

ALCUNI CONCETTI DI FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

F. Tartarelli (INFN - Milano)

Benvenuti alle

International Masterclasses

Hands on particle physics

17th Masterclasses 2021

dal 11/02 al 27/03/2021

<https://physicsmasterclasses.org/index.php>

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

7^a edizione Milano (INFN+UNIMI)

05/03/2021

<https://agenda.infn.it/event/25667/>


















Perche' 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'Universita' degli Studi di Milano

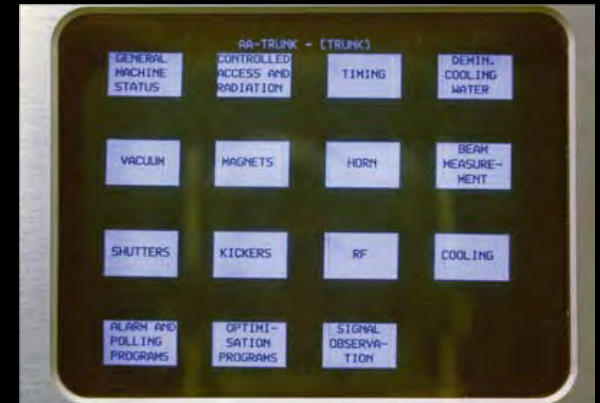
Programma della giornata

- Ore 9:00
 - Inizio Masterclass
- Ore 9:15
 - 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 13:00 connessione Zoom aperta per chi ha avuto problemi con l'istallazione del software di analisi)
- Ore 13:30
 - 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

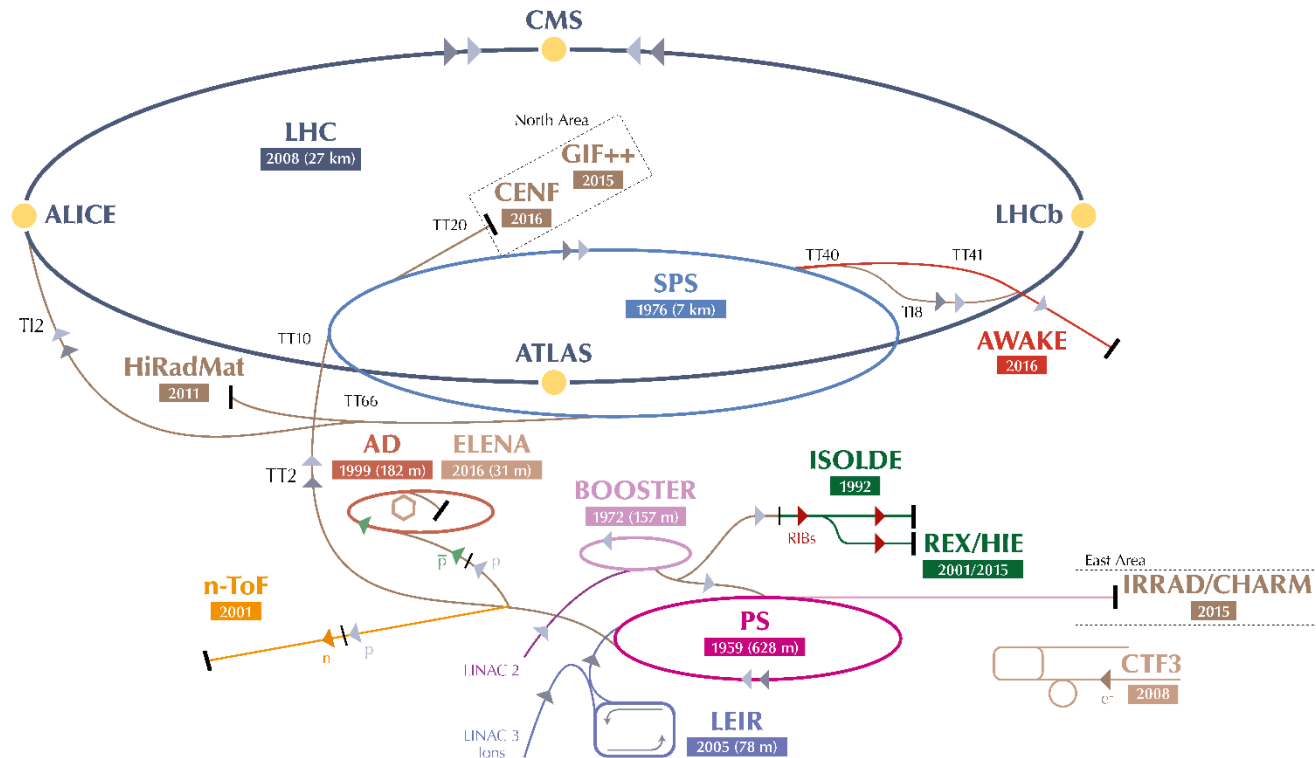
	Mon, Mar 01	Tue, Mar 02	Wed, Mar 03	Thu, Mar 04	Fri, Mar 05	Sat, Mar 06
topic	VC 1: LHCb	VC 1: CMS	VC 1: ATLAS Z	VC 1: CMS	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS W
moderators	Mick	Ashish	Karolos	David	Alessandra	André
moderators	Oliver	Jesus	Katharina	Émilien	Ennio	Giulia
moderators	Lakshan	Silvia	Shalini	Ilaria V.	Meirin	Muhammad A.
	Bonn 	Istanbul, Ozyegin 	Naples 	Plovdiv 	Genova 	Funchal 
	Pisa 		Krakow IFJ PAN 	São Paulo SPRACE 	Slovakia 	Dresden 
	Heidelberg 		Prague CU 	Genova 	Lecce 	
					Louisiana Tech 	
					Milan 	

CERN

- Laboratorio internazionale fondato nel 1954
 - CERN: *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*
 - European Laboratory for Particle Physics
 - L'Italia e' 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 e' 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)**



Acceleratori al CERN



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

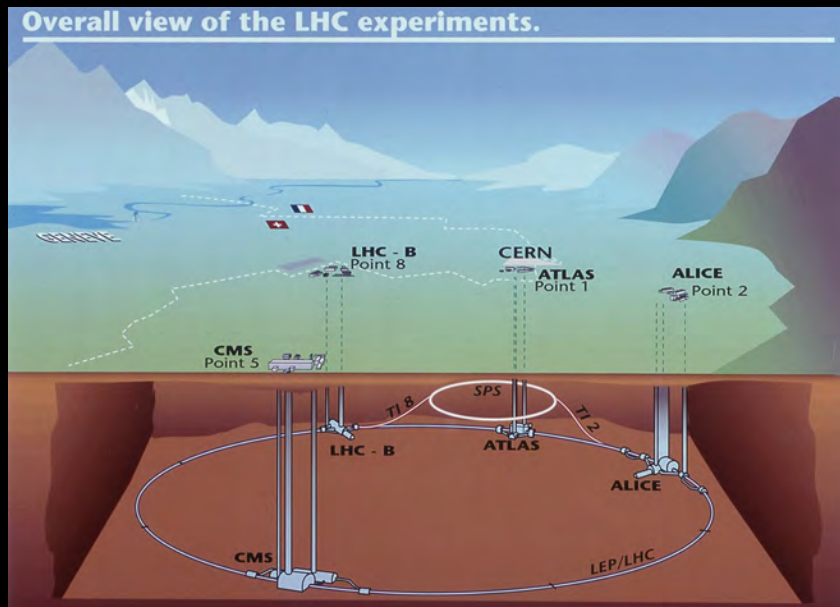
LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 AWAKE Advanced WAKEfield Experiment ISOLDE Isotope Separator OnLine REX/HIE Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator 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 - 10/2015, copyright 2015/2017

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

LHC al CERN

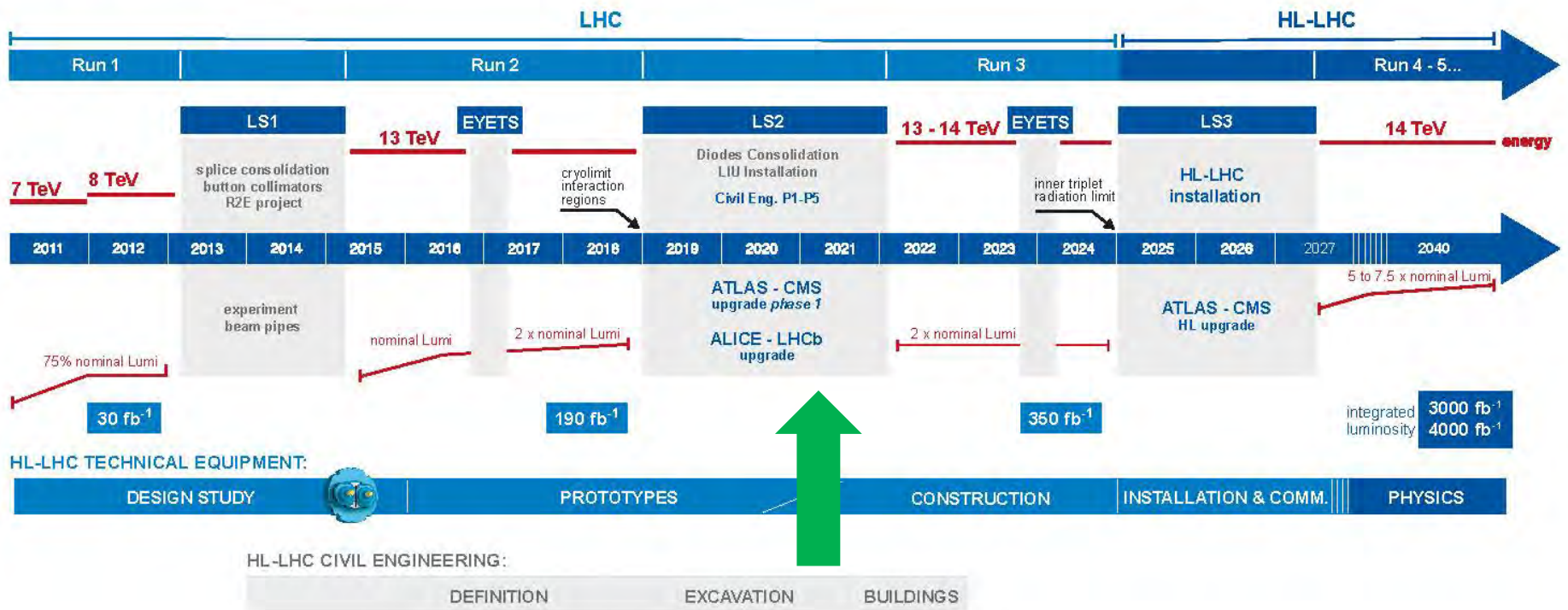
- ⦿ LHC = Large Hadron Collider
- ⦿ Grande collisionatore pp: ~27 km di circonferenza percorsa dai protoni a circa la velocità della luce
 - energia massima dei fasci 6.5 TeV
 - 13 TeV nel centro di massa
- ⦿ Posto in un tunnel circolare tra la Svizzera e la Francia, vicino Ginevra
- ⦿ 4 sale sperimentali sotterranee per altrettanti esperimenti
 - **ALICE, ATLAS, CMS, LHCb**



Programma dei prossimi anni

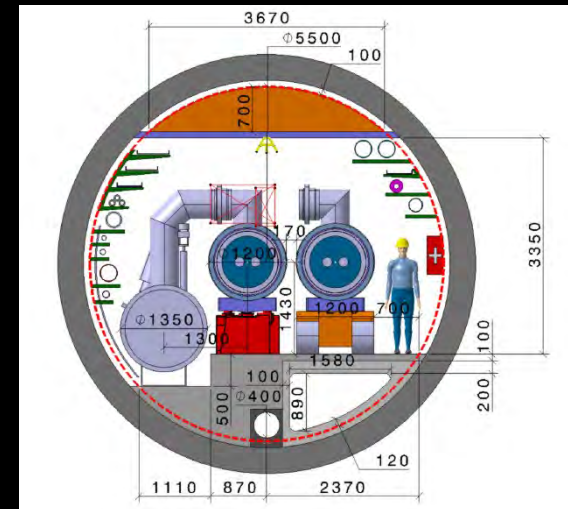
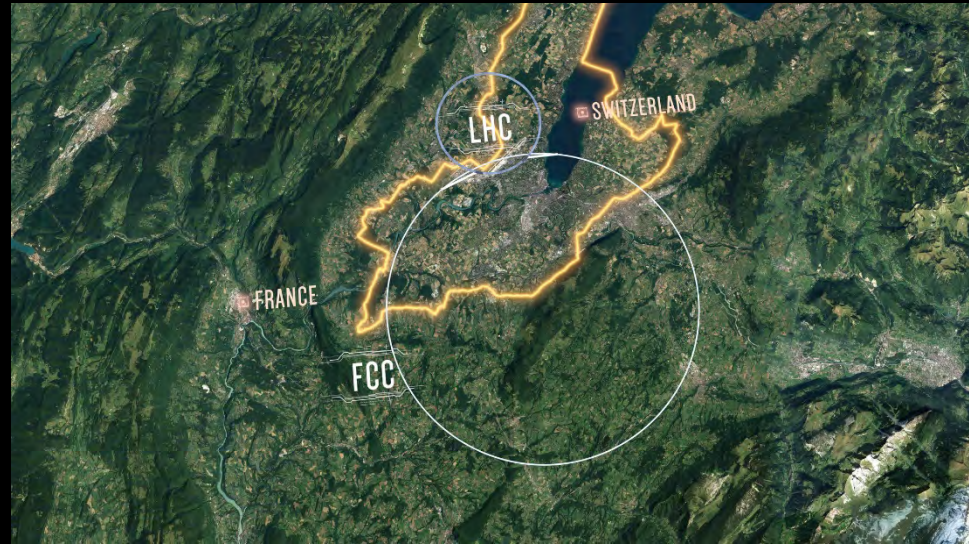


LHC / HL-LHC Plan



Future Circular Collider

- FCC: Highest-energy hadron collider (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)

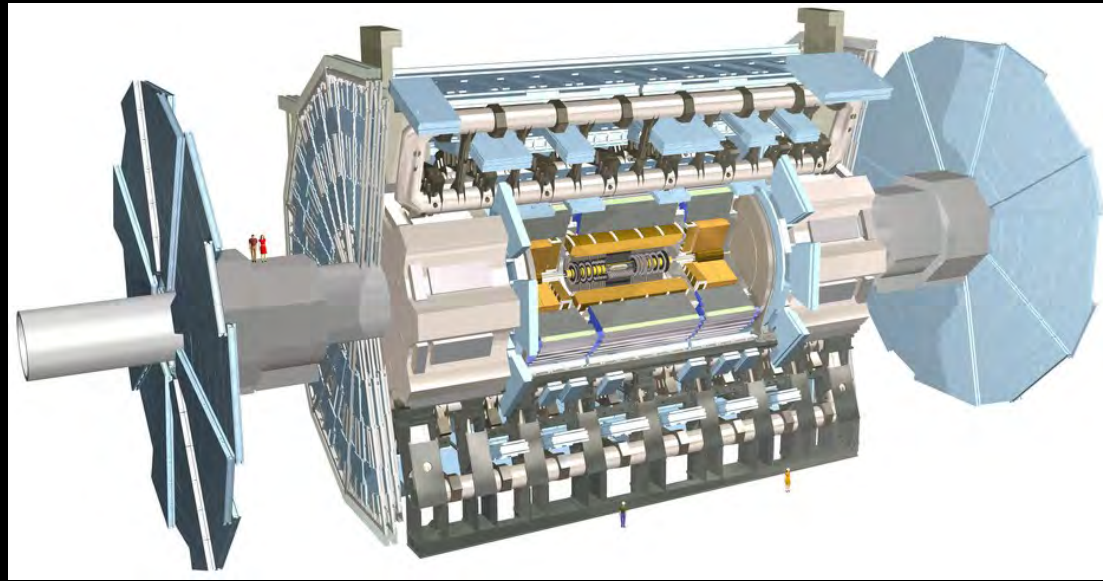


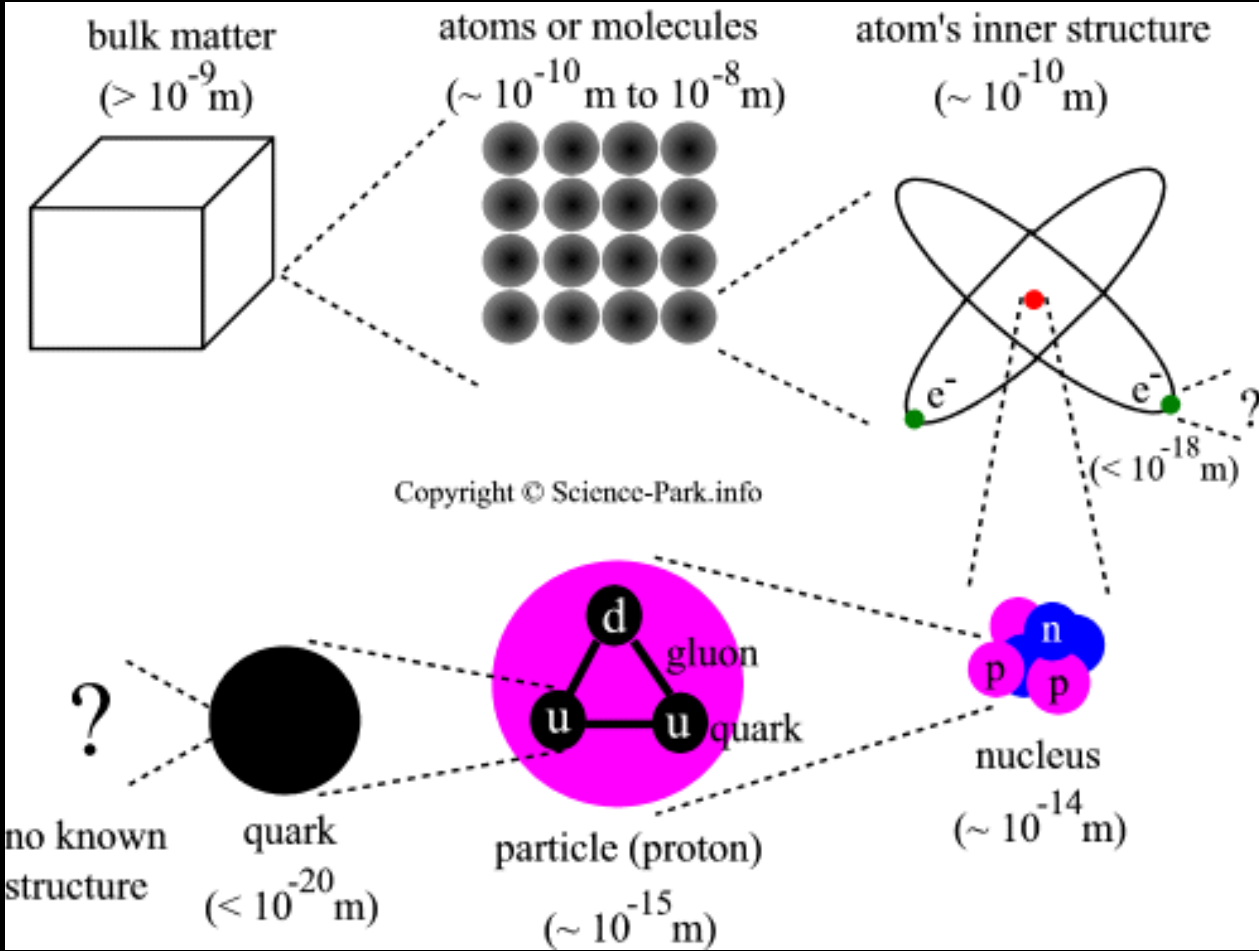
Electron Volt (eV)

- ⊙ 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 di 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.
 - $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- ⊙ Multipli dell' elettronvolt, per cui 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 ($E=mc^2$), eV/c² e' anche usata come unità' di massa
 - in fisica delle particelle elementari si usa un sistema di unita' di misura in cui si pone $c=1$, e quindi eV diventa una unita' di massa

ATLAS

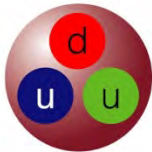
- Rivelatore polivalente, con un vasto raggio di studi:
 - Higgs
 - Supersimmetria
 - Fisica oltre il Modello Standard
- Il piu' grosso dei 4 rivelatori di LHC





A proton is composed of 2 up quarks (u) and 1 down quark (d).

A neutron is composed of 1 up quark (u) and 2 down quarks (d).

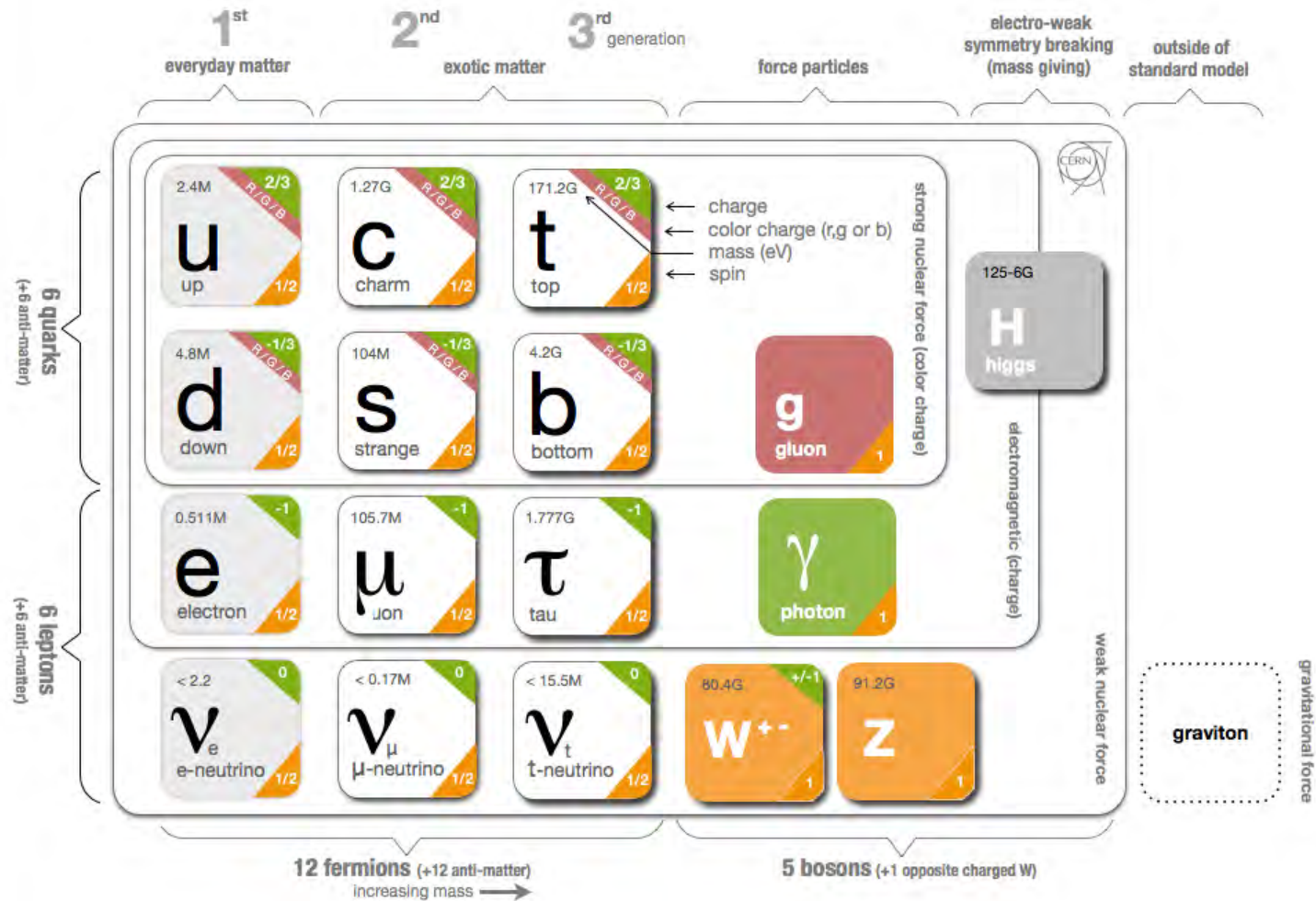


Total charge:
 $+ 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$

Total charge:
 $+ 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

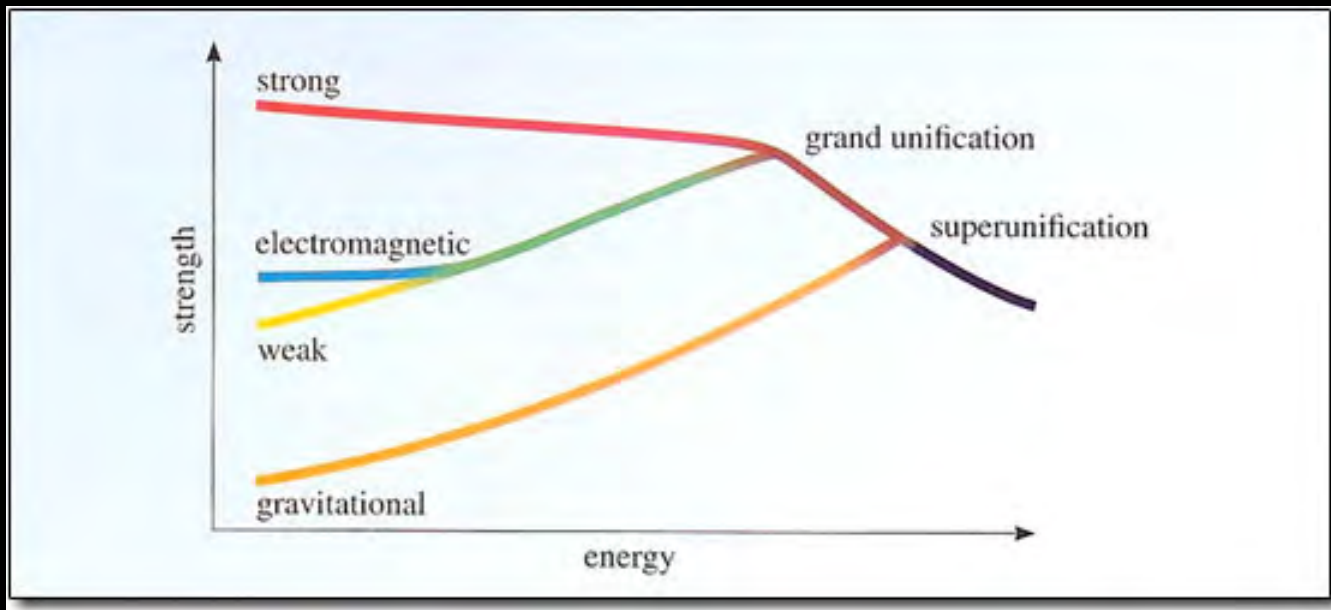
Struttura del protone e del neutrone

Il Modello Standard

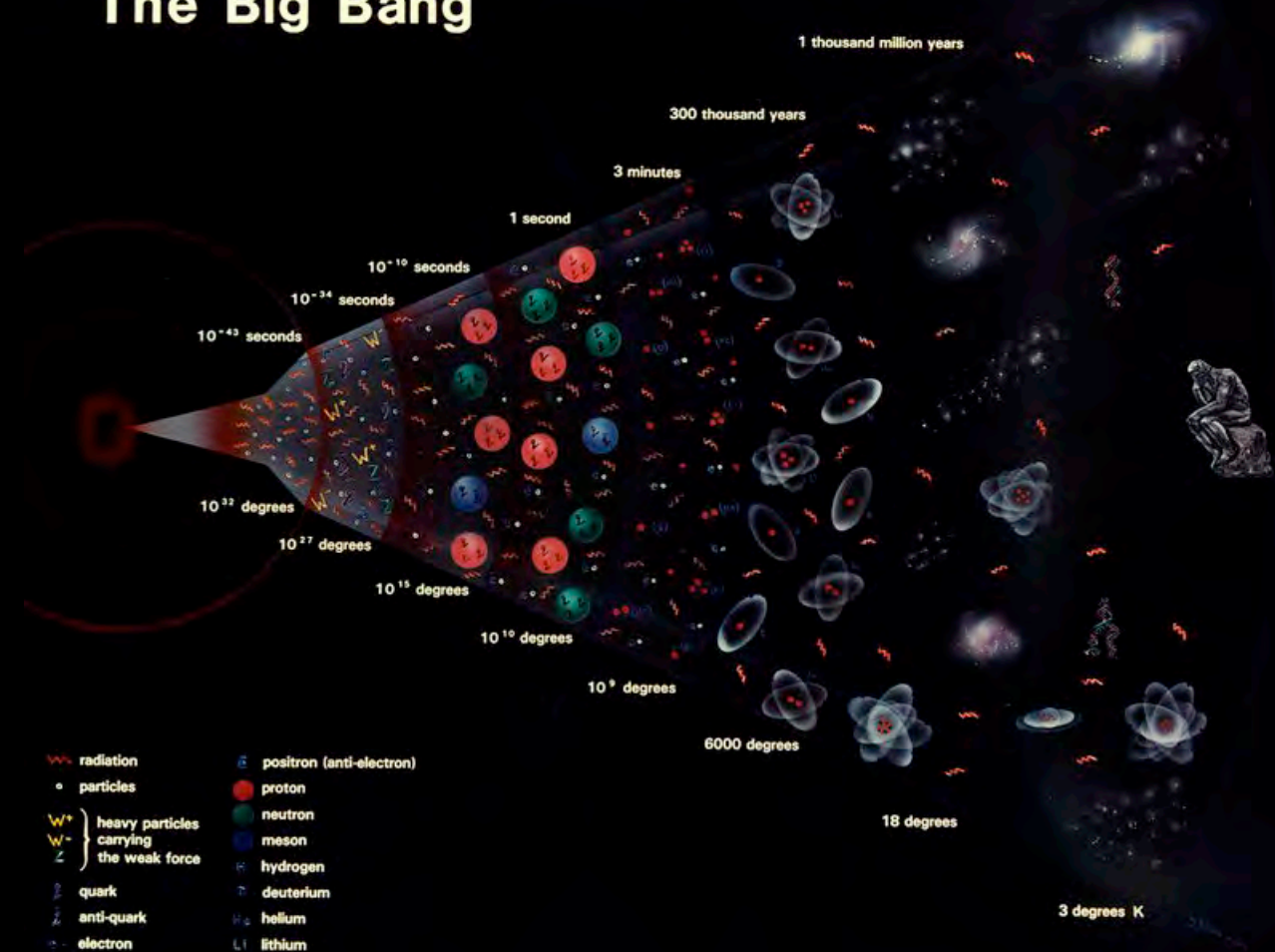


PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

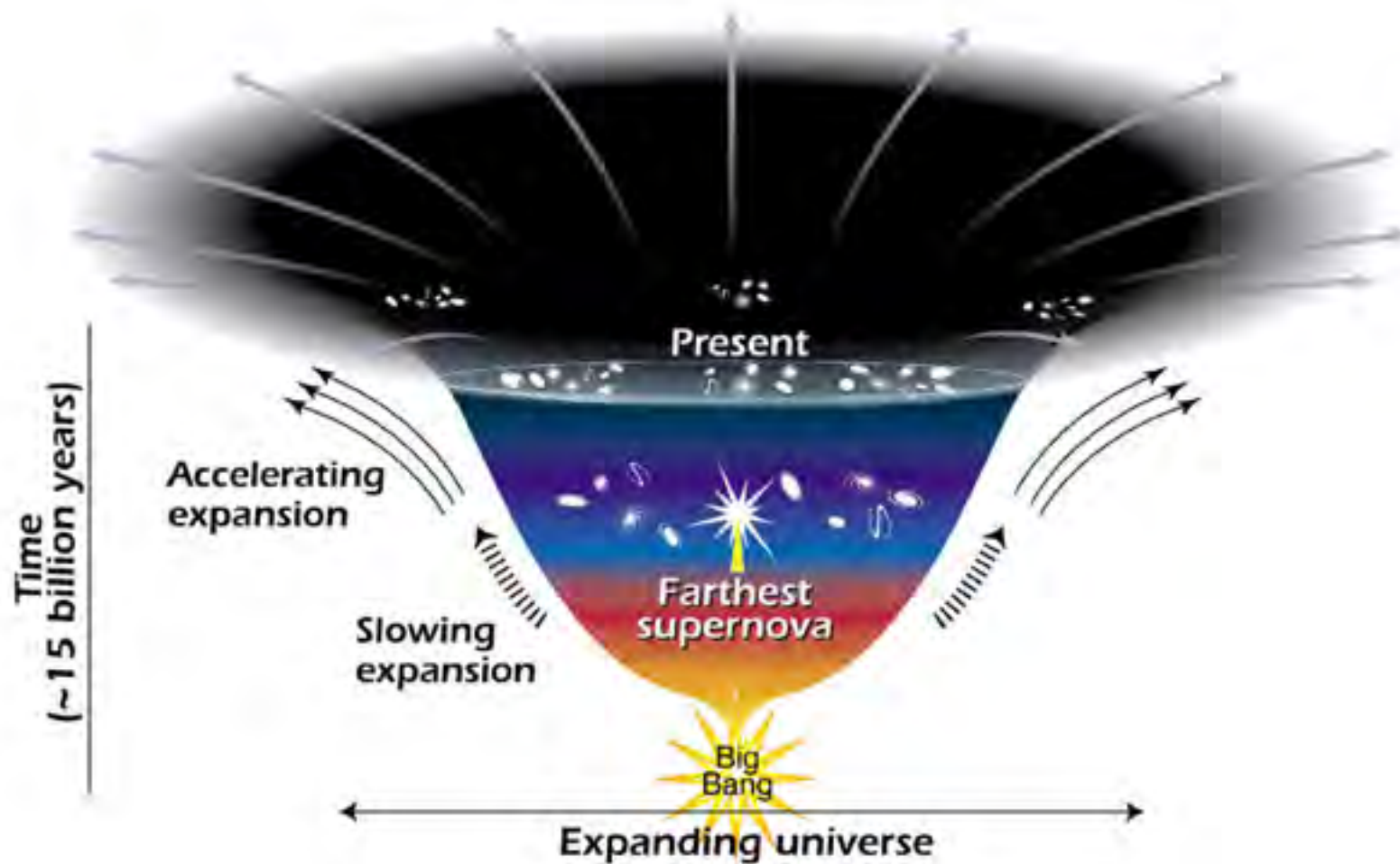
Property \ Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	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	20



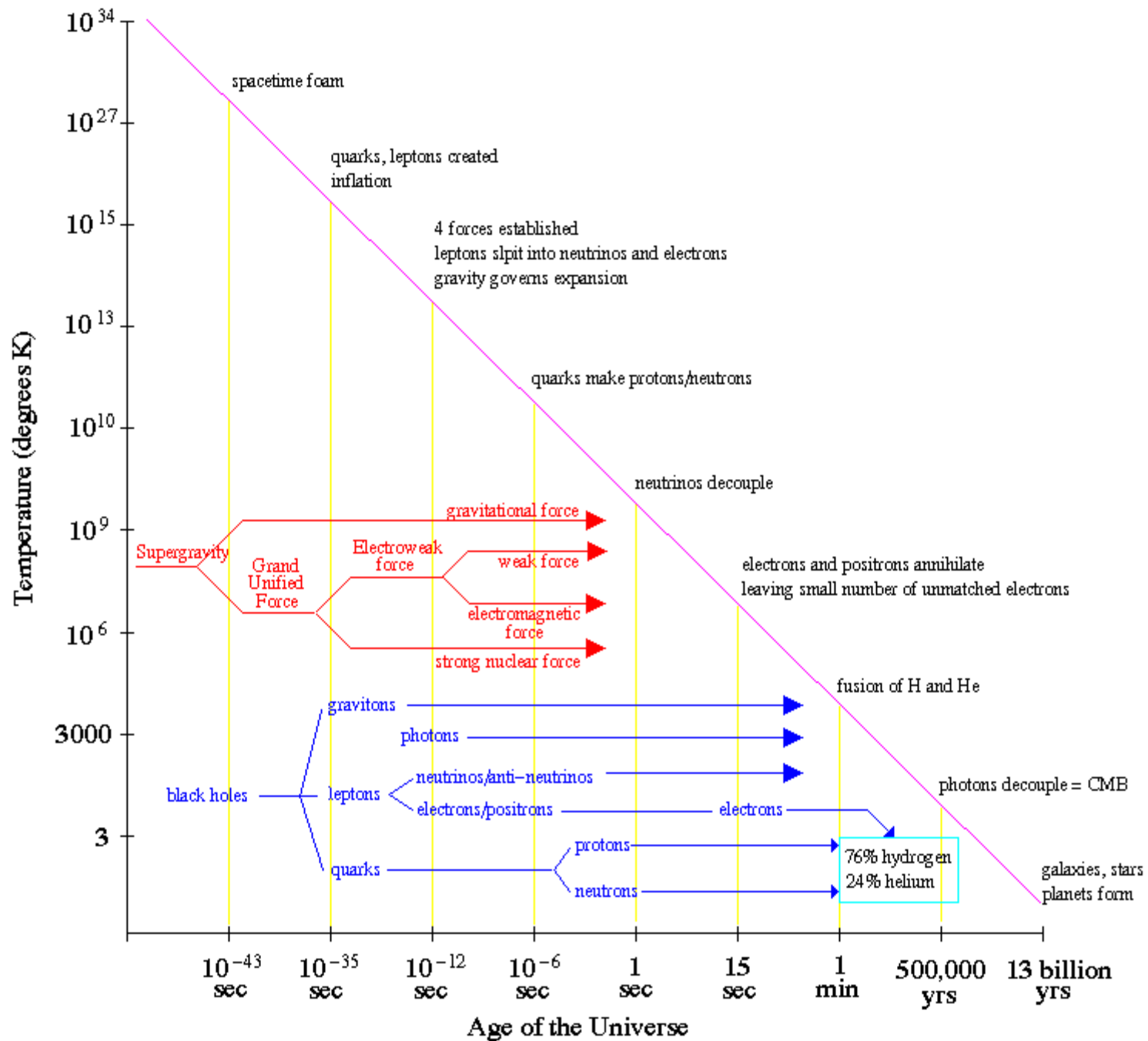
The Big Bang



- Teoria ad oggi piu' accredita 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.



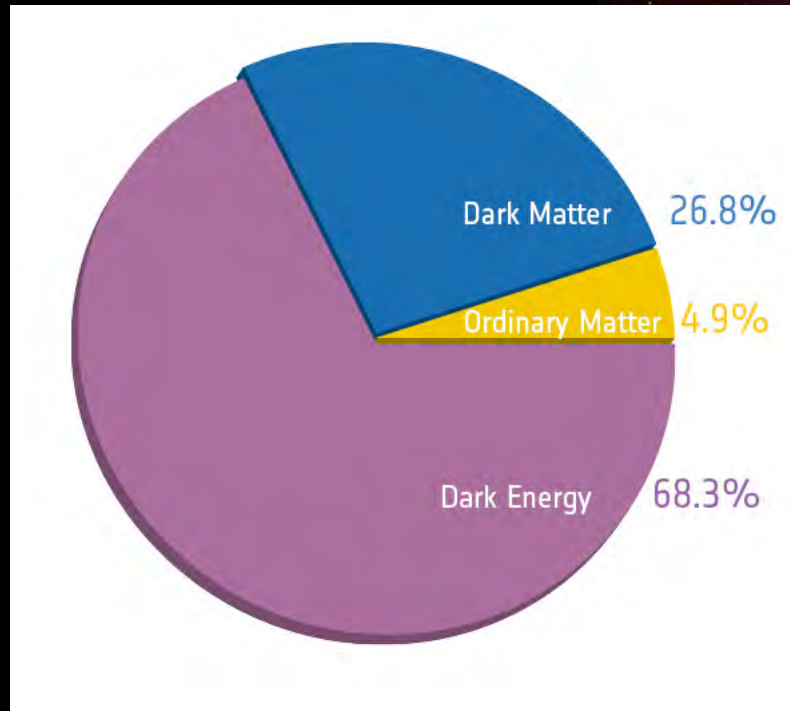
I Modelli Standard

- Il Modello Standard delle particelle elementari (SM) e il Modello Standard cosmologico (Λ CDM) spiegano un numero enorme di osservazioni e di risultati sperimentali praticamente dalla scala di Planck (10^{-33} cm) alla dimensione dell'universo (10^{28} cm)
- Lo SM e' una teoria quantistica, rispetta la relativita' ristretta di Einstein e descrive solo le interazioni elettrodeboli e forti. Non descrive la gravita' (in questa teoria, la gravita' e' un campo classico, esterno alla teoria)
- Il Λ CDM si basa sulla relativita' generale che descrive la forza gravitazionale che e' la forza piu' importante dell' universo su grande scala
- 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:
 - masse dei neutrini
 - dark matter
 - dark energy
 - assenza di 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

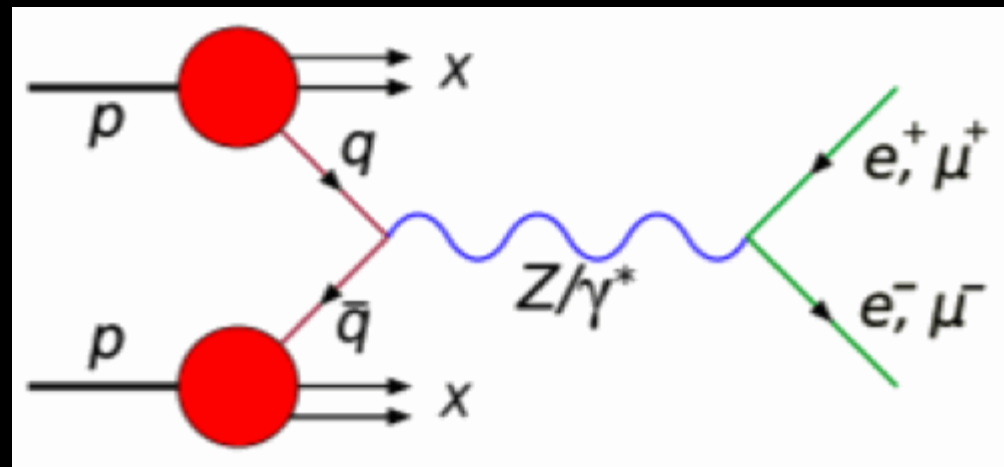
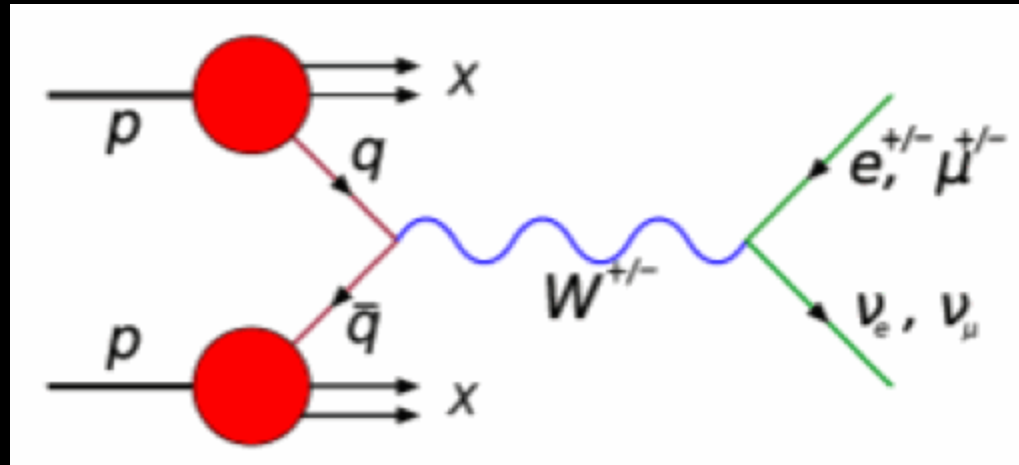
- ◉ We now know that the vast majority of matter is *dark*. This *dark matter* does not interact electromagnetically (does not emit, reflect or absorb light), nor we have yet observed any known particle interacting with it.
- ◉ It is through the gravitational effect of dark matter on other matter in 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.
- ◉ Potrebbe essere:
 - una particella 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

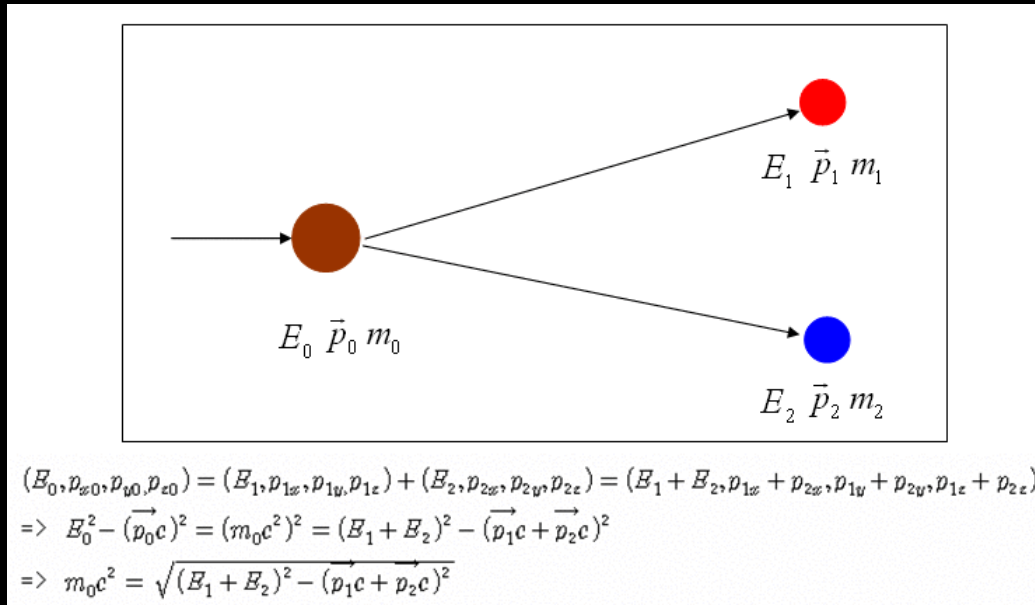
- Mediate da: W^+ , W^- e Z^0
- Caratteristiche dell'interazione debole:
 - E' l'unica interazione che puo' cambiare il sapore dei quark (cioe' cambia i quark da un tipo ad un altro)
 - Viola sia la simmetria di parita' P, che la simmetria CP (parita' seguita da coniugazione di carica)
 - E' propagata 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

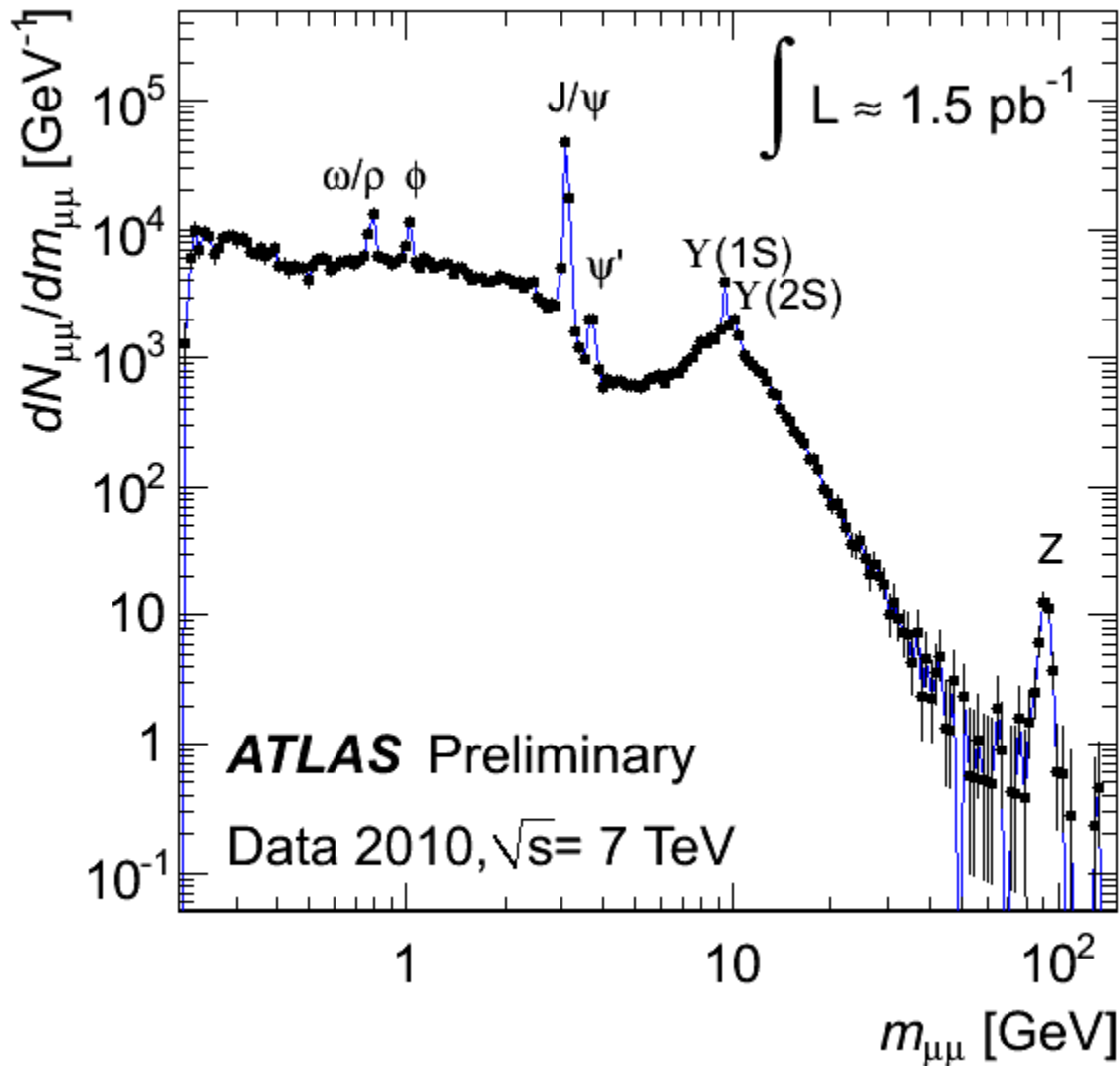


Massa invariante



- Dai vettori quantità di moto dei due prodotti di decadimento si può ricostruire la particella iniziale
- In realtà poiché siamo in ambito relativistico dobbiamo considerare i quadrimomenti delle due particelle finali:
 - $P^{1\mu} = (E_1, \mathbf{p}_1)$ e $P^{2\mu} = (E_2, \mathbf{p}_2)$
- E costruire la massa invariante della particella che decade:
 - $M^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2|^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2)$
- Massa “invariante” perché è la stessa in tutti i sistemi di riferimento legati da una trasformazione di Lorentz

Spettro di massa invariante



$\rho(770)$ $775.26 \pm 0.25 \text{ MeV}$

$\omega(782)$ $782.65 \pm 0.12 \text{ MeV}$

$\phi(1020)$ $1019.461 \pm 0.019 \text{ MeV}$

J/ψ $3096.916 \pm 0.011 \text{ MeV}$

ψ' $3686.109 + 0.012 - 0.014 \text{ MeV}$

$Y(1S)$ $9460.30 \pm 0.26 \text{ MeV}$

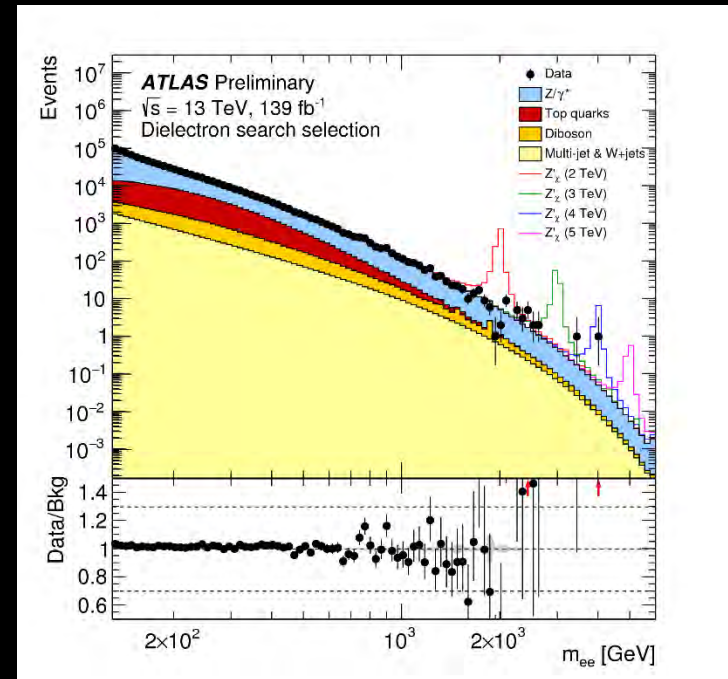
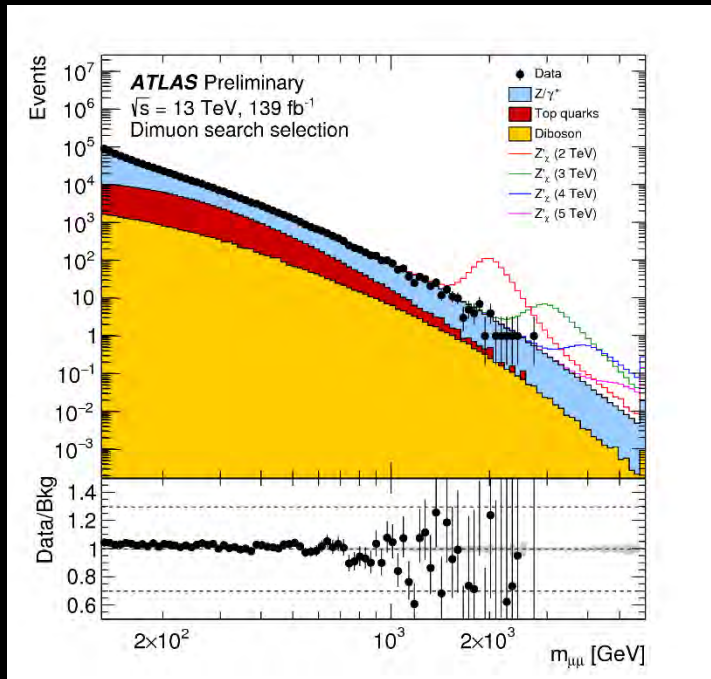
$Y(2S)$ $10023.26 \pm 0.31 \text{ MeV}$

Massa bosone Z (GeV/c^2):

$M_Z: 91.1876 \pm 0.0021$

Altre ricerche

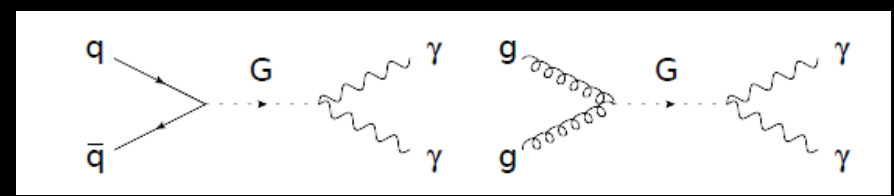
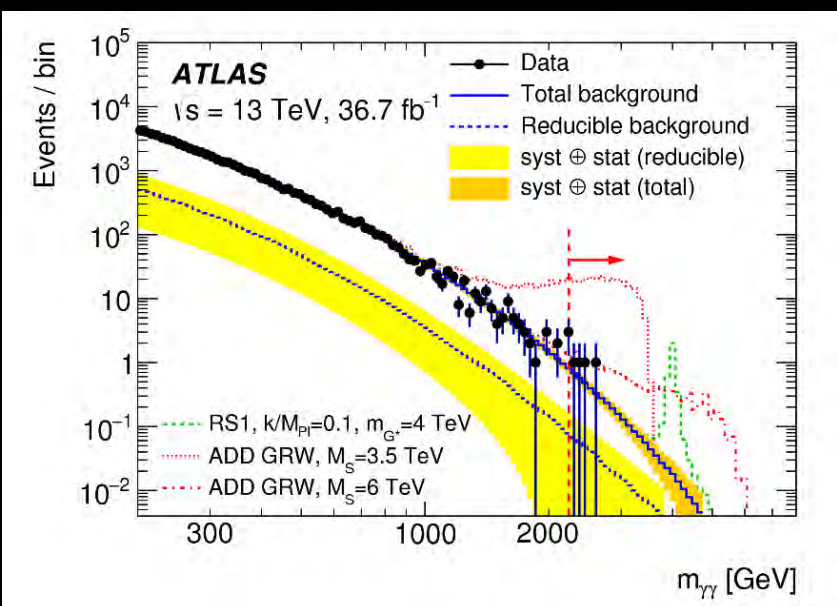
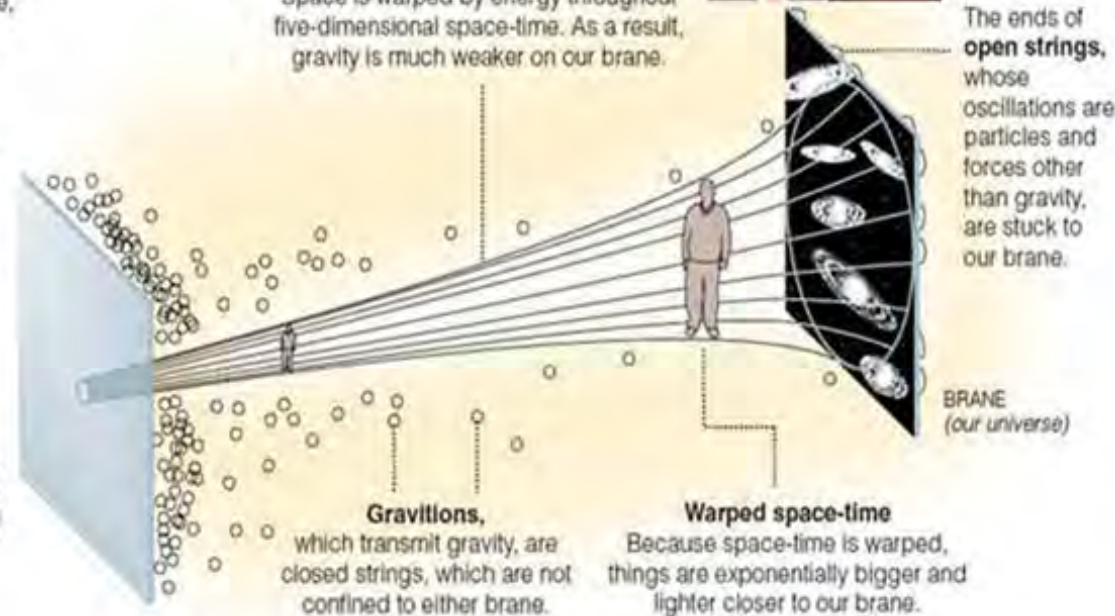
- Bosone Z' di massa maggiore dello Z previsto da alcune teorie



- In particular, the results imply a lower limit of 4.5 (5.1) TeV on M_{Z^0} for the Z^0_ψ (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 γ ad
alta massa