

Il futuro a LHC: rivelatori 4D a CMS per nuove sfide

Seminari sperimentali INFN

6 Luglio, 2020

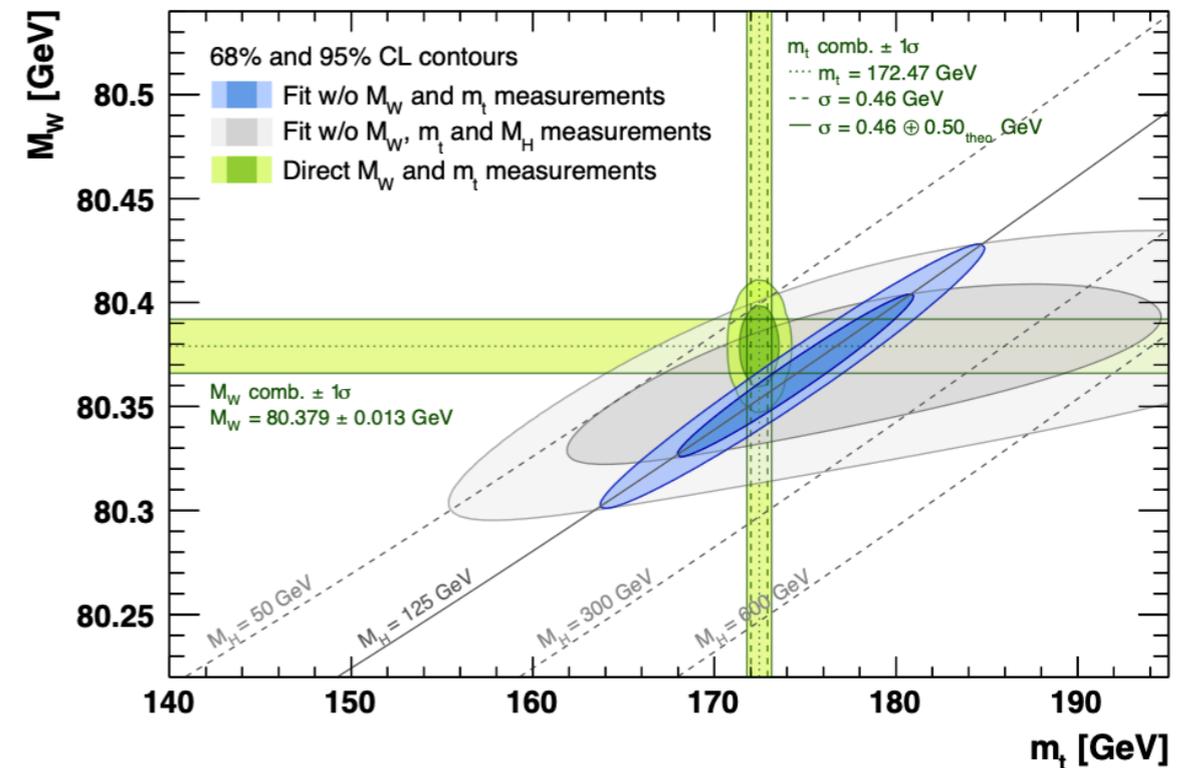
[Andrea Benaglia](#)

INFN Milano-Bicocca

10 anni di LHC: cosa abbiamo imparato?

30 Marzo 2010:
prime collisioni
a $\sqrt{s} = 7$ TeV

- LHC funziona bene, anche meglio di quanto atteso
- Gli esperimenti funzionano bene, e sono capaci di misure anche più precise di quanto atteso
- La teoria funziona bene, ed è anche più attendibile di quanto atteso
 - NLO è ormai routine, NNLO esiste per alcuni processi chiave, primi conti N³LO
- Il bosone di Higgs esiste
- ... non abbiamo ancora trovato niente al di là del Modello Standard (MS)
 - l'esplorazione della regione del TeV ha ulteriormente consolidato la robustezza del MS
- ... ma lo spettro di fisica emerso da LHC è estremamente ricco!
 - EWK: m_W , m_t , $\sin^2\theta_W$, interazioni EWK al TeV (DY, VV, VVV, VBS, Higgs, ttH...)
 - QCD: misure precise di pdf del protone, sezioni d'urto, spettroscopie esotiche (tetra/pentaquark)...
 - Fisica del sapore: $B_s \rightarrow \mu\mu$, violazione di CP nel sistema dei mesoni D [1], Υ_{CKM} , test dell'universalità leptonica nel decadimento dei mesoni B...



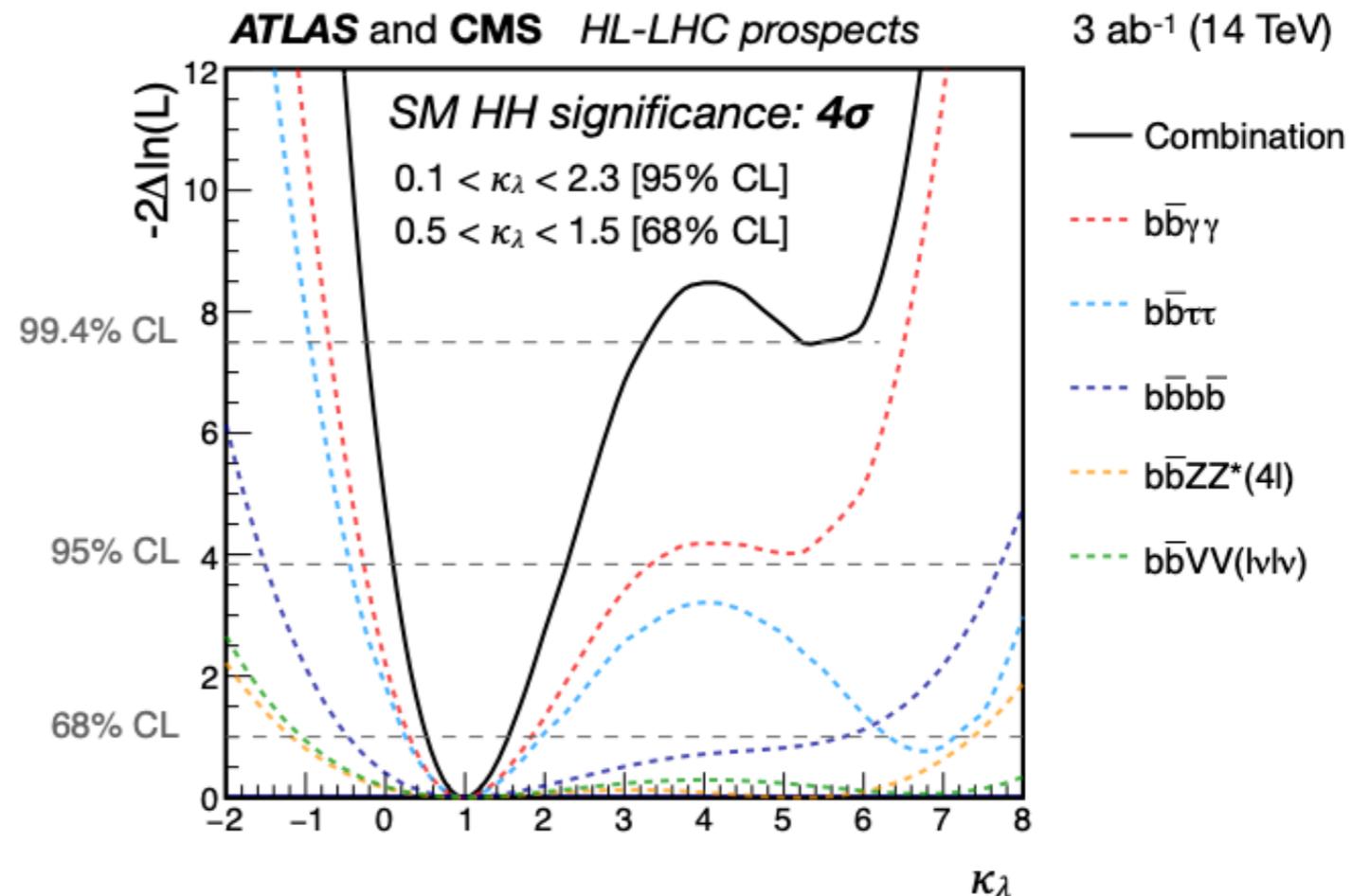
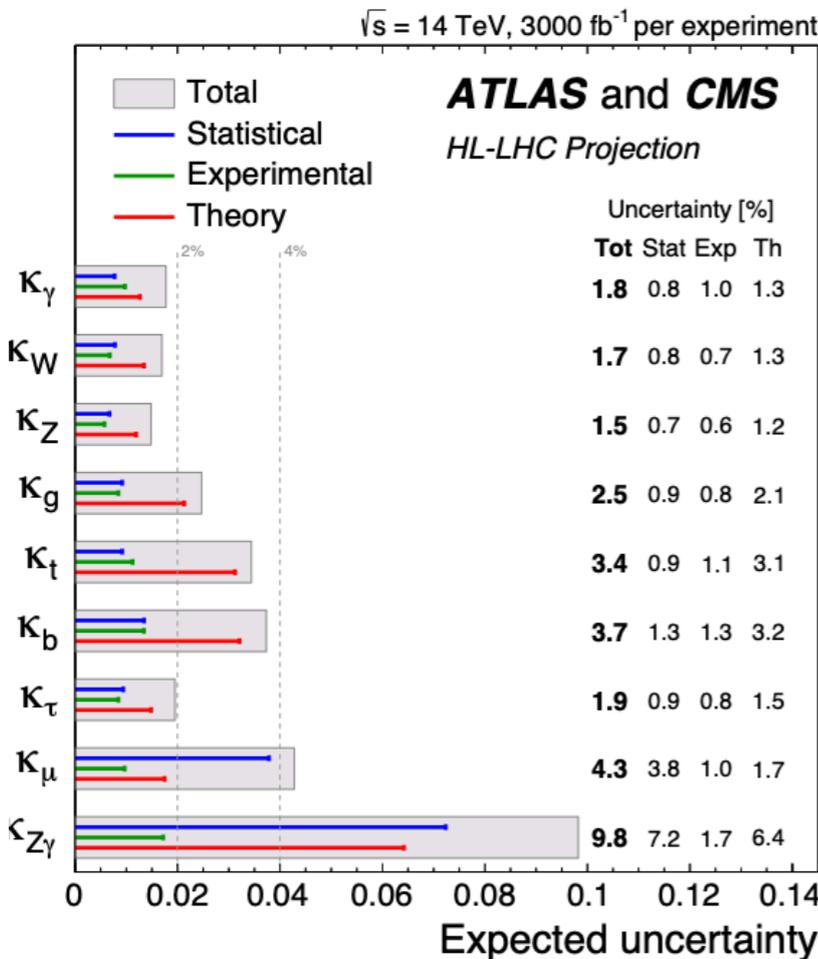
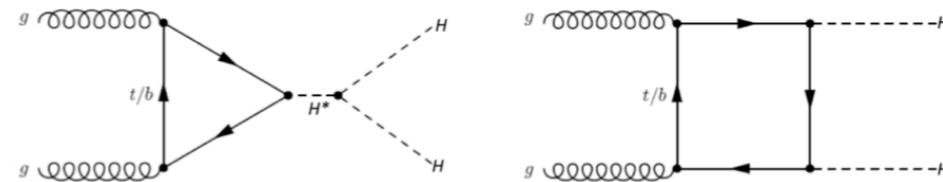
Parola chiave per il futuro: precisione

- **Misure di precisione** sono la chiave di volta per **consolidare** la nostra descrizione della natura, **aumentare la sensibilità** a possibili deviazioni dalle predizioni del MS e **vincolare nuovi modelli**, qualora anomalie vengano osservate
- Esempio: con 3000 fb⁻¹ a disposizione...
(ad oggi, CMS e ATLAS hanno accumulato circa 150 fb⁻¹)

...accoppiamenti del bosone di Higgs misurati entro il 3-4%

$$[\kappa_i^2 = \sigma_i / \sigma_i^{\text{SM}} \quad \text{o} \quad \kappa_i^2 = \Gamma_i / \Gamma_i^{\text{SM}}]$$

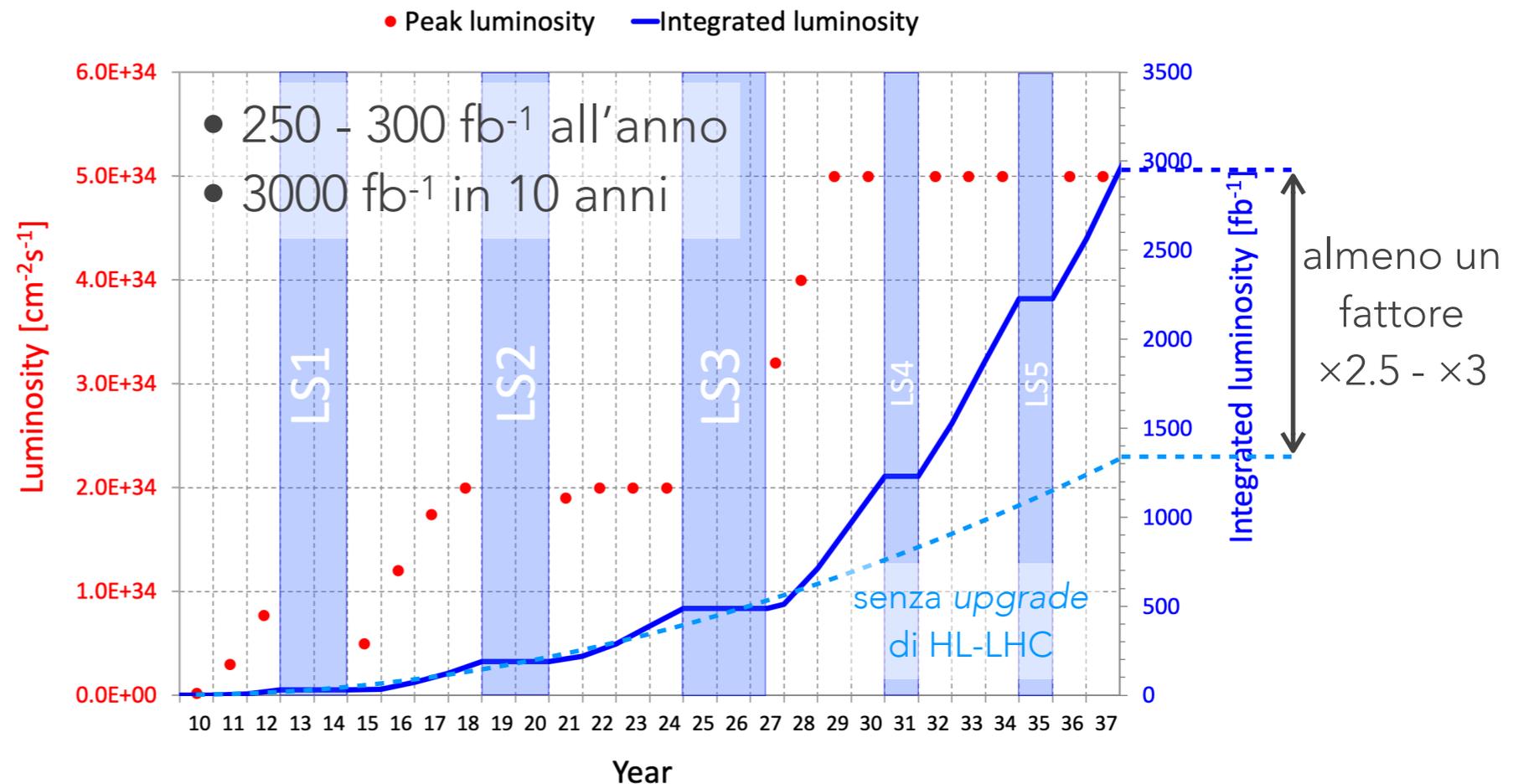
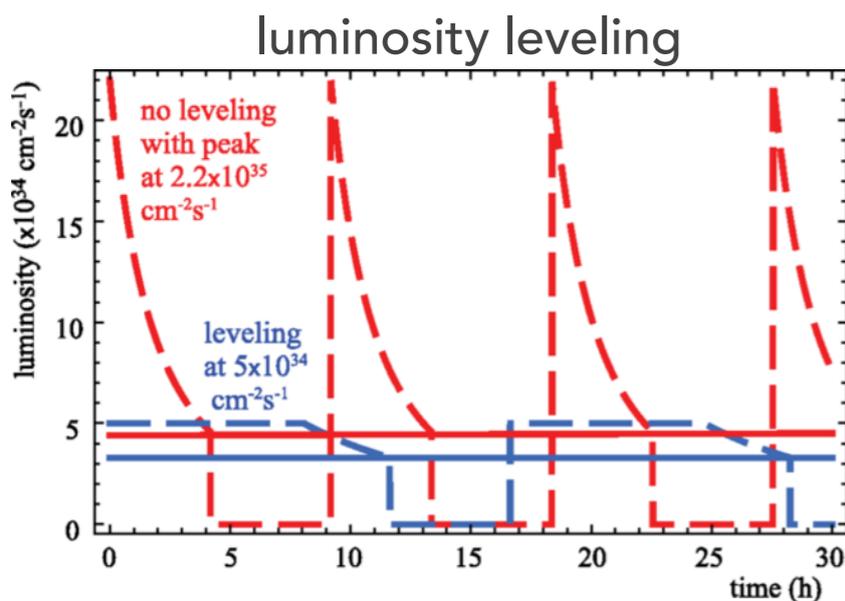
...auto-accoppiamento del bosone di Higgs accessibile [2]



Il futuro di LHC: alta luminosità

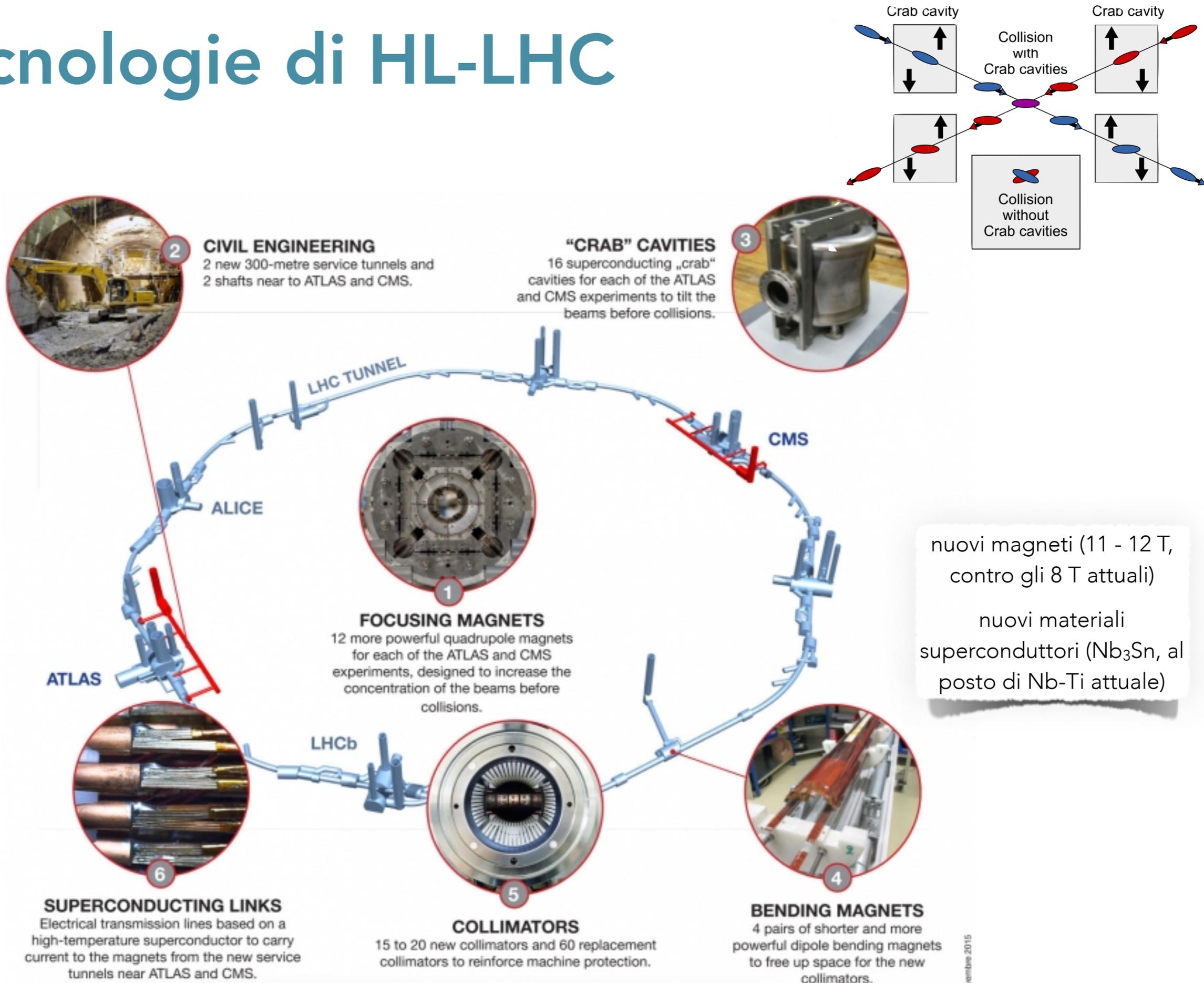


- Progetto HL-LHC: *upgrade* dell'acceleratore e degli iniettori
 - “baseline”: $L_{inst.} = 5.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, pileup = 140
 - “ultimate”: $L_{inst.} = 7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, pileup = 200
 - luminosità “livellata”: compromesso tra dati raccolti e prestazioni degli esperimenti



- EU Strategy for Particle Physics, 2013: « Europe's top priority should be the exploitation of the full potential of the LHC, including the high-luminosity upgrade of the machine and detectors with a view to collecting ten times more data than in the initial design, by around 2030 »
- CERN June Council, 2016: formal approval of the entire HL-LHC project. HL-LHC declared an ESFRI landmark

Le tecnologie di HL-LHC



nuovi magneti (11 - 12 T, contro gli 8 T attuali)

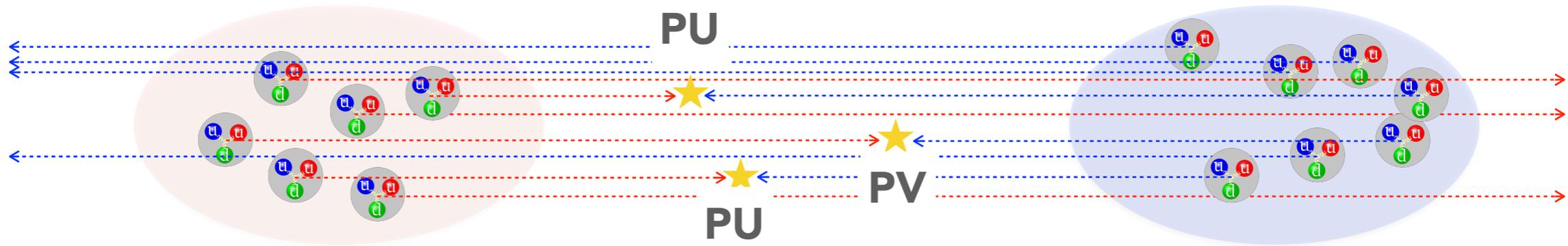
nuovi materiali superconduttori (Nb₃Sn, al posto di Nb-Ti attuale)

interventi importanti su 1.2 km dei 27 di LHC

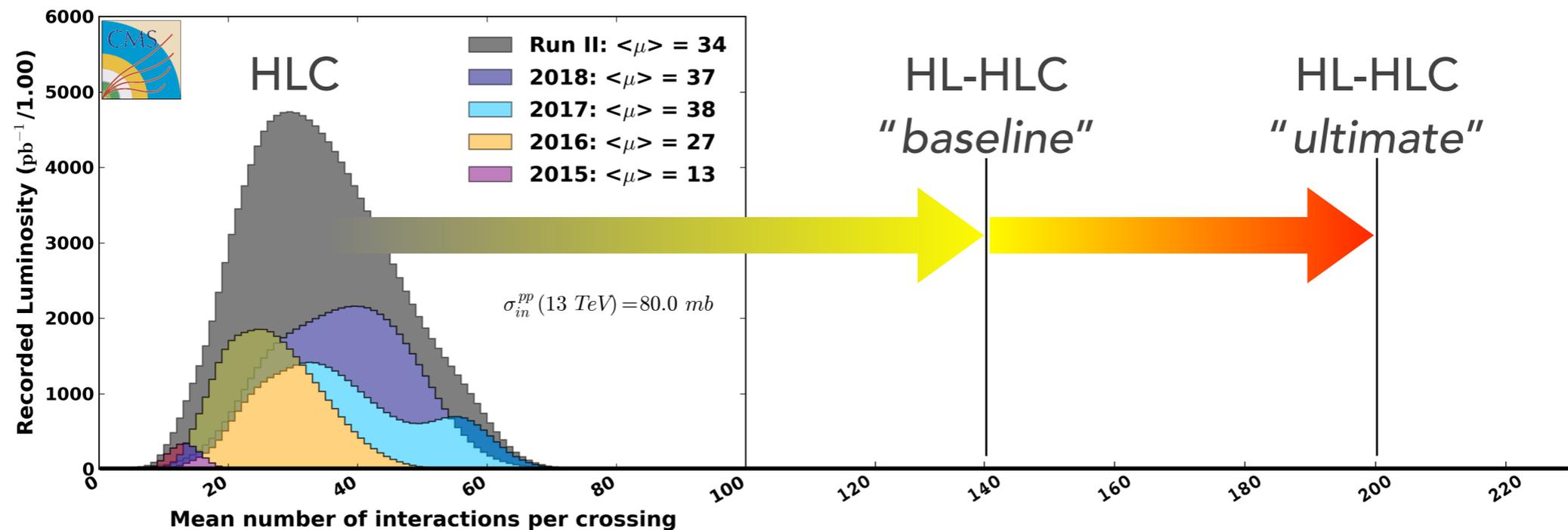
HL-LHC e il pileup

- Ci sarà un prezzo da pagare per l'aumento di luminosità: il **pileup**

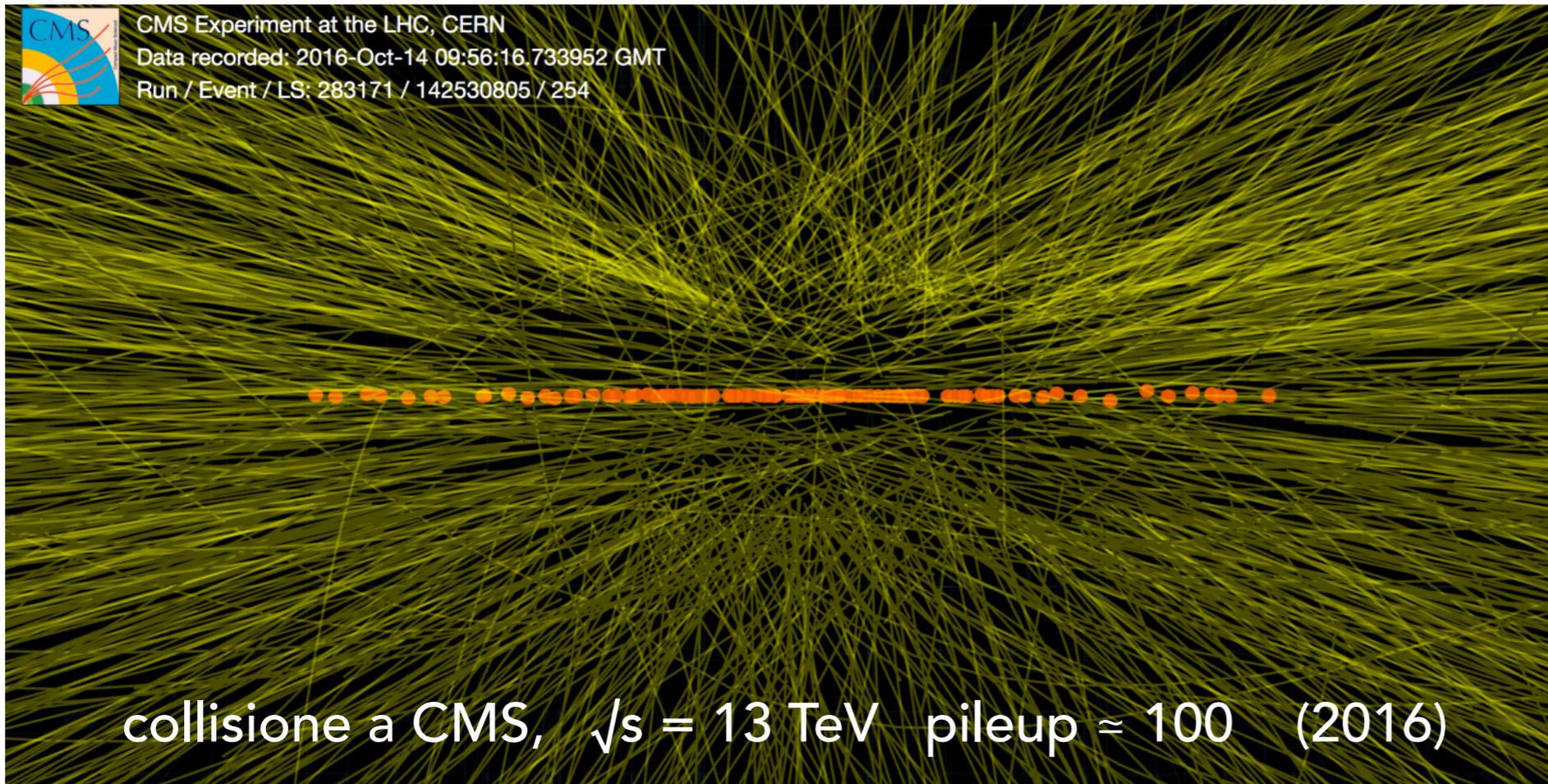
interazioni protone-protone simultanee per ogni intersezione dei fasci



CMS Average Pileup (pp, $\sqrt{s}=13$ TeV)

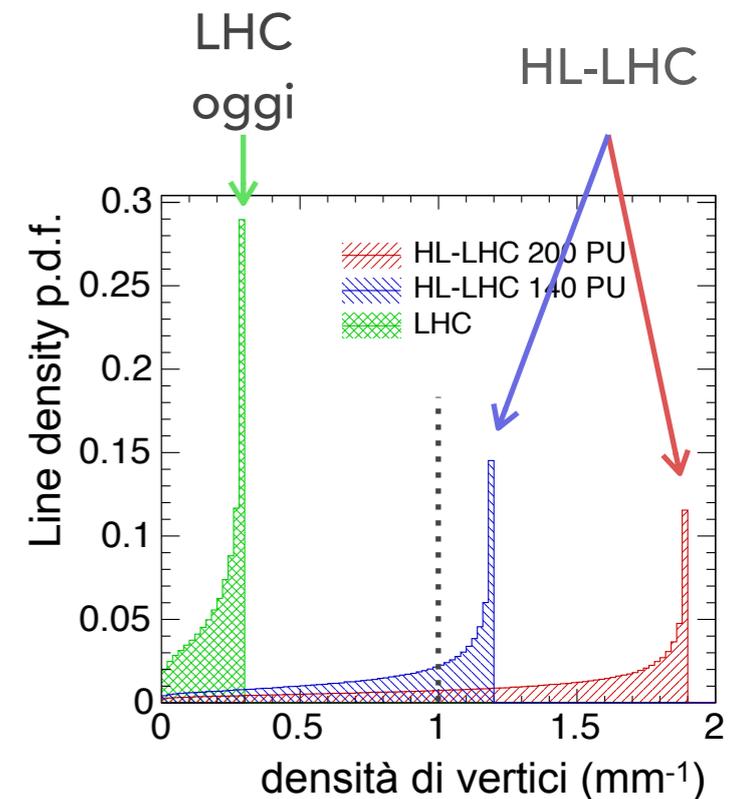
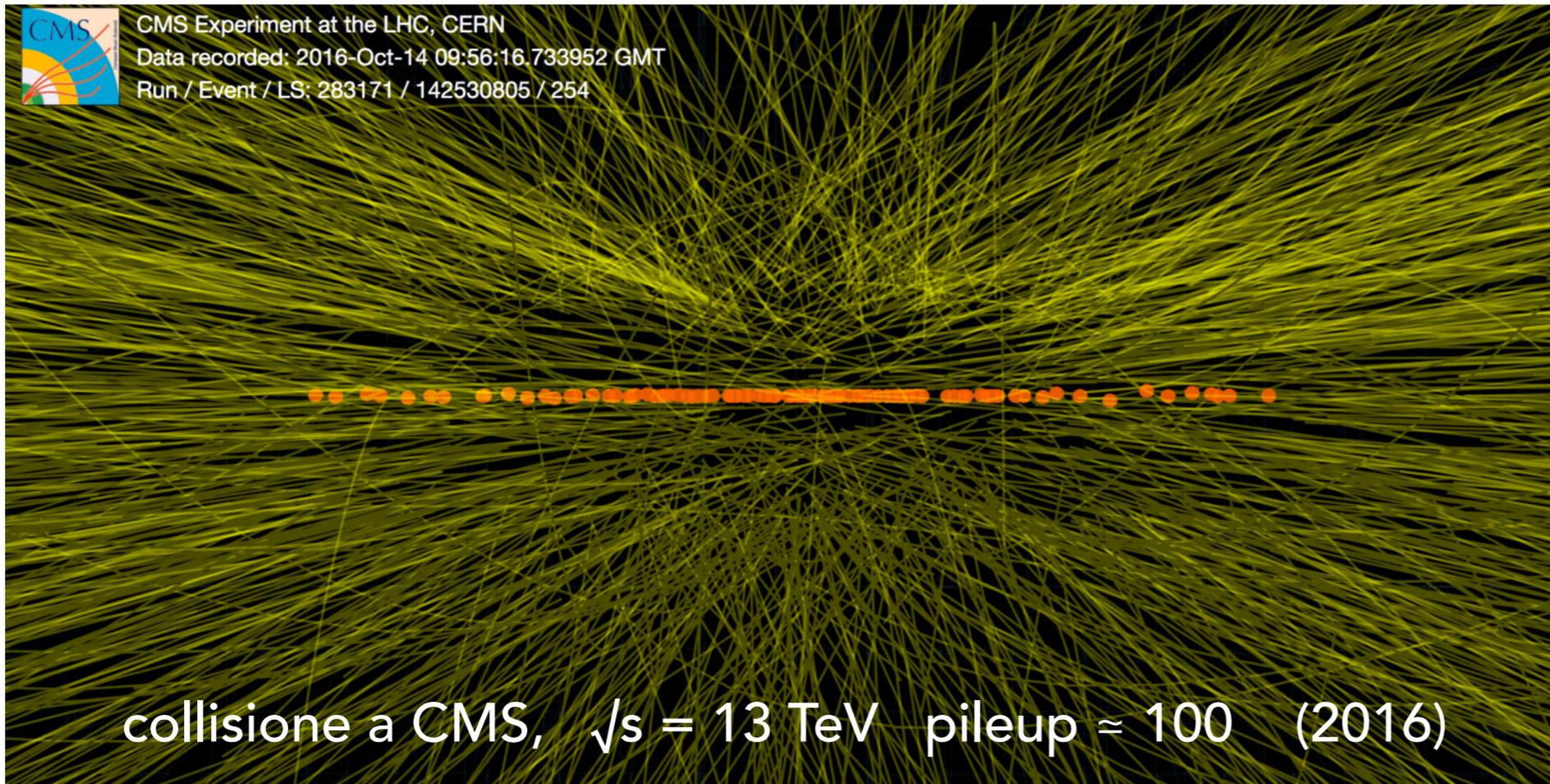


HL-LHC e il pileup



- Le **condizioni sperimentali** saranno estremamente **impegnative** in presenza di alto pileup:
 - a CMS, la ricostruzione degli oggetti è basata su **algoritmi di Particle Flow**, i quali dipendono in maniera cruciale dalla **corretta assegnazione delle tracce** ai rispettivi vertici di interazione
 - criterio fondamentale per **mitigare il pileup**: rigettare le particelle non associate al vertice dell'interazione primaria (PV)
 - » sfrutta l'alta granularità e risoluzione del tracciatore
 - **Selezione tipica: $|\Delta z(\text{traccia}, \text{PV})| < 1 \text{ mm}$**
 - » z è la coordinata lungo l'asse del fascio

HL-LHC e il pileup



- Le **condizioni sperimentali** saranno estremamente **impegnative** in presenza di alto pileup:

- a CMS, la ricostruzione degli oggetti è basata su **algoritmi di Particle Flow**, i quali dipendono in maniera cruciale dalla **corretta assegnazione delle tracce** ai rispettivi vertici di interazione
- criterio fondamentale per **mitigare il pileup**: rigettare le particelle non associate al vertice dell'interazione primaria (PV)

» sfrutta l'alta granularità e risoluzione del tracciatore

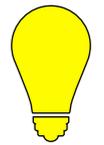
- **Selezione tipica: $|\Delta z(\text{traccia}, \text{PV})| < 1 \text{ mm}$**

» z è la coordinata lungo l'asse del fascio

contaminazione
importante!

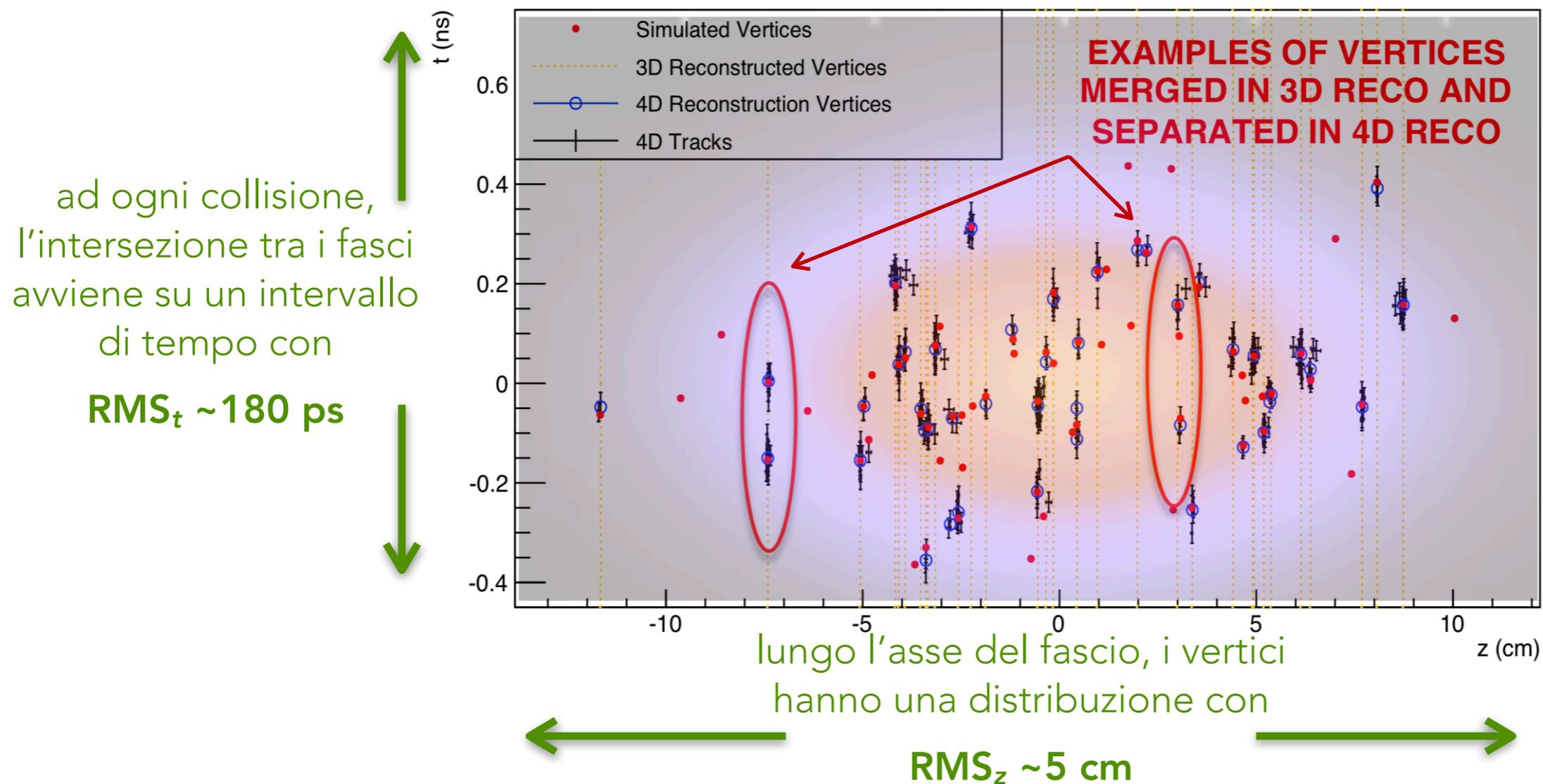
Mitigazione del pileup col timing

- **Idea per mitigare** gli effetti avversi del **pileup** con un'alta densità spaziale di vertici di interazione: **sfruttare la 4° dimensione (tempo)**



misura del tempo di **ciascuna traccia** con **~30 ps RMS** e ricostruzione dei **vertici 4D**

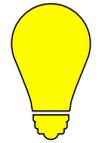
$$|\Delta t(\text{traccia}, \text{PV})| < 3\sigma_t$$



come se la regione di interazione fosse divisa in sequenze temporali consecutive da ~30 ps → si recupera l'attuale densità di vertici (200 pileup × 30 ps/180 ps = 33 pileup)

Mitigazione del pileup col timing

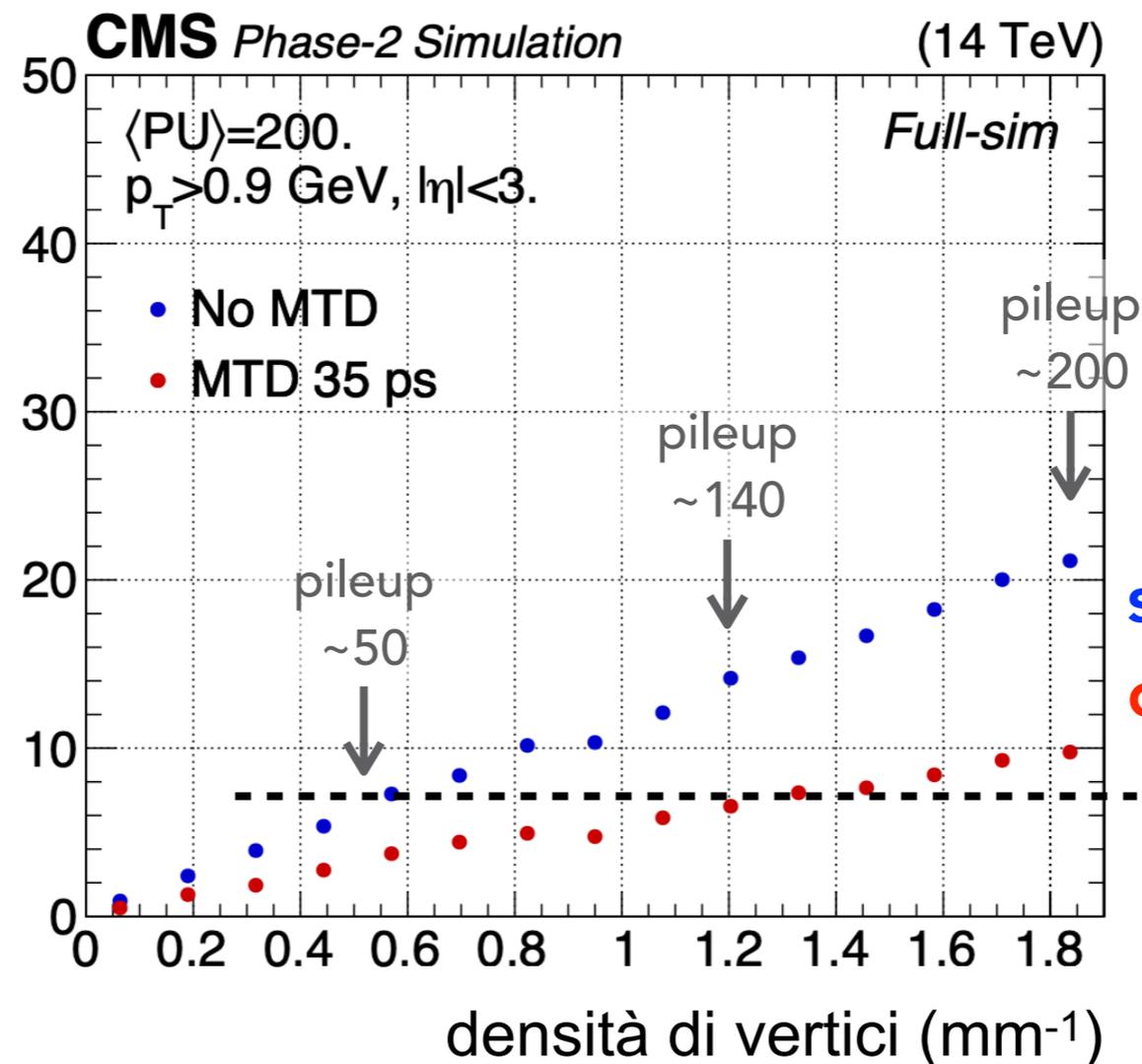
- **Idea per mitigare** gli effetti avversi del **pileup** con un'alta densità spaziale di vertici di interazione: **sfruttare la 4° dimensione (tempo)**



misura del tempo di **ciascuna traccia** con **~30 ps RMS** e ricostruzione dei **vertici 4D**

$$|\Delta t(\text{traccia}, \text{PV})| < 3\sigma_t$$

numero di tracce di pileup associate al PV



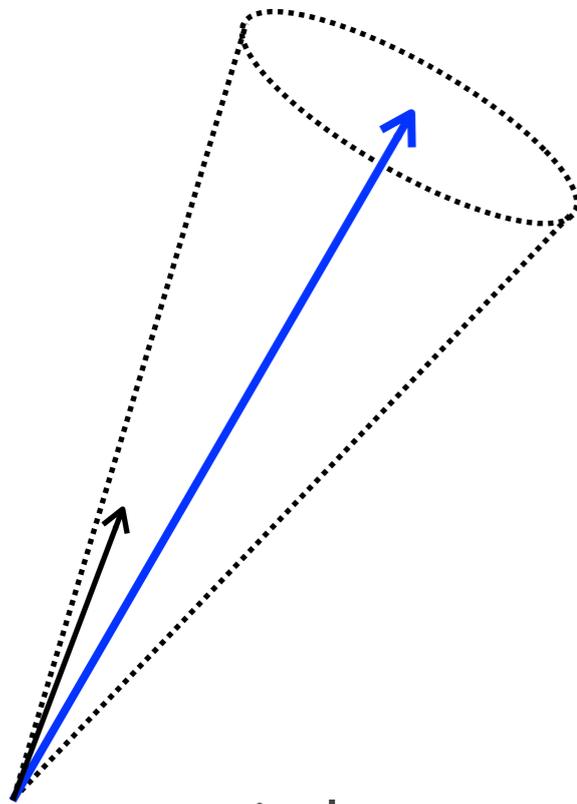
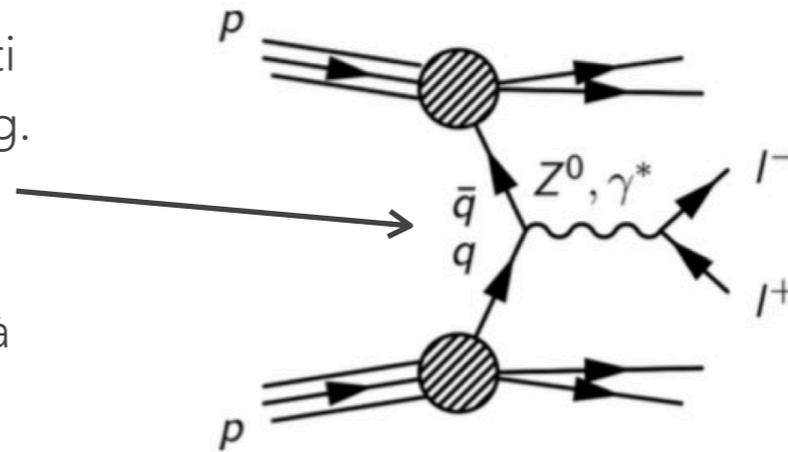
senza timing
col timing

come se la regione di interazione fosse divisa in sequenze temporali consecutive da ~30 ps →
si recupera l'attuale densità di vertici (200 pileup × 30 ps/180 ps = 33 pileup)

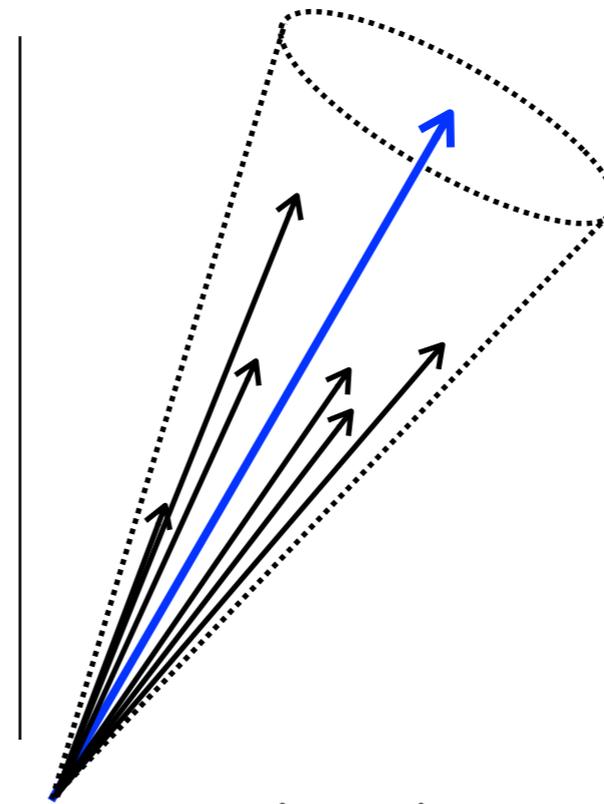
Benefici del timing nella ricostruzione degli oggetti

- 1° esempio: **isolamento dei leptoni** (nel caso qui mostrato, dei muoni)

i leptoni primari provenienti dall'interazione primaria (e.g. produzione di bosone Z) sono tipicamente "isolati" rispetto al resto dell'attività adronica dell'evento



muone isolato
(no pileup)

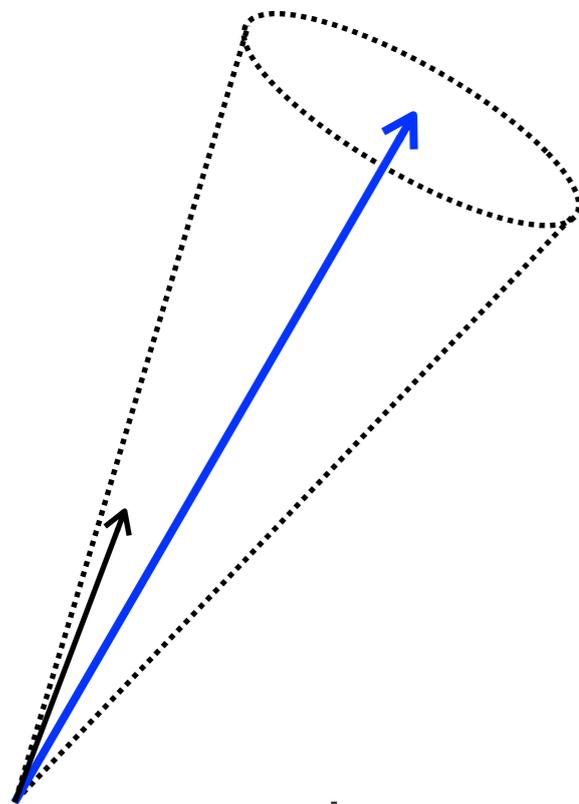
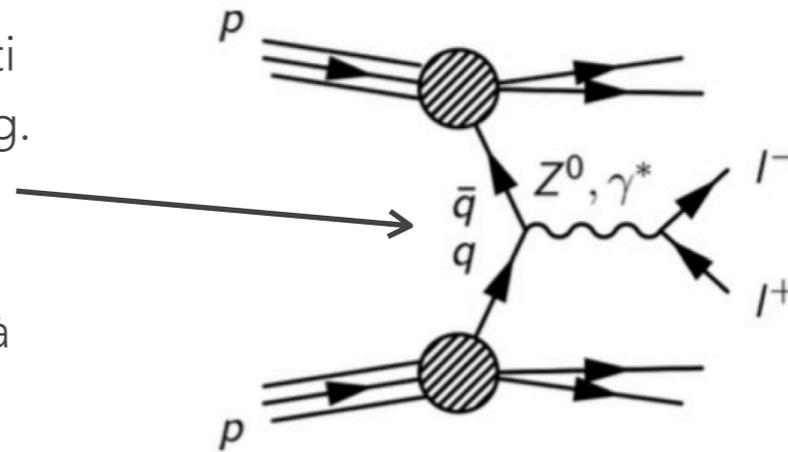


muone in un jet
(no pileup)

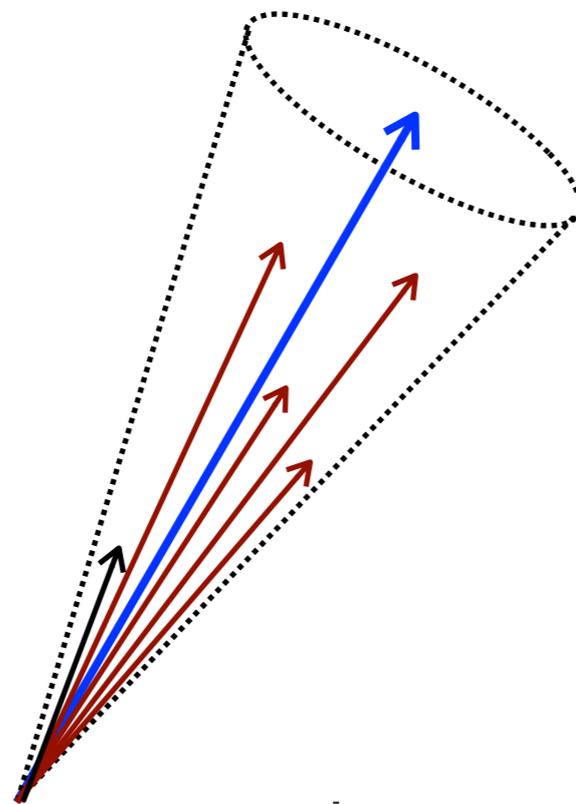
Benefici del timing nella ricostruzione degli oggetti

- 1° esempio: **isolamento dei leptoni** (nel caso qui mostrato, dei muoni)

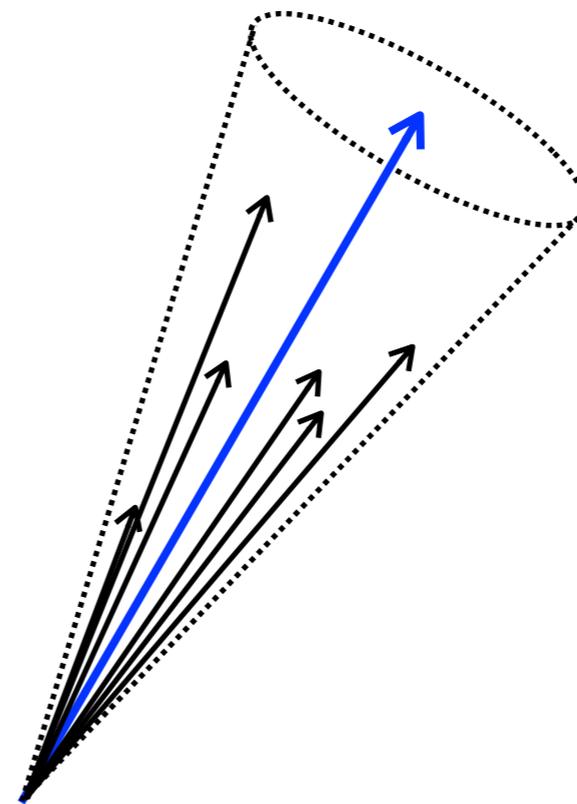
i leptoni primari provenienti dall'interazione primaria (e.g. produzione di bosone Z) sono tipicamente "isolati" rispetto al resto dell'attività adronica dell'evento



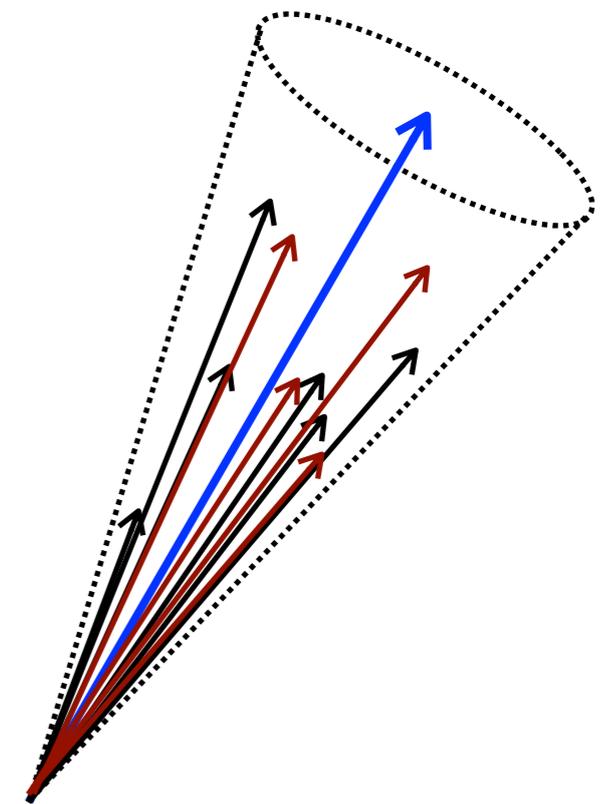
muone isolato
(no pileup)



muone isolato
(**pileup**)



muone in un jet
(no pileup)

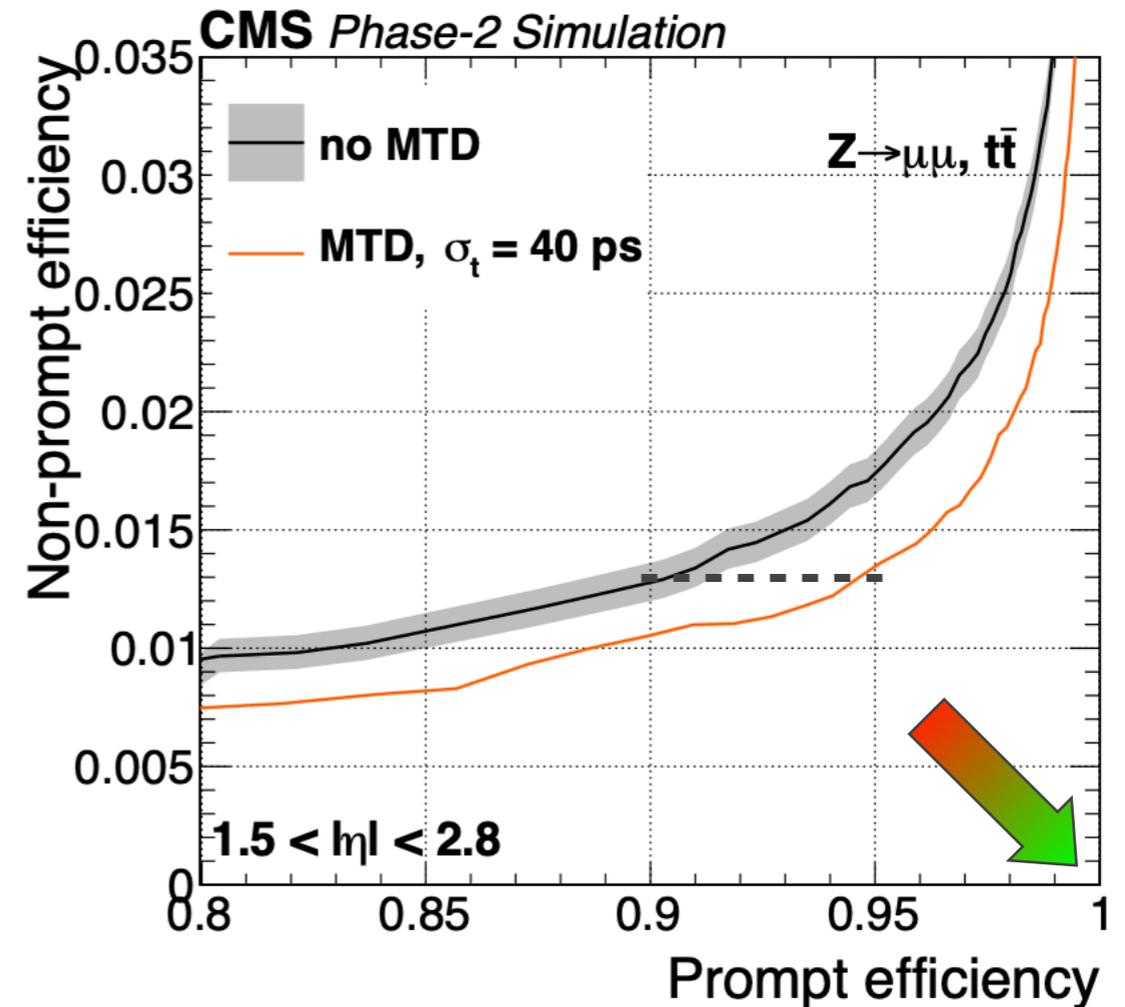
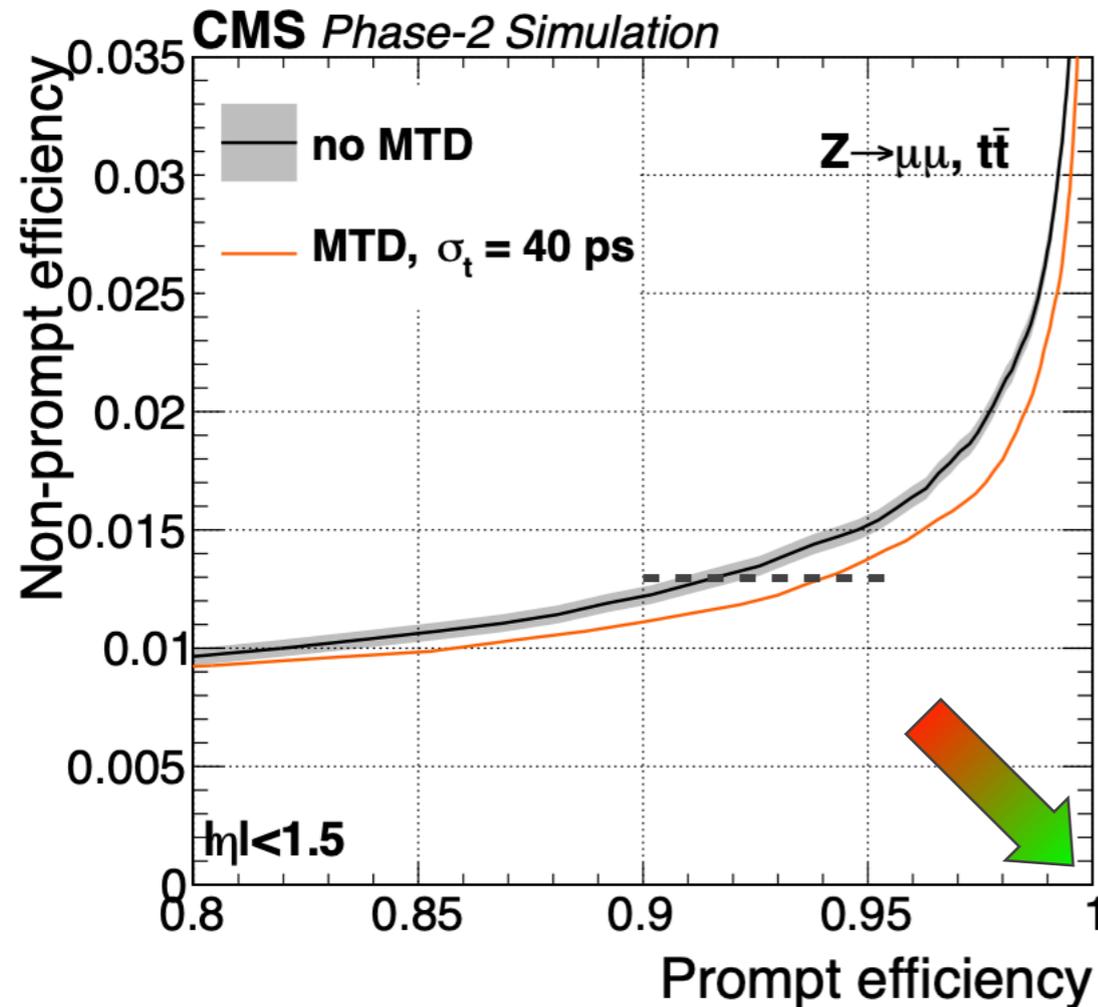


muone in un jet
(**pileup**)

Benefici del timing nella ricostruzione degli oggetti

- 1° esempio: **isolamento dei leptoni** (nel caso qui mostrato, dei muoni)

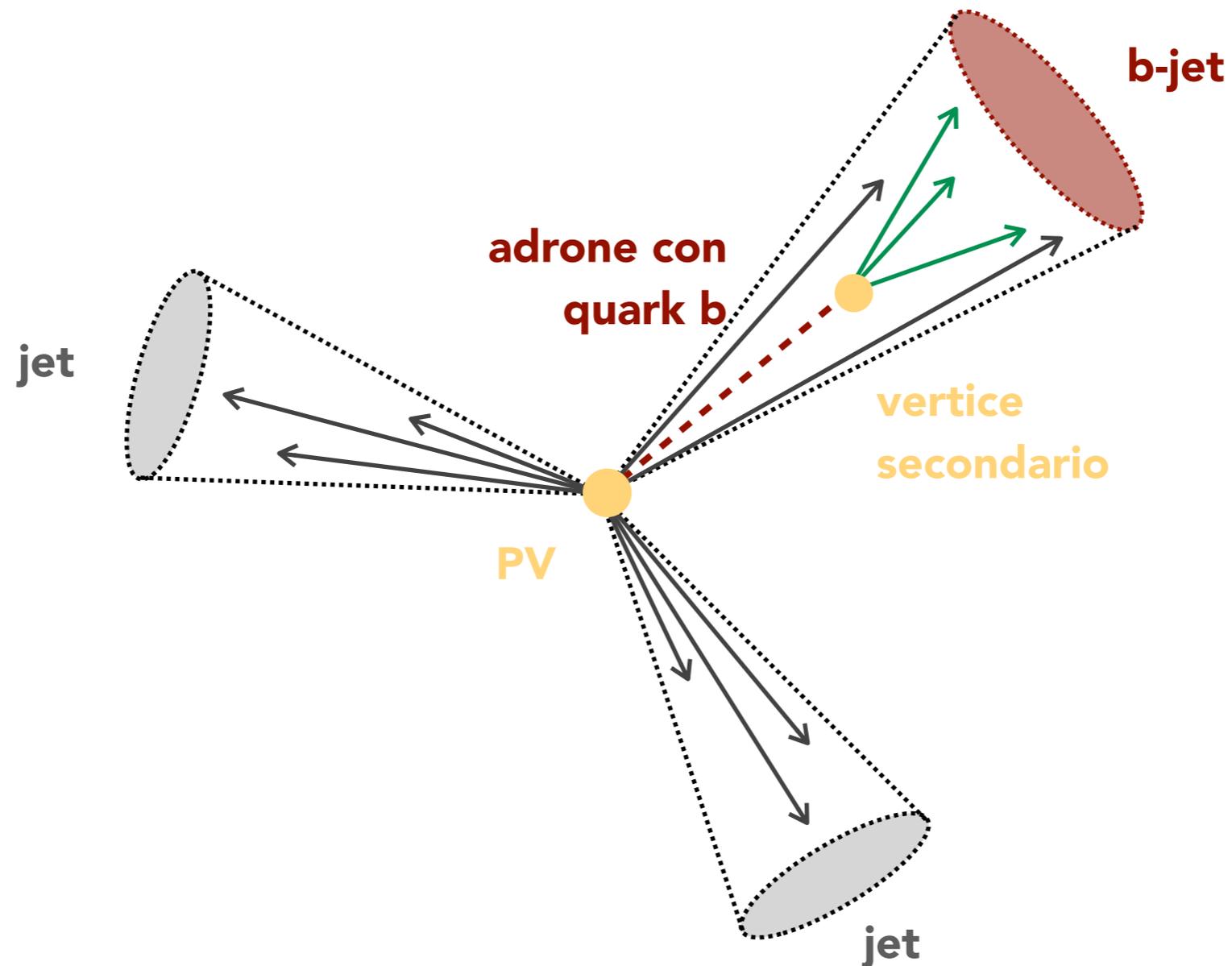
curve ROC (receiver operating characteristics)



5-6% di aumento dell'efficienza per muoni "veri"
a parità di livello di contaminazione da muoni "fake"

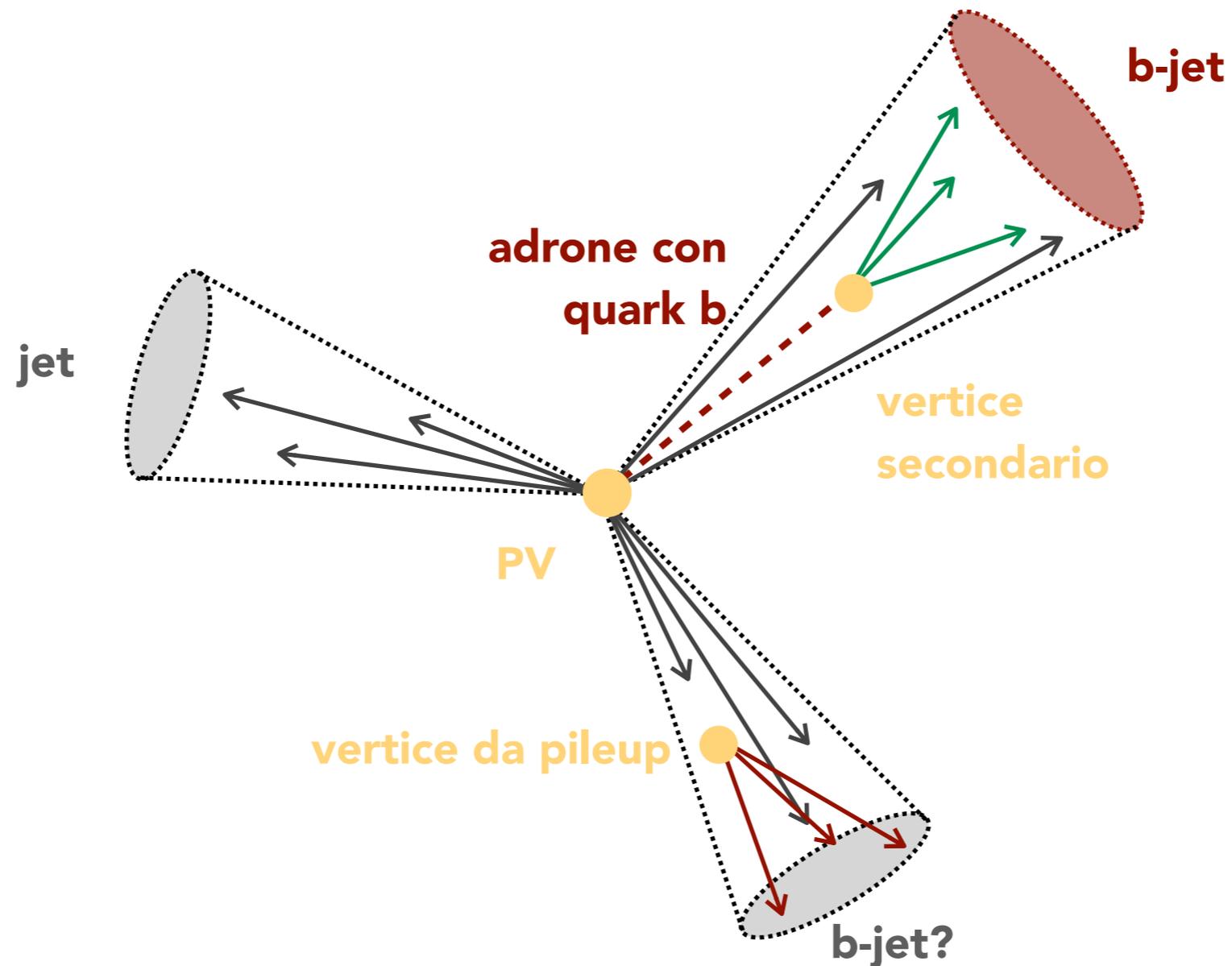
Benefici del timing nella ricostruzione degli oggetti

- 2° esempio: **vertici secondari** e identificazione dei **b-jet** (*b-tagging*)



Benefici del timing nella ricostruzione degli oggetti

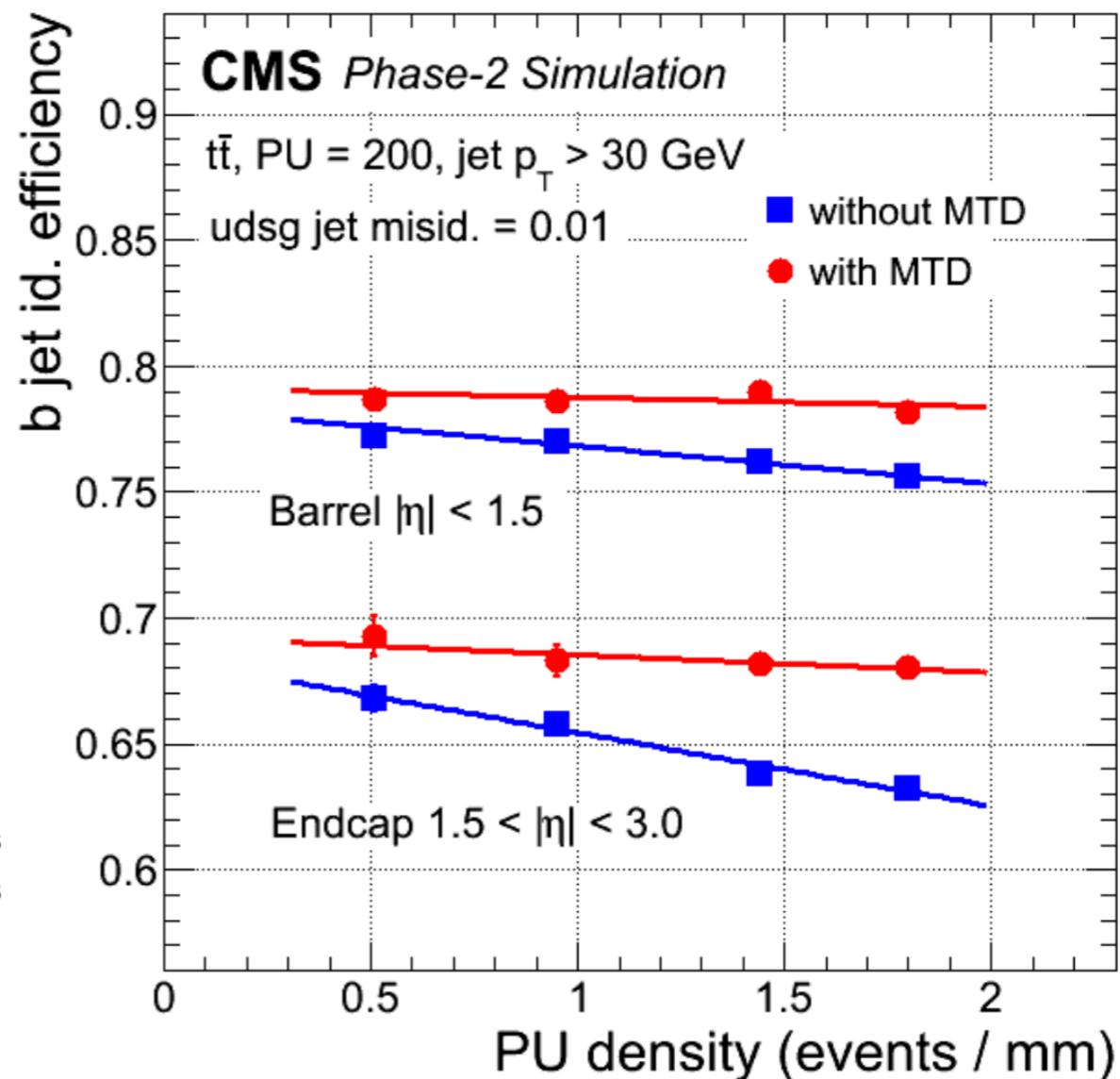
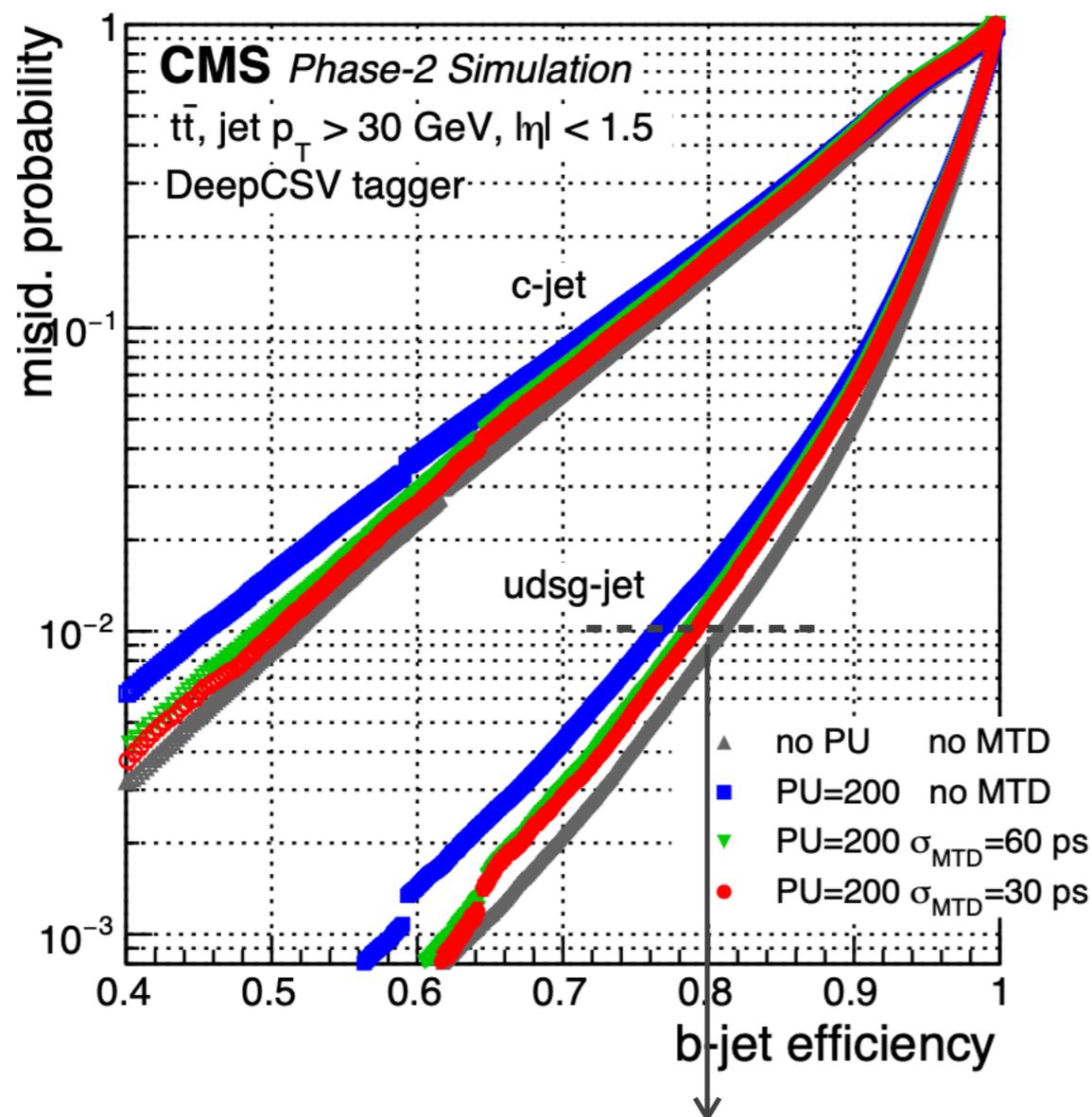
- 2° esempio: **vertici secondari** e identificazione dei **b-jet** (*b-tagging*)



Benefici del timing nella ricostruzione degli oggetti

- 2° esempio: **vertici secondari** e identificazione dei **b-jet** (*b-tagging*)

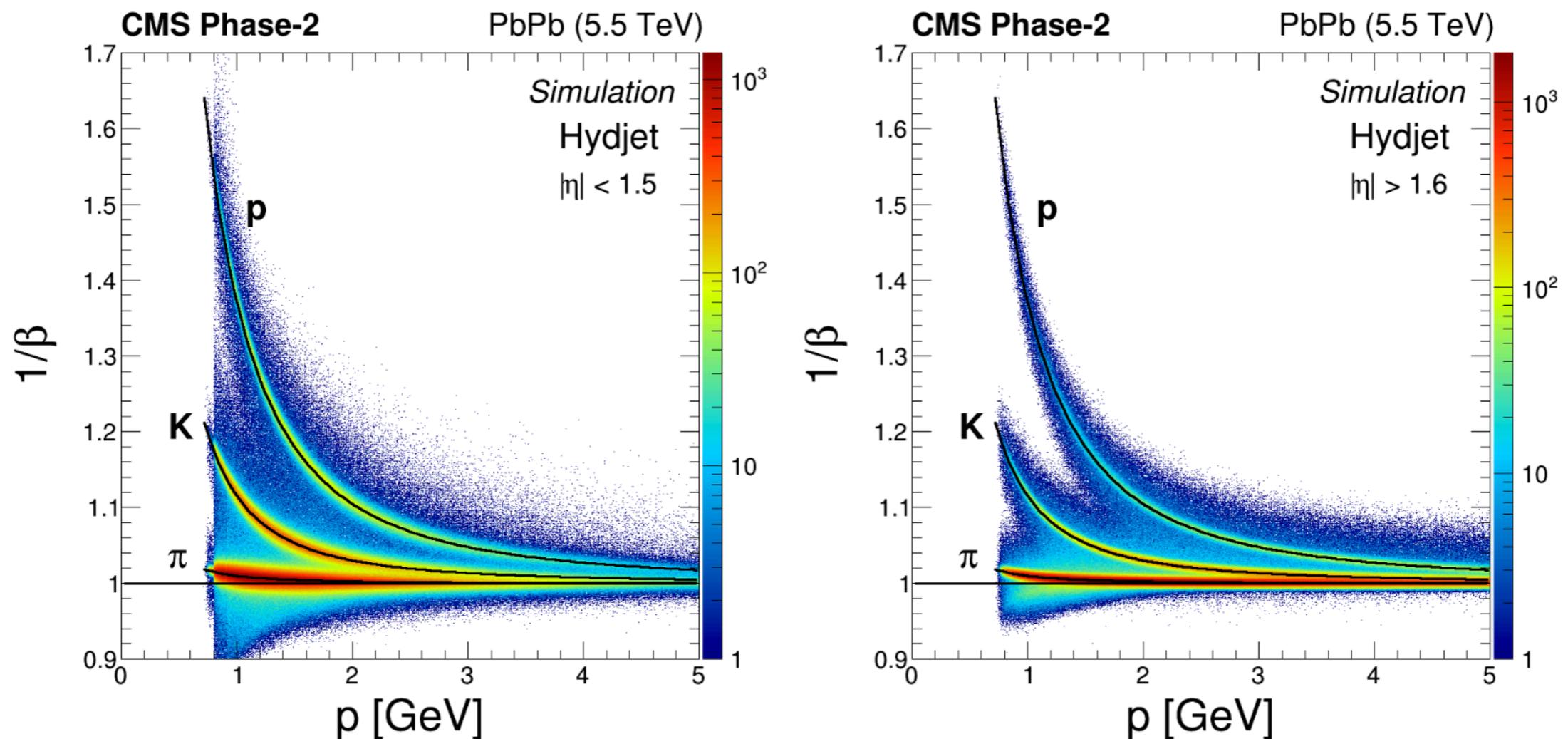
curve ROC (receiver operating characteristics)



4-6% di aumento dell'efficienza per b-jet
a parità di livello di misidentificazione di jet non da quark b

Benefici del timing nella ricostruzione degli oggetti

- 3° esempio: identificazione di particelle (**PID**)
 - dalla misura del tempo di volo di particelle con massa diversa (→ diversa velocità)
 - **PID** è uno strumento prezioso per la **fisica degli ioni pesanti** (collisioni PbPb) e del **sapore**



$$1/\beta = c \cdot (t - t_{PV}) / L$$

ci sono ulteriori benefici
(jet, p_T^{miss} ,)...

Impatto del timing sulla fisica a CMS

- 1° esempio: produzione di **coppie di bosoni di Higgs**
 - uno degli obiettivi primari di HL-LHC
 - considerando unicamente i benefici apportati dal timing a isolamenti e *b-tagging*
 - » i guadagni sui singoli oggetti si combinano in stati finali a molti oggetti
 - » ulteriori guadagni attesi da riduzione dei jet di pileup, miglioramento della risoluzione di p_T^{miss} , etc.

proiezioni per 3000 fb⁻¹

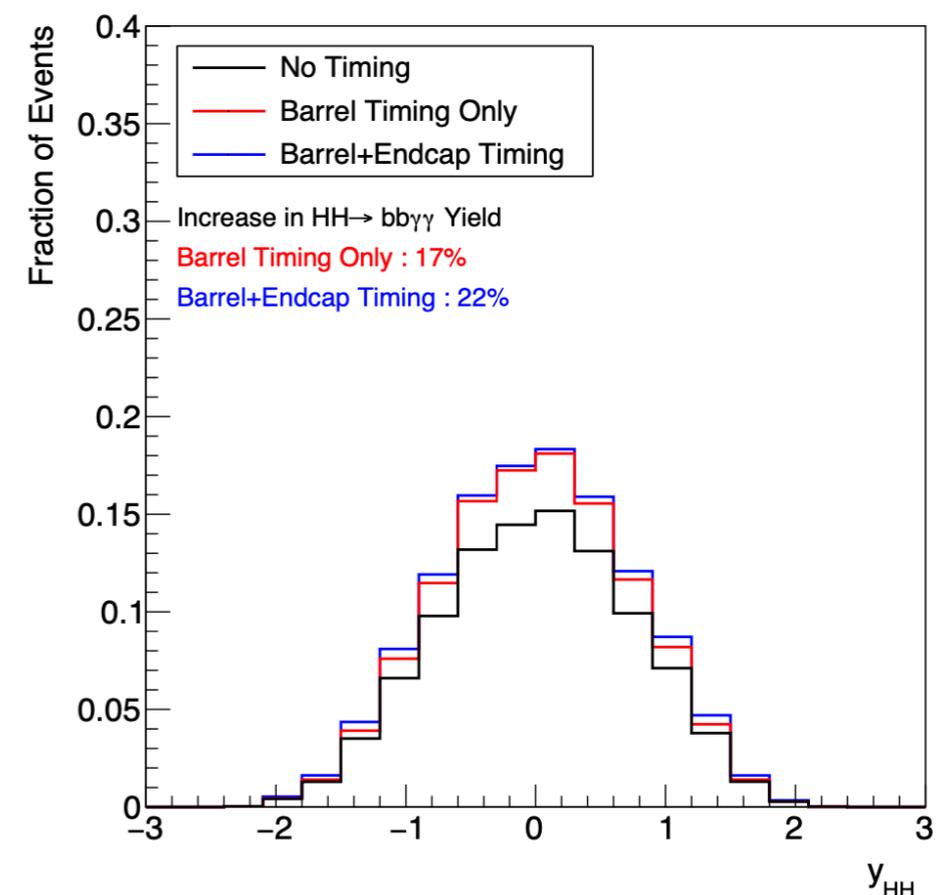
Di-Higgs decay	Signal increase (%)		Expected significance	
	BTL	BTL+ETL	No MTD	MTD
bbbb	13	17	0.88	0.95
bb $\tau\tau$	21	29	1.3	1.6
bb $\gamma\gamma$	13	17	1.7	1.9
bbWW			0.53	0.58
bbZZ			0.38	0.42
Combined			2.4	2.7

+13% in sensitività statistica

cioè, servirebbe **+26%** di luminosità per equiparare guadagno senza timing

cioè, circa **3 anni[*]** in più di HL-LHC

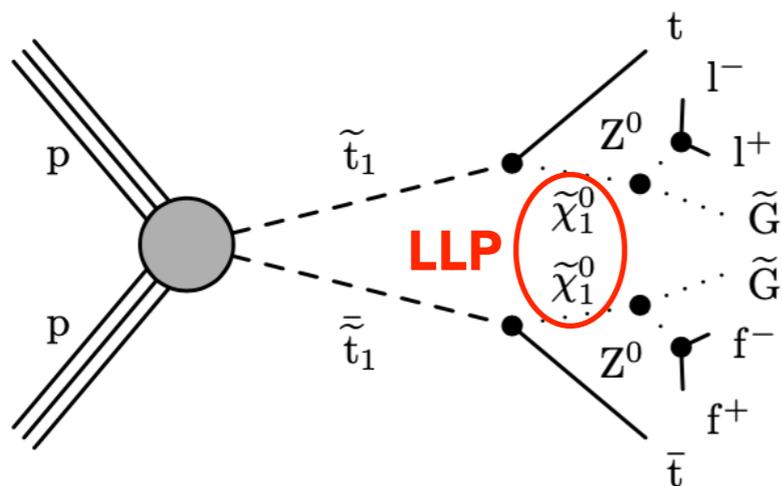
HH \rightarrow bb $\gamma\gamma$ (200 Pileup Distribution)



costo di 3 anni di LHC: ~1.1GCHF [\[Facts and figures about LHC\]](#)

Impatto del timing sulla fisica a CMS

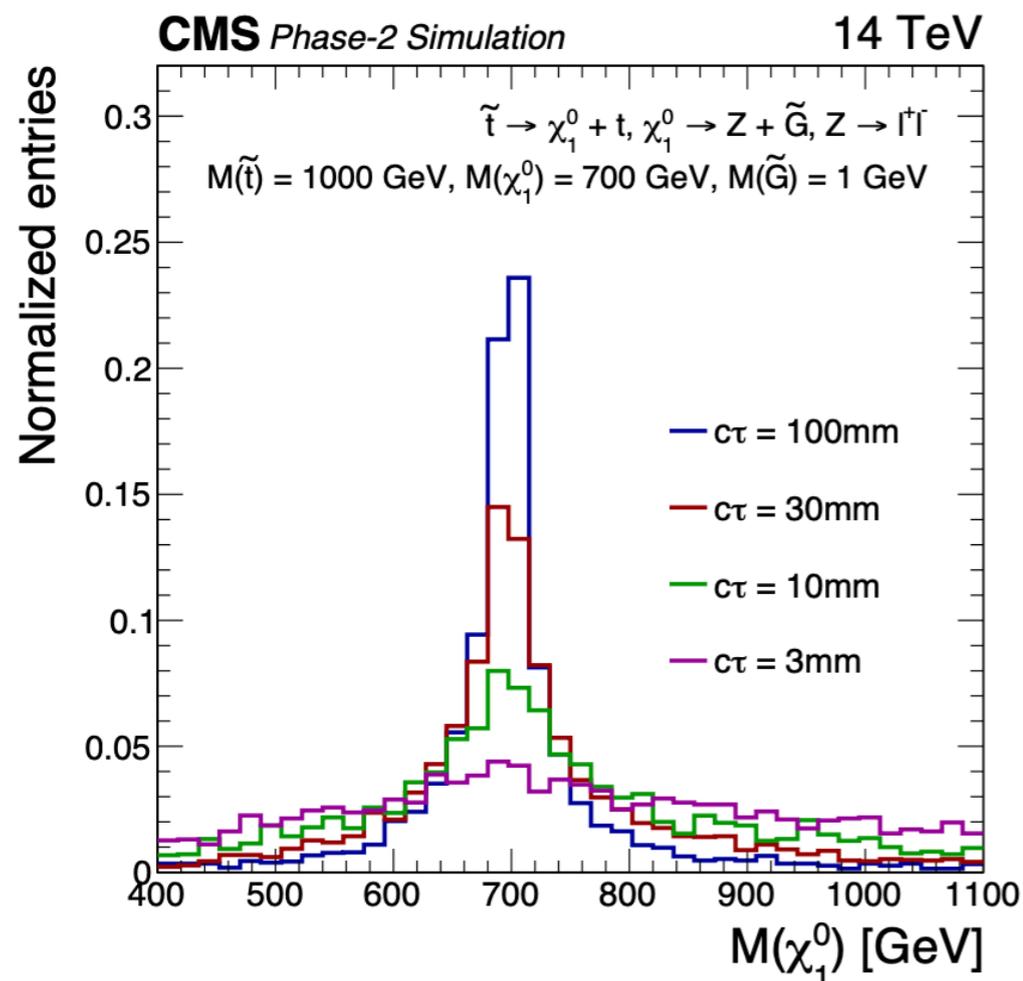
- 2° esempio: modelli oltre il modello standard, e.g. *long lived particles* (**LLP**) in GMSB SUSY



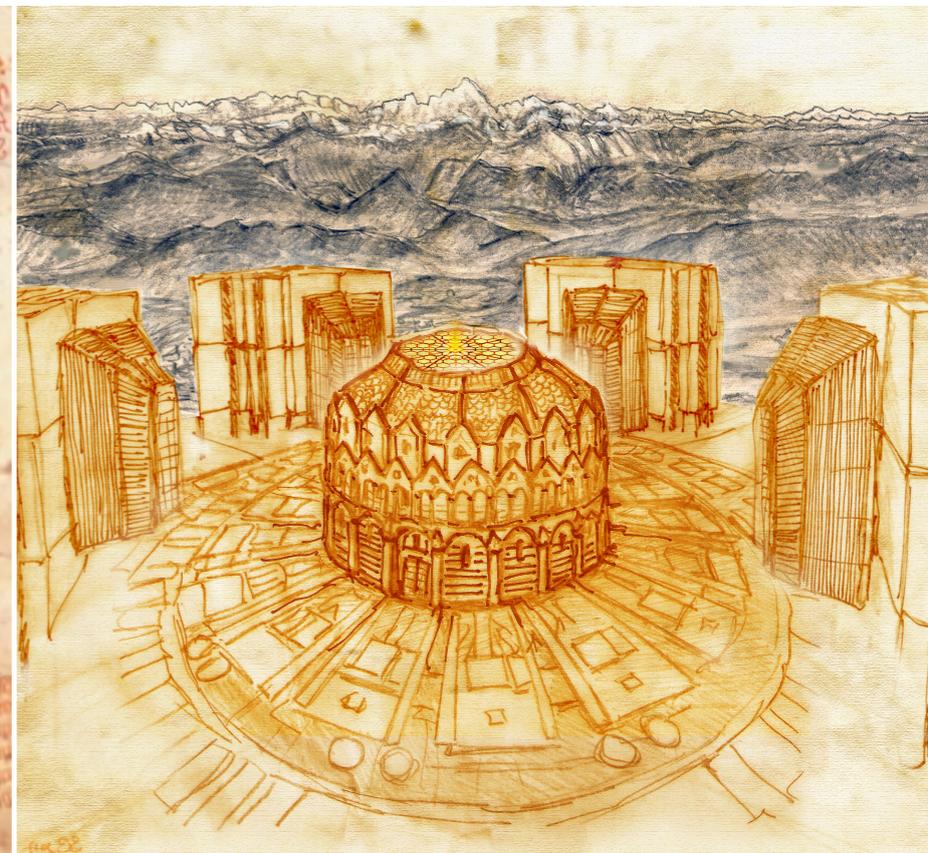
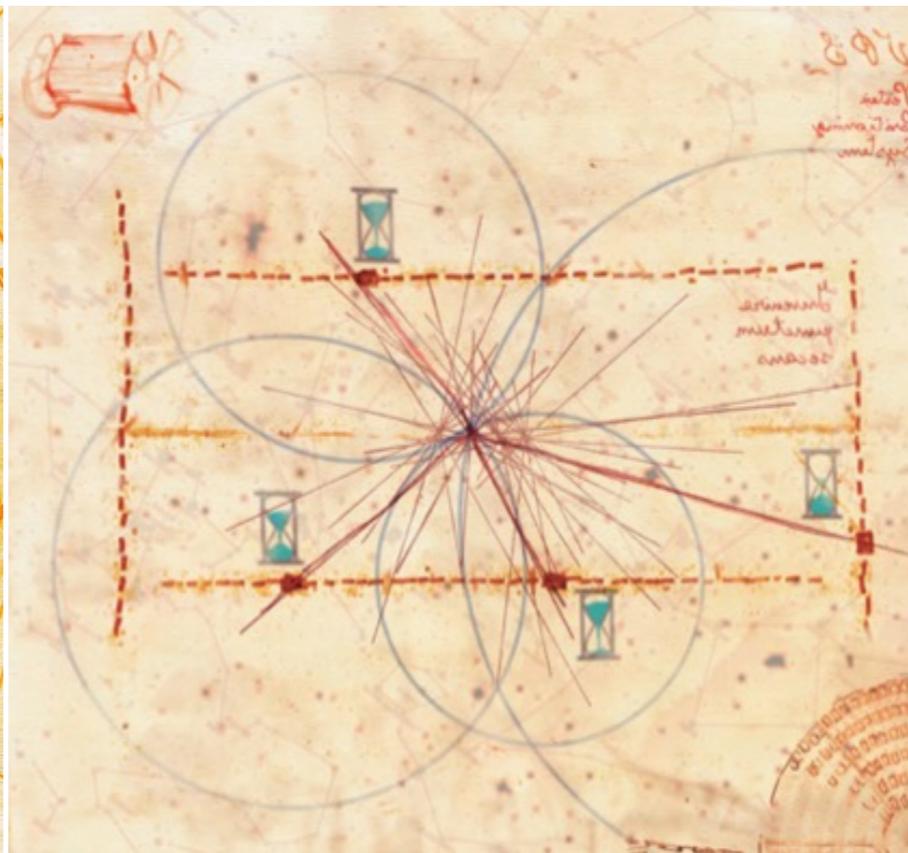
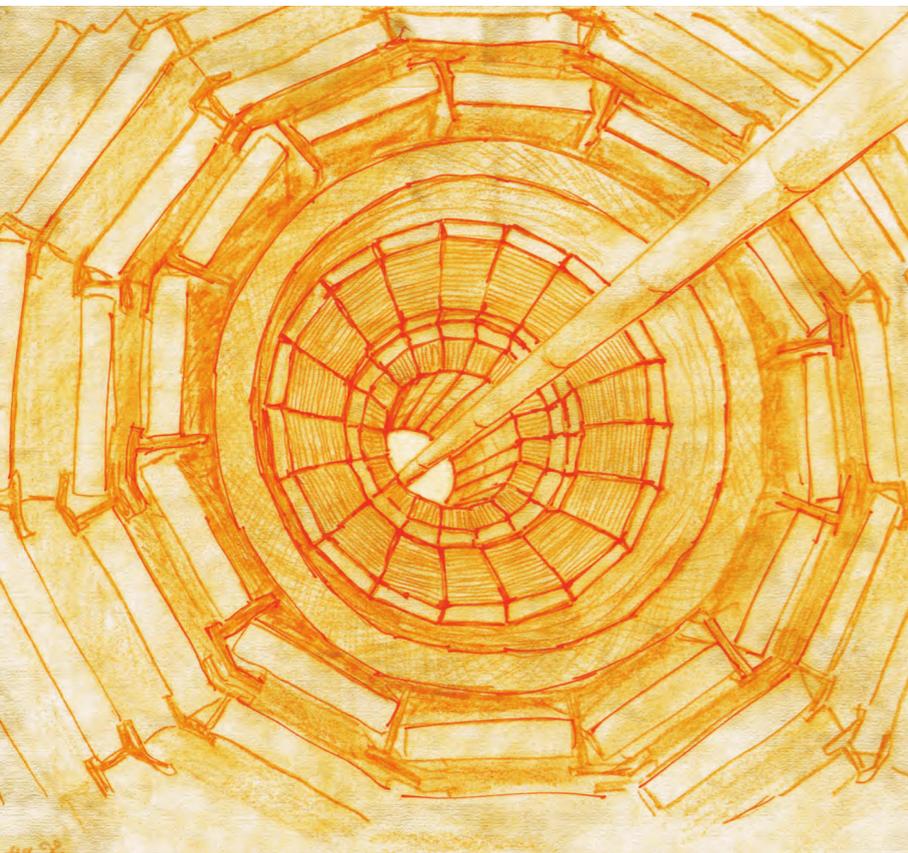
il timing consente di misurare la velocità del neutralino χ_1^0 dalla distanza temporale (oltre che spaziale) del vertice primario e secondario

questa informazione, combinata con le proprietà cinematiche dei prodotti di decadimento visibili, consente di ricostruire la massa del neutralino nell'assunzione di gravitino leggero o *massless*

la possibilità di ricostruire una **variabile di massa** (cioè un **picco!**) cambia radicalmente le prospettive di queste ricerche



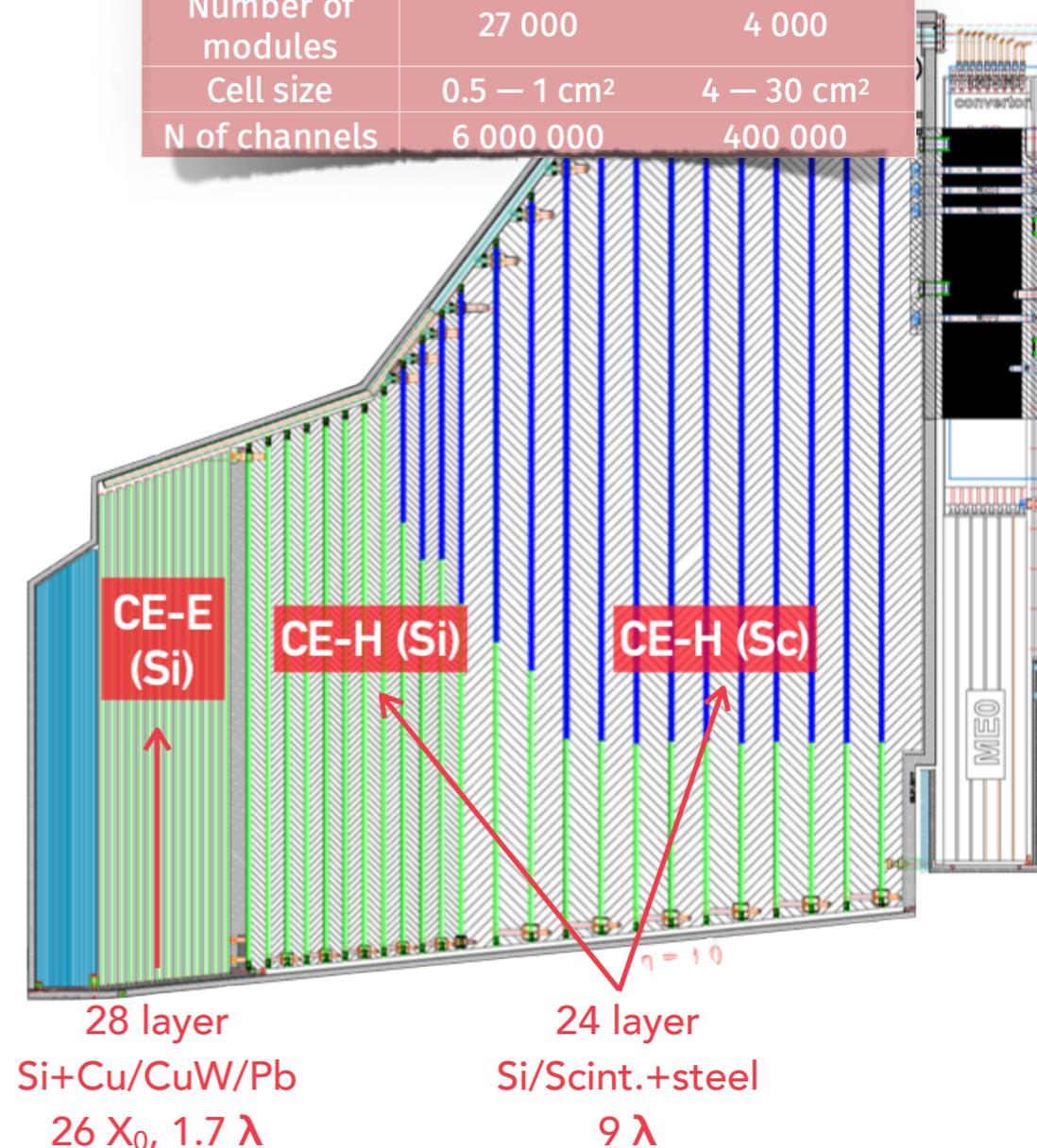
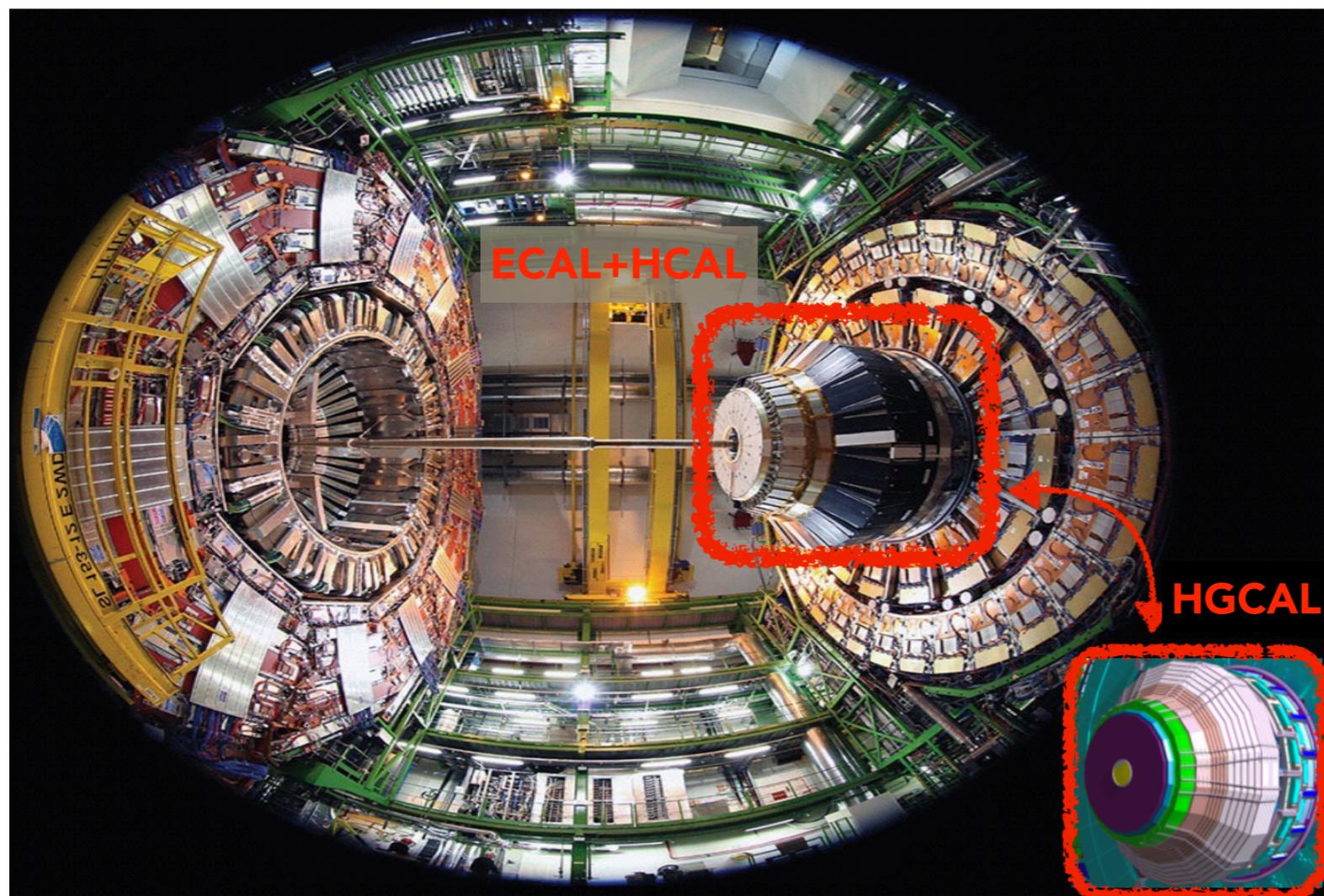
Come si misurerà il tempo delle particelle a CMS



Upgrade della calorimetria in avanti: HGCAL

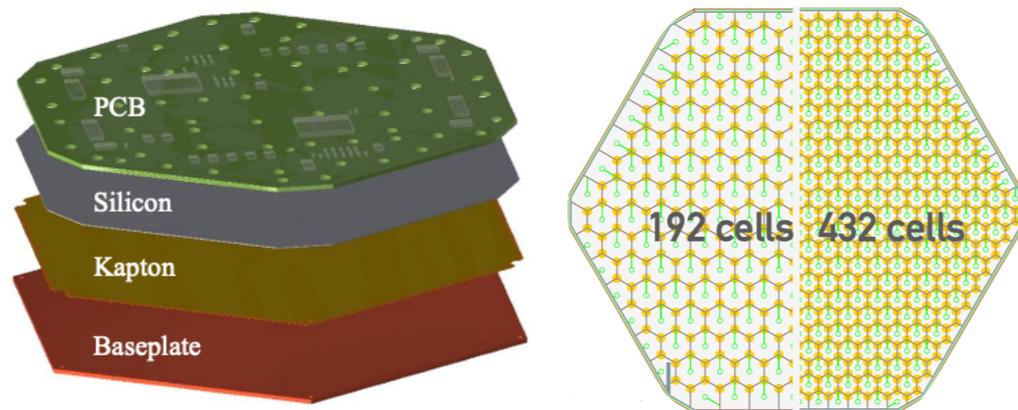
- I calorimetri della parte in avanti (*endcap*) dovranno essere sostituiti
 - degradamento delle prestazioni dovuto alla dose da radiazione integrata in ~15 anni di LHC
- Al posto di ECAL+HCAL → **HGCAL** (High Granularity CALorimeter)
 - alta granularità e timing per combattere il pileup

Endcap coverage: $1.5 < \eta < 3.0$		
Total	Silicon sensors	Scintillator
Area	600 m ²	500 m ²
Number of modules	27 000	4 000
Cell size	0.5 – 1 cm ²	4 – 30 cm ²
N of channels	6 000 000	400 000

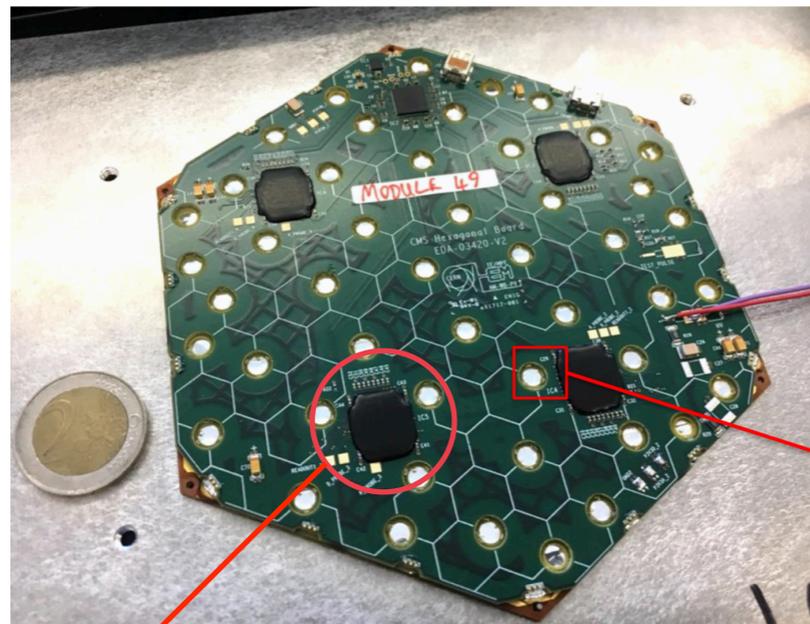
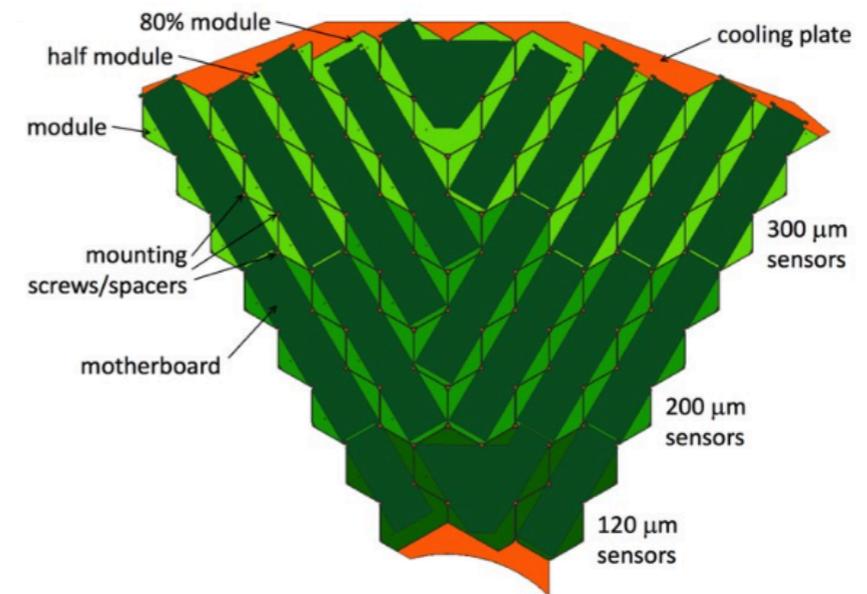


Upgrade della calorimetria in avanti: HGCal

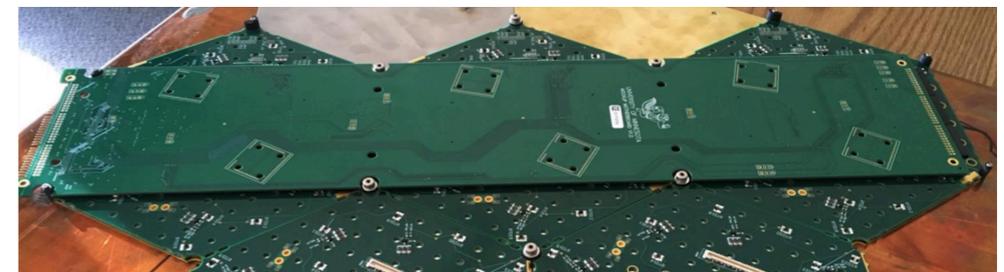
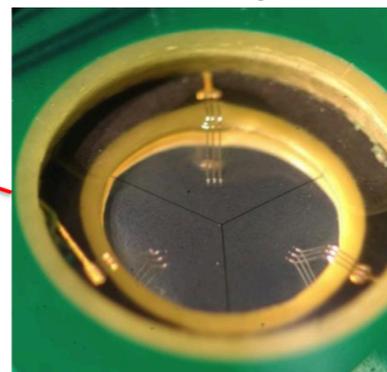
Sensori: wafer esagonali da 8" di silicio, divisi in sotto-celle esagonali



Cassette: settori da 30 o 60° (sensori e supporto + motherboard di lettura)

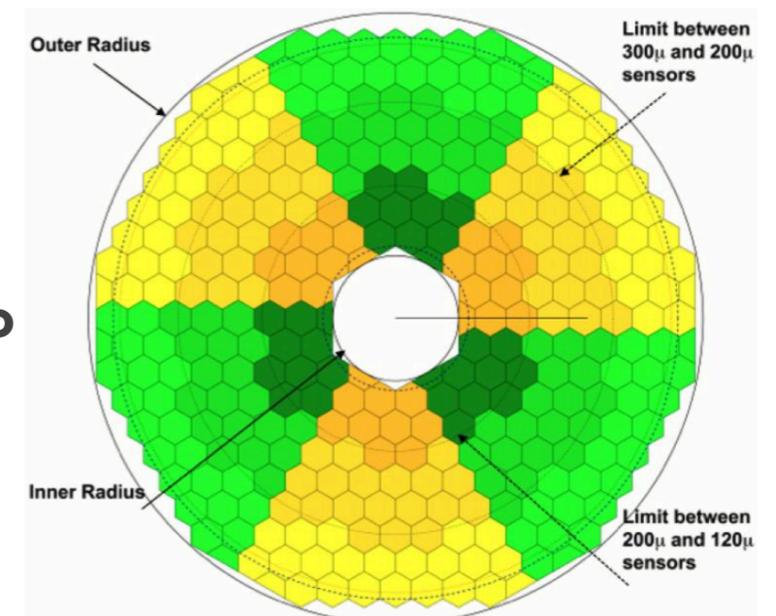


Wire bonding from PCB to silicon through holes



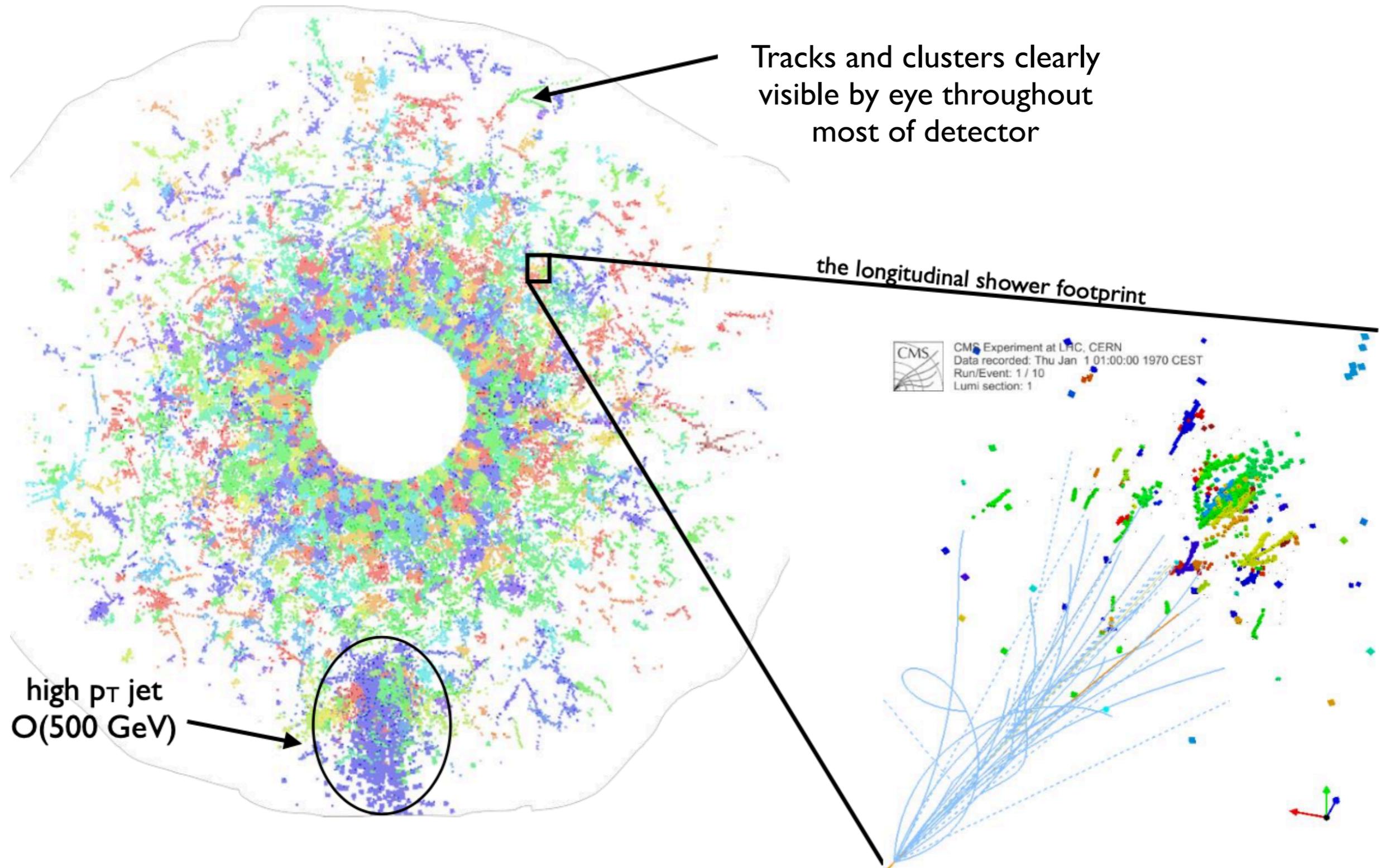
HGCROC chip: misura del ToT (÷ ampiezza del segnale) e timing (per segnali di almeno 12 fC, ~3 MIP)

Disco



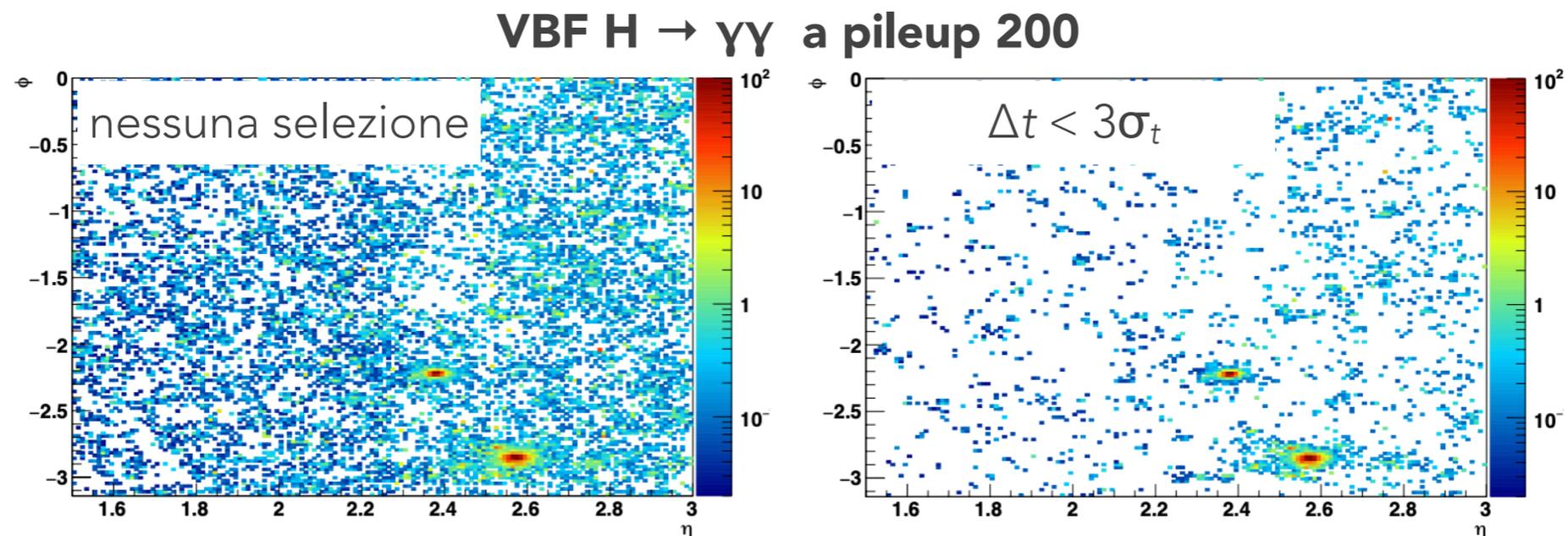
HGCAL: misura di e/γ e adroni 5D

- Misura 5D: energia, posizione e tempo di ogni particella
 - il terreno di prova ideale per tecniche avanzate di *pattern recognition*



Timing in HGCAL

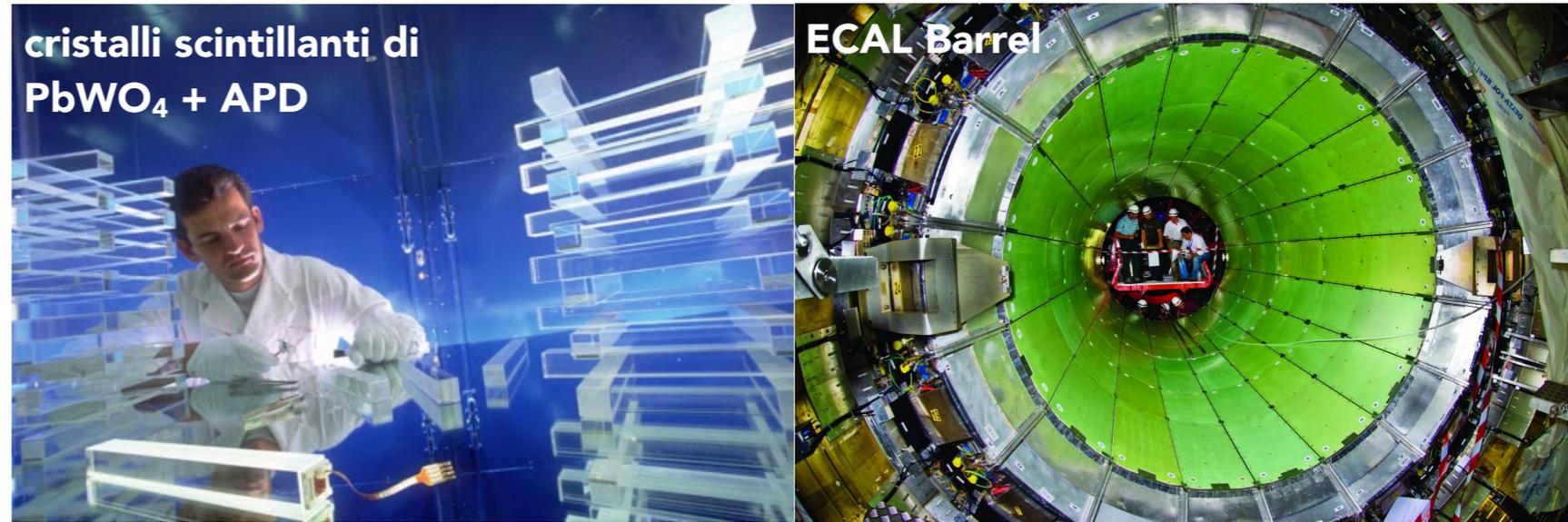
- Ogni cella con almeno 12 fC depositati (~ 3 MIP) consentirà una misura di tempo con precisione di 20-150 ps
 - la cascata elettromagnetica/adronica di ciascuna particella interessa molte celle, che possono essere combinate \rightarrow miglioramento della risoluzione



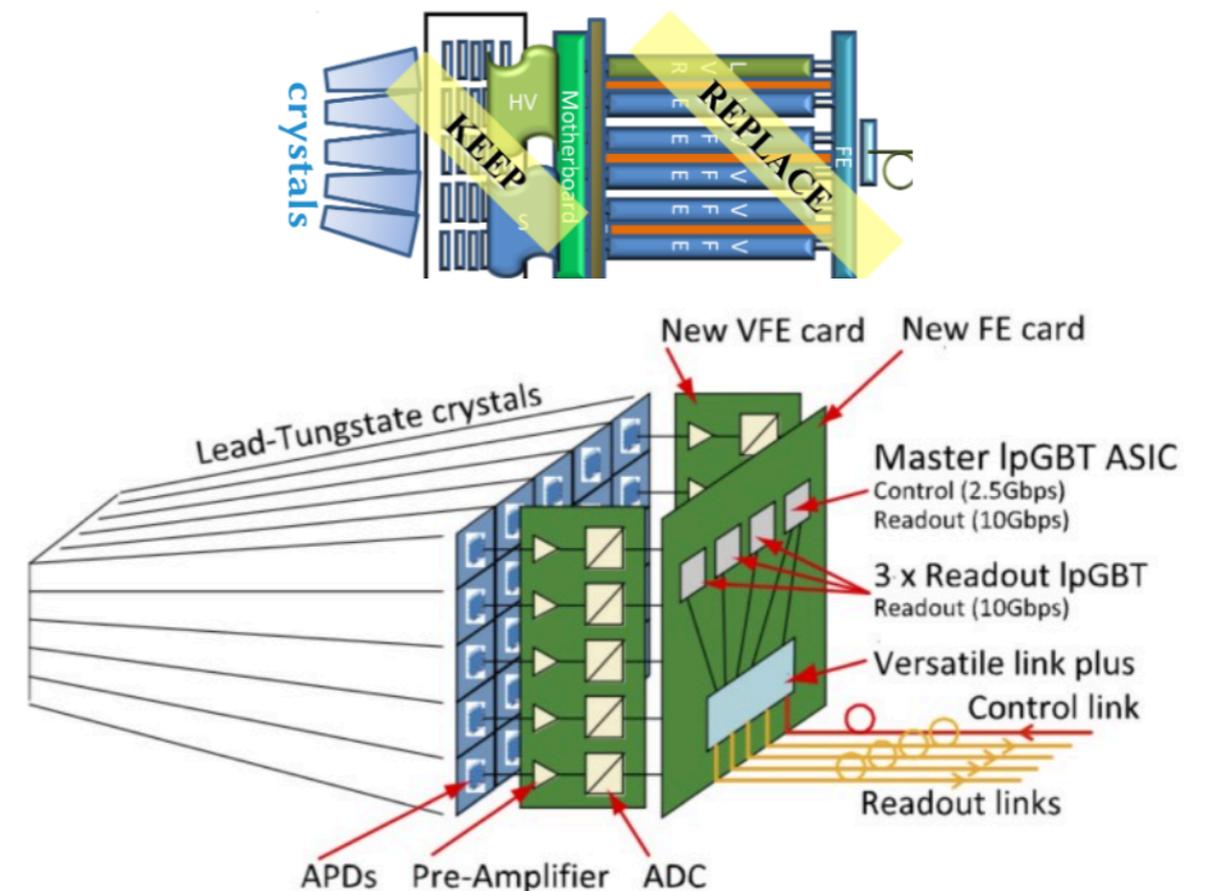
- Ci si aspetta:
 - **fotoni/elettroni**: misura del tempo con risoluzione ≤ 30 ps fino a $p_T \sim 2$ GeV
 - **adroni**: ~ 50 ps di risoluzione per il 70% delle particelle con $p_T \sim 2$ GeV
 - » N.B.: lo spettro di momento trasverso delle particelle dei vertici di pileup è molto soffice!

Timing di fotoni centrali: ECAL barrel

- Nella parte centrale del calorimetro elettromagnetico, i sensori attuali (cristalli+fotorivelatori) verranno mantenuti anche per la fase di alta luminosità
 - le **limitazioni intrinseche** nella dispersione temporale dovuta allo sviluppo dello sciame e alla raccolta di luce sono **< 30 ps**



- L'elettronica di lettura e formatura del segnale verrà invece **sostituita**
 - *shaping time* più breve → fronte di salita del segnale più ripido → **misura del tempo con risoluzione ≤ 30 ps per e/ γ di almeno 30 GeV**
 - » nessuna informazione temporale per particelle MIP o fotoni di bassa energia



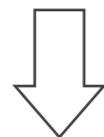
Serve un rivelatore di timing dedicato

- Per realizzare i vantaggi della mitigazione del pileup attraverso il timing descritti precedentemente, è necessario **misurare il tempo** di, possibilmente, **tutte le particelle** uscenti dai vertici di pileup.
- Ma, abbiamo visto che gli *upgrade* in programma per i calorimetri non hanno questa capacità:

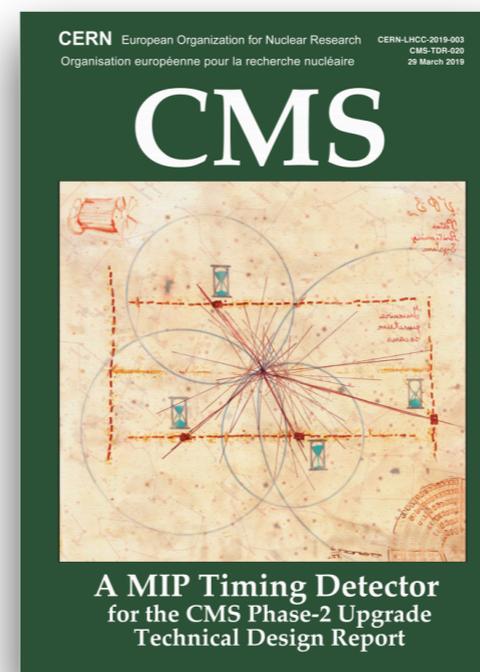
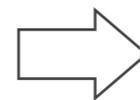
0	barrel	1.5	endcap	3	
η					
$e/\gamma \gtrsim 30 \text{ GeV}$		✓	$e/\gamma \gtrsim 2 \text{ GeV}$		✓
$e/\gamma \sim 1 \text{ GeV, MIPs}$		✗	MIPs		✓/✗

Serve un rivelatore di timing dedicato

- Per realizzare i vantaggi della mitigazione del pileup attraverso il timing descritti precedentemente, è necessario **misurare il tempo** di, possibilmente, **tutte le particelle** uscenti dai vertici di pileup.
- Ma, abbiamo visto che gli *upgrade* in programma per i calorimetri non hanno questa capacità:



è necessario dotare CMS di un rivelatore di timing ermetico capace di misurare il tempo con risoluzione ~30 ps per depositi di particelle al minimo di ionizzazione (MIP)

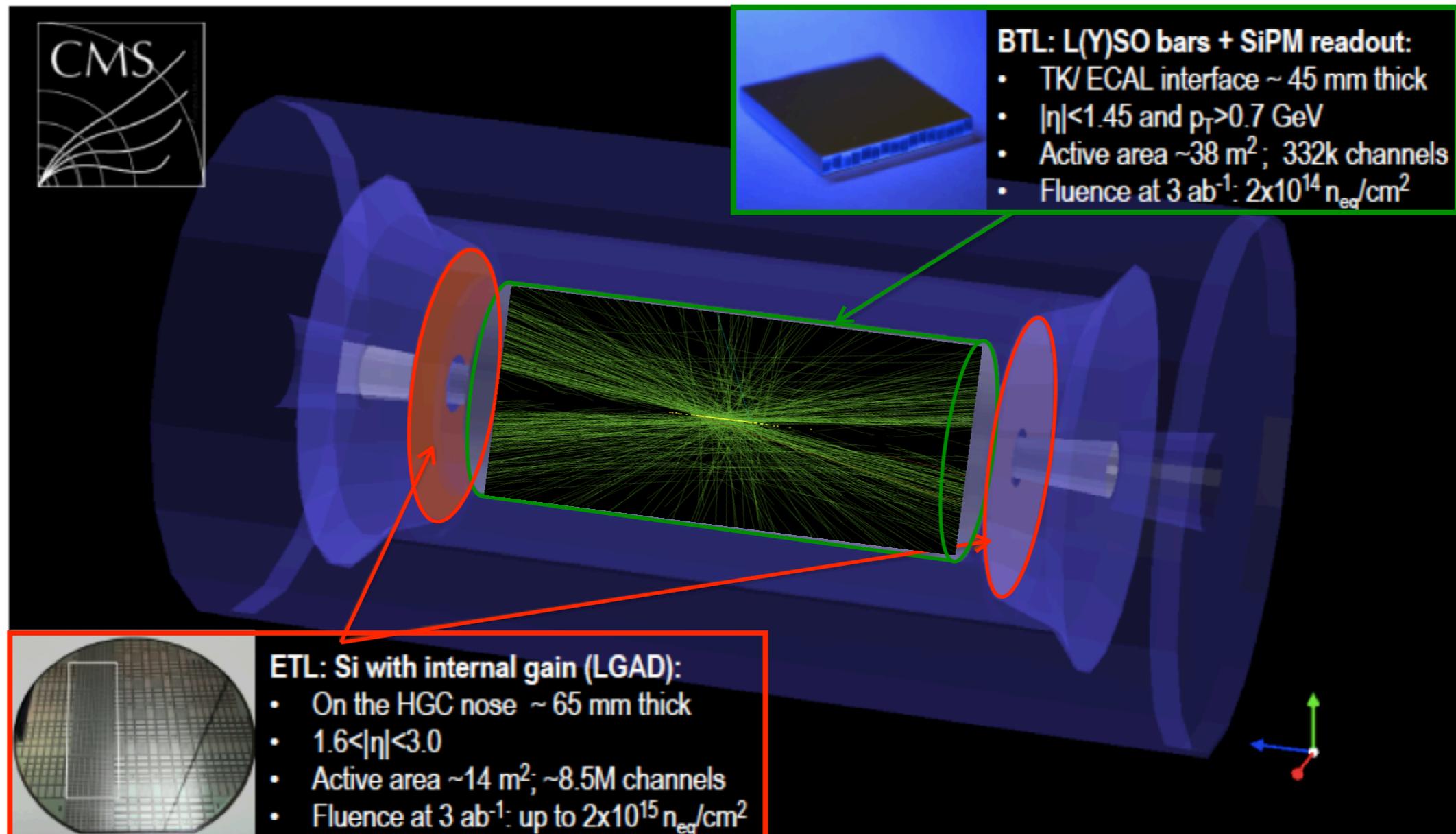


Nov. 2017: Technical Proposal
Apr. 2018: Progetto ufficiale in CMS (Project Manager: T. Tabarelli de Fatis)
Set. 2019: Technical Design Report e approvazione del progetto da LHCC

Progetto nato con l'importante contributo di Milano-Bicocca!

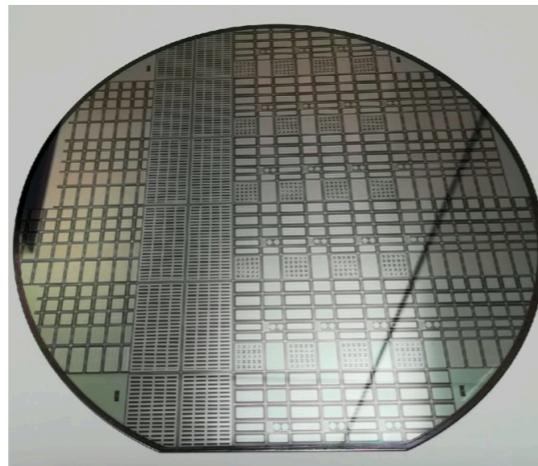
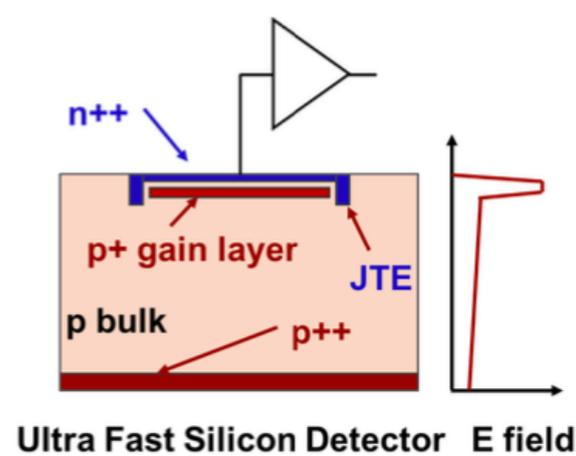
Il rivelatore MTD (MIP Timing Detector)

- Una sfida imponente:
 - rivelatore ermetico e sottile, posto tra il tracciatore e i calorimetri
 - compatibile (in termini di schedula e integrazione) con gli altri *upgrade*
 - limitate possibilità di *R&D* di sensori per vincoli di schedula
 - sensori in grado di sopravvivere ad alti livelli di radiazione
 - obiettivo: risoluzione di ~ 30 ps per depositi di particelle MIP

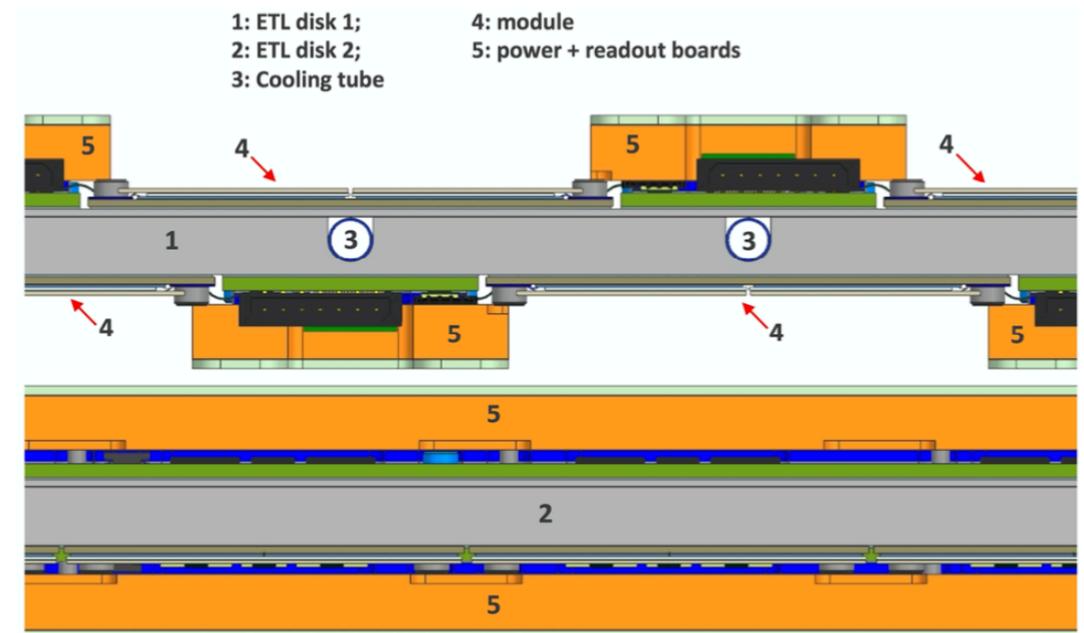


Design del rivelatore in avanti (ETL)

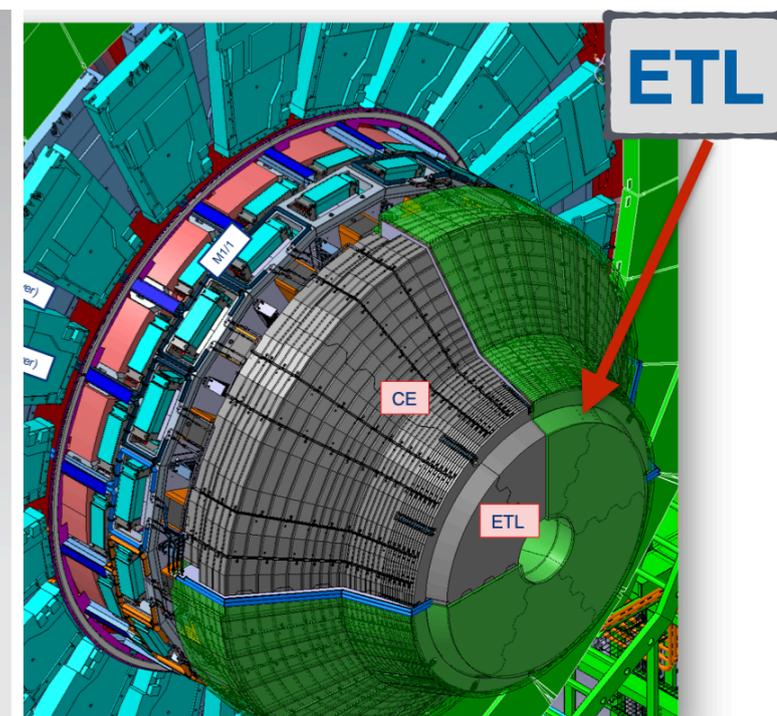
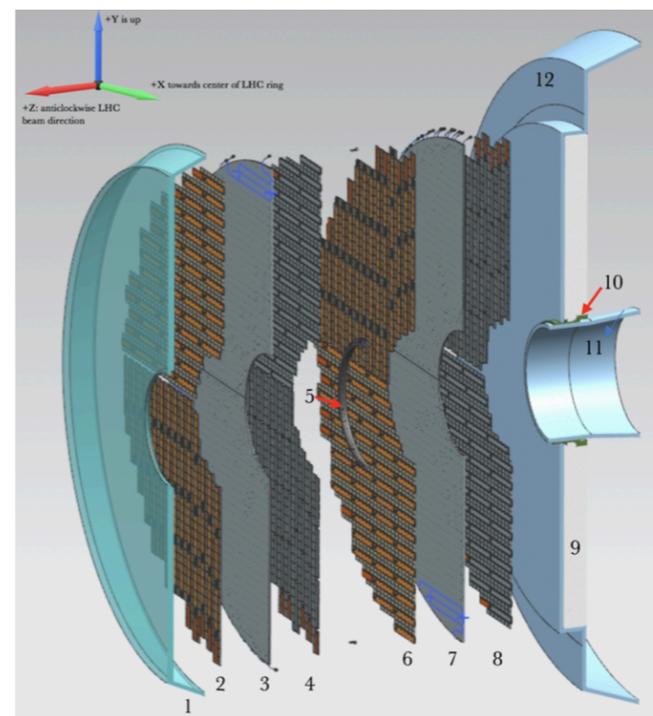
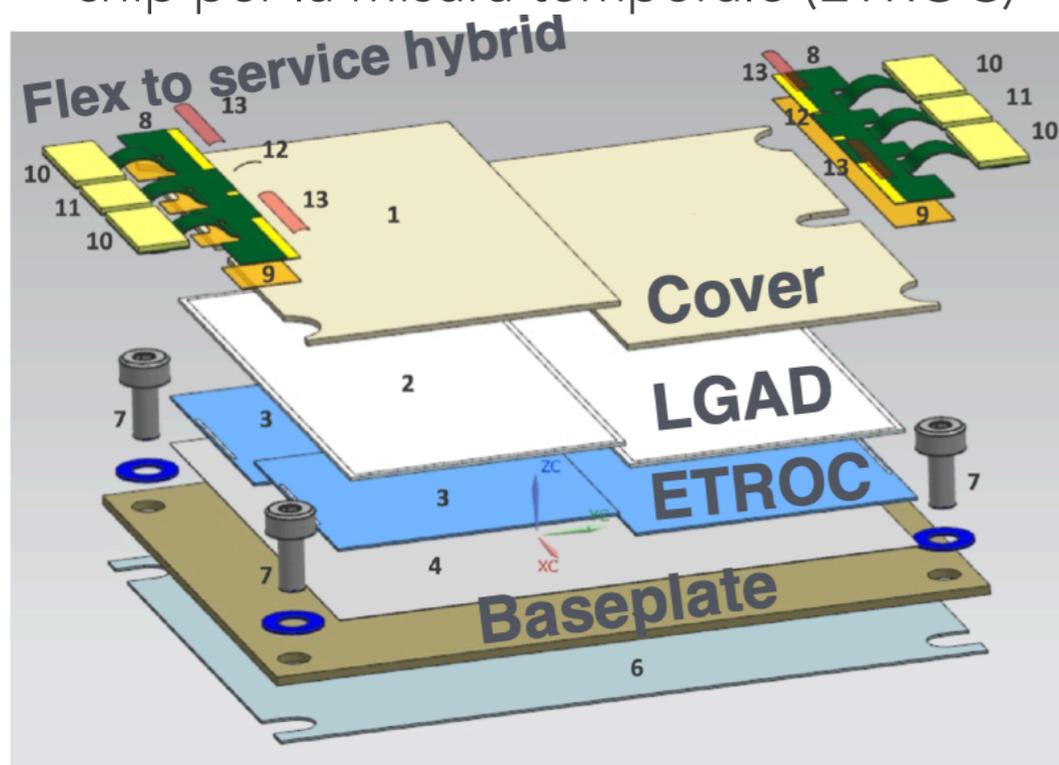
Sensori: Low Gain Avalanche Diode, guadagno tipico $\times 10-30$, area della singola cella $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$



Due dischi con moduli e servizi (power & readout) alternati, raffreddati a -30° C .
Dischi montati sul "naso" di HGICAL

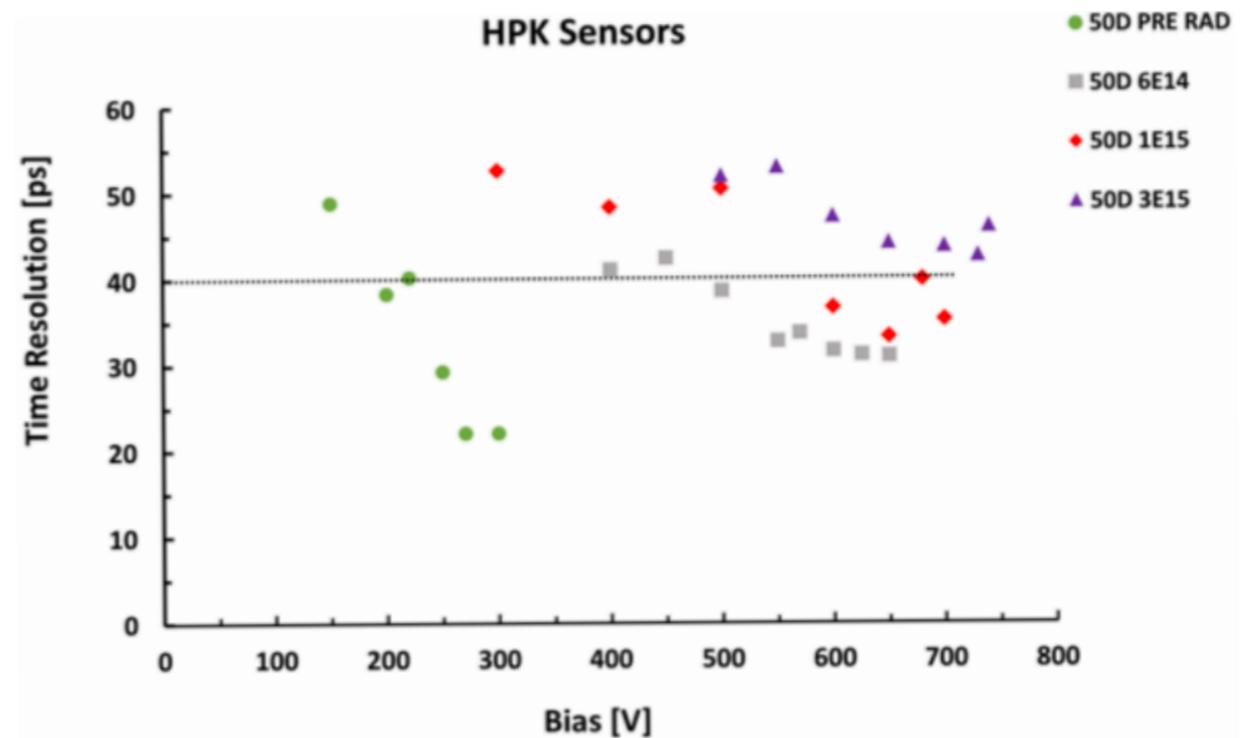
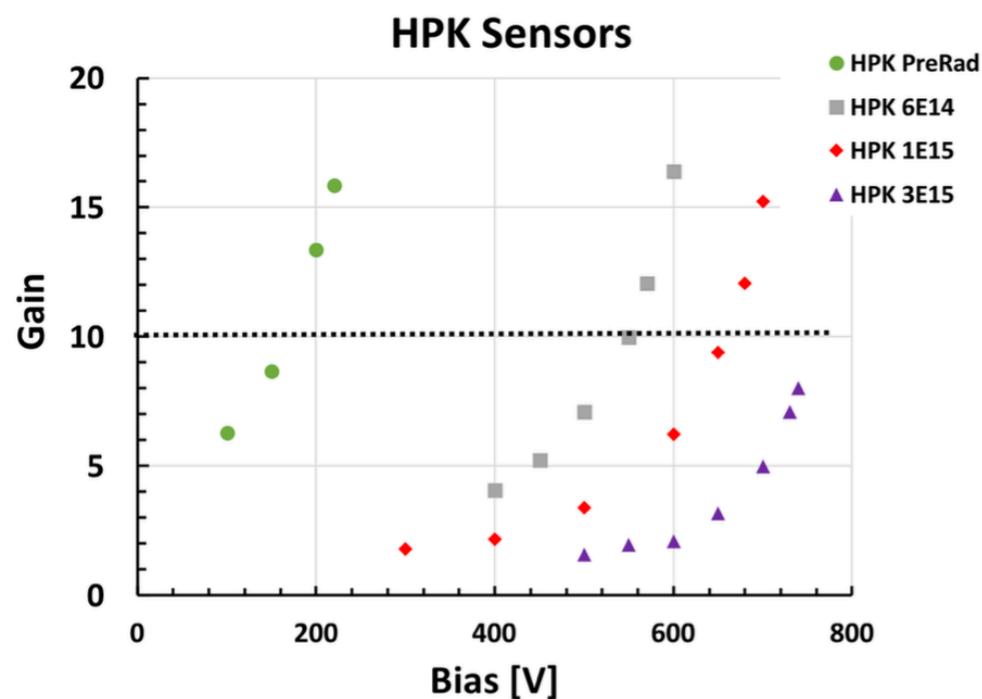


Moduli: sensori *bump-bonded* sul chip per la misura temporale (ETROC)



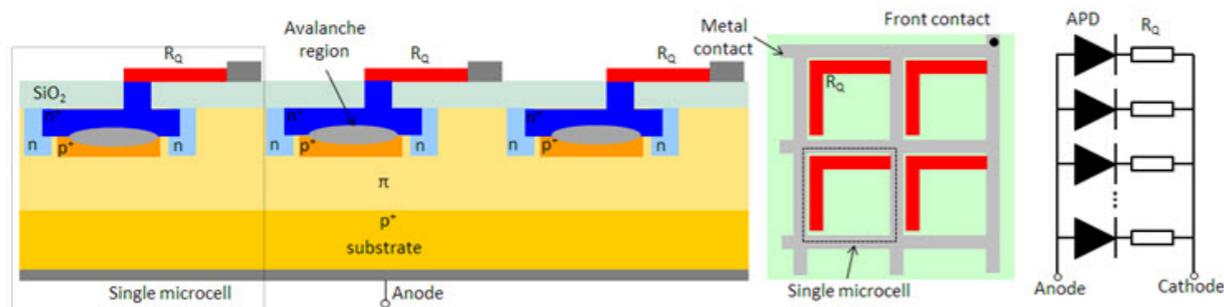
Il danno da radiazione in ETL

- Ad una luminosità integrata di 3000 fb^{-1} corrisponde una fluensa di particelle attesa di $1.6 \times 10^{15} \text{ 1 MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ che investirà i sensori di ETL
 - la particolare configurazione del campo elettrico dei sensori LGAD e la temperatura di esercizio (-30° C) fanno sì che la riduzione nell'efficienza di raccolta di carica e l'aumento della corrente di buio dovuti alla radiazione siano effetti modesti
 - l'effetto più importante dovuto al **danno da radiazione** è una **riduzione dell'amplificazione** → compensata da un **aumento della tensione di polarizzazione** della giunzione
 - **prestazioni** su singolo canale **migliori di 40 ps per l'intera durata di HL-LHC** dimostrate a test su fascio
 - » la maggior parte delle particelle interagisce in due sensori successivi



Design del rivelatore centrale (BTL)

Sensori: barre scintillanti di LYSO ($3 \times 3 \times 57 \text{ mm}^3$) lette alle due estremità da fotomoltiplicatori al silicio (SiPM)



matrice di fotodiodi a valanga (APD)

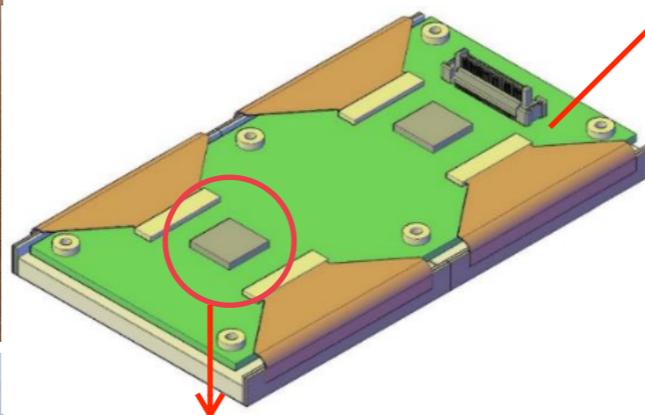
40000 celle/SiPM ($15 \times 15 \mu\text{m}^2$) nel caso dei sensori di BTL

Tray: "carrelli" di moduli lunghi 2.5 m

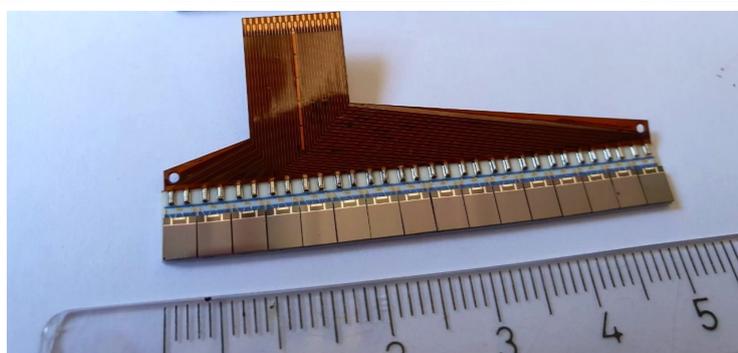


Moduli: matrici lineari di 16 barre di LYSO accoppiate su due lati a matrici lineari di 16 SiPM + elettronica di FrontEnd

72 tray "infilati" nel tubo in fibra di carbonio che sosterrà il tracker



TOFHIR chip: misura di timing e energia, mitigazione del noise



Barrel timing detector
72 trays: $2(z) \times 36(\phi)$
332k channels

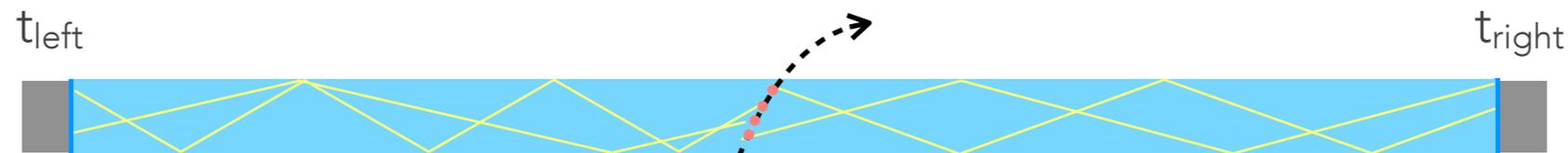
Length: 4.8 m
Radius: 1.8 m

La misura del tempo in BTL

~**170×10³ fotoni di scintillazione** per l'energia tipica di una MIP a CMS (4.2 MeV)

9000-6000 fotoelettroni in ciascun SiPM

timing determinato dai primi **O(20)** fotoelettroni



$$t_{\text{bar}} = \frac{1}{2} [t_{\text{left}} + t_{\text{right}}]$$

risposta temporale indipendente dal punto di impatto
contributo di noise (scorrelato) dei due SiPM ridotto di un fattore $\sqrt{2}$ nella combinazione

- L'ASIC di BTL amplifica il segnale del SiPM e misura:

- **il tempo**, in corrispondenza del superamento di una soglia fissa (*leading edge discrimination*)

- » alto guadagno per avere fronte di salita ripido e consentire basse soglie equivalenti

- **la carica** dell'impulso (energia), per correggere effetti di *time walk*

- » basso guadagno per evitare saturazione e preservare linearità

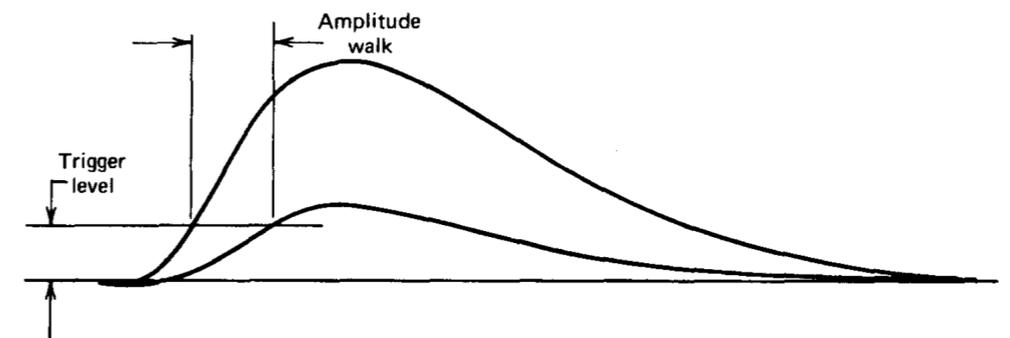
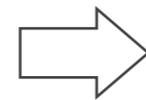
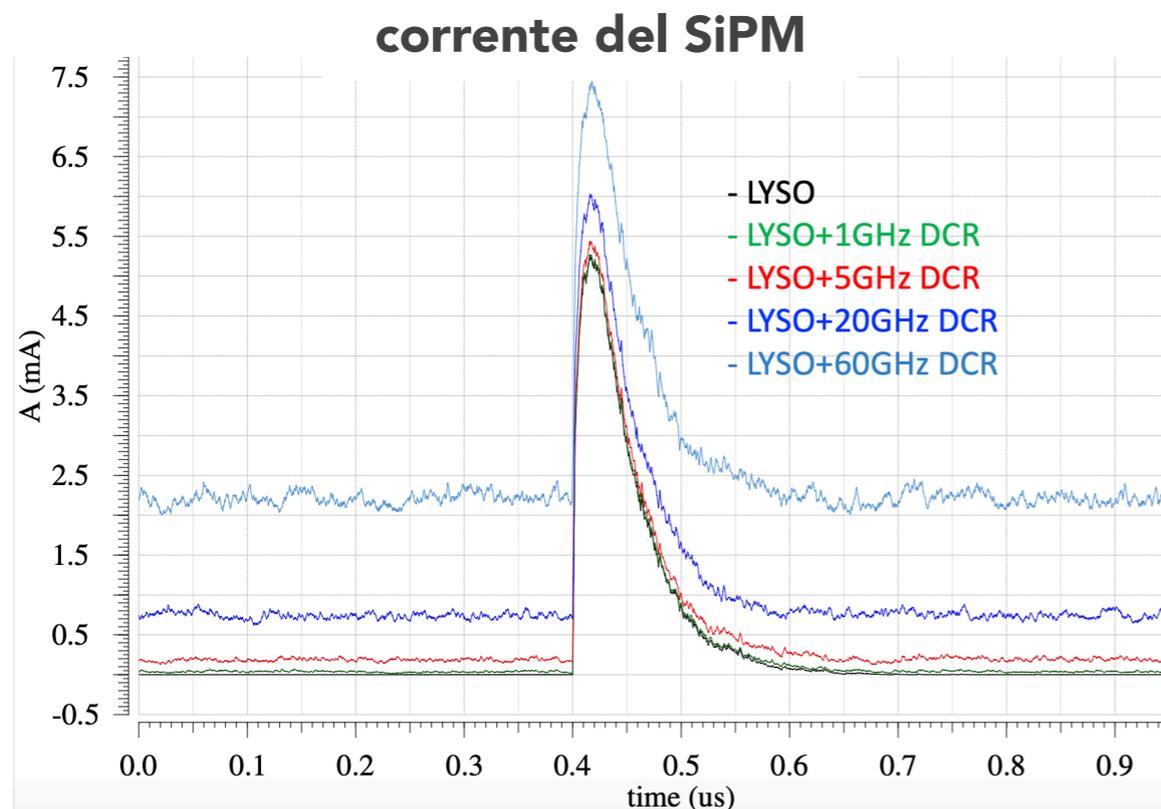


Figure 17.37 Amplitude walk in leading edge triggering. Two pulses with identical shape and time of occurrence but different amplitude are seen to cross the trigger level at different times.

G. Knoll, Radiation Detection and Measurement

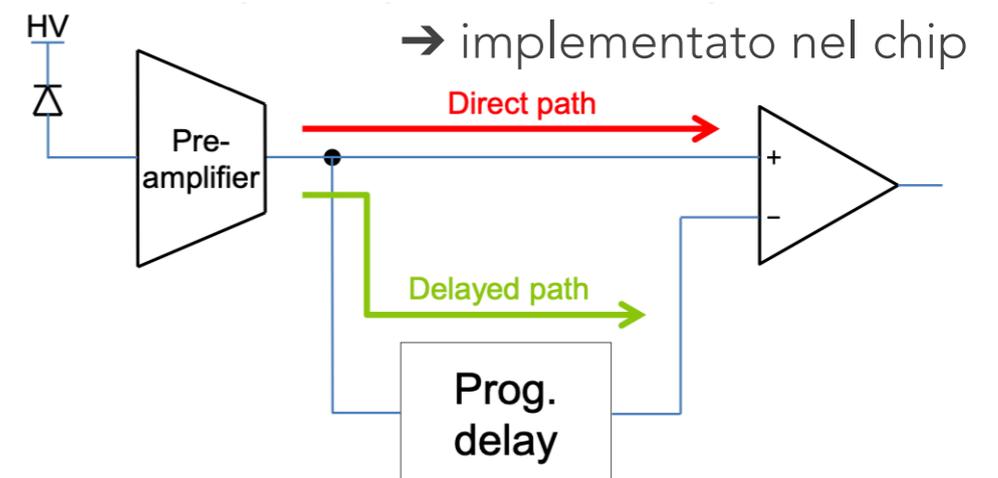
La sfida di BTL: il danno da radiazione

- Ad una luminosità integrata di 3000 fb^{-1} corrisponde una fluenza di neutroni attesa di $2 \times 10^{14} \text{ 1 MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ che investirà i sensori di BTL
 - → difetti nella struttura del silicio che aumentano la probabilità di eventi di buio
 - » singole celle del SiPM con valanghe iniziate da elettroni termici
 - » a 3000 fb^{-1} , ci si aspetta un tasso di conteggi di buio (DCR) pari a **50-60 GHz!**
- Strategie per mitigare l'impatto del noise (implementate):



filtro del noise

somma di segnale ritardato e invertito
→ cancella noise correlato, preservando fronte di salita



La sfida di BTL: il danno da radiazione

- Ad una luminosità integrata di 3000 fb^{-1} corrisponde una fluenza di neutroni attesa di $2 \times 10^{14} \text{ 1 MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ che investirà i sensori di BTL
 - → difetti nella struttura del silicio che aumentano la probabilità di eventi di buio
 - » singole celle del SiPM con valanghe iniziate da elettroni termici
 - » a 3000 fb^{-1} , ci si aspetta un tasso di conteggi di buio (DCR) pari a **50-60 GHz!**
- Strategie per mitigare l'impatto del noise (in corso di studio):

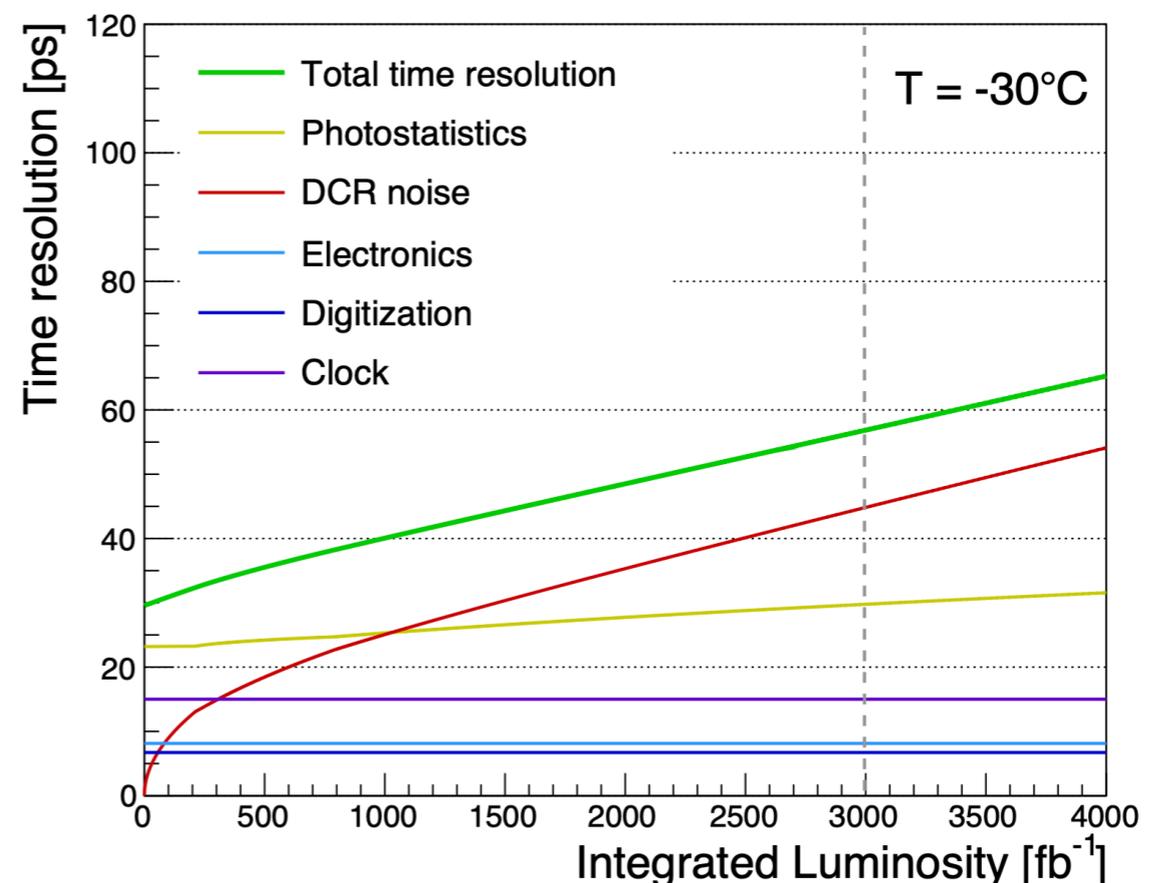
raffreddare localmente i SiPM fino a **$\sim -40^\circ$** con celle Peltier
il DCR è causato da elettroni termici e si riduce di un fattore ~ 2 ogni 10° C

riscaldare localmente i SiPM fino a **$\sim +50^\circ$** durante i periodi di fermo di LHC
un *annealing* ad alta temperatura ripara (in parte) i danni nel silicio

BTL sottoposto a cicli termici di $\Delta T \sim 100^\circ \text{ C}$!

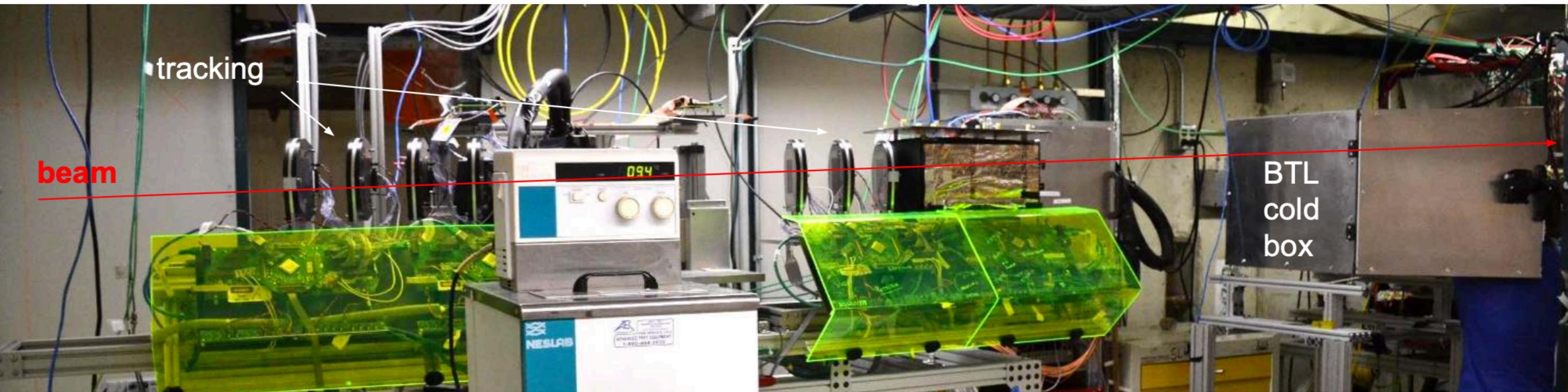
La sfida di BTL: il danno da radiazione

- Ad una luminosità integrata di 3000 fb^{-1} corrisponde una fluenza di neutroni attesa di $2 \times 10^{14} \text{ 1 MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ che investirà i sensori di BTL
 - → difetti nella struttura del silicio che aumentano la probabilità di eventi di buio
 - » singole celle del SiPM con valanghe iniziate da elettroni termici
 - » a 3000 fb^{-1} , ci si aspetta un tasso di conteggi di buio (DCR) pari a **50-60 GHz!**
- Strategie per mitigare l'impatto del noise (in corso di studio)
 - filtro di noise
 - raffreddamento dei SiPM durante la presa dati e *annealing* ad alta temperatura *in situ*
- Proiezione delle prestazioni nel corso dei 10 anni di HL-LHC:



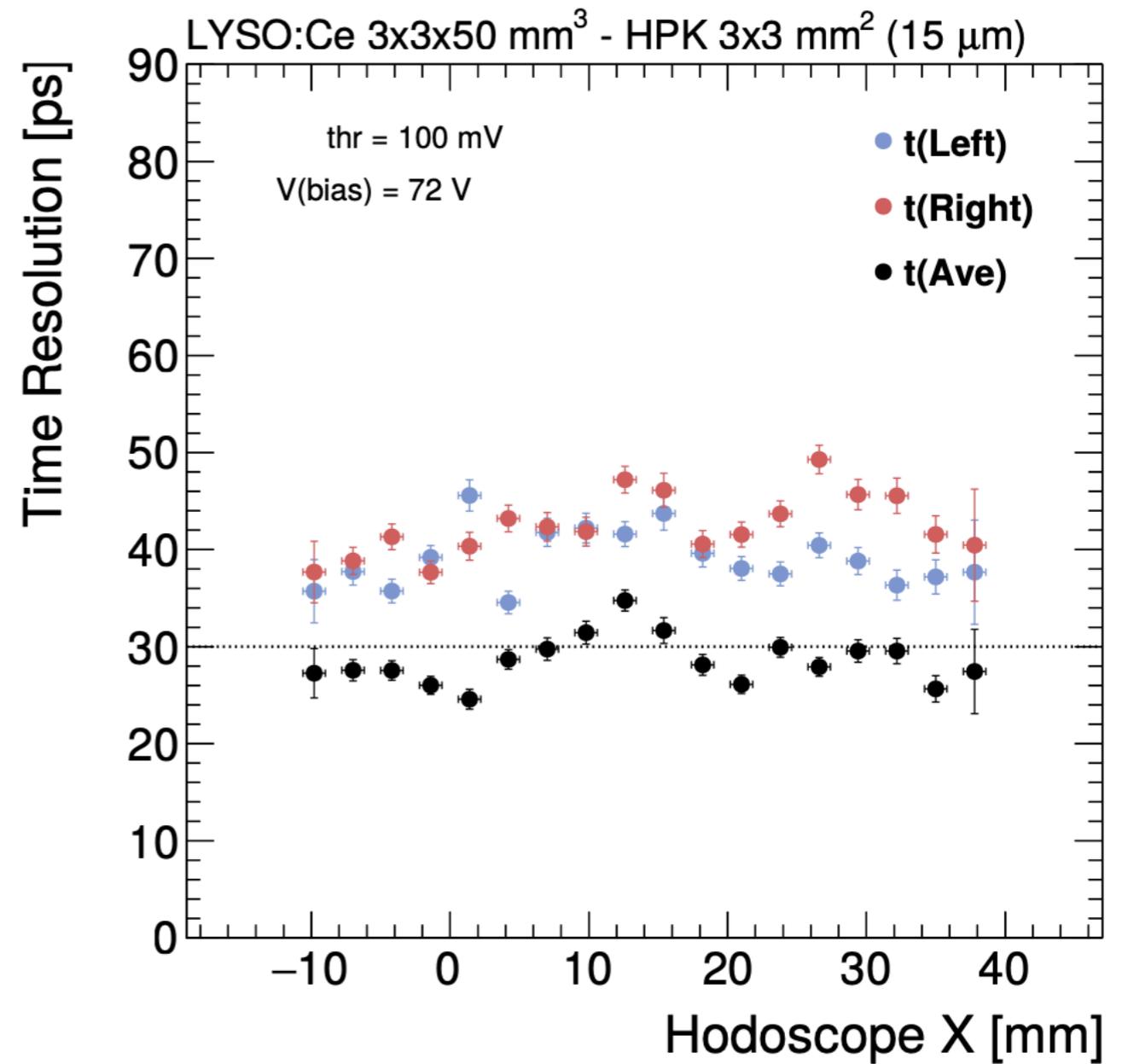
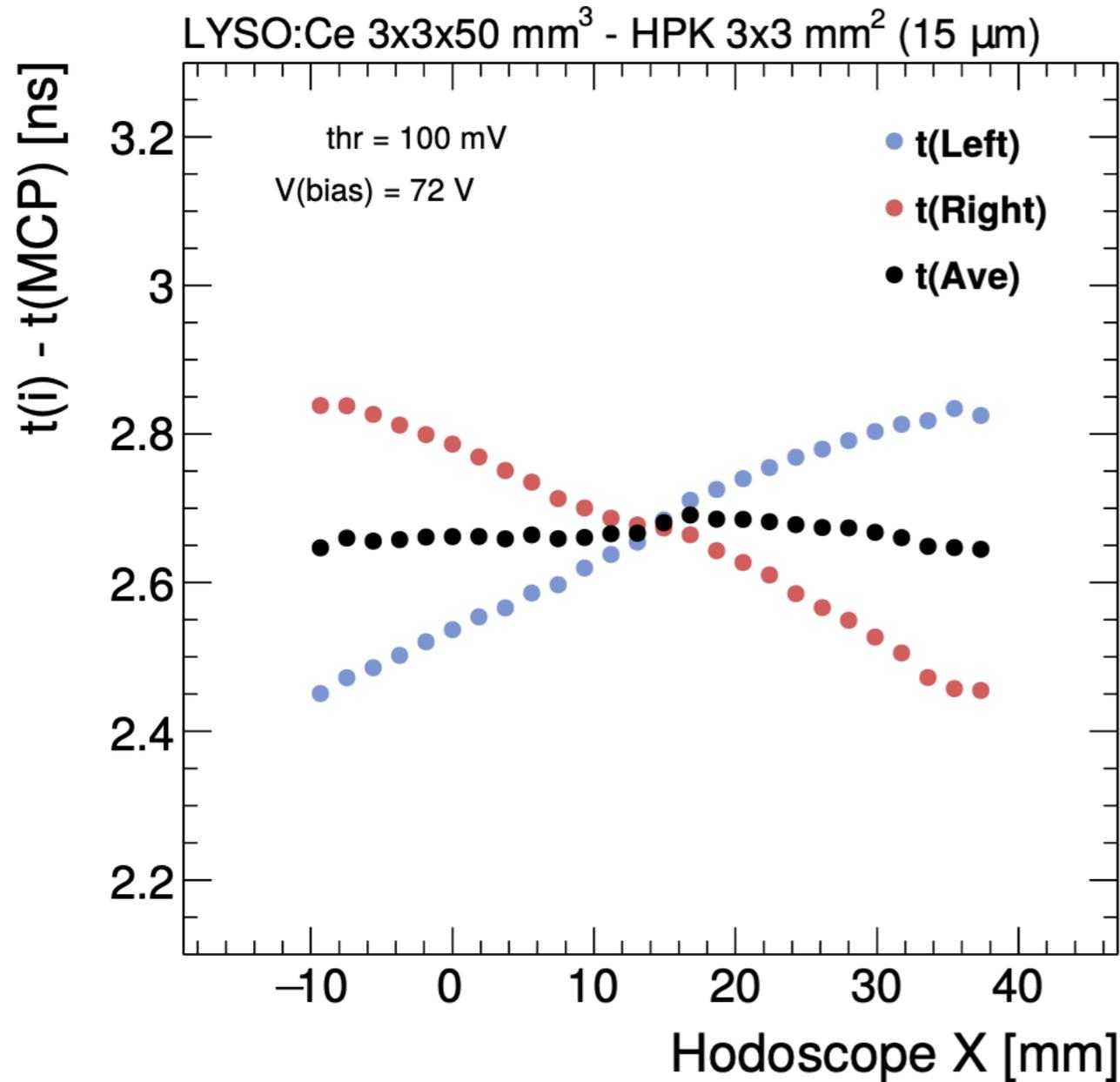
Caratterizzazione su fascio

- Prestazioni dei sensori studiate in diverse campagne di test su fascio al Fermilab



Caratterizzazione su fascio

- Prestazioni dei sensori studiate in diverse campagne di test su fascio al Fermilab

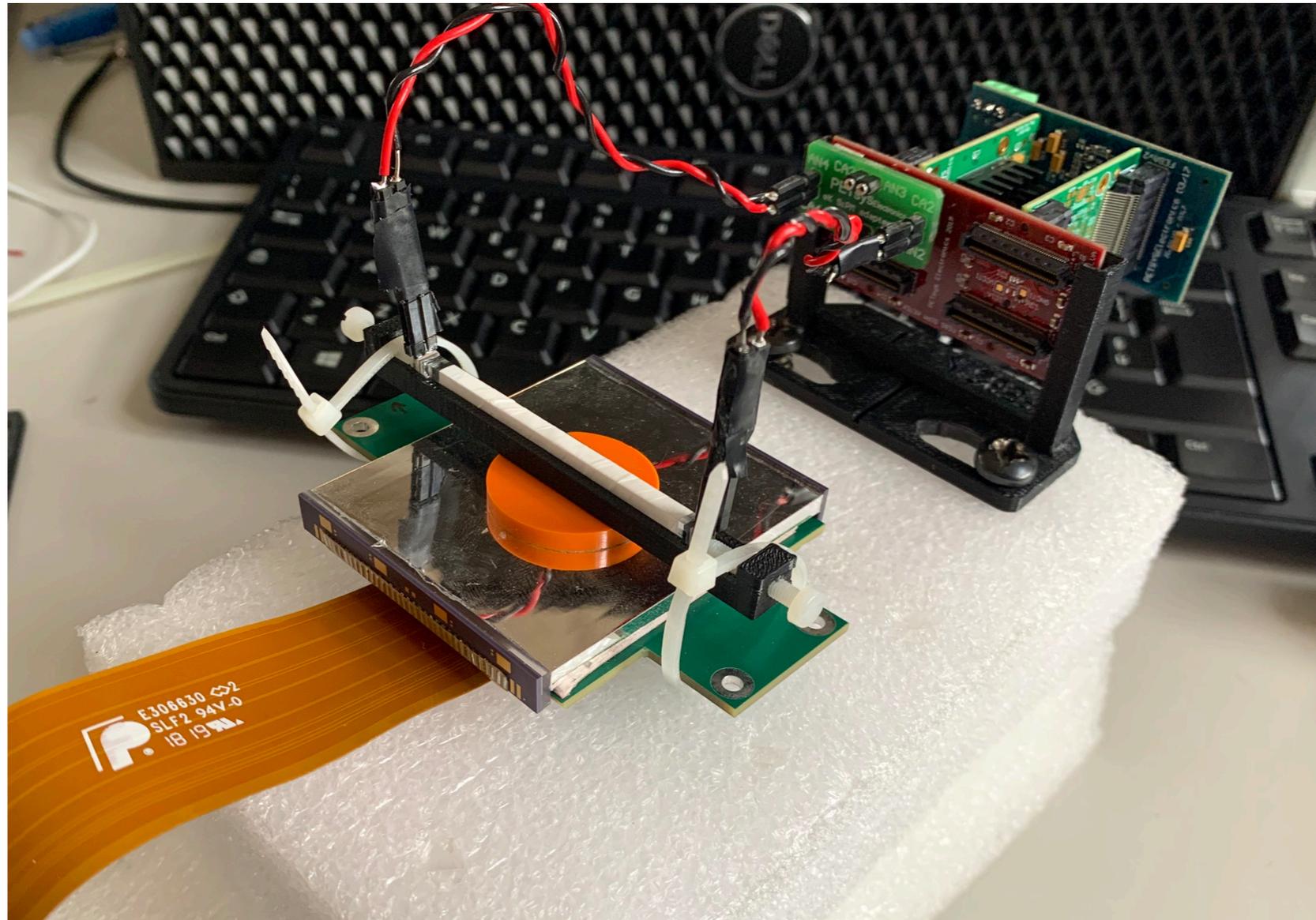


L'assemblaggio di $\frac{1}{3}$ di BTL avverrà a Bicocca

- A partire dal 2022 (pandemie permettendo):

L'assemblaggio di $\frac{1}{3}$ di BTL avverrà a Bicocca

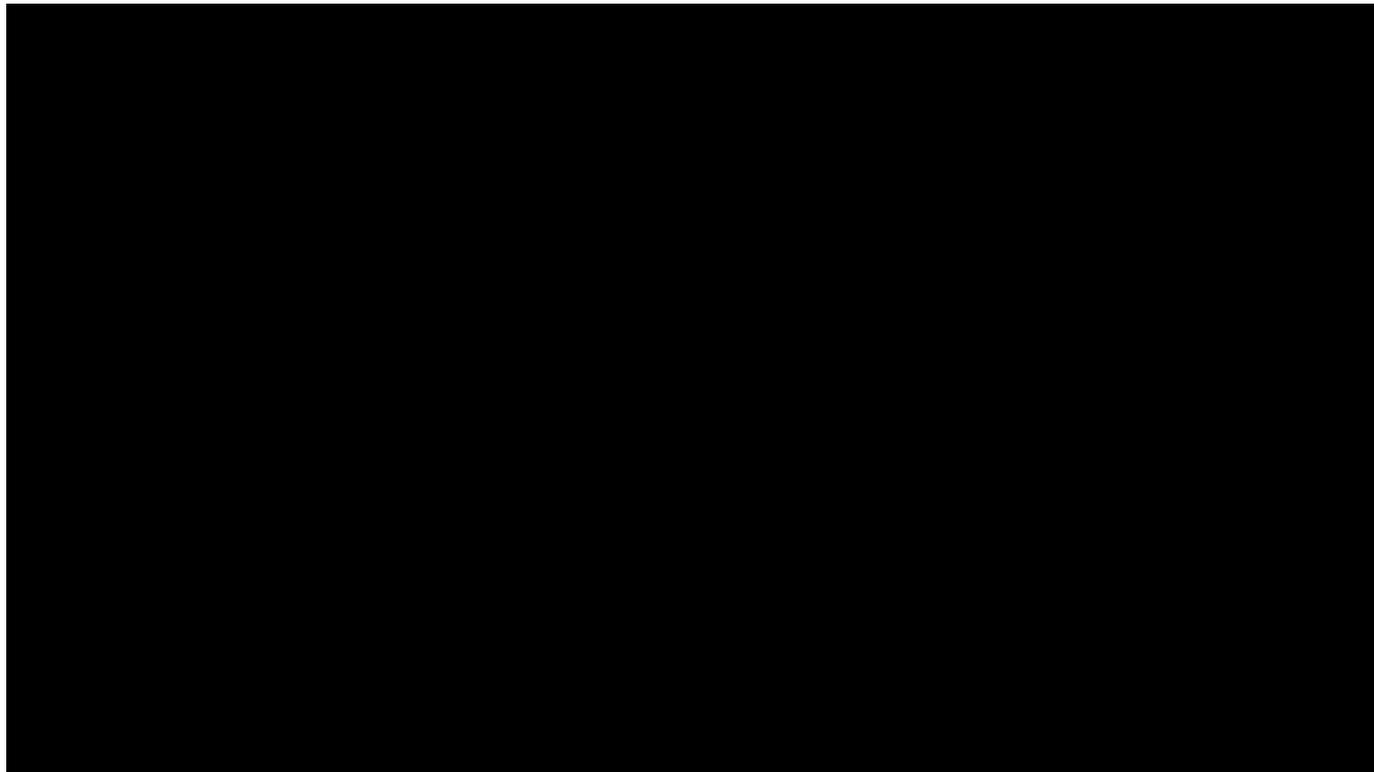
- A partire dal 2022 (pandemie permettendo):
 - assemblaggio e controllo di qualità di ~3500 moduli in 9 mesi



prototipo di modulo + ASIC in misura
(Lab 5015)

L'assemblaggio di $\frac{1}{3}$ di BTL avverrà a Bicocca

- A partire dal 2022 (pandemie permettendo):
 - assemblaggio e controllo di qualità di ~3500 moduli in 9 mesi
 - integrazione dei moduli in 24 tray e relativo controllo di qualità in 9 mesi



esercizio della procedura di assemblaggio
con prototipi del rivelatore



freezer da 2.5 m per il test dei tray a -30°C
(Lab. 4021b)

Sommario

- I prossimi 20 anni a HL-LHC si prospettano entusiasmanti per la fisica delle alte energie
- Dobbiamo prepararci alle molte *scoperte* che, sicuramente, ci saranno
 - nell'accezione più ampia di una più profonda comprensione della natura
- Le sfide tecnologiche per sfruttare al meglio il potenziale di HL-LHC sono importanti
 - alto pileup e danno da radiazione
- L'esperimento CMS, grazie ad un ambizioso programma di *upgrade*, che comprende calorimetri ad alta granularità e rivelatori di timing di precisione [*], interpreta al meglio i cambi di paradigma richiesti per trasformare una macchina adronica in una macchina di precisione

[*] questo elenco ha (almeno) un'omissione notevole, per la quale rimando al seminario di venerdì prossimo da parte di Simone

Referenze

- [1] "La scoperta della violazione di CP nel charm e il RICH di LHCb", M. Martinelli e C. Gotti, <https://indico.cern.ch/event/916972/>
- [2] "Il carattere del bosone di Higgs: una relazione da approfondire", M. Malberti e F. Brivio, <https://indico.cern.ch/event/916967/>
- [3] "Il futuro a LHC: nuove sfide per l'acquisizione e l'analisi dei dati in CMS", S. Gennai, <https://indico.cern.ch/event/916985/>