

La relativitat general d'Einstein avui

Enric Verdaguer

Departament de Física Fonamental, Universitat de Barcelona. Carrer de Martí i Franquès, 1. 08028 Barcelona

enric.verdaguer@ub.edu

1 Introducció

La teoria de la relativitat general va néixer oficialment l'any 1915 amb la publicació a la revista *Annalen der Physik* d'un llarg article d'Albert Einstein. En aquest article, l'autor introdueix les famoses *equacions d'Einstein*, que descriuen com una distribució de matèria i energia corba l'espai-temps. Postula que les partícules lliures o de prova, és a dir, les partícules no sotmeses a altres forces que la gravitacional, segueixen les equacions geodèsiques de l'espai-temps. A més, demostra que en la nova teoria hi haurà un avançament en el periheli de Mercuri que està d'acord amb les observacions astronòmiques, dóna una predicció de la desviació dels raigs de llum quan passen a prop del Sol i prediu el desplaçament de la freqüència de la llum en un camp gravitacional, l'anomenat *desplaçament al roig gravitacional de la llum*. Des d'aleshores, la teoria ha passat nombroses proves i en aquests darrers 25 anys s'ha convertit en la teoria clàssica de la gravitació i en l'eina bàsica de la cosmologia per descriure l'Univers a gran escala.

2 Desenvolupament i estat actual de la teoria

2.1 Gènesi de la teoria

El període de gènesi de la relativitat general es considera que va entre els anys 1887 i el 1929. L'any 1887, A. A. Michelson i E. W. Morley publiquen l'experiment interferomètric en què intenten mesurar la velocitat de la Terra respecte de l'èter amb un resultat negatiu. Aquest experiment es considera la primera evidència experimental del que més tard seria la teoria de la relativitat especial que Einstein publicava l'any 1905. Un dels postulats bàsics de la teoria és que la velocitat de la llum en el buit és la mateixa en tots els sistemes de referència inercials. Per tant, seria impossible determinar la velocitat de la Terra respecte d'un sistema de referència inercial amb un experiment amb llum del tipus del que van dur a terme Michelson i Morley. La teoria de la relativitat especial es va convertir aviat en el marc en el qual cal descriure tota teoria fonamental de la física. Però, mentre que la teoria electromagnètica de Maxwell encaixa perfectament en aquest marc, la teoria de la gravitació de Newton no ho fa. Per

aquesta raó, Einstein es va proposar trobar una teoria relativista de la gravitació. Un pas important en aquesta direcció el va donar l'any 1907, quan va introduir el principi d'equivalència, que el mateix Einstein va considerar més tard com la idea més feliç de la seva vida. En aquest principi s'estableix l'equivalència local entre un sistema de referència inercial i un sistema de referència associat a un observador en caiguda lliure en un camp gravitacional. Basant-se en aquest principi, Einstein va predir que els raigs de llum que passen a prop del Sol s'han de desviar un angle de $0,875''$ d'arc. Aquesta predicció resulta ser la meitat de l'angle correcte tal com Einstein va derivar més tard a partir de la teoria completa de la gravitació relativista.

El principi d'equivalència va servir de guia a Einstein per arribar, a través d'un llarg i complicat camí, a la idea que la gravitació ve descrita per un espai-temps corbat i que la font de la curvatura és qualsevol distribució de matèria i energia. Finalment, i tal com ja hem comentat abans, l'any 1915 Einstein formula la teoria de la relativitat general i dóna les equacions que lliguen curvatura de l'espai-temps i distribució de matèria i energia. A més, Einstein va proposar les tres proves clàssiques de la teoria: l'avanç del periheli de Mercuri, que resulta ser de $43''$ d'arc per segle; la desviació dels raigs de llum pel Sol, que és d' $1,75''$ d'arc, i el desplaçament al roig de la llum en un camp gravitacional, $\Delta\omega/\omega = gh/c^2$, on ω és la freqüència de la llum, h l'alçada que es desplaça la llum, g l'acceleració de la gravetat a la superfície de la Terra i c la velocitat de la llum. Poc després, l'any 1916 K. Schwarzschild troba una solució exacta de les equacions d'Einstein sota la condició de simetria esfèrica i estacionarietat. La solució de Schwarzschild descriu aproximadament el camp gravitacional a l'exterior de les estrelles com el Sol, dels planetes com la Terra, etc. Encara que en aquell moment no es va apreciar, la solució descriu els forats negres més generals estacionaris sense rotació que resulten del col·lapse gravitacional d'una estrella.

L'any 1919, A. S. Eddington, aprofitant un eclipsi solar, organitza dues expedicions (una a Sobral, al Brasil, i una altra a l'Illa Prince, al golf de Guinea) per comprovar la fórmula d'Einstein sobre la desviació dels raigs de

llum pel Sol. Les observacions van confirmar el resultat d'Einstein amb una precisió, però, que no arribava al deu per cent. Aquest fet i la publicitat consegüent convertiren Einstein en una figura popular.

L'ús de les equacions de la relativitat general per descriure l'estructura a gran escala de l'Univers l'inicià Einstein l'any 1917, quan introduí la constant cosmològica per poder descriure un Univers estacionari, segons requerien les observacions del moment. Anys més tard, el mateix Einstein considerà la introducció de la constant cosmològica com l'error més gran de la seva vida. Va ser el físic rus A. Friedmann que, l'any 1922, fent ús de la teoria d'Einstein, arribà a les equacions que descriuen el model cosmològic del Big Bang, model que preveu que l'Univers s'expandeix i que en fer-ho es refreda; per tant, ha d'haver passat per etapes més calentes. G. Lemaître arribà de manera independent l'any 1927 a les mateixes conclusions. Aquests treballs, no obstant això, van tenir molt poc impacte perquè la idea prevalent en aquell moment era que l'Univers és estacionari. Això, però, va canviar l'any 1929, quan l'astrònom americà Hubble va descobrir que les galàxies més allunyades se separen de nosaltres amb una velocitat proporcional a la distància. Era la primera evidència de l'expansió de l'Univers i, a més, aquestes observacions estaven d'acord amb els models de Friedmann i Lemaître. Aquí podem posar el punt final a l'etapa de gènesi de la relativitat general. L'activitat en aquest camp va ser petita durant les tres dècades següents, que van estar dominades pel desenvolupament de la teoria quàntica i la física nuclear.

2.2 Renaixement

Després d'aquests anys de poca activitat va venir un període de renaixement de la relativitat general, que va des de l'any 1960 fins l'any 1980. En aquesta etapa es produeixen una sèrie d'observacions especialment de caràcter astronòmic i cosmològic que requereixen les propietats relativistes de la gravitació i, per tant, converteixen la teoria d'Einstein en una eina de treball, d'aplicació i de confrontació amb l'experiment i l'observació. Al mateix temps, en el camp teòric la relativitat general gaudeix d'un desenvolupament molt important en tots els vessants.

L'any 1960 R. V. Pound i G. A. Rebka comproven amb un difícil experiment el desplaçament al roig gravitacional, amb una precisió d'un 10 %. Aquest era el darrer dels tres tests clàssics de la teoria que havia proposat Einstein.

Un dels moments àlgids d'aquest període es produeix l'any 1965 quan A. A. Penzias i R. W. Wilson descobreixen la radiació cosmològica de fons. Aquest fet constitueix l'evidència més important d'una etapa calenta prèvia de l'Univers i concorda amb el model cosmològic de Friedmann i Lemaître. Aquesta radiació es manifesta amb un espectre de cos negre i correspon a una temperatura de 3 K actualment.

Un altre dels moments àlgids es produeix l'any 1967

quan J. Bell i A. Hewish descobreixen els púlsars, que s'identifiquen com estrelles de neutrons, objectes que ja havia predit L. Landau l'any 1930, que resulten del col·lapse gravitacional d'una estrella prou massiva en les darreres etapes de la seva evolució. En aquesta mateixa línia es descobreix l'any 1971 una font de raigs X a la constel·lació del Cigne, Cygnus X-1, amb evidència que és un objecte compacte de 8 masses solars. Com que no es coneix cap mecanisme que pugui evitar el col·lapse d'un objecte tan massiu, aquesta és la primera evidència d'un forat negre. La radiació X és emesa pel gas d'un disc d'acreció que orbita el forat negre.

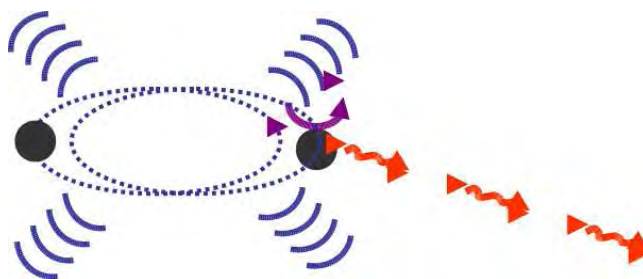


Figura 1: Púlsar binari B1913+16: dues estrelles de neutrons de 1,4 masses solars, una d'elles és un púlsar que s'observa. El radi de l'òrbita és de 100.000 km. El període de l'òrbita és de 7,75 h i decreix a un ritme de $2,4184 \cdot 10^{-12}$ segons cada segon, a conseqüència de l'emissió de radiació gravitacional.

L'any 1978 D. Walsh descobreix un quàsar doble, és a dir, una imatge doble d'un mateix objecte i que és evidència clara de l'efecte de lent gravitacional. Un altre dels moments estel·lars d'aquesta època daurada va ser el descobriment, l'any 1974, del púlsar binari B1913+16 format per dues estrelles de neutrons d'1,4 masses solars que orbiten amb un període d'unes 8 hores. Una de les estrelles és un púlsar que permet seguir el seu moviment amb gran precisió. Segons la teoria de la gravitació d'Einstein, aquest sistema ha d'emetre energia en forma de radiació gravitacional, i aquesta pèrdua d'energia s'ha de traduir en un decreixement del període de l'òrbita de $2,4184 \times 10^{-12} \text{s/s}$. L'any 1980 R. A. Hulse i J. H. Taylor, després d'un seguiment del sistema durant sis anys, van confirmar aquest fet i, per tant, van confirmar la primera evidència indirecta de radiació gravitacional. Amb aquest important descobriment es considera acabada l'etapa de renaixença de la relativitat general.

Cal comentar també alguns dels avenços teòrics més importants que es van produir en aquesta etapa. L'any 1963, R. Kerr va descobrir la «mètrica de Kerr», és a dir, la solució exacta de les equacions d'Einstein en el buit que s'obté sota les condicions d'estacionarietat i simetria axial i que dona el camp gravitacional creat a l'exterior d'un objecte massiu amb rotació. La solució té dos paràmetres, un d'ells representa la massa i l'altre el moment angu-

lar de la font, quan no hi ha rotació esdevé la solució de Schwarzschild. La importància d'aquesta mètrica rau en el fet que representa l'estadi final del col·lapse gravitacional de qualsevol objecte astrofísic prou massiu. És a dir, representa el forat negre més general d'acord amb el teorema que diu que els forats negres no tenen pèls. Notem que en el col·lapse d'una estrella, en general, hi tenim la massa, el moment angular, el moment quadrupolar i altres moments més alts. L'esmentat teorema ens assegura que en el col·lapse tots els moments són radiats en forma de radiació gravitacional, excepte els moments monopolar (massa) i dipolar (moment angular).

Aquests mateixos anys, R. Penrose i S. Hawking van establir els resultats sobre singularitats que bàsicament diuen que són inevitables en relativitat general via col·lapse gravitacional, o via Big Bang en cosmologia. L'any 1974 Hawking va fer un descobriment sorprenent: va demostrar que, com a conseqüència d'efectes quàntics, els forats negres poden radiar amb un espectre tèrmic de cos negre a una temperatura característica que és proporcional a l'invers de la massa (per al cas de forats negres sense rotació). Aquest resultat, juntament amb altres d'obtinguts pel mateix Hawking, per J. Bardeen, per B. Carter i per J. Bekenstein, va concloure amb les anomenades *lleis de la termodinàmica dels forats negres*. Aquestes lleis estableixen una connexió encara no del tot entesa amb una possible teoria quàntica de la gravitació.

2.3 Els darrers 25 anys: eina, tests i cosmologia

Arribem al darrer període, que ja inclou els nostres dies i en el qual la relativitat general s'ha convertit en una eina imprescindible per a la cosmologia, l'astronomia i fins i tot per a algunes eines de la vida quotidiana com ara el GPS. A més, mai com ara la teoria ha estat sotmesa a tot tipus de tests de precisió, des de proves del principi d'equivalència fins a proves que van molt més enllà de les proves clàssiques suggerides per Einstein, que involucren camps gravitacionals febles per arribar fins a tests en sistemes que involucren camps gravitacionals forts.

En el camp de la teoria i l'observació cal assenyalar algunes dates importants, la majoria relacionades amb la cosmologia. L'any 1981 A. Guth, aplicant les conseqüències de la física de partícules a les temperatures altíssimes properes al Big Bang, va arribar a la idea d'inflació en cosmologia. Segons aquesta idea, poc després del Big Bang, l'Univers, o una regió, hauria passat per un període molt breu d'expansió accelerada. Aquesta regió, que es convertiria en el nostre Univers observable, esdevindria molt homogènia, isotròpia i aplanada. De seguida es va veure que els efectes quàntics produïts en aquesta breu etapa inflacionària tindrien conseqüències macroscòpiques en les fluctuacions del camp gravitacional que podrien ser a l'origen de la formació d'estructura a gran escala, com ara anisotropies a la temperatura de la radiació còsmica de fons o la formació de les galàxies. L'espectre d'aquestes

fluctuacions coincidia efectivament amb el que es necessitava. Actualment, una etapa inflacionària ja forma part del model cosmològic estàndard.

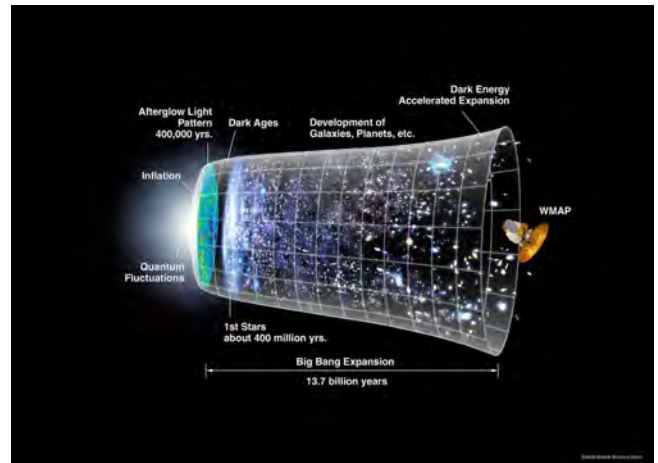


Figura 2: *Evolució de l'univers en la cosmologia estàndard. Inclou dues èpoques d'expansió accelerada: una etapa curta a l'inici (inflació) i l'etapa actual (constant cosmològica)*

L'any 1992 un equip dirigit per G. Smoot i J. Mather, amb les dades del satèl·lit anomenat COBE, va fer el primer mapa global de les anisotropies de la temperatura, T , de la radiació còsmica de fons que van resultar ser de l'ordre $\Delta T/T \sim 1/10^5$. S'entrava així en l'era de la cosmologia de precisió. L'any 2002 les dades del satèl·lit WMAP milloraven considerablement aquest mapa i permetien deduir un gran nombre de paràmetres cosmològics. El model cosmològic resultant té un ritme d'expansió de 71 km/s per megaparsec, amb geometria espacial plana i amb un 72 % d'energia fosca compatible amb una constant cosmològica molt petita. Poc abans, l'any 1999, en un projecte encapçalat per S. Perlmutter per mesurar la velocitat d'allunyament de les galàxies fent servir un tipus de supernoves com a candelas estàndard, s'havia descobert que les galàxies s'allunyaven seguint una llei d'expansió accelerada. Expansió ben diferent de la que tindria un univers dominat per la matèria o la radiació. Aquest resultat era compatible amb l'existència d'una constant cosmològica i perfectament d'acord amb el resultat del WMAP. L'existència d'una constant cosmològica no s'entén bé en els nostres models teòrics. Alguns físics consideren el problema de la constant cosmològica com un dels problemes fonamentals de la física teòrica actual, comparable fins i tot al problema del cos negre abans de la mecànica quàntica.

2.4 La cinquena força i el principi d'equivalència

L'any 1986 E. Fischbach i alguns col·laboradors van dur a terme una reanàlisi detallada de les dades de l'experiment de R. V. Eötvös de l'any 1922 en el qual va intentar mesurar les possibles diferències entre la massa inercial

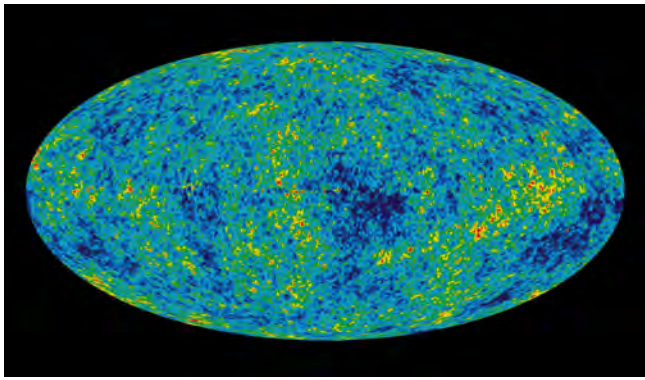


Figura 3: Anisotropies en la temperatura de la radiació còsmica de fons mesurades pel satèl·lit WMAP

i la massa gravitacional d'un objecte fent servir una balança de torsió. El principi d'equivalència feble sosté que aquestes masses són idèntiques. Els resultats d'aquesta anàlisi van ser que l'experiment era compatible amb l'existència d'una cinquena força d'intensitat comparable a la gravitacional i que podria ser sensible a la hipercàrrega. No cal dir que aquest treball va tenir una gran repercussió i va esperonar tot tipus d'experiments i teories per identificar o descartar l'existència d'aquesta força. En particular, va esperonar nous experiments sobre el principi d'equivalència en les seves versions febles i fortes. També experiments que van des d'escala mil·limètriques fins a escales quilomètriques per verificar la llei « invers del quadrat de la distància » de la gravitació newtoniana. En el marc teòric es van estudiar les teories de Kaluza-Klein, de Brans-Dicke i d'altres per poder encabir-hi una nova força, que involucraria camps diferents del purament mètric de la gravitació d'Einstein. Finalment, avui no hi ha cap evidència per a una cinquena força i tenim experiments del tipus del d'Eötvös que milloren el del 1922 amb 5 ordres de magnitud. El darrer es va fer l'any 2001 amb el nom d'experiment Eöt-Wash i dona una equivalència entre les masses gravitacionals i inercials amb una precisió de $3/10^{13}$. Una altra conseqüència d'aquesta activitat ha estat la mesura de la constant de gravitació de Newton amb molta precisió.

2.5 La parametrització postnewtoniana

La major part de les proves existents de la relativitat general es basen en tests fets en condicions de gravetat feble, és a dir, de camps gravitacionals poc intensos. Per sistemes lligats això també suposa condicions poc relativistes, en el sentit de velocitats petites en comparació de la velocitat de la llum. Certament, tots els experiments gravitacionals en el sistema solar cauen en aquesta categoria. És convenient quantificar les condicions de camp feble, o no, d'un sistema amb un paràmetre ϵ definit com

$$\epsilon \equiv \frac{GM}{Rc^2} \sim \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2},$$

on G és la constant de gravitació de Newton, c la velocitat de la llum, R la grandària del sistema gravitacional que s'estudia i M la massa. A la dreta v representa una velocitat típica que, en el cas de la gravitació newtoniana, podria ser la velocitat d'escapament d'una partícula que es troba en un radi R d'una massa M amb simetria esfèrica. Un sistema és de gravetat feble quan $\epsilon \ll 1$. En el cas del sistema solar tenim que $\epsilon \sim 10^{-5}$ a la superfície del Sol. Diem que un sistema és de gravetat forta quan ϵ és d'ordre 1, per exemple a la superfície d'una estrella de neutrons $\epsilon \sim 0,2$, a l'horitzó d'un forat negre $\epsilon \sim 0,5$, i quan parlem d'escala cosmològica de l'ordre del radi de Hubble $\epsilon \sim 1$. La generació d'ones gravitacionals es produeix majoritàriament en sistemes de gravetat forta, si bé la pertorbació del camp gravitacional que produeixen les ones lluny de les fonts (que és on s'intenten detectar) és extraordinàriament feble.

La teoria de la relativitat general ha passat nombrosos tests de precisió en el marc de la gravetat feble. De fet, hi ha una manera sistemàtica d'estudiar totes les possibles teories mètriques en aquest règim que s'anomena *parametrització postnewtoniana*. Consisteix a escriure una mètrica que doni l'extensió més general possible de la teoria newtoniana en termes d'uns potencials generalitzats i fins a ordres de $(v/c)^2$. La mètrica més general conté deu paràmetres, dels quals només dos són diferents de zero en el cas de la relativitat general. Qualsevol experiment dut a terme en el marc de gravetat feble s'utilitza per posar cotes als paràmetres postnewtonians. Tests del principi d'equivalència, de la desviació de la llum, de l'avanç del periheli, del retardament en els senyals de radar, etc., involucren de manera diferent aquests paràmetres i, fins ara, la relativitat general ha passat tots els tests possibles. Cal dir que moltes combinacions dels paràmetres postnewtonians no corresponen a cap teoria física en el sentit modern, és a dir, que es pugui formular a partir d'una acció. Per aquest mètode permet explorar de manera sistemàtica tot el règim de camp feble i no relativista. Malauradament, no tenim una sistemàtica similar en el cas de gravetat forta. En aquest cas, el que es fa és explorar les possibles conseqüències de les diferents alternatives o extensions de la relativitat general que es coneixen.

2.6 Sistema de posicionament global

Una de les aplicacions quotidianes de la relativitat general es troba en el sistema GPS que des de l'any 1993 està a disposició de la població d'una manera generalitzada. El va posar en funcionament la Força Aèria dels Estats Units i consta de 24 satèl·lits en sis òrbites planes, per tant amb quatre satèl·lits a cada òrbita, que orbiten a una alçada de 20.200 km i a una velocitat de 14.000 km/h respecte del centre de la Terra. Els satèl·lits contenen rellotges atòmics de precisió i emeten senyals que donen informació de la seva situació i del temps en què emeten.

Un observador amb un rellotge que rep aquest senyal de tres satèl·lits diferents pot saber la seva posició tenint en compte que, si el senyal ha viatjat un interval de temps Δt des d'un dels satèl·lits, aquest es troba a una distància de $d = c\Delta t$. El fet que l'observador no disposi d'un rellotge es pot substituir per informació redundant que es rep d'altres satèl·lits, normalment es rep senyal de set o vuit satèl·lits. Notem que per determinar una distància de 30 m cal tenir una precisió en la mesura del temps de 10^{-7} s i perquè el sistema funcioni cal, naturalment, que els rellotges es mantinguin sincronitzats. La gravitació d'Einstein prediu que els rellotges s'avancen respecte als rellotges de la Terra en 39×10^{-6} s/dia com a conseqüència de trobar-se en un camp gravitacional més feble que els rellotges de la superfície de la Terra. Els rellotges disposen d'un programa informàtic que els fa avançar en aquesta quantitat. Si aquesta conseqüència de la relativitat general no es tingués en compte, el sistema deixaria de ser operatiu al cap de tres hores.



Figura 4: El sistema de posicionament global GPS consta de 24 satèl·lits que orbiten la Terra a una alçada de 20.200 km

3 Tests de la relativitat general

3.1 Avanç del periheli

El periheli de Mercuri avança $574''$ d'arc per segle. D'aquests, $277''$ s'expliquen per la influència de Venus; $153''$, per Júpiter; $90''$, per la Terra i $11''$, per la influència de Mart i la resta de planetes. Queden $43''$ d'arc que no troben explicació en la gravitació newtoniana. Aquest fet ja era conegut per U. Le Verrier l'any 1859, que va intentar buscar una explicació (sense èxit) en la possible existència

d'un nou planeta que anomenà Vulcà. De manera remarkable, Einstein va trobar que la seva teoria donava justament aquest valor quan l'aplicà a Mercuri, fet que el va emocionar en gran manera perquè era el primer test de la nova teoria i el passava amb solvència. La història, però, no acaba aquí. L'any 1966 R. H. Dicke i H. M. Goldenberger van fer noves mesures de l'aixafament del Sol amb el resultat d' $1/10^5$. Això volia dir que el diàmetre al pla equatorial seria 52 km més llarg que entre els pols. Aquest resultat implicava un moment quadrupolar del Sol no negligible que es tradueix en un terme en el potencial newtonià que va com $1/r^4$, on r és la distància al centre. L'efecte d'aquest terme seria produir un avançament extra a Mercuri de $3''$ d'arc per segle, cosa que resultava incompatible amb la precisió del resultat d'Einstein. Més tard, l'any 1973, H. A. Hill va fer noves mesures del moment quadrupolar del Sol amb el resultat que l'aixafament és només d' $1,7/10^7$, cosa que implica una diferència en els diàmetres de només 2 km i un avanç de $0,5''$ del moment quadrupolar, que és compatible amb el resultat d'Einstein. Els darrers resultats de l'any 1990 han millorat molt el coneixement del moment quadrupolar del Sol i fent ús de la parametrització postnewtoniana s'ha arribat a la conclusió que la relativitat general dóna el resultat correcte amb una precisió d' $1/10^3$. Aquest efecte de l'avançament del periastre s'ha observat també en diversos sistemes binaris, el més ben mesurat dels quals correspon al púlsar B1913+16.



Figura 5: Il·lustració que mostra l'avançament del periheli d'un planeta d'acord amb la teoria de la gravitació d'Einstein.

3.2 Desviament de la llum

Després de les expedicions d'Eddington per comprovar la desviació de la llum quan passa a prop del Sol durant l'eclipsi solar de l'any 1919, es van organitzar més expedicions per millorar la precisió de les mesures, aprofitant els eclipsis dels anys 1922, 1929, 1931, 1947, 1952 i 1973. Els resultats d'aquest tipus de mesura no arriben a una precisió gaire millor del 10 %. El problema principal és que la refracció que sofreix la llum visible a la corona solar emmascara l'efecte. Per aquesta raó, l'any 1991 es fan experiments amb ones ràdio. S'observen quàsars que

estan a 10^9 anys llum amb radiotelescopis en fila i en aquest cas les radioones passen més lluny de la corona. El resultat és una millora considerable en el càlcul de l'angle de desviació de la llum i un acord d'1/1000 amb la predicció de la relativitat general. Aquests resultats es van millorar un ordre de magnitud l'any 2004 fent prop de 10^6 observacions de manera sistemàtica i automatitzada de 541 fonts de radioones amb l'ús de 78 interferòmetres de fileres de radiotelescopis. En aquest cas, la precisió és d'1/10⁴. L'acord entre l'angle mesurat i l'angle que prediu la relativitat general d'1,7505" d'arc és, doncs, molt remarcable.



Figura 6: La relativitat general prediu el desviament de la llum quan passa a prop del Sol. Una estrella com la de la figura es veuria des de la Terra en una posició aparent desviada en un angle de 1,7505" d'arc.

3.3 Retard en l'eco de radar

Si es fan rebotar radioones a Venus quan aquest planeta es troba gairebé darrere del Sol, de manera que el senyal ha de passar proper a la superfície del Sol, el temps del viatge d'anada i tornada del senyal es retarda d'acord amb el que diu la relativitat general en 250×10^{-6} s respecte del que trigaria si l'espai temps fos pla. Aquest experiment es va poder fer amb molta precisió a partir de l'any 1977, quan una nau *Viking* va deixar un mirall a Mart perquè s'hi reflectissin les ones. Els resultats indiquen un acord amb la predicció de la relativitat general d'1/1000. Aquest efecte es coneix com a *retard en l'eco de radar*. Les imprecisions de l'experiment provenen principalment de la precisió amb què es coneix l'òrbita de Venus. Aquest mateix efecte s'ha pogut mesurar l'any 2003 fent servir la nau *Cassini*, que anava a Saturn. Els resultats, en aquest cas, donen un acord amb la teoria d'1/10⁵. Aquest experiment també ha servit per posar cotes importants en alguns dels paràmetres postnewtonians.

3.4 Desplaçament cap al roig

El primer experiment el van dur a terme R. V. Pound i G. A. Rebka a la torre Jefferson de la Universitat de Harvard. D'acord amb la relativitat general, el canvi en la freqüència de la llum en pujar 22,5 m de la torre és de $\Delta\omega/\omega = 2,5 \times 10^{-15}$. Naturalment aquest és un efecte molt difícil de mesurar. En el primer experiment van fer servir un isòtop del Fe-57 de vida mitjana de 10^{-7} s que emet fotons de longitud d'ona de 0,86 Å quan es desexcita. L'experiment aprofitava l'anomenat *efecte Mössbauer*. El resultat va estar d'acord amb la predicció de la relativitat general en un 10 %. El mateix

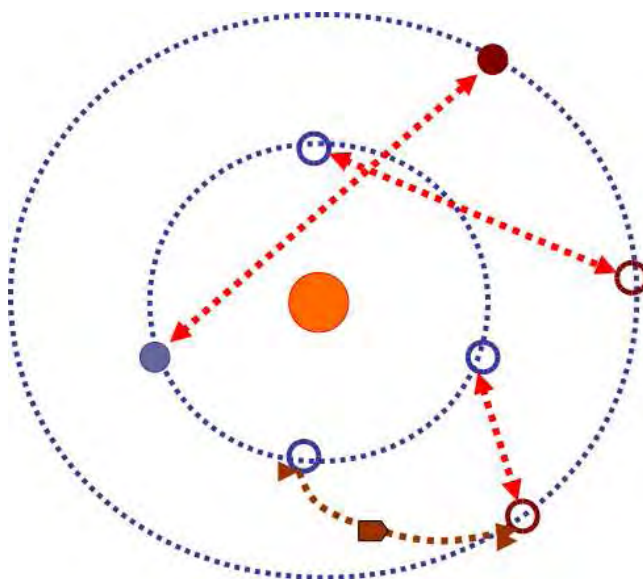


Figura 7: Una nau Viking deixa un mirall a Mart que permet enviar ones de ràdio d'anada i tornada des de la Terra a Mart en diferents posicions relatives respecte el Sol.

R. V. Pound, amb J. L. Snider, va repetir l'experiment perfeccionat l'any 1965, amb un acord amb la teoria de l'1 %. L'any 1976, R. Vessot, fent servir un coet Scout D equipat amb un rellotge masser de precisió que enviava senyals durant el seu allunyament de la Terra cap a una estació terrestre equipada amb un rellotge idèntic, va poder comprovar amb molta més precisió l'efecte dels camps gravitacionals en la freqüència de la llum. L'acord en aquest cas és d'1,4/10⁴. Per destriar l'efecte Doppler, produït pel moviment relatiu dels rellotges, de l'efecte purament gravitacional, des del rellotge de l'estació es van enviar fotons que rebotaven a la nau i tornaven a la Terra. Els fotons d'anada i tornada sofrien un efecte Doppler doble, mentre que els fotons emesos pel rellotge de la nau sofrien només l'efecte Doppler simple. Comparant els dos feixos de fotons es podia eliminar fàcilment l'efecte provocat pel moviment relatiu.

L'experiment més precís l'ha encapçalat H. Müller a la Universitat de Califòrnia l'any 2010. Fent servir interferències d'ones de matèria s'ha trobat un acord amb la predicció de la relativitat general de 7/10⁹. Han preparat un àtom de cesi en un estat quàntic superposició coherent de dos estats quàntics que corresponen a àtoms que segueixen durant uns 0,3 s dos camins lleugerament diferents que després es tornen a unir. Un dels camins transcorre a una alçada de 0,1 mm superior a l'altre, i per tant el «rellotge» de l'àtom s'avança respecte al de l'altre camí. El rellotge en aquest cas el defineix la freqüència de Compton associada a la massa de l'àtom, que és molt alta i fora de poder ser observada, no obstant la diferència en els temps transcorreguts es detecta per interferència

quàntica.

3.5 Precessió de giròscops

L'eix d'un giròscop sempre apunta en la mateixa direcció en un sistema de referència inercial. Per aquesta raó, els giròscops s'utilitzen moltes vegades per mesurar quant n's, d'inercial, un sistema de referència. D'acord amb el principi d'equivalència d'Einstein, un giròscop en caiguda lliure transportarà paral·lelament el seu eix. Si la Terra no girés i es posés un giròscop en una òrbita a 100 km d'alçada durant un any, s'esperaria un canvi en la direcció del giròscop de $6''$ d'arc. Aquest efecte es coneix com *precessió geodètica*, i el causa la curvatura del pla de l'òrbita de manera similar a com aquesta curvatura produeix l'avanç del periastre. La relativitat general prediu, a més, un nou efecte degut a la rotació de la Terra que s'anomena *d'arrossegament de sistemes de referència o efecte Lens-Thirring*. Aquest efecte faria que un giròscop estacionari que estigués orbitant durant un any en una òrbita polar sofrís una precessió de $0,1''$ d'arc, que cal afegir a l'efecte de la precessió geodètica.

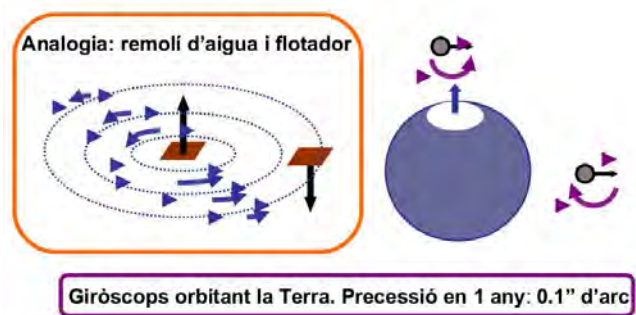


Figura 8: Il·lustració de l'efecte Lens-Thirring: una massa en rotació com la Terra arrossega l'espai-temps al seu voltant.

L'any 1960, L. Schiff, W. Fairbank i R. Cannon van idear un experiment per mesurar aquest efecte, que no cal dir que és extraordinàriament difícil. Finalment l'any 2004, seguint el projecte anomenat *Gravity Probe B* encapçalat per L. Everitt, es va llançar una nau en òrbita polar de 642 km d'alçada amb quatre giròscops i es van prendre dades durant tot un any. Cada giròscop és una esfera de quars de 4 cm de diàmetre folrada d'una capa fina de niobi, té una esfericitat d' $1/10^6$ (si l'esfera tingués el diàmetre terrestre tindria bonys de 2 m com a màxim) i es manté a 2 K en un contenidor d'heli superfluid. El giròscop es posa en rotació per fricció de gas d'heli a pressió. L'eix del giròscop apunta a una estrella de la constel·lació Pegasus. El niobi és superconductor a aquestes temperatures i genera un camp magnètic alineat amb l'eix de rotació, que permet monitorar la direcció de l'eix i també permet mantenir l'esfera en suspensió elec-

tromagnèticament. L'any 2009 es van anunciar uns resultats preliminars que indiquen un acord amb la relativitat general d'un 15 %. Si es confirma, seria la primera observació de l'efecte d'arrossegament de sistemes per rotació d'una font gravitacional, la Terra en aquest cas.

4 Ones gravitacionals

Com a bona teoria relativista, la relativitat general prediu l'existència d'ones gravitacionals, de la mateixa manera que la teoria de Maxwell prediu l'existència d'ones electromagnètiques. Qualsevol distribució de massa i energia que tingui un moment quadrupolar canviant amb el temps en produirà, per exemple un sistema binari. La generació d'ones gravitacionals forma part, en general, del domini de gravetat forta. No obstant això, la detecció es fa en regions on els camps gravitacionals associats a aquestes ones són febles. La detecció d'ones gravitacionals és un dels objectius als quals es dediquen més esforços. Per a la detecció hi ha, bàsicament, dos tipus d'antenes: les antenes ressonants ideades per J. Weber i els interferòmetres de làser.

Les antenes que avui ofereixen millors perspectives són els interferòmetres de làser. Són aparells conceptualment molt semblants als de Michelson i Morley. La diferència és que els dos miralls de l'interferòmetre estan units a dues pesades masses que es penjen per aïllar-les de possibles vibracions mecàniques. El pas d'una ona gravitacional produirà moviments relatius entre les masses. Un potent i estable feix de làser es divideix en dos feixos perpendiculars que s'envien contra els dos miralls. Els feixos reflectits es tornen a superposar i es recullen finalment en un interferòmetre. Del resultat de la interferometria es pot deduir la diferència de camins que han recorregut els dos feixos perpendiculars i d'aquesta manera es poden mesurar petits desplaçaments relatius de les masses. Amb aquest sistema s'espera poder determinar fluctuacions de longituds de $\Delta l \sim 10^{-18}$ m, és a dir, una mil·lèsima part d'un nucli atòmic. Els interferòmetres d'aquest tipus que es construeixen i els que ja estan construïts tenen dos braços perpendiculars d'uns quants quilòmetres de longitud; d'aquesta manera, el desplaçament per unitat de longitud $\Delta l/l$, que correspon bàsicament a l'amplitud de l'ona gravitacional, és molt petit.

Actualment hi ha construïts dos interferòmetres d'aquest tipus als Estats Units amb braços de 4 km. Un d'ells es troba a Handford, a l'estat de Washington, i l'altre a Livingston, a l'estat de Louisiana. Els dos constitueixen l'antena LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*) i naturalment treballen en coordinació. Amb un sol interferòmetre seria molt difícil poder determinar si el que es detecta és una ona gravitacional o un efecte local. D'altra banda, amb dos interferòmetres prou allunyats es pot fer una estimació més acurada de la direcció d'on prové l'ona. LIGO és una antena operativa,

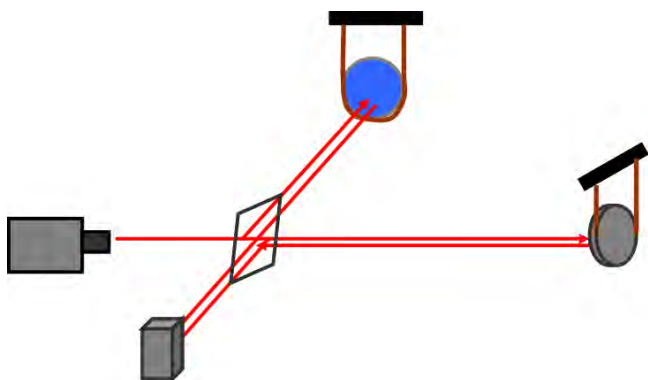


Figura 9: Interferòmetre de làser format per dues masses (amb miralls) penjades. Permet mesurar el moviment relatiu d'aquestes masses produït pel pas d'ones gravitacionals.

que funciona amb la precisió esperada. S'està establint tota una xarxa mundial d'interferòmetres d'aquest tipus que, a part de LIGO, comptarà amb dos interferòmetres a Europa (el GEO600, que és una col·laboració germanobritànica i VIRGO, fruit d'una col·laboració italofrancesa) i un interferòmetre al Japó anomenat TAMA300. En aquests moments ja s'està treballant en una millora de LIGO anomenada LIGO-II, que permetrà sintonitzar els interferòmetres a base de moure els miralls i que hauria de poder detectar ones gravitacionals de fonts com ara sistemes binaris compactes de la nostra galàxia quan, en els seus moments finals, es precipiten en espiral.



Figura 10: Antena gravitacional LIGO a Livingston (Louisiana, EUA). S'aprecien els dos braços perpendiculars de l'interferòmetre.

Un dels projectes més ambiciosos és un interferòmetre de grans dimensions a l'espai que s'anomena LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*). L'antena és un projecte NASA-ESA, es tracta de posar en òrbita solar, seguint l'òrbita de la Terra, tres petits satèl·lits que formaran un triangle equilàter de costats 5×10^6 km (deu vegades el radi del Sol). El sistema està dissenyat perquè pugui mesurar diferències relatives entre les masses de $\Delta l \sim 10^{-11}$ m. Els tres satèl·lits disposaran de propulsors per poder corregir les seves òrbites, que sotmeses a la pressió de radiació del Sol i altres perturbacions no orbiten totalment lliures, per seguir a les masses lliures respectives amb una precisió de 10^{-8} m, que correspon a una centèsima de la longitud d'ona de la llum visible. S'està pensant ja en un projecte relacionat que de moment s'anomena Short-LISA que consistiria en tres sistemes semblants al LISA però amb distàncies entre els satèl·lits de cada sistema de 5×10^4 km. Aquests tres petits LISA es col·locarien també en l'òrbita terrestre.

Bibliografia

FISCHBACH, E.; SUDARSKY, D.; SZAFER, A.; TALMADGE, C. L.; ARONSON, H. "Reanalysis of the Eötvös experiment". *Phys. Rev. Lett.*. Vol. 56, 1 (1986), p. 3-6.

MISNER, C. W.; THORNE, K. S.; WHEELER, J. A. *Gravitation*. Freeman, San Francisco, 1973.

MÜLLER, H.; PETERS, A.; CHU, S. "A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves". *Nature*. Vol. 463(2010), p 926-929.

SMOOT, G. F. et al. "Structure in the COBE differential microwave radiometer first year maps". *Astrophys. J., Part 2 - Letters*. Vol. 396, 1 (1992), p. L1-L5.

WILL, C. W. "The confrontation between General Relativity and Experiment". *Living Reviews in Relativity*. Vol. 9 (2006), 3.