

Fisica delle particelle

- alte energie -

Presentazione delle attività di tesi triennali

Dipartimento di Fisica G. Occhialini



Qual è l'obiettivo ultimo? La comprensione della Natura

- Puntare al raggiungimento di una conoscenza della Natura **oggettiva, affidabile, verificabile**
 - Sviluppo di teorie che **descrivano la Natura** come la conosciamo e che siano al tempo stesso **predittive**
 - Sviluppo di esperimenti per **verificare o falsificare le predizioni**
- Un continuo scambio fra **teoria** ed **esperimenti**

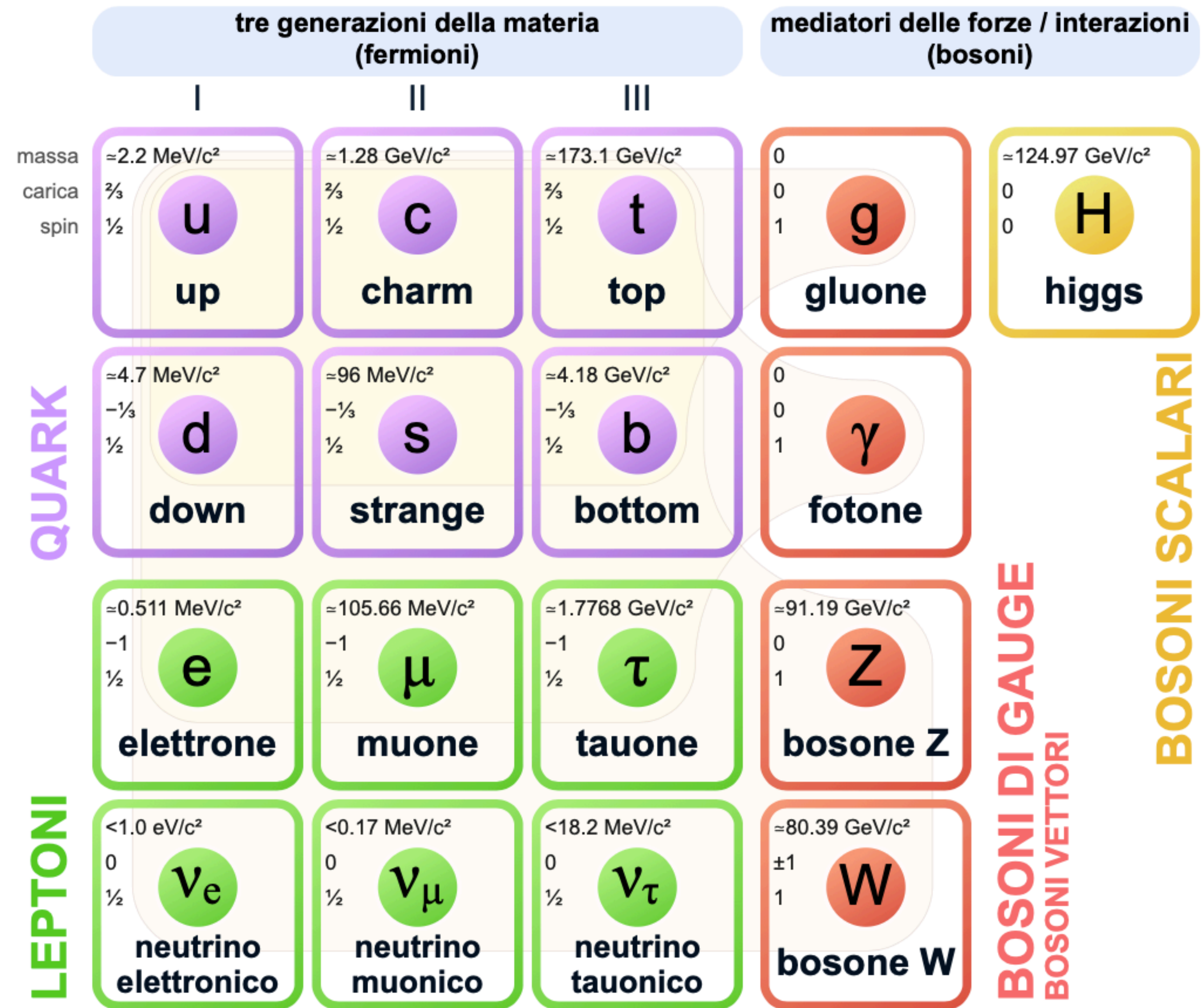


« Nessuna quantità di esperimenti potrà dimostrare che ho ragione;
un unico esperimento potrà dimostrare che ho sbagliato. »

(Albert Einstein, lettera a Max Born)

Il Modello Standard delle particelle elementari

- Una **teoria di successo** che descrive
 - la fenomenologia della fisica delle particelle
 - la materia e i suoi **costituenti** (materia ordinaria → 1^a gen)
 - tre delle quattro **interazioni** fondamentali
- Tuttavia sappiamo che **non si tratta della teoria ultima**



Quali interrogativi sono ancora senza risposta?

- Quante sono le forze che agiscono nel nostro universo e perché sono così diverse fra loro?
- Cosa tiene insieme gli ammassi di galassie? Che cos'è la Materia Oscura? ...e l'Energia Oscura?
- Come fanno i neutrini ad avere massa?
- Quante sono realmente le dimensioni in cui viviamo?
- Dov'è finita l'antimateria?
- Perché esistono 3 famiglie di quark e leptoni?
- Quanto è preciso il Modello Standard?
- La Supersimmetria esiste?
- Come si è creato l'universo che conosciamo?

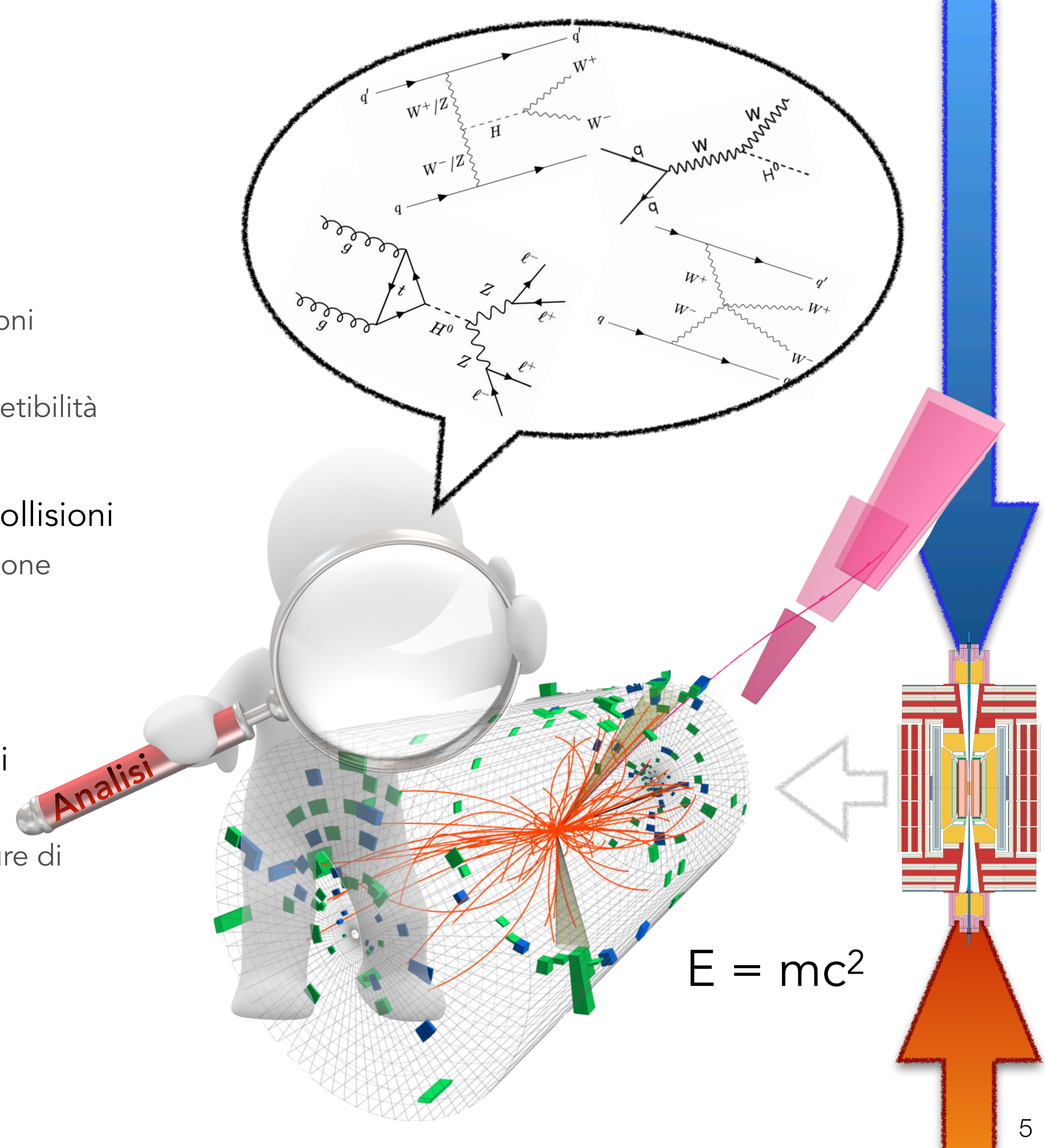
E molti altri...

Alcune di queste domande sono in comune con altri campi di ricerca
→ **si investiga a diverse scale**

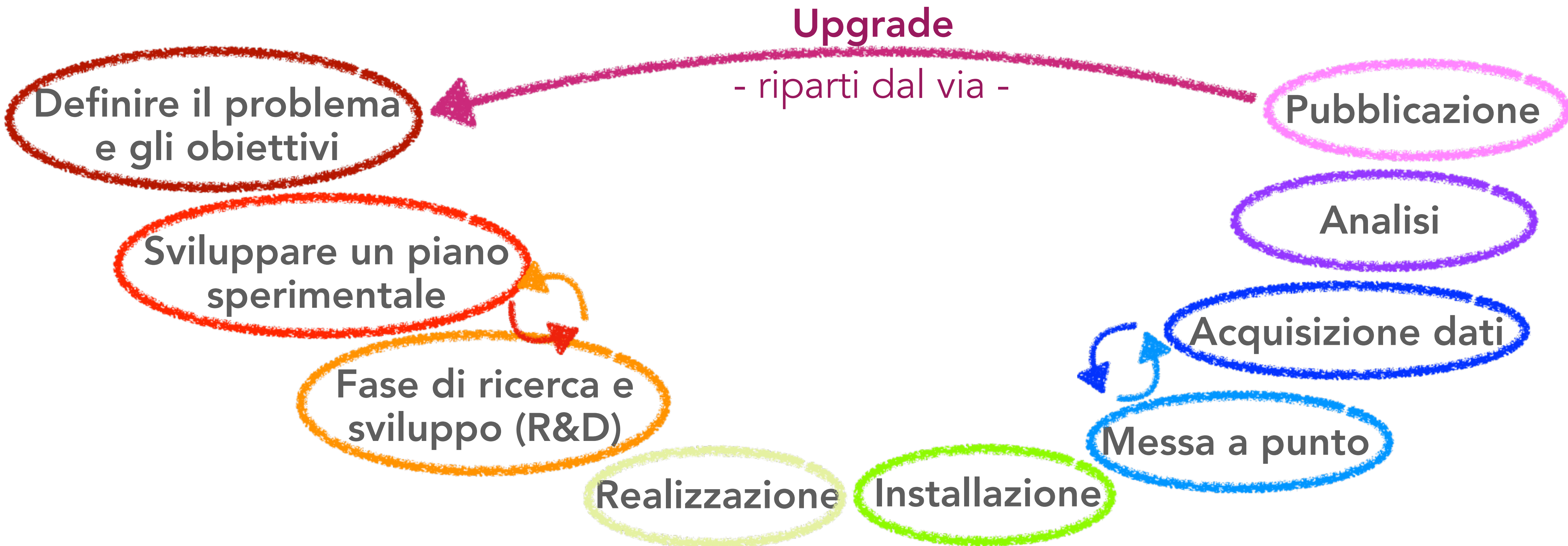


Le alte energie

- **Utilizzare gli acceleratori per**
 - Produrre particelle che non si osservano in Natura in condizioni normali
 - Dar vita a processi in un ambiente controllato: statistica e ripetibilità
- **Utilizzare i rivelatori di particelle** per 'fotografare' le collisioni
 - Le particelle interagiscono con i rivelatori (interazione radiazione materia)
 - La risposta dei rivelatori viene ricostruita e combinata
- **Analizzare i dati** per isolare e studiare processi specifici
 - Selezionare il segnale, rigettare i fondi
 - Approccio statistico per scoprire nuove particelle o fare misure di precisione



Le diverse fasi di un esperimento



Istruzioni NON incluse!

Ogni passaggio è una sfida e richiede studio, ricerca, dedizione...



- **Sviluppo di nuovi rivelatori**

- **Disegno, realizzazione e test di prototipi**
- Studio e misura di performance tramite **campagne di raccolta dati** (laboratorio, test beam)
- Simulazione

- **Messa a punto di rivelatori esistenti:**

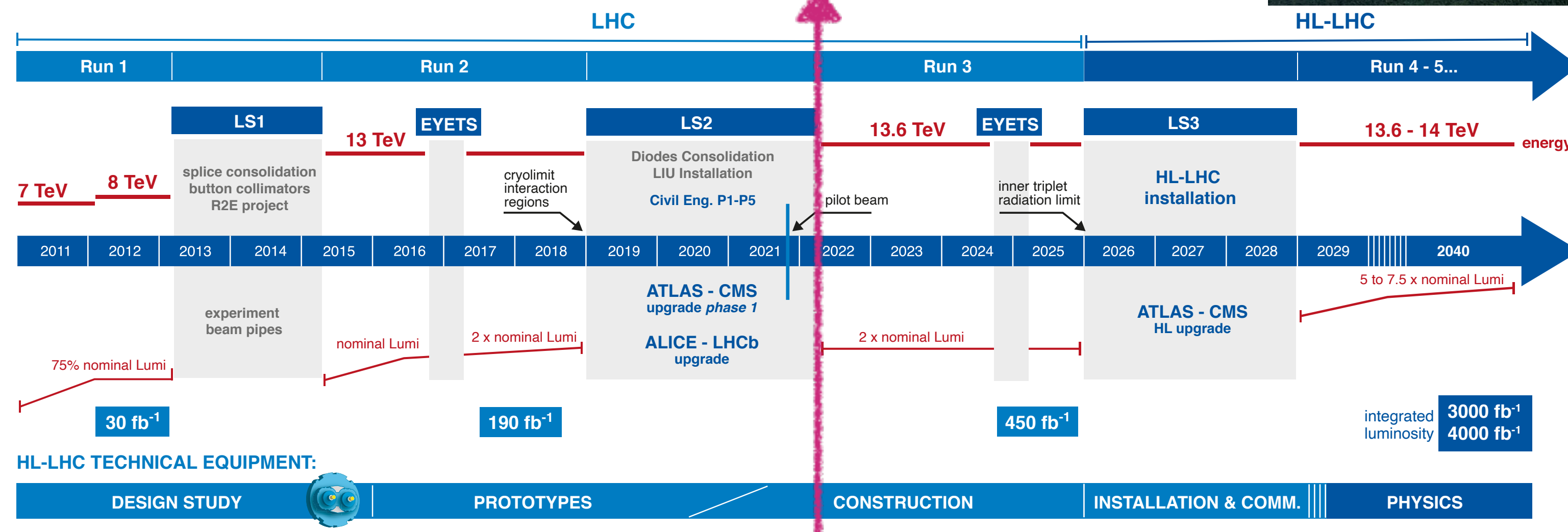
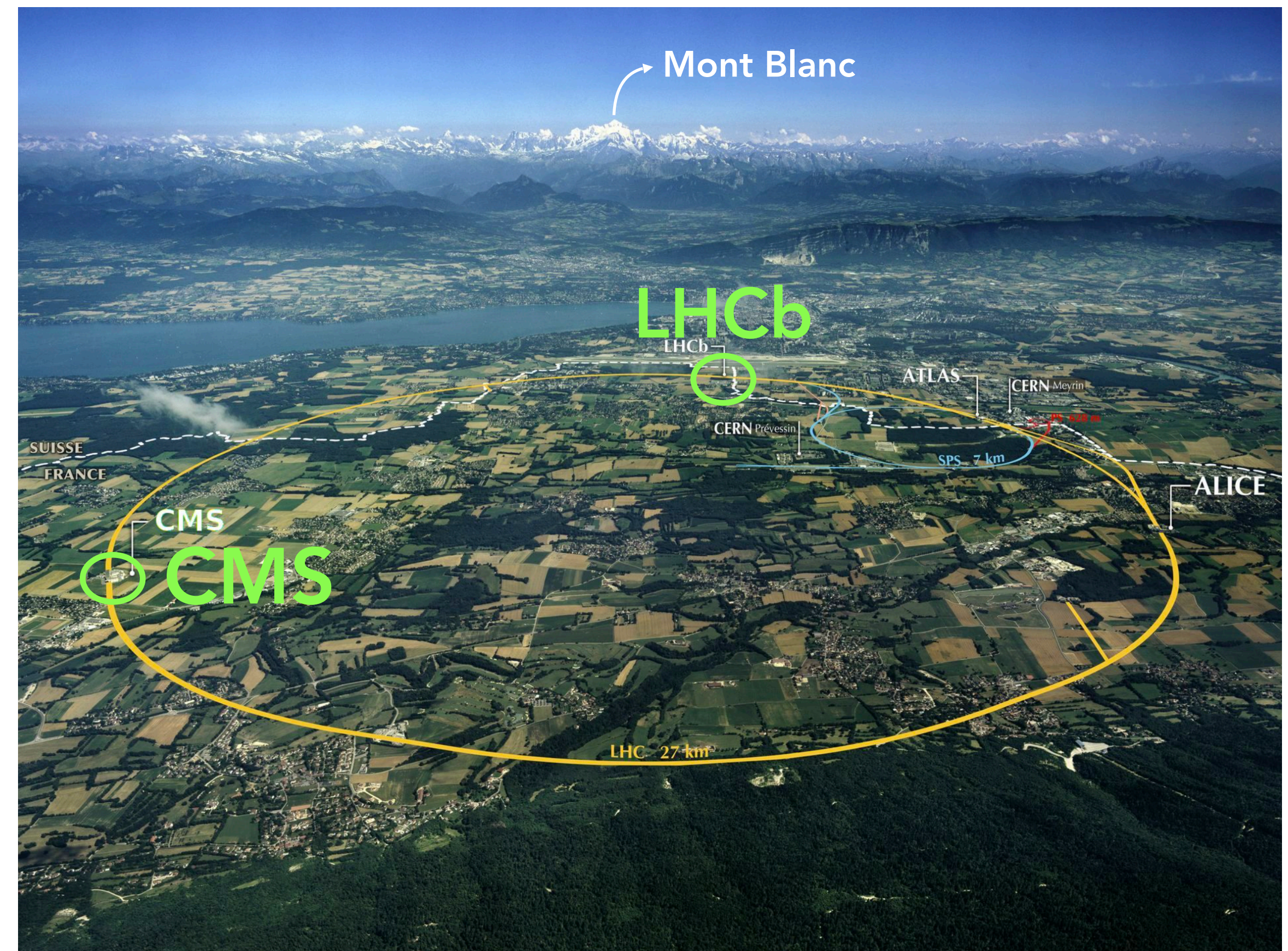
- **Ottimizzazione delle performance** di rivelatori in uso tramite calibrazione, allineamento, monitoring, miglioramenti nella ricostruzione
- Simulazione

- **Analisi 'di fisica'**

- Ricerca dell'**evidenza particelle o processi** non ancora osservati
 - Processi rari previsti dallo Standard Model
 - Evidenza di nuova fisica
- **Misure di precisione** per verificare le predizioni dello SM
- Includono lo **sviluppo di tecniche avanzate** di analisi (Machine Learning)

Il Large Hadron Collider

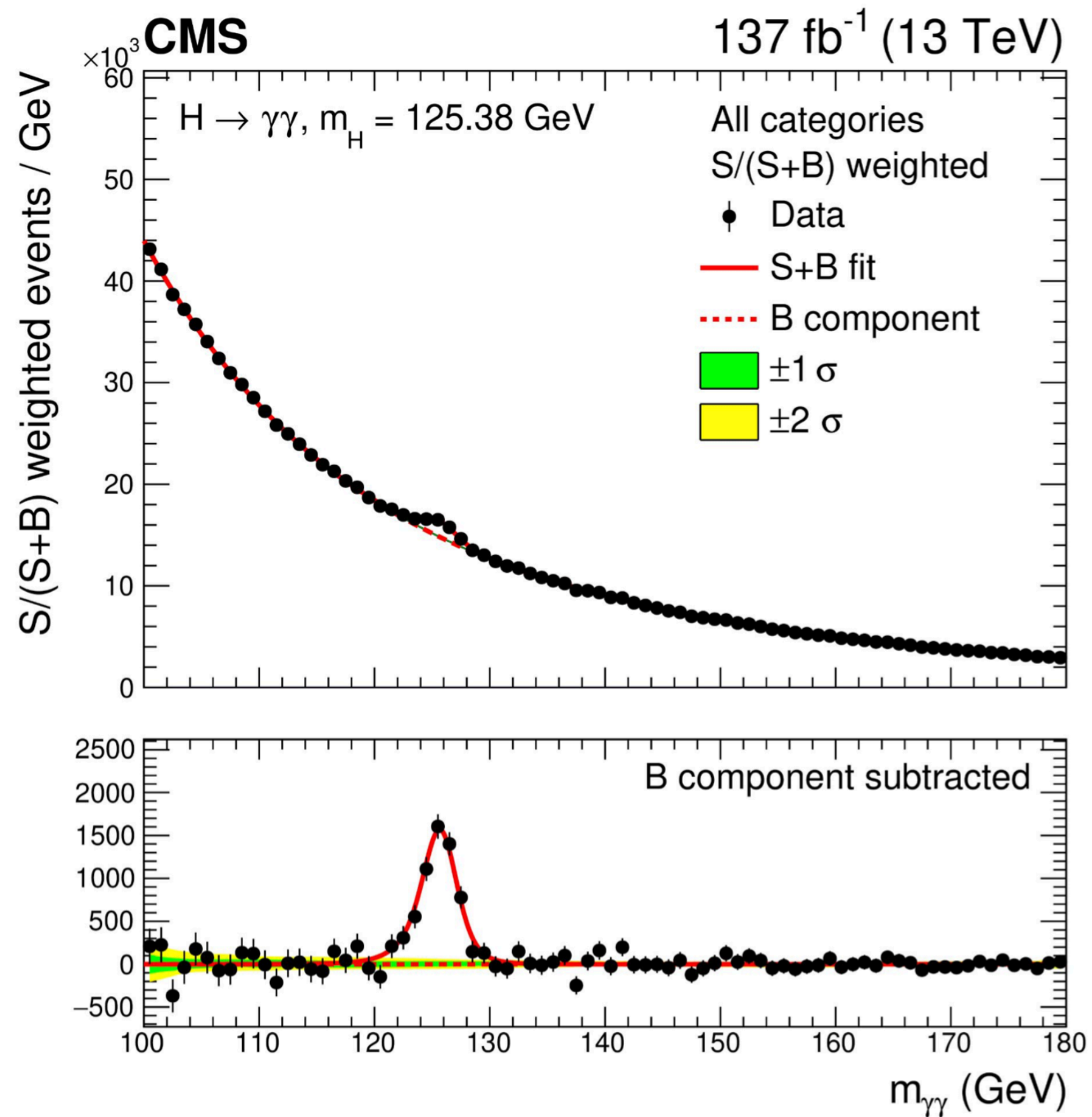
- Si sente parlare di LHC da almeno 10 anni, ma:
 - Si tratta di un progetto trentennale
 - Solo il **5% della luminosità integrata totale è stato acquisito** → c'è ancora molto da esplorare
 - Acceleratore ed esperimenti esperimenti sono in continua evoluzione
- In bicocca sono rappresentate le collaborazioni **CMS** e **LHCb**



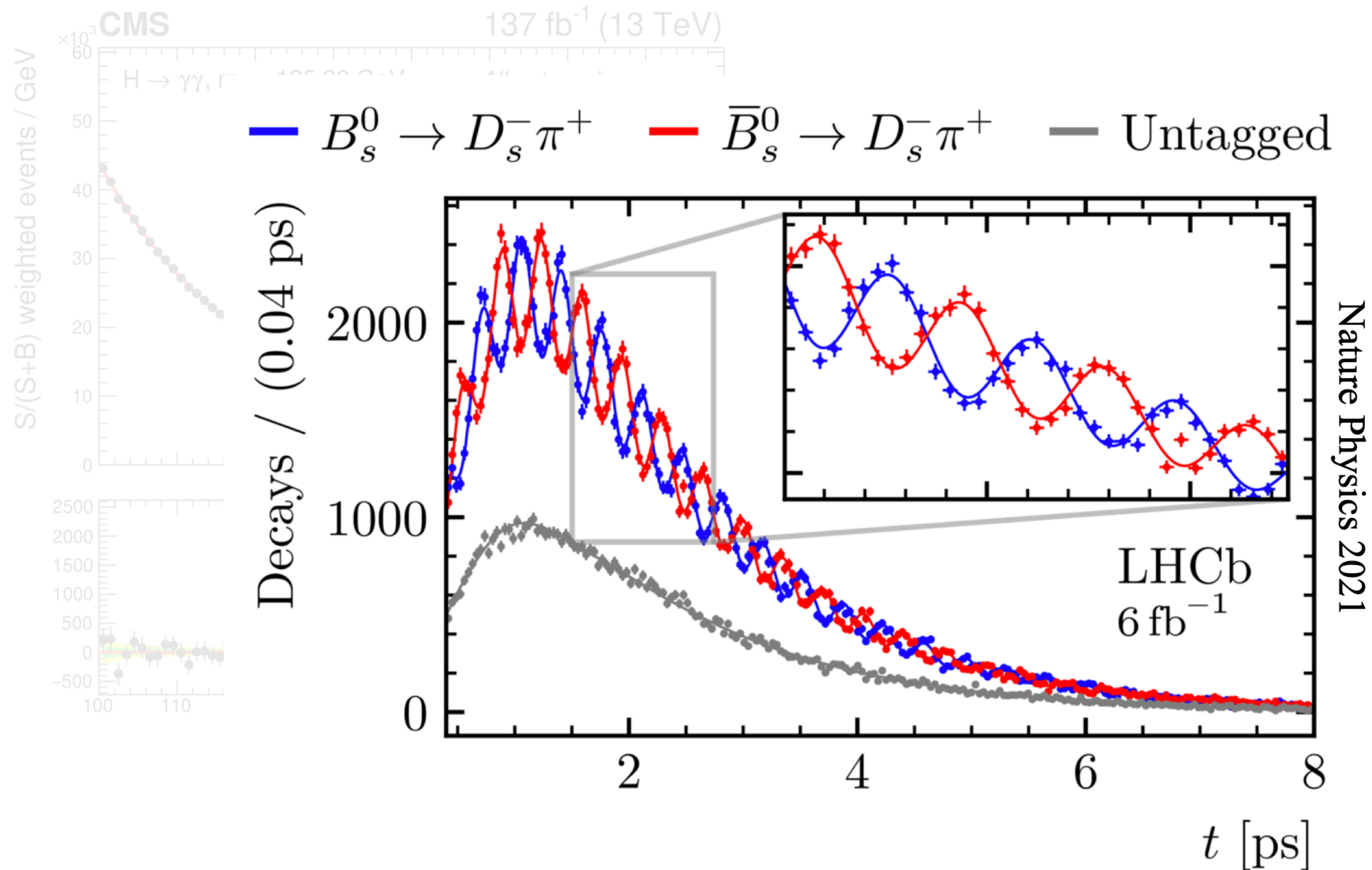
Da macchina per scoperte a macchina per misure di precisione

- Rivelatori più sensibili
- Analisi più raffinate

Alcuni risultati di LHC



Alcuni risultati di LHC



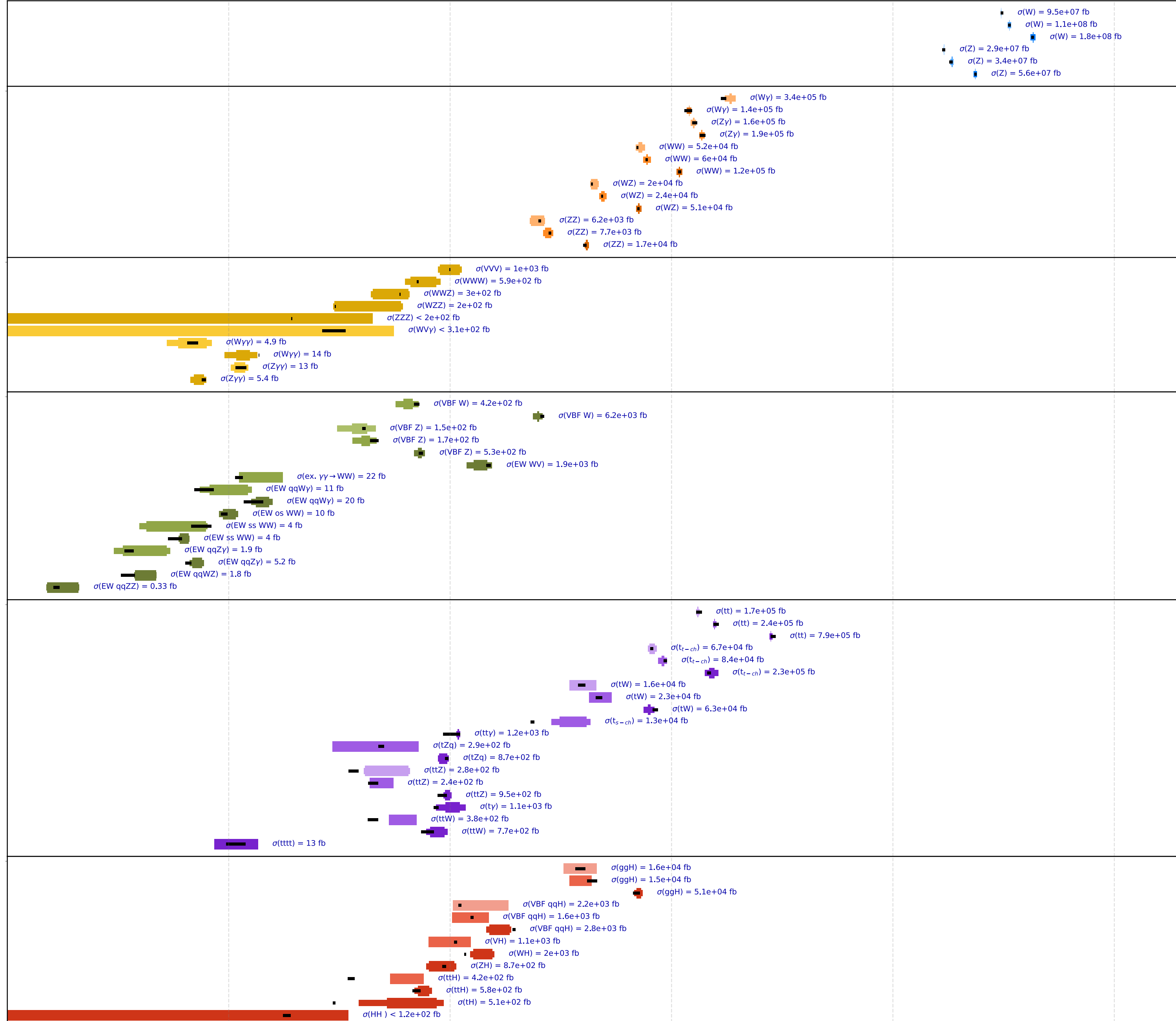
Overview of CMS cross section results

18 pb⁻¹ - 138 fb⁻¹ (7,8,13 TeV)

CMS preliminary



Category	Process	Energy	Reference	
Electroweak	W	7 TeV	JHEP 10 (2011) 132	
	W	8 TeV	PRL 112 (2014) 191802	
	W	13 TeV	SMP-15-004	
	Z	7 TeV	JHEP 10 (2011) 132	
	Z	8 TeV	PRL 112 (2014) 191802	
	Z	13 TeV	SMP-15-011	
di-Boson	W _γ	7 TeV	PRD 89 (2014) 092005	
	W _γ	13 TeV	PRL 126 252002 (2021)	
	Z _γ	7 TeV	PRD 89 (2014) 092005	
	Z _γ	8 TeV	JHEP 04 (2015) 164	
	WW	7 TeV	EPJC 73 (2013) 2610	
	WW	8 TeV	EPJC 76 (2016) 401	
	WW	13 TeV	PRD 102 092001 (2020)	
	WZ	7 TeV	EPJC 77 (2017) 236	
	WZ	8 TeV	EPJC 77 (2017) 236	
	WZ	13 TeV	Submitted to JHEP	
	ZZ	7 TeV	JHEP 01 (2013) 063	
	ZZ	8 TeV	PLB 740 (2015) 250	
ZZ	13 TeV	EPJC 81 (2021) 200		
tri-Boson	VV _γ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WWW	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WWZ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WZZ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	ZZZ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WV _γ	8 TeV	PRD 90 032008 (2014)	
	W _{γγ}	8 TeV	JHEP 10 (2017) 072	
	W _{γγ}	13 TeV	JHEP 10 (2021) 174	
	Z _{γγ}	8 TeV	JHEP 10 (2017) 072	
	Z _{γγ}	13 TeV	JHEP 10 (2021) 174	
	VBF and VBS	VBF W	8 TeV	JHEP 11 (2016) 147
		VBF W	13 TeV	EPJC 80 (2020) 43
VBF Z		7 TeV	JHEP 10 (2013) 101	
VBF Z		8 TeV	EPJC 75 (2015) 66	
VBF Z		13 TeV	EPJC 78 (2018) 589	
EW WV		13 TeV	Submitted to PLB	
ex. γγ → WW		8 TeV	JHEP 08 (2016) 119	
EW qqW _γ		8 TeV	JHEP 06 (2017) 106	
EW qqW _γ		13 TeV	PLB 811 (2020) 135988	
EW os WW		13 TeV	SMP-21-001	
EW ss WW		8 TeV	PRL 114 051801 (2015)	
EW ss WW		13 TeV	PRL 120 081801 (2018)	
EW qqZ _γ		8 TeV	PLB 770 (2017) 380	
EW qqZ _γ		13 TeV	PRD 104 072001 (2021)	
EW qqWZ		13 TeV	PLB 809 (2020) 135710	
EW qqZZ		13 TeV	PLB 812 (2020) 135992	
Top	tt	7 TeV	JHEP 08 (2016) 029	
	tt	8 TeV	JHEP 08 (2016) 029	
	tt	13 TeV	Accepted by PRD	
	t _τ -ch	7 TeV	JHEP 12 (2012) 035	
	t _τ -ch	8 TeV	JHEP 06 (2014) 090	
	t _τ -ch	13 TeV	PLB 72 (2017) 752	
	tW	7 TeV	PRL 110 (2013) 022003	
	tW	8 TeV	PRL 112 (2014) 231802	
	tW	13 TeV	JHEP 10 (2018) 117	
	t _s -ch	8 TeV	JHEP 09 (2016) 027	
	tty	13 TeV	Submitted to JHEP	
	tZq	8 TeV	JHEP 07 (2017) 003	
	tZq	13 TeV	Submitted to JHEP	
	ttZ	7 TeV	PRL 110 (2013) 172002	
	ttZ	8 TeV	JHEP 01 (2016) 096	
	ttZ	13 TeV	JHEP 03 (2020) 056	
ty	13 TeV	PRL 121 221802 (2018)		
ttW	8 TeV	JHEP 01 (2016) 096		
ttW	13 TeV	JHEP 08 (2018) 011		
tttt	13 TeV	EPJC 80 (2020) 75		
Higgs	ggH	7 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	ggH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	ggH	13 TeV	HIG-19-005	
	VBF qqH	7 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	VBF qqH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	VBF qqH	13 TeV	HIG-19-005	
	VH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	WH	13 TeV	HIG-19-005	
	ZH	13 TeV	HIG-19-005	
	ttH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	ttH	13 TeV	HIG-19-005	
tH	13 TeV	EPJC 81 (2021) 378		
HH	13 TeV	HIG-20-005		



Process	Energy	Reference
σ(W)	9.5e+07 fb	
σ(W)	1.1e+08 fb	
σ(W)	1.8e+08 fb	
σ(Z)	2.9e+07 fb	
σ(Z)	3.4e+07 fb	
σ(Z)	5.6e+07 fb	
σ(W _γ)	3.4e+05 fb	
σ(W _γ)	1.4e+05 fb	
σ(Z _γ)	1.6e+05 fb	
σ(Z _γ)	1.9e+05 fb	
σ(WW)	5.2e+04 fb	
σ(WW)	6e+04 fb	
σ(WW)	1.2e+05 fb	
σ(WZ)	2e+04 fb	
σ(WZ)	2.4e+04 fb	
σ(WZ)	5.1e+04 fb	
σ(ZZ)	6.2e+03 fb	
σ(ZZ)	7.7e+03 fb	
σ(ZZ)	1.7e+04 fb	
σ(VV)	1e+03 fb	
σ(WWW)	5.9e+02 fb	
σ(WWZ)	3e+02 fb	
σ(WZZ)	2e+02 fb	
σ(ZZZ)	< 2e+02 fb	
σ(WV _γ)	< 3.1e+02 fb	
σ(W _{γγ})	4.9 fb	
σ(W _{γγ})	14 fb	
σ(Z _{γγ})	13 fb	
σ(Z _{γγ})	5.4 fb	
σ(VBF W)	4.2e+02 fb	
σ(VBF W)	6.2e+03 fb	
σ(VBF Z)	1.5e+02 fb	
σ(VBF Z)	1.7e+02 fb	
σ(VBF Z)	5.3e+02 fb	
σ(EW WV)	1.9e+03 fb	
σ(ex. γγ → WW)	22 fb	
σ(EW qqW _γ)	11 fb	
σ(EW qqW _γ)	20 fb	
σ(EW os WW)	10 fb	
σ(EW ss WW)	4 fb	
σ(EW ss WW)	4 fb	
σ(EW qqZ _γ)	1.9 fb	
σ(EW qqZ _γ)	5.2 fb	
σ(EW qqWZ)	1.8 fb	
σ(EW qqZZ)	0.33 fb	
σ(tt)	1.7e+05 fb	
σ(tt)	2.4e+05 fb	
σ(tt)	7.9e+05 fb	
σ(t _τ -ch)	6.7e+04 fb	
σ(t _τ -ch)	8.4e+04 fb	
σ(t _τ -ch)	2.3e+05 fb	
σ(tW)	1.6e+04 fb	
σ(tW)	2.3e+04 fb	
σ(tW)	6.3e+04 fb	
σ(t _s -ch)	1.3e+04 fb	
σ(tty)	1.2e+03 fb	
σ(tZq)	2.9e+02 fb	
σ(tZq)	8.7e+02 fb	
σ(ttZ)	2.8e+02 fb	
σ(ttZ)	2.4e+02 fb	
σ(ttZ)	9.5e+02 fb	
σ(ty)	1.1e+03 fb	
σ(ttW)	3.8e+02 fb	
σ(ttW)	7.7e+02 fb	
σ(tttt)	13 fb	
σ(ggH)	1.6e+04 fb	
σ(ggH)	1.5e+04 fb	
σ(ggH)	5.1e+04 fb	
σ(VBF qqH)	2.2e+03 fb	
σ(VBF qqH)	1.6e+03 fb	
σ(VBF qqH)	2.8e+03 fb	
σ(VH)	1.1e+03 fb	
σ(WH)	2e+03 fb	
σ(ZH)	8.7e+02 fb	
σ(ttH)	4.2e+02 fb	
σ(ttH)	5.8e+02 fb	
σ(tH)	5.1e+02 fb	
σ(HH)	< 1.2e+02 fb	

Measured cross sections and exclusion limits at 95% C.L. See here for all cross section summary plots
Inner colored bars statistical uncertainty, outer narrow bars statistical+systematic uncertainty
Light colored bars: 7 TeV, Medium bars: 8 TeV, Dark bars: 13 TeV
Black bar theory prediction
Jan 2022

Overview of CMS cross section results

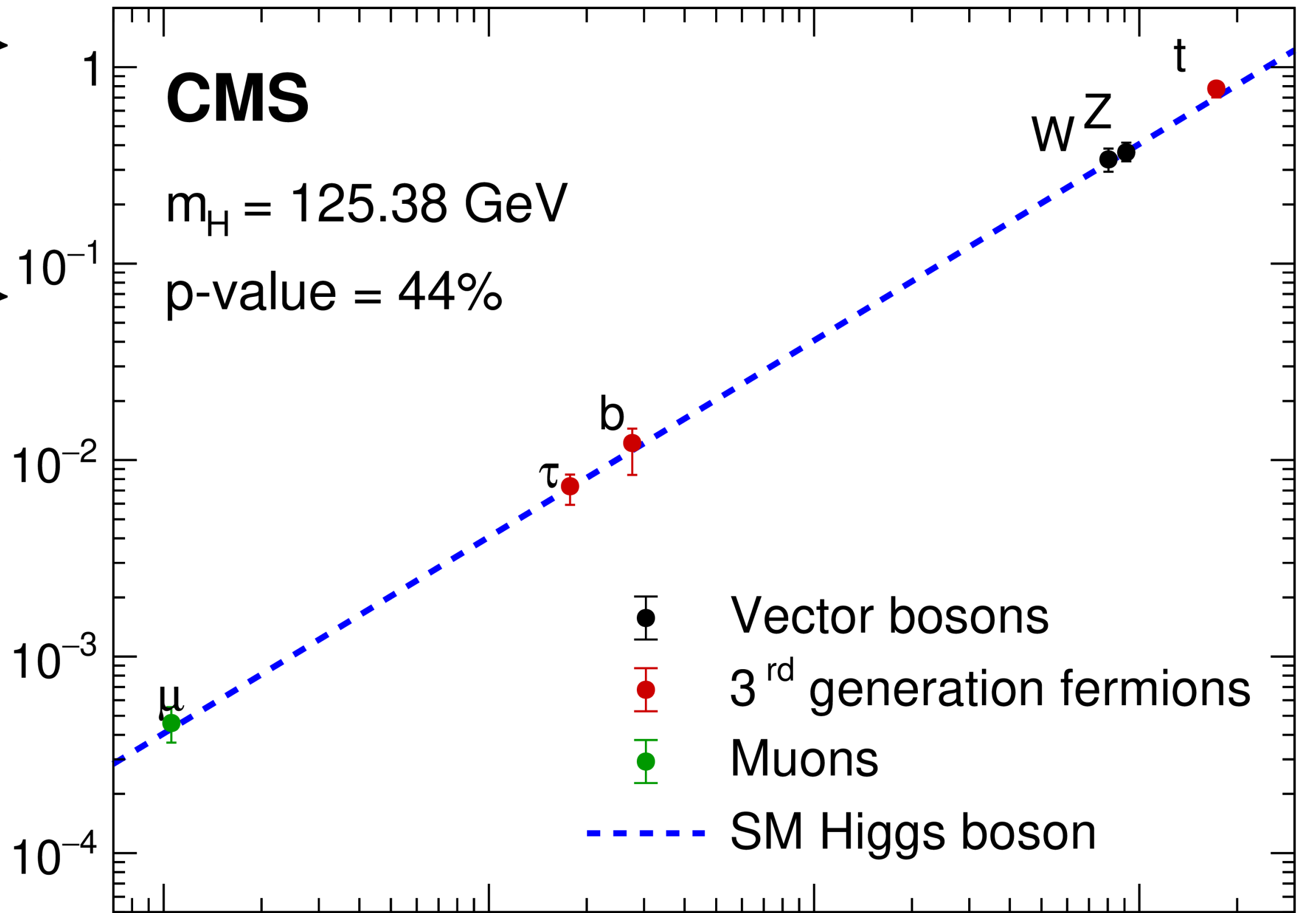
35.9-137 fb⁻¹ (13 TeV)



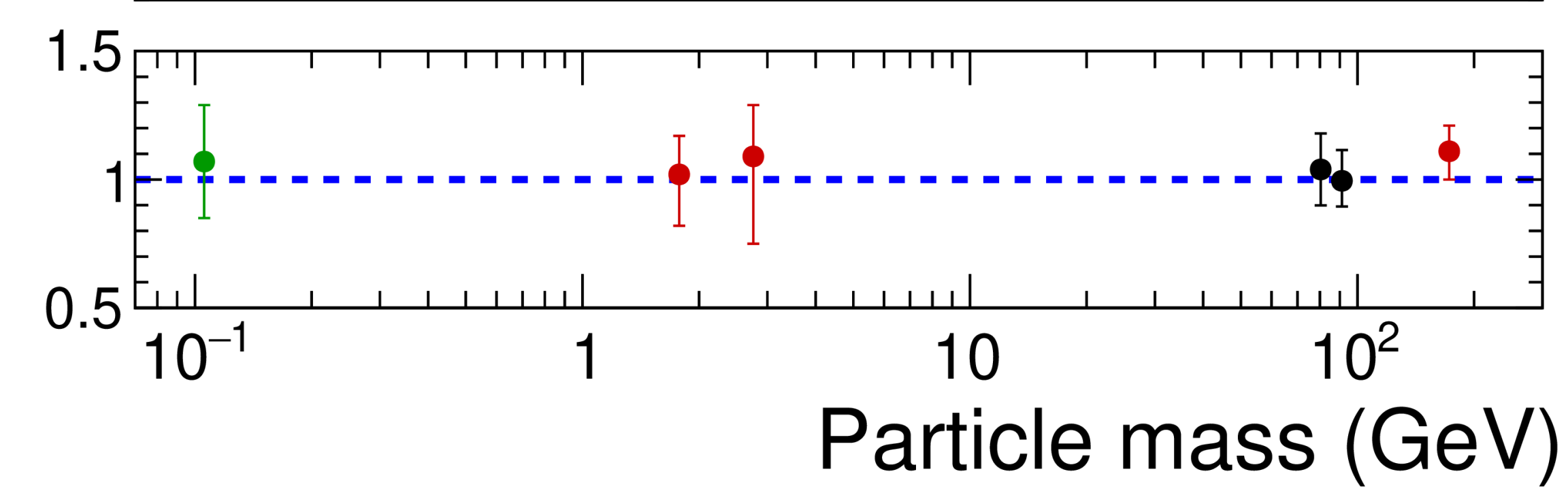
Category	Process	Energy	Reference	
Electroweak	W	7 TeV	JHEP 10 (2011) 132	
	W	8 TeV	PRL 112 (2014) 191802	
	W	13 TeV	SMP-15-004	
	Z	7 TeV	JHEP 10 (2011) 132	
	Z	8 TeV	PRL 112 (2014) 191802	
	Z	13 TeV	SMP-15-011	
di-Boson	Wγ	7 TeV	PRD 89 (2014) 092005	
	Wγ	13 TeV	PRL 126 252002 (2021)	
	Zγ	7 TeV	PRD 89 (2014) 092005	
	Zγ	8 TeV	JHEP 04 (2015) 164	
	WW	7 TeV	EPJC 73 (2013) 2610	
	WW	8 TeV	EPJC 76 (2016) 401	
	WW	13 TeV	PRD 102 092001 (2020)	
	WZ	7 TeV	EPJC 77 (2017) 236	
	WZ	8 TeV	EPJC 77 (2017) 236	
	WZ	13 TeV	Submitted to JHEP	
	ZZ	7 TeV	JHEP 01 (2013) 063	
	ZZ	8 TeV	PLB 740 (2015) 250	
ZZ	13 TeV	EPJC 81 (2021) 200		
tri-Boson	VV	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WWW	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WWZ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WZZ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	ZZZ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WVy	8 TeV	PRD 90 032008 (2014)	
	Wyy	8 TeV	JHEP 10 (2017) 072	
	Wyy	13 TeV	JHEP 10 (2021) 174	
	Zyy	8 TeV	JHEP 10 (2017) 072	
	Zyy	13 TeV	JHEP 10 (2021) 174	
	VBF and VBS	VBF W	8 TeV	JHEP 11 (2016) 147
		VBF W	13 TeV	EPJC 80 (2020) 43
		VBF Z	7 TeV	JHEP 10 (2013) 101
		VBF Z	8 TeV	EPJC 75 (2015) 66
		VBF Z	13 TeV	EPJC 78 (2018) 589
EW WW		13 TeV	Submitted to PLB	
ex. yy → WW		8 TeV	JHEP 08 (2016) 119	
EW qqWy		8 TeV	JHEP 06 (2017) 106	
EW qqWy		13 TeV	PLB 811 (2020) 135988	
EW os WW		13 TeV	SMP-21-001	
EW ss WW		8 TeV	PRL 114 051801 (2015)	
EW ss WW		13 TeV	PRL 120 081801 (2018)	
EW qqZy		8 TeV	PLB 770 (2017) 380	
EW qqZy		13 TeV	PRD 104 072001 (2021)	
EW qqWZ		13 TeV	PLB 809 (2020) 135710	
EW qqZZ	13 TeV	PLB 812 (2020) 135992		
Top	tt	7 TeV	JHEP 08 (2016) 029	
	tt	8 TeV	JHEP 08 (2016) 029	
	tt	13 TeV	Accepted by PRD	
	tτ → cτ	7 TeV	JHEP 12 (2012) 035	
	tτ → cτ	8 TeV	JHEP 06 (2014) 090	
	tτ → cτ	13 TeV	PLB 72 (2017) 752	
	tW	7 TeV	PRL 110 (2013) 022003	
	tW	8 TeV	PRL 112 (2014) 231802	
	tW	13 TeV	JHEP 10 (2018) 117	
	tτ → cτ	8 TeV	JHEP 09 (2016) 027	
	tty	13 TeV	Submitted to JHEP	
	tZq	8 TeV	JHEP 07 (2017) 003	
	tZq	13 TeV	Submitted to JHEP	
	ttZ	7 TeV	PRL 110 (2013) 172002	
	ttZ	8 TeV	JHEP 01 (2016) 096	
ttZ	13 TeV	JHEP 03 (2020) 056		
tγ	13 TeV	PRL 121 221802 (2018)		
ttW	8 TeV	JHEP 01 (2016) 096		
ttW	13 TeV	JHEP 08 (2018) 011		
tttt	13 TeV	EPJC 80 (2020) 75		
Higgs	ggH	7 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	ggH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	ggH	13 TeV	HIG-19-005	
	VBF qqH	7 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	VBF qqH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	VBF qqH	13 TeV	HIG-19-005	
	VH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	WH	13 TeV	HIG-19-005	
	ZH	13 TeV	HIG-19-005	
	ttH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
ttH	13 TeV	HIG-19-005		
tH	13 TeV	EPJC 81 (2021) 378		
HH	13 TeV	HIG-20-005		

CMS preliminary

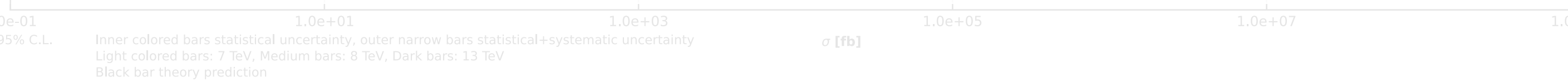
$$\frac{m_F}{\kappa_F v} \text{ or } \sqrt{\frac{m_V}{\kappa_V v}}$$



Ratio to SM



Particle mass (GeV)



TeV

36 pb⁻¹
18 pb⁻¹
43 pb⁻¹
36 pb⁻¹
18 pb⁻¹
2 fb⁻¹

5 fb⁻¹
137 fb⁻¹
5 fb⁻¹
20 fb⁻¹
5 fb⁻¹
19 fb⁻¹
36 fb⁻¹
5 fb⁻¹
20 fb⁻¹
137 fb⁻¹
20 fb⁻¹
137 fb⁻¹
137 fb⁻¹
137 fb⁻¹
137 fb⁻¹
19 fb⁻¹
19 fb⁻¹
19 fb⁻¹
19 fb⁻¹
19 fb⁻¹
19 fb⁻¹
19 fb⁻¹
36 fb⁻¹
5 fb⁻¹
20 fb⁻¹
36 fb⁻¹
138 fb⁻¹
20 fb⁻¹
20 fb⁻¹
36 fb⁻¹
138 fb⁻¹
19 fb⁻¹
137 fb⁻¹
20 fb⁻¹
36 fb⁻¹
137 fb⁻¹
137 fb⁻¹
5 fb⁻¹
20 fb⁻¹
20 fb⁻¹
137 fb⁻¹
2 fb⁻¹
5 fb⁻¹
2 fb⁻¹
5 fb⁻¹
5 fb⁻¹
20 fb⁻¹
36 fb⁻¹
20 fb⁻¹
138 fb⁻¹
20 fb⁻¹
138 fb⁻¹
20 fb⁻¹
78 fb⁻¹
36 fb⁻¹
20 fb⁻¹
36 fb⁻¹
137 fb⁻¹
137 fb⁻¹
138 fb⁻¹
138 fb⁻¹

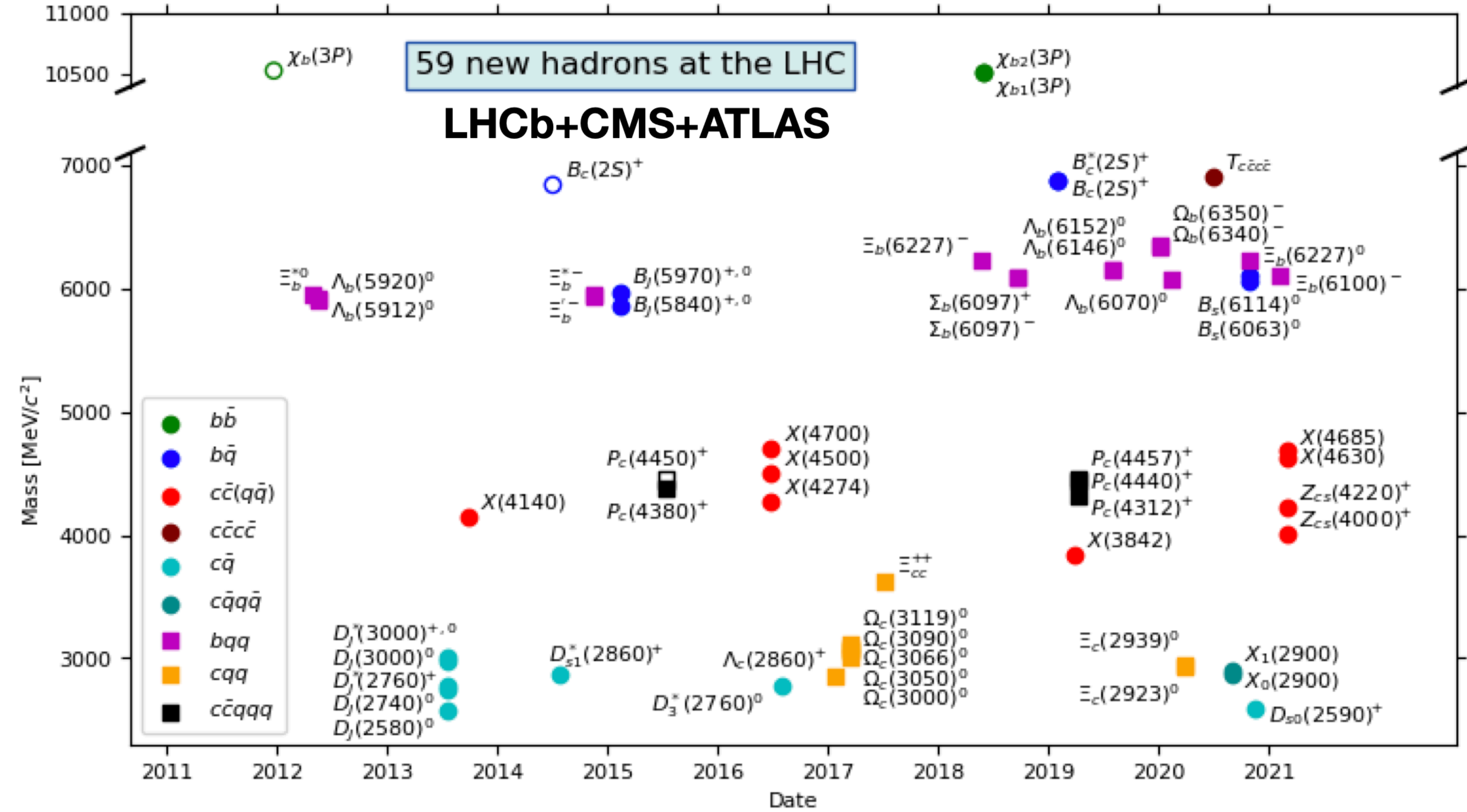
Jan 2022

35.9-137 fb⁻¹ (13 TeV)

SPETTROSCOPIA



Electroweak	W	7 TeV	JHEP 10 (2011) 132	
	W	8 TeV	PRL 112 (2014) 191802	
	W	13 TeV	SMP-15-004	
	Z	7 TeV	JHEP 10 (2011) 132	
	Z	8 TeV	PRL 112 (2014) 191802	
	Z	13 TeV	SMP-15-011	
di-Boson	Wγ	7 TeV	PRD 89 (2014) 092005	
	Wγ	13 TeV	PRL 126 252002 (2021)	
	Zγ	7 TeV	PRD 89 (2014) 092005	
	Zγ	8 TeV	JHEP 04 (2015) 164	
	WW	7 TeV	EPJC 73 (2013) 2610	
	WW	8 TeV	EPJC 76 (2016) 401	
	WW	13 TeV	PRD 102 092001 (2020)	
	WZ	7 TeV	EPJC 77 (2017) 236	
	WZ	8 TeV	EPJC 77 (2017) 236	
	WZ	13 TeV	Submitted to JHEP	
	ZZ	7 TeV	JHEP 01 (2013) 063	
	ZZ	8 TeV	PLB 740 (2015) 250	
ZZ	13 TeV	EPJC 81 (2021) 200		
tri-Boson	VVγ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WWW	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WWZ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WZZ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	ZZZ	13 TeV	PRL 125 151802 (2020)	
	WVγ	8 TeV	PRD 90 032008 (2014)	
	WVγ	8 TeV	JHEP 10 (2017) 072	
	WVγ	13 TeV	JHEP 10 (2021) 174	
	ZVγ	8 TeV	JHEP 10 (2017) 072	
	ZVγ	13 TeV	JHEP 10 (2021) 174	
	VBF and VBS	VBF W	8 TeV	JHEP 11 (2016) 147
		VBF W	13 TeV	EPJC 80 (2020) 43
VBF Z		7 TeV	JHEP 10 (2013) 101	
VBF Z		8 TeV	EPJC 75 (2015) 66	
VBF Z		13 TeV	EPJC 78 (2018) 589	
EW VV		13 TeV	Submitted to PLB	
ex. yy → WW		8 TeV	JHEP 08 (2016) 119	
EW qqWγ		8 TeV	JHEP 06 (2017) 106	
EW qqWγ		13 TeV	PLB 811 (2020) 135988	
EW os WW		13 TeV	SMP-21-001	
EW ss WW		8 TeV	PRL 114 051801 (2015)	
EW ss WW		13 TeV	PRL 120 081801 (2018)	
EW qqZγ		8 TeV	PLB 770 (2017) 380	
EW qqZγ		13 TeV	PRD 104 072001 (2021)	
EW qqWZ		13 TeV	PLB 809 (2020) 135710	
EW qqZZ		13 TeV	PLB 812 (2020) 135992	
Top	tt	7 TeV	JHEP 08 (2016) 029	
	tt	8 TeV	JHEP 08 (2016) 029	
	tt	13 TeV	Accepted by PRD	
	tτ	7 TeV	JHEP 12 (2012) 035	
	tτ	8 TeV	JHEP 06 (2014) 090	
	tτ	13 TeV	PLB 72 (2017) 752	
	tW	7 TeV	PRL 110 (2013) 022003	
	tW	8 TeV	PRL 112 (2014) 231802	
	tW	13 TeV	JHEP 10 (2018) 117	
	tτ	8 TeV	JHEP 09 (2016) 027	
	tτ	13 TeV	Submitted to JHEP	
	tZq	8 TeV	JHEP 07 (2017) 003	
	tZq	13 TeV	Submitted to JHEP	
	ttZ	7 TeV	PRL 110 (2013) 172002	
	ttZ	8 TeV	JHEP 01 (2016) 096	
	ttZ	13 TeV	JHEP 03 (2020) 056	
tγ	13 TeV	PRL 121 221802 (2018)		
ttW	8 TeV	JHEP 01 (2016) 096		
ttW	13 TeV	JHEP 08 (2018) 011		
tttt	13 TeV	EPJC 80 (2020) 75		
Higgs	ggH	7 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	ggH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	ggH	13 TeV	HIG-19-005	
	VBF qqH	7 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	VBF qqH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	VBF qqH	13 TeV	HIG-19-005	
	VH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	WH	13 TeV	HIG-19-005	
	ZH	13 TeV	HIG-19-005	
	ttH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212	
	ttH	13 TeV	HIG-19-005	
	tH	13 TeV	EPJC 81 (2021) 378	
HH	13 TeV	HIG-20-005		



Measured cross sections and exclusion limits at 95% C.L. See here for all cross section summary plots

Inner colored bars statistical uncertainty, outer narrow bars statistical+systematic uncertainty

Light colored bars: 7 TeV, Medium bars: 8 TeV, Dark bars: 13 TeV

Black bar theory prediction

σ [fb]

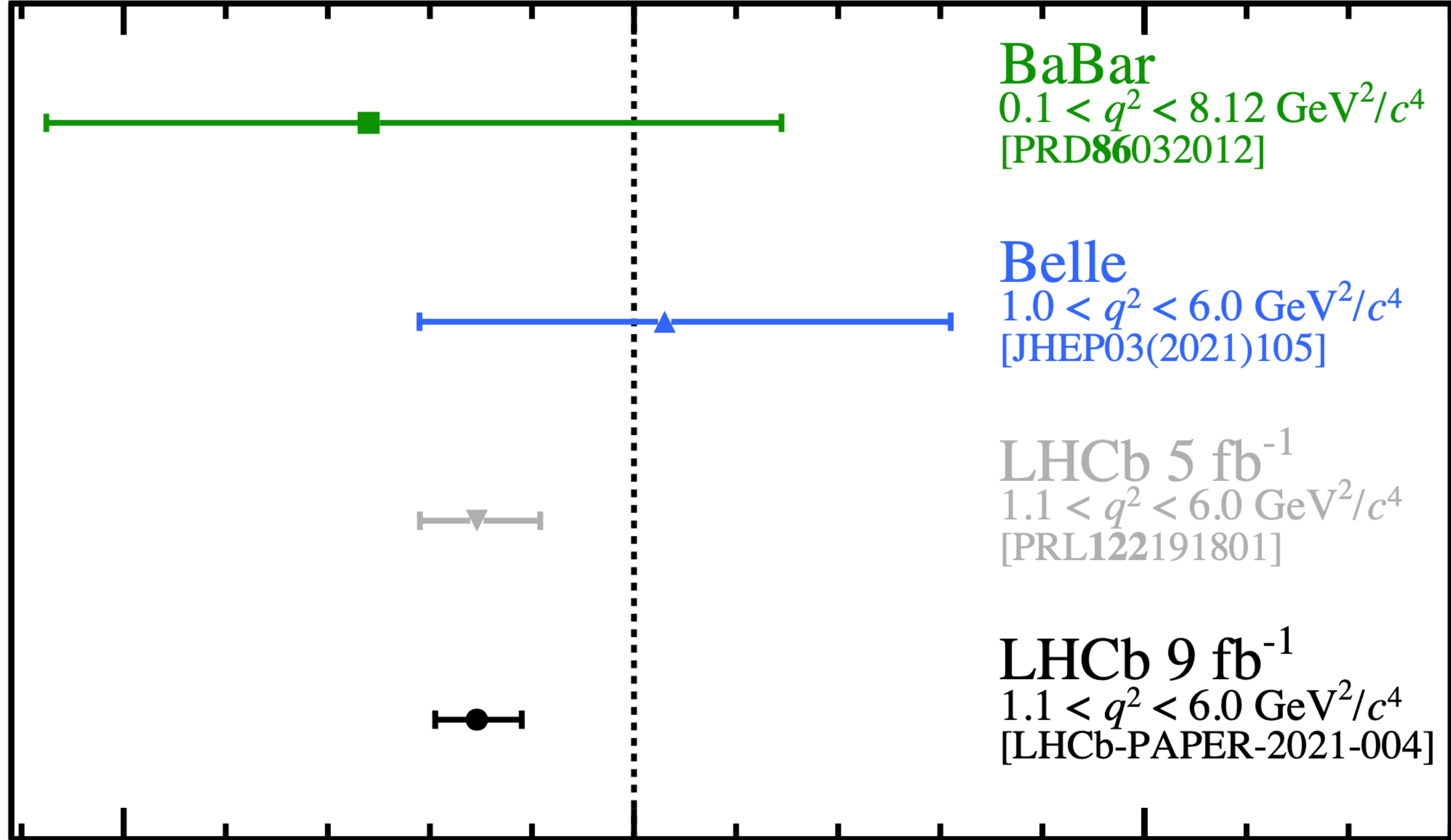
Jan 2022

Overview of CMS cross section results

35.9-137 fb⁻¹ (13 TeV)



Electroweak	W	7 TeV	JHEP 10 (2011) 132
	W	8 TeV	PRL 112 (2014) 191802
	W	13 TeV	SMP-15-004
	Z	7 TeV	JHEP 10 (2011) 132
	Z	8 TeV	PRL 112 (2014) 191802
di-Boson	Wγ	7 TeV	PRD 89
	Wγ	13 TeV	PRL 126
	Zγ	7 TeV	PRD 89
	Zγ	8 TeV	
	WW	7 TeV	
	WW	8 TeV	
	WW	13 TeV	
	WZ	7 TeV	
	WZ	8 TeV	
	WZ	13 TeV	
tri-Boson	ZZ	7 TeV	
	ZZ	8 TeV	
	ZZ	13 TeV	1
	VV	13 TeV	
	WWW	13 TeV	
	WWZ	13 TeV	1
	WZZ	13 TeV	
	ZZZ	13 TeV	
	WVy	8 TeV	
	Wyy	8 TeV	
VBF and VBS	VBF W	8 TeV	
	VBF W	13 TeV	
	VBF Z	7 TeV	
	VBF Z	8 TeV	
	VBF Z	13 TeV	
	EW WW	13 TeV	
	ex. yy → WW	8 TeV	
	EW qqWy	8 TeV	
	EW qqWy	13 TeV	
	EW os WW	13 TeV	
	EW ss WW	8 TeV	
	EW ss WW	13 TeV	
	EW qqZγ	8 TeV	
	EW qqZγ	13 TeV	
	EW qqWZ	13 TeV	
EW qqZZ	13 TeV		
Top	tt	7 TeV	
	tt	8 TeV	
	tt	13 TeV	
	tτ	7 TeV	
	tτ	8 TeV	
	tτ	13 TeV	
	tW	7 TeV	
	tW	8 TeV	
	tW	13 TeV	
	tτ	8 TeV	
	tty	13 TeV	
	tZq	8 TeV	
	tZq	13 TeV	
	ttZ	7 TeV	
	ttZ	8 TeV	
ttZ	13 TeV		
tγ	13 TeV		
ttW	8 TeV		
ttW	13 TeV		
tttt	13 TeV		
Higgs	ggH	7 TeV	
	ggH	8 TeV	
	ggH	13 TeV	
	VBF qqH	7 TeV	EPJC 75 (2015) 212
	VBF qqH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212
	VBF qqH	13 TeV	HIG-19-005
	VH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212
	WH	13 TeV	HIG-19-005
	ZH	13 TeV	HIG-19-005
	ttH	8 TeV	EPJC 75 (2015) 212
	ttH	13 TeV	HIG-19-005
	tH	13 TeV	EPJC 81 (2021) 378
	HH	13 TeV	HIG-20-005



BaBar
 $0.1 < q^2 < 8.12 \text{ GeV}^2/c^4$
 [PRD86032012]

Belle
 $1.0 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2/c^4$
 [JHEP03(2021)105]

LHCb 5 fb⁻¹
 $1.1 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2/c^4$
 [PRL122191801]

LHCb 9 fb⁻¹
 $1.1 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2/c^4$
 [LHCb-PAPER-2021-004]

$$R_{K^{(*)}} := \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-)} \stackrel{\text{SM}}{\approx} 1$$



Measured cross sections and exclusion limits at 95% C.L. See here for all cross section summary plots

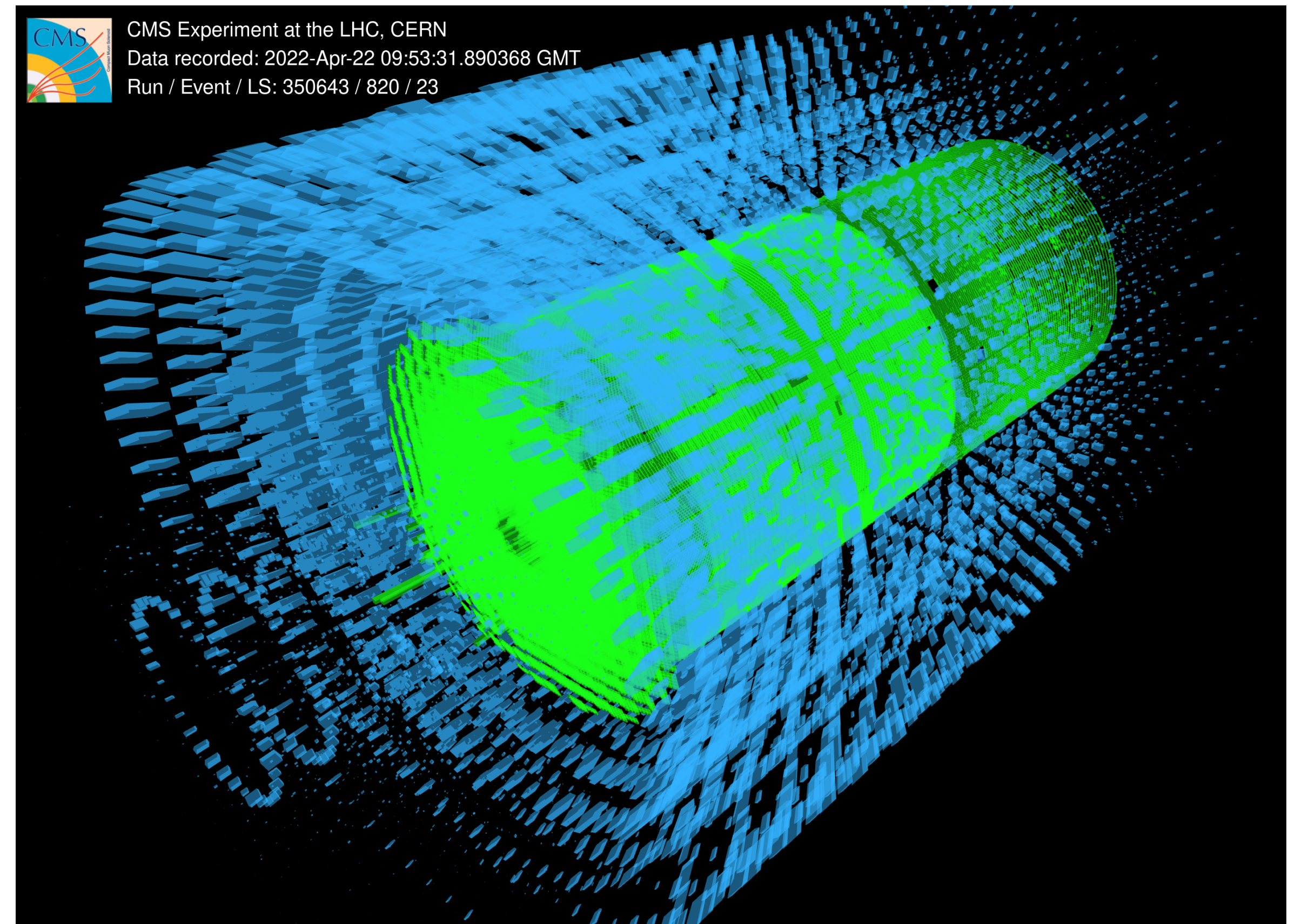
Inner colored bars statistical uncertainty, outer narrow bars statistical+systematic uncertainty
 Light colored bars: 7 TeV, Medium bars: 8 TeV, Dark bars: 13 TeV
 Black bar theory prediction

σ [fb]

Jan 2022

È appena cominciato il Run3!

- I fasci di protoni sono tornati a circolare nell'LHC
 - Splash events registrati a CMS il 22 Aprile
- LHCb inizia la presa dati dopo un estensivo upgrade (seguono dettagli)
- Diverse misure attualmente in "tensione" con lo SM beneficeranno dei nuovi dati

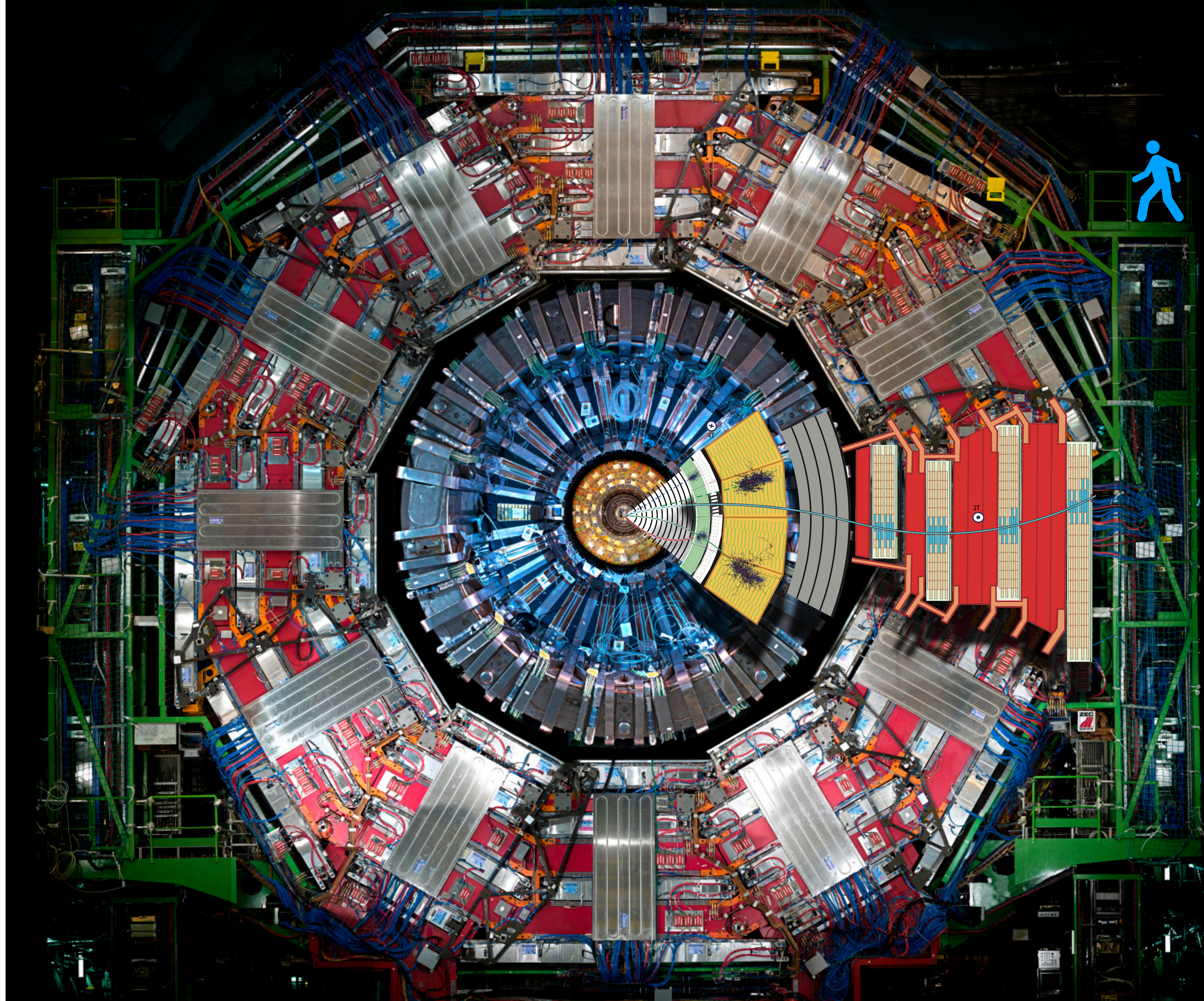


The CMS detector approach

General purpose

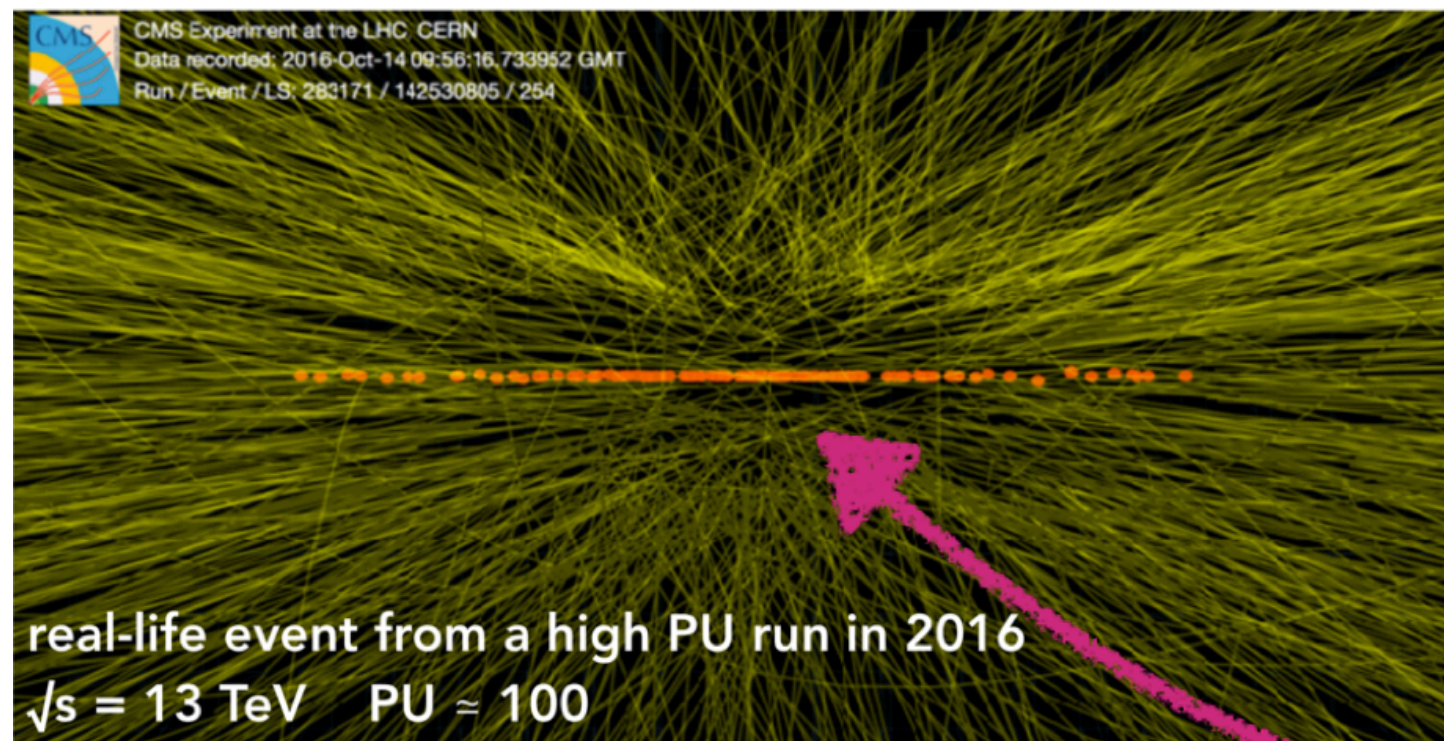
Potente magneti e struttura a strati per misurare il quadri-momento delle particelle

- Inner tracking: Pixels+Strips ○
- Calorimetri: ECAL+HCAL ○
- Outer tracking: Muon system ○

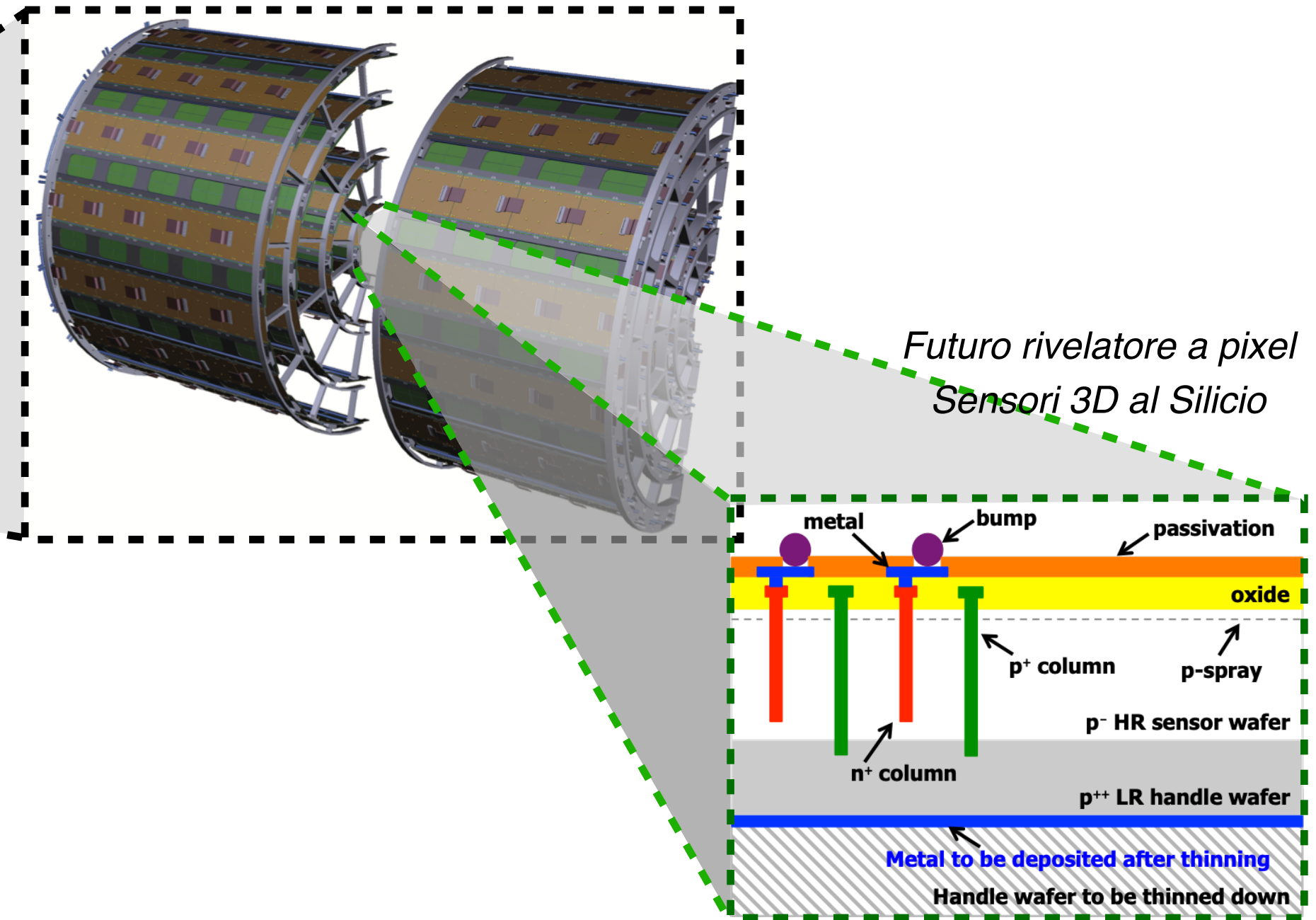
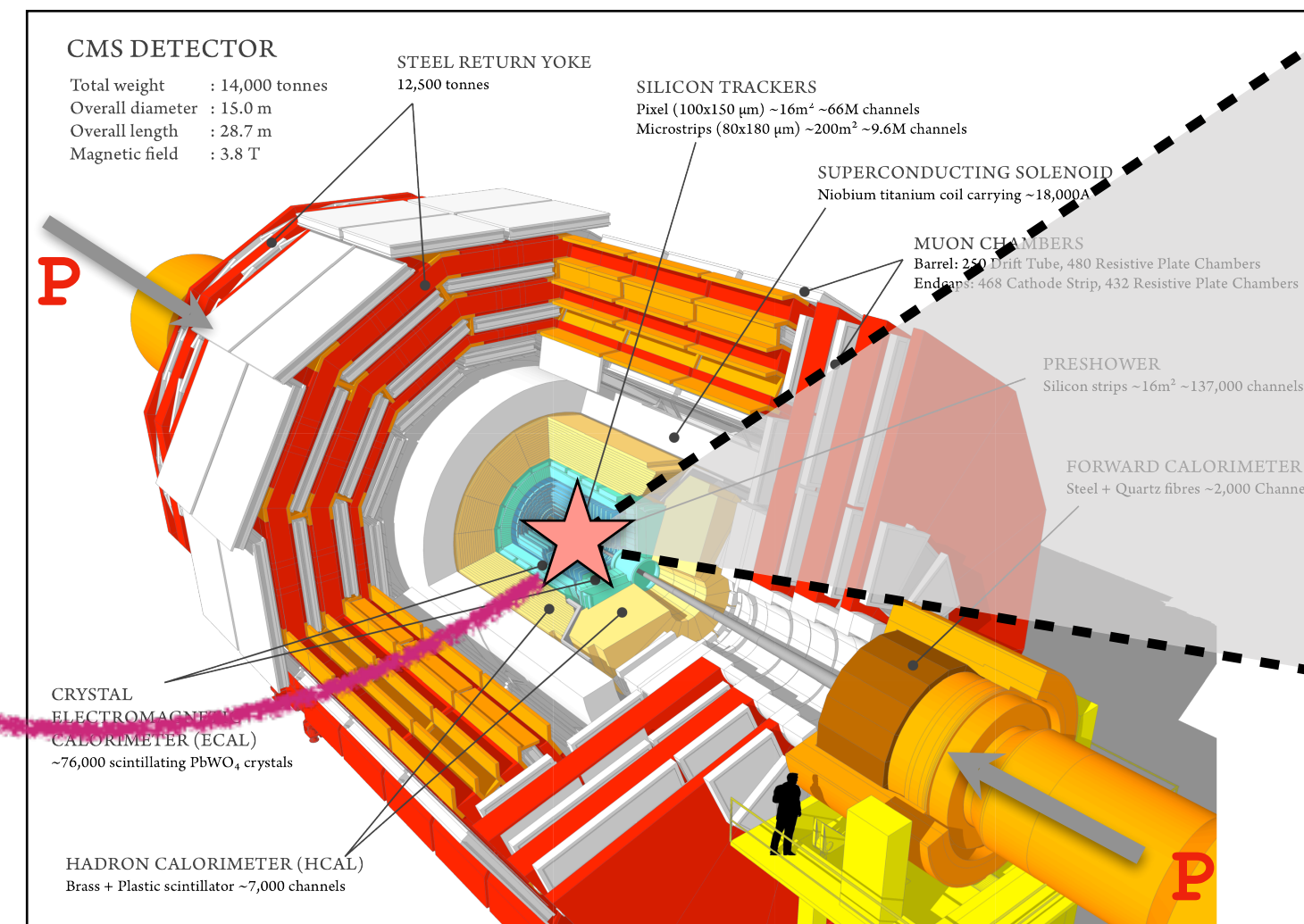


CMS Upgrade Pixel detector

Attività
strumentale



Fino a 200 collisioni per evento ad HL-LHC



- Per l'upgrade di LHC, CMS deve sostituire il rivelatore a pixel, situato nel cuore dell'esperimento, con uno a granularità più fine (x6) e più resistente alle radiazioni (x10)

- A Milano Bicocca siamo coinvolti nell'R&D dei sensori e nello sviluppo del software per pilotarlo e calibrarlo
- Caratterizzazione dei prototipi con test su fascio e simulazioni

CMS ECAL

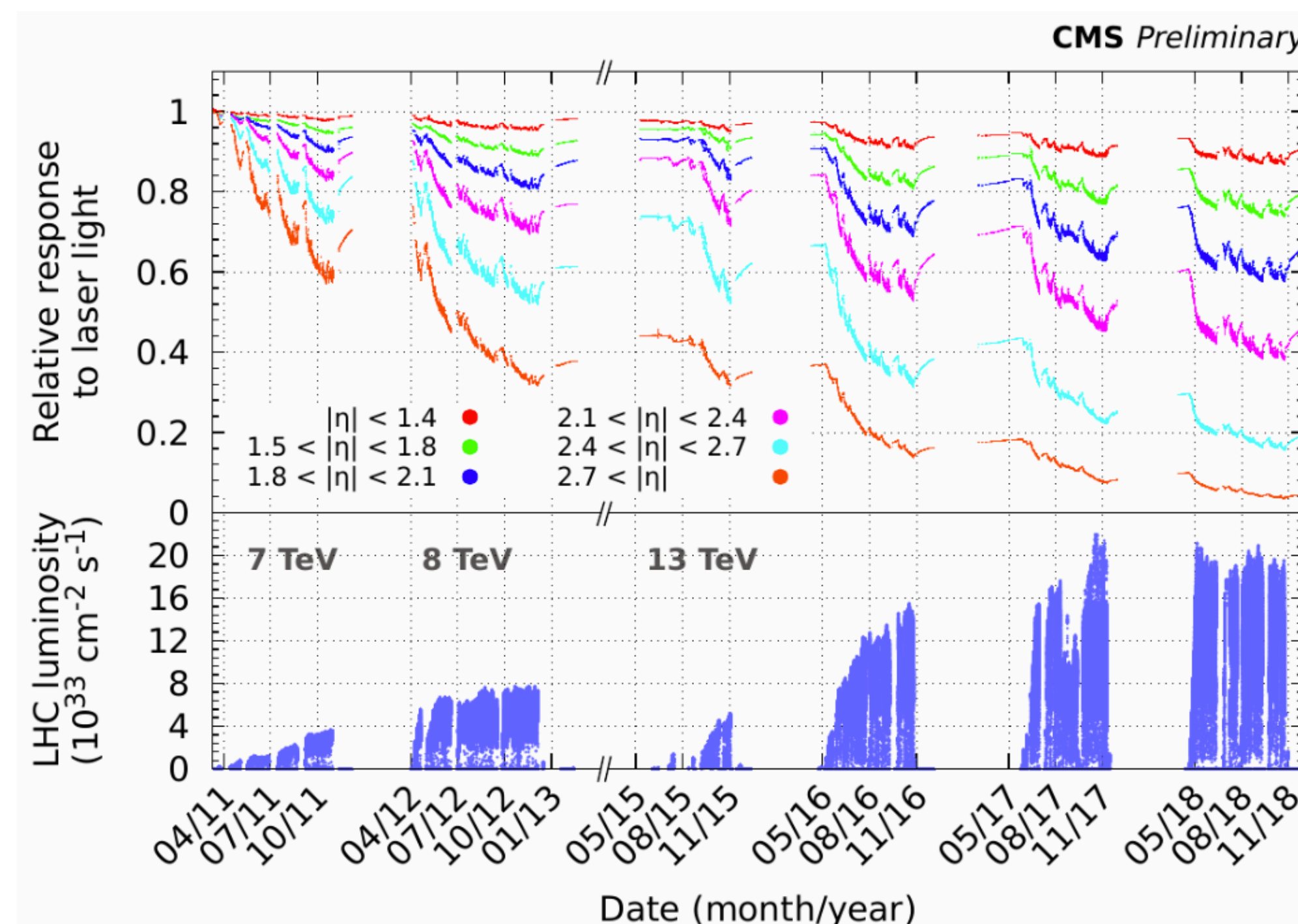
- ECAL è composto da 75848 cristalli scintillanti
 - Misura di energia tramite misura della luce di scintillazione
- L'esposizione alla radiazione **danneggia i cristalli**
 - Sistema di monitoring della trasparenza
 - Correzioni disponibili con un ritardo di 48h



Attività strumentale

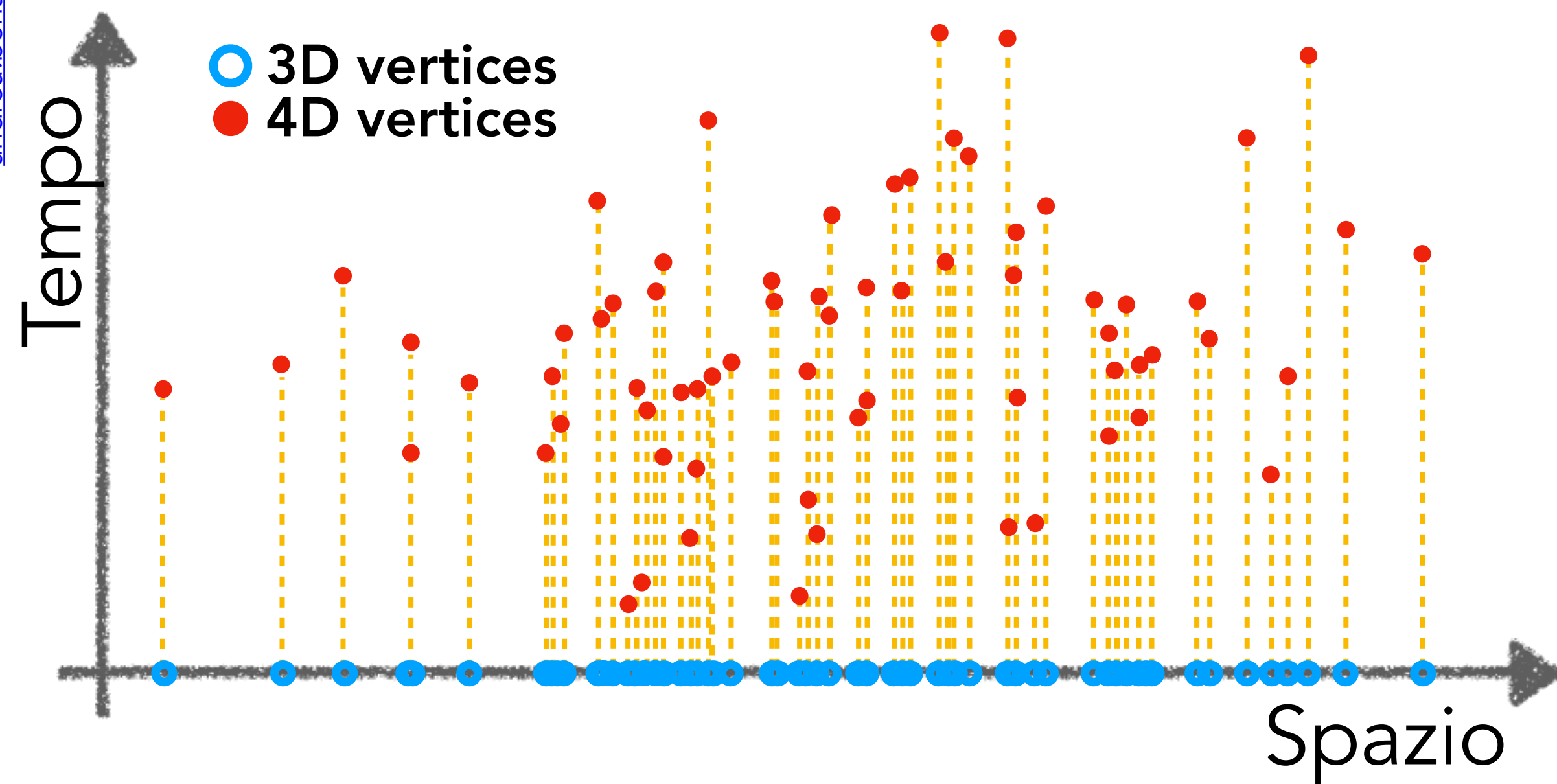
Transparency evolution prediction with machine learning

- E' possibile **predire la perdita di trasparenza?**
 - Usare i dati esistenti per esercitare **algoritmi ML**
 - Applicare le giuste correzioni online
 - Particolarmente critico per sistema di trigger



MTD: un rivelatore per il futuro!

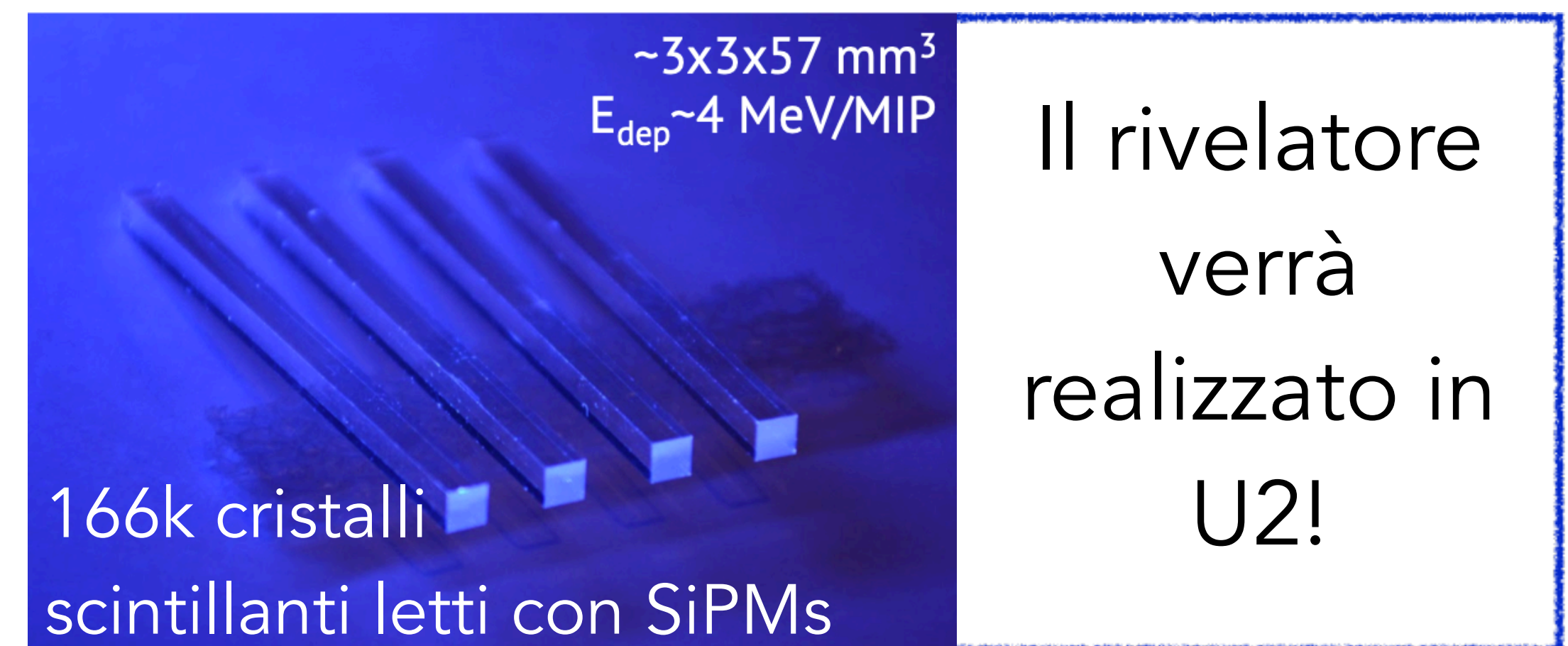
- **High-Lumi LHC:** $L_{inst} = 7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - 140-200 collisioni per evento (pileup)
- **Misure temporali → cambio di paradigma**
 - per mitigare l'impatto del pileup sulla fisica



Mitigazione del pileup con misure di tempo

Attività strumentale

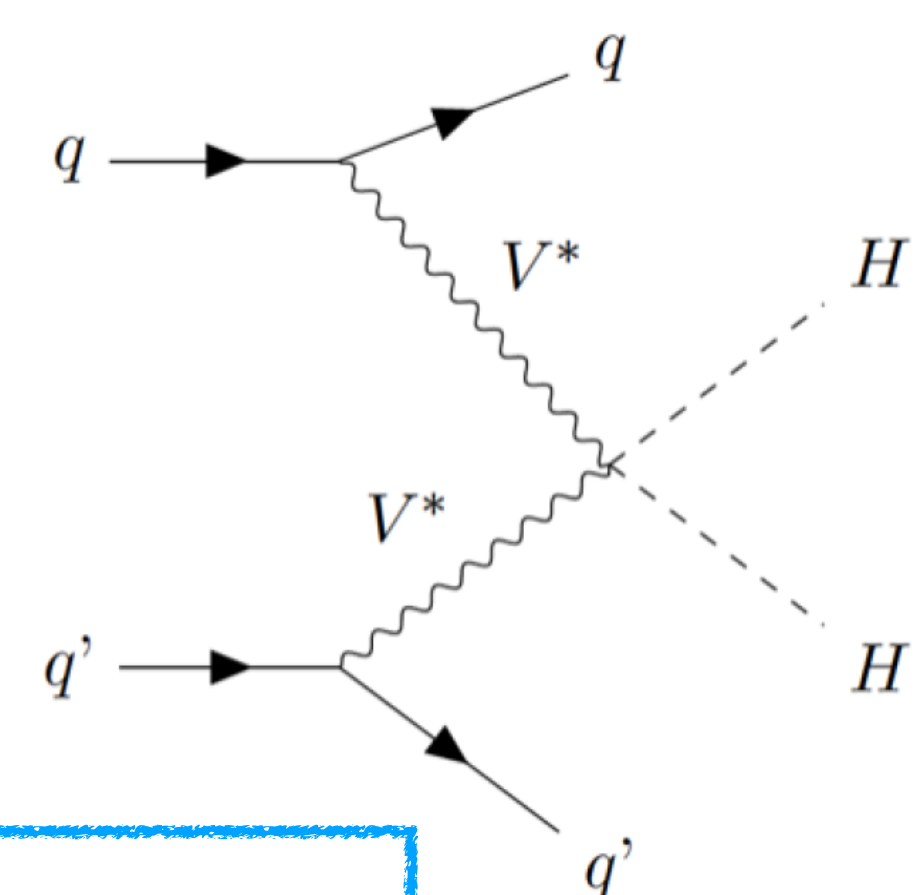
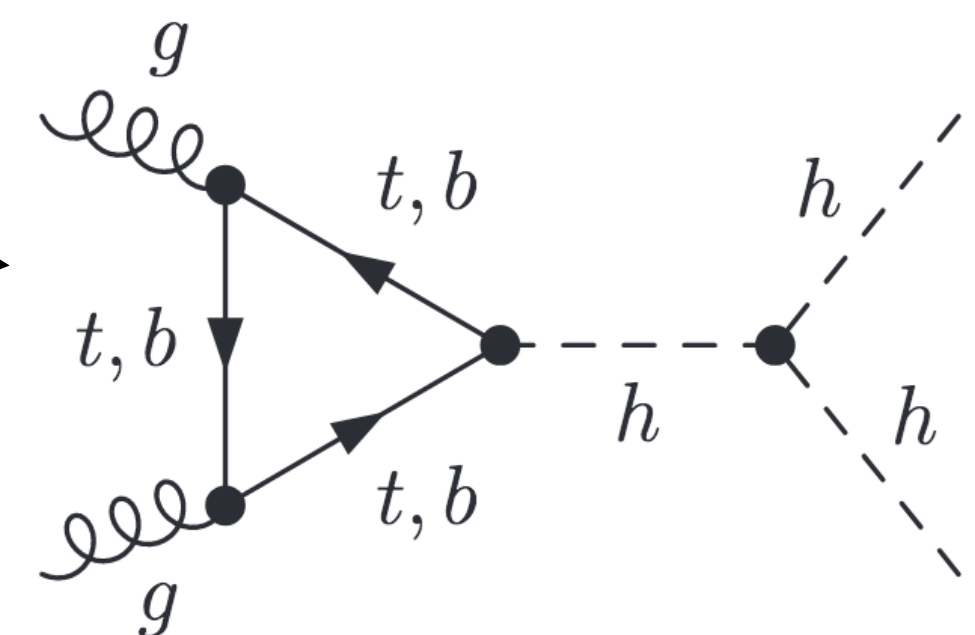
- Nuovo rivelatore **importante contributo di Bicocca!**
 - misurare il tempo delle tracce al alta risoluzione
 - **Ricostruzione 4D** → risolvere vertici sovrapposti ma separati in tempo
 - Migliorare associazione traccia-vertice
- Analisi di dati raccolti usando prototipi su fascio di protoni e simulazione



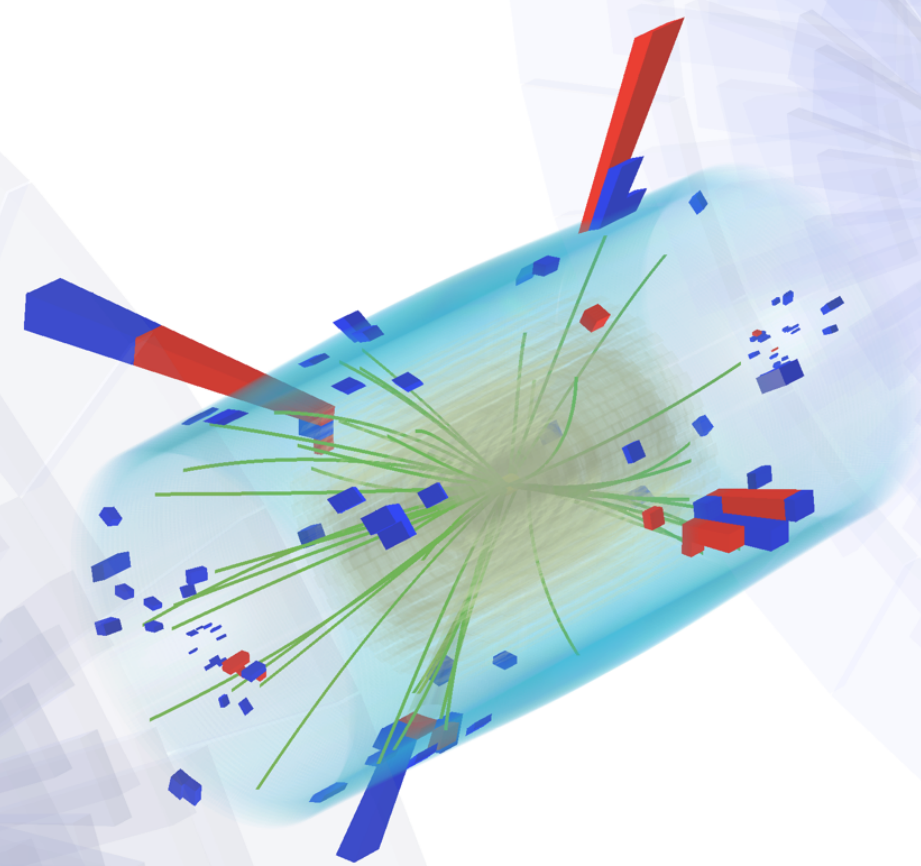
Analisi

Higgs physics: $HH \rightarrow b\bar{b}\tau^+\tau^-$

- Ricerca di eventi con **produzione di coppie di bosoni di Higgs**
 - Caratterizzazione del settore di Higgs
 - Misura del tri-linear self-coupling (λ_{HHH})
 - Misura del coupling con due bosoni vettori (c_{2V})
 - Portale di accesso a eventi di **Nuova Fisica**



Tecniche utilizzate
Deep Neural Network
Simulazioni Monte Carlo

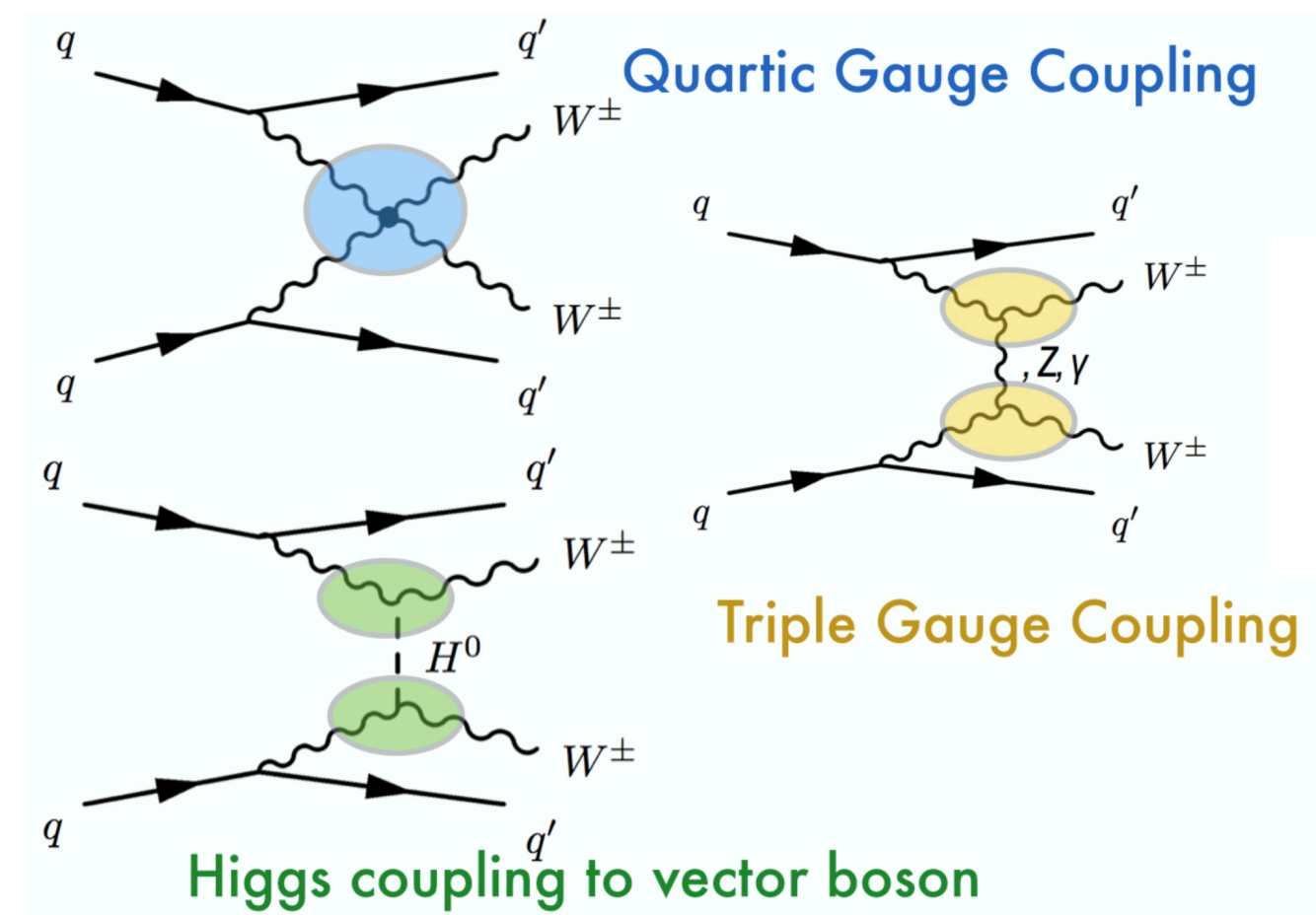


Candidato evento $HH \rightarrow b\bar{b}\tau_h\tau_h$ registrato nell'Ottobre 2016 dall'esperimento CMS

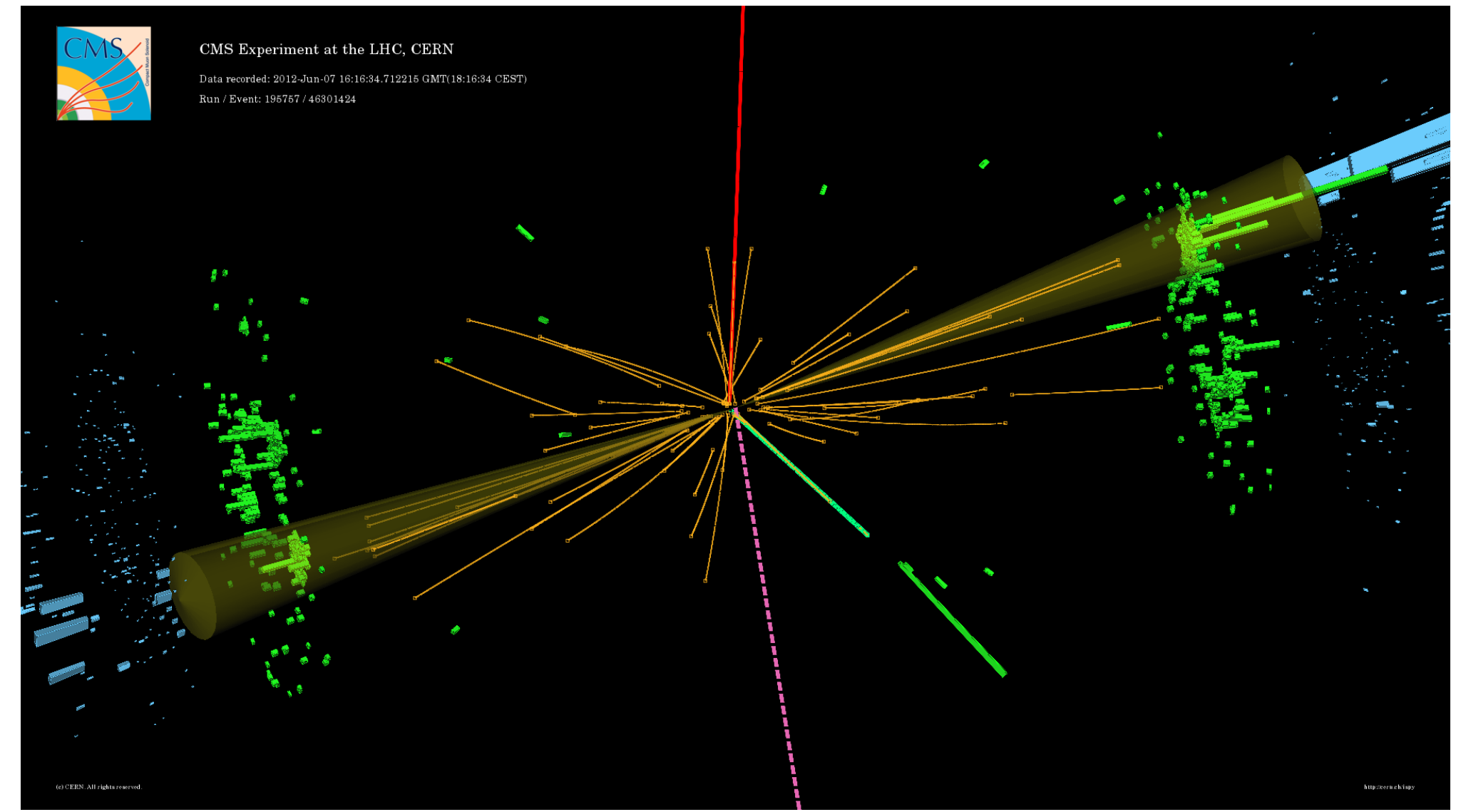
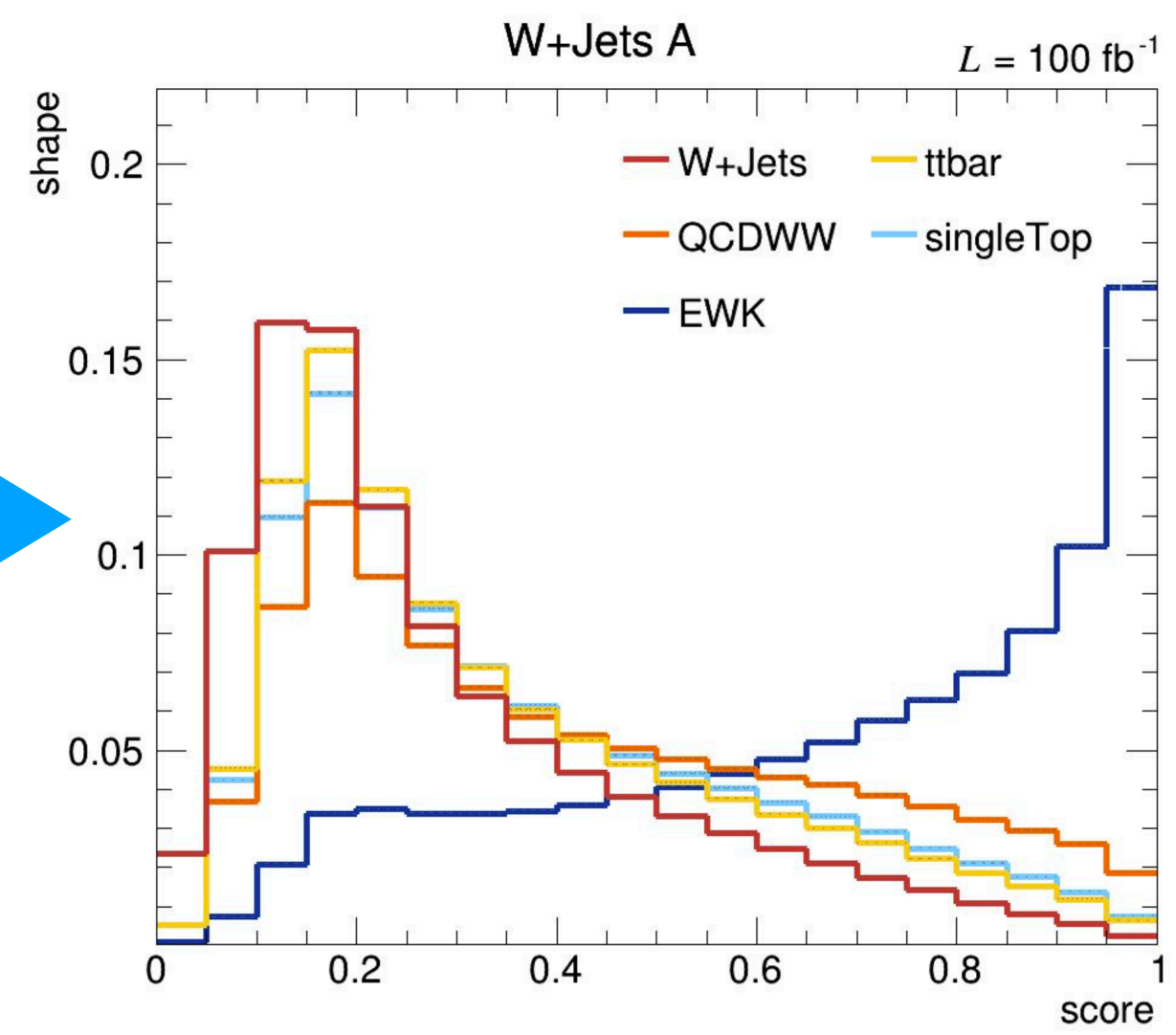
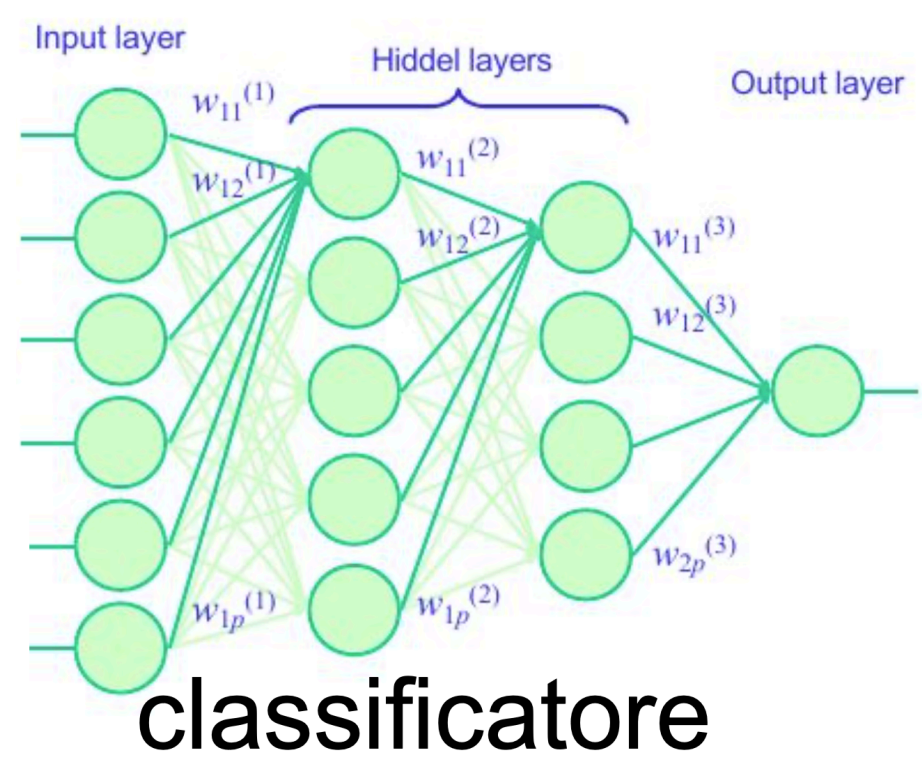
Scattering di bosoni vettori (VBS)

Analisi

- Misura della **sezione d'urto electroweak**
 - Test efficace del meccanismo di Higgs
 - Qualunque deviazione dalle attese potrebbe essere indicazione di **Nuova Fisica**
- **Processo raro** (α^6_{EWK}) generalmente con **molto fondo**
 - più interessante man mano che si acquisiscono dati
 - **Deep Neural Network** per identificare e scartare i fondi



Contatti: pietro.govoni@mib.infn.it; andrea.massironi@mib.infn.it; marco.paganoni@mib.infn.it



Bicocca coordina una **rete mondiale** di analisi sperimentali + previsioni teoriche su VBS!

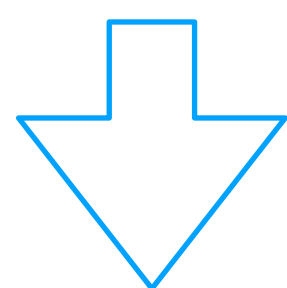
VBS: interpretazioni oltre lo Standard Model

- **Teorie di campo efficaci (EFT)** per cercare manifestazioni di fisica BSM alla scala di massa accessibile (M_Z)

$$\mathcal{L}_{EFT} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_{i,d>4} \frac{c_i}{\Lambda^{d-4}} \mathcal{O}^{(d_i)}$$

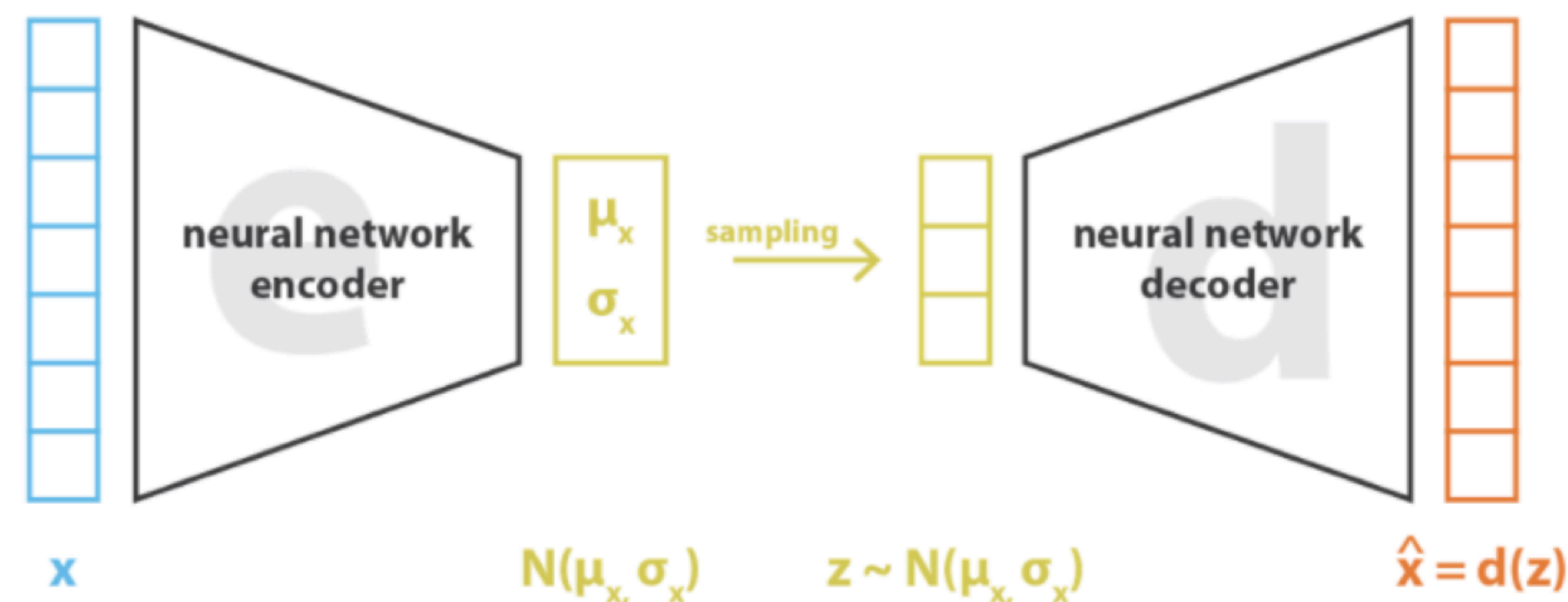
Scala della nuova fisica

Gli operatori EFT modificano le distribuzioni delle osservabili

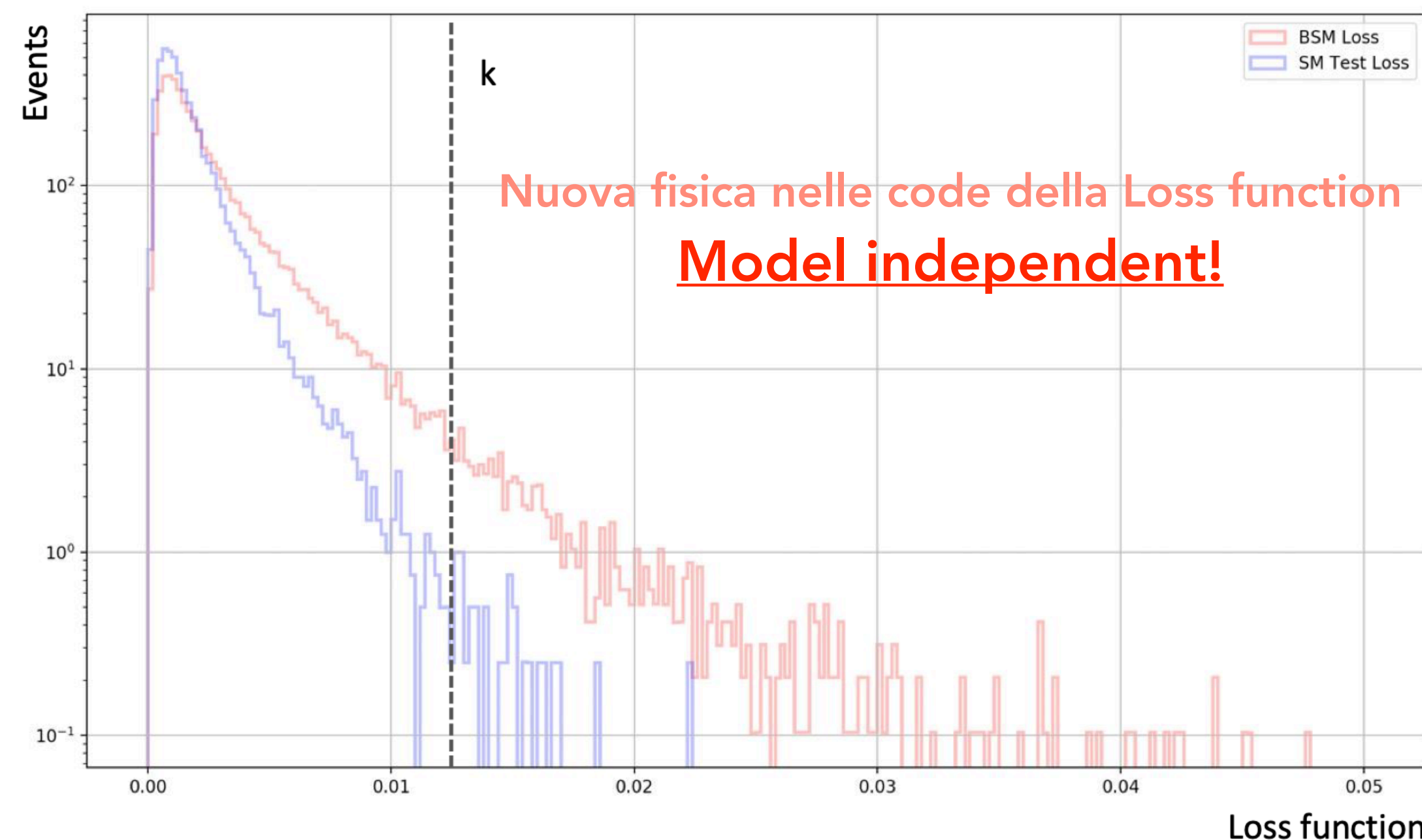


Cercare anomalie nei dati con approcci basati su **Machine Learning**

Train Auto-Encoder on SM physics (Semi-supervised)



Loss function



Fisica del sapore in CMS:

Analisi angolare del decadimento $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu \mu$



Cosa facciamo a Milano?
Usiamo una GPU Nvidia Tesla per:

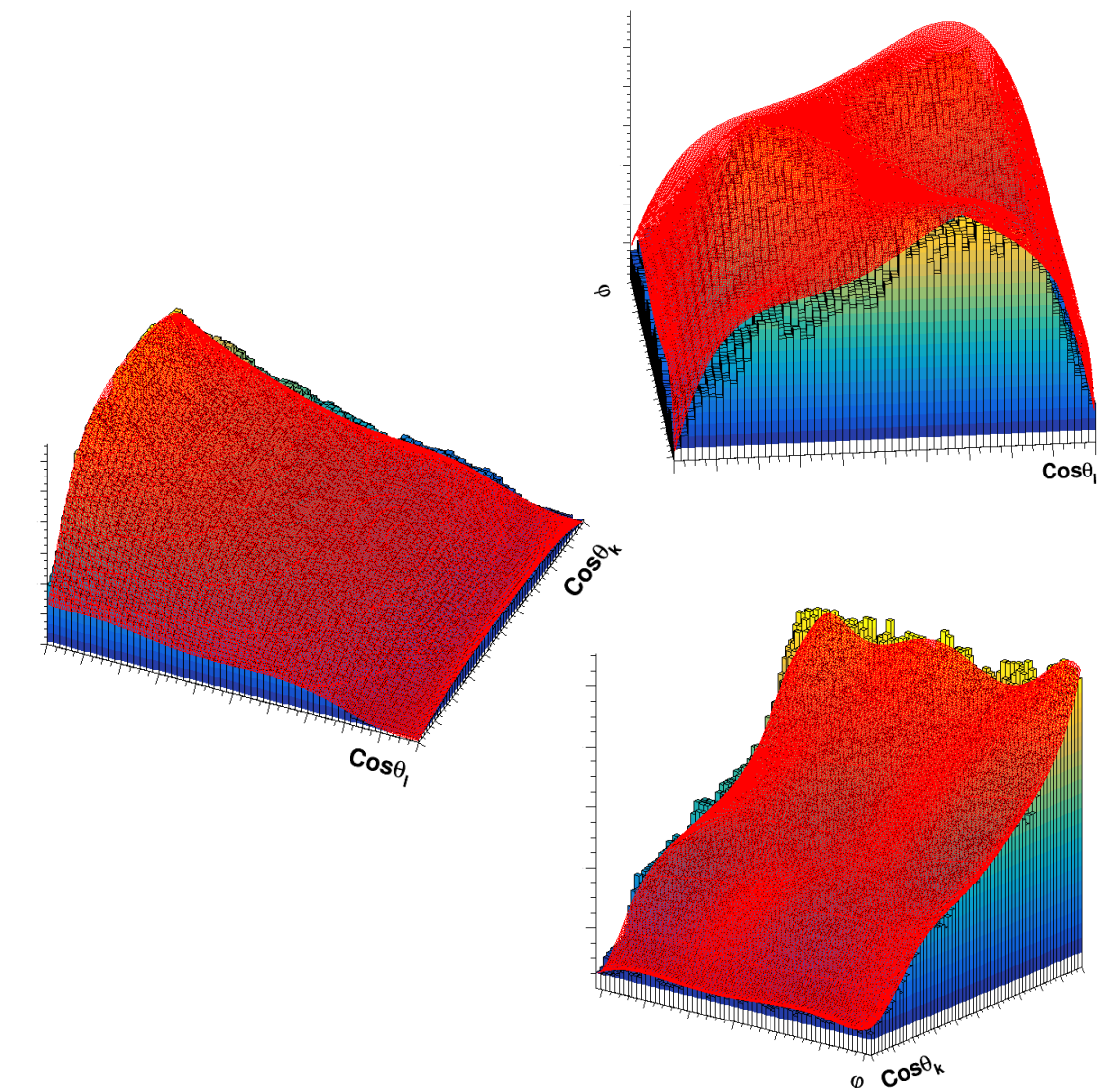
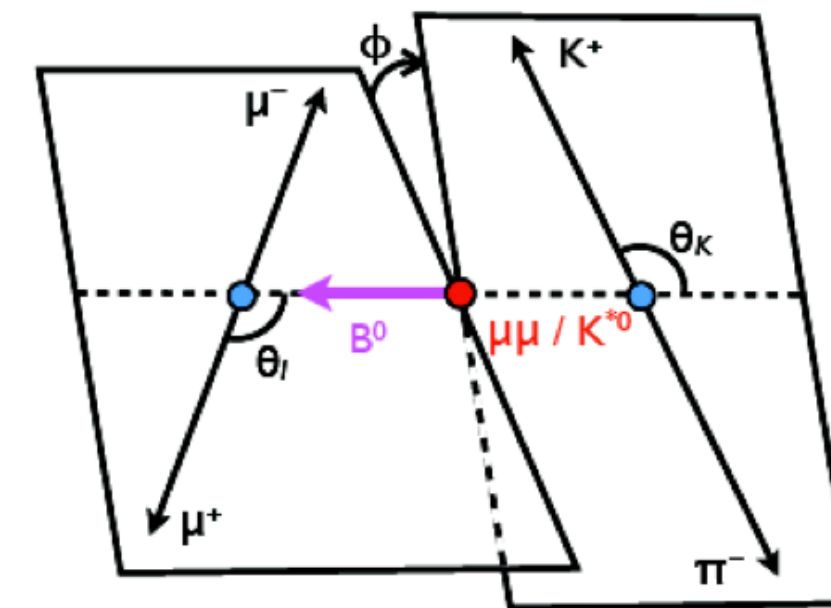


Studio Angolare degli
Eventi di fondo (3 Dim)

Studio Angolare
dell'efficienza di
Ricostruzione

...studi fondamentali per l'analisi!

- Ricerca indiretta di fisica **oltre lo SM** attraverso decadimenti FCNC rari
 - $b \rightarrow sll$ (soppresso in SM)
 - analisi angolare: molte osservabili con incertezze teoriche ridotte
- Tecniche di **Machine Learning** per discriminare il segnale



I punti di forza sono il pixel detector* e il muon detector

*contributo di Bicocca!

The LHCb detector approach

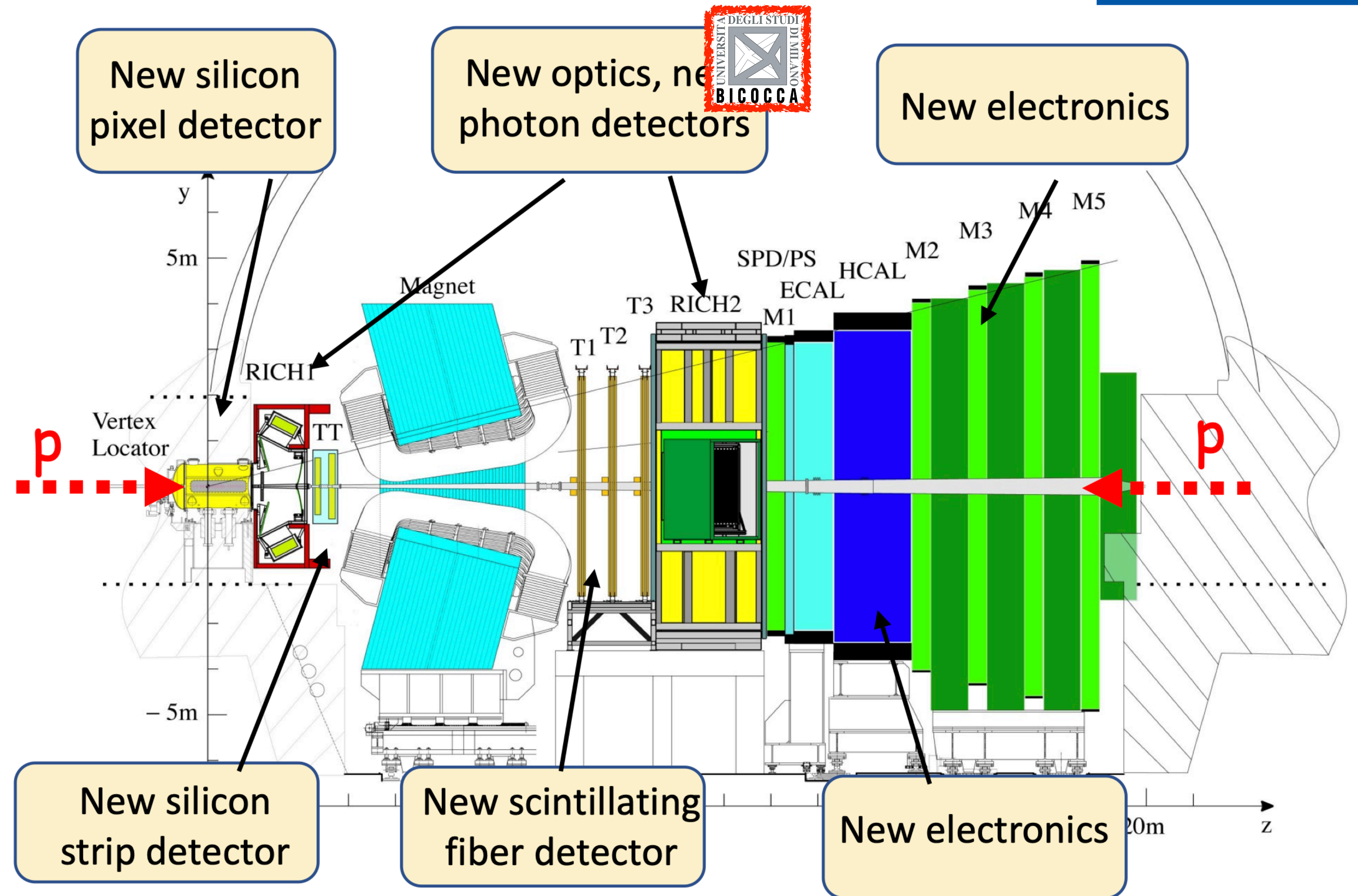


Ricerca di nuova fisica
tramite studi di violazione
di CP e decadimenti rari
nel settore dei b e c-quarks

Rivelatore di vertici e sistema di
tracciamento interno/esterno

Calorimetri: EM+HAD ○

Rivelatori Cherenkov: particle ID ○



LHCb in Bicocca

<https://sites.google.com/unimib.it/lhcbbicocca/home>



Analisi

Attività strumentale

Misure Matrice CKM (V_{ub})

Test Universalità Leptonica

Fisica del Charm CPV+Mixing

Calorimetria Upgrade II

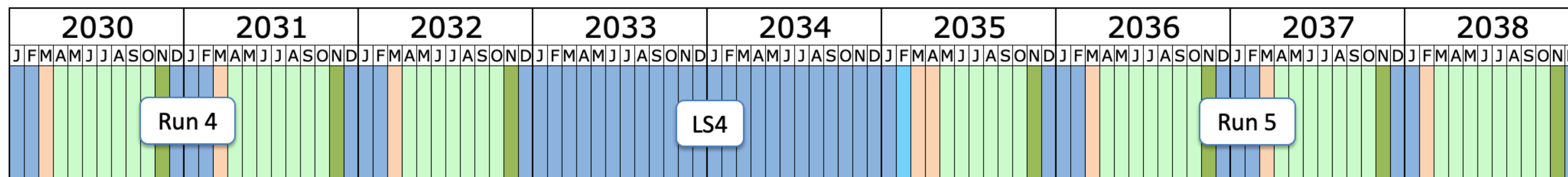
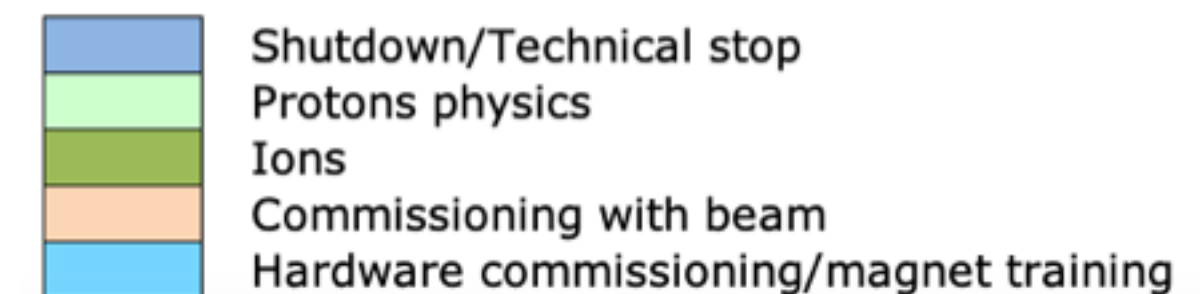
Tecniche ML per la ricostruzione degli eventi

Elettronica Fotomoltiplicatori

Programma LHC



LHCb Upgrade: **nuovo** rivelatore raccoglierà **5x** i dati di LHCb



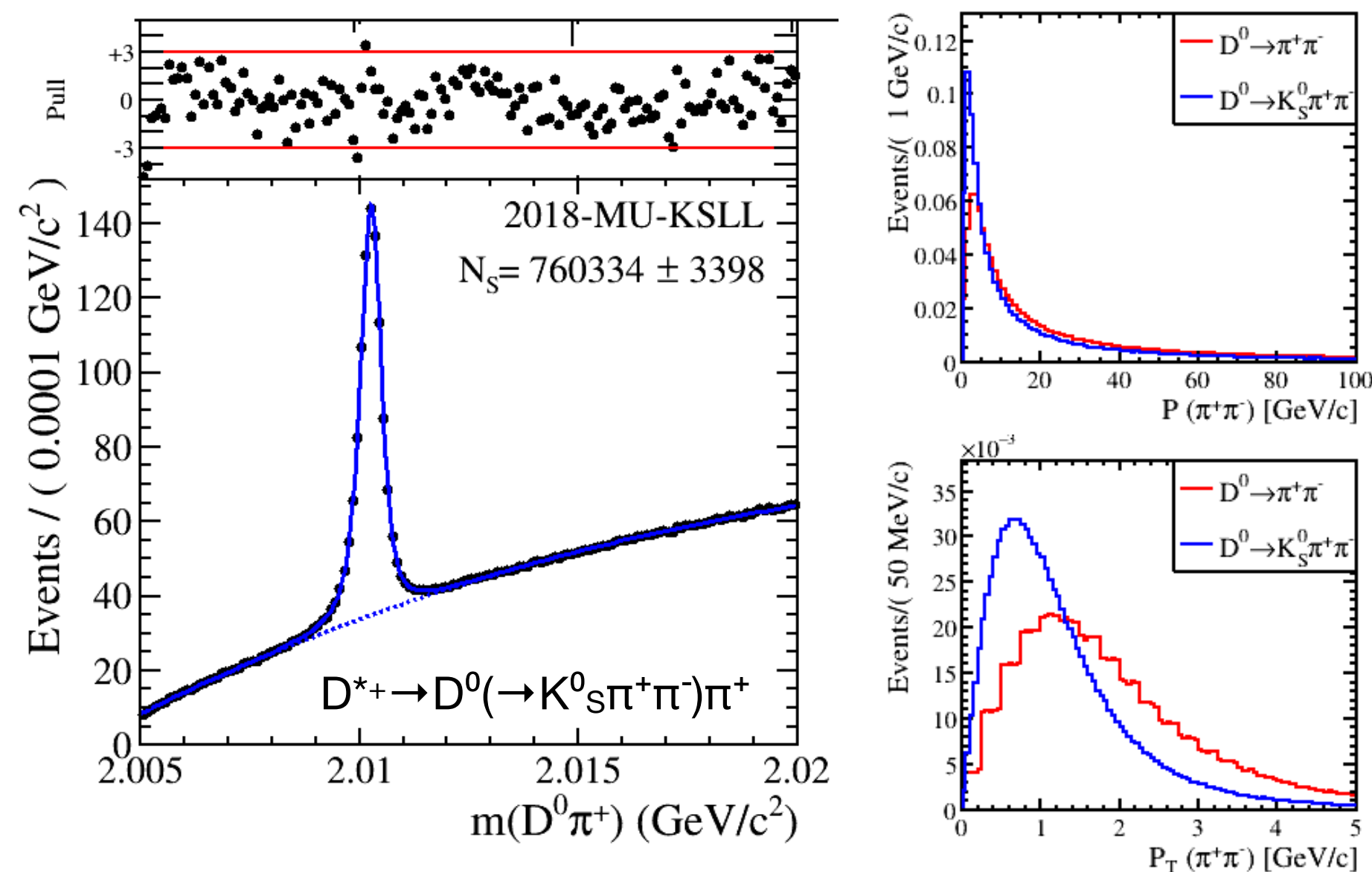
Proposte Tesi LHCb

Analisi

Analisi Dati

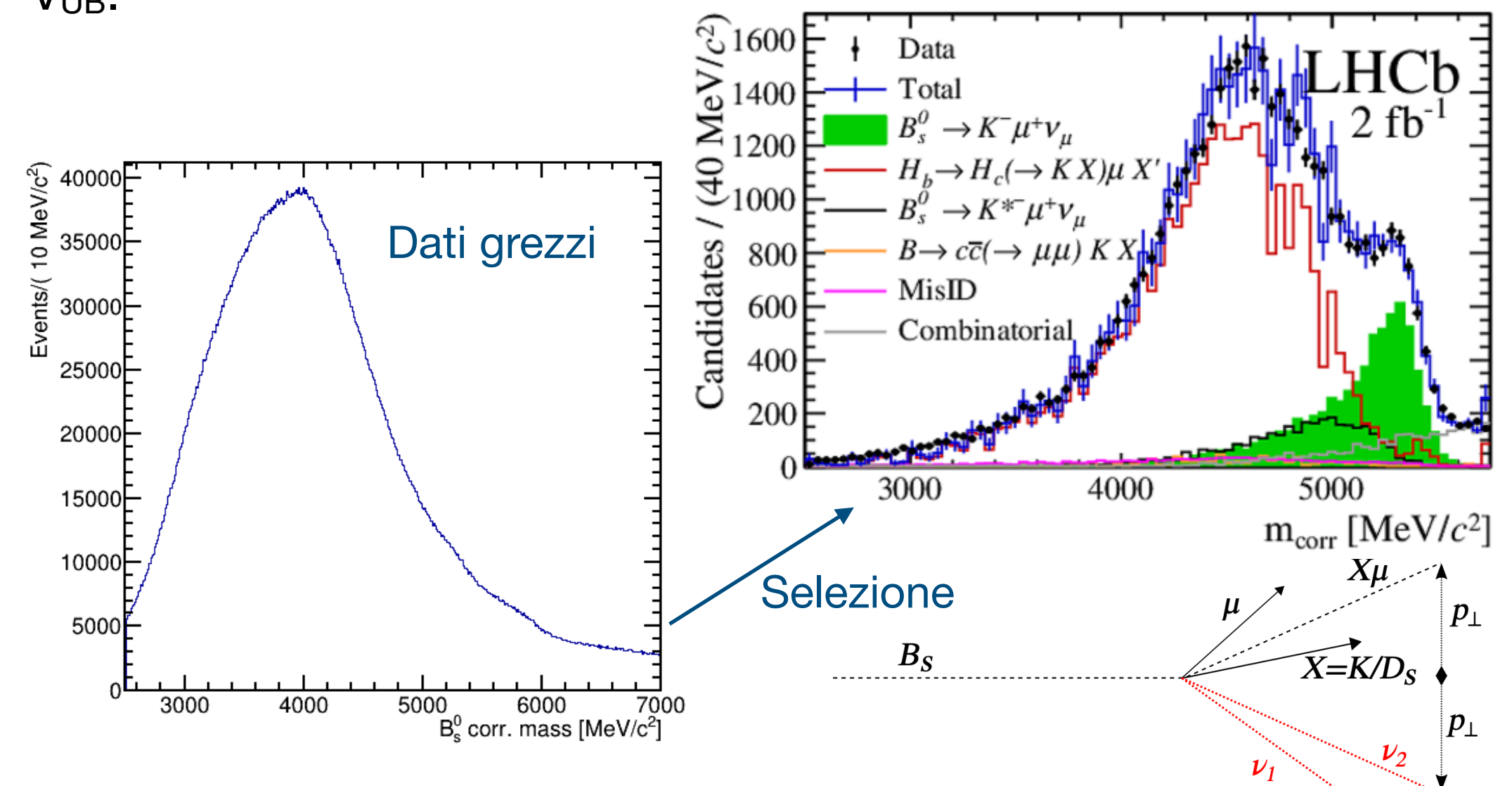
Studio dell'Efficienza di ricostruzione di $D^0 \rightarrow K^0_S \pi^+ \pi^-$

- **Campione:** Dati **reali** e simulati
- **Obiettivo:** Determinare la **correzione** da applicare a $D^0 \rightarrow K^0_S \pi^+ \pi^-$ perché la simulazione sia in perfetto accordo con i dati.
- **Metodo:** Si confronteranno numerose variabili (e.g. p , p_T, \dots) nel campione simulato e nei dati $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ (controllo). Si allena e testa un classificatore **Machine Learning** per ripesare il campione simulato in modo che sia in accordo perfetto con i dati. Il risultato del classificatore viene applicato al campione simulato $D^0 \rightarrow K^0_S \pi^+ \pi^-$ e si verifica l'accordo con i dati reali.



Applicazioni di ML agli studi del decadimento $B^0_s \rightarrow K^- \mu^+ \nu$

- **Campione:** Dati **reali** e simulati
- **Obiettivo:** Separare il segnale dal fondo.
- **Metodo:** Si studierà l'isolamento del segnale rispetto alle altre particelle cariche o neutre nell'evento e si ricostruirà in modo **indiretto il momento del B^0_s** tenendo conto del neutrino che sfugge alla ricostruzione. Entrambi gli esercizi richiedono l'uso di tecniche di **Machine Learning** da validare su eventi simulati e dati reali anche utilizzando il canale di controllo $B^0_s \rightarrow D^-_s \mu^+ \nu$ finalizzato alla misura di V_{UB} .



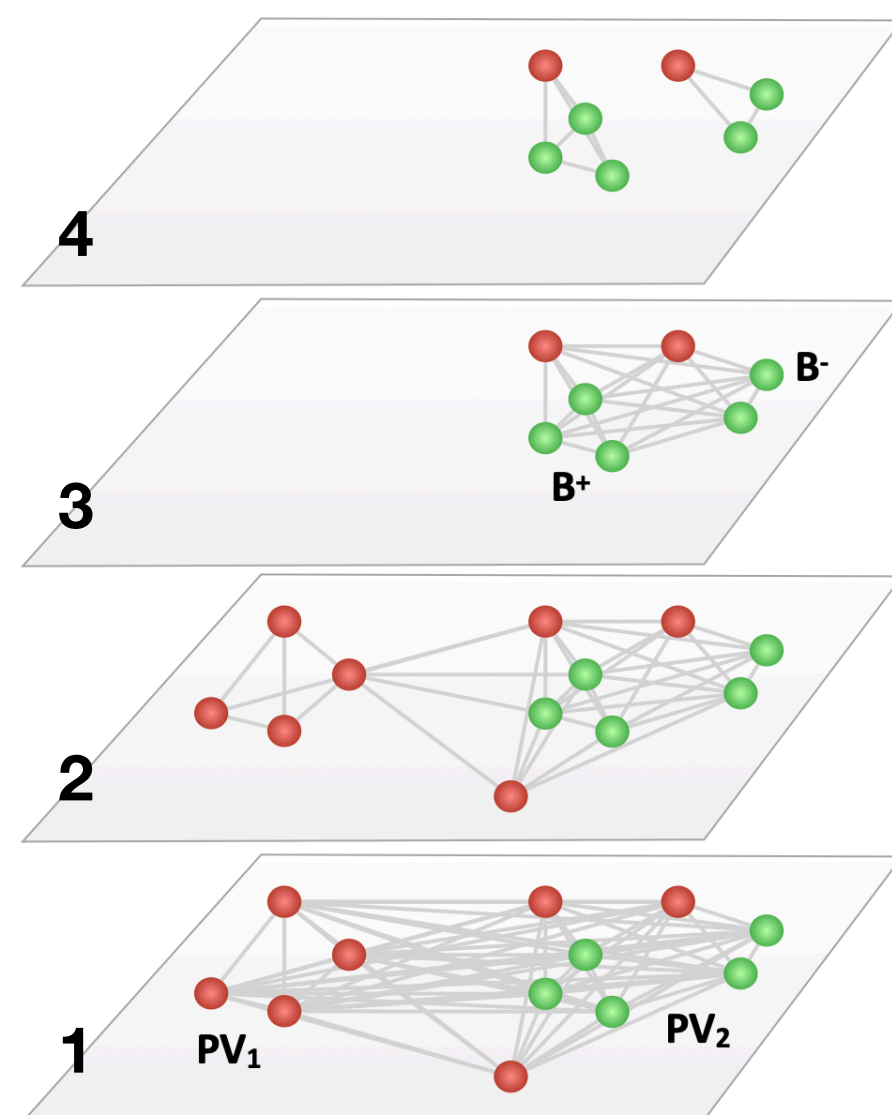
Proposte Tesi LHCb

R&D Software e Detector

Attività
strumentale

Algoritmi di Deep-Learning per il trigger di eventi a LHCb

- **Campione:** Dati simulati
- **Obiettivo:** Sviluppare un prototipo di **ricostruzione globale** degli eventi utilizzando **Graph Neural Networks**.
- **Metodo:** Si ottimizzeranno e valideranno i prototipi degli algoritmi sviluppati per ricostruire le catene di decadimento degli adroni. Questa tecnologia di selezione degli eventi (Full Event Interpretation) è particolarmente innovativa e richiede algoritmi basati sul **Deep Learning**.



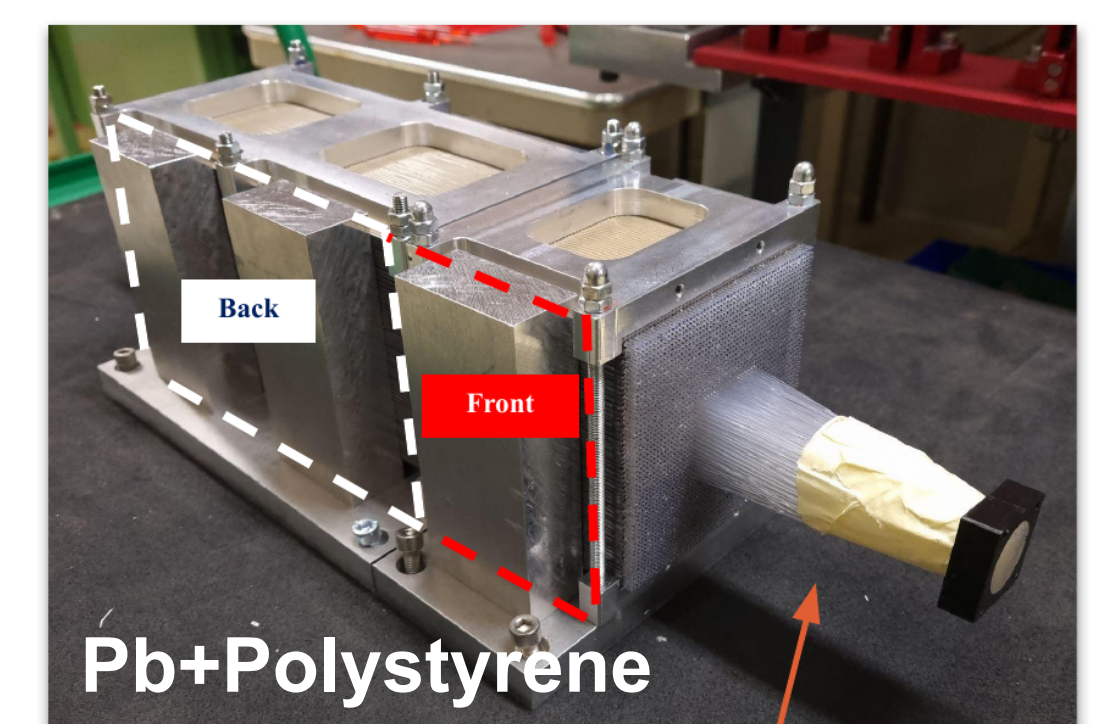
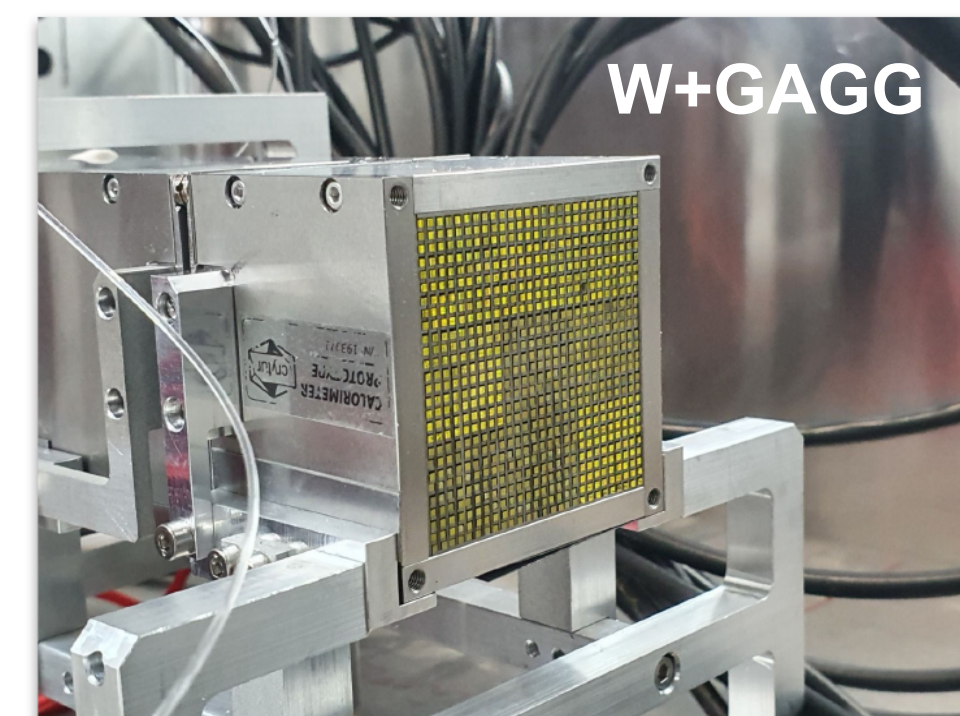
Verde: particelle da B
Rosso: altre particelle
nell'evento

Vari algoritmi per filtrare in modo successivo le particelle di interesse



Studio di prototipi di calorimetro elettromagnetico a fibre scintillanti

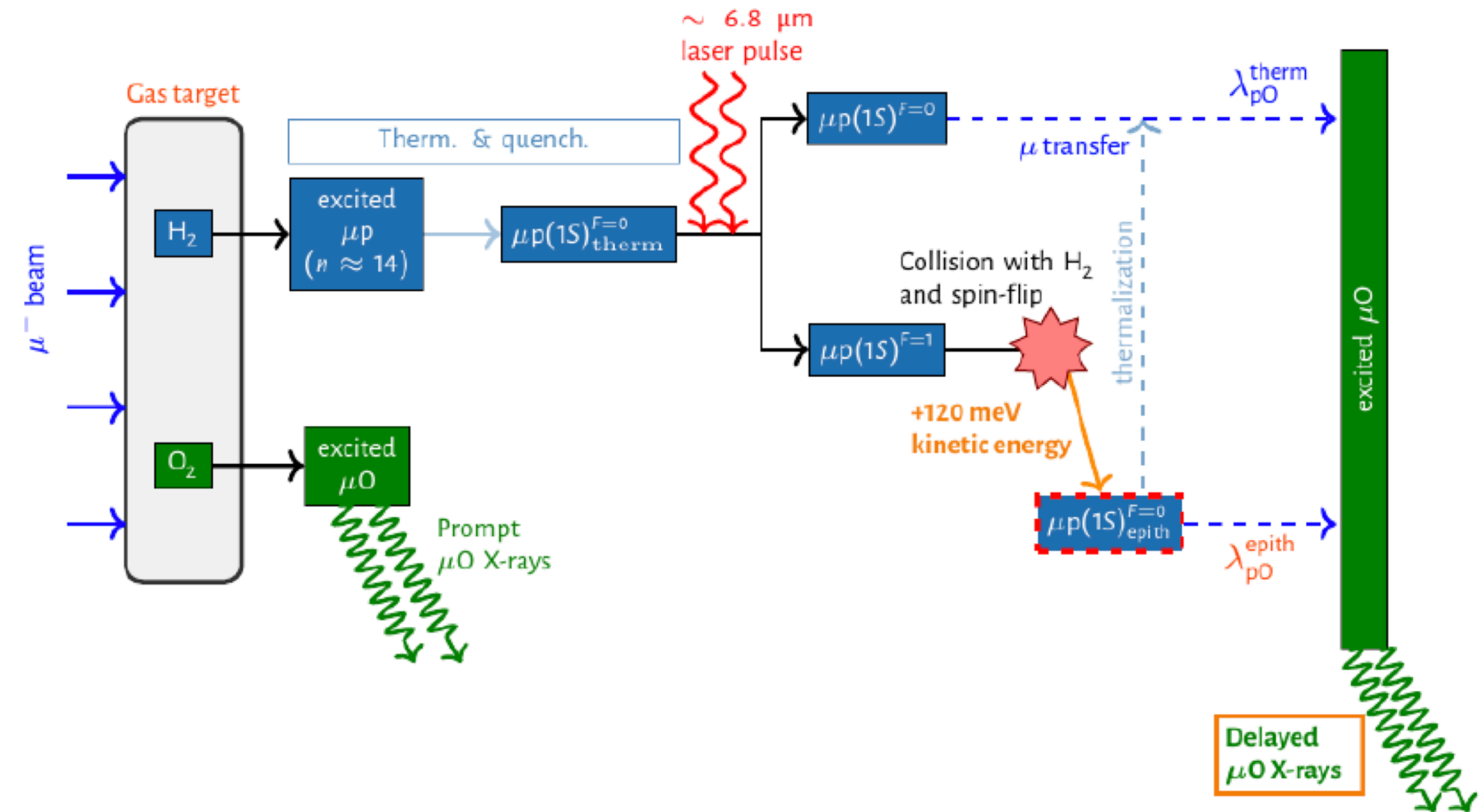
- **Campione:** dati **reali** e simulati
- **Obiettivo:** valutare ed ottimizzare le **performance** di diversi prototipi di calorimetri basati sulla tecnologia SPACAL
- **Metodo:** saranno analizzati dati sperimentali provenienti da diverse campagne di test su fascio per determinare le **risoluzioni** energetiche, temporali, spaziali e angolari di prototipi SPACAL realizzati con diverse combinazioni di materiali scintillanti ed assorbitori. In parallelo si svolgerà uno studio di simulazione **Monte Carlo**: si utilizzeranno i dati reali per validare il framework di simulazione, e successivamente saranno studiate varie geometrie dei prototipi al fine di ottimizzarne le performance.



FAMU (Fisica degli Atomi Muonici)

Attività
strumentale

- Alcune proprietà del protone non sono ancora ben capite
 - **Proton radius "puzzle"**: discrepanza nella misura del raggio di carica del protone in via di soluzione, necessita però di misure sul raggio di Zemach mai effettuate con alta precisione per muoni incidenti



- **FAMU**: misura spettroscopica della struttura iperfine dello stato 1S dell'idrogeno muonico (rel. precision: 10^{-5})
 - Fascio di muoni intenso e pulsato (RIKEN-RAL)
 - Sistema per rivelazione di raggi X (100 KeV)
 - MIR Laser ($\lambda \sim 6785$ nm, linewidth ~ 0.07 nm)

Contributo di INFN-MIB

- Sistema di odoscopi basato su fibre scintillanti e SiPMs per caratterizzazione del fascio di muoni
- Sistema di 24 cristalli scintillanti (LaBr₃:Ce) da 1/2" o 1" letti con Sipm arrays per rivelare 100 KeV X-rays

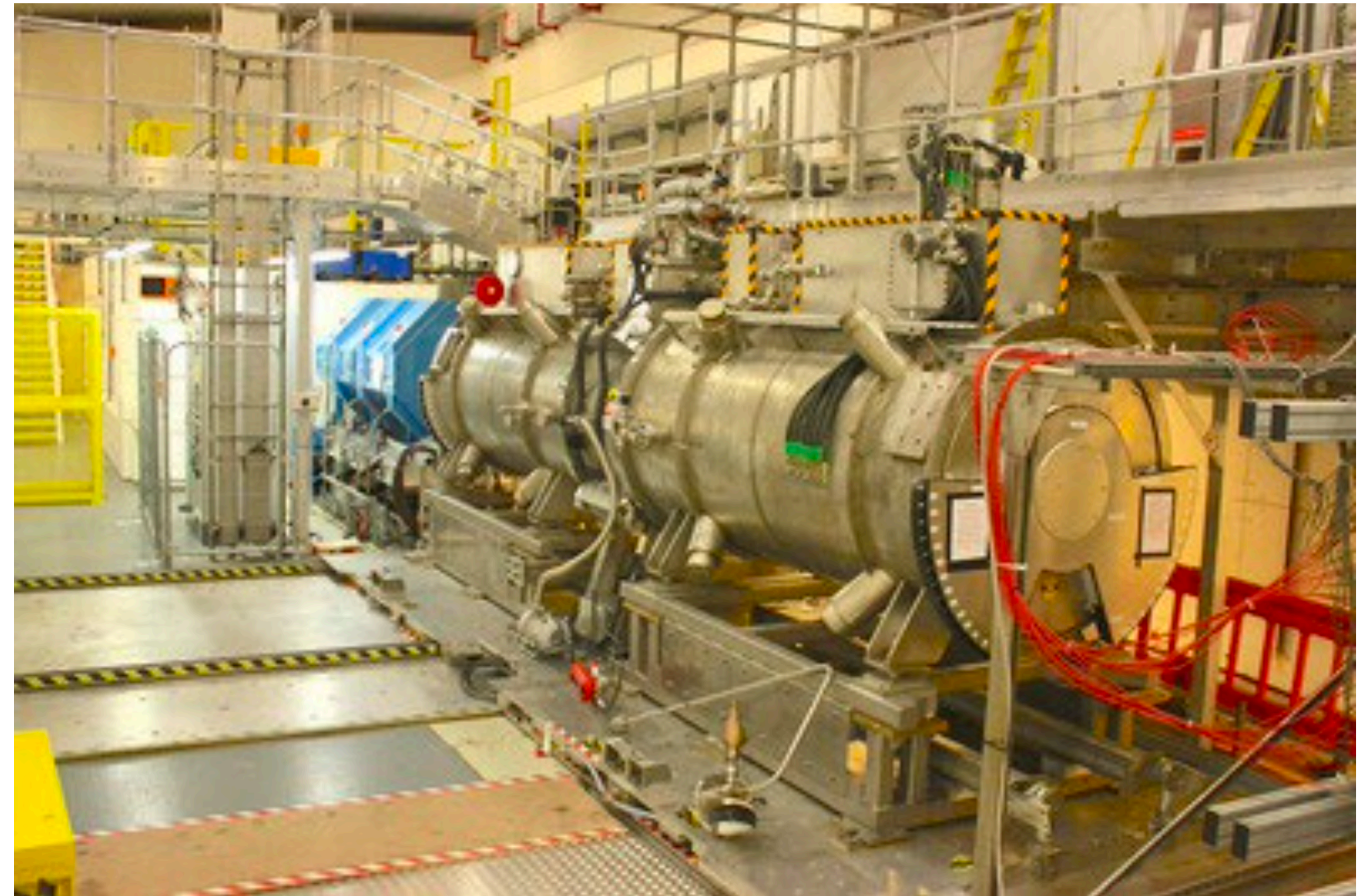
Muon Collider R&D (MuCool)

Attività
strumentale

- I **fasci di muoni** offrono interessanti possibilità
 - **Neutrino factory:** $\mu \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu$ uguale frazione di $\nu_e \nu_\mu$
 - **Higgs factory:** grande accoppiamento con l'Higgs
 - **Colliders:** sonda di precisione delle interazioni fondamentali

Contributo di INFN-MIB

- Costruzione Sistema di time of flight (TOF) con risoluzione ~ 50 ps
- Studio della diagnostica di fascio per il dimostratore del muon collider



<http://mice.iit.edu>



- concorso -

10 ANNI DALLA SCOPERTA DEL BOSONE DI HIGGS

L'ultima particella
della materia conosciuta

Tre minuti per raccontare in video
il significato di una scoperta fondamentale
per la fisica.

Partecipa al concorso dedicato agli studenti
delle **lauree triennali in scienze
e tecnologie fisiche (L30)**.

I vincitori saranno premiati in occasione della
**International Conference on High Energy
Physics - ICHEP 2022, a Bologna,
dal 6 al 13 di luglio.**



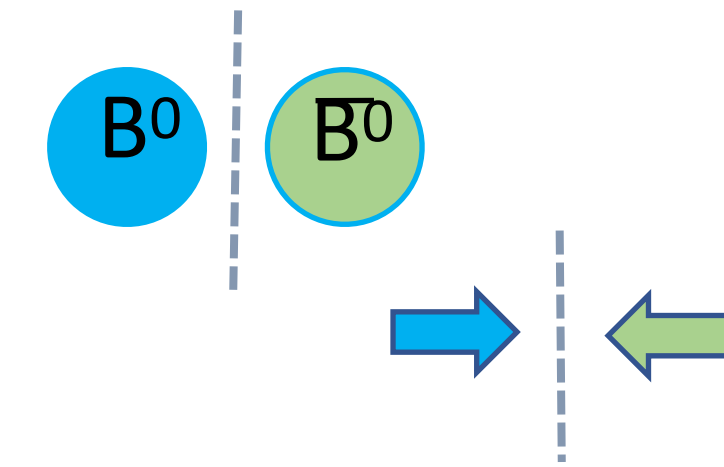
Iscriviti e partecipa al concorso
<https://l.infn.it/10higgs-concorso>

<https://agenda.infn.it/event/31131/>

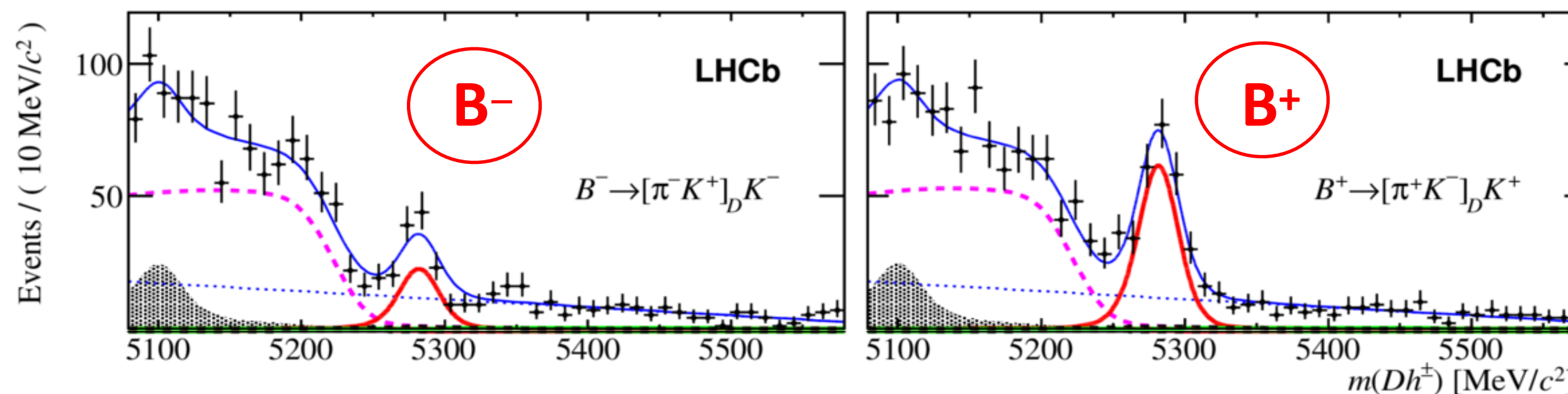
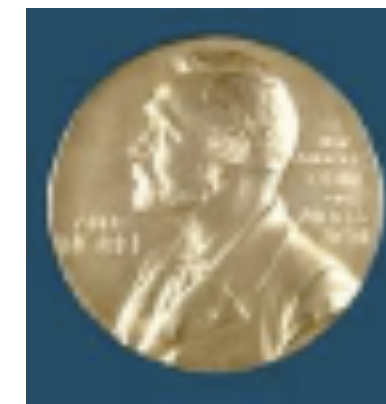
Bonus slides

Asimmetria materia-antimateria

- Se l'universo è nato simmetrico: dove è sparita l'anti materia?
 - CP è la simmetria che combina
 - Coniugazione di carica: particella trasformata in anti-particella
 - Parità: riflessione spaziale delle coordinate
 - Se CP è violata: il mondo non è lo stesso riflesso nello "specchio CP"

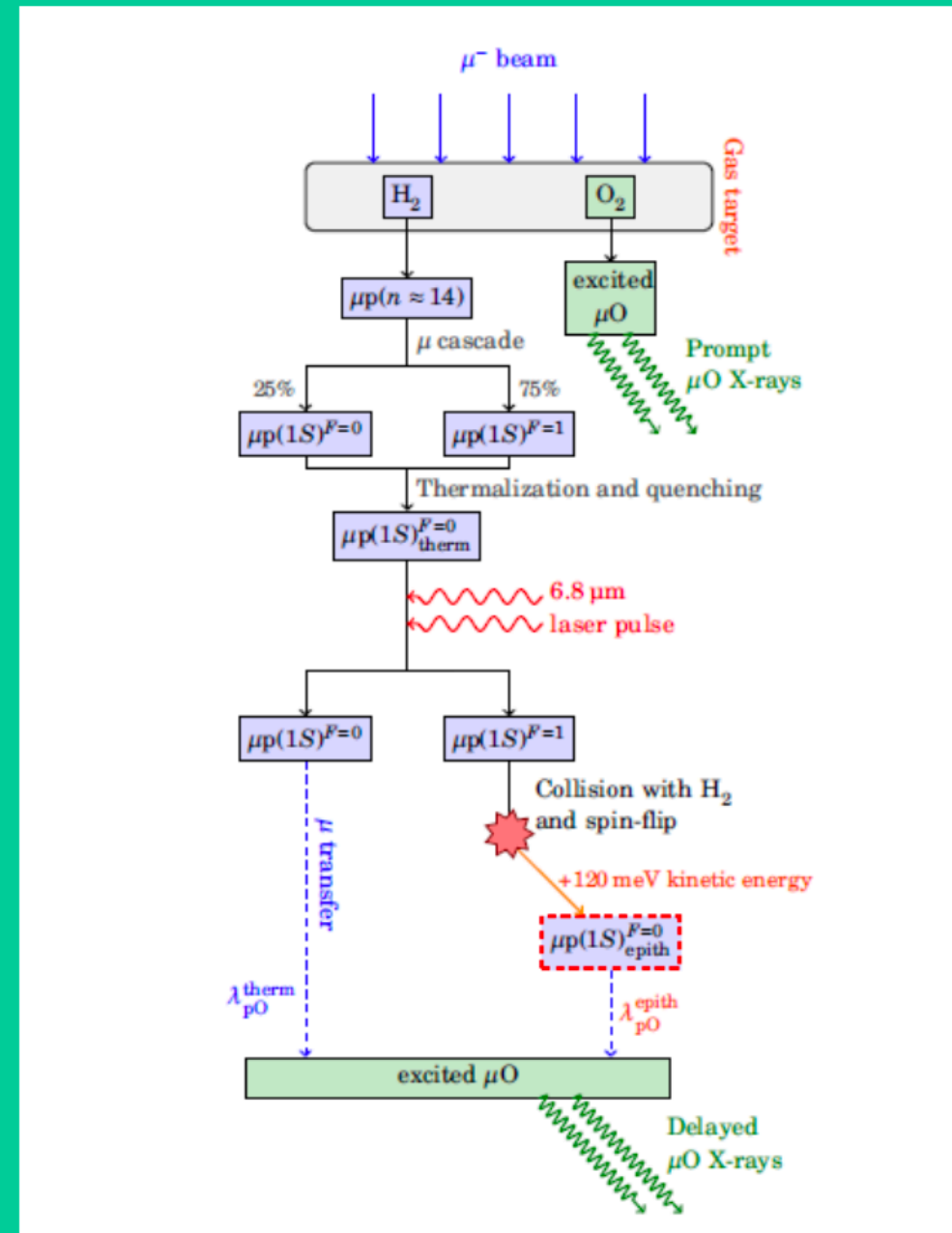


- Esistenza di CPV osservata per la prima volta nel 1964 nei mesoni K^0
- CPV negli adroni beauty: osservata CPV a partire dal 2001
 - CPV permessa nel Modello Standard, ma in piccola quantità.
 - Necessarie misure precise per evidenziare possibili contributi di Nuova Fisica.



- Molteplici osservazioni sono possibili nei decadimenti e nelle oscillazioni dei B

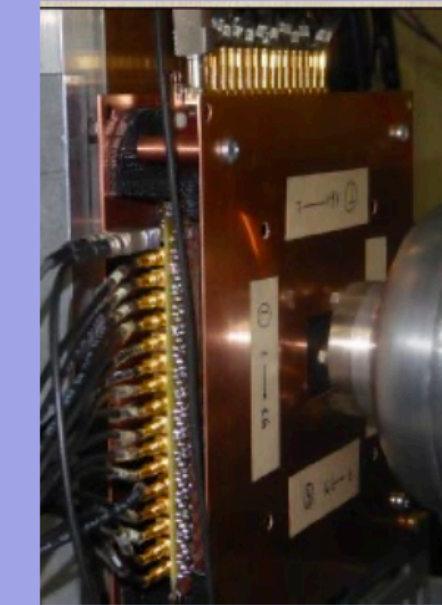
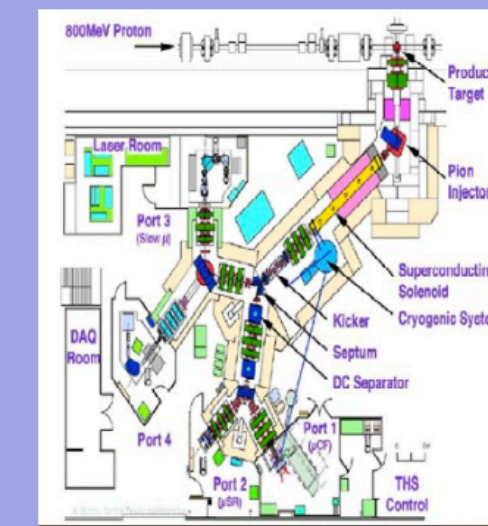
FAMU (Fisica degli Atomu Muonici)



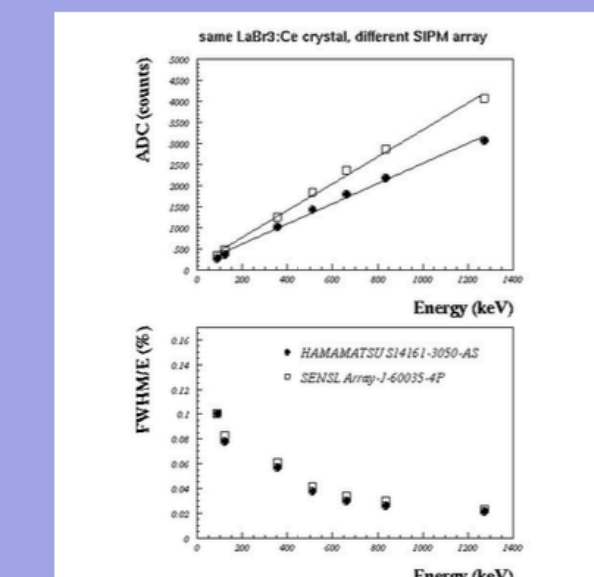
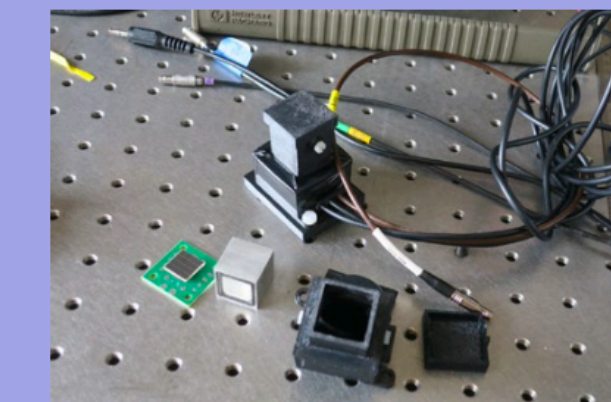
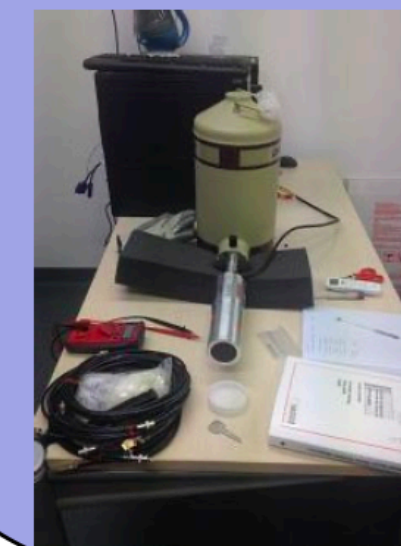
- The proton radius is extremely hard to measure with high precision and good control of systematics [1]
- FAMU will realize a spectroscopic measurement of the hyperfine splitting (hfs) in the 1S state of muonic hydrogen, providing crucial informations on proton structure and muon-nucleon interaction [2].
- The method is outlined in the figure:
- Experimental requirements:
 - ❑ An intense pulsed muon beam (RIKEN-RAL)
 - ❑ A system for detection of X-rays ~ 100 keV
 - ❑ An intense tunable MIR laser with $\lambda \sim 6785$ nm and a linewidth ~ 0.07 nm [3]

The experimental apparatus includes:

- A system of three beam hodoscopes based on SiPM and scintillating fibers developed at INFN MIB [4] to measure the high intensity pulsed μ beam:



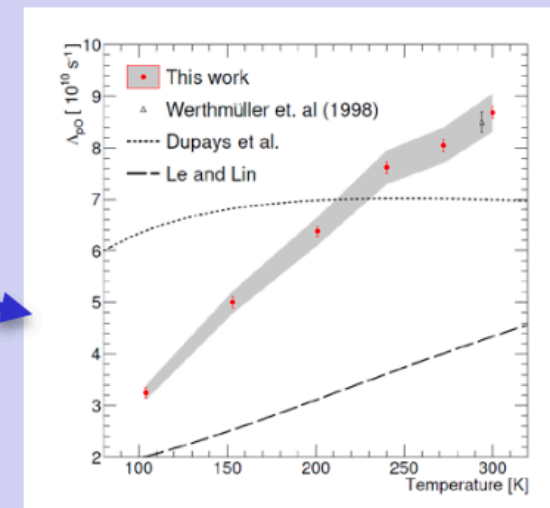
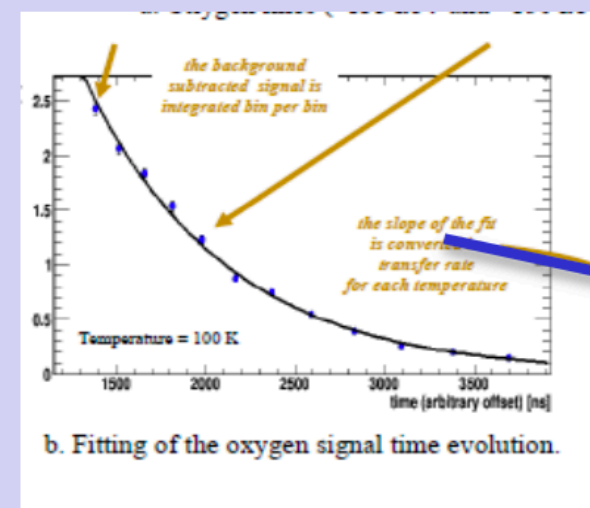
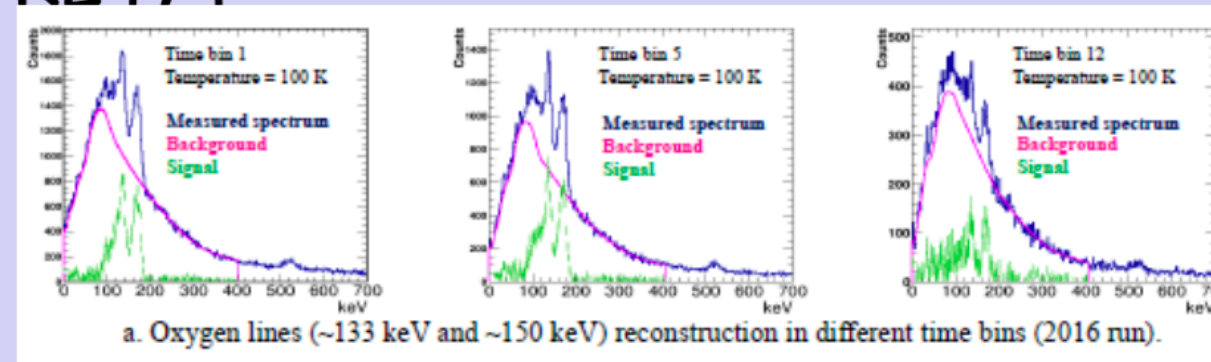
- A system of 16 1" LaBr3:Ce crystals read by PMT developed at INFN Bo [5] and 24 1/2"/1" LaBr3:Ce crystals read by Sipm arrays in development at INFN MIB [6], to detect x-rays ~ 100 keV. This system includes also 4 HpGe detectors for inter-calibration (INFN MIB)



Detectors/measurements, possible stages

Transfer rate measurement

Measurement taken in 2016 confirm the energy dependent muon transfer rate to Oxygen and a paper has been submitted to PRL [71]



Possible stages:

- Development in laboratory of 1" LaBr3:Ce read by SiPM arrays
- Study at CNAO beam of the performances of a fiber-SiPM beam hodoscope
- Characterization of a system for HV of SiPM with temperature feedback
- Laboratory study of MIR detectors and characterization of specialty fibers for MIR light transport
- Theoretical models for modelling the transfer rates

Contacts/infos:

- maurizio.bonesini@mib.infn.it
- roberto.benocci@mib.infn.it
- hector.roman@yahoo.com
- massimiliano.clemenza@mib.infn.it
- riccardo.rossini@mib.infn.it

Bibliography:

1. R.Pohl et al., Nature 466 213 (2010); R.Pohl et al. Science 353, 669 (2016)
2. A.Adamczack et al, JINST 11, P05007 (2016); c. Pizzolotto et al., Eur.Phys.J.A 56 (2020) 7, 185
3. L. Stoychev Proc SPIE Vol 913501 (2014)
4. M. Bonesini et al. JINST 12, C03035 (2017)
5. G. Baldazzi et al., JINST 12, C03067 (2017)
6. M. Bonesini et al., PoS EPS-HEP 2017 (2017) 777; PoS EPS-HEP2021 (2022) 770
7. E. Mocchiutti et al, Phys.Lett.A 384 (2020) 126667