

# 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

	Mon, Mar 28	Tue, Mar 29	Wed, Mar 30	Thu, Mar 31	Fri, Apr 01
topic	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS W	VC 1: ATLAS Z
moderators	Guglielmo	Denis	Christos	Ilaria	Émilien
moderators	Hassnae	Liza	Tadej	Eleanor	Liza
moderators	Jason	Matt	Karolos	Christos	Christos
	Bielsko-Biala 	London, UCL 	Sheffield 	Bonn 	Graz 
	Milan 	Athens, NTUA 	Zilina 	Hamburg 	Iasi 
	Oslo 	Berlin, HU / Zeuthen 	Lancaster 		Košice 
	Brighton, Sussex 	Banská Bystrica 	Košice 		Lavras 
	Rio de Janeiro UERJ 		Vila Real 		Trento 

# 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 'Masterclass 2022 - Hands On Particle Physics', the dates '21-28 Mar 2022', and the location '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...' and 'Le iscrizioni sono aperte (scadenza il 2...'. Below this, there are two dates: '21 Marzo 2022' and '28 Marzo 2022'. The main content area contains text about the project, mentioning 'International Masterclasses' and 'Sezione di Milano dell'Istituto Fisica dell'Università degli Studi di Milano'.

# 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

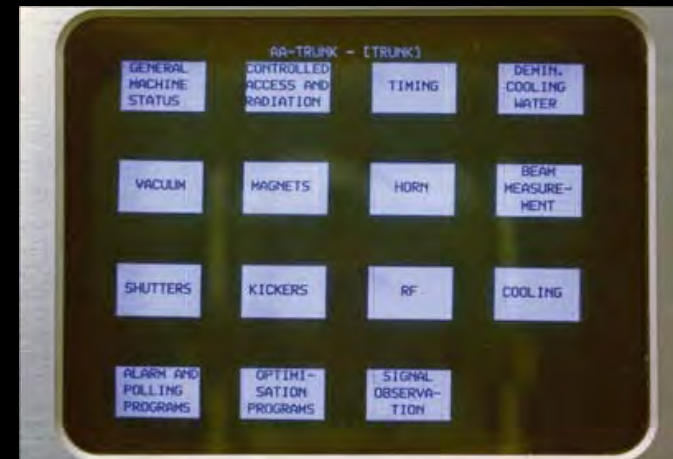
## Altre invenzioni con sviluppi iniziali al CERN

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

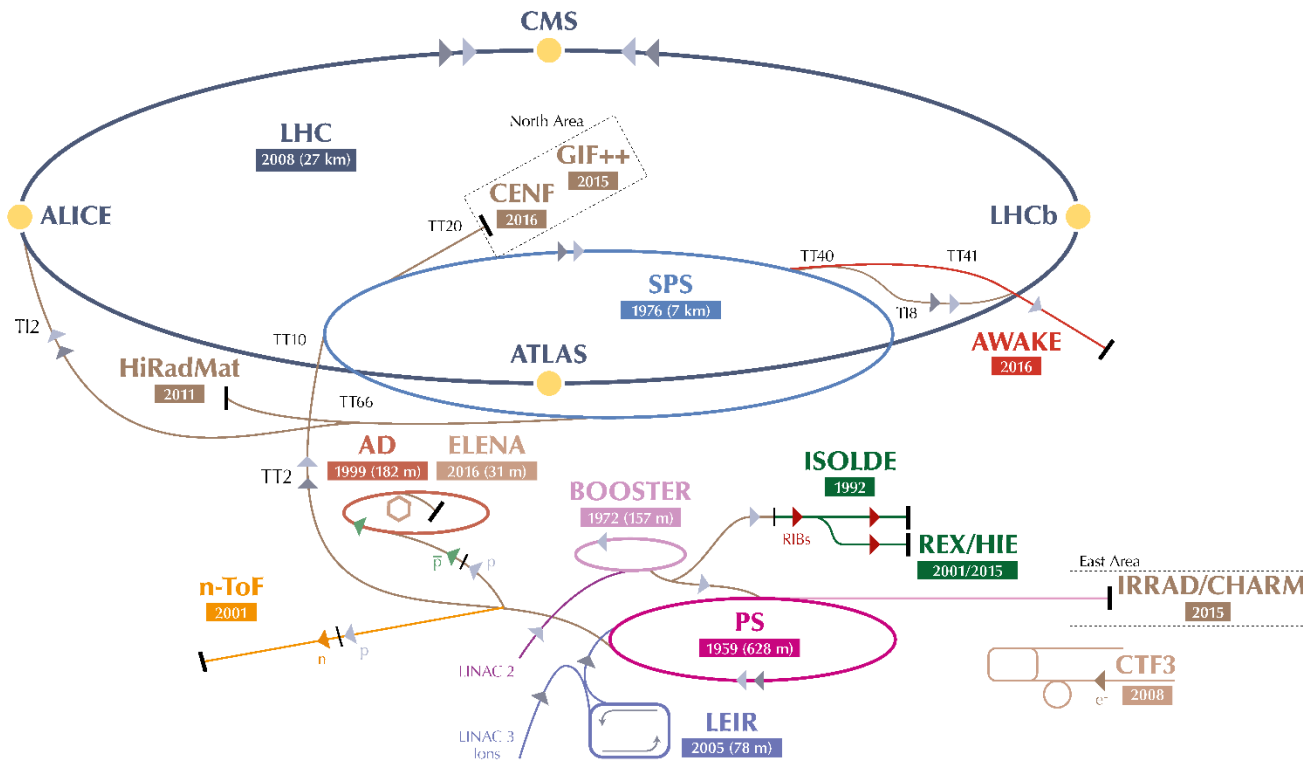
Contributo agli sviluppi iniziali della PET (Positron Emission Tomography), a un nuovo design degli scanner PET e in particolare al PET-CT (Computer Tomography) scanner

## 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 CERN 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-positroni

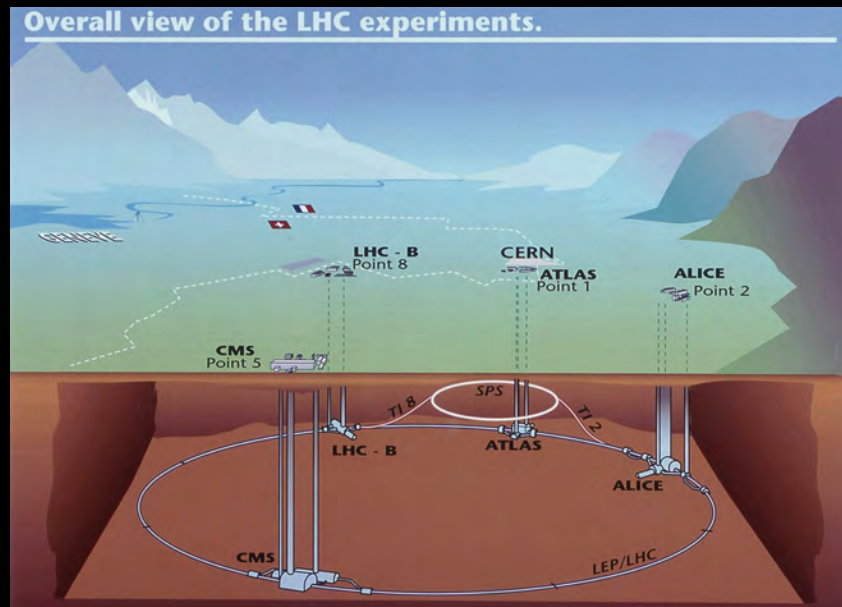
In funzione dal 2008

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



# ATLAS

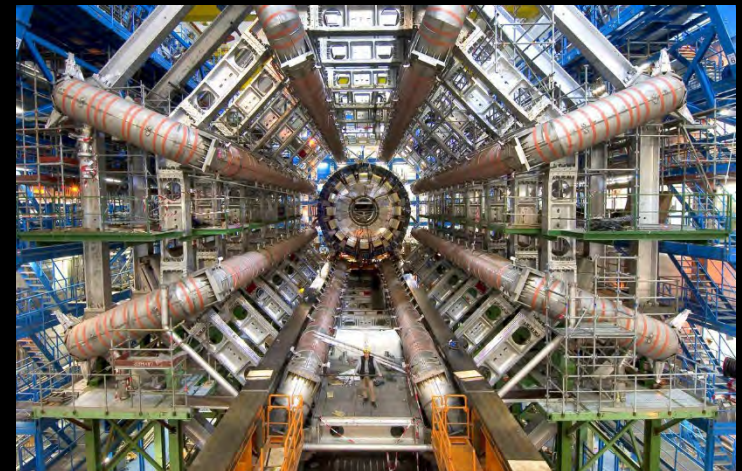
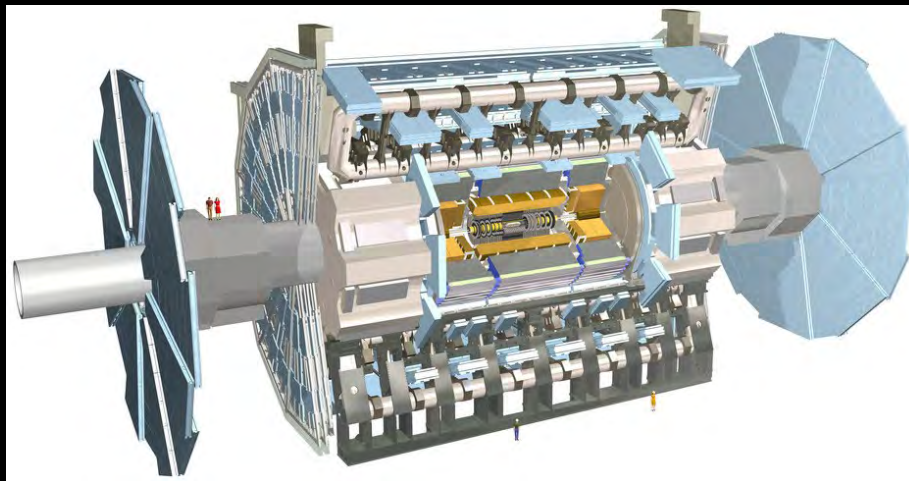
Rivelatore polivalente, con un vasto raggio di studi:

Higgs

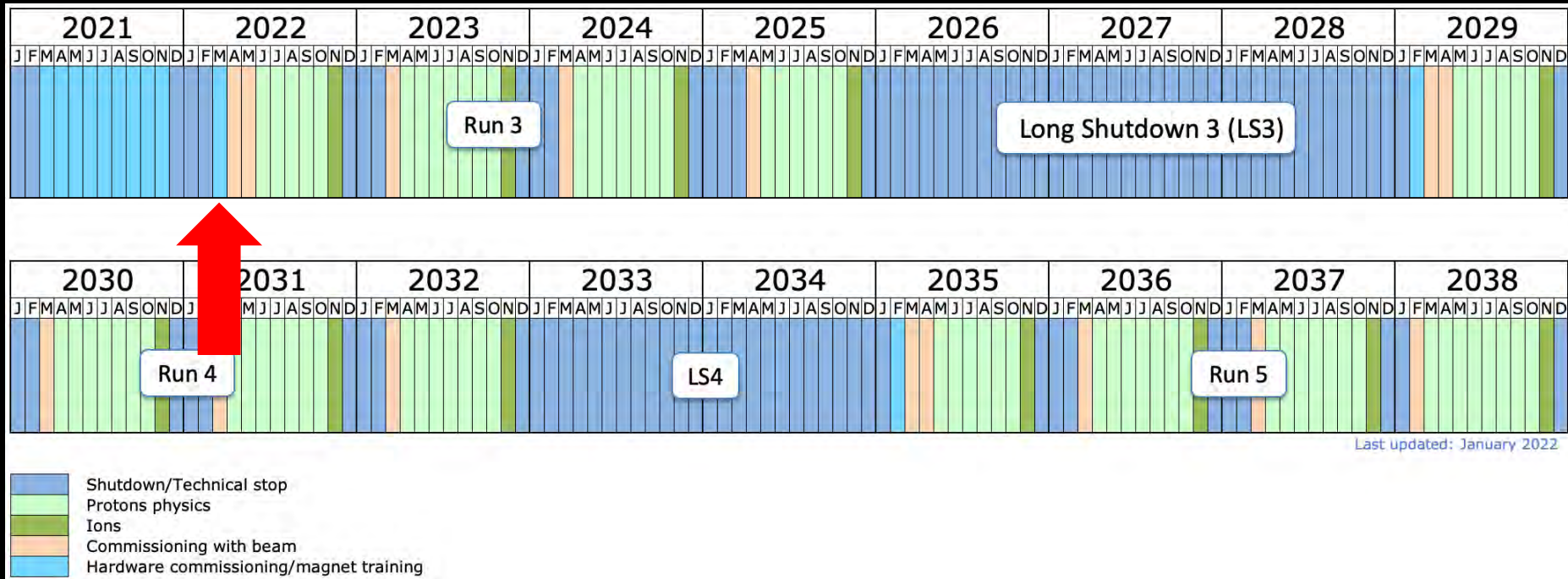
Supersimmetria

Fisica oltre il Modello Standard

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



# 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

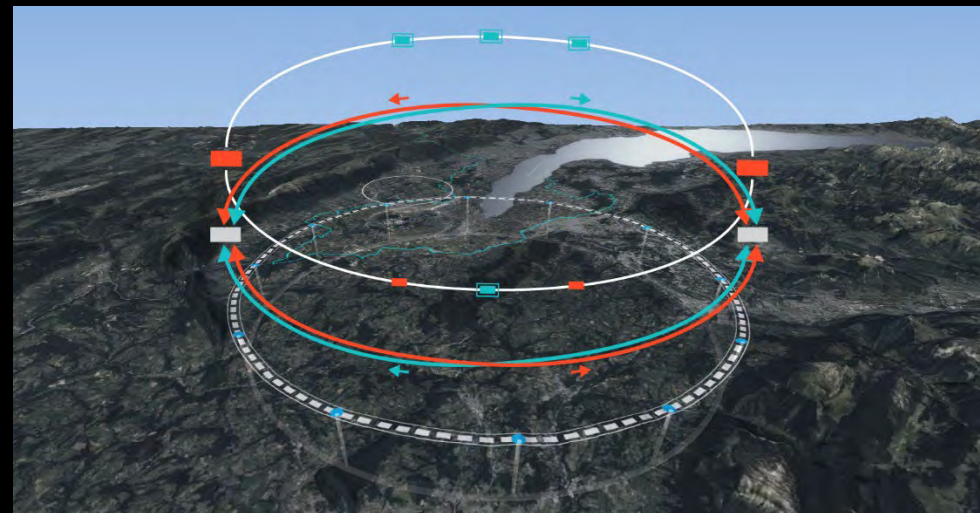
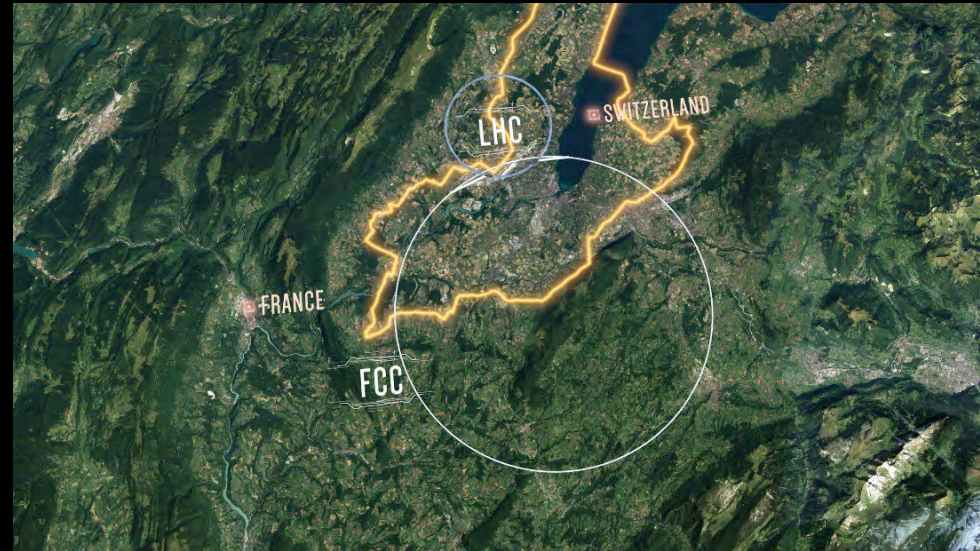
Integrated luminosity of at least a factor of 5 larger than the HL-LHC

$e^+e^-$  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:**

$1 \text{ MeV} = 1.000.000 \text{ eV} = 10^6 \text{ eV}$  (un milione di eV)

$1 \text{ GeV} = 1.000.000.000 \text{ eV} = 10^9 \text{ eV}$  (un miliardo di eV)

$1 \text{ TeV} = 1.000.000.000.000 \text{ eV} = 10^{12} \text{ eV}$  (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  $938.27 \text{ MeV}/c^2$

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

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:

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

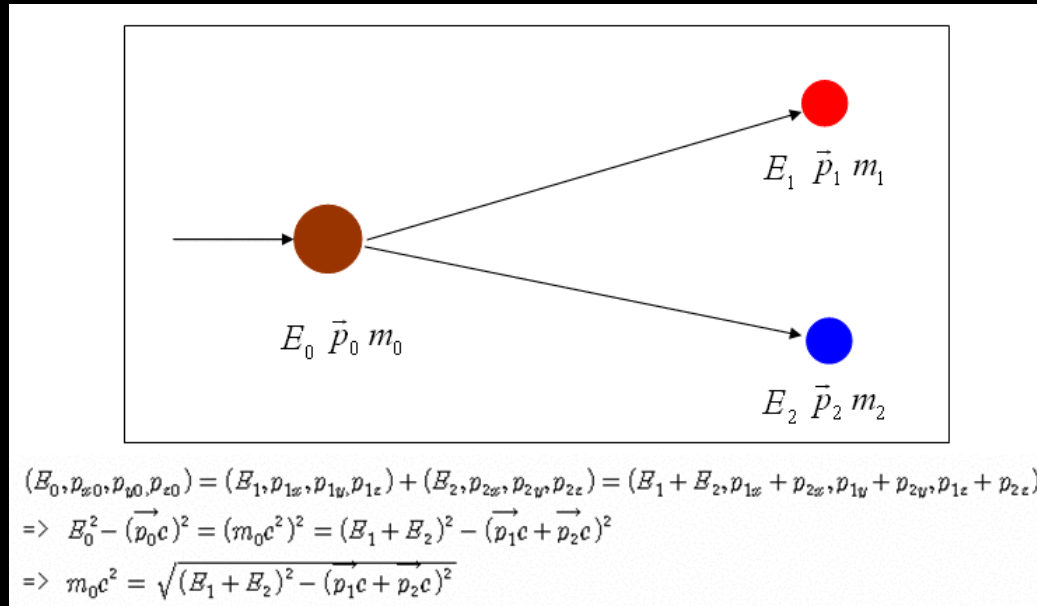
$$P \cdot P = \frac{E^2}{c^2} - p^2 = P' \cdot P' = \frac{E'^2}{c^2} - p'^2 = m_0^2 c^2 \text{ è invariante}$$

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



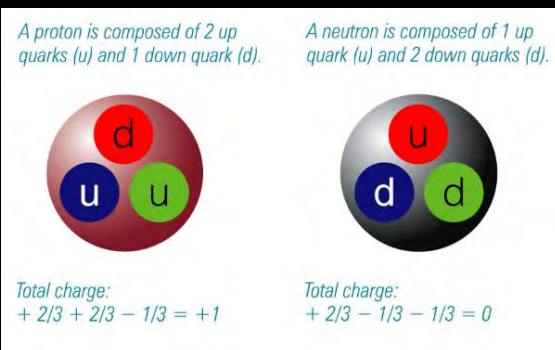
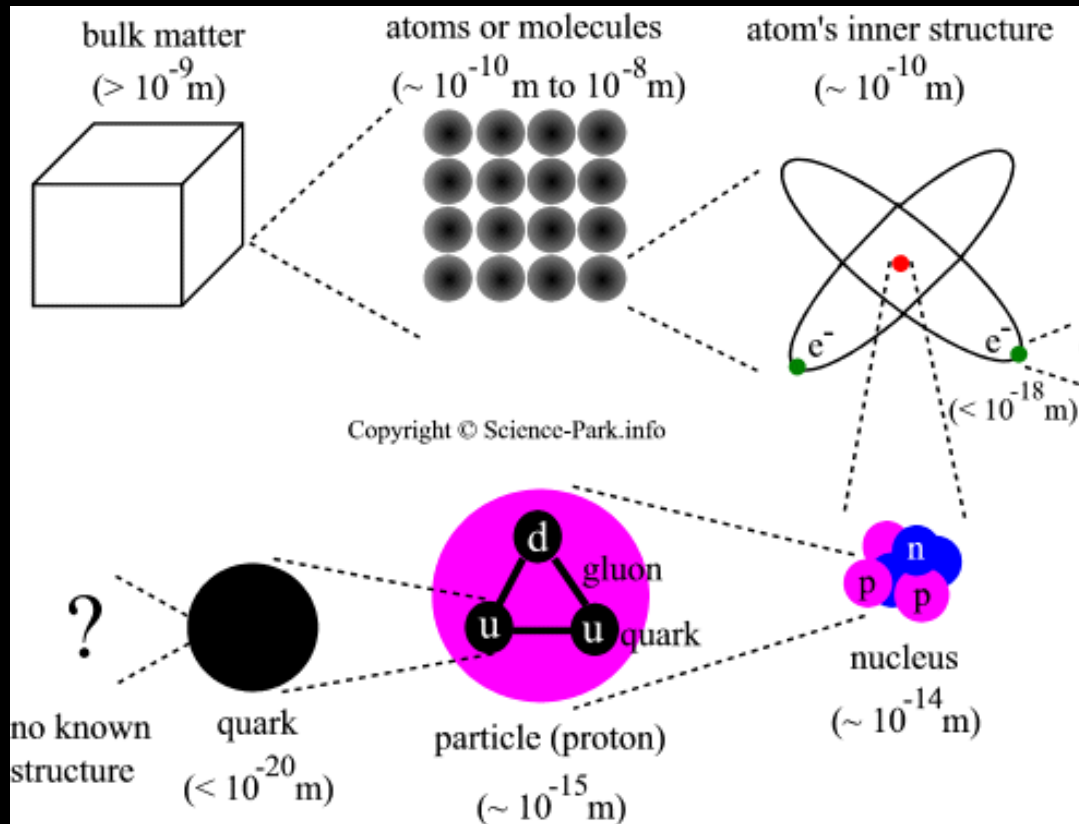
Decadimento di una particella in due particelle

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

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

$$P^0 \cdot P^0 = (P^1 + P^2) \cdot (P^1 + P^2) = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2 = m_0^2$$

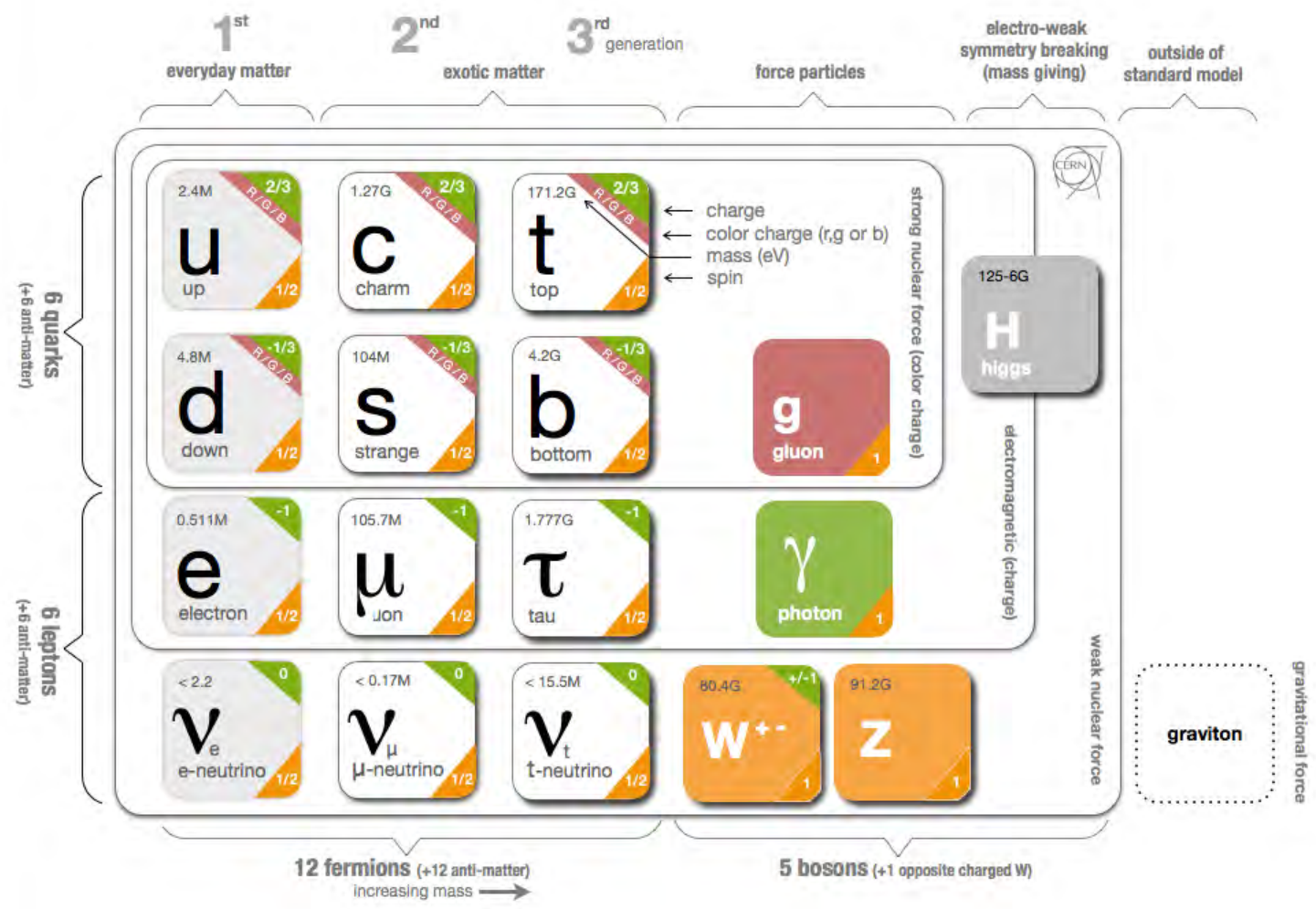
# La Materia



## Struttura del protone e del neutrone



# Il Modello Standard



# Proprietà delle particelle elementari

## Massa

grande range di masse:  $< eV$  (neutrino) a  $172.76 \pm 0.30$  GeV (quark top),  
Particelle a massa nulla (fotone, gluone, gravitone)

## Carica elettrica

Particelle neutre (fotone, gluone, Z,  $H^0$ , gravitone), carica frazionaria (quark),...

## Carica di colore

Tre stati (R, G, B): quark e gluone

...

## Spin

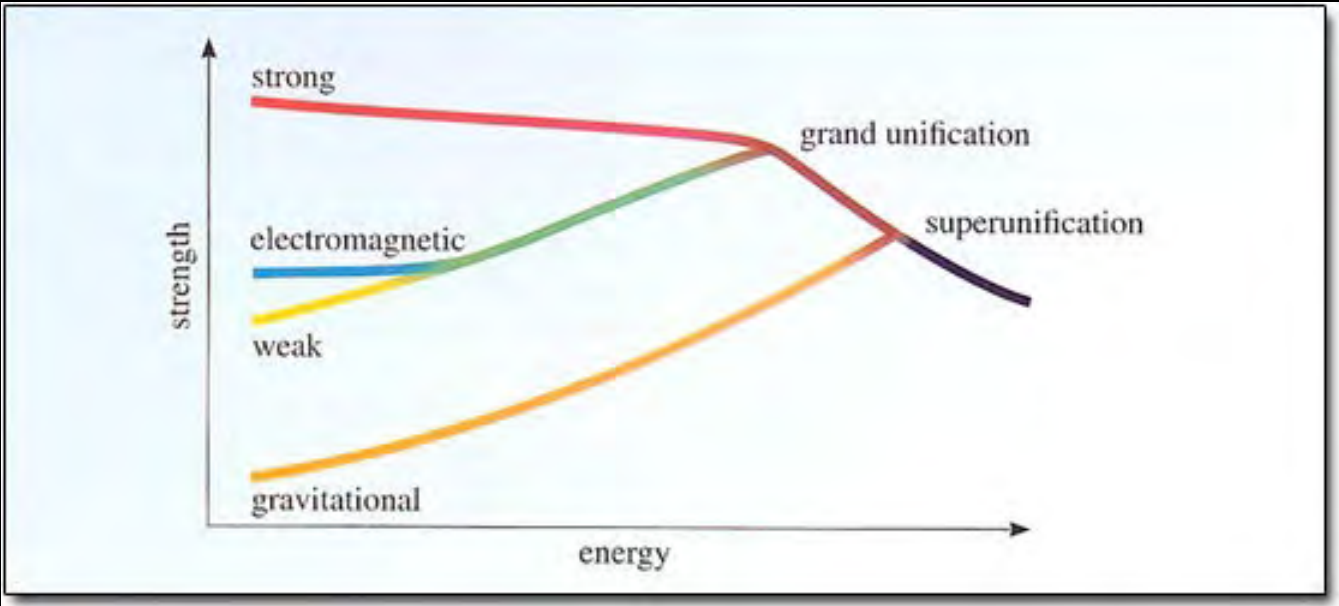
Momento angolare intrinseco di una particella; assume valori interi o semi-interi

**Fermioni:** spin semi-intero (leptoni e quark con spin  $\frac{1}{2}$ )

**Bosoni:** spin intero (g,  $\gamma$ , Z,  $W^\pm$  con spin 1,  $H^0$  con spin 0, il gravitone G con spin 2)

# 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
	$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60	
	$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	Not applicable to hadrons	



# Il Big Bang

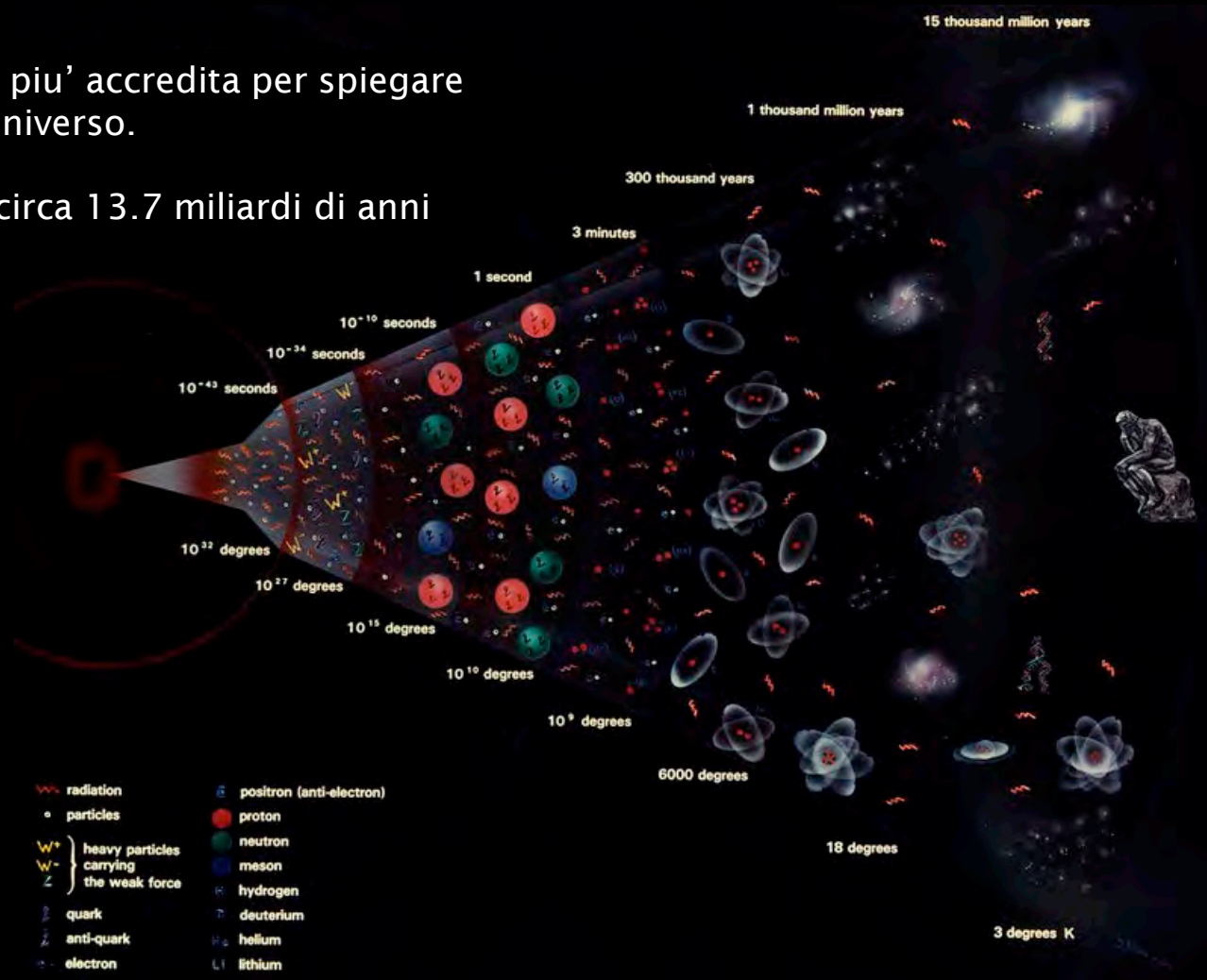
Teoria ad oggi piu' accreditata per spiegare l'origine dell'Universo.

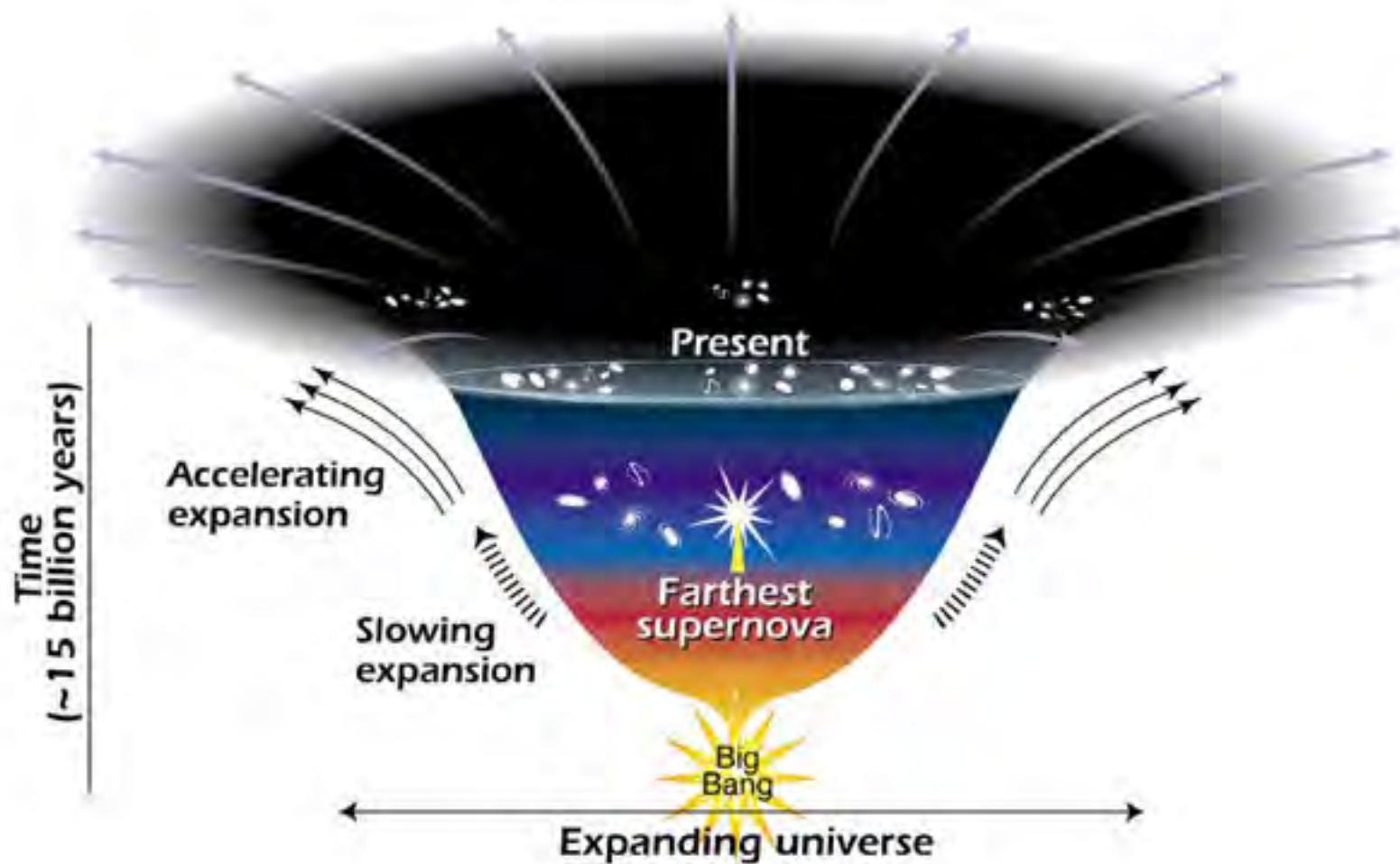
L'Universo ha circa 13.7 miliardi di anni

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

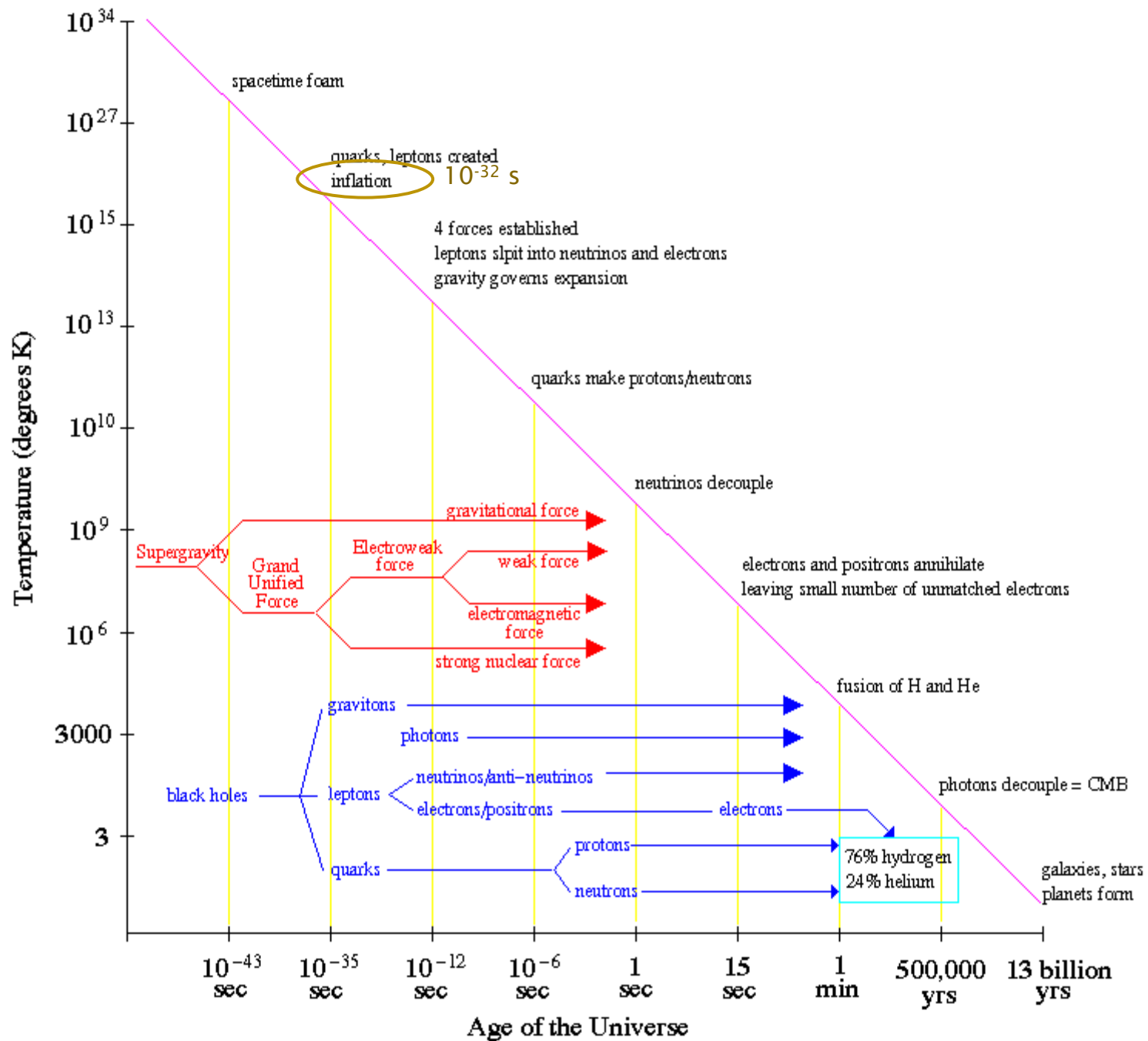
L'Universo ha cominciato ad espandersi, ad allargarsi e durante questa espansione si e' via via creato tutto quello che ci circonda.

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 baroinica (protoni, neutroni)

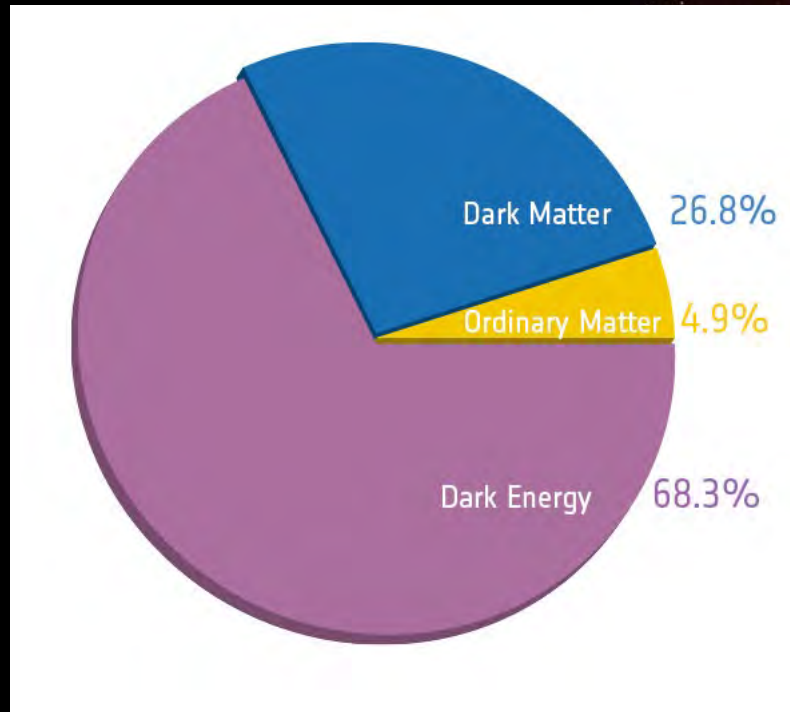
**dark energy**

**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

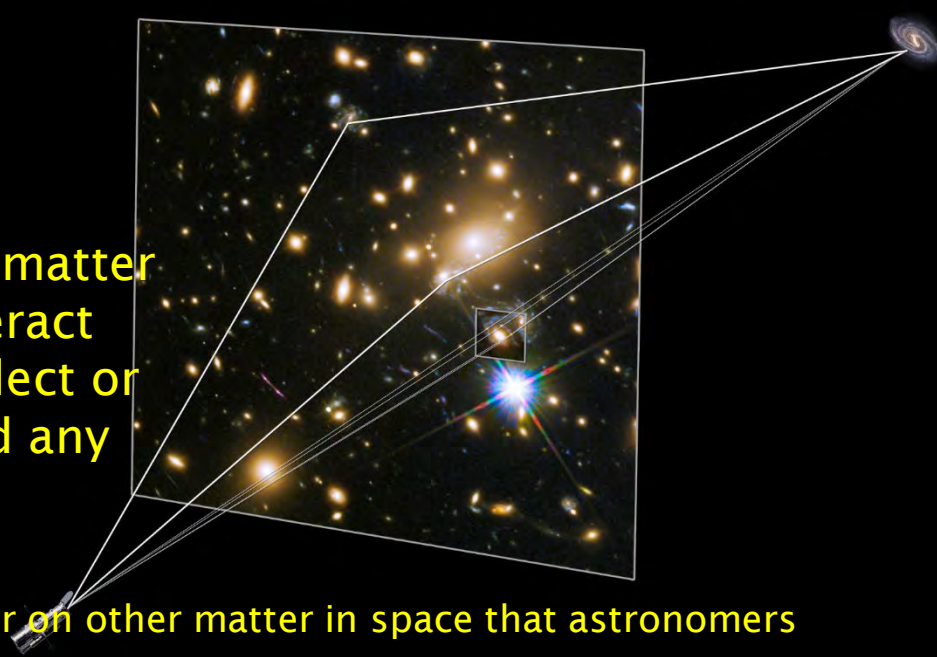
Because of gravitational lensing, an effect related to Einstein's general theory of relativity, matter that stands between a light source and its observer can bend the light from the source so that the observed image is distorted. From comparing the known position of the source (e.g., obtained through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

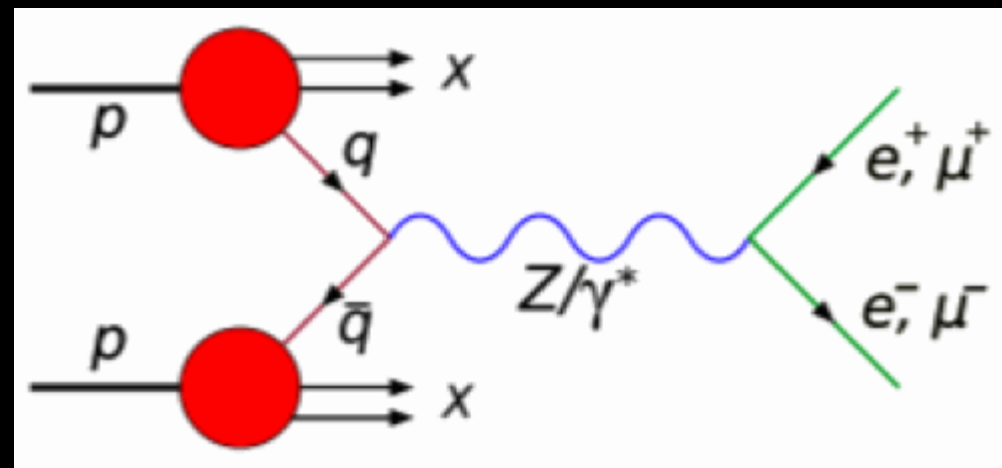
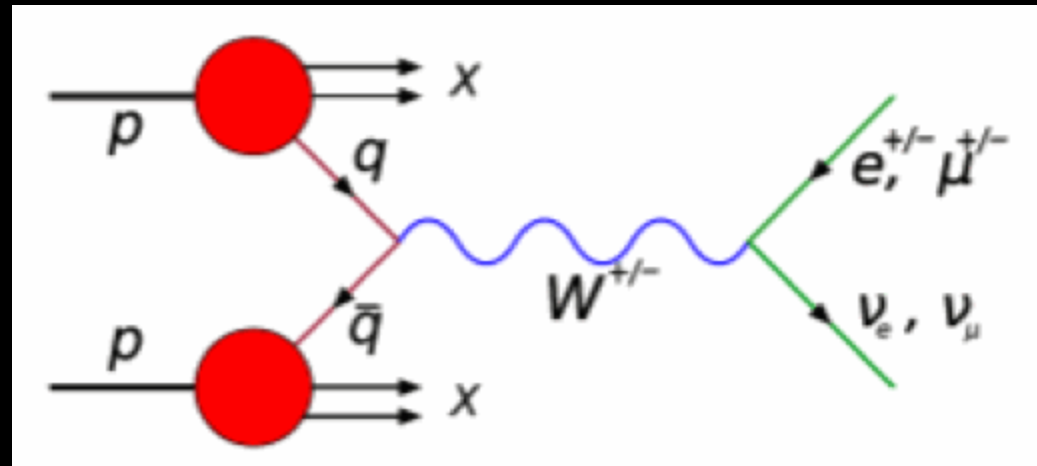
Poi studiate in dettaglio a LEP, a SDC e al Tevatron

# Produzione di W e Z

A LHC in urti protone-protone

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

I prodotti del decadimento possono essere rivelati



## Z DECAY MODES

	Mode	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Scale factor/ Confidence level
$\Gamma_1$	$e^+ e^-$	[a] ( 3.3632 ± 0.0042 ) %	←
$\Gamma_2$	$\mu^+ \mu^-$	[a] ( 3.3662 ± 0.0066 ) %	←
$\Gamma_3$	$\tau^+ \tau^-$	[a] ( 3.3696 ± 0.0083 ) %	←
$\Gamma_4$	$l^+ l^-$	[a,b] ( 3.3658 ± 0.0023 ) %	
$\Gamma_5$	$\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$		
$\Gamma_6$	$l^+ l^- l^+ l^-$	[c] ( 4.63 ± 0.21 ) × 10 <sup>-6</sup>	
$\Gamma_7$	invisible	[a] ( 20.000 ± 0.055 ) %	←
$\Gamma_8$	hadrons	[a] ( 69.911 ± 0.056 ) %	←
$\Gamma_9$	$(u\bar{u} + c\bar{c})/2$	( 11.6 ± 0.6 ) %	
$\Gamma_{10}$	$(d\bar{d} + s\bar{s} + b\bar{b})/3$	( 15.6 ± 0.4 ) %	
$\Gamma_{11}$	$c\bar{c}$	( 12.03 ± 0.21 ) %	
$\Gamma_{12}$	$b\bar{b}$	( 15.12 ± 0.05 ) %	
$\Gamma_{13}$	$b\bar{b} b\bar{b}$	( 3.6 ± 1.3 ) × 10 <sup>-4</sup>	

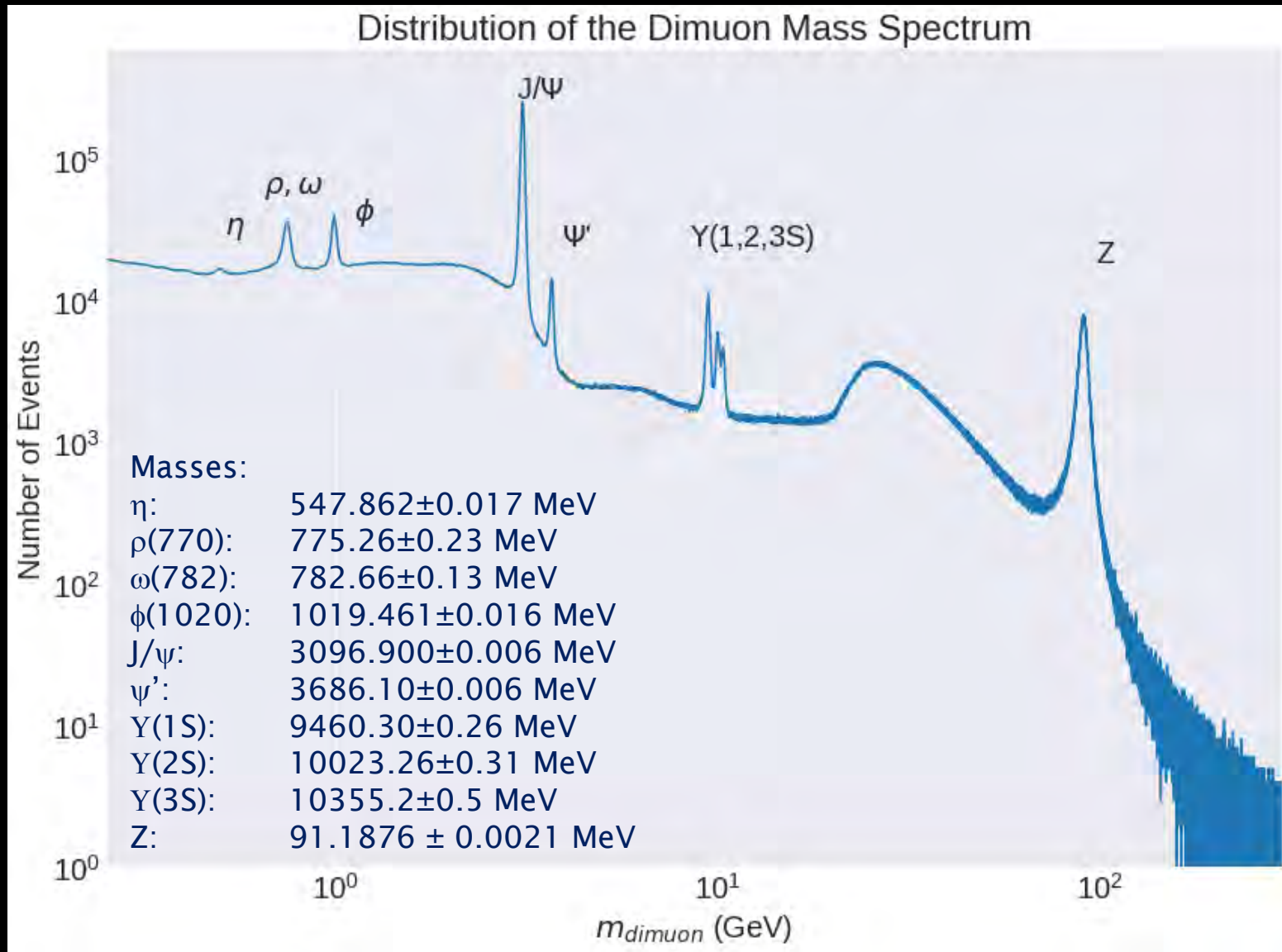
E' possible  $Z \rightarrow \gamma\gamma$ ?

No! Una particella di spin 1 non puo' decadere in due fotoni (teorema di Landau-Yang)

E' possible  $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ ? E  $G \rightarrow \gamma\gamma$ ?

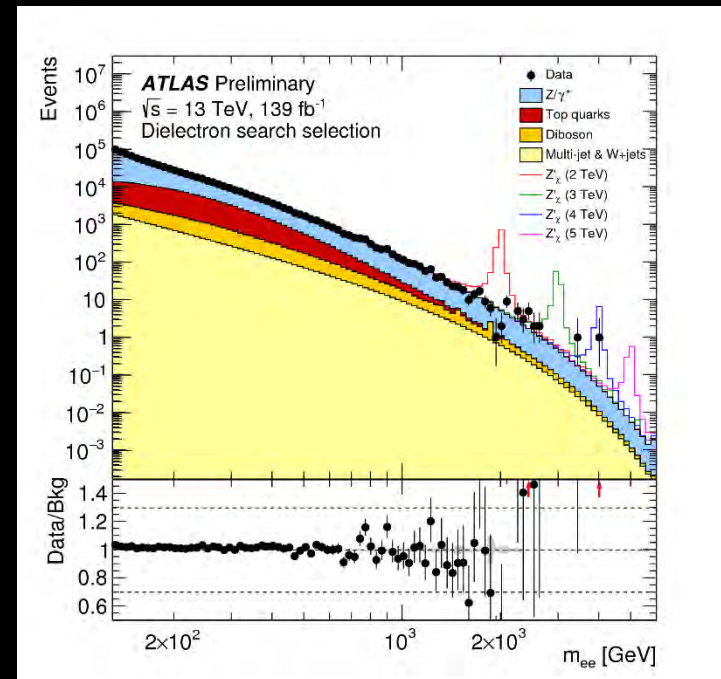
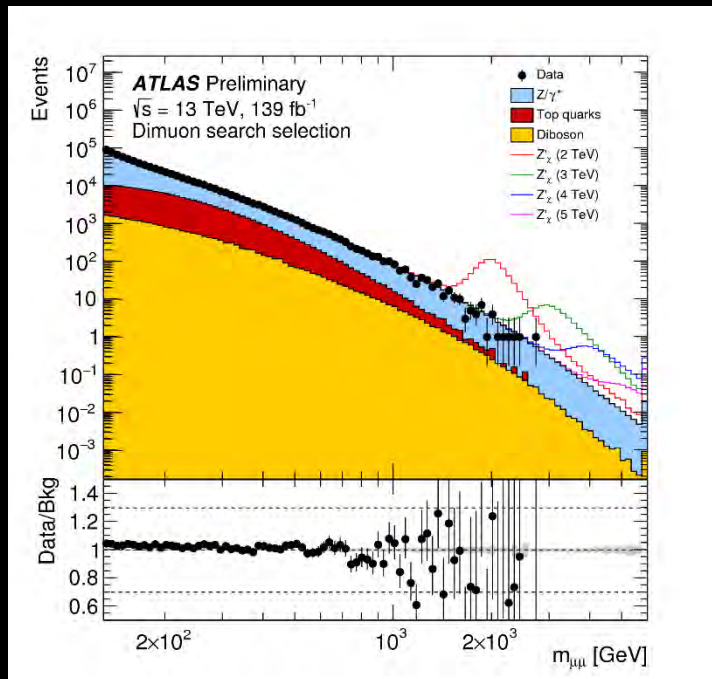
Si!  $H^0$  ha spin 0 e G ha spin 2

# Spettro di massa invariante



# Altre ricerche

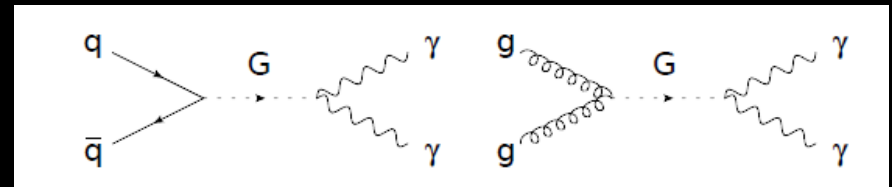
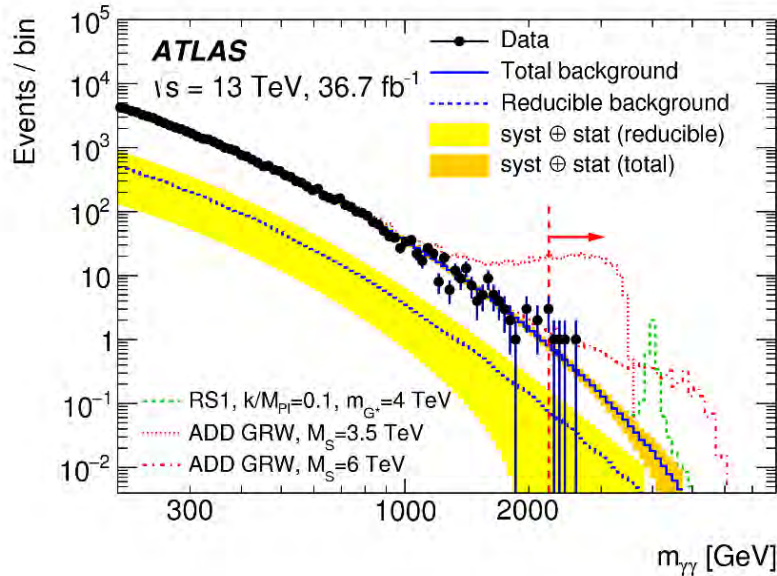
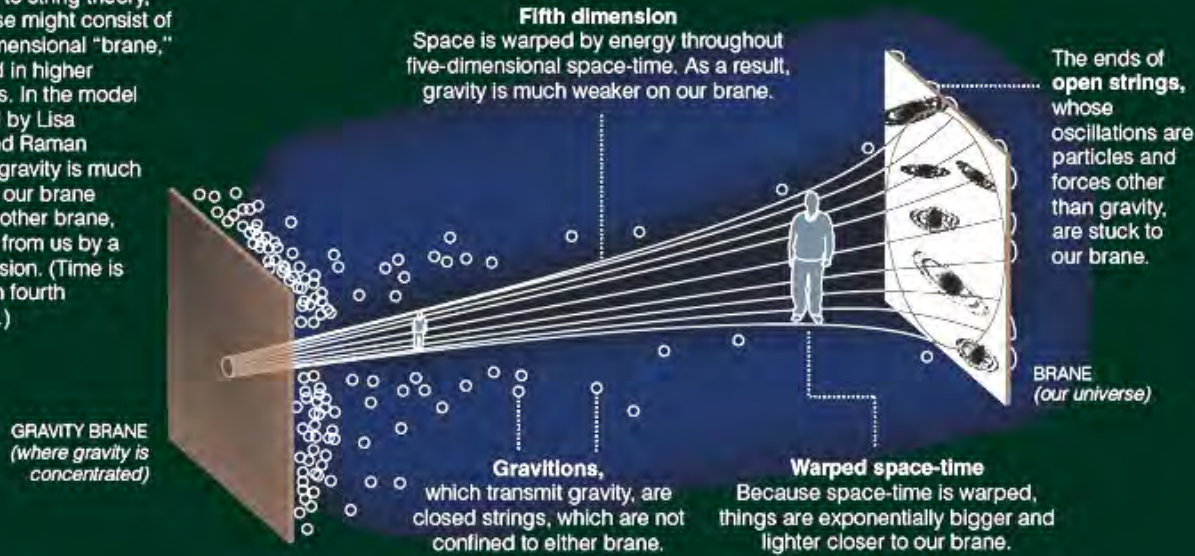
Bosone  $Z'$  di massa maggiore dello  $Z$  previsto da alcune teorie  
Neutra, spin 1, decadimenti simili allo  $Z$



In particular, the results imply a lower limit of 4.5 (5.1) TeV on  $M_{Z^0}$  for the  $Z_\psi^0$  ( $Z_{SSM}^0$ ) 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.)



Gravitone massivo con spin 2  
decade in due  $\gamma$  ad alta massa