

Einsteinova otkrića iz 1905. i Svjetska godina fizike 2005.

Ivica Picek

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Kratki pregled kroz period koji je prethodio čudesnoj godini

Albert Einstein je rođen kao sin Hermanna Einsteina i Pauline (rođ. Koch) u Ulmu (Njemačka) 14.03.1879. godine. Već slijedeće godine obitelj seli u München gdje kasnije Albert pohađa katoličku osnovnu školu. Dodatni satovi judaizma potiču kod njega u dobi od jedanaest godina fazu intenzivnog vjerskog zanosa, a dodatni satovi violine ostavljaju mu taj instrument kao doživotnu ljubav. Od ranih doživljaja kojih se Einstein kasnije volio prisjećati istaknimo njegovu općinjenost magnetskim kompasom (odnosno skrivenom silom koja upravlja magnetskom iglom) u dobi od pet godina. Svoje «otkriće geometrije» (jednostavnih, dokazljivih tvrdnji, poput one da se tri visine trokuta sijeku u jednoj točki) duguje maloj knjižici koja mu je došla pod ruku kad je bio star dvanaest godina.

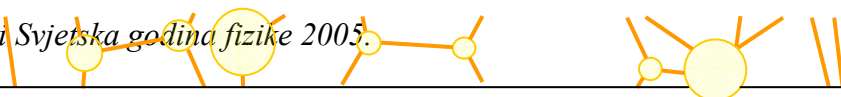
God. 1896. prolazi (iz drugog pokušaja, zbog problema s grčkim i latinskim jezikom) prijemni ispit na ETH u Zürichu. Za vrijeme studija nastavlja samostalno izučavati teorijsku fiziku, a pri polaganju ispita se oslanja na izvrsne bilješke svojeg prijatelja Marcela Grossmanna. Nakon diplomiranja 1900. bezuspješno pokušava naći posao u nastavi. Uz pomoć oca istog prijatelja preuzima posao u patentnom uredu u Bernu i 1901. postaje švicarskim državljaninom. Nakon što 1902. s kolegicom sa studija Milevom Marić dobiva kćer Lieserl, oni se vjenčaju i u braku koji traje do 1914. dobivaju još sinove Hansa-Alberta i Eduarda.

Posao u patentnom uredu u Bernu dopuštao je Einsteinu da se posveti teorijskoj fizici kao svojem hobiju. U tada vodećem njemačkom časopisu *Annalen der Physik* on u naredne četiri godine objavljuje četiri rada u kojima se bavi realnošću atoma i molekula, nečeg što tada još nije bilo opće prihvaćeno. Potom dolazi do eksplozije njegove kreativnosti u 1905. godini, njegovoj čudesnoj godini (*annus mirabilis*) [1].

Čudesna godina 1905.

U ovom napisu zadržat ćemo se na godini u kojoj su se pojavili Einsteinovi radovi koji će obilježiti cijelo nadolazeće stoljeće:

- **17.03.1905.** Einstein šalje na objavljivanje u *Annalen der Physik* rad u kojemu predlaže postojanje kvanta svjetlosti i na temelju toga daje objašnjenje fotoelektričnog učinka;



- dovršava rad u kojemu pokazuje kako se izračunava Avogadrov broj i veličina molekula i to na temelju njihova gibanja u otopini. Taj mu je rad **u srpnju** prihvaćen kao doktorat na Sveučilištu u Zürichu, a odmah potom on šalje u *Annalen der Physik* **još jedan rad** u kojemu daje objašnjenje Brownovog gibanja;
- **30.06.1905.** u časopis *Annalen der Physik* stiže njegov rad «o elektrodinamici tijela u gibanju», u kojemu, pri preispitivanju tadašnjeg razumijevanja prostora i vremena, uvodi specijalnu teoriju relativnosti;
- **27.09.2005.** u isti časopis stiže i peti, posljednji njegov rad iz te godine, u kojemu ispituje ovisnost inercije tijela o njegovoj energiji.

Izgleda nevjerojatno da su svi ti radovi djelo istog čovjeka: rad na **Brownovom gibanju**, **fotoelektrični učinak** i **specijalna relativnost** s relacijom $E=mc^2$, svaki slijedeći impresivniji od prethodnoga! Po riječima Franka Wilczeka, jednog od dobitnika Nobelove nagrade za 2004. godinu (o njoj će biti riječi u mojem drugom predavanju) ta bi tri rada, u navedenom redosljedu, zasluživala solidnu, jaku i super jaku Nobelovu nagradu. Dogodilo se da je nagrađen samo ovaj srednji koji se odnosi na svjetlosne kvante, 1921. godine, «za njegove doprinose teorijskoj fizici, a posebice za otkriće zakona fotoelektričnog učinka».

S današnjeg gledišta postaje jasno kako je svojim radovima iz «čudesne godine» Einstein postavio abecedu (korake koje ćemo u ovom napisu označiti s **A**, **B** i **C**) povijesnog pohoda na izučavanje atomskog i subatomskog svijeta, pohoda koji je na neponovljivi način premostio 19. i 21. stoljeće.

Kao što su radovi iz 1905. samo blistavi početak, tako već Einsteinov rad iz 1907. pokazuje da je on svjestan kako je i sama specijalna relativnost samo početak općenitije teorije. Isprva Einstein smatra da je oblačenje specijalne relativnosti u moderno tenzorsko ruho, kako je to učinio Herman Minkowski, samo odraz «suvišne učenosti». No ubrzo i sam usvaja tenzorsku metodu koja mu omogućuje prijelaz od specijalne na opću teoriju relativnosti kojom postavlja teoriju za silu gravitacije i koja se općenito smatra njegovim najvećim postignućem.

Dio i cjelina u Einsteinovu radu

Einsteina je od početka vodila potreba općenitog razumijevanja prirode i u toj službi je bio i njegov interes za odabrane vrlo specifične probleme poput Brownovog gibanja ili fotoelektričnog efekta. Tim je problemima kao čarobnim štapićem počeo razotkrivati ljuske mikrosvijeta.

A: Brownovo gibanje je poslužilo za nepobitni dokaz molekularne i atomske podstrukture.

B: Uvođenjem kvanta svjetlosti Einstein je naćeo problem dualnosti ćestice i vala. Na razriješavanju dualnosti, nezaobilazne na skali karakteriziranoj Bohrovim radijusom atoma, $r_B = 5.3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, izrasla je kvantna mehanika.

C: Pokazalo se da je pri izučavanju još manjih dimenzija, na subatomske skali karakteriziranoj tzv. Comptonovom valnom duljinom, $r_c = 3.86 \cdot 10^{-13}$ m, potrebno kvantnu mehaniku dopuniti sa specijalnom teorijom relativnosti. U tom spoju rođena je teorija polja (relativistička kvantna mehanika) kao moćno oruđe za budući opis temeljnih sila (pa tako i temeljne jakе sile, za koju je dodjeljena Nobelova nagrada za 2004. godinu).

Budući da su specifične teme pod **A** i **B** pokrivene drugim predavanjima na ovoj školi, zadržimo se ovdje na idejama i dosezima specijalne teorije relativnosti.

Specijalna teorija relativnosti

Einsteinova specijalna teorija relativnosti predstavljala je neviđeni odmak u dotadašnjem shvaćanju prostora i vremena. Usprkos imenu "relativnosti", ta se teorija temelji na dvijema apsolutnim sastavnicama: **brzini svjetlosti** i **vlastitom vremenu!** Ono što je "relativno" je pojava. Primjerice, dok mirujemo u odnosu na električni naboj, za nas je on izvor čisto električnog polja. No, ukoliko se gibamo u odnosu na taj naboj, uz električno opažat ćemo i magnetsko polje. Takva «relativnost pojavnosti» događa se na još elementarnijoj razini gdje ruši Newtonove pojmove apsolutnog prostora i vremena. Newtonovo je shvaćanje blisko našem svakodnevnom iskustvu. Prema njemu vrijeme ima pojava potpuno različitu od one prostora. Udaljenosti u prostoru nemaju ništa zajedničko s vremenskim razmacima. Kvadrat vremenskog intervala, t^2 , pozitivna je vrijednost, kao i kvadrat prostorne udaljenosti, l^2 . Ova posljednja u pravokutnom koordinatnom sustavu zadovoljava poznato Pitagorino pravilo,

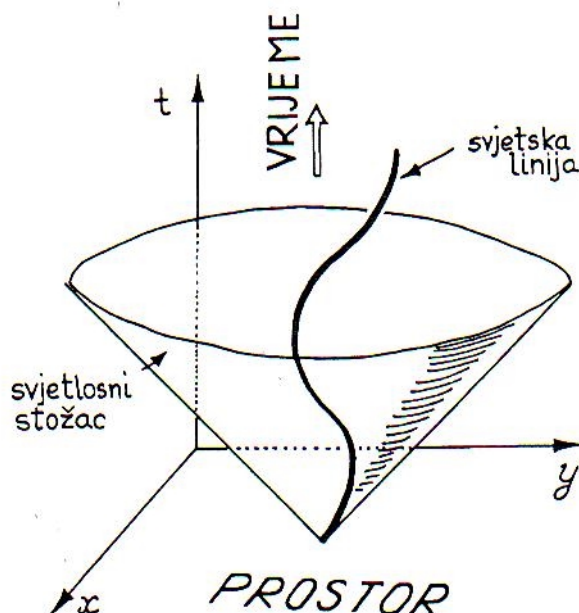
$$l^2 = x^2 + y^2 + z^2.$$

Međusobna neovisnost prostora i vremena odražava se i u različitim jedinicama (metrima i sekundama) u kojima mjerimo prostor i vrijeme. Shvaćanje specijalne relativnosti, prema kojoj prostorni i vremenski razmaci između dva događaja nisu "invarijantni" (isti za svakoga) nego ovise o stanju gibanja promatrača, naizgled se kosi s iskustvom (doduše ograničenim na brzine koje su puno manje od brzine svjetlosti).

O kakvom je prostoru uistinu riječ, dočarat će nam neobično svojstvo širenja svjetlosti, koje ne pošiva uobičajeno zbrajanje brzina (vidjeti *Vježbu 1*). Naime, mnoga su mjerenja potvrdila iznenađujuće rezultate prvih mjerenja Michelsona i Morleya iz 1881. godine, koja su pokazivala uvijek istu brzinu svjetlosti, bez obzira na brzinu kojom se giba osoba koja tu brzinu mjeri. To je u sukobu s Newtonovim zakonima, prema kojima rezultat mjerenja brzine mora ovisiti o brzini opažача. U sustavu mirovanja etera (koji podržava širenje svjetlosti i koji prema Newtonu miruje u apsolutnom prostoru) mjerila bi se ista brzina svjetlosti u svim smjerovima, dok netko u gibanju treba mjeriti različitu brzinu. S druge strane, apsolutnost brzine svjetlosti, njena ista vrijednost za svakoga, omogućava nam da onda i prostorne udaljenosti mjerimo svjetlosnim sekundama ili svjetlosnim godinama, kao vremenom koju svjetlost treba da prevali danu udaljenost.

Poistovjećivanjem svjetlosti i vremena dolazi do stapanja prostora i vremena u objedinjeni četverodimenzijski prostorno-vremenski svijet. Zasebni Newtonovi intervali vremena i prostora spojeni su u "invarijantni" prostorno-vremenski interval, putem neobičnog poopćenja Pitagorinog poučka:

$$(\text{prostorno-vremenski interval})^2 = (\text{vremenski interval})^2 - (\text{prostorni interval})^2.$$



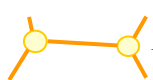
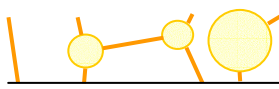
Slika 1-1: Prikaz svjetske linije-gibanja čestice u prostoru-vremenu s dvije prostorne koordinate (preuzeto iz ref. [2])

Relativni "minus" predznak u tom "poučku" govori o neeuclidskoj geometriji prostora-vremena, o prostoru Minkowskog. Označimo li četvero interval tog prostora slovom s , a brzinu svjetlosti slovom c , gornji "poučak" dobiva ekonomičniji, matematički zapis

$$s^2 = c^2 t^2 - (x^2 + y^2 + z^2).$$

To je u stvari jednadžba čuvenog "svjetlosnog stošca", kakvog možemo nacrtati u dvije dimenzije, na papiru, u x, y, t -koordinatama (vidjeti sl.1-1.).

Svjetlosni stožac je u stvari omotač putova svjetlosnih zraka, za koje je prostorno-vremenska udaljenost $s = 0$. Četverodimenzijska prostorno-vremenska udaljenost između našeg oka i zvijezda koje ono gleda, je nula [3]. "Svjetlosno područje" koje opisuje stožac, razdvaja unutarnje "vremensko područje" dohvatljivo svjetlosnim signalima, od vanjskog "prostornog područja" koje svjetlost ne može dohvatiti. Time je određen i "horizont" kauzalno povezanih događaja za nekog budućeg promatrača.



Svaki opažač koji živi u četverodimenzijском prostoru-vremenu, posjeduje vlastiti sustav, sustav mirovanja, u kojemu je definirano vlastito vrijeme, τ , kao invarijanta dana relacijom

$$s^2 = c^2 \tau^2.$$

Vlastito vrijeme je važni atribut elementarnih čestica [2], koje posjeduju određena, dobro definirana vremena života. Primjerice, mion, čestica koja u mirovanju živi samo milijuntinku sekunde, djeluje kao sat. Mioni u gibanju žive duže, tako da primjerci koji se gibaju brzinama bliskim brzini svjetlosti mogu prevaliti znatne udaljenosti, bilo u atmosferi, bilo u prstenovima suvremenih ubrzivača elementarnih čestica (vidjeti *Vježbu 2*).

Nasuprot «relativnoj» pojavnosti, zakoni prirode su apsolutni (posvuda isti). Najbolji primjer za to su danas spoznati temeljni zakoni međudjelovanja elementarnih čestica. Univerzalnost tih zakona postaje očigledna kada se oni formuliraju u tenzorskom zapisu u četverodimenzijском prostoru vremenu, na "relativistički invarijantni način".

Neke od posljedica specijalne relativnosti

Einsteinovim postavljanjem **invarijanti**, veličina koje su iste za sve inercijalne opažače, započela je era vladavine načela simetrije u fizici. Relativistička simetrija opisana grupom Lorentzovih transformacija imaće niz zanimljivih posljedica koje dolaze do izražaja tek kod sustava s velikim brzinama v relativnih gibanja, izraženih relativističkim faktorom

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Faktor γ se često pojavljuje u relativnosti (posljedica je Lorentzovih transformacija koje prikazujemo u *Vježbi 1*). Tim su faktorom određene i glasovite pojave *dilatacije vremena* i *kontrakcije dužina* (koje ćemo objasniti u *Vježbi 2*):

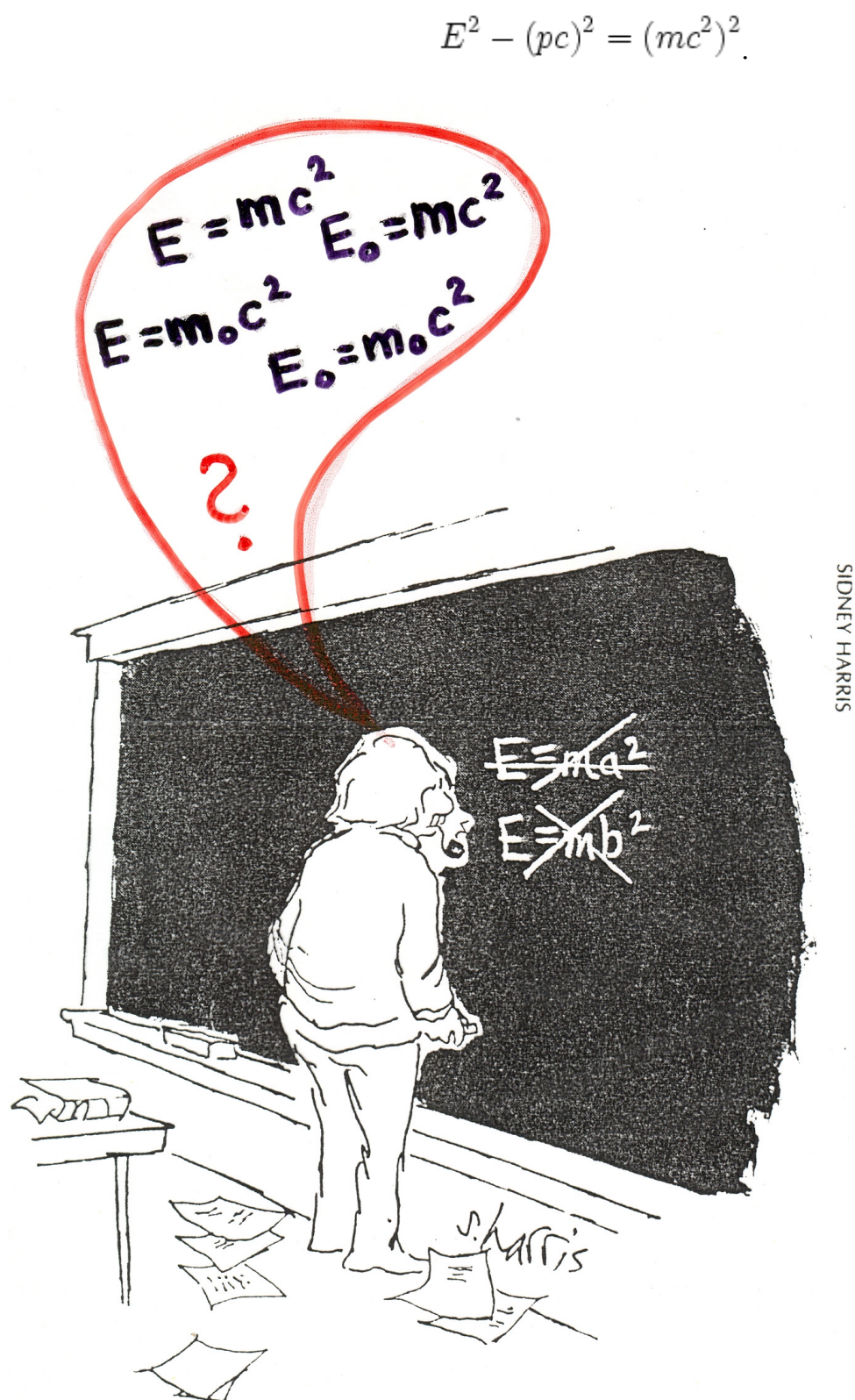
$$\Delta t = \gamma \Delta t_0; \quad L = L_0/\gamma.$$

Faktor γ će ući i u izraze za energiju i impuls tijela mase m u gibanju brzinom v ,

$$E = \gamma mc^2$$

$$p = \gamma mv.$$

pri čemu su energija i impuls povezani relativističkom formulom



Slika 1-2: Nadopunjena ilustracija preuzeta iz ref. [4].

Za brzine puno manje od brzine svjetlosti γ se može razviti u Taylorov red, što daje

$$E \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

$$p \approx mv$$

Oдавде je očigledno da je masa samo jedan oblik energije (čuvana ekvivalentnost na sl.1-2).

Vježba 1: Relativističko zbrajanje brzina

U klasičnoj fizici znamo za jednostavno zbrajanje brzina. Promatrajmo tri koordinatna sustava: prvi sustav O, drugi O' koji se duž njegove x -osi giba brzinom v i treći O'' koji se duž x' -osi sustava O' giba brzinom u . Tada se O'' giba u odnosu na O brzinom $u+v$. Lako je zamisliti sustave koji se onda gibaju dvostrukom brzinom svjetlosti. Da bi očuvali c kao maksimalnu moguću brzinu, sustavi moraju biti povezani Lorentzovim transformacijama: transformacije od O na O' i od O' na O'' mogu se napisati u matričnom obliku,

$$\begin{pmatrix} x' \\ ct' \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} 1 & -\beta \\ -\beta & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ ct \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x'' \\ t'' \end{pmatrix} = \gamma' \begin{pmatrix} 1 & -\beta' \\ -\beta' & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ ct' \end{pmatrix}$$

gdje su uvedene oznake za β i za γ na način

$$\beta = \frac{u}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\beta' = \frac{v}{c} \quad \gamma' = \frac{1}{\sqrt{1-\beta'^2}}$$

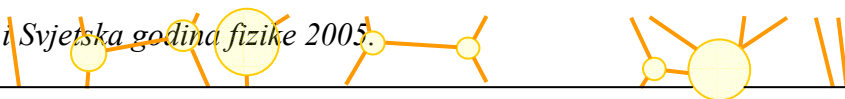
Veza između koordinata sustava O i O'' dobije se jednostavnim množenjem matrica

$$\begin{pmatrix} x'' \\ ct'' \end{pmatrix} = \gamma\gamma' \begin{pmatrix} 1 + \beta\beta' & -(\beta + \beta') \\ -(\beta + \beta') & 1 + \beta\beta' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ ct \end{pmatrix}$$

Isčitajte odatle β'' izraženu s β i β' . (Iscrpni odgovor naći ćete u udžbenicima, npr. ref. [5]).

Vježba 2: Vrijeme života čestice u gibanju

Mioni su elementarne čestice koje žive $2.2 \cdot 10^{-6}$ sekundi prije nego se raspadnu (za razlikovanje «vremena života» od «poluživota pogledajte ref. [5]). Kojom se brzinom moraju gibati mioni stvoreni u atmosferi na 15 km visine, da bi u svojem preletu dosegli površinu Zemlje? Usporedite viđenje tog događaja od promatrača koji «sjedi» na mionu i od promatrača koji sjedi na Zemlji.



Literatura

- [1] Abraham Pais, "*Subtle is the Lord... Scientific biography of A. Einstein*", Oxford University Press, 1982
- [2] Ivica Picek, "*Elementarne čestice – iskrenje u svemiru tamne tvari*", Školska knjiga, Zagreb 1997
- [3] Edward R. Harrison, "*Cosmology, the science of the universe*", Cambridge University Press, 1981
- [4] Lev b. Okun, "*The concept of mass* ", Physics Today, June 1989 , p.31
- [5] Ivica Picek, "*Fizika elementarnih čestica*", Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, HINUS, Zagreb 1997

Niz web-stranica nudi sadržaje specijalne relativnosti. Od onih na hrvatskom jeziku preporučam e-školu Hrvatskog fizikalnog društva, <http://eskola.hfd.hr>, posebno «fiziku svemira», http://eskola.hfd.hr/fizika_svemira/svemir.html.