

# Sto let splošne teorije relativnosti (drugi del)

Obletnice v fiziki (ob Mednarodnem letu svetlobe 2015)

Janez Strnad

»1915 vložitev svetlobe v kozmologijo s splošno teorijo relativnosti.«

Wikipedia

## Trije »klasični« preizkusi

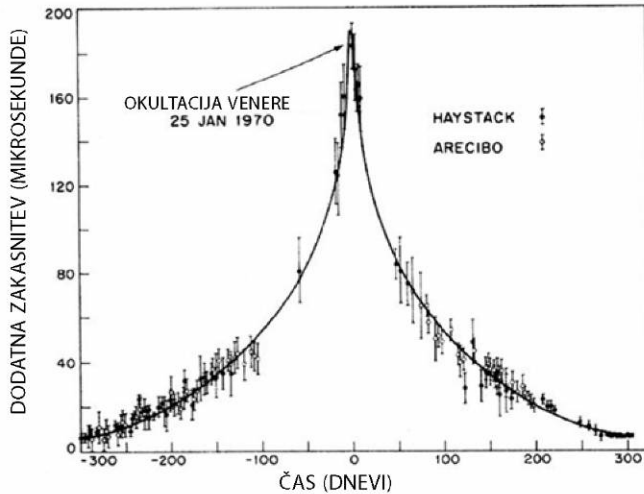
Najprej so bili v ospredju trije »klasični« preizkusi splošne teorije relativnosti: gravitacijski premik spektralnih črt, sukanje Merkurjevega perihelija in odklon svetlobe z zvezde pri prehodu mimo Sonca. Gravitacijski premik je bilo mogoče obvladati samo z načelom ekvivalentnosti, brez splošne teorije relativnosti. Tedaj ga tudi ni bilo mogoče meriti. Za sukanje Merkurjevega perihelija so mislili, da bi Einstein lahko zavestno ali podzavestno svojo enačbo naravnal po znanem podatku. Tako so največji pomen pripisali odklonu svetlobe z zvezde. V Angliji so ugotovili, da bi ga bilo mogoče opazovati ob Sončevem mrku 29. maja leta 1919. Poslali so odpravi v Sobral v Brazilijo in na otok Principe pred zahodno afriško obalo, kjer je bil mrk popoln. Odprava v Sobralu je opazovala v dobrih okoliščinah in je namerila za odklon 1,98 kotne sekunde, odprava na otoku, ki so jo delno motili oblaki, pa odklon 1,61 kotne sekunde. Zaradi napak pri merjenju so upoštevali, da sta rezultata negotova na tretjino kotne sekunde, se pravi na 20 odstotkov. V okviru dosežene natančnosti sta se ujemala z napovedjo in so v njiju videli potrditev teorije. O tem so poročali po vsem svetu. Po končani prvi svetovni vojni so bile novice take vrste posebej zaželene. Einstein je postal slaven. Danes ne opazujejo več ob popolnih Sončevih mrkih. Precej natančneje merijo radijske valove s treh kvazarjev. Kvazarji so zelo oddaljena vesoljska telesa, ki oddajajo radij-

ske valove. Opazujejo tri kvazarje, ki ležijo na nebu skoraj v ravni črti. Enega od njih enkrat na leto pokrije Sonce. Z radijskimi teleskopi so v času okoli prekritja zaznavali radijske valove z vseh treh kvazarjev. Merjenje je dalo rezultat, ki se je na 0,7 odstotka natančno ujemal z napovedjo.

Pozneje so izmerili tudi gravitacijski premik spektralne črte proti rdečemu delu spektra. Merjenje s svetlobo s Sonca motijo tokovi v Sončevi atmosferi. Zaradi njih je rezultat precej negotov. Leta 1961 so napoved podprli na 5 odstotkov natančno. Izmerili so tudi premik v gravitacijskem polju Zemlje, za katerega je Einstein mislil, da ga ne bo mogoče izmeriti. Z novim merilnim načinom, znanim kot brezodrivno sevanje in absorpcija žarkov  $\gamma$ , so leta 1964 opazovali premik pri višinski razliki 22,5 metra in leta 1981 celo pri višinski razliki 1 meter. To kaže tudi, kako močno se je razvila merilna tehnika.

## Četrty preizkus

Pozneje so opazovali še druge pojave. Omenimo samo enega. Proti Veneri so z Zemlje usmerili sunke radarskih valov in merili zakasnitev šibkih odbitih valov. Tako so ugotovili dodatno zakasnitev valov, ki je bila največja, ko sta bili Venera in Zemlja na nasprotnih straneh Sonca in so valovi na poti na Venero in ob povratku šli mimo Sonca. Za zakasnitev so izmerili nekaj manj kot 200 milijonin sekunde, kar se je v okviru dosežene natančnosti pri merjenju



*Zakasnitev radarskih valov po odboju na Veneri v odvisnosti od časa. Od časa je odvisna razdalja, v kateri gredo valovi mimo Sonca. Zakasnitev je največja, ko gredo valovi mimo Sonca v najmanjši razdalji. Krivulja kaže napoved teorije, točke pa izmerke. Navpične črte pri izmerkib kažejo negotovost. Zakasnitev so napovedali leta 1974 in prvič izmerili leta 1978.*

dobro ujemalo z napovedjo. Poskus so večkrat ponovili z vesoljskimi sondami, ko ni bilo treba loviti odbitih valov. Tako so leta 2002 izmerili zakasnitev elektromagnetnih valov z vesoljske sonde Cassini pri prehodu mimo Sonca. Izid se je na tisočino odstotka ujemal z napovedjo teorije.

### Gravitacijsko valovanje

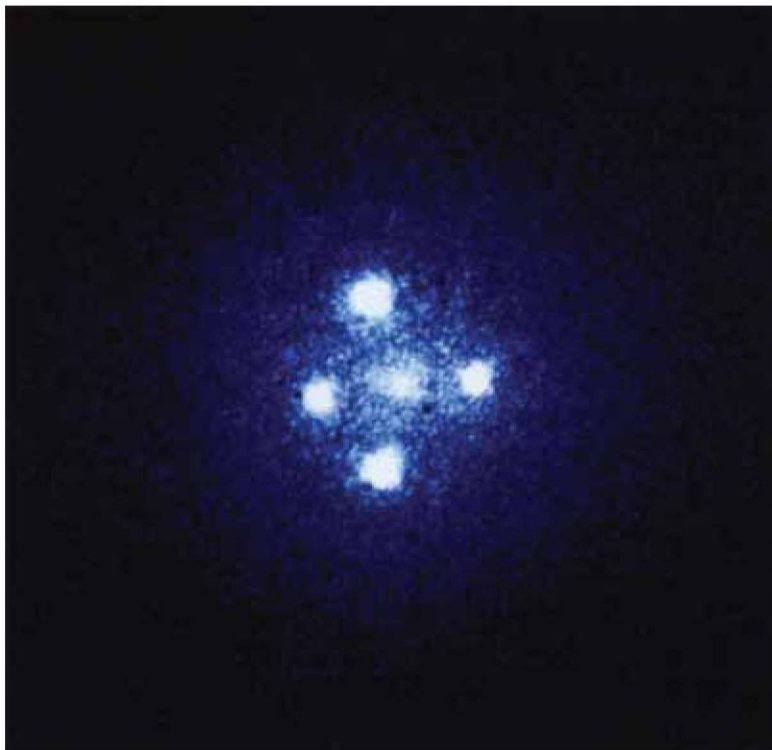
Leta 1916 je Einstein v članku v *Poročilih* obdelal enačbo gravitacijskega polja v najnižjem približku. Pri tem je ugotovil, da spremembe gravitacijskega polja potujejo s hitrostjo svetlobe in da obstaja *gravitacijsko valovanje*. O valovanju sta že prej razpravljala Lorentz in Poincaré. Gravitacijsko valovanje sevata telesi, ki se gibljeta okoli skupnega težišča ali trčita, ali zvezda, ki se sesede vase ali eksplodira. Gostota energijskega toka v gravitacijskem valovanju je zelo majhna. Na svetu je več velikih naprav, s katerimi poskušajo zaznati gravitacijsko valovanje. Do zdaj to še ni uspelo.

Sredi sedemdesetih let prejšnjega stoletja so naleteli na nevtronski zvezdi, ki se gibljeta okoli skupnega težišča. Ena od njiju je pulzar, ki oddaja sunke radijskih valov v časovnem razmiku po 53 tisočin sekunde. To omogoča zelo natančno merjenje. Čas med zaporednima sunkoma zelo počasi narašča.

Vrtenje pulzarja okoli osi postaja počasnejše, ker pulzar oddaja energijo s sevanjem radijskih valov. Čas med zaporednima sunkoma se še malo spreminja, ker se pulzar giblje glede na Zemljo. Čas med sunkoma se malo skrajša, ko se pulzar približuje Zemlji, in malo podaljša, ko se od nje oddaljuje. S tem Dopplerjevim pojavom so zasledovali gibanje pulzarja in prek njega tudi gibanje druge nevtronske zvezde. Z merjenjem so preizkusili enačbo splošne teorije relativnosti. Pri tem se točka, ki ustreza periheliju pri Merkurju, zasuče za več kot štiri kotne stopinje na leto. Teoretično je bilo mogoče napovedati tudi, kolikšno energijo odnese gravitacijsko valovanje. Zato se večja obhodni čas pulzarja, in sicer sorazmerno s kvadratom časa. Izmerjeni podatki so se ujemali z napovedjo. To za zdaj najtrdneje podpira – čeprav posredno – obstoj gravitacijskega valovanja. O tem sta poročala leta 1979 Joseph H. Taylor in Russell A. Hulse in »za odkritje pulzarja nove vrste, ki je odprlo nove možnosti za raziskovanje gravitacije«, dobila Nobelovo nagrado iz fizike za leto 1993.

### Črne luknje

Leta 1783, ko so svetlobo imeli za tok delcev, je John Michell v pismu omenil, da bi



*Slika galaksije v oddaljenosti okoli 400 milijonov svetlobnih let obdajajo štiri slike okoli 8 milijard svetlobnih let oddaljenega kvazarja, ki nastanejo zaradi gravitacijskega lečenja. Ta Einsteinov križ v ozvezdju Pegaza so odkrili leta 1985.*

bilo mogoče določiti maso zvezde, če bi ugotovili, za koliko se zmanjša hitrost svetlobe, ki zvezdo zapusti. Leta 1796 je Pierre Simon Laplace razmislil o velikih vesoljskih telesih, ki jih svetloba sploh ne more zapustiti. Pri dani masi telesa je v Newtonovi mehaniki izračunal polmer telesa, ki ga svetloba ne more zapustiti.

Leta 1916 je Einstein na zasedanju pruske akademije prebral prispevka Karla Schwarzschilda, vodje astrofizikalnega observatorija v Potsdamu, ki je služil v nemški vojski na ruski fronti. V prvem prispevku je Schwarzschild poročal o natančni rešitvi Einsteinove enačbe gravitacijskega polja v krogelnosimetričnem primeru, ko se razmere ne spreminjajo s časom. V drugem prispevku je navedel rešitev za kroglo iz nestisljive tekočine. Rešitev ima posebnost pri polmeru, ki ga je navedel Laplace in ki ga imenujemo po Schwarzschildu. Od leta 1967 telesa, ki so manjša od Schwarzschildovega polmera in jih svetloba ne more zapustiti, imenu-

jemo *črne luknje*. Črno luknjo obdaja zelo gosto gravitacijsko polje in privlači snov iz okolice. Snov pada proti zvezdi in se močno segreje, preden preide Schwarzschildov polmer, in seva tudi rentgensko svetlobo. Kratkotrajni neurejeni sunki rentgenskega sevanja so značilni za kandidate za črne luknje. Poleg tega so ugotovili črne luknje z ogromno maso v središču številnih galaksij.

### **Vesolje v splošni teoriji relativnosti**

Leta 1917 je Einstein v *Poročilih* v članku *Kozmološka razmišljanja k splošni teoriji relativnosti* poskusil zajeti vse vesolje. To je bil sploh prvi poskus take vrste. Tedaj so poznali samo zvezde v Galaksiji in praznino okoli nje. Hitrosti zvezd so bile veliko manjše kot hitrost svetlobe. Zato so si kot nekdanj Aristotel predstavljali, da se vesolje s časom ne spreminja. Newton je po odkritju gravitacijskega zakona razmišljal o tem. Vendar kaže, da se je misli ustrašil, ko je ugotovil, da krogelnosimetrična skupina

zvezd v mirovanju sploh ne bi mogla obstajati in bi zvezde »padle v sredino«. Einstein se je temu izognil z odločnim korakom. Enačbi gravitacijskega polja je dodal člen s *kozmoško konstanto*. Utemeljitev je bila zgrešena, a člen je bil popolnoma v duhu splošne teorije relativnosti. Ustreza mu odbojna sila, ki v krogelnosimetričnem vesolju narašča sorazmerno z oddaljenostjo od središča in ima smer od središča.

Pozneje so opazovanja pokazala, da obstajajo v vesolju oddaljeni »zvezdni otoki«, *galaksije*. Podobni so naši Galaksiji, ki je samo ena od njih. Predlagali so modele, v katerih se galaksije gibljejo. Einstein se jim je spočetka upiral, a jih je s časom sprejel. Preklical je člen s kozmoško konstanto in ga imenoval »največjo zablodo v življenju«. Ironično ima danes ta člen pomembno vlogo v modelih vesolja na osnovi splošne teorije relativnosti. To je že nova zgodba o *temni energiji*. Pripomnimo, da je Einsteinova enačba gravitacijskega polja v vesolju dokaj preprosta. Privzamemo namreč, da velja *kozmoško načelo*, da so v vesolju vse točke in vse smeri enakopravne.

### Gravitacijsko lečenje

Leta 1936 so Einsteina opozorili, da bi opazovalec na Zemlji zelo oddaljeno zvezdo videl kot kolobar, če bi svetloba z nje šla mimo bližnje zvezde in bi Zemlja ležala na zveznici obeh zvezd. Če bi bila Zemlja malo odmaknjena od zveznice zvezd, bi na Zemlji oddaljeno zvezdo videli dvojno. Svetloba z oddaljene zvezde bi se namreč odklonila v gravitacijskem polju bližnje zvezde. Einstein je pojav podrobno preračunal, a je mislil, da ga ne bo mogoče opazovati. Leta 1979 pa so ugotovili, da dve sliki ne ustrežata dvema kvazarjema, ampak podvojeni sliki enega. Svetloba tega zelo oddaljenega kvazarja se odkloni v gravitacijskem polju manj oddaljene galaksije, ko gre na poti med kvazarjem in Zemljo mimo te galaksije. Pojav, znan kot *gravitacijsko lečenje*, uspešno izkoriščajo pri opazovanjih oddaljenih galaksij.

### Splošna teorija relativnosti danes

Do šestdesetih let prejšnjega stoletja so se s splošno teorijo relativnosti ukvarjali maloštevilni matematiki in v matematiko usmerjeni fiziki. Potem je začelo število fizikov, ki so delali v splošni teoriji relativnosti, naraščati, sprva zelo počasi, potem vse hitreje. Pojavile so se posebne revije in začeli so prirejati redna mednarodna znanstvena srečanja. Naraslo je tudi število s splošno teorijo relativnosti povezanih poskusov. Danes se s splošno teorijo relativnosti ukvarja precejšnje število fizikov, astrofizikov in matematikov.

Rezultate splošne teorije relativnosti je treba upoštevati že v vsakdanjem življenju. Sistem za določanje lege na Zemlji GPS sestavlja skupina več kot 24 umetnih satelitov, ki krožijo okoli Zemlje v višini 20.200 kilometrov, jo obidejo približno v 12 urah in oddajajo radijske valove. Naprava lovi valove z več satelitov in po njihovi zakasnitvi ugotovi zemljepisno dolžino in širino in nadmorsko višino točke na površju Zemlje. Trije podatki so negotovi na 15 metrov. Ura na satelitu v 24 urah uro na Zemlji zaradi višinske razlike prehitri za 45,6 milijonine sekunde in zaradi večje hitrosti zaostane za njo za 7,08 milijonine sekunde. Če ne bi upoštevali splošne teorije relativnosti, bi v 24 urah zgrešili lego za približno 12 kilometrov in sistema GPS ne bi mogli uporabljati.

#### Literatura:

Strnad, J., 2005: *Einstein,  $E = mc^2$* . Ljubljana: Modrijan.