

I quarks pesanti alla frontiera della Fisica

Giovanni Punzi

11/4/2018

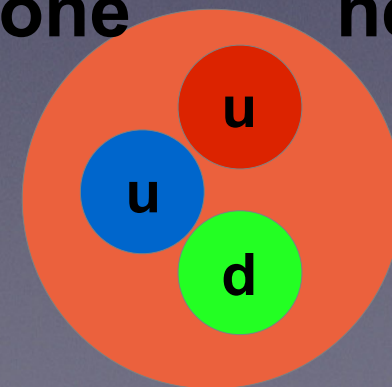
Seminario Area Pontecorvo
Dip. di Fisica, Università di Pisa



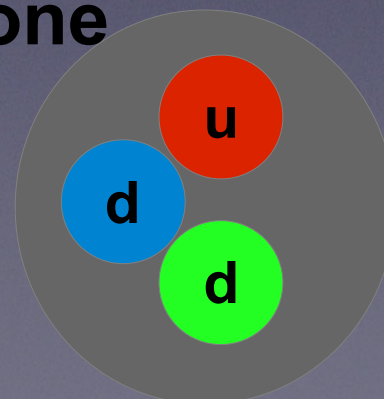
PESO: 85 KG. QUARKS: 99.98 %

Si tratta pero' solo di quark leggeri (u, d)

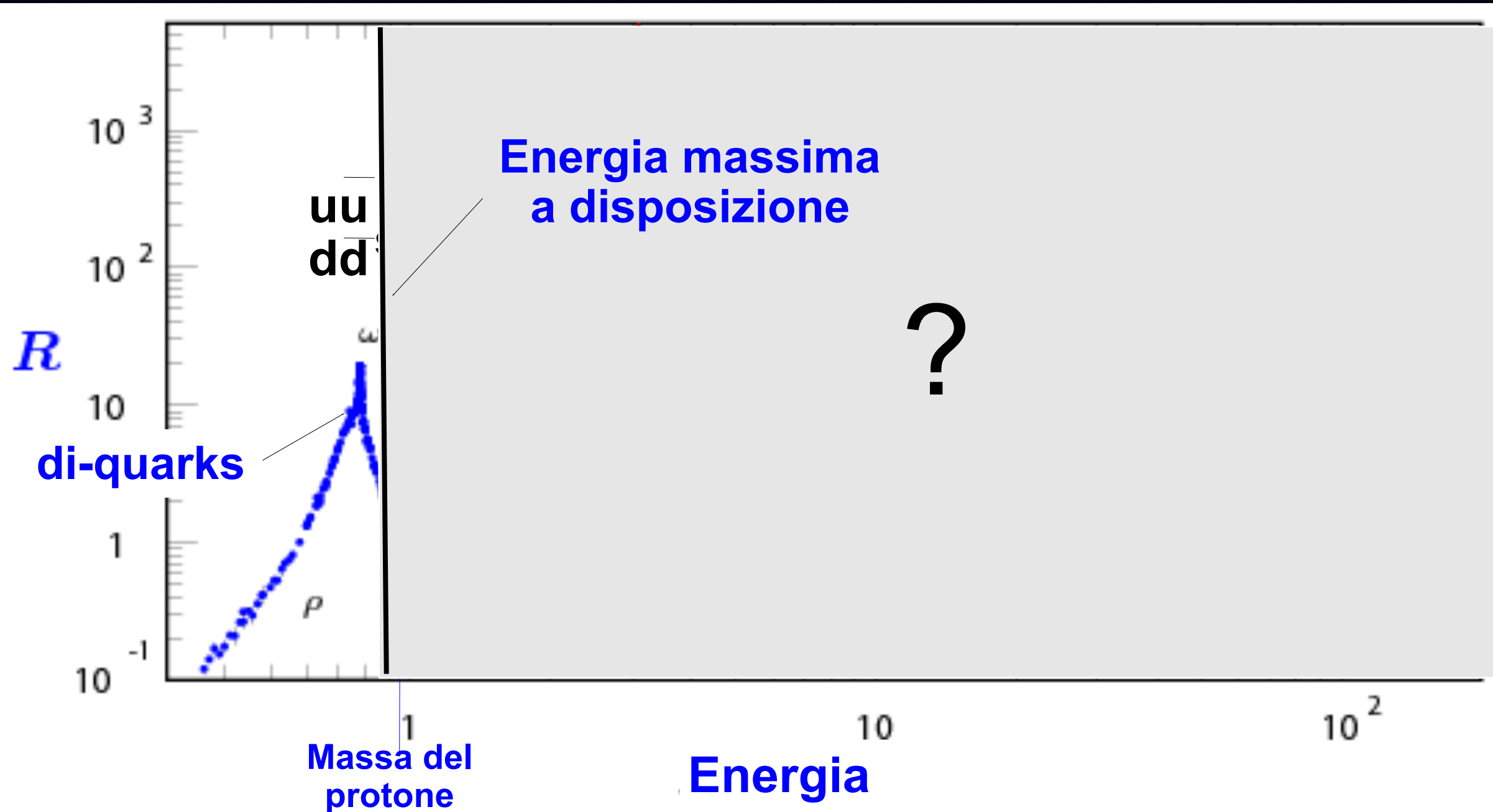
protone



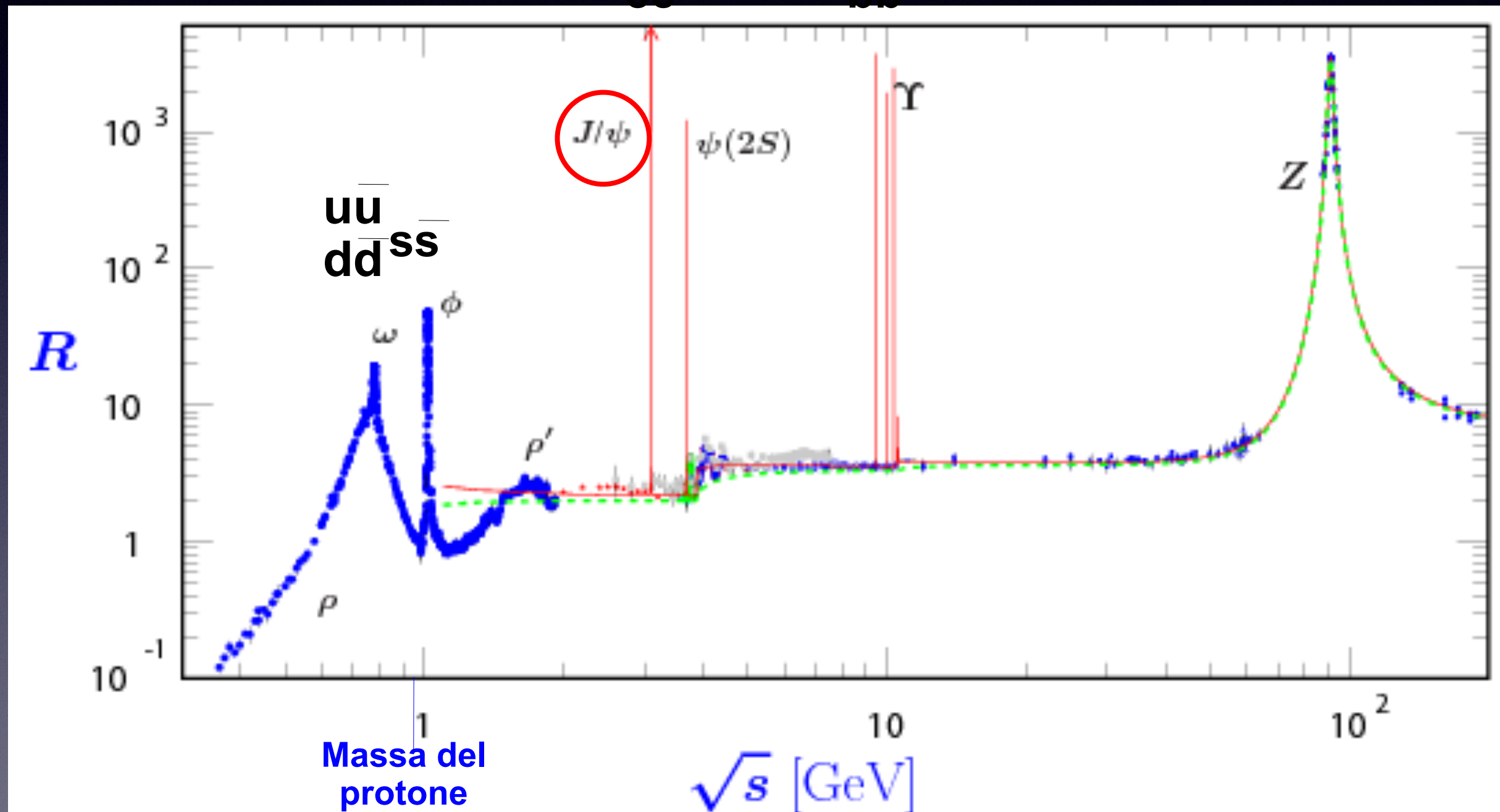
neutrone



A basse energie solo i 2 quarks piu' leggeri



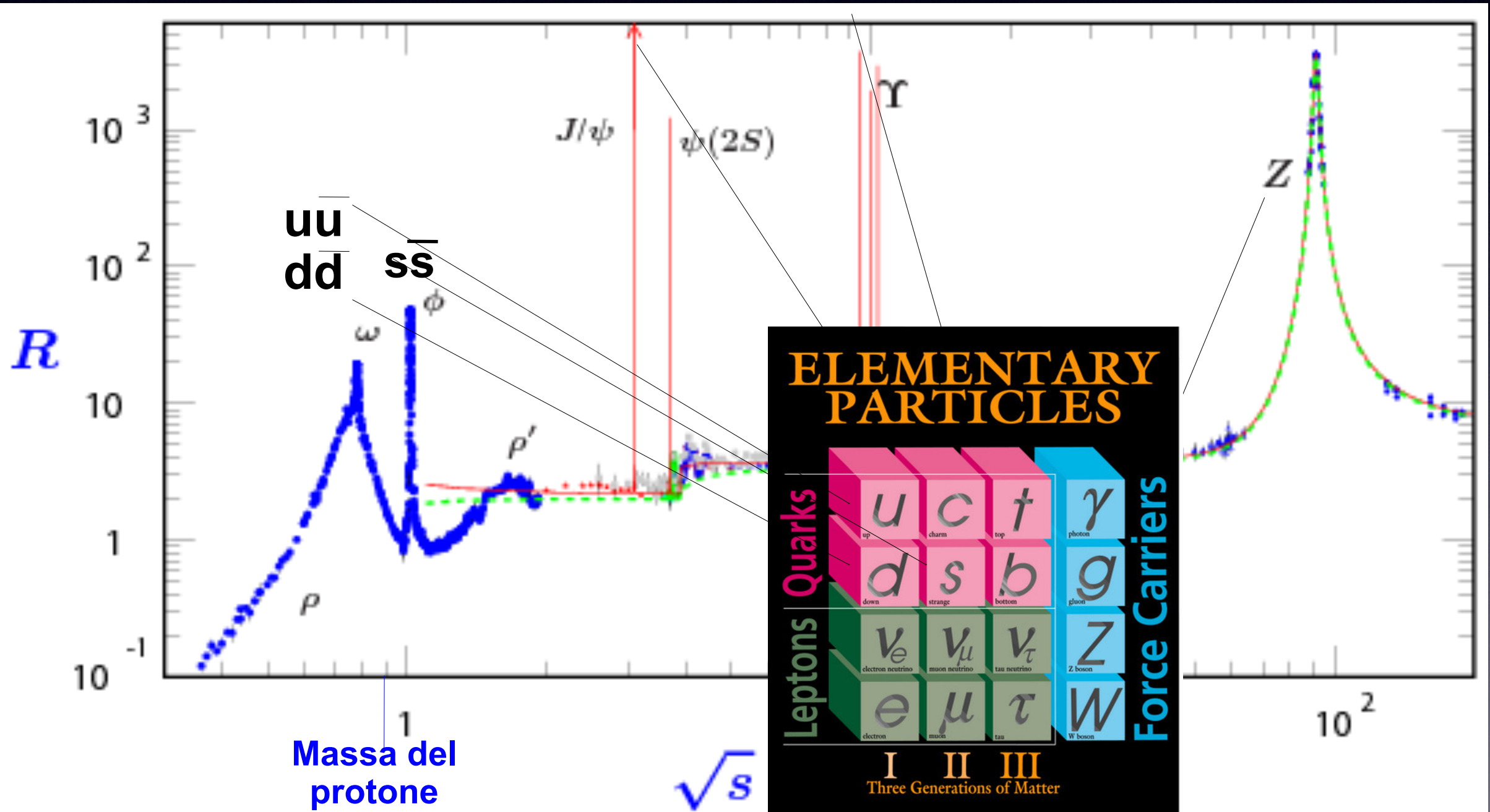
Aumentando l'energia/massa :
nuovi e piu' pesanti quarks...



Classificazione

$c\bar{c}$

$b\bar{b}$



I quark pesanti Bottom(Beauty) e Charm

- Molto interessanti per la varietà e il numero di interazioni, offrono molte opportunità per misure di precisione - di questi parleremo oggi
- Il top non forma stati legati perché decade troppo rapidamente: $m(\text{top}) > m(W)$.
Fenomenologia completamente diversa, non ne parleremo oggi (meriterebbe un seminario per conto suo)

Due esperimenti, e un premio Nobel

- Babar e Belle hanno studiato a lungo bottom e charm, prodotti da:
 $e^+e^- \rightarrow Y(4S) \rightarrow B + \text{anti-B}$
- Programma proseguito in Belle II (ma non discusso qui - oggi solo produzione adronica)
- Programma culminato in Nobel a K-M nel 2001

CPV studies: goal reached

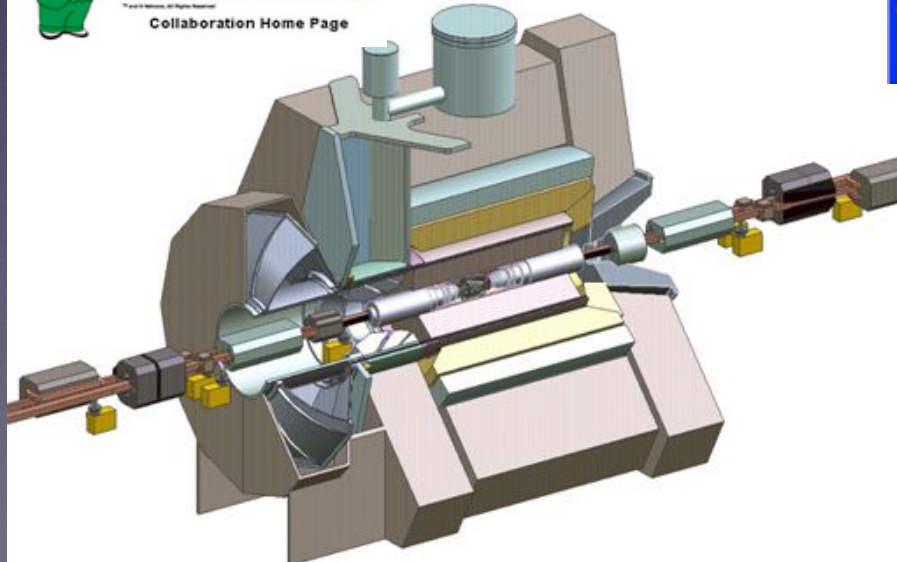
- The Nobel Prize for Kobayashi and Maskawa: the crown of CPV studies

The spontaneous broken symmetries that Nambu studied, differ from the broken symmetries described by **Makoto Kobayashi** and **Toshihide Maskawa**. These spontaneous occurrences seem to have existed in nature since the very beginning of the universe and came as a complete surprise when they first appeared in particle experiments in 1964. It is only in recent years that scientists have come to fully confirm the explanations that

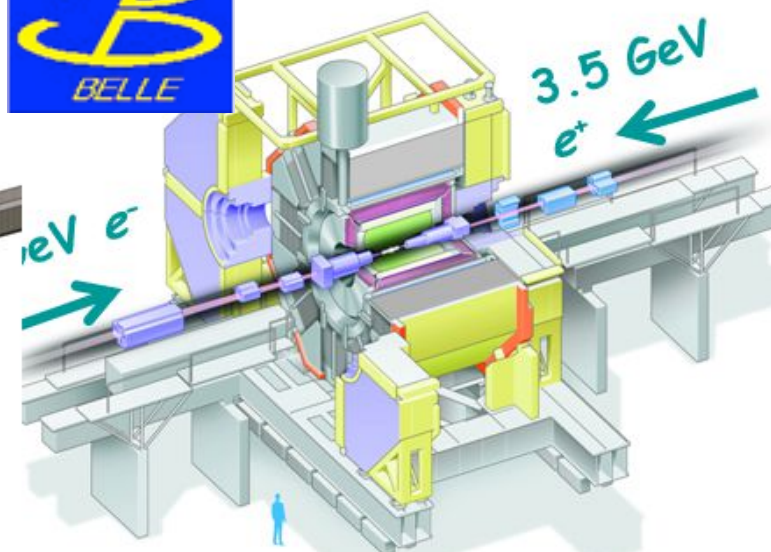


that they are now awarded the prize in the framework of the three families of quarks. These results were exactly as earlier.

BaBar



Belle



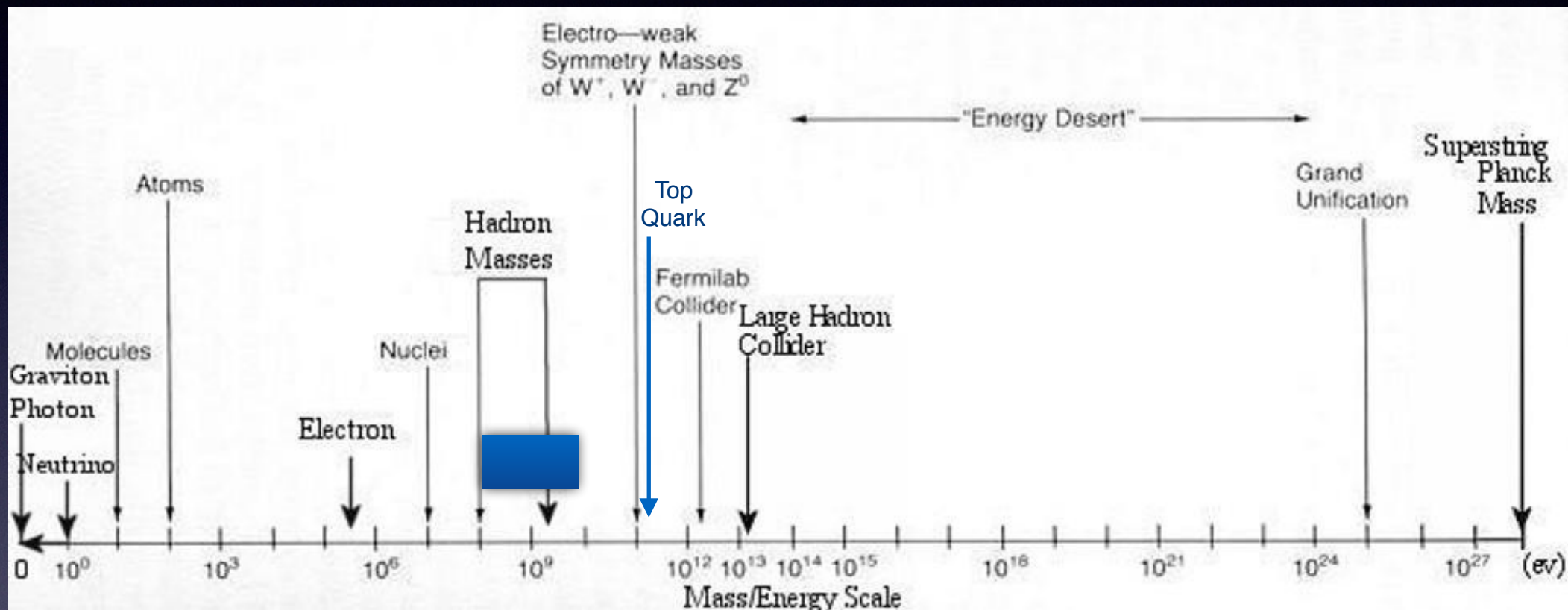
complex couplings between quarks)
sensitive to the complex phase)

$$\begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_L W^+_\mu$$

$V_{ub} V_{td}$: complex

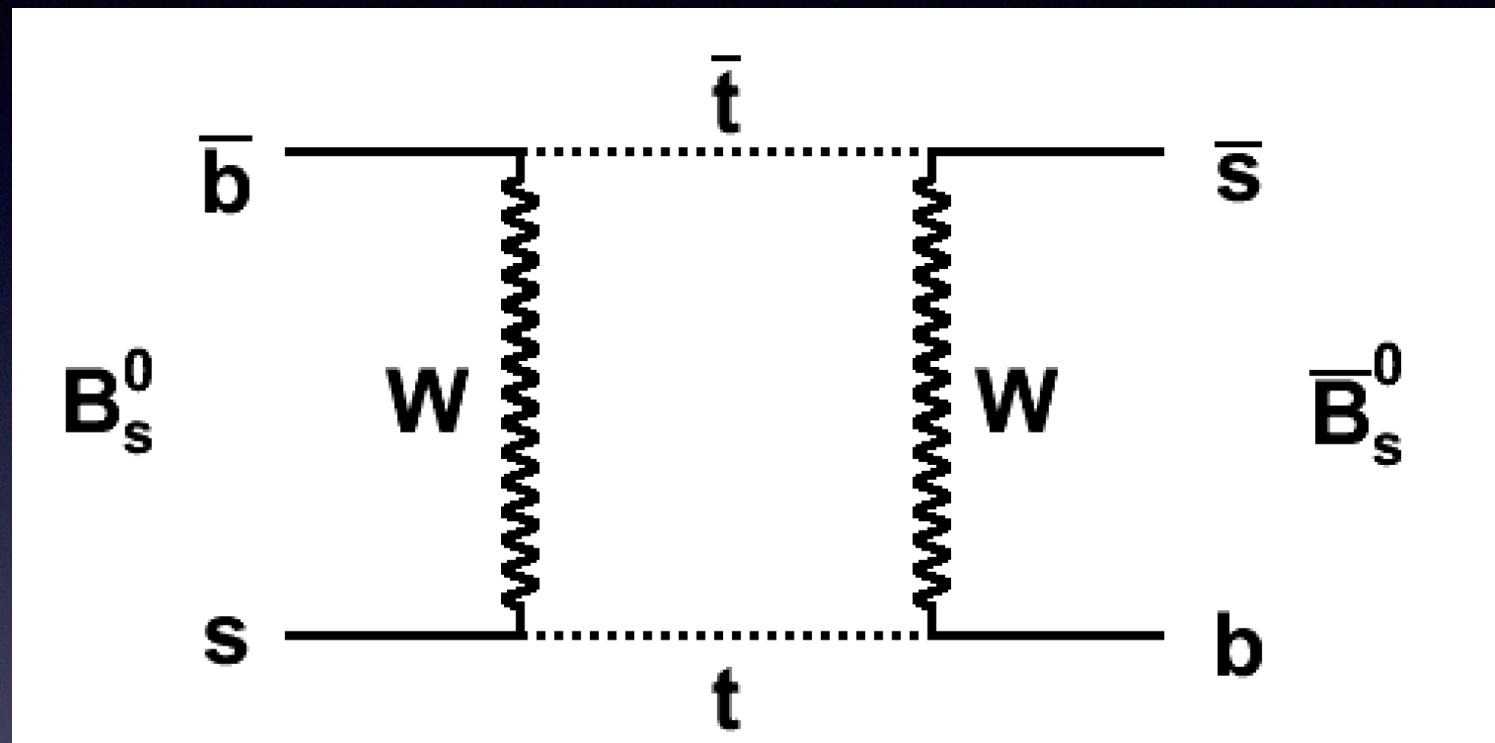
K-M mechanism
sources

La scala delle Energie



- Recentemente, molta attenzione e' stata dedicata "frontiera dell'energia" Tevatron, poi LHC. Energie molto piu' alte, esplorazione fenomeni $\sim$ TeV
- Perche' sono ancora interessanti le interazioni a bassa energia dei quarks bottom e charm ?

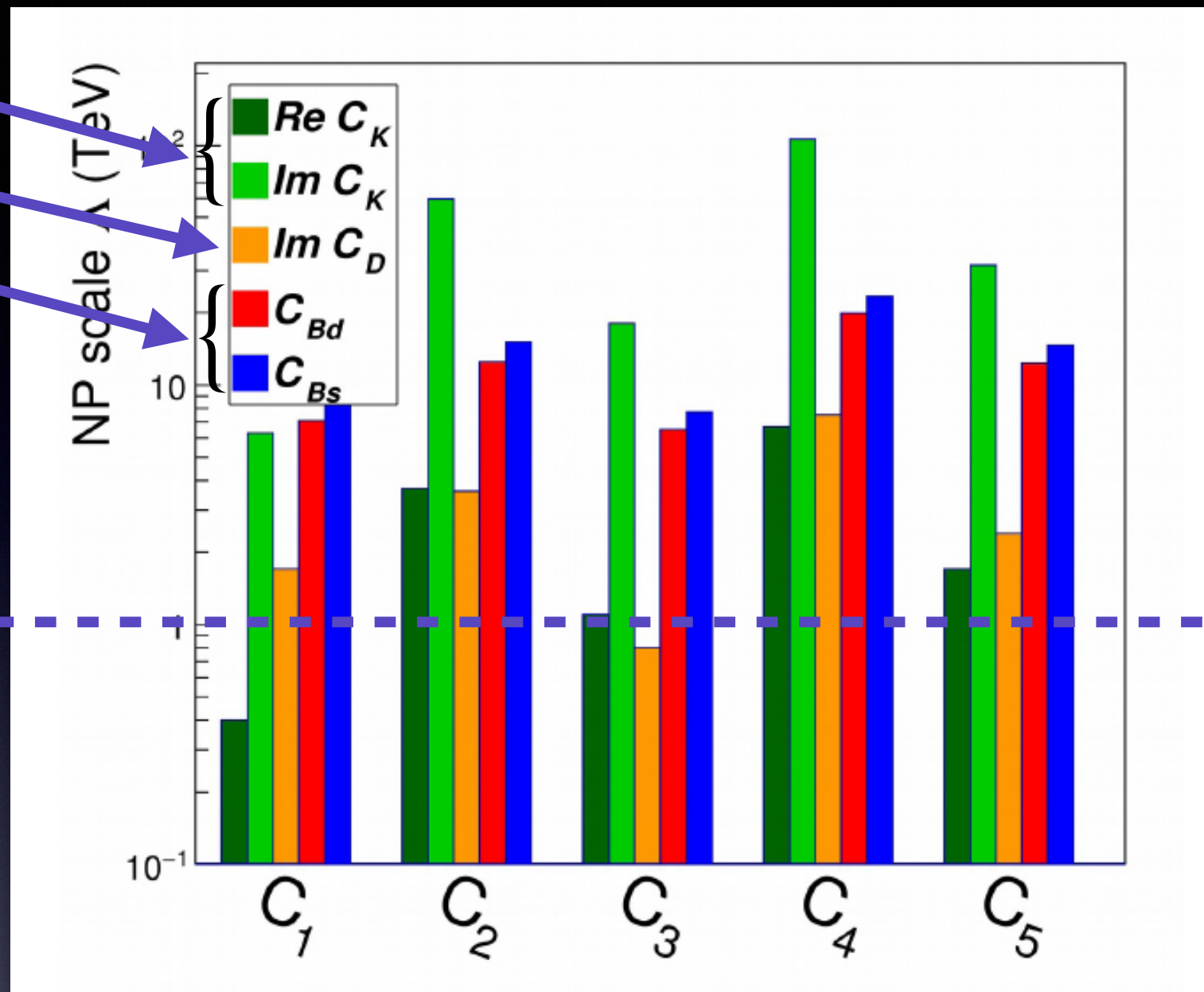
Bottom e Charm interagiscono con oggetti di masse molto maggiori



- Il quark top influenza il comportamento del bottom pur avendo massa molto maggiore (175 vs 5 GeV)
- L' esistenza del top si poteva dedurre dai dati sul bottom, molto prima di vederlo direttamente

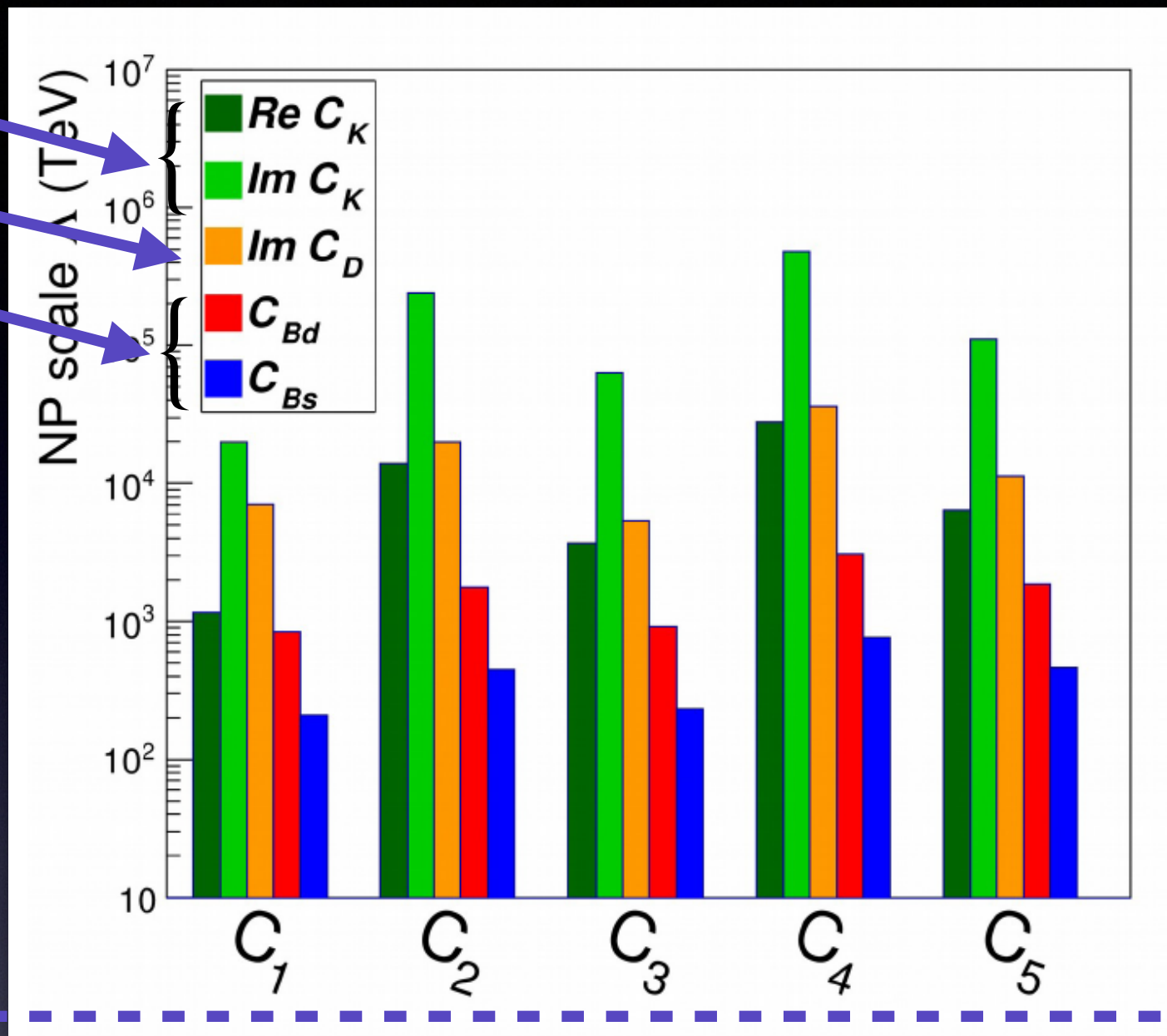
- Quark s
- Quark c
- Quark b

TeV scale



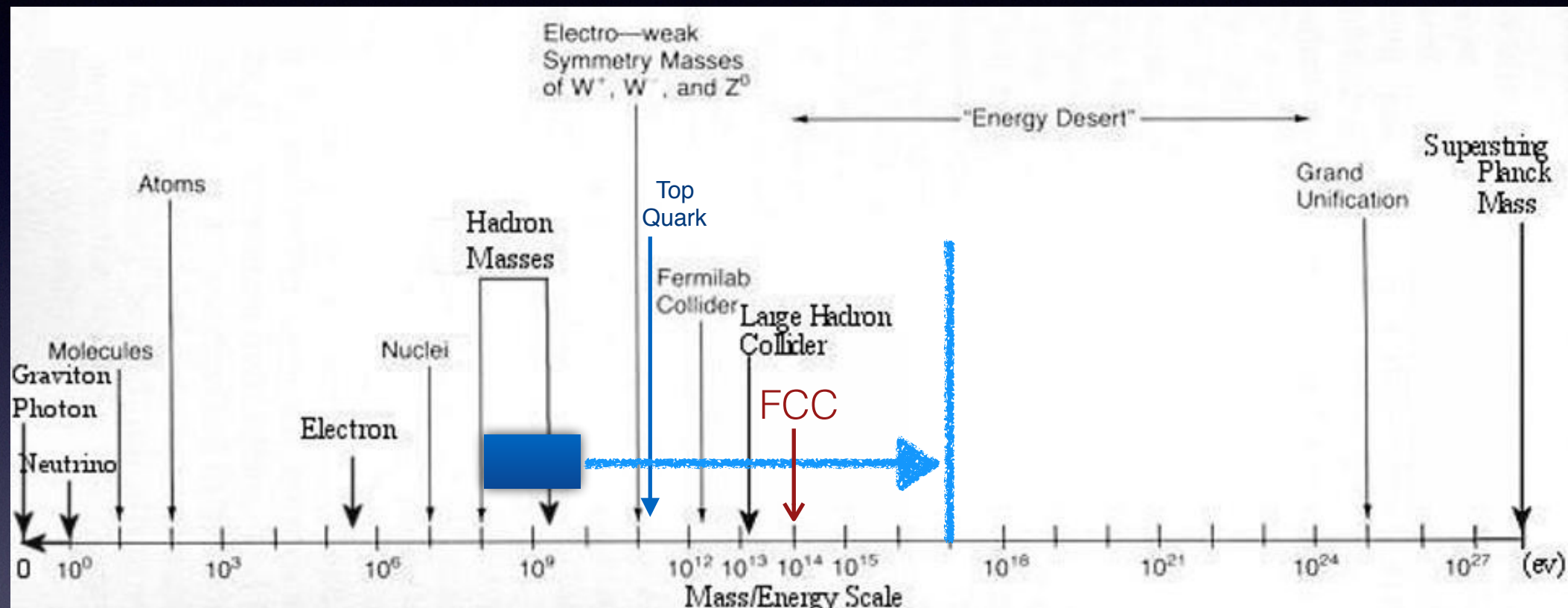
Con la precisione di oggi, siamo sicuramente sensibili fino a $O(10)$ TeV...
 ...assumendo che la NP "somigli" allo SM il piu' possibile
 (Minimal Flavor Violation)

- Quark s
- Quark c
- Quark b



... ma potenzialmente sensibili fino a 10^5 TeV !
 se Nuova Fisica di tipo "generico", non proprio simile a SM

La scala delle Energie



Ovvero: abbiamo gia' delle "sonde" nel territori remoti del "deserto"
OK, non coprono ogni possibilita', e non arrivano alla scala di Planck... ma comunque niente male....

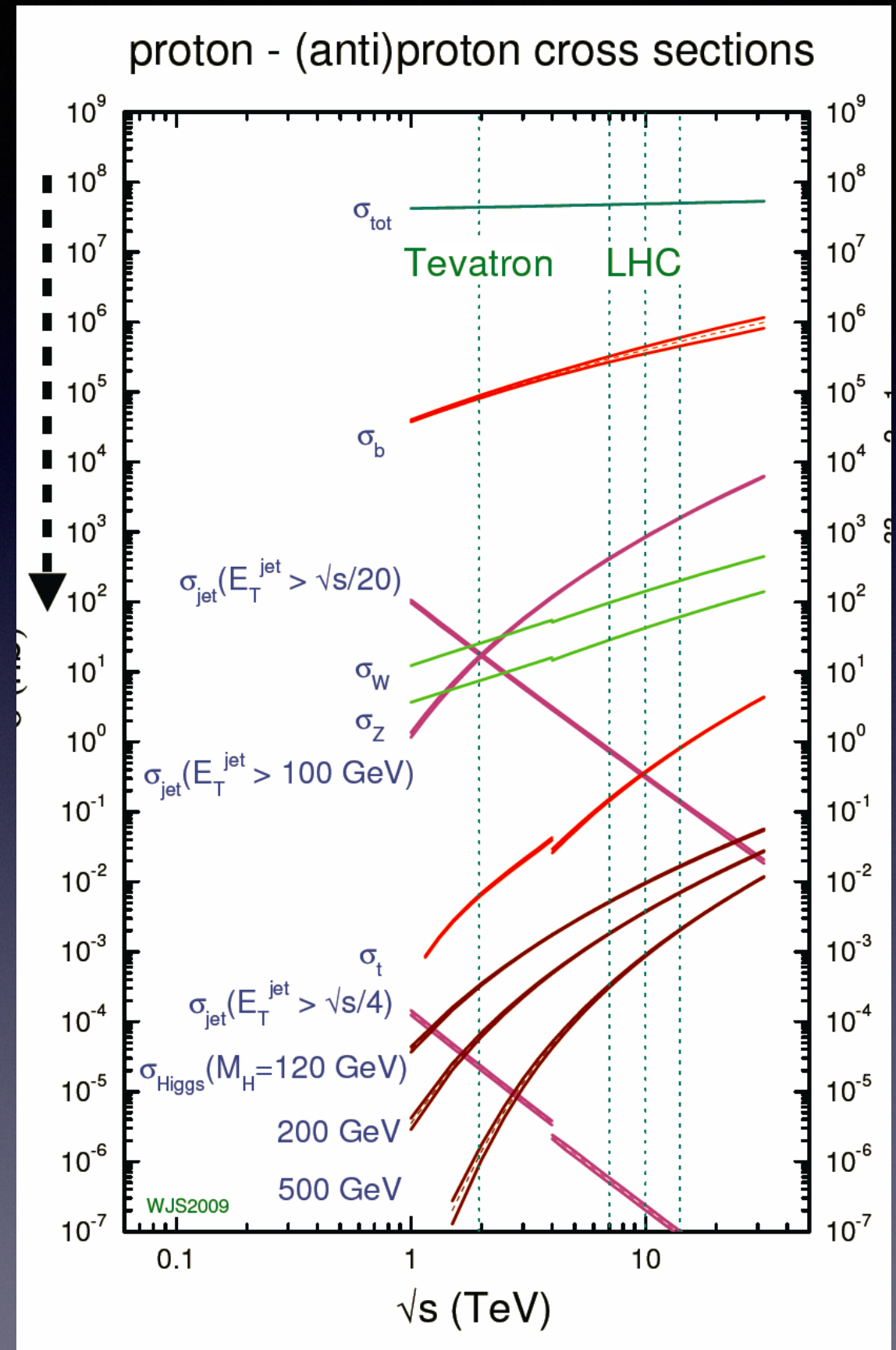
Gia' oggi piu' in la' dei futuri acceleratori circolari

Si puo' progredire ulteriormente su questa strada ?

Il Large Hadron Collider (da un altro punto di vista)



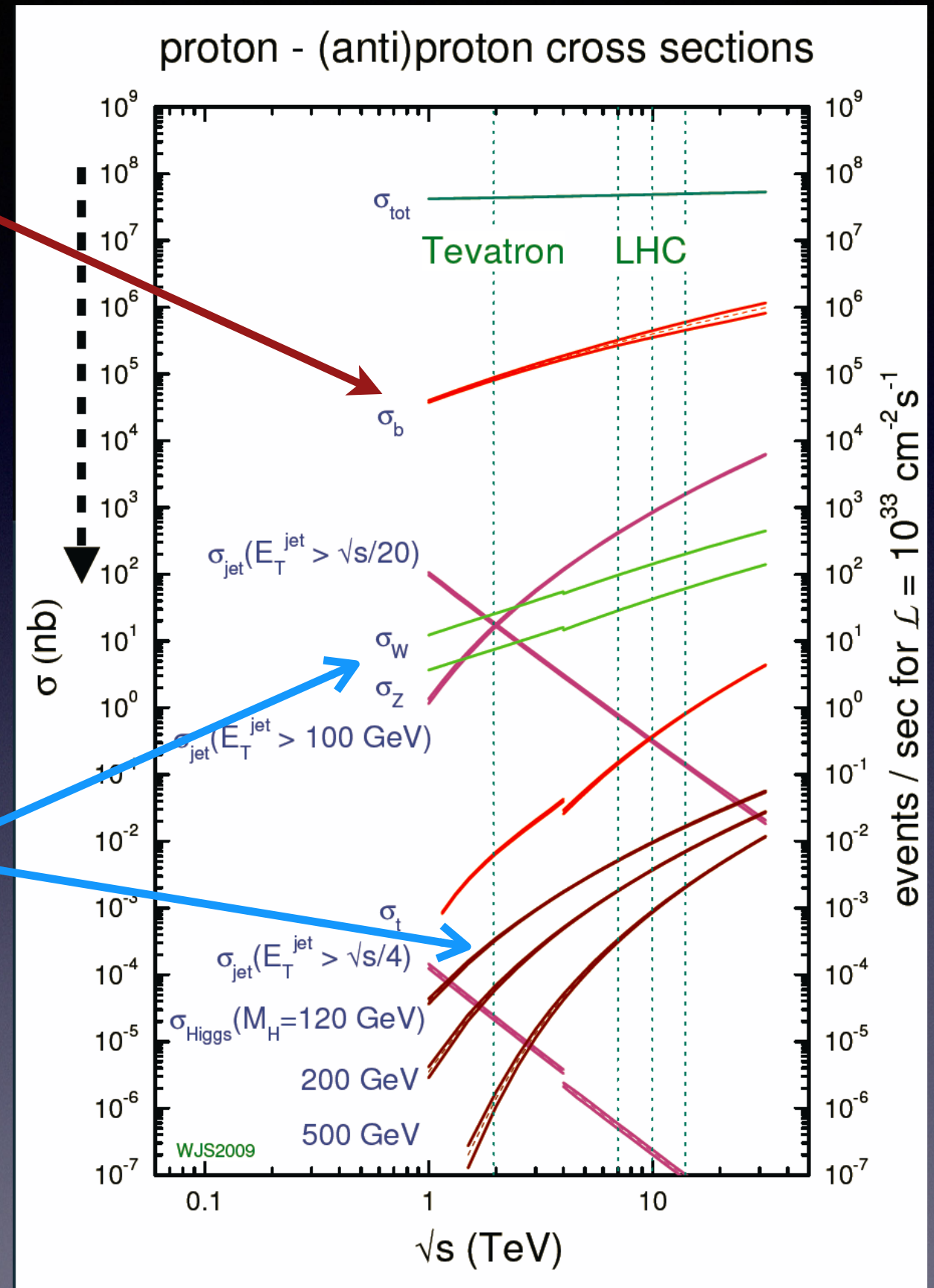
Le sezioni d'urto di produzione a LHC



10^6 b quarks/secondo (!)
 $= 10^{13}$ b quarks/anno
 Perche' non usarli ?

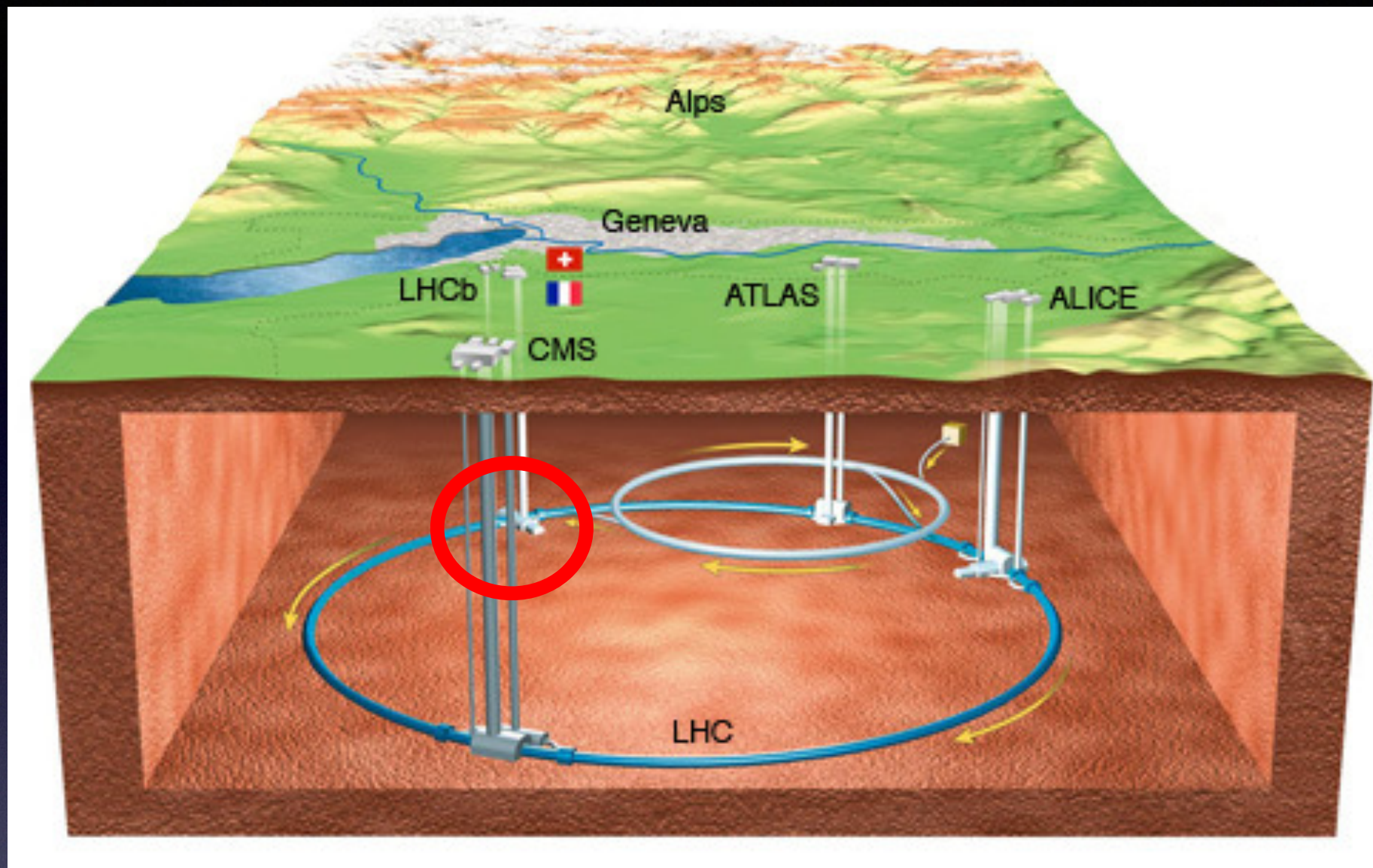
Sembra facile... ma ci
 vuole un apparato apposta

Obiettivi di CMS &
 ATLAS : Bosoni pesanti

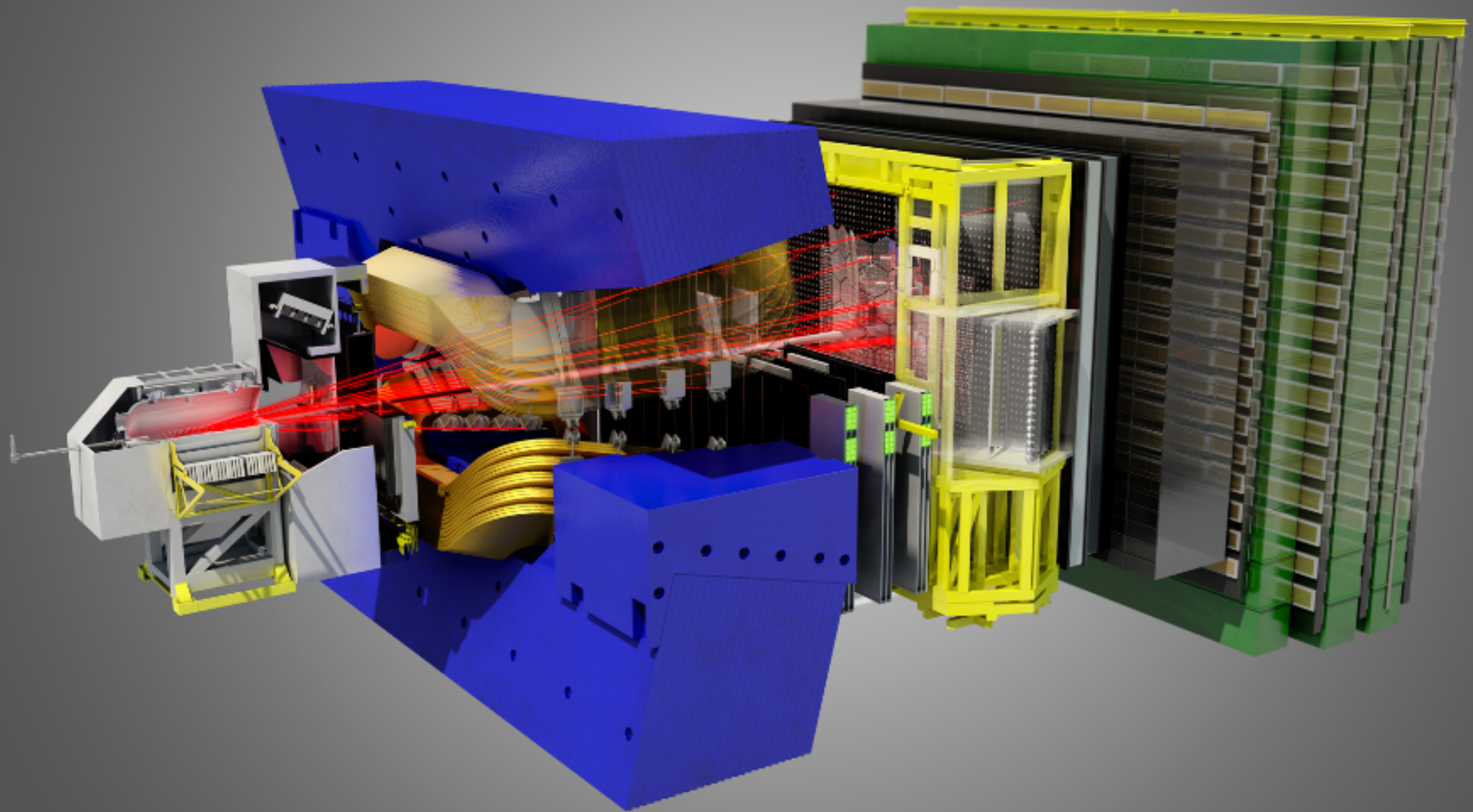




LHCb:
The *Beauty* experiment at LHC

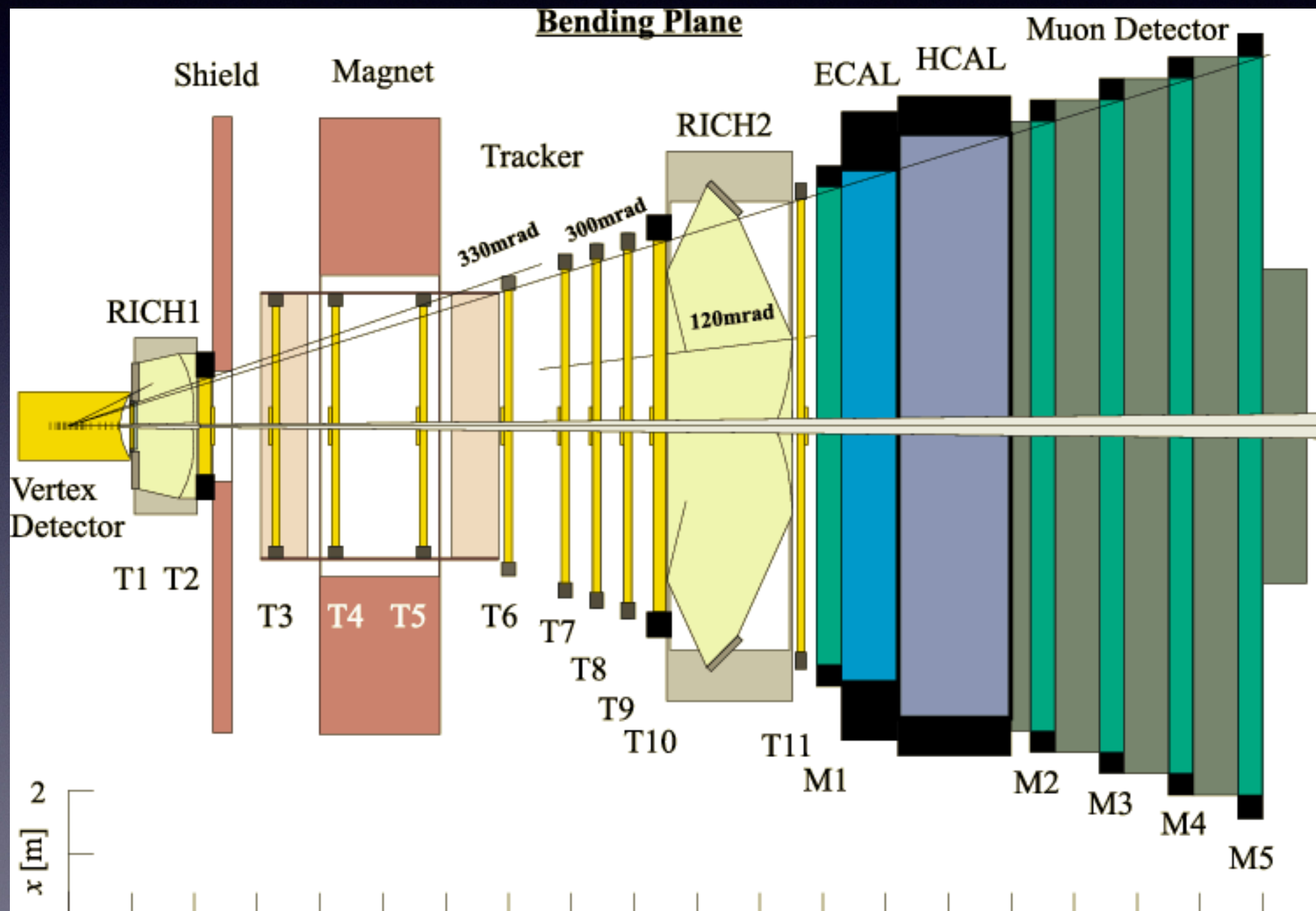








LHCb: The *Beauty* experiment



LHCb Collaboration



17 countries



61 institutes, ~800 members



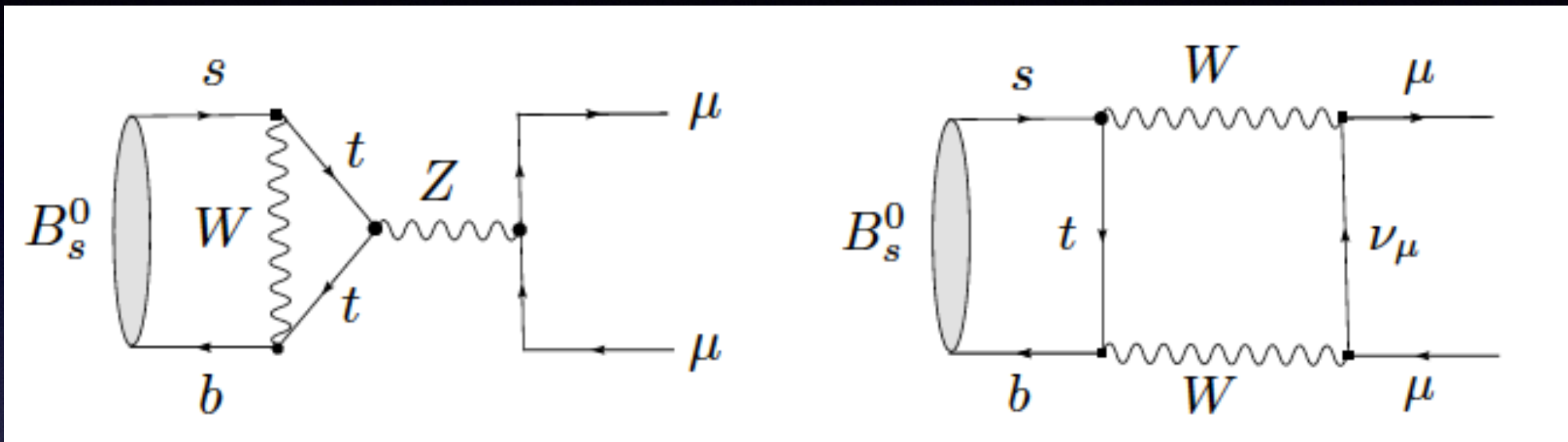
800 Fisici (una decina a Pisa)

Alcuni Esempi

di misure di Fisica con LHCb

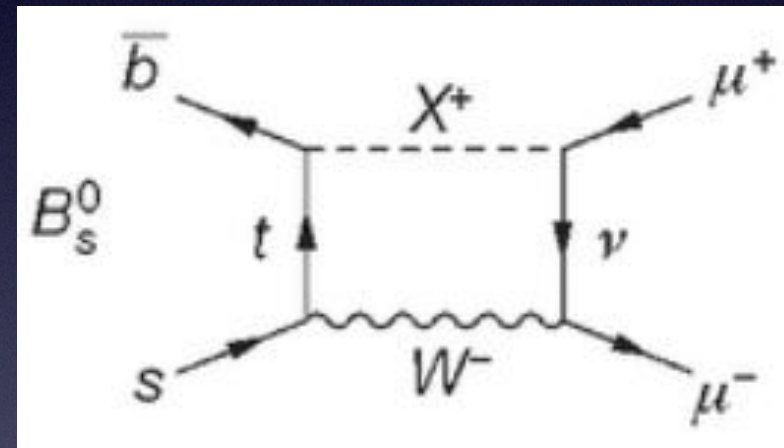
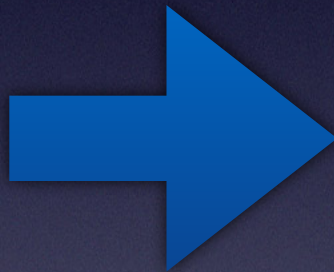
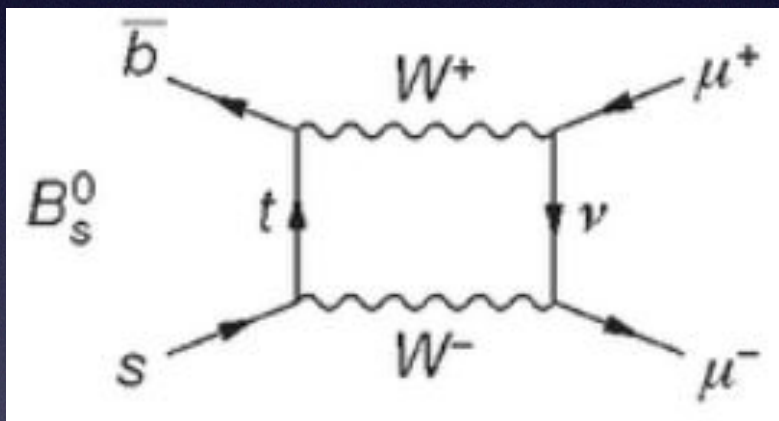
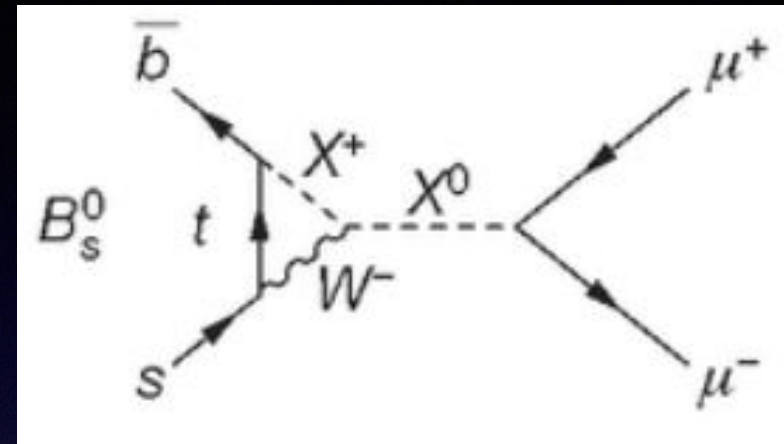
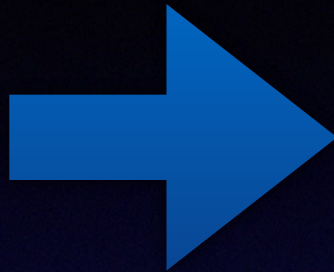
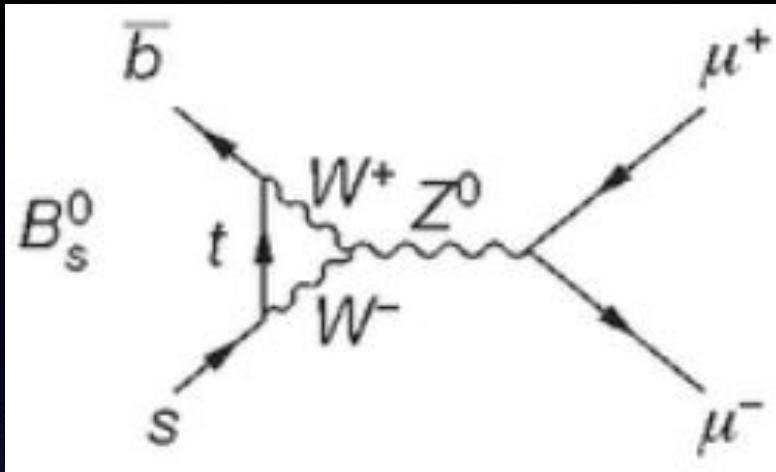
Esempio 1: Decadimenti rari

$$B^0/B^0_s \rightarrow \mu^+\mu^-$$

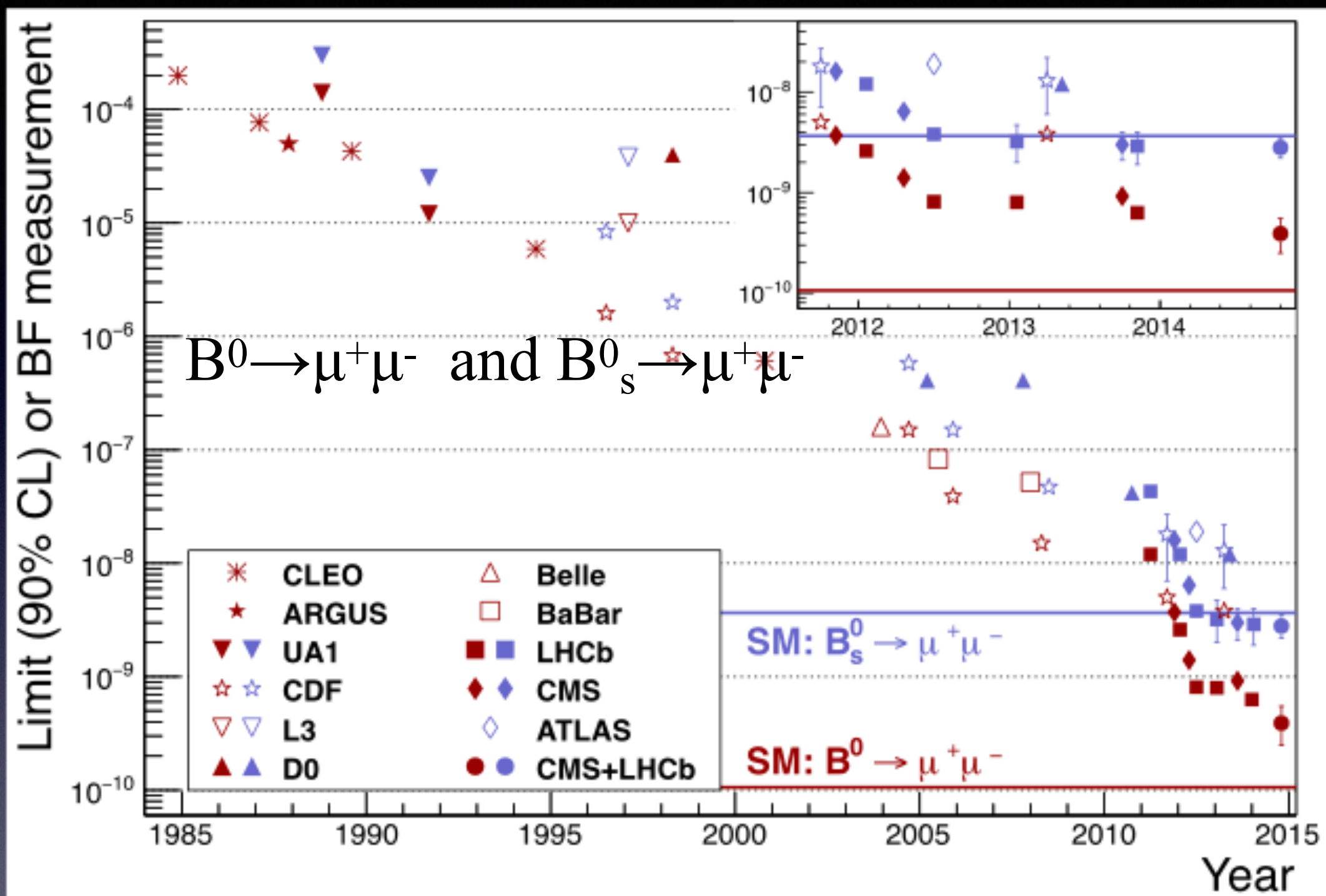


- Decadimento raro nel SM (10^{-9})
- I due quarks non possono annichilare se non in modo complicato -> bassa probabilita'
- Interazioni e particelle non-SM, se esistono, possono contribuire al decadimento -> 10 ÷ 100 volte piu' frequente

$$B^0/B^0_s \rightarrow \mu^+\mu^-$$



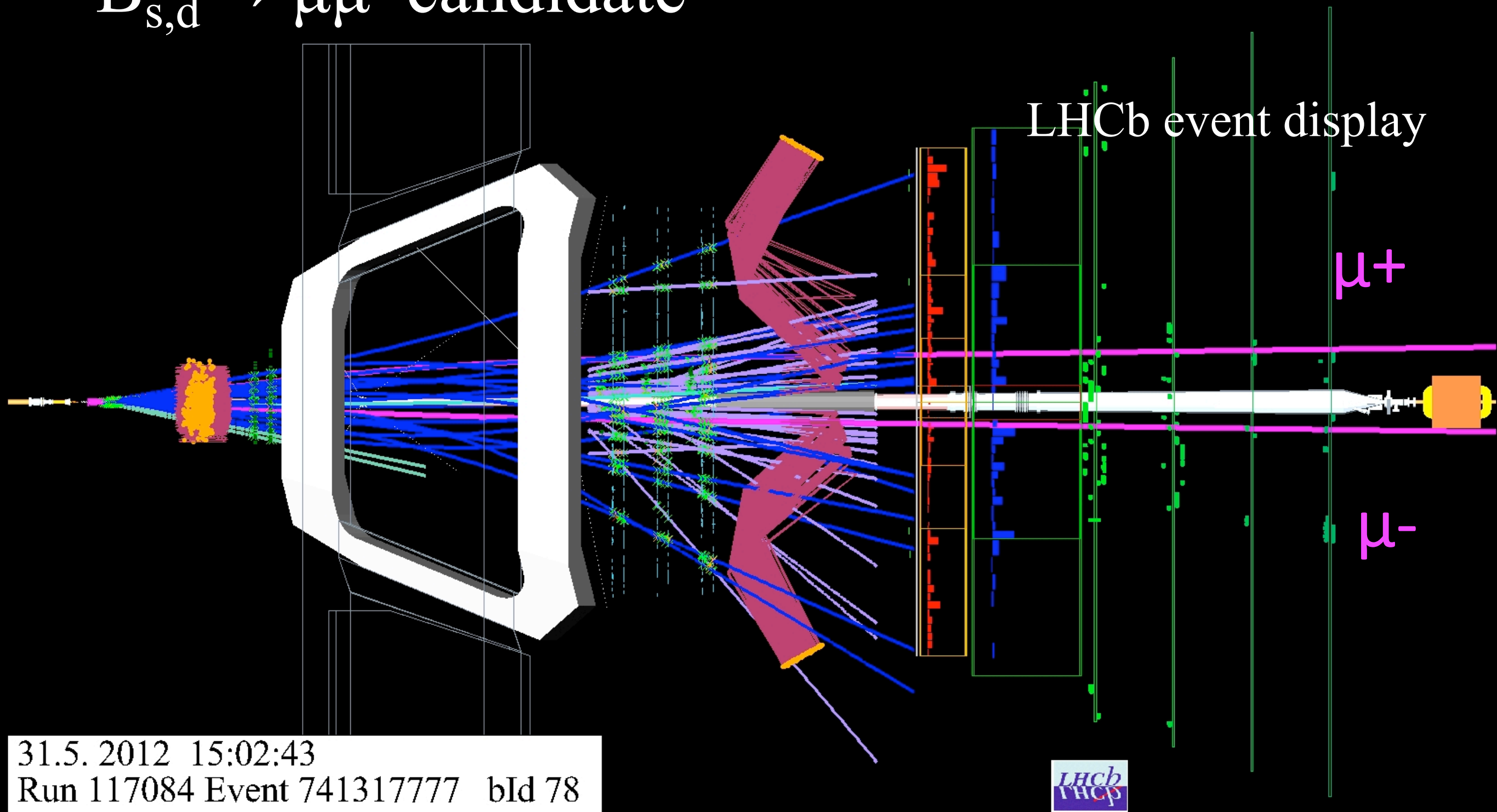
- Molte particelle non-SM possono compiere processi simili a quelle SM, aumentando la frequenza del decadimento (es. supersimmetria - ma molte altre possibilita')
- Una sonda molto efficace per "sentire" la presenza di nuova fisica anche senza riuscire a vederla direttamente
- Decadimento cercato per anni



Una caccia durata 30 anni

Ha resistito a 13 esperimenti - trovato infine grazie alla enorme produzione di b quark a LHC

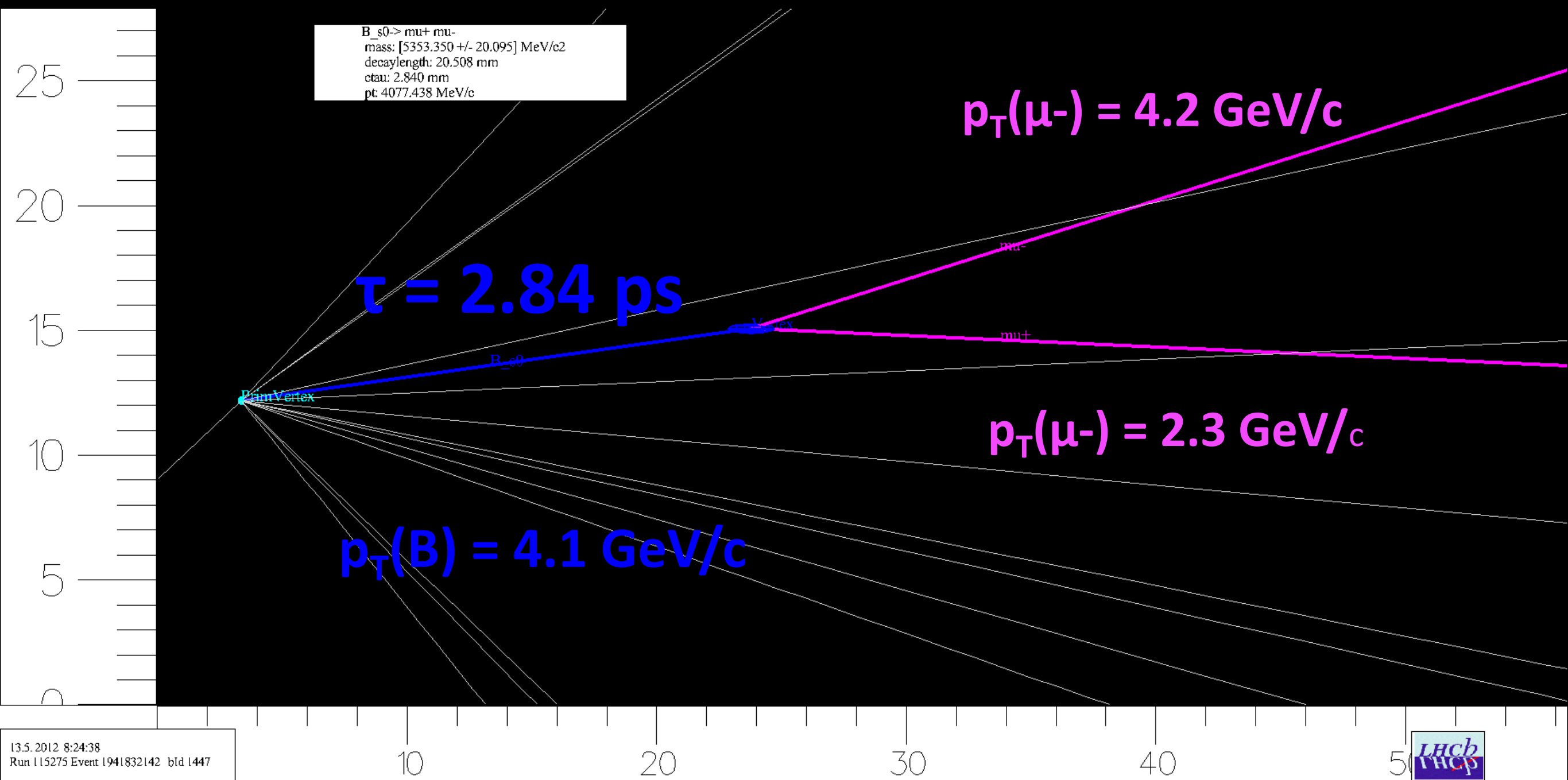
$B_{s,d} \rightarrow \mu\mu$ candidate



$M(\mu\mu) = 5353.4 \text{ MeV}/c^2$, $\text{BDT} = 0.826$, $\tau = 2.84 \text{ ps}$



$B_{s,d} \rightarrow \mu\mu$ candidate: zoom



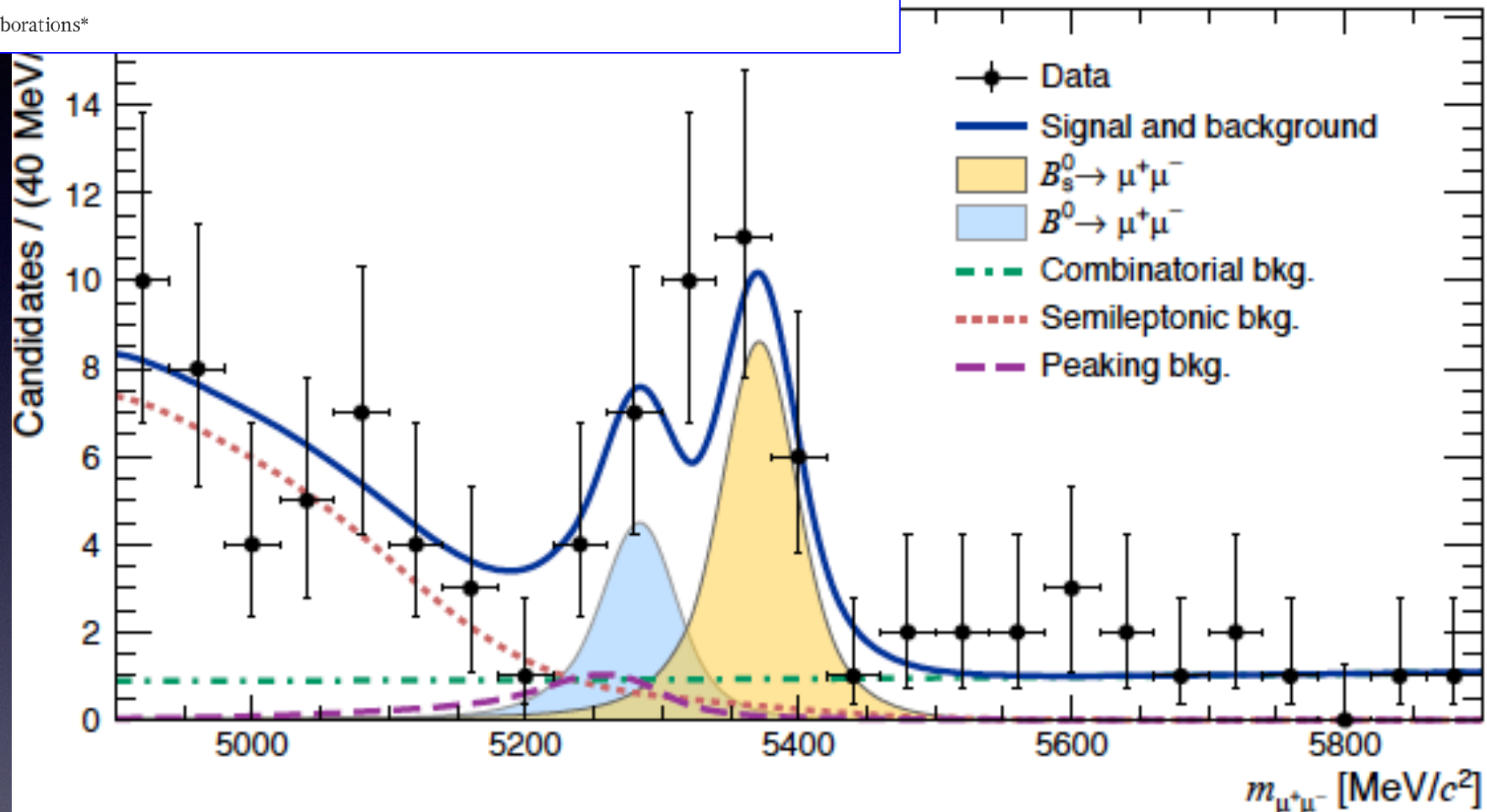
Cosa c'e' dietro

- Molto piu' di quello che e' possibile coprire in questa breve presentazione
- Ogni evento e' in realta' selezionato in base a molte osservabili simultanee, utilizzando tecniche di "analisi multivariata" (NN, BDT, PDE...), e Likelihoods a molte dimensioni
- Vari altri canali di decadimento sono stati individuati e analizzati per ottimizzare la selezione, calibrare efficienze, e molto altro
- Ha richiesto lo sforzo di alcuni anni e la creativita' di un piccolo gruppo di fisici sperimentali esperti

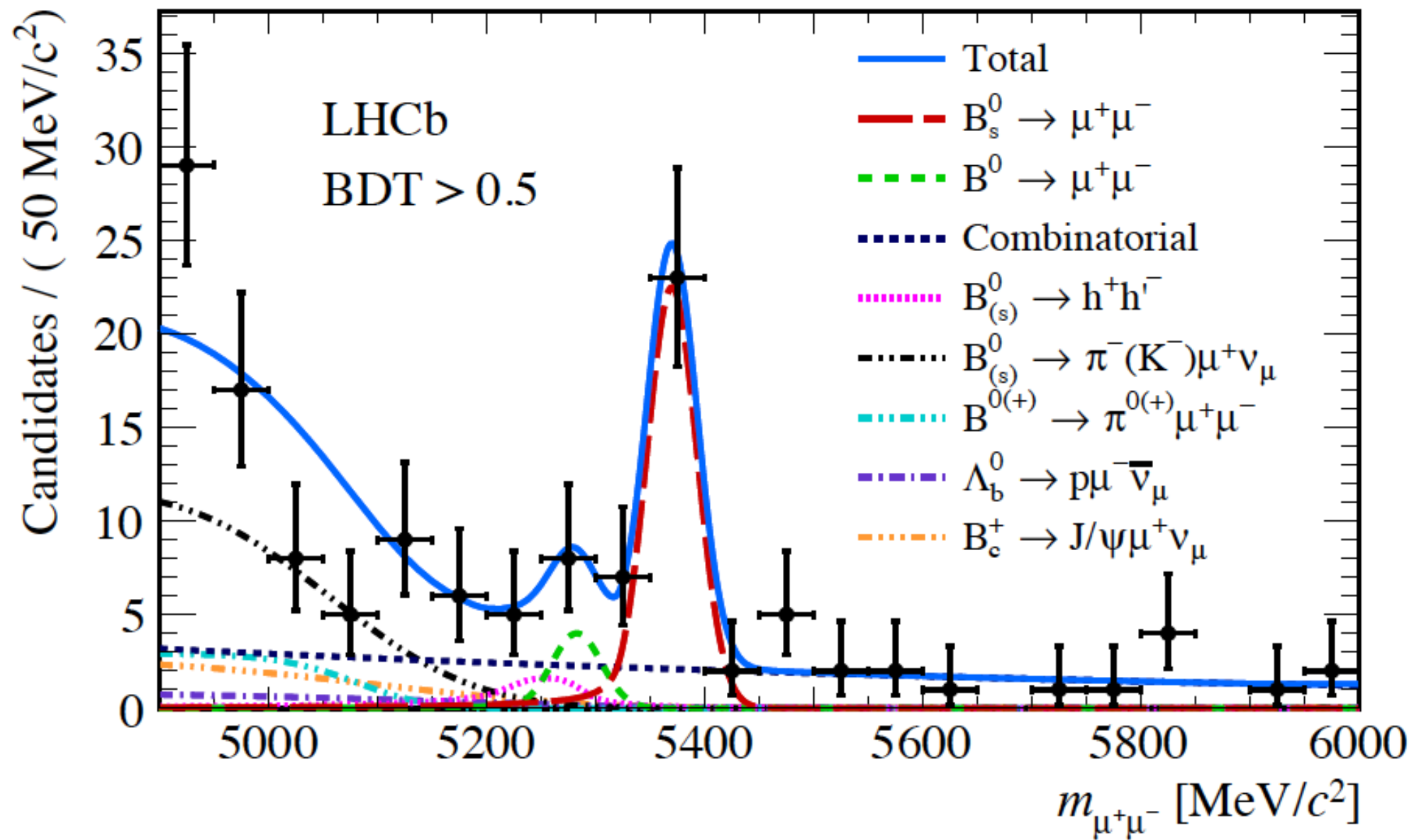
Observation of the rare $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay from the combined analysis of CMS and LHCb data

The CMS and LHCb collaborations*

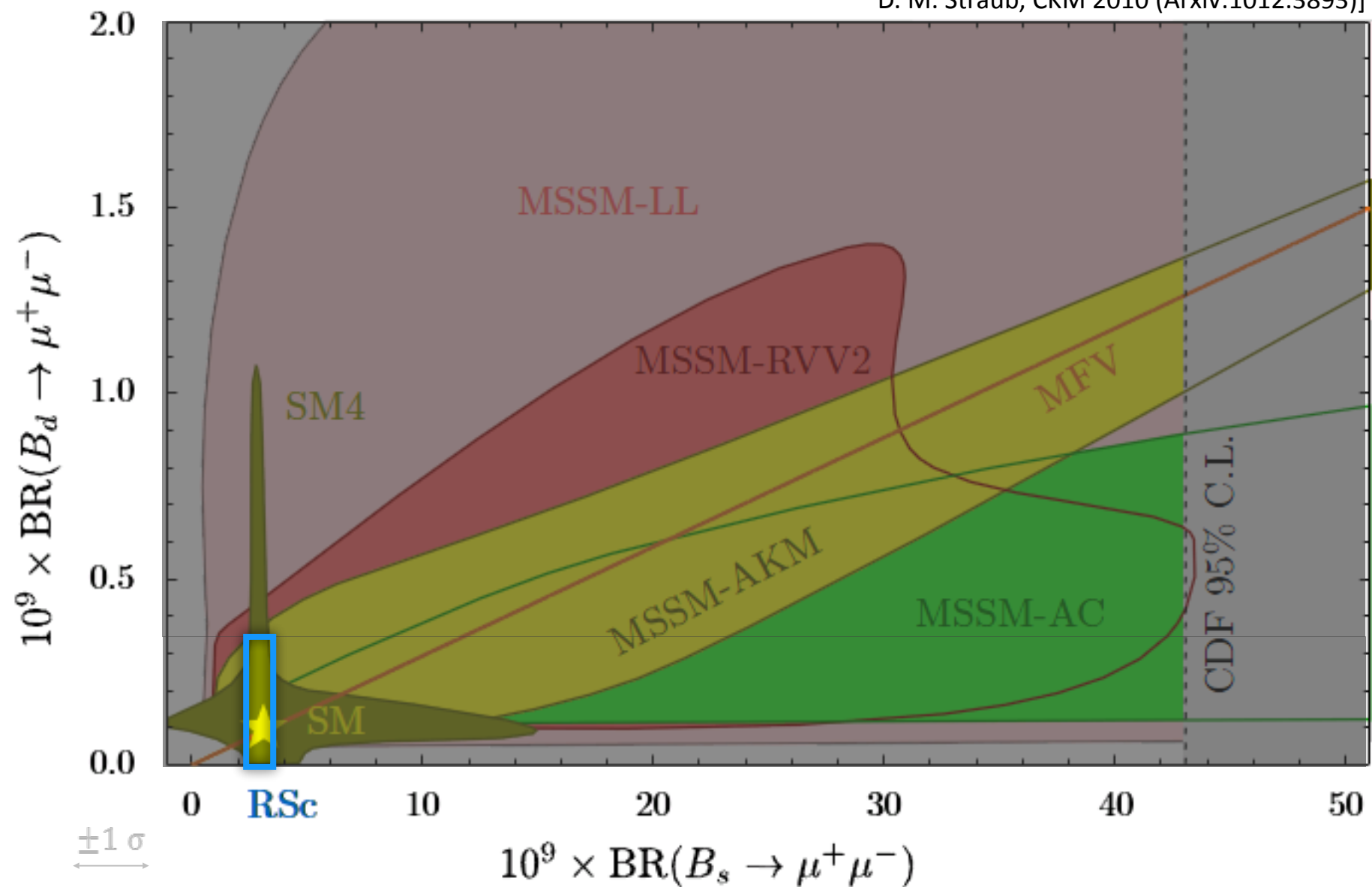
Nature 522, 68 (04 June 2015)



Risultato: osservato il decadimento del B_s , trovato in accordo con SM entro le incertezze (2015)

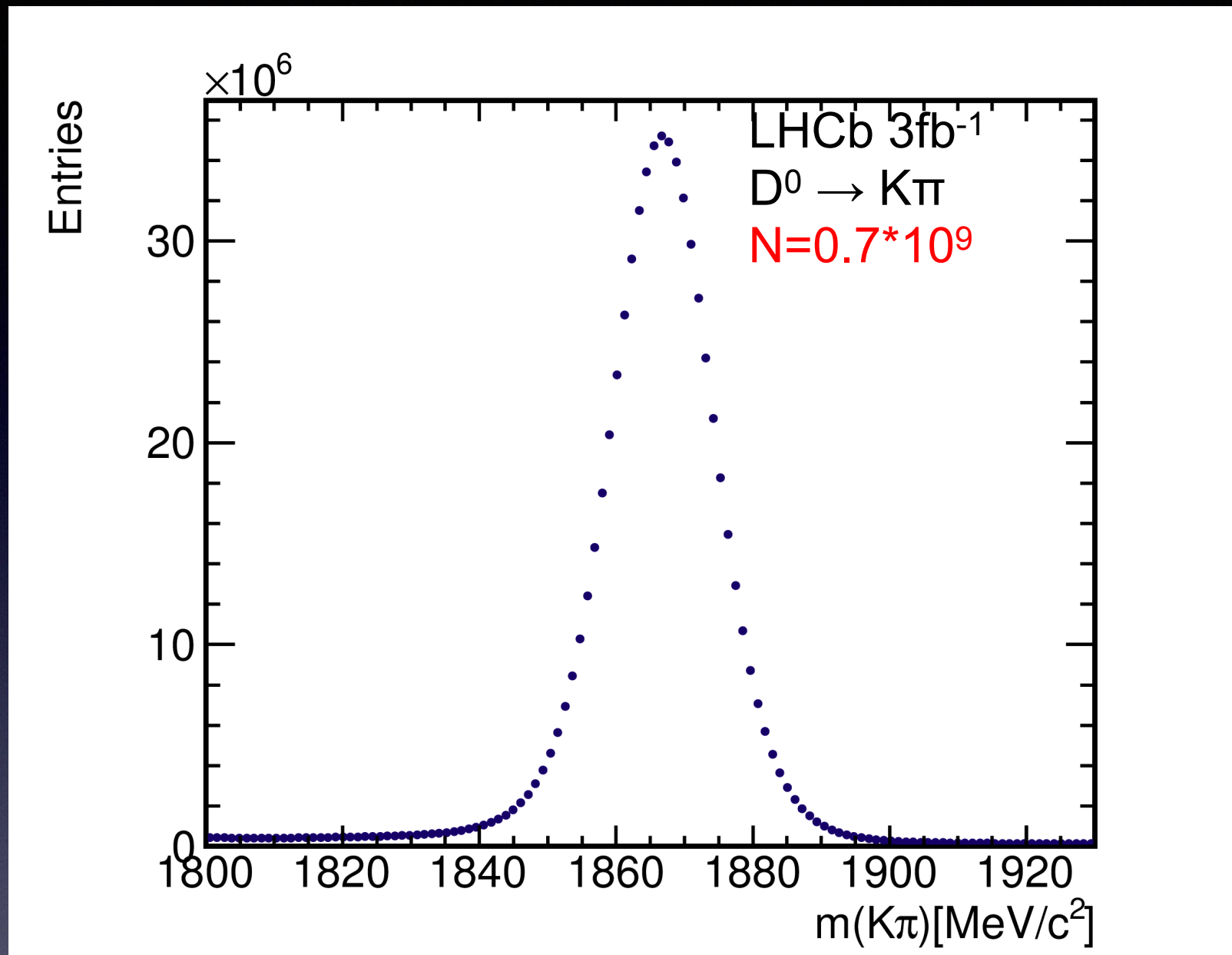


2017: LHCb migliora la misura con l'aggiunta di altri dati, e raggiunge da solo 5-sigma per il B_s



Implicazioni delle misure di $B_{\mu\mu}$ su
possibili modelli Supersimmetrici

Esempio 2: Charm CPV
Dal molto raro al molto
frequente...



~1 Miliardo di mesoni con charm (D^0)

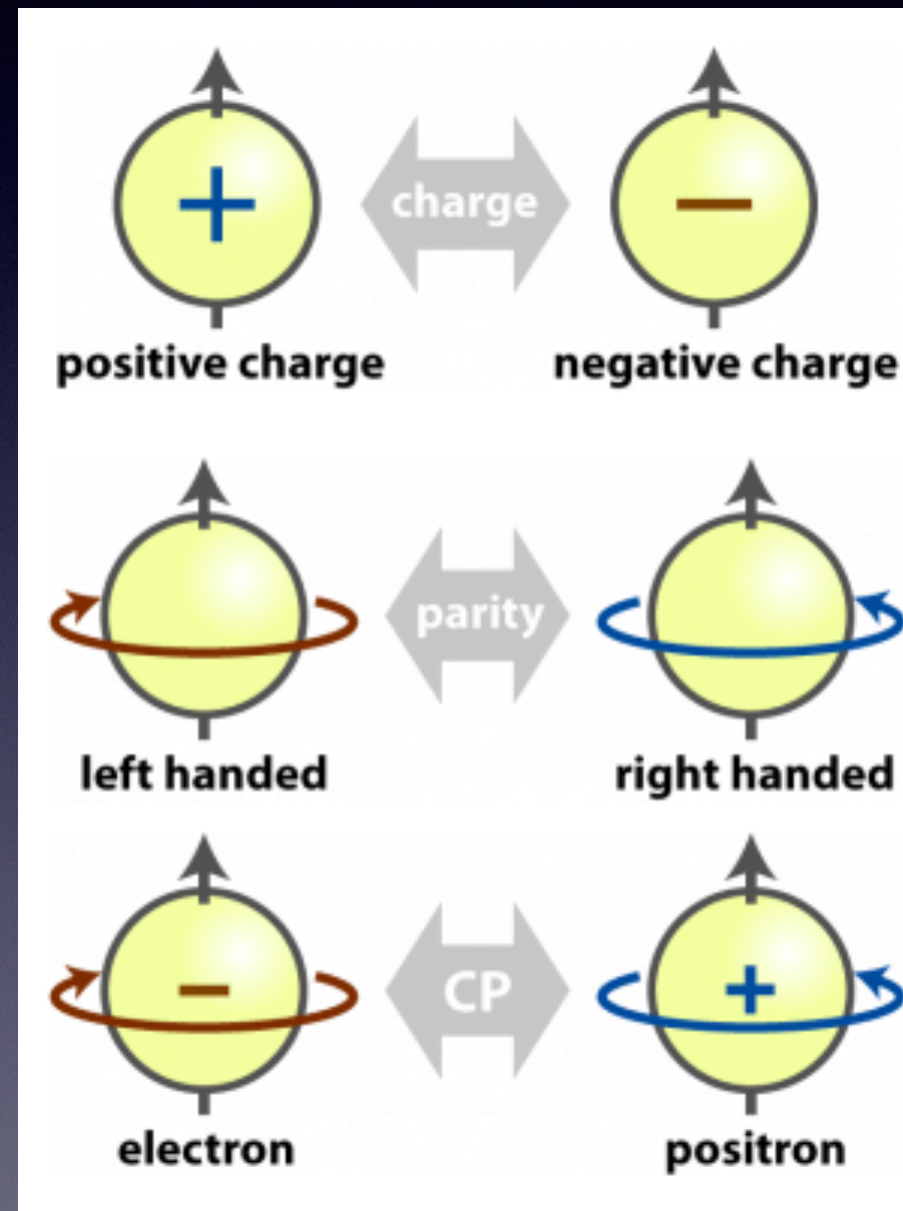
Ma che cosa ce ne facciamo ?

Simmetrie e Antimateria

Interazioni deboli
totalmente asimmetriche

Interazioni deboli
totalmente asimmetriche

Interazioni deboli
quasi simmetriche

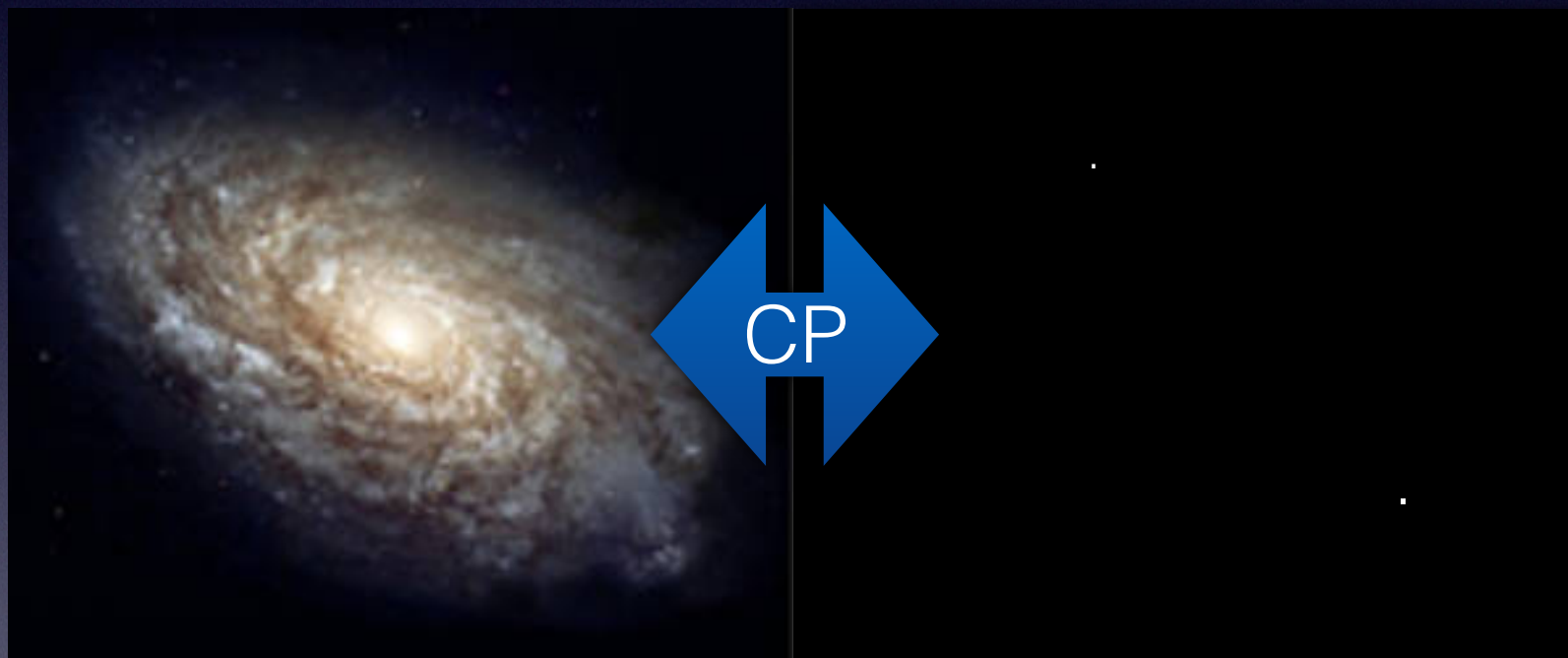


"materia"

"anti-materia"

Antimateria e Universo

Uno dei due tipi di particelle e' ***molto*** piu' comune dell'altro (asimmetria barionica dell'universo) - lo abbiamo chiamato "materia"

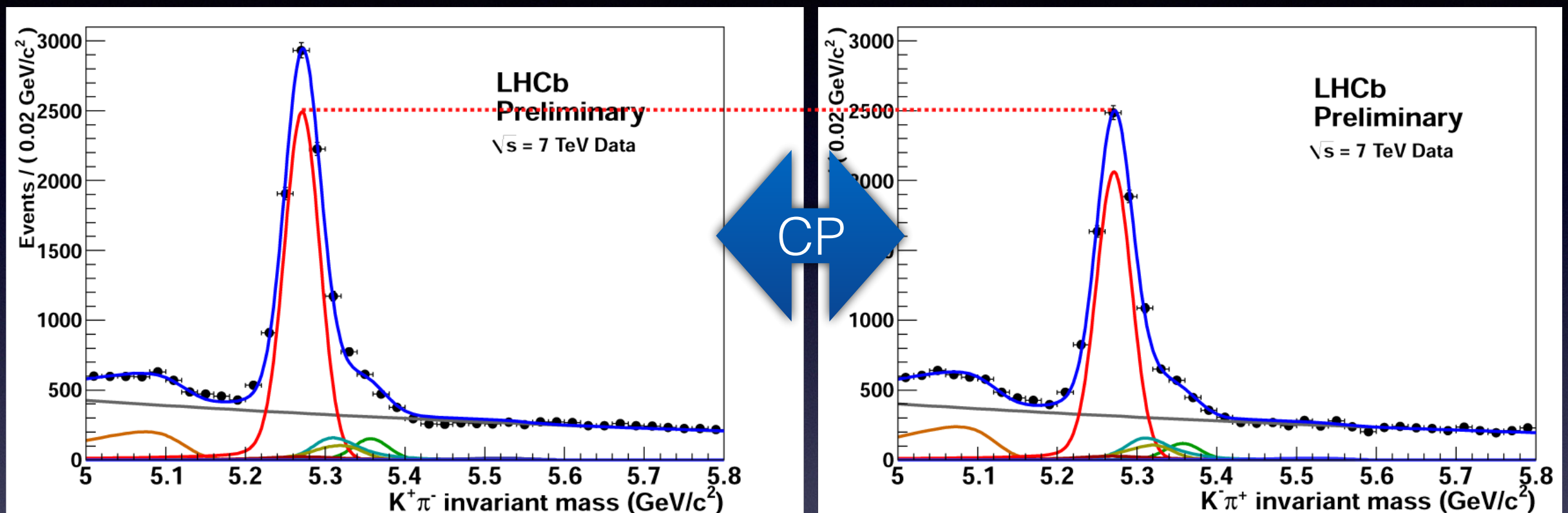


"materia"

"anti-materia"

- E' possibile che la asimmetria barionica sia dovuta alla asimmetria delle interazioni fondamentali ?
- La risposta e' si' sotto certe condizioni necessarie. Una di esse e' che la asimmetria CP sia MOLTO MAGGIORE di quella di quella dello SM
- Forte motivazione per CERCARE nuove e diverse forme di asimmetria CP
- LHCb offre ampie opportunita' per questo tipo di ricerca

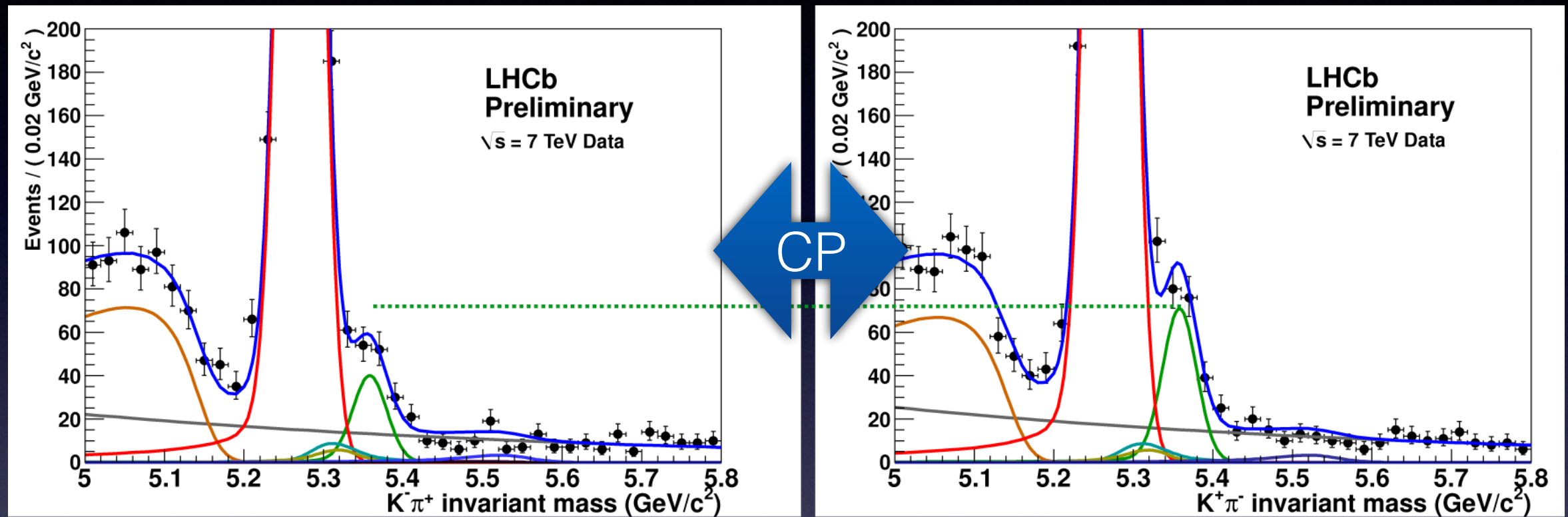
ACP ($B^0 \rightarrow K^- \pi^+$)



Asimmetria nota e spiegata dallo SM

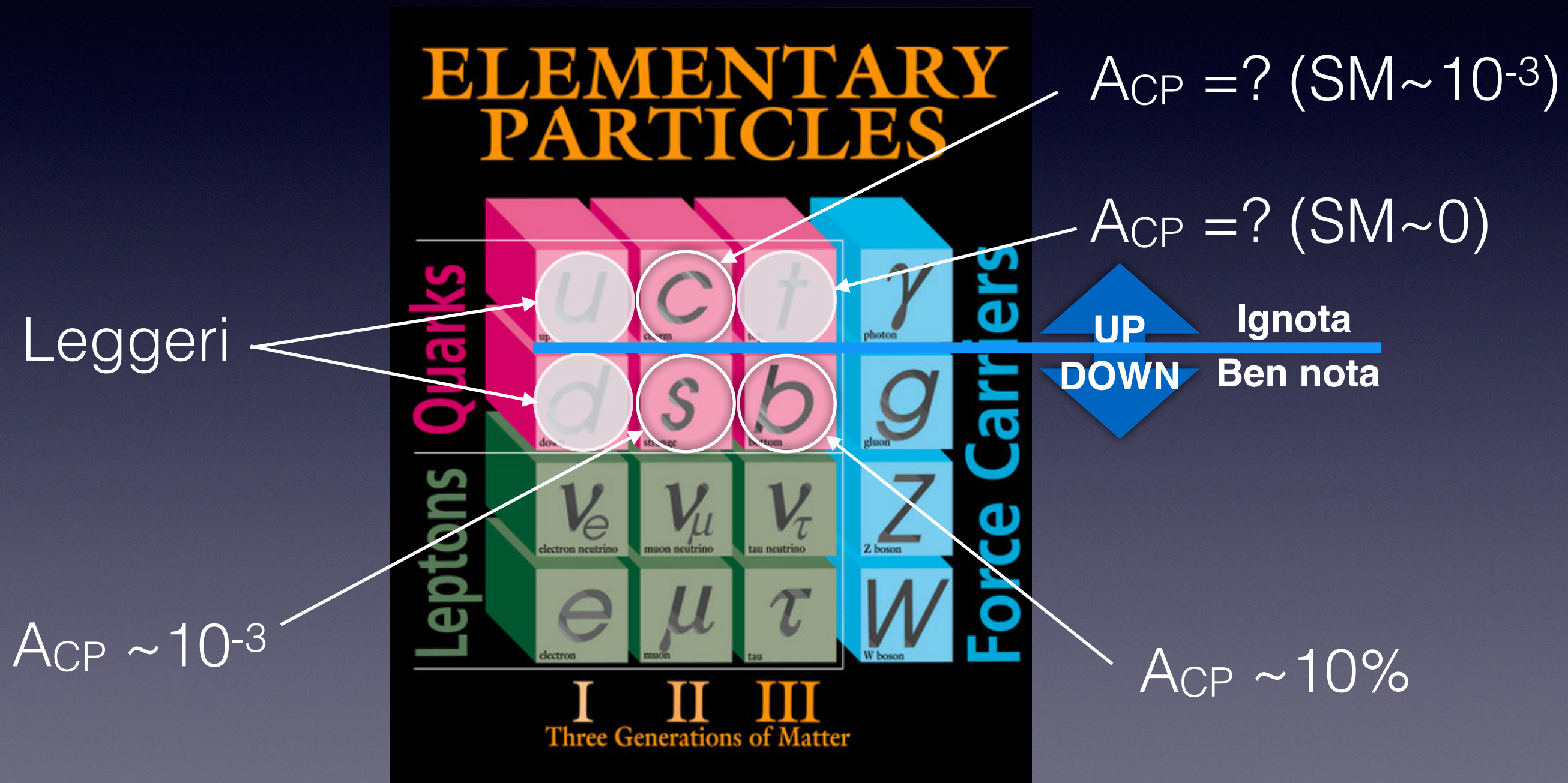
ACP ($B^0_s \rightarrow K^+\pi^-$)

Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 221601



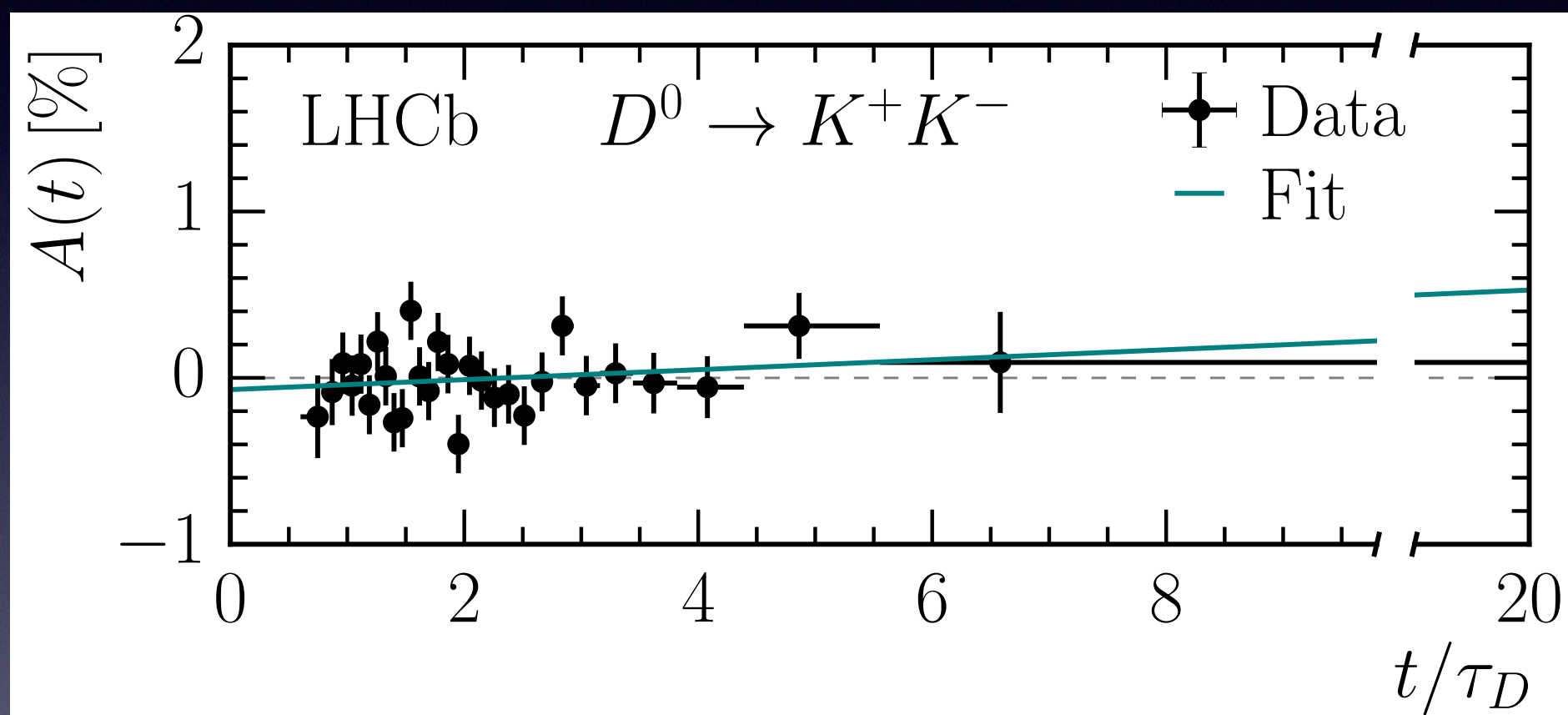
Osservata da LHCb per la prima volta la
asimmetria CP in un mesone B_s
(comunque in linea con le previsioni SM)

I quarks e la Asimmetria CP



Asimmetria CP del charm, in funzione del tempo

- $A_{CP}(t) = \frac{N_{D^0}(t) - N_{\bar{D}^0}(t)}{N_{D^0}(t) + N_{\bar{D}^0}(t)}$ dipende dal tempo

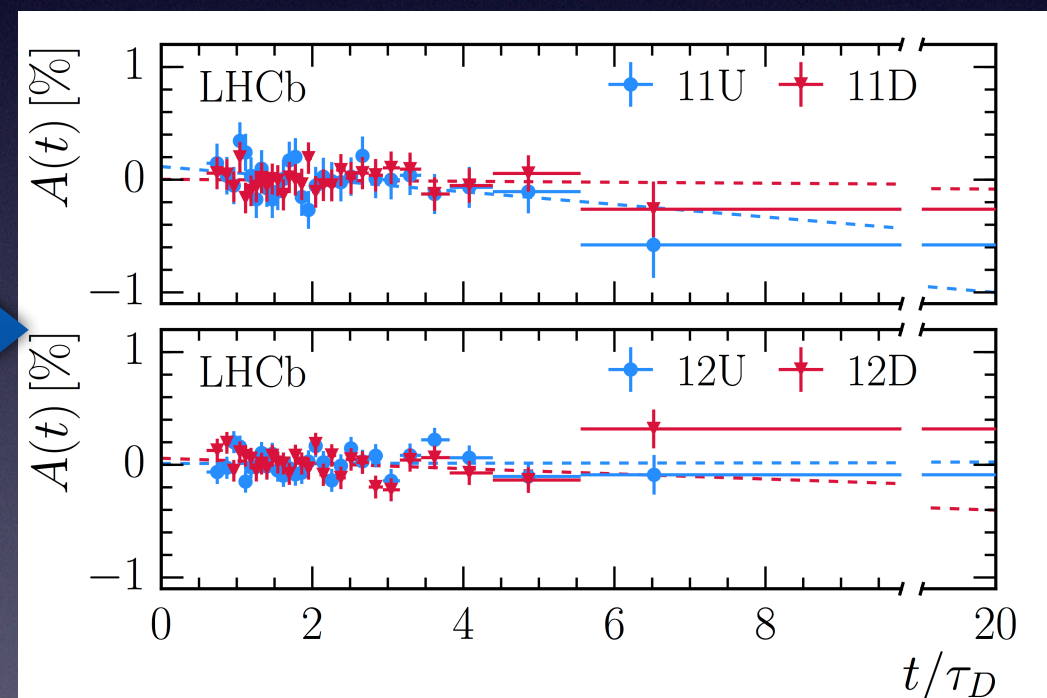
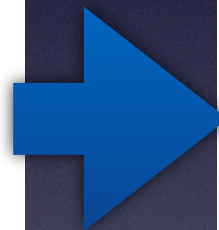
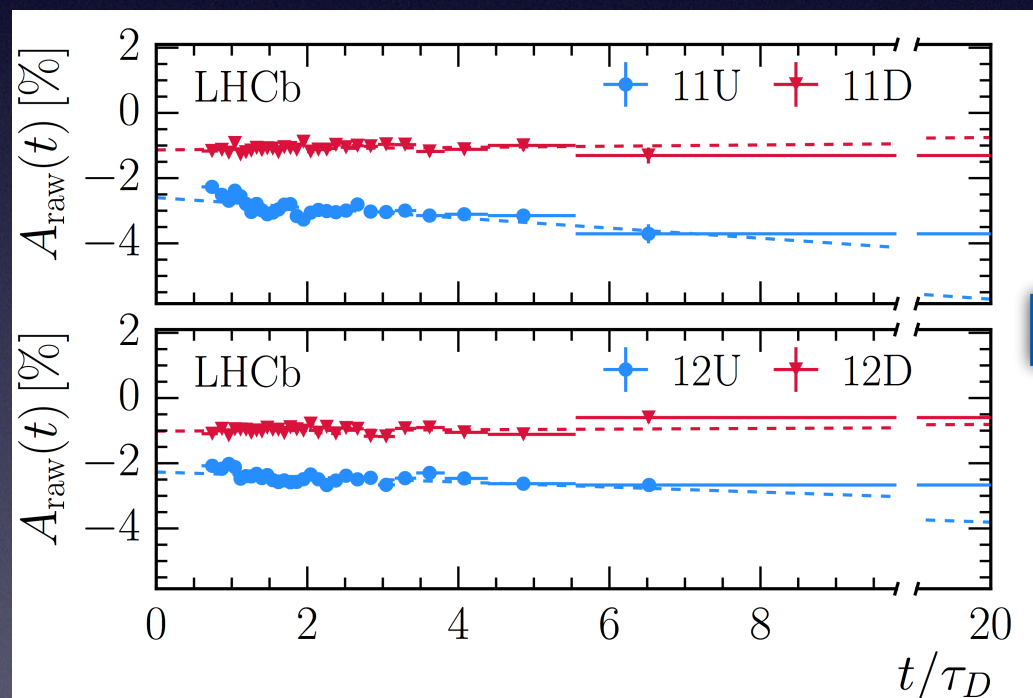


$$A_{CP}(t) = (-0.30 \pm 0.32 \pm 0.10) \cdot 10^{-3} \quad t/\tau_D$$

Risultato NULLO entro una frazione di permille
Ormai sensibilita' vicina all'effetto SM atteso...

Cosa c'e' dietro ?

- Come misurare asimmetrie sotto il per mille se il rivelatore non e' costruito con un simmetria migliore del percento ? E' come cercare di misurare qualcosa con la precisione di 100 μ m usando un metro da sarto....
- Per di piu' il rivelatore e' fatto di materia e non di antimateria
...intrinsecamente CP-asimmetrico



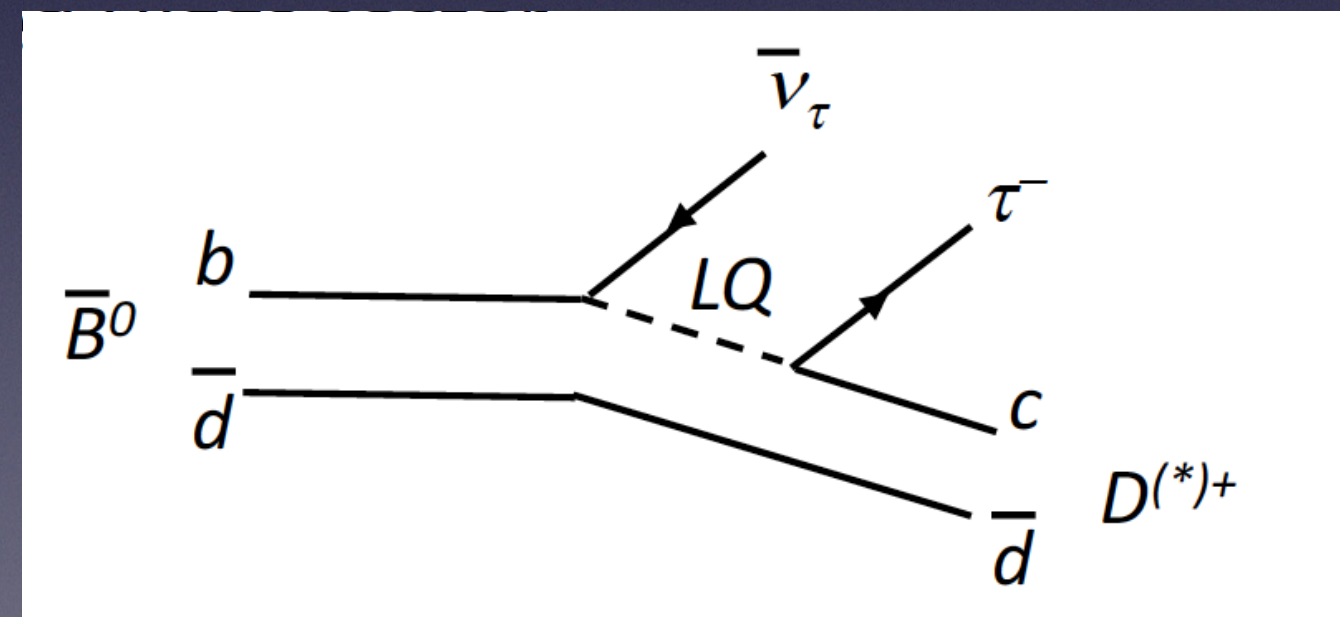
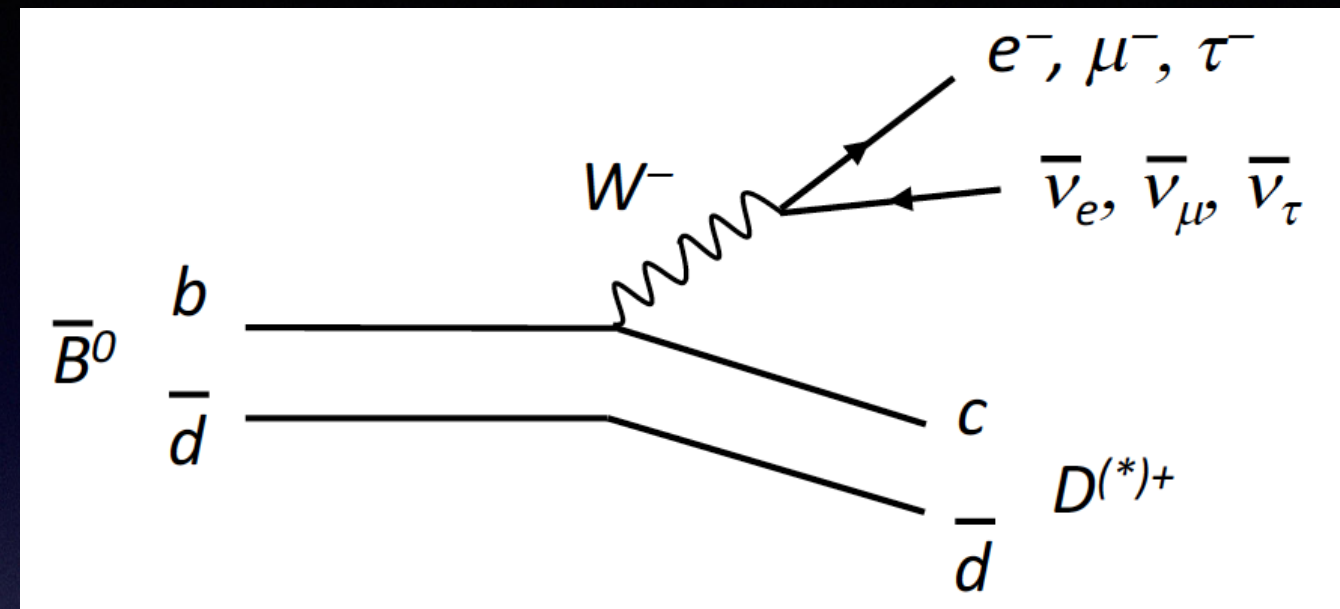
- Si puo' tentare di rimediare almeno a P invertendo il campo magnetico... ma non basta.
- Il segreto sta nella tecnica di calibrazione, basata su altri campioni di riferimento, che consentono di sottrarre/sopprimere le asimmetrie intrinseche del rivelatore.

Esempio 3: LFU

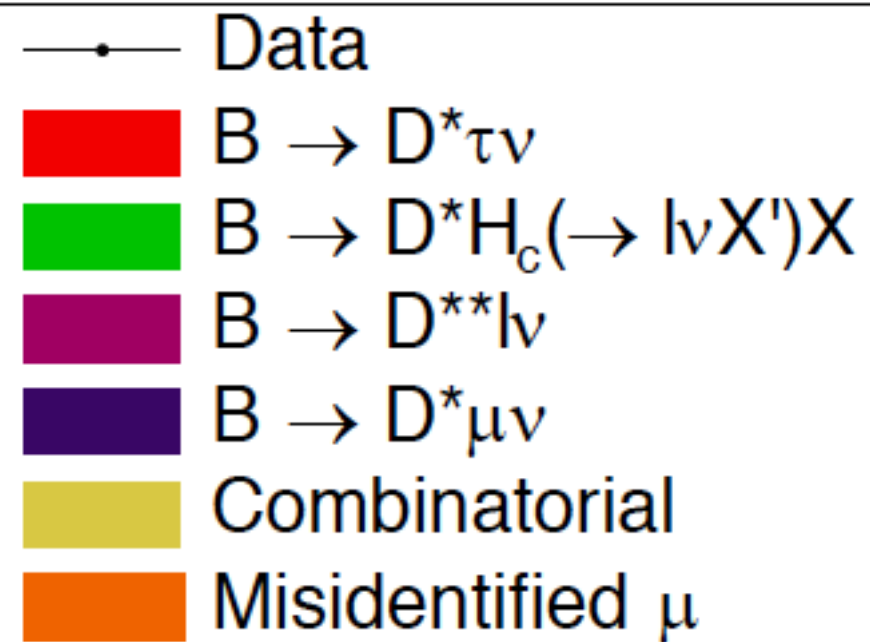
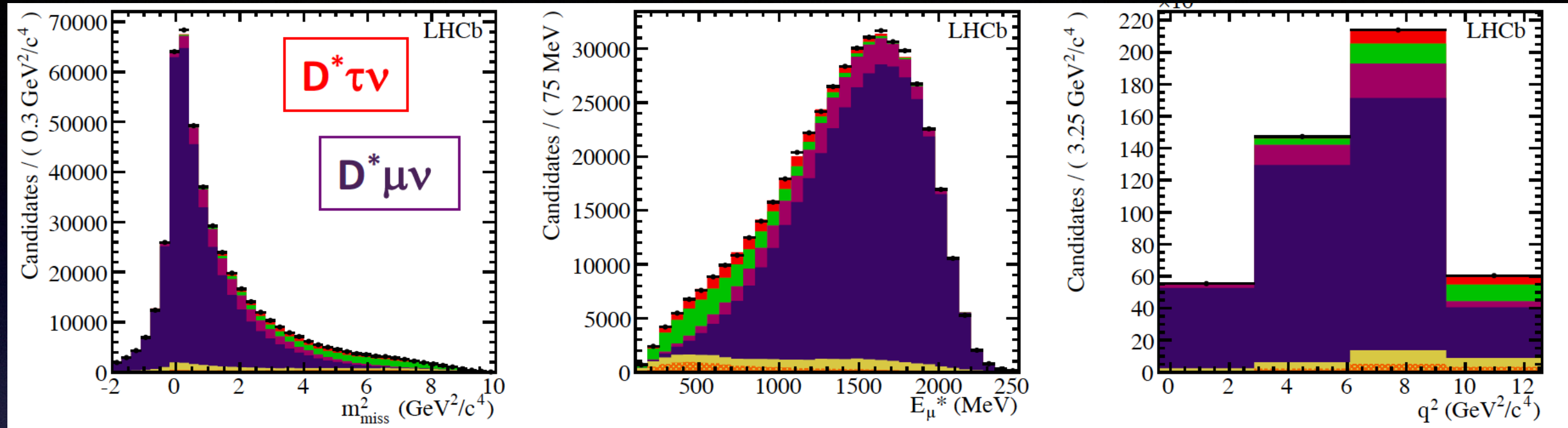
Da quarks pesanti, leptoni pesanti

Decadimenti in leptoni molto comuni: $\sim 10\%$

- Attesi UGUALI (a parte cinematica) in TUTTI i tipi di leptoni ("Universalita'")
- Ma nuove interazioni che riguardano solo i quark pesanti possono alterare il quadro - importante test



Esempio: $B \rightarrow D \tau \nu$

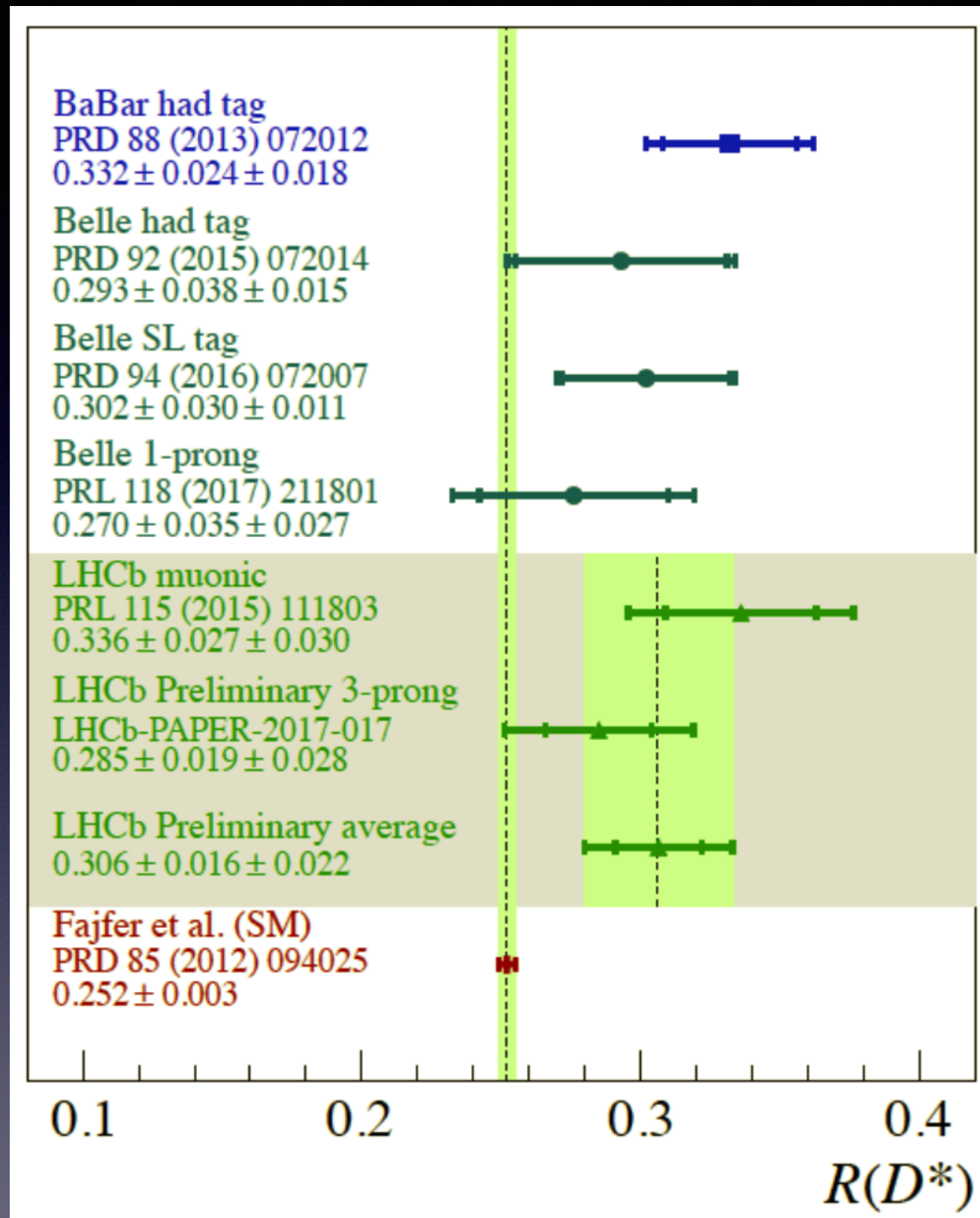


$$R(D^{(*)}) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu)}$$

$$R(D^*) = 0.336 \pm 0.027 \text{ (stat)} \pm 0.030 \text{ (syst)}$$

In accordo con
molte altre misure
precedenti, e troppo
grande rispetto alle
predizioni SM

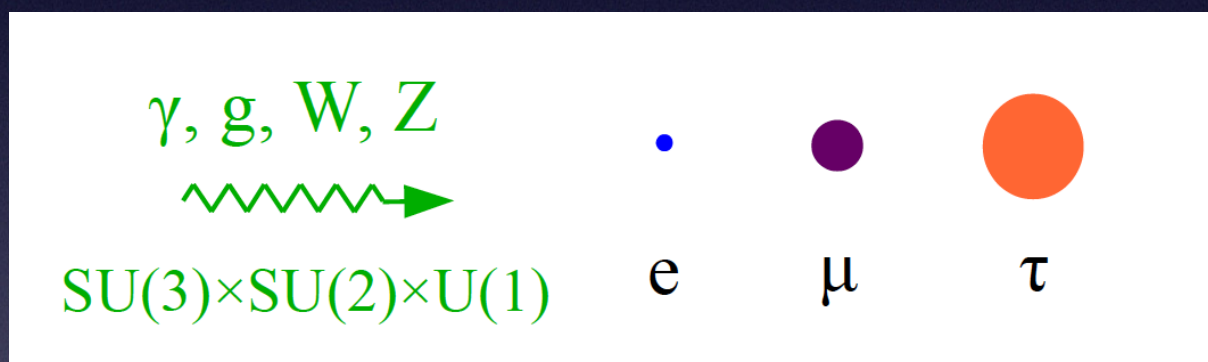
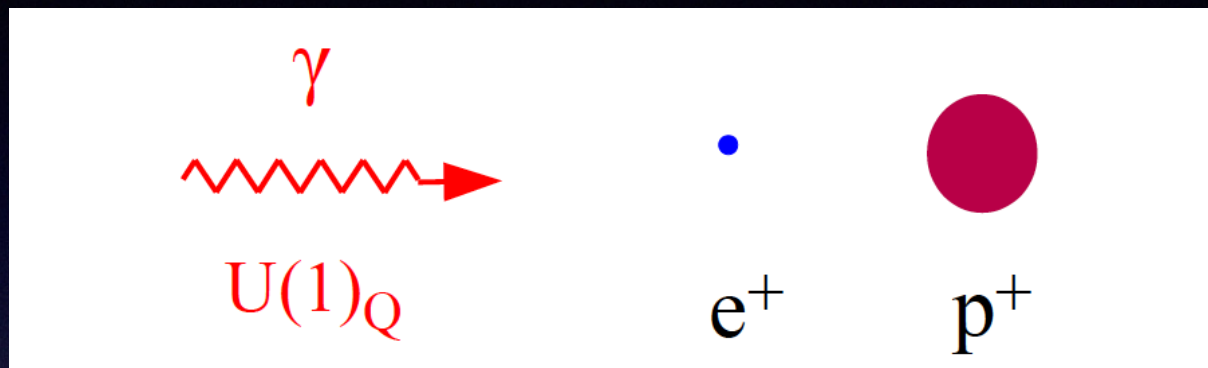
Stiamo vedendo una
prima manifestazione di
un fenomeno nuovo ad
alte energie, o e' solo
incertezze ?



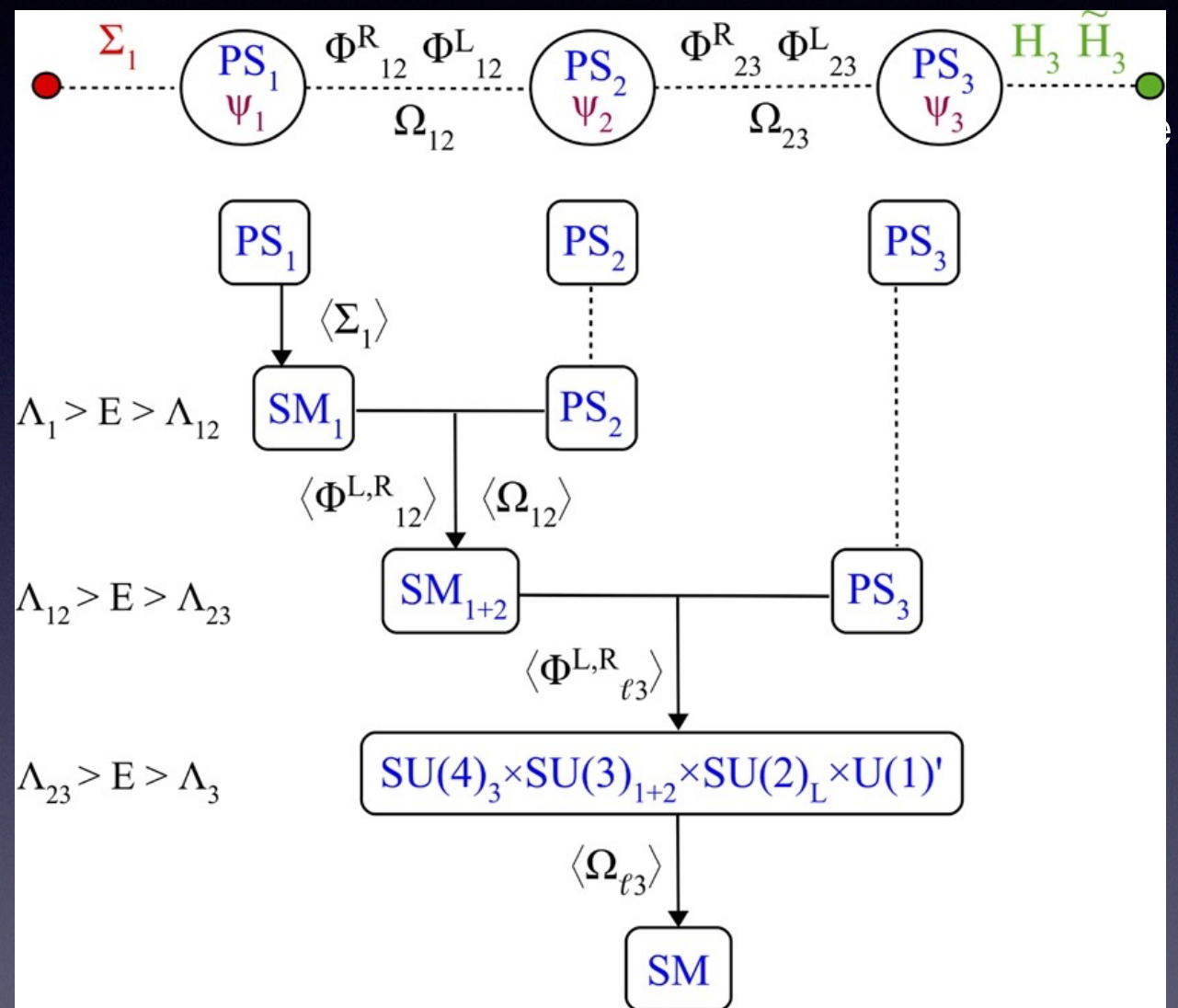
**Media mondiale
~3 sigma > SM**

Cosa potrebbe voler dire una violazione di Universalita' ?

Esempio/analogia:



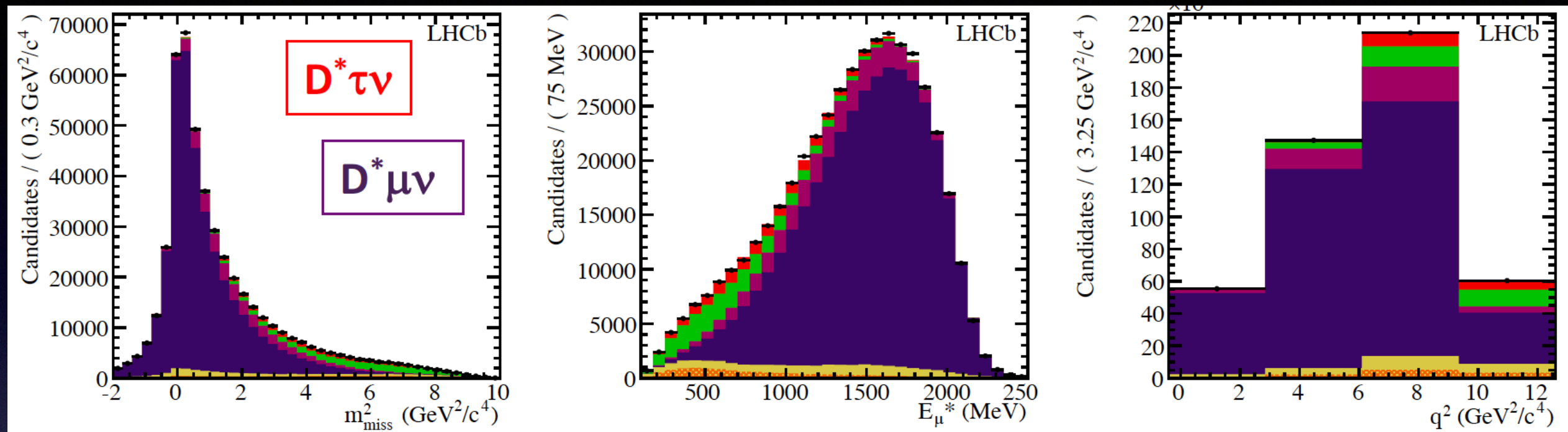
Esistono modelli dettagliati...



Phys. Lett. B 779, 317, 10 April 2018

Soltanto misure piu' accurate ci potranno dire se idee come questa hanno realmente colto qualche aspetto della fisica di alta energia

Come migliorare ?



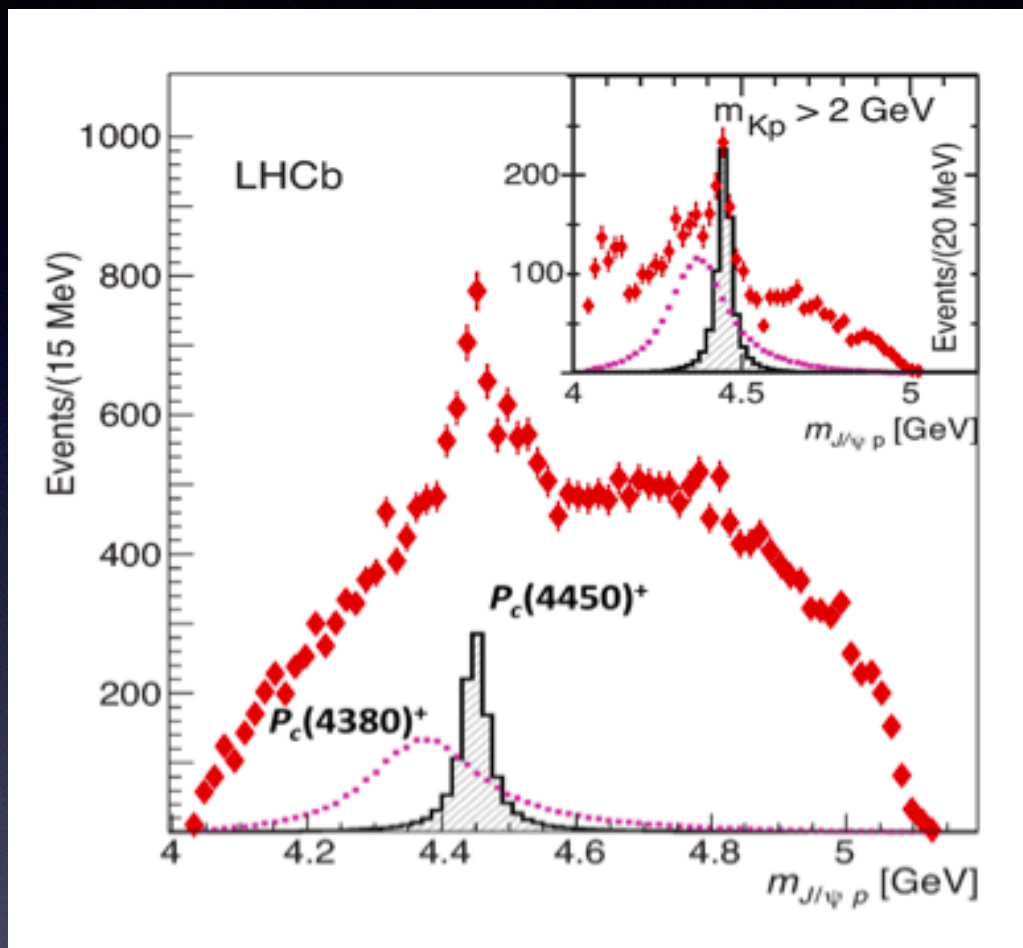
$$R(D^*) = 0.336 \pm 0.027 \text{ (stat)} \pm 0.030 \text{ (syst)}$$

- Incertezza dovuta a *statistica* della simulazione MonteCarlo: 0.020 (su 0.030)
- Situazione rara nel passato, ma sempre piu' frequente a LHCb, a causa dei grandi campioni
- Nuovi metodi in sviluppo:
 - Piattaforme di calcolo nuove, calcolo eterogeneo (coprocessori GPU o FPGA)
 - Tecniche di MonteCarlo piu' veloci (simulazioni semplificate, template precalcolati, Reti Neurali....)
 - Riformulare la metodologia di analisi per diminuire dipendenza da Simulazione

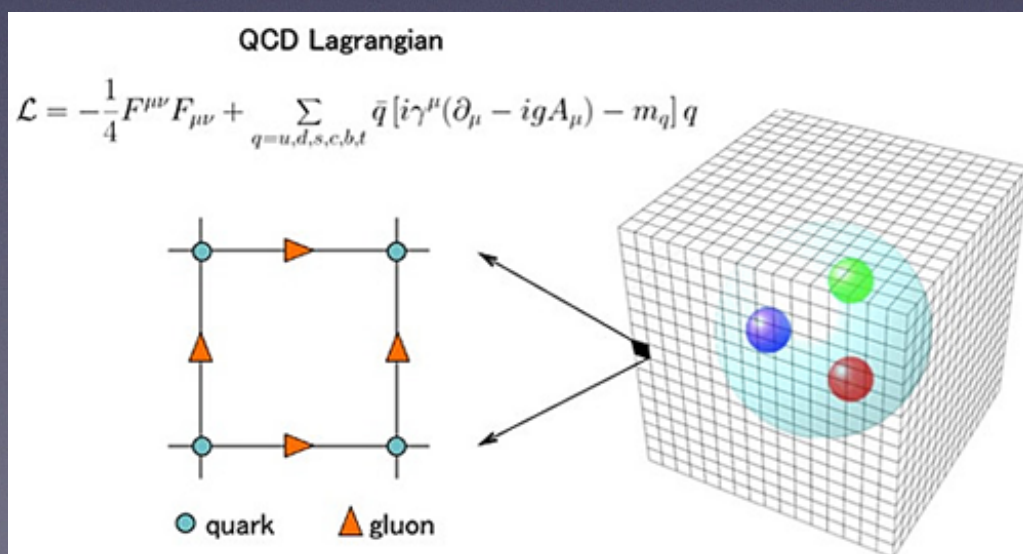
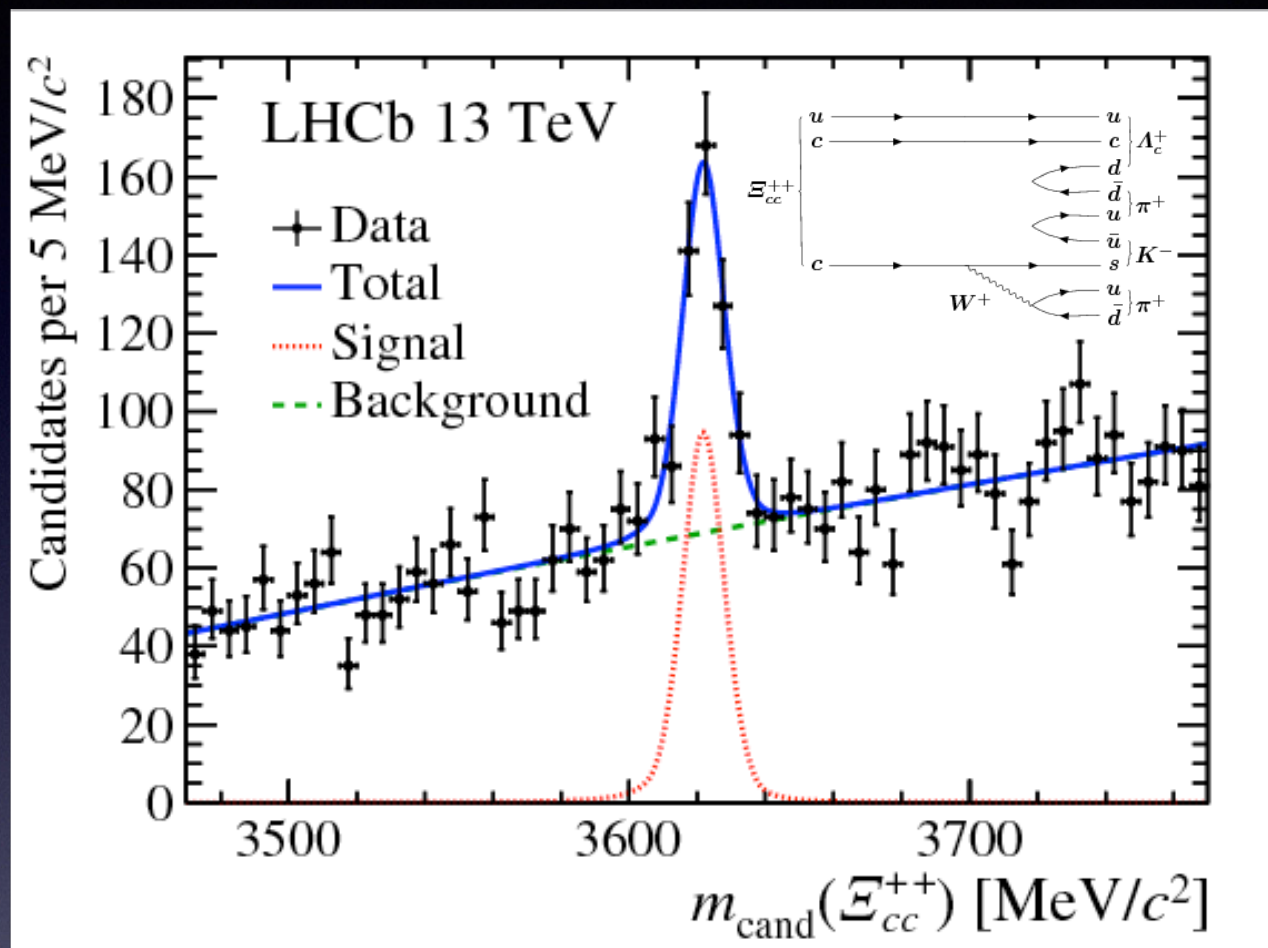
Esempio 4: spettroscopia

Nuovi stati legati scoperti da LHCb

Pentaquarks

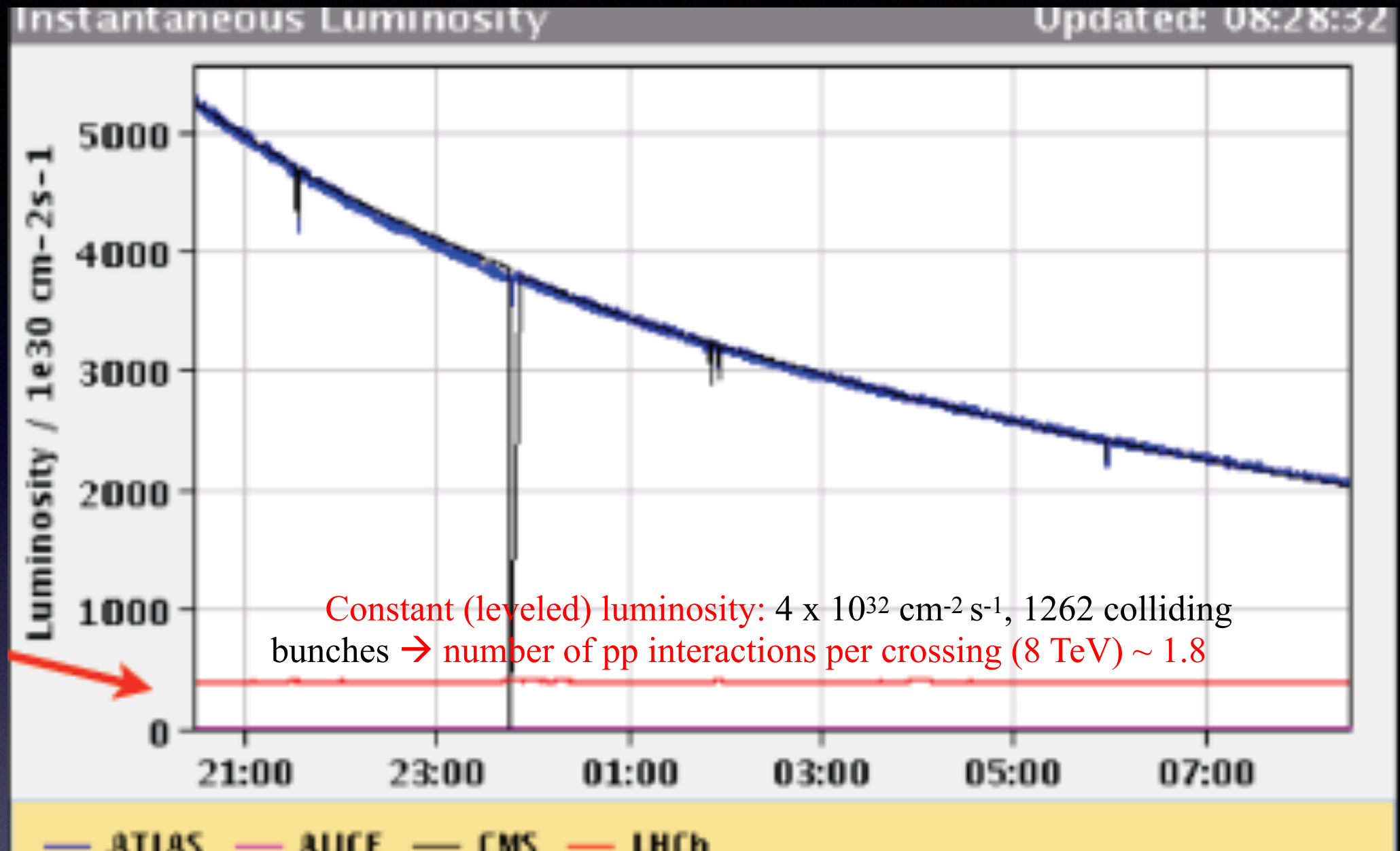


Doppio-charm: Ξ_{cc}



Informazioni su un'altra frontiera:
dinamica QCD a basse energie

II Futuro



Perche' non aumentare la luminosita'?

LHCb Attuale: 4×10^{32}

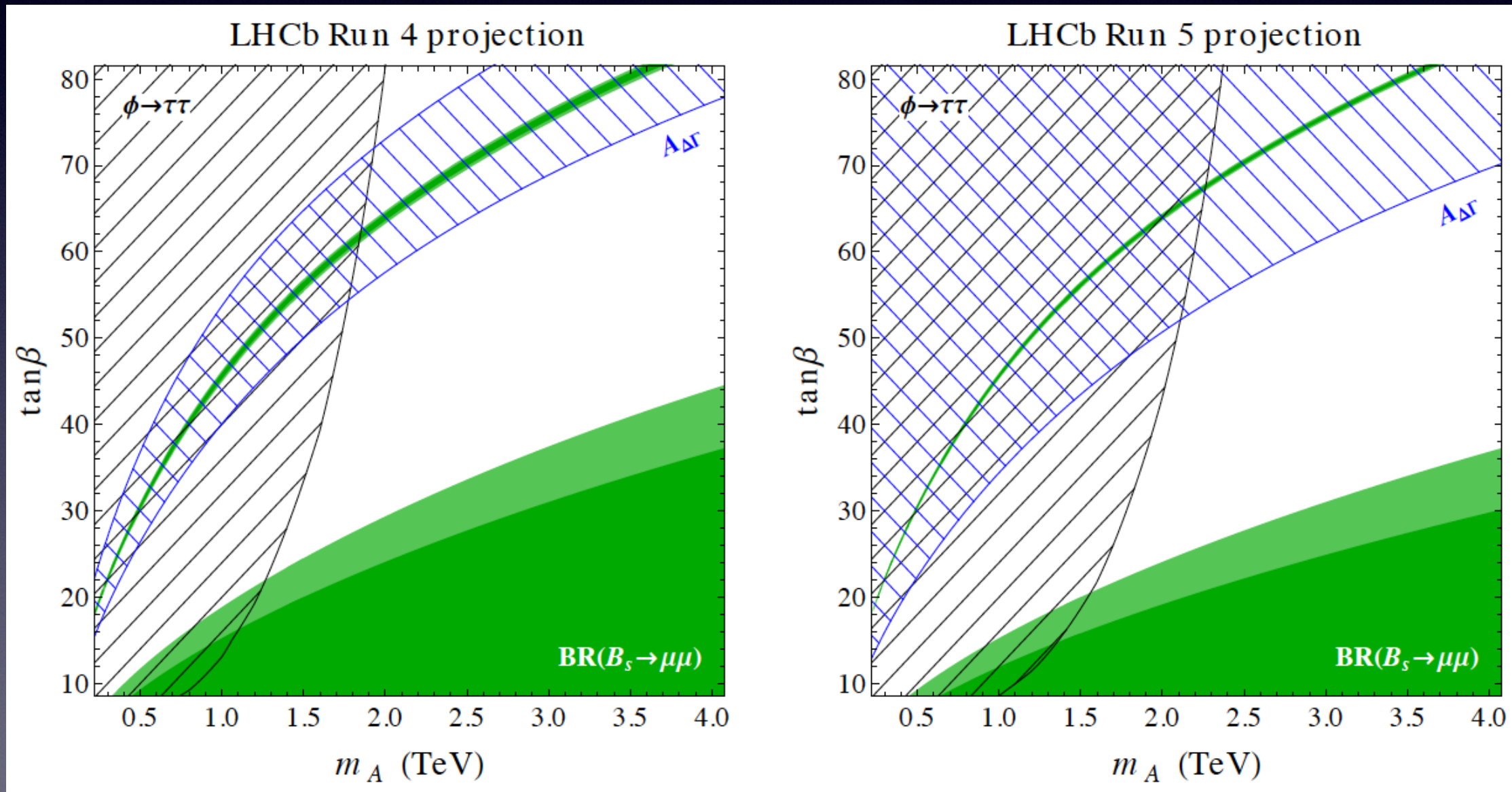
HL-LHC: 4×10^{34}

Un fattore **100x** (potenzialmente) a disposizione !

Quarks pesanti continueranno a essere alla frontiera

2025+

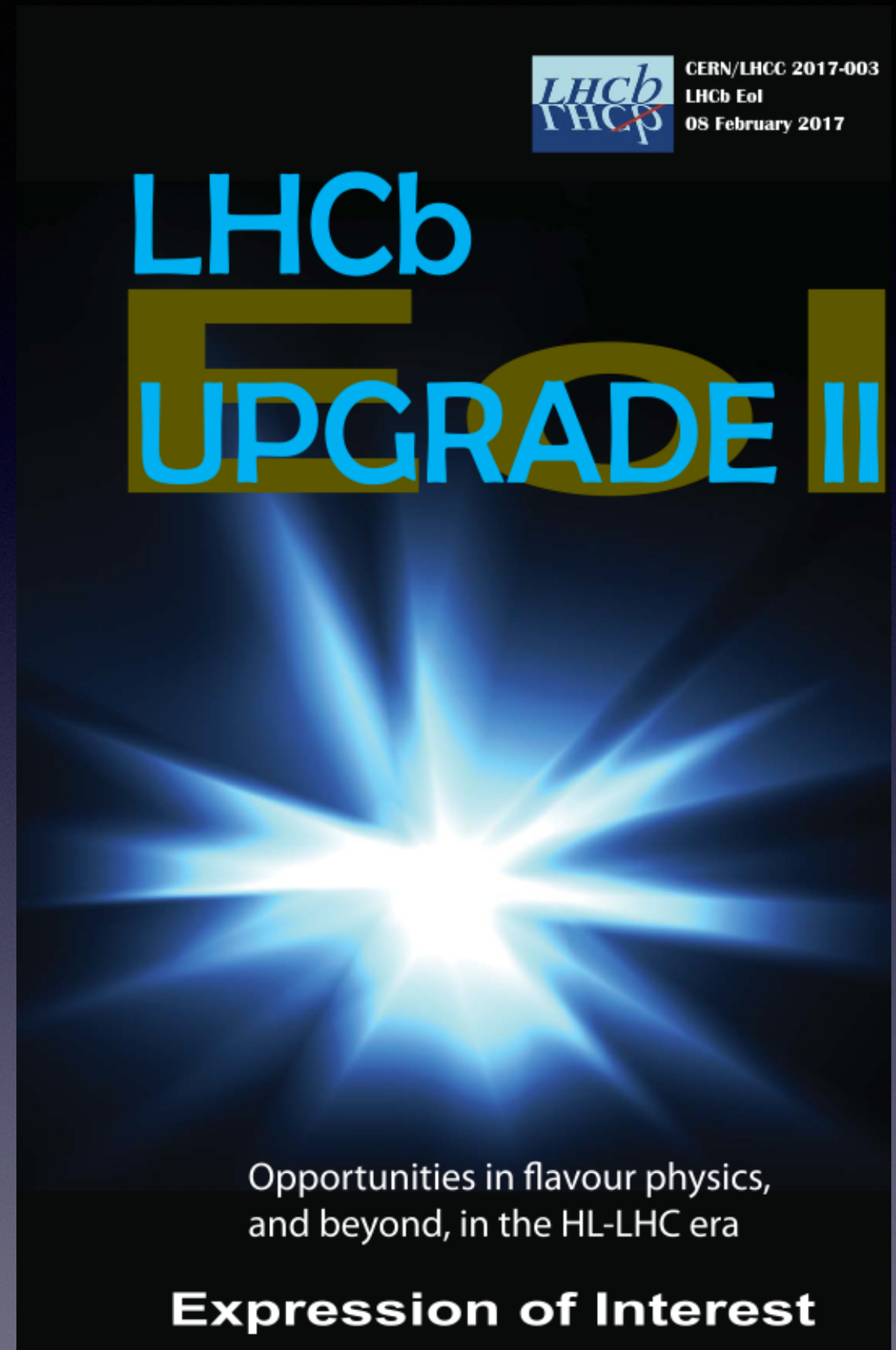
2030+



Expression of Interest

di LHCb in programma a
piu' alta luminosita'
(Feb. 2017)

Risultato di 2 workshops
internazionali "aperti"
(di cui uno organizzato
dal gruppo di Pisa)



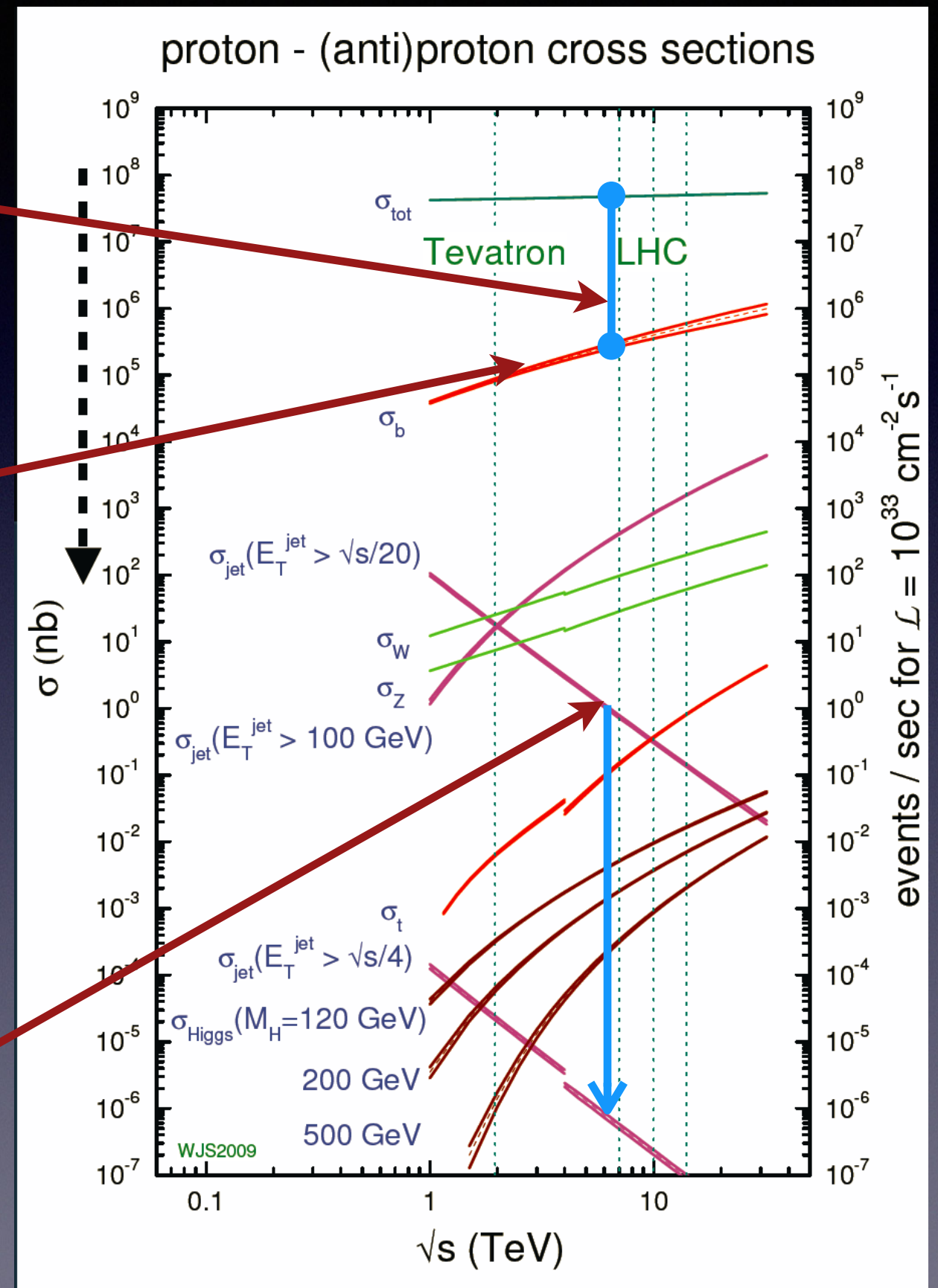
Perche' e' una sfida

Il fondo alla fisica del Flavor NON si puo' ridurre alzando semplicemente le soglie (entrambi calano dello stesso fattore)

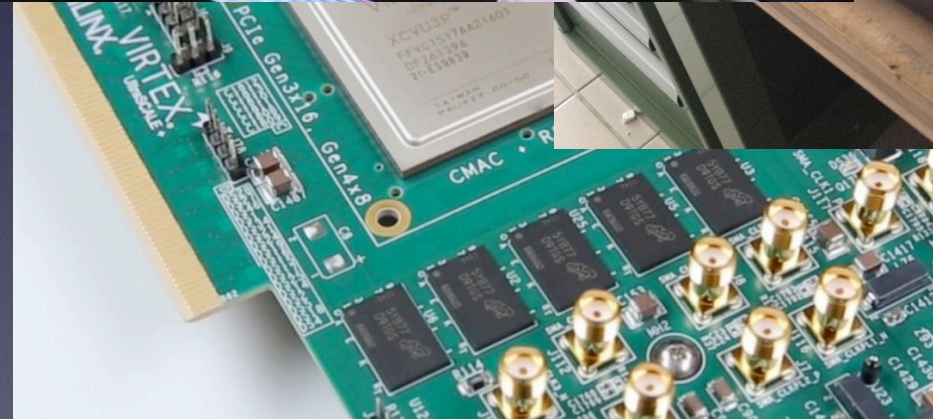
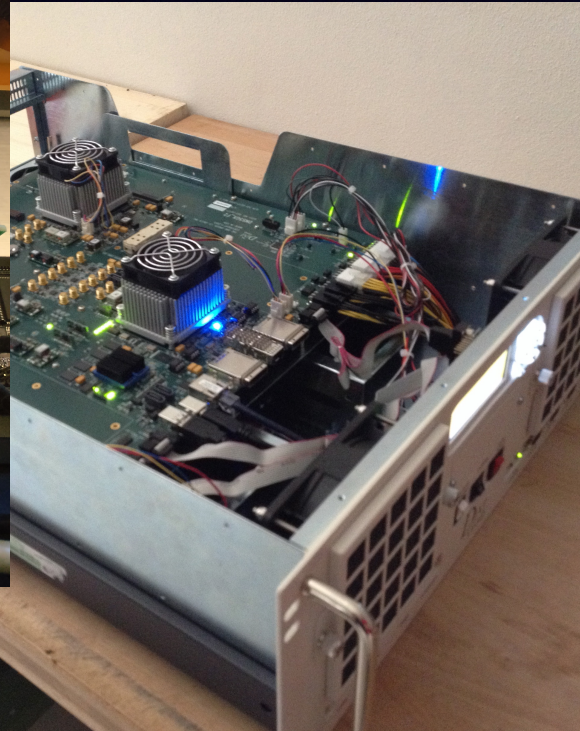
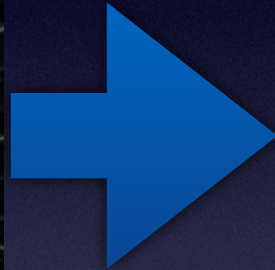
Problema sperimentale CRUCIALE:
analisi dettagliata di quasi ogni evento

Da 10^6 a 10^8 b quarks/
secondo (!!). Le cose si
fanno difficili - PIU' difficili
che per ATLAS e CMS

Riduzione di questo fondo
selezionando eventi di
"Alta energia/momento trasverso"



Evoluzione verso strumenti di elaborazione dedicati ad alta banda



- Legge di Moore non piu' sufficiente
- Elettronica specializzata programmabile - e a bassa latenza
- ASICs, FPGA, GPU,... tecnologie tipiche da High Frequency Trading, radar,...
- ***Ricostruzione "embedded" nella lettura del rivelatore ?***

Technology, technology...

- Tecnologie di rivelatori: sensori al silicio, misure di tempo, ricostruzione 4D
- Elettronica: readout, network switches, connessioni ottiche veloci, CPU avanzate
- Tempo reale: calcolo parallelo, FPGA, "embedded tracking"
- Algoritmi: Likelihoods, analisi multivariata, limiti multidimensionali, discriminanti, PCA, NN, PDE...
- **Strategia** di analisi: quale metodo, quali osservabili, quali campioni di controllo e calibrazione, quale approccio statistico, come tenere sotto controllo le incertezze sistematiche - come provare scientificamente che ci si è riusciti.

Conclusioni

- Con lo LHC, i quarks pesanti sono tornati ad essere un potente mezzo di esplorazione delle frontiere della Fisica.
- Possibili sorprese a breve termine, e ampi spazi per ulteriore progresso nel futuro (x100).
- Avanzamenti basati su progressi tecnici e metodologici senza necessita' di nuovi acceleratori.
- Programma molto vario: innumerevoli possibili misure, nuove idee su molti fronti, ampio spazio per la creativita'.