



SCUOLA
NORMALE
SUPERIORE



European Research Council
Established by the European Commission



Compact Muon Solenoid

IFAE 2024: Incontri di Fisica delle Alte Energie, 3-5 Aprile 2024, Firenze

Performance e nuovi sviluppi

nella ricostruzione delle tracce

in CMS durante il Run 3

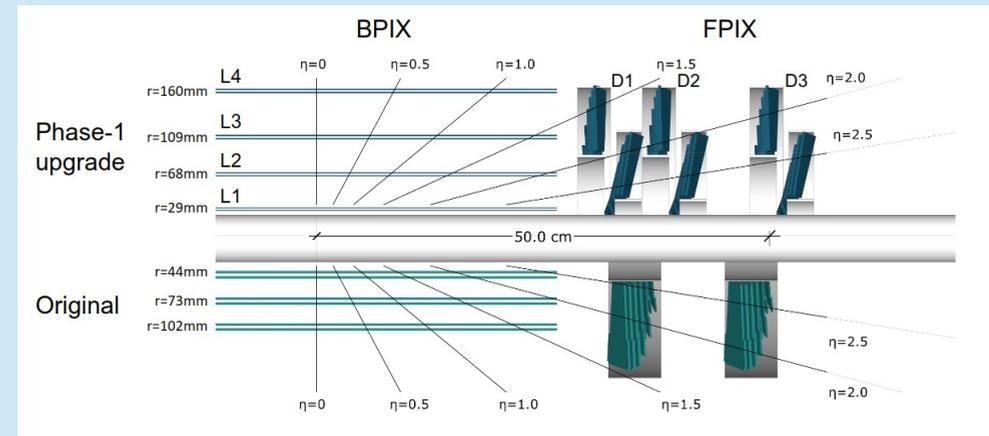
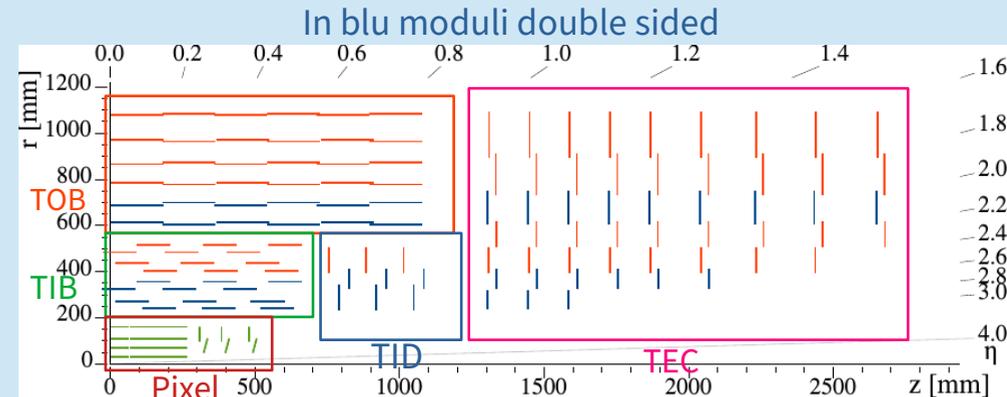
Davide Bruschini^{1,2}, a nome della collaborazione CMS

1. Scuola Normale Superiore, Pisa

2. INFN Sezione di Pisa

Ricostruzione delle tracce in CMS [1]

- Tracciatore immerso in un campo magnetico solenoidale di 3.8 T.
- Due tecnologie:
 - Pixel: 4 layer nella regione centrale e 3 dischi negli end-caps
 - Micro-strip di silicio: TIB, TID, TOB, TEC.
- In CMS algoritmo di iterative tracking:
 - Multiple iterazioni della sequenza di ricostruzione, prima per cercare le tracce facilmente identificabili e le loro hit vengono rimosse, le successive cercano tracce in regioni cinematiche più complesse
 - In alcune iterazioni seeding fatto solo con pixel e in altre solo con strip.

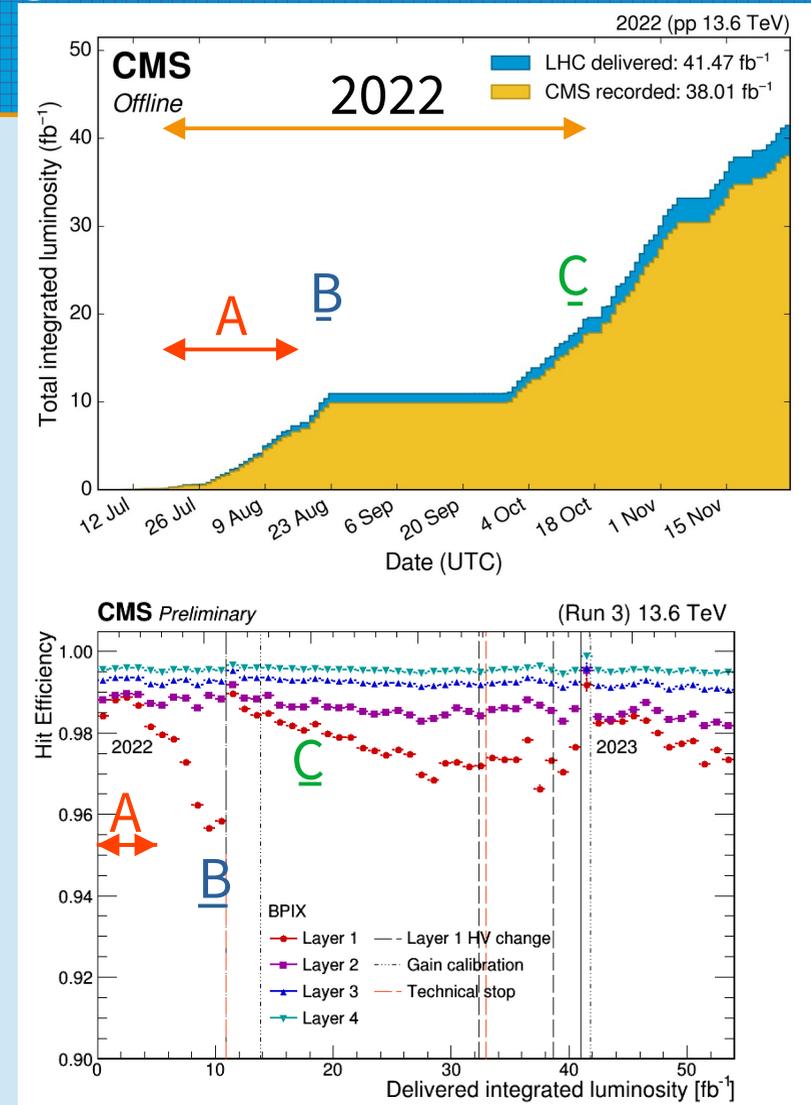


Outlook

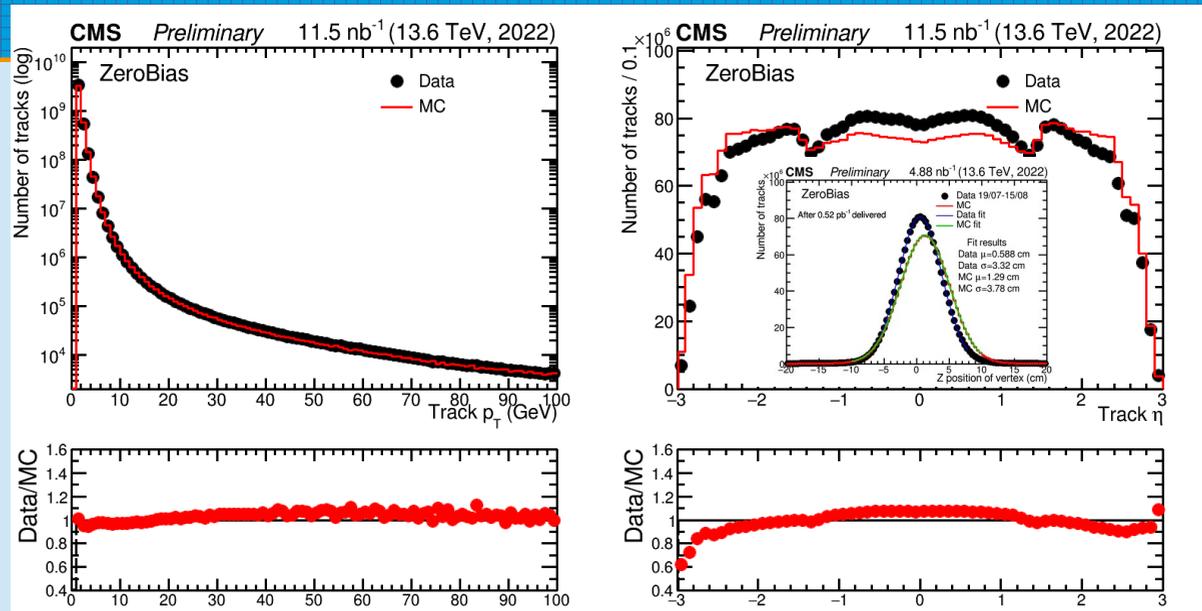
- In questa presentazione verranno mostrati alcuni risultati di performance della ricostruzione delle tracce in CMS nel 2022 e nel 2023.
- Questo viene fatto per i seguenti motivi:
 - Commissioning del nuovo software di CMS [2].
 - Validazione dei Monte Carlo usati.
 - Ispezionare le condizioni del tracciatore.
- Per le misure di performance sono stati utilizzati dati ZeroBias, cioè selezionati a livello di trigger usando solo l'informazione sulla coincidenza dei fasci di protoni:
 - Il **2022** è stato il primo anno di presa dati del Run 3 ad un'energia del centro di massa di 13.6 TeV e durante il long shutdown è stato **sostituito il Barrel Pixel layer più vicino alle collisioni tra fasci** [3].
 - Nel **2023** è stato osservato un **malfunzionamento** che ha riguardato i **layer 3 e 4 del Barrel Pixel detector**.
- Verranno poi mostrati sviluppi relativi alla ricostruzione delle tracce, perlopiù legati alla **mitigazione degli effetti di questo malfunzionamento**.

Confronti dati/MC 2022

- Gli eventi selezionati sono eventi ZeroBias, le tracce selezionate passano la selezione “highPurity” [1] e hanno $p_T > 1\text{GeV}$.
- La simulazione Monte Carlo degli eventi ZeroBias è una **simulazione di eventi Minimum Bias provvisoria**.
- Gli eventi ZeroBias sono stati raccolti dal 19 luglio 2022 al 17 ottobre 2022 (ad eccezione del periodo dal 23 agosto al 27 settembre).
- Gli eventi MC sono stati ripesati in modo tale che **la distribuzione del numero di vertici ricostruiti nel MC sia uguale a quella nei dati**.
- I risultati sono stati riportati nella [2022 DP Tracking Performance note](#) [4].

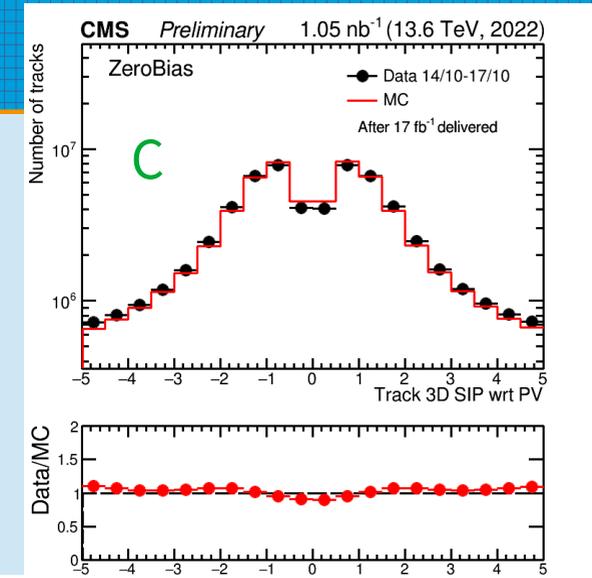
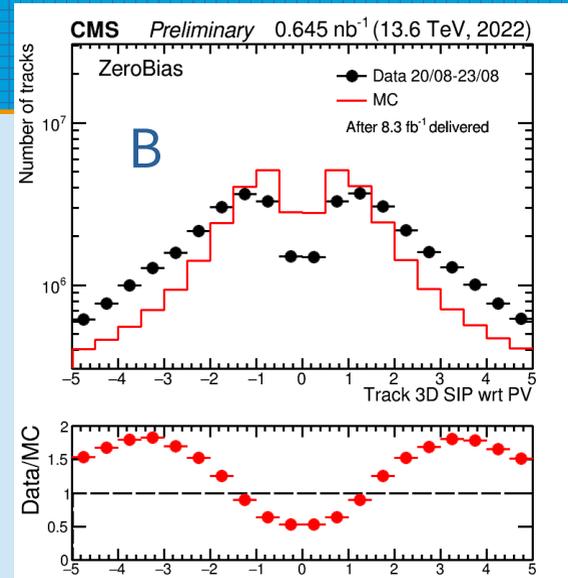
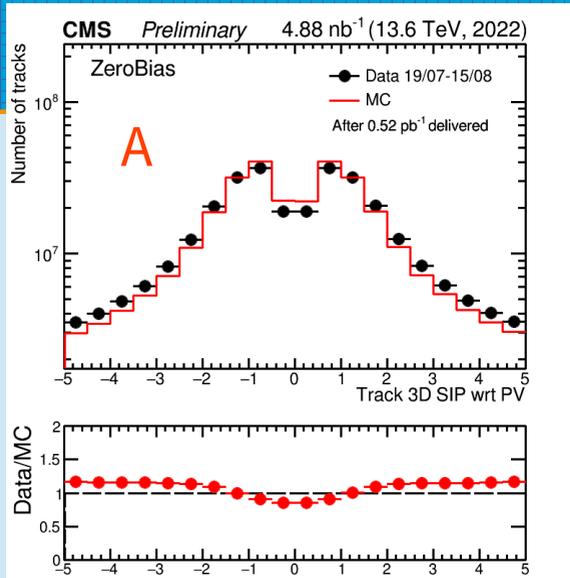


Proprietà cinematiche

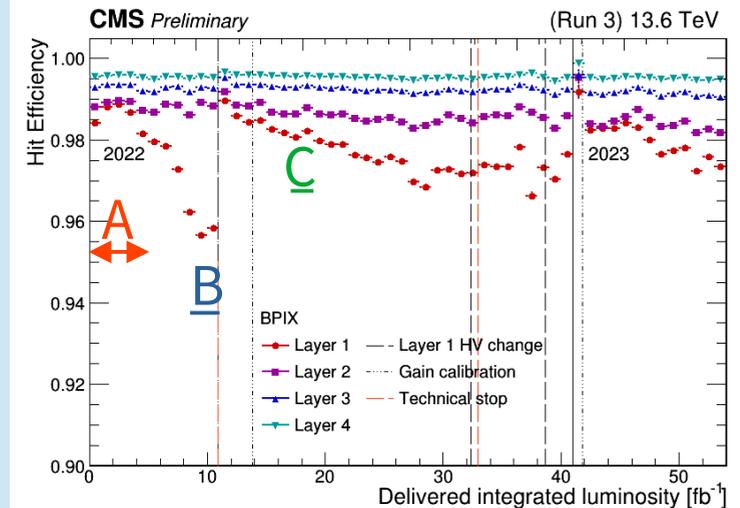


- Le figure mostrano le distribuzioni in p_T , pseudorapidità (η) delle tracce che passano la selezione descritta in slide 4.
- Per la distribuzione del p_T l'accordo dati/MC è del 10%.
- La distribuzione di η è più larga nel MC che nei dati:
 - Probabilmente legato al tuning dei parametri del MC, che **non è quello definitivo per le analisi del 2022**.
 - Asimmetria in $|\eta|$ legata alla diversa posizione Z del Beam Spot tra dati e MC, come in inserto, corretto in nuove simulazioni.

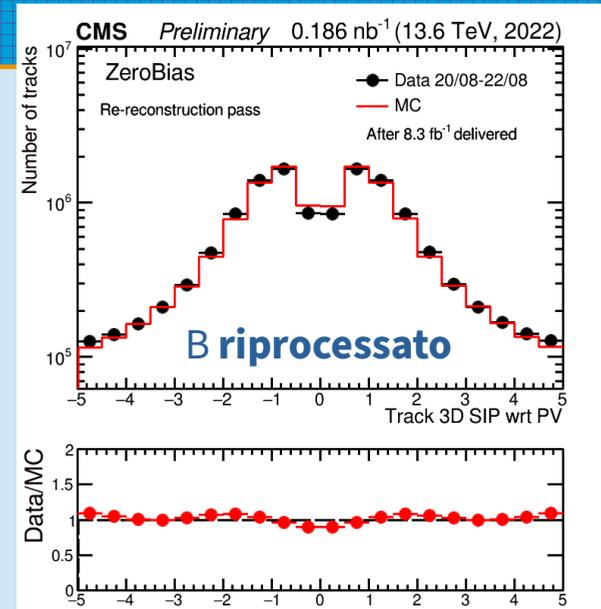
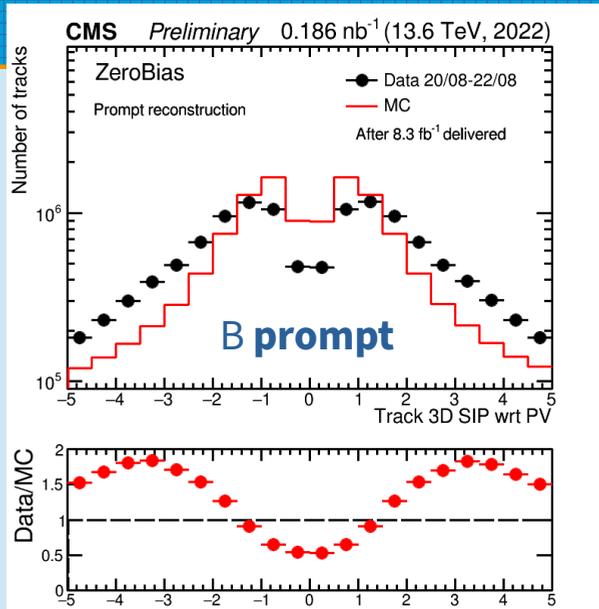
Significatività di IP 3D



- I confronti sono mostrati per i diversi periodi in figura. La luminosità integrata riportata in figura corrisponde alla luminosità accumulata a partire dalla installazione del nuovo Layer1 del Barrel Pixel.
- **Peggioramento dell'accordo dati/MC, suggerisce un deterioramento del BPix layer 1 a causa della radiazione accumulata.**
- Il **miglioramento** dell'accordo nell'**ultimo periodo** di presa dati è dovuto ad un aggiornamento della tensione di polarizzazione a cui è sottoposto il silicio e al riallineamento spaziale dei moduli.

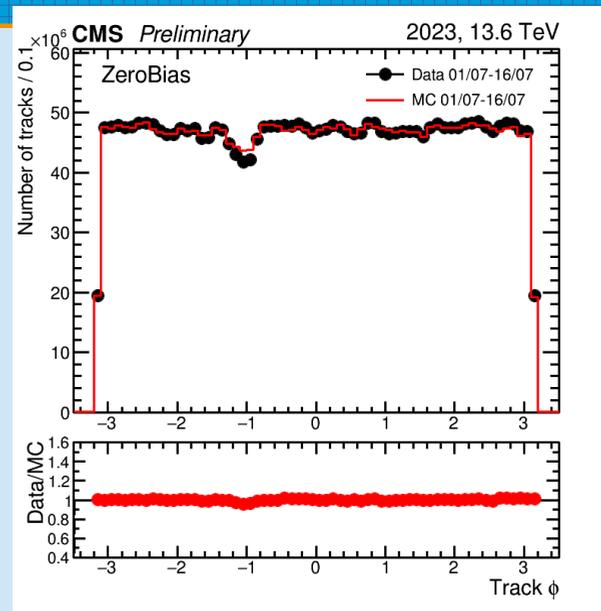
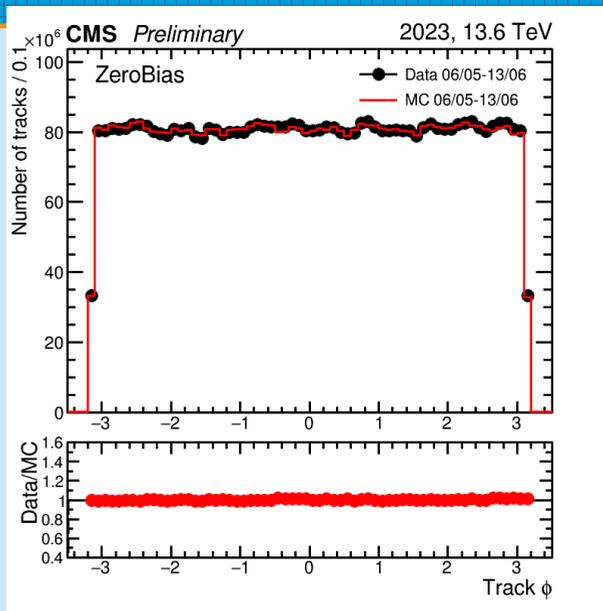


Significatività di IP 3D



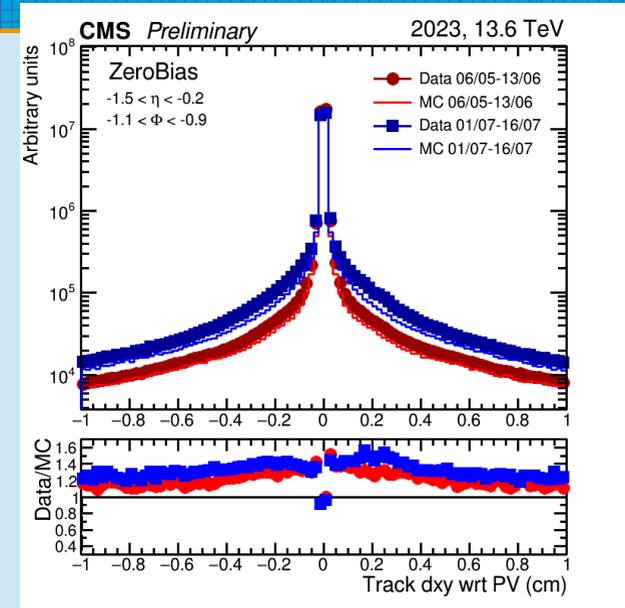
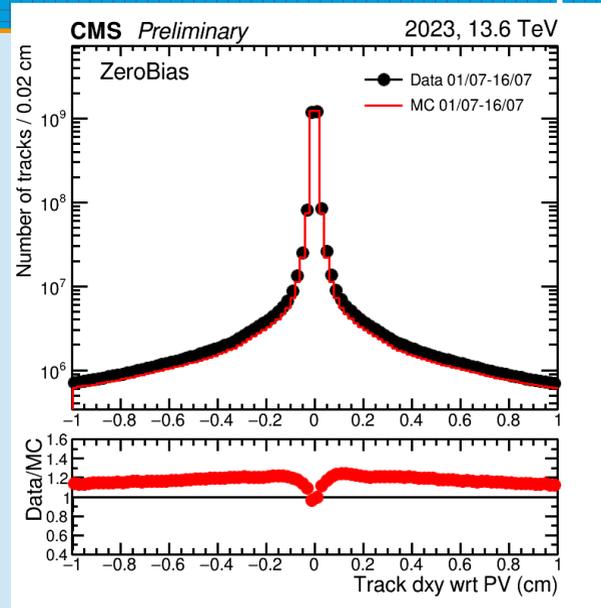
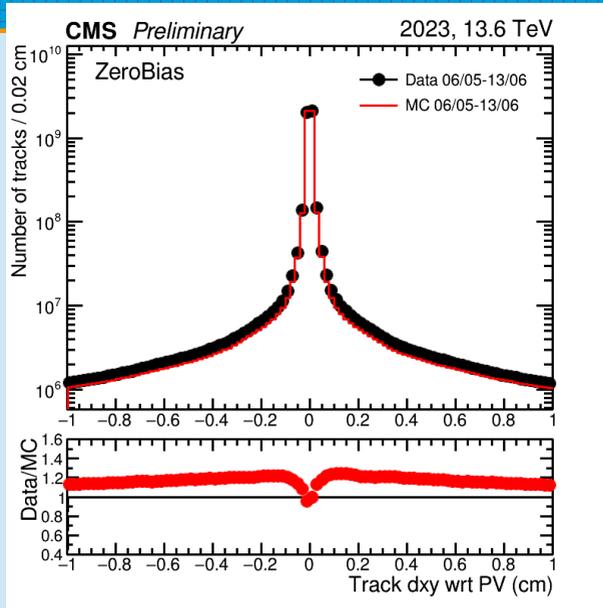
- In questo caso vengono considerati solo gli **eventi nei dati che sono stati riprocessati**, che sono un sottoinsieme di quelli mostrati nel pannello centrale di slide 6.
- **Il dataset riprocessato include miglioramenti legati alla ricostruzione locale nei pixel e l'allineamento spaziale dei moduli del tracciatore.**
- Le variabili legate ai parametri di impatto (quindi usate per b/tau tagging, ecc.) sono quelle che risentono maggiormente del riprocessamento, come ci si aspetta dati i miglioramenti indicati in precedenza.
- **L'accordo tra dati e MC è significativamente migliorato dopo il riprocessamento.**

Confronti dati/MC 2023: Distribuzione ϕ



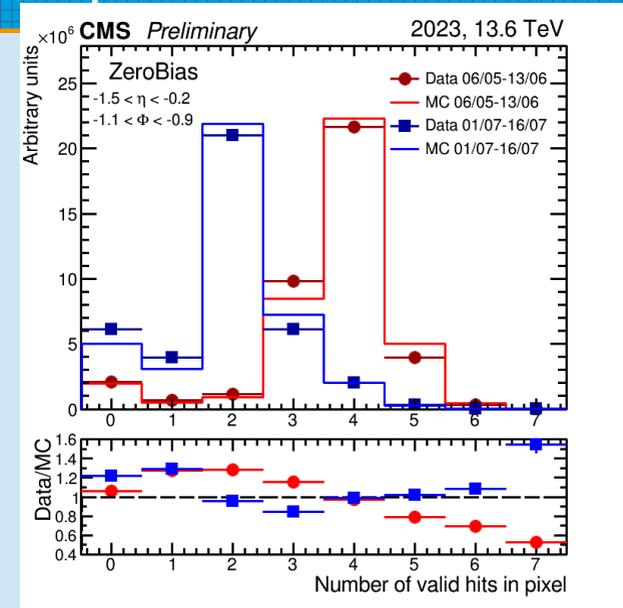
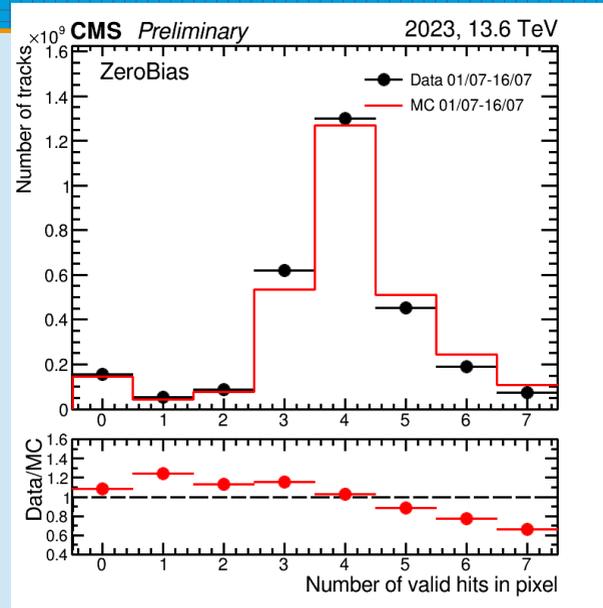
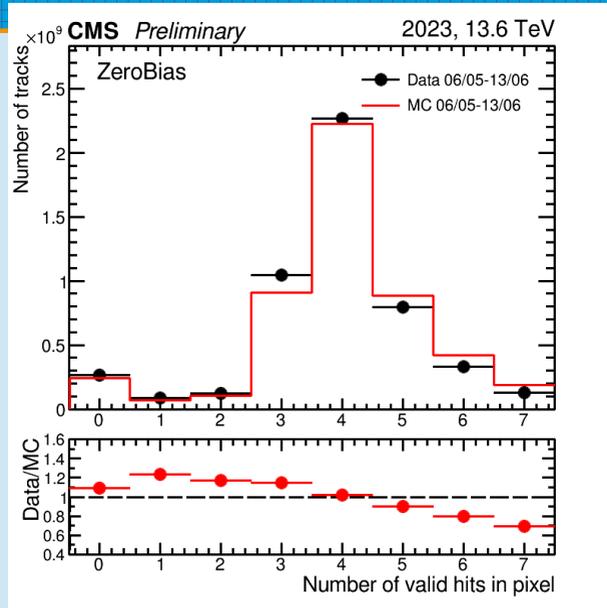
- I dati utilizzati per i confronti mostrati nel seguito sono dati ZeroBias a 13.6 TeV raccolti in due periodi.
- I risultati sono contenuti nella [2023 DP Tracking Performance note](#) [5].
- **Nel secondo periodo osservati problemi ai layer 3 e 4 del barrel pixel tracker**, che impattano le tracce con $-1.5 < \eta < -0.2$ e $-1.1 < \phi < -0.9$ (buco, nel seguito). Usati due set di dati Monte Carlo diversi per simulare le diverse condizioni del detector.
- Le figure mostrano le distribuzioni dell'angolo azimutale ϕ per delle tracce che passano la selezione indicata in slide 4.
- L'accordo dati per p_T ed η è analogo al 2022.
- **Buon accordo tra dati e MC**, nella figura di destra si può vedere l'effetto del **malfunzionamento**, nella regione interessata l'accordo è di circa il 5%.

Distanza di minimo approccio



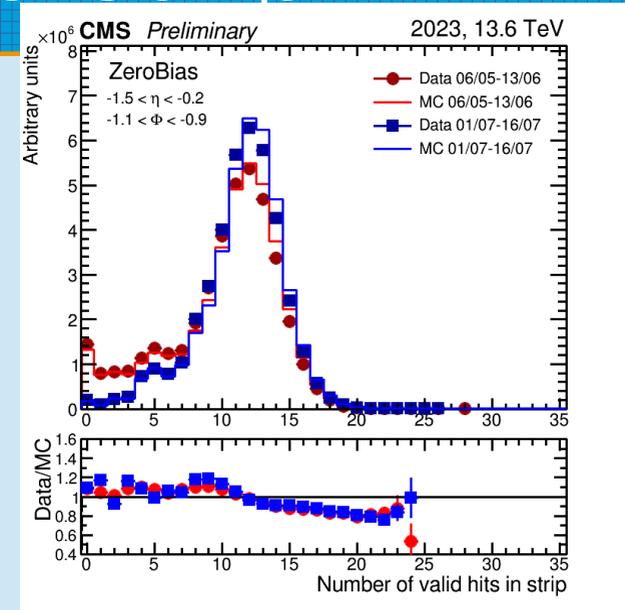
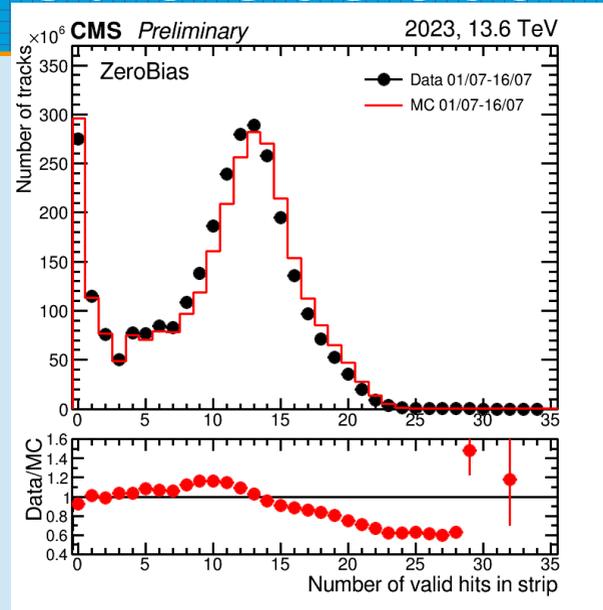
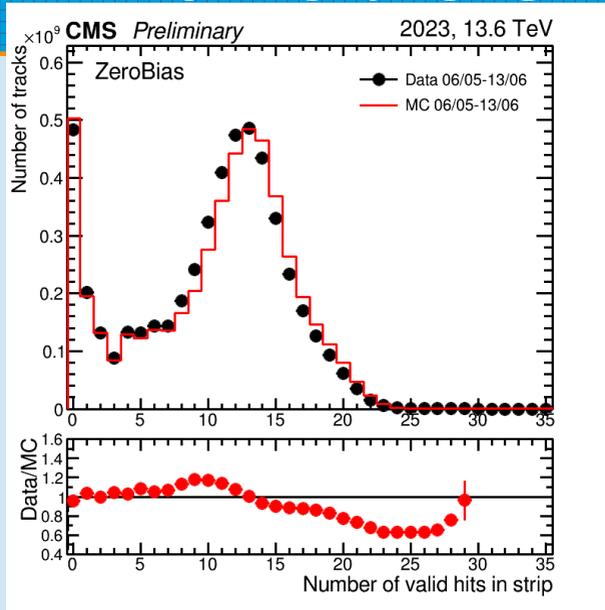
- Distribuzioni della distanza di minimo approccio rispetto al vertice primario per le tracce che passano la selezione descritta in slide 4: primo (a sinistra) e secondo (al centro) periodo del 2023 in tutta l'accettanza geometrica, e confronto tra i due periodi per le tracce nel buco (a destra).
- Distribuzioni più strette nel MC che nei dati dovute alla **migliore qualità dell'allineamento nel MC**.
- Distribuzione più larga nel secondo periodo per le tracce nel buco, che indica un **peggioramento della risoluzione a causa del malfunzionamento dei moduli nei layer 3 e 4**. L'accordo è peggiore nel secondo periodo (circa 30% contro circa 20% nel primo).

Hit valide nel detector a pixel



- Queste distribuzioni sono sensibili alle componenti difettose del detector.
- L'accordo ha una **dipendenza in funzione del numero di hit**, simile a quanto visto nel 2022 [4], numero di tracce con **4 hit valide ben riprodotto** per entrambi i periodi in tutta l'accettazione geometrica e per il primo periodo per le tracce nel buco.
- Per il secondo periodo per le tracce nel buco: **numero di hit valide più basso, con un picco a 2**, come atteso perché sono rimasti 2 layer nel barrel in quella regione, ed è ben riprodotto nel MC, mentre l'accordo generale è peggiore che nel primo periodo.

Hit valide nel detector a strip

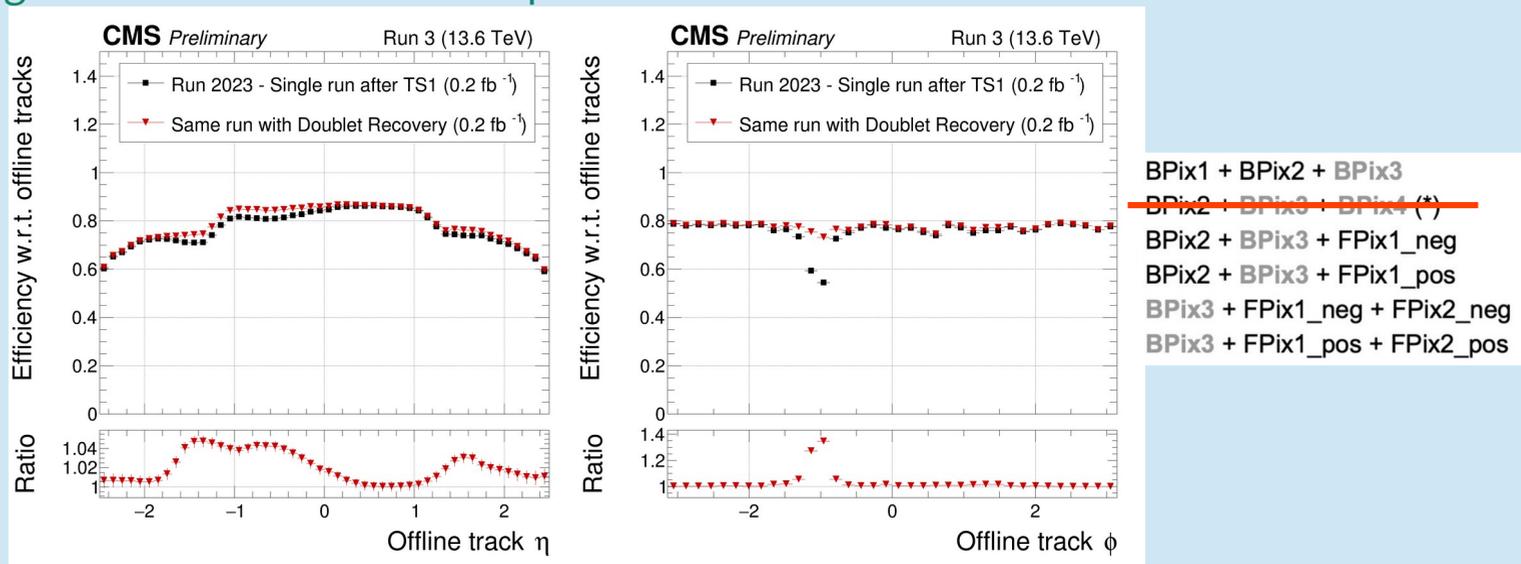


- In generale il **numero di hit è sovrastimato**, ma questo trend è simile a quanto osservato per il 2022 [4]. Per il secondo periodo quando si considerano solo le tracce con nel buco si osserva una **riduzione significativa nel numero di tracce con meno di 4 hit valide, e in generale la distribuzione è spostata verso valori più alti**:
 - Per una buona efficienza di tracking, sono necessarie più hit nei detector a strip quando sono attivi solo due layer a pixel.

Malfunzionamento BPIX: Mitigazione

HLT [6]

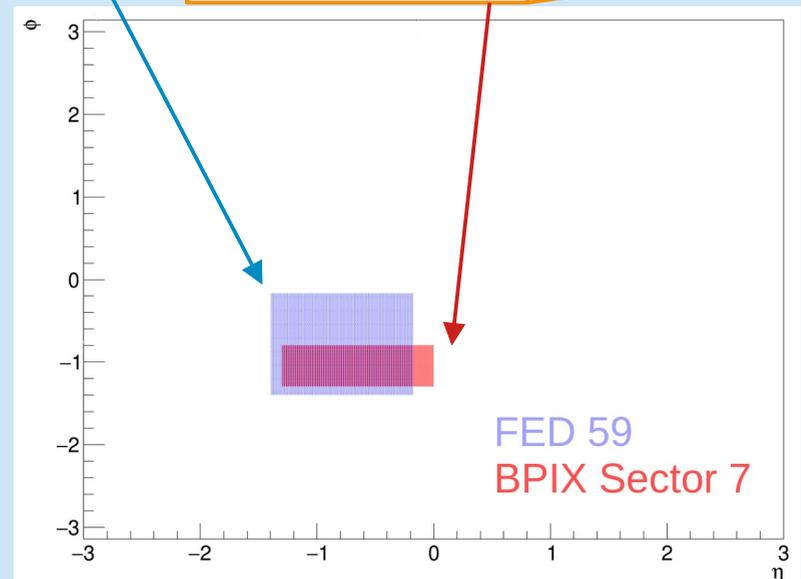
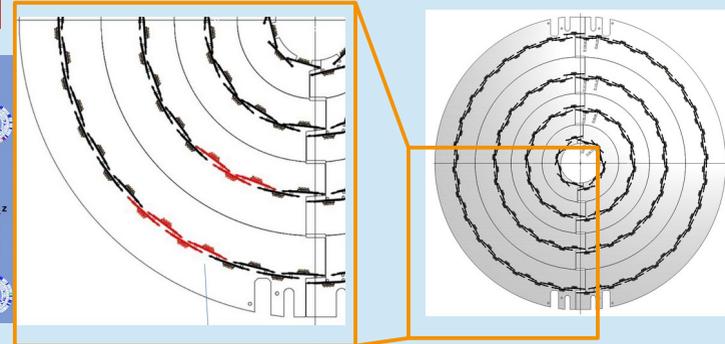
- Di norma tracking effettuato in un'unica iterazione considerando tracce con almeno tre hit nel pixel e $p_T > 0.9$ GeV
- Per il 2024 aggiunta iterazione di **pixel doublet recovery**
- In particolare si considerano solo combinazioni di doppietti di pixel hits a partire da combinazioni di tripletti di pixel hits dove mancano le hit in BPix layer 3 e 4
- **Recupero significativo dell'efficienza rispetto alle tracce offline**



Malfunzionamento BPIX: Mitigazione

Offline [7], [8]

- Offline sono **già implementate le diverse iterazioni che consentono di avere una ricostruzione delle tracce con un'efficienza elevata** (tra queste c'è anche la pixel doublet, e iterazioni che usano le strip double sided per seeding).
- Inoltre non funzionamento nella stessa regione di due layer del BPix e il primo layer dello micro-strip (già osservato a fine 2022).
- Di conseguenza non si hanno cambiamenti significativi (a meno di aumenti elevati del fake rate) modificando le iterazioni.
- Attualmente non sono stati introdotti aggiornamenti.



Conclusioni

- Sono stati mostrati risultati di performance della ricostruzione delle tracce in CMS nel 2022 e nel 2023, utilizzando dati ZeroBias.
- Necessario tuning della descrizione dell'underlying event.
- Nel 2022 sono stati osservati gli effetti del danno di radiazione sul nuovo BPix layer 1, effetti mitigati da aggiornamenti nella ricostruzione nell'ultima parte dell'anno e nel dataset riprocessato.
- Nel 2023 sono stati osservati gli effetti del malfunzionamento dei BPix layer 3 e 4, e del peggioramento della ricostruzione delle quantità relative ai parametri di impatto.
- Gli effetti di questo malfunzionamento sono stati mitigati a livello di High Level Trigger aggiungendo un'iterazione specifica alla sequenza di ricostruzione delle tracce.

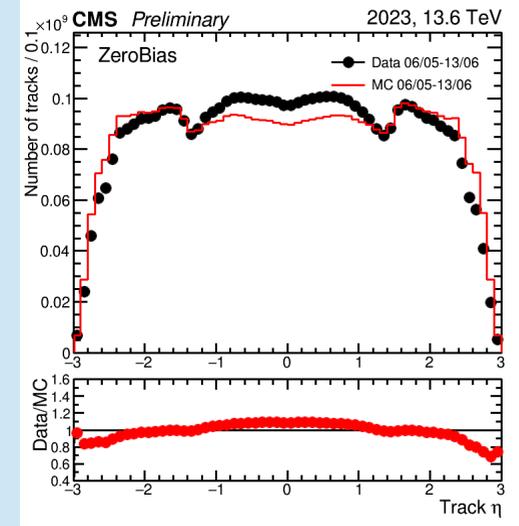
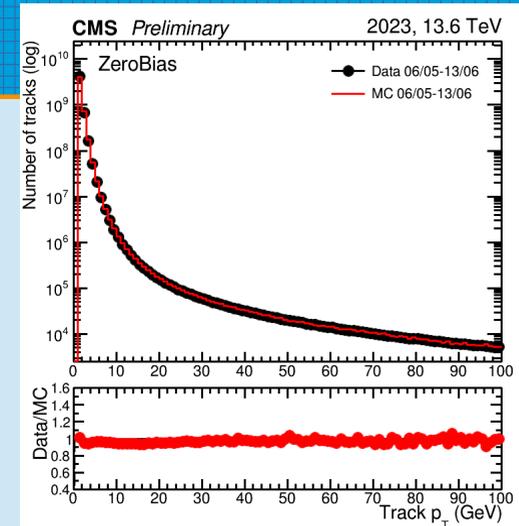
Bibliografia

- [1]: Description and performance of track and primary-vertex reconstruction with the CMS tracker, The CMS Collaboration, arXiv:1405.6569v2 [physics.ins-det] 28 Oct 2014
- [2]: Performance of Run 3 track reconstruction with the mkFit algorithm, The CMS Collaboration, CERN-CMS-DP-2022-018
- [3]: The CMS Phase-1 Pixel Detector Upgrade, CMS Tracker Group of the CMS Collaboration, JINST 16 (2021) P02027
- [4]: Early Run 3 tracking performance, The CMS Collaboration, CERN-CMS-DP-2022-064
- [5]: CMS tracking performance in 2023, The CMS Collaboration, CERN-CMS-DP-2023-090
- [6]: Performance of Track Reconstruction at the CMS High-Level Trigger in 2023 data, The CMS Collaboration, CERN-CMS-DP-2024-013
- [7]: CMS Technical Design Report for the Pixel Detector Upgrade, A. Dominguez et al., CERN-LHCC-2012-016
- [8]: SiStrip Bad components tracker maps, CMS Collaboration

BACKUP

Confronti dati/MC 2023

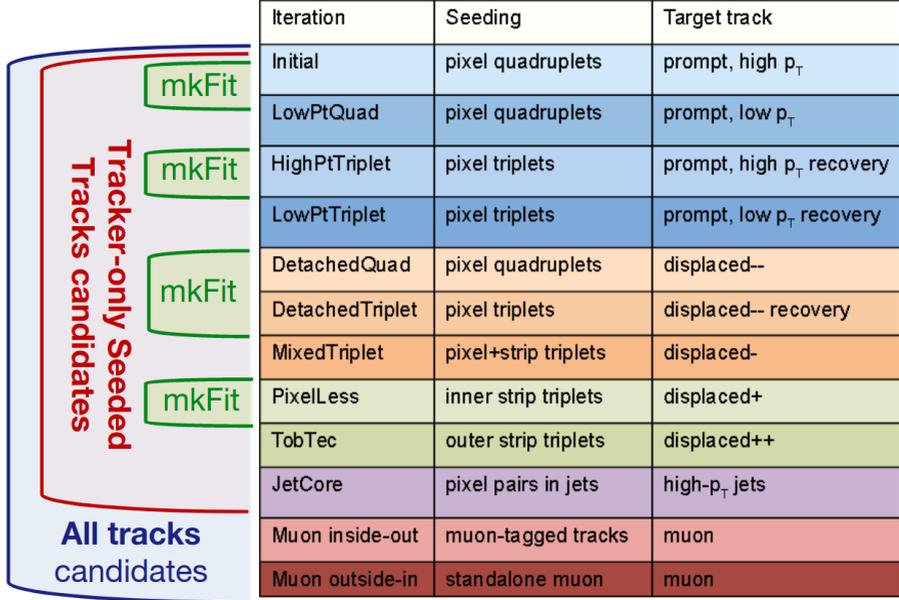
- I dati utilizzati per i confronti mostrati nel seguito sono dati ZeroBias a 13.6 TeV raccolti in due periodi, tra il 6 maggio e il 13 giugno 2023 e il 1° luglio e il 16 luglio 2023. Nel secondo periodo sono stati osservati problemi ai layer 3 e 4 del barrel pixel tracker, impattando le tracce con $-1.5 < \eta < -0.2$ e $-1.1 < \phi < -0.9$. Sono stati usati set di dati Monte Carlo diversi per simulare le diverse condizioni del detector nei due periodi.
- La simulazione della produzione degli eventi è analoga a quella usata nel 2022, con simile accordo dati/MC per le distribuzioni cinematiche (da confrontare con slide 5 per il 2022).
- I risultati mostrati sono presi dalla [2023 DP Tracking Performance note](#) [6].



Malfunzionamento BPIX: Mitigazione

Offline

- **Pixel doublet recovery** già implementato a partire dal 2017
- **Retraining di DNN per classificazione** ha portato ad un marginale miglioramento (< 0.5%), ma un aumento significativo del fake rate
- **Rilassare il pixelPair seeding** risulta in un aumento significativo del fake rate
- Pochi miglioramenti da **pixel-less recovery** a causa di problemi in TIB1 nella stessa regione
- Attualmente non sono stati introdotti aggiornamenti



Iteration	Seeding	Target track
Initial	pixel quadruplets	prompt, high p_T
LowPtQuad	pixel quadruplets	prompt, low p_T
HighPtTriplet	pixel triplets	prompt, high p_T recovery
LowPtTriplet	pixel triplets	prompt, low p_T recovery
DetachedQuad	pixel quadruplets	displaced--
DetachedTriplet	pixel triplets	displaced-- recovery
MixedTriplet	pixel+strip triplets	displaced-
PixelLess	inner strip triplets	displaced+
TobTec	outer strip triplets	displaced++
JetCore	pixel pairs in jets	high- p_T jets
Muon inside-out	muon-tagged tracks	muon
Muon outside-in	standalone muon	muon

Malfunzionamento BPIX: Mitigazione

- Miglioramenti in mitigazione introdotti da DeepCore [9] (per tracking in jet ad alto p_T)

[9]: DeepCore 2.0: Convolutional Neural Network for Tracking in Jets with High Transverse Momentum, The CMS Collaboration, [CERN-CMS-DP-2024-003](#)

