

Deflessione della luce

Analizziamo la propagazione della luce in un campo gravitazionale studiando l'equazione relativistica del moto di un fotone al suo interno.

$$dp_\mu + (kh_{\mu\alpha,\beta} p^\alpha - \frac{k}{2} h_{\alpha\beta,\mu}) dx^\beta = 0$$

La variazione dell'impulso del fotone è

$$\Delta p^\mu = -kp^\alpha \int_{-\infty}^{\infty} (h_{\mu,\alpha\beta} - \frac{1}{2} h_{\alpha\beta,\mu}) dx^\beta$$

$$\Delta p^\mu = \frac{k}{2} p^\alpha \int_{-\infty}^{\infty} h_{\alpha\beta,\mu} dx^\beta$$

Marco Antonucci - 27.05.08

Deflessione della luce

Lo spostamento radiale e il vettore impulso, nel caso di un fotone che penetra nel campo generato dal Sole, risultano

$$dx^\beta \approx (dt, 0, 0, dz) = (dz, 0, 0, dz)$$

$$p^\alpha \approx (p^3, 0, 0, p^3)$$

$$\Delta p_1 = \frac{k}{2} p^3 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial}{\partial x} (h_{00} + h_{33}) dz = \frac{4GM_\odot}{b} p^3$$

L'angolo di deflessione assume la seguente espressione:

$$\vartheta \approx \frac{\Delta p_x}{p_z} = -\frac{\Delta p_1}{p^3} = -\frac{4GM_\odot}{bc^2} = -1,75 \text{ arc sec}$$

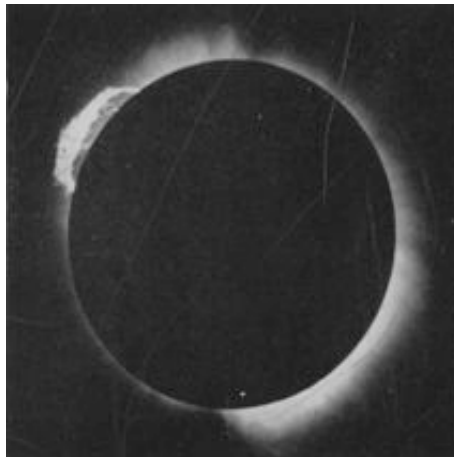
Deflessione della luce

La deflessione si manifesta mediante uno spostamento apparente della sorgente sulla volta celeste. Il campo stellare che circonda il Sole, tuttavia, può essere osservato soltanto nel corso di un'eclissi totale, durante la quale la luminosità della corona impedisce peraltro di scorgere emissioni di sorgenti con parametri d'urto $b < 2R$.

Deflessione della luce

Il procedimento sperimentale prevede il confronto tra due scatti fotografici: il primo relativo al campo stellare retrostante il Sole occultato, il secondo effettuato di notte a mesi di distanza. L'istantaneità del fenomeno e le eventuali alterazioni degli strumenti nel periodo che intercorre tra le fotografie condizionano l'esito: la stazione di rilevazione è allestita appositamente nella regione posta nel cono d'ombra dell'eclissi.

Deflessione della luce



Deflessione della luce

29 maggio 1919

Eddington e Dyson

isole di Sobral e Golfo di Guinea

Sobral: $\vartheta = (1,98 \pm 0,16)arc\ sec$

Principe: $\vartheta = (1,16 \pm 0,40)arc\ sec$

Misura recente nel campo ottico:

30 giugno 1973

Mauritania: $\vartheta = (1,66 \pm 0,19)arc\ sec$

Deflessione della luce



Deflessione della luce

Esaminando il fenomeno nell'ambito delle onde radio non è necessario attendere un'eclissi. Ad esempio, il disco solare si sovrappone ogni anno alla sorgente quasi-stellare 3C279 il giorno 8 ottobre; mediante gli interferometri radio si può misurare lo spostamento apparente in rapporto alla posizione di oggetti celesti caratterizzati da sufficiente distanza angolare. Registrando la deflessione su varie frequenze si corregge il contributo attribuito alla rifrazione causata dal plasma della corona solare.

Deflessione della luce

1991

VLBI

$$\frac{\vartheta_{\text{perimentale}}}{\vartheta_{\text{teorico}}} = 1,0001 \pm 0,0001$$

VLBI correla misure simultanee di alcuni radiotelescopi separati da distanze intercontinentali; i segnali, incisi su nastro, vengono contraddistinti dall'esatto istante di rilevazione mediante orologi atomici sincronizzati posti presso ogni osservatorio.

Deflessione della luce



Ritardo della luce

Un altro effetto sul moto dei fotoni imputabile all'azione del campo gravitazionale è il ritardo temporale, causato dalla riduzione della velocità di propagazione dei segnali luminosi ed espresso dalla relazione

$$\frac{dz}{dt} = \left(1 - \frac{2GM_{\odot}}{r}\right)$$

Il ritardo accumulato da un raggio luminoso per spostarsi tra due punti interni al campo dipende dalla loro distanza e dal parametro d'urto che caratterizza la traiettoria – in prima approssimazione rettilinea. Esso è massimo in congiunzione superiore.

Ritardo della luce

Il ritardo si può ricondurre al fenomeno della deflessione interpretando quest'ultimo in termini di rifrazione del fronte d'onda. In prossimità della sorgente del campo gravitazionale, infatti, esso subisce un rallentamento maggiore a causa della deviazione della direzione di avanzamento.

L'analisi quantitativa e sperimentale di tale processo richiede numerose correzioni, alcune di natura relativistica e geometrica, altre associate alla presenza del plasma interplanetario lungo il tragitto del segnale.

Ritardo della luce

1966 – 1971

Shapiro

Radiotelescopio di Arecibo

Per elidere i contributi spuri nei tempi di ritardo misurati dagli eco-radar (i segnali inviati verso Venere e Mercurio e da essi riflessi) si rese necessaria una prolungata serie di misure, volte ad ottenere dati di notevole precisione su masse, orbite, dimensioni e configurazione topografica dei pianeti. Questo permise di conoscere accuratamente la posizione della superficie riflettente, ricavando un buon accordo tra valori sperimentali e teorici.

Ritardo della luce



Ritardo della luce

1975

Anderson

Sonde spaziali Mariner 6 e 7

Le sonde, una volta raggiunte dai segnali, erano in grado di trasmetterle verso la Terra utilizzando strumenti propri. L'accordo con i risultati previsti si rivelò ottimo, sebbene le sollecitazioni casuali – dovute alle fuoriuscite di gas dai sistemi di controllo dell'assetto e alle fluttuazioni della pressione di radiazione solare – introducessero incertezze sistematiche sulla localizzazione della superficie-bersaglio.

Ritardo della luce



Lenti gravitazionali

I raggi luminosi che, provenendo da una sorgente remota, passano alle estremità opposte di una distribuzione di massa vengono deviati dal suo campo gravitazionale e si intersecano a grande distanza da essa. In tale punto, un osservatore vedrà due immagini distinte della sorgente. Stelle e galassie che determinano immagini multiple costituiscono le lenti gravitazionali.

Lenti gravitazionali

Le lenti gravitazionali non possiedono tuttavia le proprietà ottiche delle lenti propriamente dette. L'angolo di deflessione dei raggi che le attraversano, infatti, decresce all'aumentare del parametro d'urto: non è definibile una lunghezza focale e non possono scaturire dalla deflessione della luce autentiche immagini.

Lenti gravitazionali

Un fascio di raggi paralleli diverge attraversando una lente gravitazionale, ma le estrapolazioni non si incontrano in un unico punto. Le immagini multiple rappresentano perciò le molteplici direzioni di incidenza dei raggi stessi in corrispondenza della posizione dell'osservatore. Questo processo è analogo ad un arcobaleno originato dalle gocce di pioggia, il quale corrisponde ad una direzione d'incidenza della luce per l'osservatore e non costituisce una vera immagine nel cielo; variando il luogo di osservazione si modifica anche la posizione apparente dell'arcobaleno.

Lenti gravitazionali



Lenti gravitazionali

Se la sorgente di luce, la stella che provoca la deflessione e l'osservatore sono perfettamente allineati, tutti i raggi passanti con l'opportuno parametro d'urto attorno alla stella convergono da ogni direzione nella posizione di osservazione. Le infinite immagini originano un anello intorno alla stella. Il suo raggio angolare è

$$\frac{b}{D} = \sqrt{\frac{4GM}{D}}$$

D rappresenta la distanza tra la stella e la Terra.

Lenti gravitazionali



Lenti gravitazionali

L'angolo caratteristico b/d rispecchia la separazione angolare tipica tra due immagini e la massima deviazione possibile dall'allineamento affinché le immagini stesse non si sovrappongano. Se questo fattore diviene inferiore al limite di risoluzione dei telescopi ottici, l'unico effetto riscontrabile è l'incremento dell'intensità luminosa dell'immagine. La probabilità che si verifichi un allineamento sufficientemente buono e la difficoltà insita nel ricondurre le variazioni di luminosità di una fonte alle lenti gravitazionali portano alla ricerca di tecniche più efficaci.

Lenti gravitazionali

Un'opportunità migliore per esaminare le lenti è offerta dalla deflessione operata dalle galassie. Essa si calcola dalla composizione vettoriale delle deviazioni prodotte dalle stelle e dagli altri corpi massivi presenti al loro interno. La distribuzione di massa non è sferica e i dettagli del conto sono complessi, ma si ricava per il rapporto b/d un valore compreso nell'intervallo di risoluzione caratteristico dei radiotelescopi. Inoltre, le probabilità di allineamenti esatti tra galassie risultano superiori rispetto a quelle delle stelle-lenti.

Lenti gravitazionali

Una galassia agisce da lente sia per i raggi che passano al suo esterno, sia per quelli che ne attraversano la distribuzione di massa. Essa, infatti, è trasparente alla luce, in quanto le distanze tra le stelle risultano molto maggiori dei loro diametri. Tale caratteristica implica che il numero di immagini prodotte per effetto-lente sia sempre dispari, per via di un teorema dell'ottica ondulatoria. Le stelle – opache nei confronti dei raggi luminosi – e i densi nuclei galattici non rientrano nella casistica del teorema perché violano la continuità del fronte d'onda.

Lenti gravitazionali

L'orlo della piega del fronte d'onda, avanzando, traccia una superficie regolare detta "caustica", alla quale i raggi sono paralleli. Tale superficie di tangenza costituisce un involuppo per i bordi del fronte ed è contrassegnata da un'intensità luminosa eccezionalmente alta. La concentrazione dei raggi avviene per una sola delle dimensioni trasversali al fascio, mentre nel punto nel quale si forma l'immagine di una lente ottica vengono condensate entrambe le dimensioni: il punto in questione è una superficie caustica degenera.

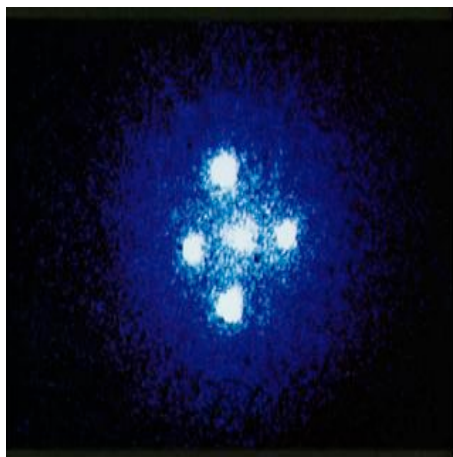
Lenti gravitazionali

1979

Walsh, Carswell e Weyman

Le prime immagini prodotte da una lente gravitazionale riscontrate nell'Universo furono i quasar Q0957+561 A e B, che presentavano identici spettri ottici e medesima deviazione verso il rosso. Solamente in seguito fu individuata la piccola galassia responsabile dell'evento. La terza immagine, prevista dai modelli teorici, non risulta rilevabile, in quanto debole e coperta dalla galassia-lente.

Lenti gravitazionali



Lenti gravitazionali

La maggior parte dei casi di effetto-lente attualmente noti è frutto di un programma sistematico di ricerca effettuato con il radiotelescopio VLA. Tutte le evidenze sperimentali riguardano sorgenti rappresentate da quasar e, inaspettatamente, il numero di immagini osservate è quasi sempre pari, in contraddizione con il teorema menzionato in precedenza. La discrepanza è dovuta probabilmente alla presenza di immagini troppo deboli per essere percepite o sovrapposte, ad esempio in prossimità di una superficie caustica; è inoltre possibile che alcune immagini siano oscurate da nubi di polvere.

Lenti gravitazionali

Altri effetti dovuti alle lenti gravitazionali si evidenziano qualora la sorgente sia estesa, a causa della distorsione operata dalla lente sulla sua immagine; la deformazione si accentua in corrispondenza delle caustiche. Una sorgente di forma discoidale, ad esempio, può originare archi o sciami di piccole linee di luce. In circostanze particolari, l'allineamento con la sorgente porta l'arco a chiudersi in un anello di Einstein

Lenti gravitazionali



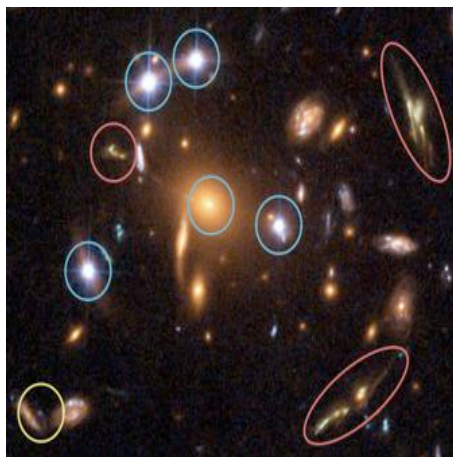
Applicazioni

Nel caso dei quasar gemelli, le traiettorie dei raggi e le velocità ad essi associate nel campo gravitazionale della lente sono differenti e, di conseguenza, diversi sono i tempi impiegati dalla luce per giungere all'osservatore dalle due immagini. Le variazioni di intensità consentono di quantificare questo intervallo di tempo, pari a circa 540 giorni. Conoscendo la geometria globale dei raggi tramite un modello teorico sulla distribuzione delle masse nella galassia-lente, il ritardo tra i segnali fissa la scala delle distanze; da essa è possibile risalire alla costante di Hubble.

Applicazioni

Le modifiche delle posizioni orbitali delle stelle di una galassia-lente possono tradursi in piccole fluttuazioni d'intensità tra le immagini distinte di una sorgente. Questi fenomeni, classificati con l'appellativo di "microlenti", consentono lo studio della materia oscura presente nell'Universo. Essa potrebbe generare immagini multiple di sorgenti retrostanti e, se fossero misurate alterazioni nella luminosità di queste ultime, sarebbe possibile evidenziare l'esistenza di grumi e addensamenti di massa. Osservare microlenti nello spazio intergalattico costituirebbe in tal senso una prova indiretta della presenza di materia oscura.

Lenti gravitazionali



Lenti gravitazionali

