

---

107° CONGRESSO SIF, 13 Settembre 2021



# Fisica oltre il Modello Standard in ATLAS e CMS

**Matteo Presilla**  
(INFN Perugia),

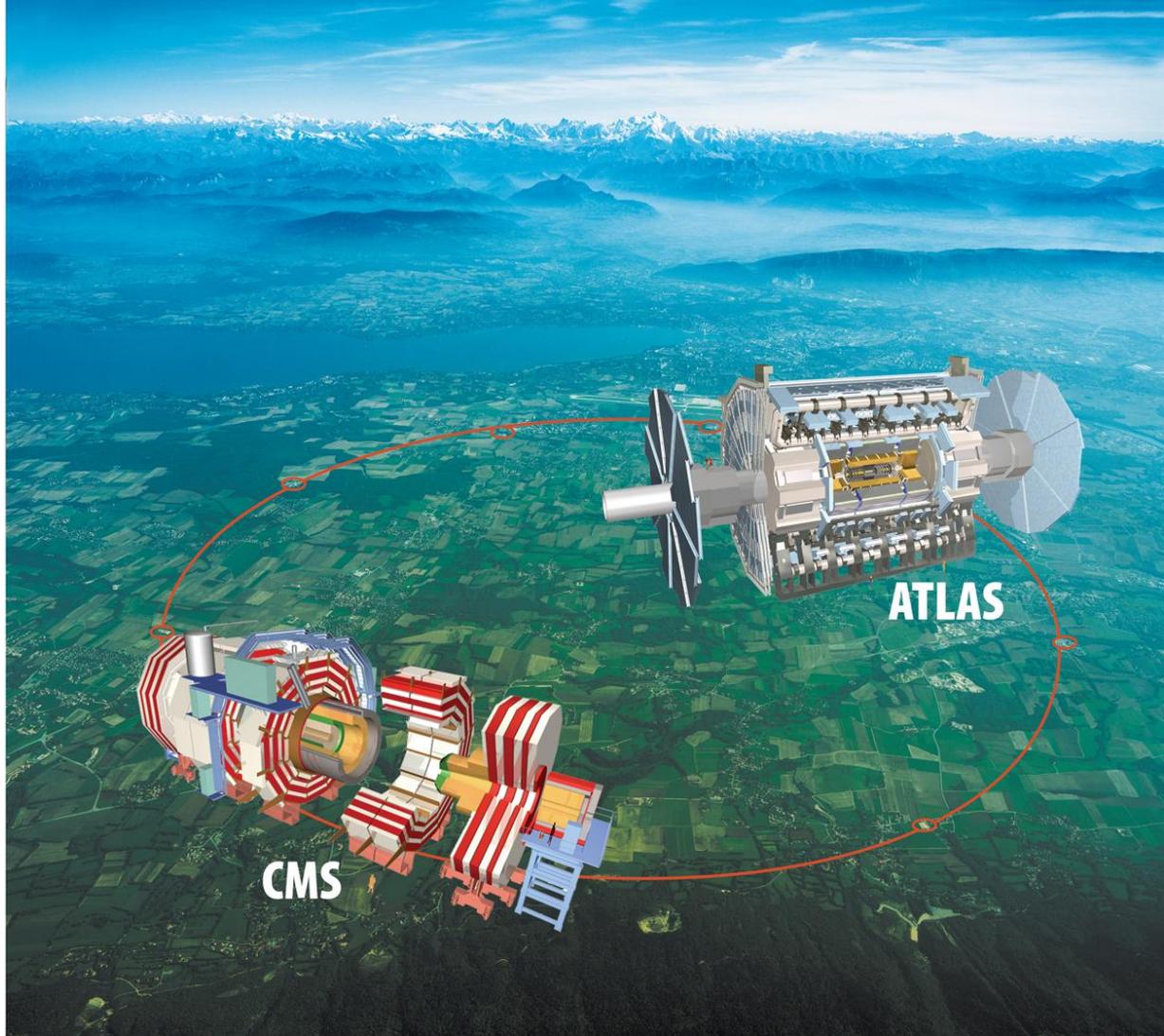
Francesco G. Gravili  
(Università/INFN Lecce)

---

Le collaborazioni  
sperimentali

# ATLAS e CMS

ed il **LHC**





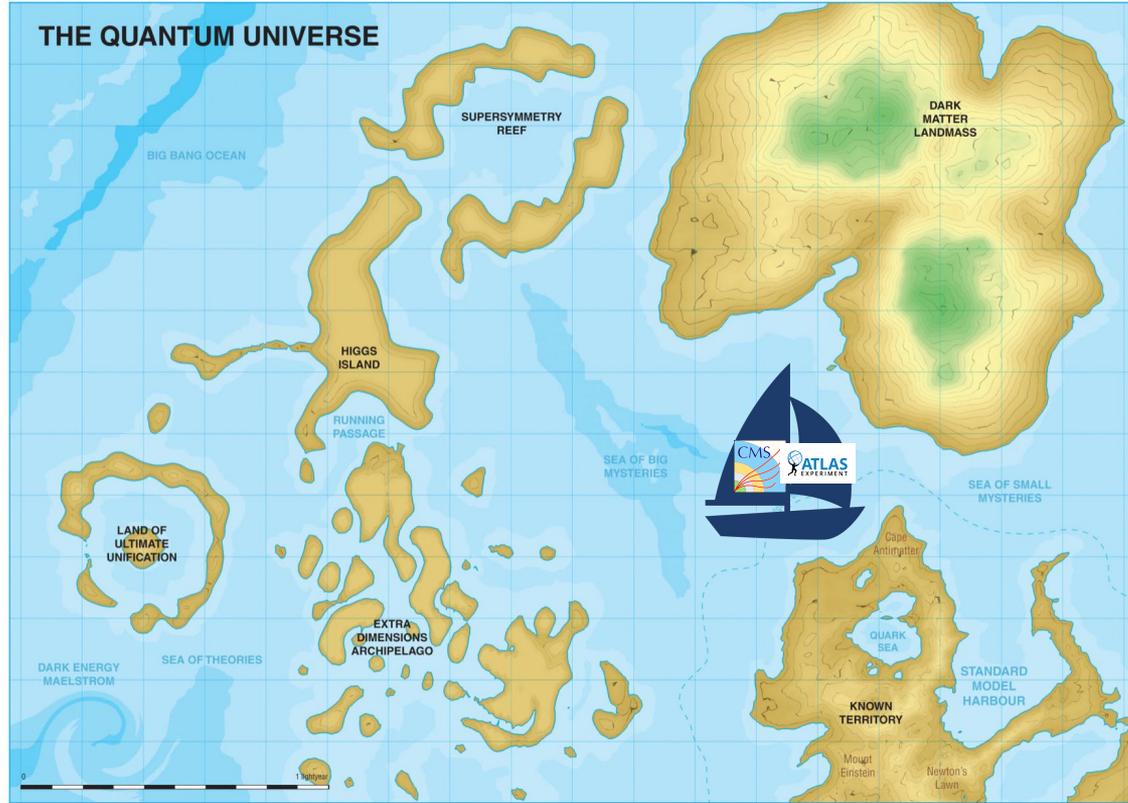


Immagine presa da: Università di Monaco

## Fisica oltre il MS

- Il MS lascia molti **quesiti non ancora risposti** (gerarchia delle masse, meccanismo di massa per i neutrini, unificazione delle forze, gravità, ...)
- Solo **poche ma significative evidenze sperimentali sembrano suggerire** nuova fisica (oscillazioni dei neutrini, materia oscura, B-anomalies,  $(g-2)_\mu$ , ...)
- Una quantità enorme di teorie cercano di fornire la soluzione

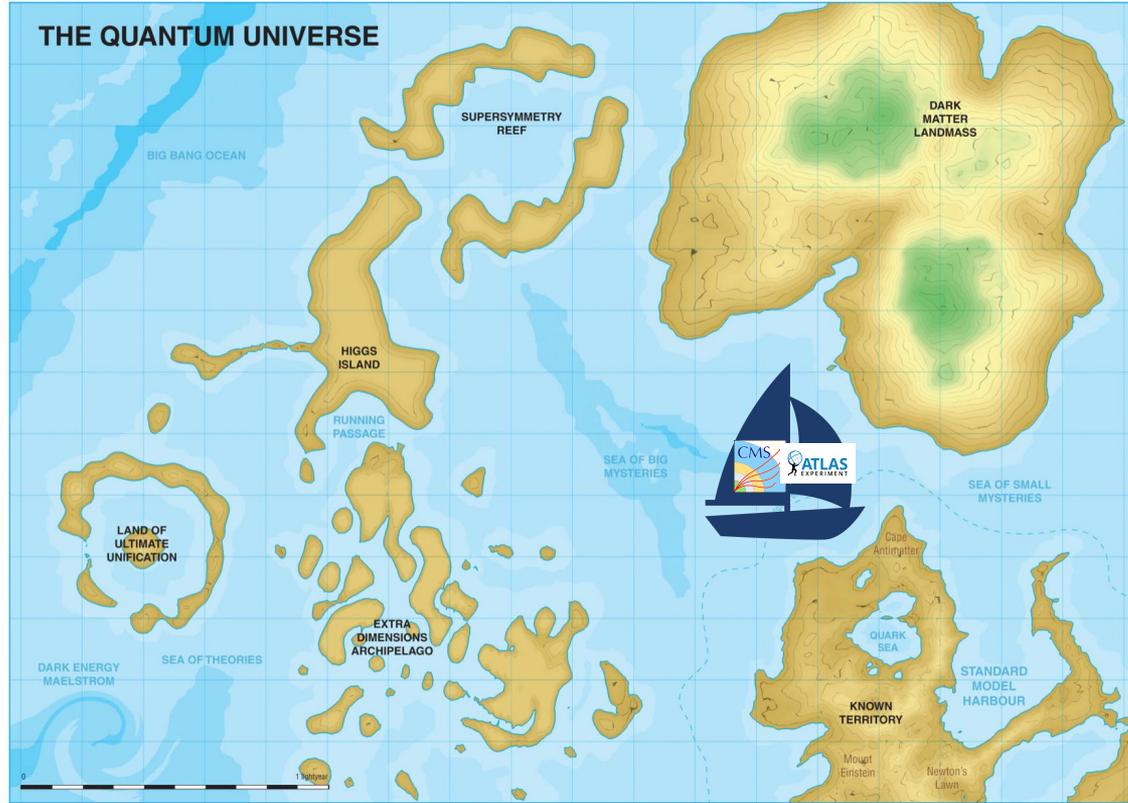


Immagine presa da: Università di Monaco

## IN QUESTO CONTRIBUTO

Risultati **RECENTI** prodotti da entrambe le Collaborazioni includendo:

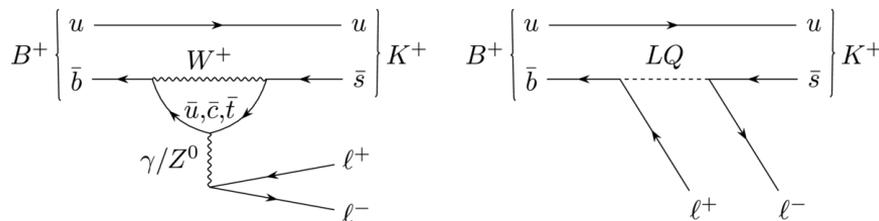
- ➔ **NUOVA FISICA ASSOCIATA ALLE B-ANOMALIES**
- ➔ **RISONANZE PESANTI con STATI FINALI BOSONICI**
- ➔ **SEGNATURE NON CONVENZIONALI**

# Lepton Flavor Universality e nuova fisica

## Anomalie in fisica dei mesoni B

Misure recenti sembrano indicare una possibile LFU in transizioni  $b \rightarrow s \ell \ell$

[LHCb-PAPER-2021-004](#) (Nature)



## Fisica esotica associata:

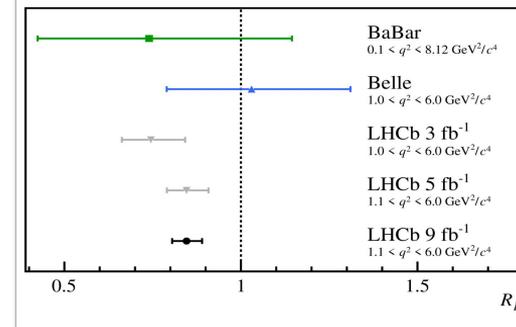
→ **Leptoquarks**, nuovi bosoni vettori pesanti  $W'/Z'$ , nuove interazioni di contatto, ...

Test di simmetrie nel settore leptonic:

→ **Violazione del numero Leptonico (LFV)**

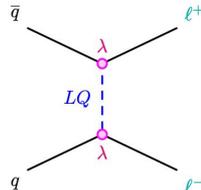
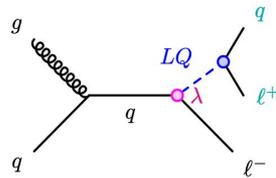
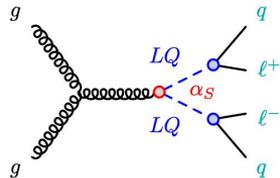


## Anomalia $R(K)$ misurata da LHCb

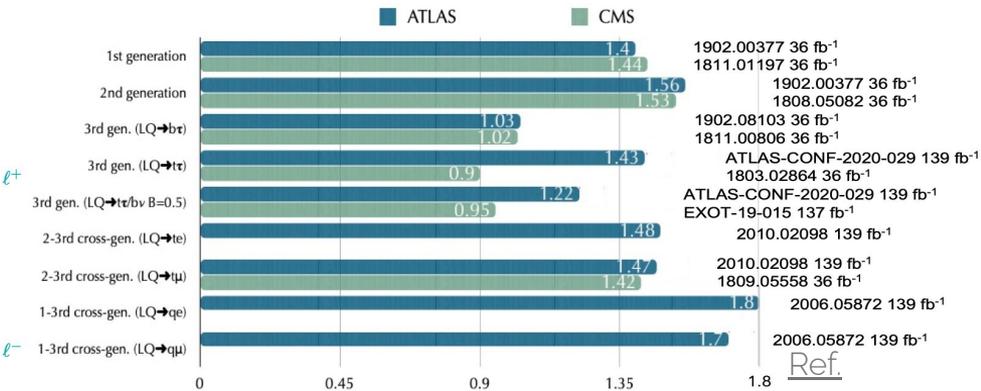
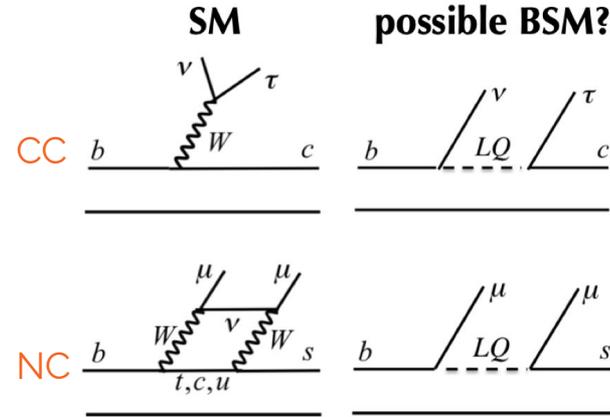


# Leptoquarks

- Nuove particelle da modelli GUT, Higgs composito
- Caratterizzati sia **numero leptonico** che **barionico**, possono presentare **accoppiamenti dipendenti dal sapore** (II,III gen. favorita)
- Diversi meccanismi di produzione ad LHC, sensibili a diversi accoppiamenti e range di massa



## Anomalia in fisica dei mesoni B e LQ

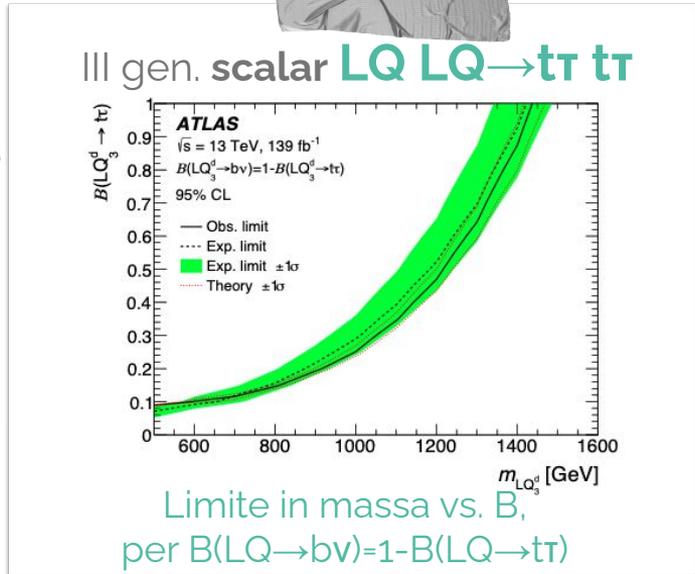


range di massa esclusi per LQ scalari da ATLAS/CMS

# Ricerche recenti di LQs

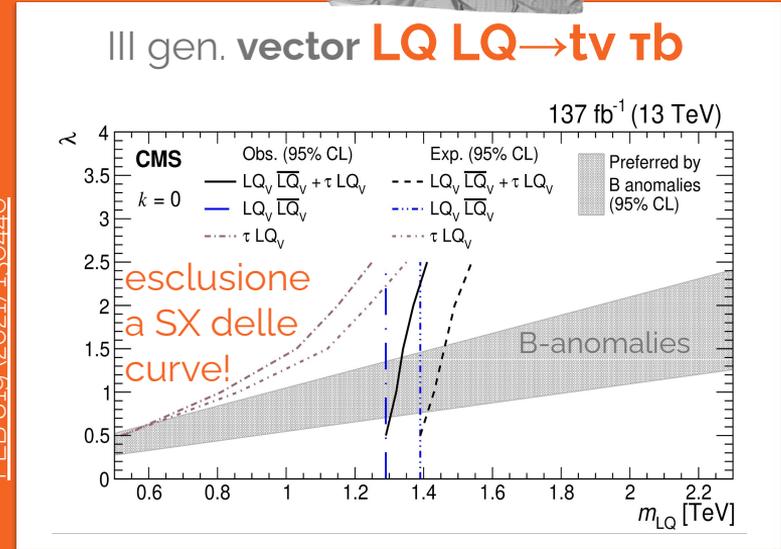
Ampia varietà di stati finali e modelli/accoppiamenti/meccanismi di produzioni esplorati da ATLAS e CMS

JHEP 06 (2021) 179



**Esclusione fino a ~ 1.4 TeV per LQ scalari con tutti i dati del Run 2**

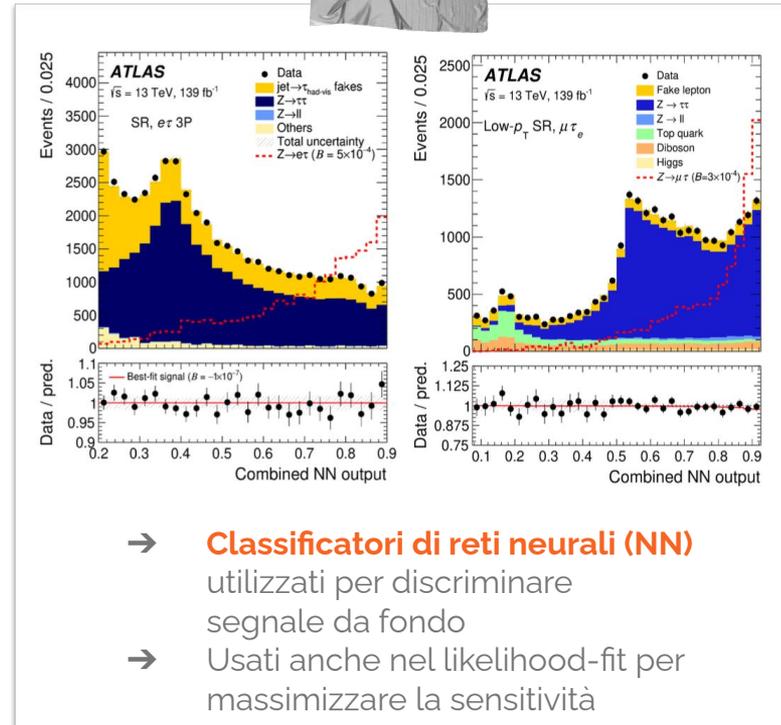
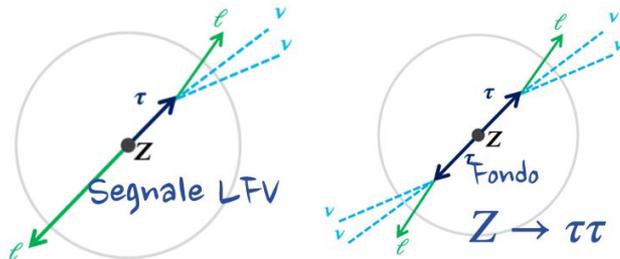
PLB 819 (2021) 136446



- **Accesso allo spazio dei parametri** che potrebbe spiegare le **anomalie** in fisica dei mesoni B
- LQ vettoriali esclusi nel range **0.98-1.73 TeV con l'intero dataset Run 2**

# LFV nei decadimenti della Z

- **Numero Leptonico** → simmetria accidentale nel MS, spesso violata in nuove teorie BSM
- Esperimenti a basse energie specializzate nei test di LFV non accedono facilmente a processi con bosoni Z  
→ **LHC ha prodotto ~8 Miliardi di Z durante il Run 2!**
- **Ricerca di segnale nei decadimenti**  
 $Z \rightarrow l\tau$ , adronici e leptonici



# LFV nei decadimenti della Z

- **Numero Leptonico** → simmetria accidentale nel MS, spesso violata in nuove teorie BSM
- Esperimenti a basse energie specializzate nei test di LFV non accedono facilmente a processi con bosoni Z  
→ **LHC ha prodotto ~8 Miliardi di Z durante il Run 2!**
- **Ricerca di segnale nei decadimenti**  
 $Z \rightarrow \ell\tau$ , adronici e leptonici

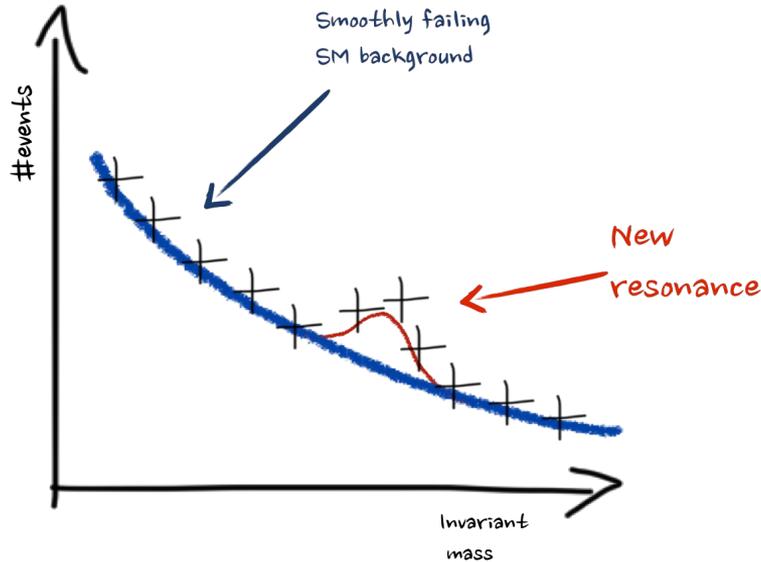
| Source of uncertainty                         | Uncertainty in $\mathcal{B}(Z \rightarrow \ell\tau)$ [ $\times 10^{-6}$ ] |           |
|---|---|-----------|
|   | $e\tau$   | $\mu\tau$ |
| Statistical                                   | $\pm 3.5$   | $\pm 3.9$ |
| Fake leptons (statistical)                    | $\pm 0.1$   | $\pm 0.1$ |
| Systematic                                    | $\pm 2.7$   | $\pm 3.4$ |
| Light leptons                                 | $\pm 0.4$   | $\pm 0.4$ |
| $E_T^{\text{miss}}$ , jets and flavor tagging | $\pm 2.1$   | $\pm 2.4$ |
| $E_T^{\text{miss}}$                           | $\pm 0.4$   | $\pm 0.8$ |
| Jets  | $\pm 1.9$   | $\pm 2.2$ |
| Flavor tagging                                | $\pm 0.5$   | $\pm 0.9$ |
| Z-boson modeling                              | $< 0.1$   | $\pm 0.1$ |
| $Z \rightarrow \mu\mu$ yield                  | –   | $\pm 0.8$ |
| Other backgrounds                             | $\pm 0.1$   | $\pm 0.6$ |
| Fake leptons (systematic)                     | $\pm 0.4$   | $\pm 0.9$ |
| Total   | $\pm 4.4$   | $\pm 5.2$ |

**INCERTEZZA DOMINANTE DI NATURA STATISTICA**

| Final state, polarization assumption                      | Observed (expected) upper limit on $\mathcal{B}(Z \rightarrow \ell\tau)$ [ $\times 10^{-6}$ ] |           |
|---|---|-----------|
|   | $e\tau$   | $\mu\tau$ |
| $\ell\tau_{\text{had}}$ Run 1 + Run 2, unpolarized $\tau$ | 8.1 (8.1)   | 9.5 (6.1) |
| $\ell\tau_{\text{had}}$ Run 2, left-handed $\tau$         | 8.2 (8.6)   | 9.5 (6.7) |
| $\ell\tau_{\text{had}}$ Run 2, right-handed $\tau$        | 7.8 (7.6)   | 10 (5.8)  |
| $\ell\tau_{\ell'}$ Run 2, unpolarized $\tau$              | 7.0 (8.9)   | 7.2 (10)  |
| $\ell\tau_{\ell'}$ Run 2, left-handed $\tau$              | 5.9 (7.5)   | 5.7 (8.5) |
| $\ell\tau_{\ell'}$ Run 2, right-handed $\tau$             | 8.4 (11)  | 9.2 (13)  |
| Combined $\ell\tau$ Run 1 + Run 2, unpolarized $\tau$     | 5.0 (6.0)   | 6.5 (5.3) |
| Combined $\ell\tau$ Run 2, left-handed $\tau$             | 4.5 (5.7)   | 5.6 (5.3) |
| Combined $\ell\tau$ Run 2, right-handed $\tau$            | 5.4 (6.2)   | 7.7 (5.3) |

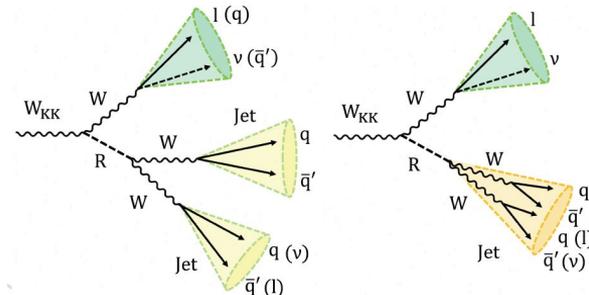
**Esclusione di LFV nei decadimenti Z migliorata di un fattore 2 rispetto LEP**

# Ricerca di nuova fisica risonante

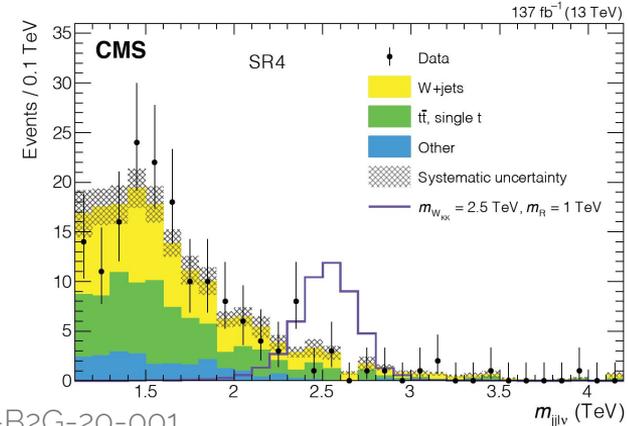


- Regione di segnale ad **alta massa/impulso**
- Adatti a ricerche di nuova fisica in **modelli BSM specifici** e/o **ricerche indipendenti dal modello teorico**

## Es: Stati finali Bosonici molto rari e di interesse teorico



**Extended Warped extra-dimensions scenarios:**  
 soppressione di produzione di coppia di bosoni vettori, in favore del canale tri-bosonico

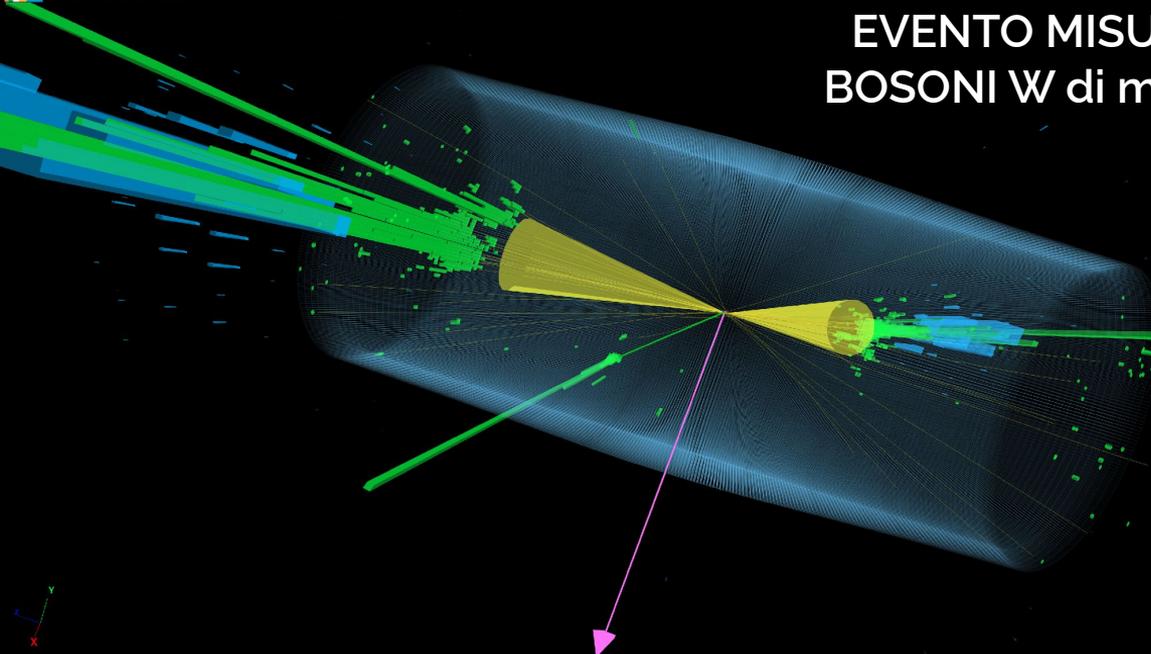


CMS-B2G-20-001

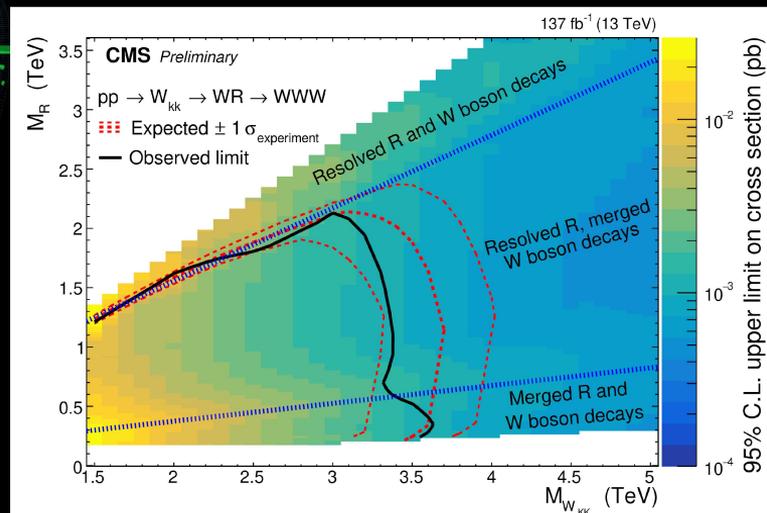
# Stato finale con tre bosoni W

CMS-B2G-20-001

CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2016-Jul-18 20:57:32.758784 GMT  
Run / Event / LS: 276870 / 2920241170 / 1610



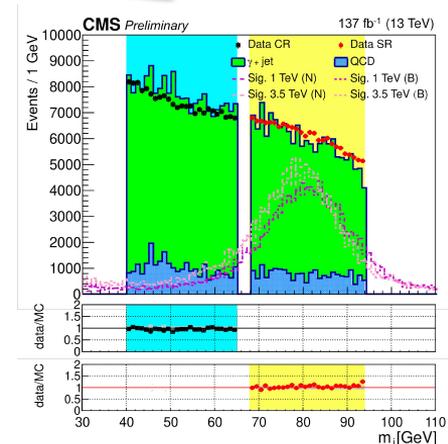
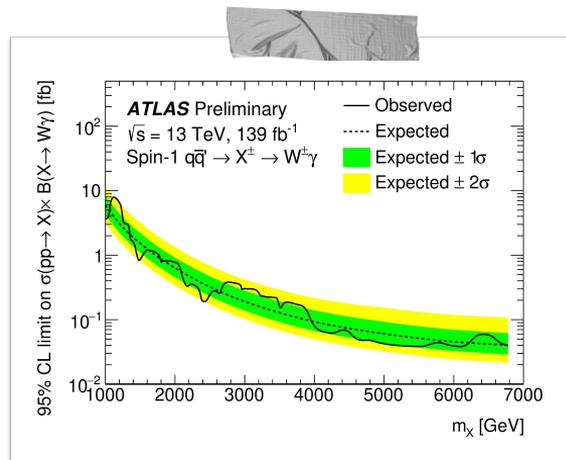
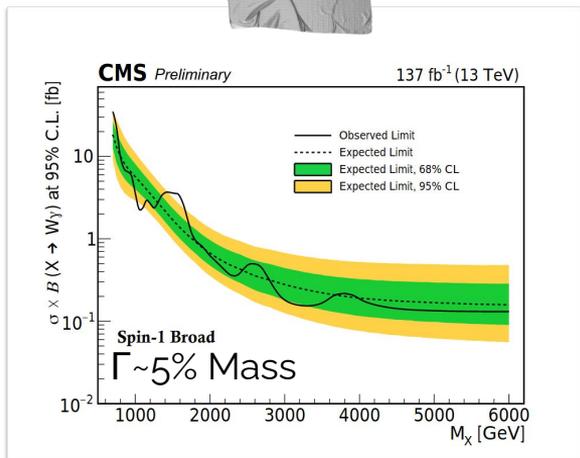
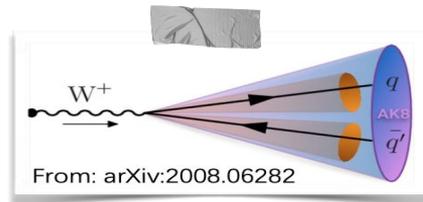
EVENTO MISURATO IN CMS CON CANDIDATI  
BOSONI W di momento: 885 GEV, 847 GEV & 115  
GEV



**Primo limite sperimentali BSM con questo stato finale!**  
Risonanze tri-bosoniche escluse fino a  $M_{W_{KK}} = 3.4$  TeV (per  $M_R = 1$  TeV) e fino a  $M_{W_{KK}} = 3.6$  TeV (per  $M_R = 0.35$  TeV)

# Risonanze in $W\gamma$

- Nuova fisica che decada in un **bosone vettore massivo ed un fotone**
- Range di massa invariante  $M(W\gamma)$  accessibile: **1-7 TeV**
- Tecnica di analisi simile in ATLAS e CMS:
  - ◆ Struttura del jet con grande Lorentz Boost (N-subjettiness tagging)
  - ◆ Stima dei fondi del MS dal fit sui dati in regione di segnale

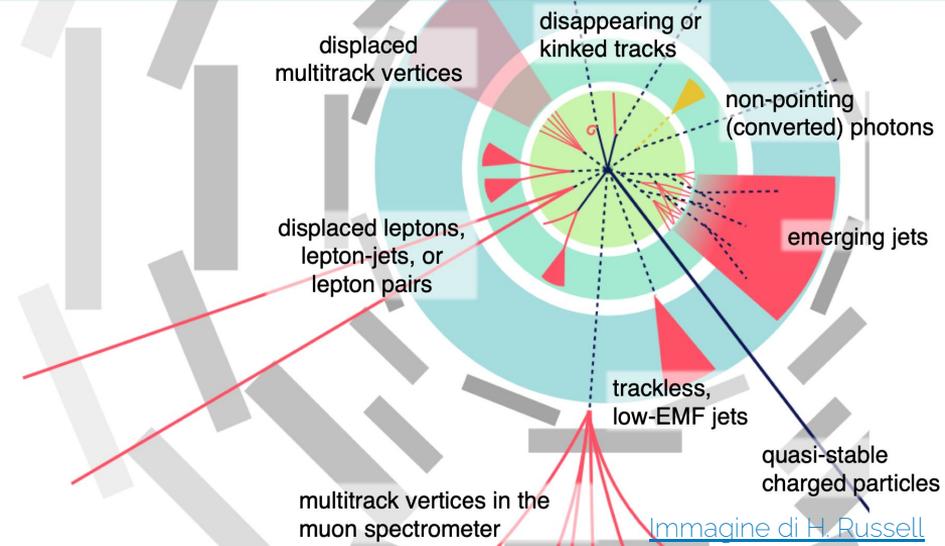


- Estrazioni di limiti indipendenti dal modello teorico
- Risonanza generica di Spin-1 Broad
- re-interpretabilità dei risultati sperimentali

# Segnatura non convenzionali

Ricerche di particelle esotiche che sfuggirebbero ai metodi di rivelazione tradizionali: Long Lived Particles (LLP), Heavy Stable Charged Particles (HSCP), ...

↔ **MASSIMIZZARE L'ACCETTANZA FISICA DEI NOSTRI DETECTOR**



## TRIGGER

- l'attività non-standard delle particelle cercate richiede la presenza di trigger dedicati

## RICOSTRUZIONE

- sviluppo di algoritmi di identificazione/ricostruzione specifici per particelle

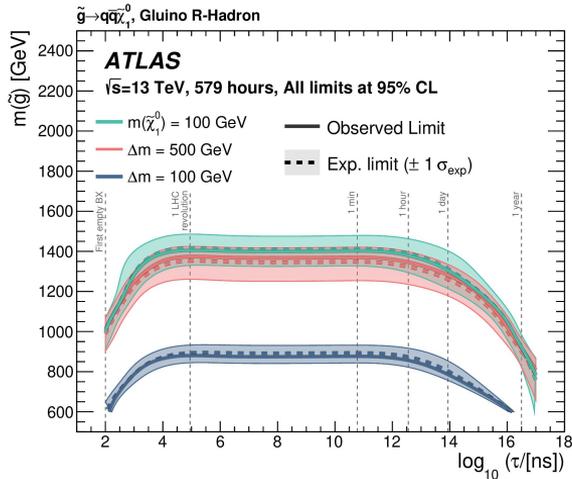
## FONDI

- processi non provenienti da collisioni pp: muoni cosmici, fondi "combinatori" (elevato PU, rumore strumentale), ...
- Spesso stimati dai dati

# Caso estremo di LLP

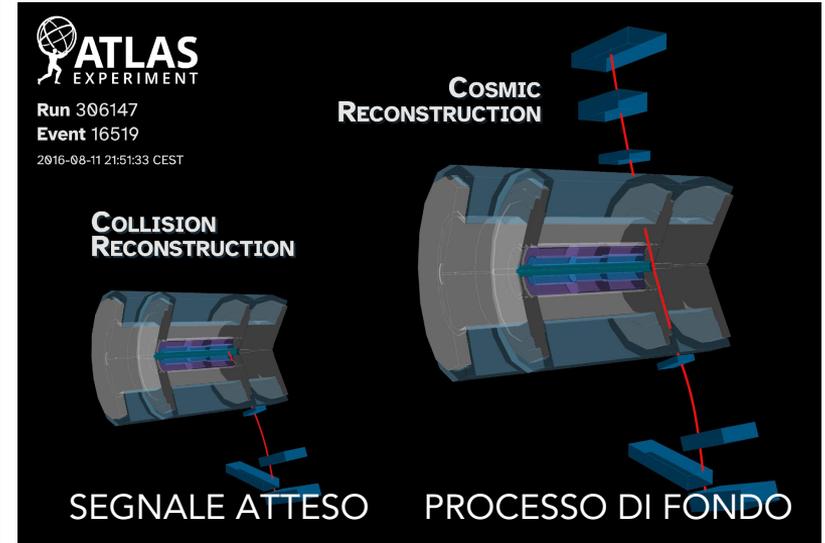
JHEP 07 (2021) 173

Segnale di fisica SUPERSIMMETRICA ("mini-split SUSY scenario"), con la presenza di un Gluino caratterizzato da grande vita media



Esclusione dei Gluini per un enorme range di vita media  $\sim$  **100 ns/3 anni**, e masse fino a 1.4 TeV

Spray energetico di adroni entranti nel calorimetro di ATLAS nell'intervallo di tempo in cui non si aspettano collisioni tra protoni!

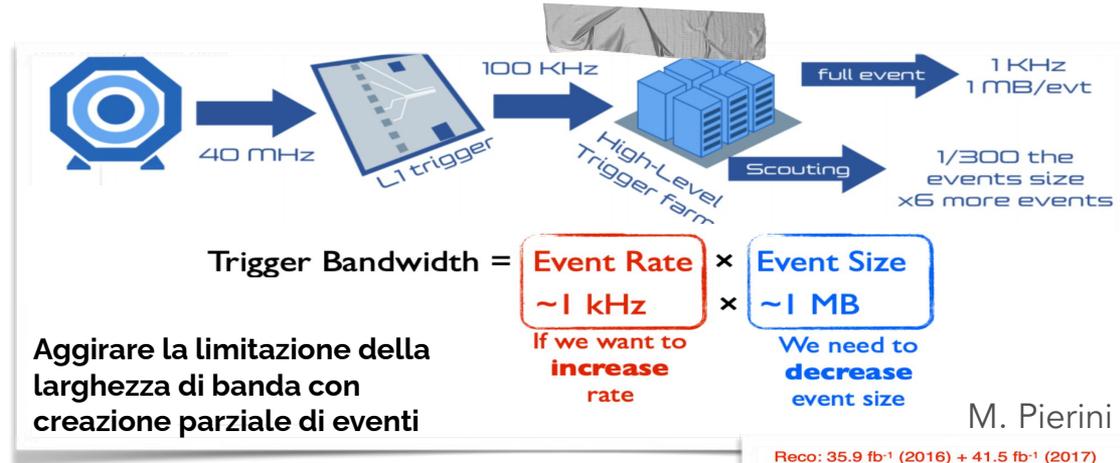


IL DECADIMENTO DEL GLUINO MASSIVO CON VITA MEDIA ELEVATA PRODUCE **JET MOLTO ENERGETICI**, MISURABILE COME DEPOSITO DI ENERGIA NEL **CALORIMETRO**

# SCOUTING + displaced di-muons

Presenza dati non convenzionale

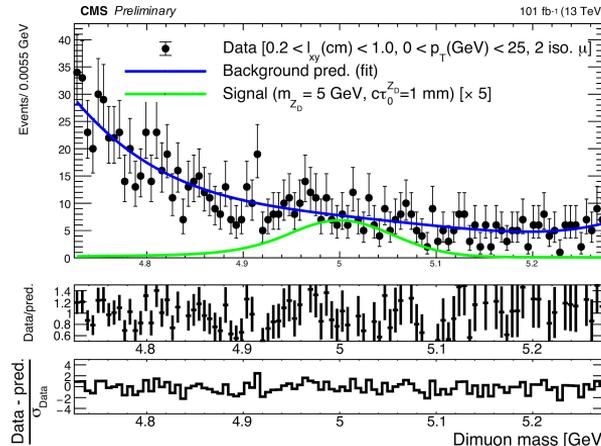
→ SCOUTING data  
salvataggio di oggetti  
ricostruiti a livello trigger  
(es.  $m_{\mu\mu} > 200$  MeV)



Reco: 35.9 fb<sup>-1</sup> (2016) + 41.5 fb<sup>-1</sup> (2017)  
+ 59.7 fb<sup>-1</sup> (2018)  
Scouting: 35.3 fb<sup>-1</sup> (2017) + 61.3 fb<sup>-1</sup> (2018)

Segnatura non convenzionale

→ Risonanze di-muoniche (DISPLACED) a bassa massa invariante

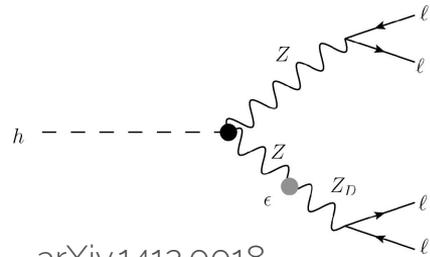


## Tecnica di analisi:

- Eventi con almeno 2 muoni displaced, con un vertice primario associato (DV)
- Considera masse fino a  $\sim 2m(\mu)$  e spostamento dal vertice primario fino a 11cm
- Analisi statistica utilizza un fit sulla massa di-muonica

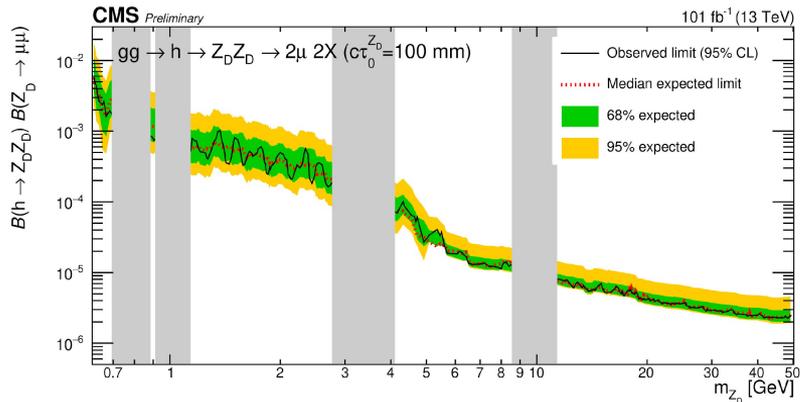
# SCOUTING + displaced di-muons

Nessun eccesso significativo nei dati analizzati, limiti espressi in termini di un modello teorico di riferimento

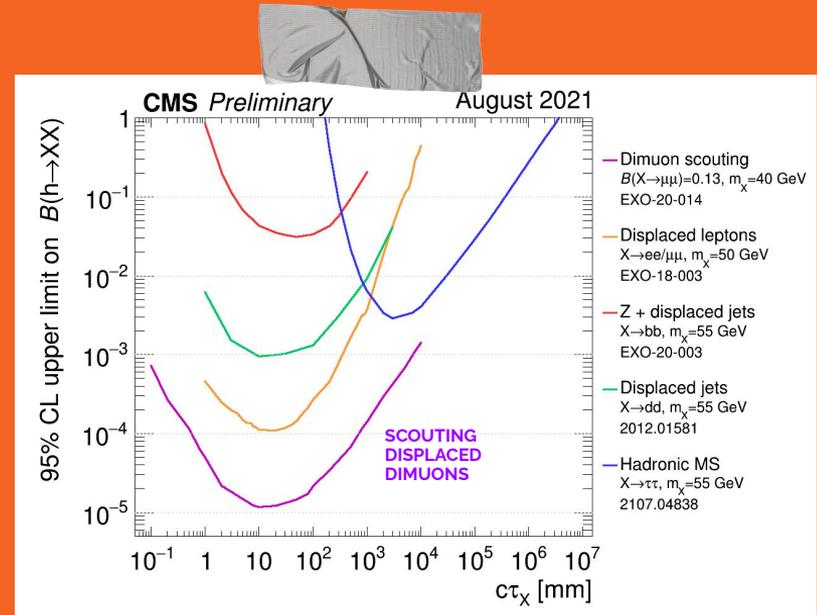


$0.5 \text{ GeV} \leq m(Z_D) \leq 50 \text{ GeV}$   
 $0.1 \text{ mm} \leq c\tau_0(Z_D) \lesssim 1000 \text{ mm}$   
 Constrain:  $\text{BR}(H \rightarrow Z_D Z_D) \cdot \text{BR}(Z_D \rightarrow \mu\mu)$

arXiv.1412.0018



Limite estrapolato per un generico processo di decadimento Higgs  $\rightarrow XX$  (con  $X=LLP$ ):

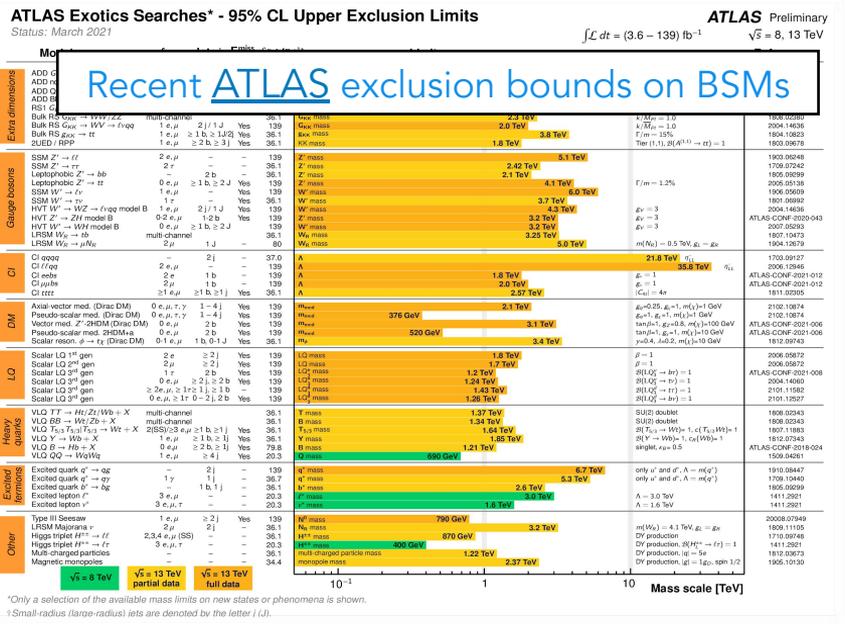
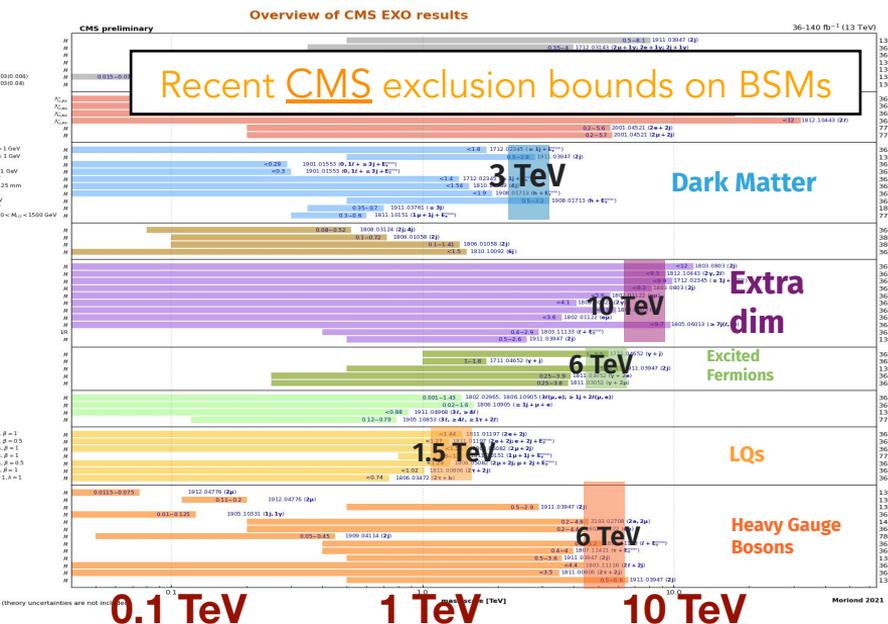


# Conclusioni

Panoramica delle più recenti ricerche di nuova fisica delle Collaborazioni ATLAS & CMS con i dati del Run2 di LHC.

Nessun segno chiaro di nuova fisica alla scala del TeV in tutti i dati di LHC 🙄

Stiamo approssicando la saturazione della frontiera energetica dei prossimi 30 anni 😭



Cosa abbiamo imparato nel Run 2 sulla fisica oltre il Modello Standard

# Il futuro luminoso di LHC\*

la storia non finisce con LHC!  
 HL-LHC, FCC(ee, eh, hh), HE-LHC ...

tanta statistica, nuovi metodi di analizzare i dati, nuove capacità dei rivelatori 😊

\*timeScale uncertainty for covid-19...

HL-LHC:  
 Peak  $L=2 \times 10^{35} \text{ cm}^2/\text{s}$  level luminosity to  
 Nominal scenario:  $L=5 \times 10^{34} \text{ cm}^2/\text{s}$  for  $3 \text{ ab}^{-1} \langle \mu \rangle = 140$   
 Ultimate scenario:  $L=7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^2/\text{s}$  for  $4 \text{ ab}^{-1} \langle \mu \rangle = 200$   
 → 25% increase in integrated luminosity



$\sqrt{s}=14 \text{ TeV}$ ,  
 $L=3-4 \text{ ab}^{-1}$ ,  
 $\langle \mu \rangle = 140-200$

---

---

# Grazie per l'attenzione

Matteo Presilla: [matteo.presilla@cern.ch](mailto:matteo.presilla@cern.ch)

Francesco G. Gravili: [fgravili@cern.ch](mailto:fgravili@cern.ch)

---