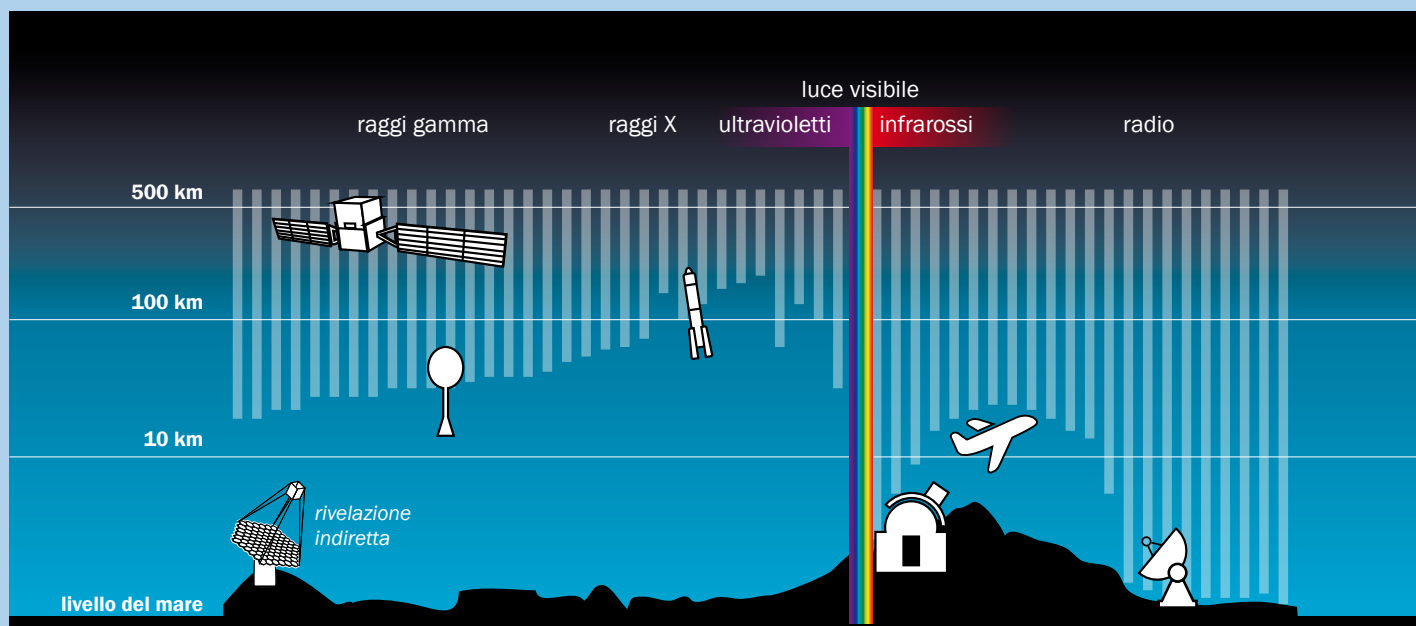


Tutti i colori del cielo

Dai telescopi ottici alle osservazioni multifrequenza

di Alessandro De Angelis



Nel 1610 Galilei dà alle stampe il trattato astronomico *Sidereus Nuncius*, il primo lavoro scientifico pubblicato sulla base di osservazioni al telescopio. Nel libro Galilei commenta e interpreta l'osservazione delle montagne della Luna, di centinaia di stelle mai viste prima e dei satelliti di Giove. Tutte queste osservazioni erano state possibili grazie alla luce emanata dai corpi celesti: per Galilei la luce è il *nuncius* (messaggero) delle stelle. La storia dei messaggeri cosmici comincia quindi dai fotoni, le particelle di luce, e ancor oggi il fotone è il messaggero per eccellenza.

In quanto neutri, i fotoni non sono deviati dai campi magnetici presenti nell'universo e nella Via Lattea, ed è quindi possibile localizzare le loro sorgenti. In queste sorgenti possono essere all'opera diversi meccanismi che producono fotoni; questi vanno dall'emissione termica a fenomeni di più alta energia, come decadimenti nucleari e interazioni adroniche. I fotoni che costituiscono la luce visibile hanno lunghezze d'onda dell'ordine di qualche decimo di micrometro, ossia energie dell'ordine di

grandezza di un elettronvolt (eV), circa 10^{-19} joule. Sono le tipiche energie che gli elettroni esterni degli atomi liberano quando passano da un livello energetico a un livello di energia più bassa. Fino al 1930 circa, l'universo era stato osservato solo in questa regione di frequenze, perché i nostri telescopi erano sensibili solo alla luce visibile. Le cose cambiano rapidamente negli anni successivi, e grazie a nuovi e ingegnosi strumenti diviene possibile produrre mappe dell'universo in lunghezze d'onda ed energie diverse. La tecnologia sviluppata nel corso della seconda guerra mondiale consente di "vedere" con grandi antenne nuovi fenomeni come quelli caratteristici delle onde radio, trasportate da fotoni di energie milioni o miliardi di volte più piccole di quelle della luce visibile (vd. fig. a). A energie un migliaio di volte più piccole della luce visibile abbiamo le microonde: a queste energie la densità di fotoni nell'universo è massima, circa 400 fotoni per centimetro cubo. Intorno ai fotoni visibili abbiamo la radiazione

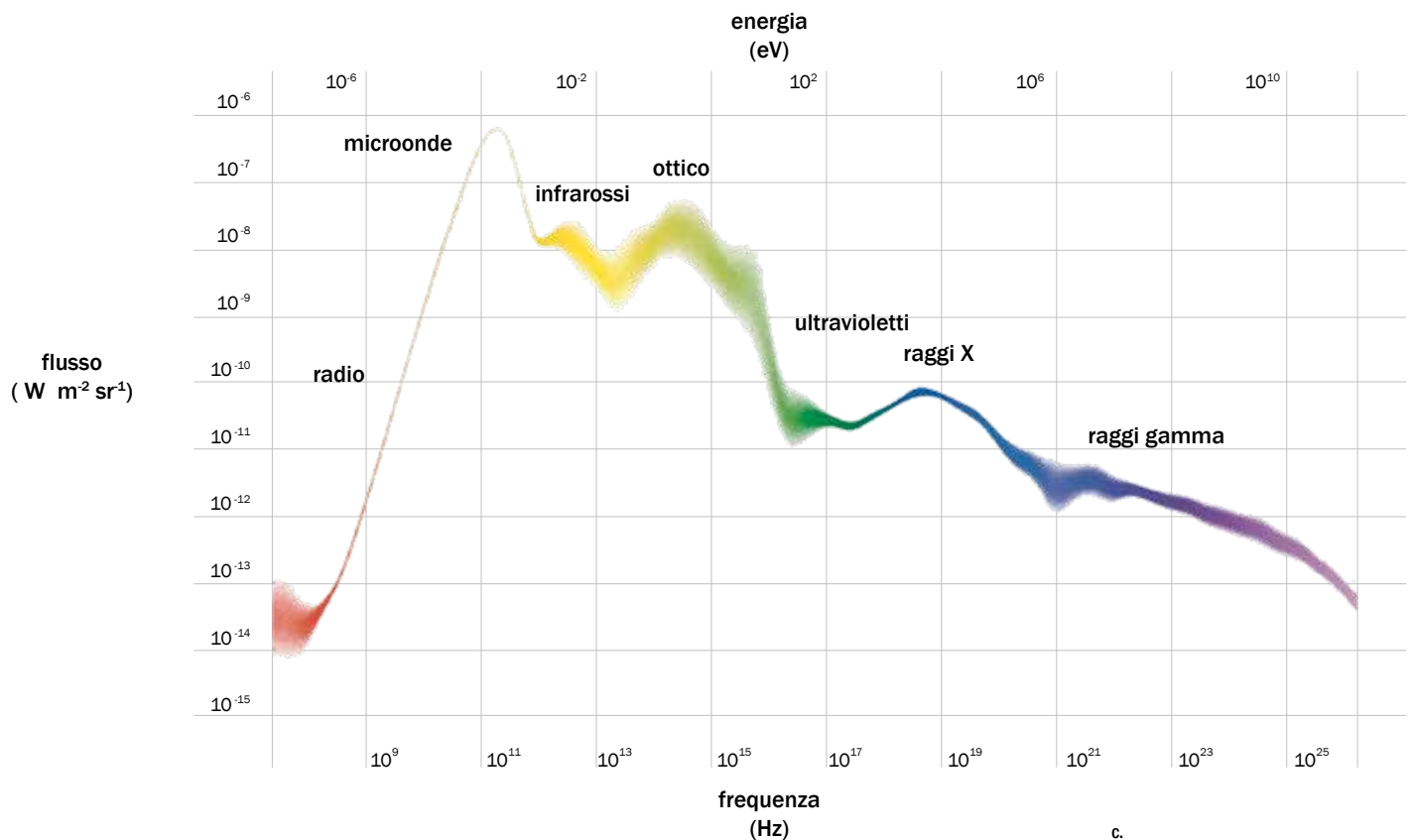
a.
L'assorbimento da parte dell'atmosfera condiziona la scelta degli strumenti da usare per la rivelazione dei fotoni. Mentre le onde radio e la luce visibile provenienti dal cosmo sono ben rivelabili con apparati installati sulla terra, i raggi X e gamma richiedono rivelatori installati su palloni aerostatici o satelliti. I raggi gamma superiori ai 50 GeV possono essere rivelati solo indirettamente osservando da terra la luce Cerenkov generata dagli sciami elettromagnetici.

infrarossa, più debole, e l'ultravioletta, più forte. Aumentando ancora l'energia abbiamo i fotoni (detti anche, per motivi storici, "raggi") X, migliaia di volte più energetici della luce visibile, e i raggi gamma, milioni/miliardi di volte più energetici. L'atmosfera terrestre ci protegge da questi fotoni, che sono nocivi, assorbendoli; di conseguenza l'osservazione è stata possibile solo con l'avvento dell'era spaziale, in particolare grazie al lavoro di Bruno Rossi e Riccardo Giacconi, e alla tecnologia della fisica delle particelle. A energie ancora più alte, l'osservazione da terra diviene di nuovo possibile: i fotoni interagendo con l'atmosfera producono sciami di particelle che sono osservabili da rivelatori posti sulle montagne, come i telescopi Magic (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov telescope), installati nelle isole Canarie (vd. fig. b), e Hess (High Energy Stereoscopic System), in Namibia. I fotoni di energie diverse ci portano messaggi diversi e ci raccontano storie diverse, e per capire la struttura di una sorgente conviene esaminarla fotografandone l'emissione a varie lunghezze d'onda. Il relativo peso dei diversi meccanismi all'interno di una data sorgente può venire evidenziato dallo "spettro" delle energie dei fotoni. Parte dei fotoni sono emessi attraverso meccanismi termici: ogni oggetto irradia parte della sua energia in forma di fotoni. Caratteristica delle emissioni termiche per sistemi vicini all'equilibrio è

il cosiddetto "spettro di corpo nero" (vd. in Asimmetrie n. 20 p. 40, ndr): uno spettro a campana, con un massimo a un'energia proporzionale alla temperatura del sistema. Questa è per esempio la distribuzione dei fotoni emessi dalla fotosfera solare, a una temperatura di circa 6000 kelvin: sono i fotoni che illuminano le nostre giornate, e la sensibilità dell'occhio umano si è evoluta ottimizzandosi per questo spettro. Nei fotoni dell'universo (vd. fig. c) vediamo tracce di molti altri sistemi termalizzati o quasi termalizzati: per cominciare, la cosiddetta radiazione cosmica di fondo, che corrisponde al residuo di luce fossile del Big Bang (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 33, ndr). Salendo ancora in energia in fig. c osserviamo altri spettri termici: quelli delle stelle, che raccontano la storia dell'evoluzione dell'universo, e a energie ancora più alte gli spettri legati alle regioni di accrescimento dei buchi neri, che corrispondono a temperature fino a milioni di kelvin - qualche kiloelettronvolt, o keV. Oltre queste energie sondiamo meccanismi non termici: i fotoni prodotti sono il risultato di transizioni nucleari e di interazioni di particelle di altissima energia. Ancora più in alto, oltre il centinaio di GeV, sondiamo le sorgenti che accelerano elettroni e protoni alle più grandi energie dell'universo. Queste emissioni, essendo legate a radiazione di particelle accelerate o a collisioni in prossimità di oggetti

b.
A sinistra i due telescopi di Magic, a destra il primo Large Size Telescope di Cta (vd. fig. d a p. 30) in costruzione. Questi telescopi rivelano la luce Cherenkov prodotta dalle particelle cariche, originate dall'interazione di raggi gamma con l'atmosfera. Poiché l'asse dello sciame di particelle e la luce Cherenkov da questo prodotta sono collineari alla direzione del fotone gamma primario, possono identificare con grande accuratezza le sorgenti cosmiche dei fotoni gamma. Sullo sfondo è visibile anche il Gran Telescopio Canarias, in alto il Telescopio Nazionale Galileo.



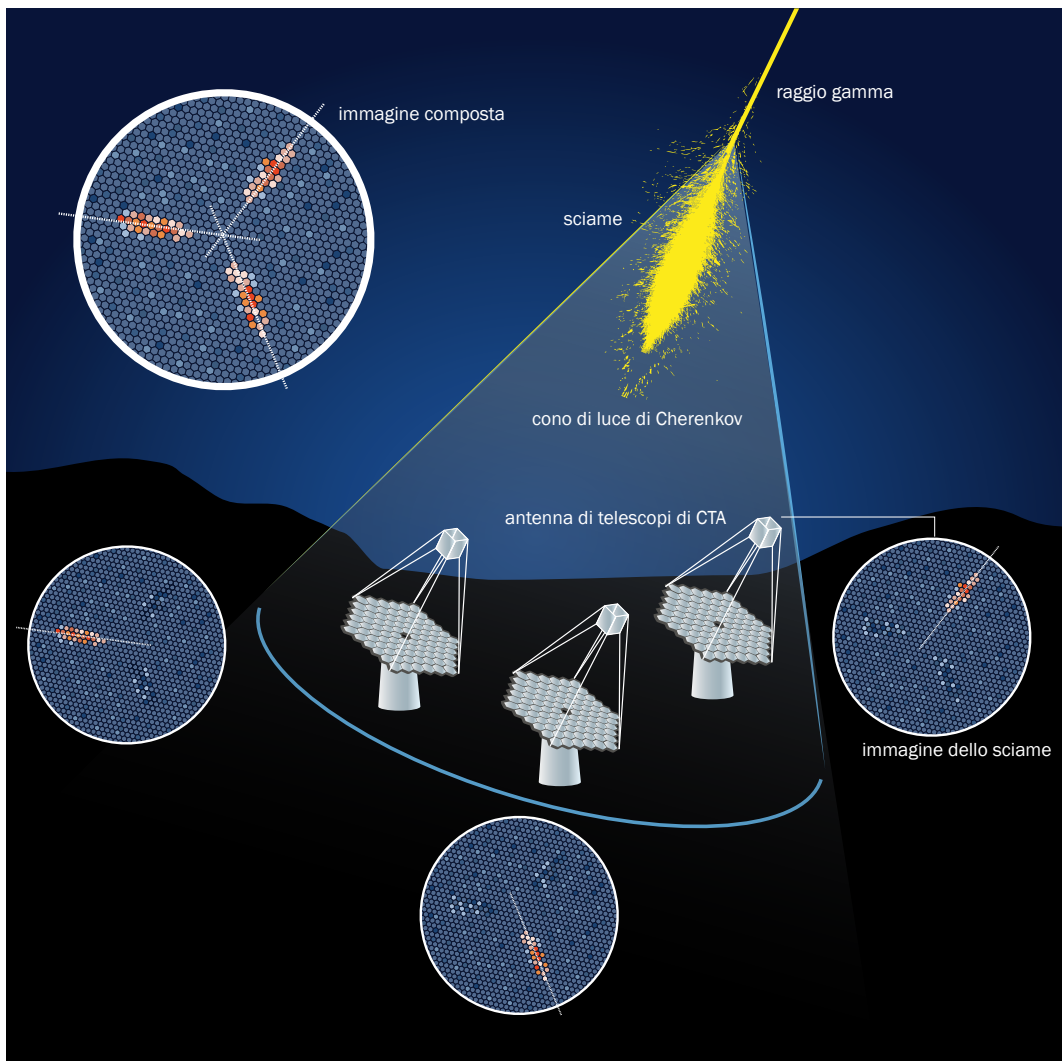


c.
Flusso dei fotoni cosmici, dalle energie delle onde radio fino a 800 GeV. Sono ben visibili i picchi relativi alla radiazione di fondo cosmico nella regione delle microonde e il picco ottico.

compatti, possono essere rapidamente variabili, con scale di tempo che vanno dalle decine di giorni, nel caso dell'accrescimento di buchi neri supermassicci (miliardi di masse solari) nel centro delle galassie, fino ai giorni, ai secondi o anche alla frazione di secondi, nel caso del collasso di oggetti stellari in stelle di neutroni o buchi neri. Nella fase di collasso delle stelle possiamo osservare "lampi" improvvisi di luce e di fotoni gamma in una banda estesa di energia; nella loro breve durata essi possono superare la luminosità totale del resto dell'universo. Sono i cosiddetti "*gamma-ray burst*" che, grazie ai nuovi esperimenti su satellite, oggi osserviamo in media una volta al giorno. L'universo non-termico è un universo violentissimo, e più che d'immagine dell'universo ad alte energie sarebbe appropriato parlare di un film. L'osservazione simultanea dell'universo

con telescopi sensibili a varie lunghezze d'onda è da decenni una delle chiavi di volta dell'astronomia moderna, e nel 2017 siamo stati protagonisti di un salto di qualità: per la prima volta abbiamo osservato in coincidenza l'emissione di fotoni e di onde gravitazionali dal collasso di un sistema binario di stelle di neutroni (vd. p. 31, ndr), e l'emissione di fotoni e di un neutrino da un buco nero supermassiccio in fase di accrescimento (vd. p. 23, ndr). Anche le onde gravitazionali e i neutrini, come i fotoni, "puntano" direttamente alla loro sorgente di produzione: queste due spettacolari osservazioni simultanee hanno aperto il campo dell'astrofisica multimessaggera (vd. in Asimmetrie n. 21 p. 21, ndr), rendendo ancor più stretta l'integrazione tra la fisica delle particelle e l'astrofisica. Molte scoperte degli ultimi anni sono dovute alla rivelazione di fotoni gamma

di alta energia: è questo il settore in cui abbiamo assistito al massimo progresso in astrofisica. In particolare, abbiamo dimostrato che i resti di supernova nella Via Lattea accelerano raggi cosmici fino a qualche migliaio di TeV (vd. in Asimmetrie n. 24 p. 16, ndr), abbiamo fotografato nuovi acceleratori cosmici costituiti da sistemi stellari binari, di cui uno è un oggetto compatto (un buco nero o una stella di neutroni), abbiamo osservato i meccanismi di accrescimento e radiazione di buchi neri supermassicci (con masse anche miliardi di volte superiori a quella del Sole) in altre galassie. Abbiamo visto all'opera lenti gravitazionali costituite da buchi neri di miliardi di masse solari, che fanno sì che lo stesso segnale gamma ci arrivi due volte a intervalli di giorni. Abbiamo spiegato il meccanismo che genera i *gamma-ray burst*, fino a pochi anni fa un puzzle astrofisico, disambiguando i meccanismi di



d. Principio di funzionamento di un'antenna di rivelatori a radiazione Cherenkov atmosferica. L'interazione di un fotone cosmico di alta energia con l'atmosfera genera uno sciame in cui le particelle cariche (prevalentemente elettroni e positroni) più veloci della luce nell'aria generano un lampo di luce che può essere rivelato da grandi telescopi di almeno una decina di metri di diametro. Combinando le immagini di diversi telescopi è possibile ricostruire con accuratezza la direzione e l'energia del fotone.

produzione di quelli "brevi", di durata inferiore a qualche secondo, che sono prodotti dalla coalescenza di stelle di neutroni, da quelli "lunghi", dovuti al collasso di supernovae di grande massa. Abbiamo rivelato una galassia che emette simultaneamente neutrini e raggi gamma, scoprendo nel suo centro un acceleratore di decine di PeV (vd. p. 23, ndr).

Nei prossimi anni nuovi satelliti sensibili a fotoni nella regione di energia tra il MeV e il GeV e nuovi strumenti a terra sensibili a fotoni di energie di centinaia di GeV e oltre (come il telescopio Cta, Cherenkov Telescope Array, vd. fig. d, che mira a realizzare un'enorme installazione di telescopi simili a quelli usati da Hess e Magic) apriranno la strada alla comprensione dei meccanismi di produzione delle più alte energie dell'universo e, probabilmente, alla scoperta di nuovi fenomeni fisici, in particolare sinergia con i rivelatori di neutrini e di onde gravitazionali. Grazie a questi nuovi esperimenti il cosmo si arricchirà sempre più di nuovi colori.

Biografia

Alessandro De Angelis dell'Infn di Padova, dopo essere stato negli anni '90 membro dello staff del Cern di Ginevra, dal 2000 si dedica alla fisica astroparticellare. È stato fra i proponenti del telescopio spaziale Fermi della Nasa e in seguito per tre anni responsabile scientifico dei telescopi Magic a La Palma. Attualmente è primo autore della proposta di un nuovo satellite gamma sensibile nella regione del MeV. Insegna fisica astroparticellare a Padova, a Trieste/Udine e a Lisbona.

Link sul web

https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/gamma_ray_astronomy1.html
<https://www.cta-observatory.org/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.7