



ASTRONOMIA I ASTROFÍSICA

Coordinat per Joan Ferrando*

L'INTERÈS DE L'HOME PER MIRAR EL CEL HA ESTAT UNA CONSTANT AL LLARG DE LA SEUA HISTÒRIA. TENIM CONSTÀNCIA D'AQUESTA ATRACCIÓ DES DE LES PRIMERES CIVILITZACIONS, EL QUE CONVERTEIX L'ASTRONOMIA EN LA MÉS ANTIGA DE LES CIÈNCIES DE LA NATURA. LA REVOLUCIÓ COPERNICANA VA OBRIR L'ERA DE L'ASTRONOMIA MODERNA, I LA LLEI NEWTONIANA DE LA GRAVITACIÓ UNIVERSAL VA TRENAR DEFINITIVAMENT LA BARRERA ARISTOTÈLICA ENTRE ELS FENÒMENS TERRESTRES I ELS DE LA RESTA DE L'UNIVERS. DURANT EL SEGLE XIX COMENÇAREN A APLICAR-SE LES LLEIS FÍSQUES ALS ESTELS: HAVIA NASCUT L'ASTROFÍSICA. ELS AVENÇOS TECNOLÒGICS DEL NOSTRE SEGLE HAN PERMÈS COMPTAR AMB UNS MITJANS OBSERVACIONALS EXCEPCIONALS QUE ENS HAN DESCOBERT NOUS OBJECTES I NOUS FENÒMENS, I HAN DONAT A L'ASTROFÍSICA UN DINAMISME I UN DESENVOLUPAMENT EXTRAORDINARIS.

DES DE L'ÈPOCA ÀRAB HI HA NOMS VALENCIANS VINCULATS ALS DIFERENTS MOMENTS DE LA HISTÒRIA DE L'ASTRONOMIA. L'OBSERVATORI ASTRONÒMIC DE LA UNIVERSITAT DE VALÈNCIA ES VA FUNDAR L'ANY 1908, PERÒ CALGUÉ ESPERAR ALS PLANS D'ESTUDI DE 1973 PERQUÈ L'ASTRONOMIA I L'ASTROFÍSICA FIGURAREN AMB ENTITAT PRÒPIA EN LA DOCÈNCIA UNIVERSITÀRIA. POC MÉS DE VINT ANYS DESPRÉS EREN PRESENTS A LA NOSTRA UNIVERSITAT DIFERENTS GRUPS CONSOLIDATS D'ASTRÒNOMS I ASTROFÍSICS, I SEMBLAVA EL MOMENT DE CREAR UN DEPARTAMENT UNIVERSITARI QUE ELS ACOLLIRA.

HEM DEMANAT A LES DIFERENTS LÍNIES D'INVESTIGACIÓ DEL DEPARTAMENT D'ASTRONOMIA I ASTROFÍSICA QUE EXPOSEN EN AQUEST MONOGRÀFIC LA SEUA RECERCA. HI PODEM TROBAR UNA DIVERSITAT D'EINES I MÈTODES DE TREBALL, UNA RIQUESA D'OBJECTES I FENÒMENS A ESTUDIAR I UNA VARIETAT DE SISTEMES D'OBSERVACIÓ, QUE SÓN UNA CARACTERÍSTICA DE L'ASTROFÍSICA ACTUAL. VALÈNCIA NO ÉS MÉS QUE UN EXEMPLE DE L'ESPECTACULAR CREIXEMENT DE L'ASTROFÍSICA ESPANYOLA EN LES ÚLTIMES DÈCADES. PER EIXAMPLAR LA NOSTRA MIRADA HEM ELEGIT L'INSTITUT D'ASTROFÍSICA DE CANÀRIES, TANT PEL SEU PAPER DE PRECURSOR COM PEL SEU POTENCIAL CIENTÍFIC I TECNOLÒGIC.

*Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València.

COMPRENDRE L'UNIVERS



ELS ESTELS BE, L'ENIGMA MÉS ANTIC DE L'ASTROFÍSICA ESTEL·LAR

Juan Fabregat*

BE STARS: THE OLDEST ENIGMA IN STELLAR ASTROPHYSICS. BE STARS ARE A PECULIAR TYPE OF MASSIVE STAR SURROUNDED BY A CIRCUMSTELLAR DISK OF IONIZED GAS EJECTED FROM THE STAR. ALTHOUGH THEY HAVE BEEN RECOGNIZED AS A SUBCLASS OF VARIABLE STARS FOR A WHOLE CENTURY, THE CAUSE OF THEIR IRREGULAR EPISODES OF ENHANCED MASS LOSS (THE SO CALLED "BE PHENOMENON") REMAIN A MYSTERY. THE AUTHORS COMMENT ON A NUMBER OF EXPLANATIONS THAT HAVE BEEN PUT FORWARD.

El ràpid desenvolupament actual dels mètodes i de les tècniques d'observació en astronomia permet l'estudi d'objectes cada vegada més dèbils i llunyans, i dóna lloc a nombrosos descobriments de fenòmens l'existència dels quals ni tan sols se sospitava. Molts d'ells posen a prova les teories i els models físics que descriuen la naturalesa dels astres i els processos que hi tenen lloc. Això no obstant, no tots els problemes oberts a què s'enfronten els astrònoms tenen el seu origen en les observacions recents. El que ens ocupa es remunta als inicis de l'astrofísica com a disciplina diferenciada dins de l'astronomia. Es tracta d'un tipus peculiar d'estels, els anomenats estels Be. El primer estel Be conegut, gamma *Casiopeiae* és perfectament visible a ull nu, i va ser identificat com a tal l'any 1866 per un dels pioners de l'espectroscòpia estel·lar, el pare Angelo Secchi. Des de llavors han transcorregut més de 120 anys, i encara és molt poc el que es coneix sobre la naturalesa d'aquests astres.

En el llenguatge de la classificació espectral, s'assigna el tipus "B" a estels amb una temperatura superficial compresa entre 10.000 i 30.000 graus Kelvin. Per comparació, recordem que la temperatura superficial del Sol és de 5.700 graus Kelvin. La massa d'un estel B és, llevat de casos excepcionals, entre 2,5 i 20 vegades superior a la massa del Sol. El sufix "e" fa referència a una anomalia en l'espectre: les línies espectrals es troben en emissió. (*Figura 1*)

Als estels normals, les línies espectrals apareixen

sempre en absorció. En el paràgraf anterior ens hem referit a la temperatura en la superfície de l'estel, quan és ben sabut que els estels són esferes de gas que no tenen cap superfície sòlida. Quan es parla d'estels se sol associar el terme superfície a la regió que amb més propietat es denomina fotosfera. És una regió de transició en la qual el material que compon l'estel passa de ser opac a transparent per a la radiació electromagnètica, i per tant és la regió de la qual ens arriba la pràctica totalitat de la llum que rebem de l'estel. La llum que abandona la fotosfera té un espectre continu.

Quan travessa les capes més exteriors, l'atmosfera de l'estel, pateix una absorció selectiva provocada pels àtoms i molècules presents en aquesta atmosfera, procés que dóna lloc a les línies espectrals en absorció

que se superposen a l'espectre continu fotosfèric.

La presència en un espectre estel·lar de línies en emissió implica l'existència en l'atmosfera o fora d'ella de matèria a la qual se subministra energia no tèrmica. En el cas dels estels Be, les línies en emissió es formen en un disc de matèria circumestel·lar amb un radi unes quantes vegades superior al de l'estel mateix, i amb una composició similar a la de l'atmosfera estel·lar. La radiació ultravioleta procedent de la fotosfera excita els àtoms del disc, que quan es desexciten produeixen les línies d'emissió observades. (*Figura 2, pàgina 13*)

La presència de discos circumestel·lars és molt comuna en estels en formació o protoestels. Aquests

**«NO TOTS ELS PROBLEMES OBERTS
A QUÈ S'ENFRONTEN ELS ASTRÒNOMS
TENEN EL SEU ORIGEN
EN LES OBSERVACIONS RECENTS»**

discos constitueixen restes del núvol de gas que va col·lapsar per formar l'estel, i se suposa que és en ells on es formen els sistemes planetaris. Durant el procés de formació estel·lar el material que compon el disc acaba caient sobre l'estel, de manera que als estels ja formats els manca el disc. D'aquesta mena de discos se'n diu discos d'acreciment. En el cas dels estels Be la situació és diferent. El disc circumestel·lar no és d'acreciment, sinó que és format per matèria ejectada pel mateix estel. Es tracta, per tant, d'un disc de decreixement. No es tracta d'un disc estàtic, sinó que la matèria que el compon es va dissipant en l'espai per la seua part més externa, mentre que en la part interna es va alimentant amb nova matèria aportada des de l'estel. En aquest sentit el disc es pot entendre com un flux de vent estel·lar de velocitat lenta en l'equador de l'estel. Els mecanismes tant d'aportació de matèria com de dissipació són altament inestables, de manera que el disc varia contínuament de dimensions i densitat. En alguns estels s'ha observat la desaparició completa del disc i la seua regeneració posterior al cap d'alguns mesos o anys. Durant la fase de pèrdua del disc l'estel Be es converteix en un estel B sense cap anomalia.

El model de disc circumestel·lar descrit permet explicar la pràctica totalitat de les observacions, i és per tant majoritàriament acceptat per la comunitat científica. De fet, en els darrers anys s'han obtingut imatges d'estels Be propers, mitjançant tècniques d'interferometria òptica, en les quals la presència del disc circumestel·lar és palesa. No obstant això, es

tracta d'un model *ad hoc*, donat que no es coneix cap mecanisme físic que permeti explicar el procés de formació del disc ni la fenomenologia que s'hi associa. Se sap que almenys el 10% dels estels de tipus B són Be. Per tant, els estels Be constitueixen el darrer gran grup d'estels variables amb uns mecanismes físics responsables de la variabilitat que ens resulten desconeguts.

Els esforços encaminats a entendre el fenomen Be han estat i continuen essent nombrosos. Se sap que una característica comuna dels estels Be és l'alta velocitat de rotació. Si aquesta superara la velocitat de ruptura, que és aquella per a la qual la força centrífuga en l'equador iguala la força gravitatòria, la matèria eixiria de l'estel. Tanmateix les velocitats de rotació mesurades arriben com a màxim al 80% de la velocitat de ruptura. L'alta velocitat de rotació, per tant, deu representar un paper important en el mecanisme d'ejecció de matèria, però no en pot ser l'única causa.

En el passat es va considerar que el fenomen Be podia correspondre a una fase concreta en el procés evolutiu d'un estel B. Es va observar que alguns estels Be es trobaven al final de la seua vida com a estels de la "seqüència principal", és a dir, estels en el nucli dels quals la reacció nuclear fonamental per a la producció d'energia és la transformació de l'hidrogen en heli. Aquesta fase constitueix aproximadament el 90% de la vida de l'estel. L'etapa de seqüència principal acaba amb una ràpida contracció del nucli d'heli que queda com a residu de la combustió de l'hidrogen, que va acompanyada d'una ràpida expansió de

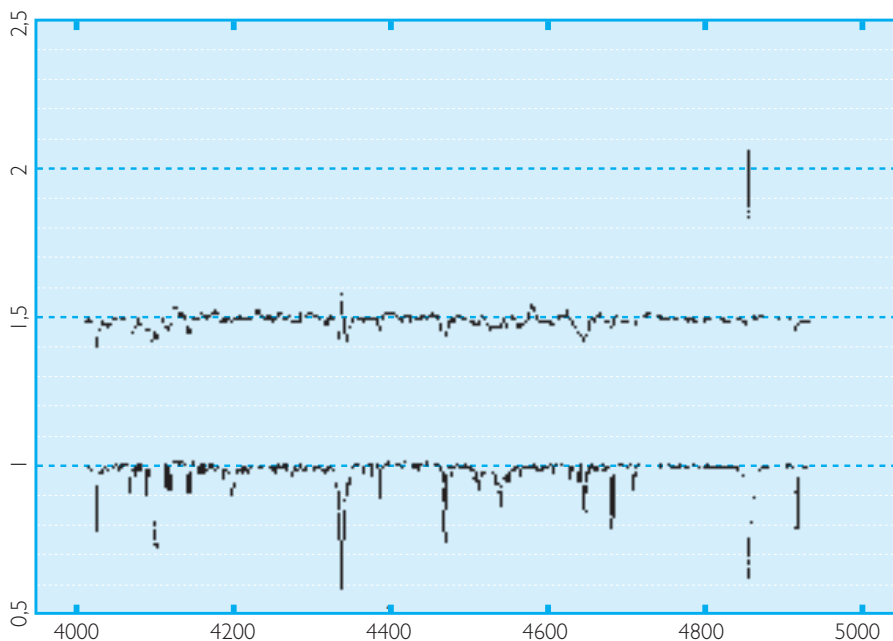


Figura 1: Espectre de dos estels de tipus B. El superior presenta el fenomen Be.

les capes més exteriors de l'estel. No obstant això, el fet que posteriorment s'hagen trobat nombrosos estels Be en estats evolutius molt diferents del descrit ha fet perdre credibilitat a la hipòtesi evolutiva com a explicació del fenomen Be.

En els últims anys, observacions molt acurades han permès detectar fenòmens de variabilitat associats no ja al disc circumestel·lar, sinó a la fotosfera de l'estel. S'ha pogut observar moviment de matèria eixint i caient sobre la superfície estel·lar, i també *núvols* o blocs de matèria calenta fixos en l'atmosfera. Això sembla reproduir els fenòmens associats a l'existència de camp magnètic proper a la superfície. En el Sol s'observen de manera habitual tubs de flux magnètic que emergeixen de la superfície, sobre la qual formen grans arcs. Pel seu interior circula material procedent de capes inferiors. De vegades els tubs magnètics es trenquen i llancen a l'espai la matèria del seu interior.

La hipòtesi magnètica presenta, tanmateix, importants dificultats teòriques i observacionals. Els intents observacionals per a mesurar camps magnètics en estels Be han donat fins ara resultats negatius. Això, però, no planteja un problema greu, perquè podria donar-se l'existència de camps magnètics localment intensos, però que es compensen sobre tota la superfície estel·lar i donen lloc a un camp magnètic global per davall del límit de detecció observacional.

Les objeccions teòriques són més difícils de defugir. La presència de camps magnètics capaços d'injectar matèria en l'atmosfera estel·lar —o fins i tot fora d'ella— és un fenomen comú en estels de massa similar a la del Sol. En aquests estels, l'energia generada en el nucli es transporta fins a la superfície per convecció, és a dir, per moviment de matèria calenta que des de capes profundes emergeix a la superfície, es refreda i torna a descendre, fenomen que dona lloc a un moviment, i per tant a corrents elèctrics. Aquests corrents al seu torn es mouen per efecte de la rotació de l'estel i generen per tant un camp magnètic de manera similar al que succeeix en una dinamo. De fet, el mecanisme que acabem de descriure es coneix en astrofísica com a model o efecte de dinamo.

En els estels més massius, i en particular en els de tipus B, l'energia es transporta a la superfície de manera radiativa. Això implica que no hi ha moviment de matèria, i que és la radiació electromagnètica la que trasllada l'energia de l'interior a la superfície. Per tant no hi ha cèl·lules de convecció, i no actua l'efecte dinamo. No hi ha cap mecanisme alternatiu conegut per a generar i mantenir un camp magnètic en un estel

amb transport d'energia radiatiu. S'ha especulat amb la possibilitat que els estels Be podrien tenir un camp magnètic primordial, és a dir, capturat del camp magnètic de la galàxia en el procés de formació de l'estel. Si aquest fóra el cas, el camp hauria

d'estar ordenat globalment i hauria de ser detectable, cosa que, com acabem d'exposar, no succeeix.

Alguns estels Be són membres de cúmuls oberts, conjunts de centenars o de milers d'estels que s'han format alhora i en la mateixa regió de l'espai, i que continuen units per efecte de la gravetat. Com a part del nostre treball dels darrers anys en aquest camp hem estudiat l'abundància d'estels Be en cúmuls en funció de l'edat del cúmul. Hem trobat que els cúmuls molt joves, d'edat inferior a 10 milions d'anys, no contenen estels Be. A partir d'aquesta edat, els estels Be comencen a aparèixer, i s'arriba a una abundància màxima, que arriba a superar el 30% dels estels B en el cúmul, cap als 20 milions d'anys. Per comparació, la vida dels estels B més massius en la seqüència principal és d'uns 40 milions d'anys.

Aquest resultat apunta de nou cap a una hipòtesi evolutiva. El fenomen Be no és inherent a l'estel —l'estel no naix essent Be— sinó que és un fet que li succeeix aproximadament

cap a la meitat de la seu vida en la seqüència principal. Aquesta conclusió xoca frontalment amb la teoria clàssica de l'evolució estel·lar, que postula que la fase de seqüència principal és un període tranquil i apacible, en el qual no té lloc cap canvi de consideració en l'estructura de l'estel.

No obstant això, resultats d'altres investigacions recents també fan suposar que la teoria clàssica de l'evolució necessita ser revisada. S'ha trobat, en estels de massa superior a sis vegades la del Sol, que a

**«L'ESTEL NO NAIX ESSENT BE,
SINÓ QUE ÉS UN FET QUE
LI SUCCEEIX APROXIMADAMENT
CAP A LA MEITAT DE LA SEU VIDA»**

**«ÉS NECESSARI PROSSEGUIR L'ESFORÇ
D'OBSERVACIÓ I D'ELABORACIÓ
TEÒRICA PER COMPRENDRE
DE MANERA DEFINITIVA
LA NATURA DELS ESTELS BE»**

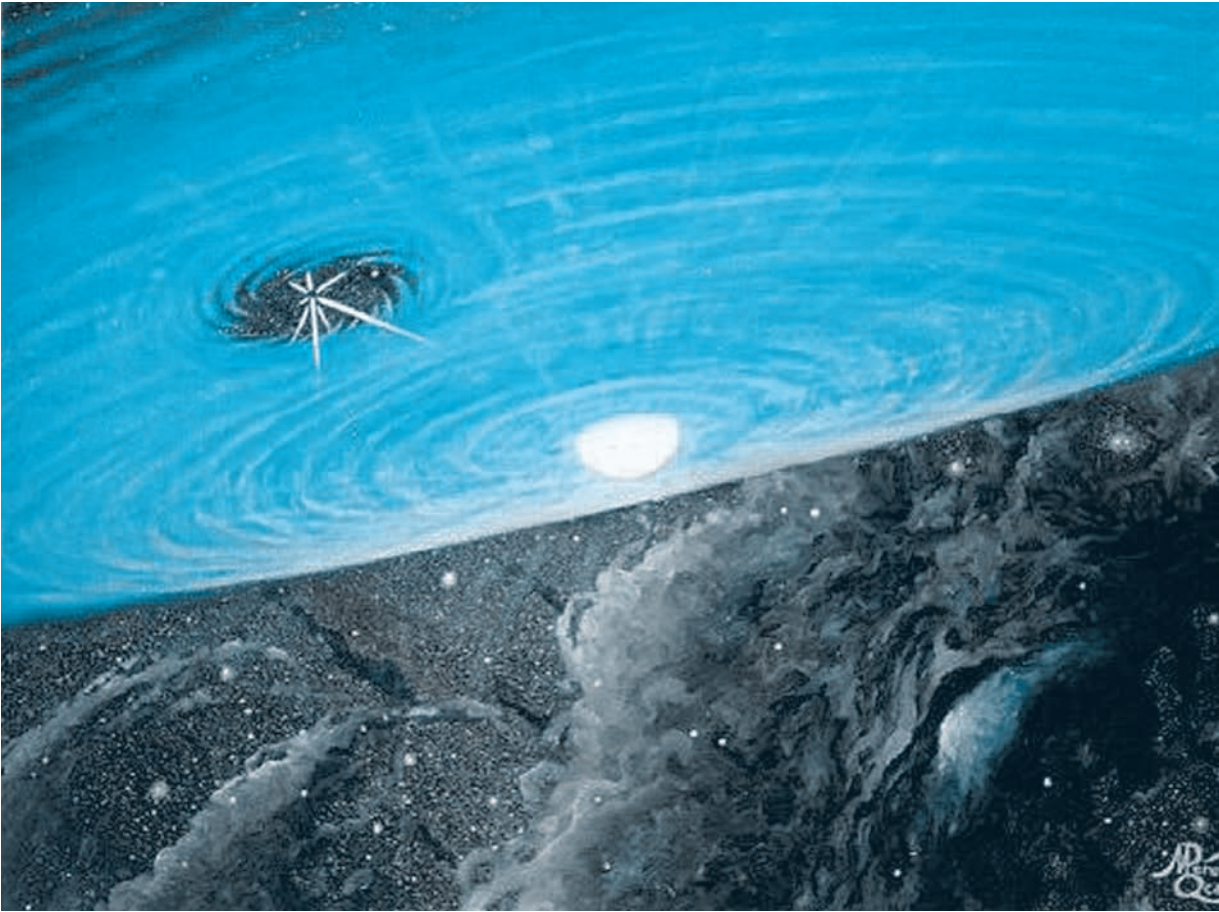


Figura 2: Representació artística d'un estel Be amb el seu disc circumstel·lar, en el qual apareix immergit un estel de neutrons acretant-ne matèria. Dibuix de Miguel Pérez Oca.

la meitat de la seua vida en la seqüència principal l'abundància d'heli i d'altres elements s'incrementa sobtadament en un factor dos. L'efecte és més notori en estels amb rotació ràpida. Això no es pot donar en un estel en què l'energia es transporta per radiació. L'heli i d'altres elements se sintetitzen al nucli per mitjà de les reaccions nuclears que s'hi esdevenen, i si no hi ha moviment de matèria —convecció— no poden aflorar a la superfície. Al contrari, l'augment en l'abundància d'aquests elements en la superfície implica que necessàriament s'han de produir moviments de matèria, i mescla entre la matèria produïda en el nucli i les capes externes de l'estel.

Actualment s'elaboren nous models d'evolució que donen compte dels resultats observacionals descrits. Aquests models prenen en consideració mecanismes de mescla de matèria, induïts per la rotació de l'estel, durant l'etapa de seqüència principal. Si acceptem que en efecte es donen aquests moviments de matèria, i considerem la ràpida velocitat de rotació dels estels Be, tenim els dos ingredients bàsics perquè es done l'e-

fecte dinamo, el que permetria l'existència de camps magnètics que al seu torn ejectarien matèria des de la superfície de l'estel i generarien i alimentarien el disc circumstel·lar.

Tot i que molt prometedors, els resultats exposats són encara preliminars i amb una component especulativa important. És necessari prosseguir l'esforç d'observació i d'elaboració teòrica per comprendre de manera definitiva la natura dels estels Be. Mundialment existeix una comunitat científica molt activa que dedica els seus esforços a la consecució d'aquest objectiu. En el mes de juny vinent els especialistes en la matèria es reuniran a Alacant en un congrés (URL <http://www.bestars.ua.es/be99/>) patrocinat per la Unió Astronòmica Internacional per discutir els darrers avenços i per planificar els esforços futurs que ens duguen a resoldre l'enigma més antic que encara perviu en l'astrofísica moderna.



*Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València.

INSTRUMENTACIÓ ESPACIAL PER A ASTROFÍSICA D'ALTES ENERGIES

Victor Reglero

SATELLITE INSTRUMENTATION FOR HIGH-ENERGY ASTROPHYSICS.

THE MAIN AIMS OF THE ASTRONOMY AND SPACE SCIENCE GROUP (GACE) IS TO DEVELOP SPACE-BORNE INSTRUMENTATION FOR HIGH-ENERGY ASTROPHYSICS SATELLITES, AS WELL AS DATA ANALYSIS OF COSMIC X AND GAMMA-RAY SOURCES USING GROUND-BASED FACILITIES. HERE THE AUTHOR OUTLINES THE GROUP'S WORK IN THE FOLLOWING AREAS: LOW ENERGY GAMMA-RAY IMAGER (LEGRI) ON MINISAT-01 MISSION, THE SPATIAL MULTIPLEXING SYSTEMS ON THE ESA MISSION INTERNATIONAL GAMMA-RAY ASTROPHYSICAL LABORATORY (INTEGRAL), AND ON-GOING CO-OPERATIVE PROJECTS WITH DENMARK AND NASA.

El Grup d'Astronomia i Ciències de l'Espai (GACE) naix a finals dels anys vuitanta com una línia d'investigació dins del Departament de Matemàtica Aplicada i Astronomia que més tard es consolida dins del Departament d'Astronomia i Astrofísica i en l'Institut de Ciències dels Materials de la Universitat de València. La idea matriu del GACE va ser d'ampliar el camp de treball des del punt de vista purament observacional i d'anàlisi de dades en l'òptic que fins el moment realitzaven els seus investigadors fins al camp del desenvolupament d'instrumentació per a astronomia d'alta energia embarcada en satèl·lits. Amb la participació en els projectes LEGRI i Integral, el GACE s'amplia i passa de ser un grup merament de la Universitat de València (UVEG) a un grup més ampli amb investigadors del CSIC-IFIC i de les universitats d'Alacant i Jaume I. Les dues àrees de treball fonamentals han estat el desenvolupament del LEGRI per al Minisat-01 espanyol i el satèl·lit Integral de l'Agència Espacial Europea (ESA). També s'ha mantingut una activitat sostinguda en l'àrea d'anàlisi de dades en l'òptic i l'infraroig de sistemes binaris emissors de raigs X d'alta massa.

■ LEGRI

LEGRI és l'acrònim de Low Energy Gamma-Ray Imager. Com el seu nom indica es tracta d'un instrument astronòmic que té com a propòsit fer imatges en el rang dels raigs gamma dèbils amb energies entre els 20-200 KeV. El LEGRI és definit al voltant de l'ús de dues noves tecnologies: multiplexadors espacials del

senyal (màscare codificades) i una nova generació de detectors d'estat sòlid. El LEGRI és en realitat un prototipus de demostració en l'espai de les tecnologies que seran usades de manera massiva en l'Integral.

La tècnica de codificació del senyal mitjançant màscare codificades en astronomia d'alta energia es va posar en pràctica operacionalment per primera vegada en la missió francosoviètica Granat, el 1990. La idea és molt senzilla. En alta energia no es poden fer servir lents o espills per fer imatges, la llum simplement els travessa sense adonar-se de la seua presència. L'alternativa elegida consisteix a mirar el passat i usar el principi en què es basa la primera càmera fotogràfica de mitjan segle XIX. Una placa opaca a la llum i un simple forat ens donen una imatge sobre el nostre detector que és la placa fotogràfica. Són les fotos primitives, no hi ha lents ni espills, tan sols un forat i un detector de llum.

Una màscara codificada és el mateix. Una placa opaca molt densa per poder frenar la llum (wolframi) amb molts forats petits. Per què molts forats? La raó és simple, el nombre de fotons d'alta energia és molt petit fins i tot per a les fonts més brillants de l'univers, com ara els púlsars, els estels de neutrons i els forats negres. L'univers és escàs en fotons molt energètics, perquè solament processos en condicions extremes els poden produir. Per tant necessitem la màxima àrea col·lectora possible i això ho aconseguim fent més forats en la placa. El LEGRI porta 98 càmeres elementals funcionant juntes. La resolució del problema matemàtic que això planteja no és pas trivial. Aquest és un dels treballs prioritaris de desenvolupament en el GACE tant

per al LEGRI com per a l'Integral. Els algorismes i els codis numèrics per realitzar la deconvolució. Les màscares codificades representen formes de treball noves en una òptica no geomètrica. És una nova òptica "binària".

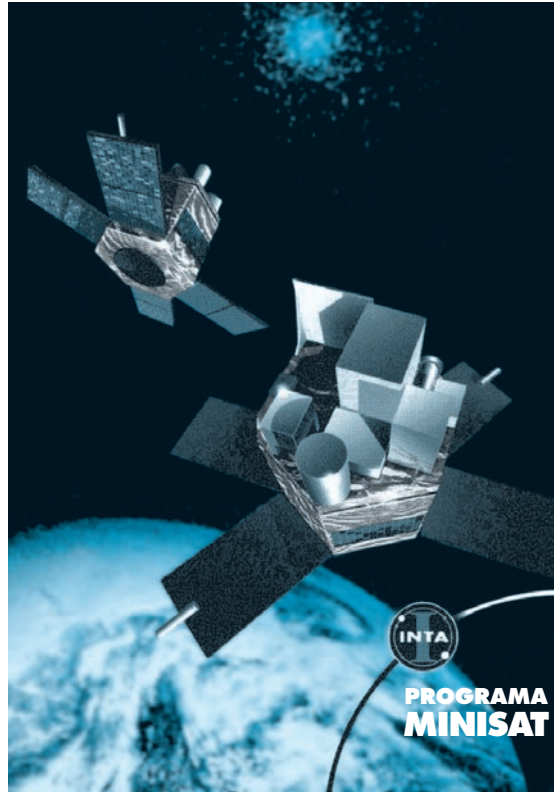
Els detectors del LEGRI són cristalls de HgI_2 i de $CdZnTe$ de novíssima generació produïts a Espanya i als EUA. Representen un avenç espectacular respecte als dispositius utilitzats fins al moment amb reduccions en massa i volum en factors 10 a 100. A més treballen a temperatures ambient ($10^\circ C$) qualitat que els fa especialment adequats per a l'espai. No cal refredar-los!

D'acord amb aquests dos conceptes es va començar a desenvolupar el LEGRI el 1993, i es va

lliurar a l'Institut Nacional de Tècnica Aeroespacial (INTA) el 1996 per al seu muntatge en el Minisat-01. Tot el maquinari de vol i el programari de bord i de terra es va desenvolupar a Espanya i al Regne Unit. En total, amb 100 detectors d' 1 cm^2 cadascun, el LEGRI pesa 25 kg i consta de les següents unitats: unitat detectora (UVEG), màscara codificada (UVEG), unitat de procés de dades (U. Birmingham), unitat d'alta tensió i sensor estel·lar (Rutherford Appleton Laboratory).

L'Science Operation Center està en la Universitat de València i és l'encarregat de les operacions del LEGRI. Les seues funcions són la recepció dels fitxers originals de dades, la seua descompressió, la vigilància de la salut de l'instrument (temperatures i voltatges), les anotacions dades orbitals i arxiu dels diferents fitxers de dades. Des del seu llançament el 24 d'abril de 1997, el LEGRI envia un 7 Mb de dades cada dia, el que representa a hores d'ara un volum d'uns 3,5 Gb de dades comprimides.

El pròxim 21 d'abril, si tot va bé, complirem els dos anys d'operacions, que és la vida útil definida per al Minisat. Tot un èxit si es té en compte que el Minisat és el primer satèl·lit mitjà desenvolupat totalment a Espanya, a l'igual com el LEGRI és el primer instrument astronòmic de vol desenvolupat a Espanya.



Una visió artística del Minisat-01 i de les seues unitats

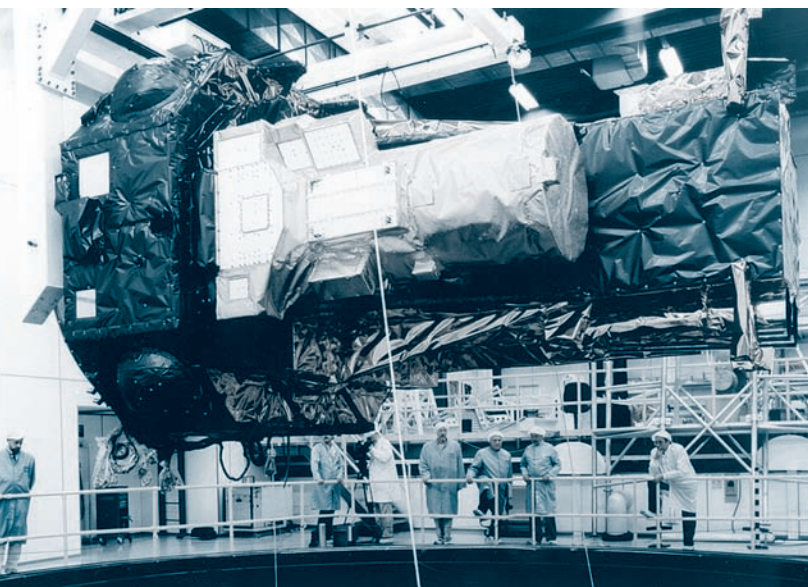
■ INTEGRAL

L'Integral és un dels satèl·lits que componen el programa científic de l'Agència Espacial Europea. Des de la seua concepció el 1990, l'Integral està definit com una missió classe observatori dirigida a explorar l'univers a alta energia en el rang gamma 20 KeV-10 MeV.

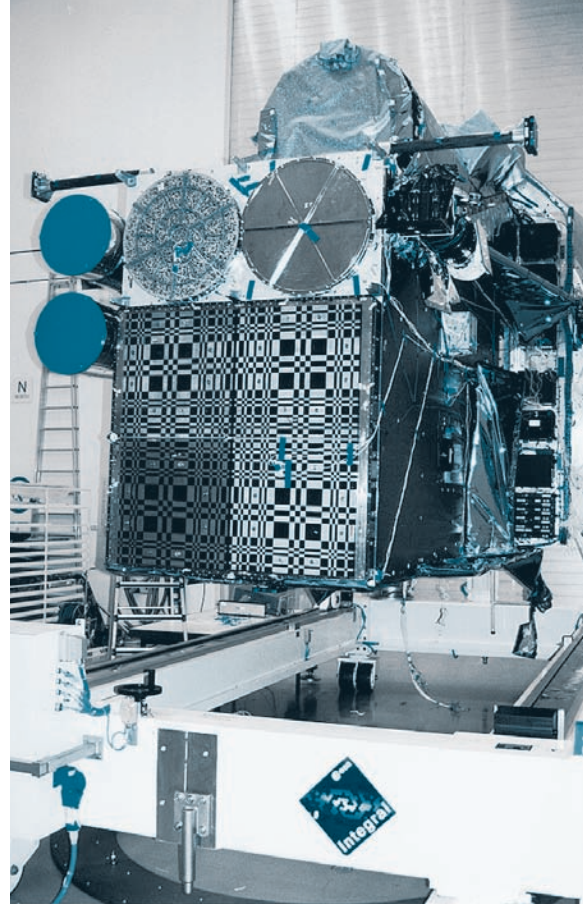
Es tracta d'una plataforma multiús que permet de fer estudis en aquesta regió de l'espectre durant els sis anys previstos de funcionament, entre l'any 2001 i el 2006. La comunitat astronòmica internacional podrà demanar temps d'observació que seran assignats mitjançant processos de selecció competitiu. De fet Integral és l'única missió prevista en el món en astronomia d'alta

energia per al decenni vinent. En la seua definició es van tenir en compte tres paràmetres fonamentals: capacitat per fer imatges i per localitzar la posició de les fonts amb precisions 3.000 vegades superiors a les existents actualment, l'ús de noves tecnologies de detectors en estat sòlid i de sistemes actius de supressió del soroll provocat pels raigs còsmics de manera que n'augmentem la sensibilitat en un factor 10 respecte als satèl·lits actuals. D'aquesta manera s'espera poder obtenir dades fonamentals per a astronomia dels objectes compactes galàctics (estels de neutrons i forats negres), sobre les regions on es produeixen o s'han produït processos de nucleosíntesi d'elements pesants (com ara les supernoves), resoldre la incògnita de l'existència d'un forat negre molt massiu en el centre de la galàxia estudiant la línia d'anihilació matèria-antimatèria dels 511 KeV i, finalment, estendre considerablement el nostre coneixement sobre els nuclis actius de galàxies amb forats negres supermassius i sobre els enigmàtics quàsars.

Aquest conjunt d'objectius amb les seues tecnologies associades que constitueixen la definició de l'Integral va ser aprovat per l'ESA el 1994 dins d'un procés de selecció realitzat entre 52 propostes de quatre anys de durada. Integral és un satèl·lit de gran pes (4.000 kg)



A l'esquerre, aspecte del model de qualificació de l'Integral a l'European Technological Center. A la dreta, visió frontal del satèl·lit on es veuen les màscares.



amb una òrbita molt excèntrica, entre els 10.000 i els 150.000 km per a evitar els cinturons de radiació que envolten la Terra. En el seu desenvolupament col·laboren instituts i centres d'investigació de la pràctica totalitat de la UE, més Rússia i centres dels EUA. La seua complexitat i cost (500 milions d'euros) fan que solament una àmplia col·laboració internacional pugui dur-lo avant en més de deu anys de feina.

La participació de la Universitat de València en el projecte es remunta a la seua concepció el 1990. L'autor d'aquest article va ser un dels quinze proponents de la missió i la resta dels membres de l'equip espanyol que treballen en el projecte s'hi van anar incorporant a mesura que aquest anava desenvolupant-se fins assolir actualment un nombre total de cinquanta investigadors.

Els sistemes òptics per a la instrumentació d'Integral estan basats en el principi de multiplexació espacial del senyal, com els del LEGRI exposats adés. Són, per tant, màscares codificades, per bé que molt més grans, complexes i precises que les del LEGRI. El seu pes aproximat és de 400 kg en comparació amb els 2,5 kg de la del LEGRI, i el seu cost, segons estimacions de l'ESA, és de 10 milions d'euros.

Durant els darrers quatre anys l'equip del GACE ha desenvolupat el disseny científic, tècnic i la fabricació dels diferents models de les tres màscares. En

aquest desenvolupament treballen 25 investigadors del GACE i de l'INTA i 14 empreses.

El 1998 els models de qualificació de les tres màscares van ser lliurats a l'ESA i provats amb el model del satèl·lit. Els resultats han estat totalment satisfactoris i han culminat quatre anys de feina. A hores d'ara procedim a la fabricació dels models de vol, que esperem enllestir a mitjan any 2000.

■ PROJECTES FUTURS

A banda dels dos projectes anteriorment esmentats, el GACE ha participat i participa en dos projectes espacials més. El XRASE, en col·laboració amb la Universitat de Harvard, per a la NASA, i l'AXO, amb el Danish Space Reserach Institute. L'objectiu del primer és fer espectroscòpia de molt alta resolució de plasmes còsmics. L'AXO pretén observar les emissions de raigs X de les tempestes (raigs) en la Terra i a les regions polars. Per treballar-hi fa servir una tecnologia de detectors en estat sòlid de CdZnTe anàlegs als del LEGRI però amb una resolució millorada en un factor pròxim a 10. Aquest projecte ha estat seleccionat com un dels quatre finalistes de dotze propostes i esperem una decisió per a aquest estiu.



*Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València.

LA MACROESTRUCTURA CÒSMICA

Vicent J. Martínez*

THE COSMIC MACROSTRUCTURE. THE AUTHOR COMMENTS ON STUDIES CONCERNING THE LARGE-SCALE STRUCTURE OF THE UNIVERSE, WHICH IS ONE OF THE MOST ACTIVE FIELDS IN CONTEMPORARY ASTRONOMY. THE LAST TWO DECADES HAVE SEEN THE DEVELOPMENT OF A COSMOGRAPHY BY MEANS OF MAPS OF THE DISTRIBUTION OF GALAXIES IN THE UNIVERSE, PROVIDED BY THE REDSHIFT CATALOGUES. ENORMOUS STRUCTURES LIKE VOIDS, FILAMENTS AND WALLS ARE OBSERVED IN OUR LOCAL NEIGHBOURHOOD SHOWING A FRACTAL-LIKE PATTERN. HOWEVER AT GREATER DISTANCES TRACES HAVE BEEN FOUND OF THE TRANSITION TO HOMOGENEITY POSTULATED BY THE COSMOLOGICAL PRINCIPLE.

La cosmologia ha experimentat un desenvolupament espectacular en la darrera dècada. La raó d'aquesta renaixença cal trobar-la en les extraordinàries observacions que contínuament aporten dades fonamentals sobre l'origen i l'evolució de l'univers. L'estudi de l'estructura de l'univers a gran escala és un dels camps més actius de l'astronomia contemporània. Les dades de satèl·lits com el COBE ens han permès conèixer el mapa de com era l'univers primitiu. Les fluctuacions de temperatura observades en aquests mapes són molt petites, d'una part de 100.000, però constitueixen l'empremta de les llavors que han esdevingut les grans estructures còsmiques. El telescopi espacial Hubble i el telescopi Keck de Hawaii, de 10 metres de diàmetre, han captat imatges de com eren les galàxies quan l'edat de l'univers era només un 10% de l'edat actual. Els mapes tridimensionals de la distribució de galàxies a gran escala, allò que anomenem la macroestructura còsmica, ens mostren un univers on les galàxies s'agrupen en cúmuls i formen estructures més grans en forma de parets i filaments. Com es construeixen aquests mapes?

L'any 1929, l'astrònom americà Edwin Hubble va demostrar que les galàxies que observem van allunyant-se a una velocitat que és proporcional a la distància que les separa de l'observador. Aquesta relació, coneguda com a llei de Hubble, ens permet estimar les distàncies a les galàxies a partir de la constant

de proporcionalitat i de la seua velocitat de recessió. La constant de proporcionalitat H_0 no és encara coneguda amb precisió, però cada vegada hi ha més acord entre la comunitat científica que el seu valor es troba al voltant de 73 km/s/Mpc, això vol dir que per cada 3,26 milions d'anys llum que ens allunyem, la velocitat de recessió de les galàxies que trobem s'incrementa en 73 km/s (262.800 km/h).

La velocitat de recessió de les galàxies es mesura bàsicament fent ús de la mateixa tècnica que utilitza la policia per mesurar la velocitat dels cotxes en les carreteres. Aquesta tècnica està basada en l'anomenat efecte Doppler. La llum visible està constituïda per ones semblants a les ones de la ràdio, la diferència és que la distància entre dues crestes consecutives de l'ona de llum, la longitud d'ona, és molt més petita que en el cas de les ones de ràdio. Hubble

observà que la longitud d'ona de la llum provinent de les galàxies llunyanes era més llarga que la de la llum emesa. Aquesta diferència s'anomena desplaçament cap al roig, ja que en la descomposició espectral de la llum visible, les longituds d'ona corresponents al color roig són més llargues que no les corresponents al color blau.

L'expansió de l'univers és, però, una expansió de l'espai, no una expansió de les galàxies en l'espai tridimensional, és a dir, a mesura que l'espai es va expandint, va arrossegant les galàxies amb ell. En aquest sentit cal interpretar el desplaçament cap al

**«L'EXPANSIÓ DE L'UNIVERS ÉS,
PERÒ, UNA EXPANSIÓ DE L'ESPAI,
NO UNA EXPANSIÓ DE LES GALÀXIES EN
L'ESPAI TRIDIMENSIONAL.»**

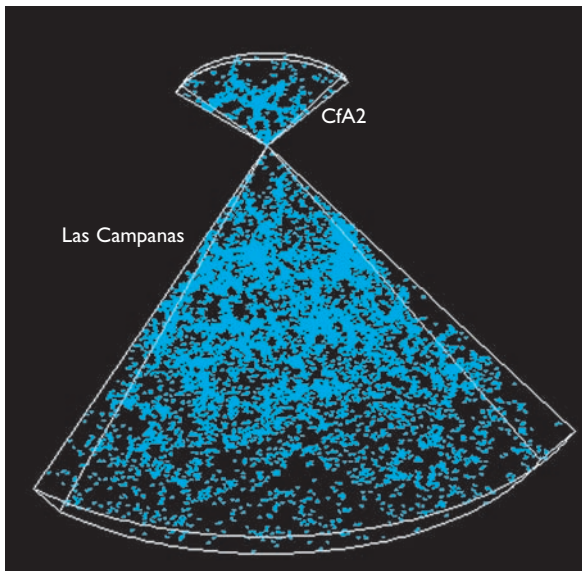


Figura 1: La distribució de 13.000 galàxies en aquestes dues llesques tracen les estructures més grans que s'observen en l'univers avui. (Reproduït amb autorització de *Science*, 284, 445; Copyright 1999, American Association for the Advancement of Science).

roig de la llum que ens arriba de les galàxies com un estirament de la seua longitud d'ona que creix a mesura que l'espai s'expandeix. La llum de les galàxies més llunyanes ha trigat més temps a arribar a nosaltres que no la de les galàxies properes i, per tant, la seua longitud d'ona ha hagut d'estirar-se més.

Cal assenyalar que l'expansió es veu frenada per la força gravitacional exercida per tota la matèria còsmica en el seu conjunt. Serà aquesta força suficient per frenar l'expansió? Això depèn de la quantitat de matèria continguda a l'univers. Si la densitat de l'univers sobrepassa un determinat valor crític, la gravetat guanyarà a l'expansió, aquesta s'anirà frenant fins que s'ature i l'univers començarà a contraure's. En altre cas l'expansió durarà per sempre. La densitat crítica és només d'uns pocs àtoms d'hidrogen per metre cúbic. És, doncs, un valor extremadament petit, la densitat de l'aire és 100 bilions de bilions més gran que aquest valor. Malgrat això l'univers està tan buit que amb la matèria visible de tots els estels i les galàxies no sobrepassem l'1% del valor de la densitat crítica. Sabem, però, que existeix la matèria obscura i que la contribució d'aquesta podria ser suficient per

fer que la densitat total de l'univers arribara a la densitat crítica. El paràmetre, directament relacionat amb la densitat de l'univers, que quantifica l'alentiment de l'expansió s'anomena paràmetre desaccelerador i es representa per q_0 . L'any 1970 Allan Sandage va escriure un article en què descrivia la cosmologia observacional com la recerca de dos nombres, H_0 i q_0 . Observacions molt recents de supernoves han fet ressuscitar un tercer paràmetre, l'anomenada constant cosmològica, introduïda per Albert Einstein el 1917 per tal que les seues equacions de la relativitat general proporcionaren un univers estàtic. Sense aquest terme, les equacions porten a un univers que o bé es va expandint o bé es va col·lapsant. Però el fet d'un univers canviant amb el temps no era conceptualment acceptable per a Einstein. Anys després el mateix Einstein afirmava que la introducció de la constant cosmològica va ser el major error de la seua vida científica. Va perdre l'oportunitat de predir amb arguments teòrics l'expansió de l'univers descoberta pel Hubble dotze anys després.

Les supernoves són estels que esclaten catastròficament i llavors produeixen una quantitat d'energia tal que la seua brillantor pot superar la de tota una galàxia formada per milers de milions d'estels. L'observació d'esclats de supernoves de tipus Ia en galàxies que es troben al voltant de 6.500 milions d'anys llum de distància semblen suggerir que l'expansió còsmica va accelerant-se. Hi hauria una forma d'energia exòtica que a escales suficientment grans actuaria com ho fa la constant cosmològica, i que exerciria una força gravitacional repulsiva que acceleraria l'ex-

pansió, i per tant que proporcionaria un valor negatiu al paràmetre de desacceleració.

Amb els valors dels paràmetres cosmològics podem determinar les propietats bàsiques del nostre univers, en parti-

cular la grandària i l'edat. A més a més, coneixent-ne els valors i mesurant el corrent cap al roig de les galàxies podem estimar les distàncies a què es troben. Com a primera aproximació podem considerar les distàncies directament proporcionals al desplaçament cap al roig. Això és el que s'ha representat en la Fig. 1, on podem observar la distribució de les galàxies en dues llesques de pocs graus d'amplària, una a l'hemisferi nord celest, la del Center for Astrophysics (CfA) realitzada des de Tucson, a Arizona, i l'altra a l'hemisferi sud, realitzada des de l'observatori de Las

**«LA VISIÓ D'AQUESTES ESTRUCTURES
VA FER QUE MOLTS COSMÒLEGS
COMENÇAREN A PARLAR DE
L'ESTRUCTURA FRACTAL DE L'UNIVERS.»**

Campanas, a Xile. La Terra es troba al vèrte0x de les dues llesques. Hi ha més de 13.000 galàxies en aquest mapa. La mostra del CfA té una profunditat de 645 milions d'anys llum, la de Las Campanas és pràcticament quatre vegades més profunda. La llesca del CfA va sorprendre la comunitat dels cosmòlegs quan va ser publicada l'any 1986. S'hi observen estructures més grans que les esperades, grans zones pràcticament buides de galàxies amb un diàmetre que arriba en alguns casos a 100 milions d'anys llum. S'observen també parets i filaments on s'agrupen les galàxies. Un model que es va proposar aleshores era l'anomenat univers de bombolles, com si les galàxies foren partícules de talc salpicades sobre bombolles com les que fa l'escuma del bany. La visió d'aquestes estructures va fer que molts cosmòlegs començaren a parlar de l'estructura fractal de l'univers. Un fractal és un objecte geomètric semblant a ell mateix en moltes escales (vegeu MÈTODE, núm. 14, pàg. 21 per a una introducció més completa). Les costes naturals en són un bon exemple. Fent ampliacions de les costes d'una península dibuixada en un paper no seria difícil trobar altres petites penínsules semblants a la inicial. En la Fig. 2 hem representat un

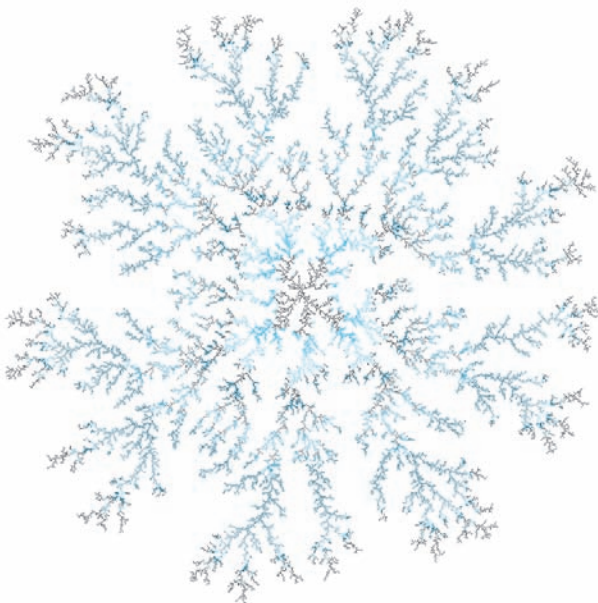


Figura 2: Fractal generat mitjançant el procés d'agregació per difusió limitada.

**«ANEM ACOSTANT-NOS “AL PRINCIPI DEL FINAL”,
ON ES POSA DE MANIFEST
LA TRANSICIÓ A L'HOMOGENEÏTAT POSTULADA
PEL PRINCIPI COSMOLÒGIC.»**

fractal que es genera per un procés anomenat agregació per difusió limitada, molt conegut en la física de l'estat sòlid. Una de les característiques d'aquesta estructura és que la densitat decreix amb el radi segons una llei de potències. En funció de l'exponent negatiu d'aquesta llei se'n pot definir la dimensió fractal, que en aquest cas és 1,7. Aquest valor seria 2, la dimensió del pla, si la distribució de les partícules en l'agregat fóra uniforme.

Tornem ara al mapa tridimensional de galàxies mostrat en la Fig 1. La densitat de galàxies també decreix segons una llei de potències, això ens

permet parlar d'una dimensió fractal per a la distribució de les galàxies, però a diferència del que passa per a l'agregat de la Fig. 2, a partir d'aproximadament 100 milions d'anys llum, l'exponent creix tot tendint a zero i per tant, la densitat s'acosta a un valor constant, propi d'una distribució homogènia amb dimensió 3. Observant la mostra més profunda de la Fig. 1, la de Las Campanas, apreciem estructures similars a les del CfA, repetint-se a diferent profunditat, però no s'observen estructures i buits més grans com caldria esperar si la interpretació d'un fractal sense límit fóra certa. Anem, doncs, acostant-nos “al principi del final”, on es posa de manifest la transició a l'homogeneïtat postulada pel principi cosmològic. Aquest principi, formulat per Einstein, encara que el terme va ser encunyat per E. A. Milne, afirma que l'univers a gran escala és homogeni i isòtrop. Quan es va postular el principi era necessari assumir moltes coses encara desconegudes per tal de poder progressar. Les observacions actuals ens permeten confirmar que allò que va ser postulat es verifica realment.

L'estudi de la macroestructura còsmica traçada per la distribució de galàxies i cúmuls, i pels mapes de fluctuacions de temperatura en la radiació de fons de microones, la seua descripció en termes estadístics, utilitzant els fractals i altres tècniques són alguns dels temes de recerca a què es dedica l'autor d'aquest article. La massa i l'extensió dels halos de matèria fosca al voltant de galàxies el·líptiques és un dels projectes observacionals que es desenvoluparà en un futur immediat. L'autor espera poder, de tant en tant, explicar com van aquests treballs des de les pàgines de MÈTODE.



*Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València.

EL FONS DE MICROONES, UN TEXT XIFRAT SOBRE LA HISTÒRIA DE L'UNIVERS

Diego Sáez*

THE MICROWAVE BACKGROUND: A CODIFIED TEXT ABOUT THE HISTORY OF THE UNIVERSE. THE UNIVERSE HAS ALWAYS BEEN FILLED BY A SEA OF PHOTONS: THE SO-CALLED COSMIC MICROWAVE BACKGROUND (CMB). COSMOLOGICAL STRUCTURES -GALAXIES, CLUSTERS, WALLS ET CETERA- FORMED INSIDE THE CMB AND ALTERED THE PHOTON FREQUENCIES PRODUCING AN OBSERVABLE IMPRINT. AS THE AUTHOR EXPLAINS, THE GREATER PART OF COSMOLOGICAL EVOLUTION CAN BE INFERRED FROM THE FEATURES OF THIS IMPRINT, AND SUCH CHARACTERISTICS COULD BE SEEN AS THE TEXT OF A CODIFIED BOOK ABOUT THE HISTORY OF THE UNIVERSE. HERE D. SÁEZ GIVES SOME EXAMPLES OF THE TYPE OF EXPERIMENT DESIGNED TO CRACK THIS CODE.

En el seu estat actual, l'univers està molt buit, molt fred i en expansió. En els anys vint, Hubble va demostrar que les galàxies se separen totes de totes; és a dir, que l'univers s'expandeix. A causa de l'expansió, la temperatura ha anat baixant durant milers de milions d'anys, per tant l'univers primitiu degué ser molt calent. Ningú no sap quin és l'origen de l'expansió, però tot s'esdevé com si una gran explosió (Big Bang) haguera produït les condicions inicials per a l'evolució.

Fins fa molt poc es pensava que l'univers solament contenia galàxies, matèria fosca i radiació. Amb aquesta composició, l'expansió devia ser frenada per la força –sempre atractiva– de la gravetat. Això no obstant, observacions recents de supernoves llunyanes de tipus Ia semblen indicar que actualment l'expansió de l'univers es va accelerant. Si això resulta definitivament cert, deu existir algun altre component energètic que produeixi la força repulsiva responsable de l'acceleració. Potser es tracta de l'efecte d'algun camp que es troba en el seu estat de mínima energia (buit), i que es manifestaria exactament igual que l'anomenada constant cosmològica (introduïda per Einstein per crear forces repulsives en cert model estàtic d'univers).

Actualment, la radiació de fons de microones (RFM) és una distribució de fotons amb freqüències compreses entre $\sim 10^3$ GHz i $\sim 0,4$ GHz. Hi ha fotons de totes aquestes freqüències en determinades proporcions. Hom ha verificat que aquestes proporcions són les mateixes que apareixerien en la radiació emesa per un cos negre que estiguera a una temperatura d'uns 2.73 graus Kelvin. Aquest fons de radiació el va predir George Gamov en els anys quaranta i va ser detectat el 1965 per Arno Penzias i Robert Wilson. La detecció va

ser casual. Aviat es va veure que una radiació com l'observada solament es podia formar –com a resultat de la interacció dels seus fotons amb la matèria– en un univers molt calent. Aquest fet va transformar el descobriment de Penzias i Wilson en un dels pilars fonamentals del model de Big Bang, en el qual l'univers primitiu és extraordinàriament calent i la formació del fons de microones resulta inevitable.

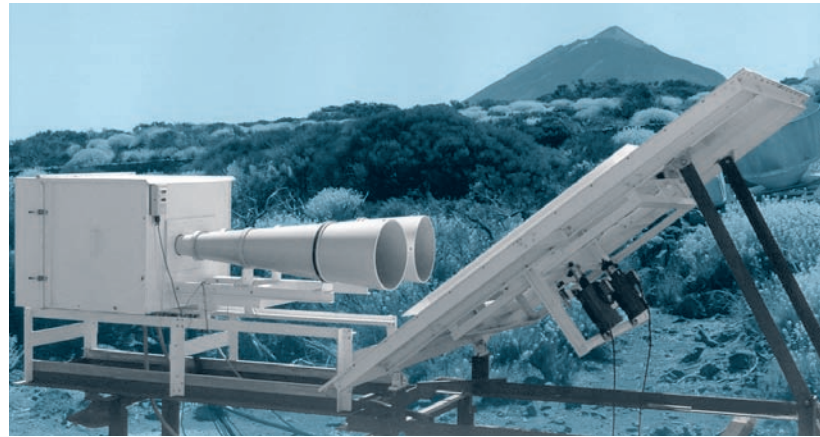
La RFM és rebuda quasi amb la mateixa intensitat en qualsevol direcció, el que significa que no és emesa per estructures discretes com ara galàxies o estels. En realitat, aquestes estructures es van formar en el seu si. Podem dir que la RFM va ser testimoni de l'evolució de les protoestructures que donaren lloc a les galàxies i a les seues agrupacions (cúmuls, parets, etc.). Aquestes protoestructures, quan interaccionaren amb la radiació, hi deixaren una empremta: una mena de missatge xifrat que hem d'interpretar. Com és aquesta empremta? Es tracta de diferències molt petites entre les temperatures de la RFM corresponents a direccions distintes. Gran part de la història de l'univers està escrita en la distribució angular –en l'esfera celest– d'aquestes temperatures, i més concretament, en les correlacions entre les temperatures que corresponen a direccions diferents. El missatge escrit en la RFM és tan important que no s'estalvien esforços per mesurar-ne la temperatura en tantes direccions com siga possible, a fi d'estimar i interpretar les correlacions que apareguen.

Les protoestructures interaccionen amb els fotons canviant la seua freqüència. Tres canvis de freqüència –per causes diferents– es van superposar: 1) el que experimenta qualsevol fotó per moure's en el camp gravitatori creat per les protoestructures; 2) el que

experimenten els fotons de microones quan interaccionen amb electrons energètics onsevolga que n'hi haja, i 3) el que experimenta tot fotó quan existeix un moviment relatiu entre la zona de la qual prové i l'observador (efecte Doppler). En presència d'una distribució de protoestructures en evolució, els fotons de la RFM que ens arriben des de direccions distintes experimenten canvis de freqüència diferents, els quals dependran de la distribució i estat evolutiu de les protoestructures que els fotons troben en cada camí. Quan canvien les freqüències dels fotons canvia la temperatura de la seua distribució. Les temperatures resultants –com els canvis de freqüències– depenen de la direcció, per això es diu que estan distribuïdes de manera anisotròpica. En l'argot cosmològic, les diferències de temperatura corresponents a direccions distintes es diuen anisotropies.

Fins a l'any 1992 solament s'havia detectat l'anomenada anisotropia dipolar: unes diferències de temperatura degudes al moviment peculiar del Grup Local (agrupació formada per una vintena de galàxies a la qual pertany la Via Làctia). Aquell any, un grup liderat pel doctor G. Smoot que utilitzava un satèl·lit de la NASA anomenat COBE va detectar altres anisotropies més petites produïdes pel mecanisme gravitatori esmentat adés. Aquest grup podia trobar diferències relatives de temperatura per a parells de direccions separades per una distància angular major que uns 10° . El valor típic de les citades diferències relatives va resultar ser de l'ordre de 10^{-5} , un valor molt petit. Els aparells a bord del COBE no tenien prou resolució per mesurar diferències relatives per a distàncies angulars menors que 10° , però aquestes mesures són necessàries per a estudiar les anisotropies d'origen no gravitatori. Alguns detectors que operen des d'observatoris terrestres (Tenerife, Pol Sud, etc.) i des de globus sonda han fet alguns mesuraments d'aquesta mena; no obstant això, els experiments amb millors perspectives són els que s'han projectat per a mesurar des de l'espai (sense el problema de l'atmosfera i capaços de cobrir quasi tot el cel en el transcurs de la missió). Entre aquests cal citar la missió MAP de la NASA, que mesurarà anisotropies considerant parells de direccions separades més de $30'$ i el satèl·lit Planck de l'Agència Espacial Europea, que serà llançat uns anys després que MAP i que prendrà mesures per a separacions angulars encara més petites (majors d'uns $10'$).

**«UN DELS NOSTRES OBJECTIUS
ÉS FER MAPES SIMULATS
I COMPARAR AMB LES PREDICCIONS
DELS DIFERENTS MODELS TEÒRICS»**



Instruments per a l'estudi del fons còsmic de microones, a l'observatori del Teide, a l'illa de Tenerife (IAC).

L'autor d'aquestes ratlles en col·laboració amb el professor J. V. Arnau i els doctors M. J. Fullana i V. Quilis, ha investigat diversos aspectes de la RFM. Aquest petit grup que pertany a un altre de major –subvencionat actualment pel Ministeri d'Educació i Cultura– ha estudiat la empremta que certes estructures cosmològiques –com ara el Gran Atractor, els cúmuls rics de galàxies i els anomentas buits– imprimeixen sobre la RFM. A més, alguns membres del grup han fet mapes –simulats amb ordinadors– de la distribució de les temperatures de la RFM en el cel i els han sotmès a anàlisis apropiades. Aquestes investigacions han donat lloc a nombrosos articles publicats en revistes internacionals especialitzades. El grup pensa continuar treballant en aquesta línia, d'una banda estenen els estudis esmentats adés al cas –de moda– d'un univers amb constant cosmològica, i de l'altra col·laborant amb l'equip del detector de baixa freqüència del projecte Planck (al qual D. Sáez pertany en qualitat d'associat). Un dels nostres objectius és fer mapes simulats del que veurien els detectors de Planck i estudiar la forma de comparar la informació continguda en aquests mapes –després d'eliminar sorolls i contaminacions– amb les prediccions dels diferents models teòrics. És una prolongació natural de la línia de simulacions de fons de microones prèviament desenvolupada pel grup.



*Departament d'Astronomia i Astrofísica. Universitat de València

ÉS POSSIBLE DETECTAR ONES GRAVITATÒRIES GENERADES EN UN LABORATORI?

Miquel Portilla i Ramon Lapiedra*

IT IS POSSIBLE TO DETECT GRAVITATIONAL WAVES GENERATED IN THE LABORATORY?. IN UNCONVENTIONAL STYLE, THE AUTHORS SUMMARIZE THEIR WORK ON GRAVITATIONAL WAVES. THEY START BY SETTING OUT A NEW METHOD TO DEAL WITH THE GERTSENSHTEIN EFFECT (THE CONVERSION OF ELECTROMAGNETIC WAVES INTO GRAVITATIONAL WAVES UNDER FAVOURABLE CONDITIONS). THE AUTHORS APPLY THEIR METHOD TO A SMALL DIELECTRIC BALL IRRADIATED BY A STRONG ELECTROMAGNETIC WAVE, AND...SOMETHING UNEXPECTED HAPPENS.

La teoria d'Einstein de la relativitat general, prediu l'existència d'ones gravitatòries. Qualsevol objecte material movent-se de determinada manera, com per exemple un pèndol oscil·lant, emet unes ones que poden propagar-se sense necessitat de cap medi material que faça de suport, com l'atmosfera ho fa amb les ones sonores. L'amplitud d'aquest fenomen, en el cas del pèndol, és major com major és la massa i com més ràpida és l'oscil·lació, però dissortadament les ones que podem produir per un procediment tan simple són massa febles per poder detectar-les. Amb bon criteri es pensa que s'ha de mirar molt més lluny, fora del sistema Solar, entre els milions i milions d'estrelles de la Via Làctia. El desavantatge que representa considerar l'objecte emissor tan lluny es compensa per l'enorme massa de les estrelles, comparada amb les masses que podem manipular en un laboratori, i pel fet que algunes estrelles estan implicades en processos molt ràpids, com les que formen una parella orbitant una al voltant de l'altra, com la Terra ho fa al voltant del Sol, però a velocitats superiors.

La situació actual és d'expectativa. S'han construït antenes per detectar les ones gravitatòries que vénen del cel (els cilindres de Weber, els interferòmetres amb braços d'uns quants quilòmetres...). Mai no s'han observat aquestes ones, però el 1975, Hulse i Taylor descobriren una parella d'estrelles de neutrons, el que es diu un púlsar binari, que aportà una evidència indirecta de radiació d'ones gravitatòries: si el púlsar binari està emetent ones gravitatòries el període de rotació orbital ha de disminuir a poc a poc, al ritme marcat per la teoria. Això és el que passa. Hulse i Taylor tingueren premi, el Nobel, per aquest descobriment.

Després d'aquest preàmbul sembla que la resposta a la pregunta del títol d'aquest escrit és un no rotund. Nosaltres no diríem un no tan fort, i que ens perdone Raimon. Movent masses en un laboratori no és possible generar ones d'amplitud suficient per a poder detectar-les, però hi ha altres mètodes. En els anys 60, Gertsenshtein, utilitzant

la teoria d'Einstein, va mostrar la possibilitat de convertir part de l'energia continguda en una ona electromagnètica, per exemple la llum, en una ona gravitatòria. Nosaltres em continuat en aquesta línia i ens permetran, imitant el gran Galileu, exposar el tema assistint al diàleg entre dos professors. Un d'ells representa els autors, l'altre, ja voldríem saber qui representa.

—Vinga home, on vas? És molt fàcil generar-les (*dient això mou ràpidament els braços com si fóra un rat penat*), però són massa febles per poder detectar-les. L'única possibilitat està en les estrelles, on podem trobar masses enormes, movent-se amb acceleracions molt grans.

—Pensem en la radiació d'un làser, o d'un màser. És una considerable concentració d'energia lluminosa, i la variació en el temps és extraordinàriament gran.

—Sí, però se sap que una ona plana electromagnètica no produeix ones gravitatòries.

—I, què em dius del col·lapse d'una estrella amb simetria esfèrica? També sabem que no emet ones. És l'excepció. En el cas que ens ocupa (radiació gravitatòria produïda per radiació electromagnètica), sabem que quan la llum travessa un camp magnètic homogeni es transforma en una ona gravitatòria de la mateixa freqüència a mesura que va propagant-se.

—Ah, em parles de l'efecte Gertsenshtein? Sí, sí, però ho fa molt a poc a poc, i la distància que hauria de recórrer la llum, per produir una ona gravitatòria apreciable, és molt gran i no cap en un laboratori.

—En efecte, però un col·lega experimental ha proposat atrapar llum entre dos espills paral·lels en una regió de fort camp magnètic. La idea és que la llum continuarà afeblint-se i l'ona gravitatòria s'engrandirà després de cada reflexió. Es poden aconseguir així unes cent mil reflexions, i això és com si tinguérem un laboratori molt més gran.

—Això no pot ser, perquè l'ona gravitatòria s'escapará travessant l'espill; tots sabem que no hi ha espills d'ones gravitatòries.

—Tens raó si ens limitem a ones gravitatòries en el buit. Però en realitat estem parlant d'un procés de conversió d'ones electromagnètiques en gravitatòries. Nosaltres ens hem replantejat aquestes qüestions, i la suggerència del col·lega experimental de nodrir l'ona gravitatòria en una cavitat ressonant, efectivament, com tu dius, no funciona. Hem trobat que tota aquesta discussió se simplifica molt si ens plantegem el problema en un medi real d'índex de refracció n diferent de la unitat, en compte de fer-ho en el buit ideal on $n=1$. Per exemple, el problema de la radiació gravitatòria produïda per un corrent elèctric variable en presència d'un camp magnètic estàtic té així una solució molt simple. L'amplitud de l'ona gravitatòria formada és una fracció: en el numerador tenim una funció de la distància al corrent elèctric, i , en el denominador el numeret $n-1$. En una campana de buit podem aconseguir que $n-1$ siga tan petit com 10^{-17} . La funció que tenim en el numerador pren valors insignificants quan estem a curtes distàncies (un metre) del corrent, i creix molt a poc a poc fins a prendre un valor respectable, de manera que, l'ona hauria de recórrer una distància molt gran per poder assolir una amplitud detectable. Aquesta ona gravitatòria és del tipus de les generades en l'efecte Gertsenshtein, que has citat adés.

—Ja veig. Per una part el numeret $n-1$ en el denominador t'ajuda a obtenir una amplitud respectable, i per altra t'ho dificulta perquè fa molt gran la distància necessària per aconseguir-ho.

—Així és la vida. Utilitzant aquest mètode hem pogut esbrinar què passa quan una d'aquestes ones de Gertsenshtein incideix sobre la superfície de separació de dos medis amb diferent índex de refracció. El cas més interessant és quan el raig incident es propaga per un medi d'índex de refracció molt pròxim a la unitat. En aquest cas, la superfície de separació es comporta com una font de radiació gravitatòria: l'ona gravitatòria reflectida té amplitud zero en la superfície, és a dir que no hereta gens ni miqueta de l'ona incident, i comença a créixer a poc a poc. Així doncs, ho sent molt per l'amic experimental. Però encara n'hi ha més. Què passa quan la llum incideix sobre una inhomogeneïtat més petita que la seua pròpia longitud d'ona? Apareix una radiació difosa. Per això és blau el cel de dia, no? Doncs bé, generalitzant el mètode anterior hem estudiat les ones gravitatòries generades per una boleta dielèctrica en un medi d'índex de refracció n .

—A que t'endevine què passa? Es genera un ona gravitatòria amb amplitud creixent amb la distància a la boleta. Creix a expenses de la llum, que anirà perdent amplitud. Necessariu un laboratori tan gran com la longitud d'ona dividida pel numeret ($n-1$) per tal d'assolir una amplitud

respectable. En fi, que hauríeu de construir una campana de buit d'uns centenars de quilòmetres i omplir-la d'un camp magnètic homogeni i intens. Impossible.

—Es veu que has captat la idea. Però hi ha un resultat que et sorprendrà una mica. L'ona gravitatòria es descompon en dues parts. Una es comporta com acabes de dir, és una ona de Gertsenshtein. L'amplitud de l'altre component de nou té en el denominador el numeret $n-1$, en el numerador té el volum de la boleta i , el que és més important, ja no hi té una funció amb valors molt menuts a curtes distàncies. Aquest segon component ja té, des que s'ha format, la màxima amplitud que podríem traure del primer component si disposàrem d'un laboratori de centenars de quilòmetres.

—Dius que si em sorprèn? No és que em sorprenga, és que no m'ho crec. Per què no apareix aqueix component

meravellós quan tracteu el problema d'un volum finit de càrregues radiatives en un camp magnètic intens? Abans m'has dit que tan sols s'hi genera un ona de Gertsenshtein. Al capdavall la boleta d'ara no és més que un conjunt de dipòls elèctrics oscil·lant.

—Bona pregunta. Em serà més fàcil contestar-te si véns després pel meu despatx, si veus les equacions ho comprendràs de seguida.

—I, com penseu detectar ones de tan alta freqüència? Perquè tenen la mateixa freqüència que la llum que les genera. Les antenes en construcció treballen en quilocicles com a màxim.

—No hem de pensar en interferòmetres, ni en cilindres de Weber. Però no et parlaré ara de cap tipus d'antena. N'hi ha quelcom de més urgent. Un segon i ens n'anem. Resulta que si divideixes l'energia emesa en ones gravitatòries per l'energia electromagnètica difosa obtens que és possible aconseguir que la gravitatòria siga un 4% o un 5% de l'electromagnètica. L'ona gravitatòria li ha furtat l'energia a l'electromagnètica, i per tant si mesurem l'energia electromagnètica difosa quan hem fet el buit i hem omplert la càmera d'un camp magnètic estàtic intens s'ha d'obtenir menys energia que quan anul·lem per exemple el camp magnètic estàtic.

—Ja veig, ja veig, vols dir detectar el fenomen de radiació per la reacció sobre el sistema que emet les ones gravitatòries, tal i com ja s'ha fet amb el Nobel púlsar binari. (Amb una mica de sorna:) Aleshores vosaltres creieu que és possible detectar ones gravitatòries generades en el laboratori?

—Home, ja saps com són aquestes coses. 

**«ES POSSIBLE CONVERTIR
PART DE L'ENERGIA CONTINGUDA EN
UNA ONA ELECTROMAGNÈTICA
EN UNA ONA GRAVITATÒRIA»**

*Departament d'Astronomia i Astrofísica. Universitat de València

L'OBSERVATORI ASTRONÒMIC DE LA UNIVERSITAT DE VALÈNCIA: NOVES PERSPECTIVES

Álvaro López García*

VALENCIA UNIVERSITY'S ASTRONOMICAL OBSERVATORY: NEW PERSPECTIVES. VALENCIA OBSERVATORY, FOUNDED AT THE BEGINNING OF CENTURY, HOLDS AN ACTIVE PROGRAM OF MINOR PLANETS OBSERVATION. NEW INSTRUMENTATION, PLACED AT CAAT OBSERVING STATION, WILL ALLOW INCREASING THIS PROGRAM AND GET INVOLVED IN OTHER ACTIVITIES. UNIVERSITY AND AMATEUR TEAMS WILL USE ALSO THE NEW OBSERVATORY FOR THEIR TEACHING AND RESEARCH PROGRAMS.

Fundat el 1908 pel catedràtic Ignacio Tarazona, l'Observatori de la Universitat de València va quedar instal·lat en l'edifici del carrer de la Nau, on va complir durant molts anys la triple funció de donar suport a la docència, ser un centre d'investigació i promoure la divulgació astronòmica. Durant més d'una dècada l'Observatori va publicar l'estadística anual d'activitat solar, base de la seua investigació durant aquells anys.

En la dècada dels cinquanta, després del trasllat a la Facultat de Ciències a l'avinguda Blasco Ibáñez, l'activitat de l'Observatori decaigué gradualment fins cessar quasi per complet a començament dels anys seixanta.

El 1967 s'inicia una nova etapa i s'assenten les bases del desenvolupament actual de l'Observatori. La col·laboració de llicenciats, alumnes i afeccionats, que han ajudat en diverses tasques, ha estat constant i decisiva al llarg d'aquests anys.

El 1985 va començar la participació de l'Observatori en diversos programes internacionals d'observació fotogràfica d'asteroides, fent servir el reflector Grubb de 15 cm. Fins avui s'han obtingut unes 950 plaques i se n'han mesurat i reduït vora 800.

Des del 1989 es mantenen contactes amb centres d'investigació de Sant Petersburg (Rússia), que han donat lloc a acords de col·laboració de gran interès per a l'Observatori. La relació amb aquests centres i amb d'altres ha propiciat l'organització de quatre seminaris internacionals sobre "Astronomia de posi-

ció i mecànica celest", celebrats el 1991 i 1992 (València), 1994 (Conca) i 1996 (Peníscola), i que han tingut una repercussió creixent.

En vista de les limitacions de l'Observatori (espai reduït i condicions de cel deficientes), i de la disponibilitat de diversos telescopis (astrògraf doble de 30-20 cm, telescopi reflector de 50 cm, càmera balística), fa uns quants anys es va plantejar la conveniència d'instal·lar aquests instruments en un lloc alternatiu, amb infraestructura i condicions de cel més favorables.

Els contactes iniciats el 1995 amb l'Associació Valenciana d'Astronomia (AVA), entitat que disposava d'un terreny adequat, en una zona sense il·luminació i a més de 1.300 metres d'altitud, cristal·litzaren en el projecte de Centre Astronòmic de l'Alt Túria (CAAT), al

terme d'Ares d'Alpont, al qual la Universitat de València aporta els seus telescopis.

La construcció del CAAT es va iniciar fa tres anys, després de la firma el 1996 d'un conveni entre la Universitat i l'AVA. La primera fase de Centre Astronòmic, que inclou l'edifici i la cúpula de 6 metres de diàmetre que conté l'astrògraf doble, va ser inaugurada pel nostre rector al maig de 1998.

El projecte i el pressupost de la segona fase (edifici i cúpula del telescopi reflector de 50 cm) ja estan disponibles i es confia d'enllestir-ne la instal·lació durant 1999. Aquest instrument és complementari de l'anterior i es podrà dedicar a l'observació automàti-


**«ELS ESTUDIANTS DE LA UNIVERSITAT
I EL PÚBLIC EN GENERAL
PODRAN GAUDIR
DE LES MERAVELLES DEL CEL
EN LES SEUES VISITES
AL NOU CENTRE ASTRONÒMIC»**

ca d'objectes específics (galàxies, estels binaris, asteroides).

La càmera balística, de 25 cm d'obertura i 90 cm de focal, és un instrument molt lluminós, amb un camp ampli i molt ben corregit. Comptant amb els mitjans auxiliars adequats, es podrà destinar a la recerca automàtica d'objectes celestis mòbils, incloent-hi cometes dèbils i asteroides pròxims a la Terra.

Aquest i altres mòduls previstos (edifici central, aula, tallers) podran ser operatius al llarg dels pròxims anys. A aquest objectiu dediquem tot el nostre esforç tant el personal de l'Observatori com alguns membres del AVA. Amb els instruments del CAAT es podran abordar diversos programes sistemàtics d'observació, en els quals la col·laboració entre els professionals i els afeccionats no solament serà possible sinó també molt desitjable. Els estudiants de la Universitat i el públic en general podran també gaudir de les meravelles del cel en les seues visites al nou centre astronòmic.

Aquesta situació es complementa amb el trasllat imminent de l'Observatori al campus de Burjassot, on disposarà de les instal·lacions i dels mitjans adequats per prestar un suport eficaç als nous programes d'observació del CAAT.

Com a colofó, podem afirmar que les perspectives de l'Observatori de la Universitat de València, a les portes del segle XXI, són apassionants. La seua contribució a l'oferta cultural que demanda la societat serà important i li permetrà complir plenament els seus compromisos estatutaris amb la docència, la investigació i la divulgació de l'astronomia. 

*Observatori Astronòmic de la Universitat de València.



Inauguració del CAAT (maig 1998).



Col·locació de la cúpula de 6 metres (abril 1997).



Estat actual del CAAT (març 1999).

ASTROFÍSICA RELATIVISTA

José M^a Ibáñez*

RELATIVISTIC ASTROPHYSICS. THE AUTHOR SUMMARIZES THE MAIN LINES OF RESEARCH THE RELATIVISTIC ASTROPHYSICS GROUP IS INVOLVED IN. RELATIVISTIC JETS, ACCRETION ONTO COMPACT OBJECTS AND THE PHYSICS OF NEUTRON AND PROTONEUTRON STARS ARE SOME OF THE TOPICS WHERE RELEVANT SCIENTIFIC CONTRIBUTIONS HAVE BEEN MADE.

Al desembre de 1962 Maarten Schmidt va aconseguir identificar, en l'espectre de la radiofont 3C273, la presència d'hidrogen. Les línies espectrals corresponents (línies d'emissió de la sèrie de Balmer) estaven desplaçades al roig en un 16%, respecte als seus valors al laboratori. Al desembre de l'any següent, Robinson, Schild i Schücking van convocar un congrés a Dallas (Texas) amb l'objectiu d'analitzar la informació que es començava a acumular sobre uns enigmàtics objectes denominats quàsars (*quasi-stellar radio sources*) i proposar models capaços d'explicar els mecanismes generadors d'una emissió d'energia a un ritme equivalent al d'un bilió de vegades el del nostre Sol ($10^{12}L_{\odot}$) i, a més, en una regió relativament petita (de fet 3C273 apareixia en les plaques fotogràfiques com una font puntual, el que explica el terme quasiestellar). Aquest congrés va ser batejat com *Texas Symposium on Relativistic Astrophysics* i els resultats els va publicar la Universitat de Chicago el 1965 sota el títol *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse*. El terme "astrofísica relativista" quedava, doncs, encunyat entre la comunitat científica. Pels mateixos anys, Zeldovich i Novikov treballaven en la seua obra *Relativistic Astrophysics*, el primer volum de la qual (*Stars and Relativity*) va aparèixer, en rus, l'any 1967. Al desembre passat tingué lloc, a París, la dinovena edició del Texas Symposium on Relativistic Astrophysics. Més de 900 participants i quinze minisimpòsiums paral·lels donen idea de l'extraordinària vitalitat, actualitat i importància d'aquest camp de l'astronomia moderna que és l'astrofísica relativista.

L'equip d'investigació definit, actualment, pel projecte de la DGES "Fluids relativistes en astrofísica i física d'objectes compactes" es va començar a gestar el

1986 quan dos dels seus membres, els doctors Martí i Miralles –actualment professors titulars de la Universitat de València– treballaven en les seues respectives tesis doctorals i als quals es va unir, posteriorment, el doctor Armando Pérez (professor titular del Departament de Física Teòrica). En el si d'aquest equip ens hem anat interessant per problemes que s'inscriuen en el marc de l'astrofísica relativista i mantenim, en aquesta disciplina, relacions científiques estables amb prestigiosos grups a Europa i als EUA: Instituto de Astrofísica de Andalucía, Max-Planck Institut für Astrophysic (Garching, Alemanya), Max-Planck Institut für Gravitationsphysik (Postdam, Alemanya), Observatoire de Paris-Meudon (França), Department of Astronomy (Boston University, EUA), Department of Physics and Astronomy (State University of New York, EUA). En la nostra mateixa universitat mantenim estrets vincles científics amb el Grup de Recerca d'Anàlisi Numèrica, liderat pel professor Marquina (Departament de Matemàtica Aplicada) i amb professors del Departament de Física Teòrica.

Un dels eixos orientadors de la nostra activitat investigadora és el que hem titulat "Física d'objectes compactes" (nans blancs, estels de neutrons i forats negres). Les contribucions principals del grup s'inscriuen en el camp de les propietats, tant físiques com observacionals, dels estels de neutrons. Els diferents treballs científics publicats es poden aplegar en dues categories: *a*) anàlisi de les propietats macroscòpiques i observacionals dels estels de neutrons amb camps magnètics intensos i, *b*) estudi de les primeres etapes en l'evolució dels estels de neutrons acabats de formar pel col·lapse de l'estel progenitor. El refredament d'un protoestel de neutrons

«L'ACRECIÓ SOBRE UN OBJECTE COMPACTE ÉS EL MECANISME MÉS EFICIENT PER GENERAR ENERGIA; PER EXEMPLE L'EFICIÈNCIA EN LA SÍNTESI DE L'HELI A PARTIR DE L'HIDROGEN ÉS, A PENES, UNA DÈCIMA PART D'AQUELL»

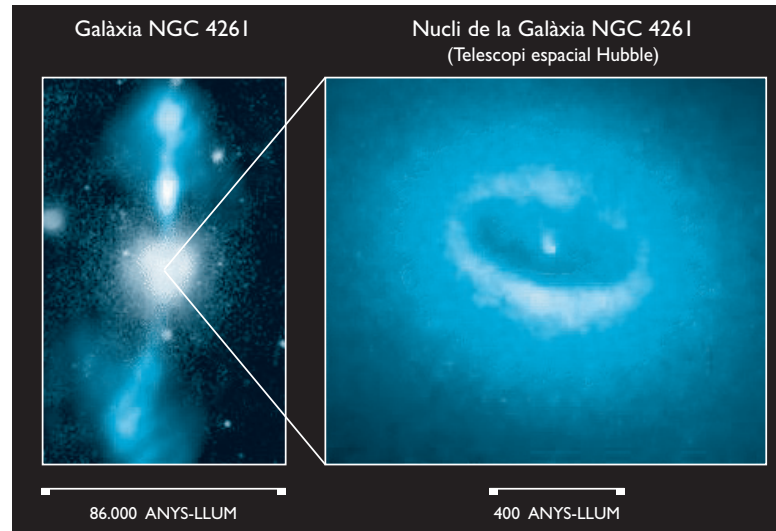
constitueix, en l'actualitat i en ell mateix, una especialitat dins d'aquest camp, donat que, com es comenta en la contribució a aquest volum de Miralles i Pons, és possible contrastar amb les observacions –detecció de neutrins– els models que es proposen per a explicar els primers cinquanta segons de la seua vida. Altres aportacions rellevants en aquest camp són les relatives a l'anàlisi de les propietats de la matèria a les densitats típiques que s'aconsegueixen en l'interior dels estels de neutrons. En aquesta direcció cal destacar el paper clau representat per la investigació desenvolupada per Armando Pérez, alguns dels resultats del qual són fonamentals per al coneixement de l'equació d'estat que descriu la matèria en les condicions extremes ja esmentades.

El segon eix orientador de la nostra activitat investigadora és el que hem denominat “Fluids relativistes en astrofísica”. Estudiem certs processos hidrodinàmics en què la matèria arriba a velocitats pròximes a la de la llum i/o evoluciona en presència d'un camp gravitatori –del qual, fins i tot, pot ser la font– tan intens que la ja mencionada evolució ha de ser descrita en el quadre de la teoria de gravitació deguda a Einstein. Encara que el dit títol pot resultar, a primera vista, poc atractiu, és difícil resumir en tan poques paraules la diversitat i interès dels diferents escenaris astrofísics implicats:

1) “Dolls relativistes extragalàctics”, associats a galàxies amb activitat nuclear, o galàctics, associats a objectes compactes d'origen estel·lar. En la contribució a aquest volum de Martí i Aloy es desenvolupa amb detall tant l'escenari astrofísic com les aportacions a aquest camp del grup. Aquesta línia de treball ha estat valorada molt positivament, entre altres, per la Societat Max-Planck (com queda reflectit en les corresponents memòries d'aquesta societat) i ha estat destacada per la Direcció General XII (Science, Research & Development) de la Comissió Europea (que va seleccionar el doctor Martí, amb quinze científics més, entre tots aquells que han gaudit de beques i/o contractes concedits per l'esmentada direcció durant els dos darrers plans quadriennals).

2) “Acreció sobre objectes compactes”. L'acreció sobre un objecte compacte és el mecanisme més eficient, de tots els coneguts, per generar energia; per exemple, l'eficiència en la síntesi de l'heli a partir de l'hidrogen (mecanisme que té lloc en estels de seqüència principal, com ara el Sol) és, a penes, una dècima part d'aquell. Els corresponents articles científics, desenvolupats en el si d'una col·laboració amb els doctors Font i Papadopoulos (del Max-Planck Institut für Gravitationsphysik), són pioners en l'anàlisi de les propietats morfodinàmiques del gas que és acretat per un forat negre de Kerr.

Cal subratllar que en els dos candidats a forats



Dolls de plasma (esquerra) i disc d'acreció associat en el nucli d'una galàxia (dreta).

negres supermassius que suposadament existeixen en el nucli central de les respectives galàxies, NGC 4261 i M87, s'ha observat l'associació dolls-discos d'acreció. El lector pot mirar d'imaginar un escenari tan fascinant com el d'un gegantesc terbolí (de gas), d'uns quants centenars d'anys-llum (distància recorreguda per la llum en un any) de diàmetre, girant, a velocitats d'una dècima part de la de la llum, al voltant d'un objecte la presència del qual solament és “detectable” indirectament (per la seua influència gravitatòria) i la massa del qual és l'equivalent a la de milions de vegades la del Sol, i, a més, en direccions perpendiculars al plànol del terbolí, i al llarg de l'eix central, n'ergeixen uns dolls de plasma a velocitats de fins un 99,9% la de la llum que s'estenen fins a distàncies de centenars de milers d'anys-llum. Mai no va ser tan certa l'afirmació que la realitat supera la fantasia.

Altres escenaris astrofísics d'importància extraordinària en què treballem són els del col·lapse gravitacional de nuclis estel·lars (precursor de les supernoves de tipus II), les erupcions de raigs gamma i, a termini mitjà, el de les col·lisions de binàries compactes.

Com es dedueix de tot el que hem exposat, els dos grans eixos orientadors de la nostra activitat investigadora –els “Fluids relativistes en astrofísica” i la “Física d'objectes compactes”– no solament estan estretament relacionats –els processos hidrodinàmics relativistes en astrofísica exigeixen la presència d'un objecte compacte– sinó que, a més a més, defineixen un ambiciós pla de treball en l'apassionant camp de l'astrofísica relativista.



*Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València

ESTELS DE NEUTRONS, EL VESTIGI DE GRANS EXPLOSIONS

Joan Antoni Miralles i Josep A. Pons*

NEUTRON STARS: LABORATORIES FOR THE PHYSICS OF MATTER AT SUPRANUCLEAR DENSITIES.
THE AUTHORS OUTLINE A BRIEF HISTORY OF THE ORIGINAL IDEA AND LATER DISCOVERY OF NEUTRON STARS. THEY GO ON TO PRESENT THE MOST WIDELY ACCEPTED THEORY ON THE FORMATION OF THESE SUPERDENSE STARS, DESCRIBING THE CONDITIONS UNDER WHICH NEUTRON STARS ARE BORN IN SUPERNOVA EXPLOSIONS. THE ABSENCE OF A NEUTRON STAR IN THE REMNANT OF SN1987A IS INTERPRETED AS THE COLLAPSE OF THE NEUTRON STAR INTO A BLACK HOLE SOON AFTER ITS FORMATION. THEY DISCUSS A SCENARIO WHICH MIGHT ACCOUNT FOR THIS LACK OF DETECTION.

Les primeres hipòtesis sobre l'existència d'estels formats essencialment per neutrons sorgeixen immediatament després del descobriment del neutró. Aquesta partícula subatòmica va ser descoberta per J. Chadwick el 1932 quan tractava d'explicar la natura d'una radiació molt penetrant que s'obtenia en bombardejar elements lleugers (Li, Be) amb partícules α (nuclis d'heli). La mateixa vesprada en què es rebia la notícia d'aquest descobriment, L. Landau, en conversacions amb N. Bohr i L. Rosenfeld a Copenhaguen, proposà l'existència d'estels formats per neutrons. Com que aquesta hipòtesi no va ser publicada, es tendeix a acceptar que W. Baade i F. Zwicky, en un treball publicat el 1934, són els qui encunyen el terme "estel de neutrons" i els qui proposen que la seua formació va associada a explosions de supernoves, i que la pèrdua de l'energia gravitacional en la formació de l'estel de neutrons proporciona l'energia necessària per a l'explosió.

Cal esperar, però, fins la dècada dels seixanta i principis dels setanta per obtenir les primeres evidències observacionals d'aquesta mena d'objectes. És un exemple clar en què la teoria s'avança unes quantes dècades a l'observació. En els anys seixanta es comença a explorar el cel amb detectors de raigs X. Amb els primers llançaments de globus, coets i, posteriorment, satèl·lits (l'alta absorció que presenta l'at-

mosfera a aquestes longituds d'ona fa impossible la detecció de raigs X des d'observatoris situats en terra), es detecten les primeres fonts de raigs X situades més enllà del nostre sistema solar i es comença a especular sobre la possibilitat que aquestes fonts siguin estels de neutrons calents. La investigació teòrica sobre aquest tipus d'objectes se centra en l'estudi de la seua evolució tèrmica a fi de poder contrastar amb les observacions que acabaven de fer-se.

L'acceptació definitiva de l'existència d'estels de neutrons es va produir el 1967, quan es descobreix el primer púlsar. En una investigació adreçada a l'estudi del centelleig de les ones de ràdio produït pel gas interestel·lar, pel gas interplanetari i per la ionosfera terrestre (efecte similar al que produeix que els estels dèbils titil·len quan s'observen des de la Terra), A. Hewish, director del Mu-

«L'ACCEPTACIÓ DEFINITIVA
DE L'EXISTÈNCIA D'ESTELS
DE NEUTRONS ES VA
PRODUIR EL 1967, QUAN ES
DESCOBREIX EL PRIMER PÚLSAR.»

llard Radio Astronomy Observatory de la Universitat de Cambridge, a Anglaterra, amb la seua estudiant de doctorat J. Bell, van descobrir un senyal polsant procedent d'una font amb ascensió recta $\alpha = 19^{\text{h}}19^{\text{m}}$ i declinació $\delta = 21^{\circ}$. El pols es repetia a intervals d'1,34 segons. Encara que primer es va aventurar la possibilitat que el senyal podia ser produït per algun instrument electrònic o fins i tot provenir d'alguna civilització extraterrestre, al febrer de 1986 es publica un article en la prestigiosa revista científica *Nature* en què



Nebulosa del Cranc. Restes d'una supernova (observada pels astrònoms xinesos, l'any 1054) on s'ha descobert un púlsar.

s'anuncia el descobriment i s'inclou una proposta sobre la possible explicació del fenomen basada en nans blancs o estels de neutrons. T. Gold, poc després del descobriment, proposa que el fenomen púlsar és produït per estels de neutrons en rotació amb camps magnètics intensos que, a mode de fars, ens il·luminen amb ones de ràdio a cada revolució de l'estel, quan es fa visible la zona d'emissió. El descobriment de púlsars amb períodes menors que una dècima de segon en les nebuloses de Vela i del Cranc feia quasi inevitable l'acceptació del model basat en estels de neutrons. A més, com que aquestes nebuloses eren restes d'explosions de supernoves, els descobriments proporcionaven una confirmació sòlida a la predicció feta per Baade & Zwicky el 1934.

A hores d'ara, generalment és acceptat que els estels de neutrons es formen en explosions de supernoves. Estels amb massa superior a $\approx 8M_{\odot}$ (el símbol M_{\odot} denota la massa del Sol 2×10^{30} kg) desenvolupen,

**«ELS ESTELS DE NEUTRONS
ES FORMEN EN EXPLOSIONS DE
SUPERNOVES»**

al llarg de la seua evolució, nuclis estel·lars de 1 a 2 M_{\odot} formats per elements amb nombre i pes atòmic proper al del ^{56}Fe . Aquests nuclis estel·lars s'inestabilitzen i col·lapsen perquè la força exercida per la pressió no pot mantenir l'estel enfront de la força de la gravetat. Aquest col·lapse transcorre en un temps característic de dècimes de segon, i solament quan la densitat supera la dels nuclis atòmics, $\approx 3 \times 10^{17}$

kg/cm^3 , la força de pressió comença a augmentar prou per aturar el col·lapse, i això provoca el rebot del material sobre la zona central. L'ona de xoc que es forma és capaç, en alguns casos, d'expulsar l'embolcall de l'estel i

de deixar en la zona central un objecte molt calent (10^{11} K) d'1 a 2 M_{\odot} , que es denomina protoestel de neutrons perquè és el progenitor dels estels de neutrons. En tan sols unes desenes de segons, el protoestel de neutrons es refreda fins a temperatures per sota de 10^9 K a causa de l'emissió de neutrins, que s'emporten la major part de l'energia gravitacional perdu-

da, i es forma un estel de neutrons. En els casos en què l'ona de xoc no arribara a expulsar prou massa, la formació d'un forat negre resultaria inevitable. L'eficàcia de l'ona de xoc depèn de diversos factors que han estat objecte d'estudi en el nostre grup d'investigació. Se'n pot destacar el comportament de la matèria a densitats superiors a la densitat nuclear, els efectes de relativitat general i el transport de neutrins.


L'esquema de formació d'estels de neutrons descrit anteriorment ha pogut ser verificat recentment amb l'observació de la supernova SN1987A, la més brillant des de la supernova de Kepler i la detecció simultània de 19 neutrins en un interval de temps de 12 segons, que cal comparar amb els 2 neutrins per hora que es detectaven procedents del Sol. No obstant això, l'absència de proves observacionals sobre l'estel de neutrons format ha dut alguns astrofísics a pensar que en la SN1987A s'ha format un forat negre. Per fer compatible l'observació de neutrins amb l'absència d'estel de neutrons (no s'hi observa púlsar ni l'efecte que un estel de neutrons podria produir sobre el material que s'expandeix) s'argumenta que el protoestel de neutrons és capaç de mantenir-se durant uns segons abans de col·lapsar a forat negre.

Recentment ens vam proposar d'estudiar aquest tema obtenint l'evolució teòrica de diferents models de protoestels de neutrons que es diferenciaven en el comportament de la matèria a altes densitats. En un d'aquests models se suposava que l'estel estava format per matèria ordinària: neutrons, protons i electrons (en condicions extremes de densitat i temperatura) i neutrins. Aquests darrers, quan es difonen i abandonen l'estel per la superfície, governen l'evolució. En un altre model s'admetia l'aparició d'hiperons (barions de major massa que els neutrons i protons) quan aquests estats foren energèticament favorables. Si es consideren estels amb masses inferiors a $\approx 1,7M_{\odot}$, no hi ha diferències notables entre ambdós models. Tanmateix, quan consideràvem masses una mica majors, l'evolució dels dos models era radicalment diferent. El model amb hiperons, després d'un cert temps, que depèn del valor exacte de la massa, es fa inestable i col·lapsa a forat negre. Hom disposa, per tant, d'un mecanisme capaç d'explicar la detecció de neutrins i l'absència d'estel de neutrons en aquelles explosions de supernoves en què es produeixen

objectes amb masses majors que $1,7M_{\odot}$. Aquelles en què l'objecte central siga de menor massa no arribaran a formar un forat negre sinó que deixaran com a residu lligat un estel de neutrons.

Un altre dels models que estudiem considera la presència de mesons K. A causa de la natura bosònica d'aquestes partícules (no estan subjectes al principi d'exclusió de Pauli) poden formar un condensat que no contribueix a la pressió, de manera que resulta més fàcil assolir configuracions inestables durant l'evolució del protoestel de neutrons. Com en el model descrit anteriorment, per a certs valor de la massa de l'estel, la formació d'un forat negre resulta inevitable.

En els casos en què, com a resultat de l'explosió supernova, es forme un estel de neutrons, aquest presentarà camps magnètics intensos. Ens vam proposar d'estudiar l'efecte d'aquests camps magnètics sobre les propietats de la radiació observada. Com que el camp magnètic, responsable del fenomen púlsar, és produït per intensos corrents elèctrics, processos de dissipació associats a la conductivitat finita del material transformarien energia magnètica en energia tèrmica en forma similar a l'escalfament que experimenta un fil conductor quan hi passa corrent elèctric. D'aquest efecte se'n diu efecte Joule, i, segons els resultats que hem obtingut pot canviar en forma important l'evolució tèrmica de l'estel en la darrera fase de la seua vida, és a dir, afectar en forma significativa l'energia que rebríem d'un estel de neutrons vell. D'altra banda, la distribució de corrents en l'estel produiria un escalfament desigual en els pols magnètics i en l'equador, de manera que, en un estel amb un eix de rotació que no estiguera alineat amb el camp magnètic, observariem un senyal polsant de raigs X. Actualment ens proposem abordar aquest problema a fi de contrastar amb observacions recents en què s'observen aquesta mena de pulsacions.

El mesurament de les propietats macroscòpiques dels estels de neutrons: massa, radi, temperatura, la detecció de neutrins i l'anàlisi de la radiació procedent de la seua superfície proporcionen informació valuósíssima sobre les propietats de la matèria densa i els converteix en vertaders laboratoris per a la física de la matèria a densitats supranuclears. 

**«EN ELS CASOS EN QUÈ
L'ONA DE XOC NO ARRIBARA
A EXPULSAR PROU MASSA,
LA FORMACIÓ D'UN FORAT NEGRE
RESULTARIA INEVITABLE.»**

*Departament d'Astronomia i Astrofísica. Universitat de València

DOLLS ASTROFÍSICS RELATIVISTES

José M^e Martí i Miguel A. Aloy*

RELATIVISTIC ASTROPHYSICAL JETS. THE PRESENCE OF COLLIMATED SUPERSONIC OUTFLOWS (JETS) IS COMMON TO SEVERAL ASTROPHYSICAL SCENARIOS FROM YOUNG STELLAR OBJECTS TO GALAXIES WITH NUCLEAR ACTIVITY. THE AUTHORS REVIEW THE PRESENT THEORETICAL AND OBSERVATIONAL STATUS OF JETS FROM ACTIVE GALAXIES IN WHICH THE DETECTION OF SUPERLUMINAL MOTIONS IS INTERPRETED AS INDICATION OF RELATIVISTIC FLOWS. THEY ALSO DISCUSS THE ROLE PLAYED BY RECENT FLUID DYNAMICAL RELATIVISTIC SIMULATIONS IN THE INTERPRETATION OF THESE OBJECTS.

El 1918, quan H. D. Curtis va fotografiar la galàxia el·líptica gegant M87, va notar la presència d'“un curiós raig rectilini aparentment connectat amb el nucli de la galàxia per una línia fina de matèria”. Aquest fet va representar el descobriment dels objectes avui coneguts amb el nom de dolls extragalàctics. Avui dia hi ha censats uns quants centenars de galàxies amb dolls, la majoria dels quals s'observen a longituds d'ona de ràdio. La seua aparença és deguda a l'emissió dels electrons que els componen i que es genera mitjançant el procés de sincrotró en què els electrons són accelerats per un camp magnètic ement ones electromagnètiques. Els dolls són els canals pels quals ingents quantitats d'energia i matèria són transportades des dels nuclis de les radiogalàxies i dels quàsars a l'espai intergalàctic, i d'aquesta manera alimenten les regions extenses de radioemissió que envolten aquestes fonts (els radiòdòbuls). Mitjançant observacions en ràdio basades en tècniques interferomètriques d'alta resolució s'ha comprovat que aquests dolls estan perfectament col·limats a distàncies molt pròximes al centre de la galàxia progenitora (un any-llum o menys) i que mantenen la col·limació fins a distàncies d'uns quants centenars de milers d'anys-llum.

A més dels dolls extragalàctics, a hores d'ara es coneixen dolls col·limats en diversos sistemes binaris en la nostra galàxia, com ara SS433. El doll estel·lar procedent d'aquesta font, descobert a finals dels setanta, es propaga a una velocitat igual a una quarta

part de la velocitat de la llum. Velocitats encara majors s'han inferit en dues fonts galàctiques de raigs X (GRS 1915+105, GRO J1655-40) consistents en binàries en què un dels membres és molt probablement un forat negre. El moviment transversal de les radiocomponents mesurat en aquests dos objectes supera la velocitat de la llum. Aquest fenomen, conegut usualment com moviment superlumínic, s'observa també en més d'una vintena de dolls extragalàctics. El moviment superlumínic és un moviment aparent, explicable mitjançant les lleis de la cinemàtica relativista, resultat de l'existència de material que es va propagant a velocitats altament relativistes i en direccions molt pròximes a la línia de visió. D'acord amb

aquesta interpretació, el fluid arribaria a velocitats de fins el 99,9% de la velocitat de la llum en les proximitats del centre de la galàxia progenitora (els primers centenars d'anys-llum) i es deceleraria fins a velocitats del 95% a grans distàncies (centenars de milers d'anys-llum).

L'aspecte dels dolls respon a la seua interacció amb el medi pel qual es propaguen. Els dolls són compostos per un gas totalment ionitzat en condicions de molt alta temperatura i extremadament baixa densitat (menys d'una partícula per centímetre cúbic). La presència d'un camp magnètic turbulent cohesiona el plasma rarificat que el constitueix i fa que es comporte com un fluid. Les simulacions efectuades per ordinador d'aquests dolls com a fluxos supersònics col·limats obrint-se pas per un medi ambient més

**«ELS DOLLS SÓN ELS CANALS
PELS QUALS INGENTS QUANTITATS
D'ENERGIA I MATÈRIA SÓN
TRANSPORTADES DES DELS NUCLIS
DE LES RADIOGALÀXIES I DELS
QUÀSARS A L'ESPAI INTERGALÀCTIC»**

dens, iniciades a començament dels vuitanta, han resultat ser molt útils en la interpretació de la morfologia i la dinàmica d'aquests objectes. A començament dels noranta, i en col·laboració amb investigadors de l'Institut Max Planck d'Astrofísica de Garching (Alemanya), començarem a realitzar simulacions relativistes de dolls extragalàctics. Es tractava de les primeres simulacions d'aquestes característiques i solament van ser possibles després d'haver desenvolupat les tècniques numèriques i els codis capaços de resoldre les equacions de la dinàmica de fluids en règim relativista.

Els nostres primers estudis van revelar que els dolls relativistes presenten unes característiques similars a les dels no relativistes. El doll s'alimenta a través d'un feix supersònic compost d'una sèrie d'ones de xoc oblíquies que ajuden a col·limar-lo i que s'observen com a radiocomponents estacionaris en alguns casos. El doll acaba en una ona de xoc situada en l'extrem del feix, pròxima al lloc d'impacte amb el medi ambient. Després del xoc, l'energia cinètica del gas es transforma en energia interna, el que genera una taca calenta que s'observa, en els dolls més potents, a freqüències de ràdio. El gas que ha travessat l'ona de xoc s'expandeix lateralment i flueix cap arrere, al llarg del feix, i crea un embolcall turbulent (origen dels radiolòbuls) que interacciona amb el mateix feix i amb el medi ambient circumdant, i que converteix el procés d'avanç del doll en

un procés complex des del punt de vista dinàmic.

Les propietats dinàmiques dels dolls no relativistes com també algunes de les seues propietats morfològiques, en particular l'extensió de l'embolcall, depenen del nombre de Mach del feix (la velocitat del fluid en el feix dividida per la velocitat local del so) i la relació de densitats entre el feix i el medi ambient. En el cas relativista cal considerar la velocitat del fluid en el feix com un nou paràmetre, a causa de l'existència d'una velocitat límit (la velocitat de la llum). En les nostres primeres simulacions considerarem els efectes d'aquests paràmetres, i classificarem els models

**«LES NOSTRES SIMULACIONS
MOSTREN QUE ELS DOLLS RELATIVISTES
ES PROPAGUEN EFICIENTMENT
AL LLARG DE GRANS DISTÀNCIES SENSE
DESESTABILITZAR-SE NI DECOL·LIMAR-SE.»**

en dues grans famílies d'acord amb la importància relativa de l'embolcall, la riquesa de l'estructura interna del feix i l'eficiència de la propagació del doll a través del medi ambient. L'estructura dels models d'una de les famílies recorda la morfologia dels anomenats dolls nus observats en alguns quàsars (3C273, per exemple).

En general, les nostres simulacions mostren que els dolls relativistes es propaguen eficientment al llarg de grans distàncies sense desestabilitzar-se ni decol·limar-se. L'estabilitat és un requeriment que ha de verificar qualsevol model que vulga explicar les observacions, car els dolls extragalàctics es propaguen sense perdre la col·limació al llarg de distàncies equivalents a un milió de vegades les dimensions del seu radi prop de la font, durant un temps característic entre 10 i 100 milions

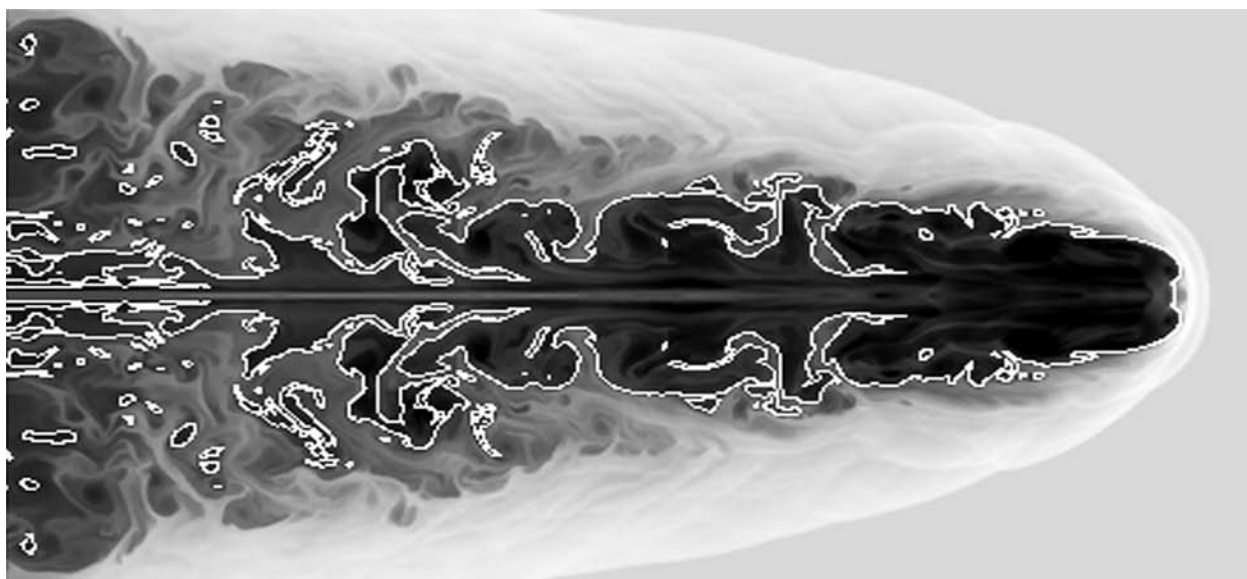


Figura 1: Simulació numèrica d'un doll extragalàctic. La línia blanca separa el material del doll del medi ambient.

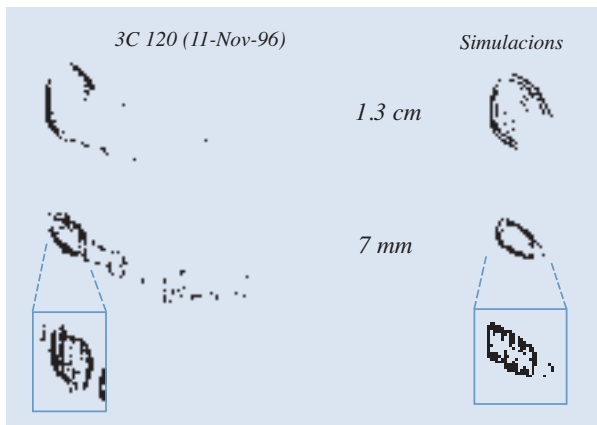


Figura 2: A l'esquerra, observacions de la zona interna del doll de la galàxia 3C 120 a dues longituds d'ona diferents. A la dreta, una simulació numèrica com a doll relativista.

d'anys. Les simulacions (un exemple apareix en la Fig. 1) han permès de concloure que l'evolució dels dolls a llarg termini està dominada per una fase de deceleració en què la seua velocitat de propagació disminueix fins assolir els valors estimats en les taques calentes dels dolls extragalàctics (al voltant d'un 5% de la velocitat de la llum). Així mateix hem estudiat el procés de formació dels radiolòbuls, estadi posterior d'evolució dels embolcalls, que aporta informació sobre les propietats del material circumdant a la radiofont. Finalment, a fi d'analitzar les propietats morfodinàmiques dels dolls extragalàctics en situacions més realistes (en particular l'estabilitat

enfront de pertorbacions generals), hem desenvolupat un codi numèric que permet la simulació de dolls relativistes en tres dimensions espacials els primers resultats del qual han vist la llum en els darrers mesos.

A escales d'any-llum, les observacions en ràdio mostren els dolls extragalàctics ja col·limats amb una taca brillant (el nucli) en un extrem i una sèrie de components que se separen del nucli amb velocitats aparents que, en molts casos, superen la velocitat de la llum. Aquests components, normalment precedides d'un augment important de l'emissió en ràdio, s'interpreten com ones de xoc que es desplacen a velocitats relativistes al llarg del doll. Les ones de xoc, comunes a fluxos supersònics, augmenten la intensitat del camp magnètic i l'energia dels electrons i reforcen l'emissió sincrotó, el que les fa detectables. A causa de la

importància dels efectes relativistes en l'emissió d'aquestes fonts, els models han de combinar els càlculs dinàmics amb models per a l'emissió sincrotó per tal que puguen ser contrastats amb les observacions. Així, en col·laboració amb investigadors de l'Institut d'Astrofísica d'Andalusia i del Departament d'Astronomia de la Universitat de Boston, hem efectuat les primeres simulacions de fonts superlumíniques. L'interès de la nostra investigació està en el fet que les nostres simulacions permeten de descriure interaccions complexes entre els suposats components causants del moviment superlumínic i l'estructura del mateix doll que s'assemblen bastant a les observacions en diverses fonts reals, com ara 3C120 (Fig. 2).

Per bé que són molt importants els resultats obtinguts fins ara en l'estudi dels dolls extragalàctics, ens queda per abordar encara l'explicació del mecanisme de formació dels dolls. Com hem comentat al començament d'aquest article, els dolls supersònics apareixen en diversos escenaris astrofísics. Als ja comentats en els casos de galàxies actives i binàries compactes, caldria afegir-hi els dolls òptics observats en escenaris de formació estel·lar. Comuna a tots aquests escenaris és la presència de matèria que llisca en espiral cap a l'objecte central fins formar un disc d'acreció. Aquest fet

ha permès d'establir una connexió entre ambdós fenòmens (disc d'acreció, formació de dolls), en què el gas acretat per l'objecte central subministraria la primera matèria necessària per a la formació del doll. En els primers models, el disc d'acreció, eixamplat en la seua part més interna, forma una

**«L'ELABORACIÓ D'UN CODI
MAGNETOHIDRODINÀMIC RELATIVISTA
QUE ENS PERMETA ABORDAR
LA SIMULACIÓ DE LA FORMACIÓ DE DOLLS
EXTRAGALÀCTICS ÉS EL NOSTRE REPTE
PER ALS ANYS VINENTS»**

mena de ximeneia per la qual el gas proper a l'objecte central, accelerat per l'alta pressió existent en aquesta regió, és expulsat en direccions perpendiculars al disc. Tanmateix, la pressió (i la temperatura) necessària per accelerar el gas fins velocitats relativistes convertiria la regió central en un emissor molt potent de raigs X, un fet que no s'observa. Els models més recents apunten a mecanismes magnetohidrodinàmics en què les línies de camp magnètic ancorades al disc d'acreció representarien el doble paper de col·limar i accelerar el plasma. L'elaboració d'un codi magnetohidrodinàmic relativista que ens permeta abordar la simulació de la formació de dolls extragalàctics és el nostre repte per als anys vinents.



*Departament d'Astronomia i Astrofísica. Universitat de València