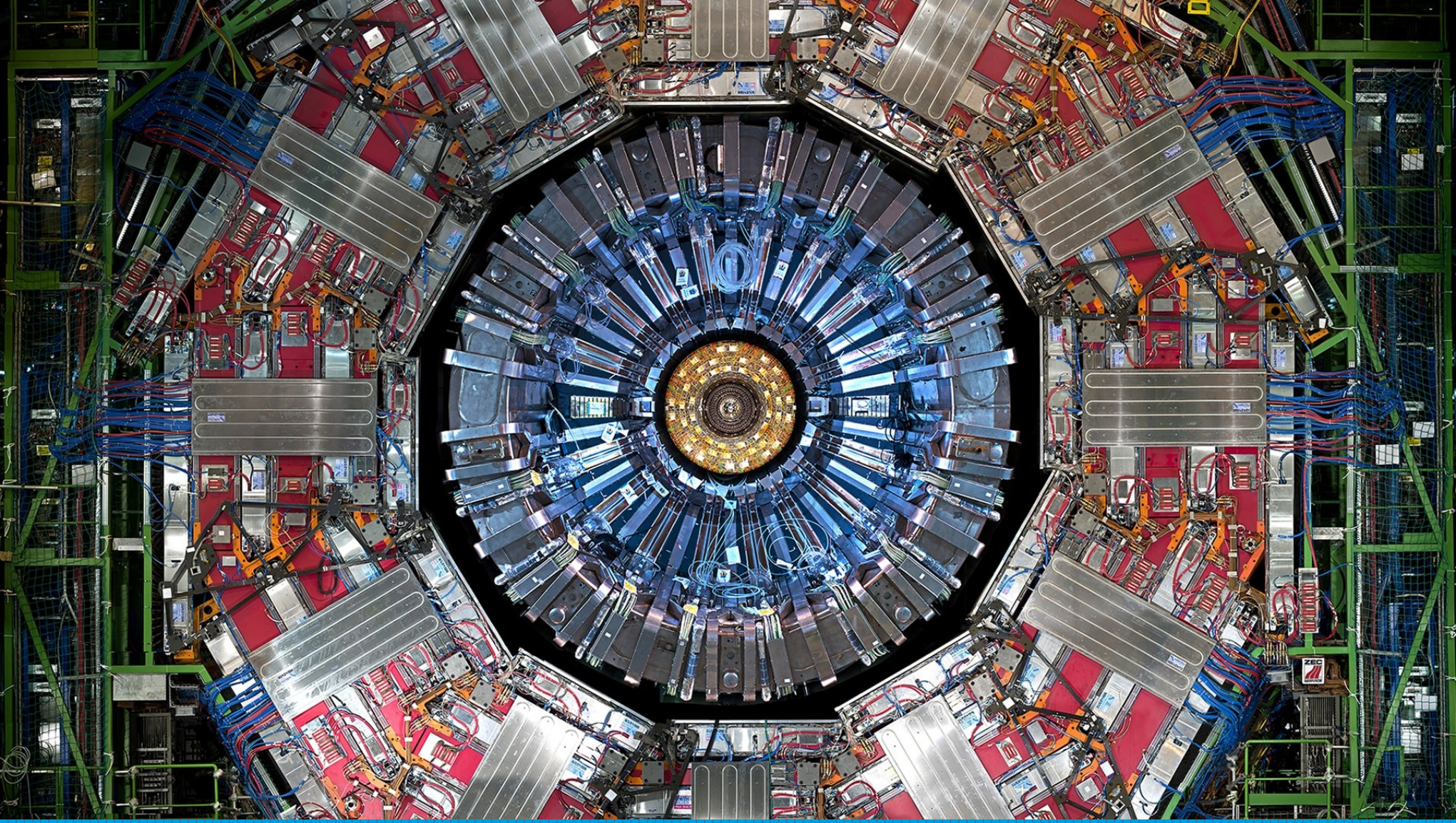


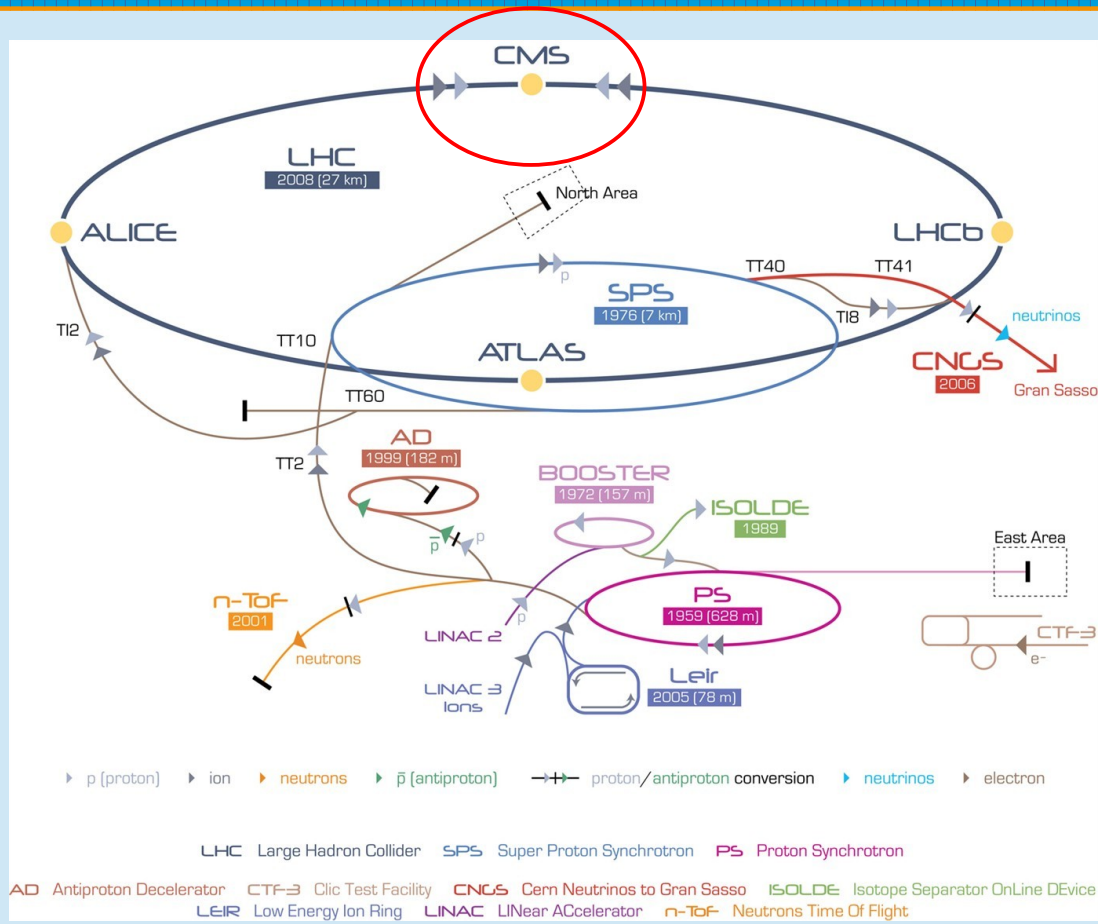
L’esperimento CMS al CERN

Davide Bruschini[1]

1: Scuola Normale Superiore e INFN Sezione di Pisa

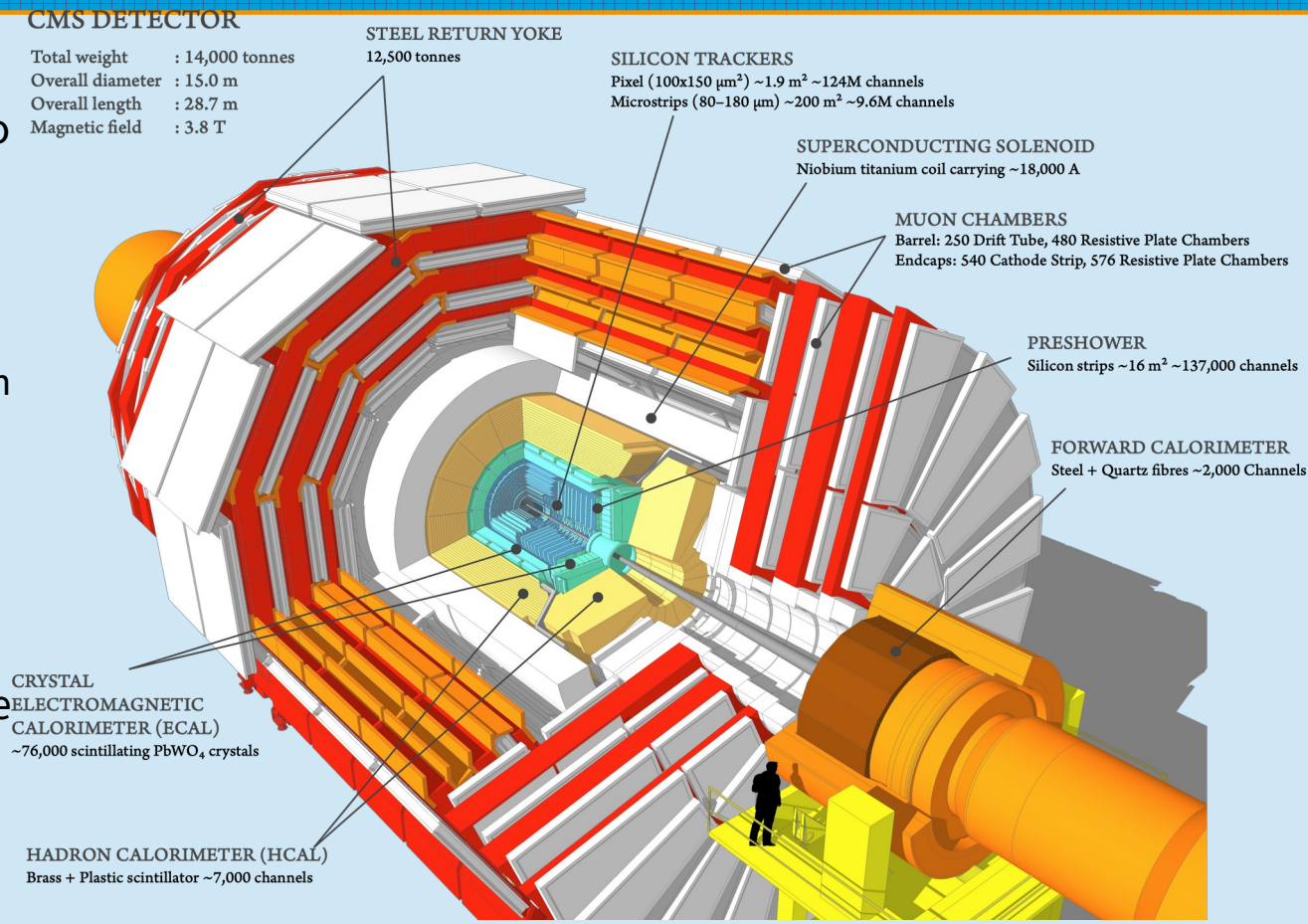
Large Hadron Collider

- 27 km di circonferenza, profondità di circa 100 m
- I fasci di protoni vengono accelerati a 7 TeV e collidono in quattro punti, in ciascuno c'è uno degli esperimenti
- I fasci sono divisi in circa 2800 pacchetti da circa 10^{11} protoni ciascuno
- Collisioni ogni 25 ns, per un rate di 40 Mhz

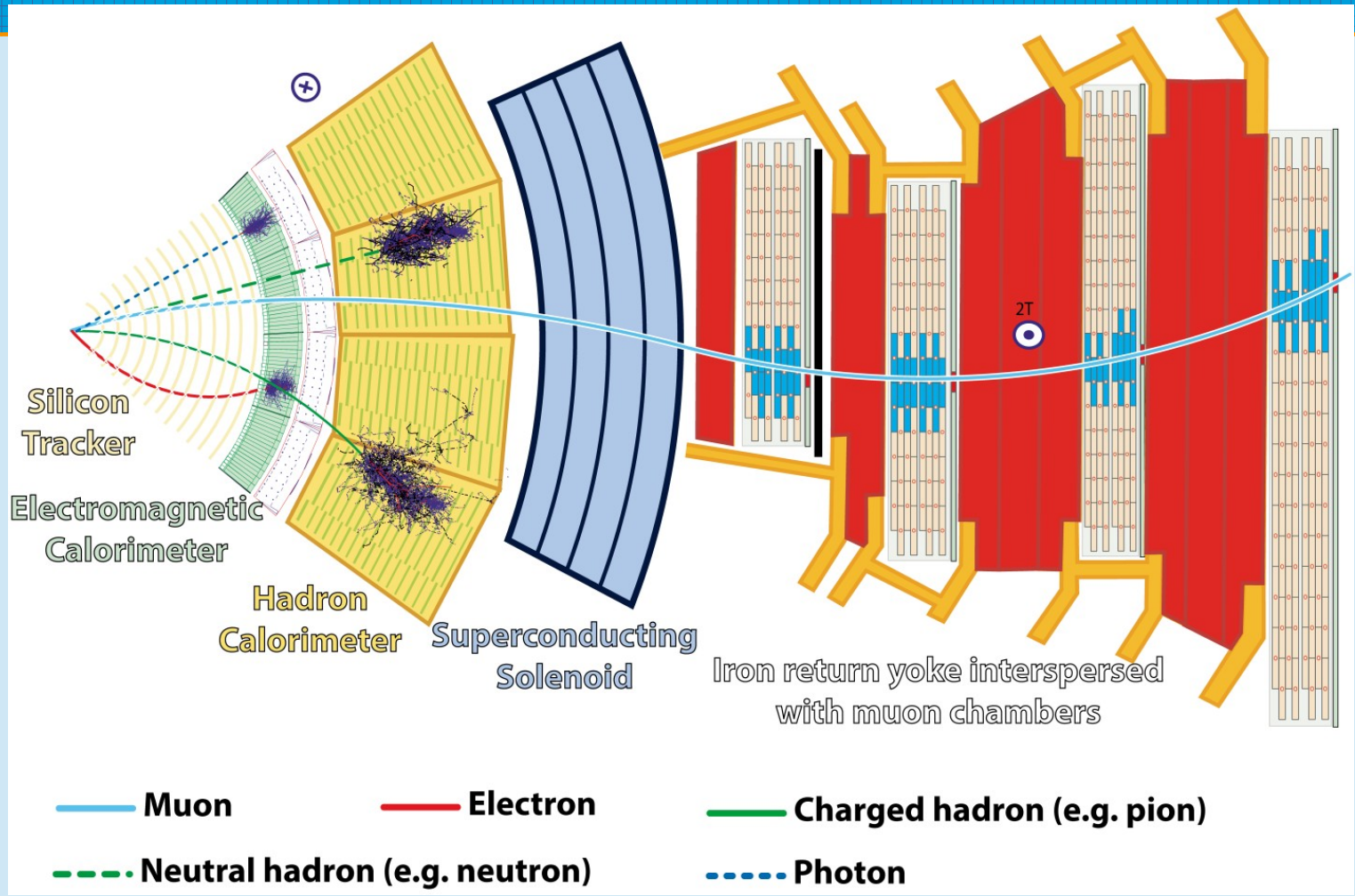


L’esperimento CMS

- Costituito da vari detector disposti a strati disposti intorno alle collisioni pp di LHC
- Ogni detector rivela un determinato di particelle:
  - Le particelle interagiscono con il materiale del rivelatore
  - Produzione di un segnale elettrico, memorizzato e successivamente interpretato
- L’insieme dei segnali elettrici viene poi “ricostruito” e si risale alla fisica dell’evento



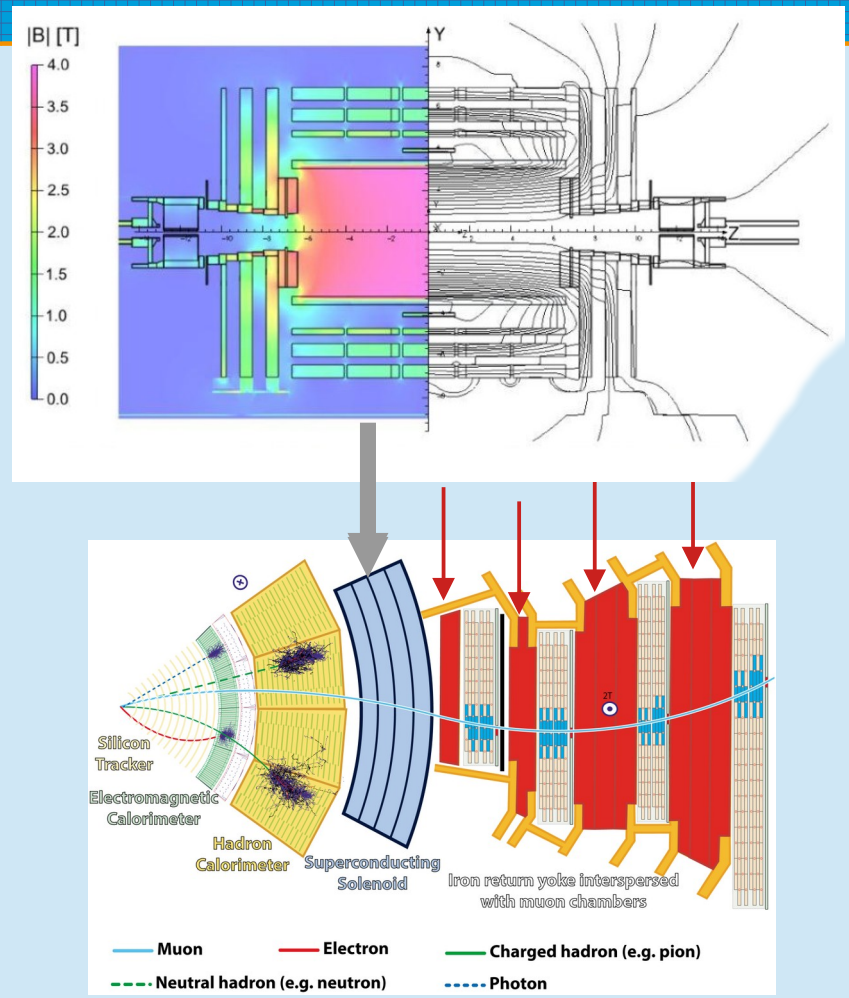
Gli strati di CMS

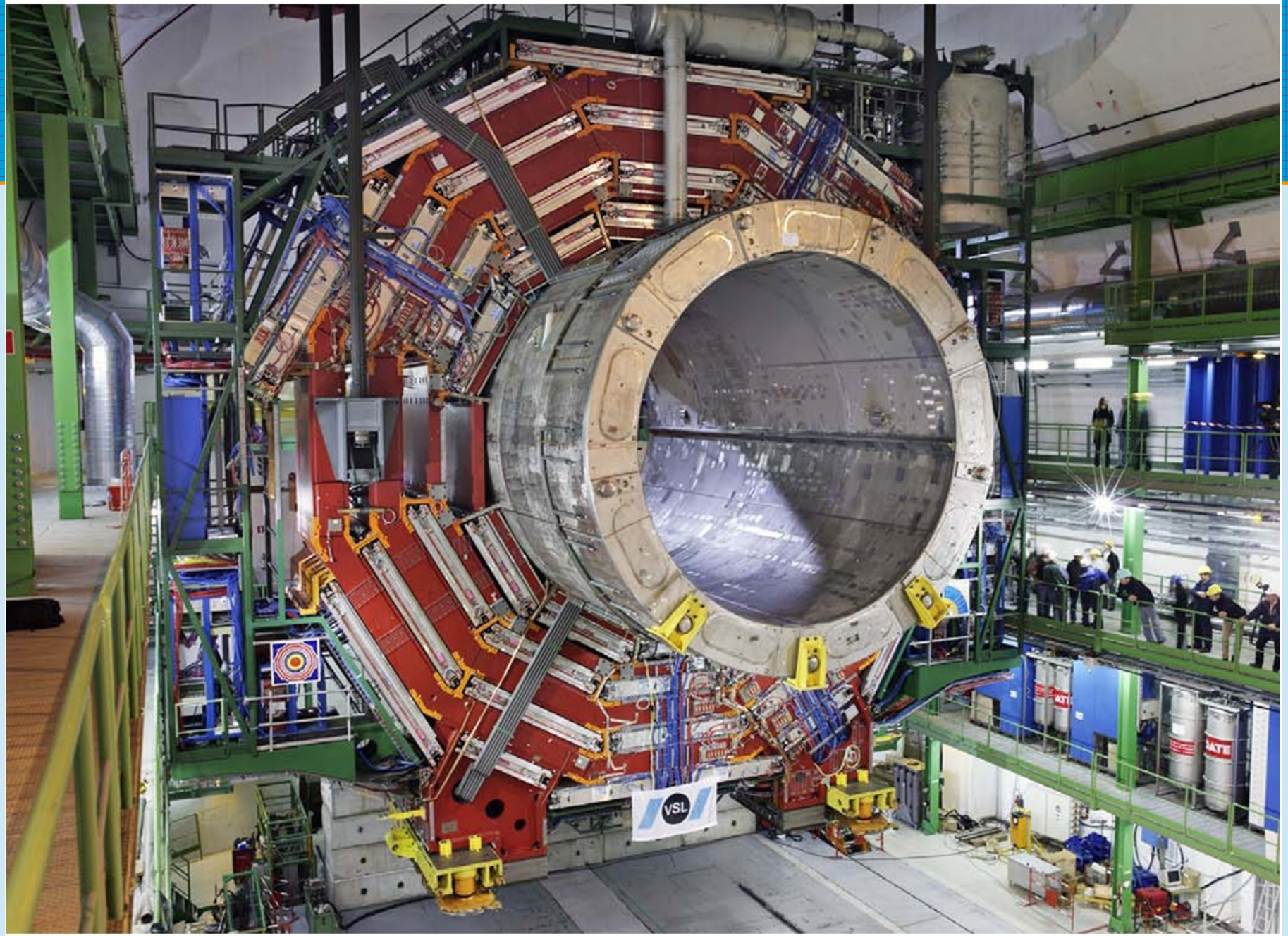


Solenoide superconduttore

- In CMS circonda tutti i rivelatori tranne lo spettrometro muonico (descritto nel seguito).
- Il solenoide di CMS fornisce al suo interno un campo magnetico pressoché uniforme di 3.8T.
- È circondato da strati di ferro collocati all'interno delle camere muoniche per concentrare le linee di ritorno del campo magnetico, generando un campo magnetico di 2T.
- Le particelle cariche curvano per effetto del campo magnetico e questo serve per misurare il loro impulso.

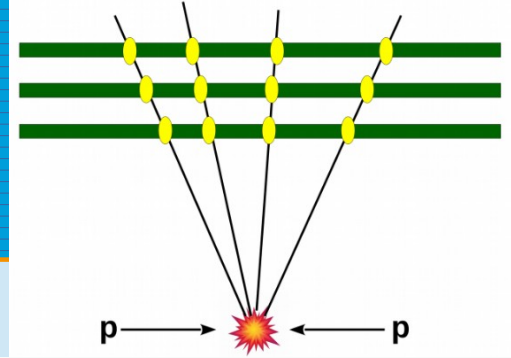
$$p_T[\mathrm{GeV}] = 0.3B[\mathrm{T}]R[\mathrm{m}]$$

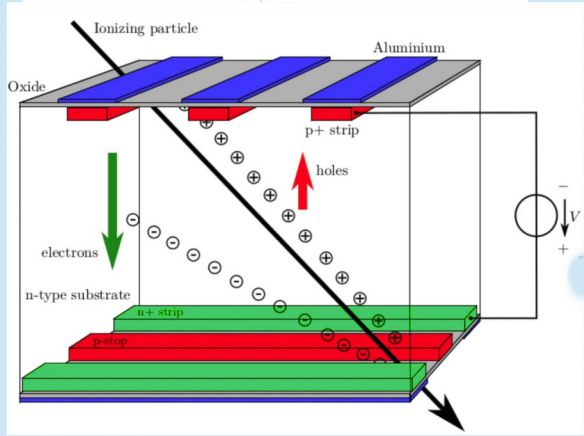


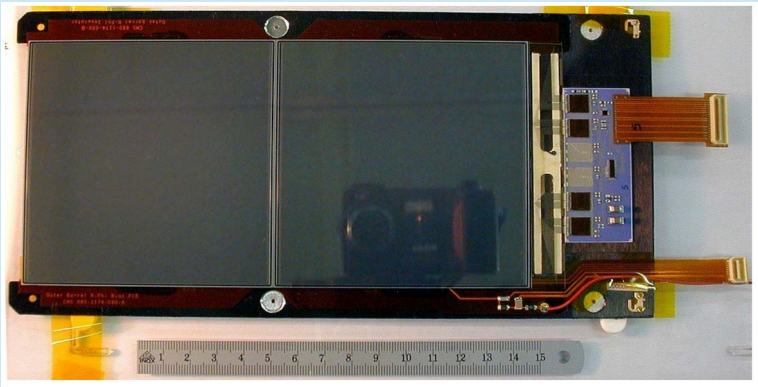

VSL

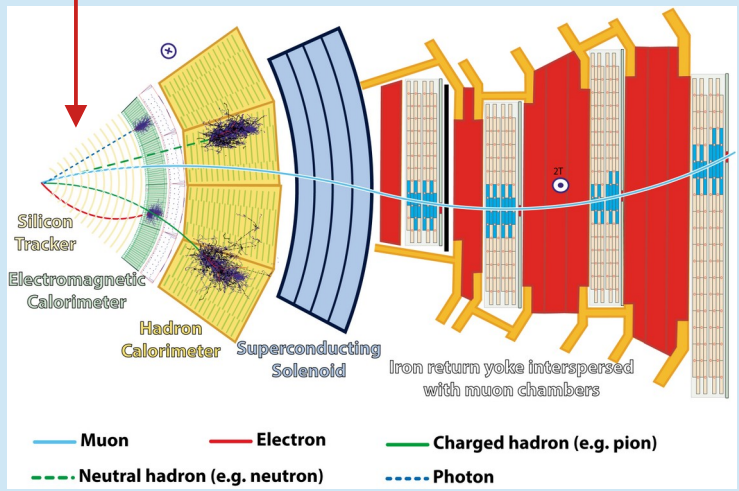
Il tracciatore

- Il detector più vicino al punto di interazione, composto interamente di silicio
- Permette di ricostruire le traiettorie delle particelle cariche
- Le particelle cariche interagiscono con gli atomi di silicio, strappando i loro elettroni:
  - Si produce un segnale elettrico che viene poi raccolto
- Il forte campo elettrico presente sposta gli elettroni generando quindi un segnale elettrico.
- CMS tracker:
  - 4 layer di pixel (100 x 150 μm^2)
  - 10 layer di strip (5 cm x 100 µm)
  - 124 M di pixel, 10 M di strip









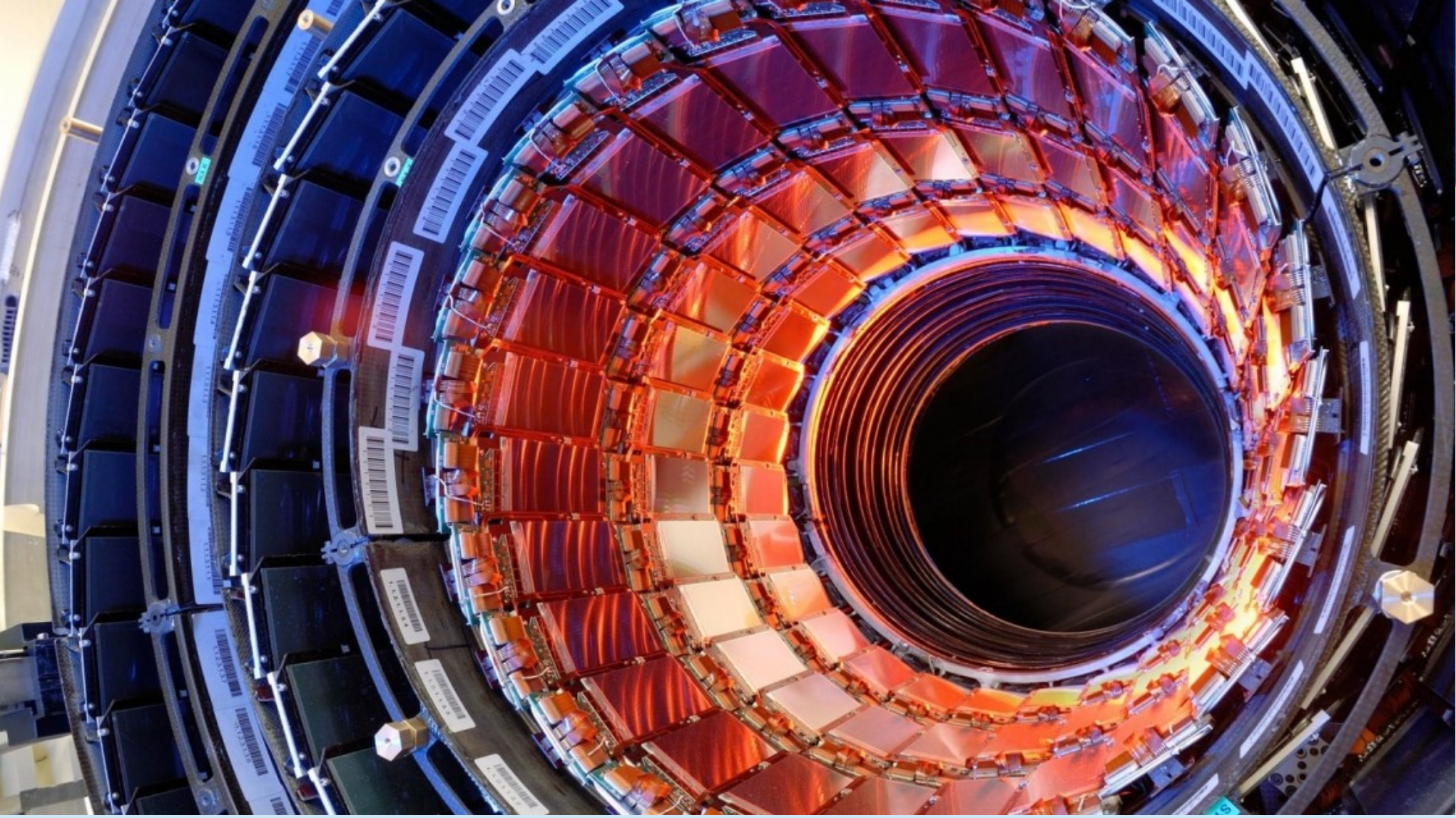


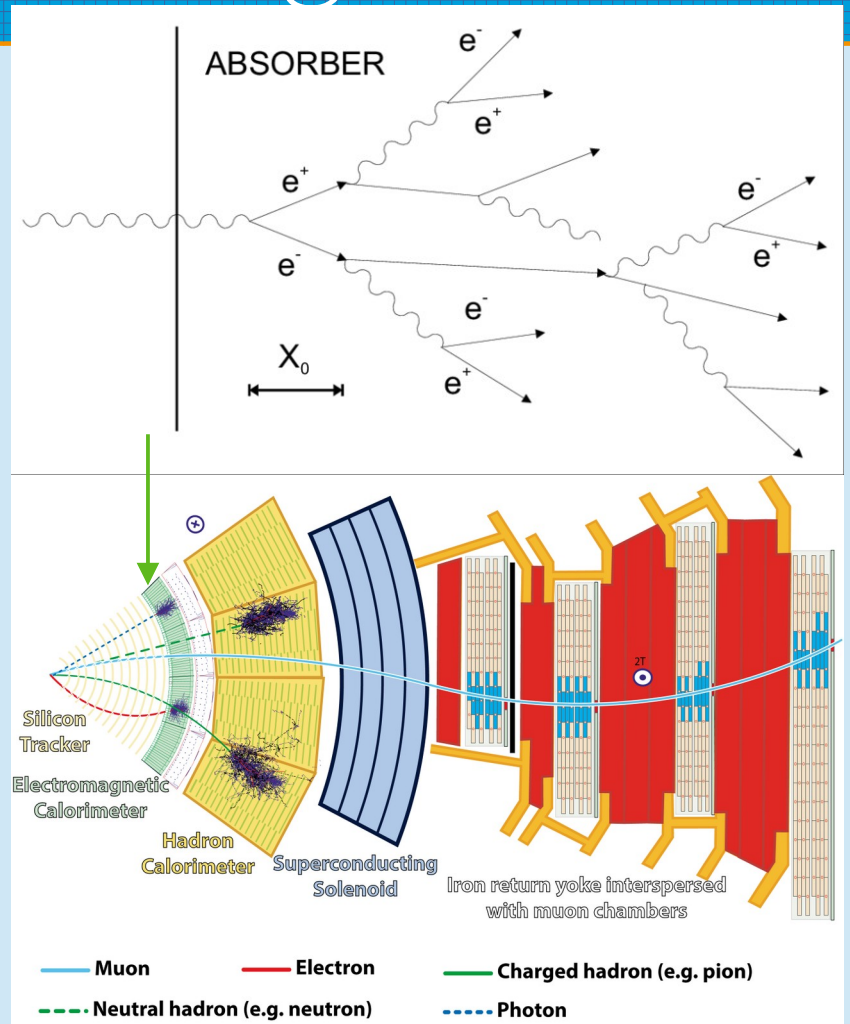
Foto del CMS outer tracker. Pisa è direttamente coinvolta nello sviluppo di questo rivelatore

Il calorimetro elettromagnetico

- Permette di misurare interamente l'energia di γ, e-, e+
- Quando un fotone di alta energia attraversa il calorimetro, esso produce una coppia di e+ e-. Sia e+ che e- possono perdere energia sotto forma di fotoni (bremm-strahlung), che a loro volta creano coppie e+ e-, formando uno sciame elettromagnetico
- Le particelle cariche prodotte nello sciame eccitano gli elettroni degli atomi del calorimetro, che poi emettono luce visibile, poi raccolta e convertita in un segnale elettrico.
- A CMS il calorimetro EM è costituito da cristalli di tungstenato di piombo (PbWO4). Riesce a contenere tutto lo sciame elettromagnetico pur essendo spesso 23 cm
- La risoluzione in energia è data dalla seguente formula

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{2.8\%}{\sqrt{E(GeV)}} \oplus \frac{12\%}{E(GeV)} \oplus 0.3\%$$

- Anche altre particelle cariche (muoni e adroni carichi) rilasciano piccoli segnali all'interno del calorimetro elettromagnetico.

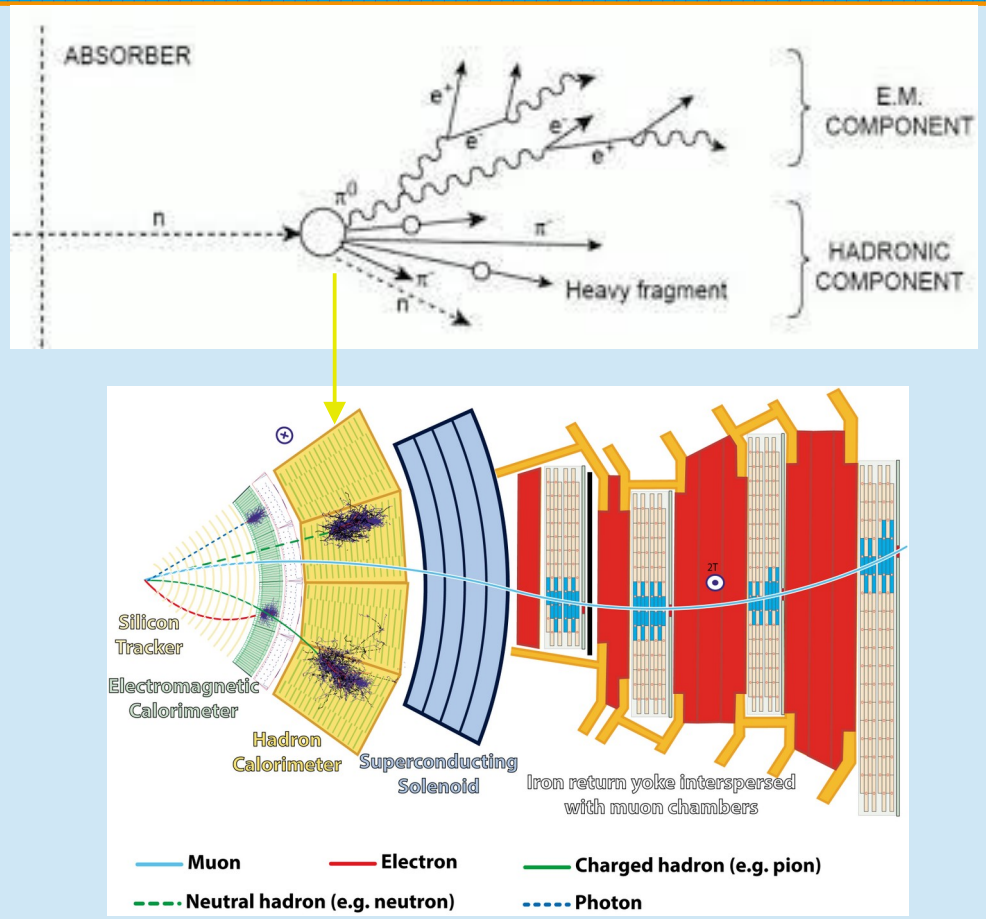


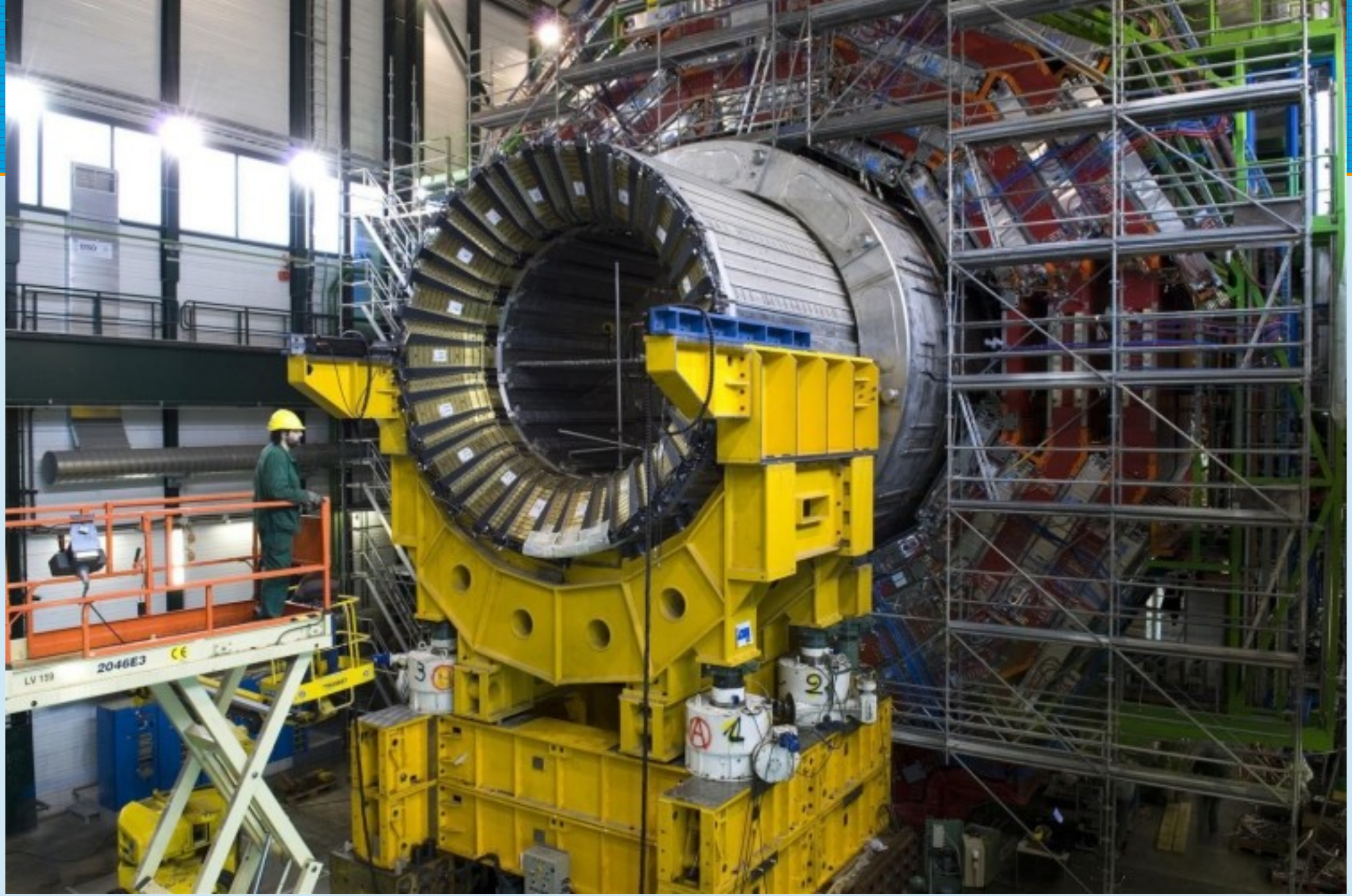
29
19

Il calorimetro adronico

- Deve fermare gli adroni, particelle che interagiscono con le interazioni forti.
- È costituito da lastre di ottone o di acciaio (mezzo passivo) alternate a strati di scintillatore (mezzo attivo):
  - Le interazioni forti degli adroni avvengono nelle lastre di ottone o acciaio.
  - Le particelle cariche prodotte interagiscono con lo scintillatore → eccitazione degli atomi → emissione di luce.
- La risoluzione è data da:

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{110\%}{\sqrt{E(GeV)}} \oplus 9\%$$




2046E3

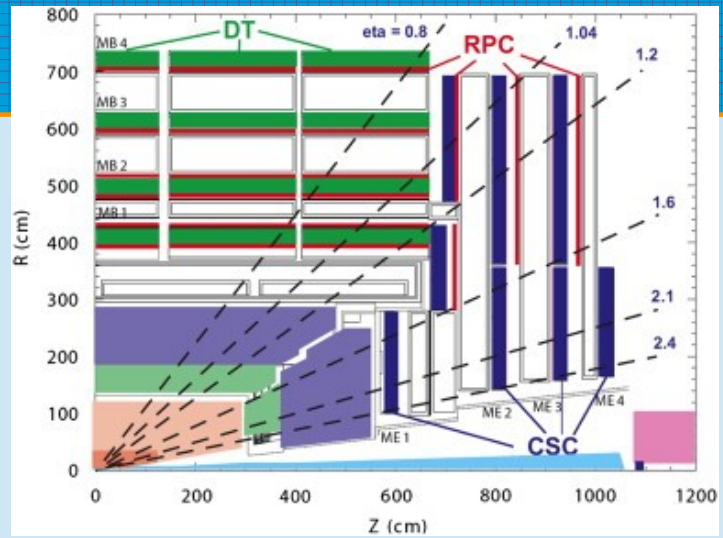
Ottone usato in calorimetro CMS

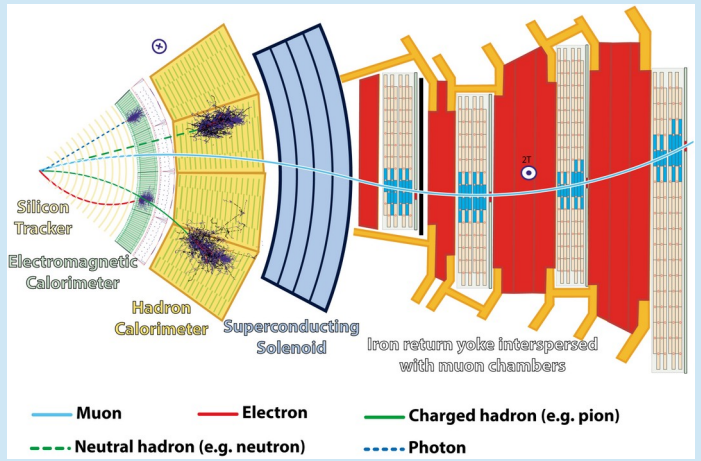
Dall’artiglieria usata dai Russi

Spettrometro muonico

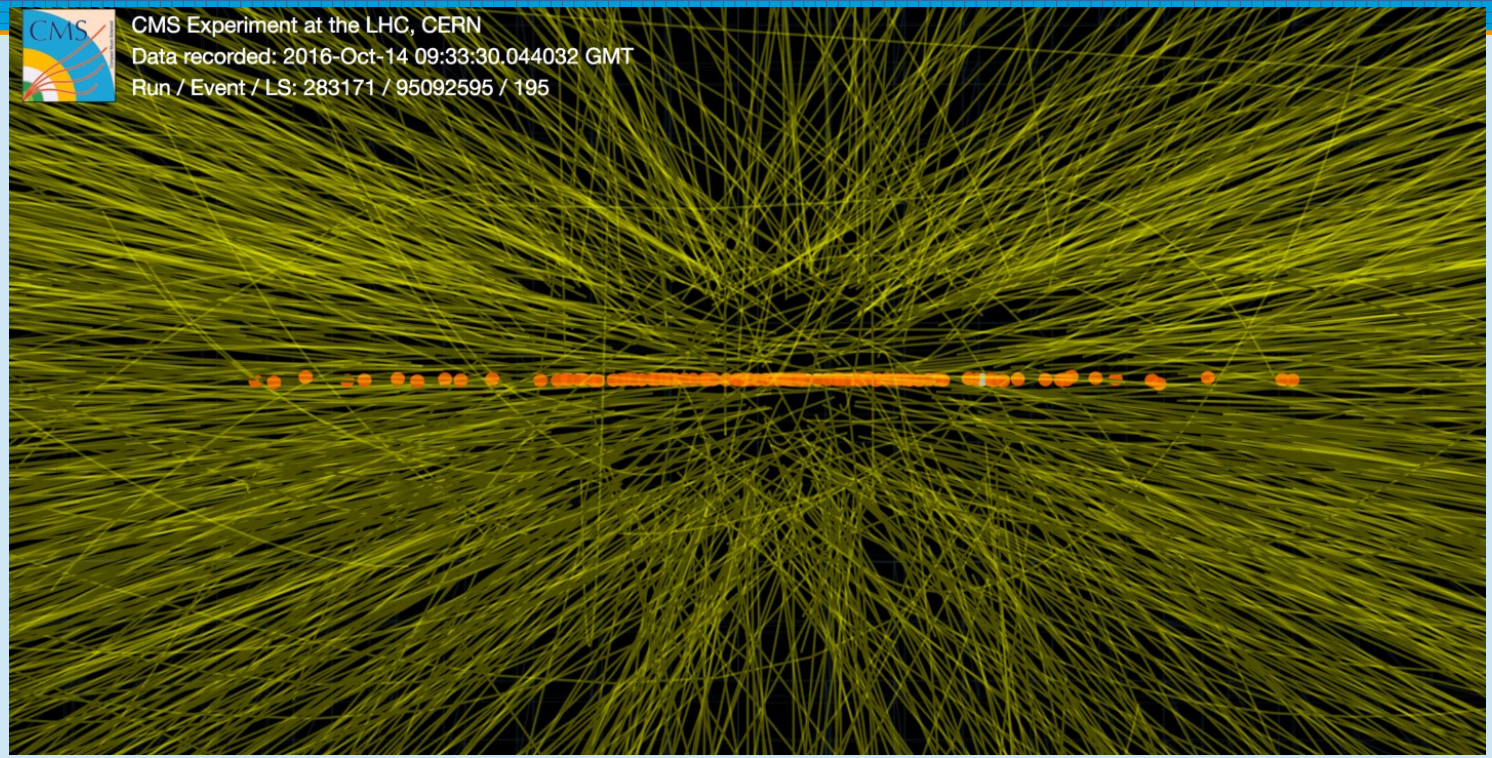
- Rivelatori a gas che misurano la posizione dei muoni.
- I muoni, a differenza delle altre particelle, sono estremamente penetranti, e sono gli unici che arrivano alle camere, tutte le altre vengono fermate negli strati precedenti.
- I neutrini, che interagiscono solo attraverso le interazioni deboli, non vengono rivelati:
  - Nelle collisioni tra protoni la somma vettoriale degli impulsi delle particelle nel piano trasverso è uguale a zero, quindi si usa energia trasversa mancante o MET per dedurre l'esistenza di neutrini nell'evento

$$\vec{MET} = -\sum_{\text{particelle misurate}} \vec{p_T}$$



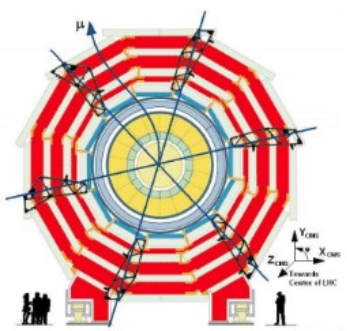


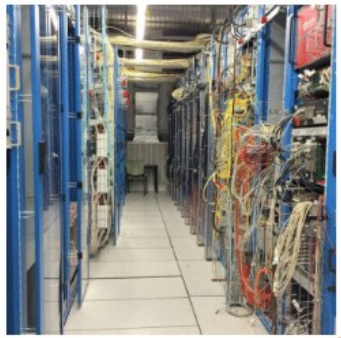
Presa dati: trigger

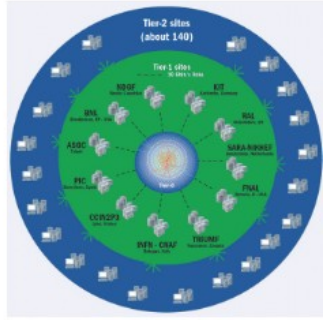


- LHC fa collidere protoni con protoni circa 40 milioni di volte al secondo
- In ciascuna di queste collisioni vengono prodotte fino a 60 interazioni simultanee (pile-up)
- Quindi i rivelatori di CMS devono essere in grado di processare i segnali in soli 25 ns

Presa dati: trigger







40 MHz
~50 m

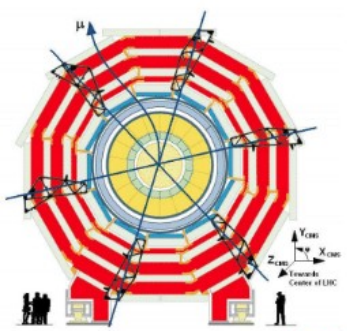
100 kHz
~400 m

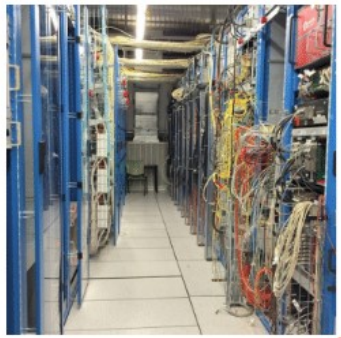
1 kHz
~10 km

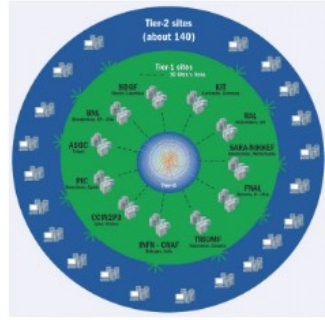
1 kHz
~10000 km

- Non tutti gli eventi possono essere salvati (40 kB/evento → 16 TB/s).
- Il sistema di trigger serve a selezionare gli eventi interessanti
- Lo fa in due step:
  - In uno stadio in cui viene utilizzato solo hardware (L1 trigger), a fianco di CMS
  - In superficie, dove viene impiegato il software di ricostruzione (HLT)

Presa dati: L1







40 MHz
~50 m

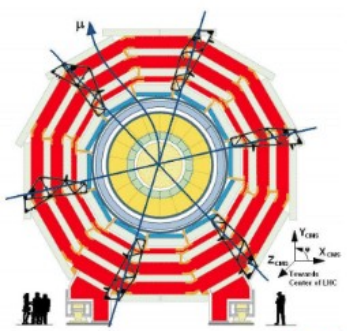
100 kHz
~400 m

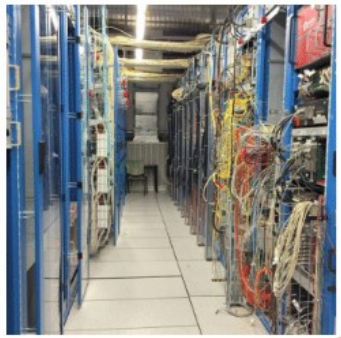
1 kHz
~10 km

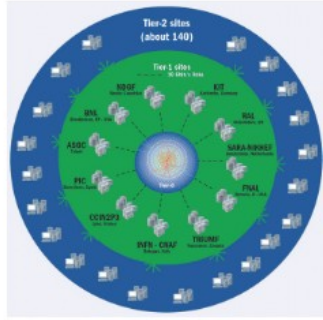
1 kHz
~10000 km

- I segnali elettronici prodotti dai rivelatori vengono portati nella “counting room” a 50 m da CMS
- Si ha una prima ricostruzione semplificata dei vari oggetti usando le informazioni dei calorimetri e dello spettrometro muonico, a 40 MHz
- Gli eventi che passano alcuni requisiti vengono passati al livello successivo, altrimenti vengono scartati (e quindi persi)
- Questo riduce il rate di eventi da processare da 40 Mhz a circa 100 kHz
- Per ogni evento questo richiede qualche microsecondo

Presa dati: HLT



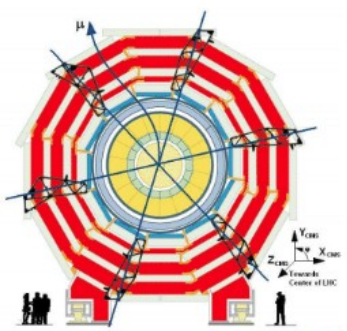


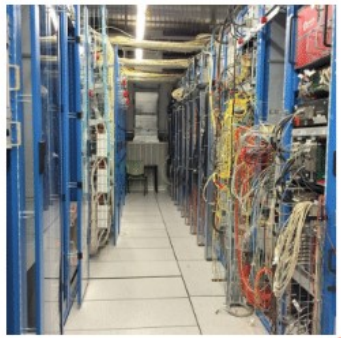


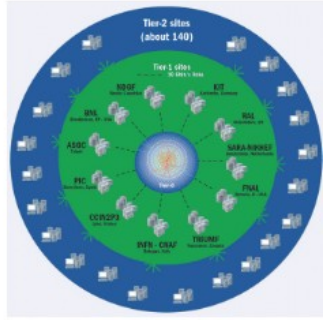
40 MHz
~50 m
100 kHz
~400 m
1 kHz
~10 km
1 kHz
~10000 km

- Per gli eventi che passano L1 viene poi processata l'informazione di tutti i rivelatori
- L'evento viene portato in superficie, dove una farm di 16000 CPU ricostruisce con una precisione superiore a L1 gli eventi, e vengono salvati solo quelli che passano alcuni requisiti particolari
- Questo riduce il rate da 100 kHz a circa 1 kHz
- Il tempo impiegato per processare un evento è circa 200 ms

Presa dati: ricostruzione







40 MHz
~50 m

100 kHz
~400 m

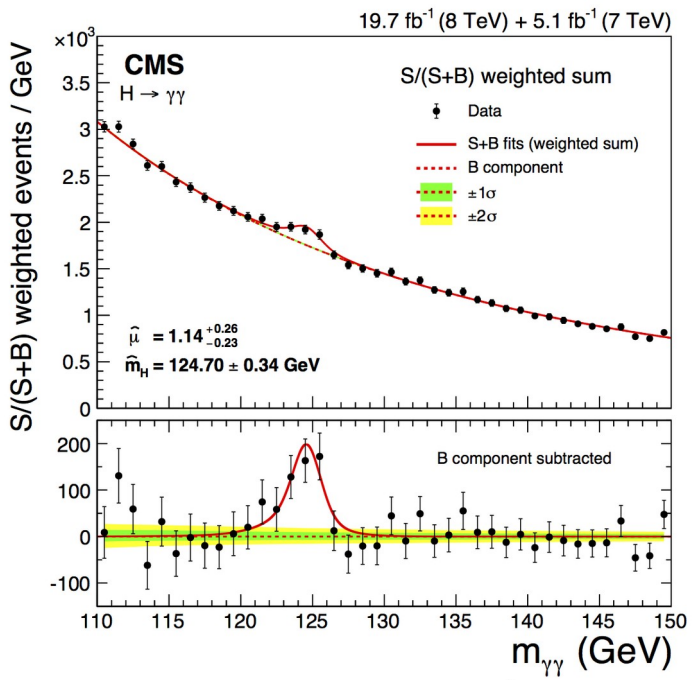
1 kHz
~10 km

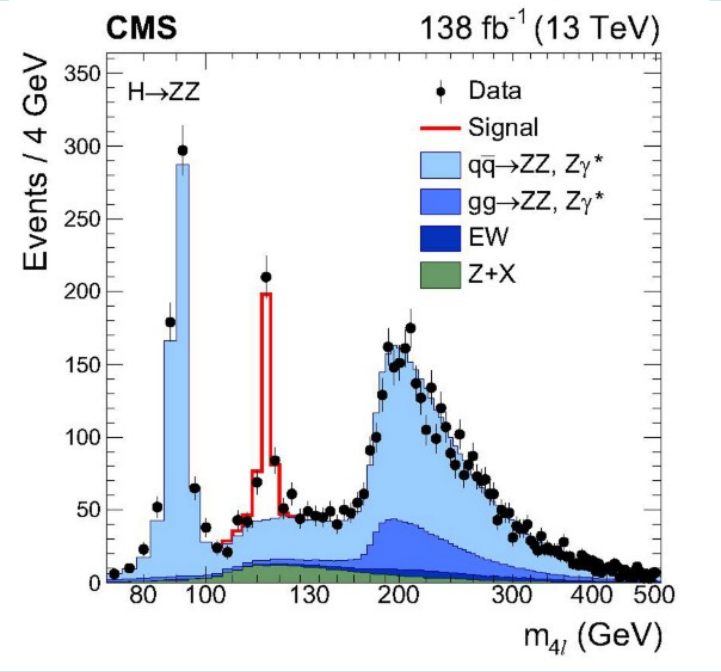
1 kHz
~10000 km

- Tutti gli eventi che vengono poi definitivamente salvati su nastro e portati al sito CERN di Meyrin dove si trova il Tier-0
- Vengono poi inviati ai centri sparsi per il mondo dove vengono poi ricostruiti con la massima precisione possibile dalle informazioni dei vari sottorivelatori per avere un'iterpretazione completa dell'evento (Tier 1)
- Questo processo di ricostruzione richiede 60 s per evento
- Questi vengono poi inviati ai vari siti che effettuano l'analisi dei dati e generano le varie simulazioni degli eventi per estrarre i risultati di fisica

Scoperta Higgs

- Questi vengono poi inviati ai vari siti che effettuano l'analisi dei dati e generano le varie simulazioni degli eventi per estrarre i risultati di fisica
- CMS è stato dei due esperimenti ad annunciare la scoperta del bosone di Higgs:
  - Ultimo pezzo del Modello Standard
  - Nobel per la fisica nel 2013
- Misura di precisione delle proprietà, per studio del Modello Standard:
  - Al momento il Modello Standard sopravvive

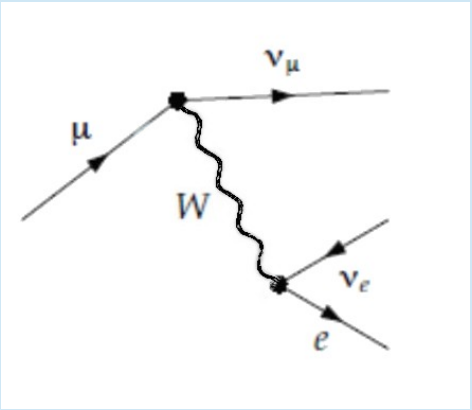




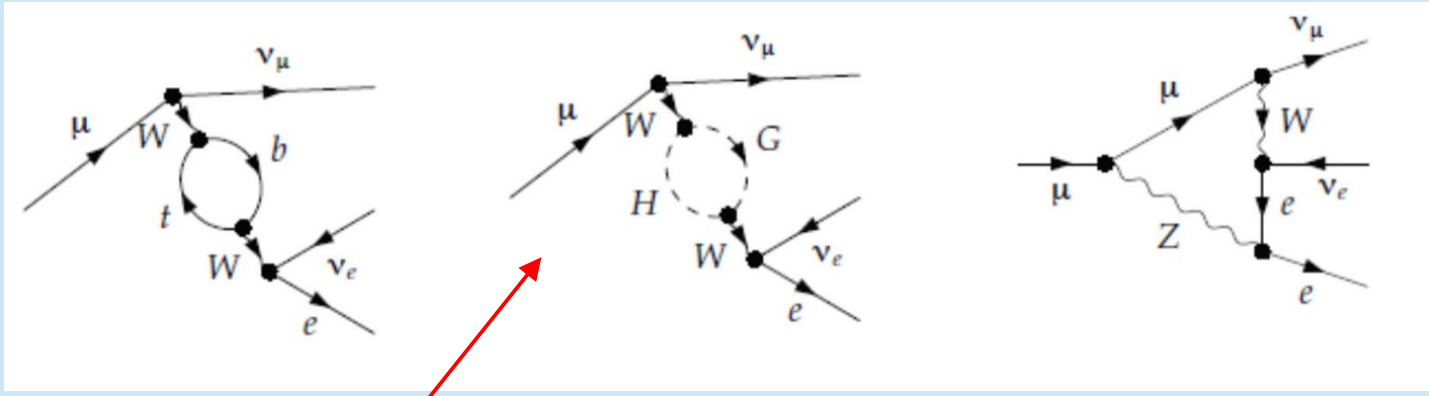
Massa del bosone W

- W è uno dei mediatori delle interazioni deboli
- La sua massa è predetta con estrema precisione nel Modello Standard:
  - Nuove particelle possono entrare in loop agli ordini successivi

Ordine “albero”



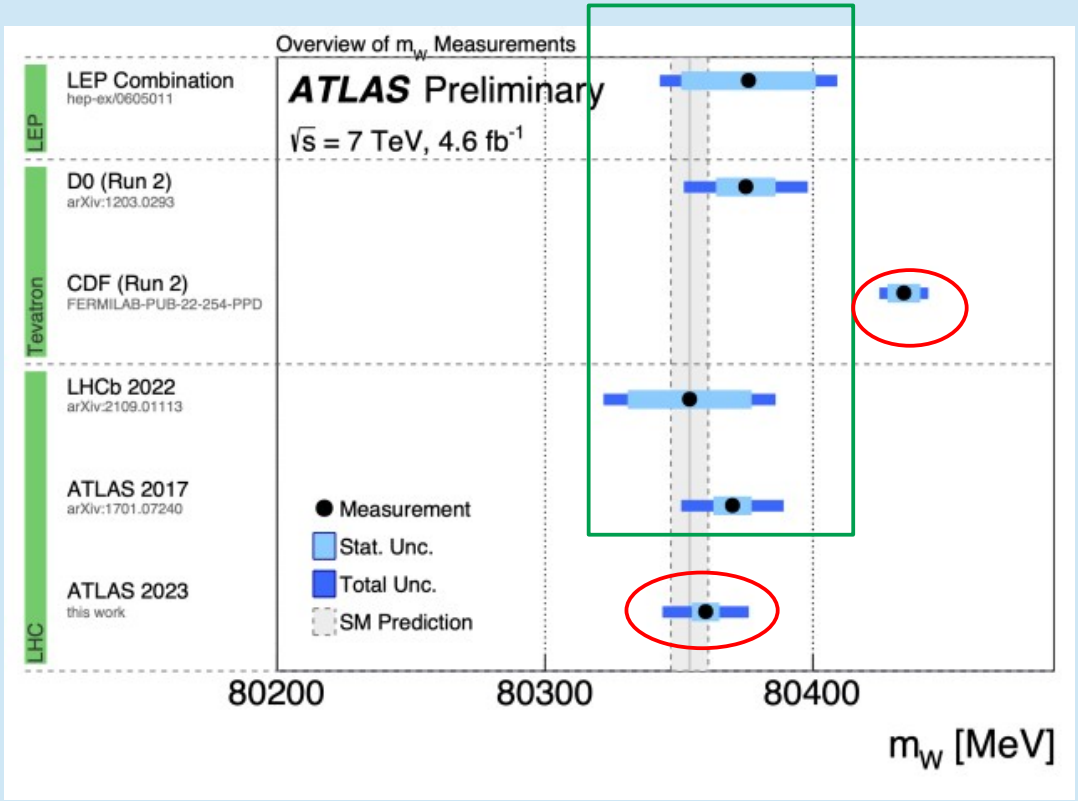
Ordini successivi



Sensibilità a particelle oltre SM

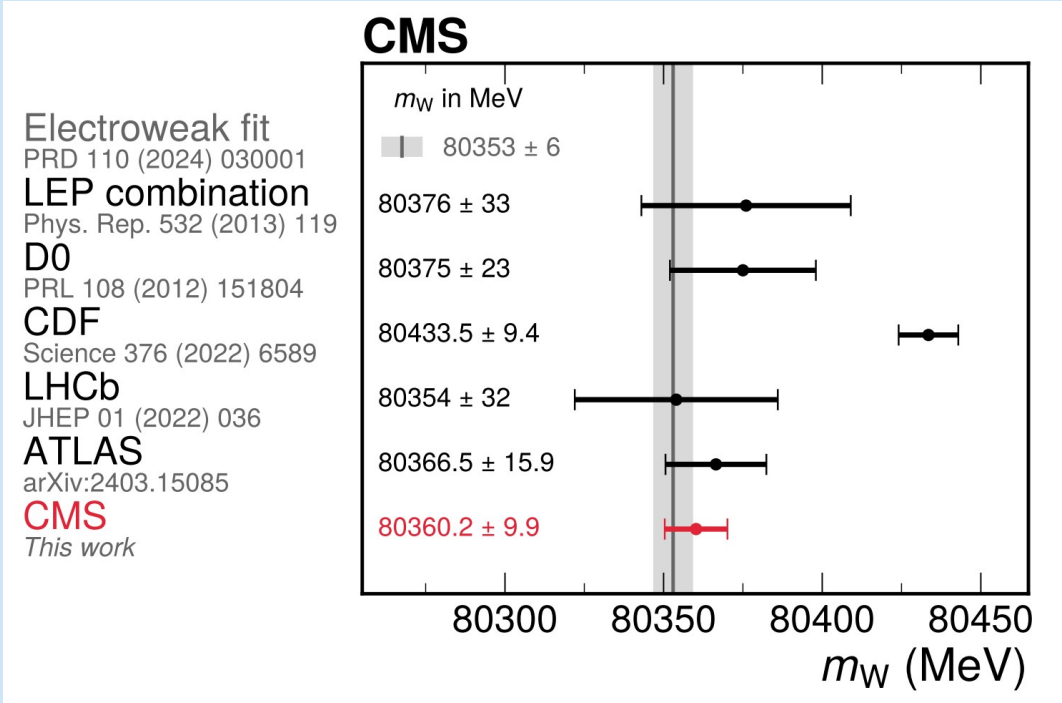
Massa del bosone W

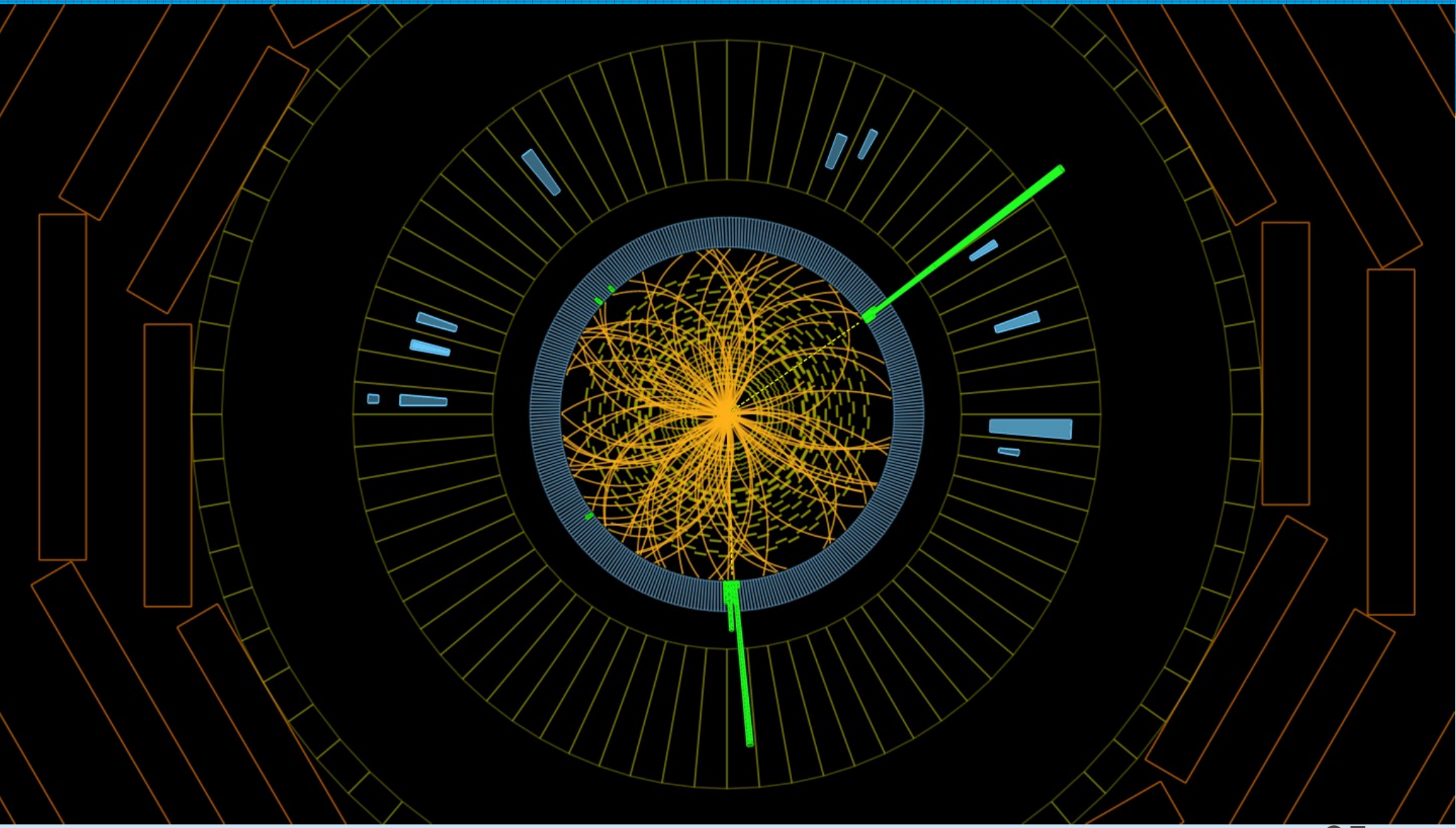
- Confronto tra determinazione del Modello Standard e misure sperimentali
- In verde: situazione prima del 2022:
  - Accordo con il Modello Standard. Obiettivo è quindi migliorare la precisione sia sperimentale che teorica, per testare SM con precisione maggiore
- In rosso: situazione dopo 2022:
  - Le due misure più precise sono in forte disaccordo. CDF in disaccordo con SM a 7σ!
  - Occorre nuova misura che possa risolvere il puzzle

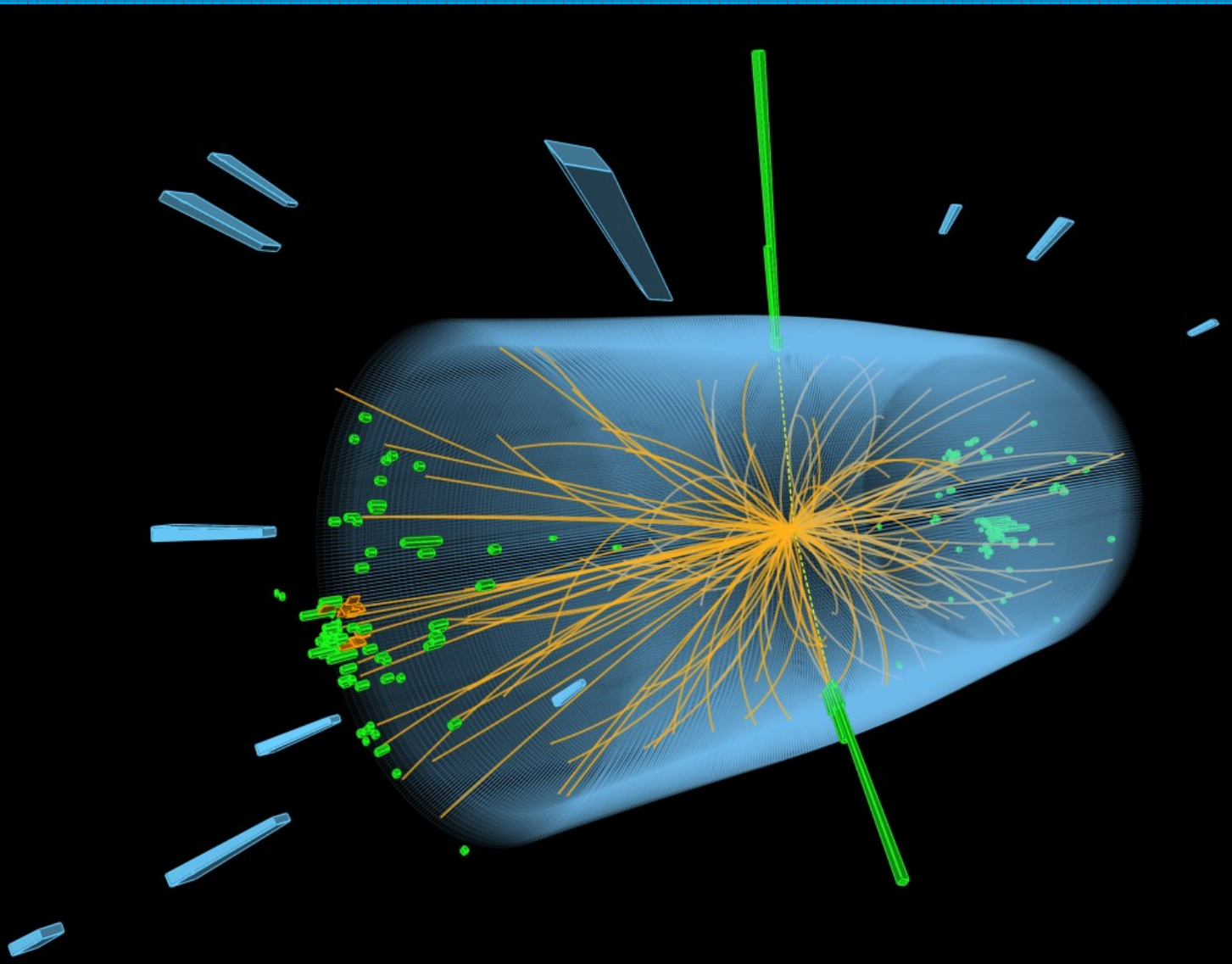


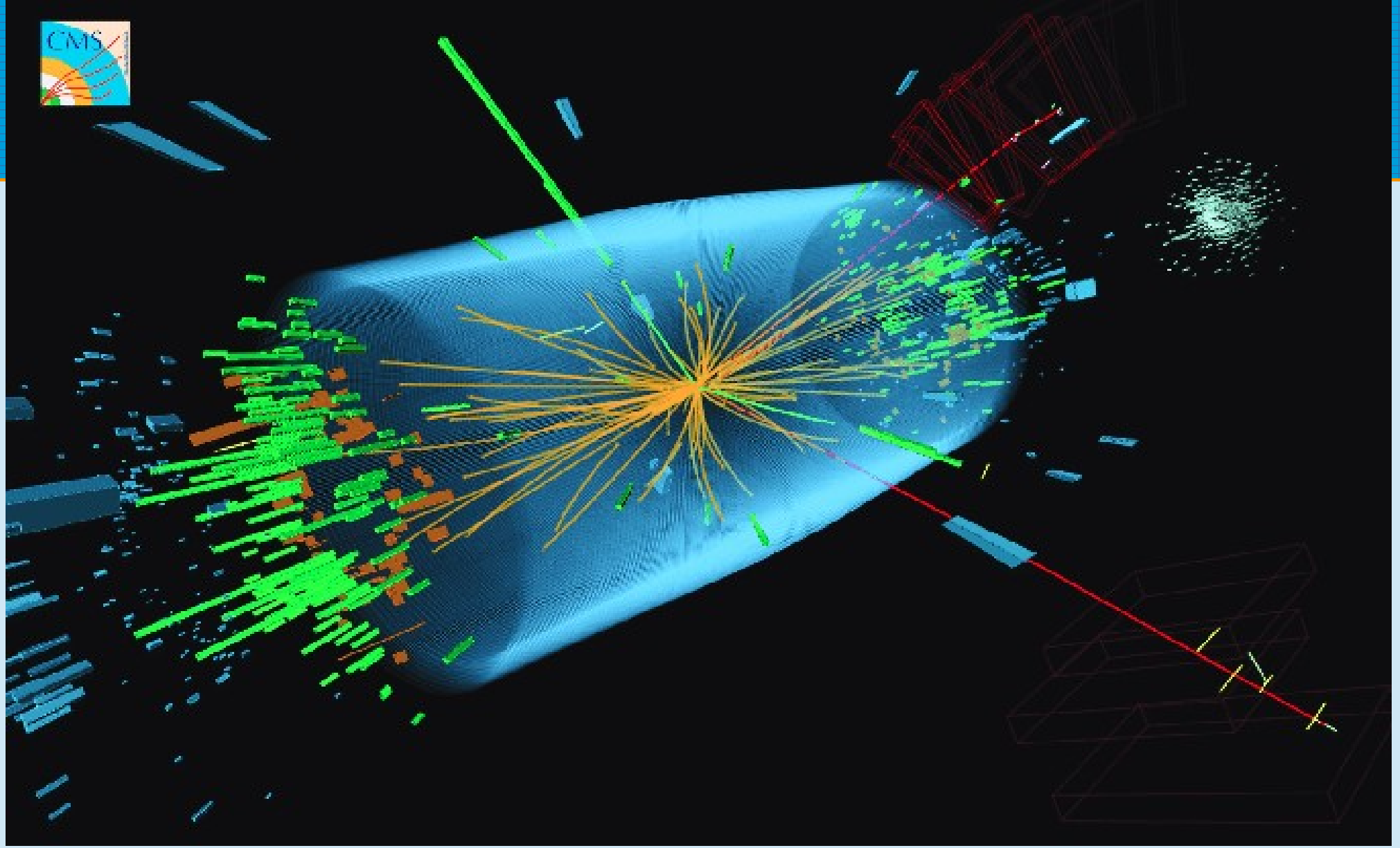
Misura di massa del bosone W

- CMS pubblica a settembre 2024 la sua tanto attesa misura:
  - Forte coinvolgimento di Pisa
  - Alcune persone hanno lavorato 10 anni a questo risultato!
- Conferma del Modello Standard:
  - Precisione compatibile con quella di CDF, che è tutt'ora la più precisa di sempre








CMS

Buon viaggio!

$$\mathcal{L}_{SM} = -\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4}g_s^2 f^{abc}f^{ade}g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2c_w^2}M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w(\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu(W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu(W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - igs_w(\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu(W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu(W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \beta_h \left(\tfrac{2M^2}{g^2} + \tfrac{2M}{g}H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-) \right) + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-) - \tfrac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - gMW^+_\mu W^-_\mu H - \tfrac{1}{2}g\tfrac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \tfrac{1}{2}ig\left(W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) - W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)\right) + \tfrac{1}{2}g\left(W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) + W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu H)\right) + \tfrac{1}{2}g\tfrac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) + M\left(\tfrac{1}{c_w}Z^0_\mu\partial_\mu\phi^0 + W^+_\mu\partial_\mu\phi^- + W^-_\mu\partial_\mu\phi^+\right) - ig\tfrac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + igs_w MA_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - ig\tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) + igs_w A_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu\left(H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-\right) - \tfrac{1}{8}g^2\tfrac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu\left(H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-\right) - \tfrac{1}{2}g^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{2}ig^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}g^2 s_w A_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\tfrac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu\phi^+\phi^- + \tfrac{1}{2}ig_s\lambda^a_{ij}(\bar{q}^\sigma_i\gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu - \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_e)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_\nu)\nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_u)u^\lambda_j - \bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_d)d^\lambda_j + igs_w A_\mu\left(-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)\right) + \tfrac{ig}{4c_w}Z^0_\mu\{(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(4s_w^2 - 1 - \gamma^5)e^\lambda) + (\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu(\tfrac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5)d^\lambda_j) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \tfrac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5)u^\lambda_j)\} + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^+_\mu\left((\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)U^{lep}_{\lambda\kappa}e^\kappa) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)\right) + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^-_\mu\left((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)u^\lambda_j)\right) + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_e(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)e^\kappa) + m^\lambda_\nu(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)e^\kappa)\right) + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_e(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)\nu^\kappa) - m^\kappa_\nu(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)\nu^\kappa)\right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}H(\bar{\nu}^\lambda\nu^\lambda) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}\phi^0(\bar{\nu}^\lambda\gamma^5\nu^\lambda) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda) - \tfrac{1}{4}\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa - \tfrac{1}{4}\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_d(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d^\kappa_j) + m^\lambda_u(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d^\kappa_j)\right) + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_d(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - m^\kappa_u(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)u^\kappa_j)\right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j) + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu\bar{G}^a G^b g^c_\mu + \bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\partial^2 - \tfrac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{X}^0 X^- - \partial_\mu\bar{X}^+ X^0) + igs_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{Y}X^- - \partial_\mu\bar{X}^+ Y) + igc_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- X^0 - \partial_\mu\bar{X}^0 X^+) + igs_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- Y - \partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_w Z^0_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu\bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu\bar{X}^- X^-) - \tfrac{1}{2}gM\left(\bar{X}^+X^+H + \bar{X}^-X^-H + \tfrac{1}{c_w^2}\bar{X}^0X^0H\right) + \tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}igM\left(\bar{X}^+X^0\phi^+ - \bar{X}^-X^0\phi^-\right) + \tfrac{1}{2c_w}igM\left(\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-\right) + igMs_w\left(\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-\right) + \tfrac{1}{2}igM\left(\bar{X}^+X^+\phi^0 - \bar{X}^-X^-\phi^0\right).$$