EINSTEIN, TEORIJA RELATIVNOSTI IN ČAS

Avtor: Franc Rozman • Kontakt: fr.rozman@gmail.com

Povzetek:

Z Einsteinom se je pred dobrimi sto leti začela doba teorije relativnosti – ene najbolj slavljenih, a tudi pogosto razpravljalnih idej v fiziki. Mnoge teorija navdušuje, drugi v njej vidijo odprta vprašanja in šibke točke, tretji teoriji odločno nasprotujejo. V vsakem primeru pa se je pri relativnosti težko delati, kot da ne obstaja – prej ali slej se z njo srečamo v šoli, v knjigah ali na internetu.

Poglejmo, kje se »zalomi«. Einstein je čas pojmoval drugače, kot ga opisuje definicija sekunde. Danes je sekunda v fiziki natančno določena (prek atomske ure) in velja enako kjerkoli in kadarkoli: dve enaki uri, ki sta na začetku usklajeni, morata po tej definiciji ob ponovnem srečanju spet kazati enak čas – če jima čas določa ista definicija sekunde.

Einstein pa pravi nekaj drugega. Predstavljajmo si dva pilota z enakima urama, ki opravita različne lete. Ko se srečata, bo po teoriji relativnosti ena ura zaostajala za drugo, čeprav sta bili na začetku popolnoma usklajeni. To je v nasprotju s pričakovanjem, da definicija sekunde zagotavlja enak potek časa za obe uri.

Ta zapis pokaže, kje se relativnost zaplete ali pusti bralca brez jasnega odgovora, ponudi pa tudi predloge, kako razumeti ta vprašanja. V ospredje postavi preprosto vprašanje: komu verjeti – definiciji sekunde ali Einsteinovi napovedi o različnih časih? Če ste med tistimi, ki vas zanima, zakaj stvari delujejo tako, kot delujejo, in kje je izvor trenj, ste na pravem mestu.

Namen? Manj dogme, več jasnosti – in priložnost, da si vsak na osnovi razumljivih argumentov ustvari svoje mnenje.

1) Teorija relativnosti in hitrosti svetlobe

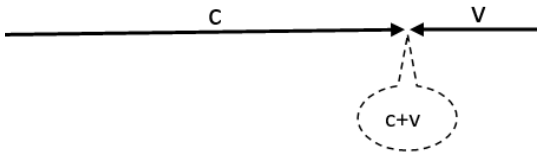
Einstein si je zamislil, da ima svetloba v vakuumu vedno enako hitrost, ne glede na to, kdo jo opazuje ali kako se giblje vir. To hitrost označimo s črko c. Skupaj z ženo Milevo je to idejo zapisal v matematičen jezik in nastala je teorija relativnosti. Matematično je teorija elegantna. Temelj teorije je postulat: v vakuumu se svetloba širi z vedno enako hitrostjo c.

Če ta predpostavka drži, teorija relativnosti opiše pojave pri zelo velikih hitrostih in v močnih gravitacijskih poljih.

Da si lažje predstavljamo, o čem govorimo, si pomagajmo z anekdoto o dveh opazovalcih. Prvi opazovalec stoji pri izvoru svetlobe, drugi pa je pri ponoru – tam, kjer svetlobo prestreže.

Svetloba zapusti vir s hitrostjo **c**. Opazovalec pri viru (Maxwellovih) ve, da svetloba s hitrostjo c potuje po celotni poti do ponora.

Zdaj si zamislimo, da se ponor premika proti viru s hitrostjo v. V sistemu, v katerem miruje vir, vidi opazovalec naslednje: - svetlobni žarek potuje proti ponoru s hitrostjo **c**, - ponor potuje proti žarku s hitrostjo **v**, - razdalja med žarkom in ponorom se zato zmanjšuje s hitrostjo **c + v**.



Tako se učimo tudi v osnovnošolski fiziki: če gre nekaj proti nam, se hitrosti preprosto seštejejo. Takšno hitrost približevanja (c + v) lahko sprejme tudi Teorija relativnosti – kot hitrost, s katero se krajša razdalja, ne kot "novo svetlobno hitrost".

Zdaj pa pogledamo še opazovalca na ponoru. Teorija relativnosti pravi, da bo on vedno izmeril, da svetloba nanj vpada s hitrostjo c, ne s c + v. Ugotavlja pa tudi, da se svetloba od izvora oddaljuje s hitrostjo, ki ni enaka hitrosti c. S tem je opis gibanja svetlobe med virom, ponorom in žarkom v njegovem sistemu opazovanja precej manj razumljiv kot v Newtonovi (klasični) fiziki, kjer si enostavno predstavljamo: svetloba odide z virom s hitrostjo c in prispe na ponor s hitrostjo c + v.

Vpliv hitrosti opazovalca na opis hitrosti svetlobe je v relativnosti omenjen. Vedeti moramo kdo kaj gleda, kar je zahtevnejše od Newtonovega pogleda. Poleg vsebinskih nejasnosti, se pojavljajo še terminološke nekasnosti, saj bi morali razlikovati med "hitrostjo približevanja" in "vpadno hitrostjo". V relativnosti se uporabljajo ti izrazi niso pedagoško jasno razloženi.

Namen tega uvodnega poglavja ni, da bi razjasnili te nejasnosti. Preveč jih je in mnoge so nerazumljive. Namen tega poglavja je, da opozorimo na stil pisanja in razumevanja Teorije

relativnosti. V nadaljevanju ne bomo pojasnjevali teh nejasnosti. Osredotočili se bomo na drugo nekoliko lažje vprašanje Teorije relativnosti: kako ta teorija razume čas.

2) Kaj meri sekunda

V fiziki čas merimo v sekundah, kot to določa definicija sekunde. Splošna konferenca za uteži in mere (CGPM) je leta 1968 s soglasjem sprejela standard za dolžino sekunde in način merjenja časa. Sekunda je določena kot 9 192 631 770 nihajev prehoda atoma cezija Cs-133 v idealni uri [1]. V praksi to pomeni: vsaka dobra ura lokalno tiktaka enako hitro; ena sekunda je povsod enako dolga. Čas med dvema dogodkoma merimo tako, da preštejemo število sekund med opazovanima dogodkoma.

Iz tega sledi enovit in nedvoumen način merjenja časa. Tu pa naletimo na pojmovanje merjenja časa v Teoriji relativnosti. Teorija relativnosti se z definicijo sekunde strinja, razlikuje pa se v načinu merjenja časa: v relativnosti na tek časa vplivata gravitacija in hitrost opazovalca, česar v standardni definiciji sekunde in postopku merjenja časa ni.

Imamo torej dva med seboj neskladna pogleda: (1) definicijo sekunde, ki naj bi veljala vedno in povsod, ter (2) Teorijo relativnosti, v kateri lahko čas teče drugače. To nas zmede. Ker razlike pri merjenju časa segajo do samih temeljev fizike, je pomembno, da jih pojasnimo in razhajanja predstavimo na razumljivih primerih. Prvi tak primer si oglejmo v nadaljevanju.

3) Zgodba z »atletskimi trenerji«: gibanje in čas

Definicija sekunde ne dovoljuje nobene razširitve glede na gibanje ure ali glede na gravitacijo, v kateri se ura nahaja. Definicija sekunde je neodvisna od gibanja in gravitacije in vse, s čemer želimo nadgraditi definicijo sekunde, je nasilje nad njo. V kaj se sprevrže tako nasilje pa ilustrirajmo v naslednji zgodbi.

Zamislim si atletski klub na oddaljenem planetu, ki se glede na Zemljo giblje s polovico svetlobne hitrosti. Tako na Zemlji kot na tem planetu čas merimo z enakimi cezijevimi (Cs) urami. Na obeh krajih organiziramo tek na 1000 metrov in po tekmovanju primerjamo čase tekmovalcev obeh klubov. Soglasno tudi v relativnosti velja, da uri na obeh prizoriščih tečeta enako hitro. Pri ocenjevanju doseženih časov torej ni nejasnosti. Kje se torej zalomi?

Po Teoriji relativnosti čas teče enako le, ko ga merimo lokalno. Ko pa primerjamo dve uri na različnih svetovih, se izkaže, da se časi na urah lahko razlikujejo. Na planetu, ki se glede na Zemljo giblje s hitrostjo 0,5 c, menijo, da nam na Zemlji čas teče približno 13 % počasneje od definicije sekunde zaradi našega gibanja glede nanje. Naša ura nam ne kaže tega, kot bi oni pričakovali, počasnejšega teka časa. Naša ura nam kaže standardne sekunde ne glede na naše gibanje glede na njih.

Po Teoriji relativnosti imajo celo oni glede naše ure dva nasprotujoča si pogleda. Vedo, da nam lokalno ura teče skladno z definicijo sekunde, obenem pa trdijo, da nam ura teče 13% počasneje. Niti ne vemo, čemu in komu naj služi ta počasnejši tek časa. Imajo dva nasprotujoča si pogleda glede teka časa na Zemlji. Tu se vprašamo: kako in zakaj?

Teorije relativnosti pravi, da opazovalec na oddaljenem planetu počasnejšega teka našega časa tu na Zemlji ne razume kot privid, ki bi ga povzročili velika oddaljenost in visoka hitrost. Meni, da nam na Zemlji ura resnično teče počasneje, česar pa mi na lastni uri ne opazimo. Meni počasnejši tek ure torej ne more služiti, ker ga ne občutim, čeprav se glede na gibajočega opazovalca na oddaljenem planetu gibljem s polovično hitrostjo svetlobe. Moja ura mi kaže čas enako, ne glede na hitrosti različnih opazovalcev, ki me morebiti opazujejo.

Tega počasnejšega teka časa torej ne opazim niti ga ne morem izmeriti. Pri meni ni merljiv, ker mi ura vedno kaže standardni čas; pri njem pa je le izračunljiv, ne pa merljiv. Nekaj, kar ni opazno in merljivo, težko šteje za znanstveni pojem.

Teorija relativnosti je lahko matematično neoporečna. Težava ni v matematiki, temveč v tem, da ta matematika morda ne opisuje stvarnosti. Po tem pogledu je ne opisuje zato, ker temelji na domnevi o vedno enaki hitrosti svetlobe, ne pa na trdni empirični potrditvi hitrosti svetlobe v vseh okoliščinah.

4) Ure na različnih višinah: ali višina »pospeši« tek časa?

Opisan primer tekaškega tekmovanja na velikih razdaljah in pri velikih hitrostih ne moremo hkrati opazovati na obeh lokacijah. Lahko pa poiščemo merljive primere Teorije relativnosti v naši bližini. Zamislim si dva atletska kluba na različnih nadmorskih višinah: enega v dolini in drugega na hribu. V obeh klubih ure po definiciji sekunde lokalno tečeta enako hitro. Tudi v tem primeru lahko rezultate teka na 1000 m merimo lokalno in uspehe tekmovalcev objektivno primerjamo. Takšno merjenje časa je skladno s Teorijo relativnosti.

Do sem torej ni razlik. Razlika nastopi, ko primerjamo obe uri. Zagovorniki Teorije relativnosti menijo, da uri na hribu in v dolini tečeta enako hitro le, ko ju opazujemo ločeno in lokalno. Takrat obe uri tečeta skladno z definicijo sekunde: uro na hribu opazujejo tisti na hribu, uro v dolini pa tisti v dolini.

V Teoriji relativnosti obstaja še križna primerjava ur: po mnenju zagovornikov višje ležeče ure pri medsebojni primerjavi tečejo hitreje od nižje ležečih, obratno pa nižje ležeče tečejo počasneje od višje ležečih.

To razlago si je težko predstavljamo. Ura, ki teče sinhrono in skladno z definicijo sekunde, kadar ju gledamo ločeno, pri primerjavi med urama pokaže drugačen čas od standardnega časa. Tak pogled je “čarodejski”, zato mu posvetimo še nekaj pozornosti.

V takem primeru ure niso toliko oddaljene, da jih v praksi ne bi mogli primerjati. Da odpravimo pomisleke, ali razlika med urama morda izvira iz netočnosti, si omislimo idealno

uro. Tudi zelo točne ure lahko odstopajo za nekaj ns na leto. Z “idealno uro” mislimo uro, ki nima niti tega odstopanja.

5) Idealna ura in definicija sekunde

V sobi na stano obesim dve uri, eno pri tleh, drugo pod strop. V teoriji relativnosti se strinjajo, da uri tečeta enako in kažeta enak čas, kadar ločeno gledamo eno ali drugo uro in njunih časov med seboj ne primerjamo. Kadar pa uri med seboj primerjamo, pa naj bi po Teoriji relativnosti opazili, da po določenem času kažeta različna časa.

Tak pogled na čas je protisloven. Vsaka ura ima svojo številčnico in teče tako hitro, kakršen čas razberemo iz njene številčnice. Ne morejo kazalci na uri kazati enega časa, kadar jo opazujemo »lokalno« in drugega časa, kadar ju primerjamo. Ura na številčnici kaže le en čas, ne glede kdo jo opazuje.

Tu dopuščamo možnost, da sta uri oddaljeni in da svetloba z ure do opazovalca potrebuje nek čas za to pot. To znamo upoštevati tako, da izračunamo koliko časa svetloba potuje do opazovalca in s tem oceniti, ali uri kažeta enak čas ali ne.

Zagovorniki Teorije relativnosti različen tek ur na različnih višinah skušajo podpreti z meritvami. Omenja se laboratorijski poskus merjenja časa na različnih višinah z dvema urama, kjer je en urni mehanizem le 33 cm nad drugim (NIST, 2010) [2]. Meritev naj bi pokazala, da uri tečeta različno hitro.

Med urama naj bi se v enem letu po relativističnem izračunu pojavila časovna razlika okoli 1 ns. Ta čas je mnogo manjši od tipične letne negotovosti ur (10 ns). Tu se vprašamo, ali lahko merimo tako neznaten relativistični učinek z uro, ki je manj natančna od učinka. Objava take meritev meče slabo luč tako na metodologijo merjenja kot tudi na izmerjene rezultate. Taka neprepričljiva meritev zastavlja vprašanje, ali znanost ne premore metodološko primerne meritve.

6) Definicija sekunde

Gornje navedbe nas zmedejo, zato se poglobimo v definicijo sekunde. Opazujmo dve časovno usklajeni idealni uri. Idealni zato, da ne razmišljano o morebitni naključni netočnosti ure. Uri sta idealni, če ves čas prikazujeta enaka čas. Idealni uri prikazujeta enaka časa ne glede na gravitacijo, ne glede na hitrost gibanja, ne glede na to, kdo in kako ju opazuje. V definiciji sekunde namreč ni pogojev, ki bi morali biti izpolnjeni, da bi ura kazala idealni čas. Po definiciji sekunde uri tečeta enako - pika.

V relativnosti naj uri ne bi kazali enakega časa, če potujeta z različnima hitrostma skozi različna gravitacijska poja, ko se vrneta na izhodiščno točko. Ta trditev se razlikuje od idealne ure. V navskrižju sta dve temeljni definiciji in tega navskrižja ne smemo spregledati. Idealna ura čas meri drugače, kot naj bi čas tekel v gravitacijskem polju skladno s Teorijo relativnosti.

V Teoriji relativnosti spregledajo ali morda celo zamolčijo to navskrižje. Namesto tega izpostavljajo meritve, ki naj bi dokazali zakonitosti Teorije relativnosti in s tem ovrgle definicijo sekunde. Izpostavljajo na primer meritev iz leta 1971, ko naj bi Hafele–Keating opravila poskus z letalom in atomsko uro. Izmerila naj bi vpliv hitrosti in višine letala na tek ure. Uri naj bi izmerili časovno razliko nekaj deset do nekaj sto ns, kar je merljivo.

Meritve nas silijo, da se opredelimo bodisi za definicijo sekunde, bodisi za Teorijo relativnosti. Definicija sekunde in 'izmerjen' tek časa na avionu, sta si v nasprotju. Definicija sekunde ne vsebuje pogojev, kot so hitrost gibanja ure ali gravitacija, v katerem se ura nahaja. Po definiciji sekunde ura teče enako, ne glede na okoliščine.

Avtorji meritve se niso pritožili nad definicijo sekunde. Vedejo se, kot da protislovna ne opazijo. Prepuščajo nam, da mi namesto njih presojamo, čemu naj verjamemo. Naša mogoče celo čustvena presoja tega protislovja ni znanstveni pristop. Znanost nam mora ponuditi enoumno razumljivo in argumentirano definicijo sekunde.

7) Teorija relativnosti ni usklajena z definicijo sekunde in merjenjem časa

Relativistični pogled torej bolj ali manj 'ogroža' definicijo sekunde ali obratno. Po eni strani priznavamo definicijo sekunde in merjena časa kot nekaj brezpogojnega, po drugi strani pa izvajamo meritve, in celo priznavamo rezultate takih meritev, ki nasprotujejo definiciji sekunde.

Meritev ur na letalu bi bila smiselna, če presojamo dva protislovna pogleda in na osnovi meritve skušamo ovreči bodisi definicijo sekunde, bodisi Teorijo relativnosti. Ne moremo pa hkrati priznavati relativističnega pogled na čas in hkrati priznava definicijo sekunde.

Med zagovorniki teorije relativnosti kroži zanimiv hipotetičen primer paradoksa dvojčkov. Dvojčka naj bi se starala različno, če bi se en dvojček gibal drugače kot drug. Glede na definicijo dolžine sekunde je ta zgodba povsem odvečna, saj se dvojčka starata enako, to je tako kot jima lokalno meri čas idealna ura, ne glede kam in kako potujeta. Tu se izrazito izkazuje trenje med definicijo sekunde in relativističnim pogledom na čas.

Odgovore na dilemo o vplivu gravitacije ali hitrosti gibanja ure na tek ure lahko pričakujemo od evropskega sistema ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) za merjenje časa na Mednarodni vesoljski postaji - ISS. S cezijevo uro PHARAO na ISS omogoča natančne primerjave med urami v vesolju in na tleh. ACES je bil izstreljen 21. aprila 2025, namestitev na modul Columbus je sledila 25. aprila, prvi vklop pa je bil 28. aprila 2025.

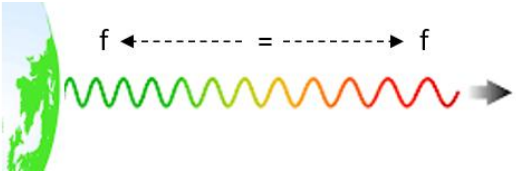
Na rezultate meritve še čakamo. Pričakujemo lahko le rezultat, da ura na ISS teče enako hitro kot na Zemlji, ne glede kako ju primerjamo. Do zamude pri objavi rezultatov lahko pride tudi iz razloga, če bi avtorji te meritve imeli določena pričakovanja, ki jih rezultati meritve ne potrjujejo.

8) Gravitacijski zamik: frekvenca, valovna dolžina in barva svetlobe

Zagovorniki Teorije relativnosti navajajo merljive pojave v podporo svojim trditvam. Ko svetloba prehaja iz močnejšega gravitacijskega polja v dolini v šibkejše polje na hribu, opazimo (izmerimo) premik spektralnih črt (poenostavljeno: barva svetlobe se spremeni).

Med hribom in dolino pošljimo na primer elektromagnetni val s frekvenco cezijeve ure f=9192631770 Hz. Lokalno izmerimo, da je frekvenca elektromagnetnega vala enaka v dolini in na hribu.

Valovna dolžina vala je enaka v dolini in na hribu, kadar ju merimo lokalno. Drugače pa je, ko na hribu merimo valovno dolžino vala, katere izvor je v dolini. V tem primeru izmerimo rdeči premik – valovna dolžina svetlobe se podaljša. Sprememba valovne dolžine na poti ob nespremenjeni izmerjeni frekvenci je dokaz, da se svetloba na poti iz gravitacijskega polja spremi valovna dolžina svetlobe. Ob nespremenjeni frekvenci to pomeni, da spremeni tudi hitrost.



Relativistična razlaga ne sprejema spremembe valovne dolžine in s tem hitrosti svetlobe, saj celotna Teorija relativnosti temelji na predpostavki stalne hitrosti svetlobe. Po relativistični razlagi ura v gravitacijskem polju teče počasneje, zato se na izvoru spremeni frekvenca svetlobe. Takšna razlaga ni sprejemljiva, saj frekvenco vala (Cs ure) lahko merimo.

Sprememba »barve svetlobe«, ki jo opazimo, torej ni posledica spremembe frekvence svetlobe na izvoru, temveč spremembe valovne dolžine na poti. Gravitacija vpliva na valovno dolžino in s tem tudi na hitrost svetlobe. Frekvenca svetlobe se ohranja.

Tu se pogledi ostro razidejo: pristaši relativnosti dosledno zagovarjajo stalno hitrost svetlobe in razlago rdečega/modrega premika skozi različen tek časa na viru svetlobe. Definicija sekunde pa zahteva ohranitev neodvisnosti sekunde in s tem tudi neodvisnost frekvence svetlobe od gravitacije na izvoru.

Imamo torej dve razlagi rdečega/modrega premika svetlobe: prva temelji na spremembi frekvence na izvoru (kar ogroža definicijo sekunde), druga na vplivu gravitacije na hitrost svetlobe (kar ogroža postulat o stalni hitrosti svetlobe, na katerem temelji Teorija relativnosti). To je ključno vprašanje; odgovor nanj lahko ponudi razlago omenjenih vprašanj in dilem.

9) Življenjski cikel in zrelost teorije relativnosti

Teorija relativnosti je priljubljena znanstvena tema že več kot sto let. V tem času so bile tu omenjene neskladnosti pogosto kritizirane, vendar to njene priljubljenosti ne zmanjšuje.

Teorija relativnosti pogosto deluje senzacionalno, na primer pri t. i. paradoksu dvojčkov. Ljudje smo praviloma željni senzacij, kar nenehno spodbuja širši krog oboževalcev k

poglabljanju v Teorijo relativnosti. Oboževalcem niti ni nujno, da paradoks dvojčkov razumejo; veliko jim pomeni že občutek, da se »čudeži« dogajajo tudi v »znanosti«.

Teorija je zanimiva tudi za poznavalce fizike. Matematični modeli Teorije relativnosti so predstavljeni v različnih grafičnih oblikah, kjer lahko fiziki v odnosu do svetlobnice oblikujejo svoje »senzacije«, kar lahko primerjamo z reševanjem križank, ki se jih nikoli ne naveličamo.

K popularnosti teorije prispeva tudi znaten del fizikov, ki so pripravljeni spregledati očitna protislovja relativnosti v odnosu do definicije sekunde in iščejo dokaze v obliki meritev, ki naj bi teorijo potrjevale. Med temi meritvami pa ne najdemo takih, ki bi Teorijo relativnosti enoznačno potrdile na način, primeren za pedagoško rabo. Meritve predvsem navdihujejo tiste, ki v rezultate že vnaprej verjamejo.

Obstaja tudi velik del fizikov, ki se Teoriji relativnosti ne posvečajo. Poznajo njene šibkosti in protislovja, vendar ne vidijo razloga, da bi jih izpostavljali. Sama teorija nima omembe vrednega pomena za naše vsakdanje življenje; v našem okolju nas ne podpira in ne ovira, zato ni razloga vlagati napor, da bi teorija doživela »končni epilog«.

Ker Teorija relativnosti po tej oceni nima vpliva na vsakodnevno življenje, teorija dobiva drugorazredno vlogo. Njeni zagovorniki zato skušajo najti razloge, da bi jo postavili bolj v ospredje. Pogosto izpostavijo, da ura na navigacijskem satelitu (GPS) teče za 38 μs/dan hitreje kot na Zemlji. Hitrejši tek časa na GPS-satelitu je po tem pogledu vprašljiv iz dveh razlogov: (1) podatki o GPS naj bi bili varovana vojaška skrivnost ameriške vojske; (2) ure na GPS-satelitih je mogoče na daljavo nastavljati z Zemlje, in to v razponu, ki nekajkrat presega 38 μs/dan. Ure na GPS naj bi torej na daljavo sinhronizirali z urami na Zemlji, brez predhodnega razmisleka o relativističnem teku ur.

10) Univerzalnost Teorije relativnosti

Teorija relativnosti opisuje pojave pri velikih hitrostih in v močnih gravitacijskih poljih. Pričakovali bi, da bolj ko so opažene hitrosti velike, toliko bolj smiselna je uporaba Teorije relativnosti za opis takih pojavov.

Opazujmo na primer dva fotona, ki potujeta od Sonca drug ob drugem proti Zemlji z enako medsebojno razdaljo (denimo nekaj metrov); njuna pot traja dobrih osem minut. Za fotona lahko rečemo, da sta ves čas na isti medsebojni razdalji, Teorija relativnosti pa ne dopušča, da bi rekli, da mirujeta drug glede na drugega. Zakaj? Za svetlobo velja, da ima vedno svetlobno hitrost, kjer koli in kadar koli, glede na kar koli. Po matematičnih zakonitostih Teorije relativnosti imata fotona torej le dve možnosti: ali se gibljeta drug glede na drugega s svetlobno hitrostjo (čeprav ostajata na isti razdalji) ali pa njunih hitrosti ni mogoče določiti. Po Teoriji relativnosti foton nima svojega mirovalnega sistema; »relativna hitrost dveh fotonov« zato ni definiran pojem. S tem Teorija relativnosti izgubi na preglednosti in razumljivosti.

Matematika bi morala razumljivo opisovati naša opažanja, ta pa bi se morala enoznačno odražati v matematiki. V primeru dveh fotonov je matematika Teorije relativnosti daleč od naših pričakovanj in predstav. Pojavi se vprašanje, ali je relativistični opis potovanja fotonov res najboljše, kar nam fizika lahko ponudi za razumljivo predstavo o hitro gibajočih se delcih.

Glede univerzalnosti Teorije relativnosti imamo več podobnih pomislekov. Naj omenim še enega. Električno in magnetno polje znotraj elektromagnetnega vala se spreminjata in se širita s hitrostmi, ki morda celo presegajo svetlobno hitrost. Tu naletimo na težavo: pri zelo velikih hitrostih se čas močno upočasni, sekunde postanejo zelo dolge, krajevne razsežnosti pa se skrčijo v točko.

Teh vplivov hitrosti polj na potek časa v zapisu Maxwellovih enačb ne opazimo. Te enačbe matematično opisujejo elektromagnetni val brez upočasnjenega teka časa. Maxwellove enačbe temeljijo na razumevanju elektromagnetnih valovanj na način, kot pojave in čas opisuje Newton.

11) Hitrost svetlobe in pogled v vesolje

Če že Teorija relativnosti nima vpliva na vsakdanje življenje, pa po drugi strani celo ovira in popači naš pogled na raziskovanje vesolja.

Naj to ponazorim s primerom. Eksplozija supernove je lahko hipna oziroma kratkotrajna, na Zemlji pa jo vidimo kot dogodek, ki traja tudi mesece. Razlog za navidezno dolgotrajnost ni v samem trajanju eksplozije, temveč v tem, da svetloba iz različnih žarečih delcev supernove, ki se gibljejo z različnimi hitrostmi, do nas prihaja z različnimi hitrostmi in tako navidezno podaljša dogajanje.

Drug zgled so pulzarji. Na poti od pulzarja se svetlobni žarki, ki se gibljejo z različnimi hitrostmi, dohitevajo in pri združevanju ustvarjajo interference, kar daje vtis zelo hitrega vrtenja pulzarja. Pulzar se lahko vrti počasi; hitro utripanje je zgolj navidezni učinek, posledica interferenc svetlobe ob združevanju svetlobe ob dohitevanju enih in drugih žarkov.

Premalo poglobljena – in morda celo zmotna – predstava o hitrosti svetlobe vpliva tudi na razumevanje drugih pojavov, na primer razumevanja temne snovi. Temne snovi morda ne bomo razumeli, dokler ne poglobimo razumevanja svetlobe.

12) Kako prepoznati, da je neko prepričanje “na tankem ledu”

Iz družbenih dogajanj v preteklosti se je oblikovalo nekaj meril, ki nakazujejo, kdaj neko prepričanje ali teorija ne sloni na trdnih temeljih. Oglejmo si nekaj ključnih, že dolgo znanih opozorilnih meril in poglejmo, kaj pomenijo za prepričanje o vedno enaki hitrosti svetlobe ter za Teorijo relativnosti.

Nudi zelo preprosto razlago kompleksnega problema.
Stališče o hitrosti svetlobe sloni na postavki o vedno enaki hitrosti svetlobe. Znanstveni pristop bi moral biti drugačen: hitrost svetlobe je treba meriti v različnih okoliščinah, jasno objaviti, v katerih razmerah je bila izmerjena in kakšni so rezultati, ter navesti, v katerih pogojih meritev še ni bilo in zato hitrosti ne poznamo.

Prepričanje je močno vezano na identiteto ali čustva.
Tudi pri prepričanju o hitrosti svetlobe in pri Teoriji relativnosti pogosto opazimo zelo osebno in čustveno zagovarjanje teh postavk. Mnogi se z njima poistovetijo, kar lahko ponazorimo z razmišljanjem: »Če to ni res, kdo sem potem jaz?«

Dokazi so predvsem anekdote.
Ta opozorilni kriterij prihaja z drugih področij, vendar je uporaben tudi tukaj. V primeru Teorije relativnosti to niso anekdote, temveč dvomljive meritve, ki nimajo širokega znanstvenega priznanja. Prepogosto so takšne meritve namenjene samopotrditvi. Ko se razprave o teh meritvah razplamtijo, zagovorniki Teorije relativnosti pogosto sklenejo: »Meni zadoščajo.«

Težko je povedati, kaj bi nas prepričalo, da se motimo.
Teorija relativnosti je tako zasidrana v naši zavesti, da pogosto ne najdemo razloga za dvom in si težko predstavljamo, kaj bi nas lahko odvrnilo od tega prepričanja.

Vsak protiargument se razlaga kot napad ali zarota, ne kot potencialno uporaben podatek.
Večino drugih znanosti praviloma sprejemamo čustveno neobremenjeno: če pride do sprememb in napredka, nas to veseli in z veseljem nadgrajujemo svoje razumevanje naravnih pojavov. V primeru Teorije relativnosti pa je zaradi čustvene navezanosti pogosto drugače in vsak izražen dvom nas hitro razjezi.

13) Bodočnost teorije relativnosti

Za razrešitev omenjenih neskladij bo morala temeljito prenovo doživeti bodisi teorija relativnosti bodisi definicija sekunde. Pomembno je, da je ta prenova podprta tako empirično kot teoretično in da so izhodišča široko razumljiva tudi v pedagoškem procesu. Za takšno prenovo se odpirajo številne poti; naša naloga je, da jih premislimo in pretehtamo.

Rdeči/modri premik pri svetlobi iz gravitacijskih polj ni samoumeven dokaz, da se spreminja frekvenca svetlobe in s tem trajanje sekunde—zlasti ker bi sprememba hitrosti teka časa nasprotovala definiciji sekunde. Dopustiti moramo možnost, da gravitacija na svetlobo deluje tako, da se ji na poti spremenita valovna dolžina in hitrost, ne pa frekvenca (in posledično ne hitrost teka ure).

Imamo torej dve pojmovanji rdečega/modrega premika v svetlobi iz gravitacijskega polja, od katerih je le eno stvarno in skladno z ostalo fiziko.

Na srečo se razmere za razumevanje fizike danes hitro spreminjajo. Omenimo lahko umetno inteligenco, ki je navdihnila tudi ta zapis. Po drugi strani je znanost načrtovala že prej omenjeno meritev primerjave ur (Zemlja–ISS) v okviru projekta ACES, ključno za presojo navedenih neskladij [5][6]. Glede na predhodna sklepanja lahko od ACES pričakujemo, da bosta uri tekli sinhrono in ne bosta pokazali različnih časov zaradi gravitacije in hitrosti satelita.

Seveda pa niti napredek tehnologije niti nedvoumni rezultati meritev ACES ne zagotavljajo, da se bo znanost hitro opredelila do teh odprtih vprašanj in kmalu naredila enega ključnih korakov v razvoju fizike. Nadaljnji razvoj lahko bistveno ovirajo ne fizikalne, predvsem čustvene ovire.

Za konec se spomnimo, da skozi vso zgodovino človeštva različne teorije nastajajo, doživijo zrelost, se postarajo in zatonejo. Enak življenjski cikel lahko pričakujemo tudi na področju teorije relativnosti.

Literatura

[1] BIPM. *The International System of Units (SI)*, 9th ed., 2019 (zadnja posodobitev verzije 3.0, 2023/2025). Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres. BIPM

[2] Chou, C. W., Hume, D. B., Rosenband, T., & Wineland, D. J. "Optical Clocks and Relativity." *Science* 329(5999), 1630–1633 (2010). tsapps.nist.gov+1

[3] Pound, R. V., & Rebka, G. A. Jr. "Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance." *Physical Review Letters* 3(9), 439–441 (1959). link.aps.org+1

[4] Hafele, J. C., & Keating, R. E. "Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains." *Science* 177(4044), 168–170 (1972). DOI: 10.1126/science.177.4044.168. Wikipedia

[5] ESA. "ACES: Atomic Clock Ensemble in Space." Uradna stran misije ESA/ACES (pregledi in novice, posodobljeno 2024–2025). sbfi.admin.ch+2ui.adsabs.harvard.edu+2

[6] ESA/ACES tehnični opisi (PHARAO/SHM, mikrovalovne in laserske povezave MWL/ELT). Npr. *ACES Factsheet* in spremljajoča tehnična dokumentacija (2011–2024). sbfi.admin.ch

[7] Griffiths, D. J. *Introduction to Electrodynamics*, 4th ed. Pearson, 2013.

[8] Einstein, A. "Zur Elektrodynamik bewegter Körper." *Annalen der Physik* 17, 891–921 (1905). Angleški prevod: "On the Electrodynamics of Moving Bodies." www2.coe.pku.edu.cn+2users.physics.ox.ac.uk+2

[9] Brecher, K. "Is the Speed of Light Independent of the Velocity of the Source?" *Physical Review Letters* 39(17), 1051–1054 (1977).

[10] Filippas, T. A., & Fox, J. G. "Velocity of Gamma Rays from a Moving Source." *Physical Review* 135(4B), B1071–B1075 (1964).

[11] Reinhardt, S., Saathoff, G., Buhr, H., Carlson, L. A., Wolf, A., Schwalm, D., … Gwinner, G. "Test of Relativistic Time Dilation with Fast Optical Atomic Clocks at Different Velocities." *Nature Physics* 3(12), 861–864 (2007).