

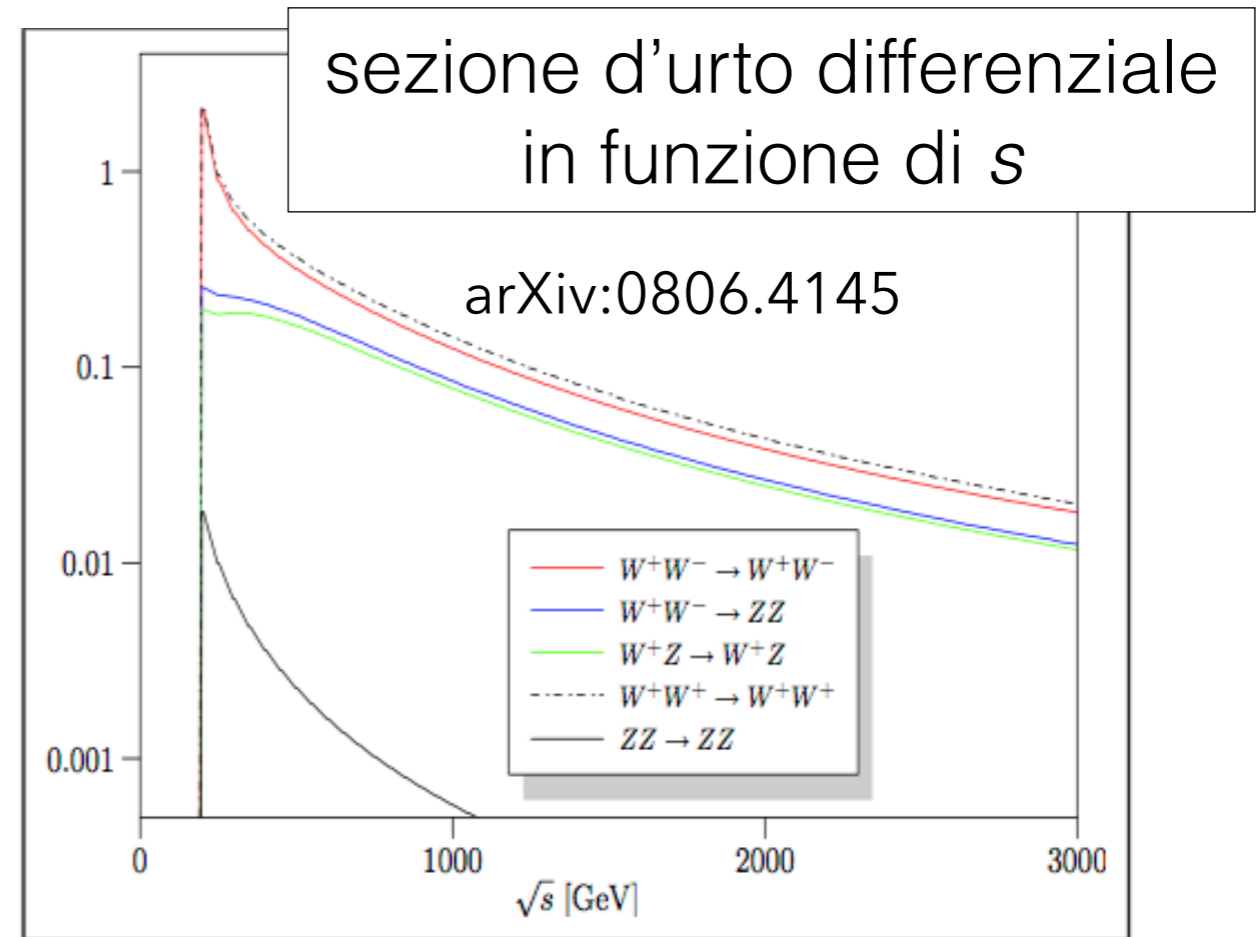
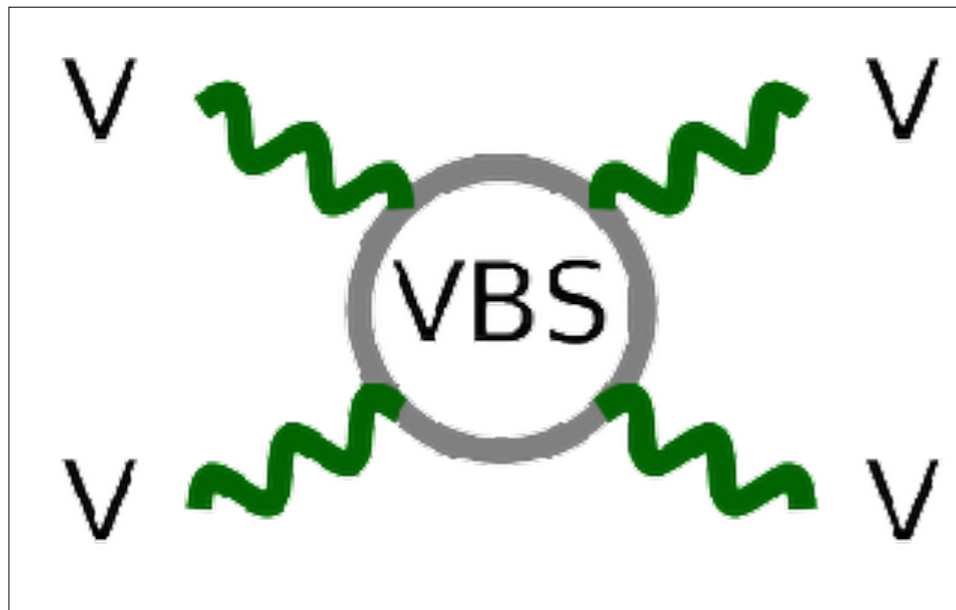
Il Modello Standard alla prova: LHC come collisore di bosoni vettori

Pietro Govoni
Università ed INFN di Milano - Bicocca

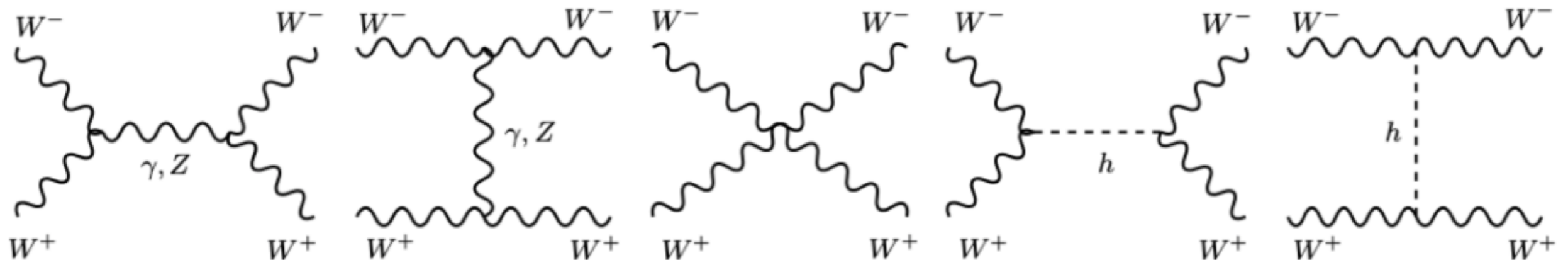


Vector Boson Scattering (VBS)

- Urto di bosoni vettori:

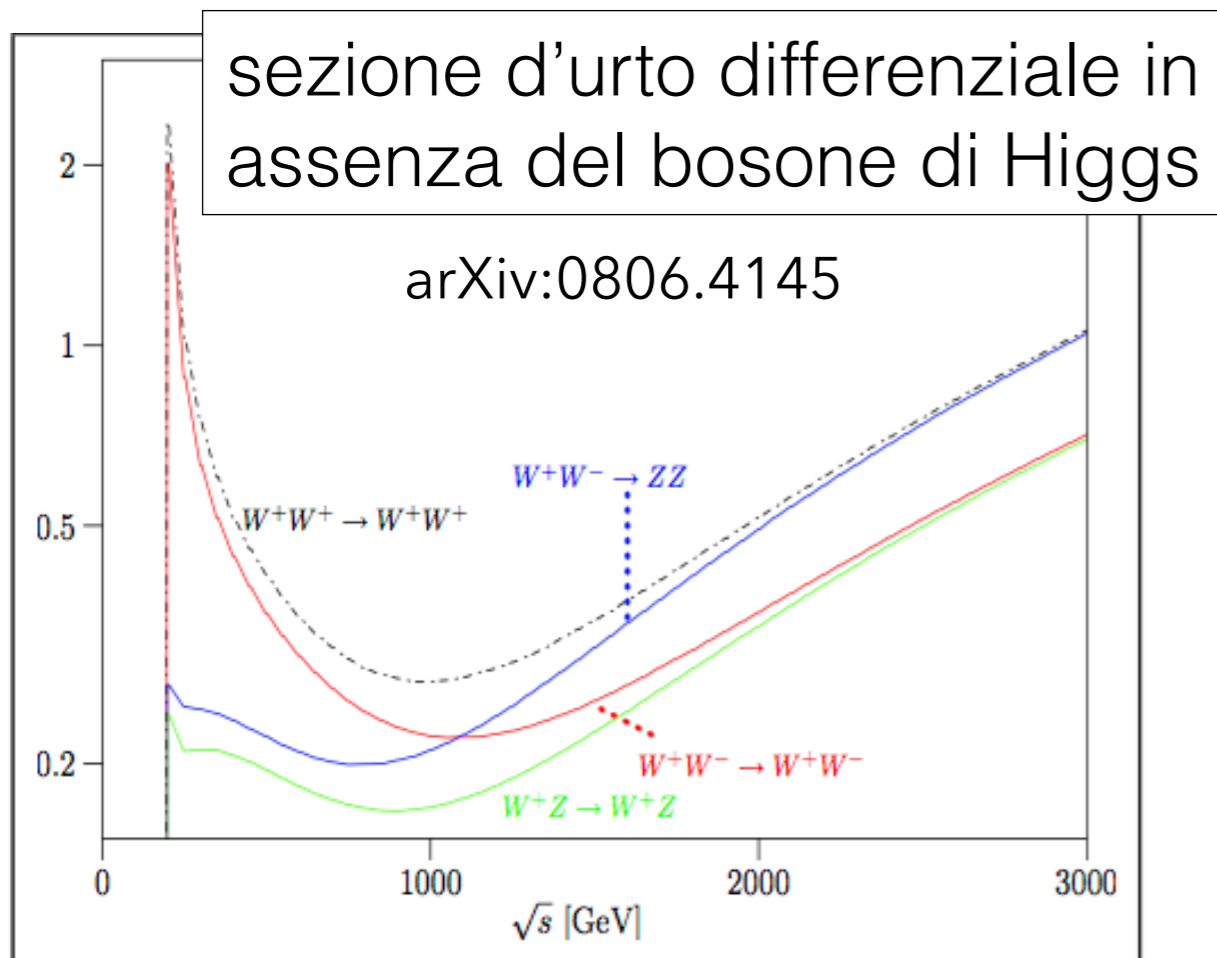


- nel Modello Standard (MS) il processo finale è il risultato della **somma coerente di molti diagrammi di Feynman**

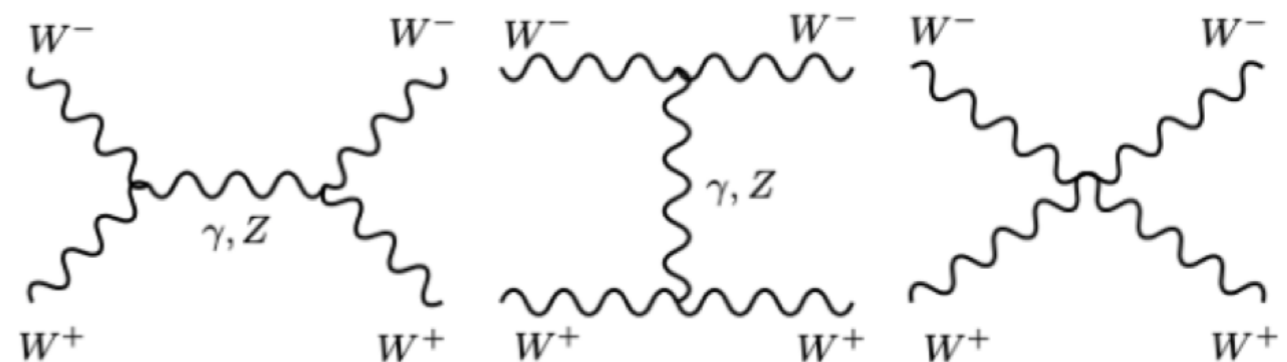


l'unitarietà del processo

- la sezione d'urto di diffusione è finita grazie ad un delicato **bilanciamento di tutti i diagrammi in gioco**



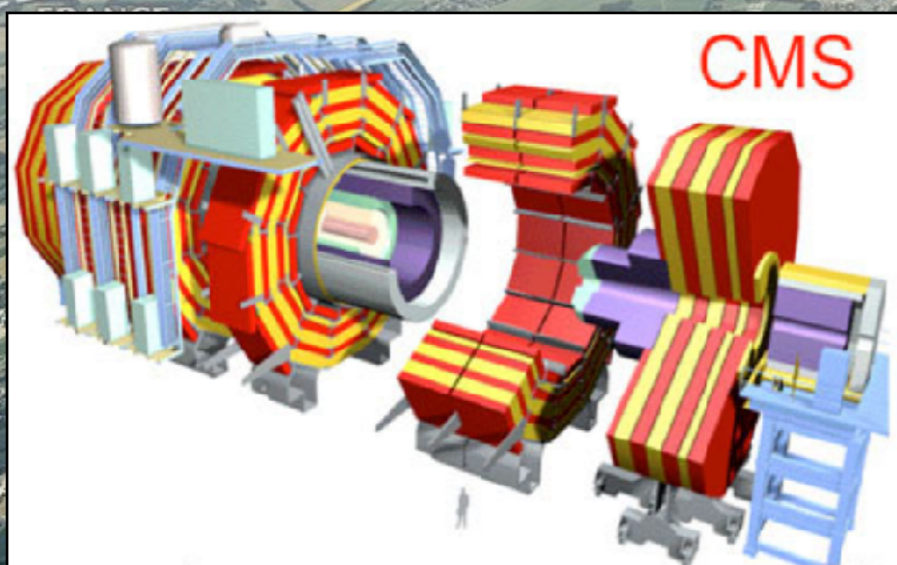
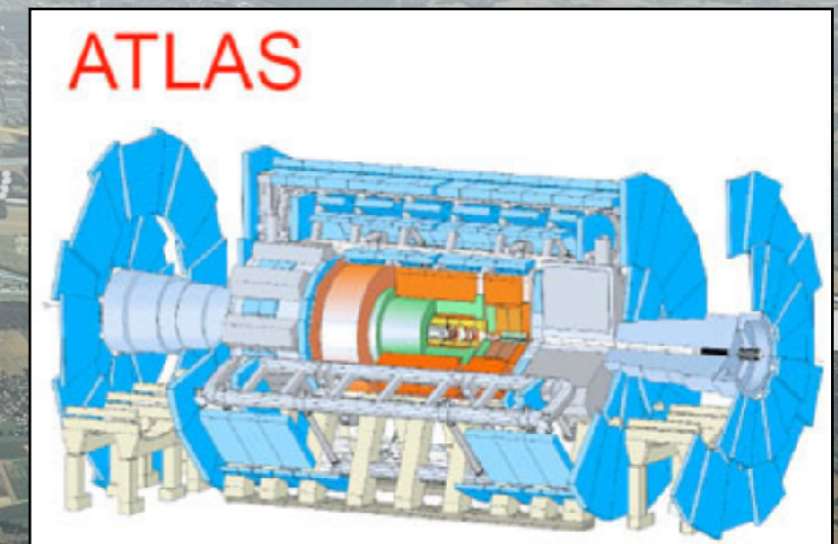
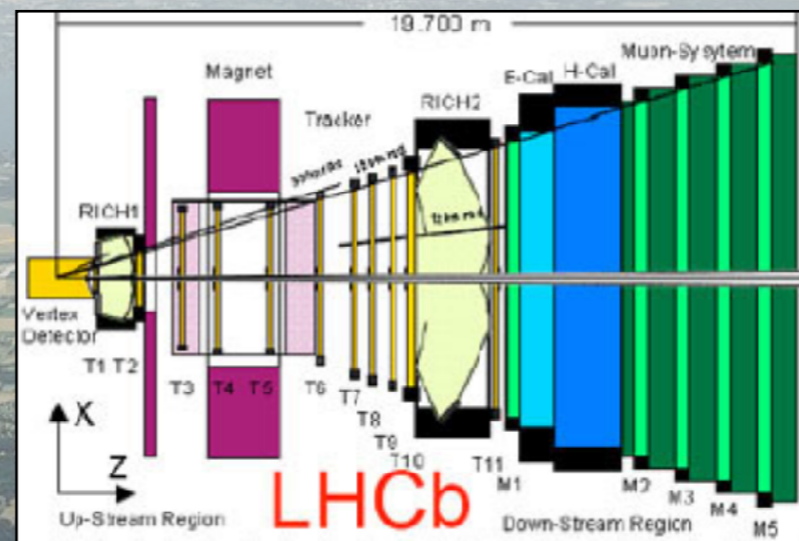
- in assenza del bosone di Higgs (o di un meccanismo equivalente di rottura spontanea della simmetria elettrodebole), c'è **divergenza ad alto s**



- processo sensibile ad EWSB e **terreno di studio model-independent ideale per nuova fisica** oltre il modello standard (**BSM**), perché lievi asimmetrie fra singoli diagrammi compromettono la cancellazione delle divergenze

Lo studio ad LHC

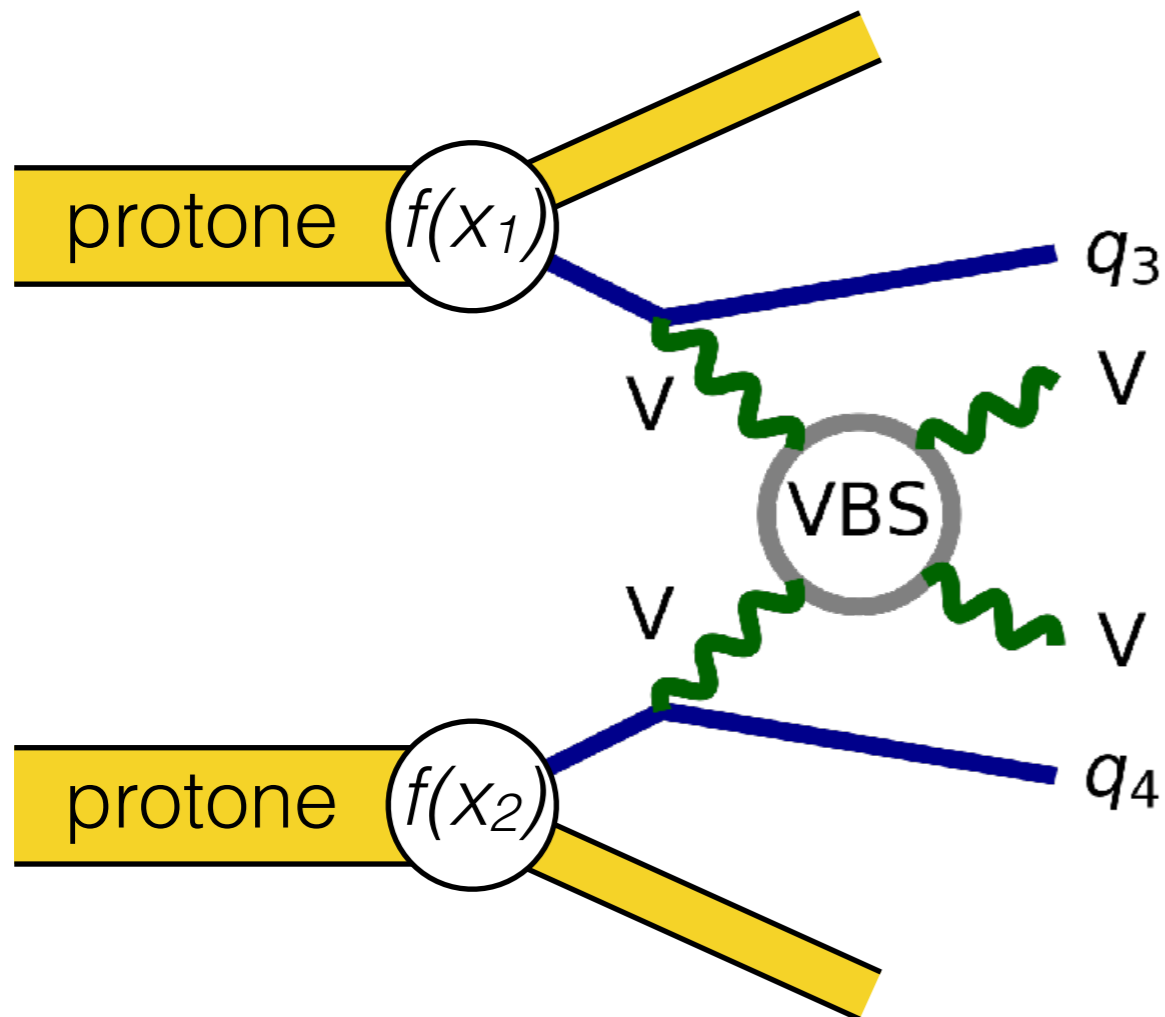
- Un collisore di bosoni vettori non esiste, si **studia il processo ad LHC**
- collisore di **protoni con 6.5 TeV** di energia per fascio
- **luminosità integrata** disponibile ad oggi: $L \sim 150/\text{fb}$ (rem. $N = L \varepsilon \sigma$)
- studiato finora dagli esperimenti **ATLAS e CMS**
 - studi recenti suggeriscono di studiarlo anche a LHCb (arXiv:1908.06805)



LHC 27 km

VBS da una collisione di protoni

- i bosoni vettori sono **irraggiati dai quark interagenti**



- energia nel centro di massa:

$$\hat{s} = 4 \hat{E}_1 \hat{E}_2 = 4 x_1 x_2 E_{\text{fascio}}^2$$

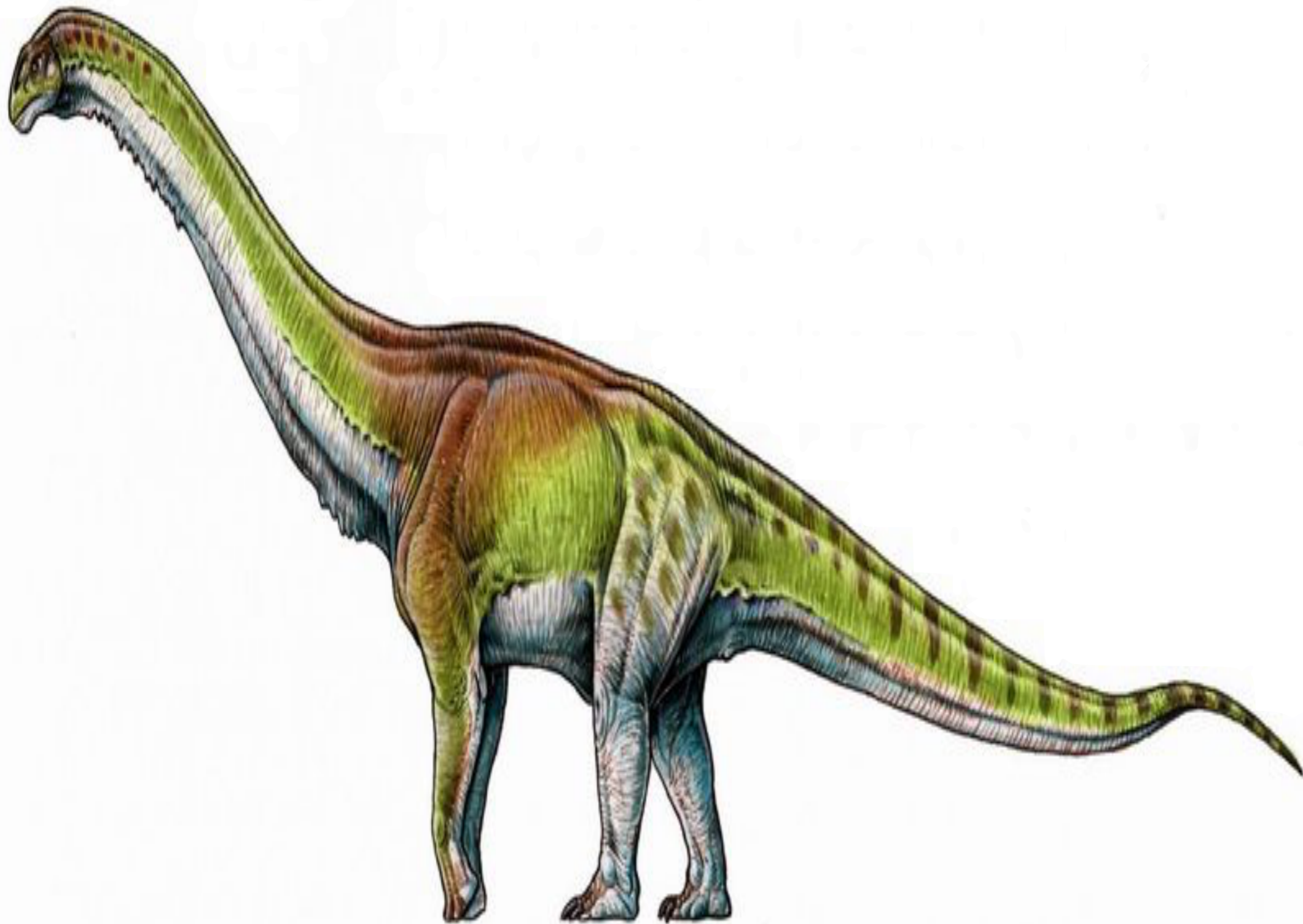
- quark di valenza:

$$\begin{aligned} \hat{s} &\simeq 4 \cdot 0.3^2 \cdot E_{\text{fascio}}^2 \\ &= 4 \cdot 0.3^2 \cdot (6.5 \text{ TeV})^2 \end{aligned}$$

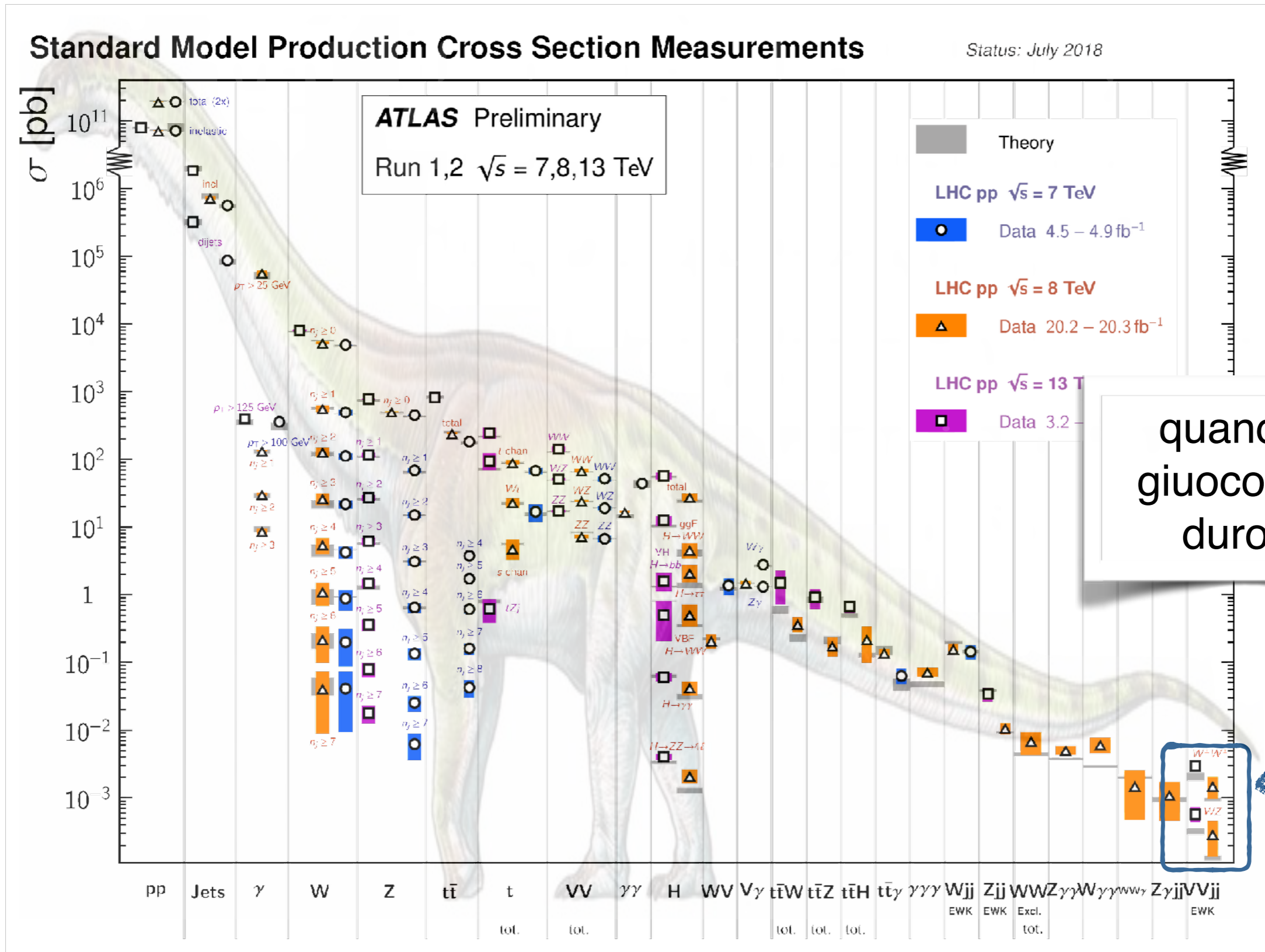
$$m_{VV} = \sqrt{\hat{s}} \simeq 4 \text{ TeV}$$

- **stato finale di sei fermioni:** due quark + prodotti di decadimento dei V
- **processo puramente debole** a LO: tutti i vertici nell'interazione e nel decadimento dei bosoni vettori sono EWK, $\mathcal{O}(\alpha^6)$
- ci si aspetta **bassa sezione d'urto**

la sfida della statistica

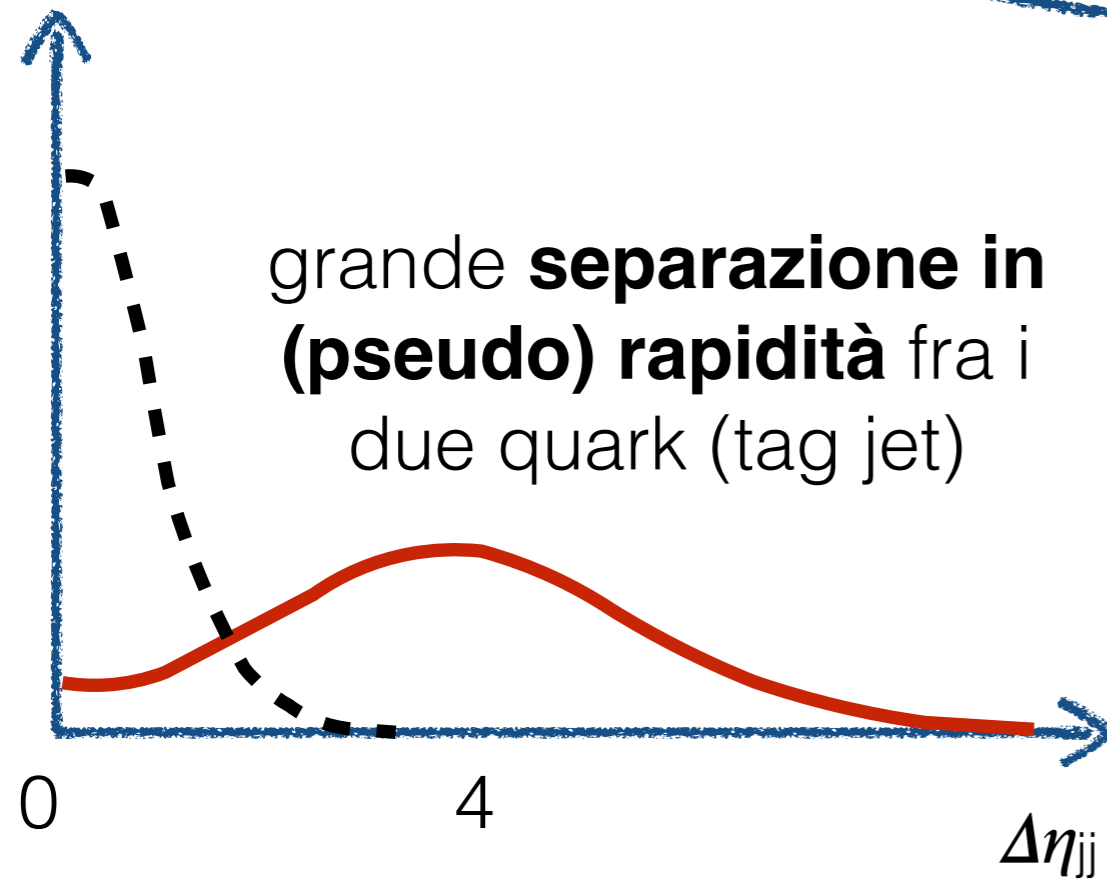
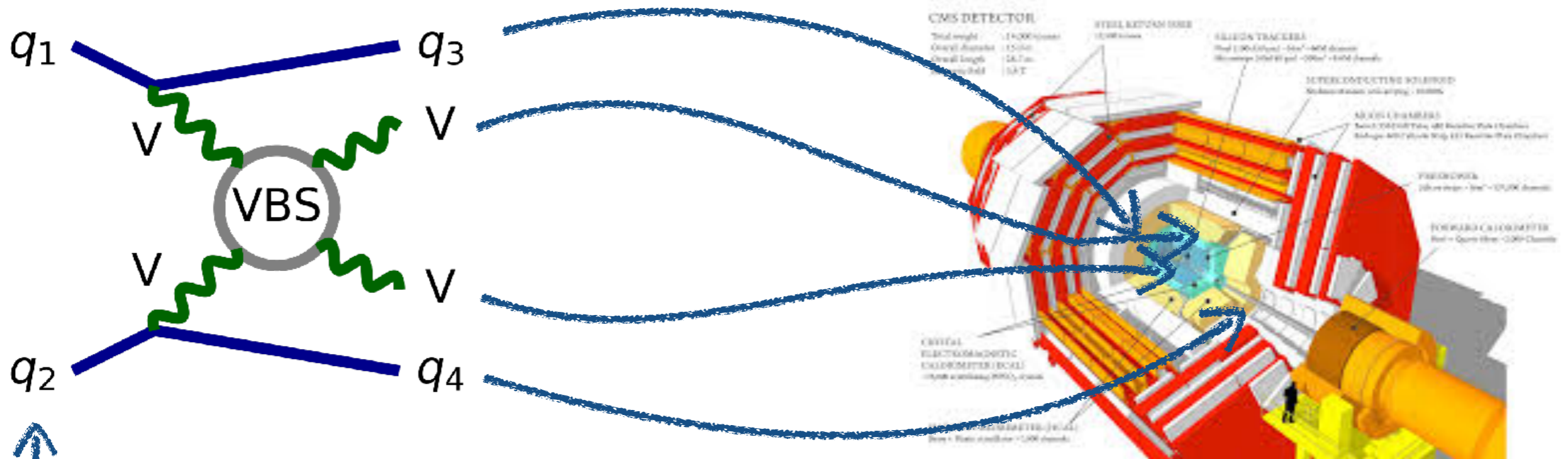


la sfida della statistica



la segnatura VBS

- **segnale**: sei fermioni entrano nel rivelatore

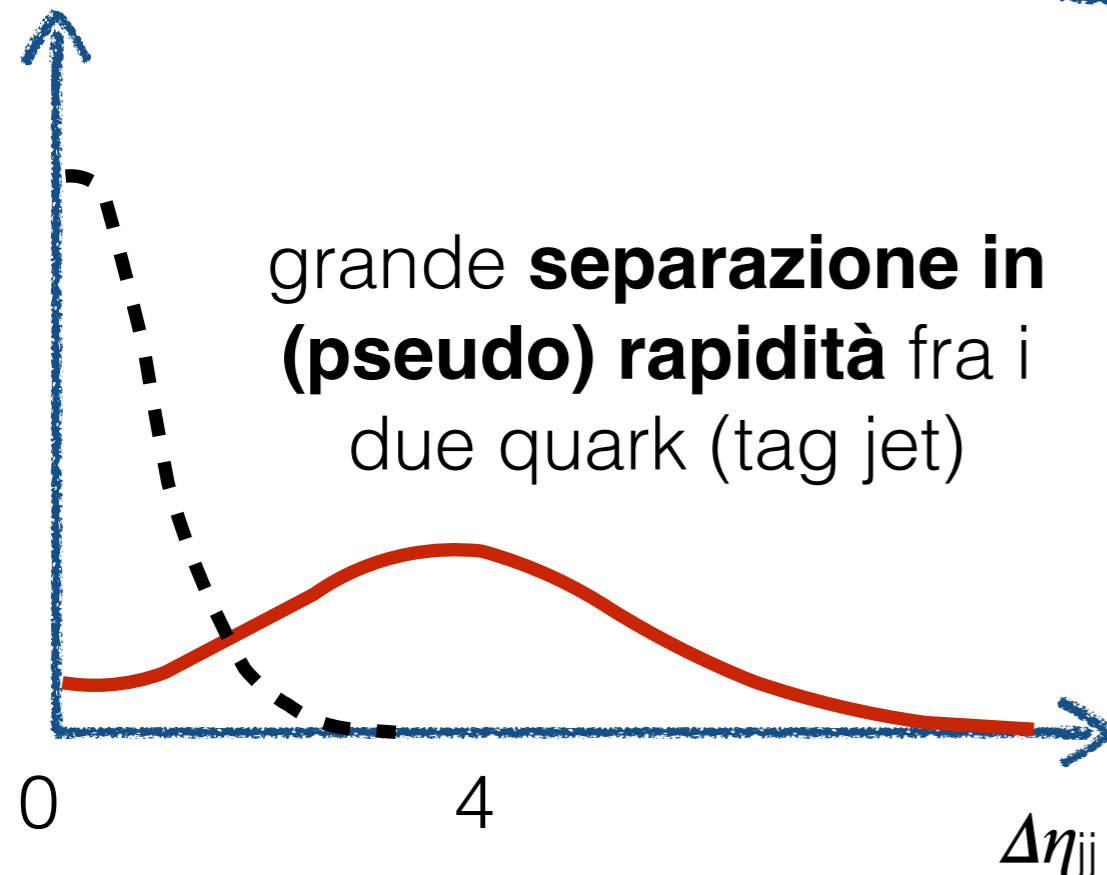
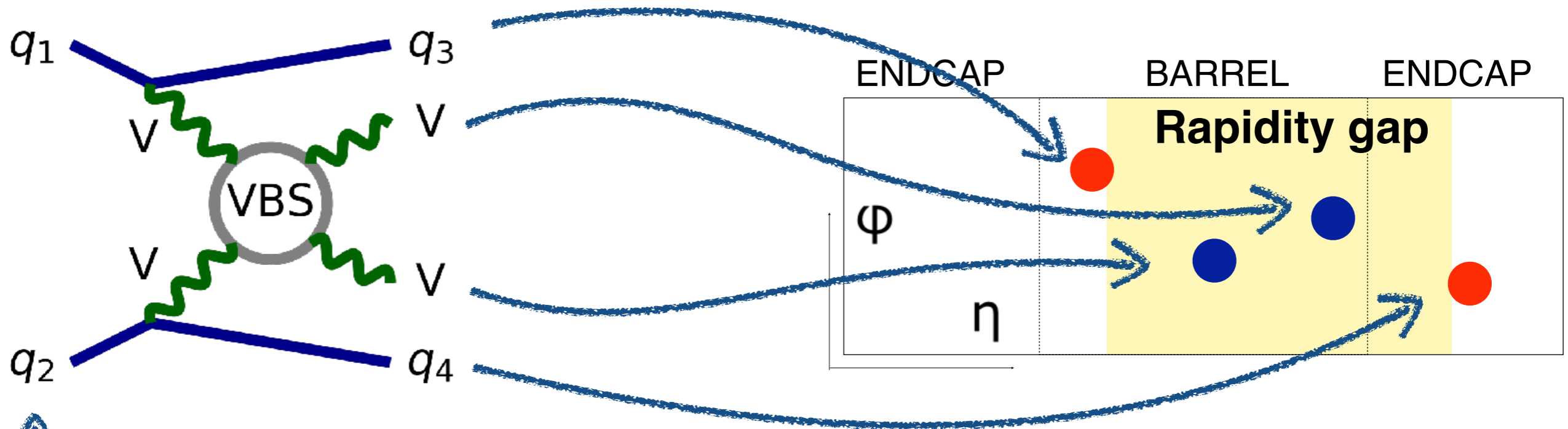


grande **separazione in (pseudo) rapidità** fra i due quark (tag jet)

poca attività QCD fra i tag jet, perché non c'è scambio di colore fra i due quark interagenti

la segnatura VBS

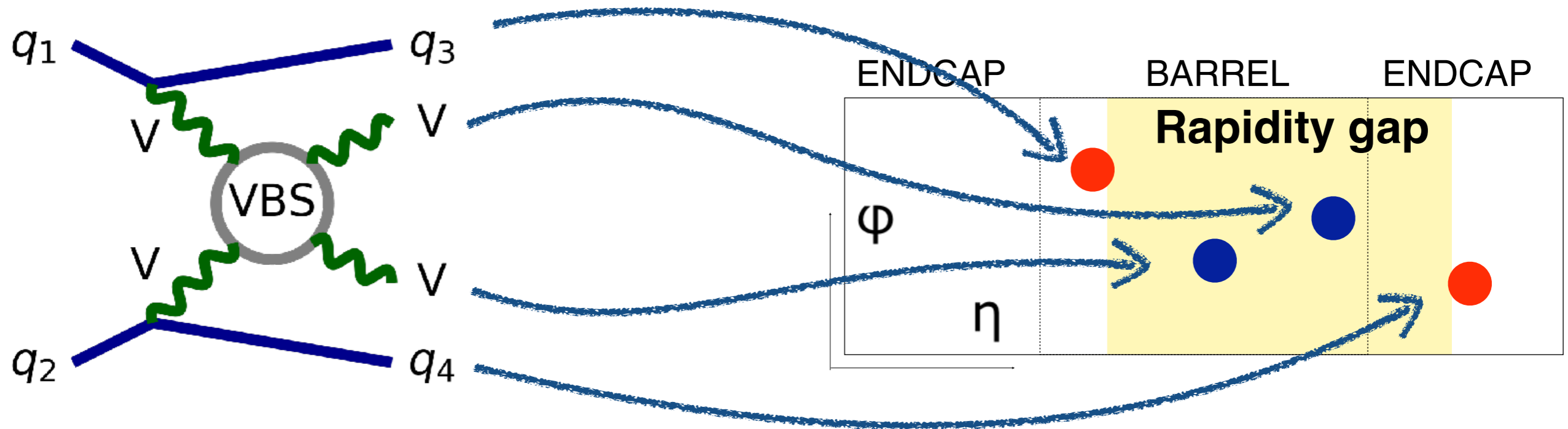
- **segnale**: sei fermioni entrano nel rivelatore



poca attività QCD fra i tag jet, perché non c'è scambio di colore fra i due quark interagenti

la segnatura VBS

- **segnale**: sei fermioni entrano nel rivelatore



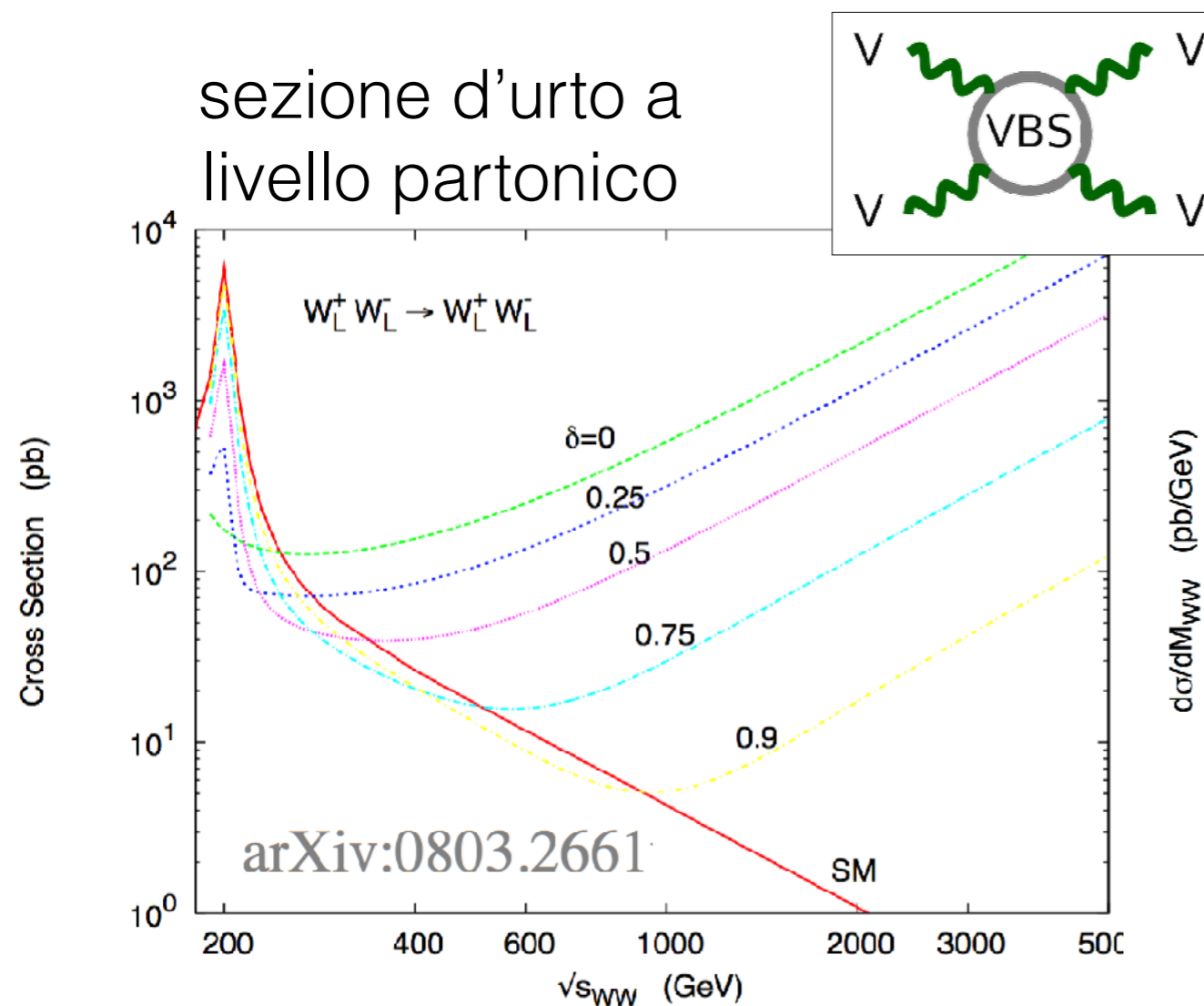
- **fondo irriducibile**: a LO $\mathcal{O}(\alpha^4\alpha_s^2)$
- già a LO interferisce con il segnale: $\mathcal{O}(\alpha^5\alpha_s)$
 - in prima approssimazione, l'interferenza si utilizza come incertezza
 - produrre una misura che combini i termini **EW+QCD**
- **fondo riducibile** mis-ID di particelle nello stato finale (e.g. $\mathcal{O}(\alpha^2\alpha_s^4)$)
- incertezze sistematiche importanti dovute alla **ricostruzione dell'energia dei getti e alla modellizzazione dei fondi**

la ricerca di anomalie

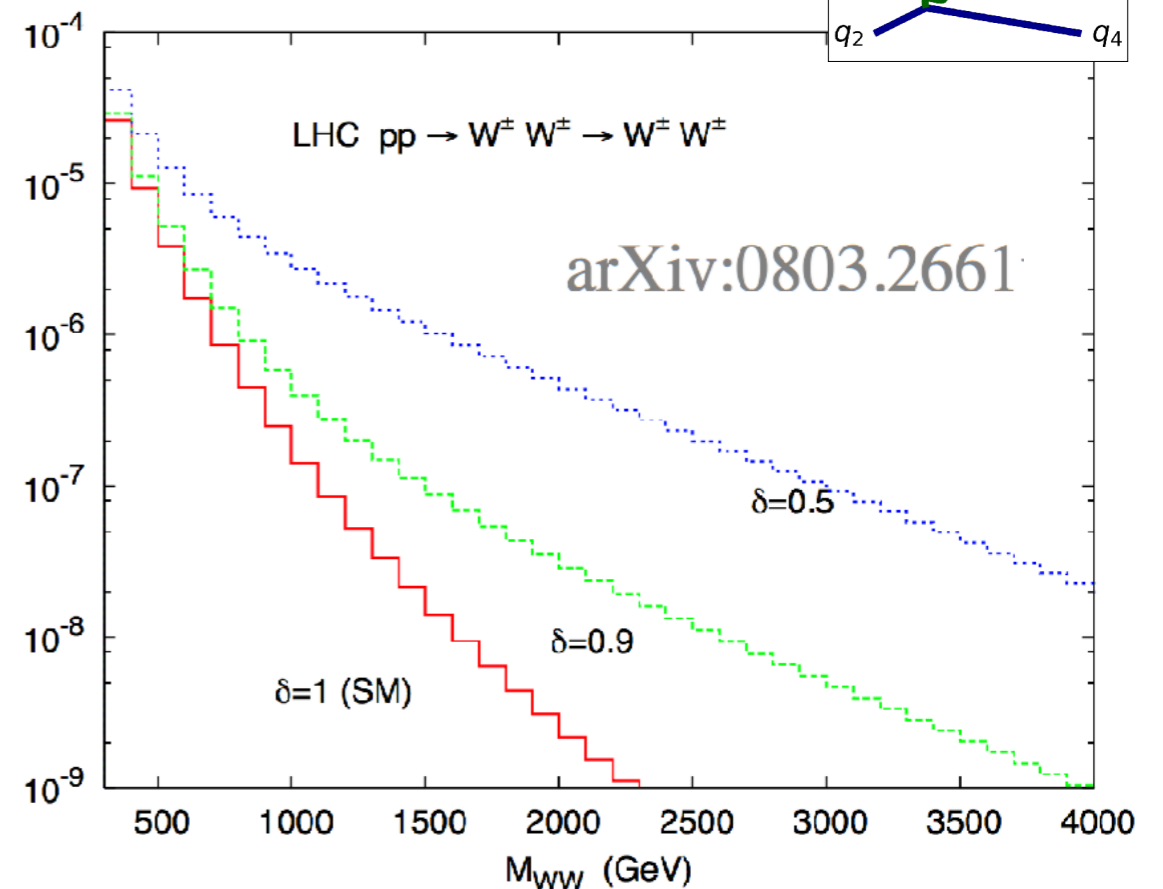
- una perturbazione dell'equilibrio:

$$\mathcal{M}_{gauge} \simeq i \frac{g^2}{4M_W^2} [s + t], \quad \mathcal{M}_{Higgs} \simeq -i \frac{g^2}{4M_W^2} [s + t] \quad (\delta)$$

- una qualunque deviazione è una **evidenza di nuova fisica ed un suggerimento sulla scala di energia** alla quale il modello standard fallisce



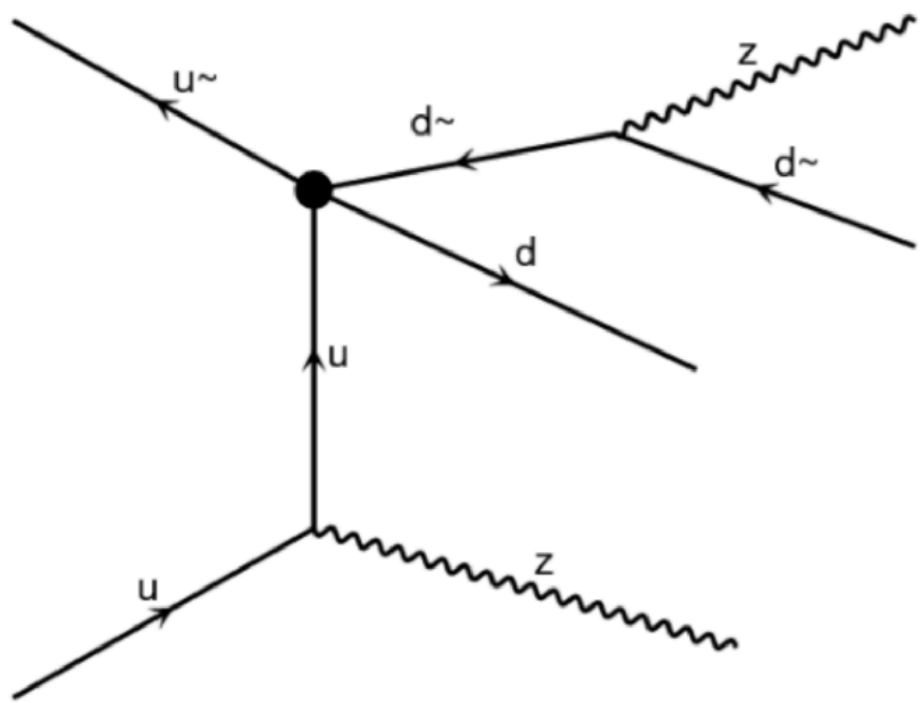
includendo le pdf



effective field theory

- si **aggiungono termini BSM** alla Lagrangiana del modello standard
- **parametrizzazione generale a bassa energia** di un modello ignoto osservabile direttamente soltanto ad energie non accessibili da LHC

$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{1}{\Lambda^2} \sum_i c_i^{(6)} \mathcal{O}_i^{(6)} + \sum_j \sum_k \frac{1}{\Lambda^{2+2j}} c_k^{(6+2j)} \mathcal{O}_k^{(6+2j)}$$



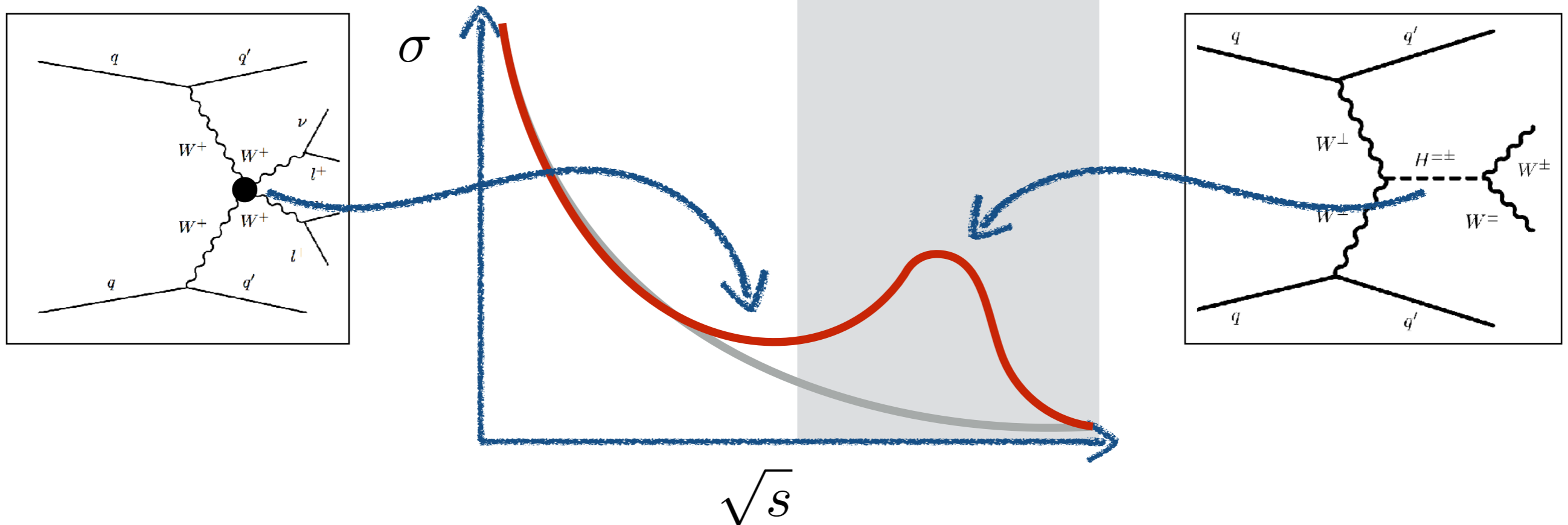
- operatori aggiuntivi generano **fenomenologie nuove** rispetto al MS
- scala di energia Λ sopprime gli effetti a basse energie: **scala di nuova fisica**
- ad es. dimensioni dispari violano simmetrie del model \rightarrow trascurate ad LHC
- **VBS dà accesso a molti operatori EFT**

modelli completi

- la Lagrangiana EFT **non contiene nuove particelle**, che sono descritte da modelli teorici completi

regime **a basse energie**:
nuova fisica descritta dalla
teoria efficace

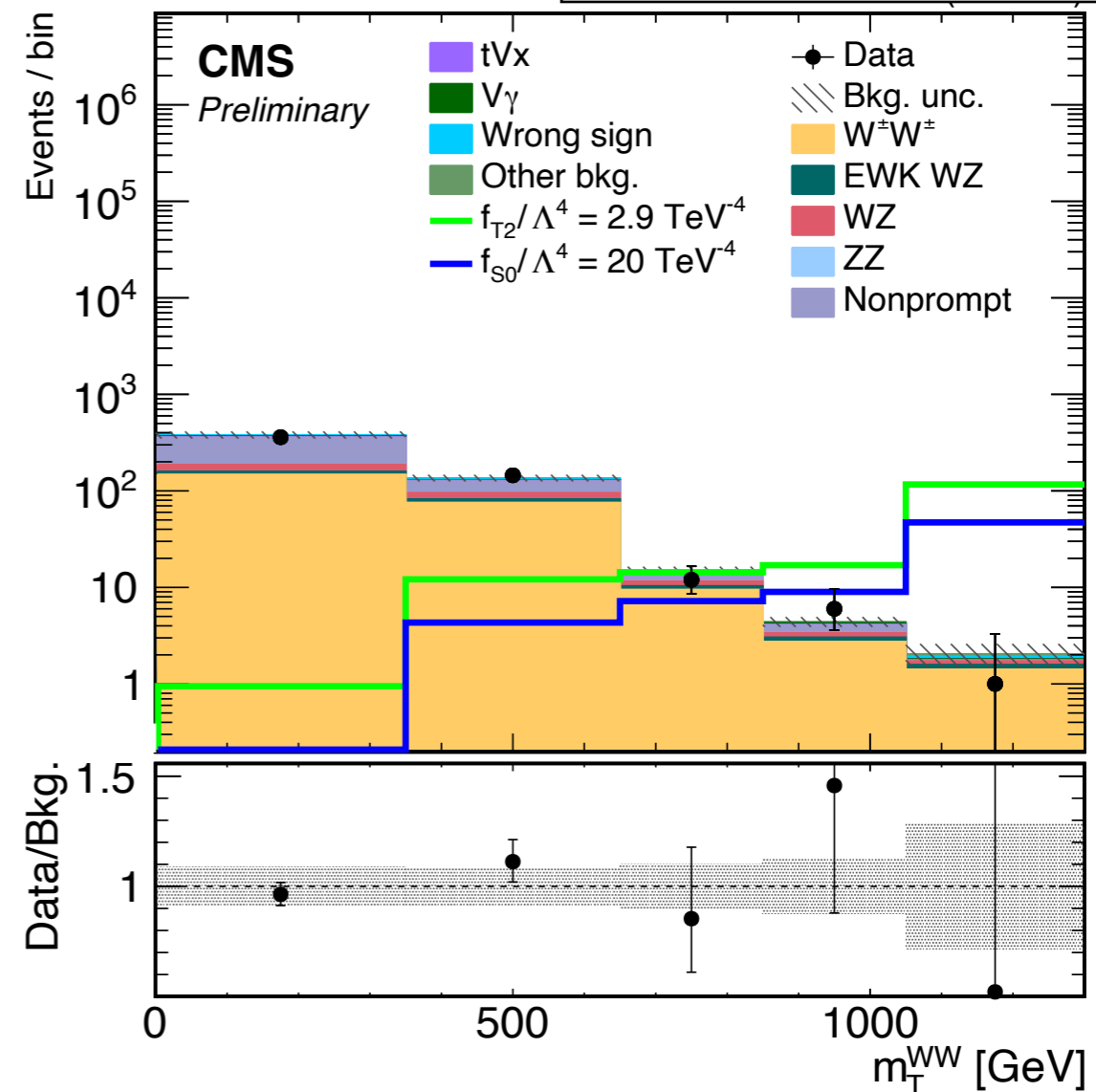
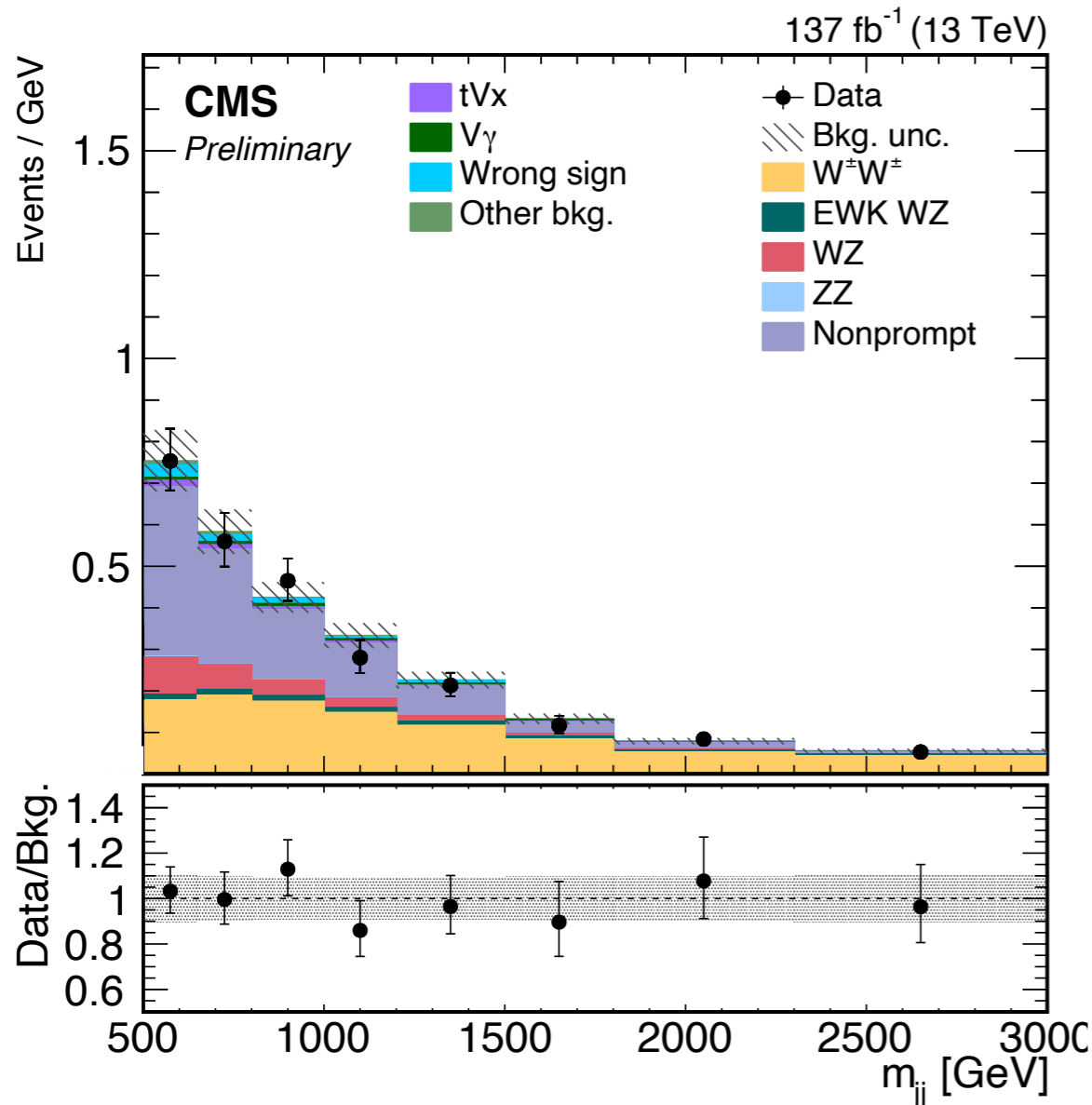
regime **ad alte energie**:
si risolve l'interazione e si
osserva la presenza di nuove
risonanze



WW di stesso segno

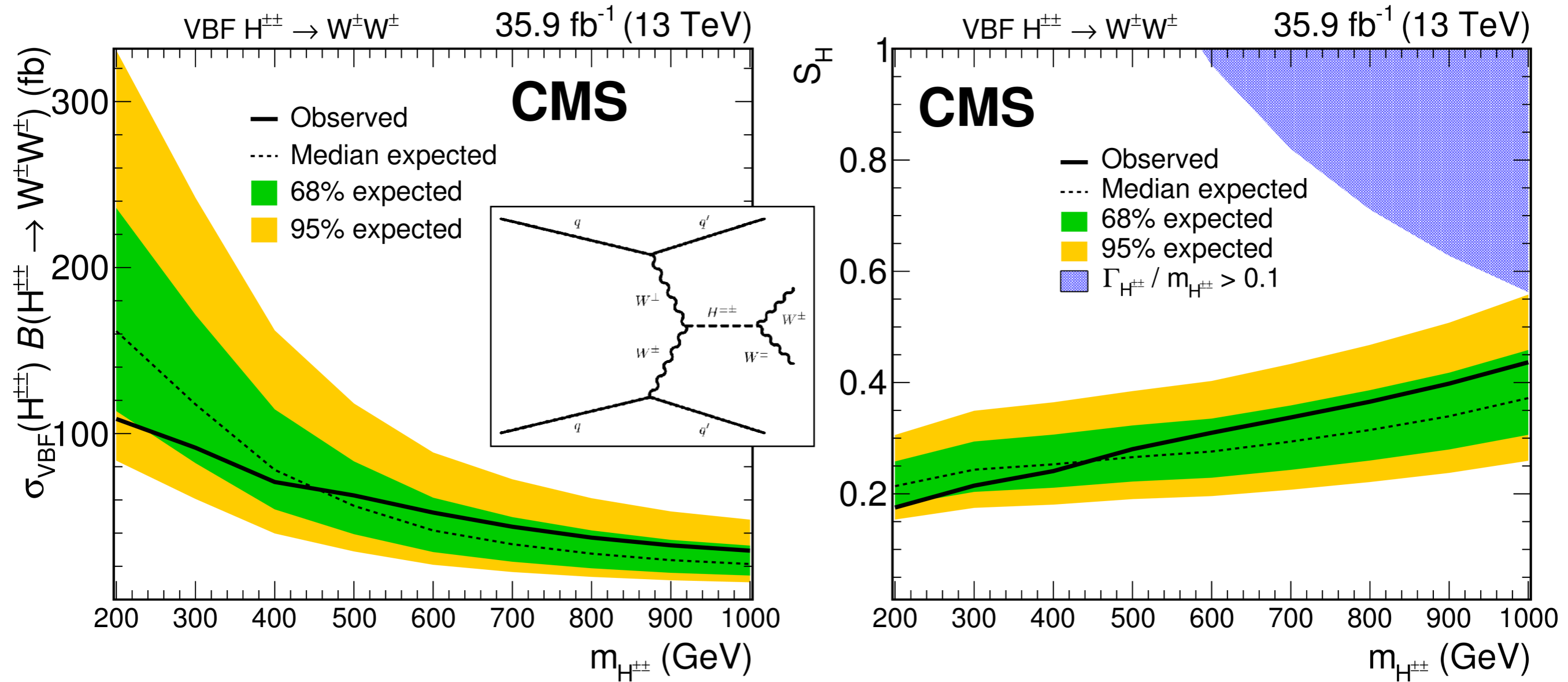
- esistono già le **prime osservazioni** di processi VBS
- **produzione EW** di due bosoni vettori W con la stessa carica
 - $\sigma_{\text{(fid)}} < 5 \text{ fb @ } 13 \text{ TeV}$ con e^\pm o μ^\pm nello stato finale
- **bassa sezione d'urto e basso fondo**

effetti BSM ad alta massa invariante

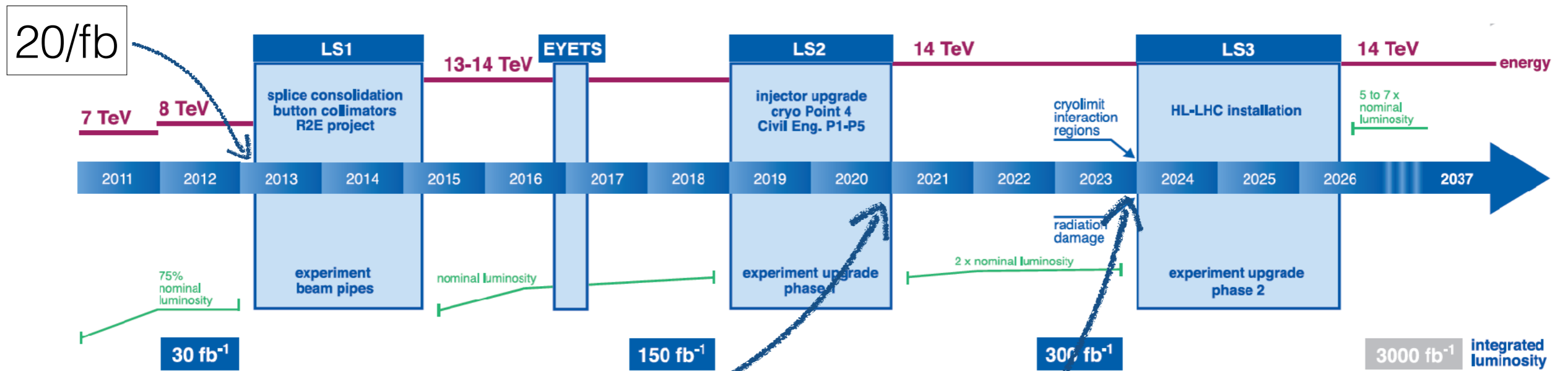


esclusione di $H^{\pm\pm}$

- limiti sulla produzione in vector boson fusion di bosoni di Higgs doppiamente carichi ($H^{\pm\pm} \rightarrow W^\pm W^\pm$)



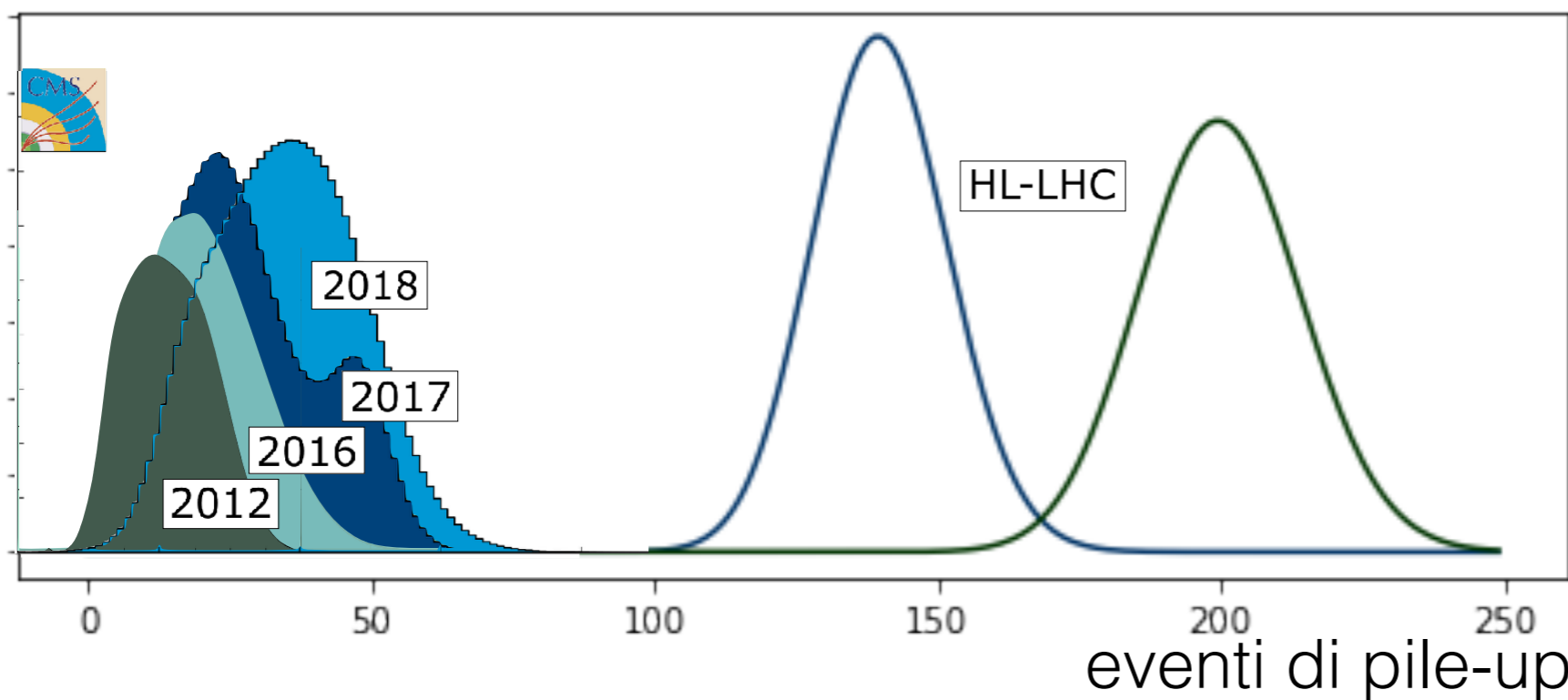
il futuro di LHC



dati analizzati fino ad ora: 137/fb

fra 3 anni: 2x statistica

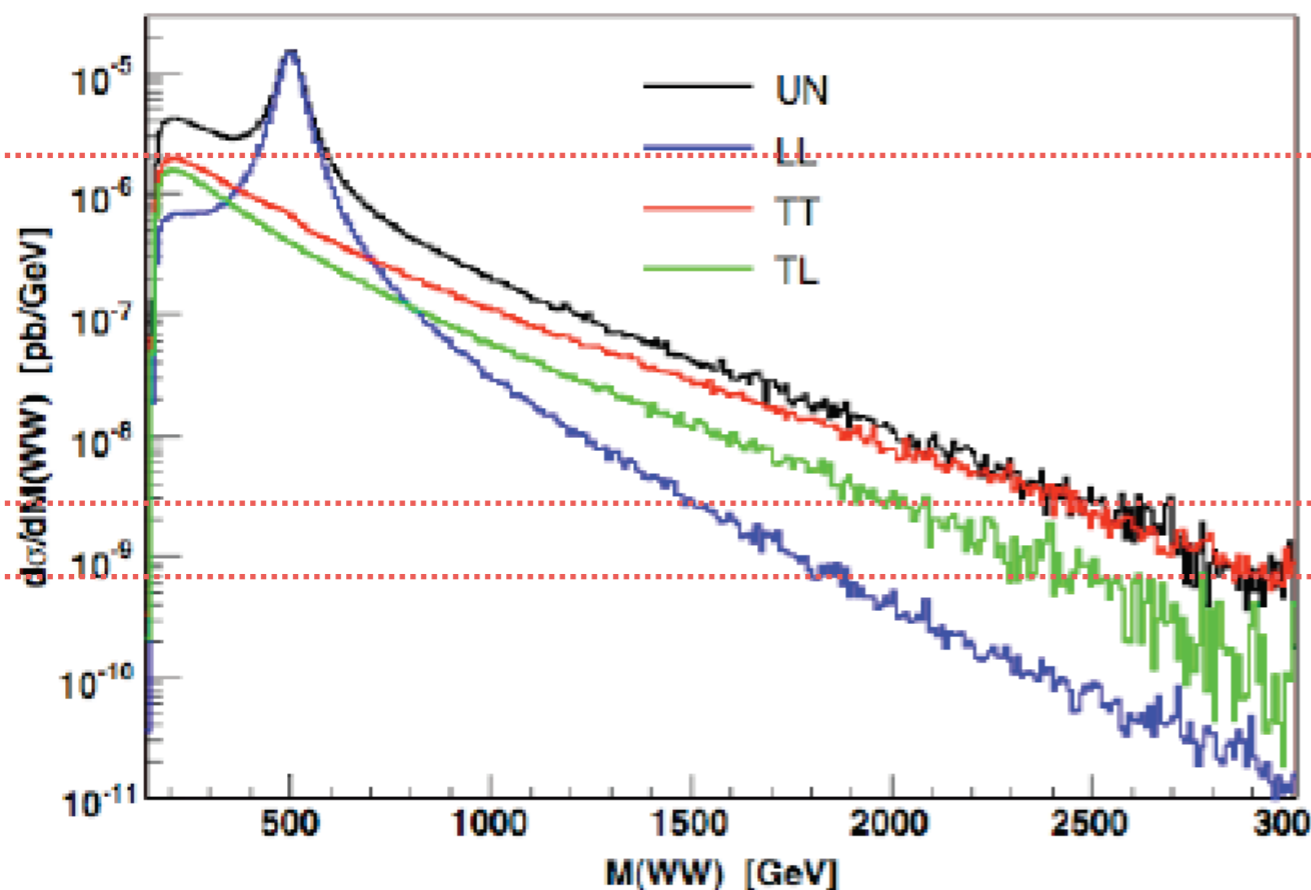
High Luminosity-LHC: 20x statistica



l'acceleratore e le condizioni di acquisizione dati cambieranno durante HL-LHC

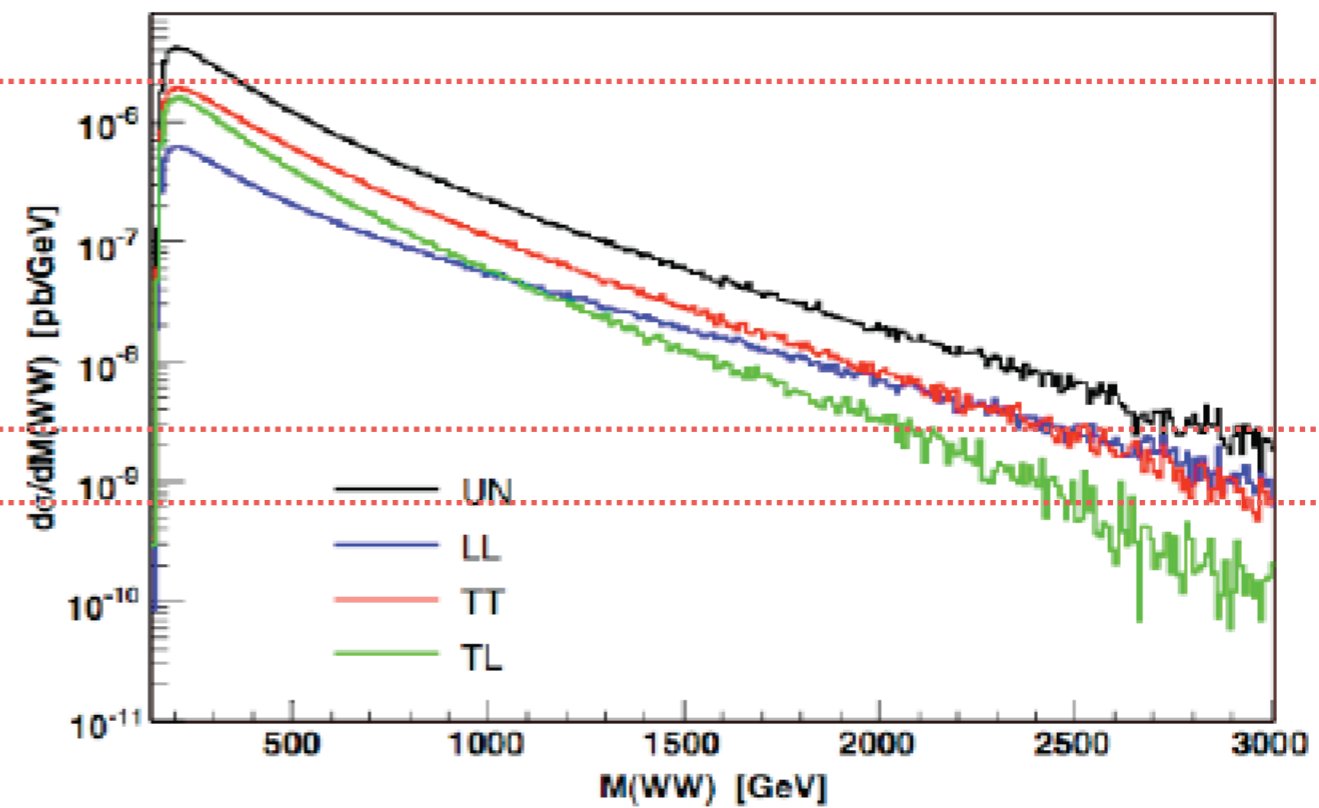
la componente longitudinale

- $V_L V_L$ è dove la EWSB entra in gioco
- A grande M_V la sezione d'urto $V_L V_L$ **cambia drammaticamente** in assenza del bosone di Higgs
- si tratta della componente che ci si aspetta essere **sensibile a fisica BSM nel settore dell'EWSB**



SM Higgs

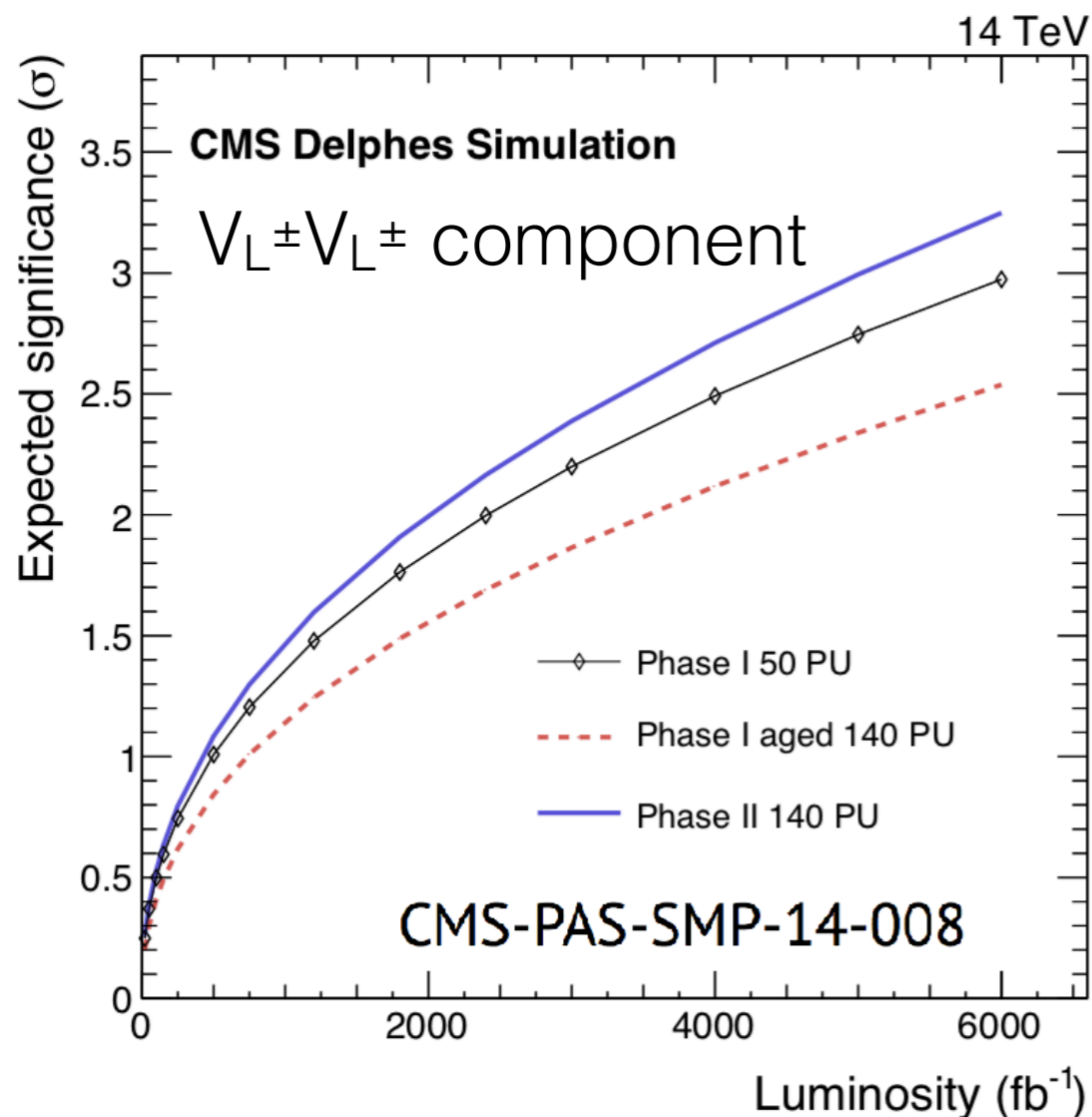
Accomando et al: hep-ph/0512219



no Higgs

proiezioni per il futuro

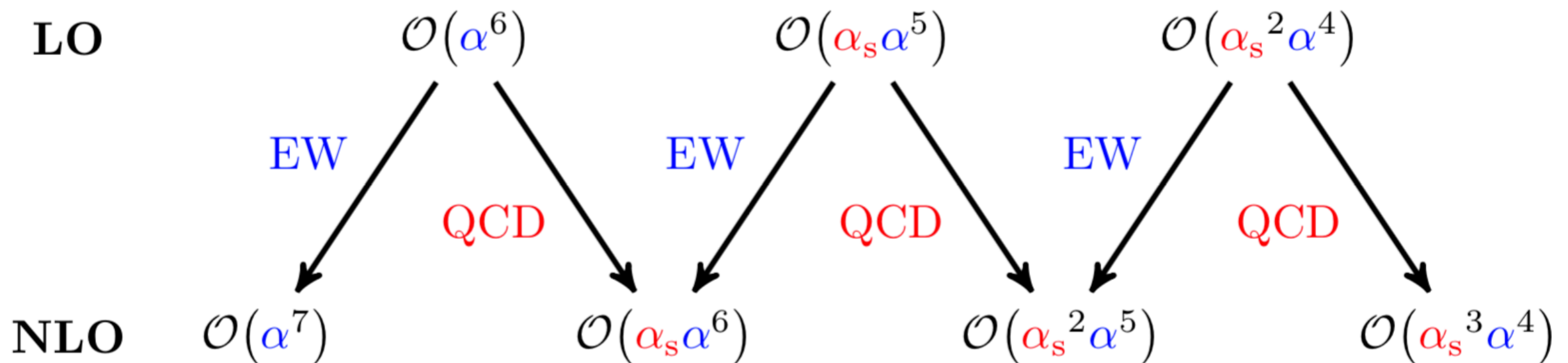
- HL-LHC comporterà upgrade di LHC e dei rivelatori
 - **nuovo tracker** con copertura fino ad $\eta = 4$, che entra nel trigger
 - calorimetro ad **alta granularità nella direzione forward**
 - **timing detector** (nato ad MiB!) per la soppressione del pile-up
 - ottimizzazione del **calorimetro elettromagnetico e dei rivelatori a muoni**
- room for improvement in the absolute performances



- studi preliminari con simulazioni parametriche mostrano **discreta sensibilità sulla componente longitudinale $V_L V_L$**
- **margin di miglioramento:** non è considerato l'effetto di tutti i rivelatori che verranno modificati

descrizione fenomenologia

- necessità di **predizioni teoriche dettagliate**: conti oltre il LO sia per la parte EW che QCD, comprensione del ruolo del parton shower, stima dell'impatto di eventuali approssimazioni, descrizione di EFT consistente
- a NLO: i termini EW sono importanti spesso quanto quelli QCD, quindi tutti i fattori vanno considerati insieme
⇒ **le misure devono combinare i contributi EW e QCD**



- ad oggi, **la precisione è limitata a NLO QCD** e soltanto per pochi processi il calcolo completo NLO QCD e EW è noto
- necessità di sviluppi nella comprensione dettagliata di VBS

uno sforzo globale

- tanti **canali di decadimento differenti** da studiare, in due collaborazioni sperimentali
 - in CMS **collaboriamo attivamente** con le Università di Firenze, Padova, Torino in Italia, con il Fermilab di Chicago, l'École Polytechnique di Parigi, le Università di Anversa e Budapest
 - con **ATLAS** interagiamo con l'Università di Pavia, Dresda, Salonicco
- la **fenomenologia VBS** ad LHC deve essere ben compresa nel Modello Standard
- vogliamo una **descrizione EFT condivisa** (ci sono tante basi di operatori), per rendere la combinazione e reinterpretazione dei risultati priva di complicazioni
 - corretto trattamento dei limiti di unitarietà della teoria efficace
- il problema complesso di VBS richiede l'utilizzo di tecniche di analisi avanzate
 - uso informato di **strumenti di Deep Learning, insieme ad esperti**
- Unimib coordina da tre anni un gruppo di ricerca mondiale teorico e sperimentale su VBS, chiamato **VBSCan**

in conclusione

- lo studio di vector boson scattering offre una **finestra unica per indagare** i dettagli del settore più nuovo del modello standard, **la rottura spontanea di simmetria**
- i primi risultati a riguardo iniziano a essere pubblicati, con l'aumentare della statistica accumulata da ATLAS e CMS saranno **sempre più interessanti, fino al termine della presa dati di LHC**
- trasformare LHC in uno strumento di precisione richiede profonda comprensione dei dettagli, **idee innovative e strumenti di analisi dati all'avanguardia**
- **Milano-Bicocca gioca oggi un ruolo di primo piano** in questa ricerca e si trova nella posizione ideale per continuare questo studio con efficacia in futuro