



Università della Terza Età "Cardinale  
Giovanni Colombo" - Milano

A. A. 2022 - 2023  
Corso di Astrofisica

Docente:  
Adriano Gaspani

# Materia Oscura ed Energia Oscura

# Il punto di partenza

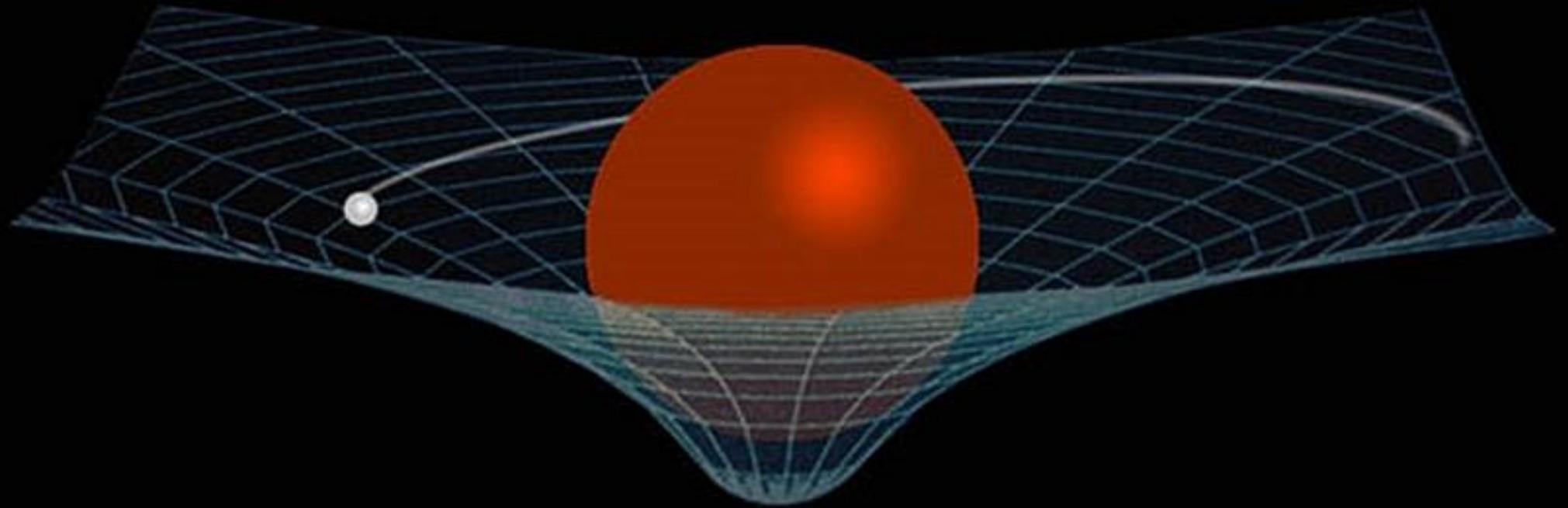
## Equazioni di Einstein 1915

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

**Geometria**

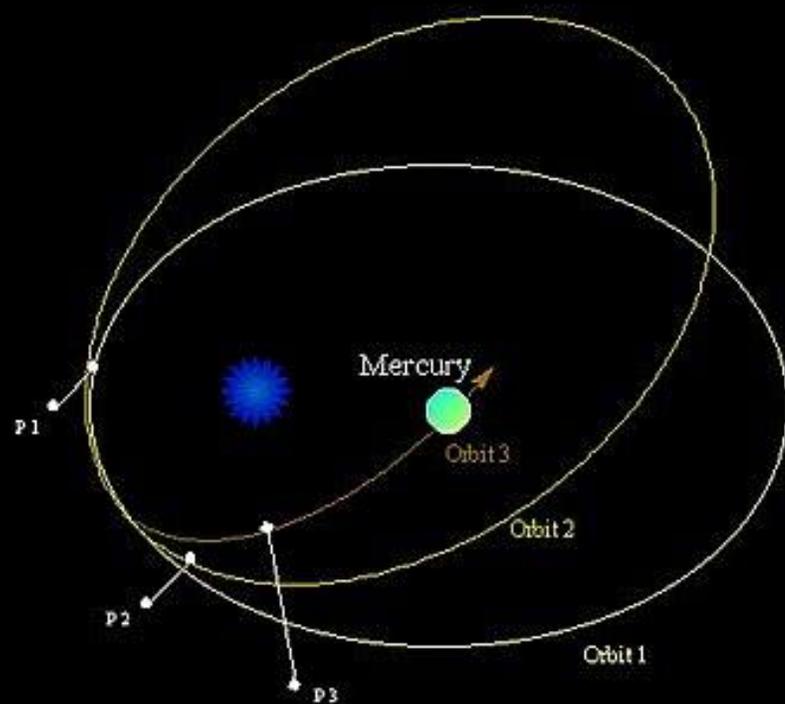
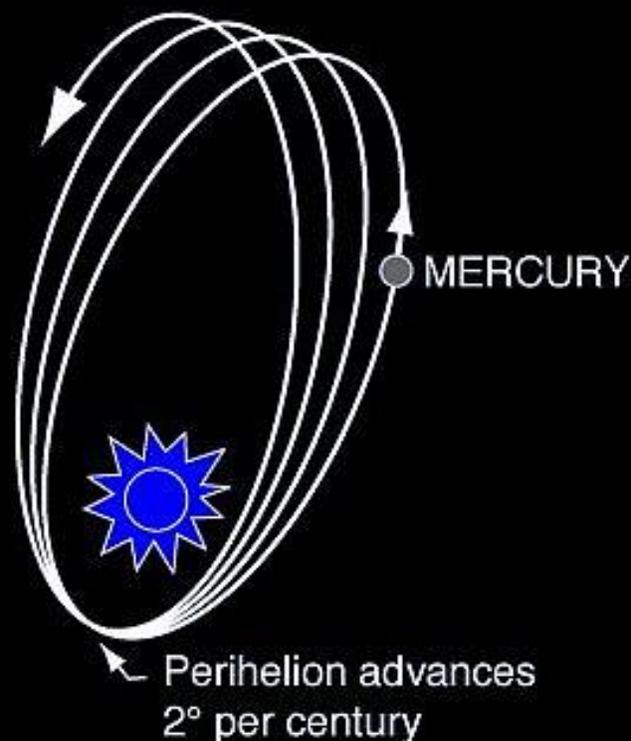
**Materia-Energia**

# Curvatura dello Spazio-Tempo



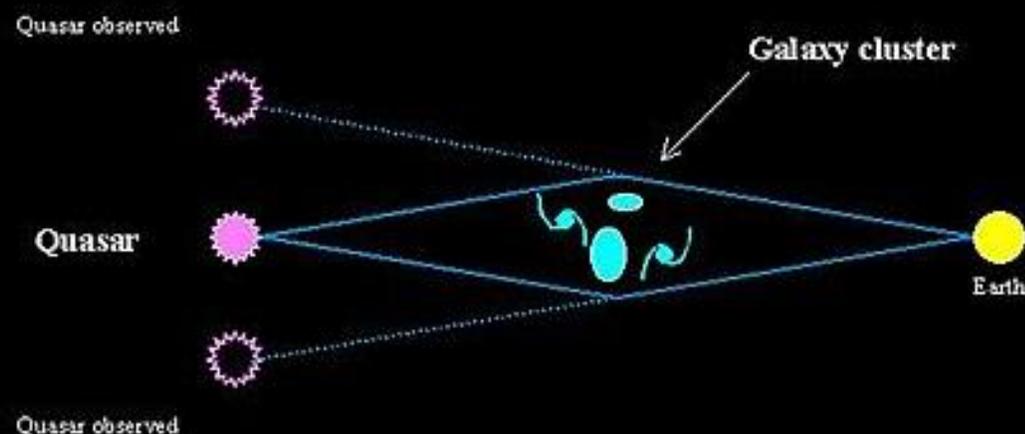
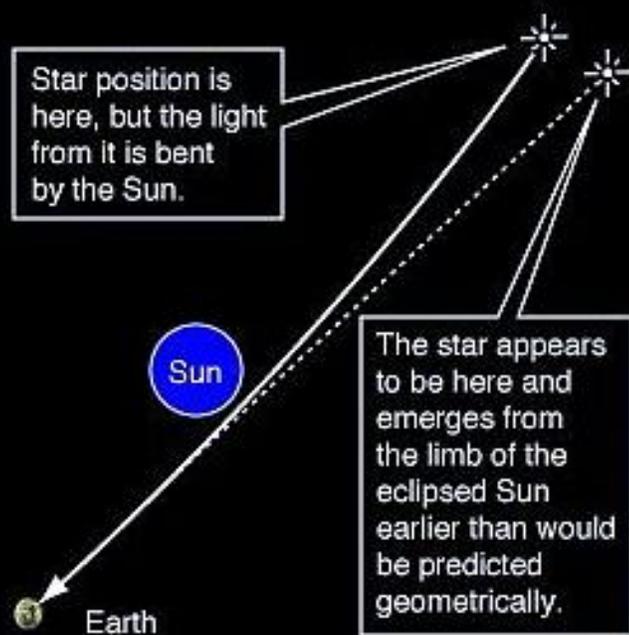
# Grandi successi della Teoria

## 1. Avanzamento del perielio Mercurio



# Grandi successi della Teoria

## 2. Deflessione dei raggi luminosi



# “Ma anche” .... Una Teoria per l’Universo

La **Teoria della Relatività Generale** rendeva possibile la formulazione di un:

## **Modello Cosmologico per il nostro Universo.**

Ai tempi di Einstein si credeva che l’Universo fosse **statico**.

Però: le soluzioni che Einstein trovava **non avevano questa proprietà**.

Egli si accorse che era possibile **modificare le equazioni introducendo un termine** che, pur **non entrando in conflitto con i principi generali della teoria** e pur **non cambiando le predizioni di quest’ultima sulle distanze planetarie**, permetteva di ottenere un **modello statico per l’Universo**. Questo termine aggiuntivo, che prese il nome di “**Costante Cosmologica**”, fornisce un **contributo addizionale all’energia dell’universo**, un contributo che non proviene **né dalla materia né dalla radiazione**.

# Equazioni di Einstein modificate

Ed eccole le Equazioni modificate dallo stesso Einstein, aggiungendo il **Termine Cosmologico**, per poter ottenere un **Universo Statico**

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Cerchiato in **rosso** il **Termine Cosmologico**. Questo termine porta al nostro Universo un **contributo di energia** che non proviene **né dalla radiazione né dalla materia** in esso presenti; un contributo di energia strano, inatteso, «**oscuro**». Un contributo di

**«Energia Oscura».**

# Facciamo un passettino indietro

Fisici ed astronomi tentavano di costruire una cosmologia **secondo la fisica e le idee di Newton**, secondo il quale l'Universo ha una **distribuzione infinita e omogenea** di materia. L'astronomo Hugo Seeliger, nel 1894, mostra che, **se la distribuzione di materia è infinita la forza gravitazionale che ne risulta è indeterminata !!!!**

Seeliger propone 2 possibili soluzioni:

- 1) L'Universo **non contiene una distribuzione infinita di materia**. Ma questa è una soluzione insoddisfacente : **una distribuzione finita di stelle in uno spazio infinito tende a disperdersi a causa dei moti casuali delle stelle !**
- 2) Su **scale cosmologiche**, la **legge di gravitazione universale di Newton** potrebbe essere **modificata**. Seeliger mostra che una **piccola deviazione dal comportamento newtoniano** della gravità rende possibile l'esistenza di una **distribuzione infinita di materia senza cadere nelle contraddizioni di cui abbiamo parlato prima**.

## e Einstein ..... ???

Einstein conosce questi lavori di Seeliger e conosce anche il punto di vista di Mach.

Secondo Mach : **il moto di un qualsiasi corpo è dovuto all'azione di tutto il resto della materia nell'Universo.** In particolare, l'inerzia di un corpo (**massa inerziale**) doveva provenire dalla interazione del corpo col resto dell'Universo.

Einstein chiama questo : **Principio di Mach**

Einstein pensava che questo principio fosse **automaticamente incorporato nelle Equazioni della Relatività Generale.**

**Ma allora.....**

anche la teoria dell'intero universo **deve obbedire al Principio di Mach.**

In particolare :

**Non devono esistere** soluzioni delle equazioni di Einstein che **descrivono Universi vuoti**, cioè privi di materia e di energia.

Inoltre : visto che l'inerzia dei corpi doveva essere dovuta alla utua interazione tra le Masse dei corpi, **l'Universo doveva contenere una quantità finita di materia** e avere un **volume finito** a meno di non volere ottenere risultati assurdi.

Nell'articolo del 1917

**“Considerazioni Cosmologiche sulla Teoria della Relatività Generale”**

Einstein mostra che :

$$\left[ G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \right]$$

- Il **Termine Cosmologico** è in **accordo col Principio di Mach** ;
- Le equazioni, con l'aggiunta della Costante Cosmologica, consentono di ottenere un **modello di Universo** :

**Statico ; Finito ; Libero dalle contraddizioni dei modelli newtoniani.**

**Tutto bene allora per il Modello di Einstein ?**

**Il Modello è In Buona Salute ?**

... Eh ... insomma ... **Poco dopo** che Einstein aveva pubblicato il suo lavoro ....

**De Sitter** dimostra che se le Equazioni di Einstein vengono modificate con

l'aggiunta di  $\Lambda g_{\mu\nu}$   $\left[ G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \right]$

Queste equazioni **ammettono soluzioni anche in assenza di materia !**

**Ahi !!! Duro colpo !!! Questo sembra sconfiggere il Principio di Mach !!!**

Einstein pensava che la **curvatura dello Spazio-Tempo** fosse legata alla **presenza di materia**, invece de Sitter mostrava che ..... **anche in assenza di materia** si aveva una curvatura dello Spazio-Tempo ....

# .....Ma c'è di più

**Hermann Weil** dimostra che :

Nell'Universo di **de Sitter** si doveva osservare un **Effetto Doppler** per gli oggetti distanti, cioè uno **spostamento verso il rosso** della luce emessa da oggetti distanti.

Attenzione:

l'**Universo di de Sitter** può essere una **buona approssimazione** al nostro **Universo reale** se la **densità di materia ed energia** è **piccola** rispetto alla **costante cosmologica**.

**Slipher** (astronomo) tra il 1912 e il 1917 **Osserva** :  
**Nebulose lontane** mostrano **spostamento verso il rosso** della **luce emessa !!**

**Weil** nota : lo “**spostamento verso il rosso**” osservato da Slipher **si spiega bene** con il **Modello di de Sitter !!**

**Einstein** 1923 :

“**Se l’Universo non è statico, al diavolo il termine cosmologico**”.

.....si trovano nuove soluzioni delle equazioni di Einstein che descrivono Modelli di **Universo Non Statico**

1) Alexandr **Friedman** (1922-1924) mostra : se l'Universo contiene una **distribuzione omogenea di materia, senza costante cosmologica**, lo spazio si deve **espandere** o contrarre.

2) Georges **Lemaitre** (1927) : trova analogo risultato anche **con costante cosmologica diversa da zero**.

Inoltre : **Nel 1929** le **osservazioni di Hubble** mostrano che le **galassie si allontanano l'una dall'altra con velocità che cresce proporzionalmente alla distanza** :

$$v = H \cdot d \quad (H = \text{Costante di Hubble})$$

**Lo Spazio si Espande !!!!!!!!**

**La fine del modello statico di Einstein** : 1930, Arthur Eddington mostra che il modello di Einstein, **era statico** ma **altamente instabile** :

anche una **piccola perturbazione nella distribuzione di energia e di materia** lo faceva **precipitare verso l'espansione o la contrazione.....**

**Einstein** abbandona l'idea di Universo Statico :  
**l'Universo si espande.**

Facciamo il punto : **Siamo agli inizi degli anni 30**

**Modello di Friedmann** (ottimo candidato per descrivere l'Universo intero)

- **“la curvatura dello spazio”** dipende dalla **densità di materia ed energia** nell'Universo.
- Se la densità di energia è pari ad un certo valore, **densità critica**, allora **lo spazio è piatto**. Altrimenti, **lo spazio è curvo**.

**Misure di de Sitter** : **“contando” le galassie** osservate in regioni diverse dell'Universo, trova che la densità di materia ed energia dell'Universo è proprio quella critica.

→ **Il modello che si afferma è questo** (**Modello di Einstein-de Sitter**) :

- Universo riempito di Energia, di Materia e con Costante Cosmologica nulla ;**
- Densità di Energia e Materia pari alla densità critica ;**
- Geometria dello spazio grande scala : Euclidea (Universo piatto !)**

**È il modello che è stato considerato dai fisici per molti decenni.**

# E la Costante Cosmologica che fine fa?

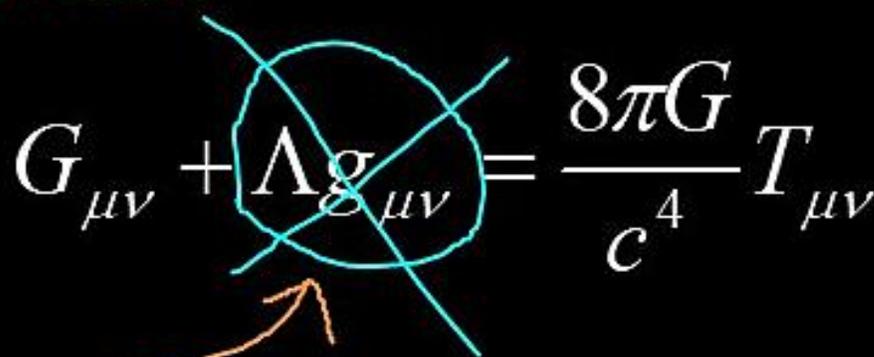
Pare che della Costante Cosmologica non ci sia più bisogno. **Einstein si pentì di averla introdotta.** Sentite che cosa scrive nel libro “**Il significato della relatività**” (1945): “**l’introduzione di un termine cosmologico** nelle equazioni della gravità, seppure possibile dal punto di vista della relatività, **è da rigettarsi sul piano della semplicità logica.** ...**Se la legge di espansione di Hubble fosse stata nota all’epoca della creazione della teoria della relatività generale, il termine cosmologico non sarebbe mai stato introdotto**”

$$G_{\mu\nu} + \cancel{\Lambda g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

A Georges Lemaitre, nel 1947, Einstein scrive: “**Da quando ho introdotto questo termine ho sempre avuto la coscienza sporca .... Sono incapace di credere che una cosa talmente brutta si realizzi in natura.**”

Georges Gamow racconta che Einstein un giorno gli disse che avere introdotto la Costante Cosmologica nelle meravigliose equazioni della relatività generale era stato **il più grande abbaglio della sua vita !**

Era dunque la fine del **Termine Cosmologico** ?



The image shows the Einstein field equations:  $G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$ . The term  $\Lambda g_{\mu\nu}$  is circled in red and has a large red 'X' drawn over it. An orange arrow points from the underlined text 'Termine Cosmologico' to the circled term.

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Storia dell'Universo dalla Equazione :

$$\underbrace{G_{\mu\nu}}_{\text{Geometria}} + \cancel{\Lambda g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot \underbrace{T_{\mu\nu}}_{\text{Materia-Energia}}$$



$$R(t) = R_{\text{oggi}} \cdot \sqrt{\frac{t}{t_{\text{oggi}}}}$$

$R(t)$  = “**Raggio dell'Universo**” all'istante  $t$  .

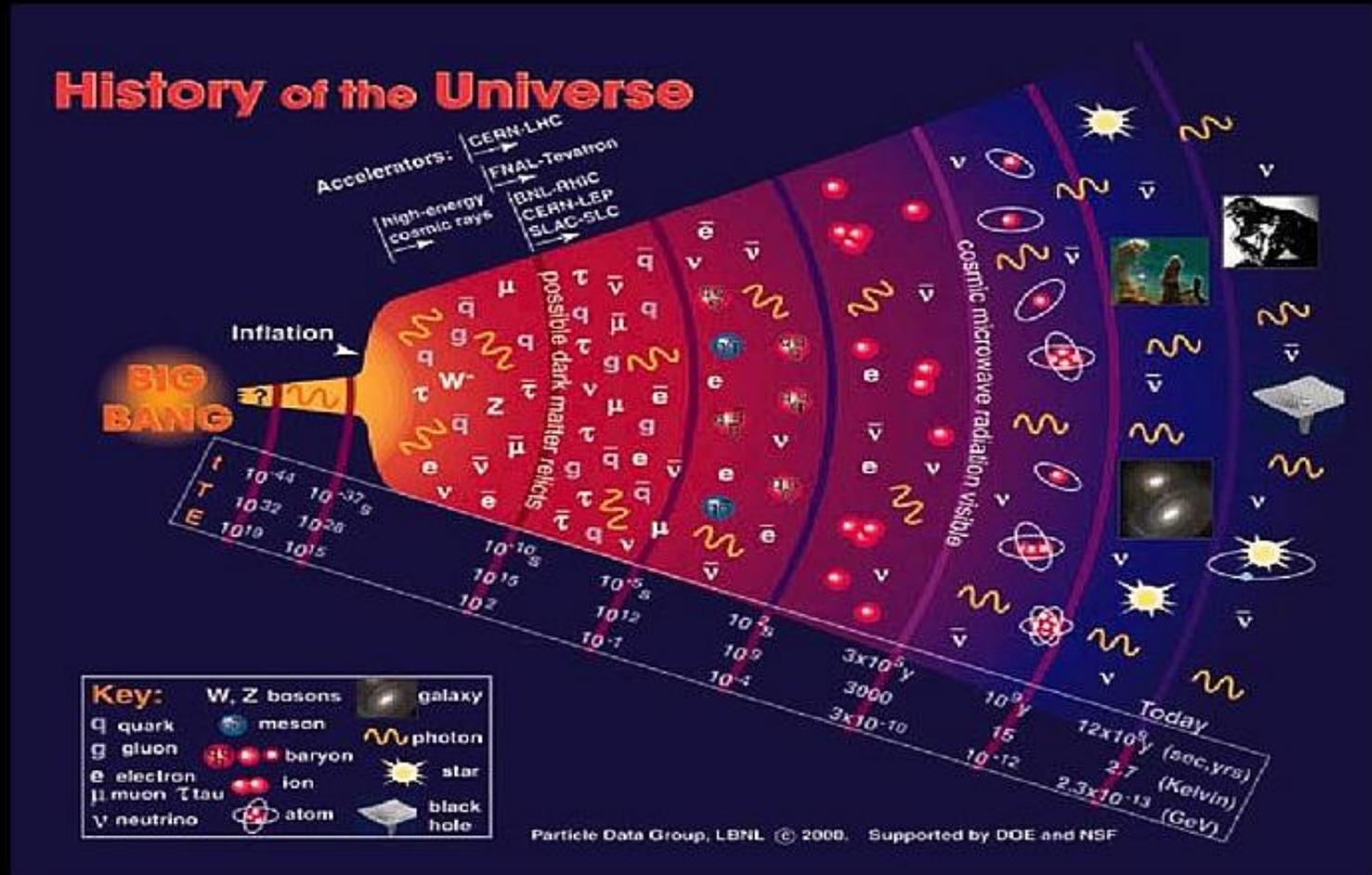
Che cosa succede a  $t=0$  ??

Risposta :  **$R(t=0) = 0$**  : **Big – Bang !**

# Storia dell'Universo

Sempre con

$$G_{\mu\nu} + \cancel{\Lambda g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu}$$



# Ma la **Cosmologia Osservativa** che cosa doveva fare dagli anni 30 in avanti?

- Abbiamo imparato la **Legge di Hubble**, che ci fornisce la velocità di allontanamento tra due galassie all'aumentare della distanza ( $H = \text{costante di Hubble}$ ):

$$v = H \cdot d$$

- Nel modello di **Einstein – de Sitter**, la **densità** era esattamente pari al **valore critico** (quello per cui lo spazio è piatto):

$$\rho = \rho_{crit} = \dots$$

**Il programma era chiaro:**

**si dovevano migliorare** la **misura della costante di Hubble ( $H$ )** e la **misura della densità media dell'universo ( $\rho$ )**. Così si sarebbe **confermato oppure sconfessato**:

**il Modello di Einstein – de Sitter.**

...e i cosmologi osservativi questo fanno...

...e confermano (fino all'altro ieri) il **modello di Einstein – de Sitter**

I teorici, dal canto loro, aggiungono un altro importante tassello ..... **INFLAZIONE** .....

(Alan Guth, Andrei Linde, Paul Steinhardt)

Perché l'Universo divenisse "omogeneo su larga scala" e "piatto", che è quel che osserviamo, occorre condizioni iniziali, cioè condizioni al momento del Big Bang, "molto speciali". L'inflazione fornisce un meccanismo dinamico che porta l'universo a queste condizioni in maniera assolutamente naturale.

# D'altra parte, visto che

l'equazione che descrive l'Universo è

$$G_{\mu\nu} + \cancel{\Lambda g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu}$$

i fisici si arrovellavano per capire quale fosse la ragione profonda per cui **la Costante Cosmologica, questa strana, Oscura forma di Energia** dovesse essere nulla:

$$\Lambda = 0$$

**Una qualche simmetria della Natura ???**

Ma... come spesso accade... il diavolo ci mette la coda ...

...e “il diavolo si traveste da

## Meccanica Quantistica

A causa della **natura intrinsecamente quantistica** delle leggi che regolano l'Universo, **anche in assenza di materia, lo spazio non è “vuoto”**. Al contrario, esso risulta riempito da una sorta di energia residua detta **“Energia di Punto Zero”**.

Nel 1967, Zeldovich osserva che questa energia dovrebbe dare il suo contributo al **Termine Cosmologico**  $\Lambda$ .

**Che cosa stiamo dicendo? Contributo a  $\Lambda$ ?**

**Ma quanto grande è questo contributo?**

$$\left[ G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \right]$$

**Orrore ! 120 ordini di grandezza più grande del limite sperimentale che ci dice che  $\Lambda$  è compatibile con zero !!!**

... i fisici comunque pensano che...

ci deve essere un meccanismo, una simmetria della Natura, ..... qualcosa insomma che ci permetterà di capire perché questo contributo enorme al Termine Cosmologico in realtà non dà contributo per nulla .... E lavorano tantissimo su questo terreno, fiduciosi che la soluzione si troverà ....

1998 (Perlmutter, Rees ) : **dall'osservazione della luminosità** di certe esplosioni stellari (**supernovae**) in galassie distanti, gli astrofisici hanno potuto stabilire che: **l'espansione dell'Universo è accelerata ! .....**

Così abbiamo la **prova provata** che :

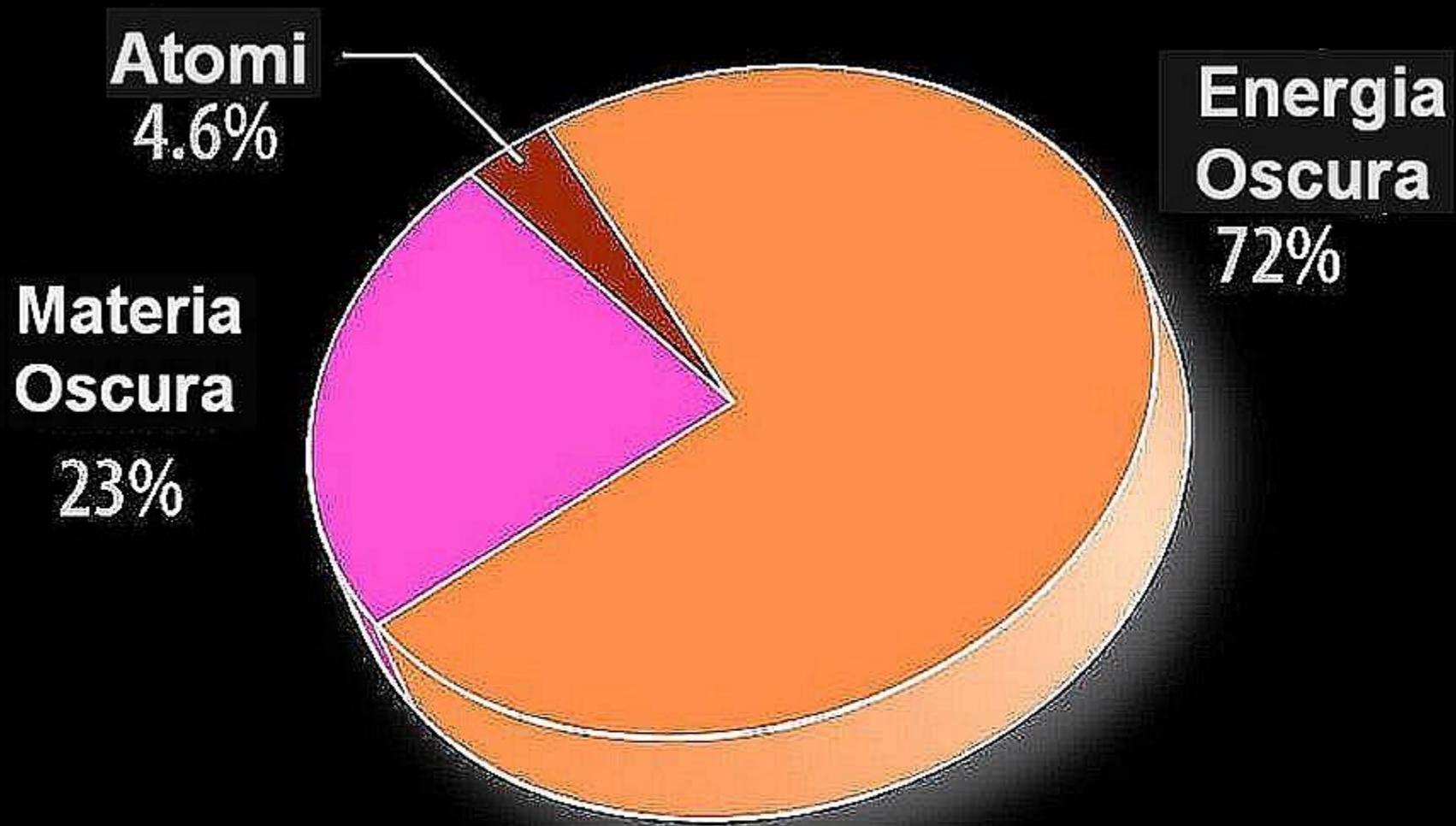
$$G_{\mu\nu} + \cancel{\Lambda g_{\mu\nu}} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad \rightarrow \quad G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Agente responsabile di tale accelerazione **un termine del tipo**  $\Lambda$  ,  
il nostro buon vecchio **Termine Cosmologico**, ovvero :

# Energia Oscura

Questi esperimenti **misurano**  $\Lambda$  , ci dicono quanto vale ! ...  
Ora la misura ci dice che  $\Lambda$  è piccolissima se confrontata  
col **valore pazzesco dell'energia del vuoto** che, secondo  
Zeldovich e non solo, dovrebbe appunto dare contributo a  $\Lambda$  .

Se invece confrontiamo il **valore misurato di Energia Oscura**  
col budget di Materia ed Energia dell'Universo, scopriamo che  
**L'Energia Oscura costituisce una frazione molto grande**  
**dell'intero budget energetico dell'Universo :**



Oggi

# L'Energia Oscura

(ovvero il **Termine Cosmologico**  $\Lambda$  )

torna a **pieno titolo** nella nostra descrizione dell'Universo e **la fa da padrona !**

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu}$$

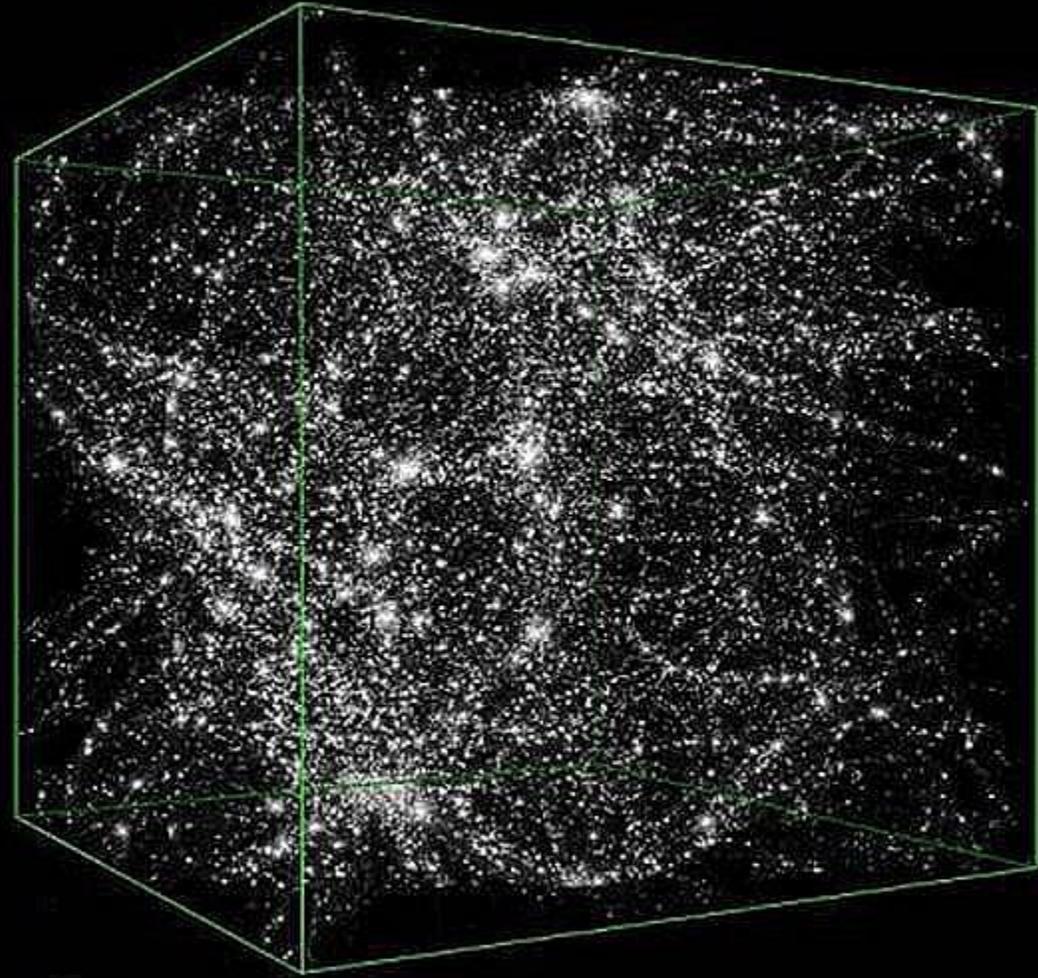
Questo è il termine dominante !

# Il Ritorno dell'Energia Oscura

- Ma che cosa è questa **Energia Oscura** ?
- Di che cosa è fatta ?
- Risposta : **non lo sa nessuno...**

**Il Mistero dell'Energia Oscura**

# Struttura dell'Universo



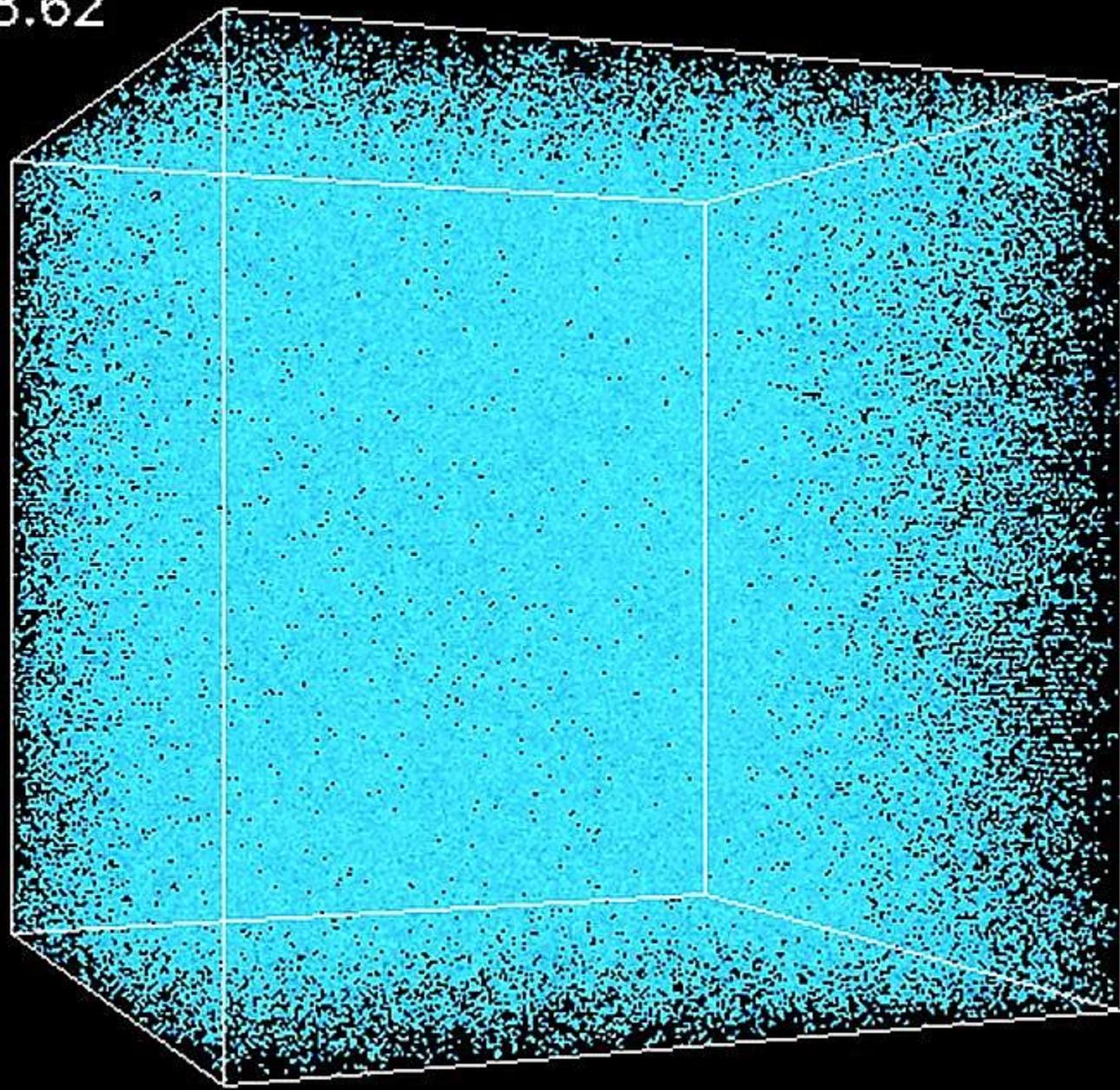


## Energia Oscura

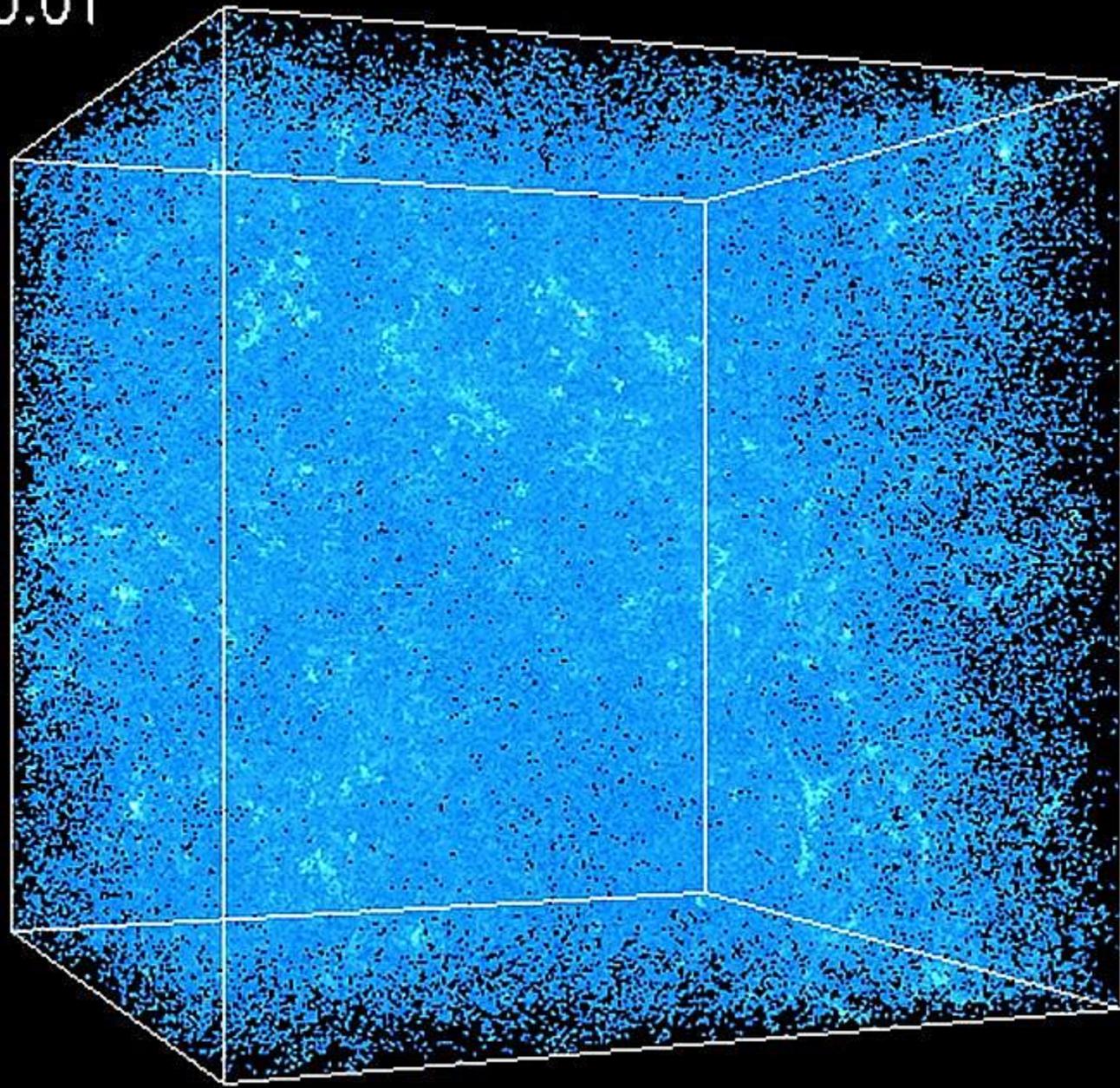
- > E' diffusa in tutto l'Universo
- > Ha bassissima densità:  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>
- > Tende a crescere con il tempo
- > Si oppone alla gravità
- > Destruce l'Universo
- > Conduce alla morte l'Universo

Ecco i suoi effetti...

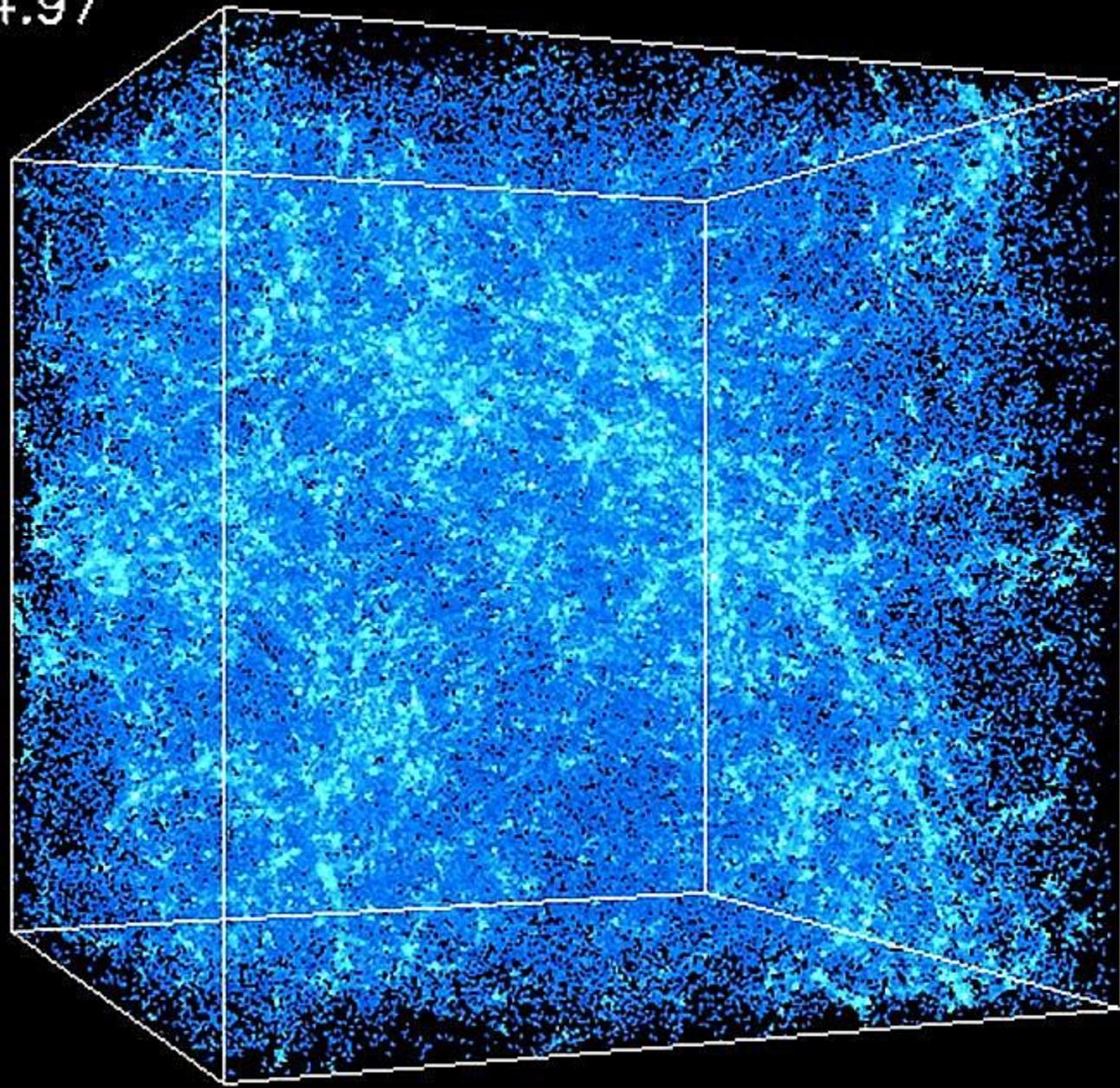
$Z=28.62$



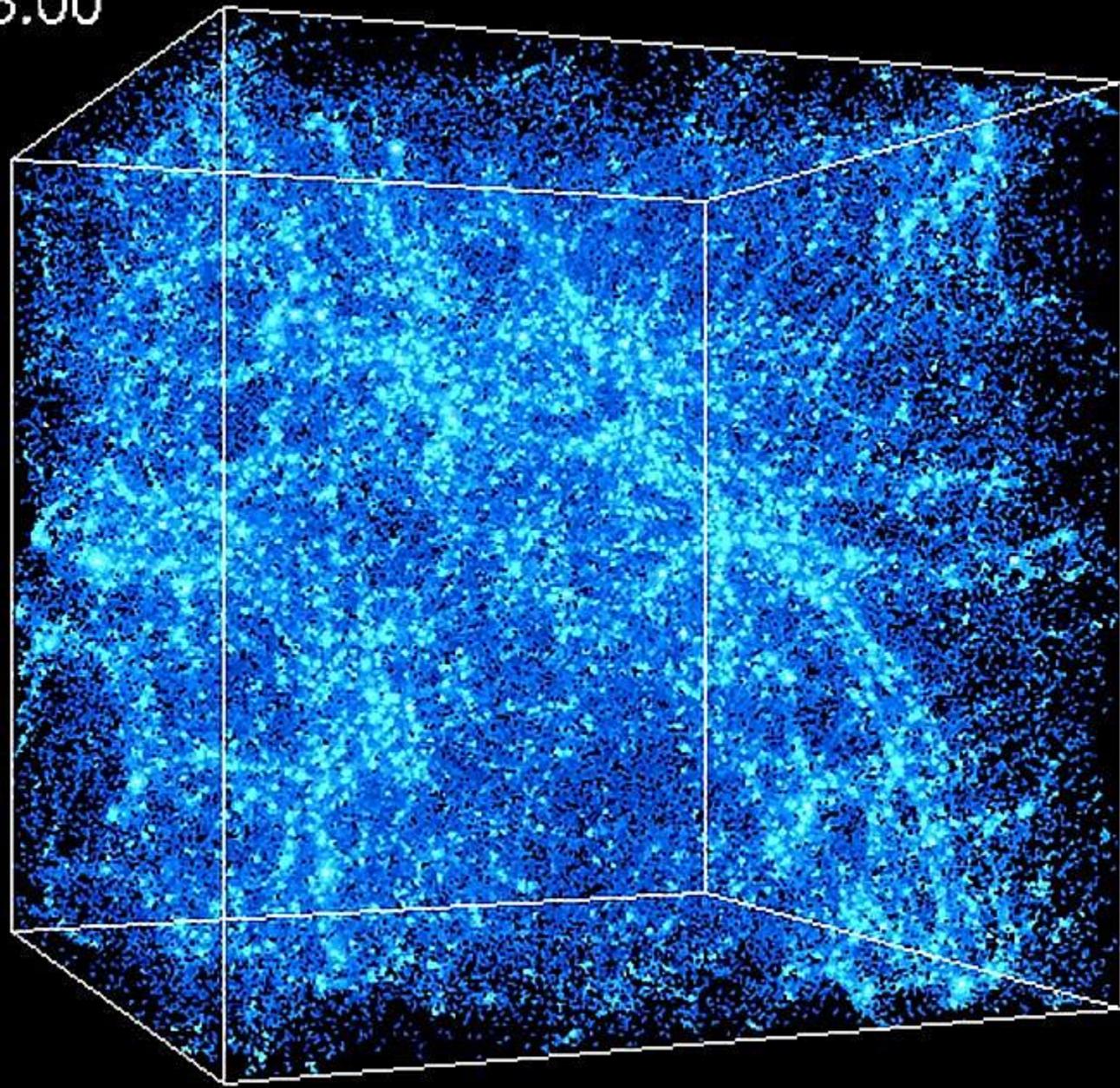
$Z=10.01$



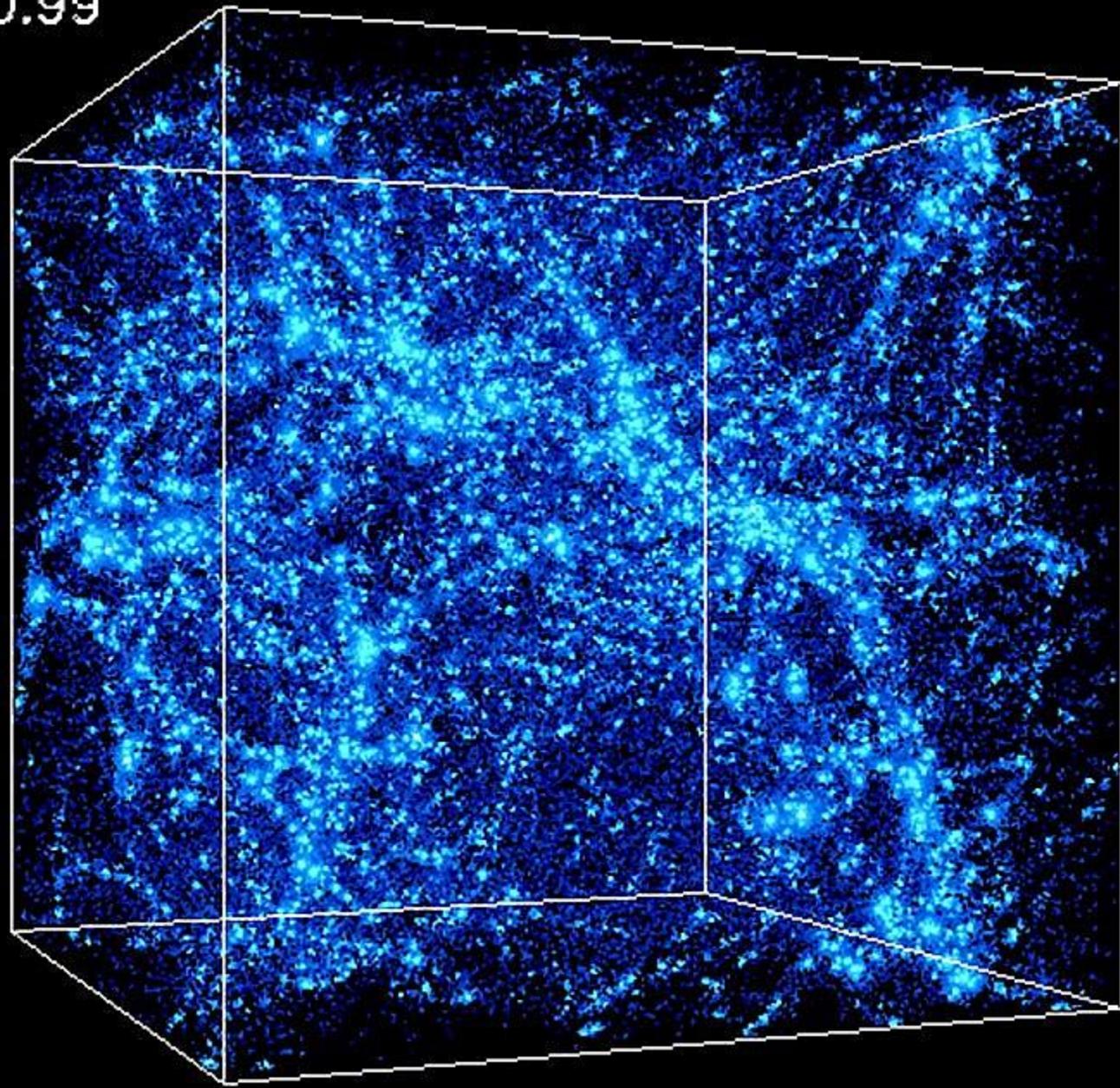
$Z = 4.97$



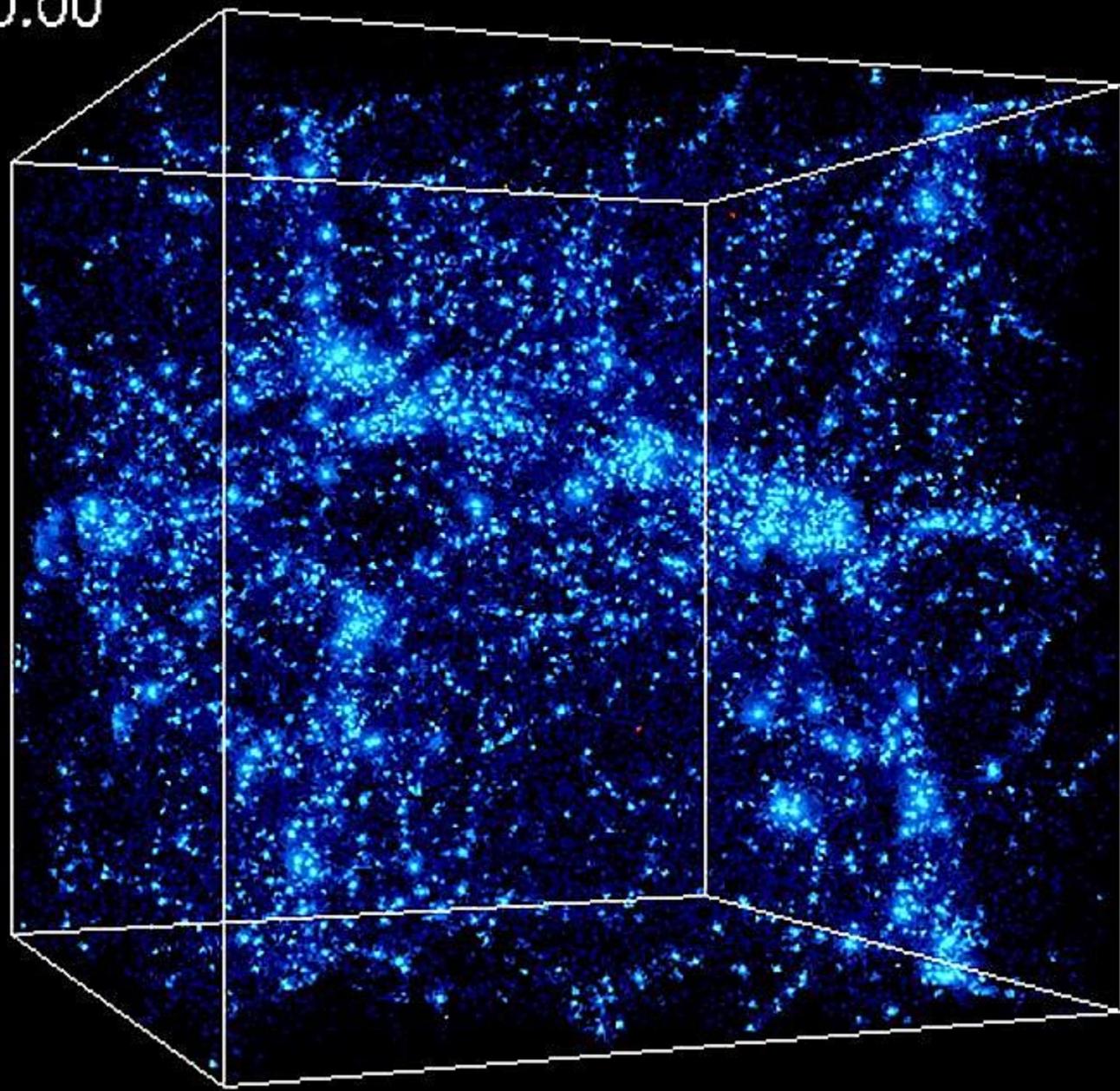
$Z = 3.00$



$Z = 0.99$



$Z = 0.00$



# Una storia interessante...

Due fisici, C.Beck e M. Mackey, nel **2004** sostengono **niente poco di meno che** :  
l'Energia Oscura dell'Universo (intesa come energia di punto zero) è stata già osservata  
in esperimenti di laboratorio attraverso la misura di un particolare tipo di corrente  
elettrica, detta "**corrente di rumore**", in **dispositivi superconduttori**.

Elaborano teorie a sostegno della loro proposta e propongono un esperimento  
predicendone il risultato.

Nel **2006**, Paul Warburton, del "**London Centre for Nanotechnologies**" , riceve  
finanziamenti per la costruzione dei dispositivi necessari per la realizzazione  
dell'esperimento.

Se fosse vero quanto affermato Beck e Mackey, l'uomo si troverebbe ad aver fatto un  
enorme passo in avanti nel cammino della conoscenza. Non sorprende pertanto che  
questa teoria abbia attratto l'interesse dei mass-media di tutto il mondo.

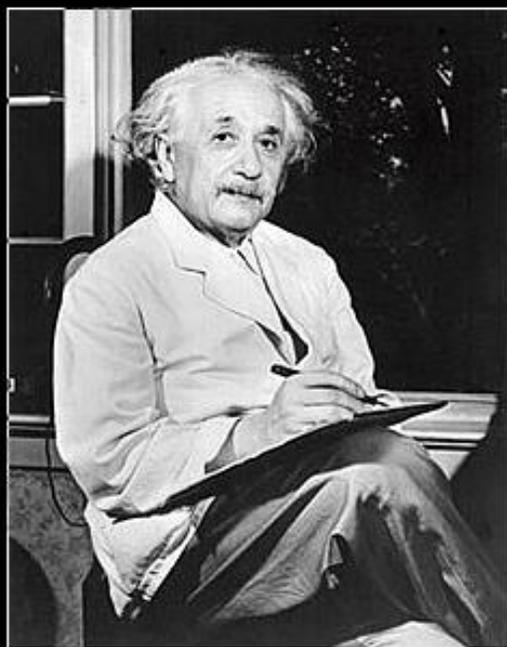
All'interno della comunità scientifica, d'altra parte, la proposta di Beck e Mackey viene anche criticata. Tuttavia, nel ping-pong delle critiche e delle repliche tra oppositori e proponenti, **la questione rimane aperta**.

In un famosissimo articolo sul problema dell'Energia Oscura, i cosmologi Copeland, Sami e Tsujikawa concludono così il paragrafo dedicato alla proposta di Beck e Mackey:

**“il tempo dirà chi ha ragione”**

# Una questione interessante...

Einstein, rispondendo ad una lettera in cui gli si chiedeva:



*“Perché la scienza moderna ... la tradizione di Galileo,..., Newton ... si sviluppò lungo le coste del Mediterraneo e dell’Atlantico, e non in Cina o in qualche altra parte dell’Asia?”*

Caro signore, lo sviluppo della scienza occidentale è basato su **due grandi conquiste**, l’invenzione del **sistema logico formale** (nella geometria euclidea) da parte dei filosofi greci, e la scoperta della possibilità di trovare **relazioni causali tramite esperimenti sistematici (Rinascimento)**. Secondo me non si deve restare stupiti che i saggi cinesi non abbiano raggiunto questi risultati. **Il fatto stupefacente è che queste scoperte siano comunque state fatte.**

Sinceramente Vostro,

Albert Einstein