

**PLS - Incontri di Orientamento**

**Dalle macchine elettrostatiche agli  
acceleratori di particelle**

**M. Diemoz - 16 dicembre 2011**



INFN Sezione di Roma

## Accelerare le particelle

Una particella di carica elettrica  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb passando attraverso una differenza di potenziale  $\Delta V$  acquista una energia cinetica  $T = e\Delta V$ .

Questa energia, per comodità, si può misurare in **elettronVolt**, o **eV**.

Secondo la meccanica classica, a questa energia cinetica corrisponde una velocità secondo la formula  $T = \frac{1}{2}mv^2$

Quindi la particella, passando attraverso  $\Delta V$ , viene **accelerata**.

# Macchine elettrostatiche

**Agli inizi del novecento, lo studio sperimentale della struttura elementare della materia richiede “sonde” sempre più energetiche. Per raggiungere potenziali elettrici elevati, gli strumenti a disposizione erano le macchine elettrostatiche.**

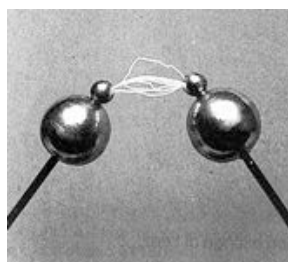
**Nelle macchine elettrostatiche, per raggiungere un elevato potenziale si devono accumulare meccanicamente cariche elettriche su un conduttore**

# Macchine elettrostatiche

Agli inizi del novecento, lo studio sperimentale della struttura elementare della materia richiede “sonde” sempre più energetiche.

Per raggiungere potenziali elettrici elevati, gli strumenti a disposizione erano le macchine elettrostatiche.

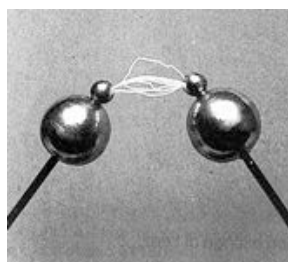
Nelle macchine elettrostatiche, per raggiungere un elevato potenziale si devono accumulare meccanicamente cariche elettriche su un conduttore



Macchina di  
Whimshurst

# Macchine elettrostatiche

Agli inizi del novecento, lo studio sperimentale della struttura elementare della materia richiede “sonde” sempre più energetiche. Per raggiungere potenziali elettrici elevati, gli strumenti a disposizione erano le macchine elettrostatiche. Nelle macchine elettrostatiche, per raggiungere un elevato potenziale si devono accumulare meccanicamente cariche elettriche su un conduttore



Macchina di  
Whimshurst



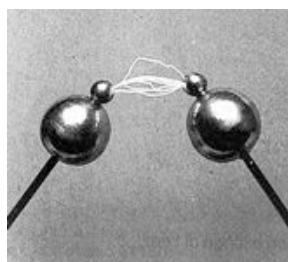
Macchina di  
Van der Graaf

# Macchine elettrostatiche

Agli inizi del novecento, lo studio sperimentale della struttura elementare della materia richiede “sonde” sempre più energetiche.

Per raggiungere potenziali elettrici elevati, gli strumenti a disposizione erano le macchine elettrostatiche.

Nelle macchine elettrostatiche, per raggiungere un elevato potenziale si devono accumulare meccanicamente cariche elettriche su un conduttore



Macchina di  
Whimshurst



Macchina di  
Van der Graaf



Qual'è il massimo  $\Delta V$  ottenibile con una macchina elettrostatica (p.es. un Van der Graaf) ?

Limite: rigidità dielettrica dell'aria

$$E_{\max} = 3 \cdot 10^4 \text{ V/cm} \quad (\text{aria secca})$$

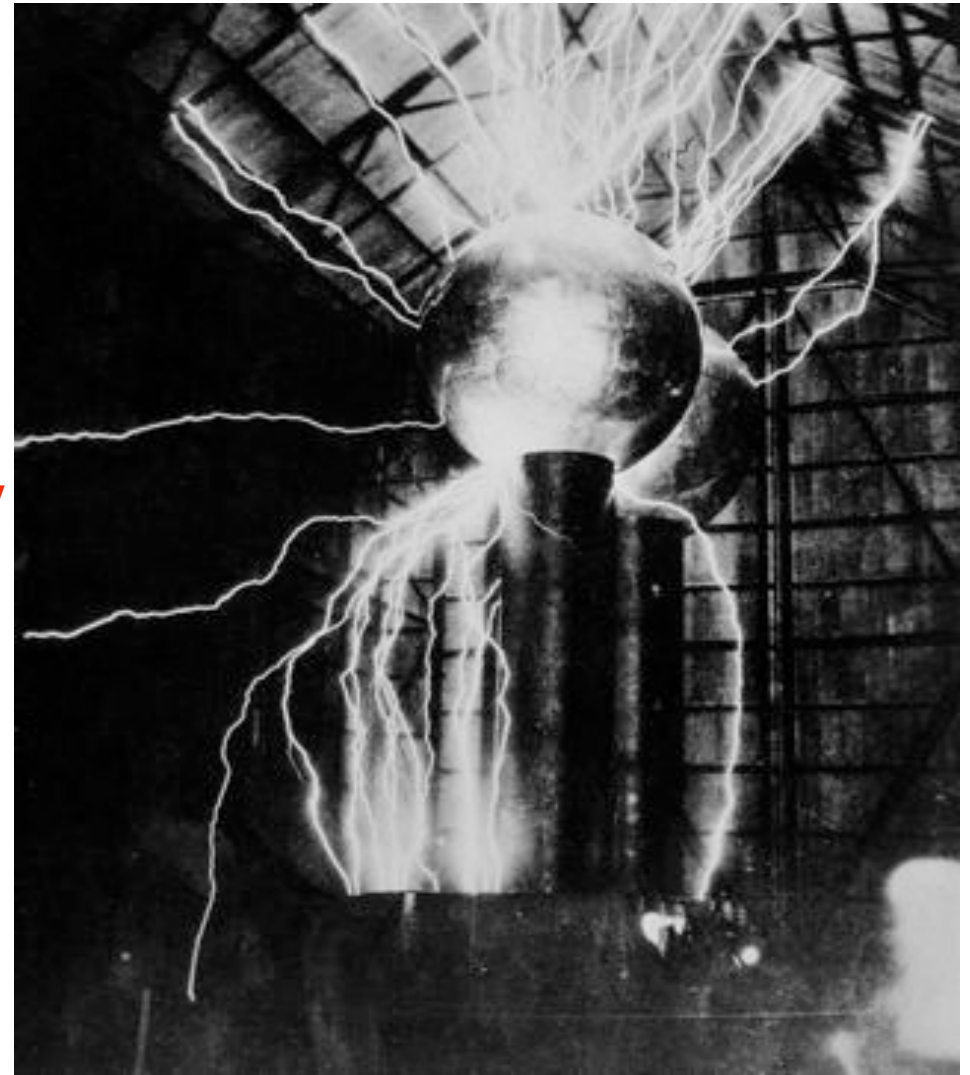
Per una sfera di  $r = 1 \text{ m}$

$$V_{\max} = E_{\max} \cdot r = 3 \cdot 10^4 \text{ V/cm} \cdot 1 \text{ m} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ V} = 3 \text{ MV}$$

massima energia

$$T_{\max} = e\Delta V \approx e \cdot 3 \text{ MV} = 3 \text{ MeV}$$

Con raggi di circa un metro si possono raggiungere energie di qualche MeV, con scariche spettacolari!



Ma quanto è un'energia di **1 MeV**?

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \cdot e(\text{Coulomb}) \cdot \Delta V(\text{Volt})$$

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Joule}$$

è grande o piccola?

se lascio cadere una matita,  $T = mgh \approx 10^{-1} \text{ Joule}$

tuttavia la massa di una particella è molto più piccola

$$m_p = 0.17 \cdot 10^{-23} \text{g} = 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_e = 1/1840 m_p = 0.9 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$



Quanto è grande **1 MeV = 1.6 · 10<sup>-13</sup> Joule?**

**Espressione classica dell'energia cinetica:**

$$T = 1/2 m v^2$$

$$m_p = 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_e = 0.9 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

$$v_p = \sqrt{\frac{2T}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13}}{1.7 \cdot 10^{-27}}} \text{ m/s} = 14 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$$v_e = \sqrt{\frac{2T}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13}}{0.9 \cdot 10^{-30}}} \text{ m/s} = 6 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

**v<sub>p</sub> e v<sub>e</sub> sono grandi o piccole?**

# Acceleratori di particelle

**Negli anni '30** i primi acceleratori (Van der Graaf o altre macchine elettrostatiche) raggiungevano **qualche MeV**.

**Oggi** si costruiscono macchine per **14 TeV** (14 milioni di MeV)

Qual'è l'interesse a raggiungere **energie sempre maggiori** ?

Che ci si fa con le **particelle di alta energia** ?

# esperimenti di scattering o diffusione (o urto)

# esperimenti di scattering o diffusione (o urto)



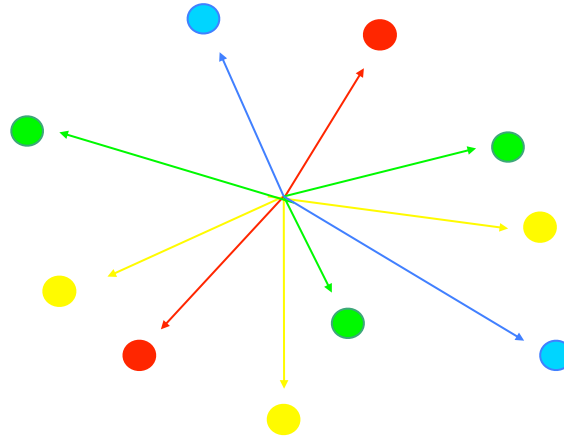
# esperimenti di scattering o diffusione (o urto)

# esperimenti di scattering o diffusione (o urto)



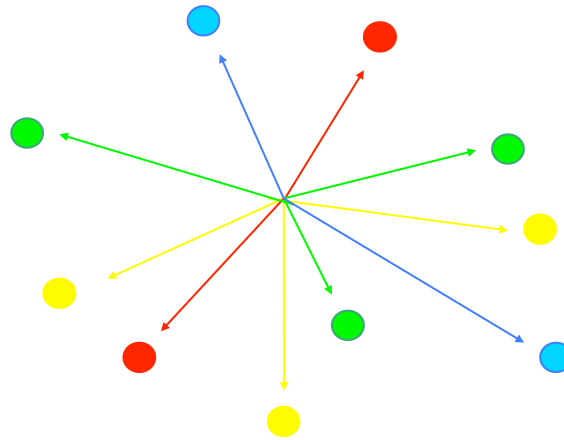
# esperimenti di scattering o diffusione (o urto)

# esperimenti di scattering o diffusione (o urto)





## esperimenti di scattering o diffusione (o urto)



**Grandi densità di energia**

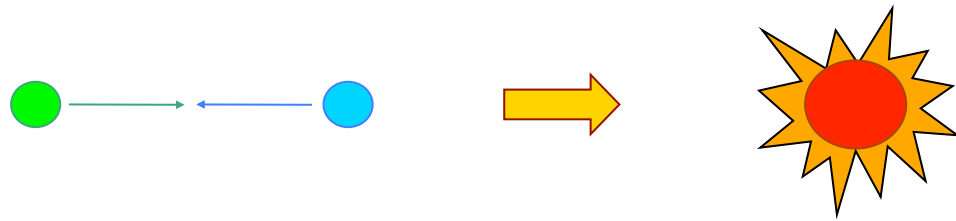
**stato primordiale della materia**

**Struttura della materia subatomica**

**grande energia → grande potere risolutivo**

**Produzione di particelle "artificiali" pesanti**

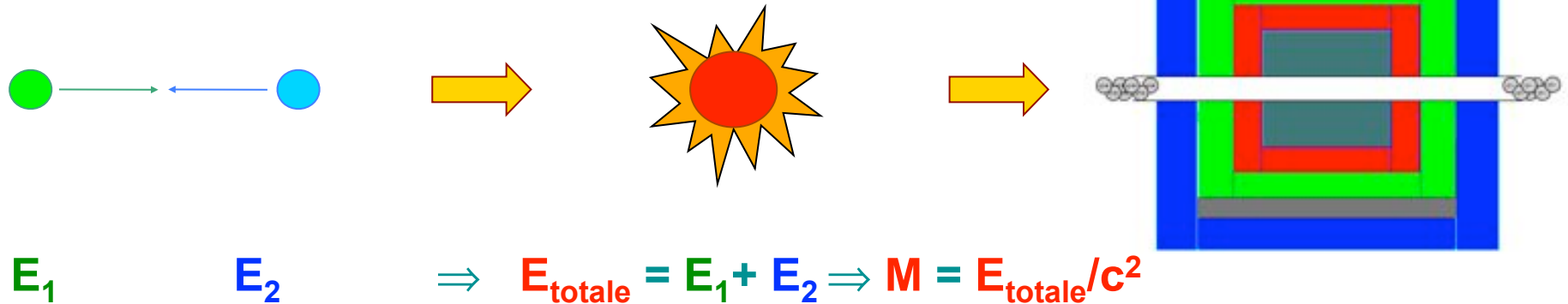
Secondo la **teoria della relatività**,  
l'energia può essere convertita in massa:  $E = mc^2$



$$E_1 \quad E_2 \quad \Rightarrow \quad E_{\text{totale}} = E_1 + E_2 \Rightarrow M = E_{\text{totale}}/c^2$$

tanto maggiore è **l'energia** delle particelle **incidenti**,  
tanto maggiore è **la massa** delle particelle che possono

Secondo la **teoria della relatività**,  
l'energia può essere convertita in massa:  $E = mc^2$



tanto maggiore è l'**energia** delle particelle incidenti,  
tanto maggiore è la **massa** delle particelle che possono

Se le particelle prodotte sono instabili, quello che si osserverà nei rivelatori sono i **prodotti di decadimento**

# massa e energia

## Particelle "naturali":

**elettrone**  $m = 0.9 \cdot 10^{-30} \text{ kg} = 0.5 \text{ MeV}/c^2$

**protone, neutrone**  $m = 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0.9 \text{ GeV}/c^2$

## Particelle "artificiali":

**bosoni intermedi W e Z:**  $m_W = 80 \text{ GeV}/c^2$ ,  $m_Z = 91 \text{ GeV}/c^2$

la più pesante finora osservata è il **quark top**,  $m_{\text{top}} = 174 \text{ GeV}/c^2$

Queste particelle così pesanti oggi possono essere prodotte solo in laboratorio attraverso macchine acceleratrici, ma negli **stati primordiali dell'Universo**, quando la densità di energia era altissima, questi erano i costituenti fondamentali.

Come si supera il limite dovuto alla **scarica** di una macchina elettrostatica?

Si può far passare la particella **attraverso** più  $\Delta V$  **acceleranti**.

Come si supera il limite dovuto alla **scarica** di una macchina elettrostatica?

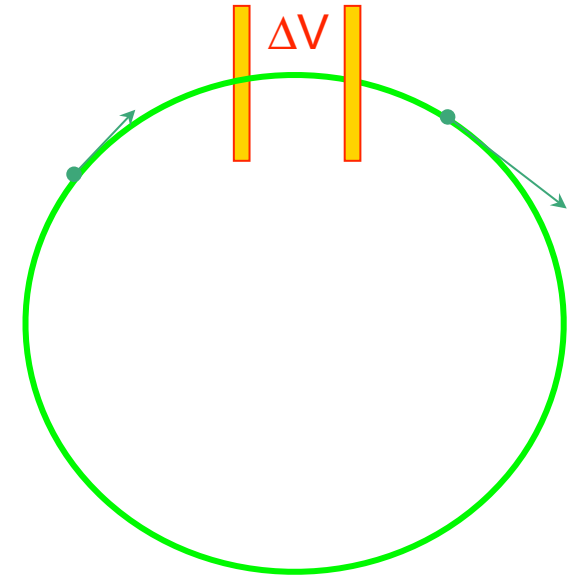
Si può far passare la particella **attraverso** più  $\Delta V$  **acceleranti**.

La maniera più semplice sembra essere quella di utilizzare più volte lo stesso  $\Delta V$ , tenendo la particella su un'orbita circolare.

Come si supera il limite dovuto alla **scarica** di una macchina elettrostatica?

Si può far passare la particella **attraverso** più  $\Delta V$  **acceleranti**.

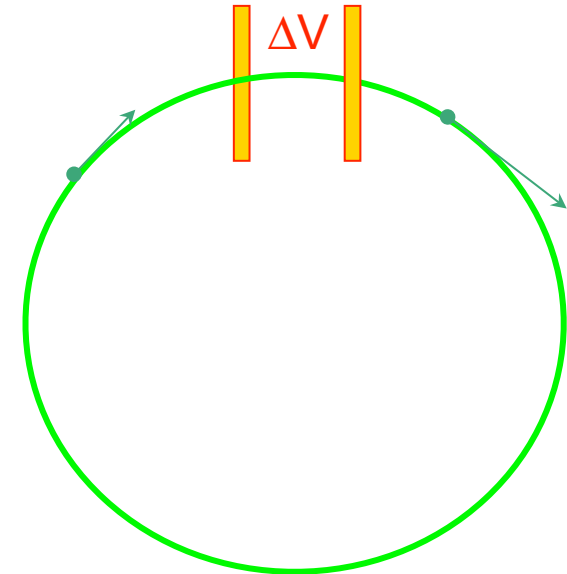
La maniera più semplice sembra essere quella di utilizzare più volte lo stesso  $\Delta V$ , tenendo la particella su un'orbita circolare.



Come si supera il limite dovuto alla **scarica** di una macchina elettrostatica?

Si può far passare la particella **attraverso** più  $\Delta V$  **acceleranti**.

La maniera più semplice sembra essere quella di utilizzare più volte lo stesso  $\Delta V$ , tenendo la particella su un'orbita circolare.

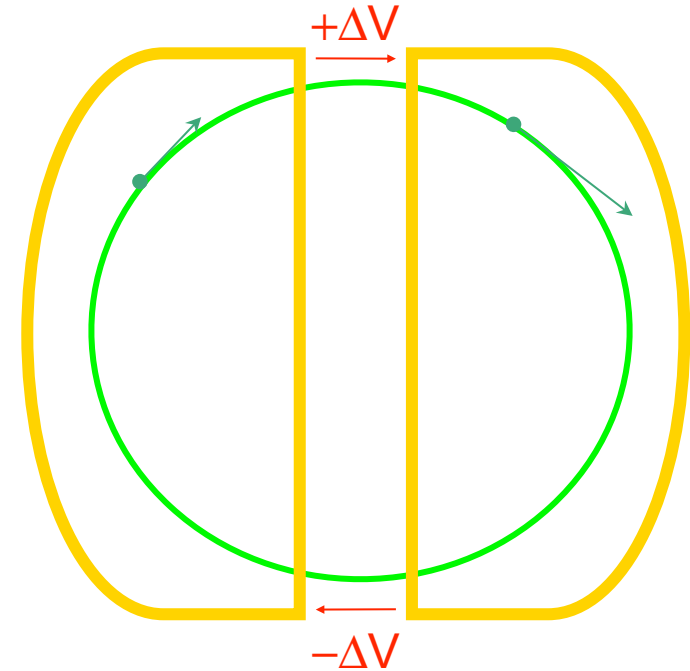


In realtà questo schema è un po' troppo semplice:  
se la particella incontra un  $\Delta V$  positivo tra le due facce, nel tornare dalla seconda alla prima faccia lungo la traiettoria circolare, incontrerà complessivamente lo stesso  $\Delta V$  **cambiato di segno!**



Questo può essere evitato se la traiettoria si sviluppa dentro due **gabbie di Faraday**:

- la particella dentro la gabbia non risente del potenziale esterno
- la differenza di potenziale tra le due gabbie può essere invertita mentre la particella percorre la semicirconferenza
- in basso la particella passa tra le due gabbie incontrando di nuovo una tensione accelerante.



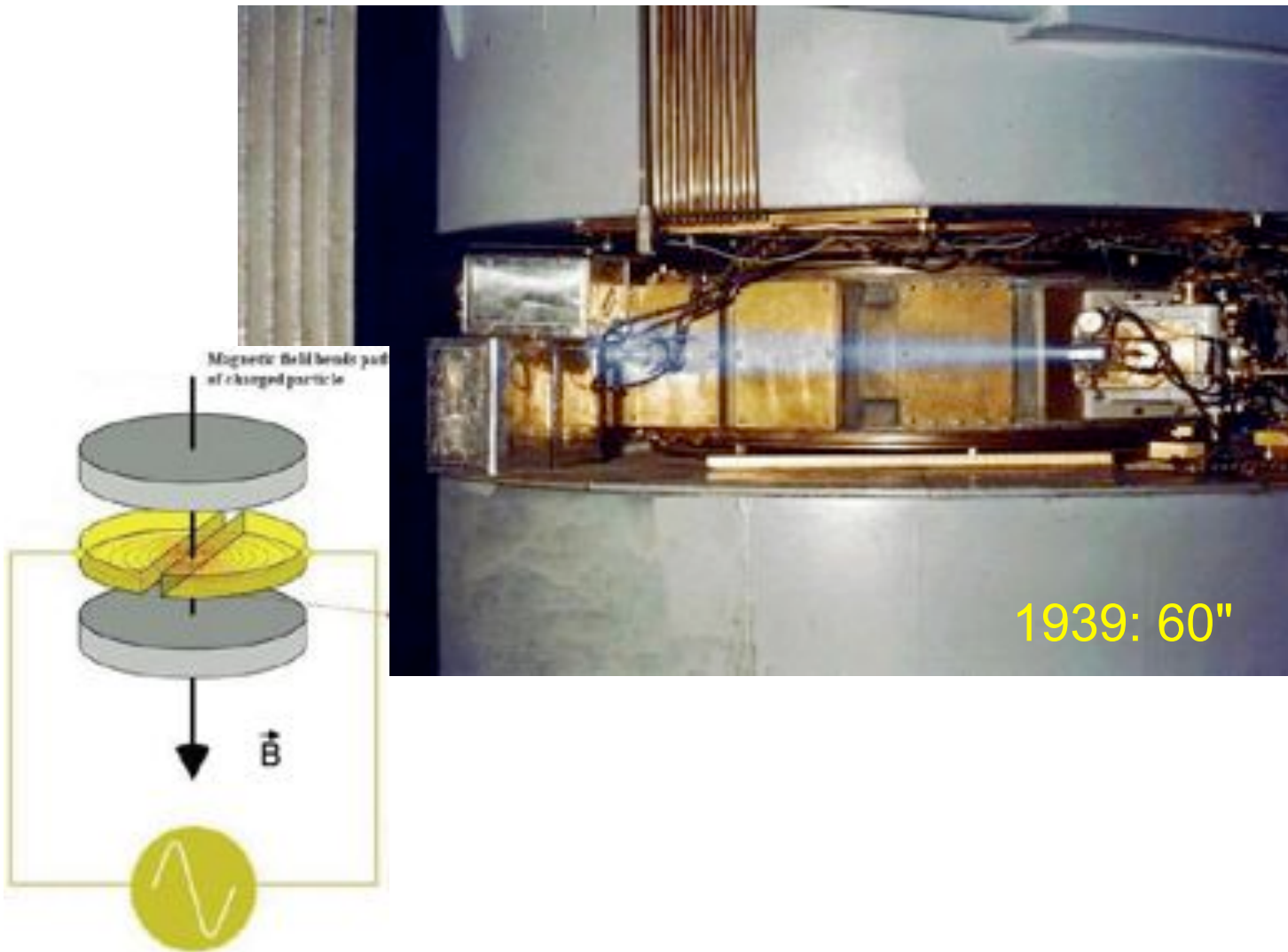
La frequenza con cui la tensione è invertita deve essere sincronizzata col tempo impiegato dalla particella a percorrere la semicirconferenza

Cosa può tenere una **particella carica** su un'**orbita circolare**?  
Un campo magnetico **B** !

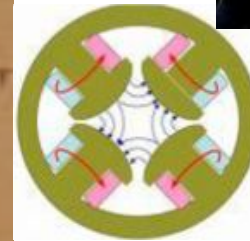
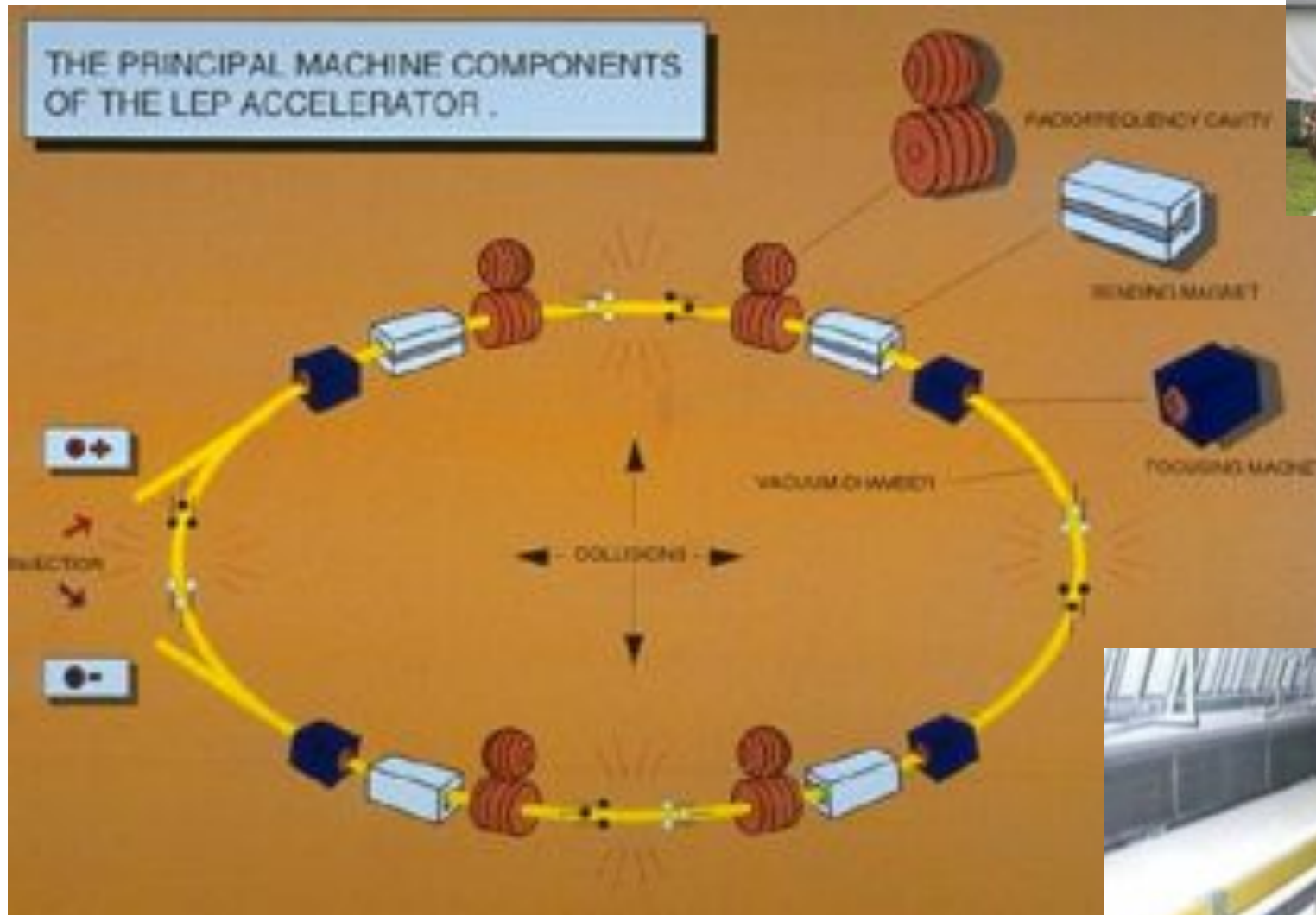
• **Forza di Lorentz** =  $q \mathbf{v} \mathbf{B}$

$qBR = mv$

# CICLOTRONE (E.O.Lawrence, 1931)



# Large Electron Positron collider - CERN



**1932** acceleratore elettrostatico C&W da 0.4 MeV

$p \rightarrow Li \rightarrow 2 He$ , prima trasmutazione del nucleo

**1955** bevatrone di Berkeley da 6 GeV

scoperta dell'antiprotone (Segré)

**1969** LINAC di Stanford da 20 GeV

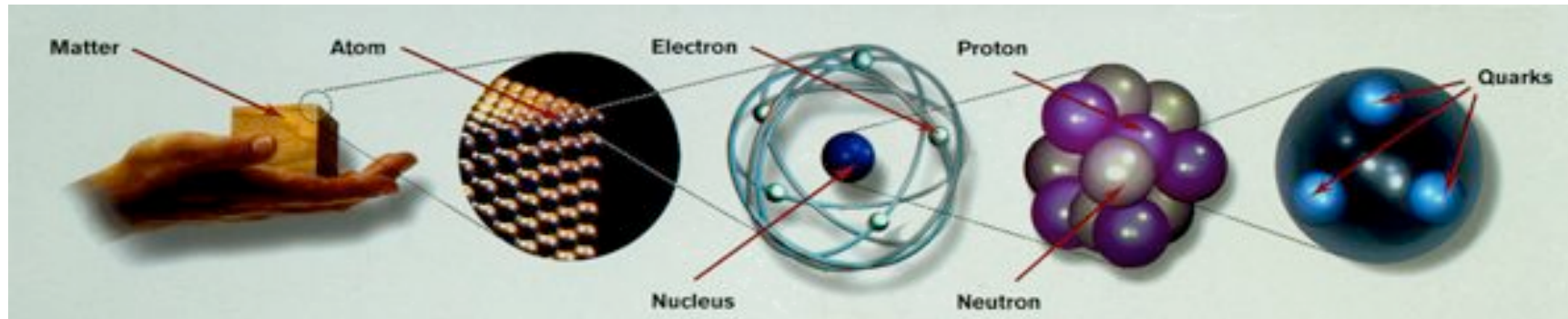
struttura a quark del protone

**1983** SppS del CERN

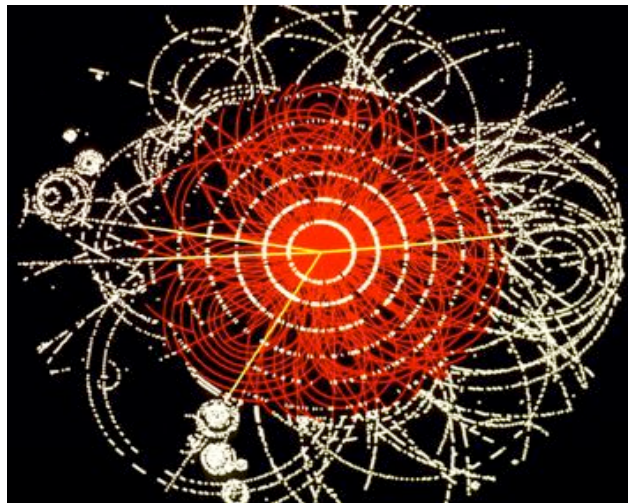
scoperta di W e Z (Rubbia)

**2009** LHC del CERN da 7+7 TEV





**Quali sono le domande alle quali la fisica delle alte energie cerca ancora una risposta?**



**Qual'è l'origine della massa?**

**La materia oscura può essere fatta di particelle supersimmetriche?**

**Perché l'Universo è fatto di materia e non di antimateria?**

.....





100 m sotto terra e' stato scavato un tunnel  
lungo 27 km





All'interno del tunnel e' stato costruito un  
acceleratore di **protoni**  
il **L**arge **H**adron **C**ollider





All'interno del tunnel e' stato costruito un  
acceleratore di **protoni**  
il **L**arge **H**adron **C**ollider





All'interno del tunnel e' stato costruito un  
acceleratore di **protoni**  
il **L**arge **H**adron **C**ollider





All'interno del tunnel e' stato costruito un  
acceleratore di **protoni**  
il **L**arge **H**adron **C**ollider





All'interno del tunnel e' stato costruito un  
acceleratore di **protoni**  
il **L**arge **H**adron **C**ollider





All'interno del tunnel e' stato costruito un  
acceleratore di **protoni**  
il **L**arge **H**adron **C**ollider





Come si creano nuove particelle?





# Come si creano nuove particelle?



$E_{\text{protone}} = 7 \text{ TeV}$



# Come si creano nuove particelle?



$E_{\text{protone}} = 7 \text{ TeV}$

$E = mc^2$



# Come si creano nuove particelle?



$E_{\text{protone}} = 7 \text{ TeV}$

$E = mc^2$



Come si creano nuove particelle?



$E_{\text{protone}} = 7 \text{ TeV}$

$E = mc^2$



Come si creano nuove particelle?



$E_{\text{protone}} = 7 \text{ TeV}$

$E = mc^2$



Come si fa a vedere cosa esce?





Come si fa a vedere cosa esce?





Come si fa a vedere cosa esce?



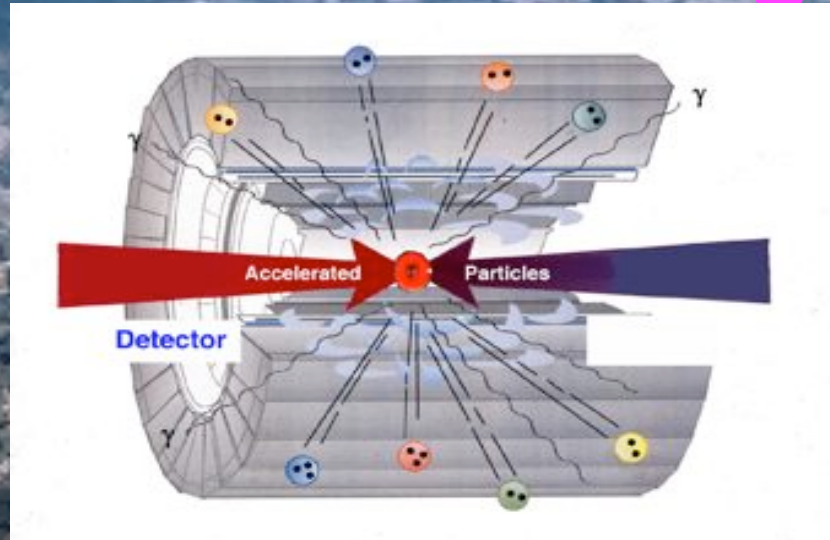


Come si fa a vedere cosa esce?



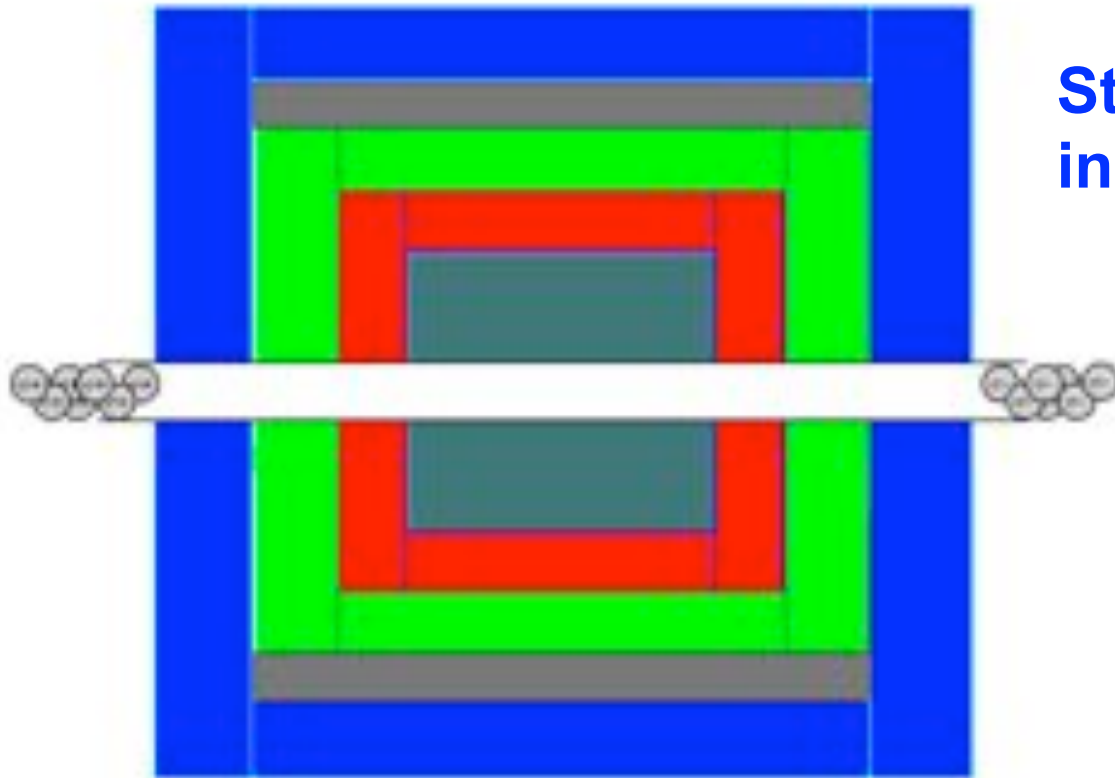


# Come si fa a vedere cosa esce?



Costruiamo attorno al punto di interazione un rivelatore di particelle che le cattura e le riconosce tutte

## Rivelatori di particelle: riconoscono le impronte!



**Strati di materiale opportuno  
in opportuna sequenza**

## Le impronte ci dicono chi è passato!



uomo sulla sabbia



sub in acqua



lepre sulla neve



moto nel fango



Le impronte ci dicono chi è passato!



uomo sulla sabbia



sub in acqua



moto nel fango

## Le impronte ci dicono chi è passato!



uomo sulla sabbia



sub in acqua



sci sulla neve



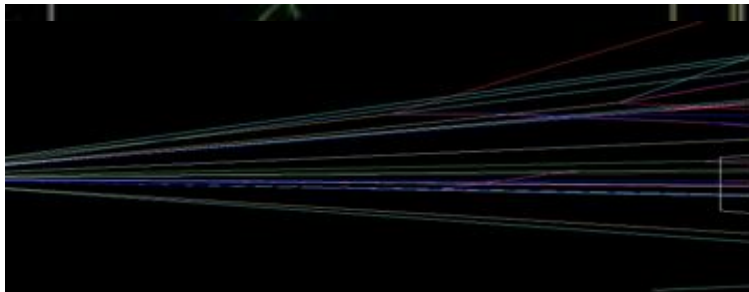
moto nel fango



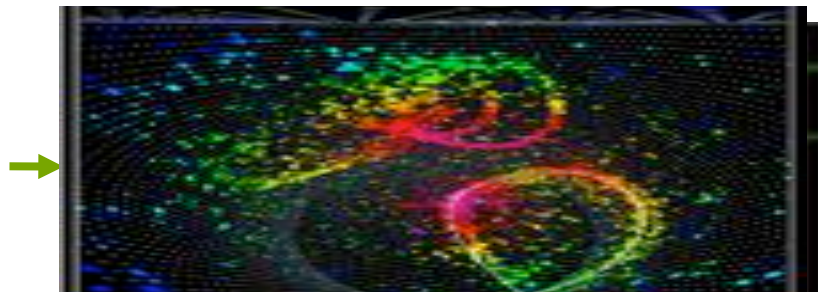
## Le particelle lasciano impronte!



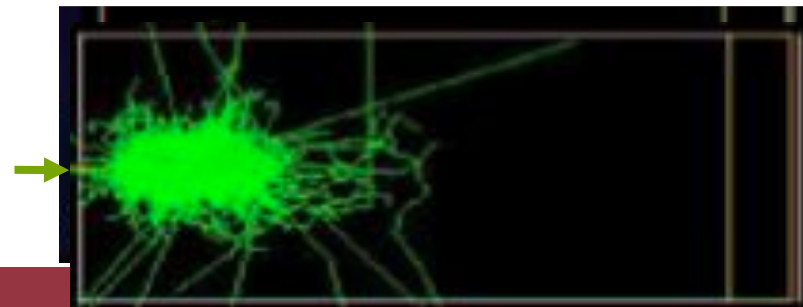
elettrone nel piombo



muoni in gas



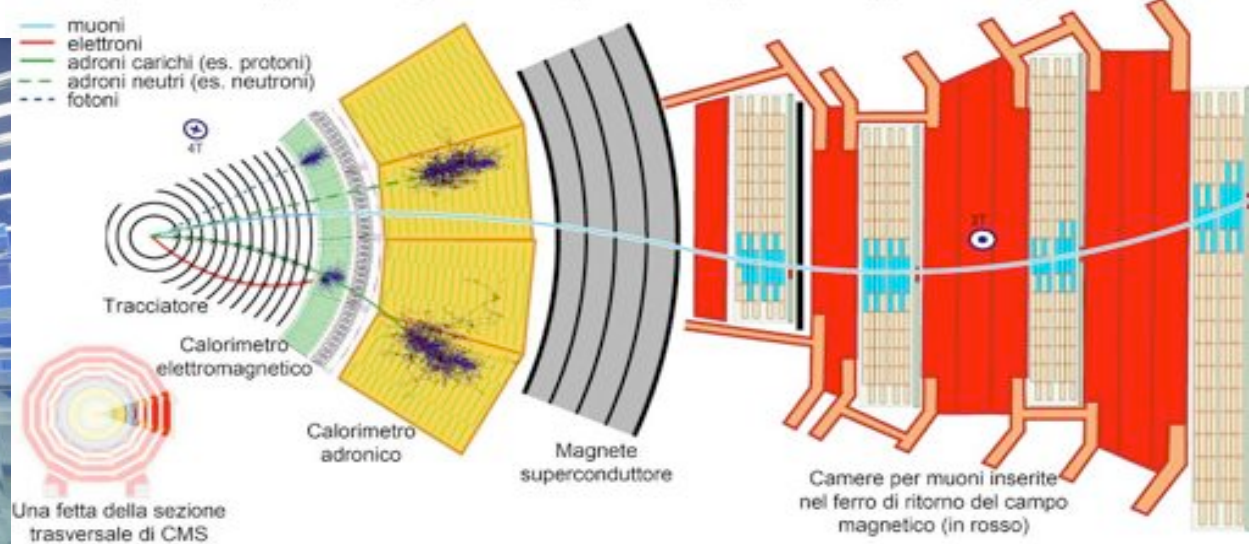
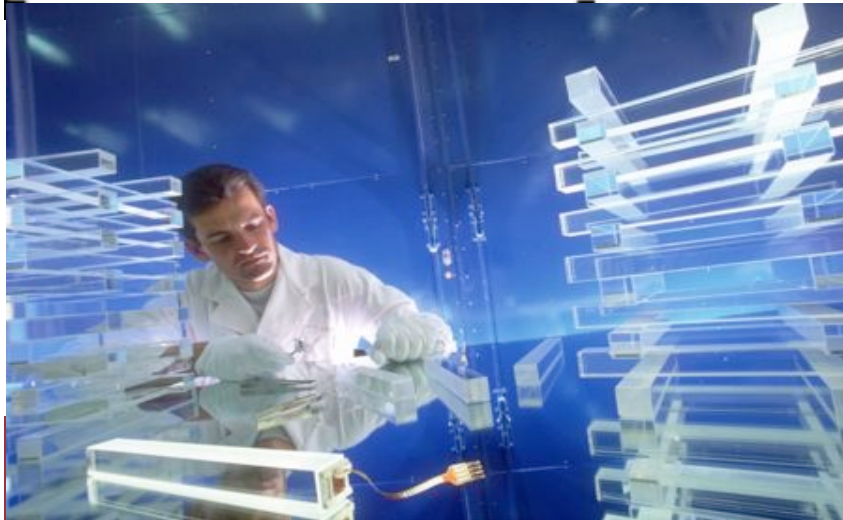
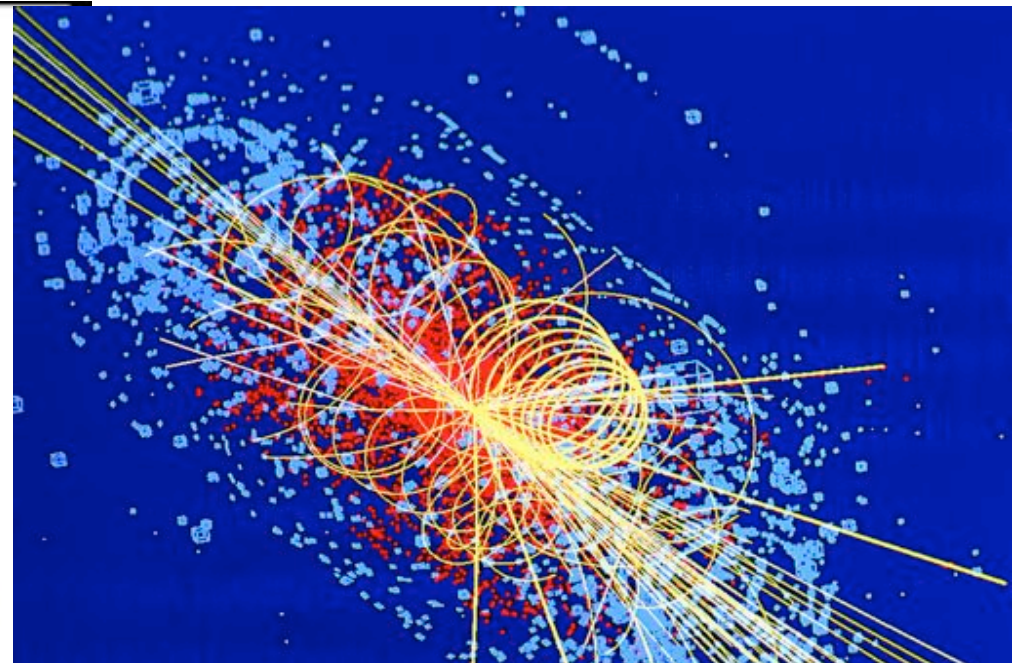
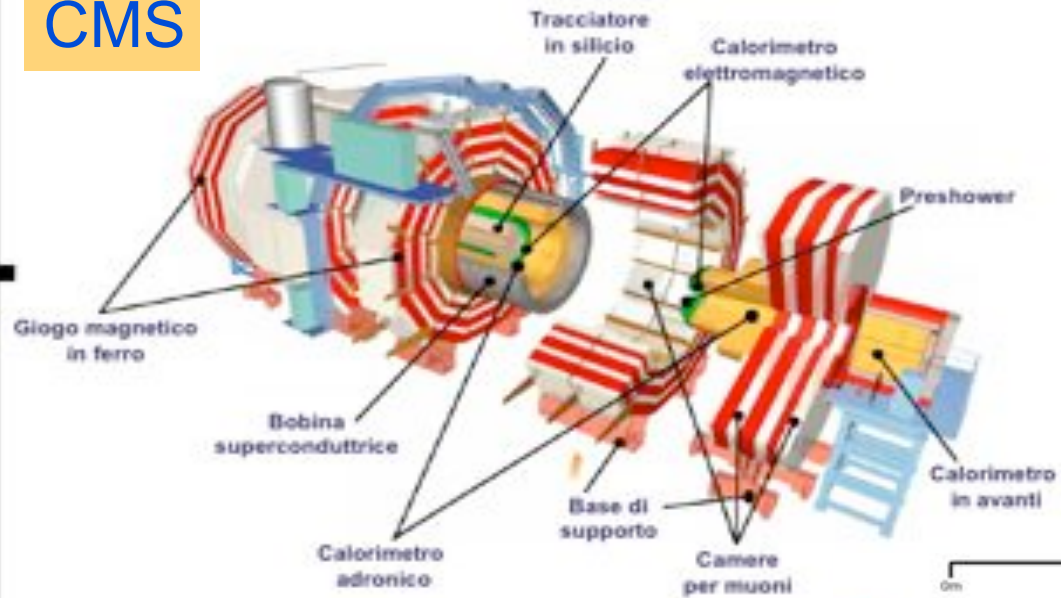
muoni in acqua



pione nel ferro

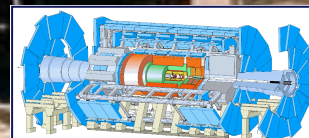
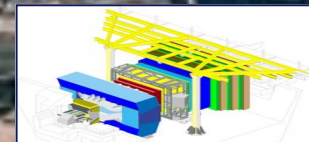
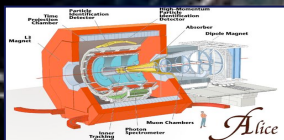
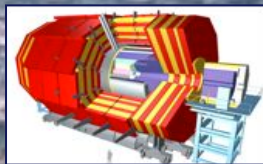
# La cattura delle particelle

CMS





# 4 Rivelatori di particelle in LHC

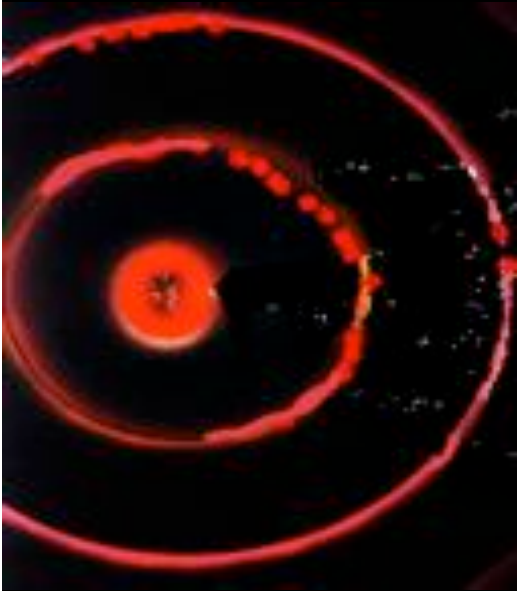


# Verso l'origine dell'Universo



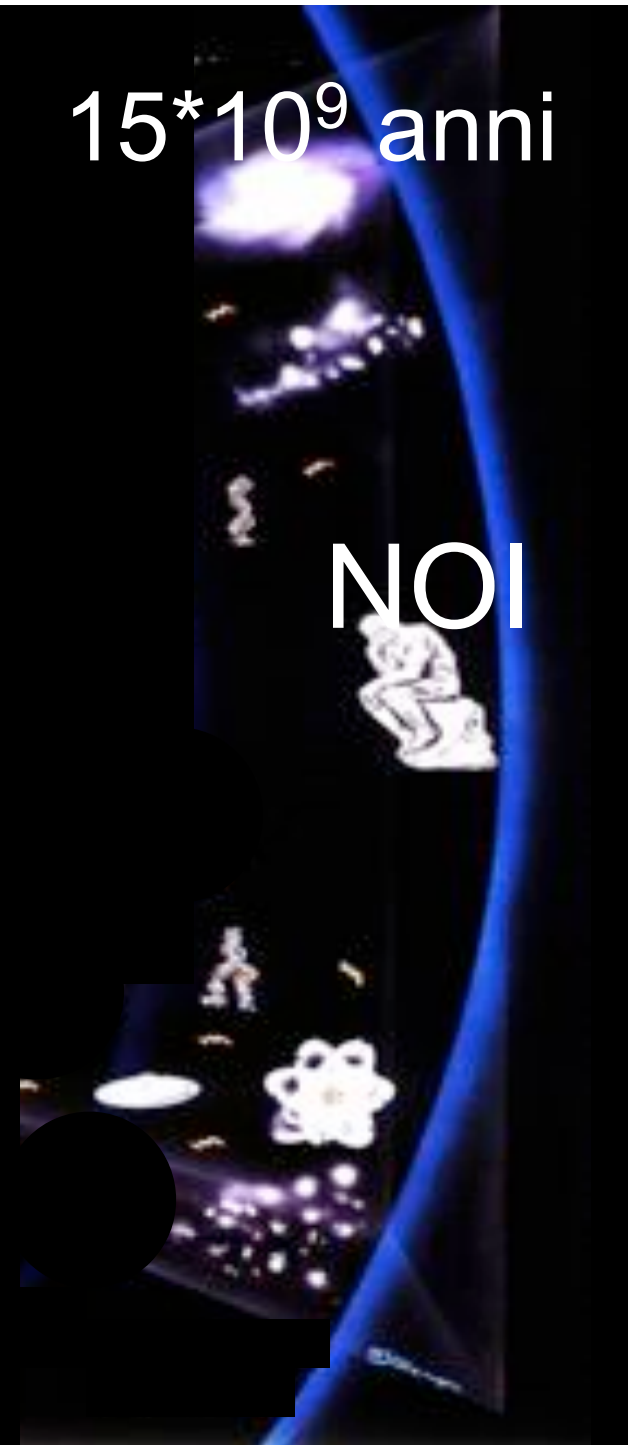
# Verso l'origine dell'Universo

$t=0$



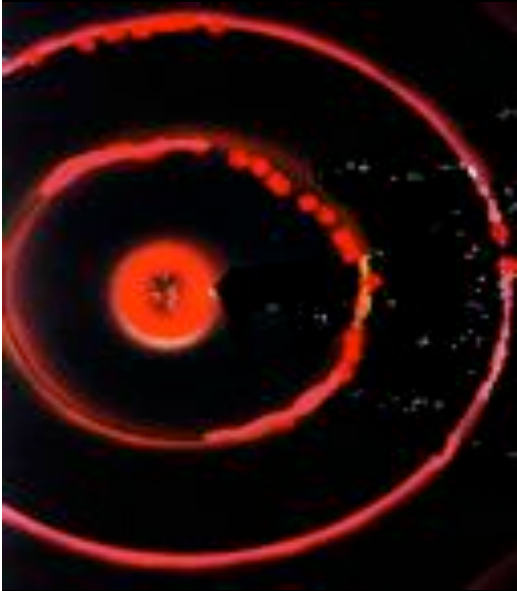
$15 \cdot 10^9$  anni

NOI



# Verso l'origine dell'Universo

$t=0$

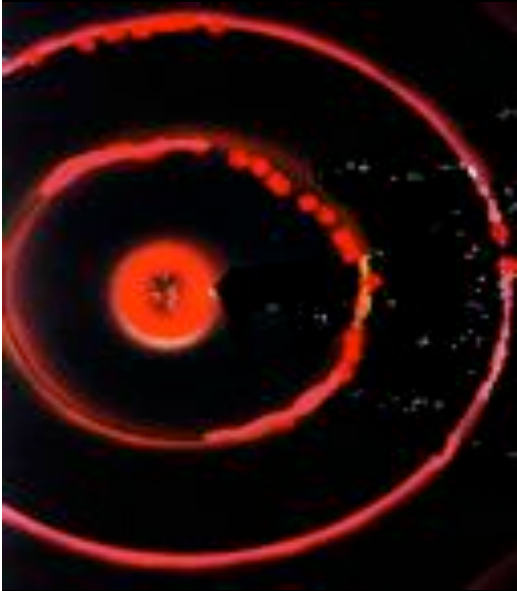






# Verso l'origine dell'Universo

$t=0$



3 min

atomi un po'  
complessi...

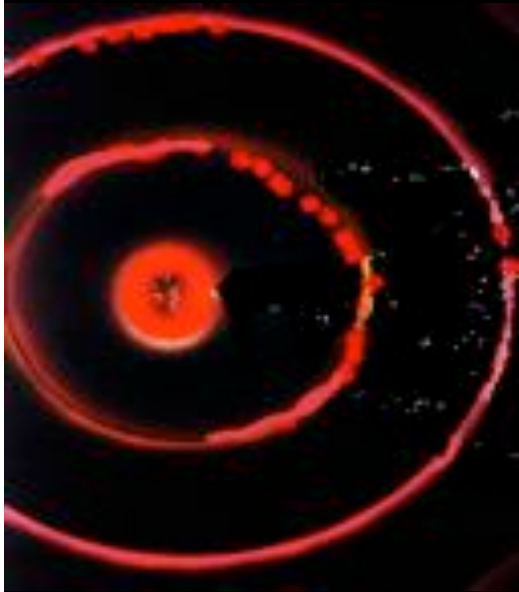
polvere





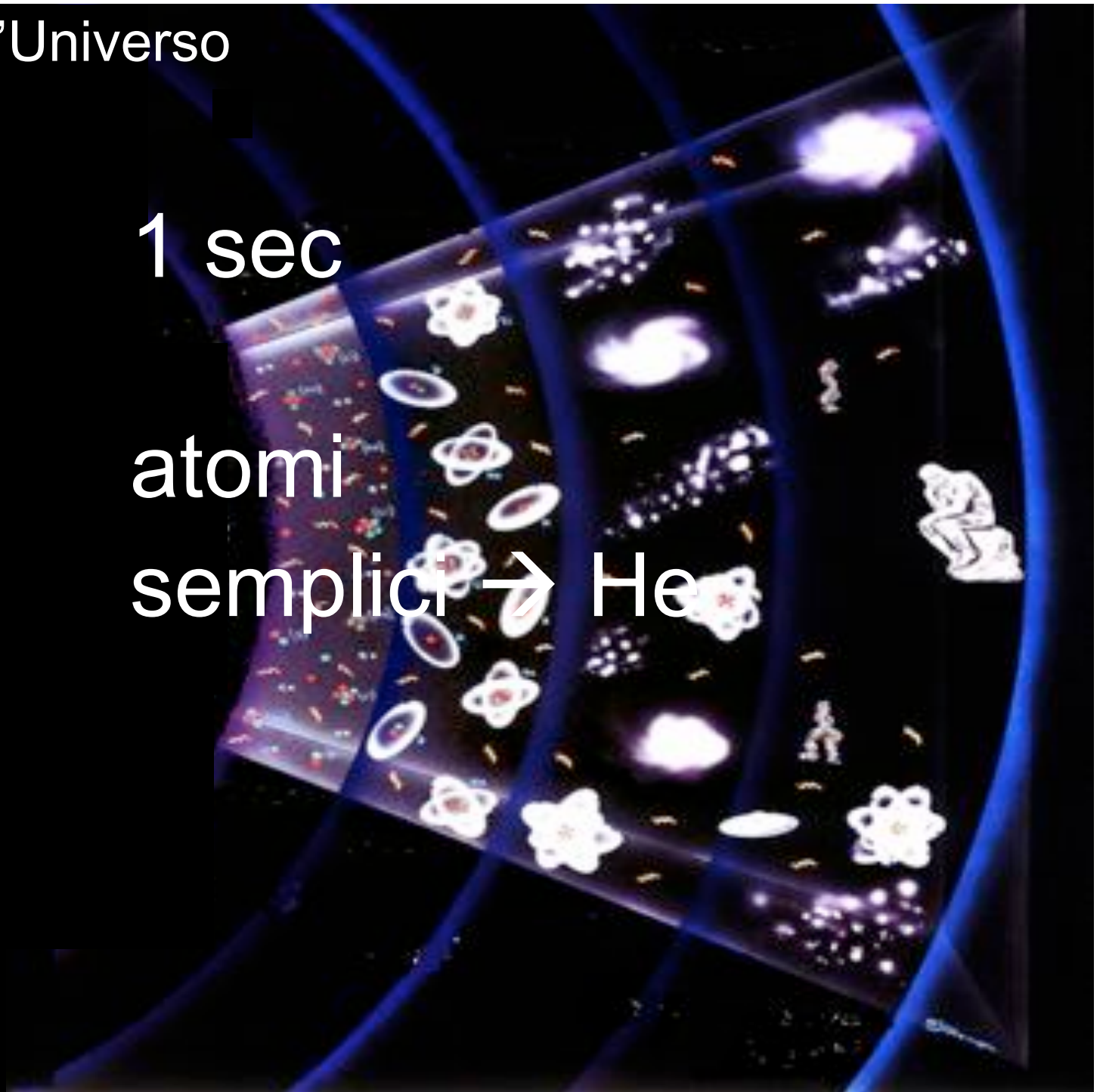
# Verso l'origine dell'Universo

$t=0$



1 sec

atomi  
semplici  $\rightarrow$  He

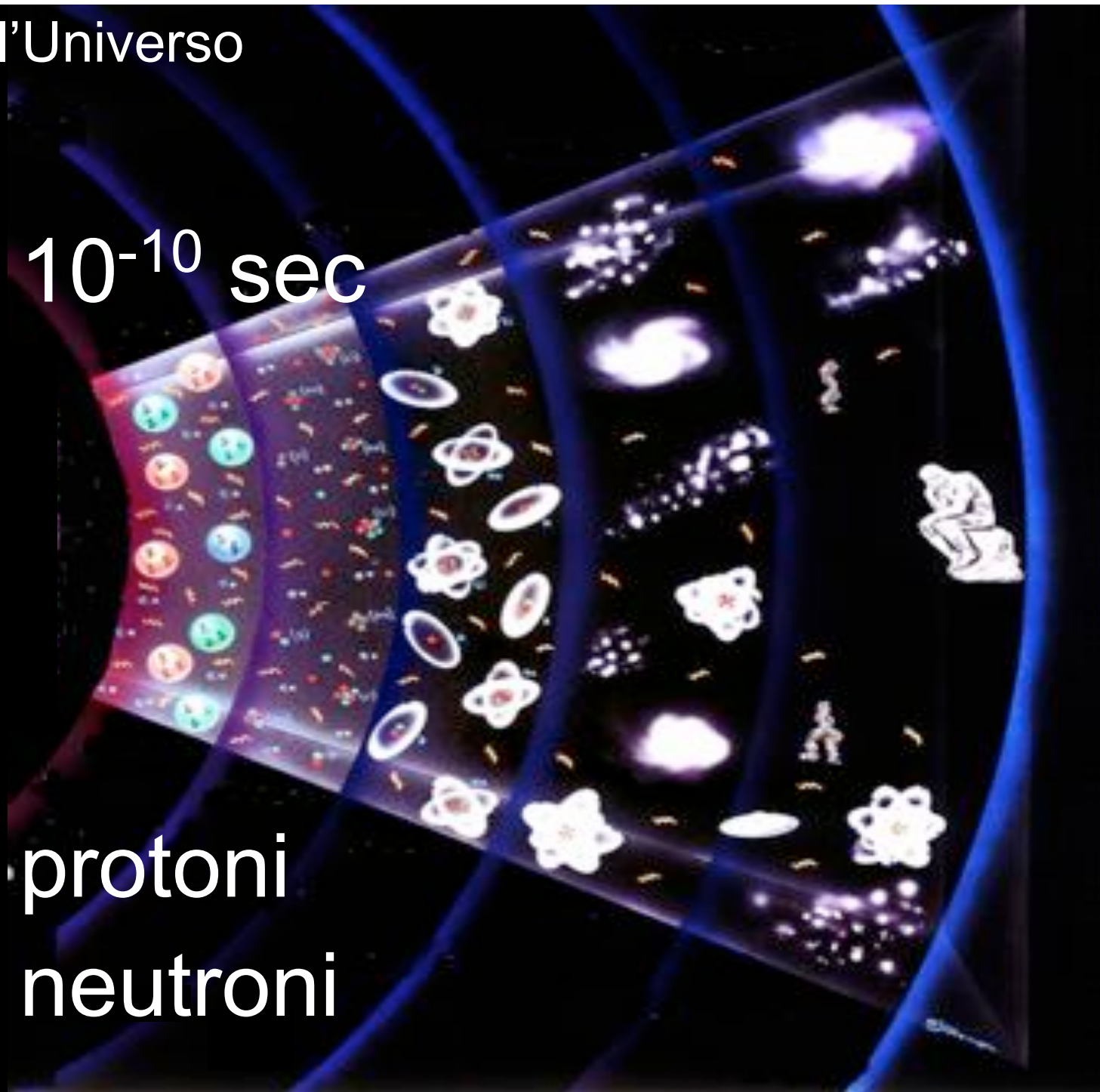
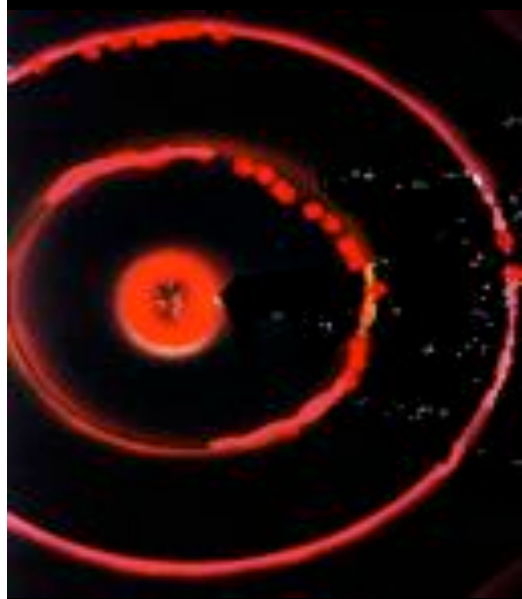


# Verso l'origine dell'Universo

$t=0$

$10^{-10}$  sec

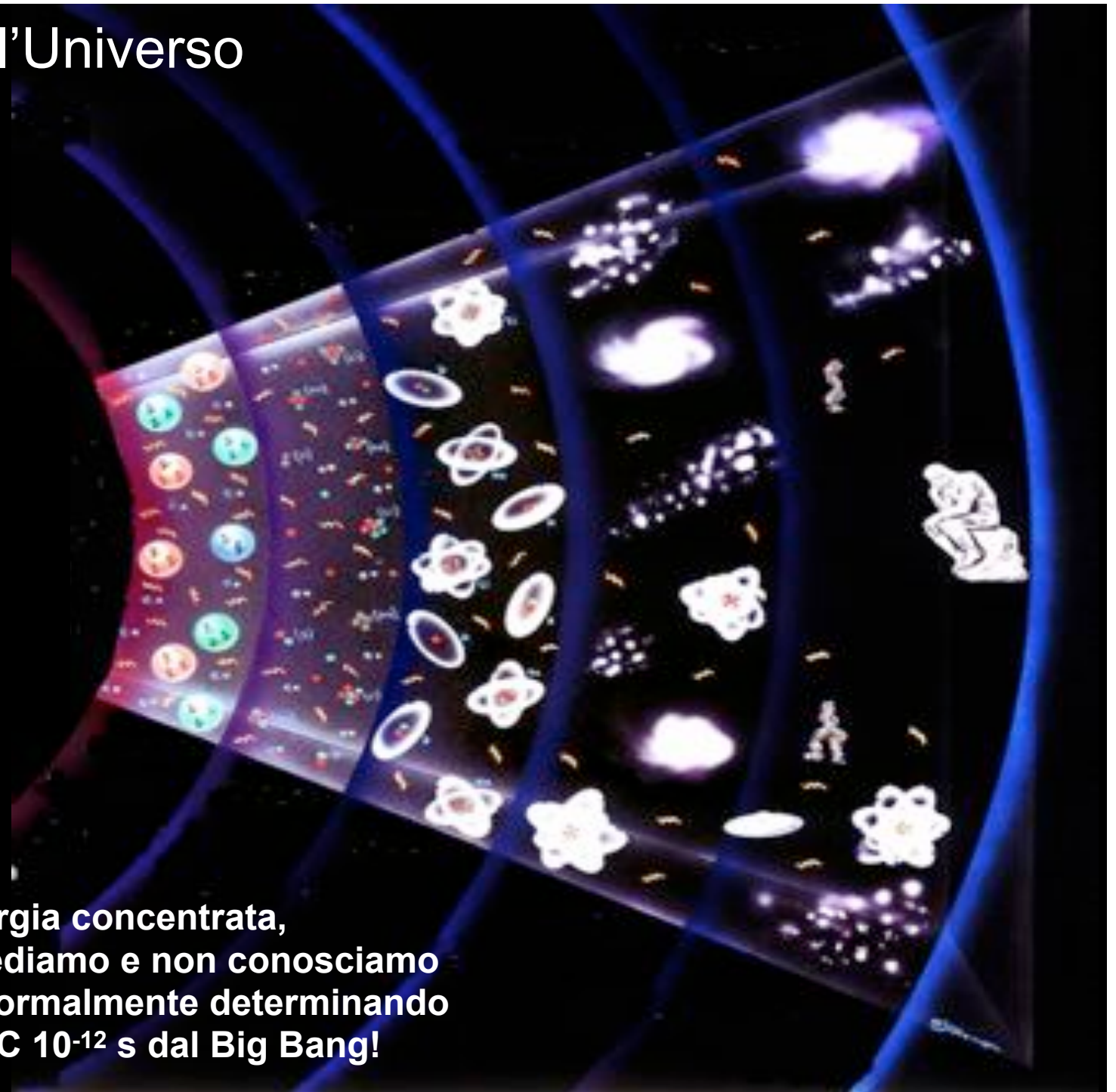
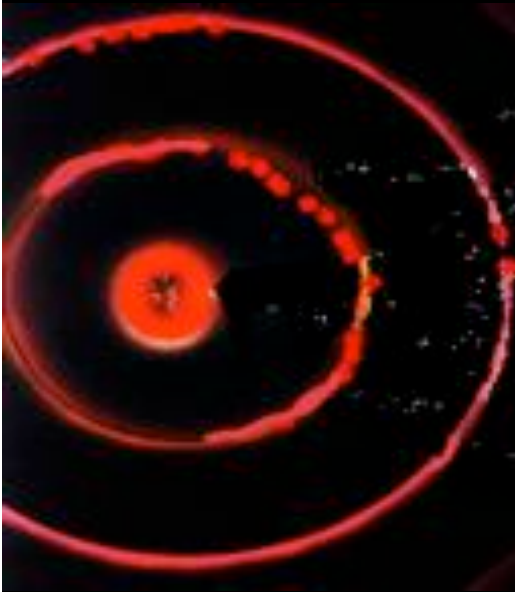
protoni  
neutroni





# Verso l'origine dell'Universo

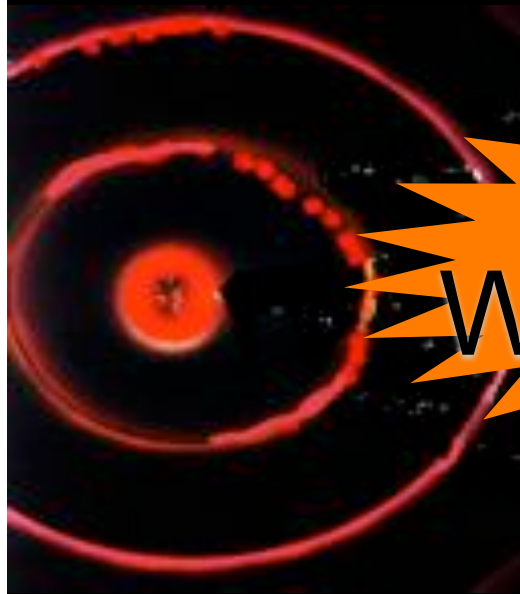
$t=0$



**Tanto tempo fa, tanta energia concentrata, particelle che oggi non vediamo e non conosciamo morivano e si creavano normalmente determinando ciò che vediamo oggi. LHC  $10^{-12}$  s dal Big Bang!**

# Verso l'origine dell'Universo

$t=0$



Tanto tempo fa, tanta energia concentrata, particelle che oggi non vediamo e non conosciamo morivano e si creavano normalmente determinando ciò che vediamo oggi. LHC  $10^{-12}$  s dal Big Bang!



# Verso l'origine dell'Universo

$t=0$



Tanto tempo fa, tanta energia concentrata, particelle che oggi non vediamo e non conosciamo morivano e si creavano normalmente determinando ciò che vediamo oggi. LHC  $10^{-12}$  s dal Big Bang!

## La materia oscura

**La materia identificata (H, He...)  
rappresenta circa il 4% della  
della massa dell'Universo**

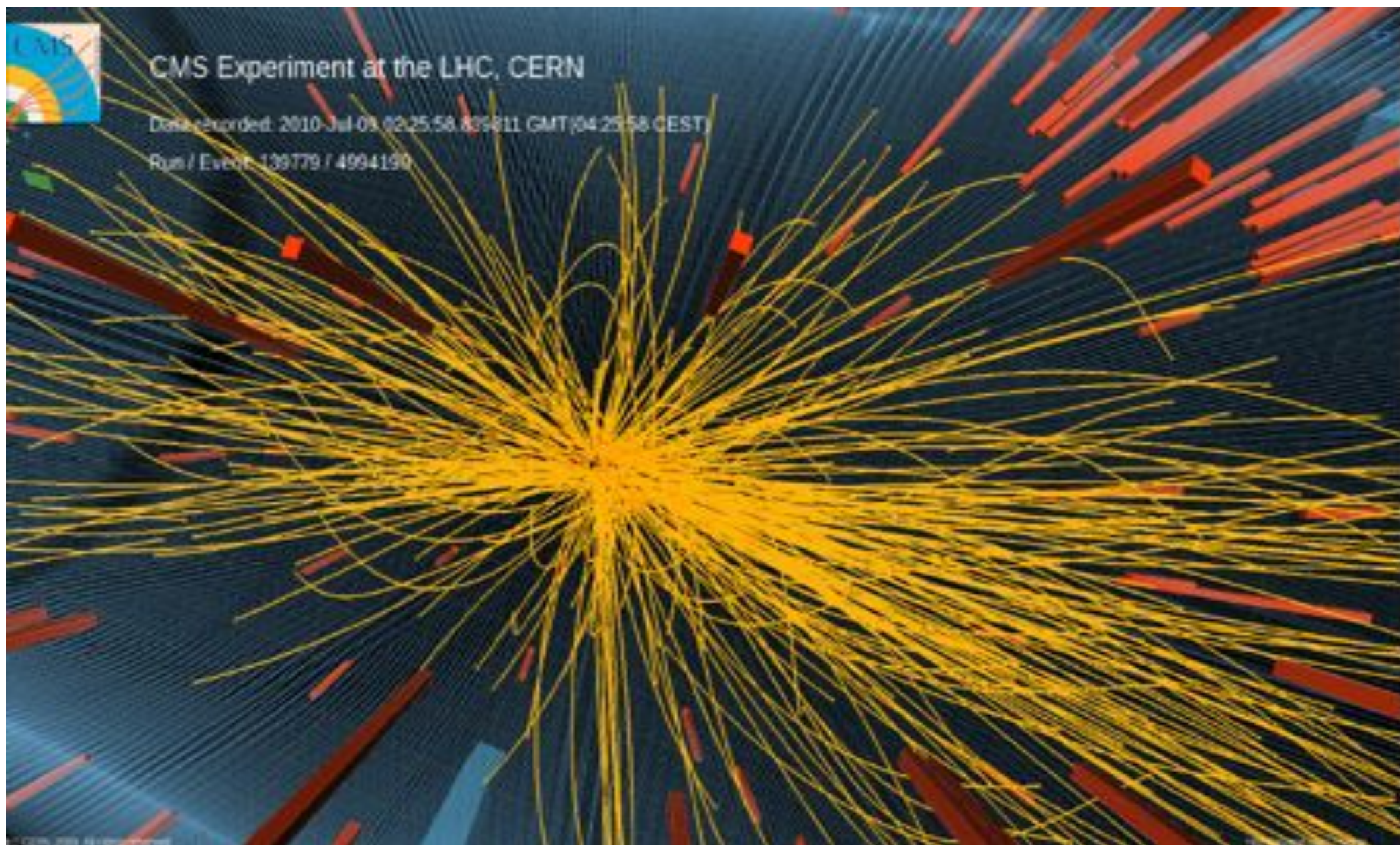
**Le osservazioni astronomiche  
possono ricostruire la distribuzione  
di questa "materia oscura" ma non  
identificarne la natura**

**Di cosa è fatta la Materia Oscura?**

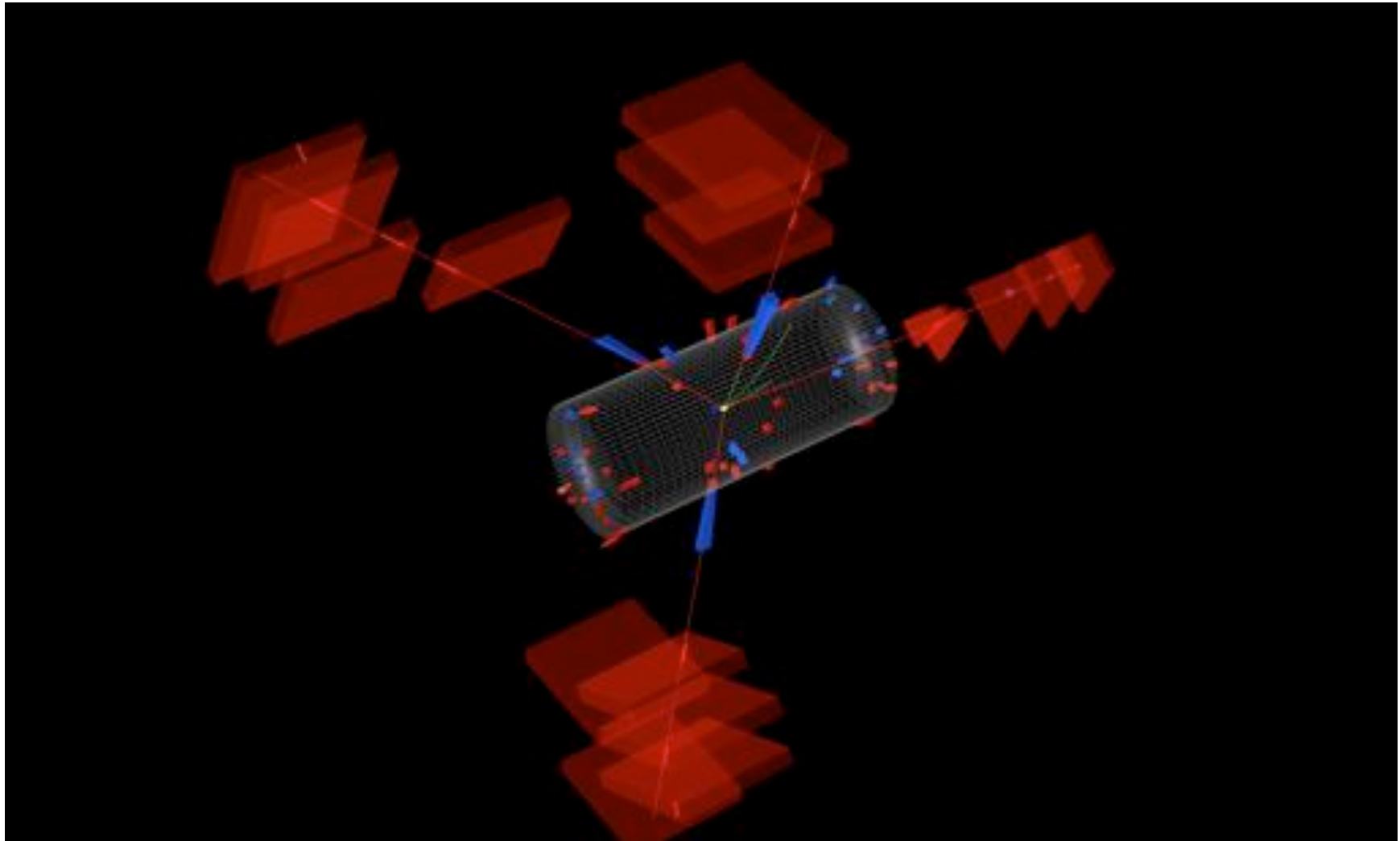
*Rob. Conway 94*



# L' avventura è cominciata!



## Ci si aspettano sorprese...





## Il quadro d'insieme



**Essere pronti con la mente libera da pregiudizi!  
La fisica è una scienza sperimentale... Mai dimenticarlo.**

## Qualche dato sulle ricercatrici



Le ricercatrici sono circa il 10% della popolazione che lavora al progetto LHC e vengono da tutte le parti del mondo. Se guardiamo la componente italiana questa % sale a circa il 20%.