

Astronomia Senza Fotoni

Stefano Spagocci

GACB



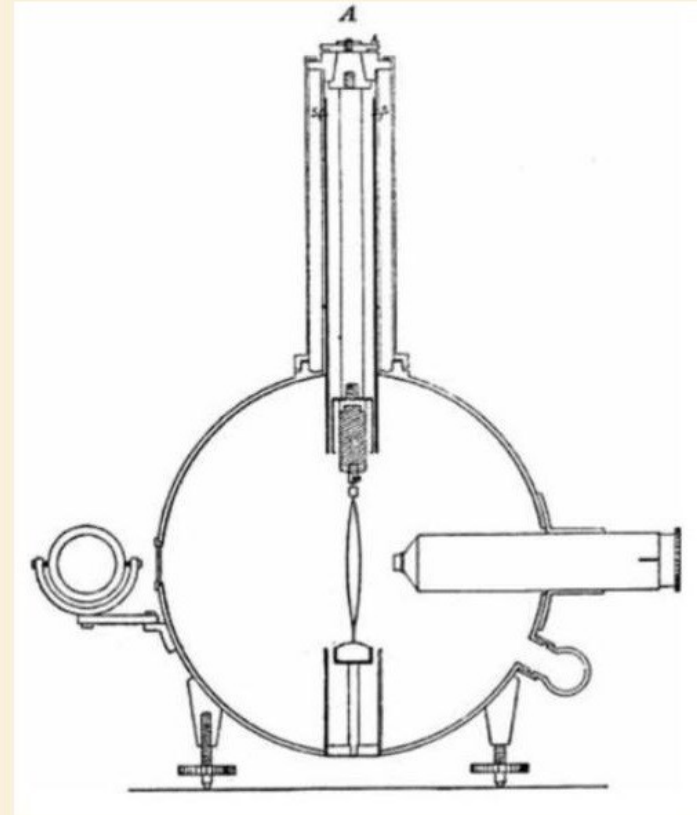
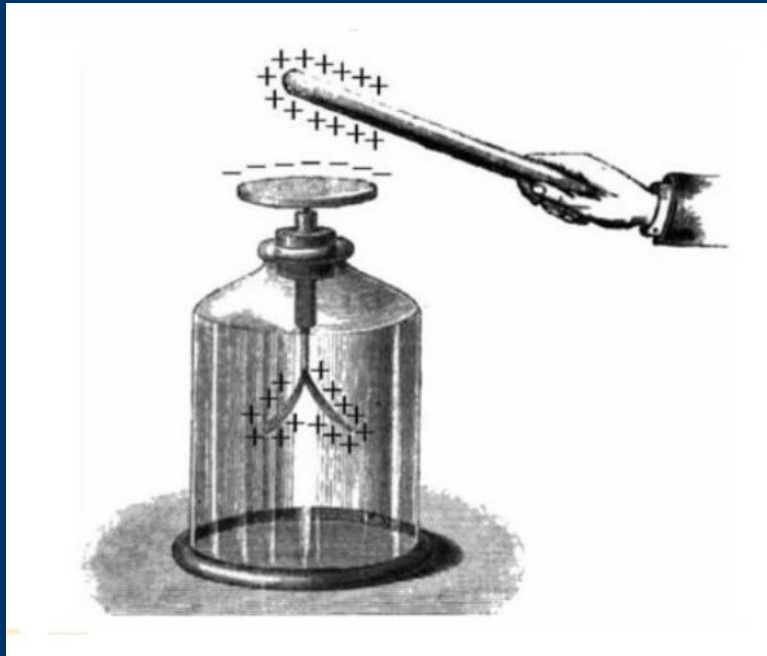
Introduzione

- L'astronomia, per ovvie ragioni, fino ad alcuni decenni fa si è basata sulle osservazioni (successivamente anche fotografia e fotometria) nella banda del visibile.
- Negli ultimi decenni, però, si sono anche affermate astronomie che si basano sulle componenti non visibili dello spettro elettromagnetico e astronomie non basate sullo spettro elettromagnetico.
- Alla seconda categoria di astronomie (tranne quella neutrinica) è dedicata questa conferenza.



- Ogni secondo, ogni centimetro quadro di qualunque superficie è bombardato da un flusso di particelle elementari: si tratta dei raggi cosmici. Ma cosa sono esattamente? Da dove provengono? E cosa possono insegnarci?
-
-





L'elettroscopio di Wulf. Il cilindro ha 17 cm di diametro e 13 cm di profondità. A destra il microscopio da cui si legge la distanza tra i due fili di vetro metallizzato, illuminati con una luce riflessa dallo specchio a sinistra. La sensibilità dello strumento è di circa 1 volt.

Elettroscopi

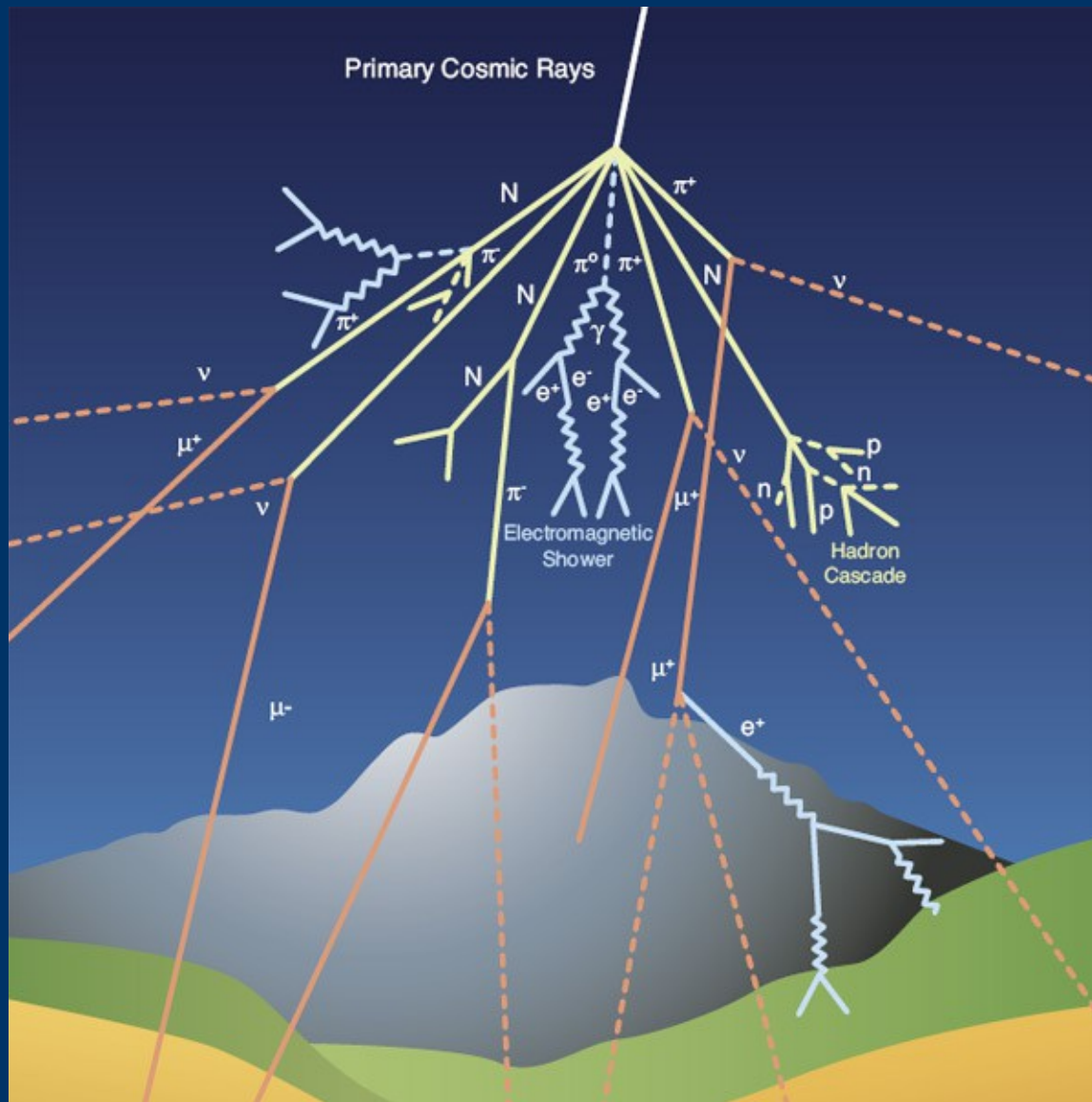
- Agli inizi del '900 C.T.R. Wilson, inventore dell'omonima camera, ipotizzò che l'elettroscopio si scaricasse a causa della ionizzazione dell'aria, indotta da una radiazione che in seguito si scoprì provenire dal cosmo. Furono così scoperti i raggi cosmici.
-
-

Cosa e Quanti Sono?

- Il flusso di raggi cosmici primari per il 90% circa consiste di protoni (nuclei di idrogeno), per il 10% circa di particelle alfa (nuclei di elio, due protoni e due neutroni), per l'1% circa di elementi più pesanti, per il rimanente 1% circa di elettroni (in prevalenza dal Sole), antimateria e fotoni (raggi gamma).
-
-

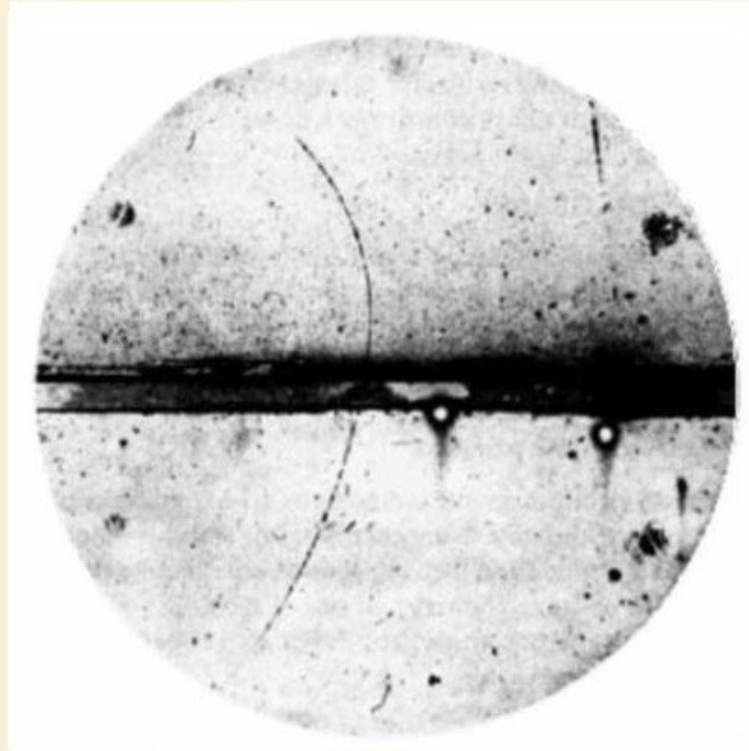
Cosa e Quanti Sono?

- Lo spettro in energia dei raggi cosmici primari arriva fino a cento milioni di volte l'energia con cui i protoni si scontrano nell'acceleratore LHC del CERN (~ 10 TeV).
 - Lo spettro in energia decresce con la terza potenza dell'energia stessa, il che significa che, considerando raggi cosmici primari con energia 10 volte maggiore, il flusso diviene 1000 volte minore.
-
-

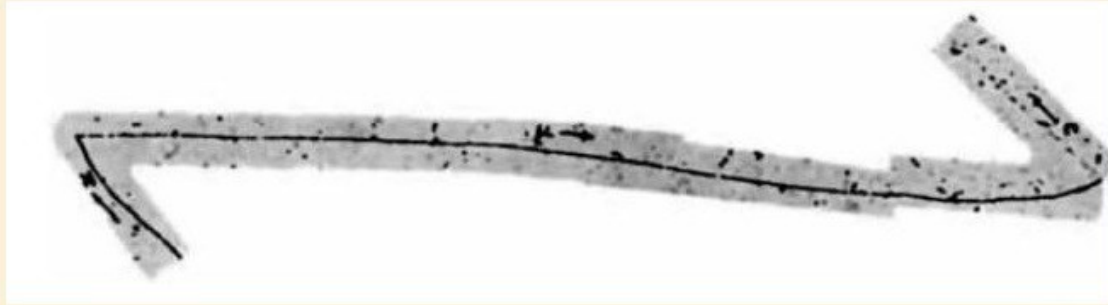


Elettroni e Positroni

- Nel 1932 C.D. Anderson scoprì il positrone (antiparticella positiva dell'elettrone negativo) tra i raggi cosmici.
 - Nel 1933 P.M.S. Blackett e G. Occhialini per primi fotografarono la creazione di una coppia elettrone/antielettrone a partire da un fotone gamma dai raggi cosmici.
-
-



Fotografia che mostra il passaggio di un anti-elettrone, o positrone, attraverso una camera a nebbia immersa in un campo magnetico. Si capisce che la particella viene dal basso per il fatto che, dopo avere attraversato la lastra di materiale nel mezzo (e quindi perduto energia), il raggio di curvatura diminuisce. Si capisce che è positiva dal verso di rotazione nel campo magnetico. La massa si misura dalla densità delle bolle



Pione e muone: la catena di decadimenti $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ (il pione viaggia dal basso in alto a sinistra, il muone orizzontalmente, e l'elettrone dal basso in alto a destra della fotografia). La quantità di moto mancante è trasportata da neutrini. Da C.F. Powell, P.H. Fowler & D.H. Perkins, *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method* (Pergamon Press 1959)

- Il muone fu scoperto da C.D. Anderson e S. Neddermayer nel 1932, esponendo ai raggi cosmici un'emulsione fotografica.

Raggi Cosmici / Acceleratori

- I raggi cosmici, fino all'ultimo dopoguerra, rappresentarono l'unico modo per studiare le particelle elementari che non fossero elettroni, neutroni o protoni.
 - Nei raggi cosmici furono scoperte molte particelle elementari (gli iperoni). I raggi cosmici svolgevano allora il ruolo poi svolto dagli acceleratori di particelle.
-
-

- Oggi si continuano a studiare i raggi cosmici ma con una diversa finalità. I raggi cosmici sono oggi studiati per precisarne l'origine, mettendoli in correlazione con fenomeni di alta energia quali i brillamenti solari, le supernovae, le pulsar e i nuclei galattici attivi.
-
-

Rivelatori di Raggi Cosmici

- Fino all'ultimo dopoguerra la rivelazione dei raggi cosmici avveniva mediante opportune lastre fotografiche (spesso pacchi di lastre) o camere a nebbia.
 - Oggi vi sono rivelatori di raggi cosmici siti a terra e nello spazio e si usano rivelatori di particelle elementari quali camere a scintilla (nello spazio) e specchi con rivelatori di luce Cerenkov (a terra).
-
-

Rivelatori nello Spazio

- I raggi cosmici di "bassa" energia (fino a 10 Tev, approssimativamente l'energia dei protoni nell'LHC del CERN) hanno flussi tali da poter essere osservati con rivelatori di dimensioni satellitari.
- Sono importanti gli esperimenti siti sulla Stazione Spaziale Internazionale, AMS (energie fino ad 1 Tev) e CREAM (energie da 1 Tev a 10 Tev).

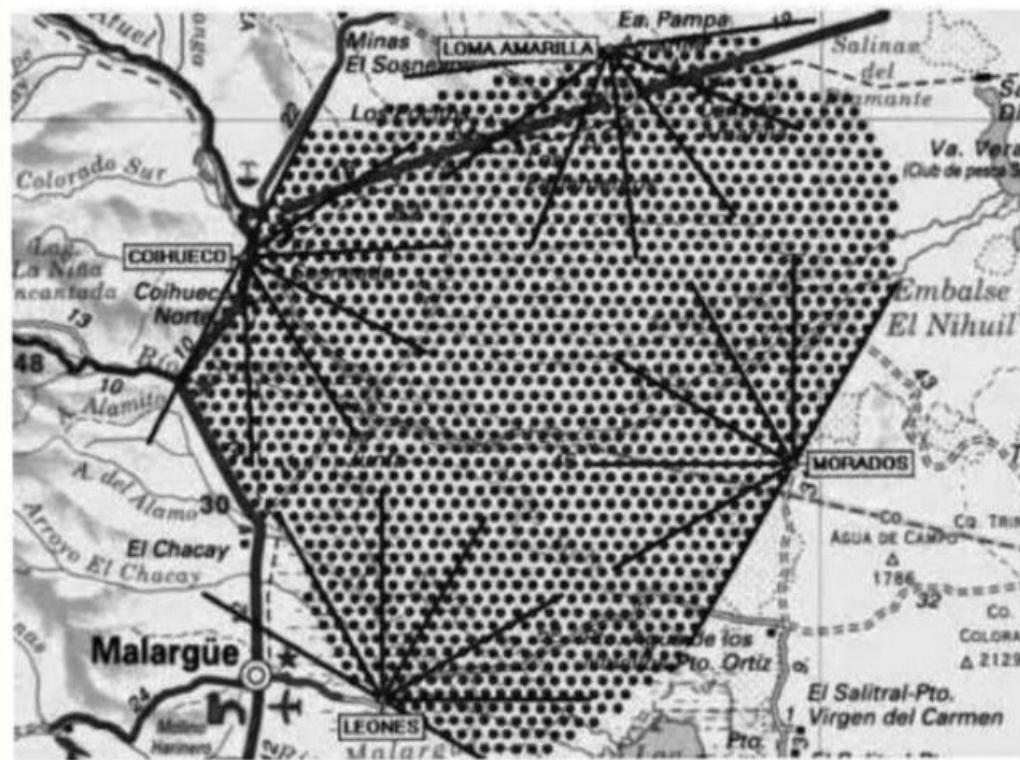


Rivelatori nello Spazio

- Esperimenti satellitari sono il russo PAMELA e LAT a bordo del satellite Fermi, che oltre a un telescopio gamma ospita anche questo rivelatore di raggi cosmici di alta energia.
 - Tali esperimenti hanno mostrato un'anomala percentuale di positroni e di litio, berillio e boro.
-
-

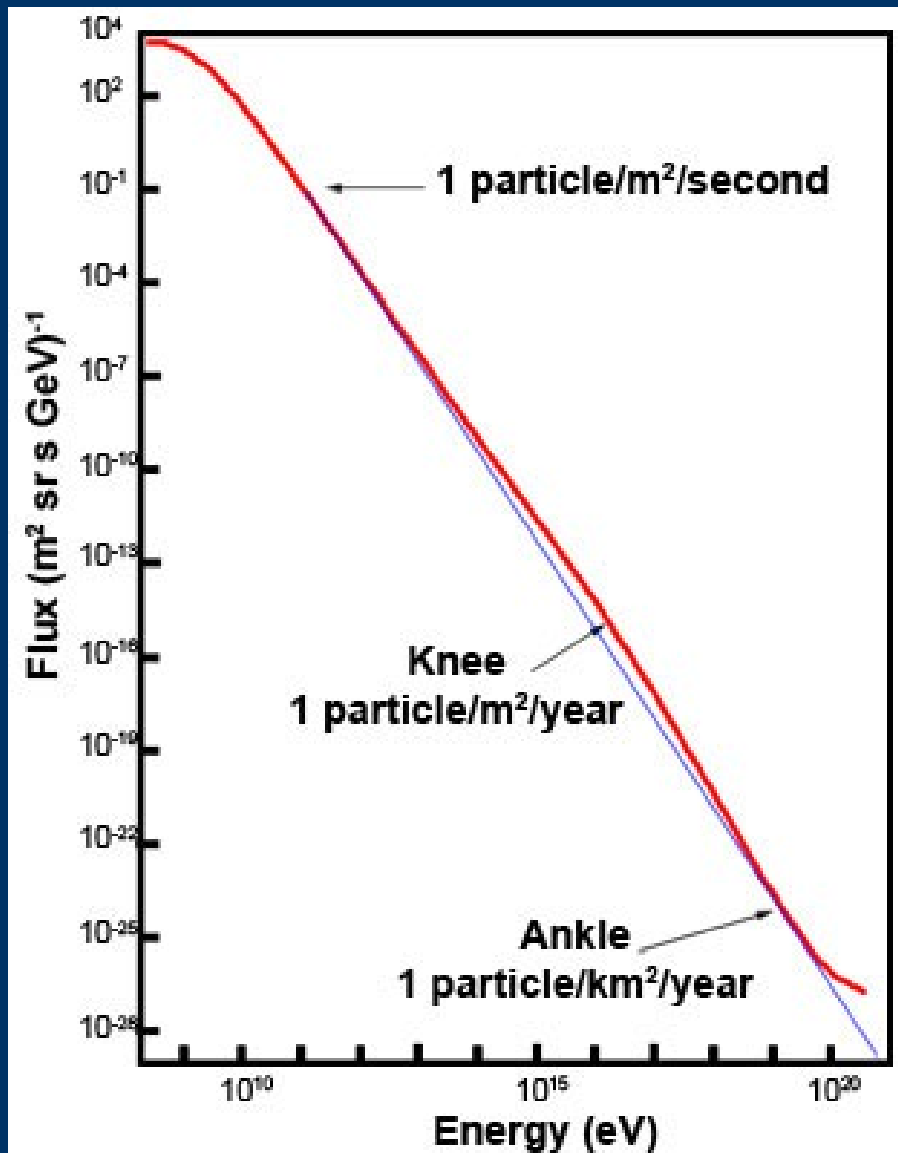
Rivelatori a Terra

- I raggi cosmici di altissima energia, come abbiamo visto, generano giganteschi sciame.
 - Le particelle prodotte in tali sciame generano luce di fluorescenza e luce Čerenkov. Opportuni telescopi ottici, di grande diametro, possono rilevare tale luce.
-
-



L'osservatorio Pierre Auger in Argentina, con i suoi 1600 "bidoni" e i quattro rivelatori di fluorescenza periferici (la distanza orizzontale coperta dalla mappa è di oltre sessanta chilometri)

- Alle altissime energie i flussi sono bassissimi, dell'ordine di una particella per chilometro quadro per secolo! Occorrono quindi schiere di telescopi.
 - L'osservatorio Pierre Auger, sito in Argentina (rivelatori Čerenkov e a fluorescenza) può rivelare raggi cosmici di energie dell'ordine del milione di Tev (centomila volte l'energia dei protoni in LHC). La sua superficie è pari a quella della Valle d'Aosta!
-
-



Origine dei Raggi Cosmici

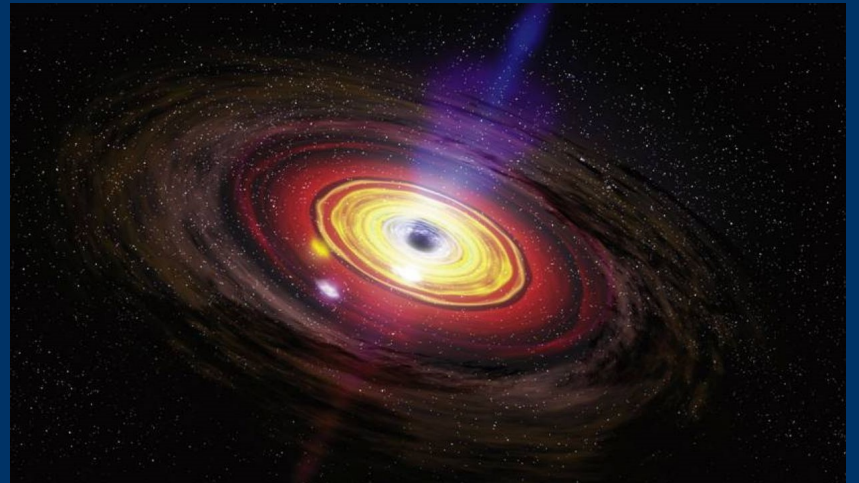
- Molti problemi restano da risolvere riguardo all'origine, composizione e spettro energetico dei raggi cosmici.
 - Schematicamente, i raggi cosmici fino a 10 GeV hanno origine solare (brillamenti).
 - Quelli fino al ginocchio o knee (3 PeV) sono prodotti e accelerati dalle onde d'urto generate dalle supernovae.
-
-

Origine dei Raggi Cosmici

- Quelli tra il ginocchio e la caviglia, o ankle, cioè tra 3 PeV e 3000 PeV si pensa siano dovuti a sorgenti galattiche ancora sconosciute.
 - Oltre la caviglia, quindi oltre i 3000 PeV, i raggi cosmici sono di origine extragalattica.
 - I raggi cosmici sono deviati dai campi magnetici galattici e dunque non se ne può determinare la direzione. Candidati naturali sono comunque i nuclei galattici attivi.
-
-

Abbondanze Anomale

- Dicevamo prima che i raggi cosmici di energia fino ad alcuni TeV rivelano un'anomala abbondanza di positroni e di litio, berillio e boro.
 - Riguardo ai positroni, si pensa siano prodotti da pulsar galattiche che, a causa delle nubi di polvere, non sono state rivelate dai telescopi nelle varie bande elettromagnetiche.
 - Riguardo a litio, berillio e boro, si pensa che l'origine sia in processi di spallazione, ovvero siano generati dall'urto di protoni dei raggi cosmici con nuclei pesanti nel mezzo interstellare.
-
-



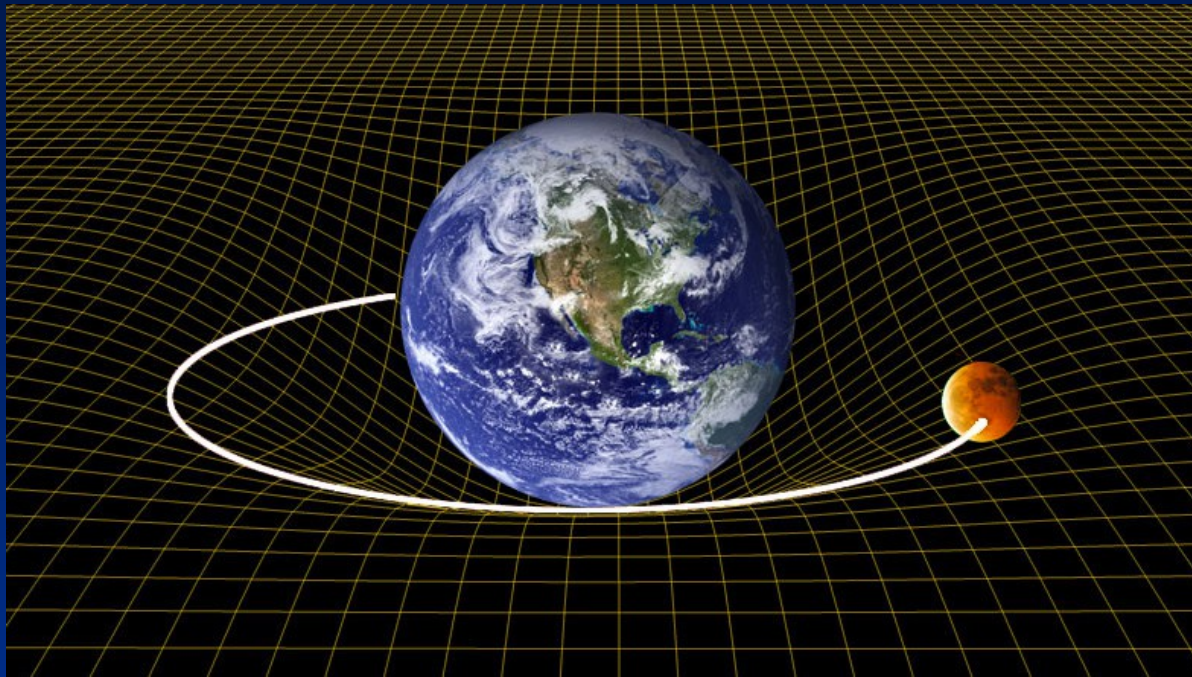
- Le onde gravitazionali, “increspature” dello spazio-tempo, furono rivelate indirettamente alcuni decenni or sono e direttamente negli ultimi anni.
- Di cosa si tratta esattamente? Come sono generate tali onde? Cosa possono insegnarci?



Meccanica Newtoniana

- Secondo Newton (Principia Mathematica, 1687), un corpo di massa M esercita, su di un altro corpo di massa m , una forza proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i due corpi.
- In altre parole, se due corpi distano d , avrò tra di loro una certa forza. Se raddoppio la distanza tra i corpi, la forza diminuirà non di 2 ma di 4 volte (perchè 4 si ottiene elevando 2 al quadrato).



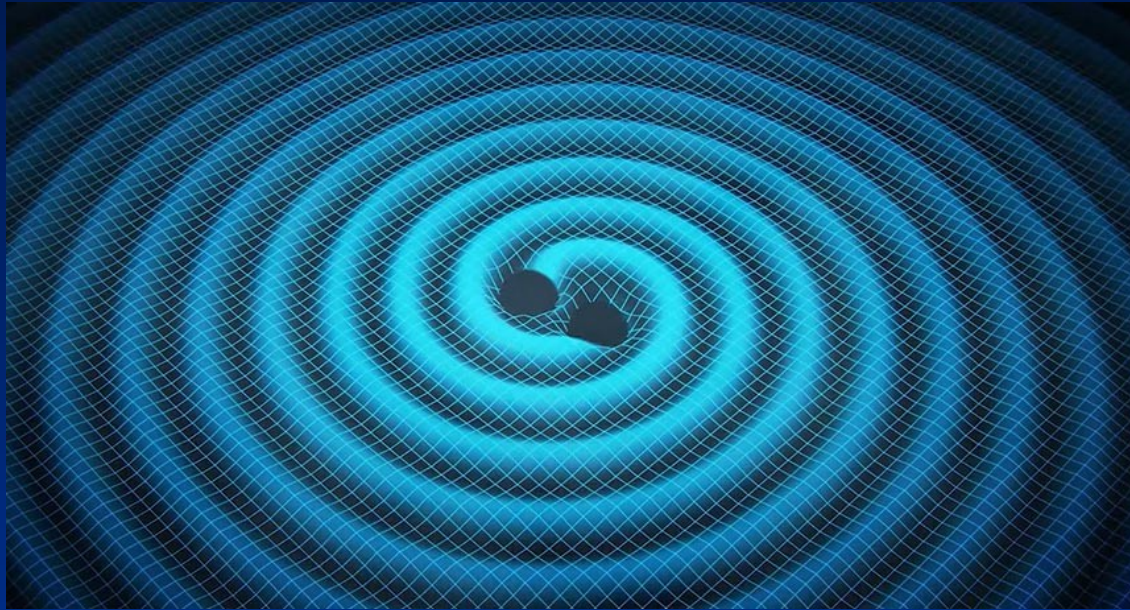


- Secondo la teoria della relatività generale (Einstein, 1916), lo spazio-tempo è paragonabile a un telo elastico.
- Il Sole, con la sua massa, deforma il telo. La Terra “cade” nella depressione e ciò genera la sua orbita.

Relatività Generale

- Se quindi il Sole scomparisse repentinamente, dal Sole partirebbe un'onda gravitazionale che porterebbe il “telo elastico” a spianarsi.
- Dopo 8 minuti tale onda raggiungerebbe la Terra che, all'improvviso, si troverebbe non più in una depressione ma su di un “telo piatto” e partirebbe per la tangente.
- Abbiamo quindi implicitamente introdotto il concetto di “onda gravitazionale”.





- Le onde gravitazionali, previste da Einstein nel 1916, sono appunto “increspature” dello spazio-tempo, originate da masse in movimento. Possiamo paragonarle a onde originate da masse rotanti in uno specchio d'acqua.

PSR1913+16

- E' un sistema doppio di pulsar, con un periodo di variazione di $7 \frac{3}{4}$ ore. Perde energia per emissione di onde gravitazionali. I due astri si avvicinano progressivamente e la loro velocità aumenta.
- Ne risulta una diminuzione del periodo di rivoluzione di 70 milionesimi di secondo per anno.
- L'emissione di onde gravitazionali (frequenza dell'ordine del Kilohertz) avviene a raffiche di durata di $\frac{1}{2}$ ora circa.

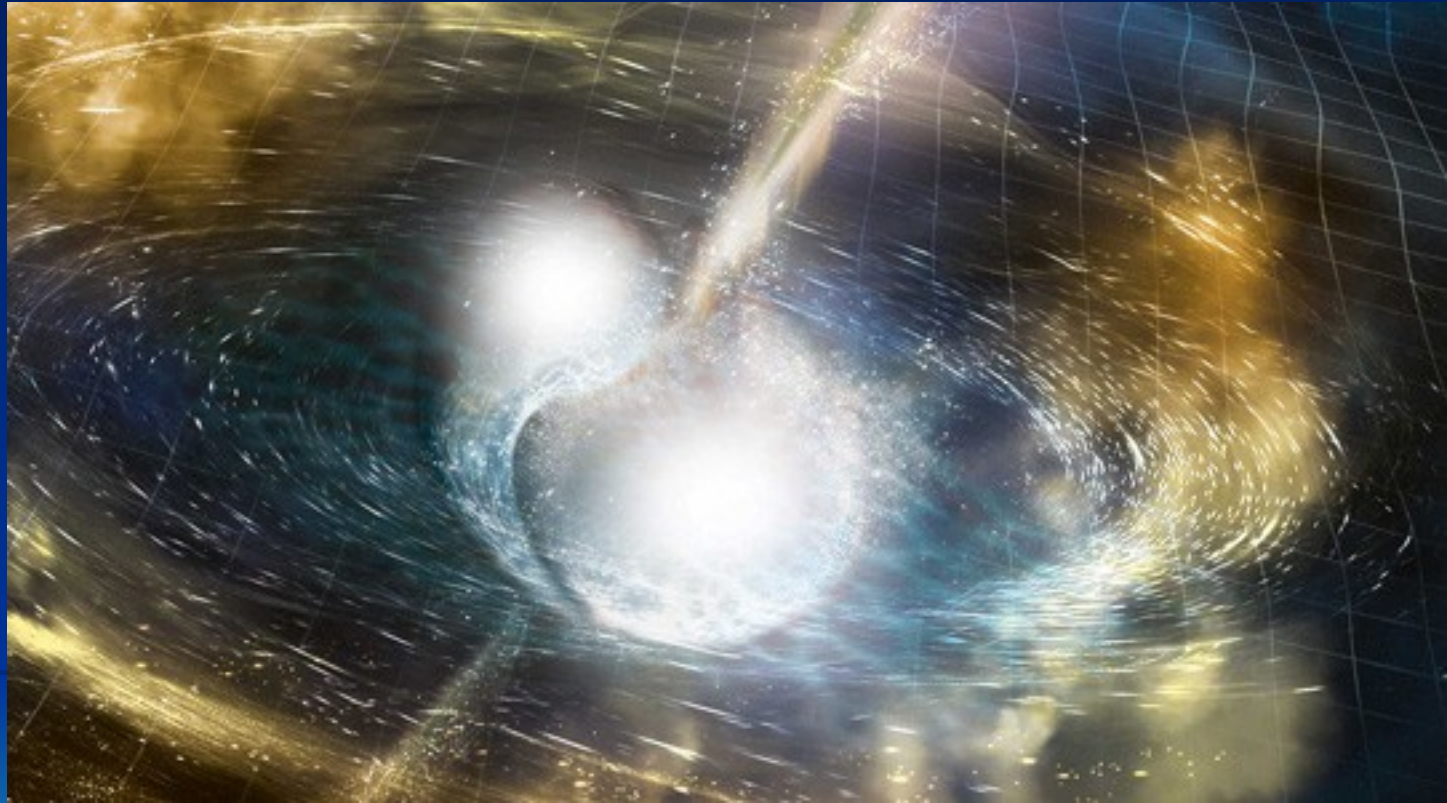


PSR1913+16

- Scoperte (e seguite per quasi due decenni) nel 1974 da R. Hulse e J. Taylor (premi Nobel per la fisica nel 1993).
- Il tasso di diminuzione del periodo concorda esattamente con le previsioni della relatività generale per l'emissione di onde gravitazionali.
- Si ebbe così la prima rivelazione (sebbene indiretta) di onde gravitazionali.



PSR1913+16



Rivelatori a Barre

- In tali rivelatori una barra di alluminio viene messa in vibrazione dal passaggio di un'onda gravitazionale. Raffreddati a pochi Kelvin sopra lo zero assoluto, per prevenire vibrazioni.
- L'ampiezza di vibrazione rivelabile è tipicamente della dimensione di un nucleo atomico. Il nucleo atomico ha diametro centomila volte inferiore a quello di un atomo. Un atomo, d'altra parte, ha dimensioni tipiche di un decimiliardesimo di metro!
- La rivelazione delle vibrazioni avveniva con sensori piezoelettrici o superconduttori (SQUID). Un rivelatore piezoelettrico, ad esempio, genera un segnale elettrico se compresso. Una compressione delle dimensioni di un atomo fornisce un segnale di circa un millivolt, perfettamente rivelabile!





Rivelatori a Barre

- Sviluppatisi per la prima volta da J. Weber che, nel 1969, credette di aver scoperto il primo segnale di onde gravitazionali. Il segnale era però migliaia di volte più intenso di quanto prevedibile dalla teoria.
- Gruppi in USA, URSS, Italia, Germania, Francia e Regno Unito non riuscirono a ottenere risultati analoghi e la scoperta si ritiene sia stata dovuta ad errori nell'analisi. Weber, però, fino alla sua scomparsa continuò a sostenere che la sua fosse stata una vera scoperta.



Rivelatori a Barre

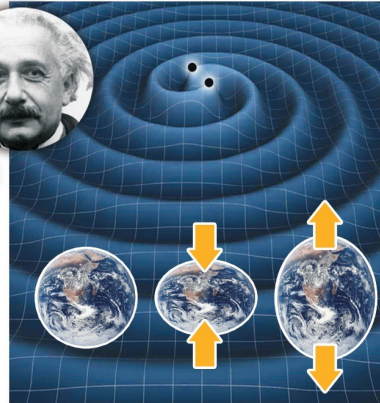
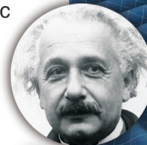
- Negli anni Novanta fu attiva la rete di rivelatori a barre formata da AURIGA (INFN – Laboratori Nazionali di Legnaro), NAUTILUS (INFN – Laboratori Nazionali di Frascati), ALLEGRO (University of Louisiana) e Niobe (University of Western Australia).
- Il gruppo di G. Pizzella (Università di Roma) ritenne di aver scoperto onde gravitazionali in parallelo alla supernova 1987A. Come per quella di J. Weber, la scoperta fu poi smentita.



Gravity waves may have been discovered

Astronomers may finally have found elusive gravitational waves, the mysterious ripples in the fabric of space. As these ripples pass the Earth, local space is alternately stretched and compressed

Gravitational waves: Concentric ripples that squeeze and stretch fabric of space-time, caused by movement of mass. Predicted by **Albert Einstein** in his 1916 *General Theory of Relativity*



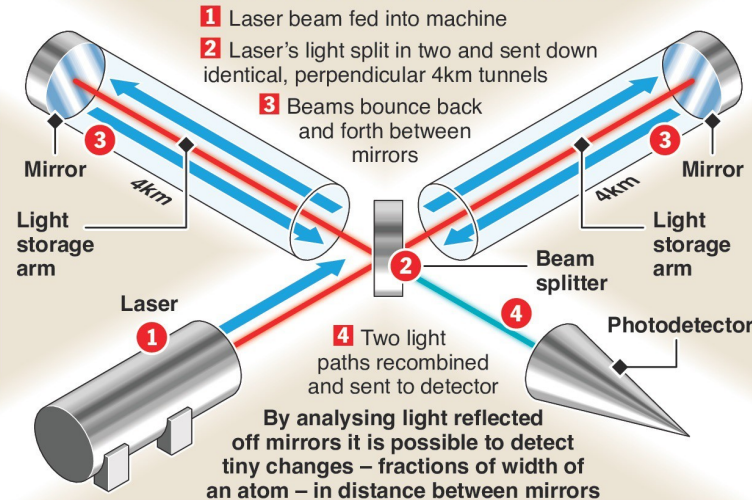
Effect of gravitational ripples, hugely exaggerated



LIGO sites

Two detectors help sift out terrestrial rumblings, such as traffic and earthquakes, from other faint vibrations within space

LIGO – LASER INTERFEROMETER GRAVITATIONAL WAVE OBSERVATORY



Interferometri Terrestri

- Il principio di tali interferometri è stato spiegato nella slide precedente. In sintesi, quando i due bracci dell'interferometro sono in posizione di riposo, i due fasci laser (IR) arrivano in controfase (quando un'onda è al massimo l'altra è al minimo e viceversa). Una minima variazione della lunghezza dei bracci (circa un millesimo della dimensione di un protone!) fa sì che le onde non si annullino. Si rileva quindi un impulso laser.
- Lo studio dettagliato su come ottenere la sensibilità voluta fu compiuto da R. Weiss, negli anni '70. Molte delle tecnologie connesse furono messe a punto da R. Drever e B. Berish. Protagonista del lavoro teorico connesso fu K. Thorne. Weiss, Berish e Thorne vinsero il Nobel per la Fisica 2017.



Interferometri Terrestri

- Principali interferometri terrestri: LIGO (2 rivelatori in Washington State e Louisiana) e VIRGO (Cecina, Pisa). Lunghezza dei bracci: 4 km, così da essere migliaia di volte più sensibili dei rivelatori a barre.
- Il progetto di Virgo (principalmente italiano e francese) deve molto ad A. Giazotto e al francese A. Brillet.
- Altri interferometri si trovano in Germania e Giappone. Alla rete LIGO/Virgo si è poi aggiunto il giapponese KAGRA (3 km di lunghezza).
- Per evitare il rumore casuale (tipicamente vibrazioni del terreno) si validano solo osservazioni in coincidenza tra vari rivelatori (i due di LIGO e Virgo).



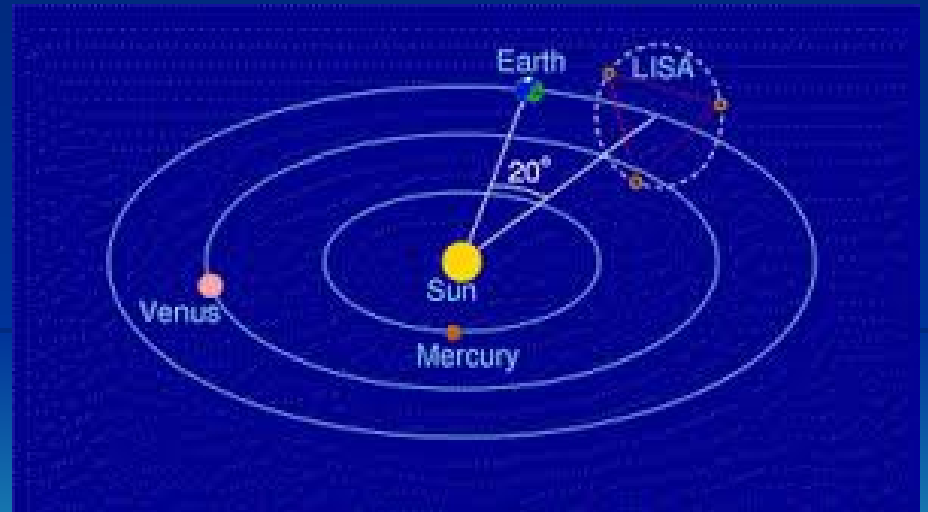
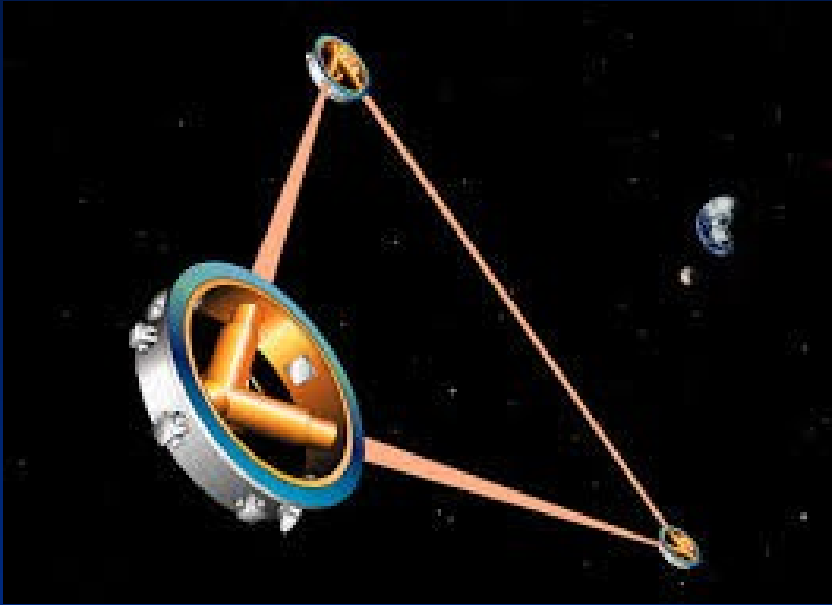




Interferometri Spaziali

- La missione LISA (prima NASA, ora ESA/NASA) metterà in orbita tre satelliti con laser e specchi riflettori che realizzeranno un interferometro con bracci di 5 milioni di chilometri, milioni di volte più sensibili degli attuali!
- La missione LISA Pathfinder (ESA) ha collaudato il sistema di stabilizzazione delle vibrazioni degli specchi. Con correzioni di rotta, ottenute mediante micro-spinte propulsive, LISA otterrà che i satelliti seguano la traiettoria voluta a meno di un diametro atomico e che la loro distanza sia tenuta costante a meno di un millesimo di diametro atomico!





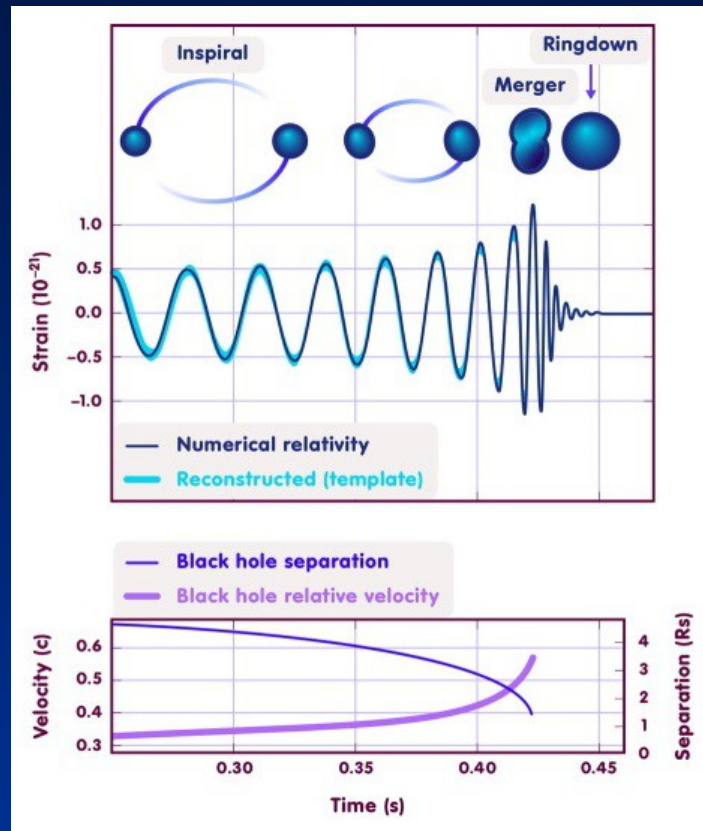
- E' anche in progetto la costruzione di un interferometro con bracci di 10 km di lunghezza, posto sottoterra.
- Si tratta dell'Einstein Observatory, la collocazione del quale è ancora in studio. Potrebbe essere situato in Sardegna che, per la sua conformazione geologica, presenta molto bassi livelli di rumore ambientale.



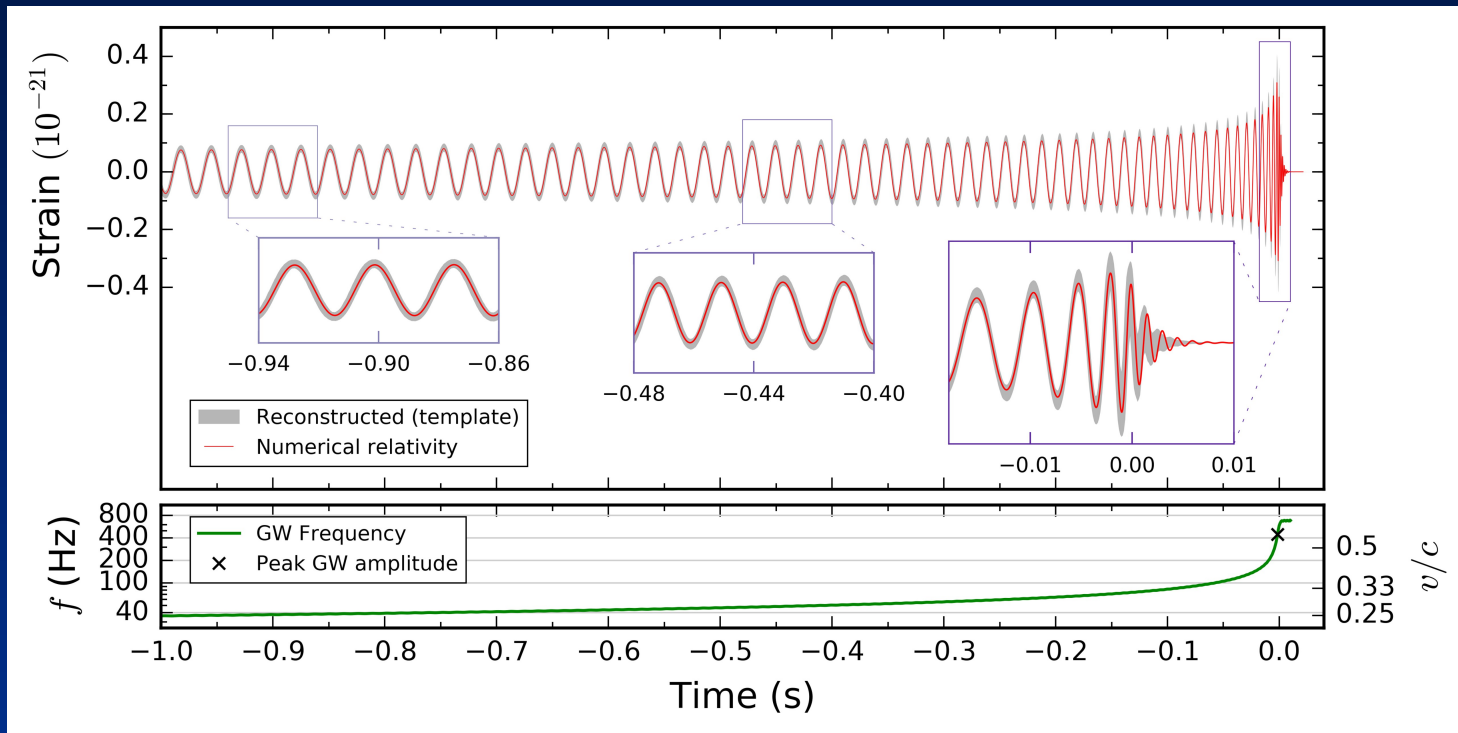
GW150914

- Il 14 settembre 2015, l'interferometro statunitense LIGO rivelava GW150914, il primo segnale di onde gravitazionali nella storia dell'umanità (fusione di due buchi neri).
- La notizia è stata divulgata dopo alcuni mesi, terminate le laboriose verifiche.
- La notizia ha scosso il mondo scientifico. Si ha l'impressione, però, che la portata della scoperta sia sfuggita al grande pubblico.





- L'evento registrato da LIGO è stato dovuto alla fusione di due buchi neri, di massa 29 e 36 masse solari e orbitanti a velocità $\frac{1}{2}$ di quella della luce. La potenza liberata equivale a 50 volte quella di tutte le stelle e galassie dell'Universo!



- Il 26 dicembre 2015 LIGO ha registrato un secondo evento, dovuto alla fusione di due buchi neri, di 8 e 14 masse solari e orbitanti a velocità pari al 70% circa di quella della luce. La potenza liberata supera quella di tutte le stelle e galassie dell'Universo!

- Il 14 agosto 2017, terminati gli upgrade di LIGO e Virgo (che hanno dato origine ad Advanced LIGO e Advanced Virgo), si ebbe la prima rivelazione congiunta di un evento, GW170814 (due buchi neri di massa 25 e 30 masse solari).
- Da allora si sono rilevati decine di eventi di onde gravitazionali. Nella maggior parte dei casi si tratta di scontri di buchi neri (massa dell'ordine delle decine di masse solari), con una minoranza di scontri buco nero/stella di neutroni e scontri di due stelle di neutroni (massa dell'ordine di una massa solare).
- Si pensa che da tali scontri nasca un buco nero che, oscillando, si assesta su una forma sferica. Il 10% circa della massa degli oggetti si trasforma in onde gravitazionali.



Astronomia Multimessaggera

- Gli studi di astronomia senza fotoni si inseriscono nel filone dell'astronomia multimessaggera. Si osservano cioè eventi di raggi cosmici, onde gravitazionali e neutrini e, onde determinarne l'origine, li si correlano con osservazioni ottiche o in altre bande dello spettro elettromagnetico.
- Esistono sistemi automatici che in tempo reale avvisano gli astronomi interessati di un evento di onda gravitazionale, raggi gamma e neutrini, in modo da iniziare subito osservazioni in altre bande elettromagnetiche e scambiarsi in tempo reale i risultati delle osservazioni.



Astronomia Multimessaggera

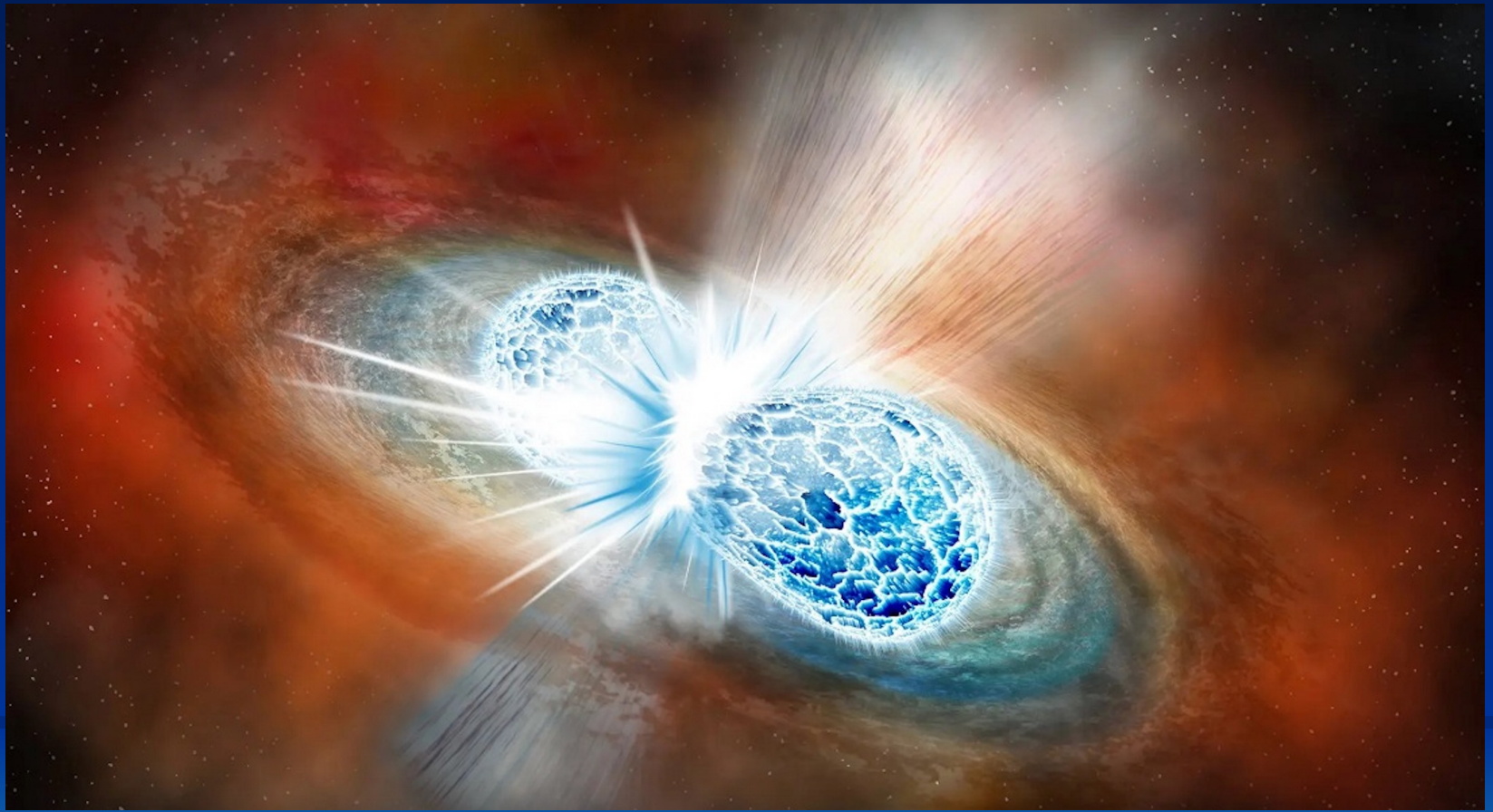
- Un esempio di astronomia multimessaggera sono gli studi connessi al gamma ray burst GRB170817A, rilevato dal satellite Fermi. In coincidenza con tale evento fu rilevato da LIGO e Virgo un evento di onde gravitazionali, GW170817.
- L'evento (al contrario di quelli prima citati che durarono dell'ordine di 1/10 di secondo e derivarono da oggetti distanti dell'ordine di un miliardo di anni luce) durò circa 100 secondi; si determinò trattarsi di uno scontro tra due stelle di neutroni, distanti circa 140 milioni di anni luce.



Astronomia Multimessaggera

- La massa delle due stelle di neutroni risultò compresa tra 1.2 e 2.6 masse solari.
- La teoria prevede che nella fusione di due stelle di neutroni si generi un potente flusso di neutroni che, impattando contro i nuclei pesanti ancora presenti attorno ai due oggetti, genera elementi radioattivi che poi decadono, emettendo radiazioni elettromagnetiche.
- Si ha un dunque un lampo gamma e poi un impulso elettromagnetico ritardato (afterglow).





Una Kilonova

- Si genera una kilonova, così denominata perchè la sua tipica luminosità è un migliaio di volte più intensa di una nova ordinaria.
- Come dicevamo, GRB170817A è stato accompagnato dall'evento GW170817, quest'ultimo avente una banda d'incertezza di 28 gradi quadrati (il solo LIGO porta ad una banda d'incertezza di circa 1000 gradi quadrati).
- Si poté così identificare, all'osservatorio di Las Campanas in Cile (telescopio da 1 m, dedicato alla survey di supernovae assieme a un gemello sito nel Lick Observatory in California), la controparte elettromagnetica, in questo caso ottica.



Una Kilonova

- La controparte ottica è la galassia NGC4993, nella quale è esplosa la kilonova.
- Dopo pochi giorni la controparte ottica è diventata progressivamente più debole e ha virato verso il rosso. Spettroscopicamente si è rilevata la presenza di nuclei radioattivi.
- Nei giorni successivi è stato possibile osservare, (satellite Chandra) l'emissione X. Dopo un paio di settimane si è rilevata l'emissione radio. Non si sono potuti osservare neutrini.



- Le caratteristiche di questi fenomeni sono quelle previste per una kilonova. Le caratteristiche del segnale gravitazionale sono quelle previste dalla relatività generale.
- Si è potuto confermare che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce. Essendo la kilonova una candela standard, si è potuto ottenere un valore per la costante di Hubble.
- Si è determinato che $H = 70 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, valore non molto preciso ma a metà strada tra le misure effettuate a partire dalle supernovae e dalla radiazione cosmica di fondo.

