

# **COSMOLOGIA METAFISICA: MODELLI DI COSMOLOGIA SCIENTIFICA**

**Corso 50656**

**Gianfranco Basti**

# INTRODUZIONE

- Il corso intende offrire uno **sguardo storico-teoretico** delle principali teorie cosmologiche, cominciando dalle teorie dell'antichità, su basi filosofiche, fino alle teorie moderne su base matematico-sperimentale, a cominciare dalla formulazione della teoria della relatività generale di Albert Einstein.
- In questa seconda parte, il corso offrirà una sintesi dei principali modelli cosmologici basati sulla meccanica relativistica, fino alle più recenti, iniziali prove sperimentali che l'osservazione astrofisica è in grado oggi di offrire, per validarne alcuni, maggiormente di altri.
- Il corso è consigliato a **tutti gli studenti delle facoltà di filosofia e teologia**, interessati allo studio delle origini dell'universo.



# SOMMARIO

Contenuti delle lezioni

3

# SOMMARIO

## ○ PARTE PRIMA

1. La nostra immagine dell'universo
2. Spazio e tempo
3. L'universo in espansione
4. La gravità quantistica
5. Le particelle elementari e le forze fondamentali

## ○ PARTE SECONDA

6. L'unificazione della fisica e teoria delle stringhe
7. Il nuovo modello ciclico di Steinhardt-Turok
8. Conclusione: dal “come” al “perché”

# BIBLIOGRAFIA

## ○ TESTI FONDAMENTALI:

- G.BASTI, *Filosofia della Natura e della Scienza, Vol.: I, I Fondamenti*, LUP, Roma, 2002 (ristampa 2010), capp. II e VI
- S. HAWKING, *La grande storia del tempo*, BUR, Rizzoli, Milano, 2006 (Cfr. ID., *Dal Big Bang ai buchi neri. Breve storia del tempo*, BUR Rizzoli, Milano, 1983).

## ○ ALTRI TESTI:

- G. F. ELLIS & W. R. STOEGER, A Note on Infinities in Eternal Inflation, *General Relativity and Gravitation*, 41(2009), 1475-1484
- P.J.STEINHARDT & N. TUROK, *Endless universe. Beyond the big-bang, rewriting the cosmic history*, Broadway, New York, 2008.
- J. BARROW, *Da zero a infinito. La grande storia del nulla*, Mondadori, Milano, 2005;
- ID., *L'infinito. Breve guida ai confine dello spazio e del tempo*, Mondadori, Milano, 2005;
- J. BARROW, F. TIPLER, *Il principio antropico*, Adelphi, Milano, 2002;
- S. HAWKING, *La teoria del tutto. Origine e destino dell'universo*, Rizzoli, Milano, 2003;
- S. HAWKING & R. PENROSE, *La natura dello spazio e del tempo*, Rizzoli, Milano, 2002;
- P. DAVIES, *Il cosmo intelligente*, Mondadori, Milano, 1999;
- S. WEINBERG, *I primi tre minuti*, Mondadori, Milano 1986<sup>3</sup>;
- F. CAPRA, *Il tao della fisica*, Adelphi, Milano, 1989<sup>15</sup>;
- R. FEYNMAN, *QED. La strana teoria della luce e della materia*, Adelphi, Milano, 1989<sup>7</sup>.

# 1. LA NOSTRA IMMAGINE DELL'UNIVERSO

Agli inizi della cosmologia scientifica moderna

6

# LA NOSTRA IMMAGINE DELL'UNIVERSO

- Cos'è una teoria scientifica
  - Metodo ipotetico-deduttivo
  - Limitato carattere sperimentale (solo osservativo) delle teorie cosmologiche
- Aristotele e la sfericità della terra
- Aristotele e la visione geocentrica dell'universo
- Tolomeo e la teoria matematico-osservativa della visione geocentrica
- Copernico e la teoria eliocentrica
  - Correzione di Keplero (orbite ellittiche)
- La Questione Galileiana
- Newton e i *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*

## CONTINUA...

- La scoperta della forza gravitazionale e i problemi legati alla natura finita o infinita dell'universo
- → Impossibilita' di un modello statico infinito dell'universo con gravitazione sempre attrattiva
- Invece di supporre universo dinamico, supposizione del carattere repulsivo della gravitazione su grandi distanze → idea della *costante cosmologica*.
- Soluzione: carattere espansivo dell'universo



## 2. SPAZIO E TEMPO

Da Aristotele, a Newton, a Einstein

9

## SPAZIO E TEMPO

- Teoria aristotelica del moto = **spiegazione causale del moto.**
- Dimostrazione di Galilei: **legge della caduta dei gravi** → forza induce **variazione velocità**
- Newton: **principio d'inerzia** → **3 leggi della dinamica** → carattere **rappresentazionale /predittivo** delle spiegazioni scientifiche.
  - **Legge di gravità**
  - Inesistenza di luoghi privilegiati → mancanza di **sistemi di riferimento assoluti**
  - Non di meno credenza in **spazio-tempo assoluti**
- Scoperta **velocità finita** della luce

## CONTINUA...

- Teoria maxwelliana della luce → velocità luce costante indipendente velocità sorgente
- Esperimento di Michelson-Morley → dimostrazione del carattere **finito e costante** della velocità della luce.
- 1905: Einstein problema dell'esperimento risolvibile se si è disposti ad ammettere l'esistenza di un **tempo assoluto**.
- **Teoria della relatività speciale:**
  - **Postulato fondamentale:** equivalenza leggi del moto per tutti osservatori in movimento + carattere-limite velocità luce
  - →  $E=mc^2$  → spiegazione **eventi sub-atomici**
  - Fine dell'idea di **simultaneità assoluta** degli eventi\*\*\*

## CONTINUA...

- Nozione di **spazio-tempo quadridimensionale**
- Velocita' della luce **finita, costante, max**
- Nozione di **cono di luce** come orizzonte degli eventi causalmente connessi nel pass e nel fut con un evento dato.
- Problema della **compatibilita'** con la teoria della gravitazione universale →
- **Teoria della relativita' generale**
  - Spiegazione gravita' come **curvatura dello spazio tridimensionale** → traiettorie **rettilinee** spazio quadridimensionale  $\equiv$  **curvilinee** spazio tridimensionale.
  - Teoria newtoniana del moto: **fine posizione assoluta**; teoria einsteiniana del moto: **fine del tempo assoluto**.
  - Ipotesi di Hawking-Penrose → universo della relativita' generale deve avere un **inizio** e una **fine**.

### 3. L'UNIVERSO IN ESPANSIONE

La legge di Hubble sull'espansione delle galassie

13

## UNIVERSO IN ESPANSIONE

- L'effetto di **parallasse** (corpi piu' vicini si muovono piu' velocemente dei lontani).
- Idea del sole che ruota lentamente intorno al centro della galassia → **forma discoidale** via lattea (Wright e Herschel).
- Scoperta di **Edwin Hubble** 1924 della presenza di altre galassie **in allontanamento reciproco** (diminuzione progressiva della frequenza di emissione luminosa → spostamento progressivo verso il **rosso**).
  - Velocita' di recessione **proporzionale alla distanza** → universo **in espansione**.

# HUBBLE E IL SUO TELESCOPIO



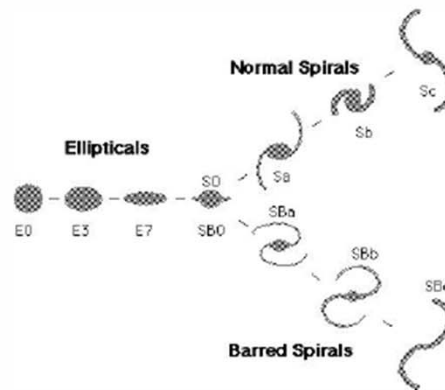
**Edwin P. Hubble**

**(1889-1953)**

**Mt. Wilson  
Observatory  
Pasadena, CA**

# L'ALLONTANAMENTO DELLE GALASSIE

## Galassie



La sequenza di Hubble



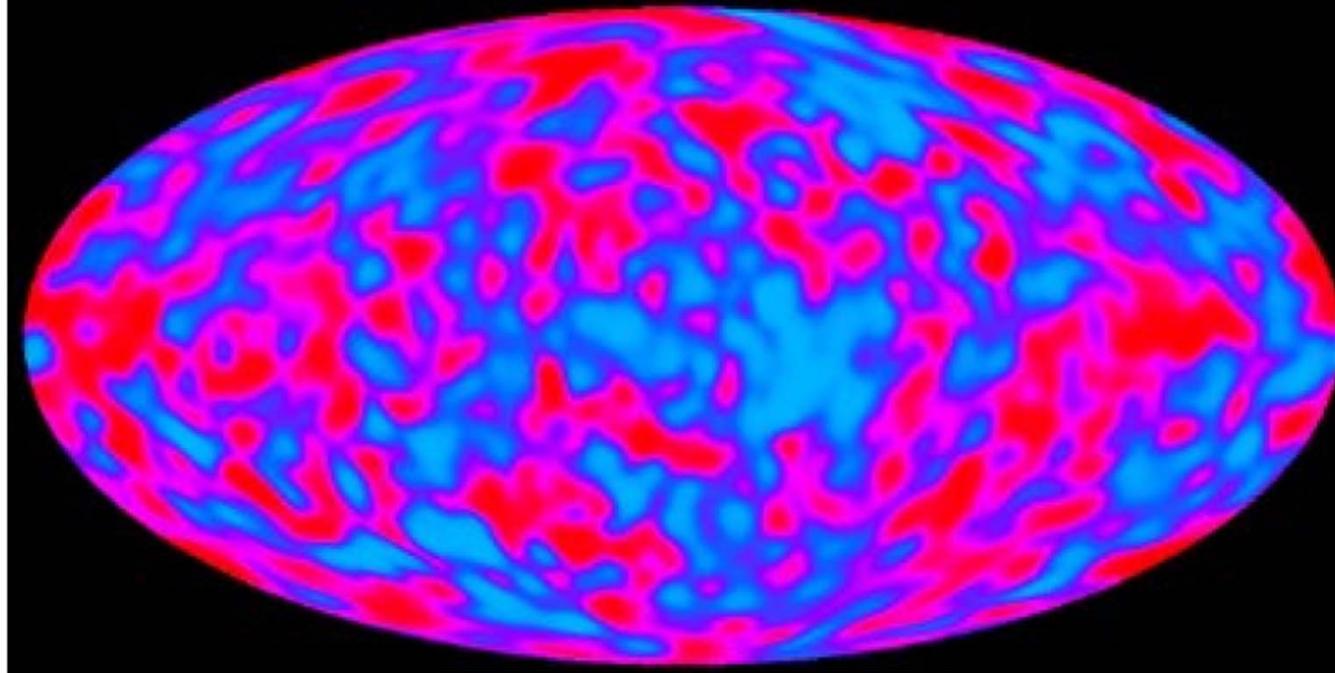
# MODELLI DI ESPANSIONE DELL'UNIVERSO

- L'espansione dell'universo poteva essere calcolata dai tempi di Newton (per controbilanciare effetto gravitazione) ma pregiudizio **staticita' universo** → ipotesi **costante cosmologica di Einstein**.
- **Fridman** al contrario predisse **universo in espansione** e il carattere **isotropo** dell'espansione.
  - **Prova** dell'ipotesi di Fridman mediante la scoperta della **radiazione cosmica di fondo** (A. Penzias e R. Wilson) e della sua **uniformita'**.
  - → **Modello inflazionario**: l'espansione dell'universo alle sue origini e' stata molto veloce → giustificare la sua uniformita' isotropa
  - → Scoperta sperimentale di alcune fluttuazioni di densità nella radiazione → ipotesi di fluttuazioni nella densità uniforme dell'universo inflazionario → **formazione delle galassie**.

# RADIAZIONE COSMICA DI FONDO A MICROONDE

## Fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo

Nella radiazione cosmica di fondo vediamo le tracce delle fluttuazioni di densità che hanno dato origine alle strutture che osserviamo oggi.



# TEMPERATURA DELLA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO

**T = 2,725 K** temperatura della "luce" che ha viaggiato verso di noi per il 90% del tempo dal Big Bang a oggi.

Sono pochi gradi ma una sorprendente quantità di calore.

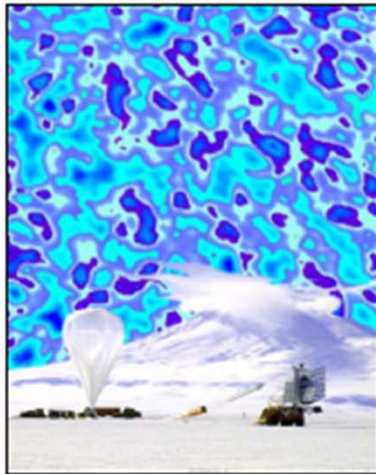
2 miliardi di fotoni per ogni atomo

# TRE MODELLI PRINCIPALI ESPANSIONE UNIVERSO

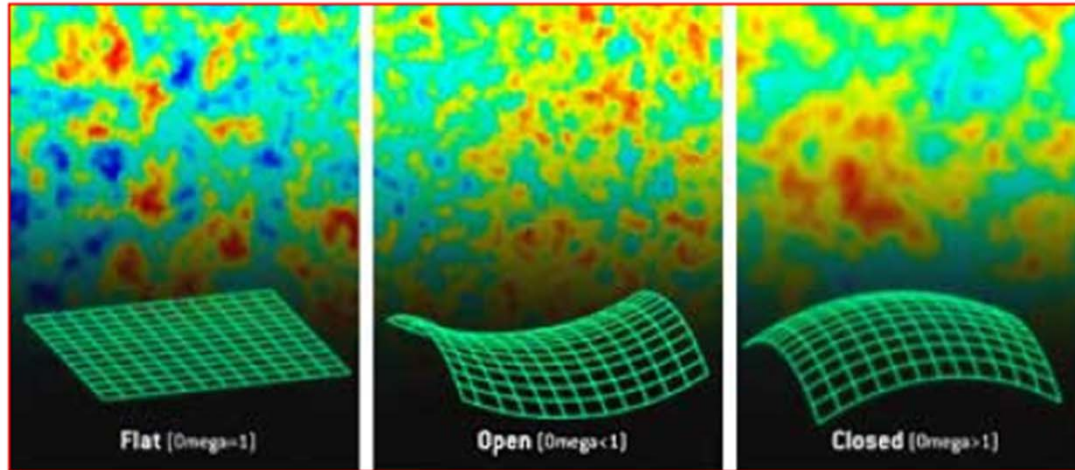
1. **Universo a curvatura positiva (chiuso):**  
prevalenza della forza gravitazionale  
sull'espansiva, anche per la presenza di  
**materia oscura.**  
Big bang → Big crunch.
2. **Universo piatto (stabile):** quasi equilibrio fra  
forza attrattiva ed espansiva
3. **Universo a curvatura negativa (aperto):**  
prevalenza della forza espansiva anche se  
rallentata.
  - Successiva scoperta dell'accelerazione  
dell'espansione → ipotesi dell'**energia oscura**

TRE GEOMETRIE POSSIBILI DELL'UNIVERSO →  
TRE MODELLI DI ESPANSIONE

# La geometria dell'universo



Boomerang



Piatto

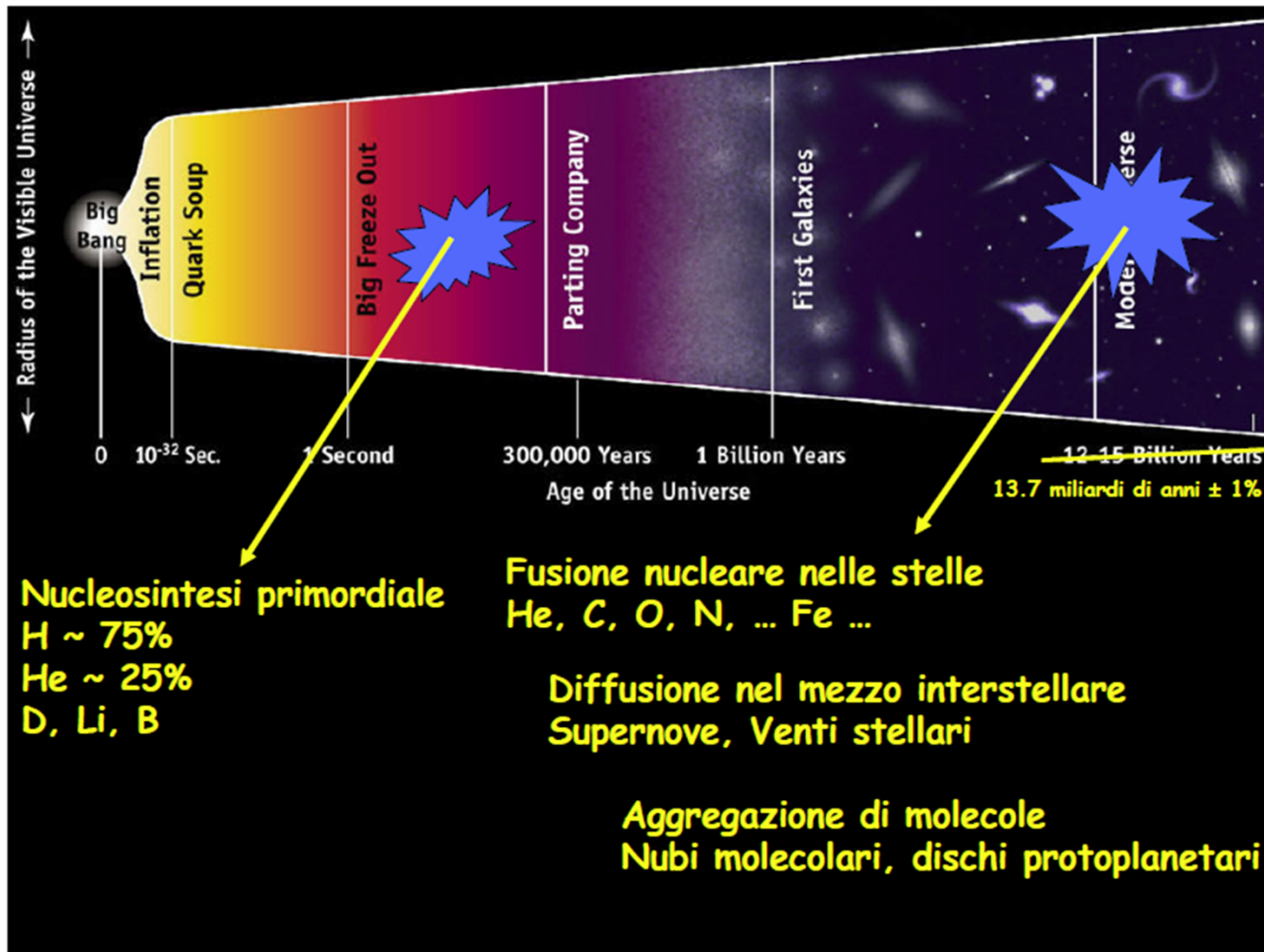
Aperto

Chiuso

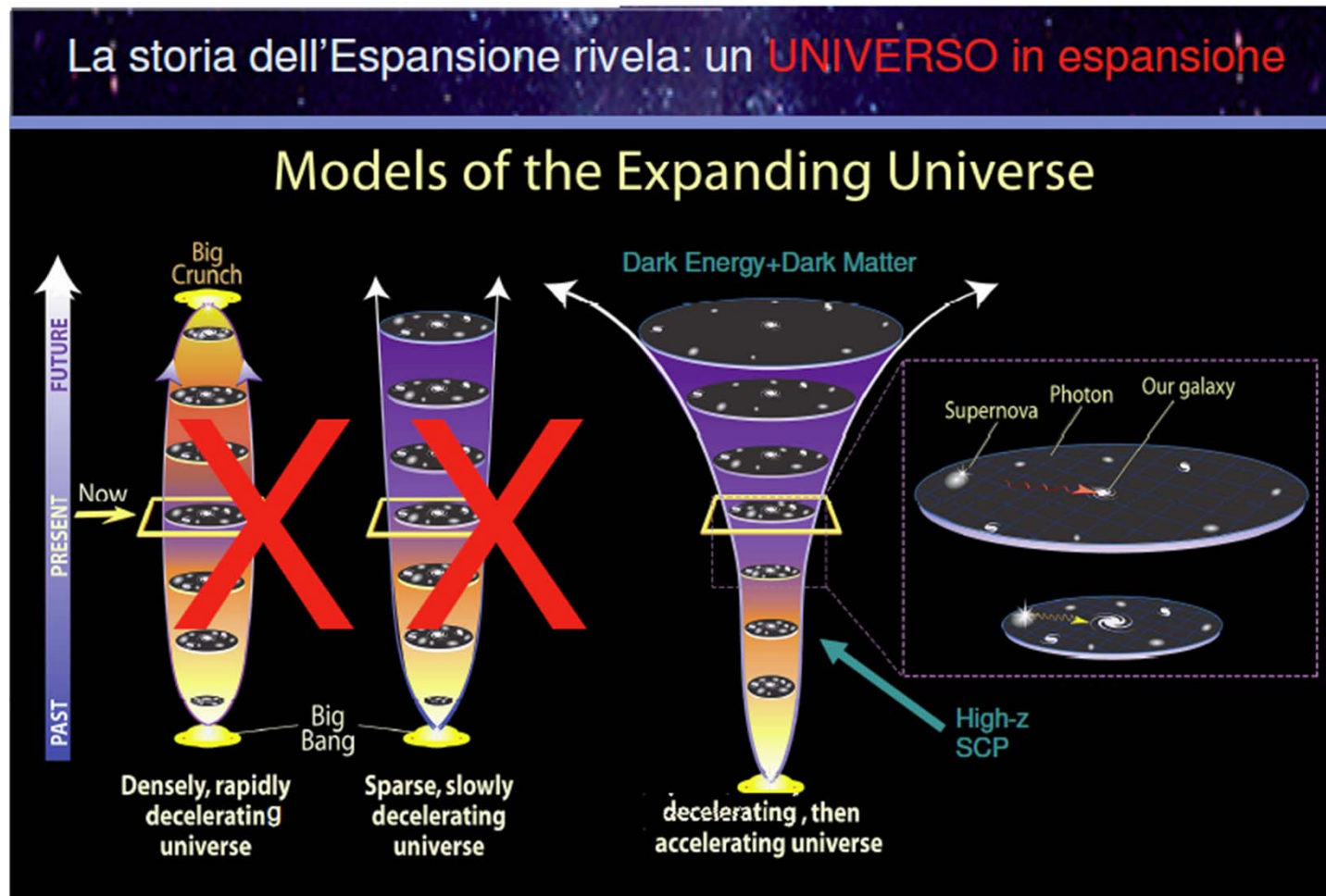
## RECENTI SCOPERTE

- Recenti scoperte hanno evidenziato due fatti inattesi:
  1. L'universo si espande con **un'accelerazione crescente** assolutamente inattesa in base ai modelli di Friedmann
  2. **Alcune increspature** nella radiazione cosmica di fondo fanno supporre che l'universo abbia una **forma piatta**
- Ipotesi della **materia oscura** per giustificare l'attrazione gravitazionale delle galassie e delle stelle nelle galassie →  $\approx 80\%$  della materia nell'universo.
- Ipotesi dell'**energia oscura** per giustificare l'accelerazione dell'espansione dell'universo

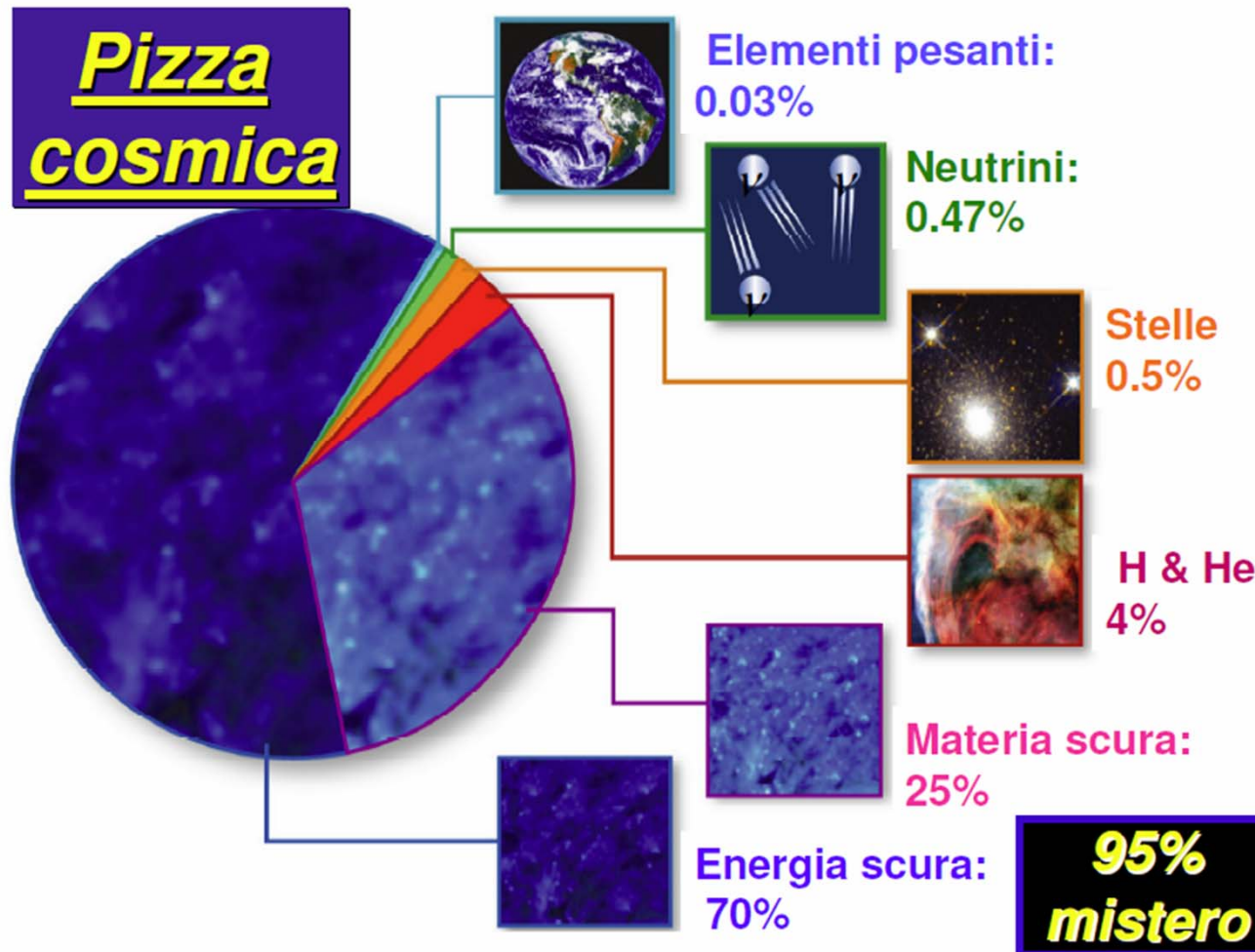
# COME ERAVAMO...



# COME SAREMO: TRE MODELLI CORRETTI DALLA SCOPERTA DELLA MATERIA + ENERGIA OSCURE



# DI COSA SIAMO FATTI...



## 4. LA GRAVITÀ QUANTISTICA

Ruolo della meccanica quantistica nella cosmologia

26

## IL PRINCIPIO D'INDETERMINAZIONE

- Determinismo laplaciano in elettrodinamica → paradosso della **radiazione di corpo nero** di Rayleigh e James: un corpo incandescente (stella) avrebbe dovuto emettere energie comprese fra 1 e 3 milioni di Hz a tutte le **infinite frequenze** → **energie infinite**.
- **Max Planck** (1900): per evitare il paradosso, principio di **quantizzazione dell'azione** (energia x tempo). Frequenze ammesse solo multipli discrete di  $h =$  **quanto d'azione**.
- **Werner Heisenberg** (1926): quantizzazione → indeterminazione fra **posizione e quantità di moto** ← impossibile “illuminare” la particella con una quantità energia piccola a piacere.

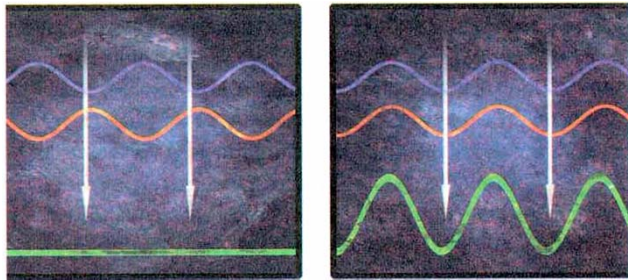
# Dualità particella-onda

- Mancanza di separazione fra le variabili (posizioni e quantità di moto) → previsione solo **probabilistica**
  - P.es., in meccanica classica, dati il valore delle due variabili ad un certo tempo  $t$  → possibile prevedere se una freccia colpirà bersaglio o no; se freccia è un atomo prevedibilità solo 90%.
- Tuttavia **perfetta e straordinaria corrispondenza** fra previsione e dato sperimentale → stabilità dei sistemi dinamici quantistici → deve cambiare solo modo di rappresentare matematicamente fenomeni quantistici
- → Riformulazione della meccanica quantistica in termini di **funzioni d'onda probabilistiche** (meccanica ondulatoria: De Broglie, Schroedinger, Dirac) e non più in termini di **funzioni-traiettoria unidimensionali** come nella meccanica classica.
- → **Principio di complementarità** particella-onda di Bohr: a ogni particella corrisponde una lunghezza d'onda  $\lambda$  → eccezionale risultato di spiegare perché soltanto alcune orbite dell'elettrone e intorno al nucleo di un atomo sono consentite = quelle che corrispondono ai **multipli interi della  $\lambda$  di e**

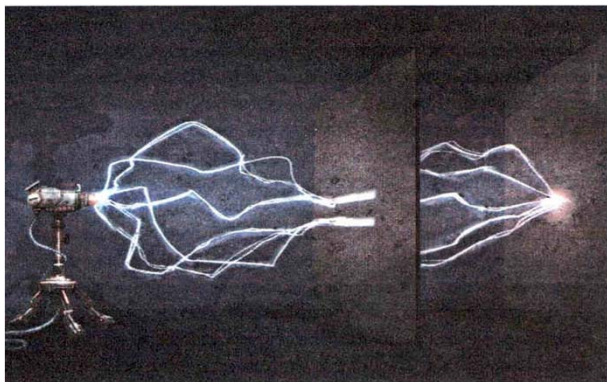
# TRAIETTORIE QUANTISTICHE COME SOMMA SULLE STORIE (*PATH INTEGRALS*)

- Ipotesi sconvolgente di Feynmann secondo la quale la traiettoria che una qualsiasi particella quantistica percorre fra due localizzazioni nello spazio data dalla **sommatoria sulle possibili infinite funzioni d'onda probabilistiche** sulle posizioni intermedie (“**somma sulle storie**” o “integrale dei percorsi”, *path integral*) fra i due punti (v. fig. 2 seguente)
- La traiettoria (funzione d'onda) più probabile data dal fenomeno dell'**interferenza** fra onde, ovvero **reciproco rafforzamento** delle funzioni d'onda più simili (“in fase”) e dalla **reciproca cancellazione** di quelle a fasi opposte → incredibili **verifiche sperimentali positive** del modello (v. fig 1 seguente)
- Ipotesi di Feynmann = **componente indispensabile della meccanica quantistica** ← è quella che fornisce la spiegazione più ovvia:
  1. Del fenomeno della **diffrazione elettronica** (comportamento ondulatorio dell'elettrone → **dualità particella-onda**) sia in fasci (v. interazione reciproca delle funzioni d'onda) sia isolato (auto-interazione (v. fig.3 seguente)).
  2. Del fenomeno della **quantizzazione delle orbite elettroniche** intorno ai nuclei secondo l'ipotesi di Bohr (v. fig. 4 seguente).
  3. Dell'**equazione di Dirac** e della relazione ivi ipotizzata fra **materia e antimateria** (v. figura 5 seguente).

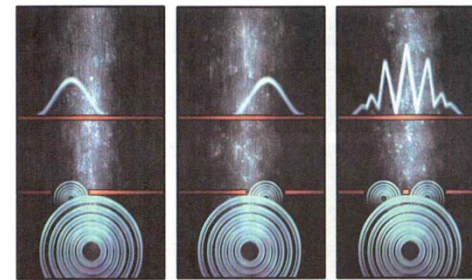
# TRAIETTORIE QUANTISTICHE COME SOMMA SULLE STORIE (*PATH INTEGRALS*)



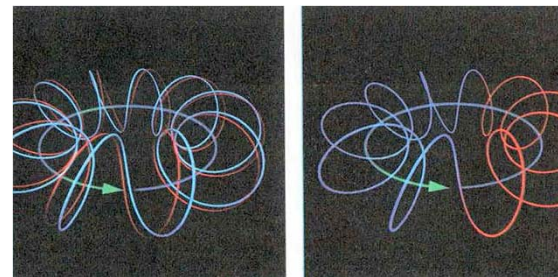
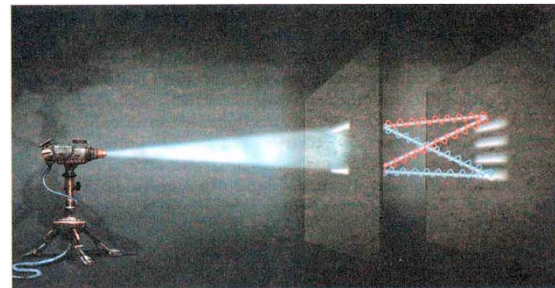
Interferenza (fig.1)



Somma sulle storie (fig.2)



Interferenza e diffrazione (fig.3)

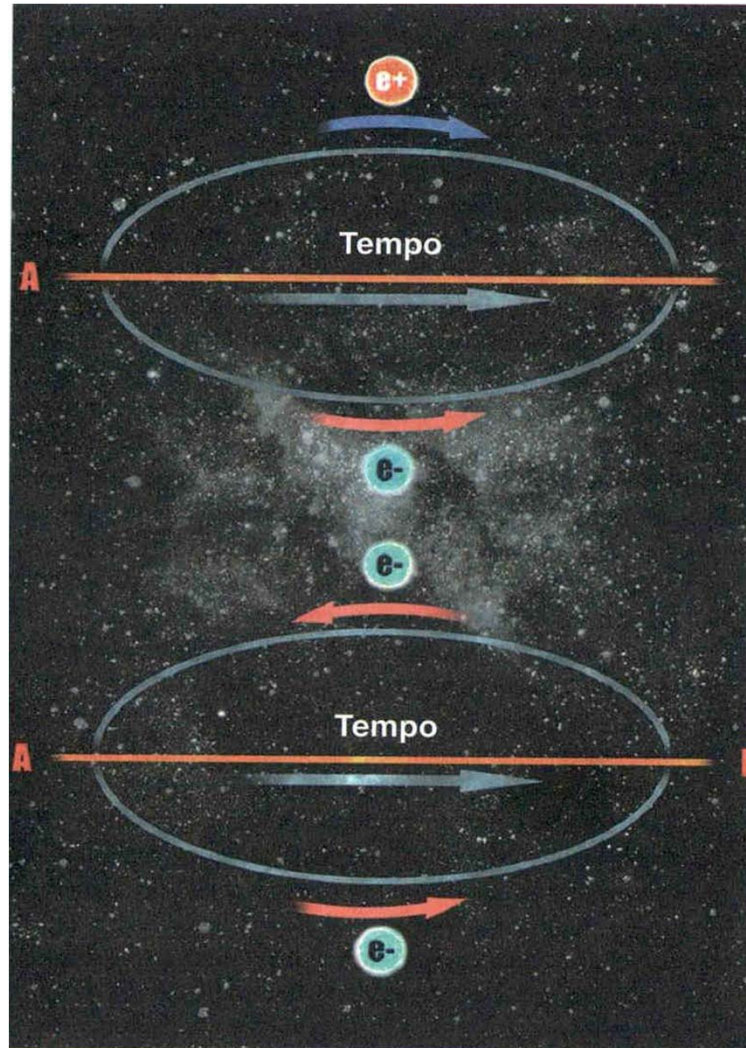


Interferenza e orbitali (fig.4)

# IL TEMPO IMMAGINARIO DI UN INTEGRALE DI PERCORSO

- Proprietà fondamentale di un integrale di percorso compreso fra due punti del **tempo reale** di un processo quantistico è quello di essere definito su uno spazio-tempo di Minkowski in cui il tempo è definito sui numeri immaginari  $i = \sqrt{-1}$
- Ciò consente di fornire una spiegazione matematica unitaria che ingloba molto naturalmente anche la **teoria dell'antimateria** di Dirac, per cui ogni posto lasciato “vuoto” dallo spostamento di una particella di materia dev'essere riempito da una di antimateria e viceversa.
- Infatti, data l'ipotesi **dell'esistenza simultanea** di una particella di **materia** e **anti-materia** all'inizio di un'integrale di percorso, il fatto che all'altro estremo di esso io trovi sperimentalmente **solo una particella** (di materia o di anti-materia) è garantito dal fatto che nel tempo immaginario al percorso **in un senso** della particella di materia, l'antiparticella associata corrisponde al **percorso in senso inverso** della particella iniziale.

# ESEMPLIFICAZIONE DELLA COPPIA $E^+ E^-$ NEL MODELLO DI FEYNMANN

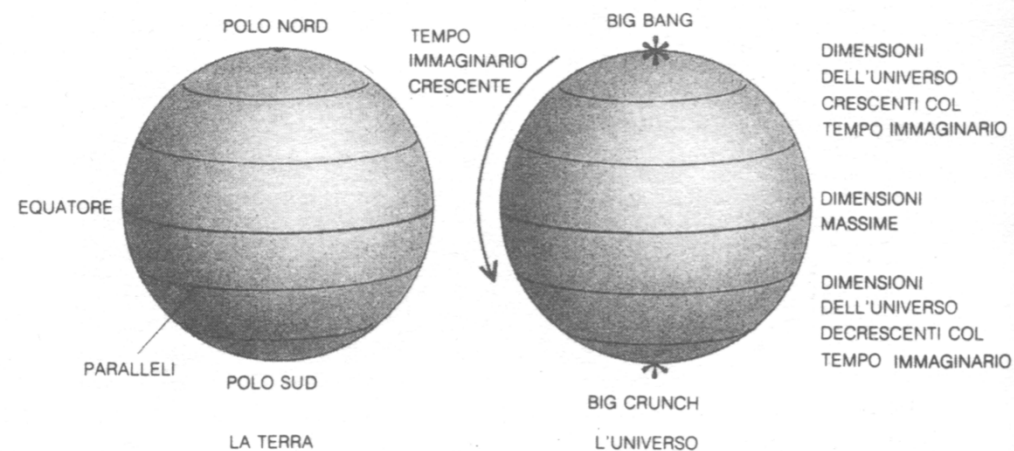


# APPLICAZIONE ALLA GRAVITÀ QUANTISTICA

- Gravi difficoltà ad applicare le leggi della quantistica che valgono per le altre tre forze fondamentali della natura (elettromagnetica e forze nucleari debole e forte) alla quarta forza la più debole di tutte: **la gravità**.
- Quando applicassimo la nozione quantistica di **integrale di percorso** (*path integral*) e di **somma sulle storie** all'evoluzione dell'universo estendendo queste nozioni allo spazio-tempo curvo della relatività generale → **risultato inatteso** dell'eliminazione delle **singolarità** (indecidibilità) dalla teoria della relatività generale.

# SPAZIO-TEMPO QUANTO-RELATIVISTA COME VARIETÀ COMPLESSA

- *Big-bang* e *big-crunch* del nostro universo come “poli” opposti di uno spazio-tempo considerato come un’unica varietà complessa dove l’evoluzione definibile sulla parte **reale** del tempo passato → futuro immersa in una sfera complessa comprendente anche la parte immaginaria → Universo **finito e illimitato**
- → Possibilità di ospitare in un tale formalismo anche teorie di unificazione come quella dei multiversi e/o degli universi ciclici (Steinhardt).



## 5. LE PARTICELLE ELEMENTARI E LE FORZE DELLA NATURA

Le forze fondamentali della natura

35



- Laboratori Nazionali di Frascati
- Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



## IL MODELLO STANDARD

Introduzione alle particelle elementari ed alle forze fondamentali

- Fabrizio Murtas  
([fabrizio.murtas@lnf.infn.it](mailto:fabrizio.murtas@lnf.infn.it))

