Opšta teorija relativnosti

Posle objavljivanja specijalne teorije relativnosti, Ajnštajn je uočio dva njena nedostatka.

Jedan od njih je bio da se ona odnosila samo na pojave u inercijalnim sistemima referencije, jer se zasnivala na Galilejevom principu relativnosti koji glasi: izabrana fizička pojava se dešava na potpuno isti način u različitim inercijalnim sistemima. Dakle teorija nije razmatrala pojave u neinercijalnim (ubrzanim) sistemima referencije.

Drugi nedostatak teorije je bio što nije uzimala u obzir gravitacione efekte, tj. razmatrala je, praktično, pojave bez prisustva gravitacije.

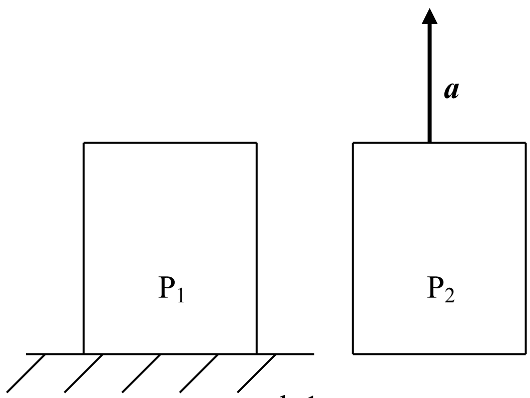
Upravo zato se ova teorija i naziva »specijalna«, jer razmatra specijalne slučajeve: kada se pojave dešavaju u inercijalnim sistemima i u bestežinskom stanju.

Ova dva nedostatka Ajnštajn je iskoristio za postavljanje nove teorije, koja je u sebe uključivala posledice specijalne teorije relativnosti – relativnost dužine, mase i vremena, ali koja je razmatrala i pojave u ubrzanim sistemima i u gravitacionom polju. Upravo zato što ova nova teorija, koja je objavljena 1915. g., razmatra ovakve opšte slučajeve, ona je i nazvana »opšta« teorija relativnosti.

U prvom delu će biti prikazan I misaoni eksperiment, iz koga je Ajnštajn došao do dva stava koji predstavljaju teorijsku osnovu njegove nove teorije. To su:

Princip ekvivalencije i Opšti princip relativnosti

I misaoni eksperiment: zamislimo da imamo dve istovetne kabine, od kojih je jedna na površini Zemlje, dakle u gravitacionom polju i da tu miruje, a da se druga nalazi u bestežinskom stanju i da se tu kreće ubrzano, sa ubrzanjem: $a = 9{,}81\frac{m}{s^2}$, koliko i iznosi ubrzanje Zemljine teže g. U obe kabine se nalazi po jedan posmatrač. U kabini, na Zemlji, deluje gravitaciona sila koja svim telima u njoj daje isto ubrzanje $g = 9{,}81\frac{m}{s^2}$. U kabini, koja se nalazi u bestežiskom stanju i ubrzava, na sva tela koja se nalaze u njoj deluje fiktivna sila u smeru suprotnom od smera u kome kabina ubrzava. Osobina ove fiktivne sile je da svim telima, na koja deluje, daje isto ubrzanje $a = 9{,}81\frac{m}{s^2}$. Dakle, obe sile daju telima potpuno jednaka ubrzanja, tj. njihova dejstva je praktično nemoguće razlikovati, što i predstavlja princip ekvivalencije, koji možemo sada izreći na sledeći način: ***dejstvo fiktivne sile ekvivalentno je dejstvu gravitacione sile.***



sl. 1.

Posledica principa ekvivalencije je da će se sve fizičke pojave, u ove dve kabine, dešavati na potpuno isti način, što mogu i potvrditi posmatrači u njima. Ovo predstavlja opšti princip relativnosti koji glasi: ***izabrana fizička pojava će se dešavati na potpuno isti način i u inercijalnom sistemu koji se nalazi u gravitacionom polju i u neinercijalnom sistemu koji se nalazi van gravitacionog polja.***

Posledice opšteg principa relativnosti se mogu korektno izvesti samo primenom vrlo složenog matematičkog postupka. Međutim najvažnije od ovih posledica se mogu izvesti i iz određenih misaonih eksperimenata.

Najjednostavnija posledica je da fiktivna sila može zameniti gravitacionu, što omogućava postojanje veštačke gravitacije u budućim svemirskim brodovima. Ako svemirski brod zarotiramo oko uzdužne ose, tada će ulogu gravitacione sile na sebe preuzeti fiktivna – centrifugalna sila – kao u dobošu veš mašine kada je uključena centrifuga. Pritom će veštačka gravitacija biti jača što se nađemo bliže spoljašnjoj bočnoj oplati broda, dok će u samoj uzdužnoj osi broda biti bestežinsko stanje.

Ostale posledice su: *da je prostor svemira zakrivljen delovanjem gravitacije i da vreme teče sporije u gravitacionom polju nego u bestežinskom stanju.*

Obe ove posledice se mogu izvesti iz sledeća dva misaona eksperimenta:

II misaoni eksperiment:

Zamislimo jednu kružnu ploču – koja se nalazi u bestežinskom stanju – i koja može da slobodno rotira oko svog centra. Dalje zamislimo da se na rubu ove ploče nalaze stubovi na međusobnom rastojanju od jednog metra. Uzmimo, takođe, da ploča rotira, ali i da je njen poluprečnik tako velik, da se njen rub kreće relativističkom brzinom, tj. brzinom bliskom brzini svetlosti u odnosu na posmatrača koji se nalazi pored ploče. Ako taj posmatrač preduzme merenje obima ploče, on to može uraditi tako što će izmeriti rastojanje između dva susedna stuba na njenom rubu dok prolaze pored njega a zatim može prebrojati stubove. Množenjem ova dva podatka posmatrač dobija traženi obim ploče. Tada on može preduzeti i merenje poluprečnika ploče. Ako uzmemo u obzir relativističku kontrakciju dužine, ovaj posmatrač će izmeriti da je rastojanje između dva susedna stuba manje od jednog metra. Zbog toga će on izračunati da je obim ploče manji od njenog obima u stanju mirovanja. Međutim, posmatrač neće meriti skraćenje poluprečnika ploče zato što se kontrakcija dužine javlja samo u pravcu kretanja, a poluprečnik ploče se pruža u pravcu normalnom na pravac kretanja njenog ruba.

Iz geometrije u ravni znamo da je odnos obima i dvostrukog poluprečnika ploče jednak broju $\pi = 3{,}14\ldots$ tj. $$\frac{O}{2r} = \pi$$

U slučaju da naš posmatrač uspostavi odnos obima i dvostrukog poluprečnika ploče koje je izmerio na prethodno opisan način, možemo videti da će ovaj biti manji od π, tj.

$$\frac{O}{2r} < \pi.$$

Sada bi smo mogli razmotriti na koji način bi ovo moglo biti moguće sa geometrijske tačke gledišta. Na ravnoj površini ovakav odnos je naravno nemoguć, ali ako je površina zakrivljena, tada bi ovakav odnos bio ne samo moguć već i nužan. Zato bi posmatrač ovu kružnu ploču video kao zakrivljenu površinu. Da bi ovo bolje razumeli, zamislimo da smo određenim otvorom šestara definisali poluprečnik datog kruga. Ako ga sada zabodemo na ravnu površinu, opisana kružnica zadovoljava uslov: $\frac{O}{2r} = \pi.$ Međutim, ako šestar zabodemo na vrh površine jedne kugle, pa sa istim otvorom šestara ocrtamo krug na njenoj površini, tada će obim ove kružnice biti manji nego u prethodnom slučaju, tako da ćemo dobiti odnos:

$$\frac{O}{2r} < \pi.$$

Pritom treba uočiti da je ovakva ploča ubrzan tj. neinercijalan sistem. Na tela koja se nalaze na njenoj površini deluje fiktivna – centrifugalna sila, koja je utoliko jača ukoliko smo bliži njenom rubu. Upravo na rubu ploče je najveće i relativističko skraćenje dužine, zato što se tačke na rubu ploče kreću najvećom periferijskom brzinom. Zato je zakrivljenje ploče i najveće na njenom rubu.

Sada se setimo opšteg principa relativnosti. On kaže da sve što se dešava u ubrzanom sistemu, mora da se na isti način dešava i u inercijalnom sistemu koji se nalazi u gravitacionom polju. Dakle ako je u ubrzanom sistemu prostor zakrivljen, tada on mora takođe biti zakrivljen i u gravitacionom polju. Ako po principu ekvivalencije fiktivnu – centrifugalnu silu zamenimo gravitacionom silom, tada je jasno da što je gravitacija jača to je i prostor više zakrivljen njenim dejstvom, kao što je ploča najviše zakrivljena na svom rubu gde je i centrifugalna sila najjača.

Najvažnija primena ovakve posledice je njena primena na svemir, koji je izložen jednom sveukupnom gravitacionom polju svih tela koja se u njemu nalaze. Zato možemo smatrati da je ceo prostor svemira zakrivljen, pri čemu je zakrivljenje određenog dela prostora utoliko veće ukoliko je gravitaciono polje na tom mestu jače.

III misaoni eksperiment:

I za ovaj misaoni eksperiment će nam poslužiti kružna ploča iz prethodnog. U ovom slučaju dodatak su časovnici koji su razmešteni duž poluprečnika ploče od njenog centra pa sve do njenog ruba. Ako se ploča opet obrće tako da je brzina njenog ruba bliska brzini svetlosti, tada će posmatrač koji se nalazi pored ploče videti da časovnici, koji se nalaze bliže rubu ploče, rade sporije od onih koji se nalaze bliže centru. U pitanju je dilatacija vremena. Možemo takođe uočiti da centrifugalna sila na ploči, jače deluje na časovnike koji su bliži rubu ploče.

Ako se ponovo setimo opšteg principa relativnosti, tada postaje jasno da sve što se dešava u ubrzanom sistemu ploče mora da se desi i u ma kom gravitacionom polju. To znači da će i u gravitacionom polju vreme teći usporeno. Upotrebivši i princip ekvivalencije možemo zaključiti da će pojačanje gravitacione sile biti propraćeno daljim usporavanjem vremena. Dakle što je gravitaciono polje jače, vreme u njemu teče sporije.

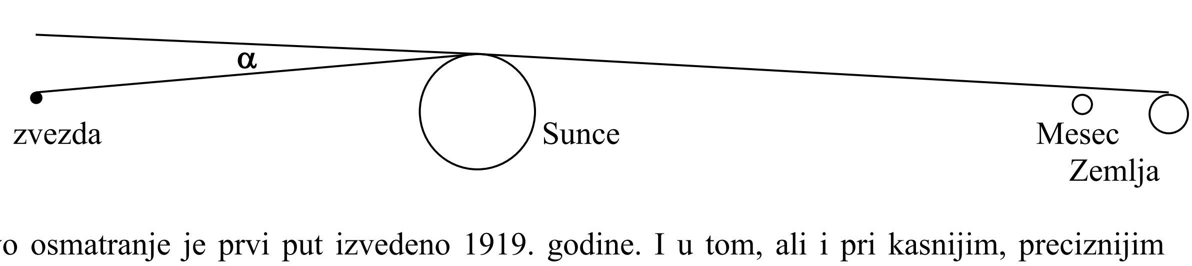
Provere opšte teorije relativnosti:

1. Precesija Merkurove orbite

Precesija Merkurove orbite po klasičnoj Njutnovoj teoriji gravitacije treba da bude: 5557" u 100 godina. Ovako predviđena vrednost precesije potiče od poremećaja izazvanih gravitacionim delovanjem Venere na Merkur. Međutim, izmerena vrednost iznosi: 5600"/ 100 g. Razliku od 43"/ 100 g. klasična teorija ne može da objasni, ali Opšta teorija relativnosti upravo predviđa vrednost koja je izmerena uzevši u obzir i gravitaciono zakrivljenje prostora koje izaziva naše Sunce, što predstavlja ne samo njenu sjajnu potvrdu, već i rešenje dugogodišnje zagonetke u astronomiji.

2. Skretanje svetlosti u gravitacionom polju

Efekat skretanja svetlosti u gravitacionom polju predviđa i klasična fizika, zato što fotoni svetlosti imaju masu dok se kreću brzinom svetlosti, pa tada gravitaciono polje kroz koje prolaze može da na njih izvrši uticaj i da ih skrene sa pravolinijske putanje. Da bi skretanje bilo veće potrebno je što jače gravitaciono polje. Od bliskih objekata Sunce ima najjače polje, pa je najbolje da pratimo kretanje svetlosnog zraka, koji potiče sa neke udaljene zvezde, kroz Sunčevo gravitaciono polje. Pritom postoji jedna nezgoda, a to je da je i samo Sunce izvor svetlosti i to mnogo jače nego što je svetlost sa te udaljene zvezde, što znači da će Sunčeva svetlost onemogućiti da je vidimo. Zato se posmatranje mora izvršiti pri pomračenju Sunca, kada su vidljive i one zvezde koje se prividno nalaze u njegovoj neposrednoj blizini.



Ovakvo osmatranje je prvi put izvedeno 1919. godine. I u tom, ali i pri kasnijim, preciznijim merenjima dobijena vrednost ugla α je bila dva puta veća od one koju je pradviđala klasična teorija. Vrednost koja je izmerena je upravo ona vrednost koju predviđa Opšta teorija relativnosti. Ona predviđa veću vrednost jer uzima u obzir i zakrivljenost prostora koju izaziva gravitaciono polje Sunca. Klasična i relativistička vrednost ugla su:

$$\alpha_k = \frac{2\gamma \cdot M}{R \cdot c^2} = 0{,}87'' \quad \text{i} \quad \alpha_r = \frac{4\gamma \cdot M}{R \cdot c^2} = 1{,}75''$$

M i R su masa i poluprečnik Sunca, dok je γ univerzalna gravitaciona konstanta, a c je brzina svetlosti.

3. Gravitacioni crveni pomak

Zbog usporavanja vremenskog toka u jakom gravitacionom polju, može se očekivati da će svetlost emitovana iz takvog polja imati smanjenu frekvenciju, što znači i veću talasnu dužinu nego svetlost koja bi bila emitovana iz istog procesa ali koji bi se dešavao u bestežinskom stanju. Dakle boja takve svetlosti bi bila pomerena ka crvenoj boji. Ova pojava se naziva gravitacioni crveni pomak, a njegova veličina iznosi:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\gamma \cdot M}{R \cdot c^2}$$

gde je M masa tela koje izaziva gravitaciono polje, dok je R rastojanje od centra tog tela do mesta gde se odvija proces koji je izvor emitovane svetlosti. λ je emitovana talasna dužina iz procesa koji se odigrava van gravitacionog polja, a $\Delta\lambda$ je razlika talasnih dužina emitovanih iz gravitacionog polja i van njega.

Brojna vrednost ovog pomaka za svetlost emitovanu sa Sunca iznosi: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 2 \cdot 10^{-6}$, što je veoma mala , ali i merljiva vrednost. Mnogo veći crveni pomak bi bio uočljiv u svetlosti emitovanoj iz znatno jačih gravitacionoh polja nego što je Sunčevo polje. Takvi objekti postoje i to su beli patuljci. To je ostatak ugasle zvezde, gde je masa približna masi našeg Sunca sabijena u prostor koji odgovara zapremini naše planete. U tom slučaju gravitacioni crveni pomak je lako meriv i poklapa se sa predviđanjima Opšte teorije relativnosti. Zanimljivo je da astronomi koriste ovako izmerene rezultate da bi izračunali masu zvezde koja je izvor zračenja.