

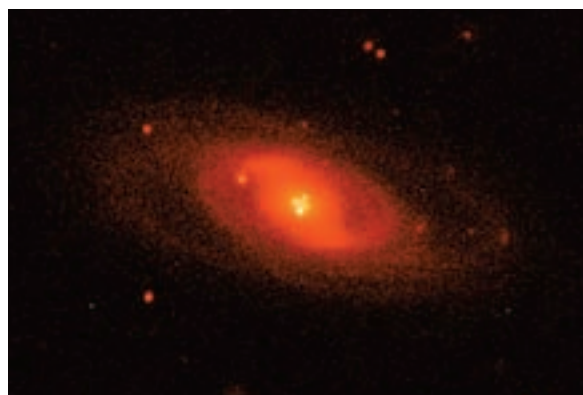
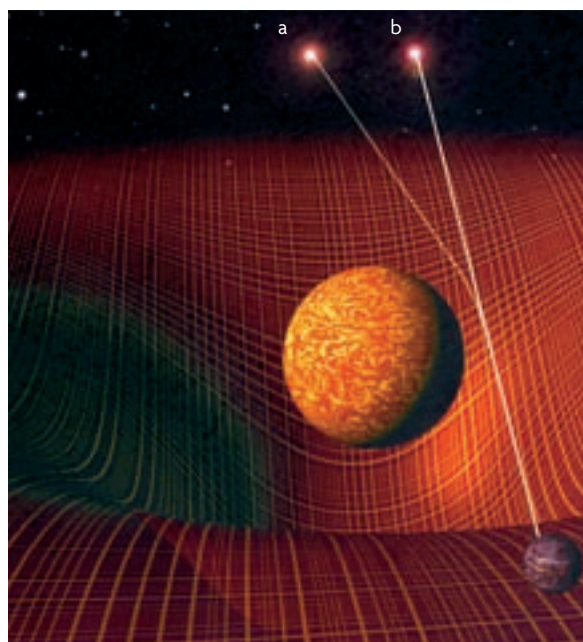
# EINSTEIN, L'ASTROFÍSICA I LA COSMOLOGIA MODERNES

José M<sup>a</sup>. Ibáñez i Diego Sáez

LA TEORIA DE LA RELATIVITAT GENERAL D'EINSTEIN, BASADA EN UNA NOVA CONCEPCIÓ DE L'ESPAI-TEMPS, GENERALITZA LA TEORIA DE NEWTON, PREDIU NOUS FENÒMENS COM LES ONES GRAVITATÒRIES, ELS FORATS NEGRES I L'EFFECTE LENT GRAVITATÒRIA, ENTRE ALTRES, I CONDUUEIX A MODELS D'UNIVERS COMPATIBLES AMB LES OBSERVACIONS.

La teoria de gravitació de Newton, vigent durant més de tres segles, ha permès entendre no sols l'harmoniosa dinàmica del Sistema Solar, les galàxies i els cúmuls de galàxies, sinó també el desenvolupament de la moderna teoria de l'evolució estel·lar. No obstant això, no pot explicar l'evolució de l'univers, l'efecte lent gravitatori ni els forats negres, entre molts fenòmens més. Per a fer-ho fa falta la teoria de gravitació d'Einstein, o relativitat general, el preludi de la qual va ser la teoria de la relativitat especial.

El 1905, Einstein va formular una teoria capaç de resoldre una autèntica crisi relacionada amb les equacions de Maxwell, que descriuen els camps electromagnètics. Per a fer-ho, va haver de renunciar als conceptes intuïtius d'espai euclidià i temps absolut i admetre conseqüències aparentment exòtiques. En la teoria de la relativitat especial, la velocitat de la llum en el buit ( $c$ ) és insuperable i independent de l'observador, la massa és una forma d'energia (tal és el significat de la famosa equació  $E=mc^2$ ), i les distàncies espacials i temporals depenen de l'observador que les mesura. Tot açò és verificat quotidianament en els acceleradors de partícules, on aquestes assoleixen velocitats comparables amb la de la llum. Per a poder descriure la gravitació, Einstein va formular, el 1915, la seua teoria de la relativitat general, amb un espai-temps encara més complex que el de la relativitat especial, perquè és modelat per l'energia que hi evoluciona. Les distàncies, la curvatura, el paral·lisme, i altres conceptes definits en l'espai es veuen afectats pel seu contingut energètic. En aquesta teoria, el Sol, una galàxia o qualsevol altra estructura determinen la curvatura de l'espai-temps dins i al seu voltant, i aquesta curvatura condiciona el moviment i les propietats de la matèria. Les equacions d'Einstein governen simultàniament l'evolució de la geometria de l'espai-temps i la de l'energia que el modela.

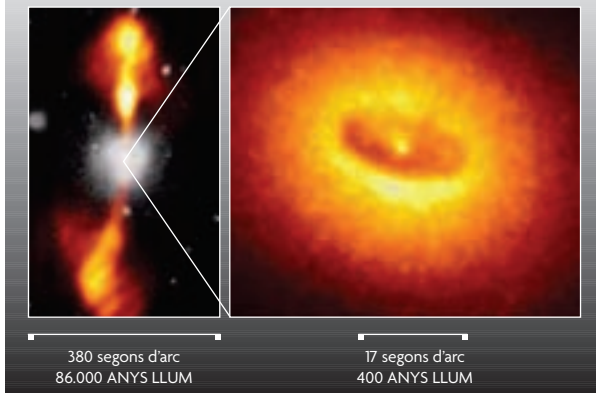


A dalt, la gravetat influeix en la trajectòria dels raigs lluminosos (S. Hawking, *El Universo en una càscara de nuez*, Crítica/Planeta, 2002.) A sota, la lent gravitatori Q2237+030, denominada "la creu d'Einstein" (J. A. Muñoz, NOT, La Palma, 2004). El camp gravitatori d'una galàxia espiral a  $z=0.039$  produeix quatre imatges d'un únic quàsar a  $z=1.69$ .

## Galàxia NGC 4261

(Telescopi espacial Hubble)

Nucli de la galàxia NGC 4261



La galàxia NGC4261 alberga, a la regió central, un forat negre supermassiu (uns quants centenars de milions de masses solars).

Esquerra: composició d'imatges en radi (estructures allargassades, en groc) i òptic (blanc) de NGC4261.

Dreta, detall de la regió central de NGC4261, en què s'ha observat un tor de matèria d'uns quants centenars d'anys llum de diàmetre, girant a velocitats pròximes a les de la llum.

A causa de l'equivalència massa-energia, la llum resulta afectada per l'atracció gravitatòria. Els raigs lluminosos procedents d'una font allunyada són desviats per acumulacions de massa situades entre la font i l'observador, fenomen que pot produir amplificacions de la imatge i imatges múltiples. Aquest fenomen, anàleg al dels miratges, es denomina lent gravitatòria. La primera observació d'aquest efecte es va realitzar el 1919, durant un eclipsi solar: en analitzar el camp d'estels durant l'eclipsi i comparar amb els registres fotogràfics del mateix camp obtinguts abans de l'eclipsi es va observar una distorsió perfectament compatible amb la que predeia la relativitat general. Des de llavors, s'han observat centenars de lents gravitatòries.

Els forats negres són regions de l'espai-temps de les quals res, ni tan sols la llum, pot escapar. Encara que no es poden veure directament, deixen empremtes de la seua presència, un exemple són els dolls extragalàctics: ejeccions de material a velocitats enormes que comprenen distàncies de centenars de milers d'anys-llum. En l'actualitat hi ha catalogats més d'un centenar d'aquests dolls. El telescopi espacial Hubble ha aportat dades que permeten afirmar que les regions centrals de les galàxies amb nuclis actius alberguen forats negres supermassius. La nostra galàxia acull un forat negre amb una massa d'uns pocs milions de masses solars.

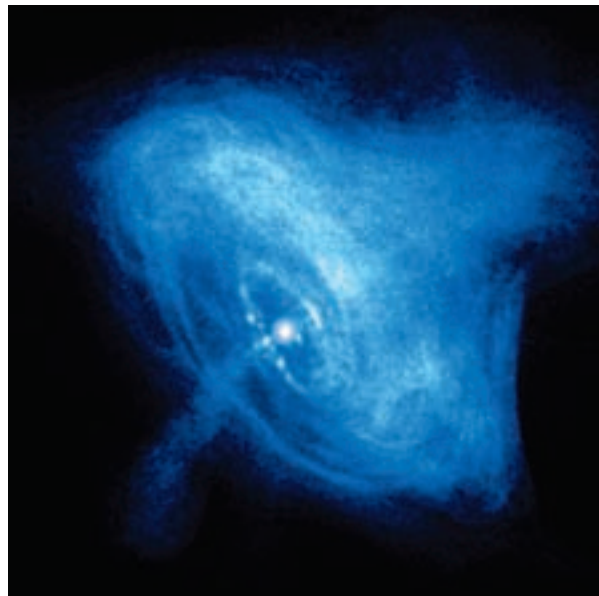
La formació de forats negres d'unes poques masses solars s'explica a partir de la teoria d'evolució estel·lar. A l'interior dels estels es produeixen reaccions nuclears que fabriquen heli a partir d'hidrogen, i successivament carboni, oxigen... fins arribar als isòtops de ferro i níquel en el cas d'estels massius. Després, els estels s'enfonsen en un gegantí cataclisme, on impera la gravetat i no hi ha cap font efectiva de pressió que pugui impedir el col·lapse gravitatori. En un parell de segons, la densitat central creix fins superar el valor de la densitat en els nuclis atòmics (més de cent bilions de vegades la de l'aigua), i la temperatura central s'aproxima al bilió de graus. En una regió d'unes dotzenes de quilòmetres de ràdio, amb una massa equivalent a la del Sol, germina la llavor d'un futur estel de neutrons. Part del material estel·lar, que en aquest procés d'enfonsament troba el centre superdens, rebota contra ell i genera una ona de xoc que acaba expulsant l'embolcall. El material estel·lar dispers en el medi interestel·lar com a resultat de l'explosió serà la llavor de la qual naixeran altres estels, altres sistemes solars i fins i tot la vida. Som pols d'estels: el ferro de l'hemoglobina, el calci dels ossos, etc., van ser sintetitzats a l'interior d'estels massius i llançats al medi interestel·lar en les explosions de supernoves.

El protoestel de neutrons, lliure de les capes externes del seu progenitor, es refreda ràpidament, es contrau i, finalment, es converteix en un estel de neutrons, o en un forat negre si l'estel progenitor és prou massiu. Els estels de neutrons són objectes celestis extraordinàriament compactes: el seu radi és d'uns pocs quilòmetres i la seua massa és una vegada i mitja la solar. En la nebulosa del Cranc hi ha un púlsar, un estel de neutrons en rotació, tan ràpid que, en un segon, ha girat més de trenta vegades al voltant del seu eix.

Els estels binaris són dos estels lligats gravitacionalment, que es mouen al voltant del seu centre de masses. En alguns

casos pot formar-se una binària d'estels de neutrons. L'any 1974 els radioastrònoms Hulse i Taylor van descobrir el púlsar binari PSR1913+16, el seguiment del qual ha permès determinar amb gran precisió les masses dels dos estels i la variació del període orbital. La dita variació només és explicada per la teoria de la relativitat general com a conseqüència de l'emissió de radiació gravitatòria. Les ones gravitatòries són petites ondulacions de l'espai-temps que es propaguen a la velocitat de la llum, transportant ínfimes quantitats d'energia (el gravitó seria la partícula associada a aquestes ones,

«EINSTEIN, SEGUINT  
EL PENSAMENT DE L'ÈPOCA,  
VA INTENTAR CONSTRUIR  
UN MODEL D'UNIVERS ESTÀTIC  
I ETERN»



Nebulosa del Cranc: restes de la supernova de 1054 observada i registrada en diferents civilitzacions de l'hemisferi nord. A l'esquerra: Imatge en l'òptic.

A la nebulosa del Cranc hi ha un estel de neutrons en rotació (més de trenta vegades per segon) que, com s'observa a la imatge —en fals color— en raigs X obtinguda pel satèl·lit Chandra (a dalt), és responsable d'una extraordinària i complexa dinàmica en el seu entorn.

igual com el fotó està associat a les electromagnètiques). PSR1913+16 constitueix la prova observacional més severa que ha superat la teoria de gravitació einsteiniana i la primera observació indirecta de l'emissió d'ones gravitatòries. La variació negativa del període orbital de PSR1913+16 permet predir que ambdós estels acabaran col·lidint.

Les col·lisions de binàries compactes són exemples de fonts astrofísiques de radiació gravitatòria. Amb això entrem en el cor de la relativitat general; és el camp d'allò que es comença a denominar relativitat astrofísica. Es requereixen càlculs numèrics complexos per a descriure aquestes col·lisions en un espai-temps dinàmic i estimar l'energia radiada en forma d'ones gravitatòries. A pesar dels esforços realitzats des de finals dels anys 1960, encara no s'ha aconseguit una detecció directa d'ones gravitatòries. L'observació directa és molt difícil perquè, a causa de la poca quantitat d'energia que transporten, produeixen efectes molt petits sobre els detectors. Aquests estan constituïts per masses les distàncies de les quals pateixen variacions relatives inferiors a  $10^{-21}$  amb freqüències inferiors a 100 Hz. El repte tecnològic consisteix en la capacitat de mesurar aquesta mena de variacions. S'han construït diversos observatoris d'ones gravitatòries. L'ESA (Agència Europea de l'Espai), junt amb la NASA, ha previst per a la pròxima dècada la missió LISA, un conjunt de tres satèl·lits que se situaran als vèrtexs que defineixen un triangle equilàter de cinc mi-

lions de quilòmetres de costat i el baricentre del qual coincideix amb l'eclíptica. Aquesta configuració seguiria la Terra en el seu moviment al voltant del Sol, i s'espera que observe la radiació gravitatòria emesa per diverses fonts astrofísiques. L'astronomia de les ones gravitatòries es convertirà a partir dels pròxims anys en una nova finestra per a l'observació de l'univers.

A l'univers podria existir un fons cosmològic d'ones gravitatòries generat en els primers instants de la seua evolució; aquest fons es degué produir, probablement, al mateix temps que les llavors de les actuals galàxies i agrupacions de galàxies que poblen el nostre univers. Ones i protoestructures es podrien haver format durant un procés d'expansió molt violenta, anomenat inflació, produït per alguna força repulsiva en els primers instants de l'evolució de l'univers. Aquest fons d'ones gravitatòries és molt difícil d'observar directament a causa de la seua baixa intensitat en tot el rang de freqüències que pot detectar la missió LISA. Potser serà més fàcil una detecció indirecta basada en l'observació dels efectes que aquestes ones produeixen sobre l'anomenat fons cosmològic de microones.

El fons de microones és una distribució de fotons que omple el nostre univers i que ha evolucionat, dins seu, des de temps molt remots; per tant, ha estat testimoni de processos tan importants com la formació de les galàxies, cúmuls de galàxies i supercúmuls. Les protogalàxies i protoestructures en general, a través dels seus camps gravitatoris en evolució, van deixar una emprem-



ta en els fons de microones. L'estudi d'aquesta empremta permetria conèixer com va evolucionar l'univers fins arribar al seu estat actual. Per això s'han desenvolupat projectes d'observació des de la Terra i des de l'espai. El que s'observa és la temperatura de fons de microones en moltes direccions. Les propietats estadístiques de la distribució de temperatures resultant constitueixen l'empremta esmentada. La interacció del fons de microones amb el possible fons de gravitons d'origen primordial també afectaria el fons de microones, és a dir, deixaria el seu segell en les propietats estadístiques de la seua distribució de temperatures. Per això, descobrir l'existència d'aquest segell en les temperatures observades seria una detecció indirecta de gravitons cosmològics. L'any 2003, la NASA va publicar l'anàlisi de les dades obtingudes durant el primer any de funcionament del satèl·lit WMAP i, encara que apareixia l'empremta de processos que van ocórrer en el passat, no es va trobar el segell característic del fons de radiació gravitatòria. Això no vol dir que no existesca, sinó que la seua intensitat està per sota de la mínima intensitat que podria haver detectat aquest satèl·lit.

L'any 2007 l'ESA llançarà un nou satèl·lit per observar el fons de microones, i potser els seus detectors, més sensibles que els de WMAP, podran posar de manifest el fons de gravitons.

De les observacions del fons de microones realitzades fins avui es desprèn la següent composició per al nostre univers. Només el 4% de la seua energia està continguda a les galàxies com a matèria ordinària, és a dir, com a matèria essencialment constituïda per protons, neutrons i electrons formant nuclis i àtoms. El 23% seria el que s'anomena matèria fosca. L'observació directa d'aquest component és molt difícil perquè pràcticament no radia fotons i interacciona molt feblement amb la matèria ordinària. Les partícules constituents de la matèria fosca produirien un important camp gravitatori que permetria detectar-les indirectament. El 73% restant correspondria a l'anomenada energia fosca, que seria l'energia de l'estat de buit ( quàntic) d'algun camp desconegut fins avui.

En qualsevol instant, l'espai tridimensional dels observadors cosmològics podria ser obert (volum infinit i curvatura negativa), tancat (volum finit i curvatura positiva) o pla (volum infinit i curvatura nul·la). Les observacions de fons de microones indiquen que la densitat d'energia total de l'univers és molt pròxima a l'anomenada densitat crítica, unes  $10^{-29}$  vegades la de l'aigua, que correspon al cas pla; podem afirmar que l'observa-

ció del fons de microones ens ha conduït a una conclusió de tipus geomètric que ens permet triar entre els tres tipus de geometria que pot tenir el nostre univers.

L'univers és el sistema més extens i de més llarga durada que existeix; a més, des que Hubble va observar, en la dècada de 1920, que totes les galàxies llunyanes se separen de la nostra, sabem que està en expansió, per la qual cosa en el futur serà menys dens i en el passat ho va ser més. Com que en temps remots era molt dens, el camp gravitatori era molt intens. D'altra banda, l'expansió va ser molt ràpida en el passat, ja que l'atracció de la gravetat l'ha estat frenant durant molt de temps abans d'arribar a la situació actual. Com que l'expansió era tan ràpida a l'univers primitiu, es parla d'una Gran Explosió (Big-bang) d'origen desconegut com la seua hipotètica causa. Finalment, si retrocedim en el temps, l'univers es va fent cada vegada més dens, de manera que en algun moment va haver de superar l'anomenada densitat de Planck (unes  $10^{93}$  vegades la de l'aigua), per la qual cosa la teoria de la relativitat general deixaria de ser vàlida. Si aplicàrem la teoria d'Einstein indefinida-

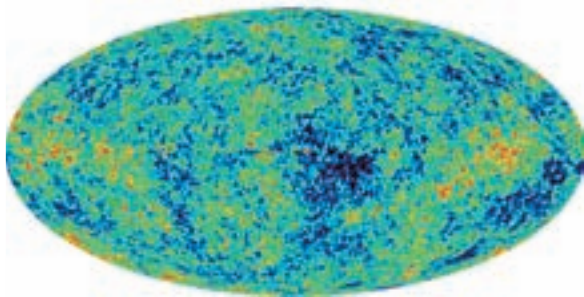
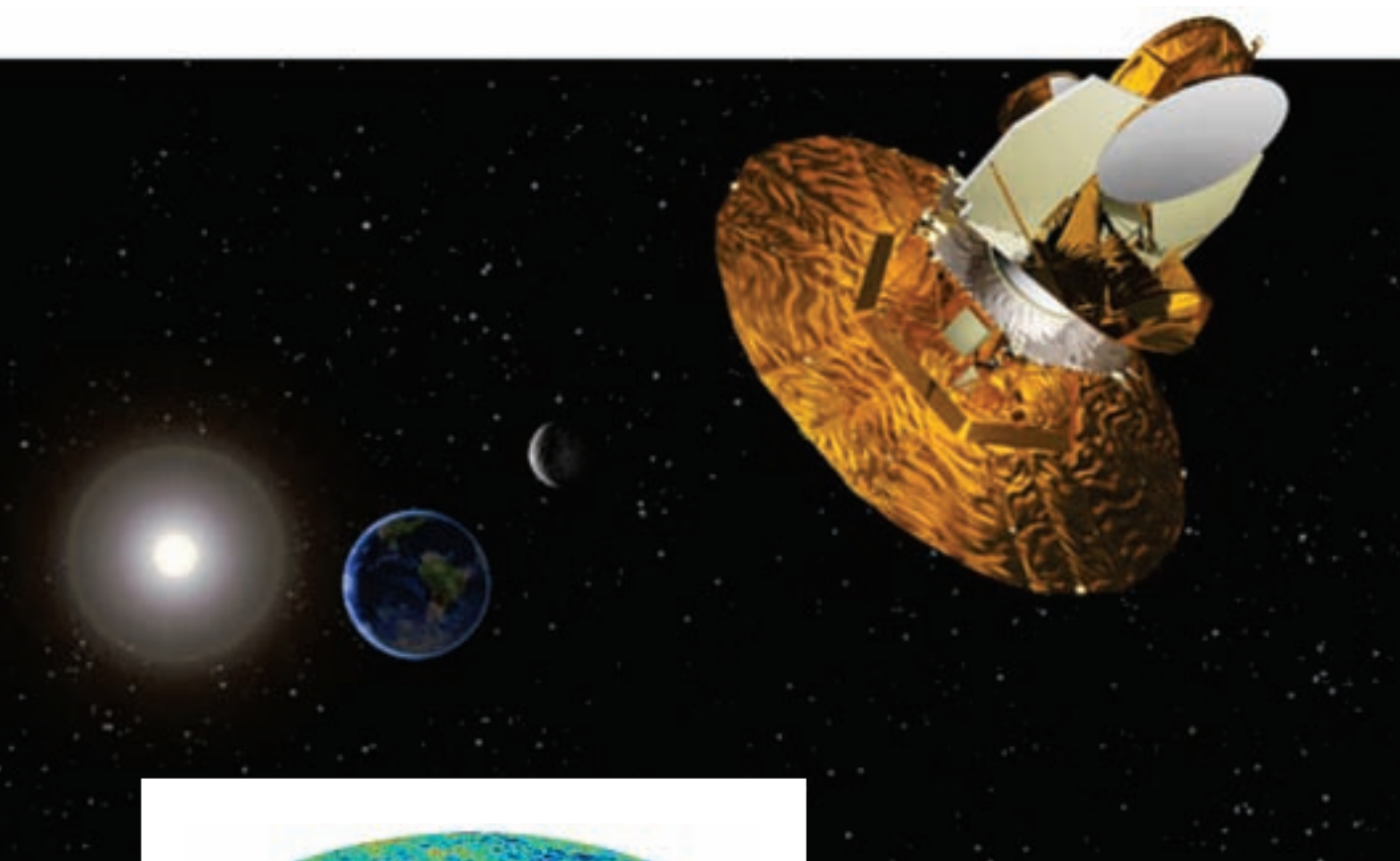
ment cap al passat, resultaria que, en un temps finit, la densitat es faria infinita, la temperatura també, i arribaríem a un estat físicament inacceptable que es denomina la singularitat inicial. Segurament no s'arribaria a aquest absurd si s'aplicara la relativitat general fins a aconseguir la densitat

de Planck i després, en temps més remots, s'aplicara una adequada teoria quàntica de gravitació, encara inexistente.

Einstein va intentar estudiar l'univers amb la seua teoria de la relativitat general, abans que les observacions de Hubble demostraren que s'expandeix; per això, i seguint el pensament de l'època, va intentar construir un model d'univers estàtic i etern. En aquest model, hi hauria un fons estàtic en què les masses es mourien per causes locals, de manera que dues regions prou grans i llunyanes estarien en repòs relatiu, encara que hi haja moviments locals dins seu. Al contrari, en un univers en expansió s'estarien separant, mentre que en un en contracció acabarien xocant. Prompte es va adonar Einstein que en el marc de la seua teoria de gravitació no hi ha universos estàtics, perquè la força de gravetat és sempre atractiva i produiria la contracció d'un univers inicialment en repòs. Com que la contracció condueix a un col·lapse i l'expansió era impensable en aquell moment, Einstein va forçar un model cosmològic estàtic modificant les seues equacions. Per a fer-ho va introduir un

**«EL GENI D'EINSTEIN HA  
PROPORCIONAT A LA HUMANITAT  
NOVES FINESTRES PER  
A L'OBSERVACIÓ DE L'UNIVERS»**





A dalt, satèl·lit WMAP en vol.  
A sota, mapa de temperatura del fons de microones obtingut per WMAP.

nou terme, de manera que apareguera una força repulsiva que, a grans distàncies cosmològiques contrarestarà la de gravetat. El nou terme contenia una constant, anomenada constant cosmològica, el valor de la qual calia ajustar per a aconseguir les forces repulsives necessàries. Després de les observacions de Hubble sobre l'expansió, i ja que la relativitat general permet models en expansió sense necessitar cap constant cosmològica, Einstein va renegar de la seua pròpia creació, i va afirmar que la introducció de la citada constant havia estat el pitjor error de la seua vida. No obstant això, observacions recents suggereixen l'existència d'aquesta constant. Potser Einstein es va equivocar quan va pensar que s'havia equivocat.

D'acord amb la teoria quàntica de camps, el terme que cal introduir en les equacions d'Einstein, per incloure la presència d'un camp en el seu estat de mínima energia, és exactament igual que el que va introduir

Einstein per aconseguir un univers estàtic, i inclou una constant que és proporcional al valor d'aquesta energia mínima; per tant, si tal camp existira en la naturalesa, la constant cosmològica hauria de ser introduïda per necessitat. Desgraciadament, l'energia del buit dels camps coneguts fins a la data és massa gran i produiria forces repulsives excessives incompatibles amb l'univers observable; hi ha per tant un problema amb la constant cosmològica que encara no ha estat resolt. A pesar de tot, recents observacions de supernoves llunyanes, que són menys brillants del que serien en absència d'aquesta constant, i de les propietats estadístiques del fons de microones suggereixen la seua existència. La mateixa constant és també compatible amb les propietats de la distribució espacial de galàxies dels catàlegs més recents. Totes aquestes observacions serien molt difícils d'explicar sense constant cosmològica en el marc de la teoria de la Gran Explosió.

El geni d'Einstein ha proporcionat a la humanitat noves finestres per a l'observació de l'univers, ha estès els límits de la teoria de gravitació newtoniana tant a les escales espacials immensament grans de la cosmologia moderna, com a les extraordinàriament petites que fixen el domini de la gravetat quàntica; i a més ha conduït a l'estranya conclusió, basada en els models cosmològics, que només un 4% del nostre univers és matèria directament observable. ☺

José M<sup>a</sup>. Ibáñez i Diego Sáez. Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València.