ALCUNI CONCETTI DI FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

F. Tartarelli (INFN-Milano)

Masterclass 2018 Milano, 22/03/2018

Benvenuti alle

International Masterclasses
Hands on particle physics
14th Masterclasses 2018

5a edizione Milano (INFN+UNIMI)
12/03/2018 e 22/03/2018

Masterclasses

- 14th edizione: dal 15/02 al 28/03/2018
- Introdurre studenti liceali alla ricerca:
  - 2 seminari che vi daranno concetti di base sulle nostre ricerche e sui metodi sperimentali che usiamo
  - effetturare un'analisi di veri dati sperimentali
    - dati dell'esperimento ATLAS a LHC (CERN) nel nostro caso
  - partecipare in videoconferenza con altri gruppi di studenti ad una discussione e combinazione dei risultati ottenuti
- Progetto che coinvolge 13.000 studenti liceali in 52 nazioni nel mondo e 200 Universita' o altre Istituzioni

Organizzazione

- Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) – Sezione di Milano *
  - Ente pubblico di ricerca
  - 20 Sezioni, 4 Laboratori Nazionali
- Dipartimento di Fisica dell'Universita' degli Studi di Milano
- FACEBOOK:
  - INFN: https://www.facebook.com/IstitutoFisicaNucleare (tag: @IstitutoFisicaNucleare)
  - Asimmetrie: https://www.facebook.com/asimmetrieInfn
  - International Masterclass: https://www.facebook.com/InternationalParticlePhysicsMasterclasses/
- TWITTER:
  - INFN: https://twitter.com/UffComINFN
  - International Masterclass: https://twitter.com/physicsIMC (tag: @UffComINFN e @physicsIMC)
- INSTAGRAM:
  - https://www.instagram.com/infn_insights/ (tag: @infn_insights)

(*) delle particelle elementari e delle interazioni fondamentali

Programma della giornata

- Ore 9:15
  - Registrazione - Sala Consiglio
- Ore 9:45
  - Benvenuto del Direttore della Sezione INFN di Milano e del Dipartimento di Fisica di UniMi
- Ore 10:00
  - Dott. F. Tartarelli “Alcuni concetti di Fisica delle Particelle Elementari”
  - Prof. L. Carminati “Acceleratori, rivelatori e altro ancora”
- Ore 12:30
  - Pausa pranzo
- 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!
  - Compilazione questionario sondaggio
- Ore 17:00
  - Fine Lavori

- Avete compilato il questionario online che vi abbiamo inviato?
- Vi invieremo nei prossimi giorni anche un questionario online da compilare al termine delle Masterclass

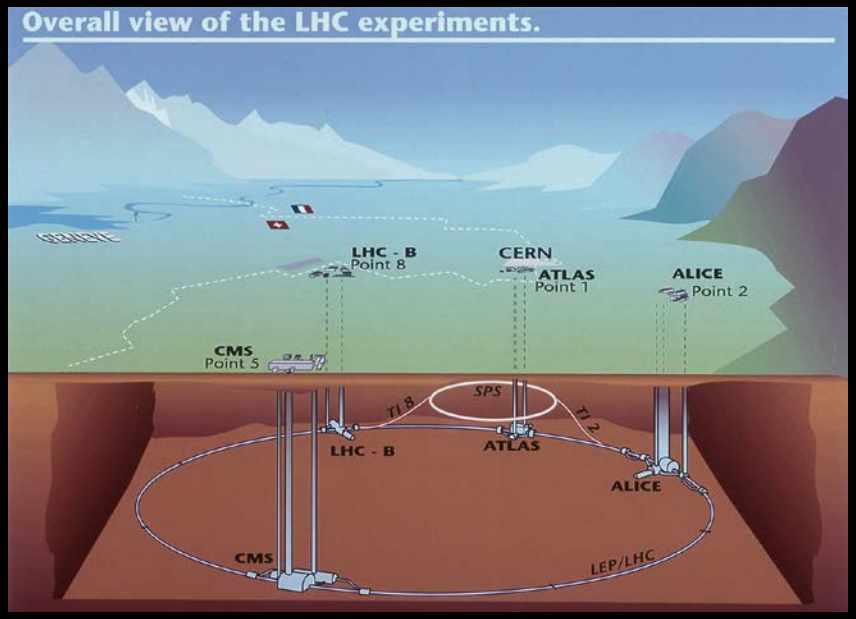
	Mon, Mar 19	Tue, Mar 20	Wed, Mar 21	Thu, Mar 22	Fri, Mar 23	Sat, Mar 24
topic	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS W
moderators	Steven	Chris	Alice	Chris	Roland	Muhammad
moderators	Tadej	Mirko	Ina	Pete	Tadej	Pete
	Kielce/Krakow	Strasbourg	Prague CU	Durham	Orsay LAL	Funchal
	Tübingen	Jerusalem	Thessaloniki Univ.	Graz	Lavras	Beja
	Annecy	Poznan	Warwick	Milan	Clermont-Ferrand	Aveiro
	Nitra	Athens	Genova	Opava	Konya	
	Bangu	Stockholm	Oslo	Udine	Zaragoza	
					Podgorica	

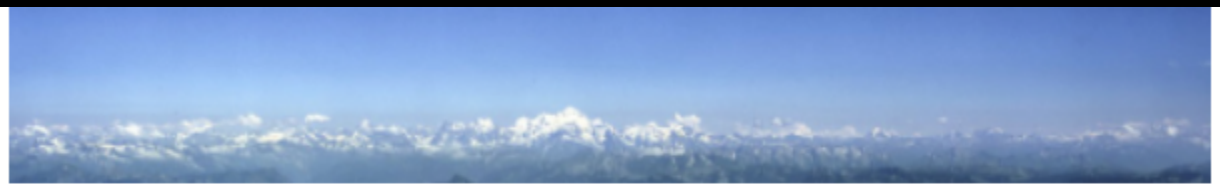
CERN

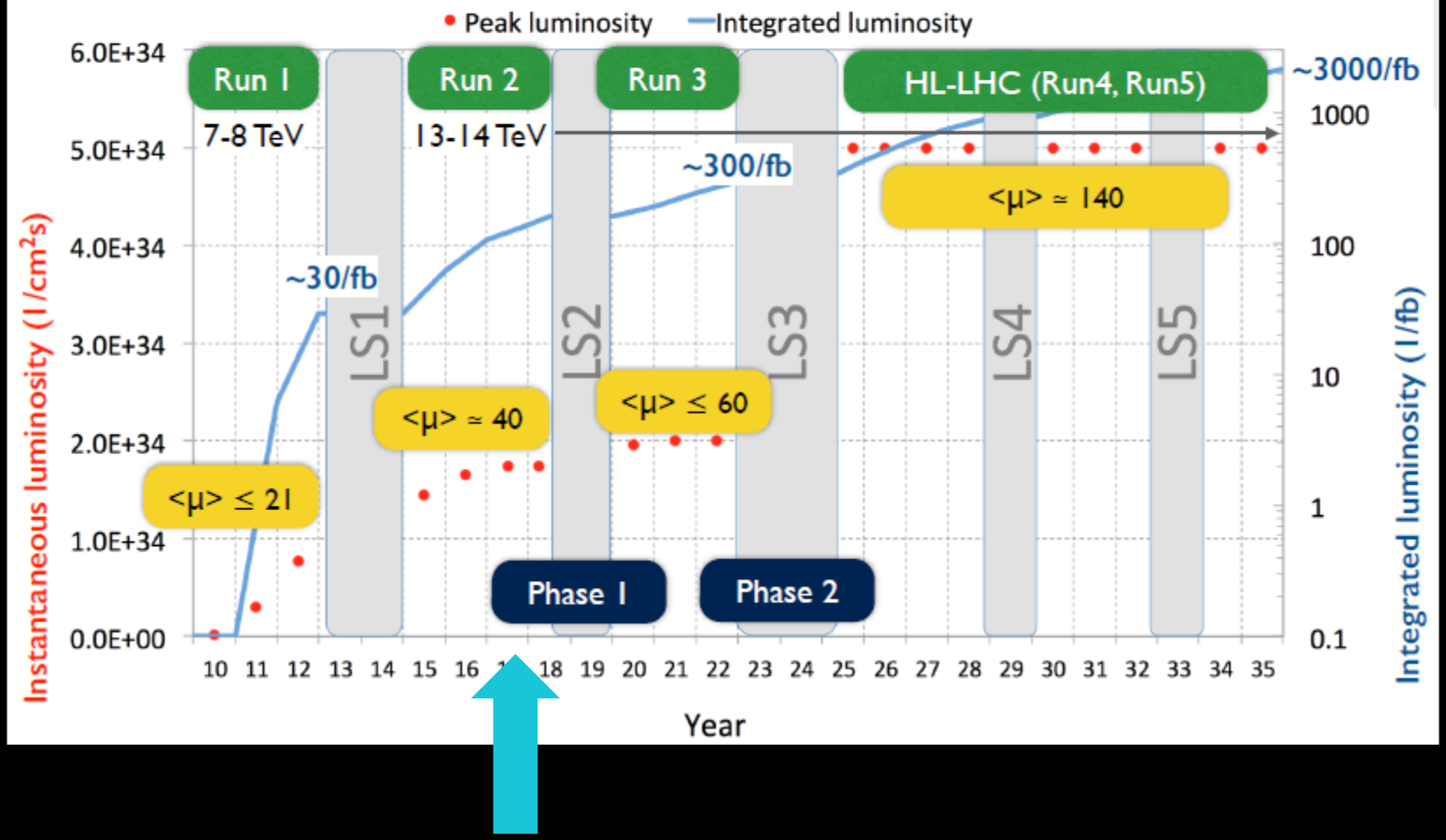
- Fondato nel 1954
- Scoperta dei bosoni W e Z nel 1983
  - Nobel per la Fisica a Carlo Rubbia e Simon van der Meer nel 1984
- Invenzione della camera a fili nel 1968
  - Georges Charpak, Nobel nel 1992
- Invenzione del World Wide Web
  - Tim Berends-Lee
- Altre invenzioni con sviluppi iniziali al CERN:
  - Touchscreen
  - Contributo agli sviluppi iniziali della PET e a un nuovo design degli scanner PET
- Scoperta del bosone di Higgs nel 2012
  - Nobel per la Fisica nel 2013 a Peter Higgs & Francois Englert

LHC al CERN

- LHC = Large Hadron Collider
- Grande collisionatore pp: ~27 km di circonferenza percorsa dai protoni a circa la velocita' della luce
- Posto in un tunnel circolare tra la Svizzera e la Francia, vicino Ginevra
- 4 sale sperimentali sotterranee per altrettanti esperimenti
  - ALICE, ATLAS, CMS, LHCb






Peak luminosity
Integrated luminosity
Run 1
7-8 TeV
Run 2
13-14 TeV
Run 3
HL-LHC (Run4, Run5)
~3000/fb
~300/fb
~30/fb
<μ> ≤ 21
<μ> ≈ 40
<μ> ≤ 60
<μ> ≈ 140
LS1
LS2
LS3
LS4
LS5
Phase 1
Phase 2
Instantaneous luminosity (1/cm²s)
Integrated luminosity (1/fb)
Year
6.0E+34
5.0E+34
4.0E+34
3.0E+34
2.0E+34
1.0E+34
0.0E+00
1000
100
10
1
0.1
10 11 12 13 14 15 16 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35

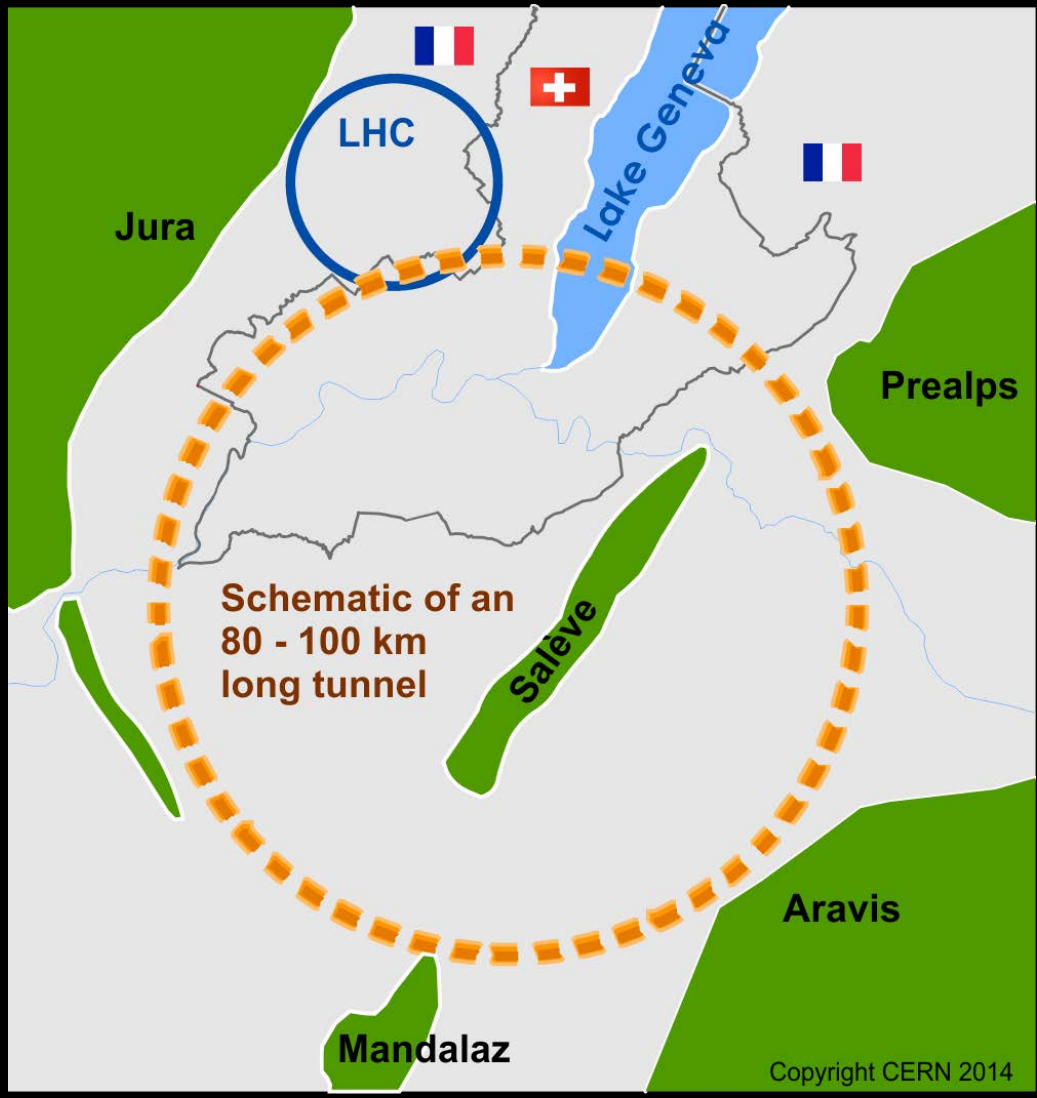
Future Circular Collider Study

Forming an international collaboration to study:

- ***pp*-collider (*FCC-hh*)**
  → defining infrastructure requirements

~16 T ⇒ 100 TeV *pp* in 100 km
~20 T ⇒ 100 TeV *pp* in 80 km

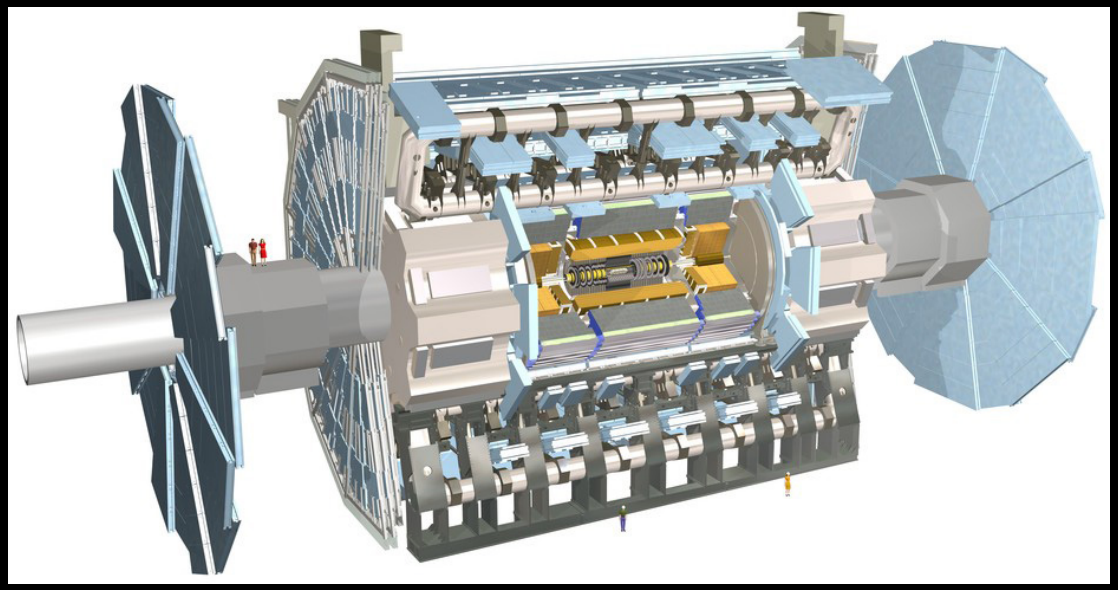
- **e^+e^- collider (*FCC-ee*)** as potential intermediate step
- ***p-e* (*FCC-he*) option**
- **80-100 km infrastructure** in Geneva area

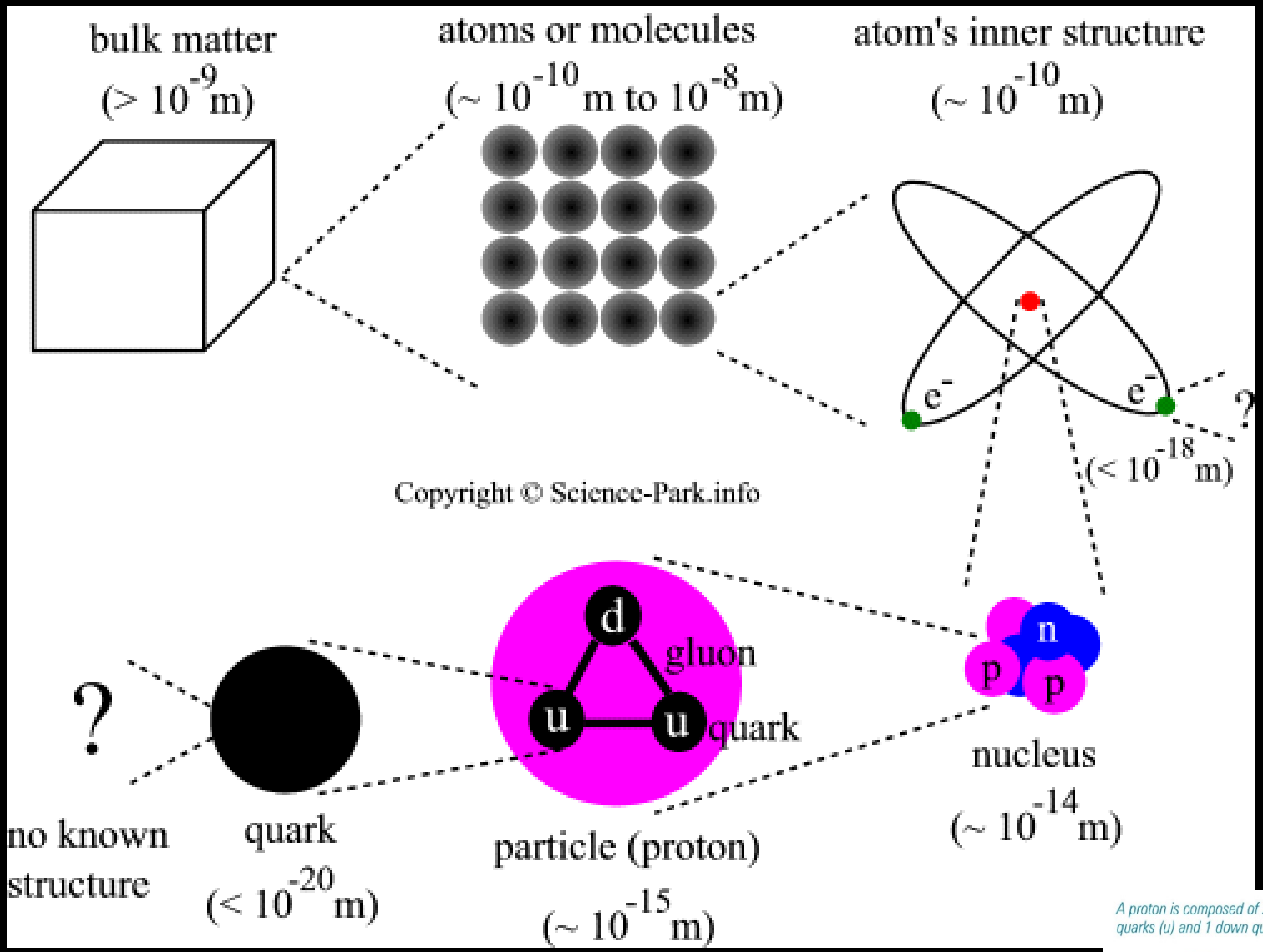


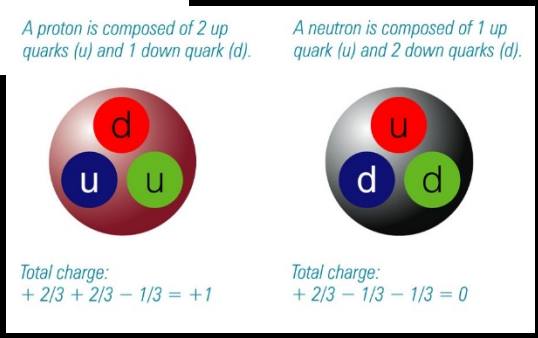
- Joule (J) come unità di misura dell'energia (kg m^2 s^{-2}):
  - Una massa di 100 g ad 1 m da terra ha una energia potenziale di circa 1 J
- In fisica delle particelle al suo posto si usa una unità più comoda chiamata elettronvolt (eV)
- energia cinetica acquistata da un singolo elettrone quando attraversa una differenza di potenziale di 1 V.
  - 1 eV = 1.602x 10^{-19} J
- Multipli dell' elettronvolt, per cui 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)

ATLAS

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

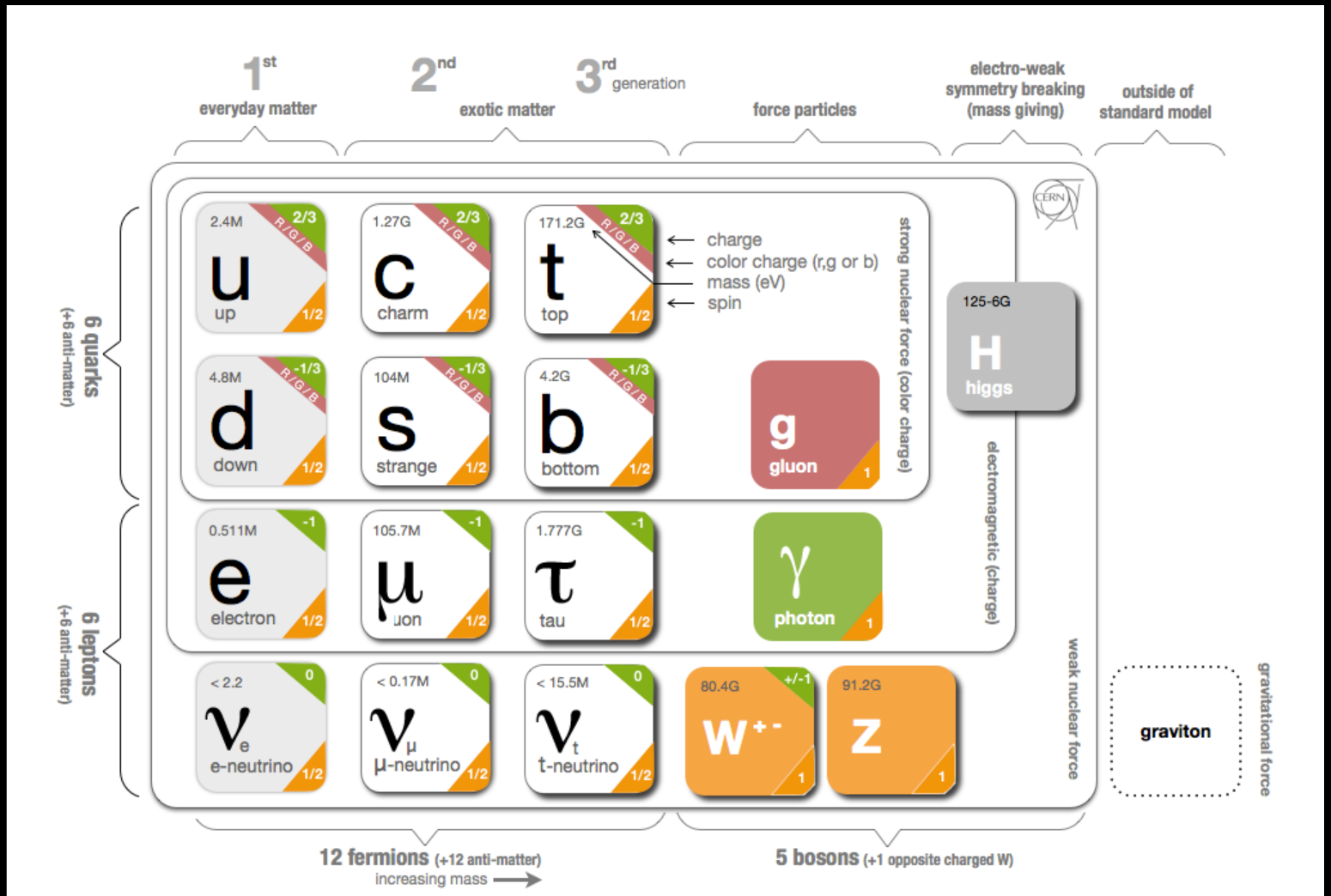






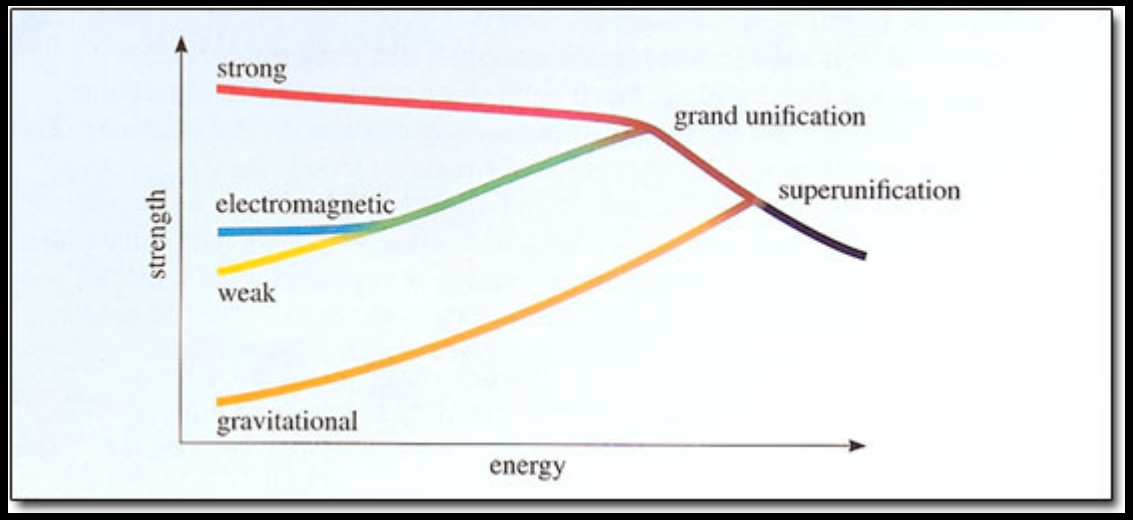
Protone e neutrone ->

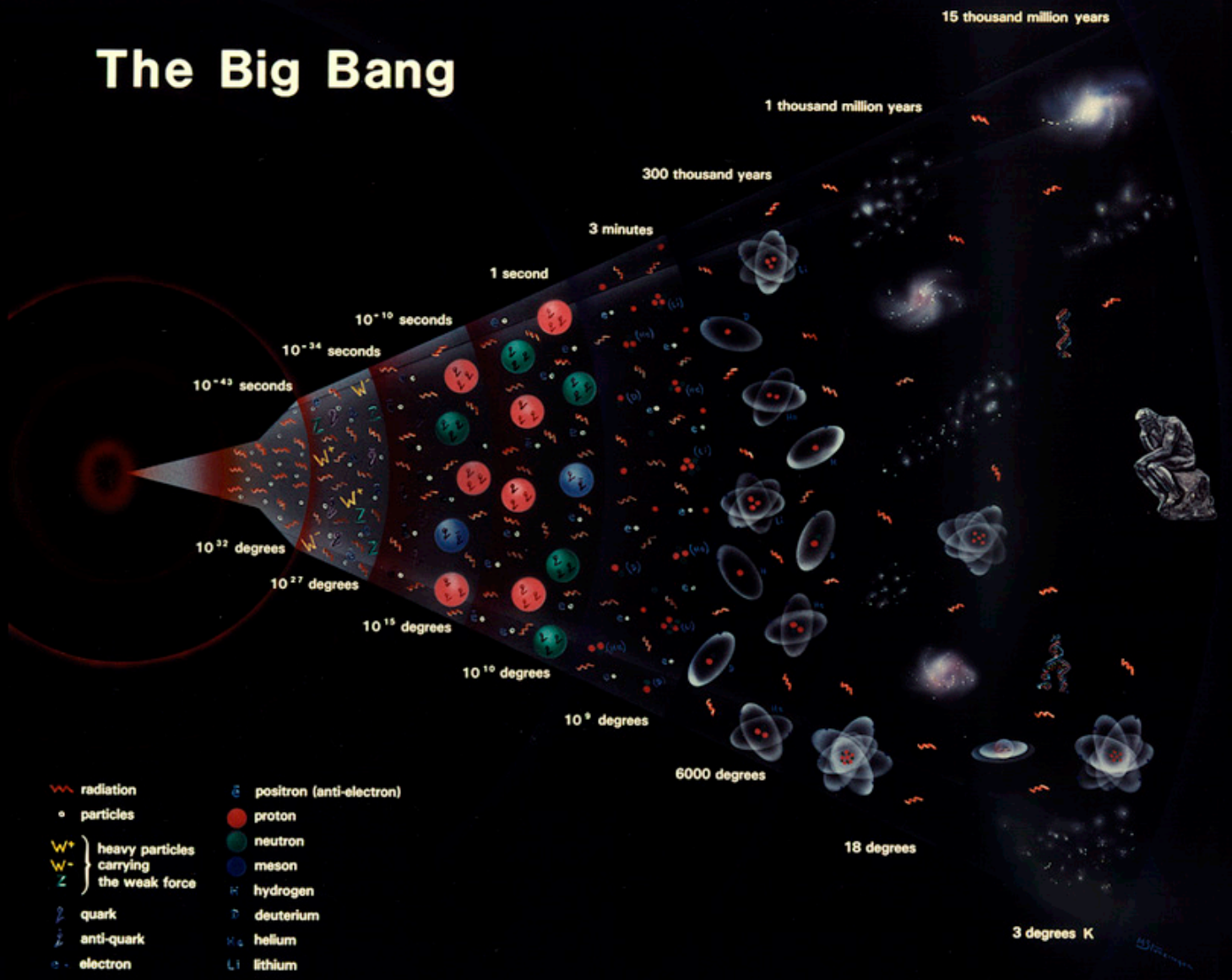
Il Modello Standard

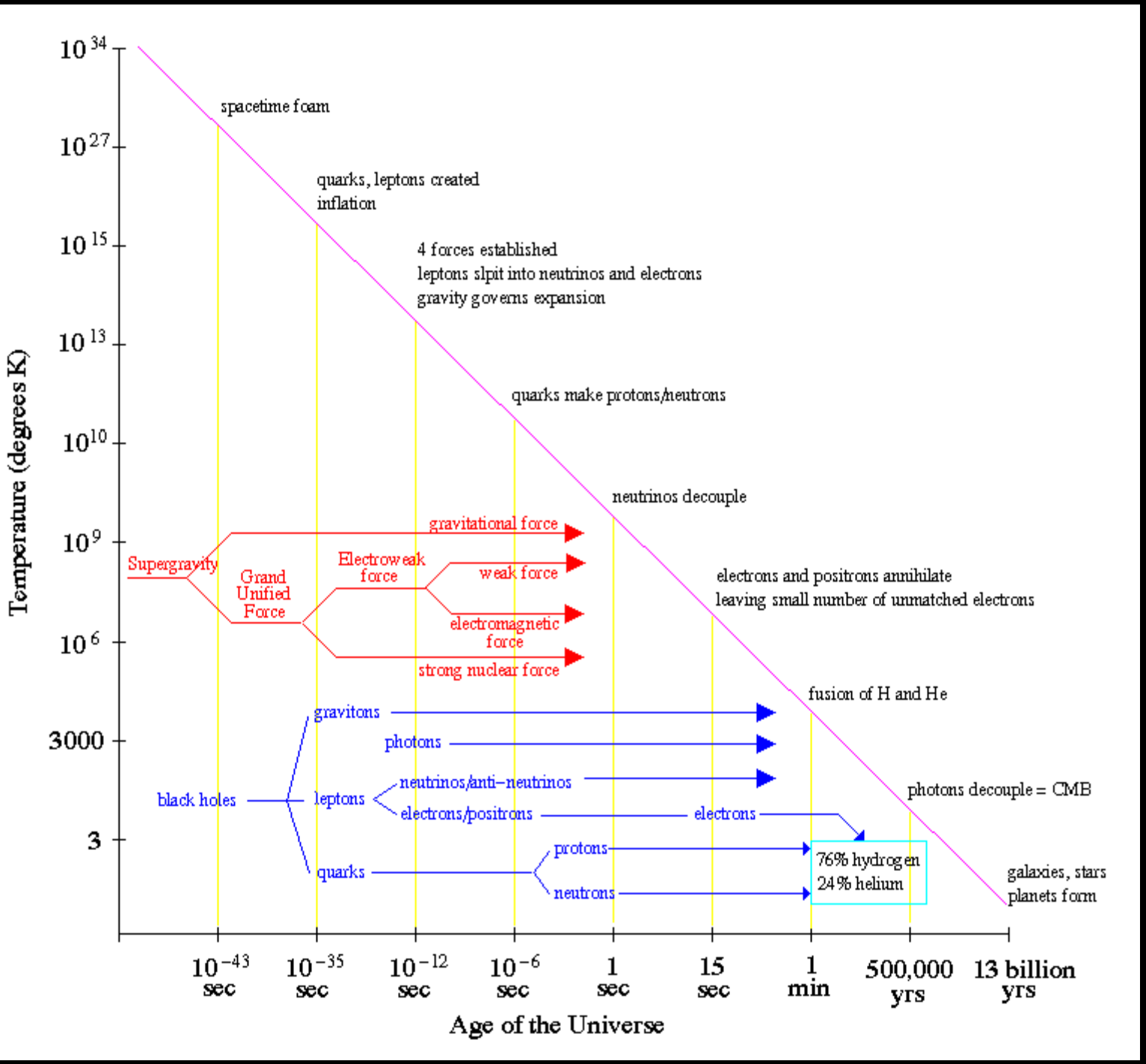


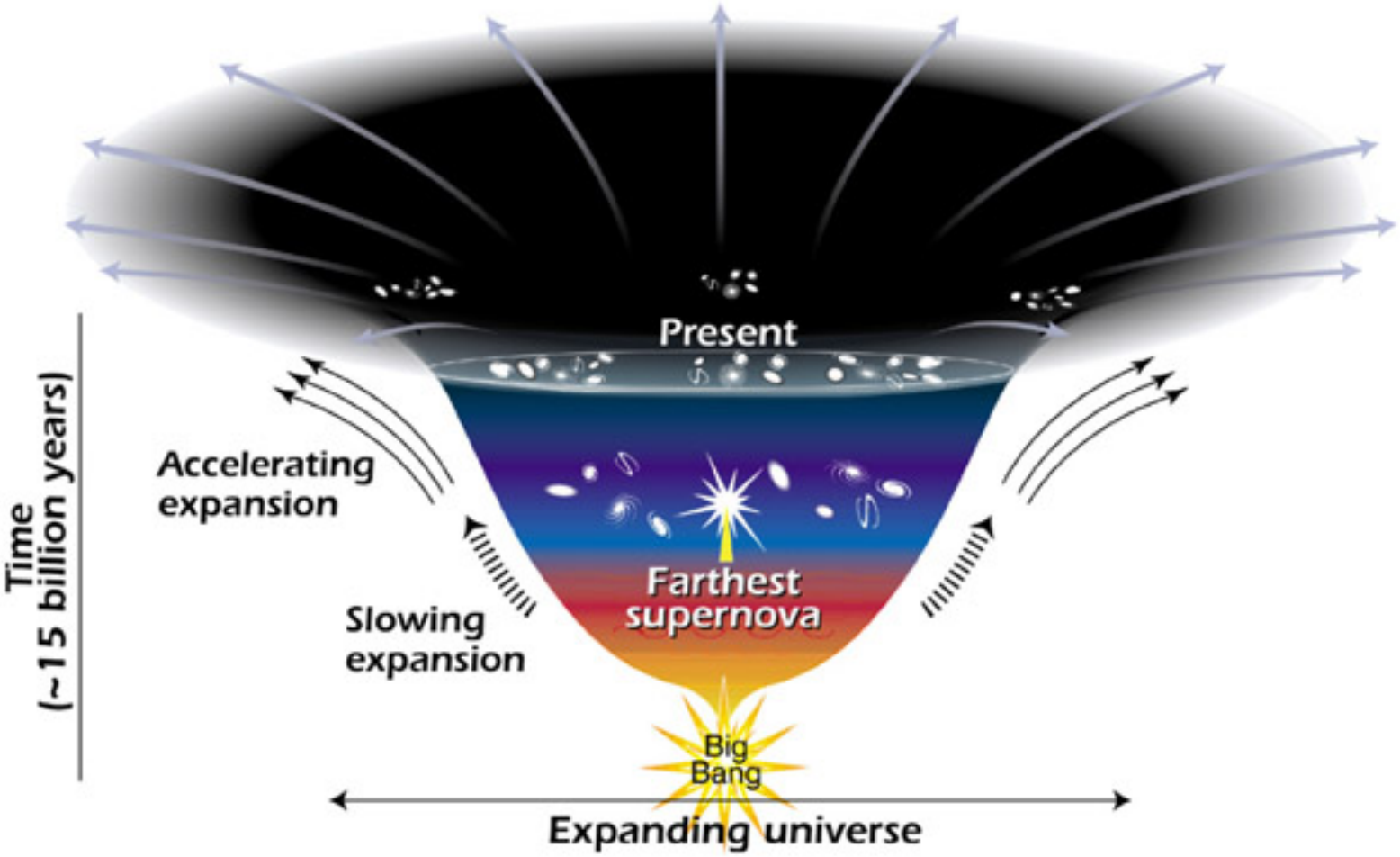
PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic (Electroweak)	Strong: Fundamental	Strong: 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^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
Strength relative to electromag for two u quarks at: 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20



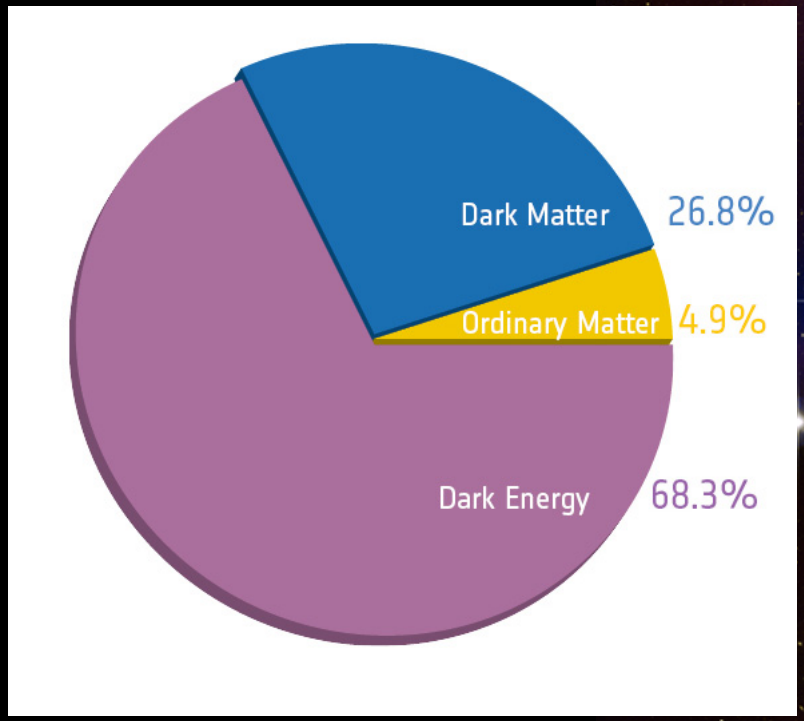

The Big Bang
15 thousand million years
1 thousand million years
300 thousand years
3 minutes
1 second
10^{-10} seconds
10^{-34} seconds
10^{-43} seconds
10^{32} degrees
10^{27} degrees
10^{15} degrees
10^{10} degrees
10^{9} degrees
6000 degrees
18 degrees
3 degrees K
radiation
particles
W+ W- Z heavy particles carrying the weak force
quark
anti-quark
electron
positron (anti-electron)
proton
neutron
meson
H hydrogen
D deuterium
He helium
Li lithium


Temperature (degrees K)
10^{34}
10^{27}
10^{15}
10^{13}
10^{10}
10^{9}
10^{6}
3000
3
spacetime foam
quarks, leptons created
inflation
4 forces established
leptons slpit into neutrinos and electrons
gravity governs expansion
quarks make protons/neutrons
neutrinos decouple
electrons and positrons annihilate
leaving small number of unmatched electrons
fusion of H and He
photons decouple = CMB
galaxies, stars
planets form
Supergravity
gravitational force
Grand
Unified
Force
Electroweak
force
weak force
electromagnetic
force
strong nuclear force
gravitons
photons
black holes
leptons
neutrinos/anti-neutrinos
electrons/positrons
electrons
quarks
protons
neutrons
76% hydrogen
24% helium
10^{-43} sec
10^{-35} sec
10^{-12} sec
10^{-6} sec
1 sec
15 sec
1 min
500,000 yrs
13 billion yrs
Age of the Universe



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.

Materia ed Energia oscura



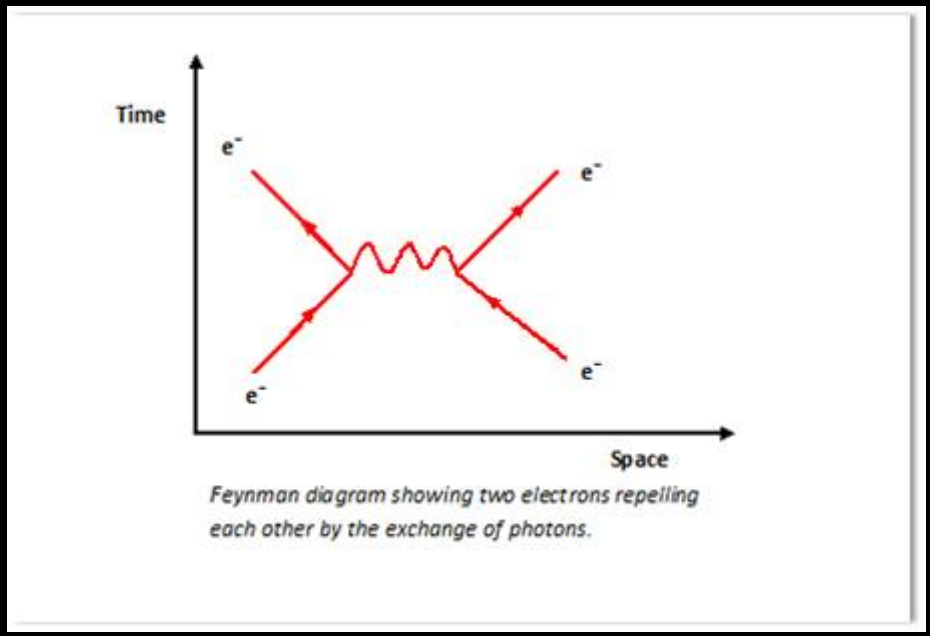
Nelle galassie c'e' piu' materia (blu) di quella che vediamo (rossa):
Materia stimata dalla dinamica delle galassie o dal gravitational lensing

Forze e particelle

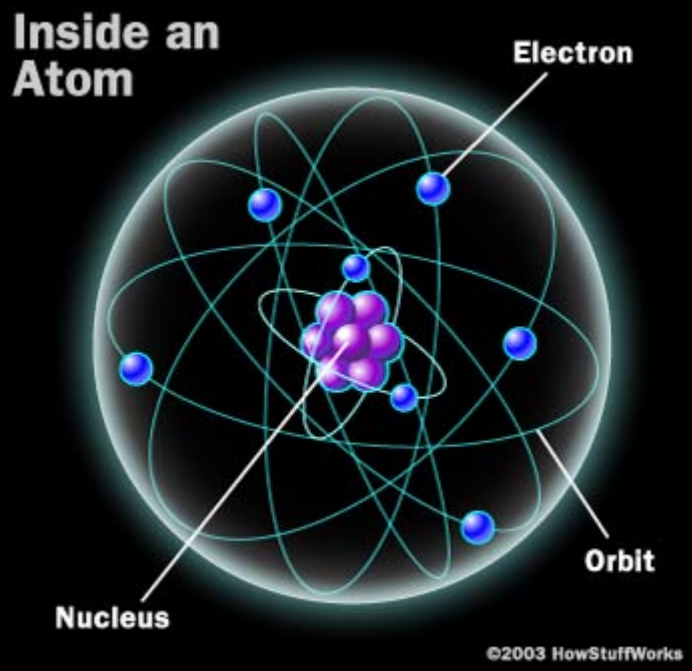
- Le interazioni tra particelle avvengono per scambio di altre particelle di spin 1 o 2 (bosoni):
  - i mediatori della forza
- Forza elettromagnetica:
  - Fotone
- Forza debole:
  - W^+, W^-, Z^0
- Forza forte:
  - Gluoni (8 tipi)

Forza e.m.

- Due elettroni (stessa carica) che si respingono si scambiano fotoni
- Anche in un atomo il nucleo (positivo) e gli elettroni si scambiano fotoni

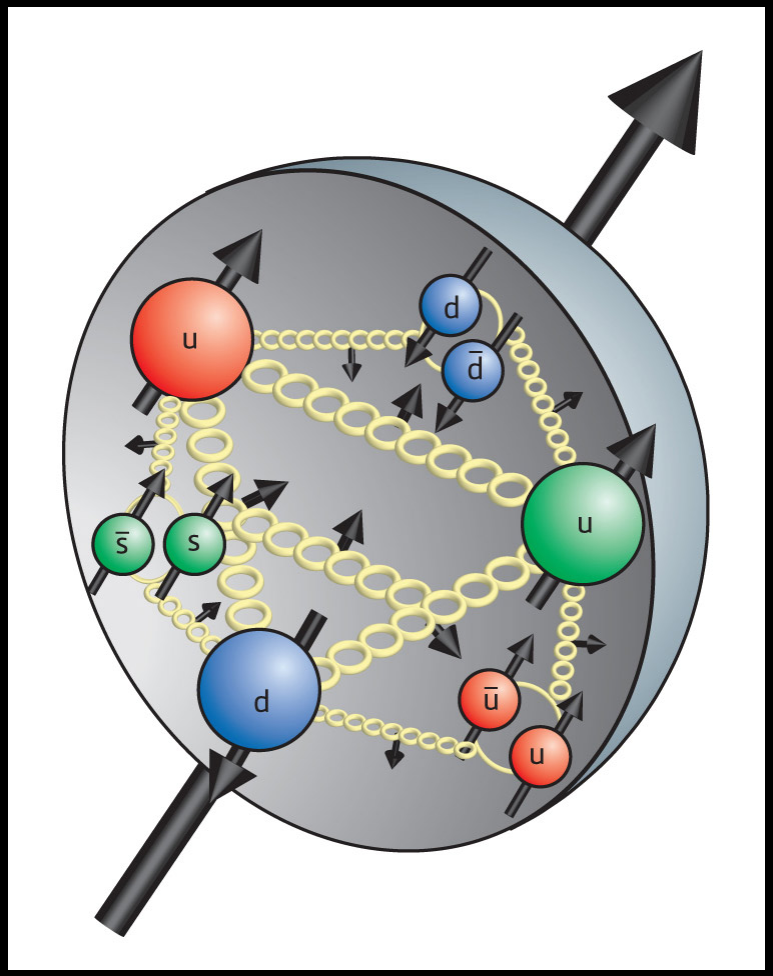


Feynman diagram showing two electrons repelling each other by the exchange of photons.



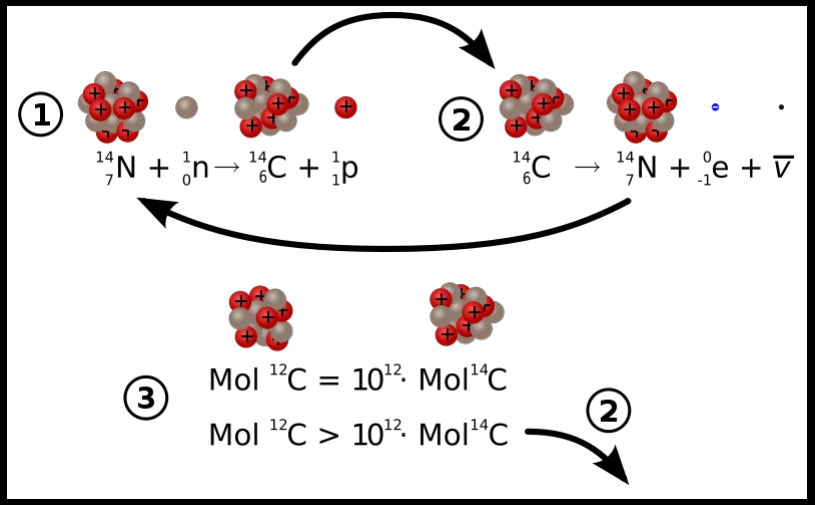
Forza forte

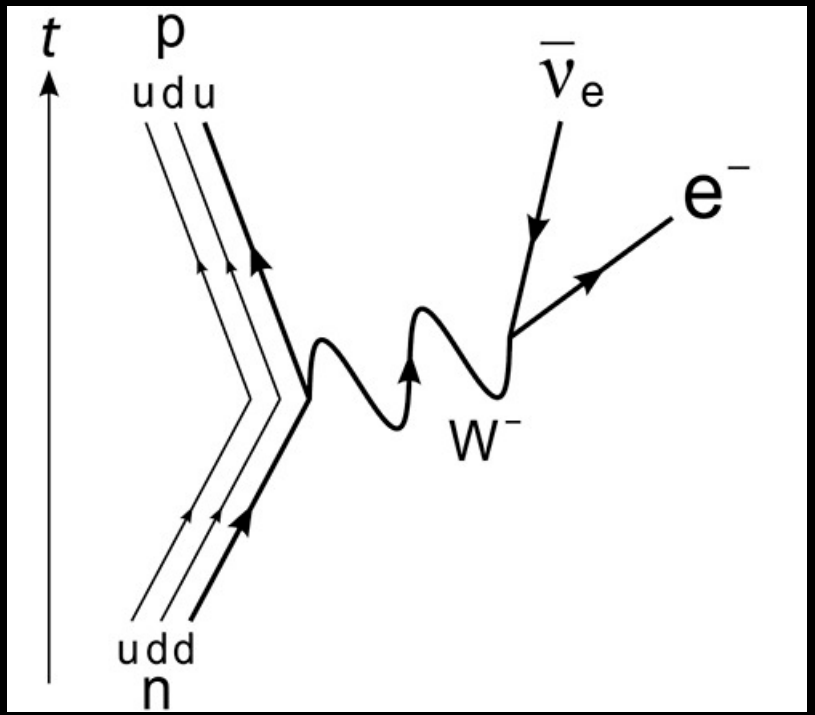
- Per esempio, e' la forza che tiene insieme i quark in un protone:
  - p: uud
- I quark si scambiano gluoni
- I quark possono avere 3 cariche (colori): Red, Green, Blue
  - I 3 colori si sommano a dare il "bianco"
- Solo combinazione bianche sono osservabili:
- 3 quarks: protone
  - Red + Green + Blue
- 2 quark: pione
  - Per esempio, Red + anti-Red
- La carica di colore si conserva nell'interazione:
  - Servono 8 gluoni



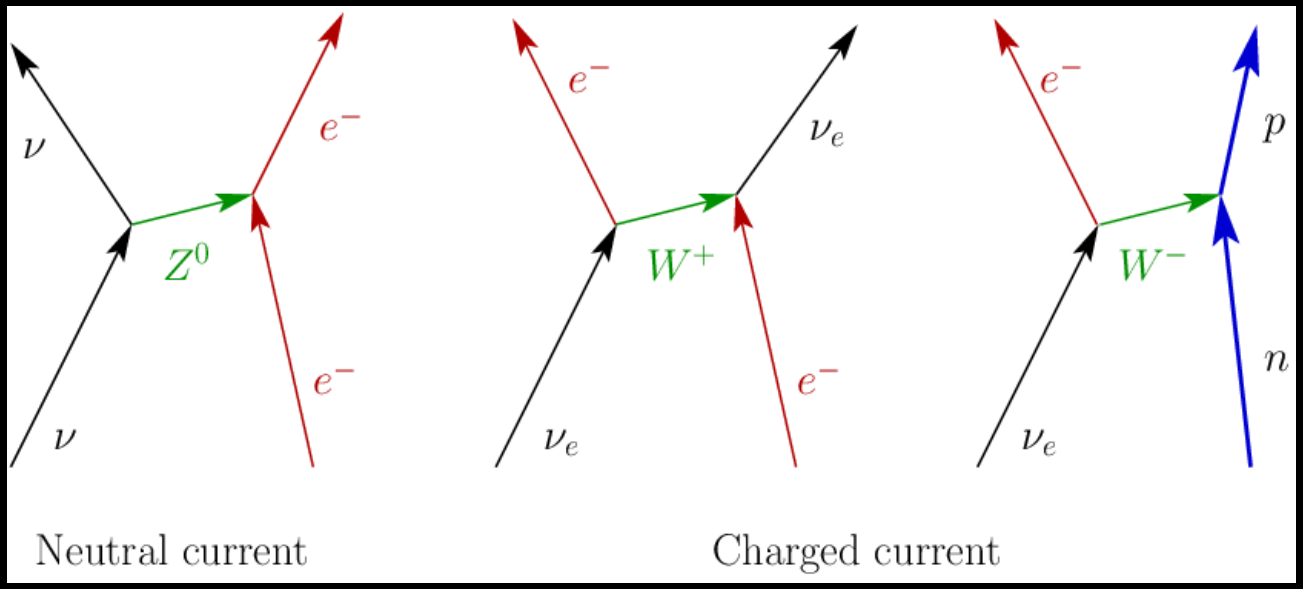
Forza Debole

- Un esempio e' il decadimento β^- del Carbonio-14 in Azoto-14:
- $^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + e^- + \nu_e$
- Processo mediato da un W^-
- Forza debole carica





Forza debole



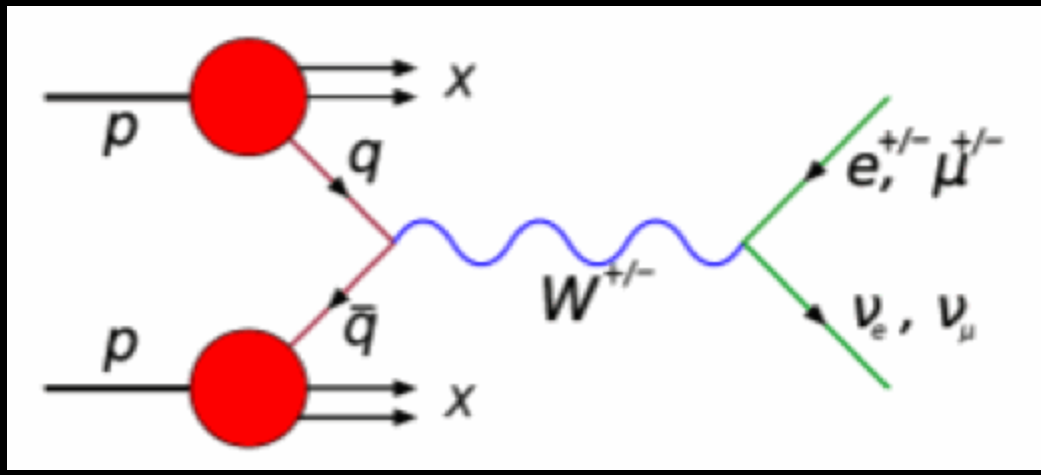
- Corrente debole neutra
- Uno dei metodi di rivelazione dei neutrini:
  - Nell'interazione con la materia, i neutrini urtano un elettrone trasferendogli energia
  - L'elettrone puo' essere accelerato ad energie relativistiche ed emettere radiazione (luce Cherenkov) che puo' essere rivelata da appositi dispositivi

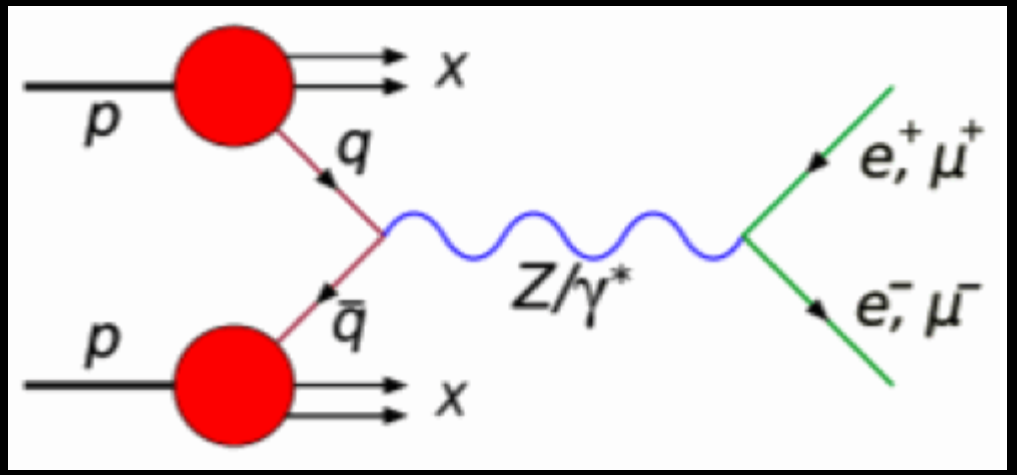
Interazioni deboli

- 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 al Tevatron

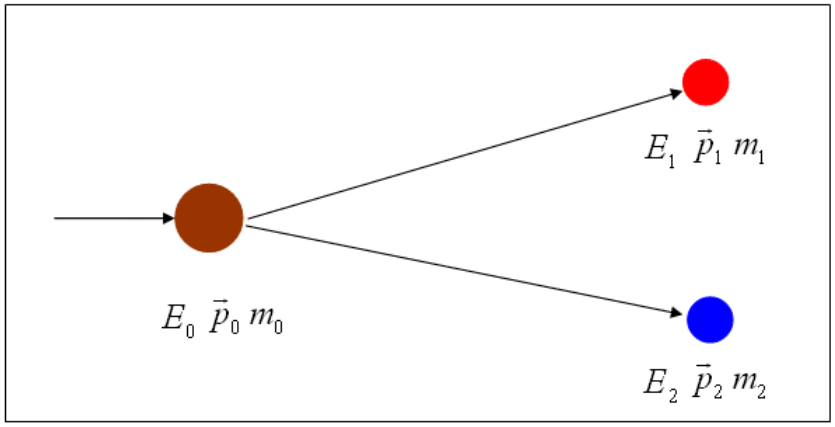
Produzione di W e Z

- A LHC in urti protone-protone
- I bosoni hanno una vita media cortissima (~10^{-25}s) e decade subito in altre particelle
- I prodotti del decadimento possono essere rivelati





Massa invariante



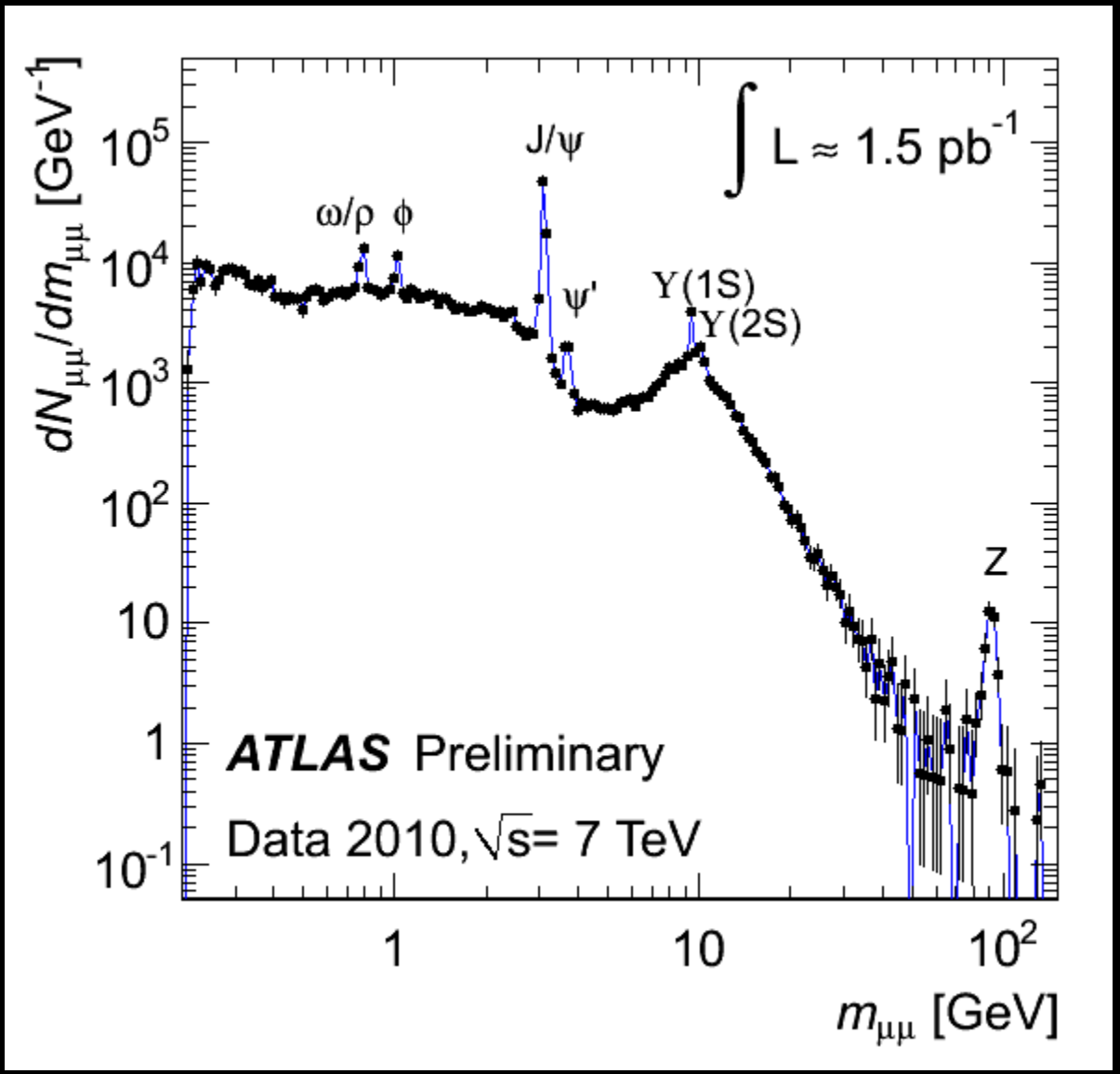
$$(E_0, p_{x0}, p_{y0}, p_{z0}) = (E_1, p_{1x}, p_{1y}, p_{1z}) + (E_2, p_{2x}, p_{2y}, p_{2z}) = (E_1 + E_2, p_{1x} + p_{2x}, p_{1y} + p_{2y}, p_{1z} + p_{2z})$$

$$\Rightarrow \quad E_0^2 - (\overrightarrow{p_0}c)^2 = (m_0c^2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\overrightarrow{p_1}c + \overrightarrow{p_2}c)^2$$

$$\Rightarrow \quad m_0c^2 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\overrightarrow{p_1}c + \overrightarrow{p_2}c)^2}$$

- Dai vettori quantita' di moto dei due prodotti di decadimento si puo' ricostruire la particella iniziale
- In realta' poiche' 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:
  - $M^2 = (E_1+E_2)^2 - |\mathbf{p_1}+\mathbf{p_2}|^2 = m_1^2+m_2^2+2(E_1E_2-\mathbf{p_1}\mathbf{p_2})$
- Massa "invariante" perche' e' la stessa in tutti i sistemi di riferimento legati da una trasformazione di Lorentz

Spettro di massa invariante



ρ(770) 775.26±0.25 MeV

ω(782) 782.65±0.12 MeV

ϕ(1020) 1019.461±0.019 MeV

J/ψ 3096.916±0.011 MeV

ψ' 3686.109+0.012−0.014 MeV

Υ(1S) 9460.30±0.26 MeV

Υ(2S) 10023.26±0.31 MeV

Proprieta' W e Z

- Massa M (GeV/c^2):
  - W: 80.385 ± 0.015
    Z: 91.1876 ± 0.0021
- Ampiezza Γ (GeV/c^2):
  - W: 2.085 ± 0.042
  - Z: 2.4952 ± 0.002

W^+ DECAY MODES

W^- modes are charge conjugates of the modes below.

	Mode		Fraction (Γ_i/Γ)
Γ_1	$\ell^+\nu$	[a]	(10.80± 0.09) %
Γ_2	$e^+\nu$		(10.75± 0.13) %
Γ_3	$\mu^+\nu$		(10.57± 0.15) %
Γ_4	$\tau^+\nu$		(11.25± 0.20) %
Γ_5	hadrons		(67.60± 0.27) %

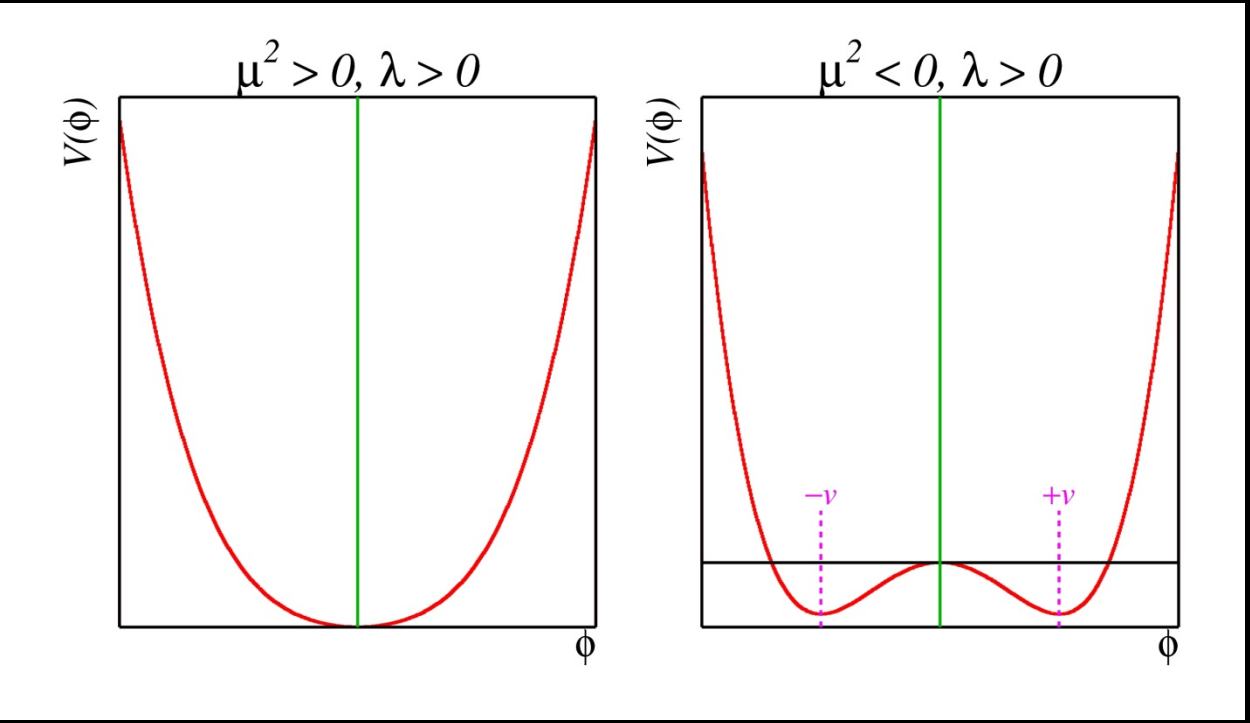
Z DECAY MODES

	Mode		Fraction (Γ_i/Γ)	Con
Γ_1	e^+e^-		(3.363 ±0.004) %	
Γ_2	$\mu^+\mu^-$		(3.366 ±0.007) %	
Γ_3	$\tau^+\tau^-$		(3.370 ±0.008) %	
Γ_4	$\ell^+\ell^-$	[a]	(3.3658±0.0023) %	
Γ_5	$\ell^+\ell^-\ell^+\ell^-$	[b]	(4.2 $^{+0.9}_{-0.8}$) $\times 10^{-6}$	
Γ_6	invisible		(20.00 ±0.06) %	
Γ_7	hadrons		(69.91 ±0.06) %	

La massa dei bosoni W e Z

- Unici bosoni con massa non nulla
- Ad alte energie (nei primi istanti dopo il Big Bang) i bosoni W e Z avevano (come tutte le altre particelle) una massa nulla:
  - W^+, W^-, W^0, B^0
- Inoltre la forza debole e la forza elettromagnetiche erano unificate:
  - Simmetria elettrodebole
- Per spiegare l'origine delle masse e' stato introdotto il meccanismo di Higgs
- Tutto lo spazio e' permeato da un campo di Higgs (e deve esistere una corrispondente particella di Higgs)
- Diminuendo l'energia il campo di Higgs assume un valore di aspettazione non nullo:
  - La simmetria elettrodebole si rompe
  - i bosoni di gauge interagiscono col campo di Higgs e si ricombinano in W^+,W^-, Z^0 (massivi) e il fotone (massa nulla)
  - Il bosone di Higgs assume una massa interagendo con se stesso
  - I fermioni interagiscono col campo di Higgs e assumono massa: l'accoppiamento col campo di Higgs e' proporzionale alla massa della particella

Meccanismo di Higgs



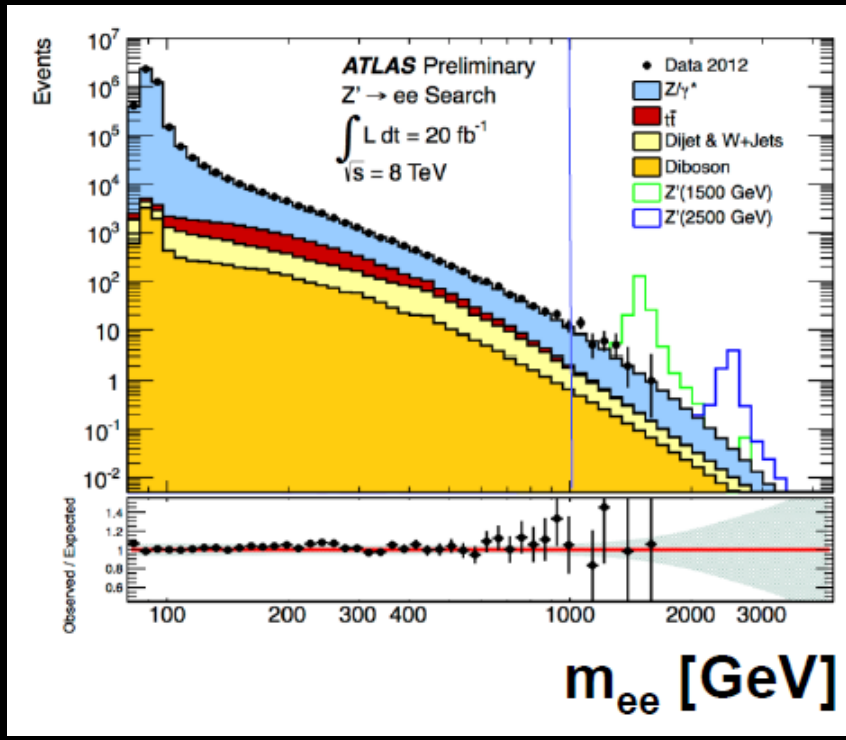
- Meccanismo verificato con la scoperta del bosone di Higgs per opera degli esperimenti ATLAS e CMS al CERN nel 2012

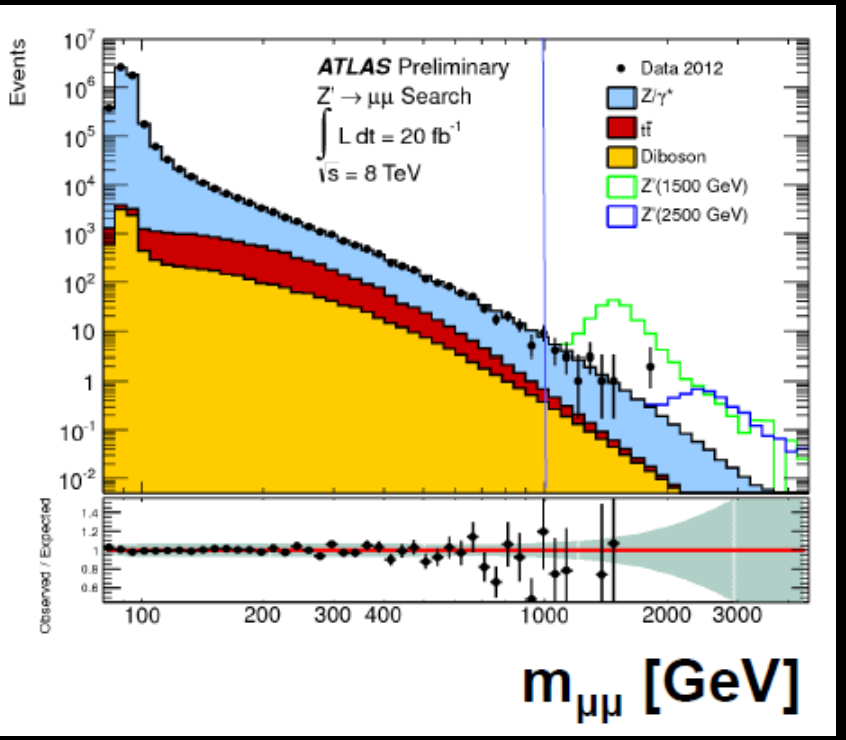
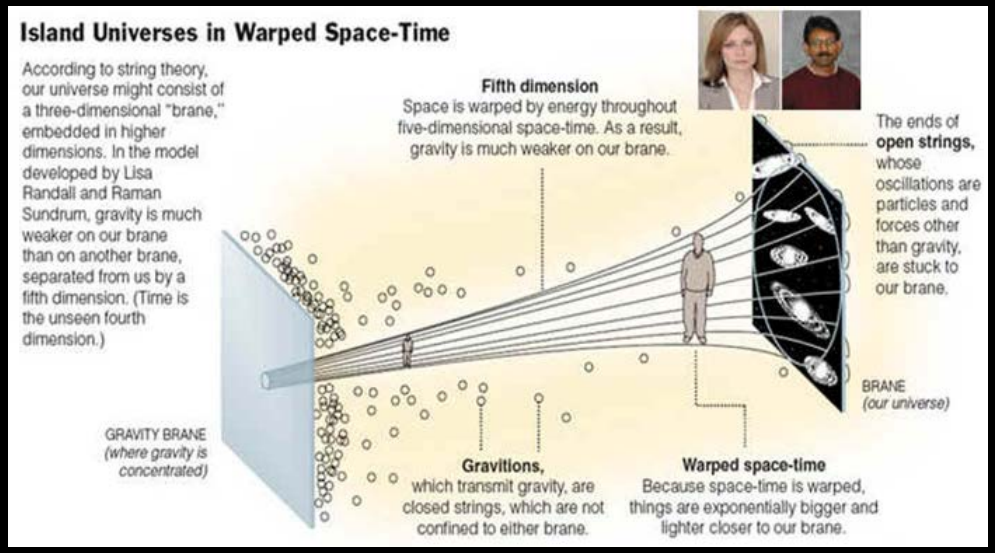
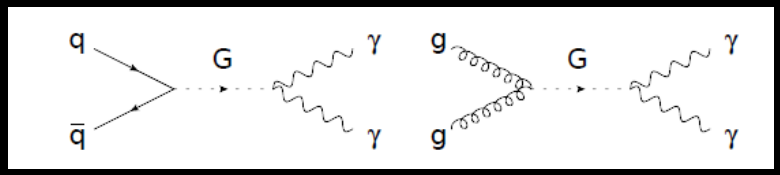
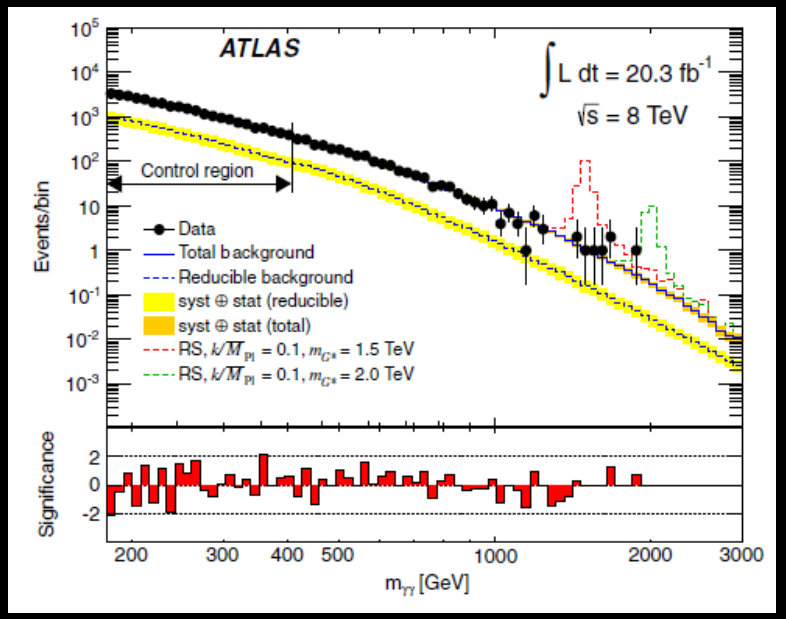
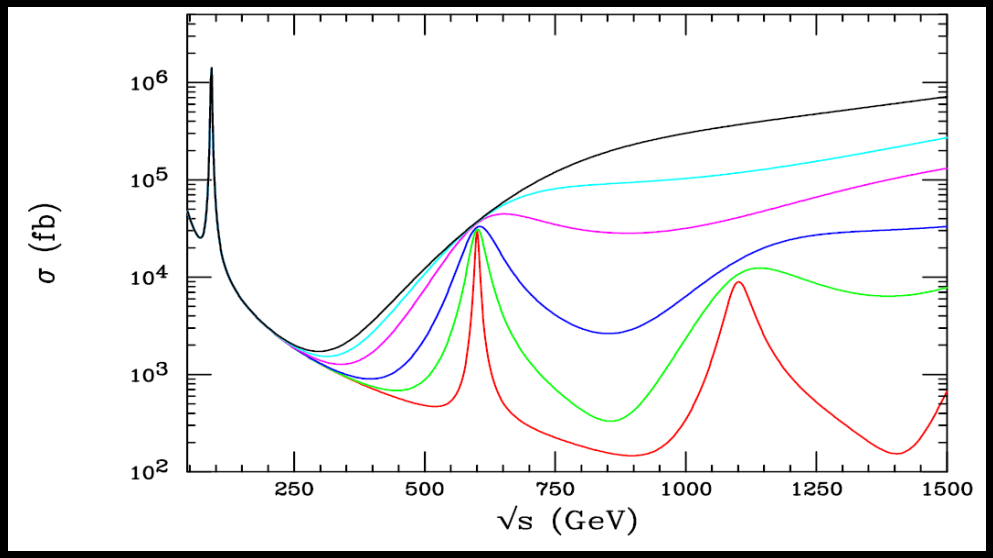
Oltre il Modello Standard

- SUPERSIMMETRIA:
  - Ogni particella “ORDINARIA” e’ accompagnata da una particella partner SUPERSIMMETRICA
  - Nuova simmetria che lega bosoni (spin intero) a fermioni (spin 1/2)
  - Ogni particella di un gruppo ha un partner (superpartner) dell’altro gruppo
  - Perche’ la materia rimanga stabile si devono porre restrizioni che implicano che la particella SUSY piu’ leggera (NEUTRALINO) sia stabile
  - Il neutralino costituisce un buon candidato di WIMP
- TEORIE CON NUOVE DIMENSIONI SPAZIALI:
  - Oltre alle usuali 3 dimensioni spaziali, ne esistono altre (EXTRA DIMENSIONS)

Altre ricerche

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





Due γ ad alta massa