

Introducció

Antoni ROCA ROSELL
Secció de Ciències i Tecnologia
Institut d'Estudis Catalans

Per commemorar el centenari del curs que Einstein va impartir a Barcelona durant la seva estada del 22 de febrer a l'1 de març de 1923, l'Institut d'Estudis Catalans (IEC) i altres institucions organitzaren diversos actes entre el 2023 i el 2024. A l'Institut, una activitat pública de relleu fou una exposició al claustre de la Casa de Convalescència. L'exposició estigué oberta, en un primer període, des del 3 de març fins al 26 d'abril de 2023. En un segon període, des del 16 d'octubre de 2023 fins a l'11 de gener de 2024, s'organitzaren visites guiades a càrrec de l'associació eXplorium. Vàrem comptar 47 grups escolars, amb un total de 1.271 estudiants, fonamentalment, de batxillerat; també hi hagué 21 visites amb públic general, amb un total de 94 persones. L'organització de l'exposició guià almenys cinc visites més, amb aproximadament cinquanta persones. A més, cal dir que el personal de l'IEC ha vist passar un seguit de visitants lliures que no han deixat de fluir durant tot el període. L'exposició tindrà una versió en línia en el web de l'IEC.

Al mateix temps, convocàrem a l'IEC experts en diferents camps per reflexionar sobre la figura d'Einstein i l'actualitat de les seves contribucions. Aquestes reflexions tingueren lloc el 3 de març de 2023 i el 16 de gener de 2024, i se'n pot seguir el desenvolupament al canal de vídeos de l'IEC.¹

Einstein ha assolit una posició singular en la ciència del nostre temps, tant per les seves contribucions com per la figura cívica que ha projectat. És clar que les contribucions d'Einstein s'han anat matisant, complementant, superant, en els debats en què participà (per exemple, sobre la nova mecànica quàntica), i, com és natural, en els anys posteriors a la seva mort el 1955. D'altra banda, Einstein s'implicà en la lluita per la igualtat i per la pau al món, cosa que els seus col·laboradors

1. <https://www.youtube.com/@comunicacioiec/videos>.

més propers difongueren i, en certa manera, exageraren (sobretot, quan s'insinuava que Einstein no era deutor del seu temps). De tota manera, la disponibilitat del seu arxiu personal i el procés d'edició dels seus *Collected Papers* ens donen l'oportunitat de contrastar la seva figura amb documents, cosa que ha donat lloc a un gran nombre d'estudis crítics arreu del món.

En aquest volum, incloem uns treballs que foren presentats a les jornades organitzades per l'IEC en els quals els autors ens ofereixen una aproximació més acurada a les seves anàlisis.

La curvatura de l'espai

Carme JORDI
Secció de Ciències i Tecnologia
Institut d'Estudis Catalans

1. INTRODUCCIÓ

Amb motiu de la inauguració de l'exposició «100 anys d'Einstein a Catalunya», de l'Institut d'Estudis Catalans, es va organitzar la jornada *Einstein i l'actualitat de les seves contribucions*. En aquest marc, la ponència «La curvatura de l'espai» aborda una de les prediccions de la teoria general de la relativitat: que la distribució de massa a l'espai modela la seva geometria, la seva curvatura. Com a conseqüència d'això, la trajectòria de la llum segueix les deformacions de l'espai provocades per les masses properes al camí des que la llum surt de l'emissor fins que arriba a l'observador.

La mesura de les posicions d'estrelles situades darrere i al voltant del Sol durant l'eclipsi solar total de 1919 va permetre fer la primera comprovació observacional de la predicció d'Einstein pel que fa a la curvatura de les trajectòries de la llum. Evidentment, això va consolidar l'acceptació de la teoria general de la relativitat per part de la comunitat científica. Després de 1919, hem obtingut moltes més proves observacionals de la curvatura de l'espai utilitzant diferents tècniques i diferents longituds d'ona. La curvatura provoca fenòmens com ara les lents gravitatòries, que, combinades amb la precisió de les mesures a la Terra o a l'espai mitjançant els instruments més actuals, permeten observar galàxies molt llunyanes o inferir la presència d'exoplanetes al voltant d'altres estrelles, per posar-ne uns quants exemples.

Aquest article se centra en la part observacional de la curvatura de l'espai, com s'ha comprovat i quines són les mesures més actuals.

2. ELS PRIMERS PASSOS

La llei de la gravitació universal publicada per Isaac Newton el 1687, en els seus *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, descriu la força que s'exerceixen dos cossos mútuament per la massa que contenen i la distància que els separa. En contraposició, la teoria general de la relativitat d'Albert Einstein, publicada el 1915, planteja la gravetat integrada en l'espai i el temps mateix, de manera que les masses escampades en l'espai i el temps en modelen la geometria, no tan sols des d'un punt de vista global sinó també local. Si ens imaginem un espai de dues dimensions, com ara una làmina elàstica, per exemple (vegeu la figura 1), les diferents masses situades en la làmina provoquen deformacions (curvatures) més grans com més massa té el cos en qüestió. Aquesta deformació força que tota partícula que viatja en l'espai i el temps (i, també, la llum) es vegi obligada a seguir la forma modelada per les masses presents. Les trajectòries no són, doncs, rectilínies, sinó corbades. Les trajectòries són geodèsiques (de mínima longitud) en aquest espai i el temps deformat. La posició aparent d'una estrella (o qualsevol altre objecte celeste) vista per un observador no és la posició real si la llum troba deformacions durant la seva trajectòria. D'aquest efecte se'n diu «deflexió de la llum». Tot i que la teoria general de la relativitat es va publicar el 1915, Einstein ja va anunciar la curvatura de l'espai i el temps el 1913.

El 1911, Einstein va suggerir que l'existència d'aquesta deflexió es podia comprovar durant un eclipsi total de Sol i va esperonar la comunitat científica a comprovar-ho. En aquell moment, basant-se en el principi d'equivalència de la teoria de la relativitat especial, va predir una desviació de la llum de 0,83 segons d'arc si la llum passa arran del limbe del Sol. Va ser el 1915, amb la teoria general

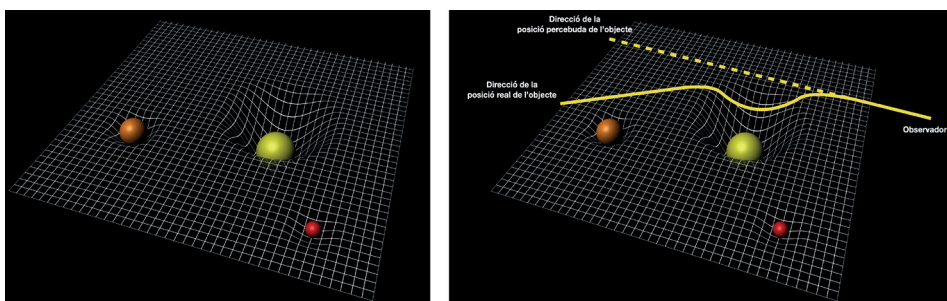


FIGURA 1. A l'esquerra, les masses presents a l'espai el deformen, talment com si fossin boletes pesades que provoquen deformacions en una làmina elàstica. A la dreta, la llum que es propaga per l'espai (la làmina) es veu obligada a seguir les deformacions i les trajectòries es corben (deflexió de la llum).

FONT: A l'esquerra, ESA - C. CARREAU, «Spacetime curvature» (en línia), <https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2015/09/Spacetime_curvature>. A la dreta, adaptació de l'autora a partir de la imatge de l'esquerra.

de la relativitat, que va adonar-se que el valor havia de ser el doble, 1,75 segons d'arc, segons la fórmula:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b},$$

en què α és l'angle de desviació, G la constant universal de la gravitació, M la massa del cos que deforma l'espai, b el paràmetre d'impacte o distància de la trajectòria de la llum al centre de la massa M , i c la velocitat de la llum en el buit. En el cas de llum rasant respecte del limbe, el paràmetre d'impacte b és el radi del Sol.

De fet, Einstein no va ser el primer de suggerir l'existència de la deflexió de la llum. El mateix Isaac Newton, en els seus tractats d'òptica, ja proposava que la llum sofreix una deflexió quan passa prop d'un cos massiu si es considera la llum com una partícula. Henry Cavendish, el 1784, i Johann Georg von Soldner, el 1801, van calcular un valor de 0,83 segons d'arc per a aquesta deflexió, però sense relacionar-ho amb la curvatura de l'espai. El primer valor calculat per Einstein coincidia, doncs, amb les prediccions anteriors de Cavendish i Von Soldner.

La Royal Astronomical Society britànica va organitzar dues expedicions a Sobral, al Brasil, i a l'illa de Príncipe, al golf de Guinea, per observar l'eclipsi total de Sol del 29 de maig de 1919, liderades per Arthur S. Eddington i Frank W. Dyson. Es tracta del primer eclipsi total que es produïa després de la publicació de les prediccions d'Einstein i després de la fi de la Primera Guerra Mundial. L'eclipsi va durar quasi set minuts i el Sol estava situat a la constel·lació de Taure, prop del cúmul de les Híades, amb prou estrelles brillants al voltant per pensar que l'experiment podia ser favorable.

Eddington i Dyson van presentar les mesures de les distàncies relatives entre les estrelles en presència del Sol (en el moment de l'eclipsi) i sense el Sol (en un altre moment de l'any sense eclipsi) a la Royal Astronomical Society el novembre de 1919, i les van publicar el 1920 (Dyson, Eddington i Davidson, 1920). Els resultats són: 1) hi ha un canvi en les distàncies relatives entre estrelles en funció de si el Sol és a la trajectòria de la llum o no hi és, i, per tant, la deflexió de la llum existeix, i 2) el valor que es dedueix de les observacions concorda amb el que prediu la teoria general de la relativitat. Tot i que alguns científics dubtaven de les mesures (per alguns núvols que hi havia a l'illa de Príncipe i pel desenfocament en un dels telescopis de Sobral) i tot i la possible presència d'errors sistemàtics en l'anàlisi de les fotografies, la comunitat científica va acceptar majoritàriament aquest resultat com a prova de la validesa de les prediccions d'Einstein. La premsa se'n va fer prou ressò amb titulars com ara «Einstein theory triumphs» («La teoria d'Einstein triomfa») (*The New York Times*, 10 novembre 1919).

Després de l'eclipsi de 1919, es va repetir l'experiment en eclipsis posteriors (cal destacar els de 1922, 1953 i 1973), en què el nombre d'estrelles era més elevat.

Els resultats obtinguts coincidien totalment amb els primers d'Eddington. No hi ha esclatxes per a dubtes, doncs!

3. MÉS EVIDÈNCIES OBSERVACIONALS

La deflexió de la llum depèn de la massa del cos present en la trajectòria i de la distància entre la trajectòria de la llum i aquest cos, tal com es descriu a la fórmula de més amunt. Com menys massa, menys curvatura de l'espai. Com més lluny del cos, menys curvatura de l'espai. Si en el cas del Sol estem parlant d'una desviació d'1,75 segons d'arc quan la llum passa rasant respecte del limbe, en el cas de Júpiter ($M_J = 1/1047 M_\odot$; $R_J = 0,10045 R_\odot$) estem parlant de 16 mil·lèsimes de segon d'arc, un factor aproximadament 110 vegades menor. En el cas de Saturn, la deflexió és de només 6 mil·lèsimes de segon d'arc pel que fa a la llum rasant.

Mesurar angles tan petits des de la Terra només és possible amb tècniques d'interferometria, i especialment amb radiofreqüències. Utilitzant la xarxa VLBI (de l'anglès *very long base interferometer*), que combina mesures fetes amb antenes de ràdio situades en diferents continents, Treuhaft i Lowe (1991) van mesurar la posició de la radiofont P0201+113 durant 4 hores el 21 de març de 1988, quan Júpiter era a una distància d'aproximadament $10 R_J$ (200 segons d'arc) en la projecció al cel. Van repetir les observacions el 2 d'abril de 1988, quan Júpiter ja era lluny de la radiofont. Si la llum rasant respecte del limbe de Júpiter es desvia 16 mil·lèsimes de segon d'arc, a una distància deu vegades superior, la desviació predita és només de 0,3 mil·lèsimes de segon d'arc. Els instruments emprats van permetre obtenir mesures amb una precisió de 0,16 mil·lèsimes de segon d'arc i rebutjar amb un 99,999 % de probabilitat la no coincidència amb la predicció de la teoria general de la relativitat. Aquesta va ser la primera mesura de la curvatura de l'espai amb radiofreqüències i, alhora, va ser una altra constatació de la validesa d'aquesta teoria.

Utilitzant també la xarxa VLBI, Lebach *et al.* (1995) van mesurar, l'octubre de 1987, les posicions de les radiofonts extragalàctiques 3C273B i 3C279 durant deu dies al voltant de l'ocultació de 3C279 pel Sol i van fer servir com a referència 3C273B, situada a una distància angular de 10 graus. El valor deduït per a la deflexió va ser de $0,9998 \pm 0,0008$ vegades el valor predit per la teoria general de la relativitat. Una altra corroboració, doncs.

4. LENTS GRAVITATÒRIES

En relació amb aquesta deflexió de la llum, el 1912 Einstein va plantejar les primeres idees sobre l'existència de múltiples imatges d'un mateix objecte real amb

llum que arriba a l'observador havent seguit trajectòries diferents perquè en el camí s'interposa un cos massiu (vegeu la figura 2). Aquest cos actua corbant l'espai i, per tant, les trajectòries de la llum. En lents òptiques convergents la trajectòria de la llum es corba de manera semblant per efecte de la refracció de la llum en la lent. Per aquesta similitud, l'efecte de la curvatura de la trajectòria de la llum per la presència d'un cos massiu s'ha anomenat *lent gravitatòria*.

En presentar les seves idees, Einstein comentava que és molt improbable que des de la Terra es puguin tenir estrelles prou alineades per observar l'efecte de lent i, per això, era molt reticent a publicar les seves prediccions. No ho va fer fins al 1936 (Einstein, 1936) i, en la publicació, hi deixa ben clar que ho fa a petició del seu company Rudi W. Mandl. En la publicació també diu:

Of course, there is no hope of observing this phenomenon directly. First, we shall scarcely ever approach closely enough to such a central line. Second, the angle β will defy the resolving power of our instruments.

Einstein no confia gens en la detecció d'aquest efecte, però prediu que, si hi ha aquesta alineació, s'ha d'observar un augment de la brillantor aparent de l'objecte en qüestió. Tornarem a això més endavant.

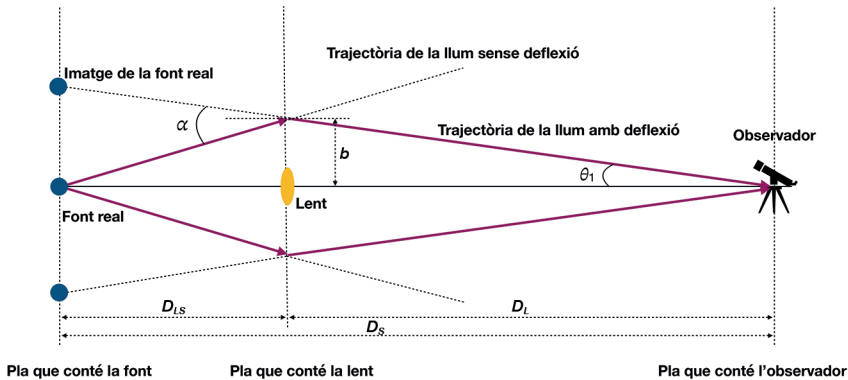


FIGURA 2. Efecte de lent gravitatòria en cas d'una alineació perfecta entre l'objecte real, l'objecte que actua com a lent i l'observador. A l'observador li arriba llum provinent d'una font real, però que segueix camins diferents per la presència d'un cos que actua com a lent gravitatòria. L'observador veu més d'una imatge de la font real, veu més d'un objecte, tot i que només n'existeix un. Si l'alineació entre la font real, la lent i l'observador no és perfecta, la longitud dels camins recorreguts per la llum per crear les diferents imatges pot ser diferent.

FONT: Elaboració pròpia.

Però les coses canvien al cap d'unes quantes dècades amb el descobriment dels quàsars, al final de la dècada de 1950. Es tracta de galàxies amb nuclis actius molt lluminosos, tan lluminosos que dominen la llum de tota la galàxia i atorguen una aparença quasi puntual (quàsar = quasi estrella). Ràpidament, es va fer ressuscitar la idea de les lents gravitatòries. En ser tan lluminosos, són els objectes més llunyans que podem observar, i la probabilitat que la seva llum passi a prop d'una galàxia abans d'arribar a la Terra no és tan negligible com Einstein pensava pel que fa a l'alineació fortuïta de dues estrelles vistes des de la Terra. A més, ara no es tracta d'una estrella que actua com a lent, sinó que l'efecte de lent el fa una galàxia molt més massiva que una estrella, i les imatges creades estan més separades entre elles i són més fàcils de resoldre de manera angular. Això obria noves perspectives.

La figura 2 mostra el cas d'alineació perfecta entre l'objecte, la lent i l'observador. D_L , D_{LS} i D_S són les distàncies entre l'observador i la lent, entre la lent i la font real, i entre l'observador i la font real, respectivament. La variable b és el factor d'impacte, la distància entre el raig de llum i el centre de masses de la lent. La variable α és la deflexió de la llum predita per la teoria general de la relativitat i expressada per la fórmula de més amunt. Si considerem la font real i la lent com a objectes puntuals, la separació angular entre la posició real de la font i les seves imatges, θ_1 , ve donada per

$$\theta_1 = \left(\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_S D_L} \right)^{1/2}.$$

Cal dir que, depenent de la forma, la massa, les distàncies i l'alineació de la font llunyana i la lent, podem obtenir imatges dobles, triples o quàdruples, anells o arcs (vegeu la figura 3).

La primera confirmació arriba el 1979 amb l'observació del quàsar bessó SBS 0957+561, situat a $9 \cdot 10^9$ anys llum de distància (Walsh, Carswell i Weymann, 1979). Es tracta de la doble imatge d'aquest quàsar creada per la galàxia YGKOW G1, situada més a prop, a $4 \cdot 10^9$ anys llum de distància, que actua com a lent gravitatòria (vegeu la figura 3). A continuació se'n van anar identificant més casos. El 1985 es va descobrir la primera imatge quàdruple (creu d'Einstein) d'un quàsar llunyà, el QSO 2237+030, situat a $8 \cdot 10^9$ anys llum de distància, creada per la galàxia ZW 2237+030, situada a 400 milions d'anys llum (Huchra *et al.*, 1985). La mida angular de la creu d'Einstein és només d'1,6 segons d'arc $\times$ 1,6 segons d'arc (vegeu la figura 3).

Buscar imatges múltiples, arcs o anells és com buscar una agulla en un paller. On els hem de buscar? Lògicament, les alineacions són més probables en zones amb molta densitat de galàxies, com és el cas dels cúmuls i els supercúmuls de galàxies (vegeu la figura 3, a baix a la dreta).

Per posar-ne un exemple, des del primer descobriment el 1985, s'han anat afegint a la llista una cinquantena de creus d'Einstein més. Recentment, n'hi hem

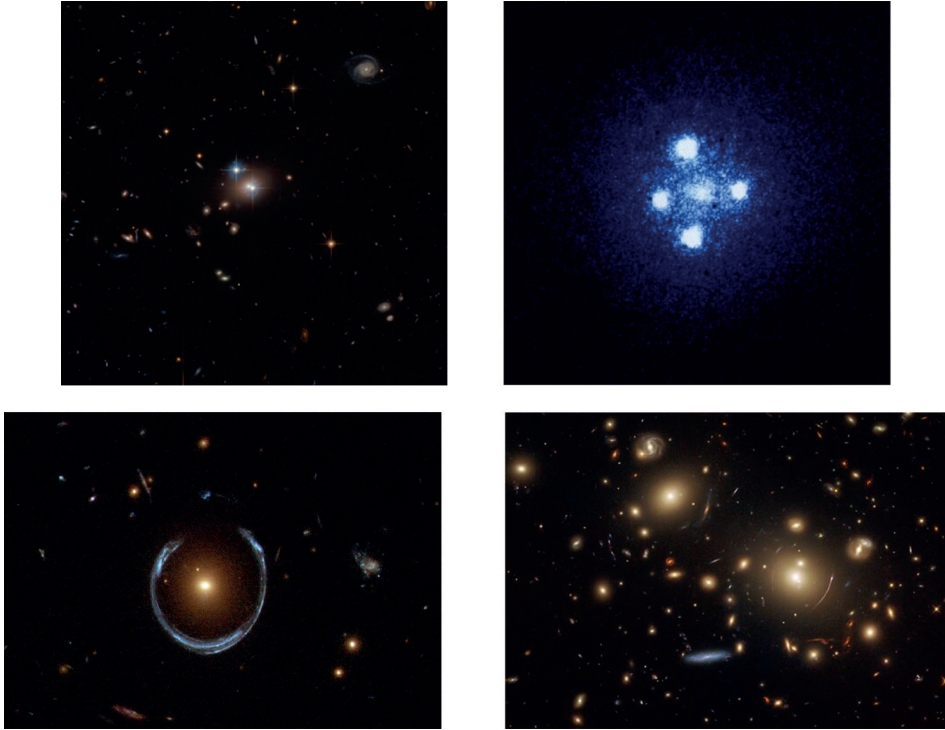


FIGURA 3. A dalt a l'esquerra, el quàsar bessó QSO SBS 0957+561. A la part central de la imatge es pot veure la galàxia YGKOW G1, que actua com a lent gravitatòria. La separació entre les imatges és de 6 segons d'arc. A dalt a la dreta, la creu d'Einstein del quàsar Q2237+030 o QSO 2237+0305, creada per la galàxia central ZW 2237+030. Les dimensions de la creu són d'1,6 segons d'arc $\times$ 1,6 segons d'arc. A baix a l'esquerra, l'anell d'Einstein creat per la galàxia vermella LRG 3-757 d'una galàxia blava més allunyada amb una alineació quasi perfecta. A baix a la dreta, el sistema de lents SDSS J0928+2031, en què el cúmul de galàxies més proper crea imatges distorsionades de les galàxies que són darrere del cúmul.

FONT: A dalt a l'esquerra, ESA/HUBBLE i NASA, «QSO B0957+0561», a *Wikimedia Commons* (en línia), <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:QSO_B0957%2B0561.jpg>, sota llicència Creative Commons Reconeixement 4.0 Internacional, <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>. A dalt a la dreta, NASA, ESA i STScI, «Einstein cross», a *Wikimedia Commons* (en línia), <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Einstein_cross.jpg>, de domini públic. A baix a l'esquerra, adaptació de Bullwersator, a partir d'ESA/HUBBLE i NASA, «A horseshoe Einstein Ring from Hubble», a *Wikimedia Commons* (en línia), <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A_Horseshoe_Einstein_Ring_from_Hubble.JPG>, de domini públic. A baix a la dreta, ESA/HUBBLE i NASA, M. GLADDERS *et al.*, reconeixement: Judy Schmidt, «Peering into the past SDSS J0928+2031», a *Wikimedia Commons* (en línia), <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Peering_into_the_past_SDSS_J0928%2B2031.jpg>, sota llicència Creative Commons Reconeixement 4.0 Internacional, <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>.

afegit dotze de cop, un augment d'un 20 % (Stern *et al.*, 2021). Per comprovar que les quatre imatges de la creu corresponen realment a imatges múltiples, els autors van realitzar observacions espectroscòpiques des de la Terra per assegurar que procedien del mateix objecte. L'increment tan ràpid del nombre de casos coneguts es deu a la missió espacial *Gaia*¹ de l'Agència Espacial Europea (*Gaia* Collaboration, Prusti *et al.*, 2016), i és perquè *Gaia* observa tot el cel sencer amb una resolució angular sense precedents. És, doncs, una màquina de descobriments i s'espera que en les properes publicacions de dades s'aportin centenars de casos més.

El descobriment de les lents gravitatòries ha permès constatar la validesa de la teoria general de la relativitat i, alhora, ha obert noves maneres d'estudiar l'Univers. Posem-ne un exemple. Tal com hem dit, la curvatura de l'espai depèn de la massa de la lent. Doncs bé, la mesura de la separació entre imatges del cos llunyà ofereix una manera de deduir la massa de la lent, que es compon no tan sols de matèria bariònica (estrelles, planetes, medi interestel·lar, etc.), sinó també de matèria fosca (la naturalesa de la qual encara no coneixem). Les lents gravitatòries ofereixen una manera de mesurar la quantitat de matèria fosca continguda en les galàxies i la seva distribució espacial.

Donem un altre exemple. Els quàsars són objectes de lluminositat variable i el senyal de la variabilitat (augment i/o disminució en un moment donat) triga un temps a arribar-nos a la Terra pel fet que la velocitat de la llum és finita. Si la llum ens arriba per camins diferents perquè hi ha una lent interposada en el camí, no veurem la variació de manera simultània en totes les imatges del quàsar. Com més llarg sigui el camí, més trigarà a arribar-nos. A partir d'aquestes diferències de temps entre la variabilitat de les imatges, es pot deduir el valor de la constant de Hubble-Lemaître, que correspon al ritme actual d'expansió de l'Univers.

5. MICROLENTS GRAVITATÒRIES

Tot i que la probabilitat que les estrelles s'alineïn no és gaire elevada, sí que pot ocórrer. Podem pensar en múltiples escenaris: lents que són estrelles simples, lents que són estrelles binàries, lents que contenen estrelles amb planetes i/o satèl·lits (llunes) i objectes llunyans que són una estrella simple, binària, amb planetes i/o satèl·lits o sense.

En aquests casos, la separació entre les diverses imatges d'un objecte real creades per la lent són molt properes entre elles i difícilment observables com a imat-

1. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>.

ges separades. Els instruments d'observació no tenen prou resolució angular, tal com ja deia Einstein quan va accedir a publicar les seves prediccions el 1936. Però sí que es pot observar fàcilment un increment de la lluentor aparent de l'objecte real (tal com deia Einstein), perquè en el moment que tenim l'alineació amb la lent ja no en veiem només una imatge, sinó dues o més, i la lluentor que observem és la suma de les lluentors de les diferents imatges. La figura 4 mostra el cas d'una lent composta per una estrella i un planeta que transita per davant d'una estrella més llunyana. Durant l'estona del trànsit es produeixen imatges múltiples de l'estrella llunyana creades per l'estrella més propera i el seu planeta. La mateixa figura també mostra el cas real d'OGLE-2005-BLG-390 ocorregut el 2005. La publicació DR3 de *Gaia* inclou 363 casos de microlents (de diverses configuracions), 90 dels quals són descobriments nous (Wyrzykowski *et al.*, 2023).

Aquest aparent augment temporal de la llum rebuda d'una estrella ha permès de descobrir l'existència d'aproximadament tres-cents exoplanetes, i segur que en un futur se'n descobriaran més a partir de missions espacials i projectes a la Terra especialment dedicats al monitoratge de la llum de les estrelles i la seva variació.

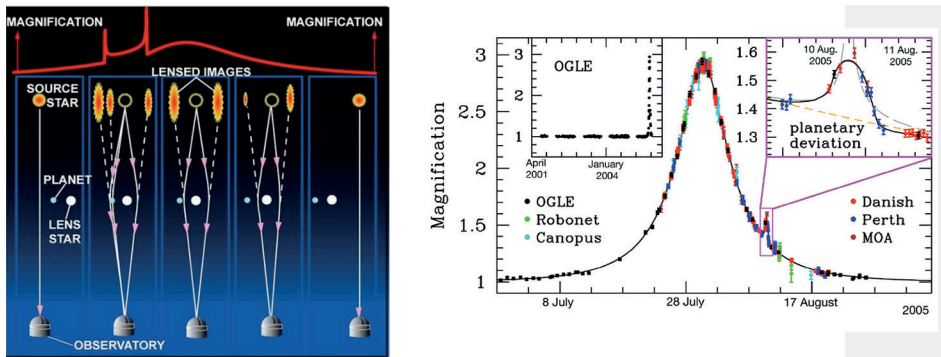


FIGURA 4. A l'esquerra, l'esquema del fenomen de microlent creat per una lent composta d'una estrella i un planeta. Quan la lent transita per davant de l'estrella llunyana (a la figura ho fa de dreta a esquerra), es creen imatges múltiples molt poc separades entre elles i que es perceben com una sola imatge de més brillantor. A la dreta, variació de la brillantor aparent en el cas de microlent OGLE-2005-BLG-390. Els punts corresponen a les observacions, i les línies, a models teòrics. Es pot veure l'increment de llum causat per l'estrella propera i també l'augment de llum creat pel seu planeta.

FONT: A l'esquerra, Dave Bennett. A la dreta, ESO, «Light curve of OGLE-2005-BLG-390» (en línia), <<https://www.eso.org/public/spain/images/eso0603b/?lang>>, sota llicència Creative Commons Reconeixement 4.0 Internacional, <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>.