

Einstein, precursor de la cosmologia

José M. M. Senovilla*

Introducció

La llista de revolucions científiques provocades per Albert Einstein, el més famós dels poquíssims científics coneguts (merescudament, tot s'ha de dir!), és tan llarga que segurament resulta inversemblant. Moltes d'aquestes veritables revolucions van tenir lloc abans o durant l'any 1905, motiu pel qual ara en celebrem el centenari: els fonaments de les teories cinètica i estadística, explicació del moviment brownià de partícules suspeses en un líquid, l'efecte fotoelèctric i la teoria *quàntica* de la radiació, la teoria de la relativitat especial. Hi ha altres revolucions einsteinianes que van tenir lloc molt després, les més conegudes de les quals són, naturalment, la teoria de la relativitat general i el començament de l'estadística quàntica.

Però aquí parlarem, encara d'una altra revolució fonamental engegada per Einstein, amb conseqüències tan rellevants, trasbalsadores i de tant abast com les altres: el naixement de la cosmologia com una disciplina científica.

El que segueix només conté fets ben coneguts, tanmateix tenyits d'un punt de vista personal: defensaré que aquest pas endavant dut a terme per Einstein està prenyat d'idees desmitificadores, pèrdua de prejudicis, audàcia, cerca de la simetria, raons estètiques, afany per la comprensibilitat, un principi d'humilitat, resolució de problemes antics i predicció de nous efectes. En fi, l'Einstein genuí en estat pur.

La gravetat i l'Univers abans del 1917

La història de la filosofia i de la ciència està plena de visions del cosmos, intuïcions sobre la seva organització o dimensions, en fi, de *cosmogonies* antigues o marcs teòrics que, o bé es basaven en raons de fe o creences, o bé no tenien altre objectiu que servir d'ambient per als fenòmens físics. Entre les cosmogonies antigues podem citar les de l'escola naturalista de Milet, com ara les de Tales, Anaximandre o Anaxímenes, la de l'escola d'Elea (Parmènides), la del pitagorisme (Filolao), o el sistema heliocèntric del gran Aristarc (vegeu la figura 1) —les dues darreres s'anticipen molts segles a les idees de Copèrnic. Pel que fa als marcs teòrics, el més obvi apareix

*José M. M. Senovilla (Àvila, 1960) és doctor en Física per la Universidad de Salamanca (1986) i actualment és catedràtic de Física Teòrica a l'Euskal Herriko Unibertsitatea (josemm.senovilla@ehu.es).

amb l'espai i el temps absoluts i infinits de Newton. En qualsevol cas, l'Univers com a tal no era *objecte* d'estudi científic.

Cal recordar, però, una de les idees més lúcides i anticipades respecte de l'organització del cosmos, deguda al grandíssim filòsof Immanuel Kant, que el 1755 va publicar el tractat *Teoria dels cels* on es presentava la idea que, si el Sol formava part d'un sistema aïllat d'estels en forma de disc, llavors les nebuloses el·líptiques que es podien veure al cel segurament eren organitzacions estel·lars del mateix tipus. Kant anomenà aquestes nebuloses *universos illa* i va fer així una sorprenent predicció que es va confirmar... 170 anys més tard!

A cavall dels segles XIX i XX van sorgir els primers resultats i crítiques científiques importants que obrien la porta al desenvolupament posterior de la cosmologia. Per començar, el 1893 Ernst Mach va fer un estudi del concepte d'inèrcia —definida *respecte de l'espai absolut* — en la teoria newtoniana i en va assenyalar les possibles qualitats, però, sobretot, els defectes. Mach va discutir de manera raonada que la inèrcia hauria de ser, de fet, una propietat d'un cos *respecte de la distribució de matèria de la resta de l'Univers* . Aquesta idea va influir decisivament en Einstein i les seves concepcions al voltant del cosmos.

D'importància similar per a la història que ens ocupa fou l'anomenada *paradoxa de Seeliger* . Avui dia és clar que la gravetat és la força més rellevant per a l'estudi de l'Univers. I encara més al segle XIX! Recalquem que llavors només es coneixien dues interaccions de la natura, l'electromagnètica i la gravitatòria. Per tant, calia fer servir una teoria de la gravitació en qualsevol estudi que involucrés el cosmos com un tot. La teoria vigent aleshores era la de la gravitació universal de Newton, basada en la famosa fórmula de la força d'atracció entre dues masses M i m

$$\vec{F} = \frac{GMm}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}, \quad (1)$$

on G és la constant de la gravitació universal i \vec{r} el radi vector que uneix les dues masses (suposant que són puntuals). Richard Bentley, contemporari de Newton, havia posat de manifest que un Univers finit és inestable d'acord amb aquesta llei. I la mateixa conclusió es dedueix si, encara que l'espai fos infinit, tota la massa estigués

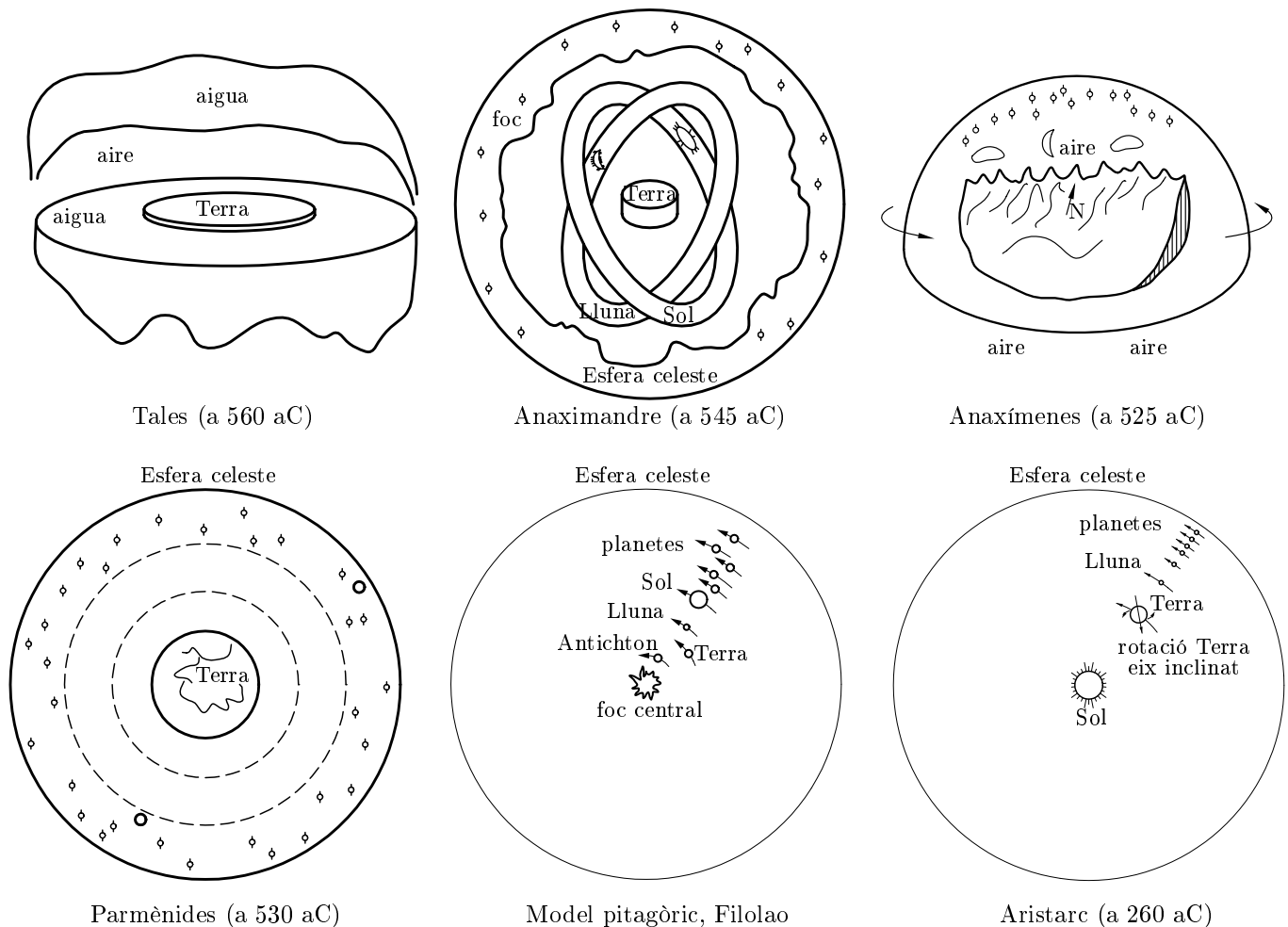


Figura 1: **Cosmogonies antigues.** Les tres primeres representen la manera de pensar de l'escola de Milet i són degudes a Tales, Anaximandre i Anaxímenes, respectivament. Com es veu, la Terra era plana o irregular, però no rodona, com és el cas en el model de Parmènides. El model pitagòric de Filolao és encara més interessant, perquè la Terra no està al centre ni és immòbil, sinó que fa voltes entorn d'un foc central, igual que fan el Sol, la Lluna i els cinc planetes coneguts aleshores. Per tal que el nombre de cossos resultant incloent-hi l'esfera celeste fos «perfecte», com calia per als pitagòrics, s'havia de posar un sisè planeta, denominat Antichton, que significa anti-Terra, i que tenia la missió de salvaguardar la Terra de la calor i la llum del foc central, a part de servir per arribar al número deu. Finalment, el model d'Aristarc de Samos és heliocèntric, amb la Terra, la Lluna i els planetes girant entorn d'un Sol en repòs, amb l'esfera celeste també immòbil. A més, la Terra gira entorn de si mateixa i l'eix de gir està inclinat respecte del pla de gir entorn del Sol. S'ha de fer notar que tant aquest model com el de Filolao van tenir molt poc crèdit perquè semblava impossible aleshores una Terra en moviment sense que, per exemple, nosaltres no sortíssim gitats o els núvols no fossin arrossegats pel vent corresponent

concentrada en una regió finita, ja que tota la massa es col·lapsaria per atracció gravitatòria. Per això Newton mateix va suggerir que la distribució de la matèria del cosmos havia d'estar pertot arreu, ser infinita i, probablement, estable d'acord amb la seva llei, de manera que la força neta resultant de tot l'Univers sobre la Terra es podia considerar com si fos només la del Sol. Aquesta conjectura resultà falsa, com va demostrar rigorosament Hugo von Seeliger el 1894: si la llei (1) valgués, el camp gravitatori seria infinit a tot arreu. Això va portar Seeliger a modificar la llei (1) de la manera següent:

$$\vec{F} = \frac{GMm}{r^2} e^{-kr} \frac{\vec{r}}{r}, \quad (2)$$

per a una constant positiva k . Amb aquesta nova llei es pot explicar el comportament del sistema planetari, però a grans distàncies la gravetat esdevé molt més feble i és possible que distribucions materials a gran escala siguin estables, fins i tot per als casos de distribucions no homogènies.

Desafortunadament la modificació (2) de la llei de la gravitació no estava exempta de problemes, com gairebé totes les modificacions *ad hoc* amb paràmetres ajustables de qualsevol teoria física. S'ha de ressaltar que la paradoxa de Seeliger no comportava una cerca de la forma o les propietats de l'Univers, no era un intent de construir una teoria cosmològica; més aviat era una crí-

tica a la teoria newtoniana atès que s'acceptava, i era de fet un axioma dins de la mateixa teoria, que l'espai era infinit.

Calia, doncs, una nova teoria de la gravitació per tal que la cosmologia pogués néixer i adquirir l'estatus de ciència. Això és el que crearia Einstein, no amb la intenció de resoldre l'esmentat problema, sinó sobretot per meres raons estètiques, de simetria i de completesa. A més a més, és clar, es podrien resoldre la paradoxa de Seeliger o els problemes plantejats per Mach, entre d'altres.

Breu introducció a la relativitat general

Com és ben conegut, i més ara el 2005, l'any 1905 Einstein va dur a terme una de les seves revolucions mitjançant la teoria de la relativitat especial, amb la qual unificà l'espai i el temps, aixecà un pont d'enllaç entre l'electrodinàmica i la mecànica, donà caràcter absolut al valor de la velocitat de la llum al buit i elevà el principi de relativitat entre sistemes de referència inercials a la categoria d'axioma indiscutible. Les conseqüències d'aquest avenç foren, són i seran transcendents per a tota la física.

Però, què passava amb la gravitació? I on quedaven els sistemes de referència no inercials? Eren «ciutadans» de segona categoria? La resposta completa a aquestes qüestions bàsiques no va atènyer la categoria de teoria físicomatemàtica fins al novembre del 1915. Però la intuïció fonamental, el resultat sobre el qual tot l'edifici es construiria després, la idea bàsica darrere la teoria de la relativitat general, aquesta la va tenir Einstein de seguida, el 1907. És l'anomenat *principi d'equivalència*, que, d'una manera directa i senzilla, explica la igualtat de les masses pesant i inercial (un fet que Newton ja coneixia), fa que els sistemes no inercials siguin tan respectables com qualsevol altre, i inclou, de passada, la gravitació dins una teoria relativista. En paraules del mateix Einstein: «glücklichste Gedanke meines Lebens» («la idea més lúcida de tota ma vida») —i això, tractant-se d'Einstein, és dir molt!

El principi d'equivalència es pot expressar com: qualsevol sistema de referència no inercial és *localment* equivalent a un sistema inercial amb un cert camp de gravitació. I viceversa, tot camp gravitatori pot fer-se desaparèixer *localment* triant un sistema de referència adient —per exemple, posant-se en caiguda lliure a la Terra. En altres paraules, les famoses forces «fictícies», centrífugues o de Coriolis poden considerar-se simplement un tipus especial de camp gravitatori. I això és així perquè la seva propietat fonamental —que tots els cossos adquireixen la mateixa acceleració independentment de la seva massa (al buit)—, és una propietat òbvia d'aquells camps. Observem que aquesta conclusió estava implícita en l'esmentada igualtat de les masses pesant i inercial, però durant anys ningú no va saber extreure

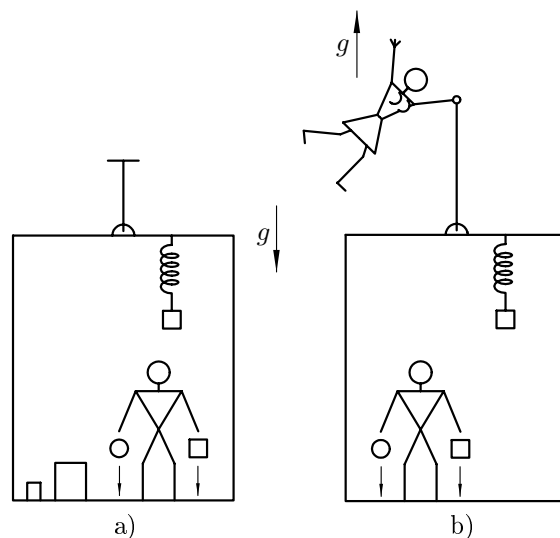


Figura 2: L'ascensor d'Einstein. Si l'ascensor es troba immers en un camp de gravitació uniforme amb grandària g (a), l'ascensorista pot penjar diferents masses de la molla i mesurar-ne la tensió així com deixar-les anar lliurement. Com que totes les masses adquireixen la mateixa acceleració l'ascensorista descobreix l'existència i la magnitud del camp gravitatori. Si no hi ha cap camp de gravitació, però la superheroïna arrossega l'ascensor estirant el cable amb acceleració constant g (b), llavors els mateixos experiments, per les mateixes raons, porten l'ascensorista a proclamar que viu en un camp de gravitació amb magnitud g

tota la informació ni les conseqüències que se'n deriven.

Un *Gedanken Experiment* einsteinià típic per comprendre el principi d'equivalència consisteix a imaginar-se un ascensor amb una persona experimentada en la física (figura 2). Li demanem que faci els experiments que vulgui per tal de decidir si l'ascensor es troba en un camp gravitatori o no. Si imaginem l'ascensor aturat en un camp gravitatori, uniforme per exemple, l'ascensorista segurament penjarà una massa del sostre i mesurarà la força en la molla de suspensió, com a la figura 2a. Posant-hi diferents masses i fent servir la propietat fonamental del camp gravitatori determinarà que, efectivament, hi ha un camp de gravitació i també en podrà quantificar la magnitud. Correcte! Si, d'altra banda, l'ascensor es troba al mig del no-res, lluny de totes les altres masses, però demanem a la nostra superheroïna favorita que agafi el cable de l'ascensor i comenci a estirar-lo amb acceleració constant, aleshores la persona podrà fer un experiment similar (vegeu la figura 2b), penjant el ressort i les masses, i evidentment les conclusions a què arribarà seran idèntiques, per les mateixes raons que abans. En conseqüència, conclou que està en un camp de gravitació. Equivocadament? Einstein va ser el primer a dir que *no!* Simplement, totes dues situacions són equivalents, intercanviables. No hi ha cap experiment *local* que pugui fer l'ascensorista que distin-

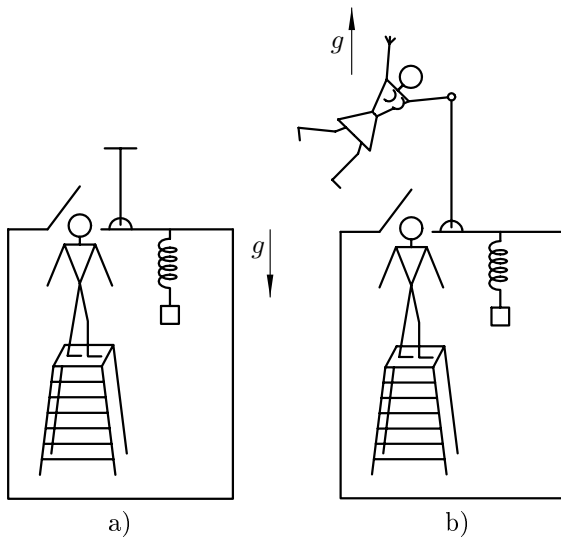


Figura 3: L'ascensor d'Einstein. Si l'ascensorista mira per una trapa veurà el cable tens, i pensarà que això manté l'ascensor en repòs en tots dos casos de la figura 2. Fins i tot si mira al llarg del cable i veu en un cas el suport del cable i en l'altre la superheroïna, pensarà que o bé aquell o bé aquesta aguanten l'ascensor per tal que no caigui a causa del camp de gravitació

geixi la primera situació de la segona. Cap. Fins i tot si hi ha una trapa al sostre de manera que l'ascensorista pugui mirar fora (figura 3), el que veurà en la primera situació serà el cable tibant que aguanta l'ascensor, exactament igual que en la segona situació! Es podria pensar que mirant «cap amunt» en el darrer cas veuria la superheroïna i desfaria l'«engany». Fals. Simplement estaria molt agraït, ja que la seva superheroïna favorita aguanta l'ascensor dins el camp gravitatori regnant i impedeix que caigui. O no?

El principi d'equivalència permet la *geometrització* de la gravetat: atès que tots els cossos es mouen igual independentment de la seva massa, podem imaginar que de fet segueixen trajectòries determinades per «la forma» de l'espai, que només van pels camins que requereixen menys esforç, pels «més curts», d'un espai que no és pla. És anàleg al que passa, per posar-ne un exemple, quan es vol anar òptimament d'un punt a un altre de la superfície terrestre: s'han de seguir les geodèsiques, per exemple meridians o el paral·lel de l'equador. S'ha d'observar que aquesta geometrització no es pot fer amb l'electromagnetisme, perquè el moviment de les partícules carregades certament depèn de la relació entre càrrega i massa. Diferents càrregues segueixen, per tant, diferents camins.

Per què s'ha ressaltat la paraula *local* als paràgrafs precedents? Observem que si volem anar del pol sud al pol nord de l'esfera terrestre amb el mínim desgast, podem agafar qualsevol dels meridians. Aleshores, dues persones que viatgen per dos meridians diferents segueixen, totes dues, geodèsiques, que a més són paral·leles

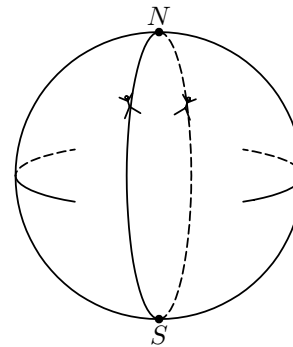


Figura 4: Desviació geodèsica: curvatura. El camí més curt per anar del pol sud al pol nord és un meridià. Dues persones que viatgen per dos meridians segueixen totes dues camins òptims, que són paral·lels, però la distància mútua canvia al llarg del recorregut. Aquesta acceleració relativa mesura la curvatura de la superfície terrestre

entre si, però la seva distància mútua varia. És molt petita però creix quan comencen el viatge, i decreix després de creuar l'equador fins que tornen a trobar-se al pol nord (figura 4). Aquesta *acceleració relativa* entre cossos que es mouen *lliurement* és una conseqüència de la manca de planor de la superfície de l'esfera, o sigui, de la seva *curvatura*. Doncs bé, conjugant de manera audaç i fins aleshores inaudita les noves teories matemàtiques del genial Riemann sobre la curvatura amb la seva teoria de la relativitat especial, i mitjançant el principi d'equivalència, Einstein va arribar a la meravellosa i alhora fructífera conclusió que la curvatura de l'espai-temps és el camp gravitatori mateix. En altres mots, no hi ha força de gravetat, simplement les grans masses deformen la geometria de l'espai-temps de manera que les partícules segueixen trajectòries *geodèsiques*, o sigui, les que comportin el mínim esforç en l'espai-temps *corbat* resultant, i en general ni són rectes ni tenen velocitat constant. D'ací la insistència en la *localitat* del principi d'equivalència, perquè si s'agafen per exemple dues masses en l'ascensor d'Einstein i es pengen del sostre, en el cas del camp gravitatori terrestre sentiran una acceleració relativa que es tradueix en una convergència de les molles, mentre que en el cas de la superheroïna aquest efecte no hi és (figura 5). Resumint, experimentant amb una sola massa no es pot distingir un sistema no inercial d'un cert camp gravitatori, però si s'utilitzen dues o més masses, de manera que es poden mesurar efectes no locals, l'existència d'un camp gravitatori autèntic sempre es pot inferir mesurant-ne les acceleracions relatives —que són la manifestació de la curvatura de l'espai-temps.

Del principi d'equivalència i la geometrització de la gravitació es pot deduir, directament, alguns dels resultats més sorprenents, com ara el canvi de freqüència dels fotons en pujar o baixar per la vertical (i en general l'efecte Doppler gravitatori), el desviament de la llum en passar rasant al Sol i, en general, la influència del camp gravitatori sobre la llum i les seves trajectòries. Tot això

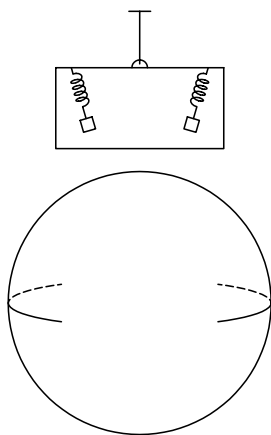


Figura 5: **Camps gravitatoris.** Els camps gravitatoris de debò sempre es poden distingir fent mesures no locals de l'acceleració relativa de dues masses, és a dir, de la curvatura de l'espai-temps. Les marees en són un exemple quotidià

ho va trobar Einstein els anys 1907-12.

Resta, no obstant això, la pregunta més difícil. La fórmula (1) perdrà validesa (tret de com a cas límit), ja que no hi ha força gravitatòria, només geometria. Però, com substituir-la? Com quantificar la curvatura de l'espai-temps, la deformació produïda per una distribució de masses? Einstein no va saber resoldre aquest problema durant anys, i de fet va proposar diverses equacions per a la seva nova teoria. No va ser fins al 25 de novembre del 1915 que finalment va presentar a Berlín les avui famoses *equacions d'Einstein*, que relacionen d'una banda les propietats mètriques de l'espai i el temps i alhora la seva deformació en termes de curvatura, i, d'altra banda, la quantitat i distribució material que creen la deformació. Les equacions d'Einstein són matemàticament molt complicades (un sistema de deu equacions diferencials en derivades parcials no lineals i acoblades de segon ordre). Esquemàticament, però, es poden escriure com:

$$\mathbf{S} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}, \quad (3)$$

on \mathbf{S} és un tensor relacionat amb la curvatura, \mathbf{T} mesura la distribució material i energètica que crea el camp gravitatori, i c és una constant universal amb el valor de la velocitat de la llum en un sistema inercial al buit.

1917: el naixement de la cosmologia teòrica

L'any 1916 es publicà la teoria de la relativitat general. El pas fonamental s'havia aconseguit, sens dubte, perquè la teoria relaciona l'existència de matèria amb la geometria —amb la forma— de l'espai-temps i, recíprocament, aquest determina les trajectòries i el moviment d'aquella. Aquesta eina en mans del geni era una bomba de rellotgeria, l'eclosió d'una ciència del cosmos era imminent. Només calia esperar, i un catalitzador: en aquest cas va ser Wilhem de Sitter, astrònom holandès

que es va trobar amb Einstein en una visita d'aquest a Holanda el 1916. De Sitter i Einstein van parlar de la nova teoria i de la possibilitat que la inèrcia tingués un origen totalment material (una idea machiana, com ja s'ha dit), la qual cosa semblava que requeria un *Univers finit* —recordem la paradoxa de Seeliger.

Aquestes converses van influir Einstein decisivament, de manera que el 1917 va publicar l'article fundacional de la cosmologia teòrica: «Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitäts Theorie».¹ En aquesta contribució fonamental es presentava un model d'Univers conegut avui dia com l'Univers estàtic d'Einstein.

En aquella època, la majoria pensava que l'Univers era *estàtic* i consistia en la Via Làctia i potser era buit més enllà. Aquesta creença és fàcil d'acceptar si pensem que, malgrat la premonitòria idea kantiana dels universos illa, les galàxies com a tal encara no s'havien descobert. La suposició d'estaticisme també és comprensible, atès que els moviments estel·lars *visibles* són clarament periòdics i deguts a la rotació de la Terra sobre si mateixa i al voltant del Sol: ningú havia pensat en moviments radials, d'allunyament de la nostra posició, ni era lògic (ni fàcil) buscar-ne. En qualsevol cas, Einstein va voler *modelitzar l'Univers sencrer* i era una bona aproximació suposar que tots els estels tenien velocitats negligibles respecte d'un sistema de referència adequat, de manera que la distribució material es podia considerar, a part d'estàtica, *espacialment homogènia i isotròpica*. Per què? Les raons eren parcialment observacionals, però no sembla gaire arriscat dir que van intervenir en la ment del geni, un cop més, les idees de senzillesa i simplicitat, democràcia i eradicació de privilegis. En resum, un nou principi d'humilitat: no ocupem cap lloc especial a l'Univers. Com tantes altres vegades, aquest pas de modestia desencadenà un salt endavant significatiu.

Però el coratge d'Einstein va haver d'anar més enllà en aquest cas. Es va veure forçat a corregir-se a si mateix. Més difícil encara, en la meta que més li havia costat aconseguir: les equacions del camp gravitatori (3). Després d'anys darrere aquestes equacions, i quan ja tot semblava rodó, va decidir desdir-se. Cap problema, el fi justifica el camí. Resultà que les equacions de camp (3) no admetien *cap* solució que fos alhora estàtica, i espacialment homogènia i isotròpica. Llavors, hem d'abandonar la idea d'isotropia i homogeneïtat? No, va dir Einstein. I la idea d'estaticisme? Tampoc, va pensar el geni. «Simplement», canviem les equacions! I així va ser com es va introduir el terme cosmològic, de manera que senzillament va modificar les equacions (3), que tants anys d'esforços li van ocasionar, per adaptar-les a una solució cosmològica estàtica i uniforme. Les equacions modificades són del tipus

$$\mathbf{S} + \Lambda \mathbf{g} = \frac{8\pi G}{c^4} \mathbf{T}, \quad (4)$$

¹ *S. B. Preuss. Akad. Wiss.*, 142 (1917).

on el sumand nou Λg es diu *terme cosmològic* i la nova constant Λ és la *constant cosmològica*.

L'atreuiment d'Einstein va ser encertat en aquest cas extrem? No se sap. Encara avui dia hi ha una discussió apassionada respecte a això, i no és clar si el terme cosmològic ha de ser present o no, equivalentment, si la Λ s'anulla o no. Però una qüestió sorgeix immediatament: si Einstein hagués pres l'altre camí hauria predit teòricament l'expansió de l'Univers! Farem una breu discussió d'aquesta sorprenent possibilitat a la secció final de conclusions.

El cas és que, amb el nou terme cosmològic, l'atracció gravitatòria en el límit de baixes velocitats, o sigui el límit newtonià, es pot descriure aproximadament per la modificació següent de la fórmula (1)

$$\vec{F} = \left(\frac{GMm}{r^2} - \frac{\Lambda}{3} mc^2 r \right) \frac{\vec{r}}{r}, \quad (5)$$

on podem constatar que per a distàncies curtes es recupera la llei de Newton, però per a distàncies llargues domina el segon terme, que és repulsiu (si Λ és positiva).

A l'article esmentat es va presentar una solució exacta de les noves equacions (4) amb les hipòtesis considerades. Aquesta solució representa un espai temps *espacialment finit però sense límits*. De fet, matemàticament l'espai és una simple esfera tridimensional, la generalització elemental d'una esfera bidimensional clàssica, o sigui, de la pell d'un globus, al cas de tres dimensions. Igual que la superfície terrestre és finita però sense límits (s'hi pot caminar indefinidament), l'esfera tridimensional té un volum finit però no té límits. Més encara, tots els seus punts són equivalents. Que se sàpiga, aquest és el primer cas a la història en què *es canvia la topologia de l'espai*: una altra modificació dràstica i sense precedents que constituï un gegantí pas endavant.

Per arrodonir la seva tasca, Einstein quantificà la relació entre la quantitat de matèria i la forma de l'Univers donant la fórmula exacta:

$$\Lambda = \frac{1}{R^2} = \frac{4\pi G}{c^2} \rho, \quad (6)$$

on R és el radi de curvatura de la 3-esfera —de manera que el seu volum és $2\pi^2 R^3$ — i ρ és la densitat de massa del cosmos, que és constant en aquest model. L'expressió (6) implicava que per a universos petits la densitat havia de ser gran i, viceversa, si la 3-esfera era molt gran la densitat de massa seria molt petita. Tot això està representat gràficament en la figura 6. Finalment, es va plantejar la qüestió de si la inèrcia de partícules de prova pot ser una manifestació de la influència de tot l'Univers, i va arribar al resultat que la inèrcia està influïda, però no determinada completament, per la matèria universal. Les conclusions en aquest cas són avui dia dubtoses i de fet Einstein va anar perdent a poc a poc interès en les idees machianes fins que les va rebutjar totalment el 1954 (Pais, 1984).

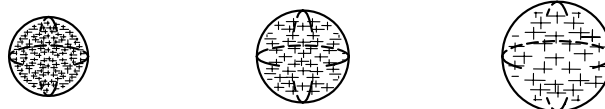


Figura 6: **L'Univers estàtic d'Einstein.** *Suprimint una dimensió espacial, el model d'univers estàtic d'Einstein es pot imaginar com la pell d'un globus on la matèria està repartida uniformement. Òbviament, no hi ha cap centre o lloc privilegiat. El radi de curvatura del globus té una relació directa amb la densitat total de matèria d'acord amb la fórmula (6), de manera que, com més gran sigui el globus, més enrarit està el gas estel·lar com es mostra a la figura*

Resumint el que s'ha escrit en cursiva en aquesta secció, podem fer un recull de les idees genials, germidores i atrevides que Einstein va presentar de manera natural al seu article, i formar una engrescadora llista irremediablement captivadora:

1. L'Univers com a objecte de la física. Per tant, naixement de la cosmologia com a ciència teòrica.
2. Homogeneïtat i isotropia espacial. Aquesta idea es coneix avui com a *principi cosmològic*, ara ja té una base experimental apreciable i és la base dels models cosmològics estàndard.
3. Estudi de la «forma» de l'Univers i primer canvi de topologia de l'espai de la història. Això és un fet comú en la ciència actual.
4. Proposició d'un espai finit i il·limitat. Aquesta proposta encara podria ser certa si l'Univers resulta finalment que és tancat.
5. Relació precisa entre les propietats geomètriques de l'Univers i la distribució de la matèria. Naturalment, aquesta és una conseqüència directa de la relativitat general, per tant continua (i continuarà) vigent encara que no exactament en la forma (6).
6. Correcció de les seves pròpies equacions i introducció del terme cosmològic. Avui dia hi ha moltes raons per considerar que la constant cosmològica no és zero, però la controvèrsia prossegueix.
7. Cerca d'una explicació científica de la inèrcia.

La contribució de Wilhem de Sitter

Ja s'ha dit que De Sitter va influir decisivament en l'inici de la ciència cosmològica mitjançant les seves converses amb Einstein. Això no obstant, de fet va contribuir de manera personal i directa al naixement de la teoria i al desenvolupament de les idees cosmològiques amb dos articles fonamentals publicats el mateix any 1917.²

²Proc. K. Ak. Amsterdam, 19, 1217 (1917); ib. 20 229 (1917).

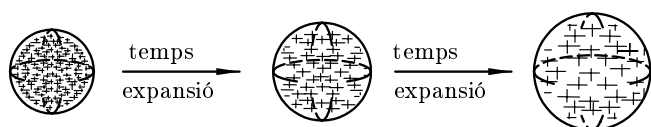


Figura 7: **El model tancat de Friedman.** Com a la figura 6, només considerem dues dimensions espacials. L'Univers està representat per la pell d'un globus que s'expandeix, de manera que la densitat de matèria decreix amb el temps i, alhora les distàncies entre els objectes còsmics augmenta. Compareu-ho amb el model estàtic d'Einstein de la figura 6

Aquests articles van canviar radicalment l'incipient començament de la cosmologia, ja que es va presentar una solució de les equacions «modificades» (4) representant un model completament *buit*, és a dir, de manera que el terme de la dreta de (4) s'anullava, la qual cosa vol dir que no hi ha cap mena de matèria.³ Una propietat inesperada de la solució és que hi havia un allunyament sistemàtic dels objectes distants a causa d'un desplaçament cap al vermell que es pot calcular explícitament. Fins i tot De Sitter va buscar resultats experimentals per tal de comparar-los amb les seves prediccions teòriques. Desafortunadament, aleshores hi havia poquíssimes mesures referents a això ja que els primers resultats de Slipher (vegeu l'apartat següent) van ser publicats entre els anys 1915 i 1917. S'ha de fer notar que aquesta és l'explicació vàlida actualment del desplaçament cap al vermell, i que De Sitter ho va saber intuir sàbiament.

La solució de De Sitter demostrava d'altra banda que les partícules de prova podien tenir inèrcia en universos buits, o sigui, inèrcia *respecte de l'espai*, i no deguda a la influència de cap mena de matèria, que és inexistent en el model. Això va fer trontollar l'esquema d'Einstein sobre el cosmos, la inèrcia, el principi de Mach i les equacions (4). Segurament en aquest moment va començar a penedir-se d'haver canviat les equacions originals (3).

La síntesi definitiva que va fer encaixar totes les peces del puzzle arribà el 1922 amb el matemàtic rus Aleksandr Aleksandrovich Friedman (també es fa servir Friedmann), que publicà un article de rellevància històrica —traduït i reproduït a Friedman (1999)— en què presentava solucions de les equacions d'Einstein (3) i (4) per a distribucions espacialment homogènies i isotròpiques de matèria. A més aquestes solucions satisfien una relació precisa entre les propietats geomètriques, físiques i *d'evolució temporal* que s'anomenen ara *lleis de Friedman*. En fi, Friedman va recollir totes les idees genials d'Einstein però en va descartar l'estaticisme —els matemàtics tenen a vegades aquests avantatges, ja que no tenen «prejudicis físics». Els models de Friedman esta-

³La solució de De Sitter és molt important en aplicacions i estudis actuals, ja que té una etapa inflacionària i un horitzó, conceptes que eren desconeguts o malentesos el 1917, però que va contribuir a aclarir i explicar.

ven en *expansió o contracció*, eren dinàmics, de manera que el desplaçament cap al vermell era una propietat immediata. Una visió gràfica intuïtiva del model tancat de Friedman es presenta en la figura 7, que s'ha de contrastar amb el model estàtic d'Einstein de la figura 6.

Després d'una reacció inicialment negativa,⁴ Einstein es va convèncer —gràcies a una carta de Friedman on li mostrava la correcció dels seus càlculs— que els models de Friedman eren correctes i va proclamar que aquests resultats eren *aclaridors*. No havent-hi, però, proves, ni tan sols indicis, que l'Univers estigués en evolució dinàmica, la predicció teòrica de l'expansió universal va quedar desafortunadament frustrada un altre cop.

Les observacions: la ciència de la cosmologia

Van ser les observacions les que van haver de destruir, definitivament, el prejudici de l'estaticisme de l'Univers. El final (feliç) d'aquesta història arribà quan els desenvolupaments teòrics que s'han relatat van complementar-se amb l'experiència, que sempre té la darrera paraula en la ciència.

L'estructura de l'Univers, i la distribució i distància dels objectes còsmics, eren en aquella època qüestions d'una gran controvèrsia. El moment àlgid arribà el 26 d'abril de 1920 amb el famós «gran debat de l'astronomia», que va tenir com a principals protagonistes Heber Doust Curtis i Harlow Shapley. El títol del debat va ser «The Scale of the Universe», i s'hi van discutir molts temes, però el que ens interessa ací —probablement la part més coneguda— són els diferents punts de vista que s'hi van defensar respecte de l'existència de nebuloses espirals *extragalàctiques*, els universos illa de Kant. Pel que ens diuen els historiadors (Hoskin, 1976), Curtis hi estava a favor, mentre que Shapley defensava el contrari. S'ha de dir, per fer justícia, que moltes de les altres declaracions de Curtis van resultar errades, i que de fet va ser Shapley el responsable de la tasca «copernicana» de posar el Sol (i la Terra) en la rodalia de la Via Làctia (en contra del que Curtis pensava) i qui va donar una estimació més acurada de les seves dimensions.

Curtis i Shapley defensaven les seves posicions basant-se en dades observacionals, si bé no acabaven de posar-se d'acord respecte de la idoneïtat de les estrelles cefeïdes variables com a indicadors de distàncies. Curiosament, Curtis tendia a pensar que no es podien fer servir, però de fet van ser les cefeïdes les que li van donar la raó respecte de les nebuloses extragalàctiques. La resolució del debat va arribar amb les aportacions transcendents del gran Edwin Powell Hubble, el pare

⁴Einstein va publicar gairebé instantàniament una rèplica en què criticava els resultats de Friedman. No podia creure que l'Univers no fos estacionari i va concloure que els models de Friedman no eren correctes, o sigui, que no eren solucions de les equacions (3-4). En aquest cas estava molt equivocat. Ara es pot dir que s'havia obstinat en l'estaticisme de l'Univers.

de la cosmologia observacional. Fent servir el telescopi Hooker al Mount Wilson entre els anys 1923-24, Hubble va descobrir cefeïdes als braços espirals de M31 (Andròmeda), i va provar que la distància a M31 era molt més gran que les més optimistes estimacions de la Via Làctia, per tant havia d'estar *fora* d'aquesta. D'això se seguia que M31 era de fet una *altra* galàxia com la mateixa Via Làctia. La distància a Andròmeda que Hubble va estimar fou de 800.000 anys llum (l'acceptada avui és d'aproximadament 2,1-2,4 milions d'anys llum), la qual cosa engrandia els confins de l'Univers conegut de manera radical i gairebé violenta.

Hubble sovint és reconegut per haver descobert el desplaçament sistemàtic cap al vermell de les nebuloses (ara galàxies), però això és inexacte i injust. El destinatari hauria de ser Vesto Melvin Slipher, que va mesurar durant els anys 1913-25 els espectres de moltes nebuloses i va descobrir una clara preferència pel desplaçament cap al vermell: 11 nebuloses de 15 al seu article del 1915,⁵ i una raó de 21 a 4 (vermell versus blau) en la seva presentació del 1917.⁶ En aquest article l'autor va defensar que, atès que nosaltres presentàvem aquest moviment respecte de les nebuloses, però no respecte dels estels, les observacions afavorien la idea que les nebuloses espirals eren sistemes estel·lars a grans distàncies. Tot això, anys abans que Hubble descobrís les cefeïdes a Andròmeda. Potser Slipher hauria de rebre també part del crèdit de la constatació que moltes nebuloses espirals són galàxies!

En qualsevol cas, Hubble sí que va ser el descobridor de la relació existent entre el desplaçament cap al vermell i la distància de les nebuloses/galàxies. Aquesta relació és aproximadament *lineal* (lleï de Hubble), de manera que com més llunyana sigui una galàxia, més gran serà la seva recessió. Aquesta és la base experimental de l'expansió de l'Univers, un dels fets més inesperats i extraordinaris mai descoberts per la ciència.

La combinació dels resultats experimentals de Hubble amb els models de Friedman van portar George Lemaitre⁷ a millorar els models de Friedman i fer estimacions de la dimensió de l'Univers i de la seva expansió, fent servir diferents possibilitats per a la topologia espacial (els famosos tres casos actuals d'universos tancats, oberts o espacialment plans). Aquest article va influir en Einstein, el qual finalment va rebutjar definitivament el terme cosmològic. Al seu article⁸ posa de manifest que els resultats observacionals i la lleï de Hubble es podien explicar de manera natural en la teoria de la relativitat general, com ho va fer Lemaitre.

En resum, s'havia aconseguit un marc teòric *falsable*, que predeïa fenòmens després observats i estava en con-

cordança amb altres observacions prèvies: la cosmologia quedava dotada de caràcter científic.

Conclusions a posteriori

La principal conclusió d'aquesta narració és que avui no hi hauria una ciència de l'Univers tal com la tenim si Einstein no hagués desenvolupat la teoria de la relativitat general i no l'hagués aplicada a *tot* l'Univers tal com ho va fer al seu article «Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitäts Theorie». Tot i que les observacions de Slipher i Hubble van ser absolutament fonamentals per al naixement de la cosmologia, era absolutament imprescindible tenir una teoria que lligués la forma geomètrica de l'Univers amb la seva evolució temporal i el seu contingut material. Es pot ben dir, per tant, que la cosmologia com a ciència va ser una altra revolució científica de la seva responsabilitat.

És instructiu també constatar que el genial Einstein era, en alguns casos, conservador. El cas paradigmàtic és la introducció del terme cosmològic, que pot semblar una audàcia però que era, en realitat, una exigència del seu prejudici d'estacionarietat de l'Univers. Si no l'hagués tingut, o si per casualitat hagués conegut els resultats de Slipher, o si hagués cregut en les seves equacions originals (3) de manera ferma, llavors és gairebé segur que l'expansió de l'Univers hauria estat una altra predicció teòrica seva. Si la predicció del desviament dels raigs de llum al voltant del Sol li van donar fama i reconeixent, gairebé veneració, mundial, què hauria passat amb la predicció *teòrica*, basada només en la seva nova teoria —innecessària des del punt de vista experimental el 1917— de l'expansió de l'Univers?

Probablement aquestes preguntes neguitejaven el mateix Einstein, perquè molts anys després Gamow informà que el geni d'origen jueu es va queixar amargament dient que «la introducció del terme cosmològic ha estat la meua errada més gran». Ni tan sols això és clar, però a més personalment penso que és irrellevant, que una mirada objectiva indica clarament quines van ser les virtuts inigualables del seu article de 1917, originari de la nova ciència, veritablement engrescador, farcit de raonaments genials, brillantíssimes idees i d'una intuïció física incomparable.

El llegat és en aquest cas ni més ni menys que la cosmologia com a ciència.

Bibliografia

- FRIEDMAN, A., On the curvature of Space, *Gen. Rel. Grav.*, **31**, 1991-2000 (1999).
HOSKIN, M., The 'Great Debate': What Really Happened, *J. Hist. Astron.*, **7**, 169-182 (1976).
LEMAÎTRE, G., The Expanding Universe, *Gen. Rel. Grav.*, **29**, 641-680 (1997).
PAIS, A., *El Señor es sutil... La ciencia y la vida de Albert Einstein*, Ariel (Barcelona, 1984).

⁵ *Popular Astronomy*, **23**, 21 (1915).

⁶ *Proc. Amer. Phil. Soc.*, **56**, 403 (1917).

⁷ *Ann. Soc. Sci. Brux. A*, **47**, 49 (1927); traduït i reproduït a Lemaitre (1997).

⁸ *S. B. Preuss Akad. Wiss.* 235 (1931).