

# Alcuni concetti di fisica delle particelle elementari

F. Tartarelli (INFN - Milano)



**Benvenuti alle**  
**International Masterclasses**  
**Hands on particle physics**  
**18<sup>th</sup> Masterclasses 2022**  
dal 24/02 al 09/04/2022  
<https://physicsmasterclasses.org>

Progetto che coinvolge ogni anno piu' di 13.000 studenti liceali in 60 nazioni nel mondo e 225 Universita' o altri centri di ricerca  
@physicsIMC #physicsIMC

**8<sup>a</sup> edizione Milano (INFN+UNIMI) 21/03 e 28/03**  
<https://agenda.infn.it/event/29255/>

# Perché oggi siete qui?

Cercheremo di darvi un'idea di come funziona il mondo della ricerca nel campo della Fisica delle Particelle Elementari

Terremo due seminari che vi daranno alcuni concetti di base sulle nostre ricerche e sui metodi sperimentali che usiamo

Effettuerete un'analisi di veri dati sperimentali dell'esperimento ATLAS a LHC (CERN)

Parteciperete in videoconferenza con altri gruppi di studenti ad una discussione e combinazione dei risultati ottenuti

## Organizzazione:

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)  
– Sezione di Milano. Ente pubblico di ricerca con 20 Sezioni, 4 Laboratori Nazionali

Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano



# Programma della giornata

Ore 8:45

Inizio Masterclass - Registrazione

Ore 9:25

Benvenuto del Direttore della Sezione INFN di Milano e del Dipartimento di Fisica di dell'Universita' degli Studi di Milano

Ore 09:30

Dott. F. Tartarelli "Alcuni concetti di Fisica delle Particelle Elementari"  
Prof. L. Carminati "Acceleratori, rivelatori e altro ancora"

Ore 12:30

Pausa

Ore 13:45

Analisi dati di  $Z^0$  dell'esperimento ATLAS al CERN

Ore 16:00

Videoconferenza con gli altri gruppi di lavoro partecipanti all'evento  
Quiz!

Ore 17:00

Fine Lavori

# Videoconferenza

21.03. - 26.03.2022

	Mon, Mar 21	Tue, Mar 22	Wed, Mar 23	Thu, Mar 24	Fri, Mar 25	Sat, Mar 26
topic	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS W	VC 1: ALICE
moderators	Hassnae	Ana P.	Andrei	Anke	David R.	Anders
moderators	Stefanie	Anke	Jennifer	Ina	Émilien	Despina
moderators	Sudeshna	David R.	Tadej	Martin	Stefanie	
	Tübingen 	Oxford 	Natal 	Bergen 	Regensburg 	São Paulo, USP 
	Milan 	São Paulo USP 	Athens, NKUA 	Oxford 	Parma 	Warsaw, WUT 
	Rome, Tor Vergata 	Sharjah 	Sharjah 	Konya 	Madrid, IFT 	
	Grenoble 		Brookhaven 	São Paulo USP 	Prague, CTU 	
	Oslo 			Tübingen 	Copenhagen 	
topic	VC 2: CMS	VC 2: CMS	VC 2: LHCb	VC 2: CMS	VC 2: ALICE	

# Videoconferenza

Alla fine della Videoconferenza ci sarà un quiz. Per partecipare bisogna utilizzare la app

[www.kahoot.it](http://www.kahoot.it)

Il pin del quiz vi verrà comunicato alla fine della videoconferenza

Vi chiediamo di compilare anche un questionario di gradimento al link

<https://agenda.infn.it/e/mcmi2022>



The screenshot shows the website for the Masterclass 2022 - Hands On Particle Physics. The header is yellow and contains the title and dates: "Masterclass 2022 - Hands On Particle Physics", "21-28 Mar 2022", and "Europe/Rome time zone". Below the header, there is a navigation menu with the following items: "Overview", "Programma (data del 21/03/2022)", "Programma (data del 28/03/2022)", "Registrazione", "Scuole Partecipanti", "Edizioni precedenti", "Come raggiungerci", and "Questionario". The "Questionario" item is circled in red. To the right of the menu, there is a section titled "Le VIII Masterclass - Milano 'Alla scoperta del r... dell'esperimento ATLAS' si svolgeranno nelle se..." with dates "21 Marzo 2022" and "28 Marzo 2022". Below this, there is a paragraph of text starting with "Il progetto International Masterclasses coinvolge di 37 differenti paesi dando loro l'opportunita' d... elementari. I centri di ricerca e le strutture unive... una giornata 'full immersion' di lezioni ed eserc... di lavoro dei fisici delle particelle elementari. Anche quest'anno la Sezione di Milano dell'Istit... Fisica dell'Università degli Studi di Milano hann... delle scuole superiori particolarmente motivati."

# il CERN

## Laboratorio internazionale fondato nel 1954

CERN: *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*  
European Laboratory for Particle Physics  
L'Italia è uno dei 12 membri fondatori

## Scoperta dei bosoni W e Z nel 1983

Premio Nobel per la Fisica a Carlo Rubbia e Simon van der Meer nel 1984

## Invenzione della camera a fili nel 1968

Georges Charpak, premio Nobel nel 1992

## Invenzione del World Wide Web

Tim Berends-Lee

Il 12/03/2019 si è celebrato al CERN e in tutto il mondo il trentennale del WWW

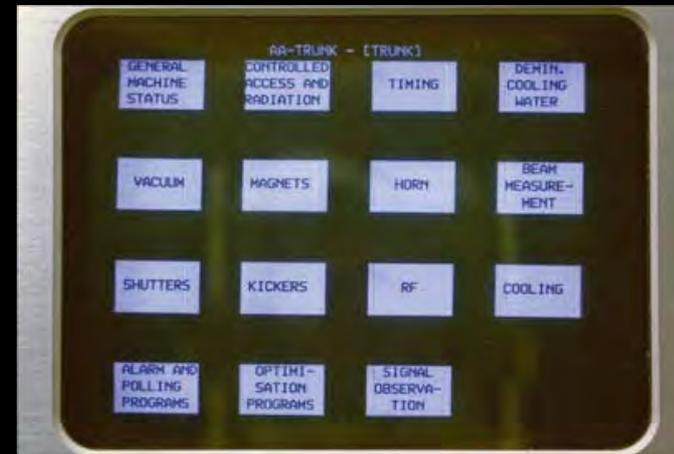
## Altre invenzioni con sviluppi iniziali al CERN

Touchscreen capacitivi: nel 1973 per le console della Control Room di uno dei primi acceleratori del CERN, l'SPS

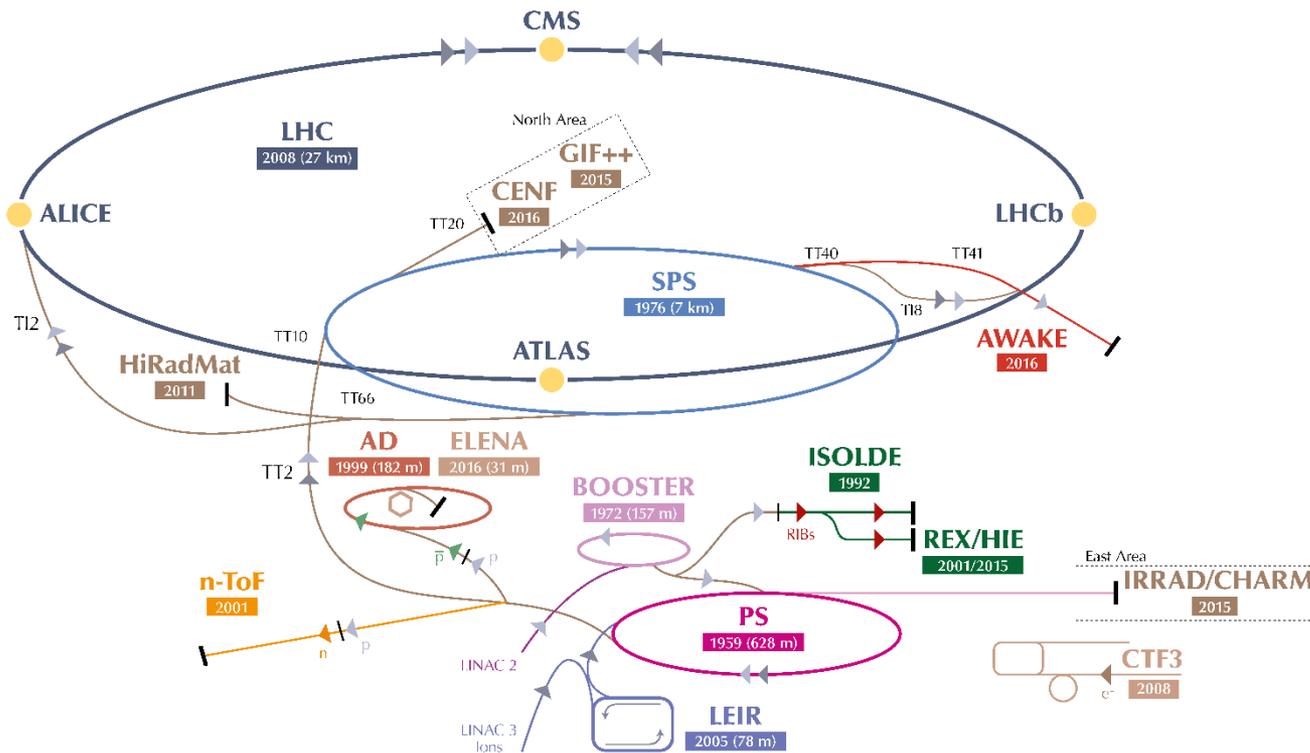
Contributo agli sviluppi iniziali della PET (Positron Emission Tomography), a un nuovo design degli scanner PET e in particolare al PET-CT (Computer Tomography) scanner

## Scoperta del bosone di Higgs nel 2012

- Premio Nobel per la Fisica nel 2013 a Peter Higgs (UK) & Francois Englert (B)
- Il 4 luglio 2022 si festeggiano 10 anni dall'annuncio della scoperta dell'Higgs!



# Acceleratori al CERN



▶ p (protons)    ▶ ions    ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)    ▶ n (neutrons)    ▶  $\bar{p}$  (antiprotons)    ▶  $e^-$  (electrons)

LHC Large Hadron Collider    SPS Super Proton Synchrotron    PS Proton Synchrotron    AD Antiproton Decelerator    CTF3 Clic Test Facility  
 AWAKE Advanced WAKEfield Experiment    ISOLDE Isotope Separator OnLine    REX/HIE Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE  
 LEIR Low Energy Ion Ring    LINAC LINear ACcelerator    n-ToF Neutrons Time Of Flight    HiRadMat High-Radiation to Materials  
 CHARM Cern High energy AcceleraTOR Mixed field facility    IRRAD proton IRRADiation facility    GIF++ Gamma Irradiation Facility  
 CENF CEm Neutrino platform

© CERN, Accelerator Complex - 17 CERN copyright January 2017

PS: 25 GeV, SPS: 450 GeV, LEP (stesso tunnel di LHC): 91 – 209 GeV

# LHC al CERN

LHC = Large Hadron Collider

Grande collisionatore protone-protone: ~27 km di circonferenza percorsa dai protoni a circa la velocità della luce

Utilizza lo stesso tunnel di LEP che era un collisionatore elettroni-positrini

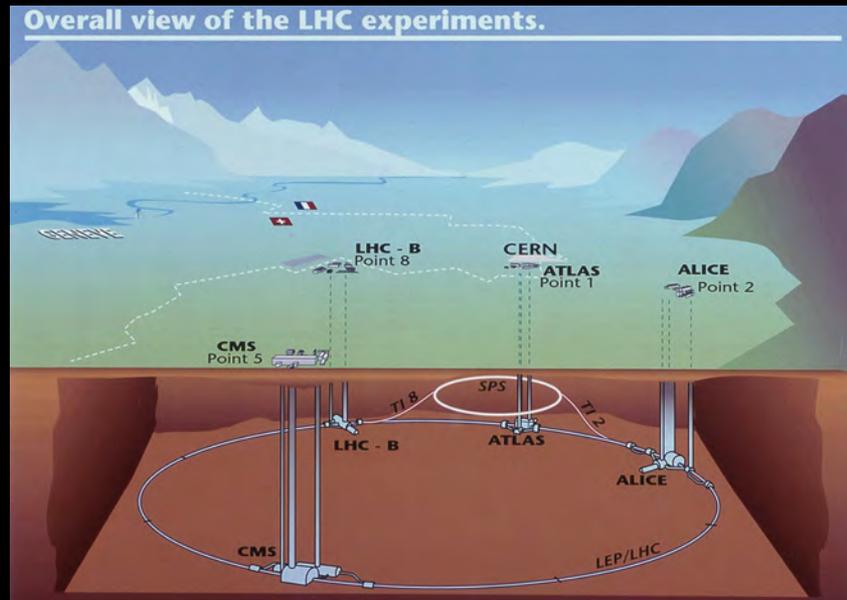
In funzione dal 2008

energia massima dei fasci 6.5 TeV (13 TeV di energia nel centro di massa)

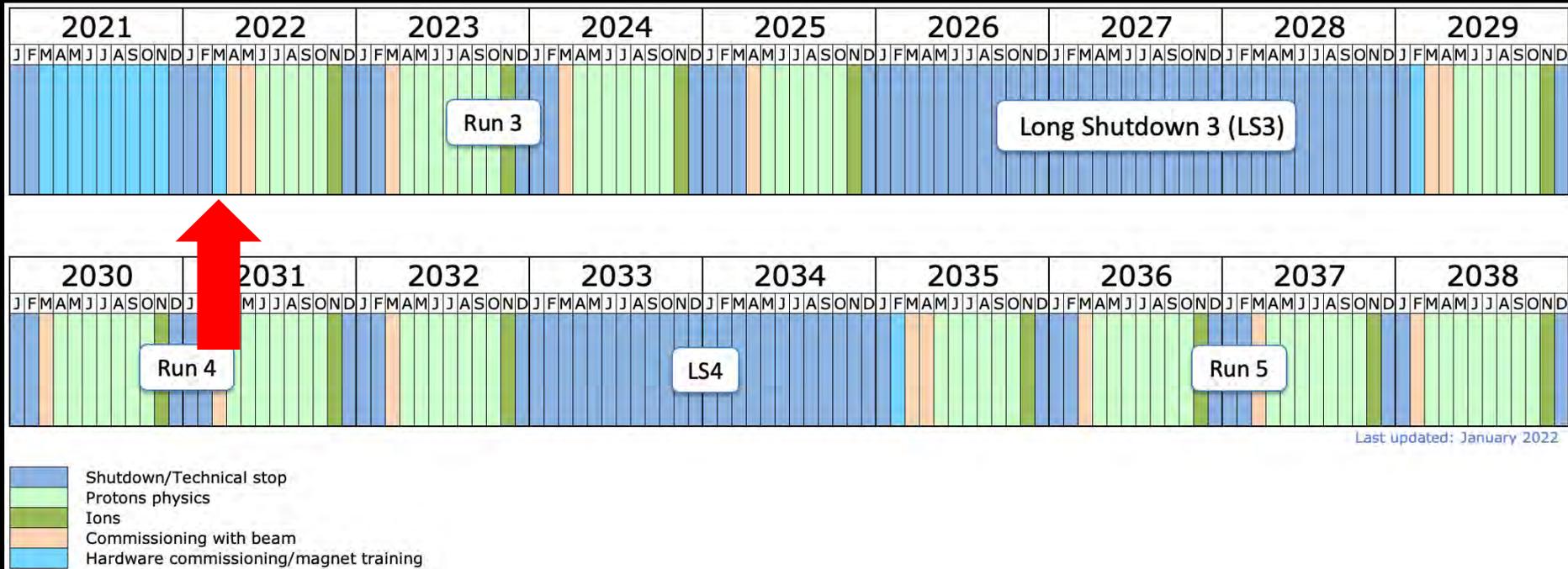
Posto in un tunnel circolare tra la Svizzera e la Francia, vicino Ginevra

4 sale sperimentali sotterranee per altrettanti esperimenti

- ALICE, ATLAS, CMS, LHCb



# Programma dei prossimi anni



A breve sono attese collisioni con energia di 6.8 TeV per fascio

# E dopo? FCC: Future Circular Collider

Highest-energy hadron collider (FCC- $pp$ ) with a centre-of-mass collision energy of 100 TeV

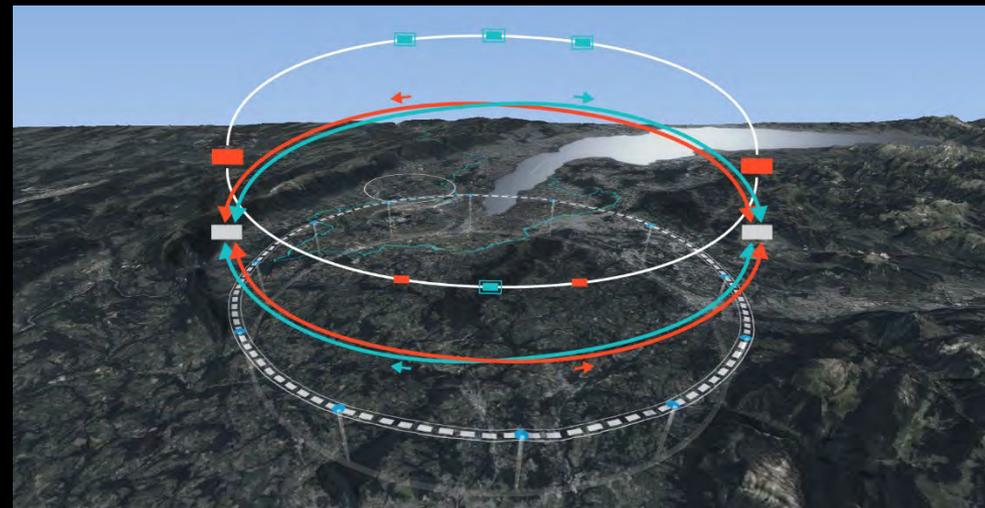
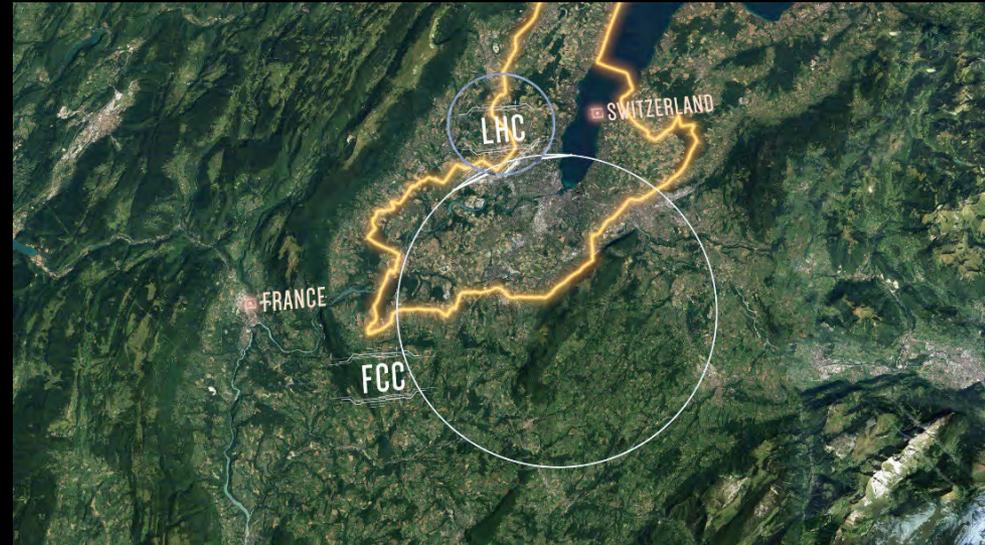
Integrated luminosity of at least a factor of 5 larger than the HL-LHC

$e^+e^-$  collider (FCC- $ee$ ) as potential intermediate step  $p-e$  (FCC- $he$ ) option

About 100 km infrastructure in Geneva area

Requires magnets of about 16 T (today in LHC 8.3 T)

Feasibility study ongoing



# Alcune definizioni e unità di misura

**Joule (J) come unità di misura dell'energia ( $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ) nel SI:**

Una massa di 100 g ad 1 m da terra ha una energia potenziale pari a circa 1 J

**In fisica delle particelle al suo posto si usa una unità più comoda chiamata elettronvolt (eV)**

Energia cinetica acquistata da un singolo elettrone quando attraversa una differenza di potenziale di 1 V:  $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

**Si utilizzano multipli dell'elettronvolt, per i quali è comodo introdurre la seguente terminologia:**

1 MeV = 1.000.000 eV =  $10^6$  eV (un milione di eV)

1 GeV = 1.000.000.000 eV =  $10^9$  eV (un miliardo di eV)

1 TeV = 1.000.000.000.000 eV =  $10^{12}$  eV (un bilione di eV)

**Data l'equivalenza massa-energia ( $E=mc^2$ ),  $\text{eV}/c^2$  è anche usata come unità di massa**

Massa dell'elettrone: circa  $0.51 \text{ MeV}/c^2$

Massa del proton: circa  $938.27 \text{ MeV}/c^2$

$$E = mc^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} E_0 = m_0 c^2 \text{ massa a riposo} \\ E = mc^2 \text{ con } m = \gamma m_0 \text{ dove } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

quadrimpulso, generalizzazione del concetto di quantità di moto della meccanica classica:

$$P = (mc, \vec{p})$$

In fisica delle particelle elementari si preferisce una diversa definizione;

$$P = \left( \frac{E}{c}, \vec{p} \right)$$

che ha modulo:

$$P \cdot P = \frac{E^2}{c^2} - p^2 = m_0^2 c^2 \quad \text{da cui } E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

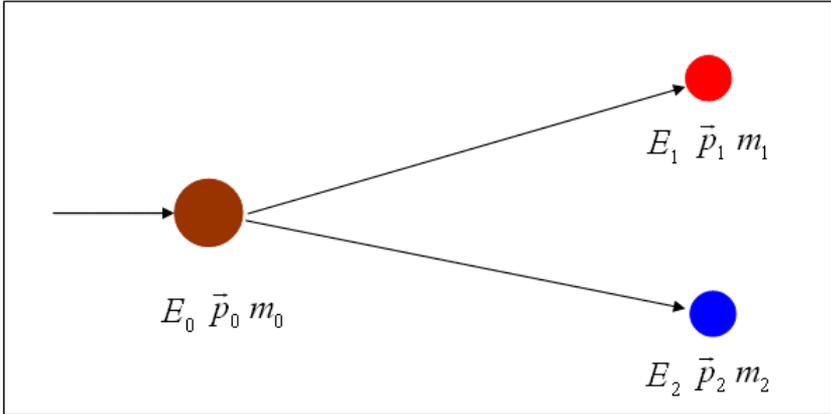
$$P \cdot P = \frac{E^2}{c^2} - p^2 = P' \cdot P' = \frac{E'^2}{c^2} - p'^2 = m_0^2 c^2 \text{ è invariante}$$

Ci sono troppe “c”! Sistema di unità di misura “naturale” ( $c = \hbar = 1$ ):

$$c=1 \quad P = (E, \vec{p}) \quad E^2 = p^2 + m_0^2$$

massa, energia e quantità di moto si misurano tutte in eV

# Massa invariante



The diagram illustrates a particle decay process. On the left, a brown circle represents the parent particle with energy  $E_0$ , momentum vector  $\vec{p}_0$ , and mass  $m_0$ . An arrow points to the right from this particle. On the right, two daughter particles are shown: a red circle with energy  $E_1$ , momentum vector  $\vec{p}_1$ , and mass  $m_1$ , and a blue circle with energy  $E_2$ , momentum vector  $\vec{p}_2$ , and mass  $m_2$ . Arrows point from the parent particle to each of the daughter particles.

$$(\vec{E}_0, p_{x0}, p_{y0}, p_{z0}) = (\vec{E}_1, p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}) + (\vec{E}_2, p_{2x}, p_{2y}, p_{2z}) = (E_1 + E_2, p_{1x} + p_{2x}, p_{1y} + p_{2y}, p_{1z} + p_{2z})$$
$$\Rightarrow E_0^2 - (\vec{p}_0 c)^2 = (m_0 c^2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 c + \vec{p}_2 c)^2$$
$$\Rightarrow m_0 c^2 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 c + \vec{p}_2 c)^2}$$

## Decadimento di una particella

dai quadrimpulsi dei due prodotti di decadimento si può ricostruire la massa invariante della particella iniziale

$$P^0 = P^1 + P^2$$

$$P^0 \cdot P^0 = (P^1 + P^2) \cdot (P^1 + P^2) = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = m_0^2$$

# ATLAS

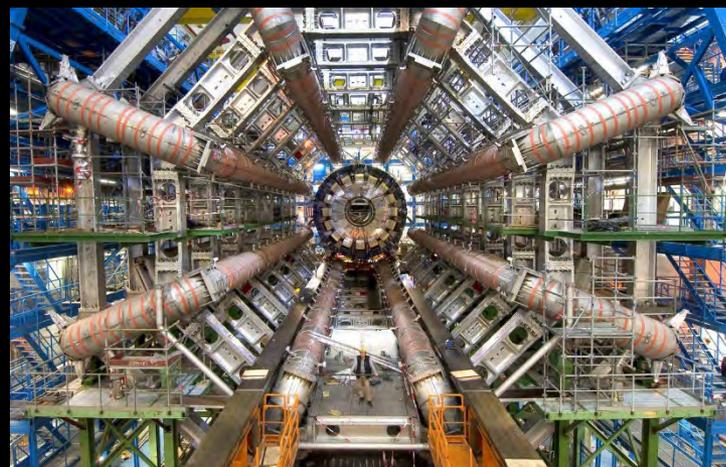
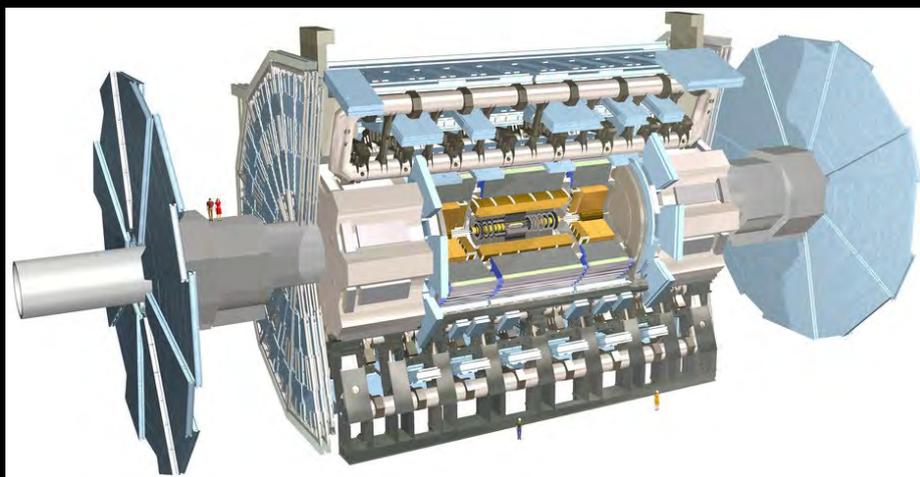
Rivelatore polivalente, con un vasto raggio di studi:

Higgs

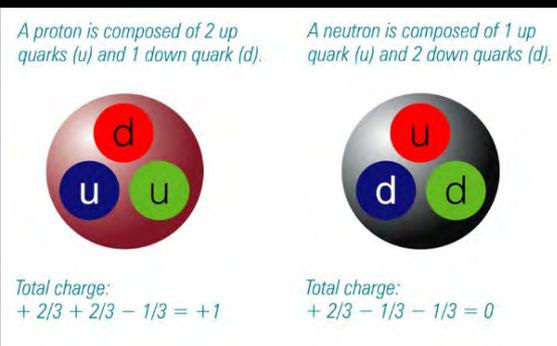
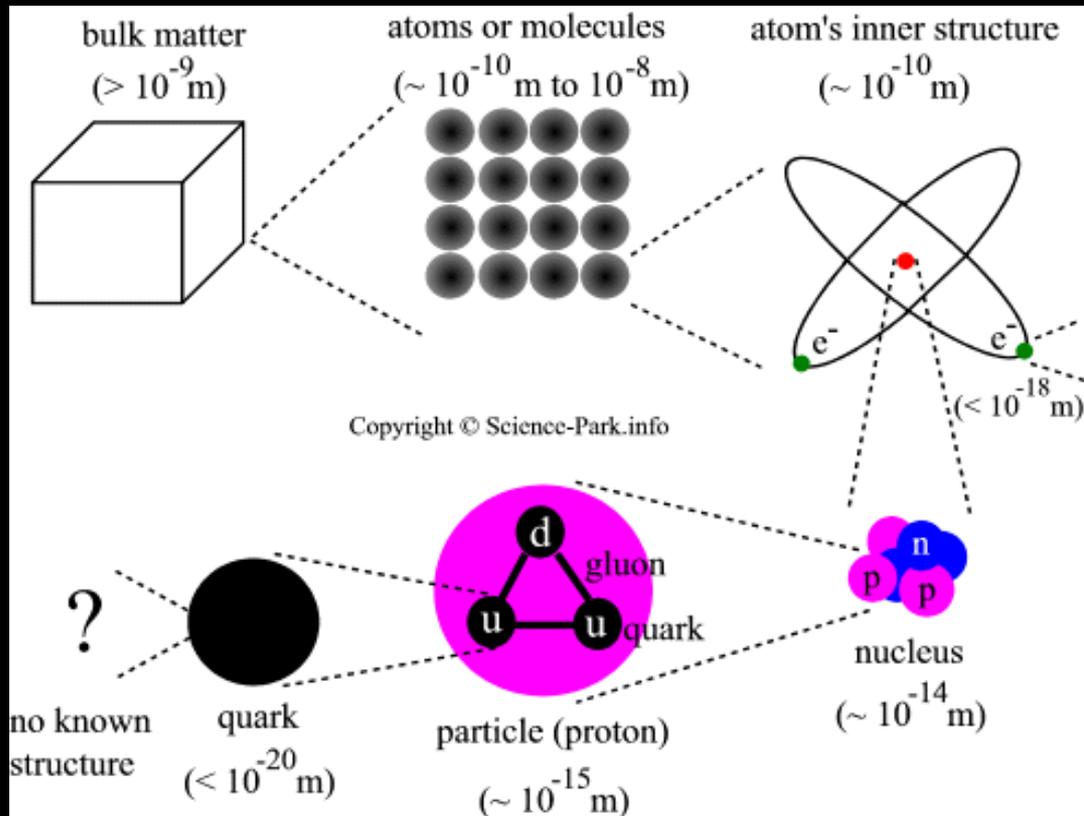
Supersimmetria

Fisica oltre il Modello Standard

Il piu' grosso dei 4 rivelatori di LHC  
lunghezza 44 m  
diametro 25 m  
circa 100 milioni di canali

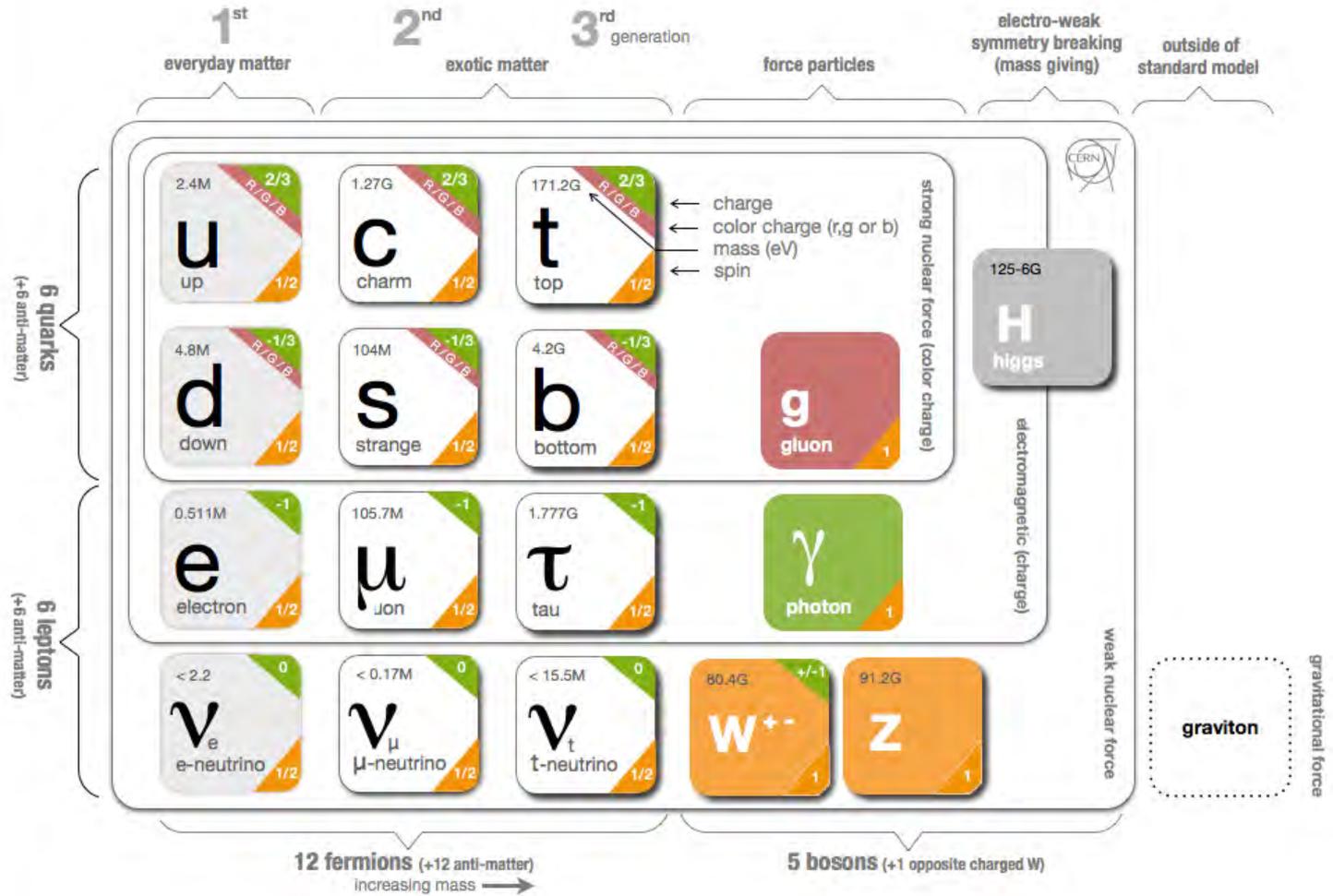


# La Materia



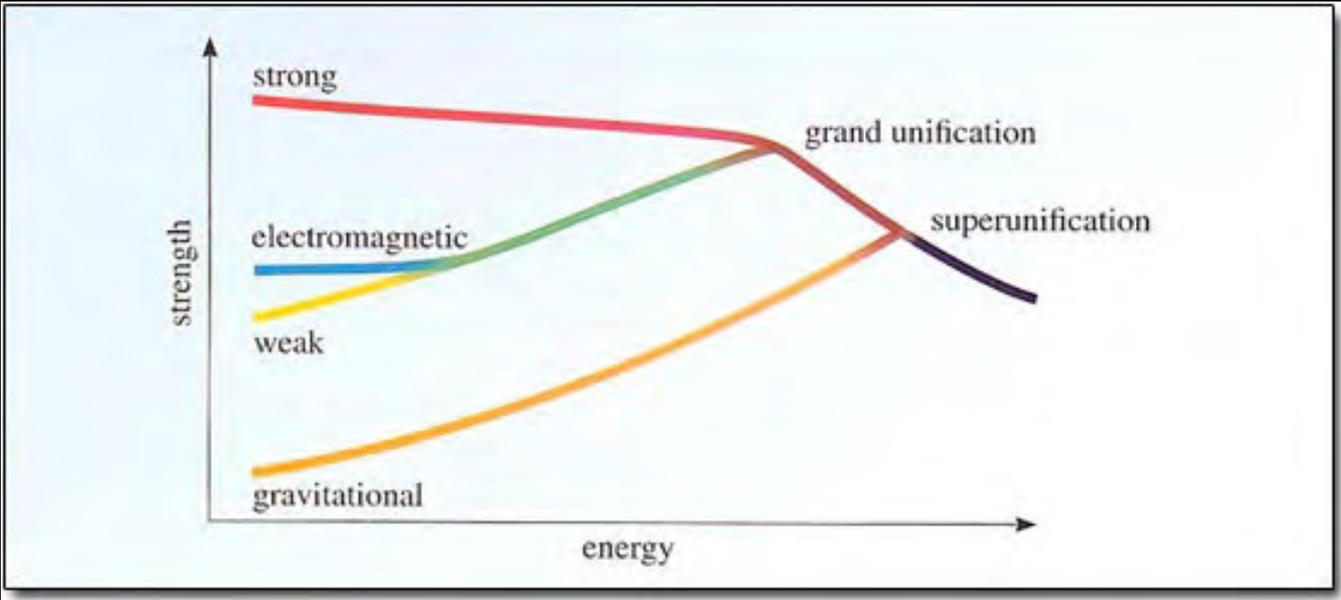
## Struttura del protone e del neutrone

# Il Modello Standard



# Le interazioni fondamentali

Property \ Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	$10^{-41}$	0.8	1	25	Not applicable to quarks
for two protons in nucleus	$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60	Not applicable to hadrons
	$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	Not applicable to hadrons	



# Il Big Bang

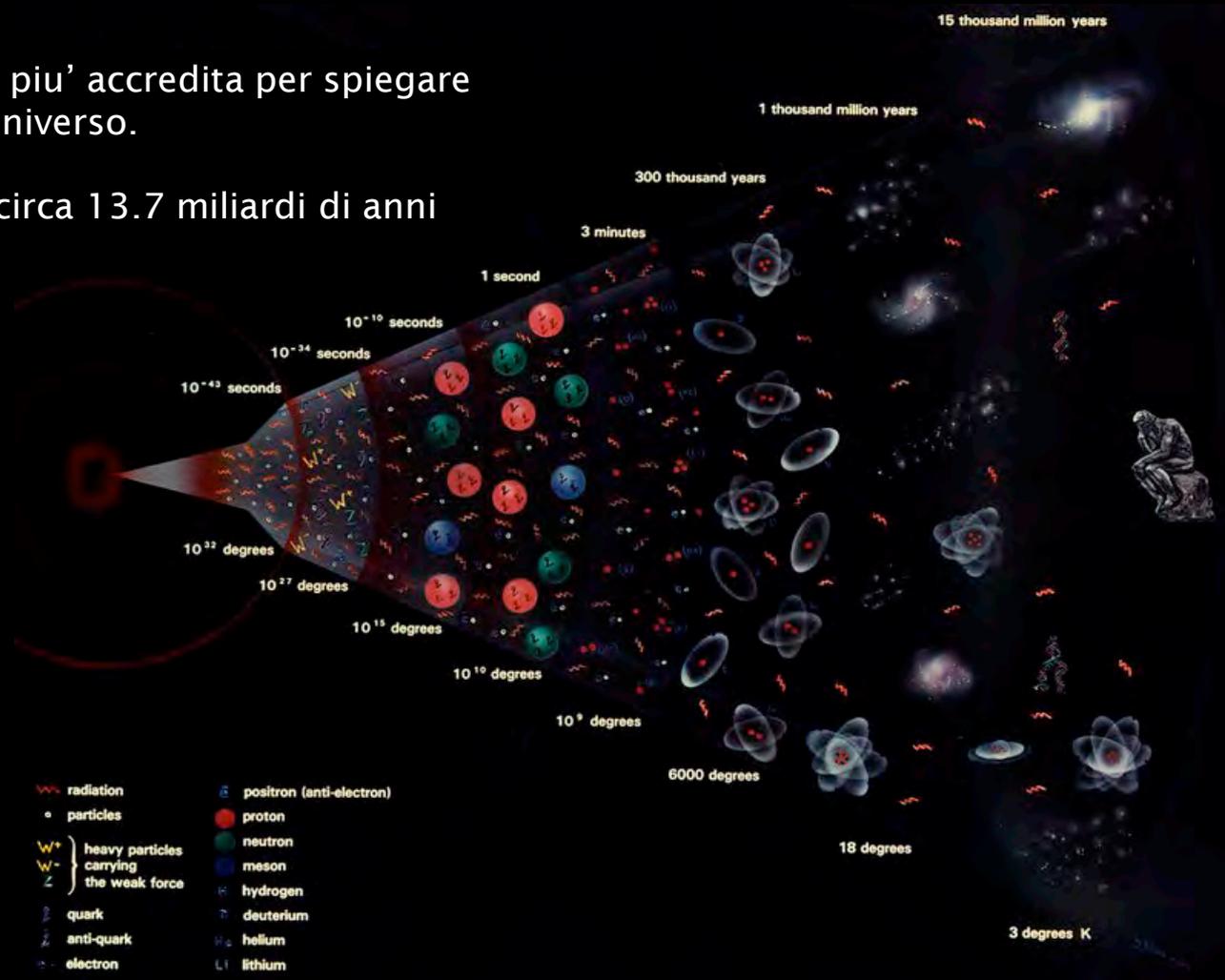
Teoria ad oggi piu' accreditata per spiegare l'origine dell'Universo.

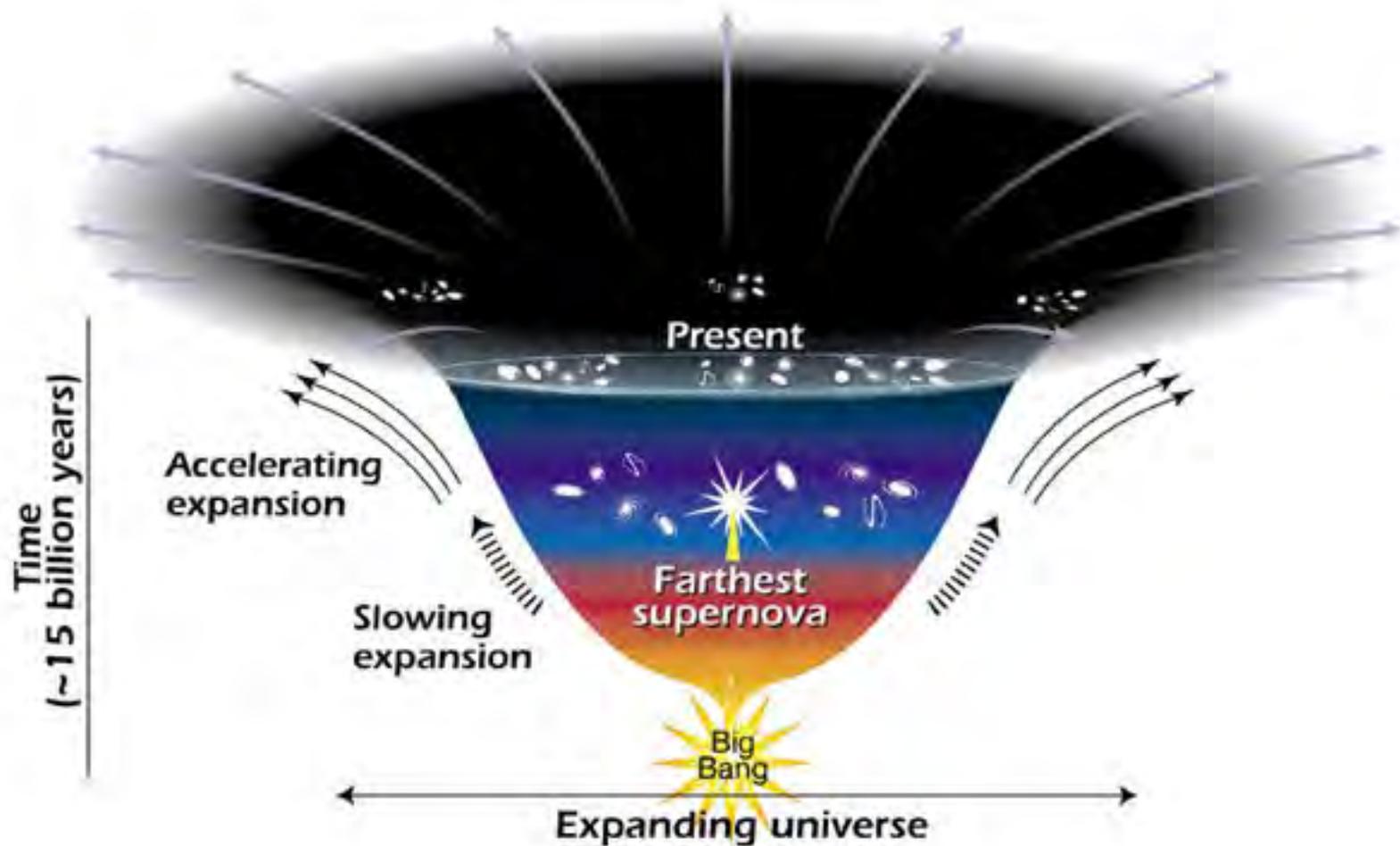
L'Universo ha circa 13.7 miliardi di anni

All'inizio (al tempo "zero") l'Universo era solo un punto con una energia grandissima

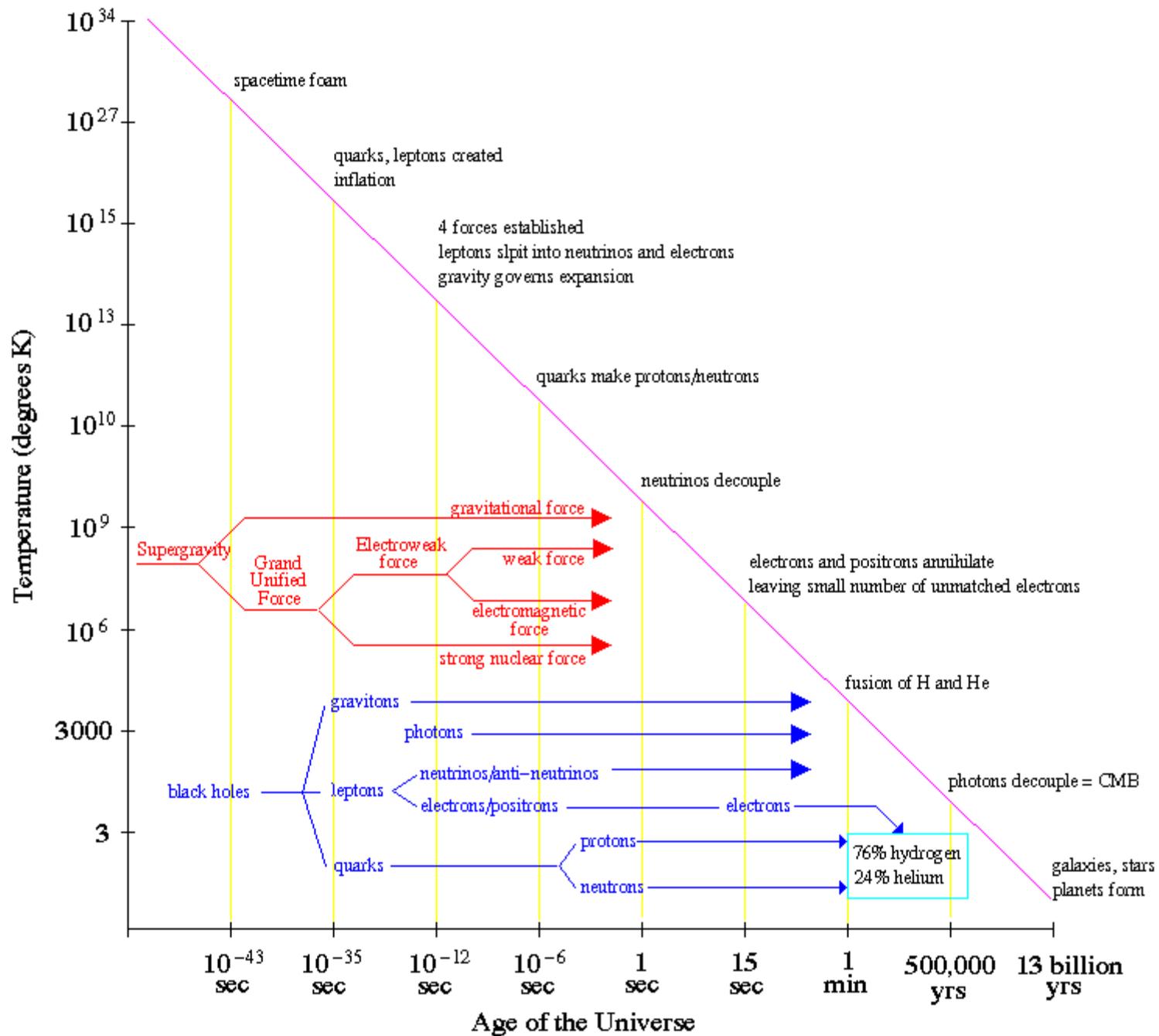
L'Universo ha cominciato ad espandersi, ad allargarsi e durante questa espansione si e' via via creato tutto quello che ci circonda.

Ancora oggi l'Universo non e' fermo ma continua ad espandersi.





This diagram reveals changes in the rate of expansion since the universe's birth 15 billion years ago. The more shallow the curve, the faster the rate of expansion. The curve changes noticeably about 7.5 billion years ago, when objects in the universe began flying apart at a faster rate. Astronomers theorize that the faster expansion rate is due to a mysterious, dark force that is pushing galaxies apart.



# I Modelli Standard

## Il Modello Standard delle particelle elementari (SM) + il Modello Standard cosmologico ( $\Lambda$ CDM)

spiegano un numero enorme di osservazioni e di risultati sperimentali dalla scala di Planck ( $10^{-33}$  cm) alla dimensione dell'universo ( $10^{28}$  cm)!

Lo SM è una teoria quantistica, rispetta la relatività ristretta di Einstein e descrive solo le interazioni elettrodeboli e forti

non descrive la gravità: in questa teoria, la gravità è un campo classico, esterno alla teoria

Il  $\Lambda$ CDM si basa sulla relatività generale che descrive la forza gravitazionale che è la forza più importante dell'universo su grande scala

$\Lambda$ CDM = Lambda Cold Dark Matter

Da anni si cerca una teoria che possa mettere insieme questi due modelli e che abbia delle implicazioni fenomenologiche che possano essere verificate sperimentalmente

# Oltre il Modello Standard

Alcune indicazioni che e' necessario superare questi modelli:

**massa dei neutrini:** non prevista nel MS, non chiara la natura della massa dei neutrini

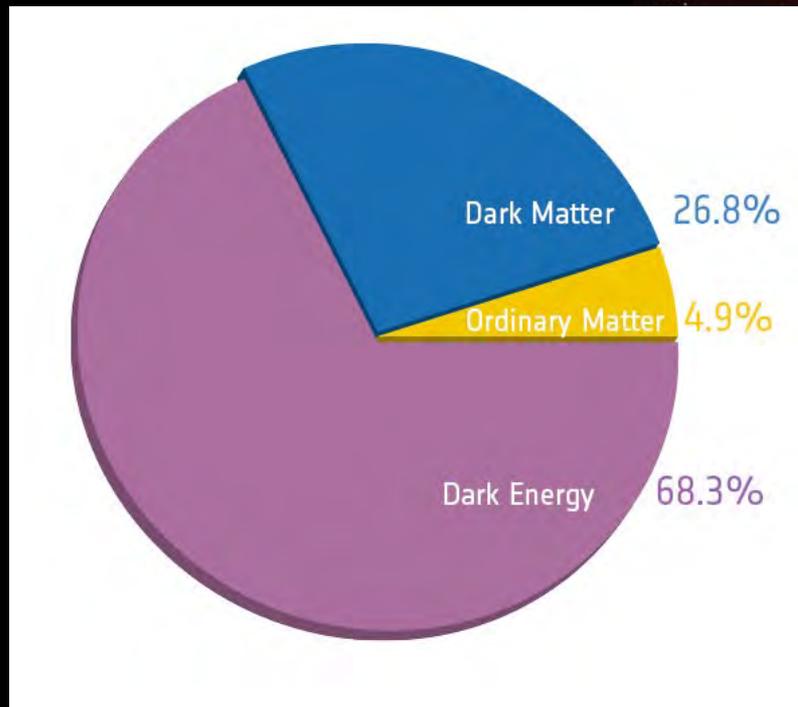
**dark matter:** materia oscura non costituita dalla materia barionica (protoni, neutroni)

**dark energy**

**assenza di antimateria nell'universo:** serve una nuova sorgente di violazione di CP oltre a quella prevista dal MS per spiegare l'asimmetria tra materia e antimateria nell'universo

**densita' di energia del campo di Higgs**

# Materia ed Energia oscura

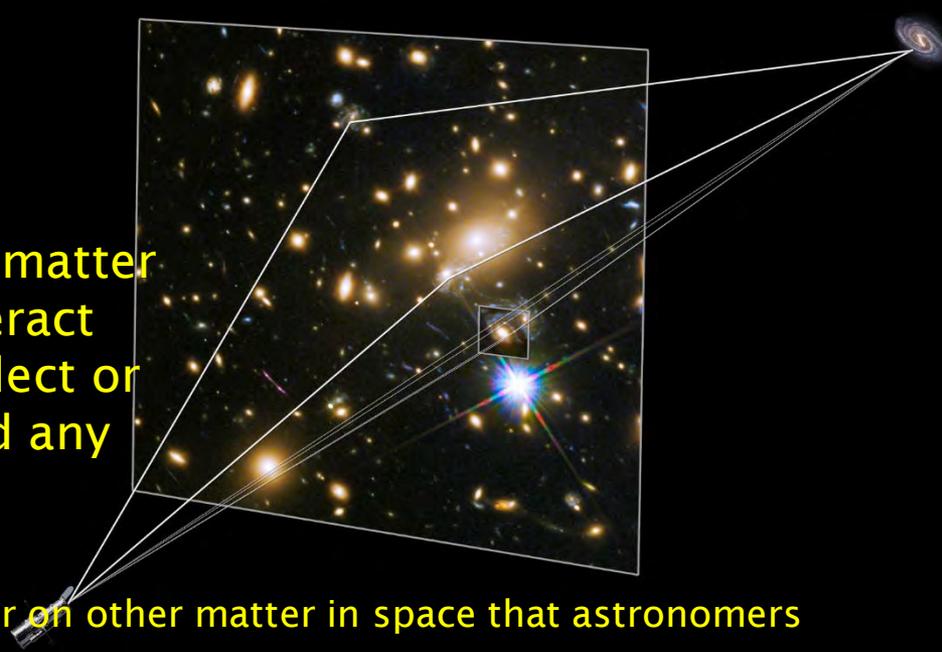


Nelle galassie c'è più materia (blu) di quella che vediamo (rossa)

Materia stimata dalla dinamica delle galassie o dal gravitational lensing

# Dark Matter

We now know that the vast majority of matter is *dark*. This *dark matter* does not interact electromagnetically (does not emit, reflect or absorb light), nor we have yet observed any known particle interacting with it



It is through the gravitational effect of dark matter on other matter in space that astronomers inferred its existence

Many astronomers had been observing the motion of galaxies and found a discrepancy with respect to their expectation that only accounted for matter that was emitting light.

Observations of the rotational velocity of galaxies

Because of gravitational lensing, an effect related to Einstein's general theory of relativity, matter that stands between a light source and its observer can bend the light from the source so that the observed image is distorted. From comparing the known position of the source (e.g., obtained through direct emission of visible particles from the source) to its distorted image, one can reconstruct the distribution of the matter causing the distortion.

We only know that if dark matter is a particle, then it must have mass, since it interacts with other matter through the force of gravity

Qualche ipotesi:

una particelle che interagisce debolmente con le particelle dello SM, con massa  $O(100 \text{ GeV})$  (WIMP), per esempio una particella supersimmetrica

una particella leggera che si accoppia molto debolmente alle particelle dello SM e che fa parte di un nuovo Dark Sector o Hidden Sector

# Interazioni deboli

Mediate da:  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$

Caratteristiche dell'interazione debole:

E' l'unica interazione che puo' cambiare il sapore dei quark (cioe' cambia i quark da un tipo ad un altro)

Viola sia la simmetria di parita'  $P$ , che la simmetria  $CP$  (parita' seguita da coniugazione di carica)

E' propagata da mediatori, noti come bosoni di gauge, che hanno una grossa massa

Scoperte al CERN nel 1983 al SppS al CERN che operava ad una energia di 450 GeV

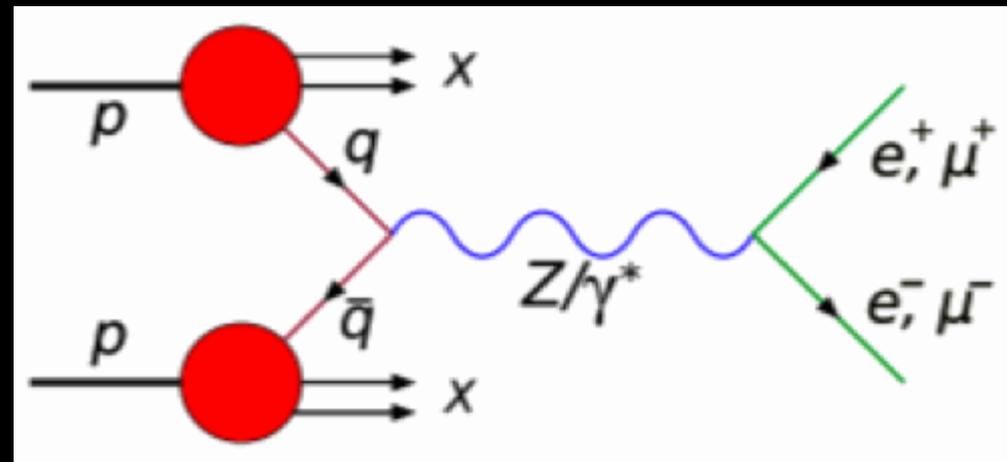
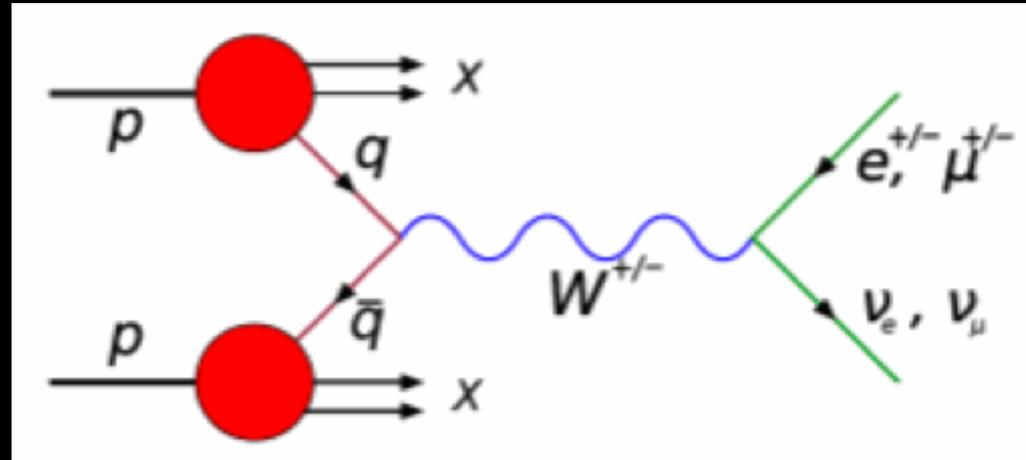
Poi studiate in dettaglio a LEP, a SDC e al Tevatron

# Produzione di W e Z

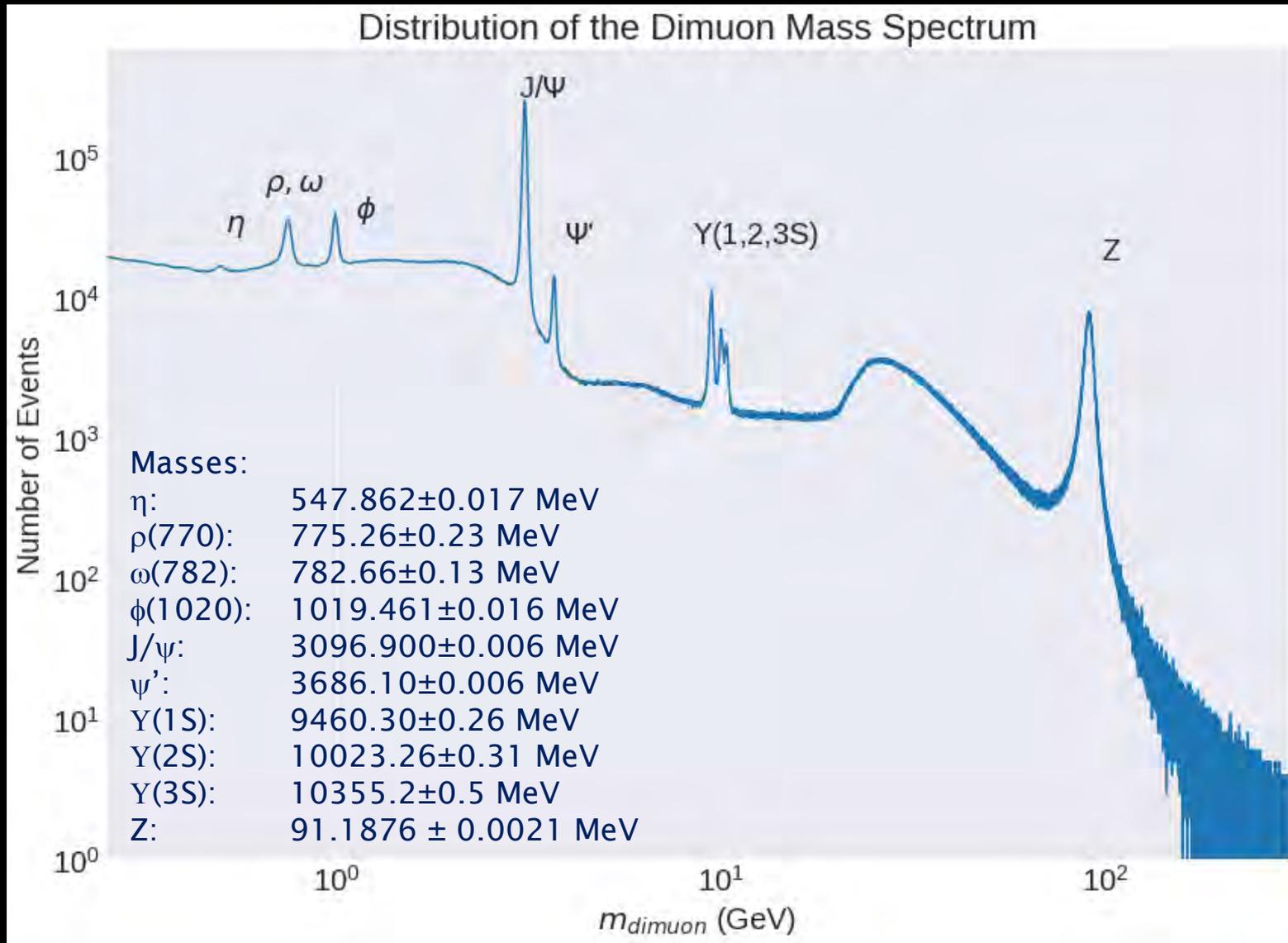
A LHC in urti protone-protone

I bosoni hanno una vita media cortissima ( $\sim 10^{-25}$  s) e decade subito in altre particelle

I prodotti del decadimento possono essere rivelati

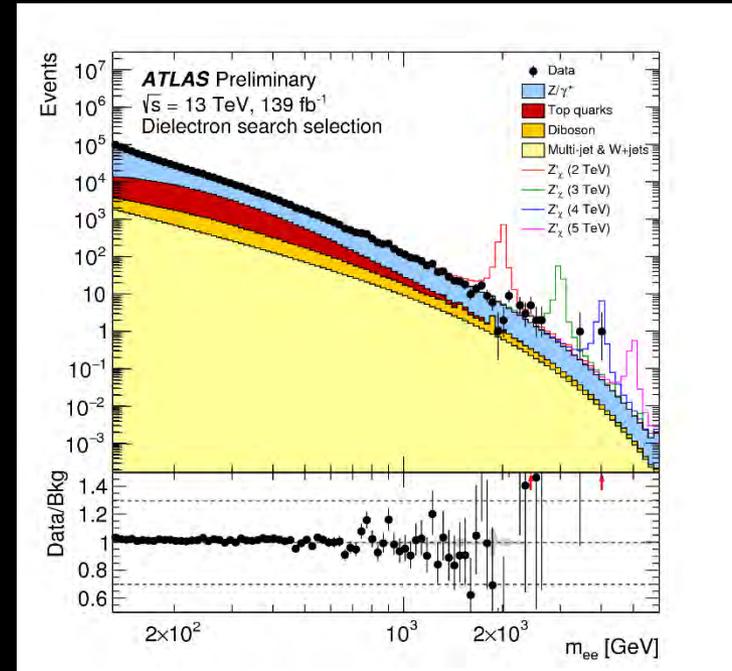
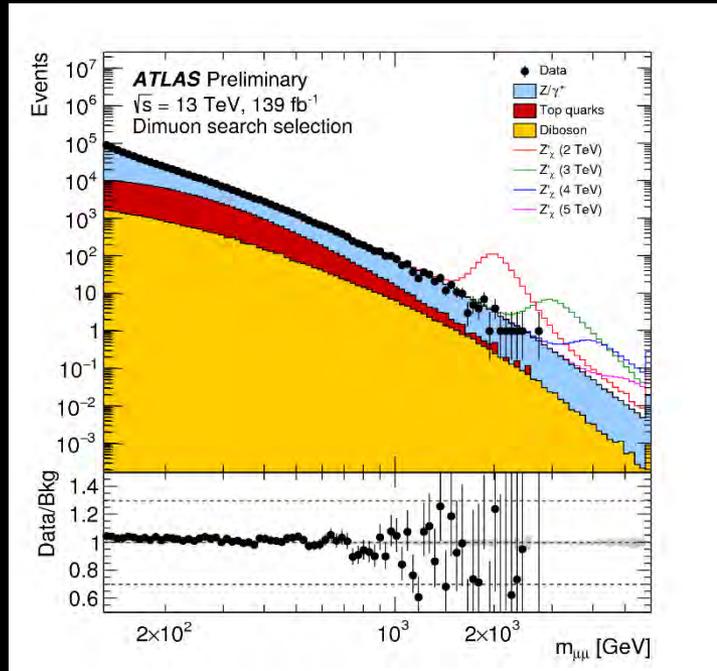


# Spettro di massa invariante



# Altre ricerche

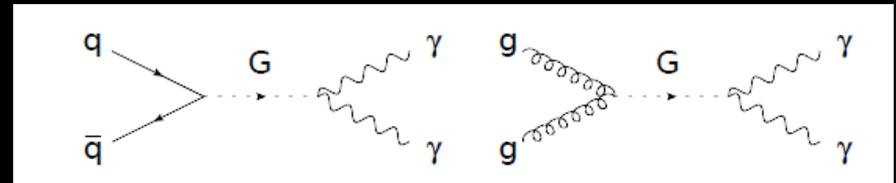
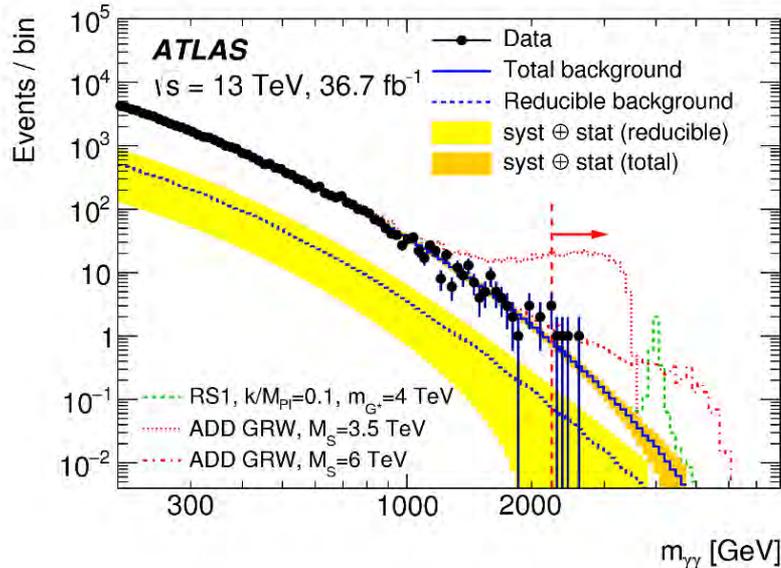
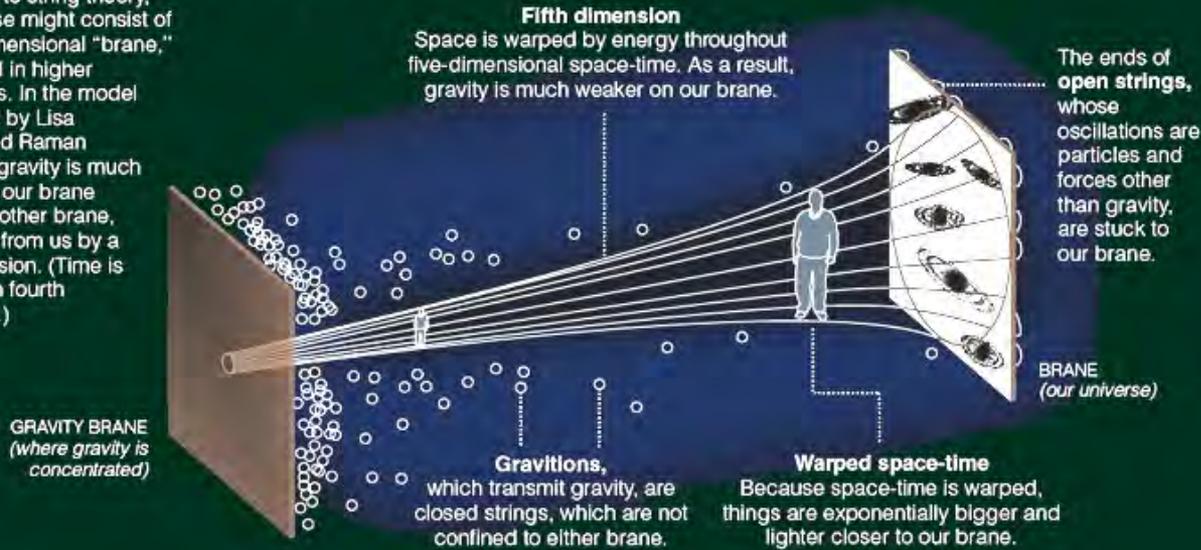
Bosone  $Z'$  di massa maggiore dello  $Z$  previsto da alcune teorie



In particular, the results imply a lower limit of 4.5 (5.1) TeV on  $M_{Z^0}$  for the  $Z^0_\psi$  ( $Z^0_{SSM}$ ) boson at 95% confidence level. These are the most stringent limits to date

## Island Universes in Warped Space-Time

According to string theory, our universe might consist of a three-dimensional "brane," embedded in higher dimensions. In the model developed by Lisa Randall and Raman Sundrum, gravity is much weaker on our brane than on another brane, separated from us by a fifth dimension. (Time is the unseen fourth dimension.)



Due  $\gamma$  ad  
alta massa