

# INTRODUZIONE

## LA RIVELAZIONE DI LIGO, UN EVENTO DI PORTATA MONDIALE

L'11 febbraio 2016, una notizia attesa già da qualche mese, ha portato un grandissimo entusiasmo nella comunità scientifica internazionale. In una conferenza stampa congiunta, la collaborazione scientifica statunitense LIGO e quella europea Virgo, hanno annunciato che le *onde gravitazionali*, predette dal celeberrimo scienziato tedesco Albert Einstein in un suo articolo di ricerca risalente esattamente ad un secolo prima [1], erano state finalmente rivelate dalle apparecchiature di LIGO dopo decenni di tentativi infruttuosi.

*L'evento GW150914* (così è stata catalogata questa prima, storica rivelazione delle onde gravitazionali da parte della collaborazione LIGO) è stato sicuramente una pietra miliare, non solo per la fisica relativistica, ma per la scienza in generale. Per capirne realmente l'importanza e le sue spettacolari conseguenze, presenti e future, nella nuova era di astronomia gravitazionale che si sta aprendo, occorre però partire da lontano.



## CAPITOLO 1

# EINSTEIN E LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ GENERALE

Le onde gravitazionali sono una previsione di quella che da molti, compreso chi scrive, è considerata la più grande realizzazione intellettuale nella storia dell'umanità, ossia *la teoria della relatività generale* di Albert Einstein, della quale nel 2015 si è celebrato il centenario.

La presentazione da parte di Einstein all'Accademia Prussiana delle Scienze del suo articolo scientifico più celebre, in cui egli derivò le equazioni finali della relatività generale, risale infatti al novembre 1915 [2].

Il celebre fisico e matematico tedesco naturalizzato britannico Max Born, uno dei massimi teorici della *meccanica quantistica* (che è la scienza che studia l'infinitamente piccolo), che ottenne infatti il premio Nobel per la fisica nel 1954 «per la sua fondamentale ricerca in meccanica quantistica [...]» [193], definì la relatività generale come «La più sorprendente combinazione di penetrazione filosofica, intuizione fisica e abilità matematica» [45].

La teoria della relatività di Einstein (*relatività speciale o ristretta* e relatività generale) è celeberrima, ma misteriosa ed inafferrabile per i non tecnici che spesso ritengono Einstein come «colui che ha dimostrato che tutto è relativo».

In realtà, se da un punto di vista puramente filosofico Einstein, differenziandosi da altri scienziati quali ad esempio il suo amico Bertrand Russell, sosteneva che la nostra visione del mondo in quanto soggettiva, deve essere relativa (vedere l'opera dello stesso Einstein *Come io vedo il mondo - La teoria della relatività* [3]), dal punto di vista prettamente fisico la questione è diversa. In un certo senso, infatti, sono le leggi fisiche a dover essere as-

solute ed universali e sono i concetti di spazio e tempo ad esser relativi agli osservatori in modo da garantire questa universalità delle leggi fisiche. Da questo punto di vista il *principio di relatività* era già noto da Galileo che sosteneva «che tutte le leggi della dinamica (la dinamica è quel ramo della fisica che studia il moto dei corpi e le circostanze che lo determinano e/o lo modificano) devono esser le stesse per osservatori inerziali».

Einstein generalizzò il principio sostenendo che «tutte le leggi della fisica devono esser le stesse per osservatori inerziali». In particolare, la velocità della luce è una *costante universale* per tutti gli osservatori inerziali. Gli osservatori inerziali sono osservatori che si muovono di moto rettilineo ed uniforme, ossia a *velocità costante in modulo e direzione* rispetto alle *stelle fisse* e rispetto ad altri osservatori inerziali.

Per i lettori che non hanno esperienza tecnica è il caso di chiarire che in fisica esistono vari tipi di grandezze. Sono dette *grandezze scalari* quelle grandezze che sono completamente determinate da un unico numero, detto *modulo*, che le rappresenta quantitativamente. La massa, ossia la quantità di materia di un corpo è una grandezza scalare. Le *grandezze vettoriali*, o, semplicemente, *vettori*, sono caratterizzate oltre che dal loro modulo, anche da un *verso* e da una *direzione*. È questo il caso dello *spostamento*, della *velocità* e dell'*accelerazione*.

Le *grandezze tensoriali*, o, semplicemente, *tensori*, sono un'ulteriore generalizzazione del concetto di vettore, che permette di assegnare ad una grandezza più di un verso ed una direzione. Questa definizione di tensore farà probabilmente inorridire i matematici ed anche molti fisici teorici, ma qui cerchiamo di far capire al lettore le cose dal punto di vista più semplice ed intuitivo possibile. Le onde gravitazionali risultano essere delle *onde tensoriali*. Ricordiamo anche che, sebbene oggi siamo consci che nel nostro universo non ci sia praticamente niente in quiete assoluta, per *stelle fisse* si intendono dei corpi celesti situati ad una distanza talmente grande dalla nostra Terra, che ci appaiono immobili nelle loro posizioni relative sulla sfera celeste.

È utile ricordare anche il *principio di inerzia* di Galileo-Newton: «un corpo non soggetto a forze persevera nel suo stato di quiete

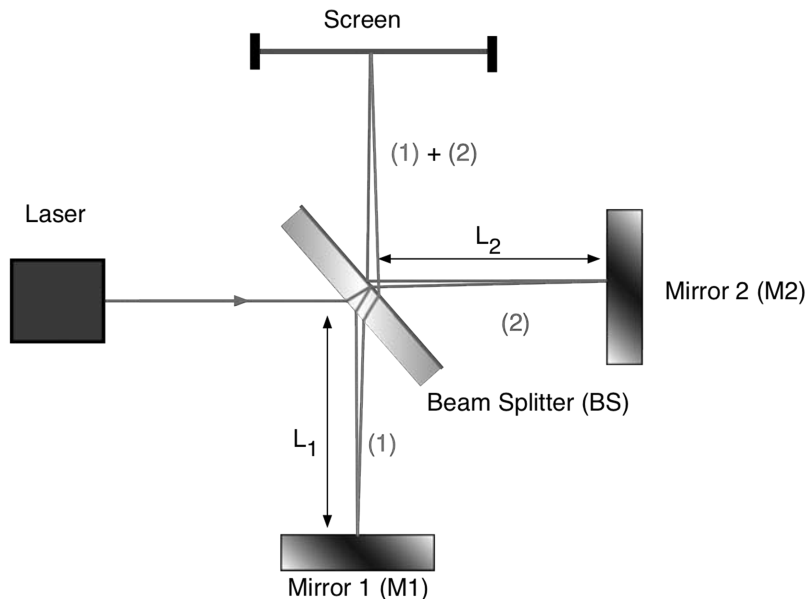


Figura 1: Interferometro di Michelson-Morley.

o di moto rettilineo uniforme».

Vediamo i passi che portarono alla teoria della relatività speciale o ristretta, da non confondere con la teoria della relatività generale di cui si è parlato prima. Verso la fine del 1800 si riteneva che l'aria fosse formata da una sostanza invisibile detta *etere*; in tal modo, ogni corpo in moto nell'universo, compreso il nostro pianeta, produrrebbe un vento d'etere che si muove alla stessa velocità del corpo in moto ma con direzione opposta. Nel 1887 due fisici statunitensi, Michelson e Morley, effettuarono un esperimento di misura della velocità della luce, alla ricerca, appunto, dell'etere, con uno strumento detto *interferometro* (vedremo in seguito che le principali apparecchiature per rivelare le onde gravitazionali altro non sono che degli interferometri di Michelson-Morley modificati; chiariremo anche il funzionamento esatto dell'interferometro) che sfruttava le proprietà ondulatorie della luce (Figura 1).

Con grande sorpresa, non solo loro, ma di tutta la comunità scientifica, Michelson e Morley trovarono che la velocità della luce era la stessa in tutte le direzioni (!!!) compresa quella di moto terrestre dove avrebbe dovuto esser presente il vento d'etere.

Si ebbero allora due interpretazioni: la prima del fisico irlandese George Francis FitzGerald, secondo cui il braccio dell'interferometro nella direzione del moto dell'etere si sarebbe dovuto accorciare, e la seconda, geniale, di Einstein, che generalizzando l'idea di *tempo locale* dovuta al fisico olandese Hendrik Lorentz, ipotizzò che anche il tempo dovesse essere relativo per giustificare la costanza della velocità della luce.

Abbiamo scritto "anche" in quanto il fatto che lo spostamento, ossia lo spazio percorso, fosse relativo all'osservatore era cosa nota già nella fisica di Galileo e Newton. Per capire questo punto basta in effetti ricordare quanto è sicuramente capitato al lettore quando si trova in un treno fermo in una stazione. Se un treno in un binario parallelo inizia a muoversi, il lettore inizialmente non capisce se è il proprio treno o quello nel binario parallelo a muoversi veramente.

Il tempo («qualunque cosa sia», come dice il celebre fisico e cosmologo britannico Stephen Hawking nel suo bestseller *Dal Big Bang ai buchi neri. Breve storia del tempo* [4]) era invece considerato come un qualcosa di assoluto ed indipendente dall'osservatore nella fisica di Galileo e Newton.

L'ipotesi di Einstein era dunque un qualcosa di assolutamente esplosivo che andava contro i nostri sensi e contro qualsiasi tipo di esperienza quotidiana. In effetti, il fisico statunitense Leonard Susskind sostiene, nel suo celebre libro *La guerra dei buchi neri* [5], che, per capire la teoria della relatività speciale, abbiamo bisogno di *resettare la nostra mente*.

La base della teoria sta dunque nella geniale intuizione di Einstein. Se lo spazio percorso è relativo all'osservatore e la velocità della luce è invece una costante indipendente all'osservatore, poiché una velocità è data dallo spazio percorso diviso il tempo impiegato a percorrerlo, allora non c'è che una soluzione: anche il tempo dev'essere relativo all'osservatore.

L'intuizione di Einstein sta alla base della *teoria della relatività*

*tà speciale* del 1905, che portò, da un lato, alla giustificazione di tutta la *teoria elettromagnetica* precedente, al punto che andrebbe invertito l'ordine storico delle scoperte, e dall'altro, sempre da parte dello stesso Einstein, alla formula  $E = mc^2$ , probabilmente l'equazione più famosa nella storia della scienza, che rappresentò, tra l'altro, la base teorica della bomba atomica. Questa celeberrima equazione di Einstein sta infatti a significare l'equivalenza tra la massa di un corpo e la sua energia, laddove  $c$ , che indica la velocità della luce, elevata al quadrato, altro non è che il fattore di conversione tra massa ed energia. Dato l'elevatissimo valore della velocità della luce (circa 300.000 chilometri al secondo; la luce impiega poco più di un secondo a percorrere la distanza Terra-Luna!) dalla formula di Einstein si deduce che bastano piccole variazioni della massa a generare enormi variazioni dell'energia. La base teorica della bomba atomica sta proprio qui. Negli anni successivi al 1905 Einstein si trovò però di fronte ad un grosso problema. La teoria della gravitazione allora conosciuta non poteva essere inquadrata nella teoria della relatività speciale.

Infatti, *la legge della gravitazione di Newton* perdeva di significato essendo basata sull'idea di *interazione simultanea* che non era più compatibile con la relatività del tempo. La ricerca della soluzione a questo problema aprì ad Einstein la strada verso la teoria della relatività generale. In realtà, non esiste una separazione netta tra relatività speciale e relatività generale, tanto che Einstein era solito parlare di «un unico edificio sebbene costruito su due diversi piani». Un'intuizione fondamentale Einstein la ebbe nel 1908, quando si rese conto che «un corpo in caduta libera non ha peso» definendo questo pensiero «il pensiero più felice della mia vita». Ciò sta a significare che la gravitazione è equivalente all'inerzia di un corpo. Ecco dunque l'idea fondamentale della teoria della relatività generale: la gravitazione non è una forza, ma una curvatura dello spazio-tempo! Non esistono più uno spazio ed un tempo distinti, ma un'unica entità, detta appunto spazio-tempo, che una massa molto pesante è in grado di curvare in modo simile a come una palla curva una superficie di gomma sulla quale è posata (Figura 2).

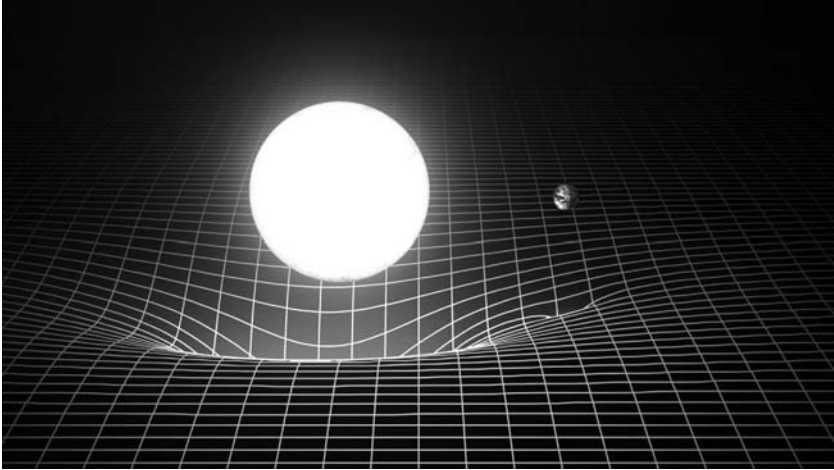


Figura 2: Spazio-tempo curvato dalla massa.

In questo contesto, il celebre *principio di equivalenza* di Einstein va visto come estensione del principio d'inerzia di Galileo. Tale principio (quello di equivalenza) dice che un corpo non soggetto a forze segue una *geodetica* dello spazio-tempo. Per geodetica si intende la curva che descrive la traiettoria più breve fra due punti di un particolare spazio. Essa risulta essere una linea retta solo nell'ordinario spazio euclideo. Ad esempio, è un arco di meridiano nella superficie sferica terrestre.

Il principio di equivalenza implica che la massa inerziale, ossia l'entità associata alla quantità di materia di un corpo che agisce durante il suo moto rettilineo uniforme, è equivalente alla sua massa gravitazionale, ossia l'entità associata alla quantità di materia di un corpo che agisce durante il suo moto accelerato o in presenza di un campo gravitazionale. In altre parole, la gravitazione è inerzia, nel senso che lo stato "naturale" del moto di un corpo è quello in cui il corpo stesso percorre la strada più breve per passare da un punto all'altro, non più nello spazio tridimensionale ordinario, ma nel continuo spazio-temporale. I "punti" dello spazio-tempo sono detti *eventi*. Nello spazio-tempo però, la quarta coordinata, ossia quella temporale, si comporta in



modo birichino. Infatti, quando vogliamo calcolare la “distanza” tra due eventi dello spazio-tempo, che è detta *intervallo*, questa è calcolata sottraendo alla distanza quadrata euclidea un termine temporale al quadrato moltiplicato per la velocità della luce al quadrato ed estraendo la radice quadrata totale.

C'è da credere, sebbene lui abbia sempre sostenuto il contrario, che Einstein venne in questo influenzato dal celebre *esperimento di Eötvös*, effettuato dallo scienziato ungherese Loránd Eötvös per la prima volta nel 1885, e migliorato nel periodo 1906-1909, in cui una misura accurata di massa inerziale e massa gravitazionale veniva effettuata con due masse poste agli estremi di un'asta rigida. L'equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale è oggi provata con un livello di precisione di una parte su 10.000 miliardi, probabilmente la più precisa misura sperimentale nella storia dell'intera scienza (prima della rilevazione delle onde gravitazionali che, come vedremo, sarà dovuta ad una misura ancora più precisa), grazie a dei precisissimi esperimenti effettuati con una bilancia di torsione [6]. Questa equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale rende dunque indistinguibile un campo gravitazionale da un sistema di riferimento in moto accelerato. Le celebri *equazioni del campo gravitazionale* di Einstein, ottenute, come detto prima, nel 1915, che sono le equazioni fondamentali della teoria della relatività generale, si possono riassumere come:

### **Curvatura dello spazio-tempo = distribuzione della massa-energia**

L'idea di base è molto semplice ed intuitiva, ma la sua matematizzazione è estremamente complicata in quanto è necessario ricorrere alla *geometria differenziale* (un ramo della matematica che studia oggetti geometrici quali curve e superfici tramite l'analisi matematica) ed all'*algebra tensoriale* (ossia lo studio matematico dei tensori) discipline sviluppate da vari eminenti scienziati già prima di Einstein, quali il tedesco Johann Carl Friedrich Gauss, Georg Friedrich Bernhard Riemann e Elwin Bruno Christoffel, l'ungherese Marcel Grossmann, amico di Einstein, che gli

fu di grande aiuto per sviluppare la matematica della relatività generale, gli italiani Gregorio Ricci-Cubastro e Tullio Levi-Civita (alla domanda su cosa gli piacesse di più dell'Italia Einstein rispose: «gli spaghetti e Levi-Civita»), ed in seguito il francese Élie Joseph Cartan.

Si conoscono poche soluzioni esatte, per lo più in casi di forte simmetria (soluzioni di Schwarzschild, Kerr, Kerr-Newmann, che portano tra l'altro all'affascinante concetto di buco nero), mentre nel caso più generale occorre ricorrere a delle approssimazioni. La relatività generale ha avuto varie conferme sperimentali ed osservative. Prove classiche, nel senso che vennero predette da Einstein sono:

1. la *deflessione gravitazionale della luce*, verificata per la prima volta dalla spedizione africana organizzata dal più grande astrofisico dell'era di Einstein, il britannico Sir Arthur Stanley Eddington nel 1919;
2. il *redshift gravitazionale*, secondo cui in presenza di un campo gravitazionale la luce perde energia cambiando colore e spostandosi verso il rosso (redshift in inglese vuol dire spostamento verso il rosso), da non confondere col *redshift cosmologico* dovuto all'espansione dell'universo;
3. la *precessione del perielio dei pianeti*, massima per Mercurio, spiega un'anomalia che non era giustificata dalla teoria della gravitazione di Newton: le orbite dei pianeti non si chiudono e ruotano.

Si ha anche una quarta prova non classica: il ritardo gravitazionale della luce proveniente dal sole, misurato da Shapiro negli anni '60, per giungere ad una delle più recenti di tutte, trovata dal sottoscritto nel 2015 [7], che tramite il già citato principio di equivalenza, spiega un'anomalia dell'esperimento di spettroscopia Mössbauer rotante che era rimasta inspiegata da oltre 50 anni, ossia da uno storico esperimento del fisico ed educatore svizzero Walter Kündig risalente al 1963 [8]. Poiché chi scrive immagina che il lettore sia incuriosito dalle prove della relatività generale, ci soffermiamo sulle stesse.

1) la deflessione gravitazionale della luce: si tratta forse della previsione più affascinante e spettacolare di tutte (Figura 3).

Il primo a notare che già la teoria newtoniana della gravitazione ammetteva la deflessione gravitazionale della luce da parte di un oggetto massiccio pare sia stato il chimico e fisico scozzese Henry Cavendish, in un suo manoscritto inedito risalente al 1784. La prima pubblicazione effettiva si deve invece al matematico, fisico e astronomo tedesco Johann Georg von Soldner (1804) [9]. Nel 1911, usando solamente il principio di equivalenza, Einstein ritrovò lo stesso valore di Soldner. Al completamento della relatività generale nel 1915, Einstein dimostrò che in realtà il precedente risultato, suo e di Soldner, era solo la metà del valore esatto. Arthur Eddington era un esperto di relatività generale, estimatore ed amico di Einstein. Al fine di diffondere la nuova elegante teoria di Einstein scrisse vari articoli per spiegarla in lingua inglese, in quanto gli articoli originari di Einstein erano in tedesco. Eddington tenne inoltre una serie di conferenze sull'argomento. Proprio in una di queste ebbe una conversazione che è diventata un aneddoto leggendario. Il fisico polacco-statunitense Ludwik Silberstein, che inizialmente era molto scettico verso la nuova teoria, disse ad Eddington: «Lei, Professore deve essere una delle tre persone in tutto il mondo che capiscono la relatività generale». Eddington non rispose subito, ma, poiché Silberstein insisteva, replicò: «Veramente sto cercando di capire chi sia la terza».

Va notato che in seguito Silberstein cambiò idea e fu tra i più forti assertori della necessità di introdurre la relatività generale nei corsi universitari. Nel 1919 Eddington ed i suoi collaboratori organizzarono la prima osservazione di deflessione gravitazionale della luce. L'idea era quella di vedere il mutamento nella posizione delle stelle quando queste passavano in prossimità del Sole sulla sfera celeste. Ovviamente era impossibile effettuare le osservazioni in una giornata normale in quanto la luce del sole copriva tutto! Fu dunque necessario organizzare le stesse osservazioni durante un'eclissi di sole totale.

Eddington organizzò dunque una spedizione per fare le osservazioni durante un'eclissi solare totale [10]. Vennero effettuate due distinte spedizioni nelle città di Sobral (Brasile) e a São

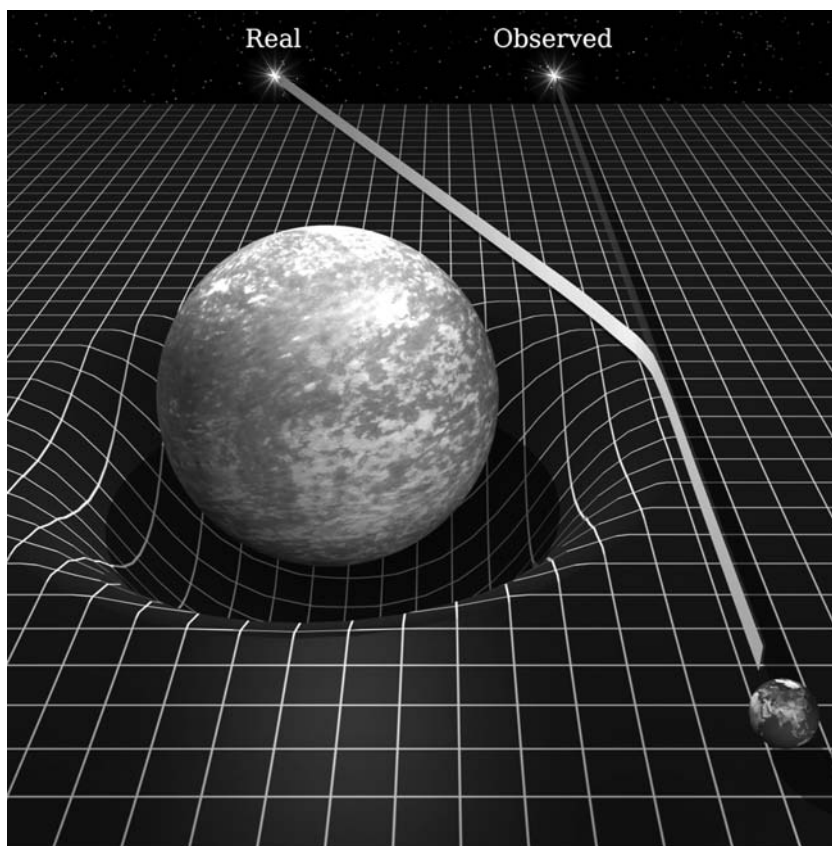


Figura 3: Deflessione gravitazionale della luce, per via dello spazio incurvato dal sole la posizione della stella vista dalla Terra appare diversa dalla sua posizione reale. L'effetto è qui ingigantito.

Tomé e Príncipe sulla costa occidentale dell’Africa, allo scopo di fare simultaneamente le osservazioni [11].

Il risultato fu che le osservazioni erano in straordinario accordo con quanto previsto da Einstein con la relatività generale. La notizia fece il giro del mondo, finendo sulle prime pagine di tutti i giornali più importanti. Ciò diede dunque grandissima risonanza ad Einstein, che venne celebrato come «il grande scienziato che prevedeva che le stelle si sarebbero spostate nel cielo», e alla relatività generale in tutto il mondo.

Esiste in proposito un altro aneddoto leggendario. Quando il suo assistente gli chiese come avrebbe reagito se la relatività generale non fosse stata confermata dalle due spedizioni, Einstein rispose con la celebre frase: «Mi sarebbe dispiaciuto per il caro vecchio signore, ma la mia teoria è corretta» [12]. Va ricordato che la precisione iniziale era in realtà piuttosto scadente. Infatti, i risultati subirono delle critiche per la presenza di errori sistematici nelle osservazioni. Tuttavia, le moderne rianalisi dei dati mostrano come, in realtà, l’analisi effettuata da Eddington e collaboratori fosse sostanzialmente precisa [13].

Successive osservazioni effettuate da studiosi del Lick Observatory nell’eclissi del 1922 diedero infatti risultati concordanti con quelli di Eddington del 1919 [14]. Le osservazioni vennero in seguito ripetute più volte. Sebbene un’indeterminazione notevole rimase per quasi cinquanta anni, ogni dubbio venne in seguito scacciato tramite osservazioni sempre più precise. Infatti, alla fine degli anni ’60 venne definitivamente dimostrato che la corretta formula per la deflessione gravitazionale della luce è quella della relatività generale e non metà del valore dato dalla teoria newtoniana. Oggi le osservazioni sono in perfetto accordo anche per stelle lontane dal sole. Infatti, nel 1997 il satellite astronomico Hipparcos, dell’Agenzia Spaziale Europea, ha misurato la posizione di circa centomila stelle distanti dalla superficie del sole ed i risultati sono d’accordo con la relatività generale con una precisione dello 0,3 per cento [15].

2) Il redshift gravitazionale. *Redshift significa spostamento verso il rosso.* Quando la luce perde energia tende ad arrossarsi, men-

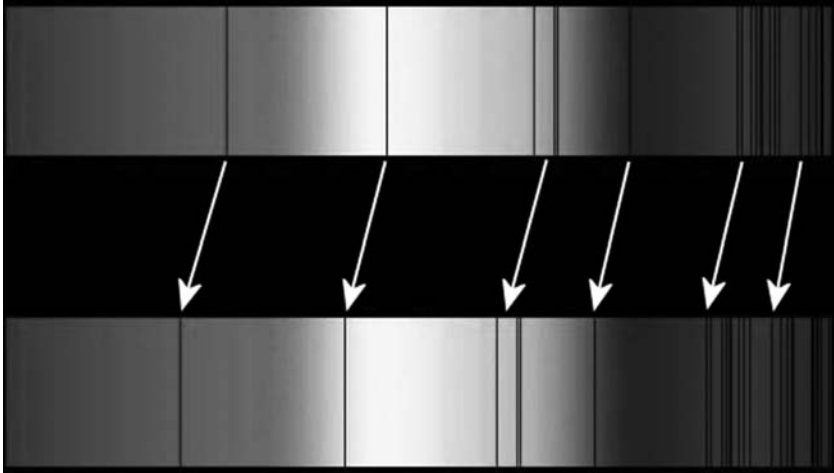


Figura 4: Il redshift gravitazionale.

tre quando acquista energia tende a diventare di colore blu (in questo caso si parlerà di *blushift*, ossia *spostamento verso il blu*) (Figura 4). Ricordiamo che in fisica si definisce *periodo* di un'onda il tempo necessario perché un ciclo completo di oscillazione venga completato. La *lunghezza d'onda* è data dal periodo di oscillazione moltiplicato per la velocità della luce.

La *frequenza* dell'onda è l'inverso del periodo e la sua unità di misura viene detta Hertz in onore del fisico tedesco Heinrich Rudolf Hertz che per primo dimostrò l'esistenza delle onde elettromagnetiche con uno strumento da lui stesso costruito. Un Hertz è l'inverso di un secondo. L'energia della luce è collegata alla sua frequenza dalla celebre formula trovata dal fisico tedesco Max Planck nel 1900,  $E = hf$ , dove  $E$  ed  $f$  sono rispettivamente l'energia e la frequenza della luce ed  $h$  è detta appunto costante di Planck.

L'*ipotesi di Planck* sosteneva che gli scambi energetici nei fenomeni di emissione e di assorbimento di onde elettromagnetiche, comprese le onde luminose, avvengono in modo discreto e proporzionale alla loro frequenza di oscillazione, tramite appunto la costante  $h$ , anziché in forma continua, come sosteneva la teo-