

Sto let splošne teorije relativnosti (prvi del)

Janez Strnad

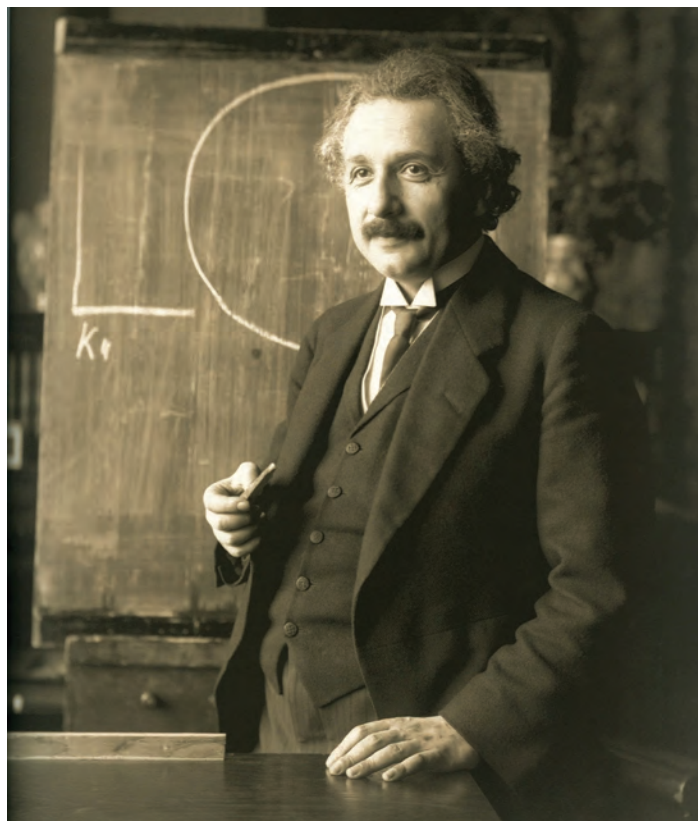
»Komaj katera teorija sodobne fizike je tako zelo stvaritev enega samega človeka kot splošna teorija relativnosti.«

Physik Journal, 2015

Posebna teorija relativnosti

Pred stodesetimi leti je Albert Einstein v berlinski reviji *Fizikalni anali* objavil članek *K elektrodinamiki gibajočih se teles*. V njem je razgrnil teorijo, ki je dobila ime *posebna teorija relativnosti*. (*K posebni teoriji relativnosti. Proteus*, 77 (2014/2015): 235–236.) Veliko pripravljalnega dela so opravili drugi, predvsem Henri Poincaré in Hendrik Antoon

Lorentz. Einstein je izhajal iz *načela relativnosti*, po katerem imajo zakoni fizike v vseh *inercialnih* opazovalnih sistemih enako obliko. »Inercialen« v tej zvezi pomeni, da sistem ni pospešen in ni treba upoštevati gravitacije. Opisal je, kako je treba sinhronizirati ure, in ugotovil, da se dolžine v smeri gibanja skrčijo in da gredo gibajoče se ure počasneje od mirujočih. Zapisal je zakone za gibanje delcev, če hitrost ni majhna v primerjavi s hitrostjo svetlobe. V kratkem dopolnilnem članku je maso povezal z energijo. Hitrost svetlobe v praznem prostoru c je neodvisna od gibanja izvira in zgornja



Albert Einstein je bil rojen v Ulmu leta 1879. S srednje šole v Münchnu je odšel v Švico, preden jo je dokončal. Po letu srednje šole v Švici je na Tehniški visoki šoli (Eidgenössische Technische Hochschule, ETH) v Zürichu leta 1900 končal študij matematike in fizike. Leta 1902 je dobil delo na Patentnem uradu v Bernu. Leta 1906 je pridobil doktorat in leta 1908 postal docent na univerzi v Bernu. Leta 1909 je postal profesor na univerzi v Zürichu, leta 1911 na nemški univerzi v Pragi in leta 1912 profesor na ETH. Leta 1914 je postal član Pruske akademije znanosti in profesor brez obveznosti predavanj na univerzi v Berlinu. Leta 1922 je dobil Nobelovo nagrado. Leta 1933 je zapustil nacistično Nemčijo in odpotoval v Združene države Amerike, kjer je postal profesor na Inštitutu za višje študije v Princetonu. Umrli je leta 1955.

meja za hitrost energije, delcev in sporočil. Hermann Minkowski je leta 1907 ugotovil, da imajo enačbe posebne teorije relativnosti pregledno obliko v prostoru s štirimi dimenzijami. Ta *prostor-čas* sestavljata običajni krajevni prostor s tremi koordinatnimi osmi in časovna os. Točke prostor-časa so *dogodki*. Časovna os se razlikuje od krajevnih osi, a prostor-čas posebne teorije relativnosti ima v vsaki točki enake lastnosti – je *raven*.

Gravitacija

Leta 1907 je Einstein v *Letopisu za radioaktivnost in elektroniko* objavil dolg članek *O načelu relativnosti in sklepi, ki sledijo iz njega*. V njem je najprej povzel članek o elektrodinamiki gibajočih se teles. Potem se je dotaknil gravitacije. Pred tem se mu je utrnila »najsrečnejša misel v življenju«. V opazovalnem sistemu, ki prosto pada, ni občutiti gravitacije. Spoznanje je dobilo ime *načelo ekvivalentnosti*. Opazovalni sistem v bližini telesa z veliko maso, v gravitacijskem polju, je ekvivalenten določenemu pospešenemu opazovalnemu sistemu.

Zamislil si je dva opazovalna sistema. Prvi se v izbrani smeri giblje s stalnim pospeškom, drugi pa miruje v gravitacijskem polju z enako velikim težnim pospeškom v nasprotni smeri. Po načelu ekvivalentnosti sta sistema ekvivalentna in veljajo v obeh enaki zakoni fizike. Pospešeni sistem je mogoče obdelati v posebni teoriji relativnosti. Vzemimo dva inercialna opazovalna sistema. Prvi naj miruje glede na pospešeni sistem v začetnem trenutku, drugi pa v poznejšem trenutku. V prvem inercialnem sistemu se drugi inercialni sistem giblje s hitrostjo, ki je odvisna od časovnega razmika med poznejšim in začetnim trenutkom. Po tej poti je mogoče ugotoviti, da ura v drugem opazovalnem sistemu teče hitreje kot ura v prvem.

V ekvivalentnem sistemu v gravitacijskem polju ura v drugi točki, v katero je treba dvigniti telo proti gravitaciji, teče hitreje kot ura v začetni točki. Na Zemlji višja ura

teče hitreje kot nižja. Pokaže se, da je čas, ki ga kaže druga ura, za gravitacijski potencial druge točke glede na prvo, deljen s c^2 , večji kot čas, ki ga kaže prva ura. Gravitacijski potencial je potencialna energija, ki je po velikost enaka delu pri premiku iz prve točke v drugo, za telo z maso 1 kilogram. Čeprav omenjamo delo, je pojav povezan le z lastnostmi prostora in časa. Ker je hitrost svetlobe c zelo velika, je razlika časov zelo majhna. Pri 3.250 metrih višinske razlike so leta 1977 z merjenjem dobili rezultat, ki se je dobro ujemal z napovedjo: višja ura je v 24 urah prehitela nižjo za 30,6 milijardin sekunde.

Svetila, katerih svetloba vsebuje spektralne črte z določenimi frekvencami, imajo vlogo ur v točkah z različnim gravitacijskim potencialom. Frekvenca je enaka obratni vrednosti nihajnega časa, zato frekvenca v valovanju z naraščajočim potencialom pojemaa. Frekvenca spektralne črte je na Zemlji manjša kot na Soncu in ustrezna valovna dolžina večja. Spektralna črta v svetlobi s Sonca je premaknjena k rdečemu delu spektra. To je *gravitacijski premik spektralnih črt*. O tem bo še tekla beseda. Poudarimo, da do njega pridemo le z načelom ekvivalentnosti.

Einstein je obravnaval še Maxwelllove enačbe, to je zakone za električno in magnetno polje, v gravitacijskem polju. Ugotovil je, da zakoni obdržijo znano obliko, če se hitrost svetlobe zaradi gravitacijskega potenciala poveča v enakem razmerju kot čas. Hitrost svetlobe v praznem prostoru je torej odvisna od gravitacije, ni konstantna kot v posebni teoriji relativnosti. Svetloba, ki ne potuje v smeri gravitacije, se ukrivi. »Žal je učinek gravitacijskega polja Zemlje tako majhen, da [...] ni upanja, da bi rezultate teorije lahko primerjali z izkušnjami.«

Einstein je leta 1911 v *Analih* objavil članek *O vplivu teže na širjenje svetlobe*. V njem je po nekoliko drugačni poti potrdil sklepe iz prejšnjega članka. Znova se je lotil gravitacije, ker ni bil zadovoljen s prejšnjim

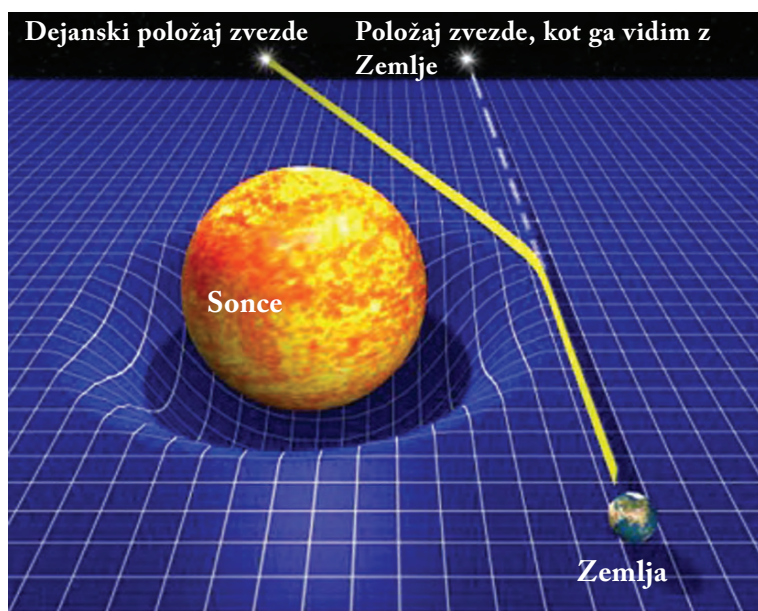
izvajanjem in ker je »uvidel, da je ena od pomembnih posledic dostopna eksperimentalnemu preizkusu«. Napovedal je, da se svetloba z zvezde pri prehodu tik mimo Sonca ukrivi in se slika zvezde odkloni za 0,83 kotne sekunde. To bi bilo mogoče izmeriti ob popolnem Sončevem mrku. (Kotna sekunda meri 7,7 desetmilijonine polnega kota.)

Leta 1912 je Einstein v *Analih* objavil dva članka. V vrtečem se opazovalnem sistemu se razdalje v smeri kroženja, to je v prečni smeri, skrčijo, tako da obseg kroga in polmer nista v takem razmerju kot v inercialnem opazovalnem sistemu. To pomeni, da ima prostor v radialni smeri drugačne lastnosti kot v pravokotni smeri. Po tem je sklepal, da je gravitacijo treba opisati v *ukrivljenem* prostor-času. (V vseh točkah ukrivljeni prostor-čas nima enakih lastnosti.) Ob tem je spoznal tudi, da načelo ekvivalentnosti velja samo *lokalno*, se pravi samo v neposredni okolici vsakega dogodka. Einstein je leta 1912 že vedel, da gravitacijskega polja ni mogoče opisati tako kot električno polje. Sila med telesoma z električnima nabojema enakega znaka je namreč odbojna, sila med

masama pa privlačna. Gravitacijski potencial je treba opisati s *tenzorjem*, ki v tem posebnem primeru vsebuje deset neodvisnih podatkov. To je pomenilo, da bodo računi zelo zapleteni. Spoznal je, da »Gaussova teorija ploskev skriva ključ do skrivnosti«. Tedaj še ni vedel, »da je Riemann celo globlje raziskal osnove geometrije«. Posvetoval se je s prijateljem matematikom Marcelom Grossmannom, ki je bil pripravljen sodelovati »ob pogoju, da mu ne bo treba prevzeti odgovornosti za nobeno trditev fizikalne narave«. Skupaj sta v *Reviji za matematiko in fiziko* v letih 1913 in 1914 objavila dva članka. Iskala sta zakon, ki bi naj v približku za šibko gravitacijo prešel v Newtonov gravitacijski zakon. Nista prišla do dokončnega sklepa, a naredila sta korak v pravo smer.

Do splošne teorije relativnosti

Leta 1915 je Einstein postopno izboljševal teorijo. Na začetku julija je po vrsti predavanj v Göttingenu optimistično zapisal, da je »teorija gravitacije že precej pojasnjena«. Toda na začetku novembra je ugotovil, da so bili njegovi računi napačni, kar mu je



Sonce ukrivi prostor-čas in svetloba z zvezde se pri prehodu mimo Sonca zaradi tega odkloni. »Snov ukazuje prostor-čas, kako se krivi, ukrivljenost prostor-časa pa ukazuje snovi [in svetlobi], kako se giblje.«

»povzročilo hude čase«. Potem je naredil nekaj odločnih korakov. Sredi novembra je izpeljal zasuk Merkurjevega perihelija in odklon svetlobe z zvezde pri prehodu mimo Sonca. Planet Merkur se giblje okoli Sonca po elipsi. Njena točka, ki je Soncu najbližja, perihelij, se počasi suče v smeri gibanja. V stoletju se zasuče za 43 kotnih sekund. Einstein je pojasnil sukanje, ki so ga poznali že prej. Za odklon svetlobe pri prehodu mimo Sonca pa je zdaj napovedal 1,7 kotne sekunde, to je dvakrat več kot prej. Pri polovični vrednosti je upošteval ukrivljenost prostor-časa v časovnem delu, zdaj jo je tudi v krajevnem delu. Zato je hitrost svetlobe za dvojni gravitacijski potencial, deljen s c^2 , večja kot hitrost svetlobe v inercialnem sistemu. V splošni teoriji je nekaj več kot zgolj načelo ekvivalentnosti. Še pred koncem leta 1915 je objavil članek o enačbi gravitacijskega polja, a enačba še ni bila prava.

V končno obliko jo je spravil pred koncem novembra v članku v *Poročilih*. Zasuk Merkurjevega perihelija in odklon svetlobe pri prehodu mimo Sonca se po tej teoriji nista razlikovala od prejšnjih napovedi. Zapisal je: »Čaru te teorije se bo komaj lahko uprl nekdo, ki jo je zares razumel.« Na poti do nje pa je prestal »dobesedno nečloveške napore«. Pozneje je dodal: »Vrsta mojih člankov o gravitaciji je veriga zmotnih poti, ki pa so vseeno postopno pripeljale do cilja.« Ironično je pripomnil: »S tem Einsteinom ni težav. Vsako leto umakne, kar je napisal leto prej.« Zapisal je še: »V luči že pridobljenega spoznanega se zdi srečni dosežek skoraj samoumeven in vsak inteligenten študent ga lahko razume brez prevelike muje. Toda leta zaskrbljenega iskanja v temi, napeto hrepenenje, menjavanje zaupanja in utrujenosti, potem pa končni predor na svetlo, to lahko razumejo le tisti, ki so sami doživeli kaj po-

dobnega.«

Neodvisno od Einsteina je enačbo gravitacijskega polja malo prej odkril matematik David Hilbert, tisti, ki je izjavil, da je fizika za fizike pretežka. Pozneje je prišlo med njima do napetosti. Potem je Hilbert v pismu omenil možnost, da je na göttingenskem predavanju podzavestno sprejel Einsteinove zamisli. Do enačbe pa je prišel po drugačni poti.

Spomladi leta 1916 je Einstein teorijo povzel v daljšem preglednem članku v *Analih*. Konec tega leta je izšel zapis *O posebni in splošni teoriji relativnosti, splošno razumljivo*, ki je do leta 1972 doživel 22 natisov. Letos je izšel slovenski prevod tega dela (*Proteus*, 77 (2014/15): 235-236).

Nepopolno napoved odklona svetlobe z zvezde pri prehodu mimo Sonca spremlja zanimiva zgodba. Ne da bi Einstein za to vedel, je polovični odklon že leta 1801 napovedal geodet in astronom Johann Georg von Soldner. Svetlobo je obravnaval kot tok delcev, kakor je bilo v navadi v Newtonovih časih. Delcem je priredil majhno maso, ki pa se v končnem rezultatu ni pojavila. Do enakega sklepa kot Soldner je že leta 1784 prišel Henry Cavendish, a je njegovo delo ostalo neobjavljeno do leta 1920. Tudi Soldnerjev članek je bil pozabljen, dokler zanj ni zvedel Einsteinov nasprotnik. Leta 1921 je del članka objavil v *Analih* in ga pospremil z uvodom, v katerem je Einsteina obdolžil plagiata. Obdolžitev je bila nesmiselna, saj je med tem Einstein že napovedal dvakrat večji odklon, ki so ga merjenja potrdila.
