

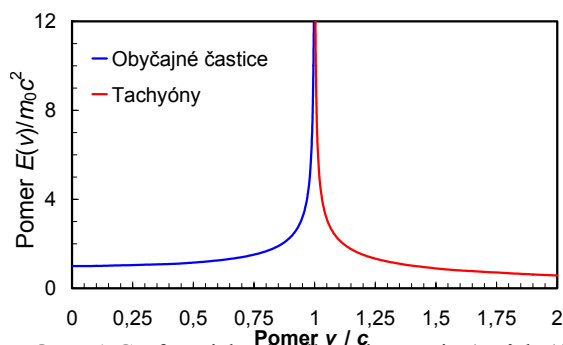
Ako nájsť tachyóny?

Špeciálna teória relativity viedla vedcov k presvedčeniu, že nijaký hmotný objekt ani informácia sa nemôžu pohybovať rýchlejšie ako svetlo vo vákuu. Začiatkom šesťdesiatych rokov sa však začalo uvažovať o tachyónoch, časticiach pohybujúcich sa rýchlejšie ako svetlo. Možnosť ich existencie vyplýva zo vzorcov teórie relativity, no doteraz sa nepodarilo experimentátorom ani jeden tachyón zachytiť. Viac informácií o týchto hypotetických časticiach si povieme teraz.

V predchádzajúcom článku, sme uviedli jednoduchý dôkaz tvrdenia, že rýchlosť hmotných telies nemôže prekročiť rýchlosť svetla vo vákuu c . Vychádzali sme z relativistického vzťahu pre energiu častice, ktorá má kludovú hmotnosť m_0 a rýchlosť v

$$E_{relat}(v) = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (1)$$

V menovateli vzťahu (1) je odmocnina, ktorej hodnota sa s približovaním rýchlosti telesa k rýchlosti svetla¹ neustále znižuje. V prípade, že $v = c$ je hodnota tejto odmocniny nulová. Energia pohybujúceho sa telesa preto s rýchlosťou rastie a v bode $v = c$ dosahuje nekonečnú hodnotu (Obr. 1). Modrý graf na obrázku 1 vyjadruje relativistickú závislosť energie obyčajného telesa (častice) od jeho rýchlosti. Ak si predstavíme, že tento graf znázorňuje kopec, tak urýchľovanie telesa je ako jeho tlačenie do kopca. Ako sa blížime k rýchlosti svetla (pomer v/c sa blíži k 1), výška kopca začína prudko rásť a v bode $v = c$ je kopec nekonečne vysoký. Takže nie je možné urýchliť ani najmenšiu časticu s nenulovou hmotnosťou na rýchlosť svetla, pretože by sme k tomu potrebovali nekonečnú energiu.



Obr. 1 Graf závislosti celkovej energie (vzťah (1)) obyčajných častíc – modrá čiara a tachyónov – červená čiara. Obe závislosti dosahujú nekonečnú hodnotu v bode $v = c$. Minimálna energia obyčajných častíc je $E(0) = m_0 c^2$ pri rýchlosti $v = 0$. Minimálna energia tachyónov je $E(\infty) = 0$ pri nekonečnej rýchlosti.

Odsúdení byť rýchlejší ako svetlo

Fyzici Bilaniuk, Deshpande a Sudarshan ukázali začiatkom 60-tych rokov minulého storočia, že samotná špeciálna teória relativity (ŠTR) pripúšťa existenciu hmotných objektov, pohybujúcich sa rýchlejšie ako svetlo. Je potrebný len jeden smelý predpoklad. Analyzujeme ešte raz vzťah (1) pre energiu telesa. Výraz pod odmocninou v menovateli sa stane menším ako 0 keď rýchlosť telesa prekročí rýchlosť svetla c (platí totiž $v/c > 1$), no a odmocnina zo záporného čísla je číslo rýdzo imaginárne² (Matematická poznámka). Energia každého hmotného telesa by sa tak pri prekračovaní rýchlosti svetla prehupla cez nekonečnú hodnotu do hodnôt imaginárnych. Keď však má fyzikálna veličina imaginárnu hodnotu nemôžeme ju v našom svete pozorovať. Obyčajné teleso preto nemôže mať rýchlosť väčšiu ako svetlo.

Spomínaní traja páni predpokladali, že existujú telesá s imaginárnou hmotnosťou m_0 , neskôr boli nazvané tachyóny, a sledovali aké vlastnosti by im ŠTR prisúdila. Energia tachyónov by bola imaginárna pri rýchlostiach menších ako rýchlosť svetla. V takomto prípade máme vo vzťahu (1) imaginárnu hmotnosť v čitateli a obyčajné reálne číslo v menovateli (odmocnina je teraz reálna). Ak by rýchlosť tachyónov prekročila rýchlosť svetla, odmocnina vo vzťahu (1) by sa stala imaginárnou. Podiel dvoch imaginárnych čísel je číslo reálne (Matematická poznámka), čiže energia tachyónov by bola reálna pre rýchlosti väčšie ako c . Závislosť energie tachyónov od ich

¹ Slovné spojenie „rýchlosť svetla vo vákuu“ budeme skracovať na „rýchlosť svetla“, prípadne namiesto dlhých slov použijeme len značku tejto rýchlosti c .

² Namiesto termínu „rýdzo imaginárne“ budeme používať termín „imaginárne“, pretože tu budeme narábať len s rýdzo imaginárnymi číslami a nemôžeme sa preto pomýliť.

rýchlosti je na obrázku 1 znázornená červenou čiarou. Vidieť, že čím je rýchlosť tachyónu väčšia, tým má menšiu energiu. Energia nekonečne rýchleho tachyónu bude nulová. Naopak, keď rýchlosť tachyónu klesá smerom k rýchlosti svetla, jeho energia sa stáva nekonečnou. Pri brzdení je potrebné tachyónu dodávať energiu. Pri urýchľovaní by energiu odovzdával – presne opačne je to pri obyčajných časticiach. Ak teda pripustíme možnosť existencie častíc s imaginárnymi kľudovými hmotnosťami, môžeme všetky častice rozdeliť do troch skupín (tabuľka I):

- **obyčajné častice** – hmotnosť je reálna. Pohybujú sa len rýchlosťami menšími ako svetlo. Ich energia by vzrástla nad všetky medze ak by dosiahli rýchlosť svetla. Pri rýchlostiach väčších ako rýchlosť svetla by sa ich energia stala imaginárnou, čiže v tejto oblasti rýchlostí nemôžu existovať.

- **fotóny** – hmotnosť je nulová. Vo vákuu sa môžu pohybovať len rýchlosťou svetla. Pri spomalení alebo zrýchlení by okamžite zanikli (ich energia by bola nulová).

- **tachyóny** – hmotnosť je imaginárna. Pohybujú sa len rýchlosťami väčšími ako svetlo. Aby sme ich spomalili na rýchlosť svetla, museli by sme im dodať nekonečnú energiu. Pri rýchlostiach menších ako rýchlosť svetla by bola energia tachyónov imaginárna, preto v tejto oblasti rýchlostí nemôžu existovať.

Tabuľka I Rozdelenie častíc podľa ich kľudovej hmotnosti m_0 .

<i>Druh častice</i>	<i>Kľudová hmotnosť m_0</i>	<i>Energia pri rýchl. $v < c$</i>	<i>Energia pri rýchl. $v = c$</i>	<i>Energia pri rýchl. $v > c$</i>
<i>Obyčajné č.</i>	Reálna	Reálna	Nekonečná	Imaginárna
<i>Fotóny</i>	Nulová	Nulová	Reálna	Nulová
<i>Tachyóny</i>	Imaginárna	Imaginárna	Nekonečná	Reálna

Zavedením tachyónov sa zmenil aj náš pohľad na rýchlosť svetla. Tú môžeme vnímať ako hranicu nepriechodnú ani z jednej strany. Obyčajné častice ju nemôžu prekonať smerom od nižších rýchlostí. Tachyóny ju zasa neprekonajú smerom od vyšších rýchlostí. Kým obyčajné častice sa nemôžu pohybovať rýchlejšie ako svetlo, tachyóny sú odsúdené na večné uháňanie rýchlosťami väčšími ako c .

Imaginárna hmotnosť tachyónov nemusí nikoho desiť. Tachyóny sa totiž od okamžiku svojho vzniku musia pohybovať rýchlejšie ako svetlo. Ich energia je preto reálna a kladná (ako sa na energiu patrí). Aby ste mohli pozorovať efekty imaginárnej hmotnosti tachyónov, museli by ste ich spomaliť na rýchlosť menšiu ako je rýchlosť svetla, na čo by ste potrebovali nekonečnú energiu.

Kde hľadať tachyóny?

Zo všetkých známych častíc len pri neutrínach zostala určitá šanca, že sú tachyóny. Existuje možnosť, že tachyóny objavíme vo forme dosiaľ nepozorovaných častíc. Niektoré strunové teórie napríklad obsahujú tachyóny ako základné stavy. Tieto stavy sú však nestabilné a sú z teórií eliminované vhodnými postupmi. My zostaneme radšej pri zemi a budeme sa venovať neutrínam.

Existujú tri druhy neutrín: elektrónové, miónové a tau neutríno. Sú to najslabšie interagujúce častice zo všetkých známych častíc. S inými časticami interagujú len prostredníctvom slabej interakcie. Tá pôsobí na veľmi krátke vzdialenosti (len v rámci elementárnych častíc) a je extrémne slabá. Na ilustráciu uvedieme, že neutríno preletí cez bežnú látku v priemere desať miliónov miliárd kilometrov, kým vstúpi do interakcie s nejakou časticou! Táto vlastnosť neutrín je zodpovedná za všetky problémy, ktoré s nimi máme.

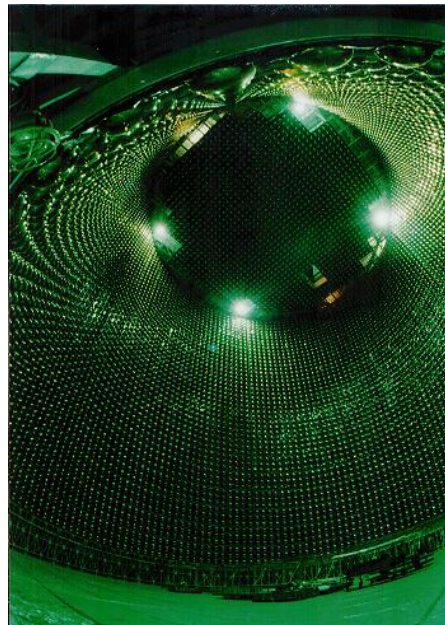
Len niekoľko rokov je potvrdené, že neutrína majú nenulovú kľudovú hmotnosť. Experimenty, založené na sledovaní oscilácií neutrín, však umožňujú určiť len kvadrát rozdielu hmotností medzi jednotlivými druhmi neutrín (kvadrát imaginárneho čísla je číslo reálne – Matematická poznámka). Nevieme preto povedať presnú hmotnosť neutrín. V tejto oblasti sme odkázaní na starý spôsob určenia ich hmotnosti pomocou sledovania β -rozpadu vhodných atómových jadier (vznikajú pritom neutrína) v pozemských zdrojoch. Tieto experimenty nemajú zatiaľ dostatočnú presnosť. Pri niektorých dokonca vychádzajú výsledky, podporujúce hypotézu o tachyónovských neutrínach. Štatistické a systematické chyby sú však zakaždým príliš veľké a

nevieme rozhodnúť s dostatočnou istotou, či sú neutrína tachyóny. Hoci novšie výsledky zmiernili problém s imaginárnou hmotnosťou neutrín, stále sa pri analýze výsledkov objavujú nezrovnalosti. Aby sme presne zistili hmotnosti neutrín pri takýchto typoch meraní, museli by sme aspoň o rád zlepšiť našu presnosť.

Merat' priamo rýchlosť neutrín je ešte komplikovanejšie. Registrujeme len energetické neutrína, takže ich rýchlosť by prekonávala rýchlosť svetla len o milióntiny percenta (čím má tachyón väčšiu energiu, tým bližšia je jeho rýchlosť k rýchlosti svetla). Pomocnú ruku by nám mohol podať výbuch blízkej supernovy. Pri takejto udalosti vznikajú obrovské množstvá neutrín. V roku 1987 vybuchla supernova vo Veľkom Magellanovom oblaku. Dva detektory vtedy zaregistrovali 20 neutrín 3 hodiny pred prvým svetelným zábleskom zo supernovy. To ešte nič neznamená, pretože neutrína opúšťajú vybuchujúcu hviezdu skôr ako fotóny. Presvedčivým dôkazom by bolo, ak by k nám doleteli nízko energetické neutrína skôr ako tie s vysokou energiou. Zaznamenaných neutrín bolo, bohužiaľ, príliš málo. Najpravdepodobnejšia je hypotéza, že neutrína prišli v dvoch skupinách (zrejme vznikli v dvoch fázach) a v týchto skupinách prišli energetickejšie neutrína skôr. Čiže opačne než by sa patrilo pri tachyónoch. Ale štatistická váha takejto interpretácie je malá. Ak by v súčasnosti nastal výbuch supernovy v našej Galaxii, zaznamenali by detektory niekoľko tisíc neutrín. To by stačilo na presnejšie zistenie hmotnosti neutrín a teda aj na potvrdenie, alebo vylúčenie možnosti, že neutrína sú tachyóny.

Zaujímavým dôsledkom tachyónovej povahy neutrín by bol samovoľný rozpad protónov na neutróny. Rozpadali by sa len protóny s energiou väčšou ako istá medzná hodnota, ktorá by závisela od hmotnosti neutrín. Takýto proces pri voľných protónoch neprebíha. Doteraz sa však rozpad protónov nepotvrdil. Ak by bol takýto proces reálny, prejavilo by sa to určite v zložení kozmického žiarenia. Kozmické žiarenie je prúd častíc s veľmi veľkou energiou, dopadajúci na Zem z vesmíru. Malo by pozostávať prevažne z protónov. Neutróny sú totiž nestabilné a rozpadajú sa na protóny. Častice kozmického žiarenia letia k Zemi tisíce a milióny rokov. Prakticky všetky neutróny by sa mali za ten čas rozpadnúť. Predpovedaný rozpad protónu za účasti neutrína by celú situáciu zmenil, pretože protóny a neutróny by sa premieňali cyklicky jeden na druhý a na Zem by dopadalo podstatne viac neutrónov v kozmickom žiarení, než sa predpokladá. Je ale veľkým problémom odlišiť v kozmickom žiarení protón od neutrónu. Sledujeme totiž len spíšku sekundárnych častíc vznikajúcich po zrážke častice kozmického žiarenia s časticou zemskej atmosféry.

Predpoklad, že neutrína sú tachyóny, by úplne prirodzene vyriešil jeden z problémov spojený s objavom hmotnosti neutrín. Doteraz boli pozorované len ľavotočivé neutrína. Pri takomto type častíc má ich spin (môžeme ho, aj keď nepresne, spojiť s rotáciou častice okolo osi) vždy opačný smer ako ich smer pohybu. Vysvetlenie tohto faktu je triviálne, ak by neutrína mali nulovú hmotnosť. V tom prípade by sa pohybovali rýchlosťou svetla a nebolo by možné ich predbehnúť. Ak totiž predbehniete rotujúcu časticu, smer jej rotácie budete vidieť stále rovnaký, no smer jej pohybu voči vám sa zmení (zrazu pôjde od smerom od vás a nie k vám). Takže po predbehnutí by ste ľavotočivú časticu videli ako pravotočivú. Ak by boli neutrína tachyóny, situácia sa nezmení. Pohybovali by sa ešte rýchlejšie ako svetlo a všetko by bolo zachránené. Ak je hmotnosť neutrín nenulová, môžu mať aj menšie rýchlosti ako rýchlosť svetla. Mali by sa preto pozorovať aj pravotočivé neutrína. Zatiaľ sme ich však neobjavili. Aj na to však existujú vhodné vysvetlenia, ktoré nepredpokladajú tachyónovskú povahu neutrín.



Obr. 2 Pohľad do vnútra detektora SuperKamiokande. Na stenách sú viditeľné tisícky fotonásobičov. Predchodca tohto detektora zaregistroval v roku 1987 12 neutrín zo supernovy SN1987A.

Takáto je teda súčasná situácia s hľadáním tachyónov. Pravdepodobnosť, že sú nimi neutrína, sa znižuje, ale celkom ju vylúčiť nemožno. Väčšina fyzikov sa už nadobro otočila tejto špekulatívnej myšlienke chrbtom, no nádej niektorých ešte celkom nezomrela.

Peter Kluvánek, 2006

Matematická poznámka

Imaginárne, alebo komplexné, čísla vznikli rozšírením reálnych čísel o odmocniny z čísel záporných. Ukázali sa ako veľmi silný nástroj nielen v matematike ale aj vo fyzike. Každé imaginárne číslo sa dá napísať v tvare $Z = a + b.i$, pričom a aj b sú obyčajné reálne čísla a i je takzvaná imaginárna jednotka, pre ktorú platí $i = \sqrt{-1}$ a preto $i^2 = i.i = -1$. O rýdzo imaginárnych číslach hovoríme v prípade ak $a = 0$, takže sa dajú písať v tvare $Z = b.i$. K rýdzo imaginárnym patria práve odmocniny zo záporných čísel. Platí napríklad $\sqrt{-9} = \sqrt{9 \cdot (-1)} = \sqrt{9} \cdot \sqrt{-1} = 3i$.

O imaginárnych číslach nepotrebujeme pre naše účely vedieť príliš veľa. V prvom rade spomenieme pomerne triviálnu vec: pomer dvoch rýdzo imaginárnych čísel je obyčajné reálne číslo. Imaginárne jednotky totiž z čitateľa aj menovateľa vypadnú: $\frac{b.i}{d.i} = \frac{b}{d}$. Druhá vec sa týka druhých mocnín (kvadrátov) rýdzo imaginárnych čísel. Platí rovnosť $(Z)^2 = (b.i)(b.i) = b^2(i.i) = -b^2$, čo je číslo reálne. No a ešte poznámka ku vzťahu imaginárnych čísel a reálneho sveta. V reálnom svete sú „prítomné“ len reálne čísla. Takže hodnoty fyzikálnych veličín môžu byť iba reálne čísla.