

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Piano Triennale

2025 | 2027

LECCE

Massimo Pietroni

Università e Gruppo
Collegato INFN di Parma

Le sfide del Modello Standard di domani

INFN

Il modello standard di oggi (I): fisica delle particelle

$$\mathcal{L}_{SM}^{(4)} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}i\not{D}\psi + (y_{ij}\bar{\psi}_L^i\phi\psi_R^j + \text{h.c.}) + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$

doppietti

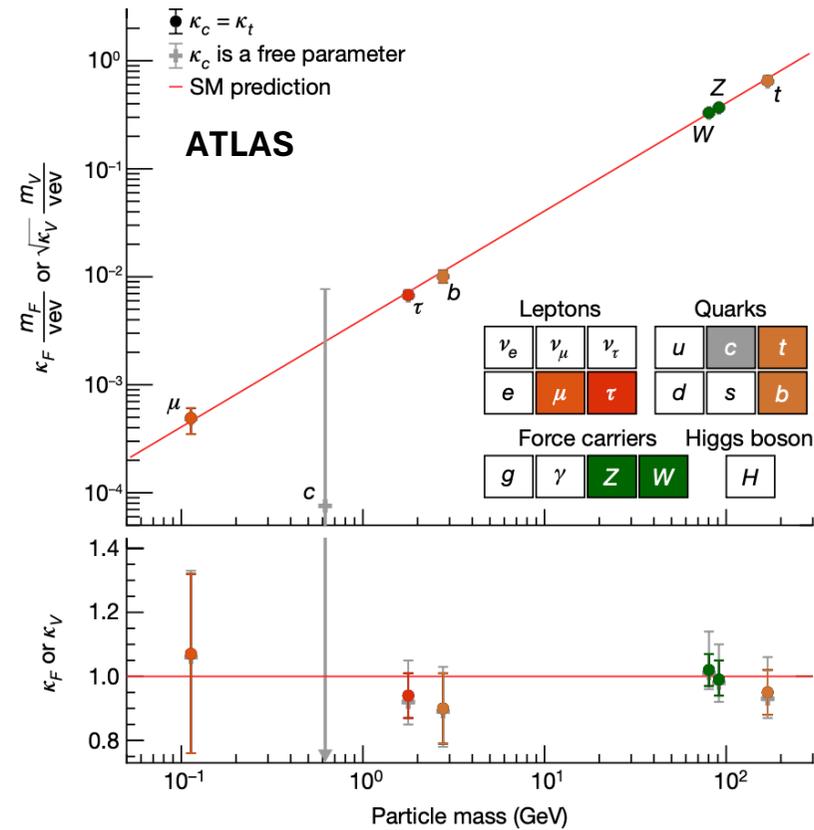
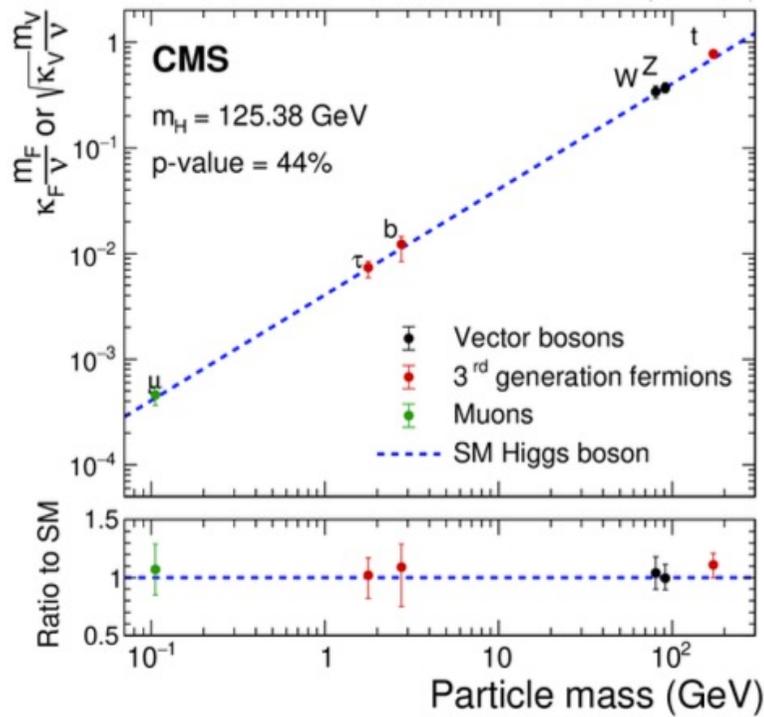
doppietti

3 famiglie

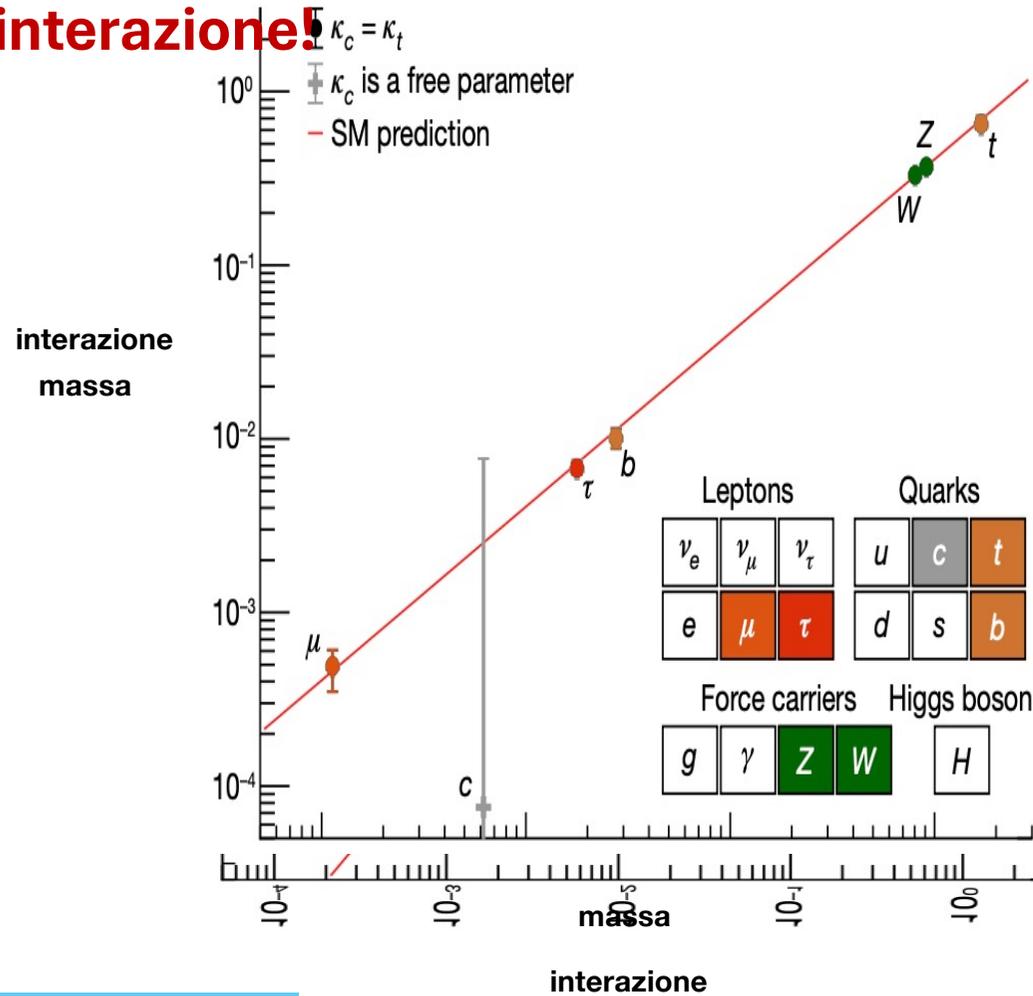
Bosoni di gauge

Immagine: Daniel Dominguez/CERN

Il modello standard di oggi (I): cos'è la massa?

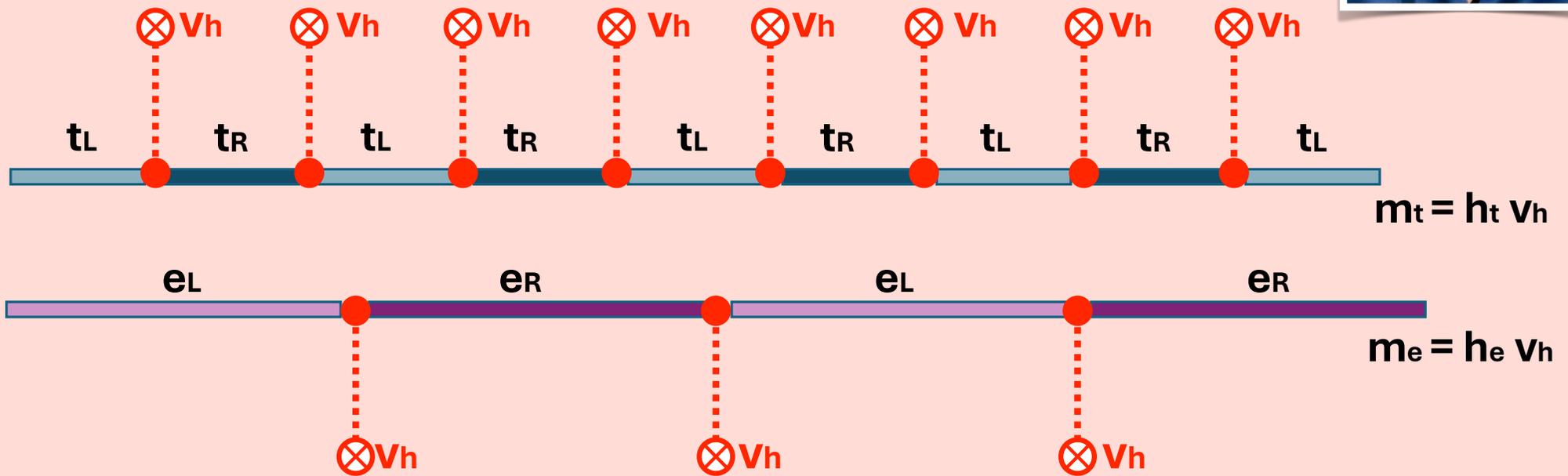


la massa è interazione!



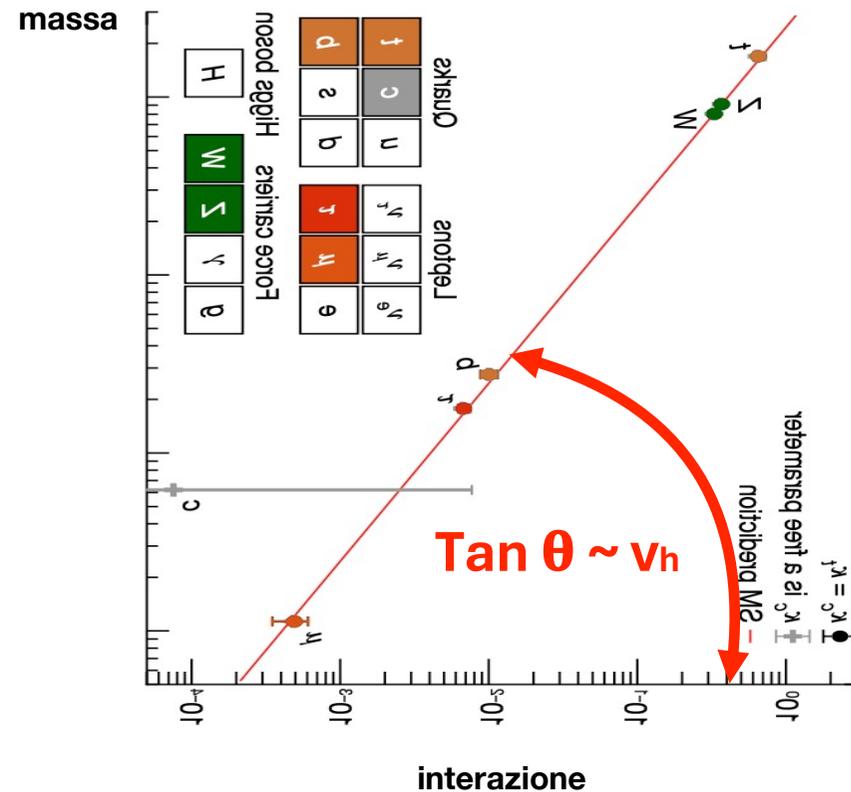
la massa è interazione!

$$V_h \neq 0$$

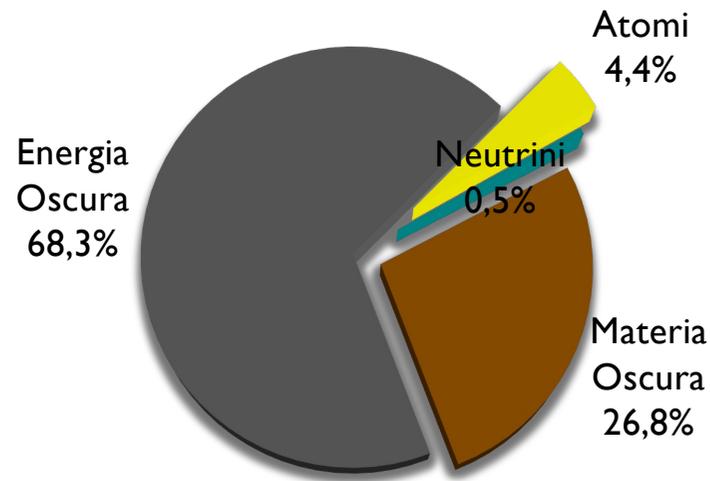


Una risposta, tante domande

- perché interazioni così diverse ?
- cosa fissa la pendenza della retta?
- il campo di Higgs è unico o è una miscela?
- è fondamentale o composto?
- come è evoluto nel tempo?
- sarà così per sempre?
- come prendono massa i neutrini?
- ...



Il modello standard (II): la cosmologia

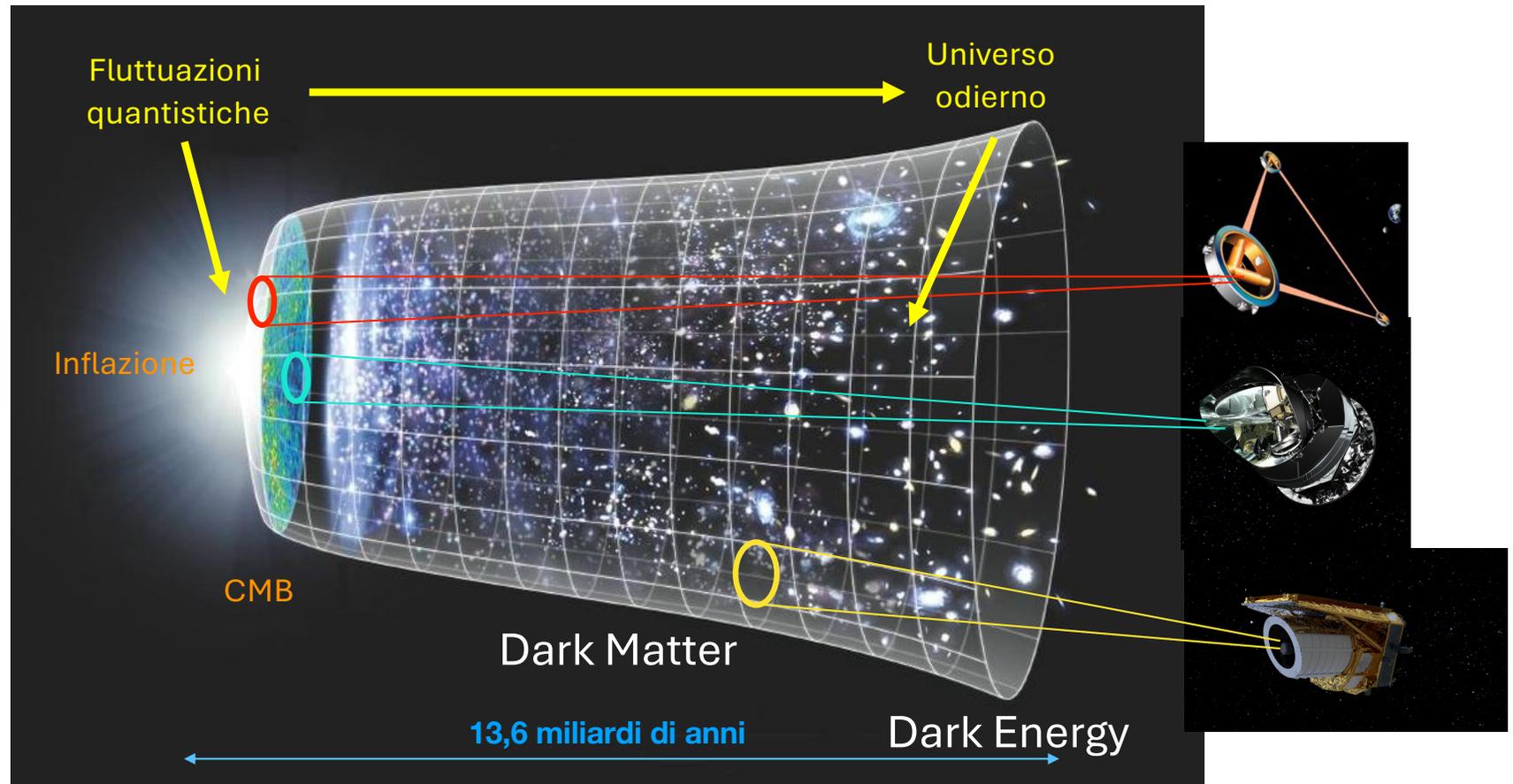


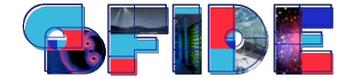
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Hf		Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Rf		Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun		Uuu	Uub					
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	



Il modello Λ CDM

dalle fluttuazioni quantistiche primordiali alle galassie





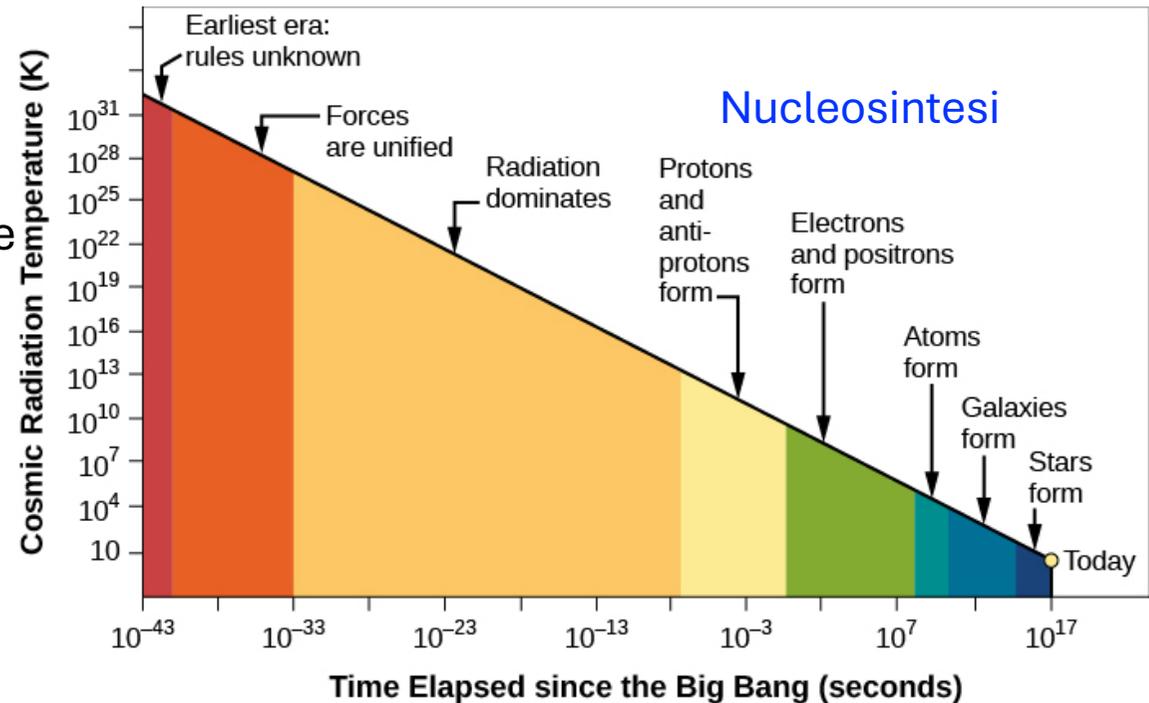
... e tante domande...

- che massa hanno i neutrini?
- quanti neutrini ci sono?
- cosa ha determinato il valore del campo di Higgs?
- ci sono state altre transizioni di fase primordiali?
- cos'è la materia oscura?
- dove è finita l'antimateria?
- cos'è l'energia oscura?
- le leggi della gravità cambiano su scale cosmologiche?
- cosa ha generato le perturbazioni primordiali?

Fluttuazioni
primordiali

Asimmetria
materia-antimateria

Nuove particelle



Grande Unificazione?

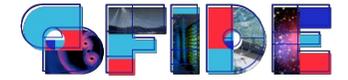
Neutrini

Transizioni di fase



L'unica previsione di questo talk...

- perché interazioni così diverse ?
- cosa fissa la pendenza della retta?
- il campo di Higgs è unico o è una miscela?
- è fondamentale o composto?
- come è evoluto nel tempo?
- sarà così per sempre?
- come prendono massa i neutrini?
- perché ci sono tre generazioni?
- che massa hanno i neutrini?
- quanti neutrini ci sono?
- cosa ha determinato il valore dell'Higgs?
- altre transizioni di fase primordiali?
- cos'è la materia oscura?
- dove è finita l'antimateria?
- cos'è l'energia oscura?
- la gravità di Einstein vale a tutte le scale?
- cosa ha originato le fluttuazioni primordiali?



L'unica previsione di questo talk:

Il Modello Standard di domani sarà unico!

Da dove partiamo?

l'Higgs è l'hub delle domande importanti

evoluzione cosmologica

higgs e gravità

inflazione

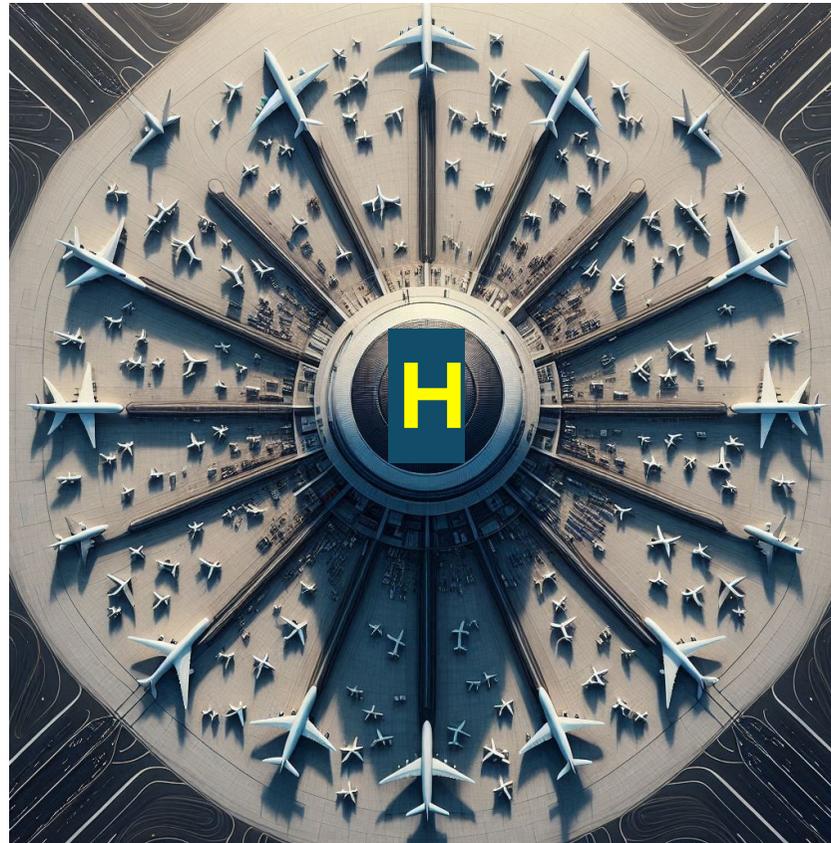
metastabilità

origine della scala elettrodebole

higgs composto/miscela

transizioni di fase

onde gravitazionali



generato con Image Creator

settori oscuri

Dark Matter

Dark Energy

numero di famiglie
neutrini

struttura di flavor

violazione CP

neutrini

Bariogenesi

violazione CP

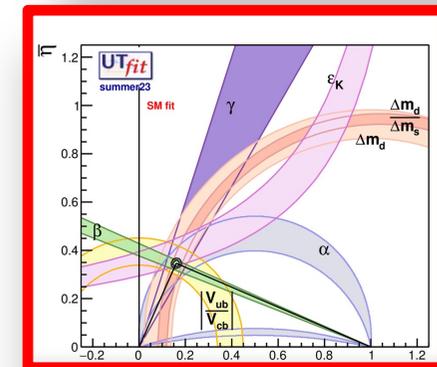
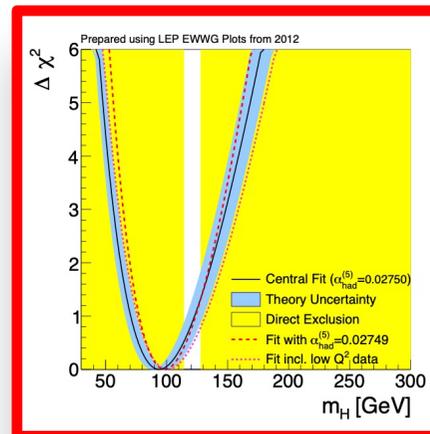
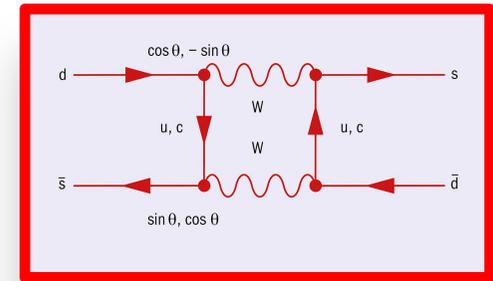
Grande Unificazione

primo comandamento: conosci l'Higgs!

Prossimi 25-30 anni: fisica di precisione

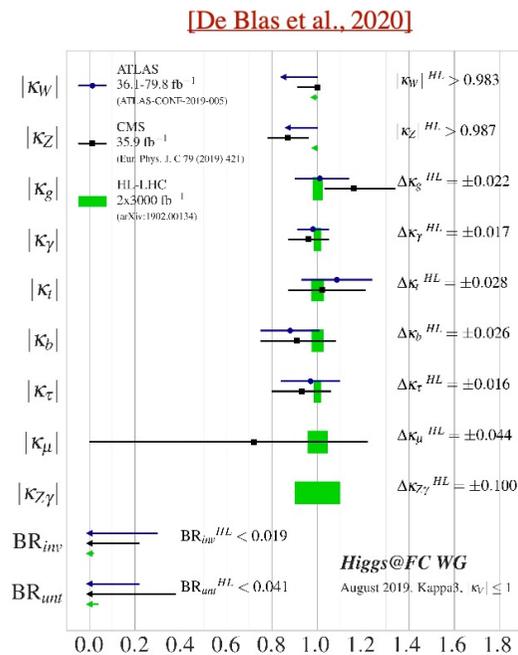
Una storia di scoperte indirette:

- K-Kbar: charm quark (G.I.M.)
- violazione CP nel K: terza generazione (C.K.M.)
- test di precisione elettrodebole: massa dell'Higgs



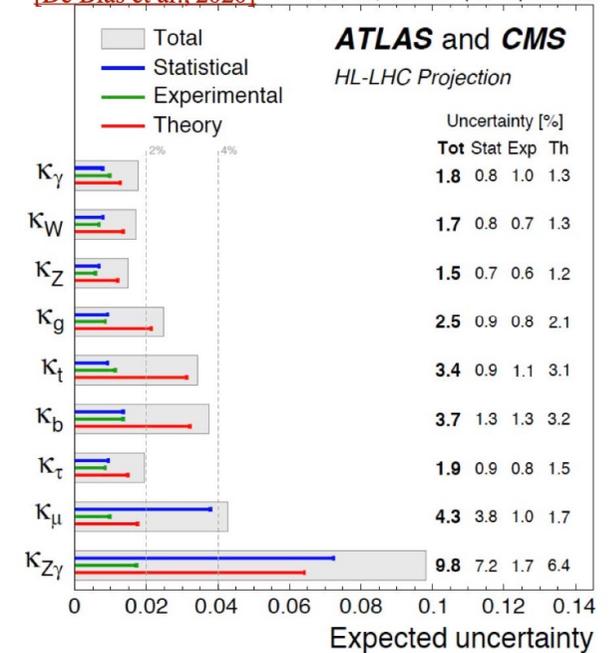
primo comandamento: conosci l'Higgs!

Accoppiamenti dell'Higgs



10-20% 2-4%

[De Blas et al., 2020] $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$, 3000 fb^{-1} per experiment

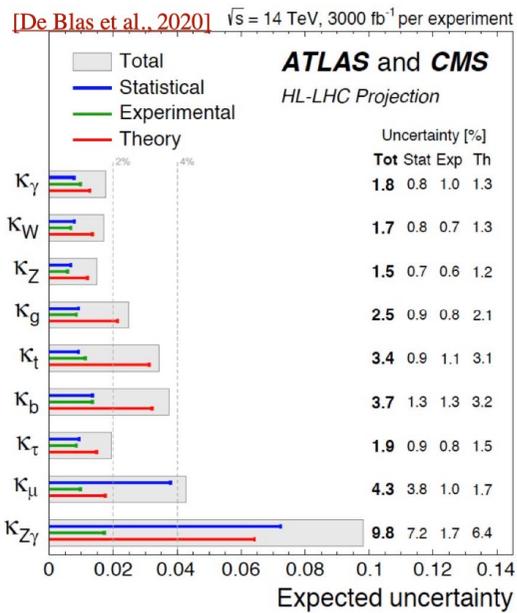




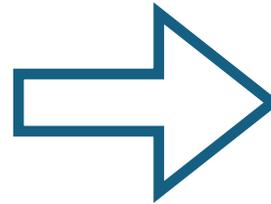
1905.03764

primo comandamento: conosci l'Higgs!

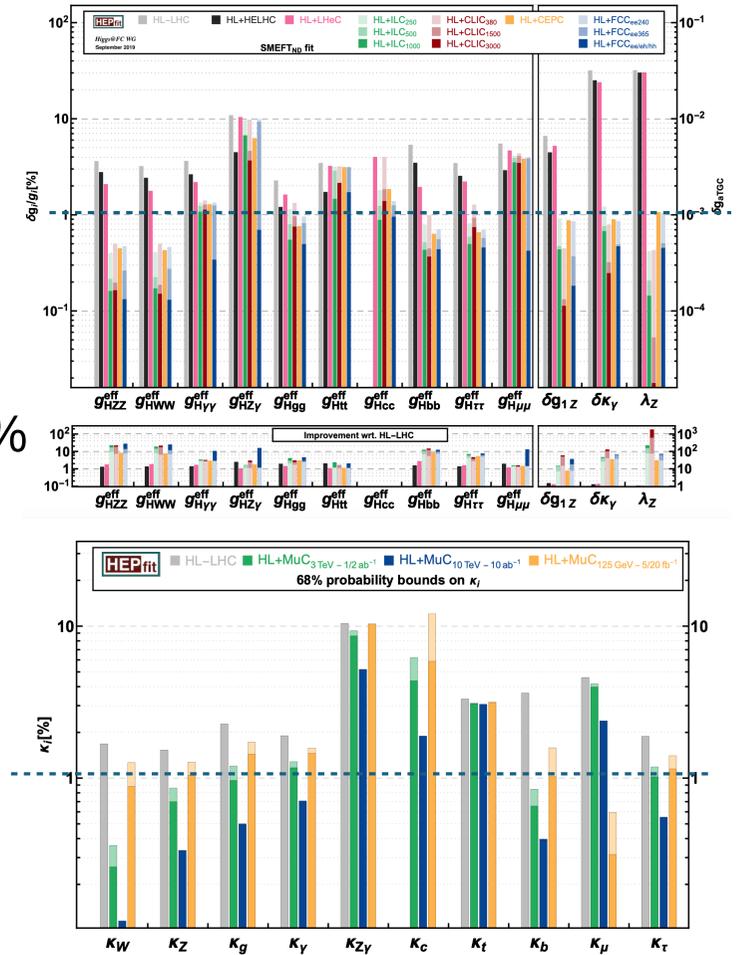
Accoppiamenti dell'Higgs



2-4%



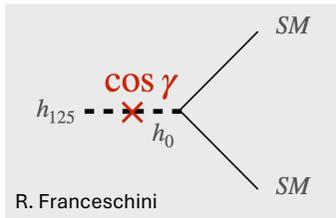
0.1-1%



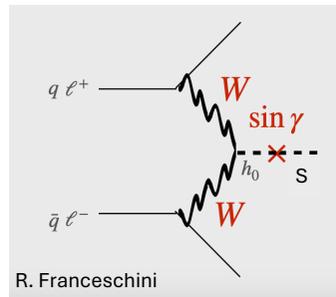
Esempio: higgs più un singoletto

$$V(H, S) = -\mu^2 (H^\dagger H) + \lambda (H^\dagger H)^2 + \frac{a_1}{2} (H^\dagger H) S + \frac{a_2}{2} (H^\dagger H) S^2 + \frac{b_2}{2} S^2 + \frac{b_3}{3} S^3 + \frac{b_4}{4} S^4.$$

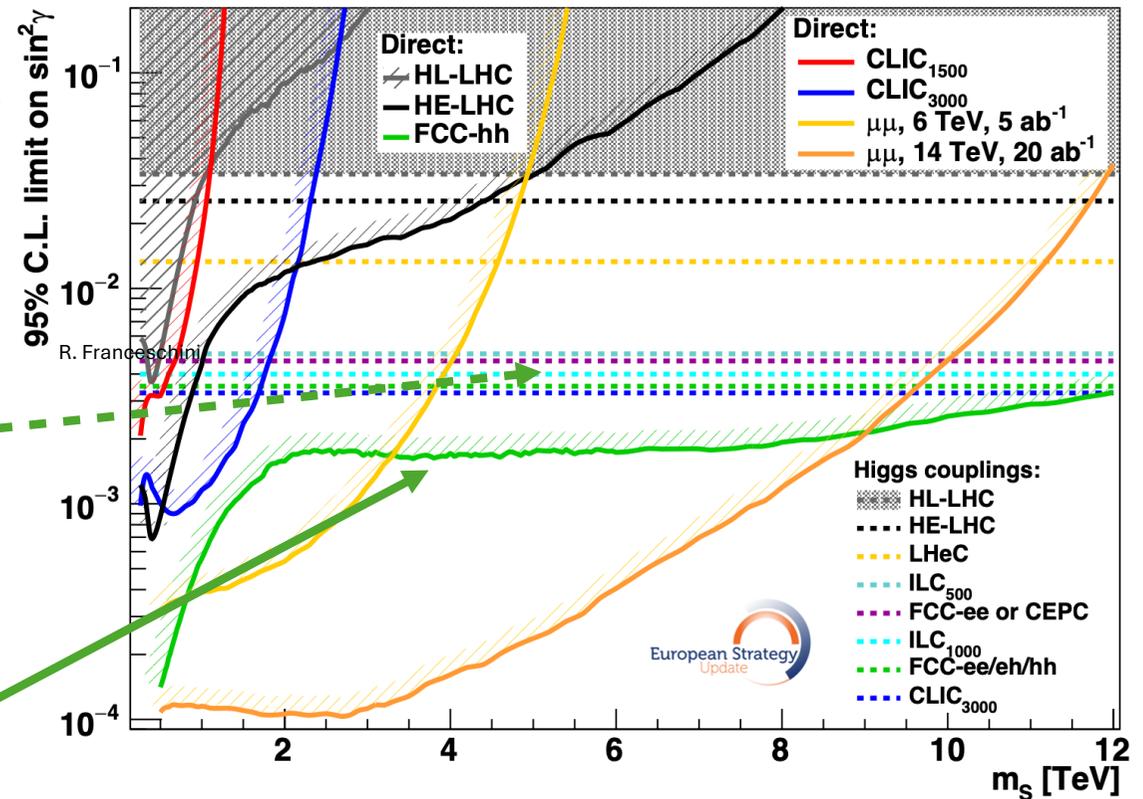
Buttazzo et al 1807.04743



Indiretta: modifica degli accoppiamenti

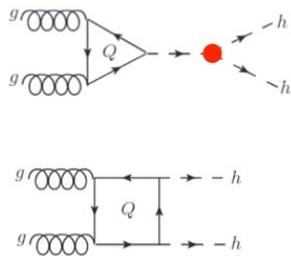


Diretta: produzione del singoletto

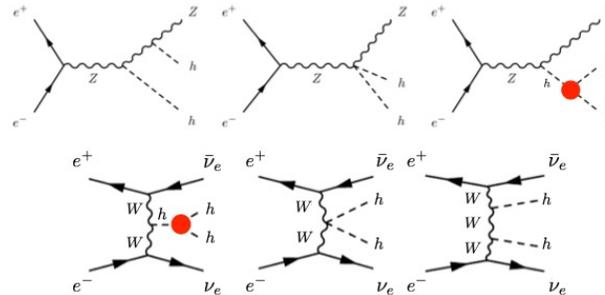


Il coupling dell'Higgs con sé stesso

Hadron collider



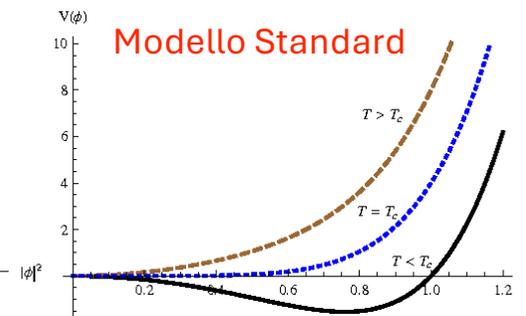
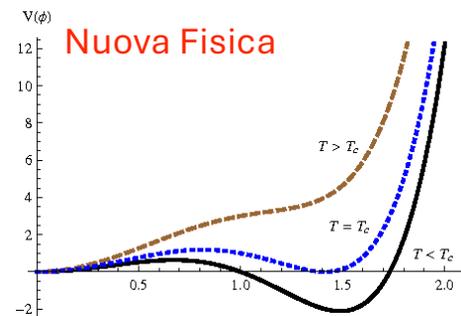
Lepton collider



$$V(h) = \frac{1}{2}m_H^2 h^2 + \lambda_3 v h^3 + \frac{1}{4}\lambda_4 h^4, \quad \text{with } \lambda_3^{\text{SM}} = \lambda_4^{\text{SM}} = \frac{m_H^2}{2v^2}$$

Transizione di fase elettrodebole:

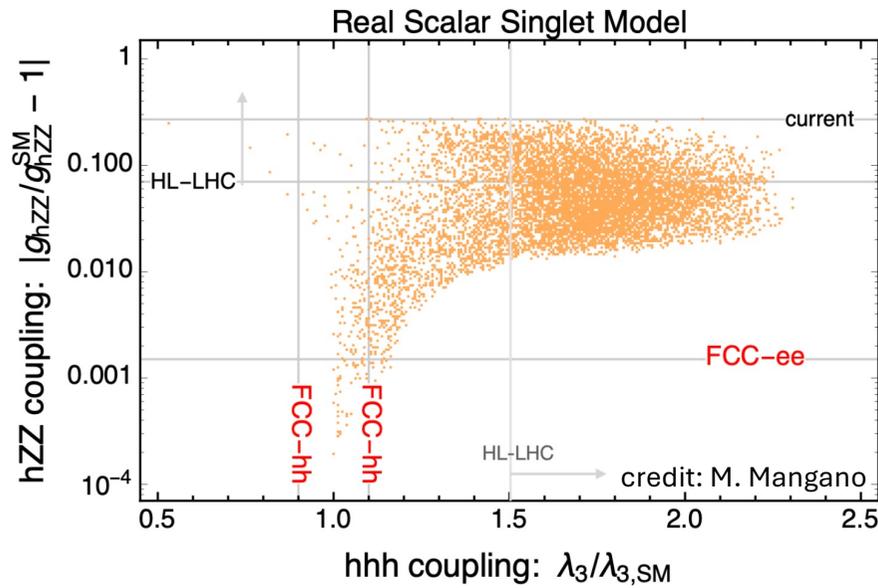
- Come è evoluto il campo di higgs?
- La transizione di fase ha prodotto onde gravitazionali?
- Ha generato l'asimmetria materia-antimateria?
- Viviamo in un vuoto metastabile?



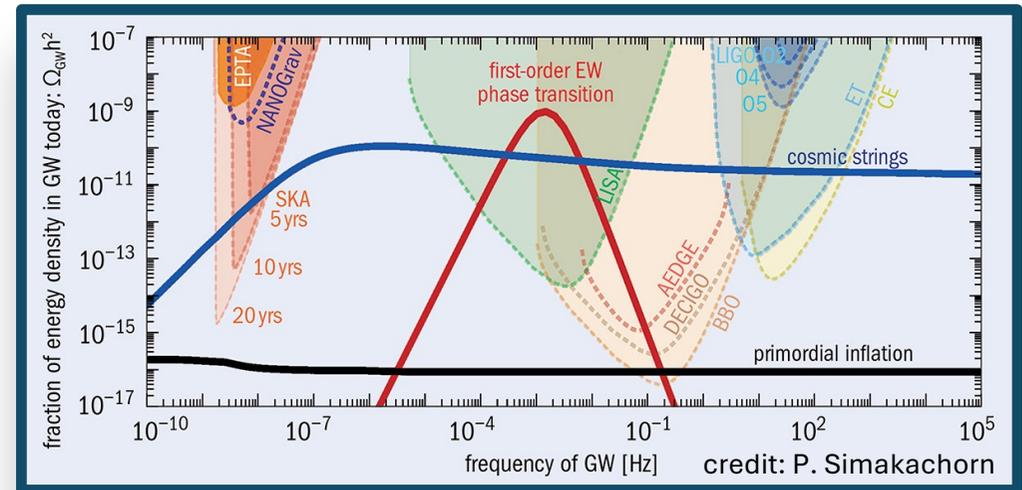
transizione di fase elettrodebole

$$V(H, S) = -\mu^2 (H^\dagger H) + \lambda (H^\dagger H)^2 + \frac{a_1}{2} (H^\dagger H) S + \frac{a_2}{2} (H^\dagger H) S^2 + \frac{b_2}{2} S^2 + \frac{b_3}{3} S^3 + \frac{b_4}{4} S^4.$$

Modello con Higgs+Singoletto



Misure di precisione ai collider

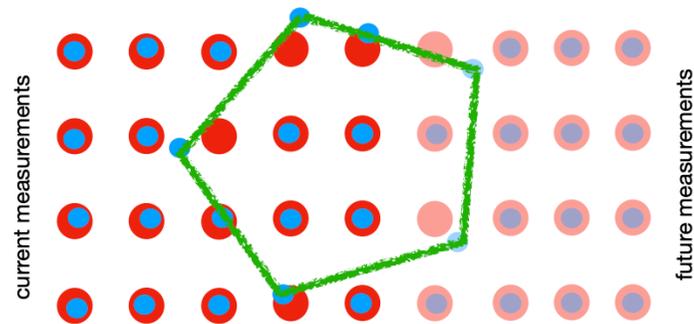
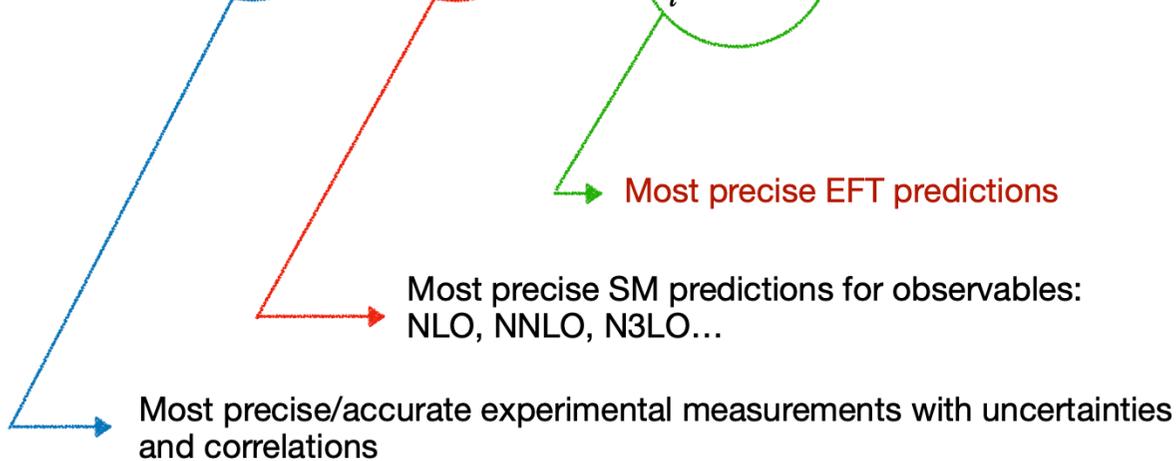


Onde gravitazionali

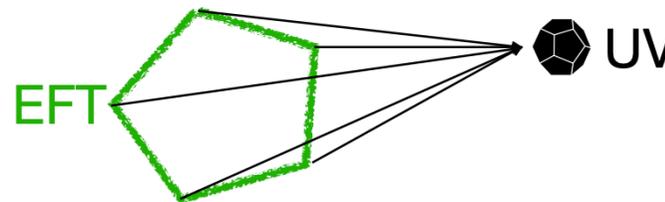
non solo couplings dell'higgs

The master equation of an EFT approach has three key elements:

$$\Delta \text{Obs}_n = \text{Obs}_n^{\text{EXP}} - \text{Obs}_n^{\text{SM}} = \frac{1}{\Lambda^2} \sum_i a_{n,i}^{(6)}(\mu) c_i^{(6)}(\mu) + \mathcal{O}\left(\frac{1}{\Lambda^4}\right)$$

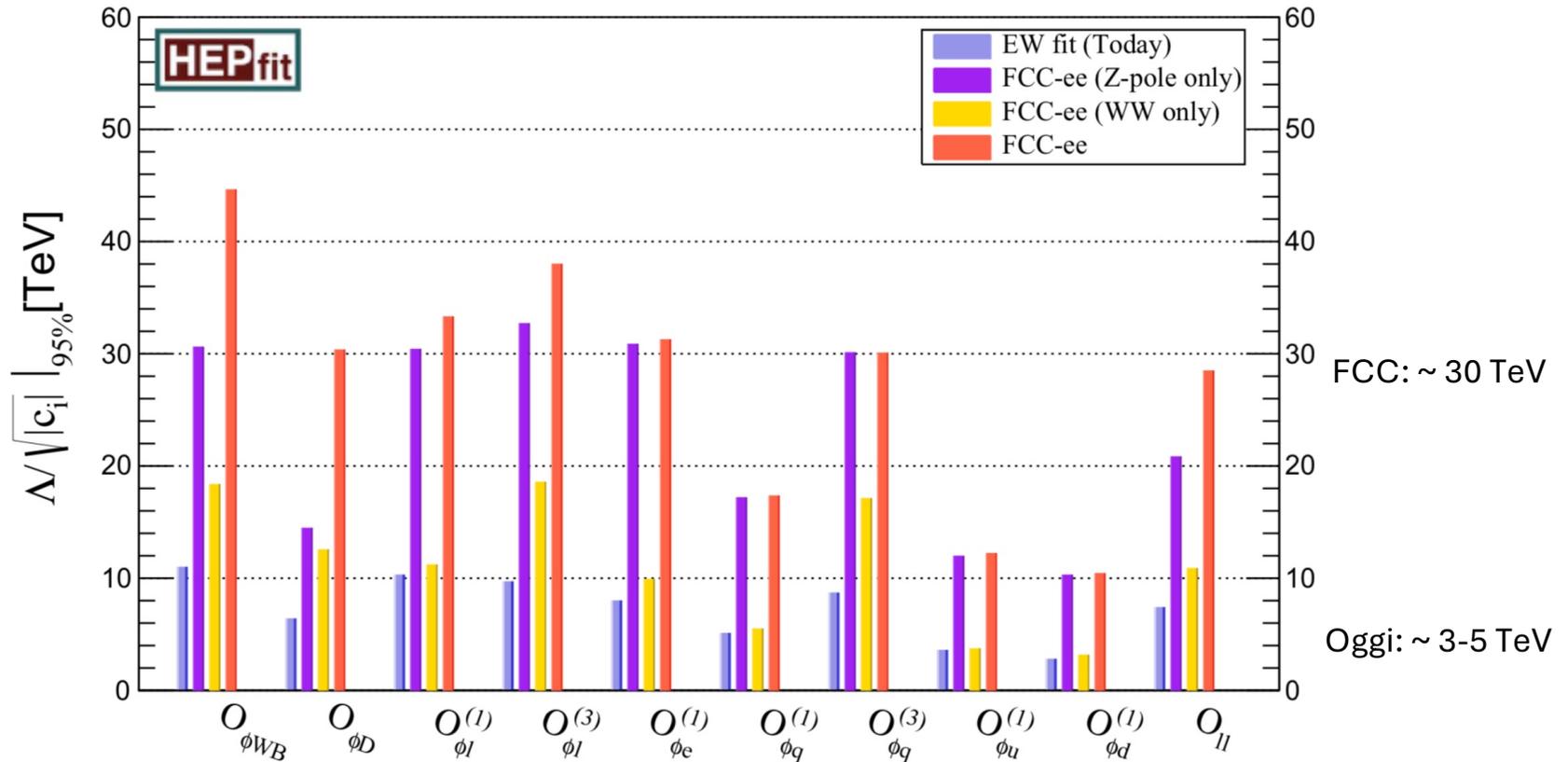


- ⇒ increased NP Sensitivity
- ⇒ increased UV identification power



esplorazione sistematica: teoria efficace

Scala efficace di nuova fisica



neutrini: come prendono massa?

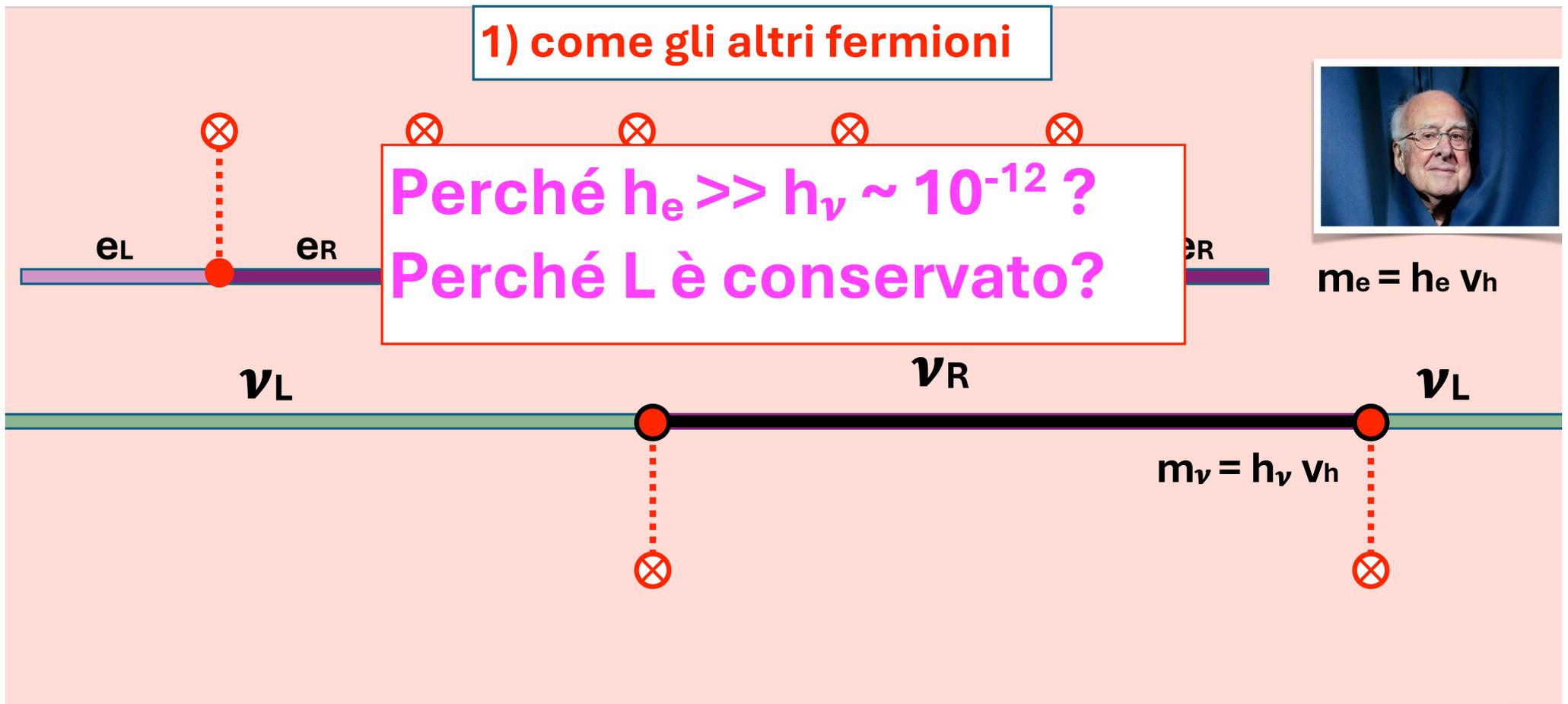
1) come gli altri fermioni

Perché $h_e \gg h_\nu \sim 10^{-12}$?
Perché L è conservato?



$$m_e = h_e v_h$$

$$m_\nu = h_\nu v_h$$



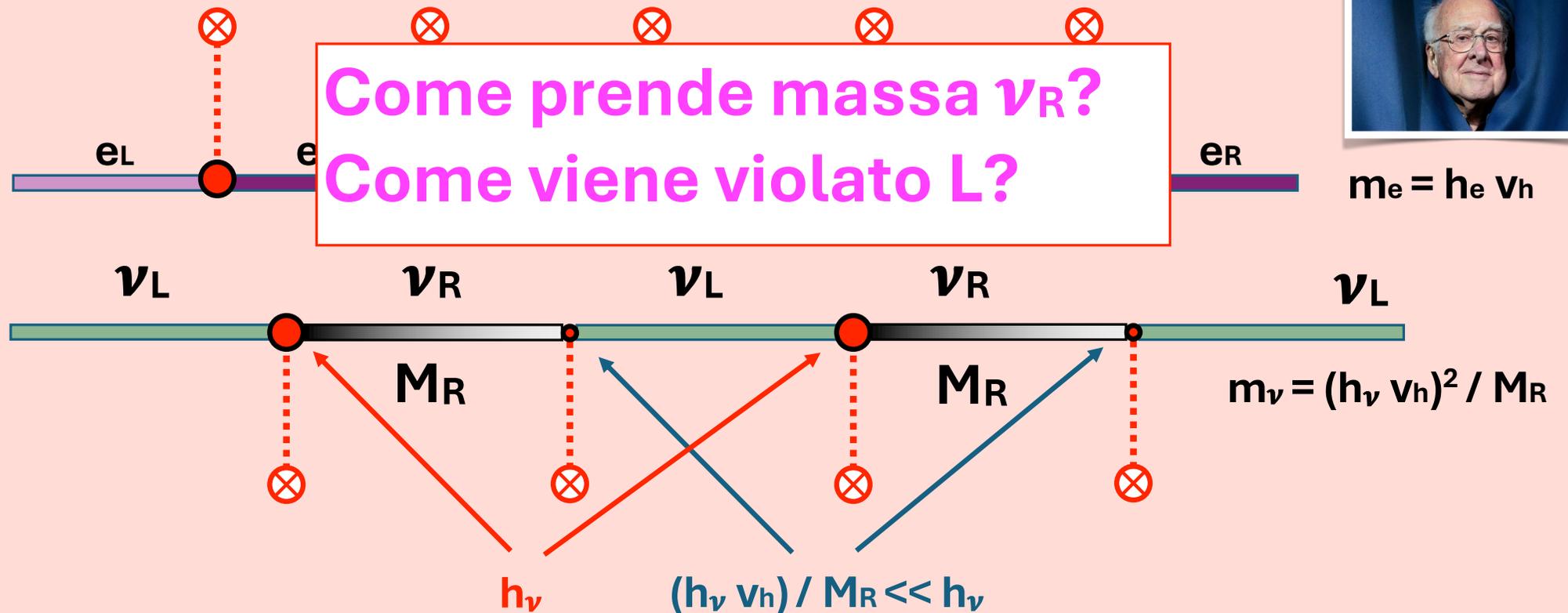
neutrini: come prendono massa?

2) ν_R prende massa non solo da Higgs

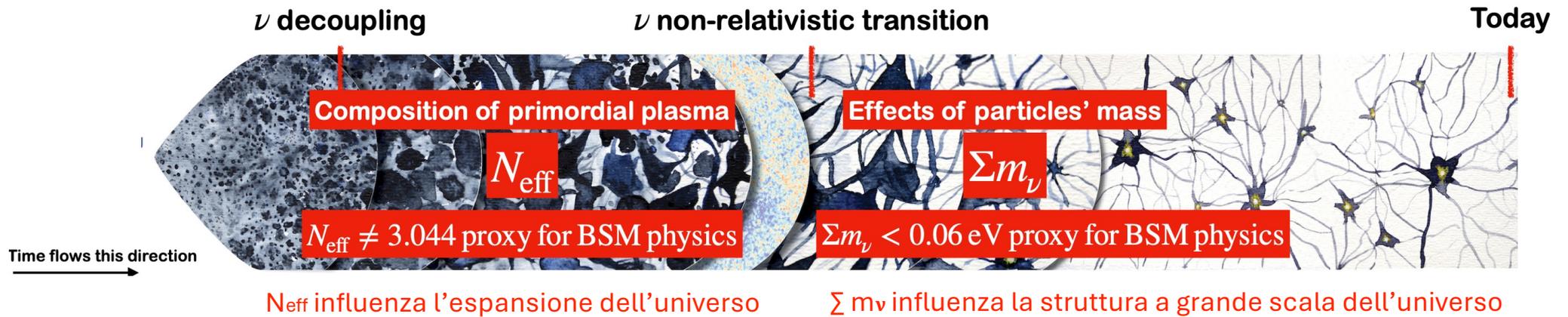
Come prende massa ν_R ?
Come viene violato L?



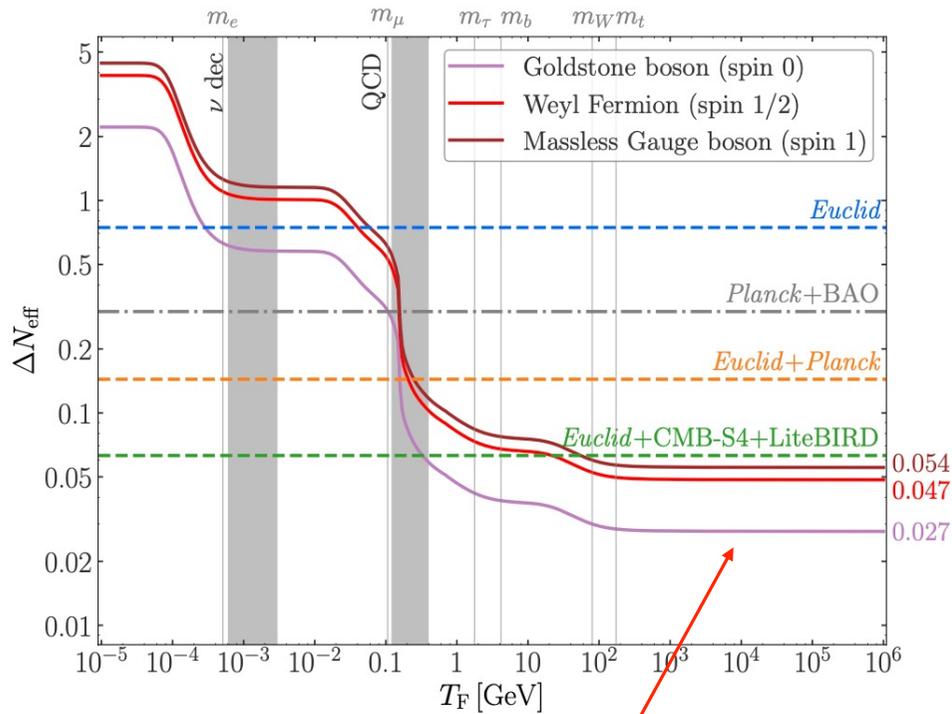
$$m_e = h_e v_h$$



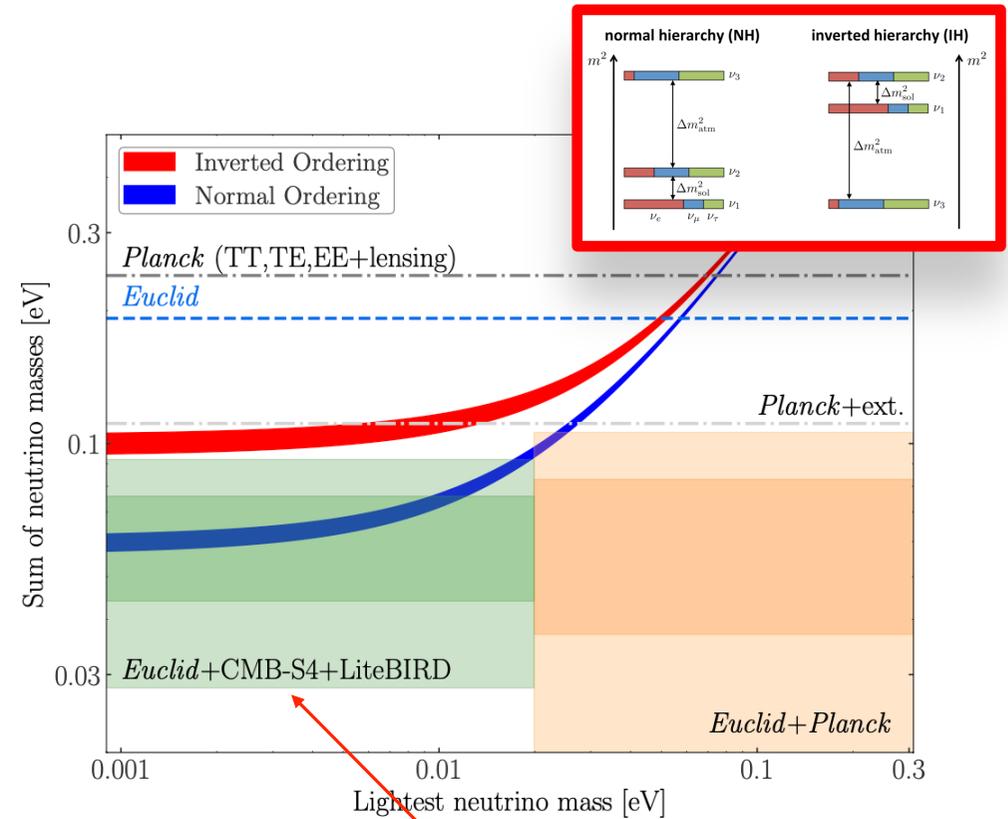
neutrini e universo



CMB + Large Scale Structure: i prossimi ~15 anni



sensibilità a nuova fisica nell'espansione dell'Universo!

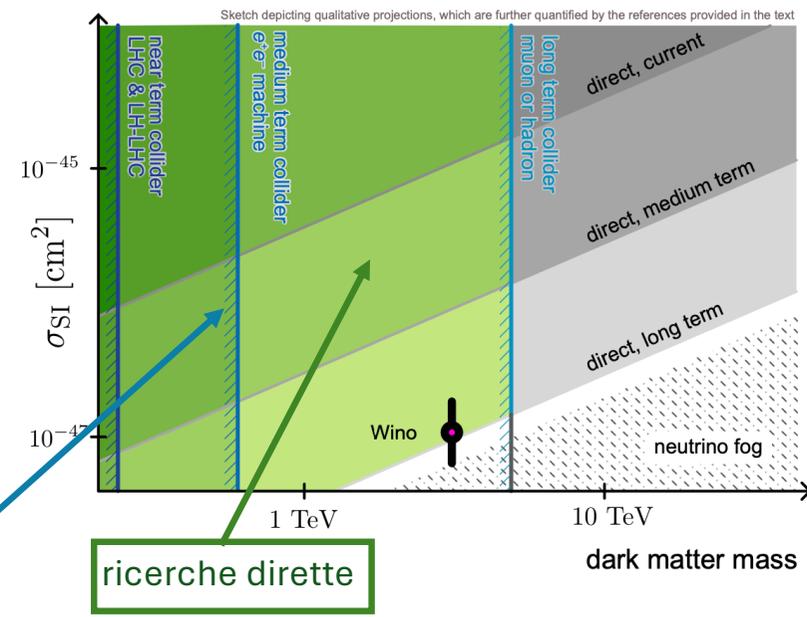
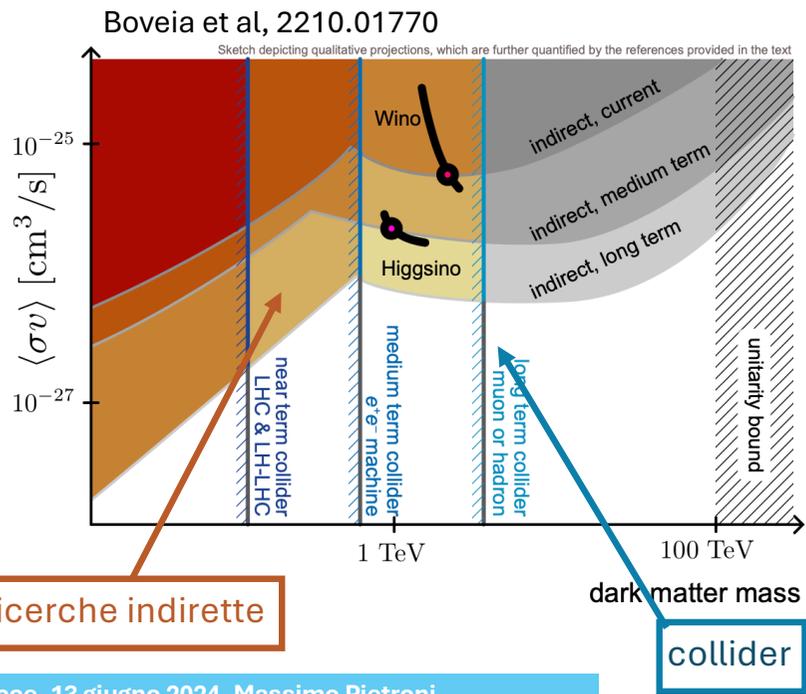


detection di $\sum m_\nu > 0$ a $\gtrsim 3\sigma$
gerarchia inversa esclusa a $> 2\sigma$

La materia oscura e le “prior” teoriche

Prior “elettrodebole”:

“la materia oscura e la fisica che fissa la scala elettrodebole sono legate”
 (motivazione: WIMP “miracle”)

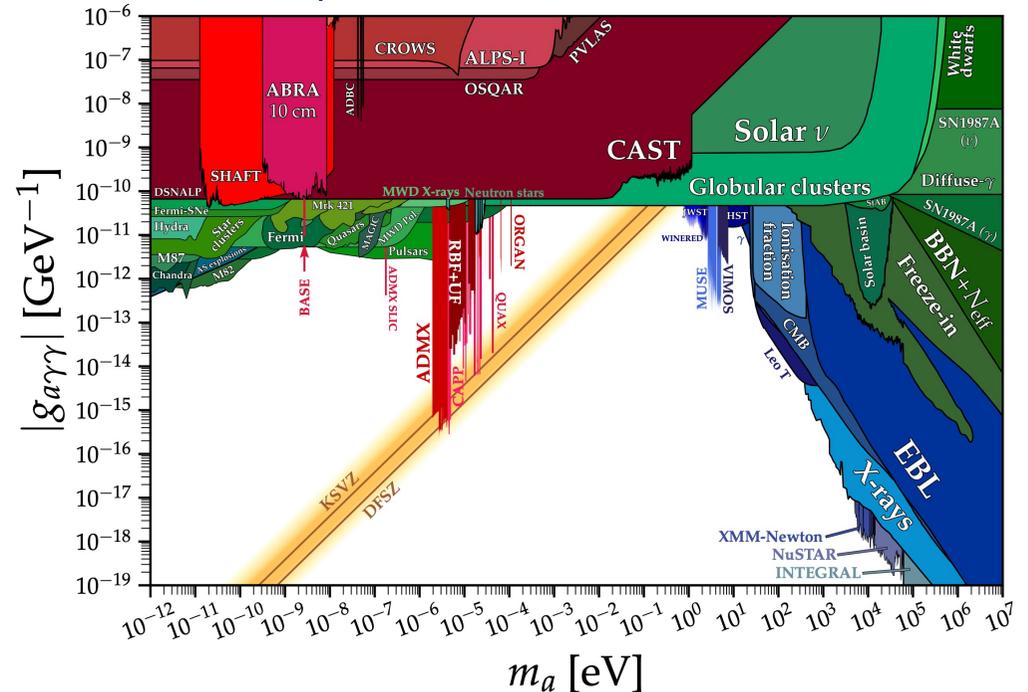


La materia oscura e le “prior” teoriche

Prior “forte”:

“la materia oscura e la fisica che impedisce ~~CP~~ forte sono legate”
(motivazione: assione di QCD)

- ricerche complementari
- diversi detector sensibili a diversi modelli (DFSZ/KSVZ)
- conseguenze per colliders
- da assione QCD a AxionLikeParticles (ALP)
- possibili sorgenti di onde gravitazionali!





La materia oscura e le “prior” teoriche

Prior “pragmatiche” (o bottom-up):

“la fisica della materia oscura deve essere:

- 1) consistente (TH);*
- 2) compatibile (EXP);*
- 3) esplorabile nei prossimi $O(10)$ anni”*

(motivazione: pragmatismo)

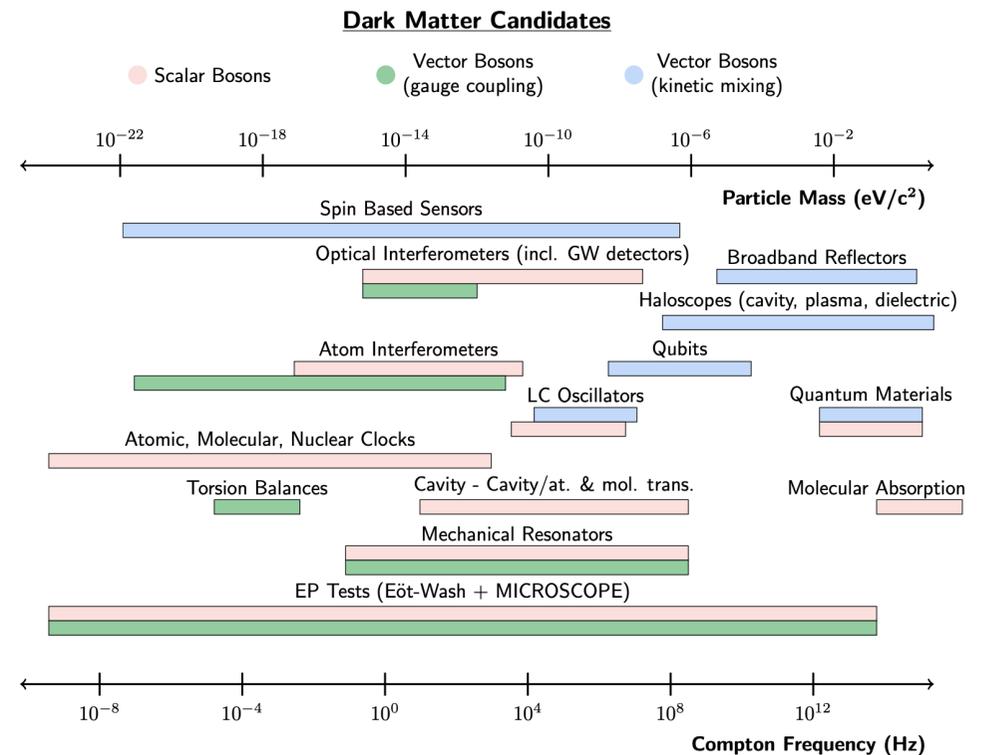
Priors sorprendentemente (?) restrittive!

La materia oscura e le “prior” teoriche

Esempio: DM termica leggera

- nuova particella $m \lesssim \text{GeV}...$
- ...per essere DM ha bisogno di nuovo mediatore...
- ... che prende massa grazie a un nuovo higgs
- ...

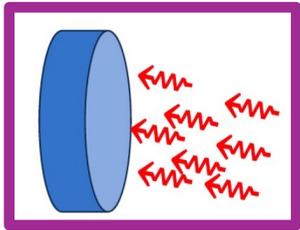
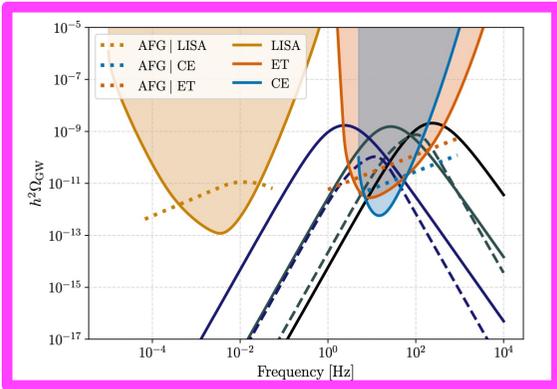
DARK SECTORS!!



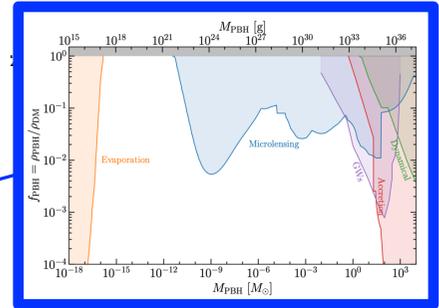
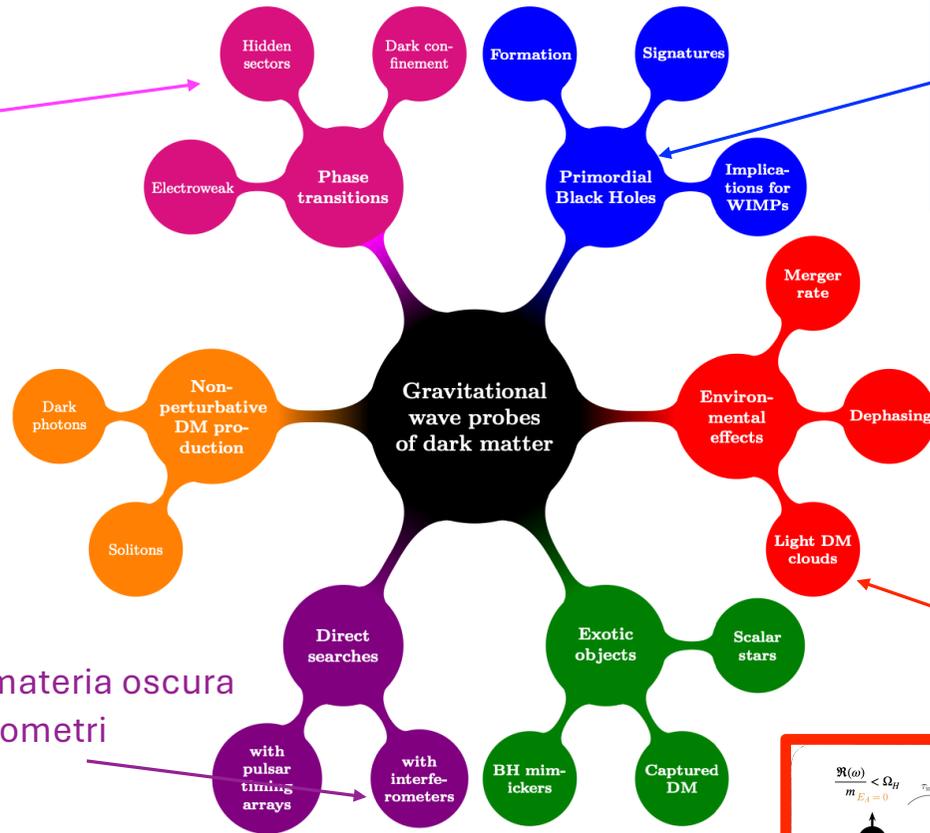
D. Antypas et al. 2203.14915

Materia oscura e onde gravitazionali

Transizioni di fase in dark sectors

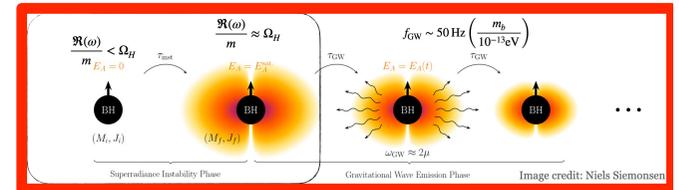


Ricerca di materia oscura agli interferometri



Buchi neri primordiali

Materia oscura ultraleggera (ALP)



Bertone et al, 1907.10610

onde gravitazionali e fisica fondamentale

La notte dei lunghi coltelli della gravità modificata

Teoria Efficace dell'Energia Oscura

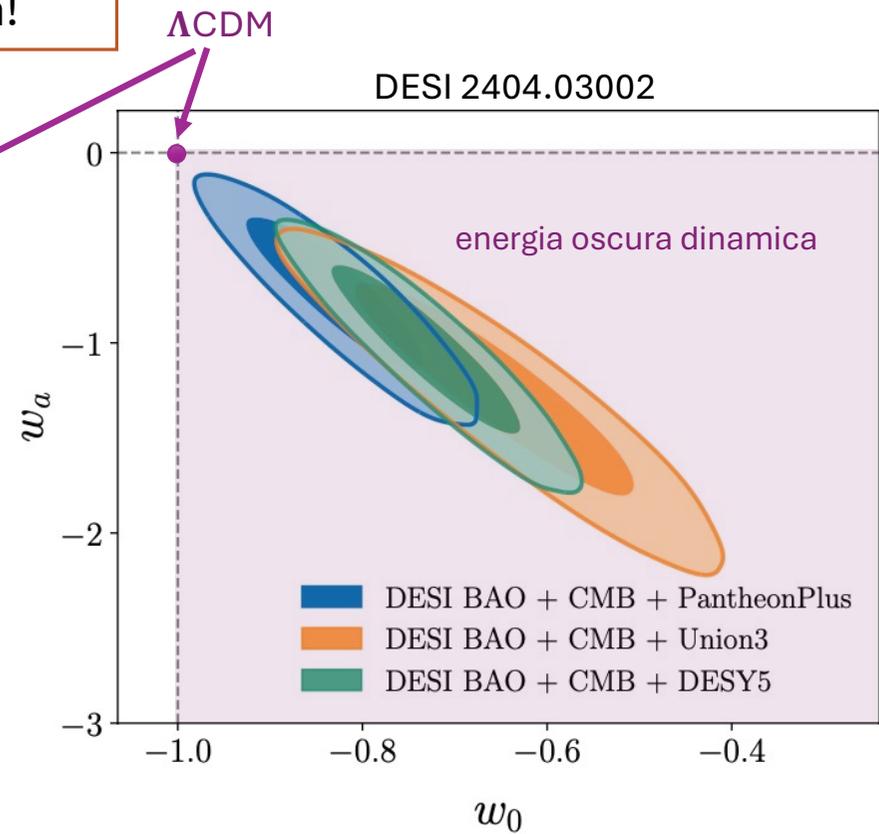
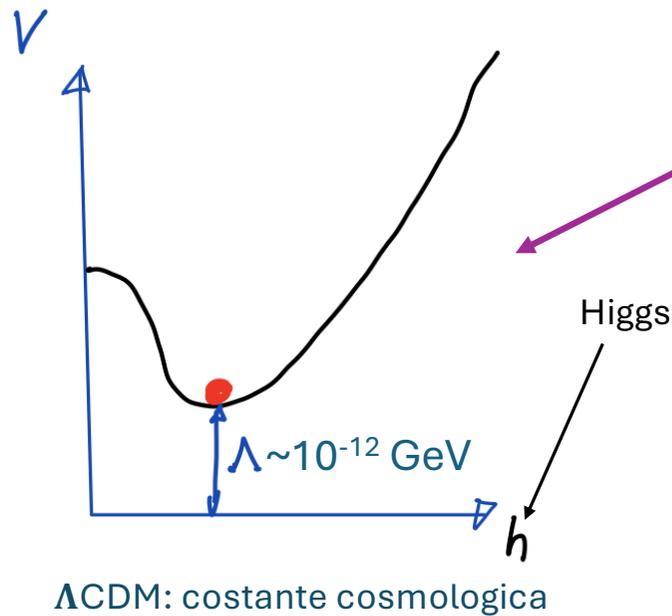
$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{M_*^2}{2} f^{(4)} R - \Lambda - c g^{00} + \frac{m_2^4}{2} (\delta g^{00})^2 - \frac{m_3^3}{2} \delta K \delta g^{00} - \cancel{m_4^2} \delta \mathcal{K}_2 + \frac{\tilde{m}_4^2}{2} \delta g^{00} R - \cancel{\frac{m_5^2}{2}} \delta g^{00} \delta \mathcal{K}_2 - \cancel{\frac{m_6}{3}} \delta \mathcal{K}_3 - \cancel{\tilde{m}_6} \delta g^{00} \delta \mathcal{G}_2 - \cancel{\frac{m_7}{3}} \delta g^{00} \delta \mathcal{K}_3 \right].$$

GW170817 + GRB 170817A: $c_{\text{GW}}/c - 1 < 10^{-15}$
 le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce

Una sola misura elimina decine (centinaia) di modelli!

energia oscura: costante cosmologica

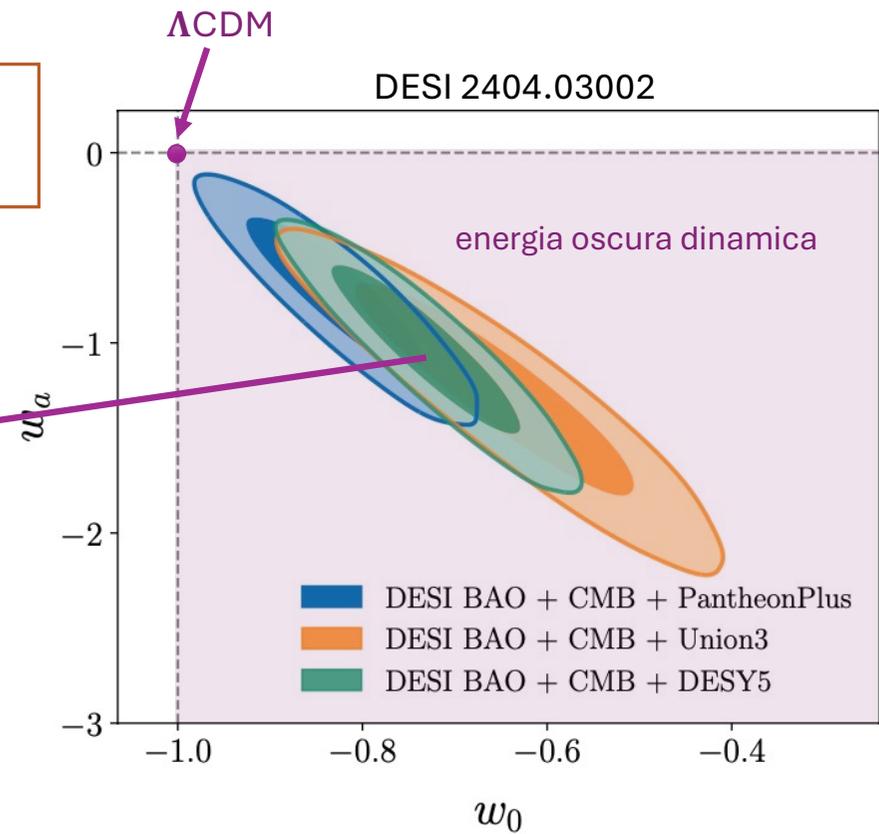
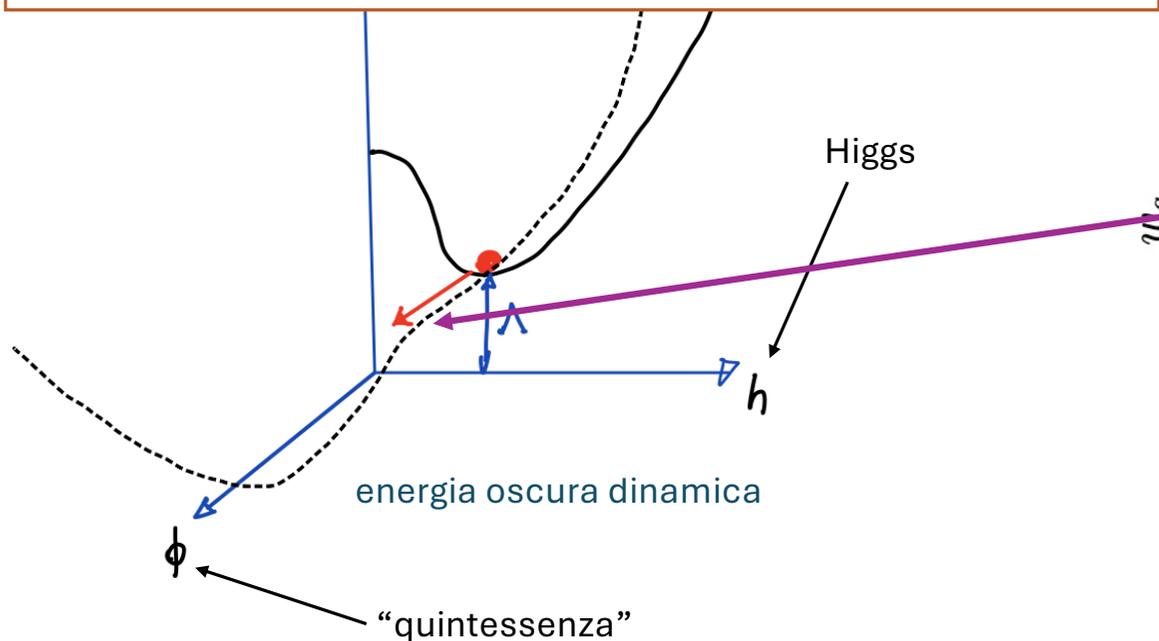
$m_h \sim 10^2 \text{ GeV} \ll M_P \sim 10^{19} \text{ GeV}$: problema della gerarchia!



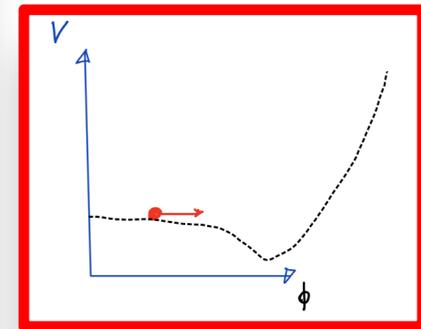
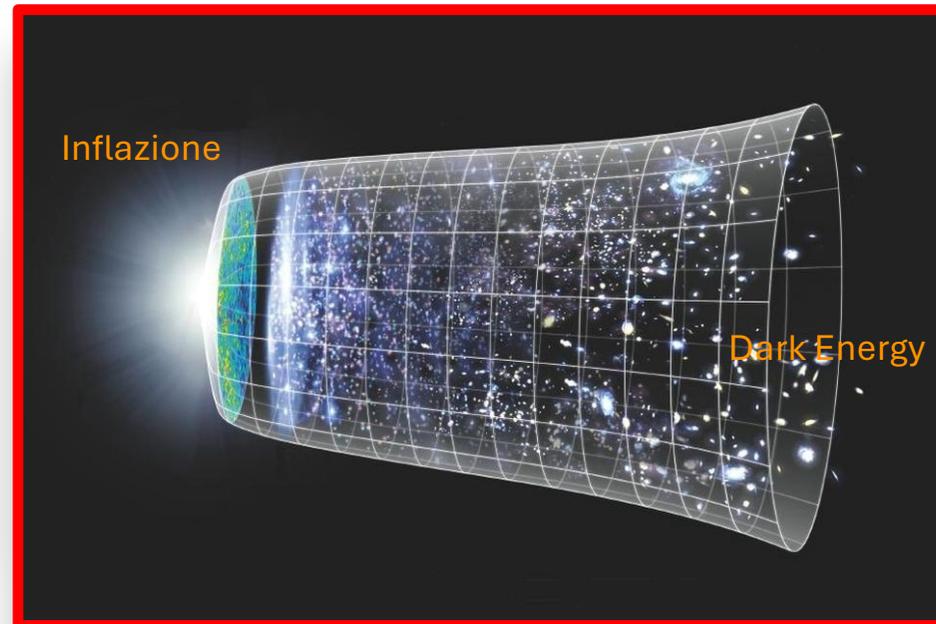
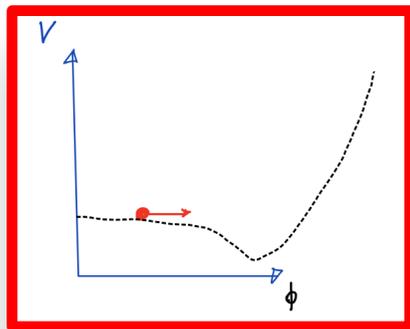
energia oscura dinamica

“moderata preferenza” per energia oscura dinamica

$m_\phi \sim 10^{-42} \text{ GeV} \llll m_h \sim 10^2 \text{ GeV} \ll M_P \sim 10^{19} \text{ GeV}$
gerarchia da incubo!



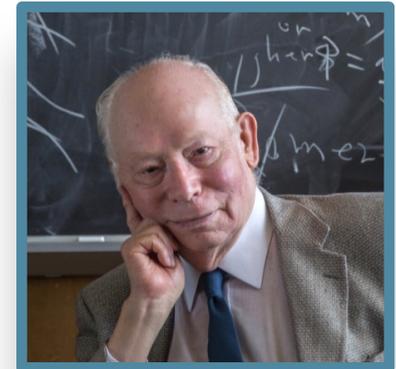
energia oscura dinamica: è già successo!



- importante studiare la dinamica dell'inflazione!
- teoria dei campi e gravità
- la cosmologia può insegnare qualcosa sulla "natura"
- sicuri che il modello standard di domani avrà una lagrangiana?

come procedere?

Steven Weinberg: “Il progresso della scienza è in gran parte la scoperta di quali domande possano essere poste.”



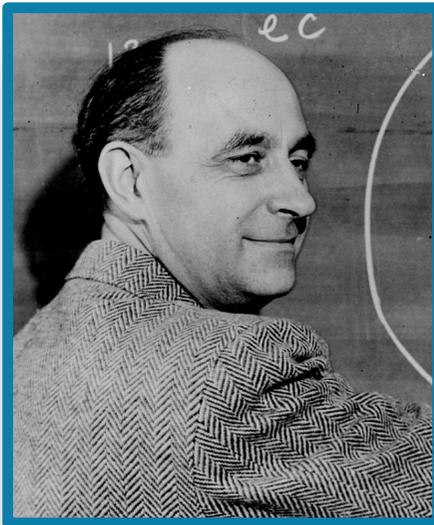
Priors teoriche: da “piccate” a ampie e pragmatiche

Affilare gli strumenti (teorici e sperimentali) per una fisica di precisione

Qualunque nuova fisica avrà bisogno di segnali ridondanti: collider, onde gravitazionali, CMB, struttura a grande scala, nuovi rivelatori ...

come procedere?

Costruire, come Fermi ...



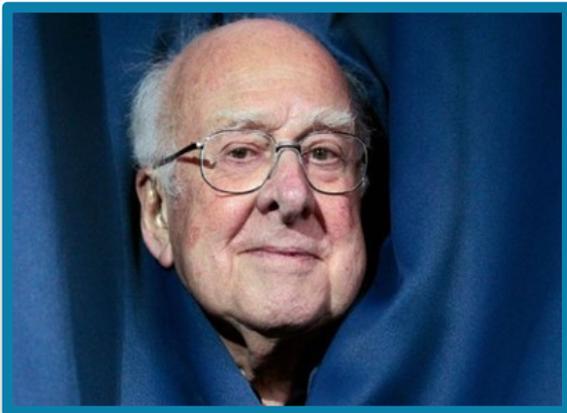
$$\mathcal{L}_{SM}^{(4)} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}i\not{D}\psi + (y_{ij}\bar{\psi}_L^i\phi\psi_R^j + \text{h.c.}) + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$



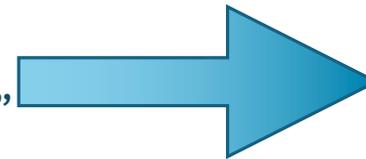
$$\mathcal{L}_{\text{Fermi}} = -\frac{G_F}{\sqrt{2}}\bar{p}\gamma_\mu n \bar{e}\gamma^\mu \nu + \text{h.c.}$$

come procedere?

... guardarsi attorno, come Higgs ...



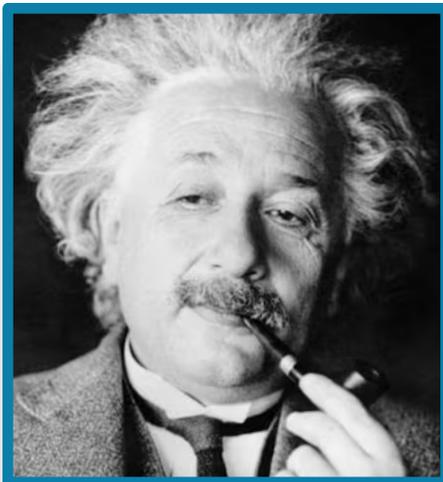
Superconduttività:
“plasmoni con massa”



Fisica delle Particelle:
“bosoni vettori
con massa”

come procedere?

... probabilmente, avremo bisogno di un nuovo Einstein...



Nuovi principi



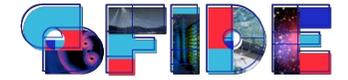
Naturalizza
Gravità quantistica

...

...che sia amico di Feynman



Se la tua teoria non torna con
l'esperimento,
la tua teoria è sbagliata!"



Brainstorming virtuale



Nicolao Fornengo



Fabio Maltoni



Martina Gerbino

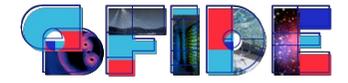
GRAZIE!



Marco Peloso

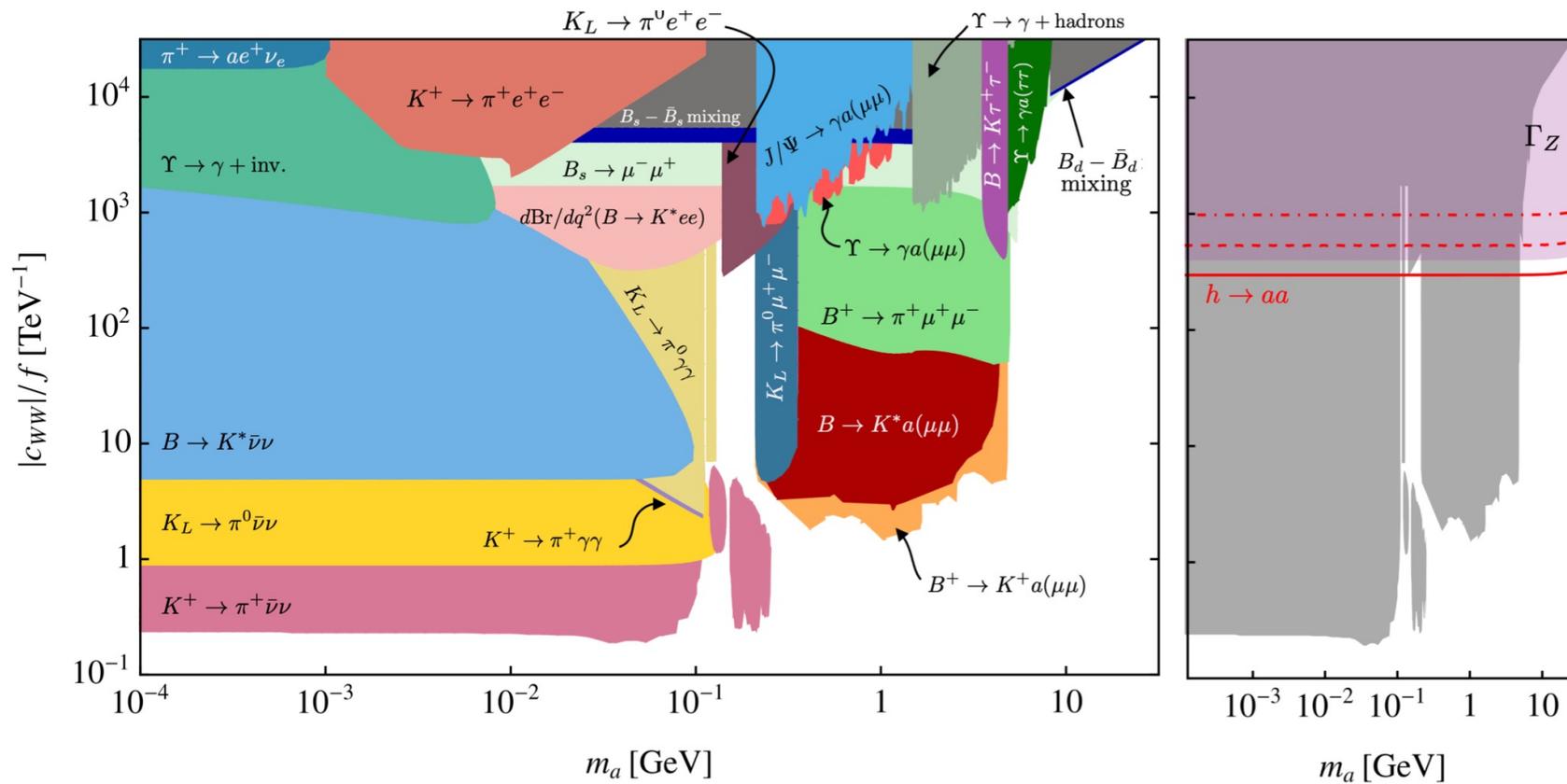


Luca Griguolo



BACKUP

ALPs e fisica del flavor





esplorazione sistematica: teoria efficace

$$\mathcal{L}_{SM}^{(6)} = \mathcal{L}_{SM}^{(4)} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i^{(6)} + \dots$$

- rispetta tutte le simmetrie del MS (anche quelle “accidentali”)
- costruita con i campi “leggeri” ($\ll \Lambda$)
- valida per $E_{\text{EXP}} < \Lambda$
- precisione migliorabile sistematicamente
- fit globale \rightarrow patterns dei c_i

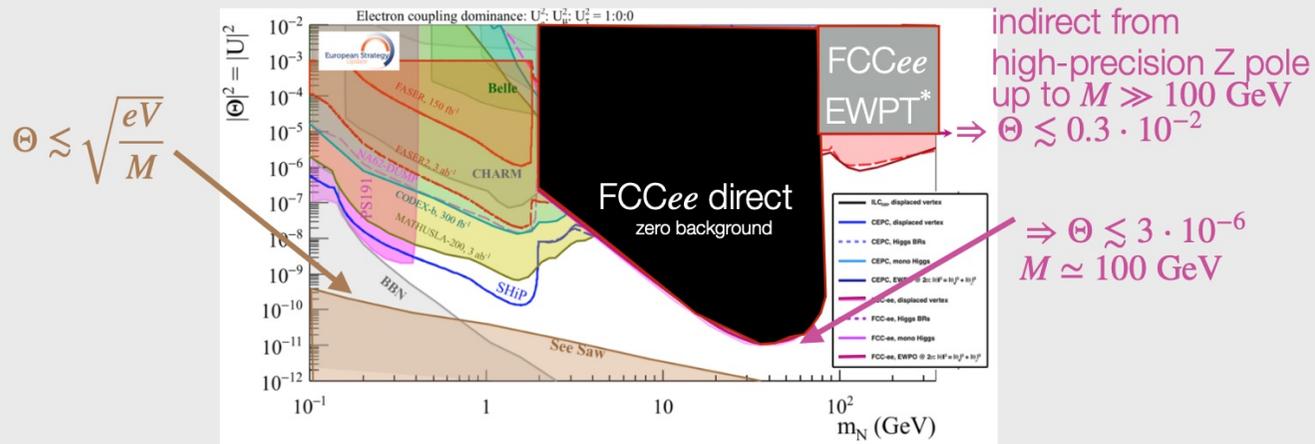
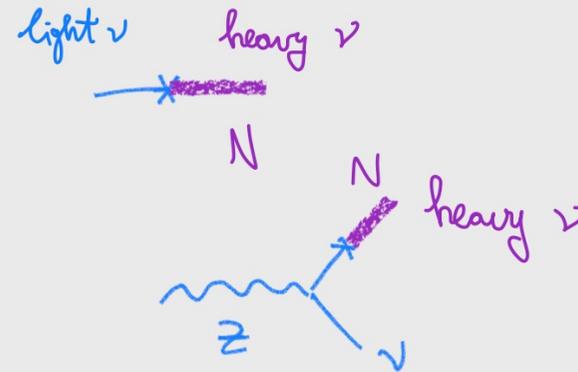
Neutrino masses

The “first” kind of see-saw

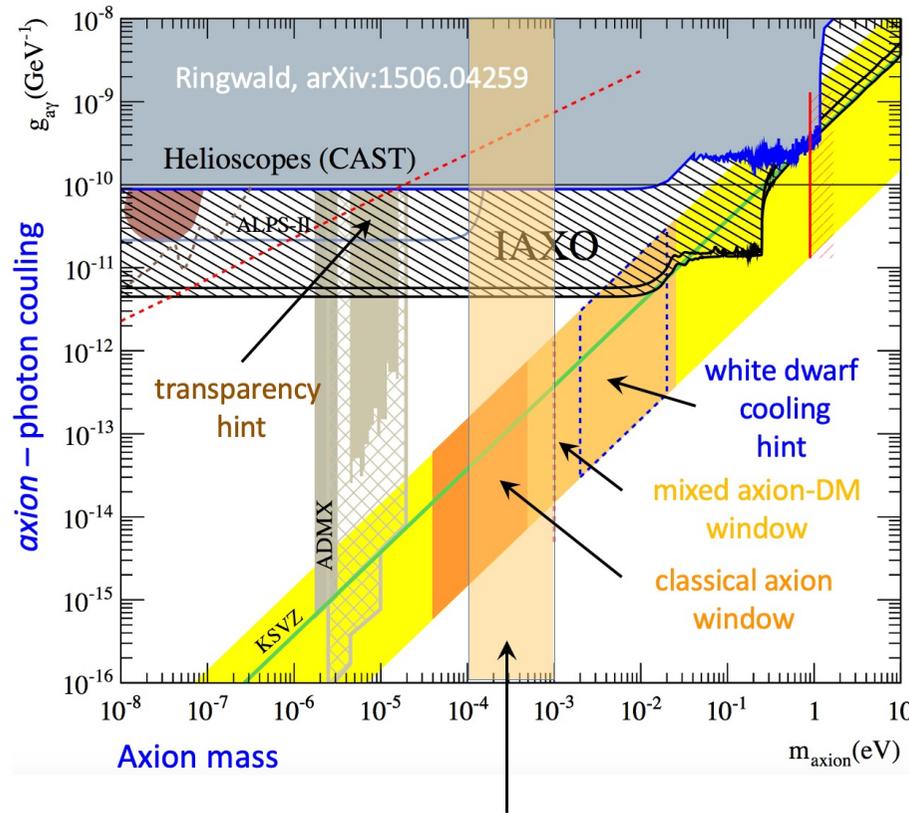
Neutrino masses at O(TeV) scale

Lighter: FASER, MATHUSALA, SHIP

$$m_\nu \sim \frac{y^2 v^2}{M} = \Theta^2 M \simeq 0.1 \text{ eV}$$



Axions and ALPs



QUAX: high-frequency magnetometer
axion-electron coupling

Techniques:

Shine through wall
(ALPS, OSQAR)

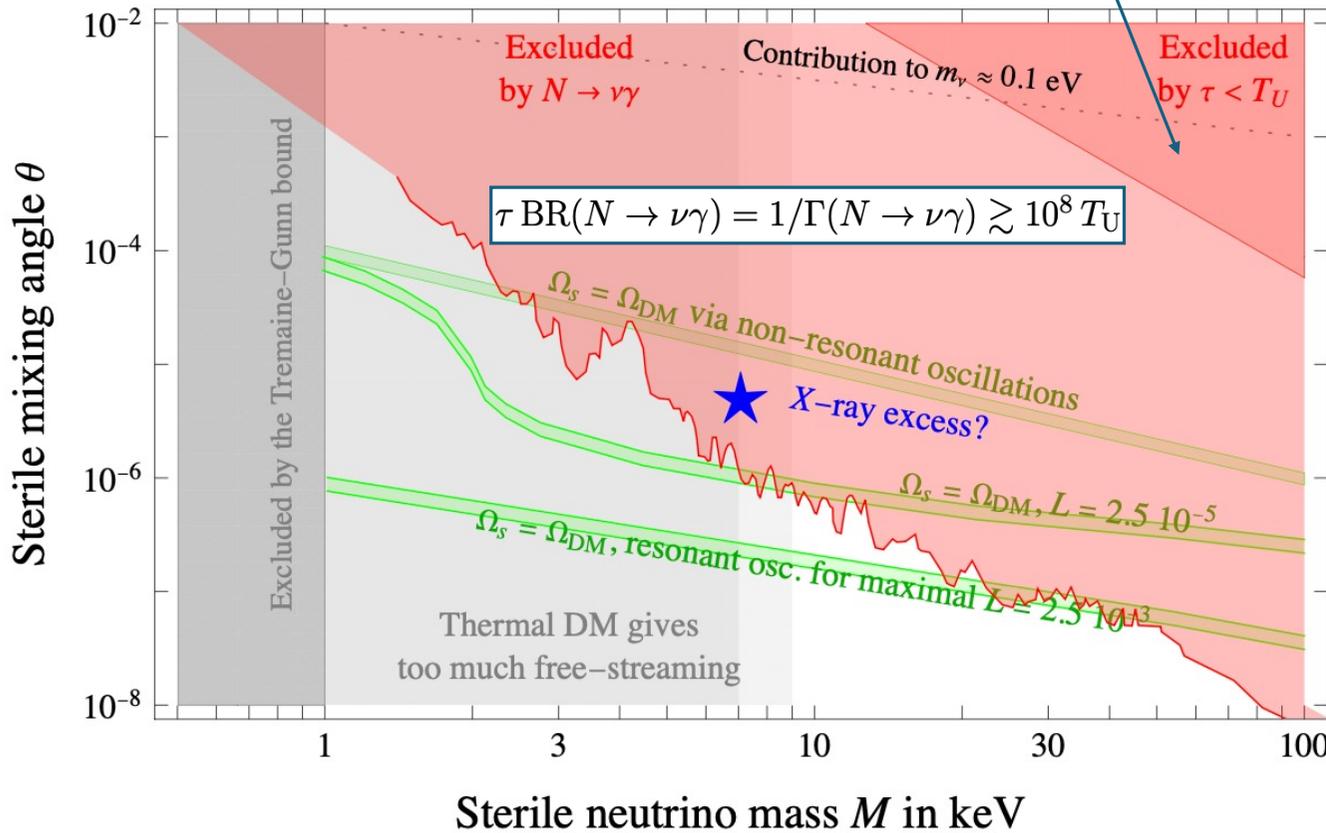
Helioscopes
(CAST, IAXO)

Haloscopes
(ADMX)

Magnetic resonance
(CASPER)

Sterile neutrino DM

$$\Gamma(N \rightarrow 3\nu) = \frac{G_F^2 M^5}{96\pi^3} \theta^2 \approx \frac{\theta^2}{33 T_U} \left(\frac{M}{\text{keV}} \right)^5$$

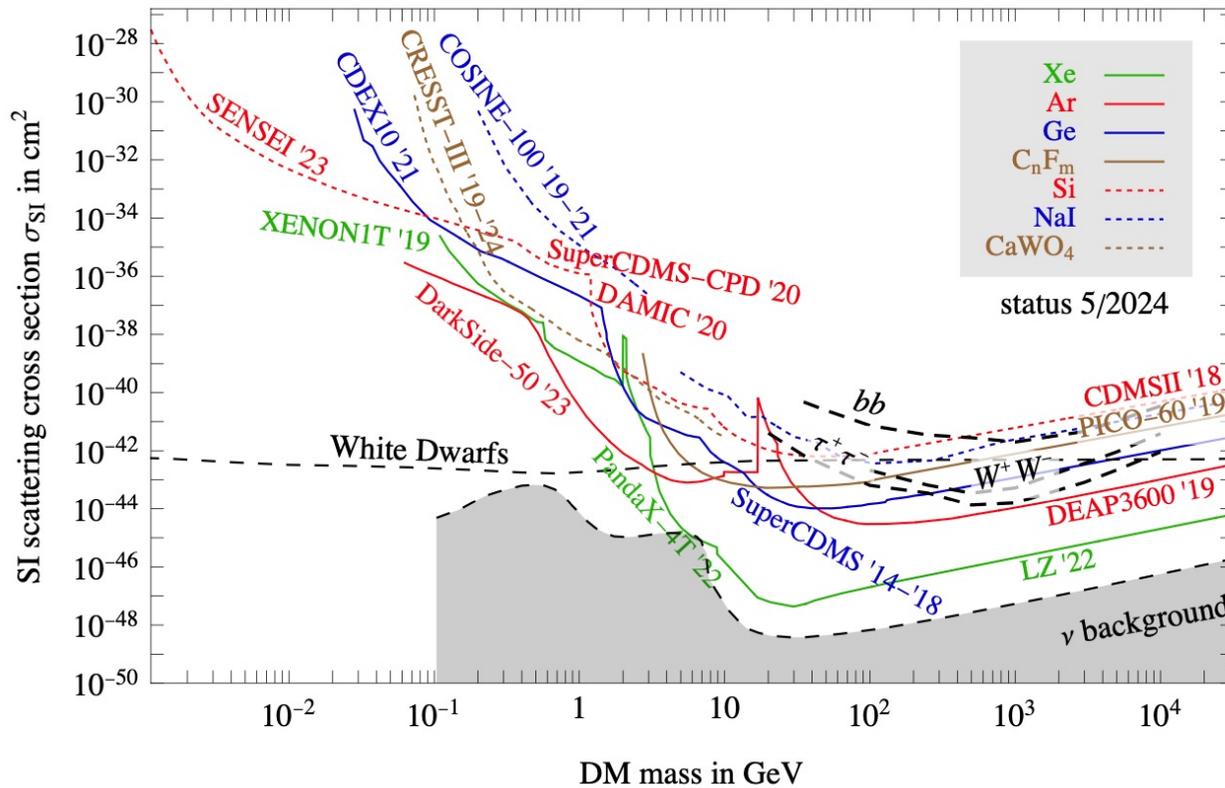


$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \bar{N} i \not{\partial} N + \left(M \frac{N^2}{2} + y N L H + \text{h.c.} \right)$$

Cirelli et al, 2406.01705

DM: direct detection

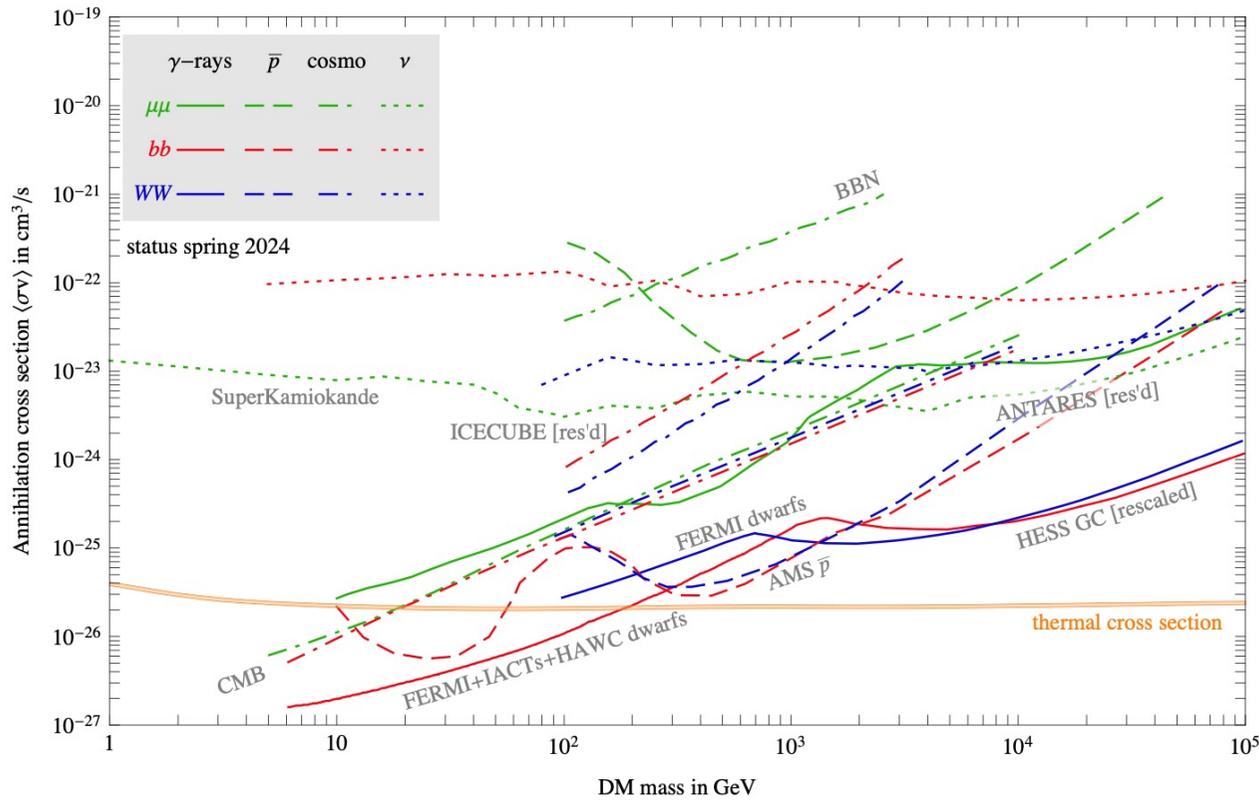
Direct Detection constraints on SI scattering



Cirelli et al, 2406.01705

DM: indirect detection

All Indirect Detection constraints



Cirelli et al, 2406.01705

Materia oscura e buchi neri primordiali

1970 - S. Hawking: “it is tempting to suppose that the major part of the mass of the Universe is in the form of collapsed objects.”

2016 - LIGO-VIRGO rivelano GW da un sistema binario di buchi neri di O(10) masse solari

Aveva ragione Hawking?

- O(10) masse solari: NO!
- ma altri range di massa ancora possibili

.. una risposta, tante domande...

- come esplorare la finestra ancora aperta?
- qual è il meccanismo di formazione (inflazione)?
- possibili sorgenti di onde gravitazionali?

