L'observació de l'Univers amb raigs X

Xavier Barcons*

Observar l'Univers és recollir, processar i entendre la informació continguda en tots els tipus de partícules i radiacions que ens arriben dels astres. Malgrat que ens arriben raigs còsmics, neutrinos, ones gravitatòries i altres materials, la llum (o radiació) és el canal més corrent que tenim per observar l'Univers i és de la llum d'on sabem extreure més informació sobre l'Univers.

Naturalment, cal entendre la llum o radiació en un sentit ampli, que inclou les ones de ràdio, la radiació infraroja (llunyana, mitjana i propera), la llum òptica (on l'ull humà i els telescopis convencionals són sensibles), la llum ultraviolada, la radiació X i finalment la radiació gamma (γ). Els astres poden emetre radiacions de totes aquestes longituds d'ona, i la història de l'astronomia (particularment en el segle XX) ha demostrat que la informació continguda a les diferents bandes espectrals no és en absolut redundant, sinó complementària. Hem vist com l'observació astronòmica restringida a determinades bandes de l'espectre de la radiació (per exemple la radiació òptica o les ones de ràdio) només ens dóna una visió parcial dels processos físics que tenen lloc als astres. Quan aquests objectes astronòmics s'han pogut observar, per exemple, a la banda de raigs X, sovint s'ha detectat la presència de fenòmens insospitats, com ara la presència de forats negres que xuclen grans quantitats de matèria del voltant o la presència de matèria tan calenta que només emet raigs X.

Amb tot això queda clar que el concepte d'observació astronòmica només és complet si podem tenir accés a totes les zones de l'espectre, des de les ones de ràdio fins als raigs γ. Però l'atmosfera que envolta la Terra només és transparent a determinades longituds d'ona de la radiació. De fet, només la llum òptica (des de 0,3 fins a 1 μm aproximadament) i les ones de ràdio (des d'1 m fins a 1 mm) poden arribar-nos des dels astres fins a la superfície de la Terra. Les ones de ràdio de longitud d'ona més llarga reboten a la ionosfera, mentre que tota la radiació infraroja és absorbida per les molècules de l'atmosfera. Només a observatoris particularment alts i secs es pot observar a l'infraroig proper (1-5 μm) i mitjà (5-20 μm). Les radiacions ultraviolades també són eliminades, mitjançant l'absorció fotoelèctrica (sobretot per l'oxigen i l'ozó) i un procés similar elimina tots els raigs X còsmics (longitud d'ona de 100 a 0,1 Å) que vénen de l'exterior. De fet, s'ha de pujar a una altura d'uns 80 km per poder veure l'Univers en raigs X. Els raigs γ poden penetrar una mica més en funció de la seva energia i, de fet, els més energètics es poden detectar indirectament des de terra, observant, per exemple, la radiació Čerenkov que emeten en propagar-se a velocitat superior a la de la llum en el medi atmosfèric.

No és estrany, doncs, que fins que la humanitat no va començar a accedir a l'espai no va ser possible observar a totes les longituds d'ona. A principi del segle XX es va desenvolupar, amb els primers coneixements de física atòmica i les aplicacions corresponents a l'electrònica, la radioastronomia. Juntament amb l'astronomia òptica, tan vella com la humanitat, fou l'eina per estudiar l'Univers fins als anys 1960. L'any 1962 un equip liderat per Riccardo Giacconi, Premi Nobel de Física 2002 (vegeu l'article de J. M. Paredes i P. Pascual), aconseguí enviar un coet equipat amb detectors de raigs X més amunt de 80 km durant gairebé 6 min. Aquest fet obrí un nou escenari per a l'astronomia, ja que els descobriments d'aquest vol pioner mostraven dos fets molt importants. El primer és que és possible detectar raigs X de l'espai exterior més enllà del Sistema Solar i el segon, que hi ha astres, com ara Sco X-1, descobert en aquell vol pioner, en què la quantitat de raigs X en relació amb la llum òptica que emeten és molt i molt superior que al nostre Sol. Aquests fets demostraren que l'astronomia de raigs X era possible i que prometia ser de tot menys avorrida.

Les eines d'observació

Els coets exploratoris, com ara el pioner de Giacconi i col·laboradors, foren substituïts a la dècada dels setanta per observatoris en òrbita al voltant de la Terra, que podien operar durant anys en lloc de minuts. L'Uhuru, posat en òrbita el 12 de desembre de 1970 des de la base italiana de San Marco a Kenya (d'aquí en prové el nom, que significa «llibertat» en swahili, per la coincidència amb el dia de la independència d'aquell país), va observar tot el cel en raigs X. Amb l'Uhuru es va disposar del primer catàleg d'un centenar llarg de fonts còsmiques emissores de raigs X, on apareixien principalment estrelles binàries i restes de supernoves al pla de la Galàxia, d'una banda, i galàxies actives i cúmuls de galàxies fora de la Galàxia de l'altra. Aquesta visió del cel en raigs X

***Xavier Barcons** (l'Hospitalet de Llobregat, 1959) és llicenciat en Ciències Físiques per la Universitat de Barcelona (1981) i doctor en Ciències per la Universidad de Cantabria (1985). Actualment és professor d'investigació del CSIC a l'Instituto de Física de Cantabria (CSIC-UC).

tan diferent de la visió proporcionada per l'astronomia òptica (on un catàleg del centenar d'astres més brillants donaria simplement una llista d'estrelles pròximes al sistema solar) confirmava la sospita inicial que l'impacte científic d'aquesta nova branca de l'astronomia seria important.

De tota manera, l'instrumental que utilitzava l'Uhuru era molt rudimentari i amb possibilitats molt limitades. Els raigs X no eren pròpiament focalitzats, sinó que, simplement, el camp de visió dels detectors (comptadors proporcionals de gas) es limitava amb unes parets metàl·liques que impedien que raigs X provinents de direccions molt allunyades de la direcció d'apuntament arribessin al detector. Amb aquest mecanisme (anomenat *col·limador*) la resolució angular no es podia fer més bona que uns quants graus. Aquesta limitació en resolució angular genera el problema de la «confusió» (presència de més d'una font de raigs X dins el mateix element de resolució) que, al cap i a la fi, és la que dicta la sensibilitat de l'aparell, és a dir, les fonts més febles que es poden detectar individualment.

Fou ja al final de la dècada dels setanta quan la NASA va posar en òrbita el primer *telescopi* —pròpiament parlant— de raigs X a l'anomenat observatori *Einstein*. La tècnica que s'ha utilitzat des d'aleshores per focalitzar raigs X consisteix fer-los incidir de manera pràcticament rasant (és a dir, amb un angle d'incidència molt petit) en miralls metàl·lics. Un raig X que es faci incidir perpendicularment en un mirall, s'absorbirà o simplement travessarà el mirall, però mai es reflectirà. És per això que s'ha d'anar a buscar un angle d'incidència petit (i molt més petit com més gran sigui l'energia del raig X) a fi i efecte d'aconseguir una reflexió total. A la pràctica, cal fer dues reflexions sobre dos miralls per tal d'aconseguir una imatge òptica acceptable. També es fa evident que l'àrea efectiva que aquests miralls (posats pràcticament paral·lels a la direcció d'observació) ofereixen per recollir fotons és molt petita. Per tant, el que es fa és posar dos conjunts de miralls en lloc de dos miralls simples (encaixant-els uns dins dels altres) de manera que al final l'àrea efectiva per a la recollida de fotons de raigs X sigui acceptable. Val a dir que el telescopi de l'observatori *Einstein* tenia una àrea efectiva de només uns 100 cm^2, similar a la que té un petit telescopi d'ús no professional.

Tot i les seves limitacions, l'observatori *Einstein* va produir una quantitat grandíssima de resultats científics a tots els àmbits de l'astronomia. Va permetre estudiar estrelles amb corones actives, restes de supernoves, binàries amb transferència de massa, el gas calent a galàxies normals, els cúmuls i grups de galàxies, les galàxies actives i el fons còsmic de raigs X. Malauradament, la distància focal (que separa els miralls del pla focal on es col·loquen els detectors) del telescopi *Einstein* era bastant curta i, per tant, només podia focalitzar raigs X relativament *tous* (de baixa energia). Això és degut al fet que l'angle d'incidència necessari per focalitzar fotons es fa més petit (i per tant la distància focal més llarga) quan l'energia dels raigs X esdevé més gran. La nova generació d'observatoris de raigs X constituïda pel *Chandra* (de la NASA, posat en òrbita el juliol de 1999) i l'*XMM-Newton* (de l'ESA, posat en òrbita el desembre de 1999) fa servir telescopis amb distància focal més llarga (fins a 7,5 m en el cas de l'*XMM-Newton*), cosa que permet obtenir imatges amb raigs X d'energia fins als 10 o 15 keV (una fracció d'àngstrom de longitud d'ona).

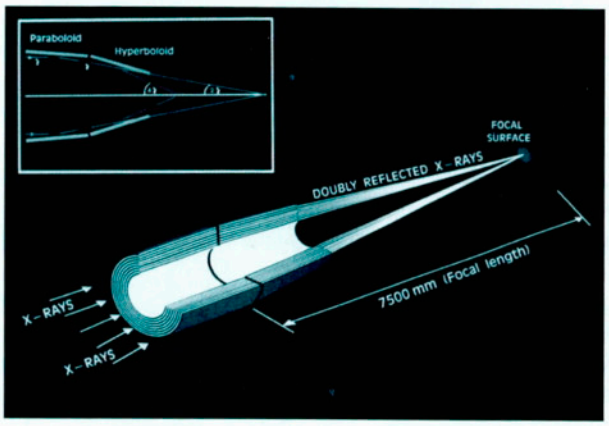

Figura 1: *Esquema del telescopi de raigs X a l'observatori XMM-Newton de l'Agència Europea de l'Espai (ESA). (Foto: ESA)*

No solament l'òptica de raigs X ha fet avançar notablement la capacitat d'observació durant aquests darrers quaranta anys, sinó que els progressos amb els detectors també han estat molt significatius. Els primers detectors (a l'*Uhuru* o fins i tot a l'*Einstein* o al *Roentgen Satellite X-ray Observatory* (ROSAT) eren comptadors proporcionals de gas, on l'arribada d'un raig X ionitzava un àtom del gas i acabava provocant una esllavissada de càrregues elèctriques gràcies a un sistema d'ànodes carregats elèctricament. L'energia de cada raig X individual es podia mesurar mirant quanta càrrega elèctrica s'acabava recollint en aquest procés, que és proporcional a l'energia dipositada pel raig X. La precisió amb què es pot fer aquesta mesura no supera el 20-30 % i aquesta és la limitació bàsica d'aquest tipus de detectors per fer espectroscòpia amb raigs X.

Avui dia els detectors més utilitzats són de tipus CCD (de l'anglès *charge-coupled device*), basats en semiconductors. Cada raig X que arriba al detector fa passar un nombre gran d'electrons del semiconductor a la banda de conducció i aquesta càrrega es mesura simplement descarregant el dispositiu. La quantitat d'electrons que s'ha fet saltar és gran i proporcional a l'energia del raig X incident. Això permet mesurar l'energia dipositada individualment pel raig X amb una precisió del 2-5 %, molt superior a la dels comptadors proporcionals. Cal

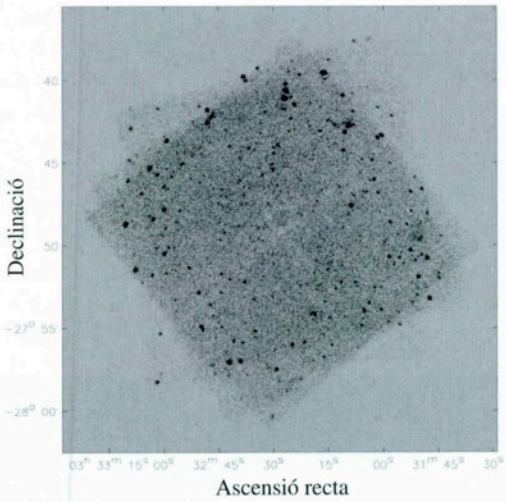

Figura 2: *Imatge del cúmul de galàxies A1795 obtinguda per la càmera EPIC MOS de l'observatori XMM-Newton, on es pot veure l'emissió difosa del gas ionitzat. (Foto: ESA)*

remarcar que en aquest tipus de detector per cada raig X es mesura la seva posició al pla focal (i per tant la direcció de què venia, cosa que permet fer imatges) i també l'energia individual. Estem, per tant, fent imatge i espectroscòpia a la vegada. Això sí, l'espectroscòpia és de resolució molt baixa (2-5 %) comparada amb els espectrògrafs que es poden trobar a la banda òptica i que tenen una resolució espectral de fins al 0,001 %.

Tant el *Chandra* com l'*XMM-Newton* tenen espectrògrafs de dispersió, és a dir, dispositius que fan sortir els raigs X focalitzats en direccions diferents segons l'energia (o la longitud d'ona). Aquests espectrògrafs poden arribar a una resolució espectral del 0,2-0,5 %, però malauradament són molt poc eficients i només són útils per observar astres molt brillants a la banda de raigs X. Tot i això, aquests nous instruments estan obrint una nova etapa a l'astronomia amb raigs X, on la quantitat de línies d'emissió i d'absorció atòmiques que es poden detectar dóna una informació tan gran i tan complexa que sovint cal completar o fins i tot revisar els mateixos paràmetres de la física atòmica.

Algunes fites importants de l'astronomia X

Si prenem com a referència les tres principals revistes d'astrofísica (*Astrophysical Journal*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* i *Astronomy & Astrophysics*), durant l'any 2002 publicaren 5.364 articles, dels quals 1.163 (un 20 %) esmenten al resum la paraula clau *raigs X* —dades obtingudes a partir de l'Astrophysics Data Server de la NASA (ADS). Això ja dóna una idea de l'impacte real d'aquesta eina astronòmica per aprofundir en el nostre coneixement de l'Univers. Naturalment, fins i tot és impossible donar una llista dels temes en què l'astronomia X ha fet contribucions importants durant aquests quaranta anys. Tanmateix, pot ser il·lustratiu presentar i discutir uns quants camps on, al parer de l'autor, aquesta contribució ha estat especialment important.

Es poden veure els forats negres?

Avui dia sabem que la majoria dels astres que emeten raigs X fora de la Galàxia (i també alguns a dintre de la Galàxia) estan relacionats amb objectes molt compactes, en alguns casos forats negres.

Un forat negre (en la versió més simple) no és sinó una massa prou gran perquè la velocitat d'escapament a la seva superfície sigui la velocitat de la llum. En termes de la mecànica newtoniana, suficients per a la majoria d'aplicacions astronòmiques, això defineix el radi del forat negre, o radi de Schwarzschild $R_S = 2GM/c^2$, on M és la massa de l'objecte i G i c són la constant de la gravitació universal i la velocitat de la llum respectivament. Així, si el Sol es contragués fins a un radi de 3 km, tindríem un forat negre. Naturalment, a la distància on vivim nosaltres, no trobaríem cap diferència en el camp gravitatori solar respecte a la situació actual. Tanmateix, la matèria que s'acostés a distàncies pròximes a aquesta «superfície» (anomenada tècnicament *horitzó*), notaria un camp gravitatori monstruós.

Aquesta versió simplificada del forat negre no és, però, suficient per a la capacitat que tenim avui dia d'obtenir informació dels voltants dels objectes compactes. De fet, sabem que tot el que hi ha a l'Univers gira (la Terra, el Sol, la Galàxia, etc.) i, per tant, és d'esperar que els forats negres també girin. La descripció de la física d'un forat negre en rotació s'ha de fer en el marc de la relativitat general i utilitzant l'anomenada *mètrica de Kerr*. La rotació del forat negre dóna lloc a una sèrie de fenòmens físics, alguns dels quals potser ja s'han pogut observar i d'altres seran potencialment observables en el futur. Un d'aquests fenòmens és la rotació dels sistemes inercials, és a dir, tota la matèria que cau cap a un forat negre, tendeix a girar-hi al voltant i en el mateix sentit quan és prou a prop d'ell. Un altre efecte important és que l'òrbita més propera a què la matèria es pot acostar de manera estable al forat negre es va fent més petita a mesura que el forat negre gira més de pressa. Per a un forat negre sense rotació, la darrera òrbita estable al seu voltant té un radi de $3R_S$, mentre que per a un forat negre en rotació màxima (on el moment angular per unitat de massa és $R_S/2$), aquesta òrbita es pot acostar fins a $R_S/2$ del forat negre. Dit d'una altra manera, a base de girar solidàriament amb el forat negre, la matèria s'hi pot mantenir molt a prop sense caure-hi.

El veritable motiu pel qual els forats negres es poden «veure» és que la matèria que hi cau emet una gran quantitat de radiació quan hi és a la vora. Aquest fenomen s'anomena *acreixement* i els seus fonaments són extremament senzills. Si pensem en una partícula de

massa m que cau des de l'infinit radialment cap a una massa esfèrica M i de radi R, quan hi xoca a la superfície allibera l'energia $E = GMm/R$ que portava i que es pot transformar en radiació. Si pensem aquest procés com la conversió de matèria m en energia $E = \xi mc^2$, l'eficiència per convertir matèria en energia és, en aquest cas, $\xi = 1/2(R/R_S)$. Per a una estrella com el Sol aquest procés de conversió de matèria en energia és extremament ineficaç ($\xi \sim 2\,10^{-6}$), però per a un objecte compacte (com ara una estrella de neutrons) pot arribar al 10 % i per a un forat negre en rotació màxima, fins al 40 %.

Aquesta matèria, provinent d'una estrella pròxima o del material interestel·lar que l'envolta, perd molt ràpidament el moment angular per col·lisions, excepte en la direcció del moment angular de l'objecte compacte central (ja sigui un forat negre, una nana blanca o una estrella de neutrons, per exemple). Això fa que el material que cau cap al forat negre no ho faci d'una manera immediata, sinó que s'hi diposita al voltant i forma una estructura plana (igual que la Terra o el Sol s'aplanen per la pròpia rotació) que gira i que s'anomena *disc d'acreixement*.

La viscositat que s'estableix al disc d'acreixement per les col·lisions entre partícules que es mouen a diferents velocitats té, al menys, dos efectes molt importants. El primer és transportar el moment angular de les parts més interiors del disc cap a les exteriors, cosa que fa que la matèria que hi ha a dins del tot pugui acabar caient cap a l'objecte compacte (sense transferir el moment angular seguiria girant inexorablement). El segon efecte és el d'escalfar el disc mateix.

En un esquema molt simplificat, la temperatura màxima a què s'escalfaria el disc, suposant que la part interior fos a l'òrbita més pròxima al forat negre, seria aproximadament $T \sim 2\ 10^7 (M/M_{\rm Sol})^{-1/4}$. Per a un disc d'acreixement al voltant d'una estrella que té una massa de l'ordre de la del Sol, això dóna una temperatura de 20 milions de graus i la radiació tèrmica que emetrà serà màxima als raigs X. Avui dia sabem que als nuclis de moltes galàxies hi ha forats negres de milions i fins i tot de milers de milions de masses solars, i els discos d'acreixement que s'hi formen s'escalfarien fins a uns centenars de milers de graus, que donarien una emissivitat màxima a la zona ultraviolada. Malgrat això, la part central d'aquests discos monstruosos està envoltada d'una atmosfera d'electrons relativistes que interactua amb la llum ultraviolada, cedint-li una part de la seva energia i promocionant aquests fotons a la zona de raigs X. Així doncs, tenim una gran emissió de raigs X al voltant de forats negres de totes les mides i, per tant, podem acabar observant-los indirectament.

Forats negres a la Galàxia

Un dels primers descobriments de l'astronomia X fou que algunes estrelles a la Galàxia han de ser en sistemes binaris amb tranferència de massa d'una a l'altra. En alguns casos, s'ha demostrat que la massa de l'objecte no visible (al rang òptic) en aquests sistemes dobles és massa gran per poder ser una estrella estable i que, per tant, ha de ser un forat negre.

Aquest és el cas d'algunes estrelles binàries de la Galàxia, com ara les de gran massa. També hi ha alguns casos de les noves de raigs X (que no s'han de confondre amb les noves clàssiques). Per a estrelles binàries on hi ha un objecte compacte, hi ha una quantitat que es pot mesurar a partir de dades observacionals i que s'anomena *funció de massa* i que es defineix com

$$F_x(M_x, M_c, i) = \frac{M_x^3 \sin^3 i}{(M_x + M_c)^2} = \frac{P v_c^3}{2\pi G} < M_x,$$

on M_x i M_c són les masses de l'objecte compacte i del company, respectivament (i és l'angle d'inclinació de l'òrbita). La funció de massa es relaciona amb la combinació del període de la binària P, que es pot mesurar observant les variacions fotomètriques en raigs X, i la velocitat radial relativa v_c, que es pot mesurar mitjançant espectroscòpia Doppler òptica. Com que la funció de massa és un límit inferior estricte a la massa de l'objecte compacte, s'utilitzen les observacions per donar límits inferiors a la massa d'aquests objectes compactes.

La importància d'aquests estudis rau en el fet que, en el marc de la relativitat general i suposant simetria esfèrica, no hi ha configuracions d'equilibri estable d'estrelles arbitràriament massives. Quan l'estructura estel·lar està suportada per la pressió de degeneració dels electrons (una nana blanca), la massa màxima correspon al *límit de Chandrasekhar* (1,4 $M_{\rm Sol}$). En el cas de les estrelles de neutrons també hi ha una massa límit al voltant de $\sim 2M_{\rm Sol}$, encara que en aquest cas el límit és més imprecís a causa del desconeixement de l'equació d'estat per a la matèria en aquestes circumstàncies. Sigui com sigui, això condueix a un límit superior per a la massa que pot tenir una estrella en equilibri estable i aquest límit és d'algunes masses solars.

Hi ha estrelles binàries de raigs X on la funció de massa supera, de molt, aquests límits. El cas més clar i més estudiat potser és el de Cyg X-1, a la constel·lació del Cigne, on la funció de massa està entre 10 i 15 masses solars. Es tracta d'un dels casos més clars on és molt difícil concebre un objecte compacte amb aquestes característiques i que no sigui un forat negre.

Els cúmuls de galàxies tenen gas ionitzat! I molta matèria fosca!

Els cúmuls de galàxies són agrupacions de centenars o milers de galàxies en un volum d'uns quants Mpc[1] cúbics. Són les estructures gravitatòriament lligades més grans que hi ha a l'Univers. El principal interès que

[1] 1 Mpc és un milió de parsecs (pc); 1 pc és aproximadament 3,026 anys-llum o $3\,10^{18}$ cm.

tenen per a la cosmologia rau en el fet que la física de la seva formació i evolució és relativament simple i està relacionada molt directament amb els paràmetres principals de la cosmologia.

Les galàxies que formen part dels cúmuls tenen velocitats relatives entre elles des d'uns centenars fins a un parell de milers de km/s, cosa que dóna una mesura de la capacitat del pou de potencial gravitatori dels cúmuls per retenir les galàxies. Les galàxies estan més concentrades cap al centre, on sovint trobem una o dues galàxies gegants el·líptiques. A la part central del cúmul hi ha evidència que la distribució de galàxies està més o menys relaxada a causa de les interaccions que han tingut entre elles. La parametrització de la densitat de galàxies en termes d'un perfil de l'estil $\rho_{\rm gal}(r) = \rho_0(1 + (r/r_{core})^2)^{-3/2}$ dóna valors per a $r_{\rm nucli}$ des de 100 fins a 500 kpc.

Un dels primers descobriments de l'astronomia de raigs X sobre cúmuls fou que són uns grans emissors de raigs X. L'espectre mostra, sobretot, radiació de frenada (*bremsstrahlung*) a temperatures que van des dels milions fins als centenars de milions de graus. Aquesta radiació s'interpreta com a provinent d'un plasma ionitzat a aquestes temperatures i que també està atrapat al pou de potencial gravitatori del cúmul. La confirmació d'aquesta hipòtesi vingué amb les primeres missions espectroscòpiques de raigs X, on es veié que els cúmuls també tenen una línia d'emissió a 6,7 keV, interpretada com a recombinació K_α ($n = 2 \rightarrow n = 1$) del Fe ionitzat 24 o 25 vegades (és a dir, amb 1 o 2 electrons). Aquest estat d'ionització és consistent amb un plasma coronal (és a dir ionitzat per col·lisions) amb la temperatura esmentada. Amb els observatoris moderns s'han vist moltes més línies d'emissió (Mg, Si, Fe L, etc.) que confirmen plenament l'existència d'una acumulació de gas enriquit químicament i atrapat als cúmuls de galàxies. Les abundàncies dels diferents elements químics, particularment del Fe que és de l'ordre d'1/3 de l'abundància solar, indiquen que l'origen d'aquest gas intracumular s'ha de buscar en la mateixa evolució de les poblacions d'estrelles a les galàxies, que han expulsat gas calent mitjançant supernoves i vents.

L'emissió en raigs X pel gas intracumular té una forma *semblant* a la de la distribució de galàxies, de manera que se n'infereix una densitat de gas de l'estil $\rho_{\rm gas}(r) = \rho_{\rm gas0}(1+(r/r_{\rm nucli})^2)^{-3\beta/2}$, on $\beta \sim 0{,}6$–1. Amb els instruments moderns que permeten obtenir imatges espectroscòpiques dels cúmuls de galàxies, és possible mesurar a cada punt (dins la resolució del telescopi de raigs X) la temperatura del gas (a partir de la forma de l'espectre) i la densitat (a partir de la intensitat rebuda). Això dóna una gran varietat de perfils tèrmics per als cúmuls, des d'aquells en què la temperatura es manté aparentment constant a qualsevol distància del centre del cúmul, fins a aquells en què la temperatura cau significativament cap al centre (els anomenats *cooling flows*, on es creu que el gas cau subsònicament cap al centre del cúmul on, com que la densitat —i per tant l'emissivitat— és més gran, es refreda).

El fet que es puguin determinar densitat i temperatura a cada punt del cúmul possibilita que es pugui fer un mapa de la massa total del cúmul en funció del radi. La hipòtesi necessària per a aquesta determinació és la suposició d'equilibri hidrostàtic del gas, és a dir, que l'atracció gravitatòria creada per la massa del cúmul s'equilibra al gas intracumular pel seu gradient de pressió:

$$\frac{dP_{\rm gas}(r)}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2}\rho_{\rm gas}(r),$$

on $P_{\rm gas} \propto \rho_{\rm gas}T_{\rm gas}$ (el gas intracumular és un bon gas ideal) i $M(r)$ és la massa total continguda en una esfera de radi r.

El resultat de mesurar el perfil de massa $M(r)$ és delicat i està subjecte a efectes sistemàtics possiblement importants. No obstant això, tots els estudis que s'han portat a terme coincideixen en una sèrie de fets importants:

- Les galàxies no constitueixen sinó el 10 % de la massa total del cúmul.
- El gas intracumular pot arribar a contenir al voltant d'un 25 % de la massa total estimada del cúmul.
- La contribució relativa del gas intracumular és més gran com més gran és el radi.
- La resta, i per tant la major part (de l'ordre d'un 60–70 %) de la massa del cúmul és matèria fosca que no es veu ni en forma de galàxies ni en forma d'emissió intracumular.

Amb el desenvolupament de nous telescopis òptics de gran obertura, i també, en gran part, gràcies al telescopi espacial *Hubble*, s'ha pogut mesurar el perfil de massa dels cúmuls per un mètode totalment independent: l'efecte lent gravitatòria. En aquest cas, el que es mesura és l'amplificació (en forma d'arcs) de fonts situades darrere del cúmul, gràcies al camp gravitatori. Aquest mètode, que mesura directament l'efecte gravitatori sobre la llum, dóna estimacions de la massa dels cúmuls molt semblants i en tot cas consistents amb les esmentades abans i obtingudes mitjançant tècniques d'astronomia X. Les discrepàncies que hi ha, a voltes, molt a prop del centre dels cúmuls són atribuïbles al fet que l'equilibri hidrostàtic no es manté en aquestes regions tan denses.

En qualsevol cas, la contribució significativa del gas intracumular a la massa dels cúmuls i també el fet que la major part de la massa sigui d'origen desconegut i fosca han quedat establerts i constitueixen una de les

evidències més fortes de l'existència de matèria fosca a l'Univers.

Provant el camp gravitatori fort

Un dels laboratoris de gravetat forta més interessants al món astrofísic és l'entorn dels forats negres, que són els responsables últims de l'emissió de les galàxies actives i dels quàsars. Ha estat precisament l'astronomia X la que ha convençut, fins i tot els opositors més aferrissats, que el fenomen de les galàxies actives només es pot explicar amb la presència d'un forat negre. Hi ha un munt d'evidències que indiquen aquest fet (la gran lluminositat en raigs X de les galàxies actives, almenys cent vegades superior a la de la nostra Galàxia, la variabilitat en escales de temps molt curtes i d'una amplitud molt gran, etc.); però, sens dubte, la més contundent ha estat la derivada de la línia d'emissió del Fe.

Les primeres evidències de la presència d'una línia d'emissió a 6,4 keV (i, per tant, de Fe poc ionitzat, a diferència de la línia present als cúmuls) es van obtenir al principi dels noranta, juntament amb indicis de que una part important de la radiació X rebuda havia estat reflectida per material relativament fred (a temperatura de menys de cent mil graus). El model que es proposà, i que es manté actualment amb petits retocs, és que la radiació X primària a les galàxies actives s'origina al voltant del disc d'acreixement (tal com ja s'ha explicat) i que aleshores una part es dirigeix novament cap al disc i la resta s'emet sense cap més reprocessament.

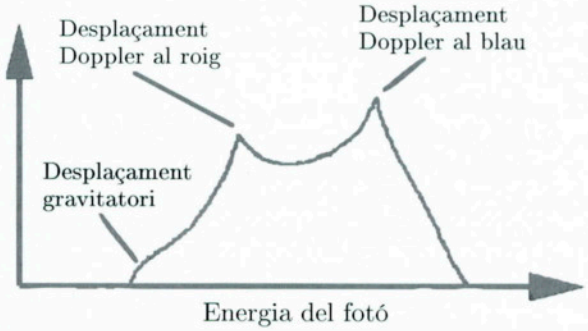

Figura 3: *Esquema del perfil de la línia d'emissió fluorescent K_α del Fe a 6,4 keV, amb els diferents components*

La part que incideix al disc és reflectida, però no de manera acromàtica com en un mirall convencional, sinó obeint uns processos físics que fan que els raigs X que en surten tinguin un espectre diferent dels que hi incideixen. Entre aquests processos hi ha la *fluorescència*, principalment sobre àtoms (o ions) de Fe. Aquest fenomen, ben familiar a la vida quotidiana, comença quan un raig X és absorbit per un àtom de Fe al qual arrenca un electró K (de la capa més interna $n = 1$). Naturalment, per això cal un fotó prou energètic i l'energia sobrant (si és que n'hi ha) se l'emporta l'electró arrencat. El pas següent depèn molt de la química atòmica de cada element, però en el cas del Fe el procés més favorable és que un electró de $n = 2$ passi a ocupar la vacant a $n = 1$ i, així successivament, la vacant es vagi propagant cap a fora (per altres elements és més favorable l'efecte Auger). El resultat net d'aquesta fluorescència és l'absorció de raigs X durs i l'emissió de línies corresponents a les diferents transicions, molt notablement la línia Kα ($n = 2 \rightarrow n = 1$), que per al Fe poc ionitzat és a 6,4 keV. La importància d'aquesta línia en particular és deguda al fet que el Fe és l'element per al producte de la seva abundància còsmica per la probabilitat que es produeixi fluorescència (contràriament a l'efecte Auger) és màxim. A més, la zona de 6–7 keV està pràcticament lliure de línies d'emissió d'elements còsmicament importants.

La línia de Fe detectada a moltes galàxies actives és molt ampla. Amb la resolució espectral que avui dia ens donen el *Chandra* i l'*XMM-Newton*, s'ha vist que és complexa i que varia molt entre diferents galàxies actives. En alguns casos es veuen clarament els efectes de la ionització al disc d'acreixement en desplaçar l'energia de la línia fins a 6,7 keV i en d'altres es veuen línies d'energies diferents, degudes probablement a la reflexió dels raigs X a diferents llocs.

Hi ha alguns casos, però, on és clar que la reflexió té lloc en un disc poc ionitzat i malgrat això la línia és extremament ampla (1/3 de la velocitat de la llum, si l'amplada s'interpreta en termes d'efecte Doppler). Aquesta estructura es va estudiar teòricament uns anys abans que es detectés i essencialment s'esperen dos pics deguts a l'efecte Doppler per la rotació del disc. Dit d'una altra manera, la línia de fluorescència emesa per la part del disc que s'acosta a nosaltres, la veurem desplaçada cap a energies més altes, mentre que els fotons emesos per la part del disc que s'allunya de nosaltres els veurem desplaçats a energies més baixes. Aquest efecte típic de la relativitat especial pot ser molt important si la reflexió es produeix a les parts més internes del disc d'acreixement, on la rotació és més ràpida. Un altre efecte de la relativitat especial que s'ha d'afegir aquí és el que fa que l'emissió que ve cap a nosaltres (i que es presenta a energies més altes) sigui més intensa que l'emissió dels àtoms que retrocedeixen.

Tanmateix hi ha un efecte addicional, aquest genuí de la relativitat general (en realitat és conseqüència directa del principi d'equivalència) i és que els fotons de la línia fluorescent del Fe que s'emeten a les proximitats del forat negre es reben amb energia més petita a causa del desplaçament cap al roig gravitatori. Dit d'una altra manera, els fotons que surten de prop del forat negre han de perdre una part de l'energia per escapar-se del pou de potencial gravitatori creat pel forat negre. Aquesta pèrdua es tradueix en una «cua» espectral del perfil de la línia d'emissió cap a energies baixes. La cua és molt més extensa com més a prop del forat negre s'emeti la línia de fluorescència.

Malgrat la complexitat de la línia del Fe en molts

casos, n'hi ha uns quants on és relativament «neta» i s'ha pogut estudiar amb detall. En el cas millor estudiat de la galàxia de tipus Seyfert 1 anomenada MCG-6-30-15, s'ha vist que la línia s'estén des d'energies de 6,4 keV per dalt fins a energies de 3–4 keV per baix. És remarcable que això implica un desplaçament cap al roig gravitatori $z = (E_{\rm em} - E_{\rm obs})/E_{\rm em} \sim 0{,}3$–$0{,}5$, ordres de magnitud més grans que els desplaçaments al roig detectats a les proves clàssiques de la relativitat general al sistema solar.

El perfil de la línia de fluorescència ens dóna en aquest cas informació directa sobre la situació del reflector (el disc d'acreixement). En el cas del material orbitant al voltant d'un forat negre que no giri, s'hi pot acostar com a molt a 3 radis de Schwarzschild i, per tant, el desplaçament cap al roig gravitatori màxim GM/Rc^2 seria de l'ordre de 0,16. La detecció de cues cap a energies molt més baixes a la línia de fluorescència del Fe és, per tant, indicativa de rotació al forat negre, ja que en aquest cas el material reflector pot orbitar molt més a prop del forat negre i, en conseqüència, emetre fotons molt més desplaçats cap al roig. En el cas de determinats estats de la galàxia activa MCG-6-30-15, s'ha suggerit que el perfil de la línia del Fe s'emet des de 0,6 radis de Schwarzschild i que, per tant, la rotació del forat negre ha de ser molt propera a la màxima.

Així doncs, les observacions amb raigs X de galàxies actives no solament permeten establir l'existència de desplaçaments cap al roig gravitatoris forts, sinó que també són eines úniques per estudiar l'entorn més proper als forats negres supermassius.

L'Univers obscur

Amb les observacions de raigs X (i també a la banda infraroja i submil·limètrica) més recents de l'Univers llunyà, s'està fent evident que molts astres emissors estan envoltats de material (gas atòmic, molècules, pols) que absorbeix la radiació a determinades longituds d'ona. Aquest material absorbent pot bloquejar totalment a determinades bandes de l'espectre electromagnètic la nostra visió de determinats processos físics que tenen lloc a l'interior dels astres. Pel mateix motiu que l'estudi dels ossos humans es fa mitjançant raigs X, la seva capacitat de penetració els fa idonis per estudiar la fenomenologia dels astres que queda tapada a altres longituds d'ona.

Els exemples més espectaculars d'aquesta mena s'han obtingut gràcies a les observacions de raigs X «durs» (d'energies superiors a 2–3 keV). Els àtoms, i particularment l'oxigen, són molt eficaços eliminant fotons de raigs X de baixa energia, mitjançant el procés d'absorció fotoelèctrica (és a dir, on els raigs X arrenquen un electró intern de l'àtom, que se n'emporta l'energia). Per a una columna d'uns $N_{\rm H} = 10^{21}$ àtoms d'hidrogen cm^{-2} (similar a la columna d'àtoms que ens trobaríem en travessar la Galàxia de dalt a baix), la majoria dels fotons d'energia inferior a 1 keV són eliminats fàcilment. Per

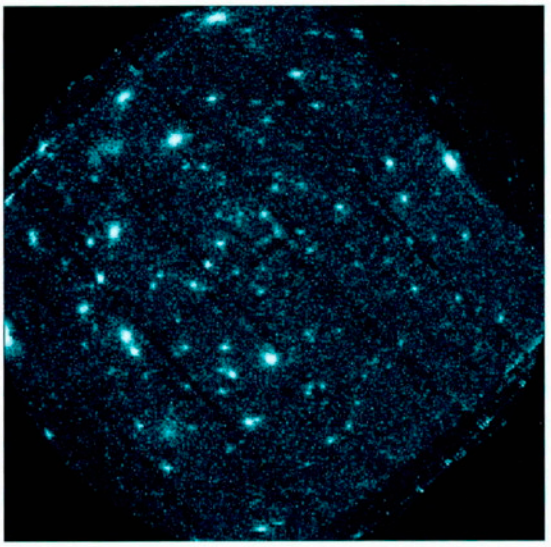

Figura 4: *Una imatge en raigs X de la zona del Lockman Hole obtinguda amb l'XMM-Newton (160 kl d'observació nets). Un 40 % de les més de 150 fonts que es poden veure tenen símptomes d'absorció fotoelèctrica a raigs X tous i, per tant, són part de l'Univers obscur*

eliminar eficaçment fotons d'energia més alta necessitem més columna, ja que la fracció de la intensitat que es transmet és l'exponencial d'un factor proporcional a $-E^3 N_{\rm H}$, on E és l'energia del fotó. Així, és clar que si tenim un telescopi que recull fotons de fins a 10 keV podrem veure regions inaccessibles per a un telescopi de raigs X d'1 keV.

El gas atòmic que provoca l'absorció fotoelèctrica als raigs X tous habitualment està barrejat amb molècules i pols (partícules formades per agregats de molècules i de mida de l'ordre d'unes micres). Aquestes partícules de pols són extremament eficients suprimint la llum òptica i la ultraviolada, i tornant-la a emetre a l'infraroig. Es dóna el cas, doncs, de fonts astronòmiques on ni les observacions òptiques, ni les ultraviolades ni les de raigs X tous ens permeten veure què hi passa.

Hi ha un munt d'exemples de galàxies, aparentment inofensives, en aquesta situació, on només l'arribada dels observatoris de raigs X «durs» ha permès detectar l'existència d'un forat negre supermassiu. Un exemple clàssic és el de la galàxia NGC 6240, prototip de galàxia molt brillant a l'infraroig on des de fa temps se sabia que s'hi estaven formant una gran quantitat d'estrelles. La gran abundància de pols (necessària per refrigerar el gas que col·lapsa formant estrelles) és totalment consistent amb aquesta descripció de la galàxia. Però no fou fins que es tingué la possibilitat d'observar-la amb raigs X durs que es descobrí que al nucli hi havia una emissió de raigs X fora de mida que reflectia la presència d'un forat negre supermassiu. De fet, avui dia sabem que NGC 6240 té dos forats negres supermassius molt pròxims i fortament

emissors de raigs X. Tanmateix, la galàxia no presenta cap símptoma de ser una galàxia activa quan la mirem amb un telescopi òptic o fins i tot amb raigs X tous.

S'ha pensat que aquesta situació ha de ser bastant genèrica a totes les galàxies. Els models que expliquen la radiació de fons còsmica de raigs X (també descoberta per Giacconi i col·laboradors en el seu treball pioner de 1962) a partir de la superposició de l'emissió de galàxies actives a diferents èpoques de la història de l'Univers, necessiten que molts dels raigs X tous que s'emeten siguin eliminats. Si es fan els càlculs, això representa que unes 3/4 parts de les galàxies actives han d'estar envoltades per gas que absorbeixi fotoelèctricament els raigs X tous. Naturalment aquest gas estarà barrejat amb pols que s'encarregarà que quan mirem aquestes galàxies amb un telescopi òptic no hi veiem cap signe que tenen un forat negre fortament emissor de raigs X al centre.

Es calcula que entre el 50 i el 85 % de l'energia que es genera per acreixement a l'Univers és absorbida i es produeix a galàxies que no mostren signes de tenir aquest forat negre supermassiu al centre. Aquestes galàxies mostraren un aspecte absolutament inofensiu a totes les longituds d'ona, excepte als raigs X durs i (més difícil de detectar) a l'infraroig llunyà.

També hi ha evidències de que algunes galàxies tenen forats negres al centre, però que estan inactius, és a dir, que no tenen matèria suficient al voltant per produir energia basada en acreixement. El centre de la nostra Galàxia segurament n'és un exemple, ja que sabem que conté un forat negre de milions de masses solars (mesurat pels ràpids moviments de les estrelles al seu voltant), però només emet raigs X esporàdicament. Aquests arguments han fet suggerir que entre unes coses i altres és més que probable que totes les galàxies continguin forats negres supermassius als centres, i que en algun moment de la seva vida el forat negre ha estat acreixent material i emetent grans quantitats de raigs X. Per a l'astronomia X, descobrir i estudiar aquestes fases actives dels forats negres centrals a les galàxies és una tasca de la més gran importància.

El futur

Malgrat tots els avenços que les observacions amb raigs X han aportat a l'astronomia (i a la ciència en general), durant aquests darrers quaranta anys, és clar que encara ens estem a les beceroles d'aquesta disciplina. Per fer-nos-en una idea, les imatges més profundes obtingudes amb el telescopi de raigs X *Chandra* de la NASA no arriben a detectar 10.000 fonts de raigs X per grau quadrat, una densitat que s'assoleix rutinàriament amb un telescopi òptic professional d'1–2 m de diàmetre (això sí, els astres vistos per l'un i l'altre són diferents). La resolució espectral màxima amb què el *Chandra* o l'*XMM-Newton* poden mesurar l'energia d'un fotó de raigs X és d'un 0,2-0,5 %, ben bé dos ordres de magnitud més grollera que la disponible als telescopis òptics.

Però més enllà d'aquestes comparacions, l'astronomia X té una sèrie de reptes científics importantíssims (molts d'ells oberts pels observatoris actuals) i que caldrà aclarir durant les properes dècades. Aquests reptes inclouen la detecció i l'estudi detallat dels primers forats negres supermassius que es formaren a l'Univers i relacionar-ne la història amb la de la formació de les mateixes galàxies (per exemple, si primer es forma la galàxia i finalment s'acaba condensant un forat negre al centre o al revés); també la detecció, l'estudi i l'evolució de les primeres grans estructures gravitatòriament lligades (els cúmuls de galàxies), ja que aquesta història còsmica està relacionada molt directament amb els paràmetres cosmològics de l'Univers; la detecció del gas que el procés de formació de galàxies i cúmuls ha deixat al medi intergalàctic, principalment en forma de gas tebi i calent (temperatura $\sim 10^5$–10^7 K); l'evolució de la química de l'Univers, quan i com es formaren els diferents elements químics no primordials; i finalment també volem seguir aprofundint en el coneixement físic de les fonts més properes a nosaltres, des de les estrelles binàries de raigs X, les restes de supernoves, o la física del voltant dels forats negres fins a les galàxies actives properes, però amb millor resolució espectral, necessària per aprofundir en el coneixement astrofísic.

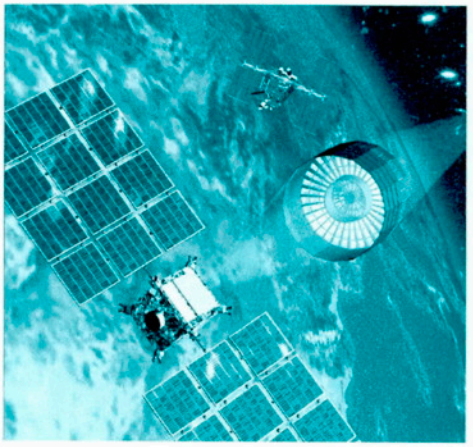

Figura 5: *Concepció artística del futur observatori XEUS, on es veuen els dos satèl·lits en operació i, al fons, l'estació espacial internacional, (Foto: ESA)*

Per assolir aquestes fites, les diferents agències espacials d'arreu del món estan estudiant diferents projectes de futur. Europa i el Japó s'han ajuntat per estudiar una missió anomenada *XEUS* (de l'anglès *X-ray Evolving Universe Spectroscopy*)[2] i que podria començar les seves operacions cap a la meitat de la propera dècada. En les seves especificacions, el *XEUS* acabaria tenint

[2] Vegeu http://astro.esa.int/XEUS.

una àrea efectiva de 30 m^2 a 1 keV (75 vegades més que l'*XMM-Newton*), una resolució angular entre 2 i 5 segons d'arc i uns instruments que, mantenint una eficiència propera al 100 %, permetrien obtenir una resolució espectral d'un 0,1 %.

En el seu disseny actual, el *XEUS* consistiria en dos satèl·lits separats 50 m entre ells (amb una precisió d'1 mm), un dels quals contindria els miralls reflectors de raigs X i l'altre els instruments de detecció i els sistemes d'alineament i apuntament. El diàmetre total del telescopi (10 m) fa difícil la posada en òrbita en un sol viatge, i s'està estudiant la possibilitat d'utilitzar l'estació espacial internacional com a «taller» per al muntatge del telescopi.

Sigui com sigui, és clar que avui dia l'astronomia és una ciència on la distinció entre el treball teòric i observacional té unes fronteres molt difoses i que per estudiar la física dels astres ens calen totes les eines al nostre abast. Els raigs X formen part d'aquestes eines i veurem com, cada vegada més, ens seran imprescindibles per conèixer millor els secrets de l'Univers.

Bibliografia

ARNAUD, M. et al., *The XEUS Science case*, ESA SP-1238 (2000).

BLEEKER, J. A. M. et al., *The XEUS Mission summary*, ESA SP-1242 (2000).

FABIAN, A. C. i BARCONS, X., The origin of the X-ray background, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, **30**, 429 (1992).

GIACCONI, R., GURSKY, H., PAOLINI, F. i ROSSI, B., Evidence for X Rays From Sources Outside the Solar System, *Physical Review Letters*, **9**, 439 (1962).

GIMENEZ, A. i CASTRO-TIRADO, A. J., *Astronomía X*, Equipo Sirius (1997).

JANSEN, F. A. et al., XMM-Newton observatory: spacecraft and operations, *Astronomy & Astrophysics*, **365**, L1 (2001). Descriu l'observatori *XMM-Newton*. Els altres articles d'aquest número contenen els primers resultats obtinguts amb aquest observatori.

MUSHOTZKY, R. F., DONE, C. i POUNDS, K. A., X-ray spectra and time variability of active galactic nuclei, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **31**, 717 (1993).

SARAZIN, C. L., *X-ray emissions from clusters of galaxies*, Cambridge University Press (1988).

SEWARD, F. D. i CHARLES, P. A., *Exploring the X-ray Universe*, Cambridge University Press (1995).

TANAKA, Y. et al., Gravitationally Redshifted Emission Implying an Accretion Disk and Massive Black-Hole in the Active Galaxy MCG-6-30-15, *Nature*, **375**, 659 (1995).

TUCKER, W. i GIACCONI, R., *The X-ray Universe*, Harvard University Press (1985).