

La radiazione cosmica di fondo: una moderna riproposizione dell'etere?

Maurizio Consoli, Alessandro Pluchino e Andrea Rapisarda

Riassunto

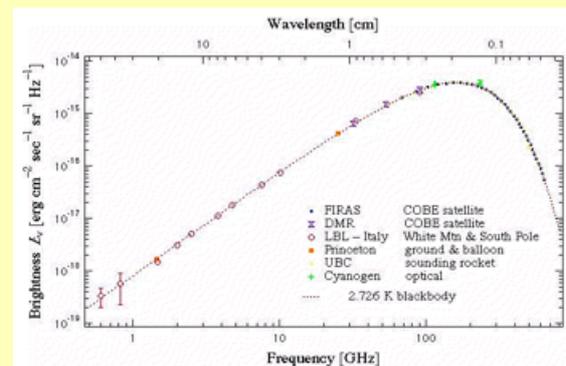
I primi esperimenti del tipo Michelson-Morley, con i quali tra fine '800 e primi '900, si cercava di mettere in evidenza l'esistenza dell'etere, hanno sempre mostrato piccoli residui, di solito considerati effetti spuri di origine termica. Una recente analisi suggerisce, invece, che essi potrebbero aver rappresentato la prima indicazione sperimentale per il moto della Terra nella radiazione cosmica di fondo. Per le sue molteplici implicazioni, questa interpretazione alternativa andrebbe verificata con una nuova generazione di esperimenti di interferometria laser.

L'osservazione della radiazione cosmica di fondo (in inglese Cosmic Background Radiation = CBR) da parte di Penzias e Wilson nel 1965 ha rappresentato, forse, la scoperta più importante per la nostra attuale comprensione del cosmo. Infatti, dalla stragrande maggioranza degli astrofisici, essa viene interpretata come la prova fondamentale, il residuo "fossile", di quell'esplosione primordiale nella quale l'Universo ebbe origine circa 13 miliardi di anni fa. Il motivo principale di questo sta nella sua forma che, nel modello del Big Bang, dovrebbe corrispondere al caratteristico "spettro di corpo nero", una curva a campana il cui picco dipende dalla temperatura (vedi Box).

Nel modello del Big Bang, l'origine ultima di questa radiazione va fatta risalire ad un'epoca in cui l'Universo era molto più caldo e denso, quando la materia passò dallo stato di plasma allo stato neutro con la formazione degli atomi. Solo allora, la radiazione si disaccoppiò dalla materia e poté cominciare a propagarsi liberamente su grandi distanze. In questo stadio primordiale estremamente caldo, il picco nella distribuzione di corpo nero era nella regione del visibile, a lunghezze d'onda molto piccole, inferiori ad un micron. Il picco che osserviamo oggi si trova invece spostato verso lunghezze d'onda maggiori di un fattore mille, nella regione delle microonde, a causa del processo di espansione che ha prodotto un fortissimo raffreddamento, portando la temperatura della radiazione cosmica di fondo a circa 2.7 gradi Kelvin.

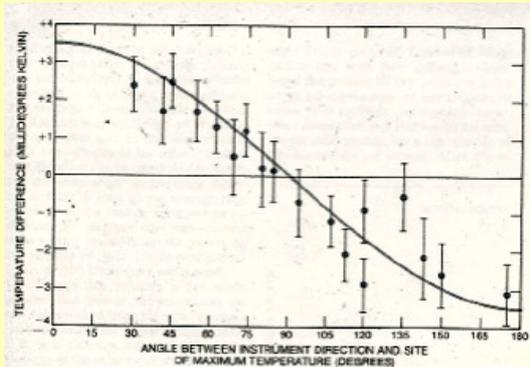
SPETTRO DELLA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

Come anni di osservazioni, e svariati esperimenti, hanno mostrato, l'accordo tra le intensità della radiazione cosmica di fondo e la curva teorica di corpo nero è eccellente e si ottiene in corrispondenza di una temperatura di circa 2.7 gradi Kelvin. Per questo valore di temperatura, la distribuzione dell'intensità della radiazione di fondo sulle varie lunghezze d'onda che la compongono mostra il picco per lunghezze d'onda di circa un millimetro e, dunque, corrisponde alla zona delle microonde.



ANISOTROPIA DI DIPOLO DELLA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

Il motivo della anisotropia della radiazione cosmica di fondo dipende dalla relatività. Infatti, per un osservatore in moto con una certa velocità v , uno spettro di corpo nero a temperatura T_0 si trasforma in un altro ad una temperatura diversa secondo la familiare formula dell'effetto Doppler. Al primo ordine di approssimazione nel rapporto $\beta = v/c$ ($c \approx 300.000$ km/s è la velocità della luce nel vuoto), questo produce un gradiente termico, cioè una variazione con l'angolo di osservazione θ , pari a $\Delta T(\beta, \theta) \approx T_0 \beta \cos\theta$. Per questo motivo, poiché la temperatura varia tra un polo "caldo", per $\cos\theta = 1$, ed un polo "freddo", per $\cos\theta = -1$, questa non uniformità della temperatura viene anche detta anisotropia "di dipolo". Ponendo $T_0 \approx 2.7$ K, e $v \approx 300$ km/s (come per la maggior parte dei moti cosmici della Terra) ci si aspettavano, dunque, differenze angolari di temperatura di pochi millesimi di grado Kelvin che, in linea di principio, si potevano rivelare misurando l'intensità della radiazione con antenne puntate in differenti direzioni. In questo modo, si potevano avere informazioni sulla velocità della Terra rispetto ad un sistema di riferimento universale, quello rispetto al quale la radiazione di fondo ha una forma esattamente isotropa. Nella figura qui sotto, presa dall'articolo di Muller, è visibile l'anisotropia della temperatura della radiazione di fondo (in millesimi di grado Kelvin) misurata con apparato a bordo di velivoli U2 a 20 km di altezza. L'asse delle ascisse indica l'angolo tra l'asse di simmetria dell'apparato di rivelazione e la direzione della costellazione del Leone.

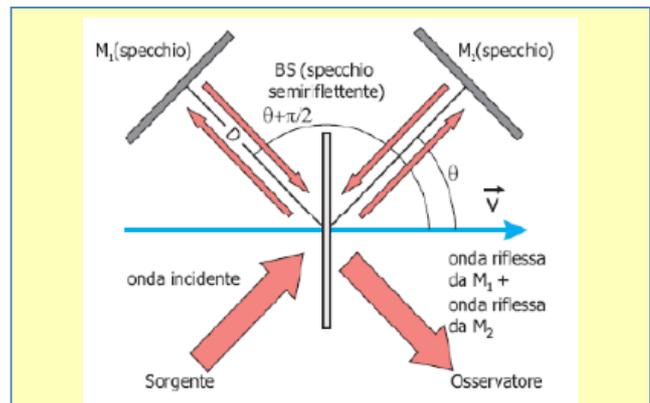


Quasi subito dopo la scoperta di Penzias e Wilson, diversi autori osservarono che ci doveva essere una piccola dipendenza dello spettro di corpo nero dall'angolo di osservazione, cioè doveva esserci quella che viene chiamata una "anisotropia di dipolo" nella temperatura della radiazione di fondo (vedi Box). La prima misura completa dell'anisotropia di dipolo fu eseguita con un apparato a bordo di un velivolo U2 a 20 km di altezza. All'inizio degli anni '90 le misure furono migliorate facendo ricorso a satelliti, in particolare al satellite COBE (COsmic Background Explorer). Le misure di COBE, per le quali Mather e Smoot hanno poi ricevuto il premio Nobel nel 2006, completarono l'analisi dello spettro confermando sia la sua forma di corpo nero che l'anisotropia di dipolo a livelli di accuratezza mai raggiunti in precedenza.

Oggi questa anisotropia viene interpretata in termini di un moto del sistema solare con velocità di circa 370 km/s verso un punto del cielo corrispondente circa alla costellazione del Leone. A sua volta, questo moto corrisponde approssimativamente ad una combinazione del moto del sistema solare nella nostra galassia con quello della galassia stessa (e del Gruppo Locale di galassie) verso il Grande Attrattore, un enorme ammasso di materia distante più di 100 milioni di anni luce da noi. Negli ultimi quindici anni lo studio della radiazione di fondo è stato ulteriormente raffinato con i satelliti WMAP e PLANCK e rappresenta oggi uno dei settori fondamentali della cosmologia.

Leggendo il discorso tenuto da Smoot in occasione del suo premio Nobel, si scopre come all'inizio della loro ricerca, negli anni '70 del secolo scorso, per lui e Muller era diventato naturale usare il termine "esperimenti di *aether-drift*" per indicare i tentativi di osservare una anisotropia di dipolo nella radiazione di fondo. Secondo loro, infatti, questa anisotropia avrebbe potuto essere interpretata come l'effetto di un moto di deriva (*drift*) della Terra rispetto ad un sistema di riferimento privilegiato: quello in cui la radiazione di fondo risulta essere esattamente isotropa ed in cui la materia originaria che l'ha emessa era globalmente in quiete. In questo senso, la radiazione di fondo poteva essere paragonata ad una qualche forma di "etere", quell'ipotetico mezzo invisibile che alla fine dell'Ottocento si pensava permeasse tutto lo spazio.

Il problema era che gli esperimenti di interferometria ottica effettuati per identificare in laboratorio il moto della Terra nell'etere, dei quali il primo e più famoso è quello di Michelson e Morley del 1887, non erano riusciti a mettere in evidenza questo moto. Quindi il concetto stesso di etere era stato messo in discussione. Tanto più che, nella formulazione assiomatica della sua teoria della relatività ristretta del 1905, Einstein aveva dedotto gli effetti relativistici senza introdurre alcuna forma di etere, presente invece nell'originale formulazione di Lorentz, ma postulando l'equivalenza di tutti i sistemi di riferimento in moto traslatorio uniforme. Questo lo aveva portato, in un primo momento, a considerare l'etere come un concetto "superfluo", e poi, dopo varie vicissitudini, a concludere, nel suo libro con Infeld del 1938, che "...sembra giunto il momento di dimenticare l'etere e di non pronunciarne più il nome". Di fronte a tale autorevolezza, si possono quindi comprendere i



L'ESPERIMENTO DI MICHELSON E MORLEY

I primi esperimenti di interferometria ottica furono quelli realizzati da Michelson, prima da solo a Potsdam nel 1881 e poi con Morley nel 1887 a Cleveland. Lo schema di base di questo tipo di esperimenti è quello mostrato in figura. Con tale apparato si studiava la figura di interferenza tra due raggi luminosi perpendicolari. Tale figura di interferenza dipende dalla differenza tra i tempi impiegati dalla luce a percorrere i due diversi cammini ottici e, ruotando tutto l'apparato, si dovrebbe spostare di una piccola frazione di lunghezza d'onda se la luce si propagasse con velocità leggermente diverse nelle varie direzioni. All'inizio, l'analisi degli esperimenti di tipo Michelson-Morley veniva eseguita utilizzando la formula classica per le frange d'interferenza:

$$\left[\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} \right]_{\text{class}} \approx \frac{D}{\lambda} \frac{v^2}{c^2} \cos 2\theta \quad (1)$$

dove v indica la proiezione della velocità della Terra nel piano dell'interferometro (aspettata essere di circa 30 km/s come per il moto medio orbitale), θ l'angolo rispetto alla direzione del drift, D il cammino ottico e λ la lunghezza d'onda della luce. In un formalismo relativistico, assumendo correnti convettive nel gas associate al moto della Terra, ed utilizzando semplici argomenti di simmetria, si trova invece che, quando la luce si propaga in un gas, le frange di interferenza possono essere convenientemente poste nella forma seguente:

$$\left[\frac{\Delta\lambda(\theta)}{\lambda} \right]_{\text{rel}} \approx \frac{D}{\lambda} \frac{v_{\text{obs}}^2}{c^2} \cos 2\theta \quad (2)$$

cioè espresse in termini di una velocità "osservabile" che è legata alla velocità cinematica v dalla relazione:

$$v_{\text{obs}}^2 \approx 2(n_{\text{gas}} - 1)v^2 \quad (3)$$

dove $n_{\text{gas}} = 1 + \epsilon$ è l'indice di rifrazione del gas.

motivi per cui il concetto di etere fosse stato bandito dalla letteratura scientifica dei decenni successivi. E' per questo che lo stesso Smoot, nel suo discorso del 2006, aggiunge che era stato necessario utilizzare il termine di "nuovo" esperimento di *aether-drift* a causa del "forte pregiudizio di quei buoni scienziati che avevano imparato la lezione di Michelson e Morley e della relatività per cui non esiste alcun sistema di riferimento privilegiato". Solo cambiando nome, ed aggiungendo tutta una serie di precisazioni e "distinguo", la loro ricerca era stata alla fine finanziata.

Tuttavia Smoot non aveva torto a considerare la radiazione cosmica di fondo come un qualche tipo di etere. Infatti l'anisotropia in temperatura, misurata con gli apparati a bordo degli aerei e dei satelliti, rappresenta effettivamente una forma di aether-drift legata al moto della Terra. Questa sostanziale equivalenza ci ha portati a rianalizzare l'esperimento originale di Michelson-Morley ed alcune delle sue prime e più accurate ripetizioni, come quelle di Miller, Illingworth e Joos negli anni Venti e Trenta del secolo scorso, in cui la luce si propagava in mezzi gassosi. Il motivo iniziale di questo nostro interesse stava nel fatto che, in passato, alcuni esperti (come Hicks e Miller) avevano posto l'accento su alcune minuscole irregolarità riscontrate in questi esperimenti e non del tutto comprese. Secondo loro si trattava di piccoli effetti residui che, pur essendo di molto inferiori al valore classicamente atteso, non avrebbero dovuto essere ignorati. Nella maggior parte della letteratura scientifica, invece, queste piccole anomalie sono sempre state interpretate come tipici effetti strumentali, superabili quindi con il progredire della moderna tecnologia. Proprio per questo, nelle versioni più recenti degli esperimenti classici di aether-drift, la luce viene fatta propagare nel vuoto più spinto oggi disponibile o in dielettrici solidi. Paradossalmente, però, potrebbe essere proprio questa differenza dei dispositivi sperimentali ad ostacolare la rivelazione del drift.

Per chiarire meglio questo aspetto, immaginiamo un gas all'interno di una cavità ottica posta nel laboratorio terrestre. Noi pensiamo sempre ad un gas come ad un mezzo isotropo, nel quale cioè le molecole si muovono disordinatamente in tutte le direzioni senza mostrare alcuna particolare preferenza. Però, consideriamo le piccole variazioni di temperatura associate al moto della Terra rispetto al sistema in cui la radiazione cosmica di fondo risulta esattamente isotropa. Questo è equivalente ad un flusso di energia che potrebbe indurre deboli correnti convettive nel gas. In questo caso, il processo di assorbimento e successiva riemissione della luce da parte delle molecole del gas in moto convettivo, servirebbe una traccia di questo moto producendo piccole differenze della velocità della luce nelle varie direzioni che potrebbero essere rivelate con precise misure di interferometria ottica. Si noti come la possibilità di tale effetto dipenda in modo essenziale dalle proprietà di coesione della materia, cioè dal fatto che il gas è un sistema molto debolmente legato. Se nella cavità ottica ponessimo invece un mezzo fortemente legato, come un dielettrico solido, tali piccole variazioni

di temperatura dissiperebbero mediante conduzione termica senza quindi generare alcun moto di particelle o anisotropia della velocità della luce. Considerazioni analoghe si potrebbero fare nel caso opposto in cui nella cavità si facesse il vuoto, per cui una differenza di temperatura non avrebbe alcun mezzo materiale su cui poter agire e la velocità della luce coinciderebbe con il suo valore di vuoto, cioè il parametro "c" che entra nelle trasformazioni di Lorentz. In presenza di gas, invece, la velocità della luce, tramite l'indice di rifrazione del mezzo, potrebbe dipendere dalla direzione. Diventa dunque fondamentale distinguere tra i vari mezzi dielettrici e, proprio per questo, i piccoli residui degli esperimenti classici in mezzi gassosi diventano cruciali.

Ebbene, effettuando una nuova analisi di questi esperimenti nelle condizioni originali in mezzi gassosi, ci siamo resi conto che, come osservato da Joos, Kennedy e Shankland, i piccoli residui riscontrati potevano avere un'origine "termica", legata cioè a differenze periodiche di temperatura di pochi millesimi di grado nell'aria lungo i cammini ottici. Poiché questo è proprio l'ordine di grandezza che ci si aspetta considerando il moto della Terra rispetto alla radiazione di fondo, si tratta di valutare, secondo la relatività, quale dovrebbe essere l'effetto sugli esperimenti di interferenza provocato dalla variazione della velocità della luce in presenza di vari mezzi gassosi. Secondo i nostri calcoli (vedi Box), occorre considerare una velocità "osservabile" v_{obs} per il moto terrestre che dipende dall'indice di rifrazione del gas $n_{gas} = 1 + \epsilon$ e che si annulla se la luce si propaga nel vuoto, dove $\epsilon=0$. Se si identifica questa velocità con quella fornita dalle vecchie analisi classiche, ecco che i valori ottenuti negli esperimenti (cioè $v_{obs} = 7 \div 10$ km/s per l'aria a pressione atmosferica, dove $n_{aria} \sim 1.00029$, e $v_{obs} = 2 \div 3$ km/s per l'elio a pressione atmosferica, dove $n_{elio} \sim 1.000035$) diventano ben consistenti con le proiezioni tipiche della velocità cinematica $v \sim 370$ km/s ottenuta dalla radiazione di fondo.

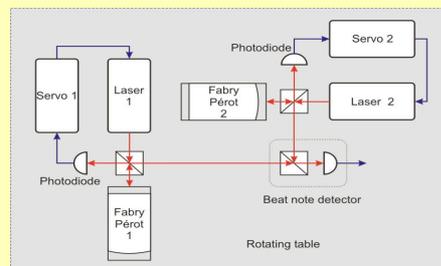
Resterebbe da giustificare il carattere irregolare dei piccoli effetti osservati. Questo ulteriore aspetto può essere chiarito tenendo in considerazione come gli effetti fisici potenzialmente rivelabili potrebbero dipendere dal moto della Terra. Di solito si assume che essi dovrebbero seguire puntualmente le lente modulazioni temporali associate con la rotazione e la rivoluzione terrestre. Tuttavia, nel nostro caso, ci si rende conto che questa assunzione non è poi così ovvia. Infatti, la relazione tra il moto macroscopico della Terra e la propagazione

“microscopica” della luce in laboratorio verrebbe a dipendere da un meccanismo complesso: variazioni angolari di temperatura, dovute al moto della Terra, che inducono correnti convettive in un gas che, a loro volta, producono differenze nella velocità della luce che si propaga al suo interno. Dunque, rispetto ad una misura diretta della radiazione di fondo nello spazio, ci sono alcuni passaggi intermedi in più. Paragonando questa situazione a quella del moto di un corpo in un fluido, potremmo dire che il punto di vista tradizionale equivale ad assumere un modello di etere regolare (regime “laminare”) in cui le proprietà globali e quelle locali del moto, cioè quelle rivelabili in laboratorio, coincidono. Invece, la situazione reale potrebbe essere più simile a quella di un etere “turbolento” dove un moto che, su grande scala, ha direzione ben definita può apparire caotico a piccole scale. In questo caso, il moto cosmico della Terra fisserebbe solo i limiti tipici per un campo di velocità microscopico che fluttua in modo irregolare. Nonostante le sue variazioni non possano essere calcolate esattamente, le proprietà statistiche si potrebbero comunque stimare con simulazioni numeriche.

Ora, mettendo insieme questi due ingredienti, cioè (a) la specificità dei mezzi gassosi e (b) la possibilità di un genuino segnale fisico irregolare, gli esperimenti del passato mostrano un’ottima consistenza con quella velocità della Terra di 370 km/s dedotta dall’anisotropia del fondo di radiazione cosmica. Questa sorprendente coincidenza, tra misure ottiche di laboratorio ed osservazioni della radiazione cosmica nello spazio, richiederebbe dunque una conferma definitiva tramite le versioni moderne dell’esperimento di Michelson-Morley, che fanno uso della interferenza tra laser stabilizzati con cavità ottiche risonanti (vedi il Box). Quest’ultima rappresenta uno strumento potente per rivelare minime alterazioni nella struttura della materia misurando piccole differenze della velocità della luce che si propaga al suo interno. Ovviamente, per quanto detto in precedenza, non si dovrebbe operare nel vuoto (come si fa oggi di solito) ma si dovrebbe inserire nelle cavità ottiche un gas leggermente rarefatto, per esempio elio a pressione un po’ inferiore a quella atmosferica. In questo modo la luce si propagherebbe ancora in presenza di materia, ma si potrebbe comunque mantenere una buona stabilità in temperatura tra le due cavità in modo da ridurre gli effetti spuri. Miglioramenti ulteriori si potrebbero ancora ottenere ricavando le due cavità dallo stesso blocco di materiale. Da una stima preliminare, questi esperimenti

MODERNA INTERFEROMETRIA LASER

Lo schema di un moderno esperimento di interferometria laser. Le frequenze dei laser vengono prima stabilizzate mediante accoppiamento a risonatori ottici di Fabry-Perot. Successivamente i segnali in uscita dalle due cavità risonanti ortogonali vengono confrontati per mettere in evidenza un’eventuale differenza tra le velocità della luce nelle due direzioni. Negli esperimenti moderni, un vuoto molto spinto viene praticato nelle cavità. Per riprodurre le condizioni fisiche degli esperimenti classici, vi si dovrebbe invece inserire del gas.



Nello stesso schema adottato per gli esperimenti classici, lo shift di frequenza Δv tra le due cavità ottiche è allora previsto essere

$$\left[\frac{\Delta v(\theta)}{v_0} \right]_{\text{gas}} \approx (n_{\text{gas}} - 1) \frac{v^2}{c^2} \cos 2\theta \quad (4)$$

dove v_0 è la frequenza di riferimento delle due cavità.

avrebbero un costo relativamente modesto (circa 400 mila euro) se confrontato con le loro implicazioni storiche e metodologiche per l’interpretazione della teoria della relatività. Infatti, se i futuri esperimenti che abbiamo suggerito confermassero con grande accuratezza la predizione in Eq.(4) (vedi il box), diventerebbe naturale considerare gli effetti relativistici come conseguenza del moto dell’osservatore rispetto a un sistema di riferimento privilegiato, individuato dalla isotropia della radiazione cosmica di fondo, come nell’originale interpretazione Lorentziana. Senza considerare che, come sottolineato da Bell, un tale cambiamento di prospettiva avrebbe anche ripercussioni sull’interpretazione degli effetti non locali della fisica quantistica.

Un’ulteriore possibile conseguenza della nostra analisi sarebbe che tutti i sistemi fisici sulla Terra, e su ogni altro corpo celeste che si muove nella radiazione di fondo, risulterebbero esposti ad un flusso misurabile di energia. Oggi, questo flusso è estremamente debole ma in passato era sostanzialmente più intenso quando la temperatura della radiazione di fondo era maggiore. Dunque questo flusso ha costituito (e costituirebbe tuttora) una forma di “rumore” indipendente da ogni sorgente localizzata. Una tale situazione di non-equilibrio potrebbe aver giocato un ruolo fondamentale nell’indurre forme di auto-organizzazione nella materia. In questo senso, una conferma della nostra interpretazione potrebbe anche rivestire interesse nell’ambito delle ricerche sull’origine della complessità in natura.

Bibliografia

R. A. Muller, *Scient. Am.* 238 (1978) 64

G. F. Smoot, *Rev. Mod. Phys.* 79 (2007) 1349

M. Consoli, C. Matheson, A. Pluchino, *Eur. Phys. J. Plus* 128 (2013) 71

M. Consoli, *Found. of Phys.* 45 (2015) 22

M. Consoli, A. Pluchino, *Il Vuoto: un enigma tra fisica e metafisica*, Edizioni Aracne, Roma 2015

M. Consoli, A. Pluchino, A. Rapisarda, *Europhys. Lett.* 113 (2016) 19001

J. S. Bell, *Dicibile e indicibile in meccanica quantistica*, Adelphi 2010