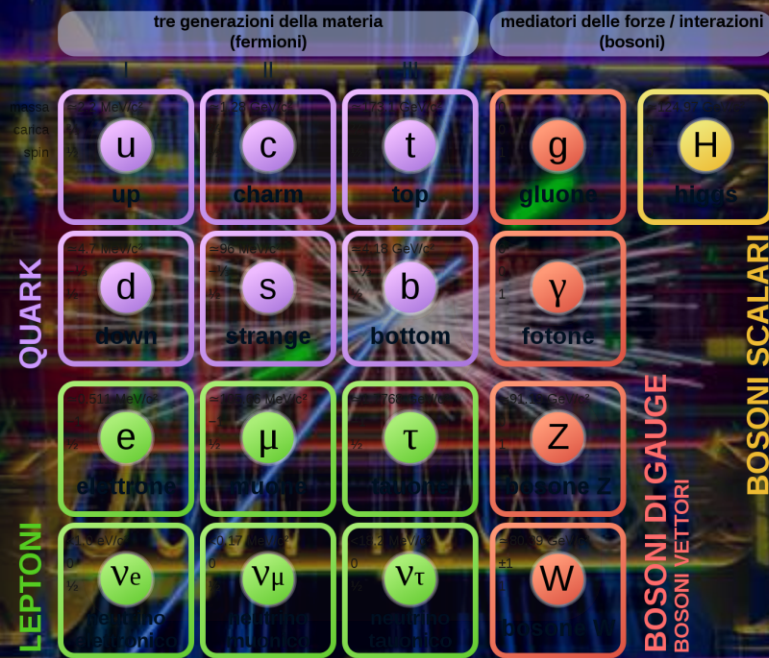


Storia del Modello Standard: dai primi '900 alla scoperta del bosone di Higgs ... e poi?

Modello Standard delle Particelle Elementari



Isabella Masina (Università di Ferrara & INFN)

Italian Teacher Programme, CERN, 07/10/2024

4 luglio 2012: scoperta al CERN una nuova particella chiamata BOSONE DI HIGGS



07/10/2024 - I.Masina

Vi sarete chiesti:

Cos'è questo bosone di Higgs?

...se avete cercato su wikipedia avete letto:

Il bosone di Higgs è un **bosone scalare, elementare e massivo** associato al **campo** di Higgs, che svolge un ruolo fondamentale nel Modello Standard conferendo la massa alle **particelle elementari** tramite il fenomeno della **rottura spontanea di simmetria**. [...]

Vi sarete chiesti:

Cos'è questo bosone di Higgs?



dopodomani lezione (tecnica)

$$\mathcal{L} \simeq -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi + y_{ij}\Psi_i\Psi_j\phi + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$

$$y_{ij}\Psi_i\Psi_j \frac{1}{\sqrt{2}}(v+h) \rightsquigarrow \frac{y_\mu v}{\sqrt{2}}\mu\mu + \frac{y_\mu}{\sqrt{2}}\mu\mu h = \mu \text{---} \mu + \mu \text{---} \mu \text{---} h$$

$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}}(v+h)$
 $y_\mu/\sqrt{2}$

$$|D_\mu\phi|^2 \rightsquigarrow \frac{g^2 v^2}{2} W^+ W^- \quad V(\phi) \rightsquigarrow \frac{1}{2}(2\lambda v^2) h h$$

M_W m_μ m_h^2

Vi sarete chiesti:

Cos'è questo bosone di Higgs?



Come l'hanno scoperto? E ora?



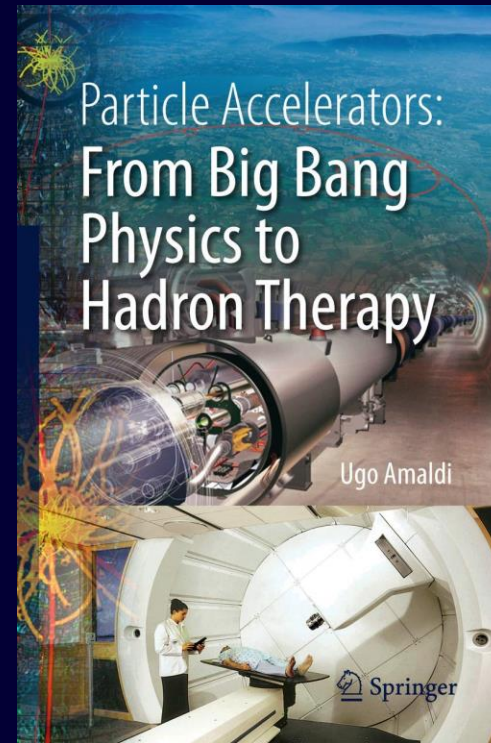
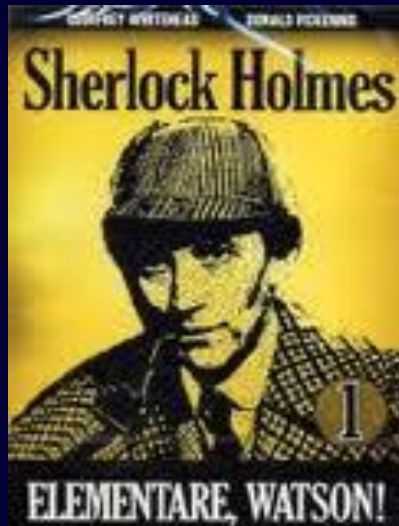
A cosa serve scoprire il bosone?
...e quanto ci è costato?



Perché e da quando si cercava?

Ha fornito indizi su altro da scoprire?

INDAGHIAMO LA STORIA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI (PE)



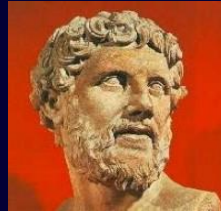
Perché e da quando si cercava?
Ha fornito indizi su altro da scoprire?

INDAGHIAMO LA STORIA DELLE **PARTICELLE ELEMENTARI (PE)**

oggetti **INDIVISIBILI**

(o meglio, ritenuti tali al momento)

Sono particelle “alla Democrito” (460-370 a.C.)?



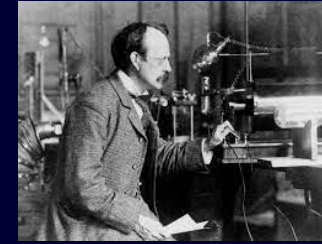
Atomismo:

Atomi = indivisibili e immutabili
in moto nel Vuoto

...almeno partiamo da fine '800!



Elettromagnetismo
OK



J.J. Thomson

e^-
↓
1897-99

1865



Maxwell

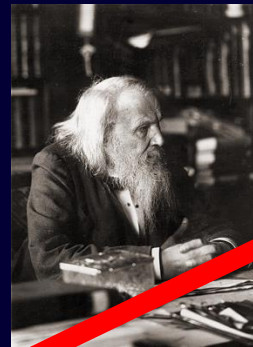
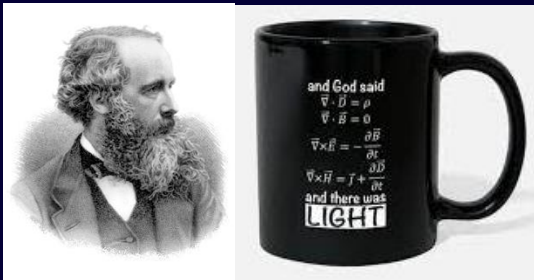
1869



Mendeleev

→ gli atomi di Mendeleev
non sono indivisibili!

elettromagnetismo



	Gruppe I. R ⁰	Gruppe II. R ⁰	Gruppe III. R ⁰	Gruppe IV. RH ⁰ R ⁰	Gruppe V. RH ⁰ R ⁰	Gruppe VI. RH ⁰ R ⁰	Gruppe VII. RH ⁰ R ⁰	Gruppe VIII. R ⁰
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63
4	K=39	Ca=40		Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	
5	(Cu=63)	Zn=65	Yt=68		As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108
7	(La=138)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	(—)	Ba=137	?Di=138	?Ce=140				
9			?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184		
10								Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208			
12				Th=231	U=240			

elementi chimici = ATOMI alla Democrito

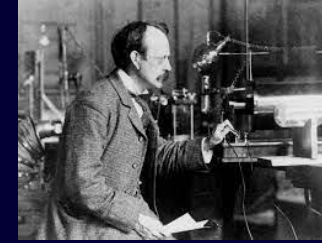


Elettromagnetismo
OK

1865



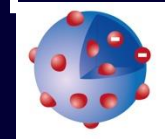
Maxwell



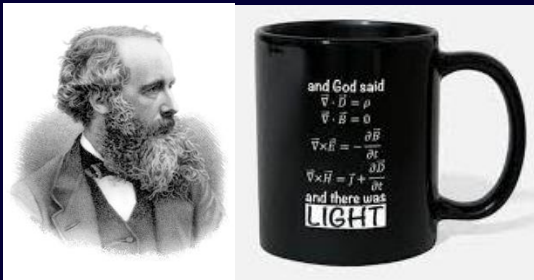
J.J. Thomson

e^-
↓
1897-99

↑
atomo
«a panettone»



elettromagnetismo



PARTICELLE ELEMENTARI

CORPUSCOLI

ONDE

A) I primi 50 anni del 900

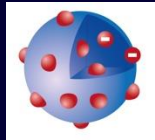
B) Gli ultimi 50 anni del 900: la corsa agli acceleratori

C) Dal 90 al 12: la caccia al bosone

D) Indizi per il futuro?

Sopra: scoperte sperimentali

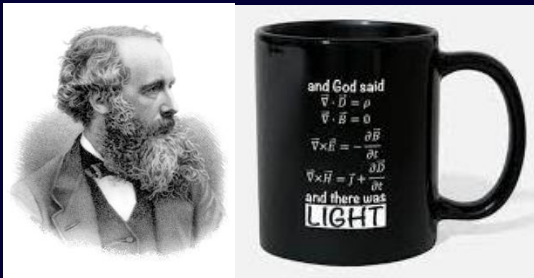
1900



Thomson atomo
«a panettone»

Sotto: teorie

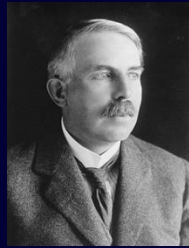
elettromagnetismo



PARTICELLE ELEMENTARI

ONDE

CORPUSCOLI

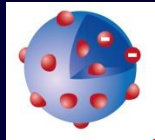


E. Rutherford

Particelle α

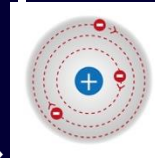
$$p = H^+$$

1917-19



Thomson atomo
«a panettone»

1911



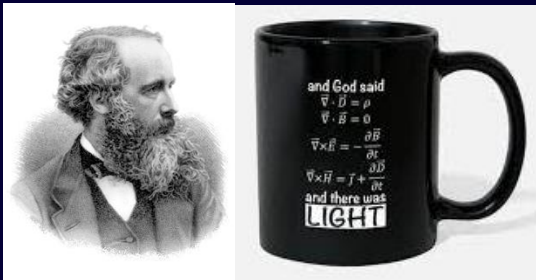
Rutherford
«planetario»

1920

$$n = (p - e^-)$$

E. Rutherford

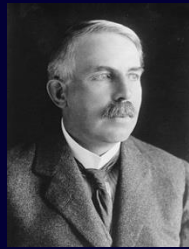
elettromagnetismo



PARTICELLE ELEMENTARI

ONDE

CORPUSCOLI



E. Rutherford

Particelle α

p

1917-19

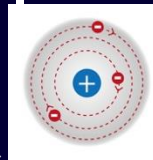
A. Compton natura corpuscolare
(ipotesi Planck, Einstein)

γ

1923

1911

Rutherford «planetario»

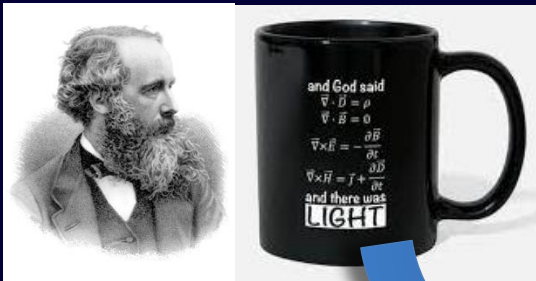


1920

$n = (p - e^-)$

E. Rutherford

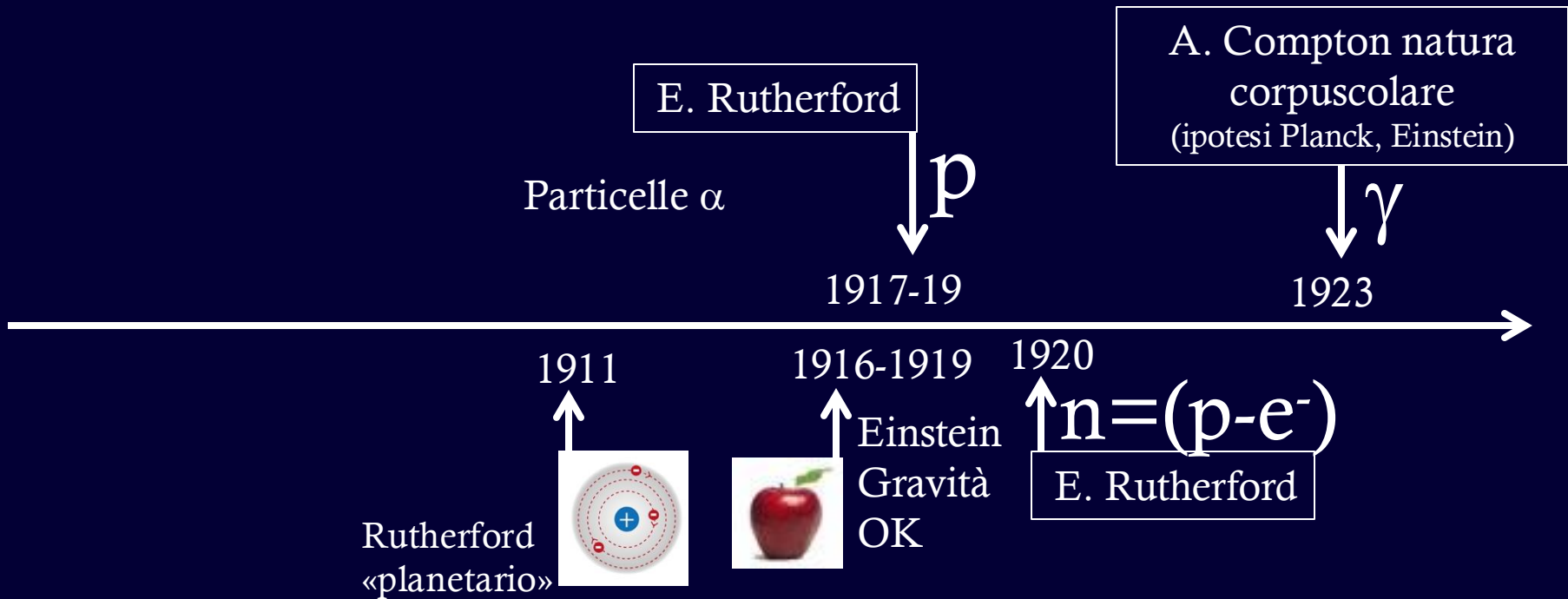
elettromagnetismo



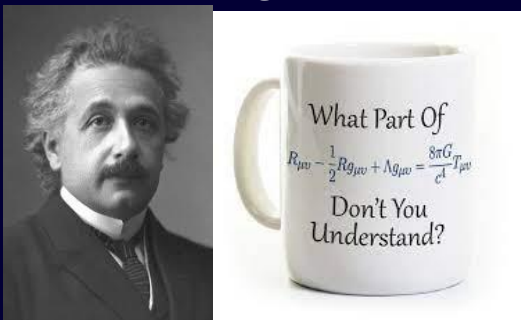
PARTICELLE ELEMENTARI

ONDE

CORPUSCOLI



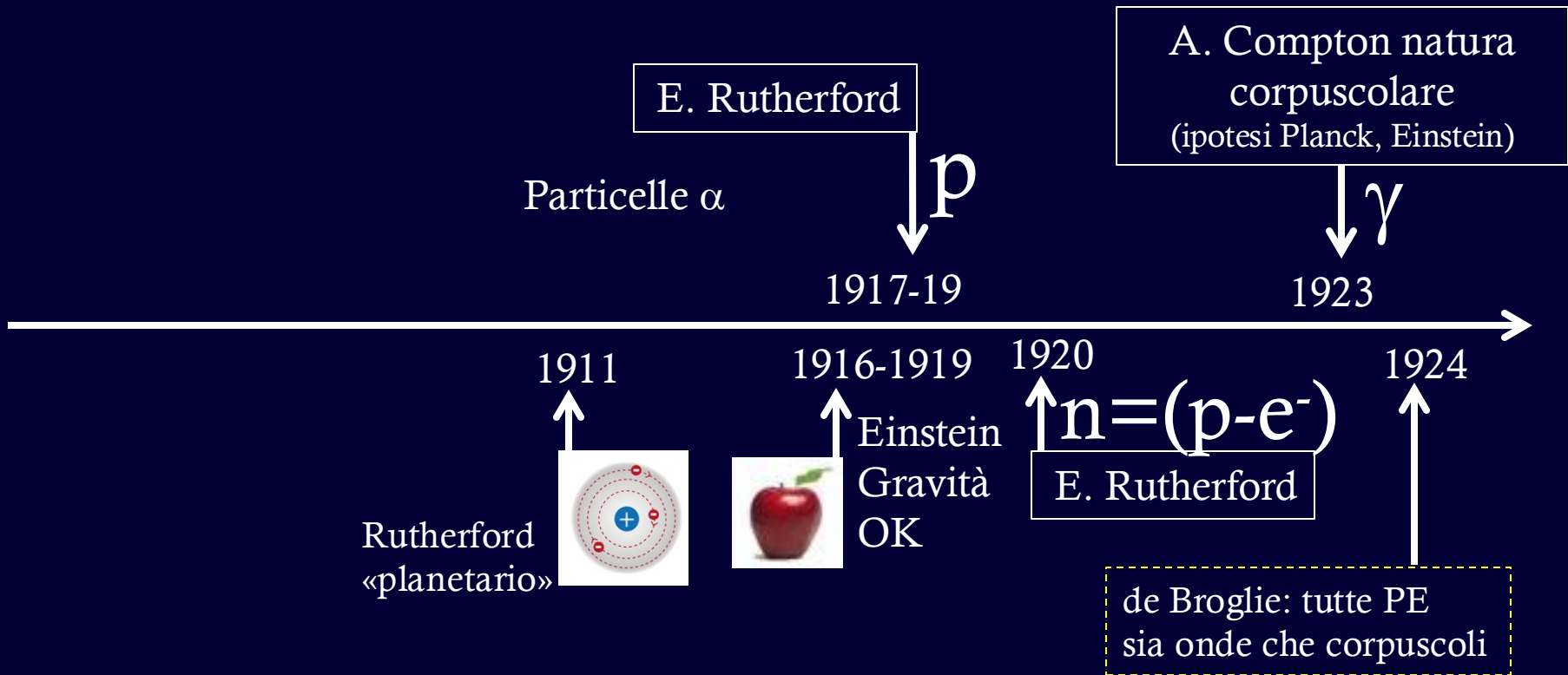
relatività generale



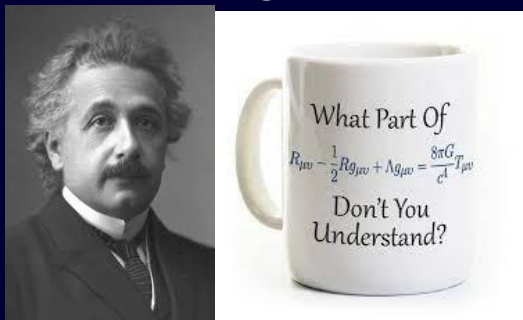
PARTICELLE ELEMENTARI

ONDE

CORPUSCOLI



relatività generale



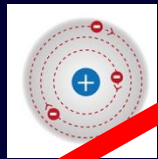
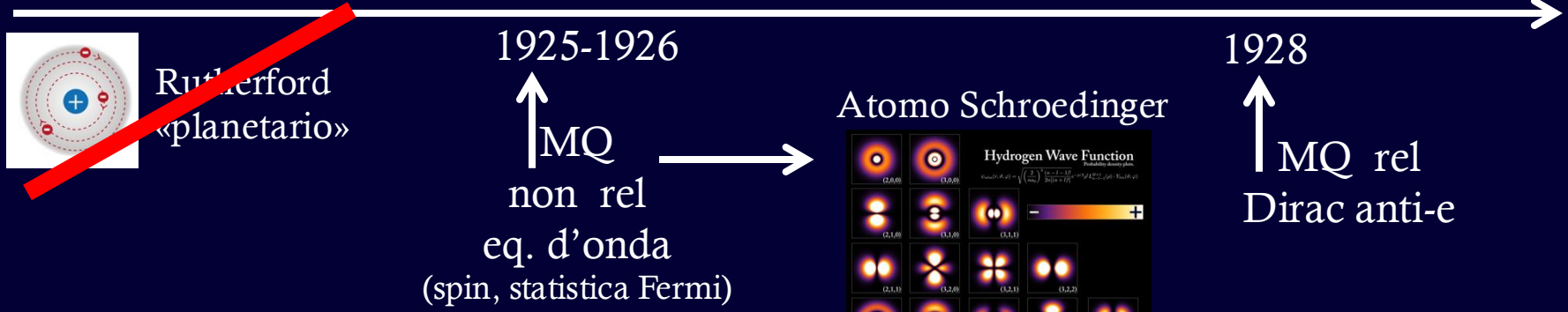
PARTICELLE ELEMENTARI

ONDE

ONDE E CORPUSCOLI

1927: Davisson-Germer
Natura ondulatoria
materia

Forze nucleari?
Si studiano i decadimenti α , β , γ
 β spettro continuo (Bohr: energia non conservata?)



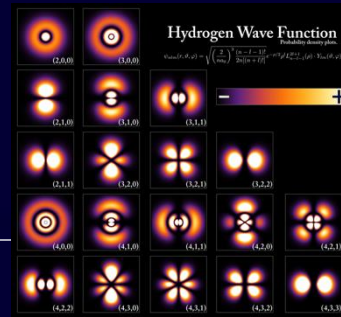
Rutherford
«planetario»

1925-1926

↑ MQ

non rel
eq. d'onda
(spin, statistica Fermi)

Atomo Schroedinger



1928

↑ MQ rel
Dirac anti-e





1930



“neutrone”
di Pauli per β



original - Photocopia of PLC 0393

Abschrift/15.12.56 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Grossenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.



J. Chadwick



n

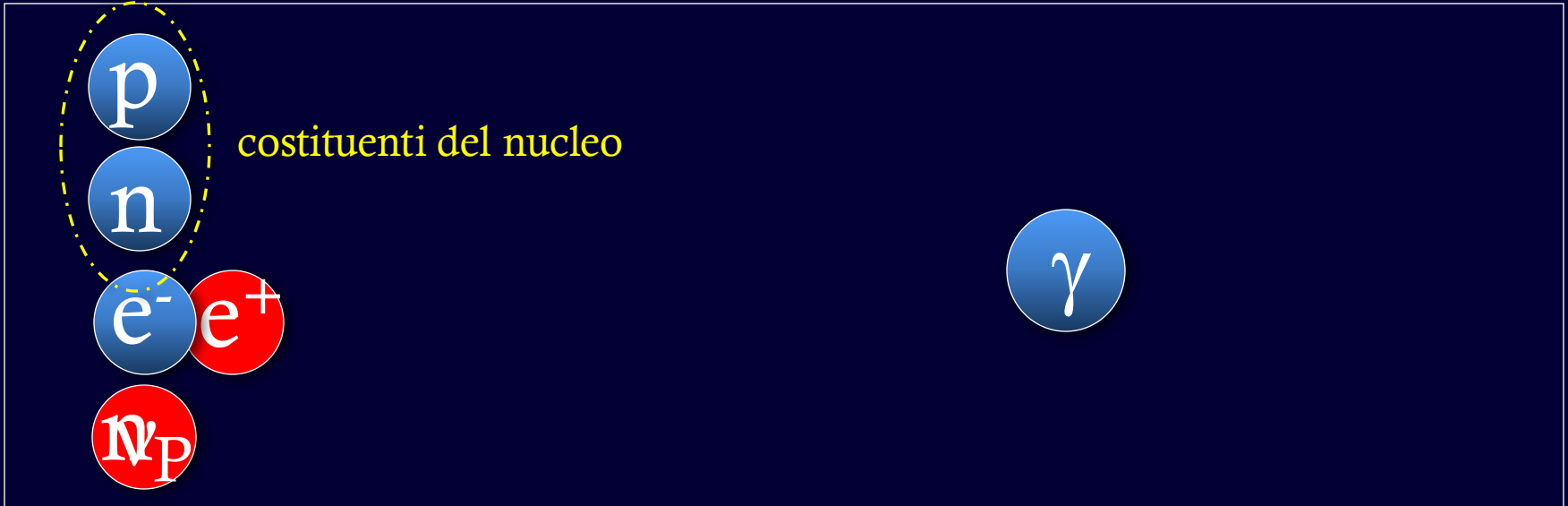
1932

1930



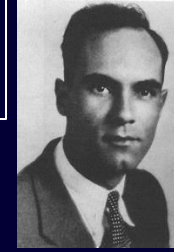
“neutrone”
di Pauli per β

«neutrino»
Amaldi-Fermi



J. Chadwick

C.D. Anderson
raggi cosmici



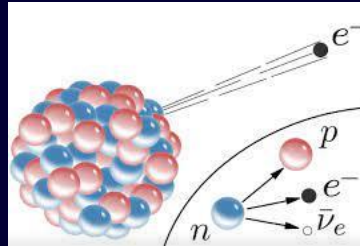
n
 e^+
1932

1930

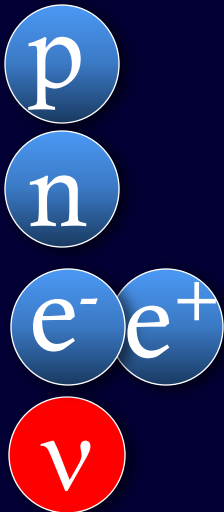
“neutrino”
di Pauli per β

1933

$n \rightarrow p e^- \nu$



Fermi: forza debole per β .
PE si trasformano le une
nelle altre



PE non «alla
Democrito»!

TENTATIVO DI UNA TEORIA DEI RAGGI β

Nota (*) di ENRICO FERMI

Sunto. - Si propone una teoria quantitativa dell'emissione dei raggi β in cui si ammette l'esistenza del «neutrino» e si tratta l'emissione degli elettroni e dei neutrini da un nucleo all'atto della disintegrazione β con un procedimento simile a quello seguito nella teoria dell'irradiazione per descrivere l'emissione di un quanto di luce da un atomo eccitato. Vengono dedotte delle formule per la vita media e per la forma dello spettro continuo dei raggi β , e le si confrontano coi dati sperimentali.

C.D. Anderson raggi cosmici
per 10 anni scambiato per π

$\downarrow \mu^{+,-}$
1937

1935

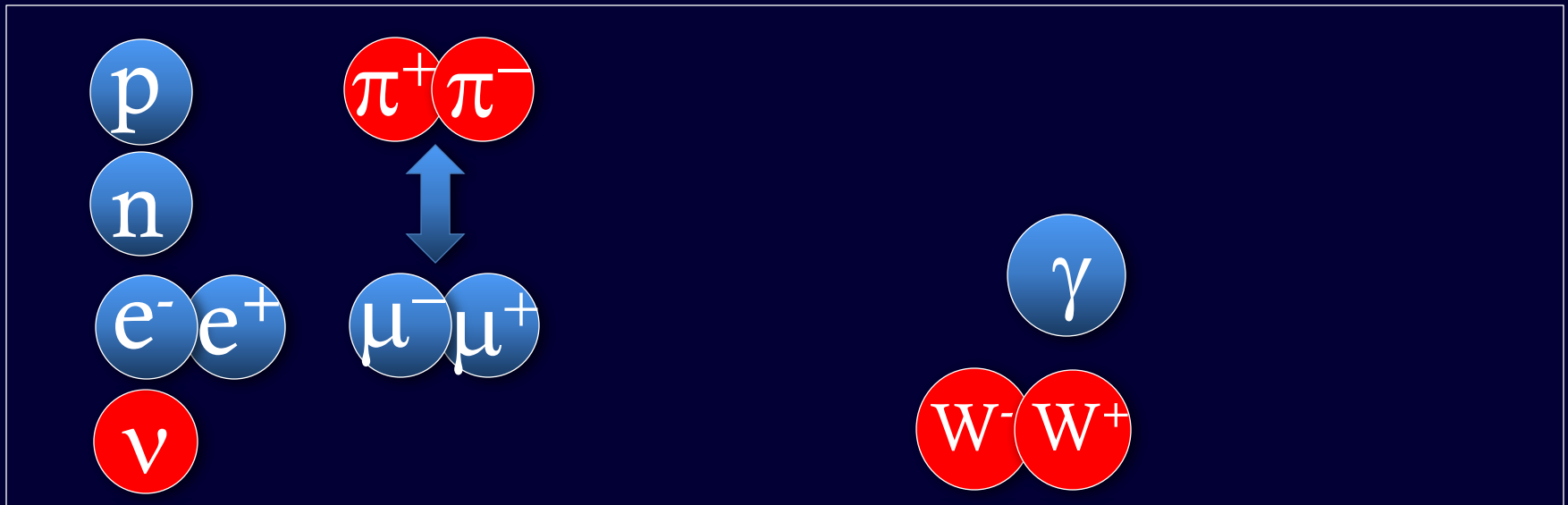
$\uparrow \pi^{+-}$

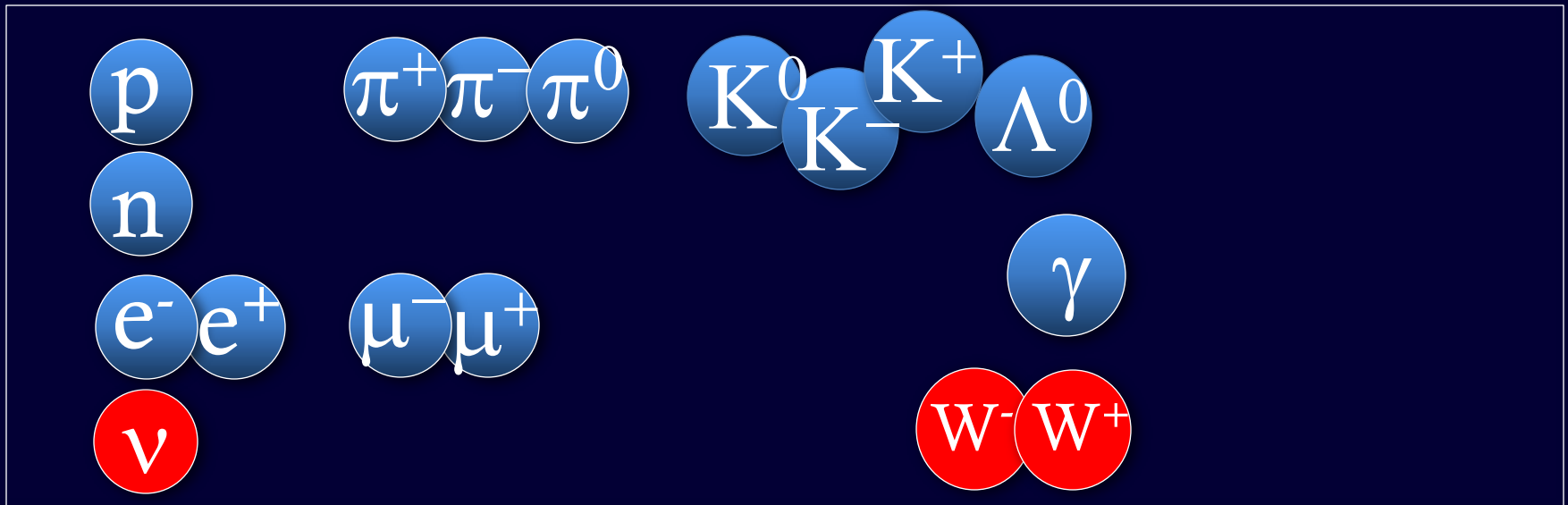
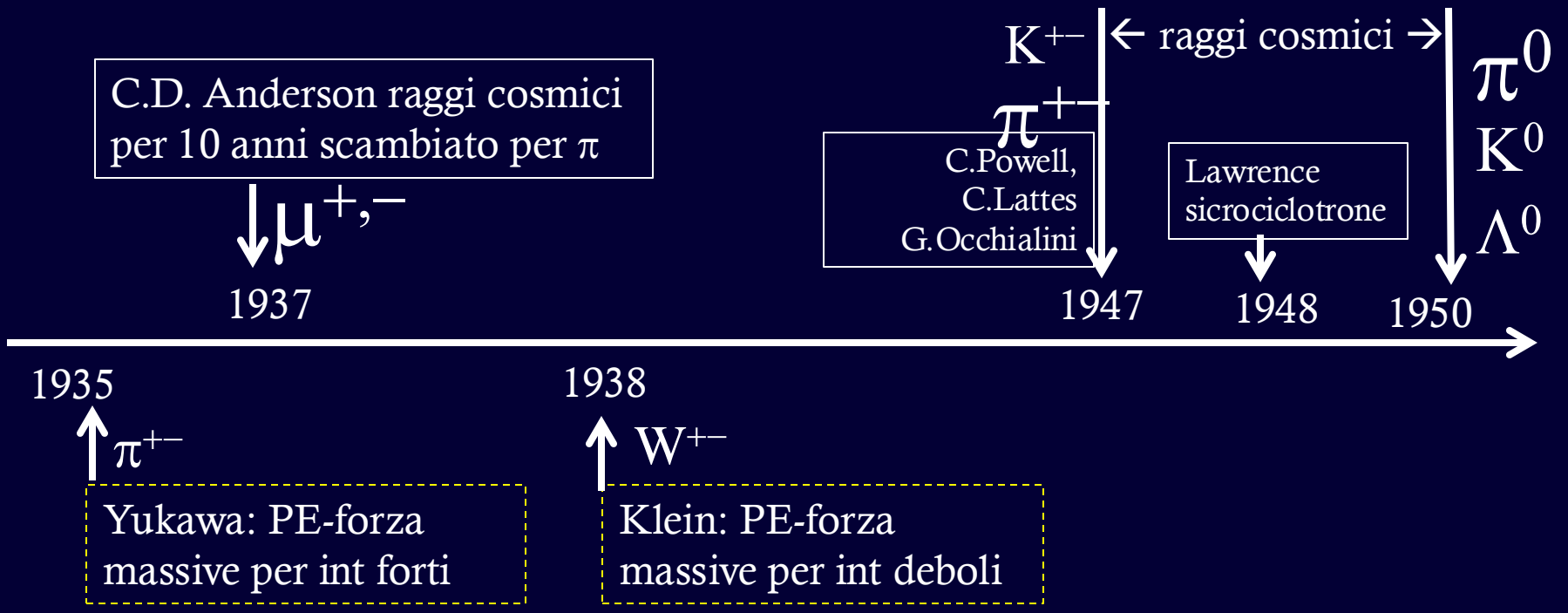
Yukawa: PE-forza
massive per int forti

1938

$\uparrow W^{+-}$

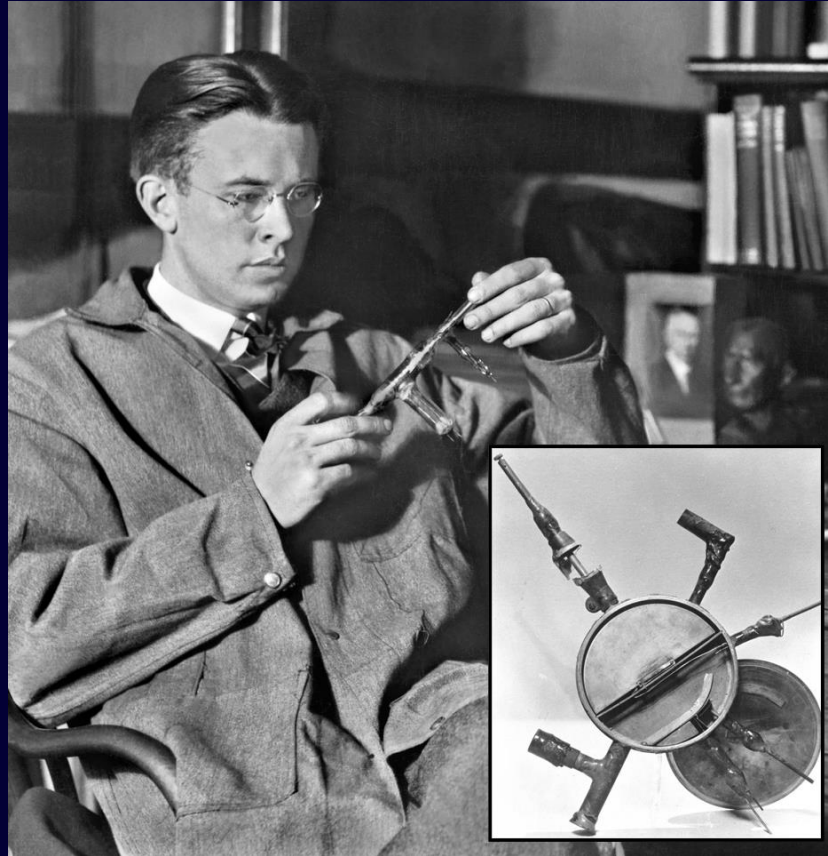
Klein: PE-forza
massive per int deboli





I CICLOTRONI DI LAWRENCE

1930:
Ciclotrone da 5 pollici
(costava 25 dollari)



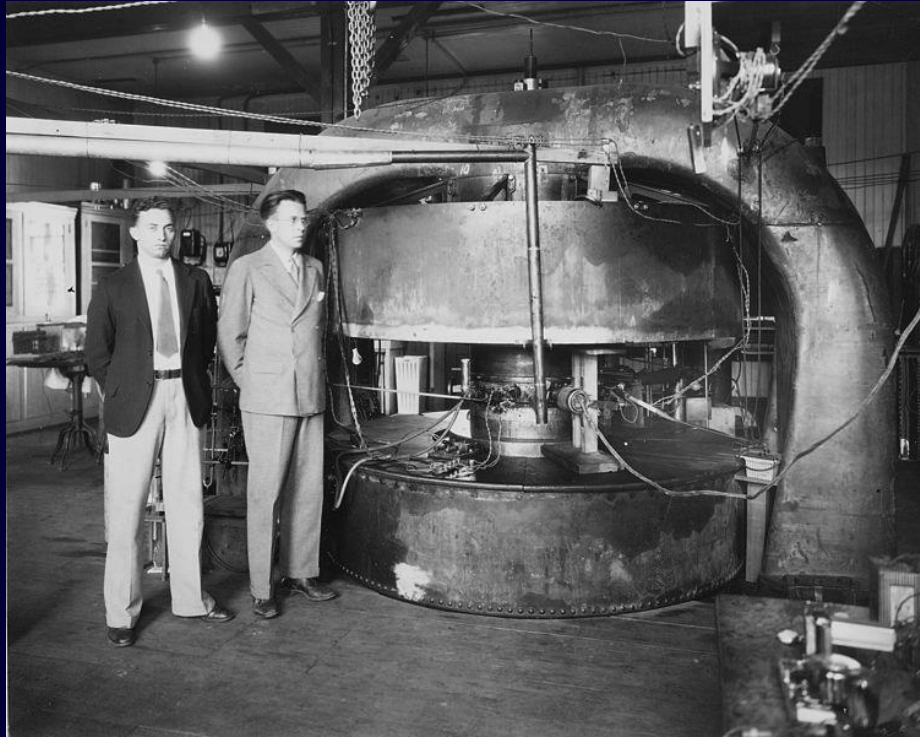
I CICLOTRONI DI LAWRENCE

1930:

Ciclotrone da 5 pollici
(costava 25 dollari)

1932:

Ciclotrone da 27 pollici



I CICLOTRONI DI LAWRENCE

1930:

Ciclotrone da 5 pollici
(costava 25 dollari)

1932:

Ciclotrone da 27 pollici

1942: progetto

Manhattan: ciclotrone
da 184 pollici per produrre
Uranio (usato per bomba
Hiroshima del 1945)



1946: upgrade del ciclotrone da 184 pollici che diventa un sincrociclotrone

1948: arriva a 200 MeV e produce muoni e pioni che osserva con camere a nebbia,
come erano stati osservati 1 anno prima nei raggi cosmici

NASCE LA FISICA DELLE ALTE ENERGIE

A) I primi 50 anni del 900: perché Democrito è superato

B) Dagli anni 50 ai 90: la corsa agli acceleratori

C) Dal 90 ad 12: la caccia al bosone

D) Indizi per il futuro?

Vengono costruiti dappertutto **SINCROTRONI** (evoluzione del sincrociclotrone)

1950: Bevatron, negli USA. Energia di 6.3 GeV

Dopo la II guerra mondiale si sentì il bisogno di fondare un centro europeo per la ricerca. Nel 1952, 12 Paesi europei riuniscono un consiglio di scienziati, il Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare (**CERN**). Il segretario generale è Edoardo Amaldi. L'accordo è firmato nel 1954.



1957: Il **Synchro-cyclotron (SC)** del CERN.
Energia di 600 MeV (15.7 m circ)



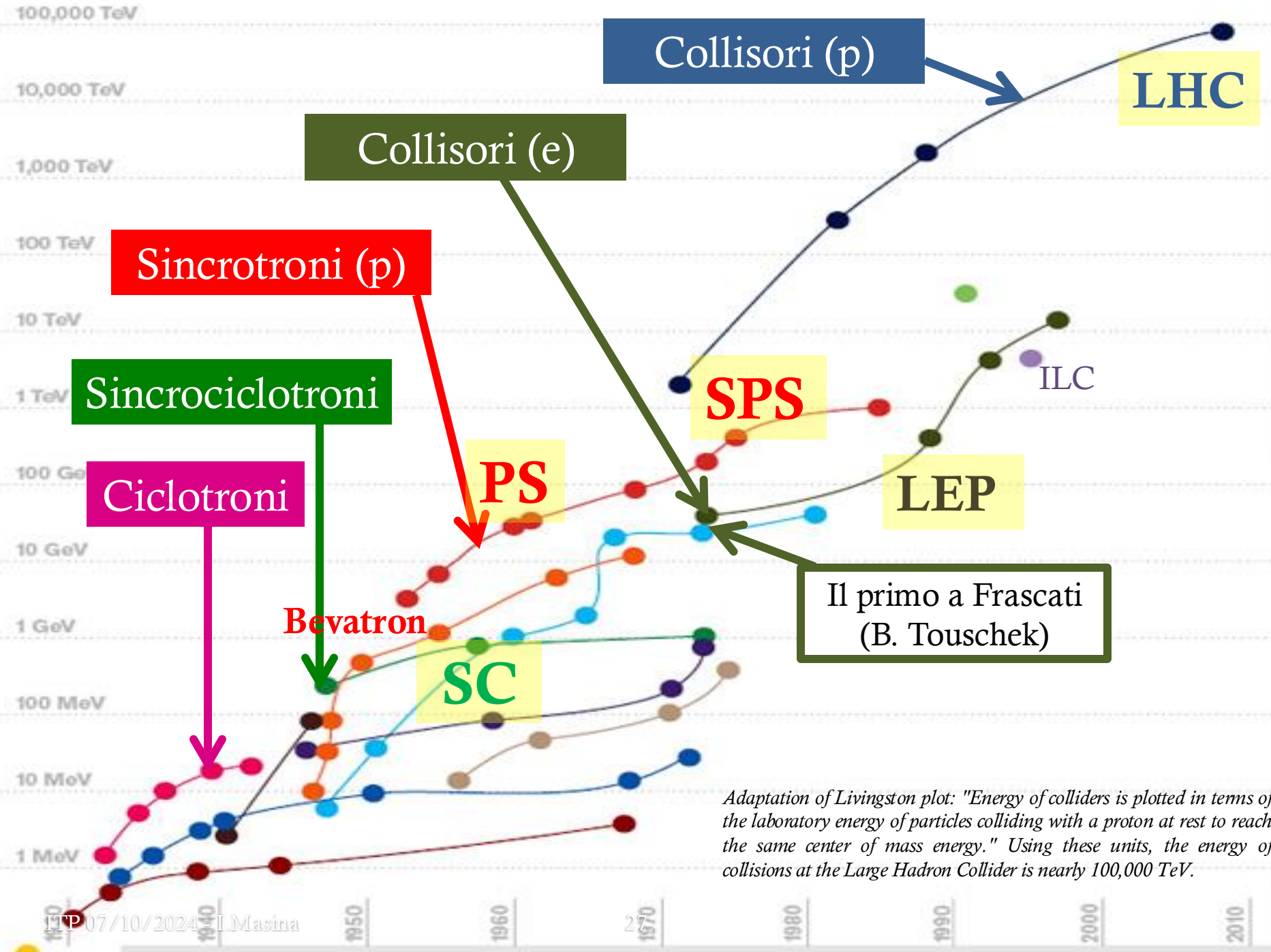
Maria Cervasi e Giuseppe Fidecaro

1959: Il **Proton Synchrotron (PS)** del CERN.
Energia di 28 GeV (628 m circ)

1976: Il **Super Proton Synchrotron (SPS)** del CERN.
Energia di 400 GeV (7 km circ)

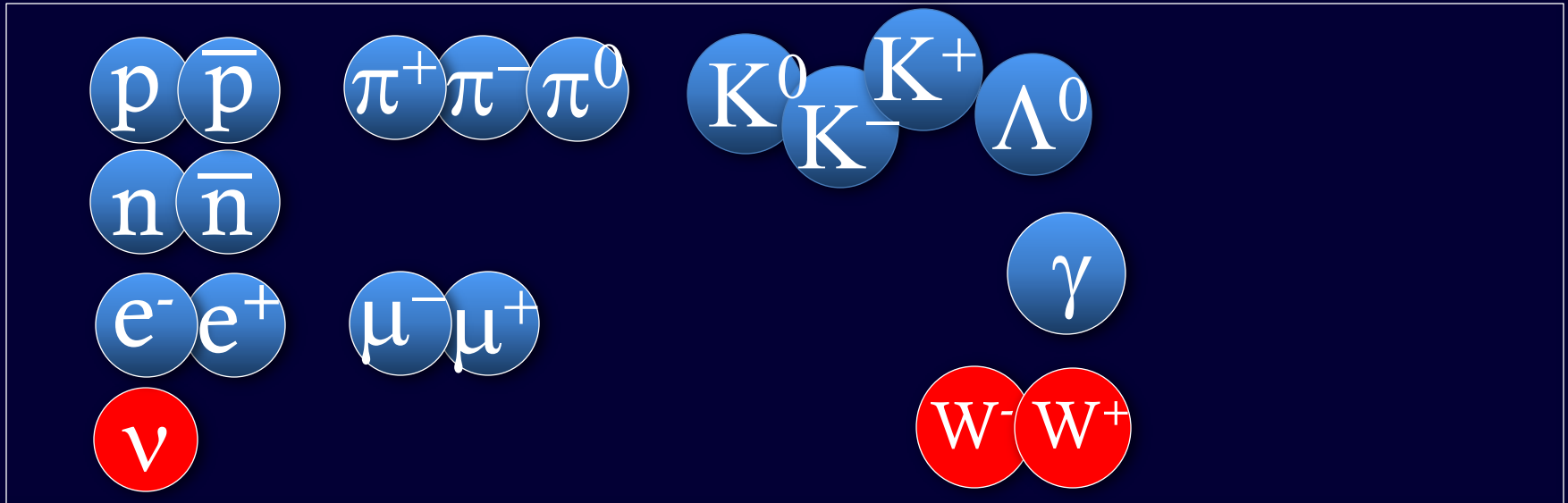
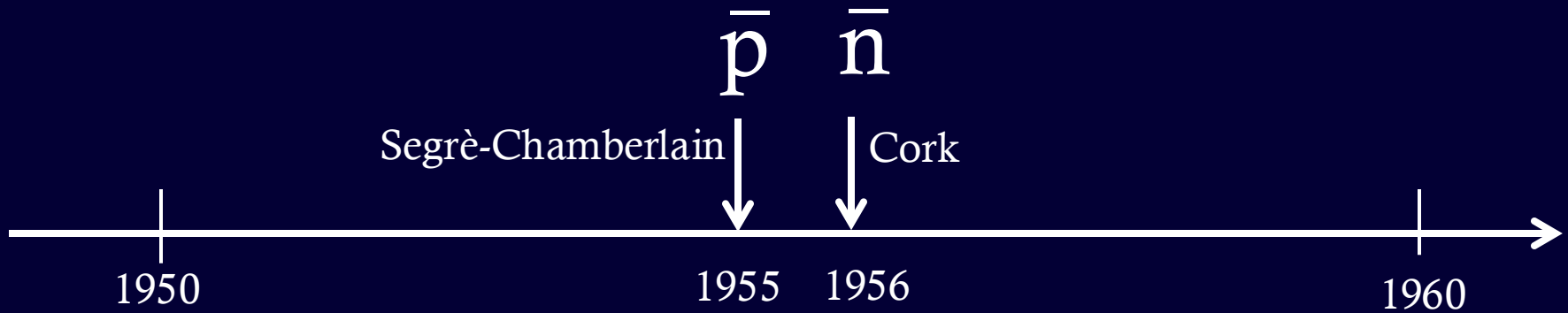


Ugo Amaldi

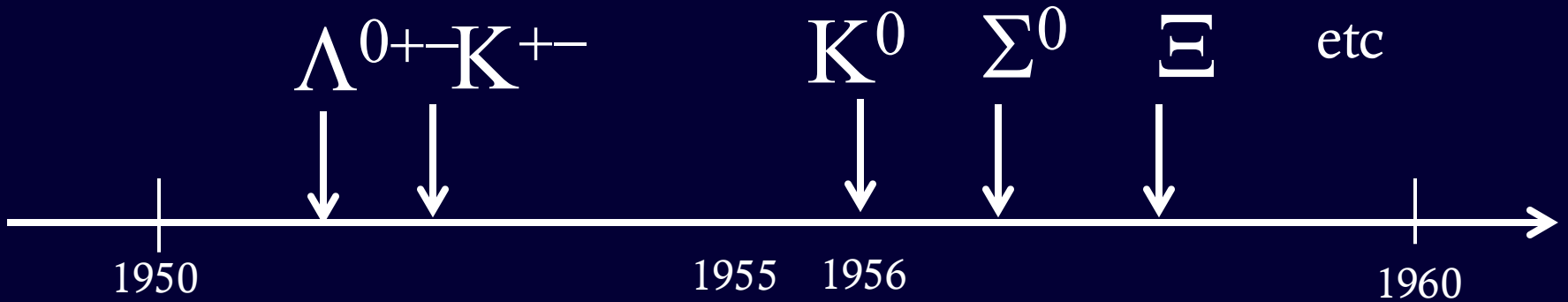


Adaptation of Livingston plot: "Energy of colliders is plotted in terms of the laboratory energy of particles colliding with a proton at rest to reach the same center of mass energy." Using these units, the energy of collisions at the Large Hadron Collider is nearly 100,000 TeV.

Particelle scoperte con il sincrotrone Bevatron, LBNL

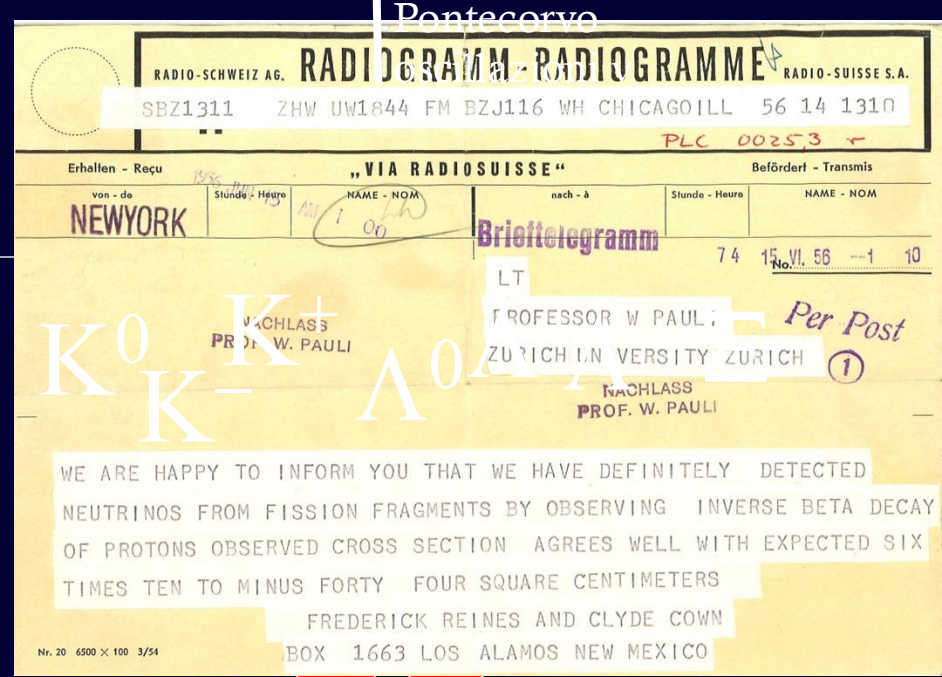
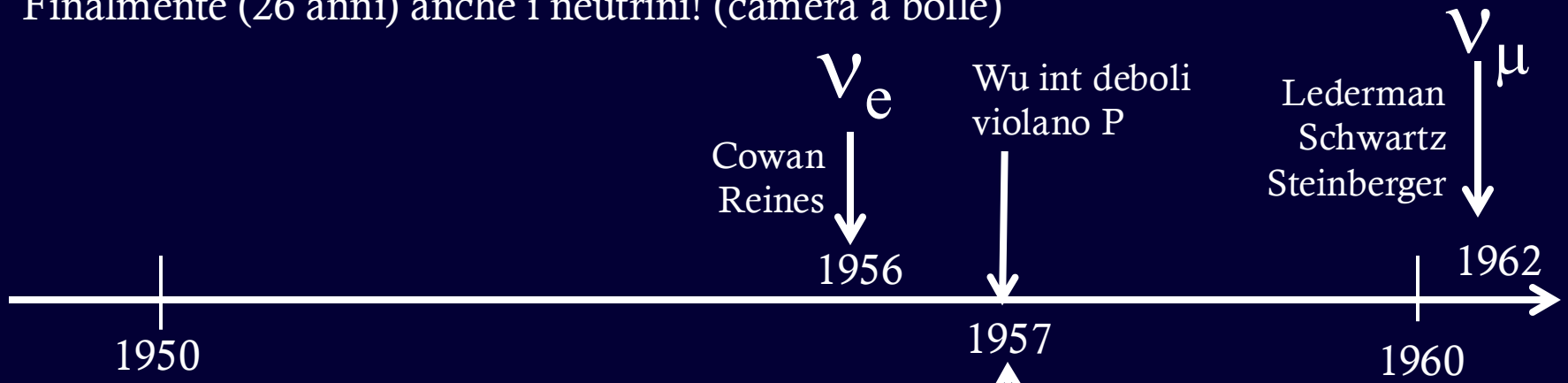


Particelle “strane” (ri)scoperte con sicrotroni (raggi cosmici)



A collection of particle symbols arranged in a grid-like fashion, each enclosed in a circle. The symbols include: p , \bar{p} , π^+ , π^- , π^0 , K^0 , K^- , K^+ , Λ^0 , Λ^+ , Λ^- , Ξ , "etc", n , \bar{n} , e^- , e^+ , μ^- , μ^+ , ν , and W^- , W^+ . In the center is a black and white portrait of a man with a speech bubble that says: "se io potessi ricordare il nome di tutte queste particelle sarei un botanico!".

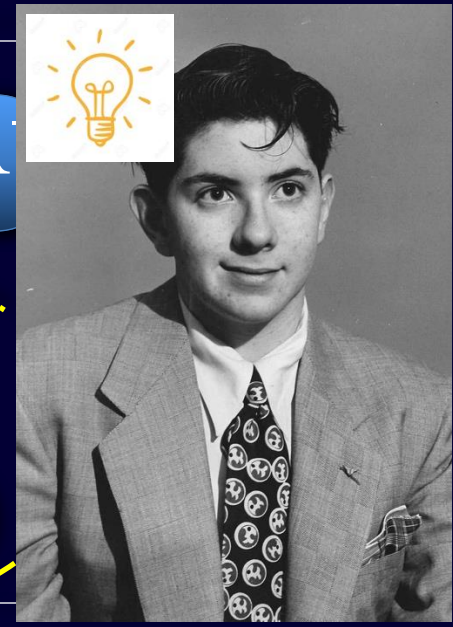
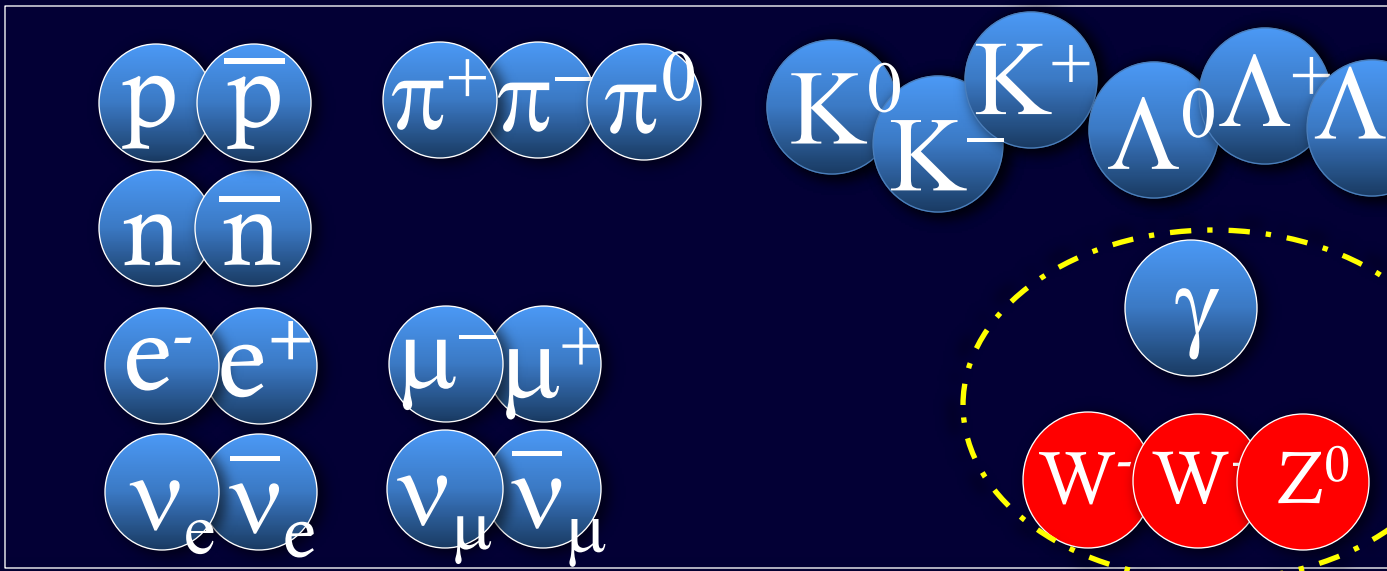
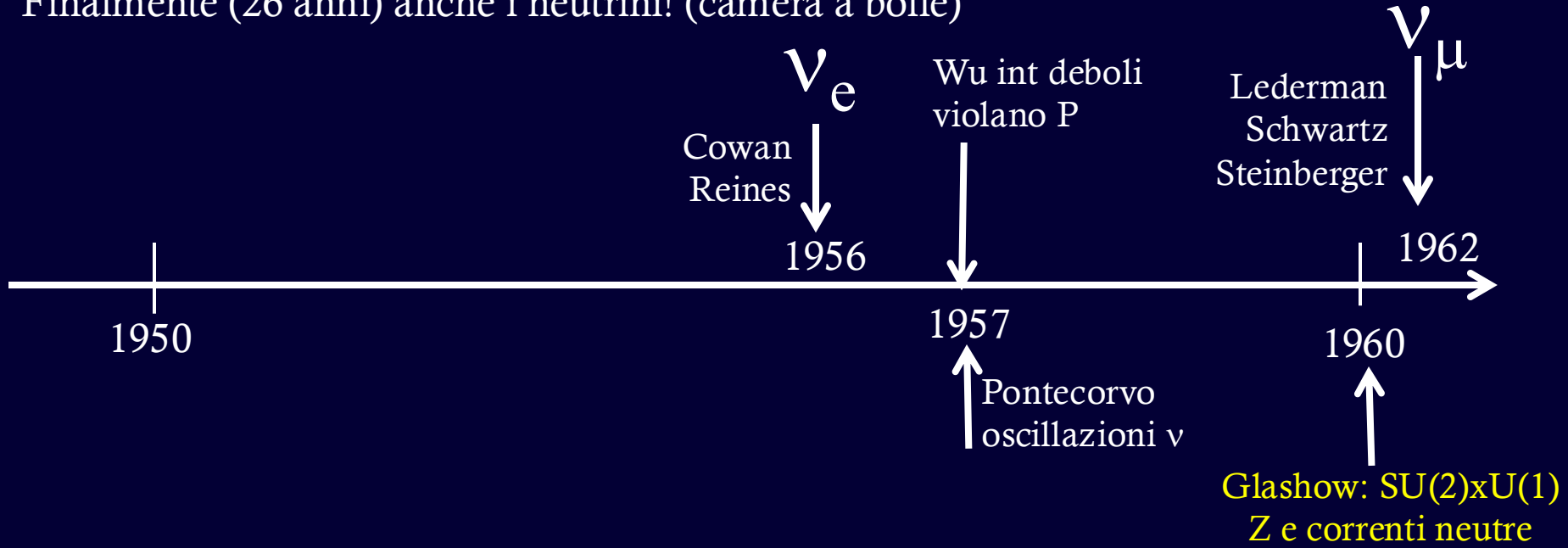
Finalmente (26 anni) anche i neutrini! (camera a bolle)



A collection of particle symbols arranged in a grid:

- Row 1: p , \bar{p} , π^+ , π^- , π^0
- Row 2: n , \bar{n}
- Row 3: e^- , e^+ , μ^- , μ^+
- Row 4: ν_e , $\bar{\nu}_e$, ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$
- Row 5: W^- , W^+

Finalmente (26 anni) anche i neutrini! (camera a bolle)

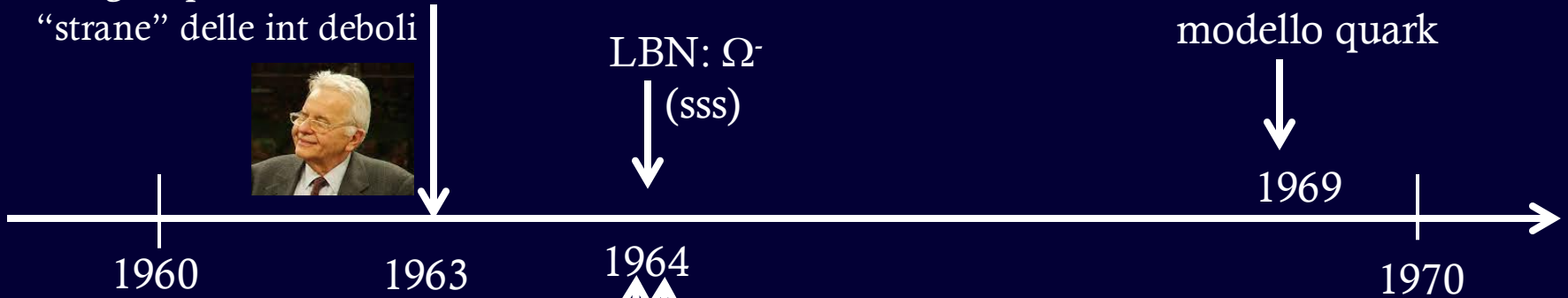


Cabibbo (aff CERN)
 angolo per transizioni
 "strane" delle int deboli

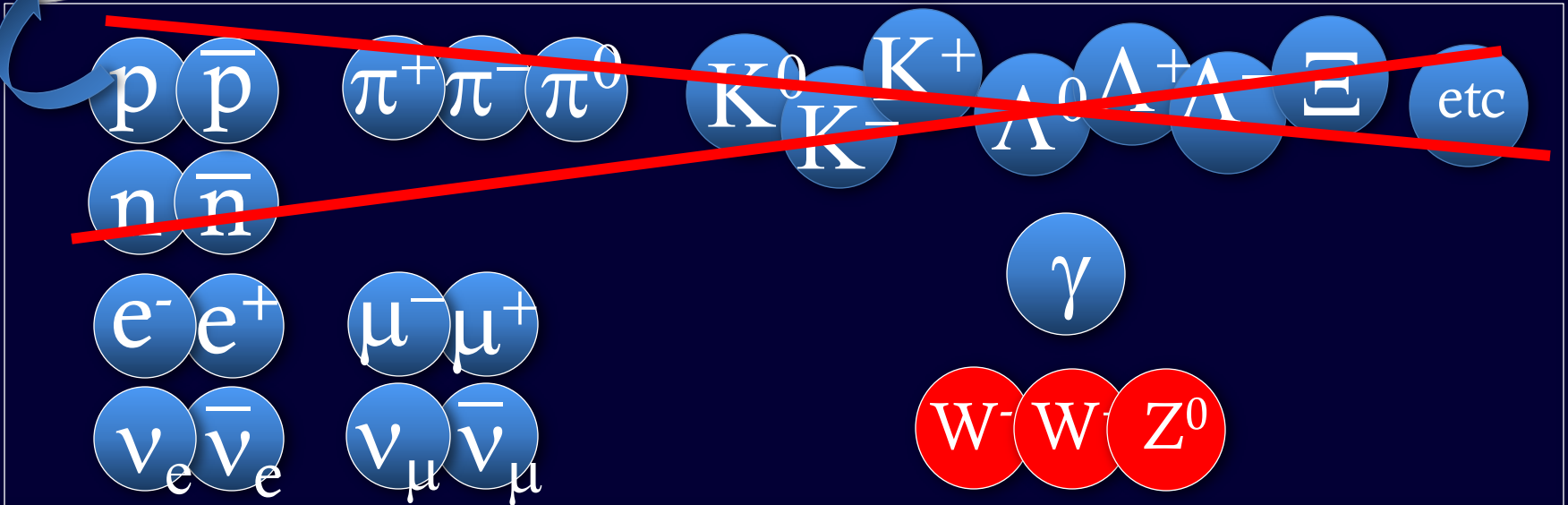
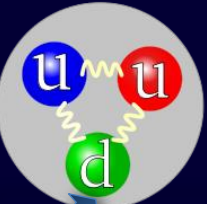


LBN: Ω^-
 (sss)

SLAC conferma
 modello quark



M. Gell-Mann Zweig (Sakata) modello a quark (u d s) e gluoni (g)
 Greenberg Han Nambu: SU(3) colore

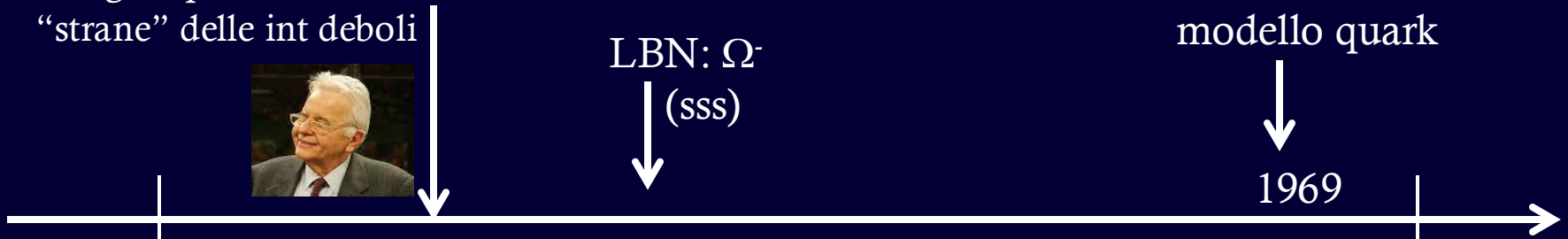


Cabibbo (aff CERN)
 angolo per transizioni
 "strane" delle int deboli



LBN: Ω^-
 (sss)

SLAC conferma
 modello quark



1960

1963

1964

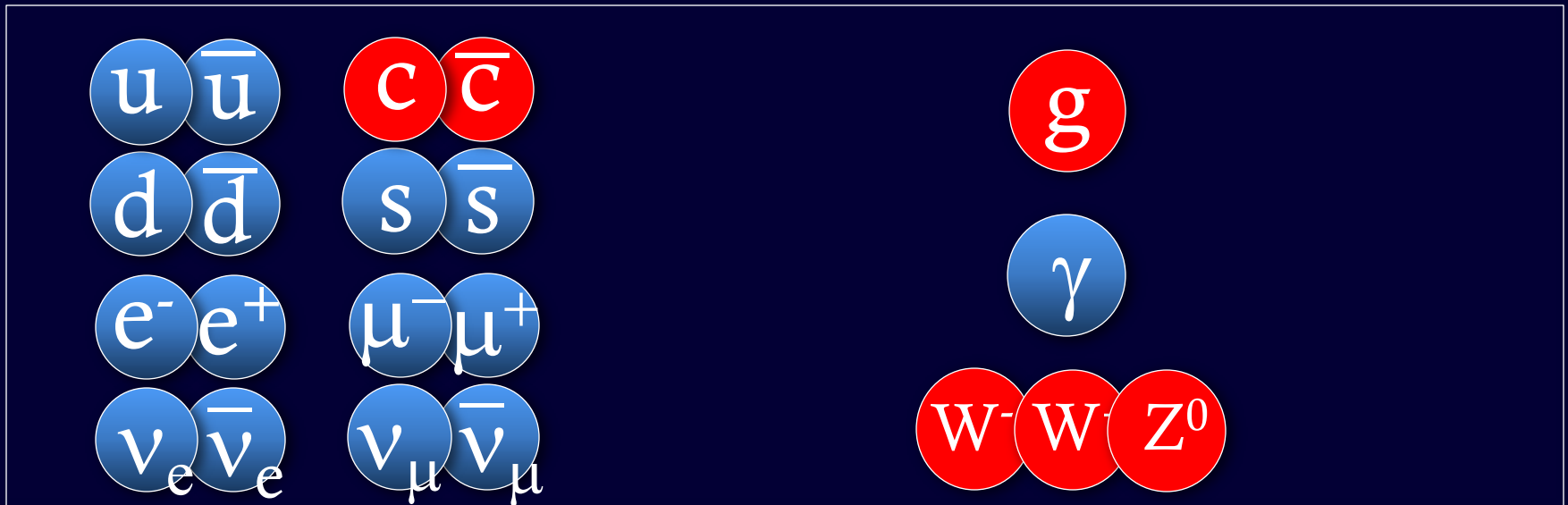
1965

1970

M. Gell-Mann Zweig
 (Sakata) modello a quark
 (u d s) e gluoni (g)

Greenberg Han
 Nambu: SU(3) colore

Glashow
 Bjorken





Modello Standard

mod Glashow+mecc Higgs
(Glashow Weinberg Salam)

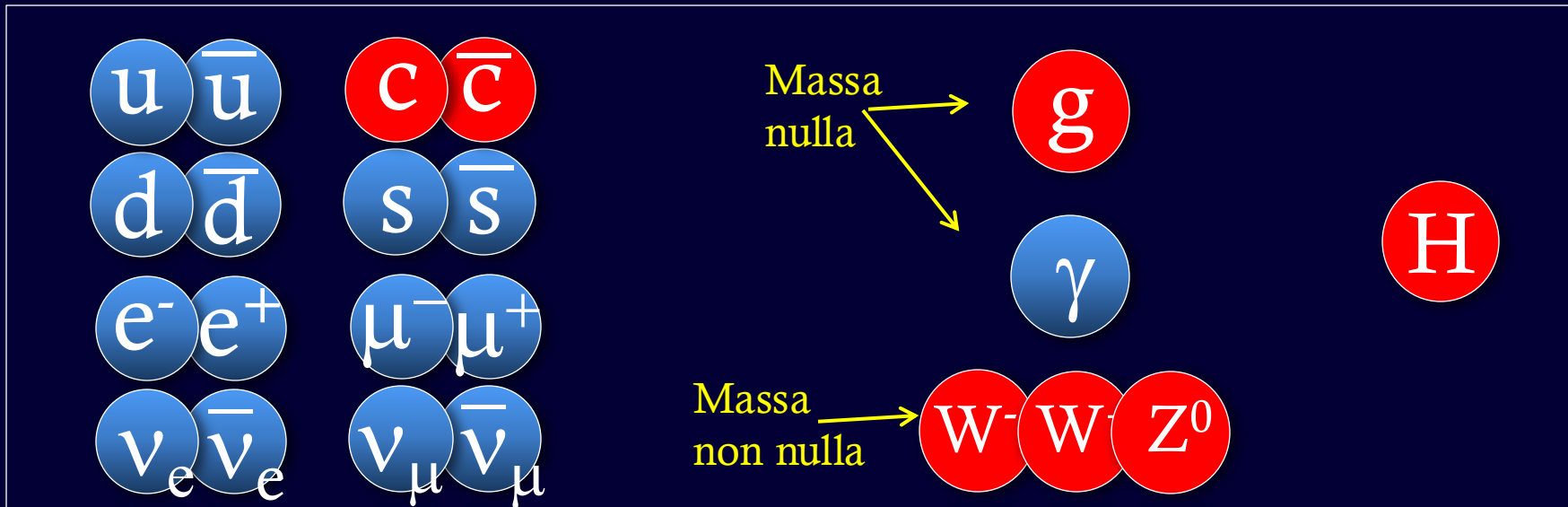
1967

Fino al '64 si pensava ("teorema di Goldstone")
**non ci fosse modo di costruire teorie
con portatori della forza massivi**
(senza rompere esplicitamente le simmetrie di gauge)

1964

P. Higgs smentisce questo teorema: **possono essere
massivi** se esiste un "campo di Higgs" (che rompe
spontaneamente la simmetria). Ciò implica

- 1) un bosone ($s=0$) elementare, noto come "bosone di Higgs"
- 2) dare la **massa alle particelle di materia**



Correnti neutre da Z
Gargamelle
(CERN)

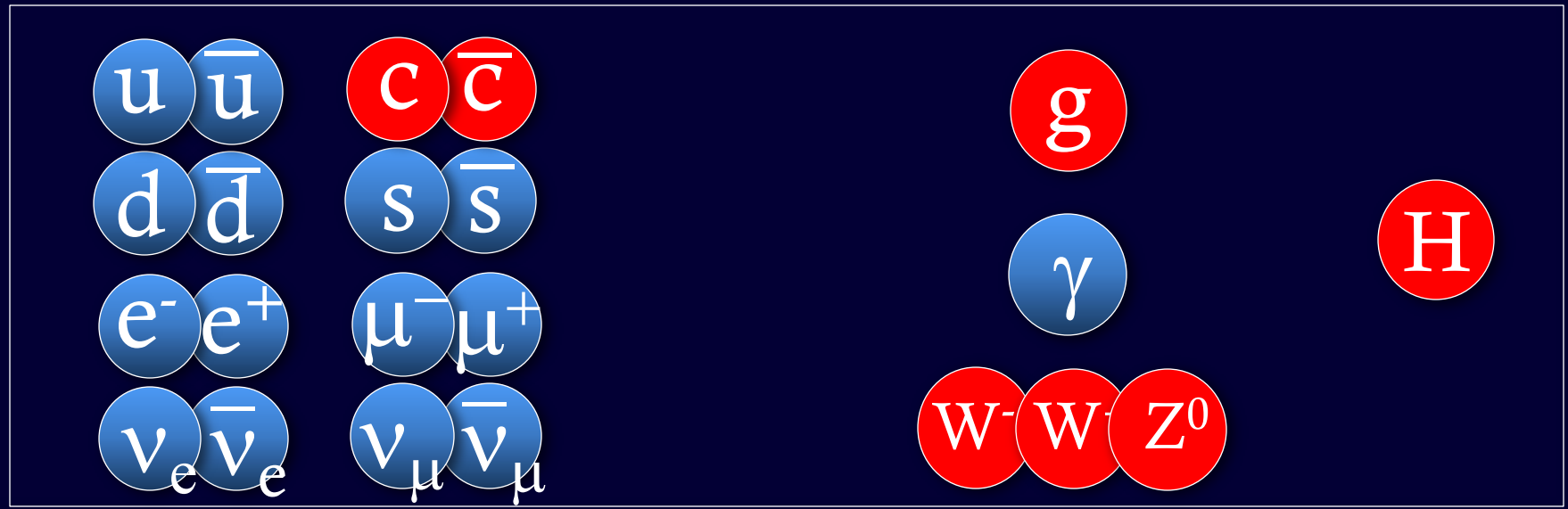


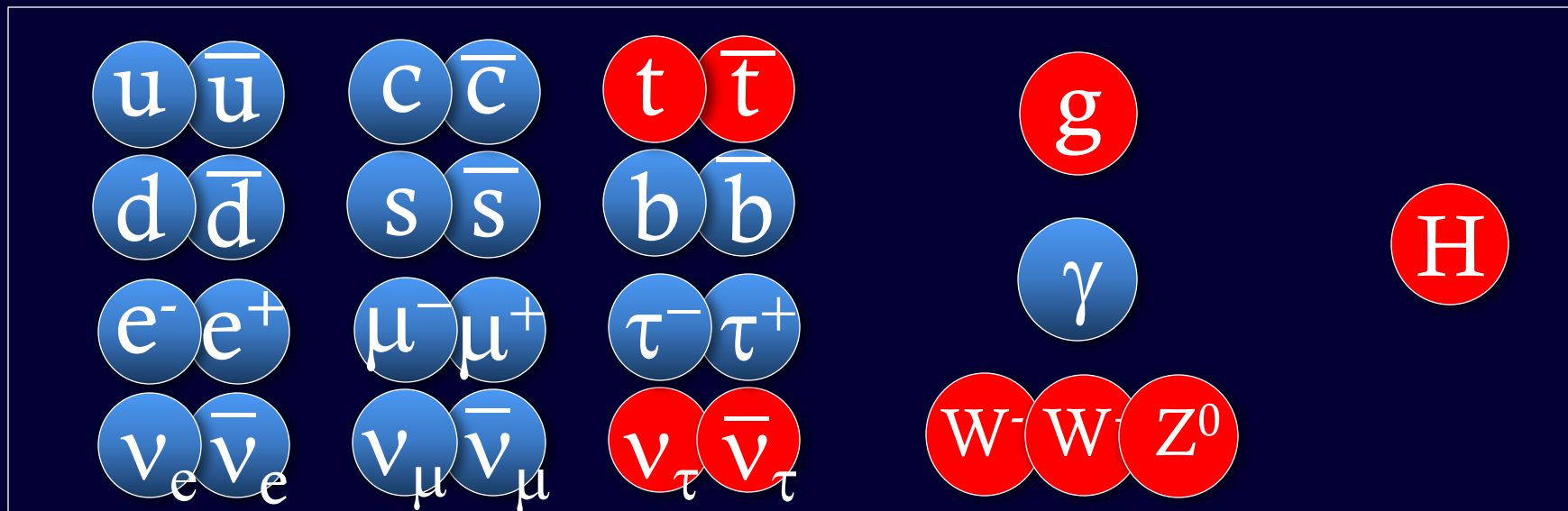
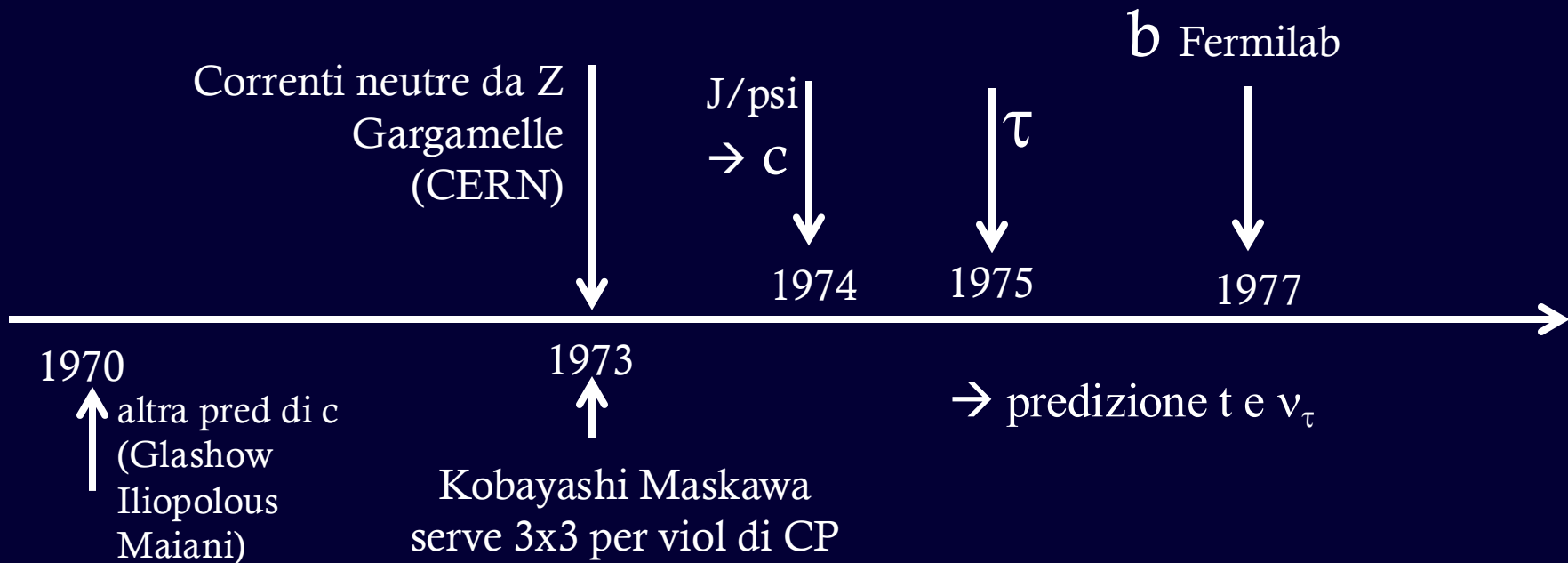
1970

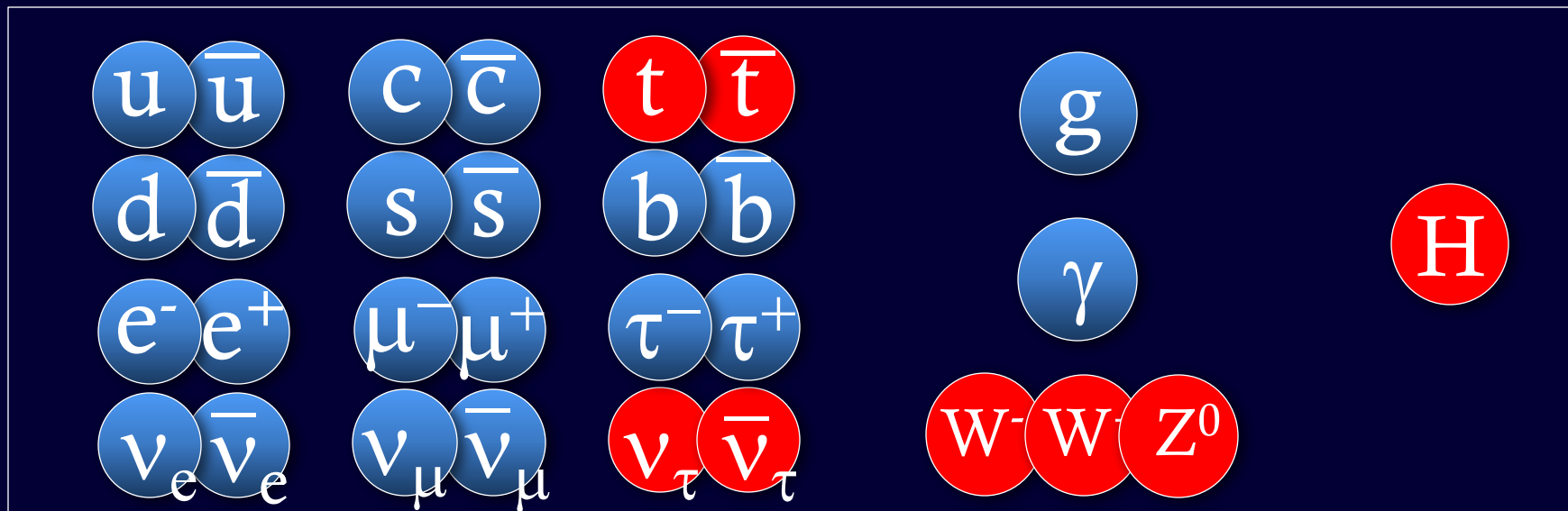
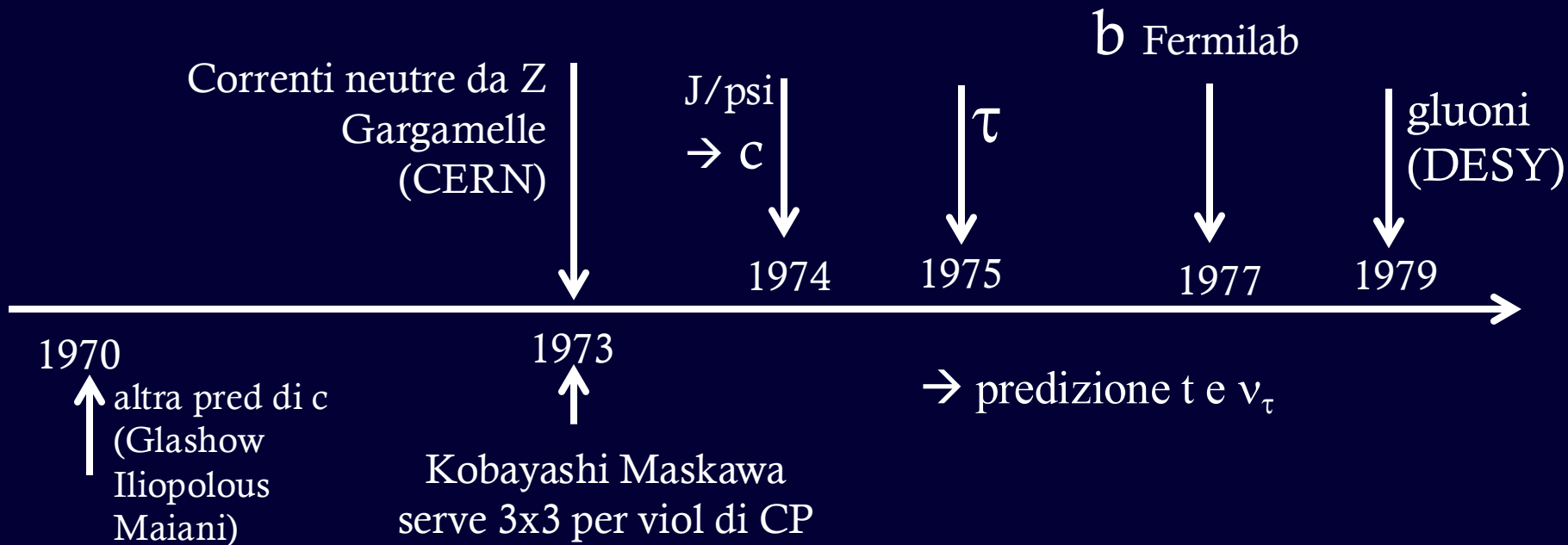
↑ altra pred di c
(Glashow
Iliopoulos
Maiani)

1973

↑ Kobayashi Maskawa
serve 3x3 per viol di CP







← Ing. G. Brianti: SPS, LEP, LHC, CNAO, ... →

C. Rubbia e
S. van der
Meer
(SPS,CERN)

Inizio LEP
(CERN)

Anti-H (CERN)
t Fermilab

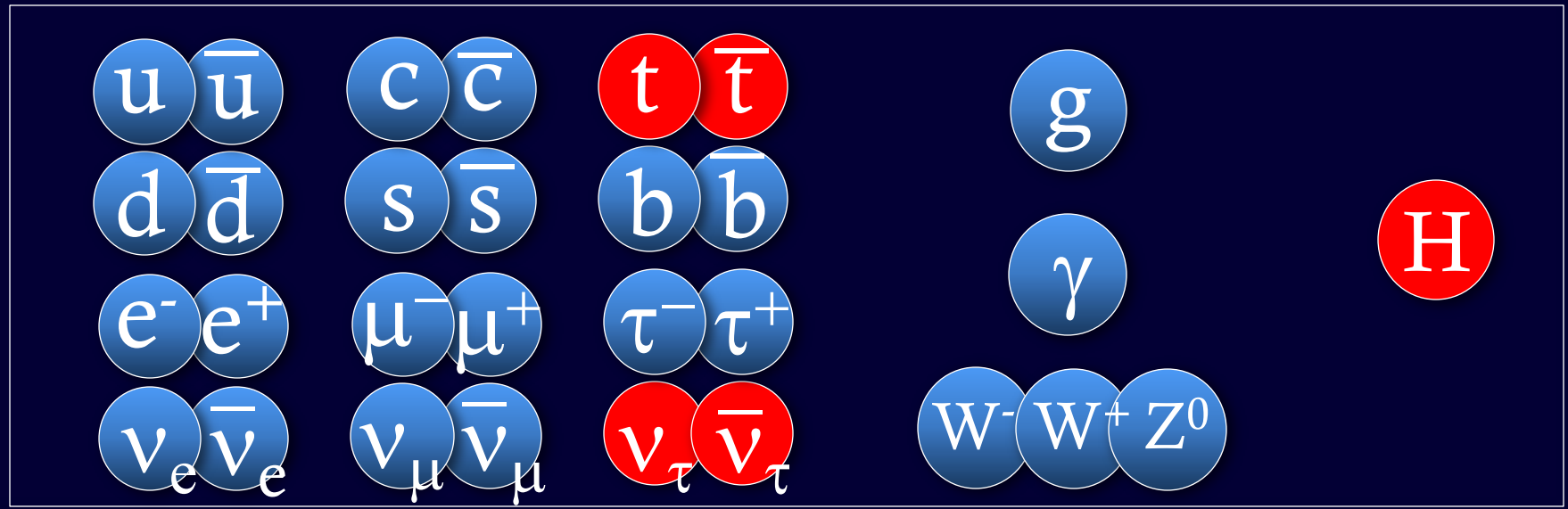
W e Z

1989

1995

1983

I valori delle masse di W e
Z erano predetti dal MS!
Non per H!



← Ing. G. Brianti: SPS, LEP, LHC, CNAO, ... →

C. Rubbia e
S. van der
Meer
(SPS,CERN)

Inizio LEP
(CERN)

Anti-H (CERN)
t Fermilab

Chiusura LEP
v_τ Fermilab

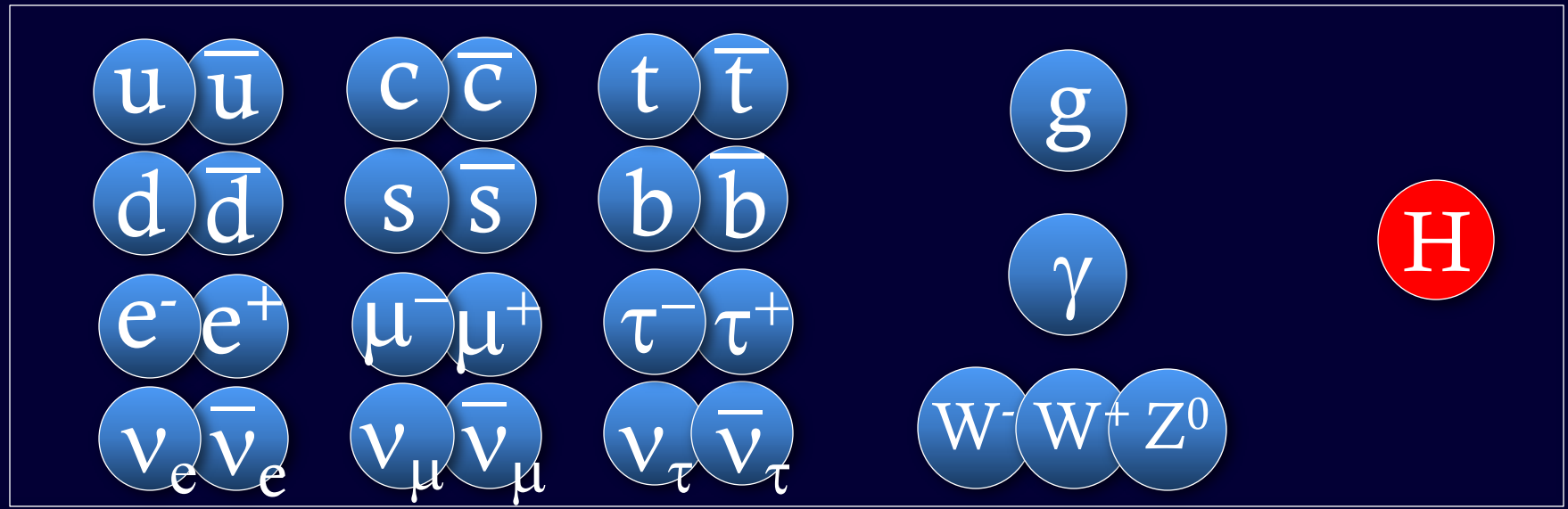
W e Z

1989

1995

2000

I valori delle masse di W e
Z erano predetti dal MS!
Non per H!

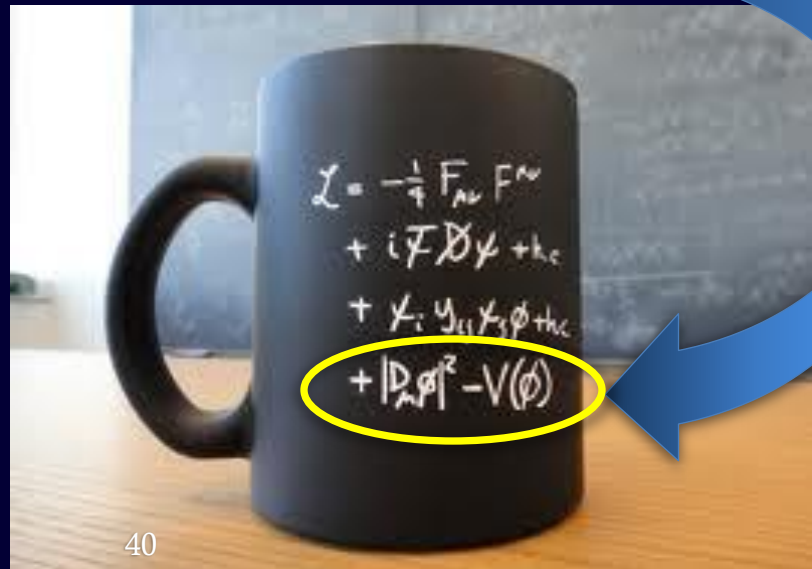


A) I primi 50 anni del 900: perché Democrito è superato

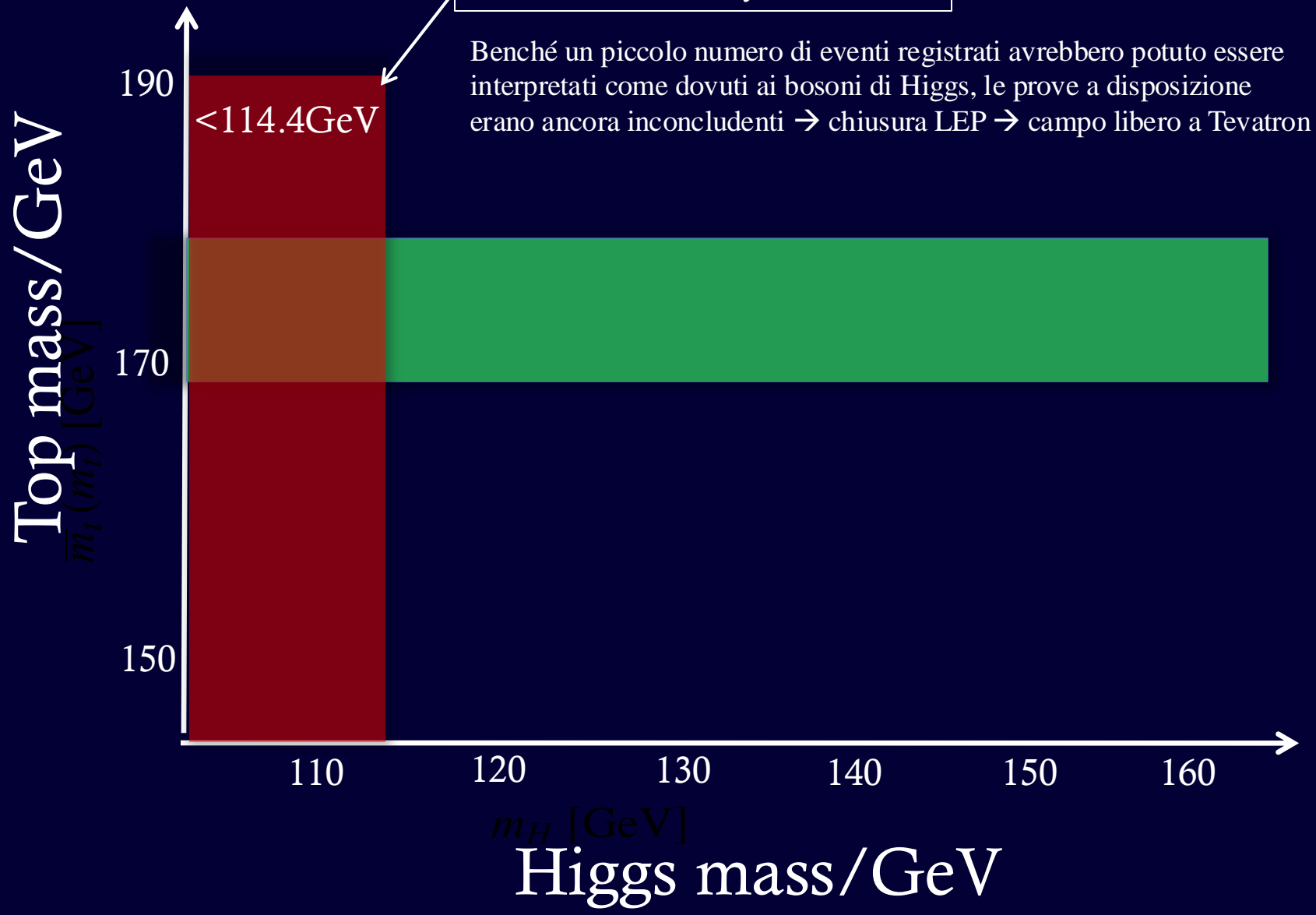
B) Dagli anni 50 ai 90: la corsa agli acceleratori

C) Dal '90 al '12: la caccia al bosone

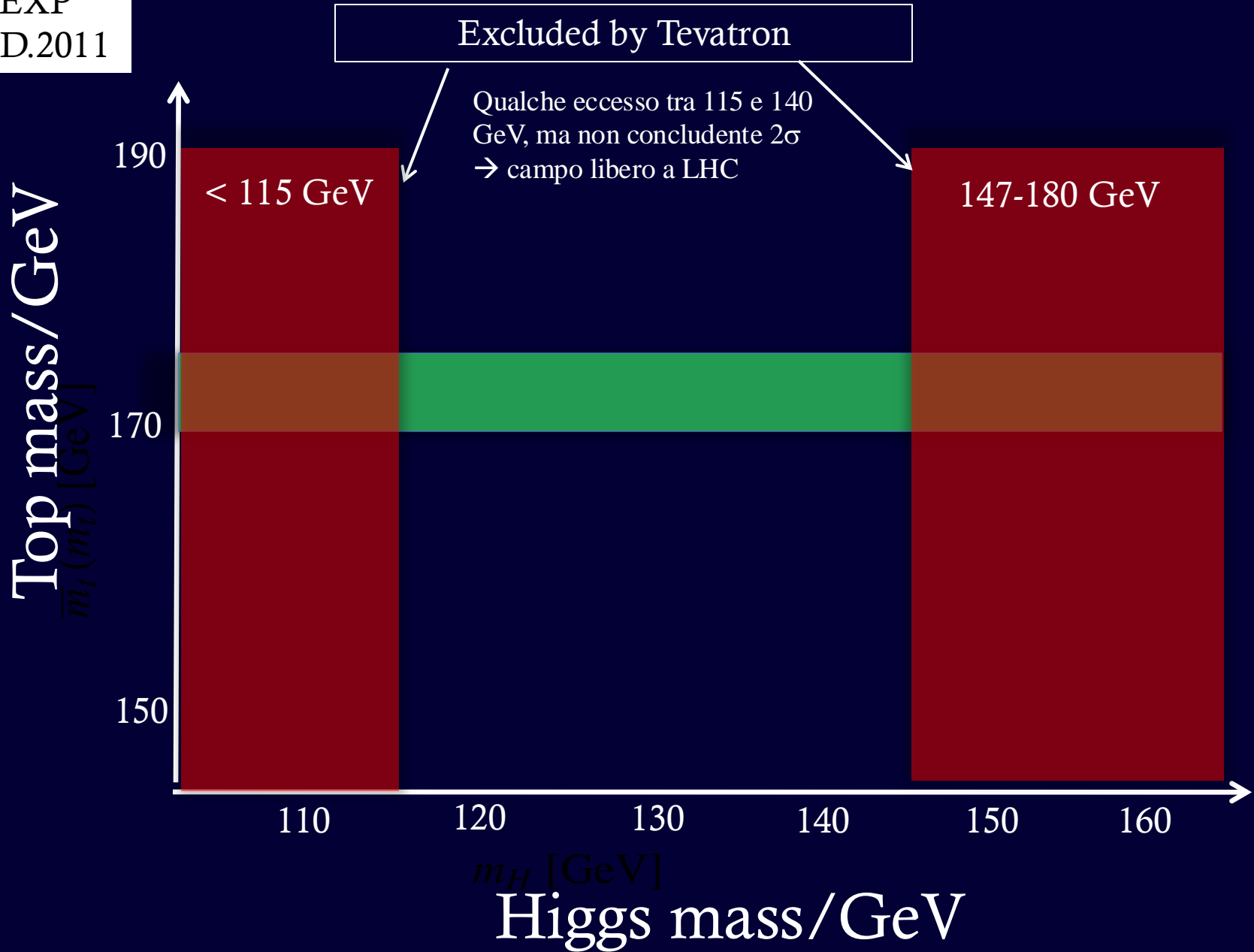
D) Indizi per il futuro?



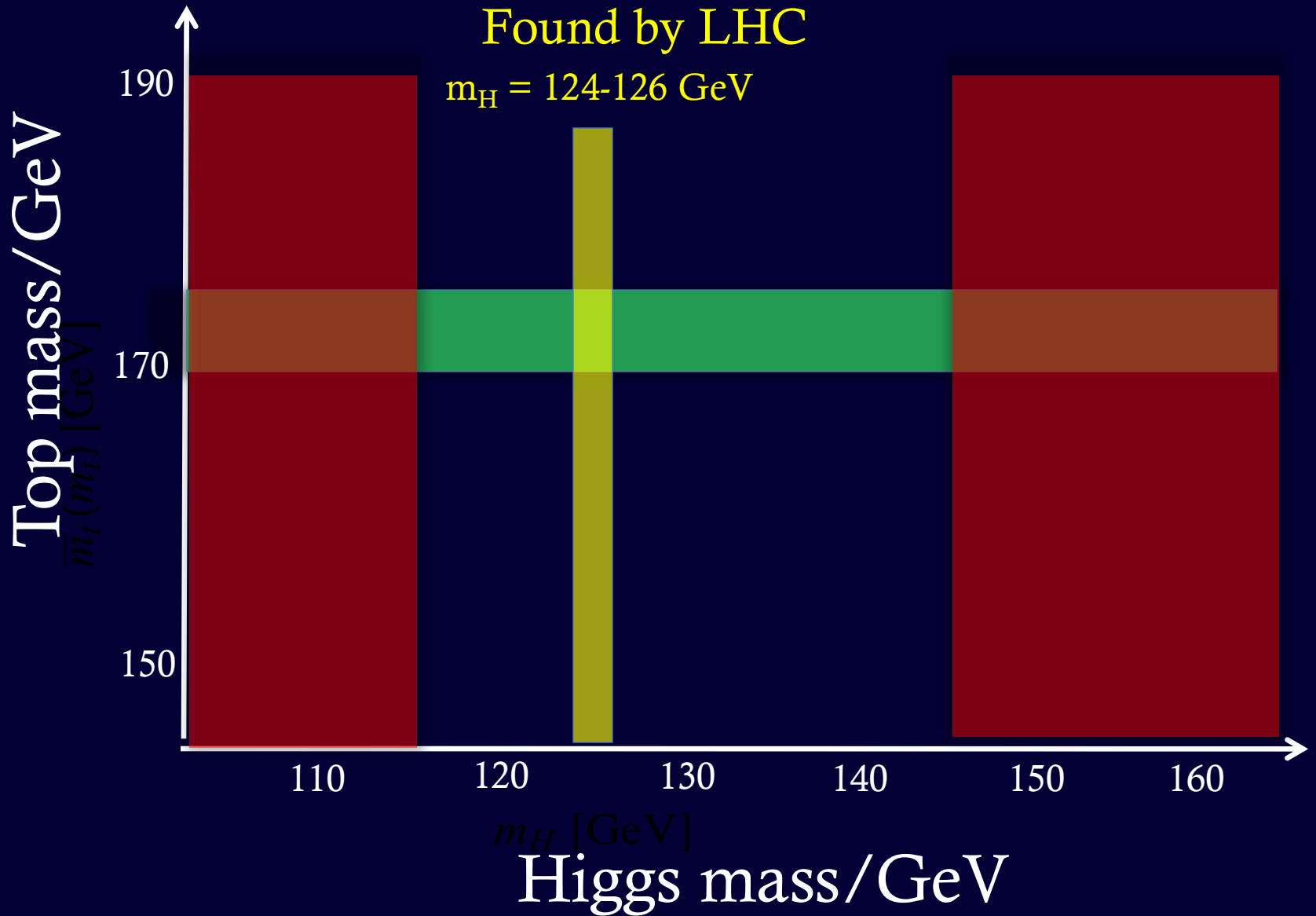
EXP
A.D.2000



EXP
A.D.2011



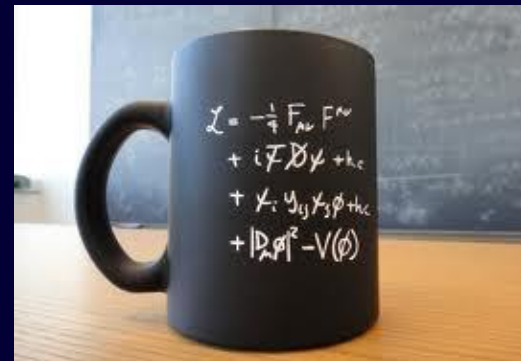
EXP
A.D.2012



CONCLUSIONI



Congratulations, Mr. Higgs



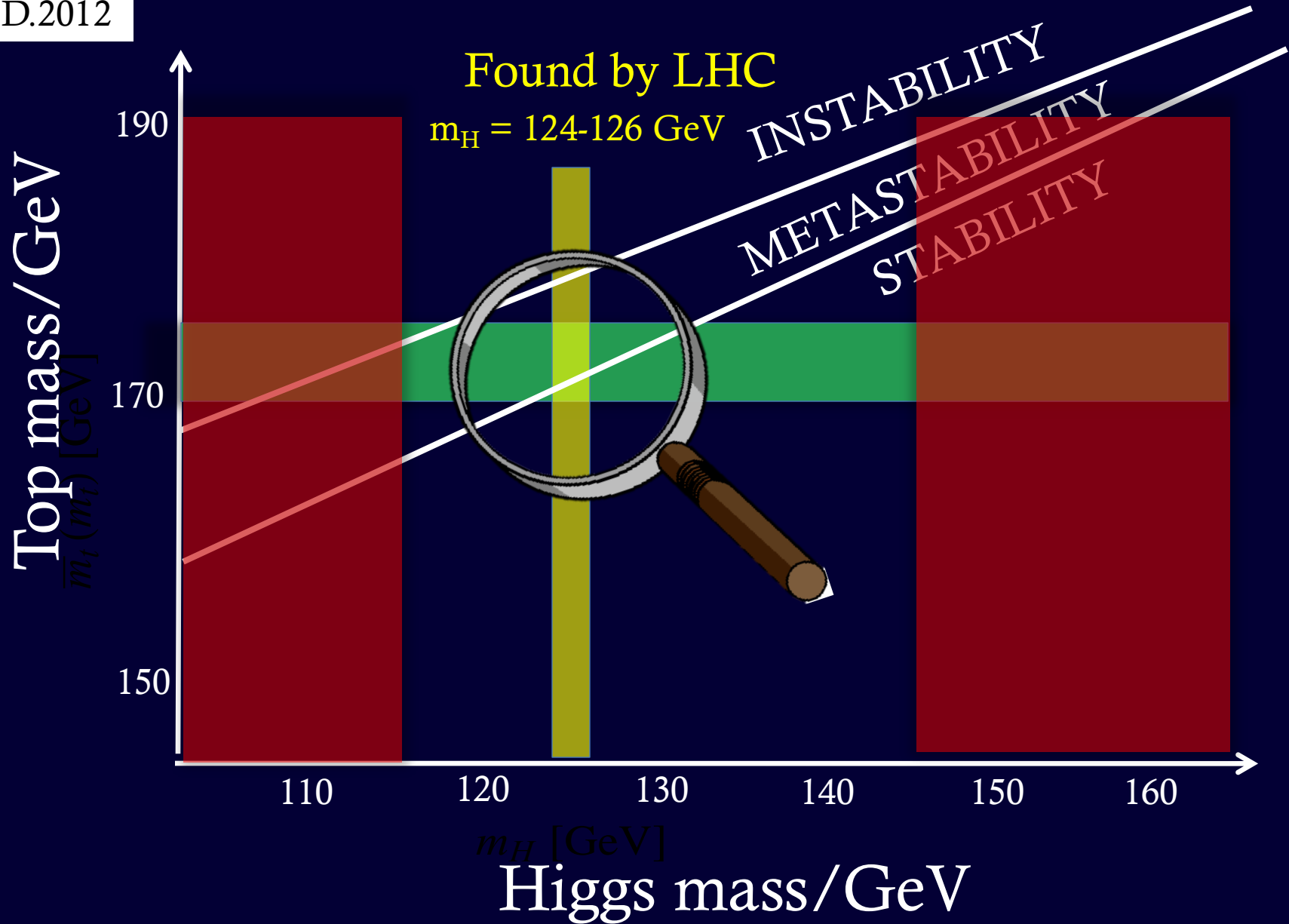
A) I primi 50 anni del 900: perché Democrito è superato

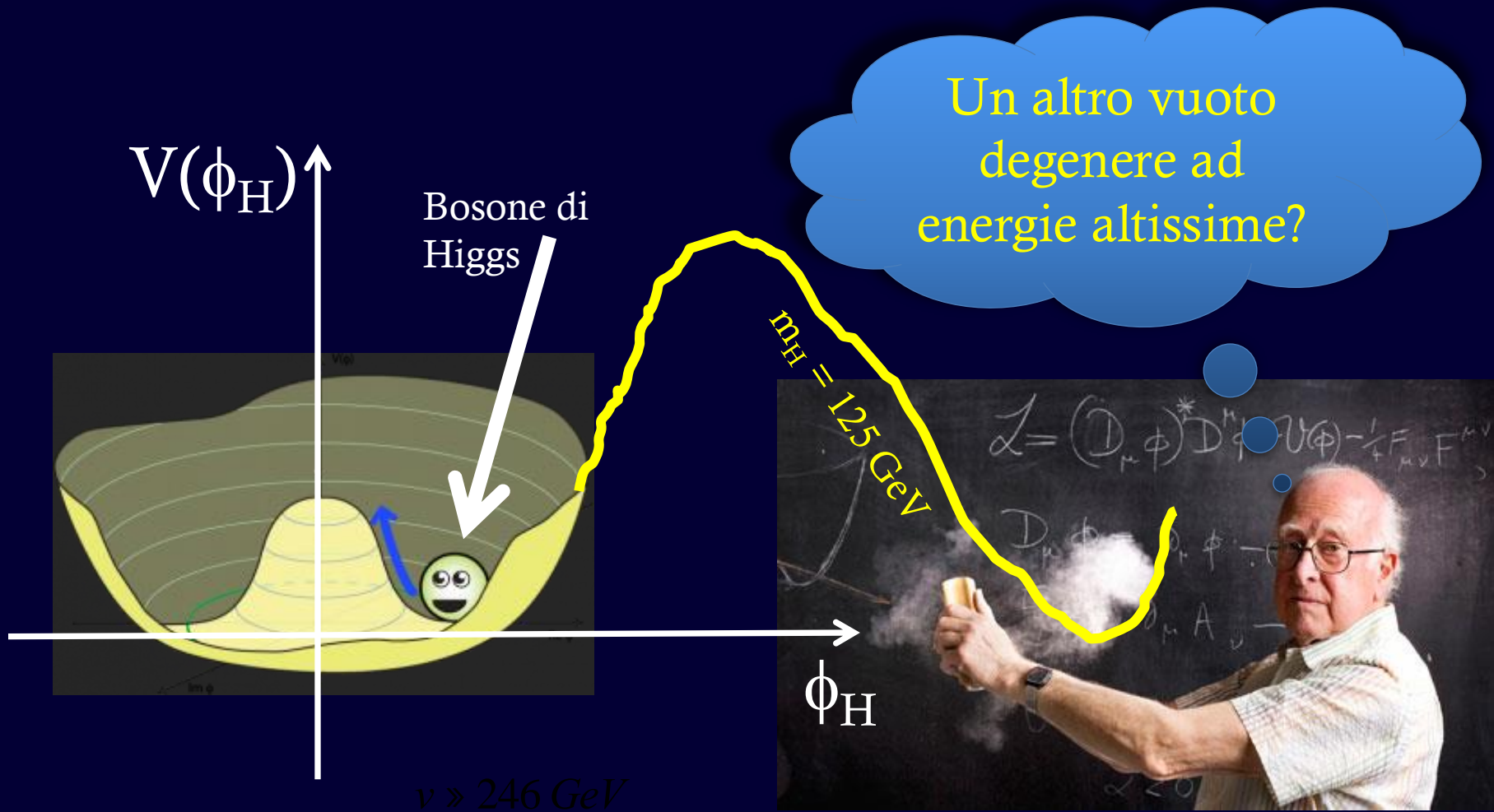
B) Dagli anni 50 ai 90: la corsa agli acceleratori

C) Dal 90 ad 12: la caccia al bosone

D) Indizi per il futuro?

EXP
A.D.2012





Forse il bosone di Higgs ha un ruolo «cosmologico» nell'inflazione primordiale?

ξ =non-minimal coupling of Higgs with gravity [Bezrukov Shaposhnikov 2008]

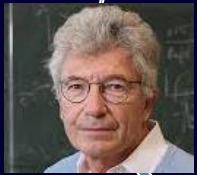
$$1 + \frac{\xi\phi^2}{M_P^2}$$

SM Higgs potential

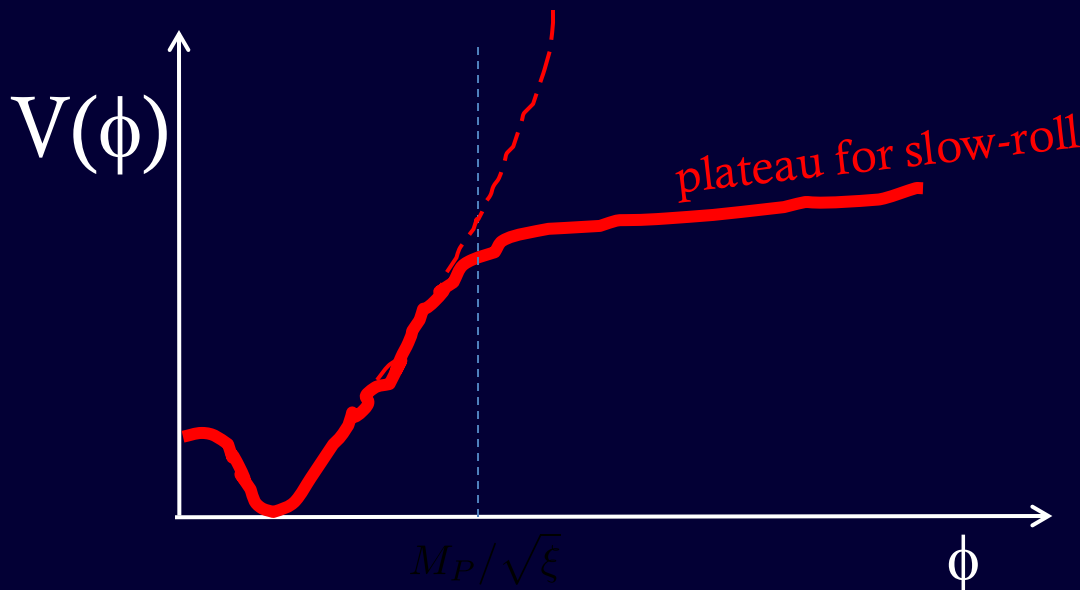


$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(-\frac{M_P^2}{2} f(\phi) R + \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - V(\phi) \right)$$

upon conformal transformation to Einstein frame and redefinition of Higgs field to have canonical kinetic term

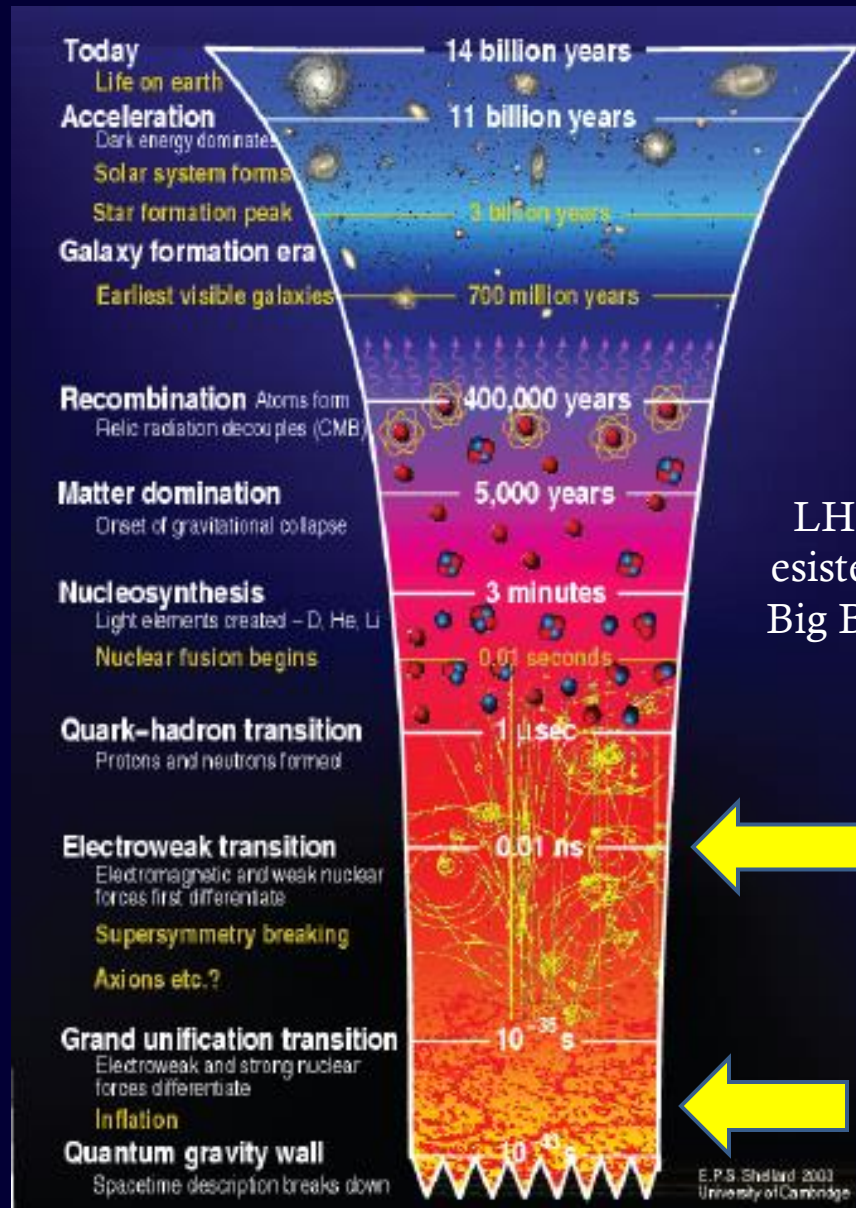


$$S_E = \int d^4x \sqrt{-\hat{g}} \left(-\frac{M^2}{2} \hat{R} + \frac{\partial_\mu \chi \partial^\mu \chi}{2} - V_E(\chi(h)) \right)$$



$$\frac{\frac{\lambda}{4} \phi^4}{\left(1 + \frac{\xi\phi^2}{M_P^2}\right)^2}$$

Higgs potential flattened (also including NNLO) at $\phi > M_P/\sqrt{\xi}$



LHC può produrre particelle che esistevano immediatamente dopo il Big Bang e che oggi non ci sono più perché sono decadute

questa è l'energia di LHC!

inflazione primordiale

BIG BANG

ALCUNE DIREZIONI DI RICERCA ATTUALI

→ Misure di precisione del MS

→ Modelli «Oltre» il MS (GUT, SUSY, stringhe, ...):

a) segnature ad acceleratori

b) segnature cosmologiche:

materia oscura

energia oscura

asimmetria materia antimateria

inflazione primordiale

onde gravitazionali/buchi neri

...

→ Riesame dei Fondamenti della meccanica quantistica