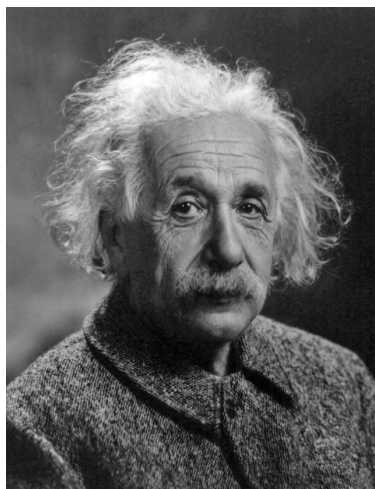


EINSTEINOVA RELATIVNOST

ŽIVOTOPIS

Albert Einstein rodio se 14. ožujka 1879. u Ulmu, u Njemačkoj, u židovskoj obitelji. U dobi od 12 godina sam je sebe naučio geometriju. Školovanje je započeo u Münchenu. S 15 godina otišao je u Aarau (Švicarska) te studirao matematiku i fiziku na Visokoj Tehničkoj školi u Zürichu. U školskom sustavu mrzio je podvrgavanje disciplini, nemaštoviti školski duh i postojeće metode učenja. Često je izostajao s predavanja i koristio to vrijeme učeći fiziku na svoj način te svirajući svoju voljenu violinu. Položio je sve ispite i diplomirao 1900. godine proučavajući bilješke svog kolege. Možda je suviše spomenuti kako profesori nisu imali lijepo mišljenje o njemu. Godine 1902. pa sve do 1909. radi u Bernu u Patentnom zavodu. U tom razdoblju otkrio je niz osnovnih zakona prirode (brzinu svjetlosti kao maksimalnu brzinu, dilataciju vremena i novu interpretaciju dilatacije dužina, ekvivalentnost mase i energije i princip ekvivalencije te osnovu opće teorije relativnosti). Godine 1903. u Zürichu se oženio matematičarkom Milevom Marić iz Novog Sada s kojom je zajedno studirao na Visokoj Tehničkoj školi. U tom braku koji je završio razvodom (kasnije se Einstein ponovo oženio) rođena su dva sina.

Godine 1905. primio je doktorat Zürichog sveučilišta, a četiri godine kasnije (1909.) postaje izvanredni profesor teorijske fizike na sveučilištu u Zürichu te redovni profesor u Visokoj Tehničkoj školi. Kratko je vrijeme radio i na sveučilištu na njemačkom jeziku u Pragu. Od 1914. direktor je Kaiser-Wilhelmovog instituta u Berlinu (Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik) i član Pruske akademije znanosti. U Berlinu radi na svojoj teoriji gravitacije, koja je sadržana u općoj teoriji relativnosti, objavljenoj u dopunjenom obliku 1916. godine. Po dolasku Hitlera na vlast 1933. Einsteinu su oduzete sve funkcije. U znak protesta, odriče se njemačkog državljanstva i odlazi u Sjedinjene Države gdje do kraja života radi u Institutu za viša znanstvena istraživanja (Institute for Advanced Study) u Princetonu. Preminuo je 18. travnja 1955. godine u Princetonu u New Jerseyju, u Sjedinjenim Američkim Državama.



Albert Einstein

Formulirao je specijalnu i opću teoriju relativnosti kojima je uveo revoluciju u modernu fiziku. Pored toga, doprinio je napretku kvantne teorije i statističke mehanike. Iako je najpoznatiji po teoriji relativnosti (posebno po ekvivalenciji mase i energije $E=mc^2$), Nobelova nagrada za fiziku mu je dodijeljena 1921. godine za objašnjenje fotoelektričnog efekta (rada objavljenog 1905. u Anno Mirabile ili „Godini čuda“) kao i za doprinos razvoju teorijske fizike.

SPECIJALNA TEORIJA RELATIVNOSTI

Problem nesuglasja između Galilejeve relativnosti i konstantnosti brzine svjetlosti razriješio je 1905. godine Einstein uvođenjem specijalne teorije relativnosti. U svojoj teoriji Einstein je krenuo od dvaju jednostavnih načela: načela relativnosti i načela konstantnosti brzine svjetlosti.

Einsteinovo načelo relativnosti

Einstein je proširio Galilejevo načelo relativnosti na sve fizikalne zakone, dakle i na zakone elektromagnetizma.

Prema tom načelu možemo govoriti samo o relativnom gibanju jednoga inercijskog sustava u odnosu prema drugome. Svaki bi motritelj mogao tvrditi da baš njegov inercijski sustav miruje.

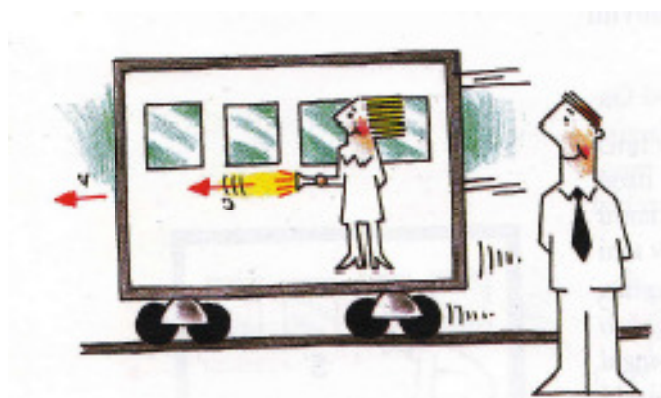
Fizičari to iskazuju ovako: „U fizici se ne može govoriti niti o apsolutnom mirovanju, niti o apsolutnom gibanju inercijskog sustava. Gibanja inercijskih sustava uvijek su relativna.“

Zakoni fizike jednaki su za motritelje u svim inercijskim sustavima, tj. svi su inercijski sustavi ravnopravni. To znači da neki fizikalni zakon ima isti matematički oblik u svakom inercijskom sustavu.

Načelo konstantnosti brzine svjetlosti

Brzina svjetlosti ne ovisi o tome iz kojeg se inercijskog sustava mjeri i jednaka je u svim smjerovima inercijskog sustava.

U svezi s tim načelom javlja se problem zbrajajna brzina.



Motriteljica Marija stoji u vagonu koji se giba brzinom v . S tla uz prugu to motri Pero. Marija emitira svjetlosni puls u smjeru gibanja vagona. Prema načelu konstantnosti brzine svjetlosti, svjetlosni puls ima brzinu c u odnosu prema Mariji. Prema Galilejevoj transformaciji brzina, brzina c svjetlosnog pulsa u odnosu prema Peri koji stoji na tlu jednaka je zbroju brzine svjetlosnog pulsa u odnosu prema vagonu i brzine vagona u odnosu prema Peri. Dakle, prema Galileju brzina svjetlosti u odnosu prema motritelju Peri na tlu jest: $c = c' + v$

No, to je u suprotnosti s Einsteinovim načelom o konstantnosti brzine svjetlosti, prema kojemu svaki motritelj mora imati istu brzinu c svjetlosnog pulsa, neovisno o tome kako se giba u odnosu prema svjetlosnom izvoru. Brzina svjetlosti u vakuumu ne ovisi ni o gibanju svjetlosnog izvora ni o gibanju motritelja i za svakog motritelja uvijek ima vrijednost c . Dakle, brzina svjetlosti u svim inercijskim sustavima ima jednaku vrijednost. Odatle zaključujemo:

Za brzinu svjetlosti ne vrijedi Galilejeva transformacija brzina.

Fizikalne posljedice načela teorije relativnosti

U prvi mah dva načela teorije relativnosti ne izgledaju osobito radikalno i ne bi se očekivalo da imaju dramatične posljedice. Međutim, Einstein je dokazao da iz njih slijedi niz neočekivanih i dalekosežnih posljedica, primjerice:

- Relativnost istodobnosti: Dva događaja, istovremena za jednog promatrača, ne moraju biti istovremena za drugoj promatrača ako su promatrači u relativnom gibanju.
- Vremenska dilatacija: Ure koje se gibaju u odnosu prema motritelju idu sporije.
- Skraćenje (kontrakcija) dužine: Tijela koja se gibaju u odnosu prema motritelju skraćena su.
- Prostor i vrijeme ne mogu se razmatrati neovisno.
- Količina gibanja i kinetička energija rastu izvanredno brzo kad se brzina tijela približuje brzini svjetlosti u vakuumu.
- Nijedno tijelo ne može premašiti brzinu svjetlosti u vakuumu.
- Masa se tijela može pretvarati u energiju, i obratno.

Definirajuća osobina specijalne relativnosti je zamjena Galilejeve transformacije klasične mehanike s Lorentzovom transformacijom.

Lorentzove transformacije

$$x' = \frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad t' = \frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y \quad z' = z$$

Ove transformacije nazivamo Lorentzovim transformacijama po nizozemskom fizičaru A. H. Lorentzu, koji ih je otkrio rješavajući jedan elektrodinamički problem. Uočimo da se u slučaju brzina mnogo manjih od brzina svjetlosti ($v \ll c$), Lorentzove transformacije svode na Galilejeve. Naime, tada je

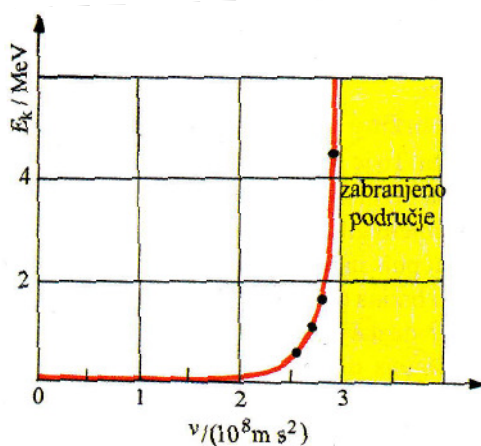
$$\frac{v^2}{c^2} \approx 0, \text{ a } \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1$$

Iz Lorentzovih transformacija proizlazi da brzina svjetlosti v ne može biti jednaka brzini svjetlosti, niti veća od nje. Kada bi brzina bila jednaka brzini svjetlosti ($v=c$), izraz $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ bio bi jednak nuli, što nema smisla, jer se taj izraz nalazi u nazivniku transformacijskih jednadžbi. Za $v > c$ izraz $1 - \frac{v^2}{c^2}$ je negativan, stoga korijen iz njega nije realan broj. To iskazuje jedno bitno prirodno načelo sadržano u specijalnoj teoriji relativnosti: ne postoji brzina veća od one kojom se svjetlost širi kroz vakuum.

Brzina svjetlosti-granična brzina

U teoriji relativnosti brzina svjetlosti c najveća je moguća brzina. To pretkazanje teorije relativnosti provjereno je brojnim pokusima.

Evo jednog pokusa koji je izveden 1964. godine. U akceleratoru su snažno ubrzavani elektroni i mjerena je njihova kinetička energija koju imaju pri različitim brzinama. Rezultati tog pokusa prikazani su u dijagramu. Na os apscisa nanosena je brzina elektrona, a na os ordinata odgovarajuća kinetička energija. Bez obzira na to koliko se kinetička energija elektrona povećavala, njihova brzina ne može dosegnuti brzinu svjetlosti. Kad im je brzina sasvim blizu brzini svjetlosti, potrebno je golemo povećanje kinetičke energije da bi im se brzina tek neznatno povećala ostajući i dalje manja od brzine svjetlosti.



Graf na slici rezultat je teorije relativnosti, a kružići predočuju mjerenje vrijednosti kinetičke energije elektrona za nekoliko različitih vrijednosti brzina elektrona. Jedinica na osi ordinata MeV, vrlo je visoka s obzirom na to da elektron ima vrlo malu masu. Zbog toga graf ovisnosti kinetičke energije o brzini, prikazan u tome koordinatnom sustavu za brzine manje od $0,1 c$, leži sasvim blizu osi apscisa. Ako bi se na osi ordinata odabrala mnogo manja jedinica, vidjeli bismo da je za brzine mnogo manje od brzine svjetlosti kinetička energija dana klasičnim izrazom

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Brzine tijela oko nas mnogo su manje od brzine svjetlosti i za njih ovaj izraz vrijedi s vrlo visokom točnošću. No za vrlo velike brzine, bliske brzini svjetlosti, taj izraz za kinetičku energiju ne vrijedi. U opisanom pokusu elektroni su se ubrzavali na brzinu od čak $0,999\,999\,999c$, tj na $99,999\,9999\%$ brzine svjetlosti. Brzina elektrona nikada ne može dosegnuti graničnu brzinu c iako mu se kinetička energija može po volji povećavati.



U superbrzome svemirskom brodu, koji s brzinom $c/2$ leti prema Zemlji, astronaut šalje svjetlosni signal. Brzina kojom se svjetlost udaljava od svemirkog broda jest c prema mjerenju astronauta. Za motritelja na Zemlji brzina svjetlosnog signala koji dolazi s broda nije $c + c/2 = 3c/2$. nego je točno c !

OPĆA TEORIJA RELATIVNOSTI (1907. - 1915.)

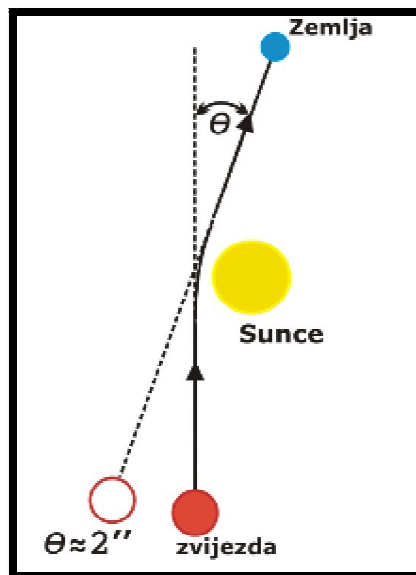
Prema jednom od načela specijalne teorije relativnosti, svi zakoni fizike imaju isti oblik u svim inercijalnim sustavima. Einstein je to načelo proširio i na neinercijalne, tj. akcelerirane sustave, te je izgradio tzv. opću teoriju relativnosti. Einstein je prvi predložio da je "prostorvrijeme" zaobljeno. 1915. on je osmislio "jednačine Einsteinovog polja" koje zakrivljenost "prostorvremena" povezuju s masom, energijom i njegovom unutrašnjom inercijom.

Neke od posljedica opće relativnosti:

-Akcelerirani sustav u kojem nema gravitacijskog polja je ekvivalentan mirnom sustavu u kojem postoji gravitacijsko polje. Zamislimo da smo u svemirskom brodu prije njegova lansiranja. Zbog sile teže djelujemo na pod broda silom koju nazivamo težina. Brod je poletio i nakon nekog vremena nalazimo se u području u kojem nema nikakvog gravitacijskog djelovanja. Međutim, ako se brod ubrzava, na nas će djelovati inercijalna sila, čiji je smjer suprotan akceleraciji broda, a to znači prema njegovom podu. U slučaju da je iznos akceleracije broda jednak g , zbog inercijalne sile ćemo pritiskati brod istom silom kao da smo na Zemljinoj površini.

-Zrake svjetlosti se zakrivljuju u prisutstvu gravitacijskog polja

Zamislimo da iz akcelerirajućeg broda, koji se nalazi daleko od svih svemirskih tijela, izlazi svjetlosna zraka iz izvora svjetlosti na bočnoj strani broda. Zbog ubrzanog gibanja broda mjesto na koje zraka upada na suprotnoj strani broda niže je od mjesta iz kojeg zraka izlazi. Put svjetlosne zrake u odnosu na sustav vezan za brod nije pravocrtan, nego zakrivljen. Ako su akcelerirani sustavi i gravitacijska polja ekvivalentni, očekujemo i skretanje svjetlosne zrake kada ona prolazi kroz gravitacijsko polje nekog svemirskog tijela. Za vrijeme potpune pomrčine Sunca 1919. godine zaista je prvi put utvrđeno skretanje svjetlosne zrake koja prolazi blizu Sunca.



Zakretanje zrake svjetlosti

-Zakretanje putanja planeta

Slično kao i skretanje zrake svjetlosti, Einstein i gibanje planeta objašnjava zakrivljenošću prostor-vremena. Gibanja nebeskih tijela opisuje i Newtonova mehanika, koja se temelji na općem zakonu gravitacije. Ipak, nije riječ o dvjema teorijama koje su paralelne, a različitim postupcima dovode uvijek do istih rezultata. Postoje pojave koje su objašnjive Einsteinovom teorijom, a nemaju objašnjenja unutar Newtonove teorije. Jedna od tih pojava je i zakretanje planeta Merkura. Newtonova teorija je dobro približenje Einsteinove teorije kada su gravitacijska polja slaba, a brzine gibanja masa male u usporedbi s brzinom svjetlosti.

-Gravitacijski crveni pomak

Opća teorija relativnosti predviđa produljenje vremenskog intervala u gravitacijskom polju. To znači da je period elektromagnetskih valova u gravitacijskom polju veći nego izvan gravitacijskog polja, a frekvencija manja. Radi li se o svjetlosti, smanjenje frekvencije znači promjenu boje svjetlosti od plavog dijela spektra prema crvenom. Zato se promjena frekvencije svjetlosti u gravitacijskom polju naziva gravitacijskim crvenim pomakom. Eksperimentalno je potvrđen usporedbom svjetlosti koja dolazi sa Sunca sa svjetlošću što je emitiraju atomi istog kemijskog elementa u laboratoriju.

DJELOKRUG

Teorija relativnosti promijenila je teorijsku fiziku i astronomiju u 20. stoljeću. Kada je prvi put objavljena, teorija relativnosti zamijenila je Newtonovu teoriju mehanike, staru 200 godina.

U području fizike, relativnost je unaprijedila znanje o elementarnim česticama i njihovim temeljnim reakcijama, uz najavljuvanje nuklearnog doba. Zahvaljujući relativnosti, kozmologija i astrofizika uspjele su predvidjeti izvanredne astronomske pojave kao što su neutronske zvijezde, crne rupe i gravitacijski valovi.

Pitanja:

1. Neka galaktika udaljava se od Zemlje brzinom $0,3c$, a druga brzinom $0,7c$ u suprotnom smjeru.

a) Kolikom brzinom dolazi ta svjetlost iz galaktika na Zemlju?

b) Kolikom brzinom svjetlost iz jedne od galaktika dolazi u drugu galaktiku?

Rješenje: $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ u oba slučaja jer brzina svjetlosti ne ovisi o tome iz kojeg se inercijskog sustava mjeri i jednaka je u svim smjerovima inercijskog sustava.

2. Količkom bi se akceleracijom morao ubrzavati svemirski brod koji plovi daleko od Zemlje i drugih nebeskih tijela da bi težina tijela u njemu bila jednaka težini na zemlji?

Rješenje? $a=g$ Ako se brod ubrzava, na nas će djelovati inercijalna sila, čiji je smjer suprotan akceleraciji broda, a to znači prema njegovom podu. U slučaju da je iznos akceleracije broda jednak g , zbog inercijalne sile ćemo pritiskati brod istom silom kao da smo na Zemljinoj površini.

Marina Kučica 4.g

EINSTEINOV ZBRAJANJE BRZINA

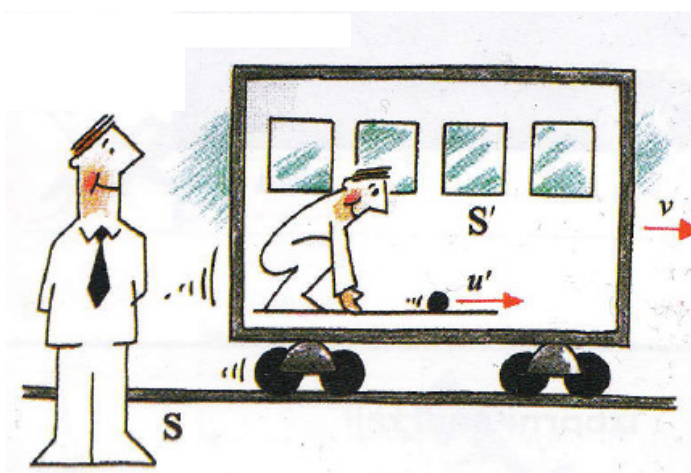
Einstein je u svojim razmatranjima krenuo od jedne neobične činjenice koja je utvrđena eksperimentom, a bila je potpuno neobjašnjiva za fiziku toga doba. Naime, poznat nam je princip zbrajanja brzina:

Imamo li pištolj koji ispaljuje metak brzinom od, na primjer, 100 m/s, te s njim sjednemo na krov vlaka, čekamo da vlak ubrza na 30 m/s i zatim ispalimo metak u smjeru gibanja vlaka, promatrač koji stoji pored pruge će izmjeriti da brzina metka iznosi 130 m/s. Međutim, vrijedi li isto i za svjetlost?

U nekoliko desetljeća prije nastanka teorije relativnosti brzina svjetlosti je prilično precizno izmjerena i znanstvenici su, upravo koristeći ovo zbrajanje brzina, htjeli provjeriti kojom se brzinom Zemlja, Sunce i cijela naša galaksija kreću "u odnosu na ostatak svemira", to jest, u odnosu na prostor kojim lete. Naime, brzine koje u svemiru možemo izmjeriti uvijek su relativne, to jest "u odnosu na nešto drugo" što promatramo. No, ono što je čovjek oduvijek htio doznati bilo je njegovo *apsolutno* mjesto u svemiru: jesmo li blizu centra, jesmo li daleko, krećemo li se brzo ili sporo u odnosu na sam svemir ili čak stojimo? No, jedina brzina koju možemo izmjeriti je naša brzina u odnosu na neki drugi objekt. Tako je brzina Zemlje u odnosu na Sunce oko 30 km/s, brzina Sunca u odnosu na galaksiju Mliječni put - dakle, brzina kojom Sunce kruži oko središta galaksije - je oko 200 km/s... Ali kolika je brzina naše galaksije u odnosu na cijeli svemir, to jest na prostor kojim se gibamo? Opet, mogli smo izračunati našu brzinu u odnosu na druge galaksije, dakle *relativnu* brzinu, ali to je sve.

Einstein je zaključio da Galilejevo zbrajanje brzina ne vrijedi u slučaju kad su brzine veoma velike, bliske brzini svjetlosti. Zato je, uz pomoć načela vlastite teorije relativnosti, izveo novu formulu za zbrajanje brzina.

PRIMJER S KUGLOM U VLAKU



Prema Galilejevoj formuli brzina lopte u odnosu na motritelja iznosila bi:

$$u = u' + v$$

Ali ova je formula u suprotnosti s načelom konstantnosti brzine svjetlosti, i zato je Einstein zaključio da u slučaju velikih brzina tu formulu treba izmijeniti.

EINSTEINOVO PRAVILO ZBRAJANJA BRZINA

Polazeći od načela teorije relativnosti, Einstein je izveo novu formulu za zbrajanje brzina

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v * u'}{c^2}}$$

u' -brzina tijela za motritelja u inercijskom sustavu S'

u -brzina istog tijela za motritelja u inercijskom sustavu S

v -brzina sustava S' u odnosu prema sustavu S

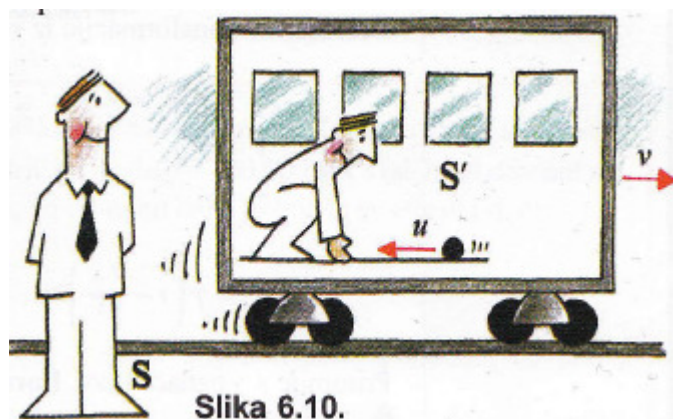
c -brzina svjetlosti

Vidimo da se Einsteinova formula za zbrajanje brzina razlikuje od Galilejeve time što u nazivniku ima dodatni član $v * u' / c^2$. Kada su brzine malene u usporedbi s brzinom svjetlosti c , taj dodatni član u nazivniku mnogo je manji od 1 pa ga možemo zanemariti. Tada Einsteinova formula prelazi u Galilejevu formulu.

Dakle, Galilejevo zbrajanje brzina granični je slučaj Einsteinova zbrajanja brzina, u slučaju da su one mnogo manje od brzine svjetlosti.

A što ako brzine u' i v imaju suprotne smjerove?

Takva je situacija predložena u idućoj slici. Tada u Einsteinovu formulu treba uvrstiti brzinu u' s predznakom minus!



BRZINA SVJETLOSTI U ODNOSU PREMA POKRETNOME INERCIJSKOM SUSTAVU

Je li Einsteinova formula za zbrajanje brzina u skladu s načelom konstantnosti brzine svjetlosti. Primijenimo Einsteinovu formulu na gibanje svjetlosti.

Zamislamo da se svemirski brod velikom brzinom v giba prema Zemlji i da motritelj iz broda emitira svjetlosni signal prema Zemlji. Brzina svjetlosnog signala u odnosu prema motritelju na brodu jest $u' = c$, pa pomoću Einsteinove formule dobivamo iznos brzine tog svjetlosnog signala za motritelja na Zemlji:

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v \cdot u'}{c^2}} \quad u = \frac{c + v}{1 + \frac{v \cdot c}{c^2}} \quad u = \frac{c + v}{1 + \frac{v}{c}} \quad u = \frac{c \cdot (c + v)}{c + v} \quad \mathbf{u = c}$$

Dakle, prema Einsteinovoj formuli za zbrajanje brzina, i motritelj na brodu i motritelj na Zemlji utvrdit će da se svjetlosni signal giba istom brzinom c . To je sukladno načelu o konstantnosti brzine svjetlosti.

Prema Einsteinovoj formuli, svi motritelji nalaze, neovisno o svom gibanju, da brzina svjetlosti ima jednaku vrijednost c .

ZADATAK

Zamislamo da se u dalekoj budućnosti svemirski brod Babylon udaljava od Zemlje brzinom $u' = 0,9c$. Drugi svemirski brod Star Wars udaljava se od broda u istom smjeru brzinom $v = 0,5c$. Kolika je brzina broda Star Wars u odnosu prema Zemlji?

$$\text{Rj.} \quad u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v \cdot u'}{c^2}} = \frac{0,5c + 0,9c}{1 + \frac{0,9c \cdot 0,5c}{c^2}} = 0,97c$$

RELATIVNOST ISTODOBNOSTI

- Albert Einstein živio je od 1879.-1955. godine
- Formulirao je opću i specijalnu teoriju relativnosti i time uveo revoluciju u modernu fiziku
- 1921. godine dobiva Nobelovu nagradu za objašnjenje fotoelektričnog efekta.

Specijalna teorija relativnosti:

1. NAČELO RELATIVNOSTI

-u fizici ne možemo govoriti niti o apsolutnom gibanju, niti o apsolutnom mirovanju. Za gibanje inercijskog sustava kažemo da je relativno

-sve fizičke pojave odvijaju se jednako u svim inercijalnim sustavima, tj. svi zakoni fizike imaju isti oblik u svim inercijalnim sustavima

2. NAČELO KONSTANOSTI BRZINE SVJETLOSTI

-brzina svjetlosti ne ovisi o tome iz kojega se inercijalnog sustava mjeri i jednaka je u svim smjerovima inercijalnog sustava

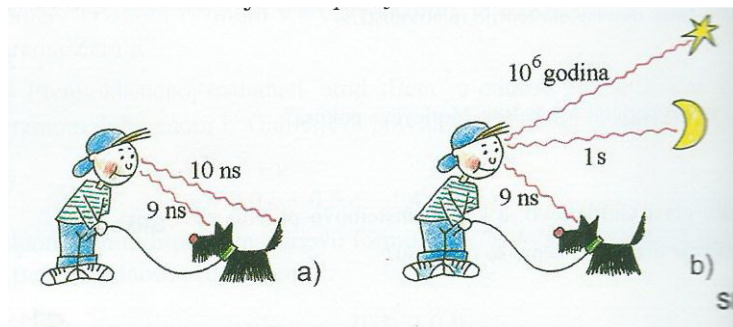
-neke od posljedica specijalne teorije relativnosti:

-relativnost istodobnosti, skrećenje duljine, vremenska dilatacija, ni jedno tijelo ne može postići brzinu svjetlost u vakuumu

- Naš subjektivni osjećaj da su neki događaji istodobni može nas zavarati.

Primjer 1: Danijel navečer izvodi svog psa u šetnju. U jednom trenutku pogleda pseću glavu i rep. Vidi li on kakvi su glava i rep u istom trenutku? Ne! Rep je udaljeniji od Danijelovih očiju nego pseća glava, pa svjetlost treba devet nanosekunda da stigne od pseće glave do Danijelovih očiju, a 10 ns da stigne do repa. ($1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ s}$). Zato svjetlost koja u jednom trenutku stigne u Danijelovo oko ne pokazuje pseću glavu u istom trenutku kad i rep, nego jednu nanosekundu prije.

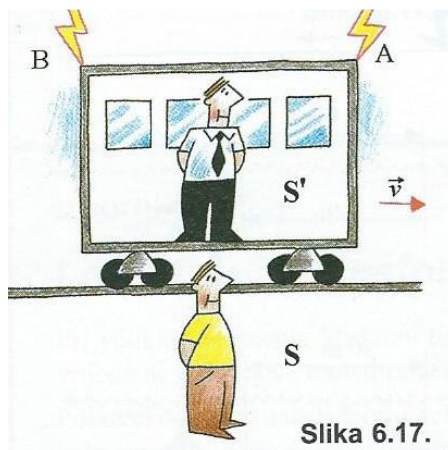
Ako pak Danijel pogleda Mjesec i obližnju zvijezdu, u tom trenutku vidi Mjesec kakav je bio prije jedne sekunde, a zvijezdu kakva je bila prije milijun godina. Dakle, svjetlost koja istodobno dolazi u oko potječe od događaja koji nisu istodobni.



Jesu li dva događaja istodobna ili nisu, u teoriji relativnosti ovisi o gibanju motritelja.

Primjer 2: Pero miruje u inercijskom sustavu S. On primjećuje dva događaja, na primjer dva svjetlosna bljeska, kao istodobna ako svjetlosni valovi od oba događaja stignu do njega u istom trenutku.

No motritelj Martin u pokretnome inercijskom sustavu S' neće ta dva događaja vidjeti kao istodobna.



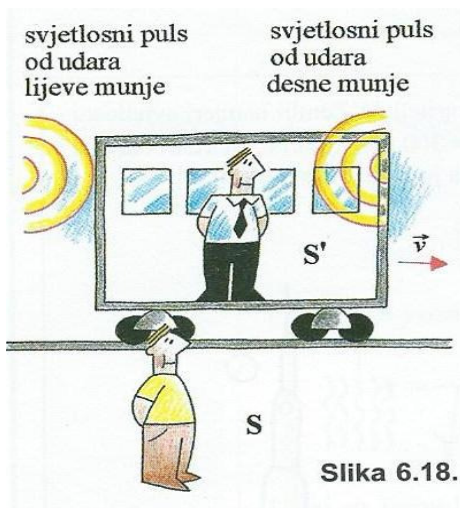
Slika 6.17.

Taj gubitak istodobnosti predložen je Einsteinovim zamišljenim pokusom:

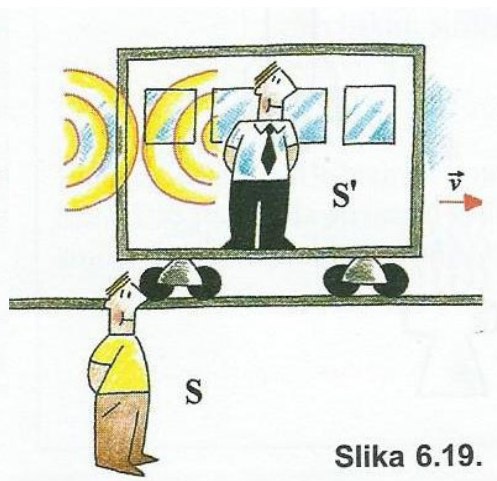
Vagon se giba prugom jednolikom brzinom v . Pokraj pruge stoji Pero. U trenutku kada pored Pere prolazi sredina vagona, tj. kada su prednji kraj vagona A i njegov stražnji dio B jednako udaljeni od Pere, jedna munja udari u prednji, a druga u stražnji dio vagona. Bljeskovi nastali udarima tih dviju munja stignu do Pere na tlu u isti trenutak jer su mjesta udara tih dviju munja jednako udaljena od njega. Za motritelja Peru na tlu ta su dva događaja (udari munje u prednji i stražnji dio vagona) istodobna.

No jesu li ta dva događaja istodobna kada ih se promatra iz vagona?

Motritelj Martin u vagonu također opazi udare dviju munja. Budući da se on giba udesno, svjetlosni puls od udara munje u desni kraj vagona A stiće do njega prije nego svjetlosni puls od munje u lijevi kraj B.



Slika 6.18.



Slika 6.19.

Međutim, Martin zna da je brzina svjetlosti koja stiže iz točke A jednaka brzini svjetlosti iz točke B što može provjeriti mjerenjem. Na temelju toga on zaključuje da je munja udarila najprije u prednji kraj vagona, a tek nakon toga u njegov stražnji dio. Dakle:

Dva događaja koja jedan motritelj u svome inercijskom sustavu vidi kao istodobne za motritelja u drugom sustavu nisu istodobni. Dakle, **istodobnost je relativna**.

-ovom je tvrdnjom neodrživa Galilejeva pretpostavka da vrijeme teče jednako brzo u svim referentnim sustavima

-iz relativnosti istodobnosti proizlazi da su Galilejeve transformacije netočne, stoga koristimo Lorentzove transformacije

-osim Einsteina, relativnost istodobnosti proučavao je i Leopold Infeld koji je imao sličan opis za uvođenje pojma „relativnost istodobnosti“

Zanimljivost:

U Einsteinovoj teoriji relativnosti jedan tip odnosa među inercijskim sustavima nije relativan, već uvijek ostaje očuvan: to su uzročne veze. Na primjer, ako neki događaj A uzrokuje pojavu nekoga drugog događaja B, tada nijedan motritelj u bilo kojem inercijskom sustavu neće moći vidjeti ta dva događaja u obrnutom redoslijedu, tj. da se događaj B događa prije događaja A. Nikad ni za jednog motritelja nije moguće narušavanje kauzalnosti, tj. neki učinak ne može se pojaviti prije događaja koji ga je uzrokovao. To znači da su mnogi znanstveno-fantastični filmovi u suprotnosti s teorijom relativnosti.

ZADATAK:

- 1) Zamislimo vagon vlaka s vratima na njegovu prednjem i stražnjem dijelu. Vrata se otvaraju kada do njih dođe svjetlost iz žarulje koja se nalazi na sredini vagona. Kada osoba u vagonu upali žarulju s namjerom da otvori vrata, opazit će da se prednja i stražnja vrata istodobno otvaraju, jer su putovi svjetlosti do prednjih i stražnjih vrata jednaki. Hoće li ta dva događaja (otvaranje prednjih i stražnjih vrata) biti istodobna i za promatrača na tlu?

Objašnjenje: Zbog gibanja vagona stražnja vrata idu u susret svjetlosti, stoga je put svjetlosti od žarulje do tih vrata kraći od njezina puta do prednjih vrata. Budući da brzina svjetlosti ima isti iznos u oba smjera (ne dodaje joj se, niti se od nje oduzima brzina vagona), svjetlost će prije doći do stražnjih vrata i ona će se za promatrača na tlu otvoriti prije prednjih. Time vidimo da je istodobnost relativna.

Marija Mužić, 4.g.

EKVIVALENTNOST MASE I ENERGIJE

Američki fizičar, njemačkog podrijetla, nobelovac Albert Einstein rođen je 1879.g. u Njemačkoj, umro 1955.g. u Americi. Završio je studij na Tehničkoj visokoj školi u Cirihiu. Radio je u Bernu u patentnom uredu. U tom razdoblju otkrio je niz osnovnih zakona prirode (brzinu svjetlosti kao maksimalnu brzinu, ekvivalentnost mase i energije, prirodu svjetlost i opću teoriju relativnosti).

Njegovo glavno djelo je teorija relativnosti koja je ne samo od osnovne važnosti za razvoj teorijske fizike već zahvaća filozofiju napose u prostoru i vremenu. Godine 1917. izveo je prve kvantne zakone. Na poju kvantne teorije dodijeljena mu je 1921. Nobelova nagrada za fiziku.

Svojim je objašnjenjima prirode otvorio novu znanstvenu revoluciju. Do tada, materija i energija vrijedile su kao dvije posve različite pojave neovisne jedna o drugoj. Kao materija vrijedila je sva tjelesna supstanca u svijetu, neovisna o veličini i o agregatnom stanju, a kao energija sve nematerijalne i netjelesne pojave kao što su svjetlost, toplina, magnetizam i elektricitet. Einstein obara tu teoriju tvrdnjom da masa odnosno materija i energija nisu dvije posve različite, već jedna te ista pojava koja se javlja na dva različita načina. Prema Einsteinu, kada bismo samo 56 kg neke tvari pretvorili u energiju dobili bismo ukupnu godišnju proizvodnju električne energije u cijelom svijetu. Nažalost znanost nije u stanju masu posve pretvoriti u energiju.

Masa i energija su jedno te isto, one su ekvivalentne. Jedno može prijeći u stanje drugoga. Količina mase odgovara količini energije. Energija je masa puta kvadrat brzine svjetlosti.

$E=mc^2$ -zakon o očuvanju mase $c=300\,000\text{km/s}$

m =masa tijela(kg), c = brzina svjetlosti(m/s), E =energija ekvivalentna masi (u džulima $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)

Formula se popularno pripisuje Einsteinu 1905.g. u poznatim Annus Mirabilis („divne godine“) radovima.

Na temelju te relacije može se zaključiti da su u jezgrama atoma sadržane goleme količine energije, jer je gotovo sva masa atoma koncentrirana u njegovoj jezgri. Modernim rezultatima o raznim nuklearnim reakcijama, o cijepanju atoma, o dobivanju jednog dijela te energije u korisne svrhe (atomske reaktori) i u razorne (atomska bomba) ova relacija, postavljena 1905.g. svestrano je potvrđena i predstavlja jednu od osnovnih zakonitosti u prirodi.

Četiri metara visoka skulptura Einsteinove formule nalazi se u Berlinu.



Kada tijelo miruje, još uvijek ima neku unutarnju energiju koju zovemo ostatak energije. Ostatak mase i ostatak energije ekvivalentni su i proporcionalni jedni drugima. Kada je tijelo u pokretu njegova ukupna energija je veća od energije mirovanja. Ostatak mase odnosno ostatak energije ostaje isti.

Jednadžba se može primijeniti ako je masa tijela odnosno energija u mirovanju , a kada se giba masa mu je m , onda je njegova kinetička energija jednaka:

$$E_k = m_0 \frac{v^2}{2} = (m - m_0) \cdot c^2$$

$E = m \cdot c^2$ ova formula se često koristi kao objašnjenje za pretvorbu energije u nuklearnim procesima.

Drugim riječima ako bi se masa bilo koje tvari pretvorila u energiju bez ostatka, iznos energije dobivamo iz formule.

Npr. ako bi se u jednadžbu uvrstio 1 kg ugljena, za energiju se dobije 250 milijardi kw/h. To je približno jednako energiju koju proizvedu sve elektrane u SAD-u u mjesec dana. Žličica ugljene prašine bila bi dovoljna da najveći brod nekoliko puta prijeđe udaljenost od New Yorka do Europe i natrag. Iz svakodnevnog života nam je poznato da se prilikom sagorijevanja ugljena oslobađa neusporedivo mala količina energije. Prilikom običnog sagorijevanja ugljena oslobađa se energija kao rezultat kemijskih procesa, ugljen ne nestaje nego se pretvara u čađu, pepeo i dim. Kad bi izmjerili produkte njihova ukupna masa bila bi 1 kg. Naravno, proces u kojem se znatna količina mase pretvara u energiju je potpuno drugačije prirode od običnog sagorijevanja.

Mala količina mase ekvivalentna je velikoj količini energije.

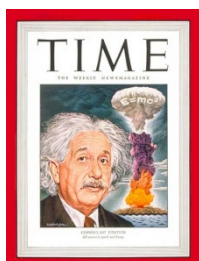
Energija ekvivalencije navodi da svaki predmet ima određenu energiju čak i kada je u stanju mirovanja. U Newtonovoj mehanici , nepomično tijelo nema kinetičku energiju, a to može i ne mora imati druge iznose unutarnje pohranjene energije kao što su kemijske energije ili toplinske, osim bilo koje potencijalne energije da mogu imati od svog položaja u polju sile. U Newtonovoj mehanici sve energije su puno manje od mase objekata puta brzina svjetlosti na kvadrat.

U relativnosti , sva energija koja se kreće uz objekt pridonosi ukupnoj masi tijela kojom se mjeri koliko se opire ubrzanju. Svaka potencijalna i kinetička energija proporcionalno doprinosi masi tijela.

Zanimljivosti:

Formula se popularno prepisuje Einsteinu 1905.g. iako Einstein nije bio prvi koji je predložio relaciju između mase i energije, pa se formula pojavila u radovima koji su prethodili Einsteinovoj teoriji.

Iranski fizičar Keshe o strukturi i prenošenju energije je reko da je Einstein pogriješio kad je rekao da je svjetlost energija. Ne, svjetlost je struktura. To je objasnio tako što ćemo u vrlo bliskoj budućnosti moći ići od Zemlje do Marsa u roku od tri sata. S potpunom zaštitom putem magnetskog polja, bez da izgaramo ijedan gram goriva. Jer Einstein je u pravu kada kaže da je svjetlost energija i da se širi maksimalnom (graničnom) brzinom u okolišu. Vrlo brzo mogli bismo ići u svemir i u idućih 1500 godina putovati tisućama puta brže od brzine svjetlosti jer je brzina svjetlosti brzina magnetskog polja.



Popularna veza Einstenova formula $E = m \cdot c^2$ i atomske bombe vidljivo je naznačena na naslovnici Time magazina u srpnju 1946.g.

2005. godina proglašena *Međunarodnom godinom fizike*. Time je zaokružena višegodišnja inicijativa pod imenom *Svjetska godina fizike 2005*.

(*World Year of Physics 2005*), koju je pokrenulo Europsko fizikalno društvo (EPS), a kojoj se pridružila Međunarodna unija za temeljnu i primijenjenu fiziku (IUPAP) te podržavao ju je i UNESCO.

2005. godina se također naziva i *Einsteinova godina*, jer se navršava točno stotinu godina od kada je Albert Einstein objavio svoja tri epohalna znanstvena rada koji su bitno utjecali na razvoj fizike i doveli do brojnih primjena koje su danas dio naše svakodnevnice.

Međunarodna godina fizike 2005. obilježava *Annus Mirabilis* 1905. i slavi genijalnost Alberta Einsteina.

Zadaci:

- 1) Sunce svake sekunde emitira energiju od $3 \cdot 10^{26}$ J. Koliko se smanji masa Sunca u sekundi?

$$E = 3 \cdot 10^{26} \text{ J}$$

$$m = ?$$

$$E = mc^2$$

$$m = E/c^2 = 3 \cdot 10^{26} \text{ J} / (3 \cdot 10^8)^2 = 3 \cdot 10^{26} / 9 \cdot 10^{16} = 3,3 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

- 2) Kolika je ekvivalentna masa čestice koja ima energiju 5 GeV? $c = 3 \cdot 10^8$ m/s

A) $5 \cdot 10^{-9}$ g B) $3 \cdot 10^{-15}$ kg C) $9 \cdot 10^{-24}$ g D) $5 \cdot 10^{-12}$ g

1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J G-giga

$$E = 5 \text{ GeV} = 5 \cdot 10^9 \text{ eV} = 5 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 8 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$E = m \cdot c^2$$

$$m = E/c^2 = 8 \cdot 10^{-10} / (3 \cdot 10^8)^2 = 8,89 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 9 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 9 \cdot 10^{-27} \cdot 10^3 = 9 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

odgovor C

