

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

**Piano Triennale**

2024 | 2026

**Trieste**

**Stazione Marittima**

**27 | 28 giugno 2023**

## Da HL-LHC a FCC

**Marina Cobal**, Università di Udine  
& INFN Gruppo Collegato di Udine

The image features a large, stylized circular graphic on the left side, composed of various colored segments (yellow, pink, teal, blue, purple, and red) arranged in a ring. In the center of this graphic is a dark blue circle containing the white text 'INFN'. To the left of the graphic is a photograph of a lighthouse tower with a green dome and a statue of a winged figure on top. The background is white with a light blue diagonal stripe on the right side.

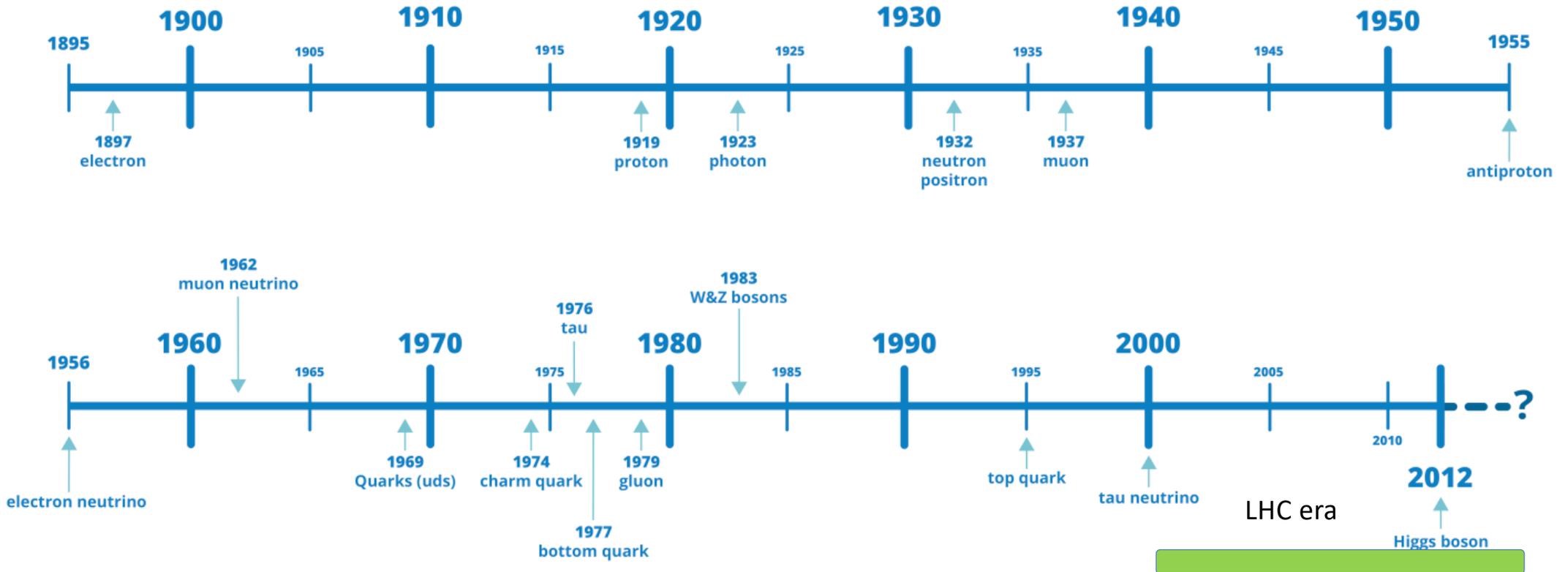


Esperienza

# Una breve storia della fisica delle particelle

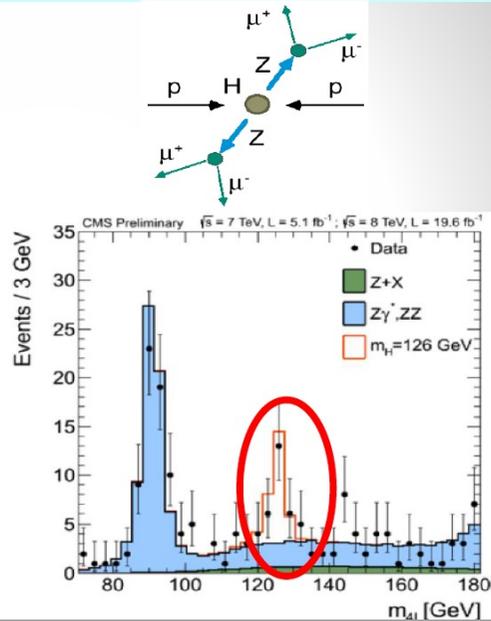
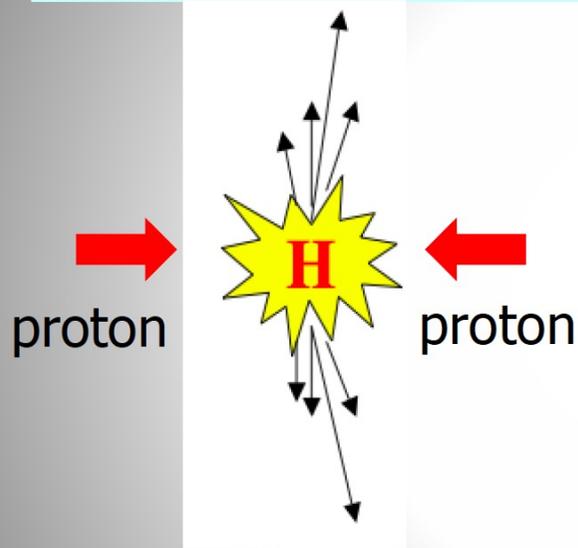


## Key particle discoveries



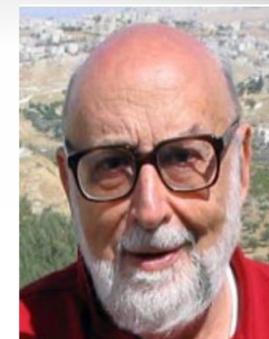
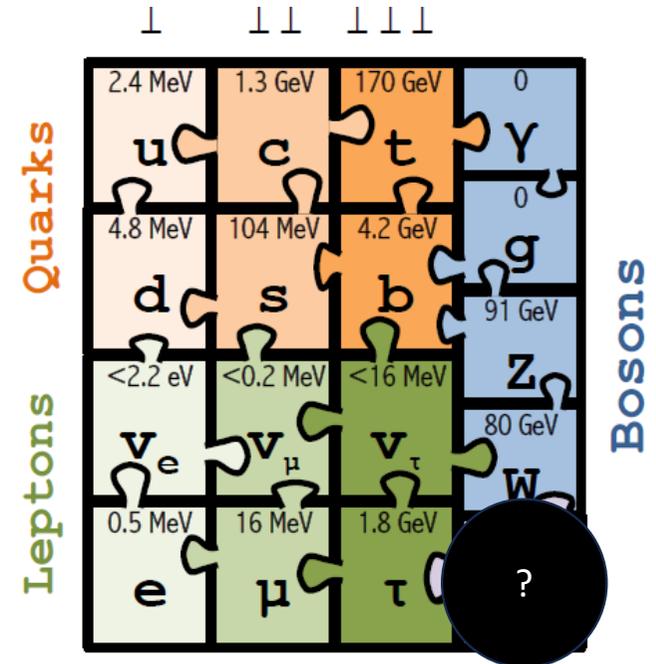
# 2012: Una pietra miliare per la fisica delle particelle

Osservazione della particella di Higgs all' LHC dopo 40 anni di ricerca sperimentale

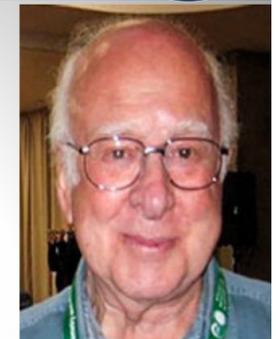


2013

La particella di Higgs era l'ultima mancante nel Modello Standard, possibile portale verso Nuova Fisica



Francois Englert



Peter Higgs



Esperimento

Esperienza

# Eppure, non abbiamo ancora..

- Un candidato per la Materia Oscura
- Una spiegazione per le masse fermioniche
- Una spiegazione della asimmetria materia-antimateria
- Un'azione per risolvere il problema della CP forte
- Una soluzione per il *fine tuning* elettrodebole
- Una soluzione per il *fine tuning* della costante cosmologica

Al momento:  
NO evidenze sperimentali  
e NO teoria che ci guidi

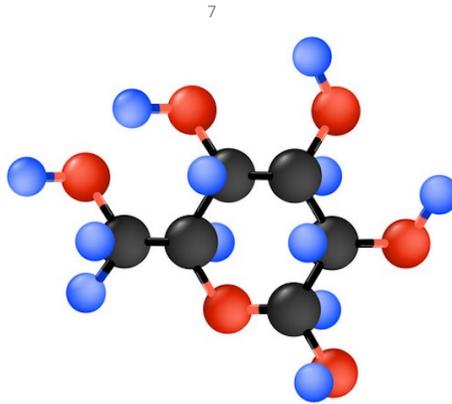
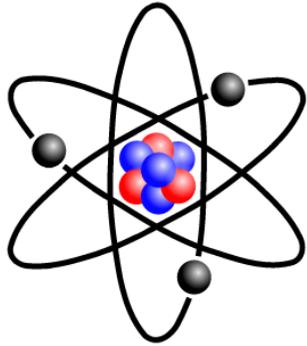


Nightmare scenario?

# Materia Visibile ed Oscura

Ipotizziamo oggi che la **materia barionica visibile** costituisca il **16% di tutta la materia** nel nostro Universo: 73% è Idrogeno, 25% Elio. Il resto: 2%

Ma la fenomenologia della materia visibile non è quella dell'idrogeno, e con quel 16% osserviamo una straordinaria complessità!

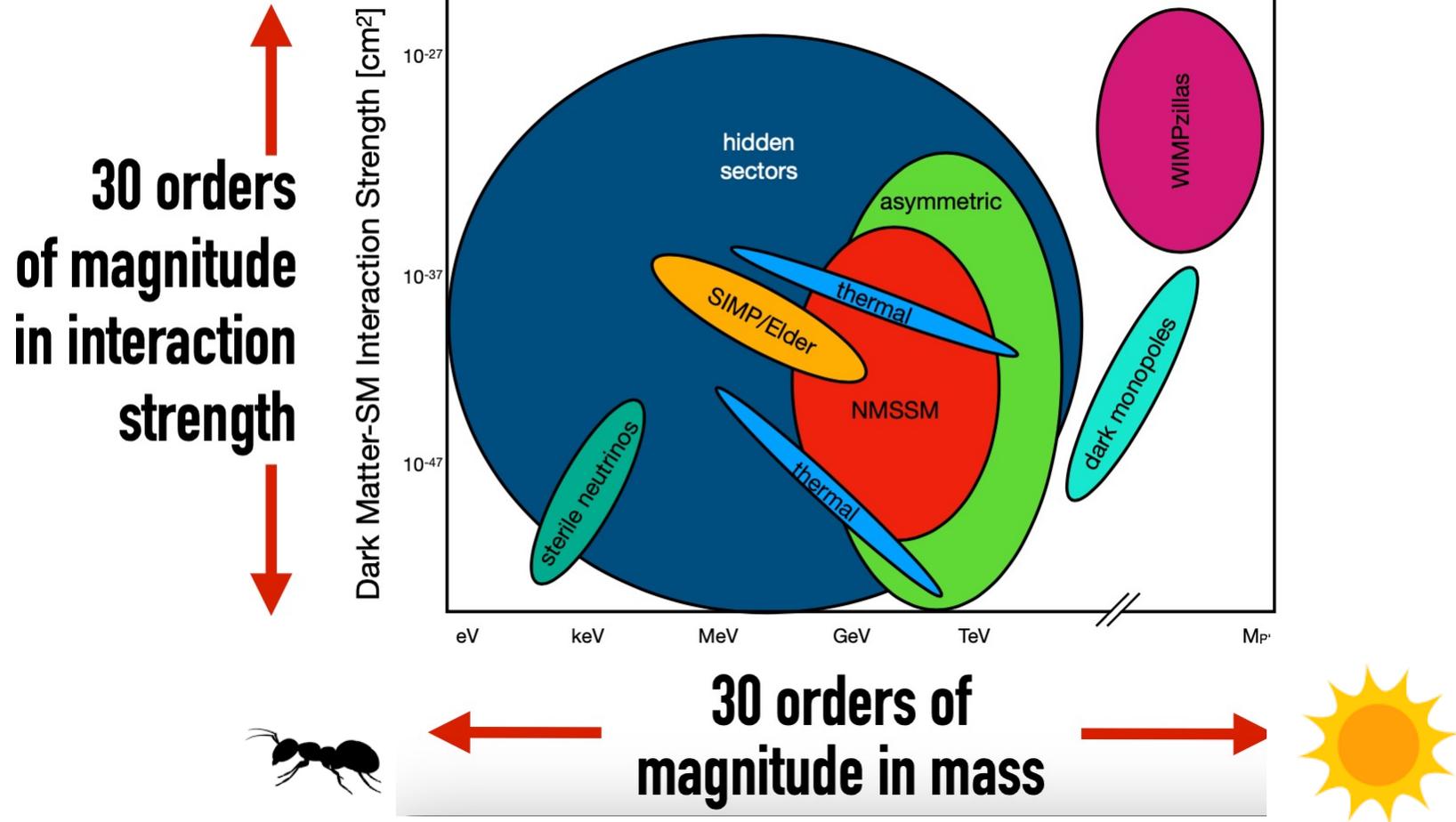


La **supersimmetria** suggeriva per la Materia Oscura: WIMPs, in piccolo intervallo di massa, MA:

Il settore visibile è ricco, perché la materia oscura dovrebbe essere differente?

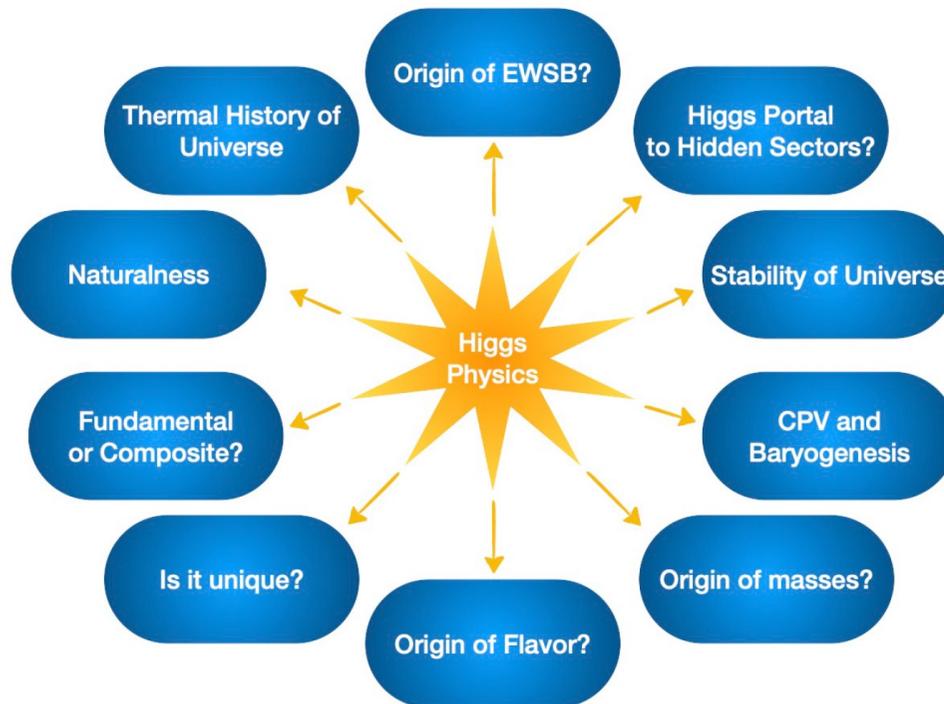
# Delve deep, Search wild..

Snowmass Dark Matter report, [2209.07426](#)

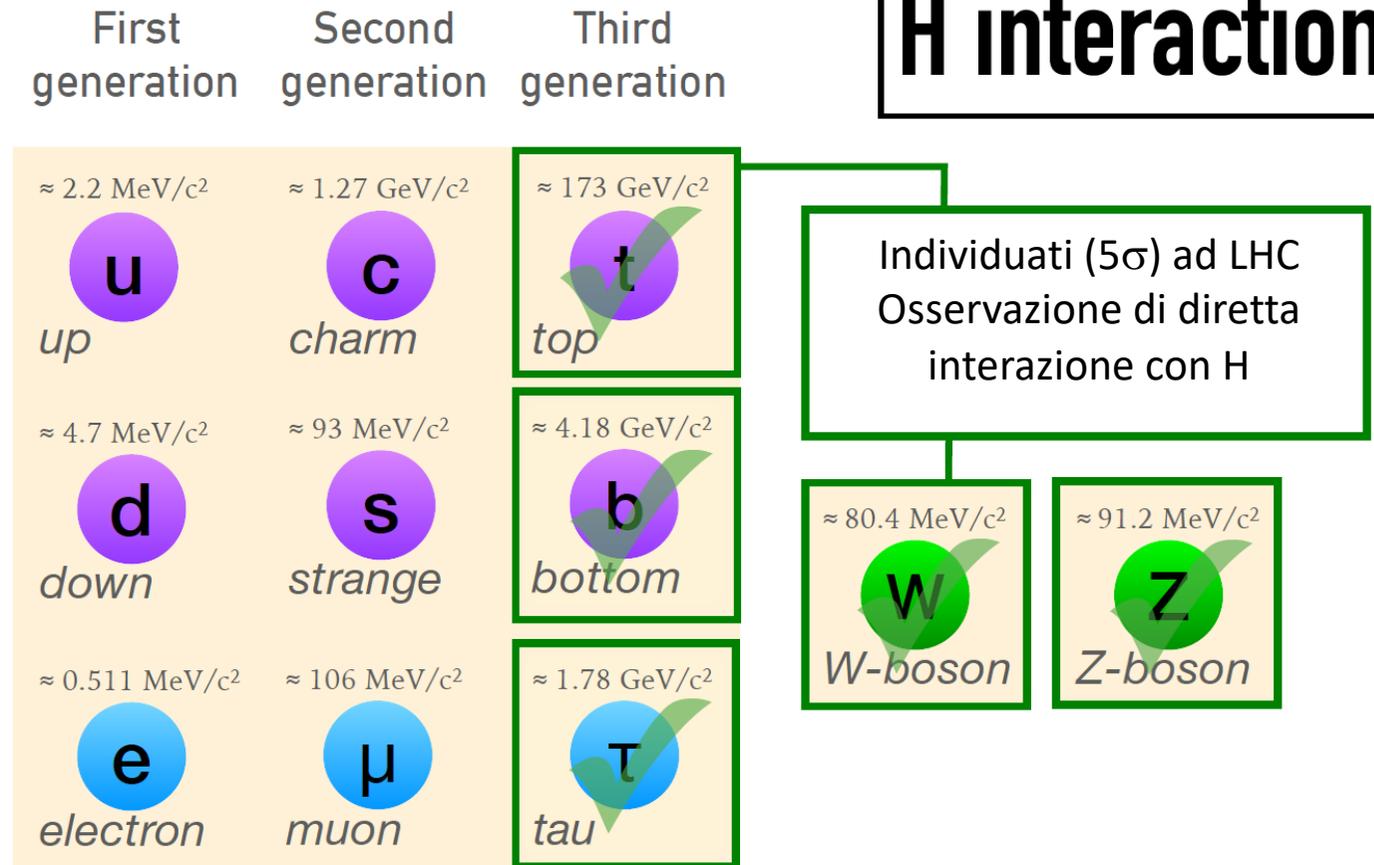


# Higgs: una chiave per capire il nostro Universo?

$$\mathcal{L} = \underbrace{y \Phi \psi \bar{\psi}}_{\text{flavour}} + \underbrace{\mu^2 |\Phi|^2}_{\text{naturalness}} - \underbrace{\lambda |\Phi|^4}_{\text{stability}} - \underbrace{V_0}_{\text{cosmology?}}$$



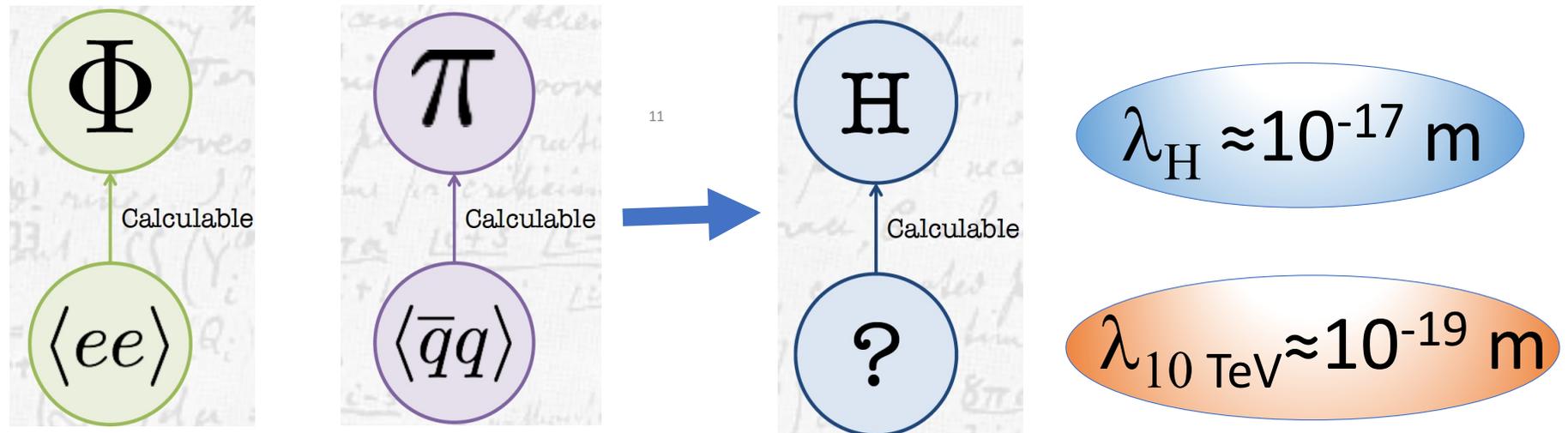
# H interactions



Ancora mancante l'evidenza sperimentale che i quark up e down, e l'elettrone, acquistino massa attraverso l'accoppiamento di Yukawa.

# Quanto bene conosciamo il bosone di Higgs?

Ogni scalare incontrato sinora ha proprietà (massa, vev..) calcolabili a partire da una teoria microscopica più fondamentale (**riduzionismo**)



Il Modello Standard potrebbe essere una «teoria effettiva» che deve essere sostituita da una Teoria più fondamentale alle corte distanze?



Aspettativa

Esperimento

Esperienza

# Che tipo di collisore?

- **Aumento Energia:** accesso diretto a nuove particelle
- **Aumento luminosità -> Precisione:** evidenza indiretta di deviazioni ad alta/bassa energia

## Più sensibilità, più PRECISIONE, più ENERGIA

- La soluzione migliore è un collisore che sia una combinazione leptónico-adronico

- La più alta statistica
- La più alta energia partonica
- Sinergie e complementarità tra  $e^+e^-$  and pp



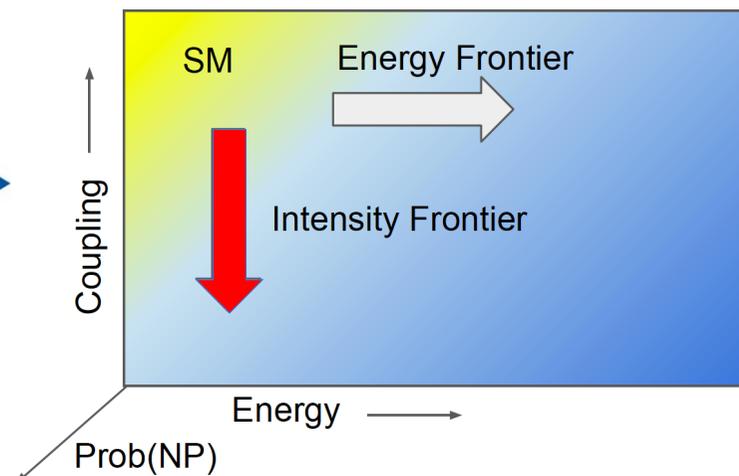
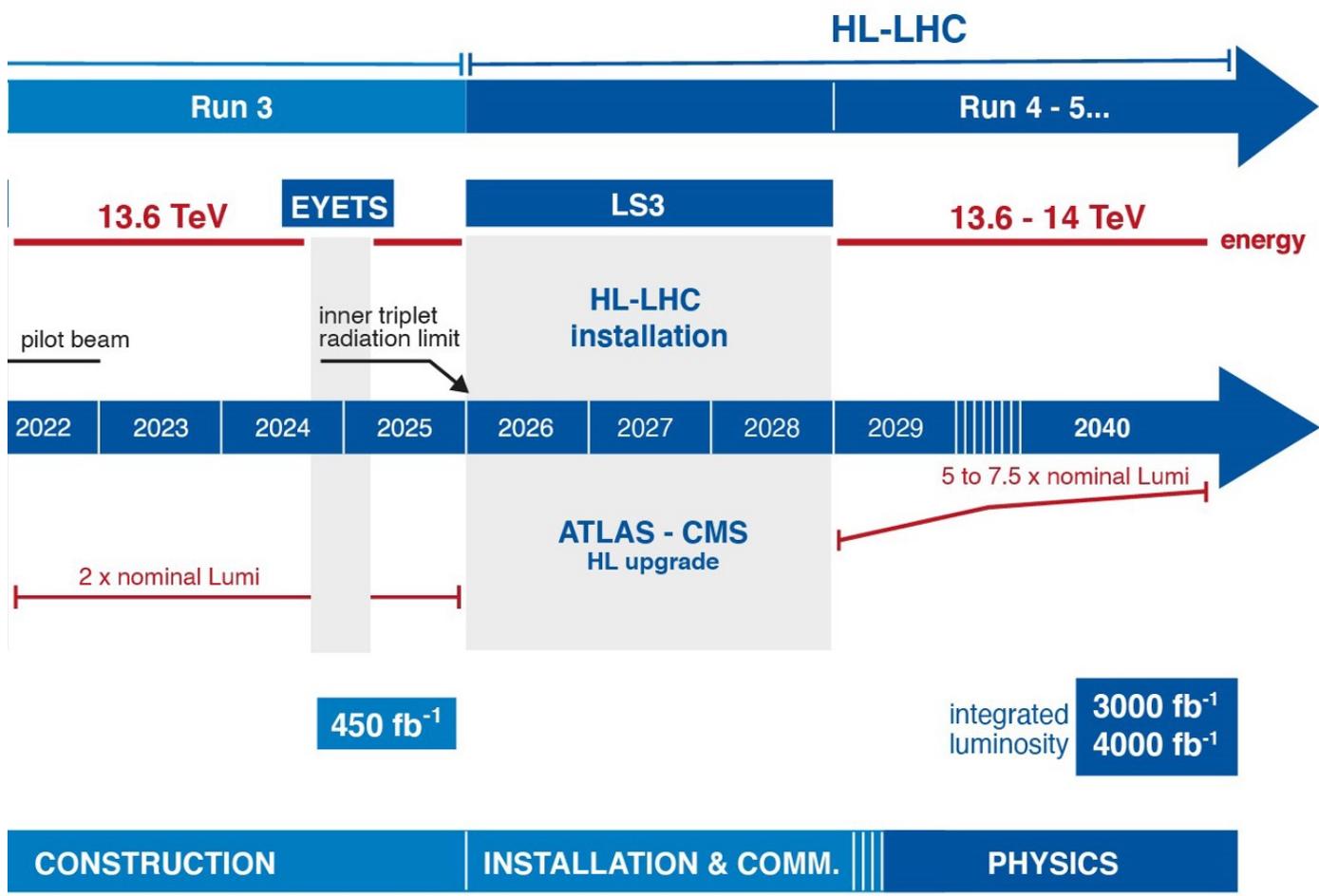
HL-LHC

FCC-ee

FCC-hh

# HL-LHC: timeline

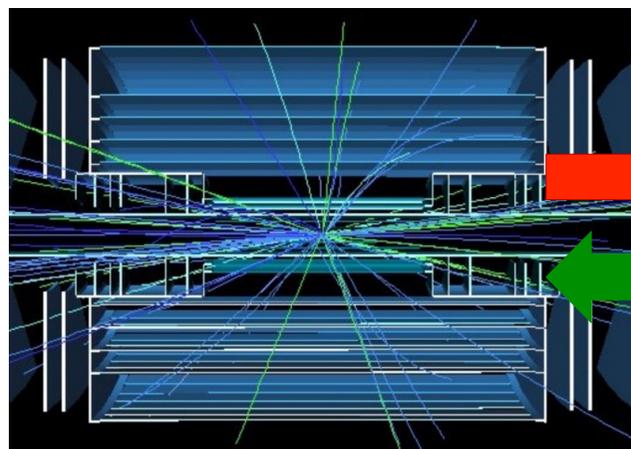
43 istituzioni  
19 paesi



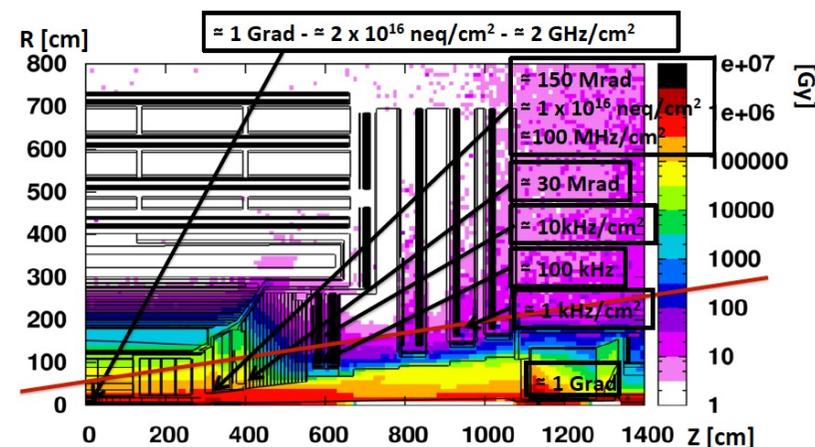
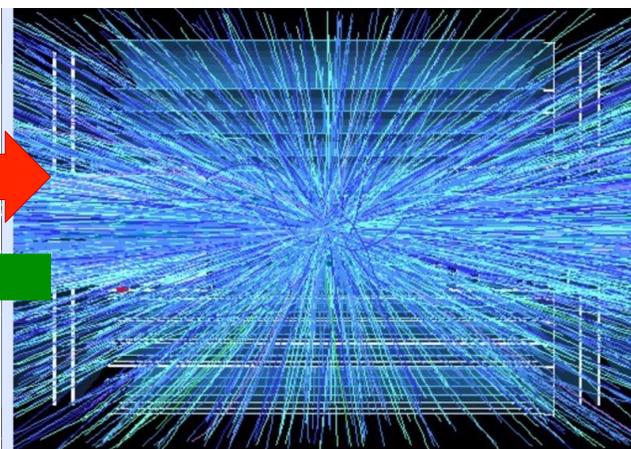
# HL-LHC: sfide sperimentali

- Alta luminosità → **200 interazioni** pp per ogni incrocio dei pacchetti
  - aumento della complessità combinatoriale, del rate di tracce false, di segnali spurii nei calorimetri, del volume dei dati da essere letti per ogni evento.
- Elementi del rivelatore ed elettronica esposti ad **alte dosi di radiazione**.  
Necessari: nuovo tracciatore, nuovi calorimetri e rivelatori di muoni in avanti, nuovi sistemi di read-out.

25 pileup

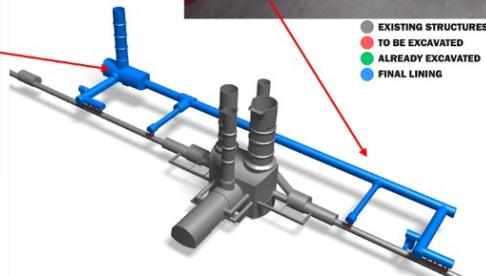


200 pileup



# HL-LHC: stato

- Progressi significativi su tutti i work packages
- Novità incoraggianti dagli USA e dal CERN per i programmi sul magnete Nb<sub>3</sub>Sn ( e buona comprensione della tecnologia di questi nuovi magneti superconduttori)
- Lavori di ingegneria civile completati (tranne i carotaggi verticali)



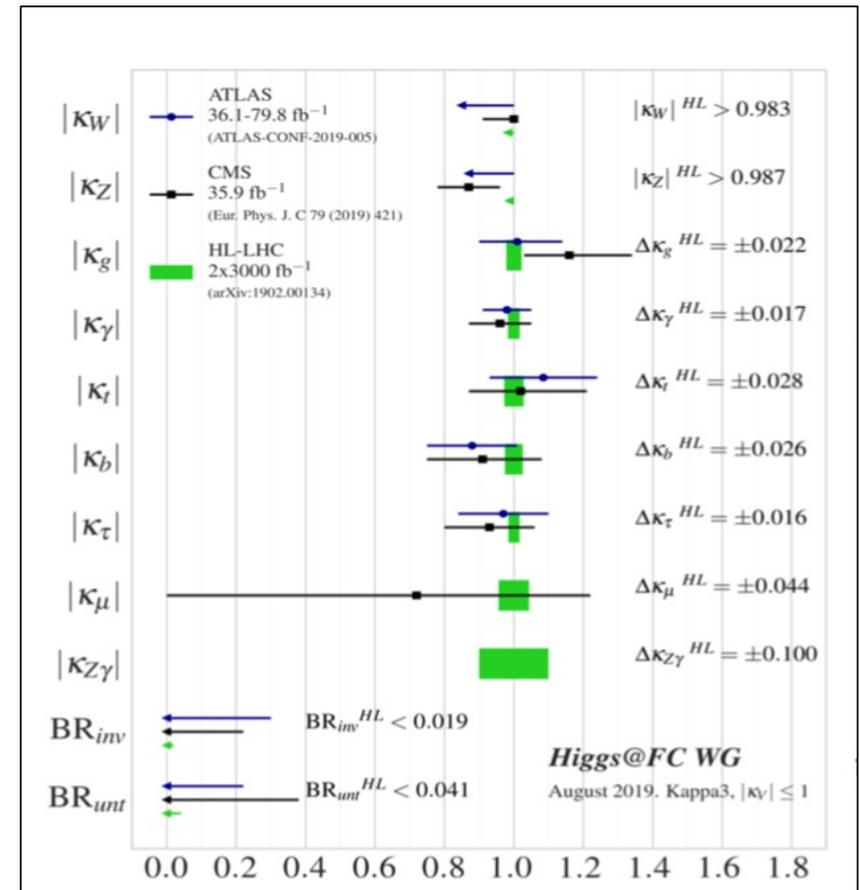
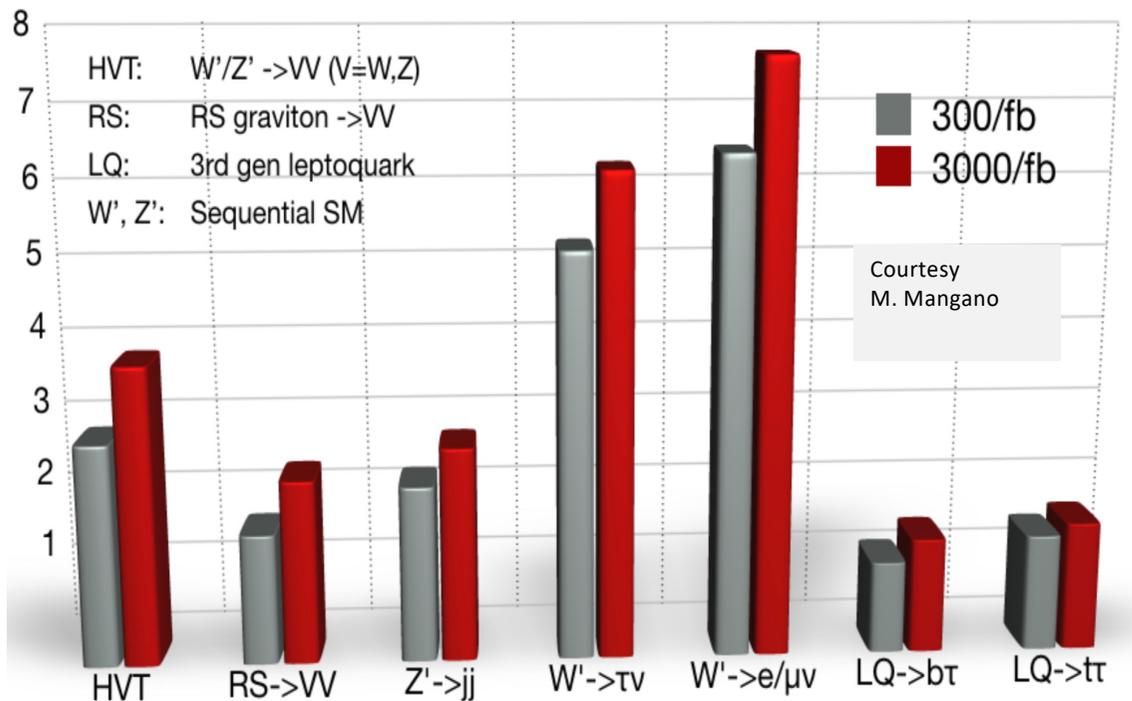
- nuovi magneti quadrupoli supercondutto
- collegamenti superconduttori ad alta T
- nuove tecnologie per il vuoto
- convertitori di potenza ad alta corrente molto precisi.

# HL-LHC: potenziale di fisica

Precisione sugli accoppiamenti dell' Higgs (normalizzati alle previsioni del MS) **oggi** e **dopo HL-LHC**

Ricerca di fotoni oscuri di massa fino a 10 GeV o più

Massa raggiungibile (TeV) per una scoperta a  $5\sigma$



→ Miglioramento per un fattore <sup>17</sup>5-10

# H interactions

Misurabile ad  
HL/LHC

First generation    Second generation    Third generation

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ <b>u</b> <i>up</i>	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ <b>c</b> <i>charm</i>	$\approx 173 \text{ GeV}/c^2$ <b>t</b> <i>top</i>
$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ <b>d</b> <i>down</i>	$\approx 93 \text{ MeV}/c^2$ <b>s</b> <i>strange</i>	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ <b>b</b> <i>bottom</i>
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ <b>e</b> <i>electron</i>	$\approx 106 \text{ MeV}/c^2$ <b><math>\mu</math></b> <i>muon</i>	$\approx 1.78 \text{ GeV}/c^2$ <b><math>\tau</math></b> <i>tau</i>

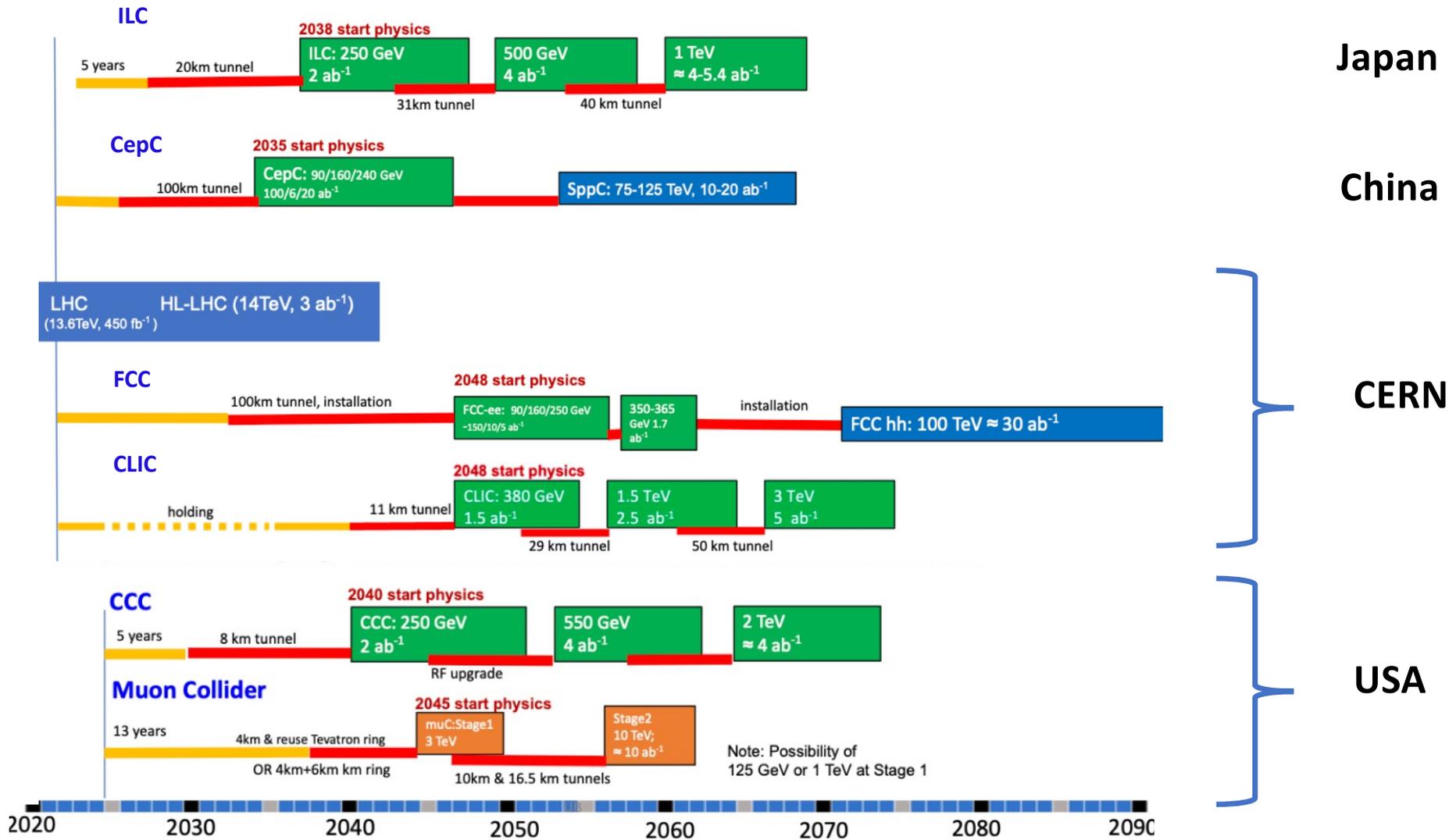
Individuati ( $5\sigma$ ) ad LHC  
Osservazione di diretta  
interazione con H

$\approx 80.4 \text{ MeV}/c^2$   
**W**  
*W-boson*

$\approx 91.2 \text{ MeV}/c^2$   
**Z**  
*Z-boson*

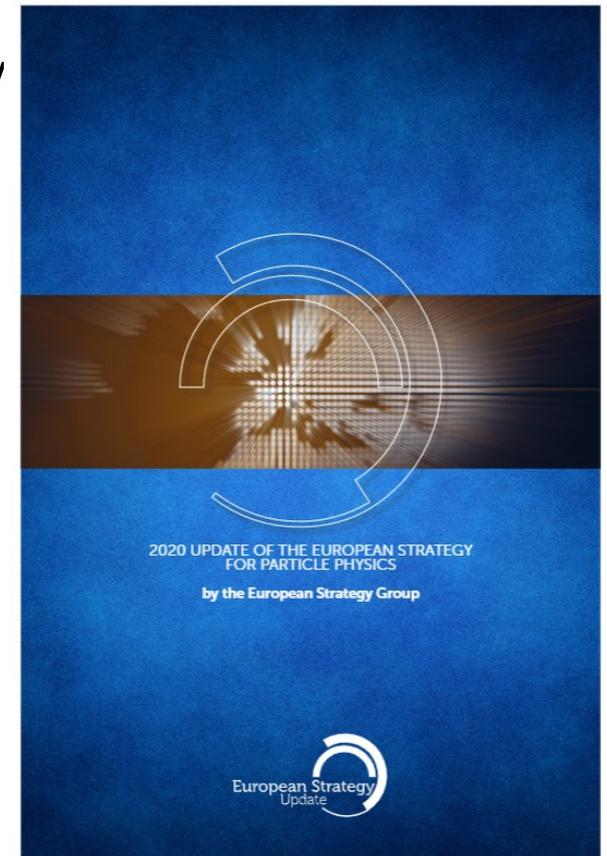
Prima Evidenza ( $3\sigma$ )  
Da confermare ad  
LHC/ HL-LHC nei  
prossimi 3-5 anni

# Progetti Futuri



- A Giugno 2020 il CERN Council ha aggiornato la European Strategy for Particle Physics.
- Raccomandazioni scientifiche:
  - Pieno sfruttamento di LHC e HL-LHC
  - Prossimo collisore in prima priorità: e+e- Higgs factory
  - Aumento dell' R&D sulle tecnologie legate agli acceleratori
  - Indagine della fattibilità tecnica e finanziaria di un futuro collisore adronico a  $\geq 100$  TeV
- Lo studio di fattibilità per FCC risponderà a queste domande

20



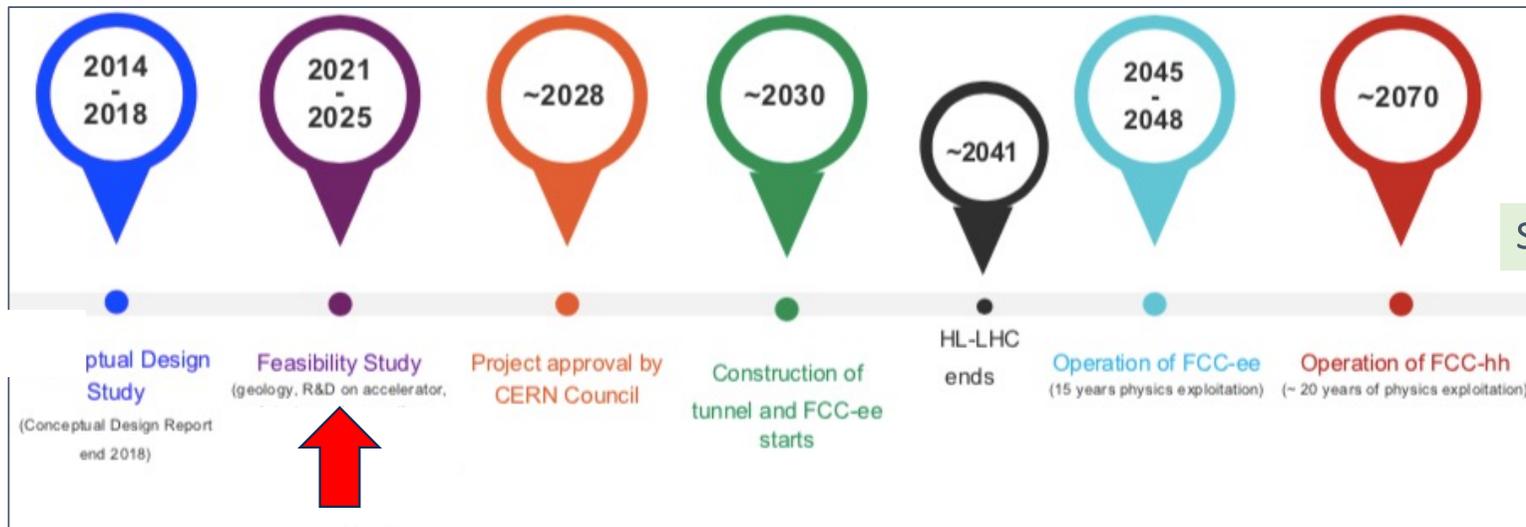
# Il Progetto FCC e la scala dei tempi

## 1° stage: FCC-ee:

- Collisioni e+e- collisions 90-360 GeV, **Costruzione:** 2033-2045 → **Presa dati:** 2048-2063
- La più alta statistica per Z, W, ZH di tutte le altre macchine proposte per Higgs e fisica elettrodebole; potenziale di **scoperta indiretta** fino a ~ 70 TeV

## 2° stage: FCC-hh:

- Collisioni pp a energia  $\geq 100$  TeV, **Costruzione:** 2058-2070 → **Presa dati:** ~ 2070-2095
- **Esplorazione della prossima frontiera di energia** (~ **x10 LHC**) e **misure mai raggiunte di accoppiamenti dell' Higgs a basso rate e "pesanti" (ttH, HH)**



Schedula realistica

# H interactions

Garantito a Fcc-ee,  
misura indipendente  
dal modello

Non chiaro come  
fare

Servono nuove  
idee!

Non ancora visto  
Potrebbe essere **nelle**  
**possibilità di FCC-ee**

First generation    Second generation    Third generation

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ <b>u</b> <i>up</i>	$\approx 1.27 \text{ GeV}/c^2$ <b>c</b> <i>charm</i>	$\approx 173 \text{ GeV}/c^2$ <b>t</b> <i>top</i>
$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ <b>d</b> <i>down</i>	$\approx 93 \text{ MeV}/c^2$ <b>s</b> <i>strange</i>	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ <b>b</b> <i>bottom</i>
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ <b>e</b> <i>electron</i>	$\approx 106 \text{ MeV}/c^2$ <b><math>\mu</math></b> <i>muon</i>	$\approx 1.78 \text{ GeV}/c^2$ <b><math>\tau</math></b> <i>tau</i>

Individuati ( $5\sigma$ ) ad LHC  
Osservazione di diretta  
interazione con H

$\approx 80.4 \text{ MeV}/c^2$ <b>W</b> <i>W-boson</i>	$\approx 91.2 \text{ MeV}/c^2$ <b>Z</b> <i>Z-boson</i>
--------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------

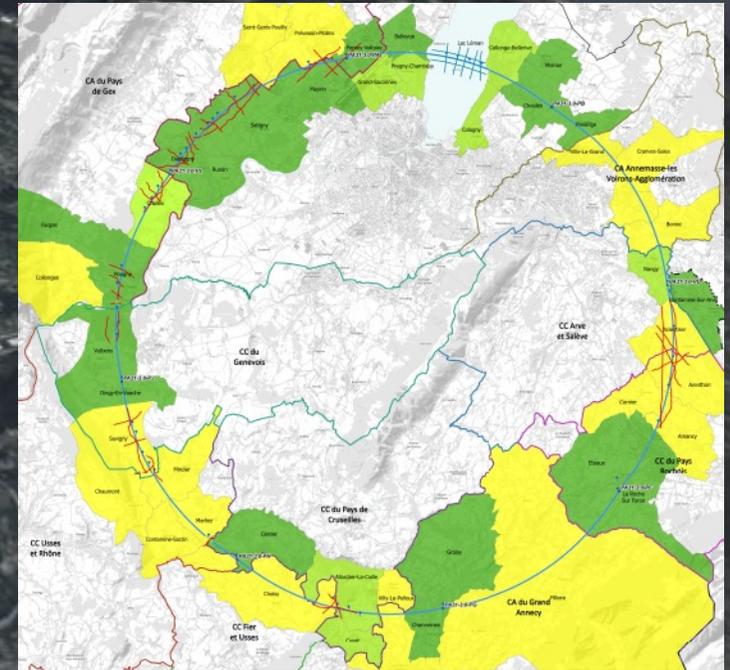
Prima Evidenza ( $3\sigma$ )  
Da confermare ad  
LHC/ HL-LHC nei  
prossimi 3-5 anni

# FCC: la baseline di 90.7 km

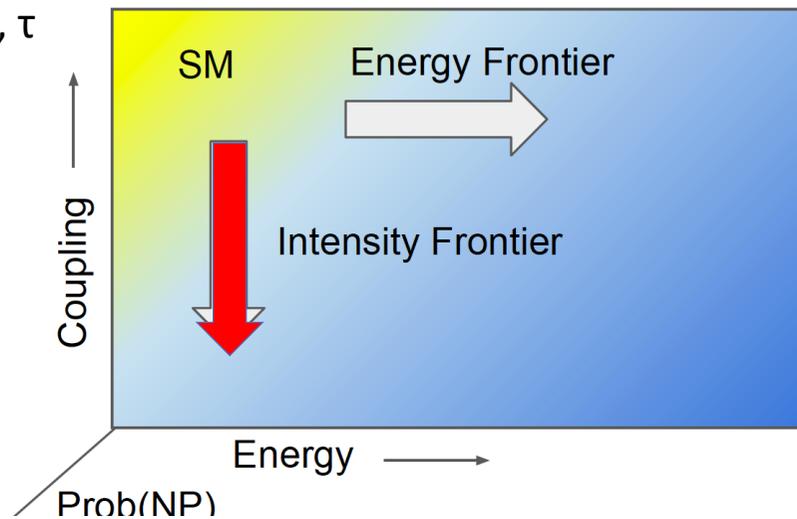
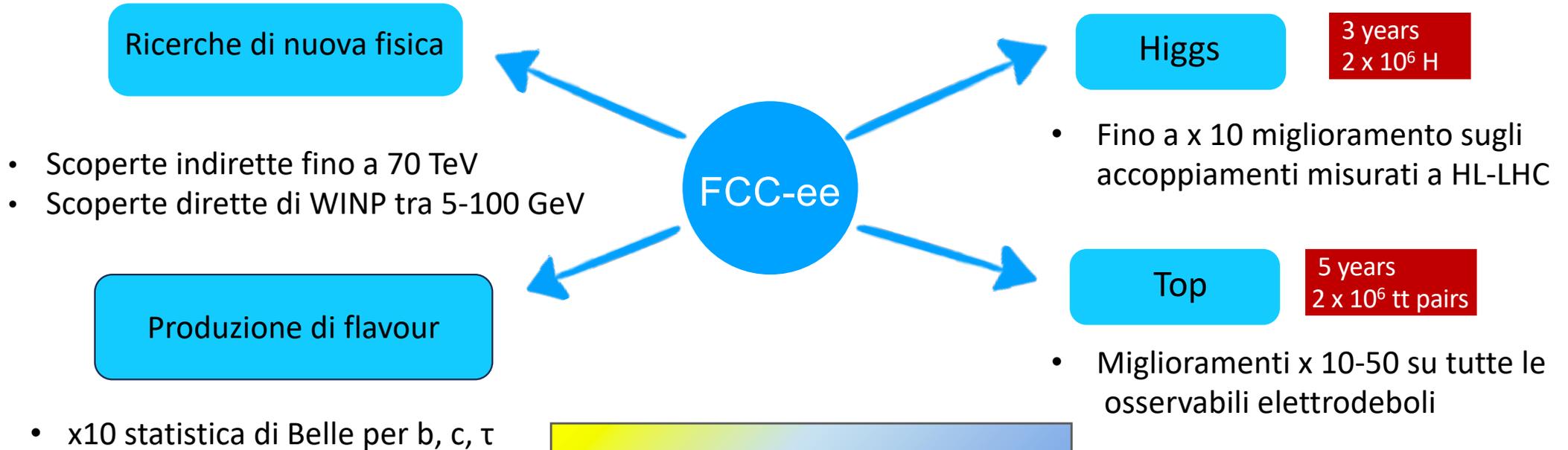
150 istituti  
34 paesi

	$\sqrt{s}$	L /IP (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Int L/IP/y (ab <sup>-1</sup> )
<b>e<sup>+</sup>e<sup>-</sup></b> <b>FCC-ee</b>	~90 GeV	Z	182 x 10 <sup>34</sup>
	160	WW	19.4
	240	H	7.3
	~365	top	1.33
<b>pp</b> <b>FCC-hh</b>	100 TeV	5-30 x 10 <sup>34</sup> 30	20-30 <sup>.1</sup>

- Minor rischio: anello di 90.7 km, 8 punti in superficie,
- 2-4 esperimenti
- Tutto il progetto si sta adattando a questa configurazione



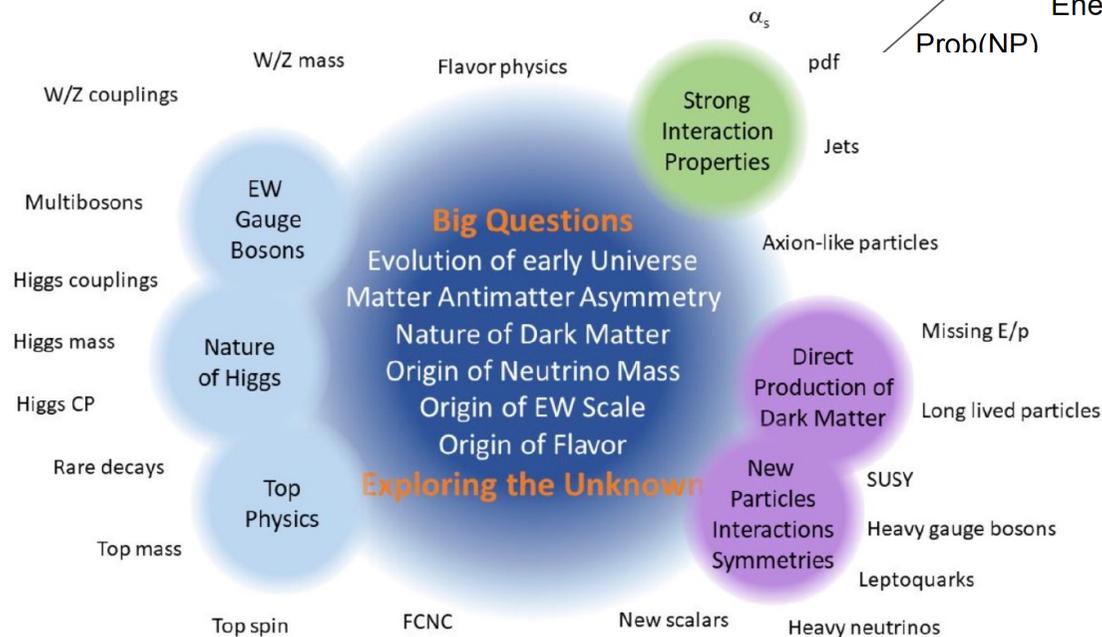
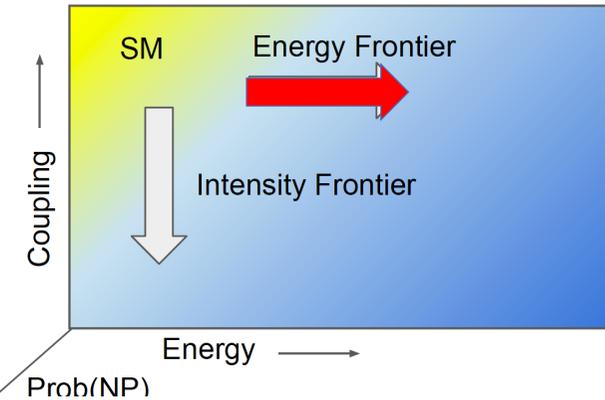
# FCC-ee: la frontiera dell'intensità



# FCC-hh: la frontiera dell'energia

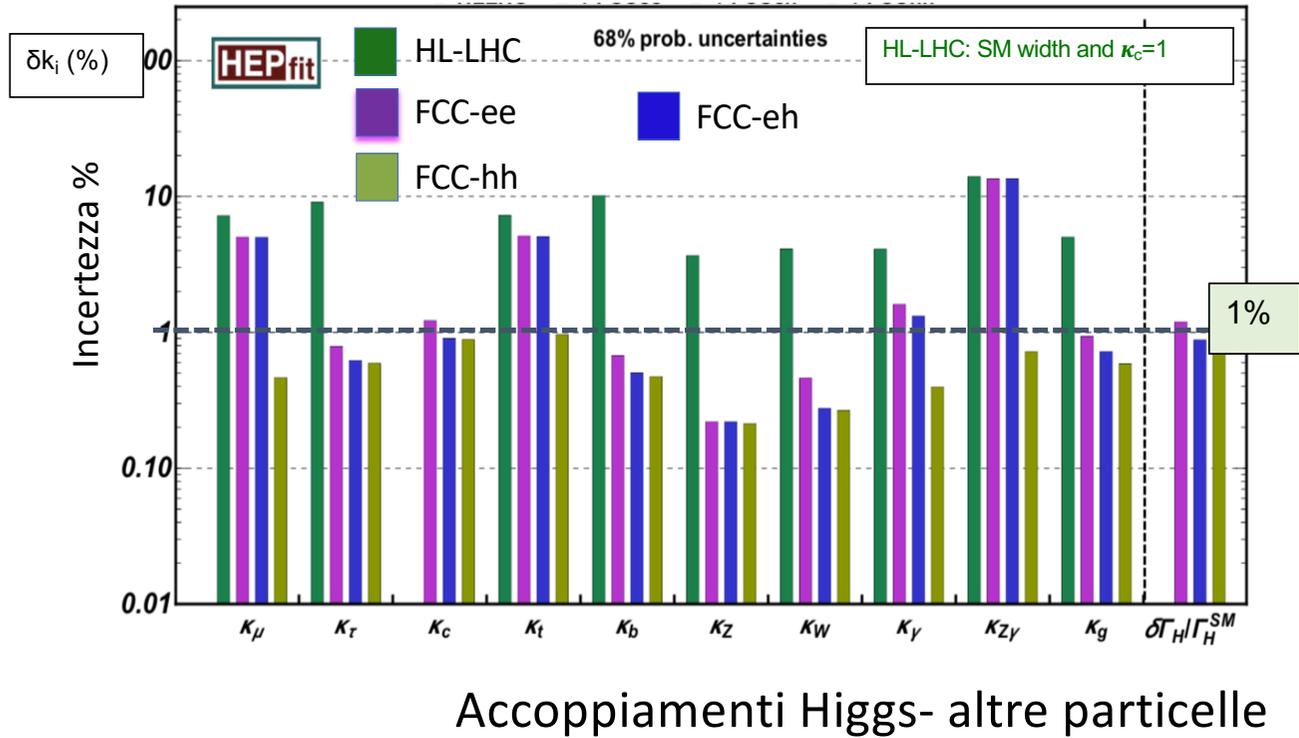
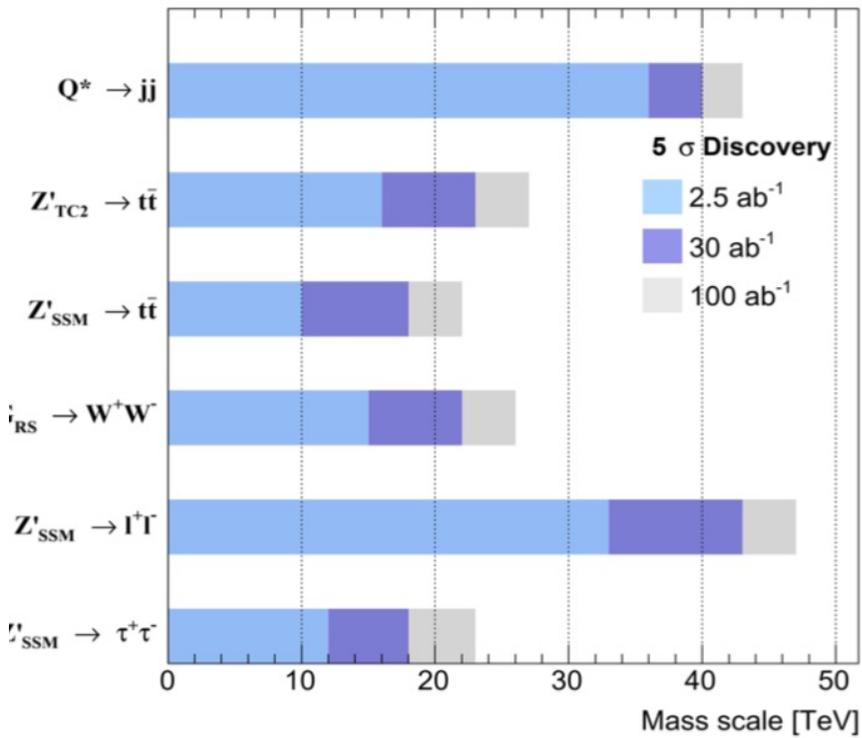
## Formidabile potenziale di fisica

- Potenziale di scoperta diretta fino a  $\sim 40$  TeV
- Misura dell' Higgs self coupling ( $\sim 5\%$ ) e ttH ( $\sim 1\%$ )
- Misure di alta precisione/model-independent di decadimenti rari dell' Higgs)
- Conclusione su Materia Oscura WIMP



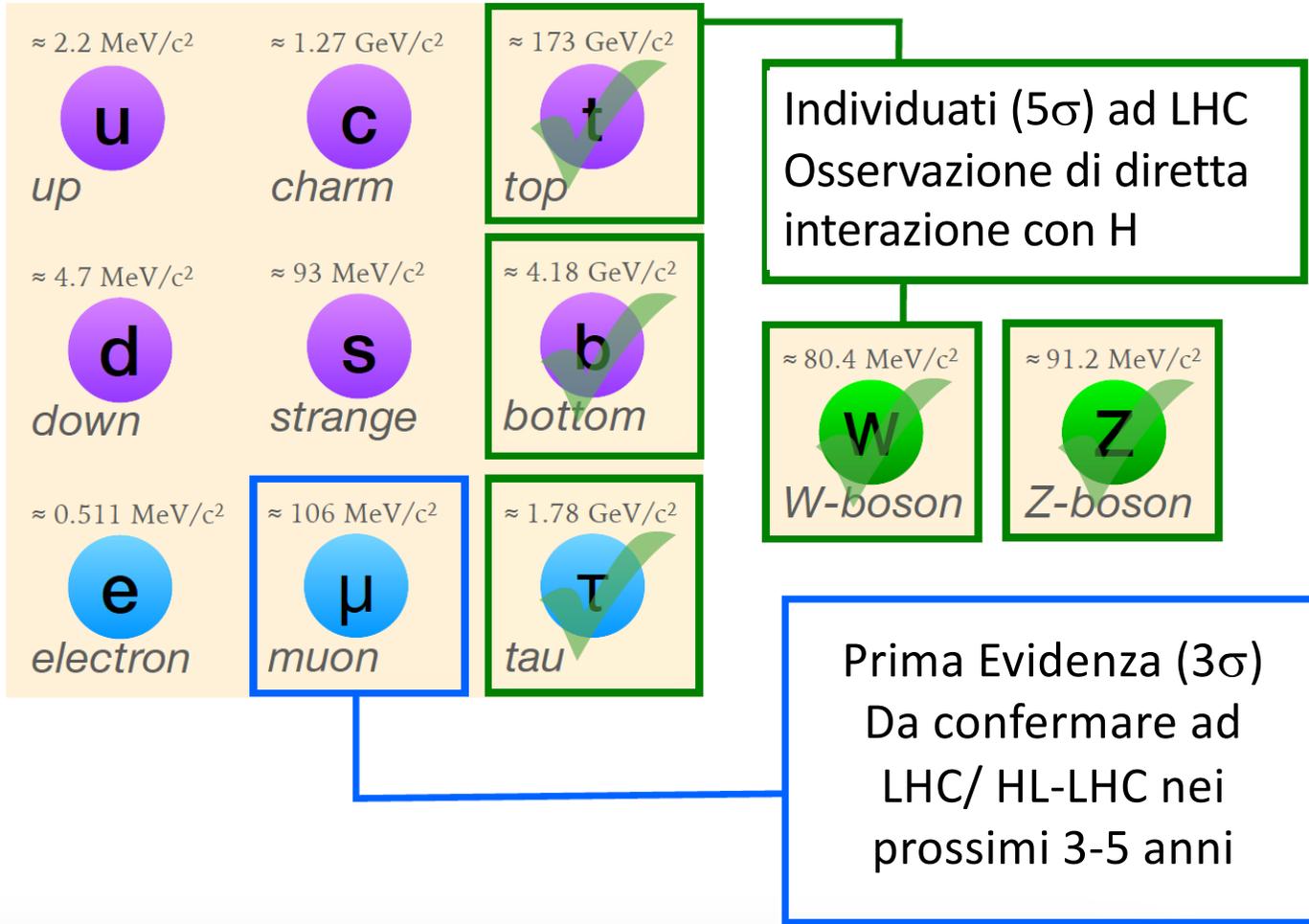
# Perchè FCC ? Potenziale di fisica

FCC-hh Simulation (Delphes),  $\sqrt{s} = 100 \text{ TeV}$



# H interactions

First generation      Second generation      Third generation



# H interactions

Garantito a Fcc-ee,  
misura indipendente  
dal modello

Non chiaro come  
fare

Servono nuove  
idee!

First generation    Second generation    Third generation

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ <b>u</b> <i>up</i>	$\approx 1.27 \text{ GeV}/c^2$ <b>c</b> <i>charm</i>	$\approx 173 \text{ GeV}/c^2$ <b>t</b> <i>top</i>
$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ <b>d</b> <i>down</i>	$\approx 93 \text{ MeV}/c^2$ <b>s</b> <i>strange</i>	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ <b>b</b> <i>bottom</i>
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ <b>e</b> <i>electron</i>	$\approx 106 \text{ MeV}/c^2$ <b><math>\mu</math></b> <i>muon</i>	$\approx 1.78 \text{ GeV}/c^2$ <b><math>\tau</math></b> <i>tau</i>

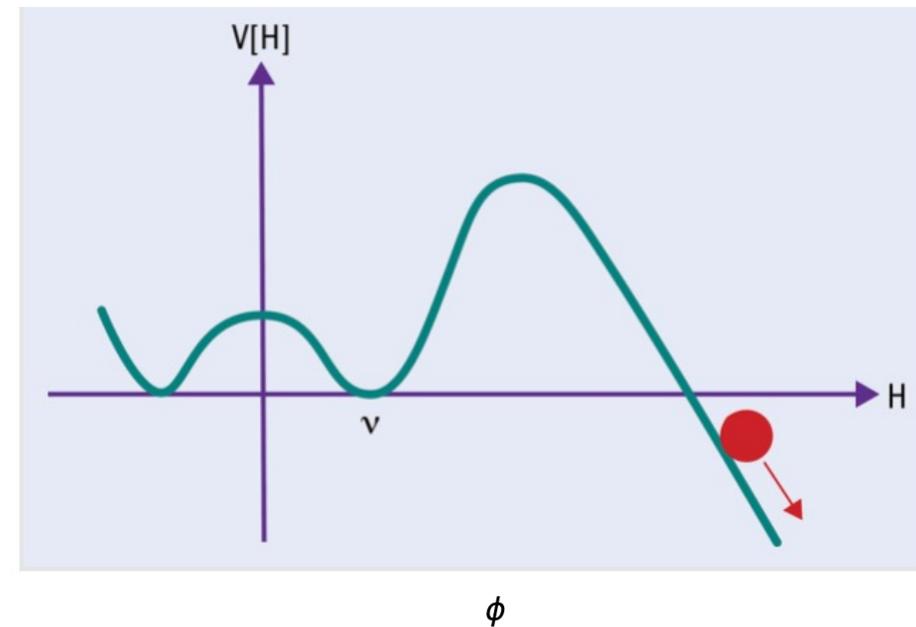
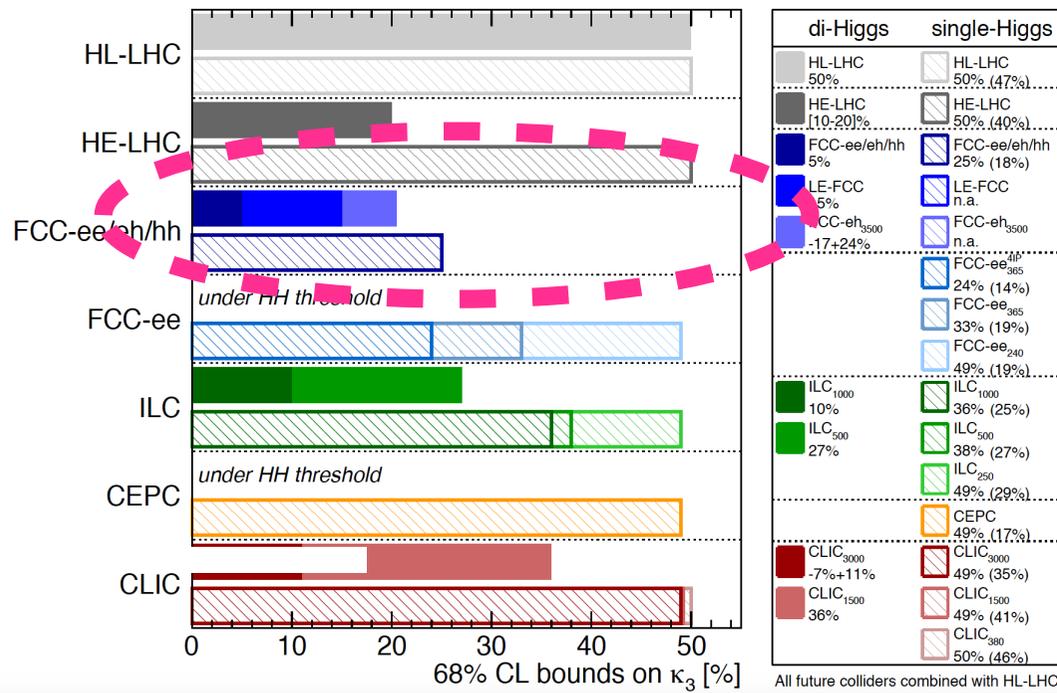
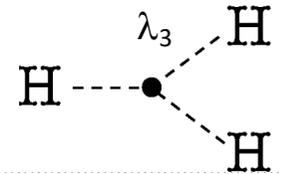
Individuati ( $5\sigma$ ) ad LHC  
Osservazione di diretta  
interazione con H

$\approx 80.4 \text{ MeV}/c^2$ <b>W</b> <i>W-boson</i>	$\approx 91.2 \text{ MeV}/c^2$ <b>Z</b> <i>Z-boson</i>
--------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------

Prima Evidenza ( $3\sigma$ )  
Da confermare ad  
LHC/ HL-LHC nei  
prossimi 3-5 anni

# Il self-coupling dell' Higgs

Le macchine future potranno farci capire la struttura del potenziale di Higgs



**Il programma integrato di FCC potrà misurare  $\lambda_3$  al 5%**

G. Salam

# Conclusioni I

- Non abbiamo più il faro del Modello Standard a guidarci mentre navighiamo nel tentativo di capire come funziona il nostro Universo.
- La fisica delle particelle richiede ora grandi macchine, grandi investimenti, e tempi lunghi (diversi decenni) per dare risultati
- Ma c'è ancora tanto da capire e scoprire: dovremmo avere la forza e il coraggio di costruire la prossima macchina per farlo.

# Conclusioni II

Ta'aanit 23a



Grazie a O. Gildemeister e a tutti quelli che - come lui - hanno piantato i carrubi che ho trovato io.

- Camminando per la via, Honi vide un uomo che piantava un carrubo. Gli chiese: quanto tempo deve passare perchè faccia frutti?
- L'uomo rispose: settanta anni. Allora Honi rispose: sei certo di vivere settant'anni?
- Rispose l'altro: io ho trovato carrubi nel mondo, perchè i miei padri li hanno piantati per me! così' io pianto questo per i miei figli..

Backup

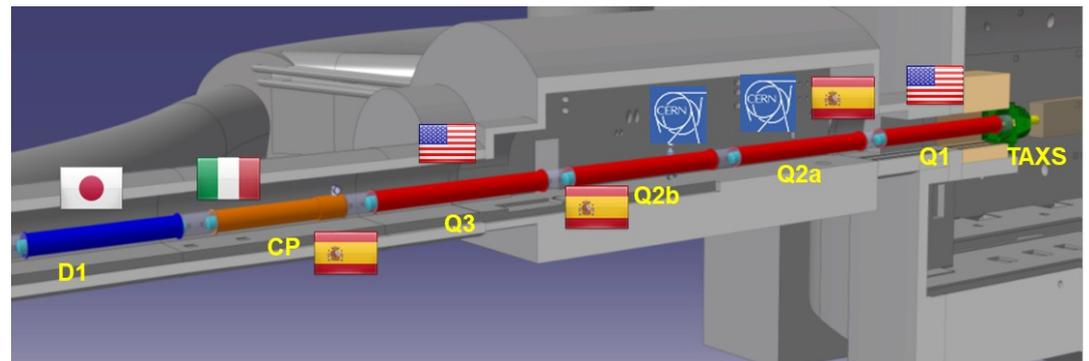
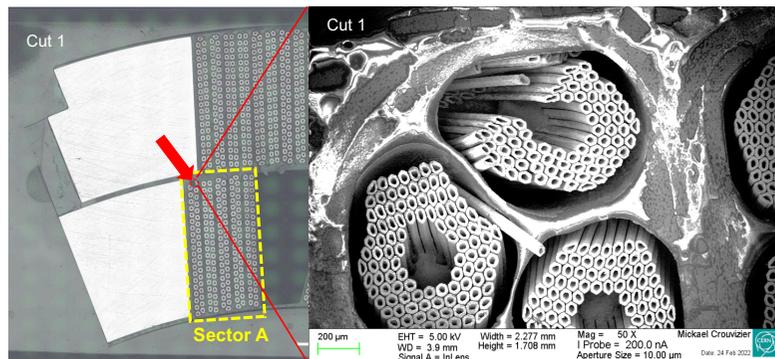
# Progress with the Nb<sub>3</sub>Sn Interaction Region Magnets

## 16 MQXFA ( 4.2m long US Magnets) to be installed

- Endurance test (50 quenches) of 4.2m long magnet successful
- 6 out of 8 magnets so far accepted after cold tests
- First 2 magnet cold-mass assembled & successfully tested

## 8 MQXFB (7.2m long CERN Magnets) to be installed

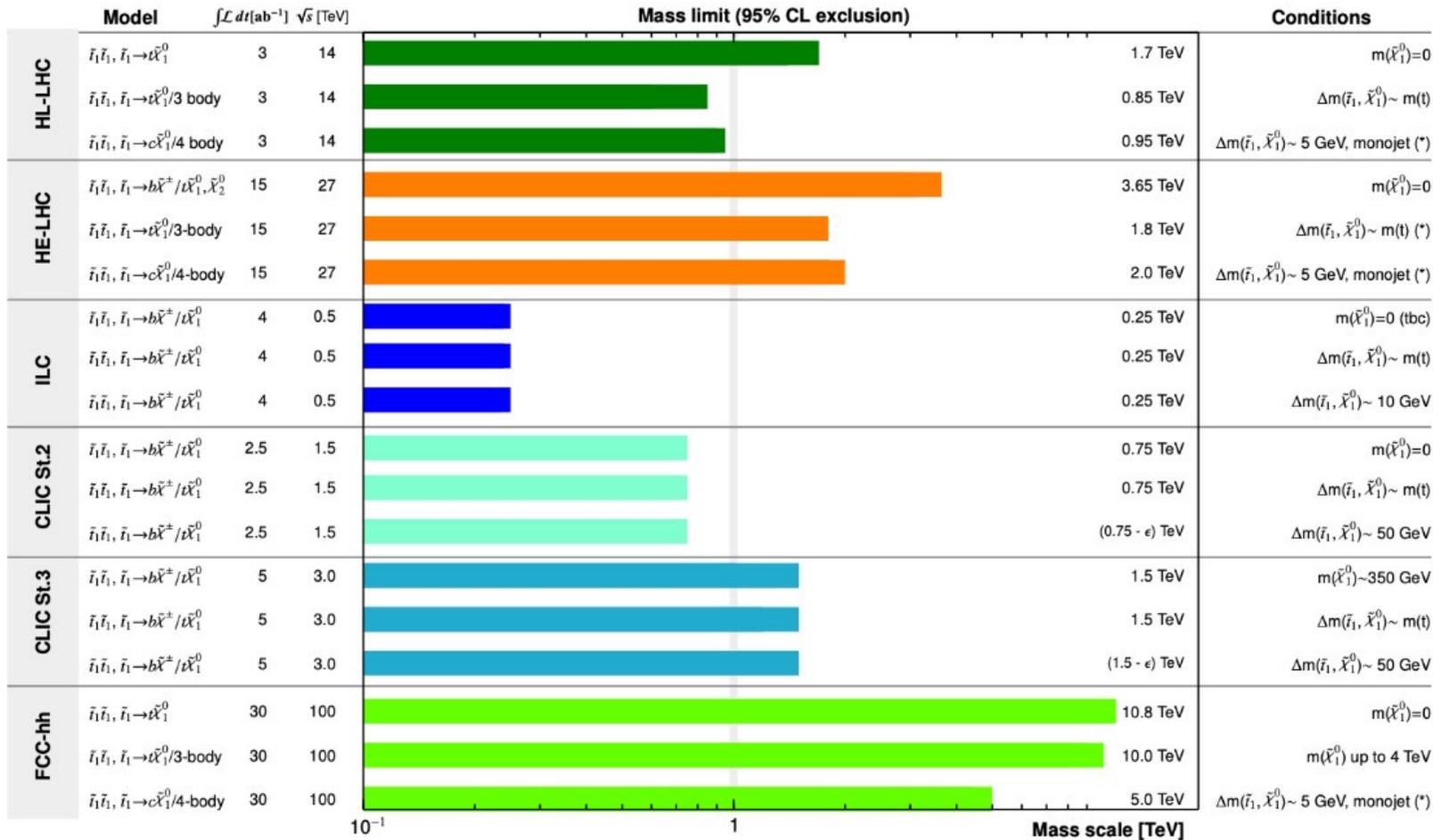
- Performance limitations identified in first 3 prototypes
- Studied in detail with 3 issues to be addressed
  - Revised welding procedure (successfully tested)
  - Revised assembly procedures (successfully tested)
  - New coil production procedure (underway)



# All Colliders: Top squark projections

(R-parity conserving SUSY, prompt searches)

Preliminary Granada 2019



(\*) indicates projection of existing experimental searches  
 € indicates a possible non-evaluated loss in sensitivity

Discovery potential  
 HL/HE-LHC  
 ~ up to 1.4/3.2 TeV

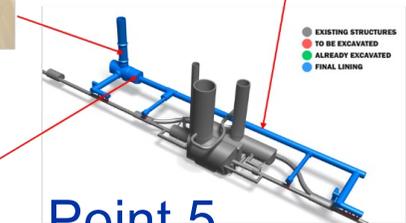
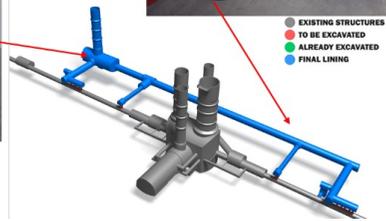
Discovery potential  
 ~ up to  $\sqrt{s}/2$   
 (with possible exceptional compressed scenarios)

Discovery potential  
 FCC-hh ~ up to 8 TeV

# HL-LHC Civil Engineering Completed



Point 1



Point 5



# FCC Civil engineering

Tunnel Circumference: 90.7 km

Excavated vol: 6.2M m3 (In the ground)

Access shafts: 12

Construction shafts: 1

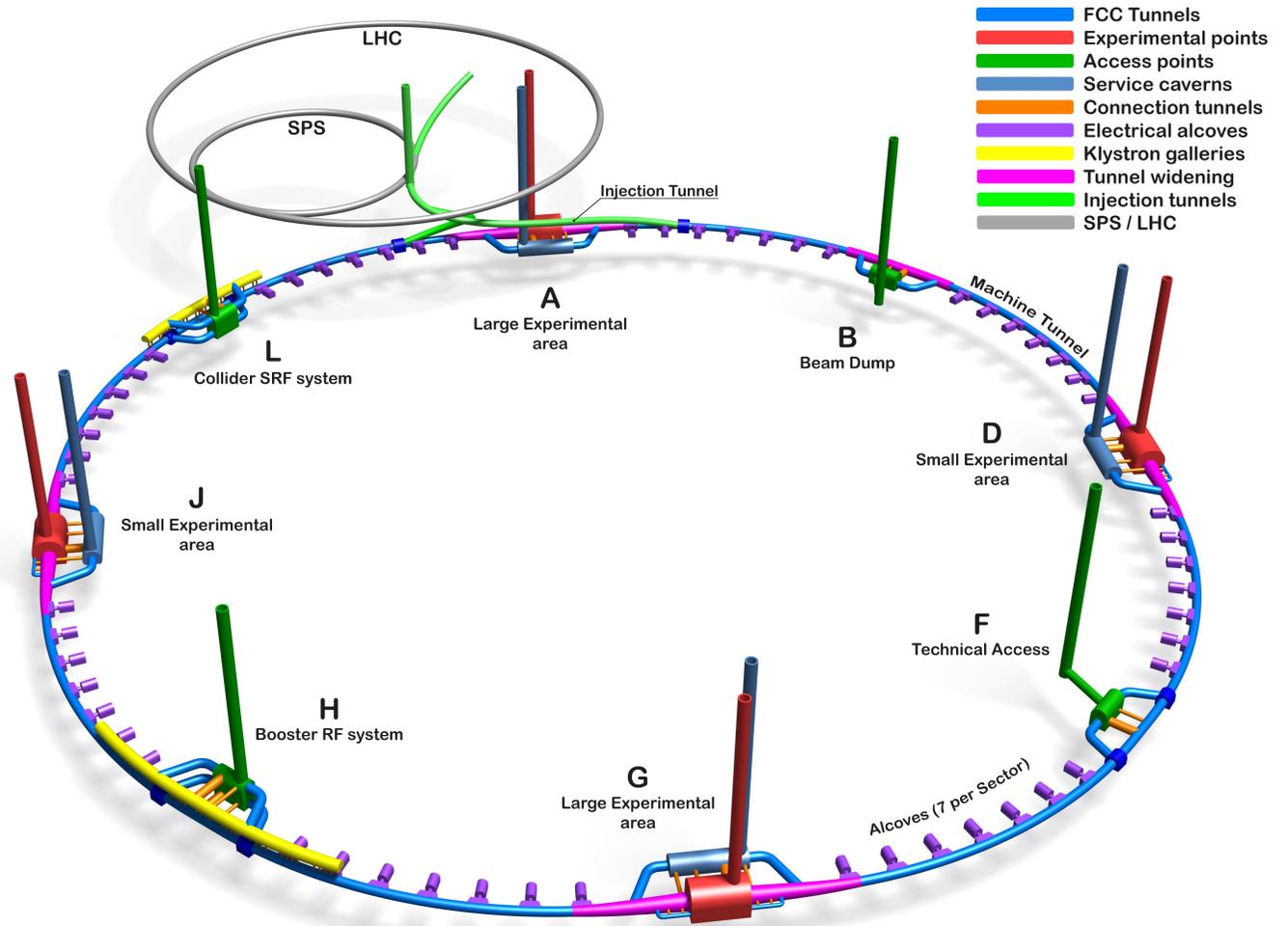
Large experiment areas: 2

Small experiment areas: 2

Technical points: 4

Deepest shaft: 400m

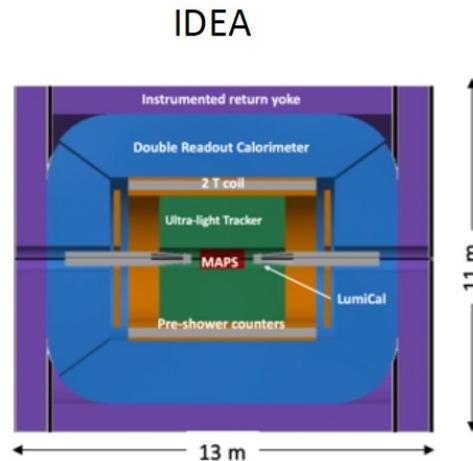
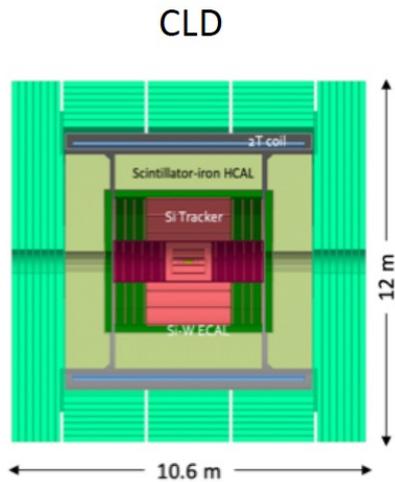
Average shaft depth: 243m



[ Not to scale ]

Schematic of the Underground Civil Engineering

# Detector concepts



Noble Liquid ECAL based



new

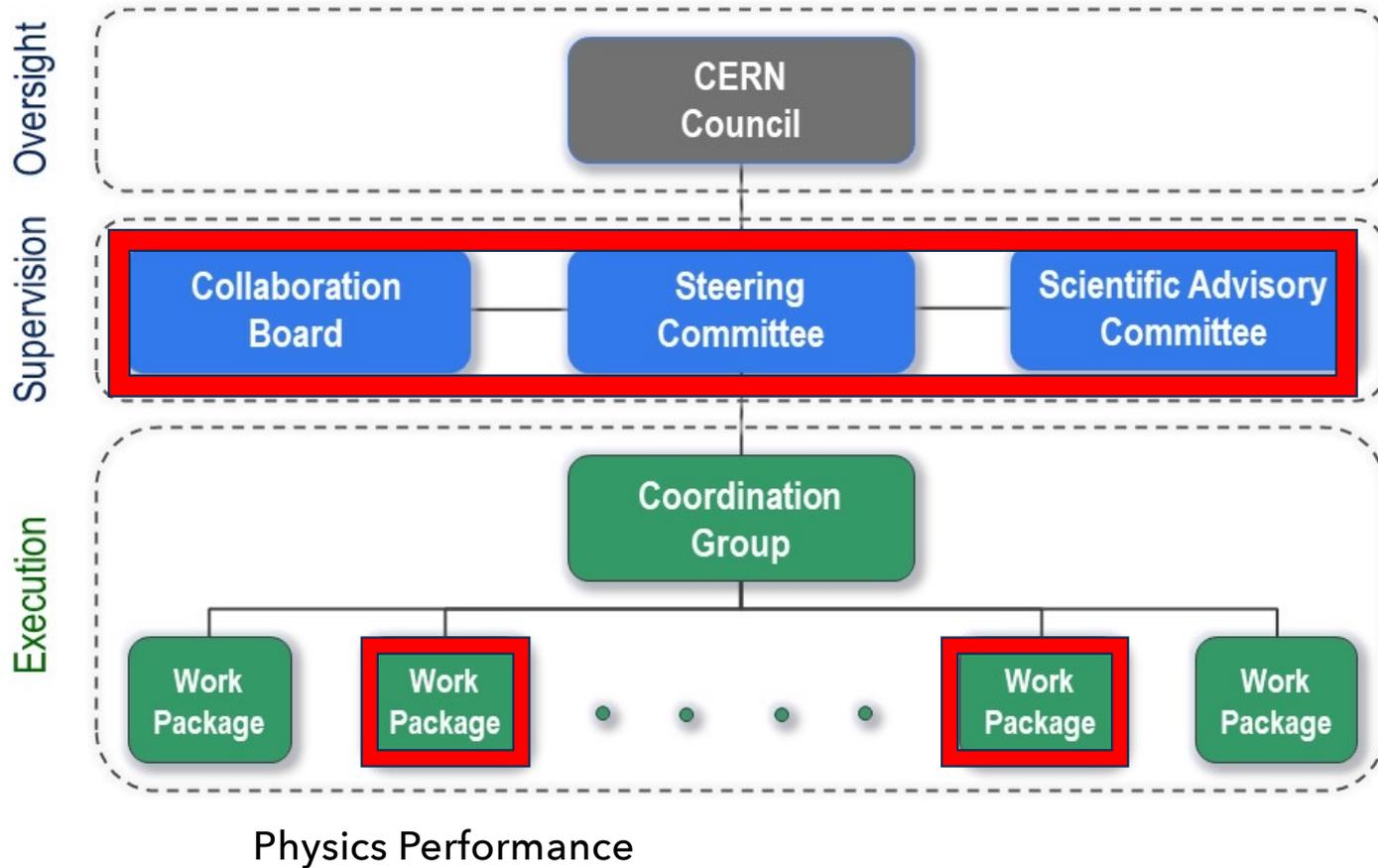
- ILC -> CLIC detector -> CLD
- Full Si vtx + tracker; CALICE-like calo; large coil, muon system

- Si vtx ; ultra light drift chamber with powerful PID; compact, light coil; monolithic parallel fibers, dual readout calo; muon system
- Possibly augmented by crystal ECAL

- High granularity ECAL
  - Pb+Lar (or W+LKr)
- Drift chamber (or Si) tracker; CALICE-like HCAL; muon sys.
- Coil in same cryostat as LAr

1911.12230,  
1905.02520

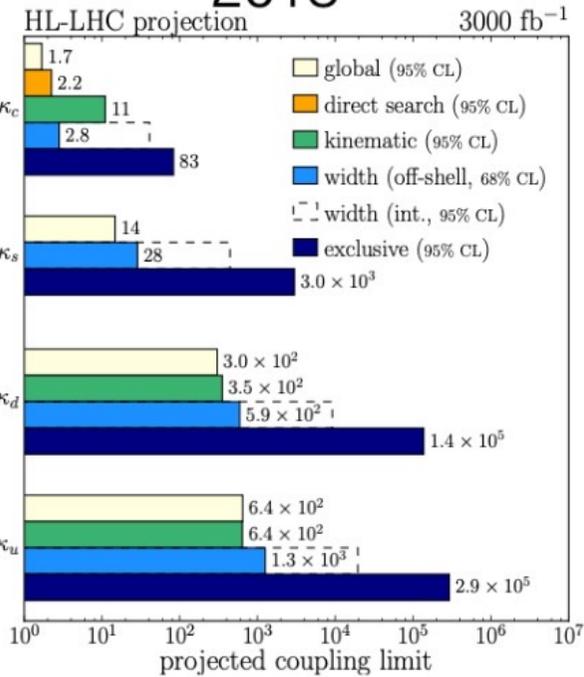
<https://pos.sissa.it/390/>



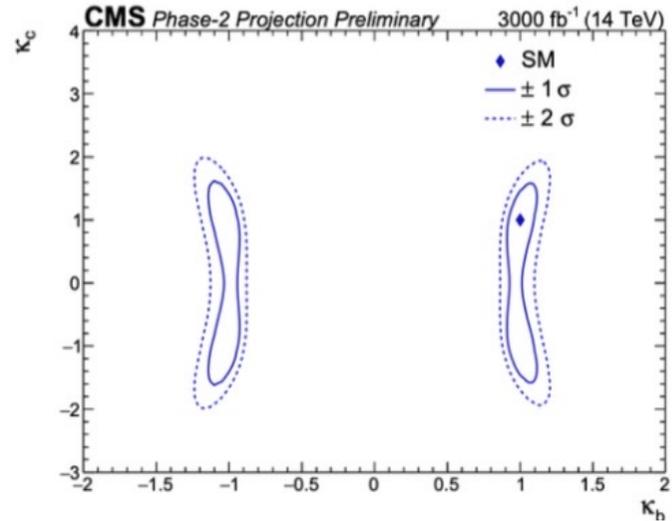
Finanziamento del CERN per lo studio di fattibilità 2021 - 2025: 100 MCHF (materiale & personale)

# Rare decays and Couplings - $H \rightarrow c\bar{c}$

2018



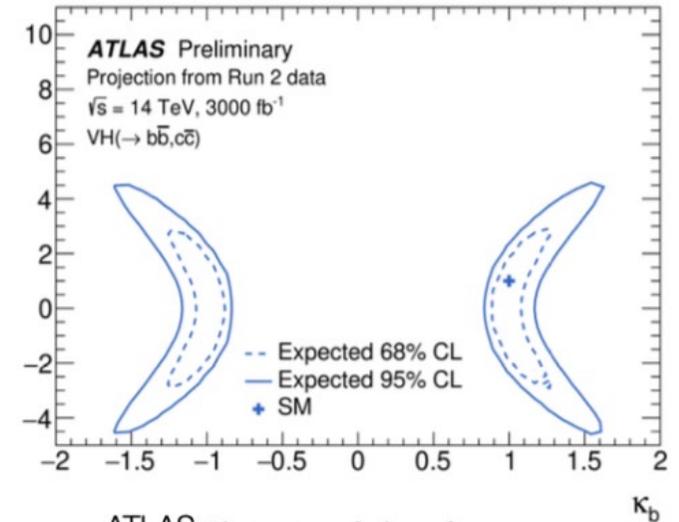
NEW



$$\mu_{VH(H \rightarrow b\bar{b})} = 1.00 \pm 0.03(\text{stat}) \pm 0.04(\text{syst}),$$

$$\mu_{VH(H \rightarrow c\bar{c})} = 1.0 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 0.5(\text{syst}).$$

NEW



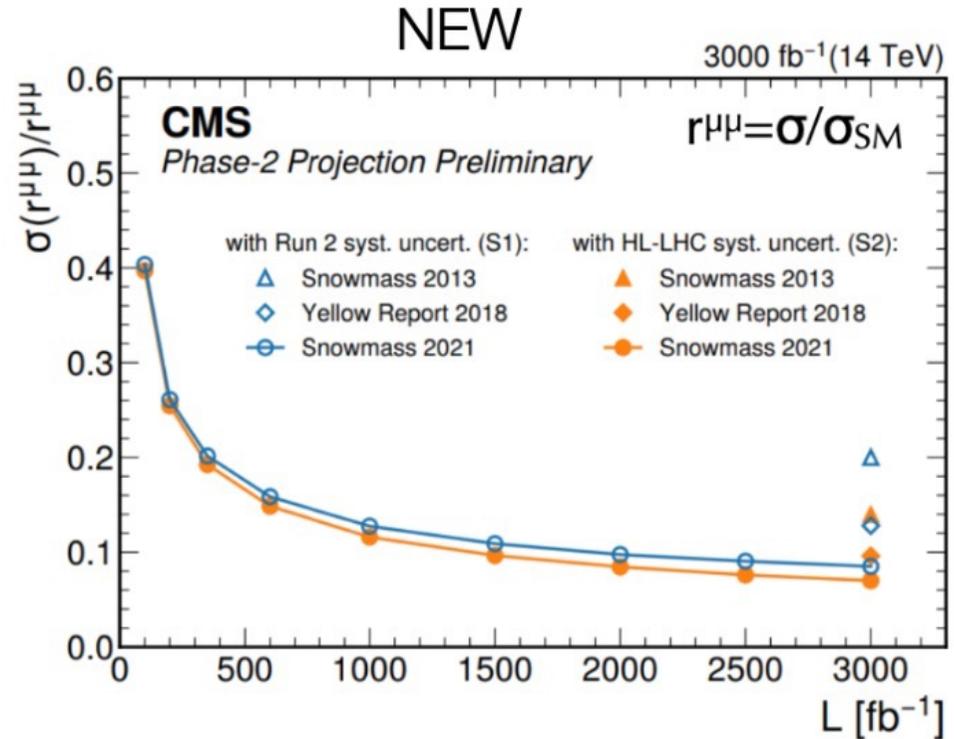
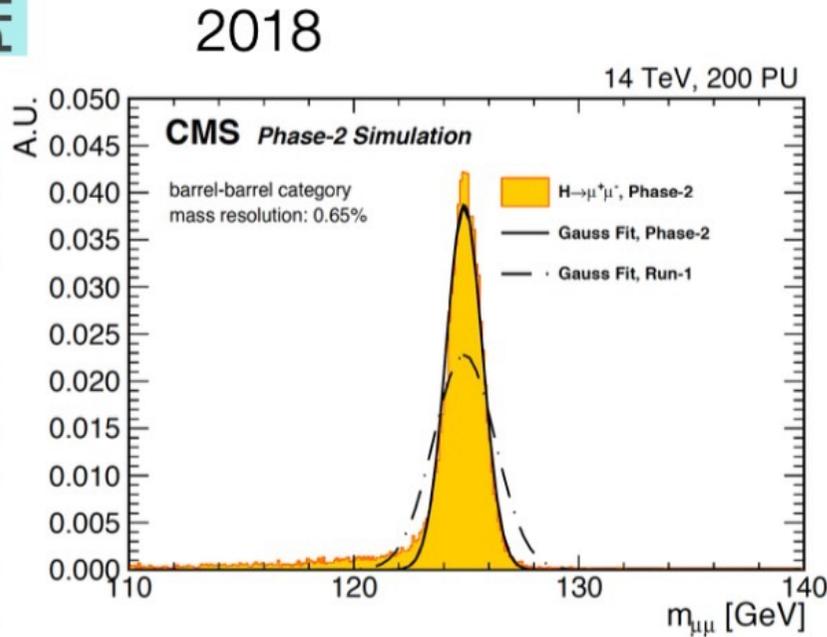
ATLAS First extrapolation of  $\kappa_c$

CMS factor 4 lower than ATLAS extrapolation

- Indirect constraints will complement the direct searches (eg from differential distributions, off-shell couplings, or from the global coupling fits)
- The combined LHC (ATLAS+CMS+LHCb) reach for  $\kappa_c$  could reach the 1% level

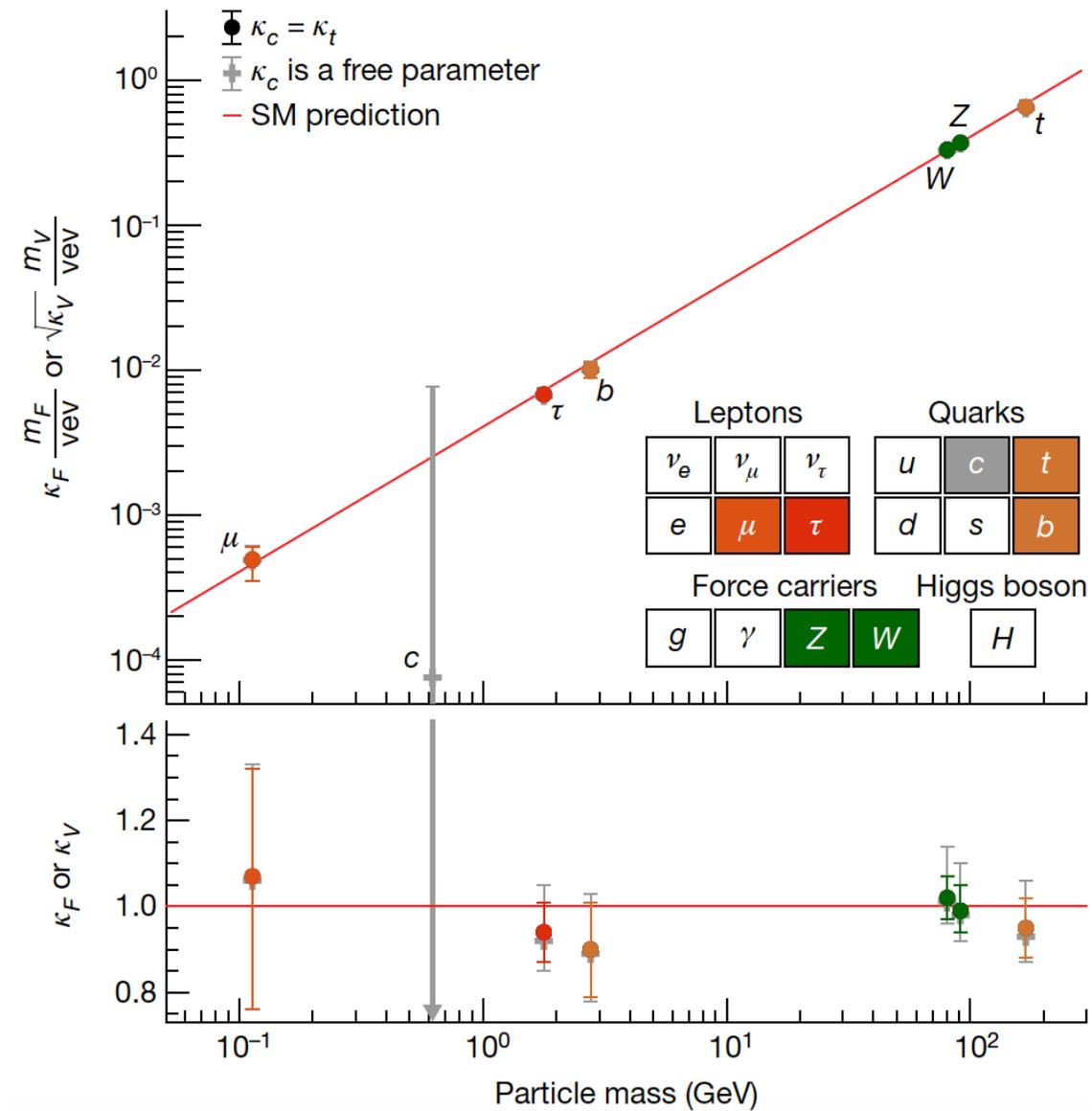
# Rare decays and Couplings - $H \rightarrow \mu\mu$

\*  $H\mu\mu$ : Probe coupling to 2nd generation  $\rightarrow$  prospects for cross section and coupling measurement  $\rightarrow$  8% & 5% uncertainty@3000fb<sup>-1</sup> respectively



30% in the mass resolution with upgraded tracking system

# Higgs Couplings (ATLAS)

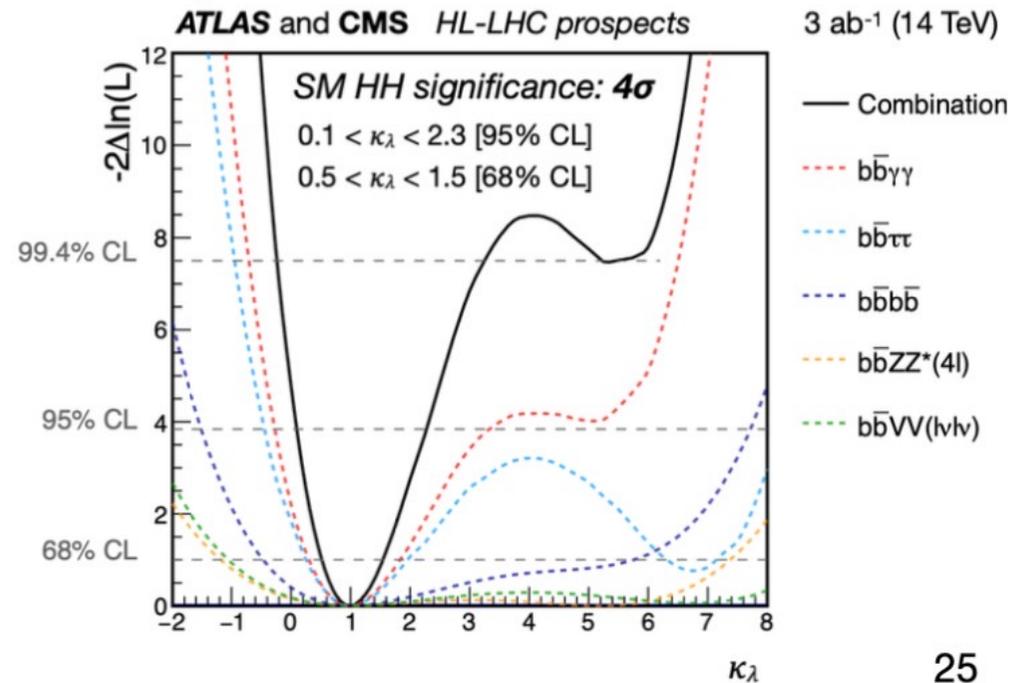


# Di-Higgs@HL-LHC

- $\sigma \sim 39.5 \text{ fb@14TeV} \rightarrow$  HL-LHC benchmark
  - Access the H self-coupling  $\lambda$
  - Low cross section: destructive interference
- 2018 YR: Combining the ATLAS and CMS results a significance of 4 standard deviation can be achieved (including systematic uncertainties).

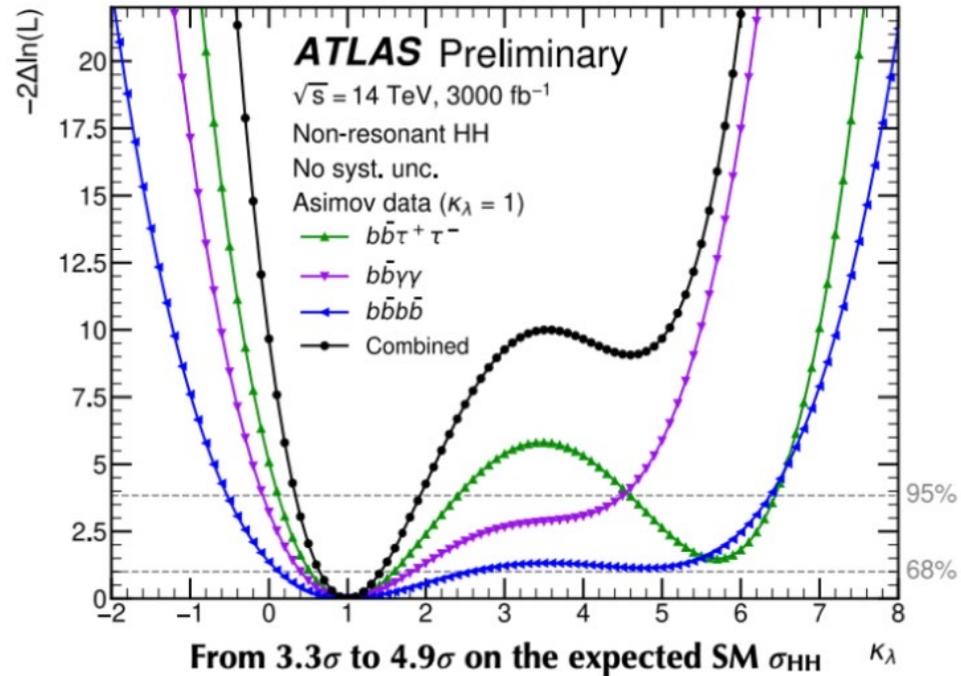
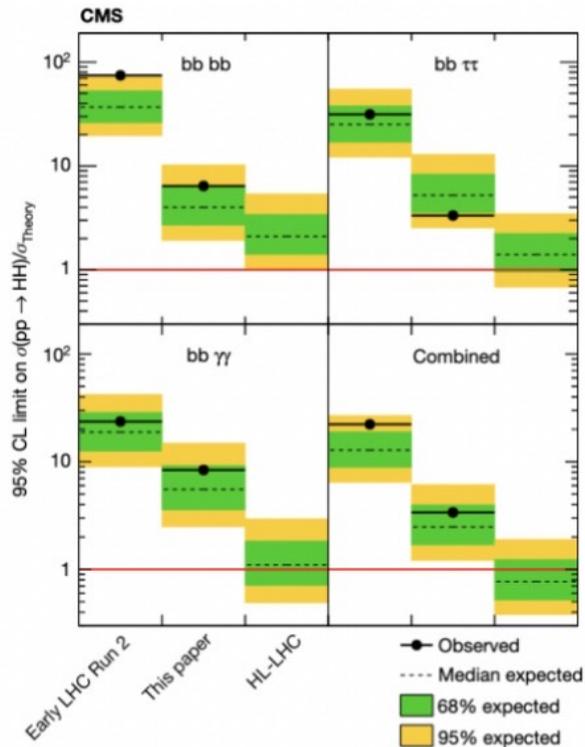
	Statistical-only		Statistical + Systematic	
	ATLAS	CMS	ATLAS	CMS
$HH \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$	1.4	1.2	0.61	0.95
$HH \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$	2.5	1.6	2.1	1.4
$HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$	2.1	1.8	2.0	1.8
$HH \rightarrow b\bar{b}VV(l\nu\nu)$	-	0.59	-	0.56
$HH \rightarrow b\bar{b}ZZ(4l)$	-	0.37	-	0.37
combined	3.5	2.8	3.0	2.6
	Combined		Combined	
	4.5		4.0	

Yellow Report 2018



# Di-Higgs at HL-LHC - Snowmass Update

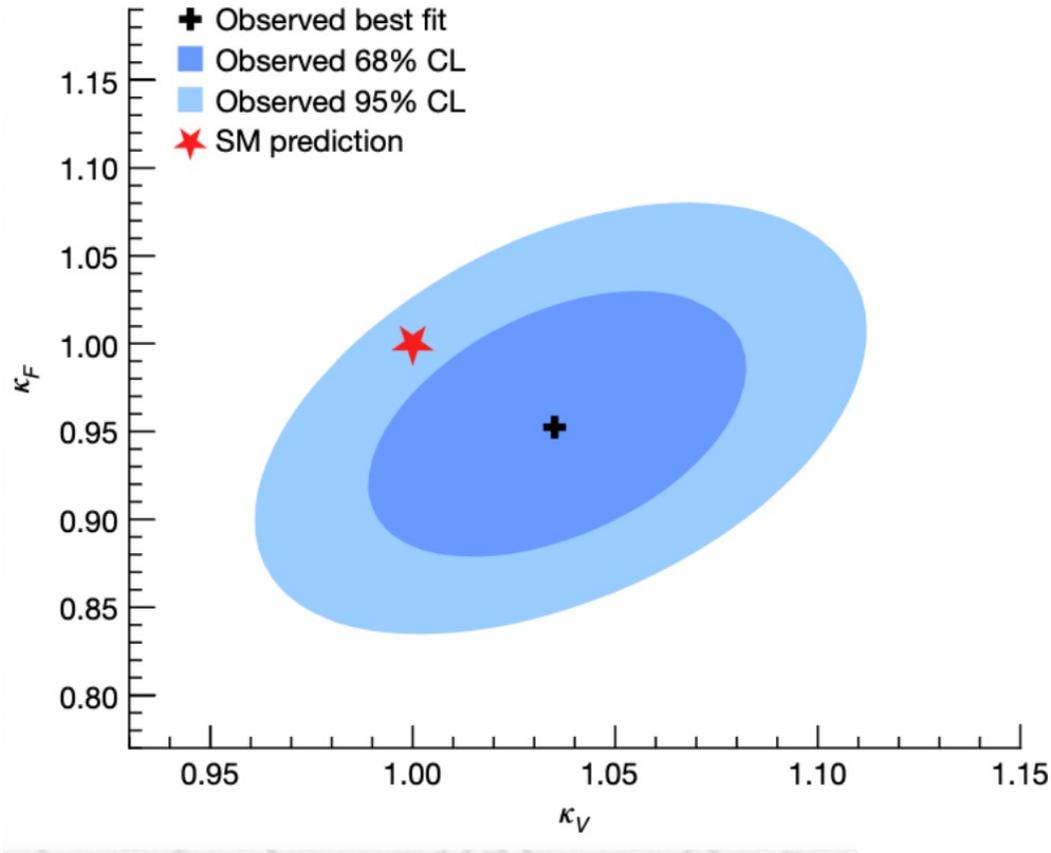
## Extrapolations from Run 2 analyses



Uncertainty scenario	Significance [ $\sigma$ ]		
	$b\bar{b}\gamma\gamma$	$b\bar{b}\tau^+\tau^-$	Combination
No syst. unc.	2.3	4.0	4.6
Baseline	2.2	2.8	3.2
Theoretical unc. halved	1.1	1.7	2.0
Run 2 syst. unc.	1.1	1.5	1.7

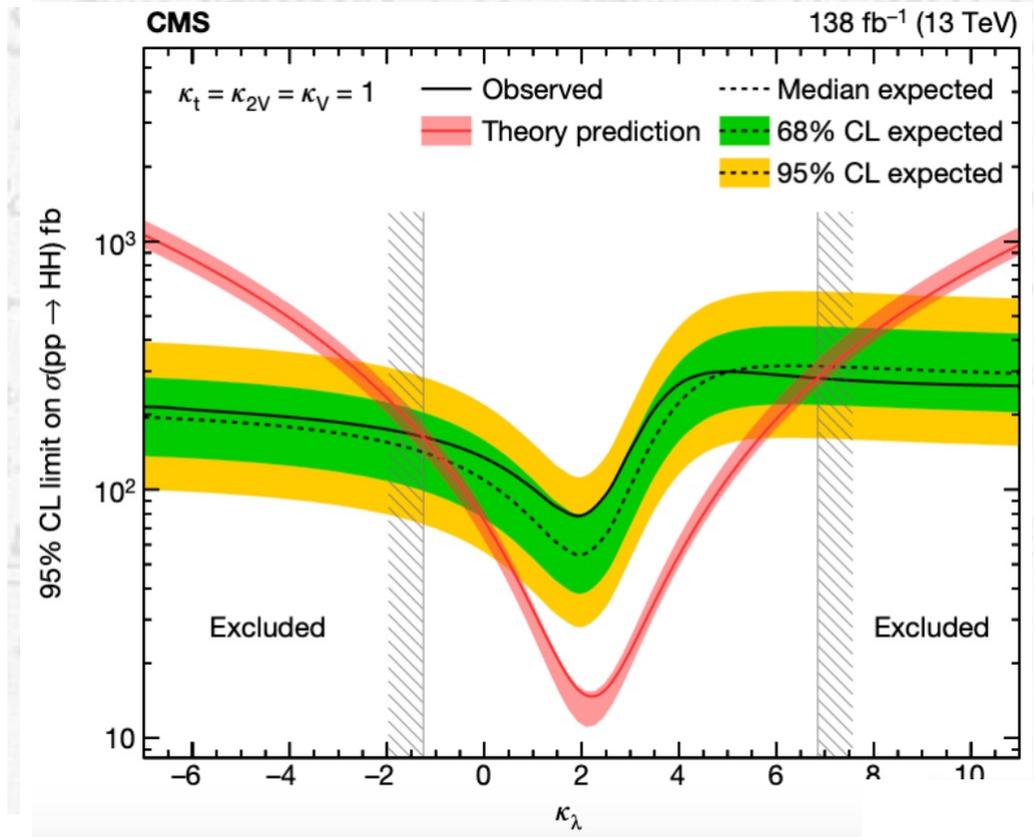
Backup

# Status of Higgs couplings



ATLAS, Nature 2022

# Status of Higgs self-coupling



CMS, Nature 2022