

L'Universo e le particelle: alla frontiera della conoscenza

Fabrizio Palla
INFN Sezione di Pisa e CERN



4 febbraio 2019
Liceo XXV Aprile - Pontedera



Di cosa è fatto l'Universo? Perché siamo qui? Che fine farà ?



100 anni di Meccanica quantistica — atomi,
molecole, nuclei, quark

100 anni di Relatività generale — gravità,
galassie, cosmo

2012: scoperta del Bosone di Higgs da ATLAS e CMS al CERN
completa il modello teorico della materia su scala microscopica

2016: scoperta delle Onde Gravitazionali da Virgo e LIGO
completa il quadro teorico della Relatività generale

50 anni di connessione tra fisica delle
particelle e cosmologia

I numeri dell'Universo

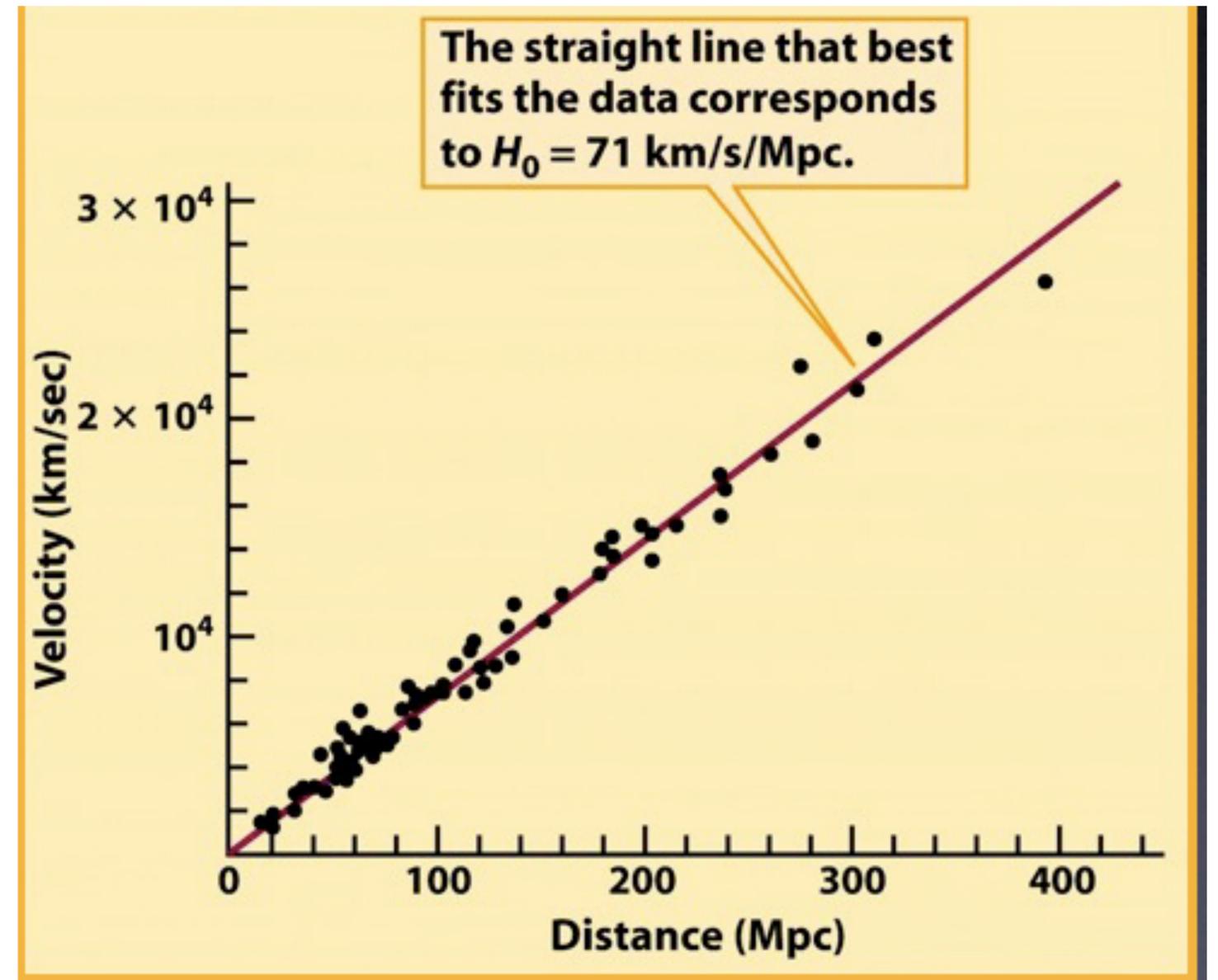
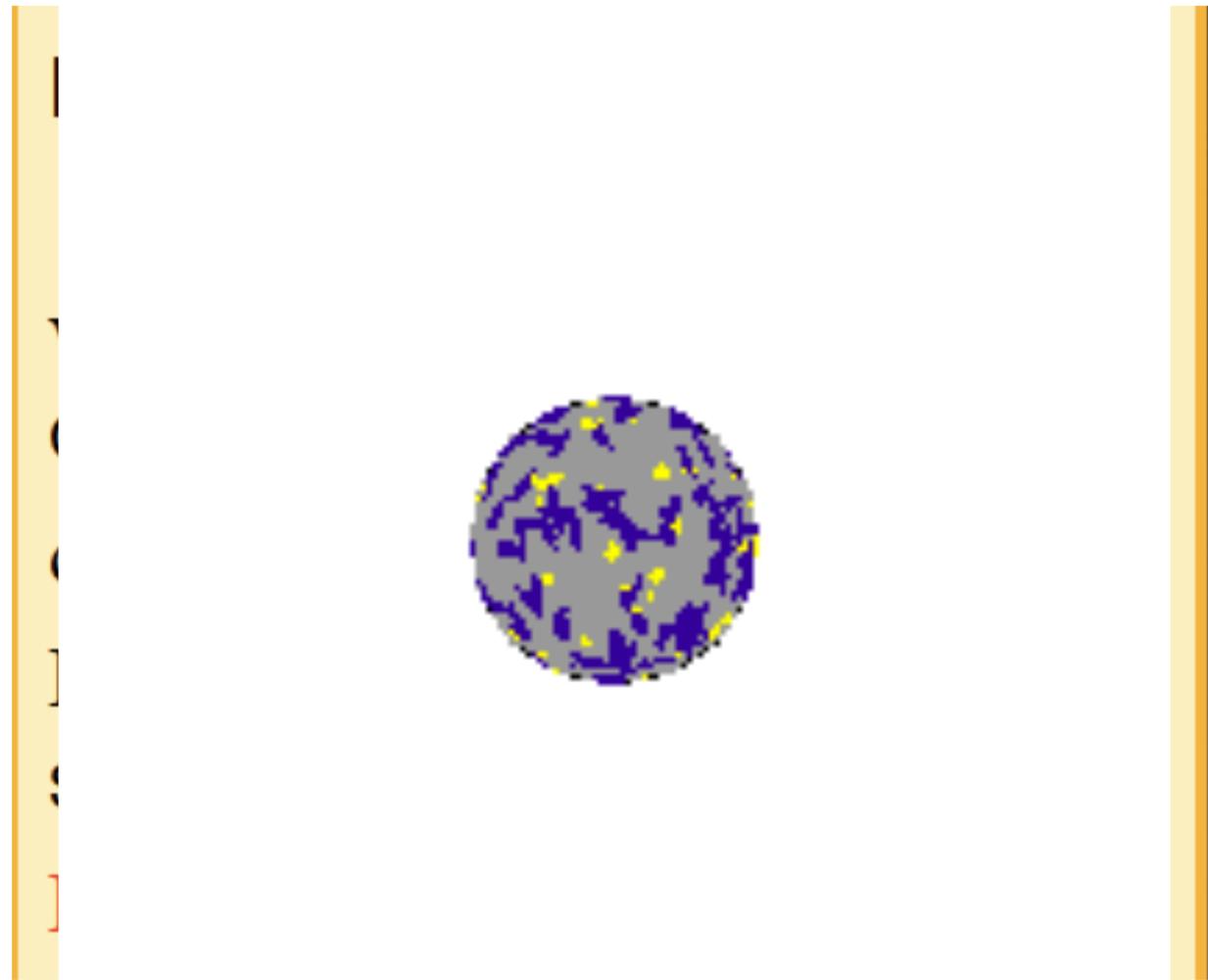


V. Van Gogh — Notte Stellata

Hubble Deep Field:
un decimilionesimo del cielo, 10000 galassie
➡ 100 miliardi di galassie nell'universo visibile

L'universo è in espansione

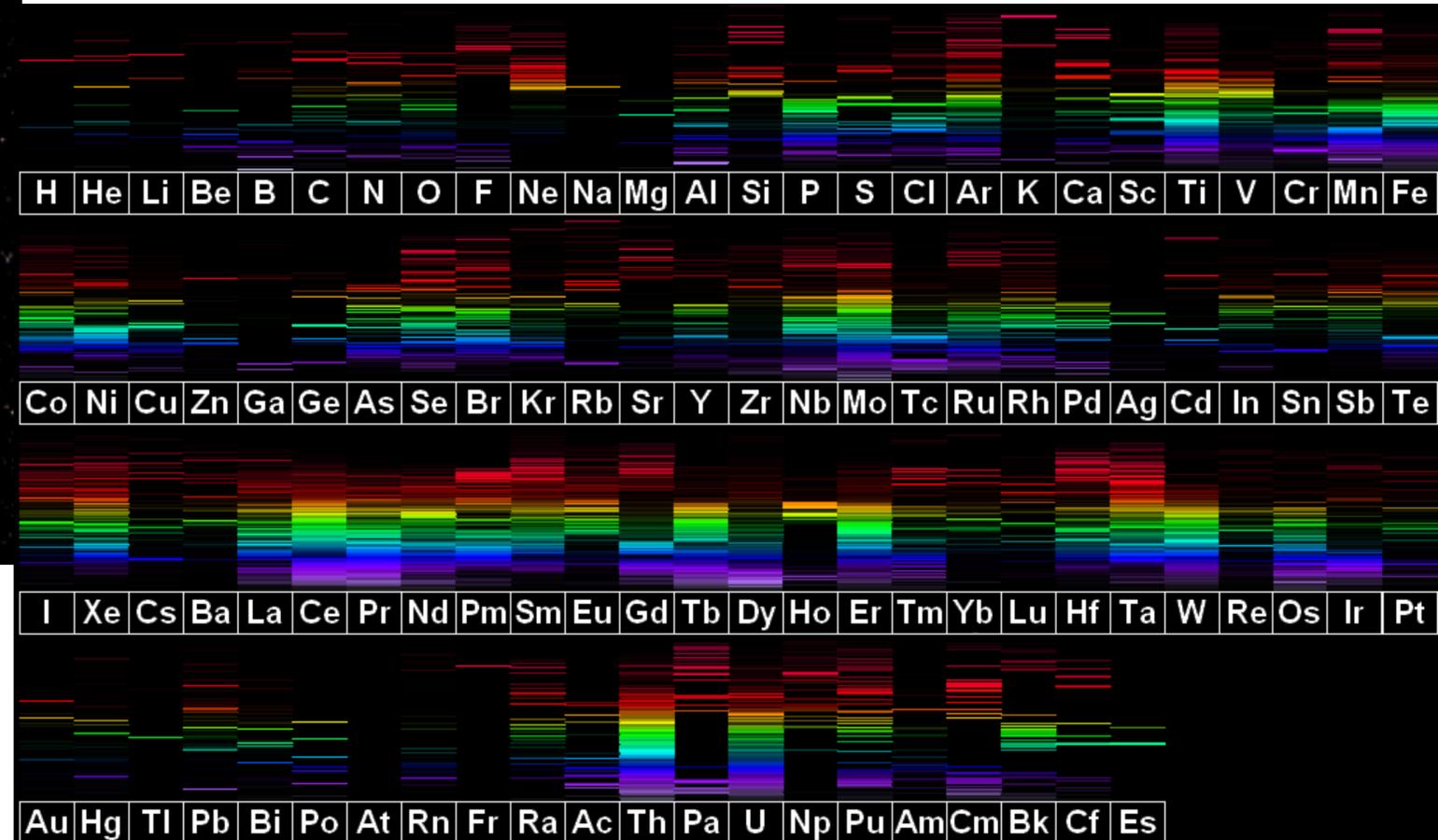
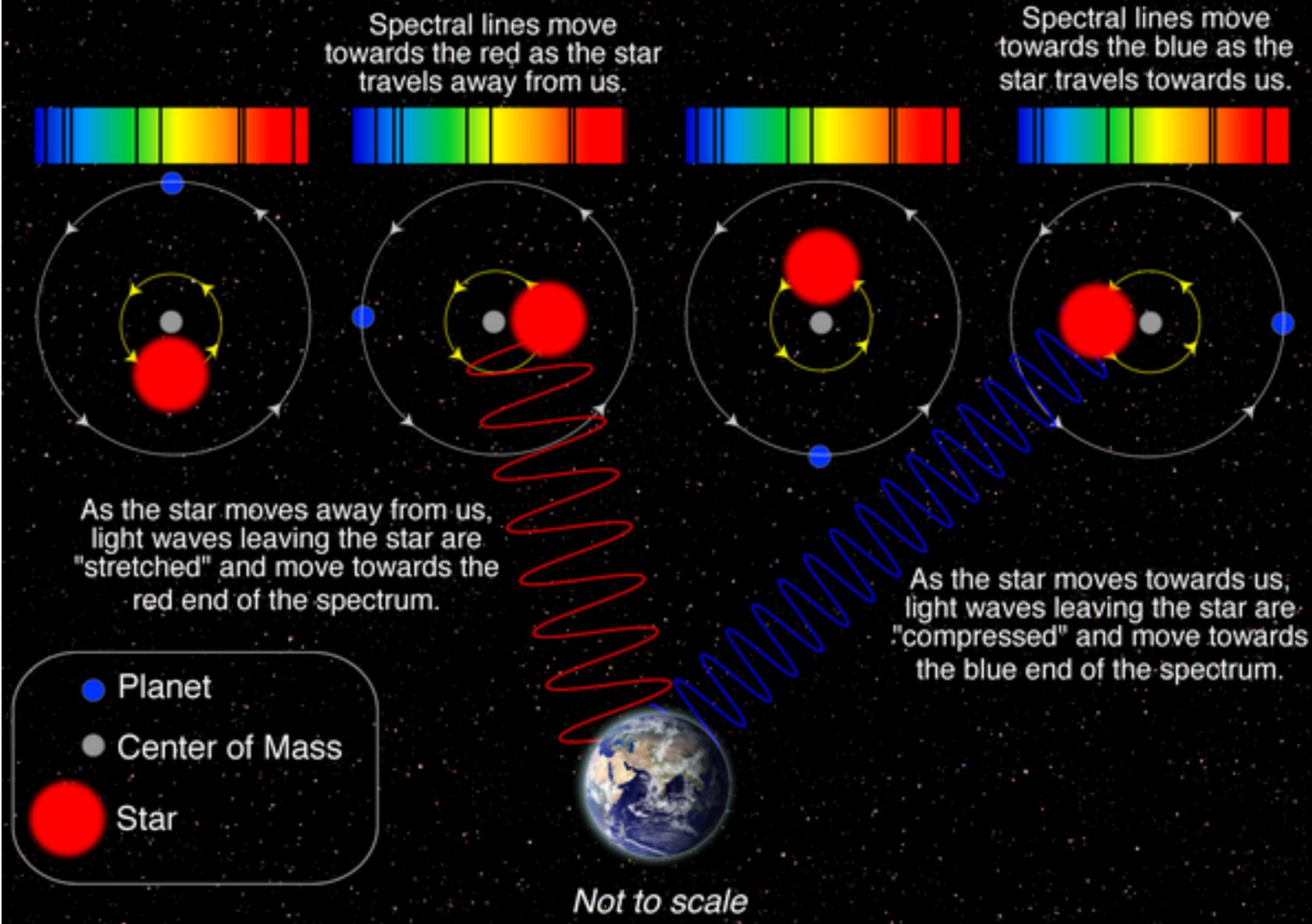
Nel **1929 Edwin Hubble** fece una delle scoperte più importanti nella storia dell'Astronomia: **le galassie distanti si allontanano dalla Via Lattea con una velocità di recessione proporzionale alla loro distanza**



1 Mpc ~ 30 mila miliardi km = 3×10^{13} km

Radial Velocity Method

The star and planet orbit their common center of mass.



II BIG BANG

La legge di Hubble implica che l'universo si sta espandendo ad un tasso costante. Se estrapoliamo indietro nel tempo, ciò significa che l'universo abbia avuto un inizio:

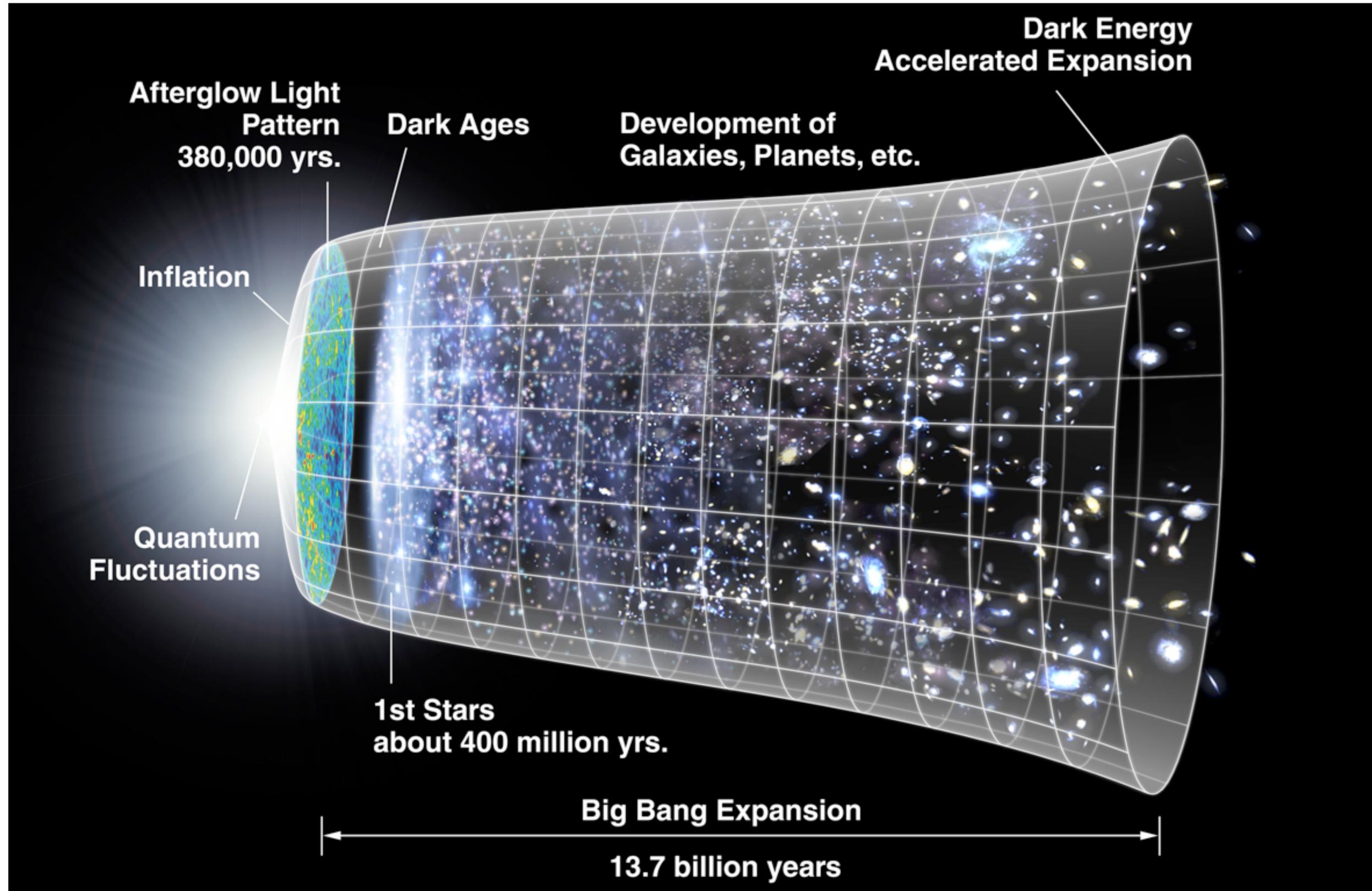
il BIG BANG

Tutte le galassie, la materia, la radiazione e lo spazio hanno avuto origine in un singolo punto (singolarità)

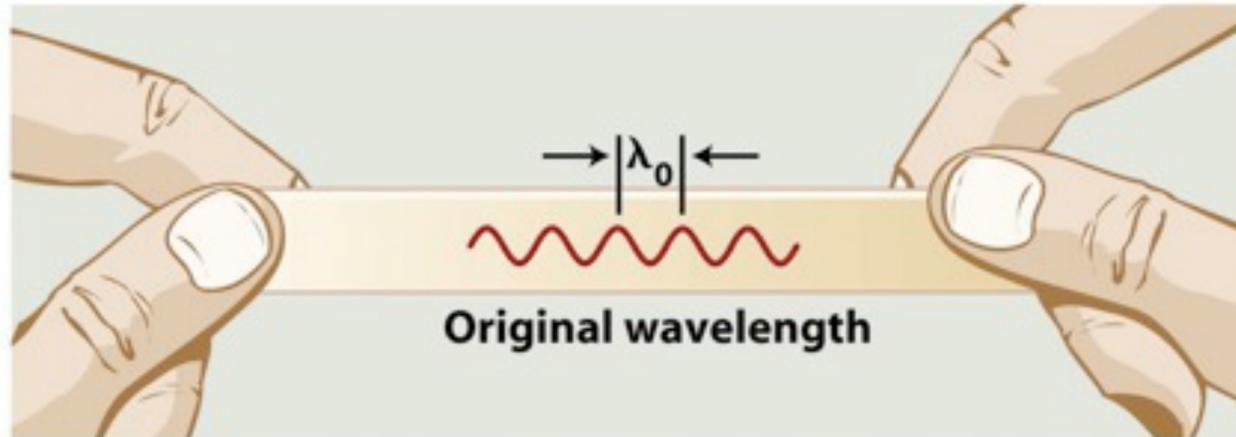
Non un punto nello spazio e nel tempo, ma l'inizio dello spazio e del tempo.

Tutte le leggi che conosciamo non valgono prima del "tempo di Planck" $\sim 10^{-43}$ s

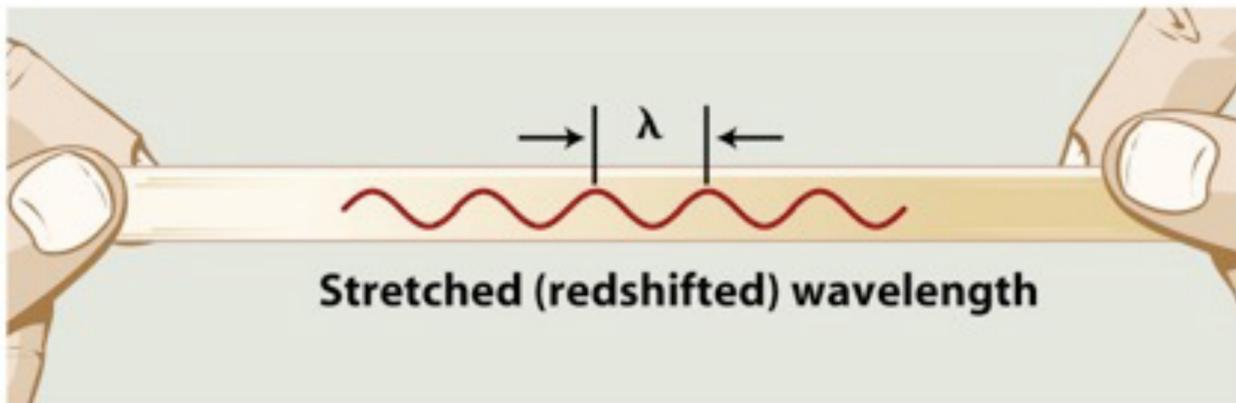
Evoluzione dell'Universo



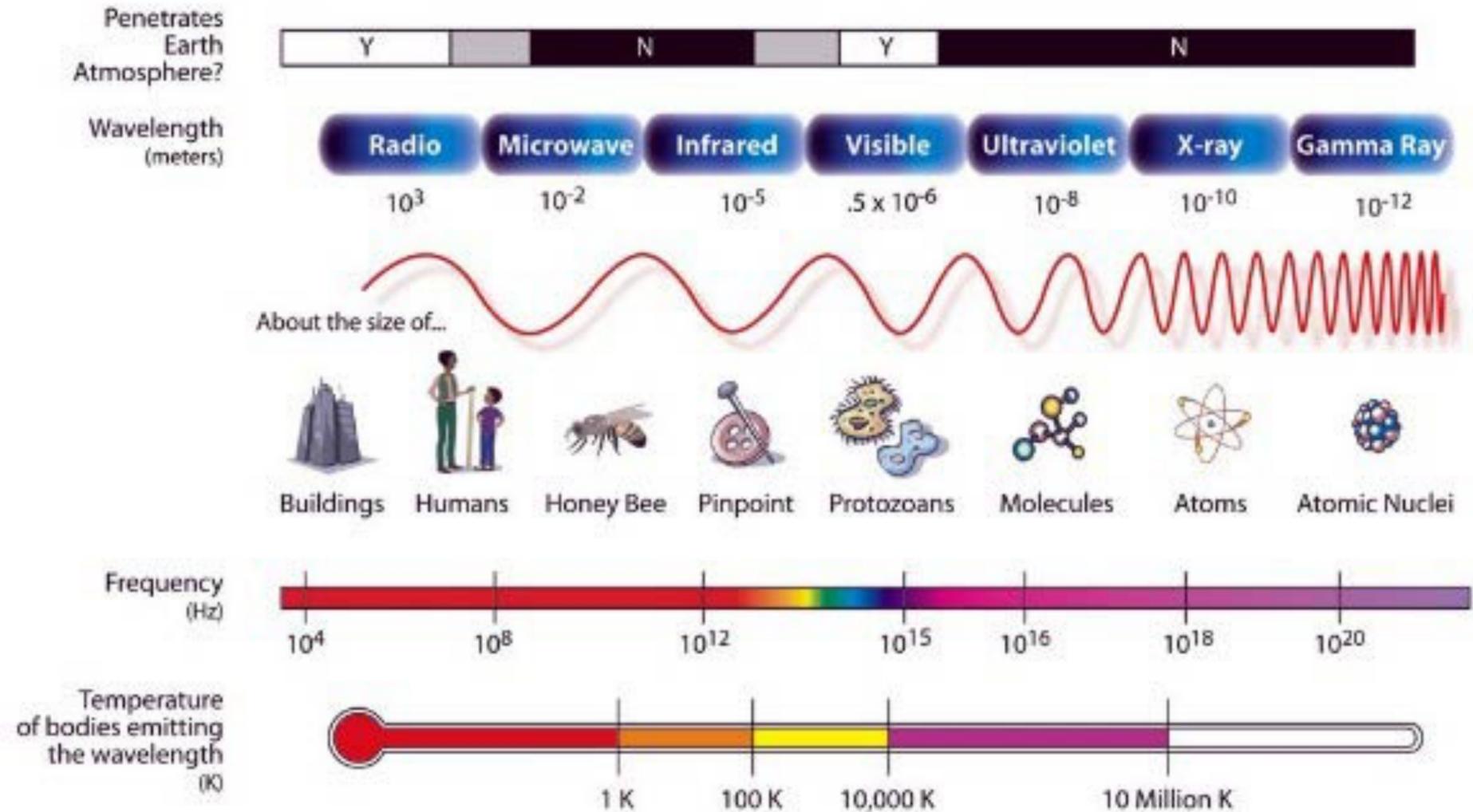
Il fondo di radiazione cosmica



(a) A wave drawn on a rubber band ...



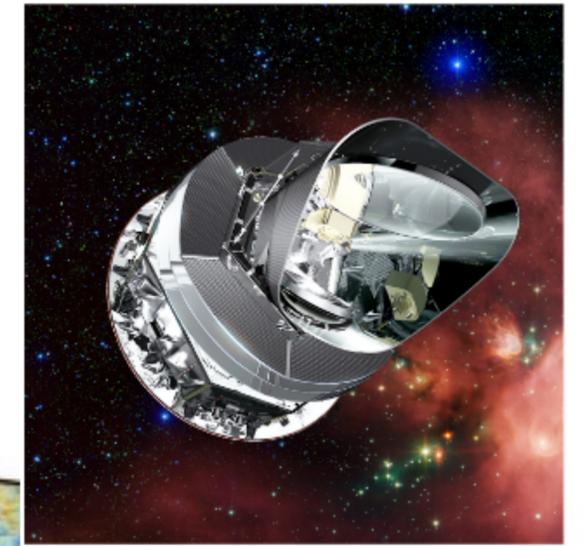
(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.



La lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche aumenta con l'espansione

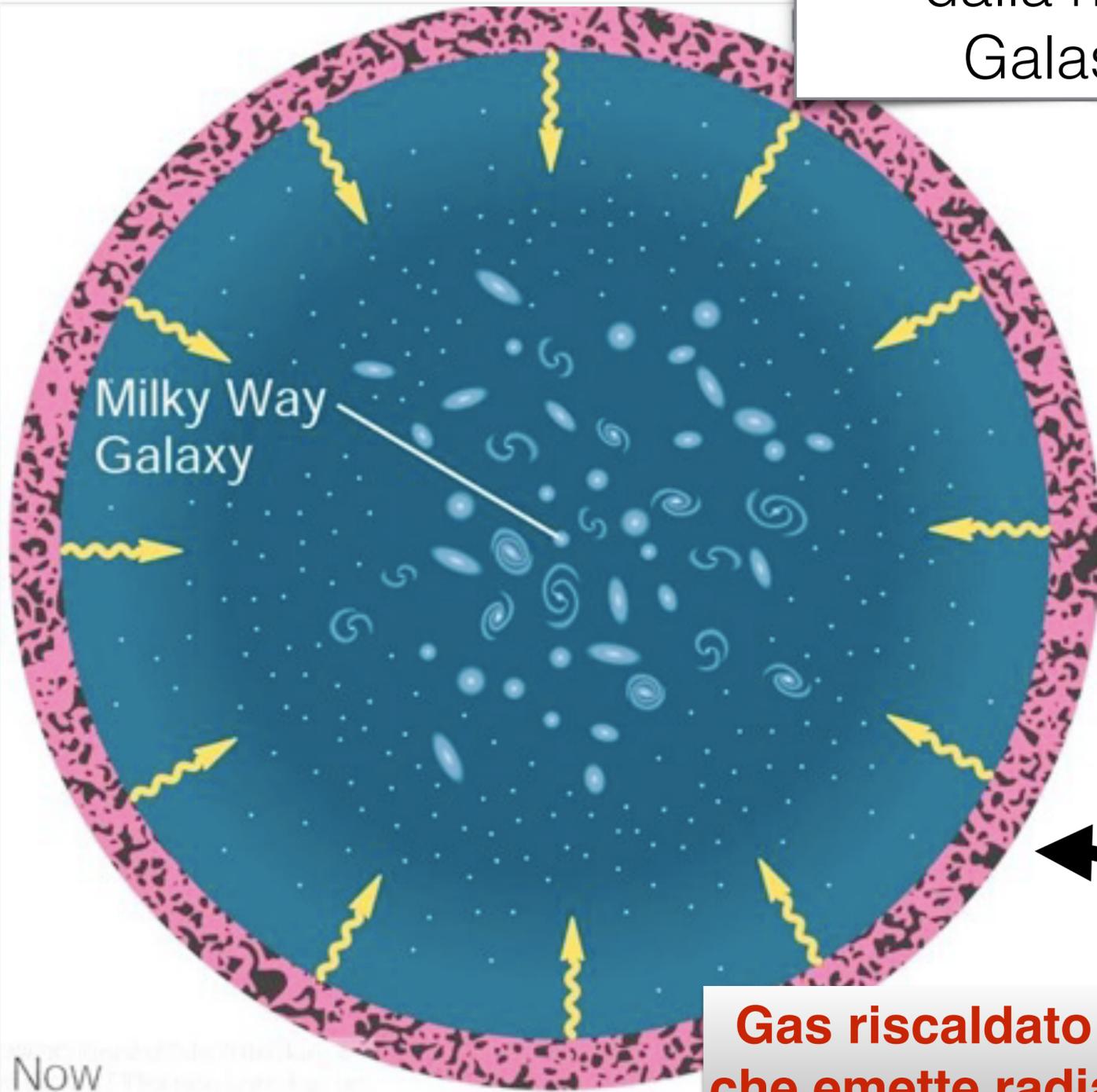
Radiazione cosmica di fondo: luce emessa dopo ~300 mila anni dopo il Big-Bang

La temperatura dell'universo attuale è 2.7 °K: la lunghezza d'onda delle onde di fondo cosmico è 1.9 mm o 160.2 GHz



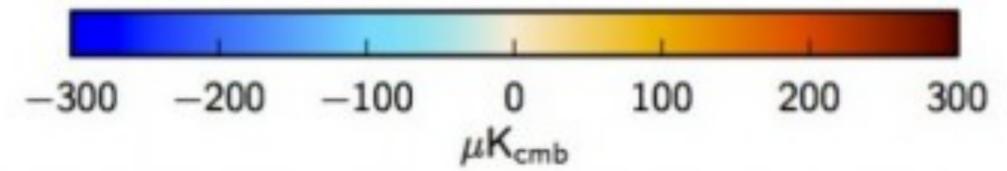
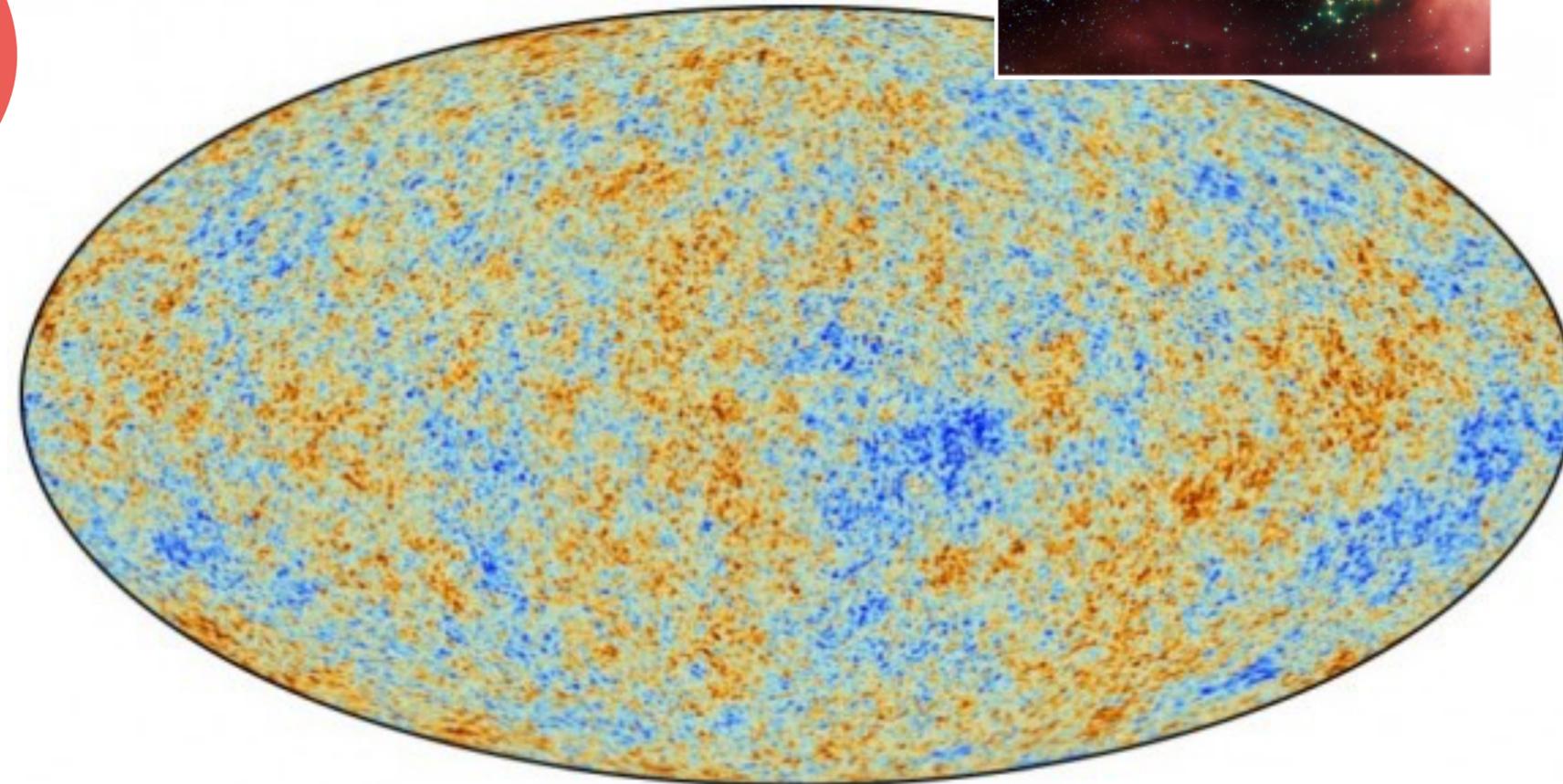
Missione Planck

Regione visibile
dalla nostra
Galassia



Milky Way
Galaxy

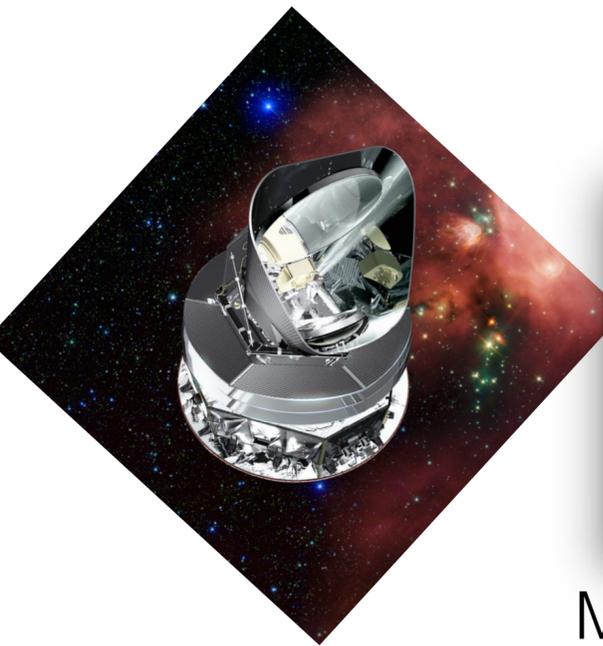
**Gas riscaldato dal Big Bang
che emette radiazione termica**



Now

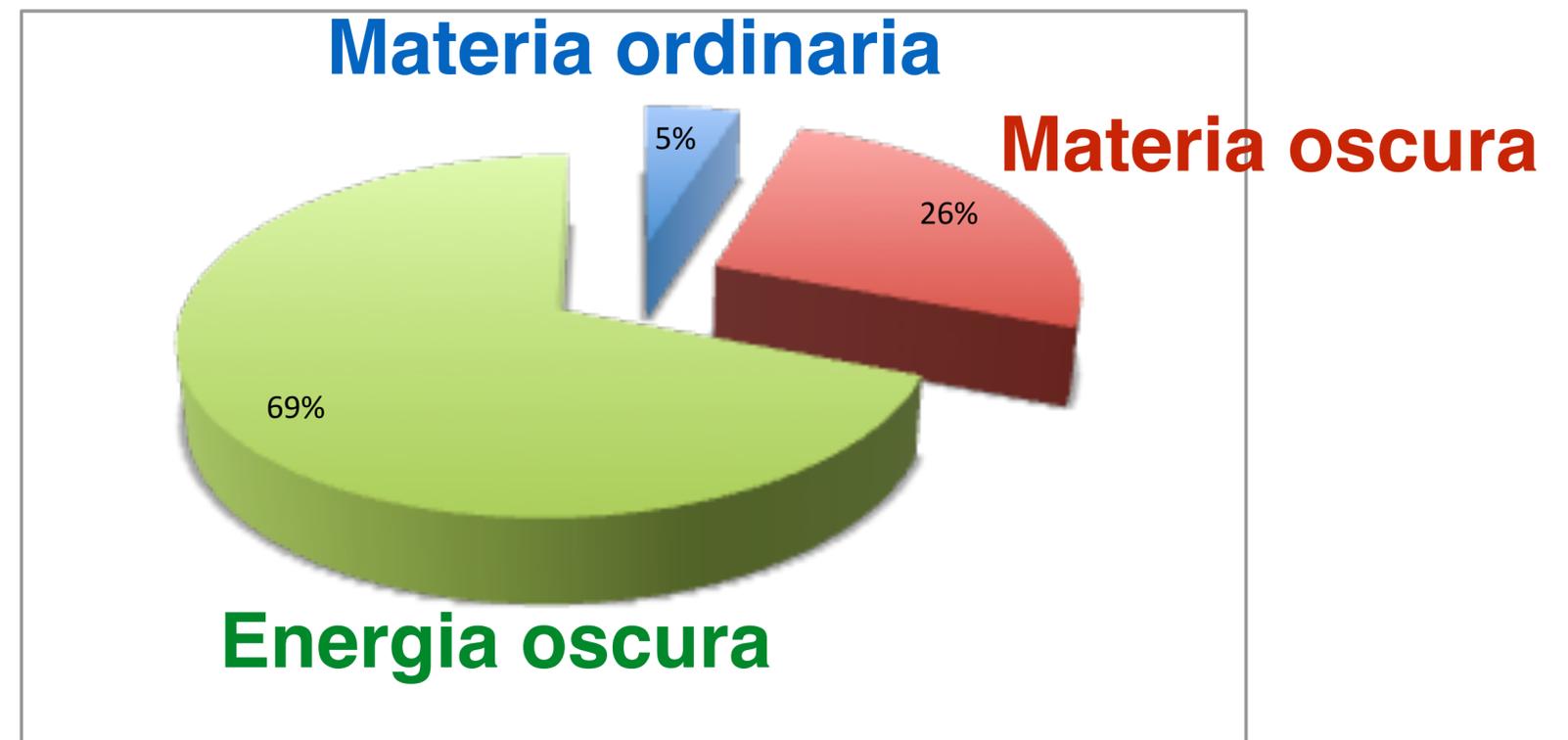
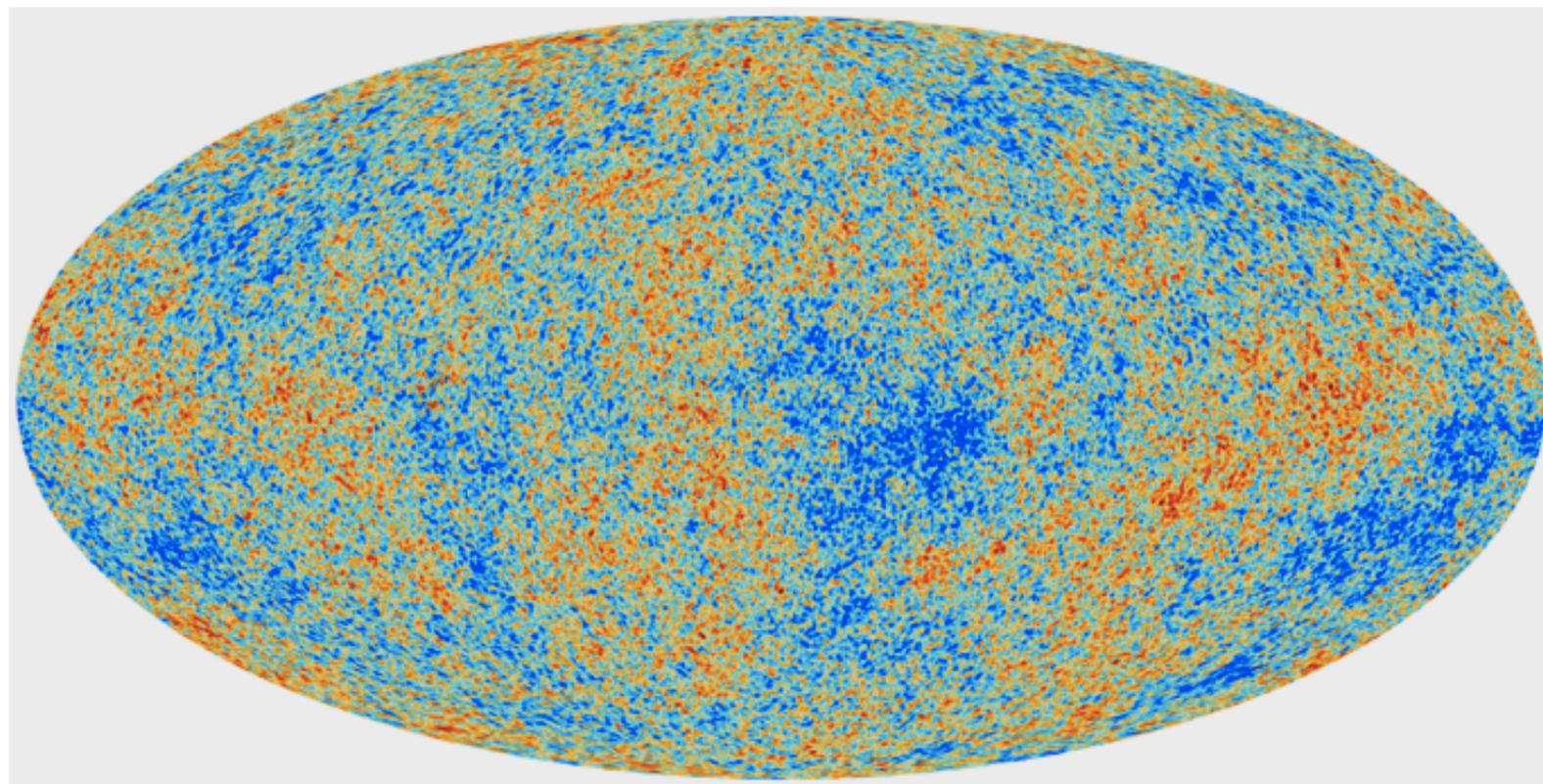
Cosa compone l'universo?

Le misure della **differenza di temperatura** tra regioni diverse del cielo interpretata nel modello cosmologico forniscono un risultato sulle proprietà dell'universo e la sua composizione in termini di materia ed energia, nonché della sua età



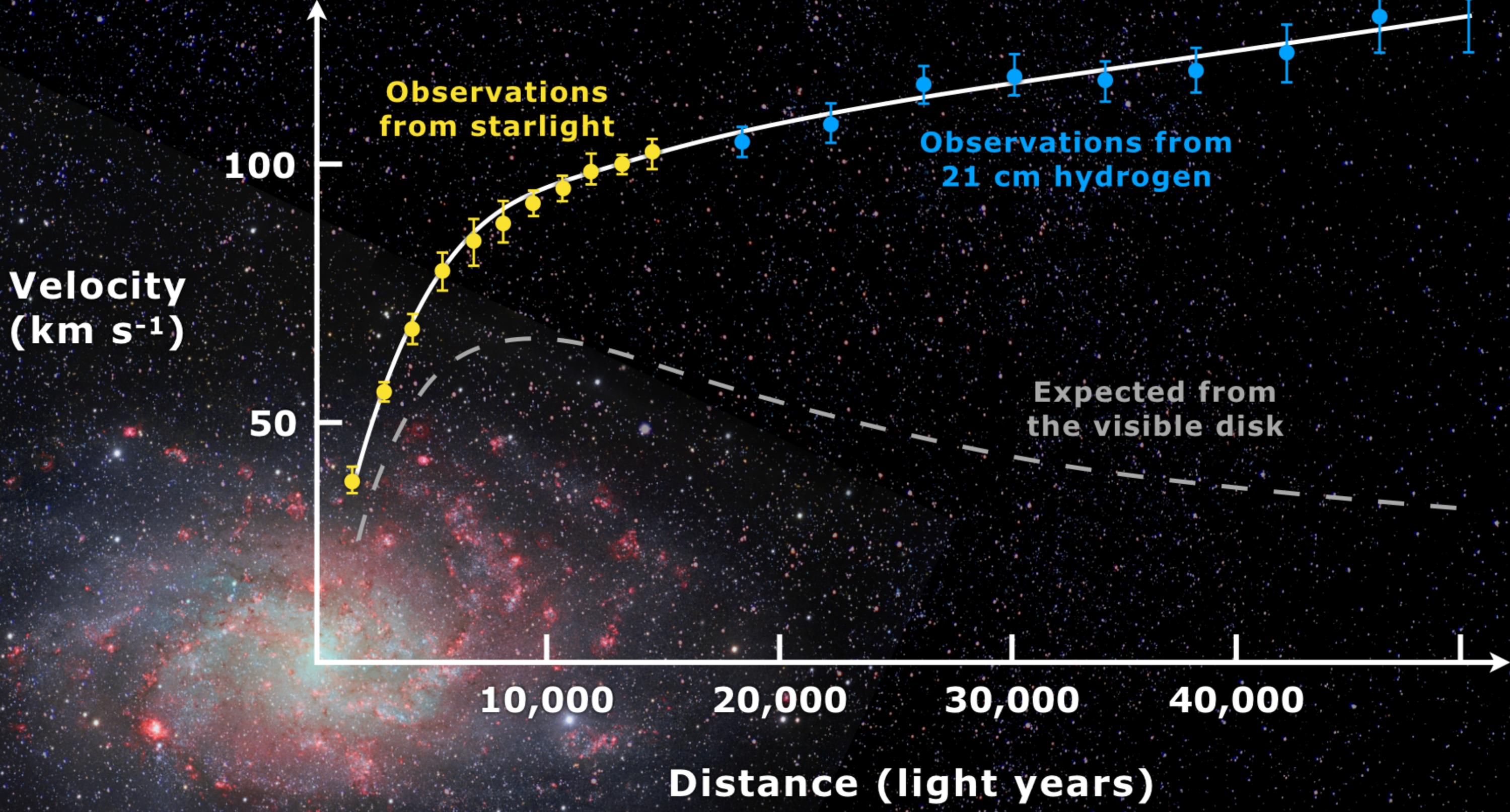
Missione Plank

9 frequenze diverse di osservazione



Età dell'universo 14 miliardi di anni

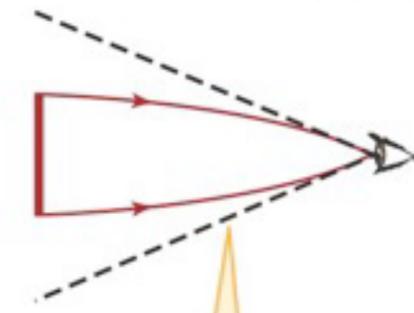
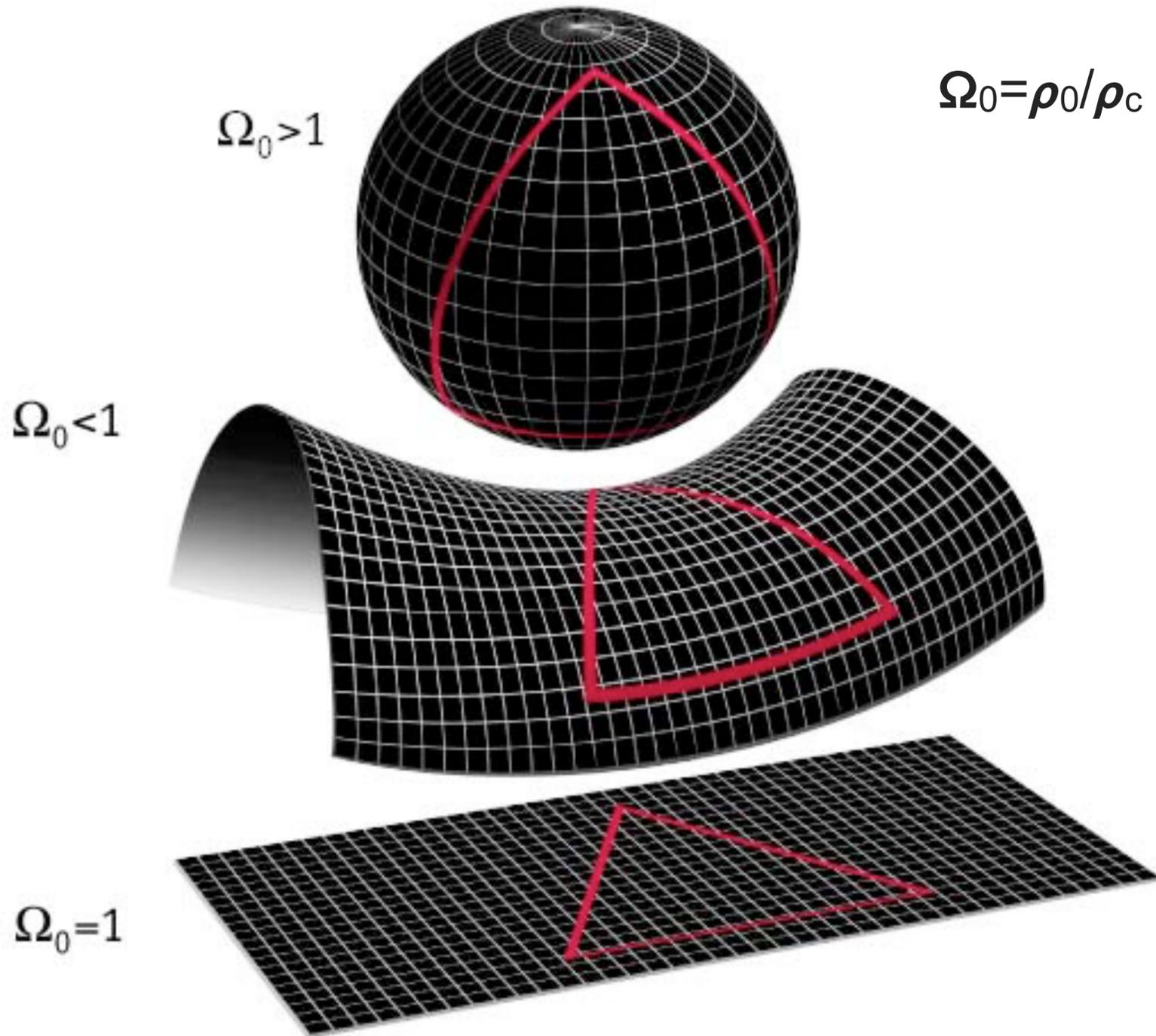
La materia oscura



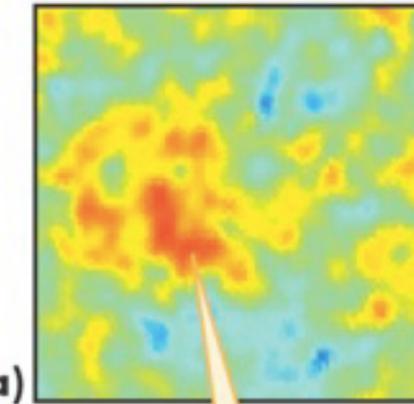
La geometria dell'Universo dipende dalla densità di massa ed energia

ρ_c = densità critica $\sim 10^{-26}$ kg/m³ (circa 10 atomi di idrogeno per metro cubo)

$$\Omega_0 = \rho_0 / \rho_c$$

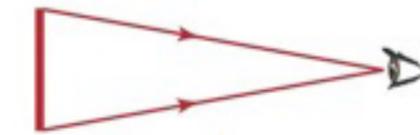


If the universe is closed, light rays from opposite sides of a hot spot bend toward each other ...

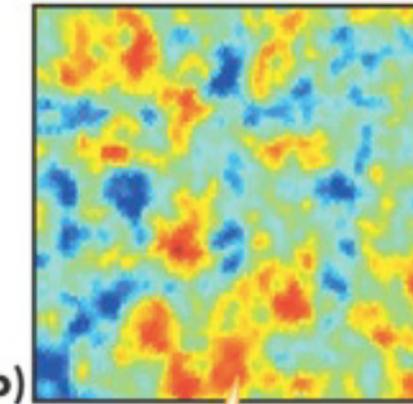


... and as a result, the hot spot appears to us to be larger than it actually is.

$\Omega_0 > 1$
più grandi



If the universe is flat, light rays from opposite sides of a hot spot do not bend at all ...

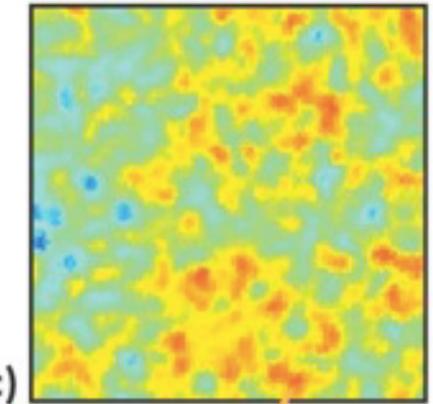


... and so the hot spot appears to us with its true size.

$\Omega_0 = 1$
uguali



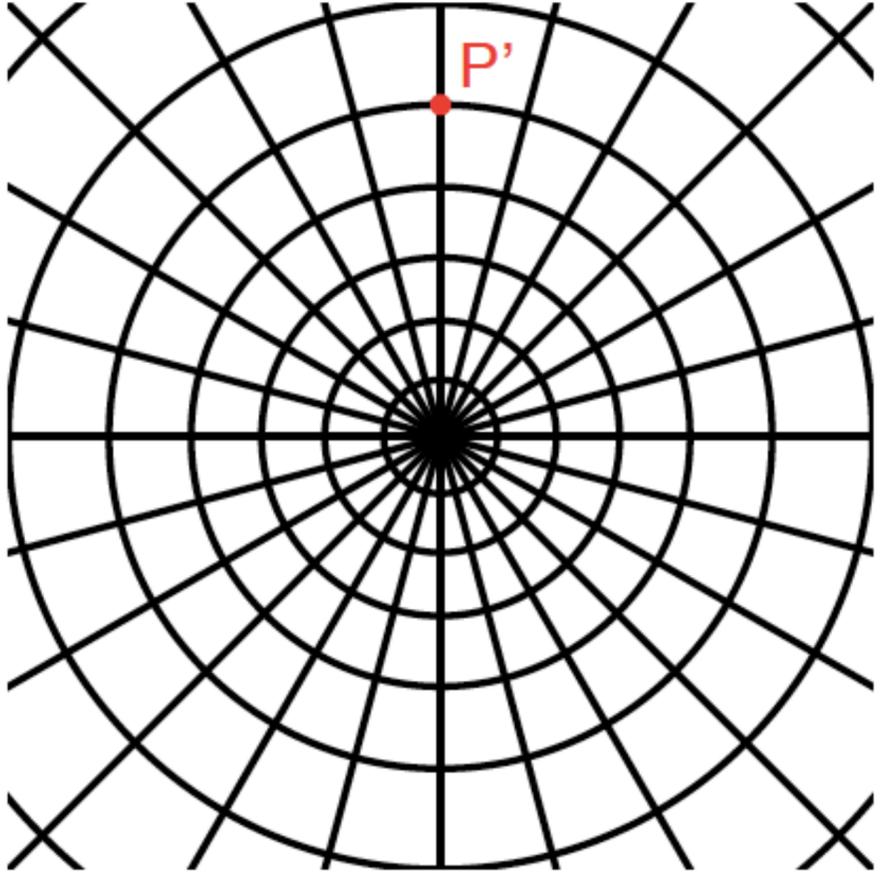
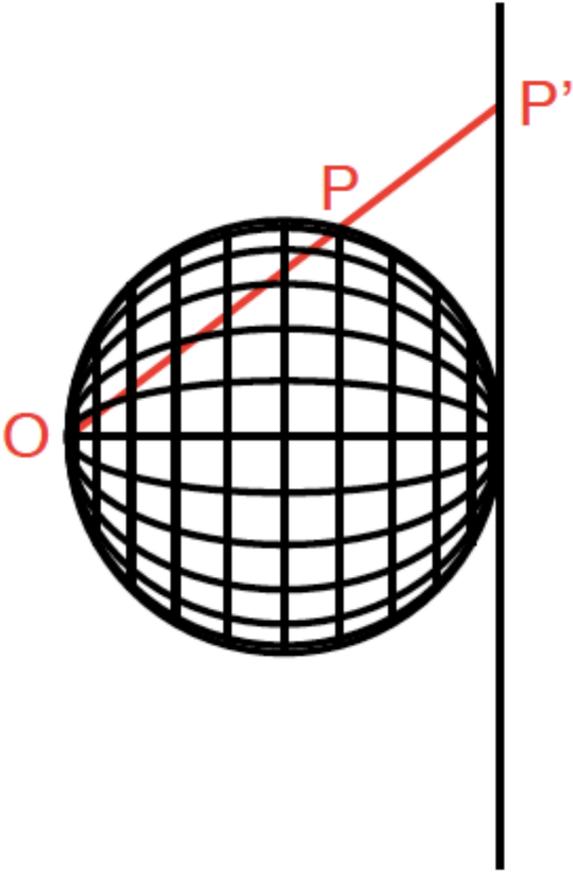
If the universe is open, light rays from opposite sides of a hot spot bend away from each other ...



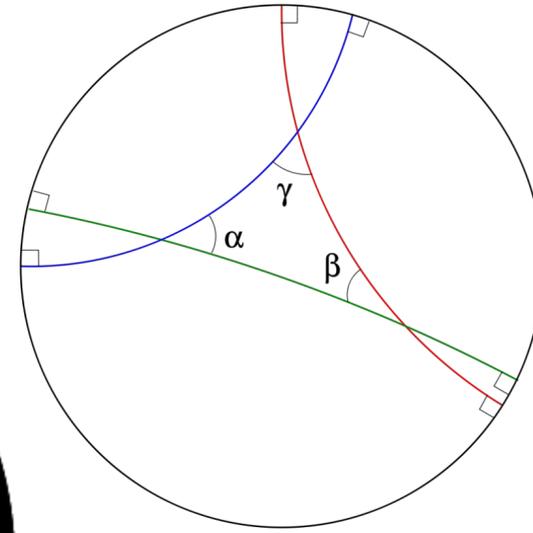
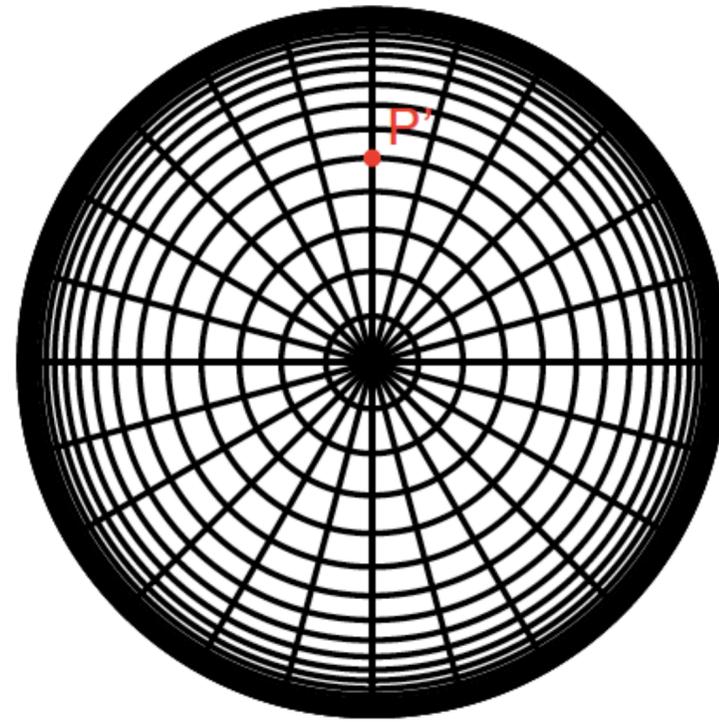
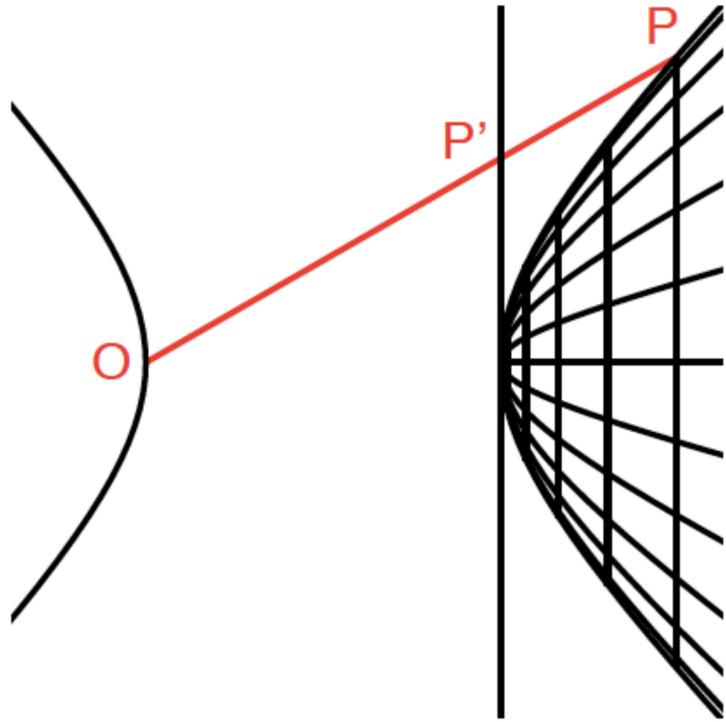
... and as a result, the hot spot appears to us to be smaller than it actually is.

$\Omega_0 < 1$
più piccole

Spazio piatto
Geometria euclidea



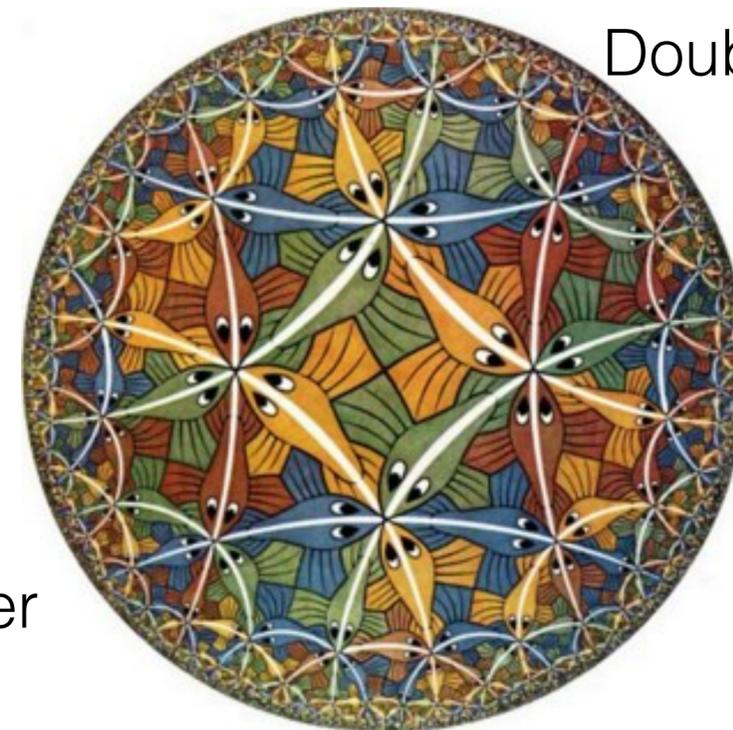
Spazio iperbolico Geometria di Minkowski



Double planetoid - M. C. Escher

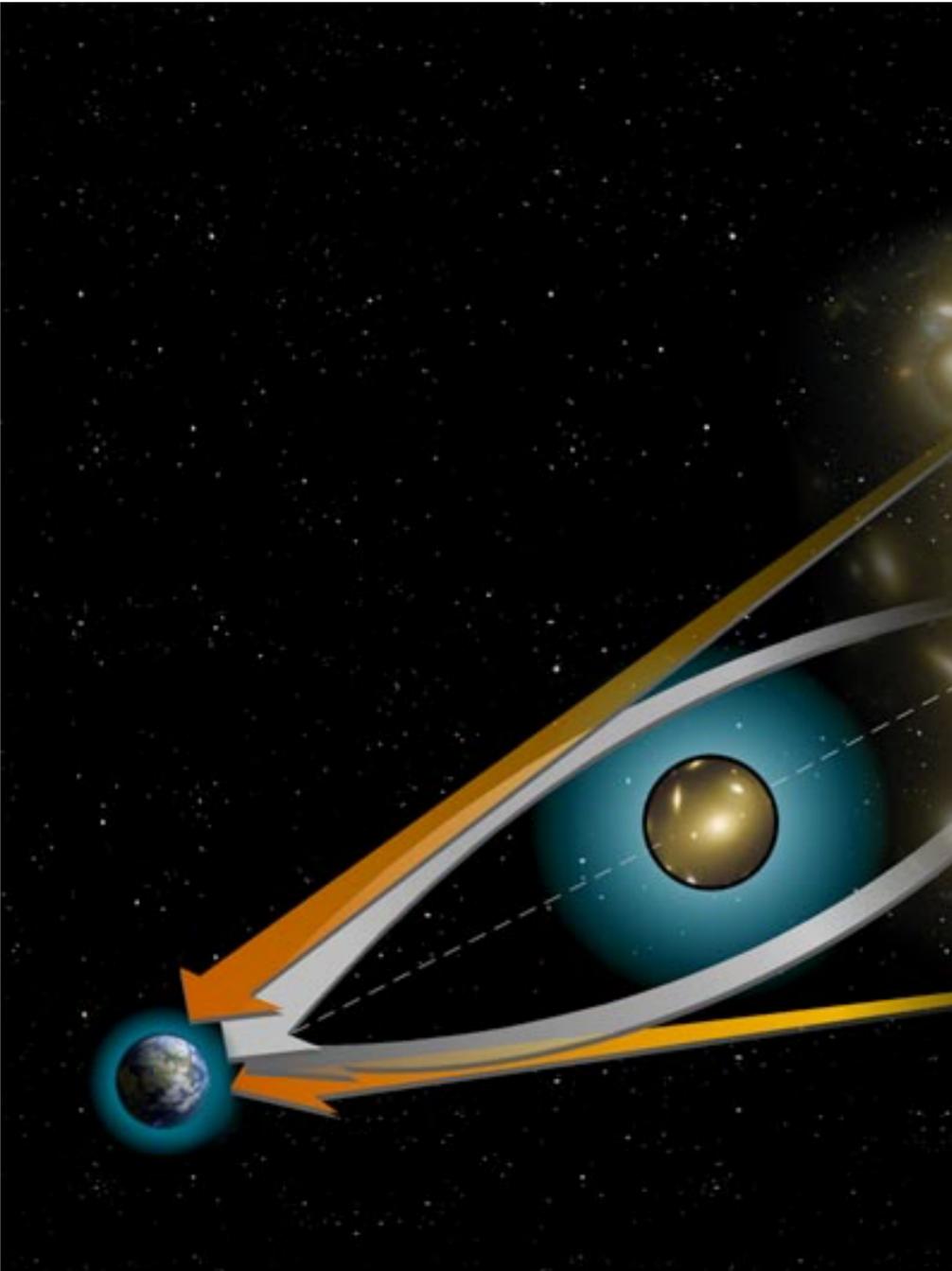
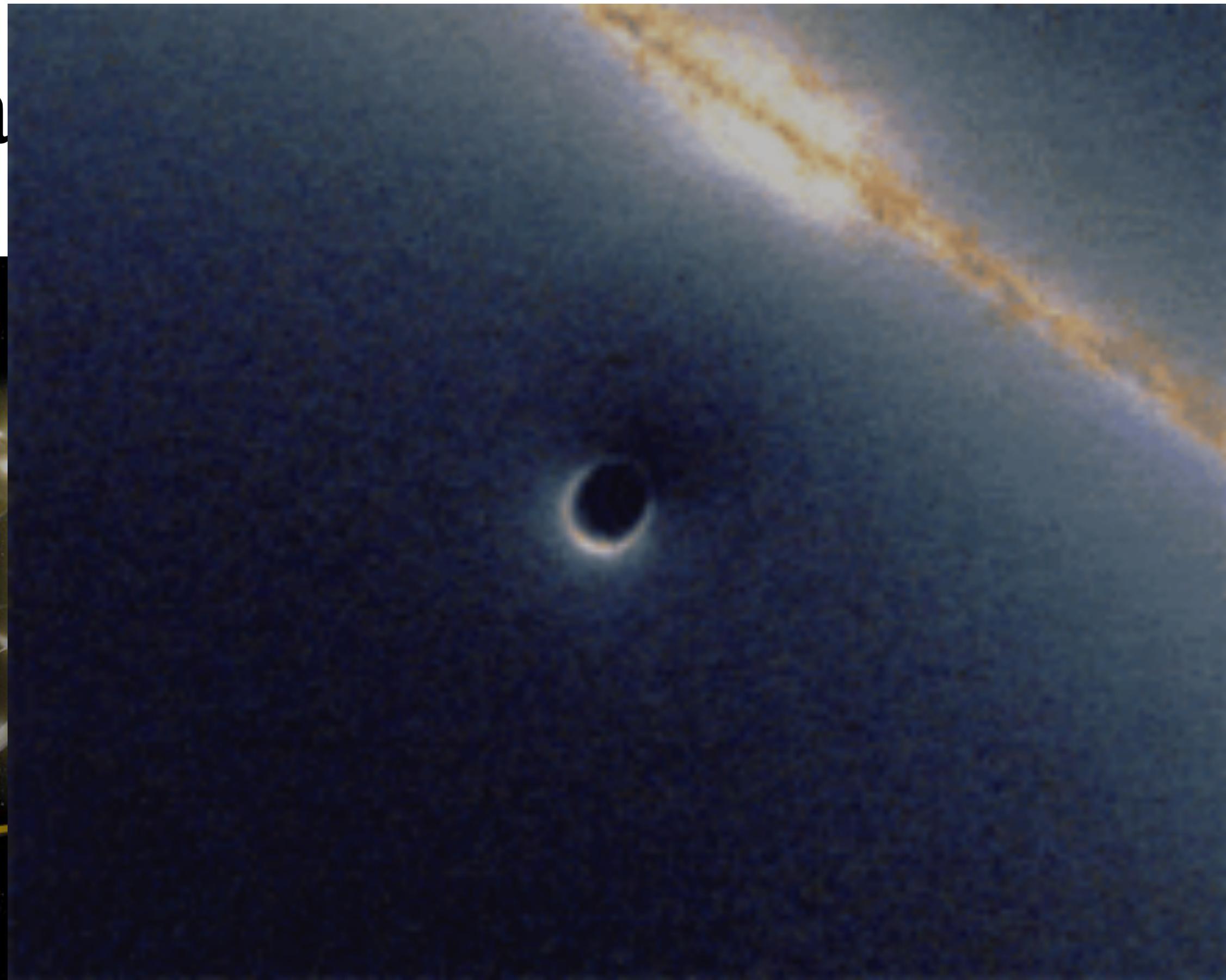


Circle Limit IV - M. C. Escher

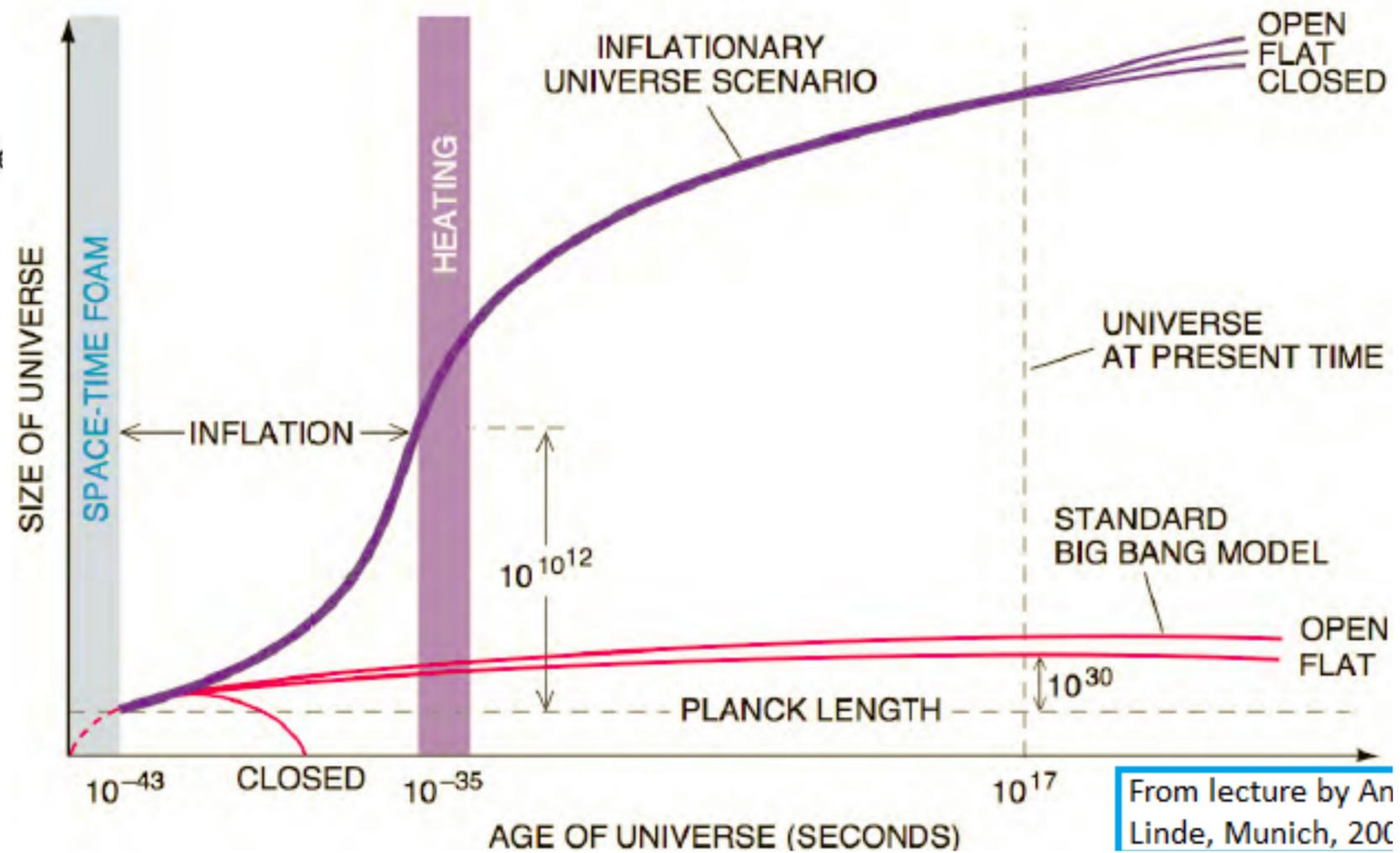
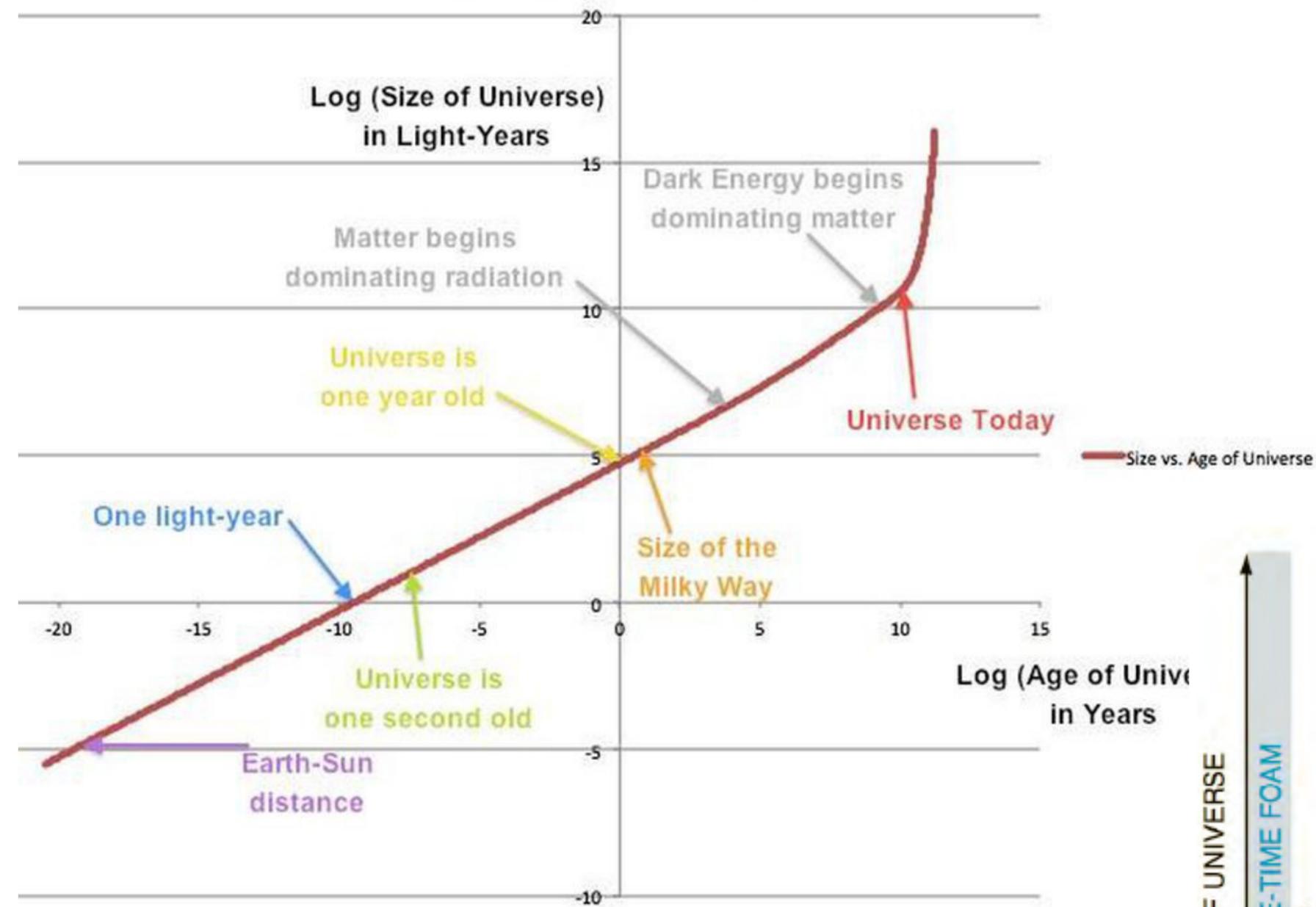


Circle Limit III - M. C. Escher, 1959

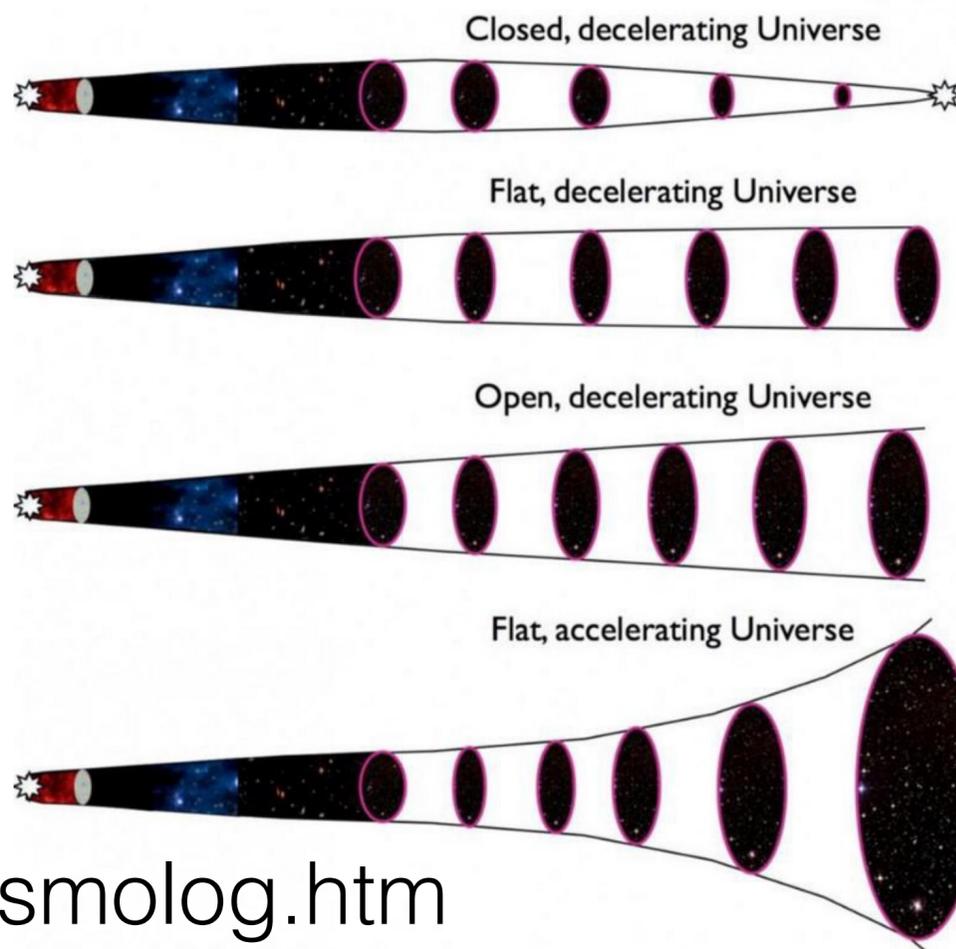
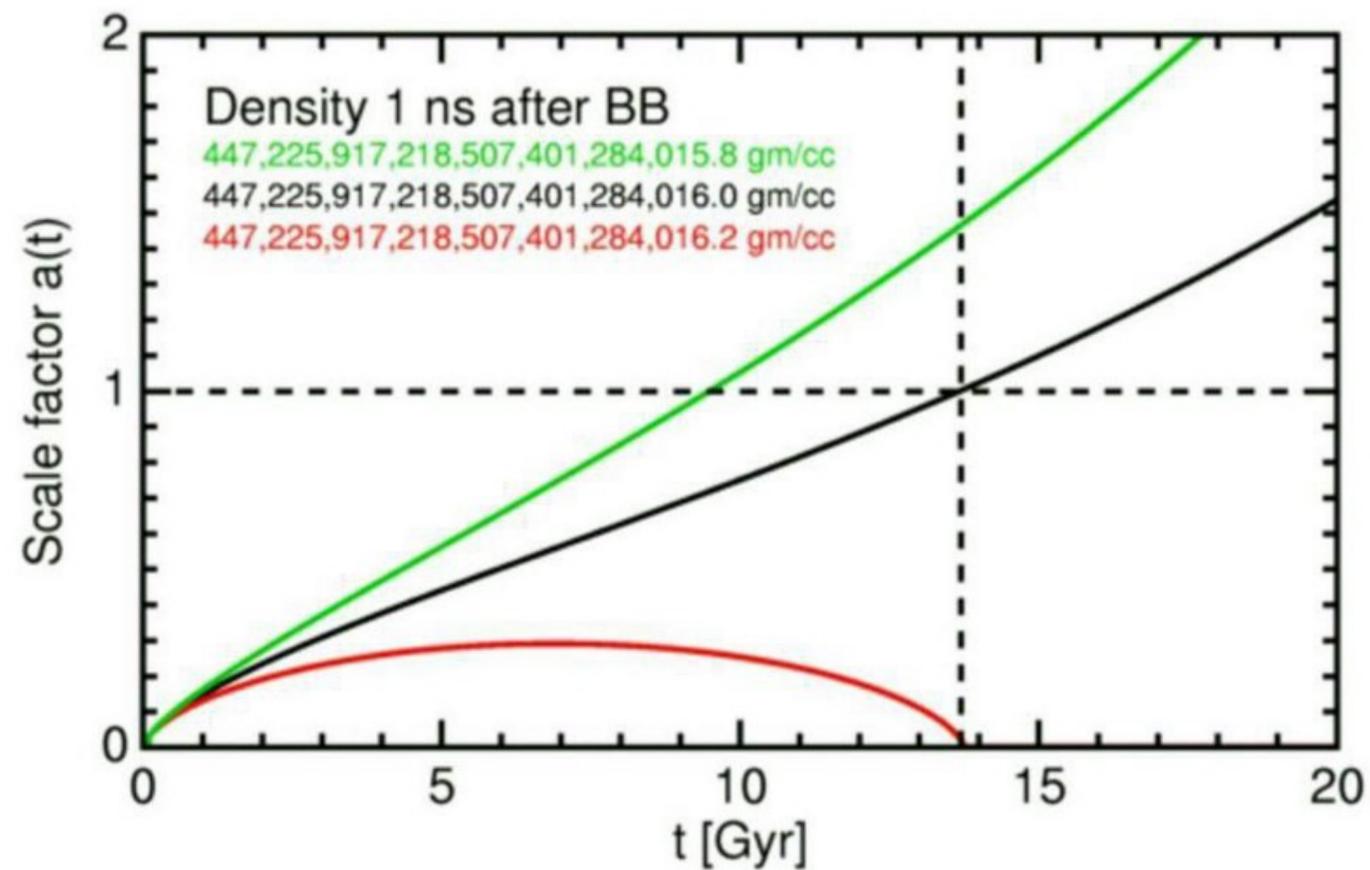
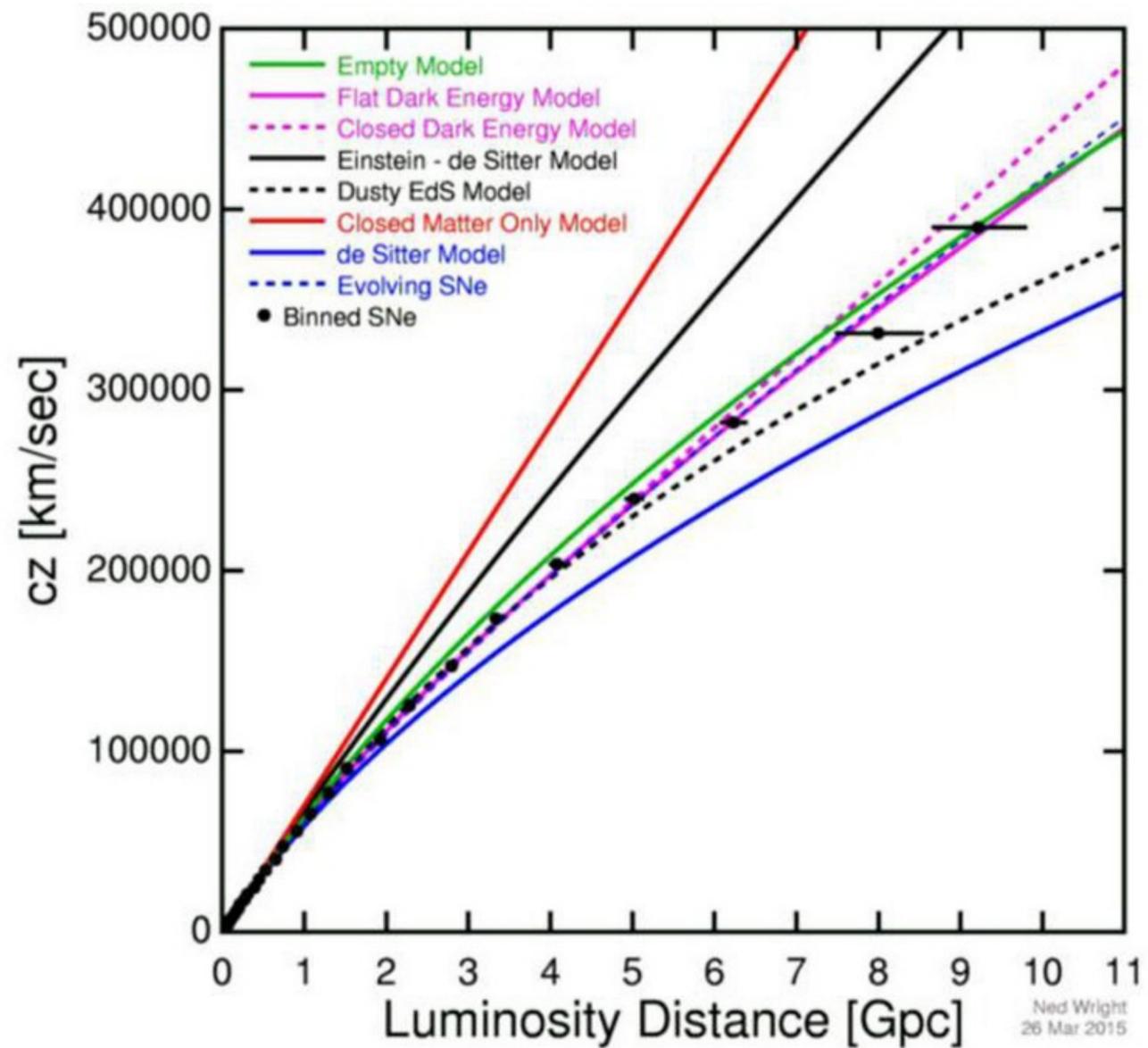
Lente gra

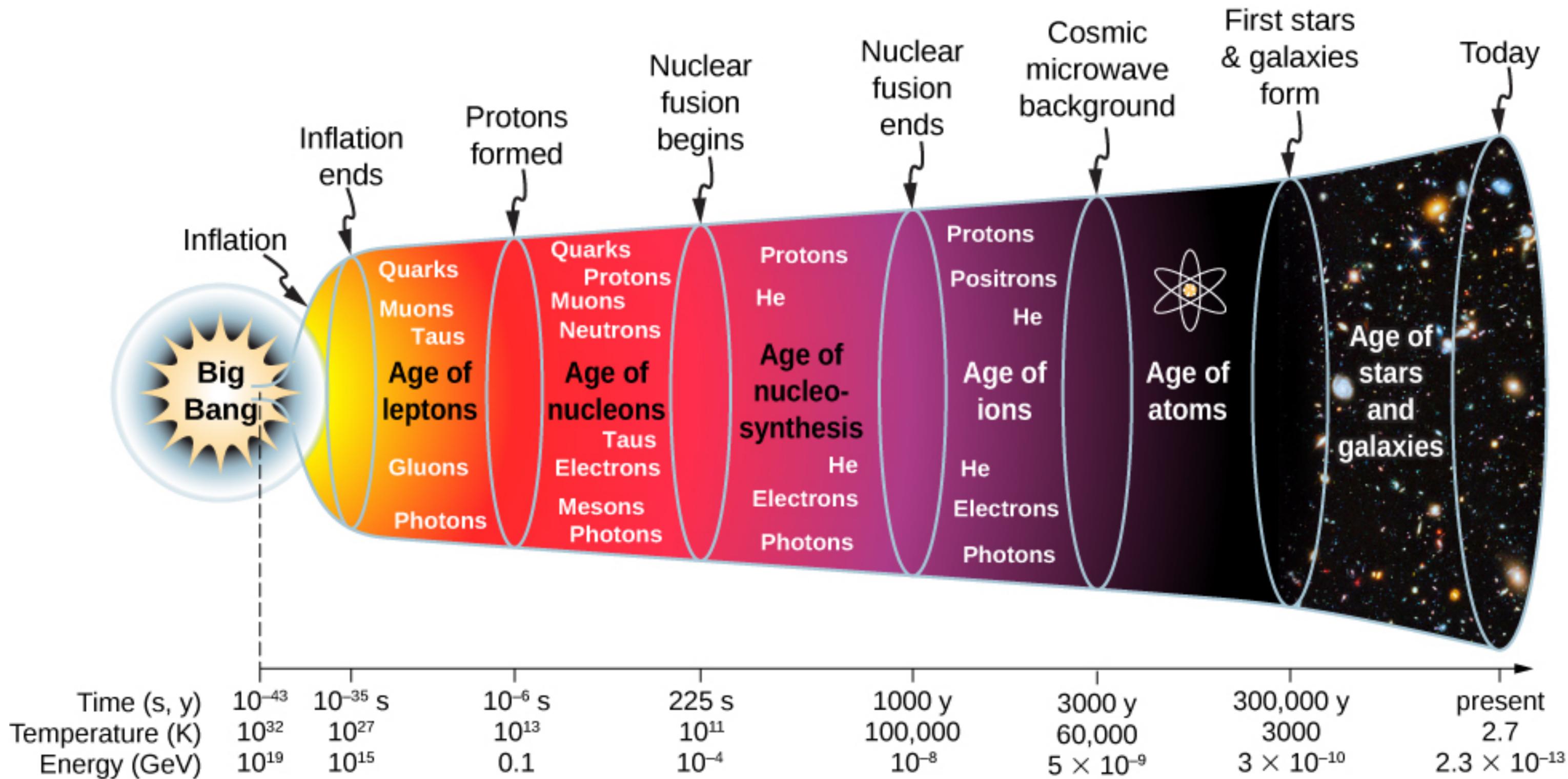


Size vs. Age of Universe



From lecture by An Linde, Munich, 200

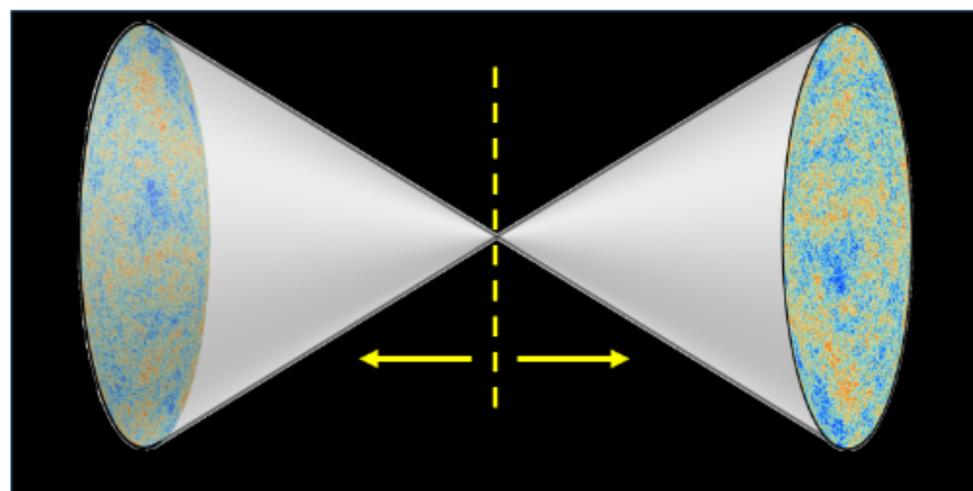
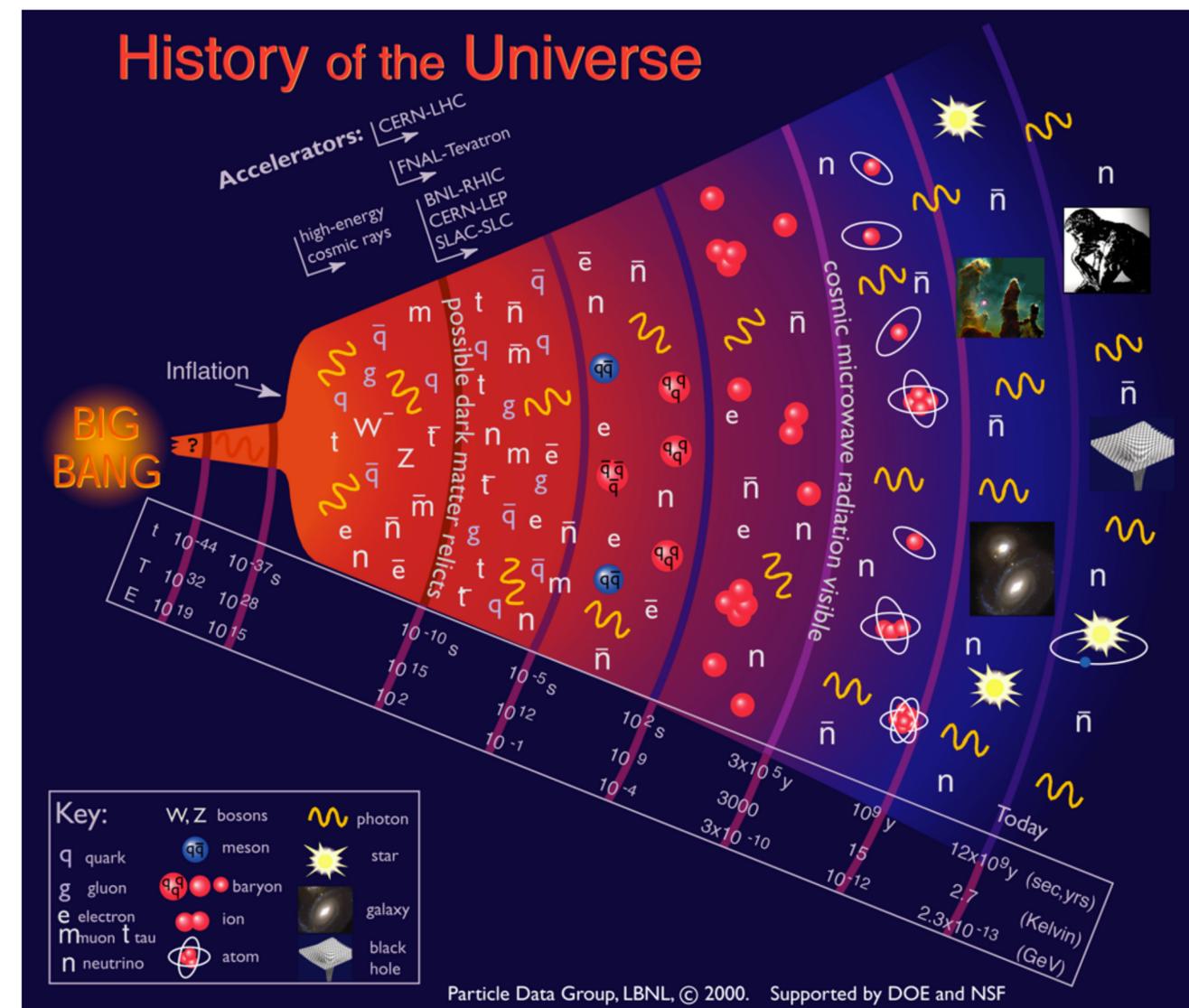




L'origine dell'universo intimamente legata alla fisica delle particelle elementari

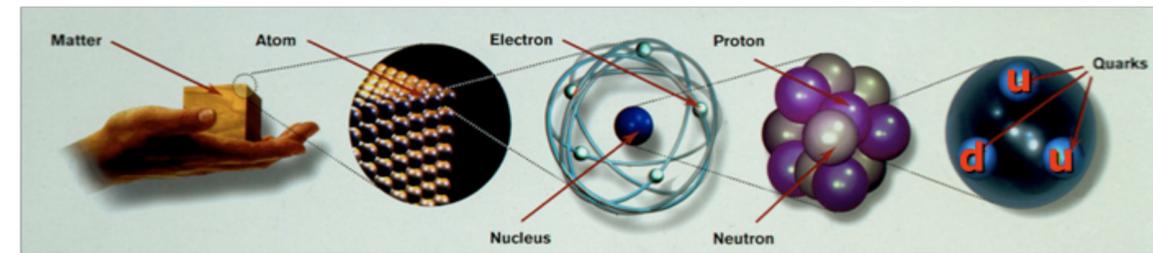
Diverse teorie che cercano di spiegare la nascita dell'universo fanno ricorso a concetti e metodi sviluppati per la descrizione quantistica delle particelle elementari applicata alla teoria della relatività generale.

Teoria di Hawking e Hartle: L'universo ha inizio da una fluttuazione quantistica del vuoto. il tempo si fonde con le coordinate spaziali all'inizio.



2018: Teoria di Turok: propone teoria alternativa che non ha bisogno dell'inflazione. Il big-bang è anche l'origine di un anti-universo, dove il tempo scorre in direzione opposta e l'antimateria è dominante.

Particelle e forze



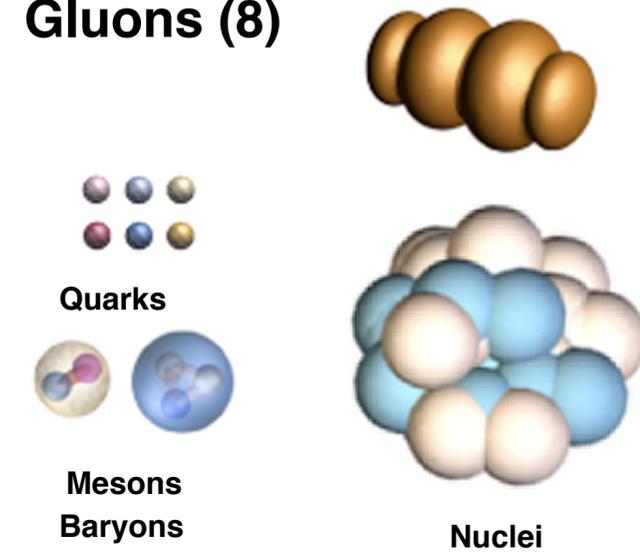
Leptons

Electric Charge

Tau		-1	0		Tau Neutrino
Muon		-1	0		Muon Neutrino
Electron		-1	0		Electron Neutrino

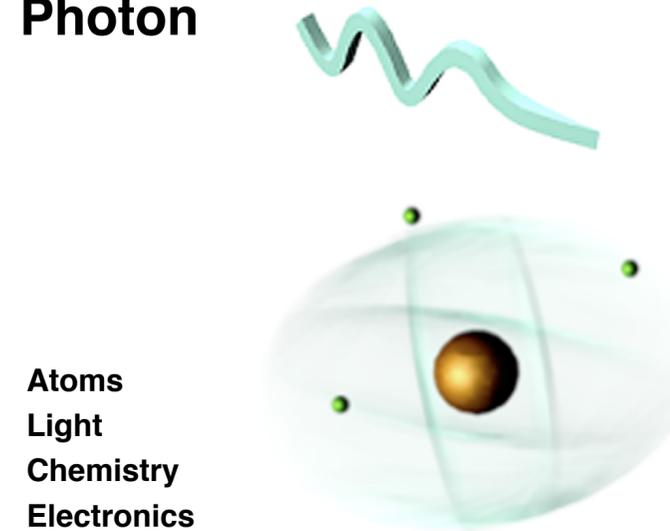
Strong

Gluons (8)



Electromagnetic

Photon



Atoms
Light
Chemistry
Electronics



The Great Wave Of Kanagawa
Hokusai

Quarks

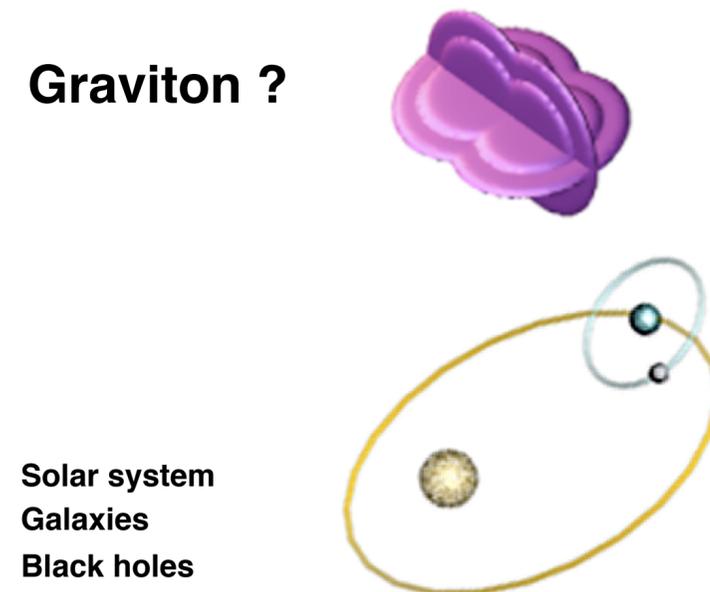
Electric Charge

Bottom		-1/3	2/3		Top
Strange		-1/3	2/3		Charm
Down		-1/3	2/3		Up

each quark: *R*, *B*, *G* 3 colors

Gravitational

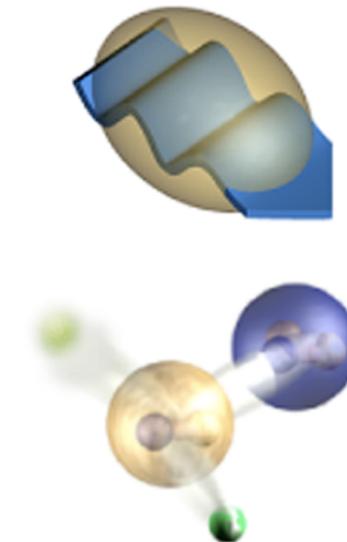
Graviton ?



Solar system
Galaxies
Black holes

Weak

Bosons (W,Z)

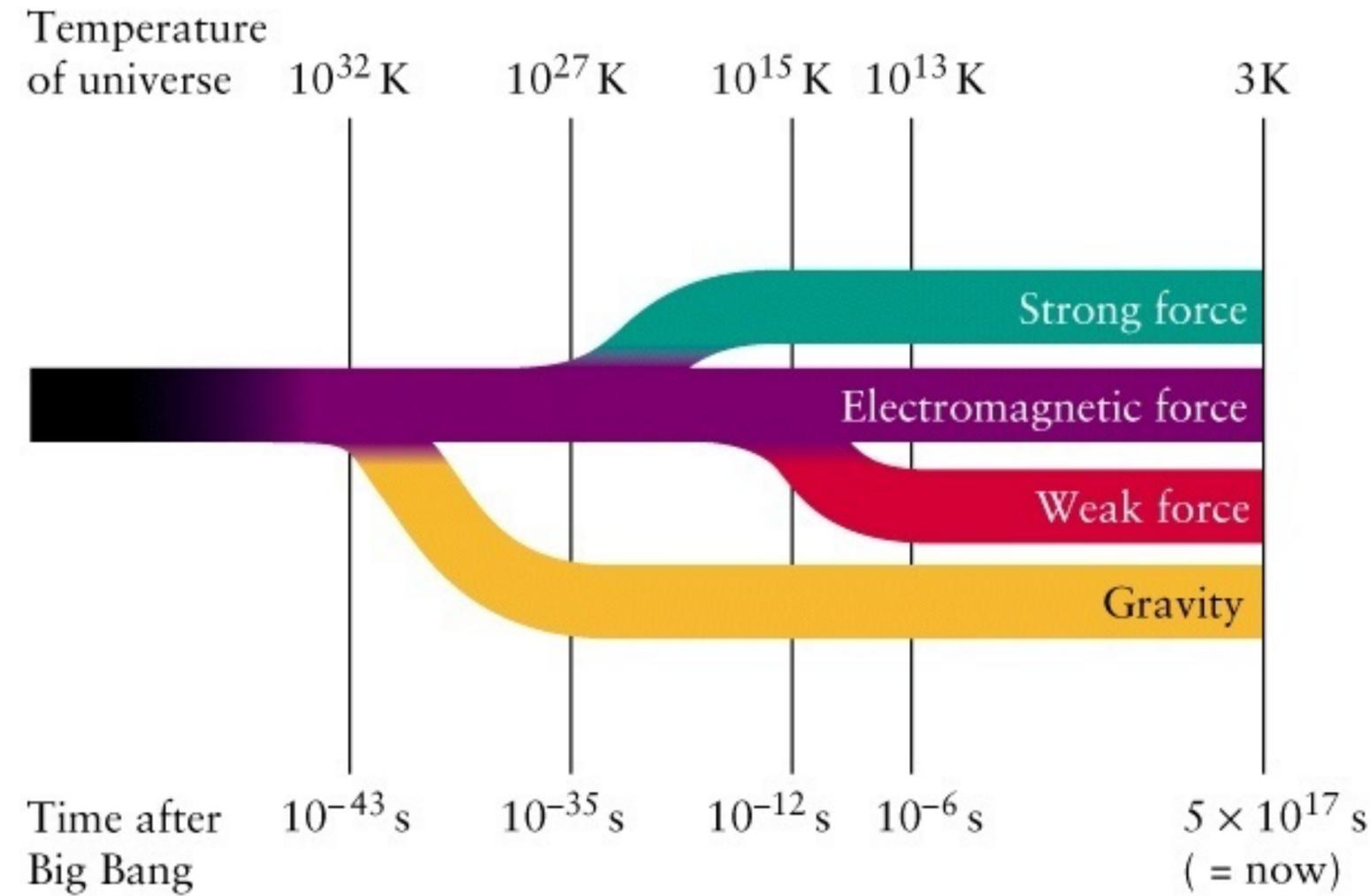
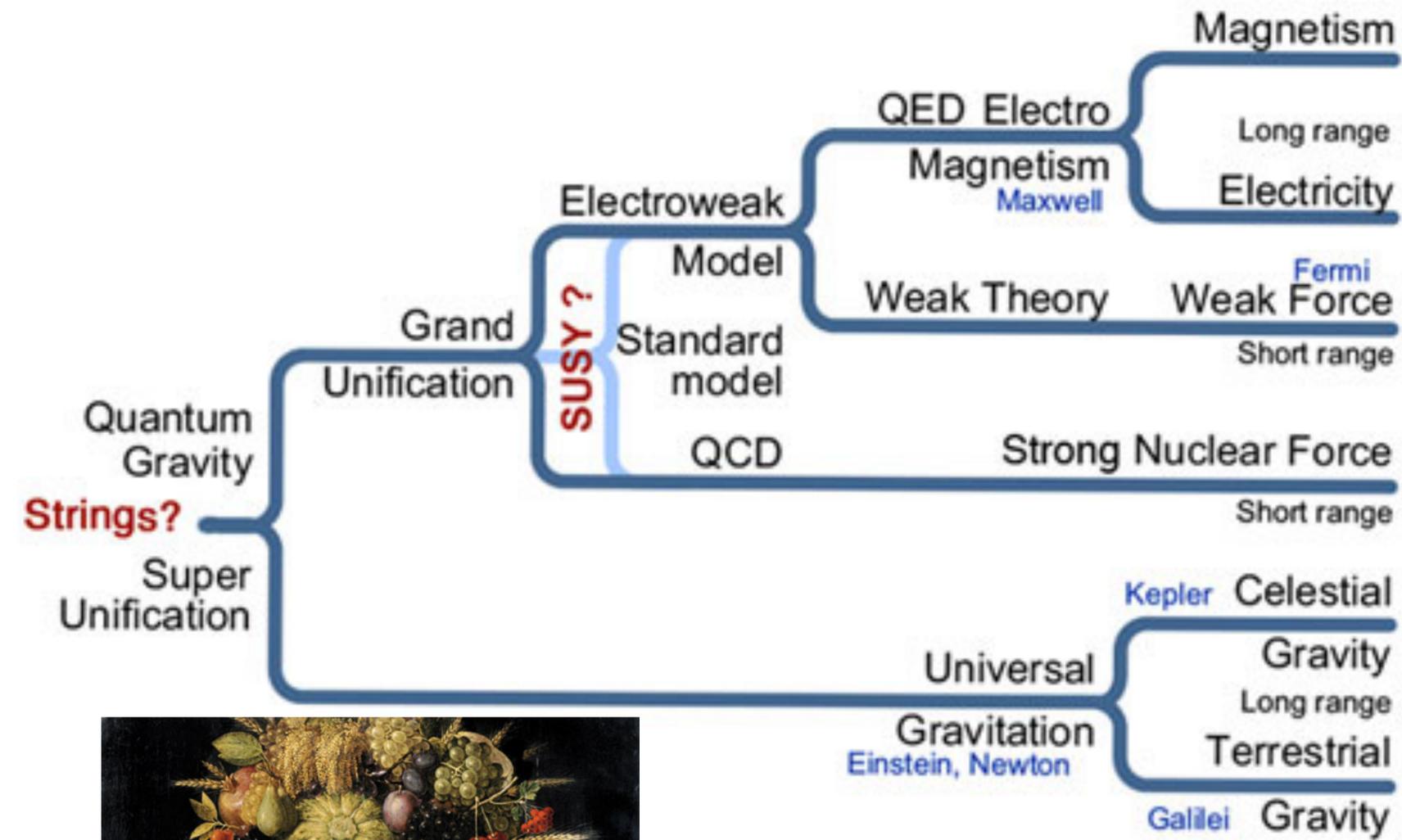


Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun

**Leptoni e quark
spin 1/2 (fermioni)**

**Particelle mediatrici
di forza spin 1 o 2
(gravitone)
bosoni**

L'unificazione delle forze: il sogno dei fisici.

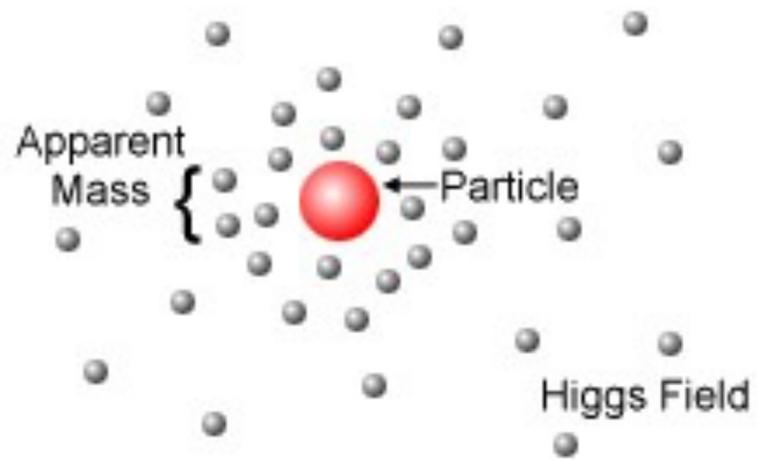


Arcimboldo
Vertumno (il dio romano della metamorfosi)
 1590

- **Nel 1864 Maxwell formulò la teoria che “unificava” le forze elettriche e quelle magnetiche come una unica forza.**
 - Particella responsabile è il fotone — di massa nulla
- **Intorno al 1964 (100 anni dopo Maxwell) si ipotizza che la forza debole e quella elettromagnetica siano manifestazioni diverse di una forza “elettrodebole”**
 - Particelle responsabili sono i W, la Z — di massa ~ 80 e 90 GeV — e il fotone
 - Nel 1982 Carlo Rubbia (et al) scopre i W e la Z con le masse giuste!
- **Ma c'è un problema: perché mai se sono la stessa forza i tre “mediatori” hanno masse così diverse ?**
 - **C'è bisogno di qualcosa che “rompe” la simmetria ➡ Meccanismo di Higgs**

Il campo di Higgs riempie il vuoto di tutto l'Universo.

Higgs Mechanism



Avere una massa vuol dire esser soggetti ad un rallentamento: maggiore è la massa, maggiore è il rallentamento.

Le particelle interagiscono con il campo di Higgs e acquisiscono massa

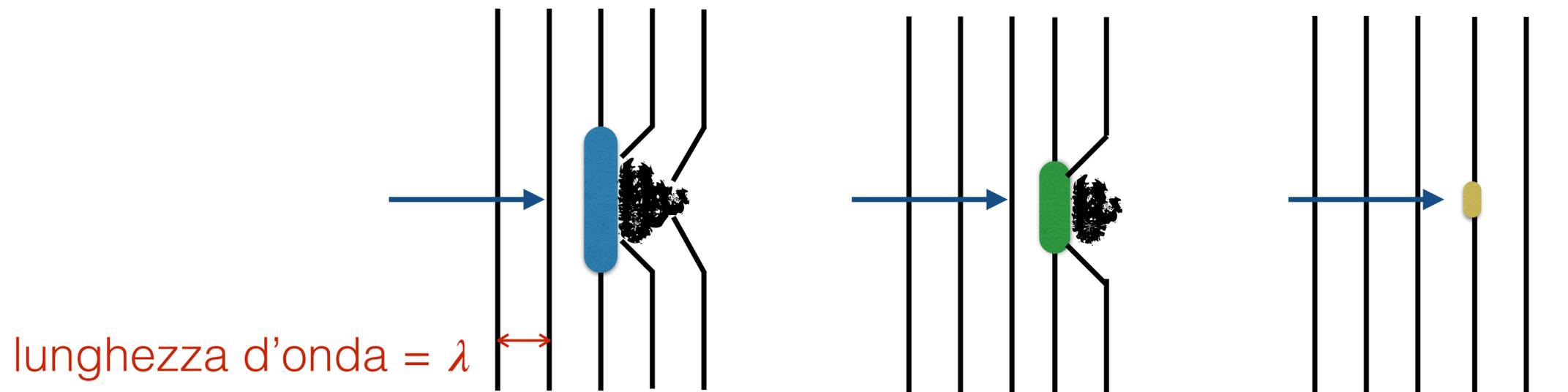
Higgs Particles



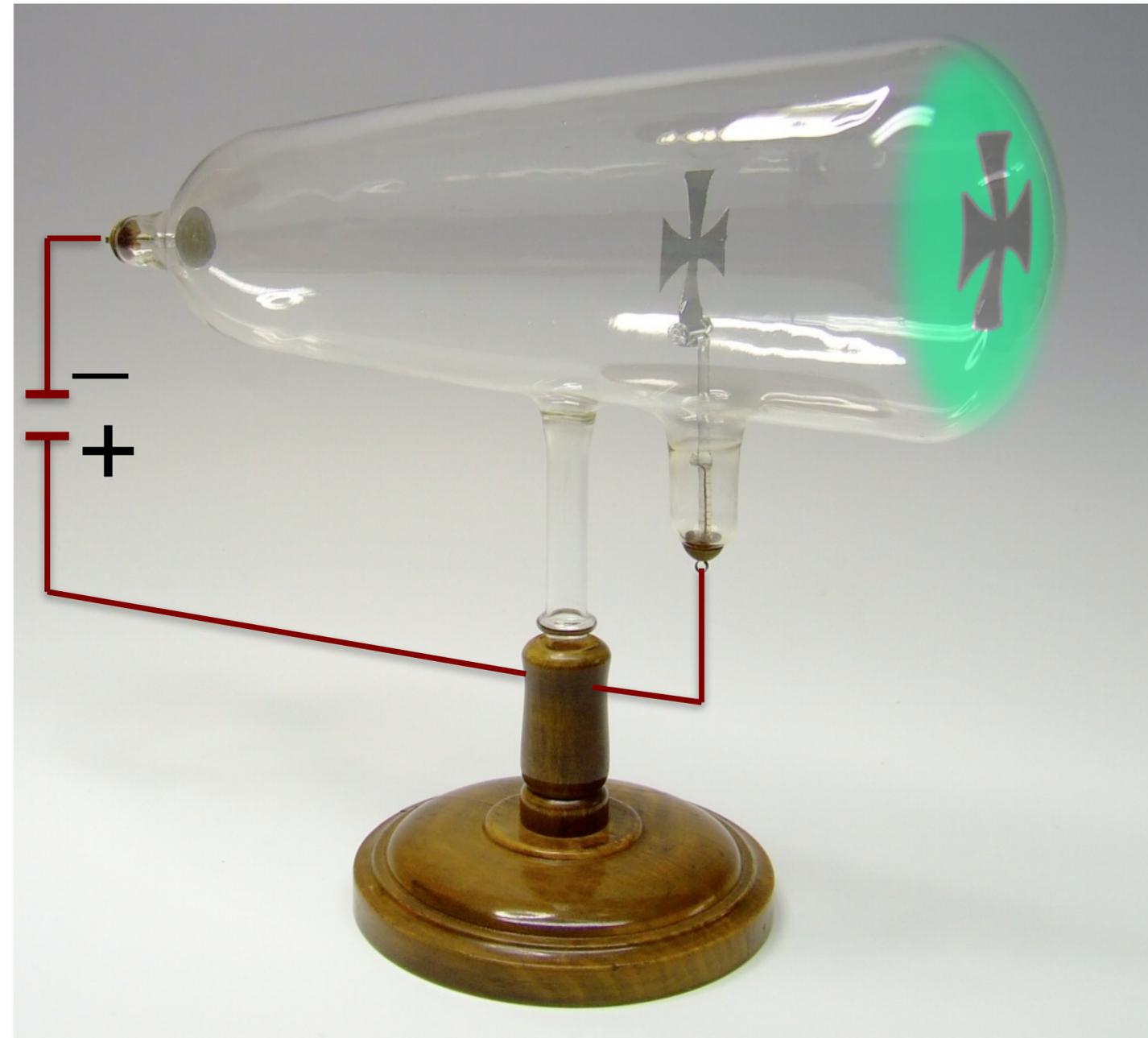
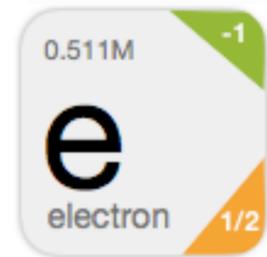
F. Botero, *Ballerina alla sbarra*, 1988

Ma come si “vedono” le strutture?

- La lunghezza d'onda della luce che serve per vedere le cose deve essere grande al più come le loro dimensioni
 - Le onde radio permettono l'osservazione delle galassie con i radiotelescopi
 - Un fascio di luce visibile ed un microscopio permettono di vedere le cellule
 - Un microscopio a scansione, con fasci di elettroni, permette di vedere il DNA
 - Un acceleratore con un fascio di particelle consente di vedere i nuclei atomici ed i quark



Che relazione c'è tra le particelle che costituiscono la materia?



La prima particella elementare scoperta è stata l'elettrone nel 1897, da parte di Sir J.J. Thomson usando un tubo a vuoto di W. Crookes

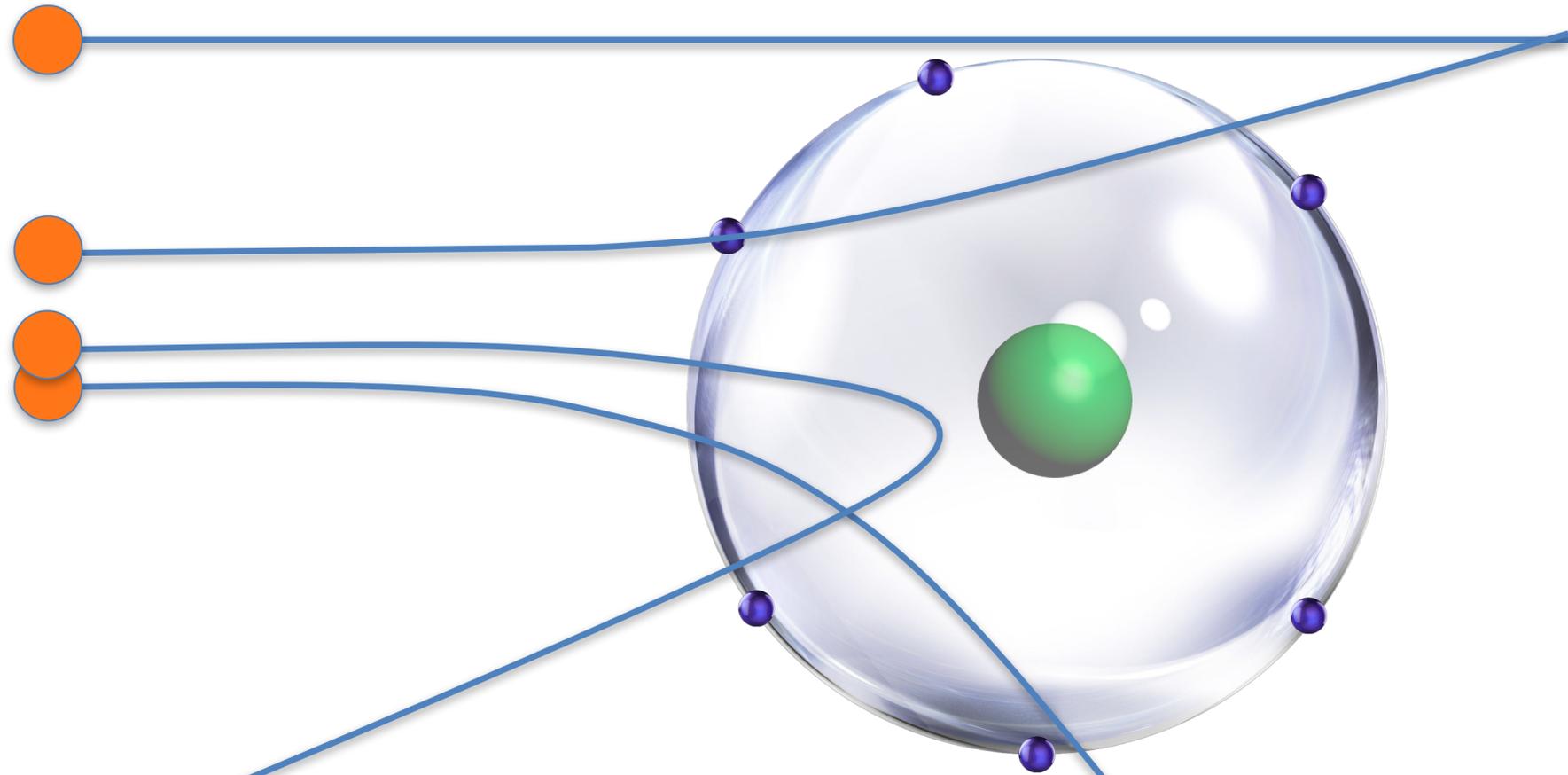
Come se lo immaginava un atomo, Thomson?



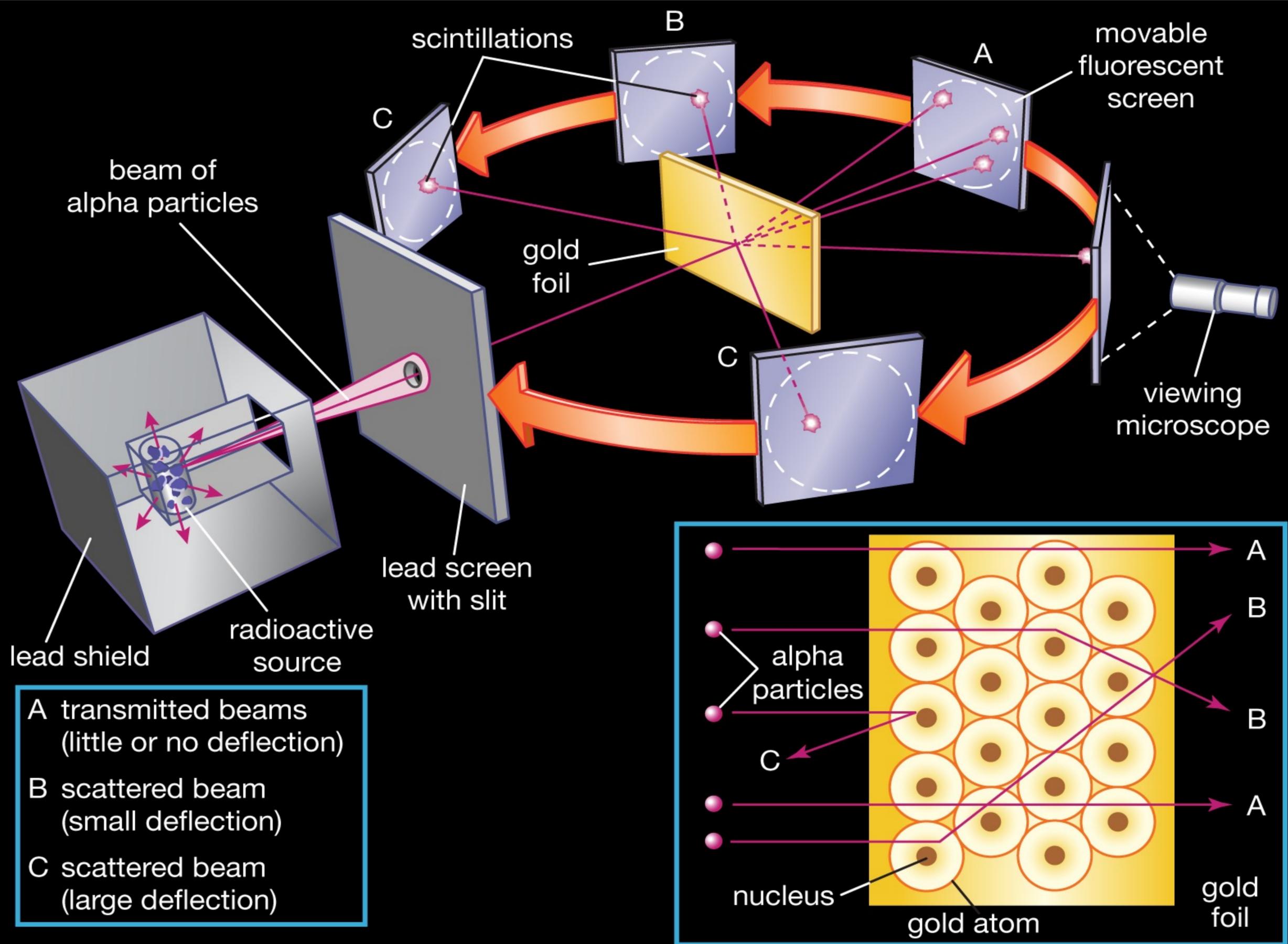
2.4M	$\frac{2}{3}$
u	R/G/B
up	$\frac{1}{2}$

4.8M	$-\frac{1}{3}$
d	R/G/B
down	$\frac{1}{2}$

0.511M	-1
e	
electron	$\frac{1}{2}$



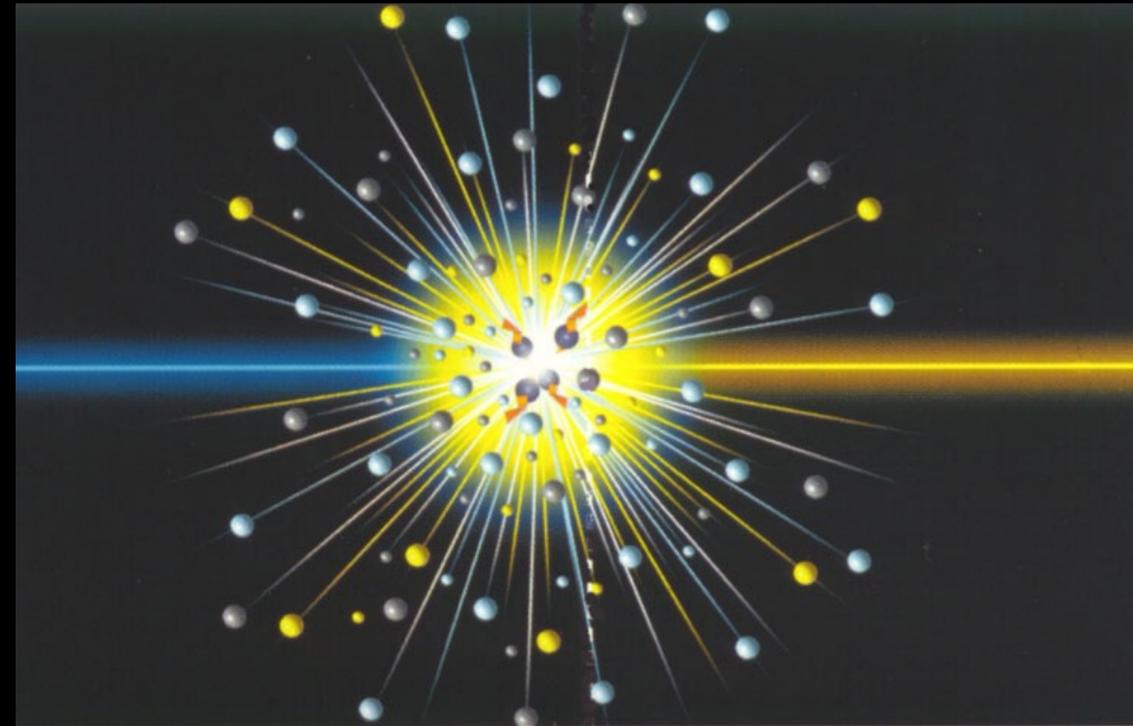
Nel 1911, Sir Ernest Rutherford scopre il nucleo atomico usando particelle alpha come proiettili. Poco dopo il nucleo viene interpretato come un composto di protoni e di neutroni.



Ma come siamo arrivati a forze e costituenti elementari?

- Acceleriamo particelle portandole ad altissime energie per poi farle scontrare
 - per studiare cosa succede durante l'interazione a $< 10^{-13}$ cm
 - per produrre nuove particelle grazie a $E=mc^2$

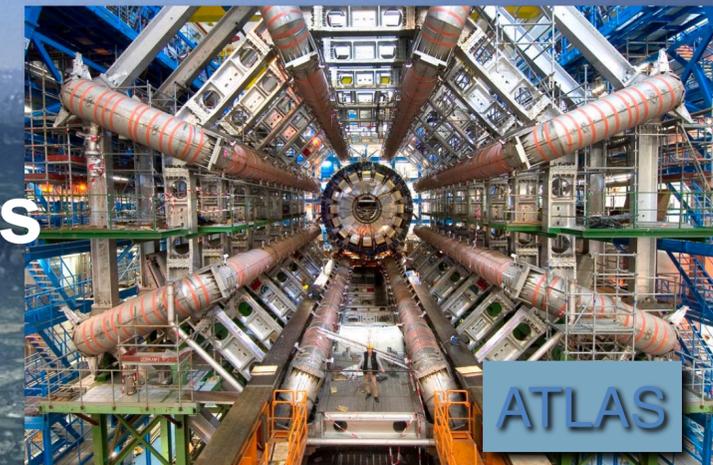
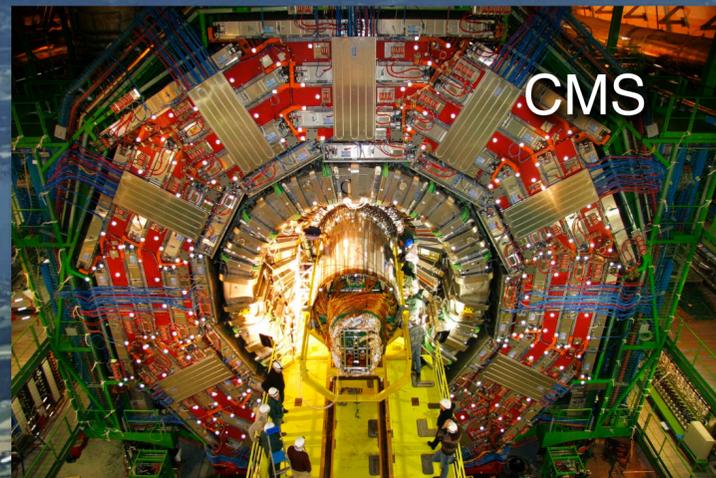
$$E=mc^2$$

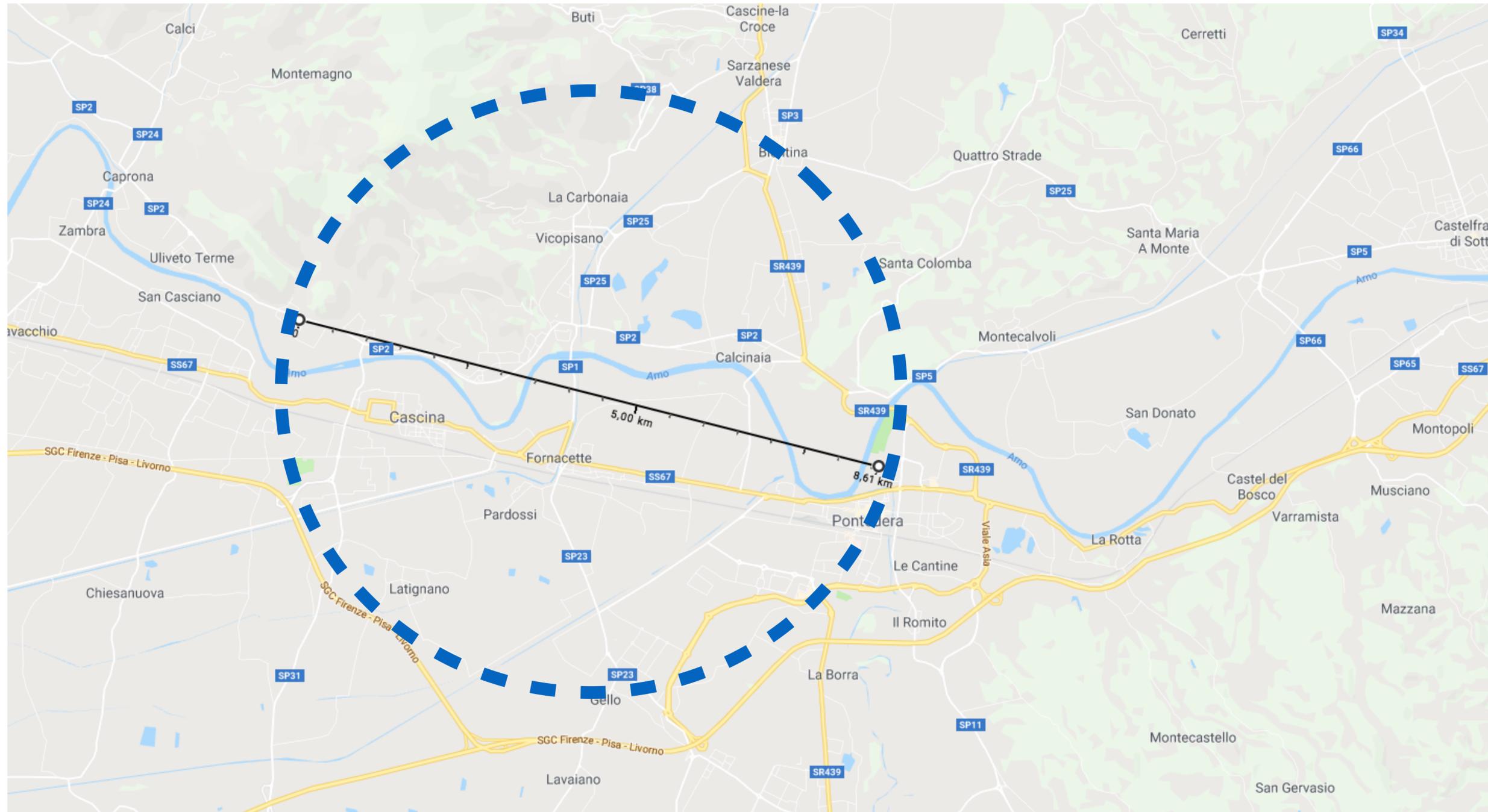


Studiando le particelle prodotte (quante sono, quali sono, le loro caratteristiche etc.) **possiamo capire cosa è successo al momento dell'urto e risalire ai processi fondamentali che regolano la natura**

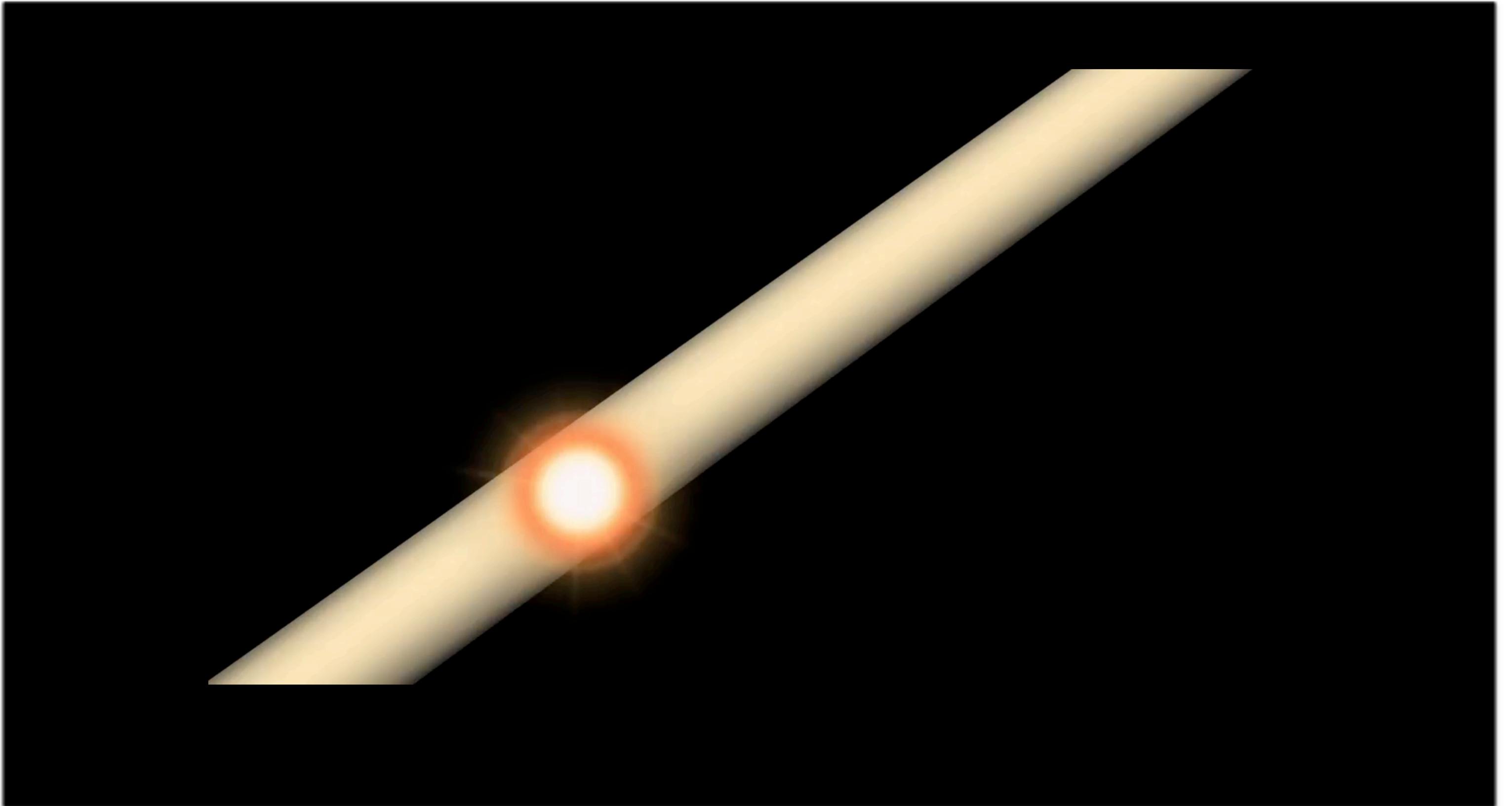
Dove dal 2010 è iniziata una nuova era della ricerca fondamentale

Ricerca diretta dell'Higgs





Se fosse a Pontedera?



LHC: l'acceleratore più potente mai costruito

Possiede il più veloce circuito di gara al mondo

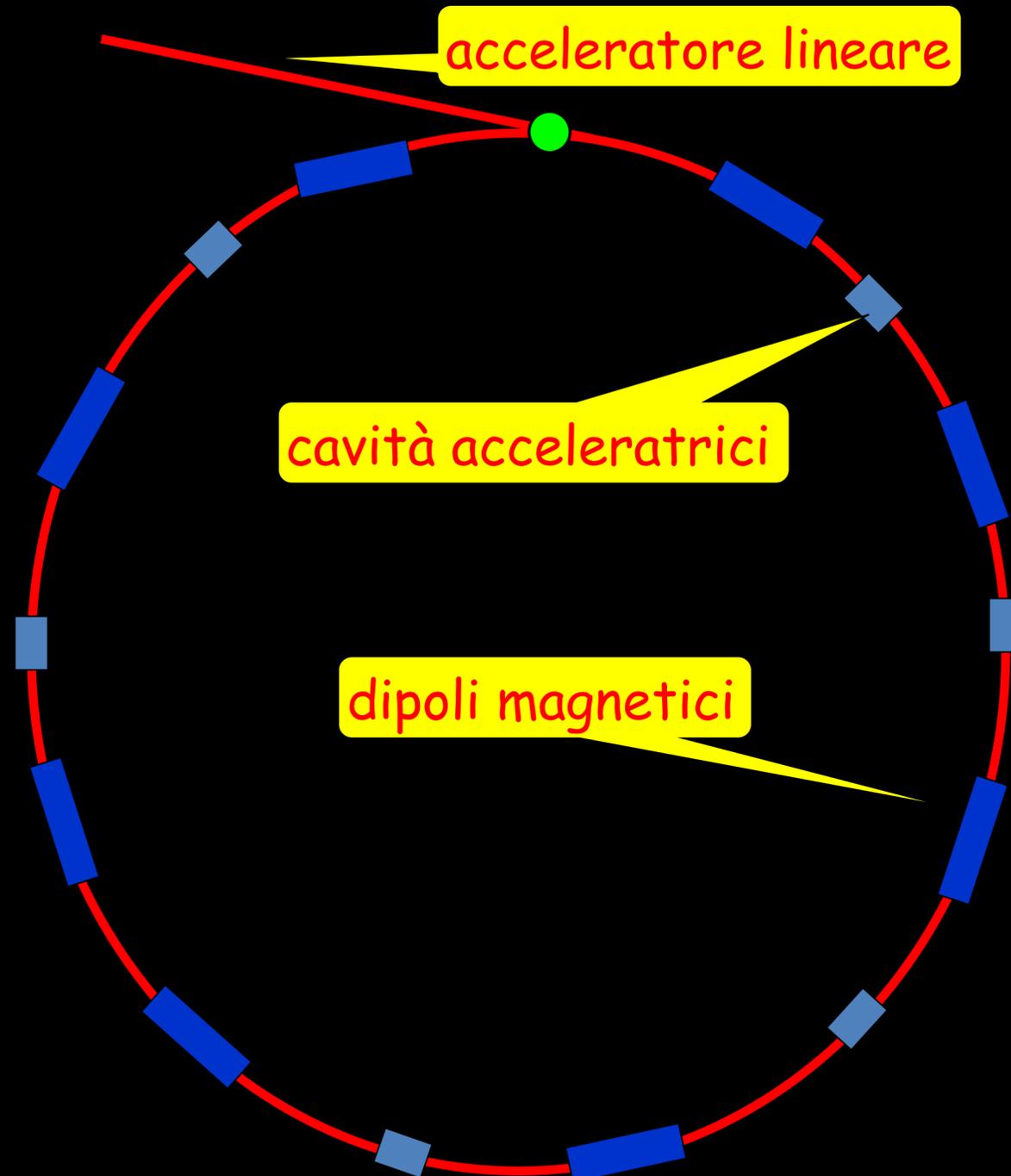


Fasci di protoni percorrono in verso opposto un circuito di 27 Km con una velocità pari al 99.999999% della velocità della luce

$c = 299782 \text{ Km/s}$
 $\sim 1.080.000.000 \text{ Km/h}$

Scontrandosi l'uno contro l'altro 40 milioni di volte al secondo nei due esperimenti ATLAS e CMS

Acceleratori circolari



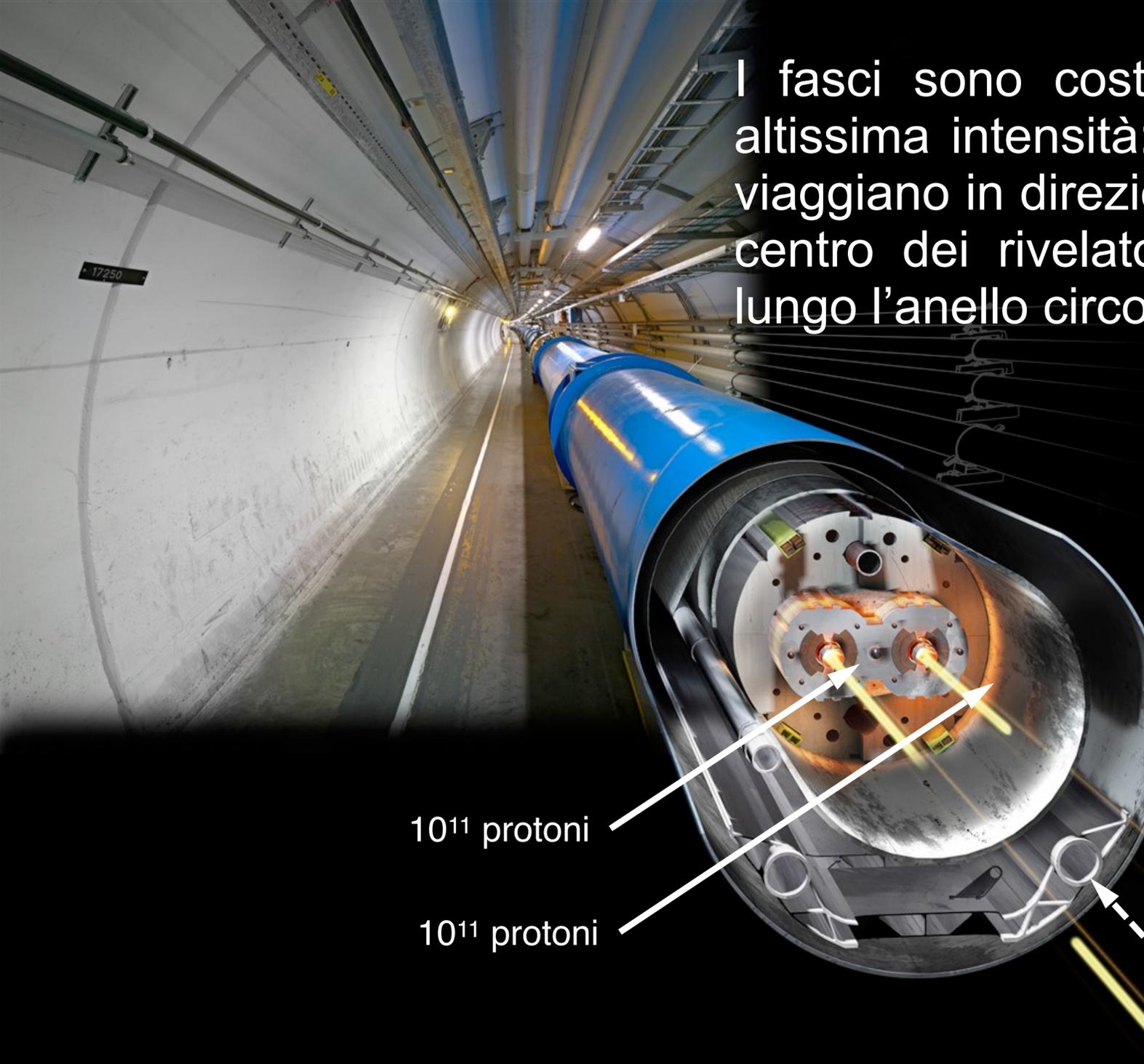
- Si confinano le particelle in una orbita circolare, che acquistano energia ad ogni passaggio dentro una cavità
- È un campo magnetico perpendicolare al disegno (uscente dal disegno) che confina le particelle in una orbita circolare



I magneti superconduttori

- Per far restare protoni da 7 TeV nell'orbita circolare di LHC sono necessari campi magnetici da circa 8 Tesla (~ 80000 volte il campo magnetico terrestre)
- Magnet speciali ("quadrupoli") strizzano i fasci nei punti di collisione per aumentare il numero di collisioni
- 1600 magneti superconduttori sono raffreddati con He liquido superfluido ad 1.9°K (-271.25°C)
- LHC contiene il sistema criogenico piú grande al mondo, ed è il luogo massivo piú freddo dell'universo!
- ~ 7000 km di cavo superconduttore: l'intera produzione mondiale di due anni!





I fasci sono costituiti da pacchetti di protoni altissima intensità: $\sim 10^{11}$ p per “pacchetto” che viaggiano in direzioni opposte e che collidono al centro dei rivelatori degli esperimenti disposti lungo l’anello circolare

La galleria sotterranea, a forma di anello, è lunga 27 km ed è al confine tra Francia e Svizzera

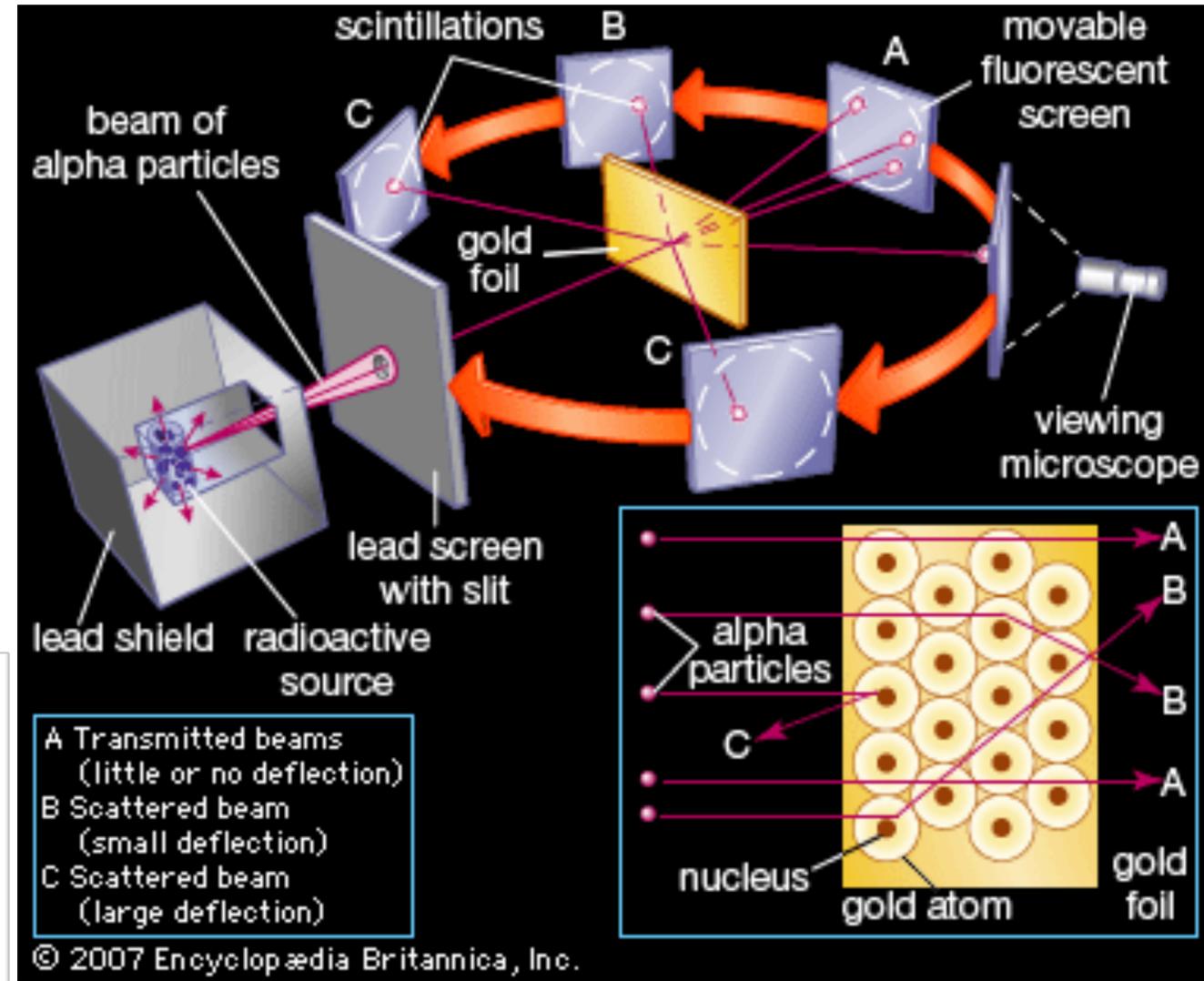
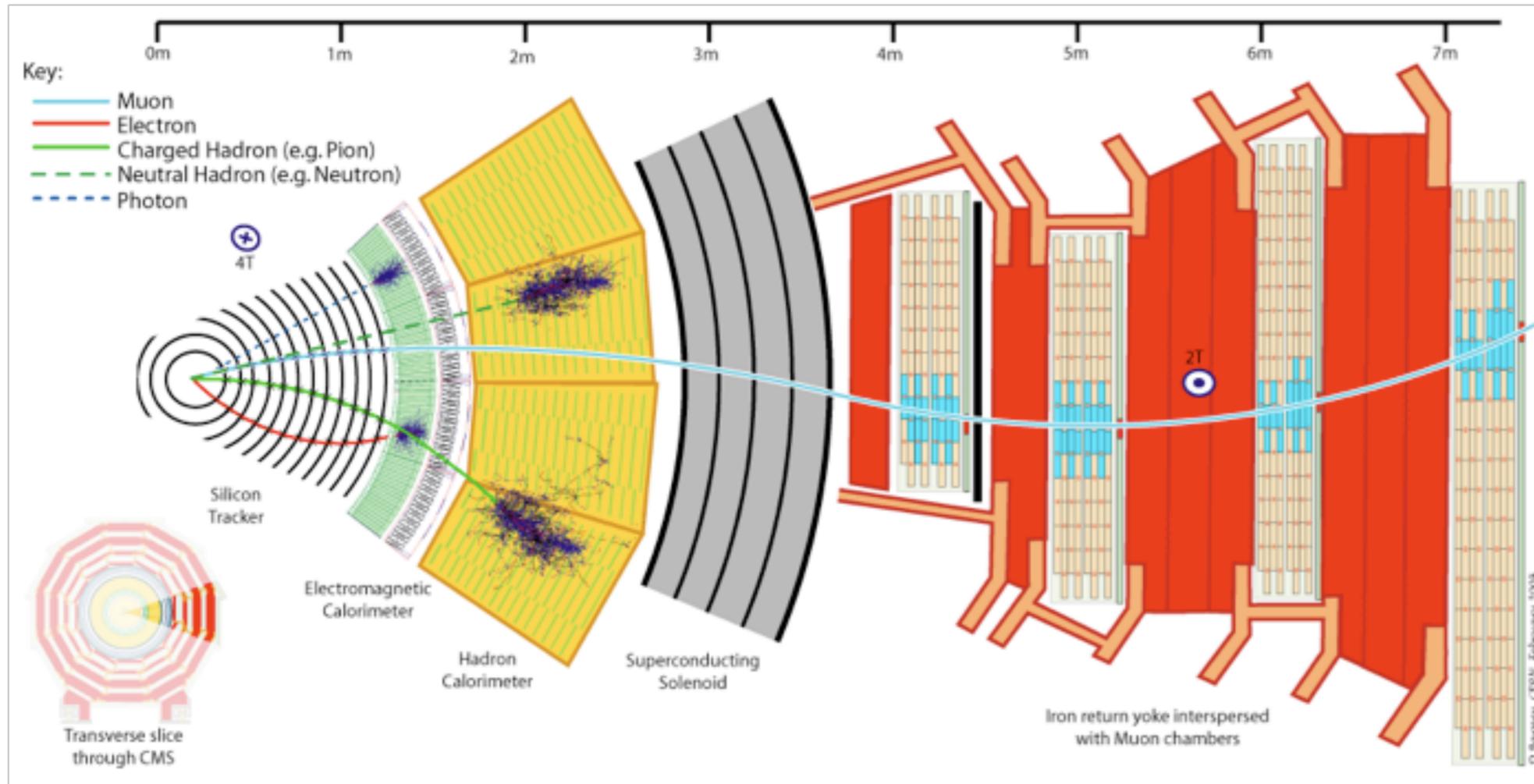
10^{11} protoni

10^{11} protoni

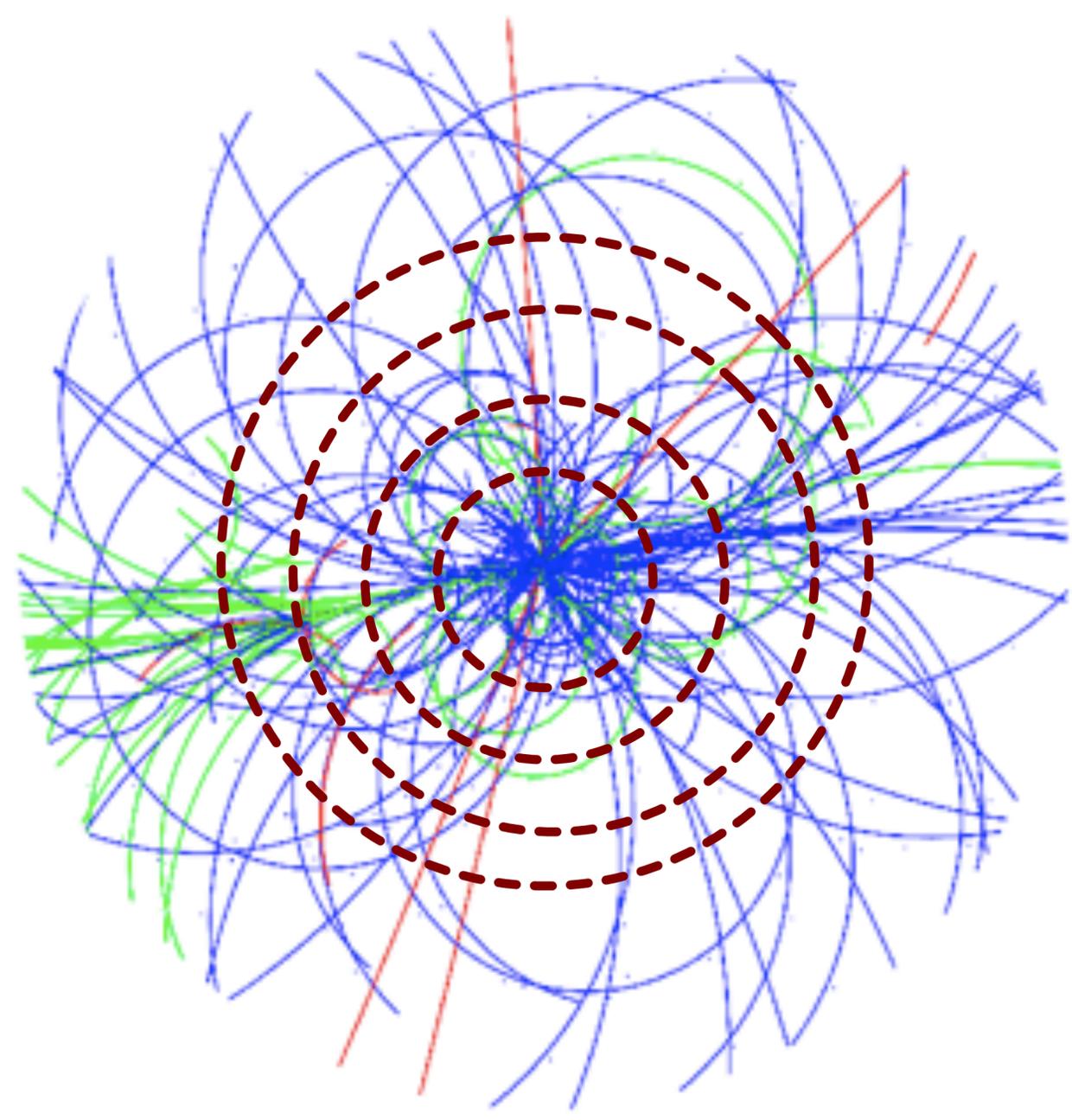
Nei tubi in cui viaggiano i protoni viene fatto il vuoto spinto per evitare le collisioni con particelle di gas residuo

la pressione è circa 1/10 di quella sulla luna!

- Rutherford 1911
- CMS 2009

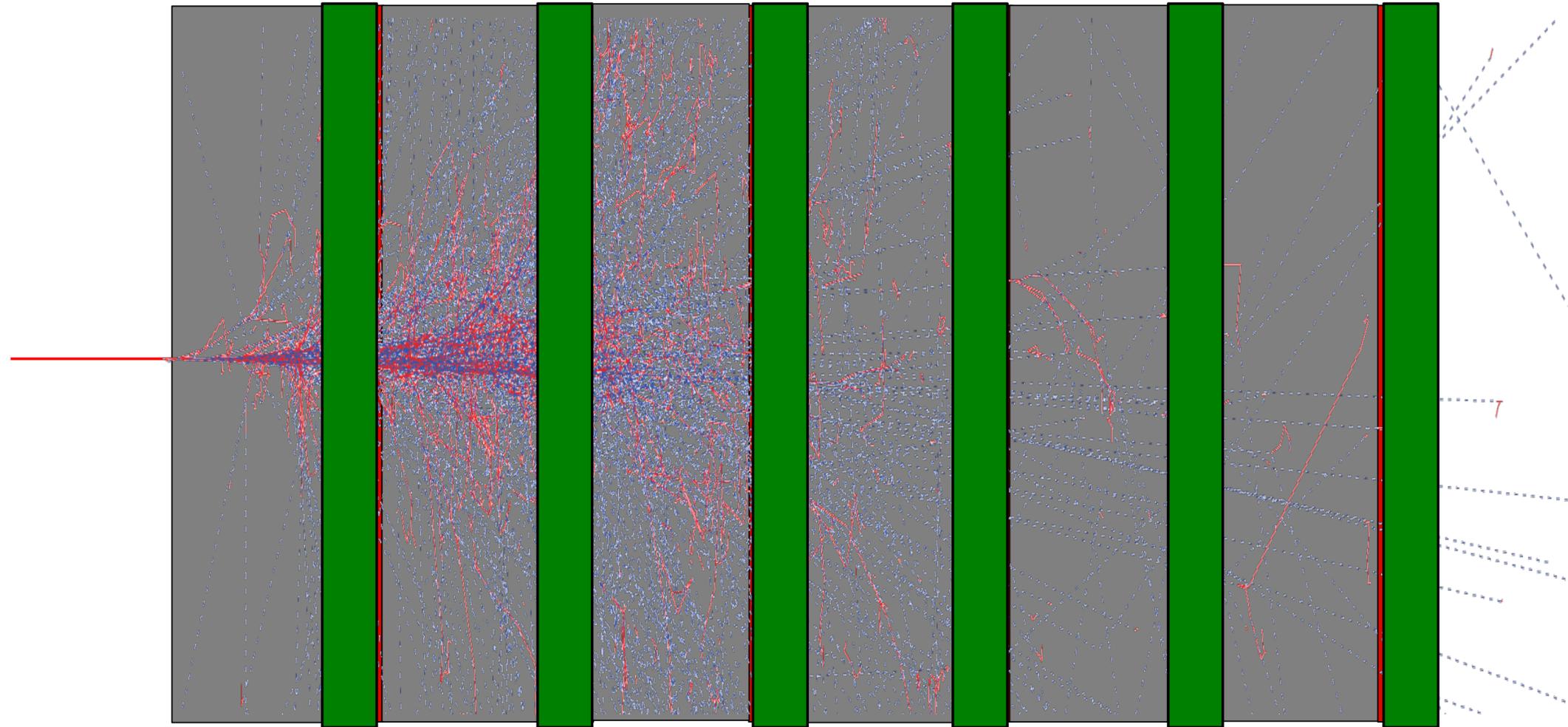


Intercettare le traiettorie con dei sensori



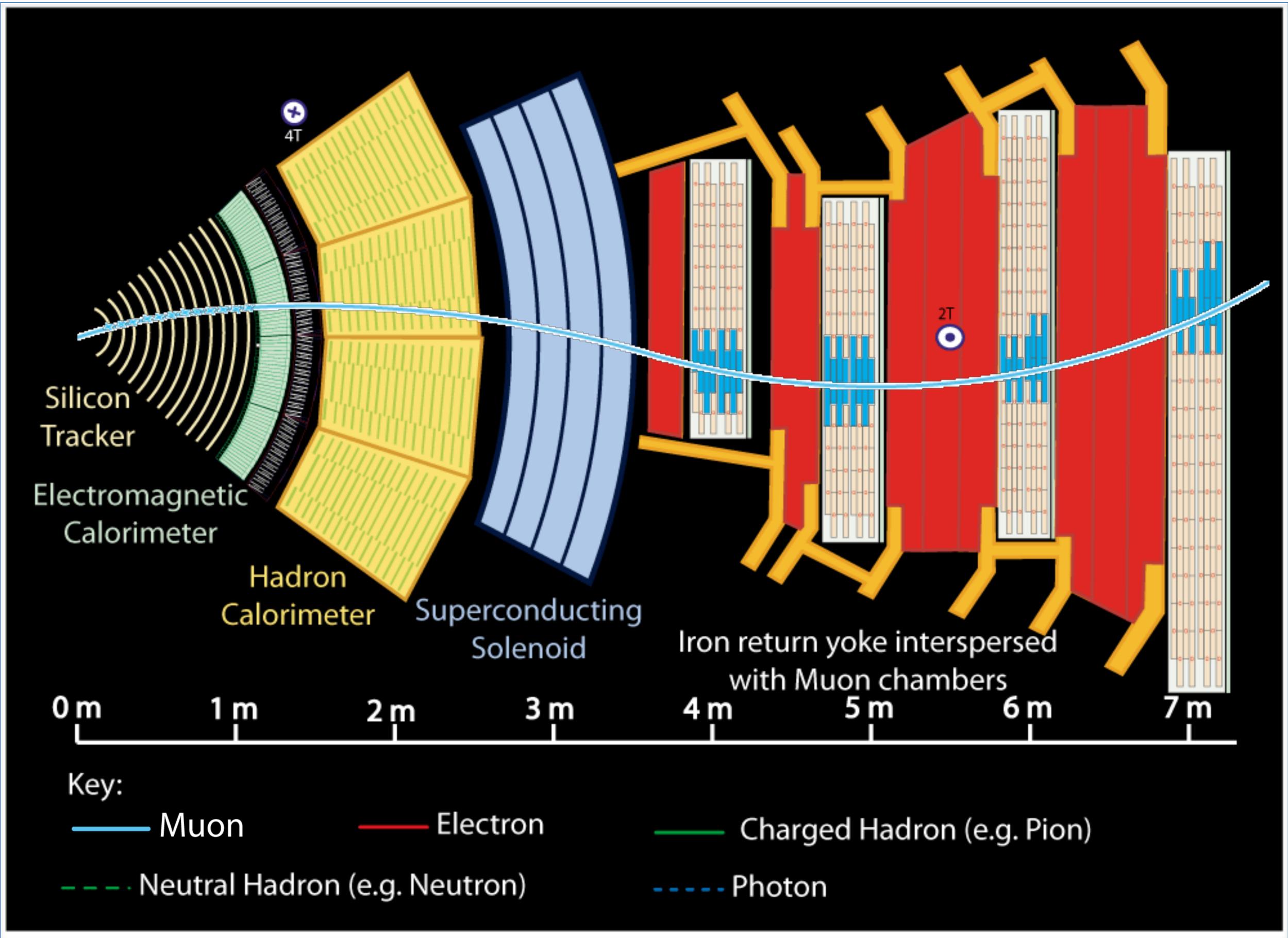
Ogni particella
interseca gli strati di
rivelazione e si
ricostruisce la
traiettoria

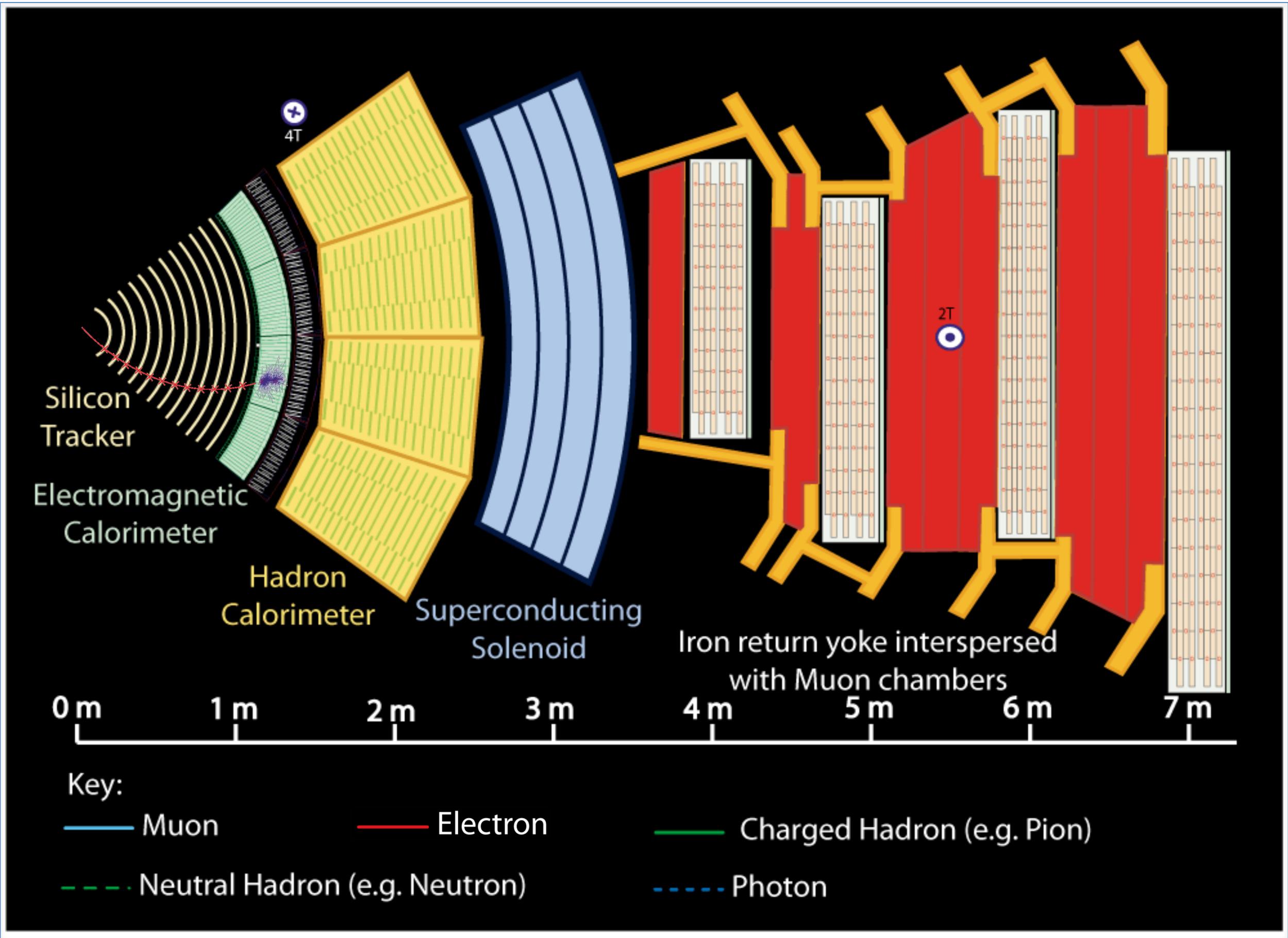
I calorimetri misurano l'energia delle particelle

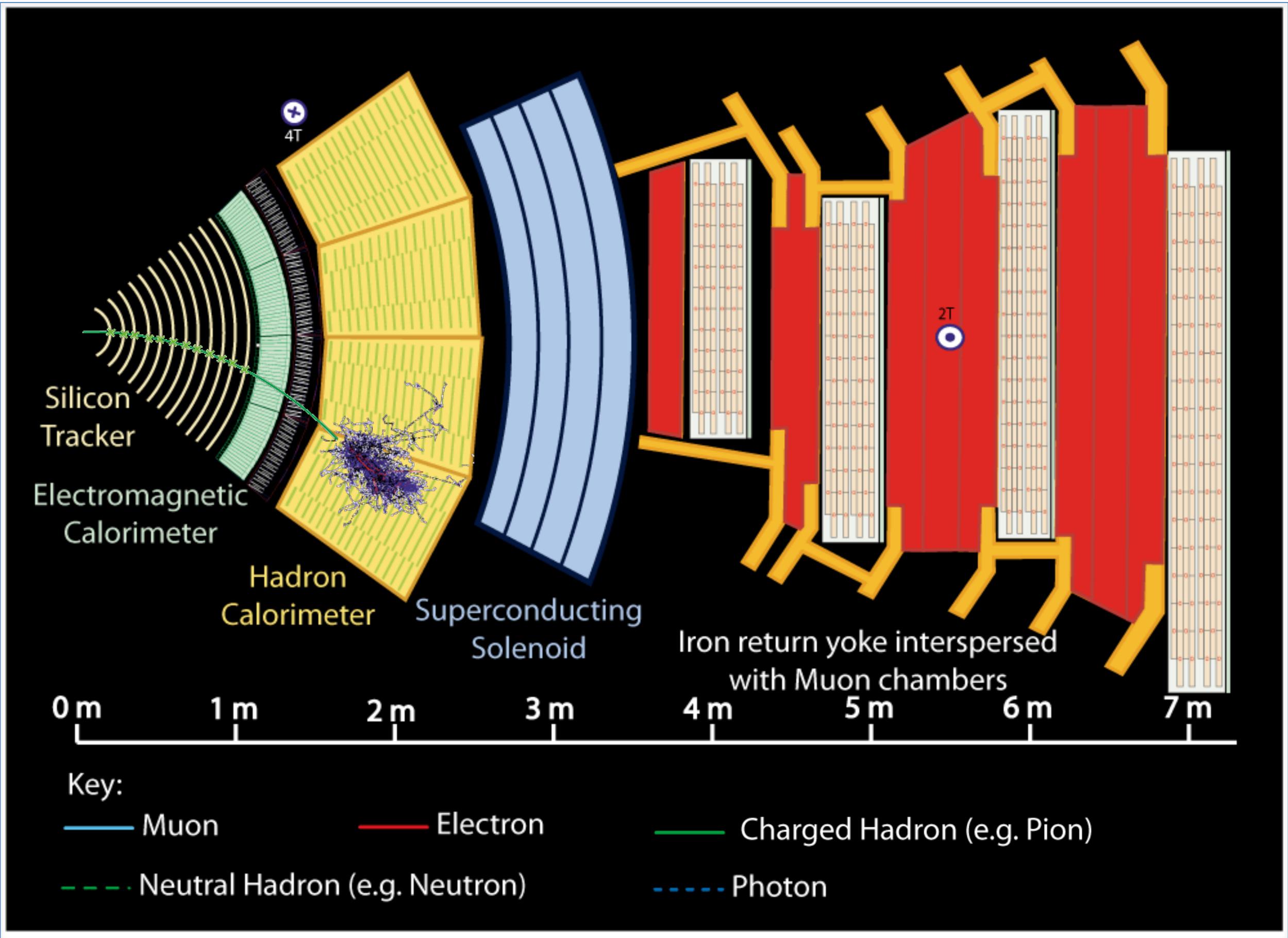


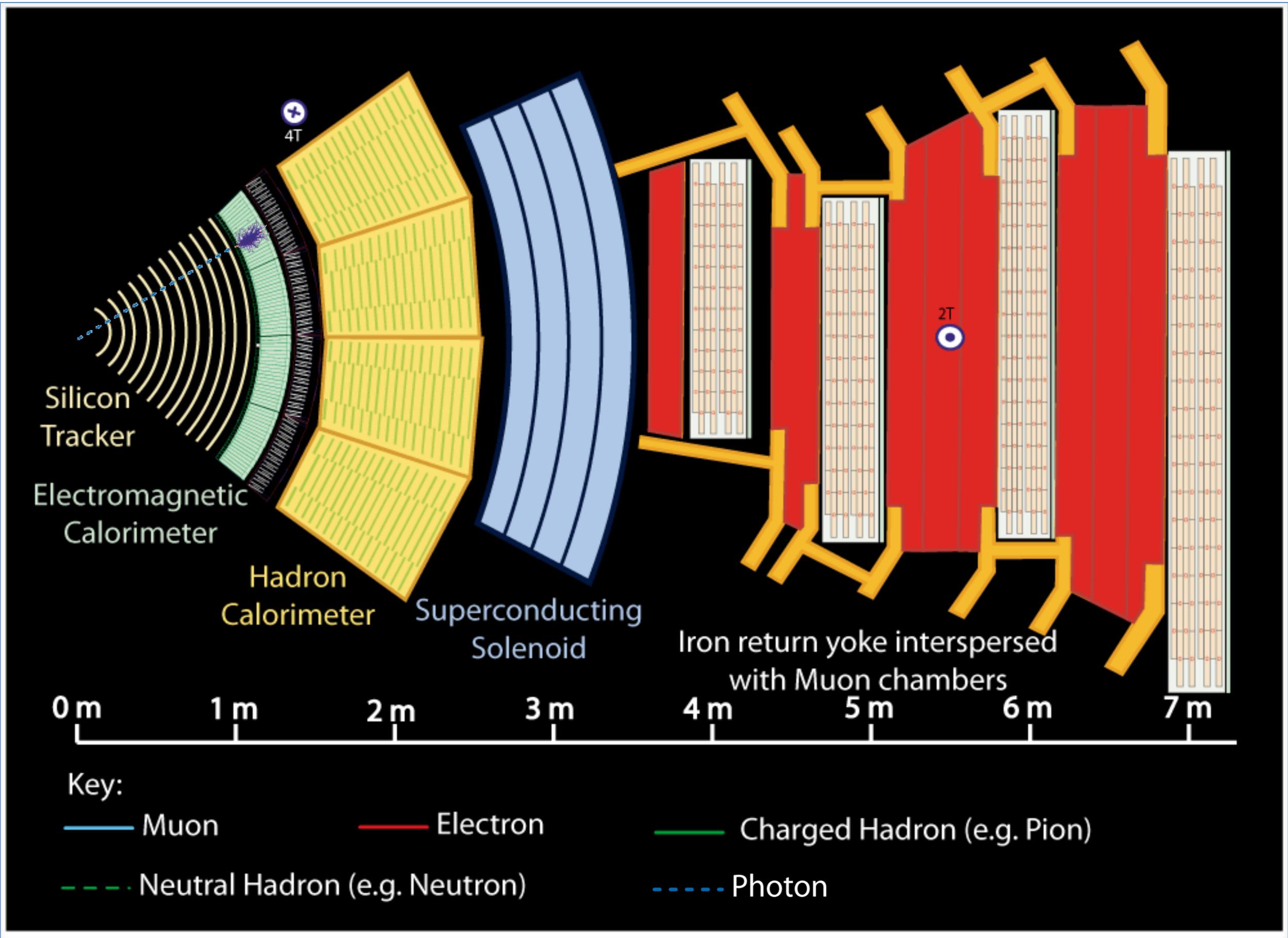
Il numero totale delle particelle è proporzionale all'energia di quella entrante

Materiali plastici (in verde) producono
della "luce" in quantità proporzionale al numero delle particelle

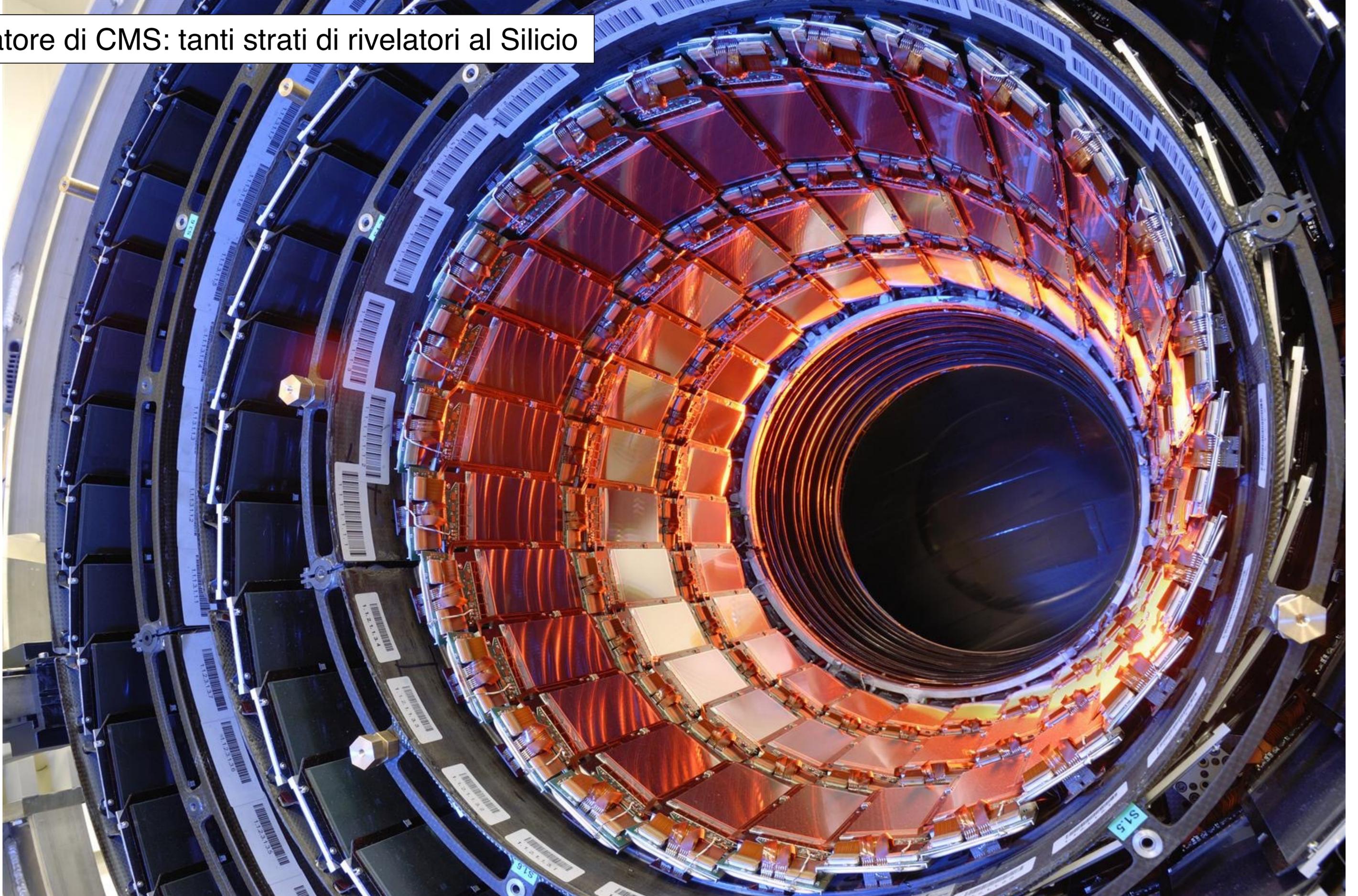






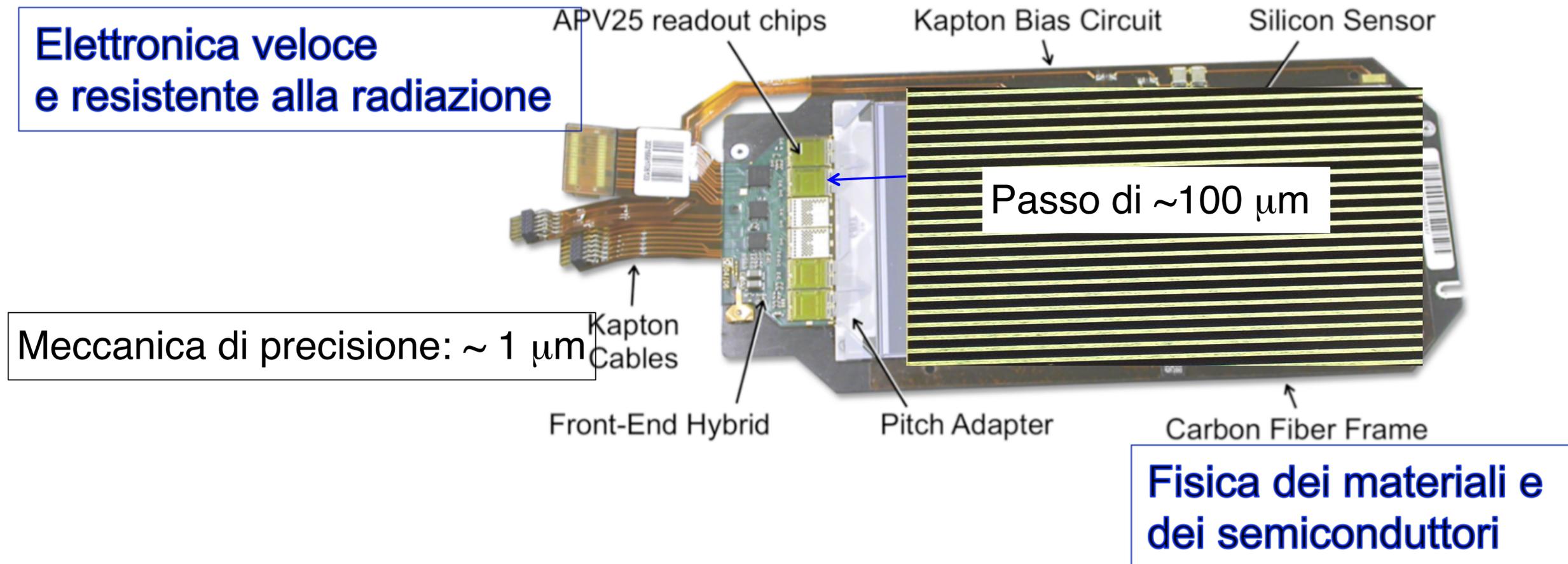


Il tracciatore di CMS: tanti strati di rivelatori al Silicio



Uno sforzo collaborativo

La costruzione di un “semplice” rivelatore come questo ha bisogno di moltissime competenze

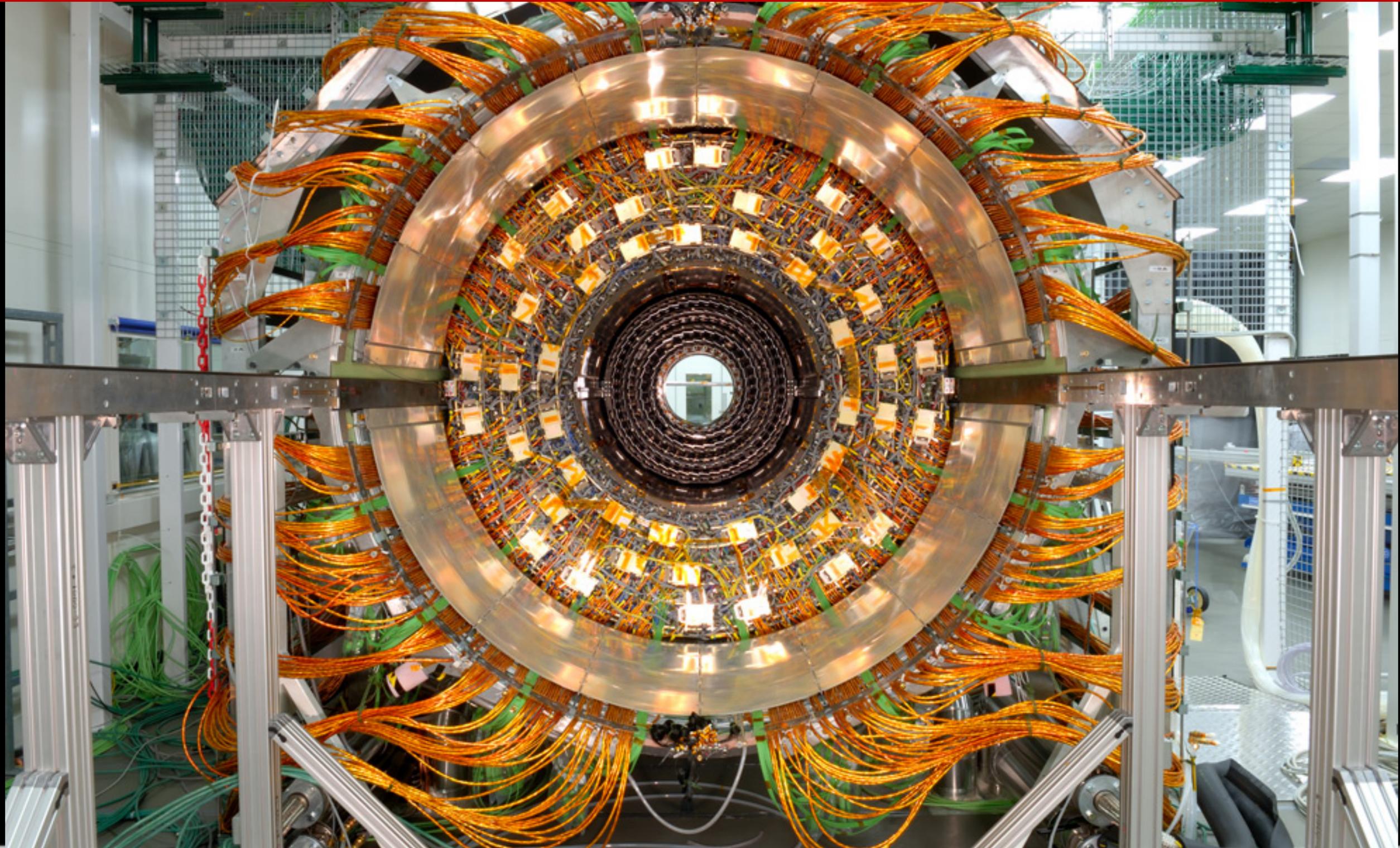


Per mitigare il danneggiamento da radiazione occorre far funzionare i rivelatori al silicio a temperature di $\sim -10^\circ\text{C}$

I sensori al silicio sono montati sulle strutture

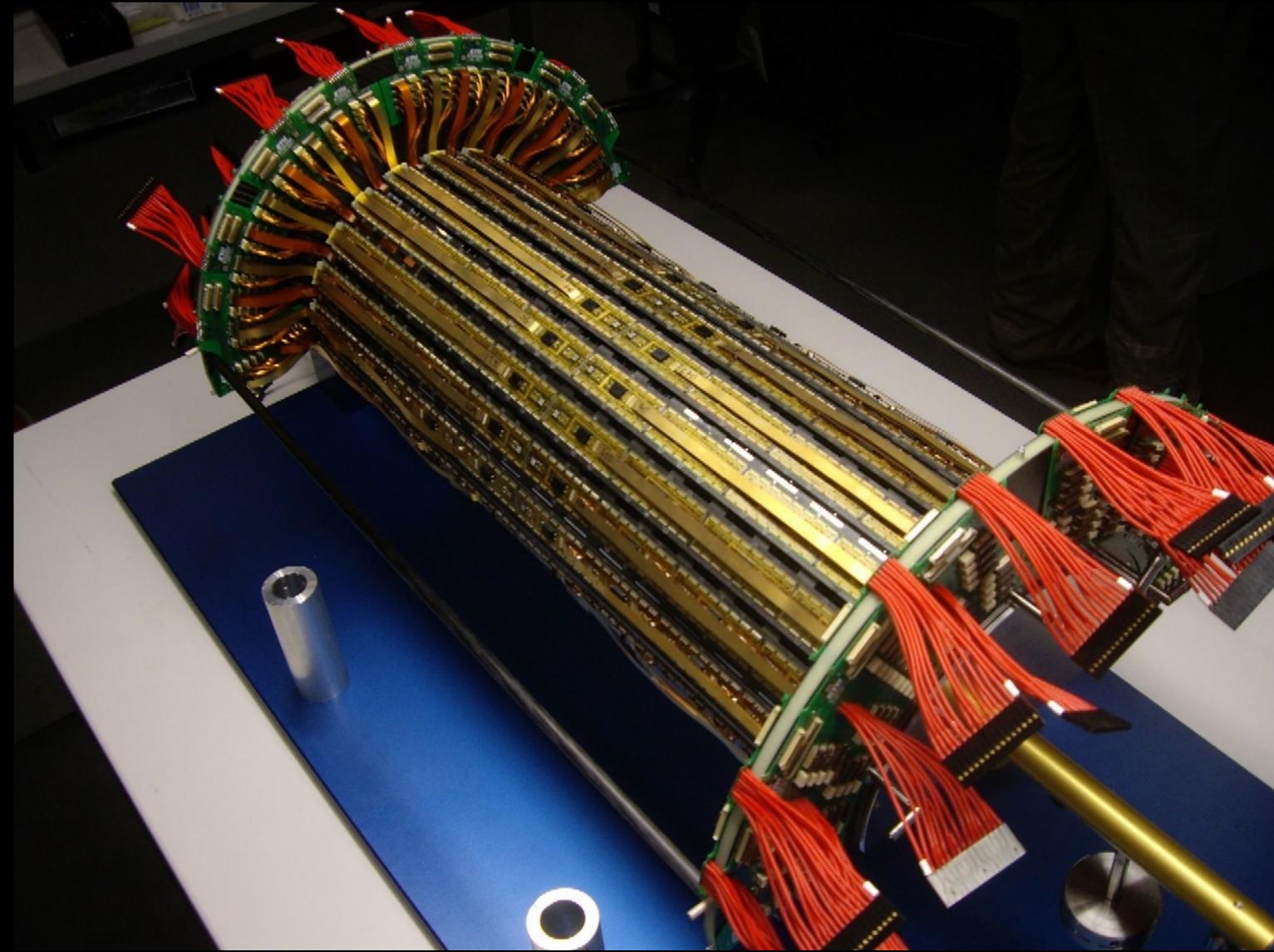
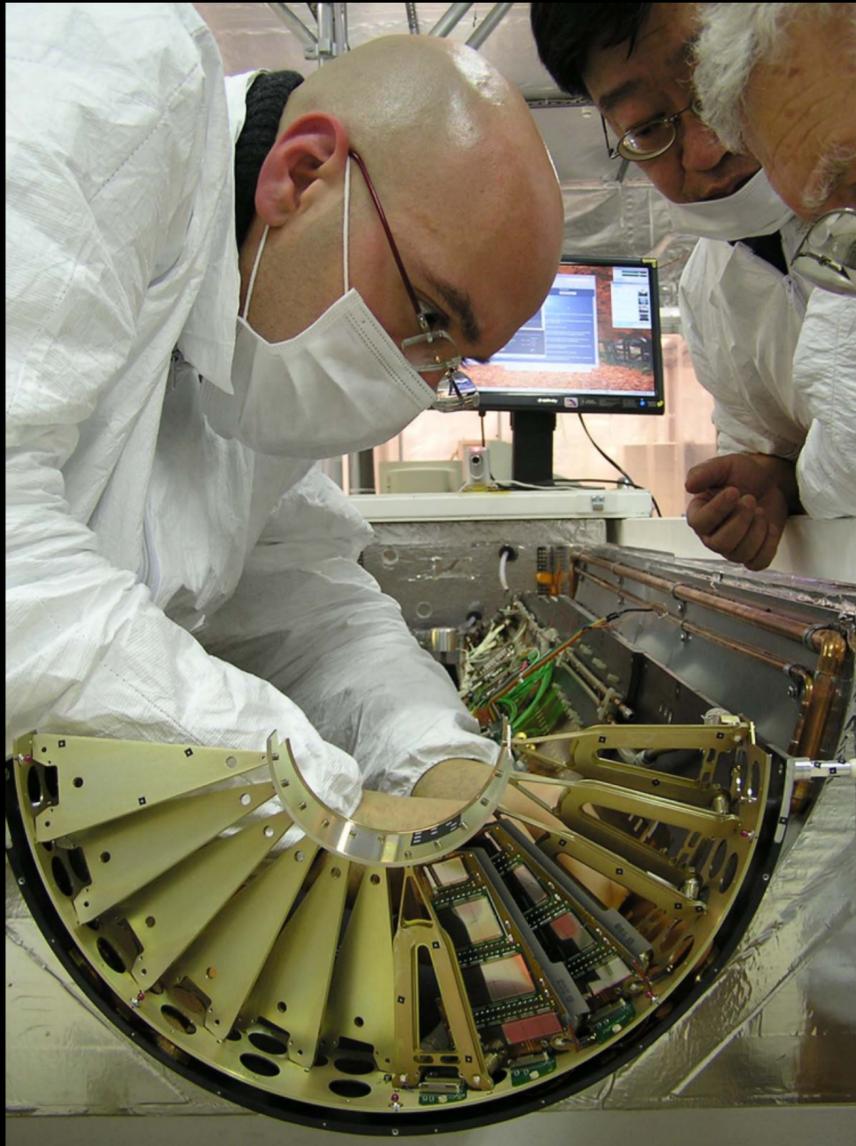


CMS – Tracker



Cablato e pronto a funzionare!

CMS – Pixels

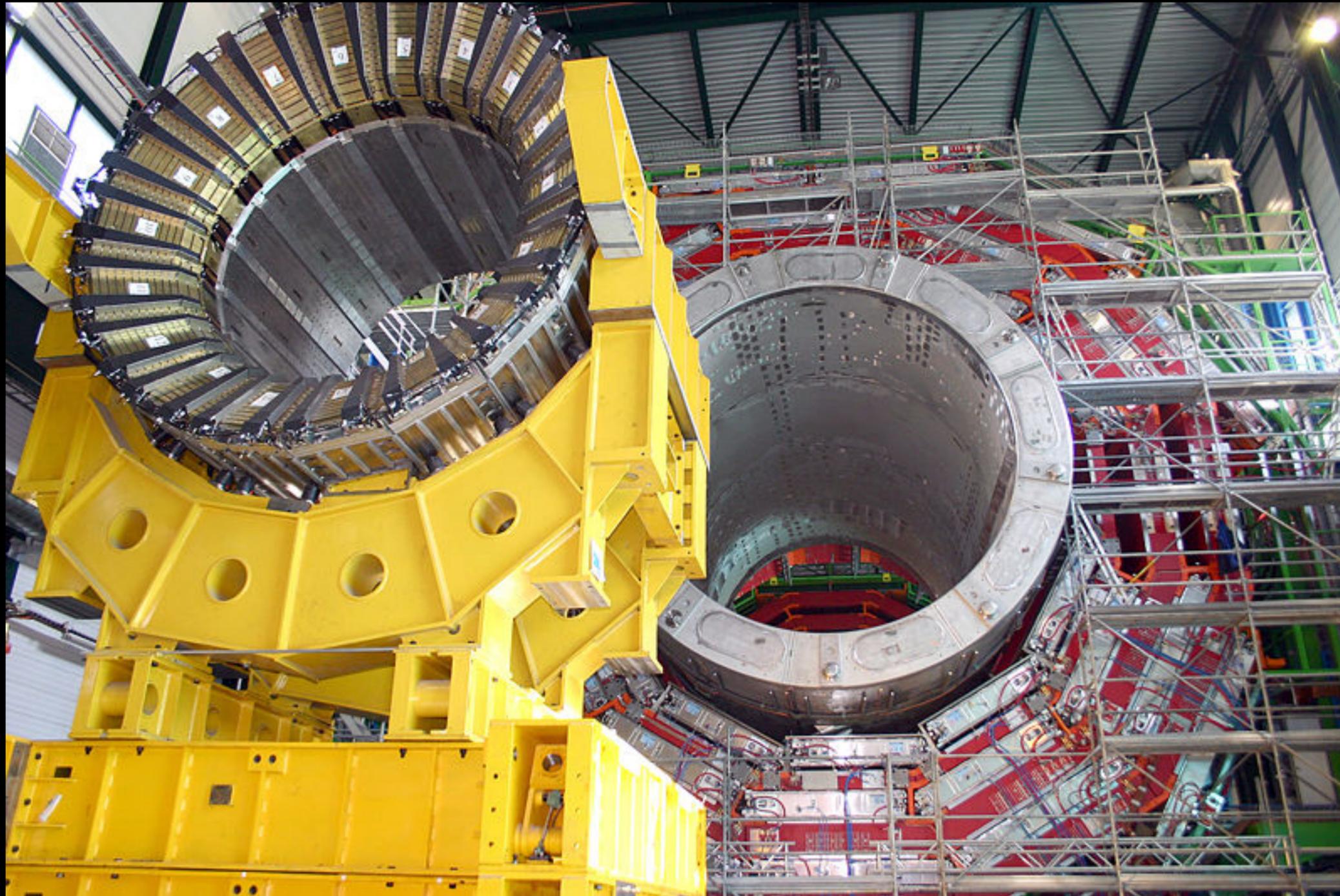


CMS – Muon Chambers



Camere per rivelare i μ

CMS – Hadronic Calorimeter



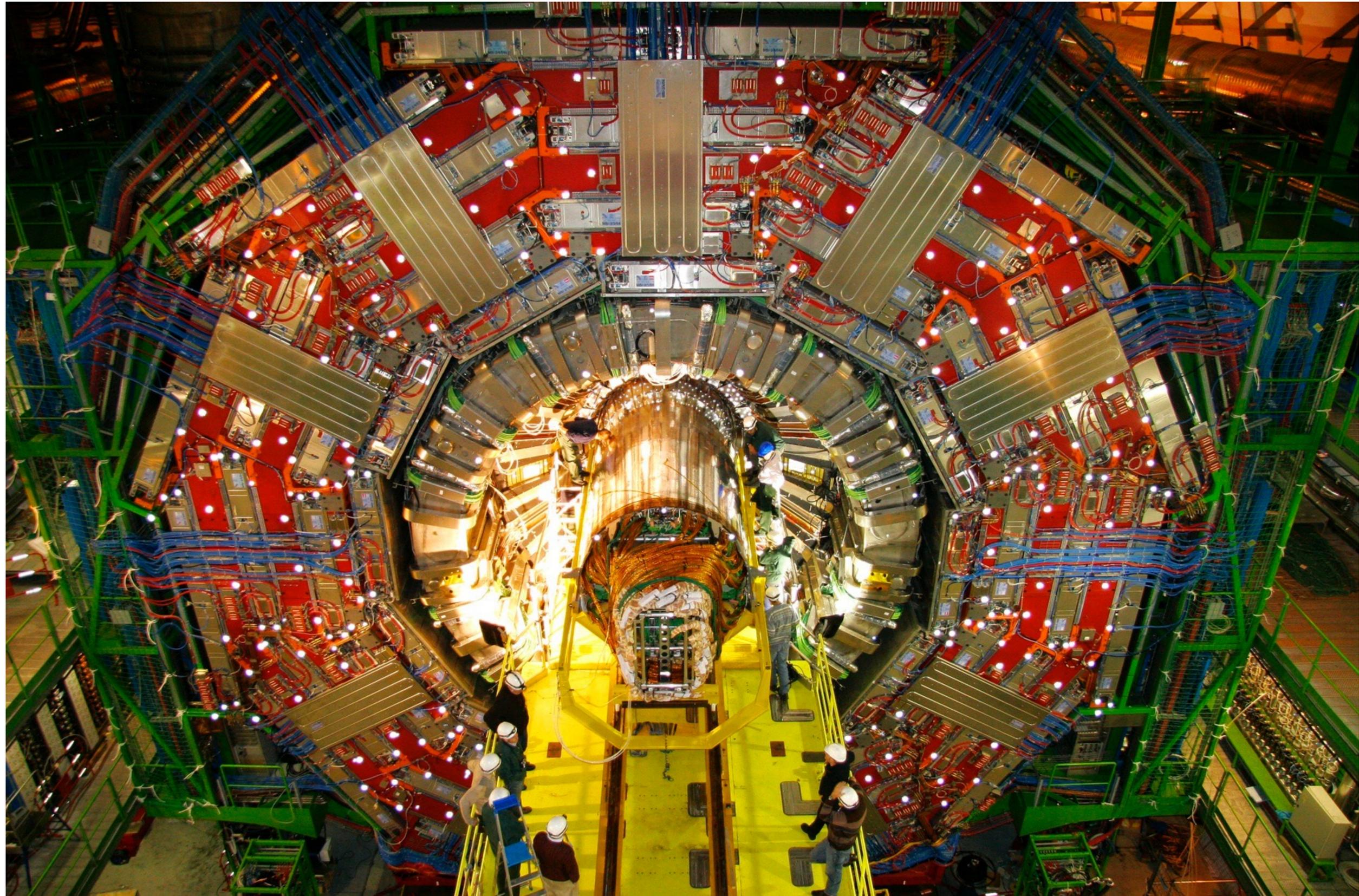
CMS: calorimetro adronico pronto a essere inserito nel solenoide

CMS – Electromagnetic Calorimeter



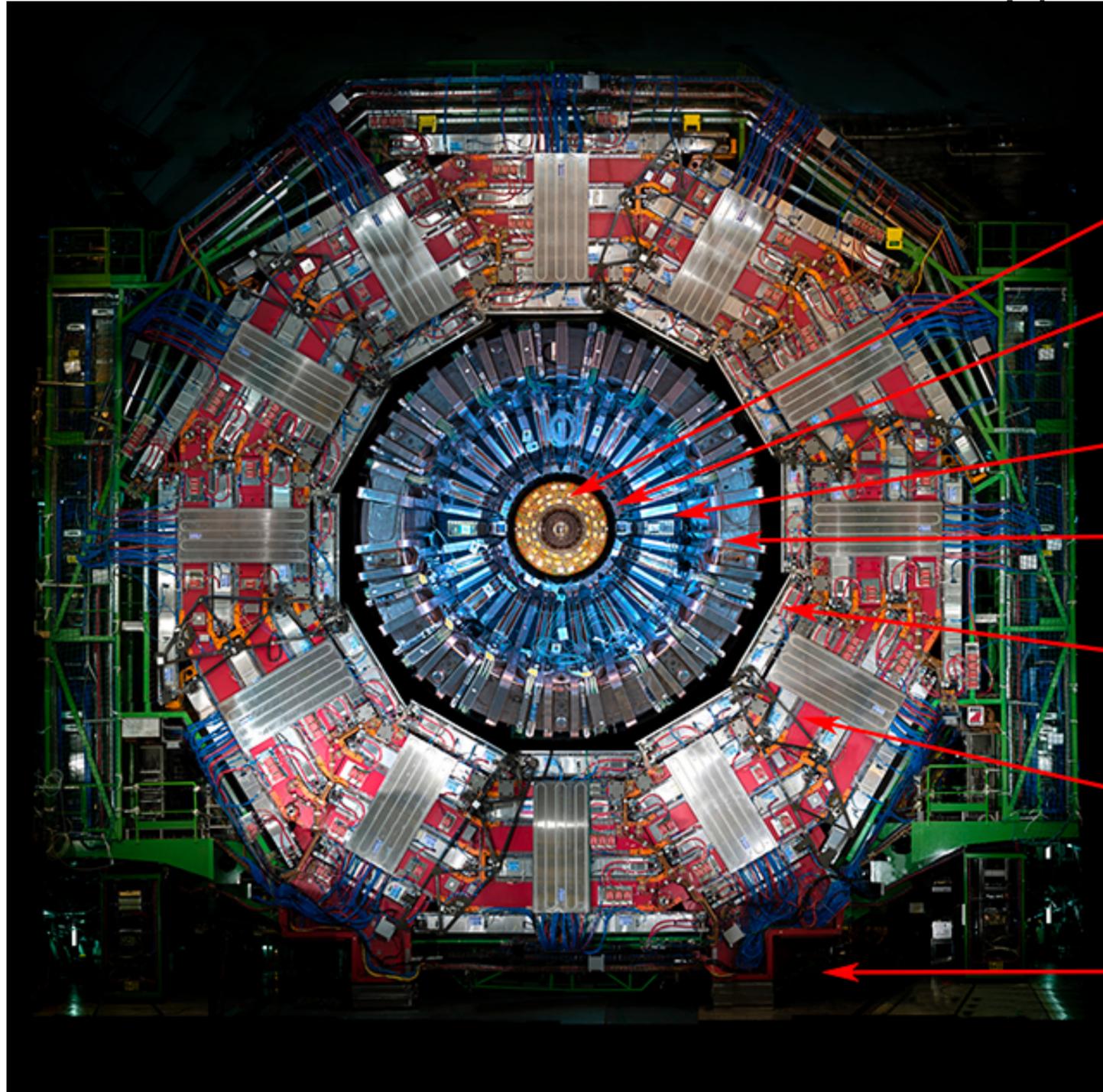
Test di qualità dei cristalli del Calorimetro Elettromagnetico

Dicembre 2007: Il Tracciatore inserito in CMS



CMS

2885 fisici (922 studenti) - 995 ingegneri - 279 tecnici
198 Istituti



Tracking system

Germany, Italy, France, Belgium, USA, Austria, Finland, Switzerland, CERN...

Electromagnetic Calorimeter

Russia, China, France, Italy, Japan, UK, Switzerland, Greece, Taiwan

Hadron Calorimeter

USA, Russia, Ukraine, Turkey, Iran, India, Hungary...

Solenoid

France, Italy, Switzerland, Finland, CERN, UK, Japan, Croatia

Muon system

Italy, Germany, Spain, USA, Russia, Belgium, Bulgaria, South Korea, Pakistan, CERN

Flux-return yoke

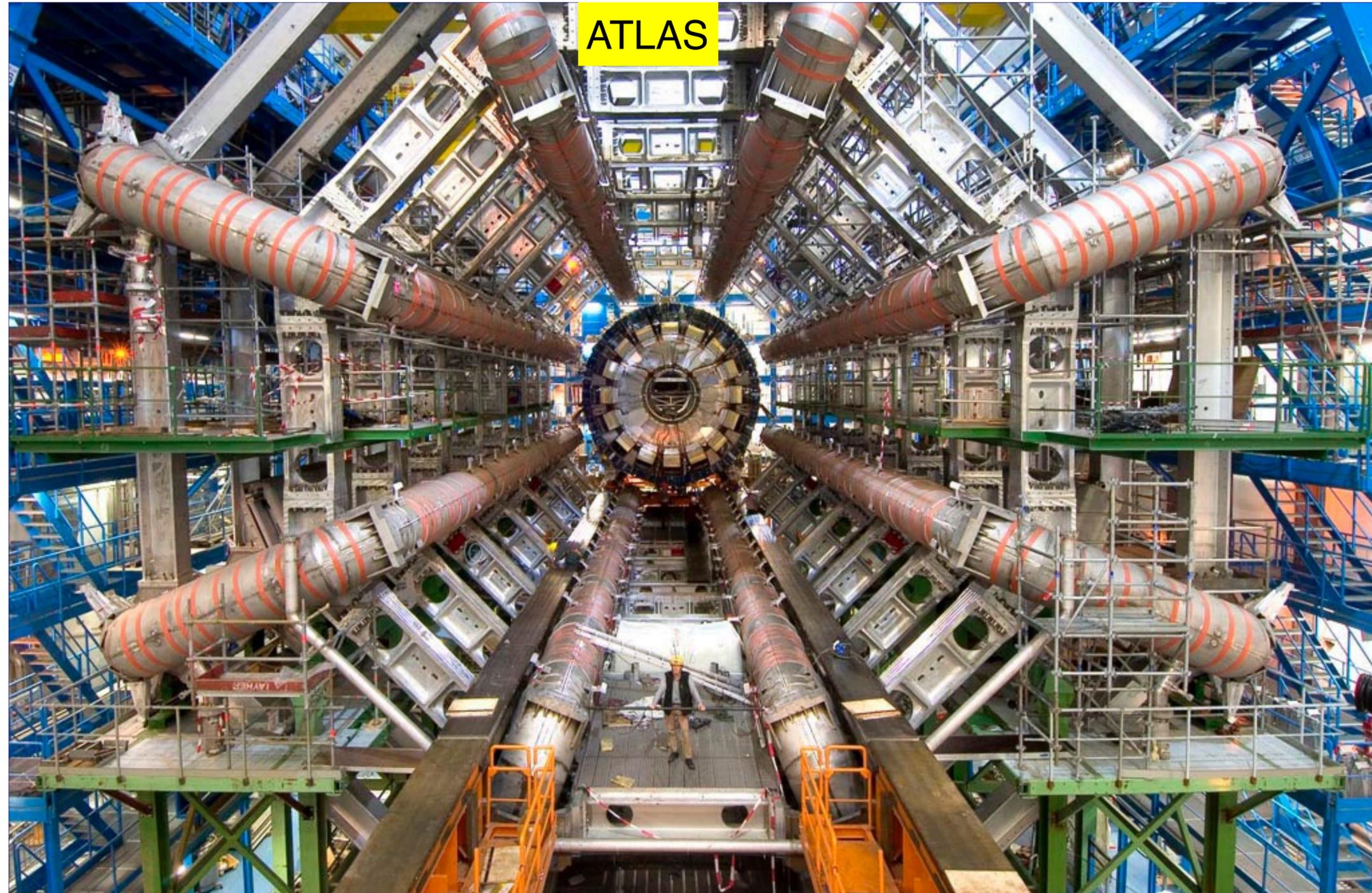
Germany, Russia, Czechia, Japan, CERN

Support system

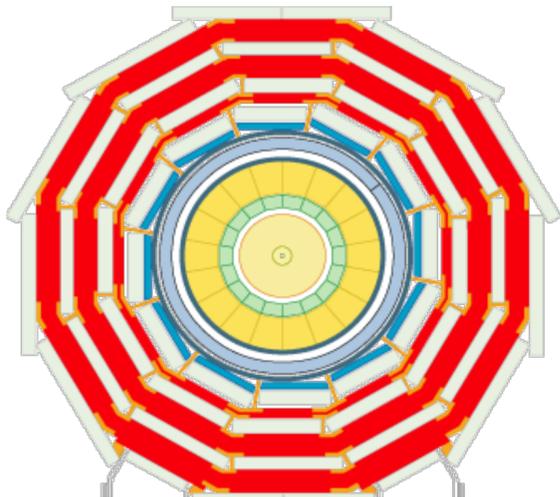
China, Pakistan, USA



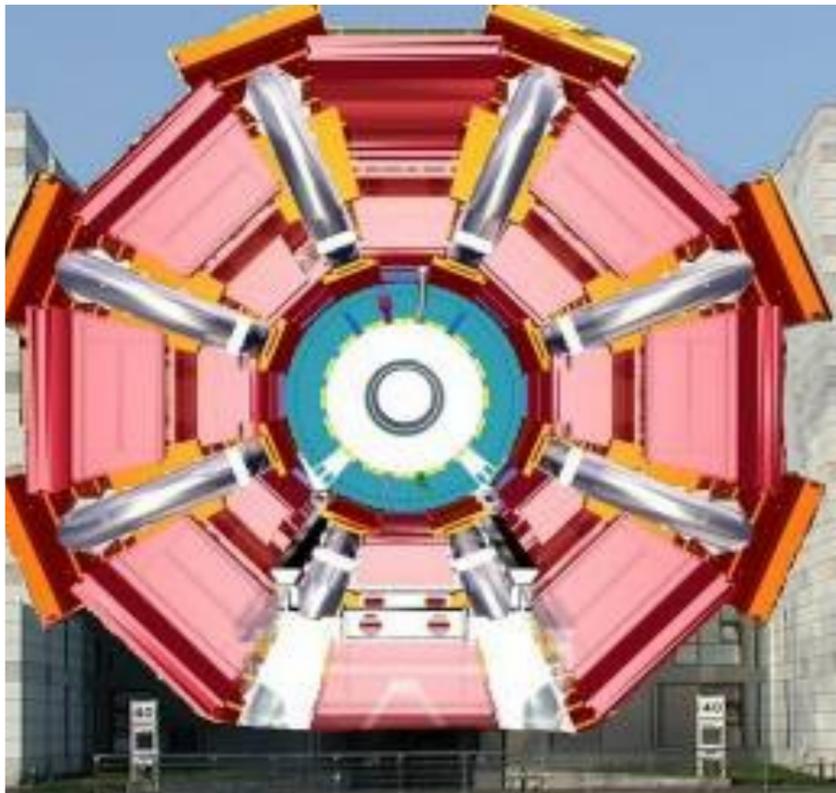
Le cattedrali del XXI secolo



CM

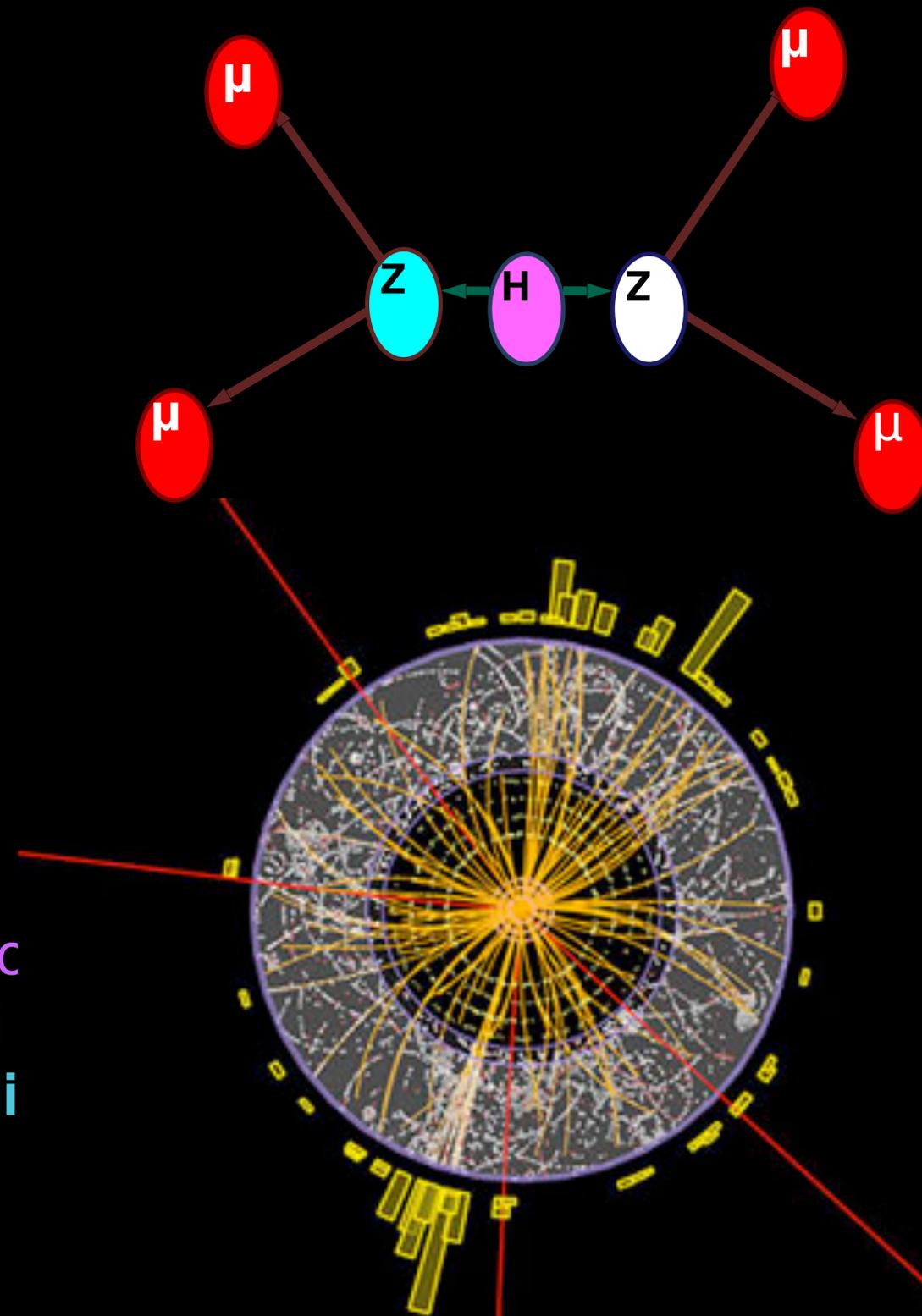


ATLAS

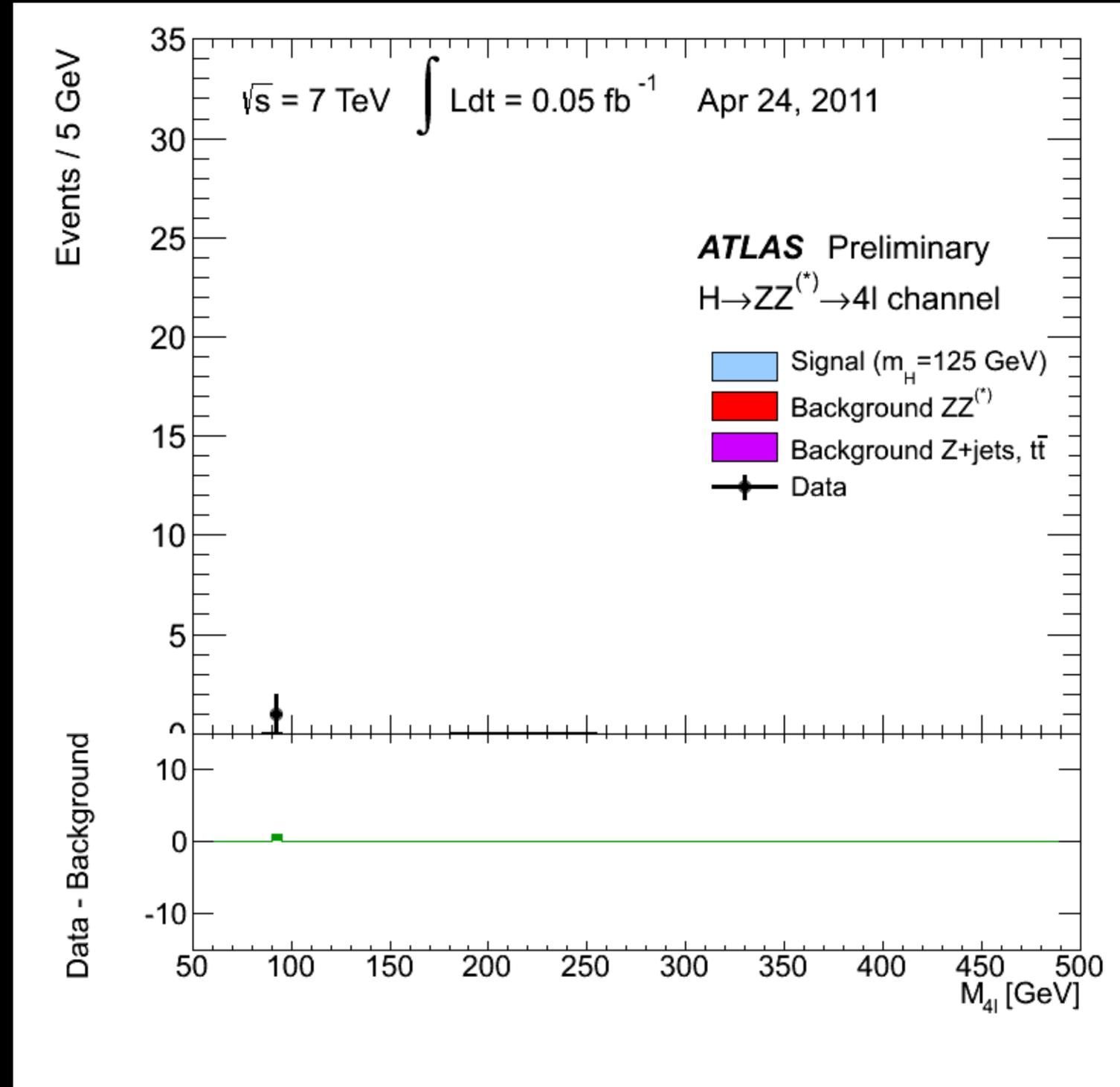


Ricostruire il bosone di Higgs

- Il bosone di Higgs una volta creato si disintegra subito e produce altre particelle. Tra i decadimenti principali ci sono
 - Due fotoni
 - Quattro elettroni o muoni (elettroni “pesanti”)
- Possiamo “vedere” solo le particelle prodotte dalla disintegrazione del bosone.
- Ci sono tante altre collisioni dove possono essere creati due fotoni o quattro elettroni (o muoni) che vengono registrati dal rivelatore: è il “rumore” di fondo

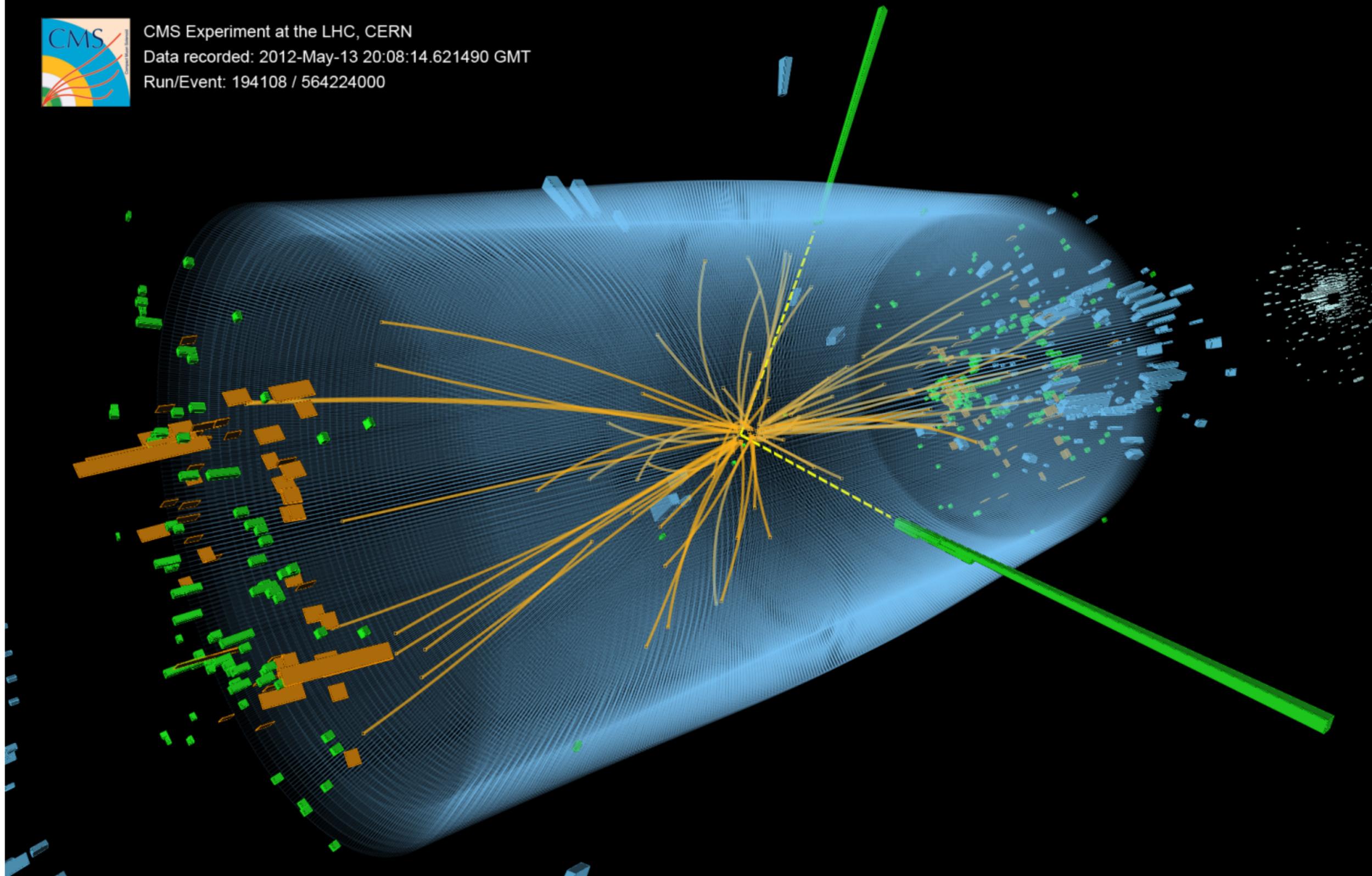


Risultati: $H \rightarrow 4l$, ATLAS





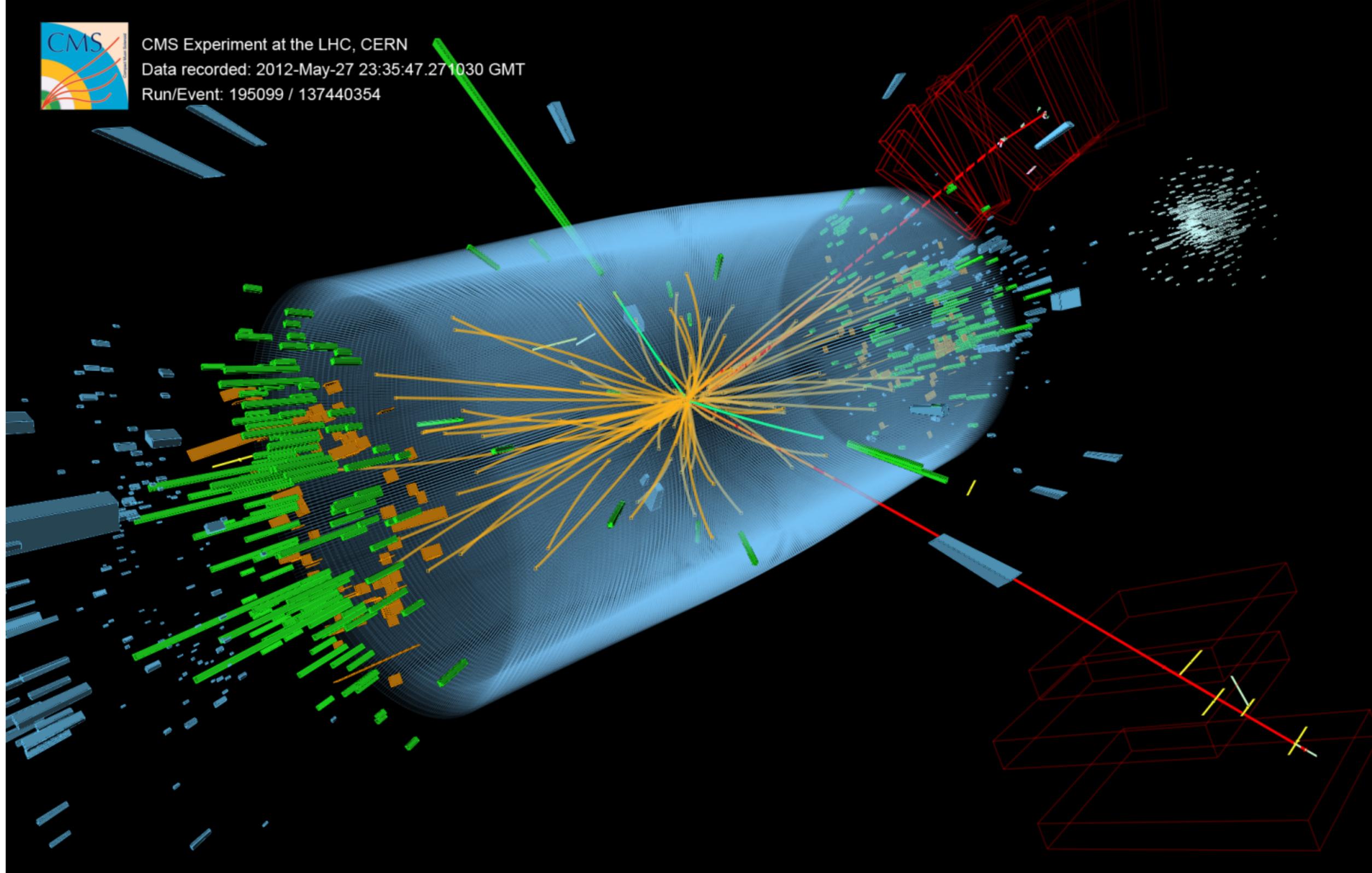
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



$H \rightarrow \gamma\gamma$



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354



$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$$

Un'enorme mole di dati

CMS: Nel 2018 ha raccolto ~20 Peta Bytes = 20 mila di TeraBytes di dati

in più ci sono i dati simulati e lo spazio disco per le analisi

~250 mila cores

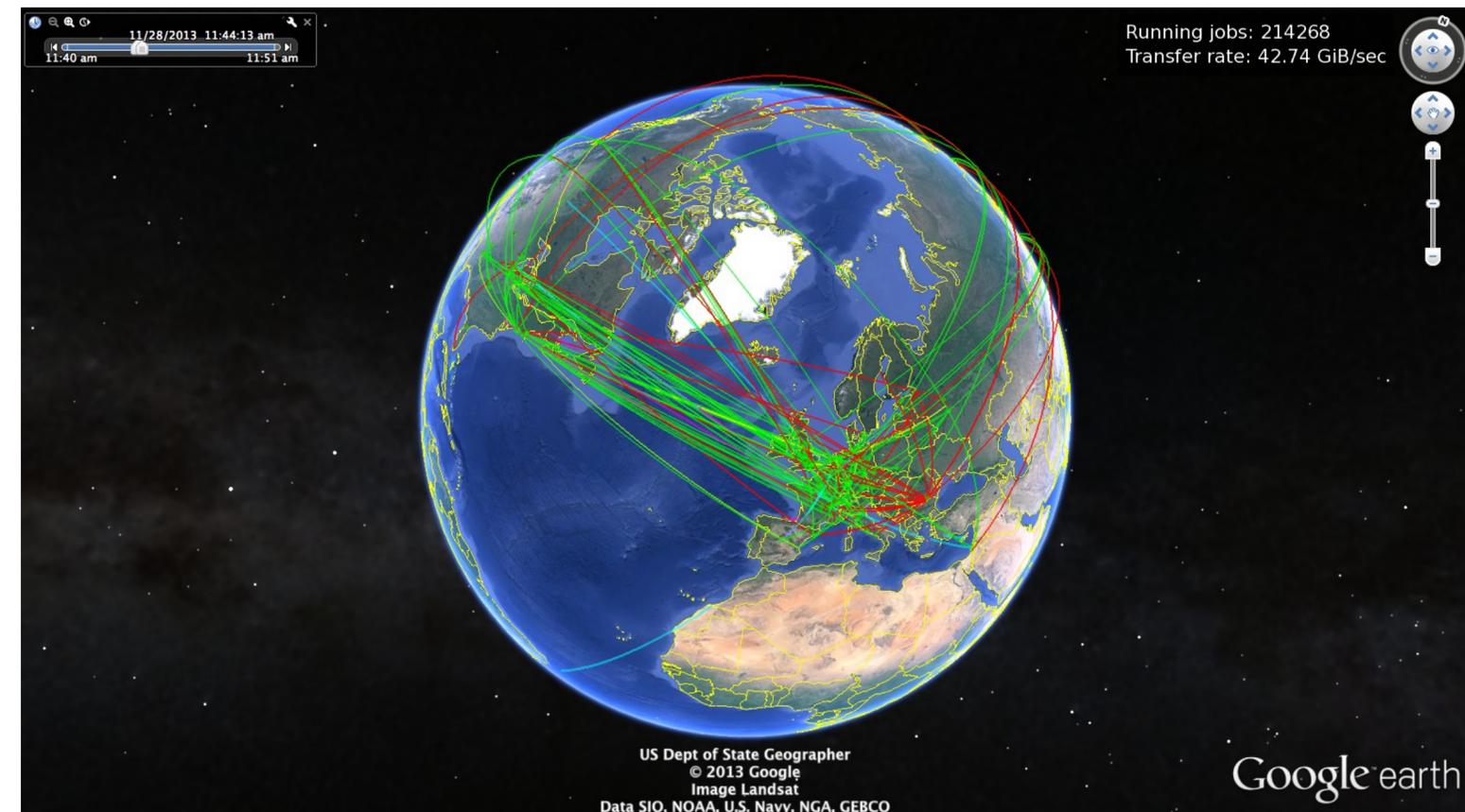
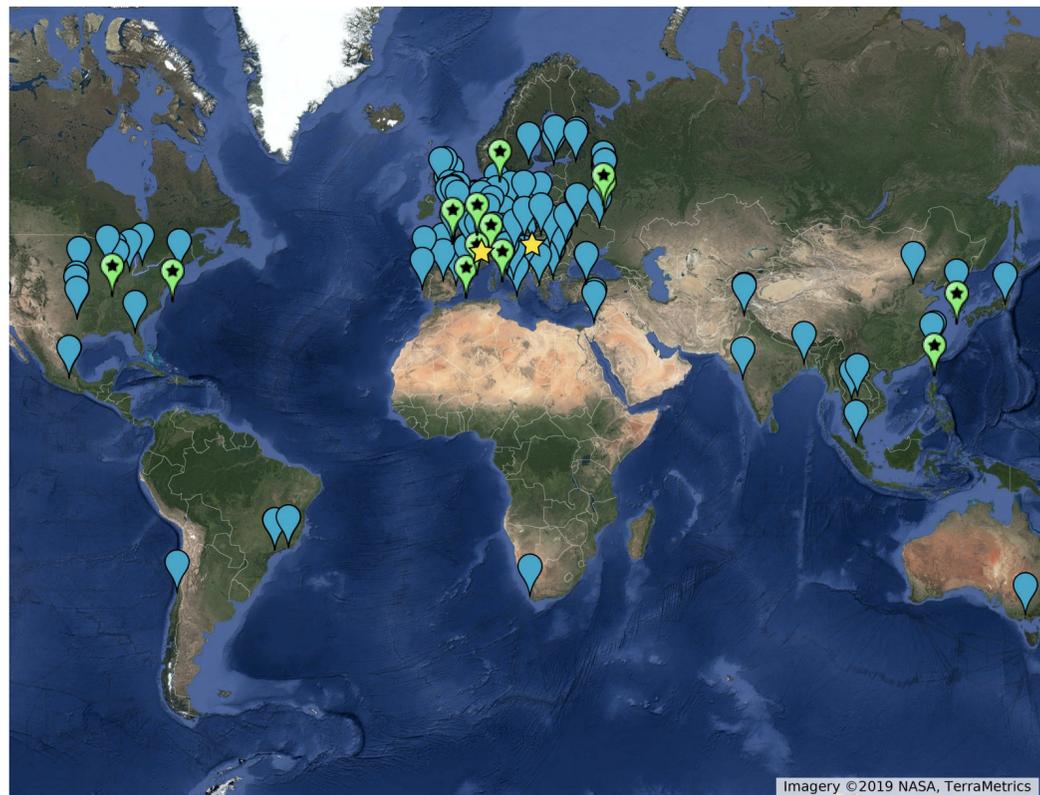
~130 PBytes di disco = 130 mila dischi da 1 TeraByte!

~250 PBytes di nastro

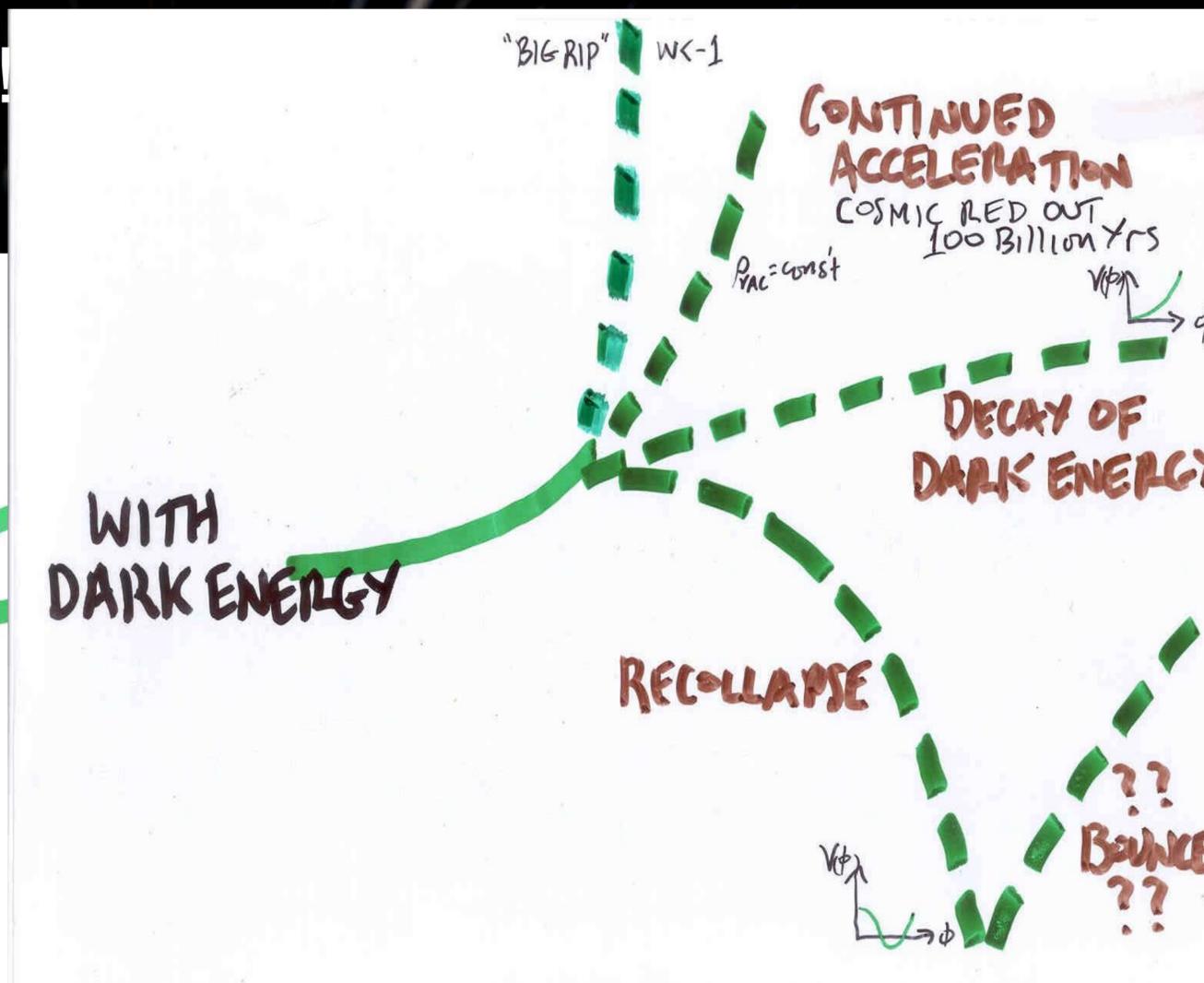
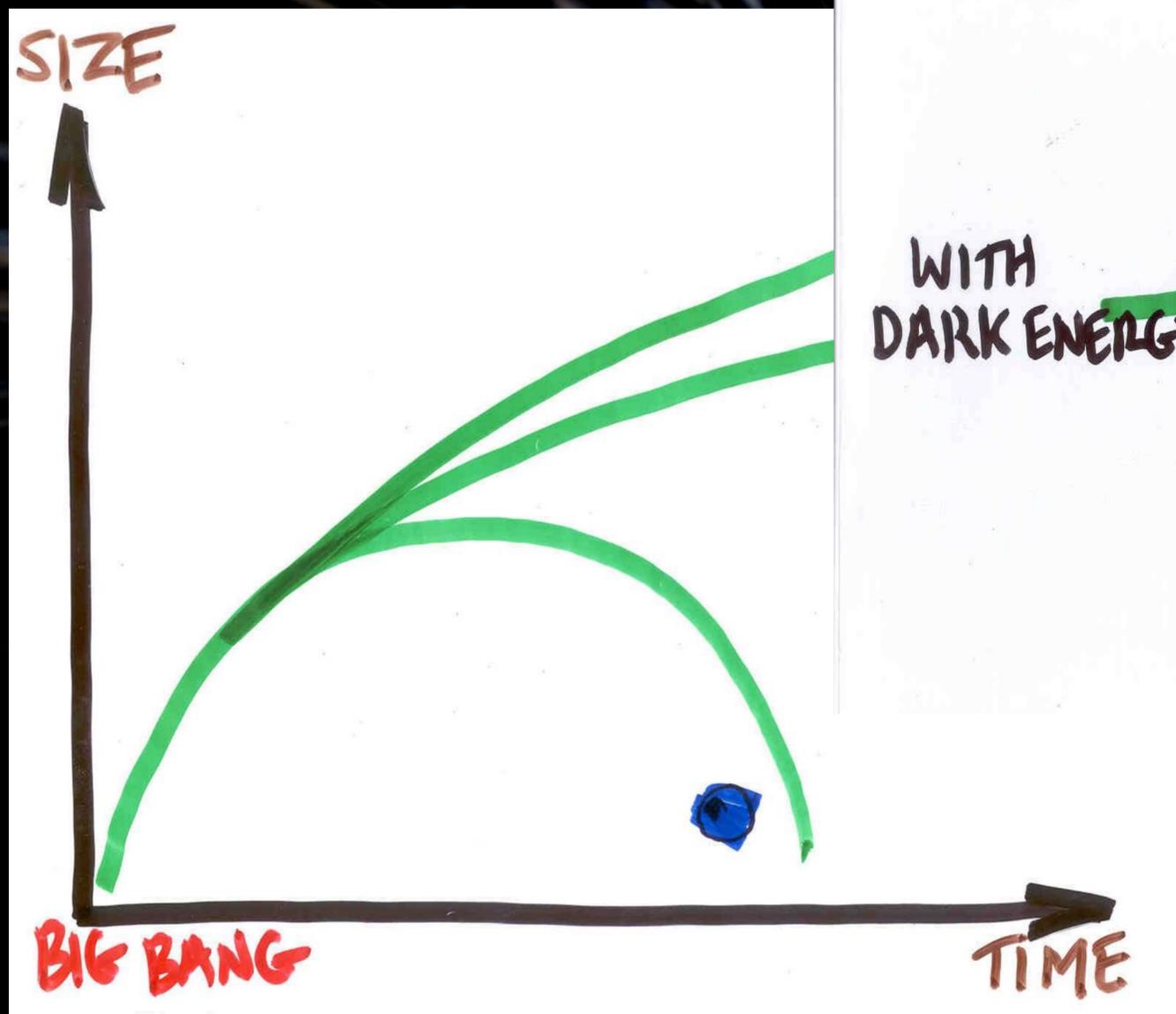
A livello mondiale ~ 1 Exabytes = 1000 PBytes di spazio di archiviazione

su più di 200 siti e ~ 1 milione di cores

WLCG: Worldwide LHC Computing Grid



In presenza di Dark Energy, un Universo "piatto" si può espandere per sempre, ricollassare, o anche spaccarsi!



Non possiamo conoscere il destino dell'Universo senza sapere cosa sia la Dark Energy

La fisica delle particelle e la società

Quanto è costato LHC?

- Circa **20 anni di lavoro** tra progettazione e costruzione, circa **10.000 fisici ed ingegneri di 85 paesi**
- **6 Miliardi di €**: è molto?
 - Un quarto delle Olimpiadi di Londra (15G€)
 - Una settimana di guerra in Iraq
 - Meno del telescopio spaziale Hubble (10G€)
- Il contributo italiano è circa il 12% del totale.
 - 36.000.000€/anno = **60 cent l'anno per cittadino**.
 - **Comunque, rientrati in gran parte come commesse internazionali.**
 - Ad esempio l'Ansaldo ha costruito in Italia $\frac{1}{3}$ dei magneti superconduttori di LHC.



Aspetti tecnologici ed economici di LHC

- La progettazione (iniziata negli anni 80), la realizzazione (completata nel 2008) e il funzionamento di LHC (e degli apparati di rivelazione) rappresentano un'enorme sforzo tecnologico in diversi campi della tecnologia:
 - ingegneria civile, criogenia, vuoto, sistemi informatici (1 anno di LHC produce ~20 km di CD impilati)
- Il costo di LHC ammonta a circa 3 Miliardi di Euro
- Il contributo annuale dell'Italia al CERN è di circa 75 MEuro (~14% dei contributi dei Paesi)

Il coefficiente di ritorno, definito come il rapporto tra la frazione di budget speso in commesse industriali verso un certo Paese e la frazione del budget CERN pagata dallo stesso Paese, è stata (nel periodo 2003-2006)

- 1.37 Italia
- 1.60 Francia (ma è uno dei Paesi ospitanti)
- 0.32 Regno Unito
- 0.63 Spagna
- Tra le imprese italiane che sono state maggiormente coinvolte citiamo **Ansaldo Superconduttori**, che ha realizzato circa un terzo dei 1200 dipoli magnetici di LHC, **Simic** (criogenia), **CAEN** (elettronica), **Renco** (ingegneria civile), **Cecom e Zanon** (meccanica di precisione), **OCEM** (elettronica di potenza) , **Saes Getters** (tecnologia del vuoto)
- Il totale dei ritorni economici verso industrie italiane dal 2000 al 2008 è stato di ~460 Milioni di Euro

Quello che non possiamo sapere oggi

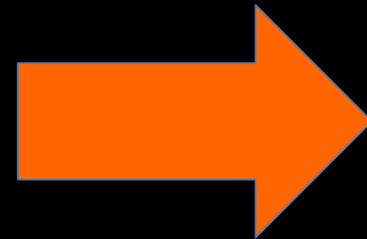
Corsi e ricorsi : alla regina che gli chiedeva a cosa servivano gli esperimenti che stava facendo (NDR: stava scoprendo l'elettricità)

Faraday rispose:

'Non lo so, ma sono sicuro che un giorno si possa tassarla'

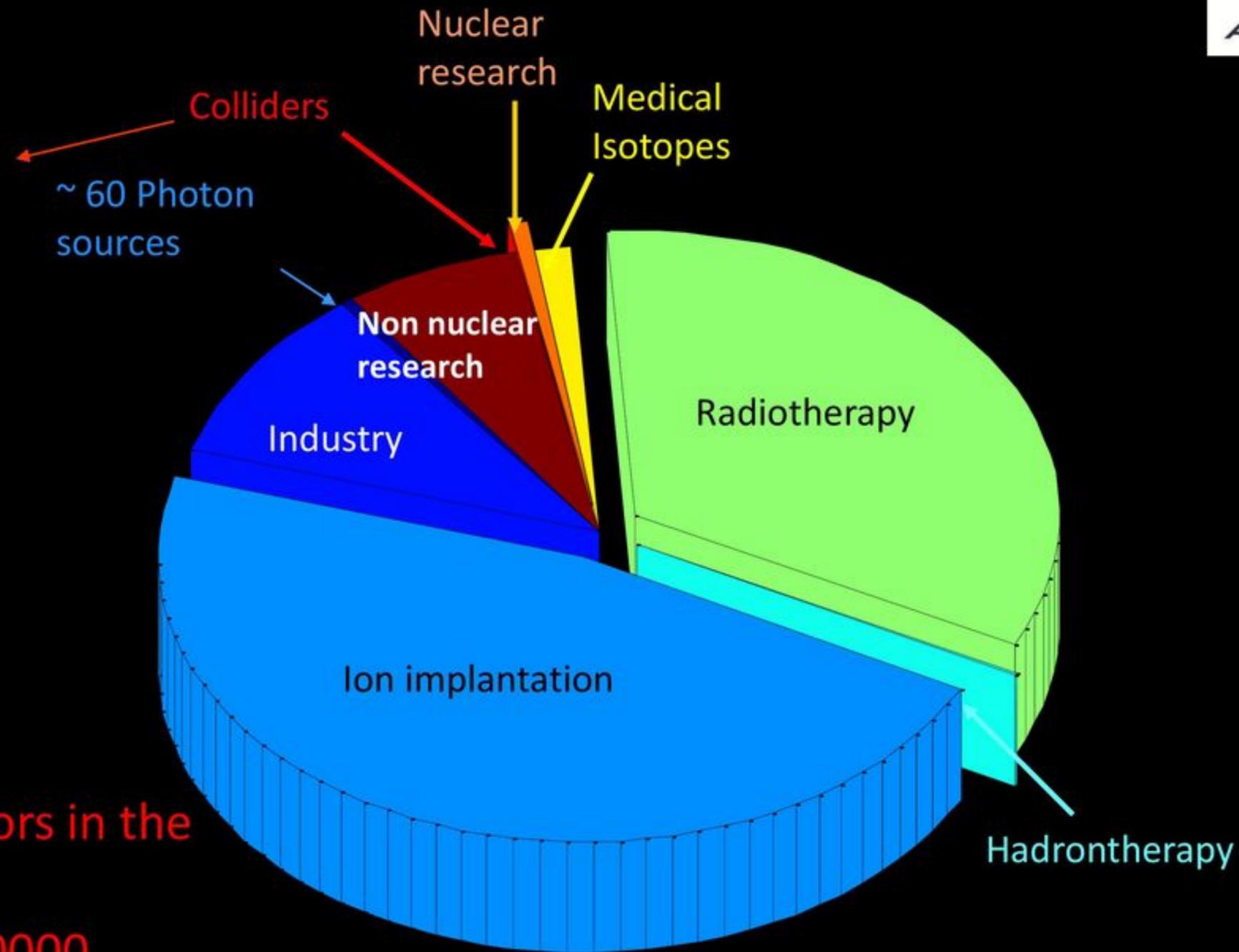


Cambio di paradigma





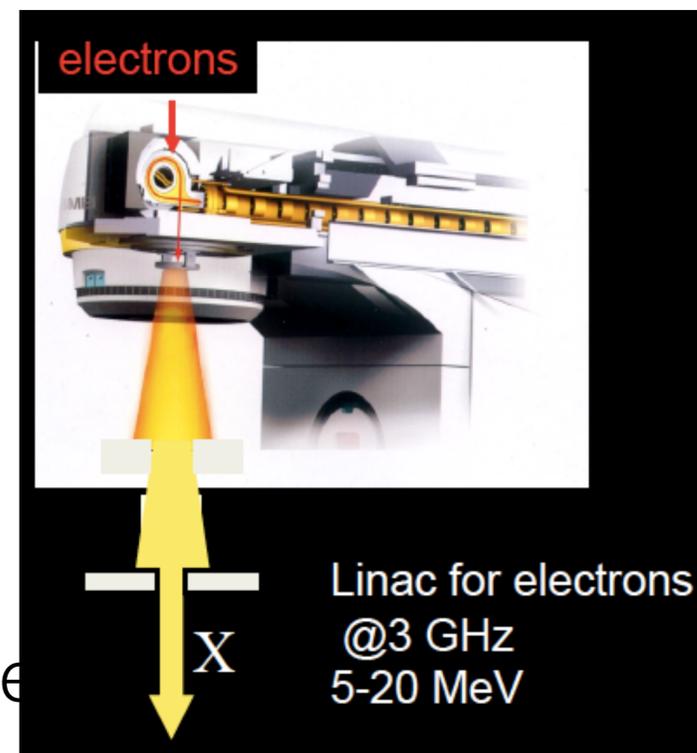
- 1 CERN
- 1 Italy
- 2 Russia
- 1 China
- 1 USA
- 1 Japan



Accelerators in the world:
around 30000
(15000 in 2000)

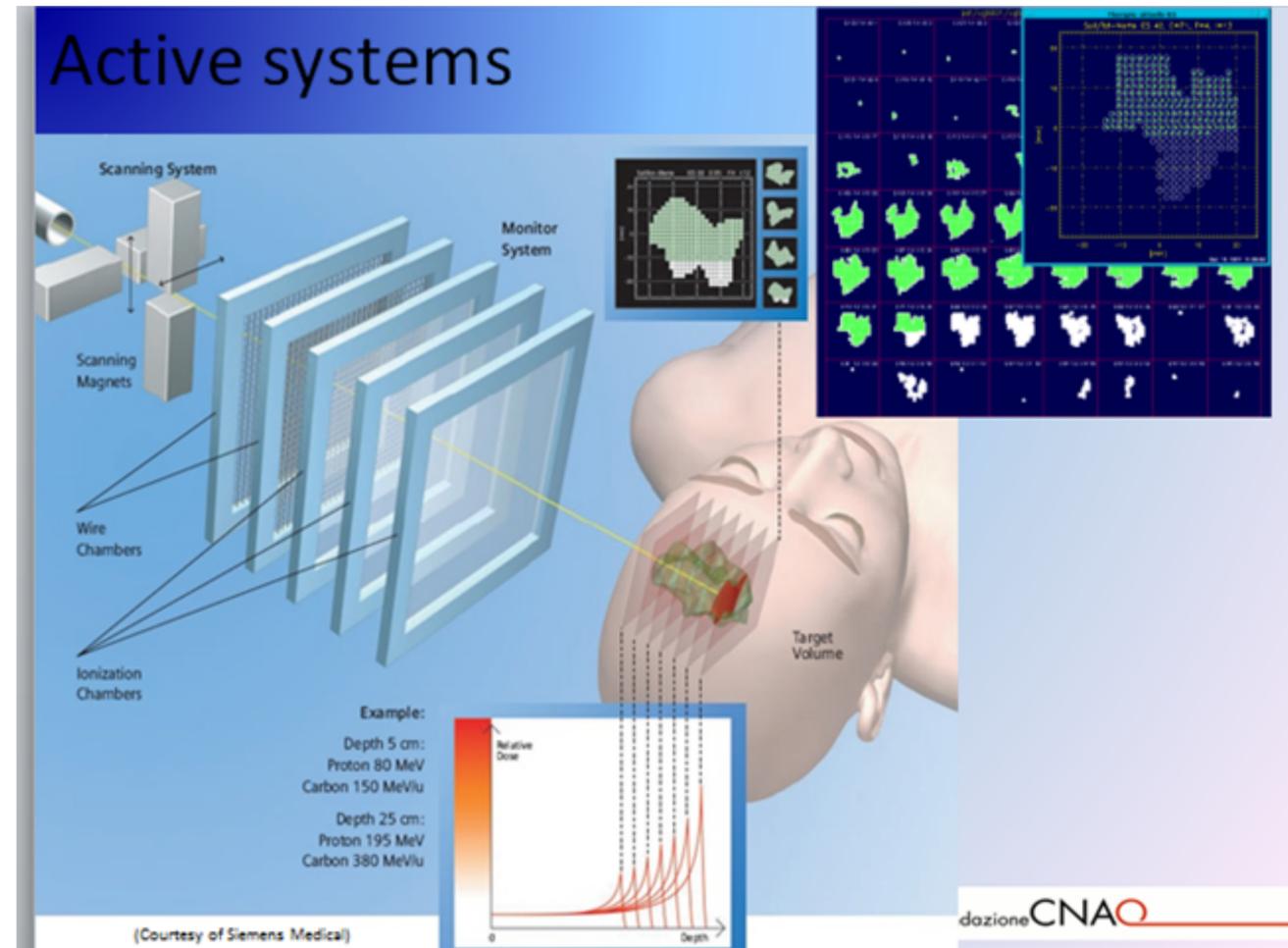
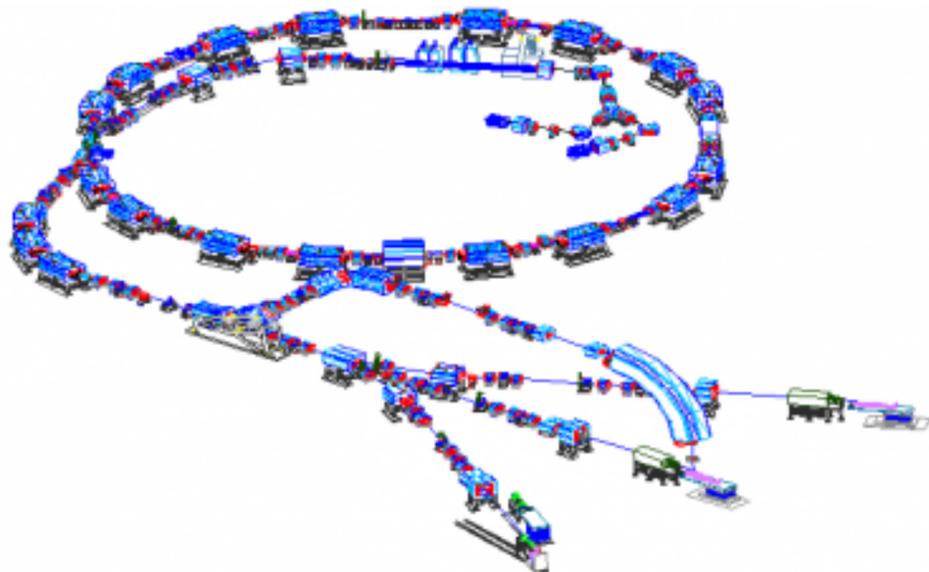
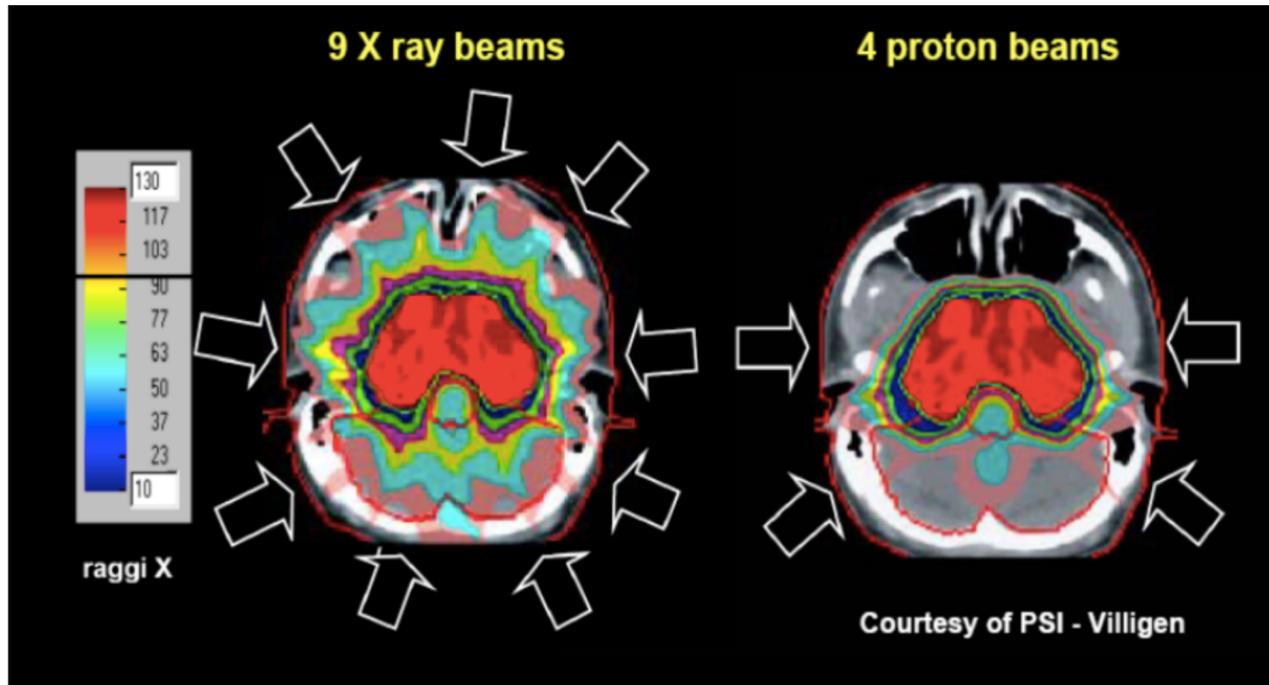
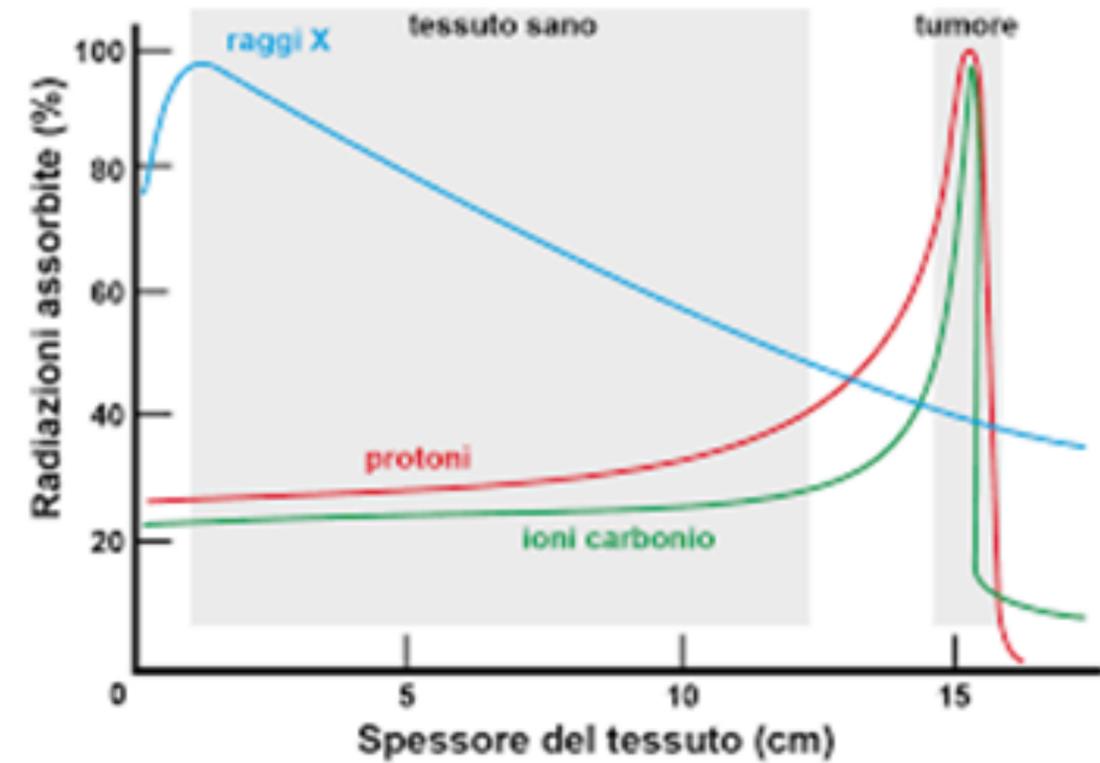
Terapia contro i tumori (Raggi X)

- 1937: primo irraggiamento raggi X con una macchina Van der Graaf
- 1954: primo paziente curato a Stanford - tumore all'occhio
- Da allora 40 Milioni di persone trattate
- Oggi il 50% delle persone con tumore sono trattate con i raggi X (70% nel mondo industrializzato)
- Linac di elettroni (4 - 22 MeV) accelerano elettroni che bombardano una superficie metallica producendo raggi-X



Adroterapia

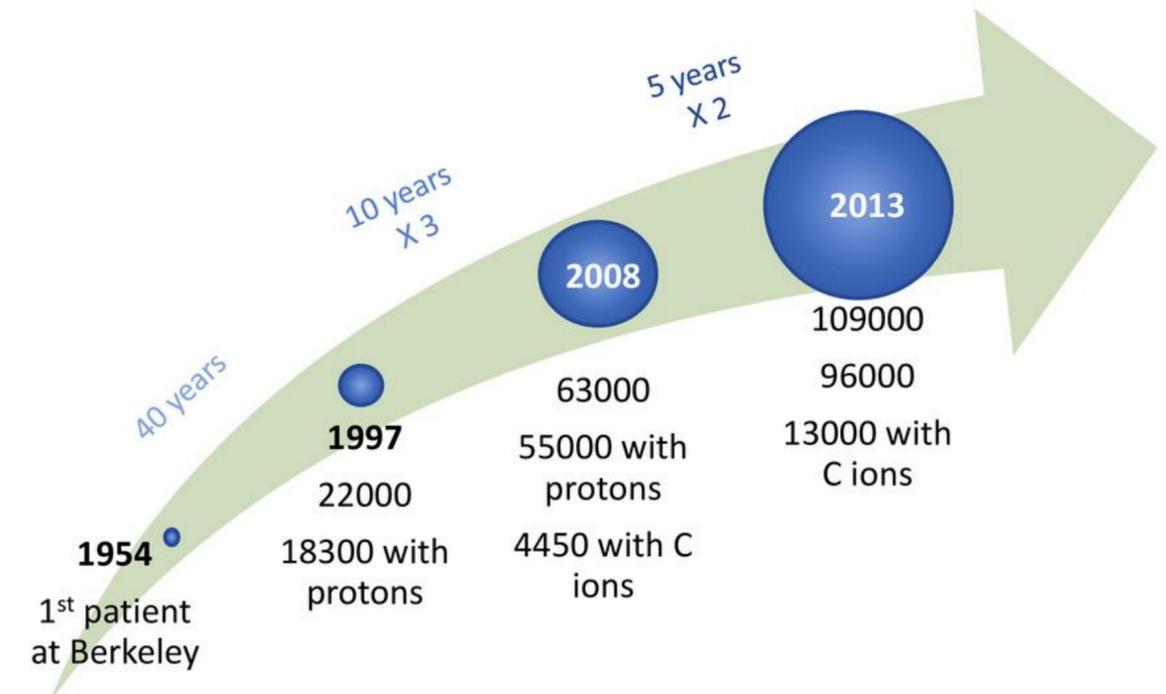
- Usa protoni o ioni per depositare energia prevalentemente nel tratto finale della traiettoria, danneggiando il tessuto in maniera minore rispetto alla terapia con raggi-X



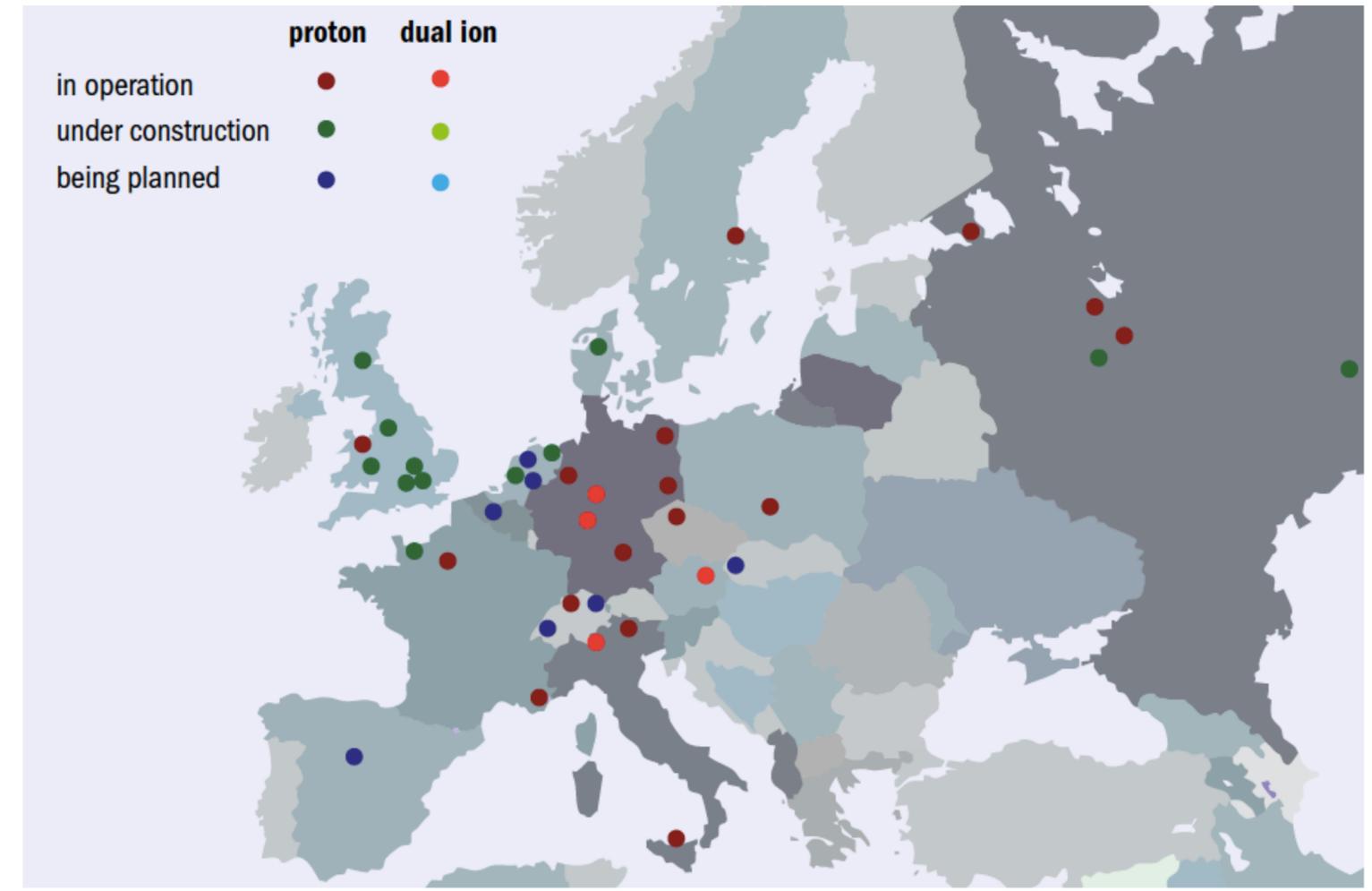


- clinical accelerator
- radionuclide teletherapy
- circular accelerator
- particle therapy

Growth of Hadrontherapy

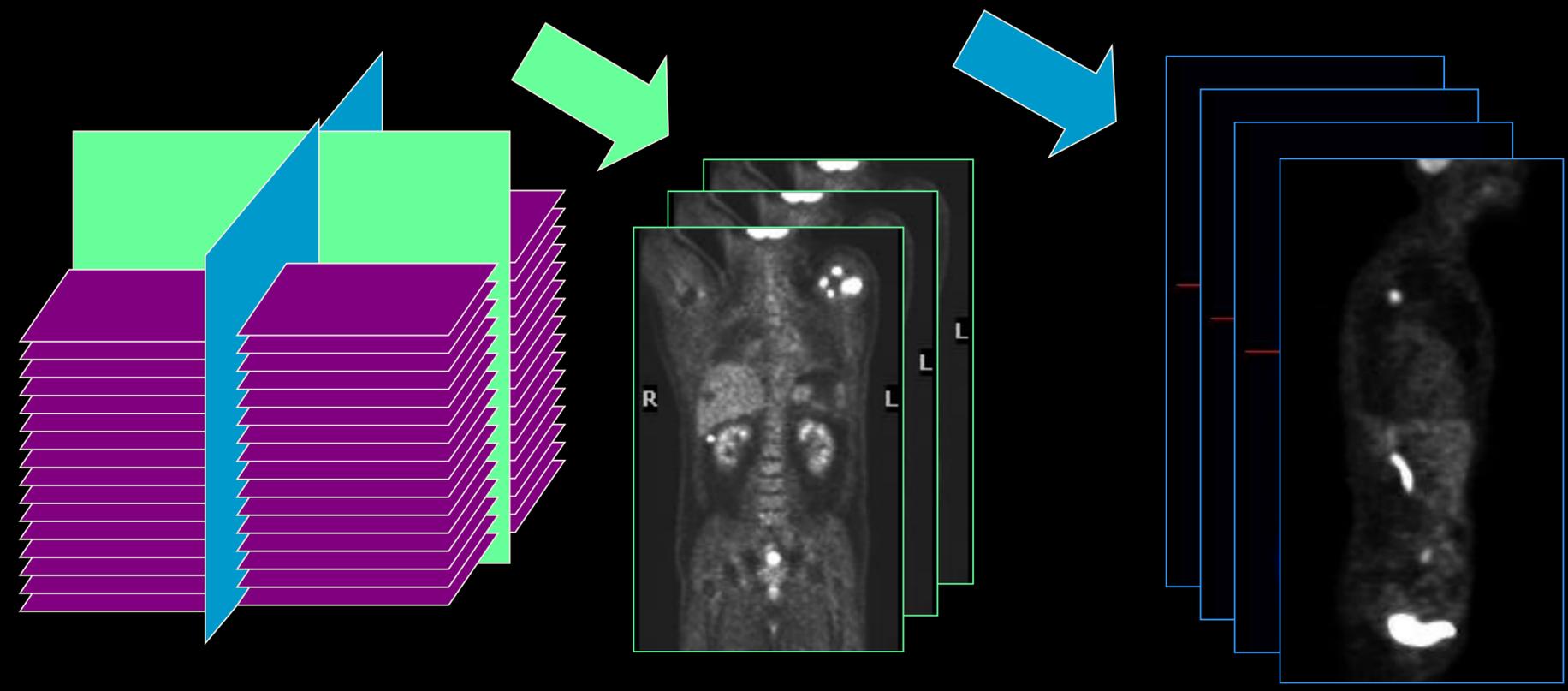
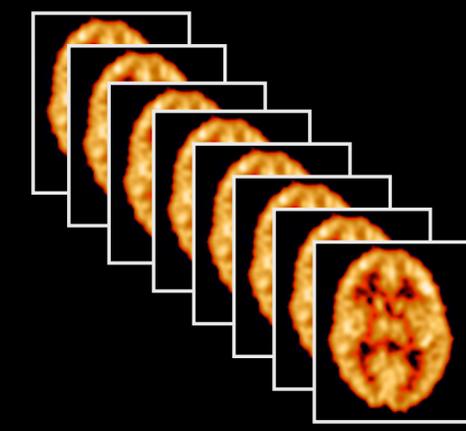
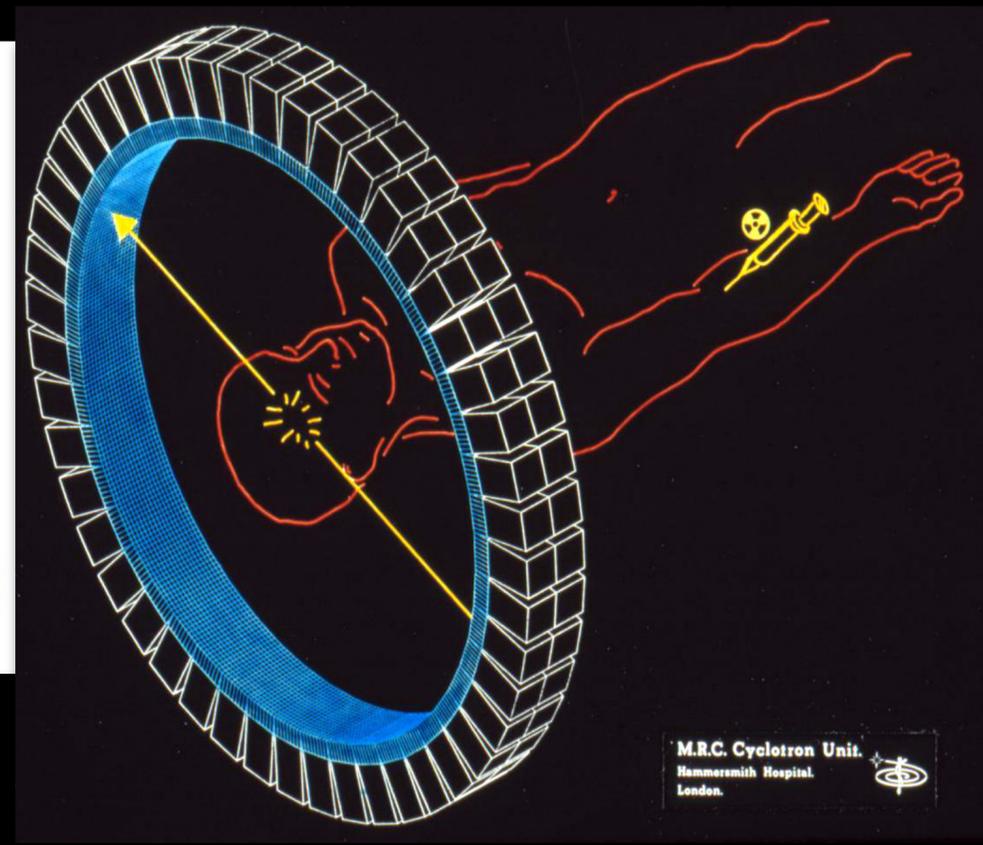
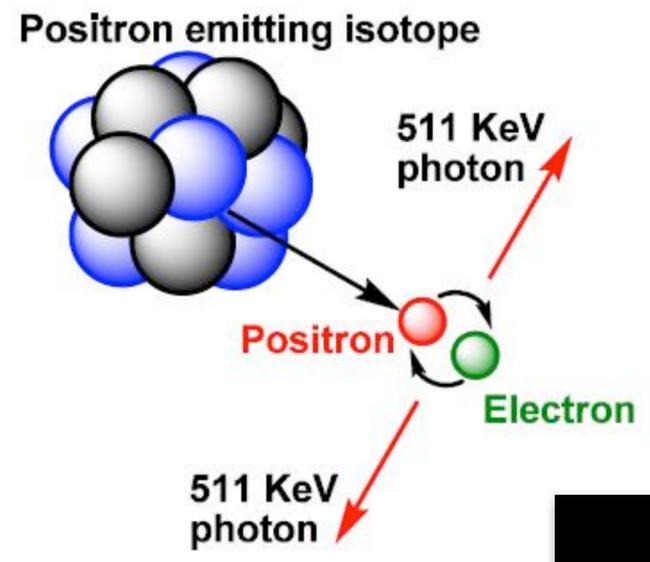


centri di adroterapia in Europa — 2016



PET

A



CT

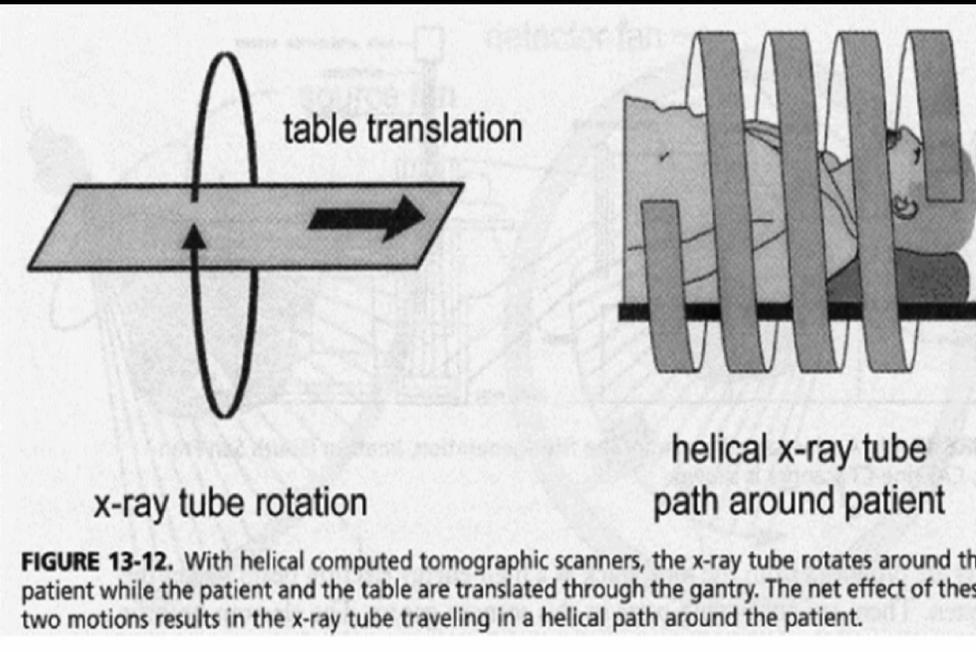
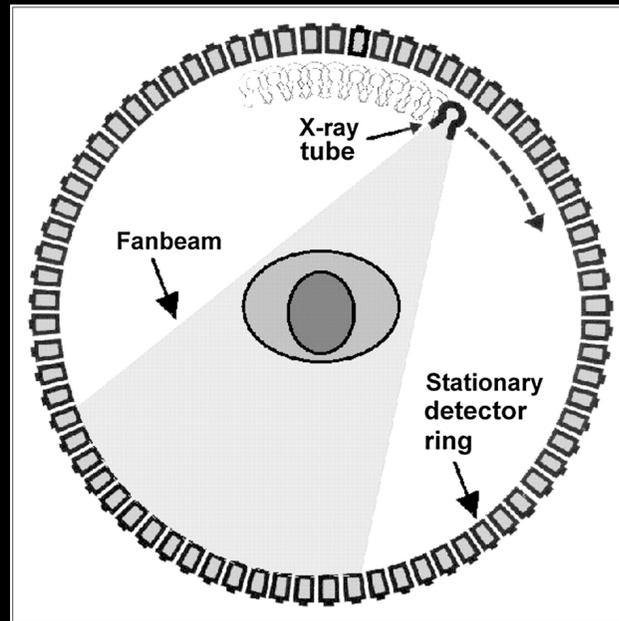
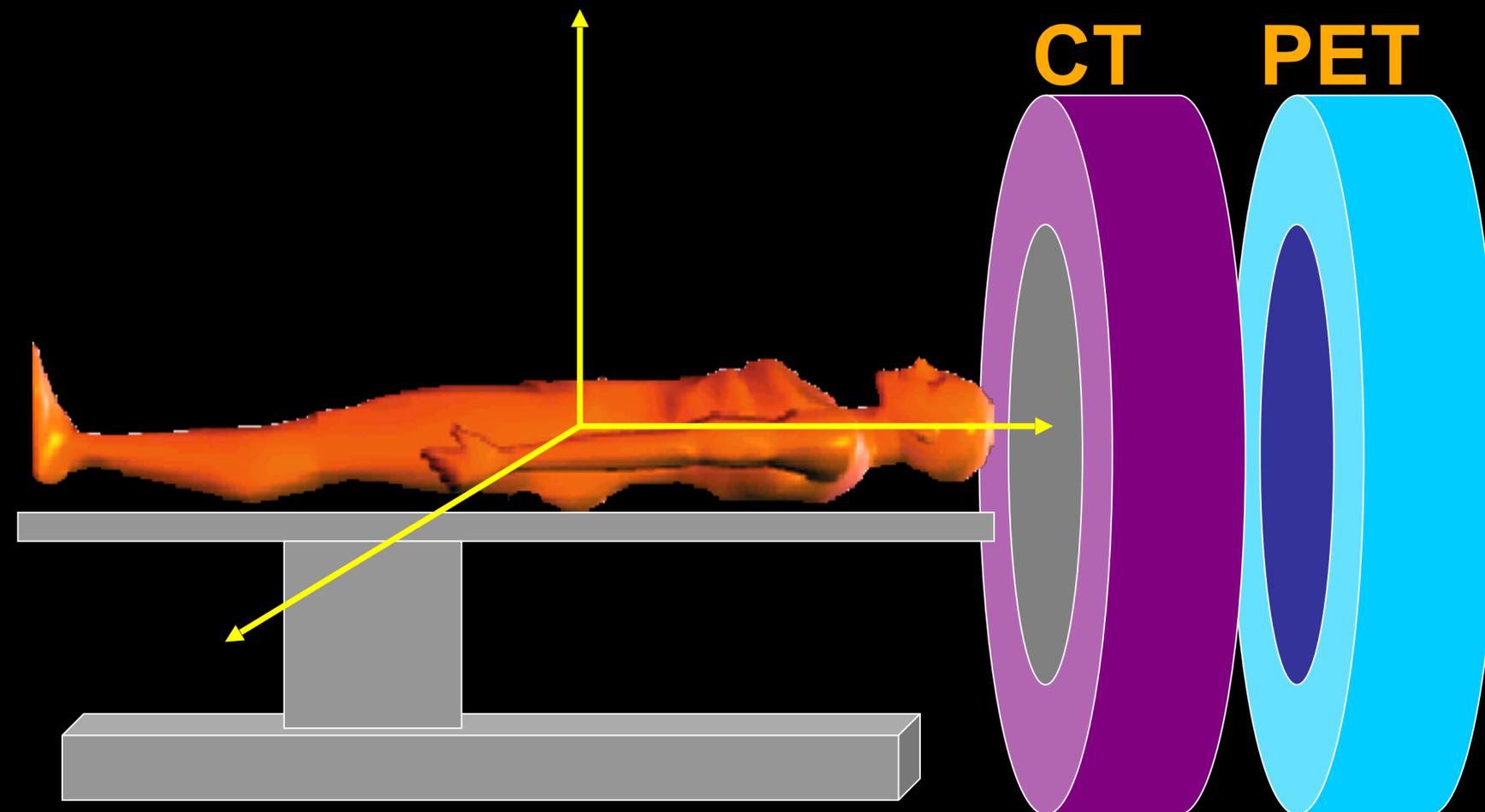
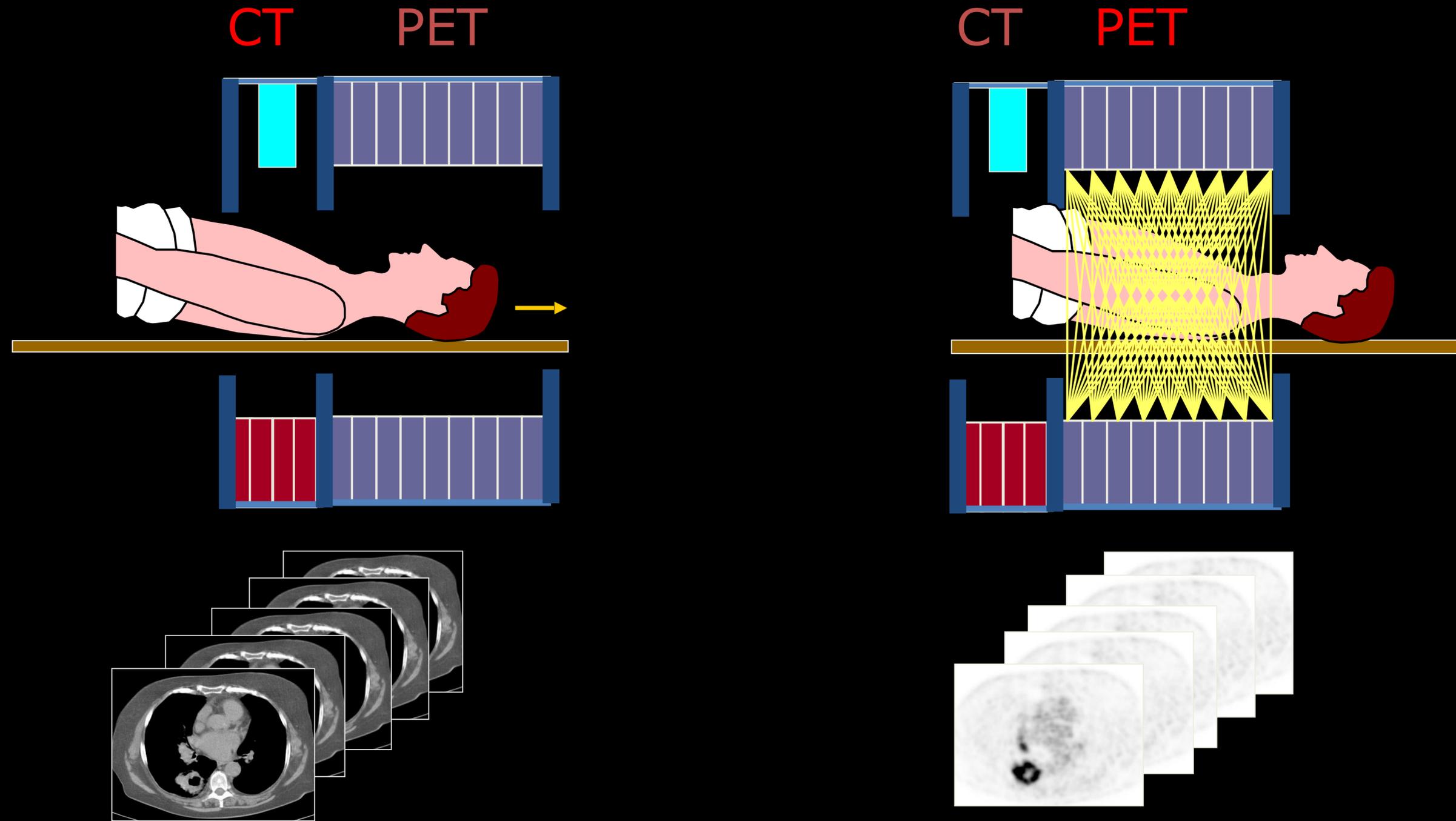


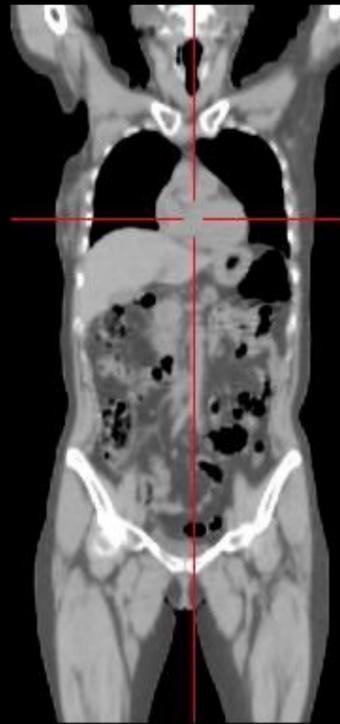
FIGURE 13-12. With helical computed tomographic scanners, the x-ray tube rotates around the patient while the patient and the table are translated through the gantry. The net effect of these two motions results in the x-ray tube traveling in a helical path around the patient.



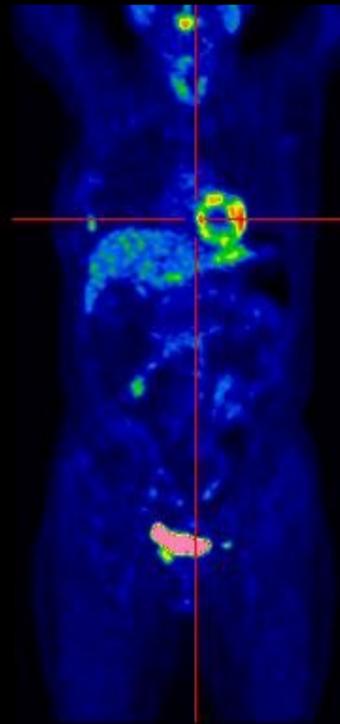
PET/CT scanner



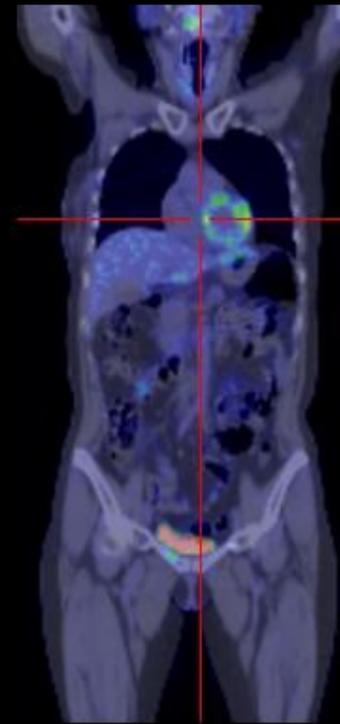
¹⁸F-FDG PET/CT



CT Coronal



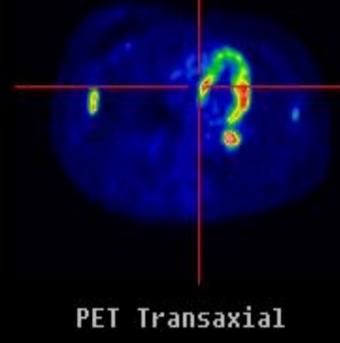
PET Coronal



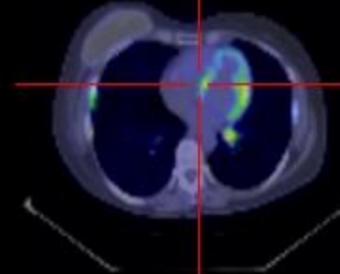
Fused Coronal



CT Transaxial



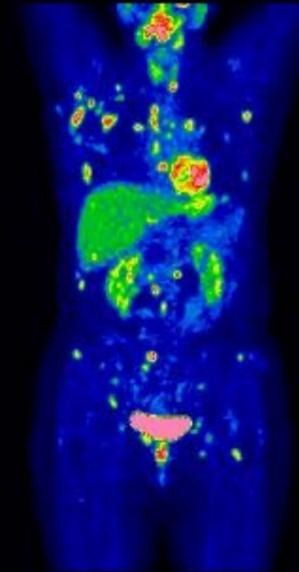
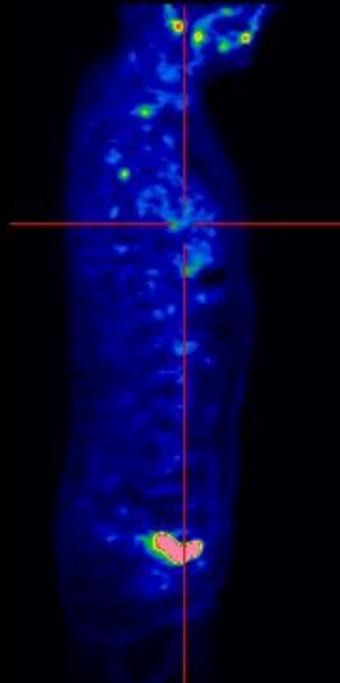
PET Transaxial



Fused Transaxial

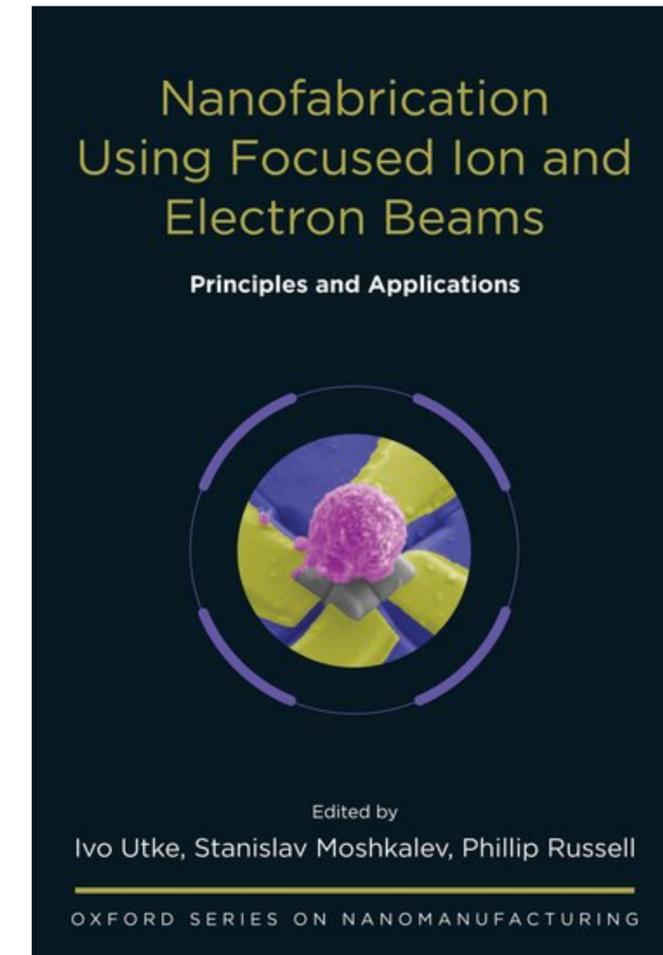
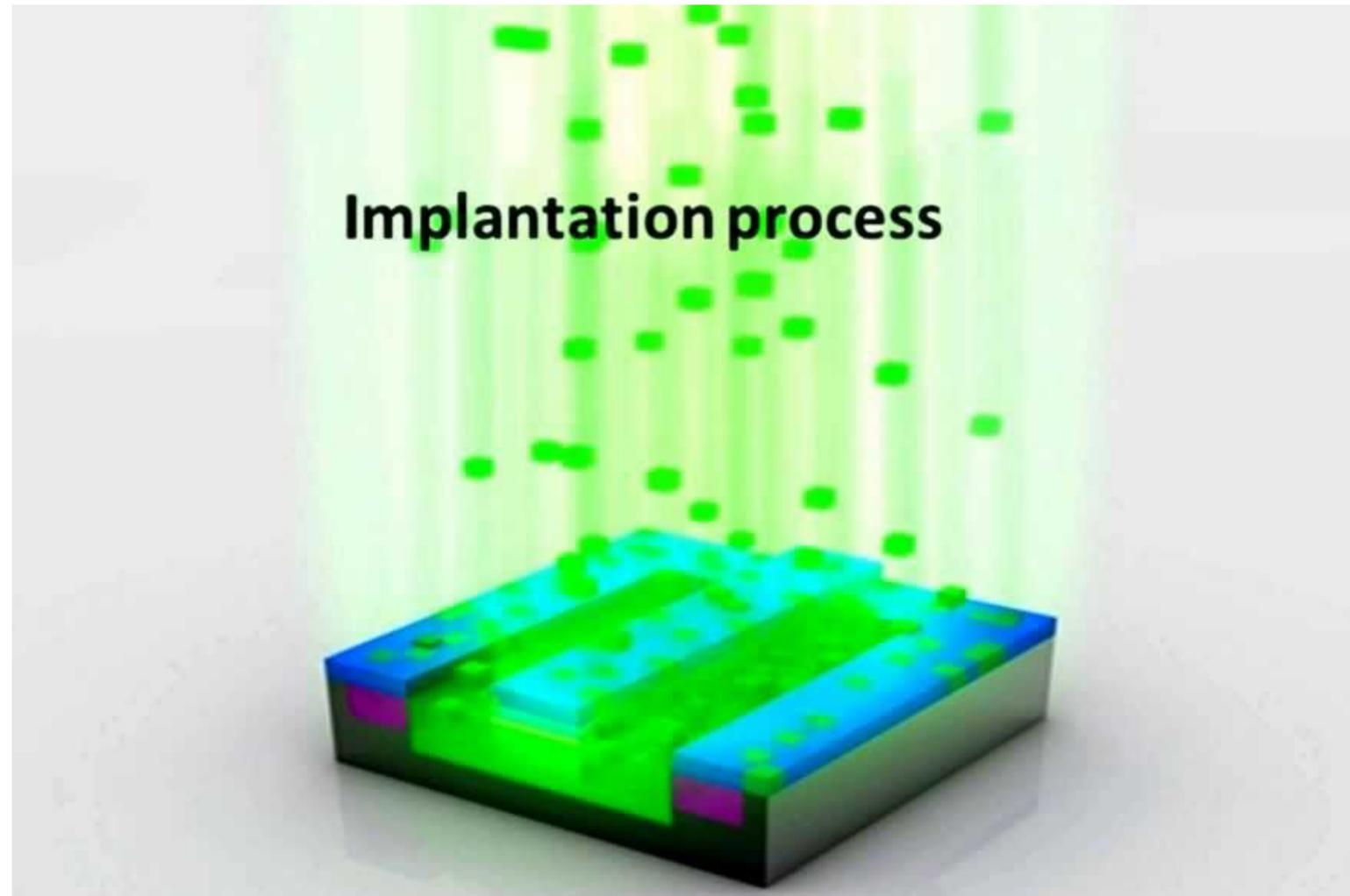


CT Scout View



Impiantazione ionica

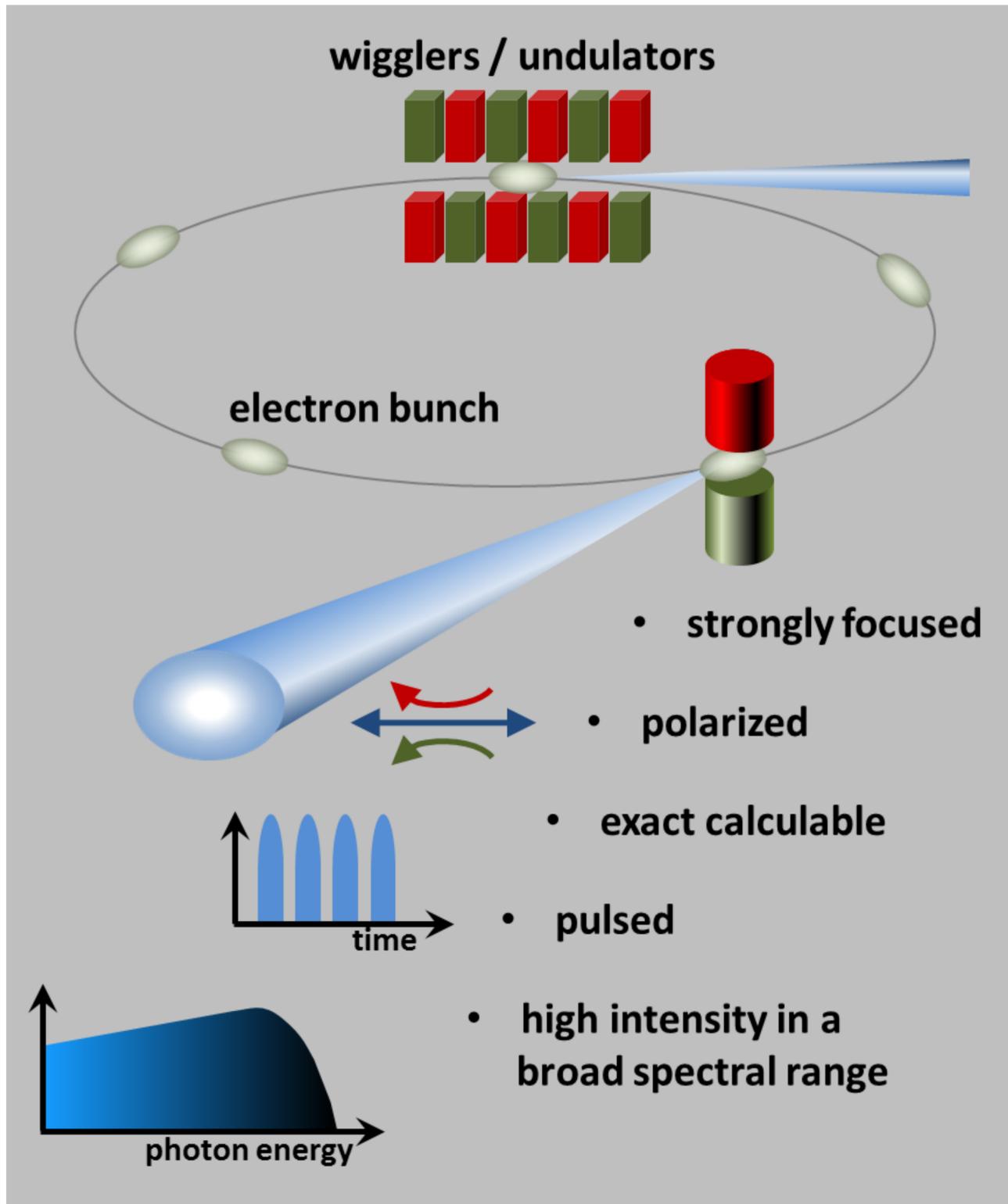
Sviluppo di materiali poco costosi, leggeri ed efficaci per applicazioni elettroniche



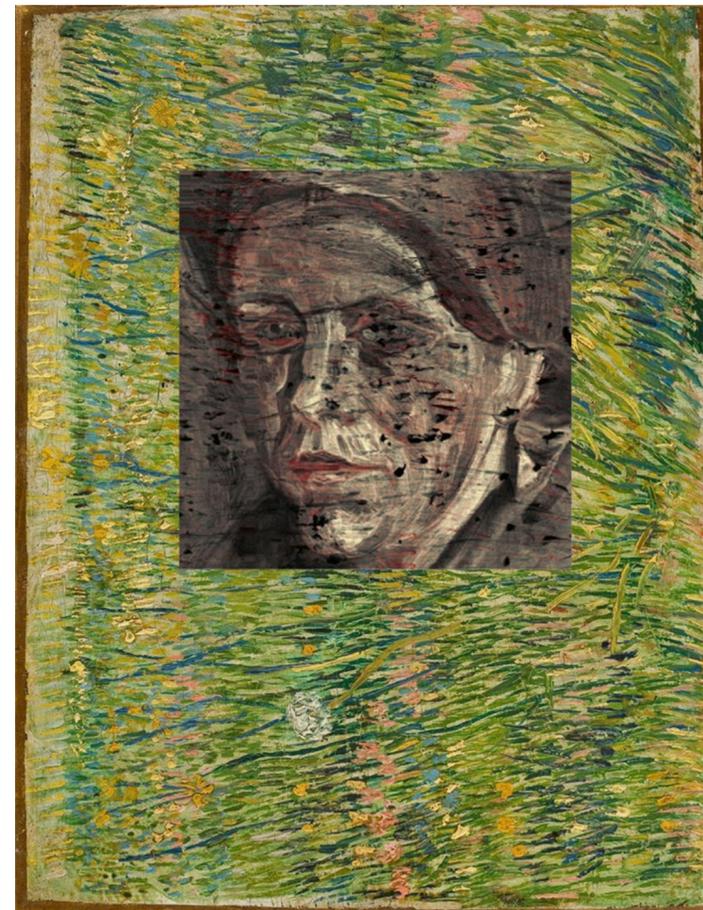
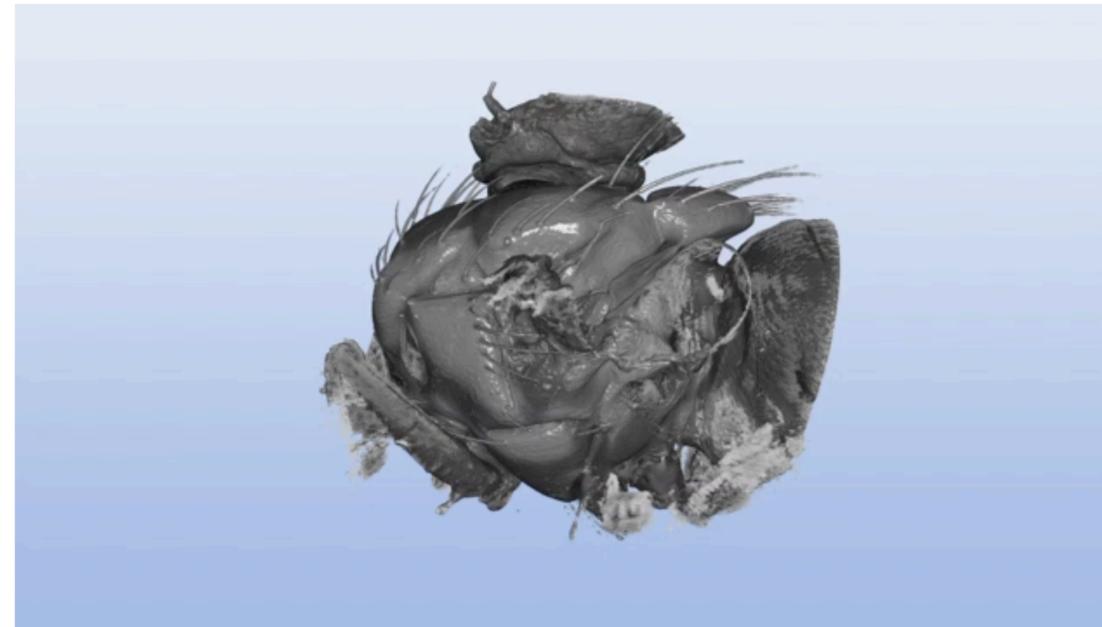
Silicio o Germanio bombardato con ioni che penetrando nel reticolo cristallino modificano le caratteristiche elettriche del materiale — transistor/diodi

Luce di sincrotrone

radiazione emessa da elettroni accelerati
e deflessi da campi magnetici



mosca *in vivo*



Fluorescenza a raggi X
autoritratto di Van Gogh
nascosto sotto uno strato di erba



Cosmic Horizon
(50 billion light-years from Earth)

Potenze di 10: distanze e dimensioni espresse in 10^x metri

GRAZI