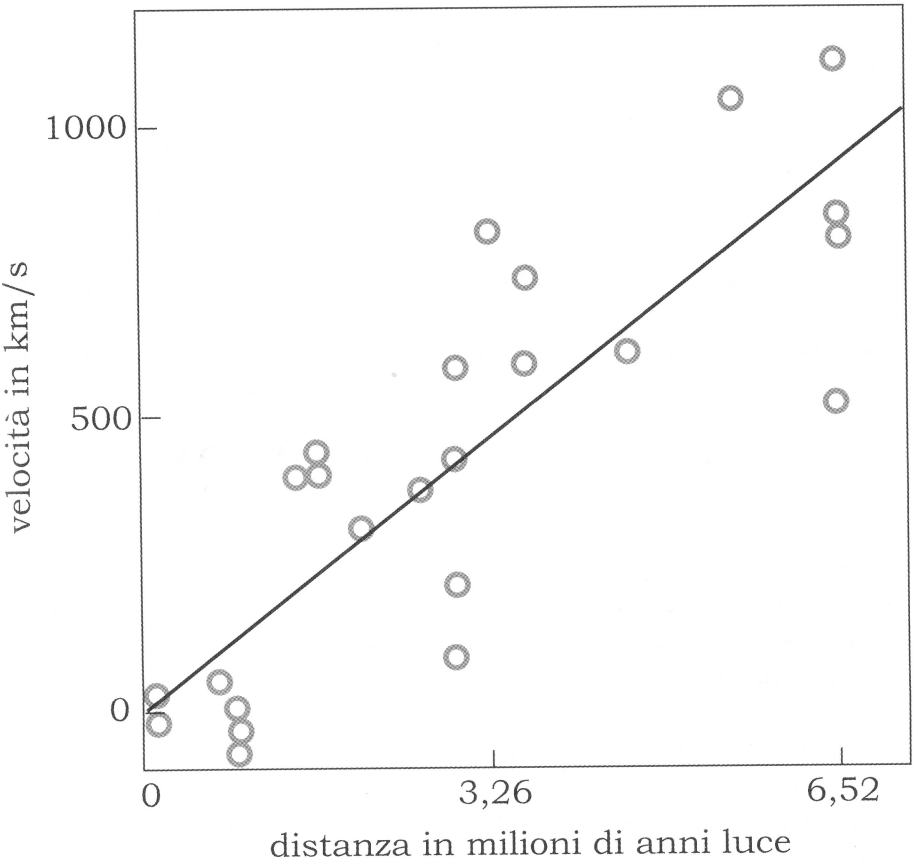

Figura 1.1: I dati originali di Hubble suggerivano una crescita lineare della velocità delle galassie all'aumentare della loro distanza da noi. Questa legge è stata poi confermata con precisione sempre maggiore dalle osservazioni più recenti. (Figura adattata dall'articolo di Hubble e Humason del 1929)

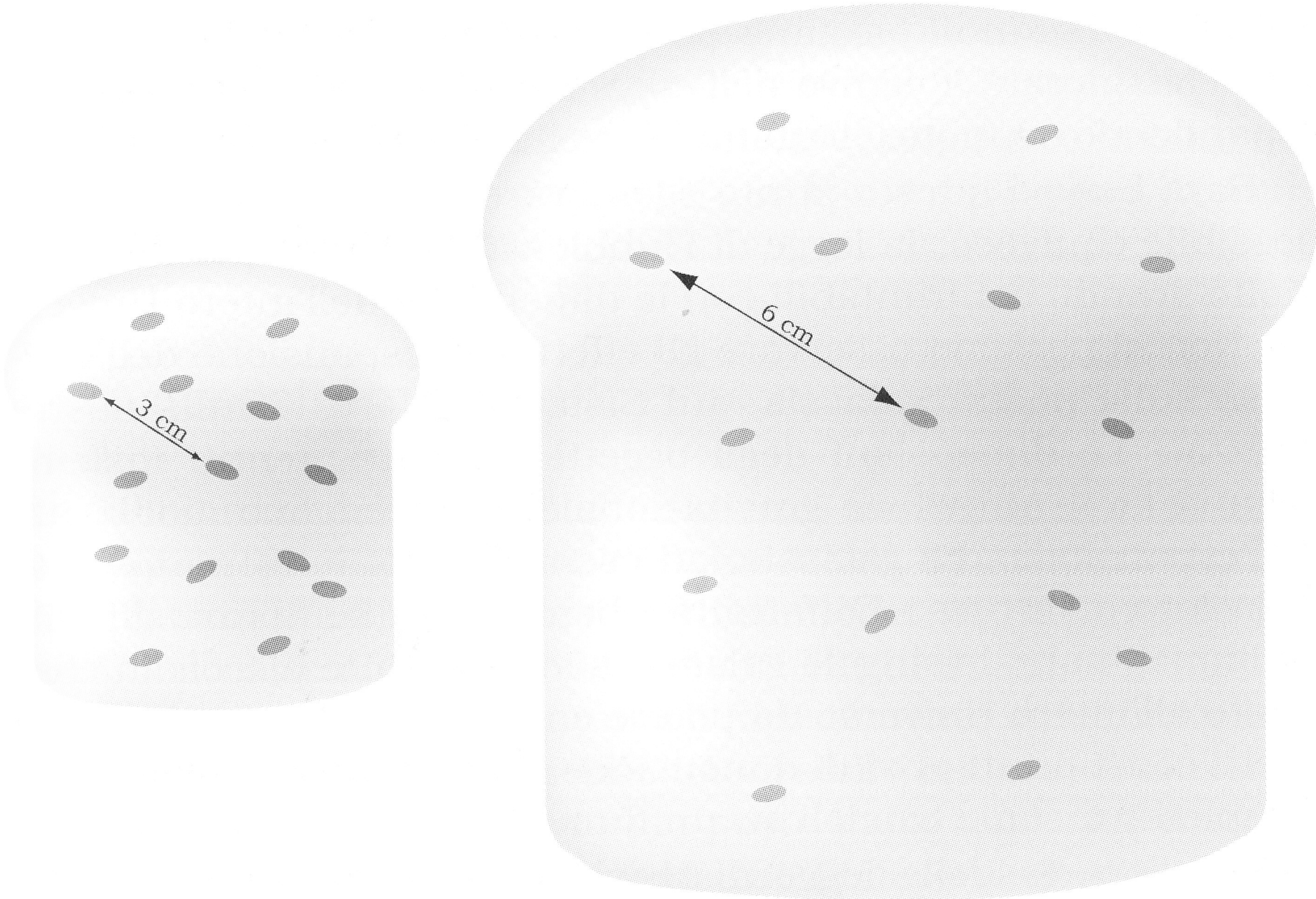

Figura 1.2: La distanza tra le galassie nell'Universo in espansione varia in modo analogo a quella tra le uvette all'interno di un panettone in lievitazione. Man mano che la pasta si espande, le uvette vengono trascinate a separazioni crescenti, e il tasso di espansione è lo stesso in ogni punto.

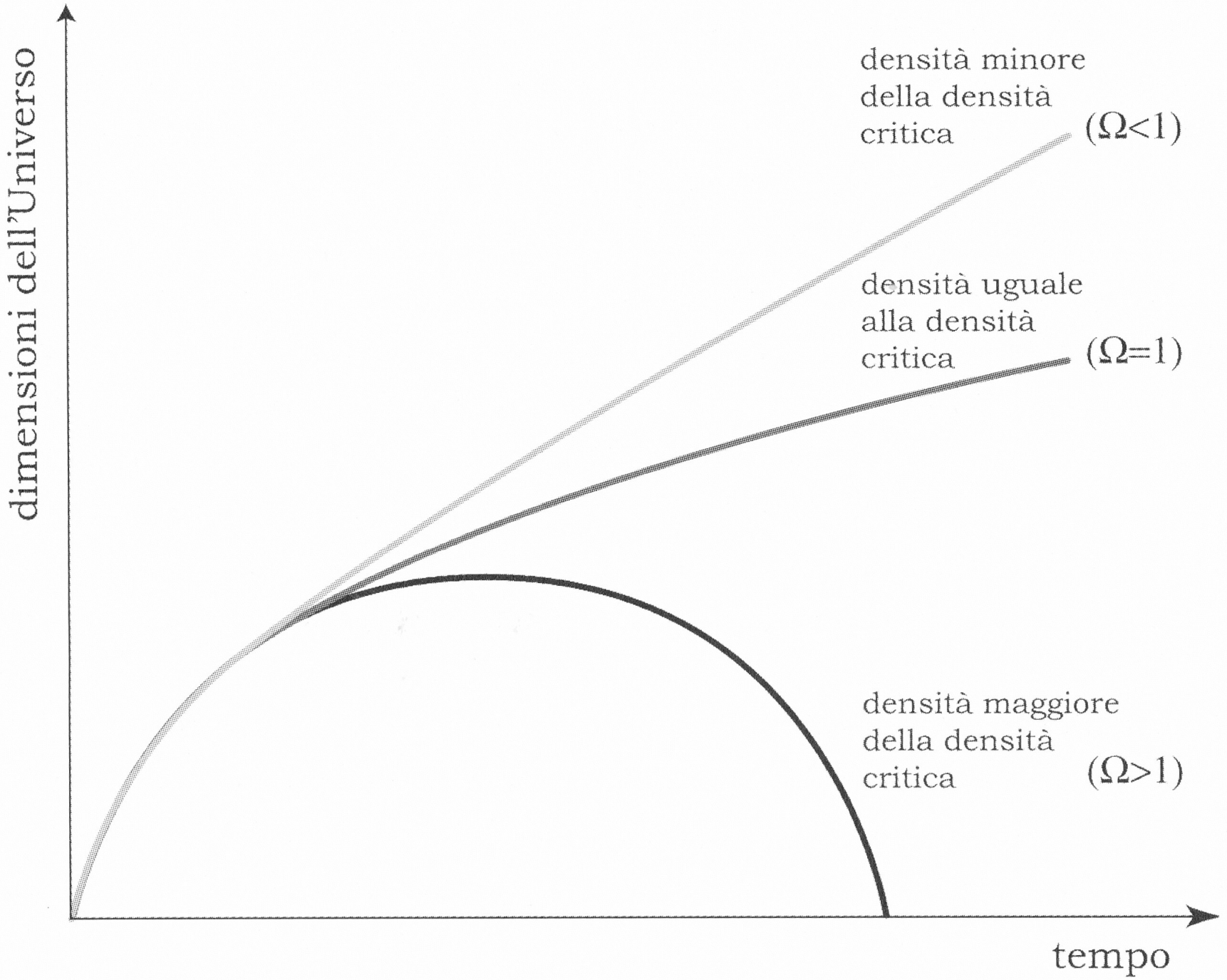

Figura 1.4: Il modo in cui si espande l'Universo dipende dalla sua densità media: se essa supera un certo valore critico l'Universo ricollassa, altrimenti si espande indefinitamente.

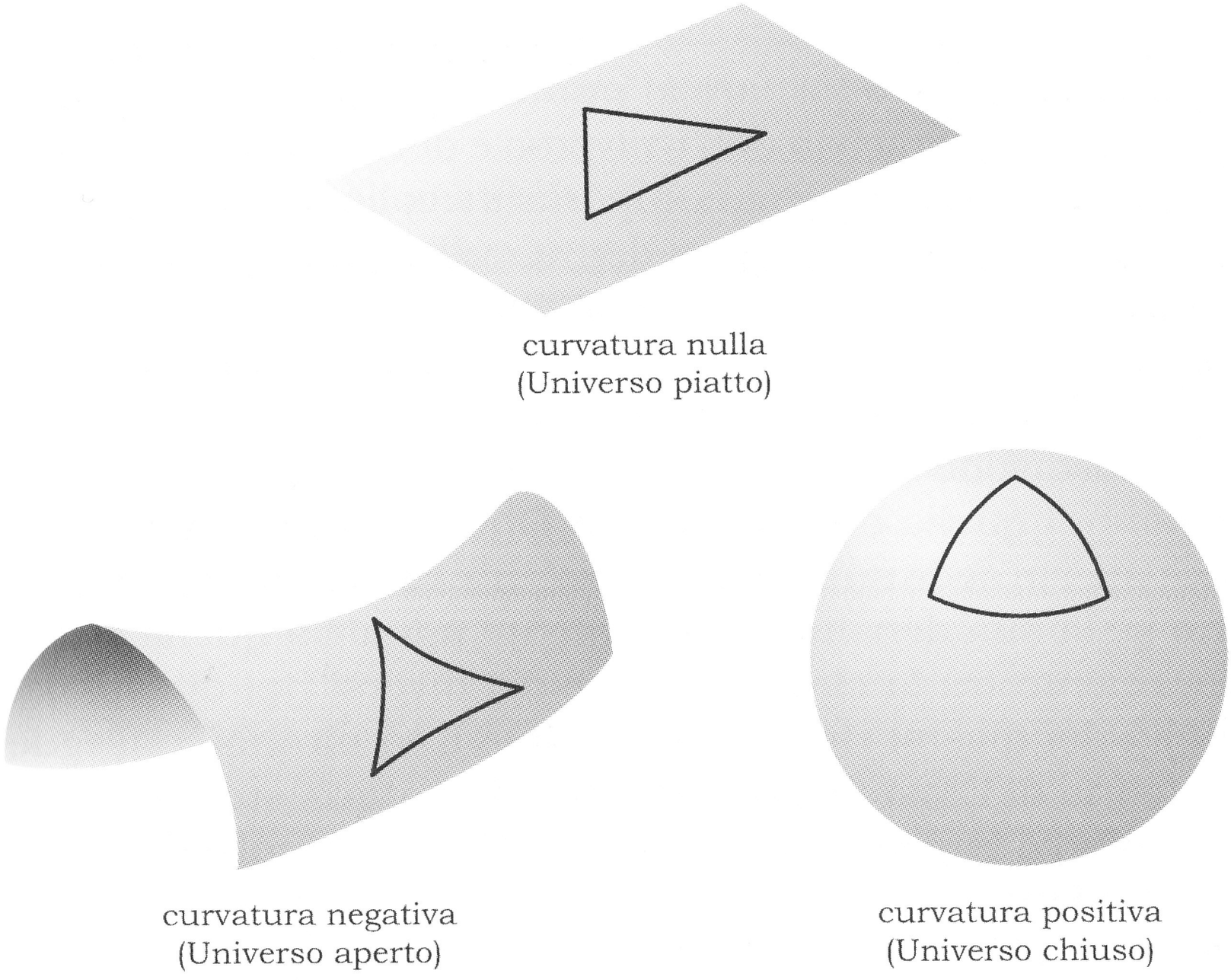

Figura 1.5: I tre possibili tipi di geometria dell'Universo possono essere visualizzati come superfici bidimensionali: un piano (Universo piatto, con curvatura nulla), una sella (Universo aperto, con curvatura negativa) o una sfera (Universo chiuso, con curvatura positiva). La somma degli angoli interni di un triangolo disegnato su ciascuna superficie è, rispettivamente, uguale a 180°, minore di 180° e maggiore di 180°.

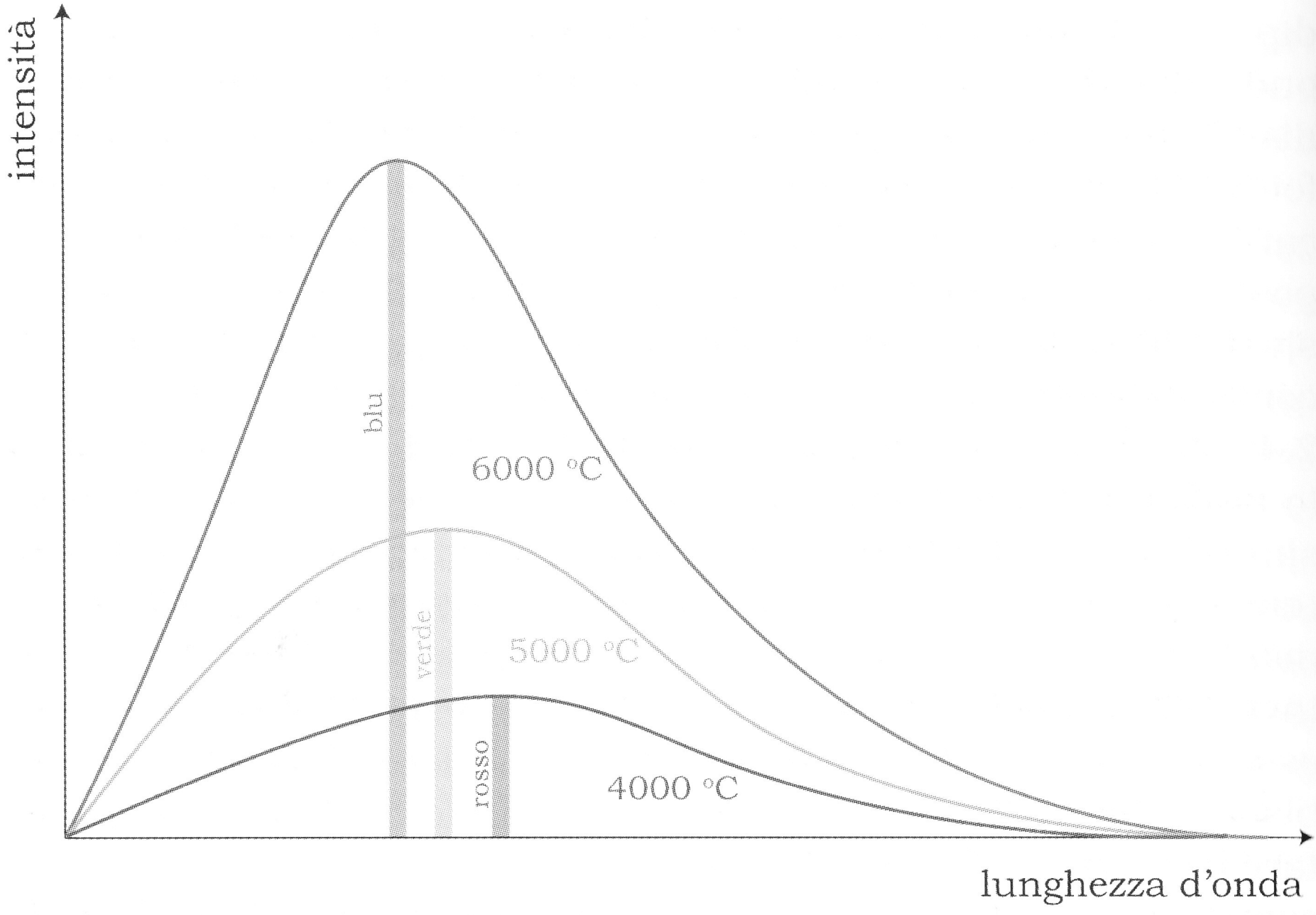

Figura 2.4: La distribuzione energetica dei fotoni in un corpo nero. Ciascuna curva corrisponde a una diversa temperatura: per queste temperature, il massimo di intensità della radiazione è emesso intorno a lunghezze d'onda corrispondenti a diversi colori di luce visibile.

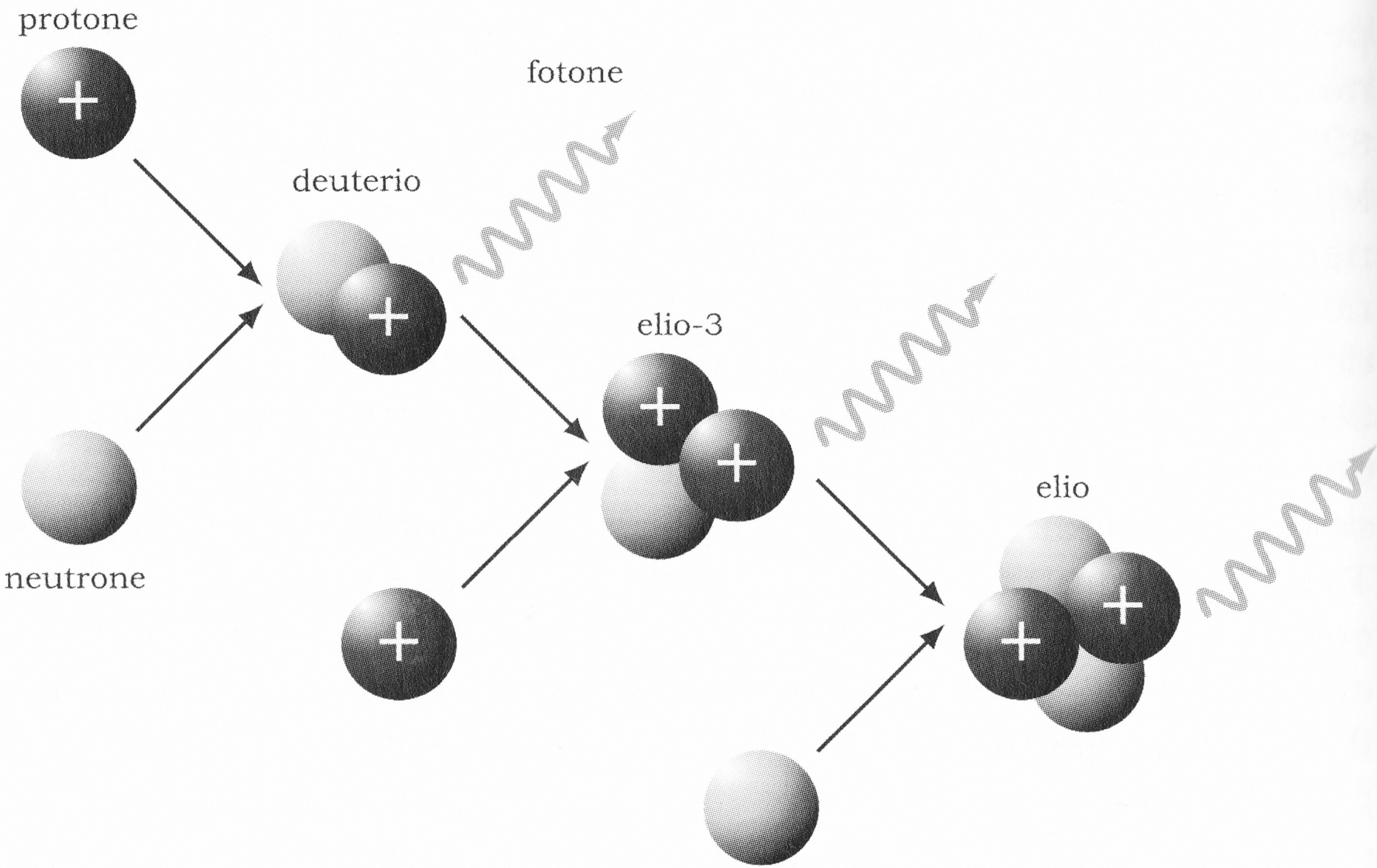

Figura 2.5: Uno dei processi che portano alla formazione di nuclei di elio nell'Universo primordiale: un protone e un neutrone formano un nucleo di deuterio; poi, con l'aggiunta di un protone, un nucleo di elio-3 (un isotopo dell'elio); infine, con l'aggiunta di un neutrone, un nucleo di elio.

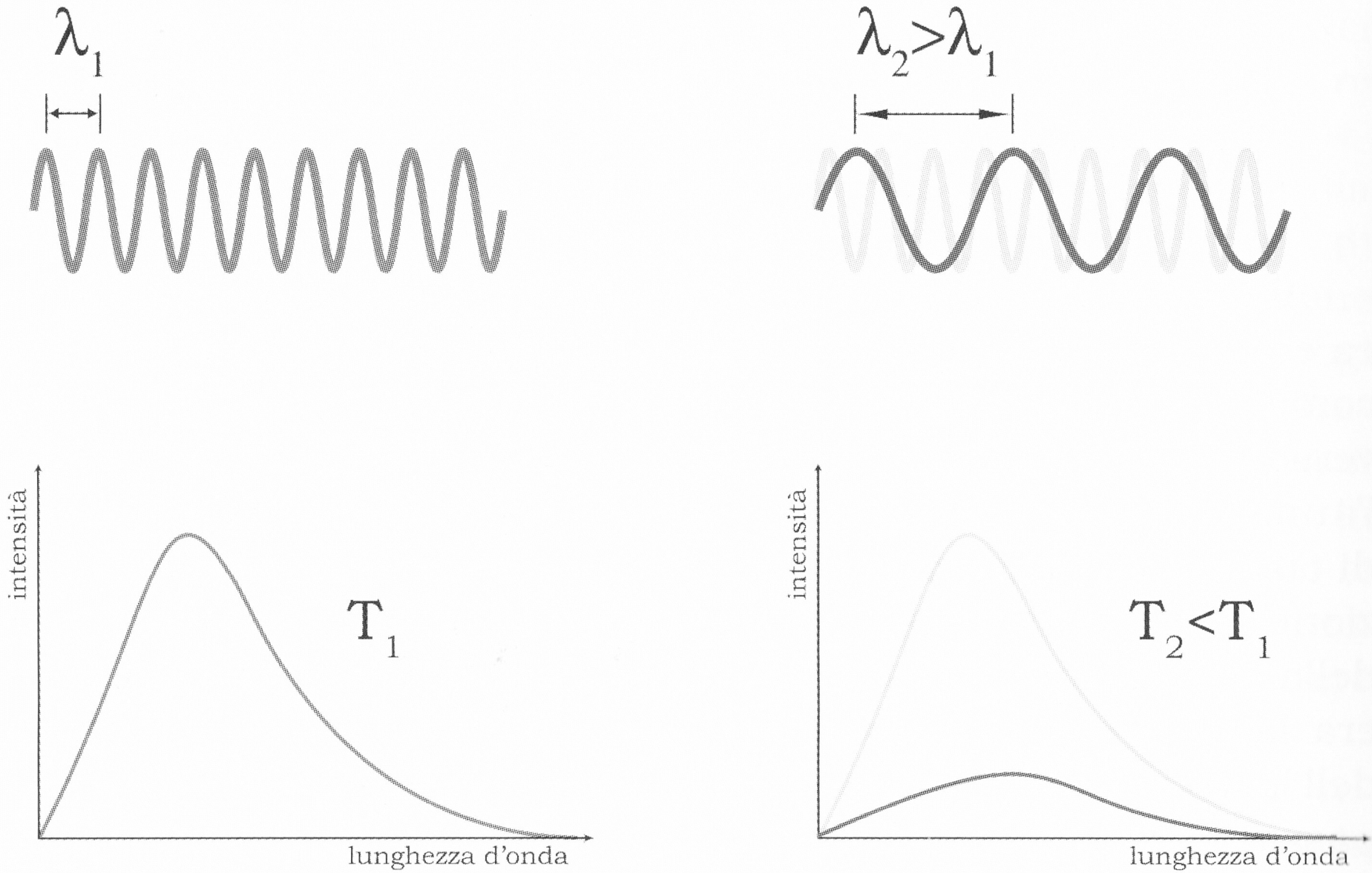

Figura 2.6: Man mano che l'Universo si espande, anche la lunghezza d'onda dei fotoni aumenta (come ogni altra distanza). La distribuzione energetica varia di conseguenza, rimanendo quella di un corpo nero, ma a temperature via via decrescenti.

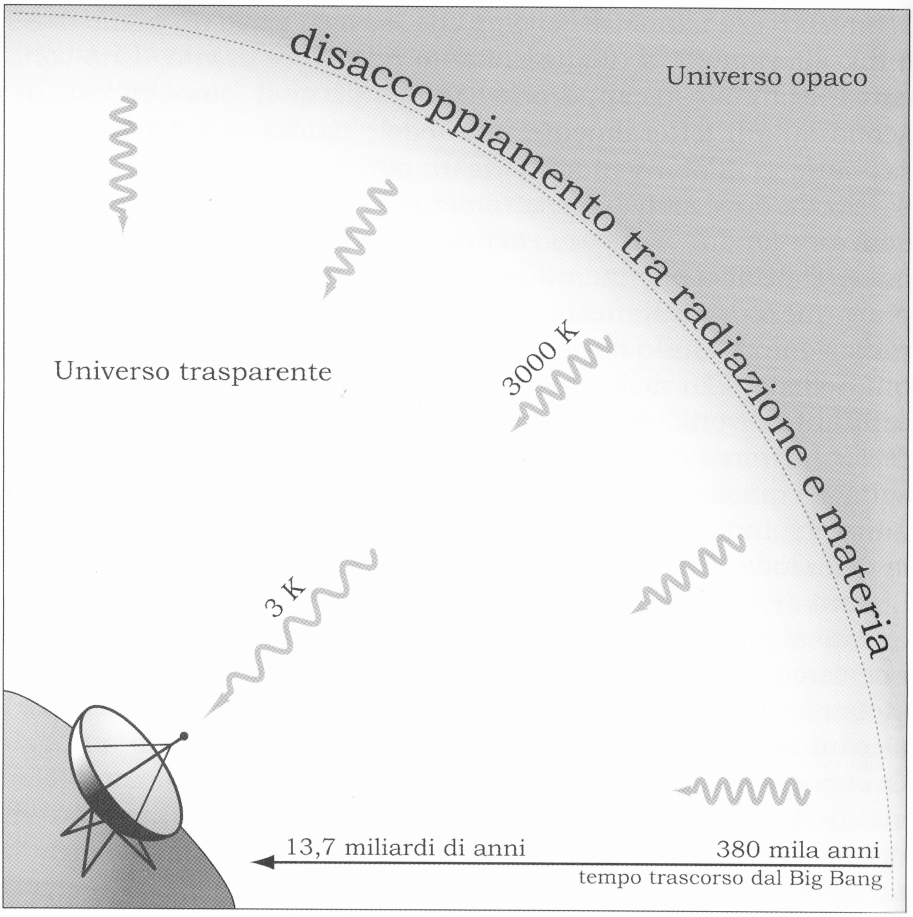

Figura 2.8: La radiazione cosmica di fondo appare provenire da una sfera che ci circonda completamente, e che segna la demarcazione tra un Universo opaco e un Universo trasparente. Il raggio della sfera corrisponde alla distanza percorsa dai fotoni da quando si sono disaccoppiati dalla materia. Durante il percorso, la lunghezza d'onda dei fotoni è aumentata di un fattore mille a causa dell'espansione dell'Universo.

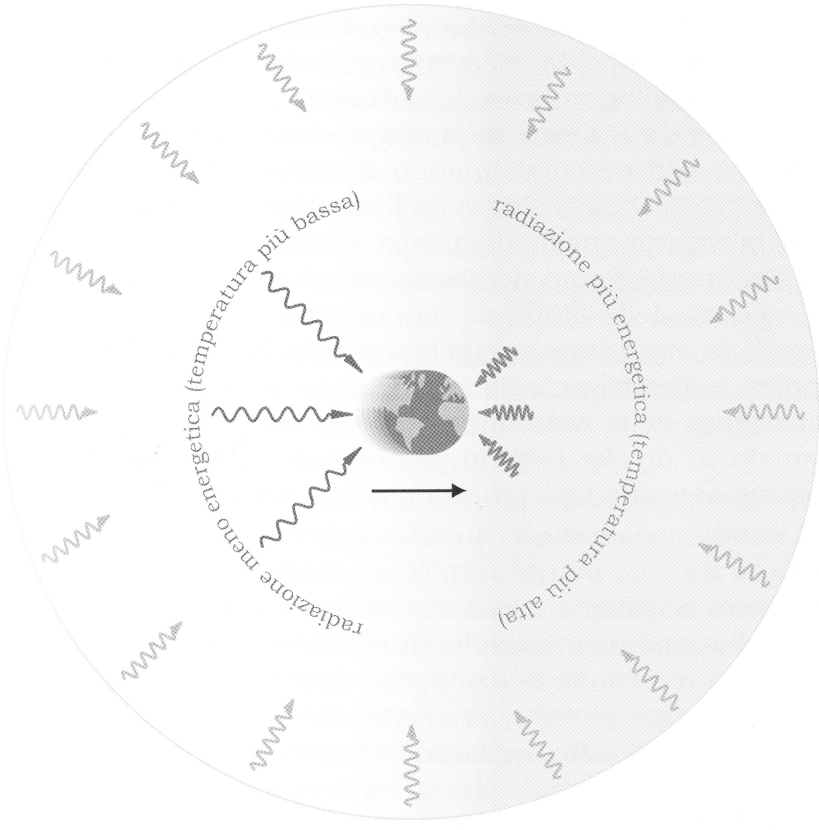

Figura 3.1: A causa dell'effetto Doppler, i fotoni provenienti dalla metà del cielo verso cui viaggia la Terra appariranno più energetici di quelli provenienti dall'altra metà. La radiazione sembrerà quindi più calda in una direzione e più fredda nella direzione opposta.

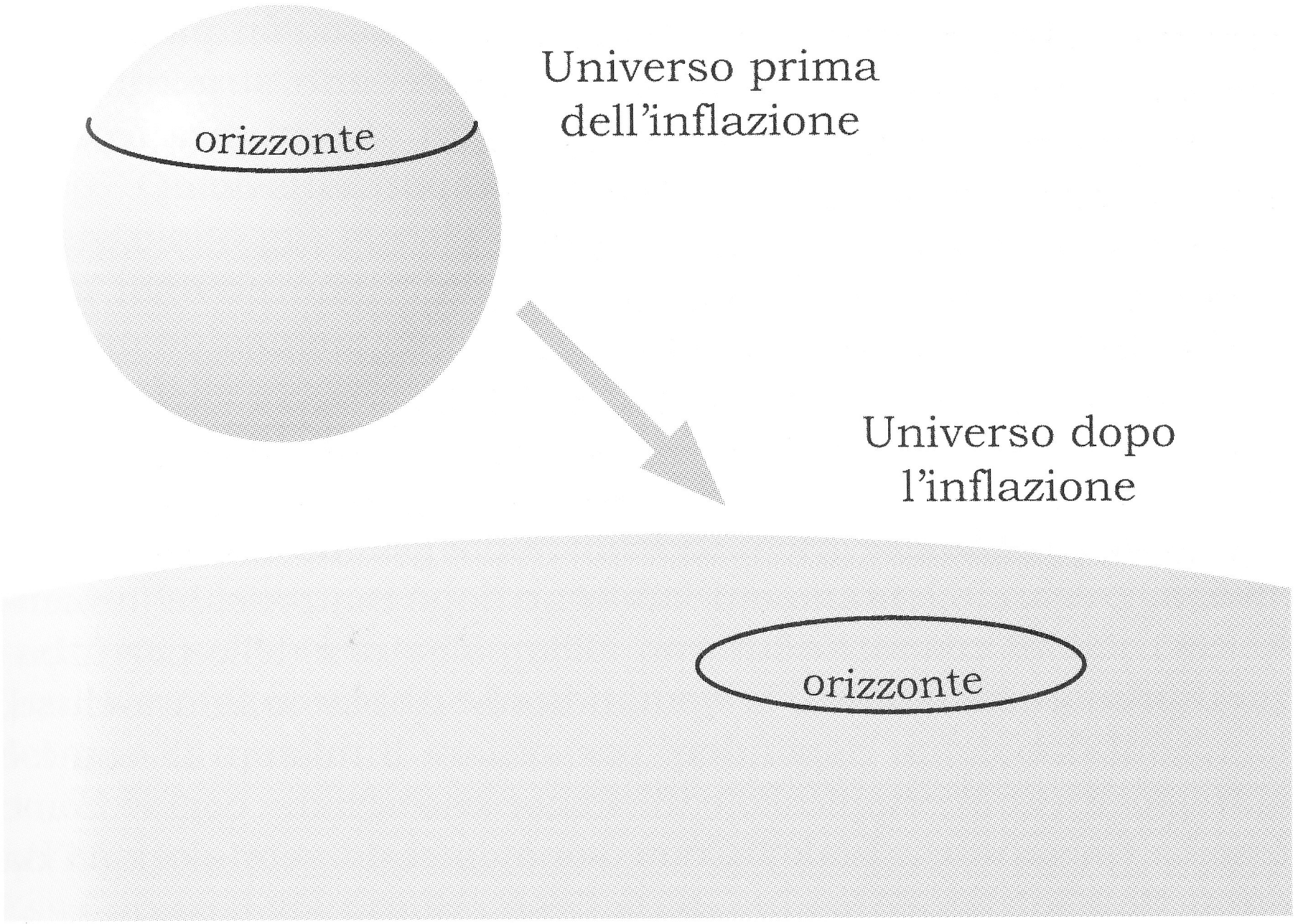

Figura 3.2: L'inflazione agisce in modo da rendere la geometria dell'Universo praticamente piatta all'interno dell'orizzonte. In questo esempio, l'Universo è chiuso prima dell'inflazione e la curvatura è ben visibile all'interno dell'orizzonte. L'inflazione fa espandere enormemente l'Universo in un periodo molto breve, durante il quale la dimensione dell'orizzonte resta praticamente costante. Dopo l'inflazione, la regione all'interno dell'orizzonte appare praticamente piatta.

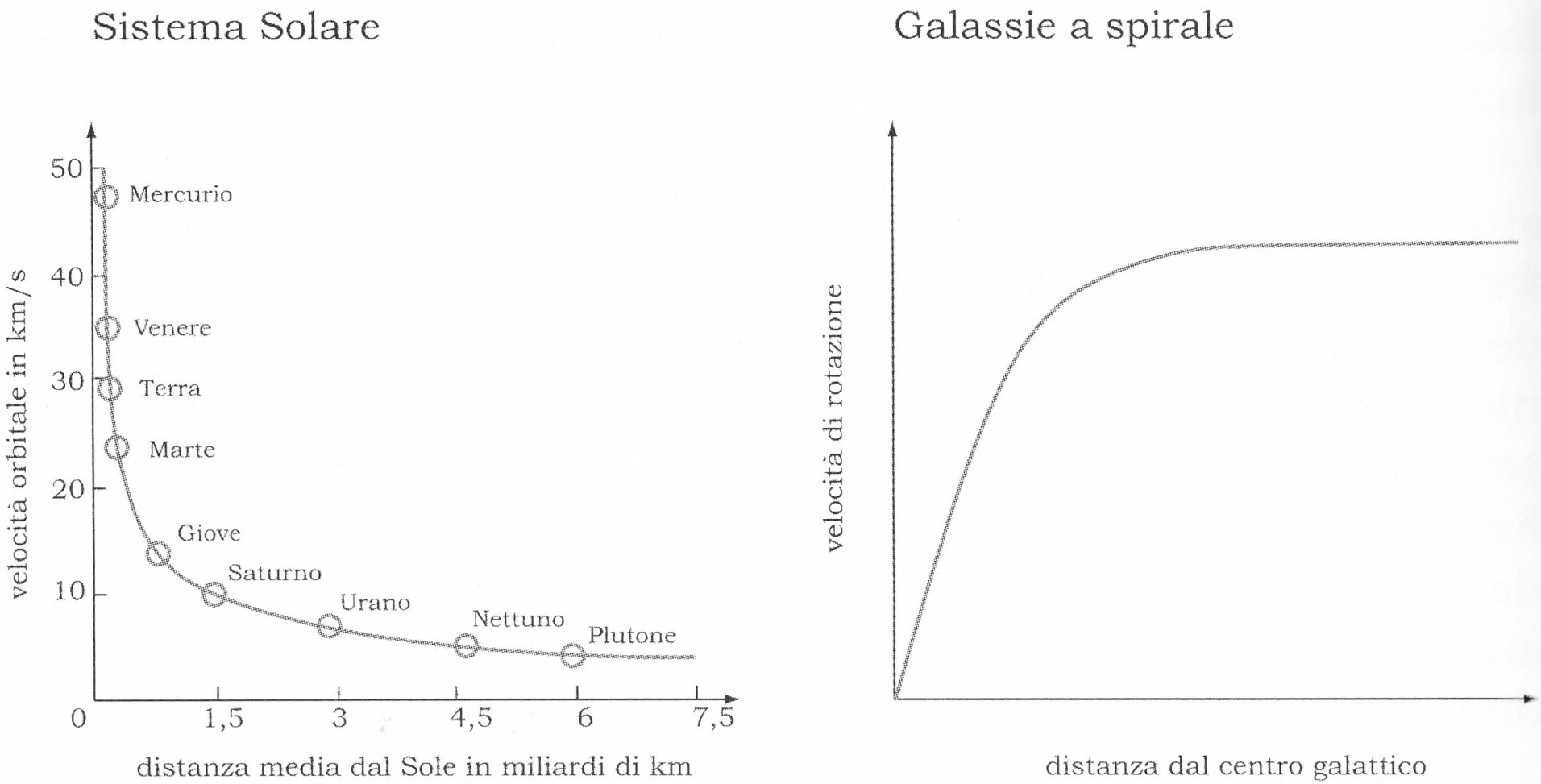

Figura 3.3: La velocità orbitale dei pianeti del Sistema Solare decresce all'aumentare della loro distanza dal Sole, come mostrato nel grafico di sinistra. Lo stesso non accade per la velocità delle stelle nel disco di una galassia a spirale, che si mantiene pressoché costante allontanandosi dal centro galattico.

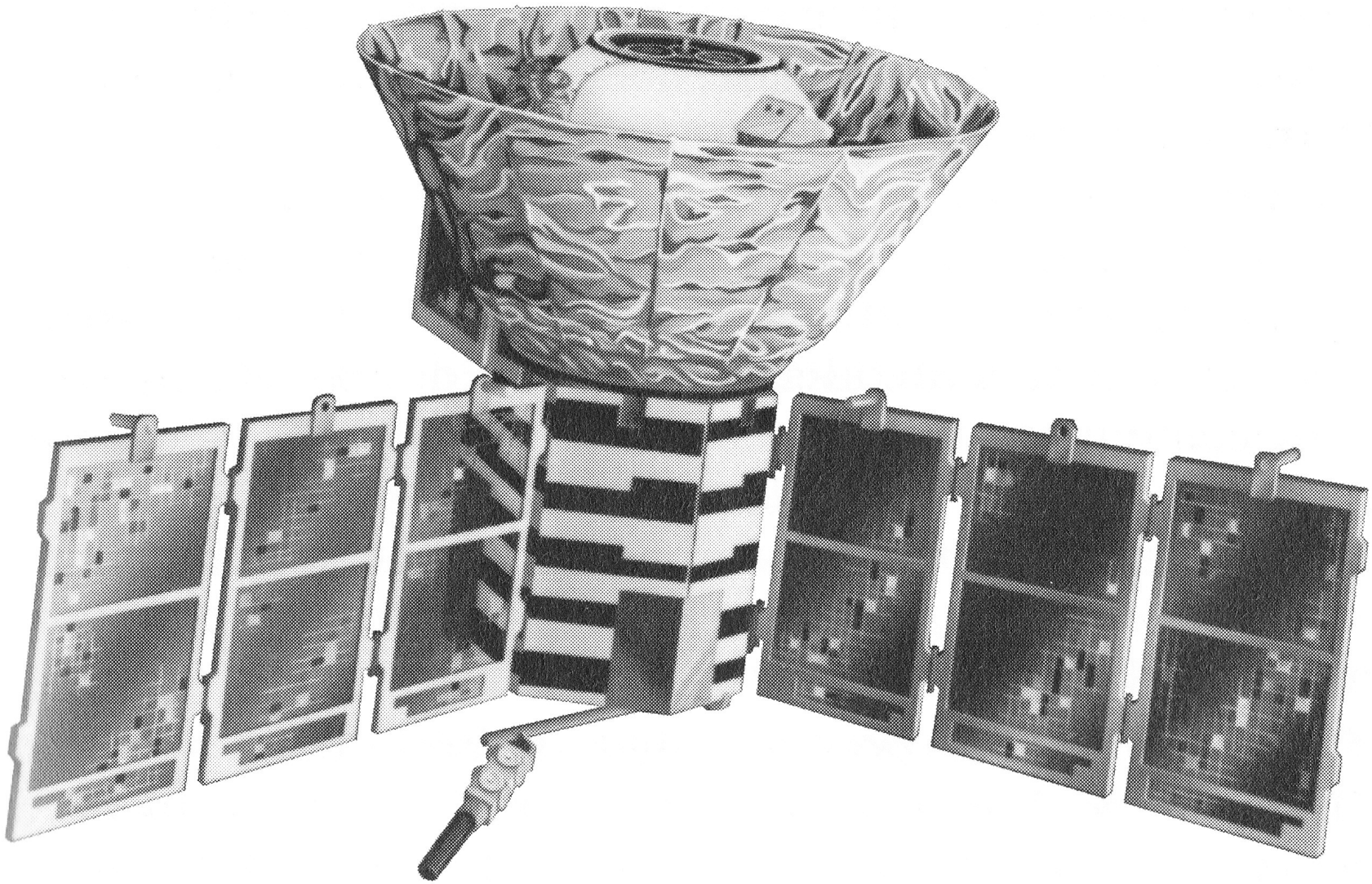

Figura 3.4: Il satellite COBE della NASA. Lanciato nel 1989, ha continuato a operare fino al 1993, osservando il cielo in orbita intorno alla Terra a circa 900 chilometri di quota. (Illustrazione COBE/NASA.)

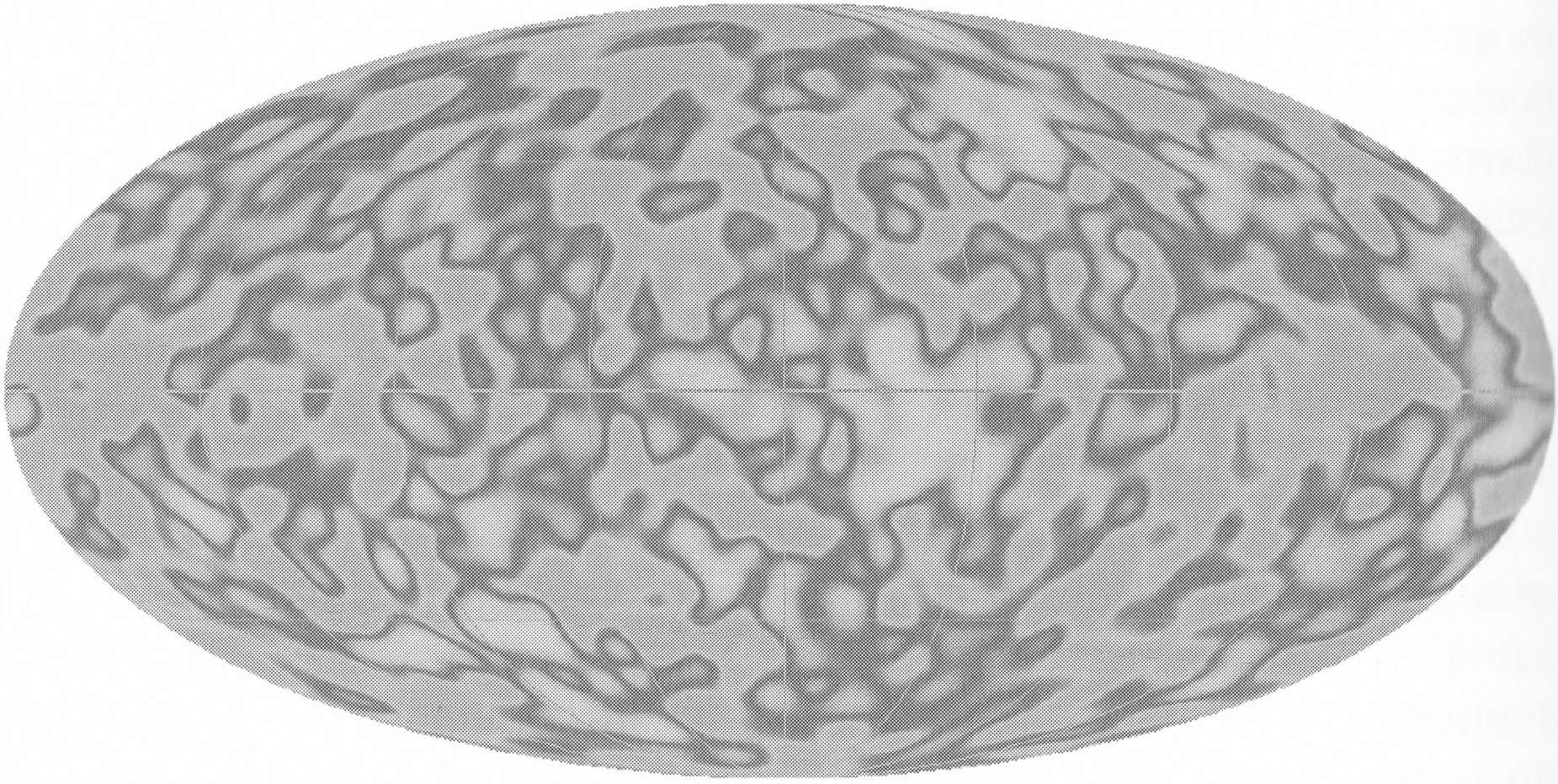

Figura 3.5: La mappa delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo ottenuta dal satellite COBE. L'intera volta celeste è raffigurata in proiezione di Mollweide, con il piano della nostra Galassia (che è stata rimossa dall'immagine durante l'analisi) allineato lungo la dimensione orizzontale. (COBE/NASA)

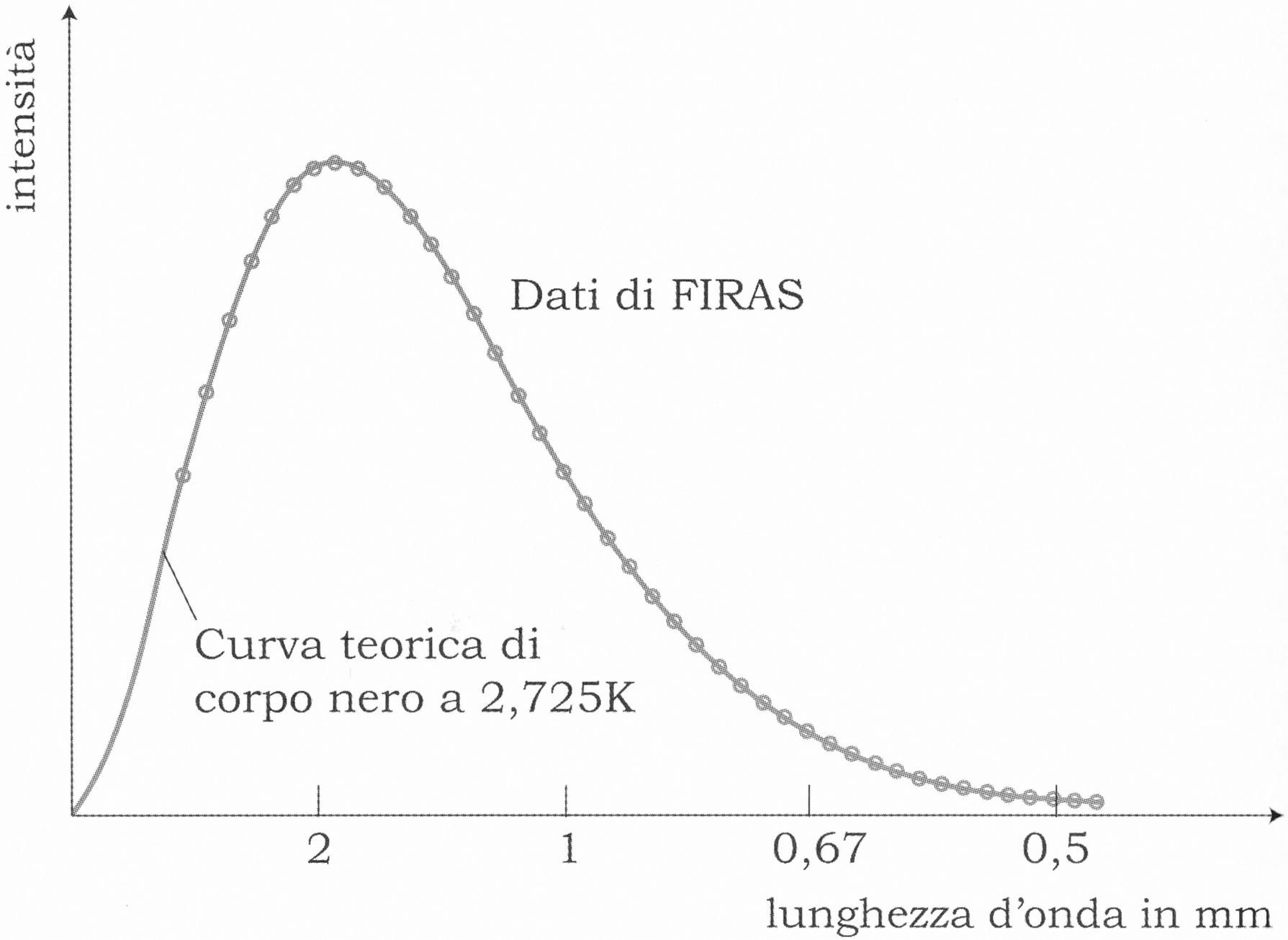

Figura 3.6: La distribuzione energetica della radiazione cosmica di fondo misurata dallo strumento FIRAS a bordo del satellite COBE. Le misure (punti) si sovrappongono perfettamente alla curva teorica corrispondente a un corpo nero a una temperatura di 2,725 K. La misura di FIRAS è talmente accurata che gli errori sperimentali non sono visibili alla scala di questo grafico. (Figura adattata da un articolo del 1996 di D. Fixsen e collaboratori)

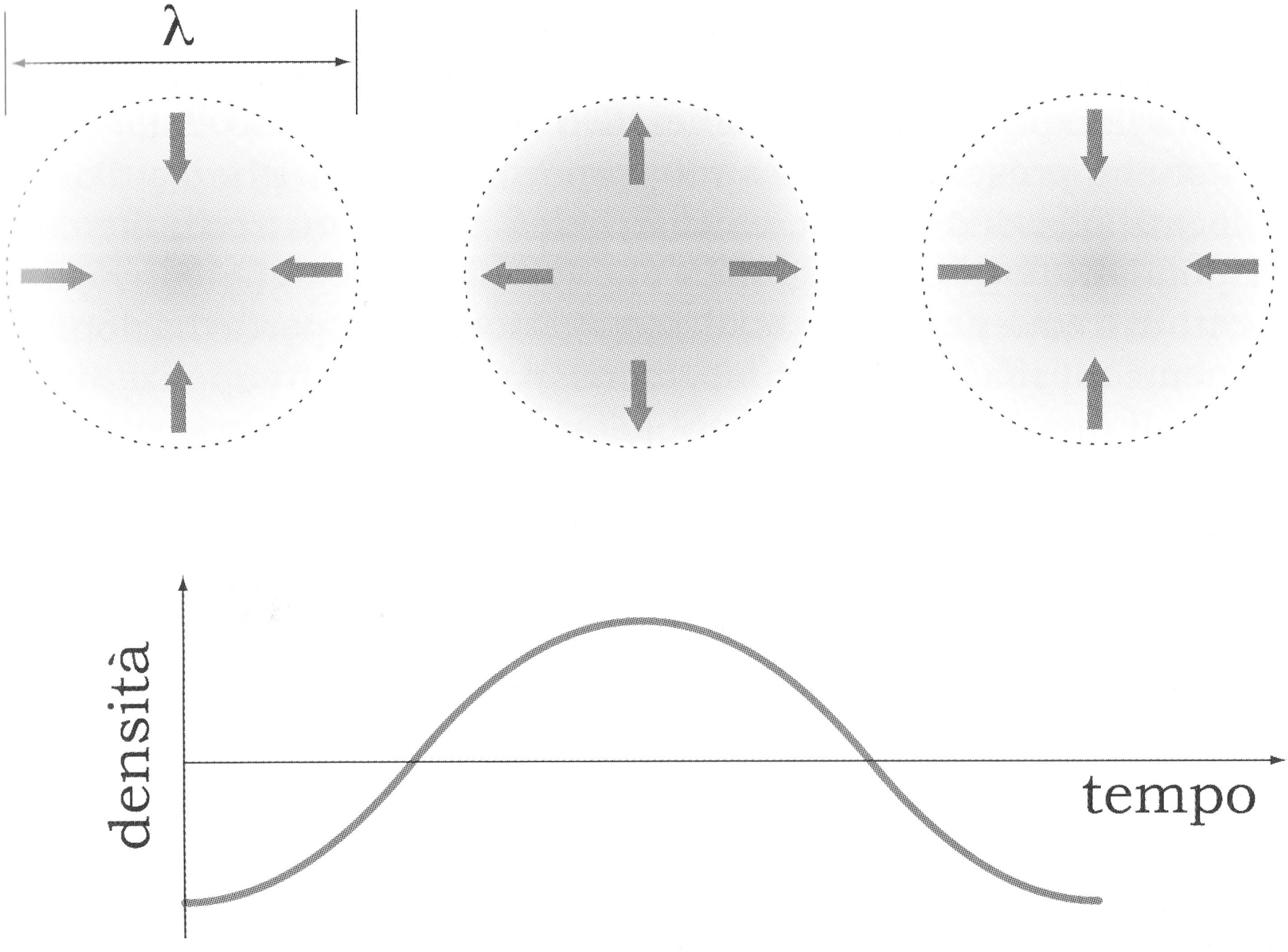

Figura 4.5: L'andamento della densità in una regione sferica di raggio λ sotto l'influenza della gravità (che tende ad accrescere la densità) e della pressione (che si oppone alla crescita), segue un andamento di tipo oscillatorio, analogo a quello prodotto da un'onda acustica.

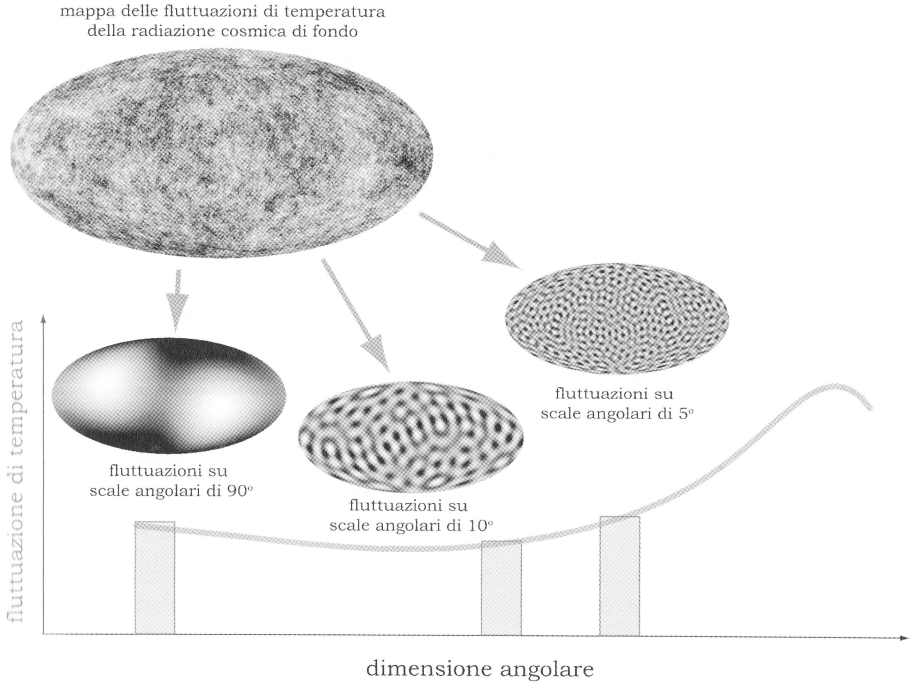

Figura 4.6: Per ricostruire lo spettro delle oscillazioni acustiche presenti nel plasma primordiale, i cosmologi analizzano un'immagine della radiazione cosmica di fondo, isolando i contributi provenienti da fluttuazioni di temperatura di diversa dimensione angolare (nella figura è mostrato il contributo delle fluttuazioni per tre scale angolari scelte a puro titolo esemplificativo). L'intensità media delle fluttuazioni (indipendentemente dal segno), in funzione della dimensione angolare, viene messa in un grafico: lo spettro ottenuto permette di ricostruire l'ampiezza che onde di diversa frequenza avevano al momento della ricombinazione.

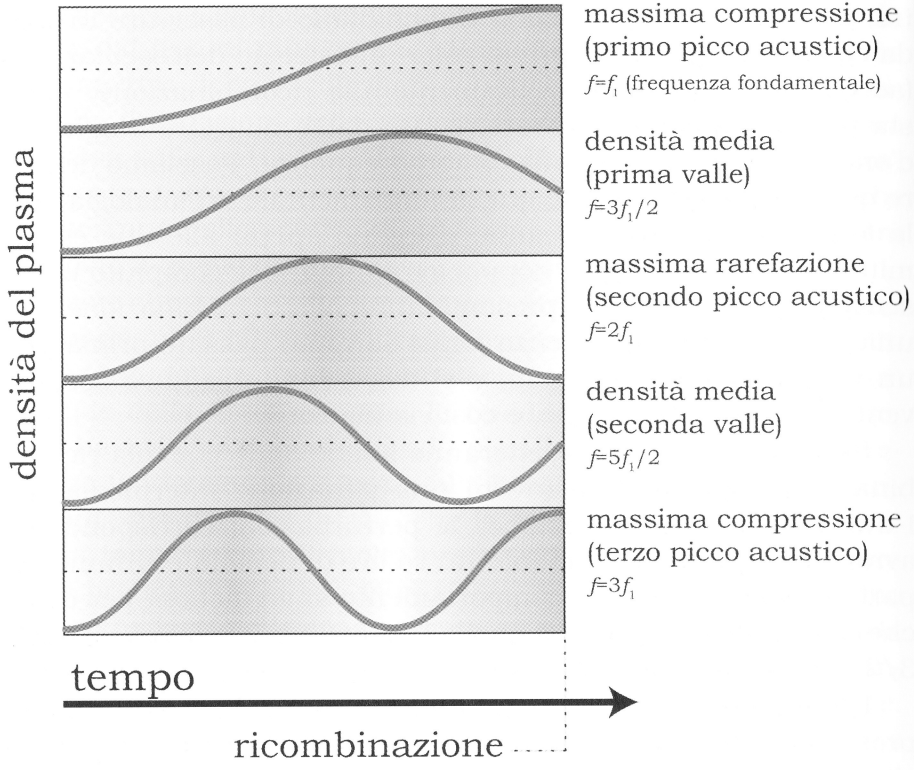

Figura 4.7: Onde acustiche di diversa frequenza arrivano alla ricombinazione in fasi diverse dell'oscillazione: l'onda che arriva per prima alla massima compressione è quella che corrisponde alla frequenza fondamentale. Questa produrrà un picco nello spettro delle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo. L'onda che giunge in una fase intermedia corrisponderà a una valle nello spettro. L'onda che si trova nella fase di massima rarefazione è quella corrispondente alla seconda armonica, e produce il secondo picco nello spettro, e così via.

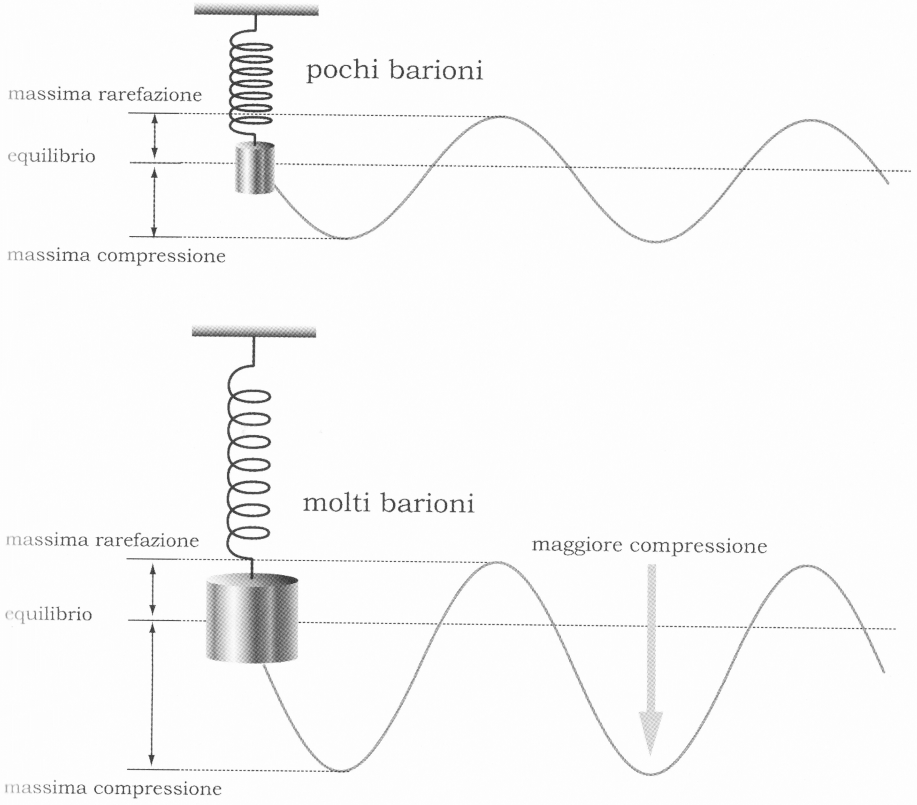

Figura 4.8: La quantità di barioni presenti nel plasma influenza l'ampiezza delle oscillazioni acustiche, proprio come quando si aumenta la massa sospesa a una molla. Se sono presenti più barioni, la fase di compressione (sospinta dalla gravità) sarà agevolata rispetto a quella di rarefazione. Questo aumenta il divario tra l'ampiezza dei picchi pari e dispari nello spettro.

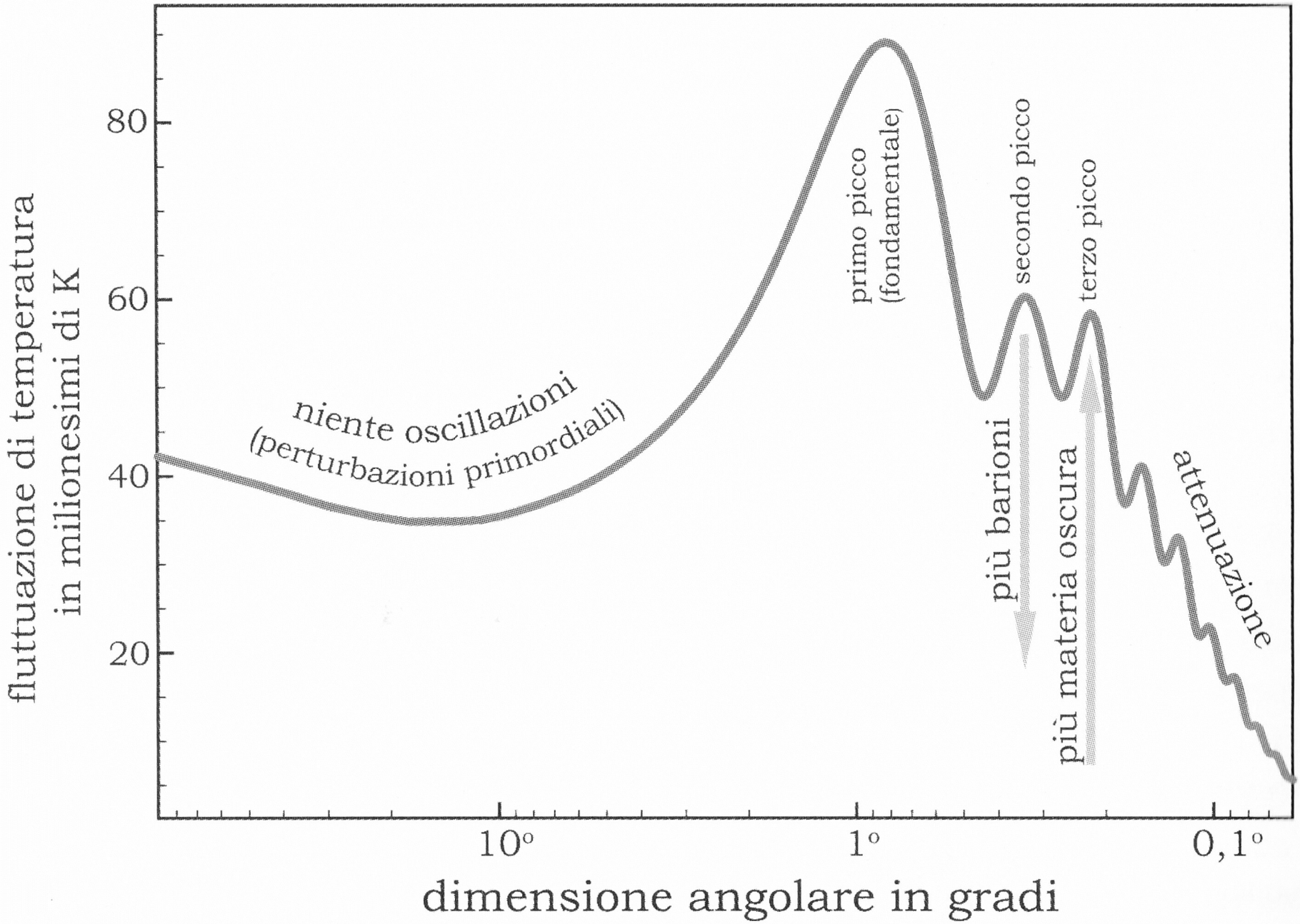

Figura 4.9: I calcoli teorici prevedono uno spettro delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo in cui sono evidenti picchi a frequenze armoniche di una frequenza fondamentale. La forma dei picchi dipende dal valore preciso dei parametri cosmologici (come la quantità di barioni o di materia oscura).

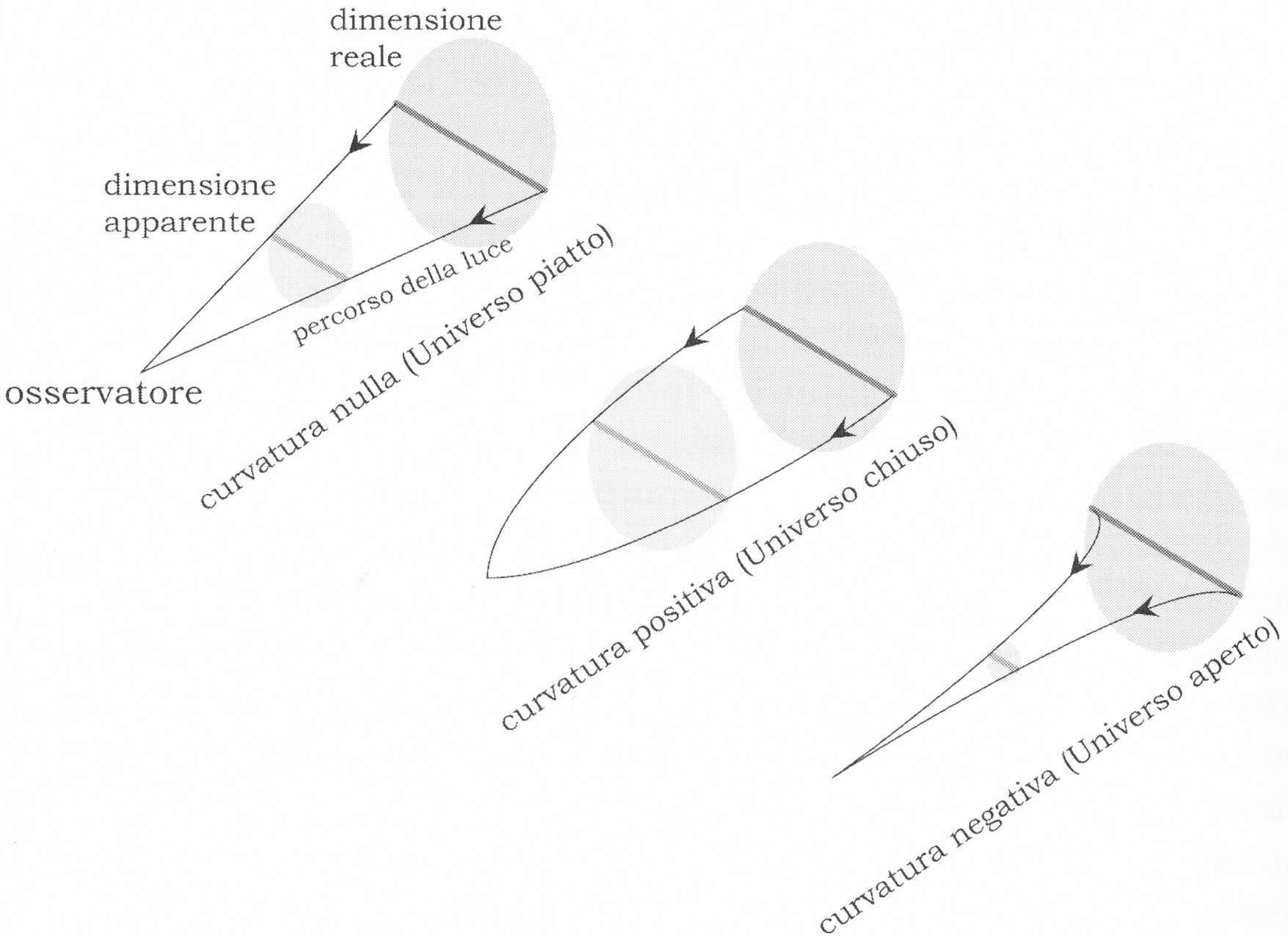

Figura 5.2: I raggi luminosi viaggiano lungo percorsi diversi a seconda della geometria dell'Universo. Quando un oggetto di una certa dimensione viene osservato da un punto molto distante (confrontabile con le dimensioni dell'Universo), la deviazione dei raggi luminosi fa apparire l'oggetto più grande in un Universo chiuso e più piccolo in un Universo aperto. Questo fatto può essere usato per misurare la geometria dell'Universo.

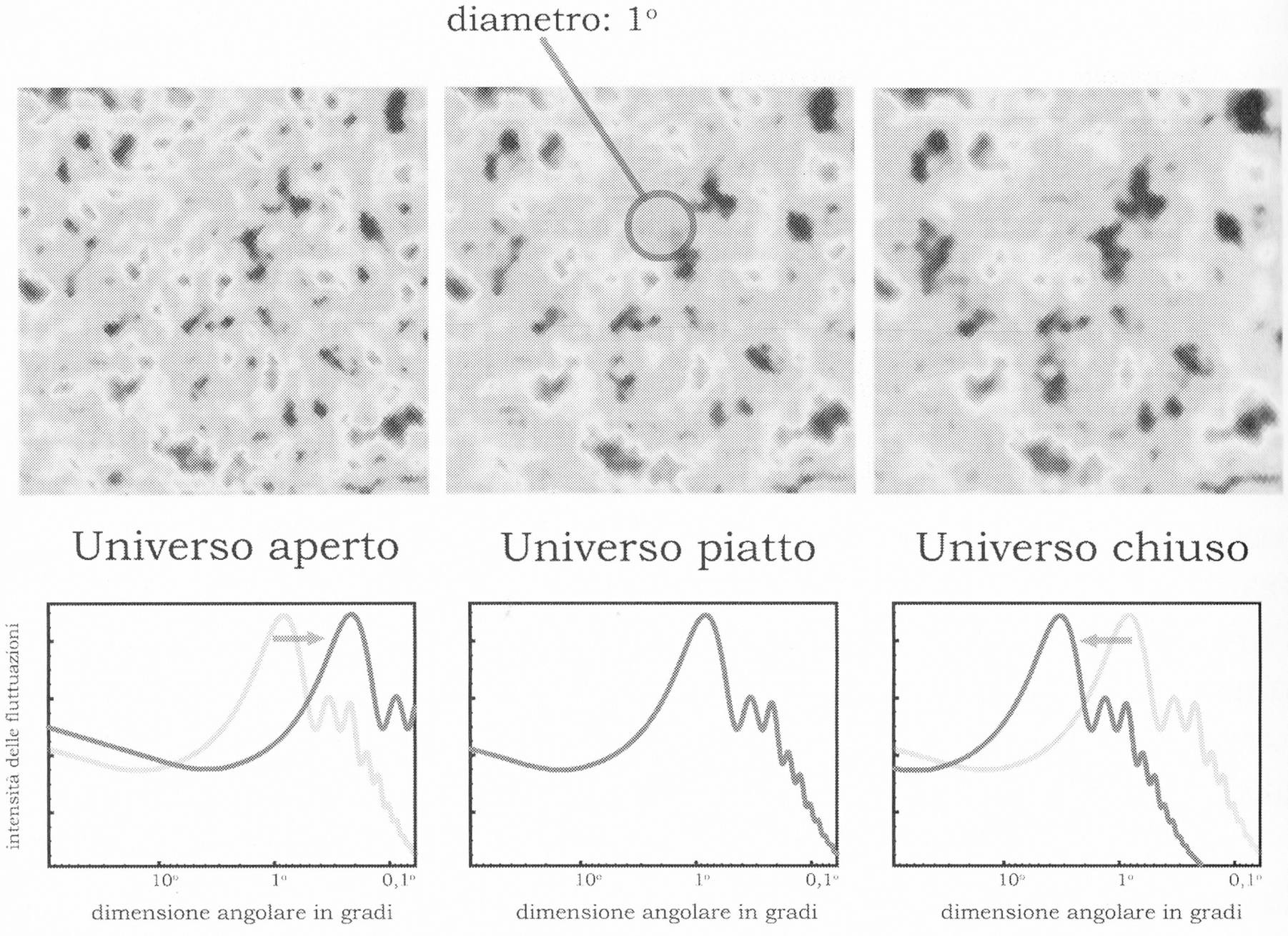

Figura 5.3: La dimensione media delle più intense fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo è fissata al momento della ricombinazione; ma, a causa della variazione nel percorso compiuto dai fotoni, appare diversa a seconda della geometria dell'Universo: circa 1° in un Universo piatto, di meno in un Universo aperto e di più in un Universo chiuso. Questo si traduce in uno spostamento nella posizione dei picchi acustici nello spettro delle fluttuazioni.

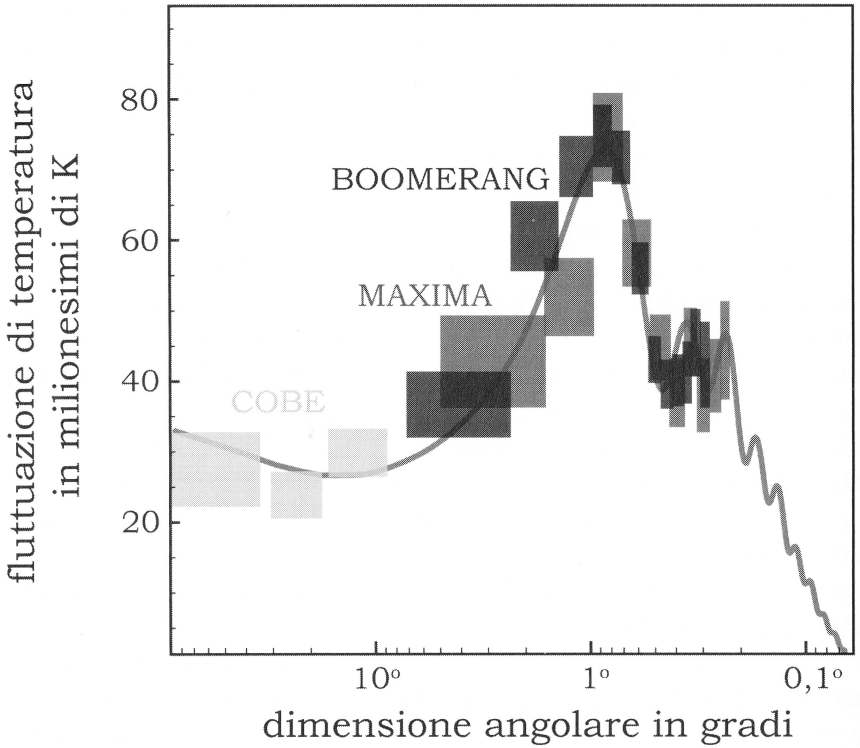

Figura 5.4: I dati di BOOMERANG e MAXIMA hanno per primi mostrato chiaramente una risalita nello spettro delle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo proprio dove i calcoli teorici prevedevano l'esistenza del primo picco acustico. La posizione del picco è quella che ci si aspetta se la geometria dell'Universo è piatta (come mostra la curva continua teorica, ottenuta proprio ipotizzando un Universo con densità totale pari a quella critica). I dati di COBE coprivano scale angolari troppo grandi e non potevano rivelare la presenza del picco. D'altra parte, BOOMERANG e MAXIMA non erano in grado di risolvere chiaramente le armoniche superiori dello spettro.

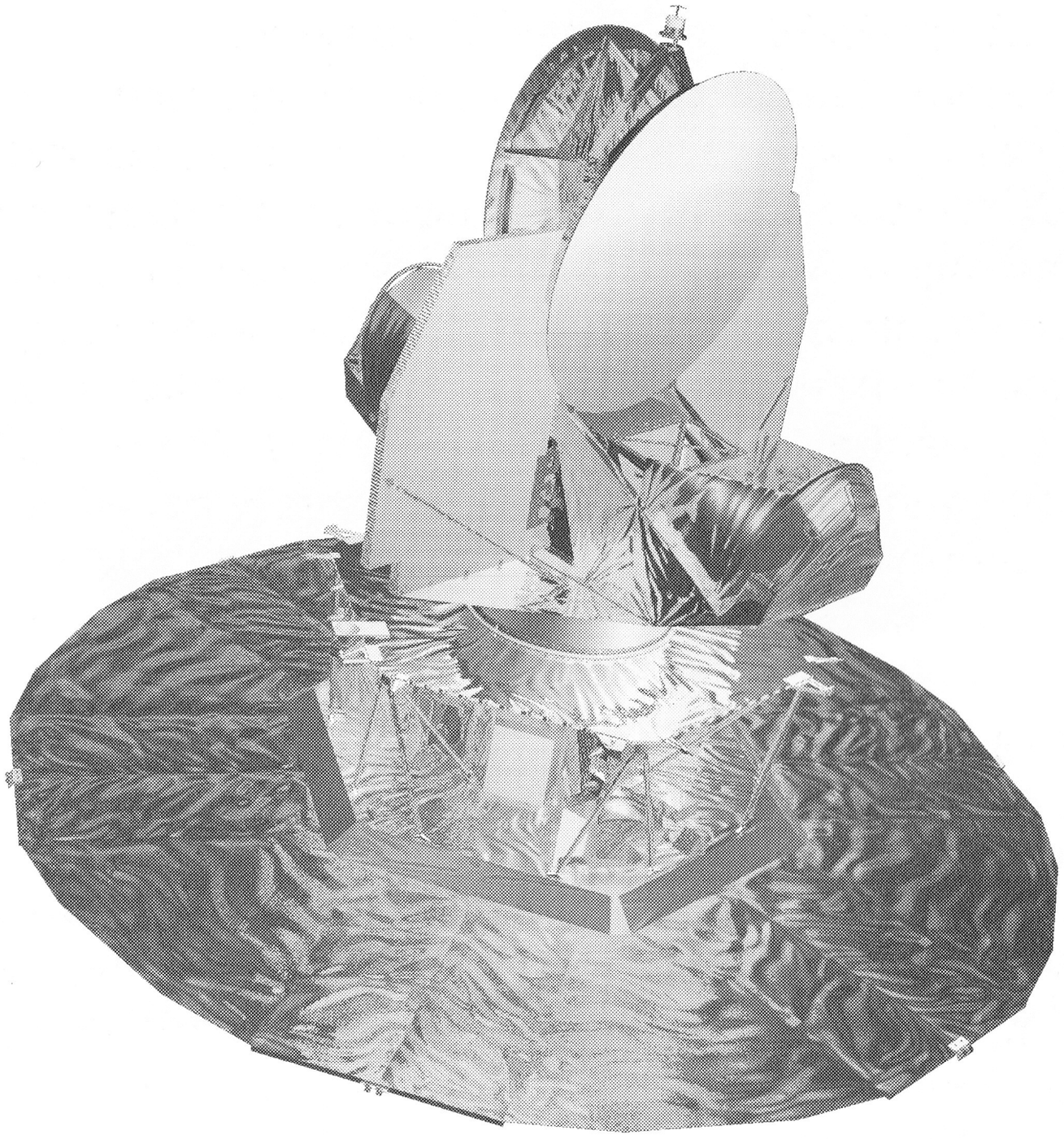

Figura 5.5: Il satellite WMAP della NASA è alto 3.8 metri e largo 5 metri, per un peso di 840 chilogrammi. WMAP ha impiegato tre mesi per raggiungere l'orbita prestabilita, a circa 1 milione e mezzo di km dalla Terra, una distanza quattro volte maggiore di quella della Luna. (NASA/WMAP Science Team)

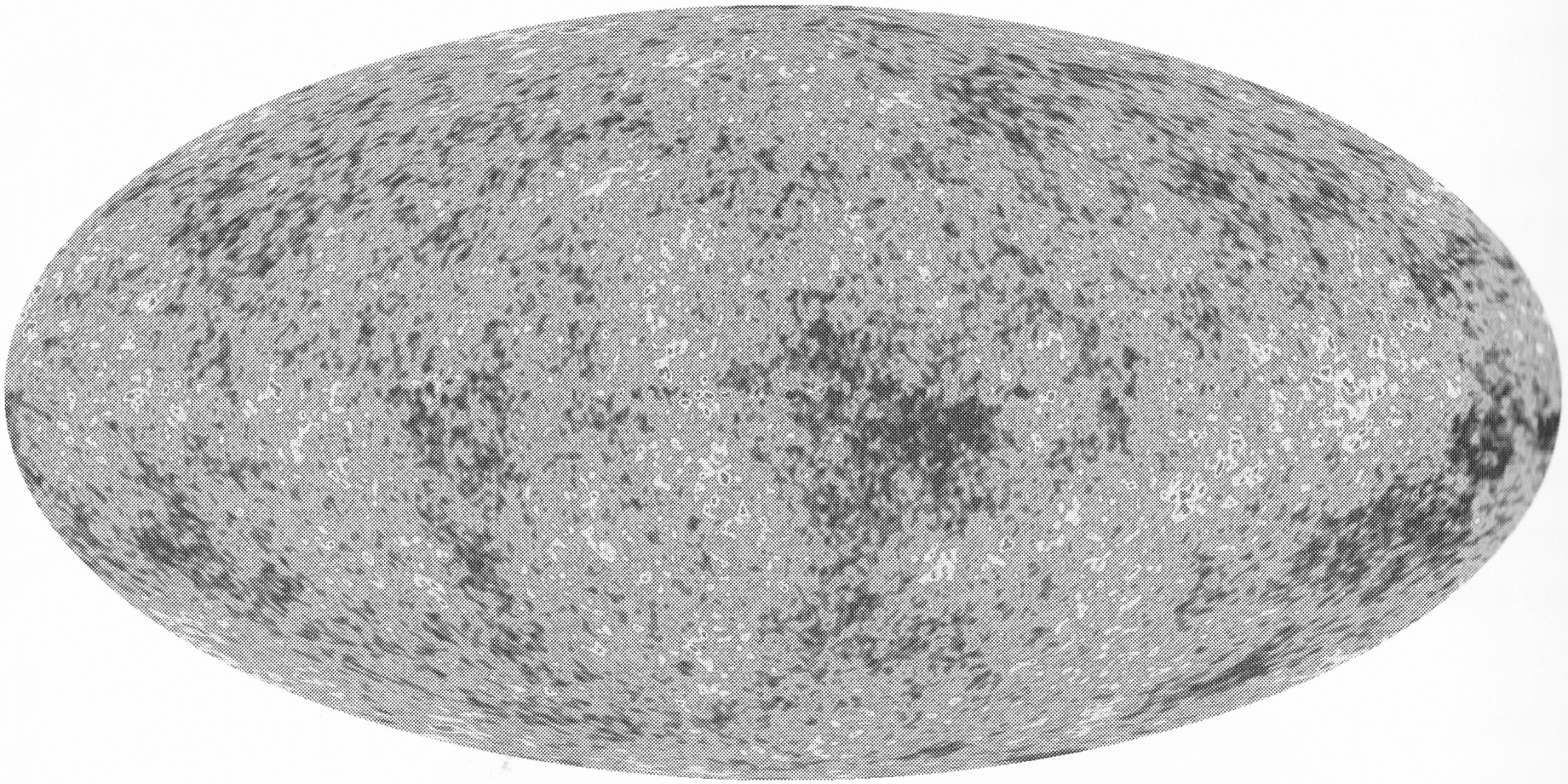

Figura 5.6: La mappa delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo ottenuta dal satellite WMAP. L'intera volta celeste è raffigurata in proiezione di Mollweide, con il piano della nostra Galassia (che è stata rimossa dall'immagine durante l'analisi) allineato lungo la dimensione orizzontale. La temperatura varia tra -200 e +200 milionesimi di Kelvin rispetto alla media. (NASA/WMAP Science Team)

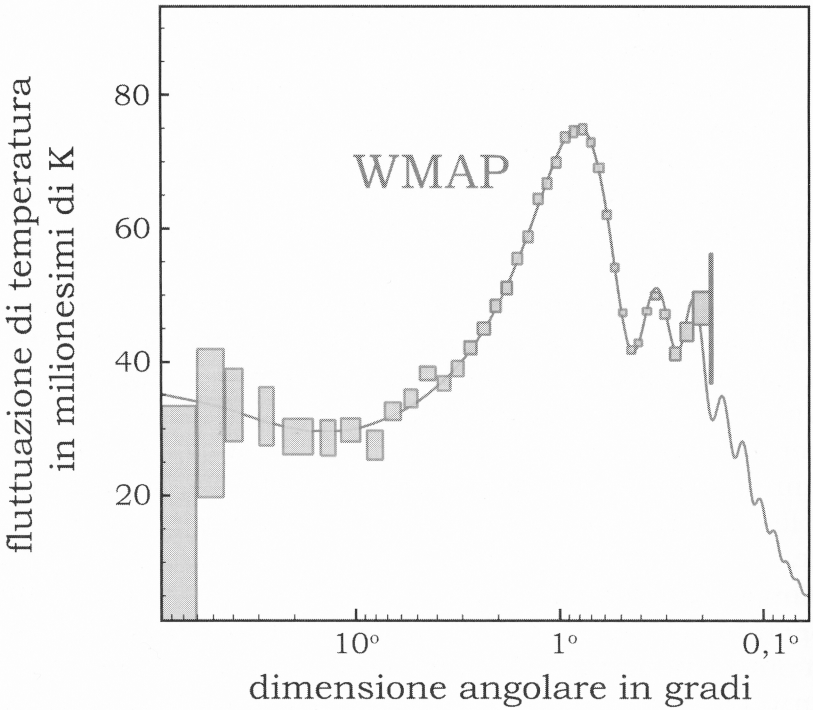

Figura 5.7: I dati di WMAP ricostruiscono lo spettro delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo con grande precisione, evidenziando chiaramente la presenza dei primi due picchi acustici. L'accuratezza a frequenze più alte non è ancora tale da rivelare le armoniche successive. A frequenze molto basse, invece, il segnale sembra meno intenso di quanto previsto dai modelli teorici. (Figura ottenuta da dati NASA/WMAP Science Team, disponibili sul sito http://lambda.gfsc.nasa.gov)

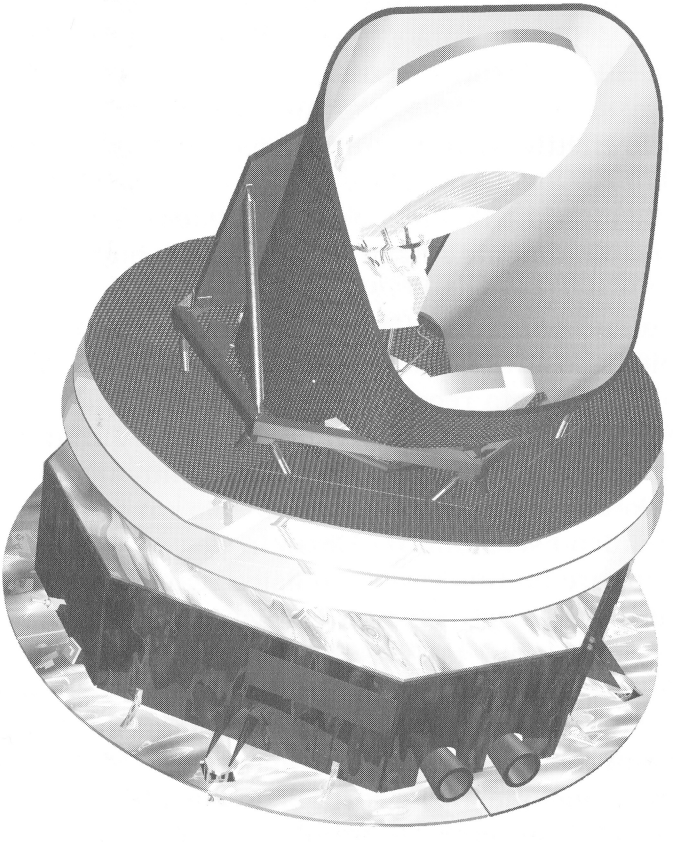

Figura 6.1: Il satellite Planck, dell'ESA, sarà la missione definitiva per lo studio delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo. Il lancio è previsto per il 2008. (Alcatel/ESA)

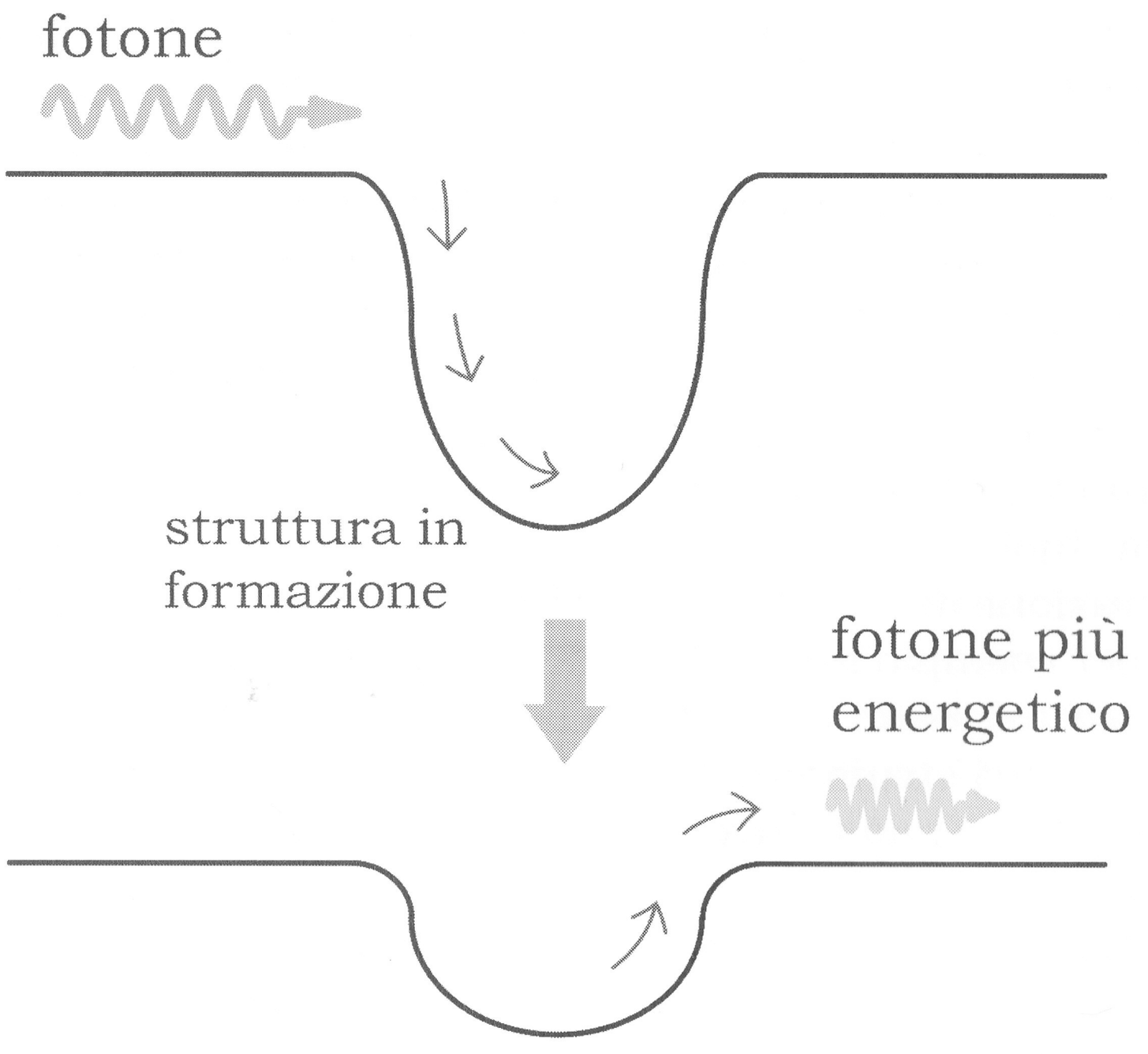

Figura 6.2: Quando i fotoni della radiazione cosmica di fondo attraversano una regione in cui sta avvenendo un mutamento nella curvatura locale dello spaziotempo (a causa della presenza di una struttura in formazione) possono guadagnare (o perdere) energia. Questo effetto è particolarmente marcato quando l'energia oscura comincia ad accelerare l'espansione dell'Universo.

Figura 6.4: La topologia di una superficie piana in cui vengono identificati i due lati opposti è identica a quella di un toro. Un fotone che attraversi un bordo di questa superficie sbucherà dalla parte opposta. Un Universo di questo tipo sarebbe finito e piatto senza essere limitato. Ogni sorgente luminosa produrrebbe un numero infinito di immagini replicate di se stessa.

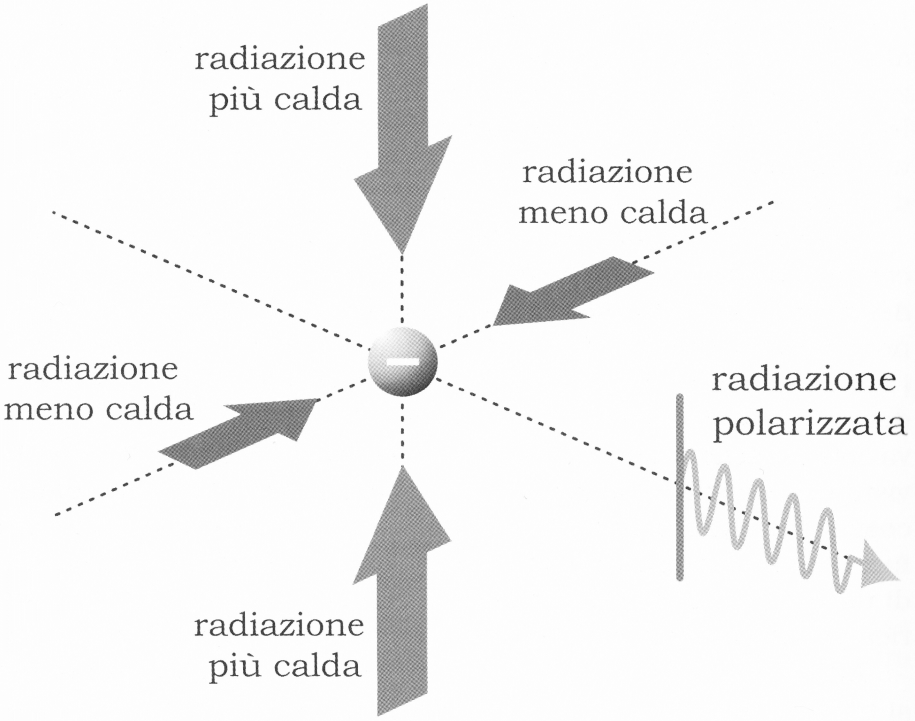

Figura 6.6: Il meccanismo attraverso il quale la radiazione cosmica di fondo può acquistare una polarizzazione particolare al momento del disaccoppiamento dipende dalla presenza di un'anisotropia di quadrupolo nella radiazione che colpisce l'elettrone: la radiazione proveniente lungo un certo asse deve essere più calda (fotoni più energetici) rispetto a quella che proviene dalle direzioni perpendicolari. In questo caso, i fotoni diffusi hanno tutti polarizzazione allineata lungo l'asse da cui proviene la radiazione più calda.