

INTRODUZIONE ALLA FISICA NUCLEARE E SUBNUCLEARE

Lezione 10 parte 1

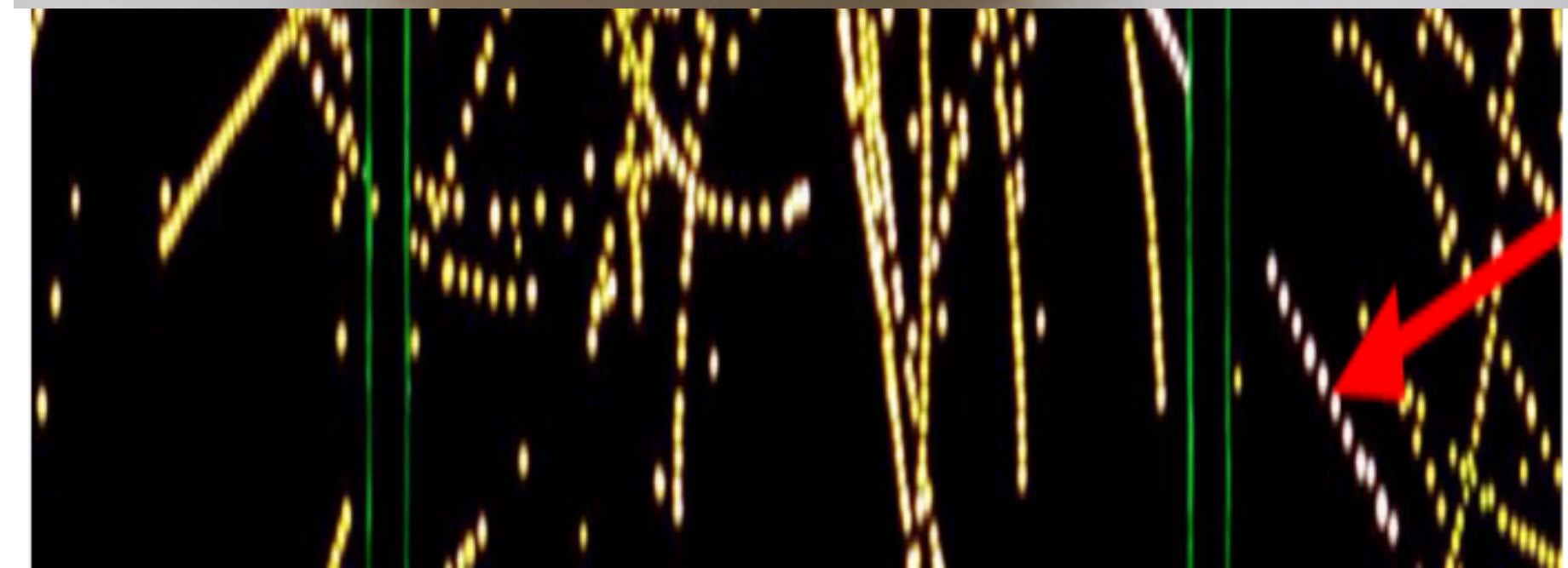
Interazioni deboli tra quarks

10/05/2024

VIERI CANDELISE



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

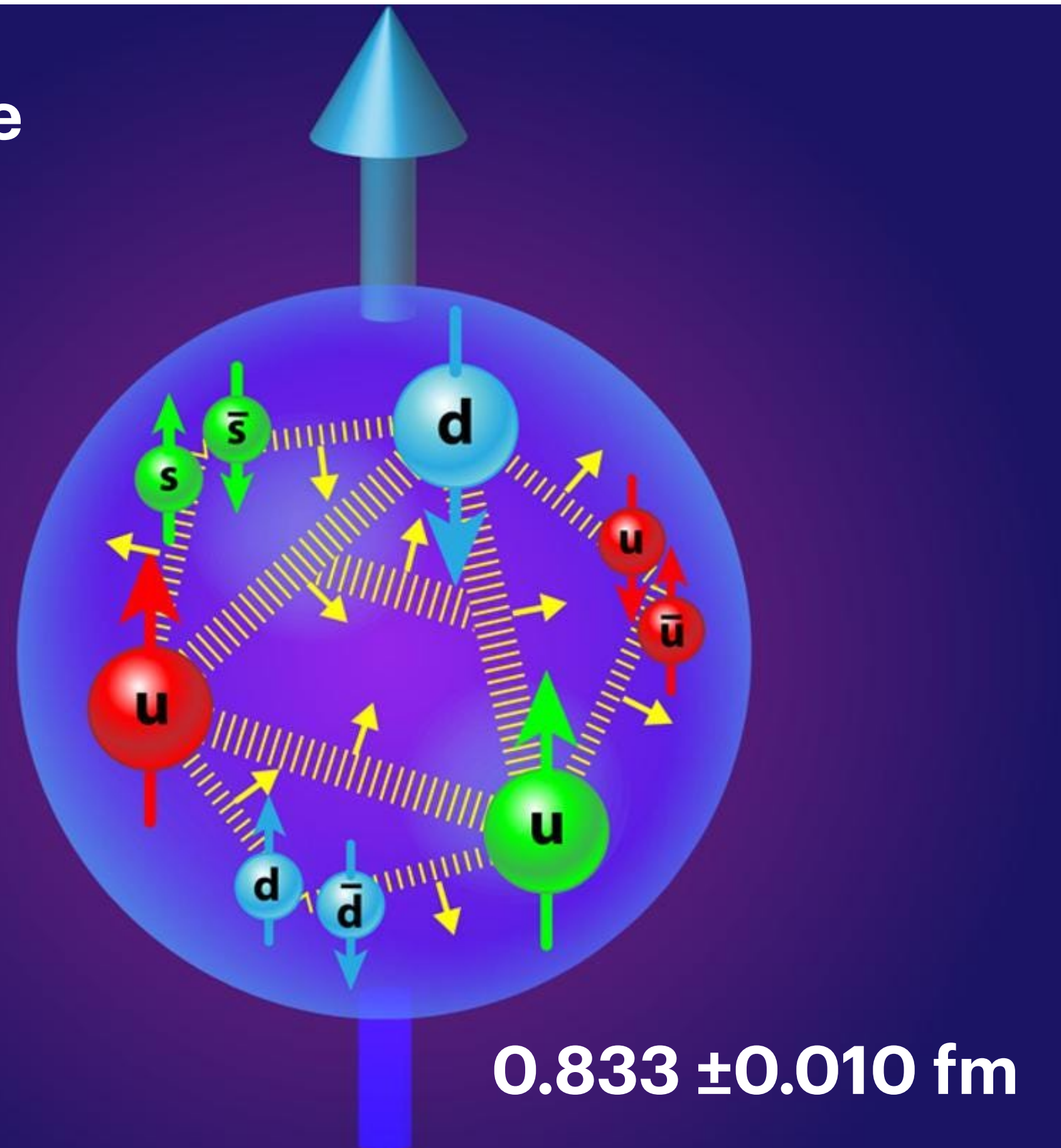


WE ARE ALL MADE OF ~~STARS~~ GLUONS

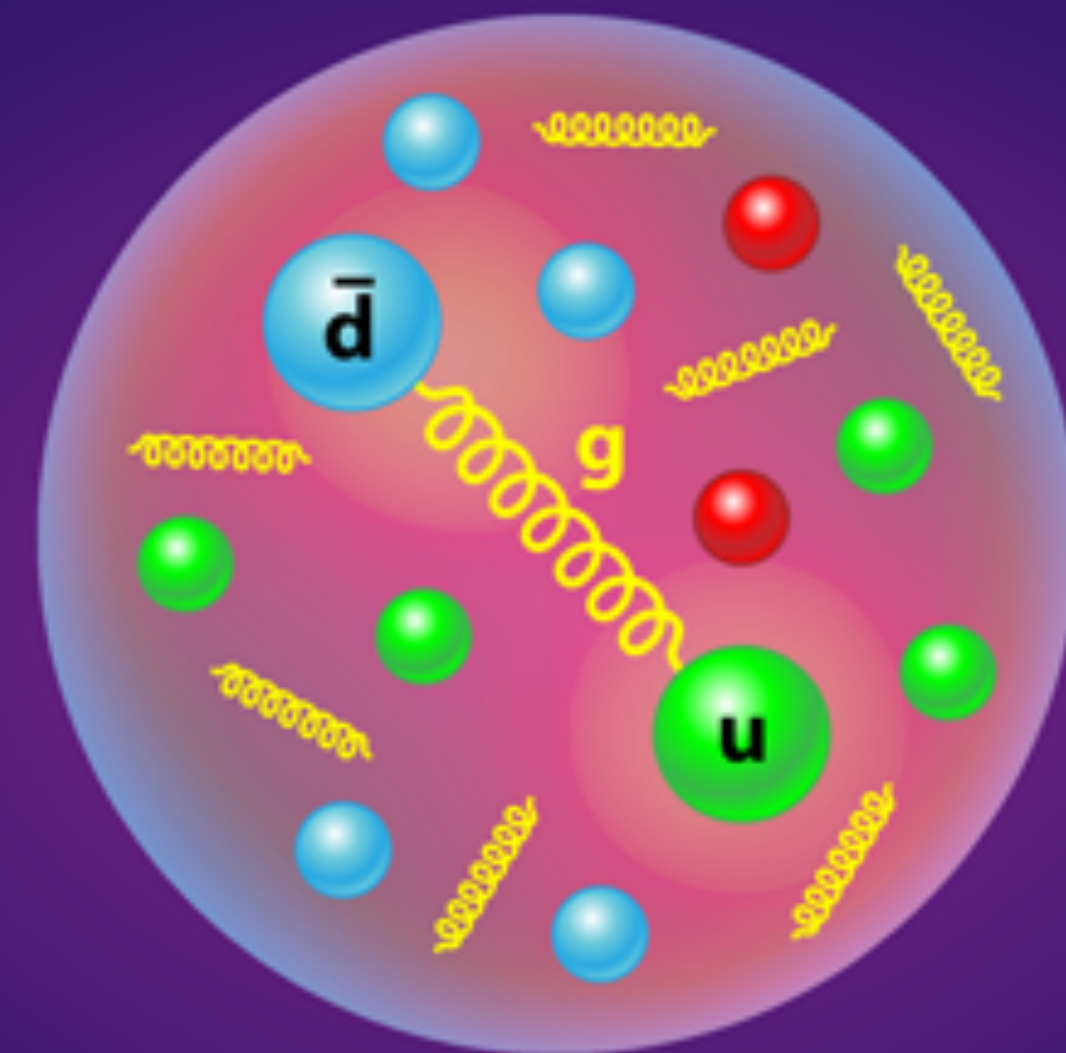
protone = 3 *quarks di valenza* uud immersi in un mare di quark (*quark sea*) e gluoni virtuali

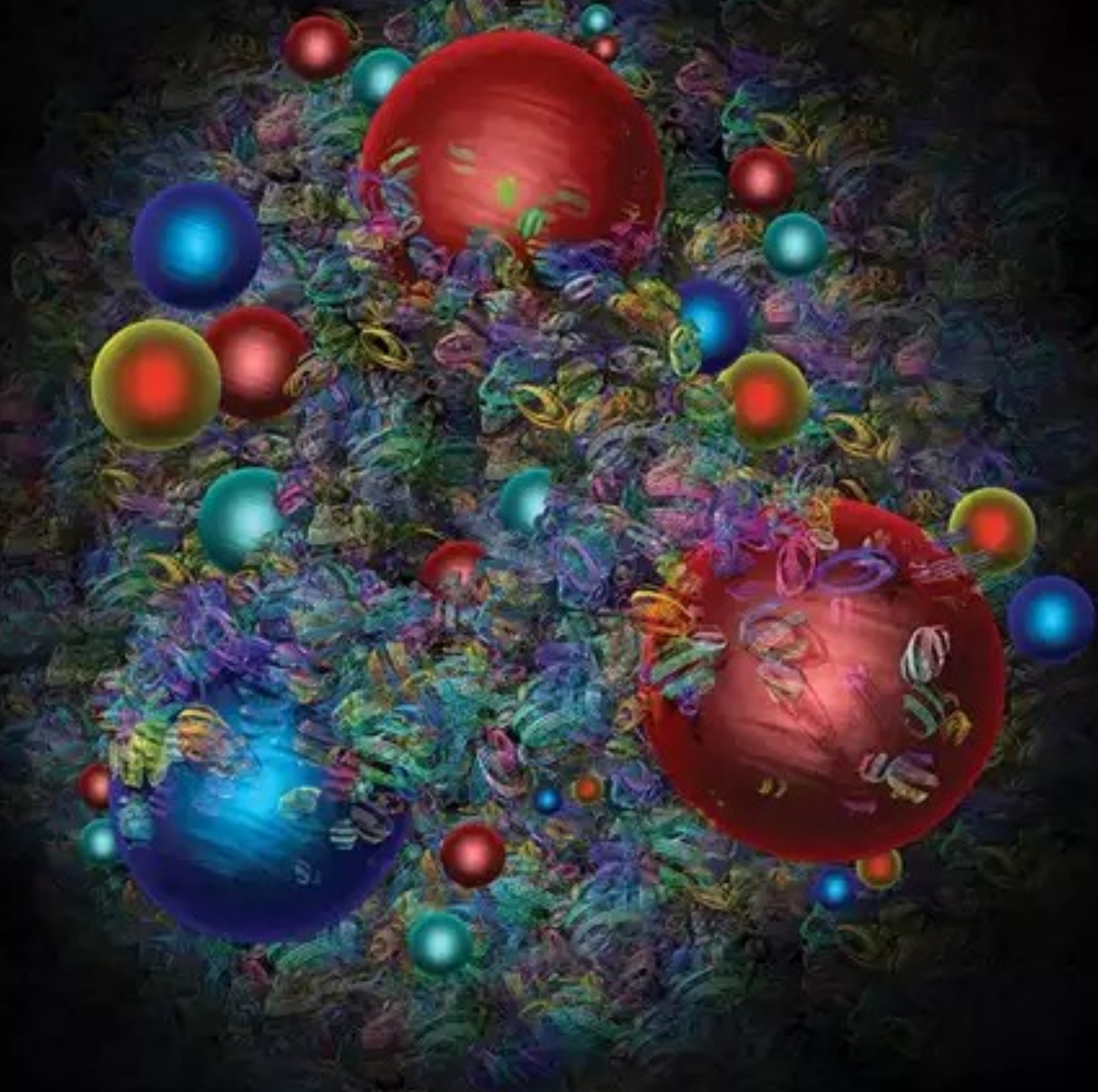
la massa del protone è per il 99% data dall'energia del campo dei gluoni

protone

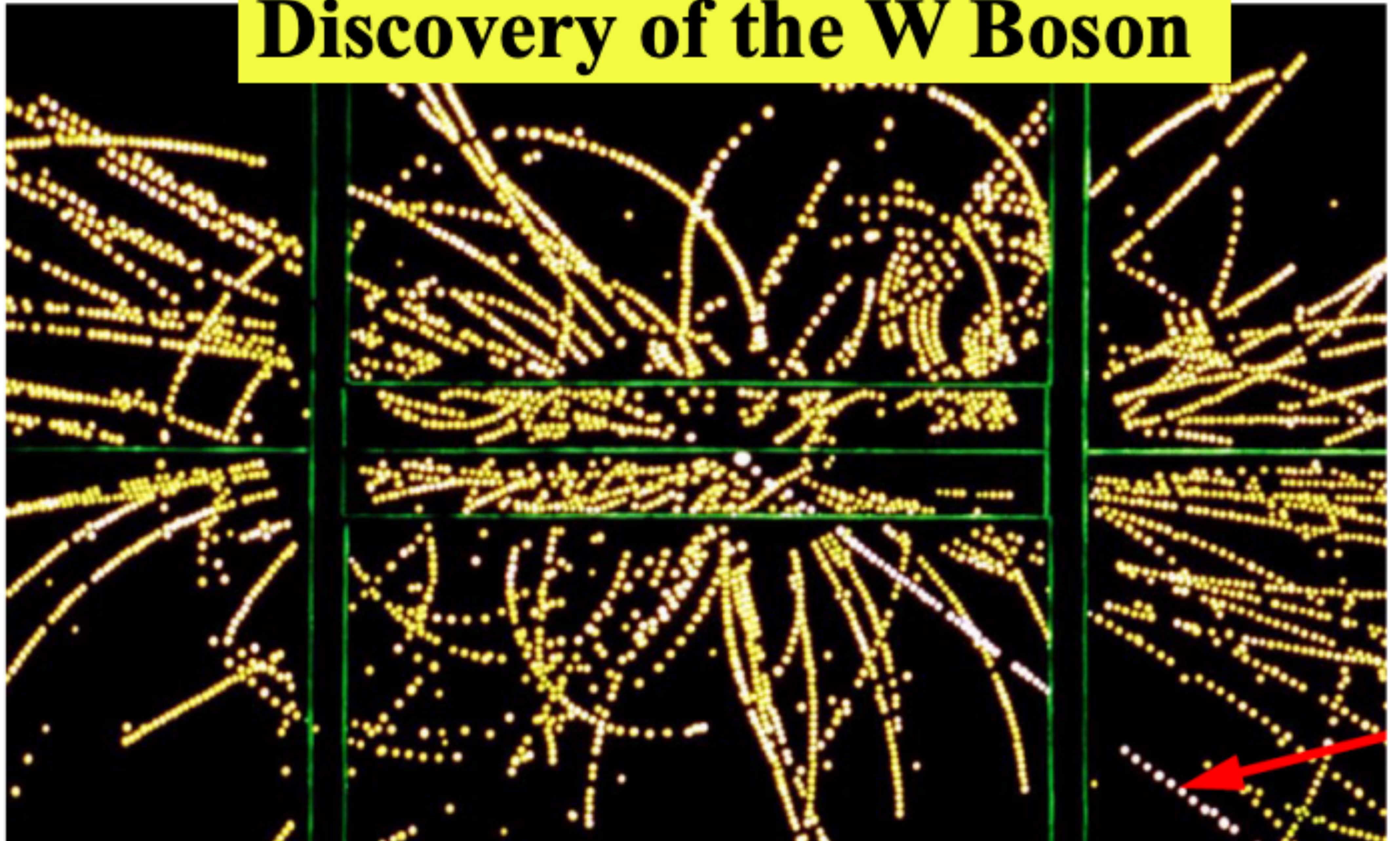


pione





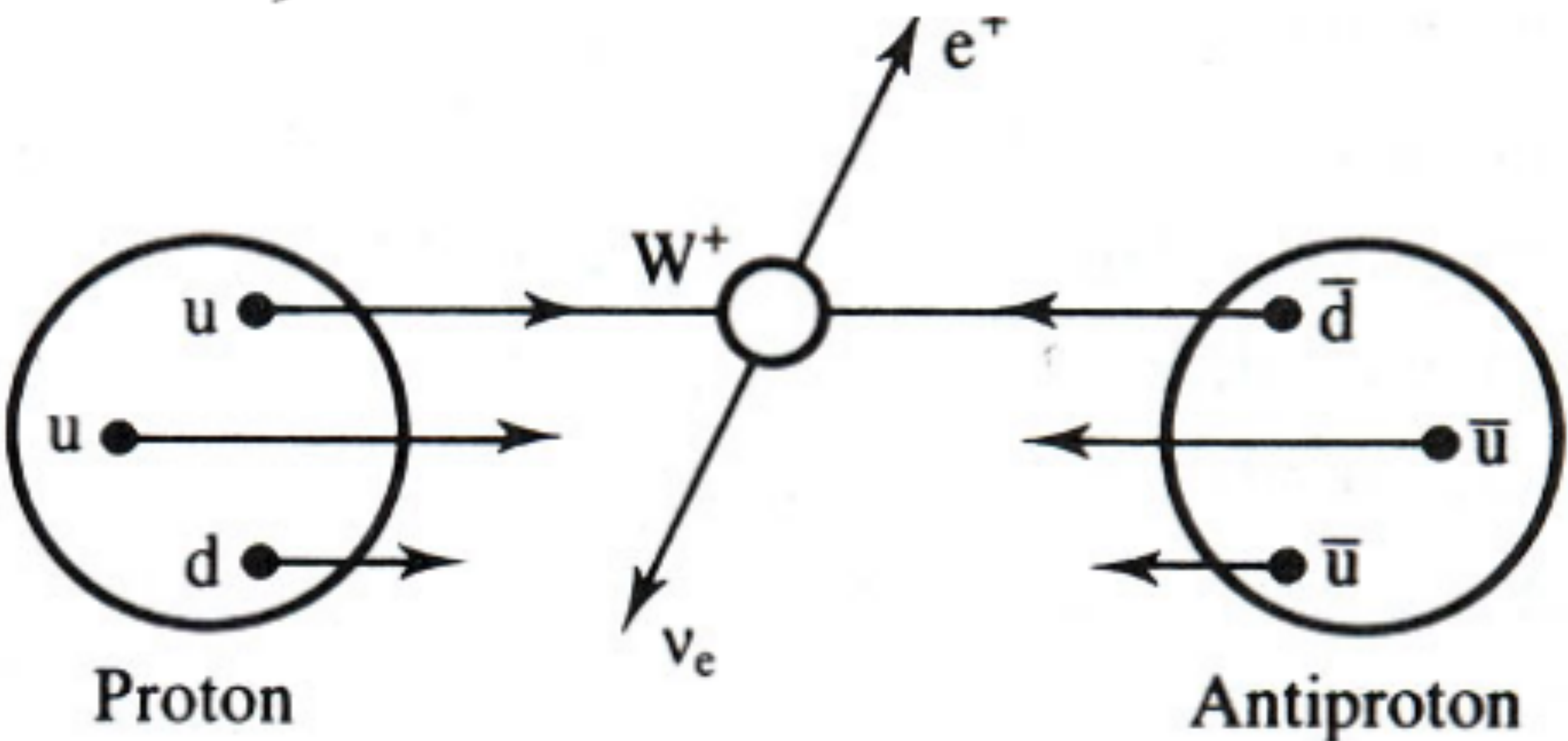
Discovery of the W Boson



SCOPERTA DEL W E DELLO Z

Prodotti nel 1983 al CERN in collisioni

protone-antiprotone ($SppbarS$) negli esperimenti **UA1 e UA2**



$$p\bar{p} \rightarrow W^+ + X$$

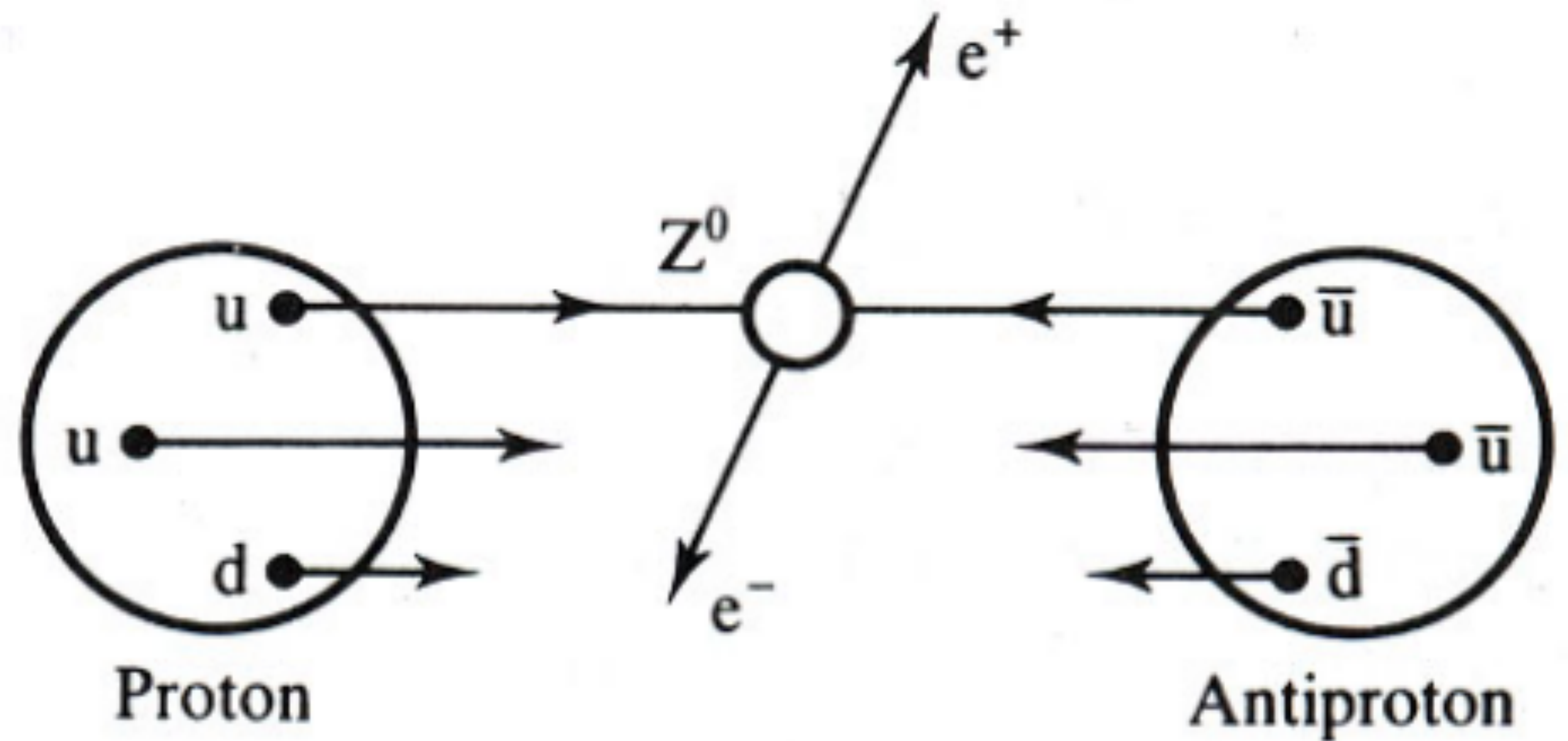
$\sqrt{s}(\text{GeV})$	$\int Ldt \text{ (nb}^{-1}\text{)}$
546	118
630	568
<i>totale</i>	686

Scoperti al CERN da Rubbia e Van Der Meer (Nobel 1984)

SCOPERTA DEL W E DELLO Z

Prodotti nel 1983 al CERN in collisioni

protone-antiprotone ($SppbarS$) negli esperimenti **UA1 e UA2**



$$p\bar{p} \rightarrow Z + X$$

$\sqrt{s}(\text{GeV})$	$\int Ldt \text{ (nb}^{-1}\text{)}$
546	118
630	568
<i>totale</i>	686

Scoperti al CERN da Rubbia e Van Der Meer (Nobel 1984)

$$W^- \rightarrow e \bar{\nu}$$

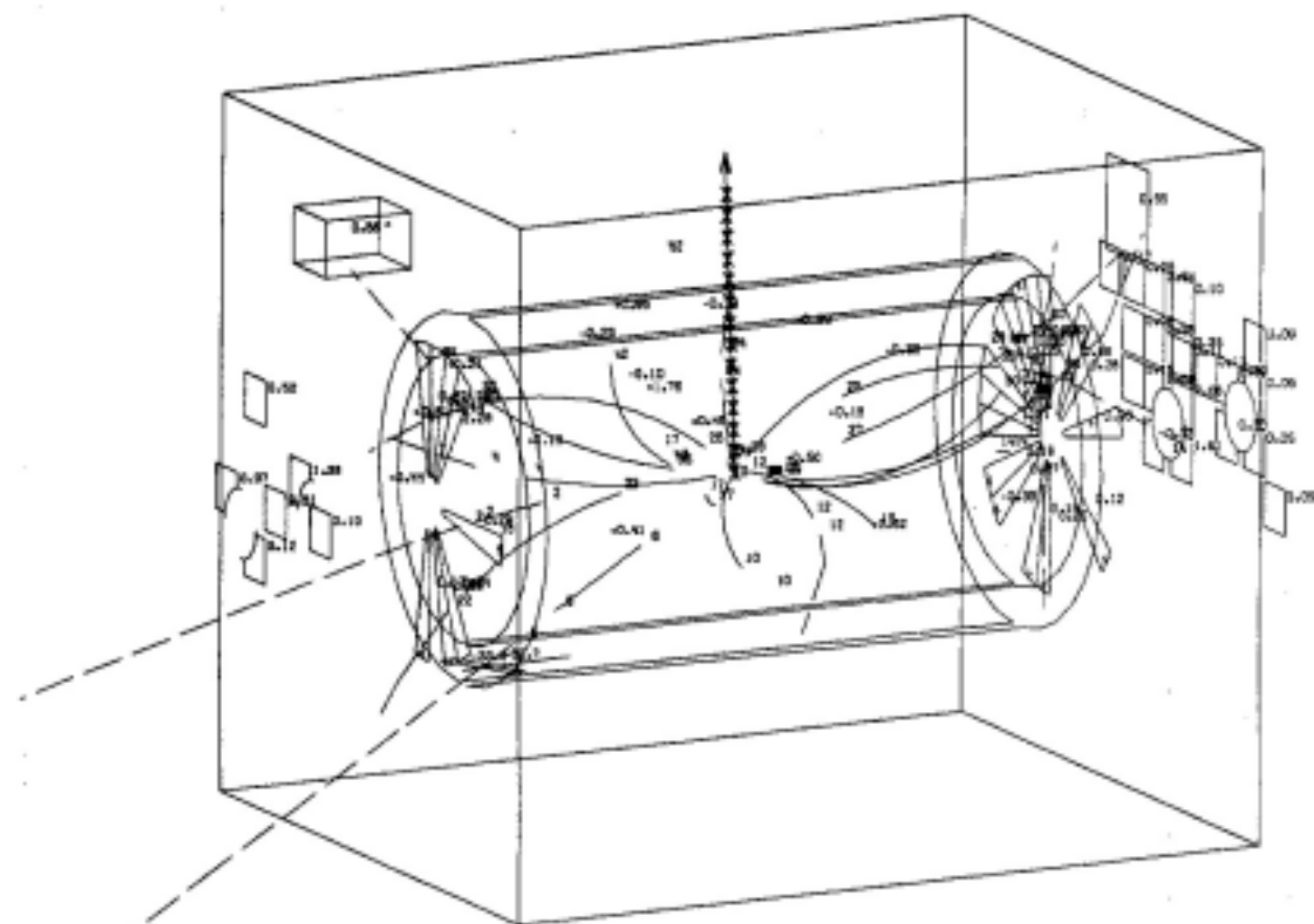


Fig. 16a. Event of the type $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$. All tracks and calorimeter cells are displayed.

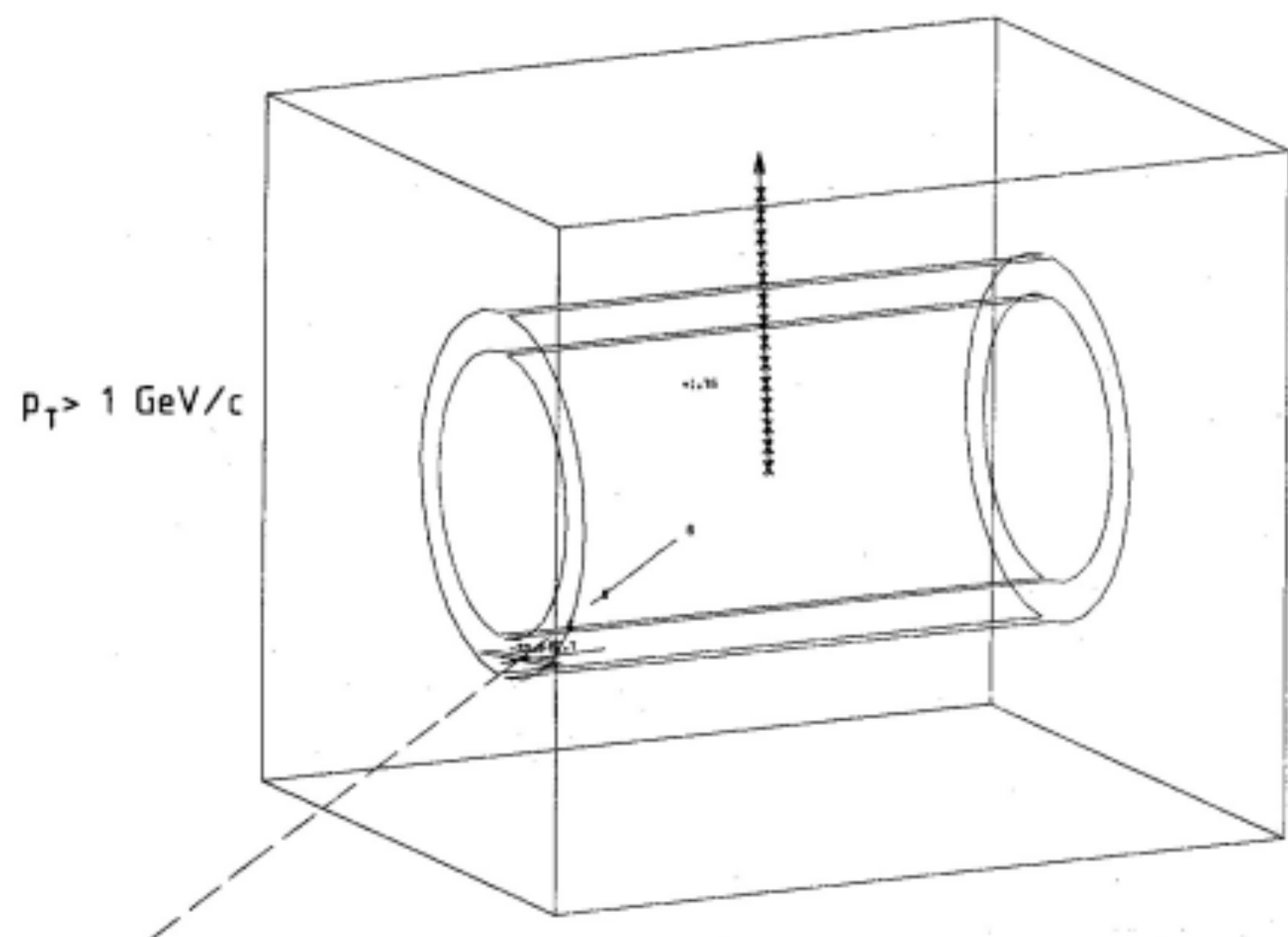
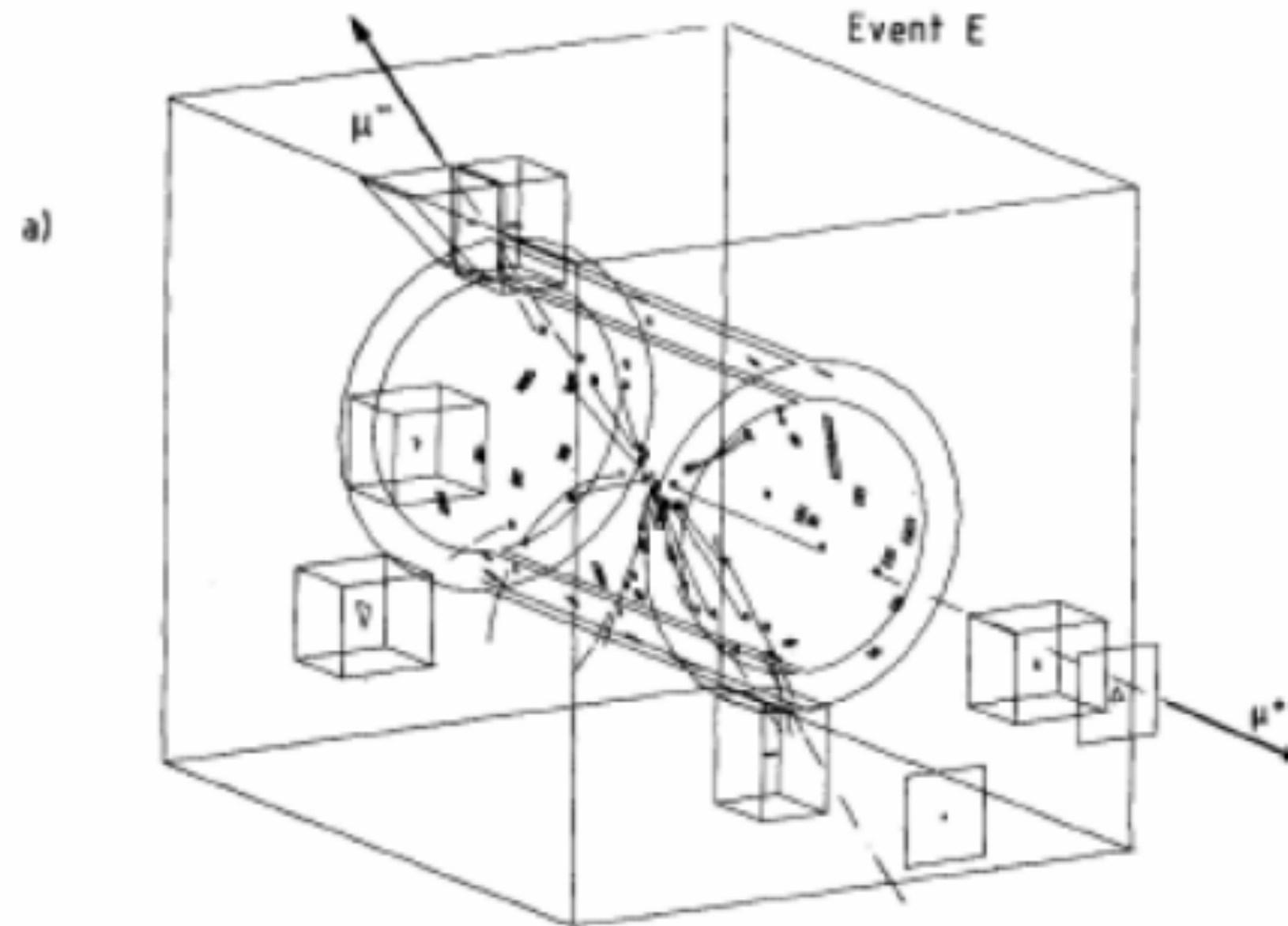


Fig. 16b. The same as picture (a), except that now only particles with $p_T > 1 \text{ GeV}/c$ and calorimeters with $E_T > 1 \text{ GeV}$ are shown.

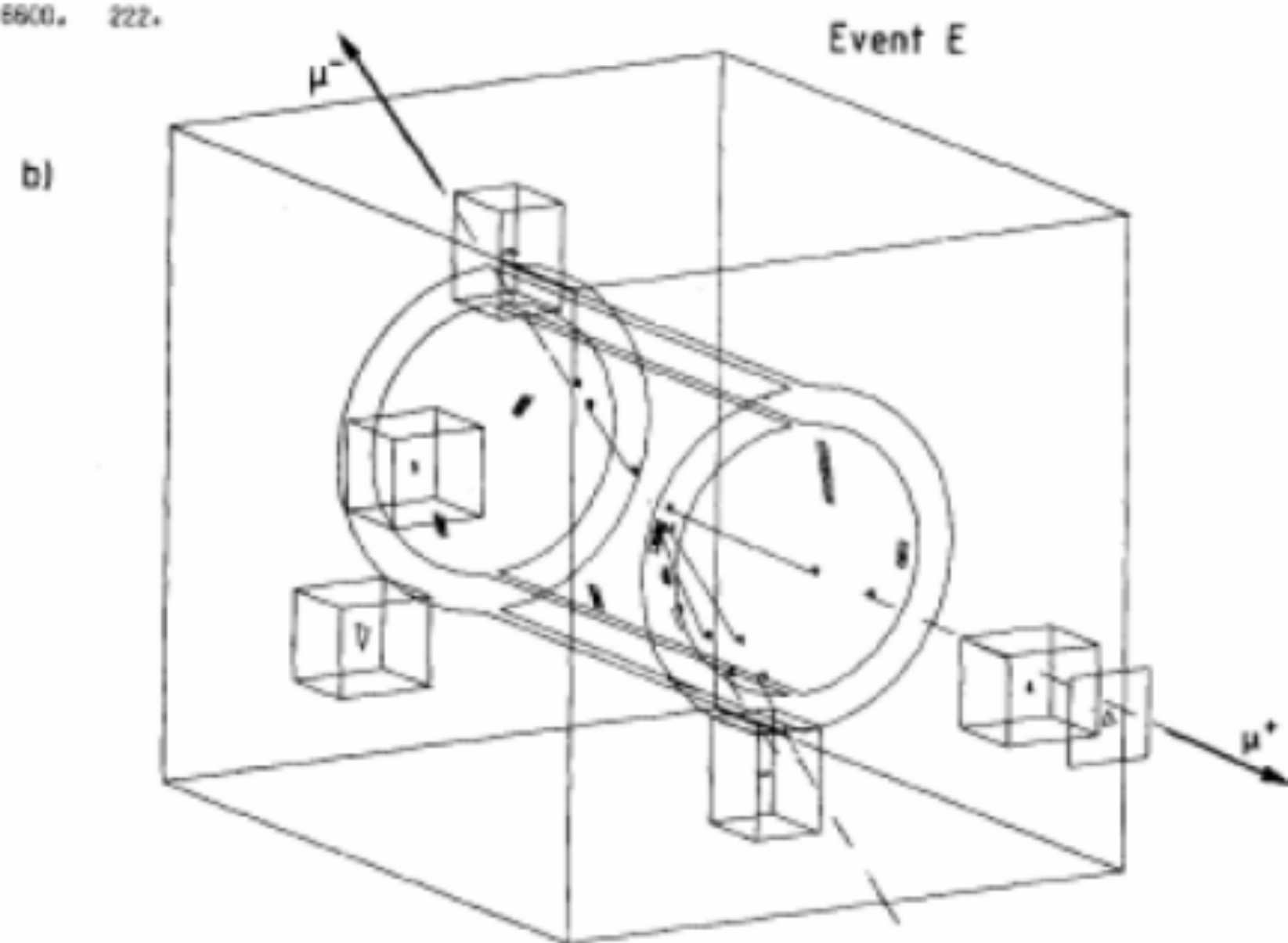
EVENT 8600. 222.



a)

$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

EVENT 8600. 222.



b)

W/Z DECADIMENTI

W^+ DECAY MODES

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

	Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level
Γ_1	$\ell^+ \nu$	[a] $(10.86 \pm 0.09) \%$	
Γ_2	$e^+ \nu$	$(10.71 \pm 0.16) \%$	
Γ_3	$\mu^+ \nu$	$(10.63 \pm 0.15) \%$	
Γ_4	$\tau^+ \nu$	$(11.38 \pm 0.21) \%$	
Γ_5	hadrons	$(67.41 \pm 0.27) \%$	

W/Z DECADIMENTI

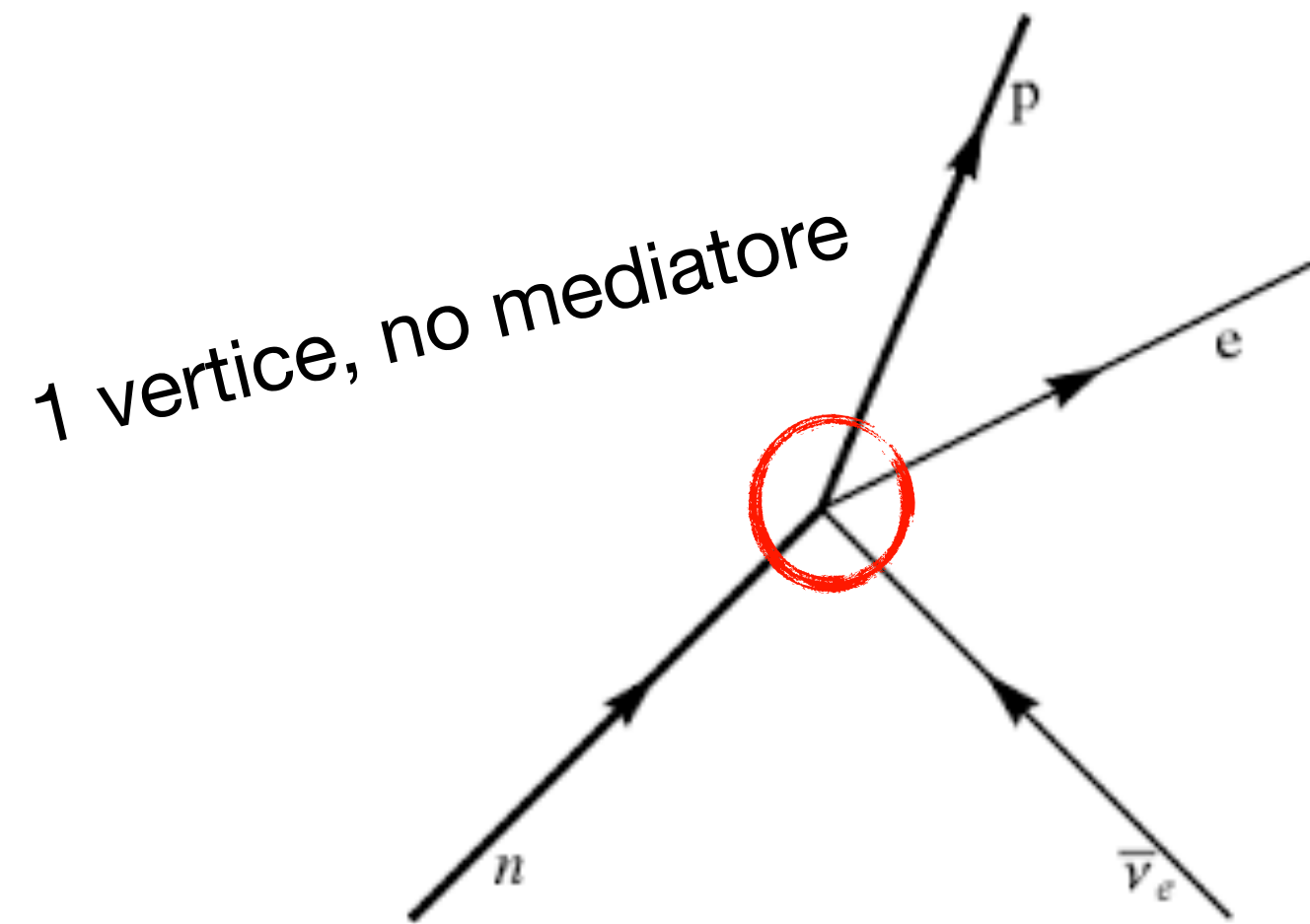
Z DECAY MODES

	Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level
Γ_1	$e^+ e^-$	[a] (3.3632 \pm 0.0042) %	
Γ_2	$\mu^+ \mu^-$	[a] (3.3662 \pm 0.0066) %	
Γ_3	$\tau^+ \tau^-$	[a] (3.3696 \pm 0.0083) %	
Γ_4	$l^+ l^-$	[a,b] (3.3658 \pm 0.0023) %	
Γ_5	$l^+ l^- l^+ l^-$	[c] (3.5 \pm 0.4) $\times 10^{-6}$	S=1.7
Γ_6	invisible	[a] (20.000 \pm 0.055) %	
Γ_7	hadrons	[a] (69.911 \pm 0.056) %	

INTERAZIONI DEBOLI TRA QUARKS

il decadimento beta rivisto alla luce dei quark

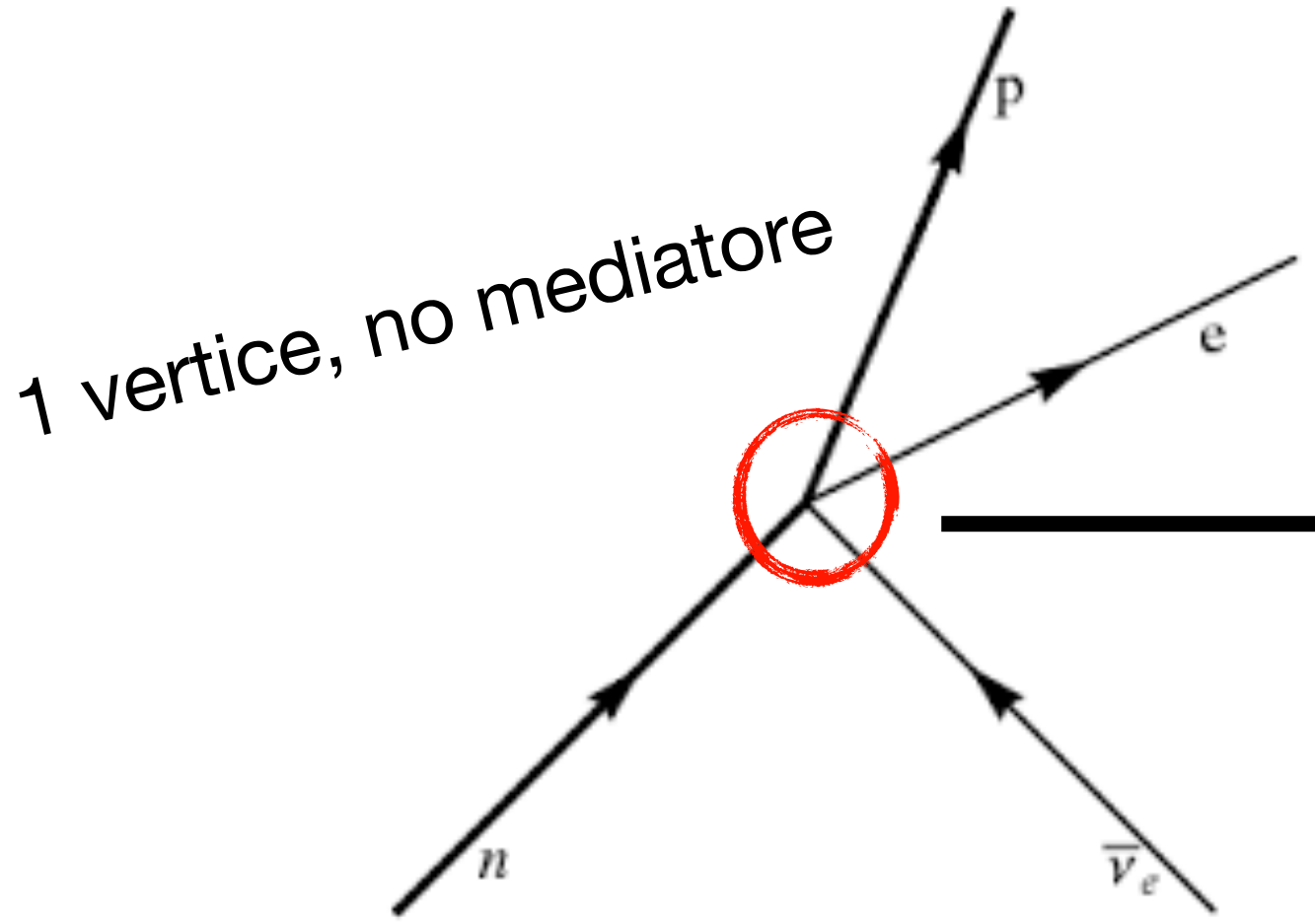
Teoria di Fermi: approssimazione "di contatto"



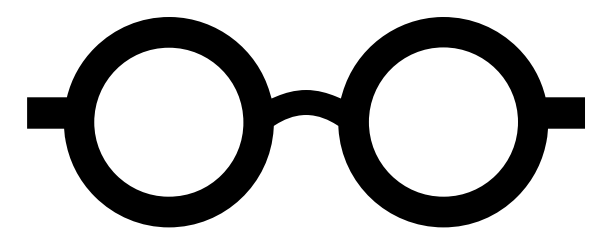
INTERAZIONI DEBOLI TRA QUARKS

il decadimento beta rivisto alla luce dei quark

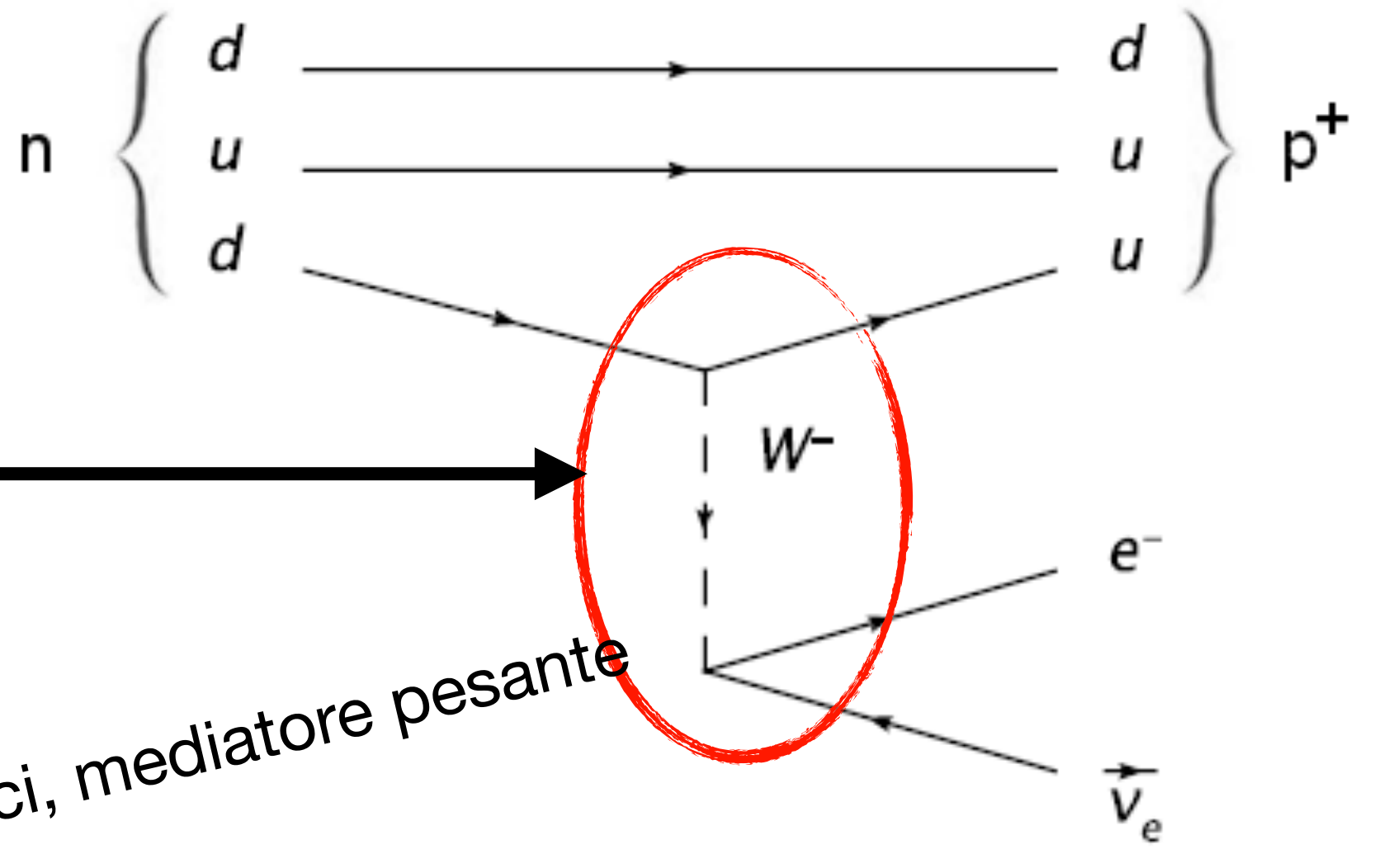
Teoria di Fermi: approssimazione "di contatto"



aumentando l'energia
si sondano le
strutture interne



il vero decadimento beta

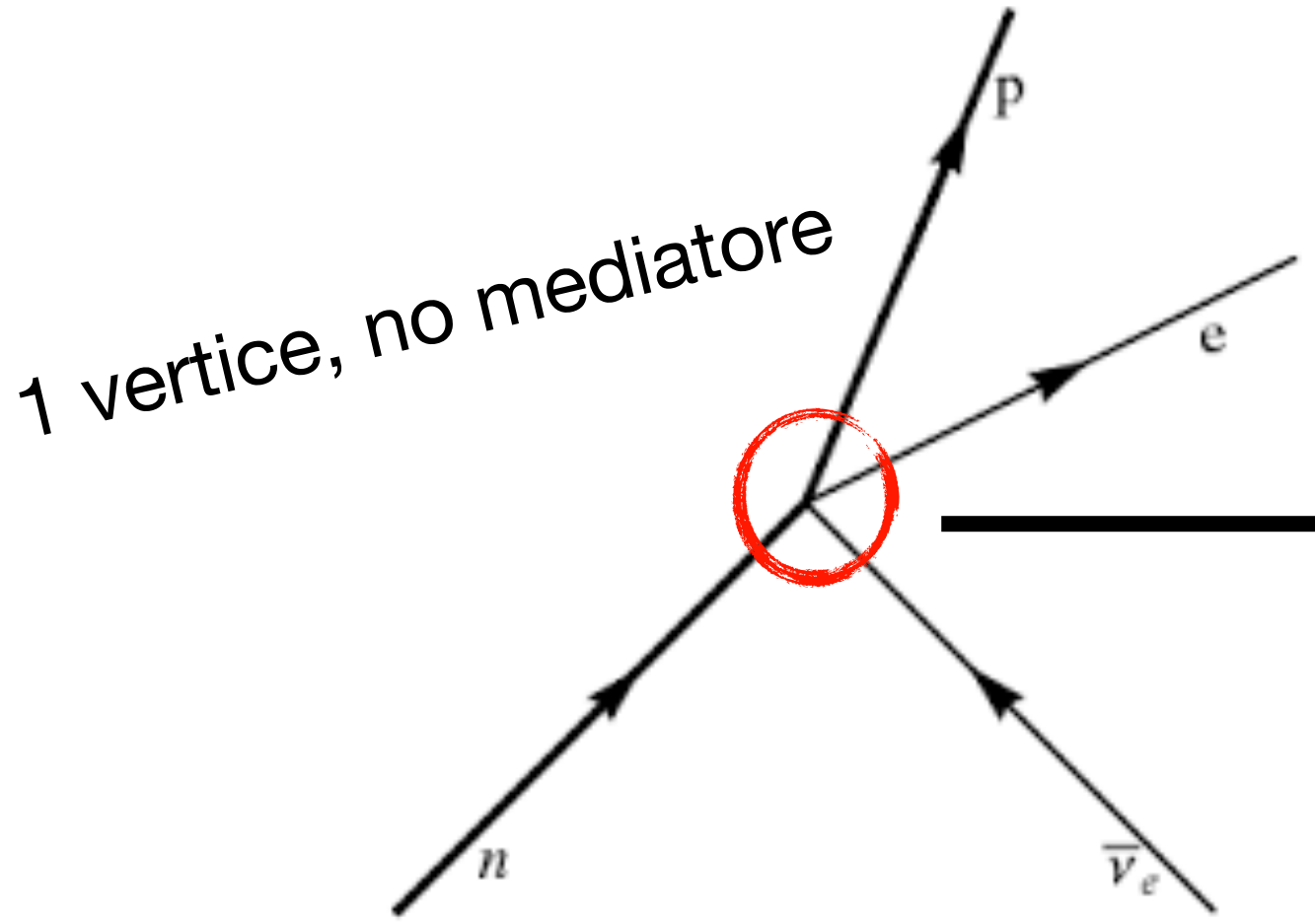


2 vertici, mediatore pesante

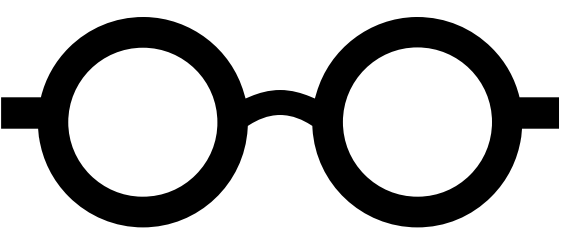
INTERAZIONI DEBOLI TRA QUARKS

il decadimento beta rivisto alla luce dei quark

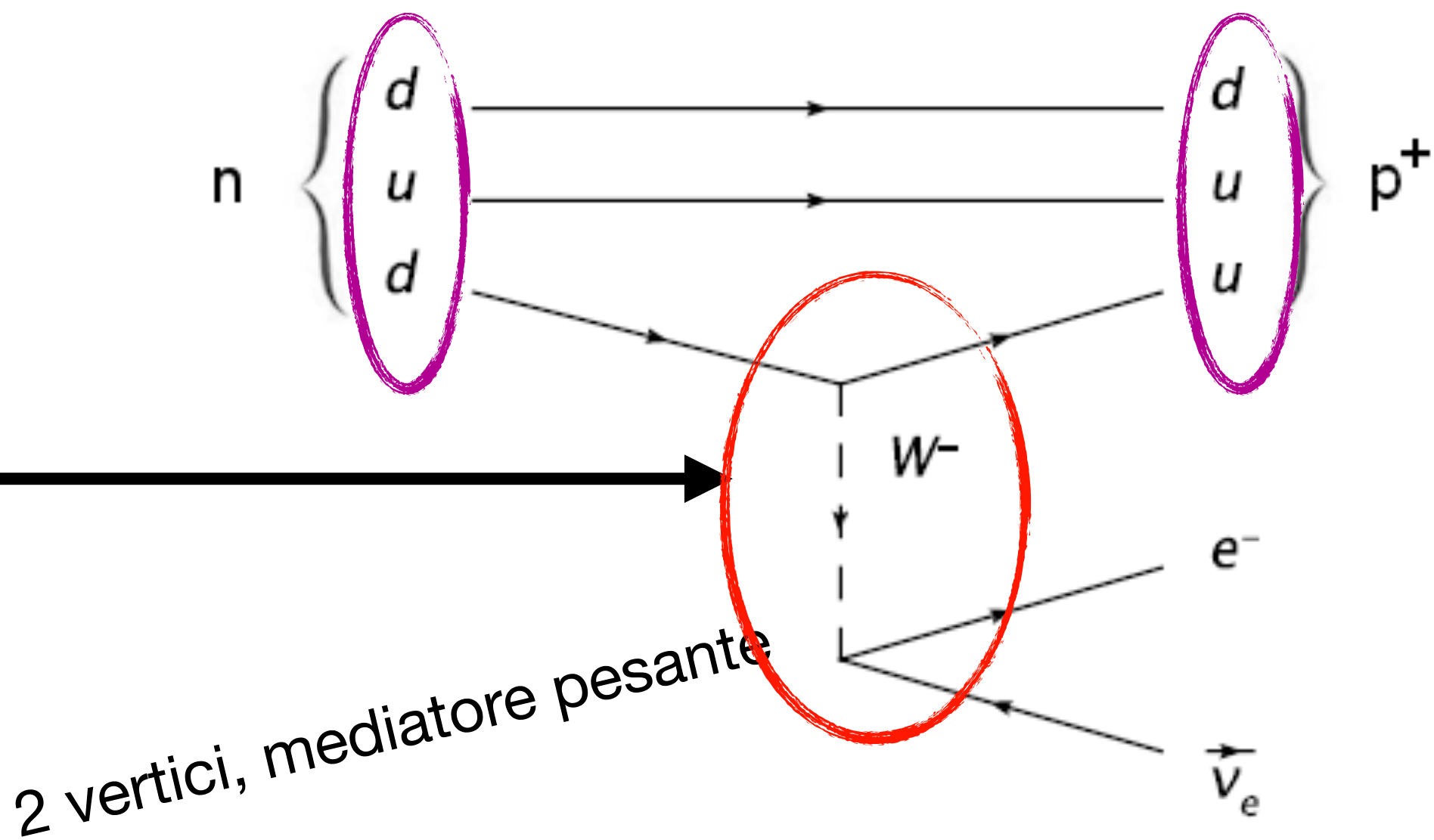
Teoria di Fermi: approssimazione "di contatto"



aumentando l'energia
si sondano le
strutture interne



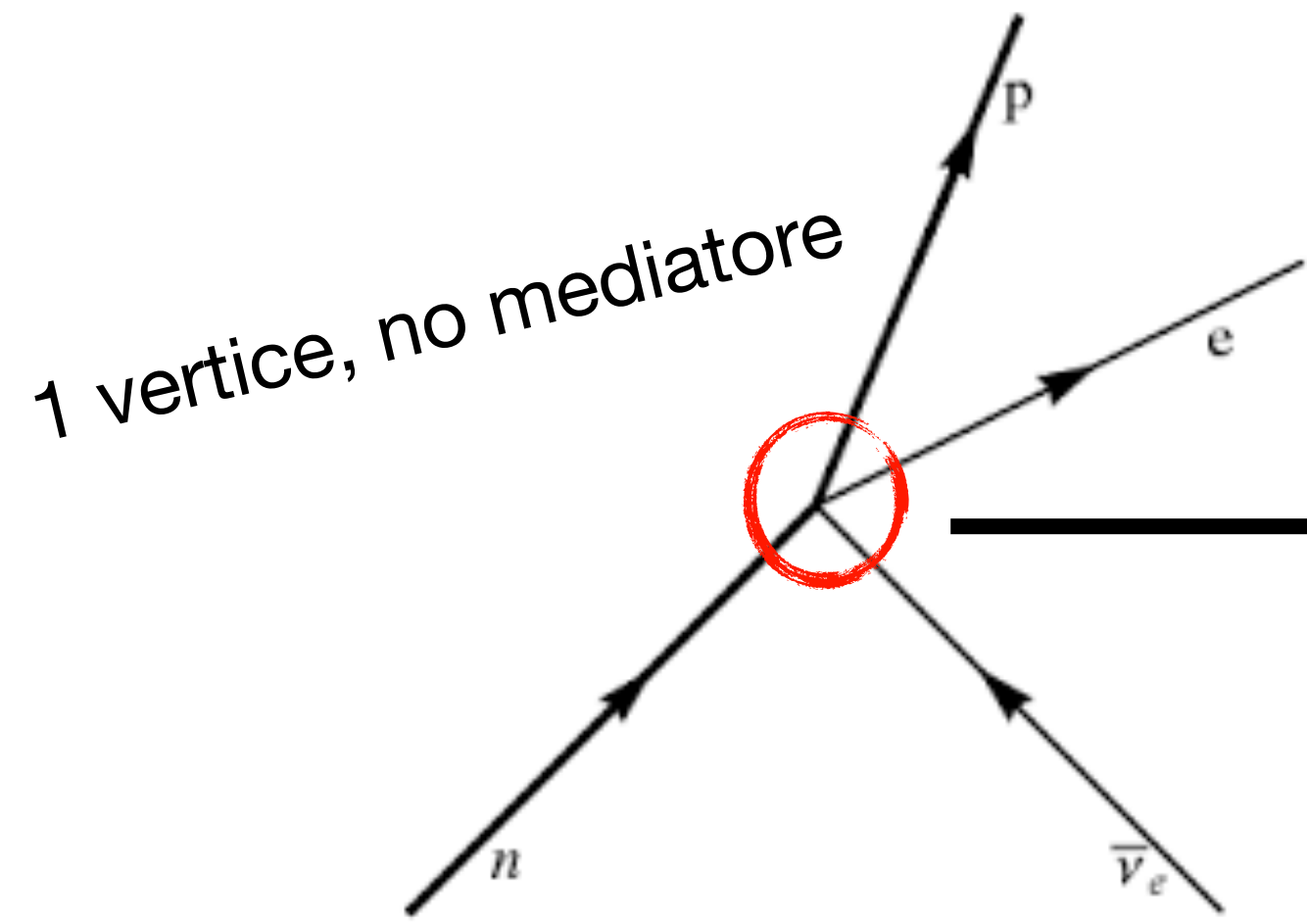
il vero decadimento beta



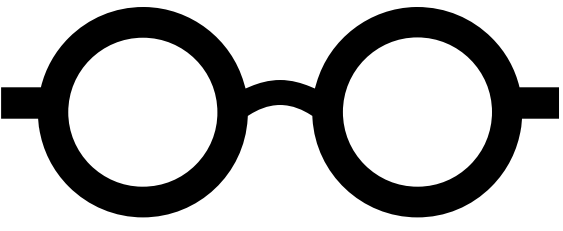
I QUARK E LE INTERAZIONI DEBOLI

il decadimento beta rivisto alla luce dei quark

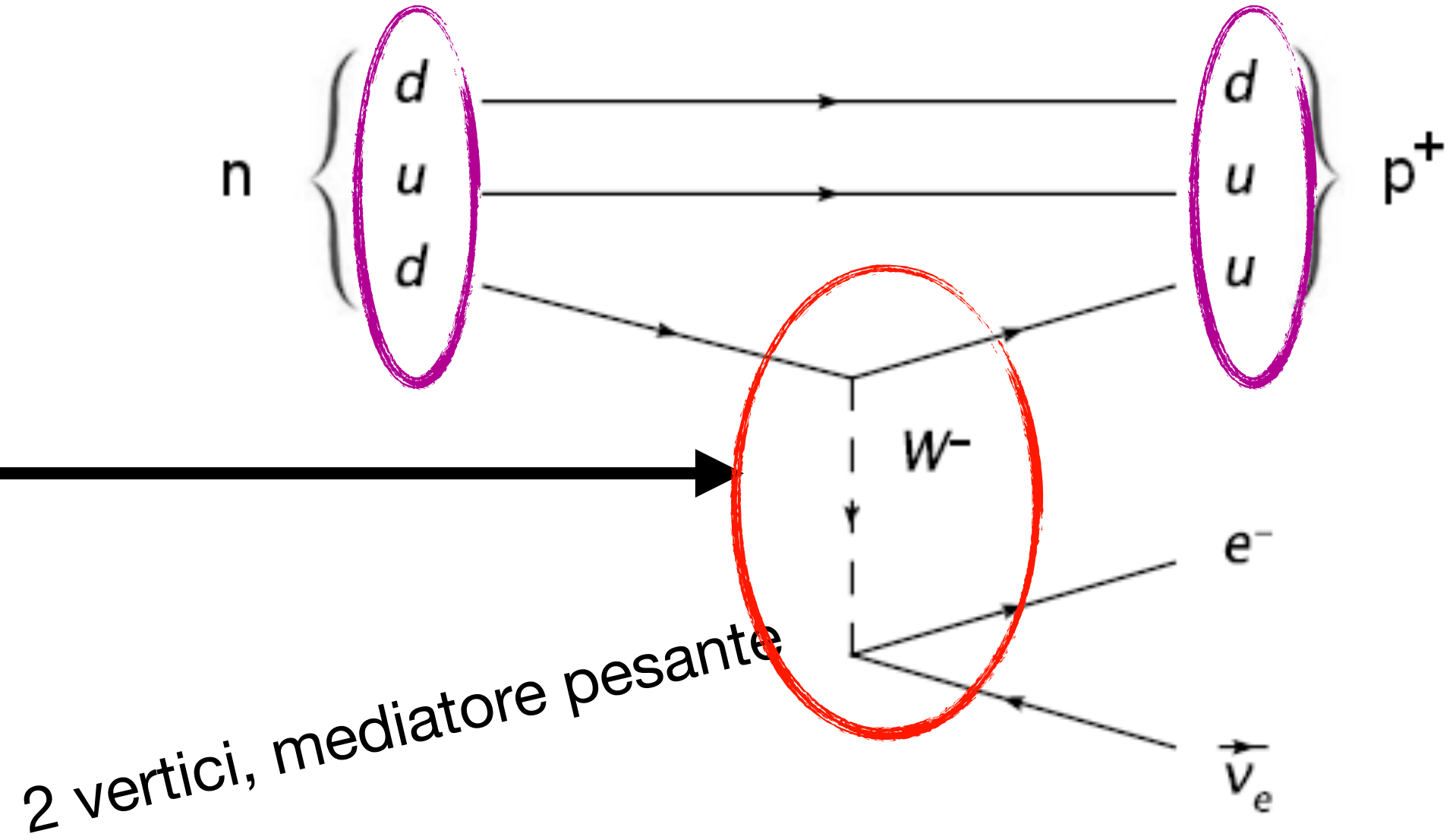
Teoria di Fermi: approssimazione "di contatto"



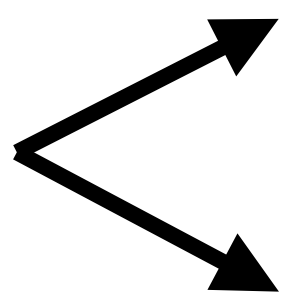
aumentando l'energia
si sondano le
strutture interne



il vero decadimento beta



I quark possono interagire debolmente attraverso due processi:



“di corrente carica”



scambio di bosoni (carichi) W^\pm

“di corrente neutra”

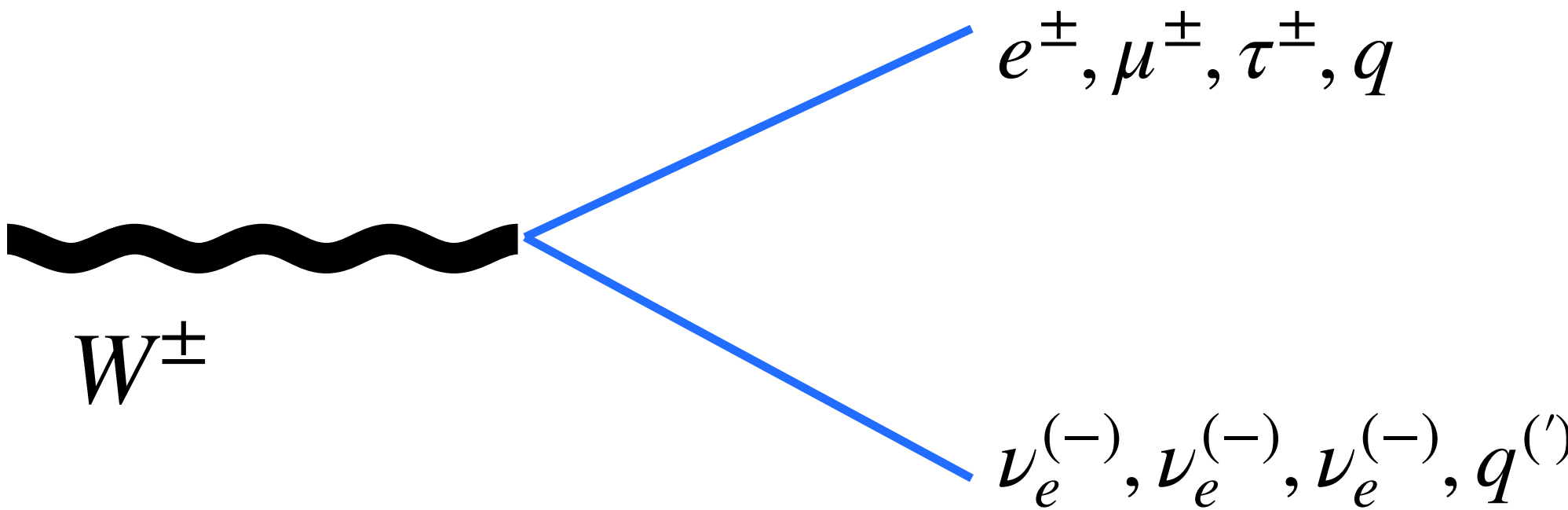


scambio di bosoni (neutri) Z

INTERAZIONI DEBOLI TRA QUARKS

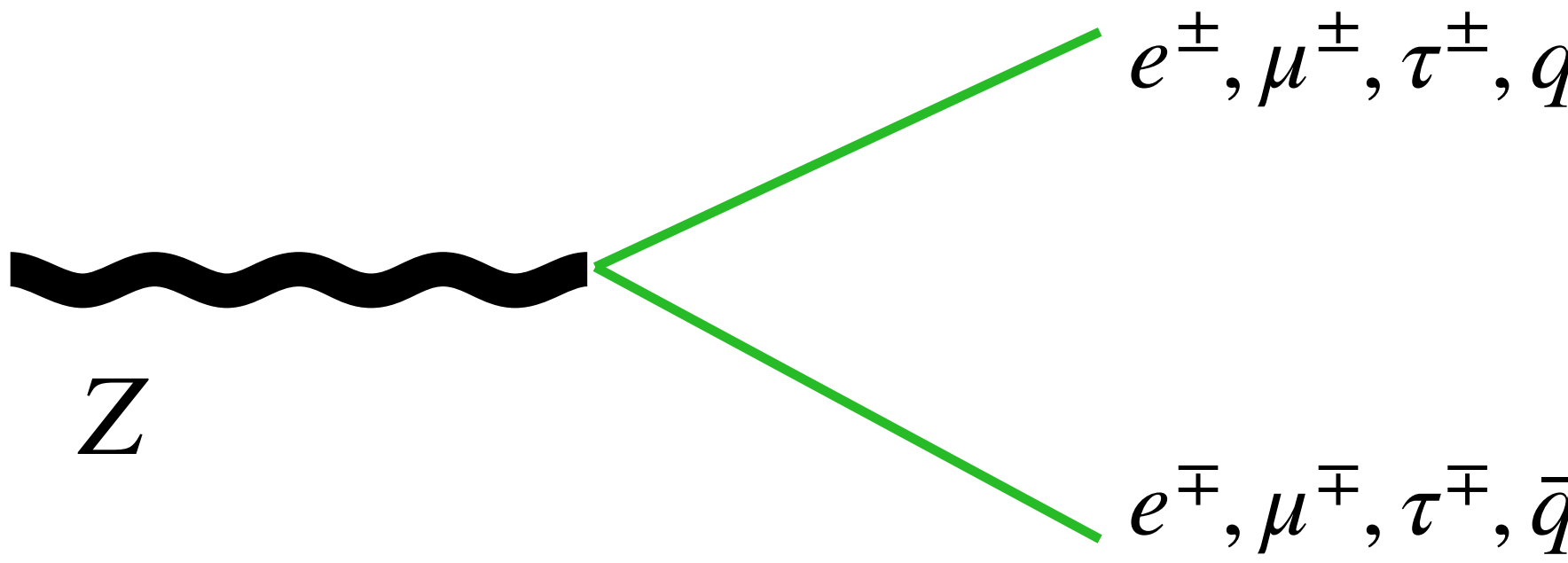
sono i mediatori delle interazioni deboli

M(W) = 80 GeV
spin(W)=1



“di corrente carica”

M(Z) = 91 GeV
spin(Z)=1

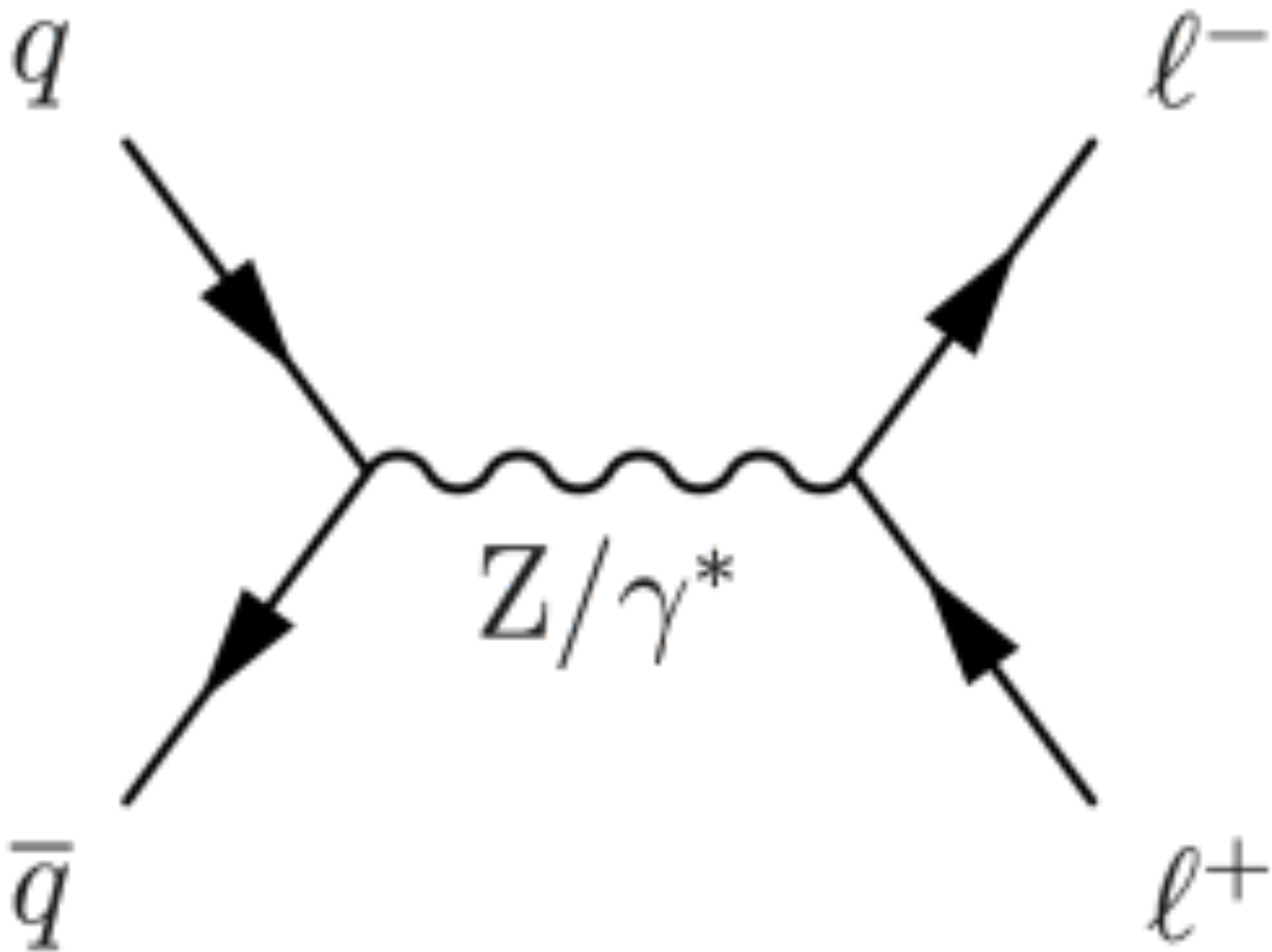


“di corrente neutra”

Saranno scoperti al CERN da Rubbia e Van Der Meer (Nobel 1984)

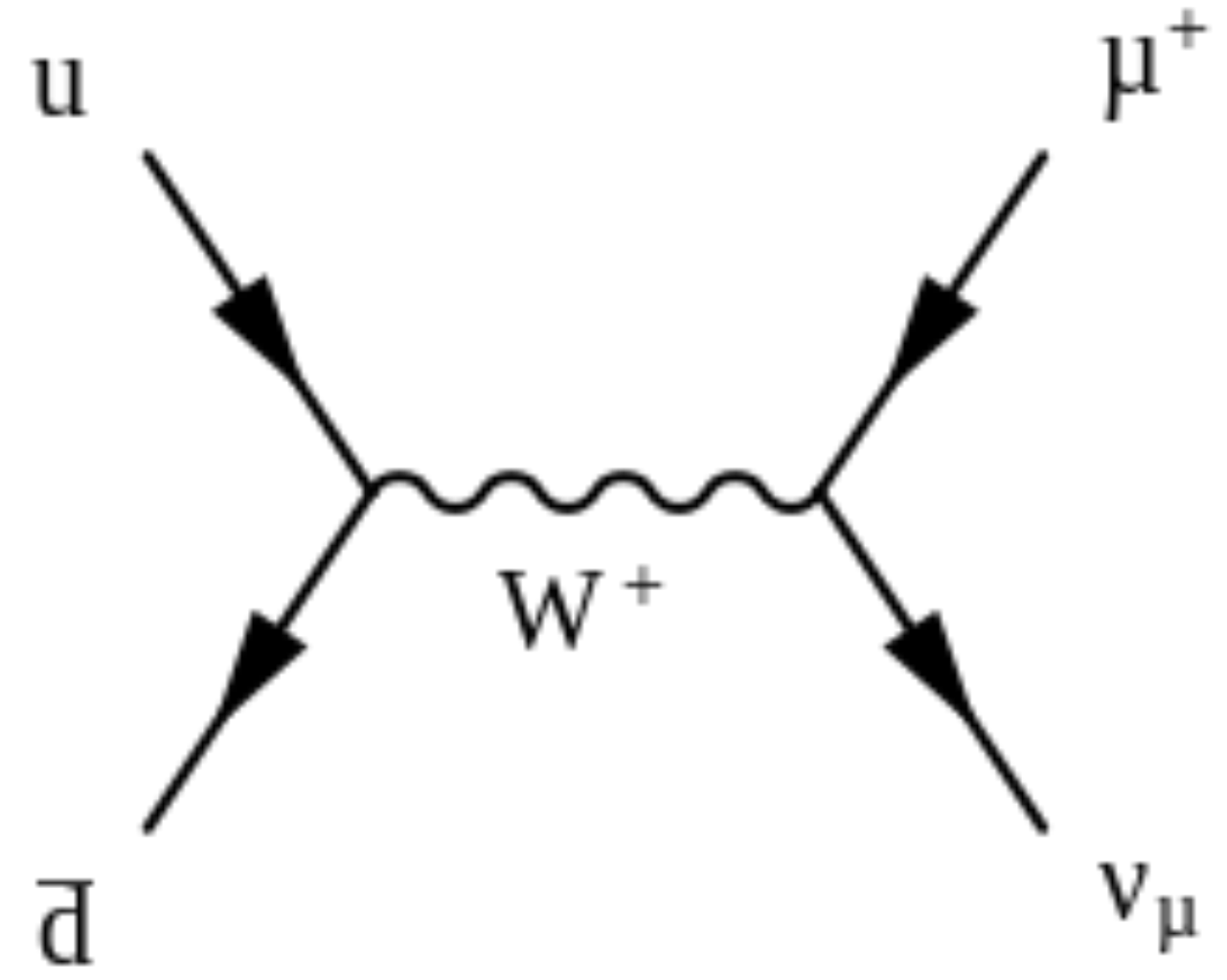
DIAGRAMMI DEBOLI TRA QUARKS

esempi di processi che coinvolgono i bosoni vettori



$$q\bar{q} \rightarrow Z \rightarrow l^+l^-$$

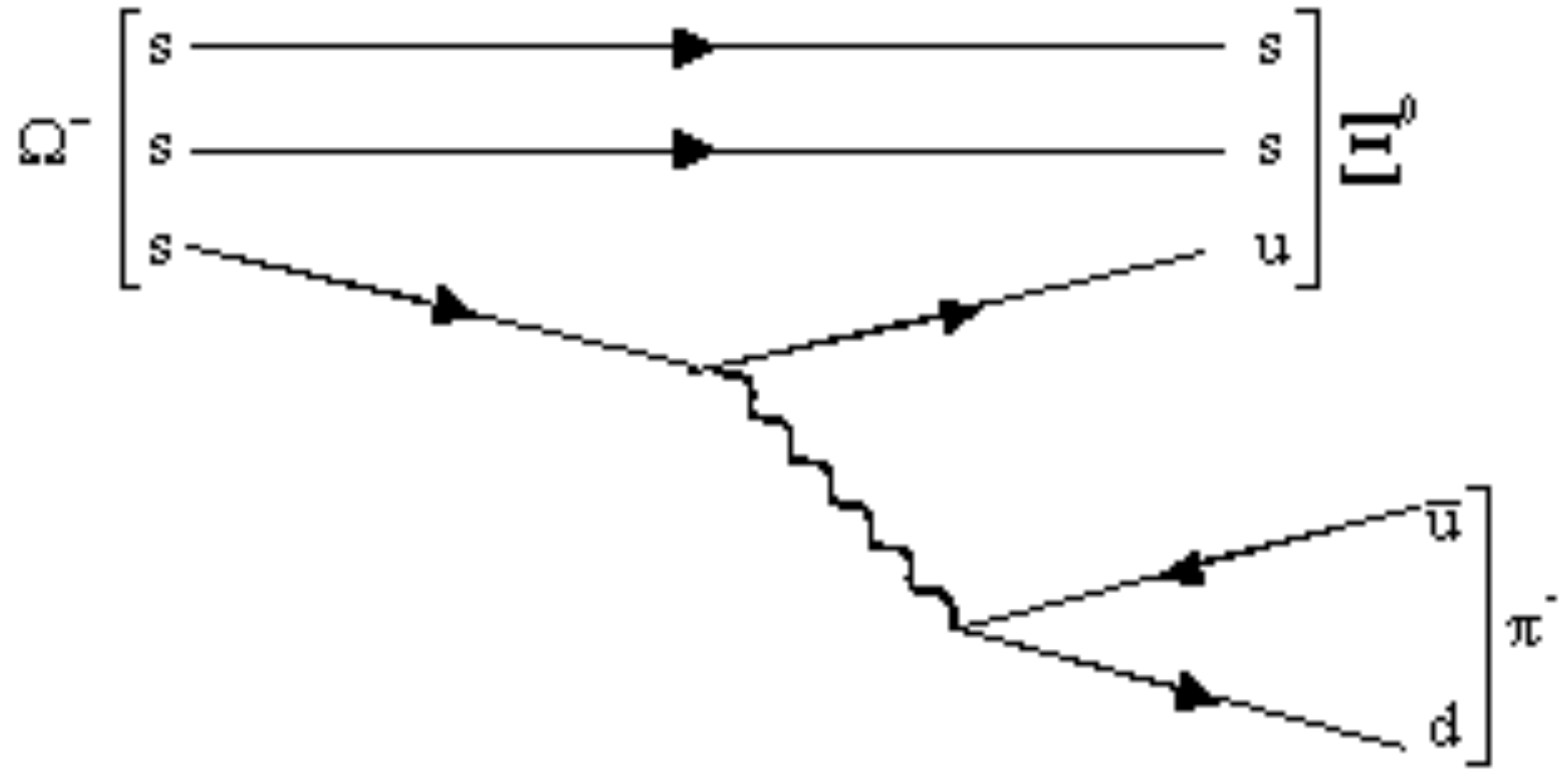
π^+



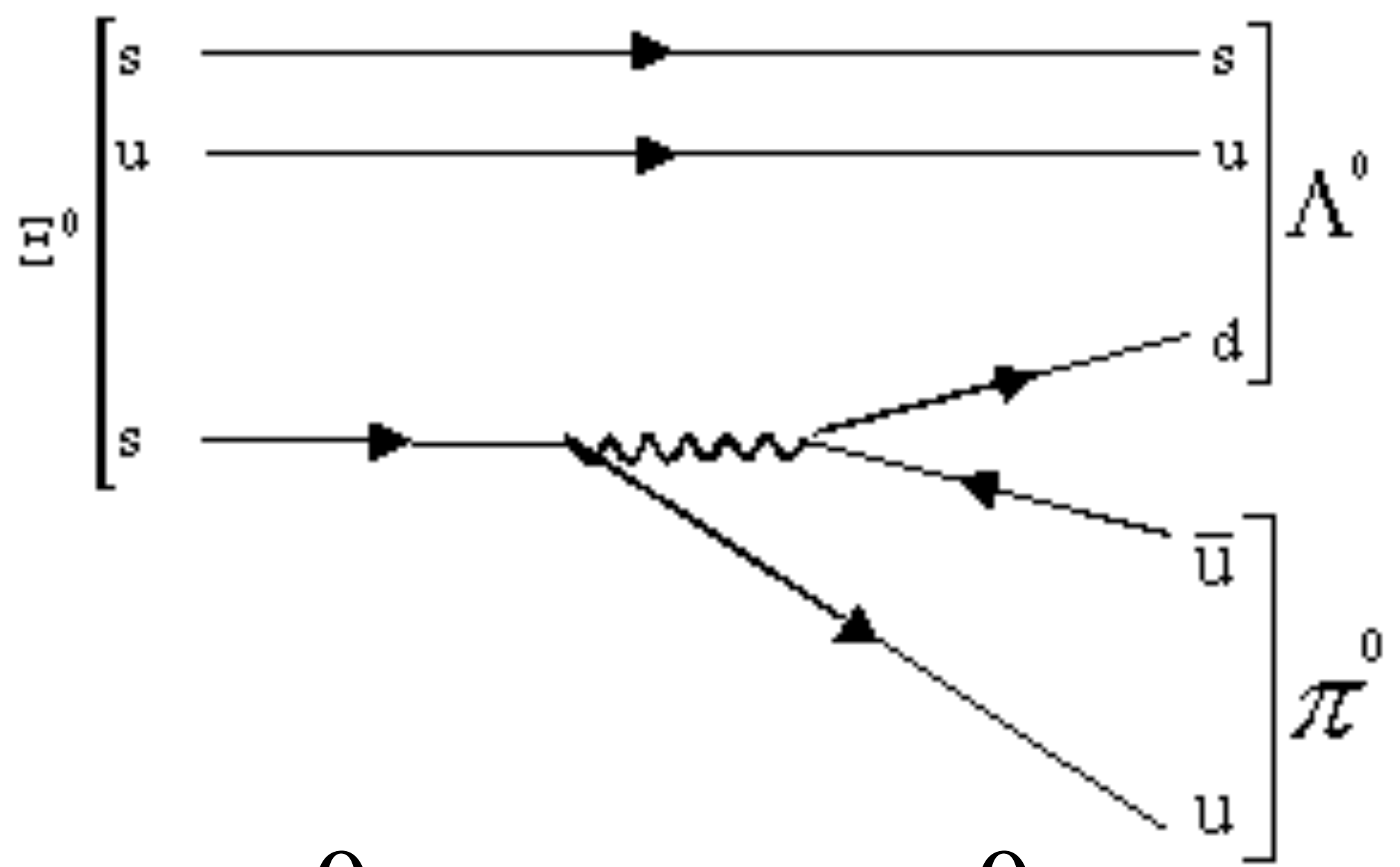
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

DIAGRAMMI DEBOLI TRA QUARKS

esempi di processi che coinvolgono i bosoni vettori



$$\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \pi^-$$

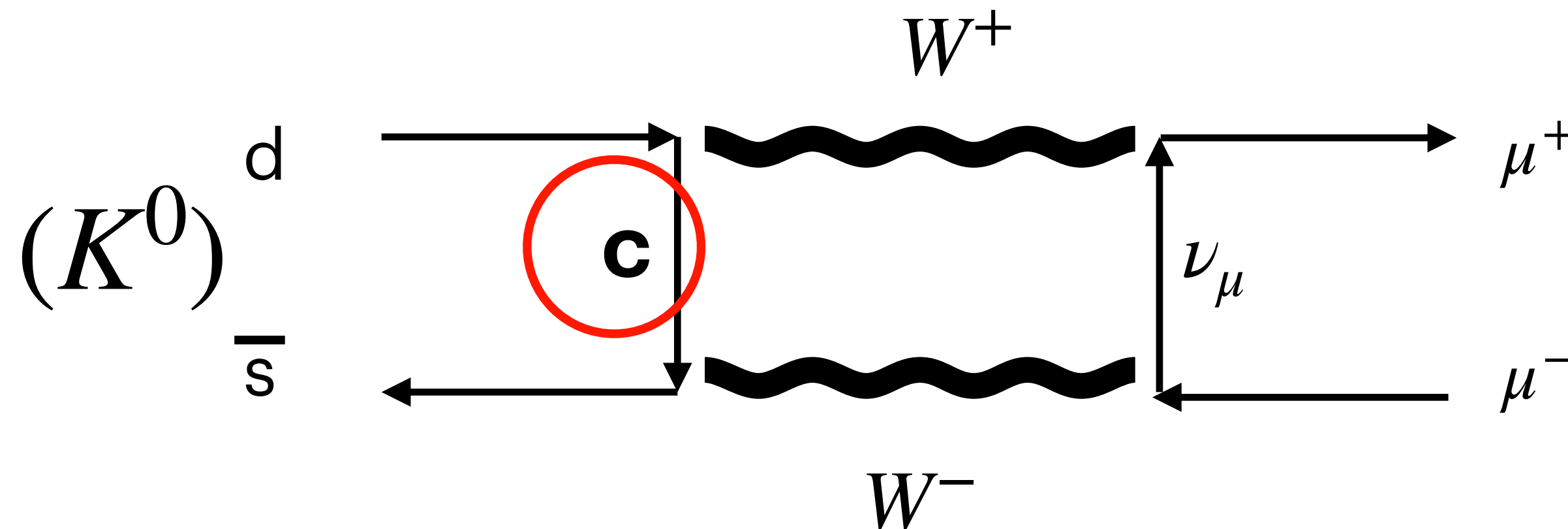


$$\Xi^0 \rightarrow \Lambda + \pi^0$$

INTRODUZIONE AL CHARM

Nel 1970 un nuovo problema sorse all'orizzonte della teoria delle particelle elementari: lo studio delle sezioni d'urto di alcuni particolari decadimenti deboli non trovava riscontro nelle misure sperimentali ormai dotate di una certa precisione di misura. Come vedrete nei corsi della magistrale, un esempio è il decadimento $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, che risultava (inspiegabilmente) soppresso rispetto al $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ di circa 8 ordini di grandezza!

Per risolvere questo problema, Glashow, Iliopoulos e Maiani introdussero un **quarto quark**, quindi un nuovo "sapore", chiamato "**charm**". Con un nuovo quark pesante i calcoli dei processi problematici trovavano una loro perfetta conferma rispetto alle misure dell'epoca



Meccanismo

GIM

LA “RIVOLUZIONE DI NOVEMBRE”

- Nel novembre del 1974 Burton Richter e Samuel Ting scoprirono “simultaneamente” una nuova risonanza con una massa di circa **3.1 GeV** ed una larghezza estremamente stretta, che in un secondo tempo fu misurata essere di **0.087 MeV**. Un valore sorprendentemente piccolo per una risonanza di 3 GeV/c² di massa!
- Il gruppo di Ting all’acceleratore a protoni AGS di Brookhaven misurava la frequenza di produzione di **coppie e^+e^-** da collisioni di protoni da 30 GeV/c su una targhetta di Berillio, scelta per minimizzare lo scattering multiplo, studiando la reazione: $p + Be \rightarrow R(e + e^-) + X$.
- Il rivelatore era stato ideato per la ricerca di risonanze con gli stessi numeri quantici del fotone, di alta massa e che decadevano in coppie (e^+e^-). La risoluzione per la massa invariante $M(e^+,e^-)$ era molto accurata, ~ 20 MeV. Entrambi gli esperimenti studiavano i processi di produzione di coppie e^+e^- o $\mu^+\mu^-$ in collisioni adroniche da un “fotone virtuale” formato dalla annichilazione di un quark di un adrone e di un anti-quark di un altro dello stato iniziale. Poiche’ gli eventi ricercati erano estremamente rari.

LA "RIVOLUZIONE DI NOVEMBRE"

$$q\bar{q} \rightarrow R(e^+e^-/\mu^+\mu^-) + X$$

$\mu^+\mu^-$

Vantaggi: sfruttando la loro penetrazione si possono separare dagli adroni su grandi angoli solidi permettendo una accettazione e quindi una frequenza di conteggio molto elevata;

Svantaggi: lo scattering multiplo nell'assorbitore.

e^+e^-

Vantaggi: identificazione con rivelatori Cerenkov e con calorimetri.

Svantaggi: piccolo angolo solido strumentato e quindi bassa frequenza

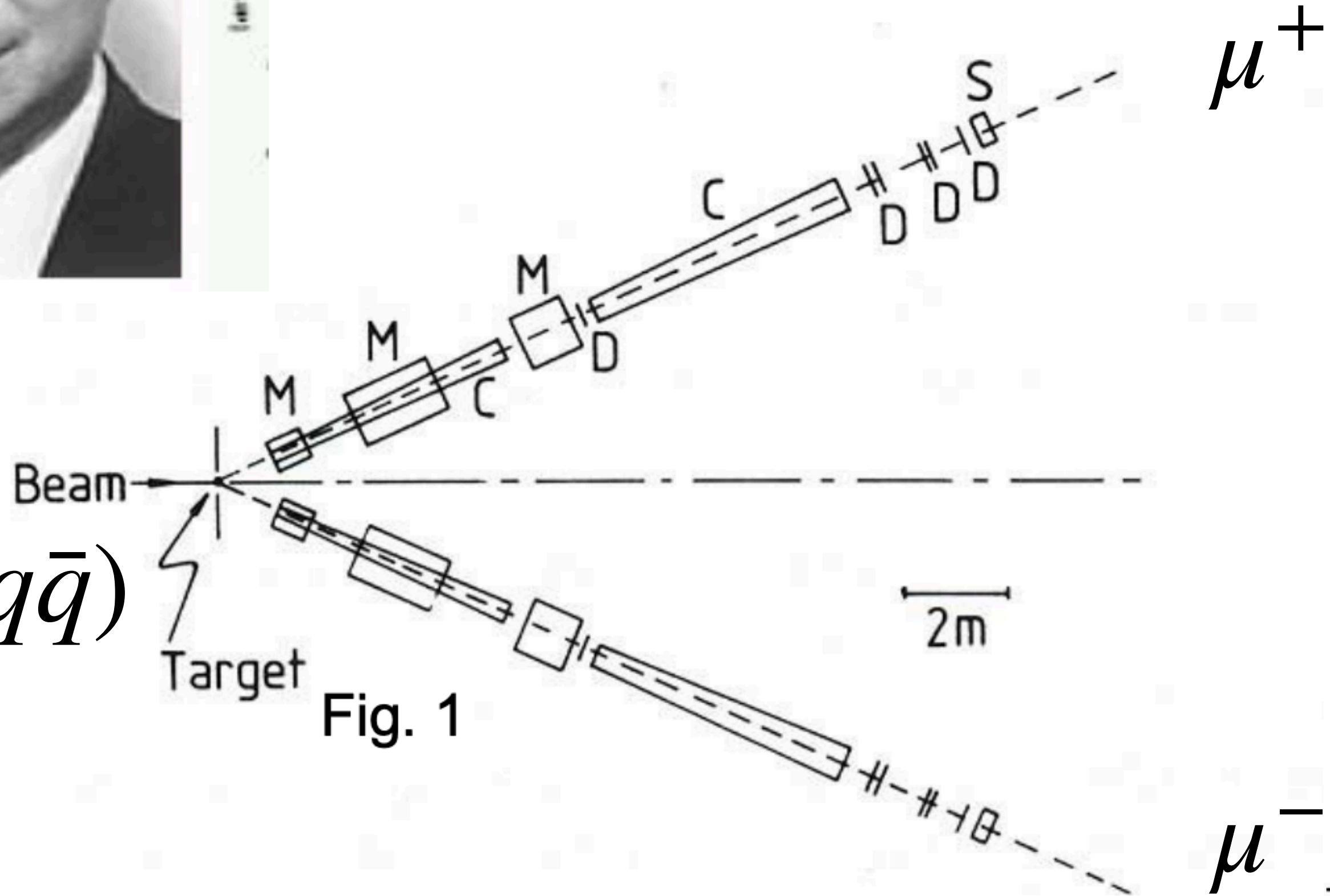
LA SCOPERTA DELLA J/ψ



S. Ting

Nobel 1976

$p + Be(q\bar{q})$



massa invariante -> picco -> risonanza -> particella

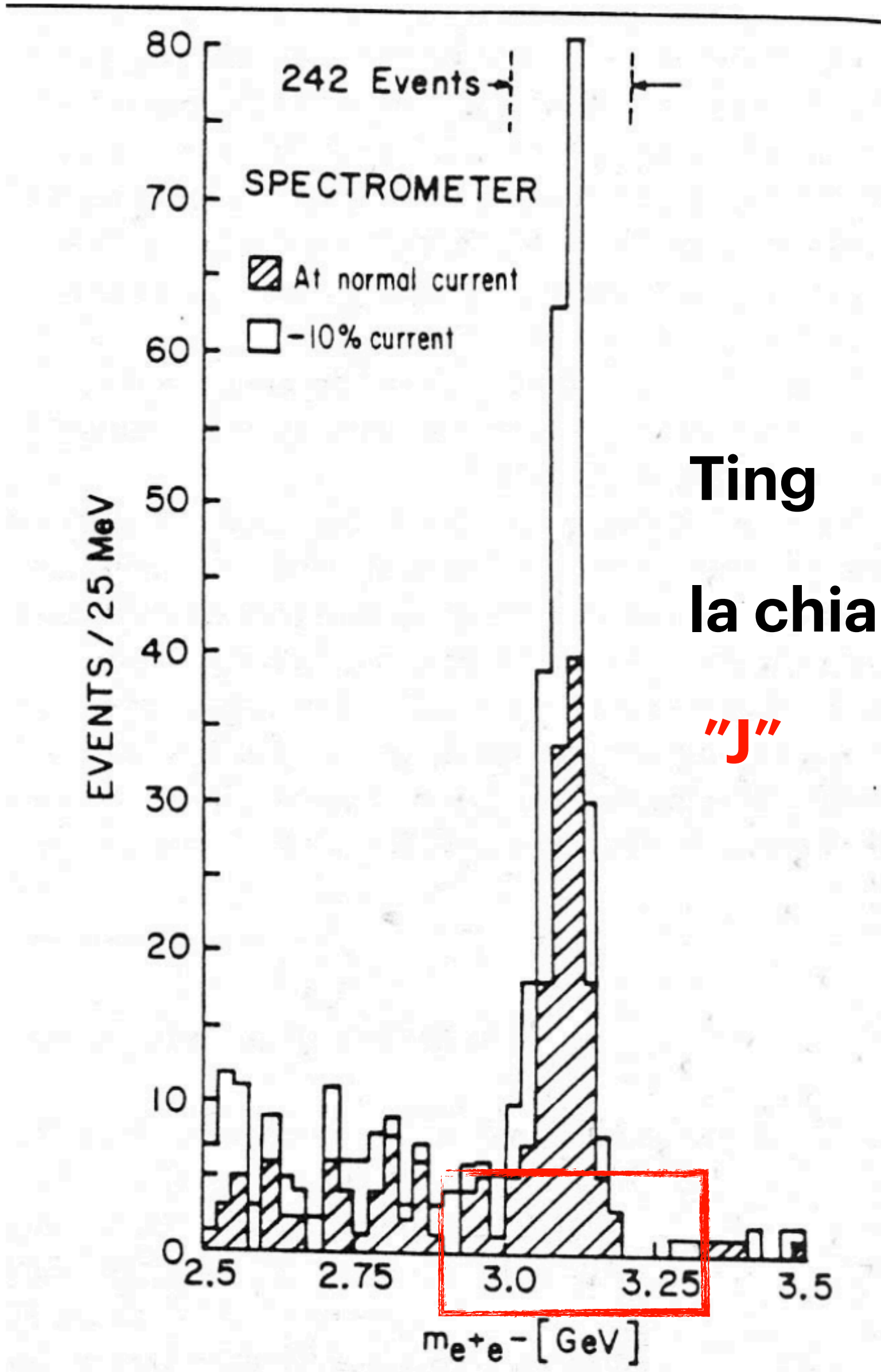
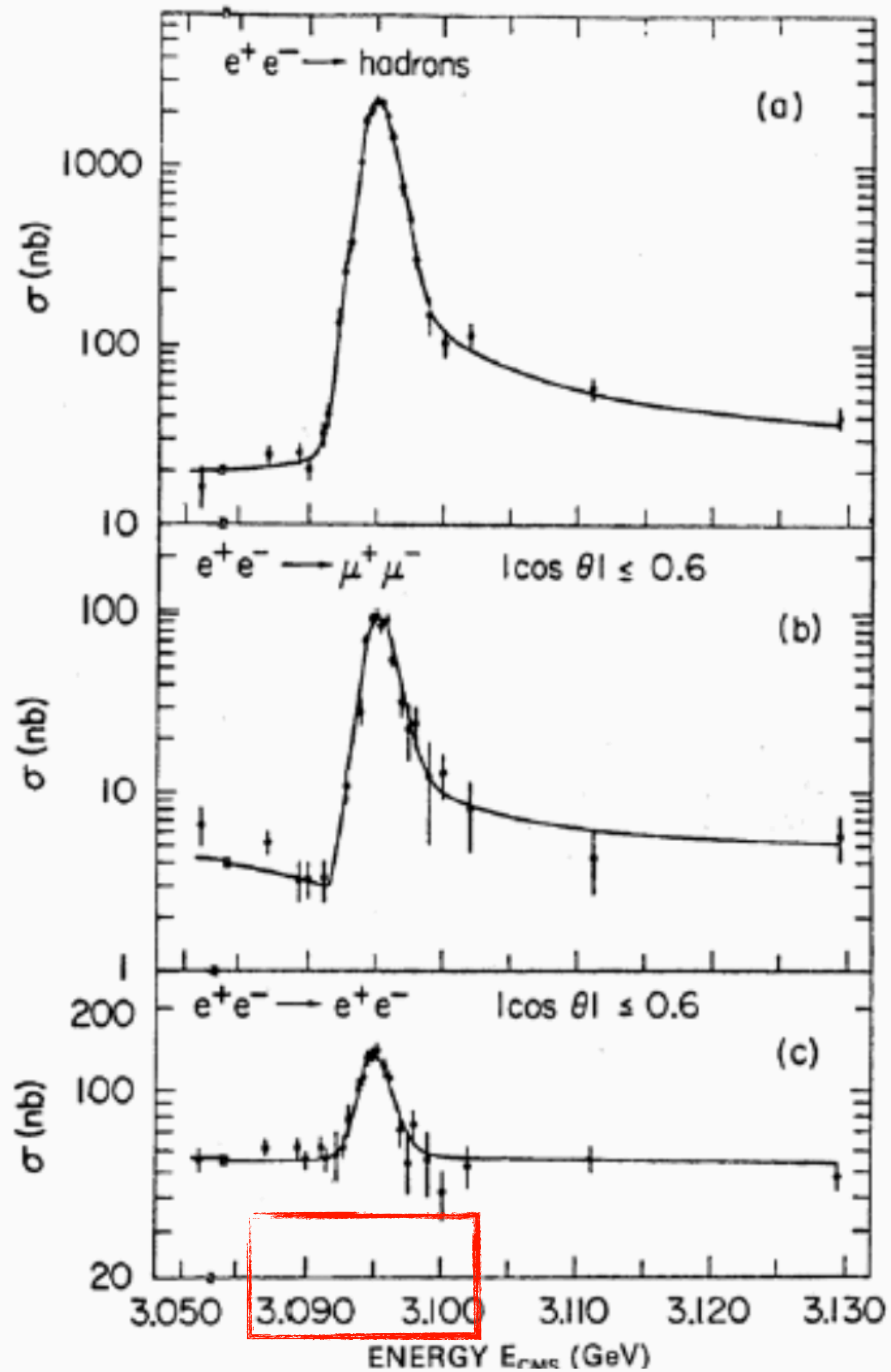


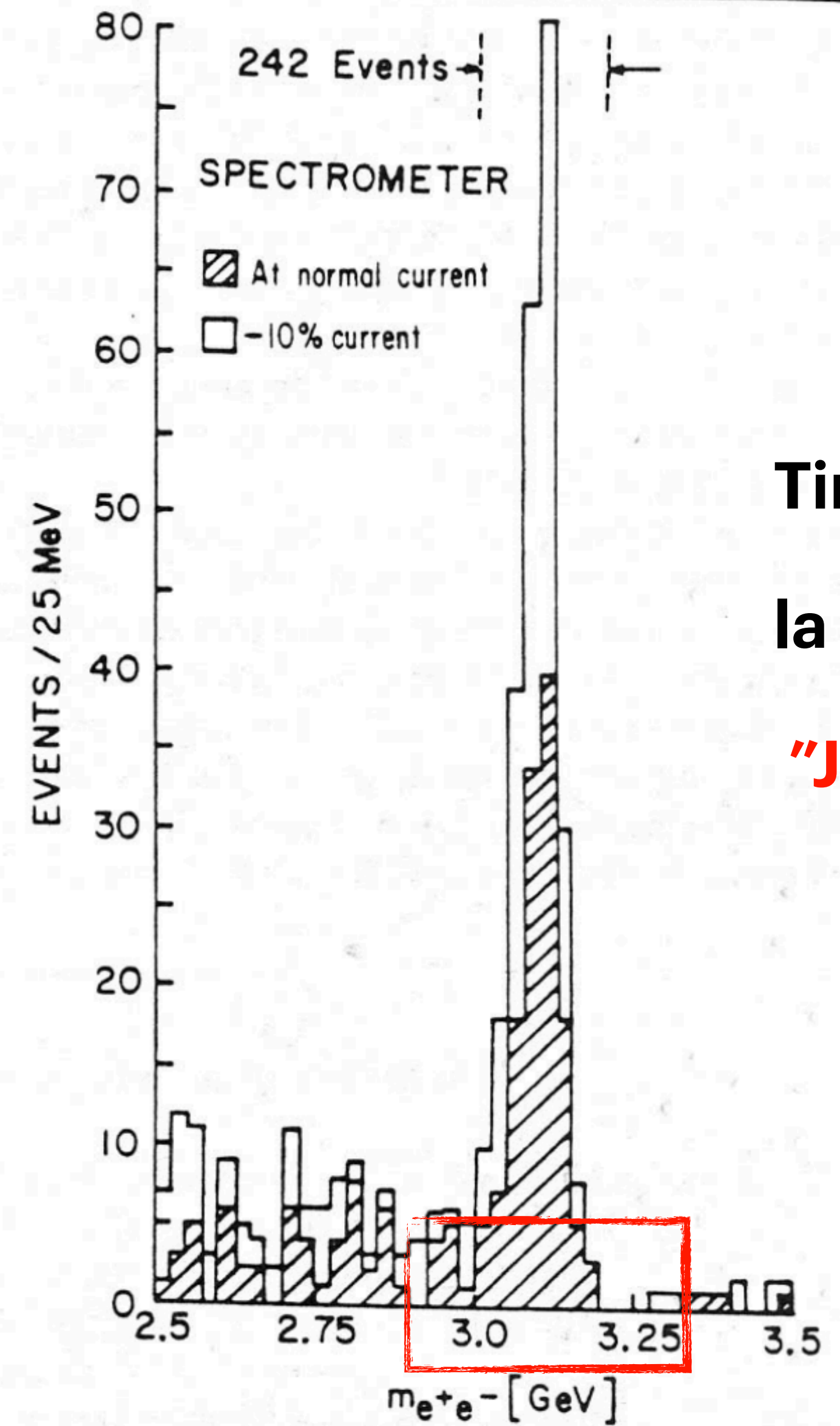
FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J . Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

7/6/2006

Richter
la chiama
"ψ"



7/6/2006

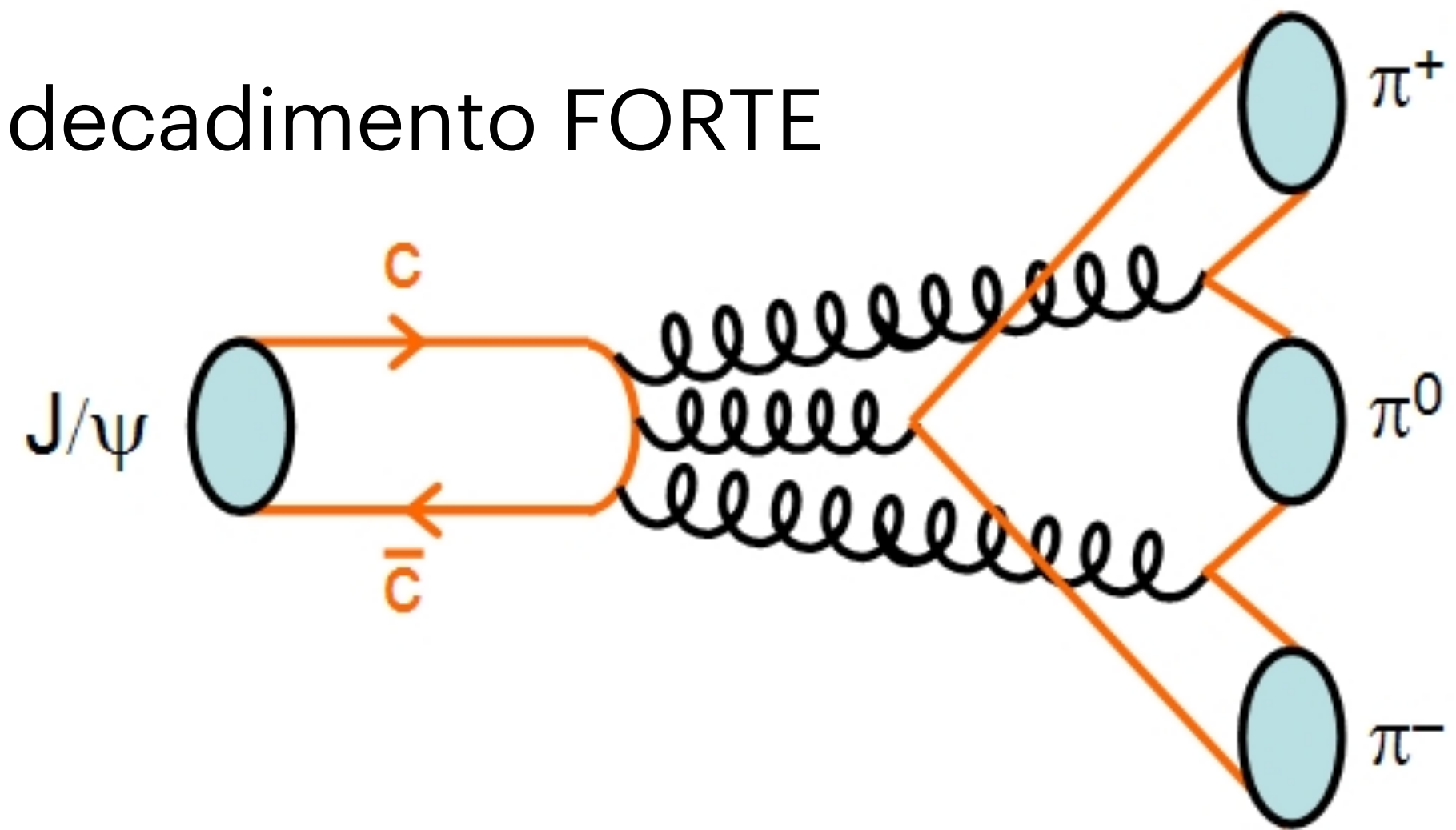


Ting
la chiama
"J"

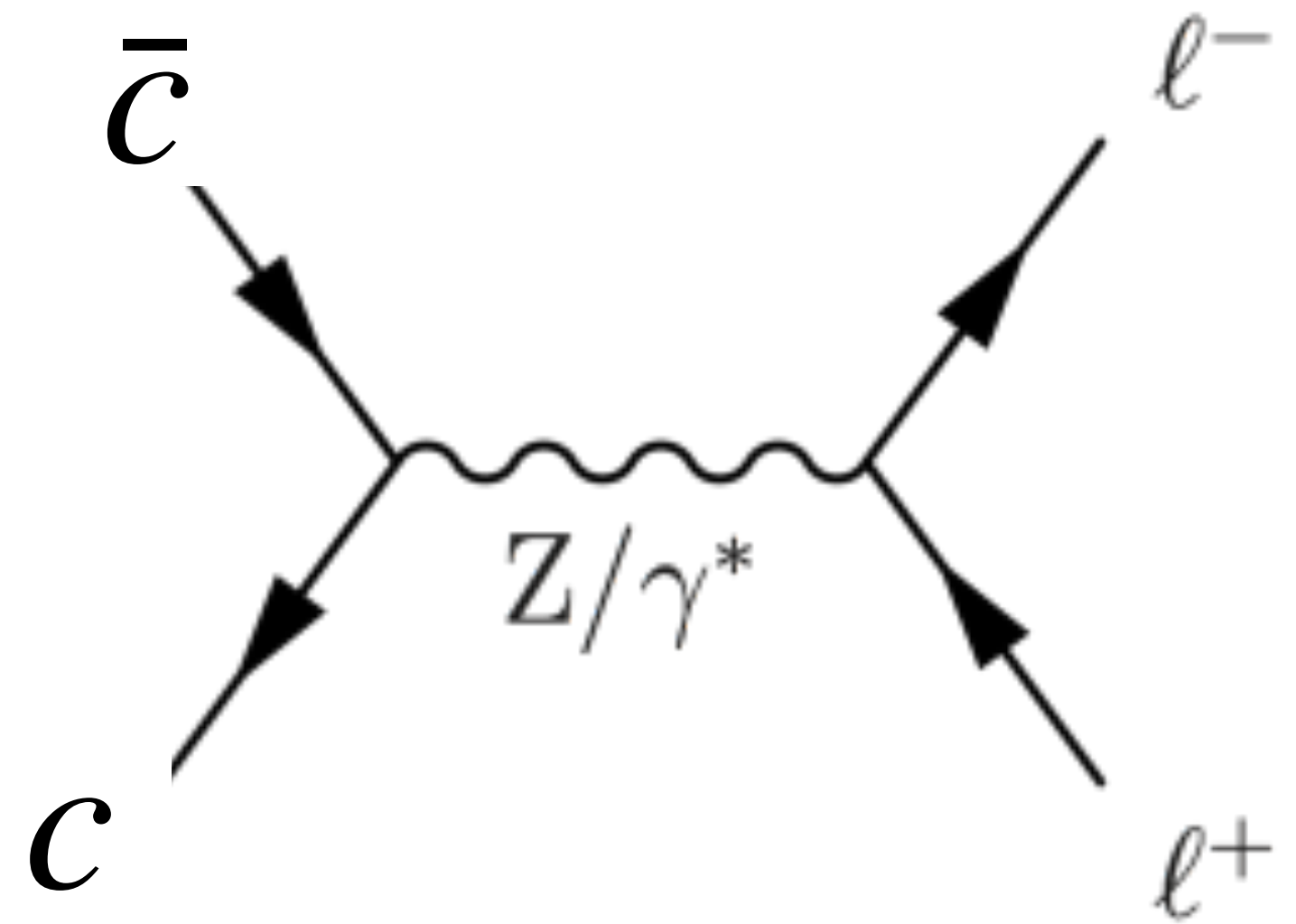
FIG. 2. Mass spectrum showing the existence of J . Results from two spectrometer settings are plotted showing that the peak is independent of spectrometer currents. The run at reduced current was taken two months later than the normal run.

ANATOMIA DELLA J/ψ

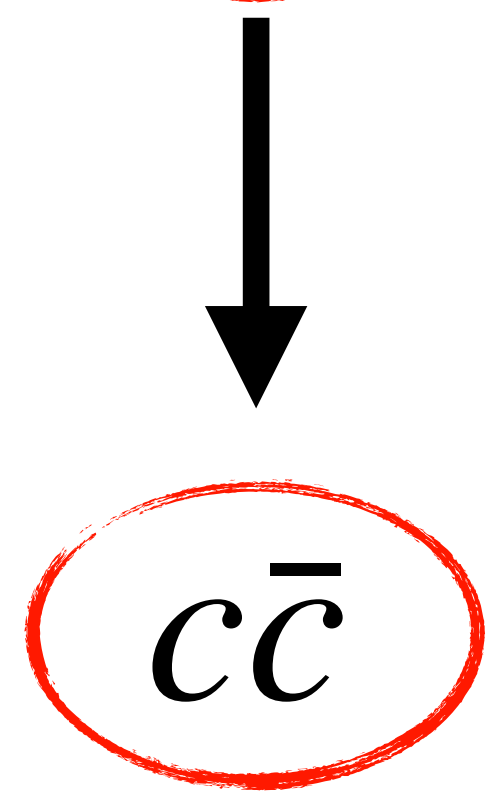
decadimento FORTE



decadimento DEBOLE



$$q\bar{q} \rightarrow J/\psi \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, q\bar{q}$$



La J/ψ è una risonanza formata da una coppia quark-antiquark con massa compatibile con il teorizzato

quarto quark: il quark charm!

$$M(J/\psi) = 3.1 GeV \quad \tau = 7.2 \times 10^{-21} s$$

$$Spin = 1 \quad Q = S = B = L = 0$$

INTRODUZIONE ALLA FISICA NUCLEARE E SUBNUCLEARE

Lezione 10 parte 2

Verso il Modello Standard

10/05/2024

VIERI CANDELISE



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

WHAT'S NEXT? FAMIGLIE ALLARGATE

charm quark

scoperto nel 1974 per risolvere alcuni decadimenti dei K da Ting mediante la risonanza J/psi (charm-anticharm)

beauty / bottom quark

scoperto da Lederman nel 1977
forma stati legati mesoni B e Upsilon

top quark

scoperto nel 1996
troppo pesante (170 GeV!) per creare stati di particelle! Decade prima di averne possibilità

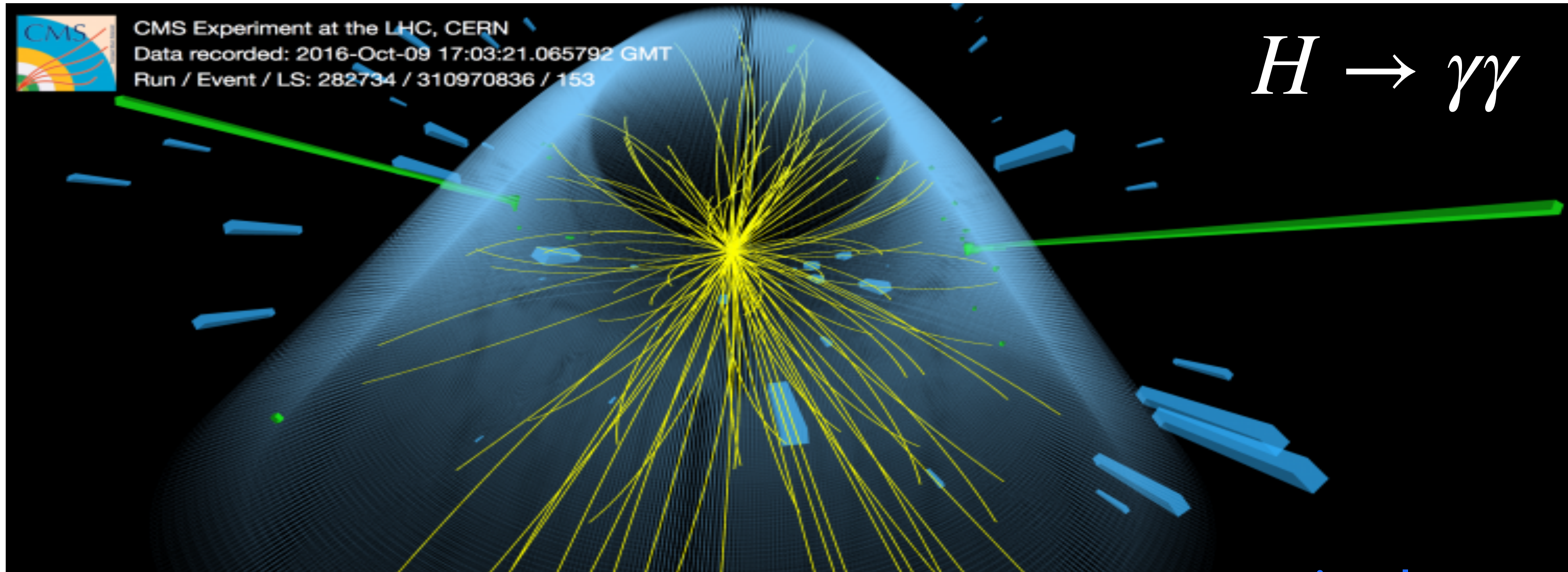
Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

WHAT'S NEXT? IL BOSONE DI HIGGS

un campo quantistico scalare che fornisce le masse a tutte le particelle



spiega la massa
nell'Universo

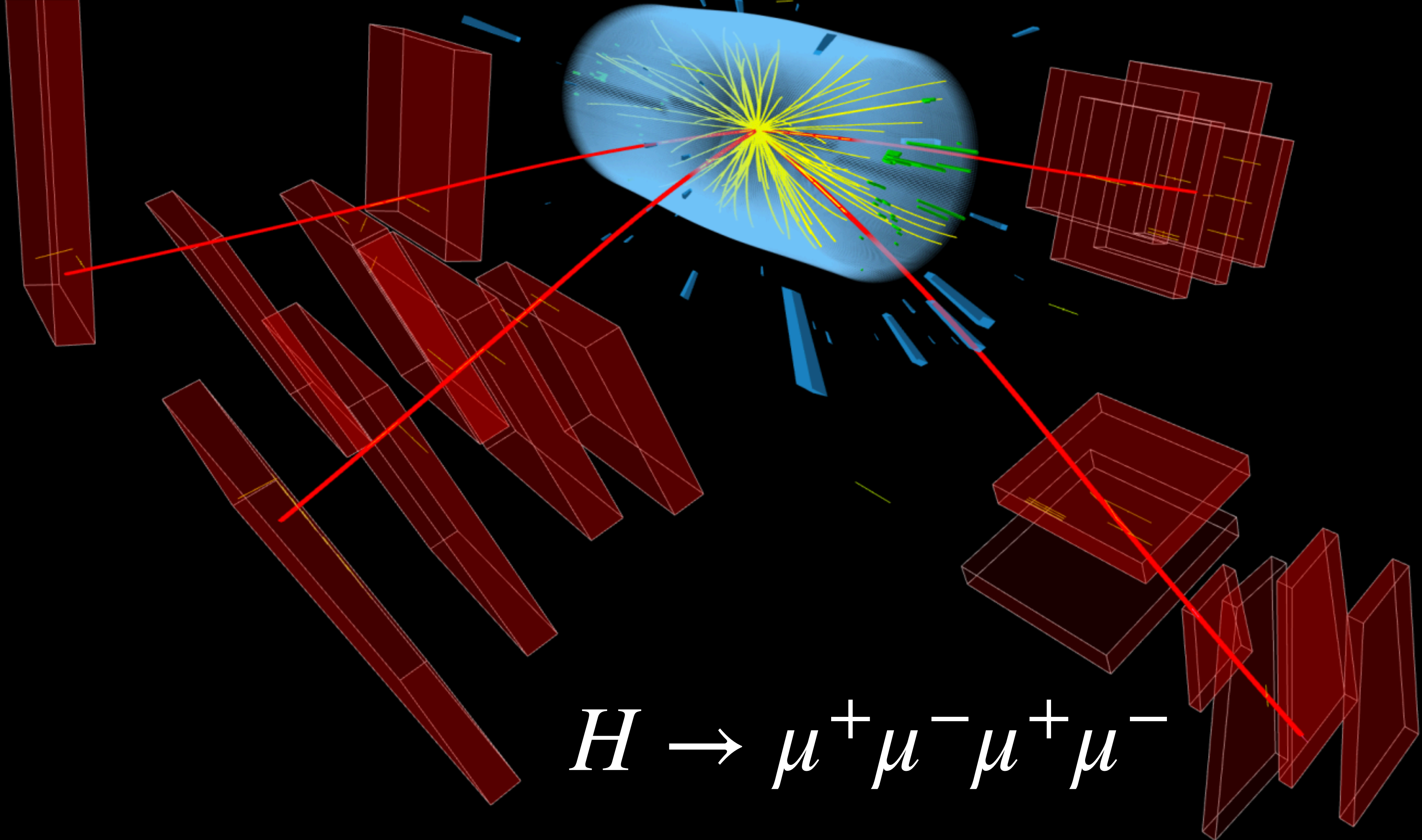
scoperto al CERN nel 2012 dagli esperimenti ATLAS e CMS



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2016-Aug-05 04:52:09.150784 GMT

Run / Event / LS: 278240 / 338025446 / 168



$$H \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

WHAT'S NEXT? SIMMETRIE ALLARGATE

SU(3) X SU(2) X U(1)

Standard Model of Elementary Particles

un gruppo di simmetria che spiega l'unificazione delle forze elettrodeboli (SU(2)) e forti (SU3))

interazione tra quark e leptoni e bosoni

		three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
		I	II	III	I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
	charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
	spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		u up	c charm	t top	\bar{u} antiup	\bar{c} anticharm	\bar{t} antitop	g gluon	H higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		d down	s strange	b bottom	\bar{d} antidown	\bar{s} antistrange	\bar{b} antibottom	γ photon	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	1	1	1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		e electron	μ muon	τ tau	e^+ positron	$\bar{\mu}$ antimuon	$\bar{\tau}$ antitau	Z Z ⁰ boson	
LEPTONS		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$
		0	0	0	0	0	0	1	-1
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	$\bar{\nu}_e$ electron antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino	W^+ W ⁺ boson	W^- W ⁻ boson

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS

WHAT'S NEXT? LA LAGRANGIANA DEL MODELLO STANDARD

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

WHAT'S NEXT? LA LAGRANGIANA DEL MODELLO STANDARD

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \bar{\chi}_i Y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

campo
elettromagnetico

WHAT'S NEXT? LA LAGRANGIANA DEL MODELLO STANDARD

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

fermioni
(eq. Dirac)

WHAT'S NEXT? LA LAGRANGIANA DEL MODELLO STANDARD

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

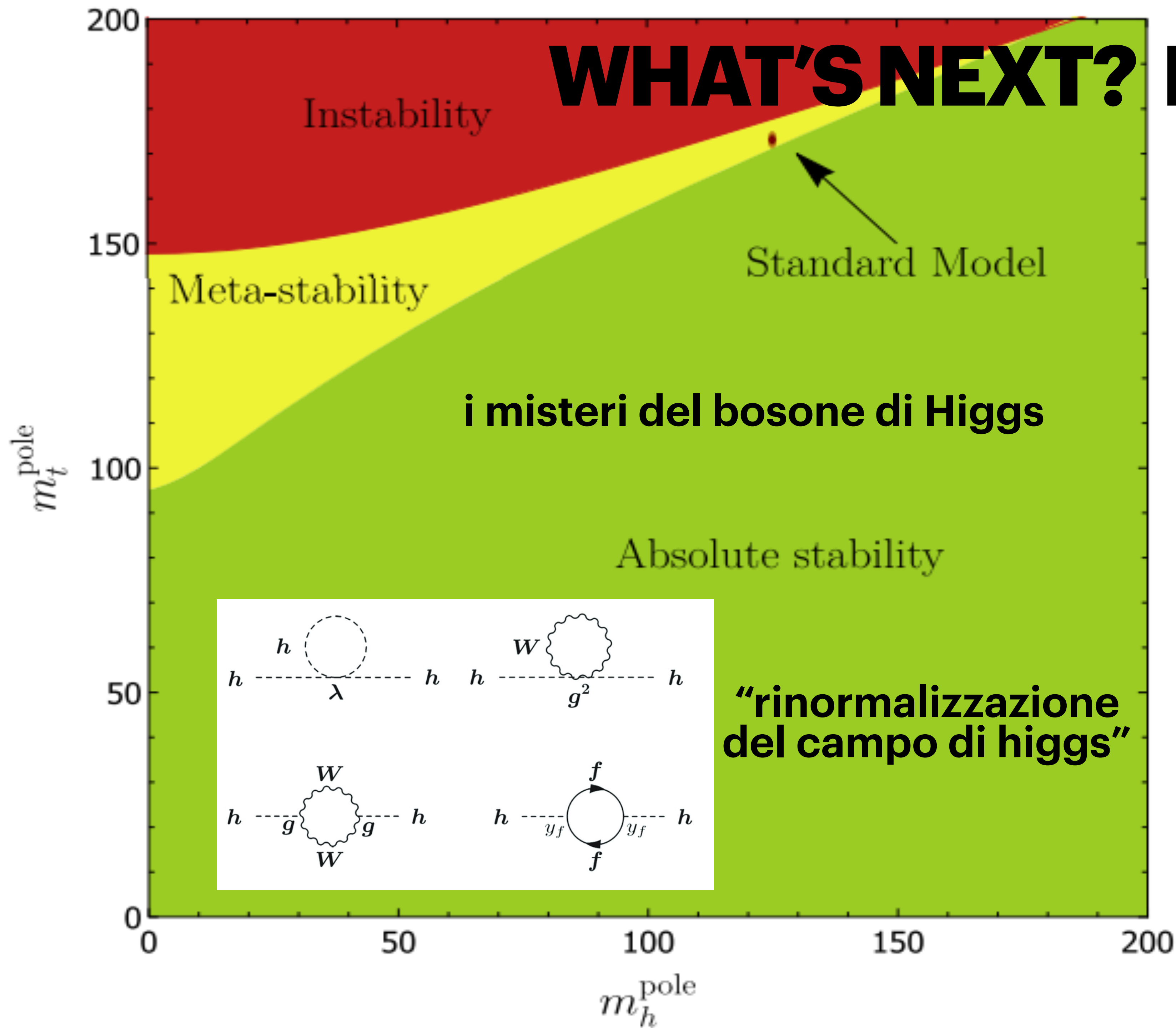
QCD
(quark e
gluoni)

WHAT'S NEXT? LA LAGRANGIANA DEL MODELLO STANDARD

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

massa
meccanismo
di Higgs

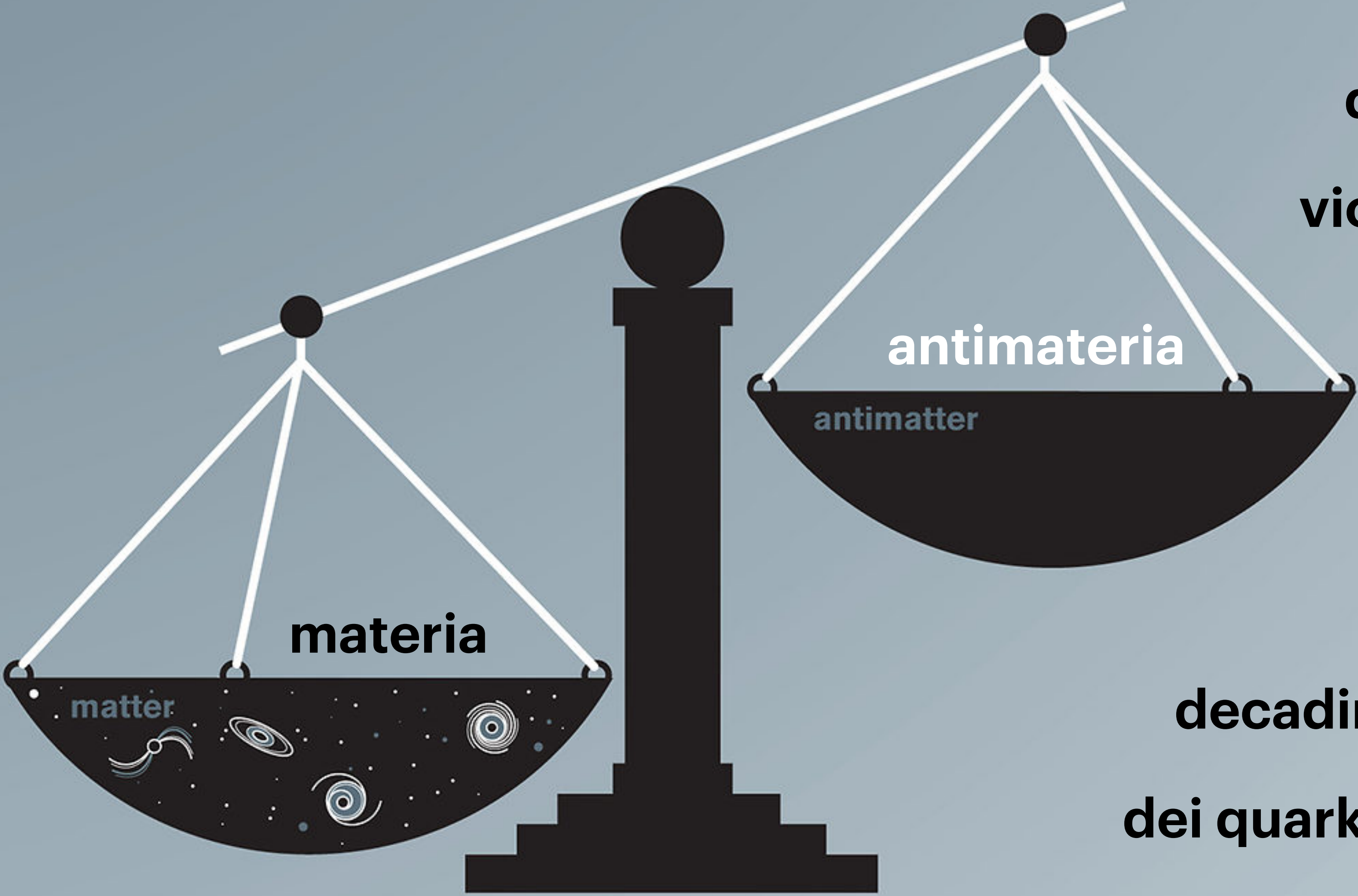
WHAT'S NEXT? BEYOND SM



misure di precisione delle caratteristiche delle particelle ci danno informazioni sull'Universo e su come si siano generate le interazioni fondamentali dopo il big bang

teoria + esperimenti ATLAS/CMS al CERN

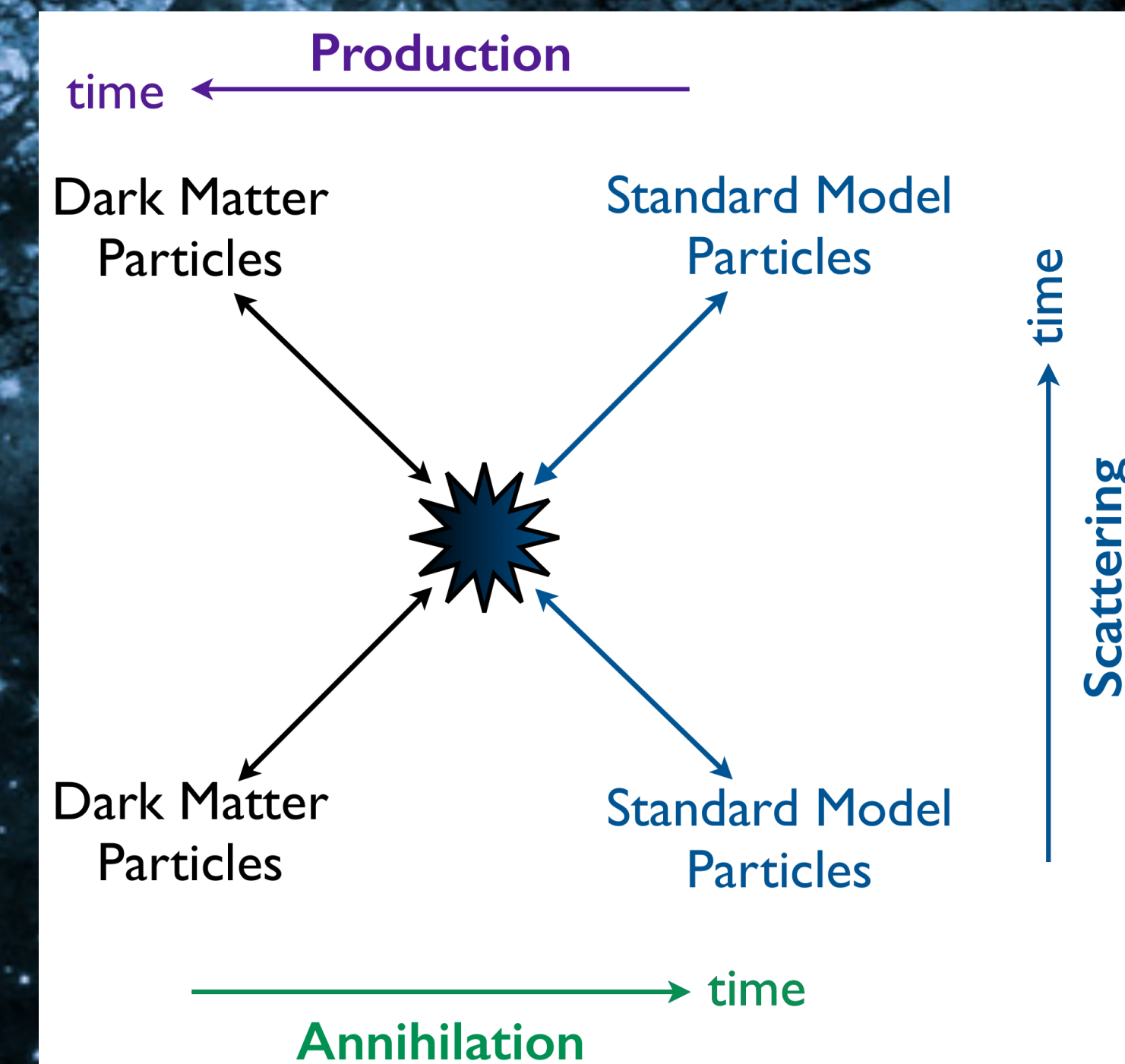
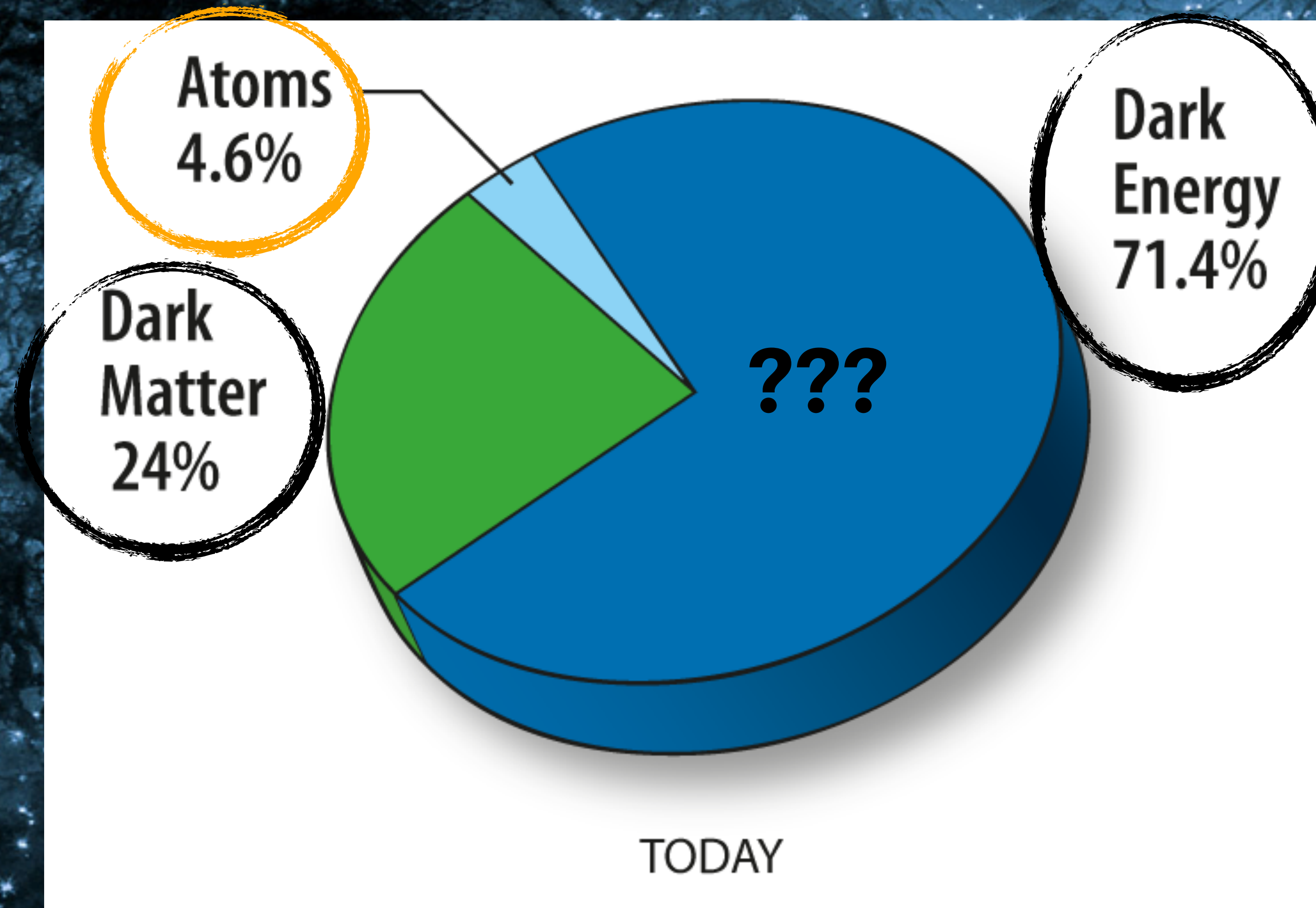
WHAT'S NEXT? BEYOND SM



dove nasce la
violazione di CP?

decadimenti deboli
dei quark pesanti s, b, c
esperimenti LHCb, Belle2

WHAT'S NEXT? BEYOND SM



ricerche dirette (produzione di DM ai collider) e indirette (esperimenti underground e astroparticelle)

THE END



...?