

# Astronomia de raigs gamma d'alta energia amb el telescopi MAGIC

Manel Martínez\*

## Introducció

MAGIC és una col·laboració internacional per a la construcció del telescopi de raigs gamma més gran i sensible de la història: un telescopi de llum Cherenkov atmosfèrica de 17 metres de diàmetre. En aquest article es descriu l'àmbit de la física en què el telescopi MAGIC (acrònim de *major atmospheric gamma imaging Cherenkov*) aportarà noves dades, es discuteixen breument els temes científics en els quals s'espera que les observacions amb el MAGIC tinguin un impacte més directe i els aspectes tècnics més rellevants de la seva construcció, així com l'estat actual del projecte, que ha de constituir una peça clau en el desenvolupament de l'astrofísica de partícules.

L'astrofísica de partícules o física d'astropartícules és un camp experimental de recerca en plena expansió que pretén estudiar l'origen, la propagació i les propietats de les partícules energètiques d'origen extraterrestre que arriben fins a nosaltres. Podem considerar que el seu començament es remunta a les primeres dècades del segle XX, amb l'estudi dels raigs còsmics, que va constituir també l'origen de la física de partícules moderna.

Però així com la física de partícules experimental ha fet des de llavors una evolució dràstica gràcies al desenvolupament tecnològic que ha permès la construcció de grans acceleradors de partícules i sofisticats detectors, l'astrofísica de partícules havia quedat estancada a causa de les limitacions observacionals fins fa poc més d'una dècada, quan tota una nova generació d'instruments que apliquen els darrers avenços i desenvolupaments en detectors de partícules ha començat a operar.

A partir d'aquest moment, l'astrofísica de partícules s'ha començat a desenvolupar ràpidament en cinc noves àrees diferenciades:

- L'astronomia de raigs gamma.
- L'astronomia de neutrinos.
- La recerca de partícules candidates a matèria fosca.
- La recerca d'ones gravitacionals.

\*Manel Martínez (Saragossa, 1960) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona (1986) i investigador titular de l'Institut de Física d'Altes Energies (IFAE) de Barcelona. Actualment és l'investigador principal del grup de l'IFAE a MAGIC i el *co-spokesman* de la col·laboració MAGIC.

- La recerca d'antimatèria còsmica.

Les dues primeres àrees es poden catalogar com a astronomies, ja que tant els raigs gamma com els neutrinos que ens arriben a nosaltres apunten a la font on es van originar, i per tant ens permeten estudiar tant l'origen (els mecanismes per a la seva producció a la font astrofísica de la qual provenen), com la seva propagació (la seva absorció a l'espai en el cas dels raigs gamma), com les seves propietats (el tipus, la massa i com es barregen entre ells —angle de *mixing*— en el cas dels neutrinos). Aquest estudi dels mecanismes de producció, íntimament lligat a l'astrofísica dels objectes dels quals provenen, només és possible amb els fotons i els neutrinos. Les altres partícules conegudes o bé es desintegren abans de travessar distàncies astronòmiques, o bé, si són estables, tenen totes càrrega elèctrica i són deflectides pels camps magnètics espacials fins al punt que perden completament la memòria de la direcció de la font on es van produir.

És per això que tant l'astronomia de raigs gamma com la de neutrinos constitueixen un clar exemple de matrimoni entre dues disciplines experimentals tradicionalment separades: d'una banda, la física de partícules i, de l'altra, l'astrofísica.

D'entre aquests dos camps, el que correspon al projecte que es presenta en aquest article és l'astronomia de raigs gamma d'alta energia (definida com a superior als 10 GeV). La major part del coneixement que hem acumulat sobre el nostre Univers prové d'observar-lo detectant radiació electromagnètica en diferents regions espectrals que cobreixen avui dia des de les ones de ràdio fins a les de pocs GeV, i per tant, aquest nou camp d'observació és la continuació natural del que fins ara ha constituït l'astronomia. Cada regió espectral permet mesurar propietats úniques dels diferents processos que succeeixen al nostre Univers: els raigs gamma d'alta energia ens han de proporcionar informació sobre els fenòmens còsmics més energètics, i per tant sobre els camps gravitatoris més intensos. D'aquesta manera, els raigs gamma d'alta energia ens poden aportar, d'una banda, valuosa informació astrofísica sobre els objectes més compactes i massius (estrelles de neutrons, forats negres, estructures del buit...), i de l'altra valuoses pis-



tes sobre qüestions fonamentals encara pendents, com per exemple: com es va formar l'estructura al nostre Univers, quant valen els paràmetres cosmològics o com casen la gravitació i la mecànica quàntica.

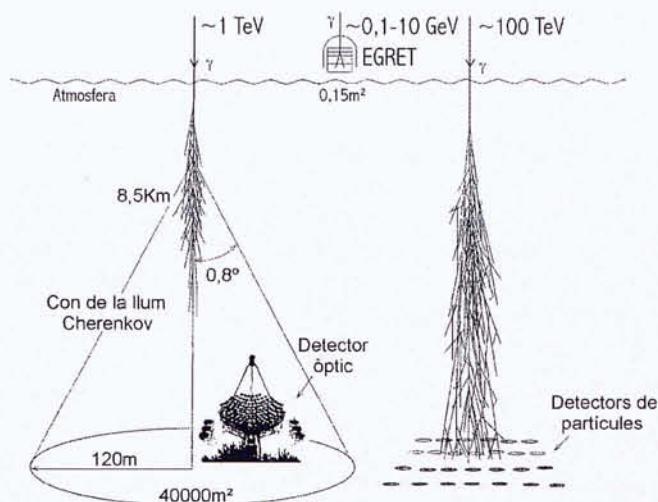


Figura 1: Visió esquemàtica de les diferents tècniques utilitzades per a la detecció de raigs gamma còsmics segons la seva energia

## Detecció de raigs gamma còsmics

La detecció de raigs gamma d'origen còsmic requereix tècniques diferents segons el rang d'energia dels gamma (figura 1):

- Per a energies per sota dels 10 GeV, l'atmosfera absorbeix completament el senyal, cosa que impedeix la utilització de detectors situats a la superfície i, per tant, cal utilitzar detectors de partícules situats a satèl·lits. Desafortunadament, la dificultat tècnica i econòmica d'enlairar satèl·lits molt grans limita les superfícies efectives dels detectors a fraccions de metre quadrat i per tant la sensibilitat al flux és baixa.

- Per a energies superiors als 10 TeV, els gamma desenvolupen a l'atmosfera cascades de partícules que arriben fins a la superfície i poden ser detectades amb xarxes de detectors de partícules desplegats en grans àrees. Per tal de maximitzar l'eficiència de detecció aquests sistemes requereixen un gran nombre de detectors i s'han de situar a grans alçades (per sobre dels 3.000 metres sobre el nivell del mar).

- Per a energies intermèdies (entre 10 GeV i 10 TeV) el nombre de partícules de la cascada que arriben a la superfície és massa baix i per tant cal aplicar una tècnica diferent: es tracta d'utilitzar el fet que les partícules produïdes a la cascada són ultrarelativistes i emeten llum Cherenkov en travessar l'atmosfera. Aquesta llum és deguda a l'ona de xoc electromagnètica produïda per les partícules que es desplacen en un medi més

ràpidament que la llum en aquest medi (semblant a l'ona de xoc acústica produïda pels avions supersònics a l'aire), i en el cas que ens ocupa és màxima a l'ultraviolat, tot i que, a causa de la posterior absorció a l'atmosfera, el seu espectre quan arriba a la superfície és en el visible. Per tant, aquesta llum es pot detectar amb fotosensors òptics de llum visible. Gràcies al gradient de densitat a l'atmosfera, la llum Cherenkov produïda per les cascades electromagnètiques generades pels raigs gamma d'energies superiors a pocs GeV arriba a la Terra com un cercle il·luminat uniformement (*light pool*) d'uns 120 metres de radi, amb la qual cosa l'àrea efectiva de qualsevol telescopi Cherenkov que sigui capaç de detectar aquesta llum és de l'ordre dels 40.000 metres quadrats, més de cinc ordres de magnitud més gran que la que es pot aconseguir amb qualsevol satèl·lit.

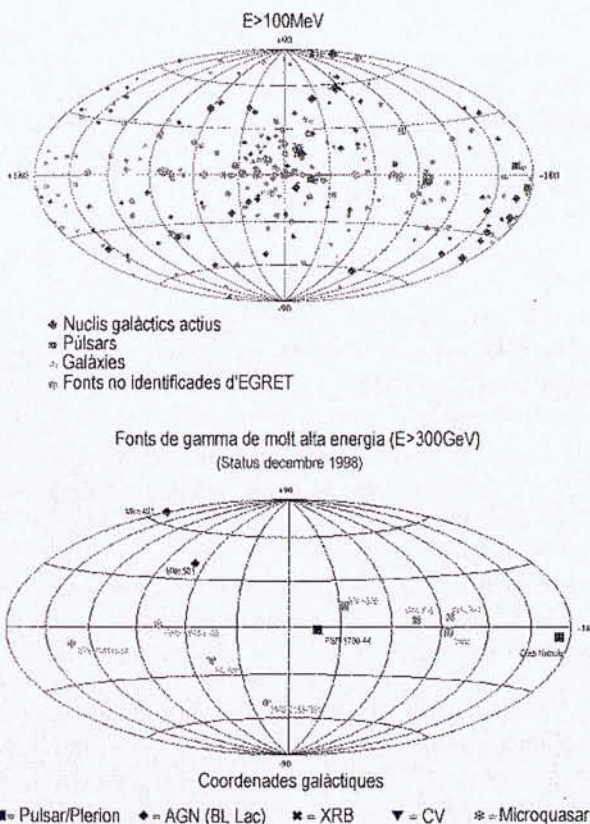


Figura 2: Dalt: fonts descobertes pel satèl·lit EGRET amb  $E_\gamma < 10 \text{ GeV}$ . Baix: fonts descobertes pels telescopis Cherenkov amb  $E_\gamma > 300 \text{ GeV}$  (del total, només 4 a l'hemisferi nord i 3 al sud han estat confirmades)

Fins ara, s'han observat raigs gamma de fins a 10 GeV provinents de més de 270 fonts amb el detector EGRET, al satèl·lit CGRO (Compton Gamma Ray Observatory) que, per evitar una caiguda descontrolada a la Terra, va ser destruït al començament de juny d'aquest any. D'aquestes fonts, més del 60 % romanen



sense identificar per a la pobra resolució angular del detector EGRET, i la resta són nuclis galàctics actius, púlsars i restes d'explosions de supernoves (figura 2a). Al mateix temps, raigs gamma de més de 300 GeV han permès identificar només set fonts de manera inequívoca amb el conjunt de telescopis Cherenkov que han estat en operació durant la darrera dècada. Els més importants han estat el WHIPPLE, a Arizona (EUA), que ha estat el pioner d'aquesta tècnica, els telescopis HEGRA a l'illa canària de La Palma, el CAT al Pirineu francès prop de Puigcerdà i el telescopi japonès CANGAROO a Austràlia. Tots ells, de menys de deu metres de diàmetre, encara continuen en funcionament, si bé s'espera que deixin d'operar definitivament d'aquí a pocs anys. Aquestes fonts han estat identificades com a nuclis galàctics actius i restes d'explosions de supernoves (figura 2b).

No s'han pogut detectar fonts que emeten raigs gamma d'energies entre 10 GeV i 300 GeV amb els telescopis Cherenkov existents per la seva manca de sensibilitat a energies tan baixes, ni pels satèl·lits per la seva petita àrea, que en limita la sensibilitat al flux. Per tant, queda encara una finestra observacional entre 10 GeV i 300 GeV (*observational gap*) sense explorar, en la qual la gran diferència entre el nombre de fonts observades a energies inferiors i a energies superiors indica que fenòmens fonamentals associats als mecanismes de producció i a l'absorció d'aquests raigs gamma a l'espai que encara no han pogut ser estudiats en són els responsables.

Per tal de cobrir aquest interval s'han proposat diferents solucions. D'una banda, l'enlairament de detectors més grans i sensibles aprofitant la construcció de l'Estació Espacial Internacional (ISS), com és el cas del detector americà GLAST, que previsiblement començarà a funcionar cap al 2005. D'altra banda, la millora de les instal·lacions terrestres construint instruments més sensibles. En aquest cas, com veurem més endavant, això implica augmentar l'àrea de col·lecció de la llum Cherenkov i millorar l'aprofitament d'aquesta llum per extreure'n la informació. Actualment, això s'intenta aconseguir de dues maneres diferents:

- Aprofitant a la nit grans instal·lacions d'energia solar ja existents, com és el cas de l'experiment CELESTE, al Pirineu francès prop de Puigcerdà, de l'experiment STACEE als EUA o l'experiment GRAAL prop d'Almeria. Aquestes instal·lacions proveeixen immenses àrees de col·lecció de llum encara que, dissortadament, estan òpticament dissenyades per aprofitar el sol i, tot i que ja fa uns quants anys que aquests experiments funcionen, encara s'ha de demostrar la viabilitat del seu ús per a la detecció dels raigs gamma.
- Explotant al màxim la tècnica dels telescopis Cherenkov que, fins ara, han estat els únics instruments terrestres capaços de produir resultats. El repte consisteix

a aplicar-hi els darrers avenços tecnològics en els camps de la mecànica, l'òptica i l'electrònica per tal d'aconseguir reduir el llindar de detecció i mantenir una gran sensibilitat al flux. Aquesta és l'estratègia de l'experiment MAGIC, que discutim amb més detall en aquest article.

## Resultats físics esperats

Atès que l'astronomia de raigs gamma és un camp molt nou d'observació, són molts els coneixements que potencialment podem adquirir i segurament moltes les sorpreses que caldrà explicar. Una extrapolació del comportament de les fonts astrofísiques conegudes a energies inferiors ens fa ser optimistes i ens fa pensar que un telescopi com MAGIC observarà centenars de fonts, cosa que permetrà separar:

### 1. La comprensió dels fenòmens de producció a les fonts

És a dir l'aprofundiment en el coneixement de l'astrofísica d'objectes com:

- **Nuclis galàctics actius (AGN)**, on l'energia necessària per produir els gamma ha de provenir d'interaccions de partícules carregades ultrarelativistes que s'expulsen en forma de jets quan ingents quantitats de matèria es precipiten en forats negres ultramassius (de l'ordre de  $10^8$  masses solars) situats al centre del nucli galàctic (figura 3). El fet que els raigs gamma només es puguin produir en els jets justifica per què només a la subclasse d'AGN denominada *blazars*, on el jet apunta cap a nosaltres, s'ha observat emissió de raigs gamma energètics. Amb l'estudi dels gamma es pretén avançar en la comprensió de la dinàmica dels forats negres molt a prop del *light horizon*, superfície a partir de la qual cap objecte pot ja escapar de l'atracció gravitatòria.

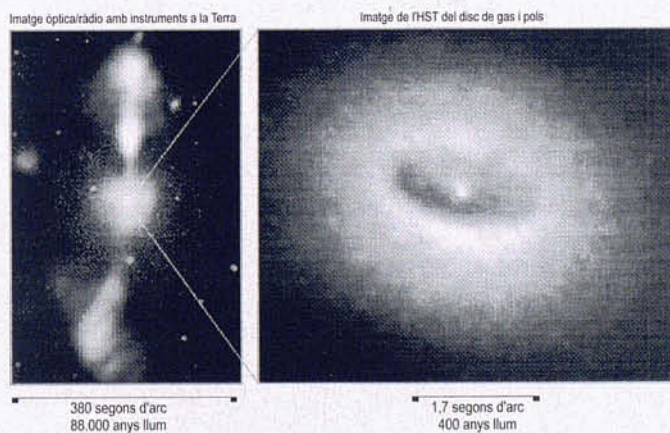


Figura 3: Imatges de l'AGN NGC-4261. A la dreta, fotomuntatge d'imatges d'òptica i de ràdio fetes des de la Terra on es veuen els jets ultrarelativistes. A la dreta, ampliació de la zona central vista pel telescopi espacial Hubble on es veu el disc de material al voltant del forat negre central



- **Púlsars**, estrelles de neutrons en ràpida rotació que constitueixen les màquines electromagnètiques més descomunals i eficients de l'Univers. Els models que s'han proposat per explicar com poden actuar com els acceleradors de partícules necessaris per tal de produir raigs gamma d'alta energia prediuen clares diferències en el tall de l'espectre d'emissió de raigs gamma precisament en el rang d'energies que roman inexplorat. El fet de poder discriminar entre aquests models ha de permetre obtenir informació fonamental sobre la dinàmica d'aquests objectes.

- **Restes d'explosions de supernoves**, on els raigs gamma són generats a la regió de l'ona de xoc entre el material ejectat i els núvols circumdants per les partícules carregades, que són accelerades amb un mecanisme semblant a l'acceleració d'una bola de ping-pong que rebota entre dues parets que s'apropen (conegut com a mecanisme de Fermi). L'origen fonamental dels raigs còsmics, que actualment continua sent un misteri, podria ser les explosions de supernoves i cal esperar que l'estudi dels raigs gamma ajudi a aclarir aquesta possibilitat.

## 2. La comprensió de la propagació i generació d'aquests raigs gamma a l'espai

Això ens ha d'ajudar en l'estudi de l'estructura, composició i evolució d'aquest espai, que constitueix l'objectiu fonamental de la cosmologia i en bona mesura també de la física de partícules. Alguns dels temes que els raigs gamma d'alta energia ens han de permetre tractar en aquesta matèria són:

- **La determinació de l'horitzó d'observació pels raigs gamma**, atesa la seva interacció amb el fons de fotons infrarojos i visibles distribuïts per l'espai, que contenen informació sobre les diferents èpoques de formació d'estructures a l'Univers, de la mateixa manera com el fons de microones conté informació sobre el desacoblament primordial de la matèria i la radiació durant el Big Bang. La formació d'estructura a l'Univers és avui dia un dels temes més candents de la cosmologia i, al contrari del que passa amb el fons de microones còsmic, que ja ha estat mesurat directament amb molta precisió, en el cas del fons infraroig i òptic, la llum zodiacal deguda al sol n'impedeix una mesura directa, i la utilització dels raigs gamma com a puntes de prova constitueix l'única alternativa present. Com es pot veure a la figura 4 la mesura d'aquest horitzó fins a distàncies cosmològiques (corriments al vermell  $z$  grans) requereix precisament poder estudiar els raigs gamma còsmics al rang d'energies encara inexplorat. Amb aquestes mesures ha de ser possible tant la determinació de la densitat d'aquest fons extragalàctic com la determinació dels paràmetres cosmològics fonamentals.

- **L'estudi de l'origen de les explosions de raigs gamma (*gamma ray bursts*)**, violents fenòmens extremament energètics descoberts fa un parell de dècades

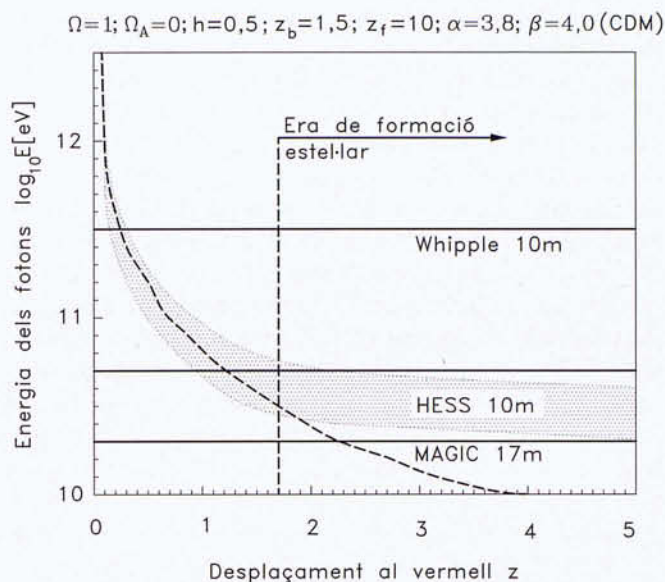


Figura 4: Predicció de l'horitzó dels raigs gamma (expressat com a corriment al vermell  $z$ ) com a funció de la seva energia. La línia correspon al model extrem en què tota l'estructura de l'Univers apareix de cop al començament mentre que la banda correspon a models més realistes, que ajusten la densitat observada d'estrelles com a funció del corriment al vermell

pels satèl·lits militars americans VELA en el marc de la supervisió del compliment dels tractats de no-prolifерació d'armes nuclears, i que van ser desclassificats i fets públics a la comunitat científica durant la dècada passada. La uniformitat de la distribució espacial observada, així com la detecció amb poc retard d'alguna d'aquestes explosions també amb telescopis òptics, ha permès determinar que el seu origen és fonamentalment cosmològic. Des de llavors, han aparegut multitud de teories per tal d'explicar-los: des d'explosions d'hipernoves fins a l'anihilació de partícules supermassives relacionades amb defectes topològics del buit originats durant les transicions de fase produïdes després del Big Bang. Per tal de discernir entre tots els models proposats cal tenir més dades i, molt fonamentalment, fer observacions en el rang de les altes energies.

- **El test d'efectes gravitatoris a nivell quàntic**, com són les relacions de dispersió que prediuen que la velocitat de propagació dels gamma al buit, a causa de l'estructura quàntica de l'espai-temps, sigui funció de la seva energia. Aquestes relacions apareixen en la major part d'intents de casar la gravitació amb la teoria quàntica, un tema teòric completament obert actualment. Utilitzant transitoris de curta durada provinents de fonts amb violentes variacions a distàncies cosmològiques com AGN o *gamma ray bursts* es pretén observar la diferència en temps d'arribada dels senyals com a funció de l'energia dels gamma per tal d'acotar l'escala de la gravitació quàntica.



• **La recerca de senyals produïts per la anihilació de matèria fosca (*dark matter*) en el nucli de la nostra galàxia.** Avui dia, diferents observacions coincideixen a indicar que la part fonamental de la matèria que forma el nostre Univers és d'un tipus absolutament diferent de la que forma la matèria que coneixem (que anomenem *bariònica*). Aquesta matèria no bariònica, de la qual només detectem els efectes gravitatoris, ha d'estar composta per partícules molt massives que interaccionen molt feblement (WIMP: *weakly interacting massive particles*). Un dels candidats favorits actualment són els neutralinos, les partícules més lleugeres i estables predites pels models supersimètrics de física de partícules més plausibles (models amb R-paritat on existeix un LSP o *lightest supersymmetric particle*). Com a resultat de la seva infructuosa recerca en els acceleradors de partícules, sabem que els neutralinos han de tenir masses per sobre dels 50 GeV. Es tracta de partícules neutres que són fermions de Majorana (són les seves pròpies antipartícules) i per tant es poden anihilar entre ells i produir parelles de raigs gamma d'alta energia. S'espera poder veure senyals d'aquestes línies d'anihilació a les regions on la densitat de WIMP podria ser màxima, com per exemple el nucli de la nostra galàxia.

Aquests estudis constitueixen simplement un exemple del potencial d'una instal·lació per a l'observació dels raigs gamma d'alta energia com MAGIC, i la seva discussió més detallada, així com una enumeració exhaustiva de totes les idees addicionals que s'han proposat, s'escapa de l'abast d'aquest article.

En qualsevol cas val la pena insistir en per què l'observació de fonts en el rang d'energia inexplorat (de 10 GeV a 300 GeV) és tan important: a part del fet que hi ha casos on sabem que en aquesta regió és on s'espera el límit d'emissió (pulsars, WIMP, ...), és en aquesta regió on l'Univers passa de ser opac a ser transparent als raigs gamma (figura 4) i per tant on tot un munt de noves fonts i nous fenòmens capaços de produir raigs gamma està esperant ser observat.

## La tècnica dels telescopis Cherenkov

Com en qualsevol experiment, en la detecció de raigs gamma còsmics el repte experimental és la discriminació del senyal per damunt del soroll. En aquest cas, com s'ha explicat abans, en els telescopis Cherenkov el senyal és la llum que prové de la radiació Cherenkov emesa per les partícules carregades de les cascades electromagnètiques produïdes en la interacció del raig gamma amb l'atmosfera. Aquesta actua com un calorímetre: produint una quantitat de llum proporcional a l'energia del gamma. Aquesta llum, correguda completament a l'espectre visible pels efectes combinats de l'absorció a la capa d'ozó i les interaccions Rayleigh i Mie amb l'atmosfera arriba a la superfície com un disc uniforme d'uns 120 metres de radi en un flaix d'uns pocs nanosegons ( $10^{-12}$  se-

gons) de duració. L'efecte focalitzador de l'atmosfera i les distribucions laterals de llum predites per acurades simulacions es mostren a les figures 5a i 5b.

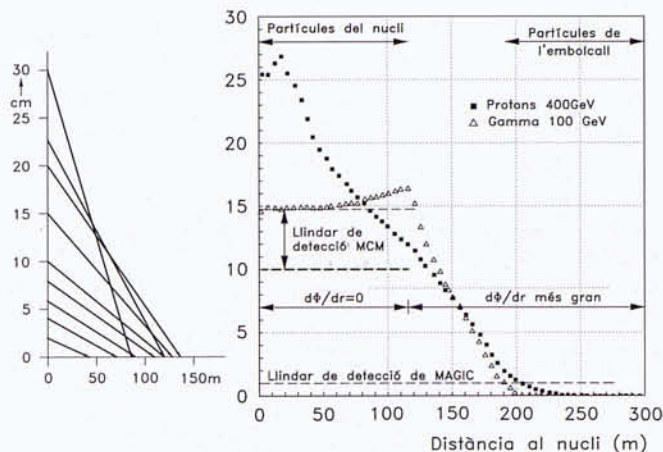


Figura 5: Esquerra: representació esquemàtica de l'efecte focalitzador de l'atmosfera sobre la radiació Cherenkov degut al gradient exponencial de densitat. Dreta: densitat de llum Cherenkov a 2.200 metres d'alçada, com a funció de la distància a la direcció del raig còsmic incident per a gamma (triangles) i protons (quadrats)

Les fonts de soroll previsibles són les següents:

- D'una banda la llum observable al cel nocturn (*light of the night sky*), bé sigui difusa (deguda a estrelles molt febles, a fluorescència, a reemissió a l'aire o a pol·lució lluminosa d'origen humà), bé sigui puntual (deguda a l'existència d'estrelles brillants en el camp d'observació del telescopi). Aquesta contaminació es redueix dràsticament dissenyant la càmera del telescopi amb una pixelització molt fina i uns fotosensors molt ràpids, de manera que la decisió de guardar les imatges (*trigger*) faci servir una finestra de temps de coincidència d'uns quants píxels molt estreta.

- D'altra banda els altres raigs còsmics (majoritàriament protons) que, amb fluxos fins a tres ordres de magnitud més grans, produeixen també flaixos Cherenkov. En aquest cas l'única manera de reduir la contaminació és explotar al màxim la diferència que s'espera observar a les imatges pel fet que els protons generen cascades hadròniques, més penetrants i alhora menys col·limades i uniformes que les electromagnètiques (vegeu les figures 5b i 6) i en què, quan el telescopi apunta a una font de raigs gamma, aquests arriben en direccions paral·leles a l'eix òptic, mentre que els protons arriben en direccions uniformement distribuïdes a l'angle sòlid per causa de la deflexió deguda als camps magnètics espacials. Aquesta segona característica es posa de manifest fent una anàlisi de la imatge en termes dels anomenats *paràmetres de Hillas*, un conjunt de variables que ajusten la imatge a una distribució el·líptica de llum on, per a cascades paral·leles a l'eix òptic, l'el·lipse apunta al cen-



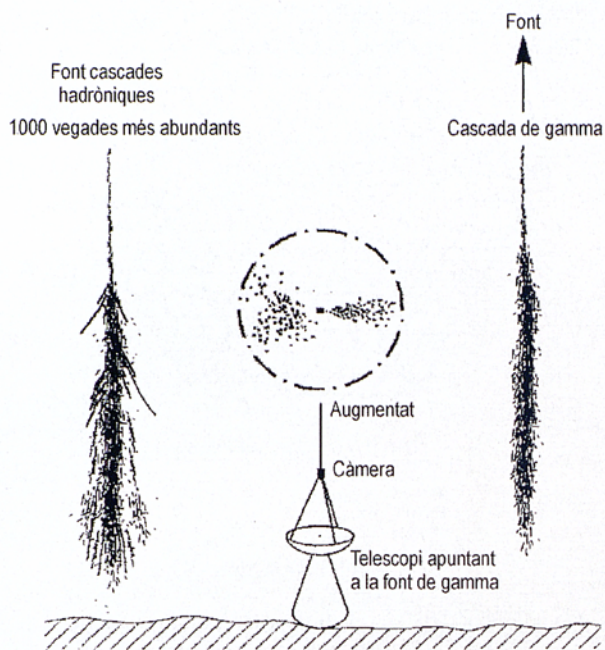


Figura 6: Visió esquemàtica de les imatges a la càmera d'un telescopi Cherenkov de la llum provinent de cascades originades per raigs gamma (electromagnètiques) i per protons còsmics (hadròniques) paral·lels a l'eix del telescopi

tre de la càmera (figura 7). L'existència d'aquesta informació a les imatges és el motiu pel qual, malgrat l'enorme contaminació potencial deguda als raigs còsmics, aquesta tècnica ha estat exitosa, i és probablement el motiu pel qual tècniques alternatives que no disposen d'aquesta eina d'anàlisi i rebuig, donen resultats inconclusius.

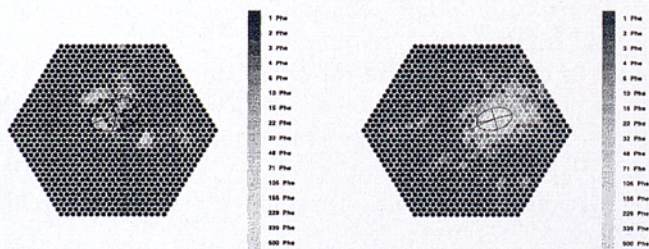


Figura 7: Simulació de Montecarlo de les imatges produïdes per protons de 400 GeV (esquerra) i raigs gamma de 400 GeV (dreta). Està sobreimpresa l'el·lipse de Hillas per als dos casos, que mostra les diferències en orientació i mida

## El telescopi MAGIC

El telescopi MAGIC té com a objectius fonamentals:

- Aconseguir un llindar d'energia de detecció molt baix, que permeti cobrir el rang inexplorat d'energies de 10

GeV a 300 GeV, i que permeti el solapament amb les observacions fetes pels satèl·lits i per la generació anterior de telescopis Cherenkov, cosa que ha de permetre la intercalibració dels dos tipus d'instruments, una qüestió fonamental encara pendent.

- Aconseguir una gran sensibilitat al flux, mantenint una àrea efectiva gran per tal de ser capaç de detectar un gran nombre de fonts, condició fonamental per ser capaços de distingir el que són característiques específiques de cada font del que són fenòmens generals més fonamentals.
- Aconseguir una estructura lleugera i de reposicionament ràpid, per tal de poder fer seguiment dels *gamma ray bursts* un cop es rebí la notificació per part dels satèl·lits que fan una vigilància continuada de tot el cel.
- Aconseguir un temps actiu tan gran com sigui possible, i que pugui observar també durant nits amb lluna i a alts angles zenit, per tal de poder seguir amb les mínimes interrupcions l'evolució temporal de les fonts.

Tot això mantenint, és clar, un cost baix (uns 3,5 milions d'euros) i un temps de construcció curt (uns dos anys i mig). La ubicació escollida és l'Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), a l'illa de La Palma, a les Canàries (28,75° N, 17,9° W, 2.326 m asl), al sector on els telescopis HEGRA, uns dels més fructífers durant la dècada passada, es troben encara en funcionament (figura 8). MAGIC és actualment una col·laboració internacional formada per més de 50 físics de 12 instituts d'arreu del món, on els laboratoris principals són el Max-Planck-Institut (MPI) de Munic, l'Institut de Física d'Altes Energies (IFAE) de Barcelona i l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) de Pàdua.

El concepte de MAGIC és el d'un telescopi reflector amb distància focal igual al diàmetre del reflector ( $f/d = 1$ ) i una obertura angular de 4°. Els elements clau del seu disseny són, d'una banda, el reflector, de 17 metres de diàmetre i de l'altra, la càmera al pla focal, amb fotosensors ultraràpids i amb una alta eficiència quàntica (probabilitat que un fotó incident generi un fotoelectró). Es pot trobar una descripció exhaustiva i detallada de tots els elements i sistemes del telescopi al *Technical design report* citat a la bibliografia, però en els paràgrafs següents explicarem breument els conceptes fonamentals que fan del disseny un desenvolupament pioner en el seu camp.

## El reflector MAGIC

Per tal de recollir la màxima quantitat de llum Cherenkov, el reflector òptic de MAGIC serà el més gran que s'ha construït fins ara: tindrà 17 metres de diàmetre (un compromís entre cost, requisits mecànics i qualitat òptica). Tindrà forma parabòlica i els seus 236 m<sup>2</sup> de superfície estaran compostos per panells de 50×50 cm<sup>2</sup> de superfície construïts amb alumini, polits amb diamant i recoberts de protecció contra la intempèrie. Aquesta



tecnologia ha estat posada a prova durant l'R+D per MAGIC a un dels telescopis de HEGRA amb uns resultats excel·lents.

Cada panell disposa d'un sistema elèctric d'escalament per evitar la deposició de vapor d'aigua i de gel, i d'un sistema mecànic controlable remotament per ajustar-ne l'orientació. Fent servir feixos làser instal·lats a cada panell, l'orientació dels panells serà contínuament ajustada en temps real (òptica adaptativa) per tal de compensar les deformacions mecàniques i assegurar la qualitat òptica (figura 8).

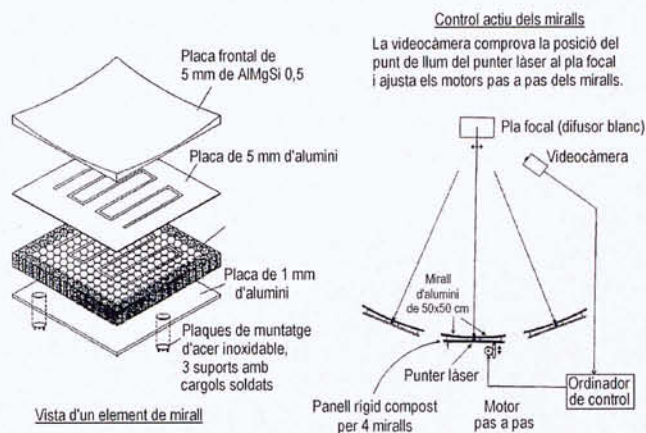


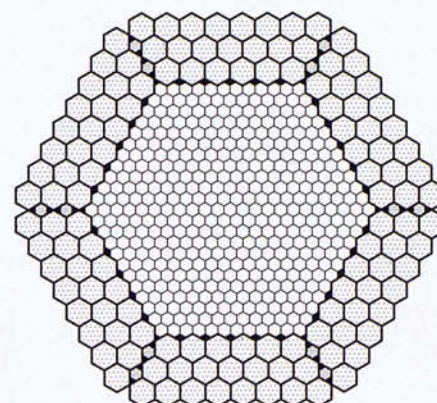
Figura 8: Visió esquemàtica de l'estructura d'un dels miralls de MAGIC i del sistema actiu d'orientació

Aquest reflector estarà muntat sobre una estructura lleugera construïda amb tubs de fibra de carboni amb un pes total del conjunt de menys de deu tones. L'objectiu és poder orientar el telescopi cap a qualsevol direcció del cel en menys de 30 segons per tal de poder seguir els *gamma ray bursts*.

## La càmera MAGICa

Al pla focal del reflector hi va instal·lada una càmera d'alta granularitat (pels estàndards Cherenkov). L'objectiu és poder fer un bon rebuig dels senyals produïts pels protons còsmics, una bona supressió del fons causat per la llum nocturna i aconseguir una bona resolució angular. En qualsevol cas, les fluctuacions estadístiques en la producció de la cascada electromagnètica que origina el flaix Cherenkov fan inútil una granularitat extrema, i una optimització fruit de simulacions de Montecarlo detallades dona com a resultat l'estructura mostrada a la figura 9. El disseny i la construcció de la càmera són responsabilitat de l'IFAE de Barcelona.

A la part central, que cobreix fins a  $2,5^\circ$ , hi ha 397 fotosensors de  $0,1^\circ$  de diàmetre, i a la part externa, que cobreix fins a  $4^\circ$ , hi ha 126 fotosensors de  $0,2^\circ$  de diàmetre. La part central és la que proporciona la informació més valuosa i la que es fa servir per decidir si la imatge s'ha de guardar (*trigger*) i, per tant, és important que la gra-



### Nombre de píxels

Zona central	397
Píxels externs	126
Píxels addicionals	12
Nombre total de píxels	535

- Regió central (11 anells + píxel central)
- Anells externs (píxels de mida doble)
- Píxels addicionals

Figura 9: Visió esquemàtica de l'estructura de la càmera de MAGIC

nularitat sigui més alta.

Els fotosensors han de complir les condicions següents:

- Tenir una alta eficiència quàntica, per tal de poder veure senyals petits.
- Ser sensibles a la llum vermella, per tal de poder observar a alts angles zenit.
- Ser capaços de separar fotoelectrons individuals, per tal de poder fer un calibratge absolut de l'aparell.
- Tenir una resposta ultraràpida, de l'ordre del nanosegon, per tal de poder rebutjar la contaminació deguda a llum contínua.
- Poder operar sense danyar-se amb llum de lluna. L'estratègia per aconseguir-ho és fer servir fotosensors amb guany intern moderat, però soroll molt baix de manera que la part fonamental del guany és pugui implementar en el conjunt de circuits electrònics externs (preamplificadors).

En el moment en què MAGIC es va concebre (fa ara quatre anys) no existien fotosensors amb totes aquestes característiques, i per això un dels R+D fonamentals que es va iniciar va ser justament l'estudi i desenvolupament de nous fotosensors capaços de complir aquests requeriments a un cost acceptable. Fruit d'aquests estudis, s'han desenvolupat diferents fotosensors i tècniques que suggereixen progressar en tres fases:

1. En una primera fase («càmera clàssica»), fer servir tubs fotomultiplicadors (PMT) especialment dissenyats, i produïts en col·laboració amb la companyia britànica



Electron Tubes per a aquesta aplicació. Aquests tubs (de 30 mm de diàmetre per als fotosensors interns i 60 mm per als externs) tenen les característiques especials següents:

- Són capaços de separar fotoelectrons individuals.
- Tenen només sis dínodes, amb la qual cosa estan optimitzats per treballar a un guany baix (20.000) i poden treballar amb llum plena.
- El fotocàtode és hemisfèric i per tant el fotoelectrons són isocrons que permeten senyals molt ràpids.
- La màxima eficiència quàntica arriba fins al 25% i, atès que el fotocàtode és hemisfèric, es pot encara augmentar fent servir un concentrador de llum (*Winston cone*) amb un disseny intel·ligent que permeti que els fotons tinguin més d'una possibilitat de travessar el fotocàtode (figura 10).

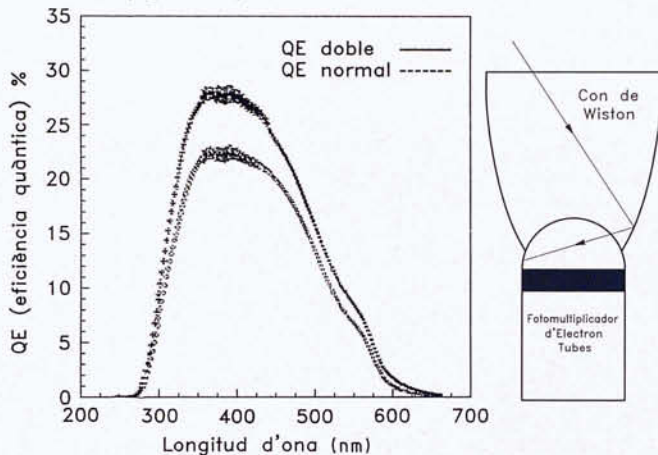


Figura 10: Esquerra: guany a l'eficiència quàntica (QE) degut al doble encreuament. Dreta: configuració que permet als fotons travessar dues vegades el fotocàtode

2. En una segona fase, es vol fer servir fotomultiplicadors híbrids (HPD) amb fotocàtode de GaAsP. Aquests dispositius funcionen accelerant electrostàticament els fotoelectrons a potencials d'uns quants kilovolts i fent-los impactar sobre un fotodíode que actua com a ànode, on l'energia cinètica adquirida genera un gran nombre d'electrons secundaris (figura 11). Fins fa un parell d'anys només els produïa una companyia dels EUA per a aplicacions militars de visió nocturna, i no estaven a l'abast de la comunitat científica. Els avantatges d'aquests dispositius són que tenen eficiències quàntiques de fins al 40% en el rang de longituds d'ona entre 330 i 650 nm, i tant la seva velocitat com el seu guany i la capacitat per separar fotoelectrons individuals estan dintre dels requeriments de MAGIC. L'R+D dut a terme a la col·laboració MAGIC ha permès estendre la sensibilitat a un rang més ampli de longituds d'ona i transferir la tecnologia a la companyia japonesa Hamamatsu, que ara els comença a comercialitzar, si bé encara a un preu inabastable pel pressupost de MAGIC, però que previsiblement baixarà d'ací a uns anys.

3. Com a darrera fase, s'ha estudiat la possibilitat

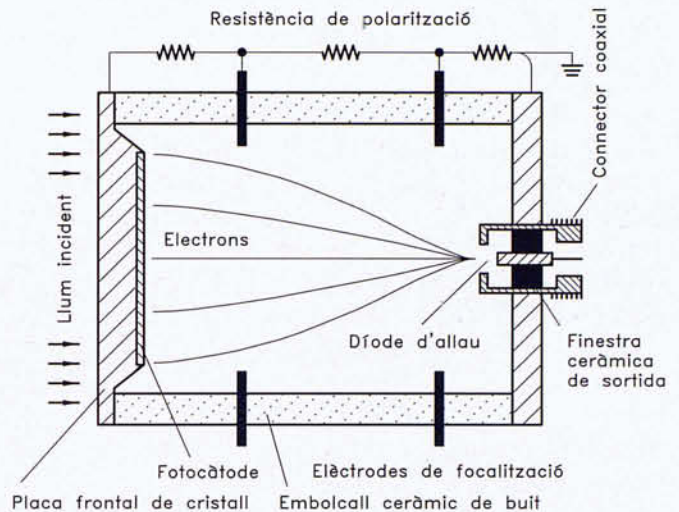


Figura 11: Visió esquemàtica del funcionament d'un fotomultiplicador híbrid (HPD)

de construir una càmera completament amb dispositius d'estat sòlid, fent servir fotodíodes d'allau (APD) com a fotosensors. Els APD fets servir en el règim lineal són dispositius d'ús molt recent en l'àmbit científic, que tenen com a virtut fonamental una gran eficiència quàntica, que supera el 80% i és uniforme en tot l'espectre de longituds d'ona rellevants. Amb aquests dispositius es podria fer una càmera molt eficient, molt compacta i amb una granularitat més gran. Desafortunadament, a causa de les fluctuacions intrínseques de l'amplificació per allau (*excess noise factor*), el soroll és molt gran i en limita l'ús per a petits senyals com els que ens interessin. La figura 12 mostra una comparació del comportament dels tres tipus de fotosensors esmentats. Malgrat això, l'R+D engegada a MAGIC ha permès entendre el problema en profunditat i proposar diferents alternatives per superar-lo que, amb l'adequat desenvolupament tecnològic, haurien de permetre crear, en el termini d'uns quants anys, una nova generació de fotosensors d'estat sòlid capaços de complir amb escriure els nostres requeriments i els de moltes altres aplicacions.

L'electrònica de la càmera també ha requerit una intensa R+D, ja que per tal de cobrir les necessitats de MAGIC havia de ser ultraràpida (per sobre del GHz) i de soroll molt baix, i conservar un rang dinàmic de quatre ordres de magnitud per tal de permetre fer observacions des de 10 GeV a més de 50 TeV. Això s'ha aconseguit a un cost raonable aprofitant els desenvolupaments tecnològics recents per l'explosió de la telefonia mòbil.

Per tal de minimitzar el pes dels cables, MAGIC farà transmissió dels senyals analògics de la càmera amb fibra òptica, per la qual cosa ha calgut desenvolupar un avançat conjunt de circuits amb díodes làser de cavi-



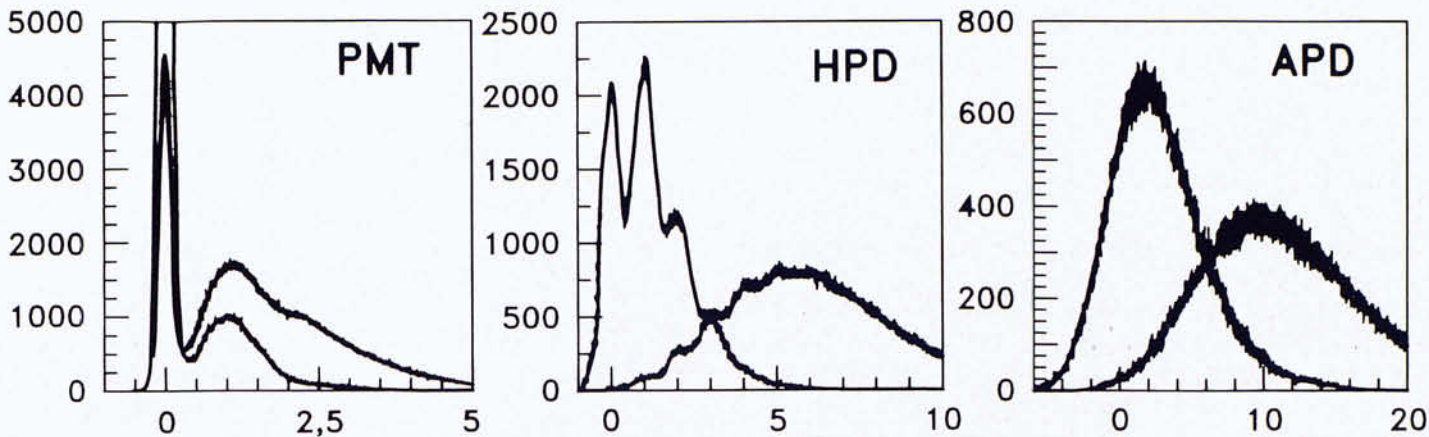


Figura 12: Comparació dels espectres de fotoelectrons produïts per feixos de 3 i 15 fotons en els tres tipus de fotosensors considerats per a la càmera de MAGIC

tat vertical (VCSEL) especialment dissenyats per a les nostres necessitats de velocitat, soroll i rang dinàmic.

Finalment, per tal de poder aprofitar al màxim la informació de les imatges per a la separació dels gamma i els hadrons, el senyal serà digitalitzat amb FADC (convertidors d'analogic a digital ultraràpids) a 500 MHz desenvolupats per la nostra col·laboració i connectables al bus PCI dels PC comercials.

### Característiques i sensibilitat de MAGIC

La taula 1 recull en detall els paràmetres fonamentals que caracteritzen la resposta que s'espera que pugui assolir MAGIC. Aquests paràmetres han estat obtinguts amb simulacions de Montecarlo detallades pel disseny base de MAGIC, que inclou una càmera feta amb HPD i assumeix les tècniques d'anàlisi aplicades als telescopis actuals, que sens dubte es podran millorar substancialment a MAGIC. Tots els paràmetres avantatgen de manera notòria les característiques dels millors telescopis actuals.

Per a la càmera amb fotomultiplicadors que s'instal·larà a la primera fase de l'experiment, la resposta en alguns paràmetres serà lleugerament pitjor, com es pot veure a les tres darreres files de la taula 1. La figura 13 mostra una comparació de la sensibilitat en flux integrat que assolirà MAGIC en comparació amb altres instal·lacions en operació o en projecte. MAGIC cobrirà el rang d'energies entre 10 GeV i  $10^5$  GeV i serà l'instrument més sensible de tots els existents i proposats. En el rang d'energies encara inexplorat, tindrà sensibilitats de més d'un ordre de magnitud millors que les dels satèl·lits de nova generació, com el GLAST, a un cost cent vegades menor, i amb l'observació a alts angles zenit podrà competir amb els millors projectes alternatius proposats, com per exemple la xarxa de sis telescopis VERITAS que operarà a partir del 2005 a Arizona (EUA).

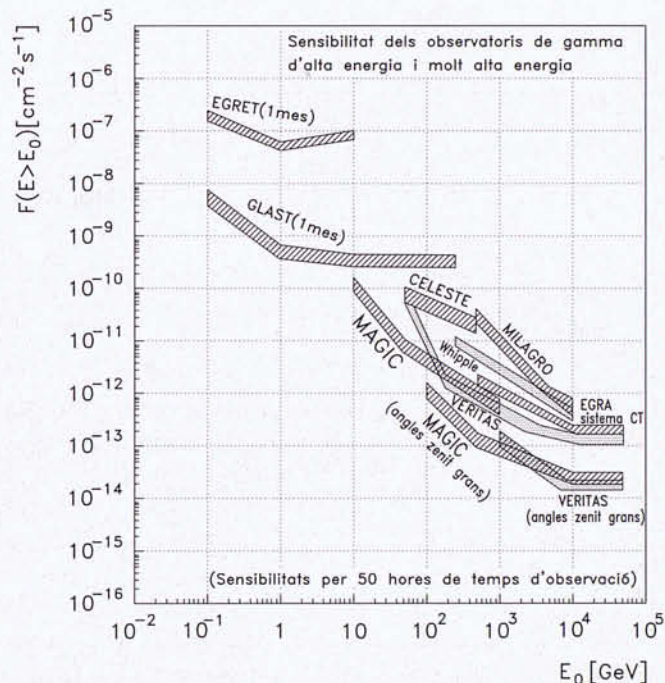


Figura 13: Sensibilitat al flux integrat com a funció de l'energia dels raigs gamma còsmics pels observatoris existents o proposats més importants

### Situació actual i plans

El projecte MAGIC i tot l'R+D que ha comportat es va iniciar fa uns cinc anys, però es va començar a consolidar el 1998 quan un *Technical design report* el va definir detalladament. Aquell mateix any, els instituts involucrats es van comprometre a iniciar les gestions per tirar-lo endavant mitjançant la redacció d'una *letter of intent*. Al final de 1998, una comissió internacional d'experts, nomenada per la direcció del Max-Planck-Institut, va revisar a consciència el projecte, hi va donar un judici extremadament positiu i va recomanar de portar-lo a



Paràmetre	Valor	Comentaris
Llindar de detecció (= pic del flux diferencial)	8–10 GeV ( $\theta_z < 20^\circ$ )	Quàdruple coincidència de píxels veïns amb $\geq 7$ fotoelectrons
Llindar físic de detecció	15 GeV ( $\theta_z < 20^\circ$ )	$\gamma$ seleccionats amb $\geq 80$ fotoelectrons per imatge i diversos filtres de tall
Àrea de col·lecció per a $\gamma$	5.000 m <sup>2</sup> ( $\theta_z < 20^\circ$ ) 20.000 m <sup>2</sup> 90.000 m <sup>2</sup> 300.000 m <sup>2</sup>	10 GeV 20 GeV 100 GeV 1 TeV (àrea ampla de detecció)
Eficiència de selecció $\gamma$ després de l'anàlisi	45–70 %	
Rebuig dels hadrons $Q(\gamma/h \text{ rebuig}) = f(E)$	$\approx 200$ $Q \approx 2 E^{0,4}$ , $E$ en GeV	$\geq 10$ GeV energia $\gamma$ estimació per $E \leq 500$ GeV
Resolució en energia $dE/E$	$\approx 50$ % $\approx 20$ %	a 10 GeV a 100 GeV
Resolució en energia com a funció de l'energia $dE/E = g(E)$	$\approx \frac{180\%}{E^{0,45}}$ ( $E$ en GeV)	Estimació; paràmetre d'impacte $< 130$ m fins a 1 TeV
Resolució angular a cada cascada	$\Delta\theta_{\text{transversal}} \approx 0,05^\circ$ $\Delta\theta_{\text{longitudinal}} \approx 0,2^\circ$	200 GeV, escala aproximadament amb $1/\sqrt{E} + \text{constant}$ (estimació aproximada)
Rebuig dels muons	molt alt	Les imatges dels $\mu$ són part de les imatges dels hadrons
Rebuig dels electrons còsmics	$\geq 12$	Per a cada camp de visió fixat
Sensibilitat	$6 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Font amb un espectre d'energia com la del fons de raigs còsmics, 5 desviacions estàndard, 50 h d'observació de la font, 20 GeV de llindar de detecció
Precisió de localització de fonts puntuals	$\leq 0,02^\circ$	Conjunt estadístic gran
Límit de separació de dues fonts properes	$0,2^\circ$	Fonts d'igual intensitat ( $E \geq 10$ GeV)
Llindar de detecció en presència de llum de Lluna	$\approx 30$ GeV ( $\theta_z < 20^\circ$ )	Lluna al 66 %, font a $> 30^\circ$ de distància angular de la Lluna
Llindar físic de detecció en presència de llum de Lluna	$\approx 45$ GeV ( $\theta_z < 20^\circ$ )	
Llindar de detecció del MAGIC clàssic	$\approx 30$ GeV ( $\theta_z < 20^\circ$ )	Fotomultiplicadors clàssics
Llindar físic de detecció del MAGIC clàssic	$\approx 30$ GeV ( $\theta_z < 20^\circ$ )	$\geq 80$ fotoelectrons imatge
Sensibilitat del MAGIC clàssic	$8 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	5 desviacions estàndard, 50 h d'observació de la font, 25–30 GeV de llindar de detecció

Taula 1: Els principals paràmetres que caracteritzen les qualitats del telescopi MAGIC. Excepte a les tres darreres files, els paràmetres han estat calculats assumint una càmera amb fotomultiplicadors híbrids

terme al més aviat possible.

A partir d'aquell moment, l'R+D per als diferents components ha deixat pas a la construcció de prototipus, i després, a l'inici de la construcció final dels diferents elements. L'últim pas necessari, que era l'acord amb l'Institut de Astrofísica de Canarias, entitat gestora de l'Observatorio del Roque de los Muchachos, per iniciar la construcció va ser signat formalment el juny d'aquest any.

Actualment, d'entre els dotze grups participants n'hi ha un de Madrid, de la Universidad Complutense, que ja ha participat en l'experiment HEGRA, i dos de catalans: d'una banda, com ja s'ha esmentat, un grup de l'IFAE

responsabilitzat, entre altres coses, del disseny i la construcció de la càmera i, d'altra banda, un grup de la Unitat de Radiacions del Departament de Física de la UAB, amb una llarga experiència en física dels raigs còsmics. S'espera que el finançament espanyol del projecte provingui del *Plan Nacional de Física de Altas Energías*, que és qui ha finançat la participació a HEGRA i tota l'R+D per a MAGIC dut a terme fins avui.

L'objectiu de la col·laboració és poder fer observació de la «primera llum» a l'estiu del 2001 i que sigui així la primera instal·lació de la nova generació a observar en aquest domini inexplorat (figura 14).



## Referències

- HOFFMAN, C. M., SINNIS, C., FLURY, P. i PUNCH, M., Gamma-ray astronomy at high energies, *Reviews of Modern Physics*, vol. **71**, núm. **4**, 897-936 (1999).
- ONG, R., Very High-Energy Gamma-Ray Astronomy, *Phys. Rep.*, **305** (3-4), 93-202 (1998).
- BARRIO, J. A. et al., The MAGIC Telescope: Design study for the construction of a 17 m Cherenkov telescope for Gamma-Astronomy above 10 GeV, *Technical design report, MPI-PhE*, **98-5**, (1998).
- PETRY, D., The MAGIC telescope - Prospects for Gamma Ray Bursts research, *A&AS*, **138**, 3 (1999).
- BLANCHOT, G. et al., Performance of a Fast Low Noise Front-End Preamplifier for the MAGIC Imaging Cherenkov Telescope, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **46**, 800-805 (1999).
- MARTÍNEZ, M. et al., Constraints in using APDs in air Cherenkov Telescopes for gamma-astronomy, *Nucl. Inst. Meth. A*, **442**, 209-215 (2000).
- OSTANKOV, A. et al., A study of the new hemispherical 6-dynodes PMT from electron tubes, *Nucl. Inst. Meth. A*, **442**, 117-123 (2000).

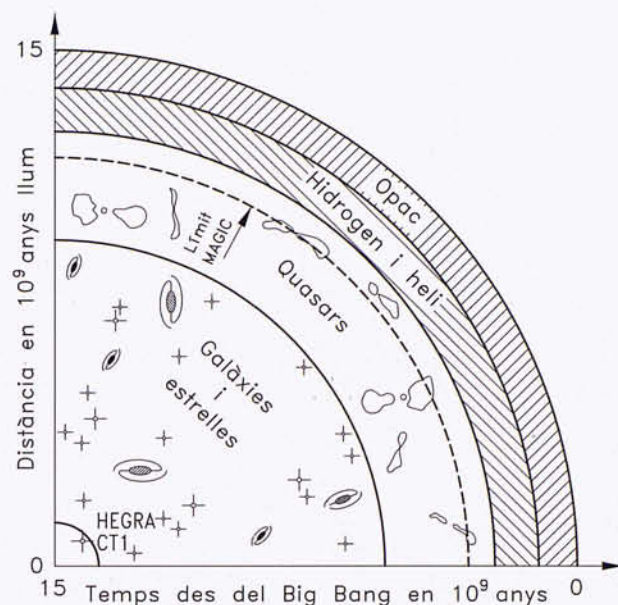


Figura 14: La història de l'Univers tal com ha estat explorada pels telescopis Cherenkov actuals i com podrà ser explorada per MAGIC

(Ve de la pàgina 1)

Un dels elements de l'orientació de l'ensenyament de la física hauria de ser la seva base experimental i, per tant, s'haurien de potenciar els laboratoris dels instituts, no solament amb mitjans materials, sinó sobretot amb personal de suport tècnic. L'ensenyament de la física a la secundària i al batxillerat ha d'insistir en els seus valors formatius i centrar-se en l'aprenentatge de procediments de treball.

Pel que fa a la qüestió de la transició de l'institut a la universitat, el primer que constataren les persones reunides a Menorca fou la desconexió real entre el professorat de secundària i batxillerat i el de la universitat. L'única connexió existent es circumsciu, gairebé, a la preparació dels exàmens d'accés a la universitat, la qual cosa sembla molt insuficient i no adequada, ja que un coneixement mutu més ampli, no reduït a un examen, ajudaria a aprofundir en moltes coses. Per exemple, es pensa en la possibilitat de col·laborar en l'elaboració de materials didàctics; o en la col·laboració i orientació pel que fa als projectes de recerca que els alumnes de batxillerat han de fer.

Tot sembla indicar que seria necessària una plataforma conjunta de diàleg i de treball entre professors de física tant d'universitat o dels cicles formatius, com de secundària, siguin específicament de física o de tecnologia. La Societat Catalana de Física, implicada com ja està en el millorament i l'extensió de l'ensenyament de la física, haurà d'emprendre accions segons les recomanacions de les Trobades de Menorca 2000. (Les recomanacions les podeu trobar en la Crònica de les Trobades en aquest mateix número de la Revista.)