

CON UN CENTINAIO DI COLOSSALI SPECCHI DISTRIBUITI SU DI UNA SUPERFICIE DI ALCUNI CHILOMETRI QUADRATI, IL **CHERENKOV TELESCOPE ARRAY (CTA)** SARÀ IN GRADO DI STUDIARE IL CIELO GAMMA CON UNA SENSIBILITÀ SENZA PRECEDENTI. **L'INAF** HA INDIVIDUATO UNA SOLUZIONE TECNICA ORIGINALE E INNOVATIVA



**Piero Vallania**

Ricercatore senior dell'Istituto Nazionale di Astrofisica, è autore di un centinaio di pubblicazioni scientifiche su riviste internazionali.



**Federico Di Piero**

Assegnista di ricerca presso l'INAF-Osservatorio Astrofisico di Torino, ha conseguito il dottorato di ricerca al Politecnico di Torino nel 2007.

# IL TELESCOPIO che scruterà l'Universo più violento



Alla fine del 2011 sono state definite le linee guida dei prossimi dieci anni della Fisica astroparticellare, cioè lo studio dell'Universo alle più alte energie tramite i nuovi "messaggeri": raggi gamma, neutrini, raggi cosmici e onde gravitazionali. Questi "messaggeri", oltre a fornire informazioni sui processi astrofisici in condizioni estreme, permettono di indagare su problemi fondamentali, come la natura della materia e dell'energia oscura.

Tra i "Magnifici Sette" progetti selezionati, nel settore dell'astronomia gamma di altissima energia primeggia il *Cherenkov Telescope Array (CTA)*. Nata dalla collaborazione tra gli esperimenti HESS e MAGIC, ai quali nel 2011 si è aggiunta la componente americana impegnata in VERITAS, questa impresa vede oggi la partecipazione di circa 900 scienziati provenienti da tutto il mondo.

## L'astronomia gamma da terra

L'astronomia gamma esplora lo spettro elettromagnetico di più alta energia, da qualche centinaio di migliaia di volte l'energia della luce visibile fino ai più alti valori misurabili. In questa regione l'atmosfera è opaca e per questa ragione le misure devono essere fatte da satellite misurando direttamente i fotoni incidenti. In passato risultati spettacolari ottennero i satelliti COS-B, Compton Gamma Ray Observatory e Beppo-SAX; in particolare quest'ultimo, operando nella banda X, ha risolto l'enigma dei lampi gamma (*Gamma Ray Burst, GRB*) posto trent'anni prima dai rivelatori montati sui satelliti Vela per verificare il rispetto del trattato internazionale che vietava i test nucleari in atmosfera. Attualmente sono attivi HETE-2, Integral, Swift, Agile e Fermi, impegnati nella mappatura del cielo e nello studio dei fe-

nomeni transienti a energie comprese tra qualche keV e 300 GeV.

Per energie superiori a circa 20 GeV la ridotta dimensione degli strumenti montati su satellite, accompagnata da una marcata riduzione del segnale all'aumentare dell'energia, rende problematica la misura diretta, mentre diventa possibile la rivelazione al suolo tramite effetti secondari prodotti dall'interazione dei fotoni con l'atmosfera terrestre, che si comporta come un gigantesco rivelatore. Questa interazione produce una cascata di particelle secondarie, principalmente elettroni negativi e positivi, che si propagano a una velocità superiore a quella della luce nell'atmosfera. Questo non viola affatto la teoria speciale della relatività: infatti in un mezzo come l'aria la luce si muove più lentamente che nel vuoto, mentre la velocità di una particella dotata di massa, pur non potendo mai eguagliare quella della luce nel vuoto, potrà avvicinarsi indefinitamente ad essa all'aumentare dell'energia, superando in certe condizioni gli stessi fotoni. Quando ciò avviene, si verifica l'emissione di un lampo di luce paragonabile al *bang* supersonico: è la luce Čerenkov, così chiamata in onore del fisico russo che per primo osservò questo fenomeno e che per questo ricevette il premio Nobel nel 1958.

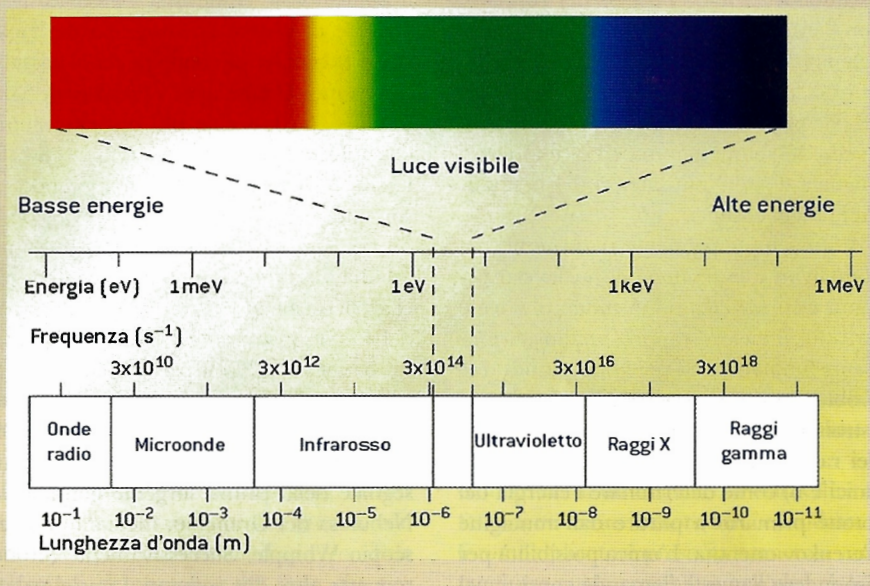
Ogni particella dello sciame emette un cono di luce la cui apertura dipende dall'indice di rifrazione, che per l'aria vale circa un grado; l'intero sciame composto all'incirca da un migliaio di particelle (a 1 TeV) illumina abbastanza uniformemente una regione al suolo di raggio pari a circa 120 metri. L'emissione è massima nell'ultravioletto ma si estende anche al visibile; è di bassissima intensità e di brevissima durata, pochi miliardesimi di secondo, ma in quel breve lasso di tempo risulta più intensa della luce diffusa del cielo notturno e può quindi essere rivelata.

Come avviene in pratica lo studio del cielo e quindi l'identificazione delle sorgenti? Apparentemente l'astronomia gamma al TeV con tecnica Čerenkov è molto simile all'astronomia tradizionale: si usano telescopi e rivelatori con i quali si ottengono le immagini sul piano focale. Le caratteristiche richieste per quanto riguarda sia l'ottica sia i sensori sono un po' diverse: il segnale è molto debole, per cui servo-

## La scala di energia

Dalle onde radio ai raggi gamma più energetici, lo spettro elettromagnetico si estende per oltre 10 ordini di grandezza. A seconda della regione, la radiazione elettromagnetica viene misurata in lunghezza d'onda, frequenza o energia, ma tutte queste quantità sono strettamente correlate e ottenibili una dall'altra. A bassa energia, nella regione delle onde radio, viene usata la frequenza: è il caso delle trasmissioni televisive, o radiofoniche, per le quali le stazioni vengono sintonizzate su di una certa frequenza espressa in hertz. Nella regione intermedia si usa la lunghezza d'onda, che va dai centimetri ai miliardesimi di metro coprendo l'intervallo dalle microonde all'ultravioletto. I nostri "sensori", gli occhi (e in particolare la retina), funzionano in una strettissima finestra compresa tra i 600 e i 400 miliardesimi di metro. Per l'ultima parte dello spettro si usa l'energia: è questa la regione dei raggi X e dei raggi gamma, con valori che vanno dai mille (keV) ai mille miliardi (TeV) di elettronvolt passando per i milioni (MeV) e i miliardi (GeV). Un elettronvolt corrisponde all'energia acquisita da un elettrone accelerato da una tensione di un volt.

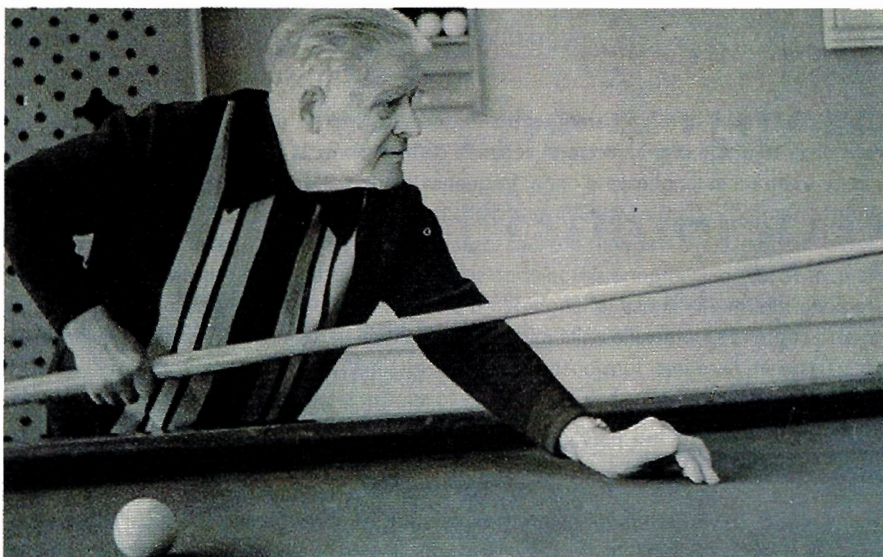
Pur trattandosi dello stesso fenomeno lungo tutta l'ampiezza dello spettro, l'interazione con la materia è molto diversa, privilegiando l'aspetto ondulatorio a bassa energia e quello corpuscolare alle energie più elevate. Cambia anche molto l'assorbimento da parte della materia e quindi cambiano anche dal punto di vista astronomico, la trasparenza del cielo e la possibilità di focalizzazione per ottenere un'immagine.



no grandi specchi; inoltre si focalizza su tutto il piano focale, rendendo necessario un grande campo di vista (dell'ordine di qualche grado) ma con una definizione dell'immagine molto peggiore rispetto a quella dei telescopi astronomici: di conseguenza, anche la realizzazione dell'ottica potrà essere molto meno accurata. Nel complesso si può pensare a un "grosso telescopio fatto male".

Un discorso a parte merita la brevissima durata del lampo di luce Čerenkov: essa impone l'uso sia di un'ottica che non di-

storca i tempi di arrivo dei fotoni, sia di rivelatori di luce molto veloci, con tempi di risposta dell'ordine del miliardesimo di secondo, per poter seguire l'evoluzione temporale del segnale accumulando una minima quantità di luce di fondo. Ma la ragione principale per la quale un telescopio Čerenkov è profondamente diverso da un telescopio ottico è il fatto che mentre per quest'ultimo i fotoni rivelati, seppur modificati durante la propagazione, sono quelli emessi dalla sorgente, i fotoni Čerenkov, come abbiamo visto, sono



Pavel Alexeyevich Čerenkov (1904-1990), premio Nobel per la Fisica nel 1958 per la scoperta della radiazione che porta il suo nome.

il prodotto dell'interazione del primario con l'atmosfera. Inoltre, benché le misure vengano fatte di notte e senza Luna per ridurre il fondo di luce diffusa, esiste un fondo che produce un segnale molto simile a quello dei fotoni gamma ed è centinaia o migliaia di volte più intenso di quest'ultimo: i raggi cosmici.

Costituiti principalmente da protoni, ma contenenti una frazione di nuclei più pesanti, essi provengono in modo uniforme da tutto il cielo e rappresentano un fondo ineliminabile. Si pongono quindi due problemi fondamentali per questo tipo di astronomia: a) come distinguere i segnali dei raggi gamma da quelli dei raggi cosmici e b) come determinare l'energia del fotone primario a partire dall'immagine Čerenkov ottenuta. L'unica possibilità per rispondere a queste domande consiste nel simulare al computer mediante appositi software l'interazione dei diversi primari (gamma, protoni, nuclei di elio ecc.) con l'atmosfera e seguirne lo sviluppo fino alla raccolta della luce Čerenkov da parte dell'ottica e alla formazione dell'immagine sul piano focale. Dal confronto tra queste immagini è possibile ricavare dei parametri per distinguerli.

L'astronomia gamma è quindi completamente dipendente dalle simulazioni, che intervengono in modo determinante sia nella fase di progettazione sia in quella di analisi. Scordatevi quindi di immaginare

il piano focale come una grossa camera CCD e di vedere la fotografia del cielo che si fa sempre più definita con il passare del tempo: le immagini Čerenkov di ogni fotone sono macchie più o meno ellittiche sparse a caso su tutto il piano focale anche se il telescopio sta inseguendo la sorgente.

Se non si analizzassero le immagini una ad una scartando il fondo di raggi cosmici e ricostruendo la direzione di arrivo del fotone primario ci si ritroverebbe in un batter d'occhio il piano focale uniformemente illuminato. Fu proprio questa l'intuizione di A.M. Hillas, che nel 1989 la collaudò con successo ottenendo un segnale della prima sorgente gamma, la Nebulosa del Granchio, mediante il telescopio Whipple. Successivamente furono scoperte altre due sorgenti, i nuclei galattici attivi Mrk 421 e Mrk 501, portando a tre il numero delle sorgenti di altissima energia scoperte all'inizio degli anni '90. Ora le sorgenti conosciute sono circa 130 (l'elenco completo e aggiornato è consultabile su: <http://www.asdc.asi.it/tgevcat>) e questo risultato è stato ottenuto mediante una nuova intuizione: che i telescopi Čerenkov riescono a ricostruire molto meglio le immagini dei fotoni gamma (e a distinguerle dai raggi cosmici) quando lavorano in coppie o meglio in schiere con un passo ottimale che aumenta con l'aumentare dell'energia.

## Il progetto CTA

CTA costituisce il naturale ampliamento delle tecniche messe a punto in questi anni, con un prevedibile incremento di un ordine di grandezza del numero delle sorgenti conosciute. Sarà composto da due schiere di telescopi Čerenkov con lo scopo di: a) aumentare la sensibilità, cioè la capacità di vedere sorgenti più deboli, migliorando nel contempo la capacità di monitorare i fenomeni transienti; b) aumentare la risoluzione angolare e quindi la capacità di studiare con maggior dettaglio la morfologia delle sorgenti estese; c) fornire una copertura uniforme per fotoni di energia compresa tra circa 10 GeV e oltre 100 TeV; d) migliorare la copertura del cielo, attualmente osservato a queste energie per una minima frazione, pari a qualche per cento.

La realizzazione di due siti è necessaria per ottenere una visione completa del cielo. Quello principale, e il primo a essere realizzato, sarà nell'emisfero sud, data la presenza di moltissime sorgenti ricche di dettagli nella regione centrale della nostra Galassia visibile unicamente da lì. Un secondo sito, operativo nell'emisfero nord, sarà dedicato principalmente allo studio dei nuclei galattici attivi e delle galassie lontane.

I luoghi dove sorgeranno questi colossali Osservatori, che si estenderanno su di un'area di diversi chilometri quadrati, non sono ancora stati definiti. Considerando le esigenze di accessibilità, basso inquinamento luminoso e alta percentuale di notti serene, vi sono pochi siti adatti. Per l'emisfero sud la scelta è attualmente tra la Namibia (dove si trova HESS, ma probabilmente non esattamente nello stesso luogo) e l'Argentina; per l'emisfero Nord si parla principalmente delle Canarie (dove si trova Magic, ma anche in questo caso non nella stessa isola) oppure dell'Arizona. La decisione verrà presa nel corso del 2012 e l'inizio della costruzione del sito sud è previsto per il 2015.

I primi studi indicano che un Osservatorio composto da un centinaio di telescopi distribuiti su di un'area di qualche chilometro quadrato può raggiungere la sensibilità richiesta, anche se la configurazione esatta dei telescopi sul terreno non è stata ancora decisa. Per coprire un intervallo di energia

così vasto non è possibile utilizzare un solo tipo di strumento, perciò CTA prevede tre schiere di telescopi di diverso tipo, ciascuno ottimizzato per osservare a energie diverse. L'energia più bassa (10 GeV-100 GeV) sarà coperta da 3-4 enormi telescopi di 24 m di diametro (da confrontarsi con i 17 m di Magic, il più grande telescopio per raggi gamma attualmente operativo) in grado di raccogliere lo scarso segnale Čerenkov prodotto a quelle energie. L'immagine è piccola e debole, quindi occorrono un enorme specchio e una piccola dimensione dei *pixel* che compongono la camera posta nel fuoco del telescopio (0,1°).

A energie intermedie il numero dei telescopi cresce e le loro dimensioni diminuiscono. Tra 100 GeV e 3 TeV opererà la schiera dei telescopi medi: circa 30 strumenti da 12 m di diametro e con un *pixel* di 0,18°. È in questa regione che ci si aspetta la maggior parte dei risultati scientifici: lo spettro delle sorgenti è ancora abbastanza intenso da generare un buon numero di fotoni gamma la cui energia è sufficiente a produrre un'immagine ben definita.

Al di sopra dei 3 TeV la situazione cambia nuovamente: l'immagine Čerenkov è di grandi dimensioni angolari e molto intensa, mentre i flussi attesi decadono rapidamente e il numero di fotoni gamma prodotti dalla sorgente costituisce la limitazione principale alla sensibilità. Occorrono quindi numerosi telescopi non molto grandi disposti a una notevole distanza tra loro in modo da coprire una superficie di circa 3 km<sup>2</sup>. Poiché questa regione di energia è in gran parte inesplorata ai livelli di sensibilità ottenibili da questo apparato, potrebbero emergere risultati inattesi.

## Il contributo italiano

La partecipazione italiana al progetto CTA è coordinata dall'INAF, Istituto Nazionale di Astrofisica, con la collaborazione di alcune Università e sezioni dell'INFN, ed è rivolta proprio allo studio di questa parte di più alta energia. L'ambizioso progetto prevede la realizzazione di uno schema ottico innovativo e l'uso di un nuovo rivelatore di piano focale.

Sono in fase di sviluppo due progetti per i piccoli telescopi. Il primo prevede uno schema classico del tutto simile a quello

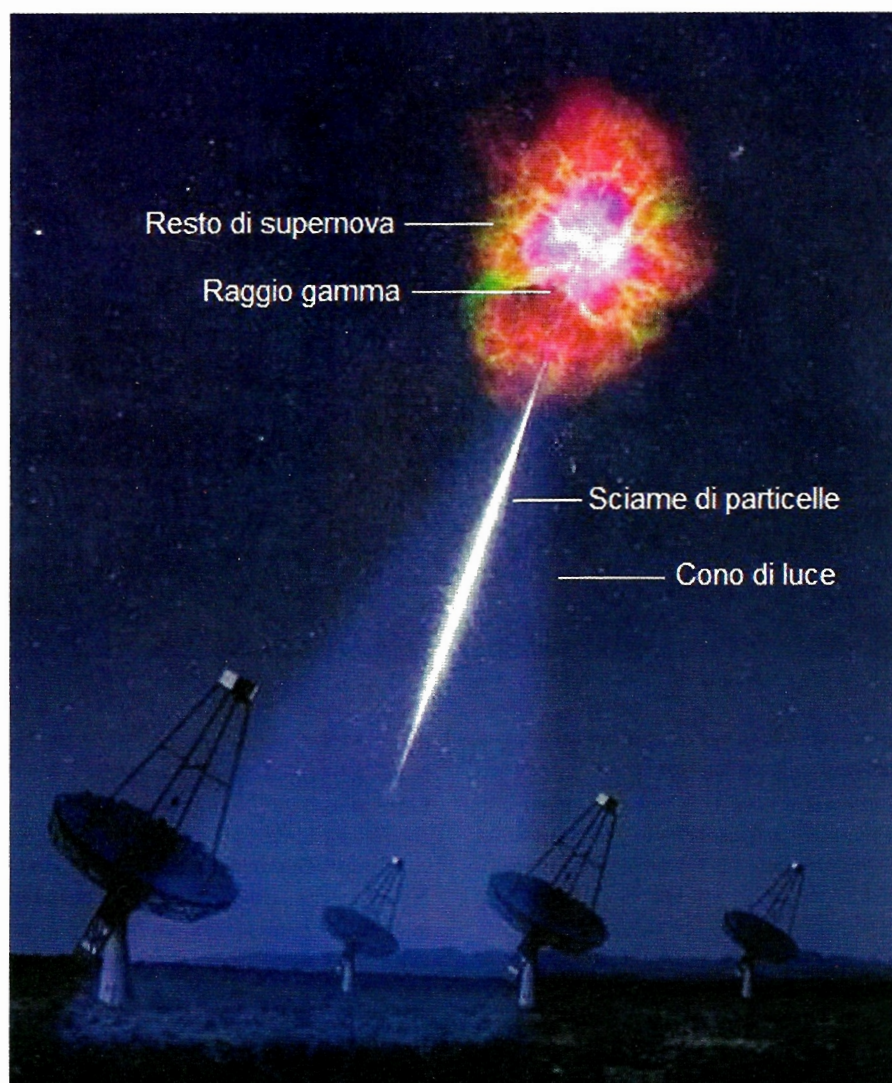


Immagine schematica della rivelazione dei fotoni di altissima energia con la tecnica Čerenkov.

adottato finora e sostanzialmente identico a quello dei telescopi più grandi, con uno specchio di 7 m di diametro. Tale schema è determinato dal fatto che per misurare il velocissimo lampo di luce Čerenkov lo strumento tradizionalmente usato sin dagli albori di questa tecnica è stato il fotomoltiplicatore, posto nel fuoco del telescopio per misurare un singolo *pixel* dell'immagine.

Dall'aspetto vagamente simile a una lampadina, come quest'ultima esso è costituito da un involucro di vetro dal quale è stata estratta quasi tutta l'aria. La conversione dei fotoni in elettroni avviene in una particolare sostanza detta fotocatodo; successivamente gli elettroni vengono accelerati e moltiplicati tramite un campo elettrico

dell'ordine di un migliaio di volt. Oltre al fatto di essere un sensore ben collaudato, il fotomoltiplicatore presenta numerosi vantaggi, tra cui la sensibilità nell'ultravioletto, dove il segnale Čerenkov è più intenso, e una scarsa sensibilità al rosso, dove è dominante il contributo della luce di fondo. Le sue dimensioni minime, dell'ordine del centimetro, determinano la configurazione ottica necessaria per soddisfare i requisiti richiesti in termini di dimensione angolare del *pixel*; la richiesta di un'ottica che conservi la struttura temporale del segnale porta alla definizione del telescopio Čerenkov standard: uno specchio tassellato con tasselli di circa un metro e una camera, a grande distanza dallo specchio, con dimensioni di 1-2 m e del peso di cen-



Il telescopio Whipple in Arizona (USA).

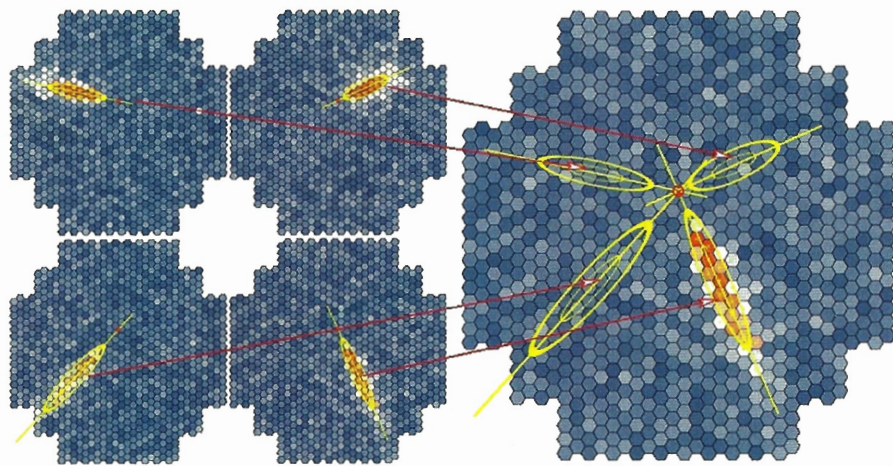
tinaia di chilogrammi, costituita da circa 1000-2000 fotomoltiplicatori.

I ricercatori dell'INAF si sono posti una domanda: è possibile immaginare una configurazione diversa ma in grado di soddisfare gli stessi requisiti utilizzando una tecnologia più recente?

La risposta è stata affermativa: aggiungendo uno specchio secondario, oltre a migliorare le proprietà ottiche del sistema a grande distanza dall'asse (il campo di vista previsto è di circa  $10^\circ$ ) si riduce drasticamente la dimensione lineare del *pixel* a parità di angolo (la cosiddetta *Plate Scale*) e diventa possibile utilizzare i più recenti fotomoltiplicatori *multipixel*, oppure i nuovissimi fotomoltiplicatori allo stato solido. In entrambi i casi la dimensione del sensore si riduce a qualche millimetro, rendendo sia il telescopio sia la camera molto più compatti; anche il diametro dello specchio primario è stato portato a 4 m. La conseguente riduzione dei costi permette di realizzarne un numero maggiore (circa 60). Lo studio di questo prototipo innovativo costituirà una grandissima sfida finanziata come PRIN (Progetto di Ricerca di Importanza Nazionale) in ambito universitario e come "Progetto Bandiera" dell'INAF sotto il nome di ASTRI. ASTRI si ripromette di progettare, realizzare e collaudare un prototipo di piccolo telescopio

presso l'Osservatorio Astrofisico Serra La Nave, sulle pendici dell'Etna.

Oltre a collaudare il funzionamento in condizioni operative, si metterà alla prova la sensibilità del telescopio puntando la Nebulosa del Granchio, ritenuta per anni la sorgente stabile più intensa presente nel cielo e anzi usata come unità di misura del flusso di raggi gamma a queste energie fino alla clamorosa scoperta della sua variabilità da parte del satellite AGILE, confermata successivamente da Fer-



Simulazione di uno sciame gamma osservato da quattro telescopi (a sinistra). Per ragioni prospettive le immagini si formano in regioni diverse del piano focale, mentre l'intensità varia in funzione della distanza dal centro dello sciame. Combinando le immagini è possibile misurare la direzione di arrivo della particella che ha generato lo sciame (a destra).

mi. Proprio per questa scoperta il team di Agile ha vinto il Premio Bruno Rossi della HEAD – *American Astronomical Society*, il più importante al mondo dedicato all'Astrofisica delle Alte Energie.

## Messaggeri di un Universo "violento"

Ma in che modo CTA dovrebbe ampliare le nostre conoscenze sull'Universo?

La generazione attuale di telescopi Čerenkov atmosferici (HESS, MAGIC e VERITAS) ha spalancato le porte dell'astronomia gamma da terra portandola dalla semplice misura di un eccesso di conteggi alla visualizzazione di mappe confrontabili con quelle ottenute ad altre lunghezze d'onda. Ed è proprio grazie a questo confronto che CTA si propone di esplorare in profondità i fenomeni più energetici del nostro universo tramite quella che viene definita "analisi multispettrale" e la collaborazione con i rivelatori di raggi cosmici e di neutrini.

Le sorgenti di raggi gamma a queste energie sono sia galattiche sia extragalattiche, con una prevalenza numerica di queste ultime. Le prime sono costituite principalmente dagli involucri gassosi dei resti di supernovae, come nel caso della già citata Nebulosa del Granchio. In questo caso i fotoni gamma sono prodotti attraverso un meccanismo a due stadi: prima come raggi X per radiazione di sincrotrone dagli elettroni accelerati negli intensi campi

## La luce Čerenkov

L'emissione di luce Čerenkov avviene quando una particella carica si muove in un mezzo con una velocità superiore a quella che avrebbe un fotone nello stesso mezzo. Non può quindi avvenire nel vuoto, dove la luce viaggia alla massima velocità indicata con  $c$ ; ma in un mezzo con indice di rifrazione  $n$  (con  $n$  sempre maggiore di 1) la velocità della luce scende a  $c/n$  e questo permette a una particella carica con velocità  $v=\beta c$  (con  $\beta$  sempre minore di 1) di produrre luce Čerenkov quando  $\beta > 1/n$ . L'indice di rifrazione dell'aria al livello del mare è pari a 1,00029, da cui si ottiene  $\beta_{min}=0,99971$ . La velocità di una particella può essere convertita in energia conoscendo la sua massa a riposo  $m$ ; nel nostro caso si ottiene  $E_{min} = 1/\sqrt{1-\beta^2} \cdot mc^2$ . Da questa formula si ricava che l'energia minima per l'emissione di luce Čerenkov si ha per la particella carica più leggera, l'elettrone (negativo e positivo), ed è pari a 21 MeV, corrispondente all'accelerazione ottenuta applicando una tensione di 21 milioni di volt. Per confronto, i tubi catodici utilizzati per visualizzare le immagini nei vecchi televisori acceleravano gli elettroni con una tensione di qualche decina di migliaia di volt.

Nonostante la presenza di molti tipi di particelle all'interno dello sciame, il maggior contributo al lampo di luce Čerenkov sarà dato dagli elettroni, anche nel caso in cui la cascata sia stata generata da un protone.



Luce Čerenkov dal caratteristico colore azzurro emessa all'interno del liquido di raffreddamento di un reattore nucleare.

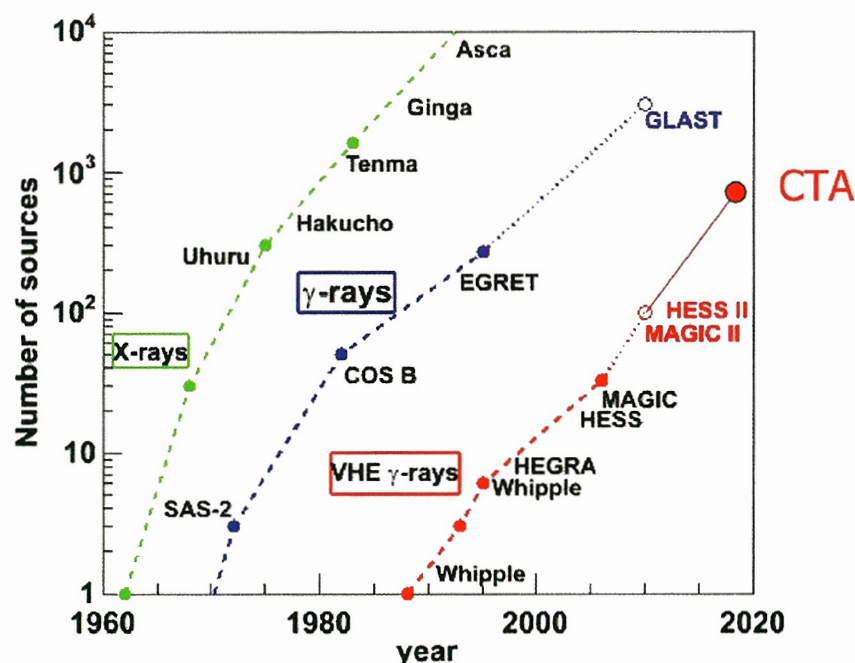
magnetici presenti nei dintorni della pulsar; successivamente gli stessi elettroni provvedono a fornire loro ulteriore energia tramite un meccanismo di trasferi-

mento detto effetto Compton inverso. In questo modo si possono produrre fotoni con energia oltre 1 TeV; il fatto che la radiazione gamma sia polarizzata, come è

emerso dalle misure del satellite Integral, conferma la correttezza di questa interpretazione.

I raggi gamma possono però essere prodotti anche tramite l'interazione tra i nuclei di idrogeno altamente accelerati e la nube di gas espulsa nel mezzo interstellare dall'esplosione di una supernova. In questo caso si produce una particella instabile, il pione neutro, che decade immediatamente in due fotoni. Benché tale processo debba necessariamente avvenire da qualche parte, non esiste al momento alcuna sorgente per la quale sia stato dimostrato inequivocabilmente che esso costituisca il meccanismo di produzione dei raggi gamma osservati. Questa scoperta proverebbe inoltre il "dogma" dell'astrofisica delle alte energie, e cioè che i raggi cosmici galattici siano accelerati dalle esplosioni di supernovae: a più di cento anni dalla loro scoperta non è stata ancora provata in maniera definitiva la loro origine.

Per quanto riguarda le sorgenti extragalattiche, si tratta principalmente di nuclei galattici attivi, che ne costituiscono la maggior parte. In questo caso ci troviamo di fronte a galassie contenenti un buco nero supermassivo, e l'emissione dei raggi gamma avviene dal materiale accelerato gravitazionalmente a velocità prossime a quella della luce. La fame insaziabile di



Il numero delle sorgenti scoperte in una nuova regione di energia cresce con il tempo seguendo all'incirca una legge di potenza. Questo è stato verificato ad esempio per i raggi X e i raggi gamma di più bassa energia osservati da satellite, con un incremento di un fattore 10 ogni circa 10 anni. Le sorgenti gamma di altissima energia scoperte sinora sono poco più di cento: con CTA si conta di raggiungere il migliaio alle soglie del 2020.

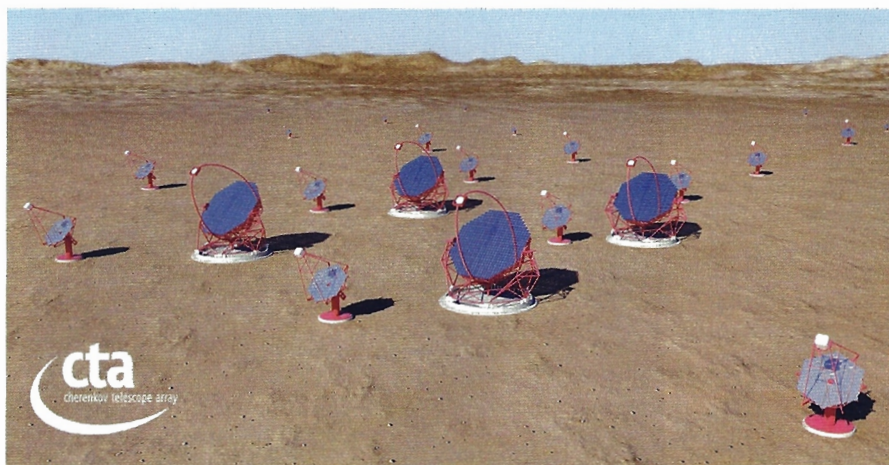


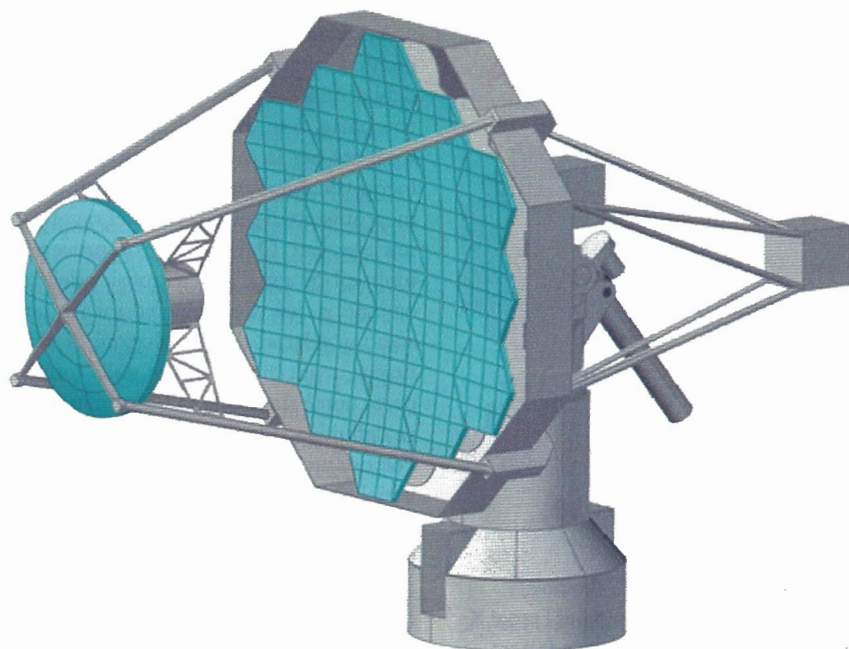
Immagine pittorica dell'osservatorio CTA, con in primo piano il centro della schiera dominato dai giganteschi telescopi per la misura degli eventi di più bassa energia.

questi mostri non è costante e talvolta si producono dei picchi di emissione gamma detti *flare* (v. *Le Stelle* n. 84, p. 13).

Un'altra categoria di oggetti galattici che si ritiene capace di accelerare i raggi cosmici è costituita dai *microquasar*, sistemi binari composti da una stella ordinaria di grande massa orbitante attorno a un oggetto compatto (una stella di neutroni o un buco nero) che ne risucchia la materia. Ciò avviene principalmente nel punto di massimo avvicinamento, dando luogo a una emissione periodica di raggi gamma.

Uno dei più noti oggetti di questo tipo è LSI+61 303, scoperto da Magic nel 2006. Infine, nonostante che molte sorgenti scoperte al TeV fossero già state studiate ad altre lunghezze d'onda, ne sono state trovate anche parecchie che non hanno alcuna controparte nota.

Oltre ad aver fornito questi risultati sulle sorgenti di fotoni gamma galattici ed extra-galattici, è sulle problematiche di fisica fondamentale che CTA potrebbe dare contributi preziosi. La gravità quantistica prevede che la velocità di propagazione di

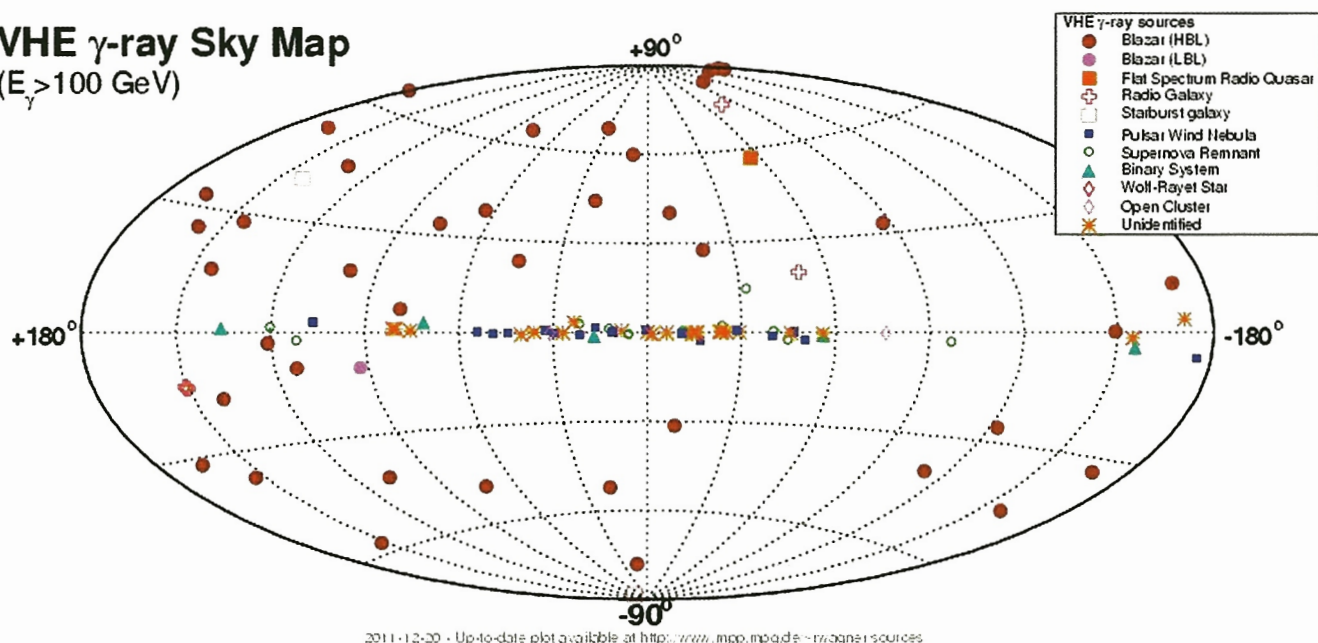


Progetto schematico del telescopio a doppio specchio sviluppato dall'INAF per l'osservazione dei raggi gamma di più alta energia.

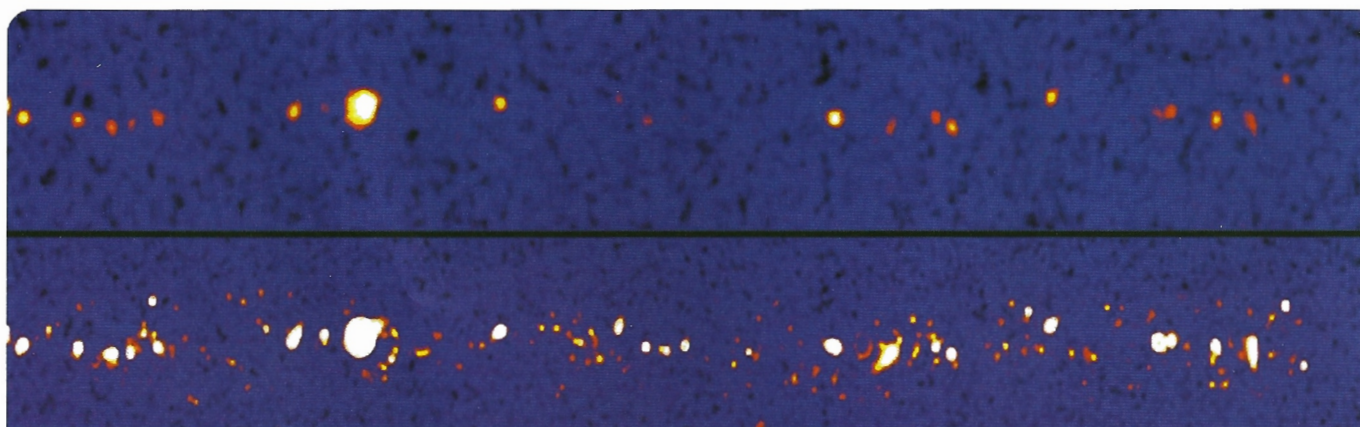
un fotone dipenda dalla sua energia. Fotoni di più alta energia viaggerebbero a una velocità leggermente inferiore, subendo una specie di indice di rifrazione gravitazionale. L'effetto è piccolissimo e può essere rivelato solo su lunghissime distanze. Questo risultato sembra essere stato messo in evidenza dal satellite Fermi studiando i fotoni gamma emessi dalle esplosioni più intense che avvengono nell'Universo: i lampi gamma. Ciò che è stato osservato è che i fotoni più energetici associati ai lampi gamma arrivano con qualche secondo di ritardo rispetto a quelli di più bassa energia, e questo dopo un viaggio che può essere anche di miliardi di anni.

Data la piccola area di raccolta dei satelliti, il confronto può essere fatto fino a energie di qualche decina di GeV, ma poiché l'effetto aumenta con l'energia, sarebbe di grande aiuto misurare l'emissione fino a 100 GeV. Si tratta di uno studio estremamente difficile in quanto i lampi gamma si producono a caso nel cielo e i telescopi di CTA dovrebbero avere la fortuna di essere puntati nella giusta direzione (oppure essere riposizionabili nel giro di poche decine di secondi come Magic); inoltre dovremmo assumere che i fotoni siano stati emessi tutti allo stesso tempo. Ma in ogni caso questo costituisce un esempio di ciò che si intende con Fisica Astroparticellare, nella quale osservazioni astronomiche producono risultati che si riflettono sulla Fisica delle particelle elementari: il mondo dell'infinitamente grande che offre risposte (e crea quesiti) a quello dell'infinitamente piccolo. Un altro esempio è dato dalla materia oscura: sappiamo ormai da parecchi decenni che le curve di rotazione delle galassie indicano la presenza di grandi quantità di massa non visibile, molto superiore alla materia luminosa delle stelle. Essa costituisce infatti l'85% della materia totale dell'Universo, ed è composta verosimilmente da una nuova classe di particelle come quelle previste dalle nuove teorie che ampliano le nostre attuali conoscenze sulla Fisica delle particelle elementari contenute nel cosiddetto *Modello Standard*. A seconda dei modelli, le particelle che compongono la materia oscura possono decadere o annichilarsi, cioè convertire interamente la loro massa in energia, dando origine alle convenzionali parti-

## VHE $\gamma$ -ray Sky Map ( $E_\gamma > 100$ GeV)



Mapa del cielo attualmente conosciuto a energie superiori a 100 GeV; la legenda a destra identifica il tipo di sorgente.



Confronto tra l'immagine attuale di una regione del piano galattico (sopra) e quella che ci si aspetta da CTA (sotto).

celle del *Modello Standard*, e in particolare fotoni di altissima energia. L'accumulo di grandi quantità di materia oscura in regioni ad alta gravità può condurre a un segnale rivelabile, specialmente qualora la produzione dei raggi gamma avvenga per annichilazione. Il nostro centro galattico è una delle regioni più promettenti per questa ricerca a causa dell'alta densità prevista per questa materia così sfuggente. Le osservazioni attuali hanno effettivamente mostrato un'emissione di raggi gamma di alta energia, ma l'identificazione della materia oscura nel centro galattico è resa difficile dalla presenza di numerose sorgenti convenzionali e di una

radiazione diffusa di fotoni gamma, difficile da stimare. Grazie alla sua risoluzione angolare ed energetica e alla sua straordinaria sensibilità, CTA sarà in grado di separare i diversi contributi.

Dopo migliaia di anni trascorsi a osservare la piccola porzione di spettro elettromagnetico alla quale siamo naturalmente sensibili, la luce visibile, abbiamo iniziato appena un secolo fa ad osservare il cielo con occhi diversi, prima andando verso lunghezze d'onda più grandi (le onde radio) e successivamente verso energie sempre maggiori, con i raggi X e gamma. Ogni nuova regione di energia ha portato informazioni sui diversi costituenti dell'U-

niverso, a causa delle diverse proprietà di emissione e di assorbimento. I raggi gamma di altissima energia provengono dagli oggetti più irrequieti e violenti, osservabili fino a miliardi di anni luce da noi, e ci forniscono informazioni sia sulla sorgente sia sullo spazio che essi hanno attraversato durante il loro viaggio fino a noi. L'astronomia gamma di altissima energia da terra è ormai matura e CTA sarà in grado di dimostrarlo. ■

*Per approfondire:*

Sito web di CTA: [www.cta-observatory.org](http://www.cta-observatory.org)

Sito web del progetto ASTRI: [www.brera.inaf.it/astri](http://www.brera.inaf.it/astri)