

Evoluzione dell'idea di Vuoto in Fisica

Maurizio Consoli

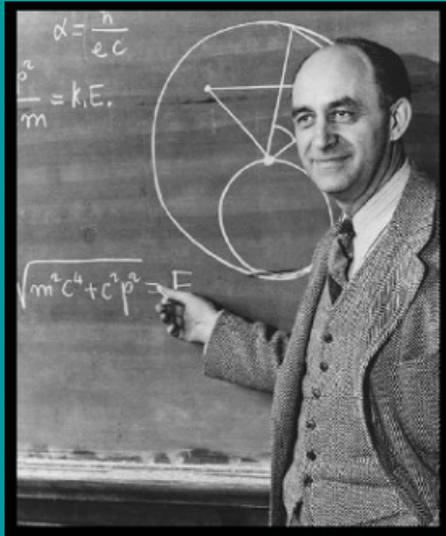
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Catania

Accademia Gioenia, Catania

Inaugurazione CCI Anno Accademia Gioenia

19 Gennaio 2024, Catania

L'ultimo viaggio di Fermi in Italia



- Durante il suo ultimo viaggio in Italia, pochi mesi prima della sua morte nel 1954, fu chiesto ad Enrico Fermi quale sarebbe stata la Fisica del futuro. Si racconta che a questa domanda il grande scienziato abbia risposto senza esitazione: « **Lo studio del vuoto** ».
- Fermi non disse altro ma, forse, si riferiva a misure molto precise di spettroscopia atomica fatte intorno al 1950. Tali misure sembravano indicare la presenza di ‘fluttuazioni del vuoto’. Questi processi, in cui quanti del campo elettromagnetico vengono emessi e riassorbiti in tempi brevissimi, pur non essendo direttamente osservabili, potevano però produrre piccole modifiche misurabili dei livelli energetici dell’atomo (‘Lamb shift’)
- Secondo Fermi, quindi, per capire sempre meglio le forme osservabili di energia/materia, avremmo dovuto spostare la nostra attenzione sempre di più su ciò che non è direttamente osservabile e che chiamiamo ‘vuoto’. L’attuale visione, nella quale la massa delle particelle note non è una loro proprietà intrinseca ma riflette la struttura del vuoto, ha del tutto confermato questa sua intuizione

Riassunto

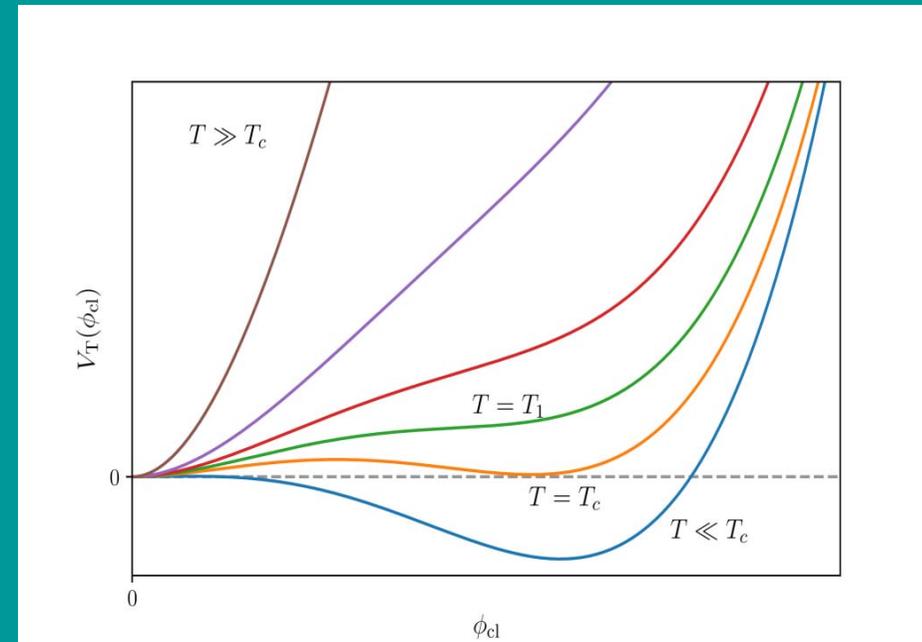
- Se potessimo, idealmente, rimuovere da una regione dello spazio, ogni forma **nota** di energia/materia. Quel che resta, e che chiamiamo ‘vuoto’, che cos’è?
- Per secoli, era stato l’Etere. Per un po’, dopo Einstein, l’idea di un substrato fondamentale fu sostituita da una descrizione dei fenomeni puramente relativa dove il vuoto, deprivato di ogni qualità fisica, poteva anche essere il ‘nulla’
- Oggi, però, si sa che nel vuoto, inteso come stato di minima energia, c’è, quanto meno, il Campo di Higgs, da cui si origina la massa delle particelle elementari
- Quindi il vuoto della fisica moderna, pur diverso dall’etere classico, ha un suo grado di materialità e non è quello degli antichi Atomisti Greci
- Ma come immaginarlo? Un’analogia viene dai mezzi superfluidi, come l’elio liquido a basse temperature, dove i corpi fluiscono senza alcun attrito misurabile.
- Esplorando l’analogia sino in fondo, possiamo anche cercare di capire come mai il vuoto ci sembra ‘vuoto’ quando non lo è. Un aspetto non del tutto banale che può influenzare la nostra percezione della realtà

Il vuoto

- “Quando diciamo che un luogo è vuoto, è evidente che noi non diciamo che in quel luogo non c’è nulla ma solo che non c’è nulla di ciò che presumiamo dovervi esserci” (Cartesio, I Principi della Filosofia)
- “Il vuoto è ciò che rimane in un recipiente quando tutto ciò che si può rimuovere è stato rimosso” (J. C. Maxwell, Trattato su Elettricità e magnetismo)
- Più esplicitamente, pensiamo ad una regione dello spazio dalla quale idealmente sia stata rimossa ogni forma nota di materia e di energia, cioè atomi, radiazione elettromagnetica, neutrini ...
- Resta ancora qualcosa? E, se resta qualcosa, che cos’è?
- E’ intuitivo che rimuovendo le forme note di energia e di materia, l’energia complessiva di questo sistema vada progressivamente diminuendo. Quindi, rimuovendole idealmente tutte, l’energia si riduce al suo minimo possibile.
- Questa condizione di **energia minima** è l’attuale DEFINIZIONE dello **stato di vuoto** e questa sua caratteristica gli dà un’importanza fondamentale nella costruzione di ogni teoria fisica. Infatti ogni sistema, lasciato a sé stesso, tende sempre a ritornare nello stato di energia minima

Il Campo di Higgs

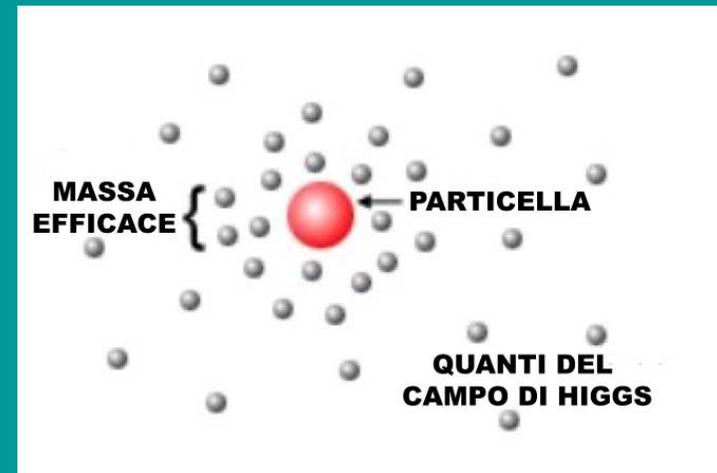
- C'è però un'entità fisica, il Campo di Higgs, rimuovendo la quale l'energia invece dovrebbe aumentare. Infatti, l'energia $V(\phi)$ è minima per un valore $\phi \neq 0$
- Il passaggio a $\phi \neq 0$ sarebbe avvenuto sotto una certa temperatura critica nelle prime fasi di espansione dell'Universo
- In seguito a questo processo, le particelle elementari avrebbero acquistato massa



Il Campo di Higgs come condensato di quanti

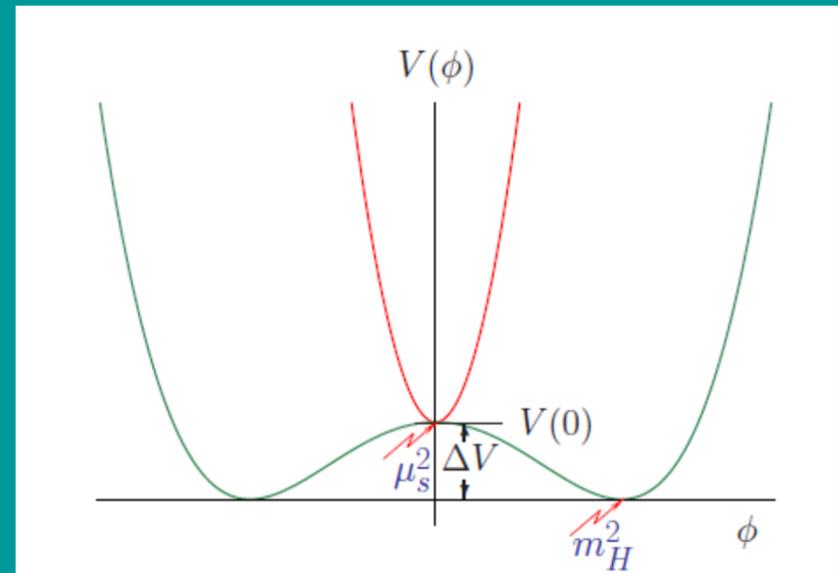
Un valore $\phi \neq 0$ del campo di Higgs riflette il processo di condensazione spontanea dei quanti ad esso associati

«Quello che noi vediamo come spazio vuoto non è che la configurazione del campo di Higgs di energia minima ($\phi \neq 0$). Se traduciamo dal linguaggio del campo a quello delle particelle, questo significa che lo spazio vuoto è in realtà riempito di quanti del campo di Higgs che sono condensati». (G. 't Hooft, Premio Nobel 1999)



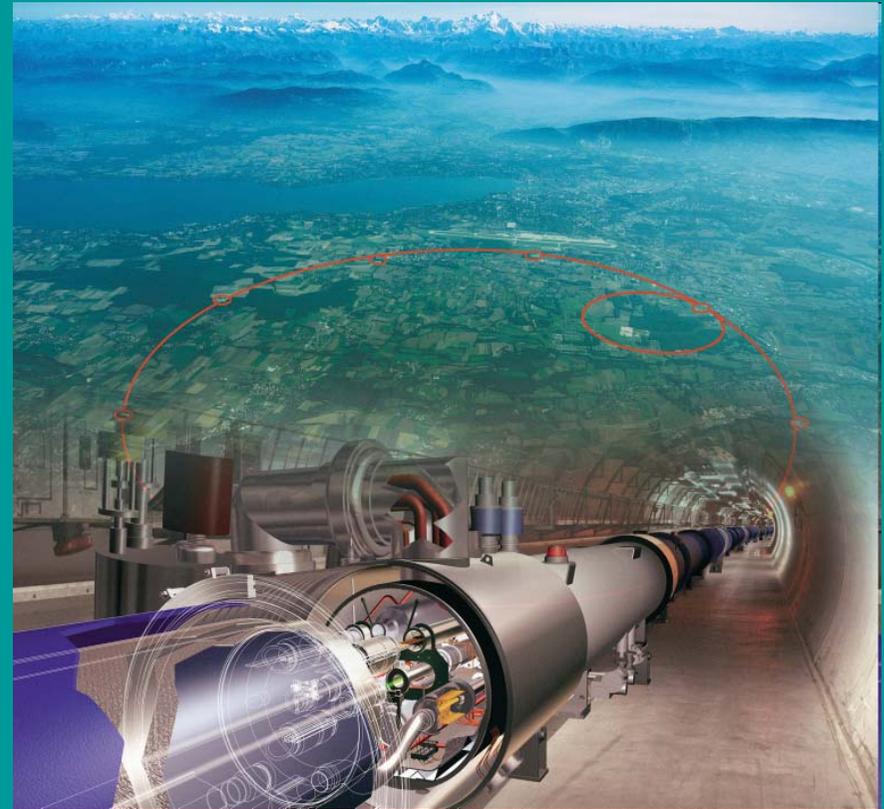
Molto bello...ma la prova sperimentale?

- La **prova sperimentale dell'esistenza del Campo di Higgs** si è ottenuta con la rivelazione, nel Large Hadron Collider (LHC) del CERN, di una particella neutra di spin zero, il 'bosone di Higgs' **H** che è una perturbazione fondamentale del vuoto
- Infatti, la massa (quadra) di **H** è data da $V''(\phi)$ al minimo ed, in questo senso, descrive le 'piccole oscillazioni' del vuoto intorno al suo valore di equilibrio
- Inoltre, **H** deve interagire con tutte le altre particelle proporzionalmente alla loro massa
- Per raccontare brevemente la sua scoperta, iniziamo un viaggio dentro LHC



L'acceleratore LHC del CERN

- Al confine tra Francia e Svizzera, nel sottosuolo di Ginevra, si è costruito un grande acceleratore, il Large Hadron Collider
- Al suo interno due fasci di protoni sono accelerati all'energia di $4 + 4$ TeV (oggi $7 + 7$)
- Il suo scopo principale è stato la ricerca (e la scoperta) del bosone di Higgs

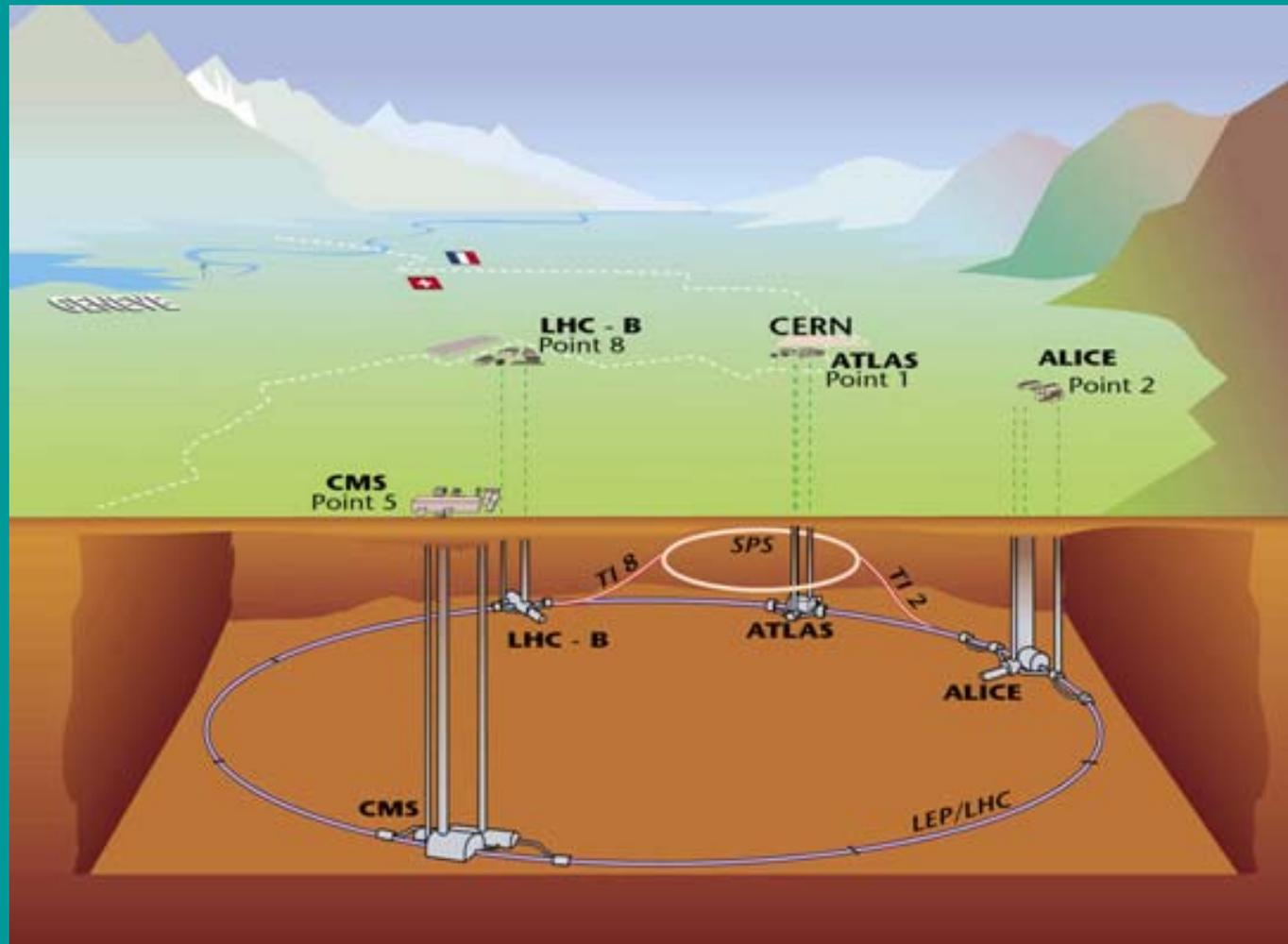


" Foto " di LHC



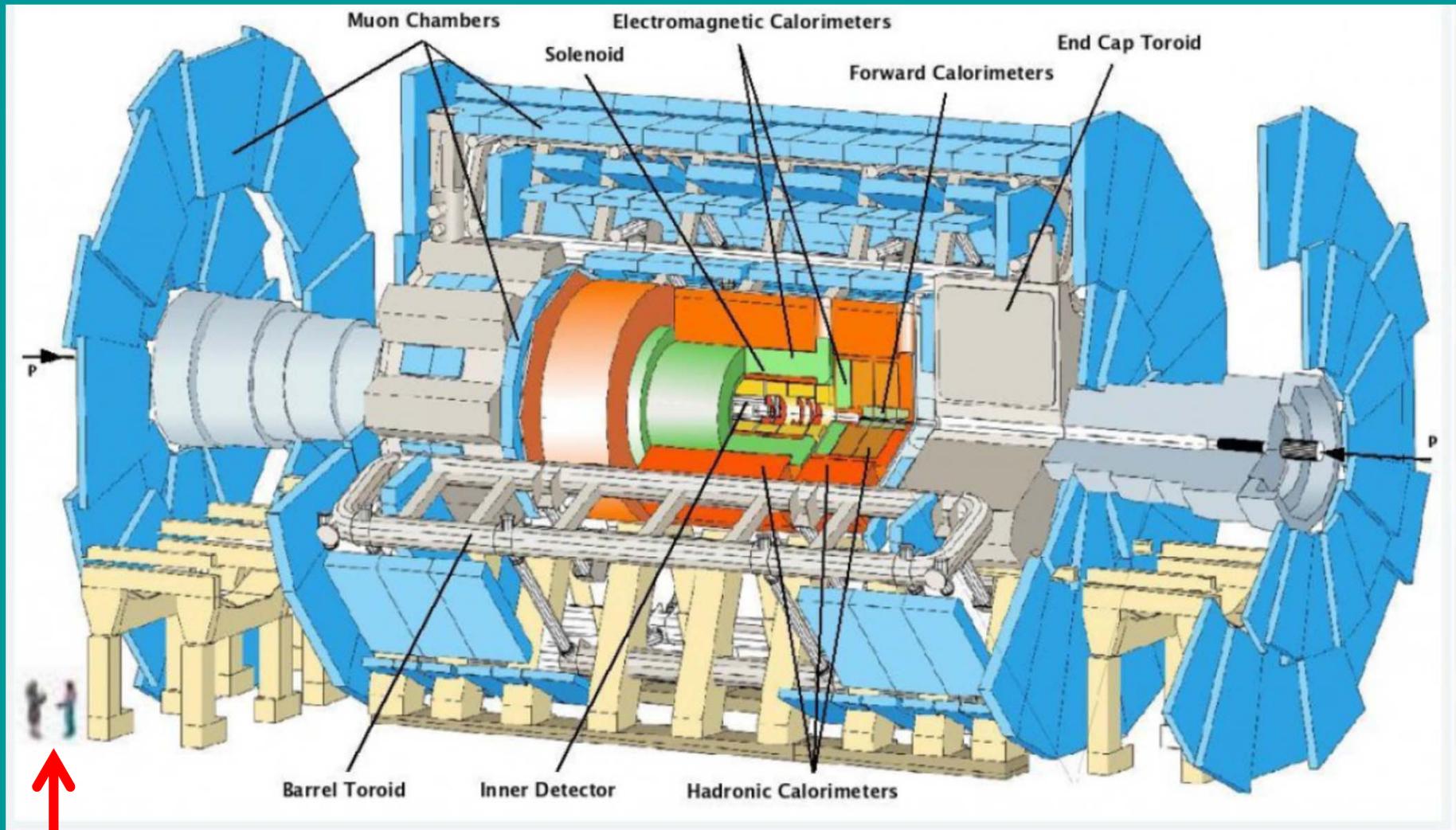
Schema di LHC

- Gli esperimenti a LHC



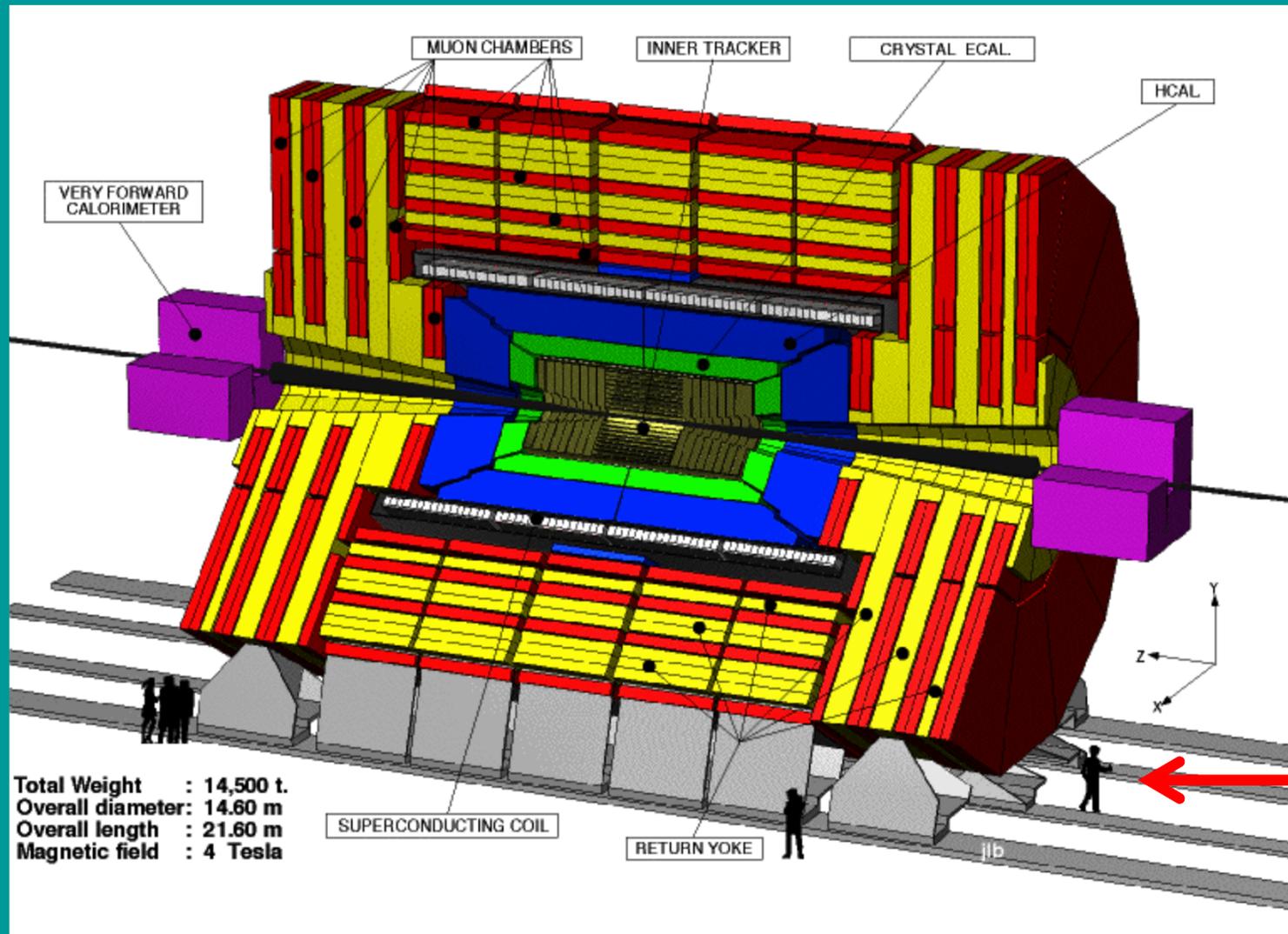
ATLAS

(A Toroidal LHC ApparatuS)

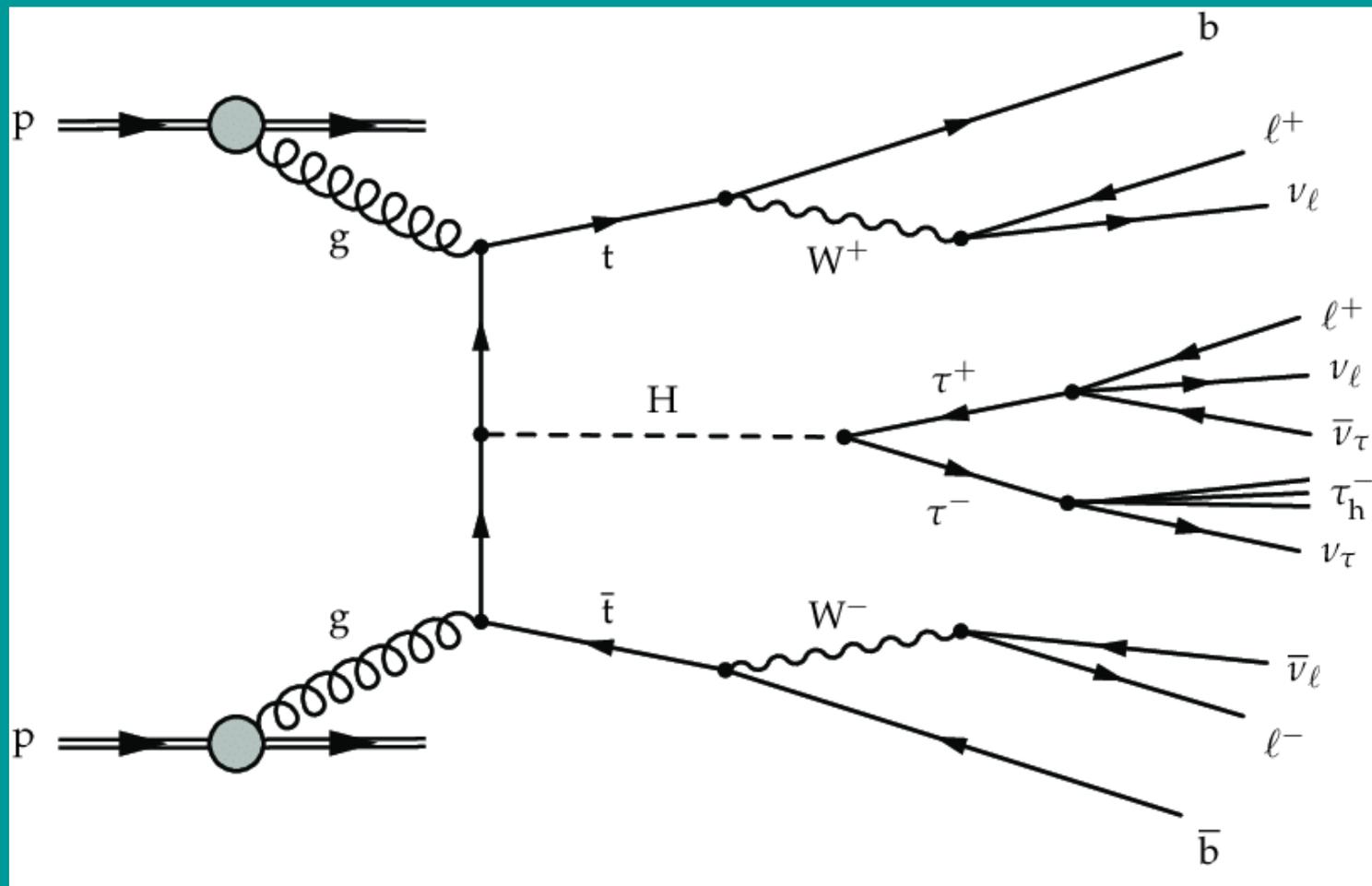


CMS

(Compact Muon Spectrometer)

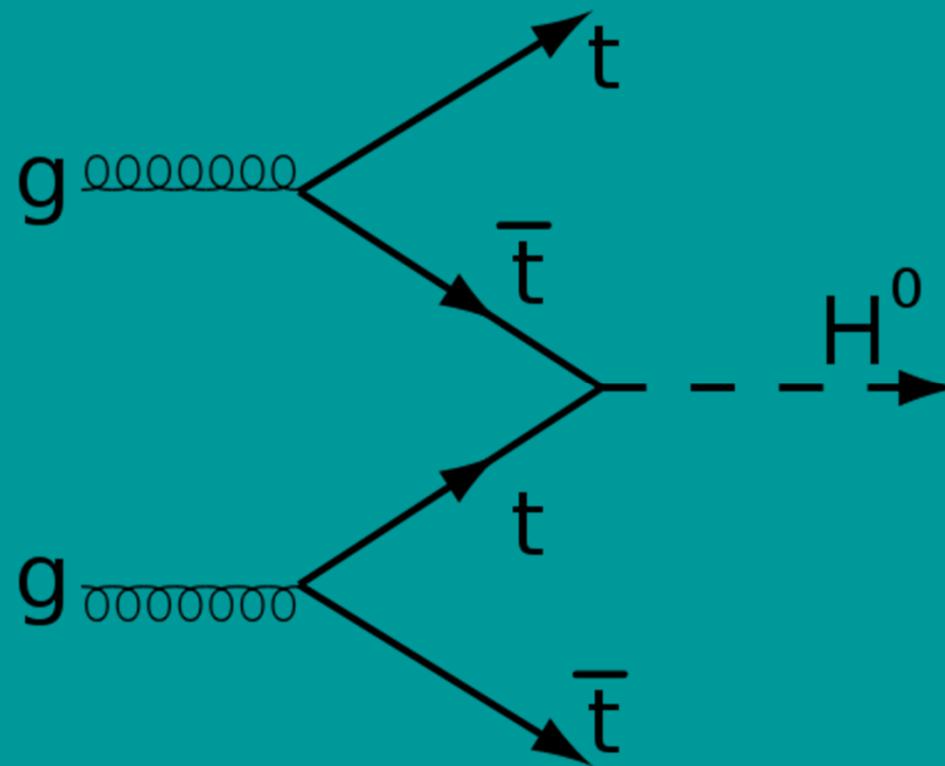


Collisioni protone-protone a LHC



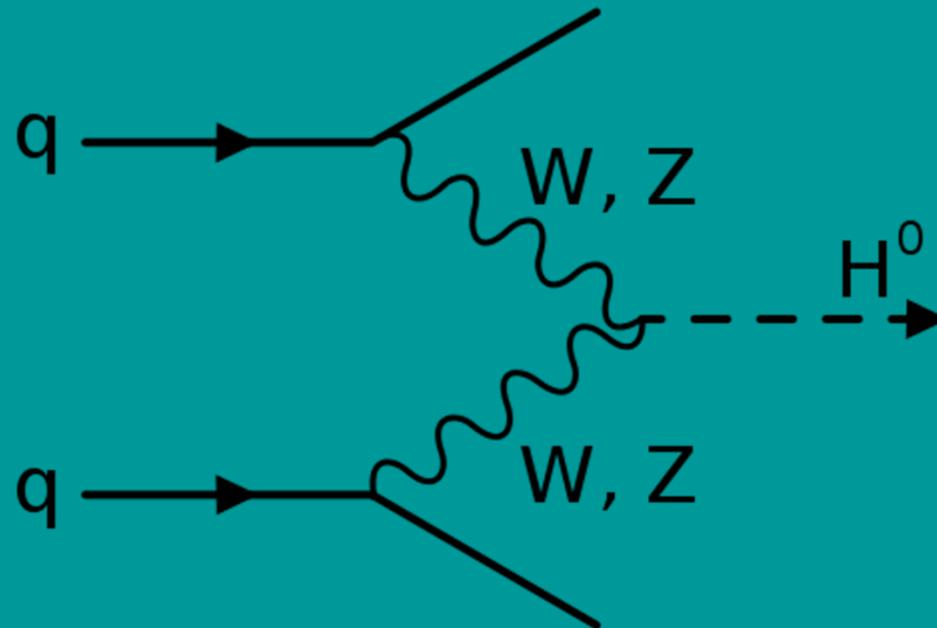
Meccanismi di produzione di H

- Produzione mediante fusione di gluoni

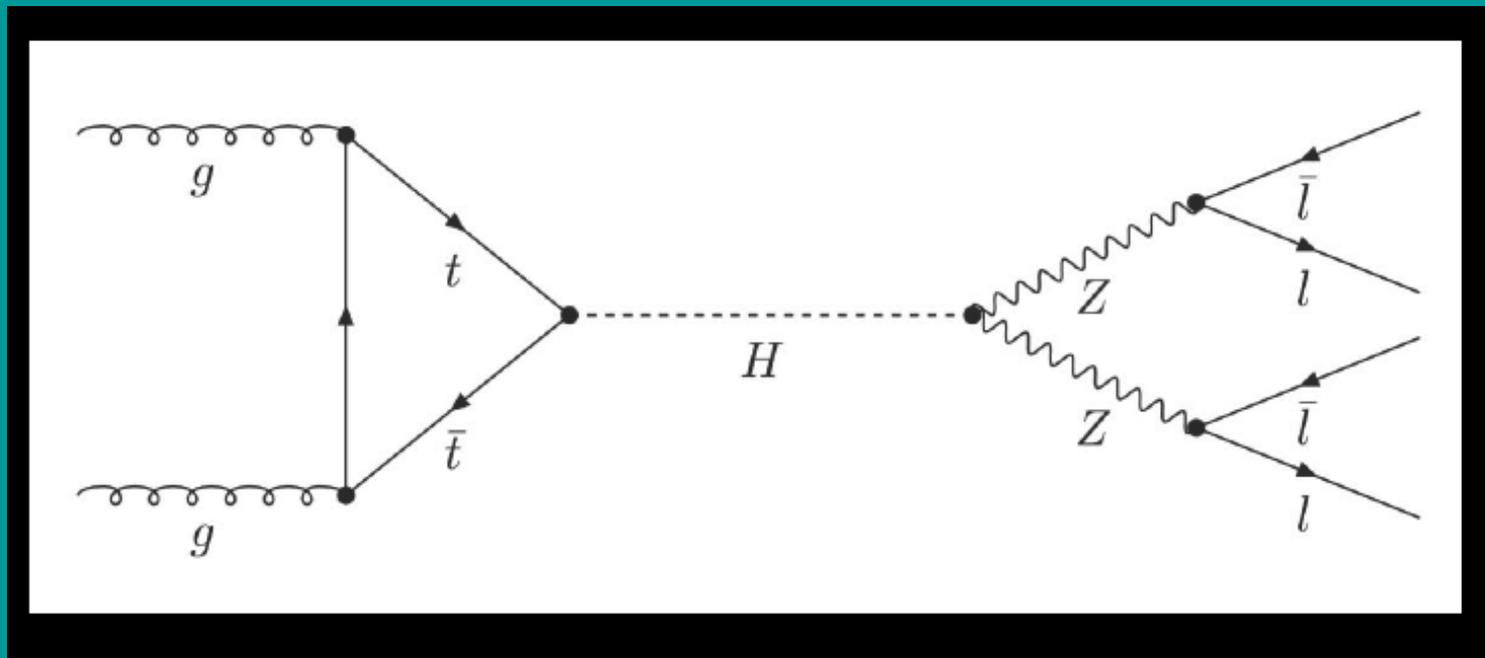


Meccanismi di produzione di H

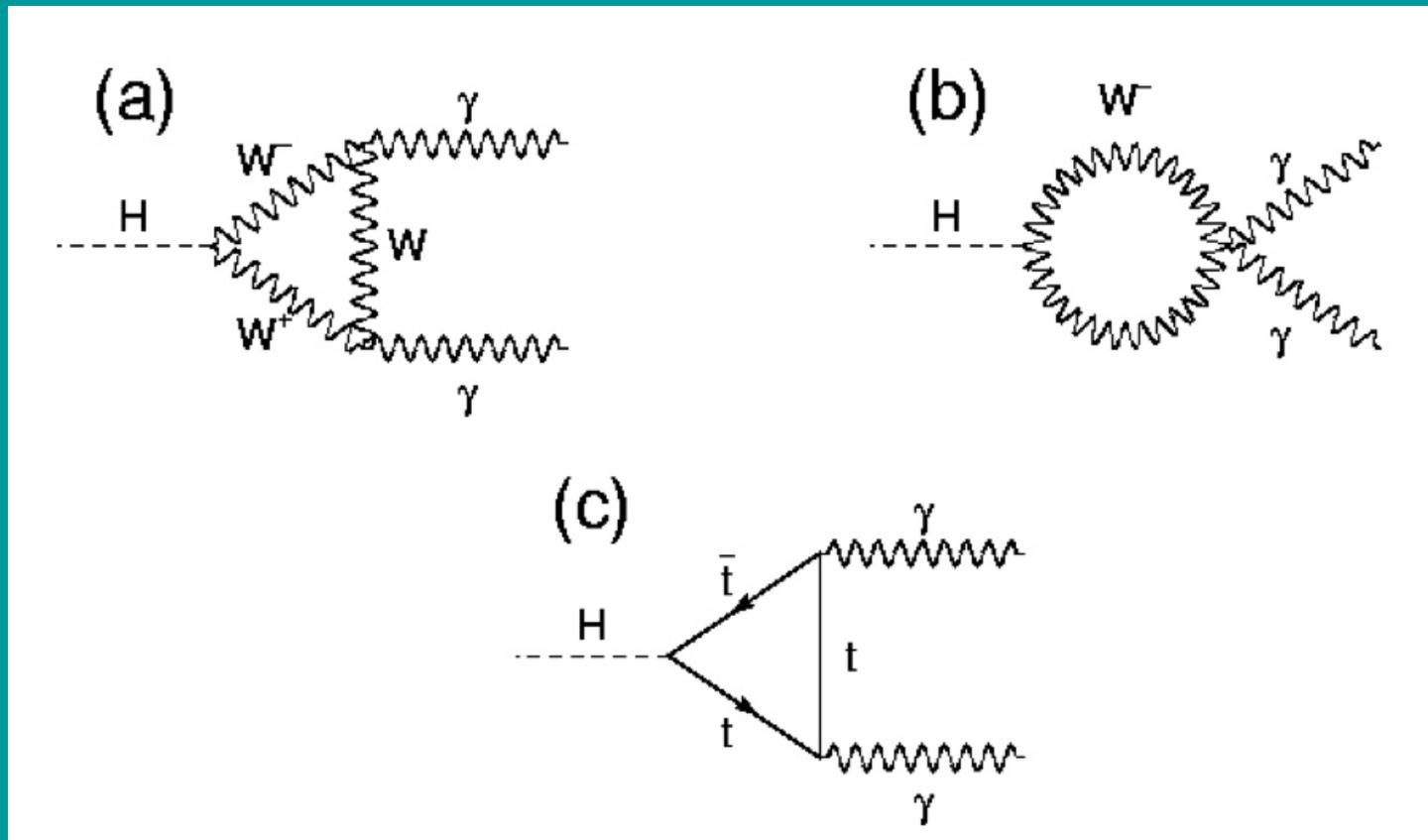
- Produzione mediante fusione di W e Z



Decadimento $H \rightarrow 4$ leptoni

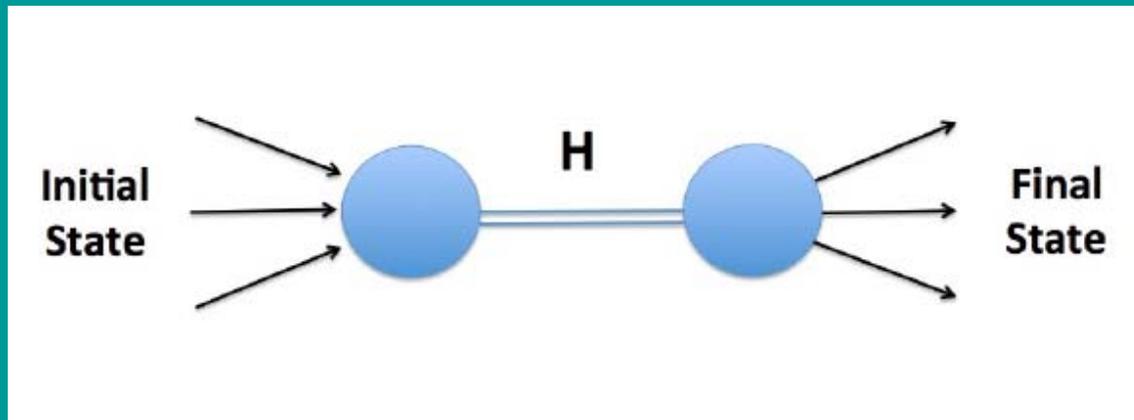


Decadimento $H \rightarrow 2$ fotoni



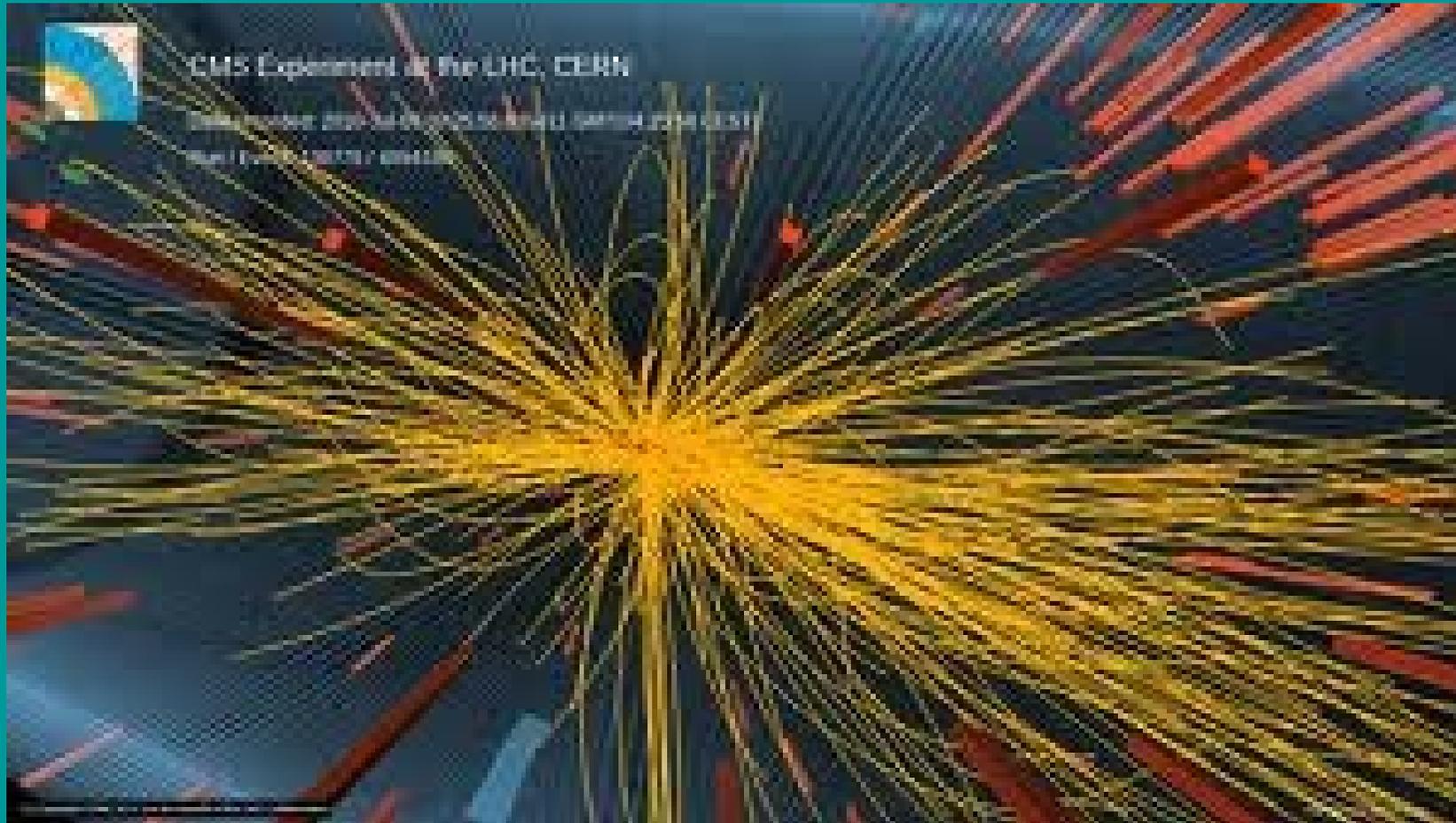
Come identificare **H**?

- **H** è una particella a brevissima vita media, Quindi non può essere rivelato direttamente. Si può però identificare analizzando i suoi prodotti di decadimento
- Secondo la fisica quantistica la probabilità di ottenere un certo stato finale (tramite un dato stato intermedio **H**) è massima quando la sua “massa invariante” ha proprio il valore m_H

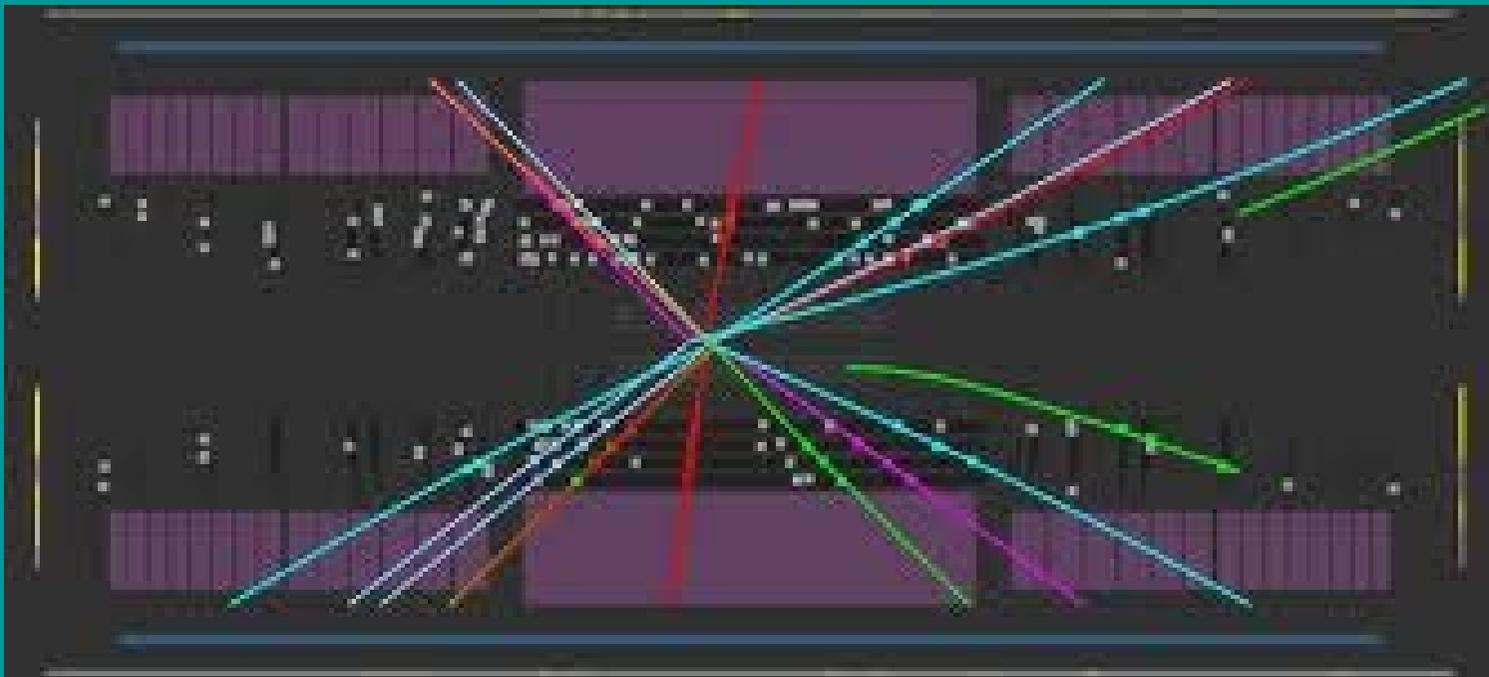


- Si devono quindi studiare i vari stati finali e cercare un (solo) valore di massa invariante dove i conteggi si distaccano dal fondo atteso ed assumono il loro massimo valore

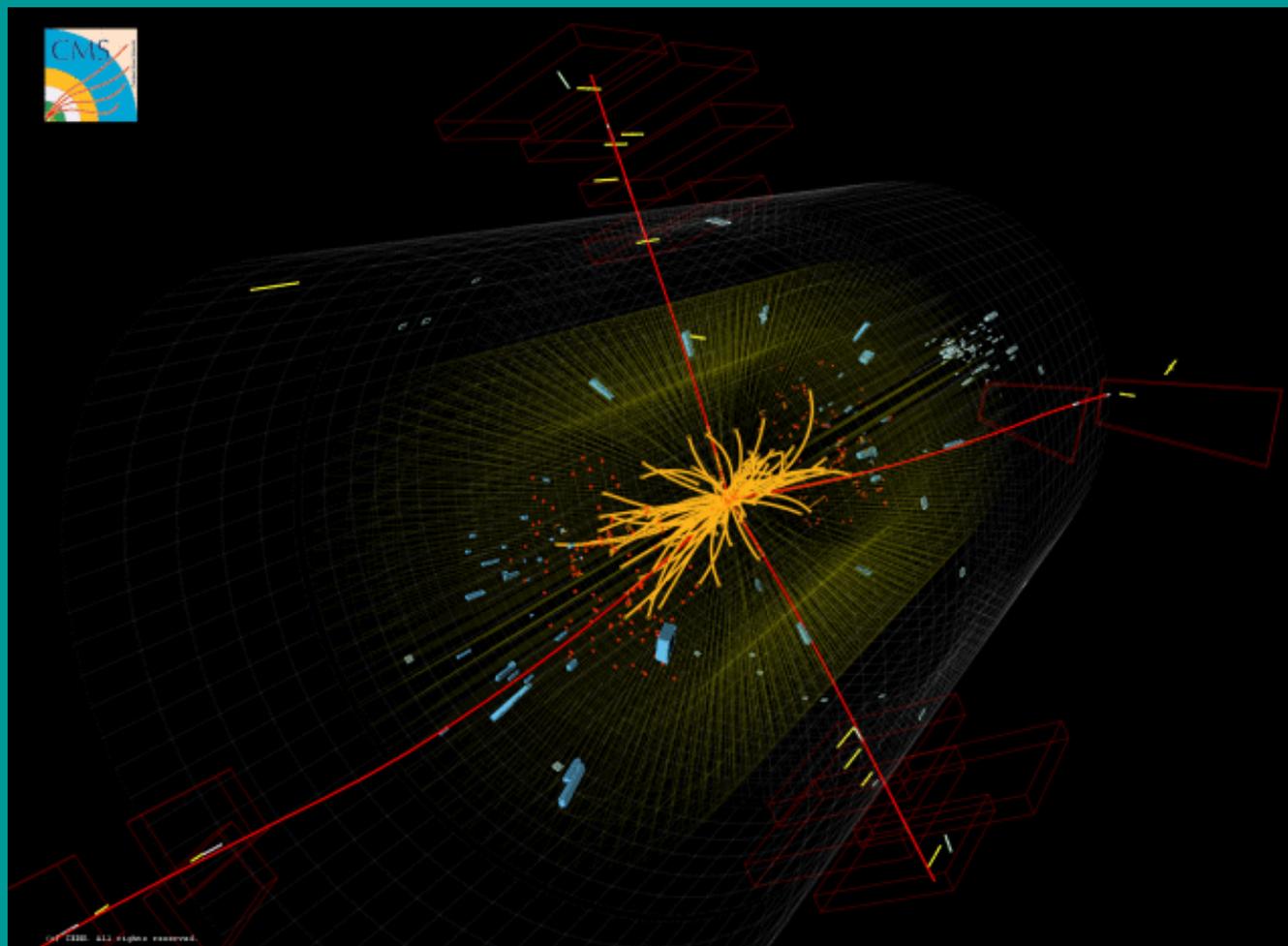
Una tipica collisione a LHC



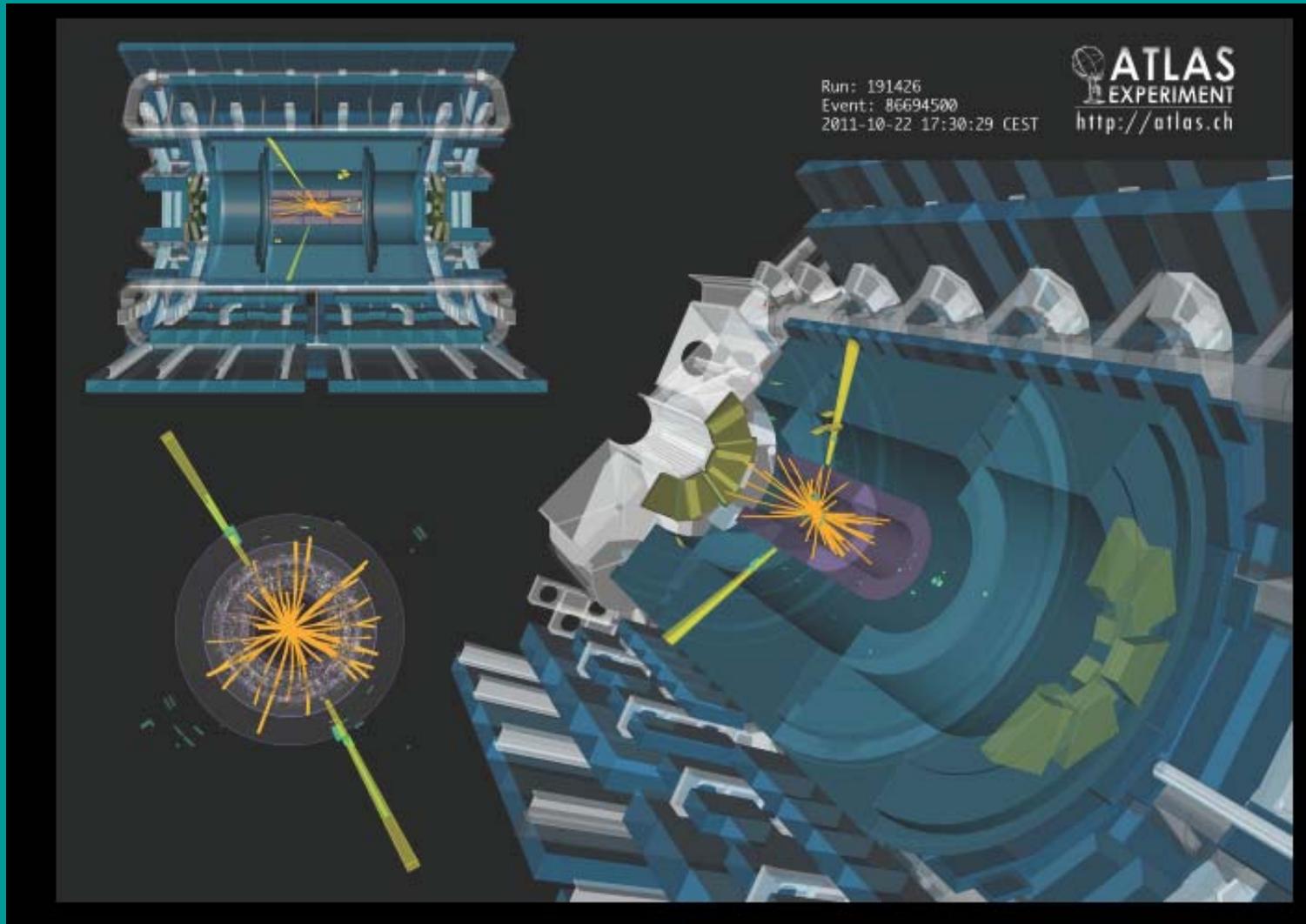
Una collisione “filtrata”



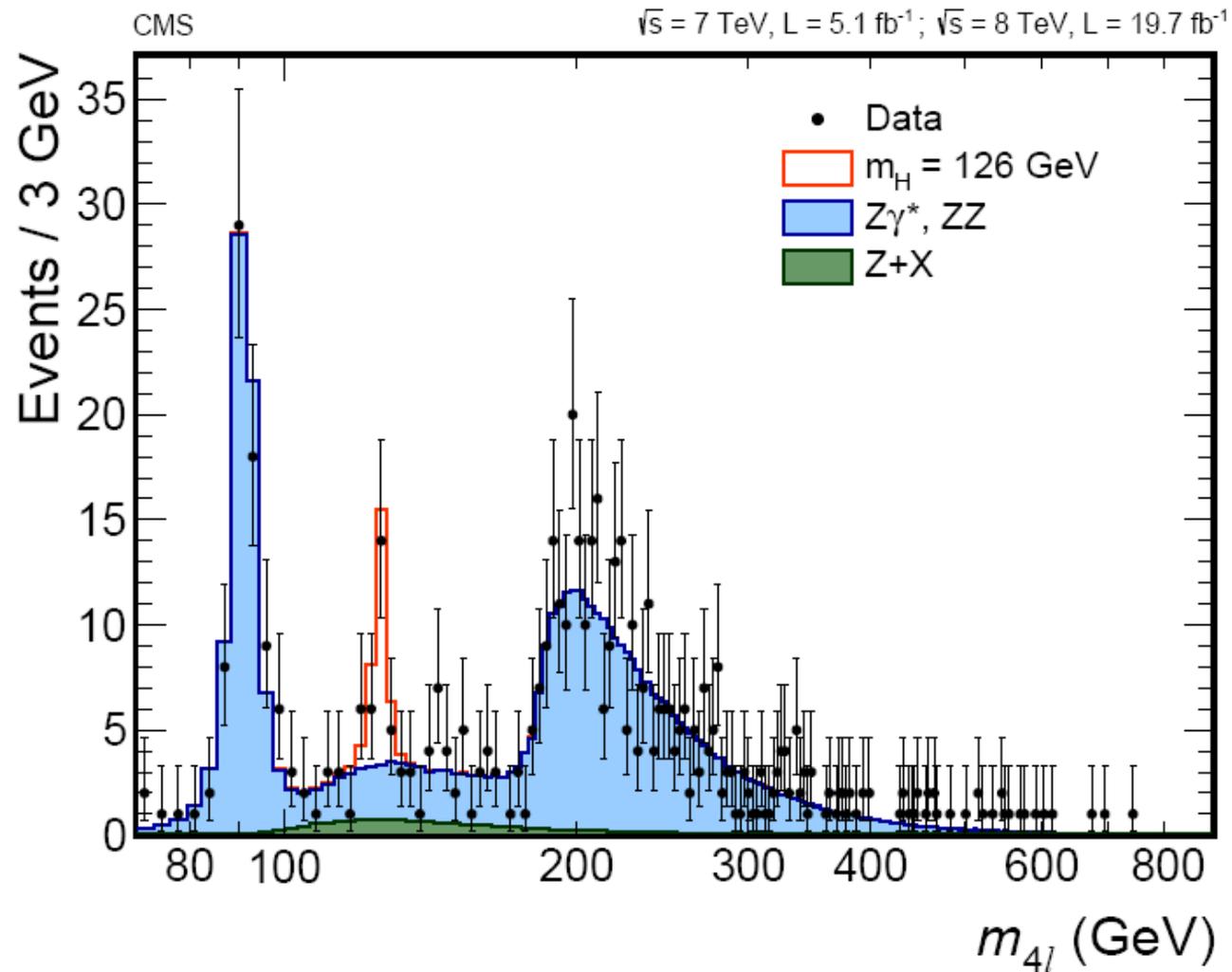
CMS: $H \rightarrow 4$ leptoni



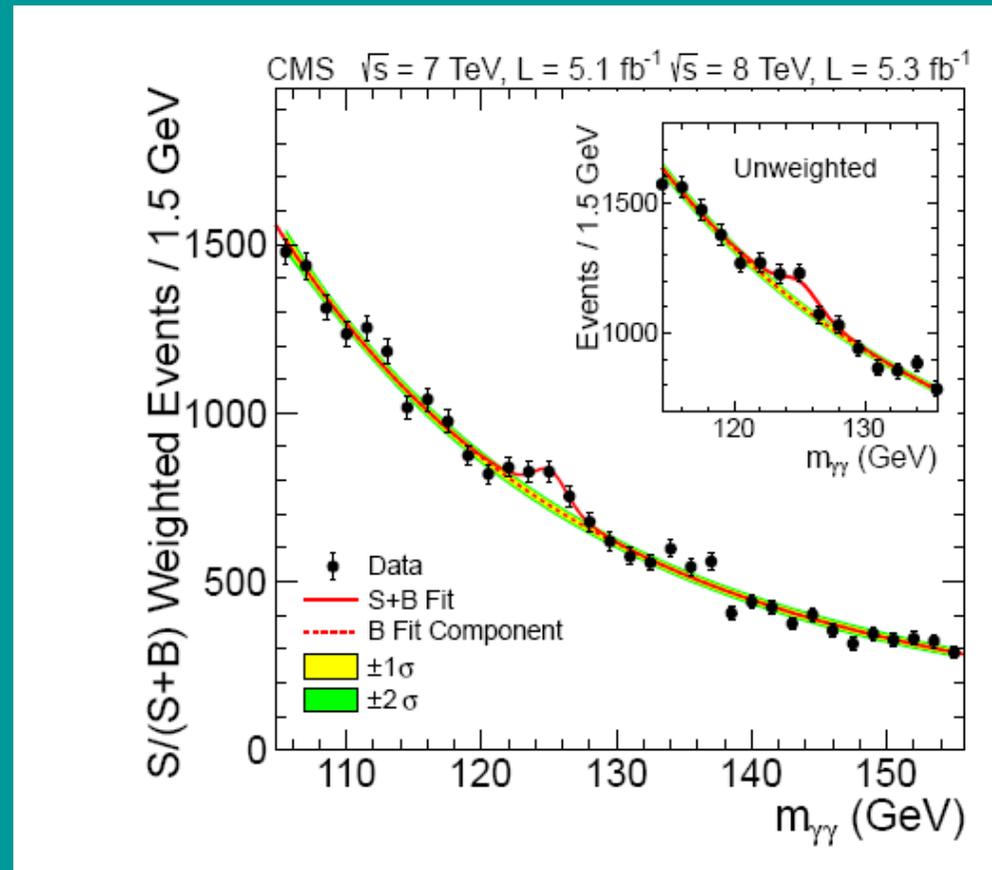
ATLAS: $H \rightarrow 2$ fotoni



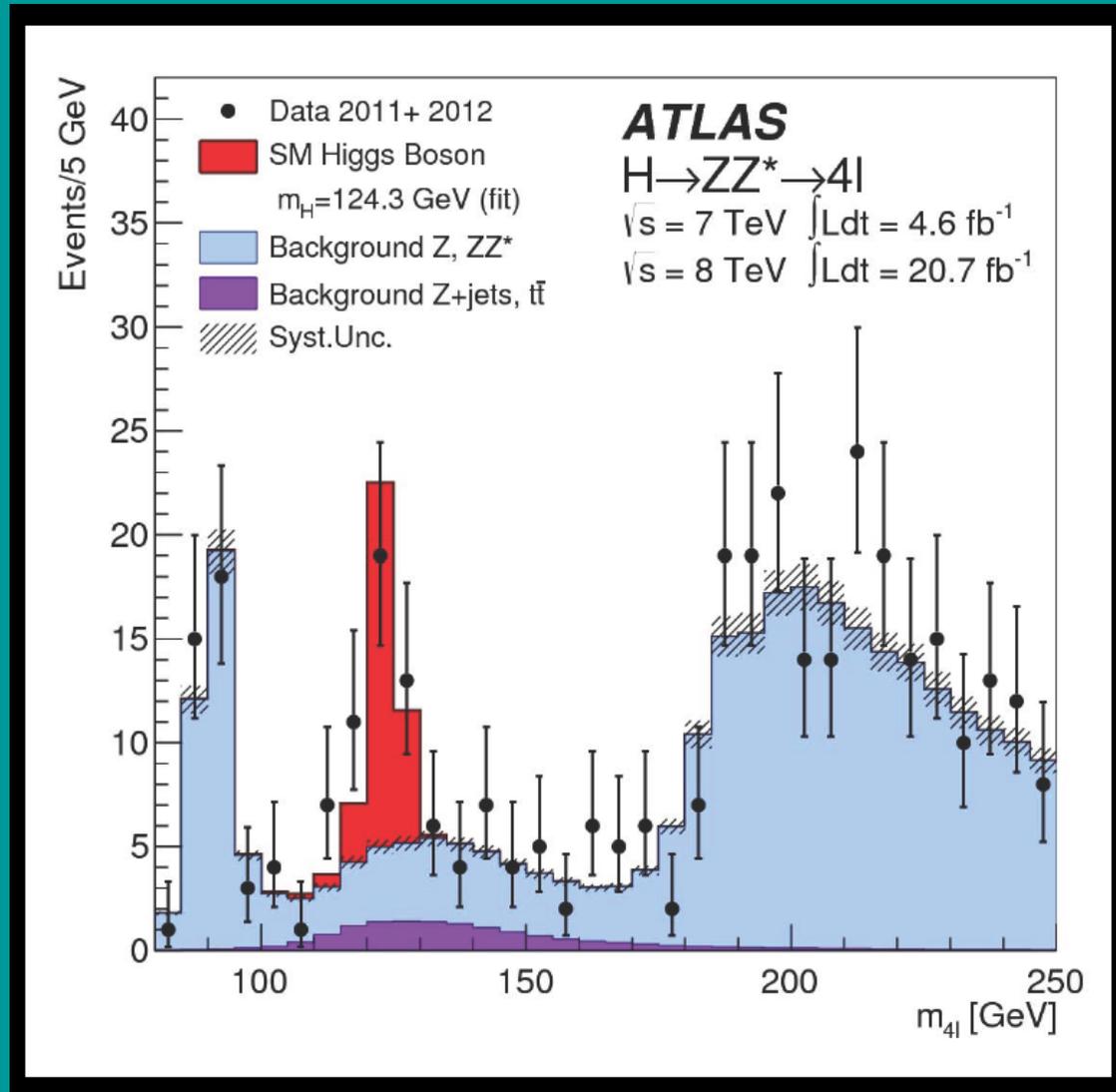
CMS (2013): $H \rightarrow 4\text{leptoni}$



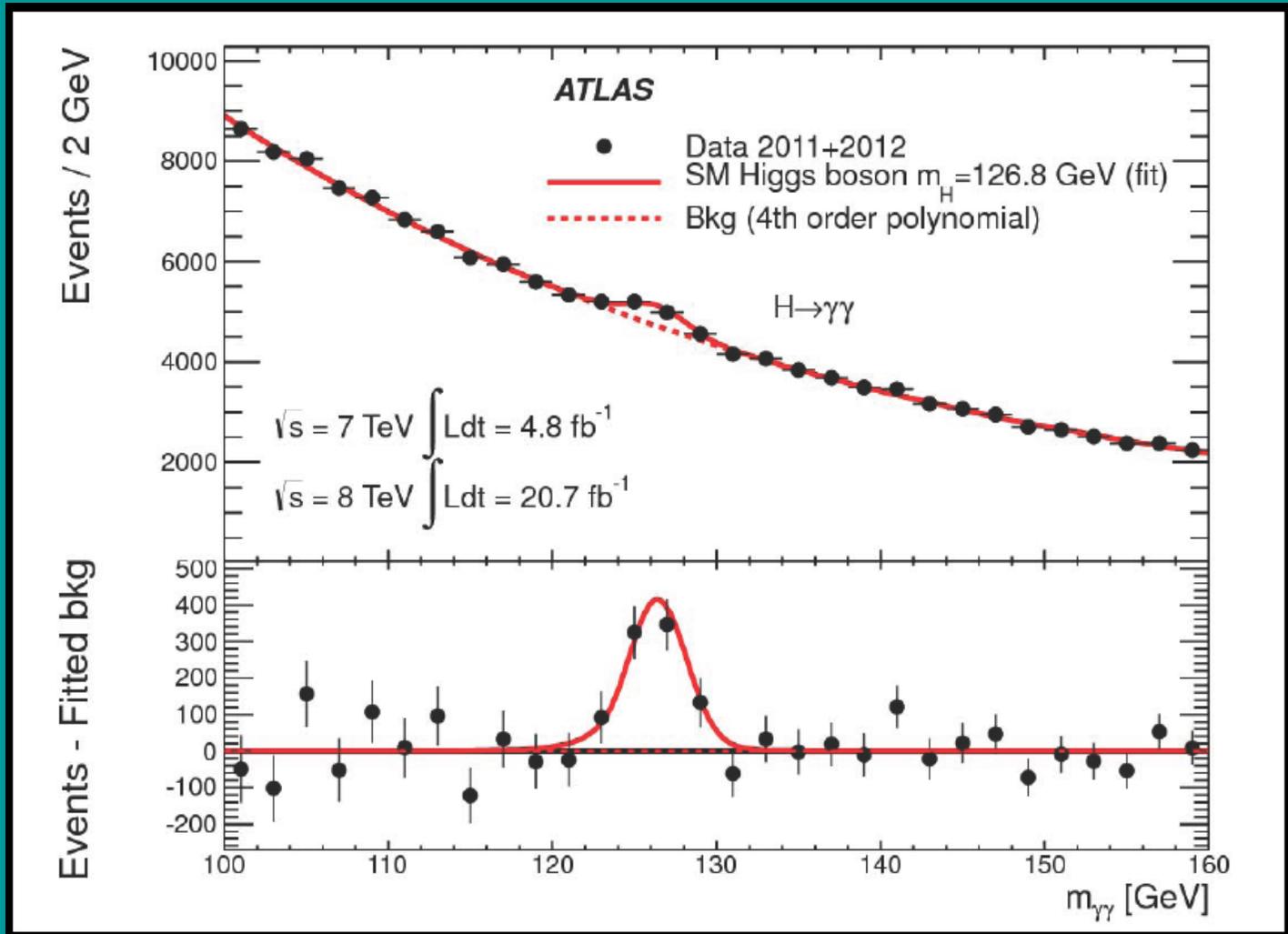
CMS (2012): $H \rightarrow 2\text{photons}$



ATLAS(2013): $H \rightarrow 4\text{leptoni}$



ATLAS(2013): $H \rightarrow 2\text{fotoni}$

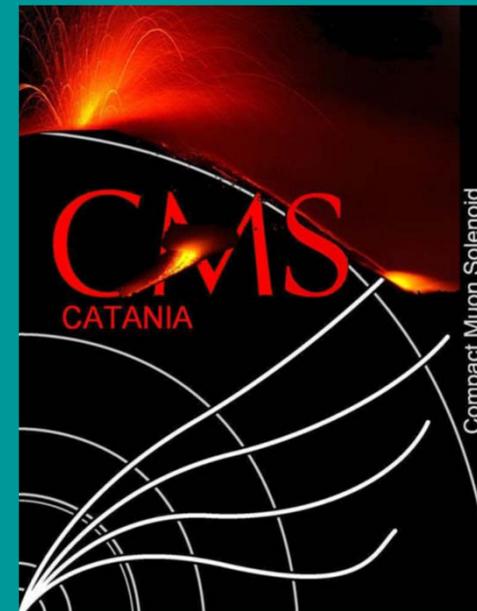


I responsabili di ATLAS e CMS nel 2012: Fabiola Gianotti e Guido Tonelli

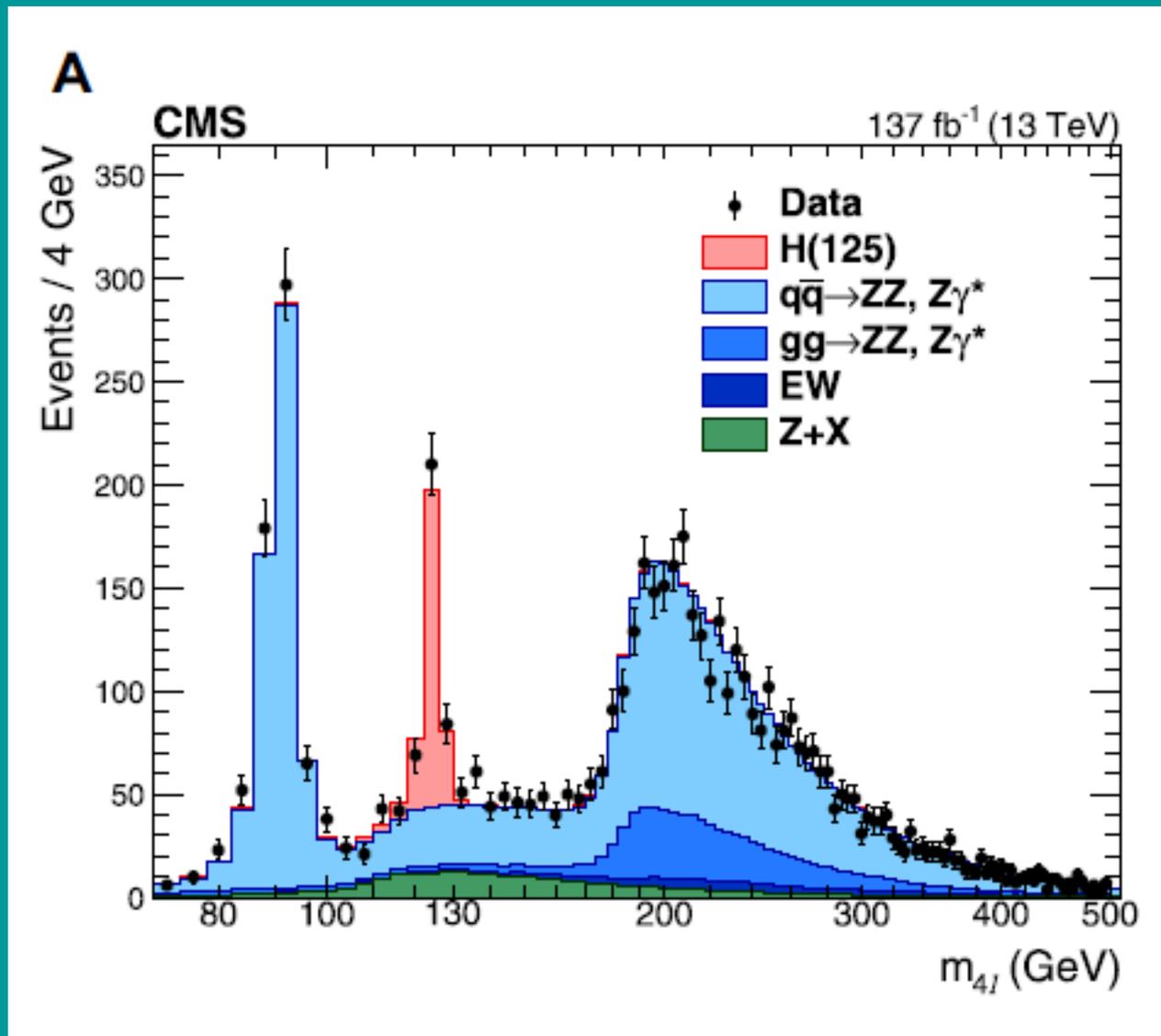


Anche Catania in CMS

- La partecipazione dell'Università e della Sezione INFN di Catania nella Collaborazione CMS, sin dal 1995, si deve alla scelta lungimirante e all'impegno di Renato Potenza
- Altri componenti del Gruppo di Catania nel tempo:
 - Sebastiano Albergo
 - Vincenzo Bellini
 - Salvatore Costa (responsabile del Tracker di CMS)
 - Alessandro Di Mattia
 - Giuseppe Russo
 - Alessia Tricomi (direttrice della Sezione INFN)
 - Cristina Tuvè

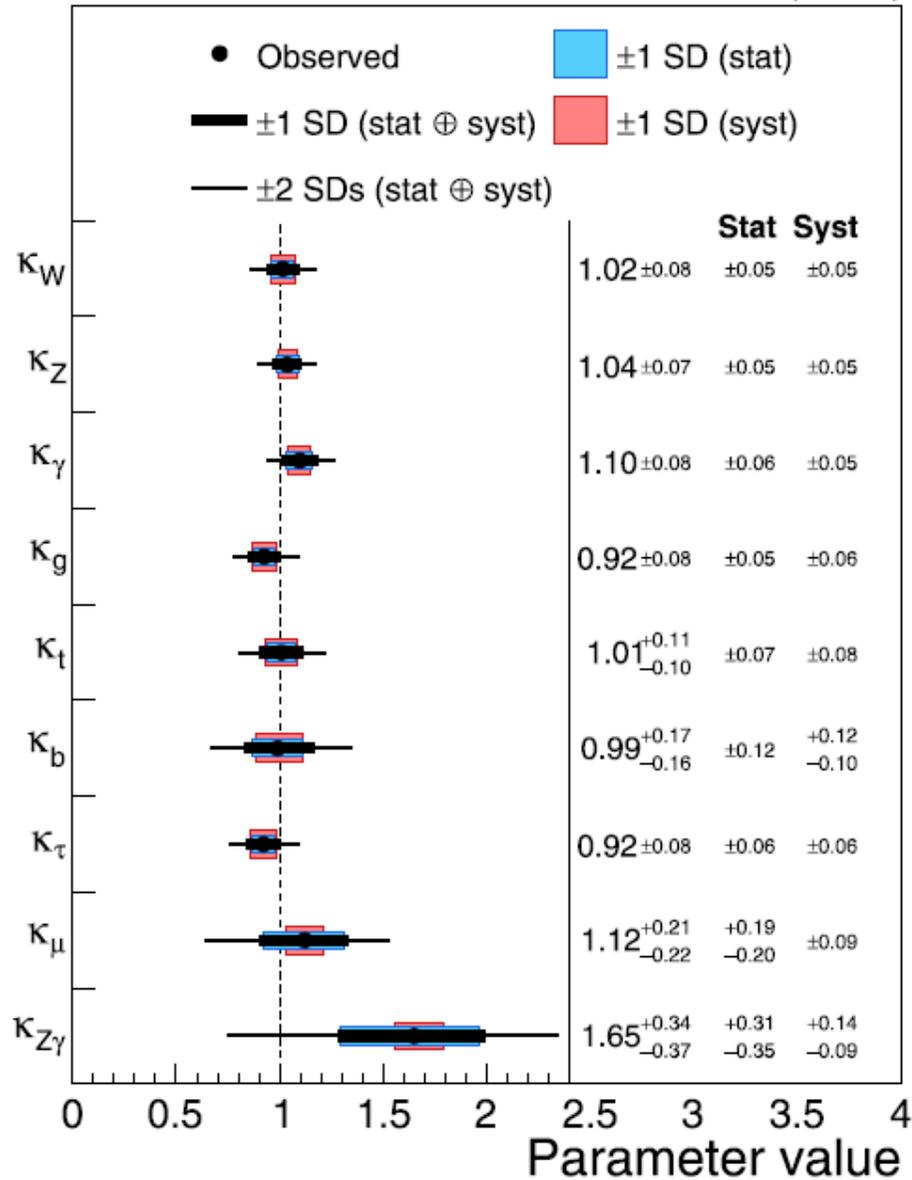


CMS(2018): $H \rightarrow 4\text{-leptoni}$



A CMS

138 fb⁻¹ (13 TeV)



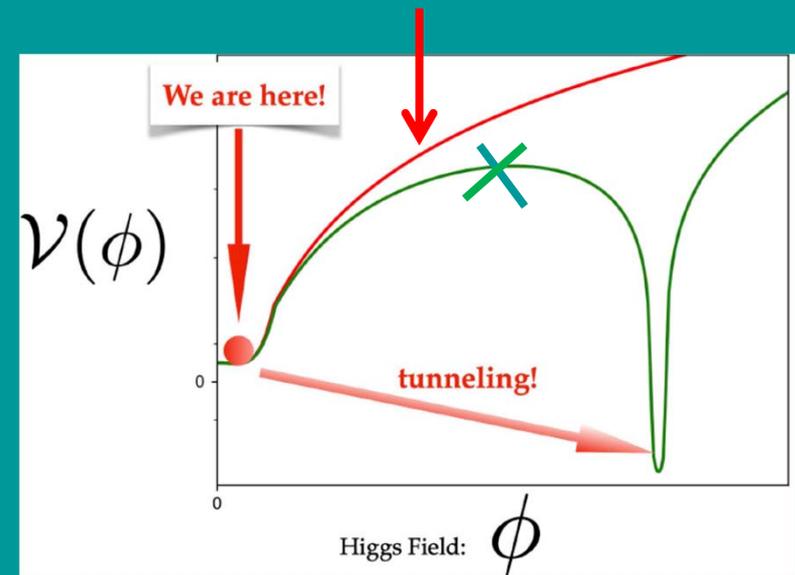
Le interazioni del bosone di Higgs
(in unità dei valori teorici aspettati)

Teoria → $\kappa=1$

- G. Ortona, *Frontiers in Physics*, Settembre 2023

Campo di Higgs: Tutto già capito?

- Potrebbe esserci ancora qualcosa da capire. Per esempio, altri minimi dell'energia $V(\phi)$? Un'importante osservazione di V. Branchina et al. , vedi PRL(2013) & PRD(2015), è che con la forma attuale di $V(\phi)$ esiste un secondo minimo, molto più profondo, per un valore molto maggiore del Campo di Higgs. La stabilità del nostro vuoto implica quindi che $V(\phi)$, pur sotto controllo vicino al minimo (locale) legato alla massa di \mathbf{H} , va probabilmente modificato a grandi valori di ϕ
- Forme alternative di $V(\phi)$? Un secondo bosone di Higgs molto più pesante che stabilizza il minimo attuale? Segnali sperimentali di questa seconda risonanza già ora a LHC? M. C. e L. Cosmai IJMPA (2020) & IJMPA (2022)



Il vuoto, quindi, non è ‘vuoto’

- Indipendentemente da sviluppi futuri riguardo all'energia degli stati con $\phi \rightarrow \infty$, possiamo dire che lo stato di vuoto in cui noi viviamo **NON** è lo spazio vuoto ($\tau\omicron$ κενον) pensato dagli Atomisti Greci per spiegare il movimento degli atomi:
- «Per gli antichi Atomisti Greci il vuoto significa chiaramente spazio non occupato dagli atomi. L'universo è fatto di pieno e vuoto. Lo spazio in questo senso è complementare alla materia ed è limitato dalla materia: materia e spazio si escludono a vicenda»
(Max Jammer, Storia del concetto di spazio)

Ma allora perché ci sembra ‘vuoto’?

- «La domanda è provocatoria ma illustra un problema concettuale di grande interesse...La seguente metafora può aiutarci a comprendere la relazione tra materia ordinaria e vuoto. L’elio, se raffreddato verso lo zero assoluto diventa un superfluido...» (dal libro ‘Infinito’ di Tullio Regge)
- Indipendentemente da uno specifico modello (Campo di Higgs o altro), Regge tenta di spiegare perché il vuoto, inteso sempre come stato di minima energia, possa sembrare ‘vuoto’ anche quando non lo è. Il punto di partenza consiste nell’analogia con un mezzo superfluido al cui interno i corpi possono fluire senza alcuna resistenza misurabile
- Ma cos’è esattamente un superfluido? A bassissime temperature l’elio liquido ha una transizione di fase, dallo stato liquido a quello superfluido. Pur con gli stessi costituenti e la stessa densità, diventa un nuovo stato della materia che si comporta in modo totalmente differente (vedi grafico seguente)

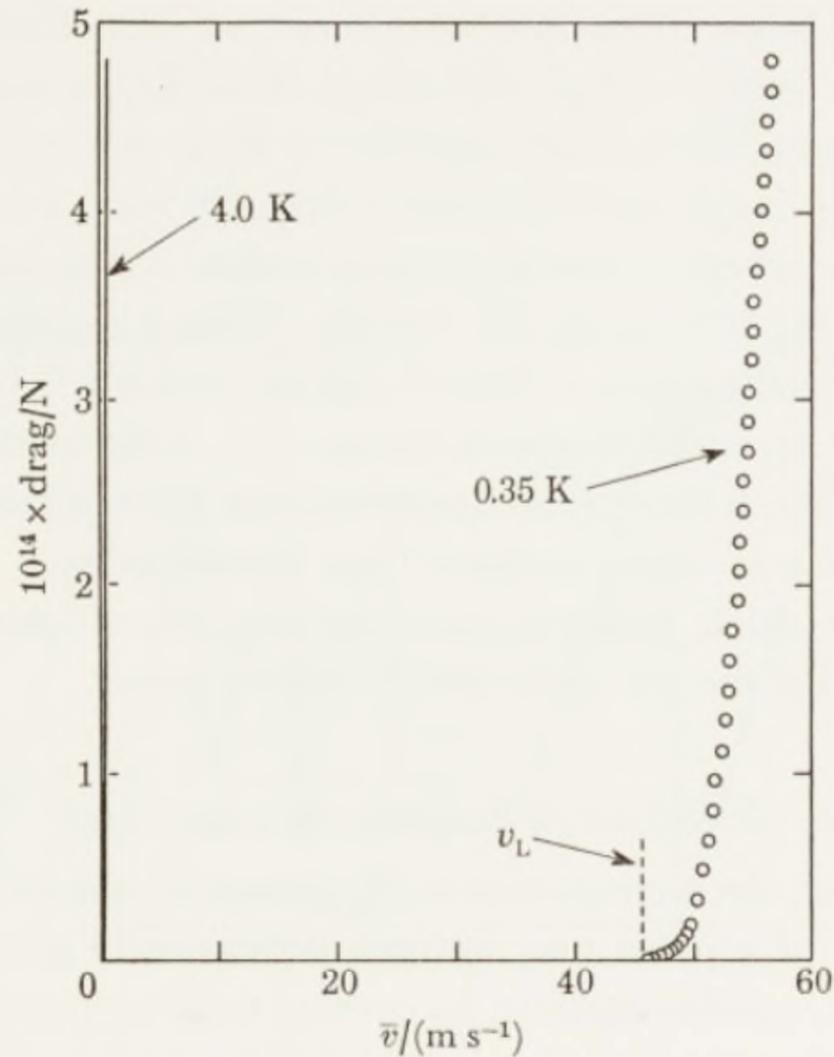
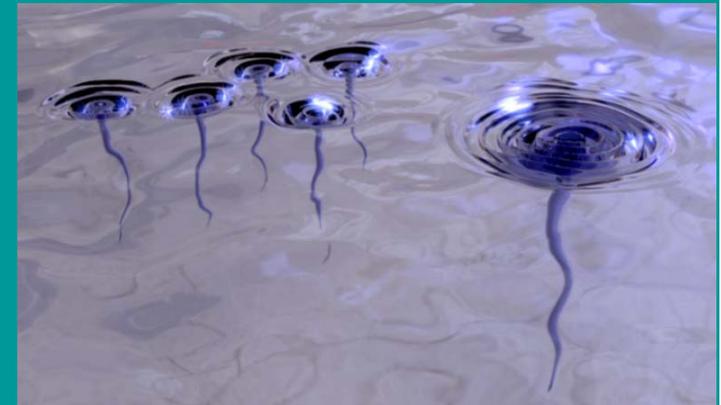


FIGURE 11. The drag on an ion moving through superfluid ^4He at 0.35 K, as a function of the average ionic velocity \bar{v} . For comparison, the equivalent plot for an ion moving through normal (non-superfluid) ^4He at 4.0 K is also shown, emphasizing the qualitative difference which exists between the two cases. It is clear that drag in the superfluid sets in abruptly at a critical velocity which is very close to the critical velocity for roton creation, v_L , predicted by Landau.

Le vibrazioni del superfluido

- A piccole energie, modifiche osservabili dell'elio superfluido (simili a quelle dei fluidi ordinari ma molto più stabili) si originano quando i suoi veri costituenti, gli atomi di elio, esibiscono particolari forme collettive di movimento → onde di pressione, **fononi**, e moti vorticosi, **rotoni**
- A piccole energie, questi moti collettivi descrivono i fenomeni nell'elio superfluido ed avendo una loro individualità e stabilità sono detti **quasi-particelle**
- Invece, le **vere particelle**, cioè i singoli atomi di elio, che costituiscono la materia del superfluido, non sono esse stesse osservabili. Esse appartengono ad un secondo livello di realtà che diventa accessibile solo ad energie più elevate
- Si noti come, a differenza dei singoli atomi di elio, sistemi di quasi-particelle, come reticoli di vortici, **possono esistere solo dentro il superfluido**. Un modello di materia costruito di tali quasi-particelle potrebbe quindi essere definito 'olistico'. Nel senso che i suoi elementi costitutivi non hanno una loro esistenza indipendente ma richiedono un'entità unificante (il superfluido) in cui poter sussistere



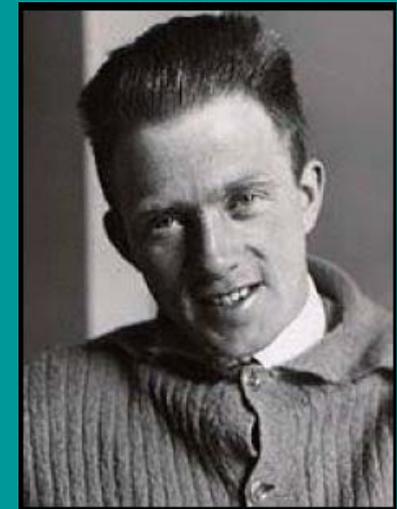
Il rapporto tra il vuoto e la materia/energia osservabile

- Ora «Le onde di pressione che si formano dentro l'elio superfluido, dette fononi (così come i moti vorticosi detti rotoni), possono considerarsi particelle vere e proprie, delle 'quasi-particelle'. Se per eventualità fossimo capaci di assemblarle in macrostrutture complesse analoghe agli elementi chimici ed alle biomolecole, potremmo creare degli esseri cui il recipiente che a noi appare pieno di elio superfluido apparirebbe vuoto. Viceversa per loro l'esterno del recipiente sarebbe inaccessibile. La percezione di quello che è vuoto o pieno dipende quindi dall'osservatore» (T. Regge)
- Quindi, per capire perché il vuoto ci sembra vuoto, potremmo pensare la materia ordinaria e noi stessi come fatti di quasi-particelle di un qualche 'primo livello'. Si arriva così ad una forma di etere: «Le particelle elementari note, di cui è fatta la materia ordinaria e noi stessi, apparirebbero come modificazioni, vibrazioni dello stato di questo etere...la separazione delle cose...l'impenetrabilità della materia ordinaria hanno quindi carattere antropomorfo» (T. Regge)

Il vuoto come *Apeiron*?

- Questa visione del vuoto ricorda entità la cui **indefinibilità**, per la coesistenza degli opposti, è anche alla base della loro **impercettibilità** intesa come incapacità di ‘impressionare’ (i nostri sensi, una lastra fotografica, un rivelatore di suono...)
- Nel Pensiero Occidentale, questa era la visione originaria di Anassimandro in cui il distacco degli opposti, e da qui la nascita di tutte le cose, si doveva al sorgere di moti di rotazione locali (vortici) dentro l'*Apeiron*. Siamo dunque condotti ad una differente nozione di elementarità:
- «Una prima possibilità è che tutte le particelle possano essere ridotte in qualche modo a pochi tipi di particelle elementari; questa è la strada seguita negli ultimi anni dalla fisica teorica. Un'altra possibilità è invece che tutte le particelle siano modificazioni di un'unica sostanza primordiale, che possiamo chiamare energia o materia (*urstoff*). Questo secondo punto di vista corrisponde all'*Apeiron* di Anassimandro e sono convinto che nella fisica moderna sia la visione corretta»

(W. Heisenberg, *Physics and Philosophy*, 1958)



Conclusioni

- Dopo l'osservazione sperimentale del Bosone di Higgs, lo spazio che ci sembra banalmente vuoto andrebbe pensato come una forma di 'condensato' che sta all'origine della massa e che realizza la condizione di energia minima. Nella cosmologia attuale, la condensazione del Campo di Higgs sarebbe avvenuta con l'abbassarsi della temperatura nelle prime fasi di espansione dell'Universo
- Questo stato non è quindi il vuoto degli Atomisti Greci ma ha un suo grado di materialità. Un'analogia intuitiva è quella con l'elio superfluido che, per molti versi, si comporta come il vuoto non offrendo resistenza al moto dei corpi
- L'analogia ha una sua valenza generale ed, in buona misura, prescinde dalle nostre attuali conoscenze. Potremmo allora cercare di utilizzarla per capire come mai lo stato di minima energia ci sembra vuoto, anche quando non lo è. Il motivo sarebbe che noi siamo strutture complesse costruite mediante quelle sue particolari modificazioni, 'vibrazioni', che chiamiamo particelle elementari
- In questo modo, il vuoto ci sembrerebbe vuoto, anche quando 'vuoto' non è, perché le particelle che noi chiamiamo elementari, in realtà, 'elementari' non sono