



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



# Higgs Physics at Multi-TeV Muon Collider

P. Andreetto<sup>1</sup>, M. Casarsa<sup>2</sup>, A. Gianelle<sup>1</sup>, C. Giralдин<sup>1,3</sup>, D. Lucchesi<sup>1,3</sup>, L. Sestini<sup>1</sup>, D. Zuliani<sup>1,3</sup>

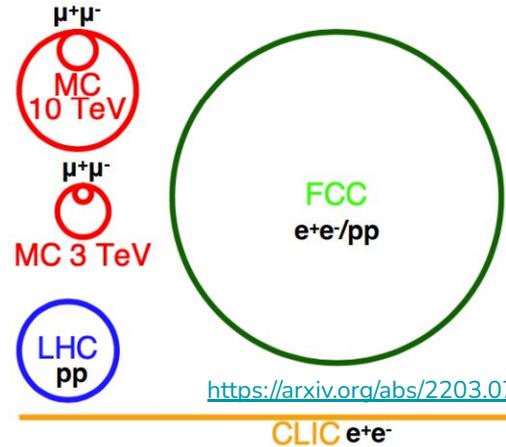
IFAE 2024

Istituto degli Innocenti, Piazza SS Annunziata  
Firenze, 03-05 aprile 2024

<sup>1</sup> INFN Sezione di Padova  
<sup>2</sup> INFN Sezione di Trieste  
<sup>3</sup> Università degli Studi di Padova

# Il futuro della Fisica delle Particelle

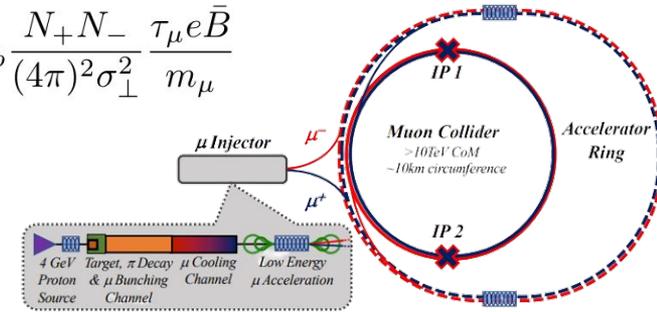
- Lo studio delle proprietà del **Bosone di Higgs** è fondamentale per testare la **fisica del Modello Standard**
- La recente Strategia Americana per la Fisica delle Particelle ha identificato le collisioni **multi-TeV tra leptoni** come uno strumento per fare questi studi (**Higgs factories**)
- Nel panorama dei futuri acceleratori, un **multi-TeV Muon Collider** è una macchina che unisce i **vantaggi** dei collisori **leptonici** (elettrone-positrone), e **adronici**



<https://arxiv.org/abs/2203.07964>

- IMCC prevede la partenza nel **2050**, e due possibilità sono presenti:
  - un primo stadio a 3 TeV, e un successivo stadio a 10 TeV
  - partire direttamente a 10 TeV (luminosità ridotta)
- La decisione dipenderà da diversi fattori, principalmente dallo sviluppo dei magneti

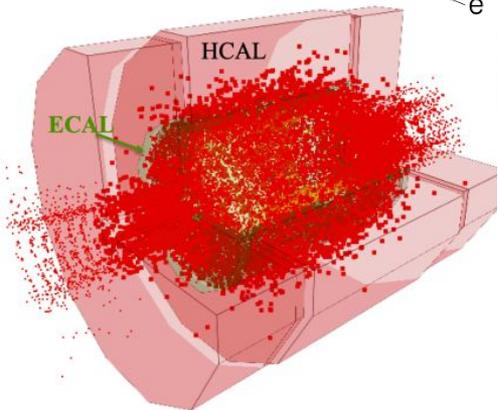
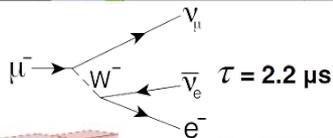
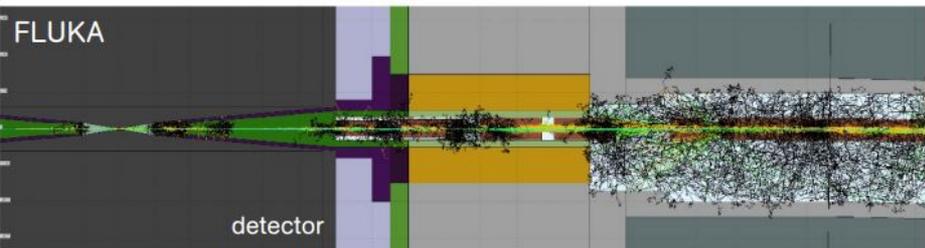
$$\mathcal{L} \approx f_r n_b \frac{N_+ N_-}{(4\pi)^2 \sigma_{\perp}^2} \frac{\tau_{\mu} e \bar{B}}{m_{\mu}}$$



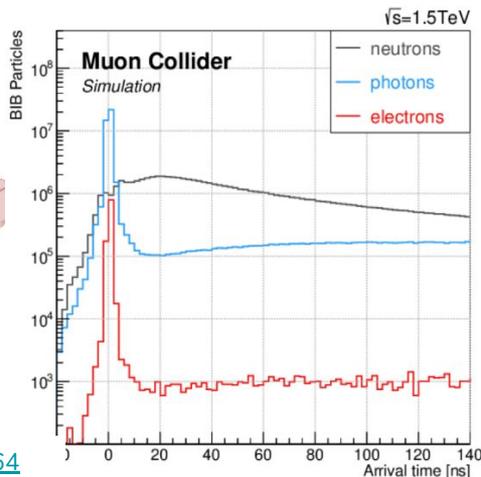
<https://muoncollider.web.cern.ch/welcome-page-muon-collider-website>

# Un ospite indesiderato: il Beam-Induced Background (BIB)

<https://arxiv.org/abs/2105.09116>



<https://arxiv.org/abs/2203.07964>



- I muoni decadono  $\rightarrow$  i prodotti del decadimento interagiscono con la macchina

$\mu^-$   $\rightarrow$  intensi flussi di particelle nel rivelatore:

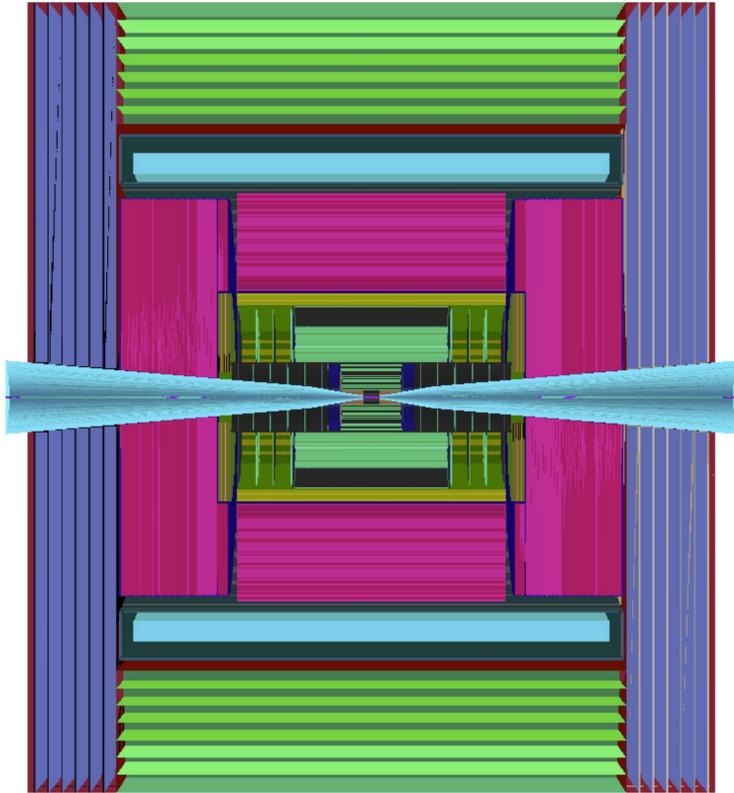
- altissima molteplicità di particelle nel tracciatore
- fondo diffuso nei calorimetri

- Sono fondamentali tecniche innovative e algoritmi appositamente ottimizzati per mitigare il BIB

- Due coni attenuatori in tungsteno (nozzles) schermano la maggior parte della radiazione
- Il BIB è fuori tempo rispetto all'interazione primaria

# Il rivelatore del Muon Collider

<https://arxiv.org/abs/2303.08533>

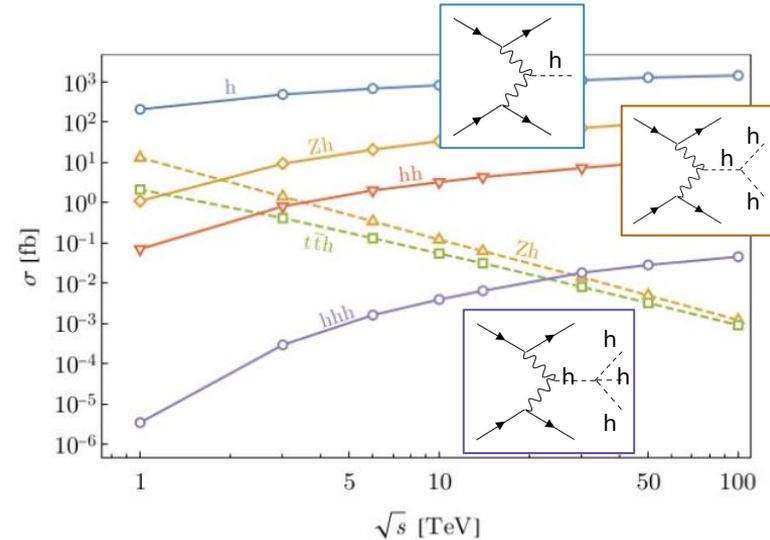


- **Rivelatore di vertici:** pixel in silicio da  $25 \times 25 \mu\text{m}^2$
- **Nozzles:** coni di tungsteno + polietilene borato
- **Tracciatore:**
  - Interno: macro-pixel di silicio,  $50 \mu\text{m} \times 1 \text{mm}$
  - Esterno: micro-strip di silicio,  $50 \mu\text{m} \times 10 \text{mm}$
- **Calorimetri:**
  - ECAL: 40 layer di silicio + tungsteno ( $22 X_0$ )
  - HCAL: 60 layer di ferro + scintillatore ( $7.5 \lambda_I$ )
- **Solenioide:** campo magnetico da 3.57 T
- **Camere dei muoni:** RPC + ferro, celle da  $30 \times 30 \text{mm}^2$

# La fisica del Bosone di Higgs al Muon Collider

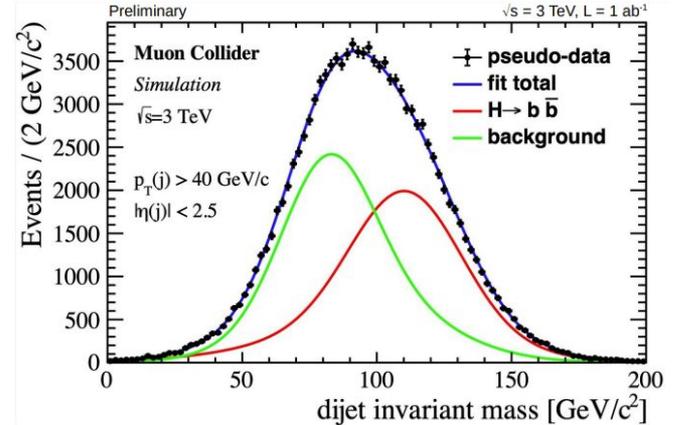
- Il Muon Collider è una **Higgs factory**:
  - misure precise **degli accoppiamenti** tra Bosone di Higgs e leptoni/bosoni
  - misura del **potenziale** del Bosone di Higgs
- Questi studi prevedono la **stima dell'incertezza statistica** su  $\sigma_H \times BR(H \rightarrow xx)$  ( $= \Delta\sigma_{H \rightarrow xx} / \sigma_{H \rightarrow xx}$ ) per vari canali di decadimento del Bosone di Higgs
- In questi studi, oltre ai vari fondi di fisica, il contributo del **BIB è incluso**
- I canali di decadimento studiati sono: <https://pos.sissa.it/414/515>
  - **solo getti:  $H \rightarrow bb$**
  - leptone + getti:  $H \rightarrow WW$  and  $H \rightarrow ZZ$
  - solo leptoni:  $H \rightarrow \mu\mu$
  - **solo fotoni:  $H \rightarrow \gamma\gamma$**

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6633/ac6678>

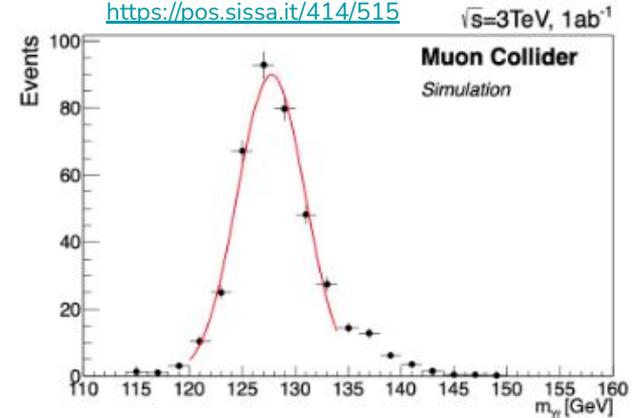


# Risultati per $H \rightarrow b\bar{b}$ e $H \rightarrow \gamma\gamma$

- $H \rightarrow b\bar{b}$  canale di decadimento **favorito** (BR  $\sim 58.2\%$ )
- Stato finale: **almeno due getti ricostruiti**
  - Algoritmo  $k_T$  con  $R=0.5$
  - $p_T > 40$  GeV e  $|\eta| < 2.5$
  - Tagli di qualità per rimuovere getti prodotti dal BIB
  - Algoritmo di **identificazione dei getti prodotti da quark b** che sfrutta le proprietà del **vertice secondario**
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ : **almeno due fotoni molto energetici**
  - $E > 15$  GeV e  $10^\circ < \theta < 170^\circ$
  - $p_T > 40$  GeV per il fotone più energetico
  - Se sono presenti più di due fotoni, si prendono i **più energetici**
  - $m(\gamma\gamma) > 40$  GeV
- Un **Boosted Decision Tree** (BDT) viene allenato per distinguere  $H \rightarrow \gamma\gamma$  dai fondi



<https://pos.sissa.it/414/515>



# Riepilogo dei risultati e confronto simulazione parametrica

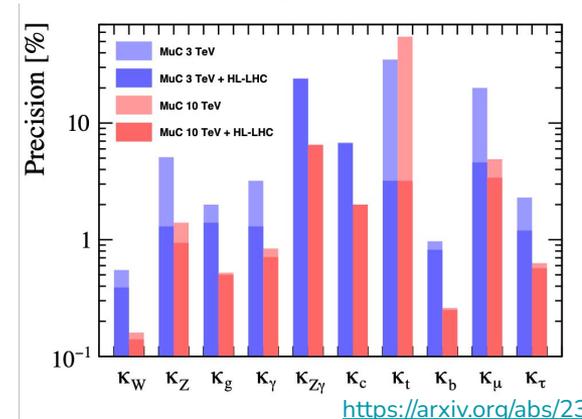
- Il **BIB** rappresenta l'ostacolo più **importante** per la misurazione di questi processi
- Valutare ogni processo con il BIB può essere molto complesso dal punto di vista computazionale

Canale di decadimento	<b>Sim. dettagliata</b>	<b>Sim. parametrica</b>
$H \rightarrow b\bar{b}$	0.75%	0.76%
$H \rightarrow W\bar{W}$	2.9%	1.7%
$H \rightarrow Z\bar{Z}$	17%	11%
$H \rightarrow \mu\bar{\mu}$	38%	40%
$H \rightarrow \gamma\gamma$	7.6%	6.1%

<https://arxiv.org/abs/2308.02633>

- Il BIB è perfettamente sotto controllo
- Ciò ci garantisce di poter **raggiungere i risultati che gli studi fenomenologici hanno già individuato**
- Il Muon Collider è molto competitivo rispetto ad altri esperimenti futuri

- I risultati appena mostrati possono essere confrontati con degli studi **fenomenologici** basati su **simulazioni parametriche** del rivelatore (**Delphes card**)
- **Ottimo accordo** tra i risultati ottenuti con simulazione dettagliata e parametrica



<https://arxiv.org/abs/2311.03280>

# Determinazione del potenziale del bosone di Higgs

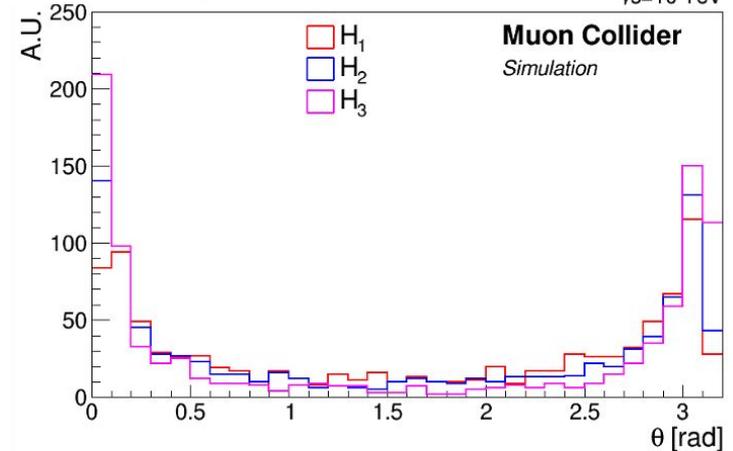
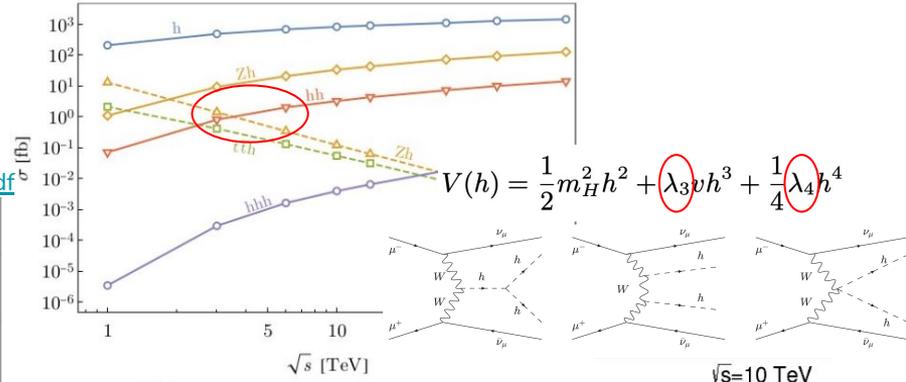
- Misurare il potenziale del Bosone di Higgs è fondamentale per cercare segnali di Nuova Fisica
- Lo studio dell'auto-accoppiamento  $\lambda_3$  può essere fatto studiando il canale  $HH \rightarrow bbbb$  <https://arxiv.org/pdf/1910.00012.pdf>

Esperimento	Luminosità	Energia c.d.m.	$\delta\lambda_3$
CLIC	5 ab <sup>-1</sup>	3 TeV	-7%, +11%
ILC	8 ab <sup>-1</sup>	1 TeV	10%
FCC-hh	30 ab <sup>-1</sup>	100 TeV	6%
<b>Muon Collider</b>	<b>5 ab<sup>-1</sup></b>	<b>3 TeV</b>	<b>10%</b>
<b>Muon Collider</b>	<b>10 ab<sup>-1</sup></b>	<b>10 TeV</b>	<b>5%</b>

- Possibilità di studiare l'auto-accoppiamento quartico  $\lambda_4$ 
  - Ad oggi solo studio fenomenologico
  - Studio con simulazione dettagliata in corso

Da studio parametrico, incertezza su  $\lambda_4 = 50\%$  con 20 ab<sup>-1</sup>

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6633/ac6678>

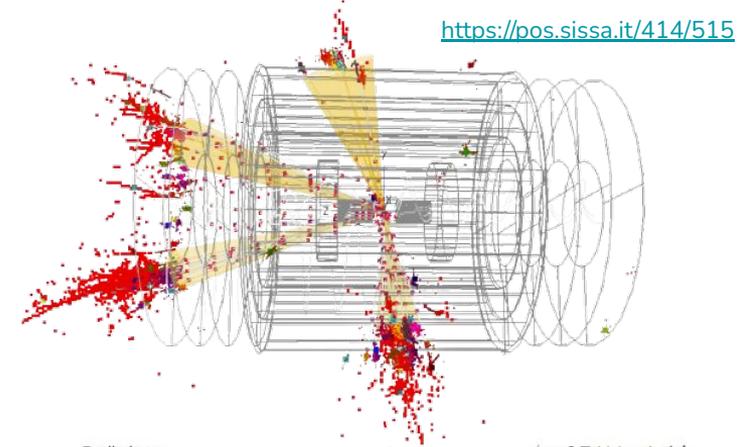


# Doppia produzione del Bosone di Higgs: $HH \rightarrow bbbb$

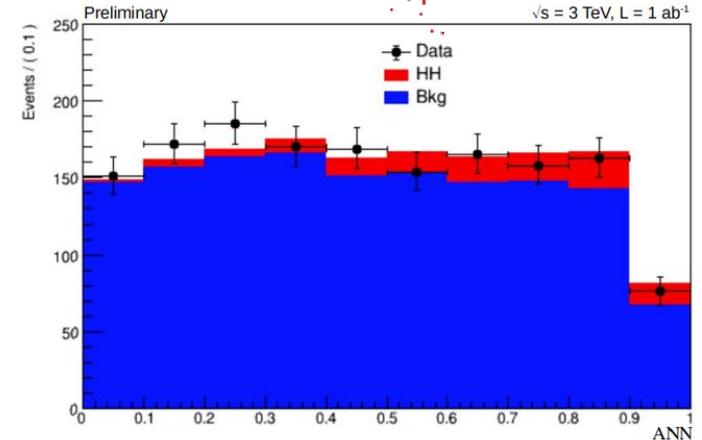
- Il processo  $HH$  è particolarmente sensibile all'auto-accoppiamento trilineare  $\lambda_3$
- In questo studio, solo il canale  $HH \rightarrow bbbb$  è stato considerato
- Selezione dell'evento: **quattro getti ricostruiti**
  - $p_T > 20$  GeV e  $|\eta| < 2.5$
  - i candidati  $HH$  sono ottenuti combinando i getti per minimizzare una particolare figura di merito
  - algoritmo di **identificazione dei b-getti** richiesto in **almeno un getto per coppia**
- Una **Rete Neurale (NN)** è usata per separare segnale da fondo

$$E_{\text{cm}} = 3 \text{ TeV}, 1 \text{ ab}^{-1} / 5 \text{ anni}$$
$$\Delta\sigma/\sigma \sim 33\%$$

- Lo stesso studio usando il canale  $HH \rightarrow bby\gamma$  è in corso

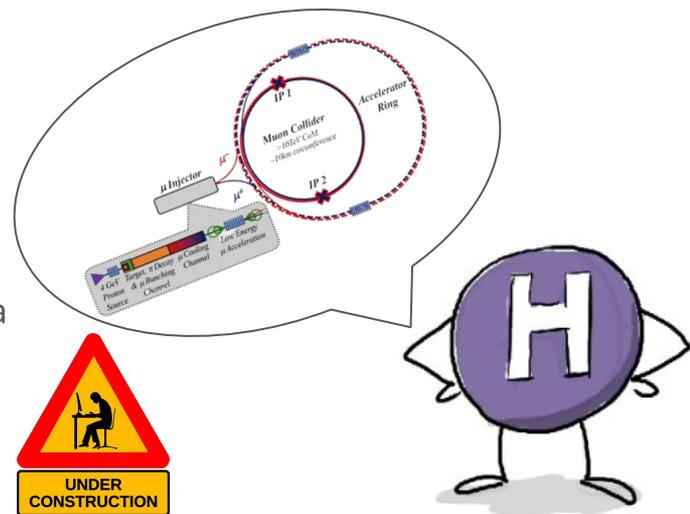
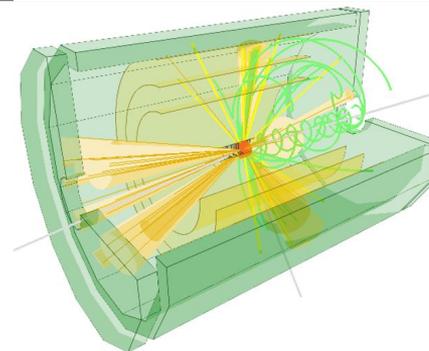


<https://pos.sissa.it/414/515>



# Conclusioni

- Il Muon Collider è una eccellente **Higgs factory**
- Nonostante la presenza del BIB, i **risultati di fisica sono competitivi**
- Questi risultati possono ancora migliorare, in particolare c'è ampio margine di ottimizzazione per quanto riguarda:
  - la **definizione della macchina**
  - la **definizione del rivelatore** ([presentazione di Carlo Giralдин](#))
  - **algoritmi** di ricostruzione degli oggetti di fisica
  
- I risultati ottenuti con la simulazione dettagliata del rivelatore sono **compatibili** con gli studi ottenuti usando simulazioni parametriche
  - Il **potenziale del Muon Collider è enorme**
  - Un Muon Collider a 3 TeV è solo il **primo passo** verso un esperimento in grado di testare il Modello Standard e la fisica del Bosone di Higgs con una **precisione mai vista prima**





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

INFN  
PADOVA



International  
MUON Collider  
Collaboration



MuCol

Grazie per l'attenzione

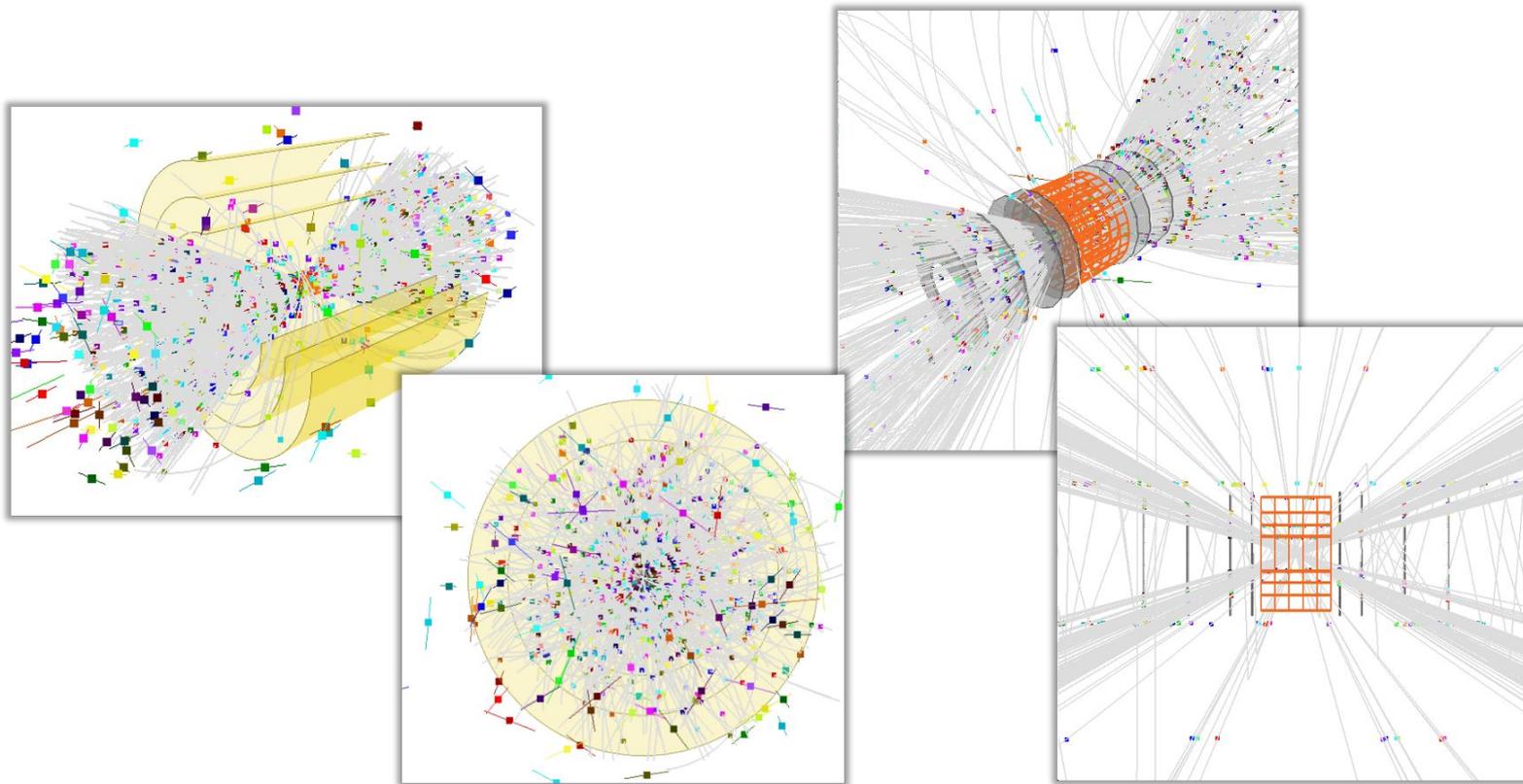


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



Backup slides

# BIB nel tracciatore



# Cinematica del Bosone di Higgs

