

Impatto del MIP timing detector sulla fisica di CMS per HL-LHC

Giulia Sorrentino

Per la Collaborazione CMS MTD

IFAE 2023 - Incontri di Fisica delle Alte Energie
Catania, 12-14 Aprile 2023

Il MIP timing detector

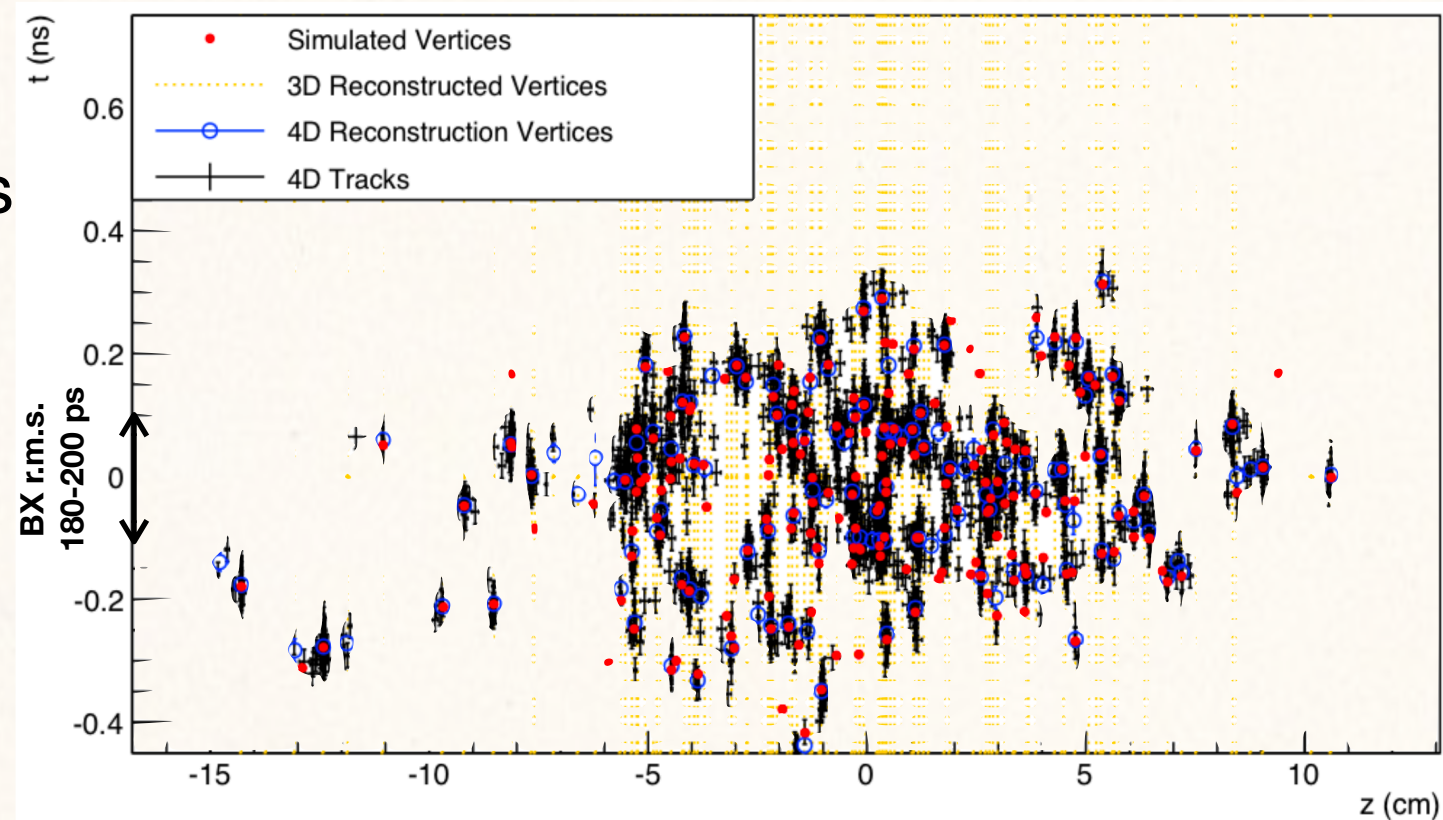
Fase di alta luminosità per LHC (HL-LHC):

- ▶ Luminosità istantanea attesa: $5-7.5 [\mu\text{b}\cdot\text{s}]^{-1}$ ($\sim 2 [\mu\text{b}\cdot\text{s}]^{-1}$ durante Run 3)
- ▶ 140-200 vertici di PU per BX (~ 60 durante Run 3)

MTD:

Misura **tempo di produzione delle MIPs**

- ▶ Vertici (e tracce) 4D
- ▶ Risoluzione temporale di 30-40 ps (50-60 ps alla fine delle operazioni)

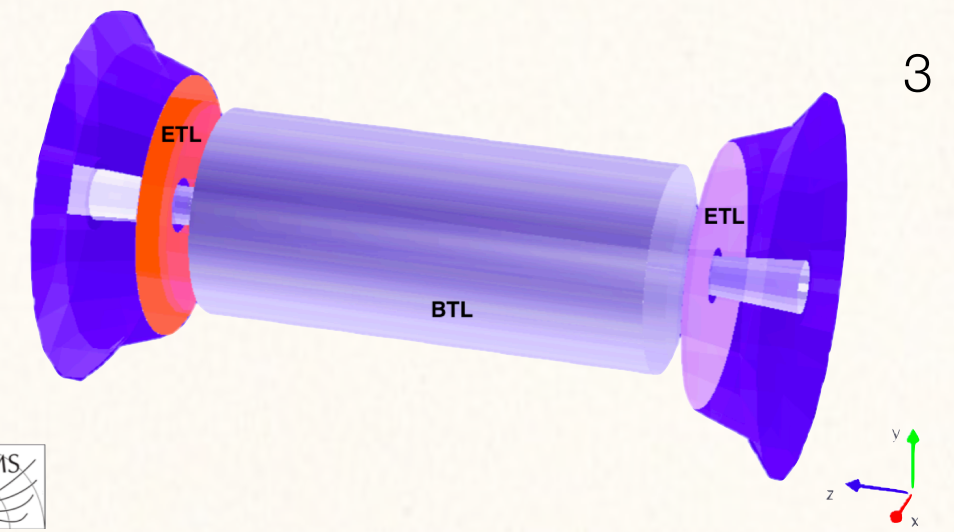


Impatto sulla fisica di CMS:

- ▶ Miglioramento della ricostruzione e selezione degli oggetti di fisica grazie alla **mitigazione degli effetti di PU** (analisi di riferimento: produzione HH)
- ▶ Introduzione di **nuove variabili temporali** (ricerca di particelle *long lived*)
- ▶ Introduzione della **PID** tramite misura del tempo di volo (fisica del b, fisica degli ioni pesanti)

Risoluzione temporale

- ▶ CMS-TDR-020: primo studio impatto di MTD sulla fisica di CMS
- ▶ CMS DP-2022/025: inclusione dei diversi scenari temporali e delle performance della PID



Barrel timing layer (BTL)

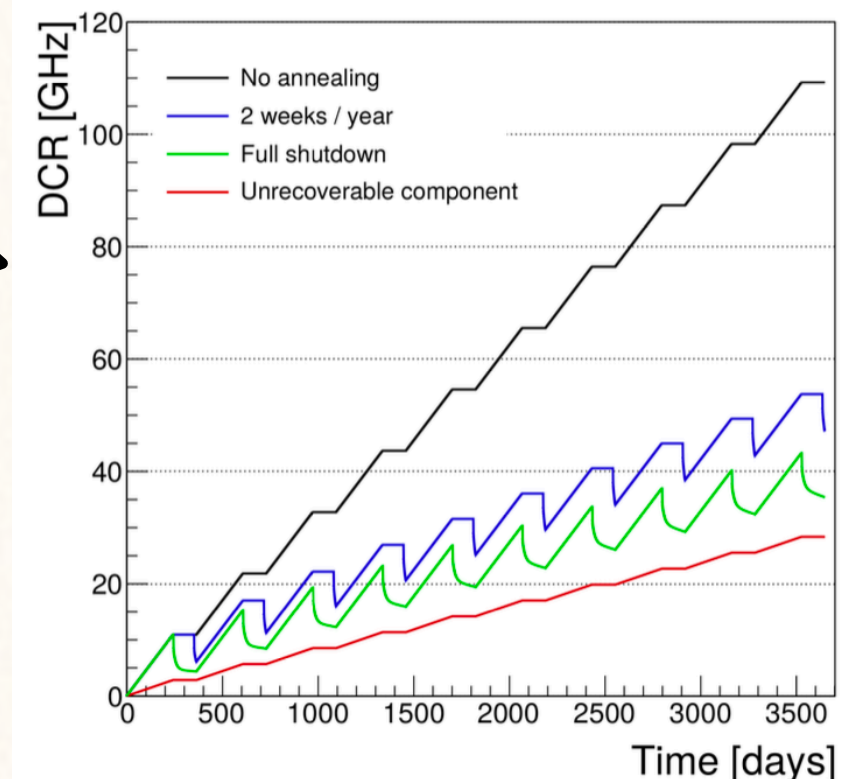
- ▶ Cristalli scintillanti (LYSO-Ce) + SiPM

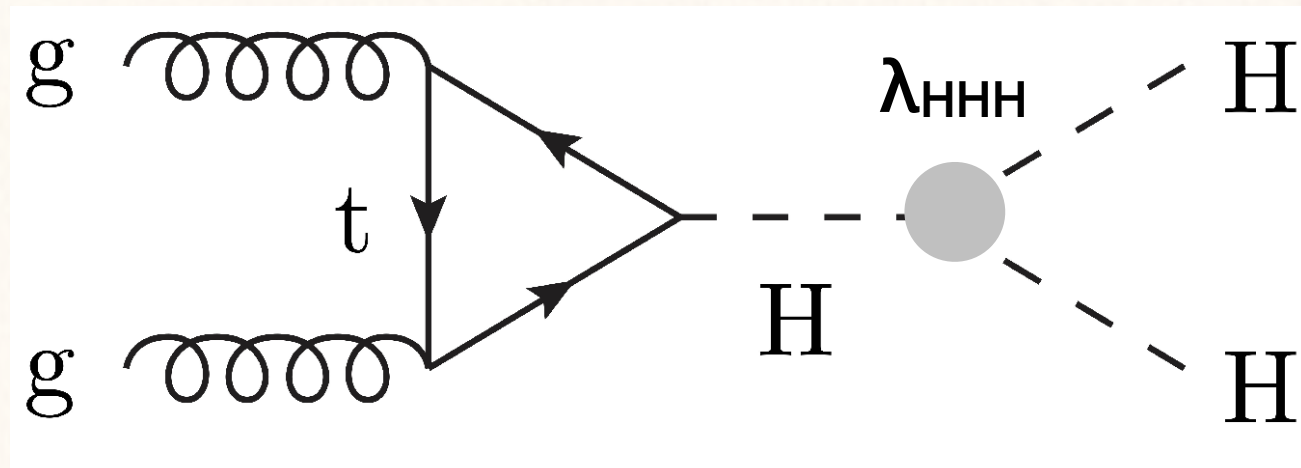
3 scenari considerati → peggioramento della risoluzione a causa delle radiazioni cui sono soggetti i SiPM

- ▶ **35 ps** – scenario nominale all’inizio delle operazioni
- ▶ **50 ps** – scenario intermedio alla fine delle operazioni (3000 fb^{-1}) in considerazione della degradazione dei moduli
- ▶ **70 ps** – scenario estremo alla fine delle operazioni che include massima degradazione dei moduli + margini di sicurezza sull’incertezza del livello di radiazione

Endcap timing layer (ETL)

- ▶ Ultra-Fast Silicon Detectors
- Risoluzione temporale eccellente fino alla fine delle operazioni (**< 40 ps**)





Tra gli obiettivi principali del programma di fisica per HL-LHC

- ▶ Unico processo che permette la misura diretta dell'auto-accoppiamento triplo dell'Higgs λ_{HHH}

Impatto di MTD studiato su **5 canali di decadimento**, successivamente combinati

Dove MTD contribuisce:

Grazie alla migliorata
reiezione delle tracce di PU

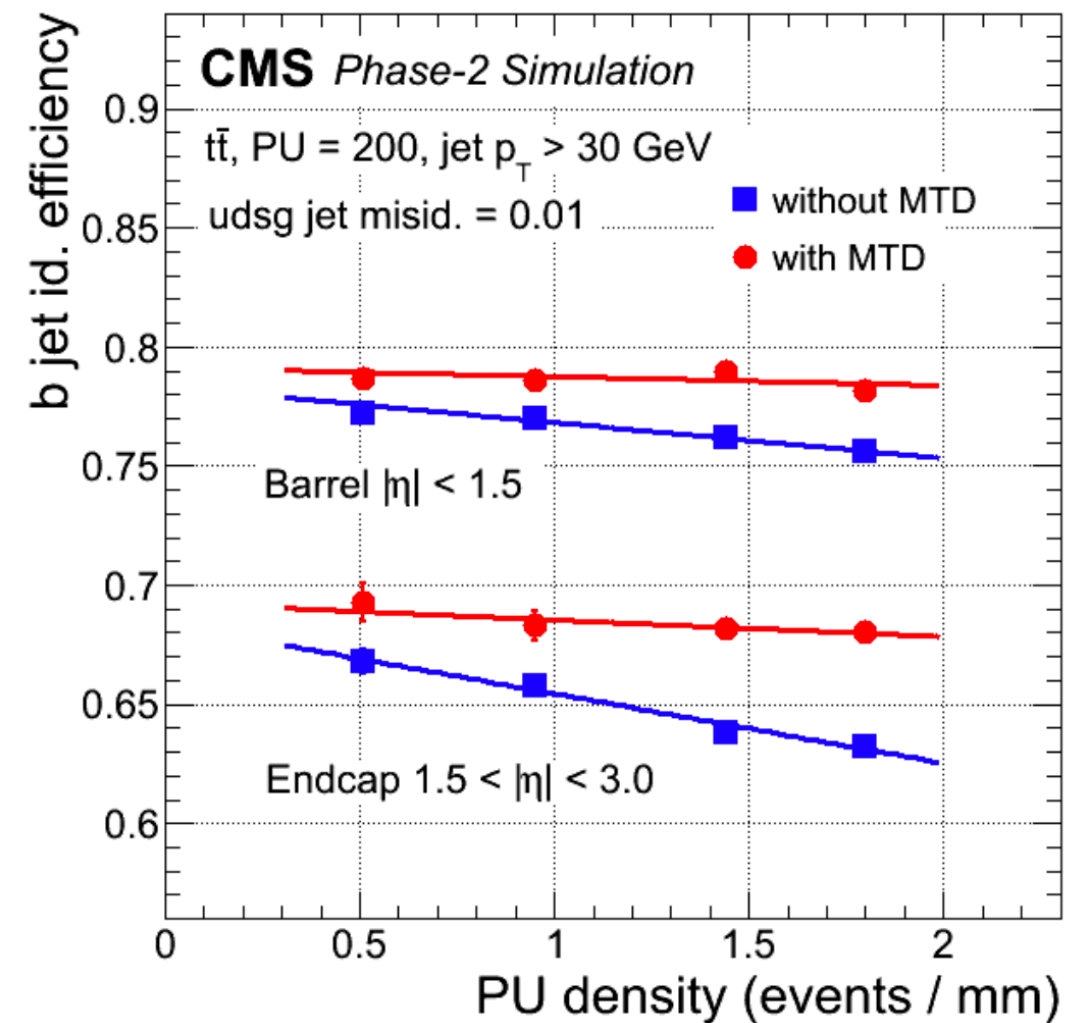
- ▶ Isolamento di leptoni e fotoni
- ▶ b-tagging
- ▶ Risoluzione p_T^{miss}
- ▶ Identificazione degli elettroni

bbbb
bb $\tau\tau$
bb $\gamma\gamma$
bbWW
bbZZ

Dove MTD contribuisce:

- ▶ Isolamento di leptoni e fotoni
- ▶ b-tagging
- ▶ Risoluzione p_T^{miss}
- ▶ Identificazione degli elettroni

Selezione aggiuntiva Δt (track, PV),
migliora efficienza isolamento fino
al 10% (18%) in BTL (ETL)

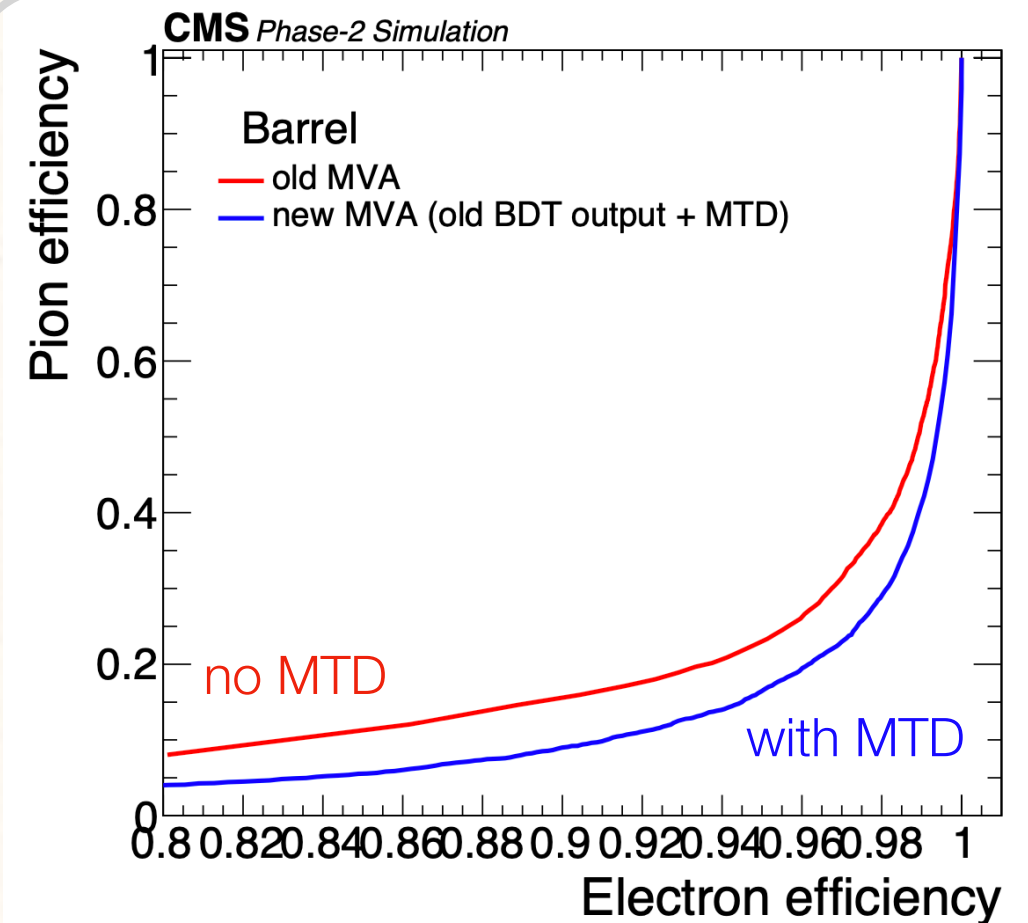


- ▶ Maggiore efficienza per b-tagging
- ▶ Aumento fino al 18% (BTL+ETL) della *signal yield* HH \rightarrow bbbb

Dove MTD contribuisce:

- ▶ Isolamento di leptoni e fotoni
- ▶ b-tagging
- ▶ Risoluzione p_T^{miss}
- ▶ Identificazione degli elettroni

- ▶ Risoluzione migliorata del 10%
→ miglioramento simile per la risoluzione della massa invariante $\tau\tau$
- ▶ Migliore separazione tra segnale $b\bar{b}\tau\tau$ e fondo $t\bar{t}$



- ▶ Pioni carichi usati come *proxy* in sostituzione dei *jets-fake* (jets ricostruiti come elettroni) → differente deposito di energia in MTD

Mitigazione pileup: produzione HH

Channel	35 ps BTL, 35 ps ETL			
	No MTD	ETL Only	BTL Only	MTD
<i>bbbb</i>	0.88	0.90	0.93	0.95
<i>bb$\tau\tau$</i>	1.30	1.38	1.52	1.60
<i>bb$\gamma\gamma$</i>	1.70	1.75	1.85	1.90
Combined	2.31	2.40	2.57	2.66

→ 2.75 con *bbWW* e *bbZZ*

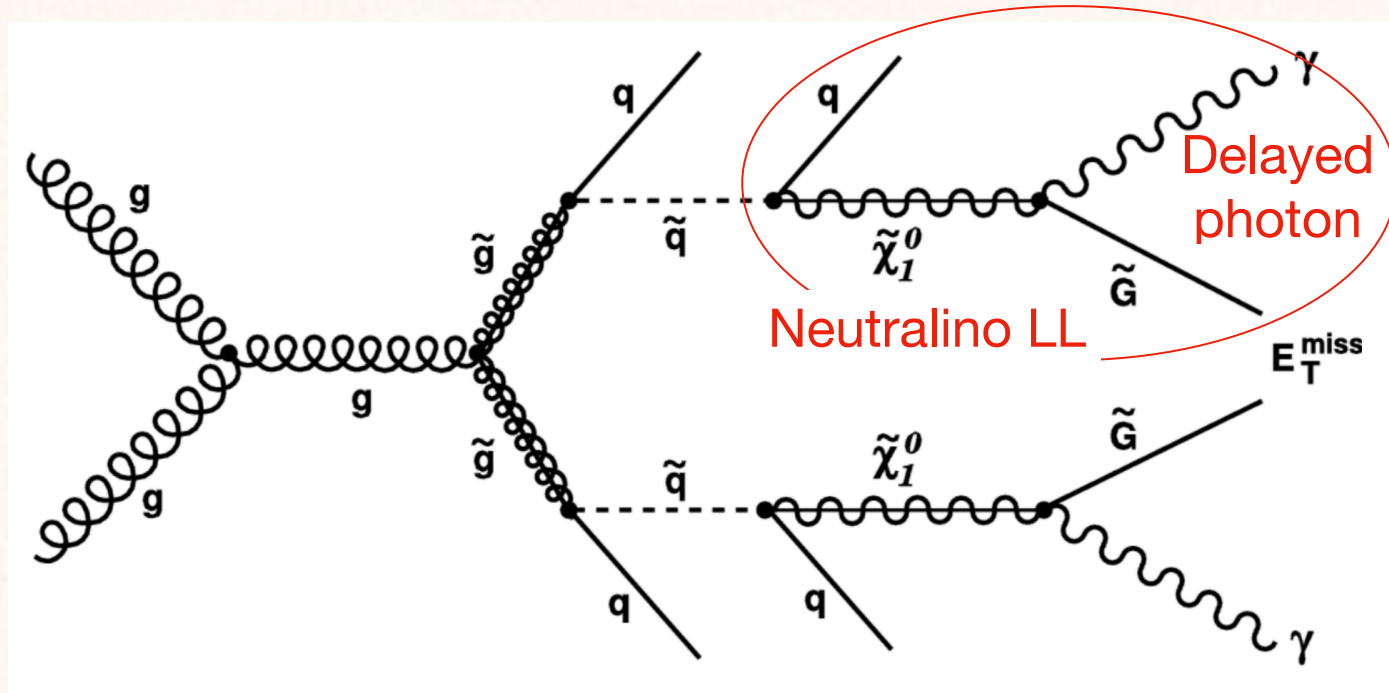
Con MTD, guadagno anche nello scenario di 70ps (BTL) rispetto allo scenario senza MTD

Channel	70 ps BTL, 35 ps ETL			
	No MTD	ETL Only	BTL Only	MTD
<i>bbbb</i>	0.88	0.90	0.92	0.94
<i>bb$\tau\tau$</i>	1.30	1.38	1.36	1.44
<i>bb$\gamma\gamma$</i>	1.70	1.75	1.76	1.81
Combined	2.31	2.40	2.41	2.51

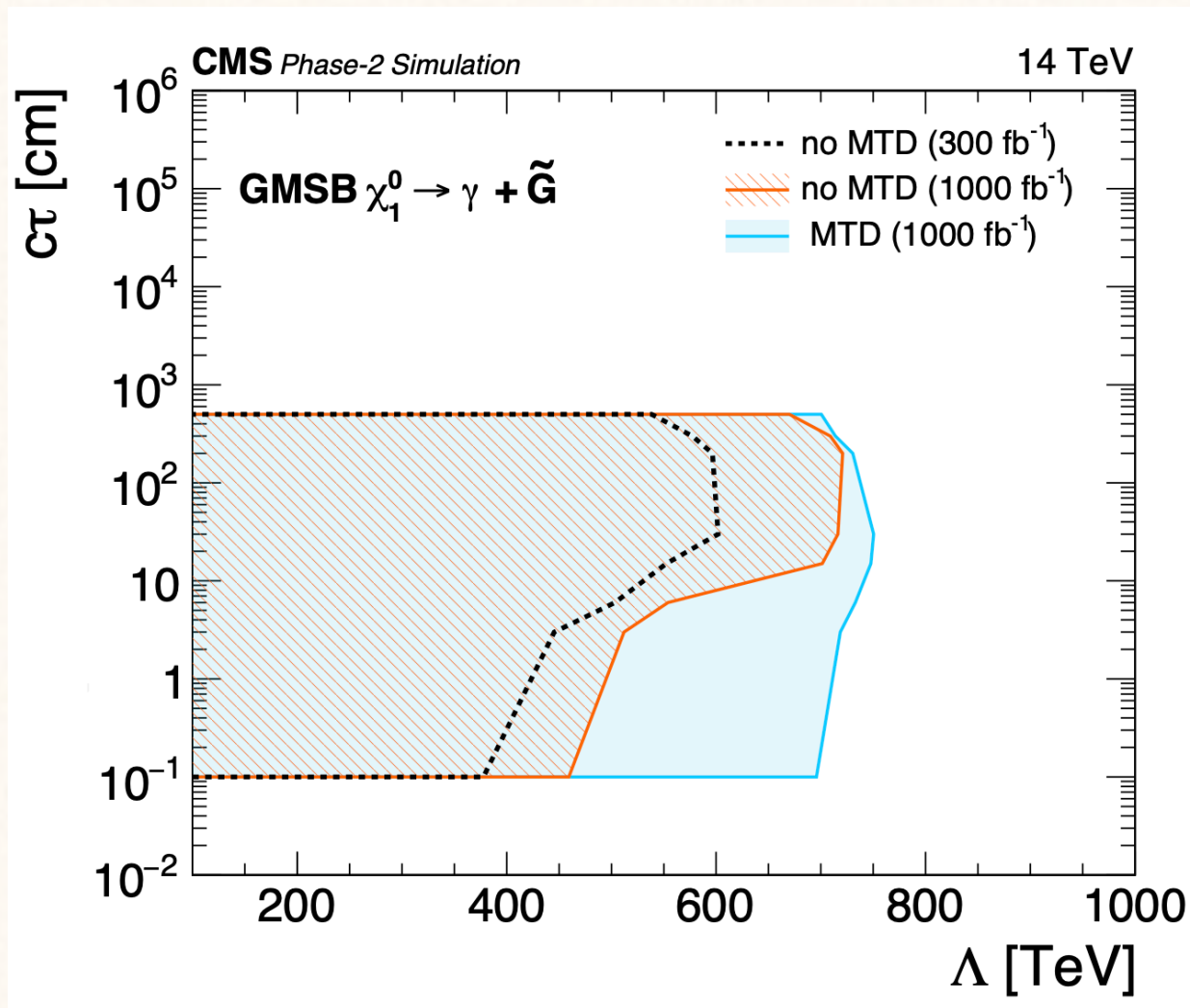
→ 2.60 con *bbWW* e *bbZZ*

- ▶ Quasi 3σ di significatività attesa per la produzione HH (3000 fb^{-1})
- ▶ Per ottenere la stessa significatività senza MTD servirebbe un aumento di luminosità integrata, rispettivamente, del 31% e 17%

Ricerca di particelle LL: delayed photons



- ▶ La **risoluzione del tempo di volo** del fotone è un elemento cruciale
- ▶ Migliore risoluzione → migliore separazione del segnale d al fondo → possono essere sondate vite medie più brevi



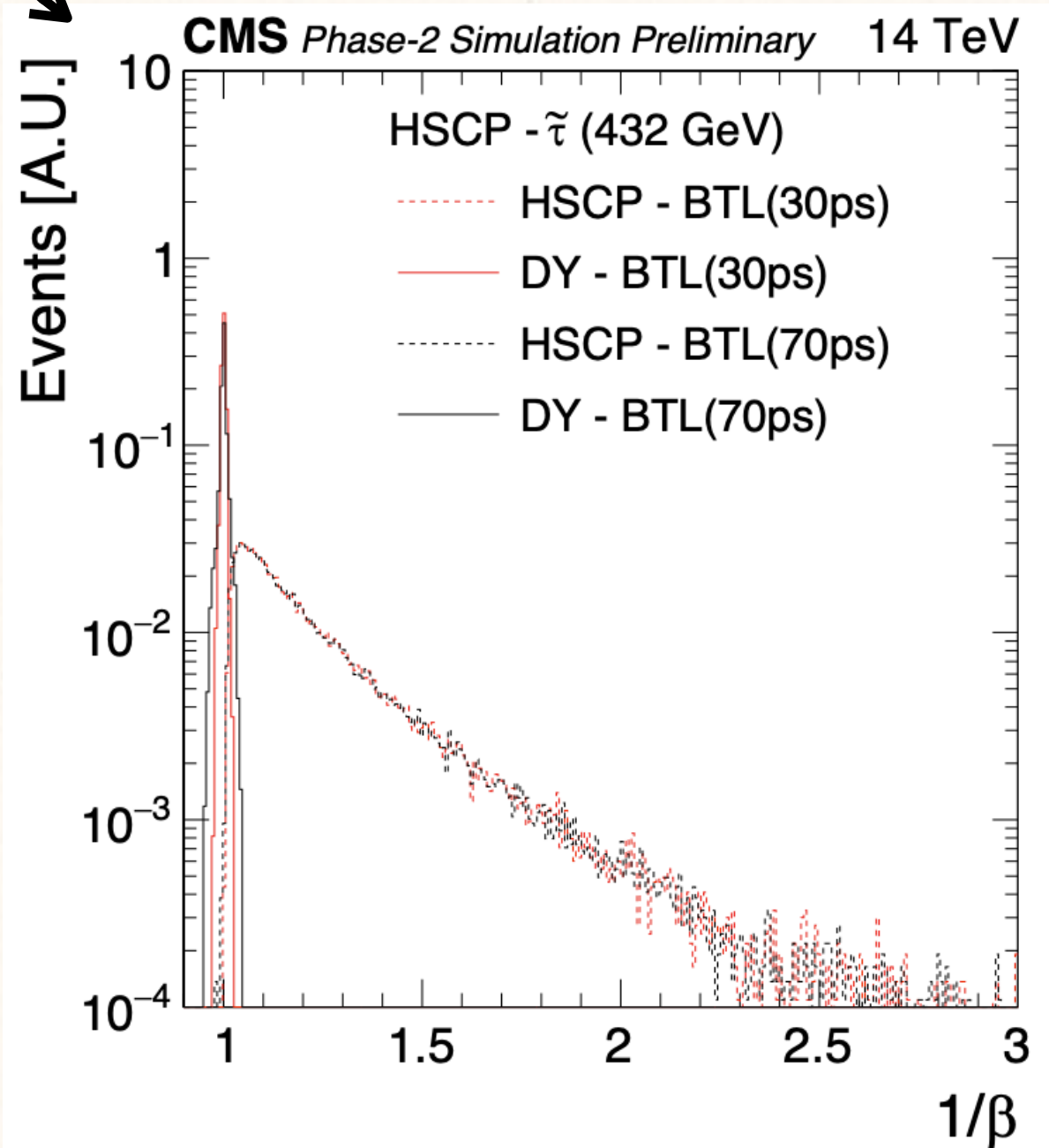
$$\sigma_{\text{TOF}} = \sqrt{\sigma_{\text{vtx}}^2 + \sigma_{\text{ECAL}}^2}$$

- ▶ MTD determinante per σ_{vtx} (~10 ps) → misurato a partire dalla risoluzione delle tracce associate al vertice primario
- ▶ Risoluzione ECAL (Fase 2) ~ 30 ps

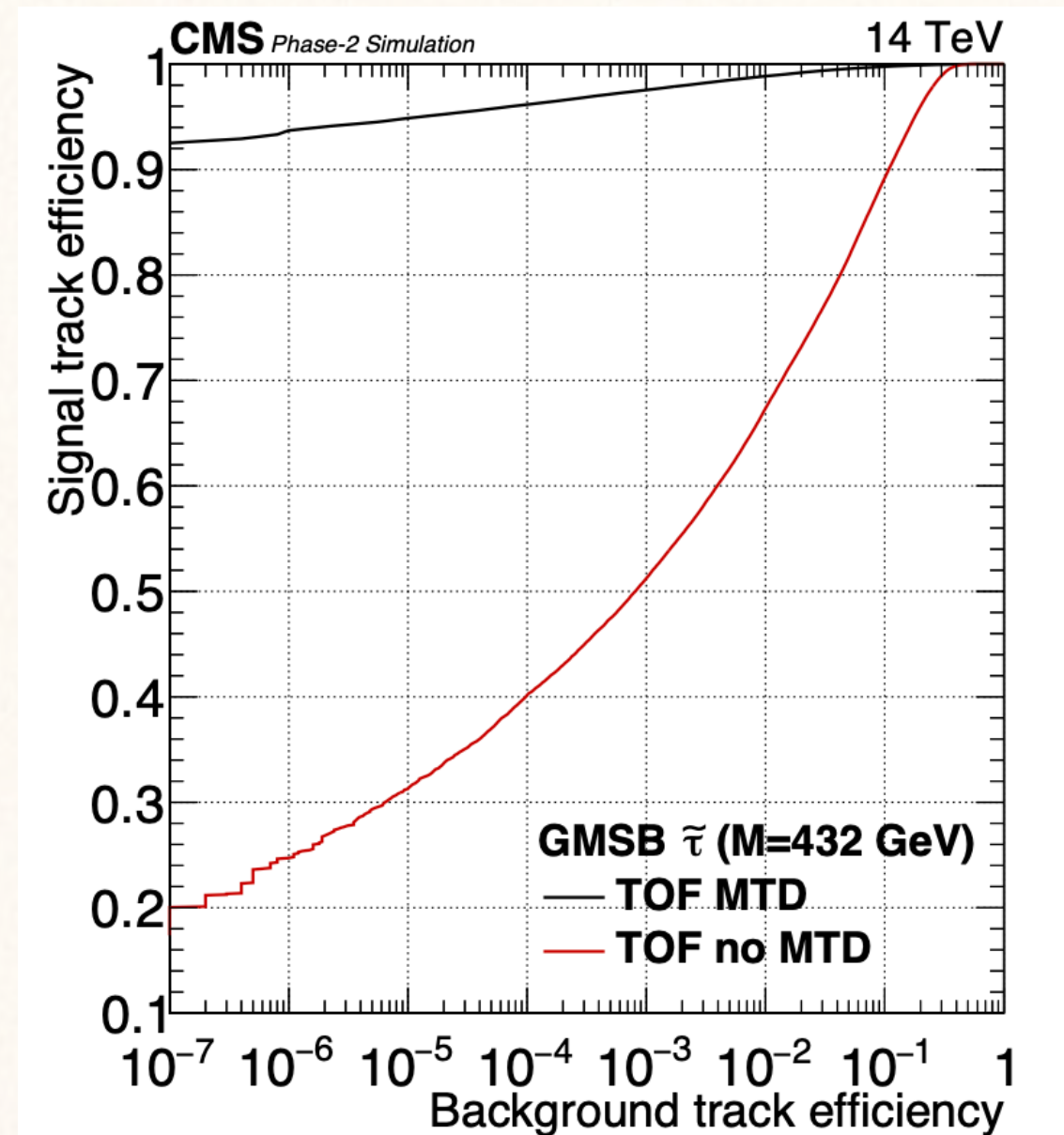
Ricerca di particelle LL: Heavy Stable Charged Particles ⁹

$$\frac{1}{\beta} = \frac{c(t_{\text{MTD}} - t_{\text{PV}})}{L_{\text{pathlength}}}$$

- ▶ Vita media molto lunga
- ▶ Velocità della particella (β) misurata da MTD usata come discriminante
- ▶ Risoluzione temporale determinante nella separazione tra segnale e fondo



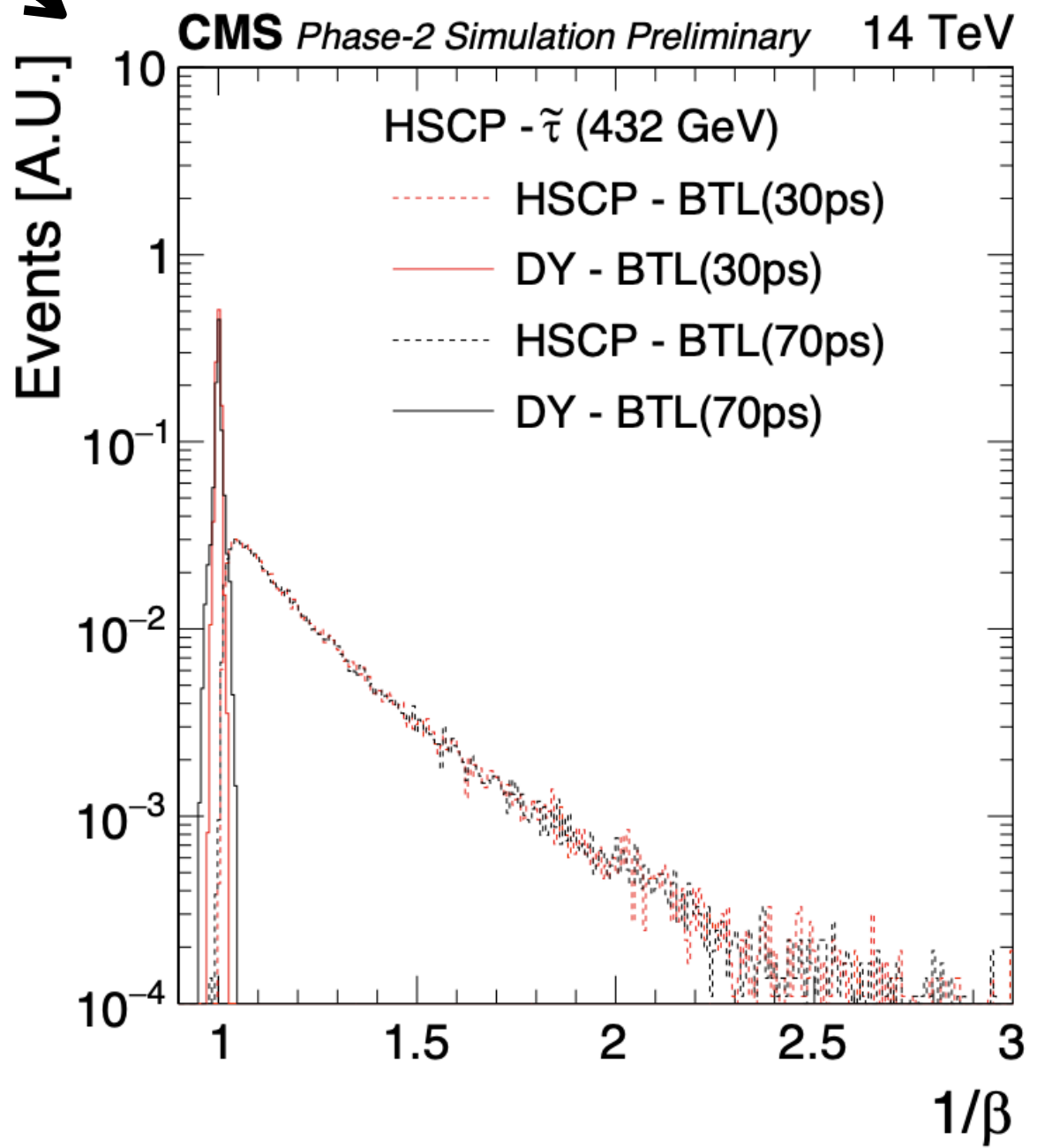
TDR: curva ROC segnale vs. fondo (confronto con e senza MTD)



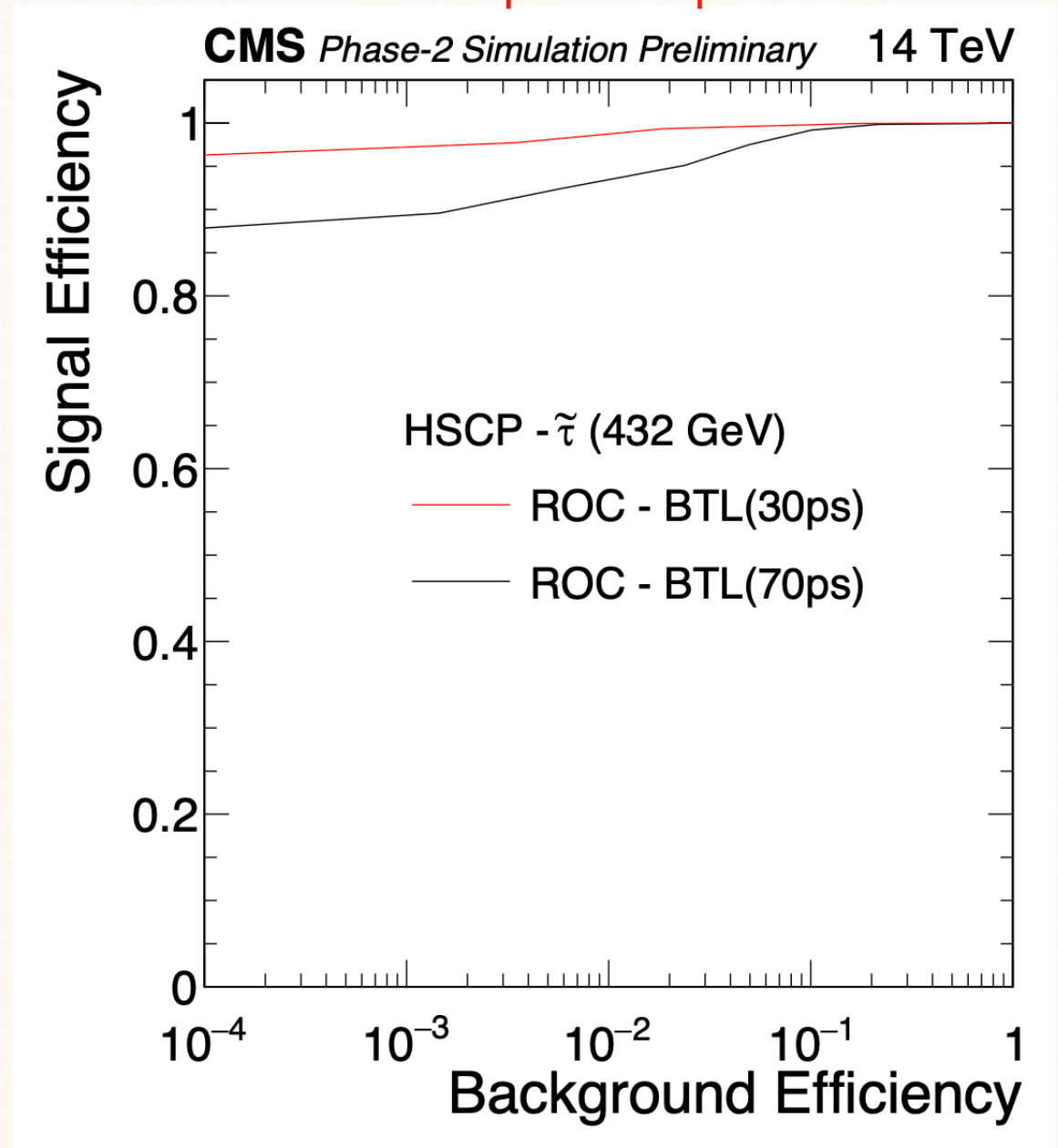
Ricerca di particelle LL: Heavy Stable Charged Particles ¹⁰

- ▶ Vita media molto lunga
- ▶ Velocità della particella (β) misurata da MTD usata come discriminante
- ▶ Risoluzione temporale determinante nella separazione tra segnale e fondo

$$\frac{1}{\beta} = \frac{c(t_{\text{MTD}} - t_{\text{PV}})}{L_{\text{pathlength}}}$$



Curva ROC negli scenari temporali di 30 ps e 70 ps

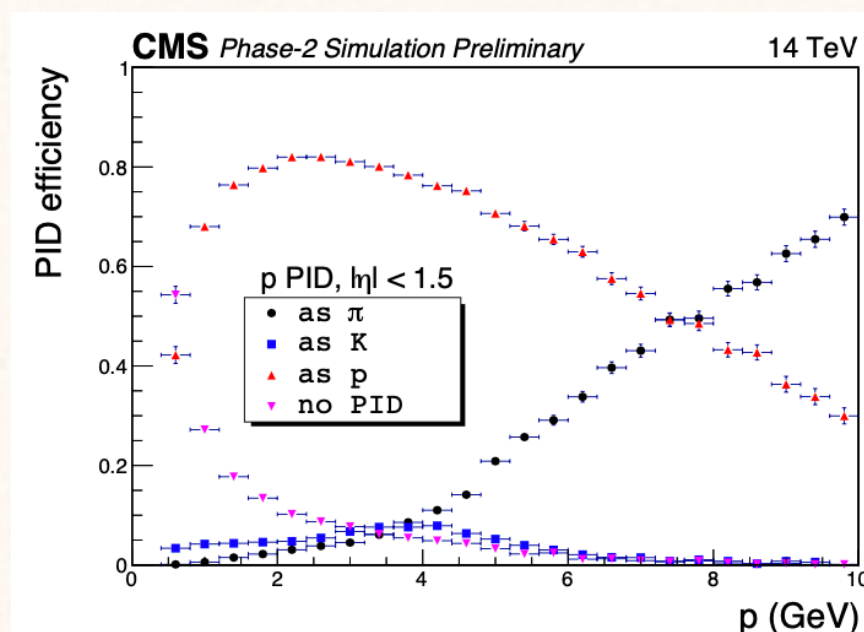


Identificazione di particelle (PID)

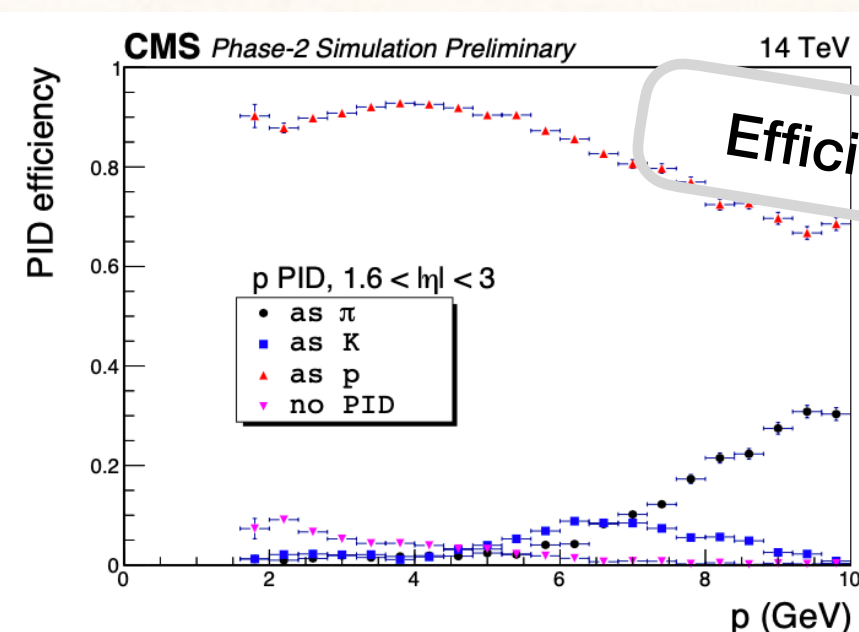
- ▶ MTD abilita la PID tramite misura del tempo di volo
- ▶ Derivazione della PID dagli algoritmi di *vertexing* 4D



La ricostruzione dei vertici 4D richiede in input il tempo della traccia estrapolato al punto di minimo approccio → implica assunzione sulla massa

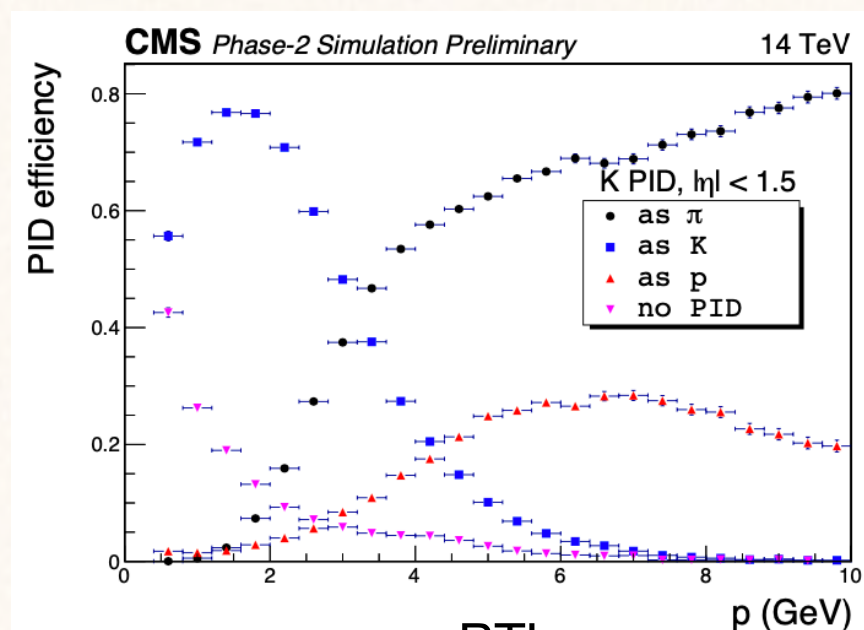


BTL

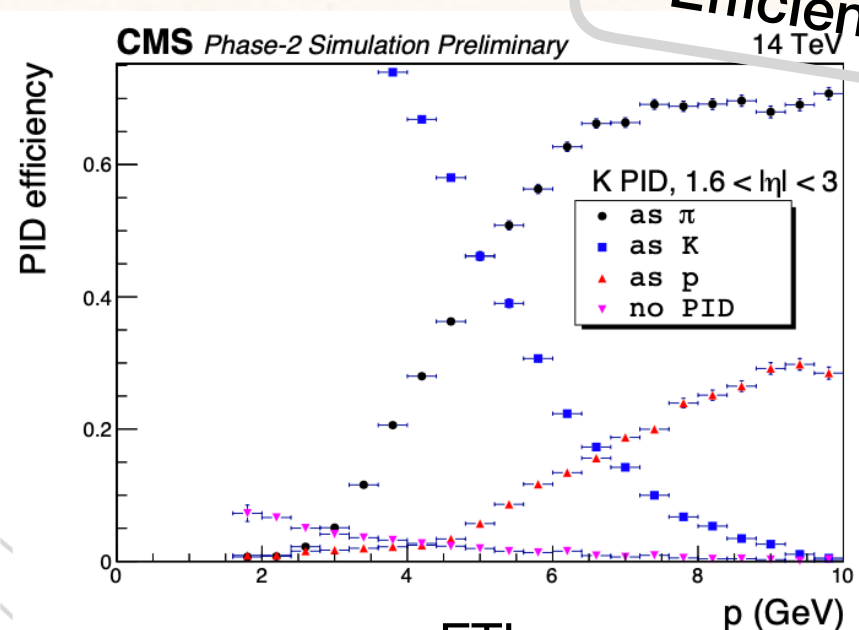


Efficienza protoni

ETL



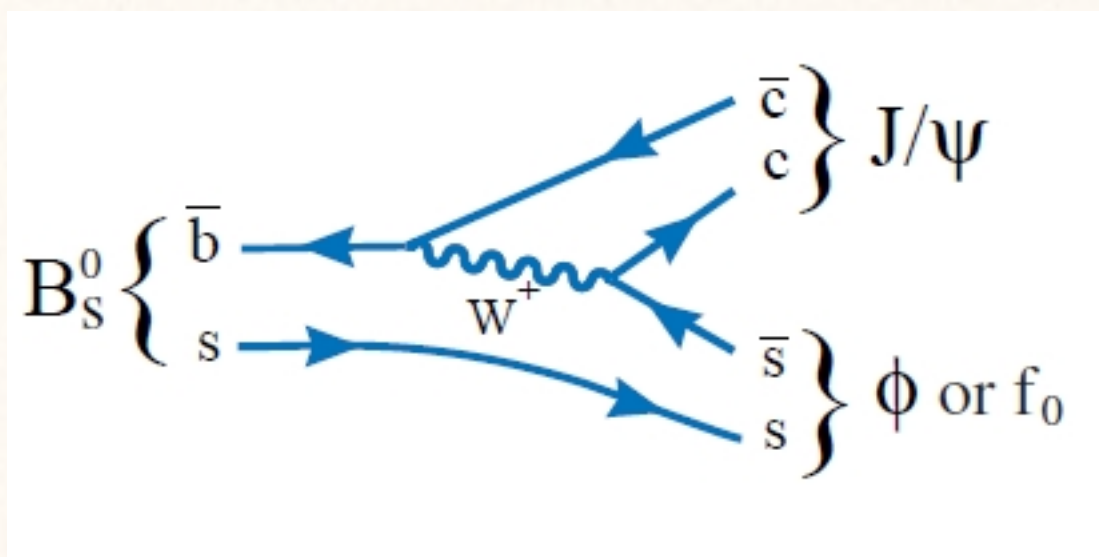
BTL



Efficienza kaoni

ETL

Violazione di CP in $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi(1020)$



- ▶ Analisi di riferimento per testare capacità della PID per la fisica del b (per gli studi sulla fisica degli ioni pesanti: [CMS-TDR-020](#) and [CMS-DP-2021-037](#))
- ▶ Necessario accurato *flavor tagging* → incide sui termini sensibili alla fase di violazione di CP

La figura di merito utilizzata è il “tagging power”

- ▶ Efficienza di tagging $\epsilon_{tag} = N_{tag}/N_{tot}$
- ▶ Mistag fraction $\omega_{tag} = N_{mistag}/N_{tag}$



$$P_{tag} = \epsilon_{tag}(1 - 2\omega_{tag})^2$$

- ▶ DNN *same-side tagger*: utilizza la correlazione di carica tra il segno del quark s e la carica di un kaone soft proveniente dallo stesso vertice primario del mesone B
- ▶ DNN *tagger* aggiornato per incorporare le informazioni fornite dalla PID

PID scenario	Gains in P_{tag} (3000 fb ⁻¹)
MC truth	+66%
PID with $\sigma_{BTL} = 40$ ps	+24%
PID with $\sigma_{BTL} = 70$ ps	+14%

Guadagno in P_{tag} → simile guadagno in statistica

Conclusioni

- ▶ MTD è un **rivelatore chiave** per mantenere le performance di CMS eccellenti durante la fase di alta luminosità di LHC
 - ▶ Contributo importante in analisi cruciali (HH, violazione CP...)
 - ▶ New PID capabilities enabled by using TOF
- ▶ **30-40 ps di risoluzione temporale**, a causa dei danni da radiazione **aumento a 50-60 ps** (per BTL) alla fine delle operazioni
- ▶ **Il contributo di MTD rimane significativo**, anche nello scenario più estremo considerato (70 ps)

Backup



35 ps BTL, 35 ps ETL				
Channel	No MTD	ETL Only	BTL Only	MTD
<i>bbbb</i>	0.88	0.90	0.93	0.95
<i>bbττ</i>	1.30	1.38	1.52	1.60
<i>bbγγ</i>	1.70	1.75	1.85	1.90
Combined	2.31	2.40	2.57	2.66 → 2.75 con bbWW e bbZZ

50 ps BTL, 50 ps ETL				
Channel	No MTD	ETL Only	BTL Only	MTD
<i>bbbb</i>	0.88	0.90	0.93	0.95
<i>bbττ</i>	1.30	1.36	1.44	1.50
<i>bbγγ</i>	1.70	1.72	1.78	1.80
Combined	2.31	2.37	2.47	2.53 → 2.63 con bbWW e bbZZ

70 ps BTL, 35 ps ETL				
Channel	No MTD	ETL Only	BTL Only	MTD
<i>bbbb</i>	0.88	0.90	0.92	0.94
<i>bbττ</i>	1.30	1.38	1.36	1.44
<i>bbγγ</i>	1.70	1.75	1.76	1.81
Combined	2.31	2.40	2.41	2.51 → 2.60 con bbWW e bbZZ

- ▶ Quasi 3σ di significatività attesa per la produzione HH (3000 fb^{-1})
- ▶ Per ottenere la stessa significatività senza MTD servirebbe un aumento di luminosità integrata, rispettivamente, del 31%, 20% e 17%

- ▶ MTD abilita la PID tramite misura del tempo di volo
- ▶ Derivazione della PID dagli algoritmi di *vertexing* 4D

↪ La ricostruzione dei vertici 4D richiede in input il tempo della traccia estrapolato al punto di minimo approccio → implica assunzione sulla massa

Procedura iterativa 4D (elementi principali)

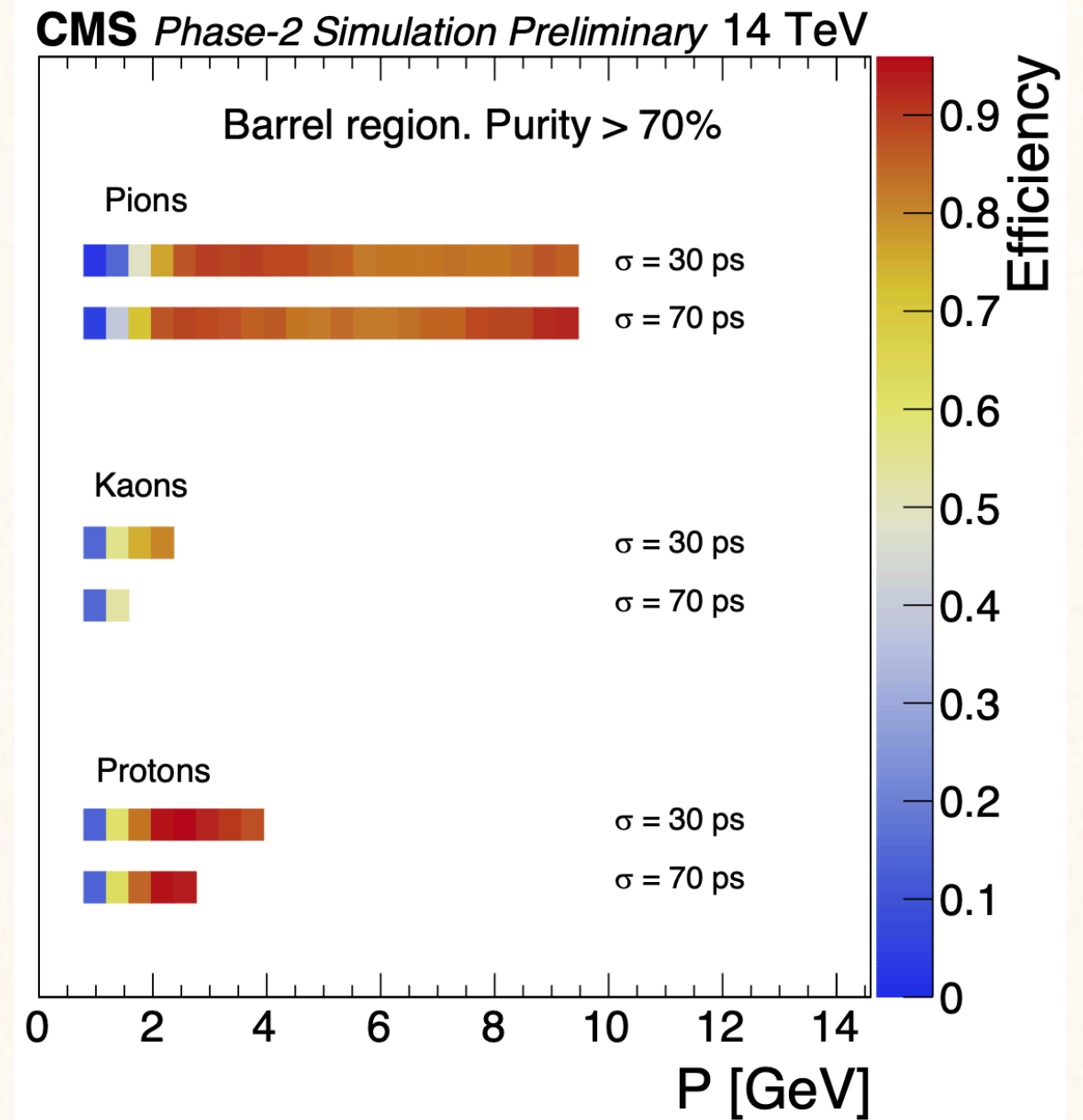
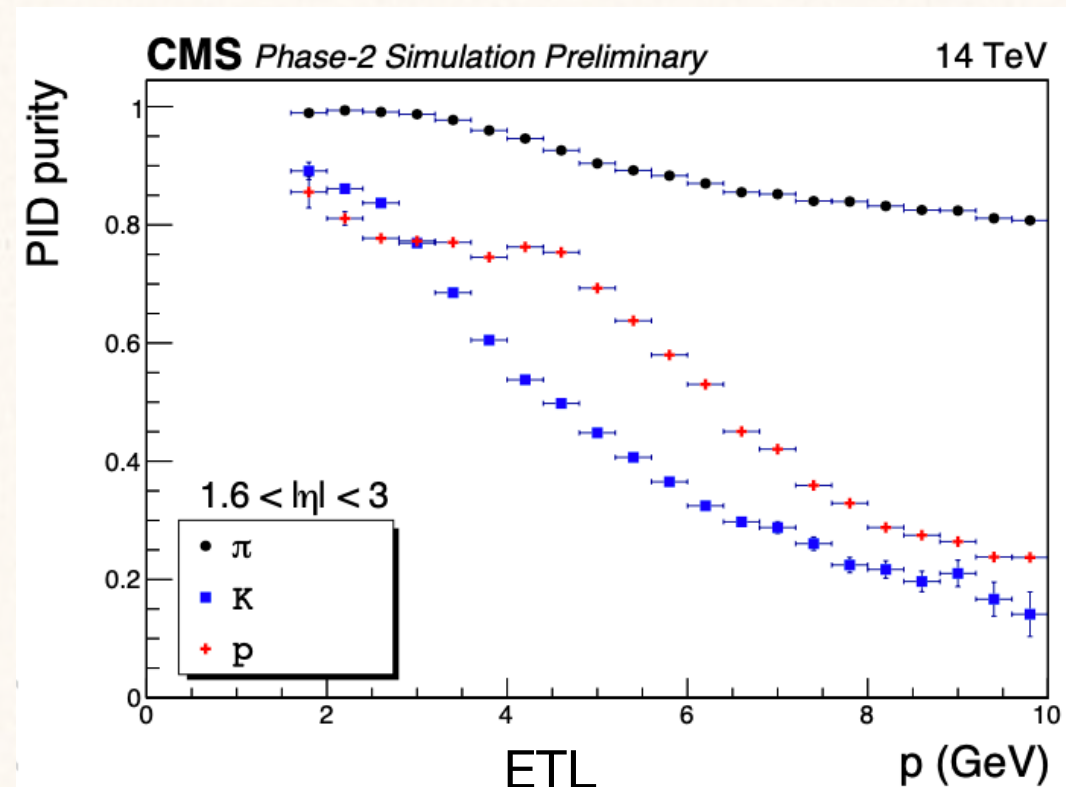
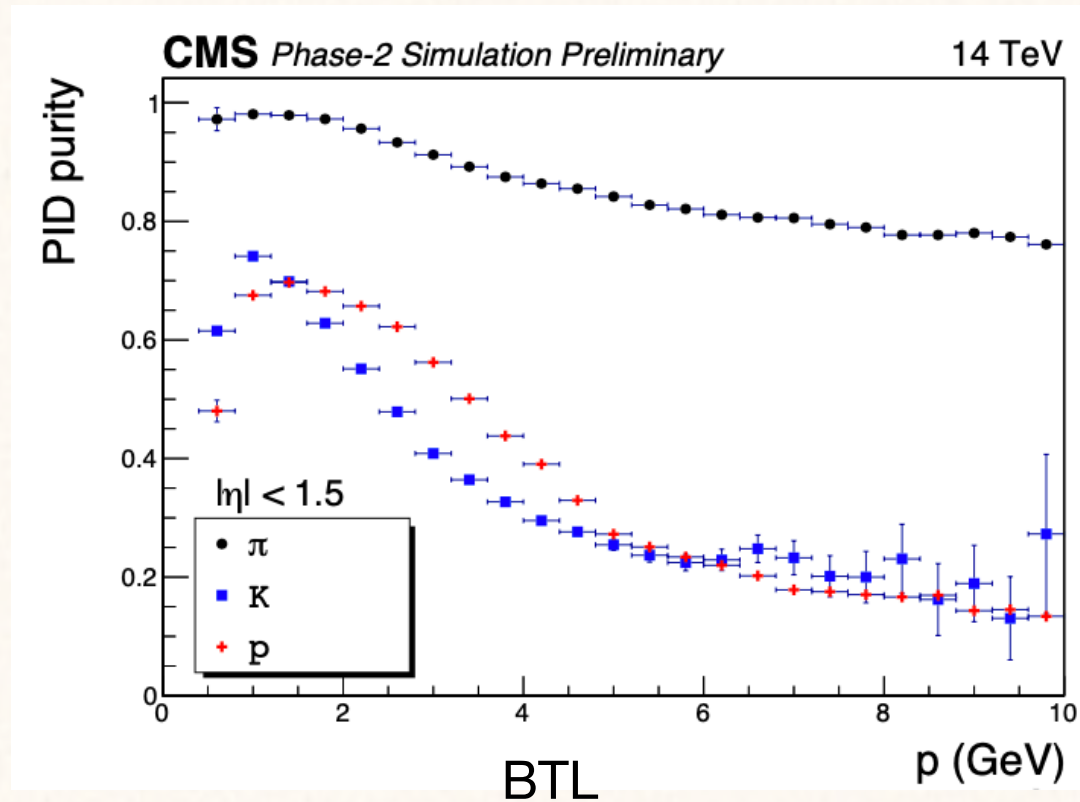
- ▶ Ipotesi massa π → prima iterazione dell'algoritmo di *vertexing* 4D e calcolo t_{PV}

- ▶ PID →
$$\chi_{\text{hyp}}^2 = \frac{(z_{\text{PCA}} - z_{\text{PV}})^2}{\sigma_{z_{\text{PCA}}}^2} + \frac{(t_{\text{PCA,hyp}} - t_{\text{PV}})^2}{\sigma_{t_{\text{MTD}}}^2}$$

- ▶ Seconda iterazione dell'algoritmo di *vertexing* 4D con nuova massa stimata tramite PID

Identificazione di particelle (PID): purezza

- Purezza calcolata usando eventi tt con PU 200



- Efficienze PID per BTL, per gli scenari temporali di 30 ps e 70 ps (purezza $> 70\%$)