

LA MUSICA DEL COSMO

Spherical Harmonic Decomposition

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{l,m} Y_{l,m}(\theta, \phi)$$

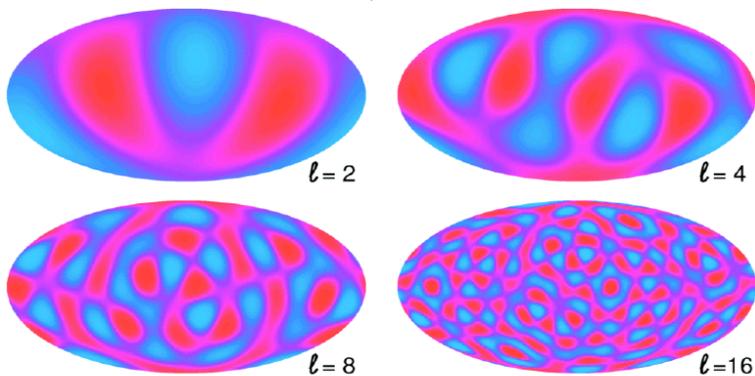


Fig.1 : Alcune armoniche

Per ricostruire lo spettro in frequenza delle oscillazioni acustiche presenti nel plasma primordiale, i cosmologi analizzano l'immagine della radiazione cosmica di fondo isolando i contributi provenienti da fluttuazioni di temperatura di diversa dimensione angolare. La figura qui a fianco mostra alcune delle armoniche sferiche che si ottengono dalla decomposizione della CBR.

L'intensità media delle fluttuazioni viene messa in un grafico: lo spettro ottenuto permette di ricostruire l'ampiezza delle onde di diversa frequenza che avevamo al momento della ricombinazione. In figura qui sopra è mostrato il contributo delle fluttuazioni per tre scale angolari scelte a puro titolo esemplificativo.

Lo spettro ottenuto in questo modo sarà simile alla successione di barrette verticali nell'equalizzatore di un impianto hi-fi. Maggiore è l'altezza di una barretta maggiore è il contributo, ossia l'ampiezza delle onde di quella data frequenza al suono complessivo.

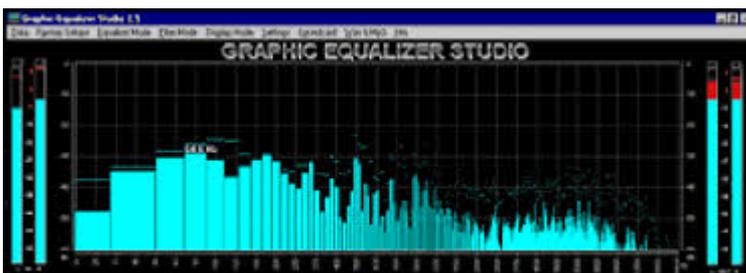


Fig.2 esempio di spettro di frequenze di un suono in un equalizzatore

Come il profilo delle barrette dell'equalizzatore dipende dal tipo di musica che stiamo ascoltando così la forma dello spettro delle oscillazioni acustiche primordiali, ricostruito dalle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo, ci dirà qualcosa sulla natura

dell'universo.

Ma che tipo di spettro possiamo aspettare di osservare ? Avrà regolarità simili a quelle che si osservano nello spettro di un suono musicale o assomiglierà piuttosto a quello di un rumore completamente incoerente ?

Come sappiamo quando uno strumento musicale emette un suono, oltre all'onda di frequenza fondamentale vengono generate altre onde a frequenza multipla della fondamentale, le cosiddette armoniche. Il fatto che la corda sia fissata alle estremità impone vincoli precisi alla frequenza delle armoniche prodotte dalla sua vibrazione. Il timbro del suono dipenderà da quali armoniche sono presenti e dall'ampiezza delle diverse armoniche. In ogni caso se ricostruiamo lo spettro di un suono qualunque emesso da una corda troveremo solo alcune frequenze: le armoniche ossia le frequenze permesse dai vincoli fisici della corda stessa.

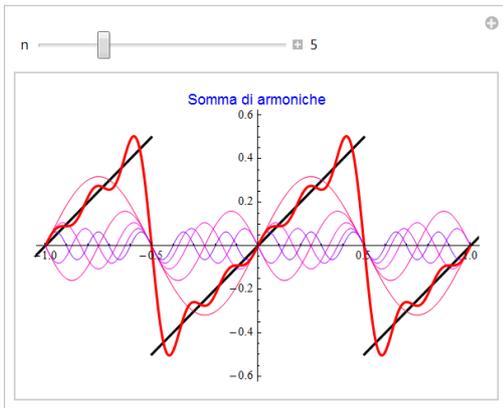


Fig.3 : Scomposizione di un'onda triangolare nelle sue armoniche

Nel caso delle oscillazioni acustiche presenti nell'universo primordiale il vincolo fisico non è di natura spaziale ma di natura temporale. La vita delle onde acustiche nel plasma è di durata limitata: va dal momento in cui le perturbazioni di densità iniziano a oscillare a causa della competizione tra gravità e pressione fino al momento in cui la radiazione di disaccoppia dalla materia.

All'atto della ricombinazione alcune perturbazioni verranno colte mentre sono in una fase di massima compressione o di massima rarefazione altre invece in momenti intermedi.

Supponiamo di osservare un'onda che raggiunge per la prima volta un estremo dell'oscillazione (per esempio un ventre) esattamente alla ricombinazione: quest'onda sarà caratterizzata dalla maggior lunghezza d'onda possibile, ossia dalla minor frequenza. Possiamo definire questa frequenza come quella

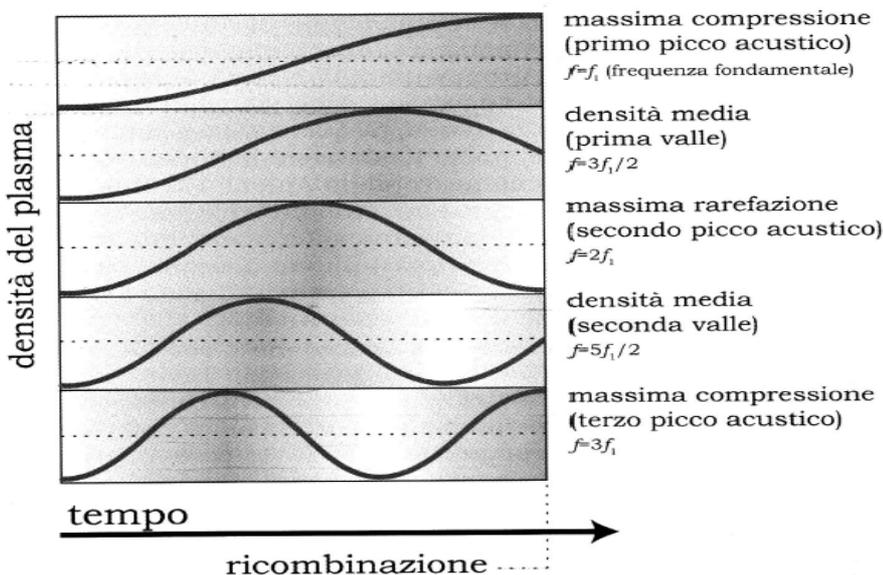


Fig.4 : Armoniche acustiche

fondamentale, in analogia con la fondamentale di una canna d'organo aperta alle due estremità.

Tutte le oscillazioni presenti nel plasma primordiale di frequenza multipla della fondamentale arriveranno alla ricombinazione in una

fase di massima compressione o massima rarefazione e produrranno pertanto macchie più intense di tutte le altre sulla CBR e daranno quindi un contributo massimo allo spettro.

Le oscillazioni acustiche presenti nel plasma primordiale si traducono perciò, al momento della ricombinazione, in uno spettro che presenta una serie di picchi armonici, ovvero di massimi per valori di frequenze multiple di una frequenza fondamentale, proprio come del caso del suono prodotto da una canna d'organo.

Una differenza fondamentale tra le oscillazioni acustiche del plasma primordiale e le onde sonore generate da una corda o da una canna è che in questi ultimi due casi l'esistenza di onde di frequenza diversa da quella fondamentale o dai suoi multipli non è consentita a causa dei vincoli fisici degli strumenti, che come già detto, impongono restrizioni molto forti al tipo suono che può esser prodotto.

Nel caso delle oscillazioni del plasma invece le onde acustiche possono invece avere qualunque frequenza. Tuttavia le onde corrispondenti alla frequenza fondamentale e alle sue armoniche avranno al momento della ricombinazione un'ampiezza molto maggiore di tutte le altre, essendo in una fase di massima compressione o di massima rarefazione. E' proprio per questo fatto che ci aspettiamo di trovare dei picchi nello spettro a frequenze ben precise.

Tutto questo ragionamento poggia però su un punto fondamentale che fin'ora abbiamo dato per scontato: tutte le perturbazioni di una certa dimensione (e quindi con una certa frequenza) devono iniziare ad oscillare in un momento ben preciso e nella stessa fase. Solo se questo è vero, le onde della stessa frequenza arriveranno alla ricombinazione esattamente nello stesso punto del ciclo di oscillazione. Ma esiste un meccanismo che possa sincronizzare le onde acustiche della stessa frequenza? Il ruolo di direttore d'orchestra per le onde sonore nell'Universo primordiale è giocato dall'Inflazione.

Come abbiamo visto, questo meccanismo produce perturbazioni di tutte le dimensioni, che entrano nell'orizzonte man mano che esso include regioni di Universo sempre più grande: le perturbazioni di scala minore entrano per prime nell'orizzonte, seguite da quelle su scala più grande e così via. Immediatamente dopo l'ingresso nell'orizzonte, le perturbazioni avvertono l'effetto della gravità e la risposta della pressione di radiazione e iniziano a oscillare. Il momento in cui prendono il via le oscillazioni acustiche è quindi identico per tutte le perturbazioni della stessa dimensione, detto in altre parole tutte le onde di una certa frequenza oscillano in fase. Di conseguenza tutte le perturbazioni della stessa dimensione si troveranno esattamente nello stesso stato al momento della ricombinazione.

Dunque se è stata davvero l'inflazione a produrre le perturbazioni primordiali dovremmo poter osservare delle regolarità nello spettro, dei picchi in corrispondenza della frequenza fondamentale e delle successive armoniche. Se invece così non fosse, se le perturbazioni di una certa frequenza fossero state generate continuamente durante l'evoluzione cosmica e avessero iniziato a oscillare con fasi completamente diverse ogni caratteristica armonica andrebbe distrutta, e lo spettro ci apparirebbe più simile a quello di un rumore confuso.

La ricca struttura armonica dello spettro è quindi una fonte di preziose informazioni per i cosmologi. L'osservazione di picchi nello spettro di frequenze previsti dalla teoria sarebbe un'enorme evidenza a favore dei modelli inflazionari.

