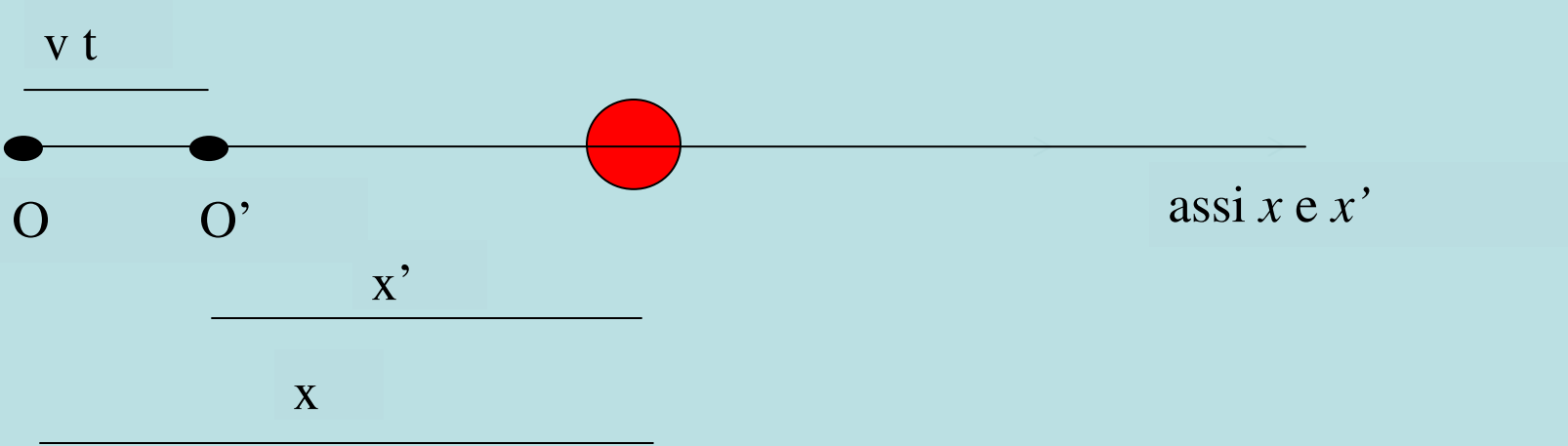


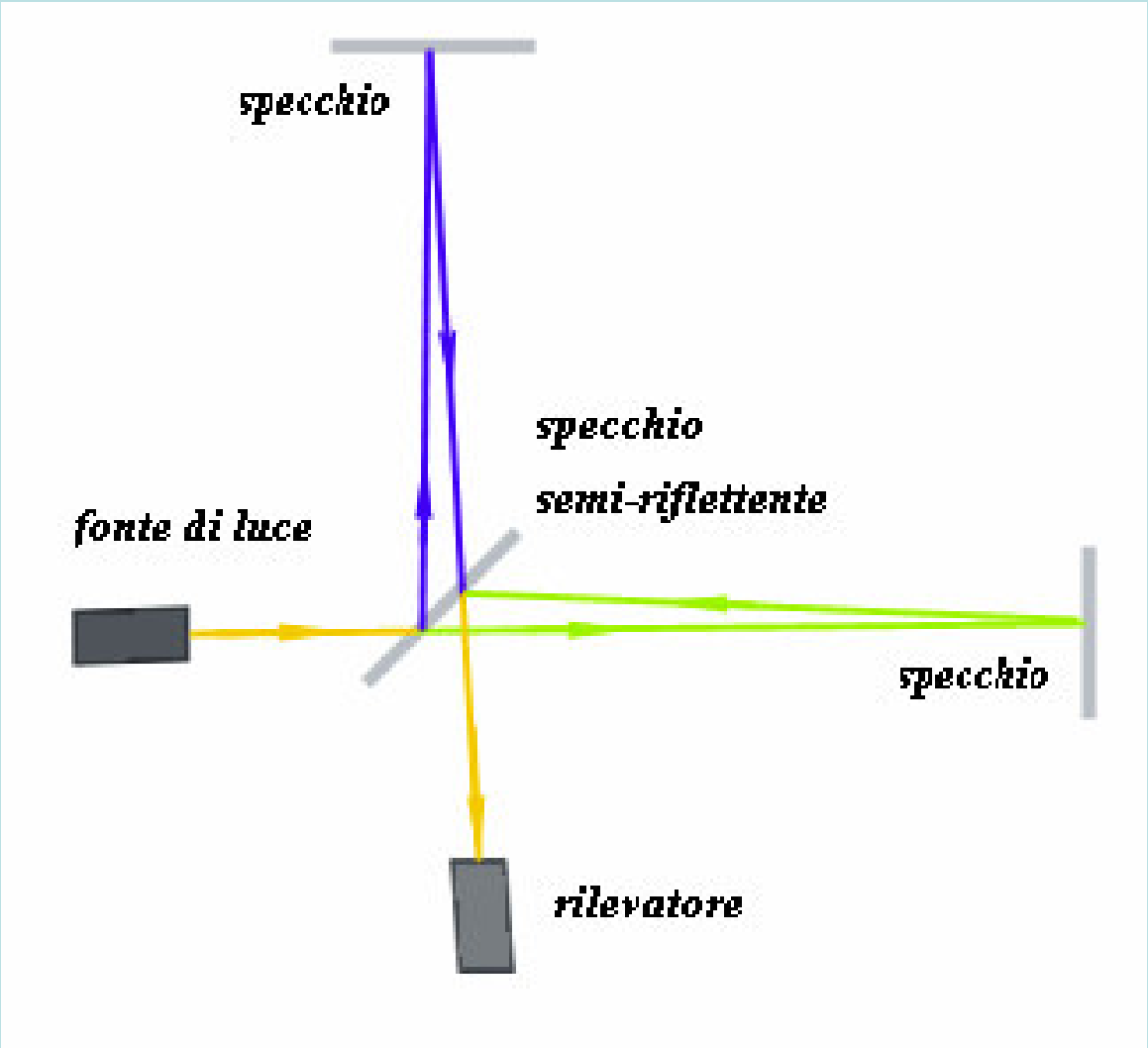
Riferimenti bibliografici

- P. Caldirola, G. Casati, F. Tealdi, Corso di Fisica per i licei scientifici, con prefazione di A. Salam, 3 volumi, Ghisetti e Corvi Editori, Milano.
- E. Segré, Personaggi e scoperte della fisica, 2 volumi, Mondadori, Milano.
- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fondamenti di Fisica, Vol. 3, Fisica Moderna, Ambrosiana, Milano

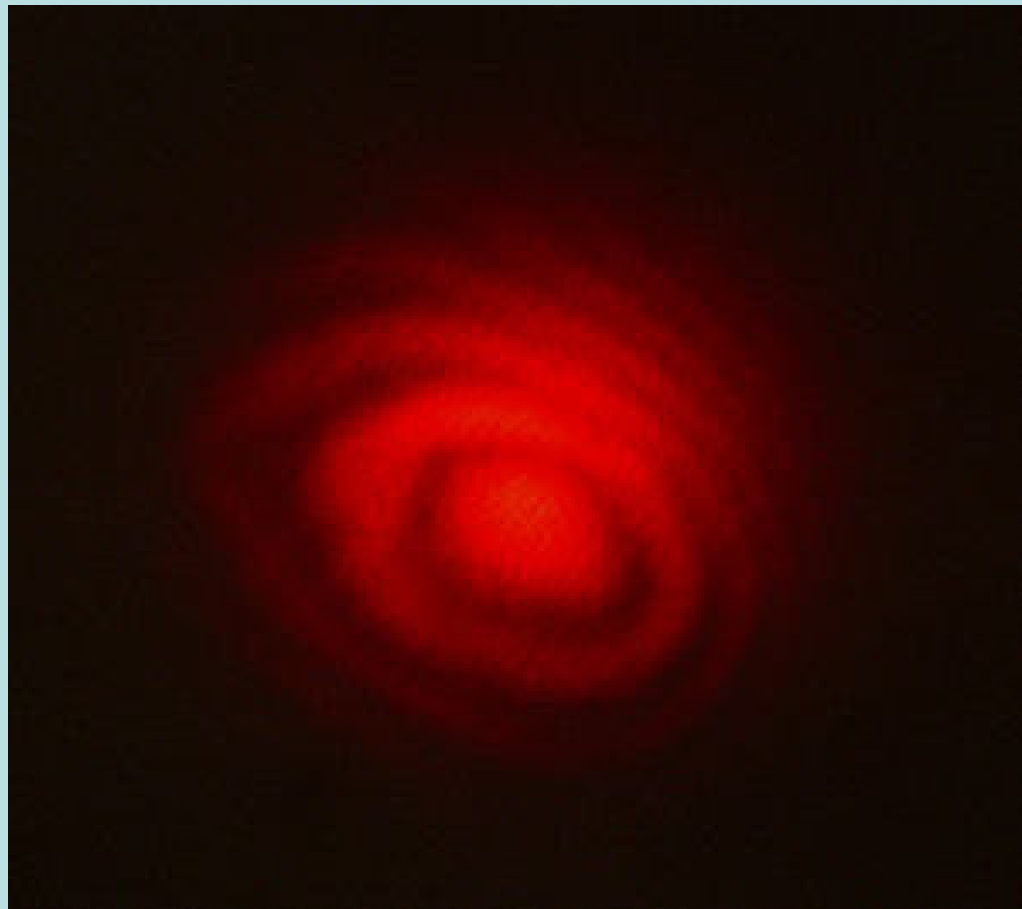
Fisica Classica

- Galileo, Dialogo, 1632
- Dinamica (Newton), Principia, 1687
- Elettromagnetismo (Maxwell), 1862
- Relatività galileiana: $x' = x - vt$; $t' = t$
- $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$; Sistema inerziale
- Composizione velocità; $\mathbf{a}' = \mathbf{a}$.
- Ipotesi dell'etere (spazio assoluto)
- *Esperimento di Michelson- Morley (1887)*





Esempio frange Interferometro di Michelson (luce rossa)



- Interferometro montato su una lastra di pietra quadrata di 15 cm di lato e circa 5 cm di spessore.
- Per eliminare le vibrazioni la lastra veniva fatta galleggiare su **mercurio liquido**, per mantenere la lastra orizzontale e farla girare attorno ad un perno centrale.
- Un sistema di specchi inviava il raggio di luce per un percorso di otto viaggi di andata e ritorno per rendere il **viaggio del raggio di luce più lungo possibile**.

Ipotesi di Lorentz per spiegare Michelson – Morley mantenendo ipotesi etere

La contrazione di lunghezza del braccio dell'interferometro parallelo alla velocità dell'etere compensa esattamente il ritardo nel moto del raggio.

Trasformazioni di Lorentz

- Trasformazioni di Lorentz: invarianza leggi Elettromagnetismo nei sistemi inerziali.
- $x' = \gamma (x - vt); t' = \gamma (t - vx/c^2)$
- $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} > 1$
- γ tende a 1 per $v \ll c$

Relatività Ristretta (1905)

Deduzione Trasformazioni Lorentz da due principi:

- Reciprocità del moto;
- Costanza di c .

Composizione velocità

Composizione velocità galileiana: $u = u' + v$

Composizione relativistica: $u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$;

Se $u' = c$, $u = \dots = c$

Esperimento CERN 1964

Decadimento del pione neutro
(detto anche “mesone π^0 ”)



La velocità dei raggi γ generati da pioni con velocità $0.799975 c$ è uguale a c .

Critica del concetto di simultaneità

$$\{x_1, t_0\} \rightarrow \{\gamma (x_1 - vt_0), \gamma (t_0 - vx_1/c^2)\}$$

$$\{x_2, t_0\} \rightarrow \{\gamma (x_2 - vt_0), \gamma (t_0 - vx_2/c^2)\}$$

Inoltre: Impossibilità di superare c .

Dilatazione dei tempi

La durata di un fenomeno osservato in movimento è dilatata di un fattore γ . (La durata di un fenomeno è minima nel sistema di quiete.)

Esempio dilatazione tempi

- Vita media mesone π (pione) in quiete:
 $2.60 \times 10^{-8} \text{ s}$
- Vita media con velocità $0.75 c$: $3.9 \times 10^{-8} \text{ s}$

(Si misura lo spazio percorso prima della disintegrazione)

(Si tratta del mesone π^+ ; in precedente diapositiva si è fatto riferimento al π^0)

Contrazione delle lunghezze

- La lunghezza di una sbarretta in movimento lungo l'asse x è contratta di un fattore $1/\gamma$.
- La massima lunghezza di una sbarretta è quella misurata da un osservatore in quiete rispetto ad essa.

Sistema NAVSTAR GPS (Global Positioning System)

- Disabilitazione Degradazione Segnale: anno 2000 (Clinton)
- Numero di satelliti: 24 + altri
- Rallentamento tempo misurato dagli orologi atomici satellitari: $7 \mu\text{s}/\text{giorno}$
- (Accelerazione tempo dovuta, per la Relatività Generale, a minore curvatura spaziotempo: $45 \mu\text{s}/\text{giorno}$)

Dinamica relativistica

$$f = dp/dt, \quad p = mv, \quad m = \gamma m_0$$

$m \rightarrow$ infinito per $v \rightarrow c$

(irraggiungibilità c)

Energia relativistica

$$E = \gamma m_0 c^2 \quad \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

$$E = m_0 c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \text{altri termini}\right)$$

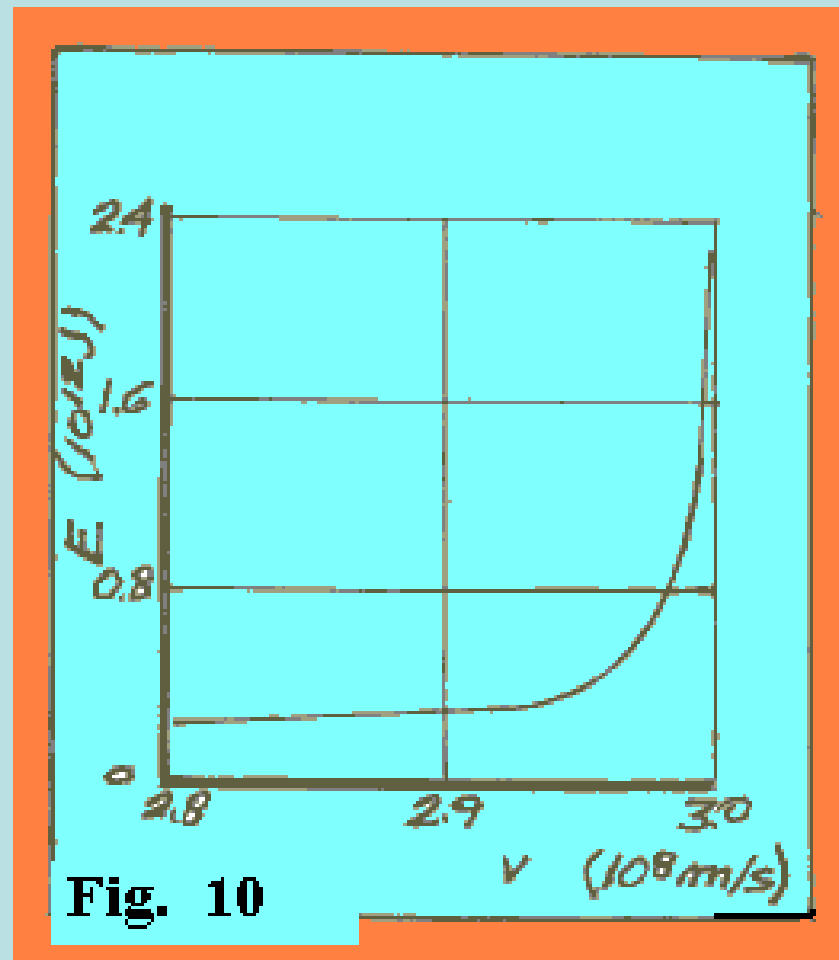
$$= m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \text{altri termini}$$

= massa a riposo + energia cinetica

relativistica, che coincide con

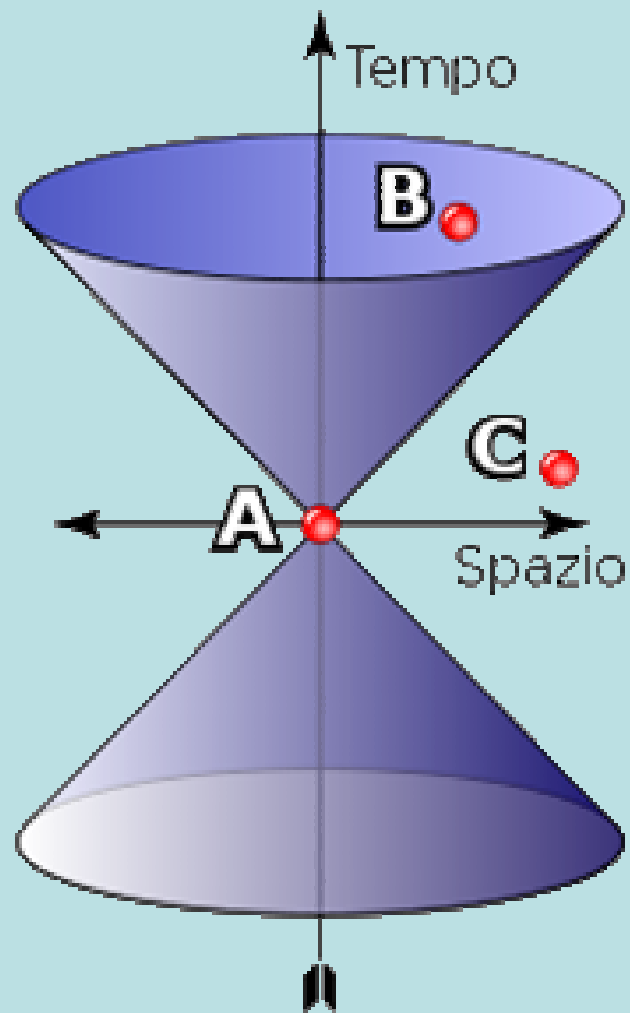
quella classica per $v \ll c$

Esperimento di W. Bertozzi (1964) (Energia di elettroni vs. velocità)



Cronotopo di Minkowski

- Invarianza della distanza cronotopica tra due eventi:
- $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2$
- **Cono di luce** di Minkowski
- **Principio di causalità**
(apparentemente violato nel caso di cambiamento ordine temporale per eventi fuori dal cono)



Le prossime cinque diapositive
riguardano alcune nozioni aggiuntive
sulla Relatività Ristretta

Effetto Doppler relativistico

$$f = f_0 \left[\frac{1-\beta}{1+\beta} \right]^{1/2}, \text{ dove } \beta = v/c,$$

v = velocità relativa tra sorgente e osservatore. (Una sola formula)

$$f = f_0 (1 - \beta + \text{termini ordine superiore})$$

Lo sviluppo al primo termine coincide con lo sviluppo delle due formule classiche.

Effetto Doppler trasverso

$$f = f_0 (1 - \beta^2)^{1/2}$$

(fenomeno connesso alla dilatazione dei tempi)

Definizione di quadrivettore

Nello Spazio di Minkowski un **quadrivettore** (o **tetravettore**) è una quadrupla di valori che nelle trasformazioni di coordinate tra due riferimenti inerziali rispetta le Trasformazioni di Lorentz (**covarianza**). La metrica dello spazio di Minkowski definisce il modulo quadratico di un quadrivettore, che è per definizione invariante per trasformazioni di Lorentz, ovvero sia è uno scalare. Esempio: energia e impulso insieme costituiscono un tetravettore; densità volumetrica di carica e densità di corrente (quadrivettore proporzionale alla tetravelocità).

Esempi di tettravettori

- Tetravelocità: $u_i = \gamma v_i/c$; $u_0 = \gamma$
- Energia-impulso: $p_i = m_0 \gamma v_i$; $p_0 = m_0 \gamma c$

Invariante connesso alla tetravelocità:

$$-u_0^2 + u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 = -1$$

Relazione fra Impulso ed Energia

- Sia $p = \gamma m_0 v =$ **Impulso**
- Sia $E = \gamma m_0 c^2 =$ **Energia**
- Sia $m_0 c^2 =$ **Massa a riposo** (il cui quadrato è l'invariante connesso al quadrivettore energia-impulso). Si ha:
$$E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$$

Limiti della definizione newtoniana di spazio assoluto e di sistema inerziale

- Secchio di Newton
- Critiche di Berkeley e di Mach

Principio di Relatività Generale (1916)

L'uguaglianza fra massa inerziale e massa gravitazionale suggerisce di estendere il principio di relatività a tutti i sistemi di riferimento comunque accelerati.

Principio di Equivalenza (Relatività Generale, 1916)

Per ogni regione spazio-temporale abbastanza piccola, esiste sempre un sistema di riferimento nel quale è assente ogni effetto della gravitazione.

Conseguenze del Principio di Equivalenza

- Il campo gravitazionale incurva la luce
- Il campo gravitazionale rallenta gli orologi

Curvatura dello spazio-tempo

- La luce si propaga seguendo il cammino più breve tra due punti, ma questo cammino non coincide con la retta euclidea se nello spazio è presente un campo gravitazionale
- In presenza di un campo gravitazionale lo spazio-tempo è curvo (non-euclideo)

Coefficienti metrici

Teorema di Pitagora generalizzato:

$$\Delta l^2 = g_{xx} \Delta x^2 + g_{yy} \Delta y^2 + g_{xy} \Delta x \Delta y$$

Nello Spazio Euclideo:

$$g_{xx} = g_{yy} = 1; g_{xy} = 0.$$

L'influenza del campo gravitazionale sui fenomeni fisici è completamente descritta attraverso le relazioni che legano i coefficienti metrici dello spazio-tempo alla distribuzione di massa-energia che genera il campo stesso.

Deviazione di un raggio
luminoso proveniente da una
stella quando attraversa il
campo gravitazionale del Sole

Prima conferma: Arthur
Eddington e collaboratori (1919)

Spostamento del perielio di un
pianeta nel suo moto di
rivoluzione intorno al Sole
(moto a rosetta)

Conferma per Mercurio

Spostamento verso il rosso della luce proveniente dal Sole o da altre stelle (dilatazione gravitazionale del tempo)

Esperimento di Pound e Rebka (1960) su raggi γ che attraversano il campo gravitazionale terrestre

Esperimento di Hafele and Keating (1977): Misure di intervalli di tempo da parte di orologi atomici posti su aerei in volo a 10000 metri di quota

Relatività ristretta: l'orologio sull'aereo rallenta (visto da terra).

Relatività generale: l'orologio sull'aereo accelera rispetto a quello a terra perché la forza gravitazionale è minore.

Consideriamo la reazione nucleare

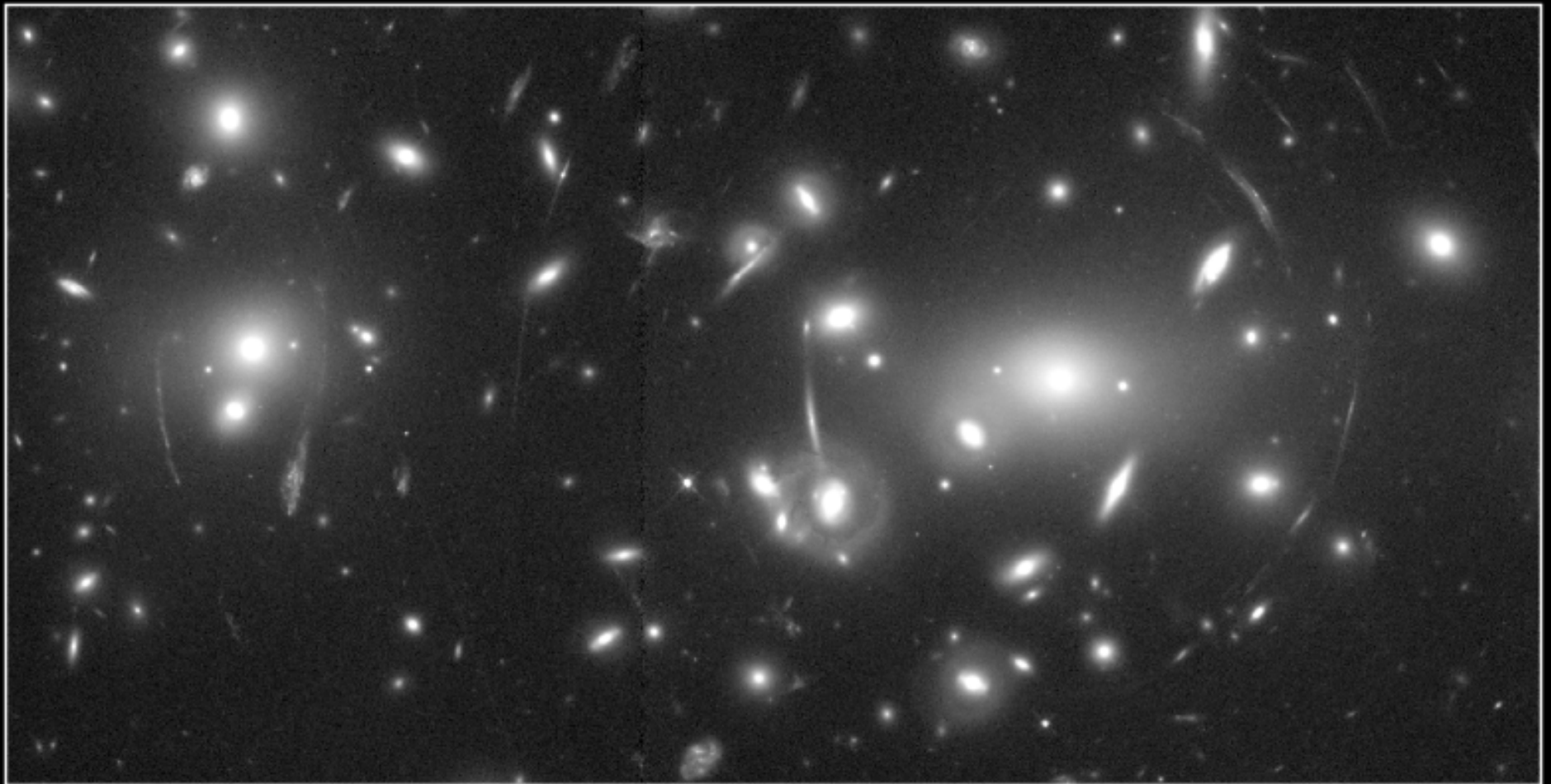
${}_3\text{Li}^7 + {}_1\text{H}^1 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_2\text{He}^4$, ottenuta per la prima volta da **Cockroft e Walton (1932)** bombardando il litio con protoni, accelerati mediante l'applicazione di un campo elettrico generato da una d.d.p. di qualche centinaio di migliaia di Volt. I protoni provenivano da un acceleratore elettrostatico e incidevano su una lastra di Litio. Sul cammino delle particelle alfa uscenti era interposto un foglio di mica a spessore variabile in modo da misurare l'energia di queste particelle. Infine una camera a ionizzazione (rivelatore di particelle a gas), collegata a un amplificatore, permetteva di misurare il numero delle particelle stesse.

Dai valori dell'energia cinetica delle particelle alfa si calcolava che l'energia prodotta dalla reazione fosse (17.13 ± 0.1) MeV. D'altra parte le masse delle particelle in gioco sono ben note attraverso misure dirette per mezzo dello spettrografo di massa. Si ha precisamente, esprimendo le masse in unità atomiche: massa ${}_3\text{Li}^7 = 7.01822$, massa ${}_1\text{H}^1 = 1.008146$ (somma di queste due masse = 8.026366), massa ${}_2\text{He}^4 = 4.00388$, che moltiplicata per due dà 8.00776; la differenza equivale a 17.27 eV.

Lenti gravitazionali

La lente gravitazionale è un fenomeno fisico previsto dalla Relatività Generale: poiché la forza gravitazionale è in grado di deflettere i raggi di luce, è possibile che quando un corpo di grande massa viene a trovarsi fra una sorgente di luce e l'osservatore, i raggi di luce provenienti dalla sorgente vengano deviati in modo tale da provocare un'amplificazione del segnale luminoso simile a quella causata da una lente. Un secondo possibile effetto delle lenti gravitazionali è di deformare l'oggetto originale, giungendo a generare immagini multiple.

- Lo Hubble Space Telescope ha scoperto nel 1995 un esempio spettacolare di lente gravitazionale nel **gruppo di galassie Abell 2218**. L'ammasso, straordinariamente compatto e massiccio, deflette la luce che lo attraversa trasformando le immagini delle galassie più lontane in archi luminosi: ne sono stati contati fino a 120. Le galassie deformate che formano gli archi sono da cinque a dieci volte più lontane del gruppo galattico che deforma l'immagine.



Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

Le prossime diapositive riportano il
testo del Gran Navilio

Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non piú gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti.

Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder cosí, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: **voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima**, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; e **gettando alcuna cosa al compagno**, non con piú forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; **le gocciole cadranno come prima nel vaso inferiore**, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; **i pesci nella lor acqua** non con piú fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo dell'orlo del vaso;

e finalmente **le farfalle e le mosche** continueranno i lor voli indifferentemente verso tutte le parti, né mai accaderà che si riduchino verso la parete che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate; e se abbruciando alcuna lagrima d'incenso si farà un poco di **fumo, vedrassi ascender in alto ed a guisa di nugoletta trattenervisi**, e indifferentemente muoversi non piú verso questa che quella parte.

E di tutta questa corrispondenza d'effetti ne è cagione l'esser il moto della nave comune a tutte le cose contenute in essa ed all'aria ancora, che per ciò dissi io che si stesse sotto coverta; ché quando si stesse di sopra e nell'aria aperta e non seguace del corso della nave, differenze piú e men notabili si vedrebbero in alcuni de gli effetti nominati: e non è dubbio che il fumo resterebbe in dietro, quanto l'aria stessa; le mosche parimente e le farfalle, impedita dall'aria, non potrebbero seguir il moto della nave, quando da essa per spazio assai notevole si separassero; ma trattenendovisi vicine, perché la nave stessa, come di fabbrica anfrattosa, porta seco parte dell'aria sua prossima, senza intoppo o fatica seguirebbon la nave, e per simil cagione veggiamo tal volta, nel correr la posta, le mosche importune e i tafani seguir i cavalli, volandogli ora in questa ed ora in quella parte del corpo; ma nelle goccioline cadenti pochissima sarebbe la differenza, e ne i salti e ne i proietti gravi, del tutto impercettibile.