Specijalna teorija relativnosti

Specijalna teorija relativnosti je jedna od tri teorije koje su se pojavile u fizici početkom XX veka, a koje su srušile osnove klasične fizike i postavile nove osnove za razumevanje sveta koji nas okružuje, tj. koje su dovele do stvaranja nove – moderne fizike. Preostale dve teorije su: Kvantna teorija i Opšta teorija relativnosti.

Svet koji nas okružuje možemo podeliti na:

- mikrosvet – svet molekula, atoma i elementarnih čestica
- makrosvet – svet na površini ove naše planete u kome i sami živimo, pri čemu smo i mi sami makrotela i
- megasvet – ili svemir, pri čemu su megatela zvezde, planete itd.

Kvantna teorija se bavi mikrosvetom, Specijalna teorija relativnosti – makrosvetom, dok se Opšta teorija relativnosti, tj. nova teorija gravitacije bavi megasvetom.

Albert Ajnštajn je autor Specijalne (1905. god.) i Opšte teorije relativnosti (1916. god.), dok je osnovne ideje za Kvantnu teoriju postavio Maks Plank (1900.god.). Ajnštajn je dokazao tačnost osnovnih Plankovih ideja (1905. god.) i za taj rad je dobio svoju jedinu Nobelovu nagradu za fiziku 1921. godine.

Brzina svetlosti

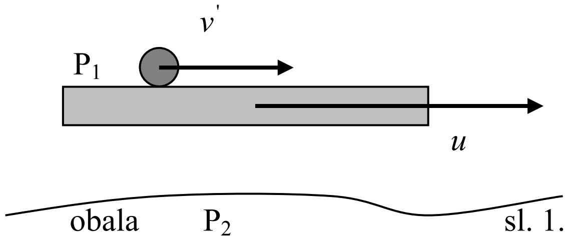
Priča o Specijalnoj teoriji relativnosti počinje pričom o brzini svetlosti, tj. pričom o tome koje su fizičke veličine apsolutne, a koje su relativne.

Naime, data fizička veličina je ili relativna ili je apsolutna.

<u>Fizička veličina je relativna ako nije ista za sve posmatrače</u>. To znači da postoji mogućnost da dva posmatrača mere jednu istu stvar i da se, bez obzira što obojica mere potpuno precizno, rezultati njihovih merenja značajno razlikuju. Ovo izgleda neobično, da ne kažem nemoguće, ali setimo se Klasičnog zakona sabiranja brzina (I razred).

Posmatrajmo slučaj prikazan na sl. 1. Imamo kuglu koja se kotrlja po splavu brzinom v' u odnosu na njega, dok se istovremeno splav kreće brzinom u u odnosu na obalu nošen rekom. Tada se brzina kugle u odnosu na obalu v može izračunati iz obrasca:

$$v = v' + u \, .$$



sl. 1.

Primer: ako se kugla kotrlja po splavu brzinom: $v' = 1\frac{m}{s}$ i ako reka nosi splav, u odnosu na obalu, brzinom: $u = 3\frac{m}{s}$, tada je brzina kugle u odnosu na obalu: $v = v' + u = 1\frac{m}{s} + 3\frac{m}{s} = 4\frac{m}{s}$. Ovako ispričano sve ovo izgleda logično. Međutim, upravo smo imali prilike da uočimo jednu relativnu veličinu u ovom primeru. Ta veličina je brzina kugle. Zamislimo da su prisutna dva posmatrača i da jedan od njih sedi na splavu P_1, a da drugi sedi na obali P_2. Ako njih dvojica preduzmu merenje brzine kugle doći će do značajno različitih rezultata. Posmatrač sa splava će izmeriti brzinu $v' = 1\frac{m}{s}$, dok će posmatrač sa obale izmeriti brzinu kugle od $v = 4\frac{m}{s}$ i ono što je najvažnije obojica će biti u pravu. Zaključak je sledeći: brzina kugle (uopšteno – brzina ma kog tela) je relativna veličina.

Nasuprot tome, data <u>fizička veličina je apsolutna ako je ista za sve posmatrače</u>.

<u>U klasičnoj (Njutnovskoj) fizici se smatralo da su apsolutne tri fizičke veličine</u>:

- <u>dužina datog tela</u>,
- <u>masa datog tela</u> i
- <u>trajanje datog vremenskog intervala</u>.

Mora se reći da se ovakvi stavovi poklapaju i sa našim intuitivnim razumevanjem sveta koji nas okružuje.

1887. godine američki naučnici Majkelson i Morli su merenjima pokazali da je brzina svetlosnog zraka apsolutna veličina. Njihov pravi cilj je bio da provere da li postoji etar. Klasični fizičari su, naime, smatrali da elektromagnetni talasi moraju, kao i mehanički talasi, da se prostiru kroz neku sredinu. Kako je već tada bilo poznato da se ovi talasi prostiru i kroz vakuum, uvedena je teorijska zamisao da je sav prostor (pa i vakuum) ispunjen specijalnim oblikom materije, koji je nazvan etar. Na ovaj način je "stvorena" materijalna sredina kroz koju mogu da se čak i kroz vakuum prostiru elektromagnetni talasi.

Majkelson je za merenje brzine svetlosti koristio svoj interferometar čija je preciznost bila oko 300 000 *km*/*s* ± 1 *km*/*s*.

Zamisao je bila sledeća:

Zemlja se kreće kroz etar (ako postoji) putujući oko Sunca brzinom od 30 *km*/*s*. Pritom se u određenom delu godine kreće prema nekoj izabranoj zvezdi. Šest meseci kasnije Zemlja se istom brzinom udaljava od te iste zvezde. Ako se svetlost te zvezde stvarno prostire do Zemlje kroz etar, tada bi brzina svetlosti kada joj se Zemlja primiče, a u skladu sa klasičnim zakonom sabiranja brzina, morala da bude 300 030 *km*/*s*, što je analogno sa situacijom kada se krećemo uz vetar pa imamo utisak da vetar duva brže. Kada se Zemlja šest meseci kasnije udaljava od nje brzina svetlosti, koja sa te zvezde stiže do Zemlje, bi morala biti 299 970 *km*/*s*, što je analogno sa situacijom u kojoj se krećemo niz vetar pa osećamo da je vetar sporiji.

No sva merenja, koja su Majkelson i Morli preduzeli, su pokazivala da je brzina svetlosti uvek ista. To znači da brojna vrednost brzine svetlosti ne zavisi od načina kretanja posmatrača, a to dalje znači da je njena vrednost apsolutna.

U novije vreme su izvedena ista ovakva merenja, ali umesto obične svetlosti korišćeni su laserski zraci. Preciznost Majkelsonovog interferometra je time povećana na 300 000 *km*/*s* ± 0.3 *mm*/*s*. Ova merenja su potvrdila Majkelsonov nalaz – brzina svetlosti jeste apsolutna. Za ovaj rad Majkelson je dobio 20 godina kasnije Nobelovu nagradu za fiziku i tako postao prvi američki nobelovac.

Kasnijim merenjima je utvrđeno da ne postoji način da se promeni brzina svetlosnog zraka dok se on kreće kroz istu sredinu. Jedini način da se njegova brzina promeni je da pređe u neku novu sredinu. Pri samom prelazu iz jedne sredine u drugu dolazi do "skokovite" promene brzine.

1905. godine u svom radu "O elektrodinamici tela u kretanju" Ajnštajn matematički dokazuje da su – ako je brzina svetlosti apsolutna i ako važi Galilejev princip relativnosti – dužina, masa i vreme relativne veličine. Kao jedna od posledica je da je brzina svetlosti ne samo apsolutna (ista za sve posmatrače) već da je i najveća brzina u prirodi, a da materijalno telo nikada ne može dostići ovu brzinu. Brzinom svetlosti se mogu kretati elektromagnetni talasi, tj. energija.

Sada je jasan i naziv ove teorije. <u>Ona je teorija "relativnosti" zato što dokazuje da su tri veličine koje su u klasičnoj fizici smatrane za apsolutne – dužina, masa i vreme – u stvari relativne</u>.

<u>Dakle, u modernoj fizici se smatra da postoji samo jedna apsolutna fizička veličina – a to je brzina svetlosti, dok su sve ostale veličine relativne</u>.

<u>Naziv "specijalna" potiče od činjenice da se ova teorija praktično bavi specijalnim slučajem: kada telo koje posmatramo ne ubrzava i kada nije izloženo gravitacionim uticajima. Dakle, telo koje posmatramo je inercijalan sisitem i nalazi se u bestežinskom stanju</u>.

Glavne posledice Specijalne teorije relativnosti

Ajnštajn je u ovoj teoriji matematički došao do sledeća četiri obrasca:

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

$$d = d_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \qquad (2)$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{i} \qquad (3)$$

$$\Delta t_B = \Delta t_Z \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \qquad (4)$$

Njihovim razmatranjem dolazi se do posledica Specijalne teorije relativnosti, koje na bitan način menjaju sliku sveta koji nas okružuje.

Relativistički zakon sabiranja brzina

U uvodu smo već videli klasični zakon sabiranja brzina:

$$v = v' + u \qquad (5)$$

a izraz (1)

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

predstavlja novi – relativistički zakon sabiranja brzina. Njegov imenioc: $1 + \frac{v' \cdot u}{c^2}$ praktično predstavlja korekciju klasičnog zakona sabiranja brzina.

<u>Pri malim – klasičnim brzinama</u> ova dva zakona daju približno iste rezultate. Pri brzinama sa kojima se svakodnevno susrećemo ili se njima i sami krećemo rezultati dobijeni pomoću ova dva zakona se praktično ne razlikuju.

Uzmimo primer sa sl. 1.

Klasični zakon daje već poznati rezultat da je brzina kugle u odnosu na posmatrača na obali:

$$v = v' + u = 1\frac{m}{s} + 3\frac{m}{s} = 4\frac{m}{s}.$$

Relativistički zakon sabiranja brzina primenjen na ovaj primer daje sledeći rezultat:

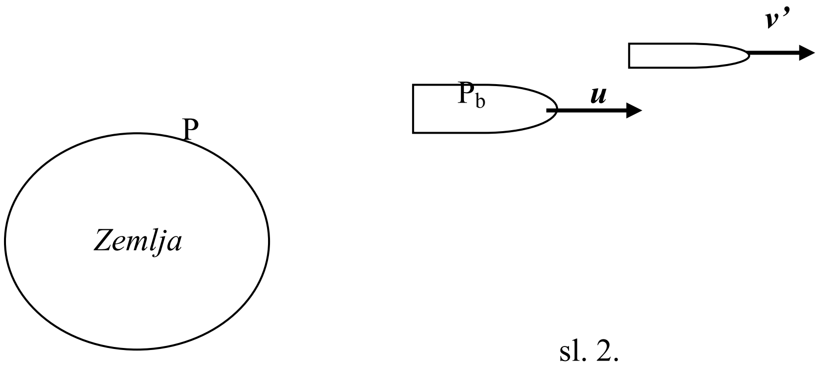
$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v' \cdot u}{c^2}} = \frac{1\frac{m}{s} + 3\frac{m}{s}}{1 + \frac{1\frac{m}{s} \cdot 3\frac{m}{s}}{90000000000000000\frac{m^2}{s^2}}} = \frac{4\frac{m}{s}}{1.000000000000000033} = 3.9999999999999999\frac{m}{s}$$

Dakle, bez mnogo razmišljanja možemo uzeti da je dobijeni rezultat i pomoću relativističkog zakona sabiranja brzina isti kao i rezultat dobijen klasičnim zakonom sabiranja brzina:

$$v = 4\frac{m}{s}.$$

Međutim, ako brzine v' i u povećavamo razlika u rezultatima, dobijenim iz ova dva zakona sabiranja, će se povećavati.

Pri brzinama v' i u bliskim brzini svetlosti – što je u fizici poznato kao relativistički slučaj, a pri čemu se ovakve brzine nazivaju relativističkim – rezultati dobijeni iz dva zakona sabiranja brzina su značajno različiti što se može videti iz primera na sl. 2.



sl. 2.

Imamo Zemlju i posmatrača P na njoj. Svemirski brod se udaljava od Zemlje brzinom $u = \frac{2}{3}c = 200000\frac{km}{s}$ i u njemu se nalazi posmatrač P_b. Svemirski brod u jednom trenutku ispali projektil, koji se kreće u istom smeru kao i brod brzinom $v' = \frac{1}{2}c = 150000\frac{km}{s}$ u odnosu na brod i posmatrača P_b u njemu.

Pitanje je: kolika je brzina projektila u odnosu na Zemlju, tj. na posmatrača P koji se nalazi na Zemlji.

Ako primenimo klasični zakon sabiranja brzina dobićemo:

$$v = v' + u = \frac{1}{2}c + \frac{2}{3}c = \frac{3}{6}c + \frac{4}{6}c = \frac{7}{6}c = 350\,000\ \frac{km}{s}$$

ili jednostavnije: $$v = v' + u = 150\,000\ \frac{km}{s} + 200\,000\ \frac{km}{s} = 350\,000\ \frac{km}{s}.$$

Međutim, ako primenimo relativistički zakon sabiranja brzina rezultat je:

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v' \cdot u}{c^2}} = \frac{\frac{1}{2}c + \frac{2}{3}c}{1 + \frac{\frac{1}{2}c \cdot \frac{2}{3}c}{c^2}} = \frac{\frac{3}{6}c + \frac{4}{6}c}{1 + \frac{\frac{1}{3}c^2}{c^2}} = \frac{\frac{7}{6}c}{\frac{3}{3} + \frac{1}{3}} = \frac{\frac{7}{6}c}{\frac{4}{3}} = \frac{7}{8}c = 262\,500\ \frac{km}{s}.$$

Intuitivno mi smo na strani klasičnog zakona i rezultata $v = 350\,000\ \frac{km}{s}$. No, tačan je relativistički zakon i rezultat $v = 262\,500\ \frac{km}{s}$, što bi potvrdila i eventualna merenja. Ovakva precizna merenja su sprovedena tek posle Ajnštajnove smrti, pa to objašnjava ponašanje Nobelovog komiteta, koji nikada ne dodeljuje Nobelovu nagradu posthumno. Jedna od glavnih odlika posledica specijalne teorije relativnosti je da su one izrazito kontraintuitivne za sve nas.

Obično se na ovom mestu, na predavanjima, sretnem sa pitanjem: »a zašto je tako, tj. kako je tako nešto uopšte moguće ?«.

Jedini odgovor koji mogu tada da dam je da je svet mnogo složeniji nego što nam se čini na osnovu naših neposrednih iskustava sa njim. Drugim rečima, naše poimanje sveta koje se zasniva na našim čulima je, blago rečeno, manjkavo.

Pritom je značajno da posledice dobijene iz Specijalne teorije relativnosti dolaze do izražaja tek pri brzinama bliskim brzini svetlosti. Kako mi nemamo nikakva iskustva sa ovakvim brzinama, jasno je da su nam ovi efekti potpuno nepoznati.

Situacija koju sada imamo u nauci je prilično složena.

Ako su brzine bliske brzini svetlosti, tj. relativističke – tada moramo koristiti Ajnštajnove relativističke zakone zato što klasični zakoni tada daju pogrešne rezultate.

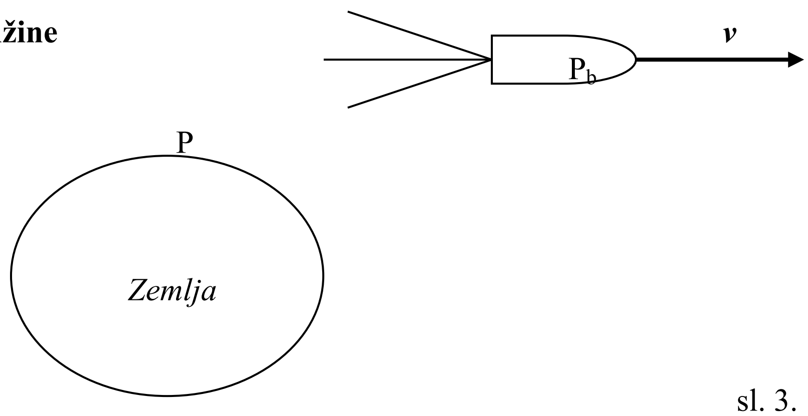
No, kada su brzine mnogo manje od brzine svetlosti – tada možemo koristiti i klasične i relativističke zakone zato što daju približno iste rezultate. U takvoj situaciji se odlučujemo za mnogo jednostavnije klasične zakone, a da su stvarno jednostavniji možete videti već pri upoređivanju klasičnog i relativističkog zakona sabiranja brzina.

Ovakva situacija u modernoj fizici se može opisati i na sledeći način: relativistički zakoni su uvek tačni – i pri malim i pri velikim brzinama, dok su klasični zakoni približno tačni – ali samo pri malim brzinama. To znači da je klasična teorija granični slučaj relativističke teorije pri malim – klasičnim brzinama. To je nešto najbolje što se može desiti jednoj staroj teoriji kada se u nauci pojavi nova teorija – da postane deo (pa makar i kao granični slučaj) te nove teorije.

Ono što je još bitno primetiti u primeru vezanom za sl. 2. je da po klasičnoj teoriji brzina tela može biti veća od brzine svetlosti: brzina projektila u odnosu na Zemlju je: $v = 350\,000\ km/s$. Međutim relativistička teorija ne dozvoljava da brzina tela pređe brzinu svetlosti, što se vidi iz dobijenog rezultata: $v = 262\,500\ km/s$. Ni povećanje brzina broda i projektila u i v' neće dovesti do prekoračenja brzine svetlosti. Na primer, čak i ako bi ove dve brzine bile jednake brzini svetlosti ni tada relativistički zakon sabiranja brzina ne dozvoljava prekoračenje brzine svetlosti što je vidljivo iz sledećeg proračuna:

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v' \cdot u}{c^2}} = \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = \frac{2c}{1 + \frac{c^2}{c^2}} = \frac{2c}{1+1} = \frac{2c}{2} = c = 300\,000\ \frac{km}{s}.$$

Kontrakcija dužine



sl. 3.

Na sl. 3. je data situacija da se svemirski brod udaljava od Zemlje brzinom v. U brodu se nalazi posmatrač P_b, dok se na Zemlji nalazi posmatrač P. Obojica posmatrača imaju zadatak da pri različitim brzinama broda u odnosu na Zemlju mere njegovu dužinu. Ovde razlikujemo četiri slučaja:

1. Brod miruje u odnosu na Zemlju, tj. $v = 0$.

Tada obojica posmatrača mere jednaku dužinu broda i ova dužina se naziva dužina mirovanja d_0:

$$d_b = d = 100m = d_0$$

gde je d_b dužina koju meri posmatrač iz broda, d je dužina koju meri posmatrač sa Zemlje, a uzeto je da brod ima dužinu mirovanja od $100\ m$.

2. Brod se udaljava od Zemlje brzinom mnogo manjom od brzine svetlosti – klasičnom brzinom:

$$d_b \approx d = 100m = d_0.$$

Kao i u prethodnom slučaju ne postoji merljiva razlika dužina koje mere ova dva posmatrača.

Prva dva slučaja predstavljaju klasične slučajeve i tada se ne javlja relativnost dužine broda.

3. Brod se udaljava od Zemlje brzinom bliskom brzini svetlosti, recimo $v = 180\,000\ \frac{km}{s} = \frac{3}{5}c$:

Dužina koju meri posmatrač iz broda je i dalje:

$$d_b = 100m = d_0.$$

Međutim dužina broda koju meri posmatrač sa Zemlje sada je:

$$d = d_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} .$$

Zamenom pretpostavljenih vrednosti d_0 i v dobija se:

$$d = 100m \cdot \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{3}{5}c\right)^2}{c^2}} = 100m \cdot \sqrt{1 - \frac{\frac{9}{25}c^2}{c^2}} = 100m \cdot \sqrt{\frac{25}{25} - \frac{9}{25}} = 100m \cdot \sqrt{\frac{16}{25}} = 100m \cdot \frac{4}{5} = 80m .$$

Upoređivanjem rezultata njihovih merenja: $d_b = 100m$ i $d = 80m$ može se jasno videti da je dužina broda (tela) relativna veličina (nije ista za sve posmatrače).

Posmatrač sa Zemlje meri skraćenu dužinu broda i zbog toga je ova posledica Specijalne teorije relativnosti nazvana: »kontrakcija dužine«.

Ako se brzina broda povećava ka brzini svetlosti dolazi do sve većeg skraćivanja – kontrakcije njegove dužine za posmatrača sa Zemlje. Za sve to vreme dužina broda ostaje nepromenjena za posmatrača iz broda i za njega je sve vreme jednaka dužini mirovanja.

<u>Ova pojava je uzajamna !</u> Naime, posmatrač iz broda meri skraćenu dužinu svih objekata pored kojih brod prolazi. Ne samo objekata, već meri skraćenje i rastojanja između objekata. To znači da za posmatrača iz broda dolazi do kontrakcije prostora.

<u>Kontrakcija dužine se javlja samo u pravcu kretanja</u>, dok u ostale dve dimenzije kontrakcije nema. To znači da za posmatrača sa Zemlje dolazi do kontrakcije dužine broda, ali da visina i debljina broda ostaju nepromenjene. Za posmatrača iz broda to znači da se kontrakcija objekata i prostora, kroz koji se brod kreće, javlja samo u smeru kretanja broda.

4. Sada pretpostavimo da je brod dosegao brzinu svetlosti $v = c$.

Posmatrač iz broda i dalje meri nepromenjenu dužinu broda:

$$d_b = 100m = d_0 .$$

Posmatrač sa Zemlje meri dužinu broda jednaku dužini koja se dobija iz Ajnštajnovog obrasca za dužinu:

$$d = d_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

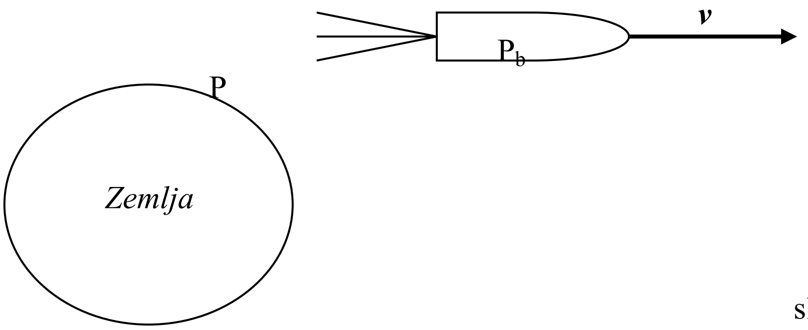
Zamenom vrednosti dužine mirovanja i brzine broda dobija se:

$$d = 100m \cdot \sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}} = 100m \cdot \sqrt{1 - 1} = 100m \cdot 0 = 0 .$$

Dakle, za posmatrača sa Zemlje brod više nema dužinu što je, uostalom, logična posledica skraćenja dužine sa porastom brzine. Ovo je prilično teško zamisliti posebno s' obzirom na to da visina i širina broda ostaju nepromenjene. No, još teže je zamisliti ono što vidi i meri posmatrač iz broda. Za njega svemir u pravcu kretanja je toliko kontrahovan da više uopšte nema dužinu, ali zato u širinu i visinu (dubinu) rastojanja između zvezda (galaksija) su ista kao da brod miruje.

Obaveze da zamišljamo ovakav svemir oslobađa nas to što se materijalna tela ne mogu kretati brzinom svetlosti (a ni većom od nje), a to će biti jedna od sledećih posledica teorije.

Masa tela pri velikim (relativističkim) brzinama



sl. 4.

Na sl. 4. prikazan je slučaj kada se brod udaljava od Zemlje brzinom v, a dva posmatrača, jedan na Zemlji, a drugi u brodu, mere masu broda. Kao i u prethodnom slučaju postoje četiri slučaja:

1. Brod miruje u odnosu na Zemlju, tj. $v = 0$.

U ovom slučaju oba posmatrača mere istu masu broda, koju nazivamo masa mirovanja m_0:

$$m_b = m = 300t = m_0,$$

gde je m_b masa koju meri posmatrač iz broda, m je masa koju meri posmatrač sa Zemlje, dok je uzeto da je masa mirovanja broda $m_0 = 300 \ tona$.

2. Brod se udaljava od Zemlje brzinom mnogo manjom od brzine svetlosti – klasičnom brzinom.

Kao i u prvom slučaju oba posmatrača mere jednaku dužinu, ili preciznije povećanje mase koje meri posmatrač sa Zemlje je zanemarljivo malo:

$$m_b \approx m = 300t = m_0.$$

Prva dva slučaja su klasična i tada ne dolazi do izražaja relativnost mase.

3. Brod se udaljava od Zemlje relativističkom brzinom, tj. brzinom bliskom brzini svetlosti. Neka ta brzina broda u odnosu na Zemlju iznosi: $v = 240\,000 \ \frac{km}{s} = \frac{4}{5}c$.

Sada posmatrač sa Zemlje meri nepromenjenu masu broda u odnosu na slučaj kada brod miruje ili se kreće klasičnom brzinom:

$$m_b = 300t = m_0.$$

Posmatrač sa Zemlje meri masu broda u skladu sa Ajnštajnovim obrascem:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Zamenom veličina dobija se:

$$m = \frac{300t}{\sqrt{1 - \frac{\left(\frac{4}{5}c\right)^2}{c^2}}} = \frac{300t}{\sqrt{1 - \frac{\frac{16}{25}c^2}{c^2}}} = \frac{300t}{\sqrt{\frac{25}{25} - \frac{16}{25}}} = \frac{300t}{\sqrt{\frac{9}{25}}} = \frac{\frac{300t}{1}}{\frac{3}{5}} = 500t$$

Upoređivanjem rezultata njihovih merenja: $m_b = 300t$ i $m = 500t$ može se jasno videti da je masa broda (tela) relativna veličina (nije ista za sve posmatrače).

Posmatrač sa Zemlje meri povećanu masu broda. Ako se brzina broda povećava ka brzini svetlosti dolazi do sve većeg povećanja njegove mase za posmatrača sa Zemlje. Za sve to vreme masa broda ostaje nepromenjena za posmatrača iz broda i za njega je sve vreme jednaka masi mirovanja.

<u>Ova pojava je uzajamna !</u> Naime, posmatrač iz broda meri povećanu masu svih objekata pored kojih brod prolazi.

4. Pretpostavimo da je brzina broda jednaka brzini svetlosti $v = c$.

Za posmatrača iz broda nema nikakve promene, on i dalje meri masu mirovanja broda:

$$m_b = 300t = m_0 .$$

Za posmatrača sa Zemlje i dalje važi Ajnštajnov obrazac:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} .$$

Zamenom veličina dobija se:

$$m = \frac{300t}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}}} = \frac{300t}{\sqrt{1-1}} = \frac{300t}{0} = \infty .$$

Dakle, za posmatrača sa Zemlje masa broda postaje beskonačno velika – što je, uostalom, logična posledica povećanja mase sa porastom brzine.

No upravo ovakav rezultat nas dovodi do graničnog karaktera brzine svetlosti, tj. do toga da materijalno telo ne može ni dostići brzinu svetlosti – što je nova posledica ove teorije.

Posmatrajmo sledeći slučaj:

Svemirski brod, čija masa mirovanja iznosi: $m_0 = 300t = 300\,000\ kg$, poleće iz mirovanja pod dejstvom pogonske sile $F = 3000\,000\ N$. To znači da je ubrzanje broda – u skladu sa II Njutnovim zakonom:

$$a = \frac{F}{m_0} = \frac{3000000N}{300000kg} = 10\frac{m}{s^2} .$$

Ovo znači da će sekundu posle polaska brzina broda biti: $v_1 = 10\frac{m}{s}$, posle dve sekunde njegova brzina je: $v_2 = 20\frac{m}{s}$ itd. Kako je brzina svetlosti c = 300 000 000 $\frac{m}{s}$, jasno je da posle t = 30 000 000 s brzina broda "mora biti" v = 300 000 000 $\frac{m}{s}$, tj. brod će u tom' trenutku dostignuti brzinu svetlosti. Sekundu kasnije brzina broda mora biti v = 300 000 010 $\frac{m}{s}$ itd. Na prvi pogled nije vidljivo to što sprečava brod da dosegne brzinu svetlosti, ili da je malo kasnije premaši.

Prethodna analiza je tipičan primer klasičnog načina razmišljanja. Ovakvo razmišljanje funkcioniše samo pri malim – klasičnim brzinama. Ali naš primer sadrži i drugi deo u kome je brzina broda bliska brzini svetlosti, a tada klasični način razmišljanja više ne dejstvuje. Tada je potrebno primeniti relativistički način mišljenja ma koliko nam on izgledao neobično.

Ono što je realno, a u skladu sa Specijalnom teorijom relativnosti, je da masa broda raste pri porastu njegove brzine, a kada masa raste tada se ubrzanje smanjuje – zato što su, na osnovu II Njutnovog zakona, masa i ubrzanje obrnuto srazmerne veličine. Pri samoj brzini svetlosti masa broda bi bila beskonačno velika, a to je ono što sprečava brod da dostigne brzinu svetlosti, jer bi ubrzanje tada postalo jednako nuli. Teorijski, brod se može primicati brzini svetlosti, ali bi mu bilo potrebno beskonačno veliko vreme da je stvarno i dosegne, a samim tim' je ne može ni premašiti. Uostalom za ubrzavanje beskonačno velike mase bila bi potrebna beskonačno velika pogonska sila, a to očigledno nije realno. U matematici bi se reklo da se brzina broda asimptotski približava brzini svetlosti.

Evo jednog primera za upoređivanje jednog klasičnog i odgovarajućeg relativističkog zakona. U pitanju je II Njutnov zakon. Jasno je zašto je klasična teorija, pri malim brzinama, opstala u fizici.

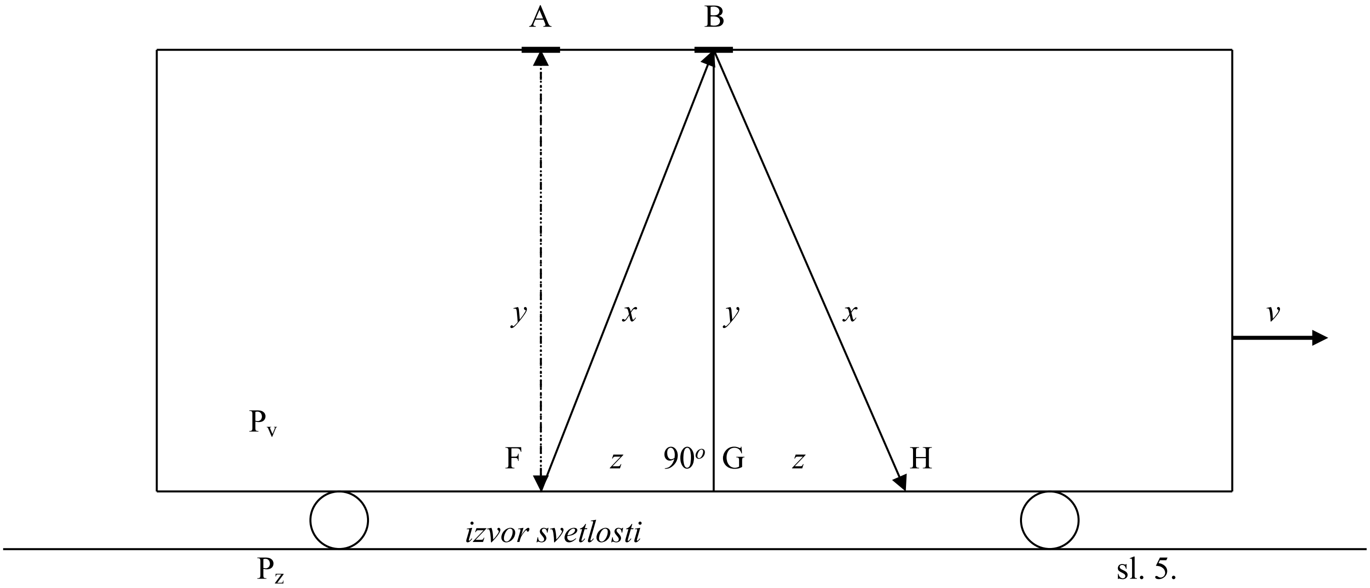
$$F = \frac{m \cdot v_2 - m \cdot v_1}{t_2 - t_1} = m \cdot a \qquad F = \frac{m_2 \cdot v_2 - m_1 \cdot v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} \cdot v_2 - \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} \cdot v_1}{t_2 - t_1} .$$

Dilatacija vremena

Prethodne tri formule imaju čudne posledice, ali najčudnija posledica tek sledi, a u vezi je sa formulom:

$$\Delta t_B = \Delta t_Z \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

koja nas dovodi do relativnosti vremena. Relativnost vremena ima vrlo dalekosežne posledice po našu civilizaciju što ćemo razmatrati u drugom delu ove teme. U prvom delu dajem izvođenje Ajnštajnovog obrasca za vreme da bih, uz sve ostalo, izbegao ne retke komentare na predavanjima otprilike sledeće sadržine: “ma hajde, pa da li Vi u to stvarno verujete”, “ma je li ovo fizika ili naučna fantastika”, itd.



sl. 5.

Na sl. 5. je vagon koji se kreće prugom brzinom v. Na podu vagona u tački F nalazi se izvor svetlosti okrenut vertikalno naviše. U vagonu se nalazi posmatrač P_v, a na zemlji pored pruge se nalazi posmatrač P_z. Iz izvora svetlosti se u datom trenutku pusti svetlosni zrak vertikalno naviše ka ogledalu koje se nalazi u tački A.

Posmatrač iz vagona P_v vidi kako se zrak svetlosti kreće vertikalno naviše brzinom c i za vremenski interval Δt_V stiže do ogledala A, a onda za to isto vreme Δt_V, posle odbijanja, stiže u polaznu tačku F. Opisana putanja zraka, koju vidi posmatrač iz vagona, je prikazana isprekidanom linijom na slici.

Nešto komplikovaniji je opis onoga što vidi posmatrač sa zemlje. Jedino što je za njega isto jeste brzina svetlosnog zraka. Naime, kako je brzina svetlosti apsolutna (ista za sve posmatrače) i za njega je brzina svetlosnog zraka isto c kao i za posmatrača iz vagona. Za posmatrača P_z zrak naviše putuje ukoso u smeru kretanja vagona, a razlog za to je upravo kretanje vagona. Dok zrak, u toku intervala Δt_Z, putuje naviše vagon se pomera udesno i za isto to vreme Δt_Z pređe rastojanje z, pri čemu se izvor svetlosti premesti iz tačke F u tačku G, a ogledalo, na plafonu vagona, iz tačke A u tačku B. U toku narednog intervala Δt_Z zrak se, posle odbijanja vrati do poda vagona, ali u tačku H zato što se za to isto vreme Δt_Z vagon premesti udesno za još jedno rastojanje z, pa se izvor svetlosti iz tačke G premesti u tačku H.

Već sada je jasno da vremenski intervali Δt_V i Δt_Z nisu jednaki. Objašnjenje je sledeće: vreme kretanja, kod ma kog ravnomernog kretanja, je jednako količniku pređenog puta i brzine kretanja, a ovo je primenljivo i na slučaj kretanja posmatranog zraka svetlosti – zato što se kroz istu sredinu svetlost kreće ravnomerno – pa je:

$$\Delta t_V = \frac{y}{c}, \quad \Delta t_Z = \frac{x}{c}, \quad \text{a kako se i vagon kreće ravnomerno važi i:} \quad \Delta t_Z = \frac{z}{v}.$$

Prostim upoređivanjem prva dva obrasca odmah se vidi da je put x veći od pređenog puta y, pa zbog iste brzine u imeniocu (c) interval Δt_Z mora biti veći od intervala Δt_V. Ma koliko to čudno izgledalo to znači da naša dva posmatrača ne mere isto vreme kretanja svetlosnog zraka, tj. isti događaj traje kraće za posmatrača u vagonu. A to dalje znači, jedino moguće, da vreme u vagonu teče sporije. Ako tražimo matematički razlog za ovakvo stanje možemo ga naći u apsolutnosti brzine svetlosnog zraka.

Prethodna kratka analiza dokazuje da je $\Delta t_Z > \Delta t_V$, ali ne pokazuje koliko puta je to vreme veće, tj. kakva relacija važi između ova dva vremena. Primer na sl. 5. omogućava pronalaženje ove relacije.

Sve tri stranice pravouglog trougla ΔFGB su pređeni putevi:

$y = c \cdot \Delta t_V$ – je put koji zrak pređe od izvora svetlosti do ogledala, a za posmatrača iz vagona,

$x = c \cdot \Delta t_Z$ – je put koji pređe zrak od izvora do ogledala, a za posmatrača sa zemlje i

$z = v \cdot \Delta t_Z$ – je put koji pritom' pređe vagon, opet za posmatrača sa zemlje.

Pošto je ovaj trougao pravougli važi Pitagorina teorema:

$$y^2 = x^2 - z^2$$

$$(c \cdot \Delta t_V)^2 = (c \cdot \Delta t_Z)^2 - (v \cdot \Delta t_Z)^2$$

$$c^2 \cdot \Delta t_V^2 = c^2 \cdot \Delta t_Z^2 - v^2 \cdot \Delta t_Z^2$$

$$\Delta t_V^2 = \frac{c^2 \cdot \Delta t_Z^2}{c^2} - \frac{v^2 \cdot \Delta t_Z^2}{c^2}$$

$$\Delta t_V^2 = \Delta t_Z^2 - \Delta t_Z^2 \cdot \frac{v^2}{c^2}$$

$$\Delta t_V^2 = \Delta t_Z^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\Delta t_V = \Delta t_Z \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Brojna vrednost korena, iz prethodnog izraza, je između nule i jedinice. Za $v_{\min} = 0 \Rightarrow \sqrt{} = 1$, a za $v_{\max} = c \Rightarrow \sqrt{} = 0$.

Zbog toga sledi da je Δt_V manje Δt_Z, što je već poznato, a što znači da vreme u telu koje se kreće (vagonu) teče sporije nego na /u referentnom telu (zemlji). Ova pojava je poznata kao dilatacija vremena. Vremena Δt_V i Δt_Z mogu biti i jednaka ali samo ako vagon miruje.

Sl. 5. nam otkriva i zašto su efekti dilatacije vremena zanemarljivi pri malim brzinama vagona, a zašto se povećavaju sa porastom brzine vagona. Što je brzina vagona v manja to je kateta z kraća, pa je zbog toga razlika između druge katete (y) i hipotenuze (x) manja, a samim tim je manja i razlika između vremenskih intervala Δt_V i Δt_Z, što se može i matematički predstaviti:

Ako je v malo $\Rightarrow$ $z = v \cdot \Delta t_Z$ je takođe malo $\Rightarrow$ $x \approx y$ $\Rightarrow$ $c \cdot \Delta t_Z \approx c \cdot \Delta t_V$ $\Rightarrow$ $\Delta t_Z \approx \Delta t_V$.

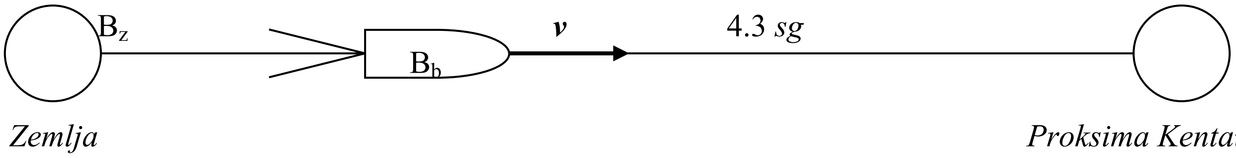
Važi i obrnuto, što je brzina vagona v veća, to je kateta z duža, pa je veća i razlika između druge katete (y) i hipotenuze (x), što znači da je i veća razlika vremenskih intervala Δt_V i Δt_Z, tj.

Ako je v jako veliko $\Rightarrow$ $z = v \cdot \Delta t_Z$ je takođe jako veliko $\Rightarrow$ $x >> y$ $\Rightarrow$ $c \cdot \Delta t_Z >> c \cdot \Delta t_V$ $\Rightarrow$ $\Delta t_Z >> \Delta t_V$.

Posle prethodnog izvođenja i analize jasno je da dilatacije vremena (usporavanja vremenskog toka u telu koje se kreće) nema samo pri mirovanju tela, a da je pri kretanju malim – klasičnim brzinama pojava dilatacije zanemarljiva.

Zašto je ova posledica Specijalne teorije toliko važna otkrićemo na sledećem primeru koji je u fizici poznat kao:

<u>Paradoks blizanaca</u>



sl. 6.

Na sl. 6. je prikazan put svemirskog broda od Zemlje do nama najbliže zvezde Proksime Kentaura u sistemu Alfe Kentaura koja je udaljena od našeg Sunčevog sistema oko 4.3 *svetlosne godine*. Svetlosna godina je, inače, rastojanje koje svetlost pređe za godinu dana. Mesec je od Zemlje udaljen oko 1.3 *svetlosnu sekundu*, a Sunce je od naše planete udaljeno oko 8.4 *svetlosnih minuta*.

Brodom putuje jedan od dvojice blizanaca (B_b) dok njegov brat (B_z) ostaje na Zemlji.

Brzina broda je $v = 259\,800\ \frac{km}{s} \approx 260\,000\ \frac{km}{s} = \frac{13}{15}c$. <u>Ova brzina je izabrana tako da vrednost korena iznosi ½</u>, pod uslovom da je brzina svetlosti $c = 300\,000\ \frac{km}{s}$. Tačna vrednost brzine svetlosti u vakuumu je: $c = 299\,792.5\ \frac{km}{s}$. Da bi uprostili primer zanemarićemo vreme potrebno za ubrzavanje, kao i za usporavanje broda, a zanemarićemo i vreme koje brod provede u sistemu Alfe Kentaura.

Posmatraćemo putovanje broda do njegovog povratka na Zemlju, pri čemu možemo da smatramo da se on i u odlasku i u povratku kreće ravnomerno – s obzirom na prethodna zanemarivanja.

Blizanac sa Zemlje (a i mi svi zajedno sa njim) mora da sačeka $\Delta t_z = 10\,godina$, da bi se brod sa njegovim bratom vratio na Zemlju. Ovo vreme je izračunato na sledeći način: ako je svetlosti, koja se kreće brzinom $c = 300\,000\ \frac{km}{s}$, potrebno vreme od $4.3\ g$ da stigne do Alfe Kentaura, tada je brodu koji se kreće brzinom $v = 260\,000\ \frac{km}{s}$ potrebno vreme za isti put $\Delta t = 4.96\,g\ \approx 5\,g$, što se dobija iz obrnute proporcije: $\Delta t : 4.3 = 300\,000 : 260\,000$.

Ako je brod krenuo 2005. godine i ako su blizanci tada imali po 30 godina, tada je godina povratka na Zemlji 2016. a blizanac sa Zemlje je tada 10 godina stariji i ima 40 godina.

Blizancu iz broda proteklo vreme računamo iz Ajnštajnovog obrasca za vreme:

$$\Delta t_B = \Delta t_Z \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Kako je vrednost korena, za izabranu brzinu broda, $\sqrt{\ } = ½$ jasno je da je u brodu proteklo samo 5 godina:

$$\Delta t_B = 10g \cdot \frac{1}{2} = 5g\ .$$

To znači da se, po brodskom kalendaru, brod vratio 2010 godine, a da blizanac iz broda tada ima samo 5 godina više tj. da ima 35 godina.

Ovo znači više stvari.

Prvo, oni više nisu blizanci jer je, zbog dilatacije, vreme u brodu teklo duplo sporije. Specijalna teorija relativnosti ne predviđa nikakve uticaje ogromnih brzina na živa bića, tj. ljudsku posadu. Ako takvih efekata ima mi o njima ništa ne znamo jer nemamo neposredno iskustvo sa kretanjem brzinama bliskim brzini svetlosti. Jedino što znamo je da će doći do dilatacije vremena i da će zbog toga posadi broda proteći manje vremena nego u okolnom svemiru.

Dalje, dilatacija vremena iz primera sa blizancima <u>znači da je blizanac iz broda putovao kroz vreme i to u budućnost!</u> S obzirom da je njemu proteklo samo 5 godina, a da je na Zemlji proteklo 10 godina to znači da je on otputovao 5 godina u budućnost.

Zamislimo sada da je brzina broda $v = 299\,999.9\ \frac{km}{s}$. Vrednost korena sada iznosi $\sqrt{} \approx \frac{1}{914}$. Uzmimo da je brod krenuo 2000. godine i da je otišao do neke zvezde koja je od Zemlje udaljena 457 *sg*, a onda se vratio na Zemlju. Ljudi na Zemlji će morati da sačekaju $457\ g + 457\ g = 914\ g$. Godina povratka će, dakle, biti 2914. Međutom, na brodu će proteći samo 1 *g*, pa će posada broda otputovati 913 godina u budućnost. Nažalost, oni se nikada neće moći da vrate u svoje vreme, jer jedan od dva temeljna zakona fizike, a to je Princip kauzalnosti, zabranjuje putovanje u prošlost.

Princip kauzalnosti glasi: <u>Ako događaj A (uzrok) prouzrokuje pojavu događaja B (posledica), tada događaj A mora da vremenski prethodi događaju B.</u> Evo kako ovaj princip zabranjuje putovanje u prošlost (I razred).

Pretpostavimo postojanje svemira u kome je moguće putovati kroz vreme – u prošlost i u kome važi princip kauzalnosti. Sada je moguće pokazati da se ove dve pretpostavke međusobno isključuju. Dakle zamislimo u takvom svetu čoveka koji je izumeo vremeplov kojim se može putovati u prošlost. Recimo da je on i preduzeo takvo putovanje godine 2001. i da je otputovao u godinu 1950. a uzmimo da je rođen 1953. godine. Po svom prispeću u 1950. god. on sretne svoju majku i ubije je (čin je drastičan ali i nužan za dokaz). Razmotrimo sada posledice ovog događaja kotisteći logiku principa kauzalnosti. Ako je on ubio svoju majku 1950. onda ga ona nije mogla roditi 1953. što znači da on nije ni živeo, pa nije mogao ni da izumi takav vremeplov, ni da otputuje u prošlost, ni da ubije svoju majku, ali to znači da je ona preživela godinu 1950. pa ga je rodila 1953, pa je onda on postojao i napravio vremeplov, te otputovao u prošlost i ubio je... Očigledan je paradoks, pa je jedino rešenje kojim ga izbegavamo da pretpostavimo da ne postoji svemir u kome istovremeno važi princip kauzalnosti i u kome je moguće putovati u prošlost.

Dalje povećenje brzine broda ka brzini svetlosti bi dovelo do još manje vrednosti korena, a to znači do sve većeg vremenskog raskoraka između vremena u brodu i vremena u okolnom svemiru, tj. na Zemlji. Dakle, vremenski raskorak (vrednost korena) može biti 1 : 1 000 000, 1 : 1 000 000 000 … To nešto može značiti posadi broda jer može prelaziti (mereno sa Zemlje) ogromna rastojanje za vrlo malo brodskog vremena, međutim nama koji ostajemo na Zemlji to njihovo putovanje ništa ne znači, izuzev nekoj od dalekih budućih generacija u vreme kada se brod vrati na Zemlju – pod pretpostavkom da civilizacija uopšte preživi taj ogroman vremenski jaz.

To dalje znači da će naše buduće osvajanje svemira biti vrlo problematično. Samo naša galaksija ima prečnik od oko 150 000 *sg*, što znači da samo sačekamo prelazak ovog rastojanja najvećom mogućom brzinom ($v \approx c$) na Zemlji će proći 150 000 godina. U brodu će proteći vrlo malo vremena pa će posada preživeti ovaj put, ali se iz očiglednog razloga postavlja pitanje svrhovitosti takvog putovanja. Ko će uopšte finansirati takvu ekspediciju, a može se pokazati da niko ne želi da prihvati ulogu člana posade, kakav će biti cilj takvog putovanja, kome će uopšte biti doneseni rezultati…

Za početak moraćemo da se zadovoljimo osvajanjem najbližih zvezda i našim postepenim širenjem ka susednim zvezdanim sistemima. Međutim, čak i takvo »Zemljino carstvo« bi vrlo teško funkcionisalo kao celina zbog velikog vremena potrebnog da se prenesu informacije od jednog do drugog naseljenog sveta. Ne zaboravimo da je najveća brzina u prirodi brzina svetlosti, a da je i njoj od Zemlje do nama najbližeg zvezdanog sistema potrebno 4.3 *g*.

Sumorna budućnost, ali uvek postoji nada. Kao što smo do početka XX veka smatrali da klasična fizika objašnjava funkcionisanje svemira, pa se ispostavilo da postoji jedna šira teorija koja kao granični slučaj obuhvata klasičnu teoriju, tako i sada postoji mogućnost da Specijalna teorija relativnosti nije konačna teorija, već da postoji neka još šira teorija koja bi obuhvatila i Specijalnu teoriju kao njen granični slučaj, a koja bi možda dozvolila i putovanja brzinom većom od brzine svetlosti. Da se naučnici ozbiljno bave ovakvim razmišljanjima ukazuje i to što su pretpostavljene čestice koje se kreću brže od svetlosti već dobile i ime – tahjoni, ali treba znati da one još uvek nisu otkrivene.

Postoje i druge mogućnosti kao što je mogućnost da ipak pronađemo način da putujemo u prošlost, ili nešto o čemu sada i ne pomišljamo.

Paradoks blizanaca nas je odveo dosta daleko, ali to i jeste razlog ogromne Ajnštajnove popularnosti, kao i popularnosti njegove teorije.

Na kraju ovog paradoksa zanimljivo je da većina ljudi smatra da je paradoks u tome što blizanci na kraju prestanu da to budu. No, istina je da su fizičari ovo nazvali paradoksom zato što im je bilo nejasno kako svemir uopšte »zna« koji se od dvojice blizanaca kreće, a koji miruje. Rešenje je verovatno u tome što brod da bi se kretao mora prvo da ubrzava, a da bi ubrzavao na njega mora da deluje pogonska sila, a to je ono što ukazuje svemiru da se baš brod kreće a Zemlja miruje, pa tako i da »zna« gde da uspori vreme.

Pogledajmo još jedan problem koji će verujem doprineti boljem razumevanju posledica Specijalne teorije relativnosti.

Zamislimo opet svemirski brod koji se kreće brzinom tako bliskom svetlosnoj da je vrednost korena 1 : 1000, tj. da vreme u brodu teče 1000 puta sporije nego na Zemlji. Neka brod pređe rastojanje od 1000 *sg* (mereno sa Zemlje). Za to će mu, opet mereno sa Zemlje, biti potrebno približno 1000 godina. To znači da je brzina broda merena sa Zemlje pređeni put podeljen vremenom kretanja:

$$v_Z = \frac{1000sg}{1000g} = c$$

što i jeste očekivani rezultat. To što je dobijeno da je brzina broda baš jednaka brzini svetlosti je posledica vrednosti vremena uzete u imeniocu od 1000 *g*. Tačna vrednost ovog vremena je ipak nešto veća od uzete vrednosti od 1000 *g*, a to za posledicu ima da je brzina broda ipak malo manja od brzine svetlosti.

Međutim problem nastaje kada pokušamo da izračunamo brzinu broda koju mere članovi njegove posade. I tada je brzina broda jednaka pređenom putu podeljenom sa vremenom njegovog kretanja. Ali vreme kretanja za posadu broda je samo 1 godina (zbog vrednosti korena), pa je:

$$v_B = \frac{1000sg}{1g} = 1000 \cdot c$$

tj. brzina broda, merena iz broda, je hiljadu puta veća od brzine svetlosti. Dobijeni rezultat izgleda logično, jer kako bi drugačije brod mogao da pređe rastojanje od 1000 svetlosnih godina za samo godinu dana. <u>Međutim dobijeni rezultat nije u skladu sa stavom da je brzina svetlosti najveća brzina u prirodi, pa se mora reći da je pogrešan! Ali gde je greška ?</u>

Ono što sam namerno propustio jeste kontrakcija – za posmatrače iz broda – prostora kroz koji se brod kreće. Setimo se da je kontrakcija dužine uzajamna pojava. Ne samo da posmatrač sa Zemlje meri kraći brod (u smeru kretanja), već i posmatrač iz broda meri skraćene dužine objekata pored kojih brod prolazi, ali i skraćenje rastojanja u smeru svog kretanja. I tu je vrednost korena 1 : 1000 pa brod zbog toga pređe put od samo 1 *sg*. Zbog toga se dobija brzina broda koju mere članovi njegove posade:

$$v_B = \frac{1sg}{1g} = c$$

što je u skladu sa stavom da je brzina svetlosti najveća brzina u prirodi.

Veza ukupne energije i relativističke mase. Zakon održanja mase i energije