

NOV PREIZKUS POSEBNE TEORIJE RELATIVNOSTI

JANEZ STRNAD

Fakulteta za matematiko in fiziko

Univerza v Ljubljani

PACS: 03.30.+p

Novi preizkusi posebne teorije relativnosti so imenitni po kakem novem merilnem načinu in ne po tem, da se izidi ujemajo z napovedmi teorije. Zelo natančno merjenje časa je omogočilo preizkus pri hitrosti nekaj deset metrov na sekundo in pri višinski razliki $\frac{1}{3}$ metra.

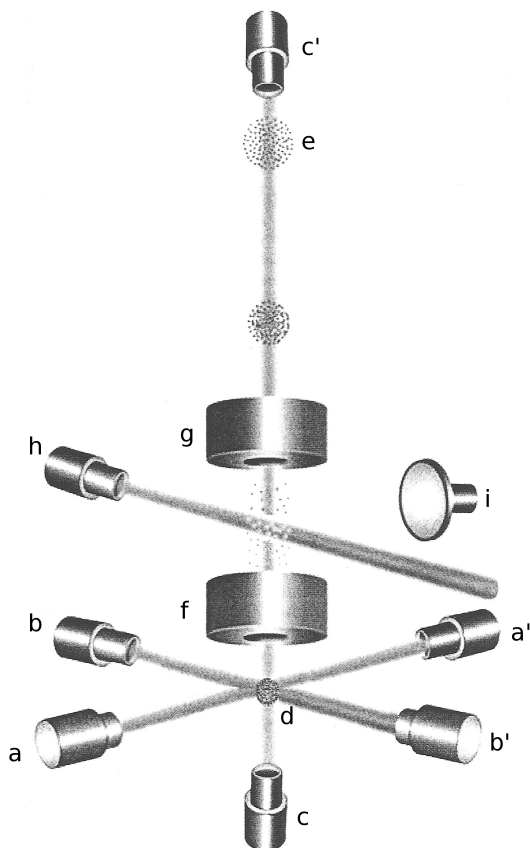
A NEW TEST OF SPECIAL RELATIVITY

New tests of special relativity are noteworthy for some new method of measurement and not for results agreeing with the predictions of the theory. A very accurate measurement of time has made possible tests at speeds of some tens of meters per second and a height difference of $\frac{1}{3}$ meter.

Današnji fiziki ne dvomijo o posebni teoriji relativnosti. Njen preizkus zbudi pozornost po kaki drugi posebnosti, ne po tem, da se izid sklada z napovedmi. Novi preizkus je omogočilo zelo natančno merjenje časa [1].

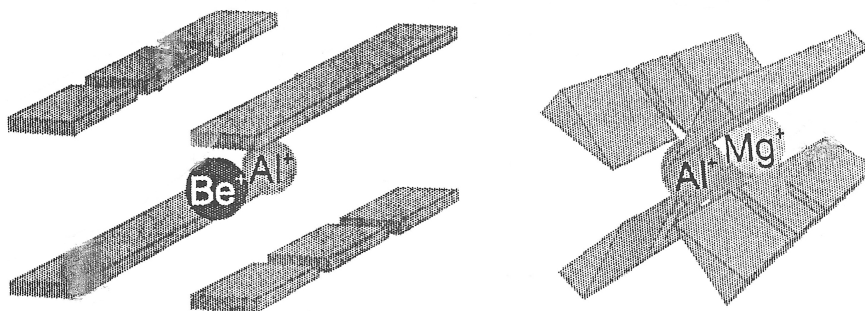
Natančno merijo čas z uro s curkom atomov cezija (slika 1) [2]. Cezijeve atome iz izvira ohladijo s tremi pari nasprotno usmerjenih laserskih curkov, pravokotnih drug na drugega. To pomeni, da močno zmanjšajo hitrost atomov. Pri ohladitvi na temperaturo $1 \mu\text{K}$ je povprečna kinetična energija atoma cezija $\frac{3}{2}kT = 2.1 \cdot 10^{-29} \text{ J} = 1.3 \cdot 10^{-10} \text{ eV}$ in koren iz povprečnega kvadrata hitrosti $v_{ef} = \sqrt{v^2} = 1.4 \text{ cm/s}$. Iz približno deset milijonov cezijevih atomov nastane gruča, ki se dviga. Dokler niso poznali takega laserskega hlajenja, so se hitri atomi v curku sipali na počasnih in zamisel ni delovala. Gruča cezijevih atomov se v navpični cevi v vakuumski posodi dviga vse počasneje in potem pada. Zaradi podobnosti z vodomedom temu pravijo „cezijev vodometa“.

Osnovno stanje atoma cezija je zaradi hiperfine sklopitve spinov jedra in elektrona razcepljeno. V stanju z večjo energijo sta spin $\frac{7}{2}$ jedra ^{133}Ce in spin elektrona vzporedna, tako da je spinsko kvantno število atoma $F = 4$, v stanju z manjšo energijo pa nasprotno vzporedna, tako da je $F = 3$. Gruča gre pri gibanju navzgor skozi mikrovalovno votlino, v kateri atomi preidejo v stanje $F = 4$, in nato po kaki sekundi pade skozi drugo votlino, v kateri atomi sevajo, ko preidejo v stanje $F = 3$. Potem gručo obsevajo s sedmim, merilnim laserjem in po fluorescenci ugotovijo, koliko atomov je prešlo iz



Slika 1. Okvirna risba ure na „cezijev vodomet“. V presečišču treh pravokotnih parov laserskih curkov (a-a', b-b', c-c') hladijo curek cezijevih atomov. Nastane gruča (d), ki se počasi dvigne, obmiruje (e) in pade. V mikrovalovni votlini (f) preidejo atomi v vzbujeno stanje in v mikrovalovni votlini (g) sevajo. Nato gručo obsevajo z merilnim laserjem (h) in zaznavajo fluorescentno svetlobo z merilnikom (i) [2].

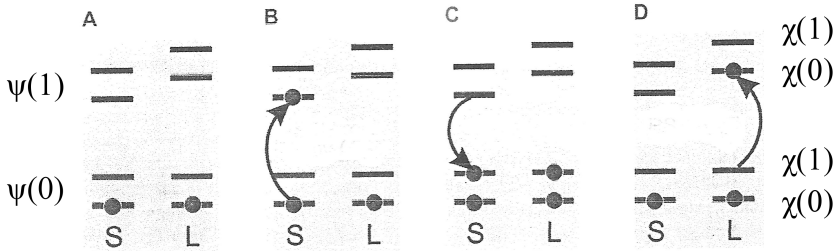
začetnega stanja v končno. Povratna vez poskrbi, da je teh atomov čim več, in s tem zagotovi, da ima elektromagnetno valovanje kolikor mogoče natančno frekvenco $9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$. To frekvenco, ki ji ustreza valovna dolžina približno 3.26 cm, vsebuje dogovor o sekundi. Časovni razmik merijo s štetjem nihajev. Za relativno nenatančnost frekvence ur te vrste navajajo $3.4 \cdot 10^{-16}$.



Slika 2. Linearne kvadrupolne pasti za ione $^{27}\text{Al}^+$ in $^9\text{Be}^+$ (levo) ter ione $^{27}\text{Al}^+$ in $^{25}\text{Mg}^+$ (desno). Pasti imata pozlačene elektrode, prva iz aluminija, druga iz zlitine bakra in berilija. V drugi sta iona oddaljena 0.4 mm od ostrin. Leta 1953 sta Helmut Steinwedel in Wolfgang Paul predlagala uporabo v kvadrupol razvrščenih podolgovatih elektrod s statičnim in radiofrekvenčnim električnim poljem v masnem spektrometru. Paul je razvil enodimenzionalno in tridimenzionalno past in si leta 1989 s Hansom Dehmeltom delil polovico Nobelove nagrade. – Aluminijeve atome iz izvira ionizira diodni laser pri valovni dolžini 369 nm, magnezijeve atome iz izvira pa barvni laser s podvojeno frekvenco pri valovni dolžini 285 nm [3].

V ameriškem Državnem inštitutu za standarde in tehnologijo NIST, nekdanjem Državnem uradu za standarde NBS, v Boulderju v zvezni državi Kolorado so v zadnjih letih razvili natančnejšo uro [3], [4]. V njej uporabijo optične prehode osamljenega iona. Ion aluminija $^{27}\text{Al}^+$ ujamejo v linearno kvadrupolno past in ga v njej zadržujejo s statičnim in radiofrekvenčnim poljem (slika 2). Izkoristijo prehod med stanjema $^1\text{S}_0$ in $^3\text{P}_0$ s frekvenco $1.121 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ ali valovno dolžino 267.6 nm na ultravijoličnem območju. Aluminijev ion ima dva zunanja elektrona – kot helijev atom. Atom z dipolnim prehodom iz stanja v singletnem delu spektra ^1S ne more preiti v stanje v tripletnem delu spektra ^3P . Zato je razpadni čas zelo dolg, $\tau = 20 \text{ s}$, in razpolovna širina $\nu_{1/2} = 1/(2\pi\tau) = 8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ zelo majhna.

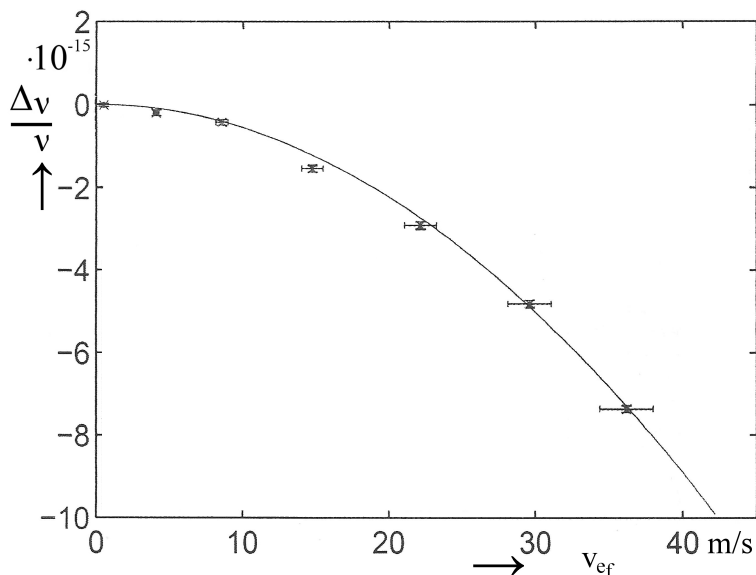
Aluminijev ion nima pripravnega prehoda, ki bi ga bilo mogoče izkoristiti za lasersko hlajenje. Zato v past poleg aluminijevega iona ujamejo še berilijev ion $^9\text{Be}^+$, ki ima tak prehod. Z laserskim curkom ohladijo berilijev ion, ki prek Coulombove sile s *sinhronskim hlajenjem* ohladi še aluminijev ion. Način je bilo mogoče uporabiti, ko so s stabiliziranimi laserji dosegli manjšo širino črte od 1 s^{-1} . Za relativno nenatančnost frekvence za uro z aluminijevim in berilijevim ionom navajajo $2.3 \cdot 10^{-17}$.



Slika 3. Kvantna logična spektroskopija (shematično). Spektroskopski ion $^{27}\text{Al}^+$ opišemo z notranjima elektronskima stanjema, osnovnim $\psi_S(0)$ in vzbujenim $\psi_S(1)$ in logični ion $^9\text{Be}^+$ ali $^{25}\text{Mg}^+$ podobno z osnovnim stanjem $\psi_L(0)$ in vzbujenim stanjem $\psi_L(1)$. Gibanje ionov v pasti opišemo s stanjema harmoničnega oscilatorja, osnovnim $\chi(0)$ in vzbujenim $\chi(1)$. S hlajenjem dosežejo začetno stanje ionov $\psi_S(0)\psi_L(0)\chi(0)$ (A). Prvi sunek laserske svetlobe s frekvenco blizu resonančne frekvence povzroči prehod spektroskopskega iona in prevede iona v sestavljeno stanje $(\alpha\psi_S(0) + \beta\psi_S(1))\psi_L(0)\chi(0) = (\alpha\psi_S(0)\chi(0) + \beta\psi_S(1)\chi(0))\psi_L(0)$ (B). Pri tem je $|\alpha|^2$ verjetnost, da je spektroskopski ion v osnovnem stanju, in $|\beta|^2 = 1 - |\alpha|^2$ verjetnost, da je v vzbujenem stanju. Drugi sunek laserske svetlobe z manjšo frekvenco povzroči prehod spektroskopskega iona in prevede iona v stanje $(\alpha\psi_S(0)\chi(0) + \beta\psi_S(0)\chi(1))\psi_L(0)\psi_S(0)(\alpha\chi(0) + \beta\chi(1))\psi_L(0)$ (C). Naposled tretji sunek laserske svetlobe z manjšo frekvenco povzroči prehod logičnega iona in prevede iona v stanje $\psi_S(0)\chi(0)(\alpha\psi_L(0) + \beta\psi_L(1))$ (D). Tako dosežejo, da stanje spektroskopskega iona preide v stanje logičnega iona z nespremenjenima konstantama α in β . Končno sunek laserske svetlobe povzroči fluorescentno sevanje logičnega iona v stanju $\psi_L(0)$. Frekvenco prvega laserskega curka spreminjajo okoli resonančne frekvence in s fluorescenco otipajo resonančno krivuljo. S povratno vezjo z akusto-optičnimi modulatorji dosežejo, da je frekvenca čim bližje resonanci. Kvantna logična spektroskopija je pomembna kot osnova kvantnega računanja. Po [5].

Pozneje so izdelali podobno uro z magnezijevim ionom $^{25}\text{Mg}^+$ namesto berilijevega iona. Magnezijev ion ima maso, ki se manj razlikuje od mase aluminijevega iona, zato je sinhronsko hlajenje učinkovitejše. Izboljšali so še nekaj drugih lastnosti, tako da za relativno nenatančnost frekvence za uro z aluminijevim in magnezijevim ionom navajajo $8.6 \cdot 10^{-18}$.

Drugi ion, berilijev ali magnezijev, *logični ion*, ima še drugo vlogo. Med prostima pozitivnima ionoma deluje odbojna sila, iona pa se v polju pasti privlačita. Ta sklopitev, ki jo izkoristijo tudi za hlajenje aluminijevega, *spektroskopskega* iona, omogoči, da z obsevanjem ionov s sunki laserske svetlobe po premišljenem načrtu prek stanja drugega iona ugotovijo stanje aluminijevega iona. Dokaj zapleteni postopek je znan kot *kvantna logična spektroskopija* (slika 3).



Slika 4. Točke kažejo izmerjeno relativno spremembo frekvence v odvisnosti od efektivne hitrosti v_{ef} . Črtice zaznamujejo efektivno napako pri merjenju te hitrosti. Spremembi hitrosti za 1 m/s ustreza sprememba amplitude nihanja za 3.8 nm [4].

Pri preizkusu so tek ure z aluminijevim in berilijevim ionom primerjali s tekom ure z aluminijevim in magnezijevim ionom. Uri sta bili v različnih laboratorijih. Primerjavo so izvedli po 75 m dolgem svetlobnem vodniku, v katerem so posebej zmanjšali motnje. Pred tem so v pasti ure z aluminijevim in magnezijevim ionom malo spremenili statično električno polje. Zaradi tega je aluminijev ion zašel malo iz središča pasti v radiofrekvenčno polje in nihal z njegovo frekvenco $\nu_r = 59$ MHz. S spreminjanjem statičnega električnega polja so vplivali na amplitudo nihanja iona s_0 in s tem na amplitudo hitrosti $2\pi\nu_r s_0$ in efektivno hitrost $v_{ef} = 2\pi\nu_r s_0 / \sqrt{2}$. Ura z aluminijevim in magnezijevim ionom kaže čas T' in ura z aluminijevim in berilijevim ionom čas T . Čas ure T' z nihajočim ionom s časom ure T , v kateri ion miruje, veže enačba za *podaljšanje časa*:

$$T' = \frac{T}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = T \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v_{ef}^2}{c^2} \right).$$

Efektivna hitrost iona je zelo majhna v primeri s svetlobno hitrostjo, zato smo koren razvili v vrsto, upoštevali samo dva člena in kvadrat hitrosti nadomestili s kvadratom efektivne hitrosti. Vzemimo, da povezuje enačba

nihajna časa. Za frekvenci, to je obratni vrednosti nihajnih časov, velja potem enačba: $\nu' = \nu(1 - \frac{1}{2}v_{ef}^2/c^2)$. Za relativno razliko frekvenc dobimo:¹

$$\frac{\nu' - \nu}{\nu} = -\frac{1}{2} \frac{v_{ef}^2}{c^2}.$$

Merjenja so podprla to enačbo (slika 4). Pri tem nismo omenili nekaterih podrobnosti.

V nadaljevanju poskusa so spremenili višino ene od ur. To sodi v splošno teorijo relativnosti, v kateri je frekvenca ure odvisna od gravitacijskega potenciala ϕ [6]:

$$\nu' = \nu \left(1 + \frac{\phi' - \phi}{c^2} \right) = \nu \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right).$$

Pri tem smo upoštevali, da je v majhni višinski razliki v bližini Zemlje razlika gravitacijskih potencialov $\phi' - \phi = gh$ s težnim pospeškom g in višinsko razliko h .

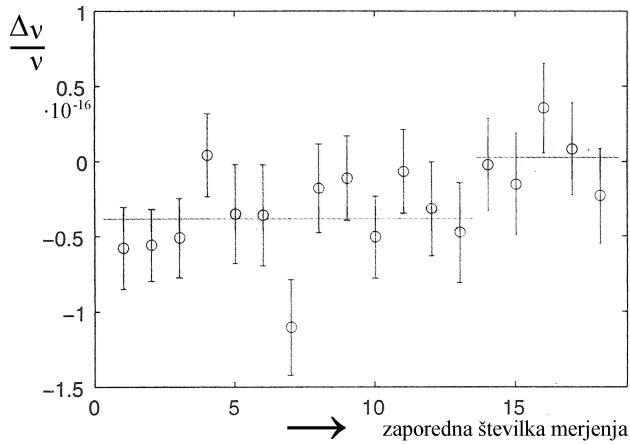
Z laserskim merilnikom višine so ugotovili, da je ura z aluminijevim in magnezijevim ionom 17 cm pod uro z aluminijevim in berilijevim ionom. V tem položaju so merili frekvenco ν skoraj 28 ur. Potem so uro z aluminijevim in magnezijevim ionom dvignili za 33 cm in merili frekvenco ν' 11 ur. Za relativno razliko frekvenc so dobili $(\nu' - \nu)/\nu = (4.1 \pm 1.6) \cdot 10^{-17}$ (slika 5). Iz tega izračunamo po zapisani enačbi višinsko razliko (37 ± 15) cm, kar se zadovoljivo ujema s 33 cm. Merjenje te vrste bi lahko postalo koristno v geologiji in hidrologiji, če bi uspelo še nekoliko povečati natančnost. Tedaj bi bilo mogoče narediti mrežo merilnih postaj, ki bi natanko opredelile geoid in odmike od njega.

Veliko natančnejši preizkus posebne teorije relativnosti so naredili z ioni litija ${}^7\text{Li}^+$ leta 2007. Ioni so krožili v nakopičevalnem obroču in so jih uporabili kot gibajoče se optične ure [7]. Pri hitrosti ionov $0.03c$ in $0.064c$ se je izid na $8.4 \cdot 10^{-8}$ natančno ujema z napovedjo teorije.

Opisani preizkus je bil manj natančen, a je pokazal, kako posebna in splošna teorija relativnosti sežeta do vsakdanjih hitrosti in višinskih razlik. Izvedba poskusa pa je zahtevala zapletene merilne naprave in postopke.

Ob tem se spomnimo preizkusa, ki sta ga leta 1960 izvedla R. V. Pound in G. A. Rebka z brezodrivnim sevanjem γ pri Mössbauerjevem pojavu.

¹Lahko bi ubrali bližnjico. V splošnem velja za Dopplerjev pojav enačba: $\nu' = \nu(1 - v \cos \varphi/c)/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, v kateri je φ kot med zveznico ionov in smerjo valovanja. Enačbo razvijemo v vrsto do kvadratnih členov $\nu' = \nu(1 - v \cos \varphi/c)(1 + \frac{1}{2}v^2/c^2)$ in povprečimo po hitrosti. Ne glede na kot φ dobimo $\nu' = \nu(1 + \frac{1}{2}v_{ef}^2/c^2)$, ker je za harmonično nihanje $\bar{v} = 0$.



Slika 5. Točke kažejo izmerjeno relativno spremembo frekvence v odvisnosti od višine h ure z aluminijevim in magnezijevim ionom. Prvih 14 meritev ustreza prvotni višini te ure, nadaljnja merjenja pa v 33 cm večji višini. Izmerjena povprečna relativna sprememba frekvence je $(\nu' - \nu)/\nu = (4.1 \pm 1.6) \cdot 10^{-17}$, izračunana pa $gh/c^2 = 3.6 \cdot 10^{-17}$ [4].

Pri tem sta spreminjala temperaturo absorberja in s tem kvadrat efektivne hitrosti nihajočih atomov železa. Namesto tega kvadrata se je v enačbi pojavila temperaturna razlika. Za odvisnost relativne frekvence od temperature sta dobila podobno krivuljo, kot jo kaže slika 4 [8]. Primerjava med člankoma razkrije, kako se je merilna tehnika razvila v petdesetih letih.

LITERATURA

- [1] J. B. Goss Levi, *Relativistic effects seen at everyday distances and speeds*, Phys. Today **63** (2010), 16 (11).
- [2] C. Bergquist, S. R. Jefferts in D. J. Wineland, *Time measurement at the millennium*, Phys. Today **54** (2001), 37 (3).
- [3] C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland in T. Rosenband, *Frequency comparison of two high-accuracy Al^+ optical clocks*, Phys. Rev. Letters **104** (2010), 070802.
- [4] C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband in D. J. Wineland, *Optical clocks and relativity*, Science **329** (2010), 1630.
- [5] P. O. Schmidt, T. Rosenband, C. Langer, W. M. Itano, J. C. Bergquist in D. J. Wineland, *Spectroscopy using quantum logic*, Science **309** (2005), 749.
- [6] J. Strnad, *Razvoj fizike*, DZS, Ljubljana 1996, str. 319.
- [7] S. Reinhardt, G. Saathoff, H. Buhr, L. A. Carlson, A. Wolf, D. Schwalm, S. Karpuk, Ch. Novotny, G. Huber, M. Zimmermann, R. Holzwarth, T. Udem, T. W. Hänsch in G. Gwinner, *Test of relativistic time dilation with fast optical atomic clocks at different velocities*, Nature Physics **3** (2007), 861.
- [8] J. Strnad, *Paradoks ur v teoriji relativnosti*, Obzornik mat. fiz. **9** (1962), 128.