

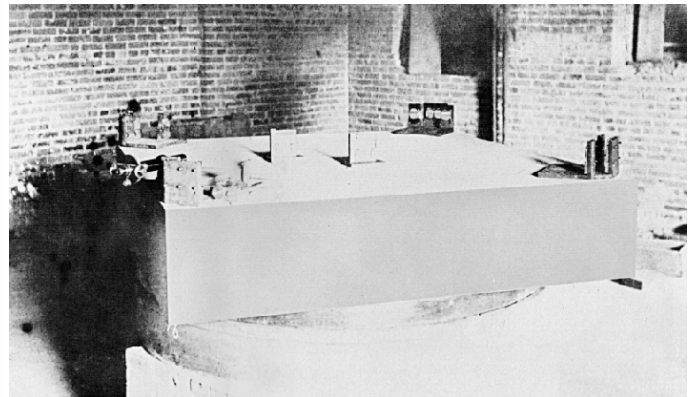
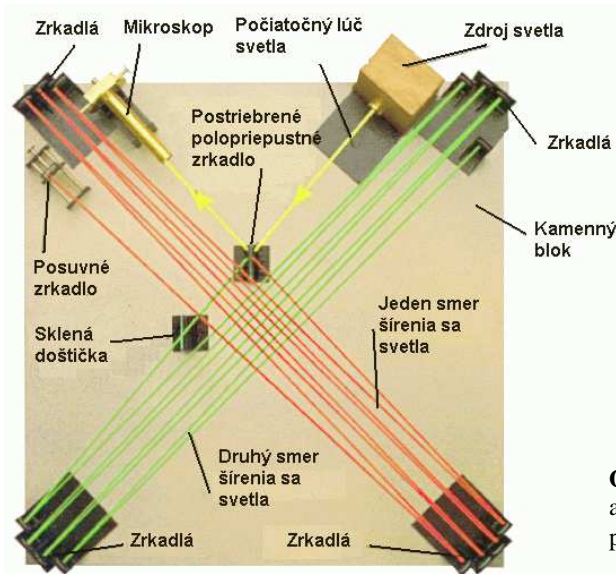
Dôkazy v prospech Einsteina

Špeciálna teória relativity nedávno oslavovala storočnicu svojho vzniku (1905). Všeobecná teória relativity je o niečo mladšia. Tieto teórie sú matematicky konzistentné, postavené na Einsteinovej geniálnej schopnosti vybrať si za základ to naozaj najdôležitejšie. Keď do nich vniknete, zostáva Vám pocit krásy a harmónie, ako po dobrej knihe alebo skvelej hudbe. Tieto vlastnosti sú pre fyzikálne teórie skutočne dôležité, no nestačia na to, aby sme ich považovali za naozaj správne. Tým najdôležitejším kritériom správnosti je ich súhlas s experimentom. Pozrime sa teda, ako na tom slávne teórie relativity v súčasnosti sú.

Špeciálna teória relativity

Špeciálna teória relativity (ŠTR) vychádza z dvoch základných predpokladov: nie je možné nijakým fyzikálnym experimentom rozhodnúť, či sa nachádzame v pokoji, alebo sa pohybujeme rovnomerne priamočiarno a rýchlosť svetla je nezávislá od rýchlosti pohybu zdroja alebo pozorovateľa. Jej výsledky rozvrátili naše chápanie priestoru a času. Dozvedeli sme sa z nich, že pri vzájomnom rovnomernom priamočiarnom pohybe dvoch pozorovateľov dochádza k skracovaniu dĺžok, dilatácii času, že súčasnosť dvoch udalostí je relatívna, že energia je úmerná hmotnosti (a samozrejme aj naopak) a mnohé iné, „zdravému rozumu“ odporujúce fakty. Hoci v čase vzniku ŠTR neboli veľké možnosti testovať jej experimentálne predpovede (rozdiel medzi ŠTR a klasickou mechanikou sa objavuje pri rýchlostiach blízkych rýchlosti svetla), existovali experimenty, ktoré ŠTR elegantne vysvetľovala, ale klasickej fyzike spôsobovali problémy.

Podľa starších teórií bolo svetlo vlnením zvláštného prostredia – éteru. Ten by musel mať vskutku veľmi zvláštne vlastnosti¹. Elektromagnetické javy, medzi ne patrí aj svetlo, mali umožniť zistiť rýchlosť pohybu Zeme voči éteru. Podľa teoretikov boli tri možnosti: éter je úplne strhávaný pohybujúcimi sa telesami (pri povrchu telesa je rýchlosť éteru nulová), éter je čiastočne strhávaný, alebo je éter v absolútnom pokoji.



Obr. 1 Schéma Michelsonovho-Morleyho interferometra (vľavo) a jeho historická realizácia (vpravo) na masívnom kamennom bloku plávajúcom na ortuti (aby sa minimalizovali otrasy aparatury).

Pokus Holanďana Hoeka z roku 1868 potvrdzoval, že éter je čiastočne strhávaný. Hoek pomocou polopriepustného zrkadla rozdelil lúč svetla na dva lúče. Jeden z nich nechal prechádzať cez prúd vody kvapaliny a pomocou interferencie s druhým lúčom zisťoval, aký vplyv má tečúca voda na rýchlosť svetla. Výsledok pokusu sa dal vysvetliť predpokladom, že éter je čiastočne strhávaný vodou.

Hviezdna aberácia, objavená Angličanom Bradleyom už v roku 1727, naopak ukazovala, že éter musí byť v absolútnom pokoji. Vďaka skladaniu rýchlosti svetla s rýchlosťou pohybu Zeme okolo Slnka sa poloha hviezd na oblohe mení a počas roka hviezdy vykonávajú na oblohe maličké elipsy. Aby bolo

¹ Napríklad musel byť dostatočne tuhý, lebo rýchlosť svetla je obrovská, a zároveň musel byť „všetkoprestupujúci“ a nemal klásť nijaký odpor pohybu telies.

možné vysvetliť uhlové veľkosti elíps, je treba predpokladať, že éter je v pokoji a nedochádza k jeho strhávaniu.

Najznámejším z pokusov, zistiť pohyb Zeme voči éteru, bol Michelsonov pokus z roku 1881. Mnohé učebnice ŠTR najprv vysvetlia Michelsonov pokus a cez jeho výsledok prejdú k ŠTR. Historicky je ale otázne, akú úlohu tento pokus zohral pre Einsteina. Sám Einstein sa vyjadril, že rozhodujúcou preň bola jednoduchosť a elegancia ŠTR a v jeho prvom článku Michelsonov pokus nebol vôbec spomenutý. Podľa niektorých historikov je však pravdepodobné, že o Michelsonovom pokuse Einstein predsa len vedel. Nič to však nemení na dôležitosti tohto pokusu. Je to jeden z najslávnejších pokusov s negatívnym výsledkom (Michelson dostal Nobelovu cenu v roku 1907). Michelson pri pokuse využil interferenciu svetla. Svetelný lúč zo zdroja rozdelil polopriepustným zrkadlom na dva lúče a nechal ich prechádzať dvoma navzájom kolmými ramenami interferometra (obr. 1). Jedno rameno bolo orientované do smeru obiehania Zeme okolo Slnka. Rýchlosti, ktorými svetlo prechádzalo ramenami, mali byť rôzne, lebo k rýchlosť svetla sa skladala s rýchlosťou obiehania Zeme okolo Slnka. Následným zložením lúčov z oboch ramien interferometra vznikli interferenčné pásiky. Pri otočení interferometra o 90° sa mal pozorovať posun interferenčných pásikov. Nič také však Michelson nezistil a nezistil to ani pri mnohých ďalších opakovaniach merania so stále lepšou presnosťou. Čiže rýchlosť svetla nezávisí od toho, či sa zdroj svetla voči Vám pohybuje alebo nie. Najlepšie Michelsonove merania mali chybu 1,5 km/s. Jeho pokus bol mnohokrát zopakovaný. Nielen na povrchu Zeme ale aj na balónoch v rôznych výškach nad Zemou (čo keby bol éter predsa len strhávaný Zemou), zakaždým s negatívnym výsledkom. Pokusy v roku 1958 mali chybu 0,03 km/s. Najnovšie výsledky, využívajúce družicový GPS (Global Positioning System), už mali chybu len na úrovni 1 m/s. S takou presnosťou je v súčasnosti isté, že rýchlosť svetla nezávisí od pohybu jeho zdroja.

Boli samozrejme realizované aj iné pokusy o určenie našej relatívnej rýchlosti voči éteru (napr. Troutonov-Nobleho, Rayleighov-Breceov, Troutonov-Rankinov). Tieto pokusy využívali iné fyzikálne princípy ako predtým spomínané experimenty, no ich výsledky boli negatívne.

Testy „zvláštností“ špeciálnej teórie relativity

Prvé experimenty, testujúce predpovede ŠTR, boli vykonané v rokoch 1909-1919. Pomocou rýchlych elektrónov, produkovaných pri β -rozpade atómového jadra, overovali vedci relativistický vzťah medzi hybnosťou elektrónov a ich rýchlosťou. Dokázali, že tento vzťah platí s presnosťou na 1 %.

Objav nestabilných elementárnych častíc umožnil testovať dilatáciu času. Porovnávaním doby života takýchto častíc pri ich rôznych rýchlostiach je možné ukázať platnosť relativistických vzťahov. V tomto smere sú učebnicovým príkladom mióny. Vznikajú vysoko v atmosfére Zeme a na jej povrch dopadajú aj napriek tomu, že ich stredná doba života v pokoji je len 2 milióntiny sekundy. Vďaka predĺženiu svojho života relativistickou dilatáciou prejdú až 30 km od miesta svojho vzniku na povrch Zeme. Elegantné overenie dilatácie času (a špeciálne paradoxu dvojčiat) sa uskutočnilo vďaka zostrojeniu atómových hodín. Jedny takéto hodiny boli naložené do lietadla a obleteli Zem, druhé zostali doma v laboratóriu. Letiace, boli oproti pozemným „mladšie“ a vzťahy ŠTR boli potvrdené s presnosťou na 1%.

S objavom jadrových reakcií získali vedci možnosť testovať asi najslávnejšiu Einsteinovu predpoveď – ekvivalenciu energie a hmoty (slávny vzťah $E = mc^2$). Pri jadrových reakciách sa uvoľňujú, alebo spotrebujú, veľké množstvá energie. Väzbové energie nukleónov v jadre sú totiž veľmi veľké a menia sa podľa zloženia jadra. Energetické rozdiely sa prejavujú merateľným rozdielom hmotností častíc na jednej a druhej strane jadrovej reakcie. Rôzne experimenty umožňujú zisťovať hmotnosť zodpovedajúcu energii a tým overovať relativistické predpovede. V decembri 2005 sa v prestížnom časopise Nature objavil článok medzinárodného tímu vedcov, v ktorom bol dôkaz platnosti vzťahu pre ekvivalenciu hmotnosti a energie s presnosťou 0,00004 %. Výsledok, 55 krát lepší než všetky dovtedajšie, dosiahli veľmi presným meraním hmotností častíc a energie vznikajúcich fotónov pri absorpcii neutrónov jadrami síry a kremíka. V tomto smere môžeme povedať, že potvrdením platnosti ŠTR je každá jadrová elektrárňa, jadrová či vodíková bomba a každá hviezda, svietiaci na nočnej oblohe.

Rozvoj urýchľovačov elementárnych častíc priniesol doslova každodenné testovanie vzťahov ŠTR. Bez ich znalosti takéto urýchľovače dokonca ani nepostavíte.

V posledných rokoch sa objavuje zvýšené množstvo experimentov, testujúcich jednu zo základných vlastností priestoru – jeho izotropiu (rovnaké vlastnosti bez ohľadu na smer). Niektoré exotickéjšie teórie predpokladajú existenciu istých energetických polí (napríklad magnetického poľa),

prestupujúcich celý vesmír. Takéto polia by určovali v priestore význačný smer, čím by bola narušená takzvaná Lorentzovská invariantnosť. Zvyšovanie presnosti týchto experimentov vedie zatiaľ len ku znižovaniu možných veľkosti týchto polí. Výsledky z roku 2006 ukazujú, že ak by symetriu narušajúce pole bolo magnetické, jeho veľkosť musí byť menej ako 10^{-15} Gaussa. Staršie experimenty (2004) ohraničili energiu pôsobenia medzi takýmto poľom a elektrónom (neutrónom) na menej ako 10^{-21} eV (10^{-18} eV). Prítom energia elektromagnetického pôsobenia medzi elektrónom a jadrom atómu sa počíta v desiatkach elektrónvoltov (eV).

Fyzici a astronómovia pátrajú tiež po narušení CPT symetrie² a hľadajú náznaky nesymetrie medzi hmotou a antihmotou. Doterajšie merania stále len posúvajú hranice platnosti týchto symetrií, ale odchýlka od nich, a tým aj od ŠTR, sa doteraz neobjavila.

Všeobecná teória relativity

ŠTR zrovnoprávnila všetky inerciálne súradnicové sústavy - pohybujú sa navzájom rovnomerne priamočiario alebo sú voči sebe v pokoji. Bokom zostali sústavy pohybujúce sa zrýchlene. Po viac ako 10 ročnom úsilí sa Einsteinovi podarilo prekonať aj tento nedostatok. Zlom pri ceste k všeobecnej teórii relativity (VTR) bolo uvedomenie si, že lokálne nedokážeme rozoznať, či sme v sústave s homogénnym gravitačným poľom, alebo v sústave bez gravitačného poľa, ktorá sa pohybuje rovnomerne zrýchlene. Vhodný zrýchlený pohyb – voľný pád, môže (lokálne) zrušiť pôsobenie gravitačného poľa a telesá sa v takejto sústave pohybujú ako v sústave inerciálnej – sú voľné. Pri všeobecnom gravitačnom poli to už nie je také jednoduché, ale vždy môžeme zaviesť v istom okolí každého bodu neinerciálnu sústavu – „voľne padajúcu“. Tá zruší gravitačné pole a platia v nej zákony ŠTR. Pospájanie týchto lokálnych sústav do globálnej vedie k zakrivenému 4-rozmernému priestoročasu bez prítomnosti gravitácie. Telesá sa v ňom pohybujú voľne po najkratších možných dráhach. V zakrivenom priestore to už nie sú priamky ale zložitejšie krivky. My nedokážeme vnímať zakrivenie priestoru a zakrivené dráhy si vysvetľujeme ako pôsobenie gravitačnej sily.

Možnosť zrušiť gravitáciu zrýchleným pohybom je jedinečná vlastnosť gravitačného poľa a nazýva sa univerzálnosť – všetky telesá padajú v gravitačnom poli s rovnakým zrýchlením. Tento jav je spôsobený tým, že zotrvačná hmotnosť telies (miera ich odporu voči zmene pohybu) je rovnaká ako hmotnosť gravitačná (tá budí v okolí telesa gravitačné pole)³. V klasickej mechanike je to nevysvetliteľná náhoda. Vo VTR zotrvačná hmotnosť a energia (zotrvačná hmotnosť je ekvivalentná energii) spôsobujú zakrivenie priestoru. Môžeme povedať, že čím je zakrivenie väčšie, tým je z nášho pohľadu väčšie gravitačné pole. V zakrivenom priestore sa voľne pohybujú telesá a na charakterizovanie ich pohybu postačuje zotrvačná hmotnosť. Úplne prirodzene sa teda objavuje ekvivalencia zotrvačnej a gravitačnej hmotnosti.

V centre celej VTR stojí univerzálnosť gravitačného pôsobenia. Táto vlastnosť bola zaujímavá aj pre klasickejšiu fyziku a preto testy rovnosti zotrvačnej a gravitačnej hmotnosti prebiehali už pred objavom VTR. Ako prvý si túto vlastnosť všimol Galilei. Po ňom ju preveroval Newton a dokázal rovnosť oboch druhov hmotností s presnosťou na stotiny. Na začiatku 20. storočia vykonal, s ohľadom na vtedajšiu techniku, jedinečné experimenty maďarský barón von Eötvös. Pomocou torzných váh dokázal rovnosť gravitačnej a zotrvačnej hmotnosti s presnosťou na 10^{-8} . Dicke a kol. v roku 1963 publikovali výsledky v podstate rovnakých experimentov (až na technický pokrok) s presnosťou 10^{-11} . Braginský a kol. zlepšili na konci 70-tych rokov túto presnosť ešte o rád. Neskoršie experimenty boli uskutočňované s rozličnými materiálmi. Rôzny podiel ich hmotnosti pripadá prítom na elektróny, protóny a neutróny. Dokonca rôznou mierou ku celkovej hmotnosti prispievajú elektromagnetické a jadrové (silné) väzbové sily. Univerzálnosť gravitačného pôsobenia je potom s dostatočnou presnosťou overená pre rozdielne druhy častíc aj pre silnú a elektromagnetickú interakciu. Bokom zostávajú slabá a gravitačná interakcia. Tá pri telesách bežných rozmerov nemá prakticky nijaký vplyv na celkovú hmotnosť a výraznejšie sa začína prejavovať až pri telesách kozmických rozmerov. Na zistenie odchýlok od univerzálnosti je potrebné

² Táto symetria z oblasti elementárnych častíc hovorí, že keď máte skupinu interagujúcich častíc a zmenili by ste znamienka ich nábojov za opačné, pozerali by ste sa na ne v zrkadle (inverzia priestorových súradníc) a zmenili by ste smer plynutia času, interakcie medzi nimi by boli rovnaké.

³ V predchádzajúcich častiach textu by sme správne mali namiesto hmotnosti používať pojem zotrvačná hmotnosť. No keďže obe sú ekvivalentné, budeme aj naďalej používať (pokiaľ to nebude nevyhnutné nutné odlíšiť) jednoducho len hmotnosť.

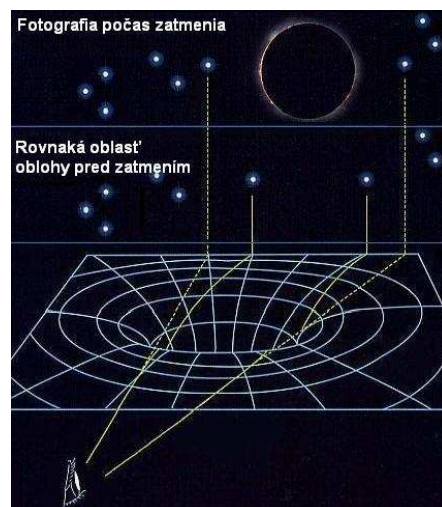
sledovať systém troch telies planetárnych veľkostí. Umiestnenie laserových odrážачov na Mesiaci, koncom 60tych rokov, umožnilo s dostatočnou presnosťou merať jeho polohu a sledovať prípadné odchýlky od predpovedanej dráhy. Rozbor dlhoročných meraní ukázal, že univerzálnosť platí aj pre gravitačnú väzbovú energiu s presnosťou na tisíciny. Vedci sa s týmto stavom pri tak dôležitom princípe neuspokojujú a objavujú sa nové a nové experimenty.

Klasické a iné testy

Za klasické testy VTR sú považované experimentálne merania gravitačného červeného posunu, ohybu svetelných lúčov v gravitačnom poli Slnka a anomálneho posunu perihélia Merkúra.

Vznik gravitačného červeného posunu možno jednoducho vysvetliť. Svetelný lúč sa skladá z fotónov. Fotón má určitú energiu, ktorá je úmerná jeho frekvencii a nepriamoúmerná jeho vlnovej dĺžke. Na základe ŠTR má preto každý fotón aj určitú hmotnosť (platí $E = mc^2$) a pôsobí naň gravitačná sila. Keď sa fotón pohybuje proti pôsobeniu gravitačnej sily (z povrchu hviezdy do voľného priestoru), musí na to vynaložiť istú časť svojej energie. Tým klesne jeho frekvencia a vzrastie vlnová dĺžka. Fotóny z modrej časti spektra sa tak posúvajú smerom do červenej⁴. V prípade ak v gravitačnom poli padá, jeho energia a tým aj frekvencia rastú (modrý posun). Veľmi presne vieme zistiť, s akou frekvenciou sú vyžarované fotóny pri niektorých procesoch. Porovnaním tejto teoretickej frekvencie s frekvenciou prichádzajúcich fotónov vieme určiť, ako sa ich frekvencia zmenila. Pozorovanie gravitačného červeného posunu na fotónoch prichádzajúcich zo Slnka je zaťažené značnou chybou. Plazma v povrchových vrstvách Slnka a v jeho atmosfére je totiž v neustálom náhodnom pohybe a ten ovplyvňuje frekvenciu a vlnovú dĺžku svetla vďaka Dopplerovmu efektu. Až do 60-tych rokov sa preto nepodarilo overiť túto predpoveď VTR s presnosťou lepšou ako 5 %. Po objave Mösbauerovho javu (dajú sa ním merať extrémne malé zmeny frekvencie fotónov) sa podarilo dvojici Pound a Rebka (neskôr Pound a Snyder) zostaviť a vykonať veľmi precízny experiment. Gama fotóny, vznikajúce prechodom jadra železa ⁵⁷Fe do základného stavu, vysielali medzi pivnicou a strechou budovy Jeffersonovho laboratória (Harvardská univerzita). Zmeraním relatívnej zmeny frekvencie fotónov overili relativistický vzťah na 1 %. V roku 1976 s využitím vodíkového masera, vyneseneho do kozmu, Vessot a kol. potvrdili predpovede VTR s presnosťou na 10⁻⁴.

Vzorec pre ohyb svetla pri prechode okolo hmotného objektu by sme sa mohli pokúsiť odvodiť podobne ako ten pre gravitačný červený posun. Na fotóny pôsobí gravitačná sila. Ich dráha bude preto v gravitačnom poli zakrivená. Výpočet pomocou VTR tento krát vedie na výsledok dva krát väčší než dáva náš „poloklasický“ prístup. Takže máme naozaj výbornú príležitosť testovať VTR. Prvé experimentálne výsledky získal v roku 1919 sir Eddington a kol. (obr. 2). Pri úplnom zatmení Slnka odfotili hviezdy pole v jeho blízkosti a porovnali ho s fotografiami z obdobia, keď sa tam Slnko nenachádzalo. Tento prístup je poznačený systematickými chybami a tak ani v roku 1976 sa nepodarilo dokázať relativistické vzťahy pre ohyb s presnosťou väčšou ako 10 %. Až sledovanie mimogalaktických kompaktných rádiových zdrojov metódami rádiovkej interferometrie priniesol zlepšenie. Dnes sú predpovede VTR pre ohyb svetla overené s presnosťou na 10⁻⁴. S využitím kozmonautiky by vedci radi preverili túto oblasť ešte lepšie.



Obr. 2 Princíp pozorovania ohybu svetla počas zatmenia Slnka.

O tom, že perihélium (bod dráhy, najbližší Slnku) Merkúra sa postupne otáča a otáča sa viac, ako pripúšťa Newtonova teória gravitácie, vedel už LeVerrier v 18. storočí. Dráha Merkúra nie je do seba uzavretá elipsa, ale elipsovité krivka, ktorá sa pri každom obehu trošku pootočí. Do úvahy pritom astronómia brali pôsobenie ostatných planét aj sploštenie Slnka, no stále zostávala časť stáčania, presnejšie 43 uhlových sekúnd za 100 rokov⁵, ktorá sa nedala nijako vysvetliť. Vedci dokonca hľadali

⁴ Kvantifikáciou týchto jednoduchých argumentov by sme dostali správny vzťah pre červený posun v slabom gravitačnom poli aj bez znalosti VTR. A naozaj Einstein tento efekt predpovedal už v roku 1907, čiže 9 rokov pred definitívnym dokončením VTR.

⁵ Pod takýmto uhlom by sme videli 10 korunovú mincu zo vzdialenosti 125 m.

novú planétu, obiehajúcu medzi Merkúrom a Slnkom. Výpočty dráhy Merkúra pomocou VTR ukázali presne také správanie, aké pozorujeme. Zhoda teórie so stáročnými optickými pozorovaniami bola v rozmedzí 1 %. Radarové pozorovania pohybu Merkúra spresnili túto zhodu ešte o jeden rád.

Nečakaná možnosť testovať VTR prišla s rozvojom rádioastronómie (už sme spomínali jej pomoc v spresňovaní starších meraní). Rádiový signál je, rovnako ako svetlo, elektromagnetické vlnenie. Hoci majú rádiové fotóny o mnoho rádov menšiu frekvenciu ako fotóny svetla, ich podstata je spoločná a vo vákuu sa tiež pohybujú najvyššou možnou rýchlosťou – rýchlosťou svetla. Jedným z dôsledkov VTR je predpoveď, že doba šírenia sa svetelného (alebo rádiového) signálu bude závisieť od gravitačného poľa na jeho dráhe. Koncom 60-tych rokov začali rádioastronomické aparatúry dosahovať také výkony, že bolo možné zaznamenať odraz rádiového signálu od planéty Merkúr, pričom signál prechádzal tak tesne popri Slnku, ako to geometria postavenia planét dovoľovala (Zem a Merkúr neobiehajú v jednej rovine, takže Merkúr nebude, až na výnimky, zakrytý Slnkom). Gravitácia Slnka na dráhe signálu spôsobila merateľné časové posuny. V rokoch 1976 – 78 boli pri takýchto experimentoch využité sondy Viking, letiace k Marsu. S ich pomocou boli predpovede VTR overené na tisíce.

Zaujímavým efektom VTR je strhávanie súradnicovej sústavy rotujúcim hmotným telesom v smere jeho rotácie (Lensova-Thirringova precesia). V roku 1998 publikoval Ciufolini a kol. analýzu presných meraní polôh dvojice satelitov Lageos. Precesia týchto satelitov súhlasí s relativistickými predpoveďami na 10 %. NASA plánuje vypustiť špeciálny satelit s kremennými chladenými gyroskopmi, ktorých smer momentu hybnosti bude „sledovaný“ supravodičmi. Výsledky tohto experimentu by mali definitívne potvrdiť Lensovú-Thirringovu precesiu.

Niektoré teórie, aspirujúce na spojenie VTR a kvantovej mechaniky, predpovedajú okrem iného zmenu fyzikálnych konštánt s časom. V roku 2001 zverejnila výsledky rozsiahlej prehliadky oblohy skupina z vedcov z Austrálie. Analyzovali spektrá vzdialených kvazarov a galaxií (až 6 miliárd svetelných rokov ďaleko). Objavili, že tmavé spektrálne čiary nemajú všetky rovnaký červený posun. Pokúsili sa spojiť túto zmenu červeného posunu so zmenou konštanty jemnej štruktúry (konštanty, vytvorená z rýchlosti svetla, Planckovej konštanty a z náboja elektrónu). Zmena by pritom bola pomerne malá – na úrovni 6 milióntin dnešnej hodnoty. Nedávno použila indická skupina astrofyzikov rovnakú metódu na analýzu nových spektier vzdialených zdrojov. Nepotvrdili predchádzajúci záver Austráľčanov. Konštanty jemnej štruktúry je naozaj konštantná, alebo prípadné zmeny boli podstatne menšie. Takže výsledky sú tu nejednoznačné a dosiaľ neobjavili nič, čo by relativita nedokázala vysvetliť.

Veľkým úspechom VTR sú aj najnovšie výsledky z oblasti kozmológie a astrofyziky. Pomocou Einsteinovej teórie gravitácie v spolupráci s teóriami elementárnych častíc (vychádzajú zo spojenia ŠTR a kvantovej mechaniky) dokážeme opísať vývoj vesmíru od zlomkov sekundy až po dnešok. Kozmologický scenár vývoja potvrdzujú aj presné výsledky merania anizotropie reliktového žiarenia z družíc COBE a WMAP. Potvrdená je existencia čiernych dier, objavili sa gravitačné šošovky – efekty predpovedané VTR.



Obr. 3 Observatórium LIGO – interferometer kilometrových rozmerov.

Pozorovania vzdialených supernov v posledných rokoch ukazujú, že rozpínanie vesmíru sa zrýchľuje. Opäť sa tak dostáva na svetlo mysteriózna kozmologická konštanty, ktorá dokáže toto zrýchľovanie popísať. Kozmologickú konštantu zaviedol do svojich rovníc sám Einstein, čo neskôr vyhlásil za svoj najväčší omyl. Nuž, zdá sa, že tento omyl má to najlepšie ešte len pred sebou.

Niektorí teoretici tiež predpovedali odchýlky od Newtonovho gravitačného zákona na veľkých vzdialenostiach aj na oblastiach pod 1 mm. Ani v jednom smere sa zatiaľ tieto odchýlky nepotvrdili. Keďže Newtonov gravitačný zákon je limitným prípadom VTR, potvrdenie jeho obmedzenej platnosti

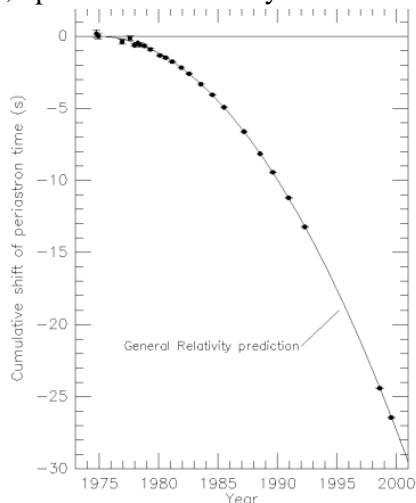
by znamenalo problém aj pre relativitu.

Najväčšou výzvou pre experimentátorov stále zostávajú gravitačné vlny. Už v 70-tych rokoch Joseph Weber, jeden z prvých tvorcov detektorov gravitačných vln, tvrdil, že sa mu podarilo zaznamenať gravitačné vlny. Nakoniec sa ukázalo, že sa mýlil, ale výrazne urýchlil ďalší vývoj v tejto oblasti.

V súčasnosti sa dokončujú viaceré obrie detektory gravitačných vln. Americké LIGO - *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* (obr. 3), sa skladá z dvoch navzájom kolmých vákuových trubíc, každá s dĺžkou 4 km. Momentálne prebiehajú jeho testy a kalibrácia. Vedci dúfajú, že s pomocou týchto monumentálnych „prístrojov“ definitívne zaregistrujú gravitačné vlny. Je ale dosť pravdepodobné, že úspešná bude až ďalšia generácia detektorov. Takže najlepším potvrdením existencie gravitačných vln stále zostáva binárny pulzar 1913+16.

Binárny pulzar PSR 1913+16

V roku 1974 s využitím 305 metrového rádoteleskopu v Arecibo objavili Američania Hulse a Taylor pulzar – rýchle rotujúcu neutrónovú hviezdu, ktorý dostal označenie PSR 1913+16. Perióda jeho rotácie bola 59 ms (za sekundu sa otočil 17 krát). Drobné zmeny v perióde pulzácií ukázali, že pulzar je členom dvojhviezdneho systému, pričom aj druhá zložka je neutrónová hviezda. Náhoda priviedla astrofyzikov k jedinečnému laboratóriu na testovanie VTR. Obe neutrónové hviezdy majú hmotnosť 1,4 krát väčšiu, ako je hmotnosť Slnka, pritom ich polomer je len rádovo desiatky kilometrov. Obiehajú okolo spoločného ťažiska s periódou 7,75 h. Ich vzájomná vzdialenosť sa mení od 1,1 polomeru Slnka na 4,8 polomeru Slnka a rýchlosť obehu je 75 až 300 km/s.



Obr. 4 Porovnanie pozorovaného posunu periastra pri binárnom pulzare PSR 1913+16 a predpovede VTR (plná čiara).

Keď sú neutrónové hviezdy k sebe najbližšie, ich gravitačné pole je tak silné, že merateľne spomaľuje rádiové pulzy, v dobrom súhlase s predpoveďami VTR. Ďalší pozorovateľný relativistický efekt je stáčanie priamky, spájajúcej neutrónové hviezdy v čase keď sú k sebe najbližšie (stáčanie periastra – analógia stáčania perihélia Merkúra – obr. 4). Toto stáčanie je $4,2^\circ$ za rok, čiže príspevok k otáčaniu za jeden deň je v tomto prípade porovnateľný s posunom perihélia Merkúra za celé storočie. Obrovský rozdiel je spôsobený veľkou rýchlosťou obehu a tiež tým, že neutrónové hviezdy majú 250 krát väčšiu frekvenciu obehu.

Určite najzaujímavejším z relativistických efektov, pozorovaných pri binárnom pulzare PSR 1913+16, je skracovanie periódy obehu neutrónových hviezd. V roku 1982 bola perióda obehu pulzara o 1 s kratšia, ako v roku 1974. Polomer obehu pulzara sa každým obhom zmenší o 3,1 mm. To znamená, že za 300 miliónov rokov dôjde ku splynutiu oboch neutrónových hviezd. Celé toto „scvrkávanie“ sa je spôsobené vyžarovaním

gravitačných vln. Teoretická hodnota skracovania periódy gravitačnému vyžarovaniu súhlasí na 0,5 % s pozorovanou hodnotou. Tieto výsledky niekoľkých desiatok rokov pozorovania sú zatiaľ najpresvedčivejším dôkazom existencie gravitačných vln.

Krátka exkurzia do oblasti dôkazov teórií relativity je za nami. Po viac ako 100 rokov od ich vzniku sa nakopil naozaj značný experimentálny materiál, potvrdzujúci Einsteinove teórie. Vidieť, že vedci Einsteinovým teóriám neprístupujú s prehnaným rešpektom. Podrobujú ich neustálym testom, ako výtvyry akéhokoľvek iného vedca, možno ešte o čosi viac, pretože opraviť dielo toho najlepšieho je veľká sláva. Zrejme ešte dlho sa budú prírody pýtať, či teórie relativity platia a kde sú hranice ich použiteľnosti. Už teraz je ale jasné, že teórie relativity je extrémne úspešná. Ak sa aj nájde niečo lepšie, nebude to znamenať jej zavrhnutie. Bude to teória, ktorá bude relativitu obsahovať ako isté zjednodušenie (podobne ako sme sa po objavení VTR nezbavili Newtonovho gravitačného zákona).