

Guardare il cielo con nuovi occhi

I raggi gamma e i telescopi Cherenkov

Materiale di accompagnamento per il concorso a cura di Sara Anzuinelli, Sandro Bardelli, Giannandrea Inchingolo, Antonino La Barbera, Valentina La Parola, Laura Paganini, Adamantia Paizis, Anna Wolter
per conto del Gruppo INDACO
(INAF per la Divulgazione di ASTRI e CTA Observatory)

I colori dell'Universo

Lo spettro elettromagnetico

Andando in ordine di energia crescente, la radiazione (o spettro) elettromagnetica si estende dalle onde radio ai raggi gamma. La Figura 1 mostra le caratteristiche in termini di lunghezza d'onda, frequenza (energia) e temperatura. È anche indicata una scala approssimativa della lunghezza d'onda in termini di dimensioni degli oggetti terrestri.

Negli oggetti astronomici, hanno luogo diversi processi fisici che emettono radiazione elettromagnetica lungo tutto lo spettro. Possono essere processi legati alla temperatura del corpo in questione, all'emissione di particelle cariche in accelerazione in un campo magnetico, allo scambio di energia fra elettroni e fotoni (effetto *Compton*), alla radiazione emessa da una particella carica in presenza di altre particelle cariche, tipicamente nuclei di atomi (*Bremsstrahlung*, in italiano: radiazione di frenamento).

Solo l'osservazione di un oggetto celeste in tutto lo spettro elettromagnetico può condurre alla comprensione della fisica (e della bellezza) dello stesso.

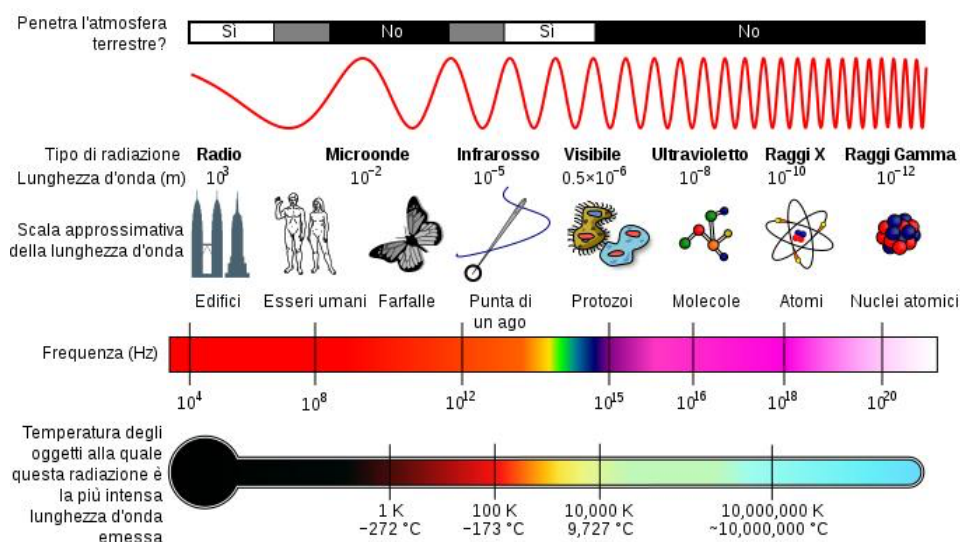


Figura 1 - Lo spettro elettromagnetico. (Crediti <https://www.chimica-online.it/>)

L'atmosfera terrestre

L'atmosfera terrestre però non permette a tutta la radiazione di arrivare al suolo. Nella Figura 2, il profilo delle curve mostra la trasparenza dell'atmosfera a una data lunghezza d'onda. Come si può vedere, a Terra giunge la radiazione visibile, parte dell'infrarosso (ad alta quota) e parte del radio.

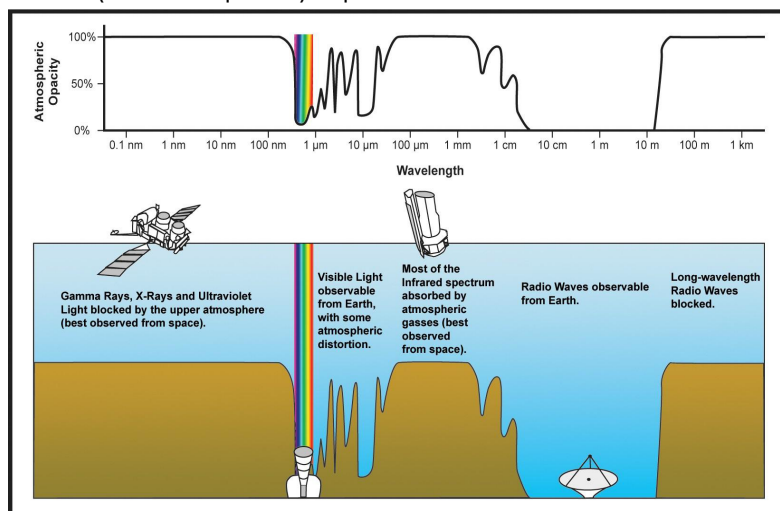


Figura 2 - Lo spettro elettromagnetico e l'opacità dell'atmosfera terrestre.
(Crediti <https://sites.science.oregonstate.edu/>)

I raggi più energetici - X e Gamma - sono totalmente schermati (per nostra fortuna, infatti sono pericolosi per la vita). Per poterli osservare è dunque necessario portare rivelatori nello Spazio; solo così si può avere una visione d'insieme in tutto lo spettro elettromagnetico.

Alcuni satelliti della flotta spaziale dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) sono mostrati in Figura 3. A questi vanno aggiunti tutti i telescopi da terra che permettono l'osservazione nelle bande in cui l'atmosfera è trasparente: visibile, parte dell'infrarosso, parte del radio.

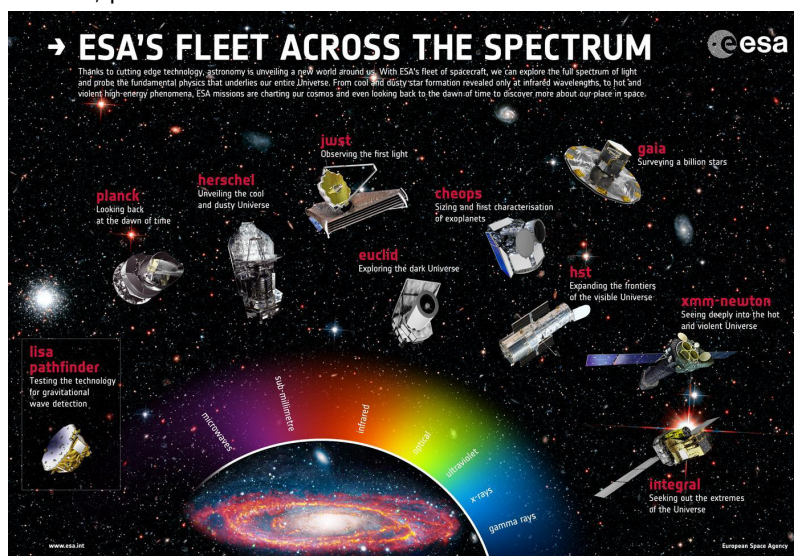


Figura 3 - Esempi di satelliti ESA. (Crediti ESA)

Un Universo multibanda

La Figura 4 mostra due esempi di come lo stesso oggetto (grande o piccolo che sia) appare nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico. Nella parte alta, si vede un'immagine della nostra Galassia, nella parte bassa un resto di supernova, un oggetto più "piccolo" e relativamente vicino a noi (a circa 6.500 anni luce di distanza), la nebulosa del Granchio (*Crab Nebula* in inglese).

Come si vede, le immagini nei raggi Gamma sono poco dettagliate rispetto alle altre bande: un po' perché ci sono meno fotoni gamma (la natura fa più fatica a crearli), un po' perché dal punto di vista tecnologico è molto difficile rivelarli. Lo vedremo nella prossima sezione.

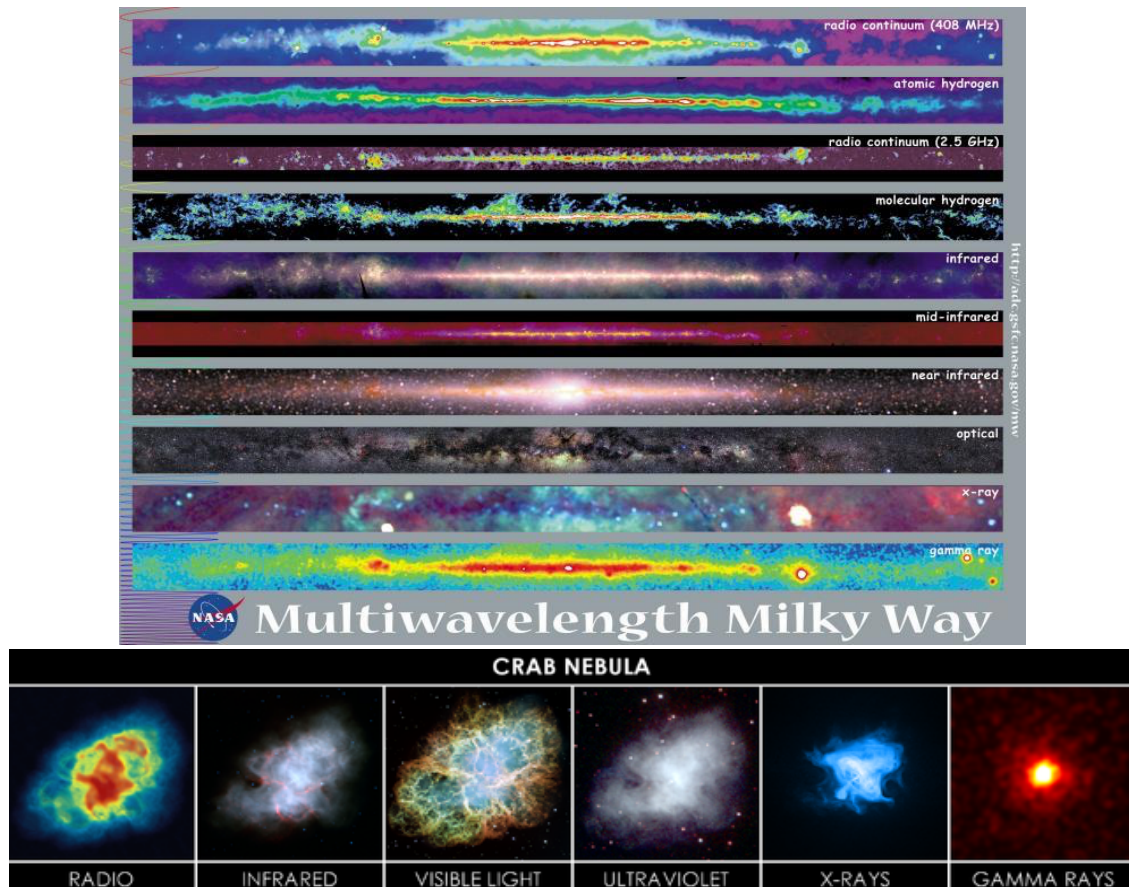


Figura 4 - I molti volti degli oggetti spaziali: sopra, la nostra Galassia; sotto, la Nebulosa del Granchio. (Crediti: NASA, WikiCommons)

Lo strano caso dei fotoni TeV

Se vuoi il TeV, cerca il blu

In base a quanto detto prima, sembrerebbe naturale pensare che se vogliamo osservare l'Universo nei raggi Gamma a più alta energia (i TeV, un milione di milioni di volte più energetici della luce visibile) è necessario andare nello Spazio. In teoria questo è vero, in pratica no. La radiazione TeV viene creata da fenomeni estremamente violenti e il numero di fotoni emesso è limitato quindi bisognerebbe mandare nello Spazio strumenti troppo grandi per poter sperare di

rivelare qualcosa. Niente a che vedere, per esempio, con la generosità del cielo nel visibile!

Come osservare dunque il cielo TeV? Usando l'atmosfera!

Quando i fotoni TeV interagiscono con l'atmosfera terrestre, producono una cascata di particelle (uno *sciame*) che viaggiano per un tempo brevissimo a una velocità maggiore di quella della luce nello stesso mezzo, in questo caso l'aria.

(Attenzione: sempre senza superare la velocità della luce nel vuoto, ~ 300.000 km/s, che è un limite insuperabile secondo le equazioni di Einstein). Le *particelle più veloci della luce nel mezzo* provocano l'emissione, per un brevissimo istante, di una radiazione blu, chiamata **luce Cherenkov** (parliamo di nanosecondi, troppo breve per vederla a occhio nudo).

Quindi avviene questa cosa molto poco intuitiva: per osservare il TeV che proviene dallo Spazio, bisogna cercare il blu nell'atmosfera terrestre. In Figura 5 si può vedere la tipica radiazione blu all'interno della piscina di raffreddamento di un reattore nucleare. Il fenomeno che produce la luce blu è lo stesso, l'effetto Cherenkov, ma il numero di particelle nel reattore nucleare è molto maggiore e la luce appare diffusa e persistente.

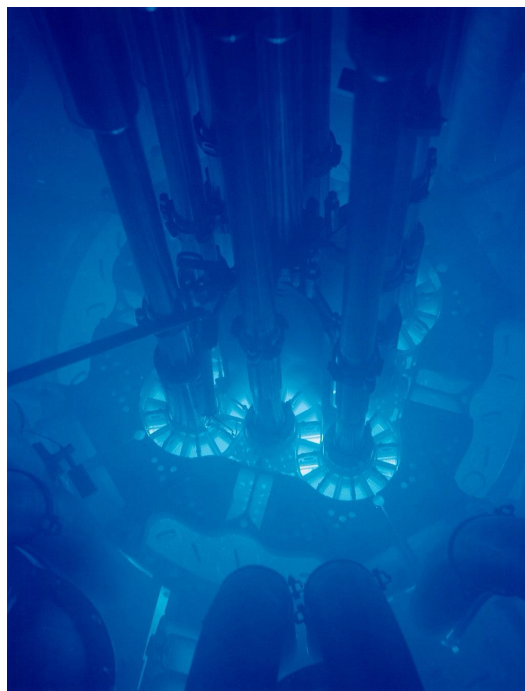


Figura 5 - Luce Cherenkov nei pressi di un reattore nucleare. (Crediti: Wikipedia)

L'effetto Cherenkov che usiamo per osservare i fotoni TeV dallo Spazio è molto meno frequente e servono potenti telescopi e strumenti ottici. Fra questi, segnaliamo ASTRI Mini-Array (<http://www.astri.inaf.it/>) e il CTAO (<https://www.ctao.org/>), capaci di ricavare in maniera indiretta le caratteristiche delle sorgenti di fotoni TeV.

La Figura 6 mostra uno dei 9 telescopi di ASTRI Mini-Array e un *rendering* dei tre tipi di telescopi del CTAO ora in via di costruzione.

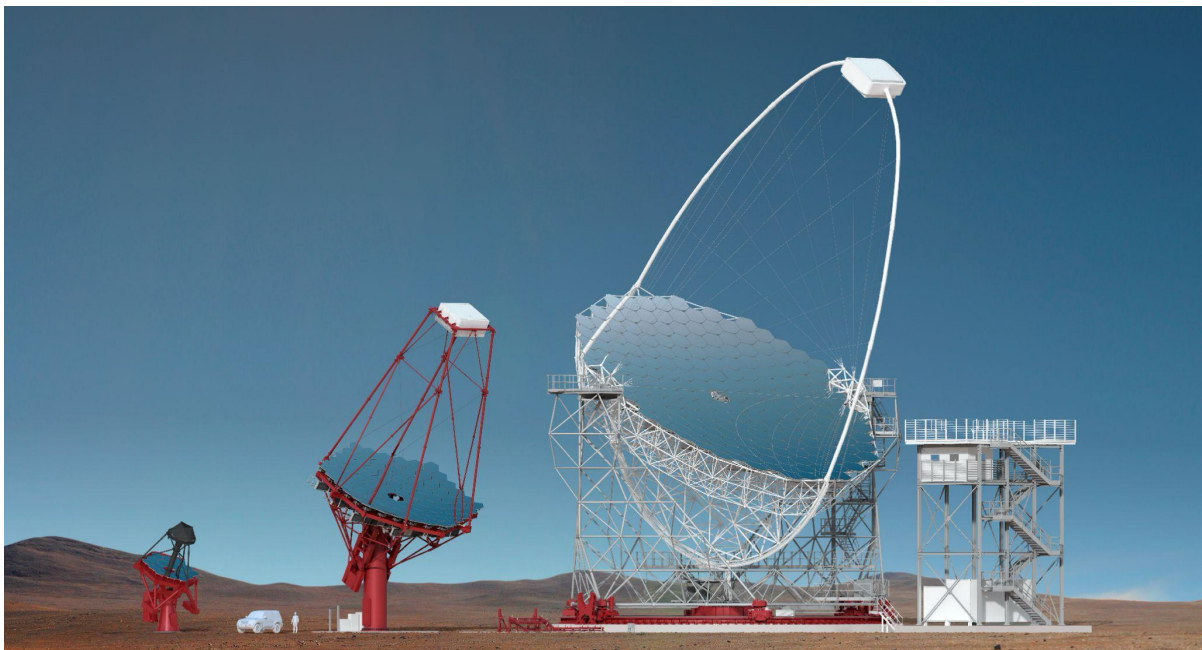


Figura 6 - Sopra: uno dei 9 telescopi di ASTRI Mini-Array. (Crediti INAF/ASTRI)
Sotto: rendering dei tre tipi di telescopio del CTAO. (Crediti: Gabriel Pérez Díaz, IAC)

A cavallo di un fotone TeV

Torniamo ai fotoni TeV dal Cosmo e al loro ingresso in atmosfera: questo video di un paio di minuti, prodotto dal CTAO, visualizza in maniera molto chiara il percorso dei raggi gamma dalla sorgente allo strumento di rivelazione: [CTA](#)

Science: Emission to Discovery (in inglese con sottotitoli anche in italiano).

Guardatelo prima di continuare a leggere.

I fotoni TeV partono dalle profondità dello Spazio, emessi da una sorgente cosmica (vedremo dopo qualche esempio di sorgente). I fotoni che vengono nella nostra direzione vengono assorbiti dall'atmosfera terrestre e, attraverso l'effetto Cherenkov spiegato precedentemente, sono trasformati in fotoni blu che lasciano un'impronta allungata sui rivelatori (Figura 7a). Combinando le informazioni da più telescopi, si riesce a capire meglio la direzione di provenienza del fotone TeV iniziale (intersezione in Figura 7b) e la sua energia.

Una rivelazione decisamente indiretta.

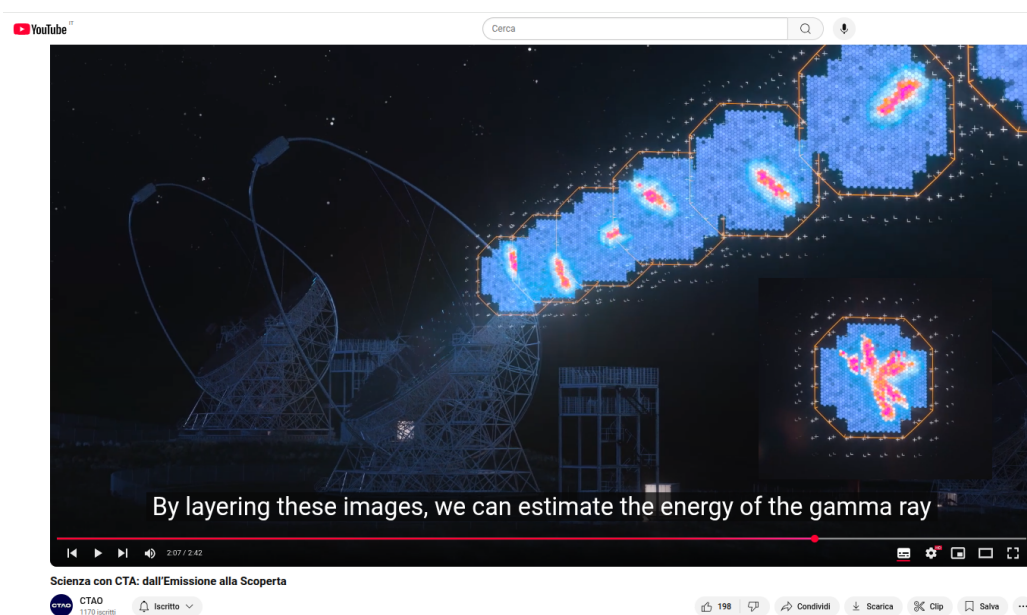
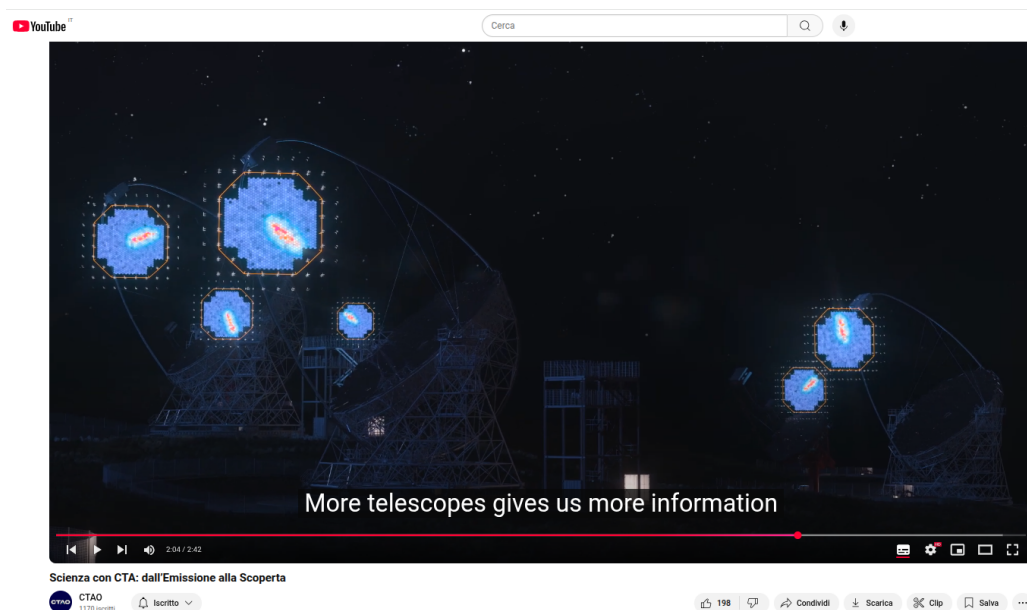


Figura 7 (dall'alto: a, b) - La ricostruzione della direzione di fotoni TeV. (Crediti: CTAO)

Ci siamo: dopo il blu, si torna al TeV!

Dopo le osservazioni nella luce blu e le relative analisi dei dati che permettono di ricostruire la direzione dei fotoni TeV di partenza, si ottengono immagini come quella mostrata in Figura 8: si può vedere una sorgente che consideriamo puntiforme, il sistema binario LS 5039, e una più diffusa, la *pulsar wind nebula* HESS J1825-137 (si veda la sezione seguente). Sono immagini ben diverse da quelle in altre bande di energia mostrate in Figura 4 e ora sappiamo il perché: c'è di mezzo l'atmosfera.

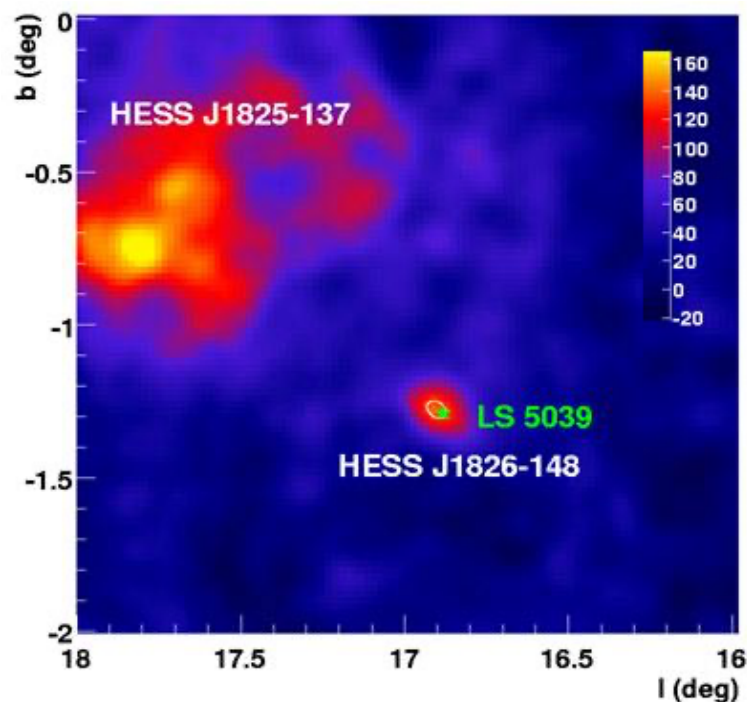


Figura 8 - Un sistema binario (LS 5039) e la PWN HESS J1825-137. (Crediti H.E.S.S. - precedente a ASTRI Mini-Array e al CTAO)

Oltre alla direzione di provenienza, il codice di analisi permette anche di avere indicazioni sul tempo di arrivo e sull'energia dei fotoni, differenziandone, per esempio, uno da 1 TeV da uno di 50 TeV. Questo è molto importante per capire i meccanismi fisici alla base dell'emissione delle sorgenti.

Le sorgenti cosmiche di fotoni TeV

I fotoni TeV mostrano la parte di Universo che va di fretta. Infatti, vengono emessi laddove ci sono particelle (protoni o elettroni) molto accelerate, dall'energia molto più elevata di quella in gioco nel acceleratore di particelle più potente al mondo: il Large Hadron Collider (LHC) del CERN. Queste particelle cosmiche, che si chiamano anche *raggi cosmici*, possono raggiungere velocità paragonabili a quella della luce, interagire con altra materia, con campi magnetici o con altri fotoni (nella sorgente o nello spazio interstellare) emettendo fotoni TeV.

Le condizioni per accelerare le particelle ai livelli richiesti -e dare vita a fotoni TeV- si trovano in diversi tipi di sorgenti. La Figura 9 ne mostra una panoramica.

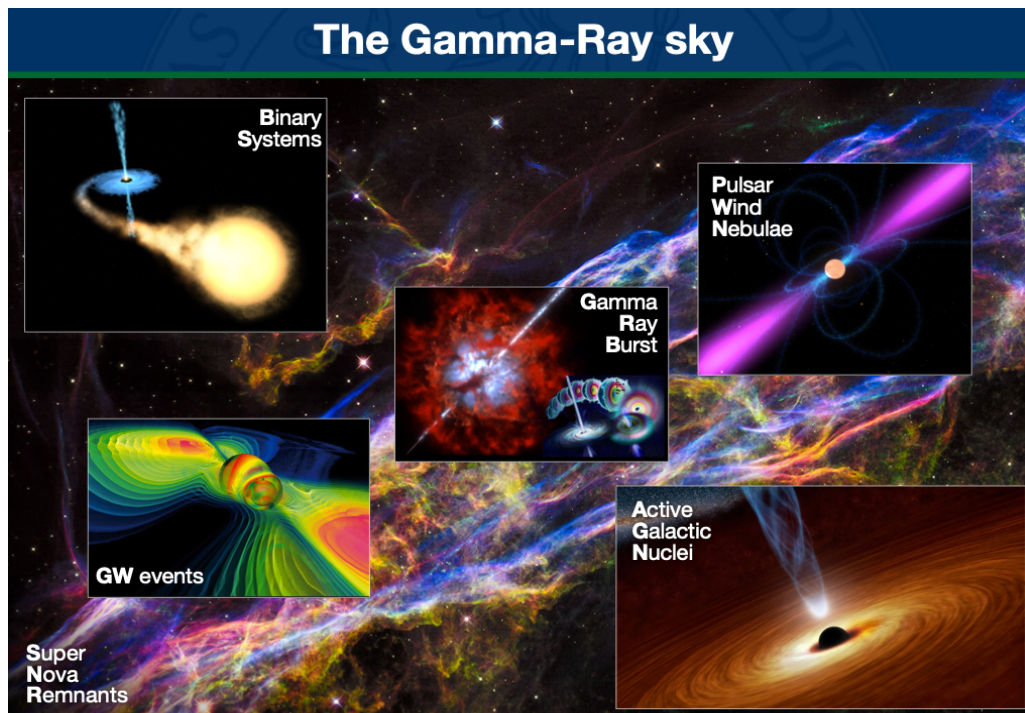


Figura 9 - Sorgenti di emissione TeV. (Crediti: Collaborazione Fermi)

Le più comuni sorgenti gamma sono di tre tipi: 1) *pulsar* nel loro ambiente (*pulsar wind nebula* in resto di supernova, *supernova remnant*, in figura); 2) sistemi binari (*binary systems*, in figura); 3) nuclei galattici attivi (*active galactic nuclei*, in figura). Vediamoli.

1. **Pulsar, Pulsar Wind Nebula e Resto di Supernova**

- a. Cosa sono: matrische cosmiche! Una *pulsar* è una stella di neutroni di cui vediamo le pulsazioni dovute alla rotazione. Le stelle di neutroni hanno campi magnetici molto intensi (mille miliardi di volte più intensi di quello terrestre o più). Per *pulsar wind nebula* (PWN) o “nebulosa da vento di pulsar” si intende un tipo di nebulosa - agglomerato di polveri spaziali e idrogeno - che si trova all’interno di un resto di supernova (quel che resta di una stella che esplode). C’è del gran movimento perché la PWN è alimentata dai venti generati dalla *pulsar* che sta al suo centro. Quindi, nell’ordine: *pulsar* centrale che emette un vento di particelle accelerate (l’ingrediente essenziale!) che alimenta la PWN, la quale, a sua volta, sta nell’involucro più esterno del resto dell’esplosione di supernova.
- b. La creazione dei fotoni TeV: le particelle accelerate dalla *pulsar* centrale si scontrano con il campo magnetico, fra loro o con fotoni circostanti, risultando nella produzione di fotoni TeV.

2. Sistemi binari

- a. Cosa sono: sistemi in cui due stelle vivono “in simbiosi” orbitando una attorno all'altra. Sono estremamente comuni nell'Universo. Può accadere che una delle due stelle si evolva più velocemente, diventando, alla fine della propria vita, un oggetto compatto -un buco nero di qualche decina di masse solari o una stella di neutroni. Se abbastanza vicino all'altra stella, l'oggetto compatto può essere alimentato dalla caduta di materiale della stella compagna. Parte di questo materiale (protoni ed elettroni) che cade spiraleggiando verso l'oggetto compatto, grazie ai campi magnetici coinvolti, può essere lanciato nello Spazio in getti ad altissima energia (ecco anche qui le particelle accelerate). Gli oggetti in cui avviene questo fenomeno – la produzione di getti - vengono detti *microquasar*. Inoltre, nel caso di una stella di neutroni, anche lo scontro tra i venti (particelle) della stella di neutroni e della stella compagna crea altre particelle accelerate.
- b. La creazione dei fotoni TeV: le particelle accelerate, nei getti o nell'interazione fra i due venti, si scontrano fra loro, con il campo magnetico o con altri fotoni nell'ambiente creando fotoni TeV.

3. Nuclei galattici attivi (AGN, dall'inglese Active Galactic Nuclei)

- a. Cosa sono: per certi versi, un AGN può essere paragonato a un sistema binario, perché alimentato dalla caduta di materiale su un oggetto compatto. Qui però consideriamo innanzitutto scale molto maggiori. Gli AGN sono infatti galassie con un buco nero supermassiccio - di milioni o miliardi di volte la massa del Sole al centro. Questo buco nero è attivo, cioè viene alimentato dalla materia che ci cade sopra (stelle, polveri della galassia ecc.) e, similmente a quanto avviene nel caso dei sistemi binari, si creano potenti getti di materia accelerata (eccola di nuovo) che viaggiano nello Spazio. In realtà gli AGN hanno una fenomenologia molto complicata, tanto che possono apparire molto diversi tra di loro, a seconda della parte che è visibile dalla Terra. Quelli il cui getto è rivolto verso di noi vengono detti *blazar*: in questi casi il getto, che emette soprattutto in radio e dai raggi X ai raggi Gamma, risulta talmente luminoso da sovrastare l'emissione del resto della galassia.
- b. La creazione dei fotoni TeV: analogamente al caso dei sistemi binari, quando queste particelle accelerate nei getti si scontrano fra loro, con il campo magnetico o con altri fotoni nell'ambiente, si creano fotoni TeV.

Non solo fotoni: i raggi cosmici

Come abbiamo accennato, oltre ai fotoni TeV anche i raggi cosmici possono sfuggire alle sorgenti nate e arrivare fino all'atmosfera terrestre. I raggi cosmici sono un miscuglio di protoni, elettroni, nuclei atomici e altre particelle più rare: un vero zoo subatomico. Ogni secondo, il nostro pianeta è investito da queste

particelle provenienti dall'Universo: testimoni di fenomeni estremi, questi messaggeri sono accelerati da eventi violenti come esplosioni di supernova e nuclei galattici attivi e ci permettono così di studiare la natura di queste sorgenti. Quando interagiscono con gli atomi dell'atmosfera, composta soprattutto di azoto, producono cascate di altre particelle e di conseguenza si innesca una batteria di effetto Cherenkov che arriva sui rivelatori.

Come facciamo a distinguerli dai raggi gamma? Per fortuna, fotoni gamma e raggi cosmici lasciano sui rivelatori tracce molto diverse (la Figura 10 ne mostra un esempio). Gli sciame prodotti dai fotoni gamma sono simmetrici e con una tipica forma a cono, simile alla luce di un lampione. Questo permette ai telescopi Cherenkov, come quelli di ASTRI Mini-Array e del CTAO, utilizzando un complesso codice di analisi dei dati, di distinguere la geometria dello sciame di fotoni da quella delle molto più numerose particelle.

Infatti, le particelle dei raggi cosmici sono elettricamente cariche, perciò durante il viaggio nello spazio sono soggette a continue deviazioni a causa dei campi magnetici galattici e intergalattici. Entrando nell'atmosfera, e arrivando da direzioni casuali, producono radiazione Cherenkov da cui non è possibile ricostruire la direzione in cielo della sorgente che le ha originate.

A differenza delle particelle cariche, i fotoni gamma, non avendo una carica elettrica, non subiscono deviazioni e arrivano sulla Terra quasi indisturbati. Rivelandoli, si può identificare con precisione la posizione delle sorgenti che li hanno emessi, come buchi neri, pulsar e galassie attive, rivelando i segreti dei fenomeni più energetici dell'Universo.

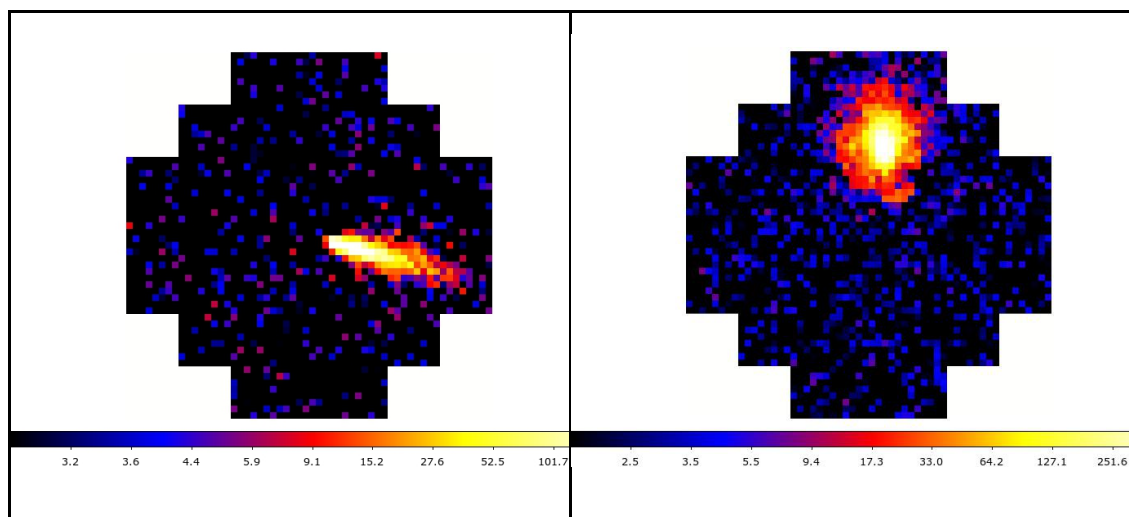


Figura 10 - Immagini simulate della luce Cherenkov prodotta da un fotone gamma (a sinistra) e un protone (a destra). (Crediti: INAF/V. La Parola)

Nota filosofica: ASTRI-Mini Array e il CTAO studiano i fotoni TeV, per cui gli eventi prodotti dai raggi cosmici diventano una forma di rumore che deve essere individuata ed eliminata dal segnale finale. Ma non è sempre così: chi studia i raggi cosmici ha il problema opposto e deve eliminare gli eventi prodotti dai fotoni TeV (che sono rumore).

È tutta una questione di punti di vista!