

Telescopi per la banda dei raggi gamma: Magic e Glast

A. De Angelis, B. De Lotto, F. de Sabata e M. Persic per il gruppo di astrofisica gamma dell'Università di Udine

La fisica delle alte energie è nata come fisica dei raggi cosmici [1]: nei primi decenni del secolo scorso, non appena si scoprì che particelle di altissima energia arrivano dal cosmo, gli studiosi di fisica fondamentale avviarono campagne di studi in atmosfera e costruirono centri di rivelazione sulle montagne (Fig. 1 a, 1 b e 1 c). Alle origini la fisica delle particelle si poteva dunque definire, con un termine moderno, “astrofisica particellare”.



Fig. 1.a



Fig. 1.b



Fig. 1.c

Fig. 1.a: il fisico austriaco Victor Hess alla partenza dell'ascensione in aerostato in cui dimostrò l'esistenza dei raggi cosmici (1912).

Fig 1.b: il fisico statunitense Robert Millikan mentre prepara un rivelatore prima del lancio in alta atmosfera (1938).

Fig 1.c: l'osservatorio della Marmolada al Passo Fedaia, Belluno (1950).

Solo in seguito i fisici impararono a produrre in laboratorio particelle di altissima energia mediante gli acceleratori. Dal 1950 alla fine degli anni '90 le potenzialità di scoperta della fisica agli acceleratori superarono quelle della fisica basata sui raggi cosmici, in quanto gli acceleratori consentivano 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 ad un rallentamento nei progressi, evidenziato nel cosiddetto plot di Livingstone in Fig. 2 a, in cui si nota una tendenza alla saturazione, in funzione del tempo, delle energie raggiunte, in corrispondenza per contro ad un'esplosione dei costi di costruzione. L'indagine astrofisica fornisce la possibilità di studiare fenomeni a scale di energia miliardi di volte superiori a quelle raggiungibili con la produzione di particelle nei laboratori terrestri. Dai relitti di supernove (Fig. 2 b) e dai nuclei galattici attivi delle galassie arrivano sulla Terra particelle di energie di decine di milioni di TeV (1 GeV è all'incirca l'energia necessaria per creare un atomo d'idrogeno in base alla nota relazione di Einstein $E=mc^2$); 1 TeV è pari a 1000 GeV. Oggi finalmente

sappiamo sfruttare questi acceleratori cosmici i quali, a differenza di quelli costruiti dall'uomo che costano ormai svariati miliardi di euro, sono gratis.

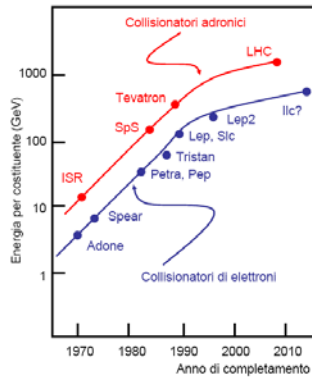
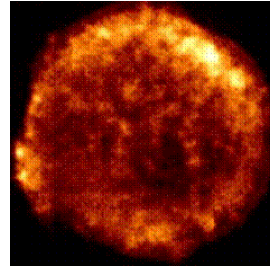


Fig. 2 a



$R \sim 10^{15} \text{km}$, $B \sim 10^{-16} \text{T}$
 $\Rightarrow E \sim 1000 \text{TeV}$

Fig. 2 b

Fig. 2.a: il "plot di Livingstone" per gli acceleratori.

Fig. 2.b: un'immagine della SNR (SuperNova Remnant) Tycho.

Una delle principali scoperte del XX secolo, forse la più importante di tutte (almeno secondo un sondaggio realizzato nel 2000 dalla rivista "Time"), è che l'Universo è in espansione. L'astronomo Edwin Hubble giunse a questa conclusione negli anni '20 del secolo scorso studiando un gran numero di galassie e osservando che la luce proveniente da quelle più lontane presenta sistematicamente lunghezze d'onda maggiori rispetto a quella delle galassie più prossime a noi. Tale "spostamento verso il rosso" (Fig. 3 a) dipende dalla velocità delle sorgenti e dimostra che le galassie si allontanano tra loro con una velocità proporzionale alla mutua distanza (legge di Hubble, Fig. 3 b).

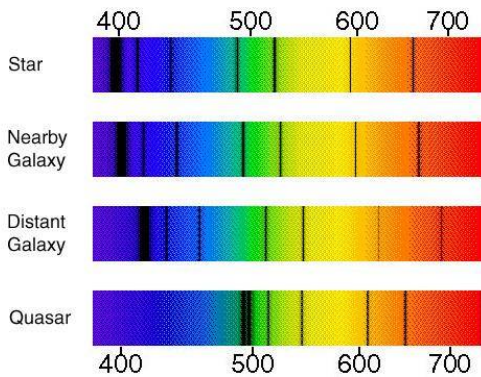


Fig. 3.a

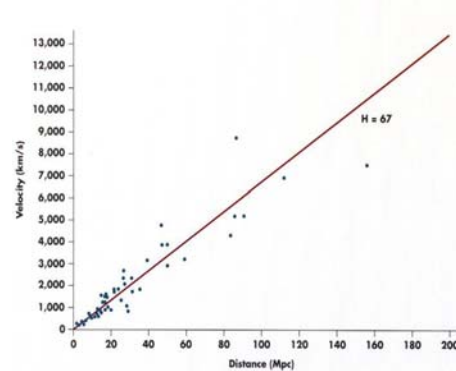


Fig. 3.b

Fig. 3.a: un confronto tra gli spettri di oggetti a varia distanza da noi che evidenzia lo spostamento verso il rosso.

Fig. 3.b: il plot di Hubble, che evidenzia la dipendenza lineare della velocità di recessione delle galassie dalla distanza.

Ciò nasce dal fatto che è lo spazio stesso che si sta espandendo, in accordo con la teoria del Big Bang, la quale prevede che l'Universo abbia avuto inizio da un volume piccolissimo. La conferma di questa teoria venne nel 1965 con la scoperta della radiazione cosmica di fondo, o "radiazione fossile", ad opera di Arno Penzias e Robert Wilson. Si tratta di un caratteristico segnale nella banda delle microonde presente ovunque nel cosmo, che venne originato in una situazione iniziale di grandissima energia: la "firma" del Big Bang. È dunque sensato chiedersi quale sia l'istante in cui tutto ha avuto inizio, estrapolando a ritroso nel tempo l'espansione a partire dalle osservazioni sperimentali: si ottiene così per il nostro Universo un'età di circa 14 miliardi di anni.

Molti processi fisici, avvenuti soprattutto nei primi istanti dell'espansione, hanno cambiato profondamente la struttura dell'Universo, modificandolo fino alla situazione attuale; un'osservazione importante è che esso, compiendo lavoro a spese della propria energia interna, deve essersi raffreddato (ossia avere diminuito l'energia cinetica media delle particelle). È quindi ragionevole pensare che all'origine fosse molto più caldo, rendendo possibili fenomeni che oggi non riusciamo a ritrovare neppure nel centro delle stelle o nei grandi acceleratori di particelle o nei più avveniristici prototipi di generatori di energia nucleare.

La conoscenza della fisica fondamentale ci consente di ricondurre tutti i fenomeni attuali a quattro tipi di interazione (gravitazionale, elettromagnetica, debole e forte), ma ricostruendo l'evoluzione dell'Universo si arriva alla conclusione che nei primi istanti dell'espansione ($\sim 10^{-43}$ s) esse fossero unificate in una sola. Questa meravigliosa e semplice simmetria fu successivamente alterata e nascosta al diminuire delle energie disponibili. La ricerca di energie più alte è dunque anche un viaggio all'indietro nel tempo (Fig. 4 a).

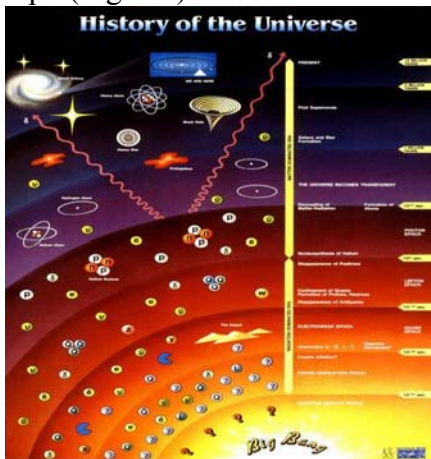


Fig. 4.a

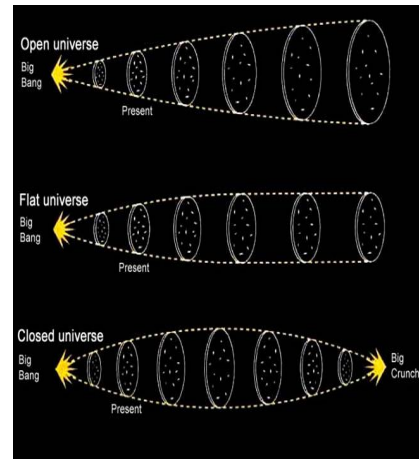


Fig. 4.b

Fig. 4.a: una rappresentazione grafica della storia dell'Universo.

Fig. 4.b: i diversi scenari possibili per l'evoluzione dell'Universo.

Facciamo ora un viaggio nel futuro. Ci si può domandare se l'espansione dell'Universo continuerà per sempre, o se prima o poi si arresterà e invertirà il proprio corso, iniziando una fase di contrazione che lo riporti alla situazione iniziale: la risposta dipende dall'intensità dell'attrazione gravitazionale esercitata al suo interno, quindi dal contenuto totale di materia dell'Universo (Fig. 4 b). Per stimare con cura tale quantità è

necessario riuscire a studiare le regioni più lontane, con strumenti che ci consentano di rilevare nuovi oggetti e nuove particelle.

Lo studio delle proprietà di rotazione delle galassie fornisce la prova dell'esistenza di una nuova forma dominante di materia, la cosiddetta "materia oscura" (Fig. 5 a). Inoltre, il confronto fra la luminosità apparente (osservata) e quella intrinseca delle supernove di tipo Ia ha indicato la presenza di una misteriosa tensione, la cosiddetta "energia oscura", che permea l'Universo e ne determina la dinamica a grande scala (Fig. 5 b).

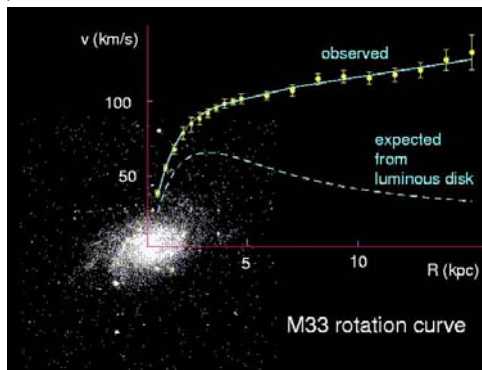


Fig. 5.a

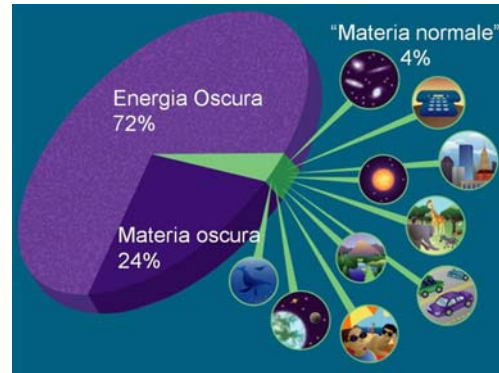


Fig. 5.b

Fig. 5.a: la velocità rotazionale delle galassie indica la presenza di massa oscura.

Fig. 5.b: le proporzioni tra energia oscura, massa oscura e massa visibile nell'Universo.

Per quanto riguarda la materia oscura, nella maggior parte delle teorie sviluppate per spiegare i risultati delle osservazioni astrofisiche si ipotizza l'esistenza di una nuova particella pesante neutra (di massa compresa fra quaranta e centomila volte la massa del protone) che interagisce debolmente con la materia ordinaria; tale particella viene chiamata WIMP (Weakly Interacting Massive Particle). Le teorie supersimmetriche offrono un candidato naturale per la WIMP, il cosiddetto neutralino. Le WIMP possono annichilarsi in coppia generando energia, come ipotizzato da Majorana (il famoso fisico siciliano misteriosamente scomparso nel 1938). L'annichilazione di WIMP è osservabile dai rivelatori di raggi gamma, in quanto gran parte dell'energia prodotta si presenta sotto forma di fotoni gamma con energie confrontabili a quelle della WIMP, e caratteristiche che consentirebbero di distinguerli dal fondo astrofisico. Il primo problema sperimentale è quindi di rivelare questi fotoni gamma di altissime energie, ma quali e quanti nuovi oggetti celesti è ancora possibile scoprire? Gli strumenti di frontiera per tale studio sono i telescopi gamma, sensibili alle sorgenti più energetiche dell'Universo.

I raggi gamma sono quanti di luce di altissima energia [2]. Nei collassi gravitazionali che avvengono nei centri delle galassie, dove grandi quantità di materia sono divorate, vengono prodotti raggi gamma con energie anche mille miliardi di volte più grandi della luce visibile. Un fenomeno spettacolare (e relativamente frequente) è quello dei "lampi gamma" o Gamma Ray Bursts (GRB): per pochi secondi una sorgente emette un'energia gamma che, se irradiata isotropicamente, è confrontabile con quella dell'Universo intero. Fortunatamente per la nostra salute, l'atmosfera assorbe molto bene

questo tipo di radiazione, consentendo l'esistenza degli esseri viventi sulla superficie terrestre; allo stesso tempo, però, questo schermo rende molto difficile l'osservazione dei raggi gamma.

La tecnologia necessaria per la rivelazione dei raggi gamma è stata sviluppata solo negli ultimi anni, seguendo due distinte metodologie di osservazione: da terra, con l'impiego di grandi rivelatori Čerenkov (specchi focalizzati, Fig. 6 a), e dall'esterno dell'atmosfera, mediante appositi strumenti montati su satelliti (Fig. 6 b) [3].

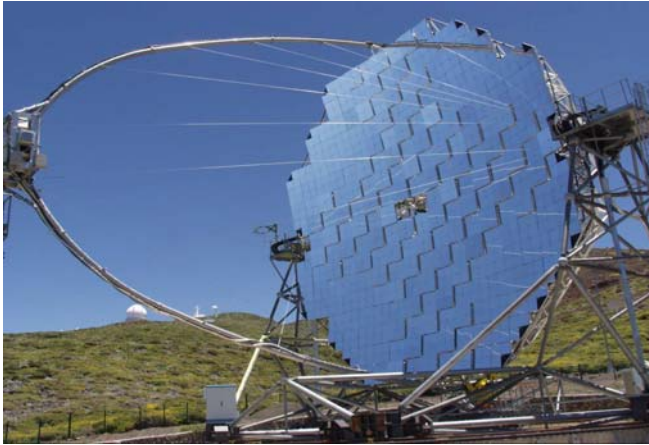


Fig. 6.a



Fig. 6.b

Fig. 6.a: il telescopio MAGIC, un rivelatore per raggi gamma da terra.

Fig. 6.b: il satellite GLAST, un rivelatore per raggi gamma in orbita.

La tecnica Čerenkov si basa sulla rivelazione della radiazione caratteristica emessa dalle particelle cariche che attraversano l'atmosfera a velocità superiore a quella della luce. Quando vengono assorbiti nell'alta atmosfera, i raggi gamma provenienti dallo spazio danno origine infatti a sciame di particelle secondarie in grado di produrre questo segnale, che è l'analogo ottico del bang supersonico per le onde sonore (Fig. 7 a). Il lampo Čerenkov viaggia verso terra nella direzione dello sciame e, benché di debole intensità, può essere rivelato da opportuni telescopi, detti IACT (Imaging Air Čerenkov Telescopes). Tra gli esperimenti attualmente in funzione che sfruttano tale tecnica spiccano le collaborazioni MAGIC, HESS, CANGAROO e VERITAS (i cosiddetti "Big Four", Fig. 7 b).

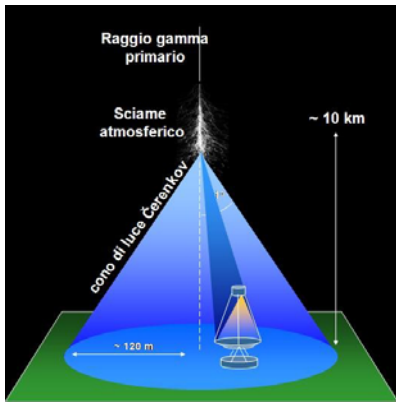


Fig. 7.a

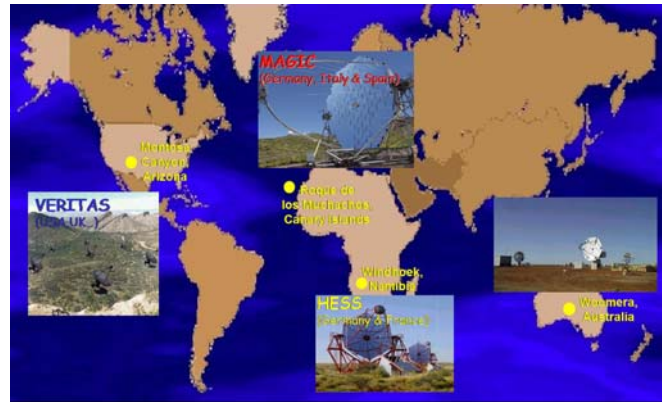


Fig. 7.b

Fig. 7 a: schema della formazione del segnale Čerenkov a partire da un raggio gamma.
 Fig. 7 b: “The Big Four”, i maggiori telescopi IACT attualmente in funzione.

Il rivelatore MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Čerenkov telescope [4,5]), frutto di una collaborazione internazionale con partner principali in Italia, Germania e Spagna, si trova sull’isola di La Palma (Canarie) ed è attivo dal 2004. Con i suoi 17 metri di diametro è attualmente il telescopio dotato del più grande specchio al mondo. Tale superficie riflettente è costituita da quasi 1000 specchi quadrati di alluminio a curvatura variabile (Fig. 8 a) per ottenere un profilo parabolico (la tecnologia è stata sviluppata appositamente in Italia) e serve per raccogliere la luce Čerenkov prodotta dallo sciame e focalizzarla su una matrice di fotomoltiplicatori (camera) posta nel piano focale dello specchio. Il segnale così ottenuto, della durata di qualche nanosecondo appena, viene registrato ed analizzato, permettendo di ricostruire una “fotografia” che identifica il raggio gamma (o di altro tipo) all’origine dello sciame (Fig. 8 b). All’esperimento partecipa un gruppo udinese formato da cinque ricercatori e sette studenti di dottorato.



Fig. 8.a

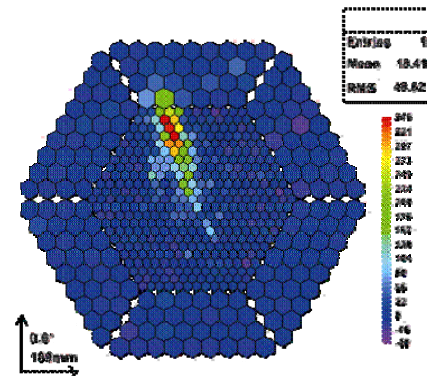


Fig. 8.b

Fig. 8.a: un particolare dello specchio parabolico composto di MAGIC.
 Fig. 8 b: l’immagine del segnale di un raggio gamma ricostruita dalla camera di MAGIC

MAGIC ha anche un'altra notevole proprietà, legata alla leggerezza della struttura in fibra di carbonio e al sistema di controllo attivo degli specchi: è la sua velocità di posizionamento, che permette di puntare il telescopio verso un punto preciso del cielo in poche decine di secondi, osservando così anche fenomeni altamente variabili nel tempo e di breve durata. Per sfruttare al meglio tale caratteristica, MAGIC è in costante contatto con la rete di satelliti GCN, che comunica a terra in tempo reale l'arrivo di un GRB (Fig. 9). Ciò ha permesso nel 2005, per la prima volta al mondo, di osservare un GRB per circa 30 secondi simultaneamente al satellite con sufficiente sensibilità ad alta energia.

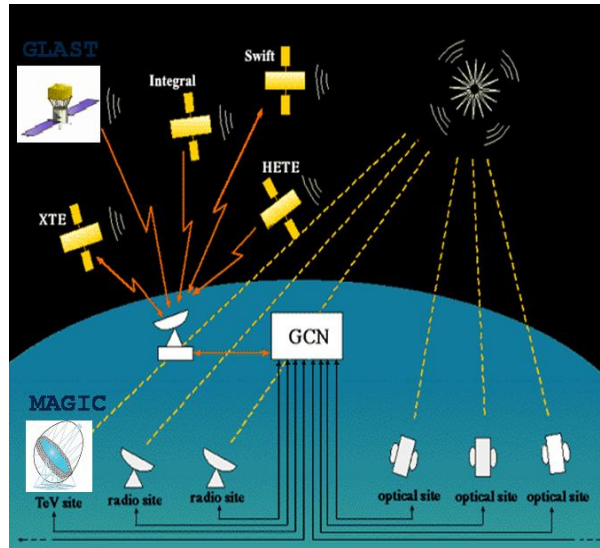


Fig. 9: la rete GCN della NASA, che funge da sistema di allerta per l'arrivo dei GRB.

Una possibilità ulteriore di osservare i raggi gamma da terra è la tecnica EAS (Extensive Air Shower), che rivela le particelle cariche degli sciami prodotti in atmosfera con rivelatori estesi posti in montagna ad alta quota: è il caso di esperimenti come ARGO [6] o MILAGRO [7] (Fig. 10 b). La tecnica EAS presenta una soglia in energia molto alta (circa 500 GeV), e risulta quindi di limitata utilità date le caratteristiche delle sorgenti gamma, a meno di non passare a dimensioni superiori (Fig. 10 a).

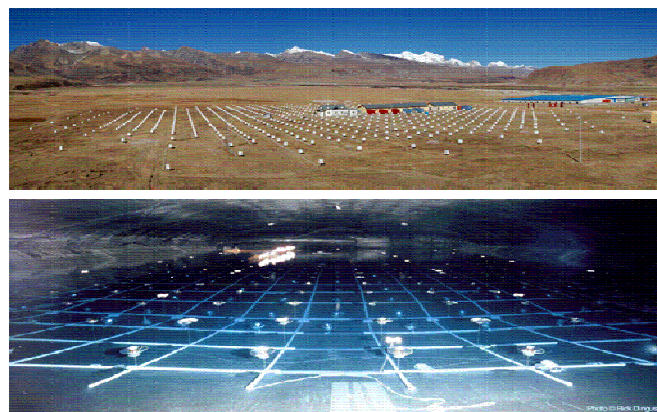
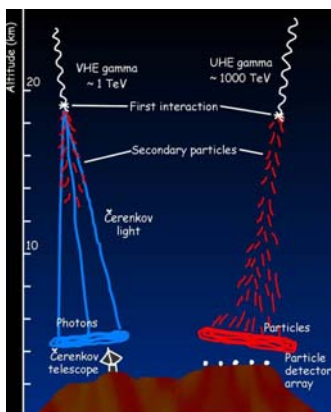


Fig. 10.a

Fig. 10.b

Fig. 10.a: un confronto tra le tecniche di rivelazione di raggi gamma da terra.

Fig. 10.b: un'immagine dei rivelatori gamma in Tibet (sopra) e di MILAGRO (sotto).

Se lo studio dei raggi gamma da terra sfrutta in vari modi gli sciame secondari prodotti nell'atmosfera, i rivelatori montati su satellite si basano su una diversa tecnologia, sviluppata negli scorsi decenni per gli esperimenti agli acceleratori: la conversione dei fotoni gamma di alta energia in coppie di elettroni e positroni viene indotta in sottili fogli di materiale assorbente (tungsteno o piombo) alternati a strati di materiale sensibile al passaggio delle cariche (scintillatore o silicio). Il piccolo sciame (generalmente una coppia elettrone-antielettrone con qualche particella elettromagnetica terziaria) così prodotto viene tracciato all'interno di un rivelatore compatto, che consente di ricostruire la direzione del raggio gamma incidente, quindi raccolto da un "calorimetro elettromagnetico" che permette di misurarne l'energia (Fig. 11 a).

AGILE (Astrorivelatore Gamma a Immagini Leggero [8]) è un rivelatore al silicio per raggi gamma: una missione scientifica dell'ASI tutta italiana in collaborazione tra i gruppi IASF-Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) di Bologna, Milano e Roma e le sezioni dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Roma e Trieste. Questo piccolo satellite è stato lanciato nell'aprile 2007 dal Satish Dhawan Space Centre in India. Le prestazioni e osservazioni di AGILE serviranno come importante banco di prova per le missioni successive, tra le quali GLAST [9,10] occupa un posto di prima importanza .

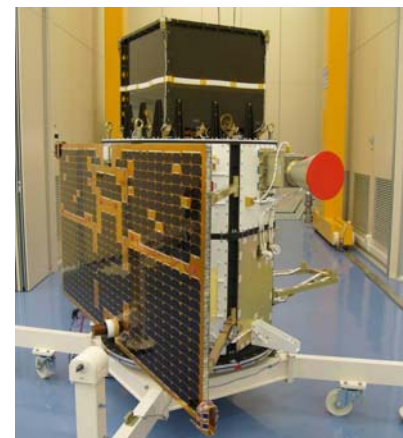
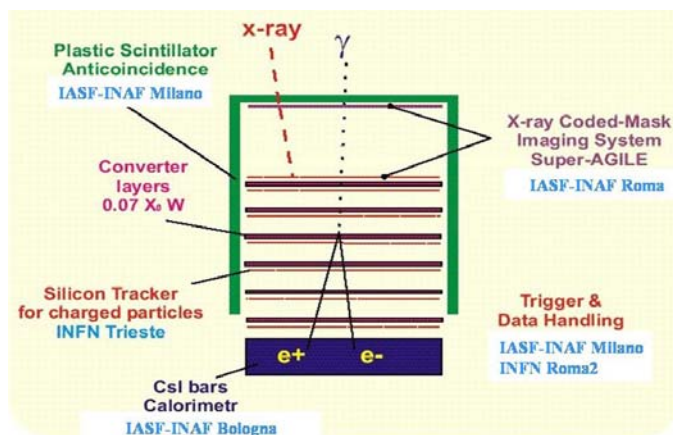


Fig. 11.a

Fig. 11.b

Fig. 11.a: uno schema di AGILE, un innovativo rivelatore per raggi gamma.

Fig. 11.b: l'integrazione di AGILE sul satellite che lo porterà in orbita.

L'osservatorio spaziale GLAST (Gamma ray Large Area Space Telescope, Fig. 12 a) nasce da una collaborazione tra Stati Uniti, Italia, Francia, Svezia e Giappone. Il satellite verrà messo in orbita dalla NASA alla fine del 2007; a bordo vi saranno due strumenti, il Large Area Telescope (LAT) ed il Gamma-ray Burst Monitor (GBM), che

permetteranno di studiare i raggi gamma da un'energia di circa 10 KeV fino a oltre i 300 GeV, un valore mai raggiunto da altri rivelatori su satellite: per le sue caratteristiche innovative, la missione è destinata a fornire contributi fondamentali allo sviluppo dell'astronomia gamma. Per l'Italia partecipano i gruppi di Bari, Perugia, Padova, Pisa, Trieste e Udine, responsabili della costruzione del LAT e di parte del software (simulazione ed event display, sviluppati a Udine).

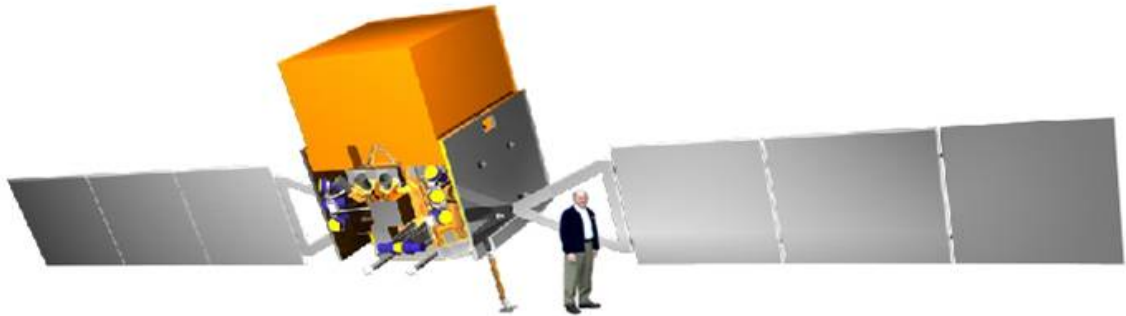


Fig. 12 a: il satellite GLAST.

Gli obiettivi scientifici principali di GLAST sono:

- la comprensione del meccanismo di accelerazione delle particelle nei nuclei galattici attivi (AGN), nelle Pulsar e nei relitti di supernova (SNR): per questo, già nei primi due anni di osservazione GLAST osserverà più di 100 sorgenti extra-galattiche e migliaia di sorgenti galattiche;
- un'accurata mappatura del cielo nella banda dei raggi gamma, incluse le sorgenti non identificate e l'emissione diffusa dalla Via Lattea. Il LAT permetterà di localizzare sorgenti gamma non identificate in altre lunghezze d'onda con una precisione inferiore al minuto di grado;
- lo studio ad alta energia dei GRB e di altri fenomeni transienti: GLAST permetterà di rivelare circa 200 GRB all'anno con una localizzazione dell'ordine del minuto di grado e di studiare emissioni ritardate ad alta energia;
- l'indagine sulla natura della materia oscura, con la ricerca di possibili decadimenti di particelle esotiche nell'Universo primordiale e di processi di annichilazione di particelle di materia oscura nell'alone della Via Lattea.

Il cuore dello strumento è il LAT, formato da 16 torri di strip di silicio alternate a fogli di tungsteno per il tracciamento dei raggi gamma, seguite da un calorimetro in cristalli di ioduro di cesio per la misura dell'energia depositata dagli elettroni. L'intero rivelatore, schermato da una copertura di scintillatore per identificare e ridurre il fondo nel segnale dovuto a raggi cosmici di altro tipo, ha un peso di circa 3 tonnellate (Fig. 12 b).

LAT overview

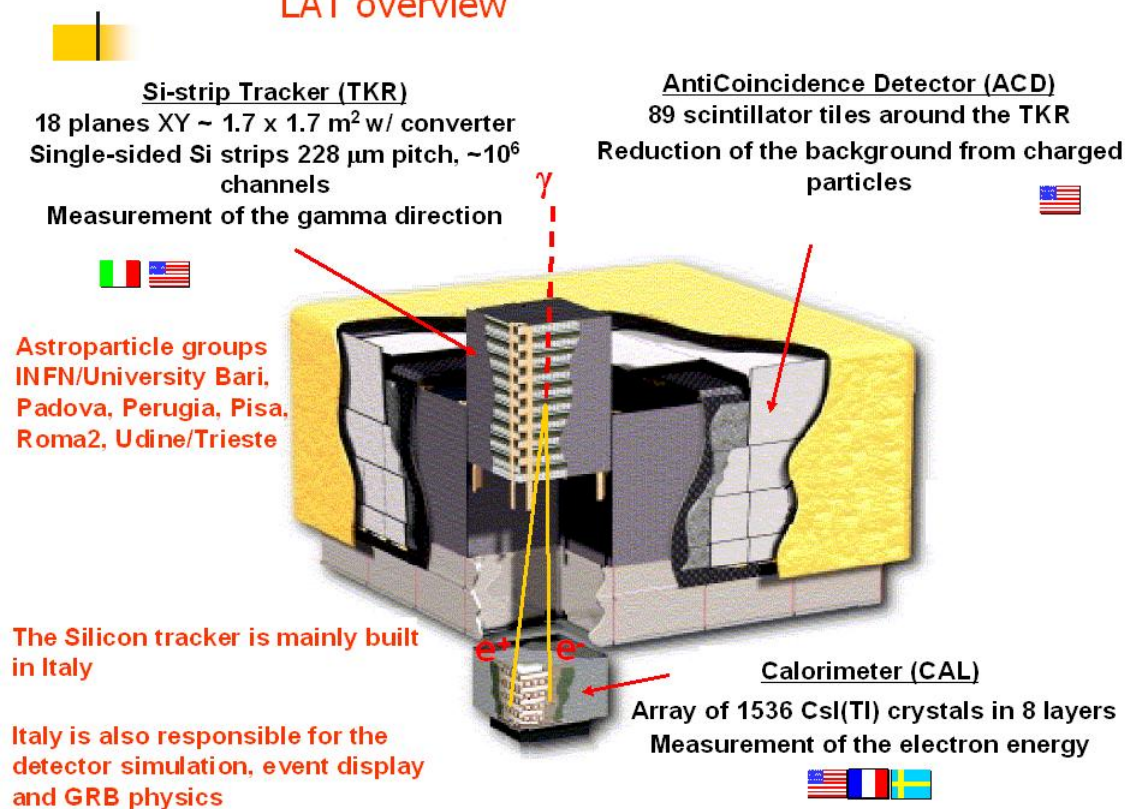


Fig. 12 b: una rappresentazione schematica del rivelatore LAT.

L'università di Udine, assieme agli atenei di Padova, Pisa, Bari e Roma, partecipa attivamente sia alla collaborazione MAGIC che a GLAST. Il gruppo di astrofisica gamma di Udine si occupa specificamente della parte informatica di GLAST, ma va anche ricordato che gran parte di questo satellite, basato su dispositivi rivelatori a semiconduttore, è costruita da un'industria friulana di Cormons. Il gruppo è inoltre responsabile dell'acquisizione dei dati provenienti da MAGIC, e un fisico di Udine (Alessandro De Angelis) è responsabile scientifico dell'esperimento.

L'astrofisica gamma è una scienza in esplosione: negli ultimi cinque anni il numero di sorgenti di altissima energia (oltre i 100 GeV) è più che decuplicata, e in una mappa celeste cominciano a disegnarsi il piano galattico e gli emettitori extragalattici (Fig. 13). Recentemente sono state scoperte anche nuove classi di emettitori gamma, come le binarie periodiche [11].

Le collaborazioni HESS e MAGIC hanno inoltre rivelato una spettacolare emissione di fotoni gamma di altissima energia dalle vicinanze del buco nero nel centro galattico. Non si può escludere che questo segnale sia la prima evidenza di annichilazione di materia oscura, anche se questa regione è ricca di emettitori gamma di natura astrofisica, che potrebbero generare fotoni gamma con le stesse caratteristiche di quelli osservati. La massa della particella che potrebbe spiegare un segnale come quello

osservato è dell'ordine della decina di TeV, più alto di quello preferito dai modelli attuali (Fig. 14).

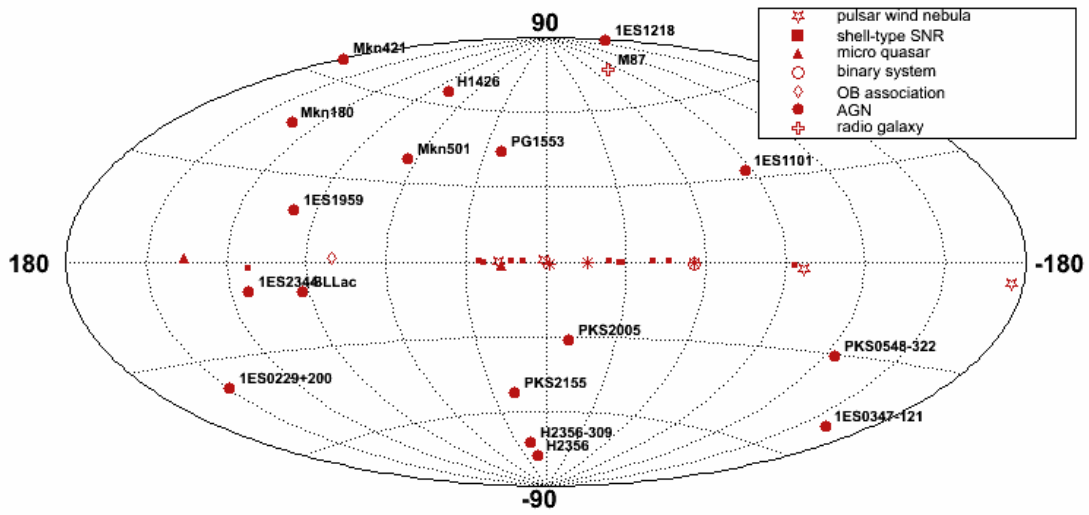


Fig. 13: una mappa delle sorgenti gamma.

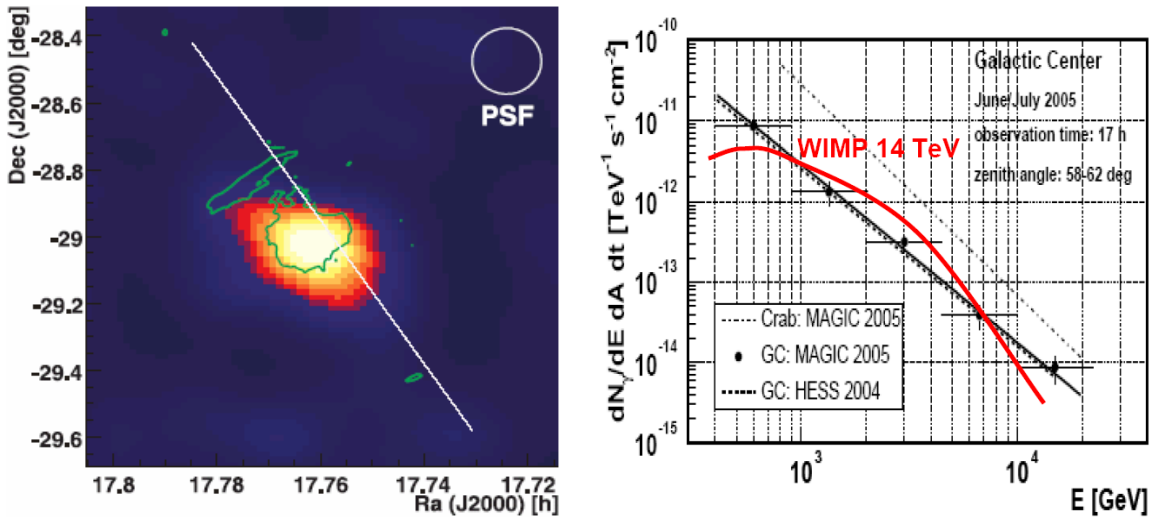


Fig. 14: A sinistra l'immagine gamma del Centro della Galassia (GC) ripresa da MAGIC; è visibile la regione del buco nero. A destra lo spettro di energia dei fotoni rivelati da MAGIC e HESS, confrontato con un'ipotesi di WIMP supersimmetrica di massa 14 TeV.

Inoltre altre galassie vicine, per le quali il moto delle stelle sembra incompatibile con la distribuzione della materia visibile, sono state studiate da MAGIC; la misura è difficile in quanto richiede di accumulare molti dati a causa dell'attenuazione del segnale con la distanza. I primi risultati sulla galassia nana sferoidale Draco, satellite della Via

Lattea, non rivelano segnali, mentre una presa dati lunga e accurata è in corso sulla radiogalassia M87, un ottimo candidato a causa di anomalie gravitazionali ivi osservate.

Le misure descritte in precedenza sono abbastanza “dirette”, in quanto evidenziano i prodotti secondari dell’annichilazione delle particelle di materia oscura. I telescopi gamma consentono anche una misura indipendente, seppure indiretta, della quantità di materia oscura, e anche dell’ancora più misteriosa “energia oscura” che controlla l’evoluzione dell’Universo governandone l’espansione. Tale misura si basa sul fatto che fotoni gamma provenienti da regioni lontanissime, come quelli che arrivano dai collassi gravitazionali nei nuclei delle galassie, viaggiano per centinaia di milioni di anni in uno spazio che si deforma; tale deformazione, misurabile dalle caratteristiche della diffusione dei fotoni, è legata alla densità di materia e di energia dell’Universo.

I prossimi anni saranno cruciali per l’astrofisica gamma, che promette di essere la chiave per scoperte fondamentali nel prossimo decennio. Un secondo telescopio MAGIC è in costruzione a circa 80 metri di distanza dal primo per consentire una visione stereoscopica; l’INFN e le università italiane consorziate 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 che si giova di un importante contributo da parte dell’INAF) e di parte dell’elettronica e del sistema di acquisizione e trattamento in linea dei dati. Questo secondo telescopio, chiamato MAGIC2 (Fig. 15), raddoppierà la sensibilità e migliorerà la precisione di imaging fino a consentire di risolvere 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 GLAST.



Fig. 15: Il telescopio MAGIC è sullo sfondo, e in primo piano il suo gemello in costruzione.

In seguito le collaborazioni MAGIC e HESS si uniranno per costruire due gigantesche matrici di telescopi, chiamate Cerenkov 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, simile a quella utilizzata attualmente, verrà replicata su decine di strumenti in due siti, uno per emisfero. L'Italia ha già avuto, con le componenti legate all'INFN e all'INAF, la responsabilità dell'ottica per questo progetto. C'è speranza tuttavia di introdurre anche nuove tecnologie che potrebbero cambiare il concetto stesso di telescopio utilizzando ottiche di Fresnel in trasmissione per concentrare la luce: ancora una volta l'Italia è all'avanguardia nelle ricerche in questo campo, e il gruppo di astrofisica di Udine svolge un contributo rilevante al data processing e alla stesura della proposta, con Massimo Persic come coordinatore scientifico.

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 [12] e un rivelatore marino in costruzione nel mediterraneo) e di onde gravitazionali (il sistema di satelliti NASA chiamato LISA [13]).

Bibliografia:

- [1] Bruno Rossi, "I raggi cosmici", Einaudi 1971
- [2] NASA, sito web "Imagine the Universe: Gamma Rays"
- [3] F. Aharonian, "The Very-High-Energy Gamma-Ray Sky", Science 315 (2006) 70
- [4] A. De Angelis e L. Peruzzo, "Le magie del telescopio MAGIC", Le Scienze, Aprile 2007
- [5] Sito MAGIC: <http://magic.fisica.uniud.it>
- [6] Sito ARGO: <http://argo.na.infn.it/>
- [7] Sito MILAGRO: <http://www.lanl.gov/milagro/>
- [8] Sito AGILE: <http://agile.rm.iasf.cnr.it/>
- [9] Sito GLAST: <http://glast.gsfc.nasa.gov/> (con una bella brochure scientifica)
- [10] Sito GLAST Italia: <http://glast.pi.infn.it/> (con una buona sezione di outreach)
- [11] J. Albert et al. (The MAGIC Collaboration), Science 312 (2006) 1771
- [12] Sito IceCube: <http://icecube.wisc.edu/>
- [13] Sito LISA: <http://lisa.nasa.gov/>

Alessandro De Angelis, coordinatore scientifico del telescopio Magic e responsabile di Magic per l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, è professore di fisica sperimentale a Udine (dove è presidente del Corso di Laurea Specialistica in Fisica) e a Lisbona. Ha compiuto i suoi studi a Padova; dopo sei anni trascorsi al Cern di Ginevra come associato e quindi staff member al collisionatore elettrone-antielettrone LEP, è approdato all'astrofisica delle particelle nel 1999 ed è fra i fondatori dell'esperimento gamma Glast con i gruppi di Udine-Trieste in Italia e di Goddard e Stanford negli Stati Uniti. Gli esperimenti Magic e Glast coinvolgono ampiamente l'Università e la realtà industriale del Friuli.