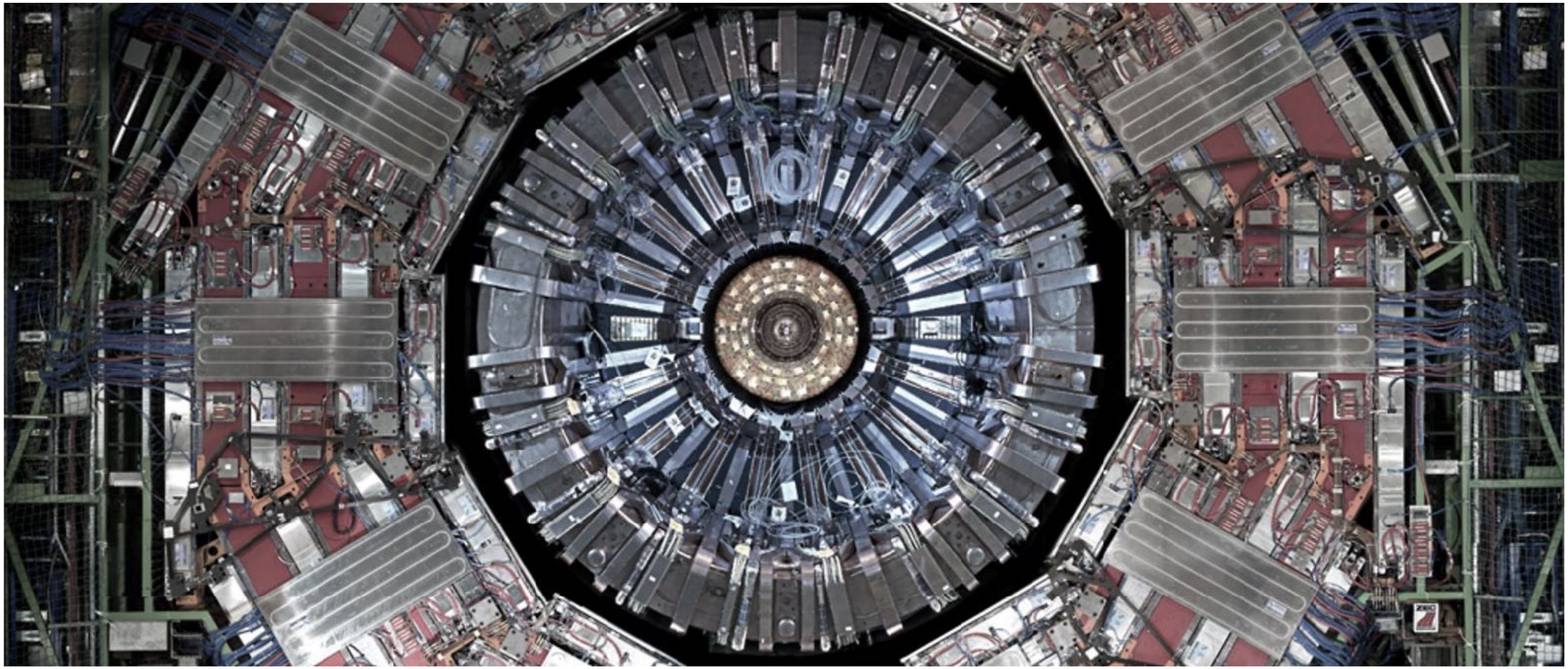
Ricerca di Fisica Oltre il Modello Standard all'LHC

Maurizio Pierini

CERN

Di cosa vi parlo oggi

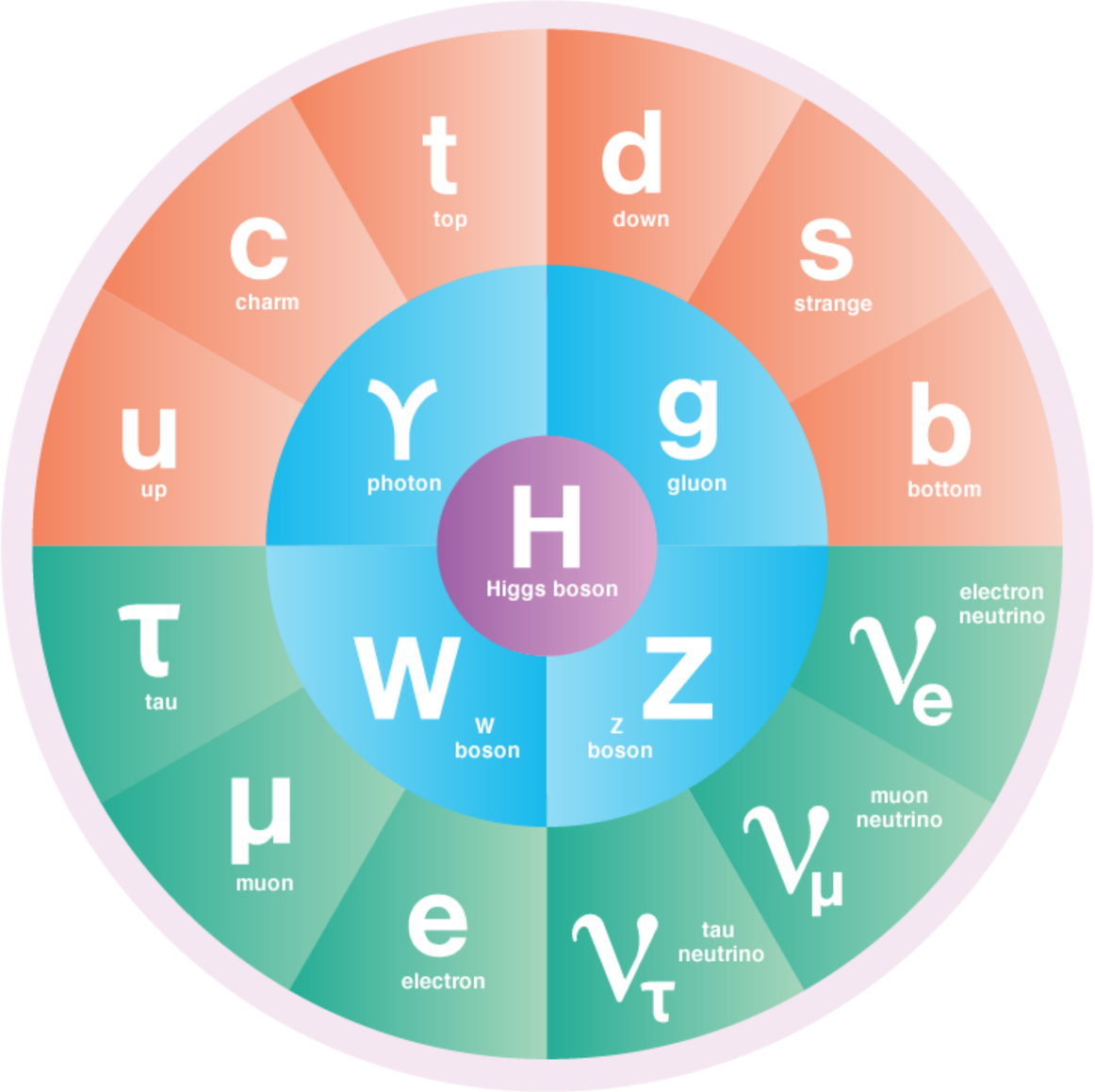
- *Perché andare oltre il modello Standard (BSM)*
  - *tasselli mancanti*
  - *il problema della massa dell'Higgs*
  - *la materia oscura*
- *Ricerca di fisica BSM*
  - *Nuove particelle & nuove topologie*
  - *Particelle invisibili*
  - *Topologie "esotiche"*
- *Superare i limiti tecnologiche…*



Perché andare oltre il modello Standard (BSM)

Il quadro (in)completo

- *La scoperta del bosone di Higgs è stata considerata come il completamento di un Puzzle*
- *In realtà', la scoperta ha reso come ancora più' pressanti una serie di domande prima solo teoriche*

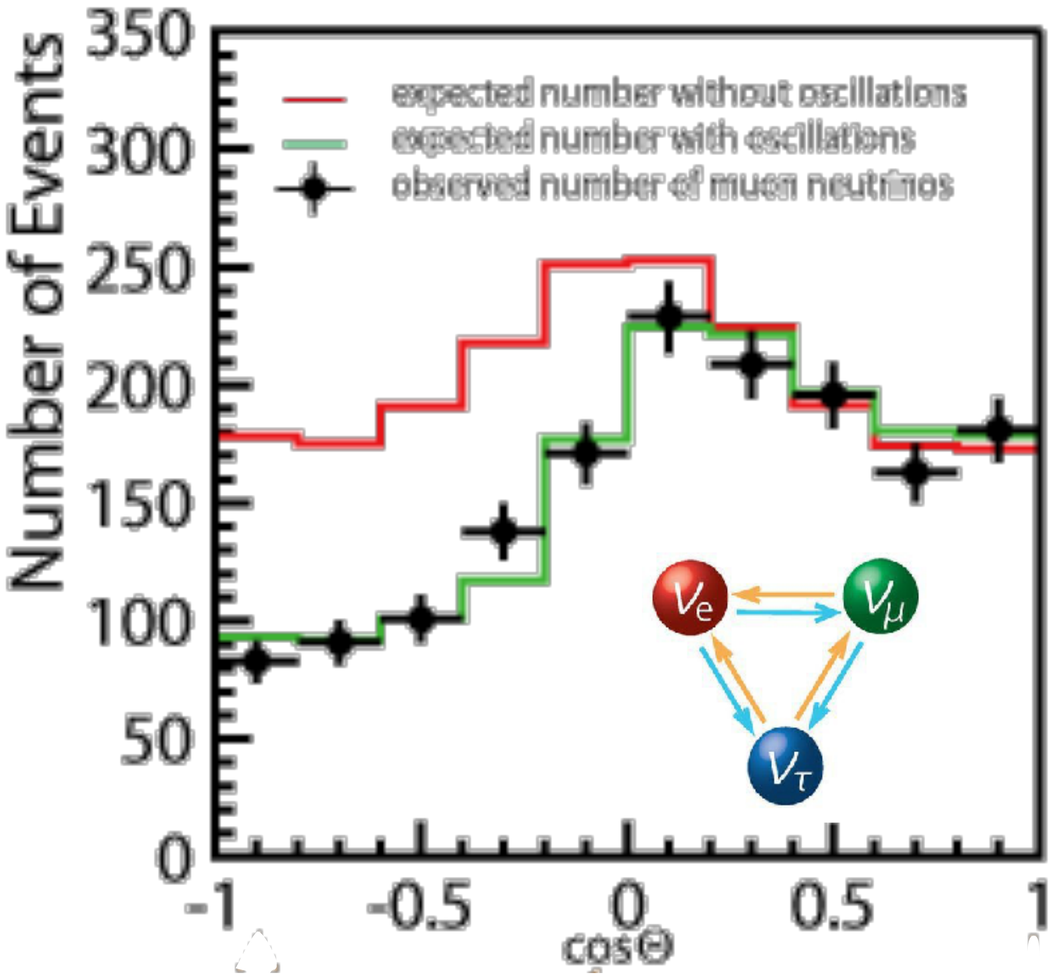


Il quadro (in)completo

- *Il quadro non e' affatto completo*
  - *mancano all'appello i neutrini right*
  - *l'assione non e' stato ancora trovato*
  - *Non esiste una spiegazione per la materia oscura come particella fondamentale*

Il quadro (in)completo

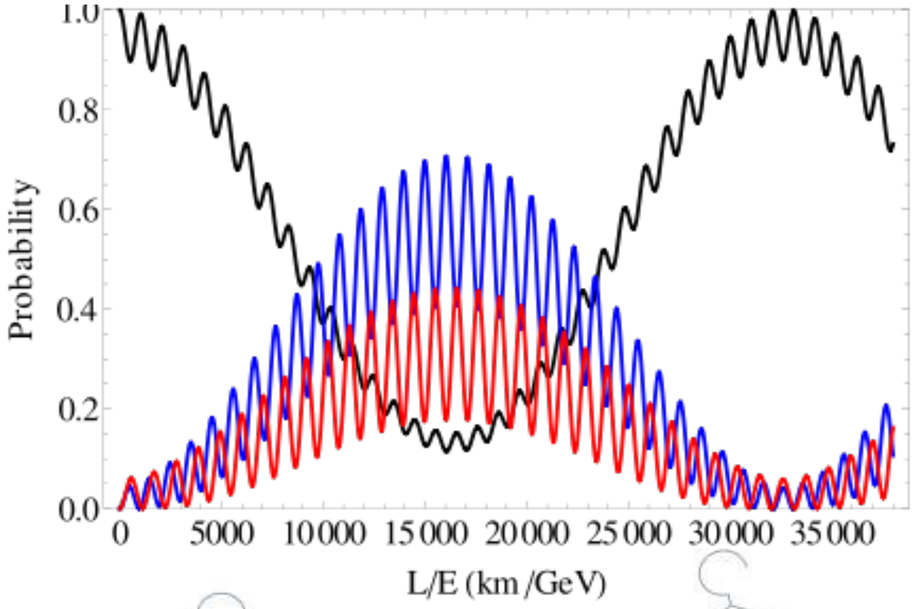
- *I neutrini oscillano → i neutrini hanno massa*
  - *Se i neutrini sono come le altre particelle, devono esistere dei neutrini right-handed*
  - *Se invece i neutrini sono solo left-handed, allora la massa dei neutrini ha una diversa origine*
- *Ad ogni modo, la massa dei neutrini punta verso nuove scoperte*



Il quadro (in)completo

- *I neutrini oscillano → i neutrini hanno massa*
  - *Se i neutrini sono come le altre particelle, devono esistere dei neutrini right-handed*
  - *Se invece i neutrini sono solo left-handed, allora la massa dei neutrini ha una diversa origine*
- *Ad ogni modo, la massa dei neutrini punta verso nuove scoperte*

$$P_{\alpha\to\beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4\sum_{i>j} \mathrm{Re}(U^*_{\alpha i}U_{\beta i}U_{\alpha j}U^*_{\beta j})\sin^2\left(\frac{\Delta m^2_{ij}L}{4E}\right) + 2\sum_{i>j} \mathrm{Im}(U^*_{\alpha i}U_{\beta i}U_{\alpha j}U^*_{\beta j})\sin\left(\frac{\Delta m^2_{ij}L}{2E}\right),$$

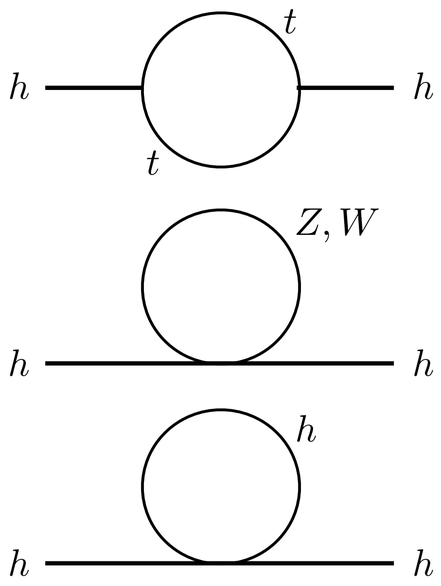


Il neutrino sterile?

Forza	quark u,c,t left	quark u,c,t right	quark d,s,b left	quark d,s,b right	leptoni e,μ,τ left	leptoni e,μ,τ right	neutrini e,μ,τ left	neutrini e,μ,τ right
elettromagnetica	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
nucleare debole	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗
nucleare forte	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗

La massa dell'Higgs e la naturalezza

- *Il bosone di Higgs e' l'unica particella fondamentale senza spin. questo comporta proprietà uniche*
  - *Il valore della sua massa e' sensibile alle masse di tutte le altre particelle*
  - *Cio' fa si che mH sia ~ la massa della particella piu' pesante*
  - *E qui iniziano i problemi…*



$$\delta m_h^2 \sim -\frac{3}{8\pi^2}\lambda_t^2\Lambda^2$$

$$\delta m_h^2 \sim \frac{9}{64\pi^2}g^2\Lambda^2$$

$$\delta m_h^2 \sim \frac{1}{16\pi^2}\lambda^2\Lambda^2$$

La massa dell'Higgs e la naturalezza

- *Per energie molto alte (10^{16} TeV ~ 10^{15} volte l'energia dell'LHC) la gravita' diventa intensa come le altre forze*

- *Lo Standard Model, che non la descrive, cessa di valere*

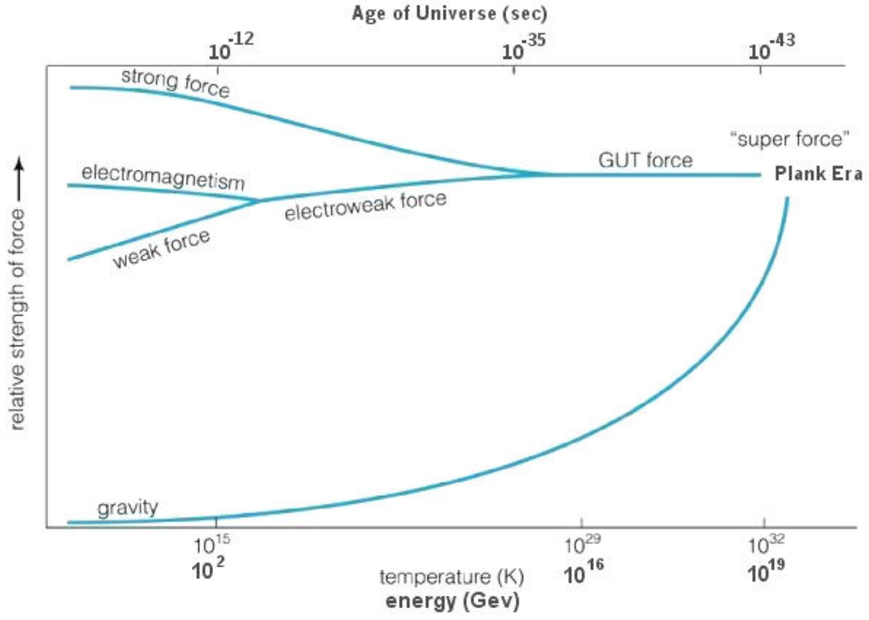
- *<u>Assumendo che non esista altra "nuova" fisica nel mezzo</u>, mH dovrebbe ricevere contributi ~ 10^{16} TeV*

  - *o mH ~ 10^{16} TeV (che sappiamo non essere vero)*

  - *o queste correzioni si cancellano per qualche strano (e poco scientifico) motivo*

  - *oppure l'assunzione iniziale non e' valida*

- *mH~125 GeV ci dice che questa nuova fisica non dovrebbe essere troppo lontana*



$\mathcal{O}(10^{19})^2 - \mathcal{O}(10^{19})^2 = \mathcal{O}(100)^2$

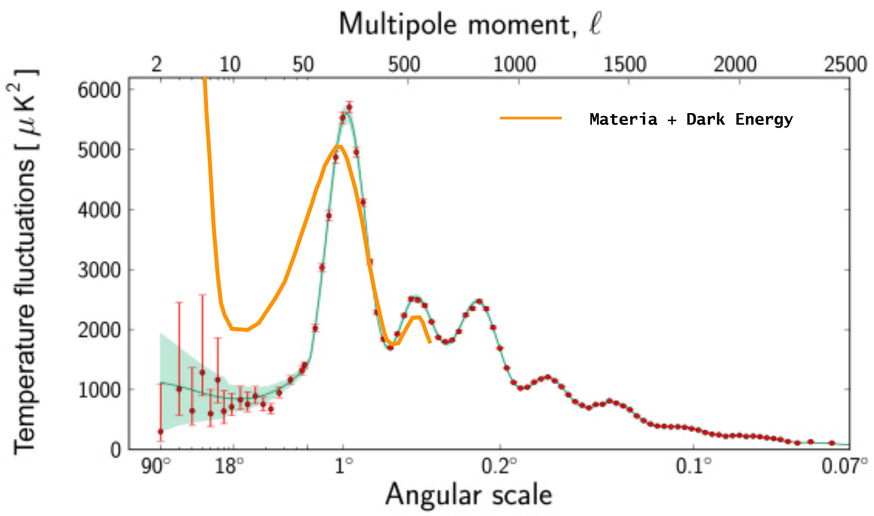
La Materia Oscura

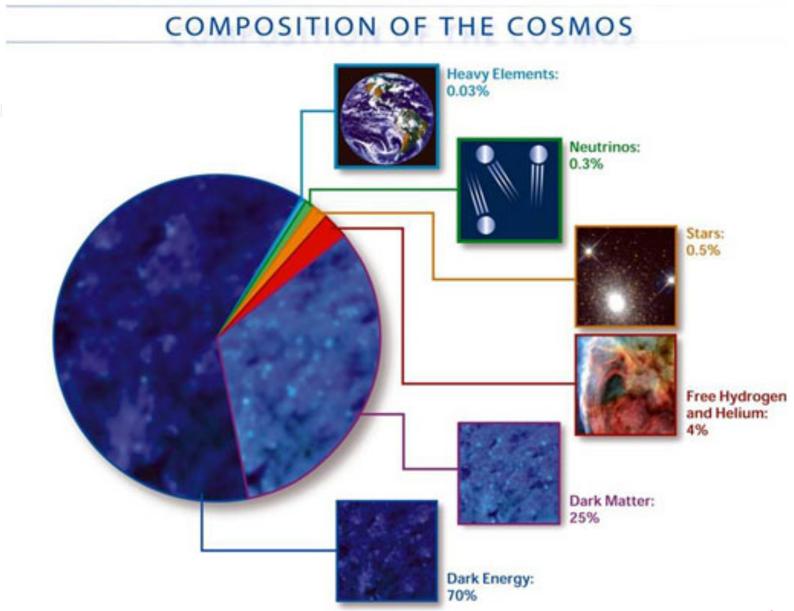
- *Una serie di osservazioni astronomiche (dal 1930 ad oggi) ha rafforzato l'idea che esista la materia oscura*

- *La misura della radiazione di fondo cosmico (l' "impronta" del big bang) ha permesso di misurare quante materia oscura esisterebbe (x6 materia ordinaria)*

- *Alcune osservazioni suggeriscono che si tratti di un gas di particelle*

- *Nel Modello Standard non esiste una particelle con le giuste caratteristiche*

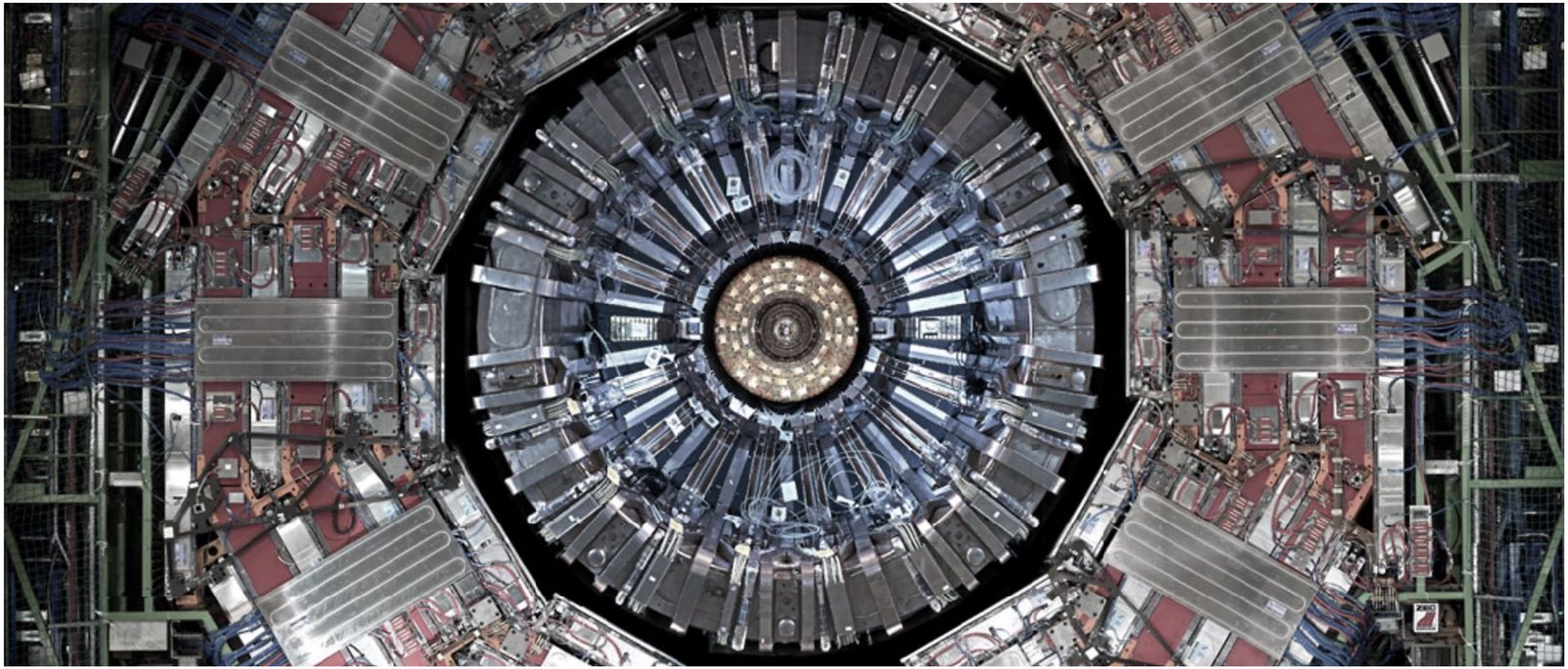




Oltre il Modello Standard

"[I]t seems probable that most of the grand underlying principles have now been firmly established and that further advances are to be sought chiefly in the rigorous application of these principles to all the phenomena which come under our notice.... An eminent physicist has remarked that the future truths of physical science are to be looked for in the sixth place of decimals."

-- *Albert Michelson, 1894*



Come si cerca una particella all'LHC

Una Tipica Analisi

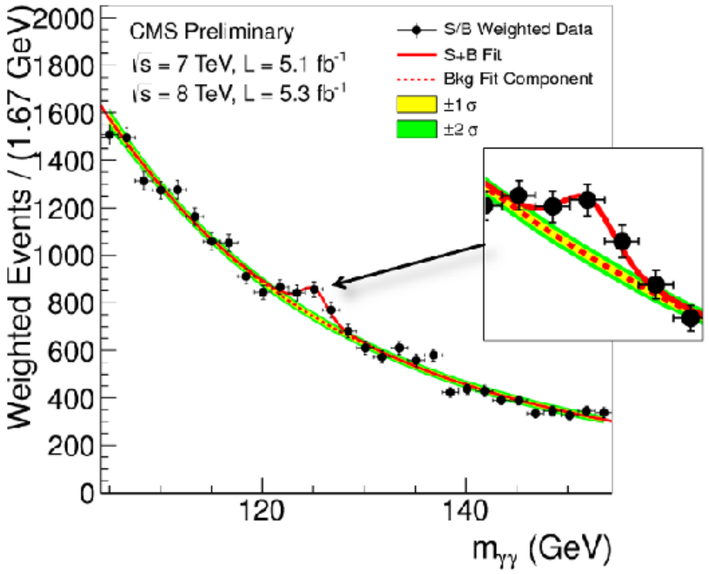
- Si inizia con una domanda
  - Per esempio: esiste il bosone di Higgs?
  - Per esempio: stiamo producendo materia oscura all'LHC?
- Si pensa alle conseguenze che tale ipotesi comporta
  - Bosone di Higgs -> eventi con due fotoni ad un valore specifico della massa
  - Materia oscura -> eventi con sbilanciamento sul piano traverso
- Si selezionano eventi compatibili con la topologia individuata
- Si misura (con altre topologie e/o con simulazioni) il fondo aspettato dai processi Standard Model
- Si misura "per differenza" la presenza di un segnale

Start from all events with two photons

Filter the events applying cleanup algorithms

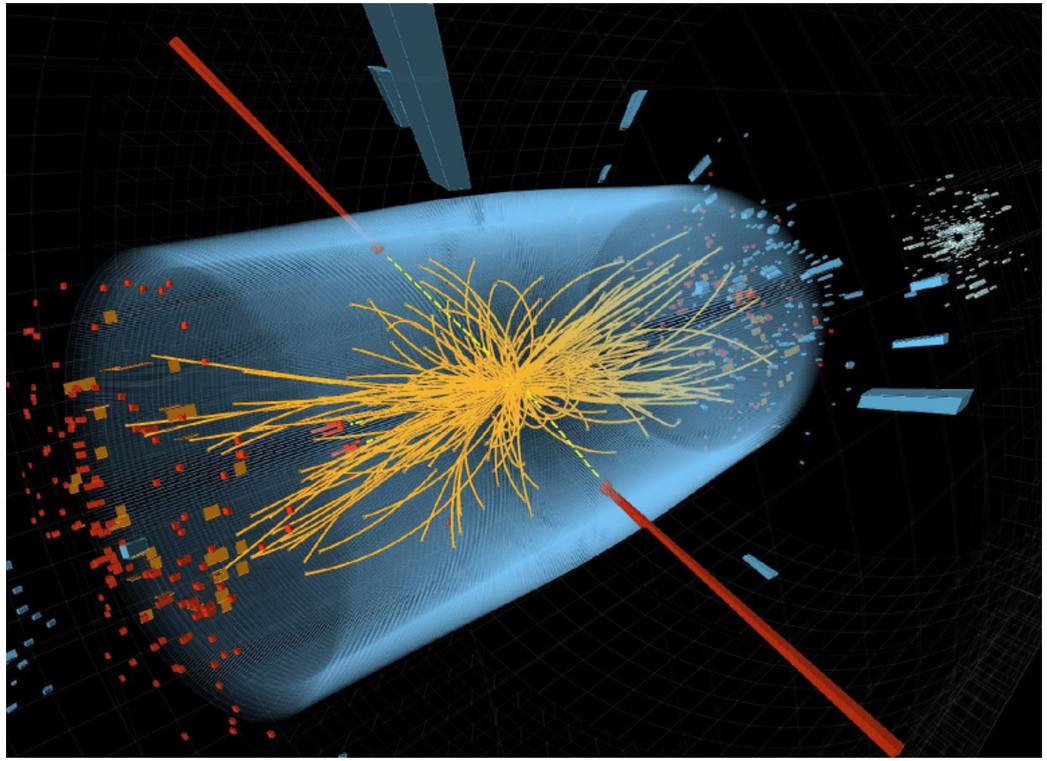
Compute the mass of the di-photon object

Run statistical analysis (search for signal over background)

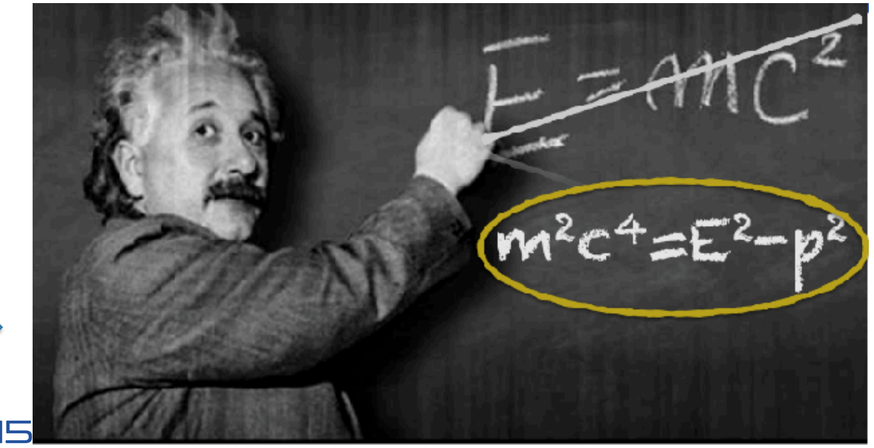


Una Tipica Analisi

- Energy of the particle E measured by detector
- Location of the deposit gives the directions (v_x,v_y,v_z) and (w_x,w_y,w_z) for γ_1 and γ_2
- Photons have no mass

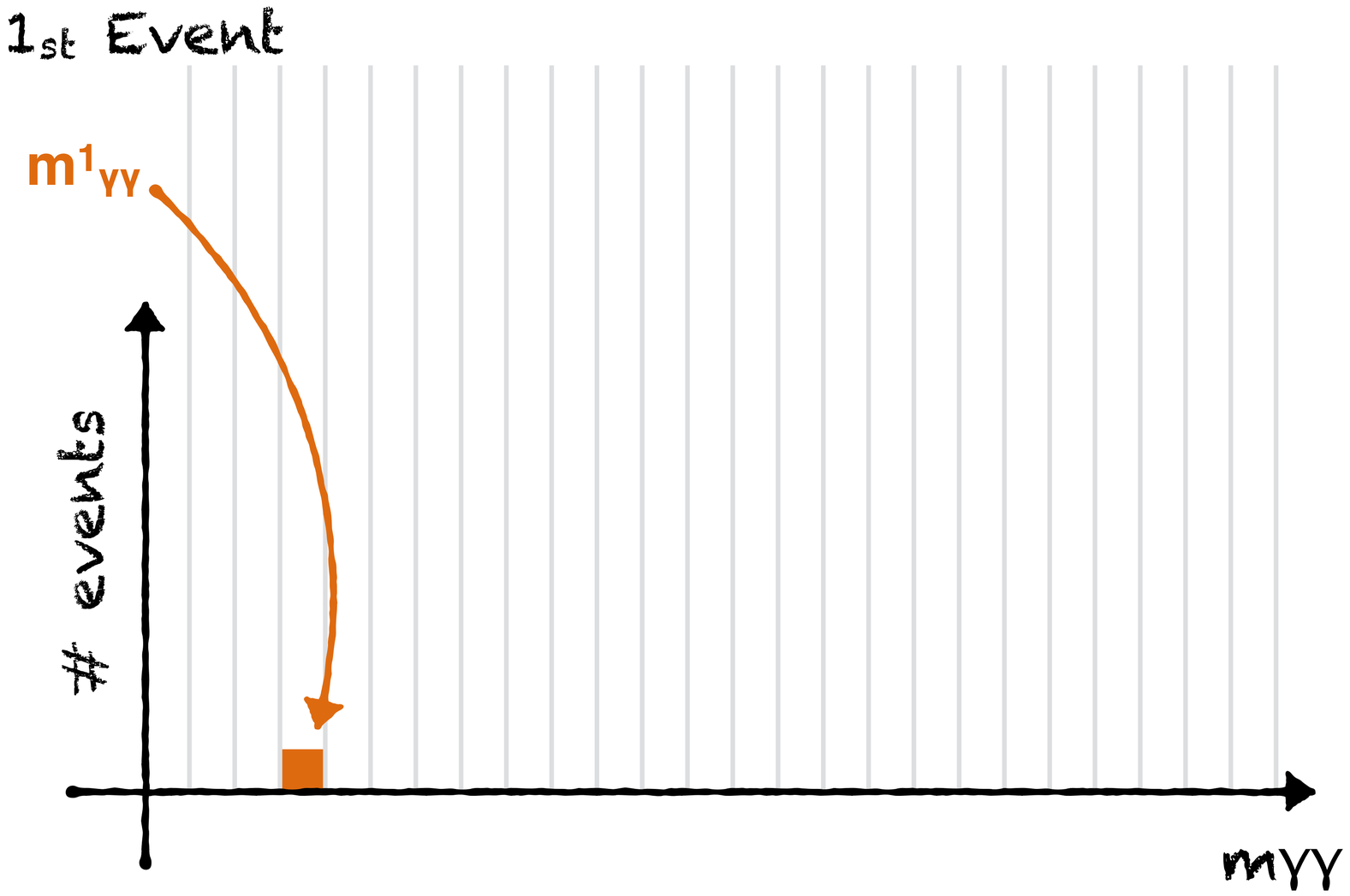


E_1	E_1v_x	E_1v_y	E_1v_z
+	+	+	+
E_2	E_2w_x	E_2w_y	E_2w_z
=	=	=	=
E	p_x	p_y	p_z

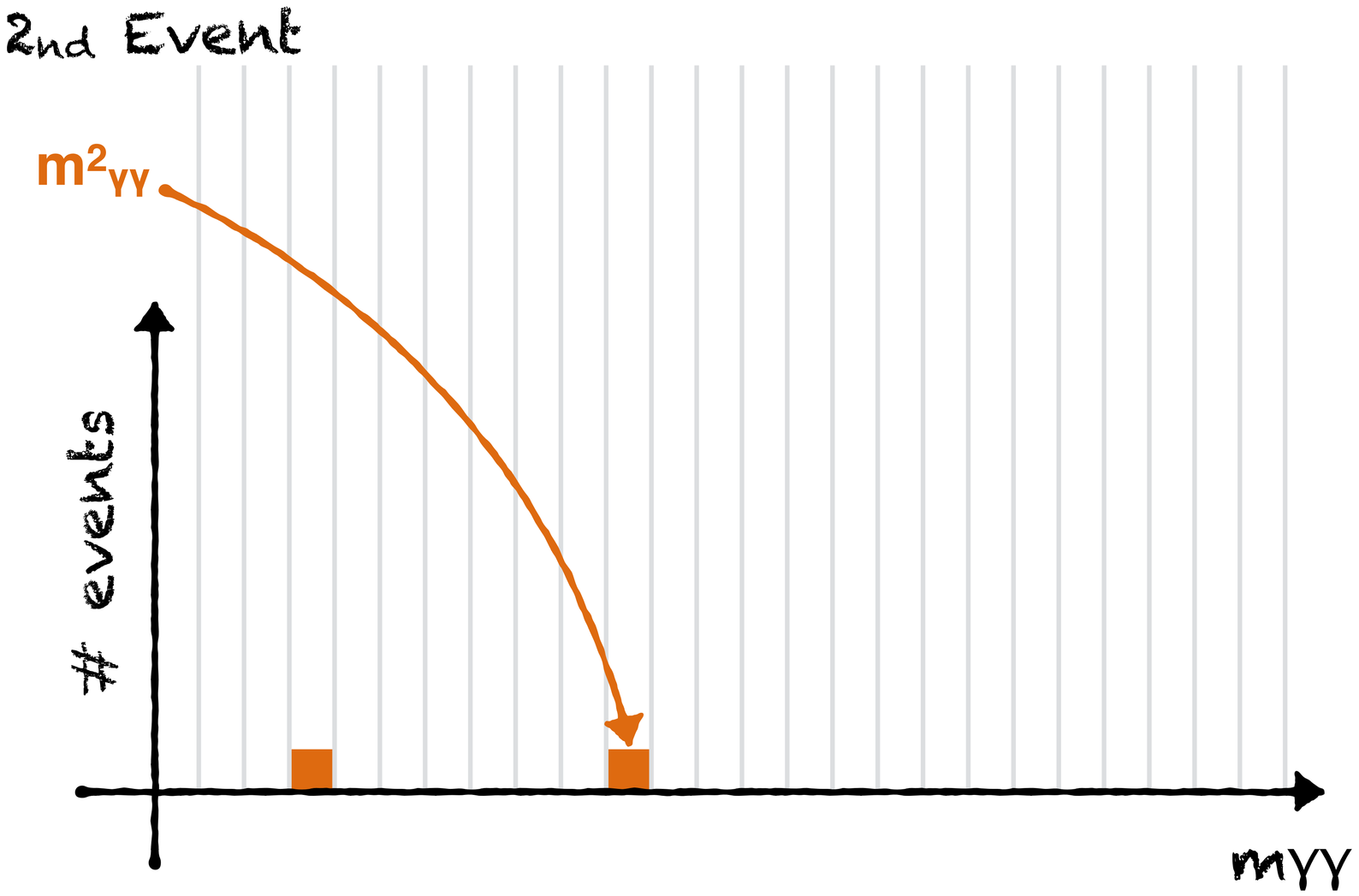


$m_{\gamma\gamma}$

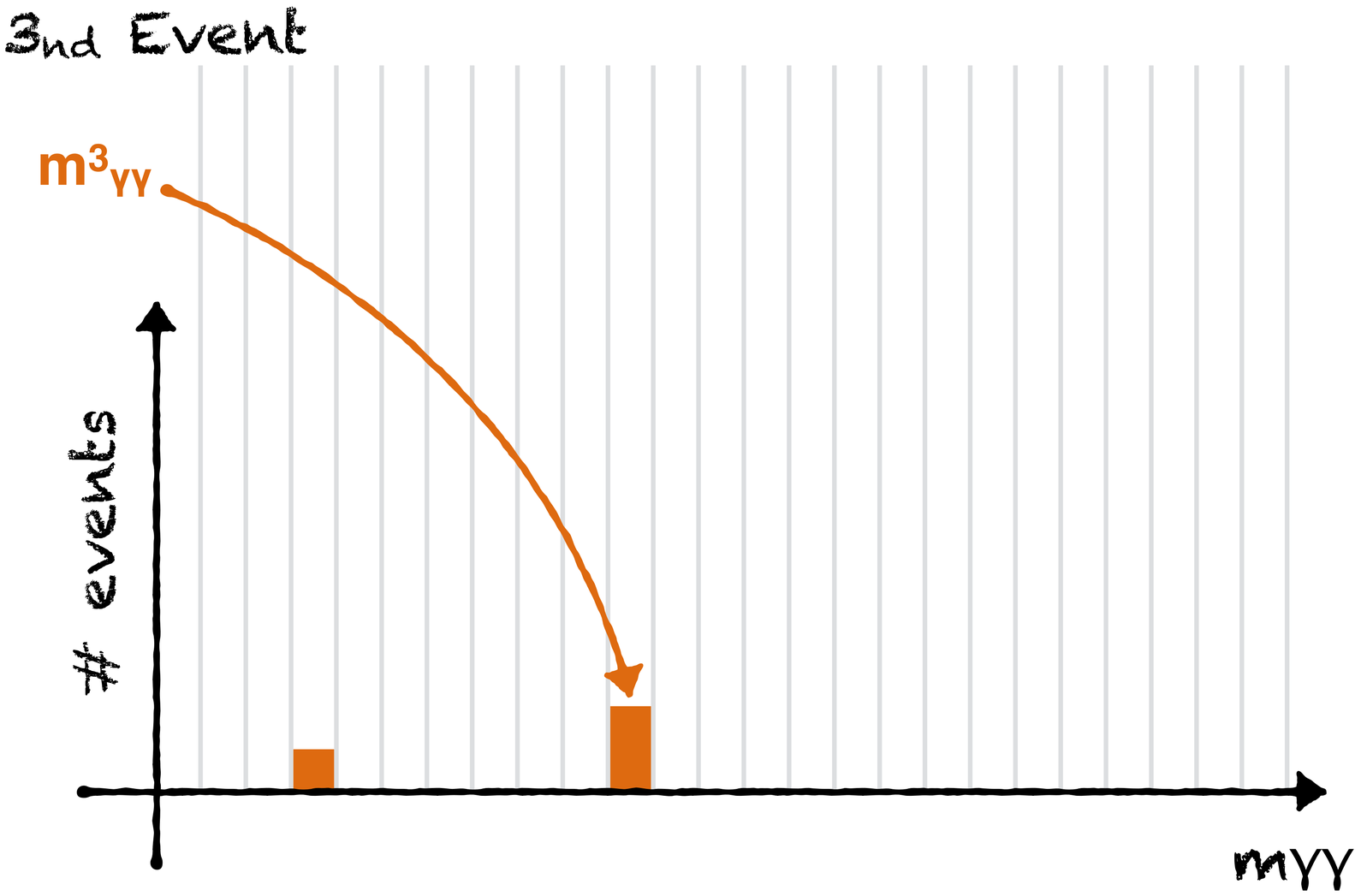
Riempire l'istogramma



Riempire l'istogramma

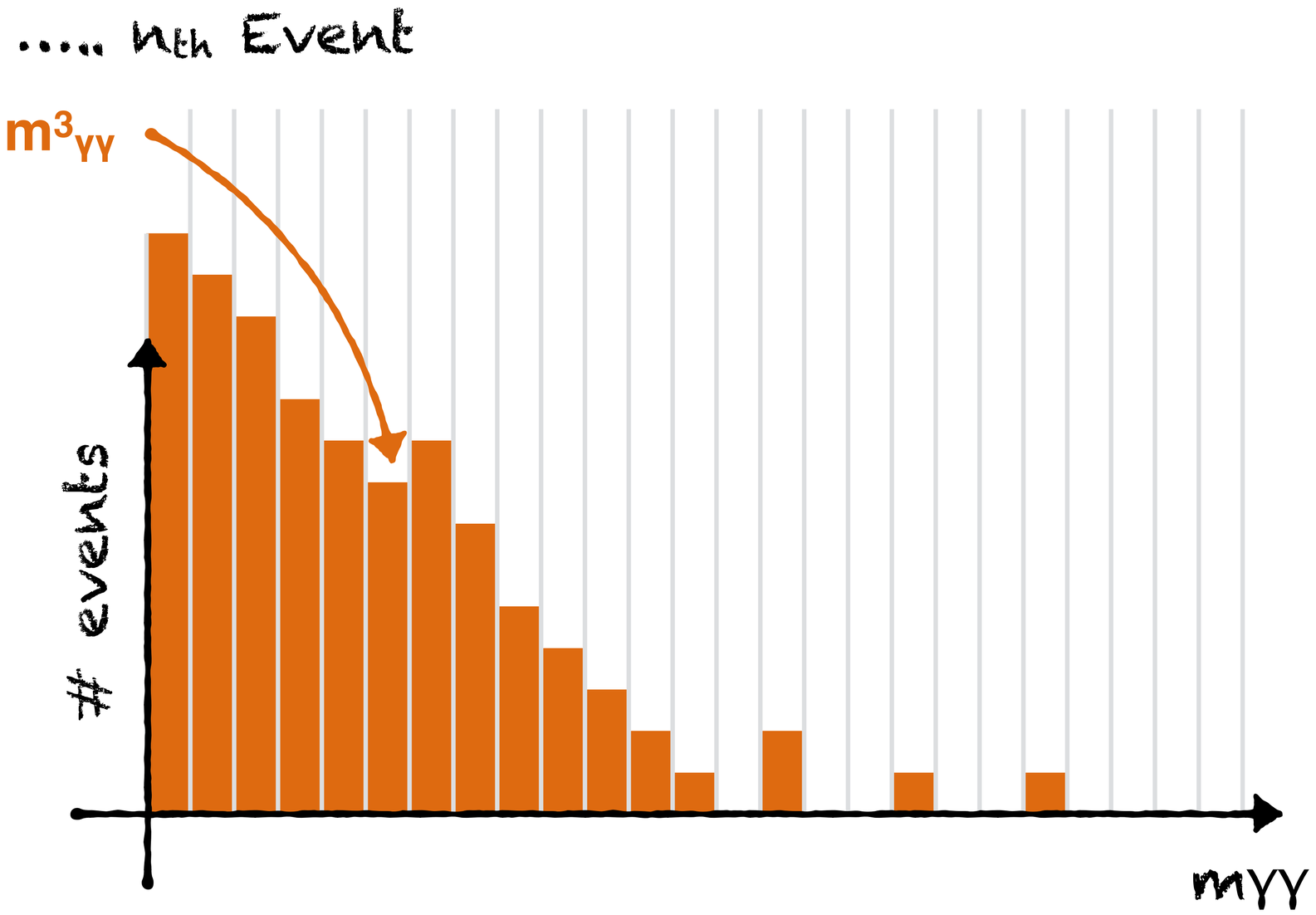


Riempire l'istogramma

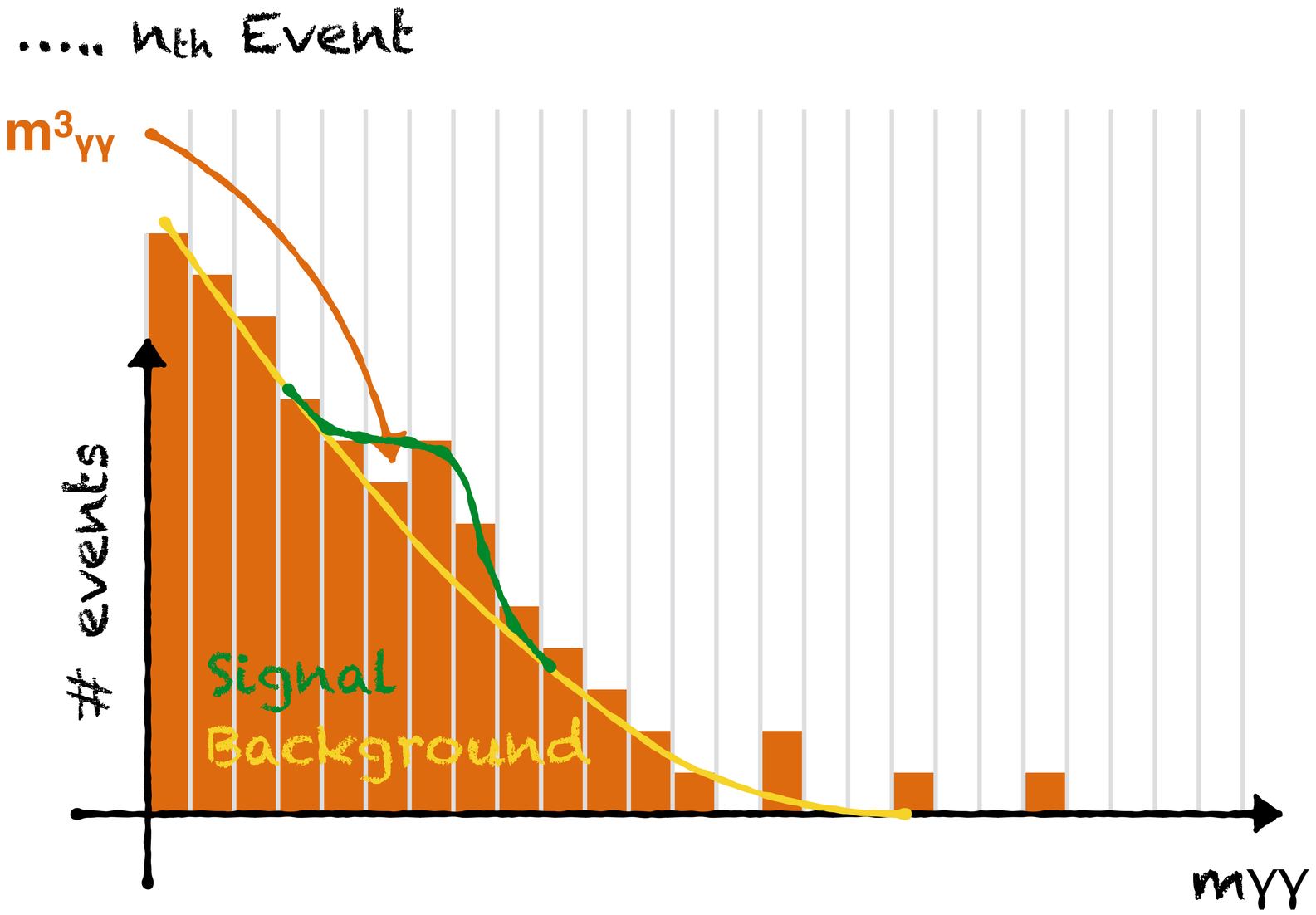


...

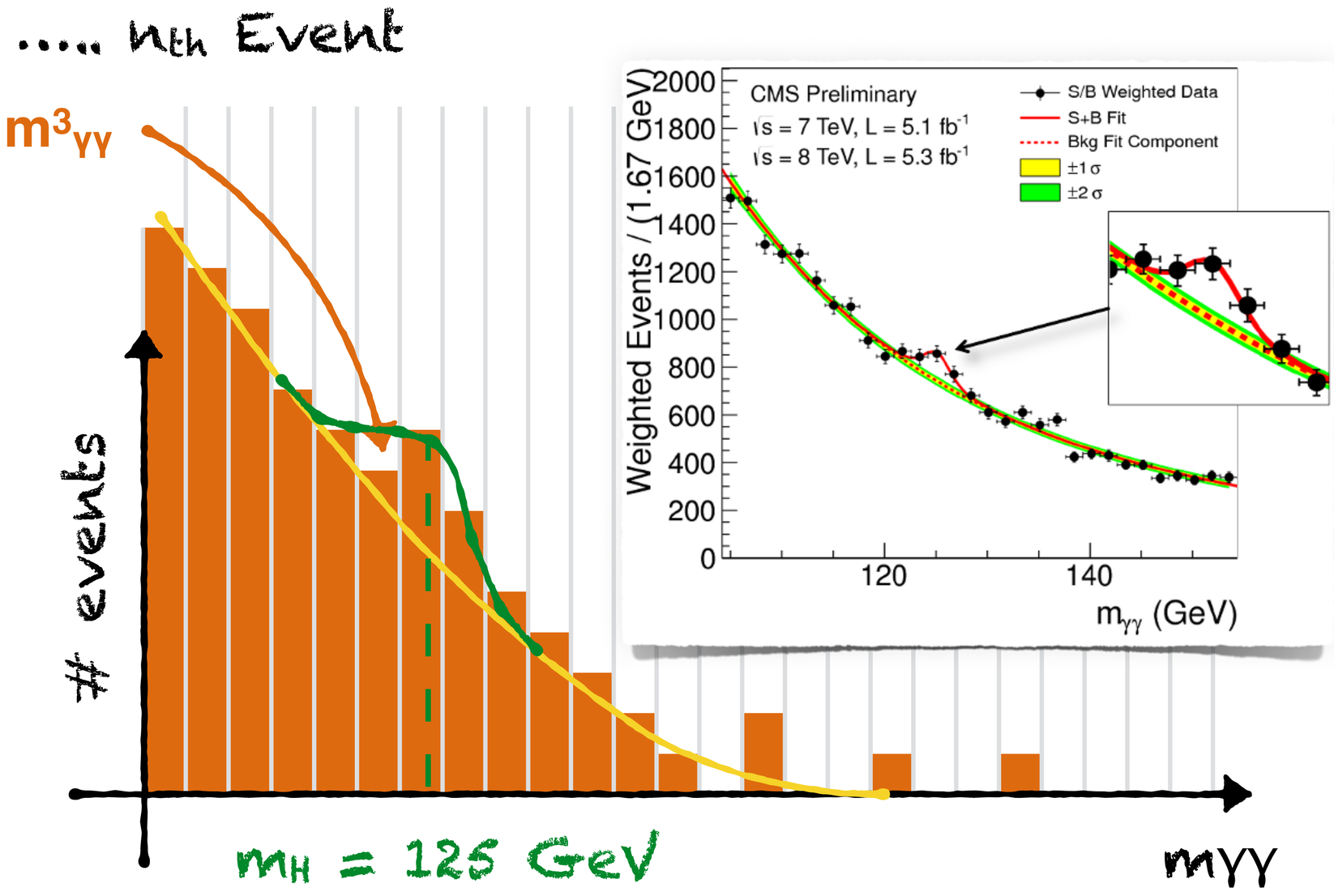
Riempire l'istogramma



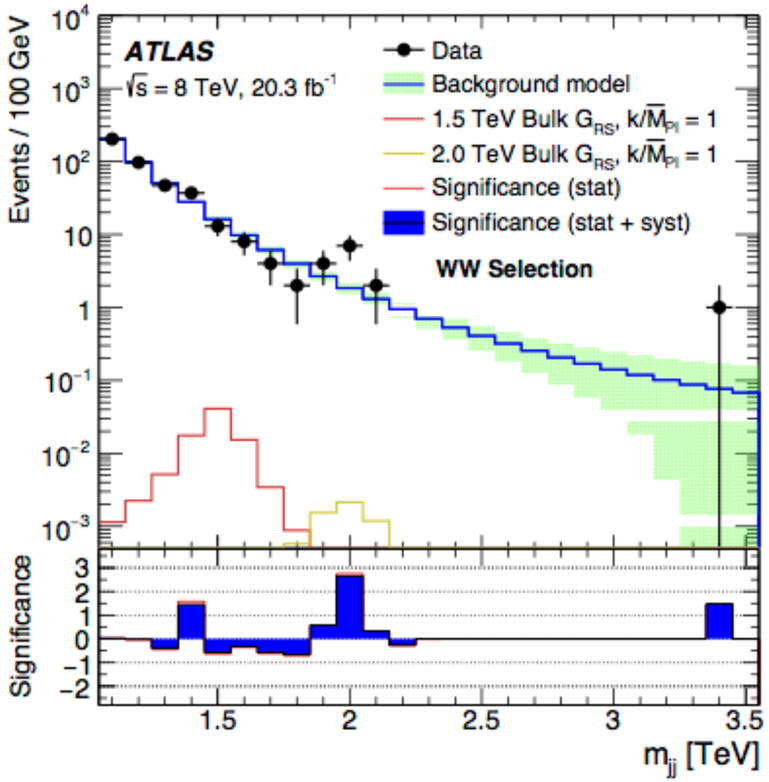
Fit dell'istogramma

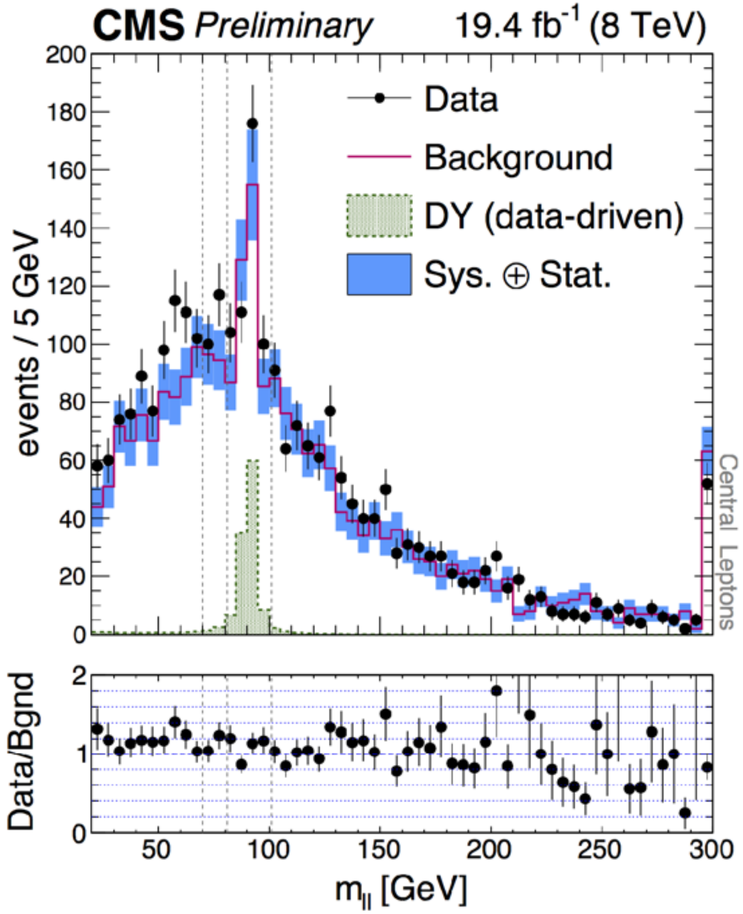


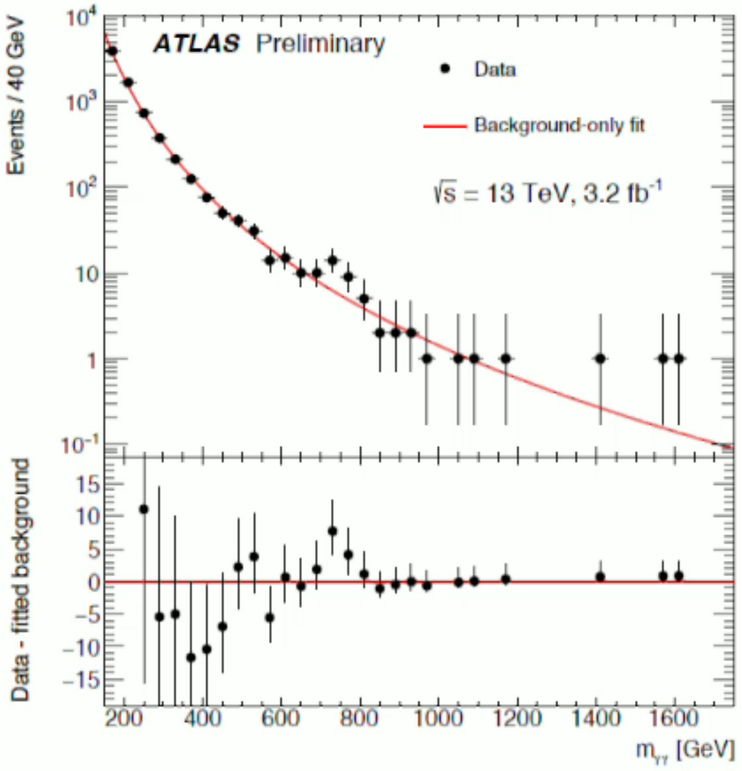
Fit dell'istogramma

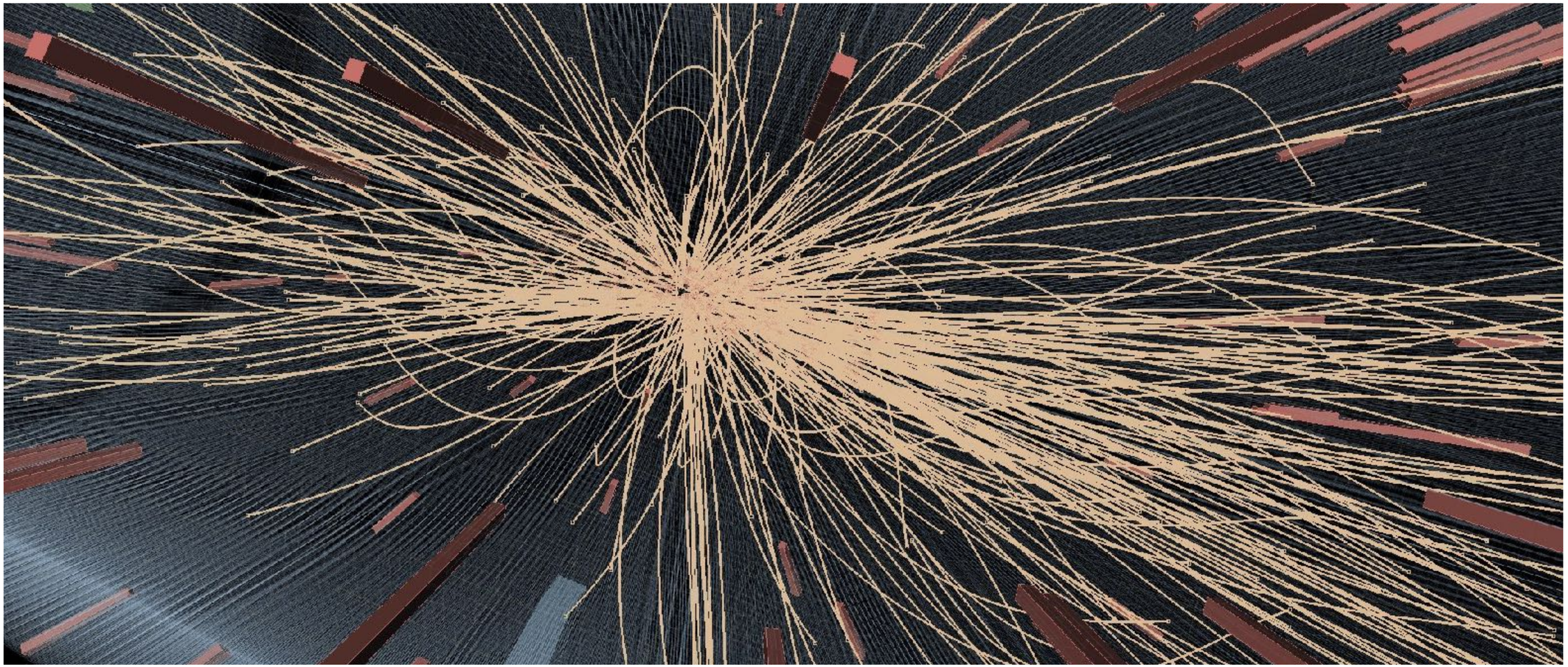


Non tutti i picchi sono scoperte





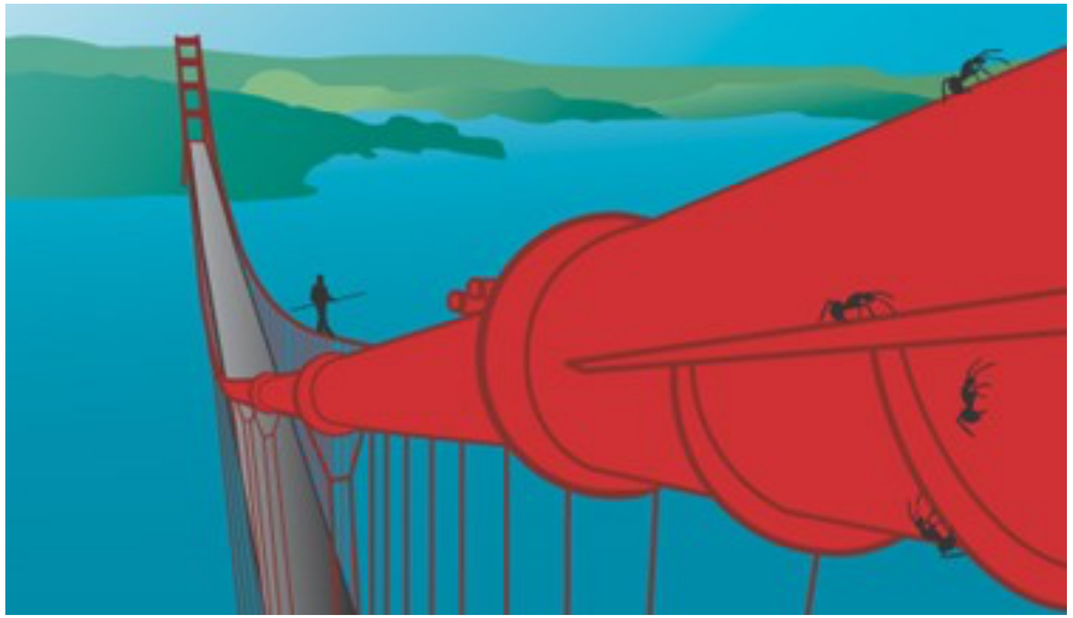


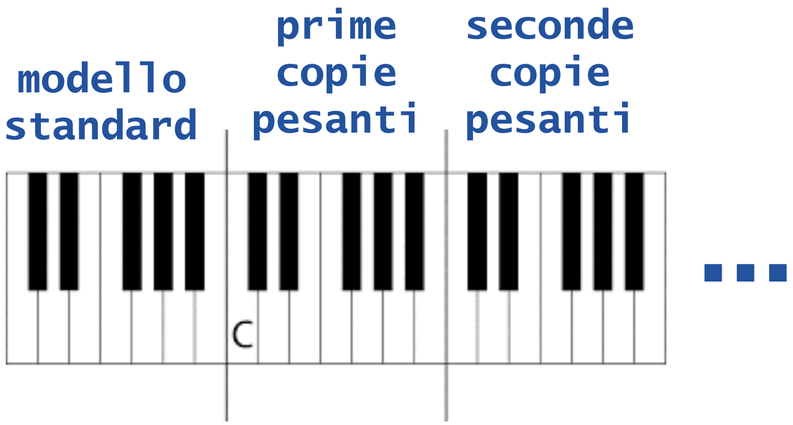


Nuove Particelle

Nuova Fisica = Nuove particelle

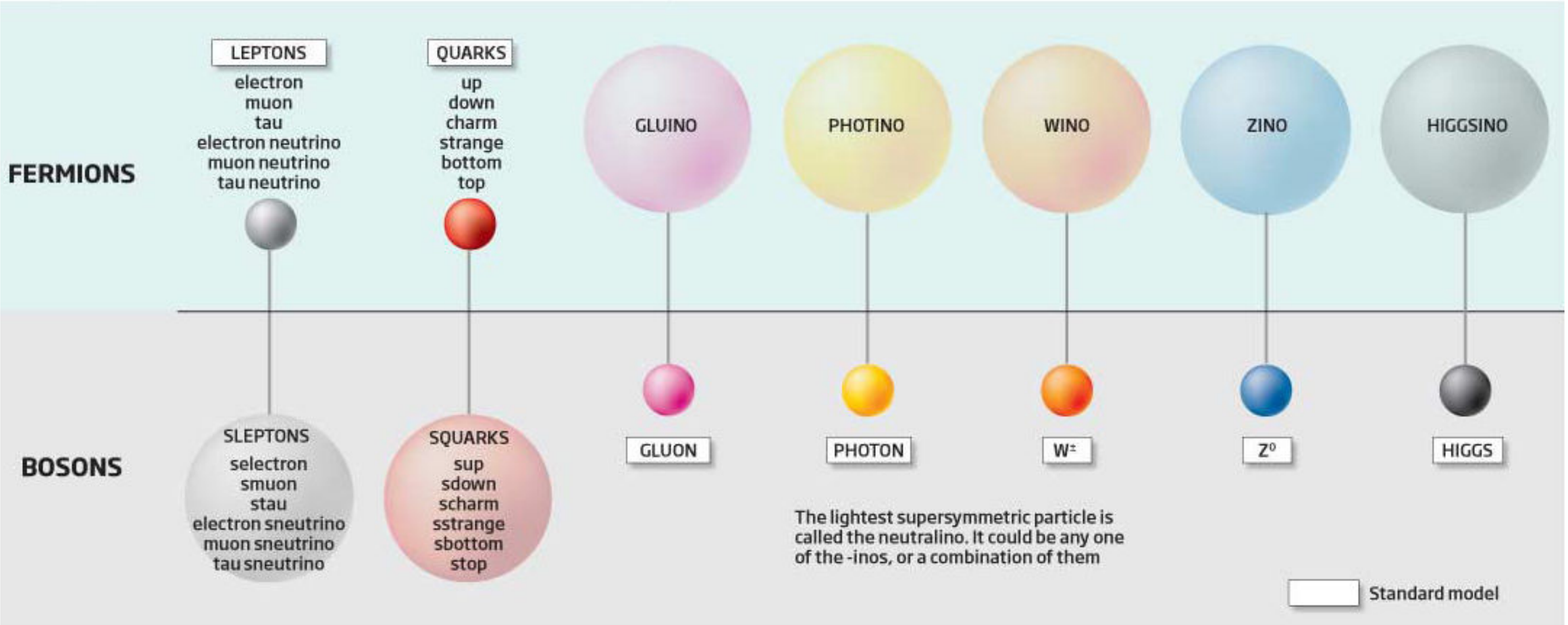
- *Molti modelli di nuova fisica prevedono copie delle particelle Standard Model*
  - *particelle analoghe ma di massa diversa*
  - *particelle con stesse interazioni ma diversa massa e spin*
- *In altri modelli, le particelle SM sono composte di oggetti fondamentali. Nuove particelle = altre combinazioni di questi oggetti fondamentali*





Nuova Fisica = Nuove particelle

- *Uno degli scenari piu' popolari e' la Supersimmetria*
  - *un bosone per ogni fermione, e viceversa*



Copie pesanti

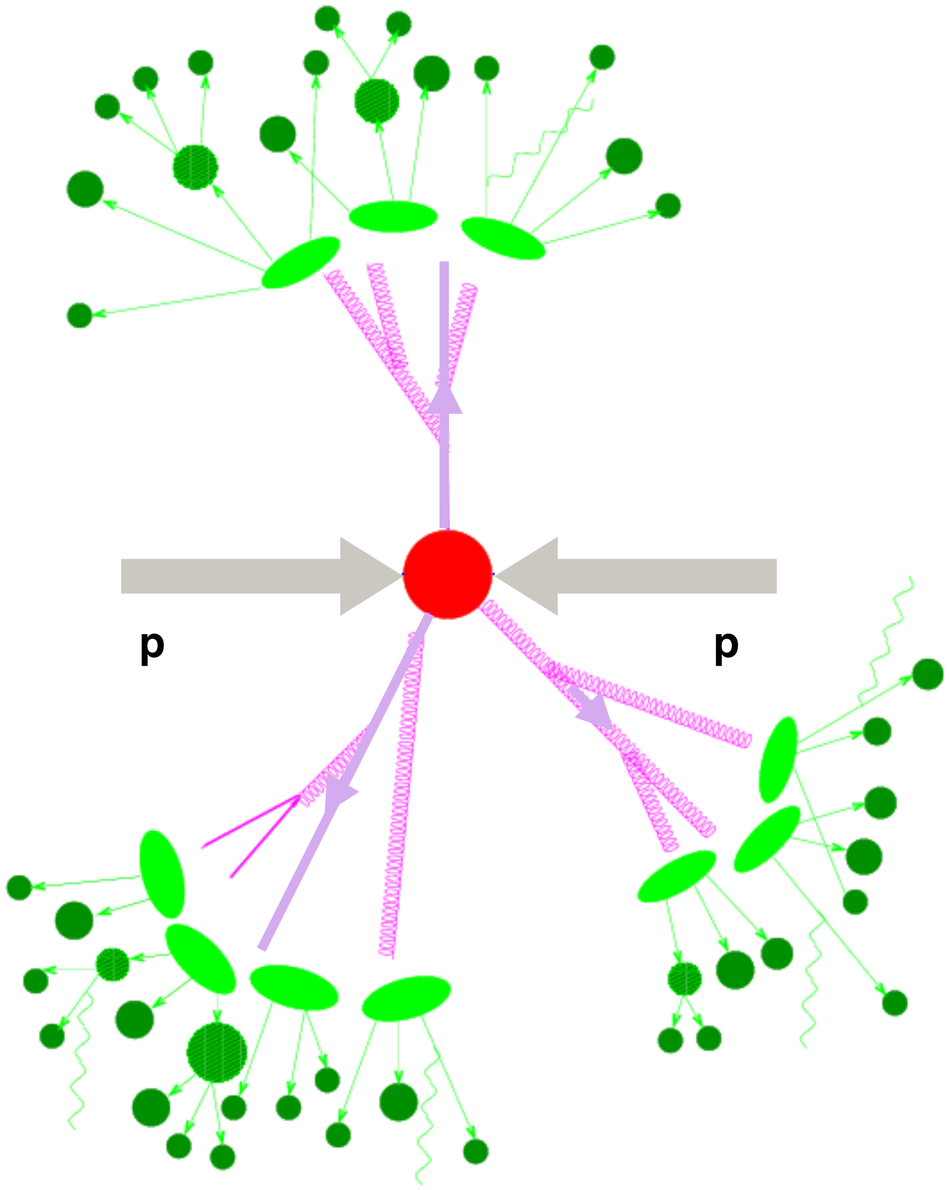
- *Fino ad ora, non abbiamo visto queste copie*
  - *devono essere più pesanti delle particelle note*
  - *quindi dovrebbero essere instabili e decadere nelle particelle conosciute …*
    - *ESEMPIO: X→ee, X→ZZ*
  - *… non necessariamente rispettando le leggi note*
    - *ESEMPIO: X→eμ*
  - *… o decadere in particelle sconosciute*
    - *ESEMPIO: gluino → gluone + materia oscura*
  - *Particelle di questo tipo possono essere cercate all'LHC*

Digressione

{

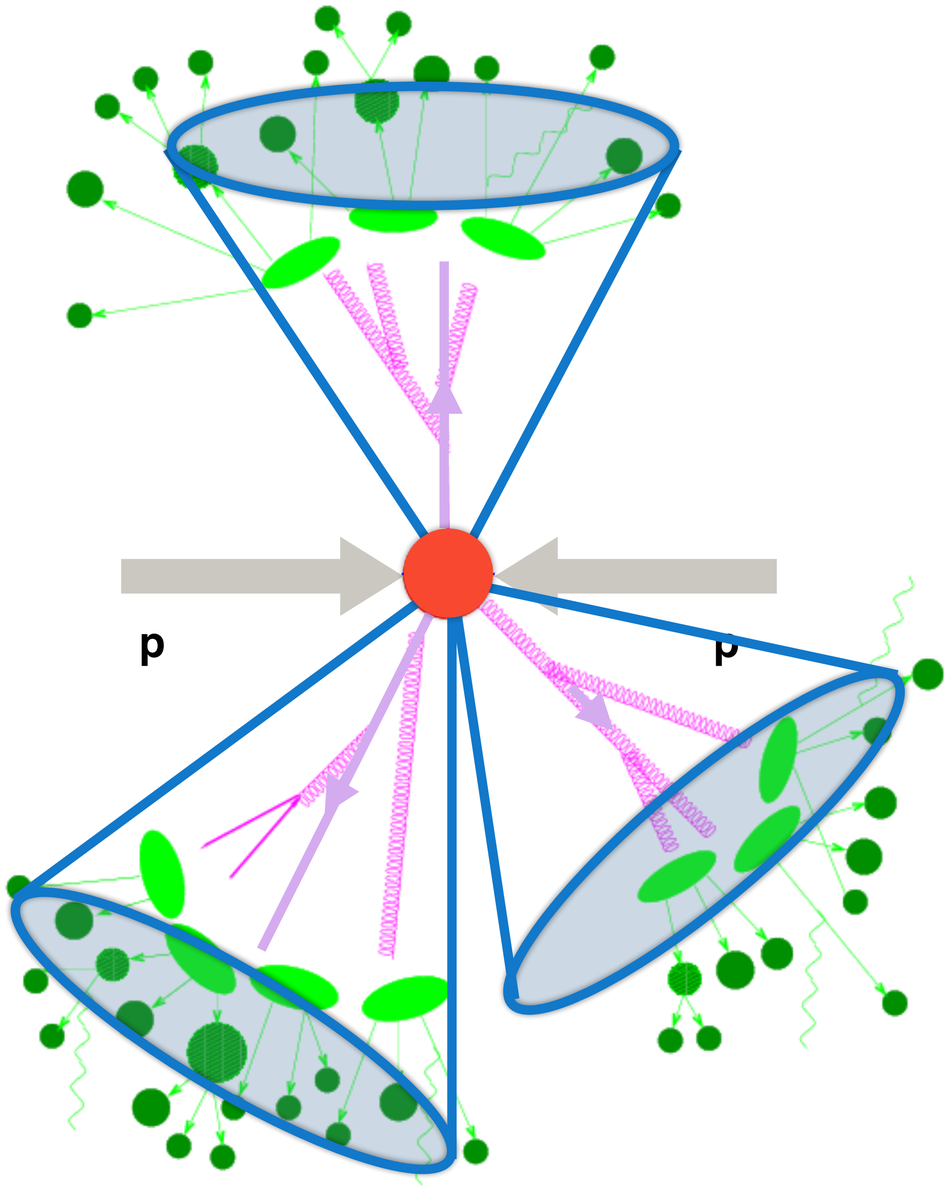
I Jet

- *Quark e gluons portano carica forte (il "colore")*
- *In natura non esistono particelle colorate*
  - *i quark e i gluons si legano ad altre particelle colorate per formare particelle composte e neutre*
    - *ESEMPI:* $u_G u_R d_B$ *= protone* $u_R \bar{u}_R$ *= mesone* π
- *I quark e i gluons formati all'LHC emettono radiazione per poi ricombinarsi a formare particelle "bianche"*
- *Il risultato sono i jet*

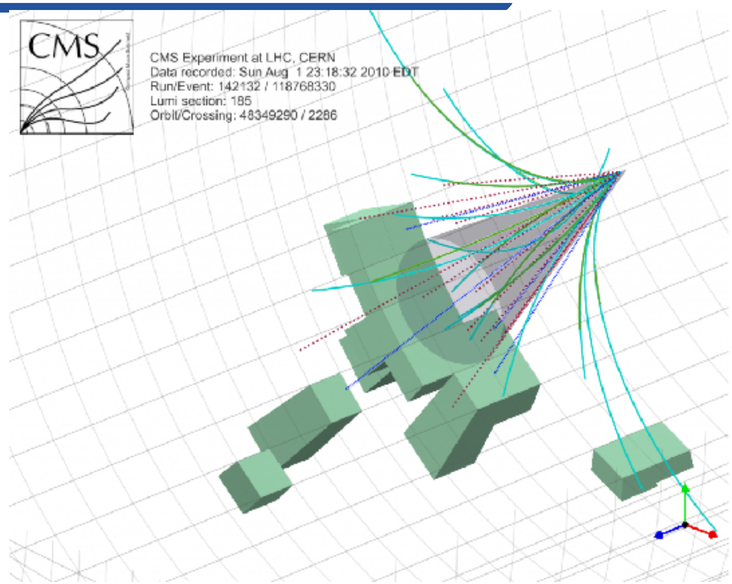


I Jet

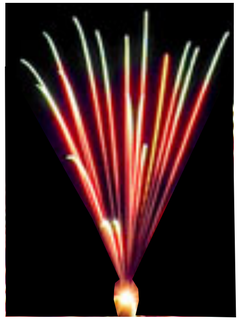
- *Quark e gluons portano carica forte (il "colore")*
- *In natura non esistono particelle colorate*
  - *i quark e i gluons si legano ad altre particelle colorate per formare particelle composte e neutre*
    - *ESEMPI:* $u_G u_R d_B$ *= protone* $u_R \bar{u}_R$ *= mesone* π
- *I quark e i gluons formati all'LHC emettono radiazione per poi ricombinarsi a formare particelle "bianche"*
- *Il risultato sono i jet*



Jet di Jet

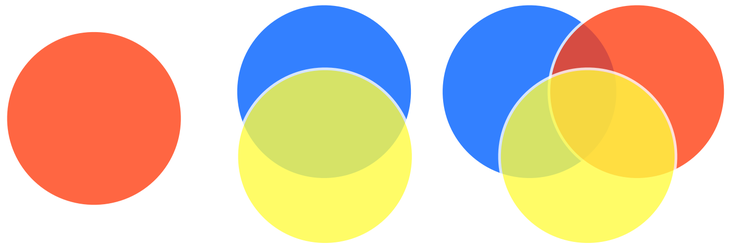


- All'LHC, l'energia delle particelle e' cosi' alta da generare nuovi tipi di jet
  - jet fatti da bosone W, Z, H o da quark top molto energetici
  - Queste particelle decadono in jet
  - ricevendo una forte spinta nella collisione, i jet prodotti finiscono per sovrapporsi
- Questi jet speciali possono essere identificati guardando alle loro caratteristiche peculiari
  - alta massa
  - molte piu' particelle all'interno,
  - etc

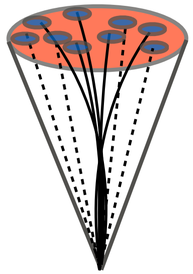


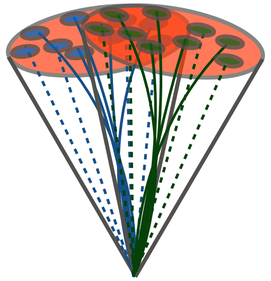
Spinta in avanti = collimazione

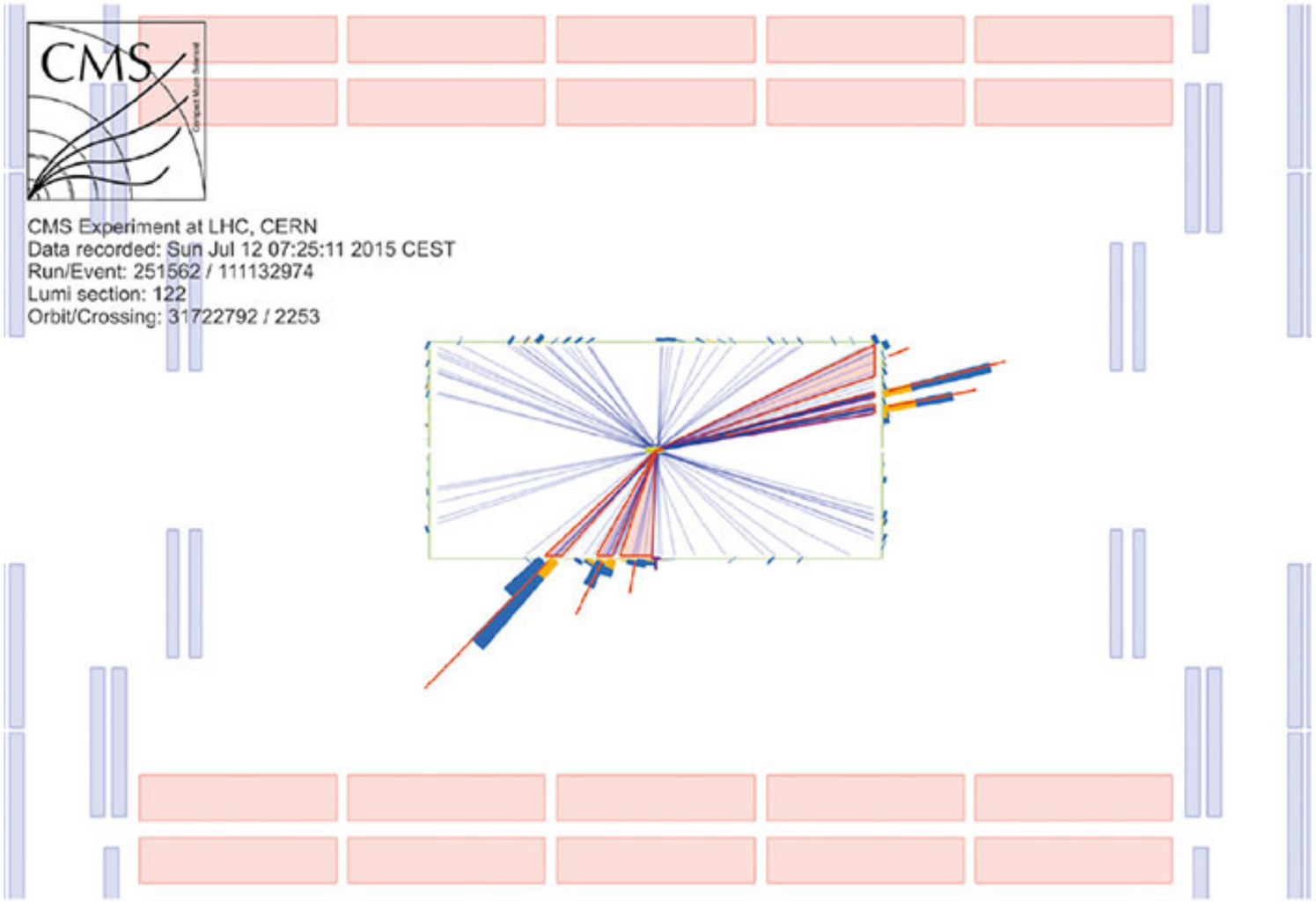
Jet di Jet



q, g *W,Z,H* *top*

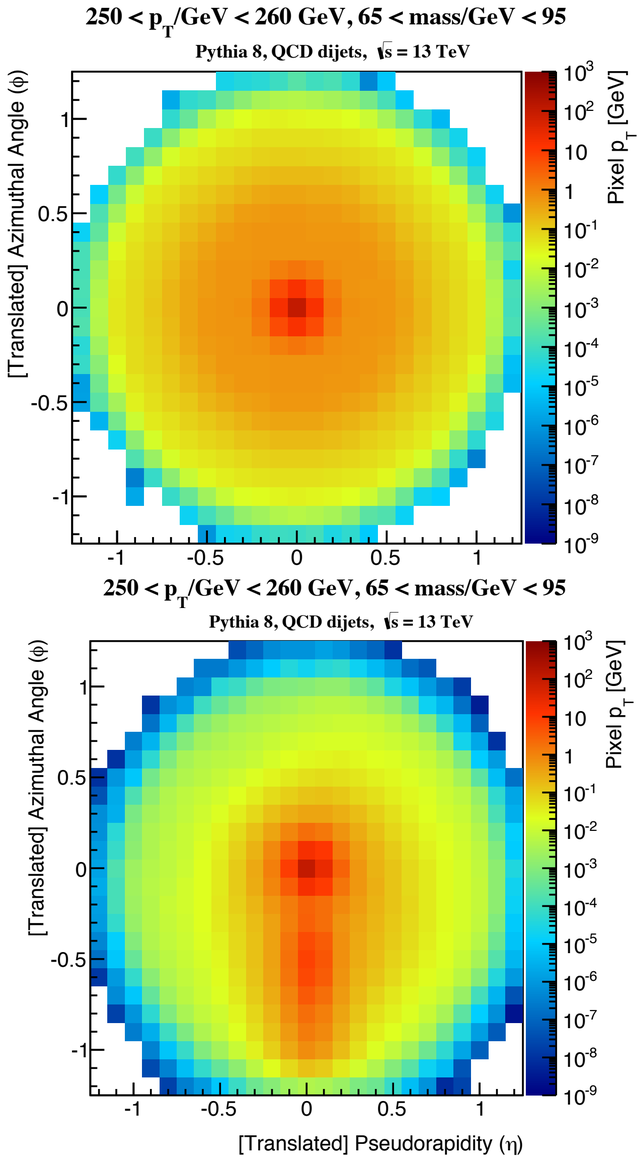






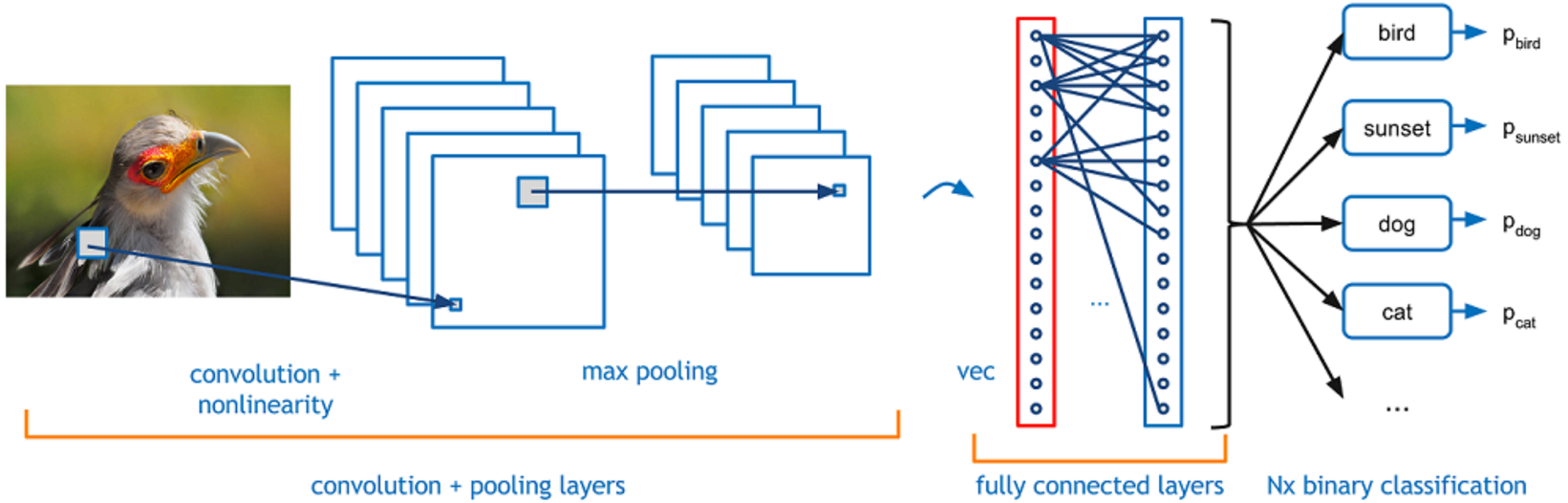
Identificare jet pesanti

- *L'identificazione dei jet viene fatta con criteri ad-hoc basati su caratteristiche fisiche*
- *Ma in pratica l'informazione e' tutta nell'immagine del jet*
- *Recentemente, tecniche usate per computer vision e Artificial Intelligence (Deep Learning con Convolution Neural Networks) introdotte in questo settore*
- *Miglioramento delle performance provato in linea di principio & molti progressi attesi in futuro*



Convolution NNs

- *Le Con. NN sono (in un certo senso) ispirate al funzionamento dell'occhio umano*



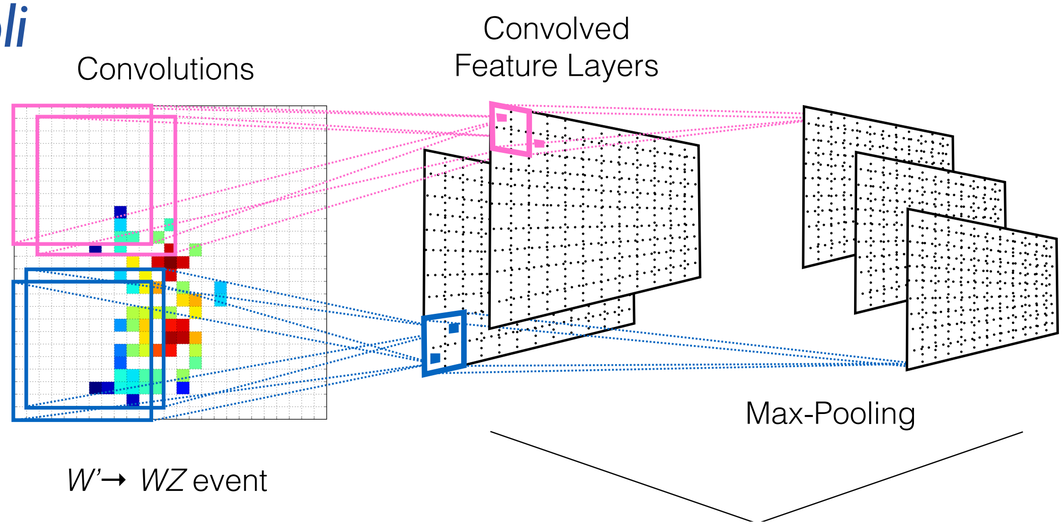
- *Immagine viene processata a zone*
- *L'informazione viene poi riunita in una rete neurale tradizionale*
- *Tecnica usata per riconoscere immagini e associarle un testo*
- *Tecnologia usata dai motori di ricerca moderni (google etc), automobili autonome, etc*

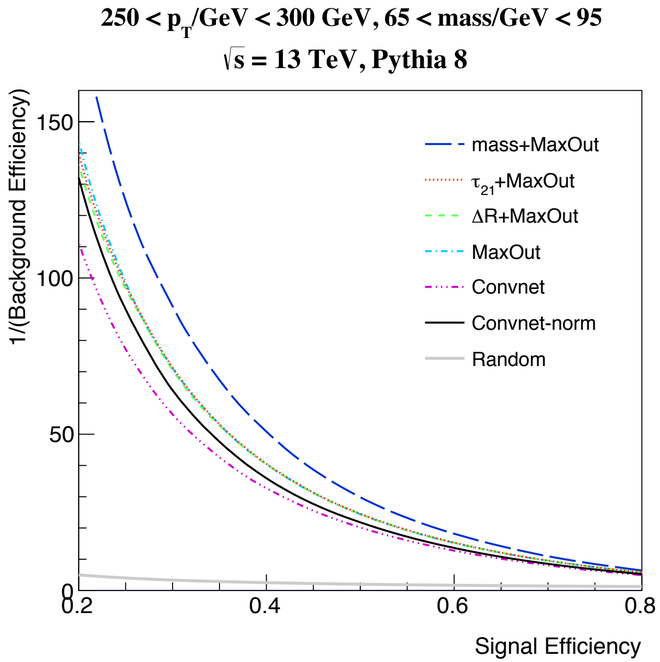
Convolution Jets

- *L'applicazione ai jet di LHC mostra progressi notevoli rispetto a tecniche piu' tradizionali*

- *Vantaggi:*
  - *non serve un background di fisica per risolvere problemi complessi*
  - *software pubblico e facile da apprendere*

- *Svantaggi*
  - *l'automatizzazione porta ad una comprensione meno profonda dei problemi (che non e' necessariamente un male per problemi più "tecnici")*



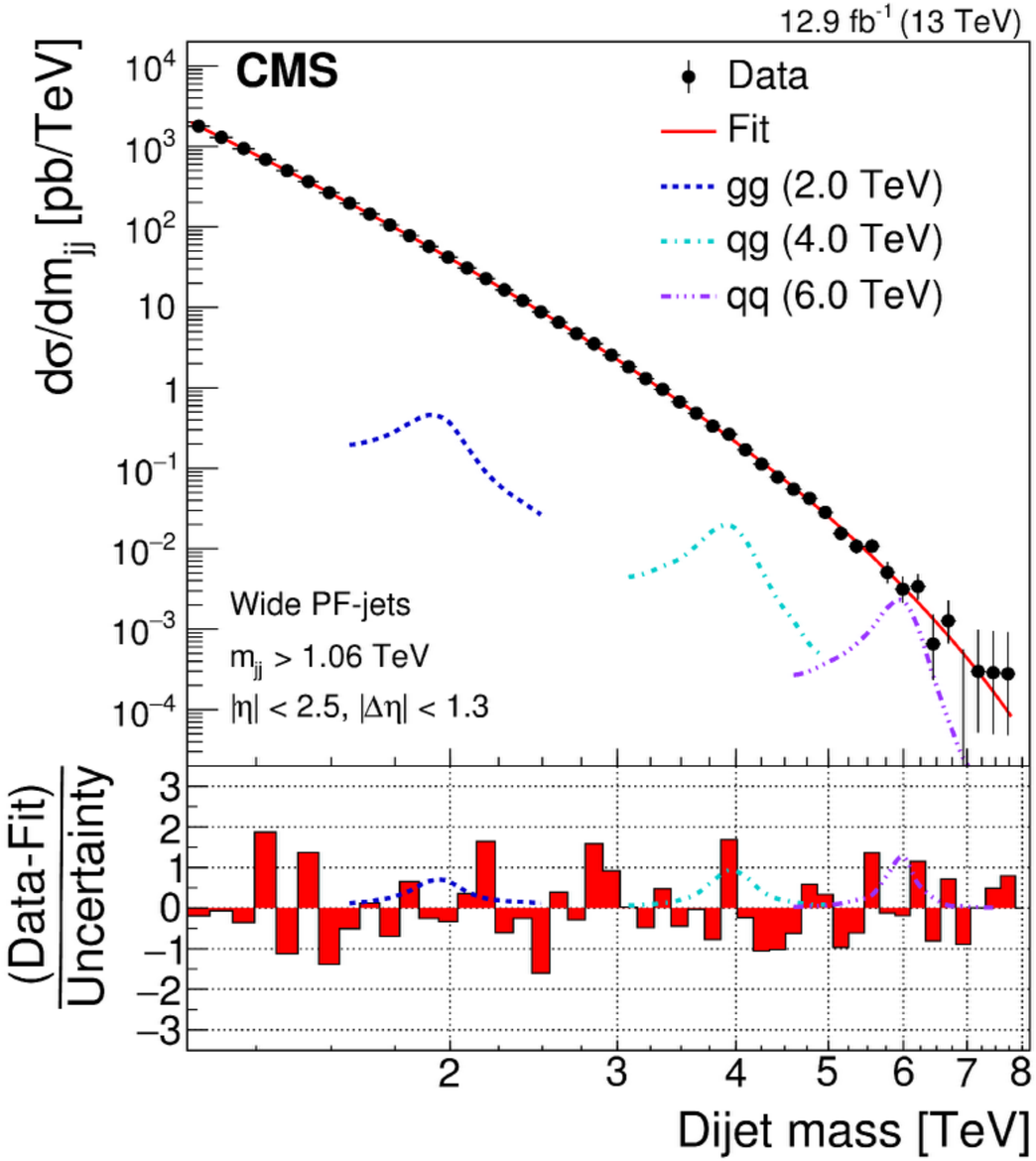


Digressione

}

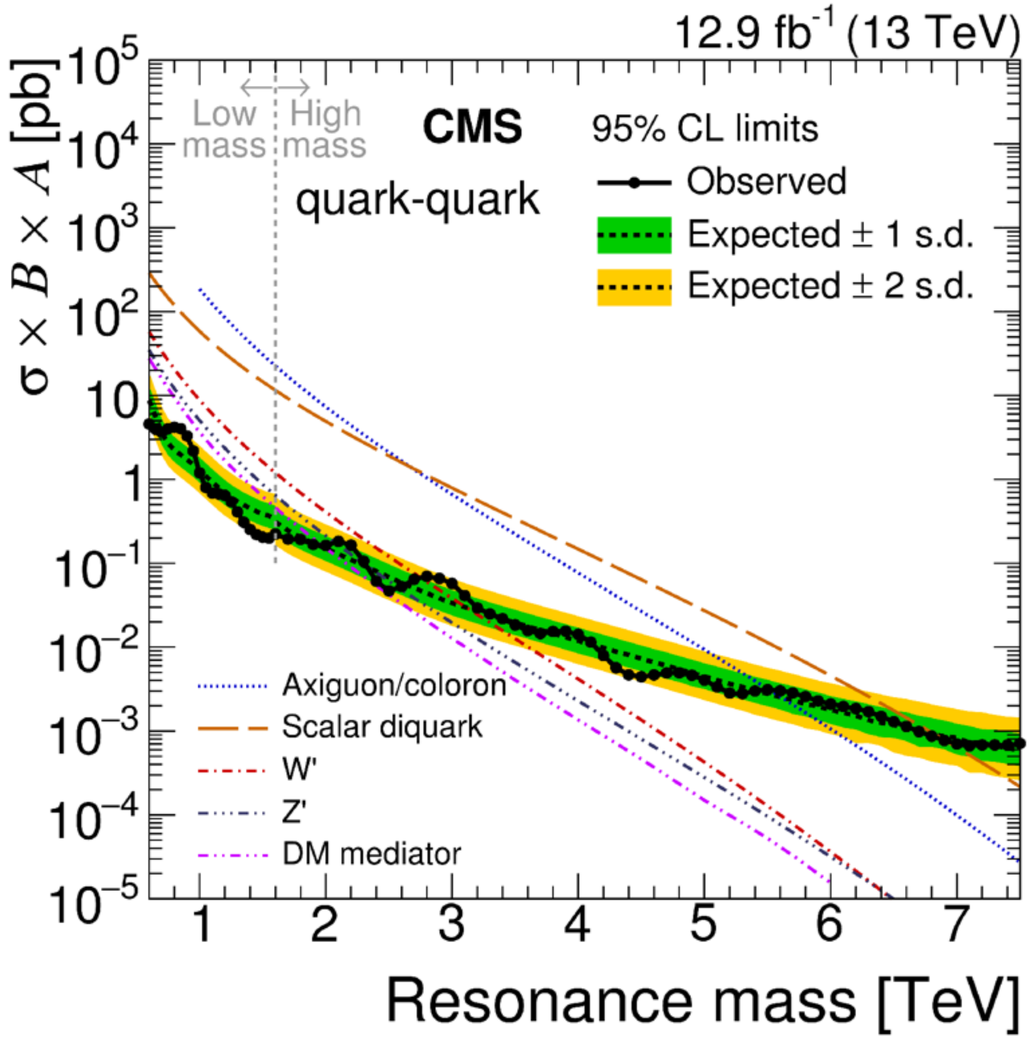
Limiti di esclusione

- *L'entità di un segnale dipende dalla probabilità' di produrre una data particella*
  - *intensità dei fasci (luminosità)*
  - *sezione d'urto*
- *In assenza di una osservazione, ogni segnale con grande sezione d'urto viene escluso (perché, se vero) sarebbe stato visto)*
- *Questo e' il limite di esclusione*

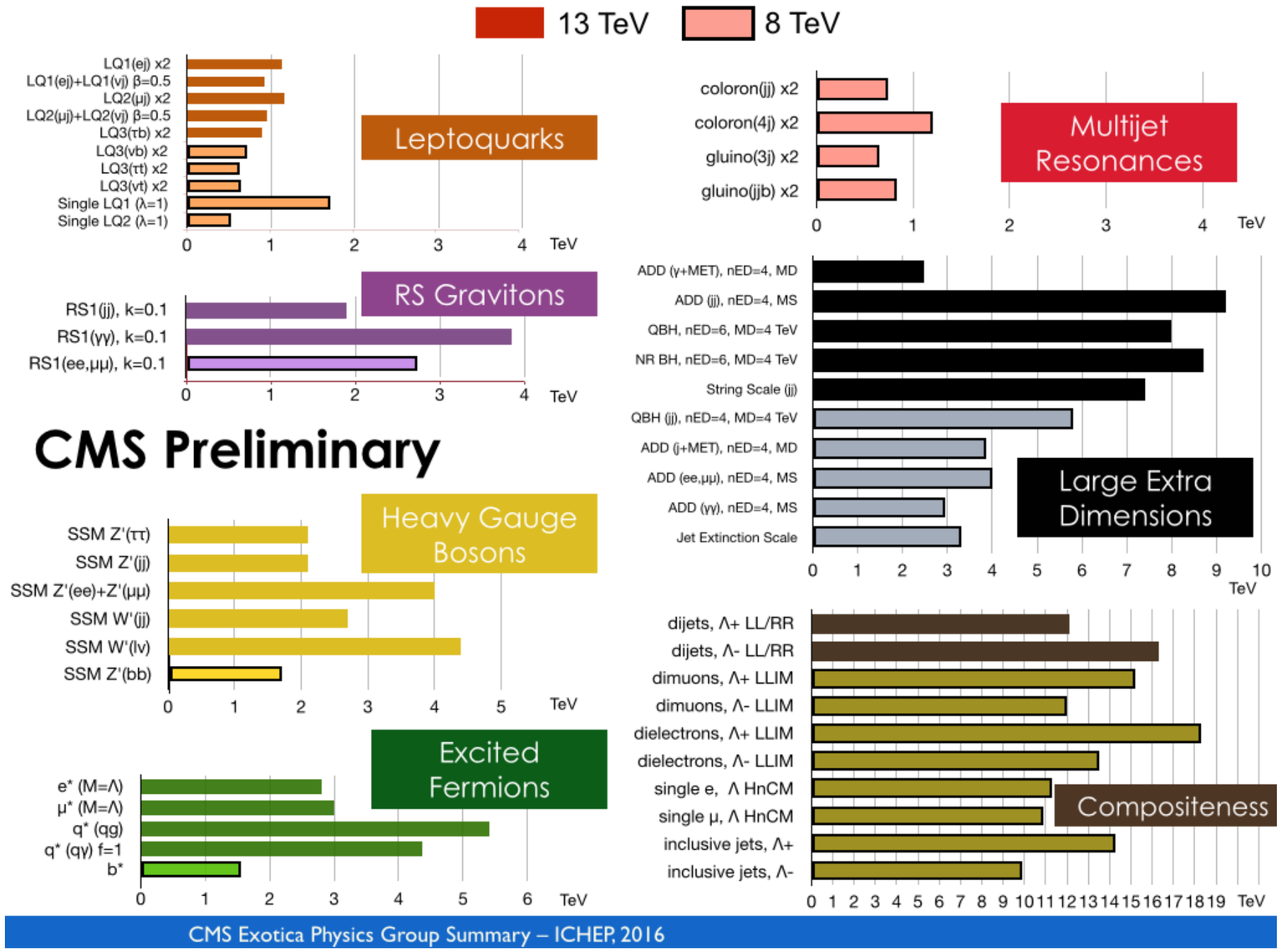


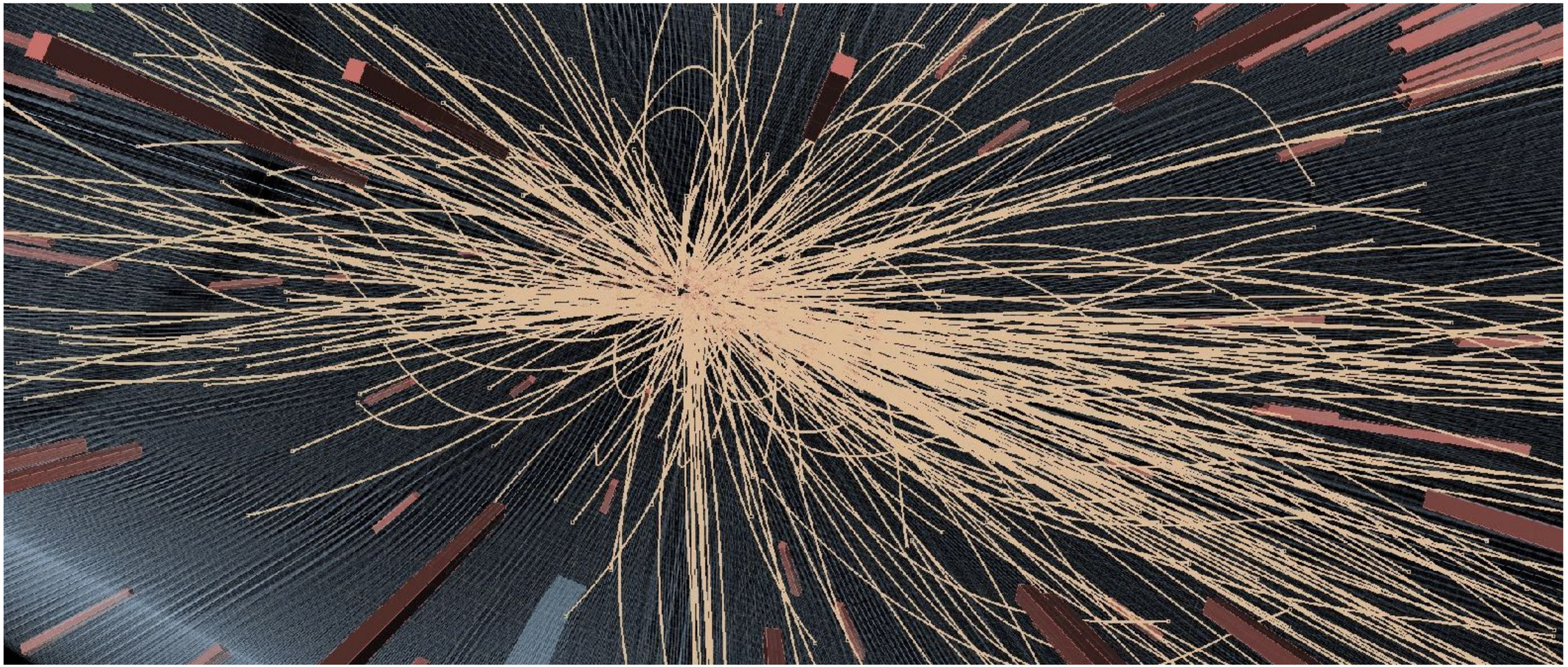
Limiti di esclusione

- *L'entità di un segnale dipende dalla probabilità' di produrre una data particella*
  - *intensità dei fasci (luminosità)*
  - *sezione d'urto*
- *In assenza di una osservazione, ogni segnale con grande sezione d'urto viene escluso (perché, se vero) sarebbe stato visto)*
- *Questo e' il limite di esclusione*



Risultati

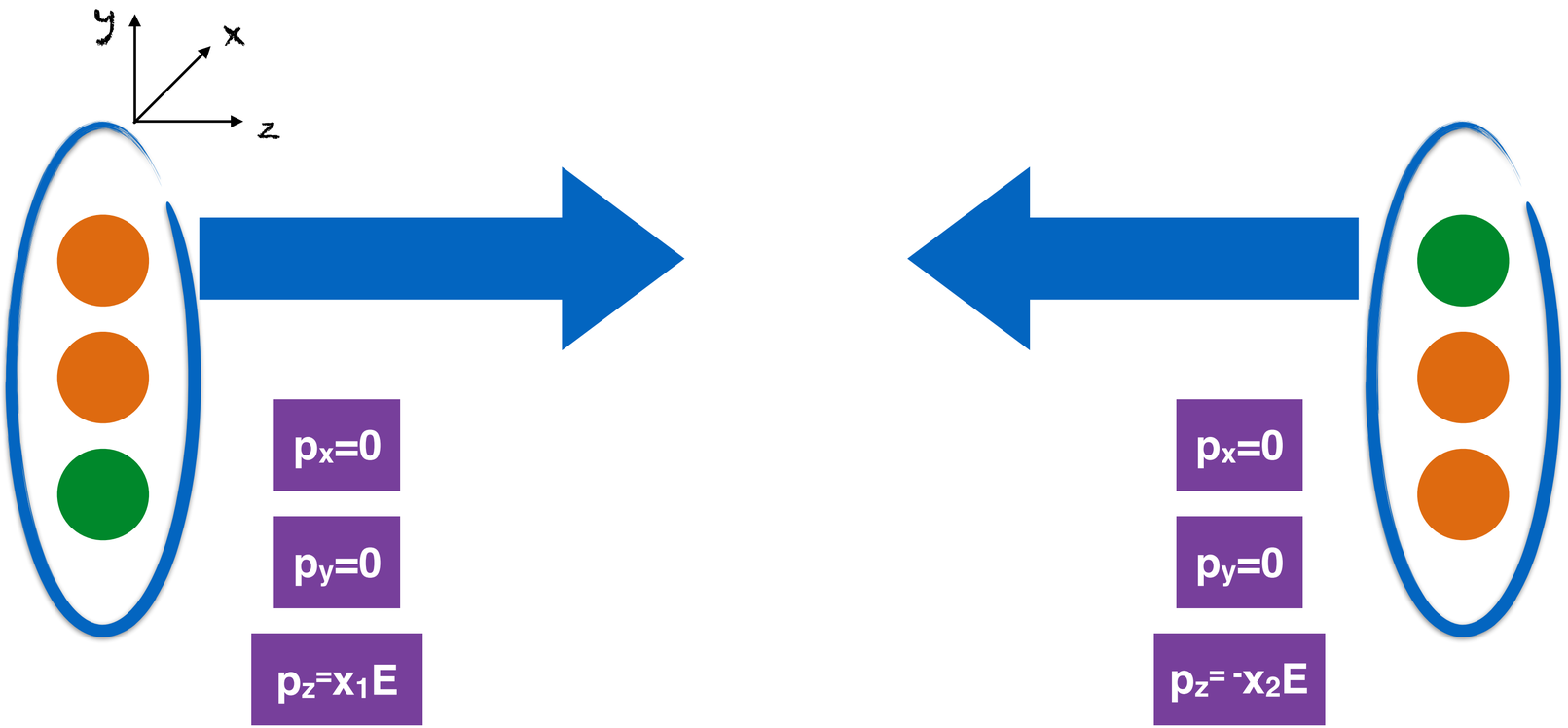

13 TeV
8 TeV
Leptoquarks
LQ1(ej) x2
LQ1(ej)+LQ1(vj) β=0.5
LQ2(μj) x2
LQ2(μj)+LQ2(vj) β=0.5
LQ3(τb) x2
LQ3(vb) x2
LQ3(τt) x2
LQ3(vt) x2
Single LQ1 (λ=1)
Single LQ2 (λ=1)
0 1 2 3 4 TeV
Multijet Resonances
coloron(jj) x2
coloron(4j) x2
gluino(3j) x2
gluino(jjb) x2
0 1 2 3 4 TeV
RS Gravitons
RS1(jj), k=0.1
RS1(γγ), k=0.1
RS1(ee,μμ), k=0.1
0 1 2 3 4 TeV
Large Extra Dimensions
ADD (γ+MET), nED=4, MD
ADD (jj), nED=4, MS
QBH, nED=6, MD=4 TeV
NR BH, nED=6, MD=4 TeV
String Scale (jj)
QBH (jj), nED=4, MD=4 TeV
ADD (j+MET), nED=4, MD
ADD (ee,μμ), nED=4, MS
ADD (γγ), nED=4, MS
Jet Extinction Scale
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 TeV
CMS Preliminary
Heavy Gauge Bosons
SSM Z'(ττ)
SSM Z'(jj)
SSM Z'(ee)+Z'(μμ)
SSM W'(jj)
SSM W'(lv)
SSM Z'(bb)
0 1 2 3 4 5 TeV
Excited Fermions
e* (M=Λ)
μ* (M=Λ)
q* (qg)
q* (qγ) f=1
b*
0 1 2 3 4 5 6 TeV
Compositeness
dijets, Λ+ LL/RR
dijets, Λ- LL/RR
dimuons, Λ+ LLIM
dimuons, Λ- LLIM
dielectrons, Λ+ LLIM
dielectrons, Λ- LLIM
single e, Λ HnCM
single μ, Λ HnCM
inclusive jets, Λ+
inclusive jets, Λ-
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 TeV
CMS Exotica Physics Group Summary – ICHEP, 2016



Come vedere le particelle Invisibili

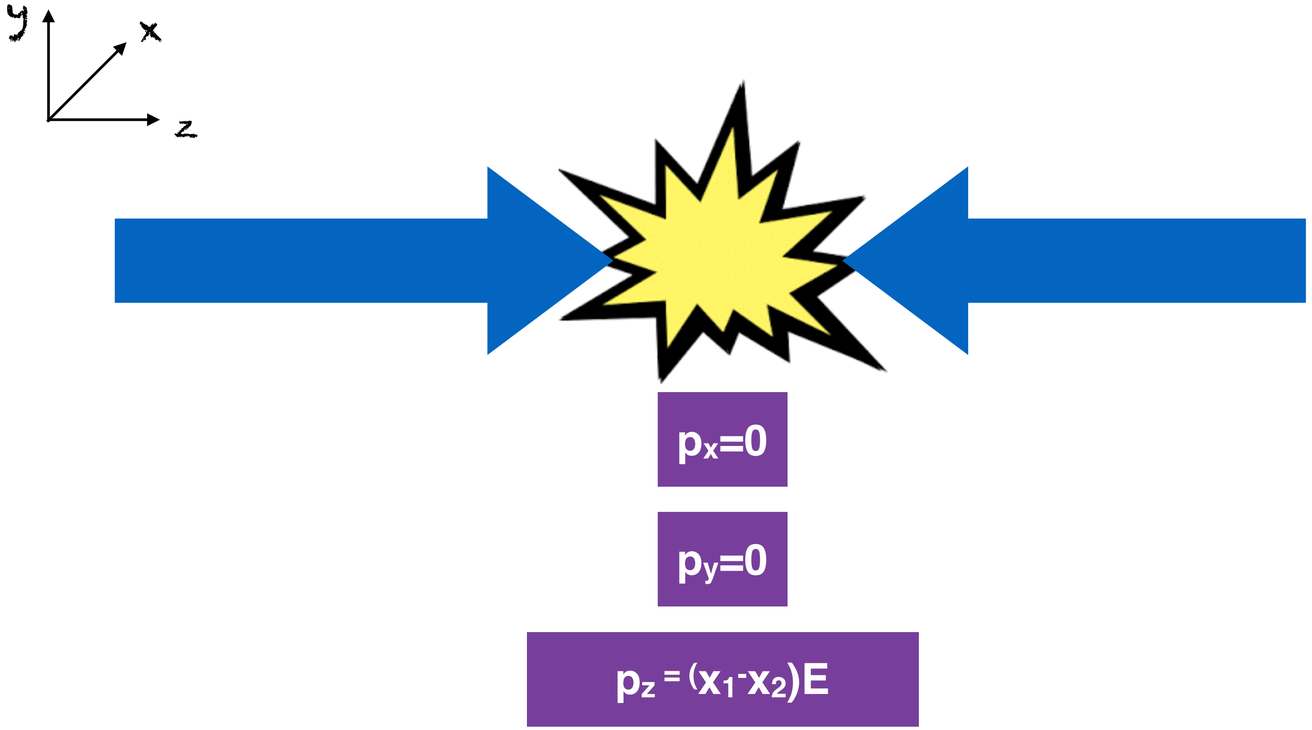
Collisione all'LHC

- *We cannot see Dark Matter*
- *But we can make it*
- *We can observe Dark Matter indirectly, using energy/momentum conservation*



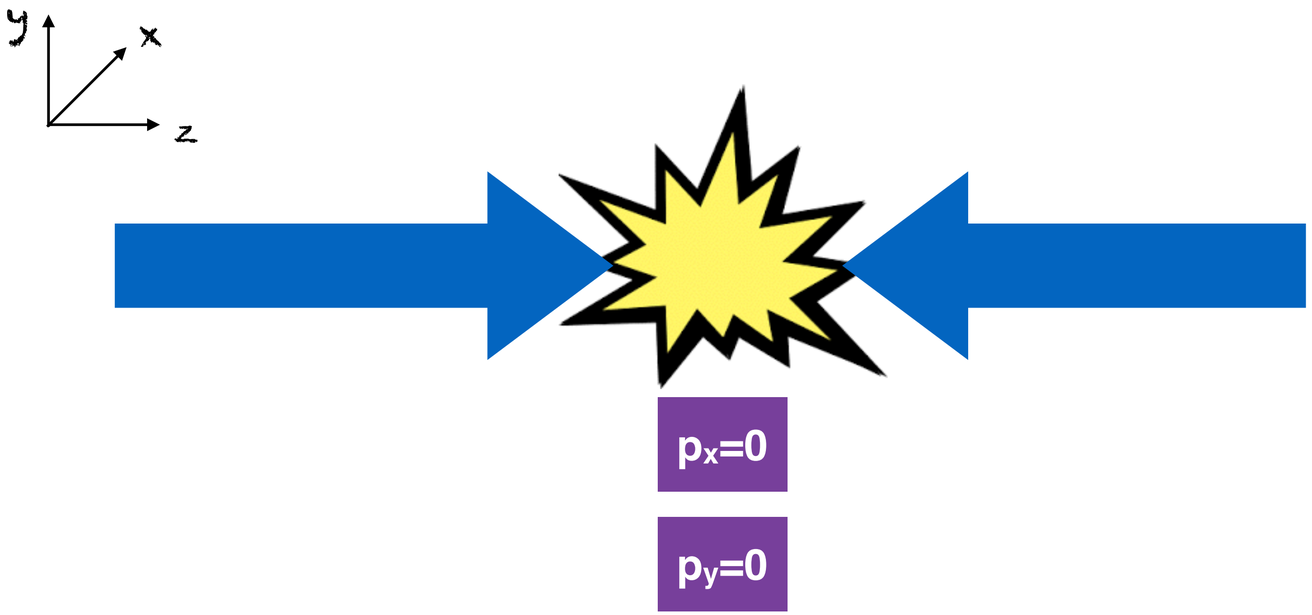
Collisione all'LHC

- *We cannot see Dark Matter*
- *But we can make it*
- *We can observe Dark Matter indirectly, using energy/momentum conservation*



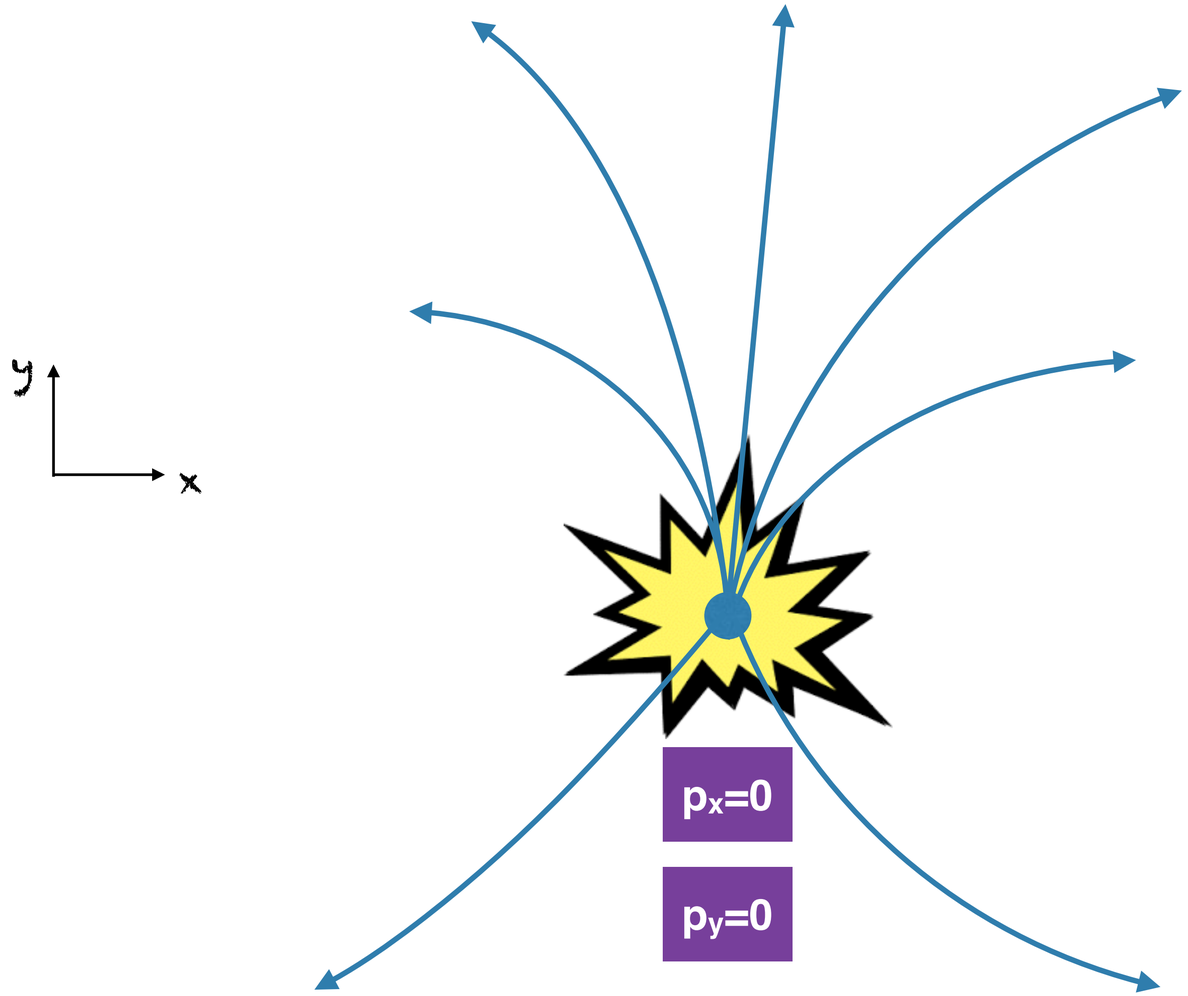
Collisione all'LHC

- *We cannot see Dark Matter*
- *But we can make it*
- *We can observe Dark Matter indirectly, using energy/momentum conservation*



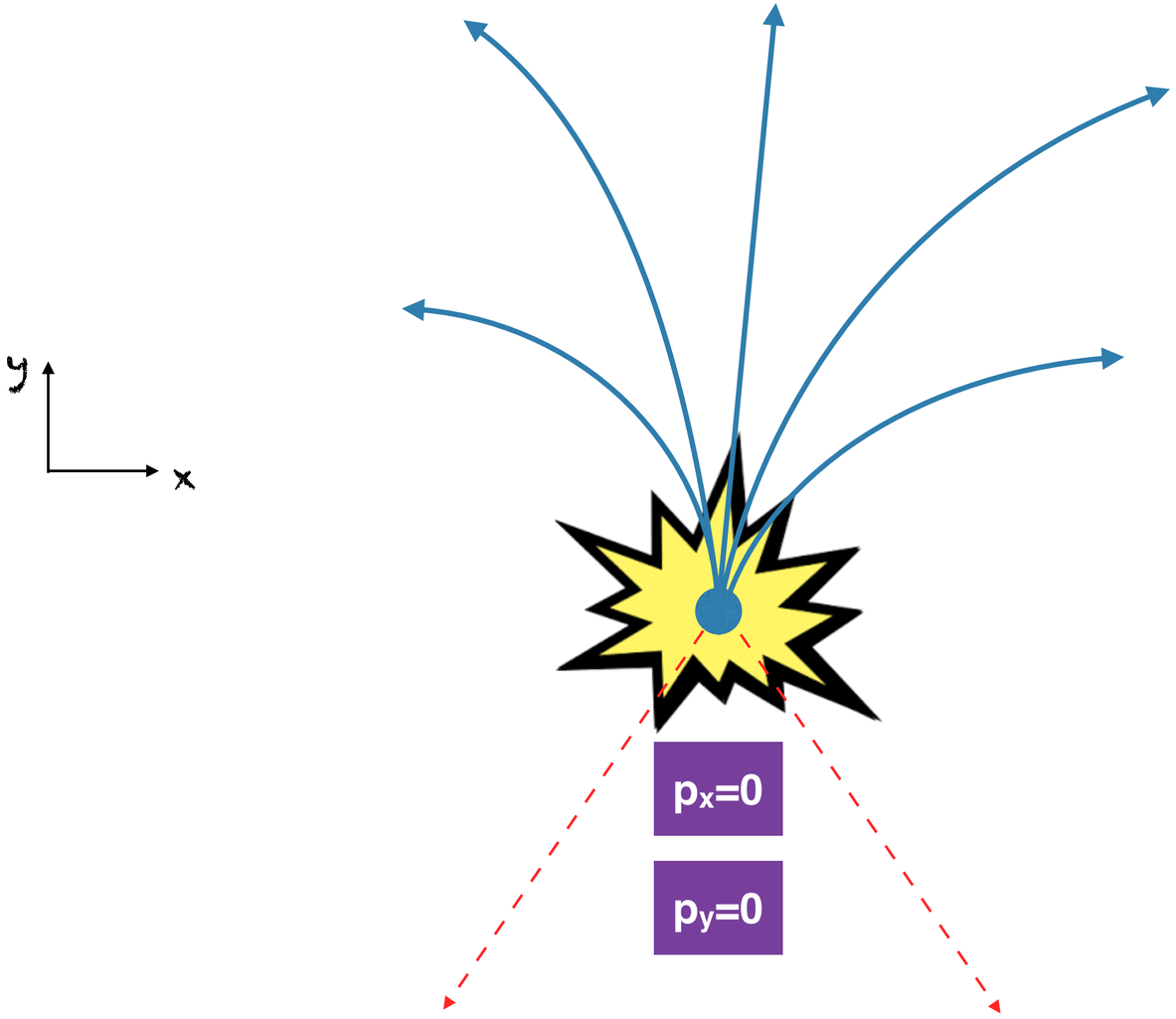
No initial momentum flows in the transverse plane

Collisione all'LHC



Total momentum flows of collision product should be 0

Energia mancante



If not, something is escaping of the detector

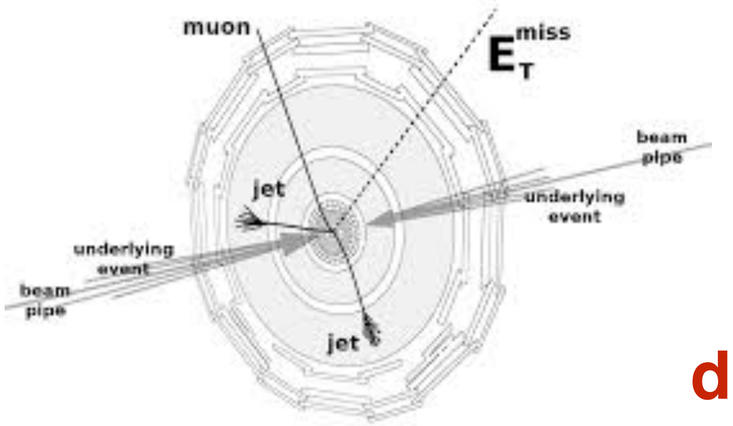
Energia mancante

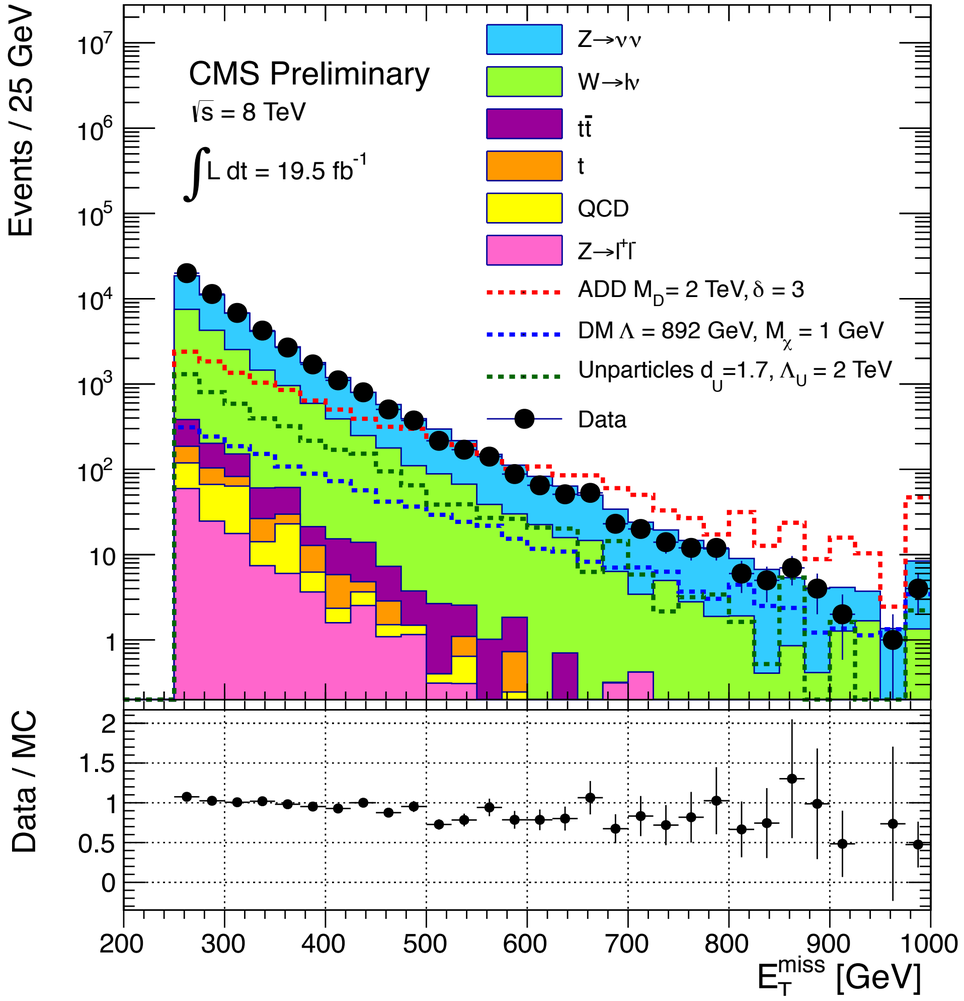
- *Momento transverso mancante*

$$p_x^{miss} = \Sigma_i \, p_x^i$$
$$p_y^{miss} = \Sigma_i \, p_y^i$$

- *Energia transverso mancante*

$$E_T^{miss} = \sqrt{(p_x^{miss})^2 + (p_y^{miss})^2}$$



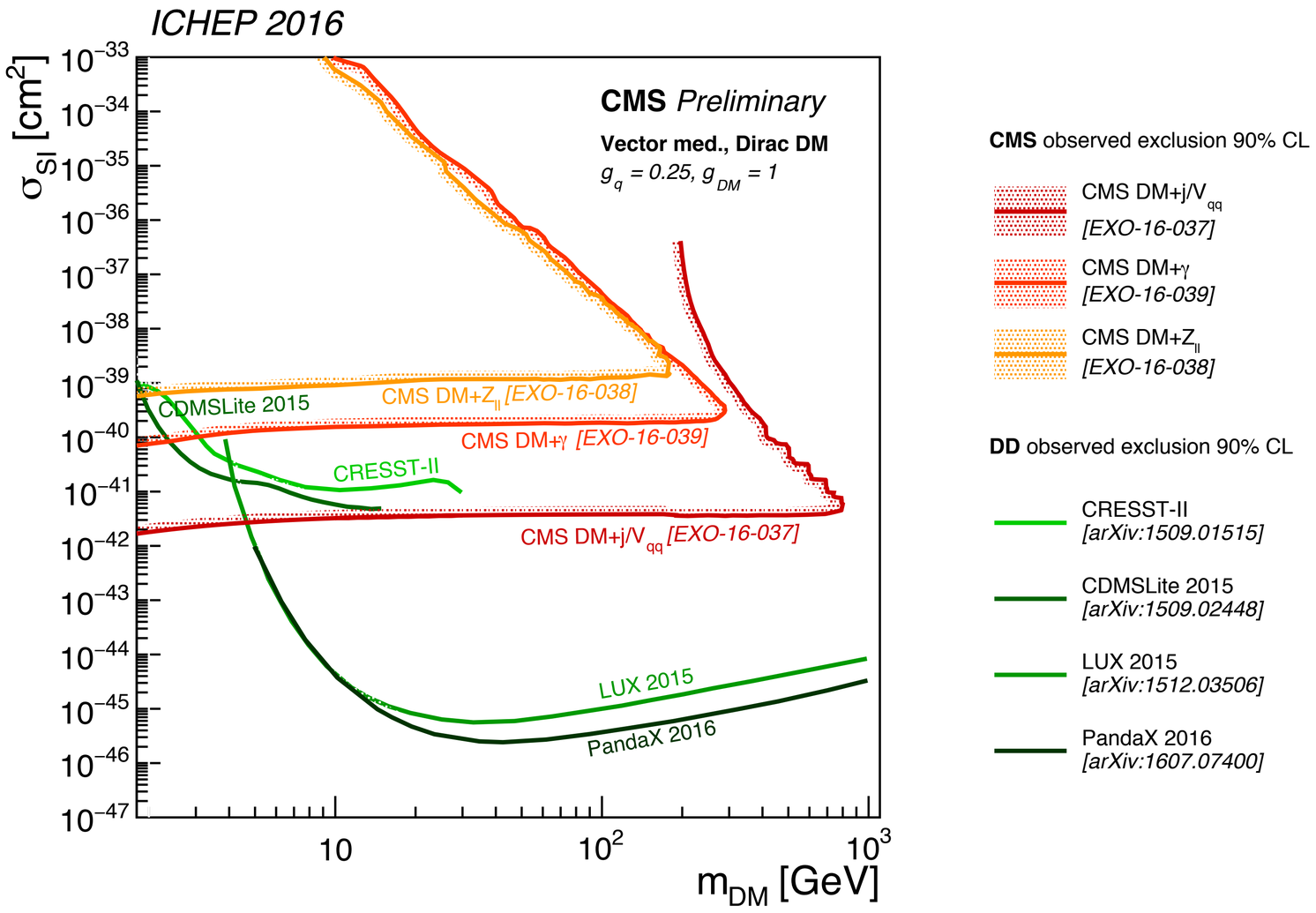


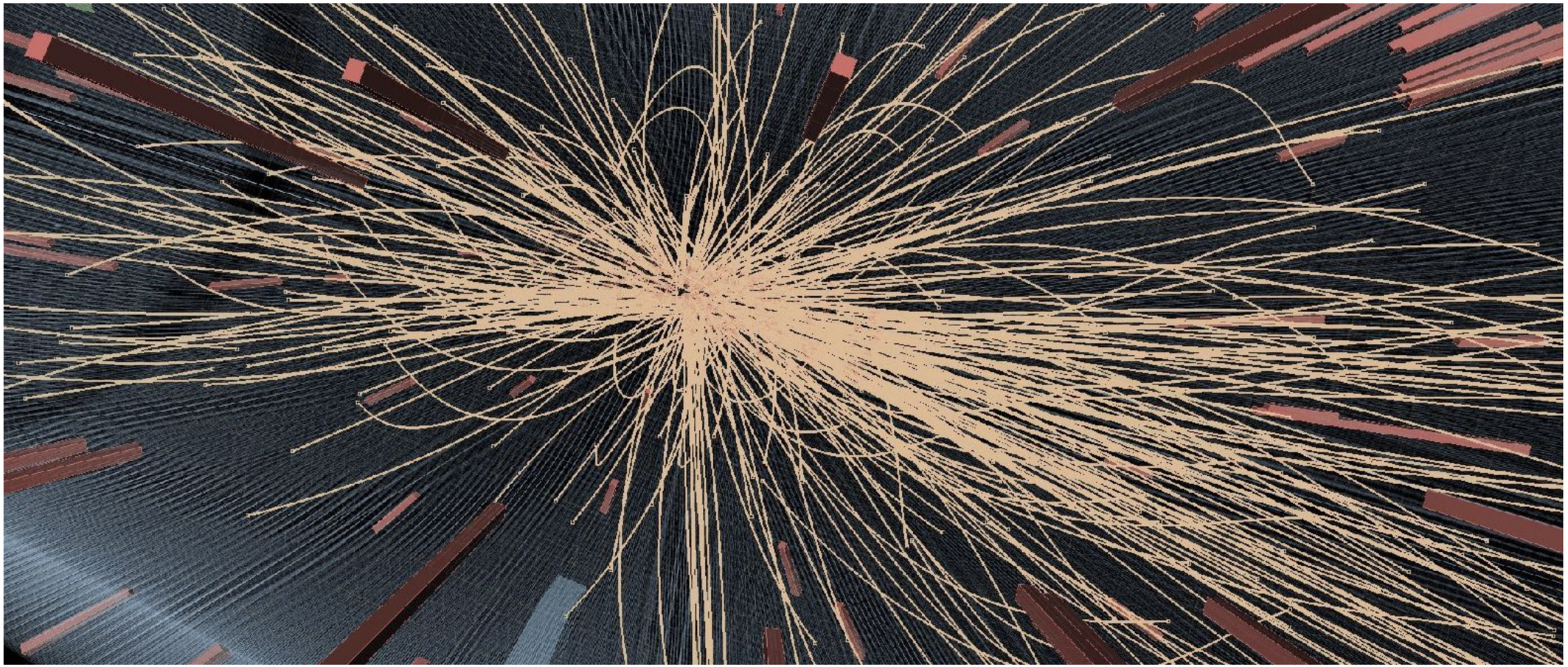
Segnale emerge nella coda della distribuzione, dove il fondo e' soppresso

Confronto con esperimenti sotterranei

- *Esiste una connessione tra quello che vorremmo fare noi (produzione dark matter) e quello che vorrebbero fare al Gran Sasso (urto Dark Matter con rivelatori)*

- *La mancata produzione della DM all'LHC mette dei limiti severi sulla possibilità di osservare la DM al Gran Sasso (e viceversa)*

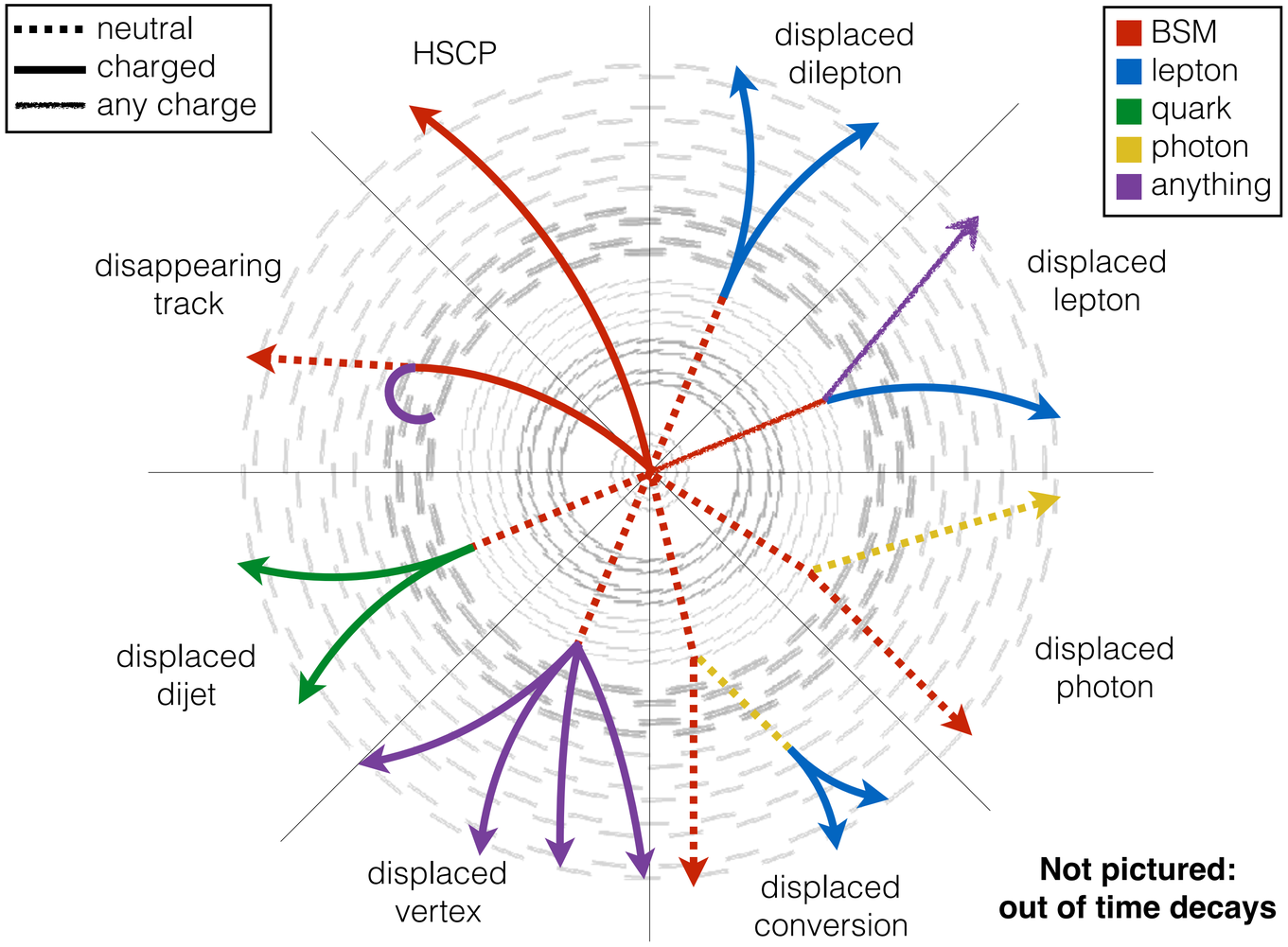




Topologie esotiche

Lunga vita media

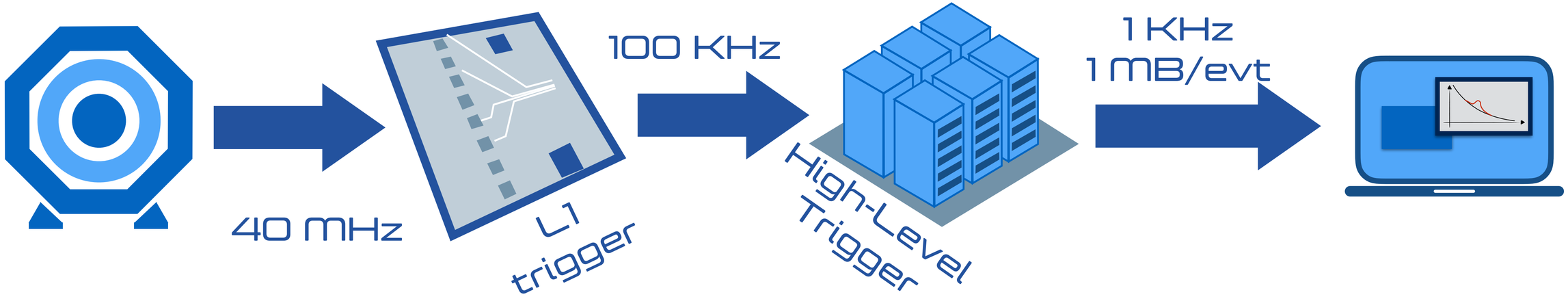
- *Fino ad ora abbiamo visto i casi estremi*
  - *particelle che decadono immediatamente*
  - *particelle che non decadono ed escono dal detector*
- *In realtà esistono tutti i casi intermedi*
  - *particelle visibili che viaggiano & decadono in particelle invisibili*
  - *particelle invisibili che viaggiano & decadono in particelle visibili*
  - *etc etc*
- *All'LHC le cerchiamo tutte, tra notevoli difficoltà*



Digressione

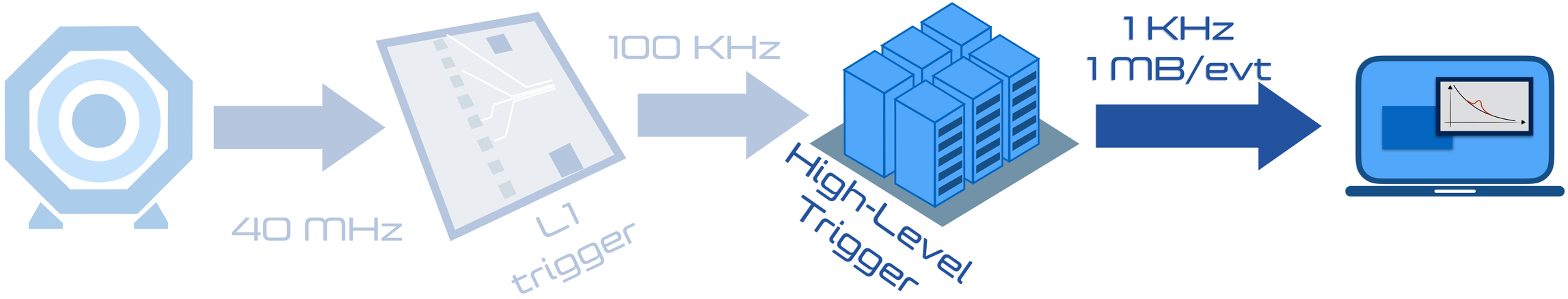
{

Il problema del trigger

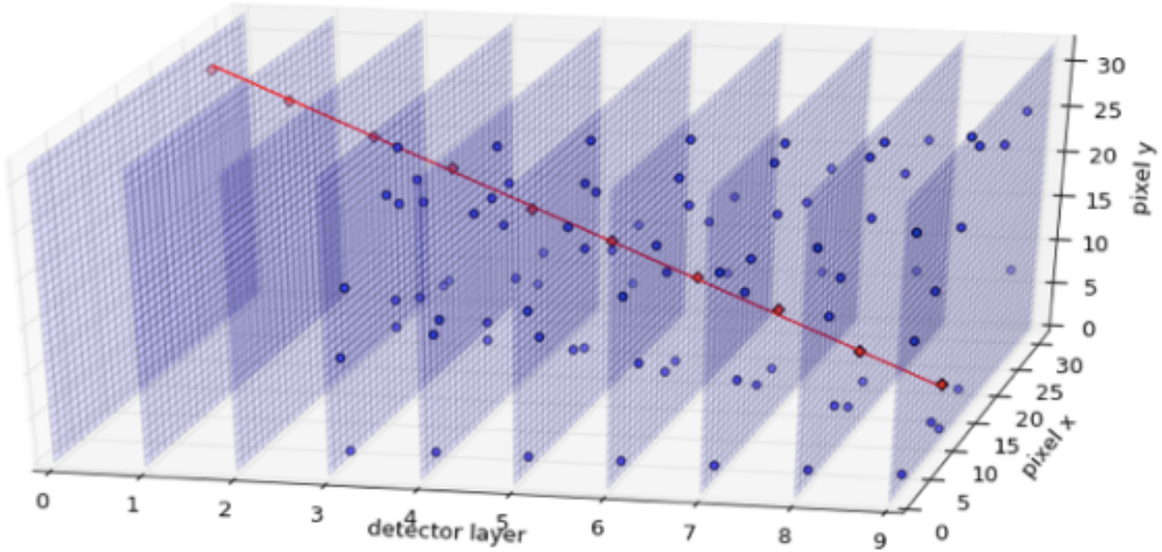


- *L'LHC produce molti più eventi di quanto possiamo scriverne*
  - *Gli esperimenti analizzano gli eventi in tempo reale per selezionarne ~ 1/40000 (sistema di trigger)*
- *La selezione si basa su una ricostruzione molto veloce, che spesso esclude la tracciatura delle particelle*
  - *Il trigger di segnali esotici non e' possibile direttamente*

Il problema del trigger

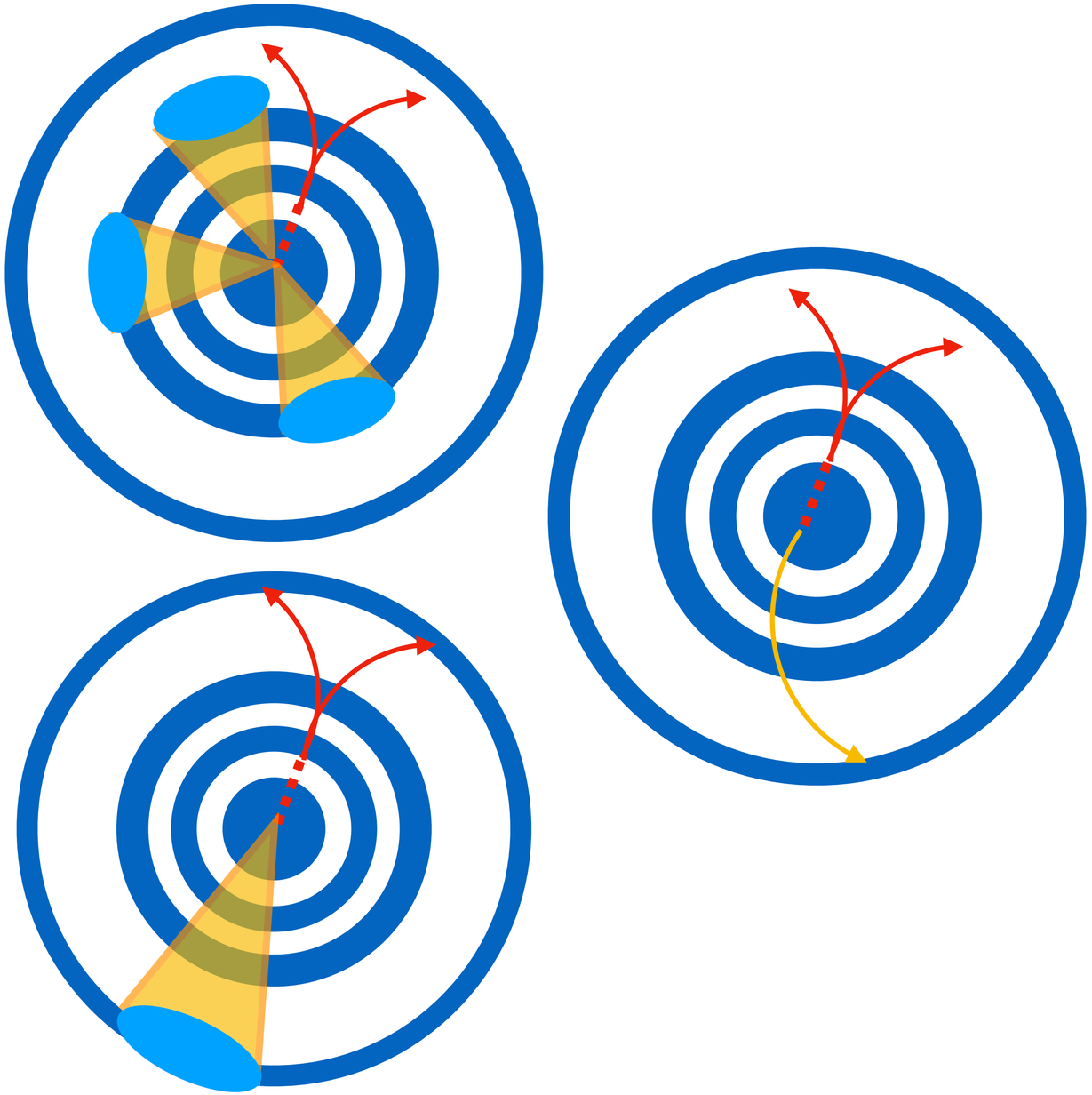


- *Una cosa che non si può fare nel trigger e' il tracking*
  - *assolutamente no per (per ora) @L1*
  - *solo per 10% degli eventi che entrano, all'HLT*



Il problema del trigger

- *Spesso si ricorre a trucchi*
  - *evento globalmente energetico*
  - *presenza di un'altra particella (ad esempio elettrone, muone, etc)*
  - *Presenza di un jet energetico aggiuntivo*
- *Ogni richiesta di questo tipo si trasforma in una perdita di sensibilità*
  - *solo una frazione degli eventi di segnale le soddisfa*
  - *gli altri eventi vanno persi per sempre*

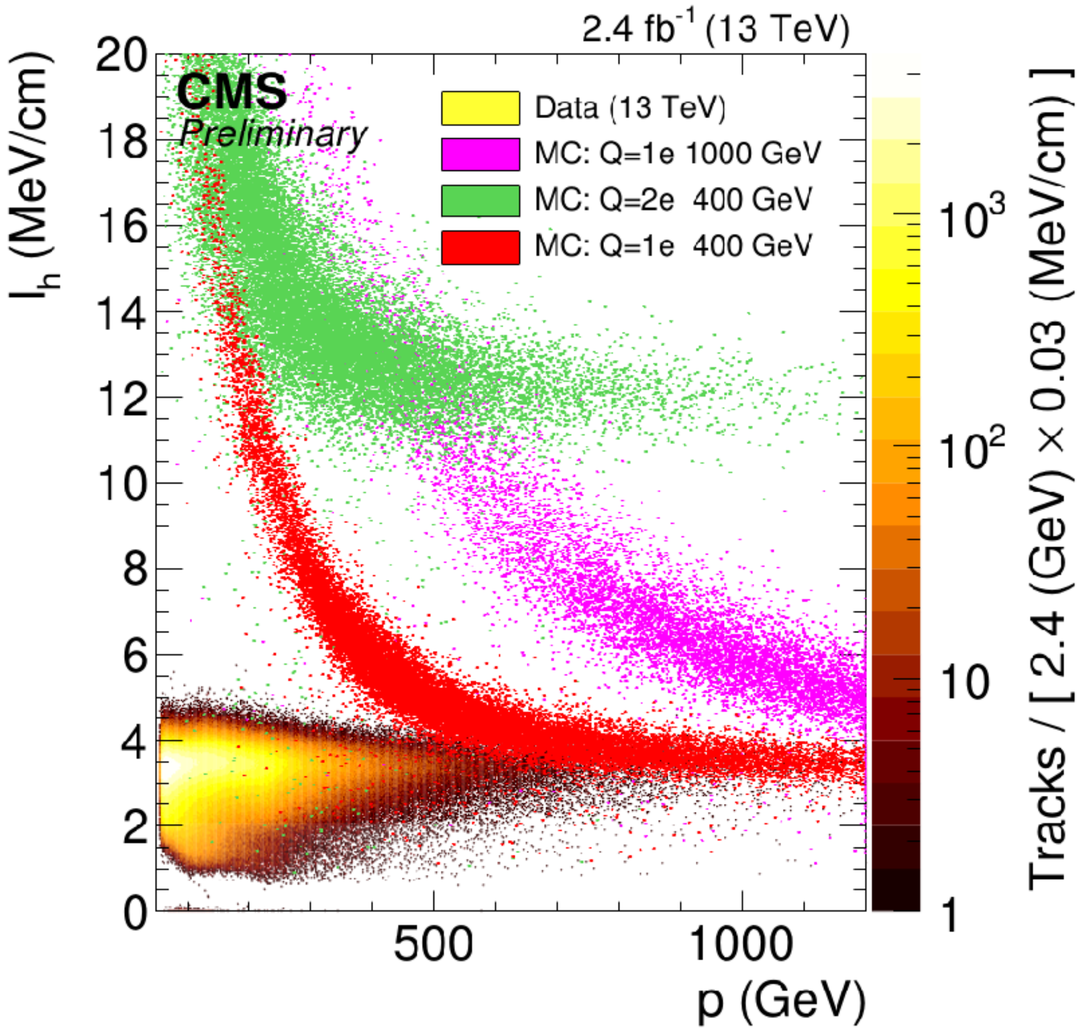


Digressione

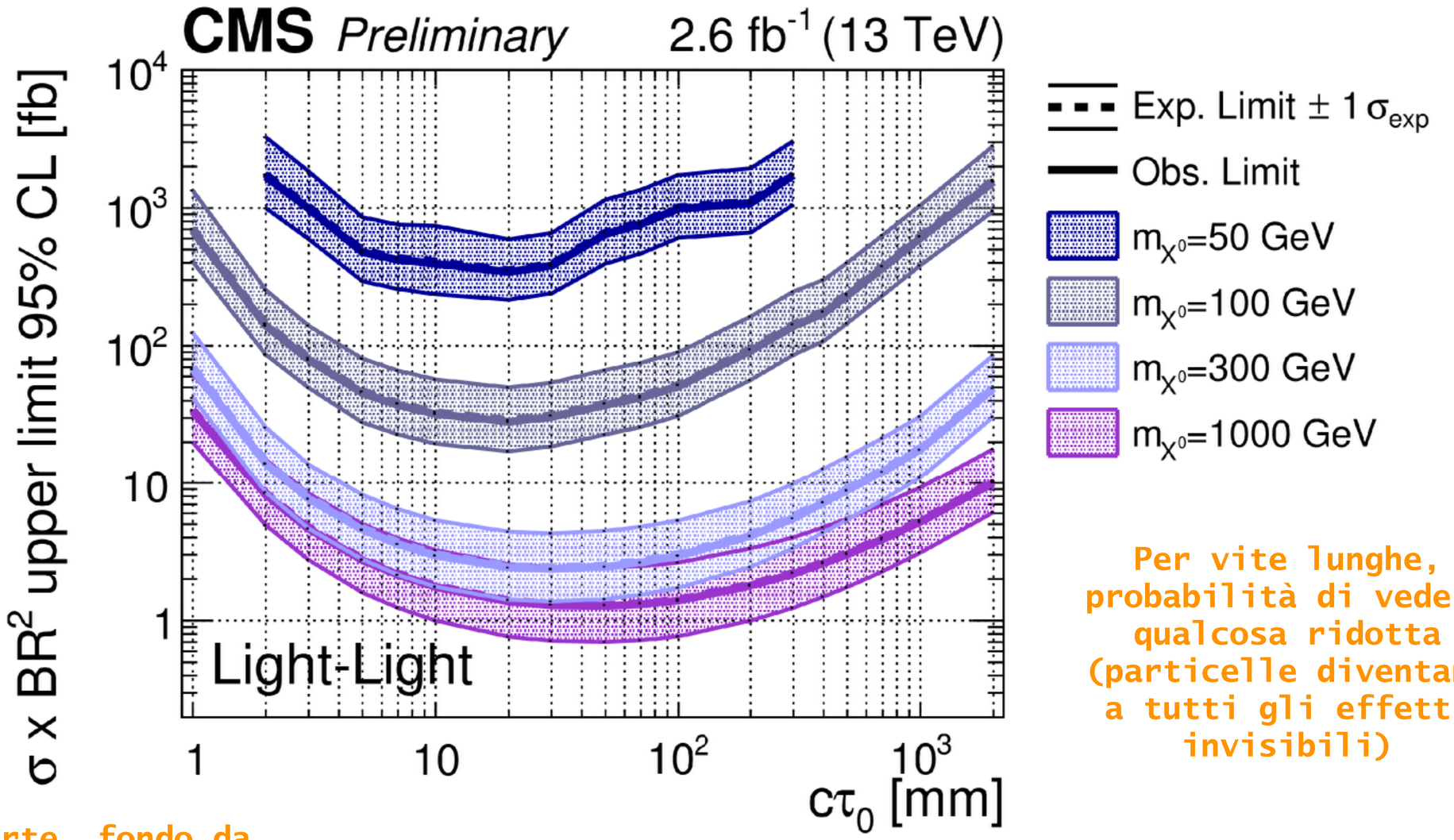
}

Come cercare particelle strane?

- *Ionizzazione*
  - *nei detector vediamo energia depositata dalle particelle attraversando la materia*
  - *la quantità di energia dipende dalla massa*
- *Vertice spostato*
  - *normalmente, tutte le tracce provengono dal vertice di interazione*
  - *particelle prodotte in volo provengono invece da vertici traslati*
- *Particelle che scompaiono*
  - *Una particella che decade nel mezzo del rivelatore non viene vista la' dove ci si aspetta estrapolando la traiettoria*



Risultato “tipico”

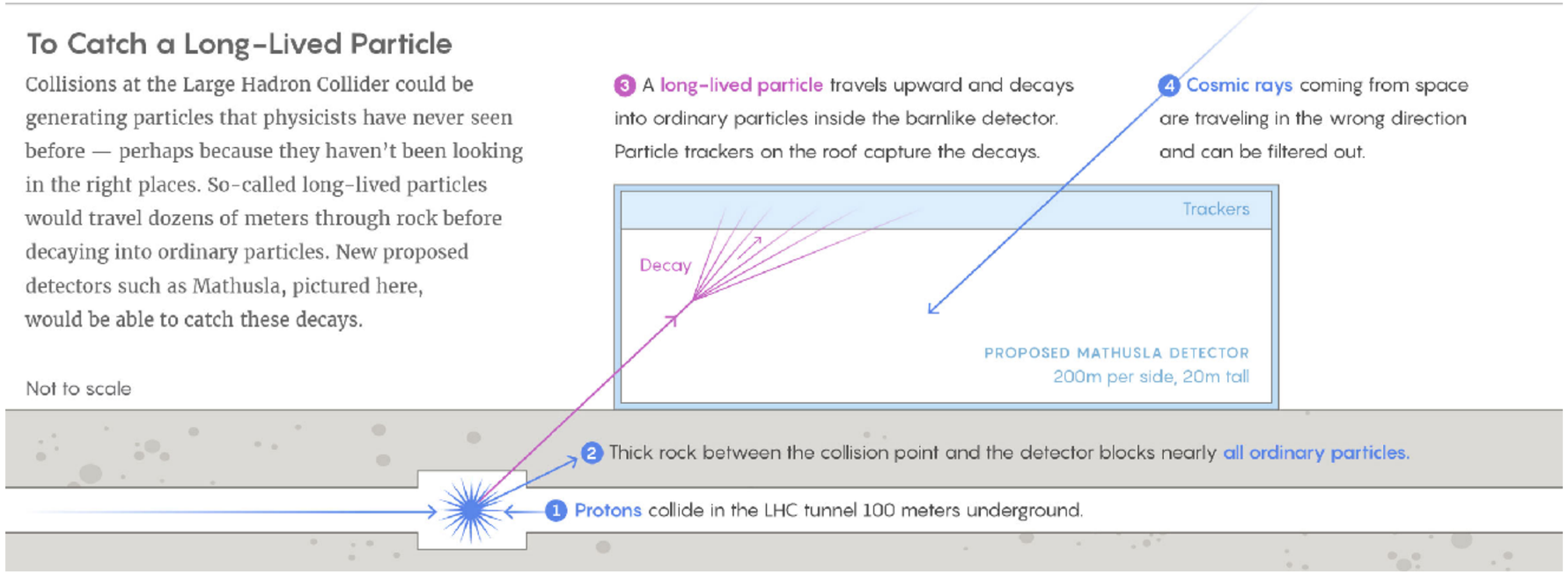


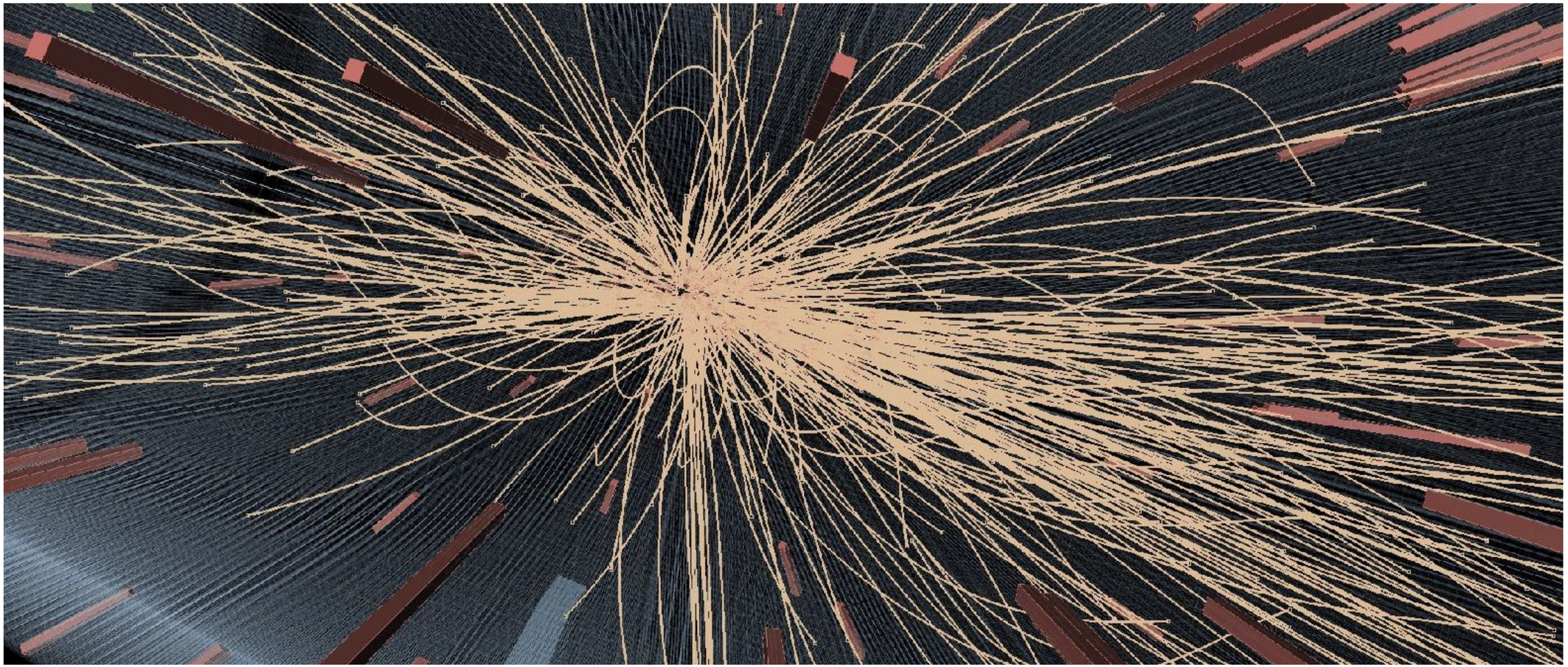
Per vite lunghe, probabilità di vedere qualcosa ridotta (particelle diventano a tutti gli effetti invisibili)

Per vite corte, fondo da decadimenti “normali” limita la sensibilità

Matusalemme

- *Per lunghe vite medie, il problema e' che il rivelatore e' troppo corto*
- *"Nuova" idea" costruire un rivelatore separato (simile ai rivelatori dei neutrini) per rivelare nuove particelle con vita media lunga*
- *Altri esperimenti dedicati previsti al CERN e in altri laboratori*

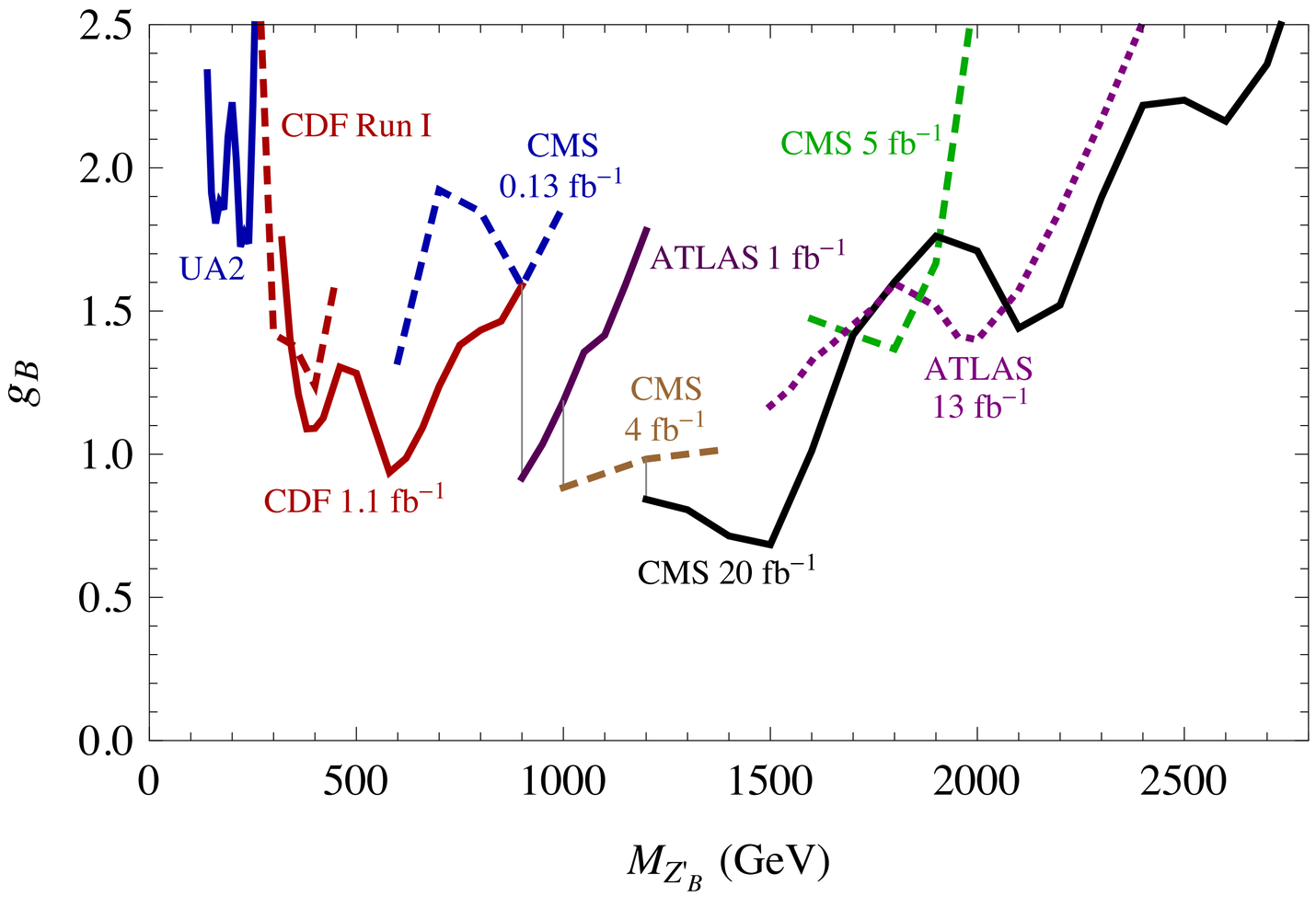




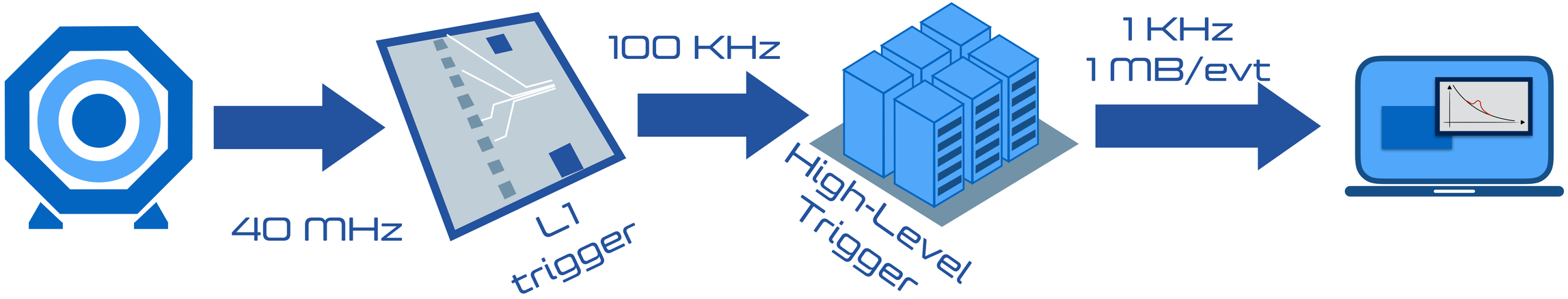
Ricerche BSM Oltre i limiti tecnologici

Territorio perso

- *I progressi con gli acceleratori sono stati più veloci di quelli tecnologici*
- *Di conseguenza, e' sempre più difficile scrivere tutte le collisioni*
- *Ogni volta che un acceleratore sale di prestazioni, noi perdiamo sensibilità a certi scenari*

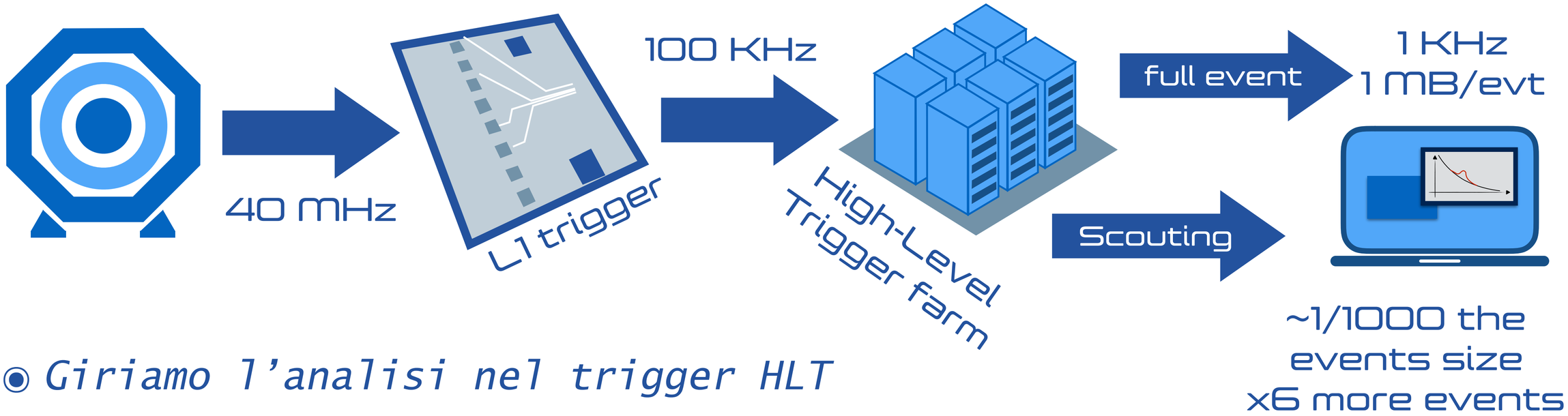


Territorio perso



- *Il problema e' sempre legato al trigger*
- *D'altra parte, prima di buttare un evento sappiamo tutto*
  - *jet nell'evento, energia, etc*
- *C'e' tutto quello che ci serve per girare l'analisi in tempo reale*

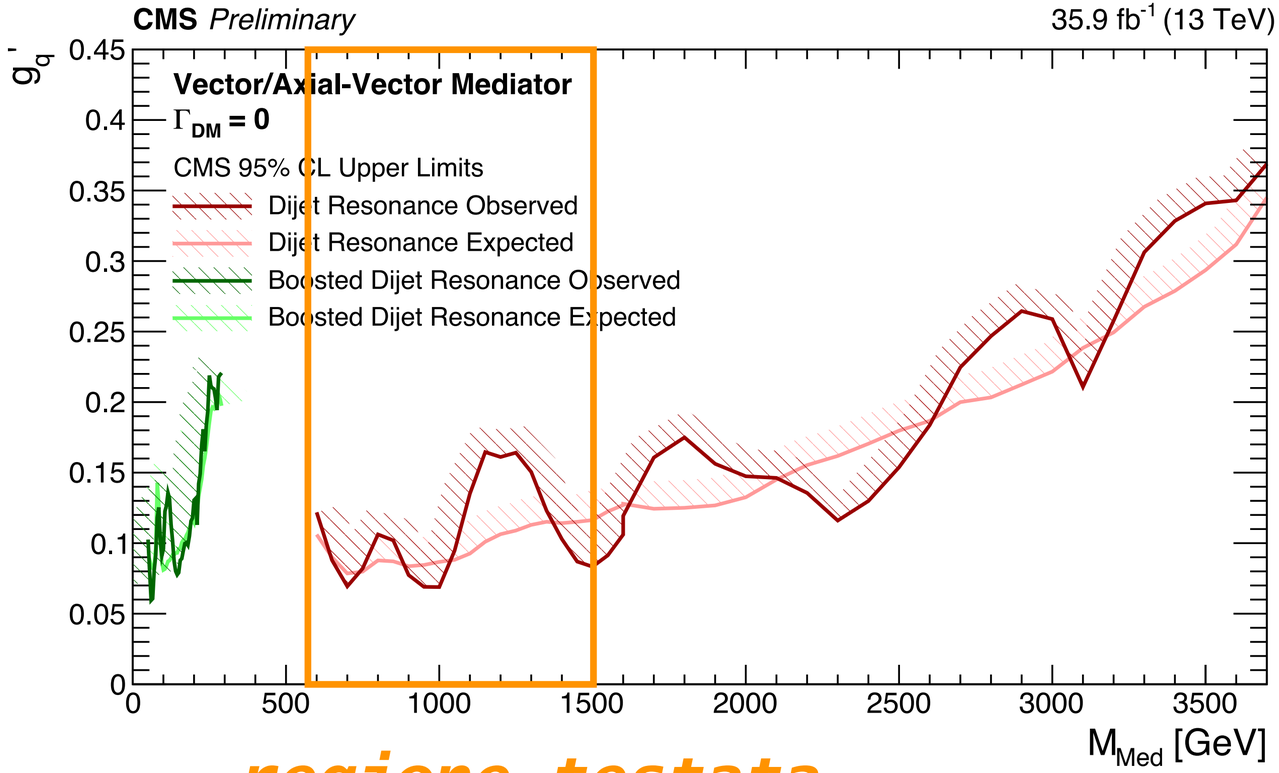
Soluzione: scouting



- *Giriamo l'analisi nel trigger HLT*
- *Scriviamo pochi numeri (energie dei jet, etc)*
- *Scrivendo meno quantità/evento, possiamo scrivere più eventi*
  - *x6 volte gli eventi "normali" con <1% delle risorse*
  - *Il tutto gratis, girando "nell'ombra" del normale HLT*

Esempio: DiJet

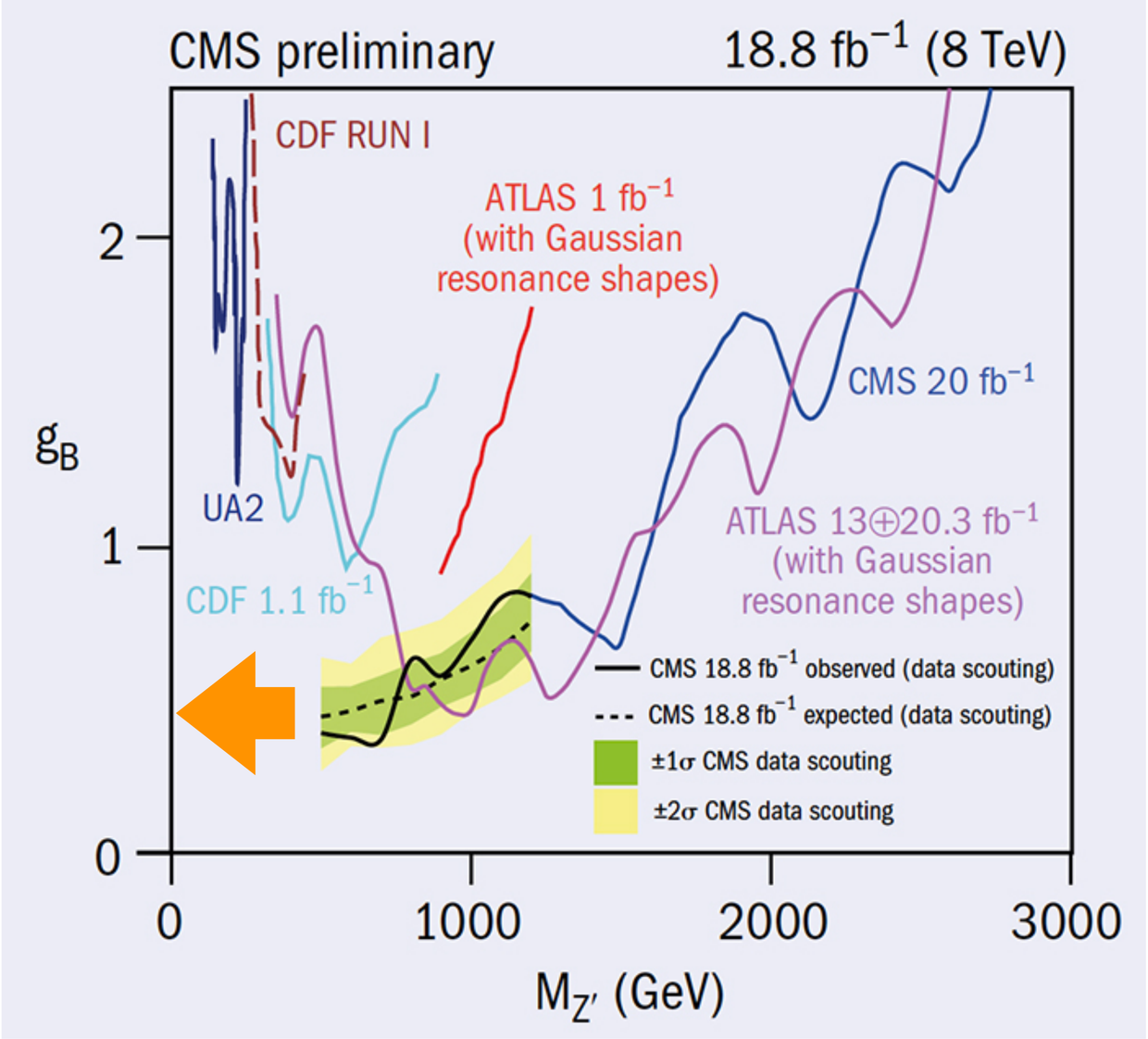
- *La prima applicazione e' stata nel 2011 (run di test) per cercare particelle che decadono in due jet*
  - *Ogni evento all'LHC ha jet, quindi gli eventi con solo jet sono i più "tartassati" quando c'e' un taglio di risorse*
- *Primo esperimento molto ben riuscito*
- *Oggi Dijet scouting fa parte delle pratiche comuni in CMS (e dal 2015 anche in ATLAS)*



regione testata grazie a scouting

Esempio: DiJet

- *Grazie a questa tecnica, l'LHC sta migliorando risultati che da 30 anni non avevano competitori*
- *Ora stiamo cercando di* ***spingere questa tecnologia al limite*** *ed estenderla ad altre analisi*



In conclusione

- *Abbiamo motivo di credere che il modello standard non sia la fine della storia*
- *Molte idee proposte per spiegare gli aspetti più controversi*
- *l'LHC ha il potenziale per testare molte di queste idee*
- *Il problema e' migliorarsi sempre*
  - *piu' dati significa anche più complicazioni*
  - *fino ad ora, siamo stati bravi a farci venire buone idee*
- *Non siamo riusciti ancora a far crollare il castello del modello standard, ma ci stiamo lavorando…*

Fine
(per ora)