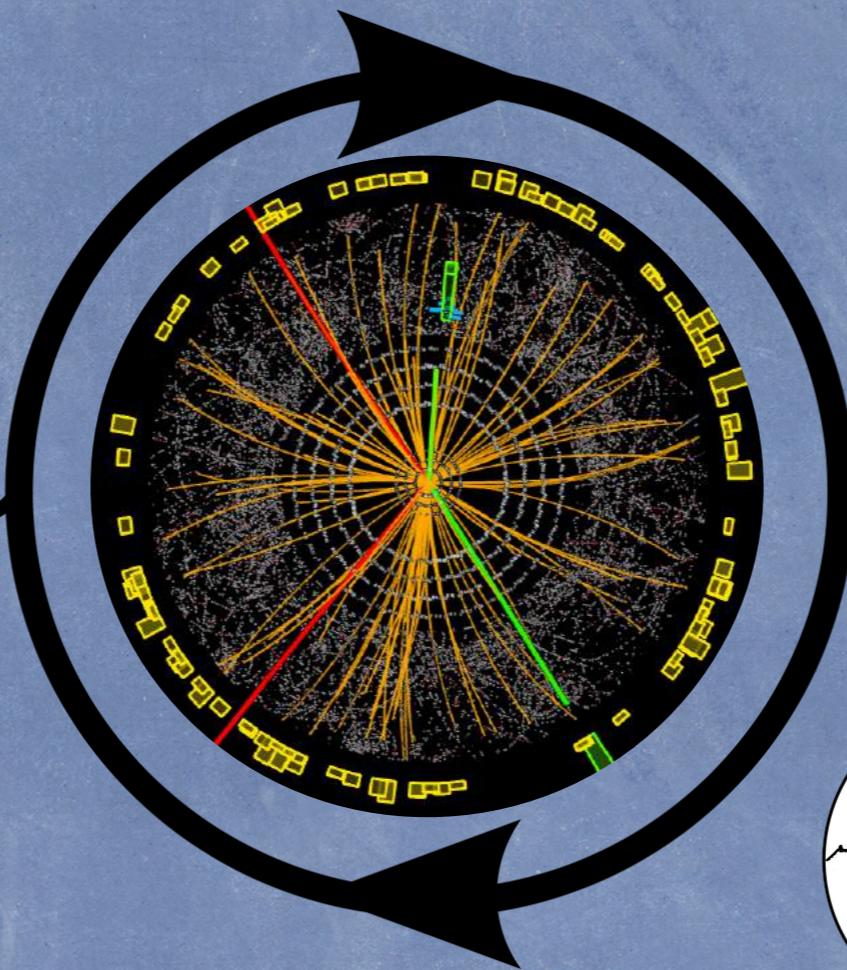


Una storia di colpi di genio, errori, gelati e zuppe.

Il Modello Standard delle interazioni fondamentali

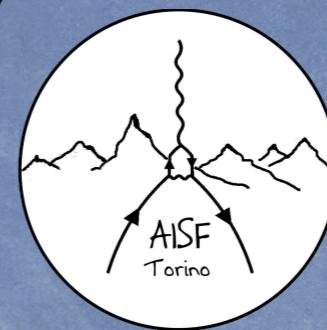
Ovvero: come i fisici si *divertivano* nel Novecento.

Molte Bolle U



L. S. S. Giordano Bruno,
Torino

07/03/2016



Chi sono

2008 - 2012 Extreme Energy Events @



Luglio 2015 GraSPA summer school in
particle and astroparticle physics @

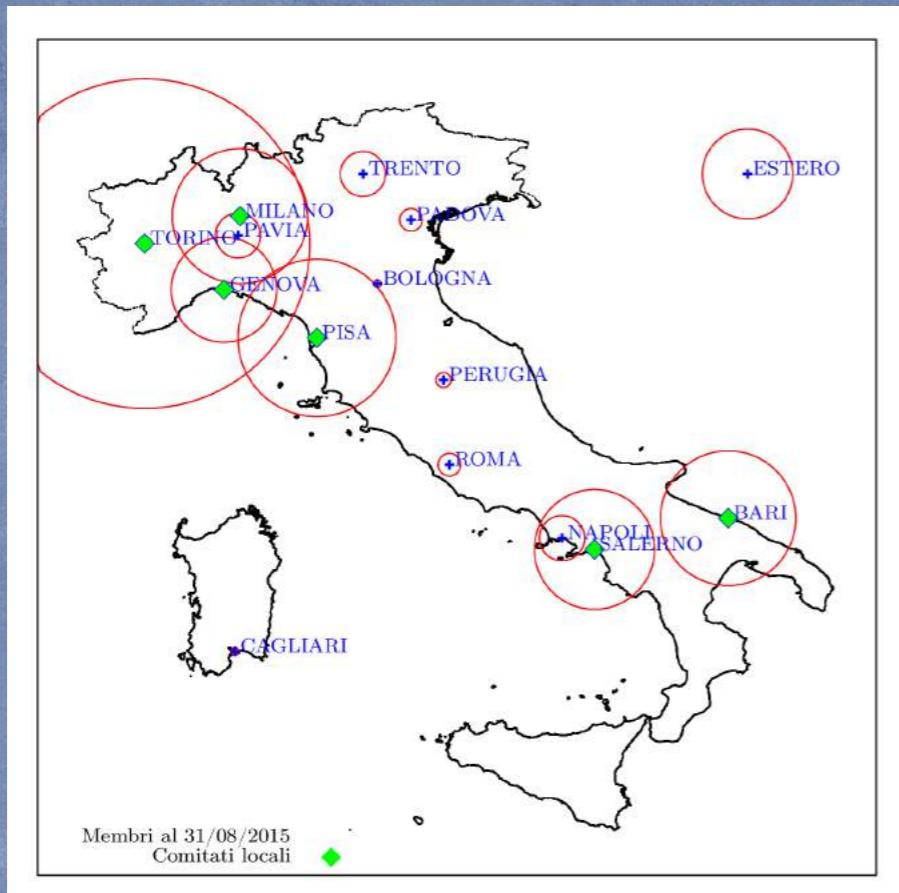


Dicembre 2015 analisi di Van Der Meer
scans (luminosity decay, pp $\sqrt{s} = 5$ TeV) @





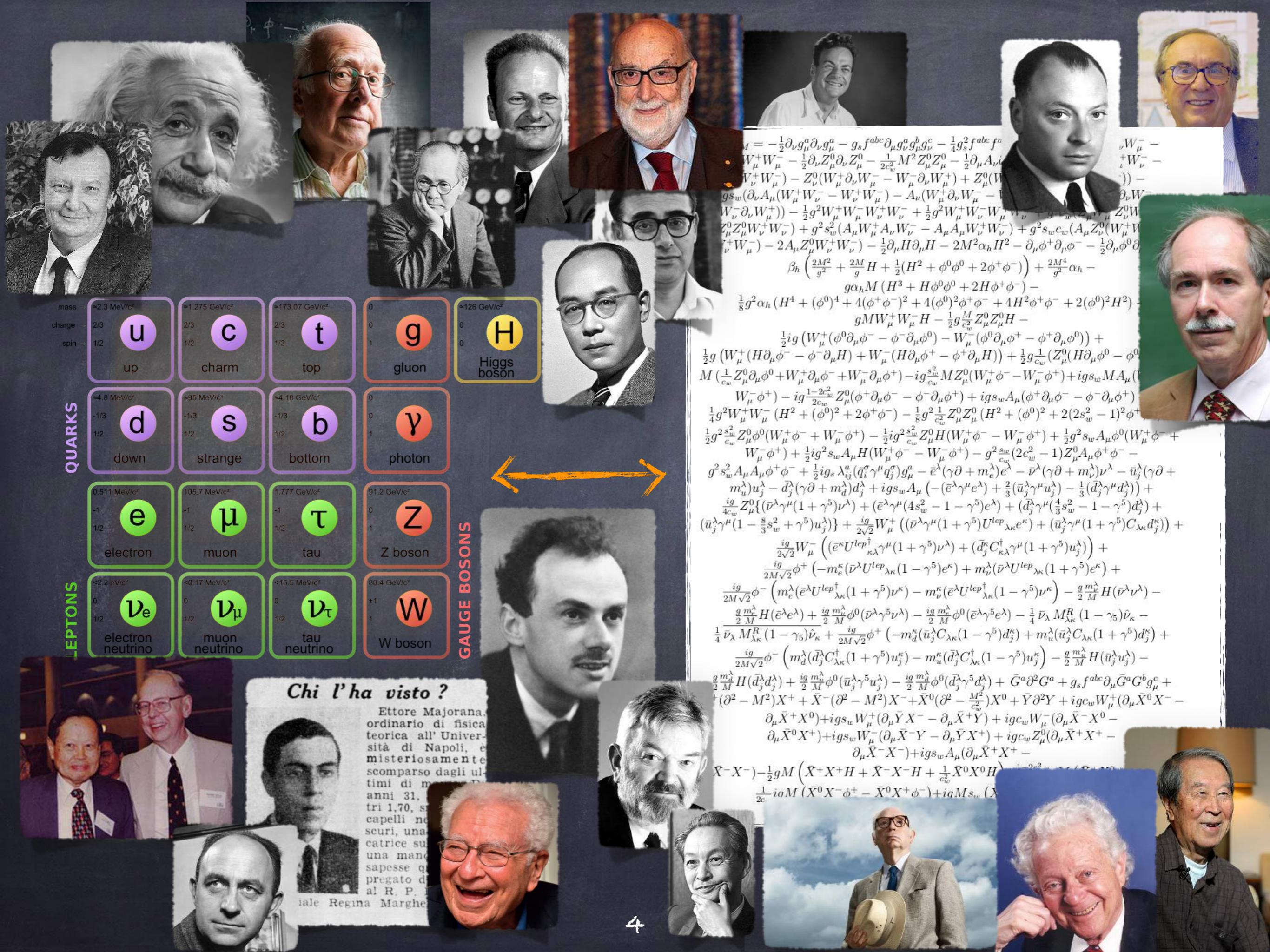
Le finalità e gli scopi dell'AISF sono la promozione delle scienze e, in particolare, della Fisica fra gli studenti e lo sviluppo di relazioni fra studenti delle diverse parti del paese.



Comitato di TORINO:
Conferenza Italiana Studenti
di Fisica

International Conference of
Physics Student 2017

ParticleBeers



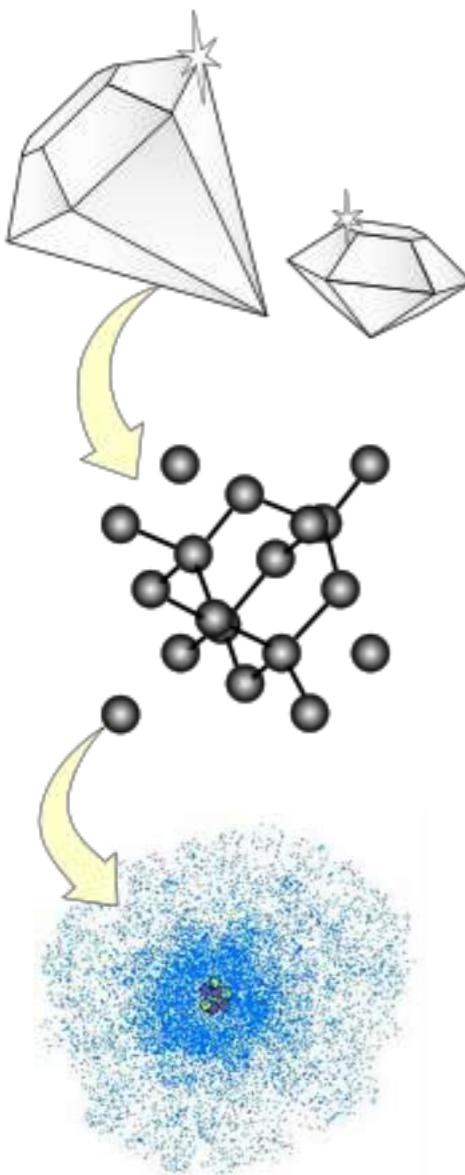
Premessa

- 1 - Esistono molti approcci al MS, ognuno ha il suo. Noi procederemo interazione per interazione.
- 2 - Le formule sono solo per bellezza (*finalmente*).
- 3 - La maggior parte dei concetti sono in realtà molto complessi: fate *domande!*



Premessa (scontata)

1 - La materia ordinaria è costituita da molecole e le molecole da *atomí*, a loro volta costituiti da protoni, neutroni ed elettroni.



2 - Valgono le seguenti leggi:

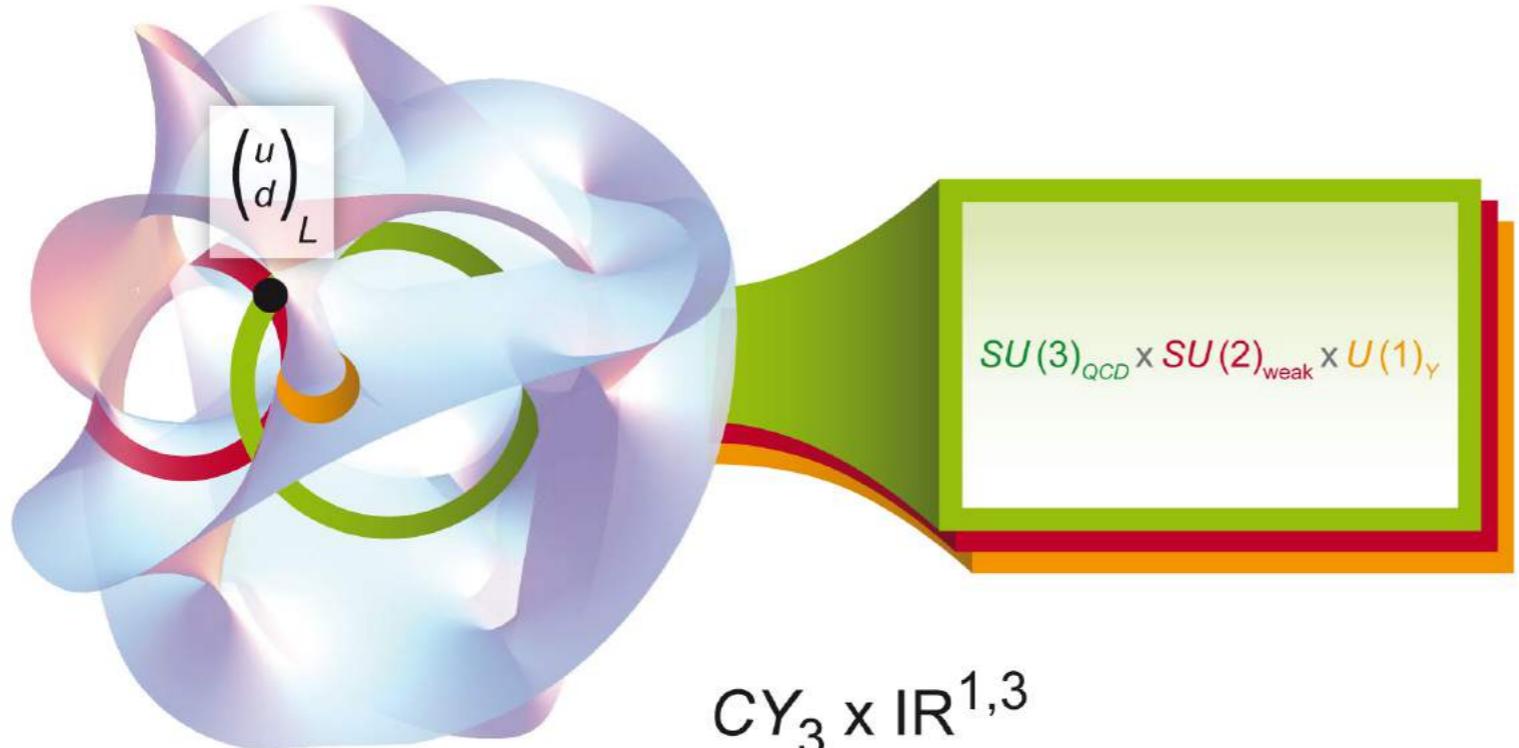
$$\vec{F}_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{u}_r \quad \vec{F}_L = q \{ \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \}$$

$$\vec{F}_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{u}_r$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\Omega} \frac{dq}{dV} \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|_{\mathbb{R}^3}} d^3 r'$$

Unificazione?



$$CY_3 \times \mathbb{R}^{1,3}$$

ST?

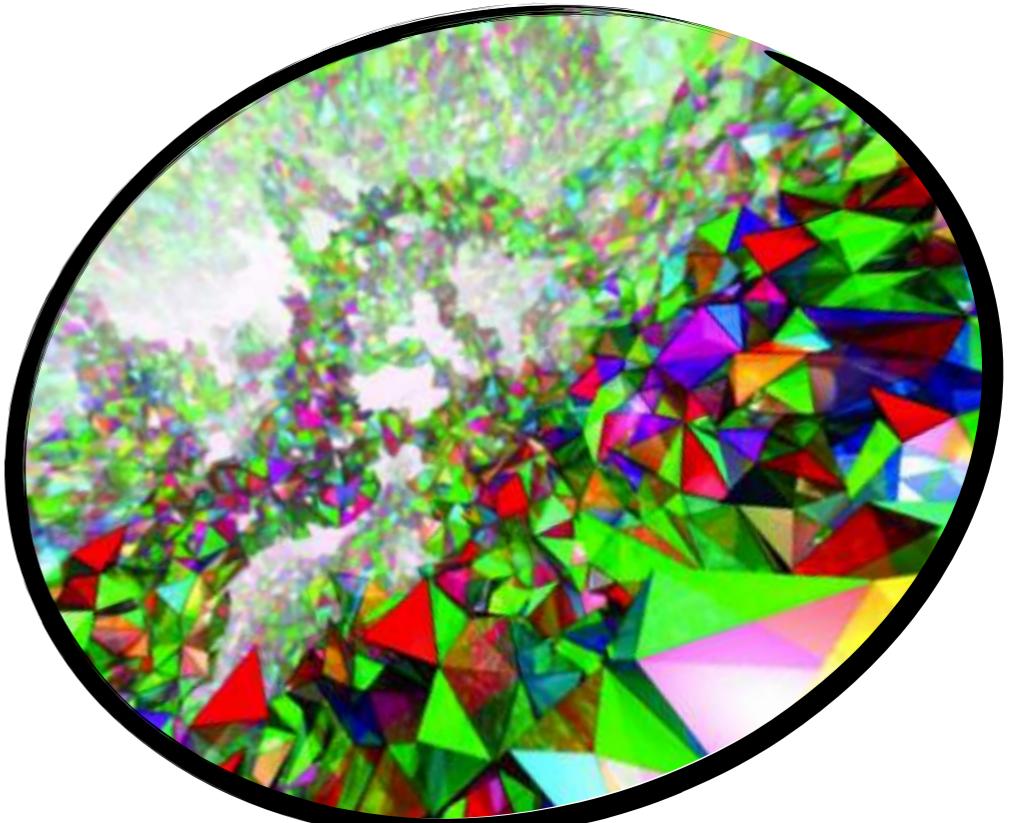
$$\frac{\partial^2 X^\mu(\sigma, \tau)}{\partial \tau^2} = c^2 \frac{\partial^2 X^\mu(\sigma, \tau)}{\partial \sigma^2}$$

$$S = -\frac{1}{4\pi\alpha'} \int d\sigma d\tau \sqrt{h} h^{nm} \partial_m X^\mu \partial_n X_\mu$$

QG?

$$\hat{H}\psi = \left(G_{ijkl} \hat{\Pi}^{ij} \hat{\Pi}^{kl} - \frac{\sqrt{h}}{2\kappa} \hat{R} \right) \psi = - \left(G_{ijkl} \frac{\delta^2}{\delta \hat{h}_{ij} \delta \hat{h}_{kl}} + \frac{\sqrt{h}}{2\kappa} \hat{R} \right) \psi = 0$$

$$V = \int_R d^3x \sqrt{\det q} = \frac{1}{6} \int_R d^3x \sqrt{\epsilon_{abc} \epsilon^{ijk} \tilde{E}_i^a \tilde{E}_j^b \tilde{E}_k^c}$$

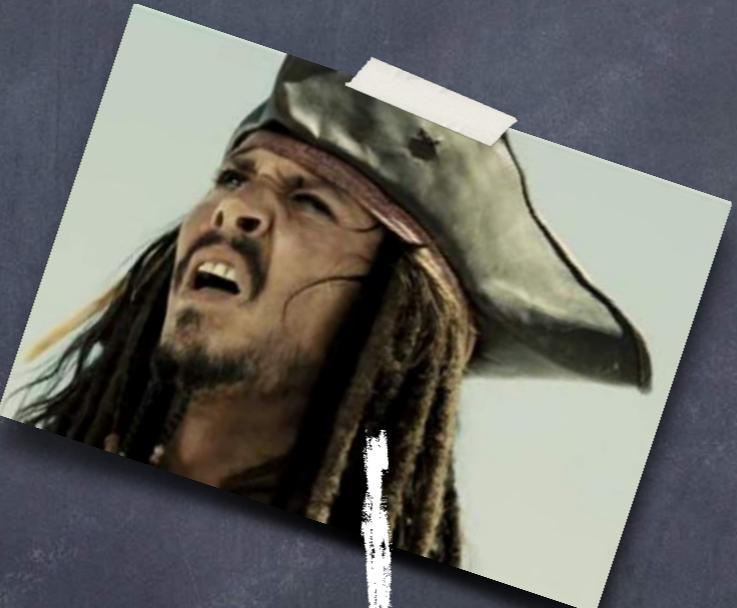


COS'È IL MS?

“Teoria quantistica di Yang-Mills
rinormalizzabile e covariante con gruppo di
simmetria $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.”

Meccanica
Quantistica

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi$$



Relatività
Ristretta

$$x^2 = \eta_{\mu\nu} x^\mu x^\nu$$

“Il framework teorico che descrive 3/4
interazioni fondamentali.”

La lezione della MQ:



Il determinismo non è fondamentale:

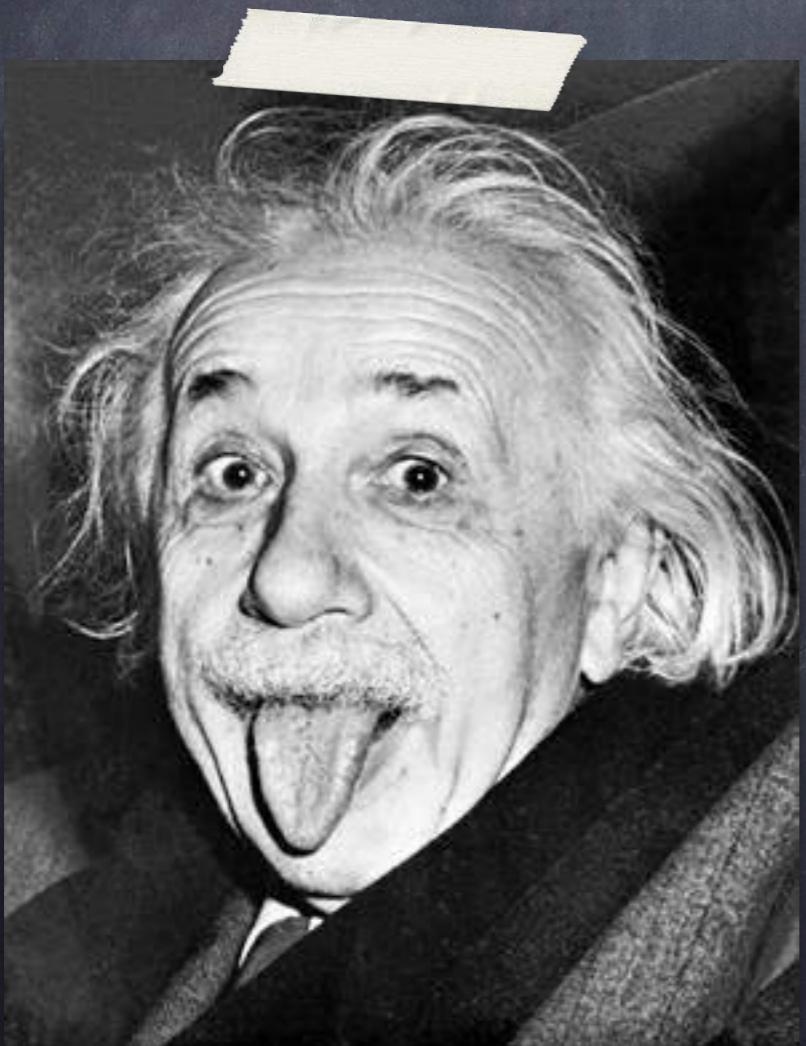
$$\Delta F \Delta G \geq \frac{1}{2} \left| \langle i[F,G] \rangle_{\psi} \right|$$

$$\Delta x^{\mu} \Delta p_{\nu} \geq \frac{\hbar}{2} \delta_{\nu}^{\mu}$$

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Delta E \Delta t \approx \hbar$$

La Lezione della RR:

1 - Tutti gli osservatori inerziali vedono la stessa fisica.

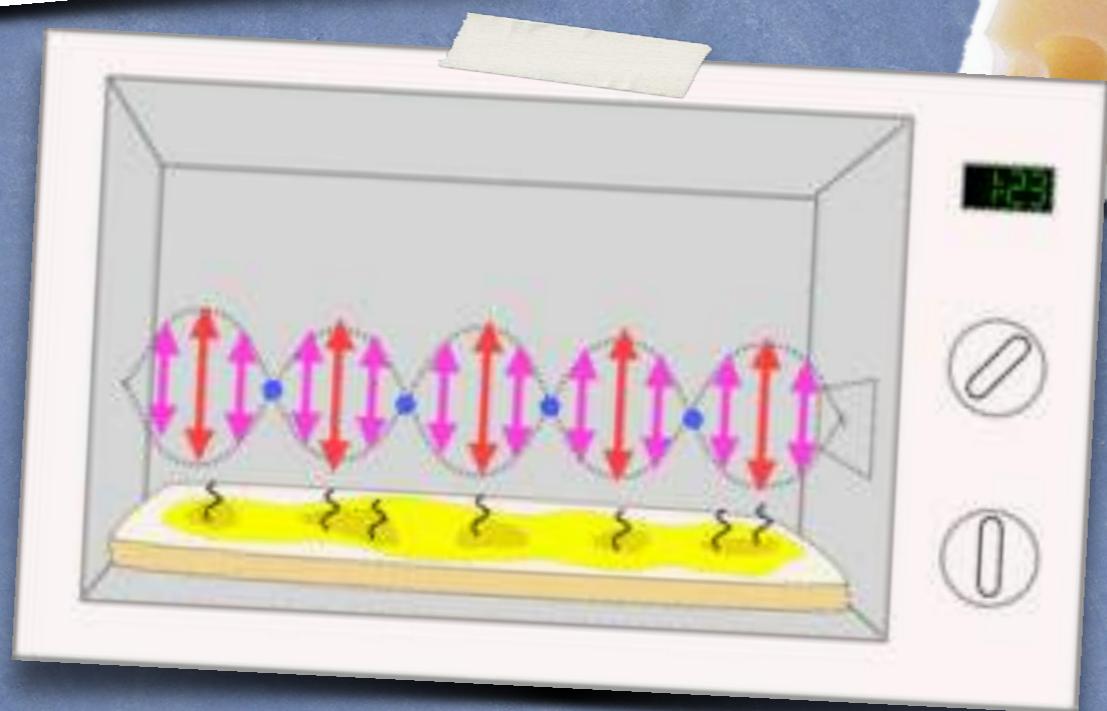
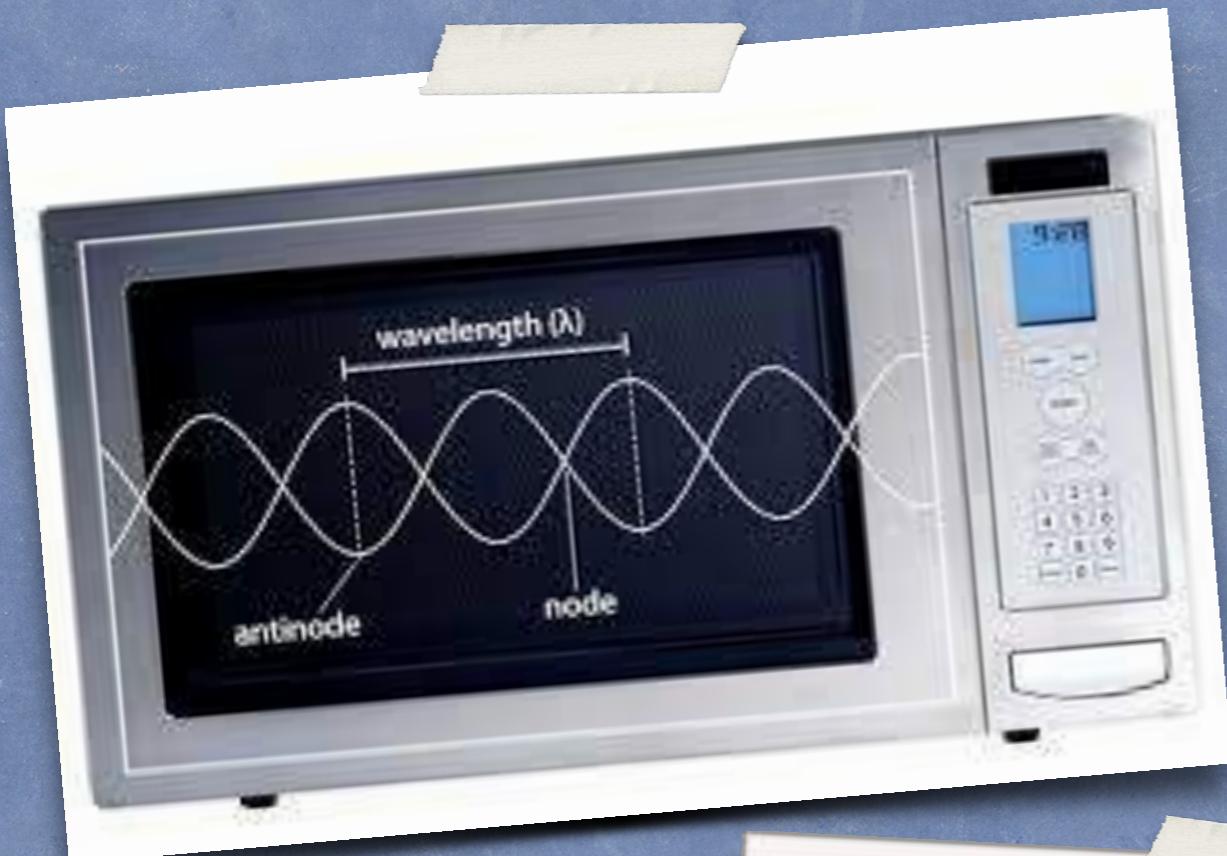


2 - La velocità della luce è costante e indipendente dal sistema di riferimento.

3 -

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = \gamma m c^2$$

Do It Yourself!



La Lezione di MQ + RR:

1 - Il numero di particelle di un sistema non si conserva:

energia cinetica \longleftrightarrow particelle massive

2 - Il vuoto non è vuoto, esistono fluttuazioni quantistiche.

3 - I *collider* sono microscopi quantistici.



La Lezione di MQ + RR:

4 - Tutte le particelle presentano un numero quantico chiamato *spin* di dimensione $[s] = [\text{energia} \times \text{tempo}]$.

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

5 - Esse si distinguono in bosoni, con spin intero e fermioni, con spin semi-intero.



Un po' di furbizia...

1 elettronvolt (eV) è l'energia guadagnata o persa da una carica elettrica fondamentale quando attraversa una differenza di potenziale nel vuoto pari a 1 V.

$$1 \text{ eV} = e \text{ J} / 1 \text{ C} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

In *unità naturali* $c = h = 1$, dunque vale:

[lunghezza] $^{-1}$ = [tempo] $^{-1}$ = [energia] = [impulso] = [massa]

Vale, poi, la relazione di De Broglie:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \sim 200 \text{ MeV} \longleftrightarrow \sim 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

La prima interazione ...

1865, J. C. Maxwell pubblica il testo *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, nel quale compaiono per la prima volta le celebri e omonime equazioni:

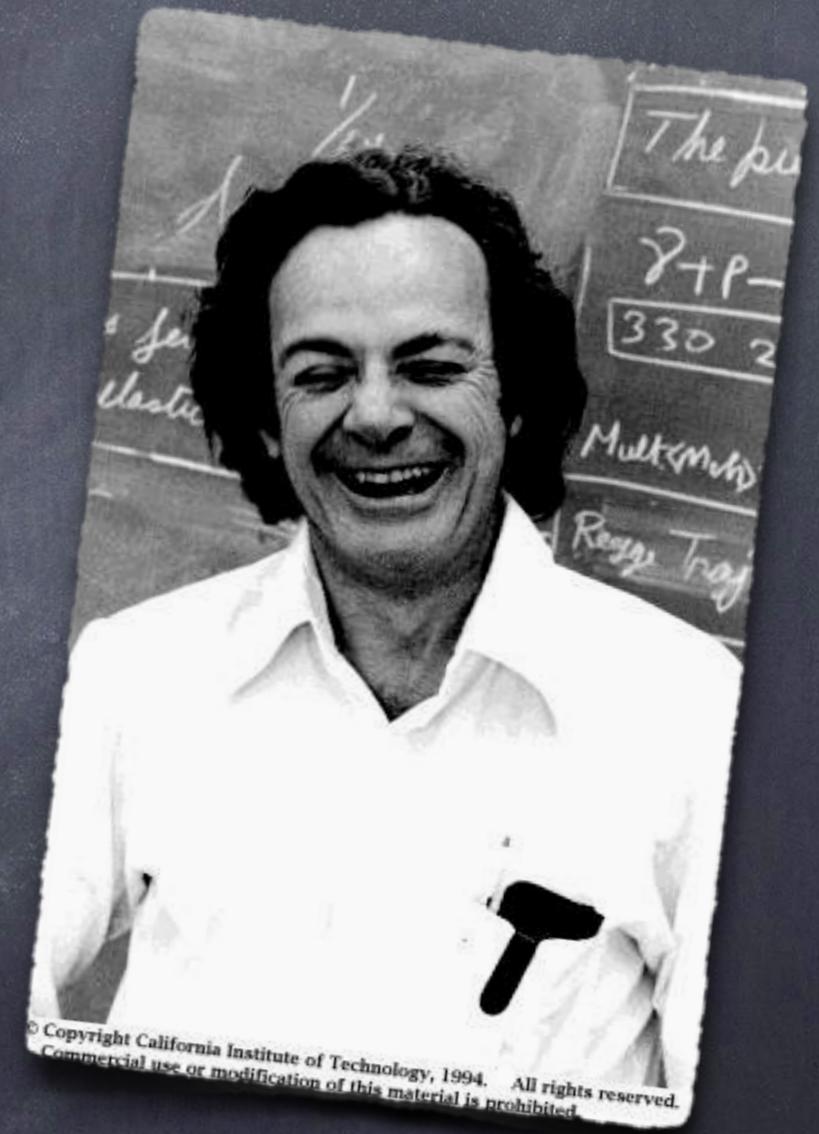
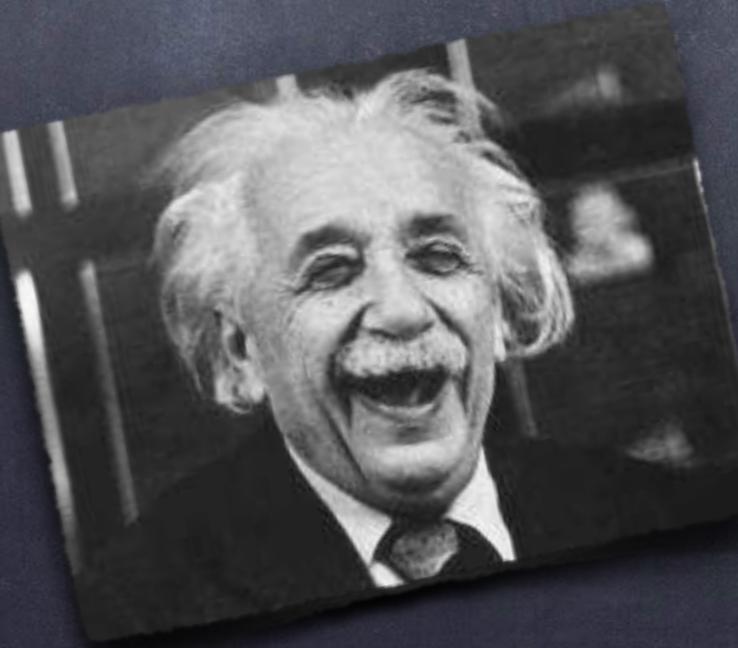
The image displays handwritten mathematical equations in black ink on a dark background. On the left, there is a signature 'Gauss'. To its right are three equations: 1) $\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{S} - \int_V \rho dV = 0$; 2) $\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$; and 3) $\oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$. To the right of these is a signature 'Faraday'. Below these is a signature 'J. C. Maxwell'. At the bottom left, there is a signature 'Ampere'. To the right of the Ampere signature is the equation $\frac{\partial}{\partial t} \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} - \oint_{\partial S} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = 0$. The term $\int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$ is circled in red.

$$\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{S} - \int_V \rho dV = 0$$
$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$
$$\oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$
$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} - \oint_{\partial S} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = 0$$

Maxwell comprese che l'elettricità, il magnetismo e l'ottica sono manifestazioni differenti di una stessa entità: il campo elettromagnetico.

“Adesso non c’è più nulla da scoprire.”

William Thomson, I barone Kelvin, 1867



© Copyright California Institute of Technology, 1994. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

... e i primi problemi.

1905, A. Einstein pubblica l'articolo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* in cui espone la teoria della relatività ristretta e dimostra che la teoria di Maxwell è covariante.

Tuttavia, quando si cercò di *quantizzare* il campo elettromagnetico i calcoli fornirono valori infiniti e, in genere, non compatibili con i dati sperimentali.

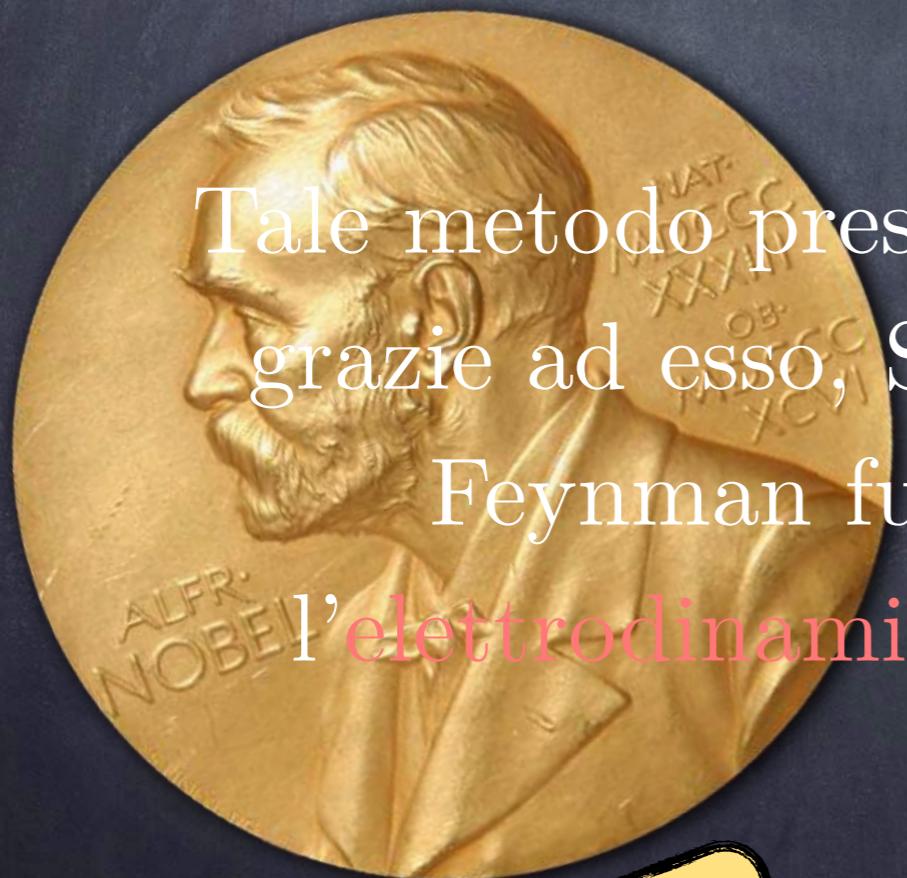
riposo

$$m_t = m_0 + \frac{1}{2} \int E^2 dV = m_0 + \frac{1}{2} \int_{r_e}^{\infty} \left(\frac{q}{4\pi r^2} \right)^2 4\pi r^2 dr = m_0 + \frac{q^2}{8\pi r_e} \rightarrow \infty, r_e \rightarrow 0$$

autointerazione



Il fisico tedesco H. Bethe risolse questo problema. In viaggio sul treno di ritorno da una conferenza scientifica, sviluppò una procedura matematica che permetteva di risolvere gli infiniti nelle equazioni.

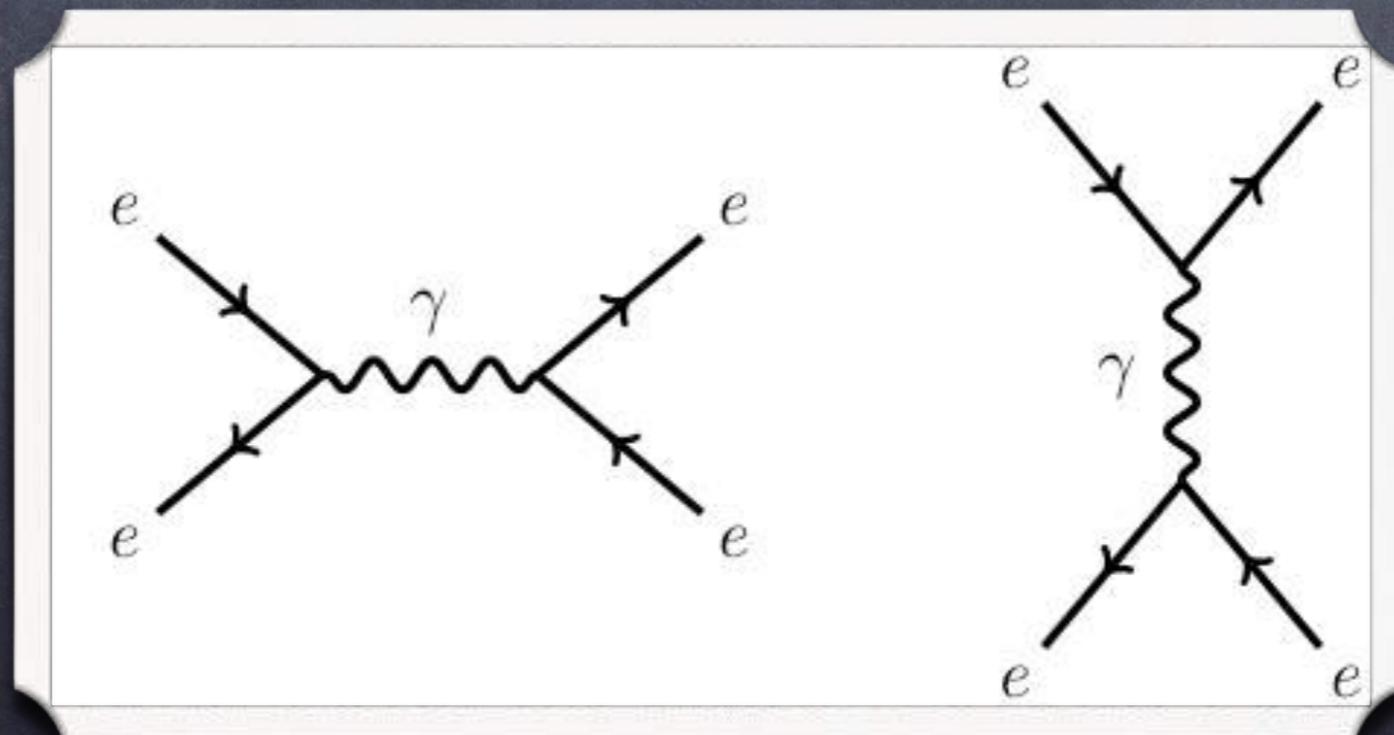


Tale metodo prese il nome di **rinormalizzazione** e, grazie ad esso, S. Tomonaga, J. Schwinger e R. Feynman furono in grado di formulare l'**elettrodinamica quantistica**, completamente covariante.

1965

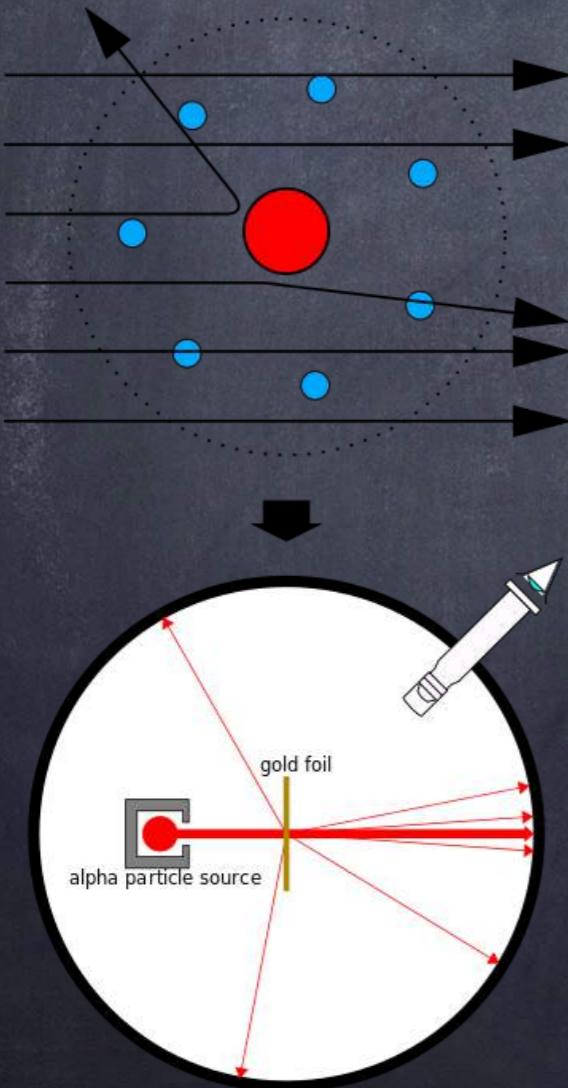
La QED

L'interazione tra particelle dotate di carica elettrica avviene tramite lo scambio di fotoni, i quali sono bosoni privi di carica elettrica e con massa nulla. L'interazione viene rappresentata graficamente con i diagrammi di Feynman.



IL NUOVO MONDO

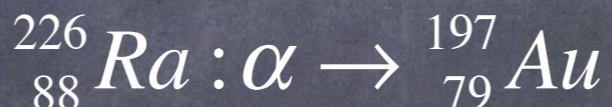
1909, gli esperimenti di H. Geiger ed E. Marsden confutano *The Corpuscular Theory of Matter* di J. J. Thomson.



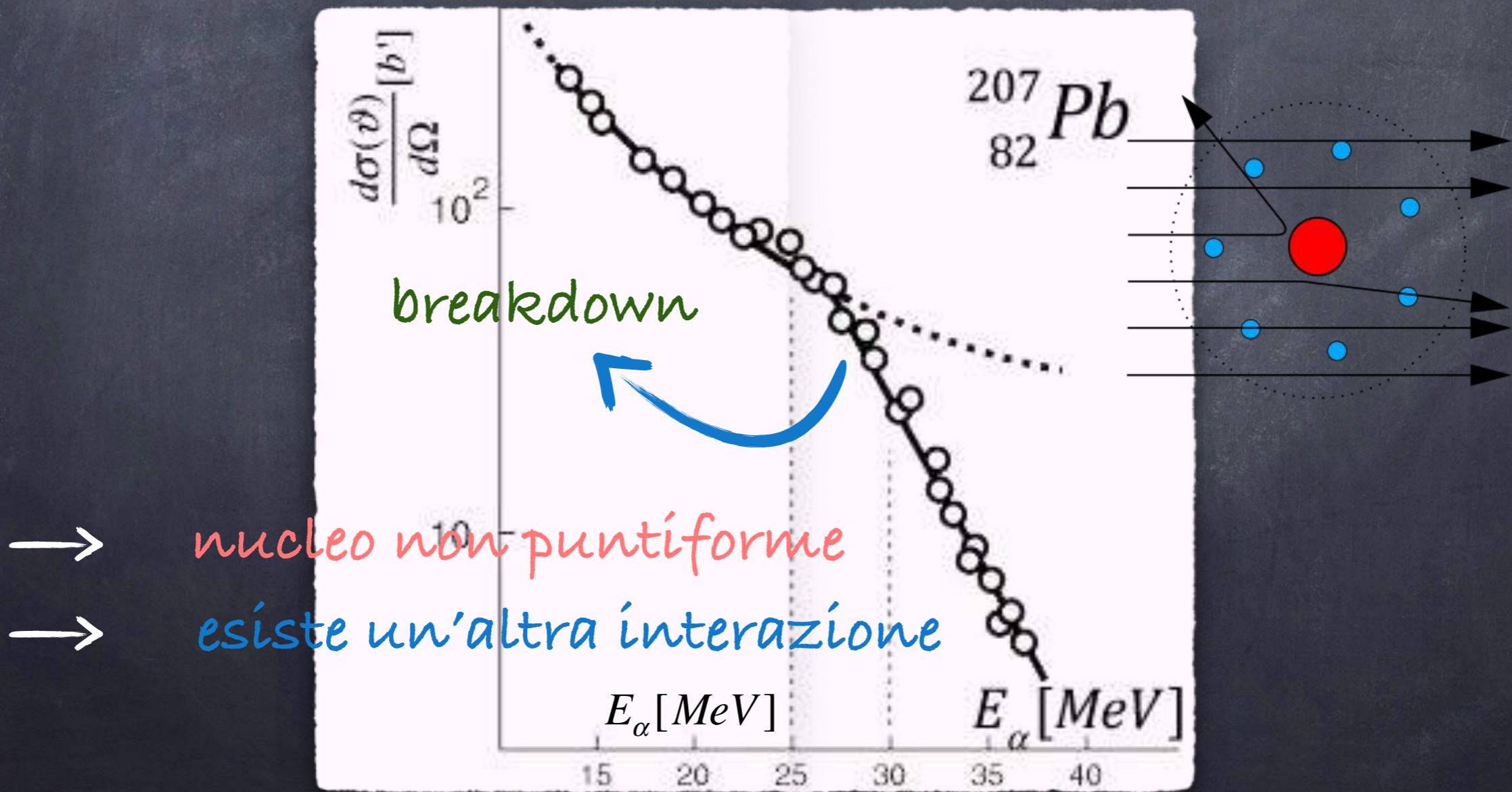
1911, i risultati sperimentali confermano il modello di Rutherford: l'atomo è composto da un centro diffusore carico positivamente, attorno al quale è presente una nuvola di elettroni carichi negativamente, in modo che l'atomo sia elettricamente neutro.

IL NUOVO Mondo

L'esperimento di H. Geiger ed E. Marsden permise di fissare un limite superiore alla dimensione del nucleo atomico. Si consideri il seguente scattering:



In tale processo si ha $E_\alpha = 4.8 \text{ MeV}$ e si ottiene $d \sim 45 \text{ fm}$.



IL NUOVO MONDO

1917, E. Rutherford scopre che il nucleo dell'H è contenuto in ogni altro nucleo. Sospettando che sia composto da una sola particella, chiama quest'ultima **protone** ($\pi\varrho\omega\tau\sigma\nu$).



1920, lo stesso E. Rutherford suggerisce che il nucleo sia in realtà costituito da protoni e da particelle prive di carica elettrica, chiamate *neutroni*.

1932, J. Chadwick scopre che bombardando bersagli di Be, Bo e Li con particelle α si produce una **radiazione neutra** costituita da particelle con massa consistente con quella del protone.



1935

L'interazione nucleare

L'interazione tra le particelle all'interno del nucleo presenta alcune proprietà.

Attrattiva a corto range: l'interazione si manifesta a distanze tipiche di $1 \div 2$ fm, distanza media tra due particelle in un nucleo.

Saturazione: per $A \geq 20$ si osserva $B/A \sim$ costante; un protone o un neutrone aggiunto al nucleo non percepisce la struttura complessiva.

Indipendenza dallo stato di carica: l'interazione è simmetrica sotto lo scambio protoni-neutroni e presenta pari sezioni d'urto, $\sigma_{nn} \sim \sigma_{np} \sim \sigma_{pn} \sim \sigma_{pp}$.

I nucleoni

1935, J. Chadwick e M. Goldhaber effettuano la prima misura di precisione della massa del neutrone; essa vale $m_n = 939.5 \text{ MeV}$ a fronte di $m_{p^+} = 938.2 \text{ MeV}$. Questa piccola differenza in massa, unita alla simmetria $n-p^+$ dell'interazione nucleare, fece pensare a W. Heisenberg che le due particelle fossero in realtà due stati di carica di una stessa particella, il **nucleone**.

W. Heisenberg introdusse un nuovo numero quantico in stretta analogia formale con lo spin, l'**isospin**. Neutrone e protone possedevano allora stesso valore di isospin, ma diverso valore della sua terza componente, la quale è legata alla carica elettrica.

$$Q = e \left\{ \frac{1}{2} + t_z \right\}$$

La teoria di Yukawa

Rimanevano da spiegare le proprietà di corto range e saturazione.

Nel 1935 H. Yukawa pubblica *On the Interaction of Elementary Particles* in cui suggerisce che queste proprietà possano essere spiegate in termini di scambio di una particella massiva, da lui chiamata mesone, tra due nucleoni.

Il potenziale che descrive l'interazione è il **potenziale di Yukawa**, il cui andamento è soppresso dall'esponenziale e spiega le proprietà di corto range e saturazione.

$$V_Y(r) = g e^{-kmr} r^{-1}$$

La teoria permette inoltre di prevedere la massa della particella mediatrice, la quale risulta compresa nell'intervallo $100 \text{ MeV} < m < 200 \text{ MeV}$.

IL pionne

1947, il team guidato da C. Powell sviluppa emulsioni fotografiche lasciate in esposizione al Pic du Midi de Bigorre, sui Pirenei francesi. Le tracce rivelano l'esistenza di una nuova particella le cui proprietà fisiche sono compatibili con il mesone ipotizzato da Yukawa.



Fine?

Gli atomi sono costituiti da un nucleo carico positivamente e da una nube elettronica, carica negativamente; i protoni e i neutroni che costituiscono il nucleo sono due stati di carica della stessa particella - il nucleone - e interagiscono scambiandosi un mesone. È davvero la *fine della storia?*

Negli anni successivi furono scoperte molte particelle (più di 20!) e diversi esperimenti, il cui obiettivo era studiare le proprietà fisiche dei nucleoni, fornivano risultati inaspettati. In particolare portarono alle seguenti conclusioni:

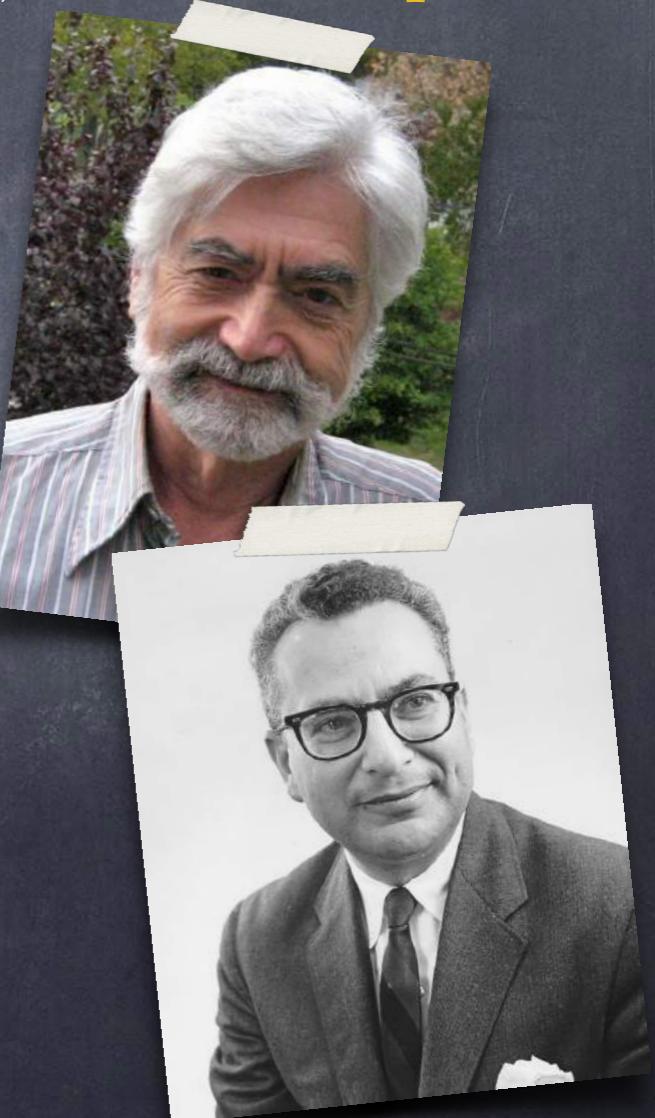
Esiste una struttura interna ai nucleoni.
Tale struttura interna ha carica elettrica,
anche per i neutroni.

IL modello a quark

1964, per spiegare questi risultati e la vasta zoologia di particelle che andava formandosi, M. Gell-Mann e G. Zweig proposero che esse fossero costituite da particelle ancora più elementari, chiamate **quarks**.

Le particelle che presentano una struttura interna costituita da quarks sono chiamate **adroni**, quelle che non presentano struttura interna e dunque sono fondamentali sono chiamate **leptoni**.

Gli adroni costituiti da tre quarks - come i nucleoni - sono detti **barioni**, gli adroni costituiti da una coppia quark-antiquark sono detti **mesoni** - come il pion.





Three quarks for Muster Mark!

Sure he has not got much of a bark

And sure any he has it's all beside the mark.

Finnegans Wake, Londra, 1939

James Joyce

Un cono due gusti

1968, gli esperimenti di scattering profondamente anelastico condotti allo *Stanford Linear Accelerator Center* evidenziarono direttamente la presenza di almeno due tipi di quarks.

Il grado di libertà che identifica i quarks fu chiamato **flavor** da M. Gell-Mann nel 1971 mentre si trovava in una gelateria Baskin-Robbins a Pasadena, ispirato dalla promozione *31 flavors*.



La carica di colore

La zoologia adronica all'epoca nota comprendeva particelle totalmente simmetriche nel flavor (es. Δ^{++}). Questo violava i principi della MQ.

1964, O. Greenberg introduce un nuovo numero quantico posseduto dai quarks, il quale non si *propaga* a livello adronico. È la carica di colore, la quale può assumere tre valori: **rosso**, **verde**, **blu**. Gli antiquarks possiedono i tre valori: **antirosson**, **antiverde**, **antiblu**.

Nasce la cromodinamica quantistica.

La QCD

Tutti gli adroni sono costituiti o da un tripletto di quarks o da una coppia quark-antiquark. Ogni flavor presenta definiti numeri quantici che si *propagano* a livello adronico ad esclusione della carica di colore.

I quarks interagiscono tramite la forza forte, i cui otto mediatori sono chiamati **gluoni**, bosoni di massa nulla e privi di carica elettrica, i quali trasportano simultaneamente carica e anticarica di colore.

$$\left| R\bar{G} \right\rangle, \left| R\bar{B} \right\rangle, \left| G\bar{B} \right\rangle, \left| G\bar{R} \right\rangle, \left| B\bar{R} \right\rangle, \left| B\bar{G} \right\rangle \\ 1/\sqrt{2} [\left| R\bar{R} \right\rangle - \left| G\bar{G} \right\rangle], 1/\sqrt{6} [\left| R\bar{R} \right\rangle + \left| G\bar{G} \right\rangle - 2\left| B\bar{B} \right\rangle]$$

L'evidenza sperimentale dell'esistenza dei gluoni si ebbe nel biennio 1978/79 all'esperimento PLUTO a DESY, con l'osservazione dei processi:



La QCD

L'interazione forte è 10^2 volte più intensa di quella elettromagnetica: due quarks preferiscono interagire scambiandosi un gluone piuttosto che un fotone. Essa presenta due proprietà particolari:

Confinamento: quando si cerca di separare una coppia quark-antiquark i gluoni formano una stringa di colore tra di essi, la quale si oppone alla separazione come un elastico. Se si cerca di separare ulteriormente le due particelle è energeticamente favorita la creazione dal vuoto di una nuova coppia quark-antiquark rispetto a un ulteriore allungamento della stringa.

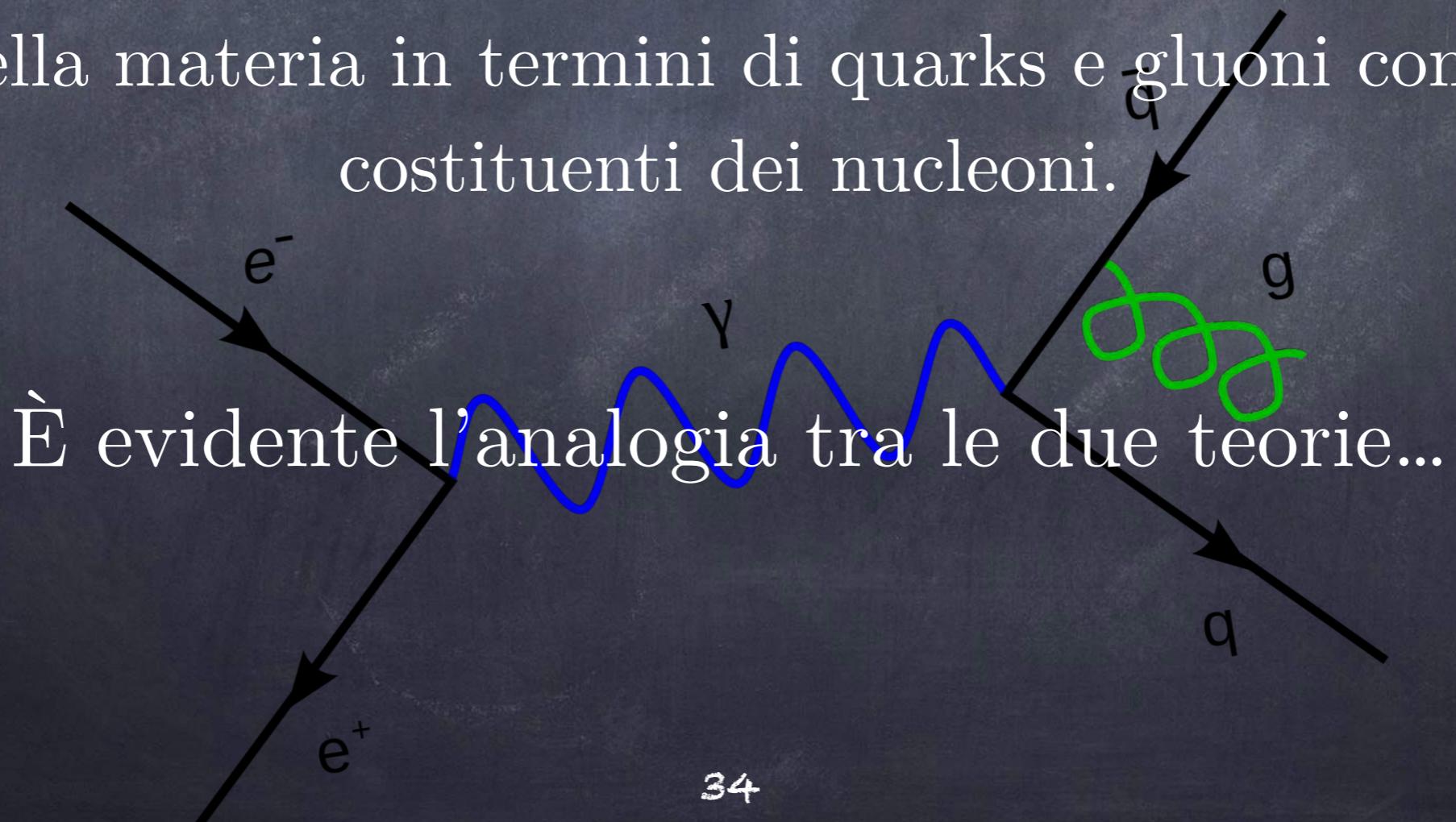
Libertà asintotica: l'interazione tra i quark diventa sempre più debole a distanze sempre minori. Fu scoperta nel 1973 da D. Gross, F. Wilczek e D. Politzer.

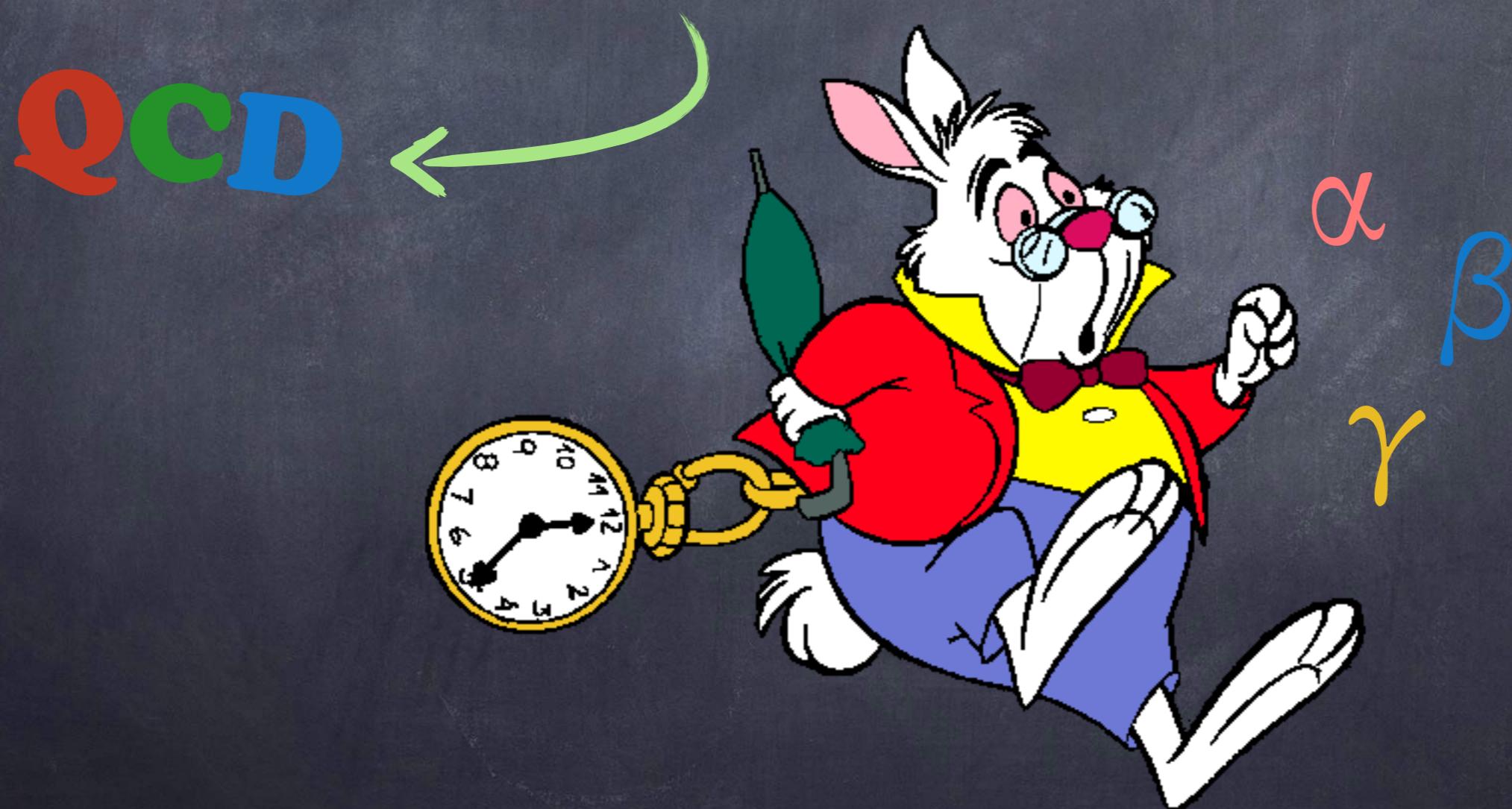
2004

Riassumendo...

L'**elettrodinamica quantistica** spiega l'interazione tra particelle cariche in termini di scambio di fotoni.

La **cromodinamica quantistica** spiega la struttura della materia in termini di quarks e gluoni come costituenti dei nucleoni.

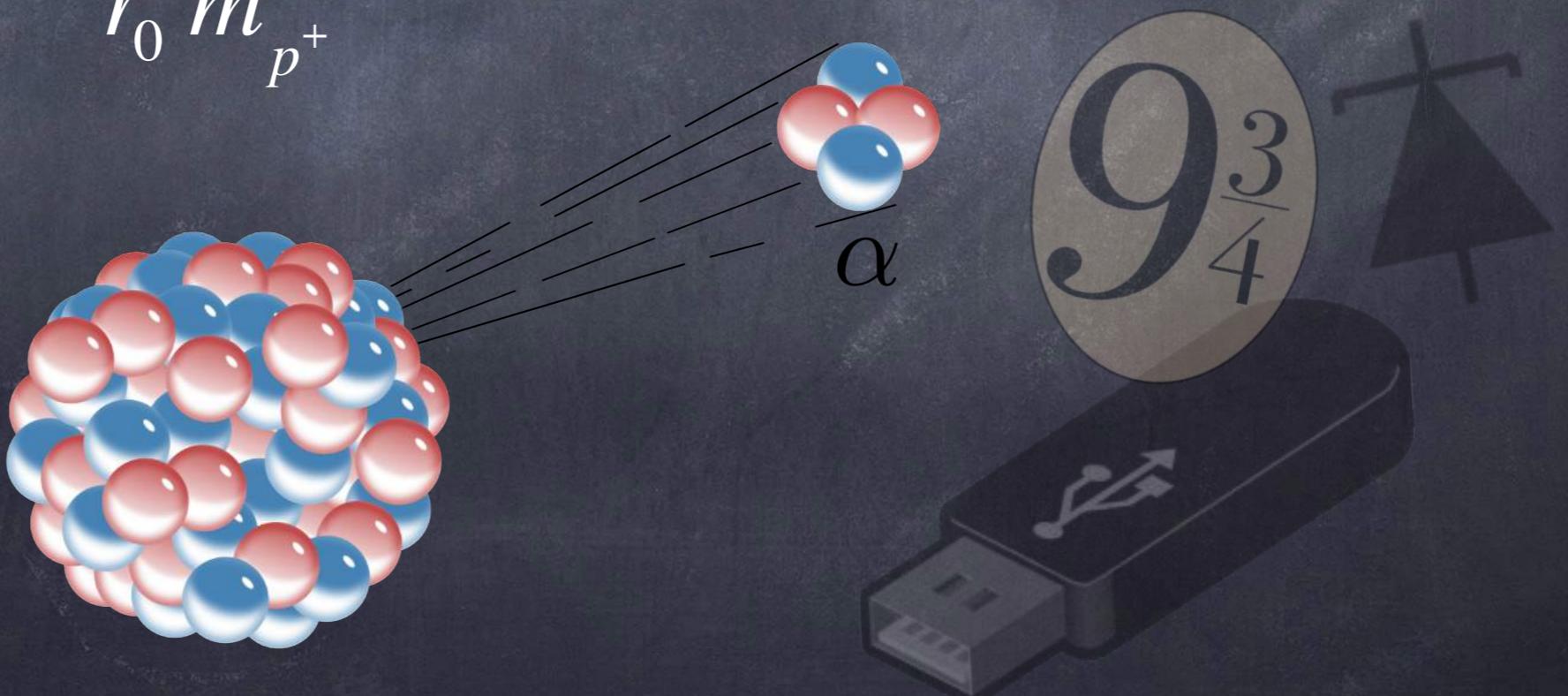




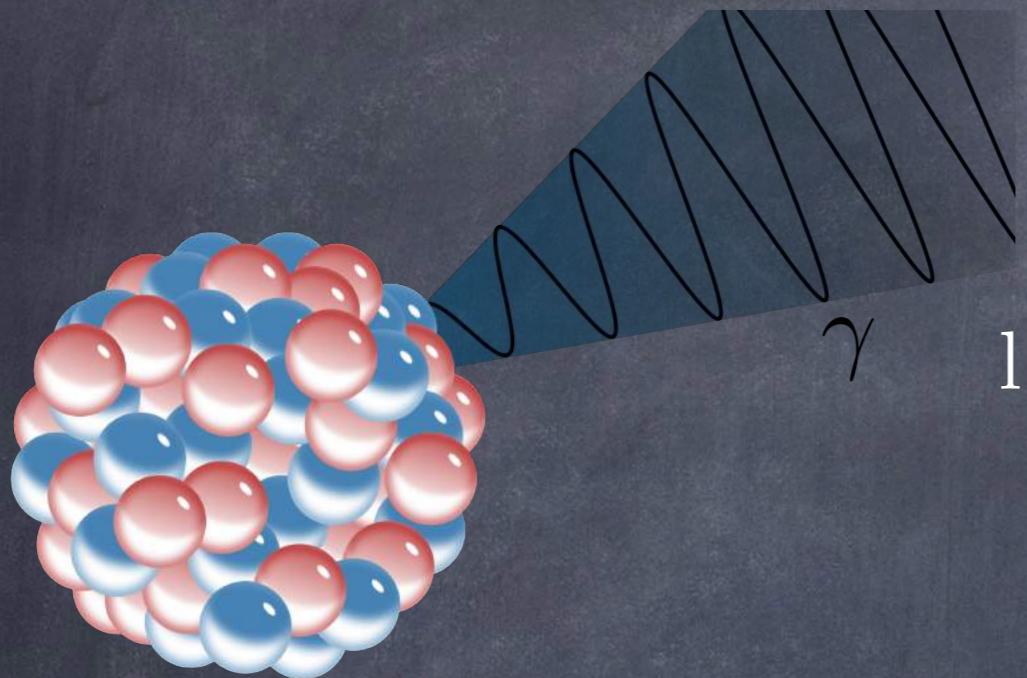
IL decadimento α

Si manifesta con l'emissione della porzione di radionuclide equivalente ad un nucleo di elio. Formalmente consiste nel **tunneling** della particella α attraverso la barriera di potenziale coulombiano costituita dal nucleo. L'emissione avviene **back-to-back** e la radiazione è **monocromatica**.

$$\Gamma = \frac{\hbar}{r_0^2 m_{p^+}} e^{-2\frac{\sqrt{8m}}{\hbar} \int_R^{r_0} \sqrt{V(R)-E} dr}$$



IL decadimento γ



Quando un nucleone transisce da uno stato eccitato a uno inferiore, avviene l'emissione di un γ con energia pari al gap tra i livelli tra i quali avviene la transizione

Cattura elettronica

Esiste una probabilità finita di trovare un e^- all'interno del nucleo.

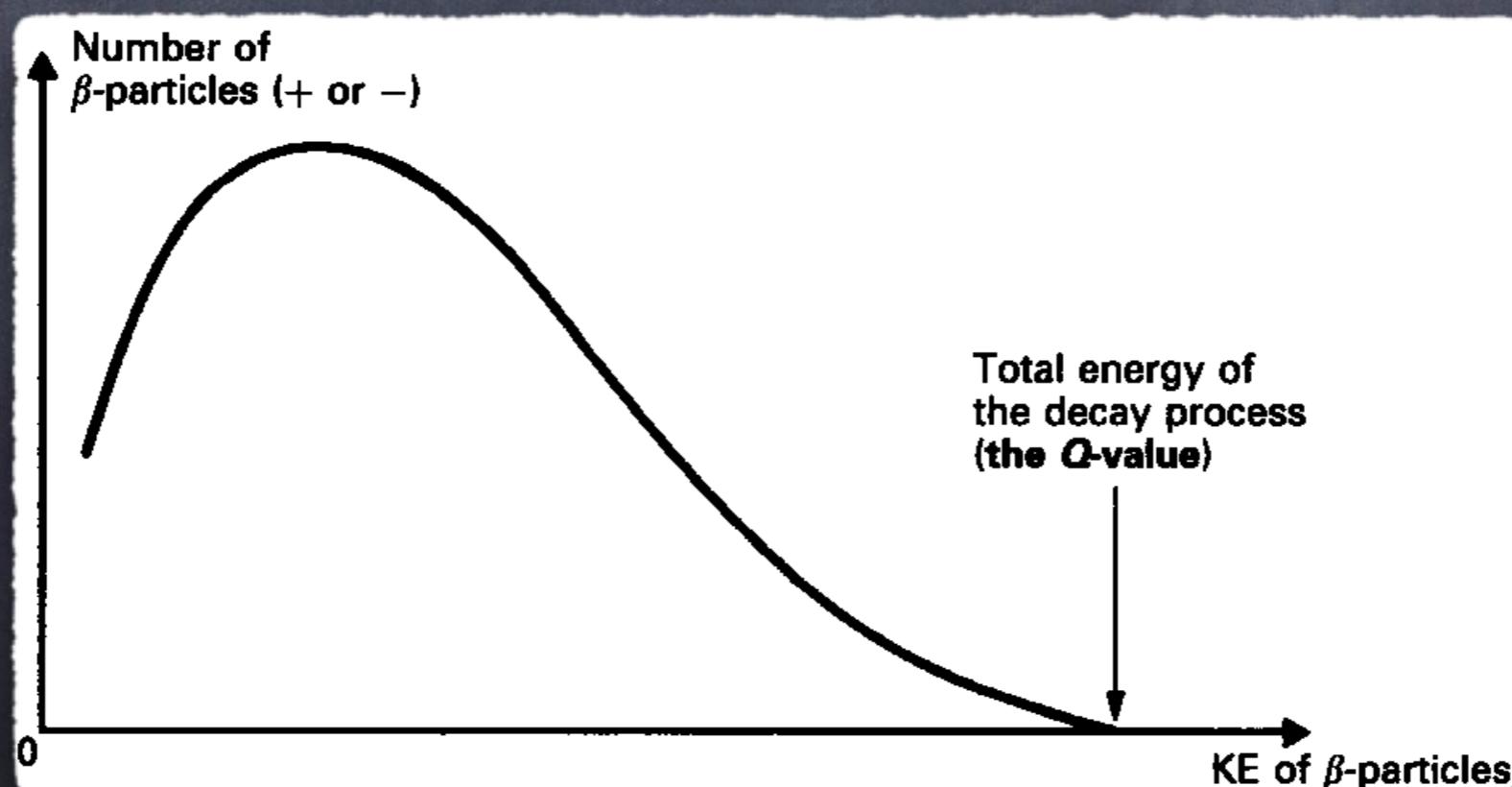
Questo avviene maggiormente per atomi pesanti in cui il raggio nucleare è maggiore e le orbite elettroniche più compatte (shell K).

Tipicamente avviene quando $\Delta E < 1.022 \text{ MeV}$.

IL decadimento β

Si manifesta con l'emissione di un elettrone estremamente energetico, chiamato particella β .

1914, J. Chadwick osserva che lo spettro energetico del decadimento β è **continuo** e non discreto come nel caso di un processo a due corpi, quale sembra essere il decadimento β .



4 dicembre 1930

Cari signore e signori radioattivi,

Come latore di queste righe, alle quali vi chiedo gentilmente di prestare attenzione, cercherò di spiegarmi in modo più esatto, considerando le statistiche 'false' dei nuclei dell'*N-14* e del *Li-6*, così come lo spettro β continuo. Ho escogitato un rimedio disperato per salvare il "teorema dello scambio" di statistica e il teorema dell'energia. Vale a dire la possibilità che possano esistere nei nuclei particelle elettricamente neutre che mi piace chiamare neutroni, le quali hanno uno spin di $1/2$ e obbediscono al principio di esclusione e, in più, differiscono dai quanti di luce nel senso che non viaggiano alla velocità della luce. La massa del neutrone deve essere dello stesso ordine di grandezza della massa dell'elettrone e, in ogni caso, non superiore a 0,01 della massa del protone. Lo spettro β continuo diventerebbe allora comprensibile in base al presupposto che nel decadimento β un neutrone venga emesso insieme all'elettrone, in modo tale che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone resti costante. [...] Solo chi scommette può vincere, e la gravità della situazione dello spettro β continuo può essere resa in modo chiaro con il detto del mio onorato predecessore in carica, Mr. Debye, "È meglio non pensarci affatto, come le nuove tasse."

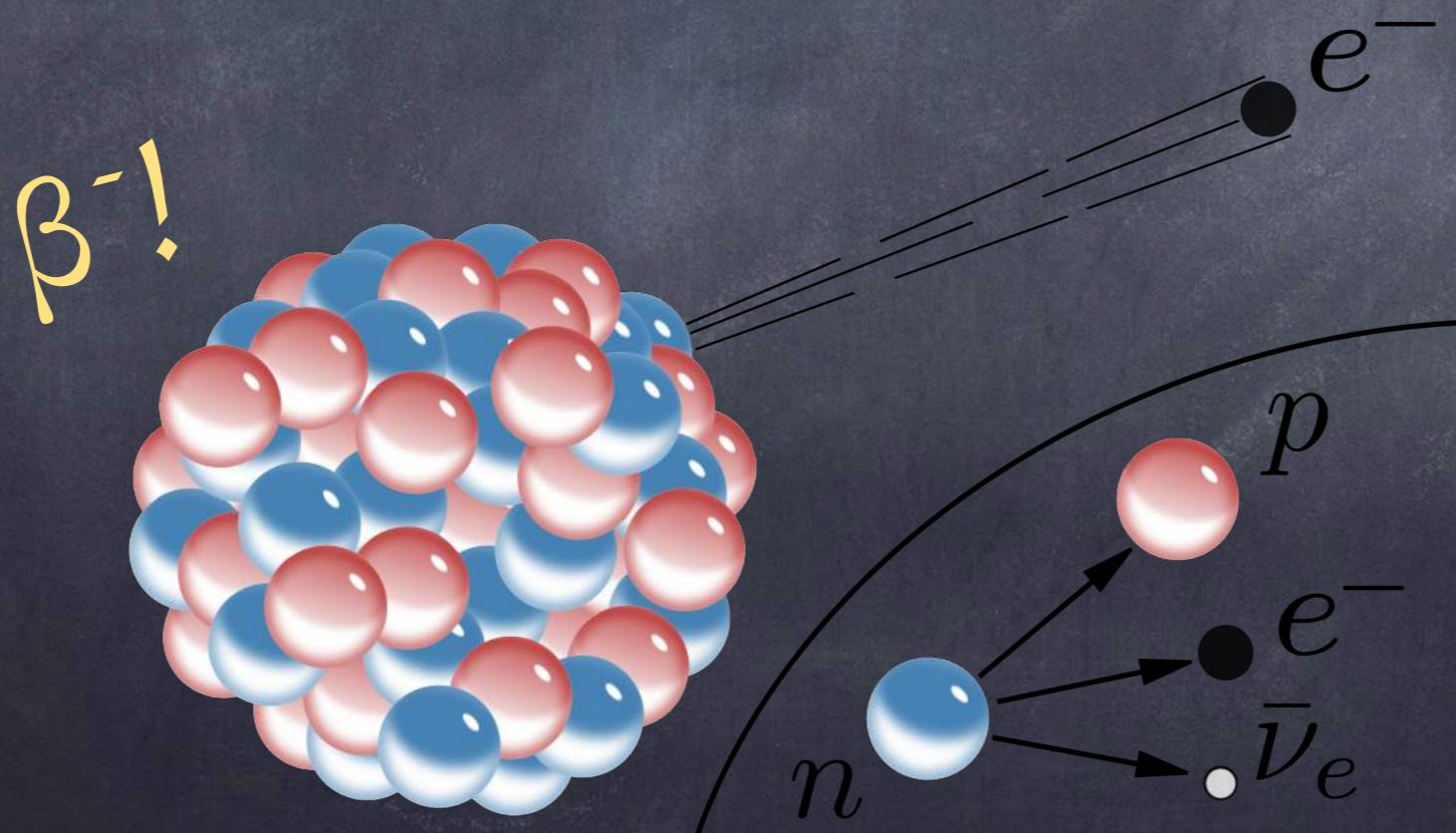
A partire da ora, ogni soluzione al problema va discussa. Così, cari radioattivi, mettetelo alla prova e sistematelo nel modo giusto. Sfortunatamente non sarò in grado di essere a Tubinga personalmente, poiché sono indispensabile per un ballo che si terrà qui a Zurigo nella notte tra il 6 e il 7 dicembre.

Con tanti saluti a voi, anche a Mr. Back, il vostro devoto servitore.

W. Pauli

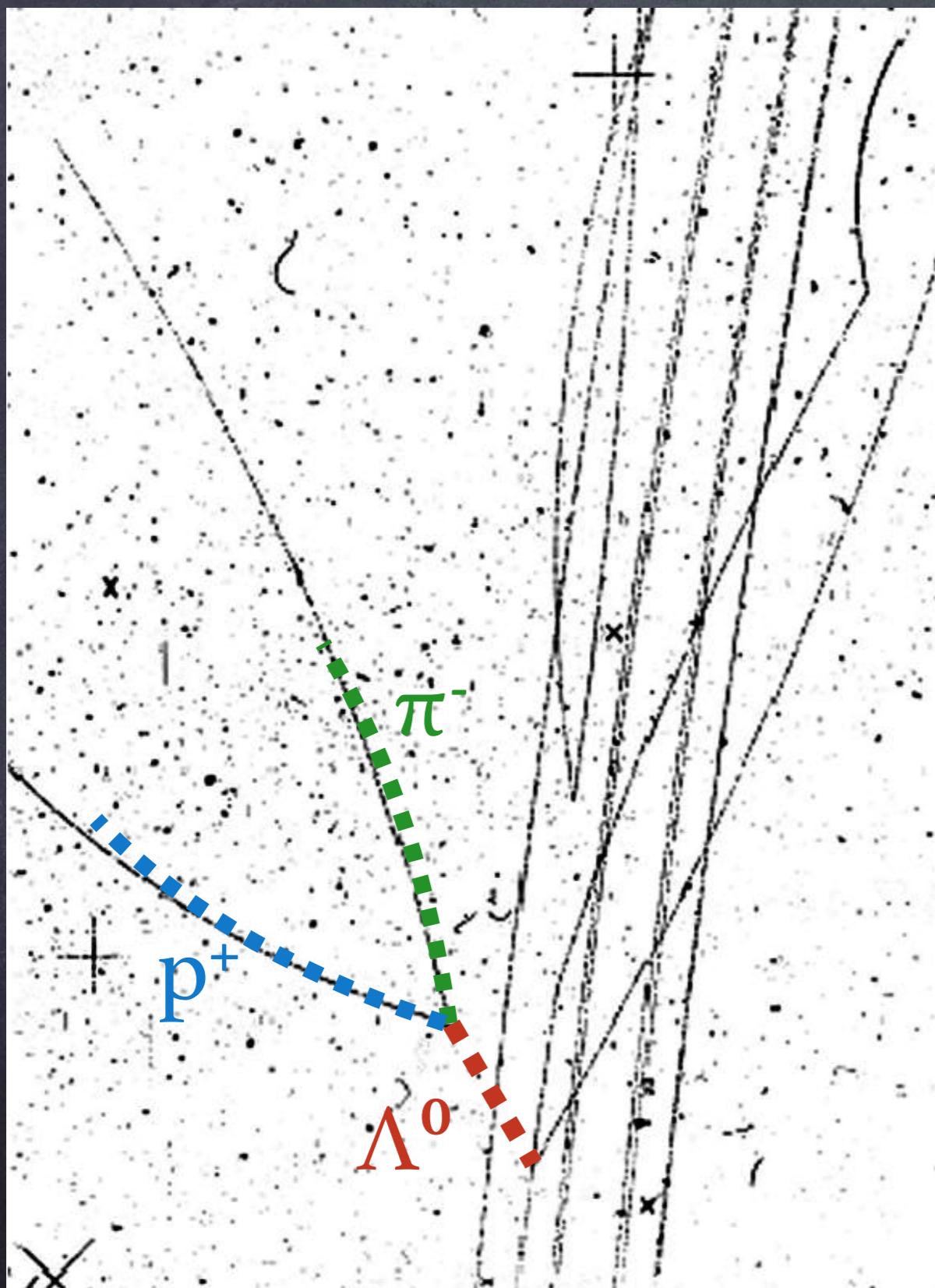
IL modello di Fermi

1934, alla luce della scoperta del neutrone avvenuta due anni prima, Fermi inquadra teoricamente il decadimento β come la trasformazione di un neutrone all'interno del nucleo instabile in un protone, un elettrone e un antineutrino (il cui nome fu inventato da U. Amaldi come *neutronino*, piccolo neutrone). Questo processo avviene nello stesso punto dello spaziotempo. La probabilità che un neutrino interagisca con la materia è molto bassa e l'interazione viene chiamata **debole**.



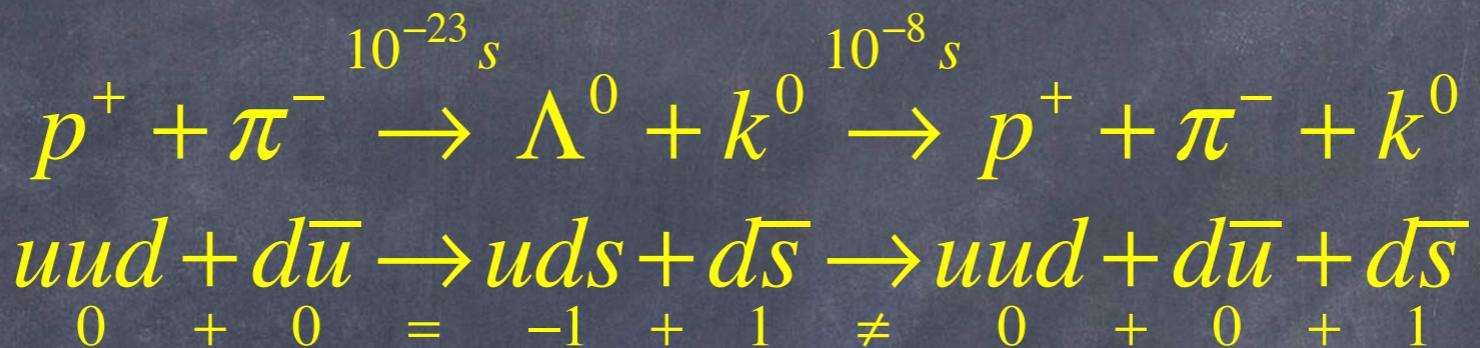
Un ospite inatteso

1947, G. Rochester e C. Butler osservano tracce di un decadimento $\Lambda^0 \rightarrow V$ in una camera a nebbia, sottoposta al passaggio dei raggi cosmici. La particella non appariva nelle tracce, indice della sua neutralità. Essa venne battezzata Λ^0 .



IL terzo gusto

1953, al *Brookhaven National Laboratory* si fanno collidere fasci di protoni e pioni per generare particelle lambda e i risultati furono inattesi. Dalla collisione si osserva un segnale *prompt* di una nuova particella, chiamata **kaone**, seguito dalla *signature* della Λ^0 .



I tempi di produzione di Λ^0 e k^0 sono compatibili con l'interazione forte, ma il decadimento della Λ^0 avviene con un tempo tipico dell'interazione debole di Fermi.

Fu A. Pais a postulare l'esistenza di un terzo flavor, chiamato **strange**, caratterizzato da un nuovo numero quantico, la **stranezza**, introdotto da M. Gell-Mann e K. Nishijima, conservato dall'interazione forte e violato da quella debole.



Potete scegliere tra:



1974, B. Richter &
S. Ting, SLAC,
BNL; teorizzato nel
1964 da J. Bjorken
e S. Glashow.

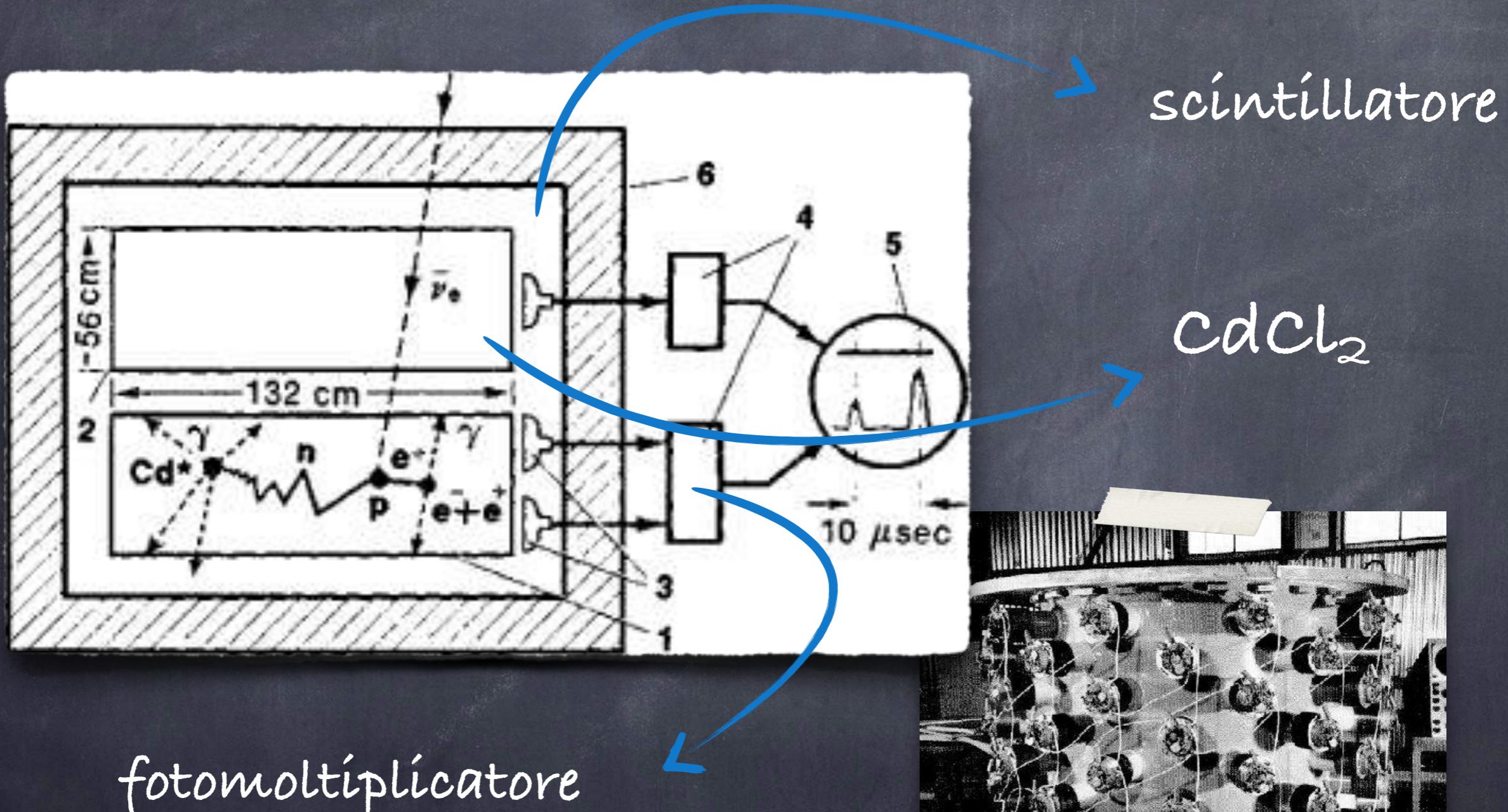


1995, CDF e DØ,
Fermilab;
teorizzato nel 1973
da M. Kobayashi e
T. Maskawa.

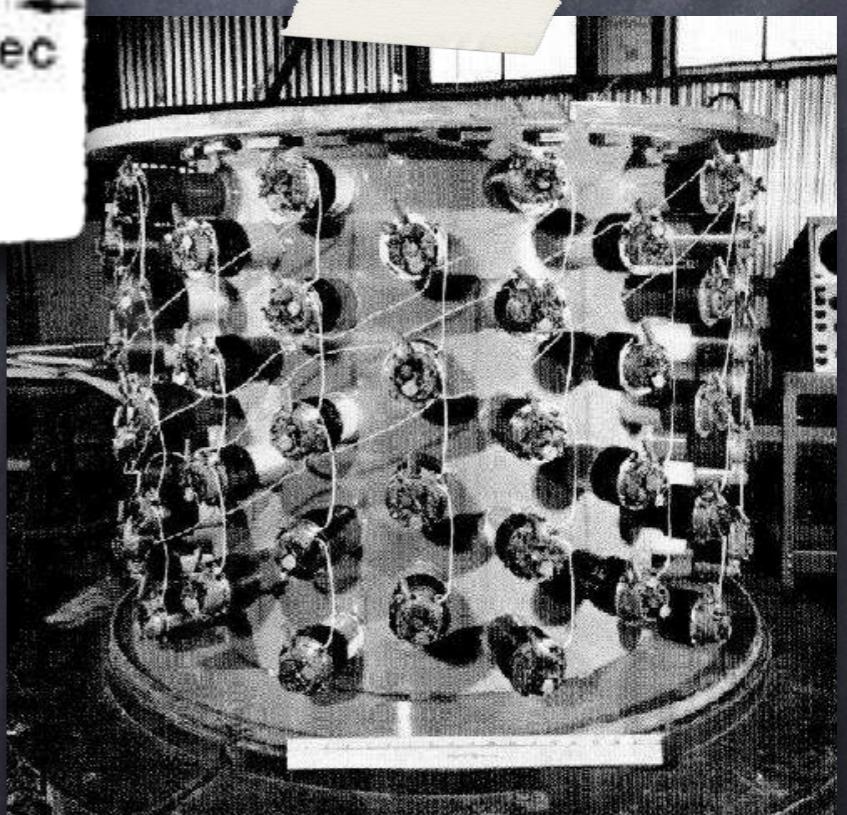
1977, E238,
Fermilab;
teorizzato nel 1973
da M. Kobayashi e
T. Maskawa.



Poltergeist Project, 1953

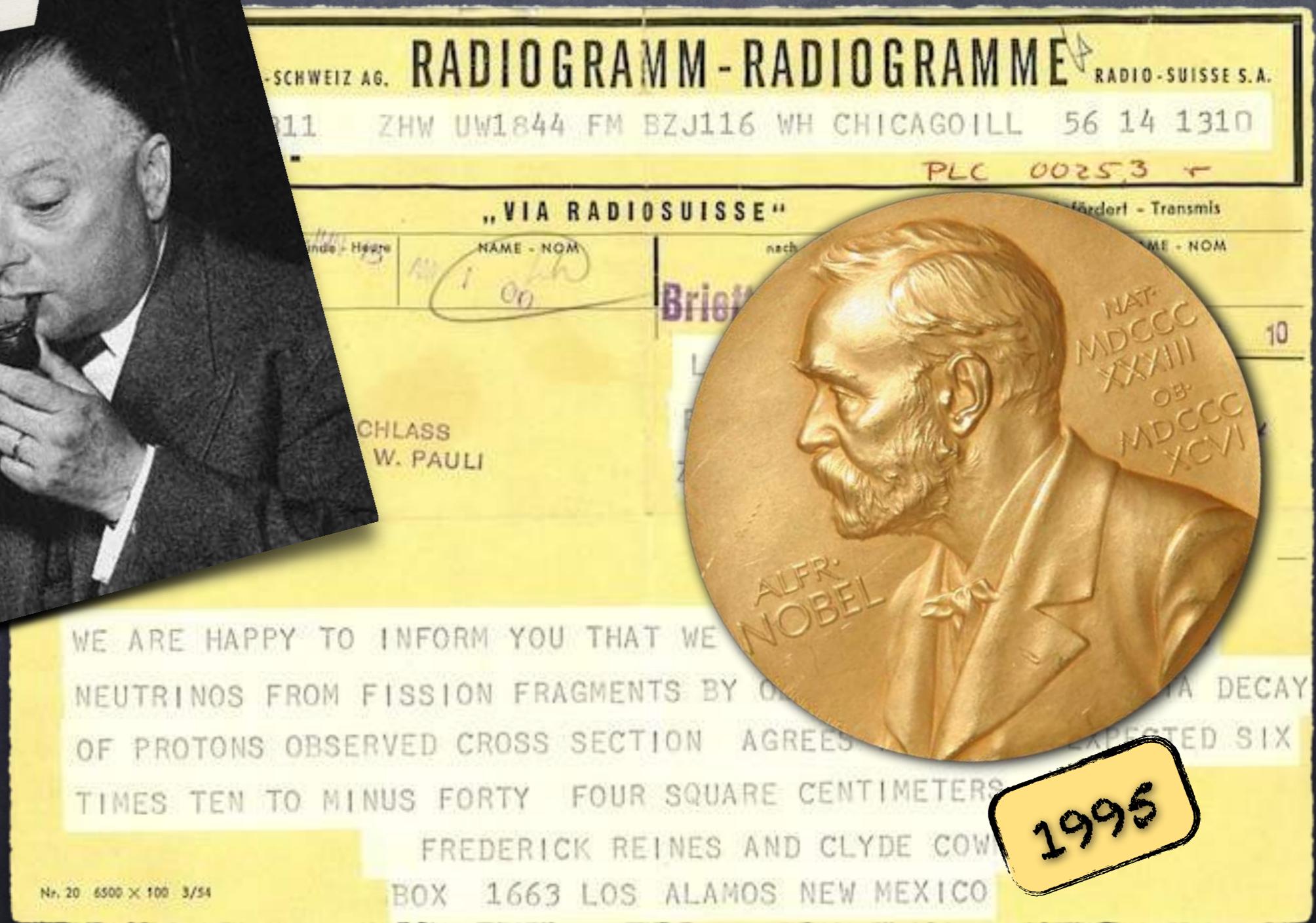
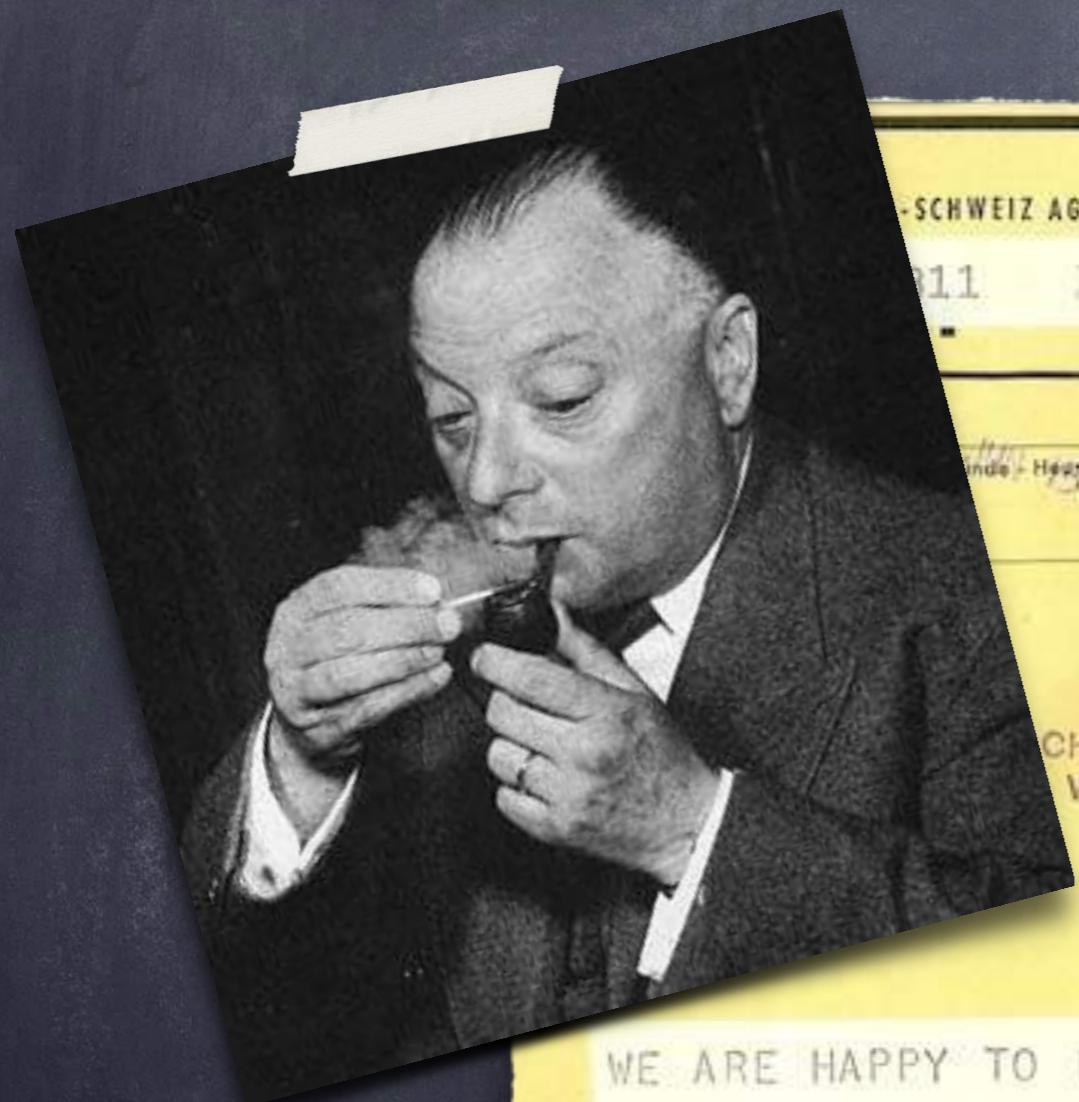


$$\Delta t_\gamma \sim 5 \text{ ms}$$



1956, Poltergeist registra due γ separati da 5.5 ms.

La teoria di Pauli è confermata.



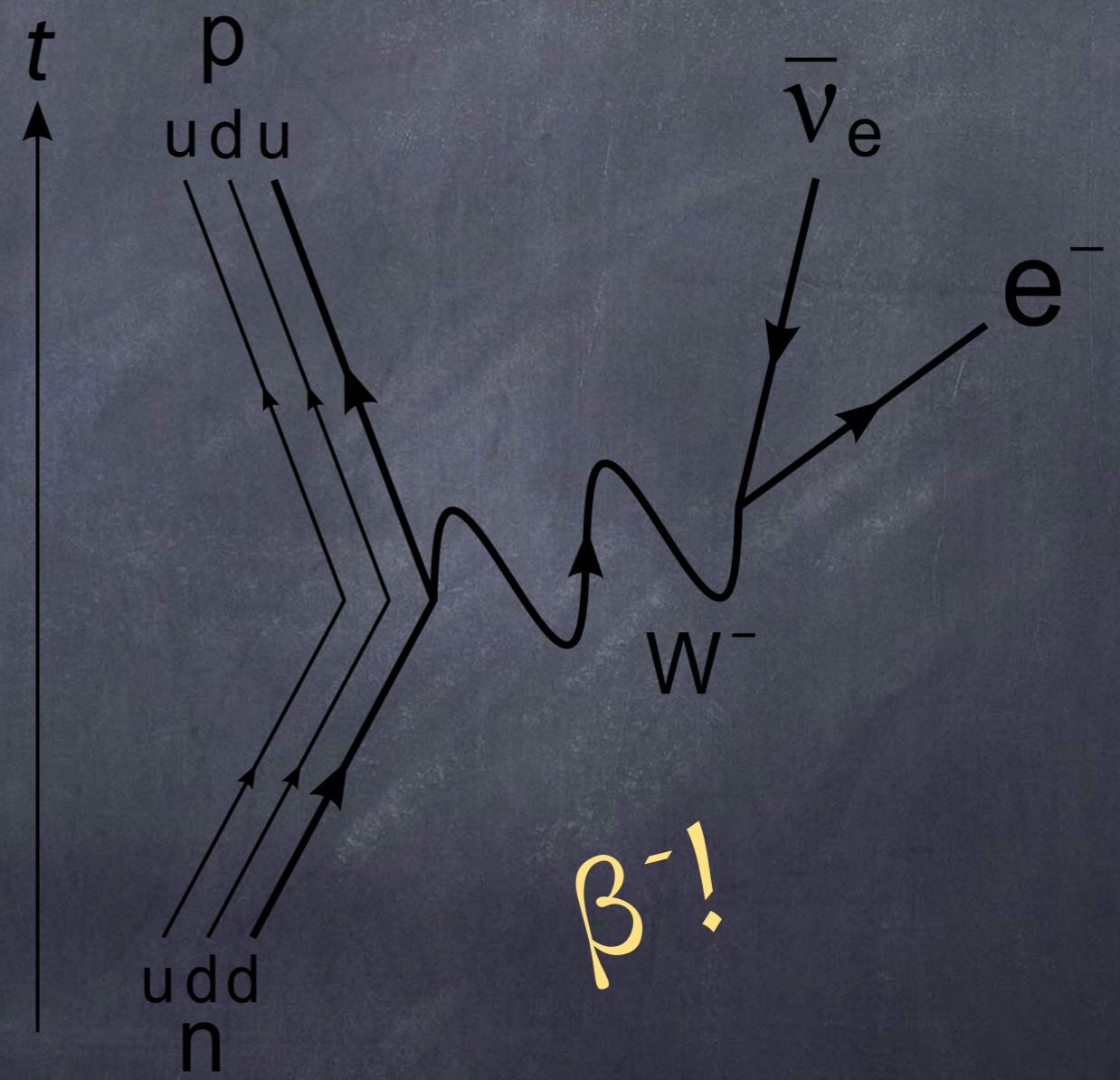
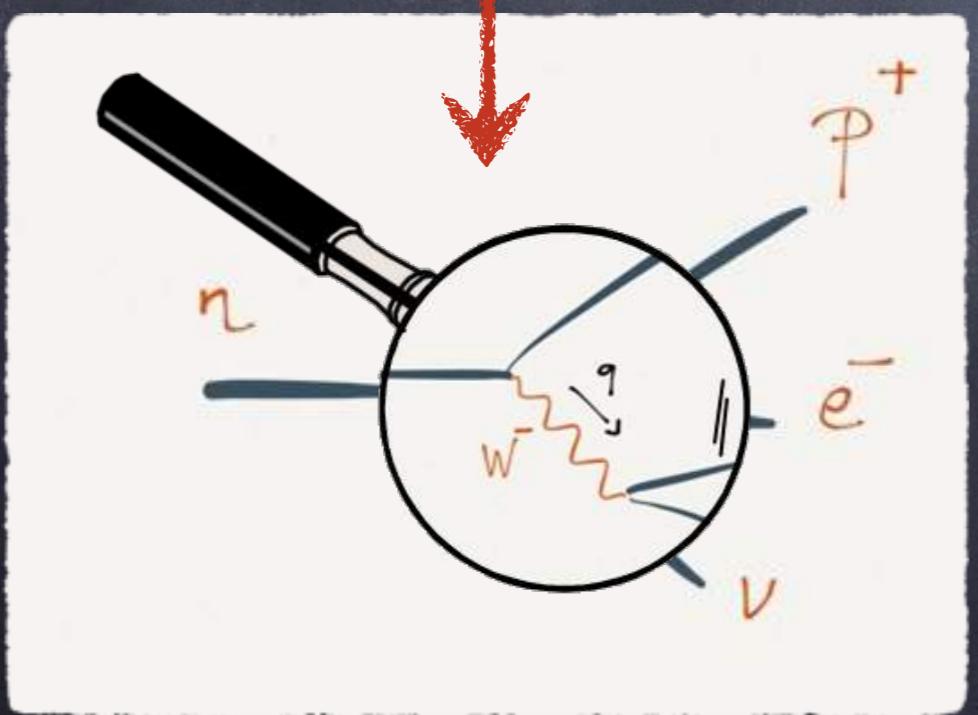
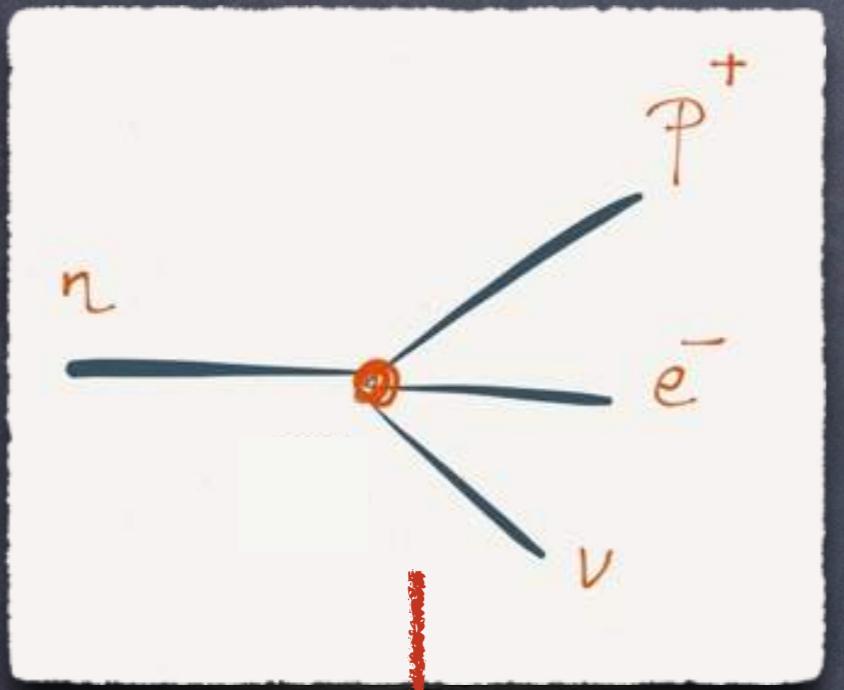
L'idea di Schwinger

1957, il modello di Fermi va corretto per alte energie poiché fornisce valori non accettabili; J. Schwinger suggerisce di imitare l'interazione elettromagnetica e introdurre un mediatore anche per quella debole. I due bosoni mediatori sono le particelle cariche W^+ , W^- .



Il decadimento β può finalmente essere spiegato in termini di interazione a corrente carica.

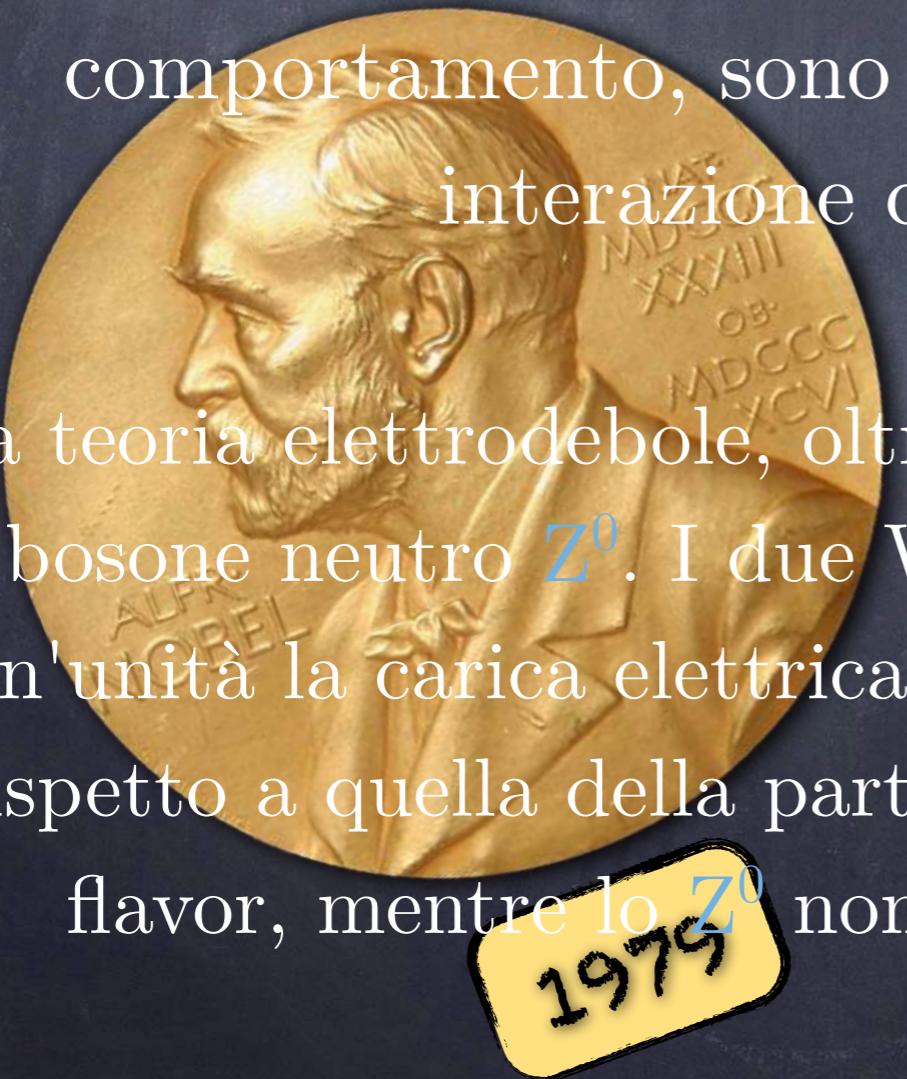
L'interazione debole



La EWT

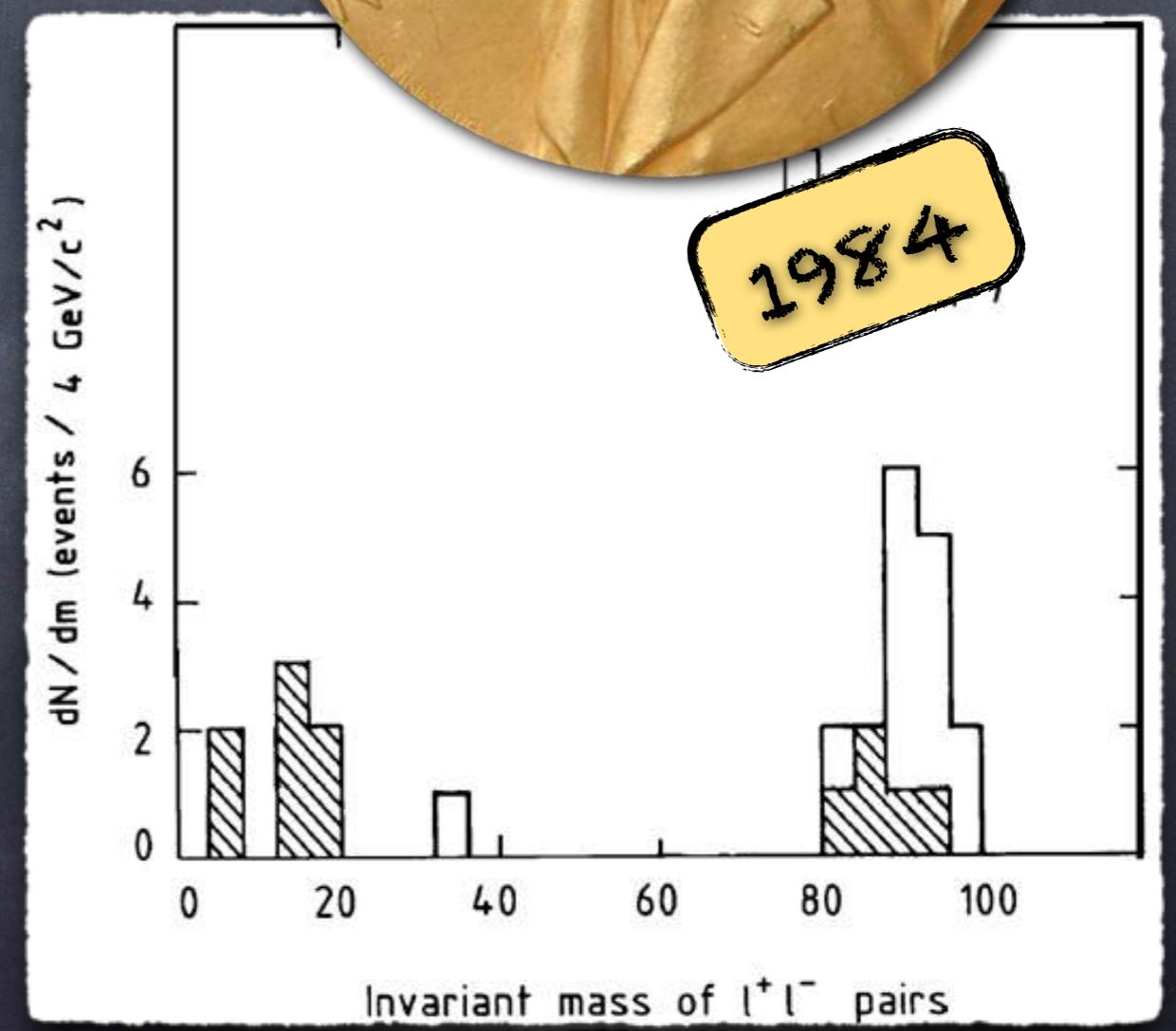
Alla fine degli Anni '60 S. Glashow, S. Weinberg e A. Salam scoprirono che a energie molto elevate - $\sim 10^2$ GeV - l'interazione elettromagnetica e quella debole hanno lo stesso comportamento, sono due manifestazioni di una stessa interazione chiamata **elettrodebole**.

La teoria elettrodebole, oltre ai bosoni W^+ e W^- , prevede anche il bosone neutro Z^0 . I due W possono aumentare o diminuire di un'unità la carica elettrica della particella generata dal processo rispetto a quella della particella iniziale e possono modificarne il flavor, mentre lo Z^0 non modifica né la carica, né il flavor.

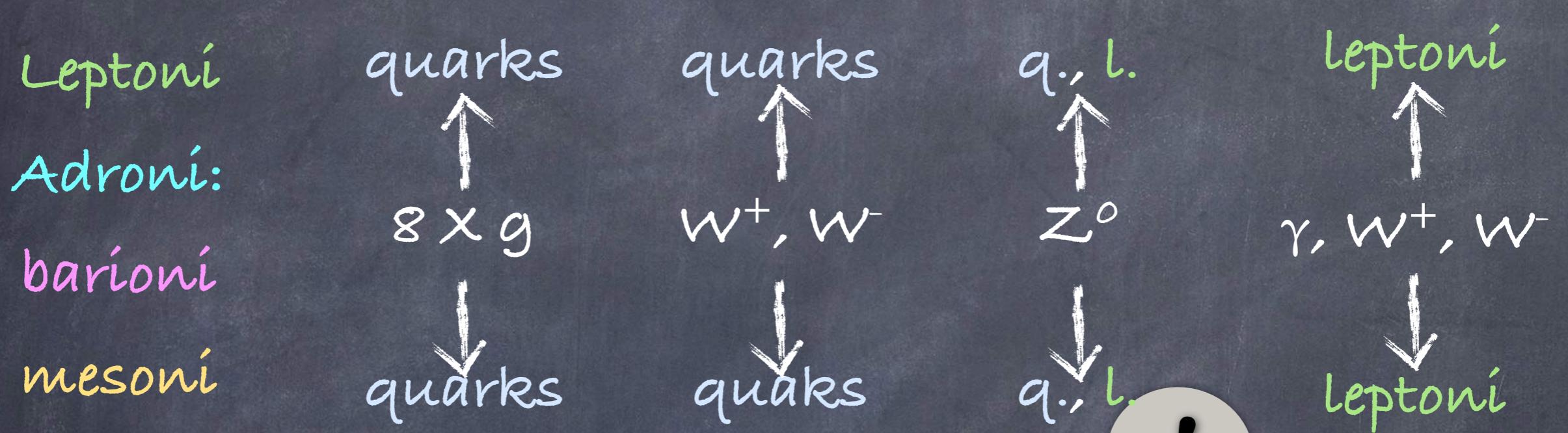


L'era degli acceleratori

La prima evidenza dei bosoni W e Z^0 si ebbe nel 1983 con i risultati degli esperimenti **UA1**, guidato da Carlo Rubbia, e **UA2** condotti all'SPS del CERN.



IL Modello Standard



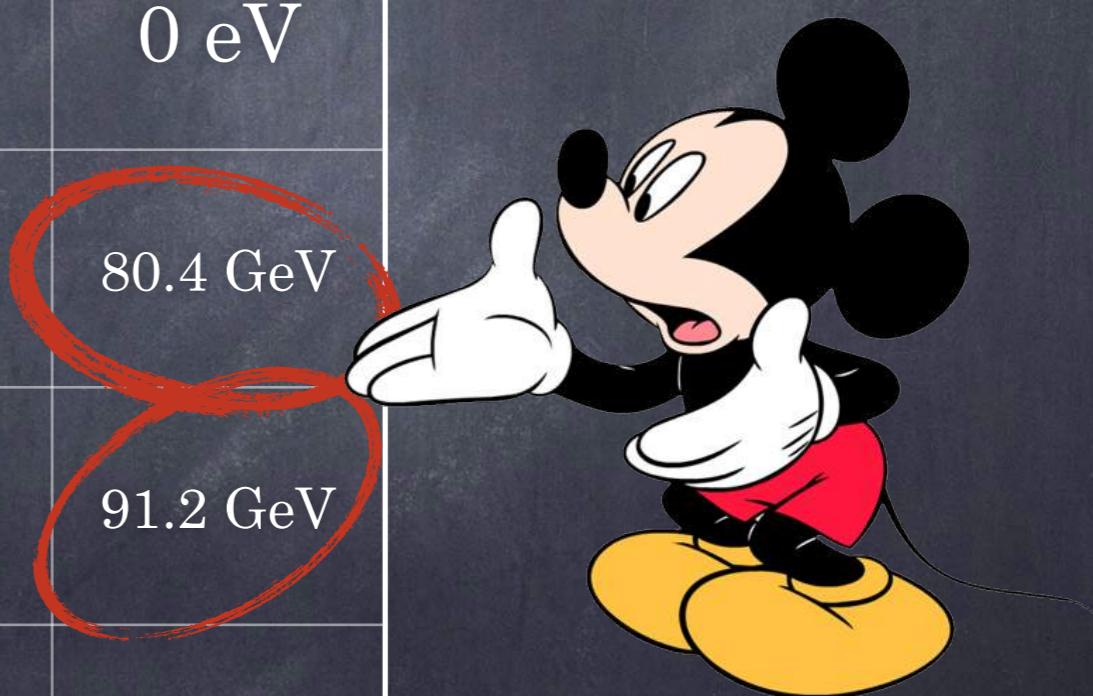
IL Modello Standard

Interazione/ Proprietà	Elettrodebole		Forte	
	Elettromagnetica	Debole	Fondamentale	Residua
Agisce su	carica elettrica	flavor	carica di colore	nuclei atomici
Particelle soggette	particelle cariche	quarks, leptoni	quarks, gluoni	adroni
Mediatore	γ	W^+, W^-, Z^0	g	mesoni
Magnitudine relativa ($G=1$)	10^{36}	10^{25}	10^{38}	/
Range	∞	10^{-18}	10^{-15}	/
Magnitudine a livello dei quarks	1	10^{-4}	60	/
Magnitudine a livello dei nuclei	1	10^{-7}	/	20

I bosoni di gauge

Ogni interazione fondamentale si manifesta tra le particelle coinvolte con lo scambio di un mediatore, il quale è un bosone con spin 1 detto *di gauge*.

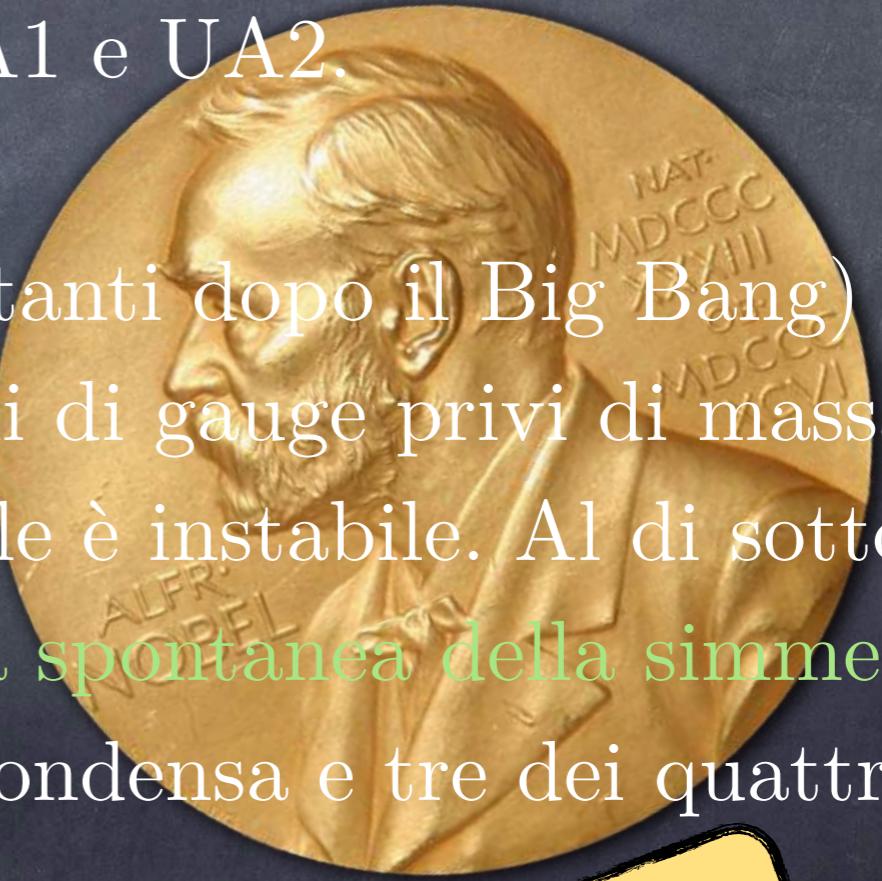
Proprietà/ Bosone	Spin	Carica elettrica	Carica di colore	Massa
γ	1	0	/	0 eV
W^+, W^-	1	+1,-1	/	80.4 GeV
Z^0	1	0	/	91.2 GeV
g	1	0	8X	0 eV (th.)



La rottura spontanea di simmetria

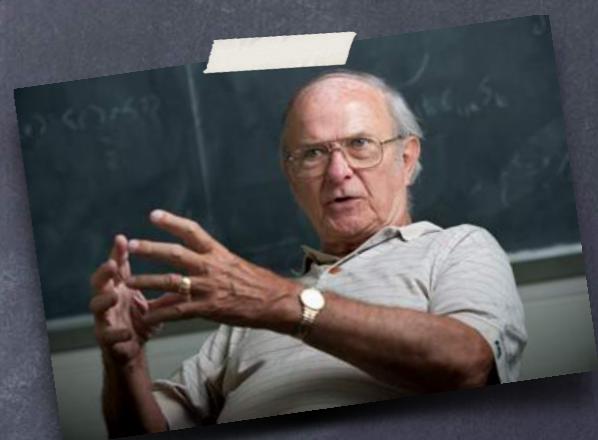
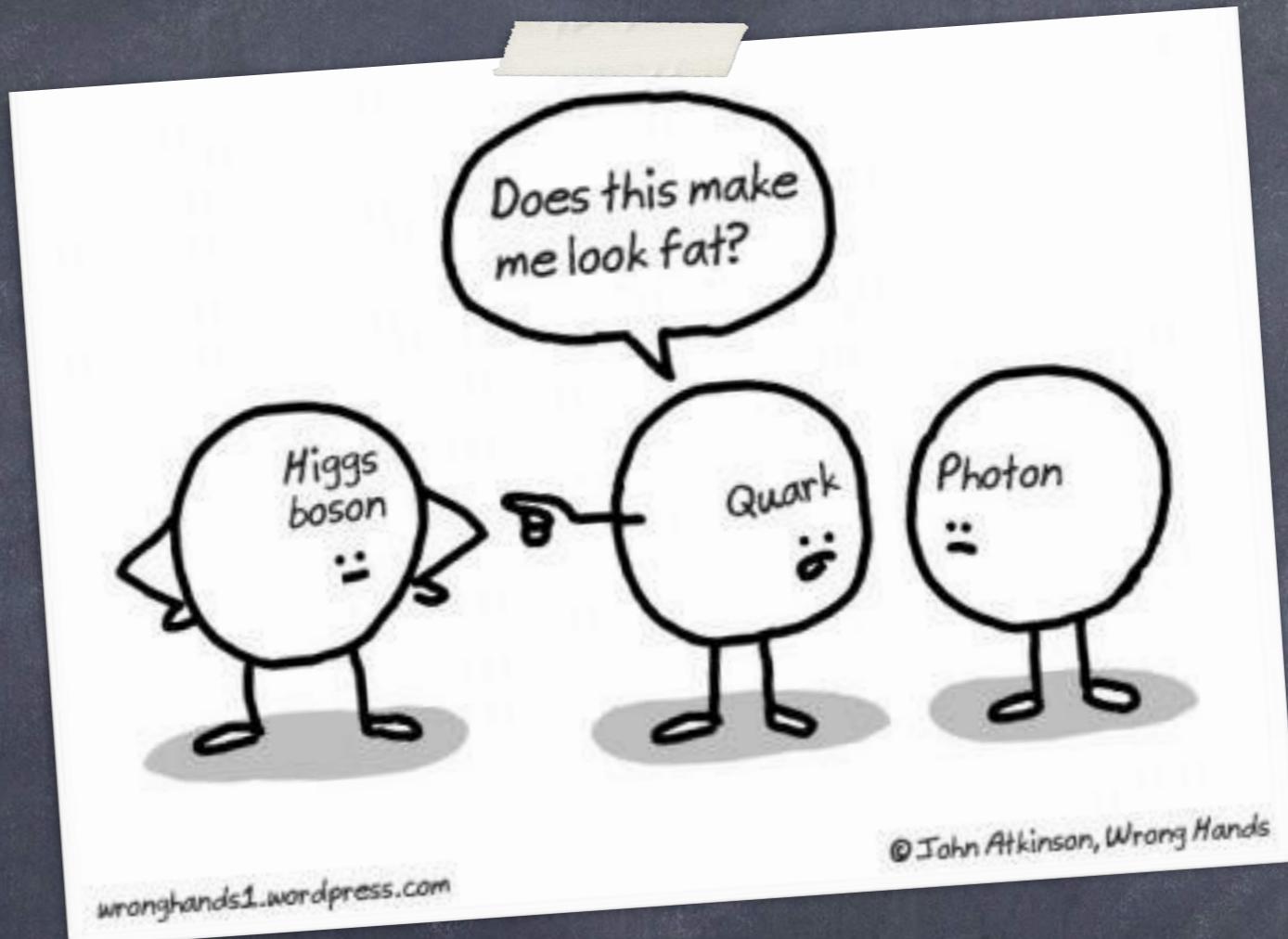
L'impianto matematico del MS prevede particelle di massa nulla, in chiara contraddizione, ad esempio, con i risultati sperimentali di UA1 e UA2.

Ad alte energie (ovvero pochi istanti dopo il Big Bang) l'Universo possiede quattro bosoni di gauge privi di massa accoppiati al campo di Higgs, il quale è instabile. Al di sotto di una certa soglia si verifica la rottura spontanea della simmetria elettrodebole, il campo di Higgs condensa e tre dei quattro bosoni acquisiscono massa.



2008

IL meccanismo EBHGHK

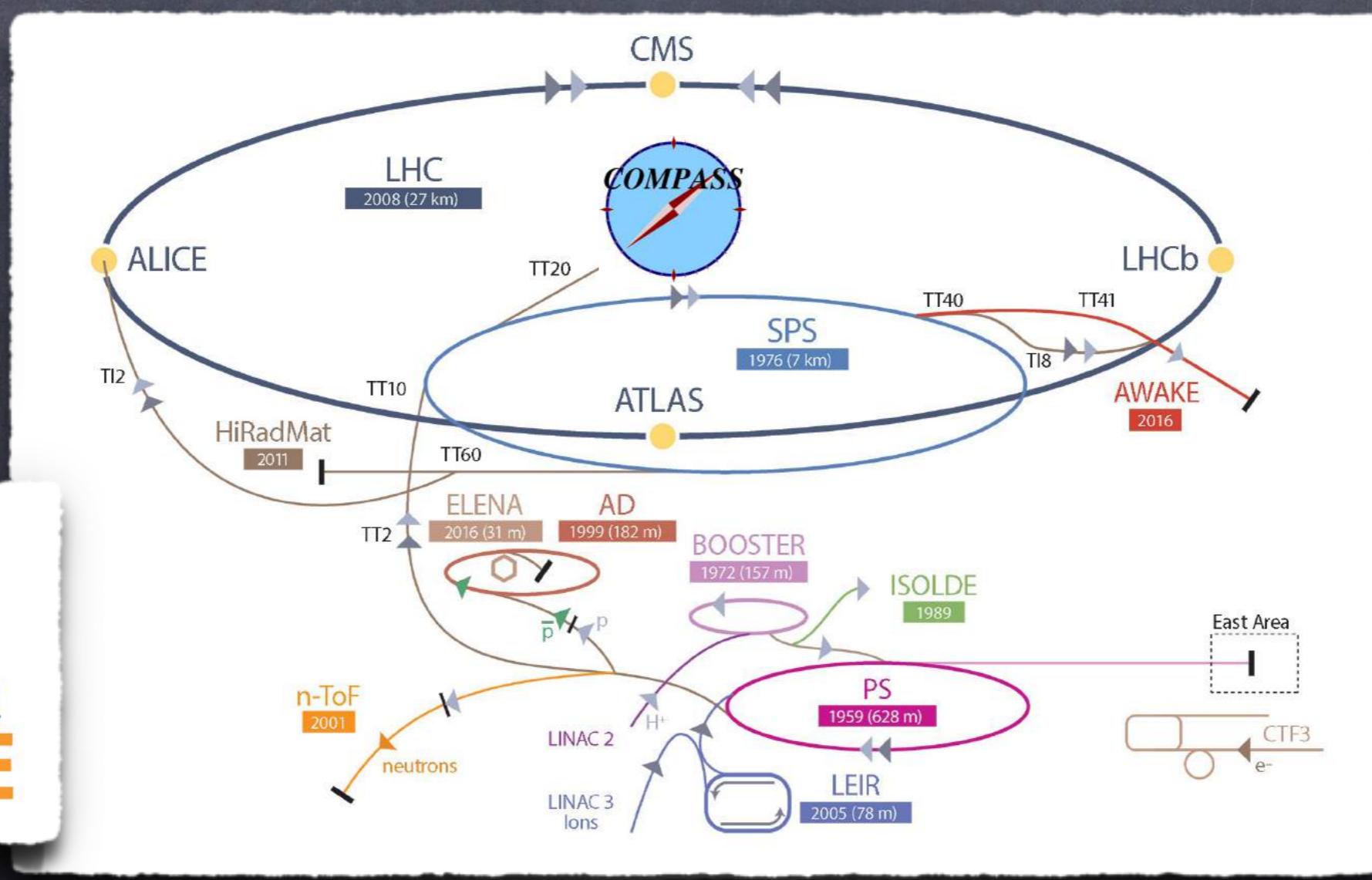
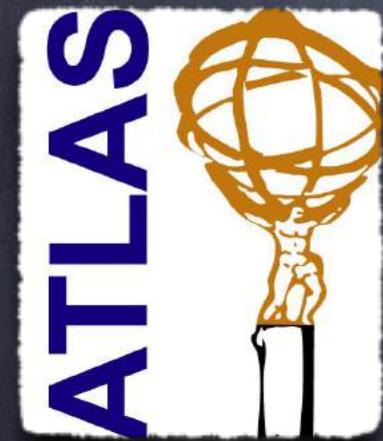


Anche questa interazione-arbitro possiede un quanto: questa particella è il **bosone di Higgs**.

L'era di LHC



1994, il CERN approva la costruzione del *Large Hadron Collider*, il più grande acceleratore di particelle del mondo, nella galleria sotterranea di 27.6 km tra la Francia e la Svizzera lasciata libera dalla macchina LEP.



Higgs search

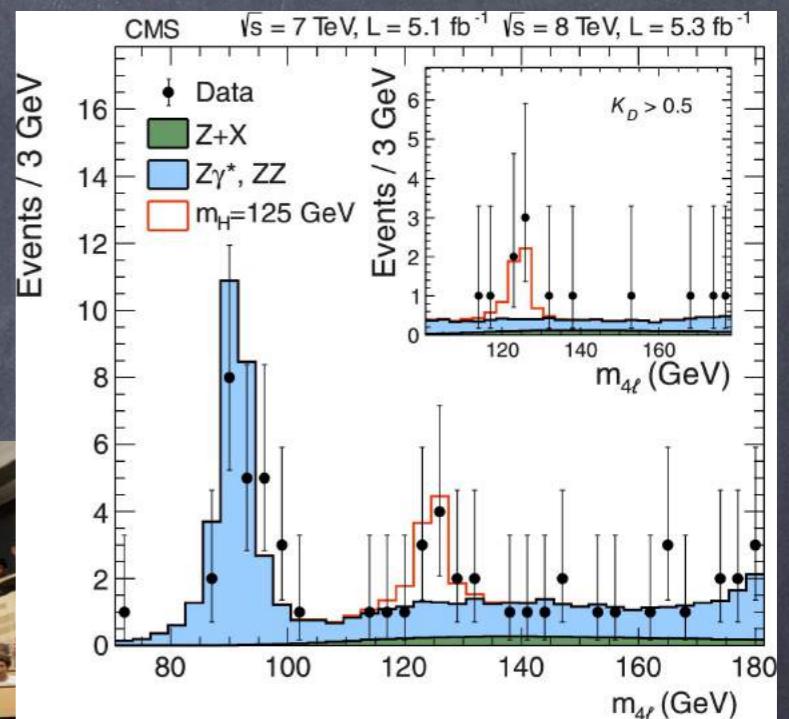
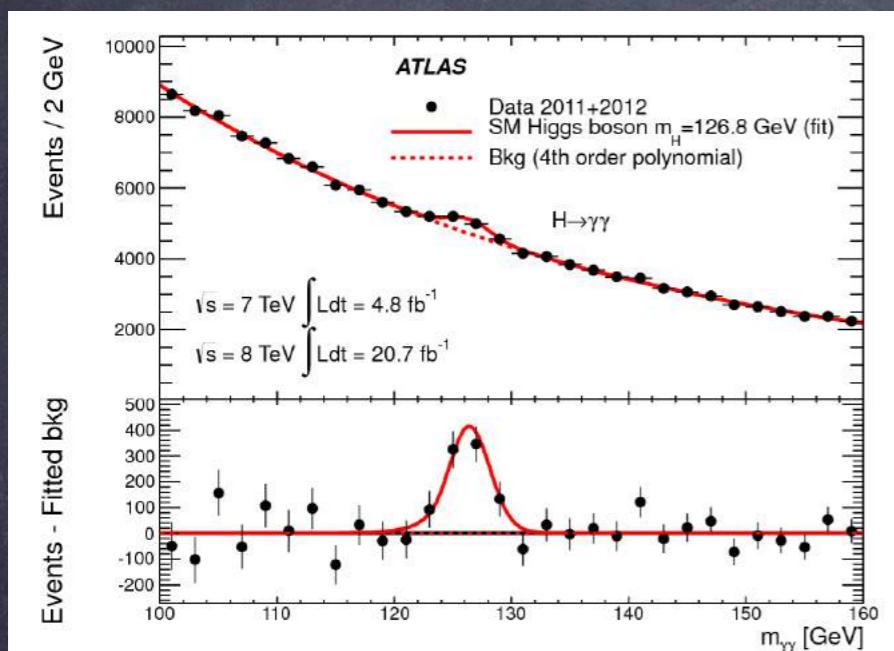


Yeah, my momma she told me
you gotta cut on pt,
cause elsewise you'll see
things detectors just cannot see.

It's all about that Higgs, Les Houches Workshop, 2015

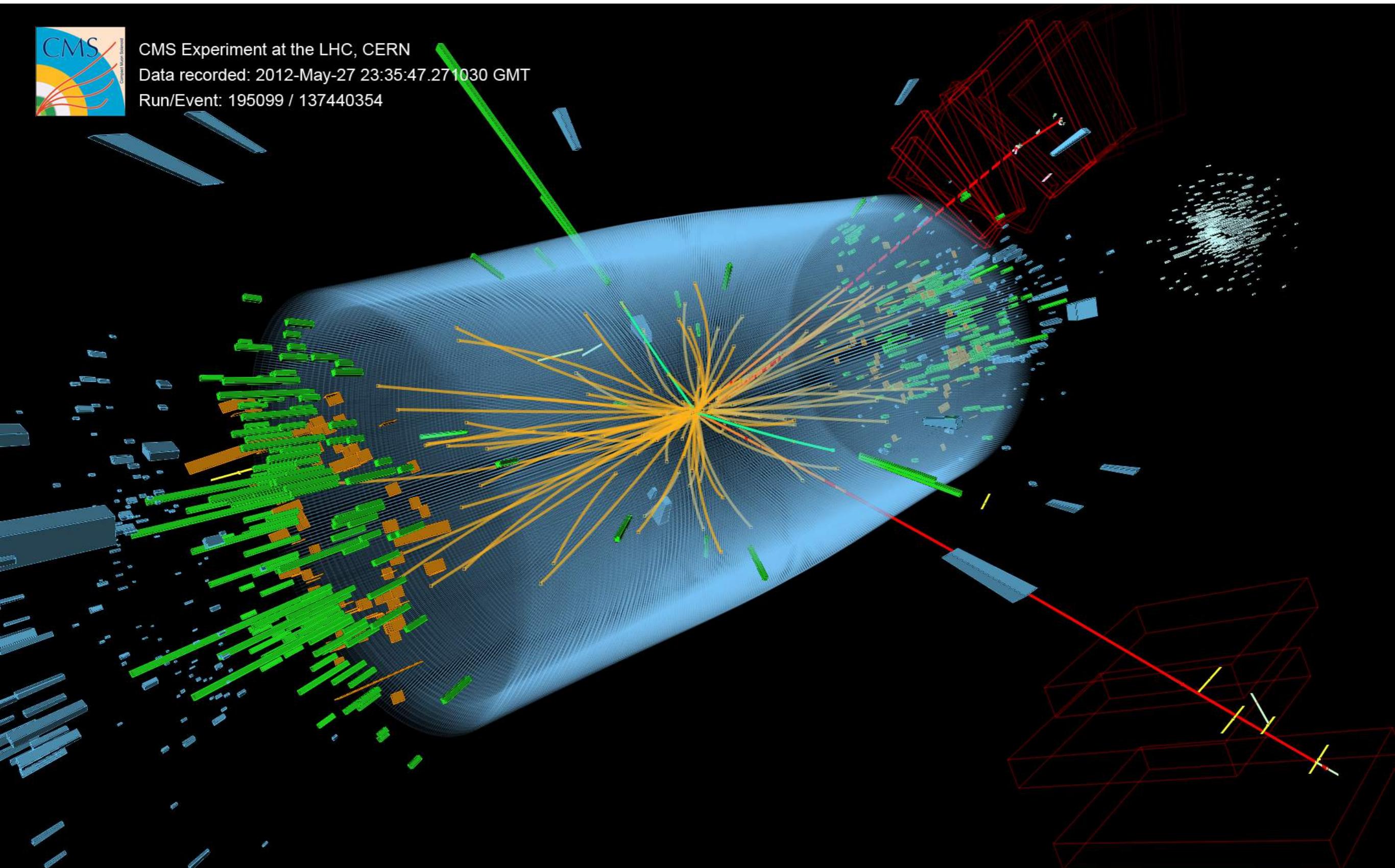
Eureka!

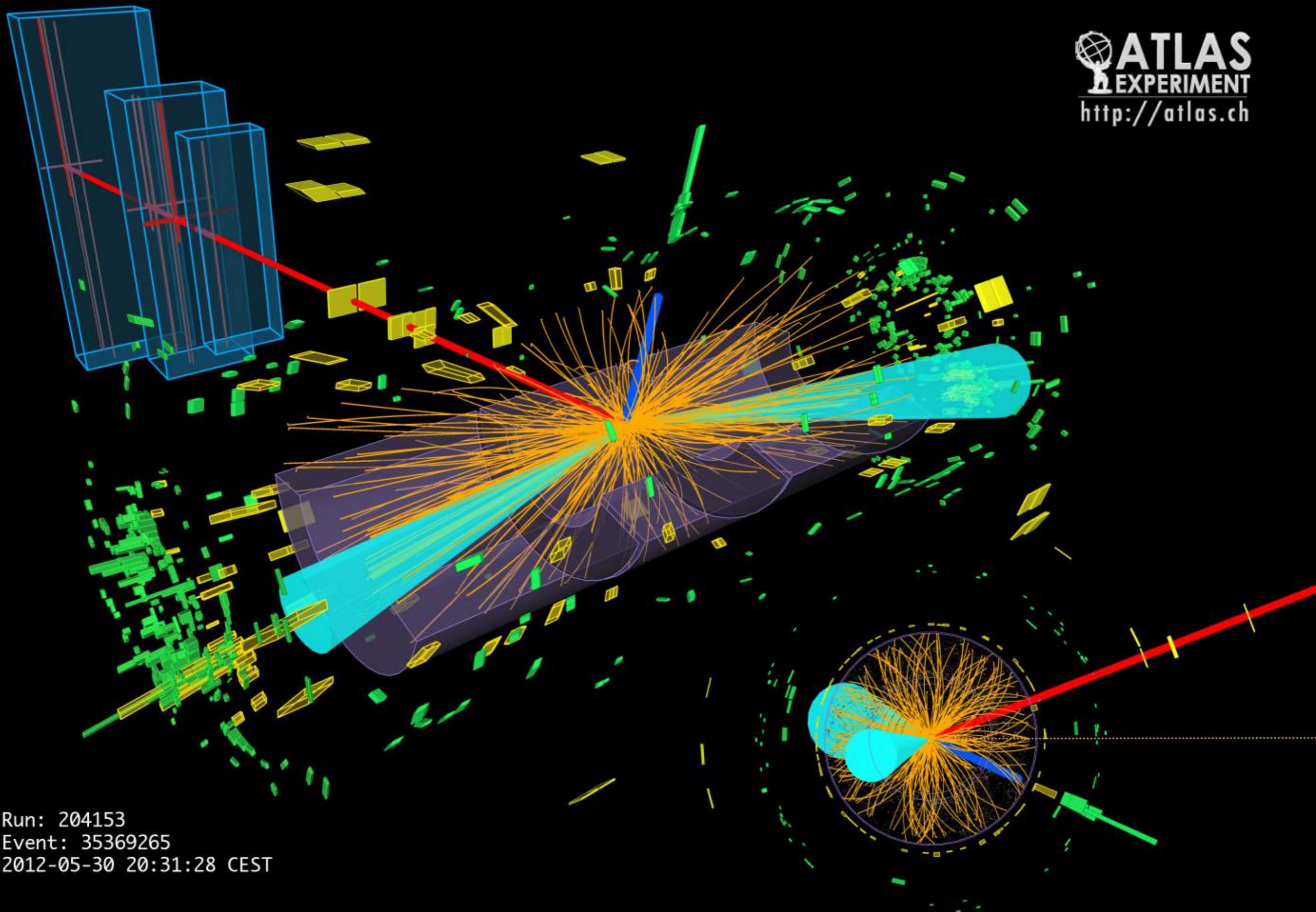
4 luglio 2012, J. Incandela e F. Gianotti presentano i risultati di ATLAS e CMS: entrambi confermano l'evidenza di una nuova particella di massa **125.3 GeV**. L'impianto teorico del MS è confermato.





CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354





Run: 204153
Event: 35369265
2012-05-30 20:31:28 CEST

Ve

Pew Ultimo Nobel

*“For the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the **ATLAS** and **CMS** experiments at CERN's Large Hadron Collider.”*



2013

My story begins in 1960, when I was appointed Lecturer in Mathematical Physics at the University of Edinburgh. Before I took up my appointment, I was invited to serve on the committee of the first Scottish Universities Summer School in Physics. I was asked to act as Steward at the School in July, my principal duty being to purchase and look after supplies of the wine which was to be served at dinner each evening.

The students at the School included four who stayed up late into the night in the common room of Newbattle Abbey College (the crypt of a former abbey) discussing theoretical physics, and rarely got up in time for the first lecture of the following day. They were Dr. N. Cabibbo (Rome), Dr. S. L. Glashow (CERN), Mr. D. W. Robinson (Oxford) and Mr. M.J.G. Veltman (Utrecht). Many years later, Cabibbo told me that their discussions had been lubricated by bottles of wine collected after dinner and hidden inside the grandfather clock in the crypt.

I did not take part in these discussions, since I had other things to do (such as conserving wine).

[...]

Domande aperte

Perché tali valori di massa?

Perché tre generazioni di leptoni?

È possibile unificare EWT e QCD?

Quali proprietà ha il QGP?

Esistono nuove particelle?

La particella di massa 125.3 GeVc^{-2} è *il* bosone di Higgs o *un* bosone di Higgs?

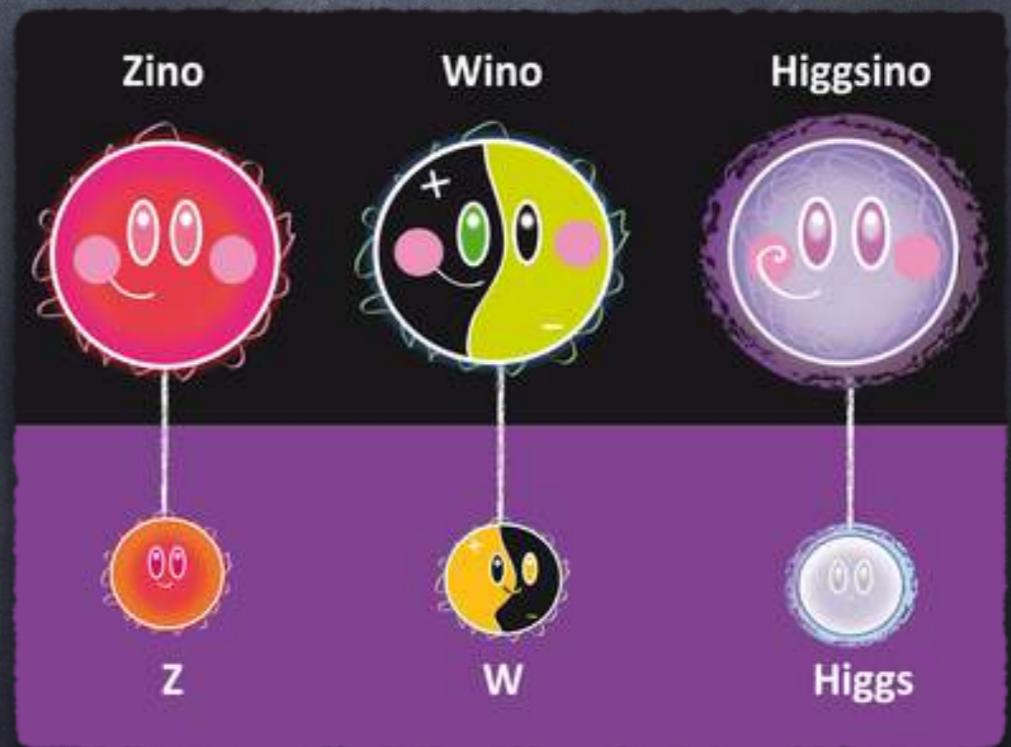
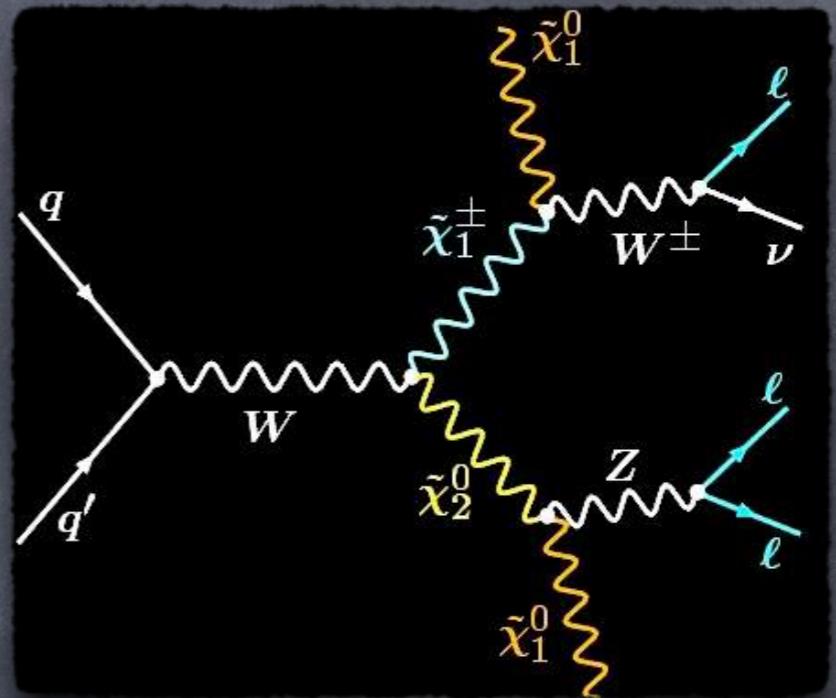
Teorie BSM? (SUSY? MSSM?)

Come si spiega la materia oscura?

Perché c'è più materia che antimateria?

...

E la Relatività Generale?



CERN time machine

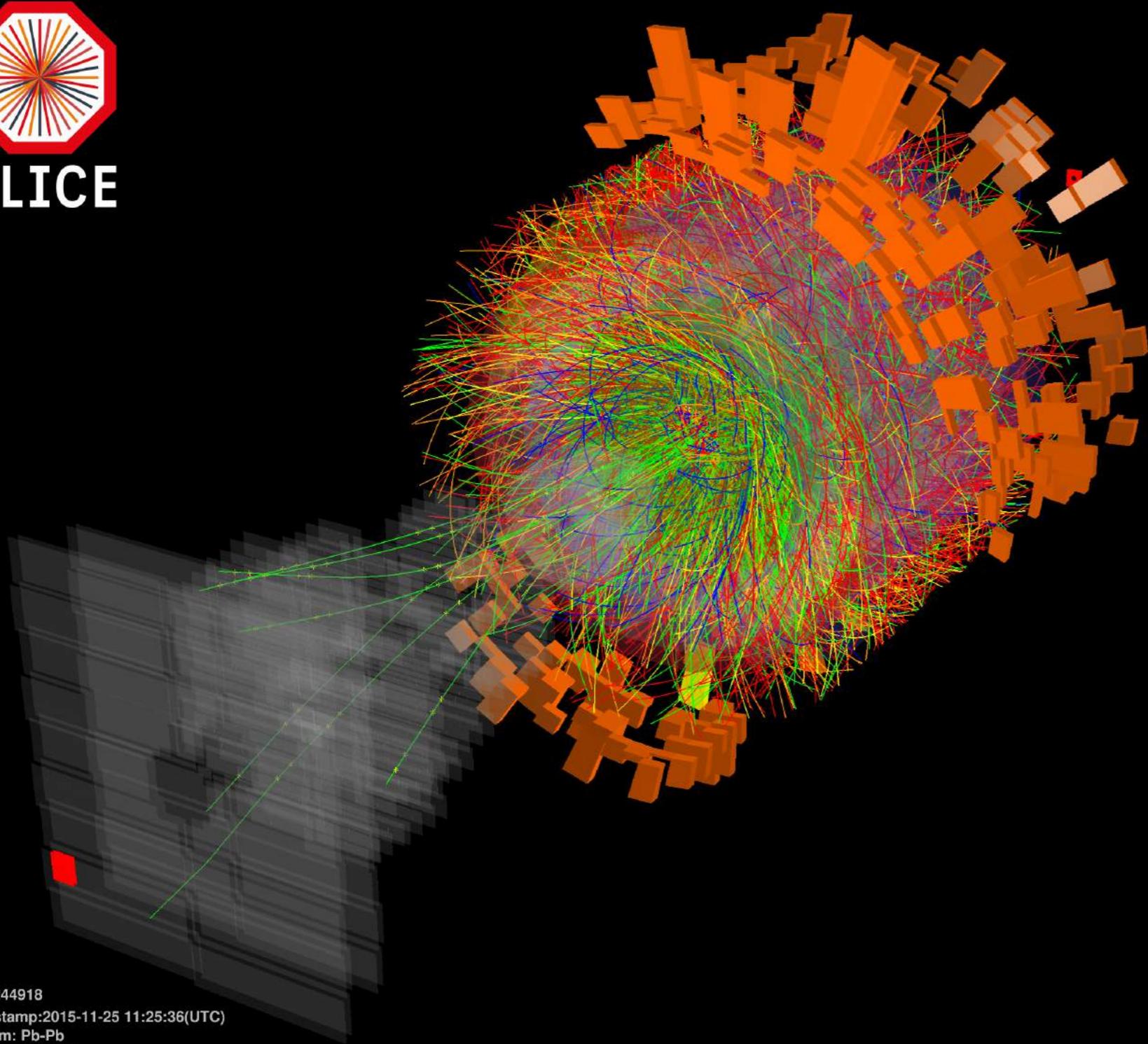


I fell into a burnin' ring of fire
I went down, down, down
And the flames went higher,
And it burns, burns, burns,
The ring of fire, the ring of fire.

Ring of Fire, June Carter, Merle Kilgore, Johnny Cash, 1963



ALICE

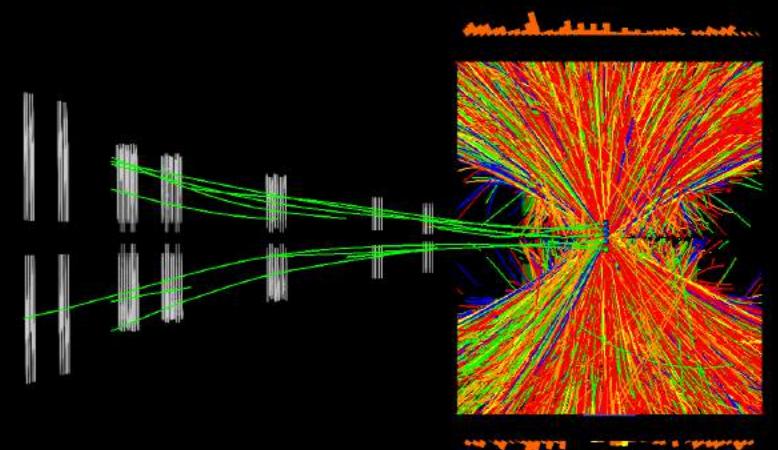
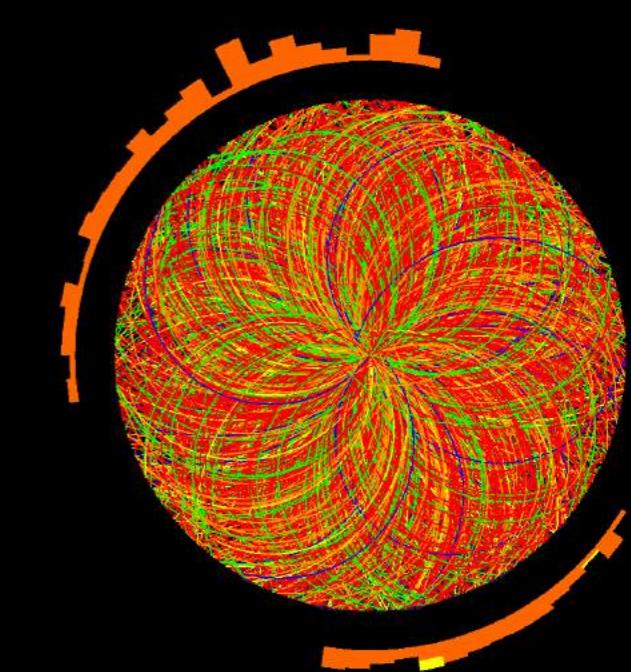


Run:244918

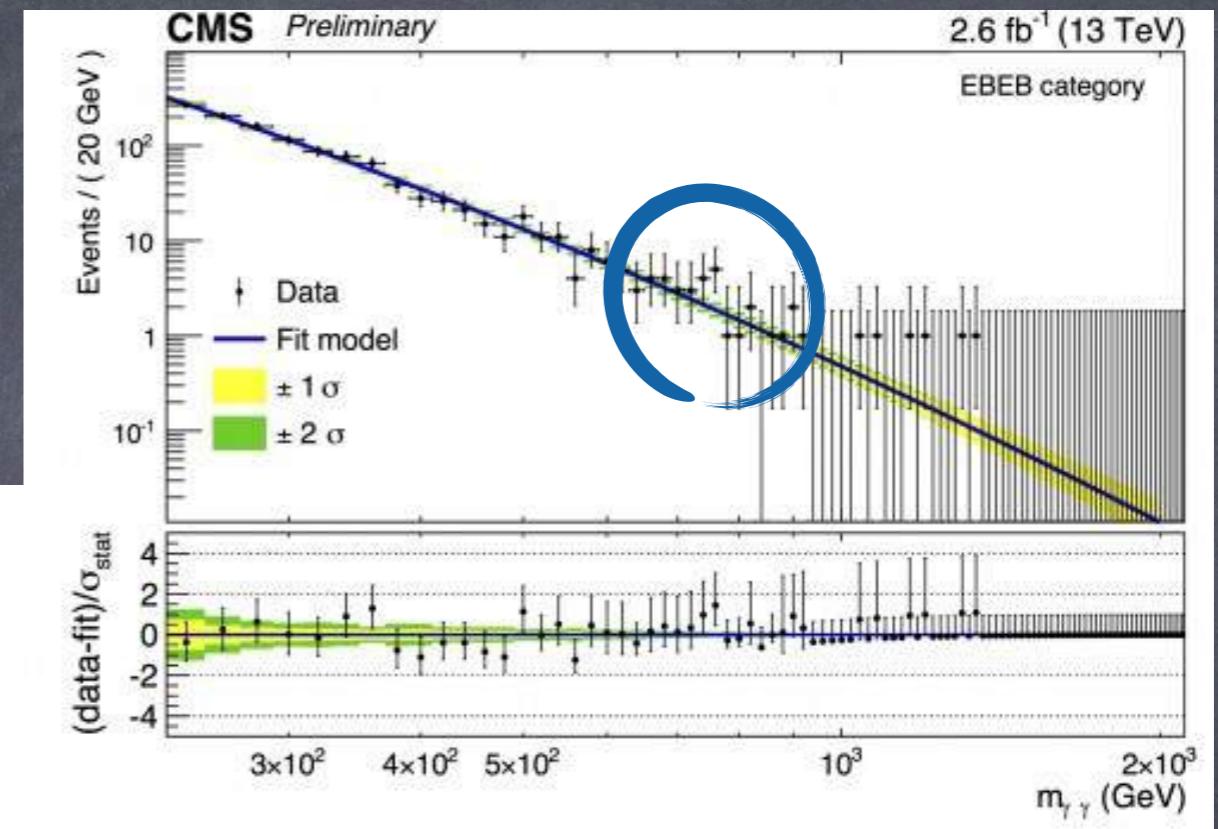
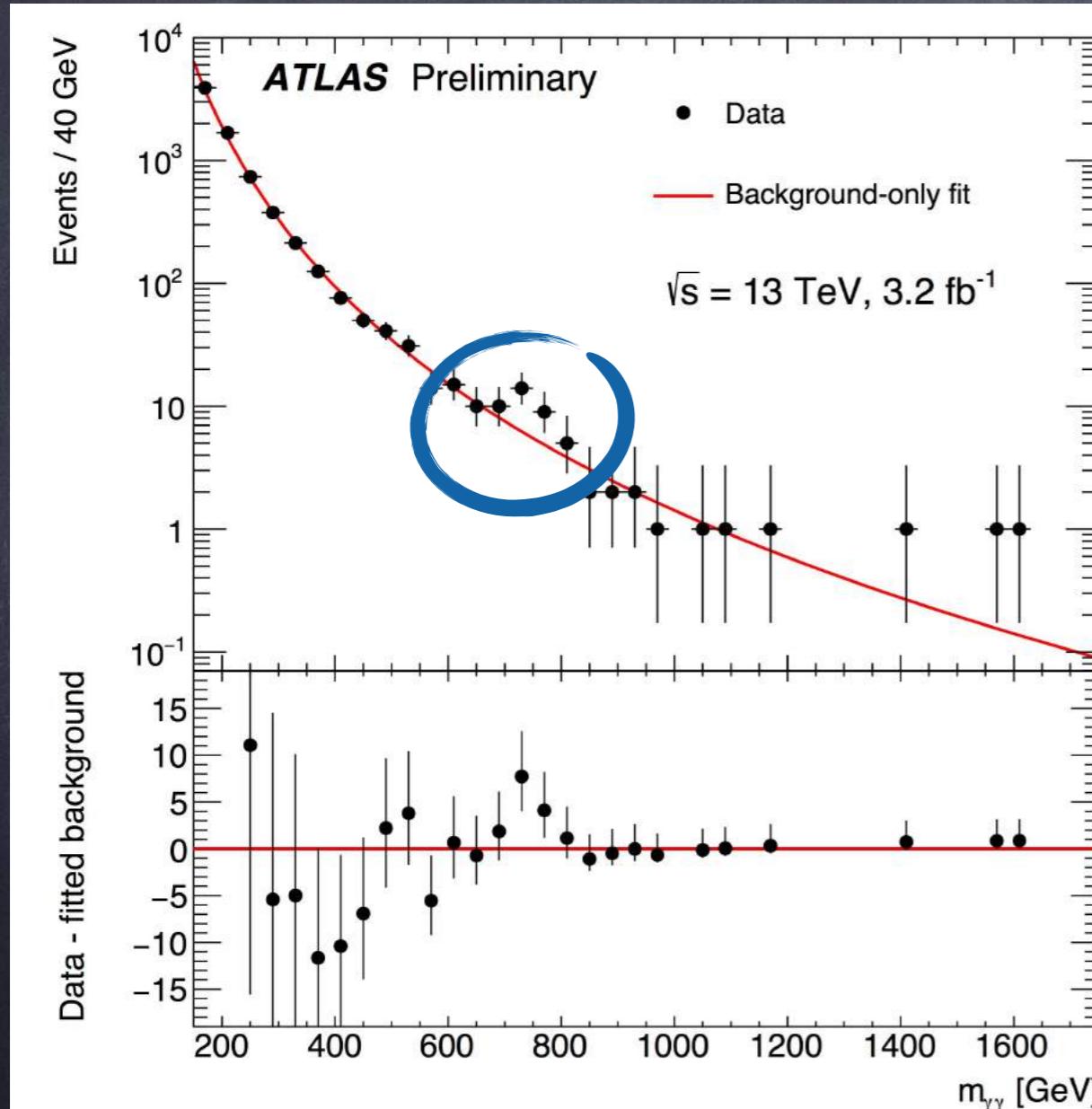
Timestamp:2015-11-25 11:25:36(UTC)

System: Pb-Pb

Energy: 5.02 TeV

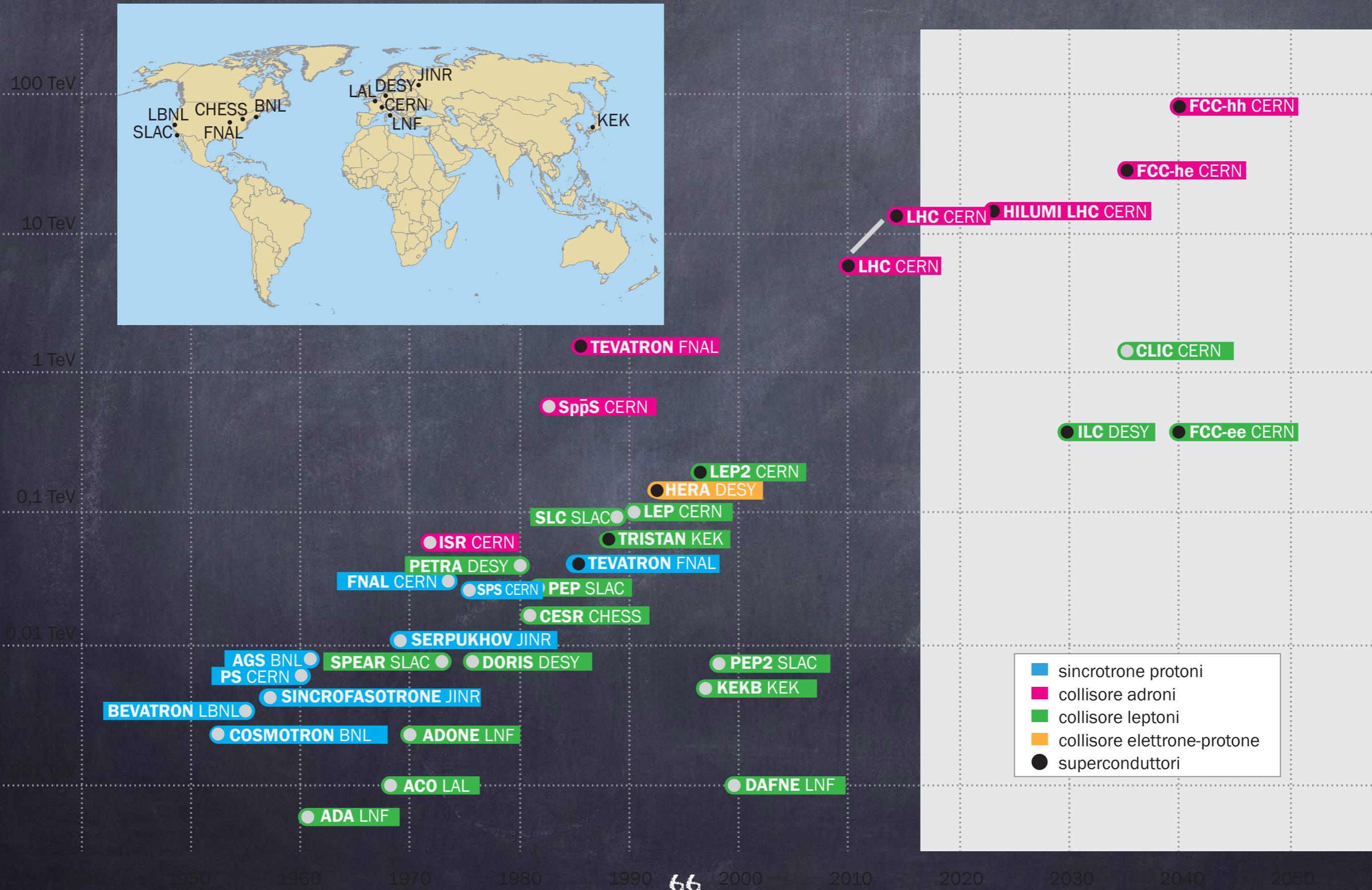


E se il futuro
fosse già qui?



I primi dati raccolti da
Atlas e CMS a 13 TeV
(2015) mostrano un debole
($< 5\sigma$) eccesso intorno a
750 GeV. Solo procedendo
con la presa dati si
avranno risposte definitive.

Come proseguire La ricerca?



Per approfondire

Ghirardi Gian Carlo, *Un'occhiata alle carte di Dio*, Net Editore, Milano, 2003.

Einstein Albert, *Relatività, esposizione divulgativa*, Bollati Boringhieri Editore, Torino, 1960.

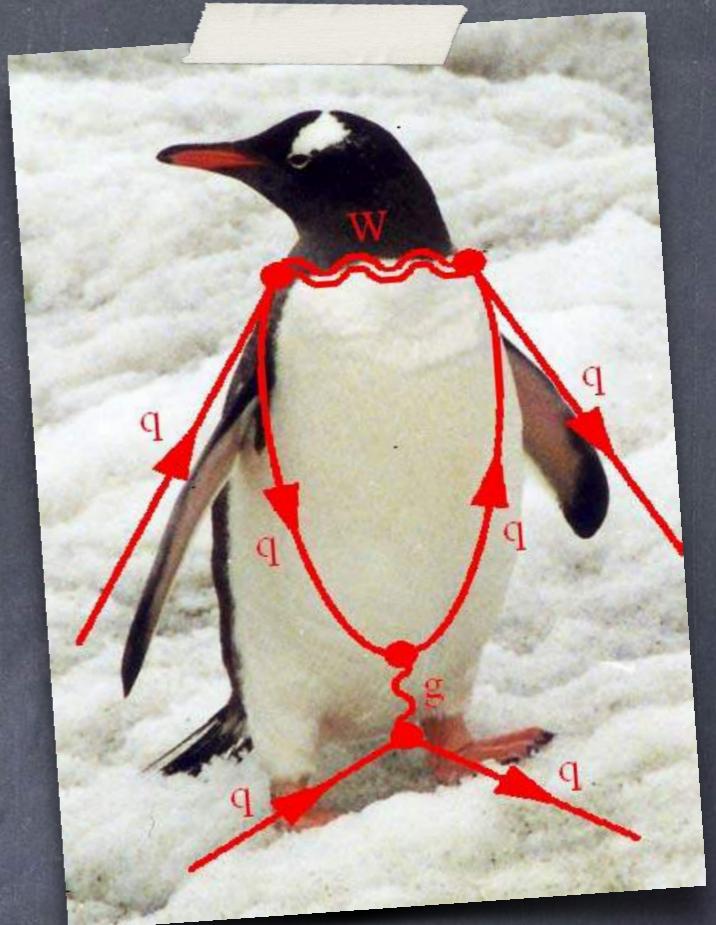
Feynman Richard, *Sei pezzi facili*, Adelphi Edizioni, Milano, 2000.

Feynman Richard, *Sei pezzi meno facili*, Adelphi Edizioni, Milano, 2004.

Feynman Richard, *QED, la strana teoria della luce e della materia*, Adelphi Edizioni, Milano, 1985.

Baggot Jim, *Il bosone di Higgs*, Adelphi Edizioni, Milano, 2013.

t' Hooft Gerardus, *Il mondo subatomico*, Editori Riuniti - University Press, Roma, 2012.





Grazie per l'attenzione.

Backup

Isospin

Nello *spazio di isospin* ogni nucleone presenta $t=1/2$ e può assumere uno stato *up* o uno stato *down* rispettivamente con $t_z=\pm 1/2$.

$$|p^+\rangle = \eta_+ = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |n\rangle = \eta_- = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Si riscrive l'isospin nei termini delle *matrici di Pauli*:

$$\vec{t} = \frac{1}{2} \vec{\tau} \quad t_i = \frac{1}{2} \tau_i \quad \tau_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Per cui:

$$\tau_3 |p^+\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = 1 |p^+\rangle \quad \tau_3 |n\rangle = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} = -1 |n\rangle$$

Isospin

Si associa l'isospin all'operatore di carica per i nucleoni:

$$Q = e \left\{ \frac{1}{2} + t_z \right\} = \frac{e}{2} \{ I_2 + \tau_3 \}$$

In modo che valgano le *equazioni agli autovalori*:

$$Q|p^+\rangle = e|p^+\rangle \quad Q|n\rangle = 0$$

L'interazione nucleare è invariante per rotazioni nello spazio di isospin:

1.3 MeV ← $[H_{had}, \vec{t}] = 0$

$$[H_{had} + H_{em}, \vec{t}] \neq 0 \quad [H_{had} + H_{em}, t_z] = 0$$

Teoria di Yukawa

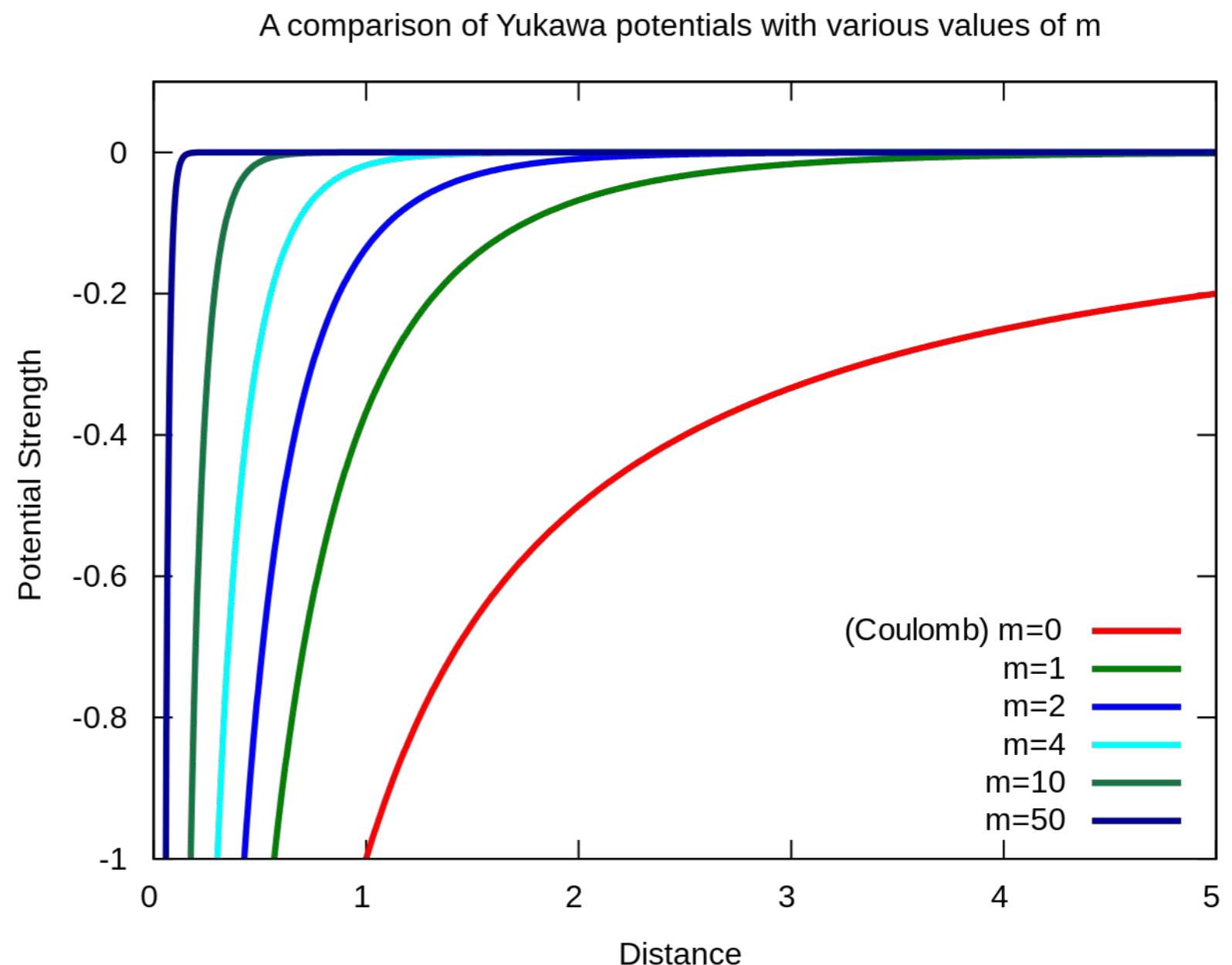
$$V_Y(r) = ge^{-kmr}r^{-1} \xrightarrow{m=0} V_C(r) = gr^{-1}$$

$$kmr = ra^{-1}$$

$$a = \frac{\hbar}{mc} \Rightarrow k = \frac{c}{\hbar}$$

$$a \in [1, 2] \text{ fm}$$

$$m \in [100, 200] \text{ MeV}$$



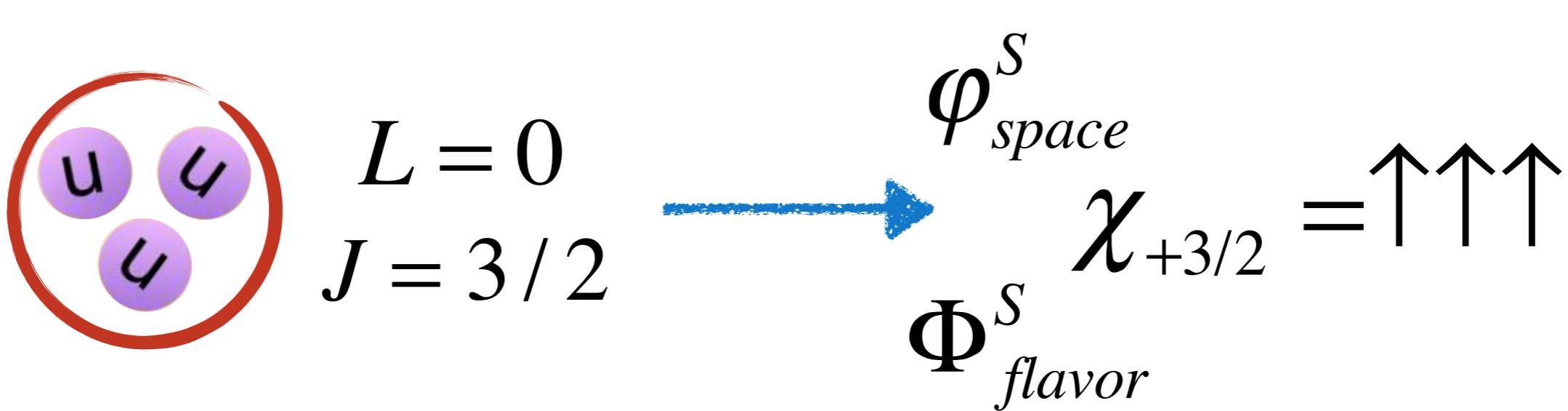
ψ spin-flavor

Data la natura fermionica dei barioni, essi devono soddisfare il principio di esclusione di Pauli: la funzione d'onda barionica dev'essere totalmente antisimmetrica per lo scambio di due quarks:

$$\psi_{3q} = N \varphi_{space} \otimes \chi_{spin} \otimes \Phi_{flavor}$$

$$\psi_{q_1 q_2 q_3} = -\psi_{q_2 q_1 q_3}$$

Alcuni barioni presentavano proprietà tali da fornire una funzione d'onda totalmente simmetrica:



ψ spin-flavor-colour

Si ipotizza, allora, che ciascun quark possieda un ulteriore grado di libertà interno conservato nelle interazioni forti e l'esistenza un nuovo *gruppo di invarianza* nella teoria, $SU(n)_{colour}$, di dimensione n . Per determinare il valore di n si richiede che la funzione d'onda di colore possa essere completamente antisimmetrica e che giustifichi la natura dei barioni quali singoletti di colore.

Tali richieste sono soddisfatte se la decomposizione in rappresentazioni irriducibili del prodotto diretto di tre rappresentazioni fondamentali di $SU(n)_{colour}$ contiene una rappresentazione antisimmetrica di dimensione uno.

$$1 = \frac{n(n+1)(n+2)}{6} \Leftrightarrow n = 3 \quad \begin{matrix} R \\ B \end{matrix} \quad G$$

Allora la funzione d'onda complessiva può essere riscritta come:

$$\Psi_{3q} = N \varphi_{space} \otimes \chi_{spin} \otimes \Phi_{flavor} \otimes \theta_{colour}$$

ψ protone

Si può scrivere la funzione d'onda di un protone in uno stato *up* di spin, esplicitando la componente di spin-flavor:

$$\begin{aligned} |p^+ \uparrow\rangle = N\varphi_{space} \otimes \{ & 2|u^\uparrow u^\uparrow d_\downarrow\rangle + 2|d_\downarrow u^\uparrow u^\uparrow\rangle + 2|u^\uparrow d_\downarrow u^\uparrow\rangle + \\ & -|u_\downarrow u^\uparrow d^\uparrow\rangle - |d^\uparrow u_\downarrow u^\uparrow\rangle - |u_\downarrow d^\uparrow u^\uparrow\rangle + \\ & -|u^\uparrow u_\downarrow d^\uparrow\rangle - |d^\uparrow u^\uparrow u_\downarrow\rangle - |u^\uparrow d^\uparrow u_\downarrow\rangle \} \otimes \theta_{colour} \end{aligned}$$



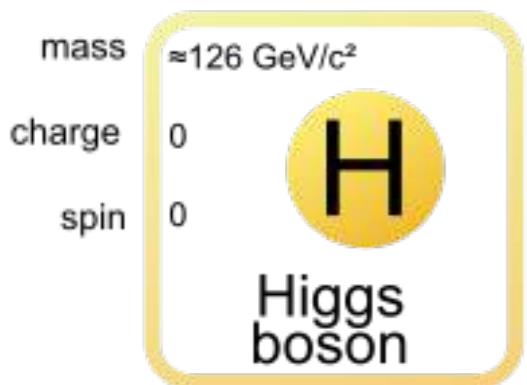
Particelle virtuali



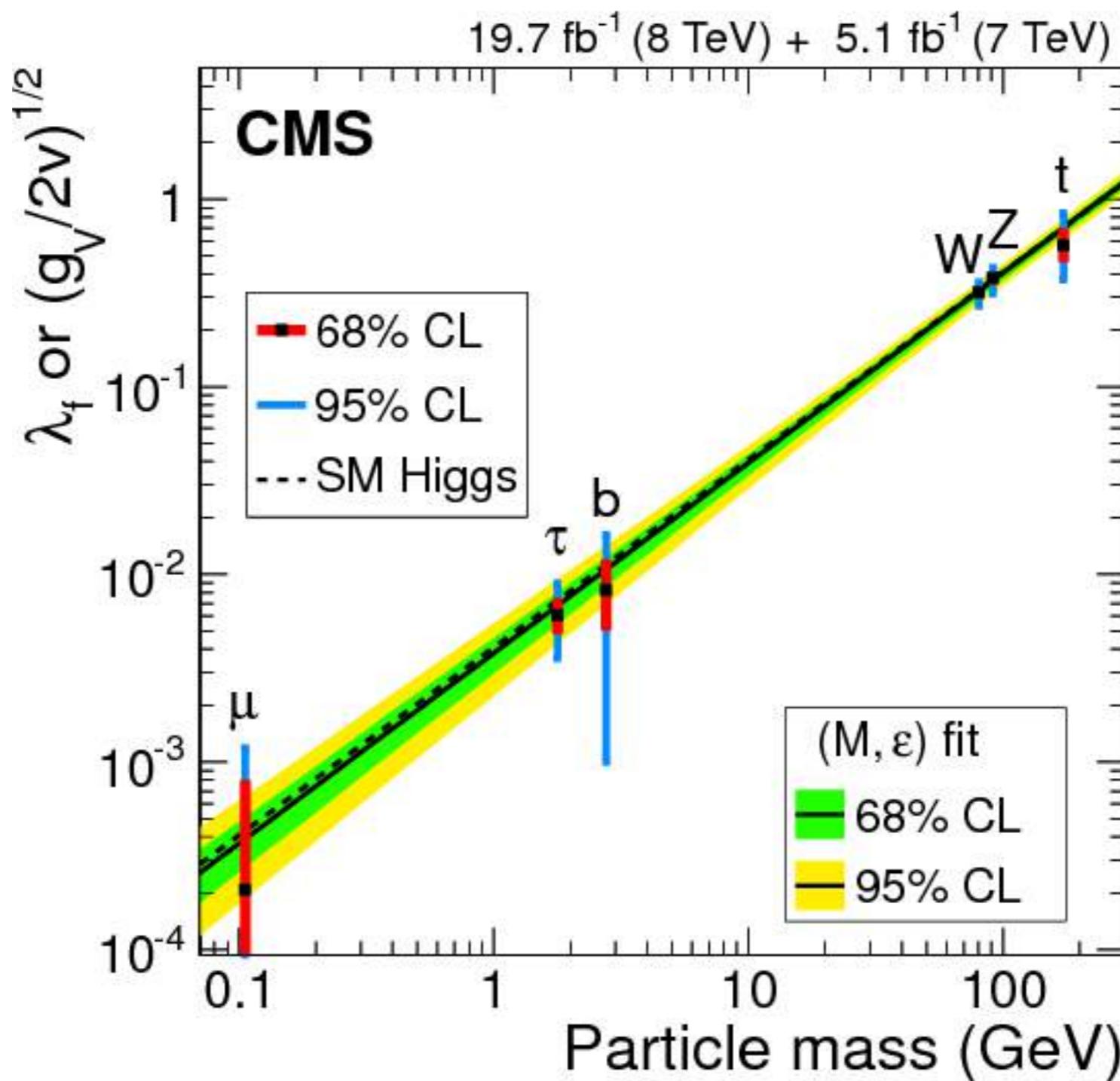
Le particelle che intervengono nelle interazioni fondamentali sono *virtuali* (*off-shell*), ovvero eccitazioni dei campi associati alle interazioni.

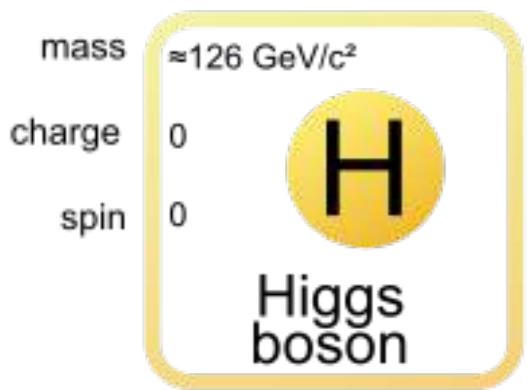
$$\Delta E \Delta t \approx \hbar$$

Poiché la massa di una particella è pari al quadrato del **quadrimpulso**, è possibile che particelle mediatici reali prive di massa (es. γ) possano possedere massa nella propria versione off-shell, massa pari al quadrato del quadrimpulso scambiato dalle due particelle interagenti.

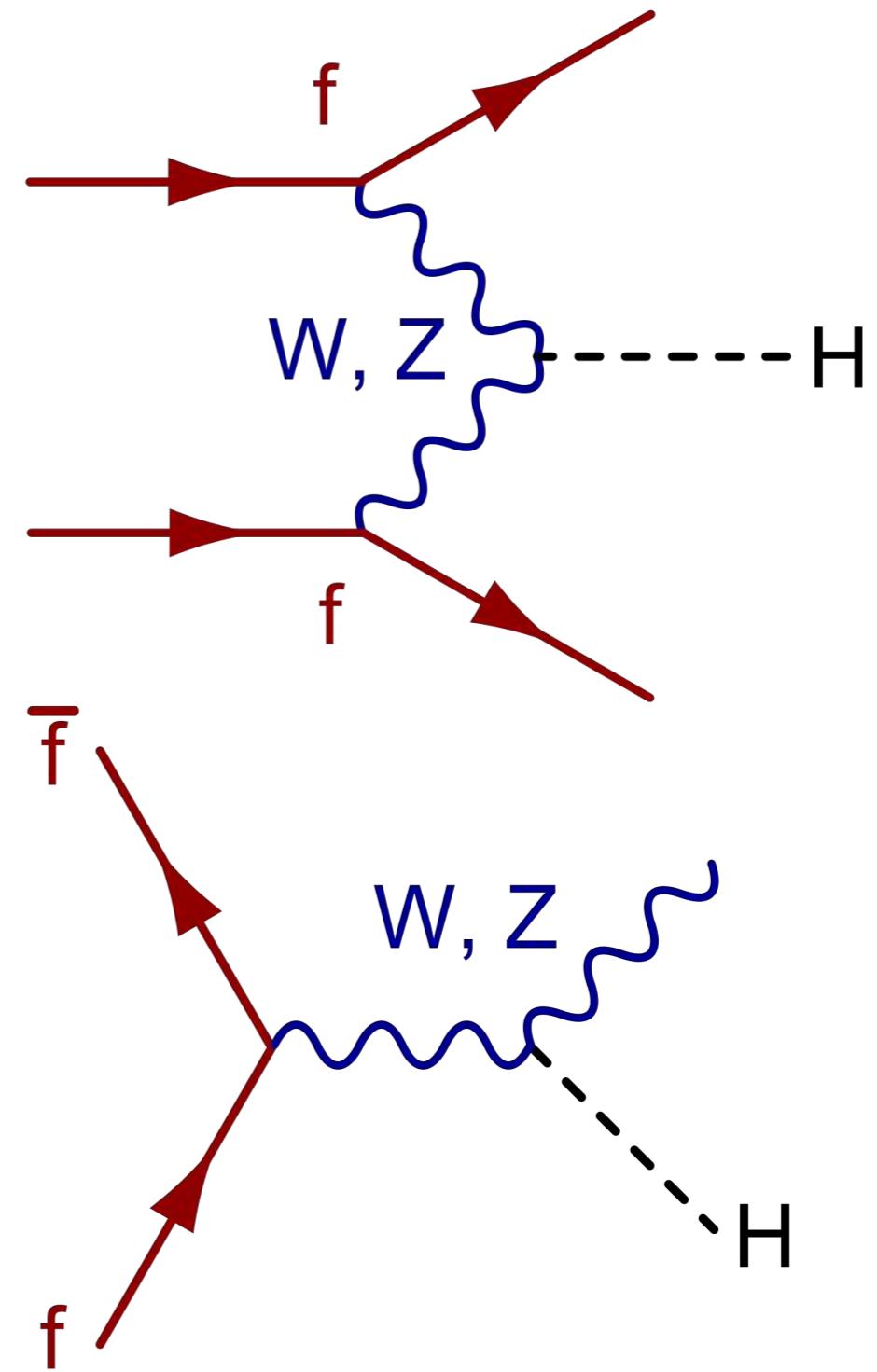
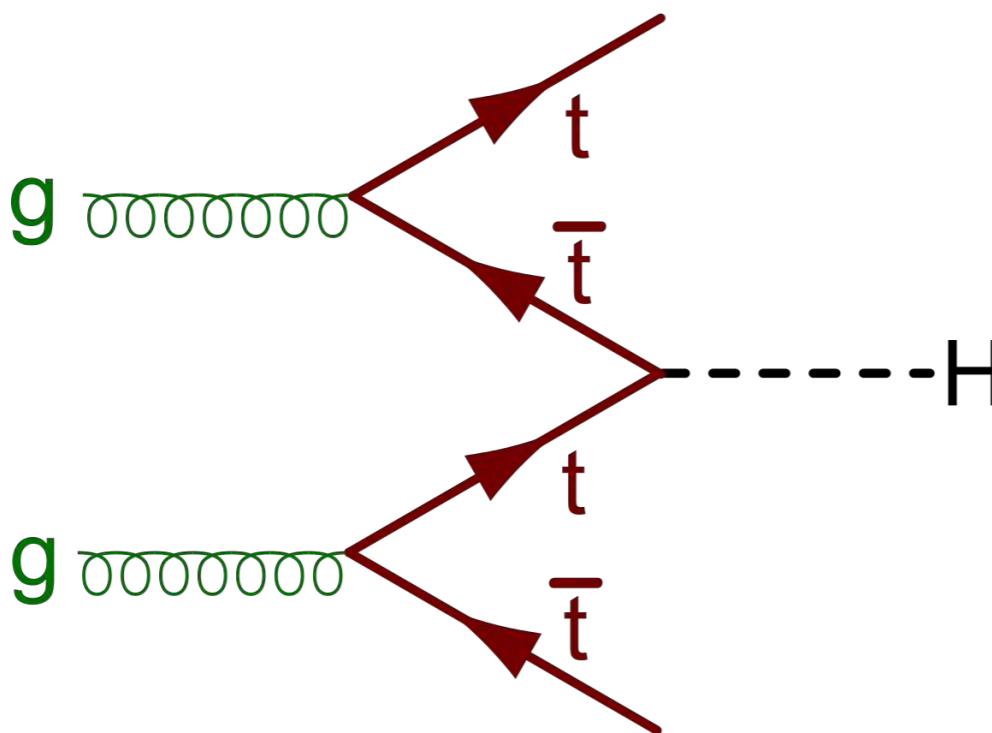
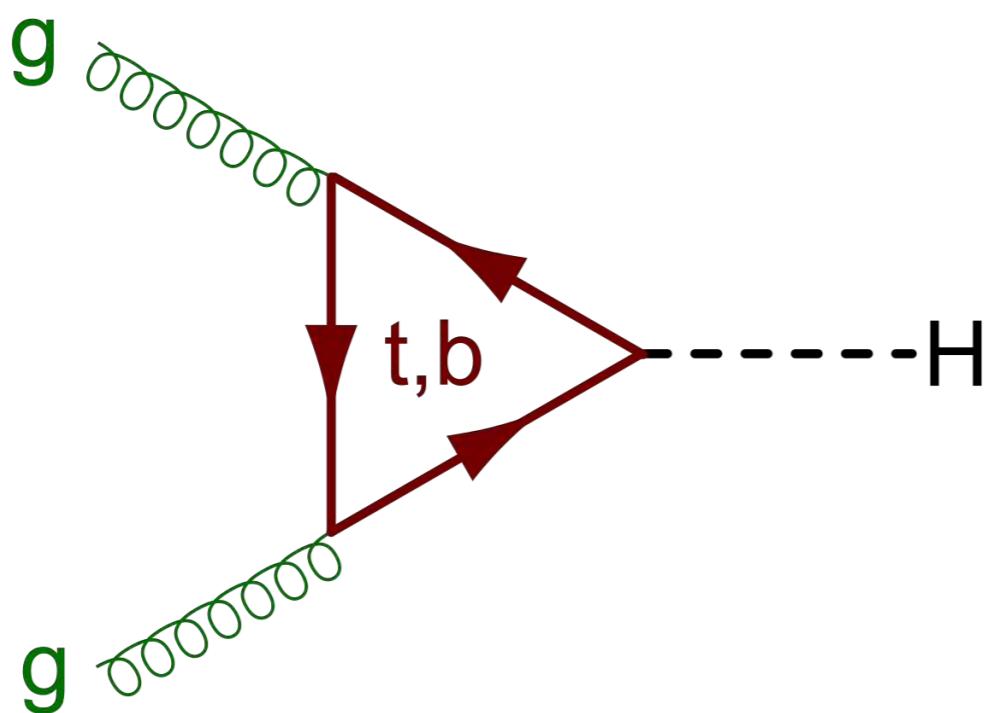


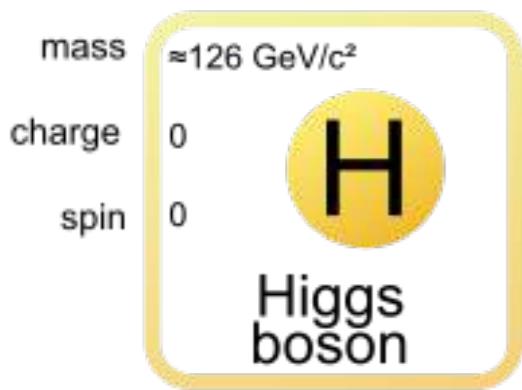
Couplings



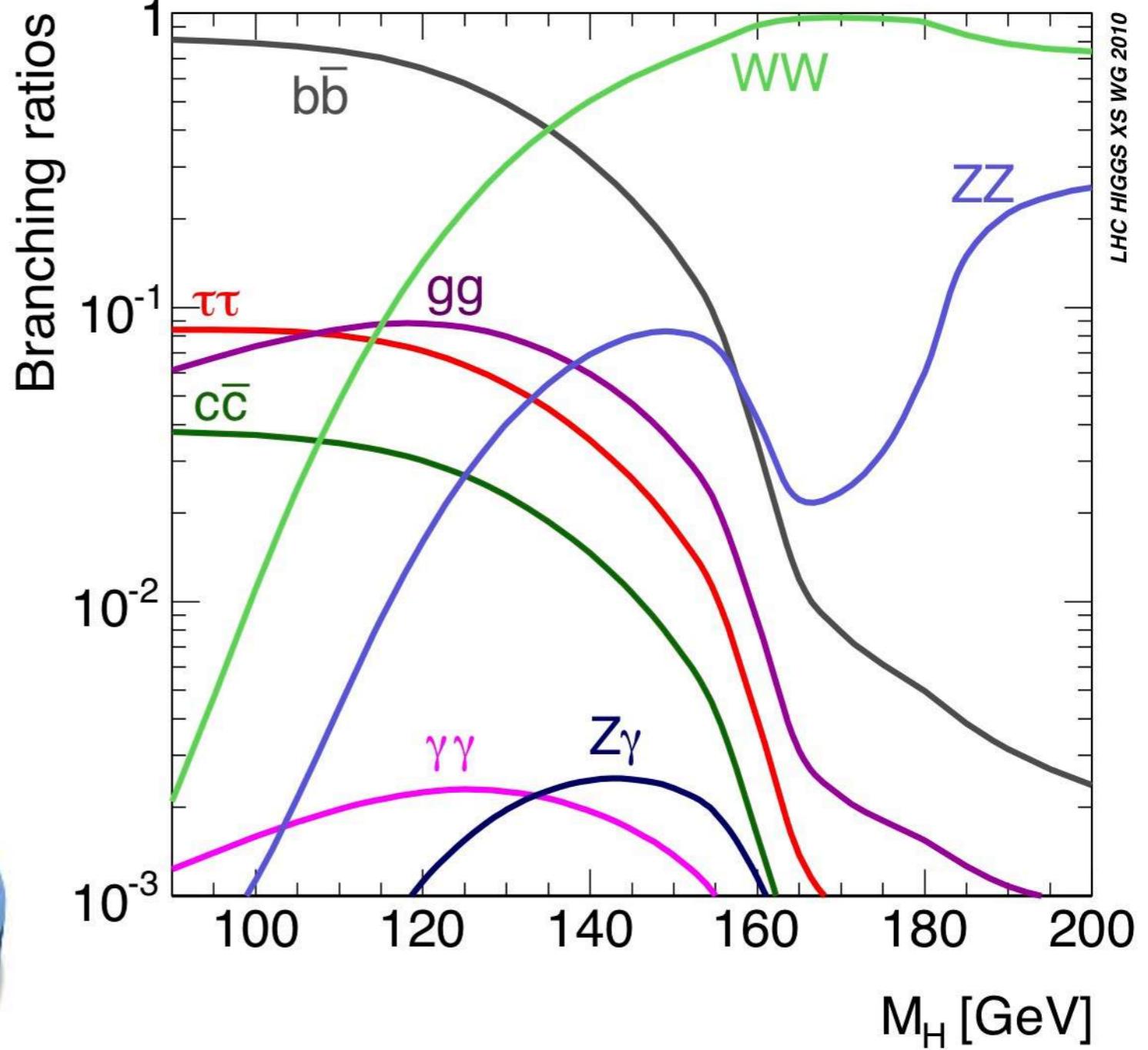
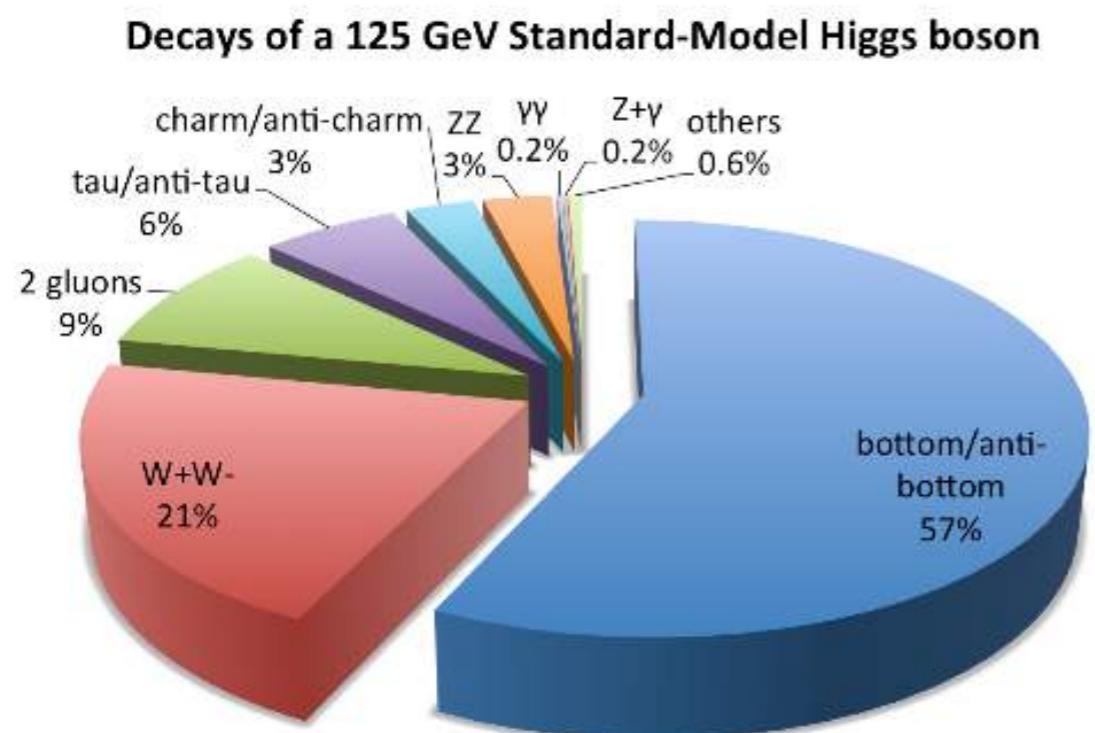


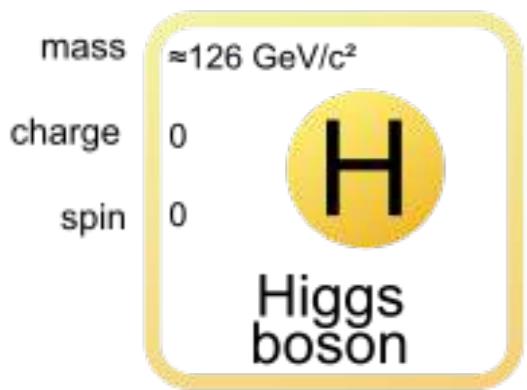
Produzione



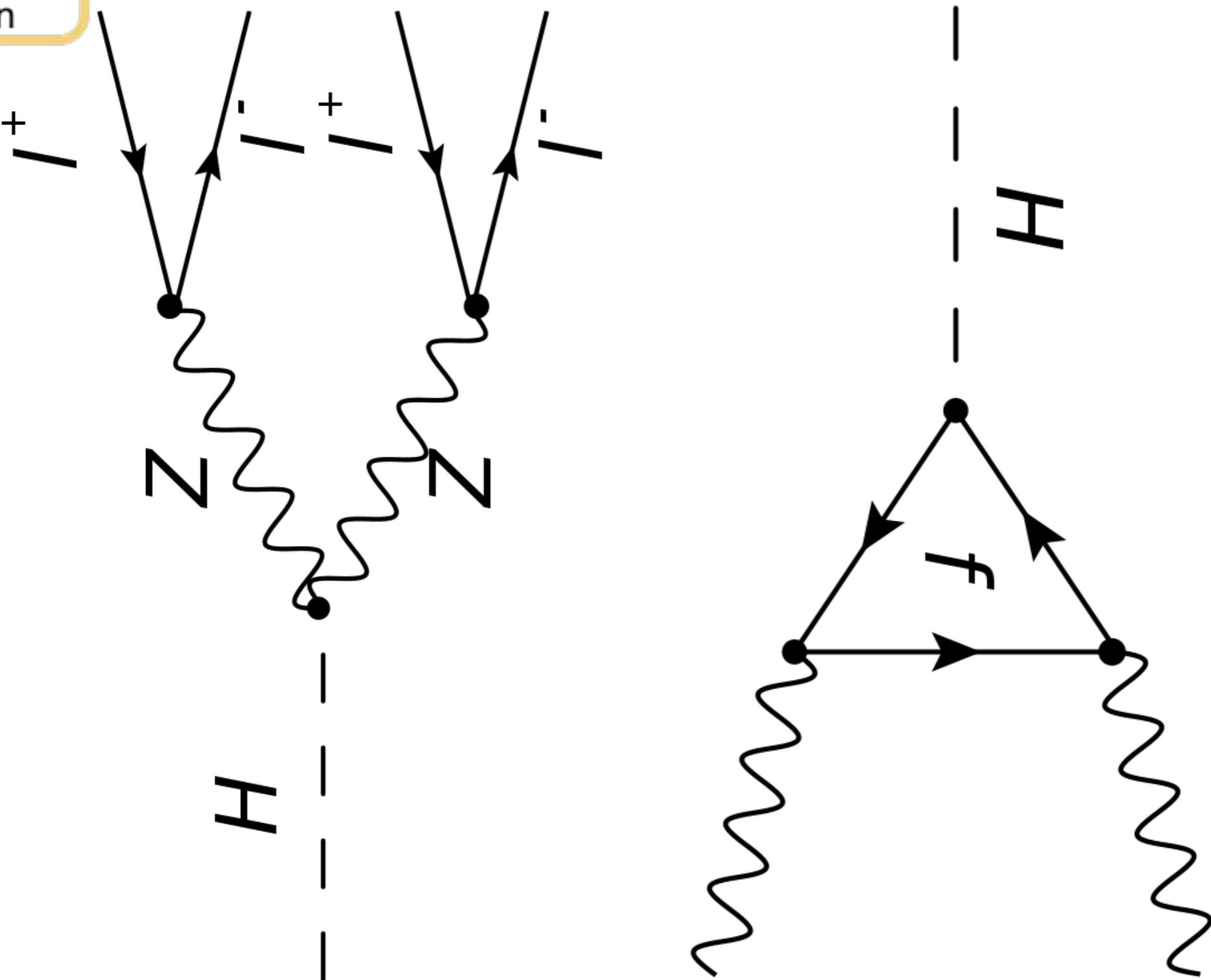


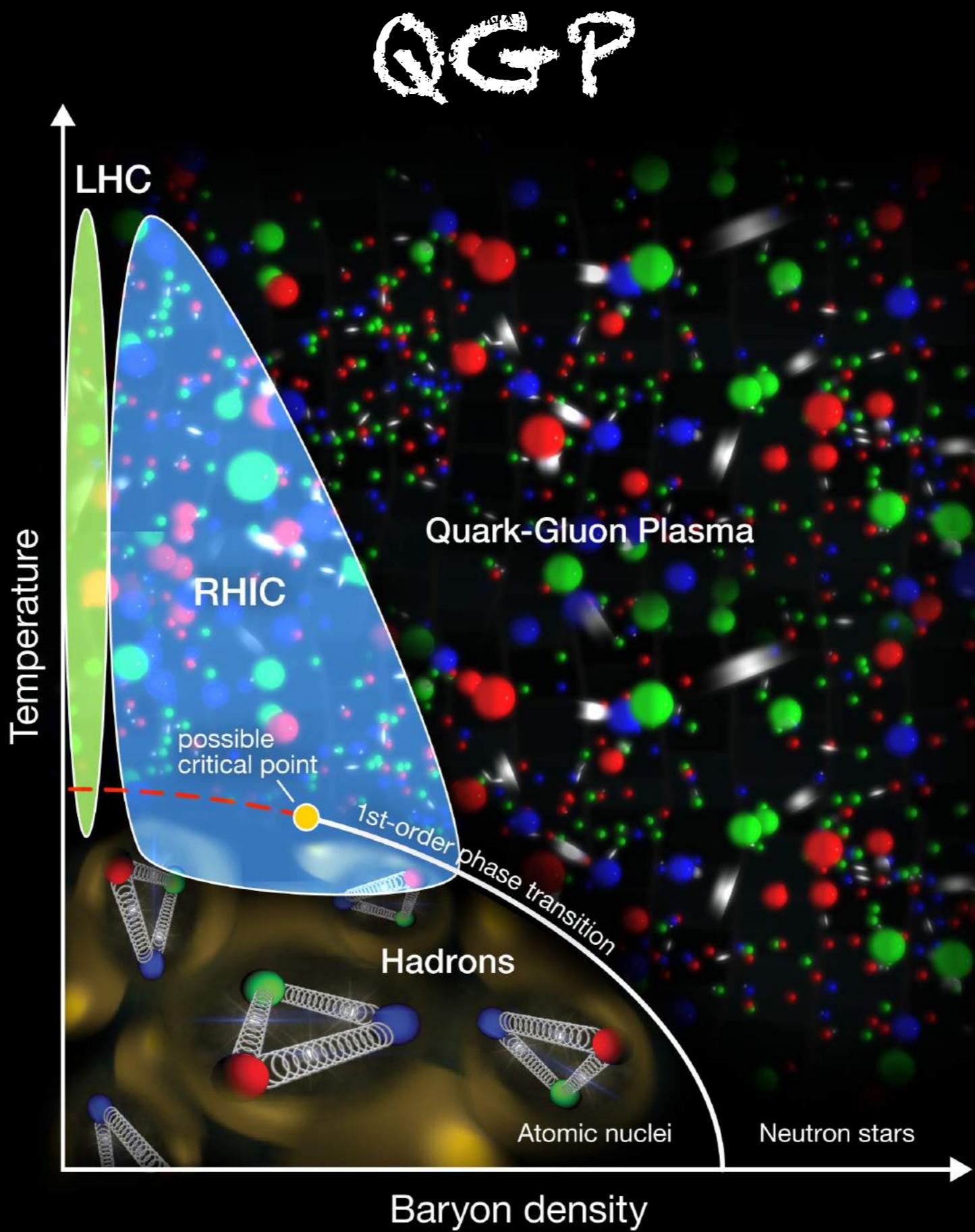
Branching ratios





Firma





Quanto ci costa?

JWST 8 G\$

ISS 150 G\$

HST 2.5 G\$

LHC 6.5 GCHF

ALICE 115 MCHF

ATLAS 540 MCHF

CMS 500 MCHF

LHCb 75 MCHF

CERN/PIL EU

1/13k €

Cosa ce ne facciamo?

Trasferimento diretto + *progresso tecnologico*

Spin-off da acceleratori:

cancer therapy,
semiconductor industry,
electron beam welding and cutting,
radioisotope production,
non-destructive testing,
incineration of nuclear waste,
source of neutrons,
source of synchrotron radiation,
solid state physics,
etc.

Spin-off da detectors:

medical imaging,
container inspector,
IT industries,
etc.

Spin-off informatici:

world wide web,
simulation programs,
fault diagnosis,
grid computing,
etc.