



LA MIRADA DE GALILEU

MONOGRÀFIC



Nassio Bayarri. *House alienígena*, 2009. Acrílic i cartró sobre taula, 195 x 225 cm.

MIRANT CAP AL FUTUR

ELS GRANS REPTES DE L'ASTROFÍSICA I LA COSMOLOGIA PER AL SEGLE XXI

Jordi Miralda

Looking to the Future. The Great Challenges Facing Astrophysics and Cosmology in the 21st Century.

The twentieth century has brought a number of exciting discoveries concerning the universe, which we could hardly have suspected a hundred years ago. The new century, just begun, promises great progress in our understanding of the origin, composition and evolution of the universe, the formation of galaxies, the secrets of black holes, the formation of stars and planetary systems and the origin of life itself.

Plantejar-se quines seran les qüestions sobre l'estudi de l'univers que podran dur-nos als avenços més importants en el nostre coneixement durant un període tan llarg com el segle XXI constitueix una proposta força temerària i en la qual és difícil de reeixir. Sovint, el progrés de la ciència es fa majorment palès en les noves qüestions que és capaç de generar, impredecibles de primer antuvi, que no pas en les respostes que puguem descobrir a preguntes llargament formulades. No hi ha millor manera de copsar la dificultat, i a la vegada les oportunitats, d'intentar endevinar els grans reptes de l'astrofísica i la cosmologia per al segle que comença, que pensar què s'hauria pogut dir sobre aquests grans reptes ara fa cent anys, partint dels coneixements que teníem el 1909, i comparar-ho amb el camí que realment han seguit els descobriments científics. En aquest article realitzarem aquest exercici per a cinc grans qüestions que podem considerar fonamentals. Veurem que, curiosament, aquestes grans qüestions que més inspiren la nostra recerca de l'univers ara i fa cent anys continuen essent molt semblants i estan estretament relacionades. En moltes d'elles els avenços assolits han estat tan espectaculars com insospitats, però en cap d'elles s'ha arribat a una conclusió final.

■ L'EVOLUCIÓ DELS ESTELS

La primera gran qüestió que probablement s'hauria plantejat fa cent anys és la font d'energia, l'evolució i el destí

final dels estels que veiem al cel. Pels volts de 1909, Annie Jump Cannon estava establint la manera de classificar els estels segons el seu espectre, però no sabíem quina relació hi havia amb les característiques físiques i l'estadi evolutiu de cada estel. Aquest és segurament el camp en què els avenços han estat més complets en el segle XX: actualment coneixem com evolucionen els estels en funció de la seva massa, passant pels estadis de la seqüència principal en què es troba ara el Sol i de diversos tipus d'estels gegants a mesura que se succeeixen les etapes de fusió nuclear de diferents nuclis.

«NO COMPRENEM ENCARA LES CONDICIONS PRECISES PERQUÈ UN ESTEL ACABI LA VIDA EN DIFERENTS TIPUS D'EXPLOSIONS SUPERNOVA I DEIXI COM A CADÀVER ESTEL·LAR UN NAN BLANC, UN ESTEL DE NEUTRONS, O BÉ UN FORAT NEGRE.»

Però no comprenem encara les condicions precises perquè un estel acabi la vida en diferents tipus d'explosions supernova, i deixi com a cadàver estel·lar un nan blanc, un estel de neutrons, o bé un forat negre. Al mateix temps, també hem descobert la presència de forats negres molt més massius que un estel en el centre de les galàxies (la Via Làctia conté un forat negre central amb una massa de 4 milions de ve-

gades la del Sol), els quals són responsables del fenomen dels quàsars, els objectes més lluminosos de l'univers. No entenem tampoc com s'han format aquests forats negres supermassius. Potser el repte més important per al segle XXI relacionat amb la fi dels estels i del col·lapse gravitatori consisteix a verificar si les característiques del camp gravitatori d'un forat negre predites per la teoria de la gravetat d'Albert Einstein s'ajusten a la realitat, i a detectar les ones gravitatòries emeses per forats negres quan dos d'ells es fusionen en un de sol, la qual cosa és l'objectiu principal de la missió espacial LISA.





El sistema binari Cygnus X-1 respon a les característiques que s'esperen d'un forat negre. Es tracta d'un objecte compacte, que podem veure en aquesta representació artística a la dreta, que conté al voltant de nou vegades la massa del Sol i canvia la seua brillantor contínuament en diverses escales de temps. A l'esquerra podem veure un superestel gegant blau, connectat amb el forat negre per una corrent de gas. Comprendre el funcionament dels forats negres és un dels reptes a què s'enfronta l'estudi de l'univers.

■ VIDA MÉS ENLLÀ DE LA TERRA?

La segona gran qüestió que ens plantejem és l'origen dels sistemes planetaris i la possible aparició de la vida a l'univers fora del nostre planeta. Aquesta qüestió s'havia plantejat ja des del moment en què es comprengué que el nostre Sol no és més que un estel, idea defensada per Giordano Bruno al segle XVI, el qual va intuir també que les lleis físiques són igualment vàlides arreu de l'univers, que cada estel tindria un sistema planetari semblant al del Sol, i que la vida podia ser present en

molts d'aquests planetes. Immanuel Kant va proposar que els planetes es formen en un disc circumestel·lar, el qual s'origina a causa de la conservació del moment angular quan la matèria col·lapsa per formar un estel.

Fa cent anys no s'havia avançat gaire més enllà d'aquestes idees bàsiques, però actualment disposem de moltes més dades científiques: hem descobert centenars de planetes gegants (semblants als planetes gasosos Júpiter i Saturn en el nostre sistema solar) al voltant d'altres estels, coneixem molts detalls de les condicions físiques dels núvols de gas interestel·lars que contínu-



© 2004 European Space Agency

ament es fragmenten i col·lapsen gravitatòriament per formar nous estels, i hem comprovat que la presència de sistemes planetaris en altres estels és freqüent. Hem pogut validar també la teoria de formació de planetes a partir de la coalescència de grans de pols en els discs circumestel·lars, els quals s'agreguen gradualment fins assolir les dimensions de roques, asteroides i, finalment, planetes terrestres.

Malgrat que no hem pogut identificar encara planetes que siguin gaire semblants a la Terra (ja que només els planetes més massius són fàcilment detectables amb les tècniques actuals), totes les indicacions de què disposem auguren una gran abundància de planetes terrestres. Molts d'aquests planetes no deuen ser adequats per a la presència de vida: alguns són massa propers o



© ESA/NASA/UCL (G. Tinetti)

Reproducció artística del planeta extrasolar HD 189733b, del qual ara es coneix que té metà i aigua. Actualment coneixem centenars de planetes gegants al voltant d'altres estels diferents al Sol, però tot i això encara no podem contestar una de les qüestions que es plantegen els astrònoms actuals: hi ha vida més enllà de la Terra?

llunyans del seu estel (i per tant, massa calents o massa freds), altres potser es mouen en òrbites massa excèntriques o inestables (amb les corresponents variacions dramàtiques del clima), altres segurament no tenen aigua líquida. Però si els sistemes planetaris són efectivament habituals entre els cent mil milions d'estels de la Via Làctia, sembla gairebé assegurat que hi hagi també molts planetes a la nostra galàxia que reuneixin totes les condicions perquè s'hi hagi pogut formar la vida.

El repte més important per al segle XXI en aquest apartat serà probablement el de caracteritzar la població de planetes aptes per a la vida a partir de diversos mètodes d'observació que s'estan desenvolupant actualment, i trobar signes que demostrin la presència de vida en alguns d'aquests planetes. Actualment ja s'han dissenyat missions espacials per utilitzar la interferometria entre diversos telescopis a l'espai per poder anul·lar la llum d'un estel i detectar directament la llum molt més feble reflectida per un planeta que orbita l'estel, per poder estudiar les variacions temporals i l'espectre d'aquesta llum que podrien revelar la presència de diversos gasos a l'atmosfera, alguns dels quals impliquen l'existència





Imatge del telescopi espacial Hubble del cúmul de galàxies Abell 1689, on podem observar diverses galàxies del rerefons distorsionades per la lent gravitatòria que produeix la massa del cúmul. La gran massa requerida per explicar aquesta lent demostra l'existència de matèria fosca.

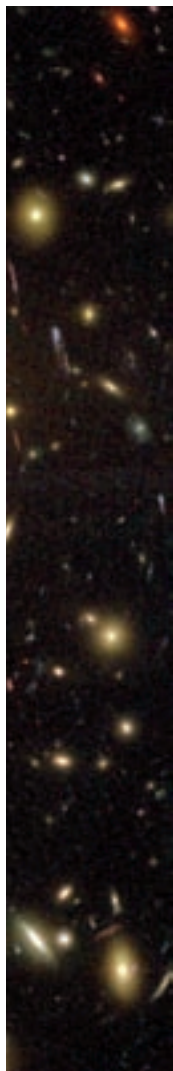
de la vida (com ara la presència simultània de l'oxigen, l'ozó i el metà).

■ ELS COMPONENTS DE L'UNIVERS

Una tercera gran qüestió consisteix a esbrinar quins són els components bàsics de l'univers. A començament del segle XX els astrònoms podien sentir-se eufòrics pels èxits obtinguts en l'espectroscòpia estel·lar i les promeses de nous descobriments: els espectres dels estels havien demostrat la presència de molts àtoms coneguts a la Terra a les atmosferes estel·lars, i es podia projectar el desenvolupament de mètodes que permetessin mesurar la composició de cada tipus d'estel. Potser de manera agosarada s'hagués pogut fins i tot preveure que tot l'univers és format de la matèria que ja coneixem, i que les abundàncies estel·lars contindrien tots els secrets que ens quedaven per descobrir sobre la composició de l'univers. Avui dia els descobriments realitzats van molt

més enllà de les expectatives que s'haurien pogut tenir fa cent anys: la composició dels estels i els núvols de gas interestel·lars revelen els processos de síntesi de cada un dels nuclis atòmics a l'interior dels estels i durant les explosions supernova, on les reaccions nuclears de fusió han generat tots els nuclis més pesants que l'heli. Prop d'un 99% de la matèria de l'univers visible en forma d'estels és hidrogen i heli, però tota la resta d'àtoms, els quals es concentren per formar grans de pols i planetes terrestres per fer possible l'existència de la vida, han estat creats a l'interior dels estels. En canvi, els nuclis més lleugers (l'heli, el deuteri i el liti) van ser creats durant els primers minuts d'existència de l'univers després del Gran Esclat, i la seva mesura ens ha dut a poder comprovar precisament el valor de la densitat mitjana de la matèria ordinària a l'univers.

Però al segle XX hem après també que l'expectativa d'un univers constituït totalment de la matèria que ja coneixem hauria estat, efectivament, del tot pre-



© NASA / ESA / JHU (H. Bradley, H. Ford) / UCSC (R. Bouwens, G. Illingworth)

matura. L'evidència observacional ens ha demostrat de forma aclaparadora que només coneixem un 20% de la matèria, constituïda pels protons i neutrons que formen els nuclis atòmics, i els electrons que completen la construcció de l'àtom. L'altre 80% ha estat anomenada matèria fosca, i només sabem de la seva existència a partir dels seus efectes gravitatoris. Tant les observacions de les òrbites de galàxies satèl·lits com les de la deflexió gravitòria experimentada per la llum en passar prop d'un cos massiu demostren que les galàxies estan envoltades d'una gran quantitat de matèria misteriosa, la qual no interacciona amb la matèria ordinària excepte per la gravetat. Diverses observacions cosmològiques (utilitzant la radiació de fons de l'univers, les abundàncies dels elements sintetitzats en el Gran Escalat, i la distribució de les galàxies en l'univers a gran escala) confirmen el mateix percentatge del 80% per a la fracció de matèria d'aquesta enigmàtica classe no-interactuant la naturalesa de la qual desconeixem totalment. Aquest és, doncs, un altre gran repte pel segle XXI: esbrinar què és la matèria fosca.

■ L'ORIGEN DE LES GALÀXIES

La quarta gran qüestió de què tractem és sobre la naturalesa i l'origen de les galàxies, principals constituents de l'univers visible. Fa cent anys, coneixíem que el Sol era part de la Via Làctia, un conjunt d'estels disposats en forma de disc, però no sabíem què hi havia més enllà de la Via Làctia, ni què eren les nebuloses de llum que s'havien detectat entre els objectes celestes. Els avenços en aquest camp no es feren esperar durant el segle XX: al 1924, Edwin Hubble demostrava que la nebulosa d'Andròmeda, un nuvólet de llum conegut avui com a galàxia d'Andròmeda que podem veure a simple vista a la constel·lació del mateix nom en les nostres vesprades de tardor, és en realitat una galàxia semblant a la nostra que es troba a la immensa distància de 2,5 milions d'anys-llum (Hubble va obtenir la distància d'un milió d'anys-llum pel fet que el mètode que utilitzava patia encara d'alguns errors sistemàtics, però fou prou fiable per demostrar que aquesta galàxia havia de ser un objecte extern a la Via Làctia i d'una mida comparable). La gran quantitat de nebuloses semblants que s'havien catalogat arreu del cel havien de ser, per tant, també galàxies que contenien milers de milions d'estels. Hubble va engrandir

així el nostre univers, que va passar de ser només la Via Làctia a ser un univers de galàxies la immensitat del qual no abastem encara a comprendre. Però, per si s'hagués quedat curt amb aquest descobriment, el 1929 Hubble va descobrir l'expansió de l'univers mitjançant la mesura de la distància i la velocitat radial d'allunyament a diverses galàxies: l'espai s'expandeix com si fos una goma que s'estira homogeniament al llarg del temps, fent que les galàxies s'allunyin progressivament les unes de les altres.

L'estructura i evolució de les galàxies han estat profusament investigades al llarg del segle XX, emmarcades dins del model del Gran Escalat que descriu l'expansió i evolució de l'univers. Avui sabem que el Gran Escalat es produí fa 13.700 milions d'anys, i les galàxies s'han format mitjançant el col·lapse gravitatori de la matèria en regions de l'univers que d'entrada tenien un petit excés de massa respecte les altres. Com que la llum viatja a una velocitat fixa, podem veure el passat de les galàxies quan les observem fins a distàncies que s'acosten a un horitzó de 13.700 milions d'anys-llum. La història de les galàxies es desplega per tant en el cel a mesura que les observem a distàncies més llunyanes. Actualment estem encara destriant aquesta història, i el repte que es planteja per al segle XXI és descobrir les característiques dels primers objectes que col·lapsaren i formaren estels, la manera com aquests han evolucionat i han format les galàxies actuals, i com les diverses poblacions estel·lars que han existit en les galàxies del passat han creat els elements atòmics amb les abundàncies que avui observem en els estels actuals.

■ COM VA COMENÇAR TOT?

Finalment, la gran qüestió que més ha encuriós els astrònoms i cosmòlegs de totes les èpoques és l'origen i la naturalesa de l'univers en la seva totalitat. Fa cent anys, aquesta pregunta s'hauria d'haver formulat des de l'única realitat coneguda, el nostre eixam d'estels anomenat Via Làctia: com es va formar la galàxia, i què hi ha més enllà? Avui dia aquesta pregunta s'emmarca en la teoria del Gran Escalat, per la qual hem acumulat durant el segle XX una evidència experimental ja definitiva gràcies especialment a l'observació detallada de la radiació còsmica de fons, residu d'una època pri-

**«L'EVIDÈNCIA
OBSERVACIONAL ENS
HA DEMOSTRAT QUE NOMÉS
CONEIXEM UN 20% DE LA
MATÈRIA. L'ALTRE 80%
HA ESTAT ANOMENADA
MATÈRIA FOSCA, I NOMÉS
SABEM DE LA SEVA
EXISTÈNCIA A PARTIR
DELS SEUS EFECTES
GRAVITATORIS»**



HI HA ALTRES MONS HABITATS, PERÒ SÓN MICROBIANS

Si em pregunteu en quina cosa crec que no puc demostrar triaria la vida extraterrestre. Però caldria matisar-ho perquè hi ha molts tipus d'extraterrestres. Deixaria de banda tots els que suposadament ens han visitat, siguen els inspiradors de la secta raeliana, siguen els innumbrables casos descrits pels ufòlegs. Res de selenites ni marcians que ens visiten, ni tan sols l'entranyable imaginari de la ciència-ficció, des d'H. G. Wells fins a Arthur C. Clarke. Ni tampoc els suposadament observats (ells o les seues obres d'enginyeria) pels astrònoms, de John Herschel a Percival Lovell.

Definitivament, la vida extraterrestre que existeix ningú no l'ha vista. Però la ciència contemporània ens permet de fer conjectures. La vida és una aberració química planetària. I perquè s'origina sabem que calen ambients propicis per a la síntesi i acumulació de molècules orgàniques en presència d'aigua líquida. També sabem que si es donen les condicions i els ingredients adients, el pas de la matèria inanimada de la geoquímica a les excrescències bioquímiques generadores de complexitat és ràpid en termes de temps geològic. S'ha de tenir molt d'orgull antropocèntric (o ser un pessimista existencial) per negligir la immensitat de l'univers i pensar que no hi ha planetes on es podria haver originat la vida.

Quan els experiments de Louis Pasteur negant la possibilitat de la generació espontània i els càlculs de William Thomson (després Lord Kelvin) atribuïnt a la Terra una edat massa curta posaren en un compromís la concepció darwinista d'una evolució lenta i gradual originada a partir de materials inerts, hom va recórrer a la vida extraterrestre. La vida era una propietat més de la matèria, universal, sense inici. La panspèrmia és la dispersió, de planeta en planeta, per mitjà d'espores o gèrmens, d'aquesta estranya propietat. Ara només hom parla seriosament d'això quan discutim sobre el risc de contaminació planetària per les nostres sondes.

Molts científics contemporanis poden admetre l'existència d'altres vides. L'espectre d'opinió va de Jacques Monod a Carl Sagan. Segons Monod l'univers no està «prenyat de vida»: la vida és un accident fortuït, una casualitat improbable, una mera xamba que ha tocat en aquest planeta. Suposar que s'haja pogut repetir en algun altre lloc de l'univers és tan sols una il·lusió. Peter D. Ward i Donald Brownlee, amb la seua proposta de la *terra rara* segueixen aquesta tradició filosòfica: el nostre planeta combina unes característiques adients per a l'aparició de la vida, però aquesta combinació és molt estranya i improbable. Carl Sagan, a l'altre extrem, no sols propugnava l'abundància de planetes habitats sinó que devia haver-hi moltes civilitzacions tecnològicament avançades amb les quals comunicar-se. Els físics i els astrònoms se senten cò-

modes amb la idea de la necessitat de l'aparició de la intel·ligència i d'una fase *superior* d'evolució cultural i tecnològica.

Malauradament per a ells, el que sabem de l'evolució biològica ens indica tot el contrari: l'aparició del pensament abstracte és una conjuminació de contingències històriques gairebé irrepetibles. És cert que no tots els biòlegs pensen així. N'hi ha que deixen orientar el seu pensament científic pel seu sentiment religiós, amb una necessitat imperiosa de trobar una transcendència en

el procés evolutiu. No obstant això, si algun dia trobem un segon exemple de vida, serà microscòpica i no tecnològica. Trobar una altra biosfera moguda per bacteris seria la culminació del principi copernicà de mediocritat. Amb tot, caldria reescriure moltes pàgines de teologia.

«EL QUE SABEM DE
L'EVOLUCIÓ BIOLÒGICA
ENS INDICA QUE
L'APARICIÓ DEL
PENSAMENT ABSTRACTE
ÉS UNA CONJUNIMACIÓ
DE CONTINGÈNCIES
HISTÒRIQUES GAIREBÉ
IRREPETIBLES»

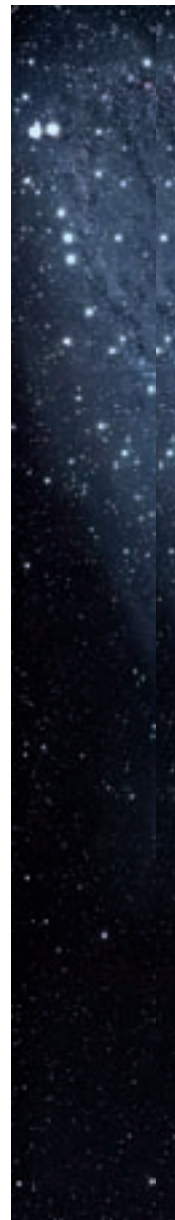
JULI PERETÓ

Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva, UV



LA MIRADA DE GALILEU

MONOGRÀFIC





© R. Gendler

El 1924, Edwin Hubble va demostrar que l'aleshores coneguda com nebulosa d'Andròmeda era en realitat una galàxia. Passavem a comprendre que l'univers no era només la Via Làctica, com fins aquell moment havíem cregut, sinó que estava compost per multitud de galàxies. A dalt, imatge de la veïna galàxia d'Andròmeda M31.

**«POTSER EL REPTE MÉS IMPORTANT
QUE PODEM DESITJAR PER AL SEGLE XXI
ÉS PODER FER NOUS DESCOBRIMENTS
I AVENÇOS EN DIRECCIONS QUE
ACTUALMENT CAP DE NOSALTRES NO
PODRIA SOSPITAR»**

mitiva en què tota la matèria de l'univers s'escampava homogèniament per l'espai i banyada de la radiació que encara avui es propaga arreu.

Però les preguntes bàsiques continuen essent les mateixes de sempre, retocades pels nous coneixements adquirits: és l'univers infinit o bé existeix una mida màxima, potser molt més gran que el nostre horitzó observable de 13.700 milions d'anys-llum, sobre el qual s'estenen les condicions d'homogeneïtat del nostre univers? Què hi havia abans del Gran Esclat, i què va donar lloc a unes condicions pràcticament homogènies però amb petites fluctuacions que després originarien el col·lapse de les galàxies? Com s'acabarà l'univers, si és que ha de tenir un acabament?

Els cosmòlegs esperem continuar trobant noves pistes que ens permetin almenys reformular aquestes preguntes des de nous paradigmes. Actualment molts científics treballen sobre dos indicis que ens poden menar cap a nous descobriments cosmològics: un és la idea teòrica del model inflacionari, que proposa que les condicions quasi homogènies del Gran Esclat van ser establertes per una fase anterior d'expansió universal accelerada i creació d'energia la qual es va convertir finalment en la matèria de l'univers, però que fins ara no ha rebut cap confirmació observacional gaire convincent. L'altre és la descoberta observacional durant l'última dècada del fet que l'expansió de l'univers ha experimentat una transició en l'època actual, passant de la desacceleració deguda a l'atracció gravitatòria de la matèria fins fa uns 5.000 milions d'anys, a una acceleració de l'expansió a gran escala d'ençà d'aleshores. Aquesta novella acceleració podria produir-se per un hipotètic nou component de l'univers que s'ha anomenat energia fosca, o qui sap si per alguna estranya modificació que alterés la teoria de la gravetat d'Einstein. Potser el repte més important que podem desitjar per al segle XXI és poder fer nous descobriments i avenços en direccions que, actualment, cap de nosaltres no podria sospitar. ☺

BIBLIOGRAFIA

- GINER-SOROLLA, A., 1983. *Un nou gènesi*. Edicions 62. Barcelona.
 HARRISON, E., 1981. *Cosmology: the Science of the Universe*. Cambridge University Press. Cambridge.
 KOLB, R., 1996. *Blind Watchers of the Sky*. Addison-Wesley. Nova York.
 MARTÍNEZ, V., 2006. *Mariners que solquen el cel. L'aventura de descobrir l'univers*. Bromera. Alzira.
 NICOLAU, F., 1992. *Els astres o l'astrofísica*. Claret. Barcelona.
 RIERA, S., 1996. *Origen i evolució de l'univers: Breu història de la cosmologia*. Edicions 62. Barcelona.
 SALVADOR, E., 1992. *L'univers conegut*. Barcanova. Barcelona.
 TRIGO, J. M., 1999. *Nosaltres a l'univers*. Proa. Barcelona.
 TRIGO, J. M., 2000. *L'origen del Sistema Solar*. Pòrtic. Barcelona.

Jordi Miralda, Professor de la Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA).

