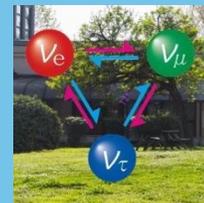


PROVIAMO A SPIEGARE CIÒ CHE NON CAPIAMO?

Mirko Rettaroli

Roma Tre Neutrino Theory Group

ν – day 12 Maggio 2025



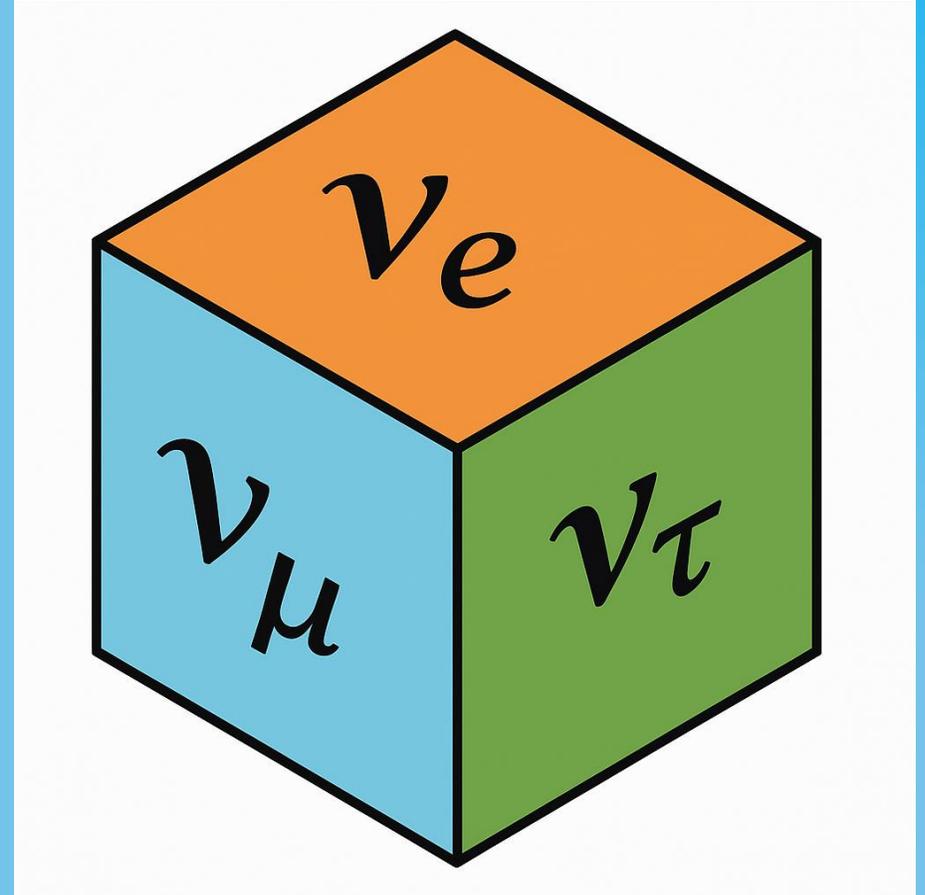
INDICE

1 NUOVE SIMMETRIE

2 NEUTRINO, CHI SEI DAVVERO?

3 QUANTI NEUTRINI ESISTONO?

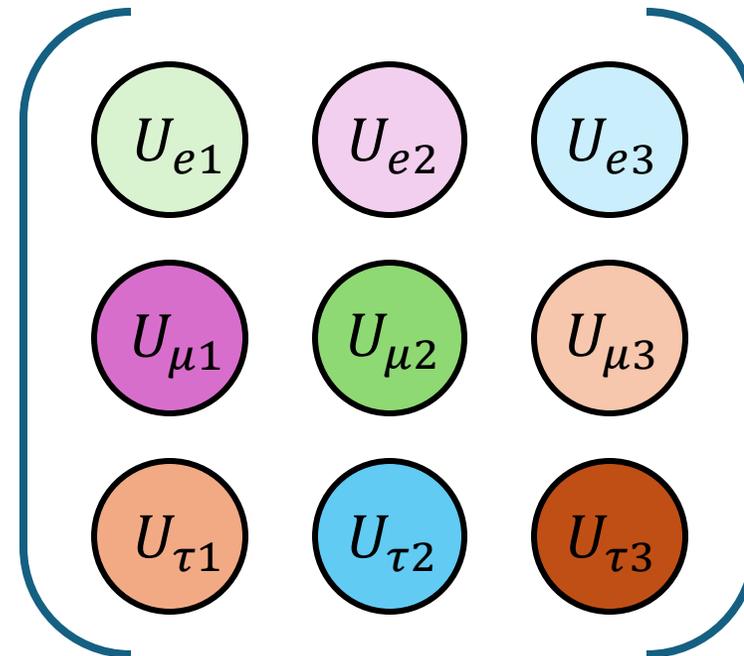
1 NUOVE SIMMETRIE



**DATI SULLE
OSCILLAZIONI**

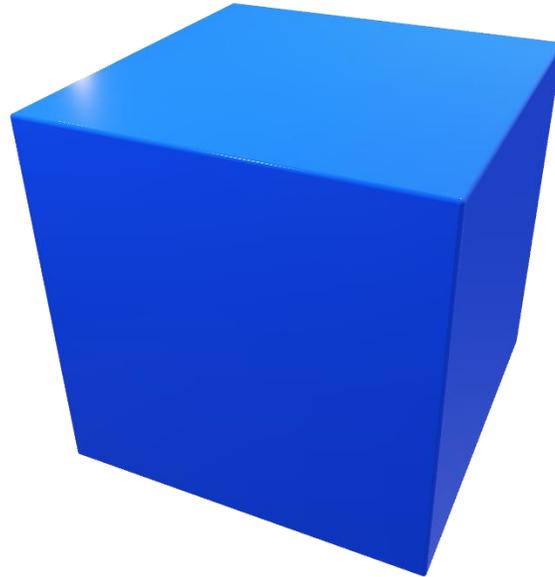


MATRICE PMNS:



SIMMETRIE

CUBO:



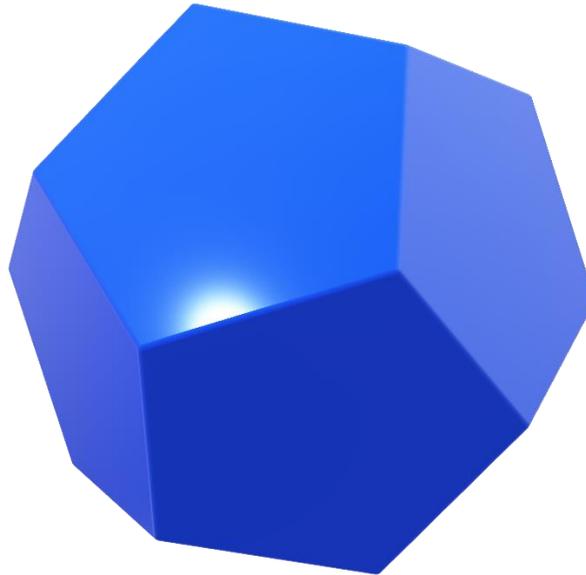
Ognuna delle 6 facce è equivalente all'altra.

Trasformazioni finite da una
configurazione all'altra



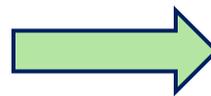
SIMMETRIA DISCRETA

DODECAEDRO:



Ognuna delle 12 facce è equivalente all'altra.

Trasformazioni finite da una
configurazione all'altra



SIMMETRIA DISCRETA

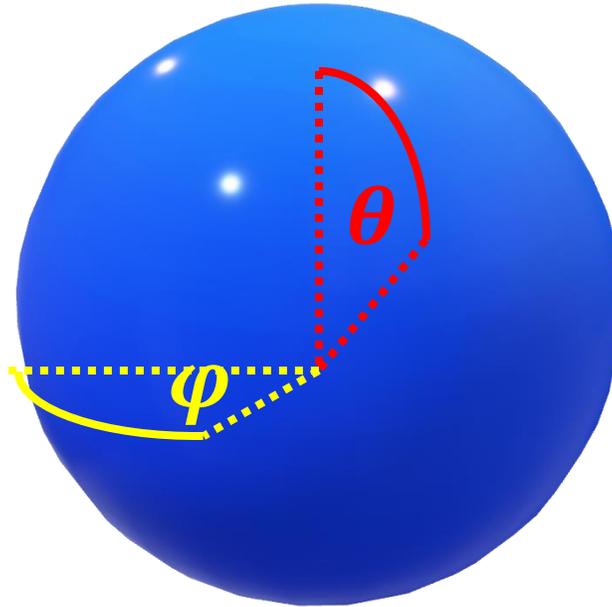
SFERA:



Ogni orientazione è equivalente.

1 NUOVE SIMMETRIE

SFERA:



Trasformazioni dipendenti
da parametri continui (θ, φ)



SIMMETRIA CONTINUA

IN GENERALE:

Dato un sistema fisico, si ha una **simmetria** se quel sistema è invariante sotto un certo gruppo di **trasformazioni**.

TRASFORMAZIONI**DISCRETE**

(es.: riflessione, rotazione di un poliedro regolare)

**SIMMETRIE DISCRETE****TRASFORMAZIONI****CONTINUE**

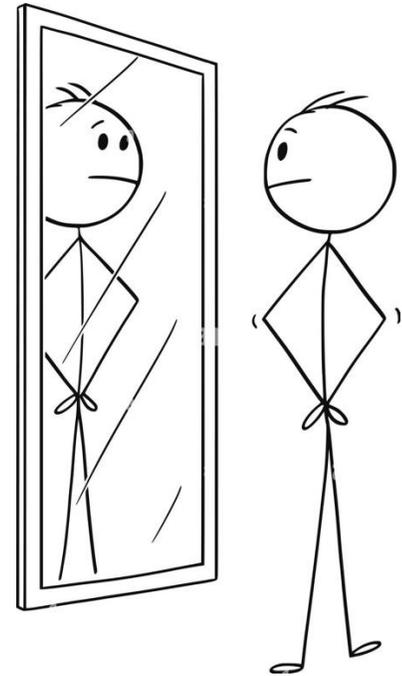
(es.: rotazione di un cerchio o di una sfera)

**SIMMETRIE CONTINUE**

Dove la vedo questa simmetria?

La simmetria di un sistema fisico si riflette sulla simmetria della corrispondente **LAGRANGIANA**.

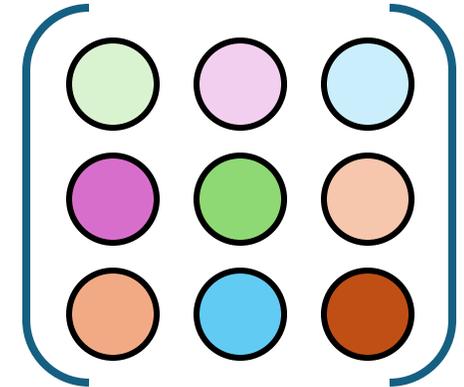
In generale, la Lagrangiana è invariante sotto certi **GRUPPI DI SIMMETRIA**.



Per esempio, secondo la teoria del Modello Standard (SM), la Lagrangiana è invariante rispetto a certi gruppi di simmetria ben definiti.

SIMMETRIE E NUOVA FISICA

Per cercare di giustificare la struttura della matrice PMNS, si ipotizza che Lagrangiana sia invariante sotto:



**GRUPPI DI SIMMETRIA DEL
MODELLO STANDARD**

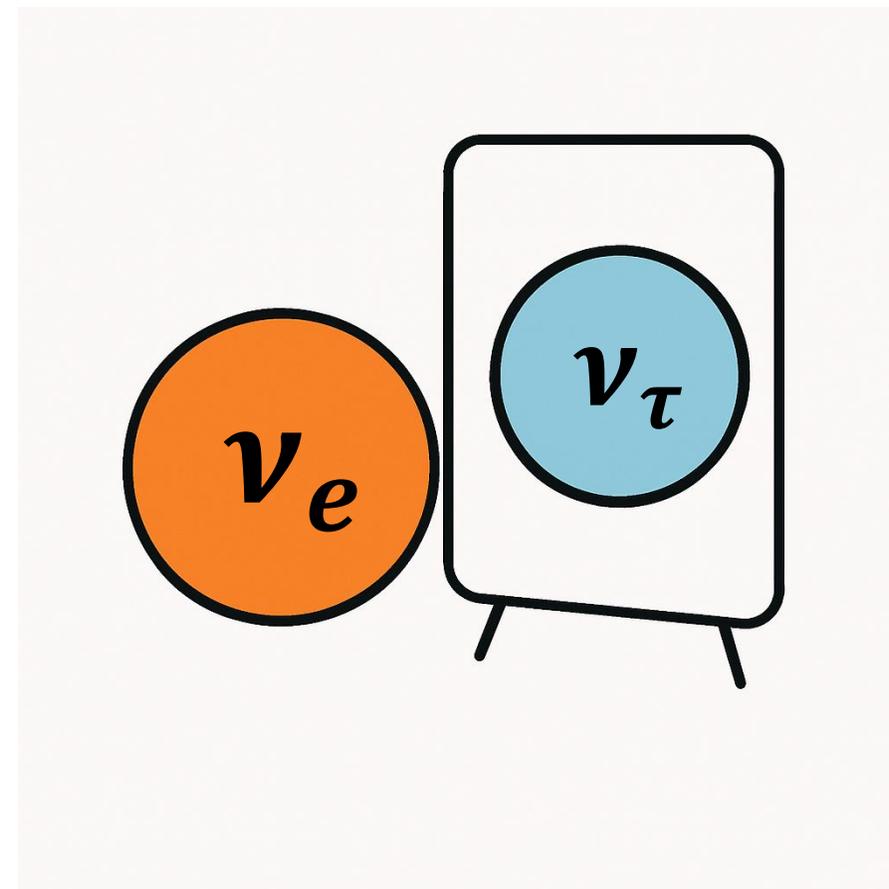


**GRUPPI DI SIMMETRIA
DI SAPORE**

SIMMETRIE DI SAPORE

Le simmetrie di sapore mettono
in relazione i 3 sapori:

ELETTRONICO, **MUONICO** e **TAUONICO**



Alcuni esempi:

SIMMETRIE DI SAPORE
DISCRETE



$A_4, S_4, A_5, \Delta(n), \dots$

SIMMETRIE DI SAPORE
CONTINUE



$U(1), U(2), \text{modulari}, \dots$

2

NEUTRINO, CHI SEI DAVVERO?



DIRAC O MAJORANA?

FERMIONI NEUTRI MASSIVI

DI DIRAC

$$\psi \neq \bar{\psi}$$

DI MAJORANA

$$\psi = \bar{\psi}$$

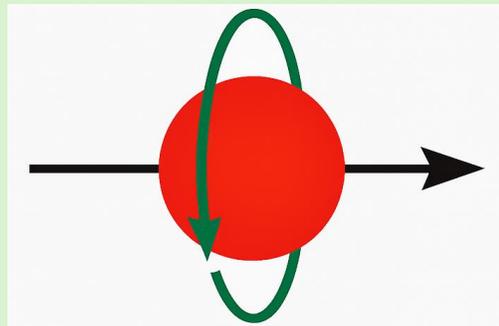
(PARTICELLA = ANTIPARTICELLA)

I neutrini sono gli UNICI fermioni neutri del Modello Standard

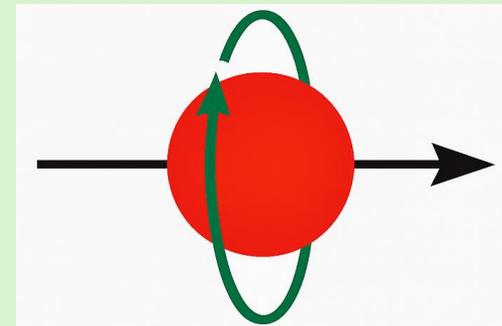
CHIRALITÀ

Distingue gli oggetti fisici in: $\left\{ \begin{array}{l} \text{DESTROSI (RH)} \\ \text{SINISTROSI (LH)} \end{array} \right.$

Per particelle di spin $\frac{1}{2}$ con massa $m = 0$:



RH

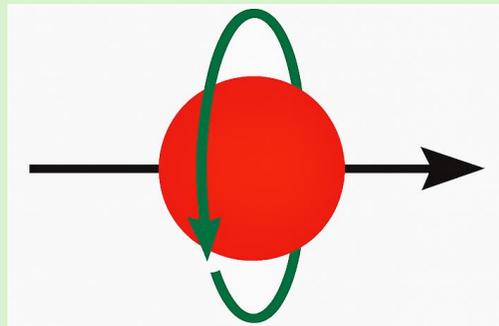


LH

CHIRALITÀ

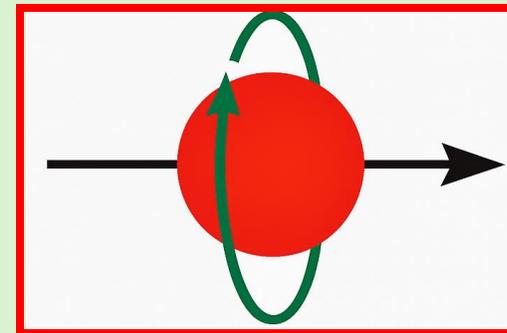
Distingue gli oggetti fisici in: $\left\{ \begin{array}{l} \text{DESTROSI (RH)} \\ \text{SINISTROSI (LH)} \end{array} \right.$

Per particelle di spin $\frac{1}{2}$ con massa $m = 0$:



RH

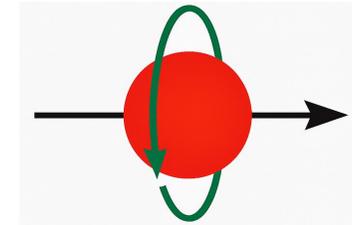
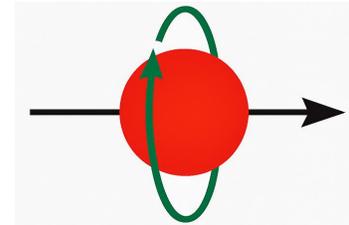
Int. debole



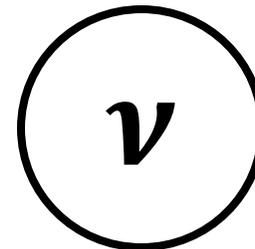
LH

NEUTRINI DI DIRAC

- Esistono sia ν_L che ν_R

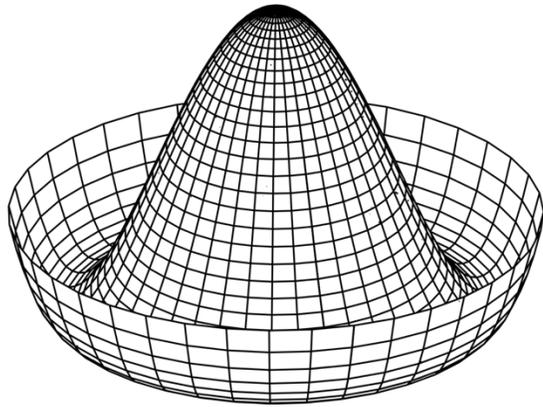


- $\nu \neq \bar{\nu}$



2 NEUTRINO, CHI SEI DAVVERO?

I neutrini di Dirac prendono massa allo stesso modo delle altre particelle:



Campo di Higgs

PRO:

Meccanismo universale

$$\mathcal{L}_m = -m_D(\bar{\nu}_L \nu_R + \bar{\nu}_R \nu_L)$$



NEUTRINO RH

CONTRO:

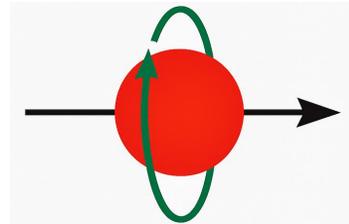
Massa troppo piccola

NEUTRINI DI MAJORANA

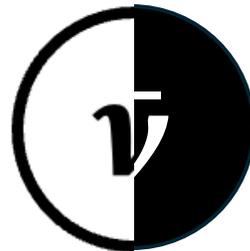
Sono stati ipotizzati da Ettore Majorana nel 1937.



- Esistono solo ν_L



- $\nu = \bar{\nu}$



COME PRENDONO MASSA? IL MECCANISMO SEESAW

Devo introdurre, **per ogni ν massivo**, un neutrino RH molto pesante chiamato N

$$m_\nu = - \frac{m_D m_D^T}{M}$$

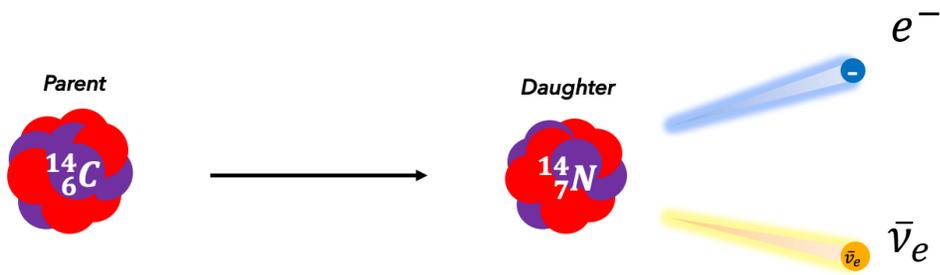
N



COME CI AIUTANO GLI ESPERIMENTI?

DECADIMENTO $0\nu\beta\beta$

- DECADIMENTO β :

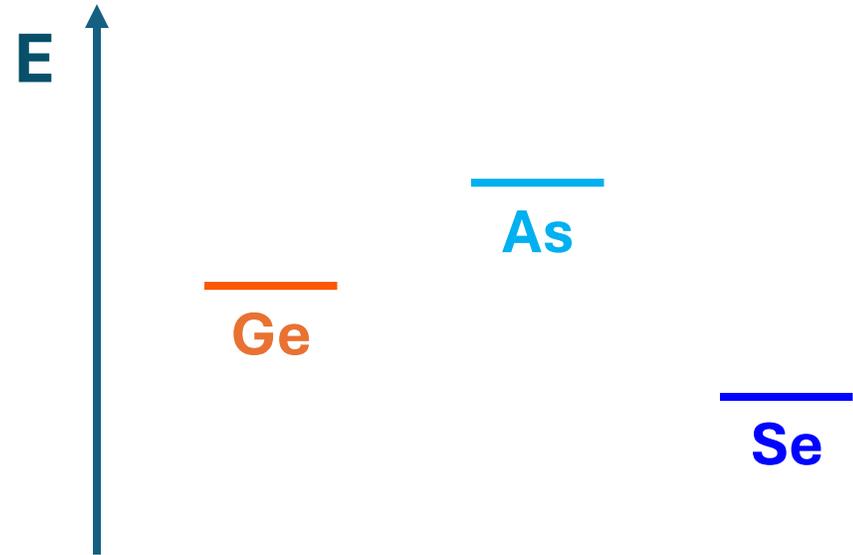
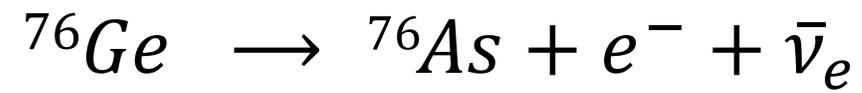


$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

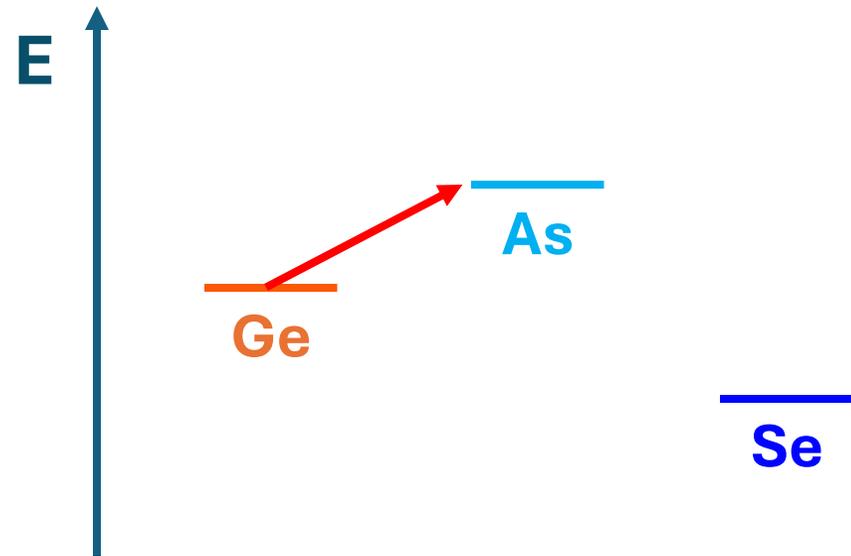
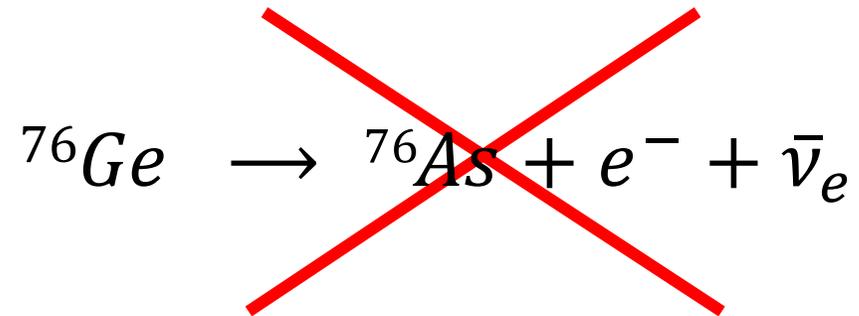


$$(A, Z) \longrightarrow (A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_e$$

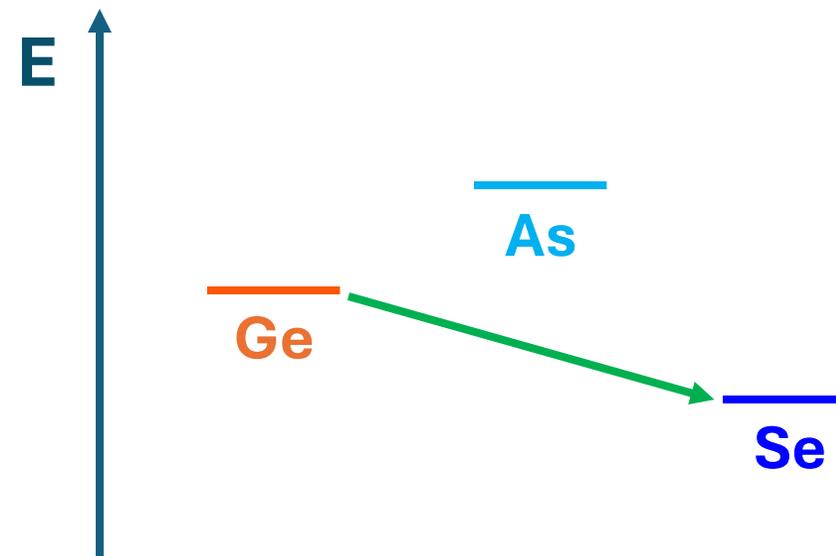
2 NEUTRINO, CHI SEI DAVVERO? – DECADIMENTO $0\nu\beta\beta$



2 NEUTRINO, CHI SEI DAVVERO? – DECADIMENTO $0\nu\beta\beta$

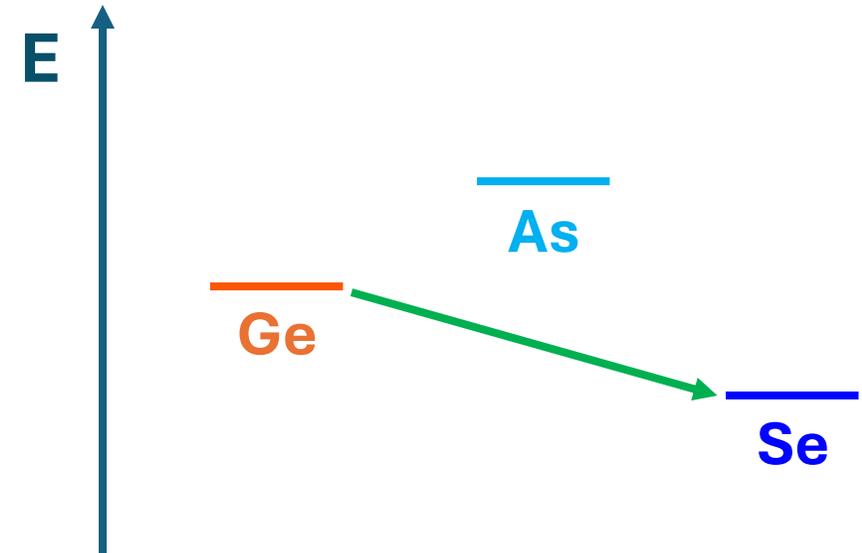
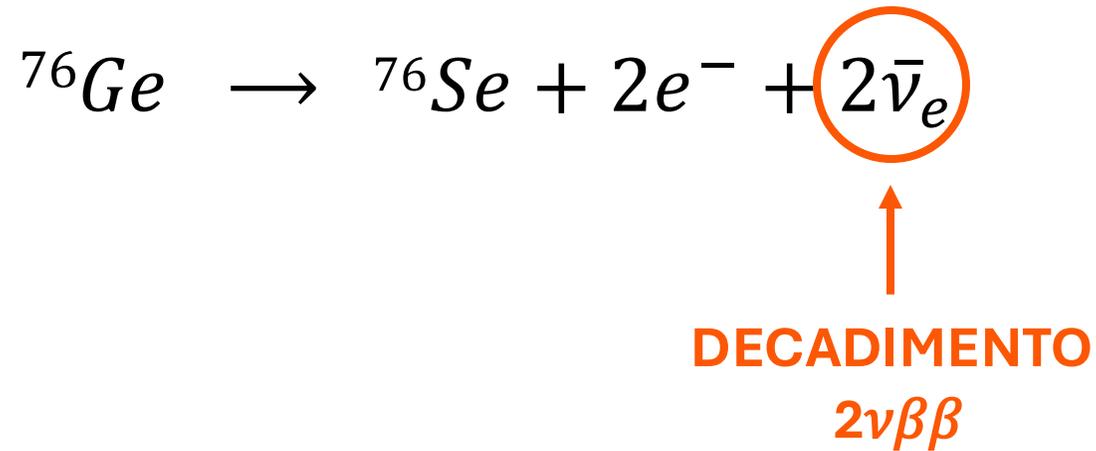


- DECADIMENTO $\beta\beta$:



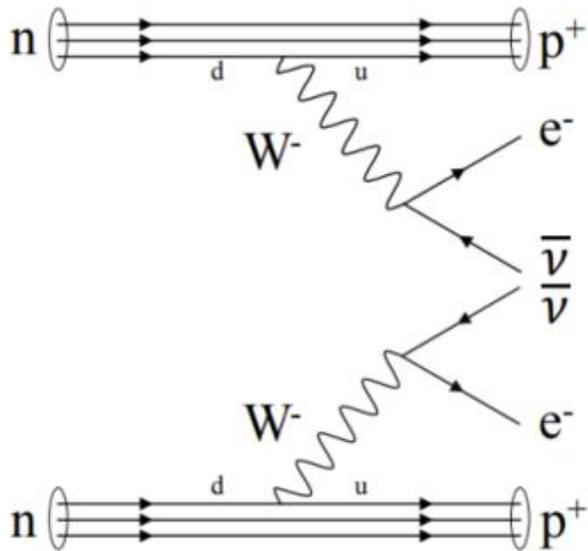
2 NEUTRINO, CHI SEI DAVVERO? – DECADIMENTO $0\nu\beta\beta$

- DECADIMENTO $\beta\beta$:

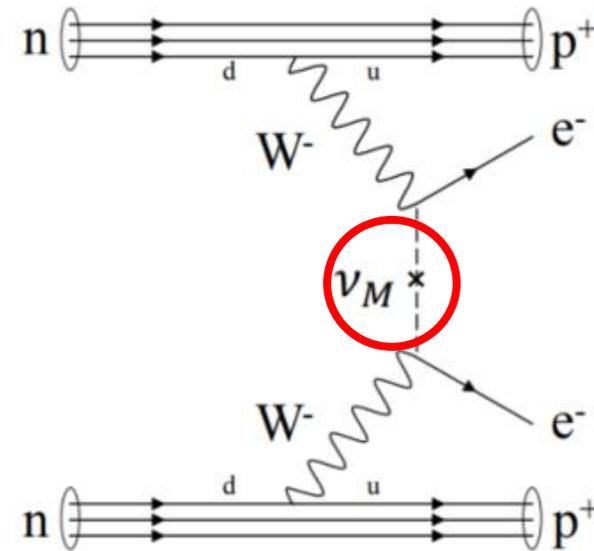


2 NEUTRINO, CHI SEI DAVVERO? – DECADIMENTO $0\nu\beta\beta$

$2\nu\beta\beta$

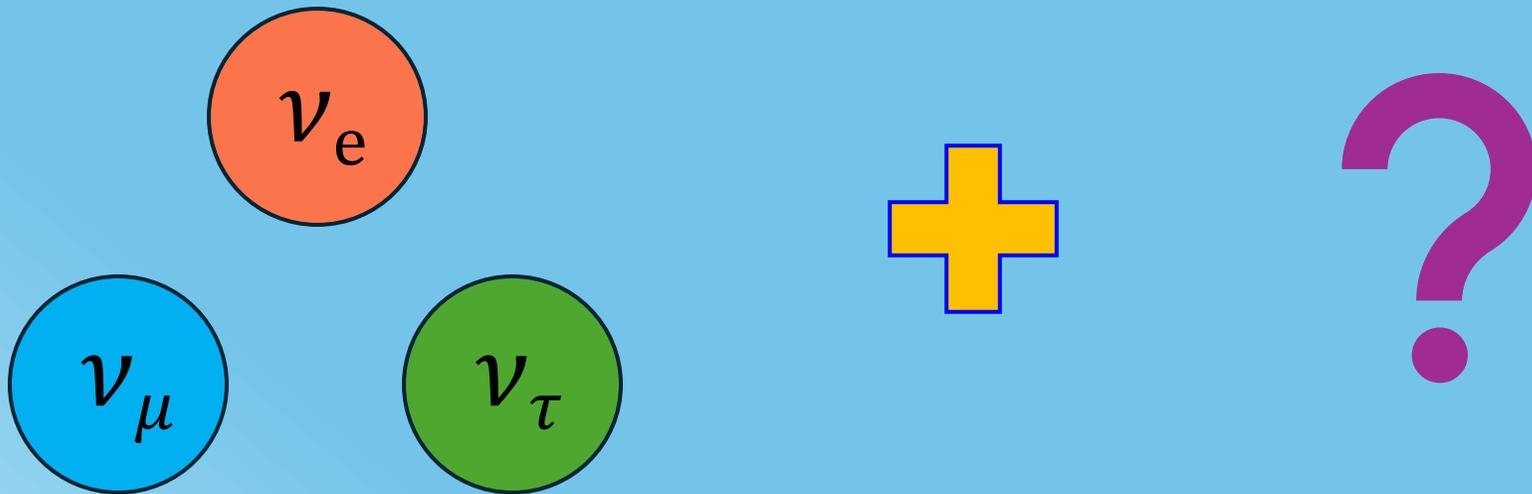


$0\nu\beta\beta$

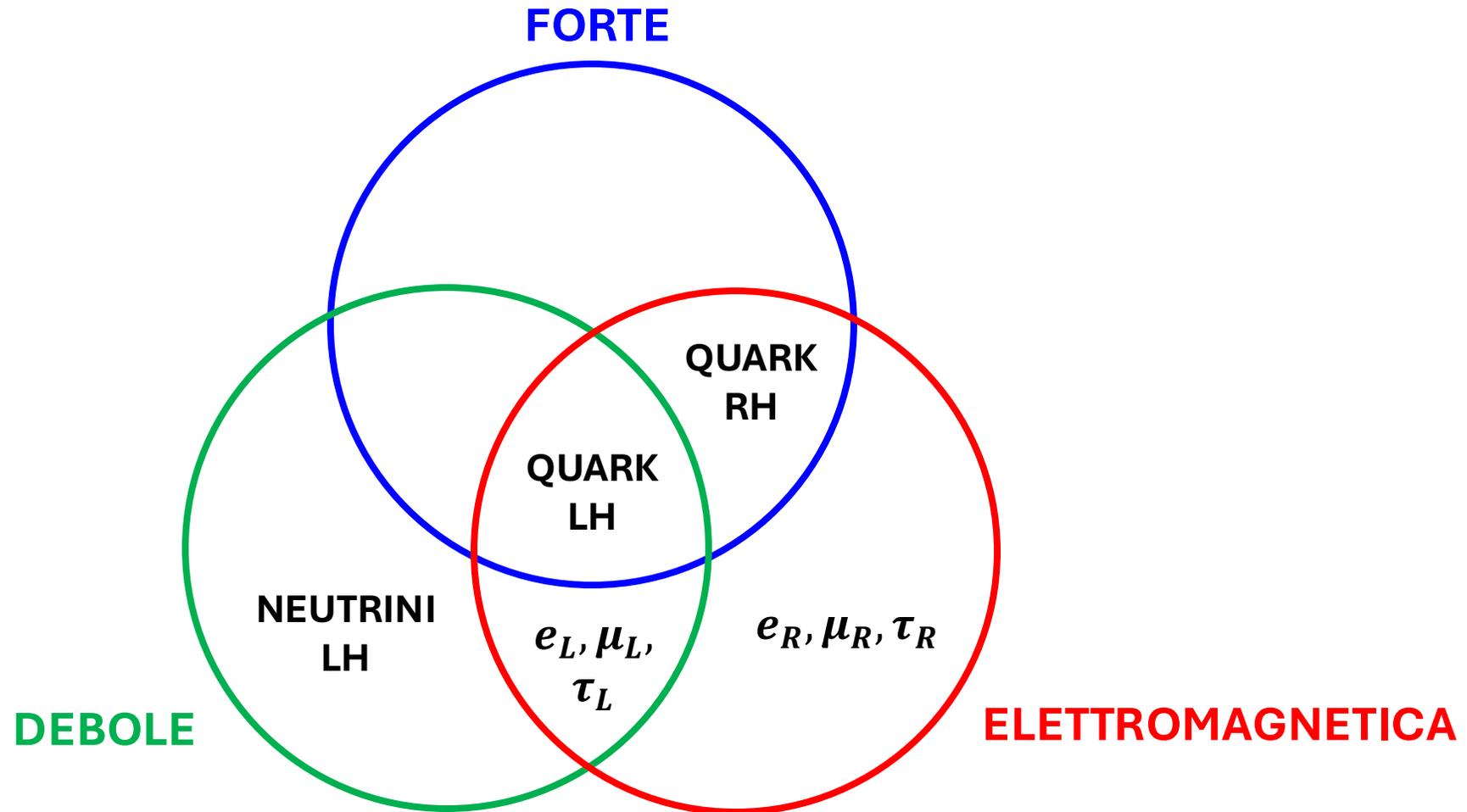


3

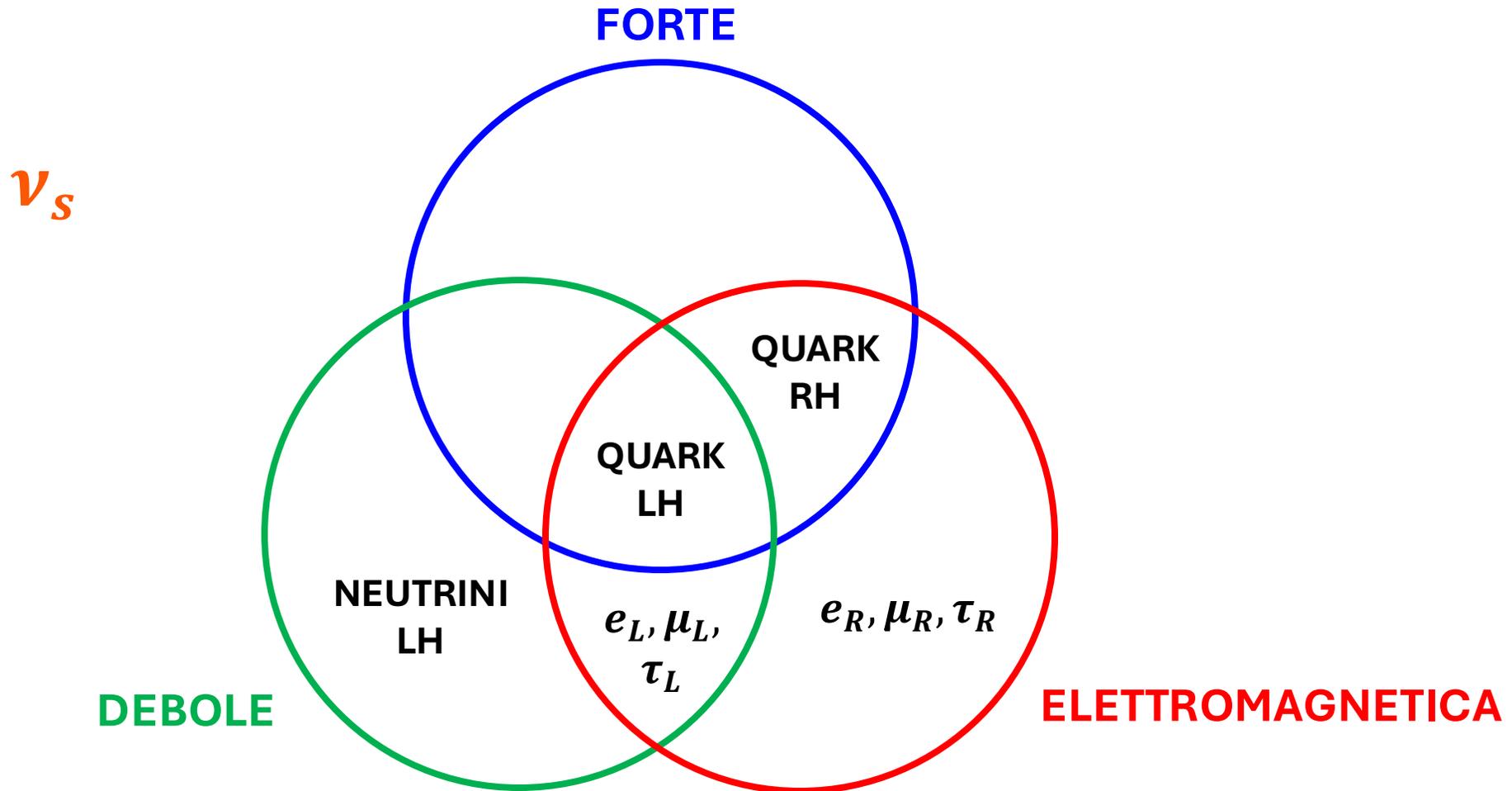
QUANTI NEUTRINI
ESISTONO?



NEUTRINI STERILI



NEUTRINI STERILI



PERCHÉ NEUTRINI STERILI?

1993 - 1998 \longrightarrow **Esperimento LSND**

Viene osservata un'oscillazione tra $\bar{\nu}_\mu$ e $\bar{\nu}_e$ con una frequenza compatibile con

$$\Delta m^2 \gtrsim 0.1 \text{ eV}^2$$

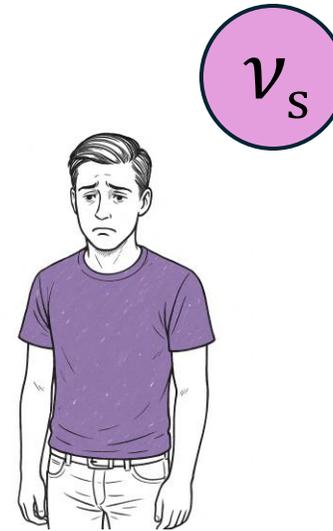
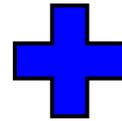
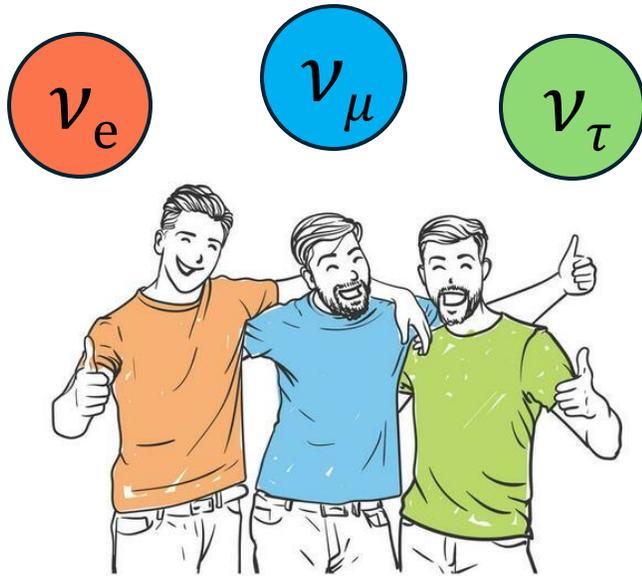
Questo valore è molto superiore a Δm_{sol}^2 e Δm_{atm}^2 .



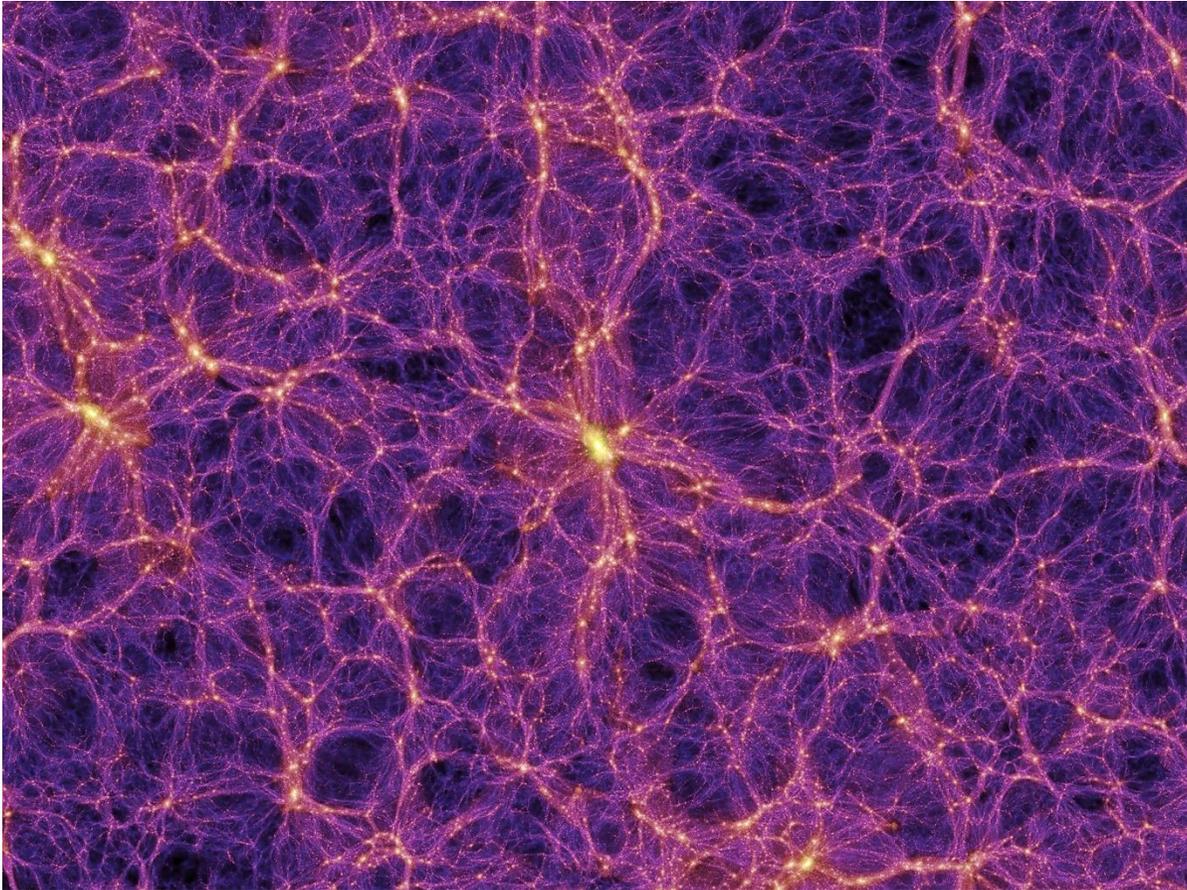
3 QUANTI NEUTRINI ESISTONO?



MODELLO 3+1



NEUTRINI STERILI E MATERIA OSCURA



IPOTESI:

- $m(\nu_s) \sim \mathcal{O}(\text{KeV})$
- angoli di mixing t.c. $\sin^2 2\theta \sim 10^{-10}$

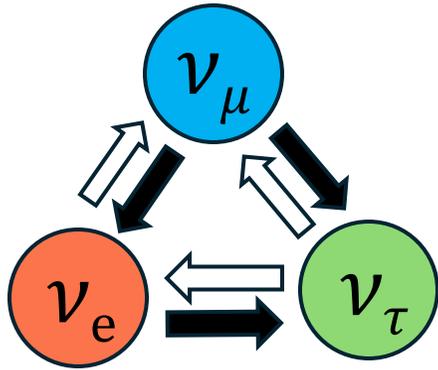


Neutrini sterili compatibili
con modello di

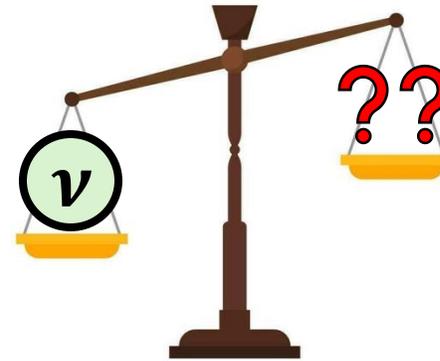
COLD DARK MATTER (CDM)

I NEUTRINI: PARTICELLE MISTERIOSE ...

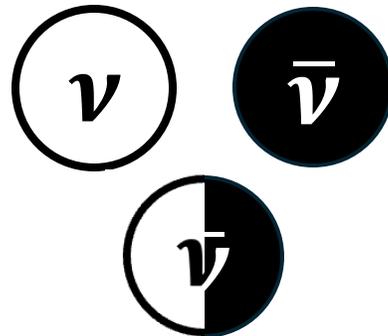
COME MIXANO?



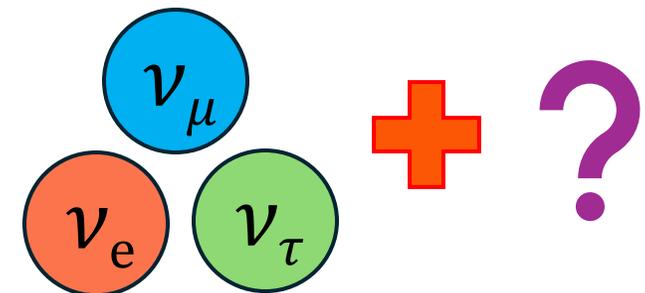
QUANTO PESANO?



CHE NATURA HANNO?

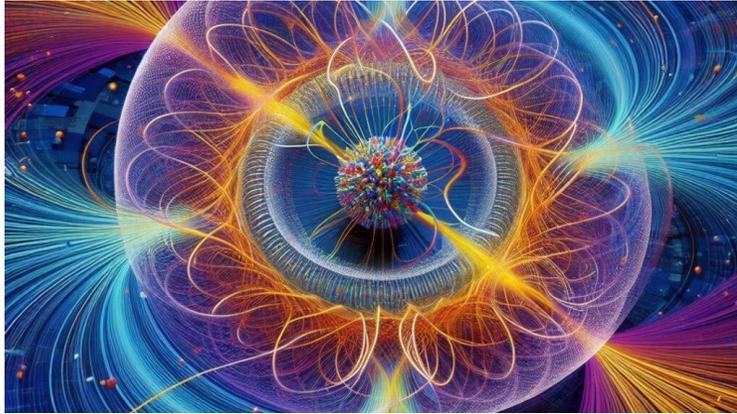


CE NE SONO ALTRI?



... VERSO NUOVA FISICA

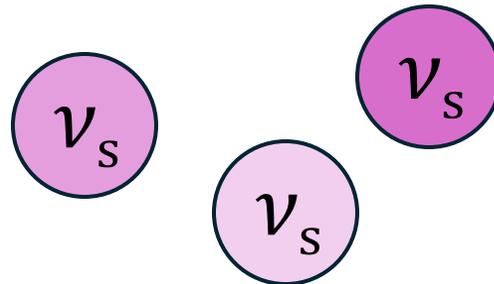
NUOVE SIMMETRIE



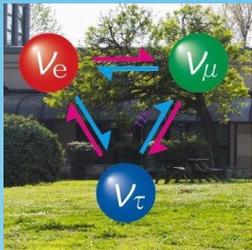
NUOVI MECCANISMI



NUOVE PARTICELLE



GRAZIE PER L'ATTENZIONE !



Contatti:

mirko.rettaroli@uniroma3.it
Roma Tre Neutrino Theory Group



[@romatreneutrino](https://twitter.com/romatreneutrino)



[Roma Tre Neutrino Theory Group](#)



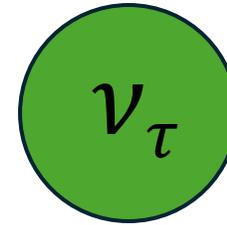
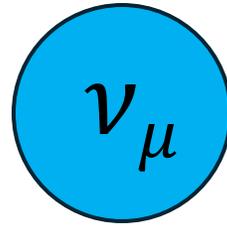
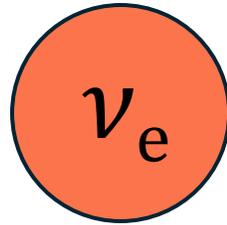
APPENDICE

APPENDICE

		FERMIONI			BOSONI	
		I	II	III		
massa		$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
carica		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		u up	c charm	t top	g gluone	H higgs
	QUARK	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		d down	s strange	b bottom	γ fotone	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		e elettrone	μ muone	τ tauone	Z bosone Z	
	LEPTONI	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	± 1	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	W bosone W	

BOSONI DI GAUGE
BOSONI VETTORI

BOSONI SCALARI



Ipotesi del MS:

- $m_\nu = 0$
- Esistono solo neutrini left-handed (LH) ν_L

- OPERATORE DI WEINBERG

$$\mathcal{L}_5 \sim \frac{y_{ij}}{\Lambda} \bar{L}_i L_j^c \tilde{H} \tilde{H}^T ,$$

con $L_i = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_{iL}$, $H = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$ e Λ scala di nuova fisica (molto grande)



$$m_\nu \sim \frac{1}{\Lambda}$$

Riesco a spiegare perché i neutrini hanno massa così piccola.