

OSNOVE TEORIJE RELATIVNOSTI

Peter Lukan
Filozofska fakulteta
Univerza v Ljubljani

POSEBNA TEORIJA RELATIVNOSTI

- Einstein v članku „K elektrodinamiki premikajočih se teles“ (*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, 1905) zapiše dva postulata posebne teorije relativnosti:
 1. princip relativnosti: zakoni fizike so invariantni (tj. identični) v vseh inercialnih sistemih (nepospešenih koordinatnih sistemih), tj. takrat, ko je vsota sil enaka 0;
 2. konstantna hitrost svetlobe: hitrost svetlobe v vakuumu je enaka za vse opazovalce, ne glede na gibanje svetlobnega izvora.
- Pridevek ‚relativnostna‘ torej *nima* veze s krilatico, „da je vse relativno“. Einstein sam je bil s tem poimenovanjem nezadovoljen, bolj ustrezno ime bi zanj bilo npr. ‚teorija invariantnosti‘.
- Pridevek ‚posebna‘ se nanaša na njeno omejenost na primere, ko je mogoče zanemariti učinke pospeševanja teles oziroma učinke gravitacije.

LORENTZEVE TRANSFORMACIJE IN FAKTOR γ

- V klasični fiziki je poznana ‚Galilejska transformacija‘, ki prevaja opis s koordinatami iz mirujočega v gibajoči se koordinatni sistem. Isti dogodek lahko opišemo iz mirujočega položaja ali iz položaja, ki se giblje z neko hitrostjo v . Npr. če stojimo na bregu, imamo en set koordinat, če stojimo na gibajočem se čolnu (Galilejev primer) pa drugačen set koordinat za opis istega dogodka.
- Posebna teorija relativnosti je podobno uvedla transformacijo, ki prevede opis s koordinatami iz enega mirujočega sistema v drugega, ki se giblje s hitrostjo, ki je blizu svetlobni.
- Transformaciji sta na videz zelo podobni, razlikujeta se za t.i. faktor gama:

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

Faktor gama

$$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t)$$

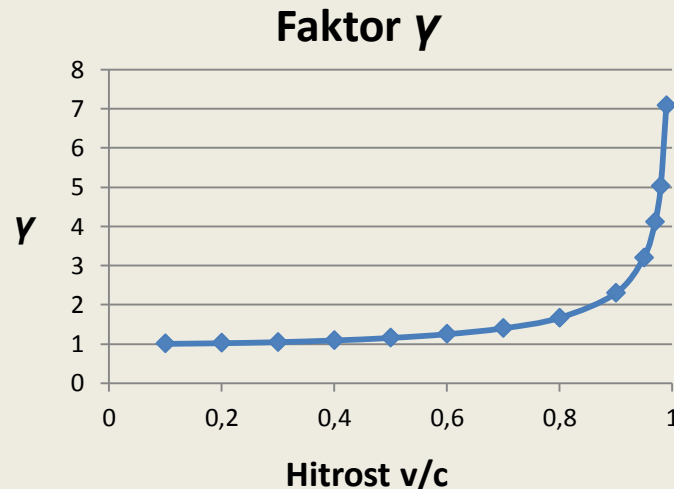
$$\Delta t' = \gamma(\Delta t - v\Delta x/c^2)$$

Lorentzeva transformacija za koordinato vzdolž smeri gibanja (x) in za čas (t).

- Galilejeva transformacija je bila brez faktorja γ in je veljala samo za prostorske koordinate.

FAKTOR γ

- Faktor gama je za klasičen primer, ko je hitrost veliko manjša od svetlobne, enak 1. Pomembno različen od 1 postane šele pri hitrostih, ki so enake vsaj polovici svetlobne hitrosti $c = 300.000 \text{ km/s}$ (glej spodnji graf, to je pri hitrosti $0.5 v/c$).



- Takšne hitrosti v vesolju dosegajo mikroskopski delci ter tudi medsebojne hitrosti gibanja galaksij (npr. gibanje galaksije MACS0647-JD znaša $0.98 c$ glede na našo – to je najhitrejša zaznana hitrost do leta 2017). Za človeka so nedosegljive.
- Četverec prostora-časa

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \\ ct \end{bmatrix}$$

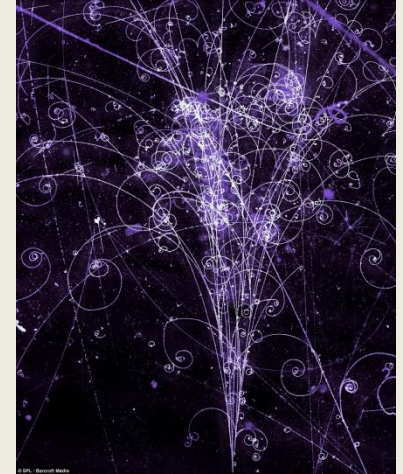
POSLEDICE POSEBNE TEORIJE RELATIVNOSTI

Tu navedene posledice sledijo neposredno iz Lorentzevih transformacij, ki matematično povzemajo oba postulata posebne teorije relativnosti:

- skrčenje (kontrakcija) dolžin: razdalje v sistemu (npr. v namišljeni raketi), ki se giblje zelo hitro glede na našega, so za nas videti krajše;
- raztezanje (dilatacija) časa: časi v sistemu (npr. namišljeni raketi), ki se giblje zelo hitro glede na našega, so za nas daljši;
- relativnost simultanosti;
- zveza med energijo in maso $E = mc^2$.

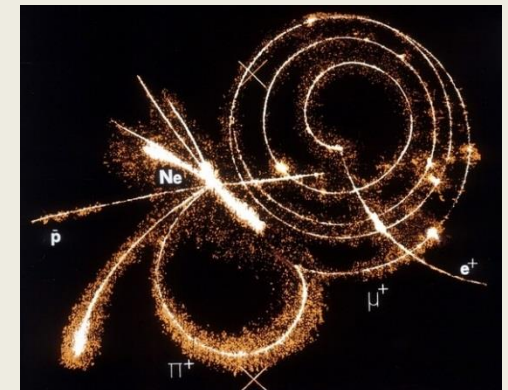
$$E = mc^2$$

- V klasični fiziki imajo energijo samo telesa, ki:
 - se gibljejo,
 - so postavljena na neko višino in se bodo gibala, če jih izpustimo,
 - so lahko napeta, ker so elastična,
 - so segreta (toplota je oblika energije).
- Energija je bila razumljena kot atribut telesa.
- Ta enačba prvič poveže pojem energije in mase – energijo imajo tudi stvari, ki relativno mirujejo (strokovni termin je mirovna energija, bolje bi bilo *mirovalna* energija).
- Ta energija je numerično ogromna (npr. človek ima mirovalno energijo $7 \cdot 10^{18} J$), vendar se ta ne more kar sprostiti iz poljubne mase, temveč se to dogaja samo pri reakcijah na nivoju atomskih jeder.
- Primeri, ki kažejo, da enačba drži:
 - atomska bomba,
 - trki delcev, ki nastajajo na novo,
 - razpadi delcev.

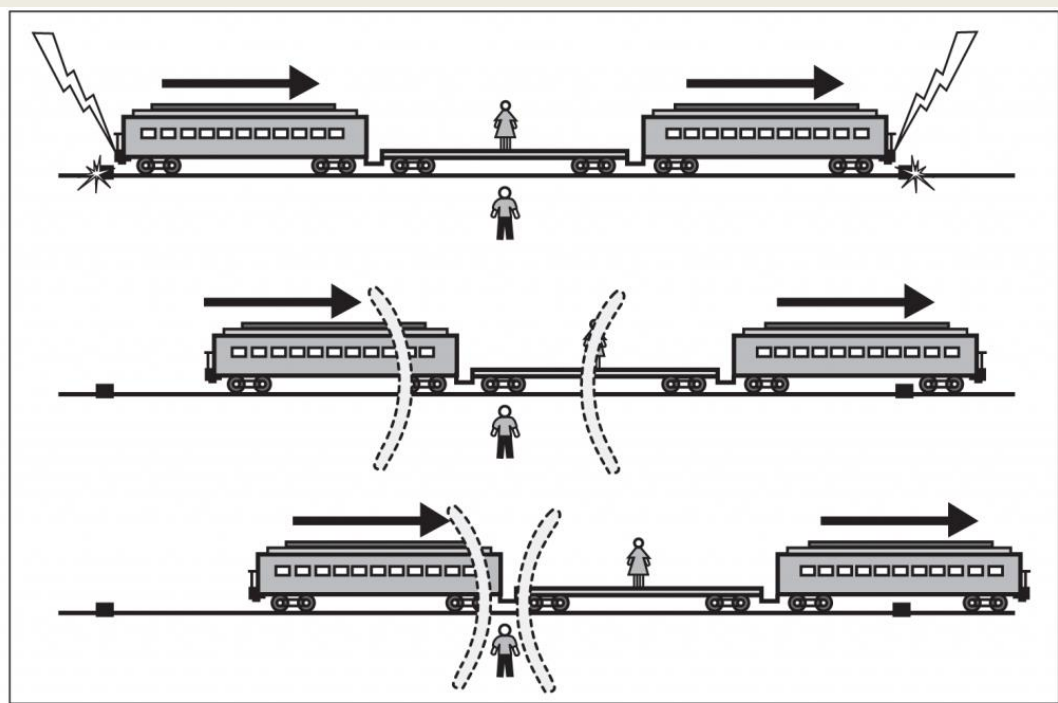


trk delcev

razpad delcev



RELATIVNOST SIMULTANOSTI



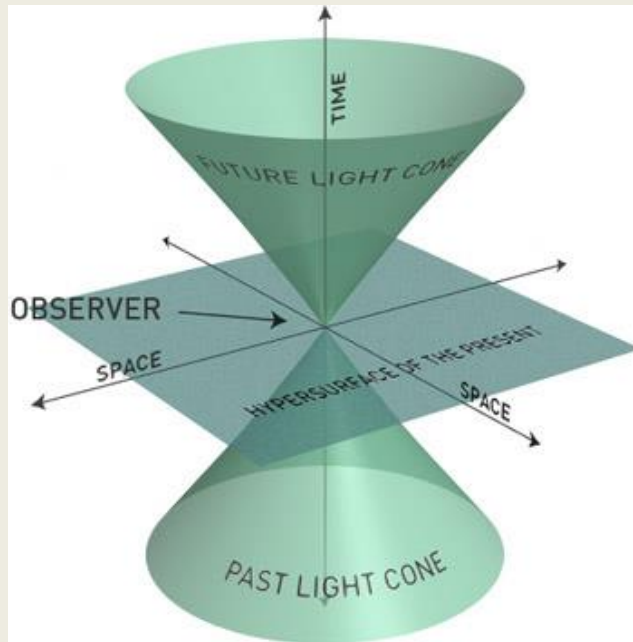
Einsteinov paradoks vlaka, ki ilustrira relativnost simultanosti. **Na vrhu:** na začetku in koncu vlaka se zgodi blisk. Vsak od obeh svetlobnih valov se širi v vse smeri. **Na sredini:** Opazovalec, ki se vozi na sredini vlaka, sklepa, da svetlobna pulza nista istočasna. Njen argument je takšen: (1) Vem, da sem enako oddaljena od obeh koncev vlaka, ter da bliska prihajata od tam. (2) Svetloba ima absolutno enako hitrost v vseh smereh. (3) Blisk je do mene prišel prej s prednje strani vlaka, zato (4) je moral zapustiti svoje izhodišče na začetku vlaka pred bliskom, ki je prišel s konca vlaka. Bliska se *nista* zgodila *istočasno*. **Spodaj:** Opazovalec stoji na mirujočih tleh na pol poti med točkama, od koder bliska prihajata, in zaključi, da sta bliska *bila sočasna*, saj ga dosežeta v istem trenutku.

POSKUSI

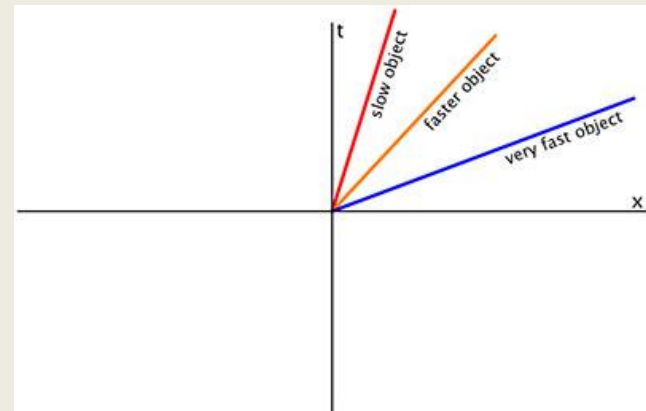
Poskusi, ki se ujemajo z napovedmi posebne teorije relativnosti:

- Razpadni časi nekaterih delcev. T.i. naelektreni pioni so delci, ki v zelo kratkem času razpadejo, te čase pa je mogoče meriti. Razpad se zgodi v merilni napravi, ta čas pa je odvisen od hitrosti delca in je za merilno napravo različen, če delec glede na napravo miruje ali se giblje počasi, oziroma če se giblje s hitrostjo, ki je blizu svetlobni.
- Rdeči premik v spektrih oddaljenih galaksij. Zaradi hitrega gibanja nekaterih galaksij glede na Zemljo pride do spremembe valovne dolžine (intuitivno: barve) oddane svetlobe proti daljšim valovnim dolžinam (za vidno svetlobo: proti rdeči – odtod poimenovanje). To je napoved posebne teorije relativnosti, t.i. relativistični rdeči premik (obstajajo tudi rdeči premiki v svetlobnem spektru, ki so drugačnega izvora).
- Poskusov, ki neposredno dokazujejo skrčenje razdalj, ni, vendar je potrebno ta učinek upoštevati pri preračunih trkov delcev v trkalnikih.

SVETLOBNI STOŽCI IN SVETOVNICE



svetlobni stožec



svetovnice

Svetlobni stožec je grafična reprezentacija vseh možnih svetovnic, pri katerih hitrost potovanja ni hitrejša od svetlobe (to velja za svetovnice znotraj stožca).

Svetovnica je pot v prostor-času, ki povezuje položaje-čase nekega telesa.

PARADOKS DVOJČKOV

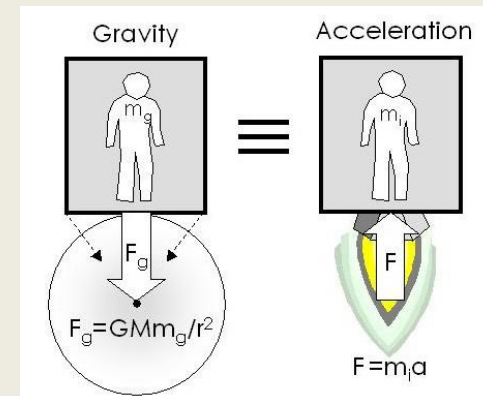
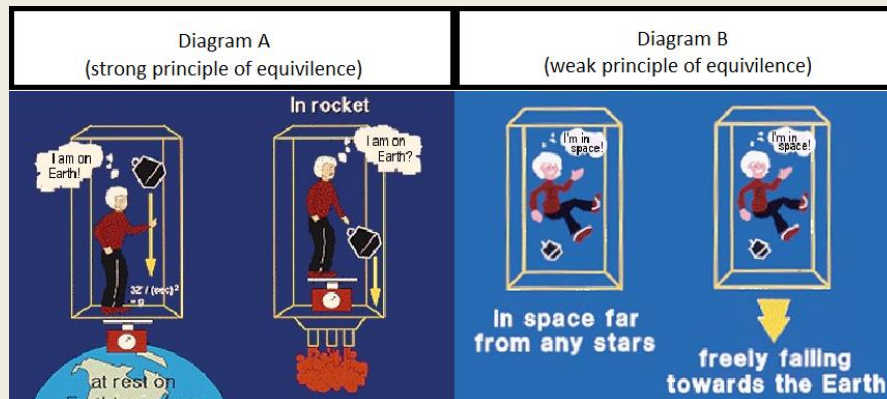
- Bil je porojen po nastanku posebne relativnosti in pred nastankom splošne.
- Zgodba: Eden od zemeljskih dvojčkov odpotuje z Zemlje v raketi z visoko hitrostjo (npr. $0.5 c$) do druge zvezde in se vrne nazaj. Zaradi visokih hitrosti z vidika zemeljskega opazovalca potniku v raketi čas teče počasneje, torej se stara počasneje. Ko se vrne, bi torej moral biti mlajši od tistega, ki je ostal na Zemlji. Vendar potujoči dvojček na enak način argumentira, zakaj bi moral biti pomlajen drugi zemeljski dvojček. Ne more pa biti en dvojček obenem starejši in mlajši od drugega.
- Rešitev: potrebno je upoštevati, da je potujoči dvojček doživel pospeševanje (kot v dvigalu), zaradi česar opis, ki ga lahko ponudi posebna teorija relativnosti, ni več ustrezen, za to potrebujemo splošno teorijo relativnosti. V njej je opis ustrezen in rezultat je ta, da je potujoči dvojček, ki je za razliko od zemeljskega doživel pospeške, pomlajen glede na slednjega.
- Video: <https://www.youtube.com/watch?v=ERgwVm9qWKA> (od 2:10 dalje)

SPLOŠNA TEORIJA RELATIVNOSTI

Einstein jo je objavil 1916 v sodelovanju z matematikom Minkowskim.

Postulati splošne relativnosti (glavna novost je tretji postulat in razširitev prvega):

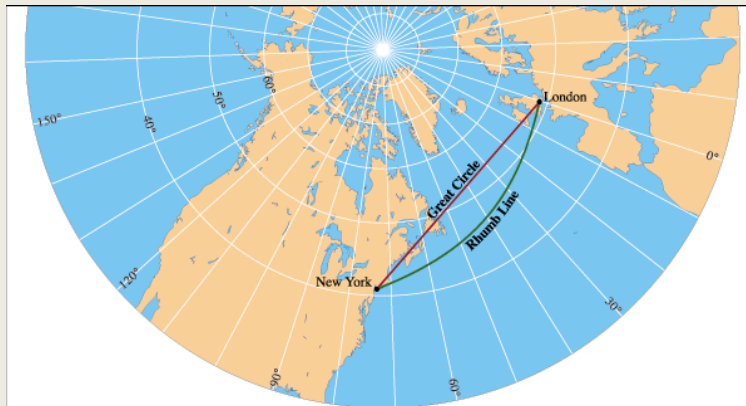
1. Posplošeni princip relativnosti. Zakoni fizike so *kovariantni* (tj. identični) v vseh sistemih, tudi *neinercialnih* (izraz *invariantnosti* fizikalnih zakonov zamenja načelo *kovariantnosti* – razlika v izrazu ima matematične implikacije).
2. Svetlobna hitrost je enaka za vse opazovalce, tj. za vse referenčne sisteme (tudi pospešene).
3. Princip ekvivalence: sistem, v katerem se telo giblje pospešeno, je enakovreden sistemu, v katerem imamo maso, ki povzroča gravitacijo (in šele ta pospešeno gibanje).



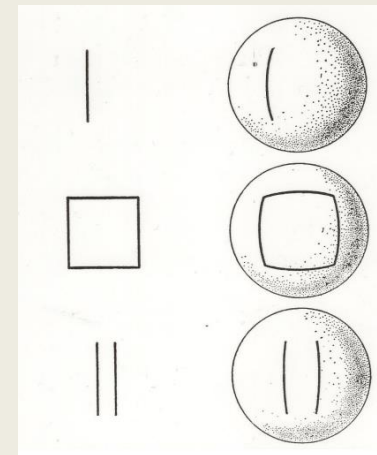
Ponazoritev principa ekvivalence neinercialnih sistemov. Za fizikalni opis dogajanja je enako, če smo na Zemlji v mirujoči raketi ali v vesolju na raketi, ki se giblje s pospeškom 9.8 m/s^2 , oziroma če smo v prosto padajočem dvigalu na Zemlji ali v dvigalu, ki je v vesolju daleč proč od planetov in zvezd in ne pospešuje.

POSLEDICE – UVEDBA NEEVKLIDSKIH GEOMETRIJ

- Svetloba je fizikalna entiteta, ki se v naravi giblje v najbolj ravni črti, je merilo ravnosti, vendar tudi svetloba na poti skozi vesolje v bližini zvezd zavija.
- Einstein je za opis tega pojava namesto sprememb fizikalnih zakonov (enačb) spremenil *referenčni okvir* -> uporabil je neevklidske geometrije (prostor Minkowskega).
- Svetloba v tem opisu ne zavija zaradi materialnih razlogov privlačnosti mase, temveč zaradi geometrijskih razlogov (princip ekvivalence), tj. ukrivljenosti prostora. Svetloba vedno potuje po *geodetkah*.
- *Geodetke* so intrinzično ravne črte v ukrivljenem prostoru v tem smislu, da so to najkrajše razdalje. V neevklidskih geometrijah najkrajša razdalja ni klasična ravna črta, temveč kriva črta, imenovana geodetka. (Intuitivno poenostavljeno: najkrajša pot med dvema točkama po neki ukrivljeni površini.)



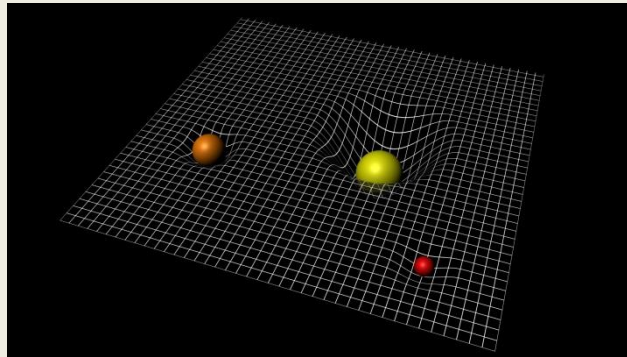
Geodetka na zemeljskem površju.



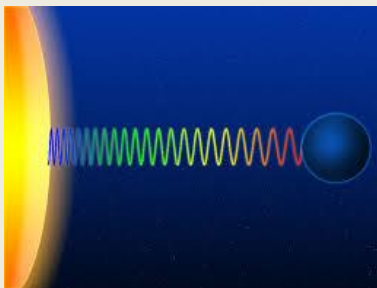
Liki na sliki so na ukrivljeni površini v običajnem smislu krivi, po drugi strani ohranjajo lastnost najkrajše možne razdalje.

POSLEDICE

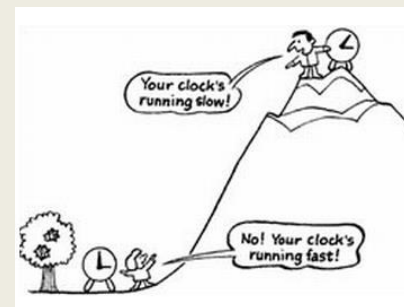
- Geometrija prostor-časa vpliva na gibanje mas in svetlobe, razporeditev mas in energije vpliva na ukrivljenost prostor-časa.



- Gravitacijska dilatacija časa: ure, ki so bliže površju planeta ali zvezde, bodo tekle počasneje kot tiste, ki so bolj oddaljene.
- Gravitacijski rdeči premik: pojav rdečega premika smo srečali že v zvezi s hitrostjo oddaljevanja galaksij (relativistični rdeči premik), v tem primeru ta isti pojav povzroči gravitacija zvezd.



Prikaz gravitacijskega rdečega premika svetlobe. Svetlobi se poveča valovna dolžina zaradi bližine zvezde.



Tudi na Zemlji atomska ura teče počasneje na nižjih nadmorskih višinah kot na višjih.

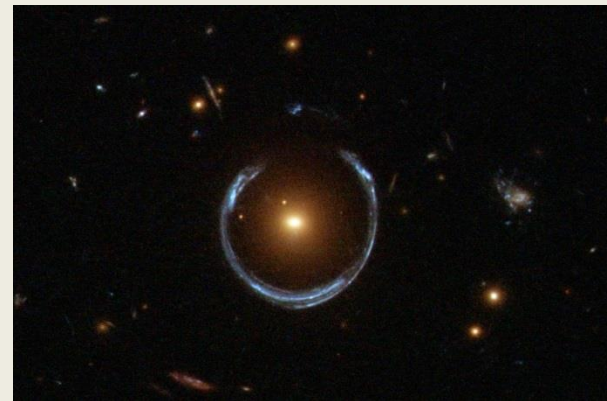
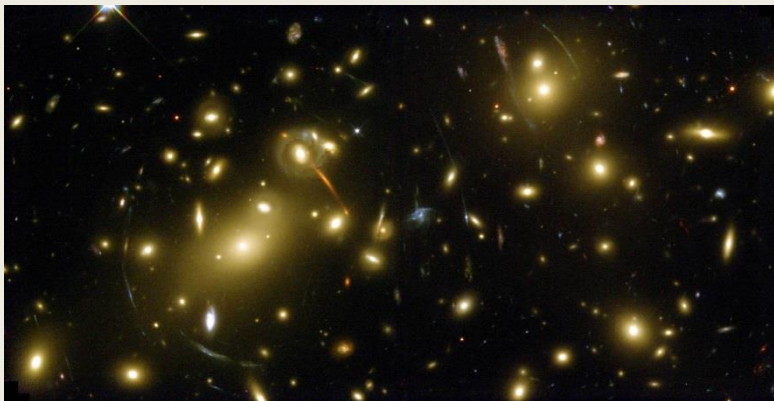
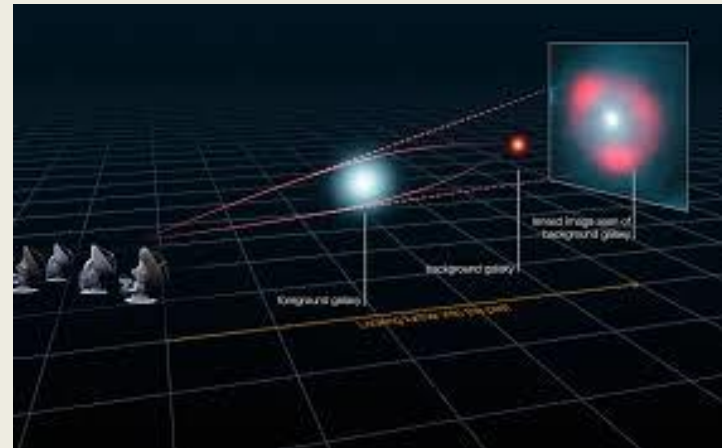
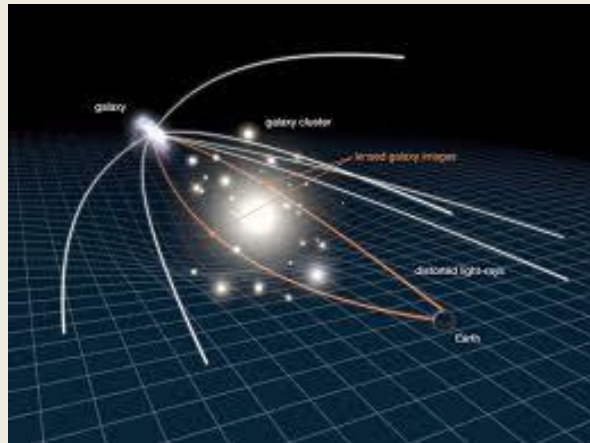
POSKUSI

- 1919 opazovanje premika Merkurjevega položaja med sončnim mrkom – prva potrditev teorije.
- Gravitacijsko lečenje.
- Upočasnitev svetlobnega signala na poti do planeta in nazaj mimo Sonca.
- Gravitacijski rdeči premik (prvi tega tipa: Pound-Rebka poskus iz 1959)
- Hafele–Keating eksperiment (1971) – dve atomski uri na potniških letalih, ki sta potovali okoli sveta v nasprotnih smereh, ter ena na zemeljskem površju; med njimi je napovedan majhen časovni zamik zaradi različnega gravitacijskega učinka (višina) in zaradi hitrosti; čas je merjen v ns = milijardinkah sekund.

ČASOVNI ZAMIKI [ns]	Gravitacijski (splošna relativnost)	Kinematični (posebna relativnost)	Skupni zamik	Izmerjeni zamik
Vzhodno	+144 ±14	-184 ±18	-40 ±23	-59 ±10
Zahodno	+179 ±18	+96 ±10	+275 ±21	+273 ±7

- Neposredna zaznava gravitacijskih valov 2016.

GRAVITACIJSKO LEČENJE



Svetloba ne potuje naravnost, temveč se ukrivi, ko potuje mimo zvezde (sliki zgoraj). Če je opazovana zvezda za neko drugo zvezdo, se svetloba združi za njo, kar je zaznavno kot učinek zbiralne leče. Spodnji dve sliki sta posnetka pojava gravitacijskega lečenja.