

ALCUNI CONCETTI DI FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

F. Tartarelli (INFN-Milano)

Masterclass 2016

Milano, 15/02/2016

Benvenuti alle International Masterclasses
Hands on particle physics
12th Masterclasses 2016

3^a edizione Milano (INFN+UNIMI)
15/02/2016 e 02/03/2016

Masterclasses

- ◎ 12th edizione: dal 11/02 al 23/03/2016
- ◎ Per un giorno introdurre studenti liceali alla ricerca, dando loro la possibilità' di lavorare come dei fisici sperimentali e fianco a fianco con dei ricercatori:
 - analizzare veri dati sperimentali
 - dati dell'esperimento ATLAS a LHC (CERN) nel nostro caso
- ◎ Progetto che coinvolge 10.000 studenti liceali in 45 nazioni nel mondo e 200 Università' 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'Università degli Studi di Milano

(*) delle particelle elementari e delle interazioni fondamentali

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

PORTALE INFN SERVIZI ELENCO TELEFONICO

Info Cerca...

HOME ISTITUTO STRUTTURE ESPERIMENTI PROGETTI COMUNICAZIONE OPPORTUNITÀ DI LAVORO

COMUNICATI STAMPATI 1 2 3 4 5

STUDENTI DELLE SUPERIORI ALLE PRESE CON I VERI DATI DEL CERN

Sono quasi 3000, quest'anno, gli studenti delle scuole superiori di tutta Italia che, in contemporanea con i loro coetanei di tutto il mondo tra l'11 febbraio e il 23 marzo, potranno conoscere dal vivo

LINEE DI RICERCA

- 1 fisica delle **PARTICELLE**
- 2 fisica delle **ASTROPARTICELLE**
- 3 fisica **NUCLEARE**
- 4 fisica **TEORICA**
- 5 ricerca **TECNOLOGICA**

what NEXT?

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

pubblico

la Comunità

Fondi Esterni

DIRECTOR OF THE INFN CALL



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Sezione di Milano

Via Celoria 16 - 20133 MILANO

Masterclass 2016 - Milano

15 Febbraio
2 Marzo

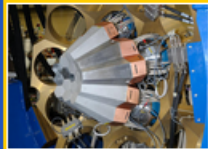


Cerca nel sito

L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) è un Ente Pubblico di Ricerca fondato nel 1951. È uno dei più prestigiosi ed importanti Istituti di ricerca italiani ed i suoi compiti istituzionali sono la conduzione, il finanziamento ed il coordinamento della ricerca fondamentale nei campi della fisica nucleare, subnucleare ed astroparticellare.

[Laboratori e sezioni](#) dell'INFN si trovano in molte città italiane. Questo è il sito Web della Sezione INFN di [Milano](#).

Nel caso desideriate *veramente* raggiungere la vecchia home-page della Sezione di Milano, è disponibile [qui](#).



Chi siamo

- » [Il sito principale dell'INFN](#)
- » [Unità e Laboratori dell'INFN](#)
- » [Il Direttore](#)
- » [Milano](#)
- » [Laboratorio Acceleratori e Superconduttività applicata \(LASA\)](#)
- » [INFN - Bicocca](#)
- » [LHC Italia](#)
- » [Come contattare l'INFN a Milano \(incluso indirizzo PEC\)](#)

Gruppi di ricerca

- I: [Fisica subnucleare sperimentale con acceleratori](#)
- II: [Fisica Astroparticellare e Fisica del Neutrino](#)
- III: [Fisica nucleare sperimentale](#)
- IV: [Fisica teorica](#)
- V: [Ricerca tecnologica](#)
- [Progetti speciali INFN](#)

Programma della giornata

- ⊙ Ore 9.30:
 - Registrazione - Sala Consiglio
 - Benvenuto del Direttore del Dipartimento di Fisica
- ⊙ Ore 10.15:
 - 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
 - Incontro con i docenti
- ⊙ Ore 16.00:
 - Videoconferenza con gli altri gruppi di lavoro partecipanti all'evento:
- ⊙ Ore 17.30:
 - Fine Lavori

15.02. - 19.02.

	Mon, Feb 15	Tue, Feb 16	Wed, Feb 17	Thu, Feb 18	Fri, Feb 19	Sat, Feb 20
topic	VC 1: ATLAS Z	VC 1: LHCb	VC 1: ATLAS Z	VC 1: ATLAS W	VC 1: ALICE S.P.	
moderators	Javier	Suzanne	Michael H.	Christin Gum.	N.N.	
moderators	Ina	Ana	Arturo	Jelena	N.N.	
	Milano 	Amsterdam 	London QM 	Bragança 	Trieste 	
	London 	Pavia 	Tübingen 	Nitra 	Cagliari 	
	Banska Bystrica 		Vila Real 	Mainz 	Heidelberg 	
	Pavia 		Krakow 	Cosenza 	Lyon 	
	Barcelona IFAE 		Amsterdam 	Erlangen 	Thessaloniki 	
topic	VC 2: CMS		VC 2: CMS	VC 2: LHCb	VC 2: CMS	
moderators	Marco		David	Suzanne	Maria	
moderators	Rebeca		Marco	Ana	Rosa	
	Aachen 		Alexandria 	Pisa 	Genoa 	
	Cairo 		Firenze 	Paris 	Zagreb 	
	Heidelberg Life Science Lab 		Pavia 	Cagliari 	Istanbul, Ozyegin 	
			Bologna 	Firenze 	Split 	

Un giorno da ricercatore?

◎ Lezioni:

- Studio, aggiornamento continuo
- Seminari, conferenze, articoli,...

◎ Analisi dati:

- Verifica sperimentale: il cuore del metodo scientifico

◎ Scambio di informazioni:

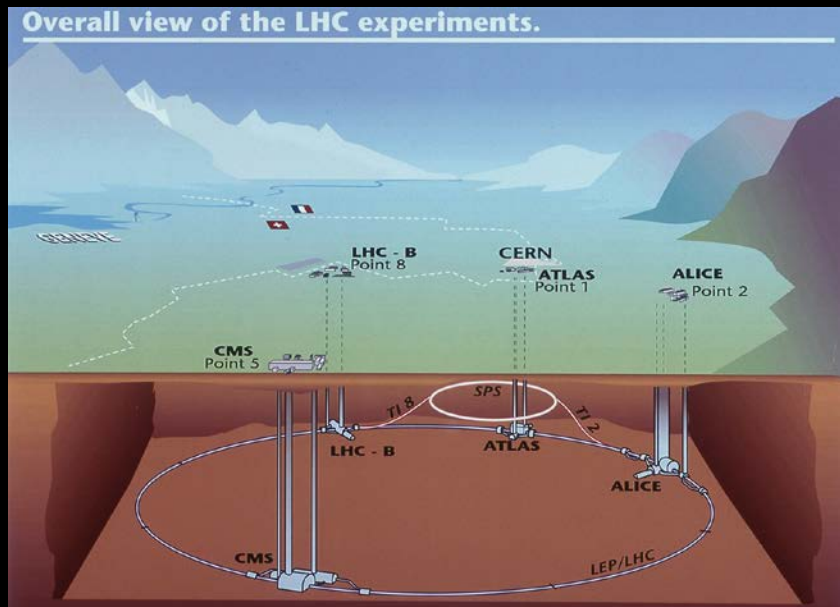
- Discussione dei risultati con colleghi del proprio gruppo di ricerca/esperimento
- Confronto e scambio di informazioni con colleghi di altri esperimenti/gruppi
- Rendere pubblici i risultati delle proprie ricerche con tutti i dettagli così' che tutti possano controllare e/o ripetere gli stessi studi
- La scienza e' «aperta»

CERN

- ◎ Scoperta dei bosoni W e Z nel 1983
 - Nobel per la Fisica a Carlo Rubbia e Simon van der Meer nel 1984
- ◎ Invenzione del World Wide Web
 - Tim Berends-Lee
- ◎ Scoperta del bosone di Higgs nel 2012
 - Nobel per la Fisica nel 2013 a **Peter Higgs & Francois Englert**

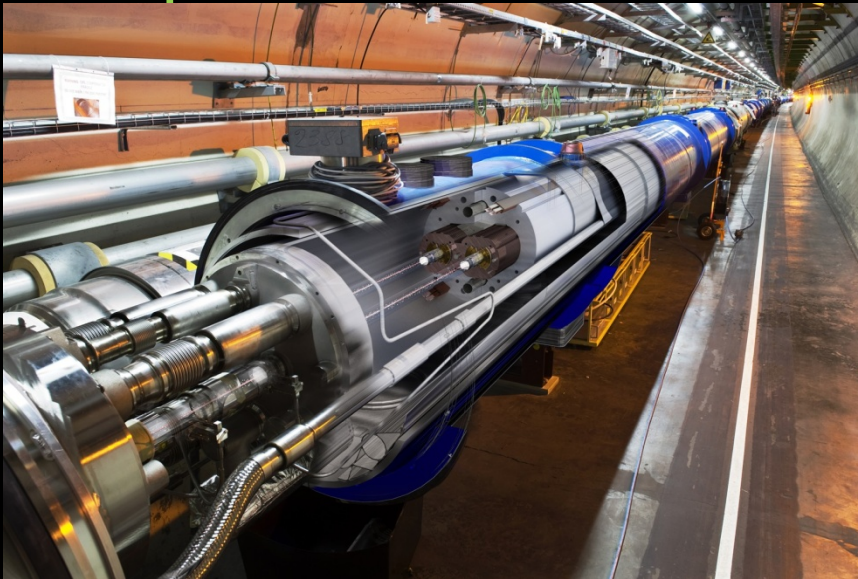
LHC al CERN

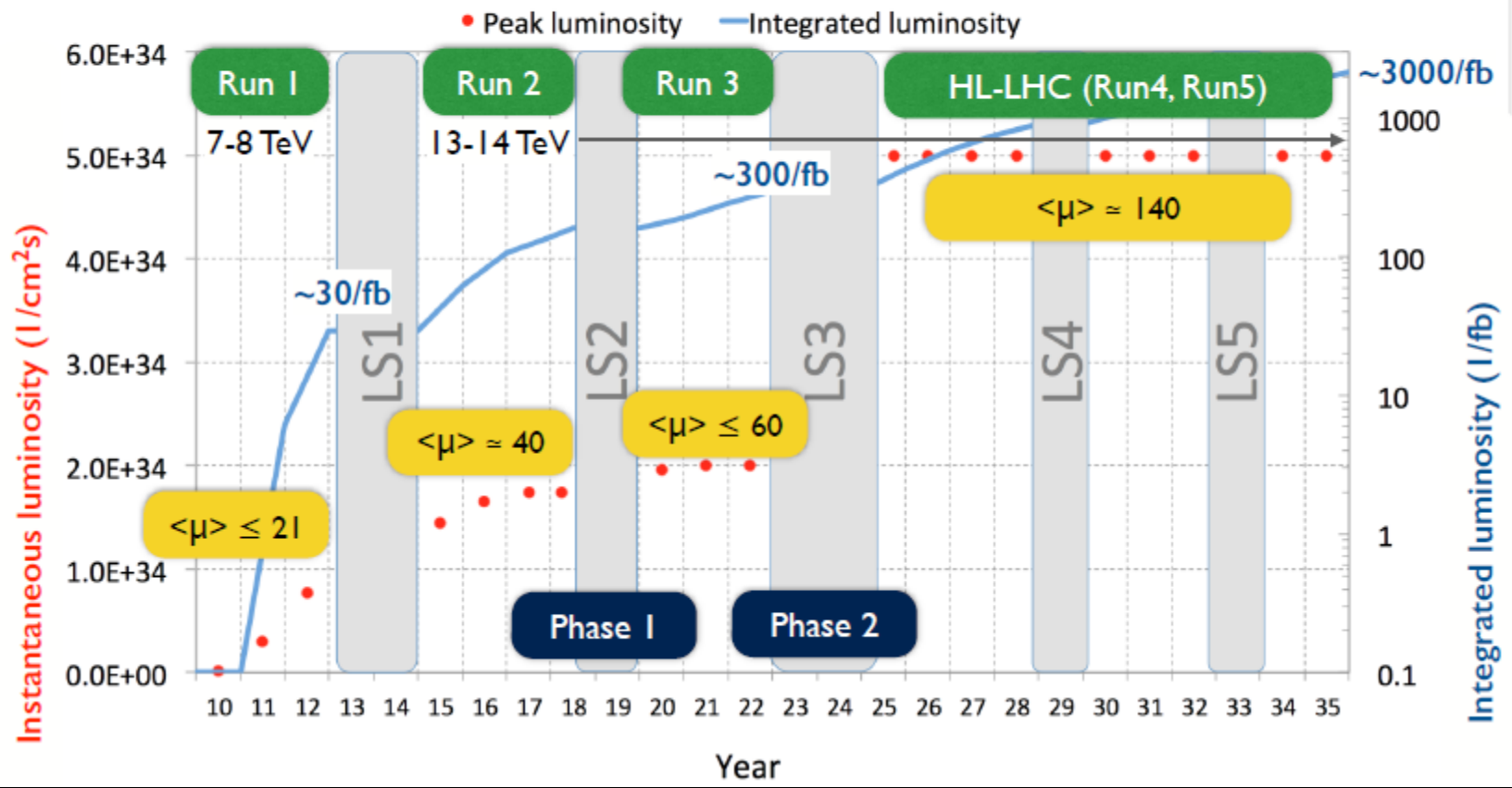
- ⦿ LHC = Large Hadron Collider
- ⦿ Grande collisionatore pp (~27 km di diametro percorsa dai protoni a circa la velocità della luce)
- ⦿ Posto in un tunnel circolare tra la Svizzera e la Francia, vicino Ginevra
- ⦿ 4 sale sperimentali sotterranee per altrettanti esperimenti
- ⦿ **ALICE, ATLAS, CMS,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



LHC

- ⦿ I principali magneti di LHC operano ad una temperatura di 1.9 K (-271.3 °C), piu' freddo dei 2.7 K (-270.5 °C) dello spazio
- ⦿ 10⁴ km di tubi sotto vuoto: e' uno dei sistemi di vuoto piu' grossi al mondo
- ⦿ La pressione nei tubi e' 10⁻¹⁰ to 10⁻¹¹ mbar, un





Future Circular Collider Study

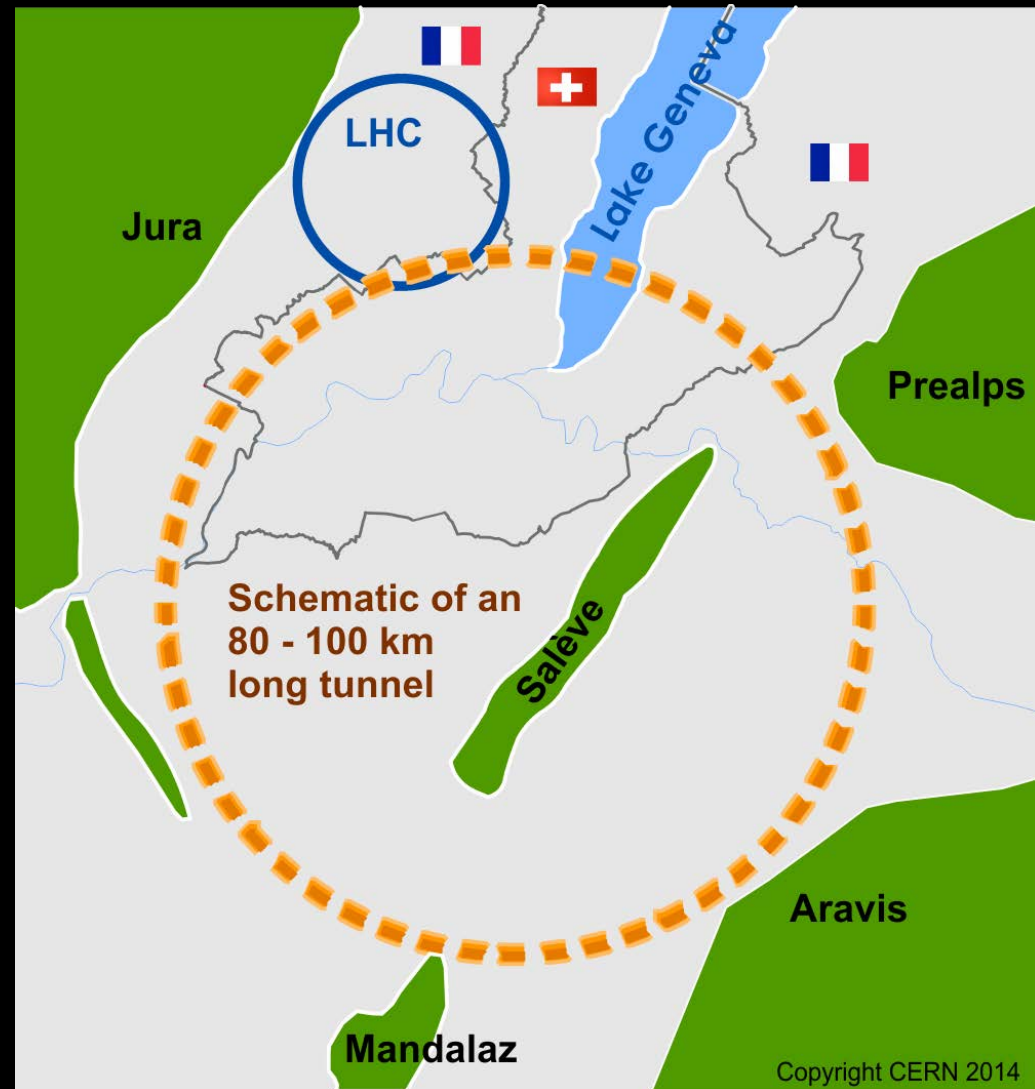
Forming an international collaboration to study:

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

~16 T \Rightarrow 100 TeV pp in 100 km

~20 T \Rightarrow 100 TeV pp in 80 km

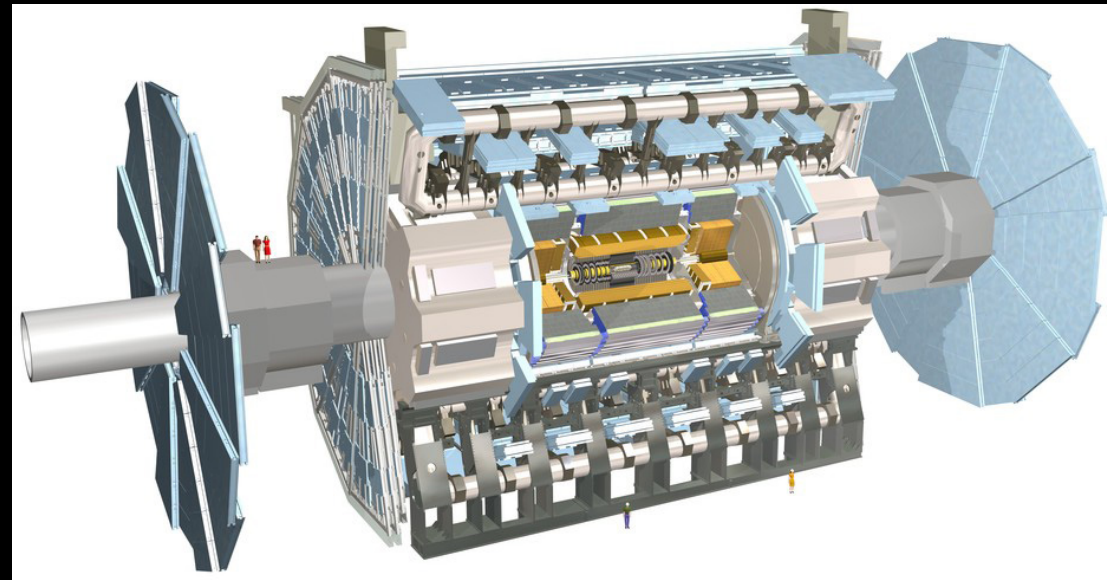
- e^+e^- collider (*FCC-ee*) as potential intermediate step
- $p-e$ (*FCC-he*) option
- 80-100 km infrastructure in Geneva area

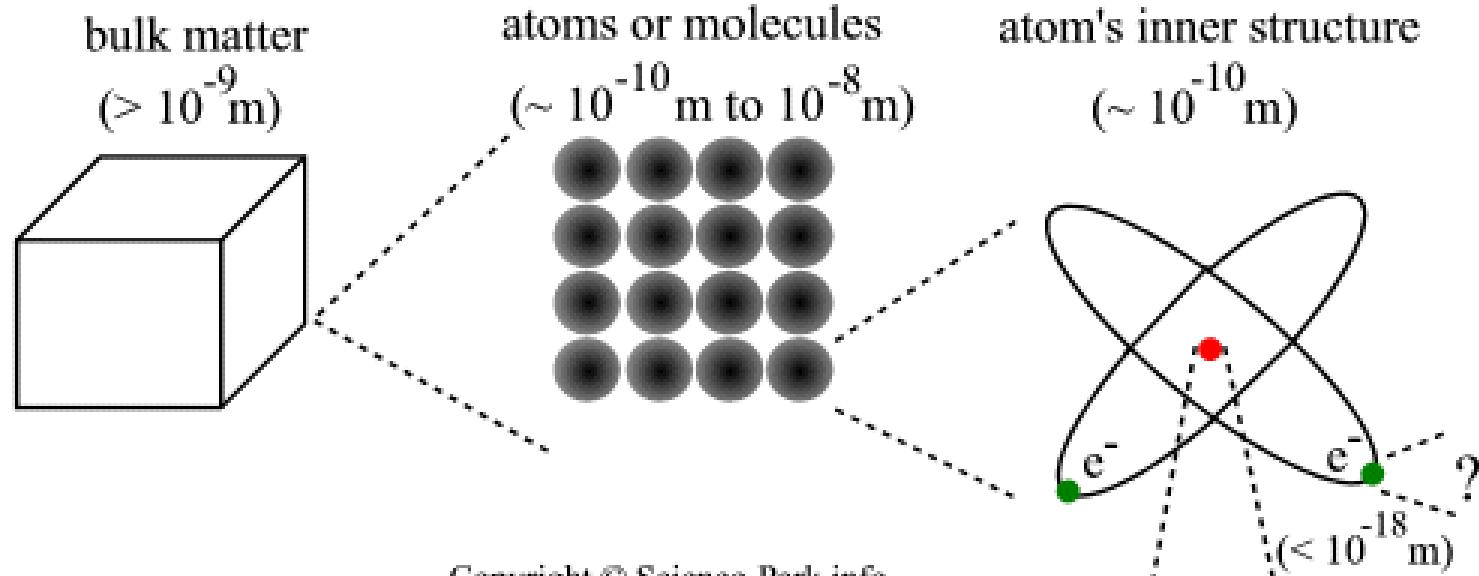


- ◎ Joule (J) come unità di misura dell'energia ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$):
 - Una massa di 100 g ad 1 m da terra ha una energia potenziale di circa 1 J
- ◎ In fisica delle particelle al suo posto si usa una unità più comoda chiamata elettronvolt (eV)
- ◎ energia cinetica acquistata da un singolo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

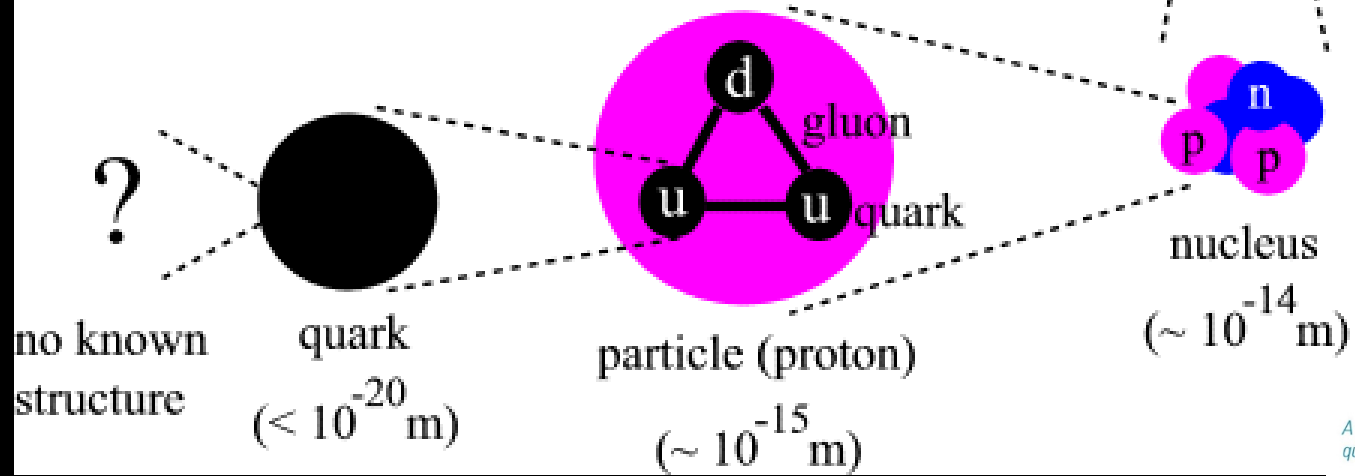
ATLAS

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



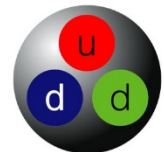
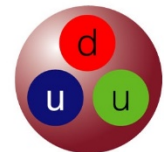


Copyright © Science-Park.info



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).

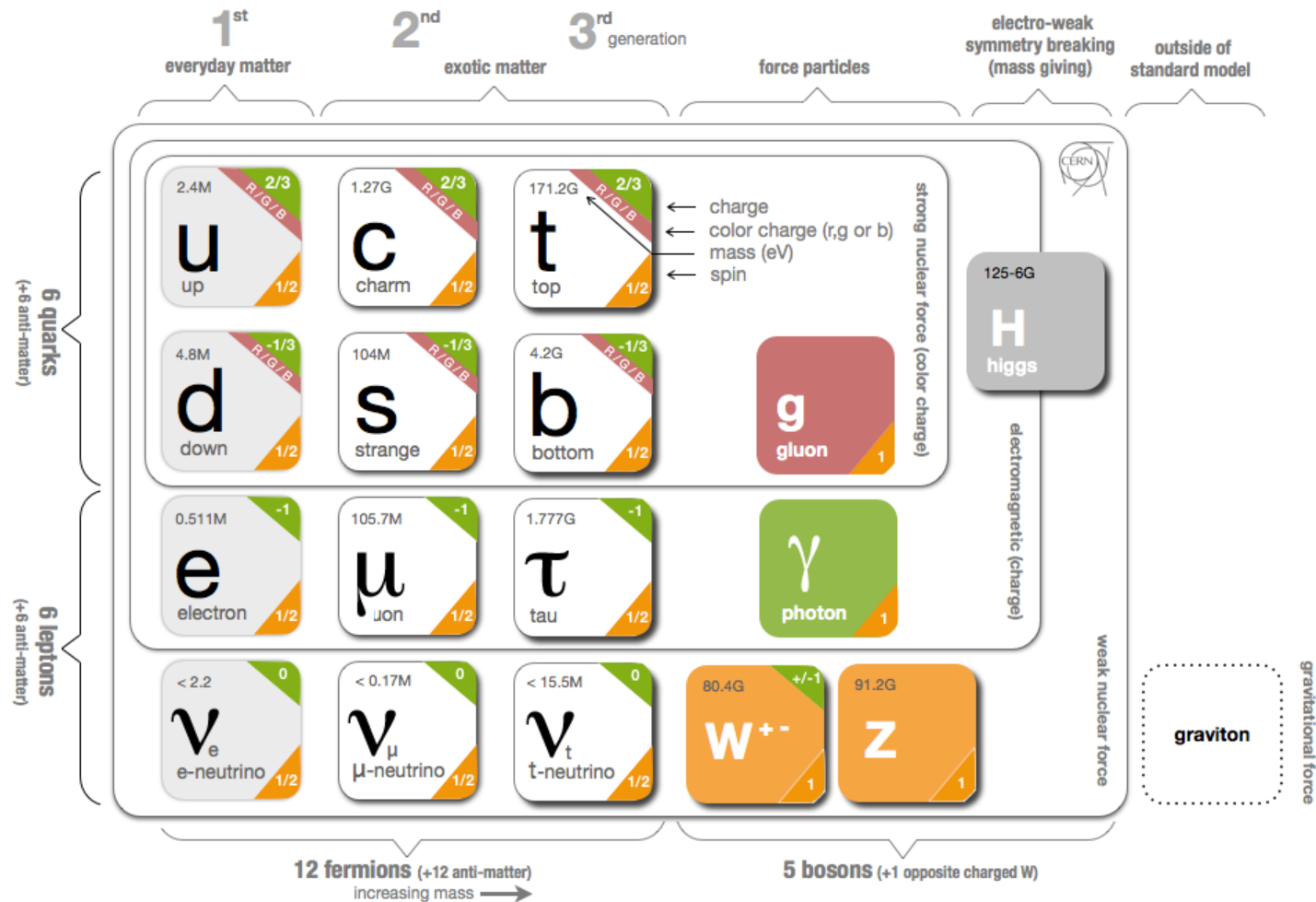


Total charge:
 $+2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$

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

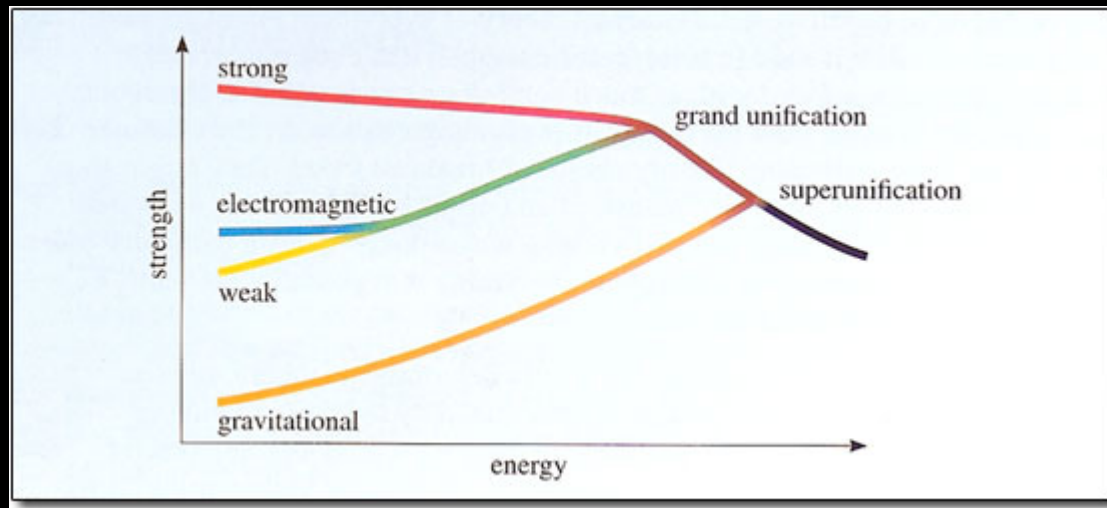
Protone e neutrone ->

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
for two protons in nucleus	10^{-41}	10^{-4}	1	60	20
	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	



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

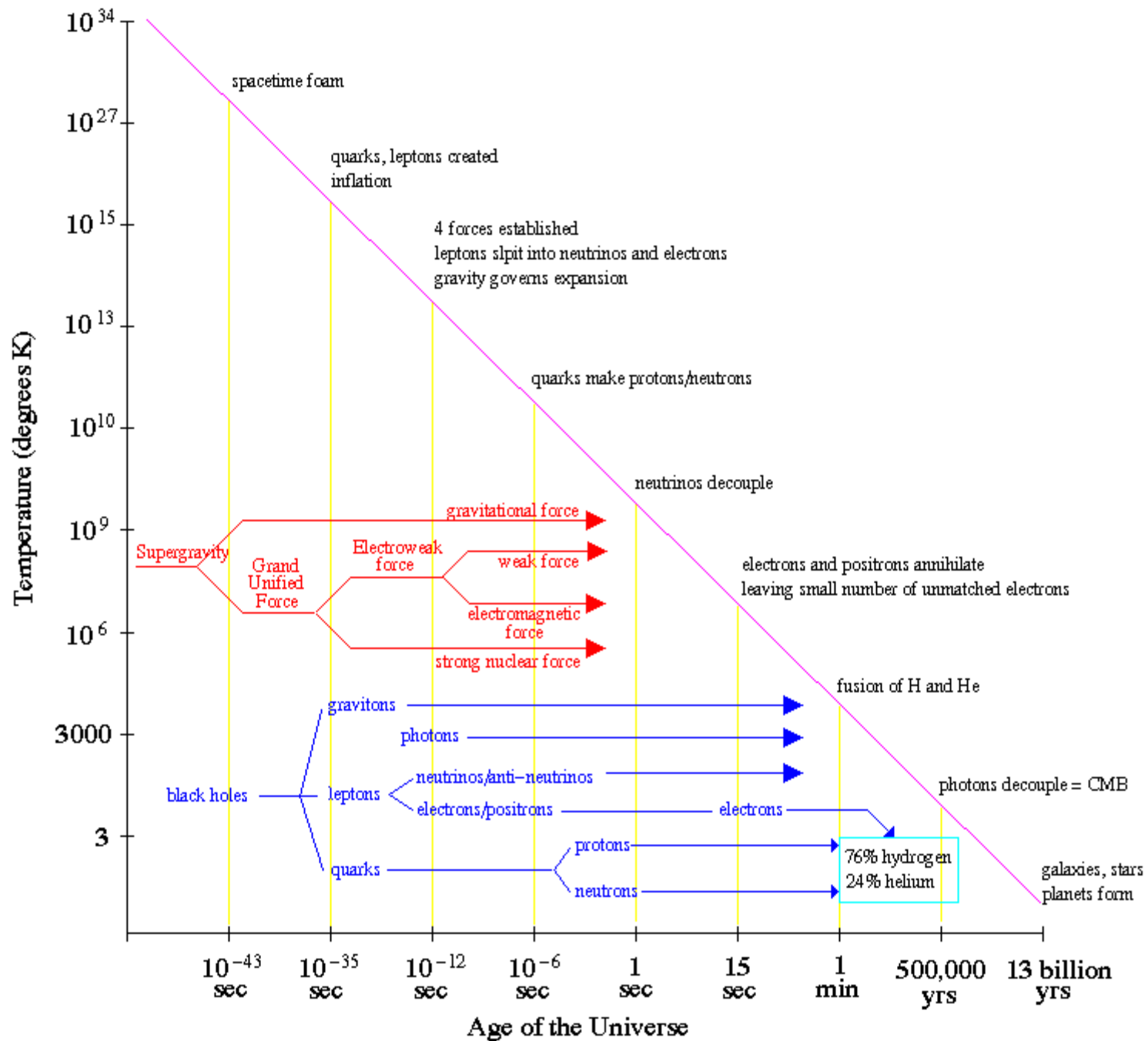
6000 degrees

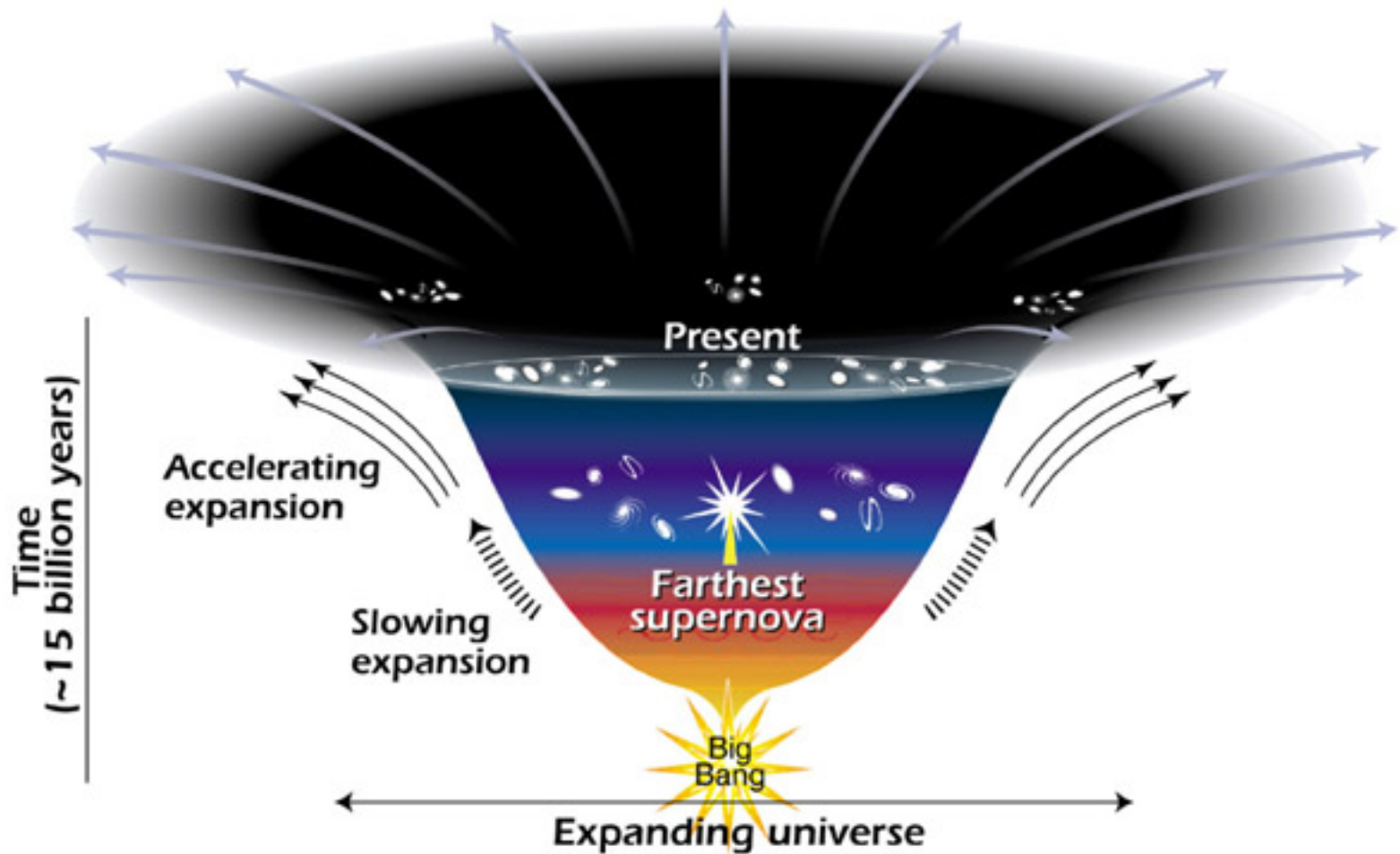
18 degrees

3 degrees K



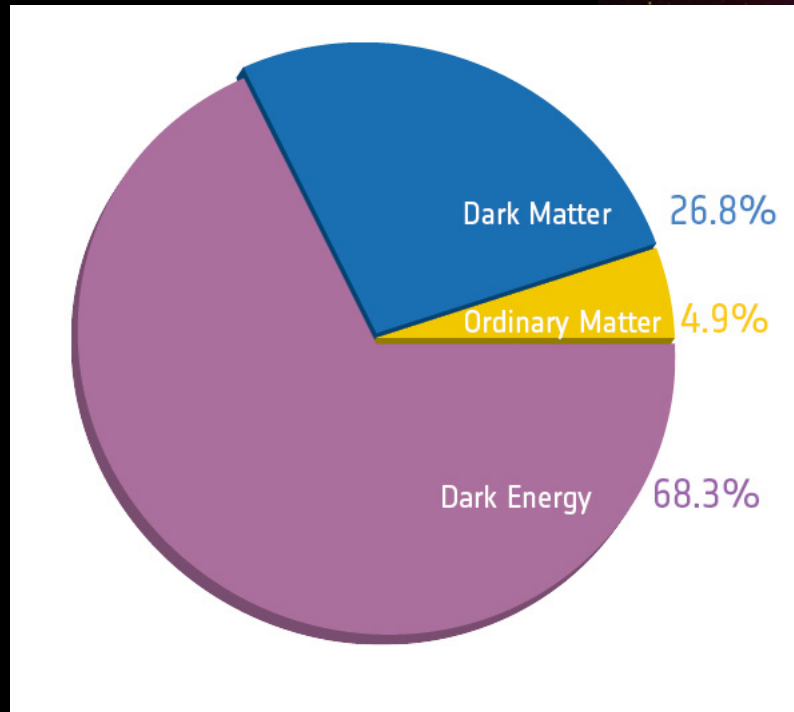
- radiation
- particles
- W^+ } heavy particles carrying the weak force
- W^- }
- Z }
- quark
- anti-quark
- electron
- positron (anti-electron)
- proton
- neutron
- meson
- hydrogen
- deuterium
- helium
- lithium





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'è più materia (blu) di quella che vediamo (rossa):
Materia stimata dalla dinamica delle galassie o dal gravitational lensing

Onde gravitazionali

688 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 22. Juni 1916

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\mu\nu}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

154 Gesamtsitzung vom 14. Februar 1918. — Mitteilung vom 31. Januar

Über Gravitationswellen.

VON A. EINSTEIN.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

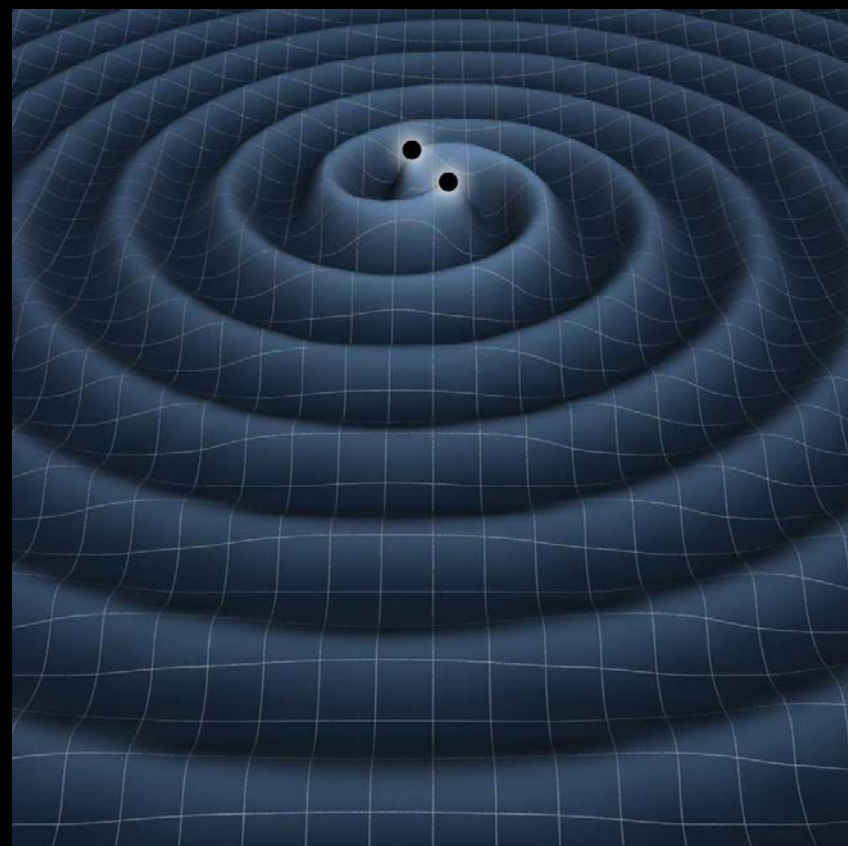
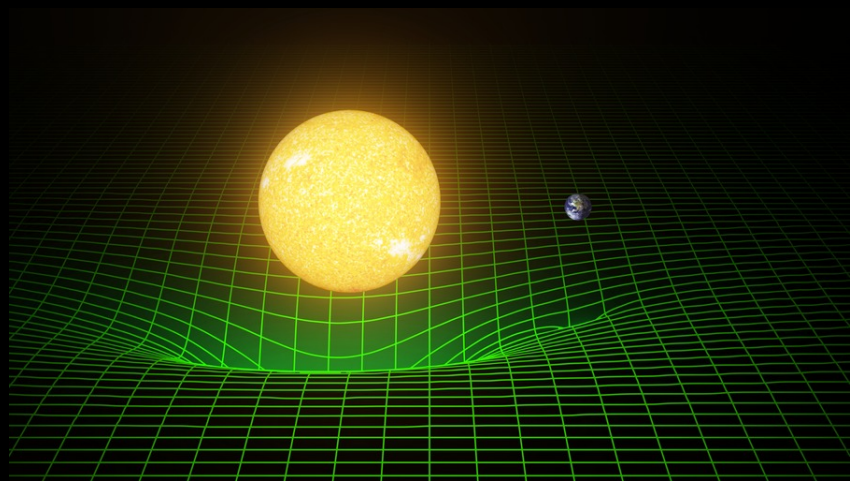
Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

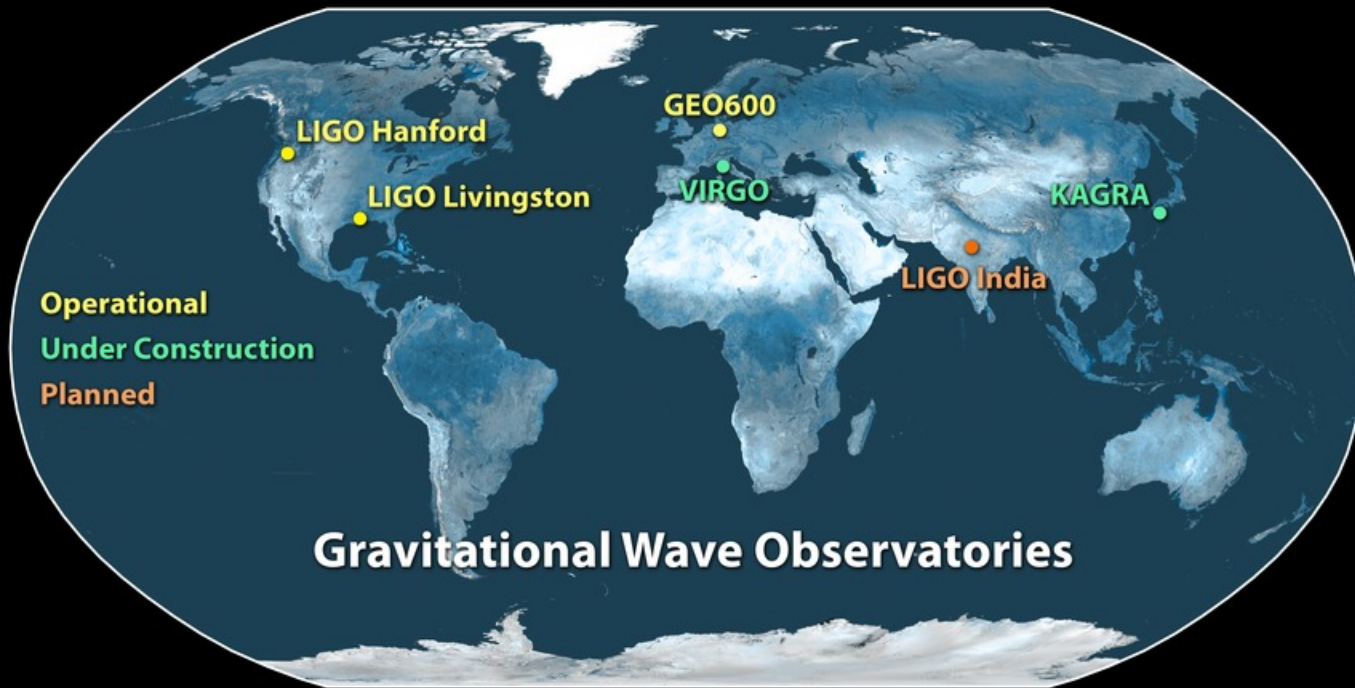
Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem »galileischen« nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

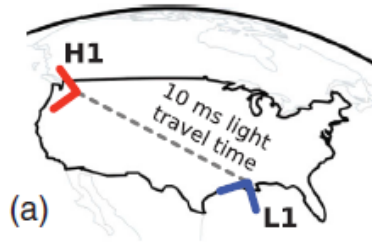
- ⦿ Previste come soluzione all'equazioni della relativita' generale
- ⦿ Campo elettromagnetico -> onde elettromagnetiche
- ⦿ Campo gravitazionale -> onde gravitazionali
- ⦿ Si trasmettono con la velocita' della luce e trasportano energia
- ⦿ Nella relativita' generale il campo gravitazionale e' una deformazione dello spazio-tempo dovuto alla presenza della massa

- Le onde gravitazionali sono delle increspature (ripples) nello spazio tempo causate da accelerazioni della massa

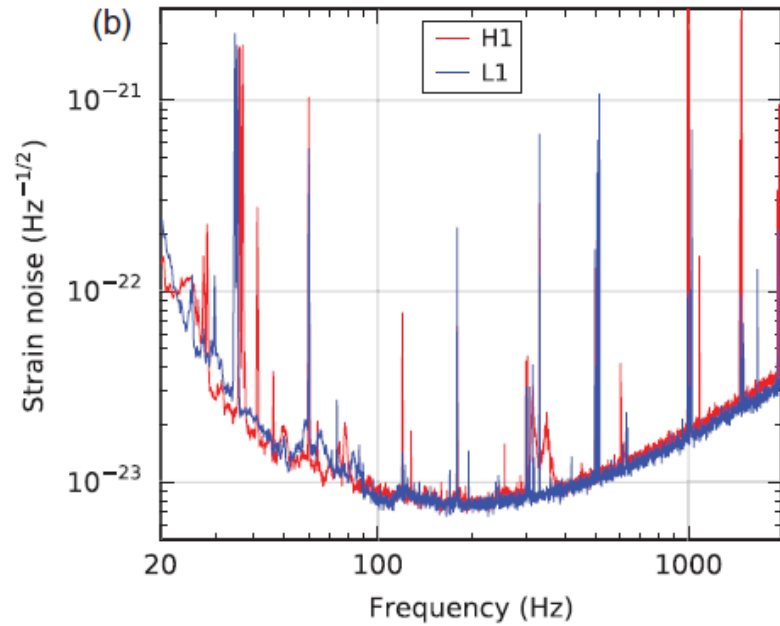
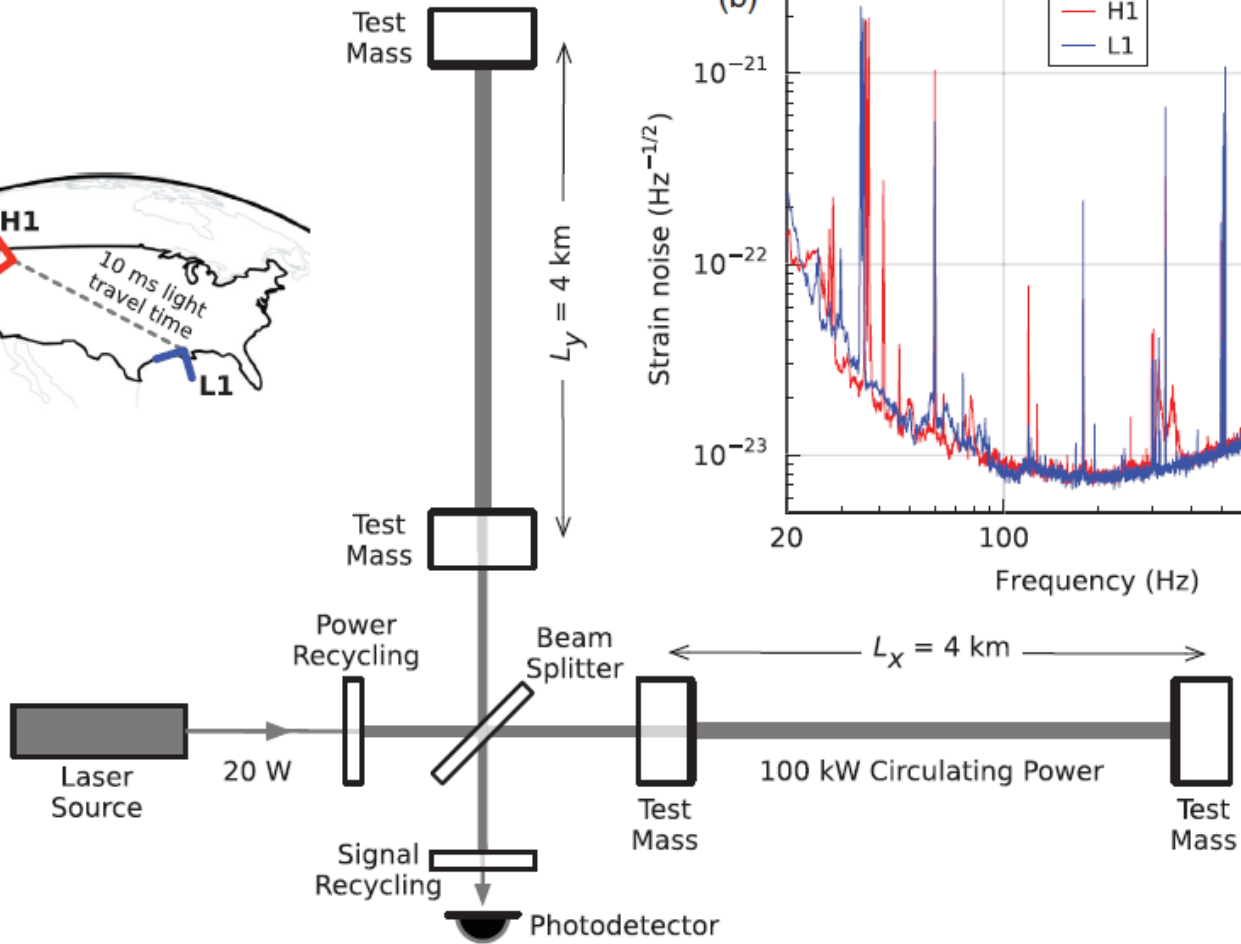




<- Virgo - Cascina (PI)



(a)



$$\Delta L(t) = \delta L_x - \delta L_y = h(t)L$$

$$L_x = L_y = L = 4 \text{ km}$$

$h = 10^{-21} \Rightarrow \Delta L = 10^{-18} \text{ m}$
 Un protone e' 10^{-15} m !



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

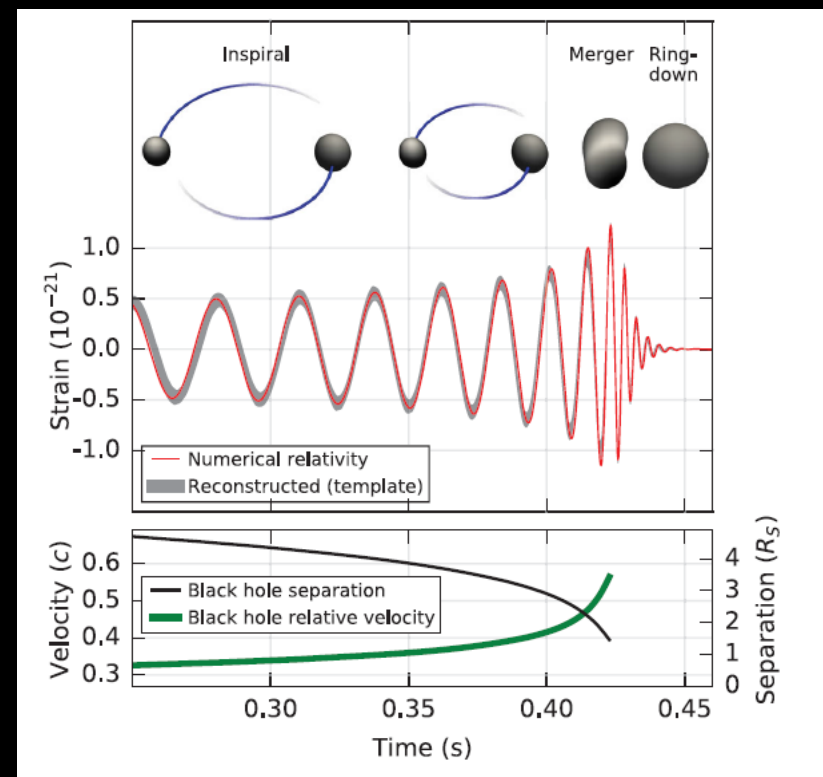
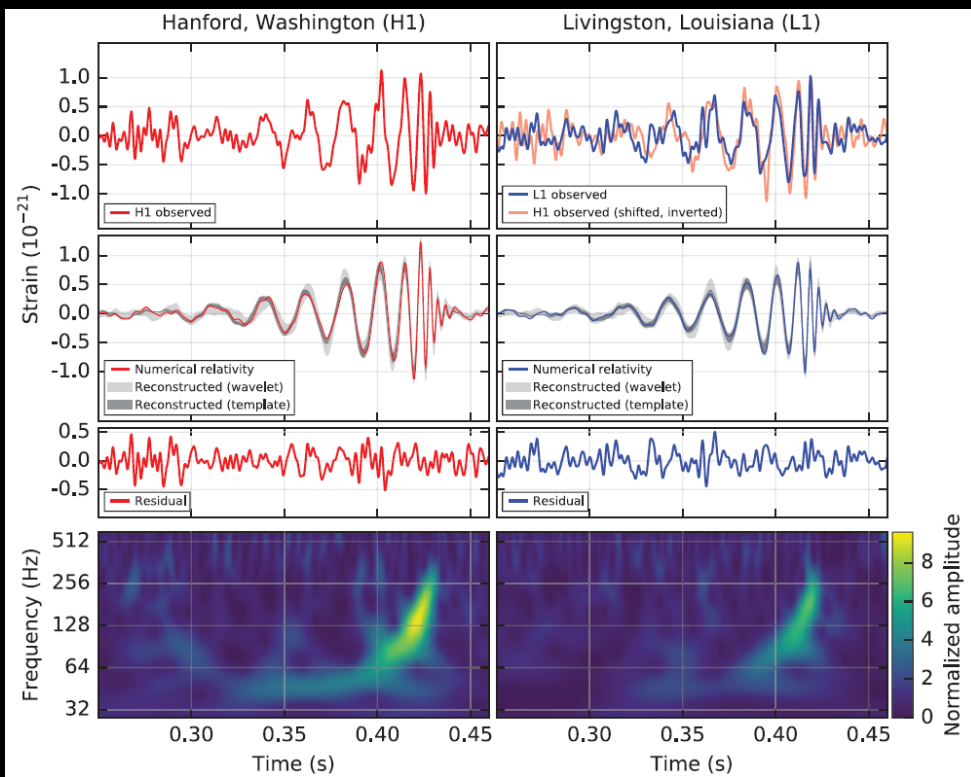
B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5}M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4}M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4}M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5}M_{\odot}c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.116.061102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102)



La scoperta delle onde gravitazionali

LE ONDE GRAVITAZIONALI

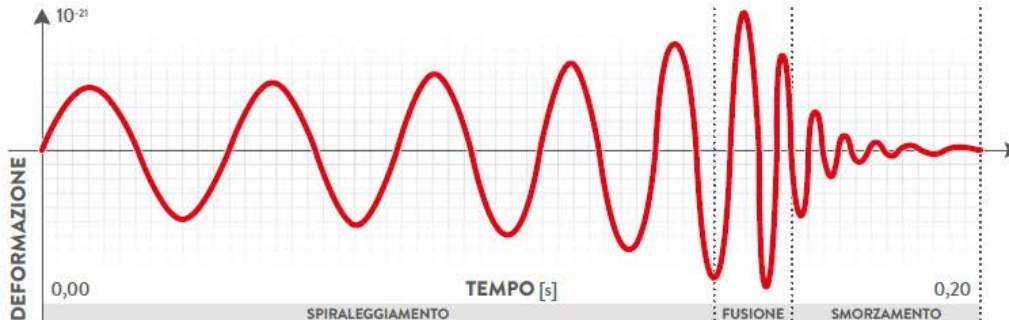
Secondo la Relatività Generale di Einstein cataclismi cosmici come scontri di buchi neri o stelle rotanti producono increspature dello spazio tempo che si propagano nel cosmo alla velocità della luce

IL SEGNALE

24 settembre 2015
Ore 09:50:45 UTC

Prodotto dal passaggio di un'onda gravitazionale, è stato osservato simultaneamente dai due interferometri gravitazionali LIGO, distanti migliaia di km, in Louisiana e nello stato di Washington (USA)

Ha una durata di qualche frazione di secondo e una frequenza variabile: da 30 a 250 Hz



NUOVE FRONTIERE DELLA GRAVITÀ

Lo studio dei dati raccolti aiuterà a descrivere meglio come agisce la forza gravitazionale in condizioni estreme mai esplorate prima, in cui le leggi della gravitazione e quelle della meccanica quantistica devono essere unificate



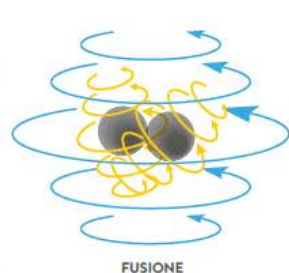
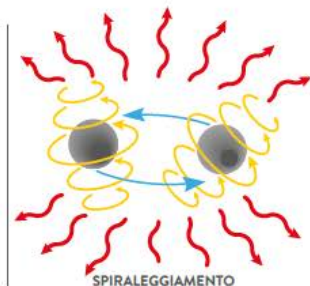
La materia è in una condizione estrema. È come se confinassimo una massa tre volte più grande del Sole in una sfera del diametro di 20 chilometri, come quello del grande raccordo anulare di Roma

UNO SCONTRO DI BUCHI NERI

L'onda è stata prodotta da un gigantesco scontro di due buchi neri distante da noi 1,3 miliardi di anni luce e quindi avvenuto più di un miliardo di anni fa

I due buchi neri di massa circa uguale (36 e 29 masse solari) si sono scontrati a una velocità di 150.000 km/s (la metà della velocità della luce)

È la prima osservazione diretta mai realizzata di un fenomeno di questo tipo



LA SCOPERTA

I dati sono stati analizzati e studiati dalle collaborazioni di LIGO e VIRGO, che è il terzo interferometro della rete internazionale. VIRGO è stato costruito presso l'European Gravitational Observatory (EGO) a Cascina (PI), dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e dal Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

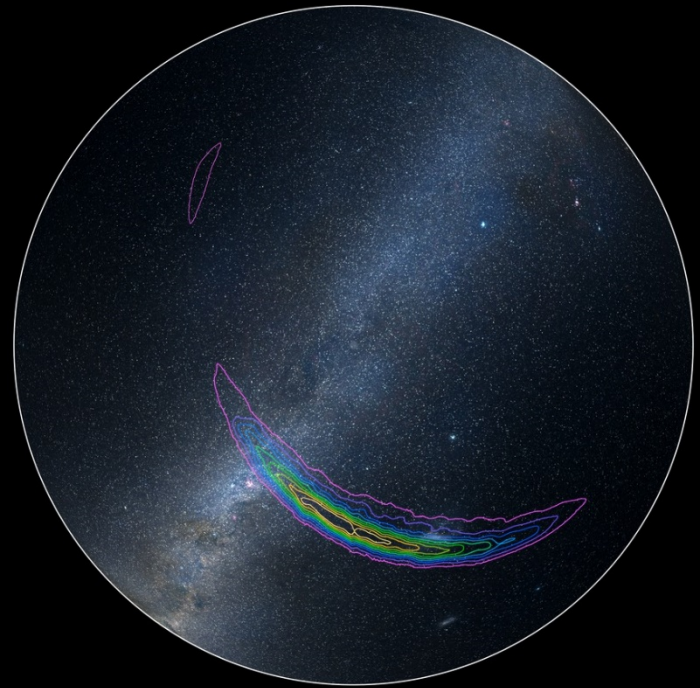
L'analisi dei dati ha confermato la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali, che è stata annunciata l'11 Febbraio 2016 in modo congiunto a Washington e Cascina



IL FUTURO

Si inaugura una nuova stagione di esplorazione del Cosmo, in cui potremo ascoltare i fenomeni più remoti e violenti dell'universo e i sussurri dell'universo primordiale

- ⊙ graviton mass:
 - $m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$
- ⊙ Evento avvenuto circa 1.3 miliardi di anni fa
- ⊙ Posizione spaziale dell'evento nota con grande incertezza
- ⊙ Bisognerà aspettare che sia pronto VIRGO per poter ridurre questa incertezza (triangolazione)

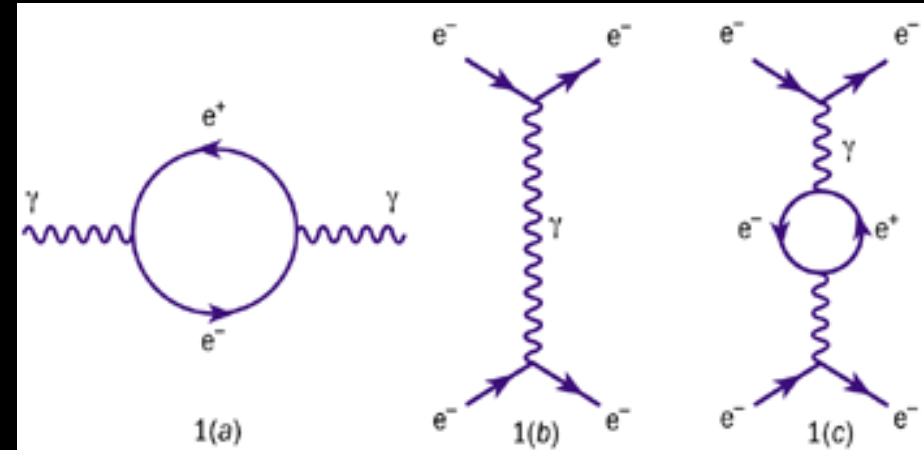


Forze e particelle

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

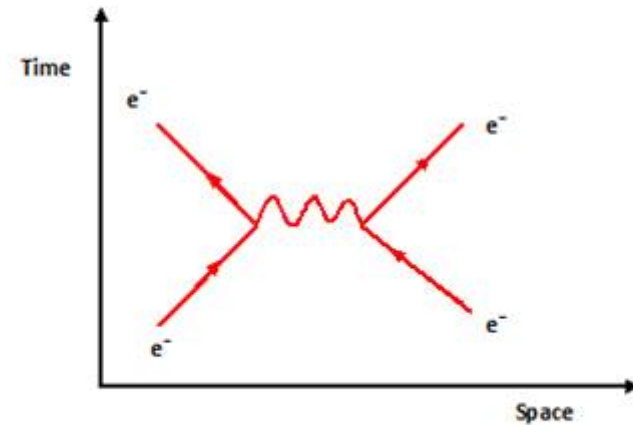
Particelle virtuali

- Effetto quantistico
- Teorie di campo quantistiche:
 - Particelle come propagatori delle forze
- Non rispettano la relazione:
 - $M^2 = E^2 - p^2$
- Possibile grazie al principio di indeterminazione:
 - $\Delta E \times \Delta t > \hbar/2$



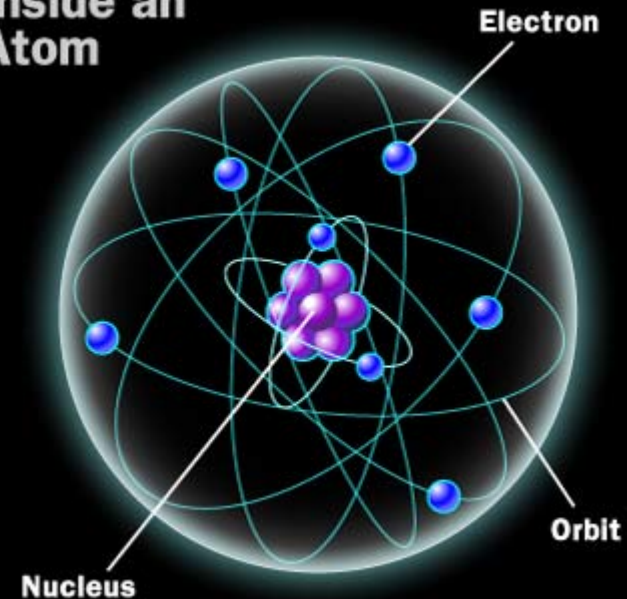
Forza e.m.

- ⦿ 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.

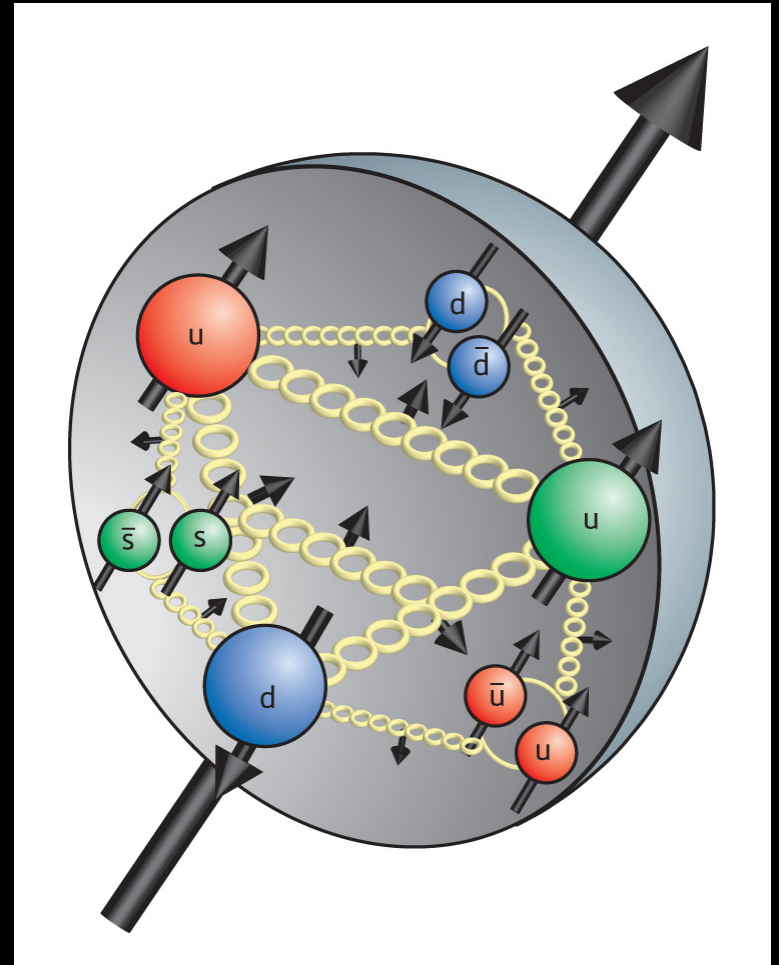
Inside an Atom



©2003 HowStuffWorks

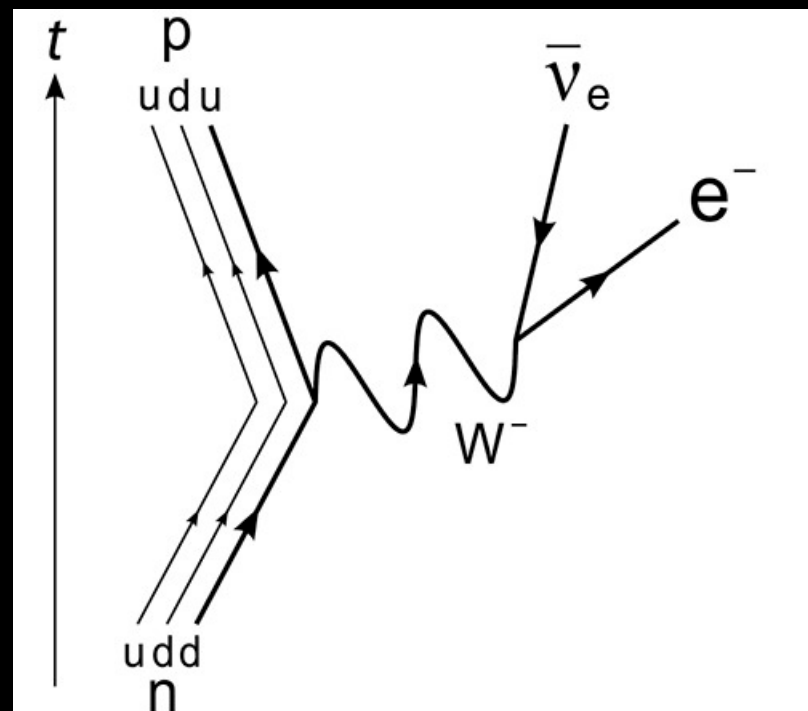
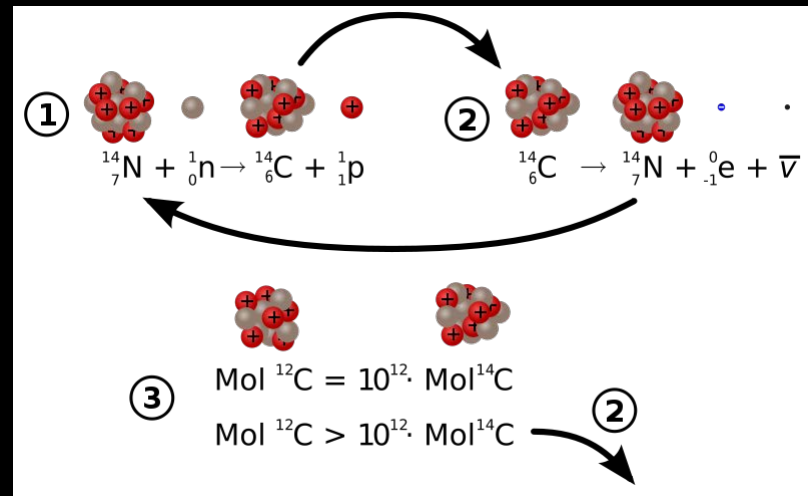
Forza forte

- ⦿ 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
 - Red + anti-Red
- ⦿ La carica di colore si conserva nell'interazione:
 - Servono 8 gluoni

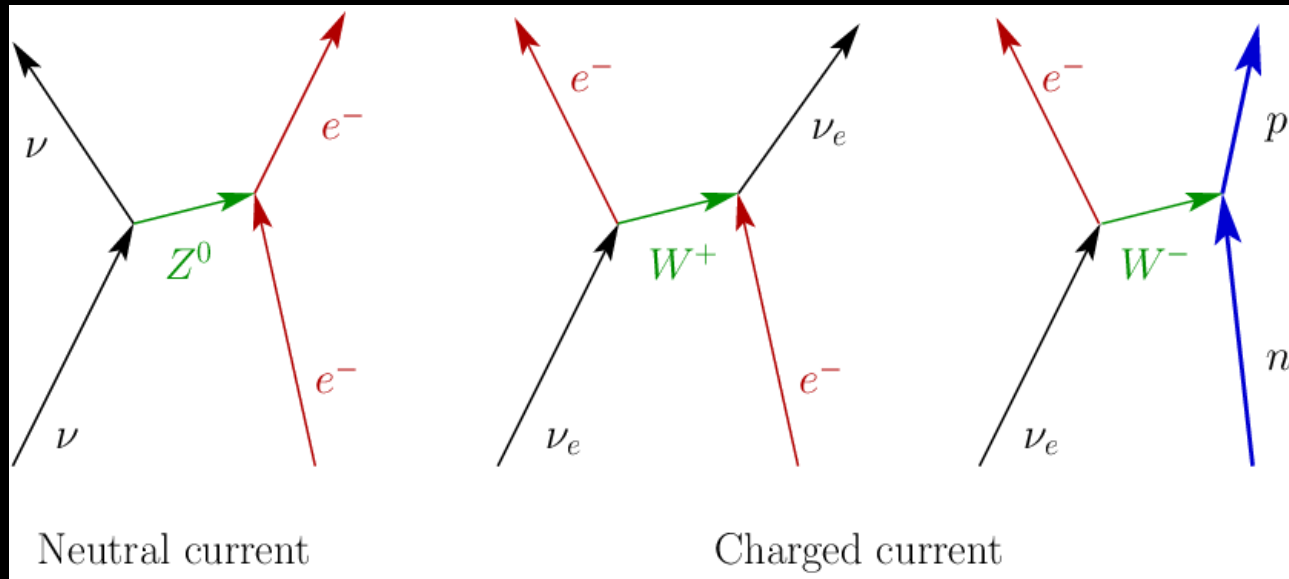


Forza Debole

- Un esempio e' il decadimento β^- del Carbonio-14 in Azoto-14:
- $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$
- Processo mediato da un W^-
- Forza debole carica



Forza debole



◎ Corrente debole neutra

◎ Uno dei metodi di rivelazione dei neutrini:

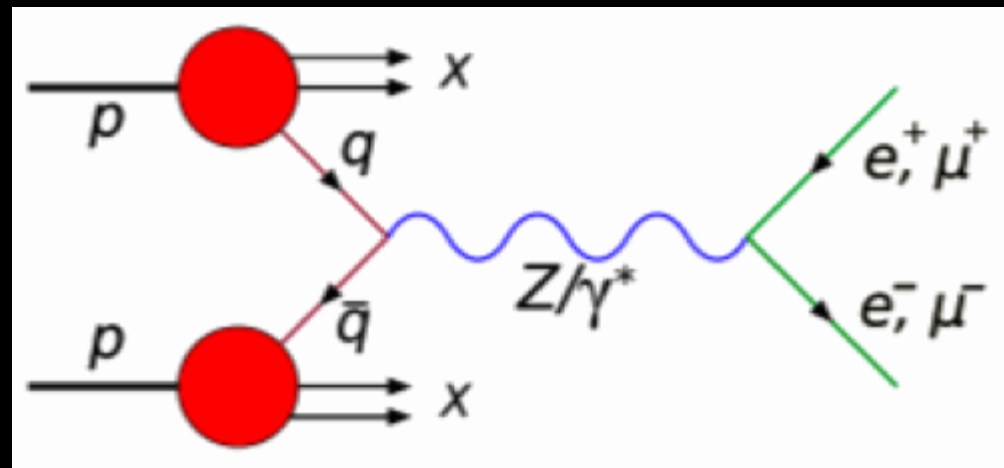
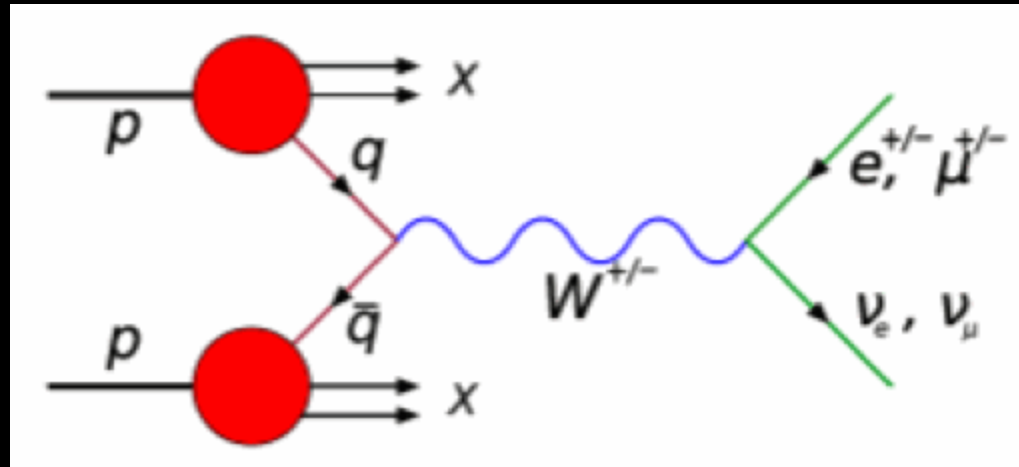
- Nell'interazione con la materia, i neutrini urtano un elettrone trasferendogli energia
- L'elettrone può essere accelerato ad energie relativistiche ed emettere radiazione (luce Cherenkov) che può essere rivelata da appositi dispositivi

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 ($\sim 10^{-25}$ s) e decade subito in altre particelle
- I prodotti del decadimento possono essere rivelati



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

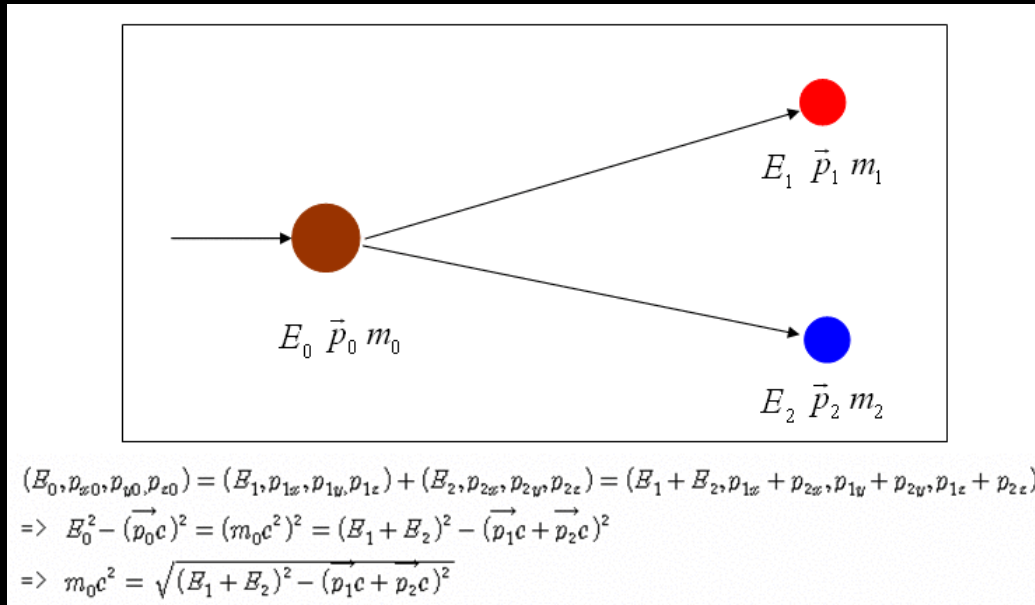
W^- modes are charge conjugates of the modes below.

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

Z DECAY MODES

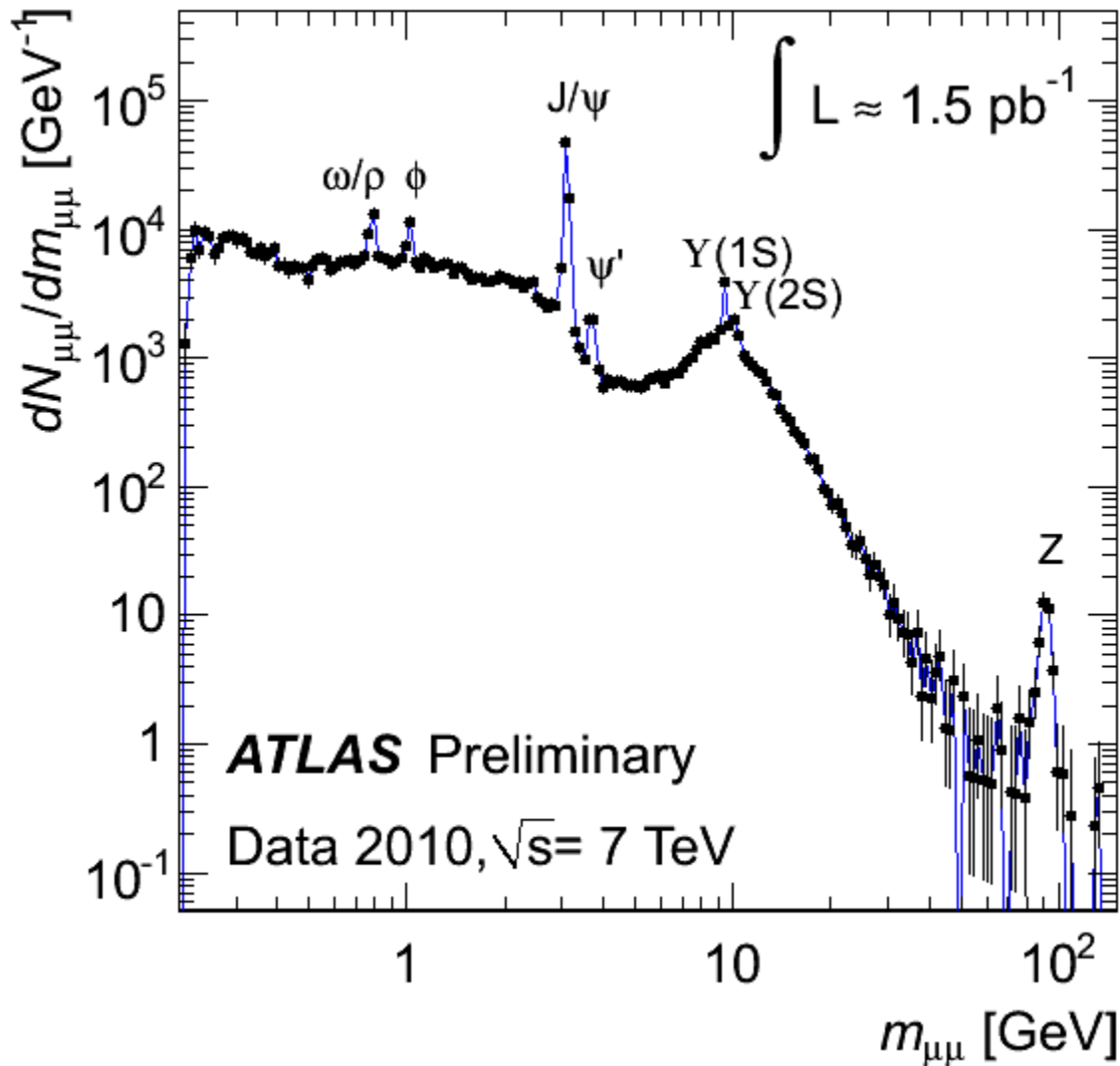
Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Con
Γ_1 $e^+ e^-$	$(3.363 \pm 0.004) \%$	
Γ_2 $\mu^+ \mu^-$	$(3.366 \pm 0.007) \%$	
Γ_3 $\tau^+ \tau^-$	$(3.370 \pm 0.008) \%$	
Γ_4 $\ell^+ \ell^-$	[a] $(3.3658 \pm 0.0023) \%$	
Γ_5 $\ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$	[b] $(4.2 \pm 0.9 \text{ to } -0.8) \times 10^{-6}$	
Γ_6 invisible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

Massa invariante



- 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:
 - $M^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2|^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - \mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2)$
- Massa "invariante" perche' e' la stessa in tutti i sistemi di riferimento legati da una trasformazione di Lorentz

Spettro di massa invariante



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

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

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

J/ψ $3096.916 \pm 0.011 \text{ MeV}$

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

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

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

Z

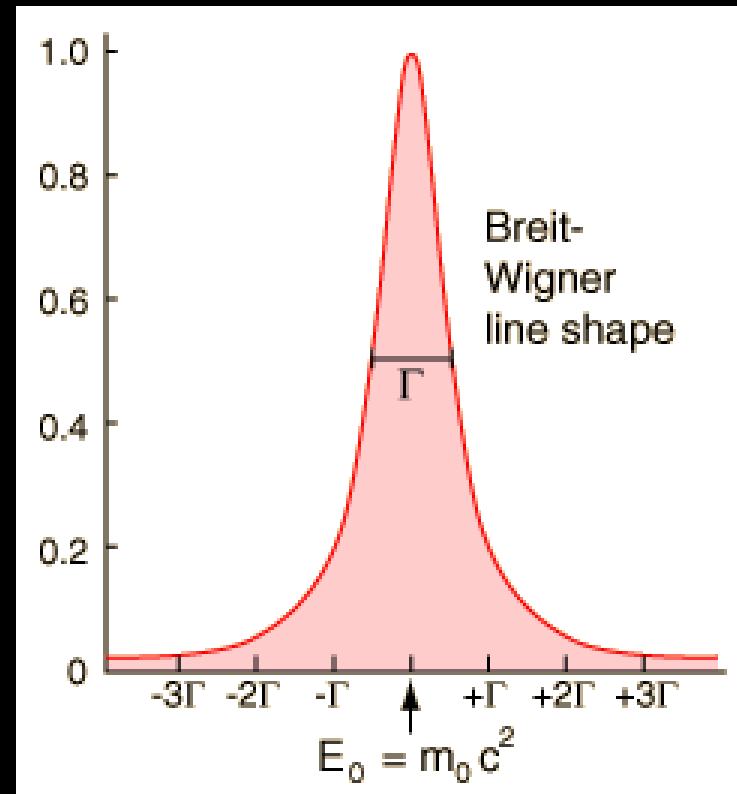
Ampiezza

- Principio di indeterminazione
- Particelle con vite medie piccole hanno incertezze piu' grandi nella misura della massa
- Misurando piu' volte la massa di una particella abbiamo una distribuzione chiamata Lorentziana o distribuzione di Breit-Wigner

$$\Delta E \times \Delta t > \hbar/2$$

$$\Delta E = \Gamma/2, \quad \Delta t = \tau$$

$$\Delta E = \hbar/2\tau$$



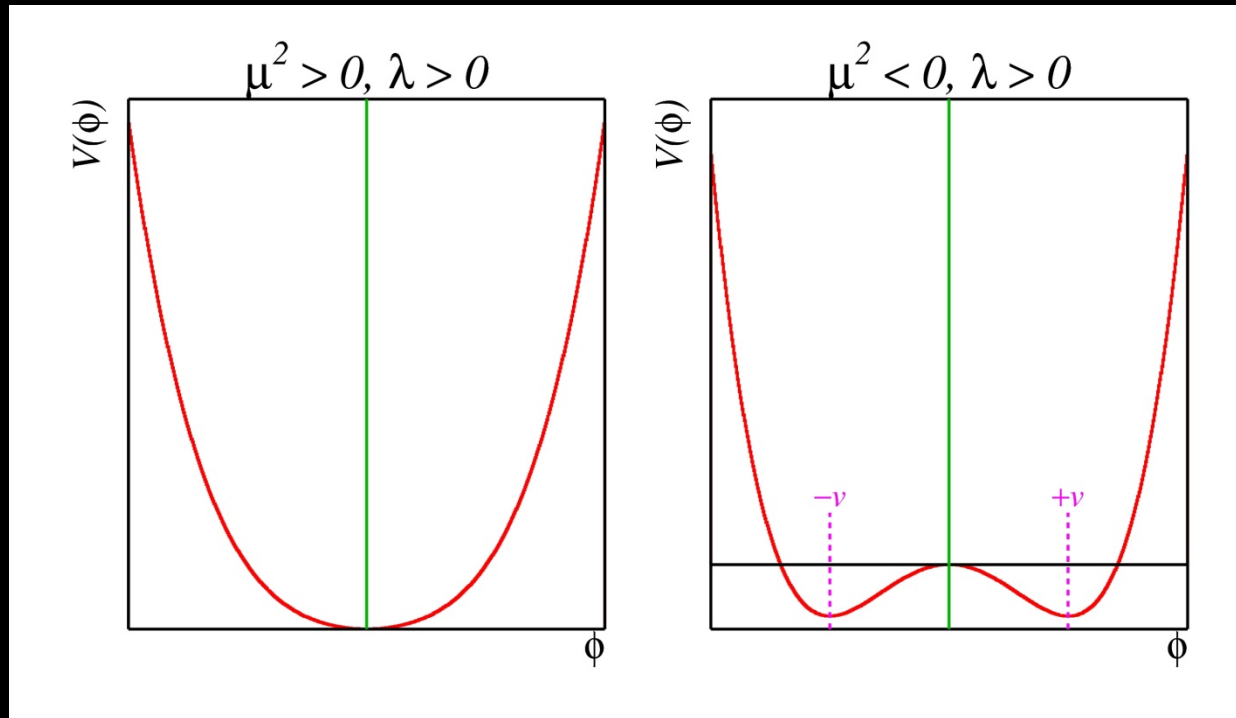
Ampiezza

- ◎ The Z boson has a mass of ~ 91.2 GeV and a width of ~ 2.5 GeV.
 - It means that the Z boson decays so fast that it can be produced with a mass of 91.2 ± 2.5 GeV.
- ◎ The Higgs boson has a mass of 125.5 GeV and a width of 4.2 MeV (0.0042 GeV).
 - It decays about 500 times less quickly than a Z (although still extremely fast), hence its mass is much better defined.

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

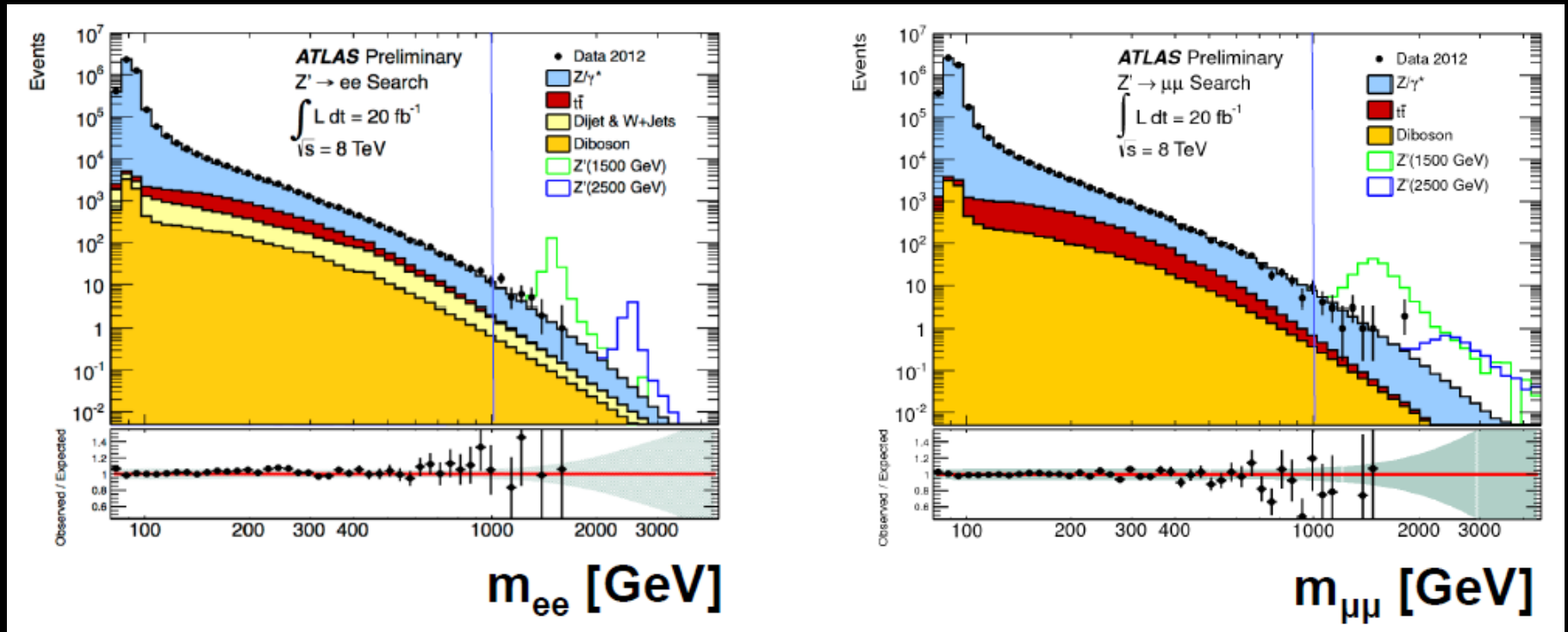
Meccanismo di Higgs



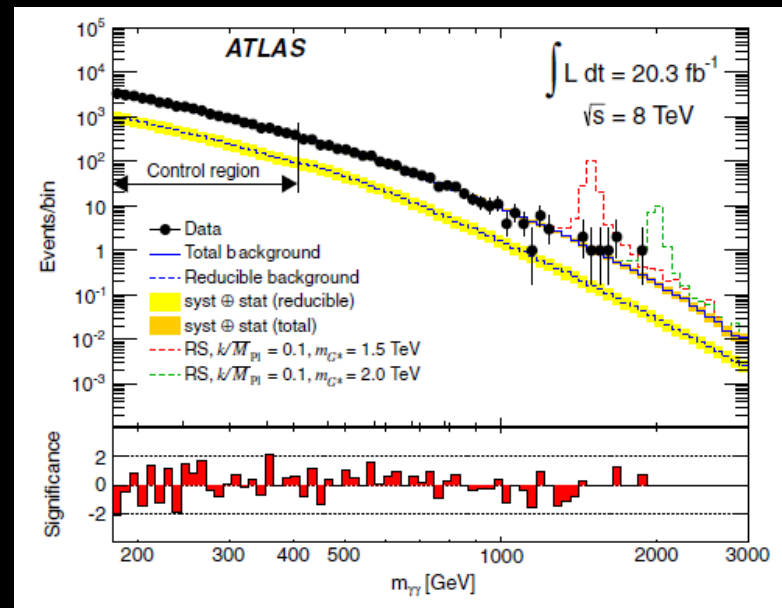
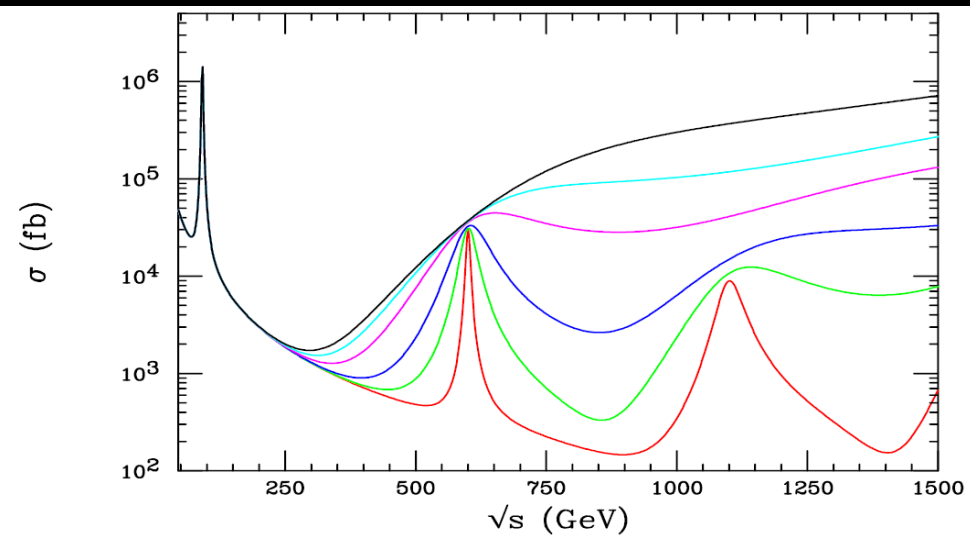
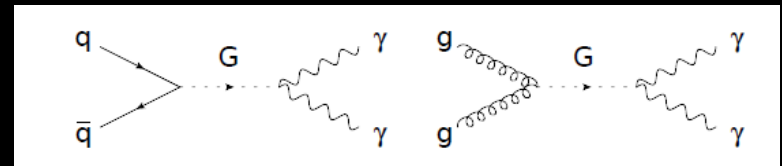
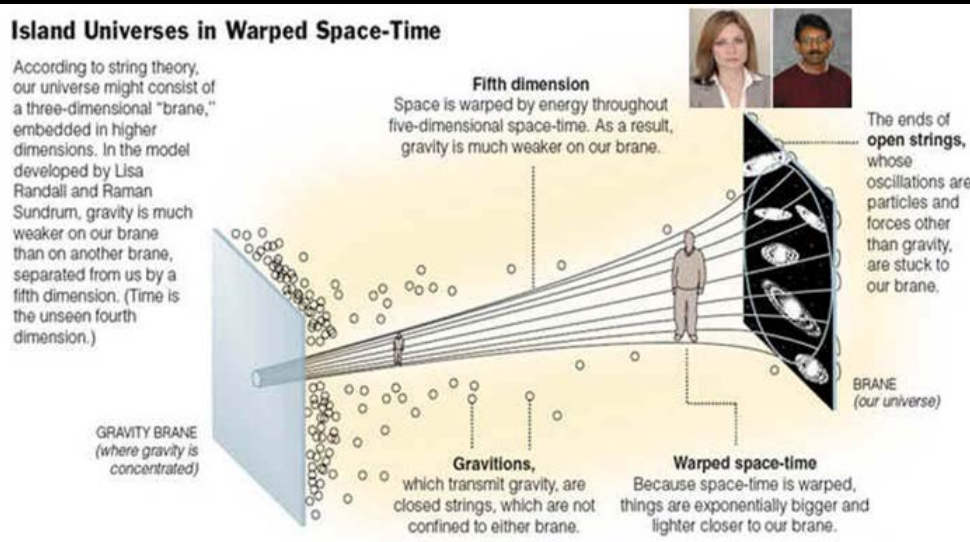
- Meccanismo verificato con la scoperta del bosone di Higgs per opera degli esperimenti ATLAS e CMS al CERN nel 2012

Altre ricerche

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



Due γ ad alta massa



Oltre il Modello Standard (MS)

- ⊙ Massa dei neutrini
- ⊙ Esistenza di materia oscura non costituita dalla materia barionica (protoni, neutroni)
- ⊙ Asimmetria cosmica tra MATERIA e ANTIMATERIA:
 - esistenza di una nuova sorgente di violazione di CP oltre a quella prevista dal Modello STANDARD
- ⊙ Impossibilita' nel MS di ottenere una FASE INFLAZIONARIA (espansione accelerata esponenzialmente) nell'universo primordiale
- ⊙ Domande "fondamentali" a cui il Modello Standard non risponde:
 - Unificazione delle forze fondamentali
 - Masse e mescolamenti dei fermioni

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)