

# ESTELS, GALÀXIES, COSMOS: LA DÈCADA PASSADA, LA DÈCADA VINENT

per Vera C. Rubin

6 (278/especial 1981

ciència 5/6)

La nostra percepció de l'univers ha estat renovada pels últims descobriments astronòmics de nous objectes i fenòmens, gràcies a una àmplia varietat de tècniques d'observació. L'any 1990, els astrònoms esperen tenir més coneixement de la distribució de la massa en l'univers, de la física de les fonts energètiques i de les intrincades interconnexions dels processos astrofísics en una varietat d'escala espacial i temporal.

V.C. Rubin és membre del departament de magnetisme terrestre de la Carnegie Institution de Washington, D.C. 20015. El seu article fou publicat amb el títol *Stars, Galaxies, Cosmos: The Past Decade, the Next Decade* a "Science", vol. 209, pàgs. 64-71, el 4 de juliol del 1980.

Copyright 1981 de l'American Association for the Advancement of Science

3  
DILLUNS

Els descobriments de l'astronomia durant els darrers vint anys han desafiat la nostra percepció de l'univers. Els intents de comprendre'ls haurien de dirigir el curs de l'astronomia dels propers anys. Pràcticament mai no hi ha hagut un període en la història de la ciència en el qual les fronteres del nostre coneixement s'hagin eixamplat tan espectacularment.

Fins a la meitat d'aquest segle, el coneixement astronòmic s'obtenia a través de l'observació directa dins de la regió òptica de l'espectre electromagnètic, és a dir, la transmesa per l'atmosfera de la Terra i detectada per l'ull humà. Aquesta radiació té una freqüència de  $10^{11}$  cicles per segon i una longitud d'ona de  $10^7$  metres, i és característica de la radiació tèrmica dels estels com el nostre Sol, amb una temperatura a la superfície propera als 6.000 °K. L'univers que els astrònoms coneixien fins a la meitat d'aquest segle era majestuós i en lenta evolució. Però amb els avenços de la tecnologia, hom ha obtingut instruments que detecten radiacions de les regions espectrals de les ones ràdio i els infraroigs, les quals són més enllà de l'extrem vermell visible de l'espectre però són transmeses per l'atmosfera terrestre. A més a més, hi ha detectors més sofisticats en òrbita, més enllà de l'atmosfera, observant les regions espectrals dels raigs X,  $\gamma$ , ultraviolats i infraroigs, en què l'atmosfera és opaca. L'espectre observable s'ha expandit fins a una amplitud de longituds d'ona que varien entre  $10^{-4}$  i 100 metres. Ara, els astrònoms saben que vivim en un veritable zoo, on els raigs X són emesos per objectes tan diversos com els *quasars*, el gas intergalàctic difús, les corones al voltant dels estels freds, la matèria que es condensa en objectes (que poden

ésser forats negres) i els residus estel·lars procedents d'explosions de *supernovae*; un univers on els raigs  $\gamma$  són una sonda directa dels processos còsmics nuclears i són produïts per la interacció dels raigs còsmics amb la matèria interestel·lar. Aquests raigs  $\gamma$  també s'originen en les *supernovae*, en el Sol i en els objectes galàctics compactes i, de vegades, en processos de transició que no duren més de 10 segons; un univers on els nuclis de les galàxies i d'alguns *quasars* irradien més en la zona infraroja que no pas en la visible; un univers on es detecta la localització dels estels acabats de néixer per llur emissió infraroja procedent de densos núvols moleculars; i un univers en què les vastes regions entre els estels de la nostra galàxia contenen composts químics orgànics complexos, els quals són constituents fonamentals dels éssers vius de la Terra. Actualment, disposem per als nostres estudis d'un menú ben exòtic de fonts astronòmiques, i hom sap que l'univers és incomensurablement més ric, més variat i més violent que el que hom hauria pogut somniar fa vint anys. A continuació descriurem alguns camps de tota aquesta varietat i identificarem uns quants camins prou clars per a la investigació astronòmica.

## COSMOLOGIA

En el sentit més ampli, l'astronomia és l'estudi de l'univers. Amb les observacions que s'estan fent actualment, els astrònoms intenten deduir la història dels primers temps de l'univers i descobrir els factors que han dirigit la seva evolució fins a l'estat actual. La majoria dels astrònoms accepten com a model un univers que s'ha expandit i refredat, a partir d'un estat inicial dens i calent. La radiació de la bola de foc primitiva sorgí de la "gran explosió", que fou el començament de l'expansió. Aquesta radiació s'ha anat estenent i refredant durant 10 o 20 bilions d'anys des d'aquell instant. La seva temperatura actual és de 3° K. Després dels estudis cosmològics de George Gamow, Alpher i German van predir, al final dels anys qua-

ranta, l'existència d'aquesta radiació de fons de microones,<sup>1</sup> però no va ésser detectada fins al 1965 per Penzias i Willson.<sup>2</sup> La investigació cosmològica actual està dominada per l'impacte d'aquest descobriment.

La radiació tèrmica de 3° K (per als físics, radiació del cos negre) té un espectre característic, amb el punt màxim de radiació situat a una longitud d'ona d'un mil·límetre, en la regió espectral de les microones, una regió dins de la qual l'atmosfera de la Terra és irradiada amb una temperatura propera als 300 ° K. Per tant, només és possible fer mesuraments exactes de la distribució de l'energia de l'espectre de la radiació de fons per damunt de l'atmosfera terrestre. Un avenç dels anys setanta fou la verificació de la naturalesa de cos negre de les radiacions de microones amb instruments llançats en un globus.<sup>3</sup> No obstant això, potser només s'hagin detectat petites emissions de la radiació del cos negre.<sup>4</sup> Aquestes desviacions són importants perquè ens permeten diferenciar entre els esdeveniments que sorgiren durant els primers moments de la història tèrmica de l'univers i els efectes més recents, tals com la radiació de pols temperada de les galàxies intermèdies al llarg de la línia de visió.

El grau fins al qual la radiació és isotròpica, és a dir, igual en totes les direccions, representa un test de la cosmologia de la "gran explosió"; és una mesura dels trencaments, les rotacions i les heterogeneïtats inicials de l'univers primitiu; i actua com un velocímetre del moviment de la nostra galàxia. Estem immersos en un mar de fotons que superen en nombre els nucleons en un factor  $10^8$ ; fotons, les energies dels quals equivalen a una temperatura de 3° K. A mesura que la nostra galàxia es desplaça a través d'aquest camp de protons, detectarem una temperatura més alta en la direcció progressiva del nostre moviment i una temperatura consegüentment més baixa en relació amb la direcció d'on venim. Aparentment, però, s'ha detectat, fa poc, una anisotropia sorprenentment àmplia en la radiació de fons.<sup>5</sup> En relació amb la radiació de fons, la galàxia i el grup local de galàxies tenen una velocitat d'aproximadament 400 quilòmetres per segon en direcció a la su-

peragrupació de galàxies de Virgo. Si això es confirmés, aquest moviment implicaria que la massa combinada de galàxies en la superagrupació de Virgo és suficient per a frenar lleugerament l'expansió de l'univers al nostre voltant. A causa que actualment la radiació de fons de microones és la sonda més accessible de què disposem per a investigar el principi de l'univers, durant els anys vuitanta s'hauran de realitzar uns experiments cabdals per a augmentar la precisió de l'espectre mesurat i per a delimitar més rigorosament la isotropia a petita i gran escala. Només aquest tipus d'observacions podrà confirmar si la radiació és una relíquia de la "gran explosió" o bé una superposició de nombroses fonts puntuals. Aquesta classe de mesuraments els farà el COBE, el Cosmic Background Explorer (Explorador del Fons Còsmic), un instrument de la NASA que estarà en òrbita durant aquesta dècada per observar la radiació de fons en l'amplitud mil·limètrica i submil·limètrica. Hauríem d'entrar en la dècada dels noranta amb més coneixement dels detalls d'aquesta radiació fòssil.

Els intents per a fer una cartografia de l'expansió de l'univers al voltant de la nostra galàxia han resultat extremament i inesperadament complicats. Hom requereix el coneixement de les distàncies i la velocitat d'un gran nombre de galàxies. Les determinacions de les distàncies, en particular, estan carregades de seleccions complexes i d'aspectes sistemàtics. Malgrat els esforços heroics per part de nombrosos astrònoms, el valor de la velocitat d'expansió, denominada constant H de Hubble, té un error d'un factor 2.<sup>6</sup> En cosmologia, el valor H és un factor d'escala. Afecta les lluminositats i els volums calculats, les densitats d'objectes extragalàctics i els mesuraments de l'edat de l'univers en les cosmologies més senzilles. Hom necessita observacions que puguin produir un valor de H amb un 10 o un 20 per cent de precisió per a conèixer l'edat i l'escala del nostre univers. Aquests tipus d'observacions continuaran essent un esforç principal durant els anys vuitanta.

Amb el llançament de l'Space Telescope (telescopi espacial) en aquesta dècada, els astrònoms tindran un telescopi òptic d'àmplia i alta resolució fora de l'atmosfera terrestre. Gràcies a aquest instrument tan genial hom podrà observar els estels individuals, les agrupacions, les *novae* i els núvols de gas ionitzat en galàxies situades a unes distàncies de la nostra molt més grans que el que mai havia estat possible. Tots aquests objectes serveixen com a instruments per a determinar les distàncies a les galàxies

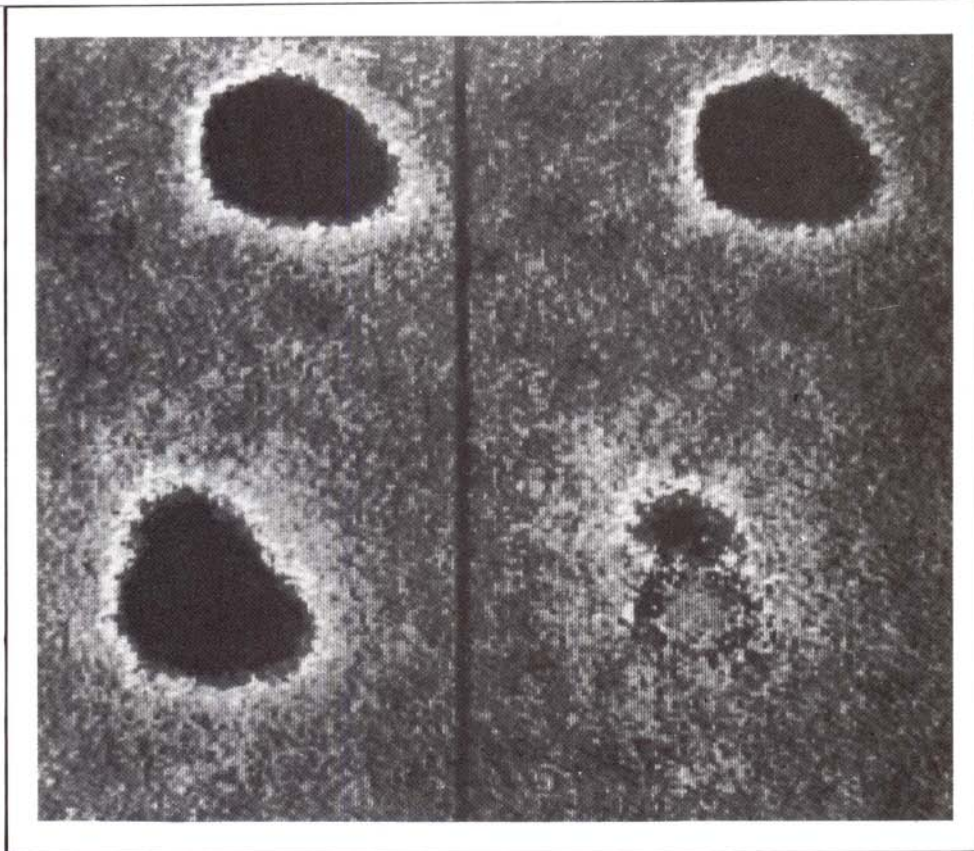


Fig. 1 El doble quasar, observat amb unes condicions de visibilitat excepcionalment bones, amb un tub d'imatges i el telescopi de 2,2 metres de Hawaii. La part esquerra mostra la suma digital de cinc exposicions d'un minut cada una. L'aspecte borros de la part superior de la imatge inferior és una galàxia tènue superposada, la qual se suposa que actua com una lent gravitacional i forma dues imatges d'un únic quasar de fons. La part dreta de la figura mostra el resultat de la substracció de la imatge superior a la inferior, de manera que es descobreix la galàxia interferent.

(Cortesia de l'Institute for Astronomy and Planetary Sciences and Data Processing Facility, University of Hawaii, i A. Stockton).

individuals. Les observacions que es fan amb l'Space Telescope, juntament amb els estudis detallats fets des de la Terra amb tècniques clàssiques i noves, haurien de resoldre la controvèrsia actual sobre el valor de H.

L'univers és tancat o obert? És la densitat mitjana de massa prou baixa perquè l'univers continuï expandint-se per sempre?; o és suficientment alta perquè la gravetat pugui alentir l'expansió i, fins i tot, aturar-la, iniciant llavors un procés de contracció? Encara que l'evidència a la nostra disposició afavoreix l'expansió continuada, realment no tenim una resposta convincent.<sup>7</sup> Si que comprenem, però, que les proves previstes inicialment per a decidir si l'univers és obert o tancat estan en relació amb l'evolució de les galàxies. Algunes d'aquestes deuen haver estat més brillants en el passat, un passat en el qual la formació estel·lar era més activa.<sup>8</sup> Les grans galàxies agrupades en "ràims" poden haver estat més tènues en el passat, abans de fer-se més brillants en "empassar-se" estels de les parts externes de les galàxies veïnes o fonent-se totalment amb les galàxies veïnes més petites.<sup>9</sup> Fins que no compreguem la

història de la lluminositat de les galàxies, no podem calcular les distàncies en l'univers original utilitzant, precisament, aquesta lluminositat. Fins ara han fracassat les alternatives d'enfocament per a estimar directament la massa de l'univers. A continuació tractarem d'aquests fracassos.

## QUASAR

El descobriment de les "fonts quasi estel·lars" (*quasar*), al principi dels anys seixanta, tingué implicacions molt més enllà de l'astronomia i la física d'aquest objectes. Els astrònoms aprenueren que, fins llavors, no s'havia descobert un constituent principal de l'univers. No obstant això, hi ha pocs dubtes que encara quedin gaires components principals de l'univers per descobrir.

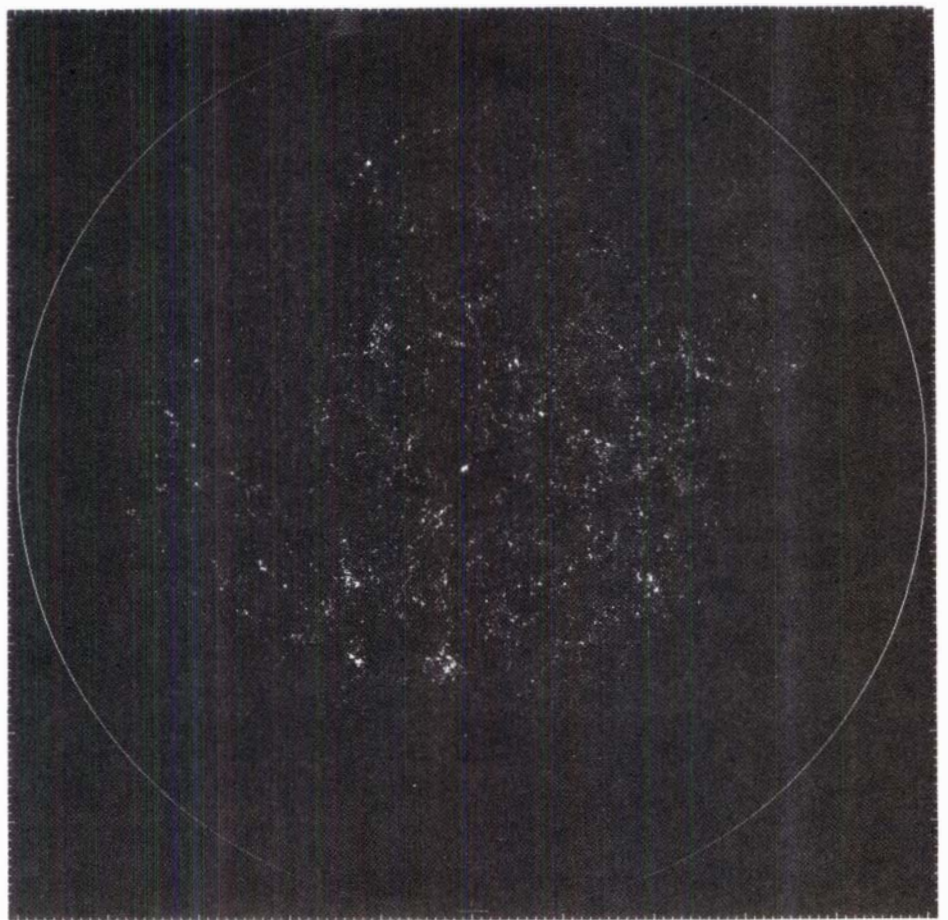
Inicialment, els *quasars* van ésser identificats per llur intensa emissió d'ones radioelèctriques.<sup>10</sup> Els estudis òptics mostraren fonts estel·lars semblants a punts, els espectres dels

quals indicaven fortes línies d'emissió amb enormes desplaçaments cap al vermell.<sup>11</sup> En un univers en expansió, les línies de l'espectre amb desplaçament cap al vermell sorgeixen d'una velocitat en recessió. Els *quasars* amb  $z = 3,4$  (és a dir, longituds d'ona de línies desplaçades de les posicions del laboratori segons un factor 3,5) són els elements de l'univers més distants que es coneixen. Avui dia, la majoria dels astrònoms estan d'acord que els *quasars* són nuclis anormals de galàxies molt llunyanes que irradien lluminositats extremament altes. Hom ha descobert que alguns d'ells estan situats en tènues agrupacions de galàxies normals. Els *quasars* i les galàxies en "raïms" tenen els mateixos desplaçaments cap al vermell i, per tant, són a la mateixa distància. Alguns *quasars* són envoltats d'un tènue material denominat el disc normal de la galàxia.<sup>12</sup>

En un cas extraordinari, dos *quasars* extremament junts en el firmament tenen uns espectres òptics pràcticament idèntics i uns desplaçaments cap al vermell també idèntics;<sup>13</sup> pot ser que aquest descobriment vulgui dir que estem observant dues imatges d'un mateix objecte (fig. 1). Una galàxia interposada en la línia de visió podria desviar la radiació del *quasar*, i, d'aquesta manera, actuaria com una lent gravitacional formant dues (o potser tres) imatges. Si aquest model és correcte, s'haurà descobert un fenomen predit fa molt de temps. A més a més, hi haurà una prova decisiva que el *quasar* és mes lluny que la galàxia intermèdia.

Hom ha observat que la lluïssor dels *quasars* varia en una escala de temps increïblement petita.<sup>14</sup> En longituds d'ona de la banda visible i infraroges, algunes magnituds canvien en un dia, i algunes polaritzacions només en algunes hores. L'enorme intensitat de raigs X dels *quasars* ( $10^{14}$  lluminositats solars per segon) pot canviar en unes hores. Aquests curts períodes de lluminositat indiquen que la font central d'energia és molt petita, amb dimensions només comparables al nostre sistema solar. Donada la gran quantitat de models per als *quasars* i els nuclis actius de les galàxies, resulta molt més satisfactori estendre la investigació als forats negres de masses solars entre  $10^6$  i  $10^{10}$ . Els estels que s'acosten als forats negres són desplaçats o "empassats", i emeten enormes quantitats d'energia gravitacional. Al marge que aquest model específic sigui correcte, la majoria dels astrònoms estan d'acord que no hi ha raons importants per a dubtar que els desplaçaments cap al vermell que s'han observat són la indicació d'enormes distàncies i creuen que és necessària una "nova física" per a comprendre els

Fig. 2 El milió de galàxies més brillants tal com es veuen en el quadrant nord del cel, segons càlculs de Shane i Wirtanen a l'observatori de Lick,<sup>16</sup> acabat de reduir.<sup>16</sup> El pol nord galàctic és al centre, l'equador és a la vora i la latitud galàctica és una funció lineal del radi.  
(Cortesia de P.J.E. Peebles).



*quasars*. Tot i això, el dilema plantejat per llur sistema energètic és un dels més complicats de l'astronomia contemporània.

Un enigma que encara persisteix ve de les observacions dels *quasars* que són fonts dobles d'ones radioelèctriques. En alguns d'aquests, sembla com si les fonts d'ones radioelèctriques se separessin amb velocitats més altes que la de la llum, si és cert que els *quasars* se situen a les distàncies cosmològiques deduïdes per llurs desplaçaments cap al vermell. Actualment, aquestes interpretacions no s'entenen com modificacions a la concepció present dels *quasars*, sinó que més aviat hom suposa que els senyals radioelèctrics són generats, dispersats o reflectits en un medi estacionari que envolta l'objecte central actiu.<sup>15</sup> Aquestes fonts s'han de relacionar amb els dolls que es veuen en les fotografies òptiques d'algunes galàxies radioelèctriques. Les observacions interferomètriques contínues que es faran durant els anys vuitanta haurien de

delimitar-ne les propietats més detalladament. Les abundants línies d'absorció que s'observen en els espectres dels *quasars* tenen, aparentment, diferents tipus d'origens.<sup>16</sup> Algunes sorgeixen de l'interior del *quasar*, d'altres en la galàxia envoltant, d'altres en les galàxies intermèdies i encara d'altres en els núvols intergalàctics al llarg de la línia de visió. Aquests darrers els aprofitarem com a única sonda de les densitats i les abundàncies dels gasos en les èpoques més primitives de l'univers. Hom espera que els estudis d'aquest núvols tan abundants ens expliquin la història química evolutiva tant d'ells com de les galàxies primàries que van formar.

Els *quasars* eren més nombrosos i lluminosos en el passat.<sup>17</sup> El nombre de *quasars* detectats disminueix a  $Z = 3$  i el *quasar* més llunyà té  $Z = 3,5$ . ¿Podem pensar que els *quasars* poden ser una eina per a identificar galàxies encara més distants, potser amb  $Z$  propera a 10? Potser es

Fig. 3 El "raim" de galàxies Hèrcules, fotografat amb el telescopi du Pont de 2,5 metres a Las Campanas, Xile. Observem la increïble varietat de formes de galàxies dins de l'agrupació.  
(Cortesia d'A. Drenler, Hale Observatories).



tracta de galàxies difuses, molt extenses, o bé tindran regions de lluïssor superficial molt baixa; potser seran vermelles a causa dels seus amplis desplaçaments cap al vermell, o bé anormalment blaves, cosa que indicaria que en aquell període primitiu va haver-hi una enorme abundància de fabricació d'estels. I quines ca-

racterístiques poden identificar l'època de la formació de les galàxies després de la "gran explosió"? Aquestes són les preguntes que els astrònoms es fan ara i que, amb les noves tècniques d'observació, hauran de ser sotmeses a un estudi crític en aquesta dècada.

## DISTRIBUCIÓ DE LA MASSA EN L'UNIVERS

La distribució de la matèria visible en l'univers és jeràrquica, en progressió de galàxies a grups de galàxies i a grups de grups de galàxies. Els càlculs dels milions de galàxies més brillants (fig. 2) revelen una xarxa diàfana de disposicions lineals i de grans buits, amb una manca sorprenent de galàxies de camp aïllades.<sup>18</sup> La majoria de les galàxies estan agrupades en petits "raïms" (fig. 3) que, a la vegada, s'ajunten per formar superagrupacions. Va ser durant la pas-

sada dècada que els astrònoms van adonar-se que les galàxies, després de llur formació, no eren els universos aïllats que Hubble havia predit, sinó que més aviat reaccionen amb llur entorn i entre ells mateixos de manera complicada. Les galàxies el·líptiques es troben preferentment en les regions de densitat més alta de les agrupacions; les espirals són sovint en les regions externes de baixa densitat, o bé aïllades.<sup>19</sup> Dins dels "raïms", les galàxies centrals es

fan massisses a costa dels estels veïns. Les galàxies en col·lisió o les que es deformen entre elles són les formes patològiques que hom observa tot sovint en el cel.<sup>20</sup> L'entorn de galàxies sembla que és fonamental per a determinar la morfologia de la galàxia.

Els factors addicionals que fan que una galàxia adopti la forma espiral o el·líptica encara es desconeixen, encara que tant la densitat local de massa com el contingut local de gas han de ser determinants. El contingut de gas és particularment significatiu per a la comprensió de l'evolució de la galàxia, ja que és d'on es formen els nous estels. Encara no sabem si les galàxies tenen la tendència d'acumular o perdre el gas en els espais entre les agrupacions. Potser facin ambdues coses en etapes diferents de llur evolució. Pel que fa a les grans galàxies en repòs al centre dels "raïms", s'ha observat que hi cauen núvols d'hidrogen. En les galàxies que es desplacen a grans velocitats a través del medi situat entre les agrupacions, hom suposa que el gas es desprèn de la galàxia a causa de la pressió brutal del gas d'entre les agrupacions. Dins les galàxies, els vents estel·lars d'altres velocitats, els remolins produïts per explosions de *supernovae* i l'evaporació produïda per un medi intergalàctic a alta temperatura poden alterar l'equilibri entre el gas, la pols i els estels. Les delicades interaccions d'aquests processos determinen la presència o l'absència d'un component gasós significatiu.<sup>21</sup>

Els estels de l'interior de les galàxies evolucionen; les galàxies de l'interior de les agrupacions evolucionen, i les agrupacions de galàxies també evolucionen. L'època actual podria anomenar-se la de l'evolució de les agrupacions. La de Virgo, per exemple (de la qual la nostra galàxia és un "suburbí"), està en un estadi primari d'evolució, amb una forma irregular, una àmplia fracció d'espirals, petits moviments entorn de les galàxies, temperatura baixa del gas d'entre les agrupacions i una baixa lluminositat de raigs X centrada en galàxies individuals (fig. 4). A mesura que els "raïms" evolucionen, la forma de l'agrupació esdevé més regular, l'expansió en velocitats entre galàxies augmenta, el mateix que la densitat de gas central (potser com a resultat del despreniment del gas de les galàxies que passen pel mig de l'agrupació), creix el potencial gravitacional central i es pot formar una galàxia el·líptica supergegant en el centre.<sup>22</sup> Els astrònoms es van sorprendre en descobrir que el gas calent situat entre les agrupacions, identificat per la seva emissió de raigs X, no és una barreja d'hidrogen i heli purs apareguda poc després de la "gran explosió" i

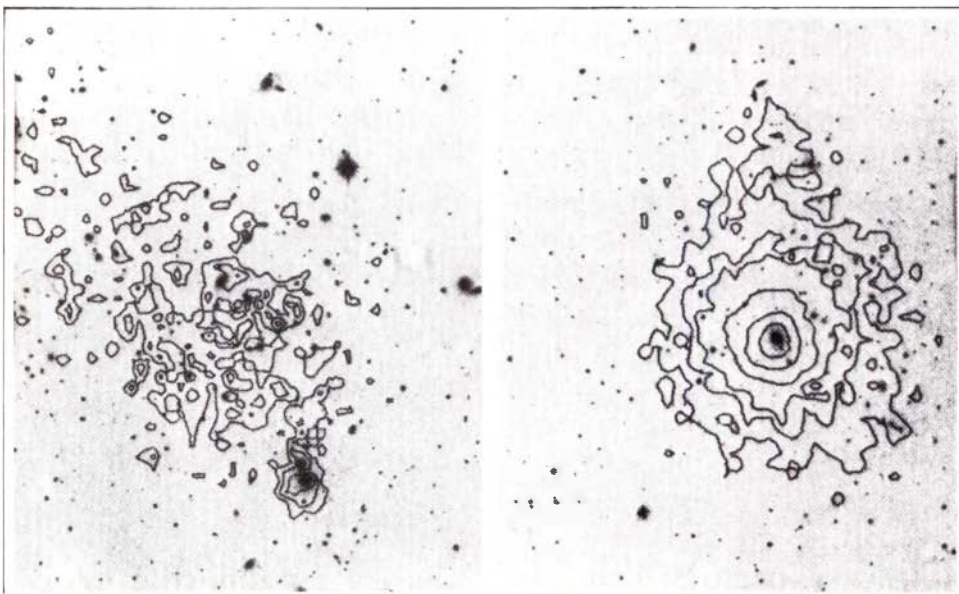


Fig. 4 Contorns d'emissions identiques de raigs X superposades en els Palomar Sky Survey Fields de dues agrupacions de galàxies, l'Abell 1367 (esquerra) i l'Abell 85 (dreta). Hom suposa que l'A 1367 és un nivell primari d'evolució, a causa del gas que emet raigs X agrupats al voltant de les galàxies individuals. En un "raim" evolucionat com l'A 85, aquest gas ha desaparegut de les galàxies individuals, i té clarament el seu pic al voltant de la galàxia el·líptica gegant central dominant. Les observacions de raigs X van ser fetes per Jones i altres<sup>22</sup> a l'Einstein Observatory.  
(Cortesia de C. Jones).

que després restà de la formació de la galàxia, sinó que és ric en elements pesants tals com, per exemple, el ferro.<sup>23</sup> Això és un signe clar que aquest gas se sintetitzà a l'interior dels estels i ha estat retornat als espais intergalàctics per les explosions de les *supernovae*. Els programes per als anys vuitanta intentaran descobrir com l'evolució de les galàxies de dins dels "raïms" ha afectat l'evolució d'aquests "raïms", i viceversa. L'astronomia, durant els darrers cinquanta anys, s'ha ampliat de l'estudi dels estels al de les galàxies. Per tant, la dècada dels vuitanta hauria d'ésser un temps dedicat a l'estudi de les agrupacions de galàxies.

Ha estat solament a la darrera dècada que els astrònoms han reconegut que una gran part de la massa de l'univers ha d'ésser invisible, encara que una certa quantitat d'informació contradictòria s'ha anat acumulant durant molt de temps. Fa quasi cinquanta anys, Smith<sup>24</sup> i Zwicky<sup>25</sup> van fer una observació sorprenent: els moviments individuals de les galàxies en un "raim" són tan amplis que l'atracció gravitacional de totes les galàxies agrupades no és suficient per a mantenir tota l'agrupació. Els "raïms" de galàxies haurien, doncs, de desfer-se, encara que, aparentment, no és així. Tot això suggereix que hi ha un component de matèria no descobert per a mantenir unides les agrupacions. Uns experiments molt recents han reforçat aquesta conclusió: la dinàmica de les galàxies individuals, les dobles, i dels grups apunta cap a aquest component de massa present a tot arreu però encara no observat.<sup>26</sup> És probable que un 90 per cent de la massa de l'univers ens sigui encara invisible. La seva lluminositat per unitat de massa ha de ser considerablement més baixa que la de la matèria estel·lar comuna. Els astrònoms solen dir que aquesta massa pot tenir forma de maó, de pilota, de Júpiter, de cometa o de miniforjat negre. Actualment, la seva presència es detecta només per la seva interacció gravitacional, però els estudis que hom està portant a terme en totes les regions de l'espectre electromagnètic ajudaran a delimitar les seves propietats. La presència d'una massa tal, en quantitats suficients per a mantenir les agrupacions juntes, probablement seria insuficient per a "tancar" l'univers.

Almenys una fracció de la matèria no lluminosa de l'univers es localitza en les parts externes de les galàxies de forma espiral. Fa molt de temps que els astrònoms saben que els estels i el gas d'una galàxia espiral orbiten al voltant del centre d'aquesta. Hom va predir que les velocitats orbitals dels estels disminuiran a mesura que

augmenti la seva distància al centre de la galàxia, de la mateixa manera que les velocitats del planetes del sistema solar són més petites com més lluny són del Sol. La disminució de la velocitat apareix com una resposta gravitacional a la massa central d'atracció, és a dir, el Sol, en el cas del sistema solar. No obstant això, alguns estudis recents dels espectres de les galàxies espirals<sup>27</sup> mostren sense cap mena de dubte que les velocitats del gas i els estels continuen essent altes a grans distàncies del centre (fig. 5). Això significa que la massa de la galàxia no està tan condensada en el centre com en el sistema solar. En les espirals comunes, la massa ha d'estar distribuïda molt més enllà de la imatge òptica, probablement en halos foscs impressionants. Fa poc s'ha detectat una corona gasosa a l'entorn de la nostra galàxia, a partir de les seves línies ultraviolades característiques observades en un espectre que s'ha obtingut amb el satèl·lit artificial International Ultraviolet Explorer. L'anàlisi preliminar n'indica que hi ha un halo d'àtoms de carboni i silici altament ionitzats i sembla que una temperatura d'aproximadament 10<sup>5</sup> °K, així com partícules menys ionitzades. El descobriment d'un halo calent a l'entorn de la nostra galàxia reforça l'evidència que algunes de les línies d'absorció dels *quasars* s'originen en halos de galàxies properes al llarg de la línia de visió cap al *quasar*.

Les galàxies el·líptiques també tenen propietats dinàmiques inesperades. Apareixen com sistemes esfèriques que presenten diversos graus d'aixafament. Els astrònoms havien suposat que una configuració tan plana sorgia com a resultat d'una rotació ràpida. Recents estudis de dinàmica han demostrat que això no és cert.<sup>29</sup> Moltes galàxies el·líptiques estan girant massa a poc a poc perquè llur rotació sigui la causa de l'aixafament que presenten. Les galàxies el·líptiques poden tenir tres eixos desiguals, amb òrbites estel·lars estables alineades amb la forma triaxial. La dinàmica clàssica dels estels s'està fonent amb la cosmologia moderna a mesura que es fan esforços per comprendre la dinàmica de les galàxies el·líptiques i espirals.

## LA NOSTRA GALÀXIA

Sorprenentment, les investigacions per a desxifrar l'estructura de la nostra pròpia galàxia no estan al mateix nivell dels avenços extragalàctics. Sabem que vivim en una galàxia espiral,

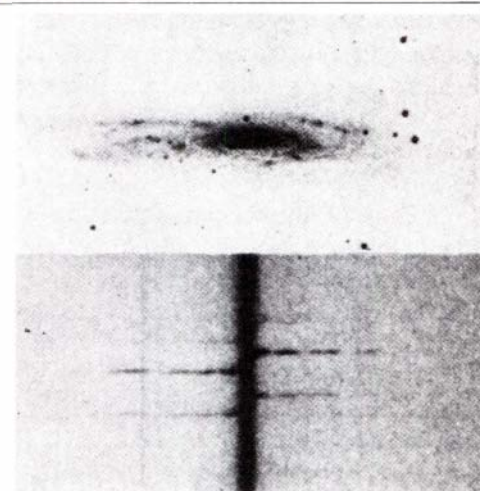


Fig. 5 (Part inferior) La NGC 801, una galàxia espiral vista de prop, amb un telescopi de quatre mestres a l'Alcatt Peale National Observatory. (part superior) Línies d'emissió al llarg de l'eix principal del NGC 801 produïdes pel gas excitat en el disc galàctic (horitzontal). La més forta es deu a l'hidrogen. La forta continuïtat (vertical) sorgeix dels estels en el nucli. Com a resultat de la rotació de NGC 801, el gas en el sud-oest (esquerra) s'està acostant a l'observador i, per això, les línies d'emissió estan desplaçades a una longitud d'ona curta; el gas al nord-est (dreta) s'està allunyant de l'observador i les línies d'emissió estan desplaçades a una longitud d'ona més llarga (part superior de la foto). L'alt grau de velocitat a prop del nucli produeix les línies tan inclinades que es poden veure. L'influència gravitacional de la massa de baixa lluminositat en amplies distàncies nuclears produeix velocitats constants de rotació observades a grans distàncies nuclears.  
(La fotografia és una cortesia de B. Carney; l'espectre el proporciona V. C. Rubin. W. K. Ford, Jr.).

Fig. 6 Fotografia feta per l'Einstein Laboratory de la regió central de M31, la galàxia Andròmeda, la qual mostra nombroses fonts de raigs X. Hom encara desconeix la naturalesa de moltes d'aquestes fonts. L'àrea brillant que indica la fletxa és molt a prop del centre M31 i pot ser que s'origini dels núvols de gas que s'acumulen formant un objecte massís. L'emissió de raigs X d'aquesta font és mil vegades més forta que qualsevol altra del centre de la nostra galàxia.

(Cortesia de L. Van Spey Broeck).

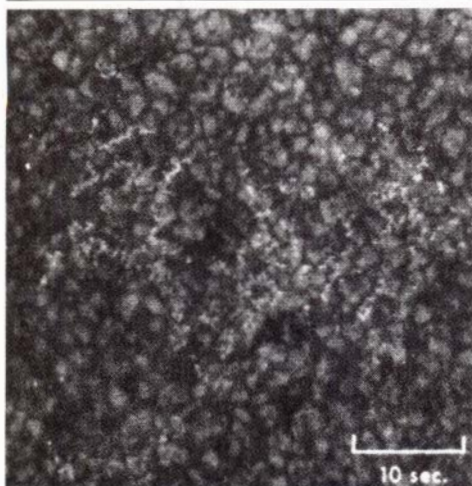


Fig. 7 La "filigrana" solar, observada amb el telescopi Tower, Sacramento Peak Observatory, Ne. Mexico. Mostrem aquestes estructures inferiors a un arc d'un segon, descobertes per R.B. Dunn, tal com apareixen a les de H $\alpha$ , a 2A del centre de la línia. També es veu el subjacent de la imatge solar. La filigrana apareix en àrees amb fort camp magnètic, però el camp pot estendre's més enllà de la filigrana. Hom no sap gaire segur quina és la naturalesa d'aquest fenomen (Foto copyright Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., Sacramento Peak Observatory).

tot i que la seva morfologia i les seves dimensions específiques ens són encara un misteri. No sabem la distància que en separa el Sol del centre ni la nostra velocitat de rotació amb prou precisió per a determinar l'escala galàctica dins d'un 20 per cent. Actualment, els astrònoms interpreten els braços de l'espiral com un fenomen ondulatori,<sup>30</sup> però aquesta teoria té més força en els aspectes generals que no pas en els específics. El progrés inicial que es va obtenir en deduir l'estructura detallada dels nuclis distants de la nostra galàxia sorgí d'una interferometria de línia molt llarga de l'espectre radioelèctric i d'unes observacions de l'emissió del neó ionitzat en l'infraroig.<sup>31</sup> Dins d'una petita regió del centre de la nostra galàxia, hi ha una configuració asimètrica sorprenent de petites fonts de diferents volums i velocitats. Tant la massa com l'emissió d'energia són altes, essencialment en els infraroigs.

La nostra galàxia no és única quant a la seva energètica nuclear. Els nuclis de les galàxies són fonts d'enormes quantitats d'energia que irradien en les regions de l'espectre dels raigs X, òptica, infraroig i radioelèctrica. Els *quasars*, les galàxies Seyfert, els objectes BLLac i fins i tot les galàxies normals produeixen enormes quantitats d'energia. Potser totes aquestes configuracions contenen un objecte central impressionant, un forat negre que devora el gas i els estels que s'hi acosten, i que allibera una enorme energia gravitacional. Alternativament, potser que els fenòmens astrofísics convencionals puguin ésser responsables dels efectes observats. Conèixer la font de la "màquina" de l'energia central i el seu efecte sobre la formació dels estels i l'evolució de les galàxies és una fita important de l'astronomia dels anys vuitanta. En la dècada vinent, la varietat d'enfocaments possibles per a fer estudis detallats de la nostra galàxia hauria de proporcionar una imatge més coherent del sistema estel·lar en el qual vivim. Amb el telescopi espacial, els estudis dels estels amb halo tènue, de les agrupacions globulars llunyanes i de les galàxies satèl·lits externes haurien de delimitar l'extensió del sistema i la seva evolució química com una funció de l'edat i de la posició. Hom espera que les observacions mil·limètriques i radioelèctriques dels núvols moleculars identificaran les regions de formació dels estels i ens ajudaran a comprendre llur dinàmica. Uns models teòrics molt complicats s'aplicaran a l'estabilitat dels sistemes de disc. Amb aquestes investigacions, els astrònoms probablement puguin descobrir quin paper juguen en aquesta estabilitat les deformacions del disc extern. Potser que dins d'aquest

context hom entengui el corrent de Magallanes, l'àmplia franja d'hidrogen neutral que s'estén des de la nostra galàxia fins als veïns més propers. Probablement obtindrem més informació sobre els fenòmens d'energia nuclear amb les observacions amb raigs X de les galàxies properes. En el nostre veí espiral més proper, el M31, hom ha identificat disset fonts de radiacions de raigs X en el seu nucli (fig. 6). No es pot entendre encara la seva naturalesa, però. Tanmateix podrem formar, peça per peça, una figura detallada de la nostra galàxia, tant mitjançant els estudis del seu interior com els de l'exterior.

## L'EVOLUCIÓ DELS ESTELS

Per a tenir una comprensió correcta de la formació dels estels és essencial conèixer les característiques del gas i la pols interestel·lars dels quals neixen les noves generacions d'estels. Durant els anys setanta, els astrònoms van descobrir que el medi interestel·lar de la nostra galàxia es compon tant d'elements calents com freds<sup>34</sup> Alguns gasos són a temperatures de 1.000.000 ° K i d'altres estan formant densos núvols moleculars amb temperatures properes a 10 ° K. Els nous instruments sensibles a les regions mil·limètrica i infraroja de l'espectre han permès que els astrònoms puguin sondejar els núvols de molècules fredes, els indrets de naixement dels estels. Les acumulacions de gas i pols es condensen sota l'efecte de llur pròpia gravetat i s'escalfen a manera que col·lapsen fins que les temperatures interiors es tornen prou altes per a iniciar la fissió nuclear. Així és com neix un protoestel o una agrupació de protoestels.

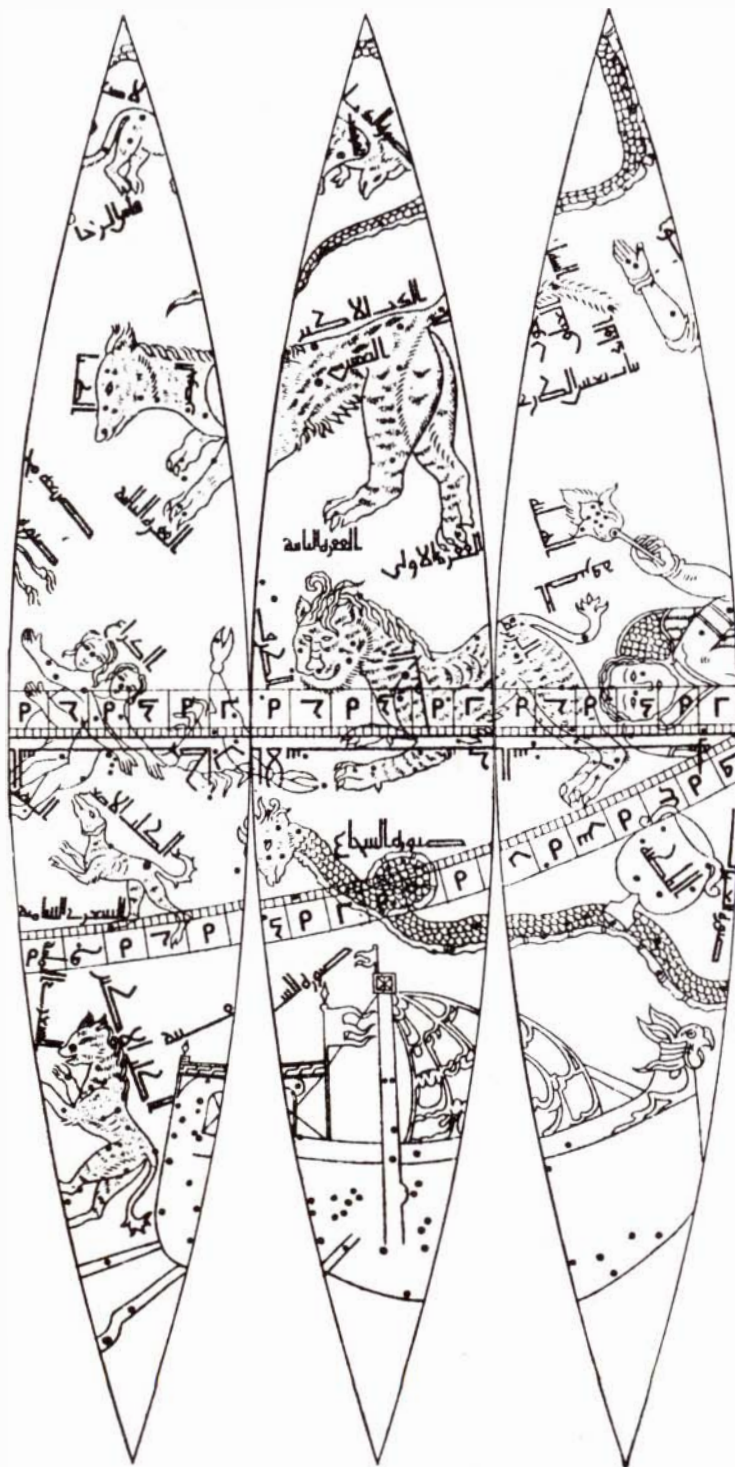
Existeixen algunes proves que les explosions de *supernovae* d'estels en procés d'extinció comprimeixen els núvols<sup>35</sup> de tal manera que apareix una nova generació d'estels. La formació d'estels és seqüencial, tant espacialment com temporalment<sup>36</sup> si considerem les noves generacions que es creen en els límits exteriors de les antigues associacions. Es desconeixen, però, els papers que hi juguen els camps magnètics, la rotació i la turbulència, així com els factors que controlen els naixements individuals o múltiples. Igual com el nostre Sol, hi ha alguns estels que mantenen al seu voltant un disc o una estructura complexa de residus després de llur formació. Aquests estels són els que probable-

ment donen lloc a les associacions de sistemes solars.

La majoria de la vida d'un estel consisteix en una fase estable en què aquest va utilitzant l'energia nuclear de les seves fonts per a mantenir el nivell energètic. Els detalls de la seva evolució depenen, entre altres factors, de la seva massa i composició. És cada vegada més segur, però, que tots els estels, siguin quines siguin llurs masses, perden quantitats considerables de massa durant llur evolució, o bé a causa de vents actius o explosions.<sup>37</sup> A partir de les observacions de les regions ultraviolades, òptiques i infraroges hom ha obtingut una imatge bàsica dels processos involucrats. És interessant, però, que ara hom cregui que la pols interestel·lar es crea dels productes expulsats per l'estel. El coneixement de l'interior, de la barreja i els mecanismes d'expulsió dels estels haurà de precedir la comprensió de la síntesi del nucli i del procés cíclic del gas dins dels estels.

Durant les darreres etapes de l'evolució d'un estel, quan aquest ha esgotat el combustible nuclear o quan ja no pot haver-hi més escalfament per contracció, té lloc una crisi energètica. Ara podem identificar els nans blancs, els estels neutrònics i, fins i tot, els forats negres com els productes finals de l'evolució estel·lar. Les observacions de Sírius B van establir l'existència dels nans blancs, així com la identificació del pulsar en la nebulosa del Cranc va provar l'existència dels núvols de neutrons. Malauradament, de moment no hi ha cap evidència concloent de l'existència dels forats negres, tot i que constantment en sorgeixen possibilitats d'explicació. Una prova de llur existència són els raigs X emesos per la matèria que s'acumula formant objectes compactes impressionants. Els elements exòtics descoberts fa poc, productors de raigs X i  $\gamma$  per explosió, estan relacionats amb aquestes circumstàncies, encara que hom no sap res concret respecte als mecanismes implicats. Davant les observacions intenses i els estudis teòrics per a descobrir la realitat dels forats negres, és interessant recordar el descobriment del primer nan blanc Sírius B. El 1844, Bessel va adonar-se de la irregularitat dels moviments de Sírius i va concloure que era un estel doble. El 1862, la firma Alan Clark, la companyia americana fabricant de telescopis, va realitzar una lent de 18 polzades encarregada per la Universitat de Mississippi. (A causa de la guerra civil, però mai no els fou enviada i finalment va acabar en el Dearborn Observatory de la Northwestern University). En fer proves amb la lent fora d'un telescopi, Alan





Clark fill detectà el company tènue de Sírius.<sup>38</sup> Això no obstant, hom no en va obtenir l'espectre fins cinquanta anys més tard, i encare van passar deu anys abans de reconèixer la importància astrofísica del descobriment d'un estel petit però massís. El ritme de la ciència és més ràpid avui dia, i esperem que no facin falta vuitanta anys per a tenir proves directes i confirmades dels forats negres.

Els estels de neutrons tenen masses com la del nostre Sol, però llurs radis són  $10^5$  vegades més petits i llurs densitats  $10^{14}$  vegades més grans. El primer estel de neutrons va ser identificat<sup>39</sup> com un pulsar radioelèctric. El pols de la radiació és produït per la presència d'un intens camp magnètic. Actualment hom coneix uns 300 pulsars dins de la nostra galàxia. Alguns d'aquests estan formant sistemes dobles compactes. L'emissió de raigs X d'aquests sistemes s'interpreta com l'acumulació de massa en un núvol de neutrons.

Els canvis observats en el període de pulsació deixen entreveure unes condicions físiques extremament complexes. Amb llurs superfícies sòlides enreixades i llurs interiors superfluids, els pulsars són com uns laboratoris que faciliten unes condicions inassolibles en el nostre planeta.

Un pulsar binari, el període del qual va ser controlat durant cinc anys<sup>40</sup>, ha aportat la primera prova indirecta però convincent de l'existència de les ones gravitacionals, les quals ja s'havien predit com un resultat de la teoria general de la relativitat. L'escurçament petit però continu de l'òrbita dels dos objectes s'atribueix a la dissipació de l'energia per radiació d'ones gravitacionals. Els experiments que hom està portant a terme per detectar directament la radiació gravitacional de fonts més intenses (centres de *supernovae* que col·lapsen, per exemple) són extremament difícils.

## EL SOL

Durant la dècada dels setanta, la física solar s'ha desenvolupat a partir d'un estudi intens del nostre estel més proper, i progressivament s'ha estès a una investigació més àmplia dels gasos ionitzats en els camps de gravetat i electromagnètic dels estels. El Sol, per a nosaltres, és gairebé un "dels nostres laboratoris" que ens proporciona més informació de fenòmens com la pèrdua de massa, les corones calentes, els cicles d'activitat i l'escalfament. Hom sap que tots aquests processos tenen lloc en una àmplia



varietat d'estels.

El descobriment d'un flux de neutrinos extremament baix que surt del Sol ha provocat una profunda revaluació de les nostres idees sobre l'estructura i la dinàmica de l'interior del Sol. El fet que probablement s'hagi detectat neutrinos<sup>42</sup> al nivell  $2,2 \pm 0,4$  unitats solars és un valor encara massa baix comparat amb el resultat predit amb els darrers resultats teòrics i de laboratori. Si volem comprendre el funcionament interior del Sol, és absolutament necessari fer un reexamen dels models i les abundàncies estel·lars, dels paràmetres nuclears i de qüestions com, per exemple, si el Sol té una part interna en rotació ràpida o si es barreja amb d'altres capes. Estem forçats a concloure que el ritme de cremació dins del Sol no és tan clar com hom pensava abans.

És essencial comprendre la naturalesa de totes les estructures, tant les grans com les petites. Aquests moviments estan íntimament connectats amb l'activitat solar i possiblement amb llargues fluctuacions del Sol. Potser totes dues tinguin conseqüències directes sobre el clima terrestre. L'espectacular descobriment que l'atmosfera solar té moviments ondulatoris radials amb un període de cinc minuts<sup>43</sup> ens ha portat a fer estudis teòrics més profunds de la generació, la propagació i l'esmoreïment de les ones de so, gravetat i magnetisme. Aquestes oscil·lacions de cada cinc minuts s'estan utilitzant per a sondejar l'interior solar d'una manera anàloga al sondeig dels sísmes de l'estructura interna de la Terra.

Les primeres investigacions de George Hale sobre els camps magnètics solars ens han permès fer la distinció entre els forts camps magnètics de les taques solars i un camp dèbil d'un gauss en el Sol. Les complicades tècniques d'observació de la dècada passada han revolucionat el nostre concepte de l'estructura del camp magnètic solar.<sup>44</sup> La seva força és molt alta (1.500 gauss) en les regions on se'l detecta. El camp magnètic general d'un gauss detectat amb anterioritat era el resultat del petit volum d'aquests elements de fort camp magnètic, la mitjana del qual hom va trobar gràcies als magnetòmetres de baixa resolució. Segons les observacions, se'n desconeix el volum veritable; són massa petits per a la resolució de fins i tot els millors magnetògrams. Deuen tenir el volum de les "filigranes" solars (fig. 7), les estructures més petites que hom ha vist en el Sol (< 0,3 segons d'arc), les quals sembla que són coespacials amb els elements magnètics. Actualment s'estan portant a terme els intents teòrics d'explicar l'origen i l'estabilitat d'aquests



Fig. 8 Fotografia del Sol, feta l'1 de juny del 1973, amb un telescopi de raigs X d'American Science, Engineering, Inc, a bord de la primera missió NASA Skylab. La regió fosca prominent és un forat a la corona, una regió on disminueixen la temperatura i la densitat de la corona. Aquest forat és de més de 750.000 km. Les petites taques blanques són punts brillants de raigs X, regions d'emissió intensa.

(Cortesia d'American Science, Engineering, Inc.).

conductes de flux magnètics.

Un dels objectius principals del Solar Optical Telescope (telescopi òptic solar) en la càpsula espacial esmentada serà l'estudi del magnetisme solar amb un detall i una qualitat mai obtinguts abans. En aquesta dècada s'estan aconseguint uns avenços cabdals en el nostre coneixement dels camps magnètics solars (i dels estels, per correspondència) i llur relació amb l'activitat solar, l'estructura de la corona i l'escalfament. Alguns dels descobriments més importants de la física solar de la passada dècada són els referents a la corona.<sup>45</sup> La corona solar conté regions actives amb forts camps magnètics i configuracions tancades com llaços. També hi ha regions tranquil·les amb camps dèbils aparentment tancats en grans escales, i forats (fig. 8) associats amb camps magnètics dèbils de configuració divergent i oberta. Els punts brillants de la corona són petites regions d'emissions intenses de raigs X i ultraviolats extrems associats amb nous fluxos magnètics de la corona. Els forats d'aquesta són la causa dels corrents de vents solars d'alta velocitat (1.000 km per segon). També a la corona són freqüents els fenòmens d'ejecció de massa amb alta energia, els quals són importants per a la reestructuració exterior de la corona i de les erupcions solars. Hom ha d'entendre tots aquests fenòmens per a poder desenvolupar una base lògica de la teoria dels vents solars. Durant els anys vuitanta, els satèl·lits equipats amb telescopis de raigs X i magnetògrafs amb capacitats de formació d'imatges d'alta anàlisi haurien de proporcionar les dades necessàries perquè els astrònoms poguessin afrontar aquests problemes, no tan sols pel que fa al coneixement, sinó per llurs implicacions astrofísiques i geofísiques.

Encara que l'estudi dels estels i del Sol porta finalment al de l'origen del sistema solar, actualment només hi ha un petit grup d'astrònoms i geofísics que es dediquen a aquests problemes. Tots els estudis de l'abundància de meteorits, provinents de la formació dels pla-

netes i de petites partícules del sistema solar, haurien d'enriquir la nostra comprensió del que és necessari per a construir un sistema solar. És probable que en aquesta dècada hom comenci la recerca de planetes al voltant d'altres estels amb una varietat de tècniques que exclouin la formació directa de la imatge o notin el seu efecte en els moviments de l'estel pare. Si podem detectar altres sistemes solars, probablement sigui possible detectar altres civilitzacions. La detecció d'aquestes i, eventualment, una comunicació amb elles, és, realment, una fita per al futur.

## CONCLUSIONS

Vivim en un univers fascinant. Durant milers d'anys, la gent ha mirat el cel i ha comptat els seus cossos. Durant segles els astrònoms han utilitzat telescopis per a descobrir components més subtils. Però ha estat només durant els últims trenta anys que els astrònoms i els físics han pogut mirar el cel amb bandes de longitud d'ona diferents de la llum visible. Aquestes visions ens han mostrat classes d'objectes i de fenòmens totalment nous que mai no havíem pogut imaginar.

No obstant això, els astrònoms de les últimes dècades no han fet més que descobrir i catalogar. Hom ha obtingut comprensions fonamentals de la complexa interacció de totes les facetes de l'univers. Hom sap que els estels es formen a partir del gas primordial, que sintetitzen elements pesants i que tornen el gas enriquit als espais interestel·lars com a material per a formar noves generacions d'estels. La dinàmica de l'estructura espiral afecta el procés de formació d'estels en el disc galàctic. Els ritmes d'aquestes formacions i l'entorn de l'agrupació influencien la morfologia de les galàxies, siguin espirals o el·líptiques. Les característiques de les agrupacions reflecteixen l'evolució de les galà-

xies. Les molècules dels nostres cossos són constituïdes per àtoms sintetitzats en algun estel i, probablement, dipositat en la nebulosa solar inicial per alguna explosió. En les properes dècades és possible que els astrònoms descobreixin objectes encara més estranys i que estudiïn llurs propietats amb uns instruments perfeccionats, en la Terra i en l'espai. En els anys vuitanta, hom espera que el llançament d'un telescopi espacial (Space Telescope) ens ensenyi meravelles que ara només podem percebre lleugerament. Amb tots aquests estudis hauríem de poder determinar més exactament com funciona l'univers. Al llibre *My first summer in the Sierra*.<sup>47</sup> John Muir va escriure: "Quan intentem comprendre quelcom per si sol, ens adonem que està lligat a tota la resta de l'univers". L'impuls de la investigació astronòmica en la propera dècada serà dilucidar algunes d'aquestes connexions.

## ( V. C. Rubin )

### Referències i notes

- R.A. Alpher i R. Herman, "Nature" (Londres), 162, 774, 1948.
- A.A. Penzias i R.W. Wilson, "Astrophys. J.", 142, 419, 1965.
- D.P. Woody, J.C. Mather, N.S. Nishioka, P.L. Richards, "Phys. Rev. Lett.", 34, 1036, 1975.
- D.P. Woody i P.L. Richards, *ibid.*, 42, 925, 1979.
- G.F. Smoot, M.V. Gorenstein, R.A. Muller, *ibid.*, 39, 898, 1977; E.S. Cheng, P.R. Saulson, D.T. Wilkinson, B.E. Corey, "Astrophys. J. Lett.", 232, L 139, 1979.
- A. Sandage i G.A. Tammann, "Astrophys. J." 210, 7, 1976; G. de Vaucouleurs i G. Bollinger, *ibid.*, 233, 433, 1979; P.J.E. Peebles, "Comments Astrophys.", 6, 197, 1978; R.B. Tully i J.R. Fisher, "Astron. Astrophys.", 54, 661, 1977; M. Aaronson, J. Huchra, J. Mould "Astrophys. J.", 229, 1, 1979.
- J.R. Gott III, J.E. Gunn, D.N. Schramm, B.M. Tinsley, "Sci. Am.", 234, 62, març 1976.
- B.M. Tinsley, "Astrophys. J. Lett.", 173, L 93, 1973.
- J.P. Ostriker i S.D. Tremaine, *ibid.*, 202, L 113, 1975; A. Toomre, dins *The Evolution of Galaxies and Stellar Populations*; B.M. Tinsley i R.B. Larson, eds. (Yale University Observatory, New Haven, Conn., 1977) pàg. 401.
- D.O. Edge, J.R. Shakeshaft, W.B. McAdam, J.E. Baldwin, S. Archer, "Mem. R. Astron. Soc.", 68, 37, 1960; C. Hazard, M.B. Mackey, A.J. Shimmins, "Nature" (Londres), 197, 1037, 1963.
- T.A. Matthews i A.R. Sandage, "Astrophys. J.", 138, 30, 1963; M. Schmidt, "Nature" (Londres), 197, 1040, 1963.
- A. Stockton, "Nature" (Londres), 274, 342, 1978; J. Kristian, "Astrophys. J. Lett.", 179, L 61, 1973; E.J. Wampler, L.B. Robinson, E.M. Burbidge, J.A. Baldwin, *ibid.*, 198, L 49, 1975.
- D. Walsh, R.F. Carswell, R.J. Weymann, "Nature" (Londres), 279, 381, 1979; D.H. Roberts, P.E. Greenfield, B.F. Burke, "Science" 205, 894, 1979.
- H. Smith i D. Hoffleit, "Publ. Astron. Soc. Pac.", 73, 292, 1961; M. Schmidt, "Annu. Rev. Astron. Astrophys.", 7, 527, 1969; H. Tananbaum i altres, "Astrophys. J. Lett.", 234, L9, 1979.
- G.A. Seielstad, M.H. Cohen, R.P. Linfield, A.T. Moffet, J.D. Romrey, R.T. Schilizzi, D.B. Shafer, "Astrophys. J.", 229, 53, 1979.
- J.N. Bahcall i L. Spitzer, "Astrophys. J. Lett.", 156, L63, 1969; A.F. Davidsen, G.F. Hartig, W.G. Fastie, "Nature" (Londres) 269, 203, 1977; P.A. Strittmatter i R.E. Williams, "Annu. Rev. Astron. Astrophys.", 14, 307, 1976.
- R.F. Green i M. Schmidt, "Astrophys. J. Lett.", 220, L1, 1978.
- M. Seldner, B. Siebers, E.J. Groth, P.J.E. Peebles, "Astron. J.", 82, 249, 1977.
- A. Dressler, "Astrophys. J.", en premsa.
- A. Toomre i J. Toomre, *ibid.*, 178, 623, 1972.
- W.G. Mathews i J.C. Baker, *ibid.*, 170, 241, 1971; S.M. Faber i J.S. Gallagher, *ibid.*, 204, 365, 1976.
- C. Jones, F. Mandel, J. Schwarz, W. Forman, S.S. Murray, F.R. Harnden Jr., "Astrophys. J. Lett.", 234, L21, 1979; J.P. Ostriker dins *The Evolution of Galaxies and Stellar Populations*, 1977.
- D.S. Mathewson i M.N. Cleary, "Astrophys. J.", New Haven, Conn., 1977, pàg. 369.
- P.J. Serlemitsos, E.A. Boldt, S.S. Holt, R. Ramaty, A.F. Briskin, "Astrophys. J. Lett.", 184, L1, 1973.
- S. Smith, "Astrophys. J.", 83, 23, 1936.
- F. Zwicky, *ibid.*, 86, 217, 1937.
- S.M. Faber i J.S. Gallagher, "Annu. Rev. Astron. Astrophys.", 17, 135, 1979.
- M.S. Roberts i A.H. Rots, "Astron. Astrophys.", 26, 483, 1973; A. Bosma, tesi, Rijksuniversiteit te Groningen, 1978; V.C. Rubin, W.K. Ford Jr., N. Thonnard, "Astrophys. J. Lett.", 225, L107, 1978.
- B.D. Savage i K.S. de Boer, "Astrophys. J. Lett.", 230, L77, 1979.
- F. Bertola i M. Capaccioli, "Astrophys. J.", 200, 439, 1975; G. Illingworth, "Astrophys. J. Lett.", 218, L43, 1977.
- C.C. Lin, "J. Soc. Ind. Appl. Math.", 14, 876, 1966; C.C. Lin i F.H. Shu, "Astrophys. J.", 140, 646, 1964; W.W. Roberts Jr., M.S. Roberts, F.H. Shu, *ibid.*, 196, 381, 1975; E.B. Jensen, K.M. Strom, S.E. Strom, *ibid.*, 209, 748, 1976.
- K.Y. Lo, R.T. Schilizzi, M.H. Cohen, H.N. Ross, "Astrophys. J. Lett.", 202, L63, 1975; R.R. Wollman, T.R. Geballe, J.H. Lacy, C.H. Townes, D.M. Rank, *ibid.*, 218, L103, 1977.
- D.S. Mathewson i M.N. Cleary, "Astrophys. J.", 190, 291, 1974.
- L. Van Speybroeck, A. Epstein, W. Forman, R. Giacconi, C. Jones, W. Liller, L. Smarr, "Astrophys. J. Lett.", 234, L45, 1979.
- G. Field dins *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data*; M.S. Longair, editor (International Astronomical Union Symposium 63, Reidel, Dordrecht, Netherlands, 1974), pàg. 13; P. Thaddeus dins *Star Formation*, T. de Jong i A. Maeder, editors (Reidel, Dordrecht, Netherlands, 1974) pàg. 37.
- W. Herbst i G.E. Assousa, "Astrophys. J.", 213, 473, 1977.
- B.G. Elmegreen i C.J. Lada, *ibid.*, 214, 725, 1977.
- J.P. Cassinelli, "Annu. Rev. Astron. Astrophys.", 17, 275, 1979.
- A.M. Clerke, *A Popular History of Astronomy During the Nineteenth Century* (A. i C. Black, Edinburgh, 1885) pàg. 52.
- A. Hewish, S.J. Bell, J.D. Pilkington, P.F. Scott, S.A. Collins, "Nature" (Londres), 217, 709, 1968.
- J.H. Taylor, L.A. Fowler, P.M. McCulloch, *ibid.*, 277, 437, 1979.
- J. Weber, "Sci. Am.", 224, 22 (maig 1971).
- J.N. Bahcall i / R. Davis Jr., "Science", 191, 264, 1976.
- R.B. Leighton, R.W. Noyes, G.W. Simon, "Astrophys. J.", 135, 474, 1962; R.F. Stein i J. Leibacher, "Annu. Rev. Astron. Astrophys.", 12, 407, 1974.
- E.N. Parker, "Sci. Am.", 233, 42 (Setembre 1975); *Cosmical Magnetic Fields* (Oxford Univ. Press, London, 1979).
- G.L. Withbroe i R.W. Noyes, "Annu. Rev. Astron. Astrophys.", 15, 363, 1977; G.S. Vaiana i R. Rosner, *ibid.*, 16, 393, 1978.
- C.D. Shane i C.A. Wirtanen, "Publ. Lick Obs.", 22" (1a. part), 1967.
- J. Muir, *My First Summer in the Sierra* (Houghton Mifflin, Boston, 1916, reimprès el 1979) pàg. 157.
- Agraïxo els doctors J. Bechers, B. Carney, J.S. Gallagher, R. Herman, J. Linsky, R.J. Rubin, J. Thomas i A. Rubin pels seus valuosos comentaris del meu manuscrit; a L.W. Mckenzie, del departament de l'Interior dels EUA, Yosemite National Park, que trobà la citació de J. Muir; i a M. Coder que la transcriví. L'Acadèmia Nacional de Ciències és responsable actualment d'un estudi d'astronomia dels anys 80, a l'Astronomy Survey Committee, càtedra del dr. G. Field. Agraïxo els grups de treball sobre astronomia extragalàctica (càtedra de S.M. Faber), astronomia solar (càtedra de A.B.C. Walker) i àrees relacionades de la ciència (càtedra de J.E. Gunn) i els membres de la UVOIR (Ultraviolet, Optical and Infrared) Panel, de la càtedra del dr. J.E. Wampler, pels seus informes preliminars, tots els quals han estat de gran valor per a identificar les qüestions més importants en astronomia en la dècada passada i en la vinent.