

● www.lescienze.it

le Scienze

edizione italiana di **SCIENTIFIC AMERICAN**



Misterioso
assassinio
nel Mesozoico



Metano, piante
e riscaldamento
della Terra

Energia oscura

UNA FORMA
SCONOSCIUTA
DI ENERGIA
HA IN PUGNO
IL DESTINO
DELL'UNIVERSO



POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - MILANO
rivista mensile - numero 464 - aprile 2007 - € 3,90



Le magie del telescopio Magic

Evoluti per il cancro?

Combustibili verdi tra mito e realtà

Le magie del telescopio Magic



CON I SUOI 17 METRI DI DIAMETRO, Magic è il più grande telescopio per raggi gamma mai costruito. Situato sul vulcano Taburiente a La Palma, nelle Canarie, è frutto di una collaborazione internazionale che conta oltre 120 ricercatori da tutto il mondo, e in particolare dall'Italia.

Buchi neri supermassicci, microquasar, resti di supernova: i telescopi Cerenkov sensibili ai raggi gamma stanno aprendo uno spiraglio sugli oggetti che popolano la regione di più alta energia dell'universo

di Alessandro De Angelis e Luigi Peruzzo

Quando un satellite segnala in tempo reale alle reti di telescopi un lampo improvviso di raggi gamma, i ricercatori di turno al rivelatore Magic verificano immediatamente che vi siano le condizioni per la rivelazione, e in tal caso decidono di accettare il segnale di allarme. Meno di 30 secondi, compreso il tempo per decidere, e il gigantesco strumento punta verso la sorgente per osservare l'evento: un'emissione energetica di breve durata, ma di grande intensità. Si tratta di fotoni dotati di energie miliardi di volte superiori a quelle della luce visibile che provengono da distanze di centinaia di milioni di anni luce.

Magic è il più grande telescopio per raggi gamma mai costruito. Situato sul cratere del vulcano Tauburiente, sull'isola di La Palma, nell'arcipelago delle Canarie, è in grado di registrare il segnale di questi fotoni nella loro interazione con l'atmosfera. Prodotti da eventi violenti a energie molto elevate, come l'accrescimento di buchi neri supermassicci al centro delle galassie, i raggi gamma di altissima energia forniscono informazioni dirette e preziose sui processi che li hanno generati e sulla fisica fondamentale in condizioni estreme.

Alle sorgenti dei raggi gamma nell'universo

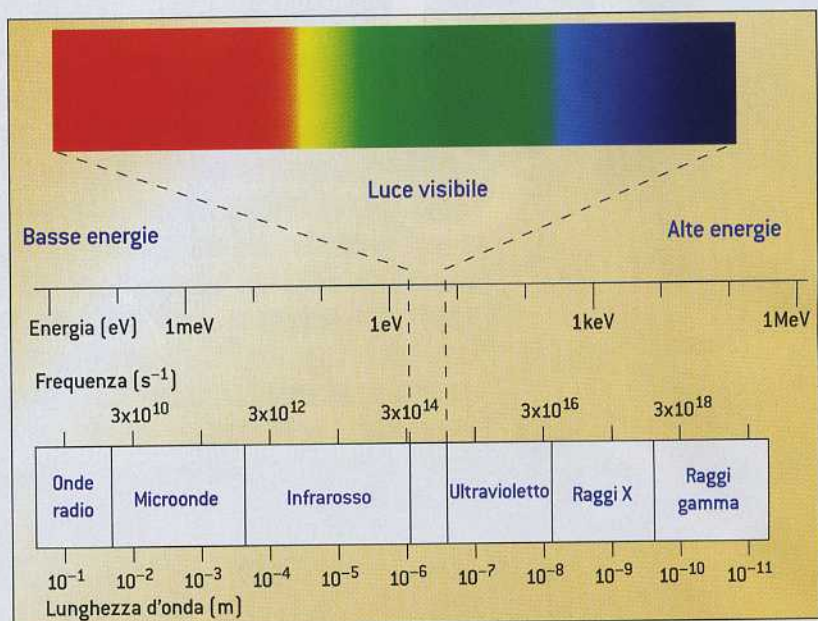
Da migliaia di anni l'astronomia si fonda sull'osservazione di onde-particelle elettromagnetiche, i fotoni, registrati dallo strumento più naturale per gli esseri umani: l'occhio. Solo una minima parte dei fotoni è però visibile dall'occhio: sono invisibili, per esempio, le microonde a basse energie e i raggi X e gamma ad altissime energie. Per poter osservare i fenomeni che caratterizzano le emissioni gamma, l'astronomia e l'astrofisica hanno sviluppato strategie e strumenti sempre più raffinati, allargando i propri orizzonti di studio e interagendo fortemente in modo sinergico. È lo studio combinato dei fenomeni a diverse energie, infatti, che aiuta gli scienziati a tracciare il quadro complesso che sta dietro le sorgenti astrofisiche di alta energia.

L'emissione in banda ottica, ovvero nella regione visibile dello spettro, è caratteristica di sorgenti come le stelle, a temperature superficiali dell'ordine di qualche migliaio di gradi, ed è spiegabile con fenomeni termici. La radiazione X, che ha energie migliaia di volte più alte di quelle della luce visibile, è caratteristica di interazioni elettromagnetiche all'interno delle sorgenti. Lo spettro dei raggi gamma parte da energie centinaia di migliaia di volte superiori a quelle della luce visibile all'occhio umano: la regione di altissime energie si estende convenzionalmente a partire da una decina di GeV (un GeV, gigaelettronvolt, è all'incirca l'energia corrispondente alla massa di un protone) ed è illimitata superiormente.

L'emissione gamma può essere spiegata da particolari processi elettromagnetici e da processi come quelli tipici delle interazioni forti. Alla base dell'emissione di alte energie c'è il motore dell'universo, l'energia gravitazionale. Parte di questa energia è convertita in radiazione elettromagnetica attraverso processi come la radiazione di sincrotrone, che genera raggi X in seguito all'accelerazione di elettroni nei campi magnetici stellari. Questi fotoni possono a loro volta intera-

gire con elettroni accelerati, e «rimbalzare» con energie ancora più alte, fino all'ordine del migliaio di GeV e oltre.

Questo meccanismo (detto meccanismo Ssc, da *Self-Synchrotron Compton*) è stato visto al lavoro da Magic, che ha rivelato spettri spiegati quantitativamente dal modello appena descritto. Una sorgente importante di radiazione a energie ancora più alte, oltre le migliaia di GeV, sembra essere legata a esplosioni di supernova in un ambiente ricco di gas interstellare (soprattutto idrogeno). L'onda d'urto generata dall'esplosione comprime violentemente il gas e accelera i nuclei di idrogeno, protoni, che ricollidano con il gas diffuso nell'ambiente circostante la stella. Questa reazione porta alla produzione di pioni neutri, particelle che decadono in fotoni gamma in tempi dell'ordine di 10^{-16} secondi. In generale la radiazione delle sorgenti gamma in funzione dell'energia E ha uno spettro di intensità decrescente come $E^{-\alpha}$, con l'indice spettrale α tipicamente compreso tra 2 e 3.

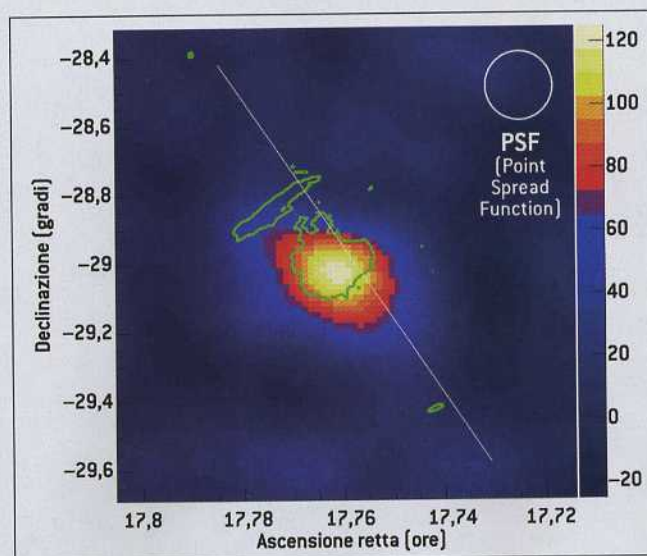


Danilo Soasi, su indicazione degli autori

I RAGGI GAMMA, terreno di indagine del telescopio Magic, sono la banda più energetica dello spettro elettromagnetico. Sotto, il centro della galassia fotografato da Magic.

In sintesi/Effetto Cerenkov

- Completato nel 2004 sul vulcano Taburiente, nell'isola di La Palma, alle Canarie, il telescopio Magic – con un diametro di 17 metri – è il più grande telescopio per raggi gamma mai costruito.
- Il principio di funzionamento di Magic, e di altri tre telescopi simili attualmente operativi, è basato sull'effetto Cerenkov, il fenomeno per cui le particelle prodotte dai raggi gamma nell'interazione con l'atmosfera, superando la velocità della luce nell'aria, generano un lampo registrabile a terra.
- Grazie ai telescopi Cerenkov, negli ultimi tre anni è stato possibile individuare un gran numero di sorgenti che emettono raggi gamma, tra cui nuclei galattici attivi, microquasar e resti di supernova. Ma questi strumenti potranno essere utili anche nella caccia alla materia oscura.



Cortesia Alessandro De Angellis e Luigi Peruzzo

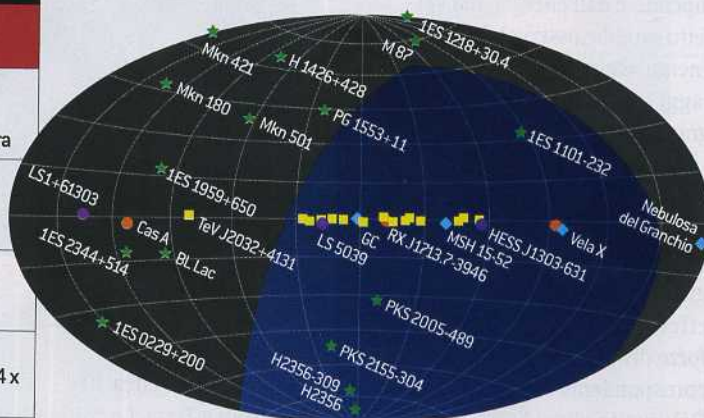


TUTTI I NUMERI DI MAGIC

Organizzazione	La collaborazione Magic è composta da Armenia, Bulgaria, Finlandia, Germania, Italia, Polonia, Spagna, Stati Uniti e Svizzera
Enti italiani	Istituto nazionale di fisica nucleare, Università di Padova, Università di Siena, Università di Udine
Località	Vulcano Taburiente a La Palma, Isole Canarie, 2250 metri sul livello del mare
Lunghezza d'onda	Raggi gamma da 50 GeV a 10 TeV (corrispondenti a lunghezze d'onda da $2,4 \times 10^{-17}$ metri a $1,2 \times 10^{-19}$ metri)
Data di completamento	2004
Caratteristiche fisiche	
Tipo di telescopio	Riflettore parabolico alto-azimutale
Diametro	17 metri
Superficie ottica	236 metri quadrati, costituita da 964 elementi riflettenti di 49,5x49,5 centimetri quadrati ciascuno
Lunghezza focale	17 metri
Meccanica	Struttura in fibra di carbonio
Massa	64 tonnellate
Tempo di riposizionamento (mezza rotazione)	22 secondi
Rivelatore focale	Sistema di 576 fotomoltiplicatori
Caratteristiche tecniche	
Campo di vista	3,6 gradi
Area efficace	6000 metri quadrati a 1 TeV
Minima intensità rivelabile a 5 deviazioni standard in 50 ore	0,02 Crab (dove un Crab è l'intensità della sorgente gamma nella Nebulosa del Granchio)
Risoluzione angolare su una sorgente	0,1 gradi
Risoluzione in energia	20% a 1 TeV (30% a 100 GeV)
Tempo di campionamento	3 nanosecondi

Un altro aspetto particolarmente interessante è legato al fatto che le stelle di massa circa dieci volte più grande di quella del Sole, terminando la loro esistenza con un'esplosione di supernova, hanno in generale vita molto breve su scala astronomica (10-20 milioni di anni), e implodono nello stesso ambiente in cui sono nate. Dato che la galassia è sostanzialmente trasparente all'emissione gamma ad altissima energia, questa radiazione giunge alla Terra inalterata. In definitiva, l'emissione gamma di altissima energia da una galassia che ospita attività di formazione stellare traccia il tasso locale istantaneo della formazione stellare.

Negli ultimi tre anni, grazie alle osservazioni compiute dai nuovi telescopi gamma, il numero di sorgenti conosciute che emettono in questa banda di energie è più che decuplicato rispetto a quanto noto in precedenza, e ora si conosce una cinquantina di emettitori. In una mappa gamma dell'universo (qui sotto) si cominciano a disegnare le strutture fondamentali: il



MAPPA DELLE SORGENTI DI RAGGI GAMMA di altissima energia (superiore a 100 GeV) nell'universo. Prima dell'avvento dei quattro grandi telescopi Cerenkov, tra i quali Magic, si conoscevano soltanto tre sorgenti di questo genere. I diversi simboli sulla mappa rappresentano diversi tipi di sorgenti: i nuclei galattici attivi (stelle in verde), resti di supernova con una stella di neutroni all'interno (o plerion, rombi in azzurro), resti di supernova a guscio (cerchi in arancione), sistemi binari (cerchi in viola) e altre sorgenti o sorgenti non identificate (quadrati in giallo).

piano della Via Lattea e le sorgenti extragalattiche. La mappa sembra ricalcare, per quanto riguarda le strutture principali, quella ottica, anche se alcuni oggetti non sembrano avere un corrispondente visibile, e sono per così dire «nuovi»; l'esplorazione è stata condotta fino a una profondità di 8 miliardi di anni luce, il limite raggiunto dalle osservazioni.

Per citare alcuni esempi di nuove sorgenti, è stata scoperta una ventina di galassie in cui un buco nero supermassiccio, pari a milioni di masse solari, si accresce inglobando i corpi stellari vicini, ed emette getti di particelle cariche e fiotti di raggi gamma. Una di queste galassie è proprio la nostra, la Via Lattea. Per fotografare l'immagine di un buco nero, per sua natura invisibile, si può sfruttare un effetto indiretto: nei collassi gravitazionali legati alle grandi masse divorate dal buco nero si generano interazioni di altissima energia, che portano all'emissione di raggi gamma. Il metodo principe consiste quindi nell'osservare l'emissione di raggi gamma nell'intorno del buco nero.

I buchi neri supermassicci si accrescono con velocità variabile: di quando in quando si osservano transizioni catastrofiche, veri e propri terremoti conseguenti a una brusca variazione della potenza di accrescimento. In questo caso si rileva una crescita improvvisa della radiazione gamma, chiamata *flare*. I *flare* da galassie lontane sono importanti sia per l'informazione che forniscono riguardo alla dinamica cosmica sia perché permettono lo studio di eventuali dipendenze del tempo di arrivo del segnale luminoso dall'energia del fotone.

Le teorie ispirate alla gravità quantistica – la recente frontiera della teoria dei campi verso l'obiettivo di unificare le forze – prevedono infatti una violazione della relatività speciale: la velocità della luce potrebbe dipendere dall'energia, ma l'effetto sarebbe osservabile solo a energie elevate come quelle dei raggi gamma e per sorgenti a grandissima distanza.

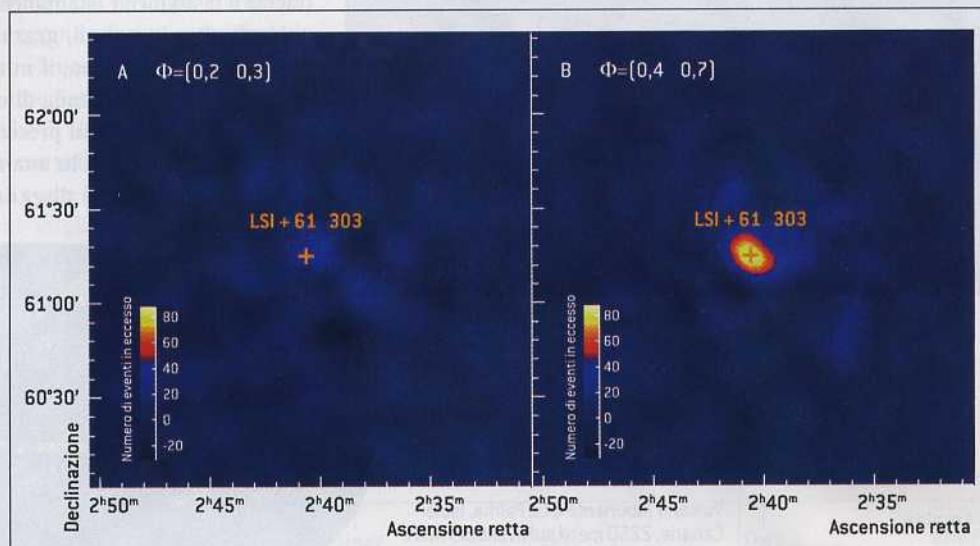
Magic sta esplorando le regioni di energia più alte mai toccate, e ha ormai una sensibilità confrontabile con l'energia alla quale si ritiene che gli effetti dell'unificazione delle forze divengano visibili, quella corrispondente alla cosiddetta «massa di Planck», pari a circa 10^{19} GeV, molto oltre i limiti degli acceleratori costruiti a Terra. Lo studio delle galassie lontane consente inoltre di misurare la quantità di luce presente nell'universo: i raggi gamma provenienti da queste sorgenti interagiscono con la luce visibile e infrarossa presente negli spazi intergalattici, sicché il loro spettro energetico si deforma durante il percorso verso la Terra.

Per quanto riguarda le sorgenti extragalattiche, Magic ha la possibilità di ricevere informazioni dalle reti di satelliti (*si veda il box a pp. 72-73*), e di reagire ad allarmi da sorgenti transienti, come i lampi di raggi gamma. Già tre volte Magic è riuscito a puntare lampi di raggi gamma durante l'emissione, anche se l'osservazione non ha dato per il momento segnali positivi alle energie rilevabili dallo strumento.

Altra interessante scoperta sono sorgenti periodiche di raggi gamma nella Via Lattea. Per la prima volta Magic ha misurato l'emissione periodica di raggi gamma da un microquasar (scoperta pubblicata nel giugno 2006 su «Science»). I microquasar, quasar in scala ridotta e con tempi di evoluzione milioni di volte più brevi, sono sistemi binari costituiti da una stella ordinaria molto più massiccia del Sole e da un oggetto compatto che può essere una stella di neutroni o un buco nero. I due oggetti sono legati gravitazionalmente, e orbitano l'uno intorno all'altro; quando sono sufficientemente vicini, l'effetto di marea può causare un improvviso trasferimento di materia dalla stella normale alla compagna compatta. Una parte dell'energia gravitazionale liberata da questo scambio si trasforma in energia meccanica, e produce getti di particelle che vengono «sparati» a una velocità prossima a quella della luce assieme a una spettacolare emissione di radiazione.

I microquasar sono ritenuti anche sorgenti di raggi cosmici carichi. Magic ha recentemente studiato uno dei circa 20 microquasar noti, LSI+61 303. Il sistema stellare binario è stato osservato a varie fasi lungo l'orbita, che ha un periodo di 26 giorni, e le variazioni dell'emissione sono risultate correlate con le variazioni orbitali, suggerendo la presenza di periodicità. Questa nuova scoperta indica che l'emissione gamma di altissima energia potrebbe essere una proprietà comune a tutti i microquasar.

Infine, il cerchio si stringe attorno alla materia oscura. Que-



Cortesia Alessandro De Angelis e Luigi Peruzzo

sta forma di materia non ancora rivelata, che costituisce circa un quarto del contenuto totale di energia dell'universo e circa il 90 per cento della sua massa, manifesta i suoi effetti gravitazionali in molteplici fenomeni astronomici, ma la sua natura è uno dei principali misteri della fisica moderna. Si pensa che la materia oscura emetta un segnale gamma caratteristico nell'intorno di punti di accumulazione, e i telescopi gamma stanno cercando questi punti. La scoperta dell'emissione gamma avrebbe una duplice valenza scientifica: da un lato risolverebbe il mistero della materia oscura, e dall'altro ne rivelerebbe la natura, confermando o smentendo le teorie sulla supersimmetria non ancora verificate (e forse non verificabili) negli esperimenti con gli acceleratori.

Una scienza in esplosione

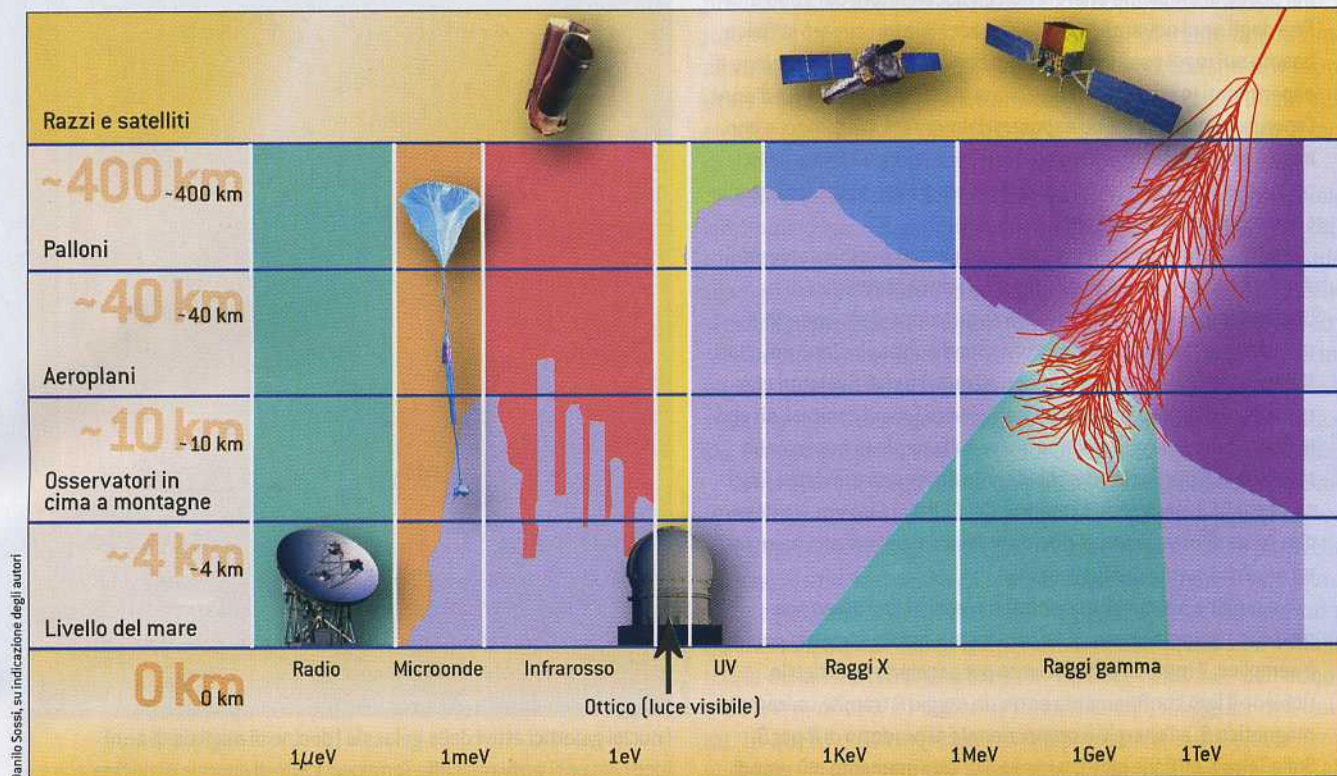
Sin dall'inizio del secolo scorso sono state evidenziate le proprietà ionizzanti della radioattività: i cosiddetti elettroscopi, i primi apparecchi utilizzati per misurare l'elettricità, tendono a perdere la loro carica se avvicinati a sostanze radioattive. La perdita di carica si osserva anche se gli elettroscopi non sono vicini a sorgenti, da cui la conclusione che esistono radiazioni ionizzanti nell'atmosfera. Nel 1912 il fisico austriaco Victor Hess e il tedesco Wolfgang Kohlhorster, salendo con palloni aerostatici, misurarono indipendentemente l'uno dall'altro la ionizzazione a differenti altezze nell'atmosfera. I loro esperimenti provarono l'esistenza di radiazioni di origine non terrestre, a cui il fisico americano Robert Millikan diede il nome di raggi cosmici.

Per capire le caratteristiche di queste radiazioni, negli anni trenta furono condotti molti studi, in particolare quelli del fisico

francese Pierre-Victor Auger e dell'italiano Bruno Rossi (che operò prima a Padova e poi, a seguito delle persecuzioni razziali, negli Stati Uniti). I raggi cosmici arrivano principalmente dal Sole (è il cosiddetto vento solare); quelli di energia più alta, che penetrano più facilmente nell'atmosfera, provengono da altre sorgenti della nostra galassia e probabilmente anche da sorgenti extragalattiche. Queste radiazioni si possono sostanzialmente suddividere in tre grandi famiglie: radiazioni di particelle cariche, radiazioni elettromagnetiche, radiazioni neutre non elettromagnetiche

(come i neutrini). Grande sforzo sperimentale viene profuso nella ricerca di una quarta famiglia, i gravitoni, mediatori della forza gravitazionale, previsti dalla teoria ma non ancora osservati.

Le radiazioni di particelle cariche sono composte da protoni, elettroni, nuclei atomici ionizzati e piccole quantità di antimateria. Viaggiando attraverso la Via Lattea, sono deviate dal debole campo magnetico galattico (all'incirca pari a un milionesimo del campo magnetico terrestre), e raggiungono la Terra dopo aver perso tutte le informazioni sulla loro direzione originaria.



Danilo Sassi, su indicazione degli autori

L'ALTITUDINE FINO ALLA QUALE PENETRA UN FOTONE influenza la scelta degli strumenti da usare per la rivelazione. Mentre le onde radio e la luce visibile sono ben rivelabili a terra, i raggi gamma lo sono solo a energie più alte di una cinquantina di GeV, come sciami elettromagnetici. A fronte, la mappa dell'emissione gamma misurata da Magic attorno alla posizione di LSI + 61 303 in due differenti fasi orbitali: quando le due stelle sono a distanza minima fra loro (A, periastro) e a un terzo dell'orbita dopo il periastro (B).

GLI AUTORI

ALESSANDRO DE ANGELIS, coordinatore scientifico del telescopio Magic, è professore di fisica sperimentale a Udine e a Lisbona, e responsabile di Magic per l'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN). È approdato all'astrofisica delle particelle nel 1999, dopo sei anni trascorsi al CERN di Ginevra come associato e quindi staff member all'acceleratore LEP. **LUIGI PERUZZO**, professore di fisica sperimentale al Dipartimento di fisica dell'Università di Padova, di cui è stato direttore dal 1992 al 1997, ha condotto ricerche in fisica delle particelle elementari fin dagli anni sessanta, con esperimenti in camera a bolle al CERN e all'Università di Berkeley. Negli ultimi 15 anni si è dedicato a ricerche in fisica astroparticellare. È stato tra i promotori di Magic, e fino al 2004 ne ha coordinato i gruppi italiani.

Le particelle neutre, invece, arrivano ai rivelatori senza che l'informazione della direzione originaria di provenienza sia perduta. I fotoni gamma (chiamati raggi gamma per motivi storici) occupano la parte più energetica dello spettro; possono percorrere lunghe distanze senza essere deviati dai campi magnetici galattici ed extragalattici. Per la loro altissima energia, sono spesso associati a processi «duri» come collassi gravitazionali verso buchi neri, e non sono contaminati da prodotti di processi termici.

I gamma però non sono facili da osservare. Contrariamente alla luce visibile, infatti, non si possono riflettere su superfici o venire concentrati con sistemi ottici su rivelatori. Si comportano più verosimilmente come proiettili energetici e la loro rivelazione deve essere effettuata con strumenti e metodologie tipiche della fisica subnucleare. Inoltre, poiché non riescono ad attraversare indenni l'atmosfera terrestre, per evidenziarli si devono collocare i rivelatori fuori dall'atmosfera stessa, e dunque porli su satellite, o costruire strumenti come Magic, in grado di rivelare il segnale delle particelle secondarie prodotte dal raggio gamma primario.

I satelliti, considerando il costo attuale delle tecnologie spaziali, sono vincolati a piccole dimensioni e piccole aree efficaci: di fatto, dato il calo esponenziale del flusso di fotoni gamma con l'aumentare dell'energia, le massime energie rivelabili su satel-

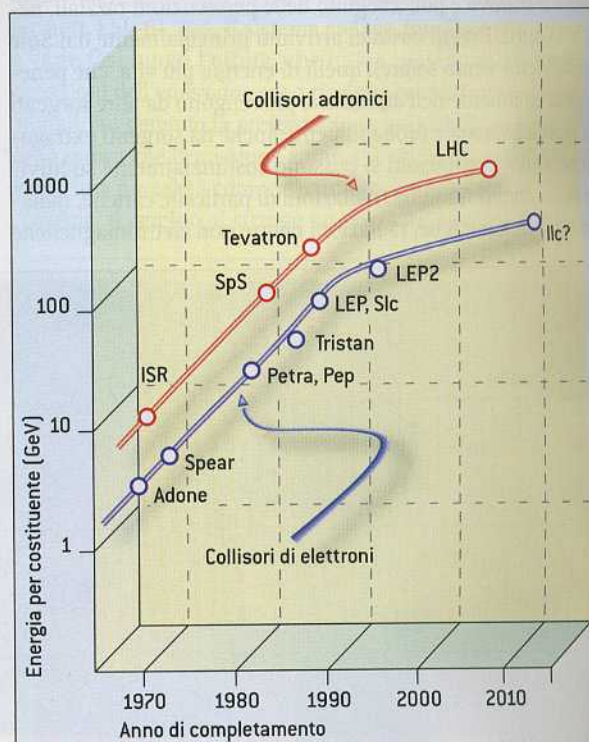
ALLE FRONTIERE ESTREME DELLA FISICA: LA FISICA ASTROPARTICELLARE

La fisica delle alte energie è nata come fisica dei raggi cosmici: non appena si scoprì che particelle di altissima energia arrivano dal cosmo, gli studiosi di fisica fondamentale, nei primi decenni del secolo scorso, costruirono sulle montagne centri di rivelazione. Alle origini la fisica delle particelle si poteva dunque definire, con un termine moderno, «astroparticellare».

In seguito i fisici impararono a produrre in laboratorio particelle di altissima energia con gli acceleratori; dal 1950 alla fine degli anni novanta la fisica agli acceleratori superò la fisica basata sui raggi cosmici, in quanto consentiva la realizzazione di esperimenti in condizioni controllate. Per una cinquantina d'anni l'energia generata crebbe esponenzialmente con il tempo, e con essa il potenziale di scoperta; in questo periodo la fisica delle particelle agli acceleratori garantì un progresso spettacolare alla conoscenza fondamentale.

Negli ultimi dieci anni si è assistito però a un rallentamento dei risultati, ben visibile nella figura a fianco, detta plot di Livingstone, nella quale si nota la saturazione delle energie raggiunte: a tale saturazione corrisponde un'esplosione dei costi. Nello frattempo sono stati sviluppati nuovi tipi di rivelatori che consentono di studiare con alta efficienza i raggi cosmici, sicché la fisica delle energie estreme si sta collocando di nuovo nello studio di tali particelle. Probabilmente l'avevano previsto i fisici che nel 1953, scrivendo lo statuto del CERN di Ginevra, richiesero che l'ente si occupasse di ricerca sulle particelle di alta energia, ed esplicitamente di raggi cosmici.

La ragione per cui gli acceleratori costruiti dall'uomo non possono competere con gli ancora misteriosi acceleratori cosmici è semplice. Il metodo più efficiente per accelerare particelle richiede il loro confinamento entro un raggio R tramite un campo magnetico B , e l'energia è proporzionale al prodotto di R per B . Sulla Terra è difficile ipotizzare raggi di confinamento più grandi di un centinaio di chilometri e campi magnetici più forti di una decina di tesla [100.000 volte il campo magnetico terrestre]. Questa combinazione può fornire energie dell'ordine della decina



IL PLOT DI LIVINGSTONE indica l'energia disponibile per la creazione di nuove particelle agli acceleratori in funzione dell'anno di completamento.

di TeV, come quelle che saranno raggiunte nell'acceleratore LHC del CERN. In natura ci sono invece acceleratori con raggi molto maggiori, come i relitti di supernove (centinaia di anni luce) e i nuclei galattici attivi delle galassie (decine di migliaia di anni luce): da essi arrivano sulla Terra particelle di energie di decine di milioni di TeV. Oggi finalmente sappiamo sfruttare questi acceleratori cosmici, che, a differenza di quelli costruiti dall'uomo che costano ormai miliardi di euro, sono gratis.

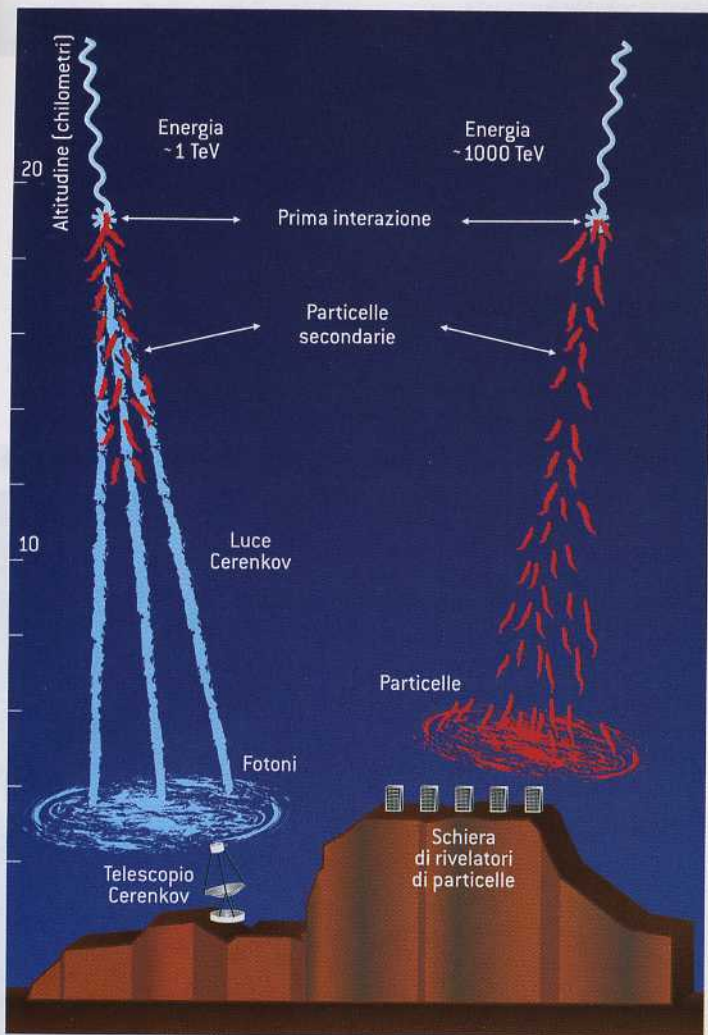
lite sono dell'ordine del centinaio di GeV. Il miglior rivelatore gamma su satellite finora lanciato, il rivelatore gamma Egret, operativo fra il 1995 e il 2000, ha scoperto un centinaio di sorgenti gamma di alta energia, fino a una decina di GeV.

La rivelazione dei fotoni gamma

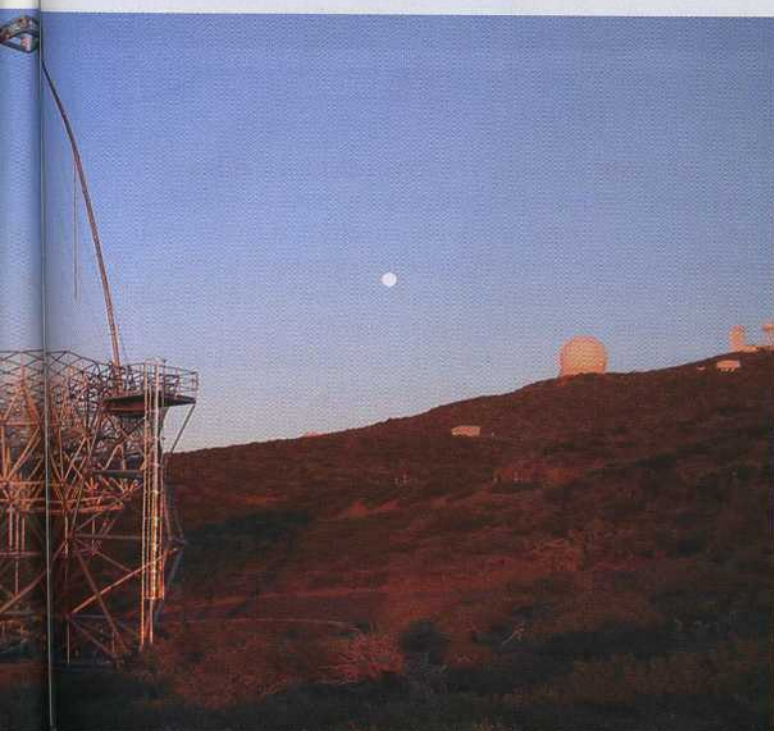
Per esplorare le altissime energie, quelle oltre il centinaio di GeV, occorre dunque utilizzare strumenti al suolo, rivelando i prodotti dell'interazione dei raggi gamma con l'atmosfera.

Un raggio gamma proveniente dallo spazio interagisce con le molecole dell'atmosfera e si trasforma in una coppia elettrone-positrone. Queste particelle cariche nel loro cammino in aria emettono fotoni attraverso un meccanismo detto di *bremsstrahlung* (radiazione di frenamento). I gamma secondari si trasformano a loro volta in coppie elettrone-positrone e si viene così a formare un cascate di elettroni, positroni e gamma; questa cascate è detta sciame elettromagnetico. Le particelle che si for-





LA RIVELAZIONE DEI RAGGI GAMMA A TERRA può essere eseguita a bassa quota, misurando la luce Cerenkov prodotta dagli sciame, o ad alta quota usando rivelatori di particelle sensibili agli elettroni e ai positroni dello sciame. Sotto, sullo sfondo il telescopio Magic e in primo piano il suo gemello attualmente in costruzione.



Danilo Sossi, su indicazione degli autori

Cortesia D. Dorner

mano nello sciame viaggiano nell'atmosfera a velocità confrontabili con la velocità della luce, e si sparpagliano lateralmente fino a distanze di qualche centinaio di metri. I meccanismi di produzione e sviluppo degli sciame sono ormai ben noti grazie soprattutto ai lavori di Bruno Rossi e della sua scuola.

Dallo spazio non arrivano solo fotoni gamma, ma anche, migliaia di volte più numerose, particelle sensibili all'interazione forte (gli adroni), come protoni e altri nuclei atomici carichi. Interagendo con i nuclei atomici nell'atmosfera, gli adroni possono produrre particelle cariche e neutre, come pioni e mesoni K, che a loro volta interagiscono. Si viene a formare pertanto uno sciame adronico non molto diverso dallo sciame elettromagnetico sopra descritto, a parte la maggior presenza di leptoni μ (analoghi agli elettroni ma di massa circa 200 volte maggiore), nonché la diversa distribuzione laterale e la densità delle particelle presenti.

Il numero di particelle cariche prodotte da un tipico sciame elettromagnetico di altissima energia ha un massimo a 5-10 chilometri di quota, ed è trascurabile al livello del mare. Pertanto se vogliamo osservare i raggi gamma con rivelatori di particelle sensibili agli elettroni e ai positroni dello sciame (tecnica degli *Extensive Air Shower detector*, EAS) bisogna collocare gli strumenti ad alta quota, con notevoli problemi logistici. Anche con questi sforzi, le soglie minime di energia rivelata dagli EAS sono piuttosto alte e la sensibilità alla scoperta di nuove sorgenti è limitata.

La tecnica che negli ultimi due-tre anni si è dimostrata vincente per l'astrofisica gamma è la tecnica IACT (*Imaging Air Cerenkov Telescope*), che sfrutta l'emissione di luce da parte delle particelle cariche in uno sciame. Negli sciame, sia elettromagnetici sia adronici, le particelle cariche possono viaggiare a velocità superiori a quella della luce in atmosfera (ricordiamo che questo non viola la teoria della relatività, in quanto la velocità della luce nell'atmosfera è c/n , dove n è l'indice di rifrazione ed è maggiore dell'unità). In questi casi emettono un lampo di luce, la luce Cerenkov (dal nome dello scopritore del fenomeno, premio Nobel nel 1958), che è l'analogo ottico del *bang* supersonico per le onde sonore. Il lampo è emesso in un cono di ampiezza di circa un grado rispetto alla direzione della particella che lo genera, e viaggia verso il suolo insieme alle altre particelle dello sciame: la luce è in gran parte visibile, e l'emissione è più intensa nella regione del blu.

I rivelatori IACT riflettono con la loro grande superficie ottica il debole lampo di luce Cerenkov su un sensore a matrice di fotomoltiplicatori posto nel piano focale del telescopio; quindi le informazioni sui singoli fotomoltiplicatori (pixel) che hanno ricevuto il segnale vengono digitalizzate. In questo modo il raggio gamma viene fotografato come se fosse una specie di stella cadente, il cui lampo dura appena 2 o 3 nanosecondi; l'immagine viene registrata su un sistema di computer e immagazzinata per l'analisi dei dati. La diversa geometria degli sciame elettromagnetici e adronici consente una classificazione su base statistica della natura della particella che ha generato il lampo di luce.

Le tecniche di analisi dei dati ancora oggi usate nei telescopi Cerenkov furono introdotte dai fisici del telescopio Whipple, in Arizona, il telescopio di 10 metri di diametro che nel 1989 scoprì la prima sorgente gamma nella Nebulosa del Granchio, tuttora usata come «candela» standard per l'astrofisica gamma. La Nebulosa del Granchio – resto di una supernova la cui esplosione nel 1054 fu registrata da astronomi cinesi e indiani – è la

MAGIC E LA RETE DEI SATELLITI SCIENTIFICI

Una dozzina di satelliti scientifici in orbita attorno alla Terra raccoglie dati sulle emissioni di fotoni, in particolare nella banda dei raggi X. Tra questi Chandra, Integral, Swift, le cui osservazioni hanno prodotto centinaia di articoli scientifici che hanno influenzato notevolmente l'evoluzione dell'astrofisica ad alte energie. Alcuni di questi rivelatori sono dotati di strumenti sensibili a fenomeni transienti come la presenza di eventi catastrofici,

per esempio i lampi di raggi gamma.

Con cadenza all'incirca giornaliera, questi lampi producono, per intervalli di tempo in generale dell'ordine del secondo, un'energia in raggi gamma anche superiore alla somma di tutte le altre sorgenti gamma dell'universo. La rete di satelliti GCN (GRB Coordinates Network) comunica in tempo reale ai rivelatori consorziati la presenza di lampi di raggi gamma; grazie a questi messaggi, già tre volte in venti mesi

Magic è riuscito a puntare una sorgente gamma durante l'esplosione primaria.

Ma non ci sono solo i lampi di raggi gamma. Sono state rivelate brusche variazioni dell'accrescimento di buchi neri al centro di galassie che producono brillamenti intensissimi della durata di pochi minuti; e questi eventi sono stati misurati contemporaneamente da Magic e dai rivelatori installati sui satelliti a energie complementari.

sorgente gamma stabile più luminosa nella Galassia. In seguito Whipple scopri due sorgenti gamma extragalattiche, i nuclei galattici attivi Markarian 421 e Markarian 501.

Gli eccitanti risultati ottenuti in astrofisica gamma hanno spinto la comunità scientifica internazionale a nuovi progetti di apparati al suolo per abbassare la soglia in energia dei gamma rivelati e aumentare la sensibilità. Lo sforzo è complementare a quello profuso per realizzare rivelatori gamma su satellite a soglia energetica sempre più alta, e che porterà al prossimo lancio dei satelliti Agile e Glast (*si veda il box qui sopra*).

Attualmente operano quattro grandi rivelatori IACT, strutturalmente simili, chiamati nel gergo della comunità «i grandi 4»: Magic e Veritas nell'emisfero nord (rispettivamente alle Canarie e in Arizona), Hess e Cangaroo (in Namibia e in Australia) nell'emisfero sud. I quattro rivelatori sono operati da collaborazioni internazionali di un centinaio di persone ciascuna.

I raggi gamma visti da Magic

Il telescopio Magic (Major Atmospheric Gamma Imaging Cerenkov) si distingue dagli altri, oltre che per essere il più grande, per la leggerezza della struttura meccanica in fibra di carbonio, che gli consente di ruotare di 180 gradi in una ventina di secondi reagendo prontamente agli allarmi relativi a *flare* e fenomeni transienti. Gli specchi a forma quadrata, con raggio di curvatura variabile per dare un profilo parabolico alla superficie riflettente, sono di alluminio lavorato con punta di diamante per essere speculari: l'apporto tecnologico italiano è stato fondamentale. Un'altra caratteristica unica di Magic è il controllo attivo degli specchi. Questi sono montati su pannelli al centro dei quali è collocato un laser: quando il telescopio si muove i laser «riaggiustano» il puntamento e compensano eventuali deformazioni facendo una messa a fuoco automatica in un tempo breve.

Il telescopio Magic è anche un banco di prova per produrre sistemi innovativi di acquisizione di dati. L'utilità di questi ultimi si estende al di fuori delle ricerche in fisica, verso campi interdisciplinari e più strettamente tecnologici. In particolare i sistemi di acquisizione dati prodotti da Magic stanno contribuendo alla soluzione di problemi di riconoscimento di immagini che accomunano le tematiche dei telescopi Cerenkov ai rivelatori in generale e su satellite (come Glast, prossimo al lancio) e a branche diverse della fisica, quale la fisica medica.



Cortesia R. Wagner

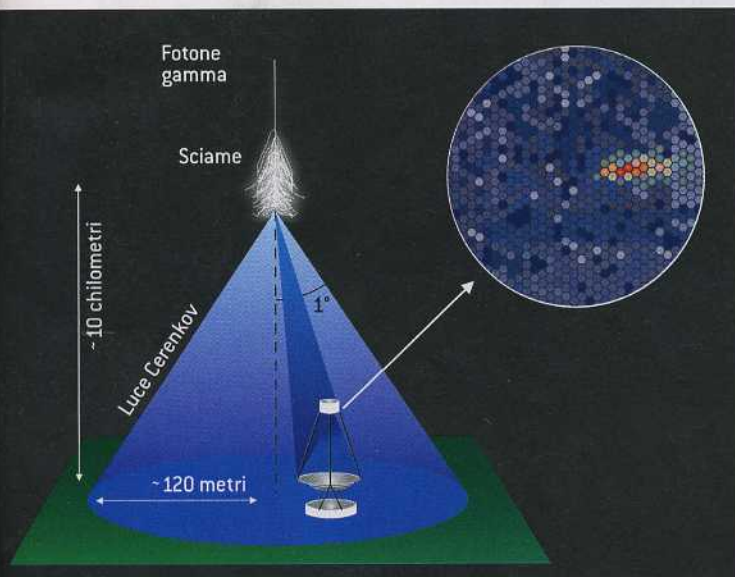
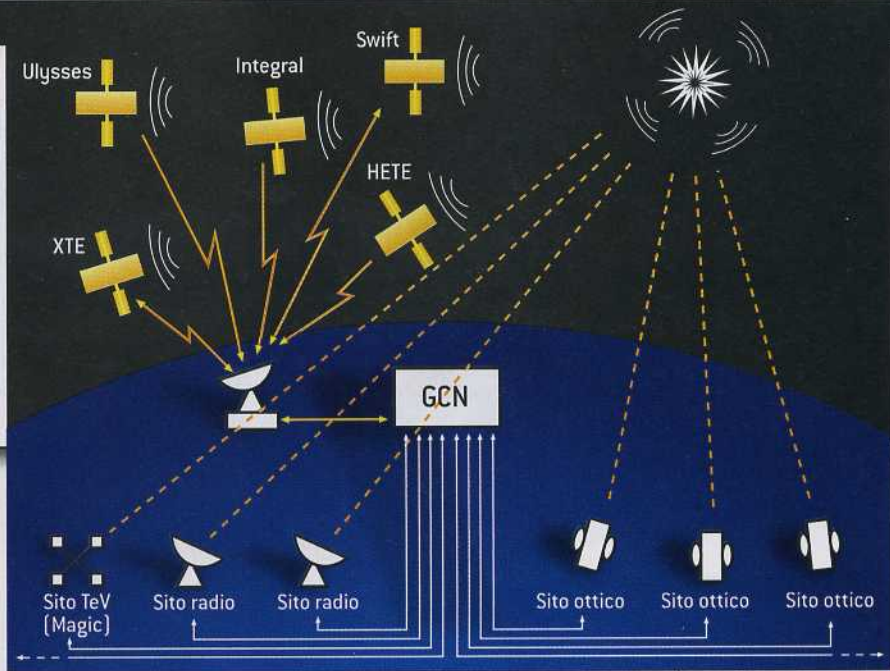
Un salto nel futuro

Gli strumenti che si sono resi disponibili negli ultimi anni hanno dimostrato di avere sensibilità tale da poter rivelare molte nuove sorgenti: estrapolando i risultati attuali, si immagina di arrivare a rivelare un centinaio di sorgenti gamma nell'universo entro il 2010. Con strumenti dieci volte più sensibili degli attuali si potrebbe arrivare oltre il migliaio di sorgenti.

Un secondo telescopio Magic è in costruzione a circa 80 metri di distanza dal primo per consentire una visione stereoscopica; l'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN) e gli enti italiani consorziati sono responsabili dell'ottica (per la quale verrà usata una tecnologia ancora più avanzata rispetto a quella del primo telescopio, sempre legata all'industria italiana) e di parte dell'elettronica e del sistema di acquisizione e trattamento dati. Questo secondo telescopio consentirà al nuovo strumento, chiamato Ma-

Nel prossimo futuro, probabilmente già a partire da quest'anno, gli strumenti esistenti saranno affiancati da due nuovi satelliti specializzati nella rivelazione di raggi gamma a energie dell'ordine del GeV: uno tutto italiano (Agile), e l'altro (Glast) costruito da una collaborazione internazionale che comprende Stati Uniti, Italia, Francia, Giappone, Svezia, e il cui lancio è gestito dalla NASA.

IL CONO DI LUCE CERENKOV (sotto) prodotto da un raggio gamma e la sua immagine nella camera focale di un telescopio IACT, dello stesso tipo di Magic. A fronte, un'altra immagine di Magic sullo sfondo del moto apparente delle stelle nel cielo notturno.



gic2, di raddoppiare la sensibilità e migliorare la precisione fino a consentire la risoluzione di particolari all'interno degli emettitori gamma galattici. È particolarmente urgente che il finanziamento di questo telescopio, il cui progetto è già stato approvato, sia presto completato, per terminare la costruzione entro il 2007 e potersi giovare della sinergia con i satelliti gamma.

Molto altro si muove nell'astrofisica gamma per i prossimi anni: oltre all'atteso lancio dei satelliti Agile e Glast, il principale strumento complementare a Magic nell'emisfero australe, Hess, si doterà di un telescopio di 28 metri di diametro che potrebbe essere operativo alla fine del 2008. In seguito le collaborazioni Magic e Hess si uniranno per costruire due gigantesche matrici di telescopi, chiamate Cherenkov Telescope Array (CTA), la cui sensibilità dovrebbe superare di oltre un ordine di grandezza quella di Magic e di Hess. Per questa nuova impresa la tecnologia scelta sembra per ora simile a quella di Magic e Hess, replicata su decine di strumenti. C'è anche la speranza di introdurre nuove tecnologie che potrebbero cambiare il concetto stesso di telescopio, e ancora una volta l'Italia è all'avanguardia nella proposta di tali tecnologie.

Negli anni successivi al 2010-2015 le informazioni raccolte dai telescopi gamma potrebbero aprire la strada ai grandi rivelatori di neutrini cosmici (Icecube al Polo Sud e un rivelatore marino, in costruzione nel Mediterraneo, per il quale l'Italia ha proposto uno dei progetti candidati, chiamato Nemo, vicino a Capo Passero) e di onde gravitazionali (il sistema di satelliti chiamato Lisa).

Le sorprese che potrà ancora regalare l'universo nell'osservazione di questi fenomeni sono il premio di cui potranno godere gli scienziati che con pazienza e sempre maggior competenza investiranno nella ricerca in questo ramo all'incrocio tra l'astrofisica e la fisica delle particelle. È proprio la potenzialità di scoperta di questo nuovo settore che sta attirando un numero sempre maggiore di giovani scienziati, e che porta allo sviluppo di nuove idee, alla realizzazione di nuove tecnologie e all'individuazione di nuovi misteri.

PER APPROFONDIRE

- ROSSI B., *I raggi cosmici*, Einaudi, Torino, 1971.
 GAISSER T., *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, 1990.
 SCHOENFELDER V., *The Universe in Gamma Rays*, Springer, 2001.
 WEEKES T., *Very High Energy Gamma-Rays*, IOP, 2003.
 PERKINS D., *Particle Astrophysics*, Oxford University Press, 2003.
 HOFFMAN C.M., SINNISC., FLEURY P. e PUNCH M., *Gamma-ray astronomy at high energies*, «Review of Modern Physics», Vol. 71, n. 4, 1999.
 VITALE S., *Dalle onde ai buchi neri*, «Le Scienze» n. 428, marzo 2004.
 CARAVED P. e TAGLIAFERRI G., *Le più potenti esplosioni del cosmo*, «Le Scienze» n. 452, marzo 2006.
 Sito web del telescopio Magic: <http://magic.fisica.uniud.it/>.