^{-8}$  sec). Signály z obou konců dráhy, kterou elektrony proletí, musí být zaregistrovány na obrazovce osciloskopu ve vhodnou chvíli, aby bylo možno odečíst časový rozdíl mezi nimi. K tomu účelu bylo použito impulsu vedeného do osciloskopu kratším kabelem (8),

kteřý obstarával smazání signálů na stínítku osciloskopu v pravý okamžik (viz obr. 1). Rychlost smazání byla kalibrována připojením standardních kabelů se známým časovým zpožděním ke kabelu přivádějícímu časový signál ze začátku průletové dráhy. Časová reakce sběracích obvodů na začátku a konci průletové dráhy v trubici „Linac“ byla asi  $10^{-9}$  sec. Při průchodu elektronů kolem sběračů signálu se pocho-pitelně v nich indukoval náboj opačné polaroty, který však jako signál zařizemím registrován nebyl. Rozdíl mezi dvěma signály reprezentujícími dobu potřebnou pro průlet elektronů danou dráhou byl určen s přesností  $7 \cdot 10^{-10}$  sec. Pro energie 0,5 MeV, 1,0 MeV, a 1,5 MeV byl „Linac“ vypnut a urychlení obstarával pouze Van de Graaffův generátor. Při energii 4,5 MeV dodával Van de Graaffův generátor elektronům energii 1,5 MeV a první část „Linacu“ asi 1 m dlouhá dodávala další 3 MeV. Je zřejmé, že rychlost elektronů se měnila pouze v prvním metru letové dráhy, takže výraz  $8,4/t$  udával pouze průměrnou hodnotu rychlosti. Užijeme-li aproximace  $v_{4,5} \doteq 8,4/t$  je vidět, že  $v_{1,5} \doteq v_{4,5}$ . Při energii 15 MeV se energie elektronů rovnoměrně zvětšuje během celé letové dráhy. Z hodnot v tab. I je vidět, že

Tabulka I.

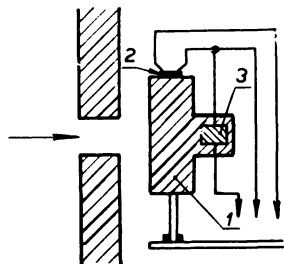
Měření	$E_k$ [MeV]	Délka signálu [cm]	odpov. čas [sec] $\cdot 10^{-8}$
a	0,5	3,30	3,23
b	1,0	3,14	3,08
c	1,5	2,98	2,92
d	4,5	2,90	2,84
e	15,0	2,86	2,80

čas  $t$  je v tomto případě přibližně stejný jako v případě d (4,5 MeV), takže  $v_{15} \doteq v_{4,5}$ . Z těchto úvah je možno usoudit, že rychlost elektronů se přibližuje ke konečné hodnotě, tj. rychlosti světla  $c \doteq 3 \cdot 10^8$  m/sec.

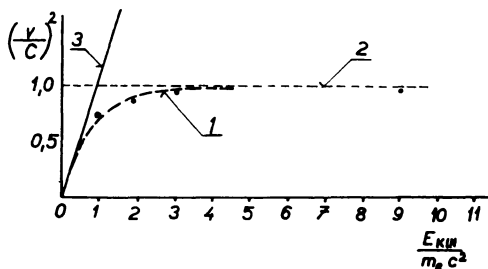
Zdalo by se, že kinetickou energii je možno určit metodou nepřímou, tj. v jednotkách urychlujícího potenciálního rozdílu ( $V$ ) Van de Graaffova generátoru a v jednotkách elektrického pole ( $E$ ) v „Linacu“. Je však nutno vzít v úvahu, že použití známého napětí nebo intenzity předpokládá znalost toho, že elektrická síla působící ve směru pohybu elektronů je nezávislá na rychlosti. Proto bylo užito k měření kinetické energie kalorimetrů.

Zastavením elektronů v hliníkovém disku (10) se vyvine jisté množství tepla. Celková energie takto vzniklá v disku je úměrná změně teploty disku, jestliže měření je provedeno v době, která je kratší než tepelně časová konstanta disku. Počet elektronů nesoucích jistou energii byl určen pomocí přírůstku náboje v disku. Na vzestup teploty reagoval galvanometr, který byl připojen k termočláнку (2). Náboj se sbíral asi 7 min. Termočláňkový proud byl kalibrován pomocí odporu (3), který byl zabu-

dován v disku (viz obr. 2). Proud 24 mA po dobu 133 sec způsobil u galvanometru výchylku 19 dílků (jeden dílek odpovídá 0,80 Joule). Nábojem, který byl zachycen na disku byl nabíjen kondenzátor, jehož vybíjecí napětí bylo 1 V. Každé vybití bylo registrováno (během 15 minut jich bylo 106). Na jedno vybití připadá  $7,6 \cdot 10^{-8}$  C.



Obr. 2.

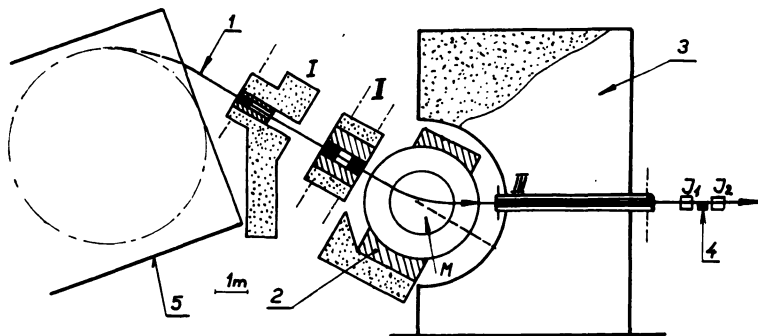


Obr. 3.

Obr. 3 ukazuje funkční závislost, která jasně potvrzuje v mezích pozorovacích chyb Einsteinovu závislost hmoty na rychlosti danou vztahem (1). Příslušné hodnoty jsou uvedeny v tab. II.

Tabulka II.

$E_k$ [MeV]	$E_k/m_e c^2$	$(v/c)_{exp}^2$
0,5	1	0,752
1,0	2	0,828
1,5	3	0,922
4,5	9	0,974
15,0	30	1,000



Obr. 4.

Další závěr, který je možno učinit na základě výsledku tohoto experimentu, je ten, že elektrická síla působící na elektron ve směru jeho pohybu je nezávislá na jeho rychlosti (tj.  $E_{kin} = eV$  nebo  $E_{kin} = e \int E dx$ ).

#### PŘOVĚŘENÍ ZÁVISLOSTI HMOTY NA JEJÍ RYCHLOSTI MĚŘENÍM RYCHLOSTI A IMPULSU PROTONŮ O ENERGII 660 MeV

Tento pokus provedli V. P. ZRELOV, A. A. TJAPKIN a P. S. FARAGÓ v laboratoři jaderných problémů Spojeného ústavu jaderných výzkumů v Dubně [3]. Schéma uspořádání pokusu je na obr. 4. K urychlení protonů na energii 660 MeV bylo použito synchrocyklotronu (5). Svazek protonů, který prošel kolimátory I a II, se odklonil v magnetickém poli elektromagnetu  $M$  do kolimátoru III a vletěl do ionizační komory  $J_1$ . Proud v elektromagnetu byl stabilizován s chybou 0,1 %. Kolísání intenzity magnetického pole bylo v důsledku nasycení železa v magnetech ještě menší.

Ve snaze o co nejpřesnější výsledky bylo vyloučeno, aby impuls byl změřen známou metodou pomocí odchylky v magnetickém poli. Bylo užito tzv. metody proudové nitě [4–6]. Celým systémem kolimátorů bylo provlečeno drátěné lanko o průměru 0,2 mm. Lanko bylo udržováno v rovnováze pomocí zavaží, které bylo umístěno na hedvábné niti. Niť byla přetažena přes speciální otáčivý blok (napětí lanka budiž  $Q$ ). Je známo, že impuls částice je roven  $p = aQ/I$ , jestliže tvar lanka, kterým prochází proud  $I$ , přesně souhlasí s tvarem dráhy částice. Přitom bylo použito takového proudu  $I$ , aby lanko procházelo celým systémem kolimátorů podél jejich os. Jestliže je napětí nitě vyjádřeno v gramech, proud  $I$  v ampérech, potom impuls nabitě částice je vyjádřen v jednotkách  $\text{MeV}/v$ . Z mechanických vlastností lanka bylo zjištěno, že  $a = 2,943$ . Při experimentu bylo napětí nitě  $Q = 300 \pm 0,3$  g a proud v lanku  $I = 0,681 \pm \pm 0,001$  A, takže impuls protonů byl  $p = 1296,5 \pm 2,3$   $\text{MeV}/c$ .

K měření rychlosti bylo použito čerenkovovských počítačů [7]. Při tomto měření bylo určeno  $(v_0/c) = 8,8090 \pm 0,005$ ; současně byl z Braggovy křivky změřen střední dolet  $\bar{R}_0$  protonů v mědi. Bylo nutno určit rozložení rychlostí ve svazku protonů. K tomu účelu se proměřovaly zvláště Braggovy křivky a střední dolety  $\bar{R}$  protonů pro různé vzorky mědi. Přitom střední dolet je vždy roven tloušťce vzorku, při které je proud v ionizační komoře roven 0,82 maximálního proudu [8]. Oprava vzhledem k rychlosti se pak určovala z veličiny  $\Delta\bar{R} = \bar{R} - \bar{R}_0$ . Bylo zjištěno, že  $v/c = 0,8112 \pm \pm 0,0005$ .

Z naměřených veličin vplynuly tyto hodnoty:

$$m_1 = p/v = 1\,598,2 \pm 3 \text{ MeV}/c^2,$$

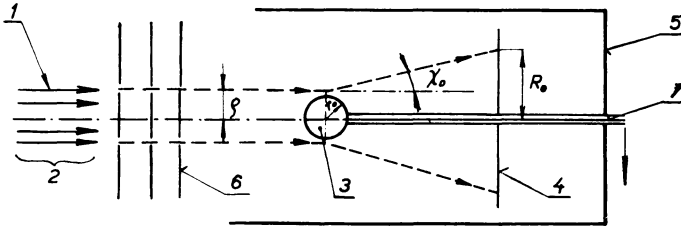
$$m_2 = m_0(1 - (v/c)^2)^{-1/2} = 1\,604,3 \pm 1,9 \text{ MeV}/c^2,$$

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 6,1 (1 \pm 0,6), \quad \frac{\Delta m}{m} = 0,004 (1 \pm 0,6).$$

Získané výsledky v mezích pozorovacích chyb souhlasí se zákonem (1).

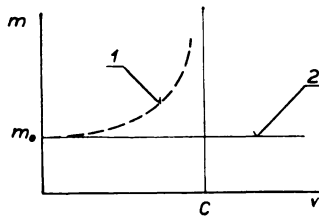
### PROVĚŘENÍ ZÁVISLOSTI HMOTY NA JEJÍ RYCHLOSTI MĚŘENÍM RYCHLOSTI A ROZPTYLOVÉHO ÚHLU

Tento pokus, na rozdíl od obou předcházejících, nebyl ještě vykonán. Přesto se v krátkosti o něm zmíníme. Uspořádání pokusu je patrné z obr. 5. Svazek elektronů (1), který vystupuje z urychlovače, prochází řadou kolimátorů (6), které vymezí úzký svazek vyplňující plášť válce o poloměru  $\varrho$ . Do cesty těmito částicím je postavena nabitá kulička (3) o poloměru  $r_0$  ( $r_0 < \varrho$ ). Nabitá kulička je vlastně bodové rozptylové centrum vytvářející statické pole s potenciálem  $U = q/r$ , kde  $q$  je náboj kuličky.



Obr. 5.

Částice rozptýlené na tomto centru vytvářejí na fotografickém materiálu (4) stopu v podobě kruhu o poloměru  $R_0$ .



Obr. 6.

Jde tedy vlastně o pohyb nabitě částice v poli centrální síly. Řešení tohoto problému je založeno na řešení příslušných Lagrangeových rovnic [9]. Langrangeova funkce tohoto problému je:

$$(2) \quad \mathcal{L}(r, \dot{r}, \dot{\varphi}) = \frac{m}{2} (\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2) + U(r)$$

Řešením této úlohy dojdeme ke vztahu

$$(3) \quad m = \frac{\alpha}{\varrho v_0^2} \cotg \frac{\chi}{2}$$

$$(4) \quad \chi = \pi - 2\varphi_0$$

přičemž  $\alpha = qe$ , kde  $e$  je náboj elektronu,  $\chi$  je rozptylový úhel,  $v_0$  je počáteční rychlost. Je zřejmé, že s rostoucí rychlostí  $v_0$  se bude úhel  $\chi$  zmenšovat, tedy hmota bude růst. Experiment má prověřit, že tato závislost je relativistická, tzn. že má průběh,

Tabulka III.

rychlost		$\chi_0$	$\chi$	$\chi_0 - \chi$
$U_1$ 3000 V	$v = c/2$	2°34'	2°14'	20'
$U_2$ 30 000 V		25°8'	21°50'	3°18'
$U_1$	$v = 5c/6$	55'4"	30'28"	24'36"
$U_2$		9°10'40"	5°4'30"	4°5'34"

který je zachycen na obr. 6. V tab. III. jsou uvedeny hodnoty  $\chi_0$  vypočtené podle vztahu (3) pro případ platnosti zákonů klasické mechaniky a hodnoty  $\chi$  vypočtené s použitím relativistické mechaniky.

Tyto hodnoty ukazují, že navržený pokus je proveditelný.

Hodnoty jsou vypočteny pro tyto parametry:

$$e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ abs. e. j.}, m_0 = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ g}, \varrho = 2 \text{ cm}, r_0 = 1,9 \text{ cm}.$$

O měření rychlosti se zde nezmiňujeme, neboť je zcela reálně možno postupovat stejným způsobem, jako v předcházejícím případě.

#### ZÁVĚR

V článku byly stručně popsány tři způsoby, kterými je možno prověřit relativistický vztah (1). Dosažené výsledky všech experimentů jej potvrzují v rámci chyb, daných použitou aparaturou i způsobem měření.



V závěru bych chtěl poděkovat panu prof. V. Petržílkovi za cenné rady, které přispěly ke zlepšení této práce.

### Literatura

- [1] P. S. FARAGÓ, L. JANOSSY: *Nuovo Cim.* 5 (1957), 1411.
- [2] W. BERTOZZI: *American Journal of Physics* 32 (1964), 551.
- [3] V. P. ZRELOV, A. A. TJAPKIN, P. S. FARAGÓ: *ŽETF* 34 (1958).
- [4] I. LOEB: *CR*, 222 (1946), 488.
- [5] M. S. KOZODAJEV, A. A. TJAPKIN: *Pribori i tehnika experimenta* 1 (1953), 21.
- [6] V. P. ZRELOV: *Otčet JJaP AN SSSR*, (1954).
- [7] R. MATHER, E. SEGRÉE: *Phys. Rev.* 84 (1951), 191.
- [8] L. D. LANDAU: *Teoretická fyzika*, I. díl, § 17, 18.
- [9] J. J. THOMSON: *Phil. Mag.* 13 (1907), 561.

#### Jak je to s technickým vybavením amerického výzkumu?

Ve výzkumu a vývoji v USA připadá na jednoho pracovníka (vědce, inženýra nebo technika) průměrně za 2800 dolarů (tj. asi za 20 000.— Kčs podle úředního kursu) přístrojů. Jejich předpokládaná životnost je 3–30 let, v průměru 5 let. Asi 20% přístrojů si laboratoře vyrábějí samy, zbytek se kupuje. Inventury se dělají nejméně jednou ročně, někde i pololetně nebo měsíčně; zpráva neuvádí, zda je tam kolem inventur také tolik řeči jako u nás.

Sk

#### Turbína na freon

se vyvíjí ve Velké Británii. U velkých parních turbín rostou rozměry nízkotlakých stupňů do nevládnutelných rozměrů, protože jimi musí projít velké množství expandované páry. Jestliže se pára v nízkotlakém stupni nahradí freonen, zahříváním parou vystupující ze středotlakého stupně turbíny, získá se přibližně stejná účinnost při 20× menším objemu plynu. Splní-li se všechny teoretické předpoklady, bylo by možno stavět parofreonové turbíny do výkonu 2000 MW.

Sk

#### Nový způsob identifikace železničních nákladních vozů

Dosavadní optický způsob, u něhož vysílačem informace jsou čísla psaná barvou a snímačem je zaměstnanec železnice, je nevhodný pro nákladnost a pomalost. Zdokonalené optické systémy s fotoelektrickými snímači a s binárními znaky místo číslic mají rovněž různé nevýhody, mj. tu, že jejich údaj závisí na směru jízdy vozu. Nedávno přišla západoněmecká firma Siemens s návrhem radiového zařízení, pracujícího v pásmu 30–130 kHz. Pevná část vysílá proti vozu řadu kmitočtů, odpovídajících řádům čteného čísla, a část mobilní odpovídá signály, jejichž kmitočty závisejí na hodnotě příslušného řádu. Činnost zařízení tedy nezávisí na směru jízdy, vzdálenost pevné a mobilní části může mít toleranci až  $\pm 20$  cm, činnost je nezávislá na počasí a na rychlosti vozu až do 160 km/h. Přečtení 10 míst netrvá déle než 50 ms i s rezervou na případné opravy chyb. Mobilní část nemá vlastní zdroj elektrické energie; vystačí s tím, co přijme z pevného vysílače zároveň s dotazem. Zařízení se zatím zkouší.

Sk