

# EL CEL DE RAIGS GAMMA EXTRAGALÀCTICS

## UNA VISIÓ DEL FENOMEN MÉS POTENT DE L'UNIVERS

MONICA ORIENTI

El cel de raigs gamma ens permet observar els processos més energètics i violents de l'univers. En els últims anys, els satèl·lits de raigs gamma estan explorant el cel per a ajudar-nos a comprendre els processos físics que governen aquestes emissions. Avui dia tenim una gran quantitat d'informació sobre els processos físics relacionats amb el cel de raigs gamma gràcies als satèl·lits que orbiten la Terra. Fins ara, s'han detectat prop de tres mil fonts de raigs gamma, i la xifra augmentarà mentre aquestes missions continuen explorant el cel. El cel d'alta energia està dominat pels objectes extragalàctics. Gran part de les fonts detectades no té un equivalent en els catàlegs d'altres longituds d'ona, la qual cosa deixa obert el debat sobre la seua naturalesa. Aquest article se centra en el cel de raigs gamma extragalàctics, en les seues propietats i processos, per a analitzar els principals problemes que es debaten en la comunitat astrofísica.

Paraules clau: raigs gamma, astronomia extragalàctica, mecanismes no tèrmics, galàxies actives, quàsars.

### ■ L'ASTROFÍSICA DE RAIGS GAMMA: UNA ULLADA A L'UNIVERS ENERGÈTIC

En una nit completament rasa, les estrelles, els planetes i les galàxies inunden el cel amb la seua llum. El que veiem amb els nostres ulls és només una petita fracció del que emeten els cossos celestes. La radiació produïda per processos astrofísics cobreix un enorme ventall d'energies. L'atmosfera terrestre és opaca a la majoria de l'espectre electromagnètic, però dues petites finestres, en els rangs òptic i de ràdio, permeten que la llum en aquestes freqüències passe i arribe al sòl.

Per a resoldre aquesta limitació observacional, s'han ubicat telescopis per a investigar la radiació infraroja, ultraviolada, de raigs X i de raigs gamma a bord de satèl·lits que orbiten la Terra. La radiació gamma representa la «llum» més energètica de l'espectre electromagnètic. Els fotons de raigs gamma tenen energies superiors a uns pocs MeV<sup>1</sup> i

poden arribar fins i tot a superar els 100 TeV. Aquestes energies tan altes són produïdes per alguns dels processos més potents i violents de l'univers.

Podem trobar emissors de raigs gamma a totes les escales: la Lluna i el Sol brillant del nostre Sistema Solar, les restes de supernoves, les binàries de gran massa i els púlsars de la nostra galàxia, així com els dolls relativistes produïts pels forats negres supermassius localitzats en galàxies actives a distàncies cosmològiques. Aquestes fonts discretes s'afegeixen a la radiació dispersa, composta principalment de dos elements: l'un omple el pla galàctic i és produït per les interaccions de raigs còsmics amb la matèria interestel·lar i el camp de radiació de la Via Làctia, mentre que l'altre –probablement d'origen extragalàctic– es distribueix isotròpicament pel cel i podria ser la brillantor col·lectiva de fonts dèbils que no es detecten de manera individual.

Encara que l'emissió de raigs gamma de l'espai interestel·lar es va predir a finals dels anys quaranta del segle passat (vegeu, per exemple, Feenberg i Primakoff, 1948), els raigs gamma còsmics

**«LA RADIACIÓ GAMMA REPRESENTA LA “LLUM” MÉS ENERGÈTICA DE L'ESPECTRE ELECTROMAGNÈTIC I ÉS PRODUÏDA PER ALGUNS DELS PROCESSOS MÉS POTENTS I VIOLENTS DE L'UNIVERS»**

<sup>1</sup> eV: *electron-volt*, energia guanyada per un electró en travessar una diferència de potencial elèctric d'un Volt.

d'alta energia provinents de fonts galàctiques i extragalàctiques es van identificar per primera vegada en els seixanta, gràcies a l'instrument de raigs gamma construït i dissenyat per l'Institut Tecnològic de Massachusetts (MIT) que es va instal·lar al Tercer Observatori Solar en Òrbita (OSO 3) (Kraushaar et al., 1972). Més tard, el satèl·lit europeu COS-B va detectar fotons en el rang entre 50 i 500 MeV del quàsar 3C 273 (Swanenburg et al., 1978). No obstant això, calgué esperar fins a la dècada dels noranta, a l'EGRET (Telescopi de l'Experiment de Raigs Gamma Energètics, en les seues sigles en anglès), ubicat a bord de l'Observatori Compton de Raigs Gamma, per a sondejar el cel de raigs gamma per complet. EGRET va observar el cel entre 30 MeV i prop de 20 GeV durant quasi una dècada, i va revelar el caràcter variable i heterogeni del cel d'alta energia. Aquest telescopi va detectar prop de 300 fonts de raigs gamma per damunt dels 100 MeV, però només una petita fracció (~30 %) es va identificar com l'equivalent d'alta energia a objectes coneguts observats en altres longituds d'ona. La gran majoria de les fonts identificades era d'origen extragalàctic (Hartman et al., 1999).

Des de 2007, l'astrofísica de raigs gamma ha viscut una edat d'or. El llançament del satèl·lit italià AGILE aquell any va ser seguit el 2008 pel del LAT (Telescopi de Gran Àrea, en les seues sigles en anglès) a bord del satèl·lit Fermi (Fermi-LAT) i va renovar l'interès de la comunitat astrofísica pel cel de raigs gamma.

A pesar de la cobertura no uniforme del cel, durant el seu primer any d'observació, AGILE va detectar prop de 50 fonts de raigs gamma amb alt nivell de confiança (Pittori et al., 2009). D'altra banda, la labor principal del Fermi-LAT és sondejar el cel: completa un mapa sencer del cel cada tres hores. Amb el seu ampli rang energètic, que va des dels 20 MeV fins a uns pocs TeV, i la seua sensibilitat millorada, Fermi-LAT va arribar a detectar prop de 200 fonts de raigs gamma en només tres mesos (Abdo et al., 2009). Després de quatre anys d'observacions, Fermi-LAT havia detectat més de 3.000 fonts de raigs gamma i descobert emissions d'alta energia de tipus de fonts que no s'havien detectat anteriorment. La majoria de les fonts de raigs gamma associades (prop del 60 %) són de naturalesa extragalàctica, mentre que uns 250 objectes són de la nostra galàxia, entre els quals els púlsars són el tipus de font galàctica més comuna (Acero et al., 2015).

Aquestes xifres potser semblen ínfimes comparades amb els centenars de milers o fins i tot centenars de milions d'objectes registrats en catàlegs de ràdio, infraroig, rang òptic i raigs X. Hem de tenir en compte que no tots els cossos celestes són emissors forts de raigs gamma. Per exemple, l'emissió del Sol o de la Lluna és observable només perquè aquests cossos estan molt prop de nosaltres. D'altra banda, l'emissió dels estels i de la pols i el gas interestel·lar és fàcil d'observar en infraroig, en el rang òptic, en ultraviolada i en raigs X, però la seua contribució a la banda d'alta energia està per sota del llindar de detectabilitat dels telescopis actuals.

Aquest article se centra en l'emissió de raigs gamma del cel extragalàctic i s'ocupa de les diferents poblacions de fonts detectades pels telescopis fins ara. Comentaré la complexa tasca de trobar l'equivalent de baixa energia en una font de raigs gamma, i el paper crític de les observacions multibanda per aconseguir una identificació sòlida de les fonts. Finalment, s'ofereix un breu repàs al cel d'alta energia i a la pròxima generació de telescopis de raigs gamma.

**«DES DE 2007,  
L'ASTROFÍSICA DE RAIGS  
GAMMA HA VISCUT  
UNA EDAT D'OR. EL  
LLANÇAMENT DEL SATÈL·LIT  
ITALIÀ AGILE AQUELL ANY  
VA SER SEGUIT EL 2008  
PEL DEL LAT A BORD DEL  
SATÈL·LIT FERMI»**

**■ EL CEL DE RAIGS GAMMA  
EXTRAGALÀCTICS**

Les galàxies són els principals blocs de construcció de l'univers. Els estels, el gas i la pols són responsables de l'emissió procedent de la galàxia en tot l'espectre electromagnètic, incloent-hi els raigs gamma, que es produeixen

per la interacció de les partícules dels raigs còsmics—accelerades, per exemple, per les supernoves— amb el gas interestel·lar. No obstant això, aquesta emissió és molt dèbil i, fins ara, només s'ha detectat en Andròmeda i en el Gran i Petit Núvol de Magalhães.

A més de les tres galàxies del Grup Local (Andròmeda, Via Làctia i Galàxia del Triangle), Fermi-LAT va detectar emissions d'alta energia provinents d'un grapat de galàxies que presenten un brot estel·lar. En aquestes galàxies, el ritme a què es produeixen estels (i al qual aquests exploten) és molt major que en galàxies com la Via Làctia. Això es reflecteix en un major índex de supernoves i, per tant, de raigs còsmics, que són la base de l'emissió de raigs gamma.

Les galàxies normals i amb brots estel·lars són ordres de magnitud menys lluminoses que les galàxies actives. Prop d'un 10 % de les galàxies tenen un nucli actiu en el centre. Els nuclis actius de galàxies són



Figura 1. Emissió de ràdio (en rosa) superposada a una imatge òptica. L'emissió de ràdio de les radiogalàxies s'estén molt més enllà de la galàxia en què s'originen els dolls relativistes.

la manifestació de l'extraordinària quantitat d'energia alliberada a l'entorn d'un forat negre supermassiu (Blandford, Netzer i Woltjer, 1990). En prop del 10% dels nuclis actius de galàxies, el forat negre supermassiu crea i expulsa un flux bipolar de partícules relativistes que es pot estendre molt més enllà de la mateixa galàxia (figura 1). Als extrems dels dos dolls, les partícules relativistes interactuen amb el medi al seu voltant i formen espectaculars estructures d'emissió dispersa.

Les partícules relativistes alliberen energia en interactuar amb els camps magnètics del doll i produeixen radiació de sincrotró, visible des de la banda de ràdio fins a la de raigs X. A més, les partícules relativistes també interactuen amb els camps de radiació circumdants. Durant aquesta interacció, les partícules relati-

vistes transfereixen part de la seua energia als fotons menys energètics. Com a conseqüència, els fotons guanyen energia i acaben convertint-se en fotons de raigs gamma. Aquest procés de dispersió es coneix com a efecte de Compton invers.

En la subpoblació de nuclis actius de galàxies que coneixem com blàzars, l'eix del doll relativista apunta cap a la Terra i la seua emissió en la nostra direcció s'amplifica gràcies als efectes relativistes (figures 2 i 3). Com a conseqüència, aquests objectes semblen més brillants que no són en realitat, la qual cosa fa més fàcil detectar-los. La lluminositat dels blàzars varia, de mitjana, entre  $10^{45}$  erg/s<sup>2</sup> i  $10^{47}$  erg/s, però pot assolir,

<sup>2</sup> Un erg equival a  $10^{-7}$  joules (J).



en alguns casos, valors de fins a  $10^{50}$  erg/s. A més, cada pertorbació, com la formació i la propagació d'una ona de xoc, s'amplifica fent que l'emissió del blàzar siga molt variable en totes les longituds d'ona.

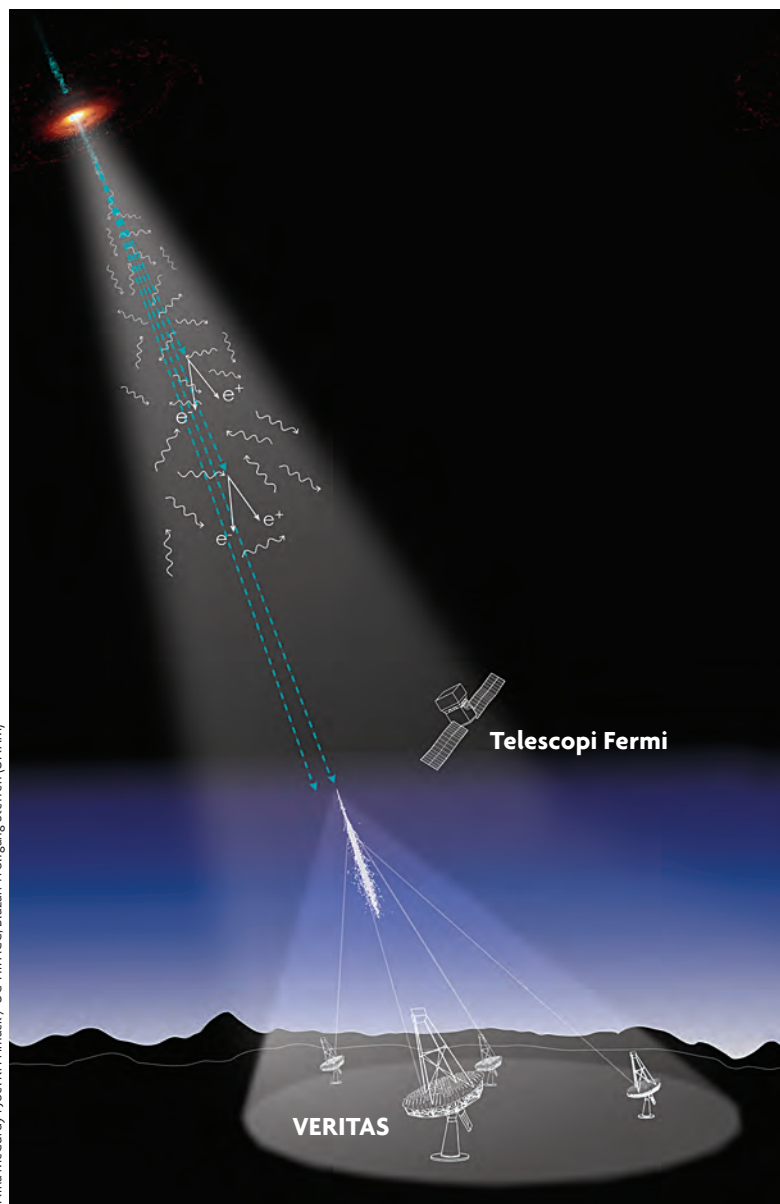
El cel de raigs gamma extragalàctics observat per Fermi-LAT està dominat quasi per complet per blàzars, que representen el 98 % de les fonts detectades. D'altra banda, els nuclis actius de galàxies amb activitat en ràdio en què els dolls relativistes no apunten cap a la Terra no presenten cap augment en la lluminositat (se'ls coneix com a «fonts» no alineades), el que converteix la detecció a altes energies en una tasca complicada. El nombre de fonts no alineades observades ha augmentat constantment amb la millora de la sensibilitat dels instruments. Ha passat de la detecció únicament de Centaurus A per part d'EGRET fins a la detecció de 30 objectes per part de Fermi-LAT (Ackermann et al., 2015). La seua lluminositat en raigs gamma es troba entre  $10^{41}$  erg/s, per a la radiogalàxia pròxima Centaurus A, i  $10^{44}$  erg/s, és a dir, en la cua de baixa lluminositat dels blàzars; i només es troben a unes desenes o uns centenars de milions d'anys llum de nosaltres. No

**«LA POBLACIÓ DE FONTS DE RAIGS GAMMA HA AUGMENTAT DE FORMA DRÀSTICA DES DEL DESCOBRIMENT DEL PRIMER QUÀSAR EN LA DÈCADA DELS SETANTA DEL SEGLE PASSAT»**

obstant això, els objectes no alineats detectats en raigs gamma fins ara estan molt més prop de nosaltres que els blàzars. Com que la lluminositat observada disminueix amb el quadrat de la distància, els objectes més llunyans han de ser més lluminosos intrínsecament per a poder ser detectats. Això implica que si una font com Centaurus A estiguera a la distància mitjana dels blàzars, la seua lluminositat seria impossible de detectar amb els instruments actuals. A pesar de ser indetectables individualment, la seua emissió acumulada contribueix al fons dispers de raigs gamma observat en el cel de manera pràcticament isotròpica.

**■ FONTS IDENTIFICADES, ASSOCIADES I NO ASSOCIADES: QUÈ SIGNIFIQUEN?**

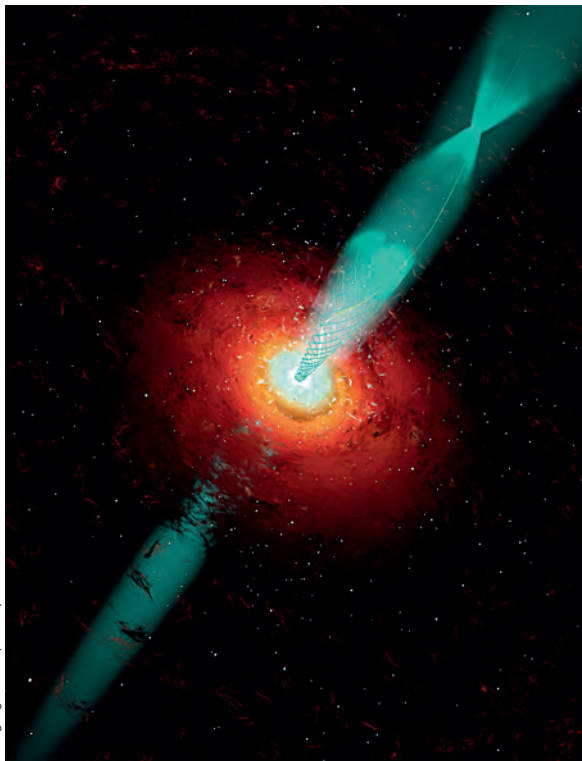
Com s'ha mencionat en l'apartat anterior, els nuclis actius de galàxies, i els blàzars en particular, són el tipus més gran de fonts extragalàctiques associades. La



Nina McCurdy i Joel R. Primack / UC-HIPACC; Blàzar: Wolfgang Steffen (UNAM)

Figura 2. Detecció de l'emissió de raigs gamma d'un blàzar. Els fotons d'alta energia s'observen mitjançant els telescopis de raigs gamma que orbiten la Terra, mentre que els fotons de molt alta energia interactuen amb l'atmosfera terrestre i produeixen cascades de partícules que es poden observar mitjançant els telescopis Txerenkov de la superfície. No tota l'emissió d'un blàzar arriba fins a nosaltres perquè, durant el seu camí fins a la Terra, interactua amb els fotons del fons còsmic i genera partícules.

**«LES FONTS DE MOLT ALTA ENERGIA OBSERVADES FINS ARA PROBABLEMENT SÓN NOMÉS LA PUNTA DE L'ICEBERG, A CAUSA DE LES LIMITACIONS DELS TELESCOPIS TXERENKOV ACTUALS»**



Wolfgang Steffen (UNAM)

Figura 3. Fotograma d'una animació conceptual de 3C 120 creada per Wolfgang Steffen. El forat negre supermassiu del centre de la galàxia activa produeix un flux bipolar de partícules relativistes.

resolució espacial dels telescopis de raigs gamma no és gaire precisa. Fermi-LAT, per exemple, és en l'actualitat el telescopi de raigs gamma amb millor resolució espacial, amb un índex d'incertesa posicional de prop de 0,5 graus a 1 GeV, la qual cosa correspon aproximadament a la grandària del Sol tal com l'observem des de la Terra. En una regió d'incertesa d'aquesta grandària, es podrien arribar a observar centenars o milers de possibles equivalents en el rang òptic o d'infraroig!

Identificar clarament l'equivalent de baixa energia d'una font de raigs gamma és molt complicat. Per aconseguir-ho, és necessari tenir accés a dades de monitorització multibanda, i això no sol ser possible. Per aquesta raó, només una petita part de les fonts de raigs gamma tenen una identificació inequívoca. Per exemple, entre les 3.033 fonts detectades per Fermi-LAT, només 238 s'han identificat de manera inequívoca, i 66 d'aquestes són nuclis actius de galàxies.

El procés d'associar una font de raigs gamma amb un objecte conegut dels catàlegs astronòmics d'altres

longituds d'ona (principalment el rang òptic, de ràdio, de raigs X i infrarojos) es basa principalment en arguments estadístics. Els catàlegs considerats per a la comparació comprenen els tipus d'objectes que són possibles emissors de raigs gamma. L'associació depèn sobretot de l'estreta correspondència posicional entre els equivalents d'alta i baixa energia. Després es verifica la naturalesa de l'equivalent. Si un dels possibles equivalents és un blàzar, un tipus ben conegut d'emissor de raigs gamma, es proposarà com a associació per a la font d'alta energia.

No obstant això, una gran part dels objectes no té un equivalent clar en altres rangs d'energia. En el tercer catàleg EGRET, les fonts no associades sumaven més del 60% de les fonts de raigs gamma detectades (Hartman et al., 1999), encara que han descendit fins al 30% en el tercer catàleg de fonts de Fermi-LAT (Acero et al., 2015).

Cal observar que els procediments d'associació depenen de la disponibilitat de catàlegs amb alta sensibilitat i que cobresquen una àrea del cel tan gran com siga possible. Aquest punt ha estat crucial en l'hemisferi sud, en el qual els oceans cobreixen més superfície que en l'hemisferi nord, fet que impossibilita la construcció de tantes instal·lacions d'observació com en el nord. El mateix ocorre amb el pla galàctic, per al qual no disposem de molts catàlegs d'objectes extragalàctics.

A part de l'excés mencionat, les fonts no associades estan distribuïdes de manera uniforme en el cel, la qual cosa suggereix un possible origen extragalàctic. Amb l'objectiu d'ampliar els catàlegs de possibles equivalents, s'han desenvolupat diverses campanyes d'observació en diferents longituds d'ona, i els catàlegs continuen creixent gràcies a noves observacions.

**«EL CEL DE RAIGS GAMMA  
EXTRAGALÀCTICS  
OBSERVAT PER FERMI-LAT  
ESTÀ DOMINAT QUASI PER  
COMPLET PER BLÀZARS,  
QUE REPRESENTEN  
EL 98% DE LES FONTS  
DETECTADES»**

#### ■ CAMPANYES MULTIFREQÜÈNCIA DE NUCLIS ACTIUS DE GALÀXIES VARIABLES

La variabilitat és una característica clau dels blàzars. Els canvis en la lluminositat s'observen en totes les longituds d'ona i estan relacionats amb períodes de diferent activitat: estats de quietud intercalats amb períodes de major activitat. De vegades, es donen brots abruptes.

Fins avui, les propietats de l'emissió d'alta energia s'han investigat amb l'ajuda complementària de campanyes de monitorització multibanda. L'anàlisi de la

corba de llum, és a dir, de la manera com el flux de la llum observada a una determinada freqüència canvia en funció del temps, apunta una possible relació entre els episodis d'esclat de raigs gamma i la variabilitat observada en la resta de l'espectre electromagnètic, la qual cosa suggereix que la variabilitat multibanda i l'episodi de l'esclat d'alta energia tenen un origen comú.

A pesar de dècades d'esforços, molts aspectes sobre l'emissió d'alta energia i la seua variabilitat continuen essent esquius. El satèl·lit Fermi, amb la seua habilitat per a sondejar tot el cel cada tres hores, permet fer una caracterització precisa del cel variable d'alta energia. Centenars de blàzars es monitoritzen contínuament, i els seus brots es capturen immediatament. L'alerta d'un esclat de raigs gamma es transmet ràpidament als telescopis que monitoritzen diferents bandes electromagnètiques, la qual cosa proporciona un seguiment multibanda tan complex com és possible.

De l'aparició del brot en les diferents bandes d'energia observades s'obté informació important sobre l'origen i la localització de l'esdeveniment que el provoca. S'ha descobert que els brots de raigs gamma es donen simultàniament en les bandes de raigs X, òptica i d'infrarojos, mentre que en la longitud d'ona de ràdio, el brot es retarda uns quants dies, setmanes, o fins i tot mesos (Fuhrmann et al., 2014; Marscher et al., 2008). Això s'explica per una ona de xoc produïda en la part central del nucli actiu de la galàxia, que es desplaça al llarg del doll (Marscher i Gear, 1985). Depenent de la longitud d'ona de l'observació, estem sondejant regions localitzades a una distància diferent del forat negre supermassiu: com més alta és la banda d'energia estudiada, més podem endinsar-nos en el si del nucli actiu de la galàxia. Al contrari, la banda de ràdio, que es troba en el límit inferior de l'espectre electromagnètic, és aliena al que ocorre en les regions centrals i comença a veure el brot quan l'ona de xoc ja ha viatjat una determinada distància al llarg del doll. La hipòtesi de l'ona de xoc ha rebut suports gràcies al descobriment de components brillants del doll expulsats de la regió central prop d'un brot de raigs gamma, que es desplacen pel feix a velocitat aparentment superlumínica. Per descomptat, la seua velocitat real no excedeix en realitat la velocitat de la llum! No obstant això, la combinació d'efectes relativistes i de projecció fa que la seua velocitat ens parega més ràpida que la llum. Aquests nusos superlumínics s'interpreten

com la manifestació observacional d'una ona de xoc en moviment (Marscher i Gear, 1985).

Ni tots els brots de raigs gamma presenten un equivalent en altres longituds d'ona, ni tots els brots en bandes de baixa energia es corresponen a un esclat de raigs gamma. L'origen d'aquests brots no correlacionats continua essent molt discutit.

## ■ UNA ULLADA AL CEL DE MOLT ALTA ENERGIA

Els telescopis de raigs gamma que orbiten al voltant de la Terra són sensibles als raigs gamma amb energies de fins a uns pocs centenars de GeV. És difícil que els satèl·lits de raigs gamma detecten fonts per damunt d'aquesta energia. Afortunadament, la nostra atmosfera ens ajuda a detectar els fotons de molt alta energia... des de la superfície del planeta! De fet, aquests fotons interactuen amb els àtoms i les molècules que es troben en

el seu camí a través de l'atmosfera terrestre. La interacció origina una cascada de partícules que es propaga aproximadament en la direcció original del fotó de molt alta energia entrant. Aquestes partícules secundàries són ultrarelativistes i la seua velocitat és major que la velocitat de la llum en l'atmosfera (per descomptat, no són més ràpides que la velocitat de la llum en el buit, perquè aquesta és la velocitat màxima a la qual pot viatjar qualsevol tipus de matèria i d'ones electromagnètiques). La diferència de velocitat entre les partícules i la llum provoca l'emissió

de radiació, coneguda com a radiació Txerenkov, que és detectada pels telescopis Txerenkov de la superfície.

Fins ara s'han detectat prop de 200 fonts de molt alta energia, dividides quasi per igual entre les d'origen galàctic, extragalàctic i aquelles l'origen de les quals és desconegut. La petita quantitat d'objectes de molt alta energia és deguda al fet que només uns pocs fenòmens celestes poden produir energies tan altes. A més, els telescopis Txerenkov actuals no observen tot el cel, sinó que apunten a objectes individuals, normalment en estat d'activitat, seguint els indicis d'altres longituds d'ona, i només quan no hi ha limitacions d'observació, com els núvols o la lluna plena. Com en el cas del cel de raigs gamma d'alta energia, les fonts de molt alta energia extragalàctica són principalment blàzars, i només s'han descobert quatre radiogalàxies pròximes.

Totes aquestes fonts estan a una distància màxima de 7.000 milions d'anys llum de la Terra. De moment,

**«LA SENSIBILITAT  
MILLORADA I L'ESTRATÈGIA  
D'OBSERVACIÓ DELS  
TELESCOPIS DE RAIGS  
GAMMA ACTUALS PERMET  
FER UNA CARACTERITZACIÓ  
DETALLADA DELS  
PRINCIPALS TIPUS  
DE FONTS QUE POBLEN  
EL CEL D'ALTA ENERGIA»**





no s'han trobat objectes a major distància. La falta de detecció d'objectes distants no és deguda a les limitacions en sensibilitat, sinó que es relaciona amb els processos físics que pateixen els fotons d'alta energia en el seu viatge a través de l'univers. La llum de fons extragalàctica està formada per fotons produïts per estels i galàxies des del començament de l'univers. Quan els fotons d'alta energia es propaguen per l'univers, interactuen amb els fotons de la llum de fons extragalàctica en longituds d'ona que van des de la ultraviolada fins a l'infraroig. Si l'energia dels fotons que interactuen és suficient, els fotons s'aniquilen mútuament i creen parells electró-positró (Gould i Schreder, 1967). Això resulta en una atenuació de les fonts de raigs gamma per damunt d'una energia crítica que depèn de la distància. L'univers és transparent per als fotons d'energia inferior a 20 GeV. A partir d'aquest punt, es torna progressivament opac a energies cada vegada més altes, i la distància de visibilitat disminueix.

## ■ OBSERVACIONS FINALS

El cel de raigs gamma brilla amb uns pocs milers de cossos celestes potents i variables. La població de fonts de raigs gamma ha augmentat de manera dràstica des del descobriment del primer quàsar en la dècada dels setanta del segle passat. La sensibilitat millorada i l'estratègia d'observació dels telescopis de raigs gamma actuals permet fer una caracterització detallada dels principals tipus de fonts que poblen el cel d'alta energia. No obstant això, encara som lluny de comprendre molts dels aspectes físics implicats en aquests processos violents. La disponibilitat de catàlegs cada vegada més amplis ens permetrà ocupar-nos de les qüestions encara obertes des d'un enfocament estadístic. Aquest aspecte serà crucial per a la nostra comprensió del cel d'alta energia.

Tal com hem vist, les fonts de molt alta energia observades fins ara probablement són només la punta de l'iceberg, a causa de les limitacions dels telescopis Txerenkov actuals i a la seua estratègia d'observació. La pròxima generació de telescopis terrestres de molt alta energia està en camí. El Cherenkov Telescope Array es construirà en els pròxims anys amb l'objectiu de millorar i expandir el nostre coneixement sobre l'univers de molt alta energia (Actis et al., 2011). La construcció es durà a terme en dos llocs diferents, en l'illa de La Palma (Espanya) per a l'hemisferi nord i a Xile per a l'hemisferi sud. Gràcies a la millora en sensibilitat i cobertura energètica, junt amb el desenvolupament de noves estratègies d'observació, aquest dispositiu tindrà un gran potencial de descobriment en àrees clau de la investigació astronòmica, astrofísica i de física fon-

amental. El Cherenkov Telescope Array, junt amb observacions multibanda i multimissatger, s'ocuparà d'estudiar l'origen dels raigs còsmics, la investigació sobre l'acceleració de les partícules en els dolls relativistes, la naturalesa última de la matèria i la física més enllà del model estàndard, la cerca de la matèria fosca i els efectes de la gravetat quàntica. Totes aquestes qüestions clau de la física de l'emissió d'alta energia. ☉

## REFERÈNCIES

- Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Axelsson, M., Baldini, L., ... Ylinen, T. (2009). Fermi/Large Area Telescope bright gamma-ray source list. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 183(1), 46–66. doi: [10.1088/0067-0049/183/1/46](https://doi.org/10.1088/0067-0049/183/1/46)
- Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., Albert, A., Atwood, W. B., Axelsson, M., ... Zimmer, S. (2015). Fermi Large Area Telescope third source catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 218(2), 23–64. doi: [10.1088/0067-0049/218/2/23](https://doi.org/10.1088/0067-0049/218/2/23)
- Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., ... Zimmer, S. (2015). The third catalog of active galactic nuclei detected by the Fermi Large Area Telescope. *The Astrophysical Journal*, 810(1), 14–48. doi: [10.1088/0004-637X/810/1/14](https://doi.org/10.1088/0004-637X/810/1/14)
- Actis, M., Agnetta, G., Aharonian, F., Akhperjanian, A., Aleksić, J., Aliu, E., ... Zychowski, P. (2011). Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: An advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy. *Experimental Astronomy*, 32(3), 193–316. doi: [10.1007/s10686-011-9247-0](https://doi.org/10.1007/s10686-011-9247-0)
- Blandford, R. D., Netzer, H., & Woltjer, L. (1990). *Active galactic nuclei*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Feenberg, E., & Primakoff, H. (1948). Interaction of cosmic-ray primaries with sunlight and starlight. *Physical Review*, 73(5), 449–469. doi: [10.1103/PhysRev.73.449](https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.449)
- Fuhrmann, L., Larsson, S., Chiang, J., Angelakis, E., Zensus, J. A., Nestoras, I., ... Pearson, T. J. (2014). Detection of significant cm to sub-mm band radio and  $\gamma$ -ray correlated variability in Fermi bright blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 441(3), 1899–1909. doi: [10.1093/mnras/stu540](https://doi.org/10.1093/mnras/stu540)
- Gould, R. J., & Schreder, G. (1967). Opacity of the universe to high-energy photons. *Physical Review Letter*, 16, 252–254. doi: [10.1103/PhysRevLett.16.252](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.252)
- Hartman, R. C., Bertsch, D. L., Bloom, S. D., Chen, A. W., Deines-Jones, P., Esposito, J. A., ... Dingus, B. L. (1999). The third EGRET catalog of high-energy gamma-ray sources. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 123(1), 79–202. doi: [10.1086/313231](https://doi.org/10.1086/313231)
- Kraushaar, W. L., Clark, G. W., Garmire, G. P., Borken, R., Higbie, P., Leong, V., & Thorsos, T. (1972). High-energy cosmic gamma-ray observations from the OSO-3 satellite. *The Astrophysical Journal*, 177, 341–363. doi: [10.1086/151713](https://doi.org/10.1086/151713)
- Marscher, A. P., & Gear, W. K. (1985). Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273. *The Astrophysical Journal*, 298, 114–127. doi: [10.1086/163592](https://doi.org/10.1086/163592)
- Marscher, A. P., Jorstad, S. G., D'Arcangelo, F. D., Smith, P. S., Williams, G. G., Larionov, V. M., ... Ryle, W. T. (2008). The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to-gamma-ray outburst. *Nature*, 452(7190), 966–969. doi: [10.1038/nature06895](https://doi.org/10.1038/nature06895)
- Pittori, C., Verrecchia, F., Chen, A.W., Bulgarelli, A., Pellizzoni, A., Giuliani, A., ... Salotti, L. (2009). First AGILE catalog of high-confidence gamma-ray sources. *Astronomy & Astrophysics*, 506, 1563–1574. doi: [10.1051/0004-6361/200911783](https://doi.org/10.1051/0004-6361/200911783)
- Swanenburg, B. N., Hermsen, W., Bennett, K., Bignami, G. F., Caraveo, P., Kanbach, G., ... Sacco, B. (1978). COS B observation of high-energy gamma radiation from 3C273. *Nature*, 275, 298. doi: [10.1038/275298a0](https://doi.org/10.1038/275298a0)

**Monica Orienti.** Investigadora de l'Institut de Radioastronomia (INAF-IRA) de Bolonya (Itàlia). Va obtenir el seu doctorat en la Universitat de Bolonya treballant en l'emissió de ràdio a gran resolució angular de fonts extragalàctiques.