

Alcuni concetti di fisica delle particelle elementari

F. Tartarelli

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Milano



Benvenuti alle
International Masterclasses
Hands on particle physics
21st Masterclasses 2025
dal 24/02 al 11/04/2025
<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](#)

XI edizione Milano (INFN+UNIMI) 10/03 e 24/03
<https://agenda.infn.it/event/44722/overview>

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

ATLAS Masterclass 2025 (1a data)

Monday 10 Mar 2025, 08:30 → 18:00 Europe/Rome

Sala Consiglio (Dipartimento di Fisica)

08:30	→ 09:10	Registrazione	40m	Sala Consiglio
09:10	→ 09:15	Introduzione e saluti Saluto degli organizzatori Speaker: Dr Giuseppe Francesco Tartarelli (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare)	5m	Sala Consiglio
09:15	→ 11:00	Alcuni concetti di Fisica delle Particelle Elementari Speaker: Dr Giuseppe Francesco Tartarelli (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare)	1h 45m	Sala Consiglio
11:00	→ 11:15	Pausa	15m	Sala Consiglio
11:15	→ 12:15	Acceleratori, rivelatori e tutto il resto Speaker: Leonardo Carminati (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare)	1h	Sala Consiglio
12:15	→ 13:30	Pausa	1h 15m	Sala Consiglio
13:30	→ 15:45	Sessione di lavoro in laboratorio di calcolo Speakers: Leonardo Carminati (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), Ruggero Turra (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare)	2h 15m	Laboratorio Didattico di Calcolo
15:45	→ 16:45	Video-conferenza con gli altri gruppi di studenti impegnati sullo stesso lavoro + Quiz finale!	1h	Sala Consiglio
16:45	→ 17:00	Conclusione dei lavori e saluti	15m	Sala Consiglio

Dipartimento di Fisica
dell'Universita' degli Studi di
Milano

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



Videoconferenza

	Mon, Mar 10	Tue, Mar 11	Wed, Mar 12	Thu, Mar 13	Fri, Mar 14	Sat, Mar 15
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
time	16:00 CET	16:00 CET	16:00 CET	14:00 CET	16:00 CET	16:00 CET
moderator	Martin	Arnd	Aleksandra	Arnd	Ana P.	Muhammad
moderator	Shalini	Karolos	José	José	Denis	Orçun
	Colmar 	Bragança 	Zilina 	Nairobi 	Strasbourg 	Iasi 
	Wuppertal 	Paris, APC 	Kielce 	Cape Town, AIMS 	Prešov 	Bucharest, Univ. 
	Milan 	Grenoble 	Vila Real 		Prague, CTU 	Cluj-Napoca 
	Stockholm 	Bologna 	Grenoble 		São Paulo, USP 	
		Skierniewice 	Rome, Tor Vergata 		Granada 	
			Košice 		Thessaloniki 	

Summer Camp

In occasione delle MC l'INFN vi invita a partecipare ad una selezione a voi riservata, per vincere un posto al [INFN STEAM Summer Camp](#), che si terrà a Bertinoro (in provincia di Forlì-Cesena, Emilia-Romagna) dal 13 al 17 luglio 2025

Il Summer Camp vi darà l'opportunità di approfondire i temi della fisica delle particelle, del supercalcolo e dell'intelligenza artificiale, ma anche di imparare nuove strategie comunicative che mettono insieme storytelling, fumetti, giochi e scienza

Se siete interessati e ci avete lasciato il vostro e-mail + autorizzazione a contattarvi, alla fine della MC invieremo il giorno e l'ora in cui collegarsi ad un link ZOOM

Durante la videochiamata vi verrà fornito un link ad un quiz su Kahoot, che durerà non più di un quarto d'ora e che verterà sulle tematiche che avete imparato durante la MC. Gli studenti selezionati con i quiz, verranno poi invitati ad una seconda selezione, che si effettuerà i primi di maggio con un colloquio motivazionale (sempre in videochiamata).

INFN STEAM Summer Camp 2025 - 13-17 luglio 2025

I vincitori avranno vitto, alloggio ed attività didattiche offerte dall'INFN e dovranno sostenere solo le spese per il viaggio

Summer Camp

Al Summer Camp e' anche possibile partecipare tramite un concorso di cui trovate il bando al link

<https://reclutamento.dsi.infn.it/>

Bando n. 27537

57 studenti saranno selezionati tramite:

- lettera di presentazione di un docente della scuola secondaria di secondo grado di qualsiasi materia scolastica
- video inedito di due minuti nel quale il candidato deve descrivere se stesso, il suo interesse nella scienza e nella tecnologia e i motivi per partecipare all'evento "INFN Summer Camp"

Data di scadenza: 31 marzo 2025

INFN STEAM Summer Camp 2025 - 13-17 luglio 2025

Fisica delle particelle elementari

Fisica fondamentale

attività di ricerca, teorica e sperimentale, nei campi della fisica subnucleare

Studio dei costituenti fondamentali della materia e delle leggi che li governano

particelle elementari e forze con cui queste particelle interagiscono

I raggi cosmici hanno inizialmente contribuito alla scoperta ed allo studio delle particelle elementari

scoperta del positrone (1932), del muone (1936), ...

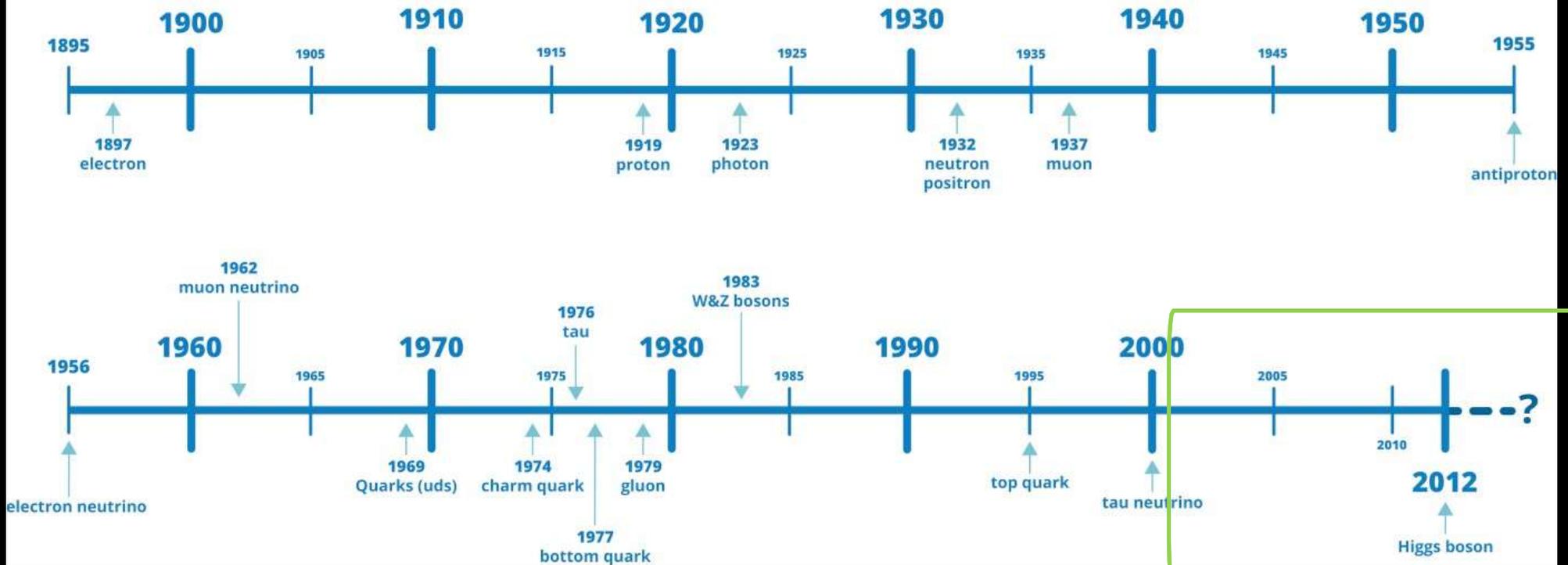
Ma dalla fine degli anni '40 ad oggi e' con le macchine acceleratrici che si fa la fisica delle particelle elementari (a parte la fisica dei neutrini e le ricerche di "materia oscura")

Sono state sviluppate negli anni macchine acceleratrici per produrre fasci di particelle cariche (elettroni, positroni, protoni, antiprotoni, ioni) e farli collidere tra loro ad energie sempre maggiori

La scoperta delle particelle elementari



Key particle discoveries



LHC era

II CERN

CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire / European Laboratory for Particle Physics

Laboratorio internazionale fondato nel 1954

Fondato dopo la seconda guerra mondiale con lo scopo di riportare la ricerca in Europa e di favorire la pacifica collaborazione tra nazioni

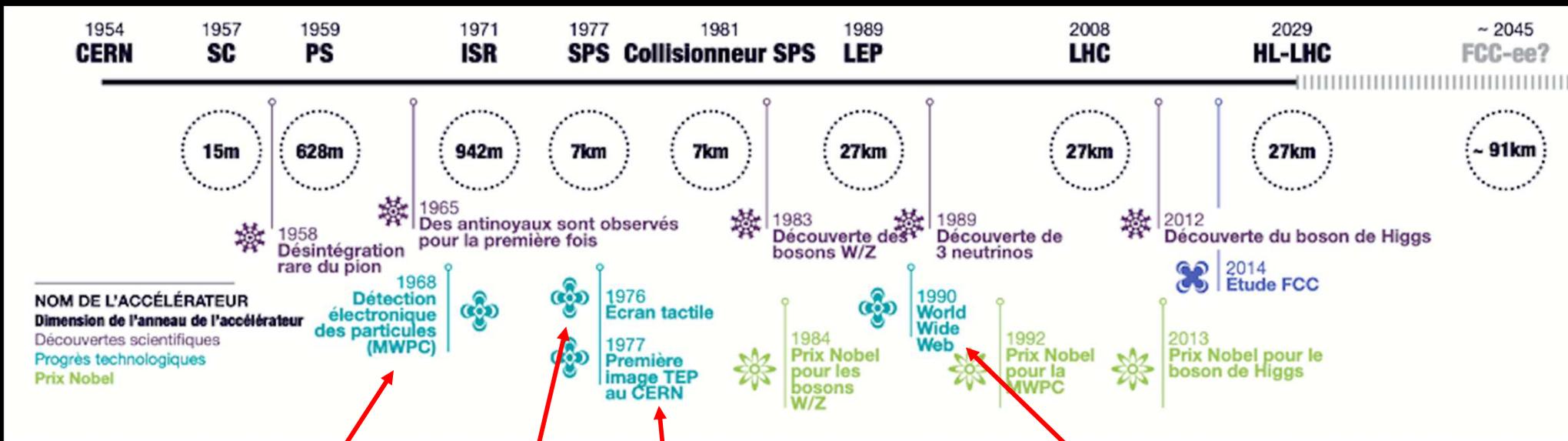
L'Italia e' uno dei 12 membri fondatori

Oggi il CERN conta 23 Stati Membri, 10 Stati Associati ed una comunita' di 17000 persone di 110 nazionalita'



YEARS / ANS CERN
1954-2024

Scoperte al CERN



Camera proporzionale a multifili

Touchscreen

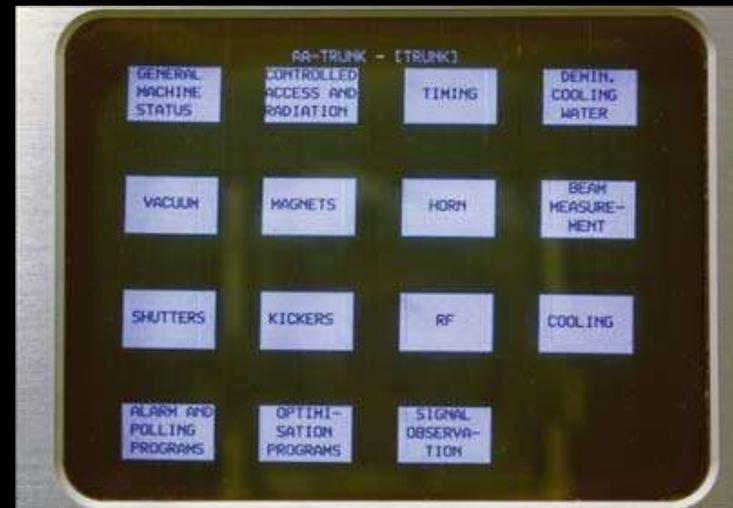
Immagine PET

Invenzione del World Wide Web

Scoperte al CERN



Camera proporzionale a multifili



Touchscreen

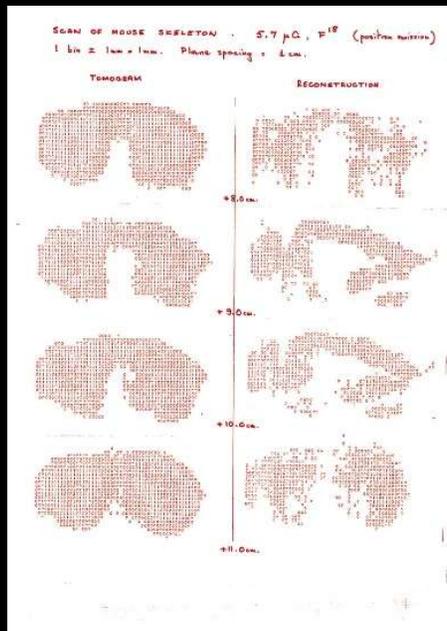
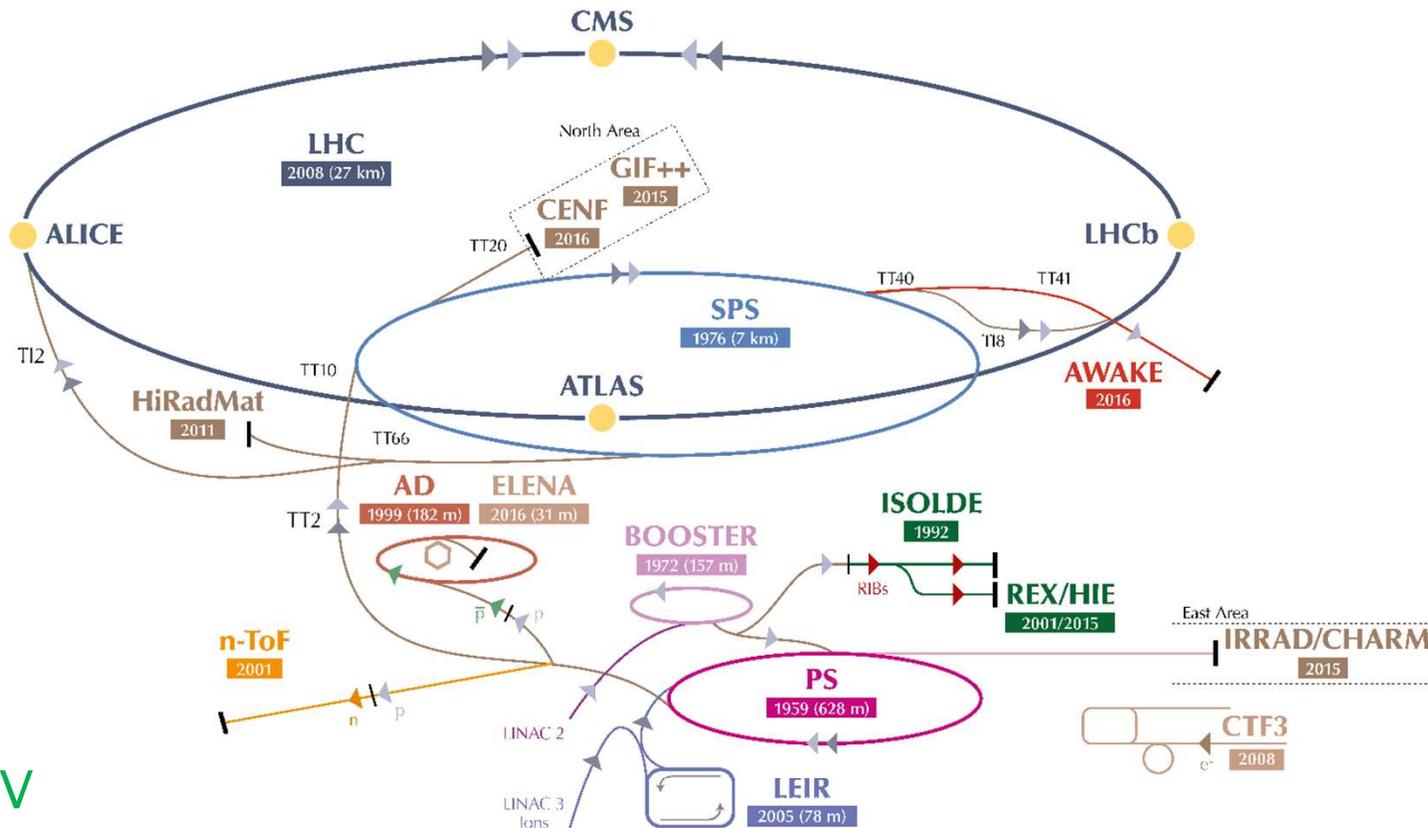


Immagine PET



Invenzione del World Wide Web

Acceleratori al CERN



PS: 25 GeV
 SPS: 450 GeV
 LEP: 91 - 209 GeV
 LHC: 13.6 TeV

▶ 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 AccelRator Mixed field facility IRRAD proton IRRADIation facility GIF++ Gamma Irradiation Facility
 CENF CERN Neutrino platform

CERN, Accelerator Complex © CERN, copyright January 2017

LHC al CERN

LHC = Large Hadron Collider
collisionatore protone-protone

~27 km di circonferenza percorsa dai protoni a circa la velocità della luce

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

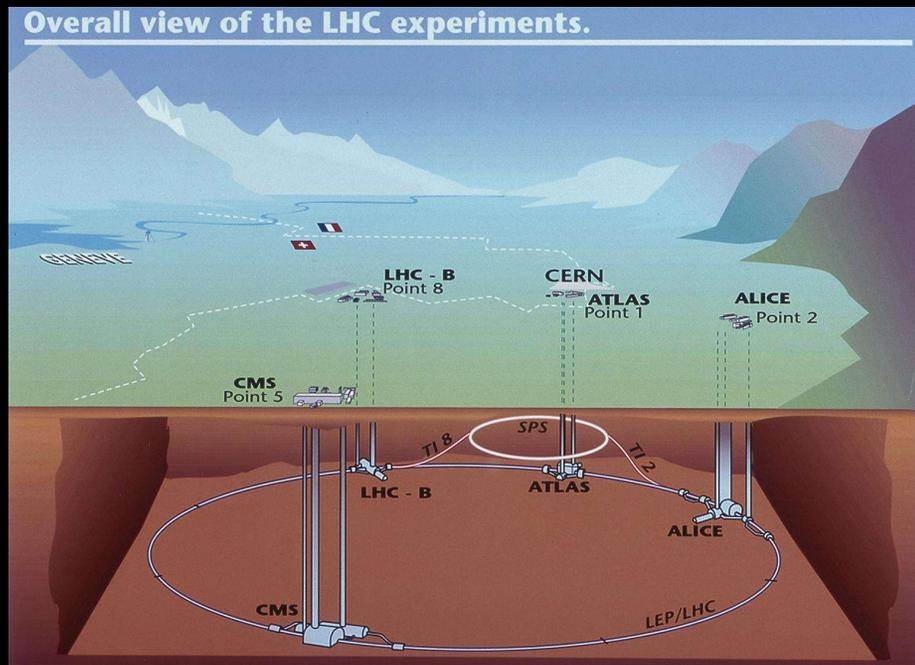
Utilizza lo stesso tunnel di LEP che era un collisionatore elettroni-positroni

In funzione dal 2008

energia massima dei fasci 6.8 TeV (13.6 TeV di energia nel centro di massa) nel 2023

4 sale sperimentali sotterranee per altrettanti esperimenti

- ALICE, ATLAS, CMS, LHCb



ATLAS

Rivelatore polivalente, con un vasto raggio di studi:

Higgs

Supersimmetria

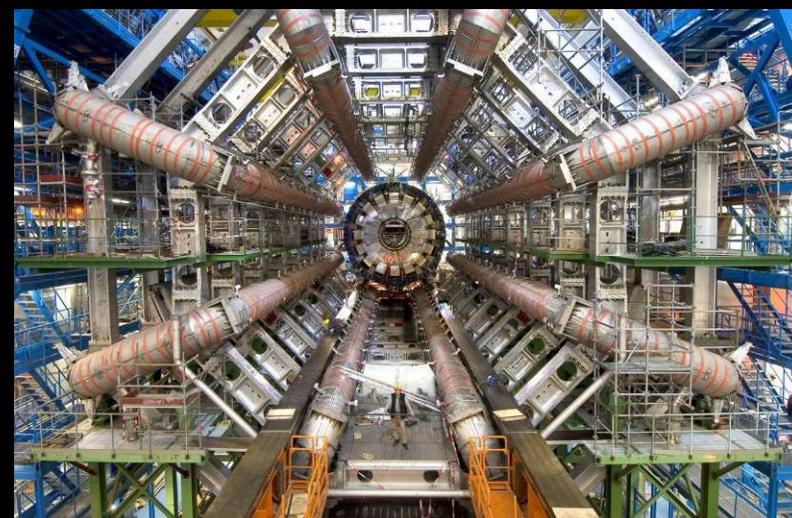
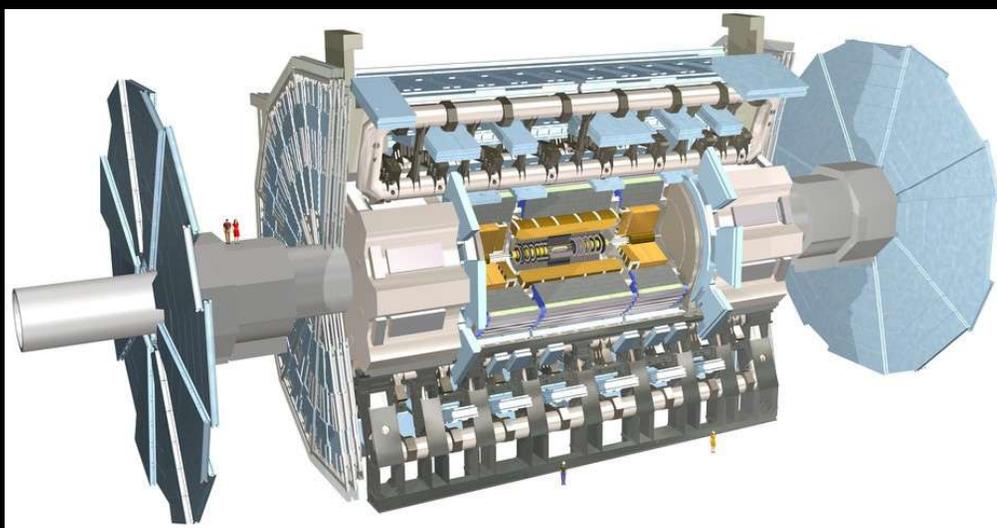
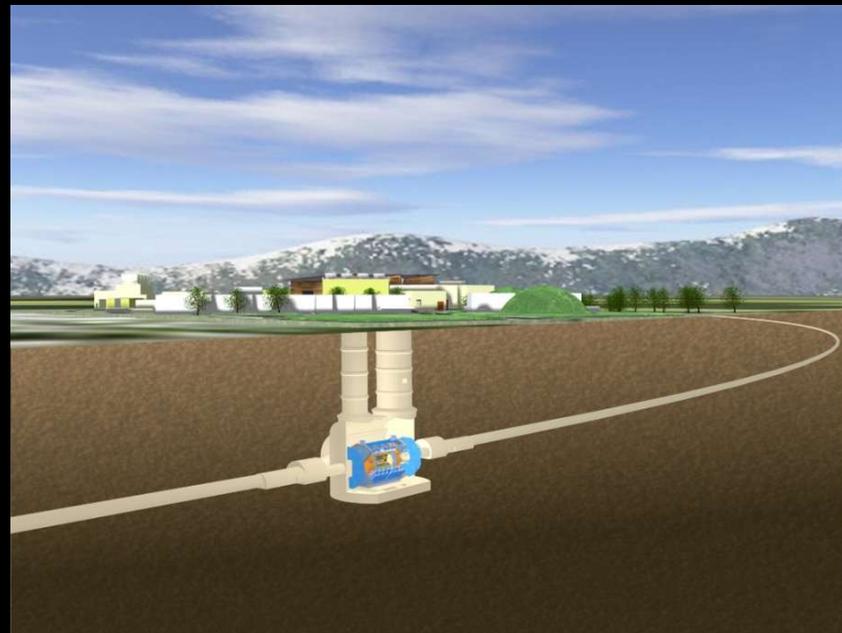
Fisica oltre il Modello Standard

Il piu' grosso dei 4 rivelatori di LHC

Lunghezza: 44 m

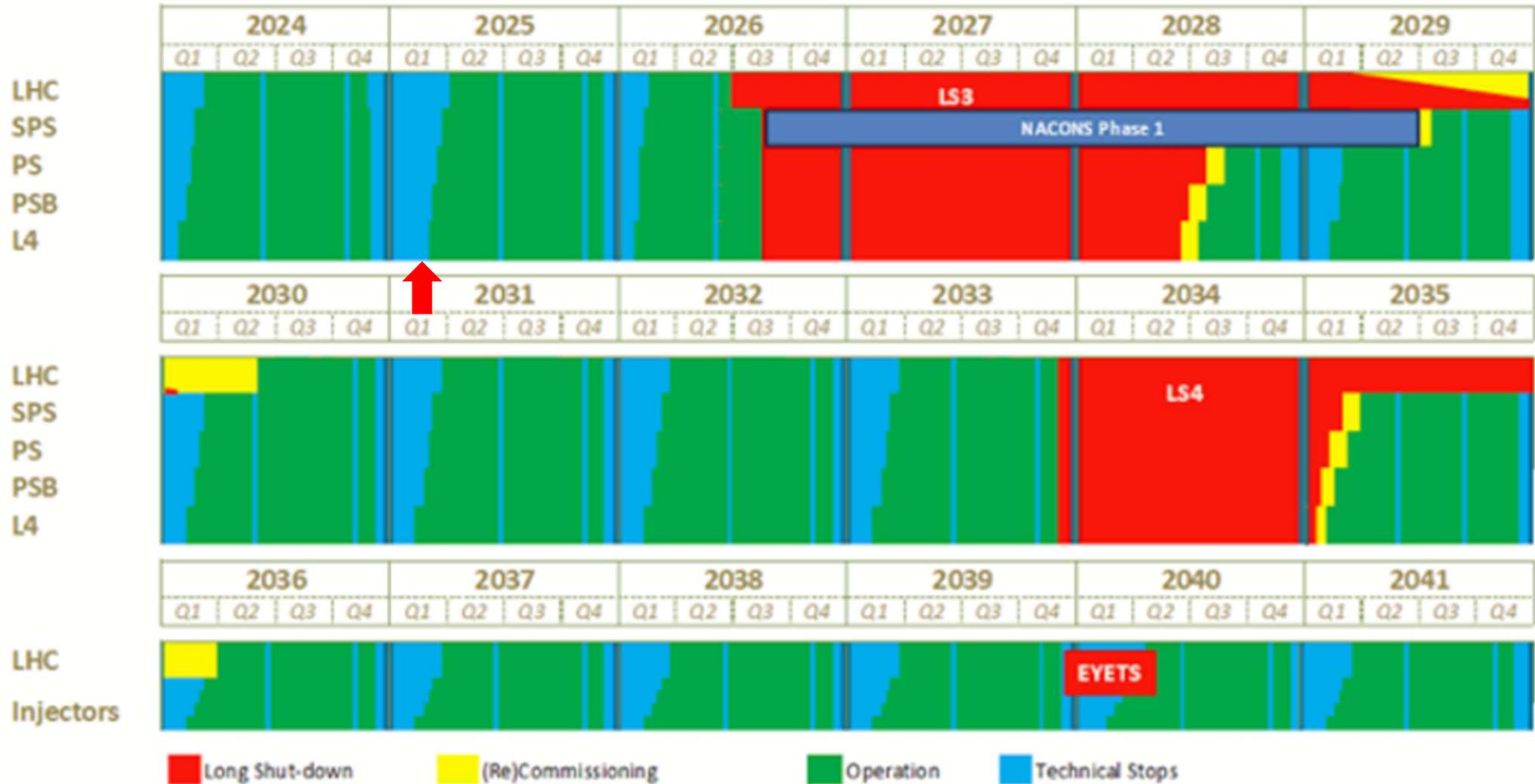
Diametro: 25 m

circa 100 milioni di canali

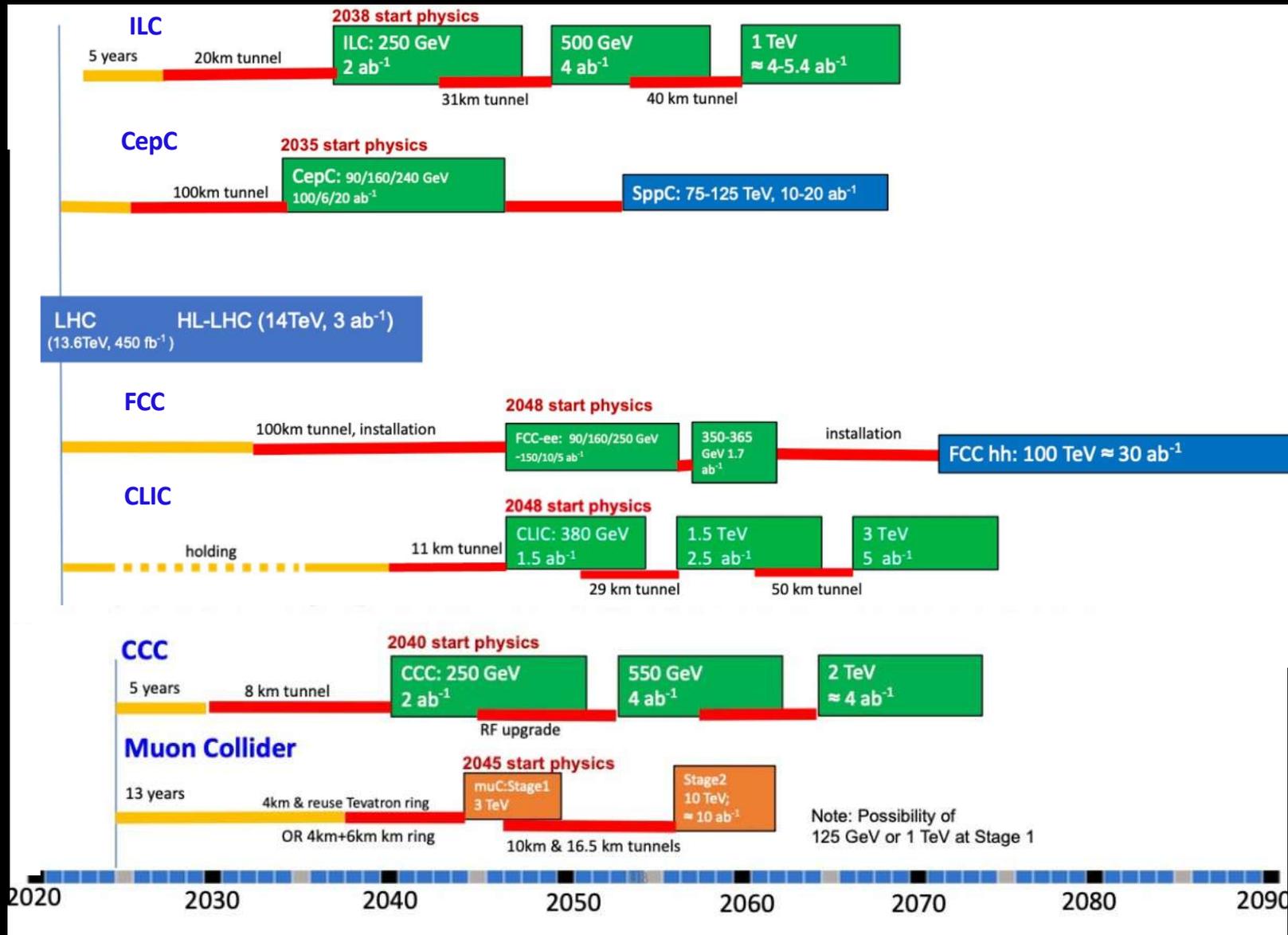


Programma dei prossimi anni

Long Term Schedule for CERN Accelerator complex



Progetti futuri



Japan

China

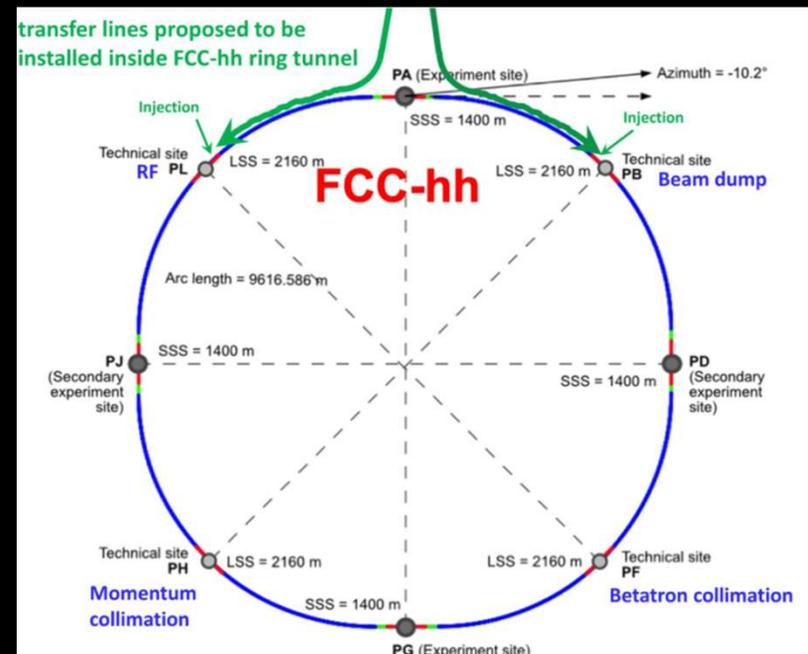
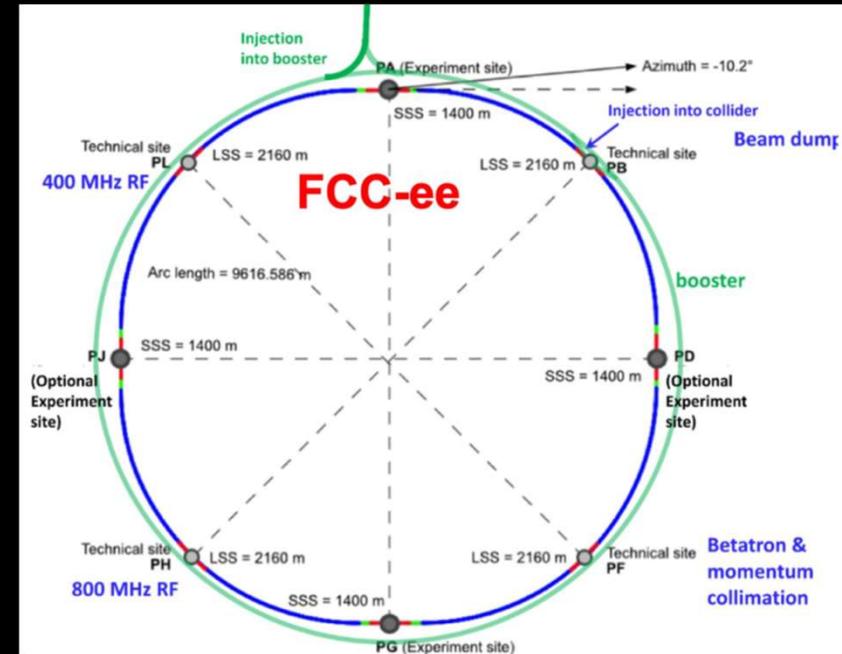
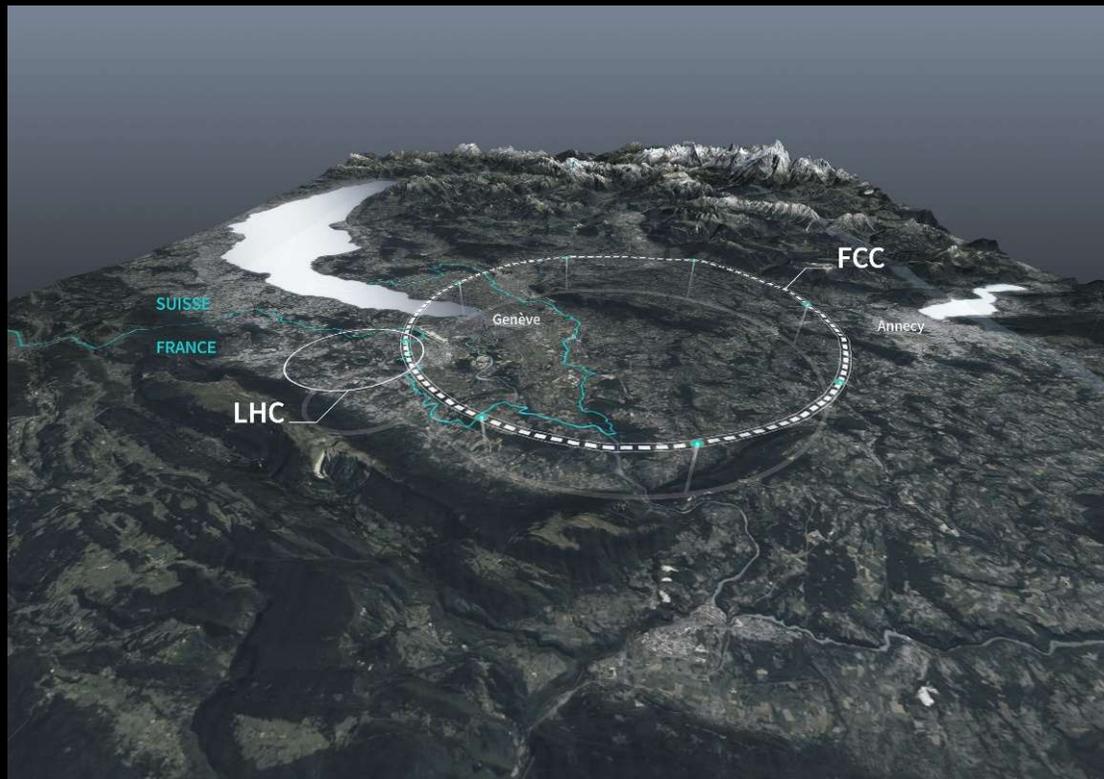
CERN

USA

Future Circular Collider (FCC)

Tunnel di circa 91 km di circonferenza

- stage 1: FCC-ee (Z, W, H, $t\bar{t}$) come Higgs factory, electroweak & top factory ad alta luminosita'
- stage 2: FCC-hh (~100 TeV) alle piu' alte energie, collisioni pp & AA collisions; e-h option
- Ingegneria civile e infrastrutture tecniche in comune, basate sulle infrastrutture gia' esistenti al CERN
- Permetterebbe di avere una nuova macchina al CERN pochi anni dopo la fine di HL-LHC



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 electron-Volt (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)

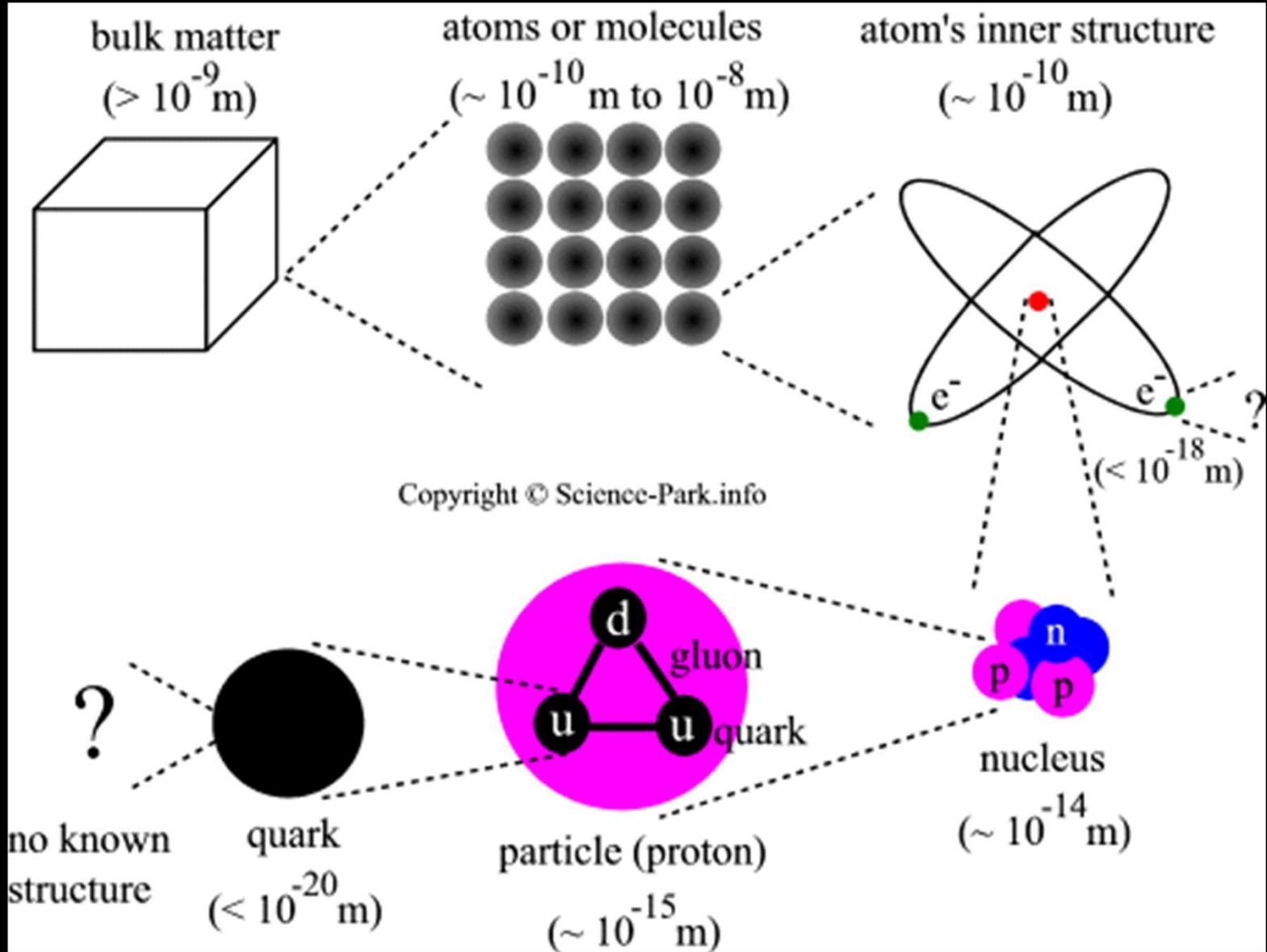
1 TeV = 1.000.000.000.000 eV = 10^{12} eV (un bilione di eV)

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

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

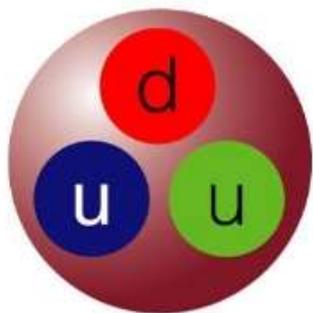
Massa del protone: circa $938.27 \text{ MeV}/c^2$

La Materia



Struttura del protone e del neutrone

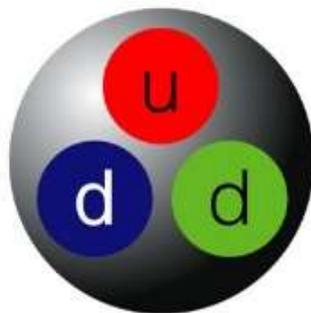
A proton is composed of 2 up quarks (u) and 1 down quark (d).



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

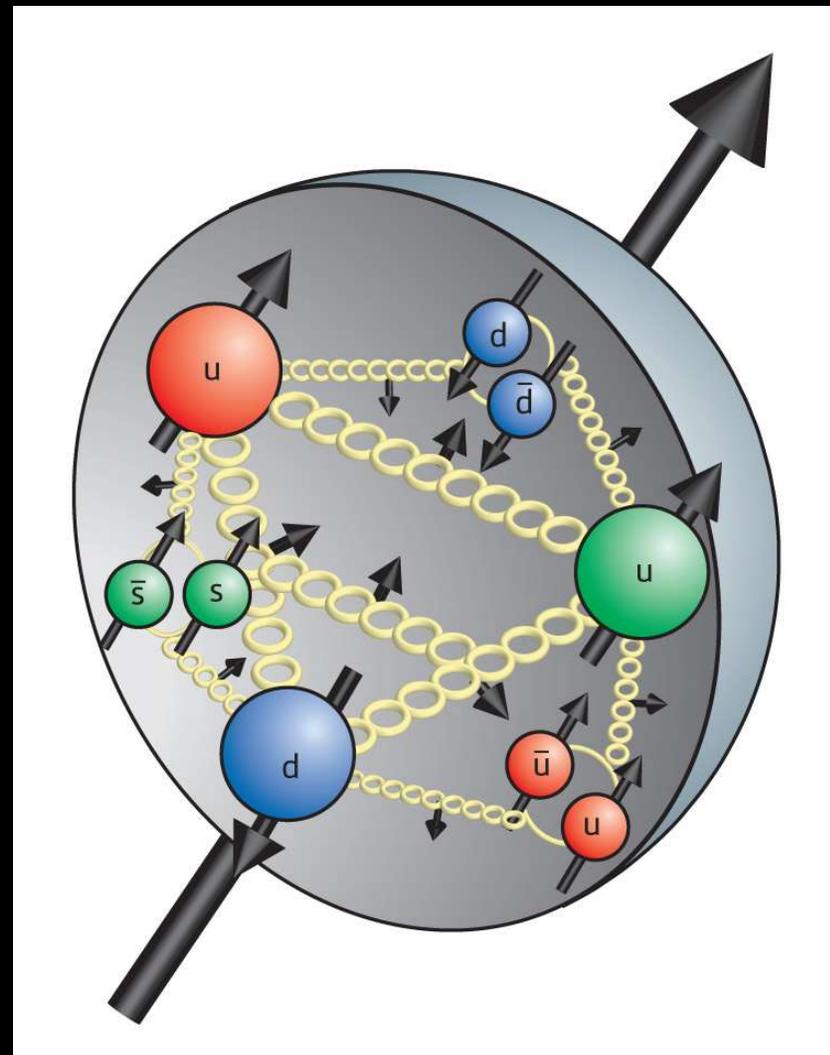
protone

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

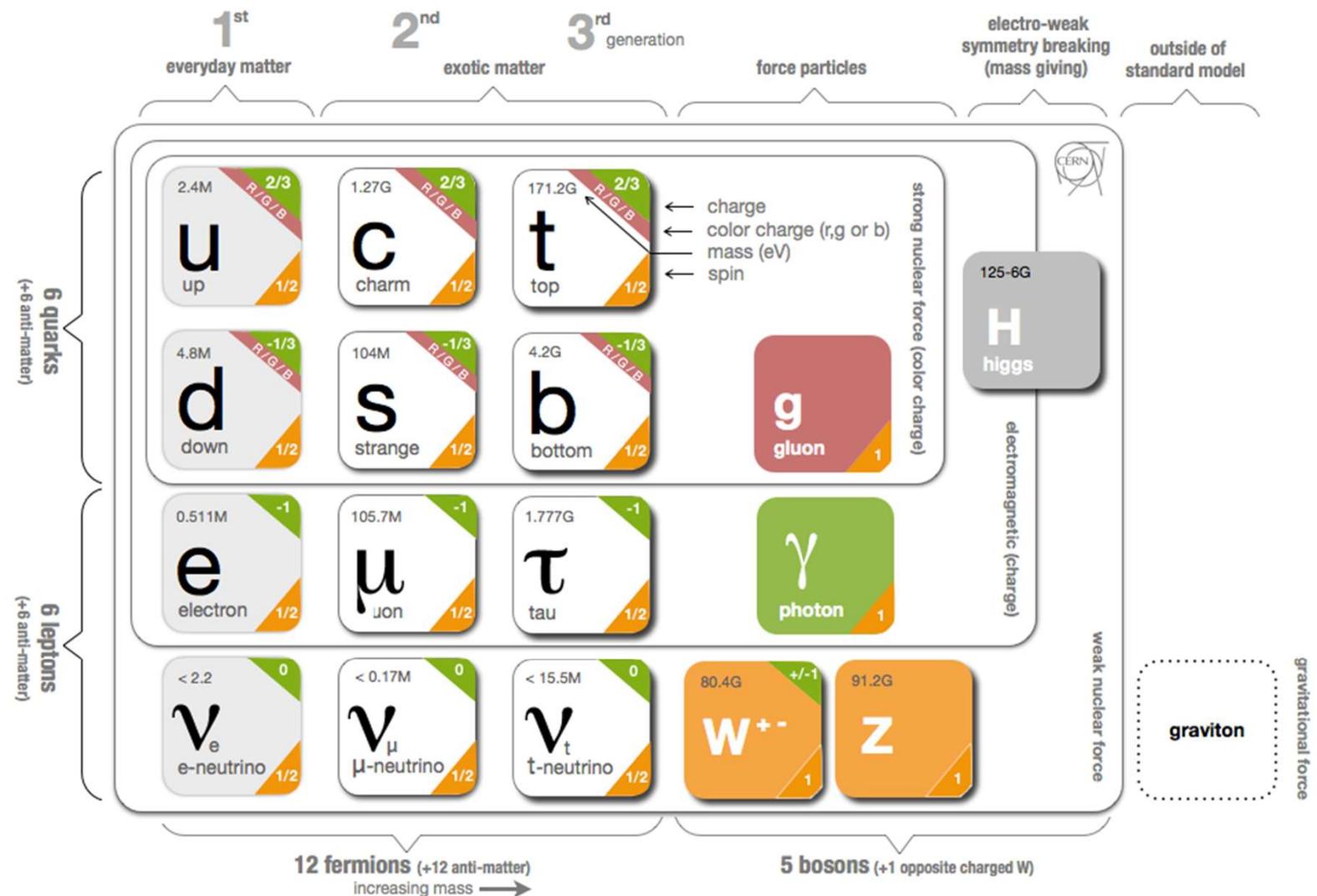


Total charge:
 $+ 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

neutrone



Il Modello Standard



Proprietà delle particelle elementari

Massa

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

Carica elettrica

Particelle neutre (fotone, gluone, Z^0 , H^0 , gravitone), cariche (elettrone, muone,...), 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

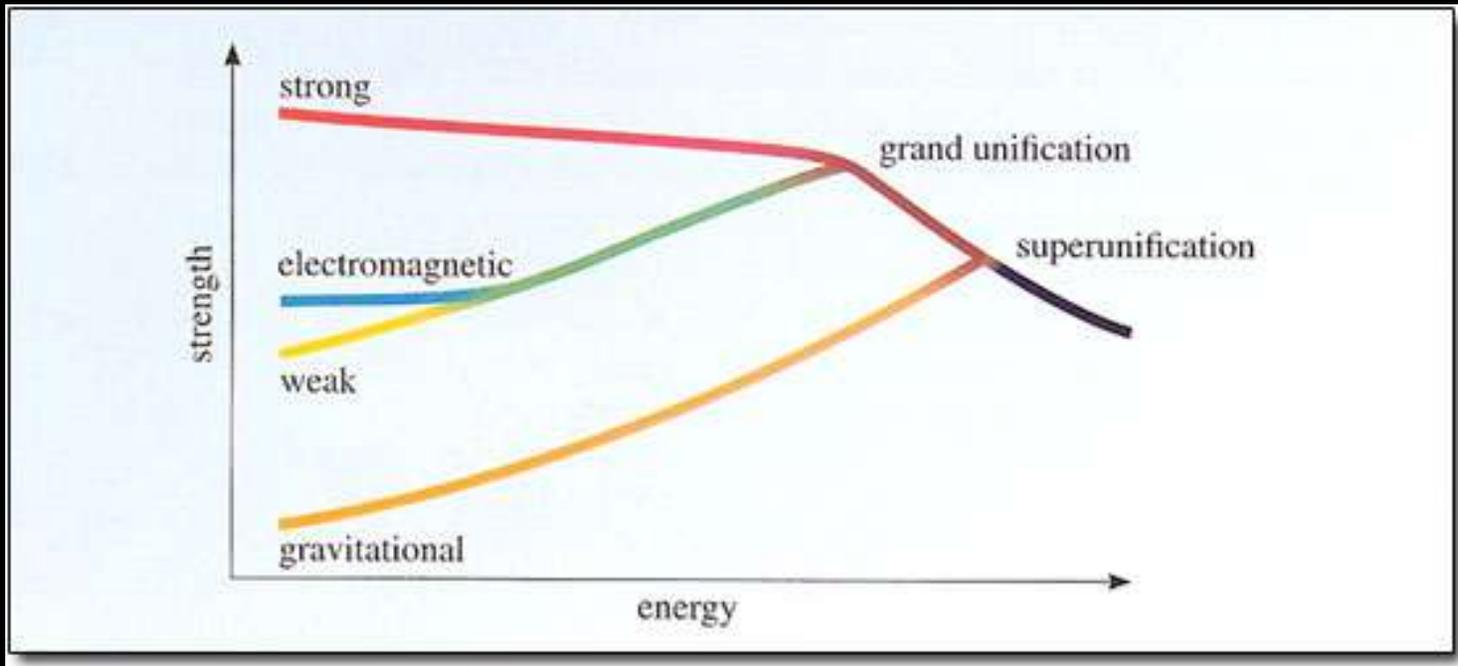
spin 0: H^0

spin 1: g, γ, Z, W^\pm

spin 2: G

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	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	



Il Big Bang

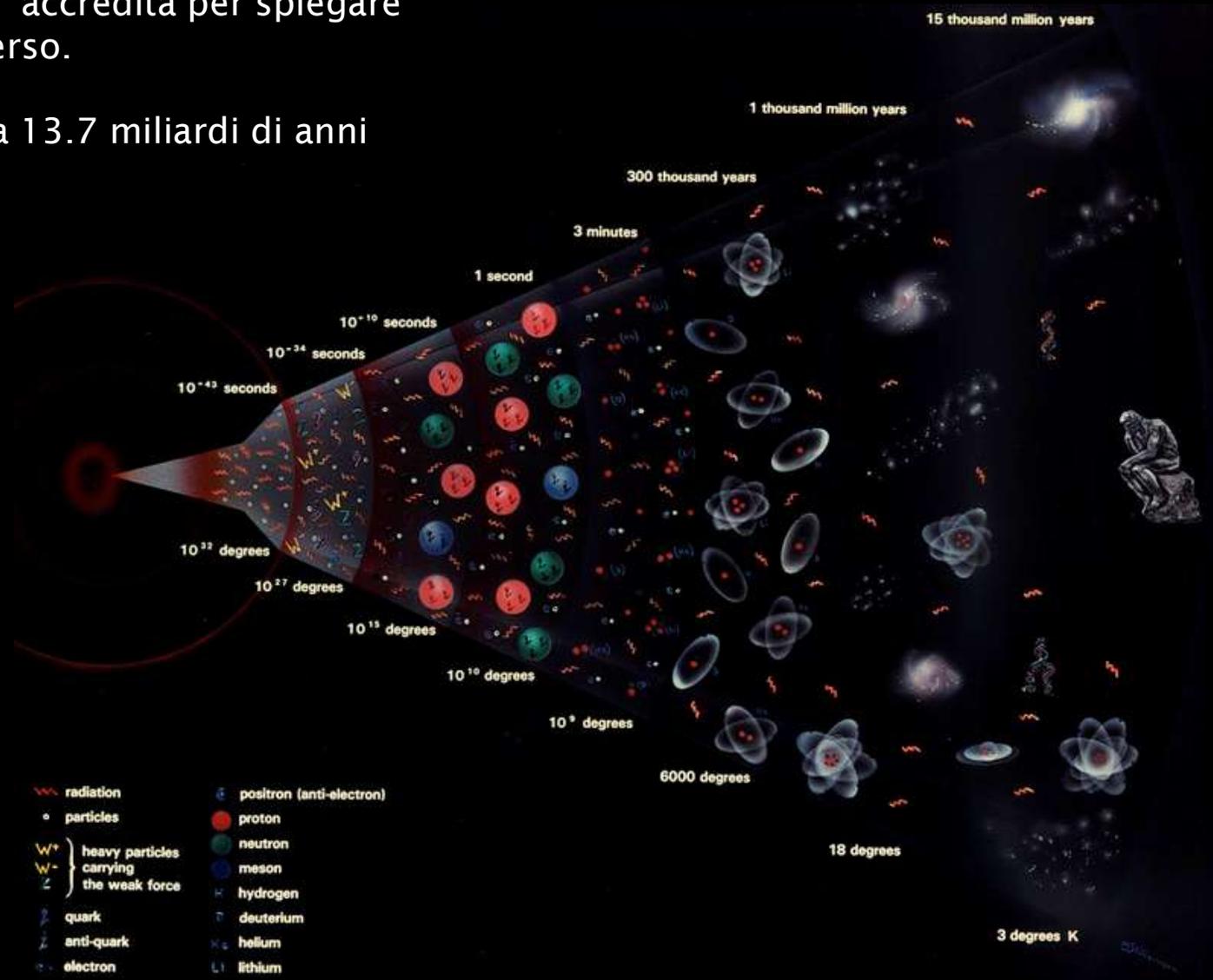
Teoria ad oggi piu' accreditata per spiegare l'origine dell'Universo.

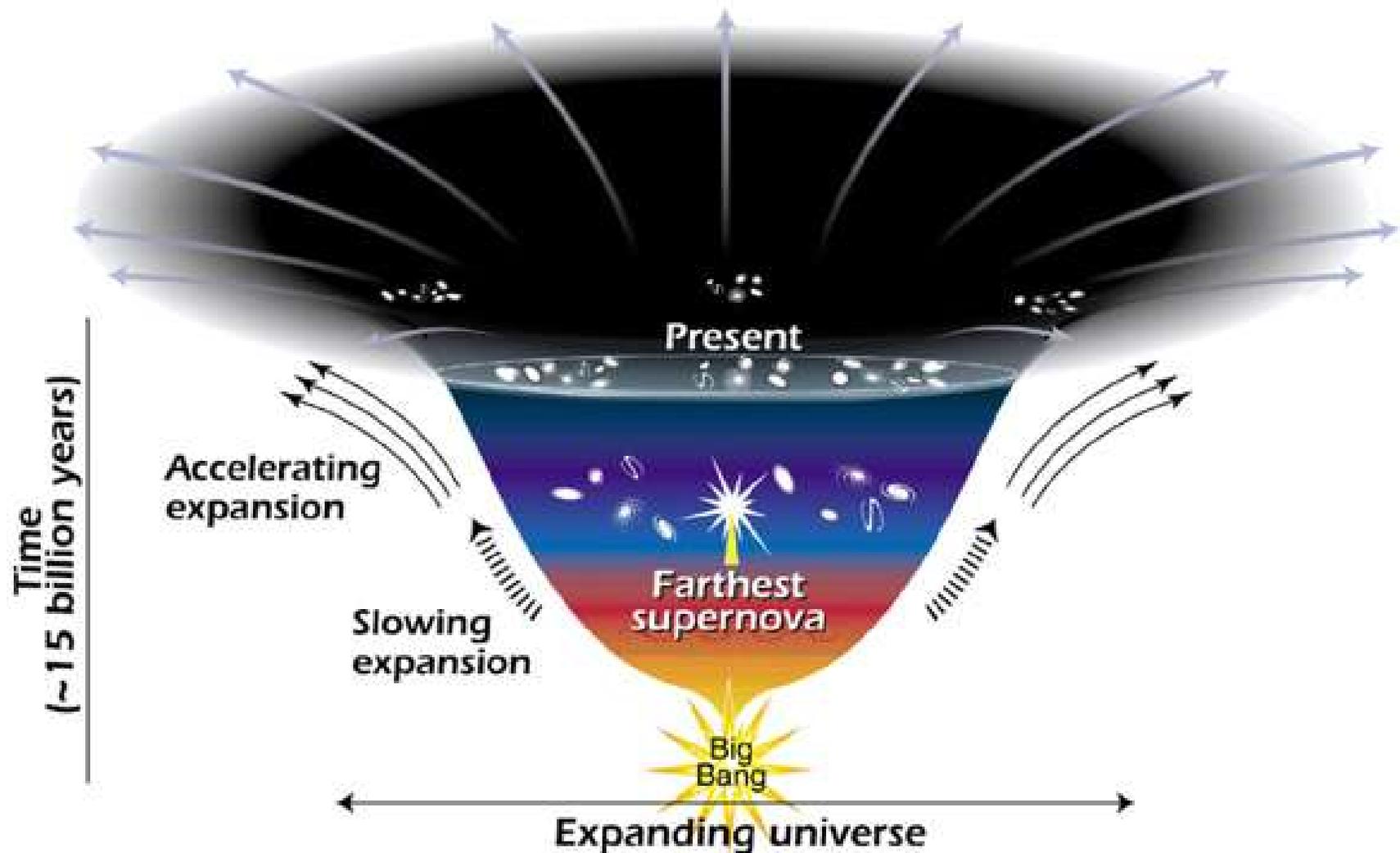
L'Universo ha circa 13.7 miliardi di anni

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

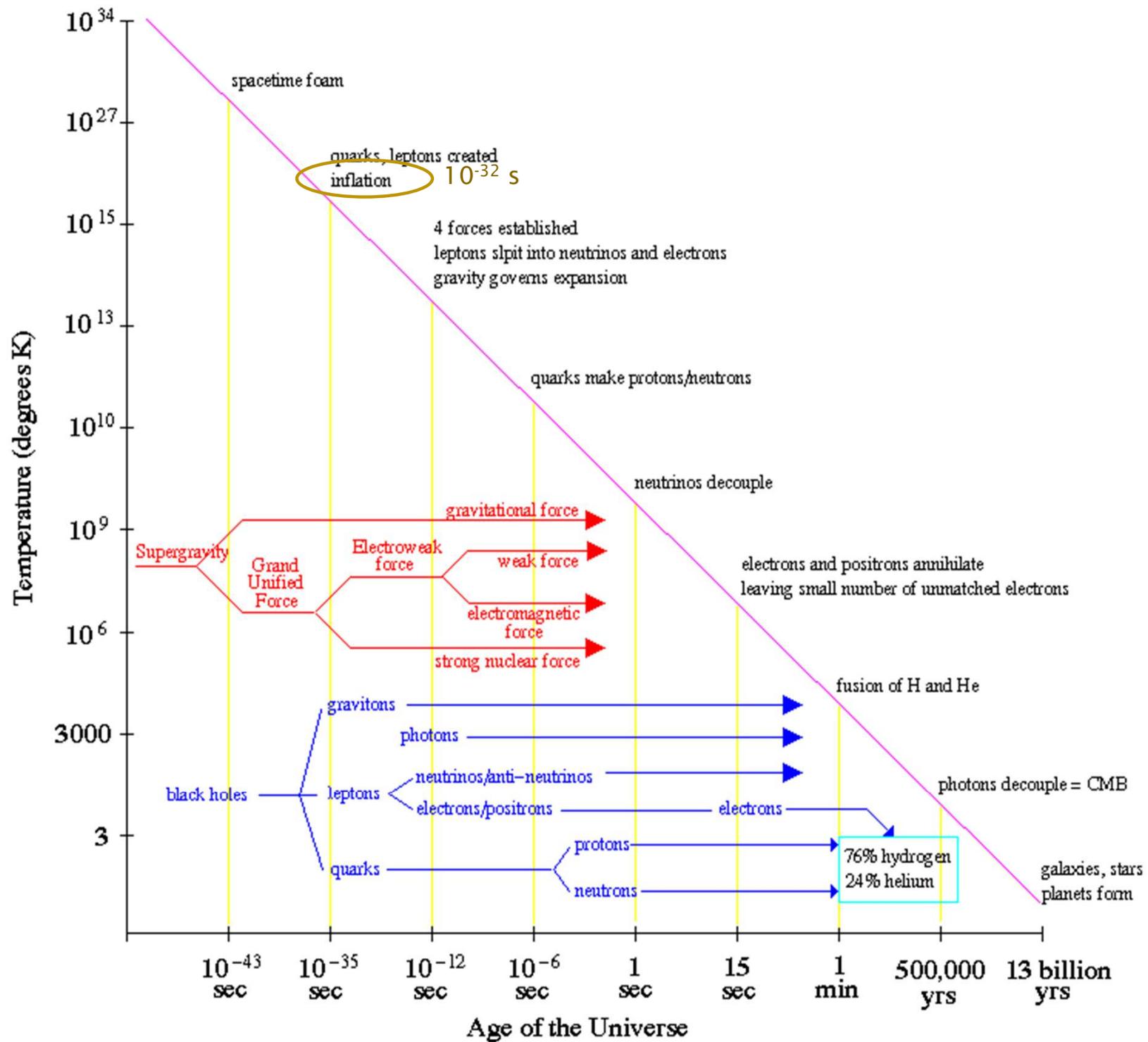
L'Universo ha cominciato ad espandersi, ad allargarsi e durante questa espansione si e' via via creato tutto quello che ci circonda.

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 due Modelli Standard

Il Modello Standard delle particelle elementari (SM) + il Modello Standard cosmologico (Λ CDM = Lambda Cold Dark Matter) 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 e' una teoria quantistica, rispetta la relativita' ristretta di Einstein e descrive le interazioni elettrodeboli e forti

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

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

Λ , costante cosmologica, associata alla dark energy e all'accelerazione dell'universe

Cold Dark Matter, materia non barionica (oscura), che si muove lentamente rispetto alla luce (cold) e che interagisce con la comune materia solo gravitazionalmente (o debolmente)

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

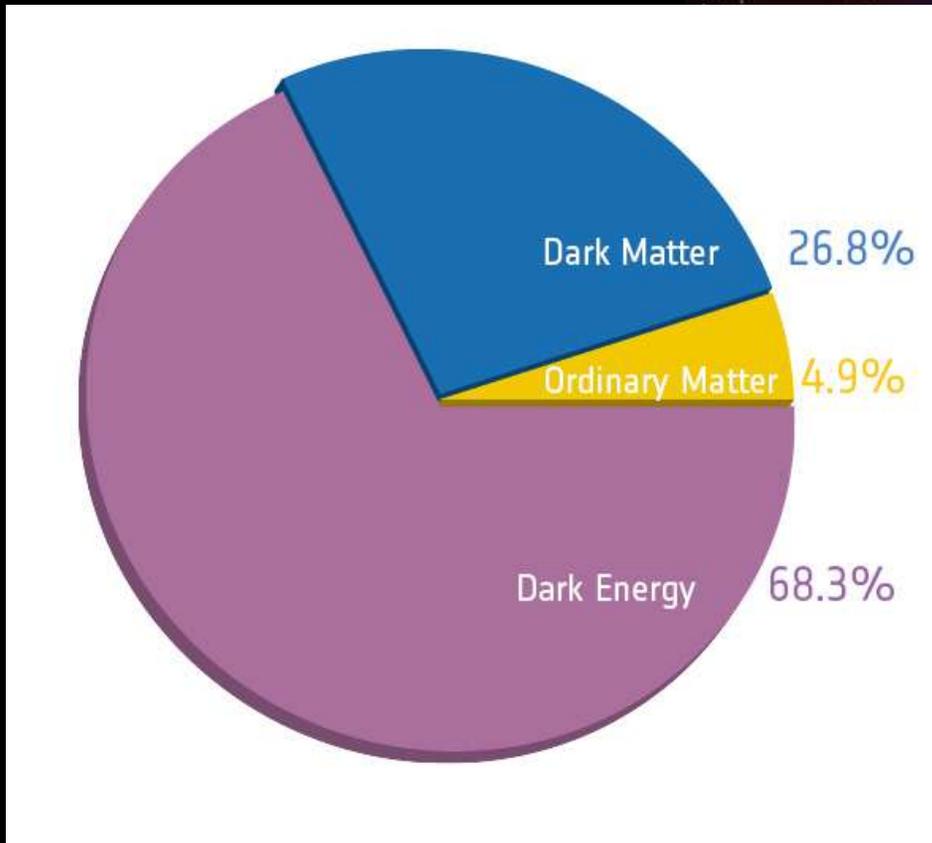
dark matter: materia oscura non costituita dalla materia barionica (protoni, neutroni)

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'e' piu' materia (blu) di quella che vediamo (rossa)

Dark Matter

Dark Matter (DM)

- non interagisce elettromagneticamente: non emette, riflette o assorbe luce
- non abbiamo ancora osservato alcuna particella che interagisca con la DM

Esistenza della DM dedotta da effetti gravitazionali su altre masse nello spazio

- Discrepanze nel moto delle galassie rispetto a quanto atteso tenendo conto della sola materia visibile
- Osservazione della velocità di rotazione delle galassie
- Gravitational lensing: effetto della relatività generale. La materia tra una sorgente di luce e un osservatore, devia la luce e quindi l'immagine della sorgente è distorta. Confrontando la posizione della sorgente (nota da emissione diretta di particelle visibili) con l'immagine distorta, si può ricostruire la distribuzione della materia che causa la distorsione

Cosa sappiamo della DM?

- se è una particella, deve avere una massa dato che interagisce con l'altra materia tramite la gravità
- potrebbe essere una particella che interagisce debolmente con le particelle dello SM, con massa $O(100 \text{ GeV})$ (WIMP), per esempio una particella supersimmetrica
- oppure 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 le simmetria di parita' P , di coniugazione di carica C e la simmetria CP (P seguita da C)

Trasformazione P , inversione coordinate spaziali ($x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$ $z \rightarrow -z$)

Coniugazione di carica C , trasformare la particella in antiparticella

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

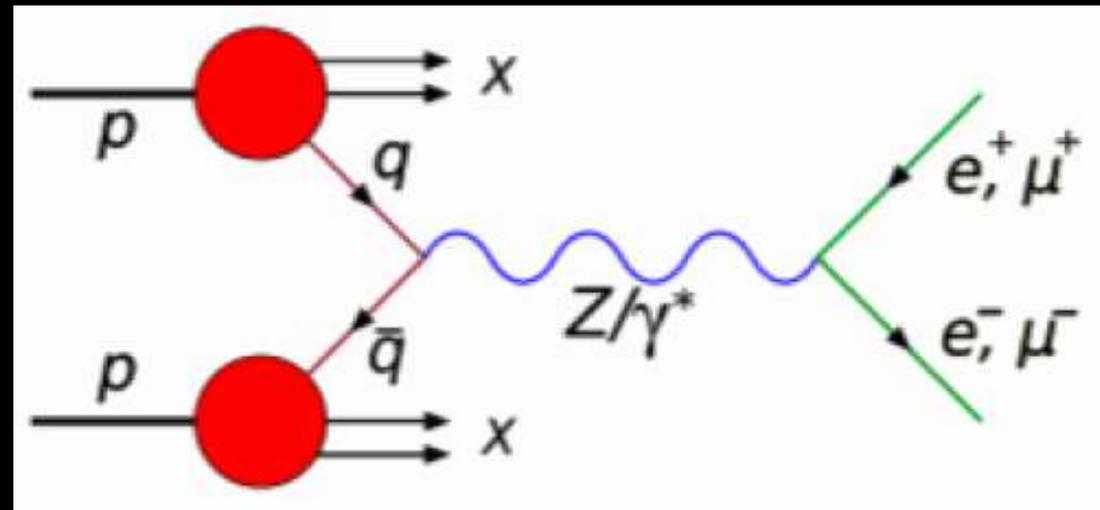
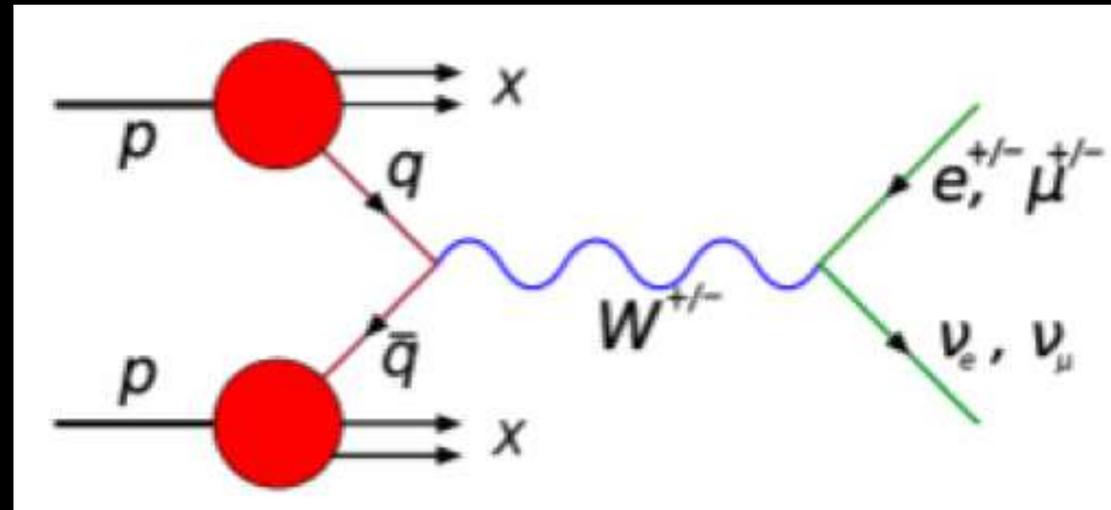
Poi studiate in dettaglio a LEP, a SDC e al Tevatron

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



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

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:

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

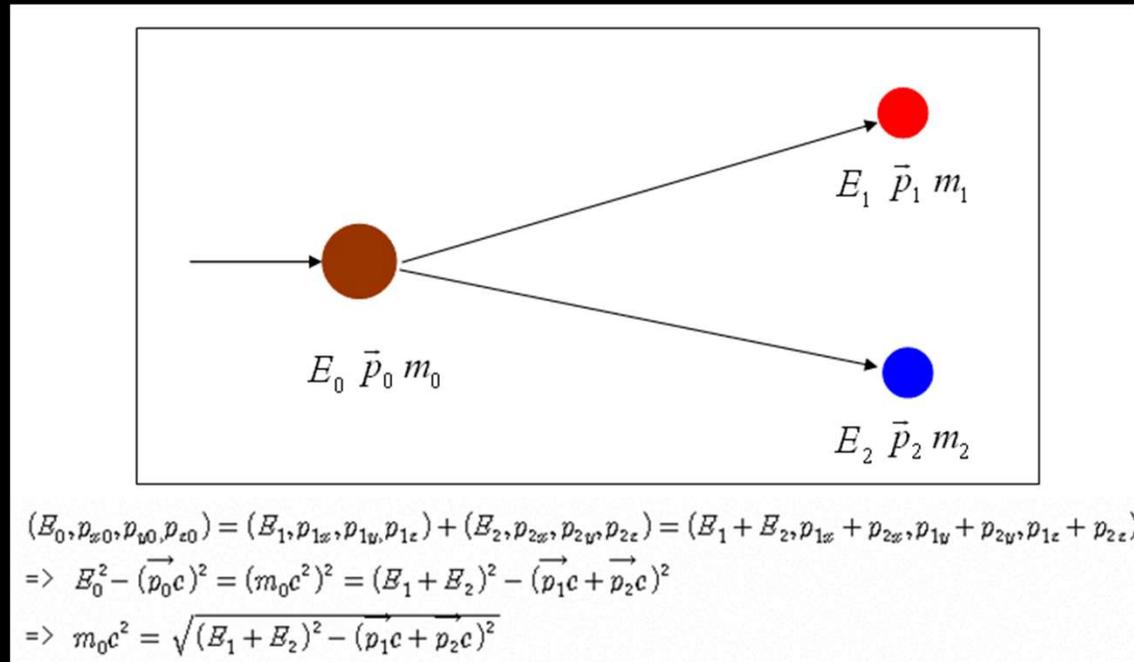
$$P \cdot P = \frac{E^2}{c^2} - p^2 = P' \cdot P' = \frac{E'^2}{c^2} - p'^2 = m_0^2 c^2 \text{ è invariante}$$

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

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

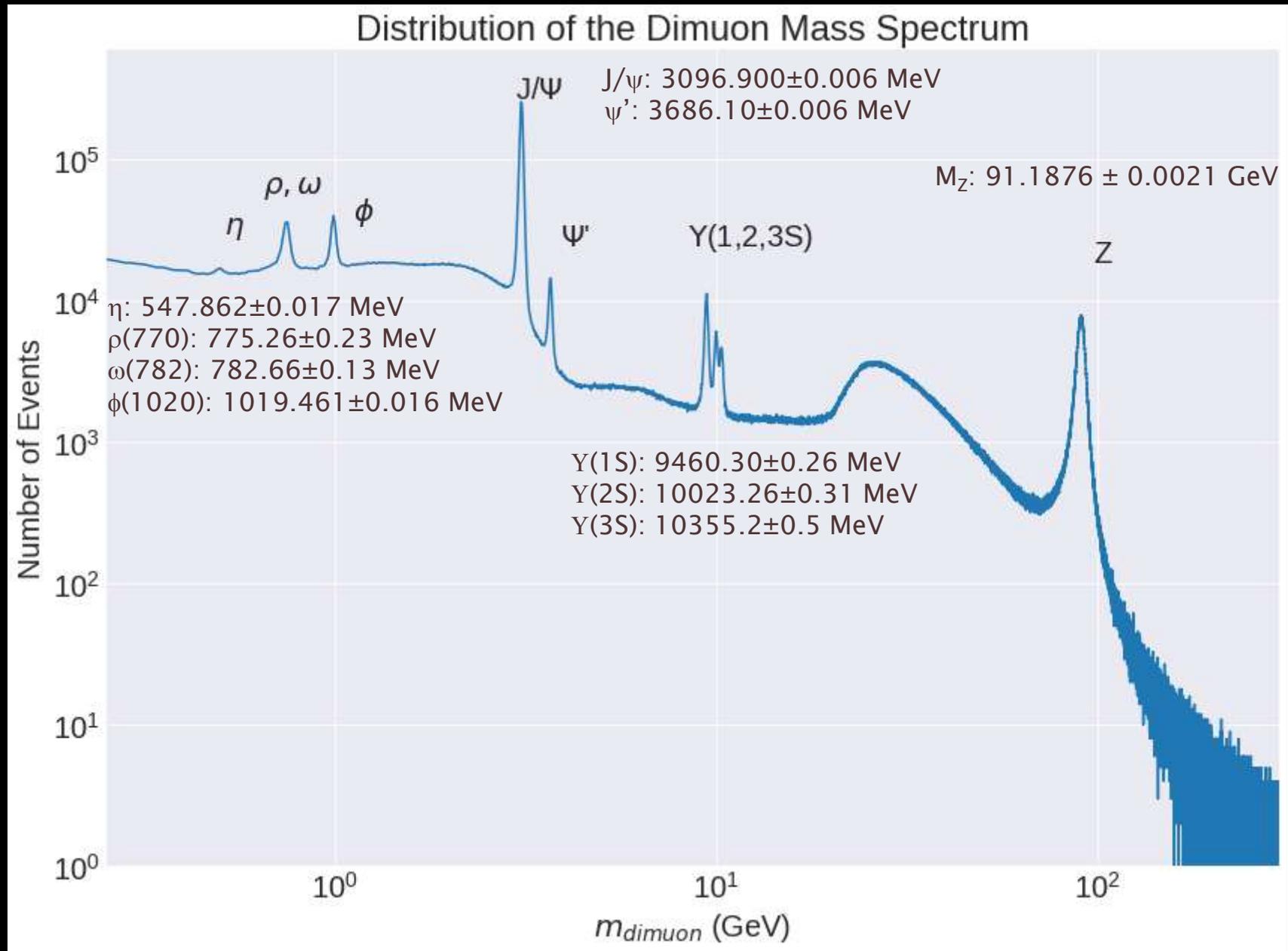
$$P^0 \cdot P^0 = (P^1 + P^2) \cdot (P^1 + P^2) = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2 = m_0^2$$



Z DECAY MODES

Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level
Γ_1 $e^+ e^-$	[a] (3.3632 ± 0.0042) %	←
Γ_2 $\mu^+ \mu^-$	[a] (3.3662 ± 0.0066) %	←
Γ_3 $\tau^+ \tau^-$	[a] (3.3696 ± 0.0083) %	←
Γ_4 $l^+ l^-$	[a,b] (3.3658 ± 0.0023) %	
Γ_5 $\mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$		
Γ_6 $l^+ l^- l^+ l^-$	[c] (4.63 ± 0.21) × 10 ⁻⁶	
Γ_7 invisible	[a] (20.000 ± 0.055) %	←
Γ_8 hadrons	[a] (69.911 ± 0.056) %	←
Γ_9 $(u\bar{u} + c\bar{c})/2$	(11.6 ± 0.6) %	
Γ_{10} $(d\bar{d} + s\bar{s} + b\bar{b})/3$	(15.6 ± 0.4) %	
Γ_{11} $c\bar{c}$	(12.03 ± 0.21) %	
Γ_{12} $b\bar{b}$	(15.12 ± 0.05) %	
Γ_{13} $b\bar{b}b\bar{b}$	(3.6 ± 1.3) × 10 ⁻⁴	

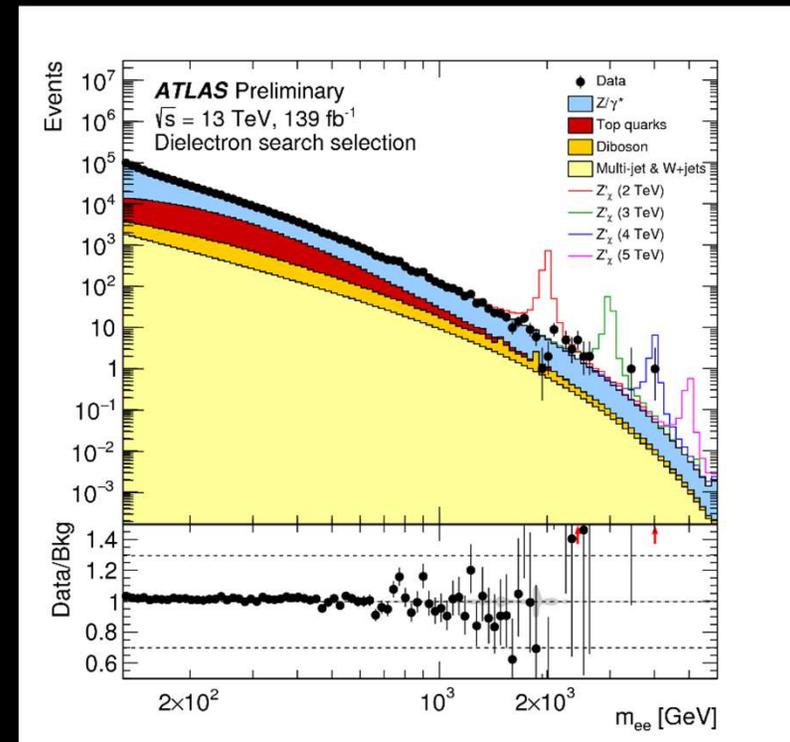
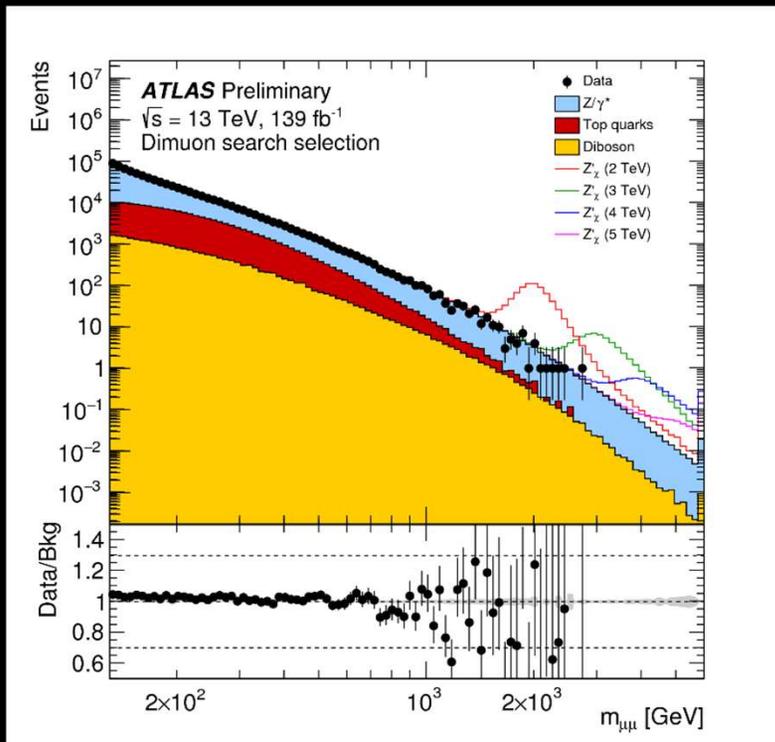
Spettro di massa invariante



Altre ricerche

Bosone Z' di massa maggiore dello Z previsto da alcune teorie che estendono il Modello Standard

particella neutra, spin 1, decadimenti simili allo Z



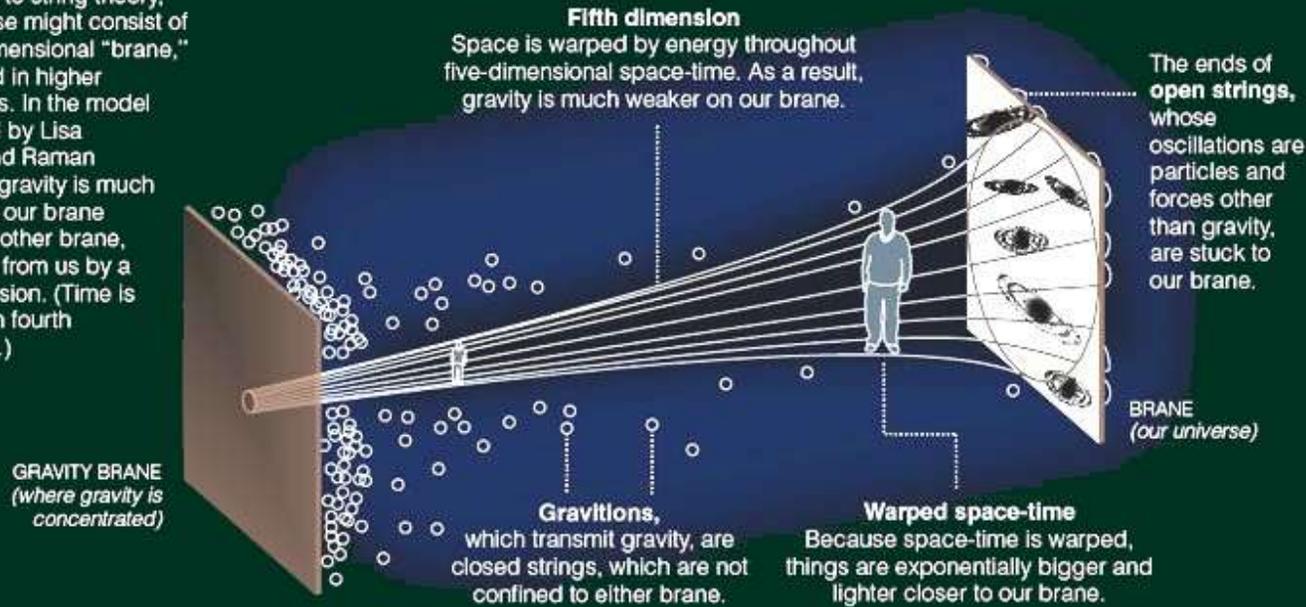
I risultati permettono di mettere dei limiti inferiori sull'esistenza di queste particelle (al 95% confidence level):

4.5 TeV per la massa del Z^0_ψ

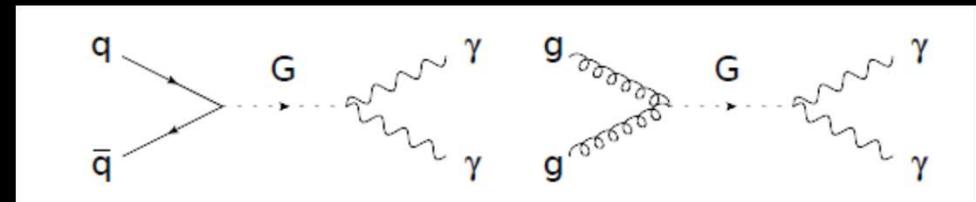
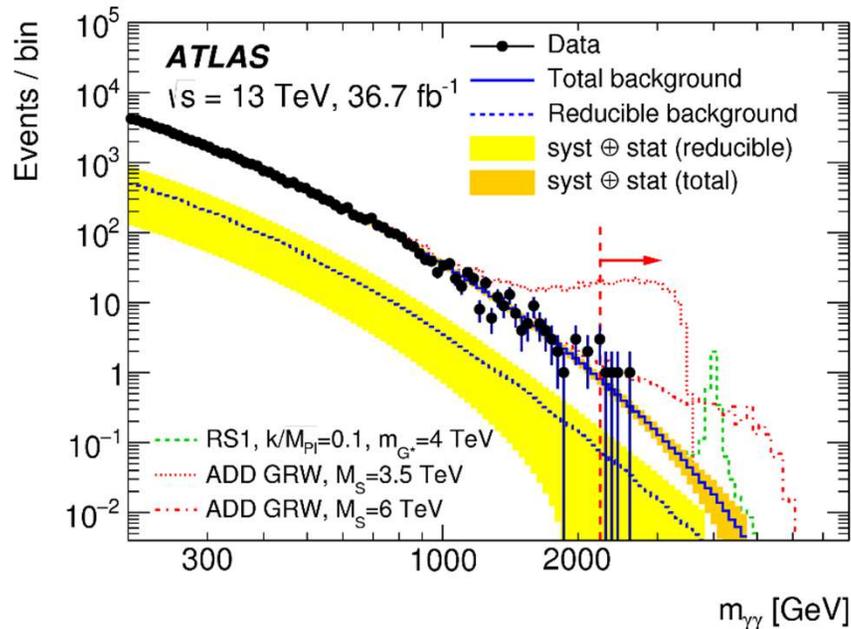
5.1 TeV per la massa del Z^0_{SSM}

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.)



Teoria di Randall-Sundrum



Gravitone massivo (stato eccitato del gravitone) con spin 2 decade in due γ ad alta massa invariante

$$Z \rightarrow e^+ e^- \quad Z \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad Z \not\rightarrow \gamma\gamma$$

Z e Z' hanno gli stessi decadimenti

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

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+ e^- e^+ e^- \quad H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^- \quad H \rightarrow \gamma\gamma$$

H → ee, μμ trascurabile, preferito H → ZZ, WW

$$G \rightarrow e^+ e^- \quad G \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad G \rightarrow \gamma\gamma$$

$$G \rightarrow ZZ \rightarrow 4e, 4\mu, 2e2\mu$$