

Ricerca di nuova fisica con gli esperimenti ATLAS e CMS: risonanze di due bosoni e particelle a lunga vita media

IFAE 2016

Genova, 30 marzo – 1 aprile

[Roberto Iuppa](#)

- Ricerca di nuova fisica ai collisori: “oggetti fisici” e signature tipiche
- Risonanze di due bosoni:
 - decadimenti e fondi
 - l’eccesso osservato nei dati del Run 1 ad alta massa
 - ricerche ad alta massa nei dati del Run 2
 - ricerche a bassa massa nei dati del Run 2
- Ricerca di R-adroni
- Sparizione di tracce e apparizione di vertici discosti
- Jet di leptoni
- Particelle lente e massive altamente ionizzanti

Nuova fisica ai collisori



[Roberto Iuppa](#)

Premessa

oggetto fisico: è una parte della ricostruzione finale dell'informazione sperimentale presente globalmente in un evento. Può essere identificato con un leptone (μ /elettrone), un fotone o un jet ⁽¹⁾ Anche l'energia trasversa mancante (MET) si può considerare un oggetto, legato a particelle non rivelate (neutrini)).

Negli esperimenti a collisore sono molteplici le signature sperimentali da considerare per scoprire la presenza di fenomeni non previsti dal "Modello Standard" delle particelle. In generale, qualsiasi quantità fisica può essere utile allo scopo, sebbene la maggior parte delle ricerche si concentri su:

1. eccessi negli spettri di energia o impulso di singoli oggetti o loro combinazioni;
- 2. eccessi nello spettro di massa invariante di due (o più) oggetti ⁽²⁾;**
3. deviazioni dallo spettro atteso di quantità cinematiche (distanze angolari, asimmetrie di carica, sbilanciamenti d'impulso) o attributi fisici (carica);
- 4. apparizioni di vertici discosti dal punto d'interazione, sparizioni di tracce, tempi volo inusualmente lunghi o ionizzazioni molto alte.**

(1) Al jet è quasi sempre associata un'informazione sul quark che lo genera, sia esso leggero, charm, strano o di tipo b.

(2) Nel caso in cui si faccia uso dell'energia trasversa mancante (MET), non essendo possibile ricostruire la massa invariante, si usa la cosiddetta "massa trasversa".

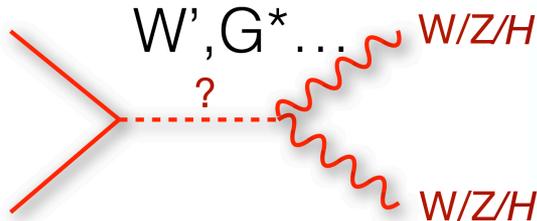
Modelli di nuova fisica nel canale VV

È possibile che nelle collisioni ad LHC vengano prodotte nuove particelle X, le quali a loro volta potrebbero decadere in due bosoni vettore⁽¹⁾: WW , ZZ , WZ (in generale VV).

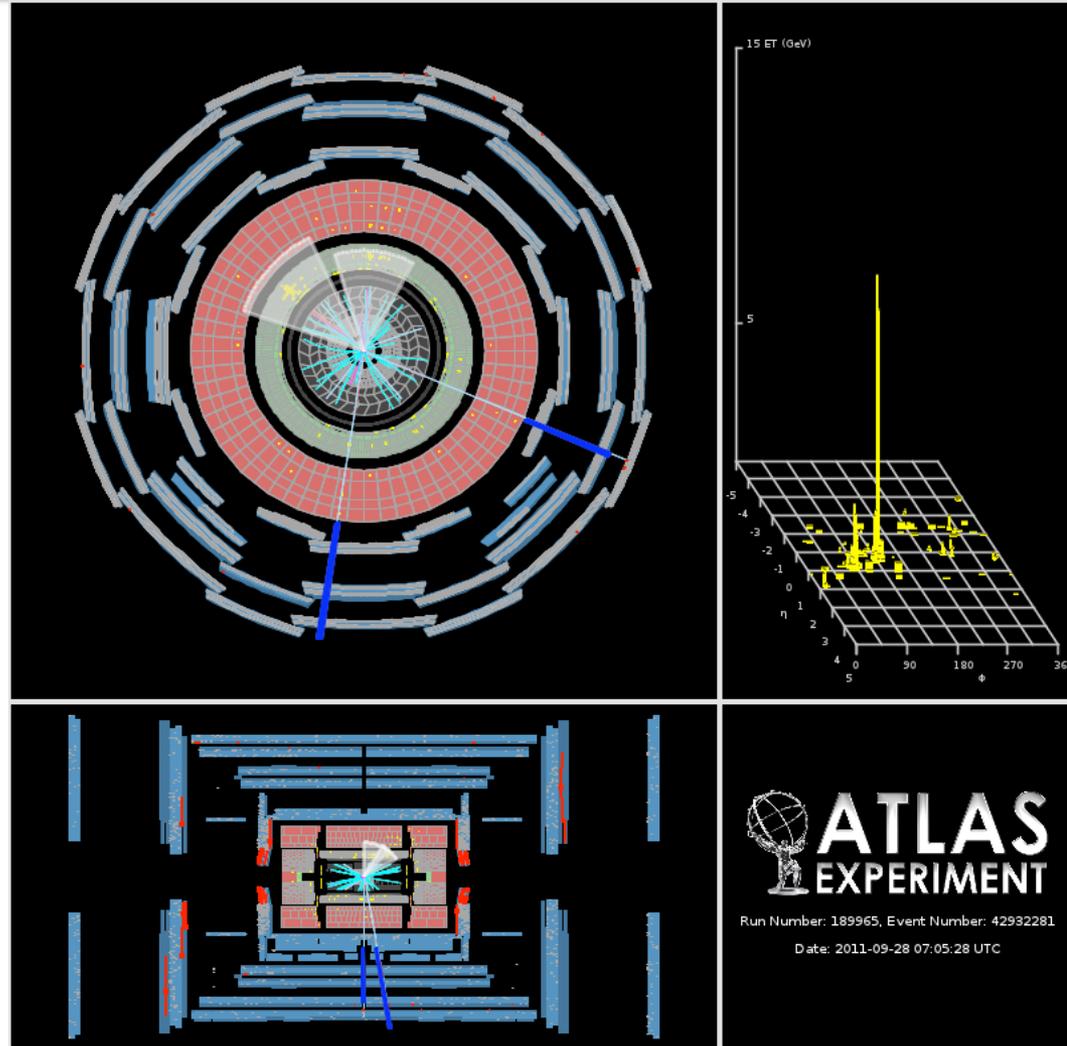
Poiché decade in due bosoni vettore (spin 1), la nuova particella X deve avere **spin intero**.

I modelli possono essere classificati come segue:

- risonanza carica spin 1 (W'), decadimento in WZ : **Sequential Standard Model (Heavy Vector Triplet** model più in generale)
- risonanza neutra di spin 2 (gravitone), decadimento in ZZ o WW : **Randall-Sundrum Graviton** o **Bulk Graviton**
- risonanza neutra di spin 0 (Higgs-like), decadimento in ZZ o WW : Heavy Higgs Boson previsto da molti modelli (**2 Higgs Doublet Model**, etc...)



(1) In numerosi modelli è previsto che nel decadimento possano formarsi uno o due bosoni scalari, casi appena accennati in questa relazione.



Risonanze di due bosoni - segnature

Roberto Iuppa

Frazioni di decadimento (nessuna corr. accett.Xeff.)

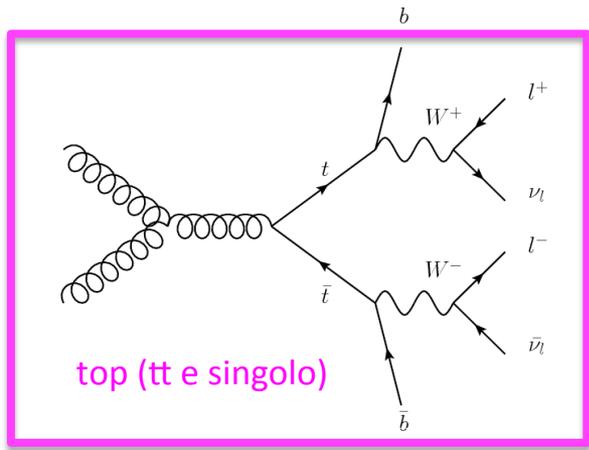
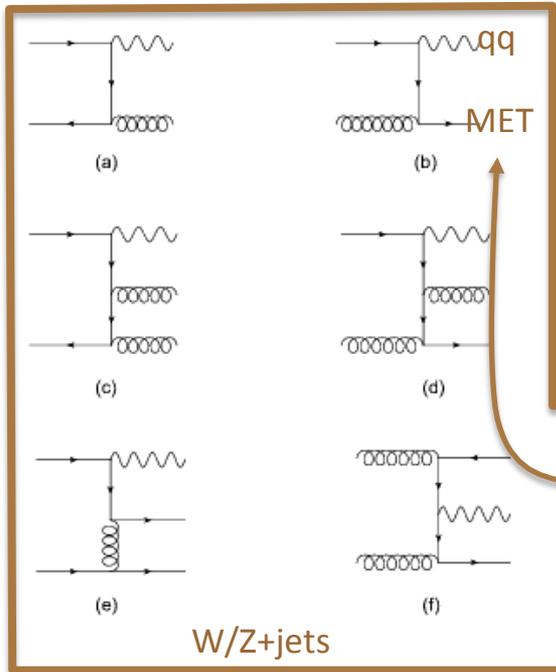
		W		Z		
		lv	qq'	ll	vv	qq
W	lv	lep + lep + MET (4.7%)	lep + jj(J) + MET (14.6%)	2lep + lep + MET (1.5%)	lep + MET (4.5%)	lep + jj(J) + MET (15.0%)
	qq'	lep + jj(J) + MET (14.6%)	jj(J) + jj(J) (o b-tag) (45.7%)	2lep + jj(J) (4.6%)	jj(J) + MET (13.9%)	jj(J) + jj(J) (o b-tag) (46.8%)
Z	ll	2lep + lep + MET (1.5%)	2lep + jj(J) (4.6%)	4lep (0.5%)	2lep + MET (1.4%)	2lep + jj(J) (4.7%)
	vv	lep + MET (4.5%)	jj(J) + MET (13.9%)	2lep + MET (1.4%)	MET (4.2%)	jj(J) + MET (14.2%)
	qq	lep + jj(J) + MET (15.0%)	jj(J) + jj(J) (o b-tag) (46.8%)	2lep + jj(J) (4.7%)	jj(J) + MET (14.2%)	jj(J) + jj(J) (o b-tag) (47.9%)

In questo tipo di ricerca i dati vengono analizzati secondo i modi di decadimento del sistema VV, per un totale di otto segnature tipiche: lep + lep + MET, 2lep + MET, lep + jj(J) + MET, jj(J) + jj(J) (o 4b-tagged), 4lep, 2lep + jj(J), jj(J) + MET, 2lep + lep + MET.

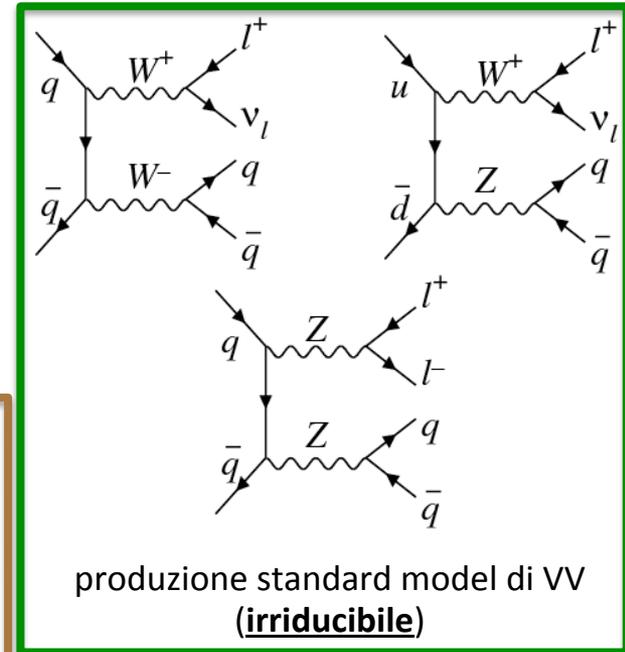
Decadimento	Frazione di decadimento (no tau)
$W \rightarrow lv$	21.6%
$W \rightarrow qq'$	67.6%
$Z \rightarrow vv$	20.5%
$Z \rightarrow ll$	6.8%
$Z \rightarrow qq$	69.2%

Risonanze di due bosoni - fondo

Vi sono processi fisici che possono essere mal interpretati per inefficienze nella catena di rivelazione/ricostruzione:

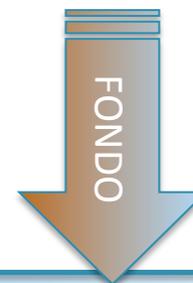


ad esempio, in un processo $Z(qq)+1jet$, la mancata ricostruzione del jet porta ad una sovrastima dell'energia trasversa mancante (MET) nell'evento, che porta a considerarlo un candidato $jj+MET$, ovvero $Z(qq)+Z(\nu\nu)$



Stato finale:

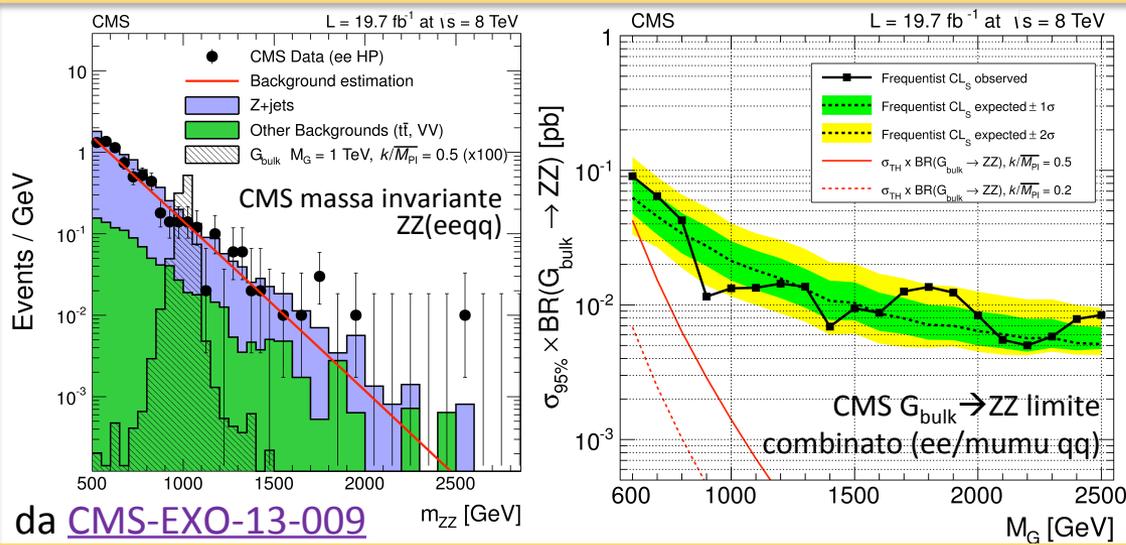
- completamente LEPTONICO es. $X \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$: 0.5%
- ...
- SEMI-LEPTONICO es. $X \rightarrow WZ \rightarrow l\nu qq$: 15.0%
- ...
- completamente ADRONICO es. $X \rightarrow ZZ \rightarrow 4q$: 47.9%



b-tagging possibile

Risonanze di due bosoni – Run 1

Roberto Iuppa

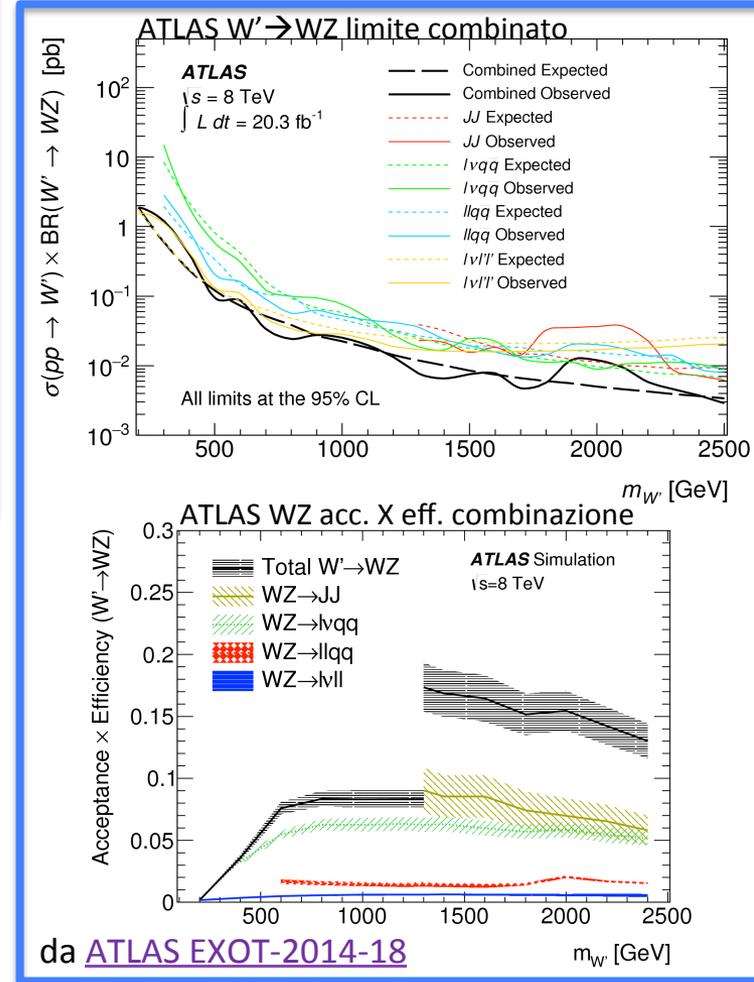


da [CMS-EXO-13-009](#)

Al termine del Run 1, ATLAS e CMS avevano raccolto 20.3 e 19.7 / fb di collisioni a 8 TeV nel centro di massa, effettuando una ricerca sistematica di nuove risonanze dibosoniche nell'intervallo di massa da 100 GeV a 3 TeV (per altro trovandone una scalare a 125 GeV). In qualche canale era visibile un **ecceso di circa 2-3 sigma per masse di 1.8-2.0 TeV**. La conferma o la smentita di tale risultato con i dati di Run 2 assunse quindi particolare rilievo.

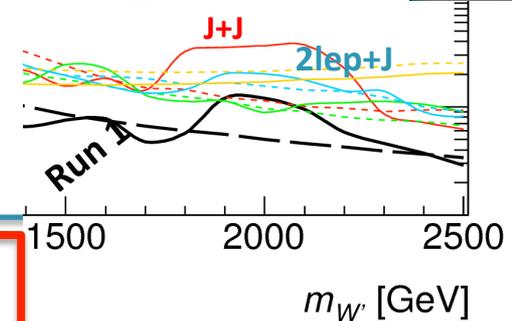
Da notare che sopra 1 TeV di massa invariante, i bosoni W/Z hanno $\gamma > 5$ e per effetto del boost i loro prodotti di decadimento sono particolarmente collimati. Nel caso completamente adronico, i due jet finiscono per sovrapporsi e costituire un unico grande jet (jj (dijet) \rightarrow J ("fat jet"), passaggio dal regime risolto a quello non-risolto ("merged" o "boosted").

Referenze: [JHEP12\(2015\)055](#) (ATLAS), [CMS-HIG-13-031](#) (CMS), [ATLAS EXOT-2014-18](#) (ATLAS), [CMS-EXO-13-009](#) (CMS)

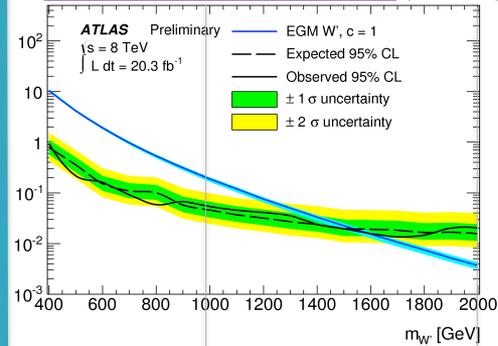


da [ATLAS EXOT-2014-18](#)

Run 2: sul luogo del delitto... (llqq e 4q)



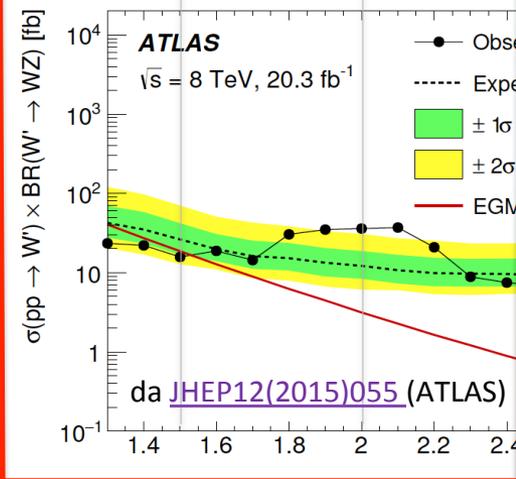
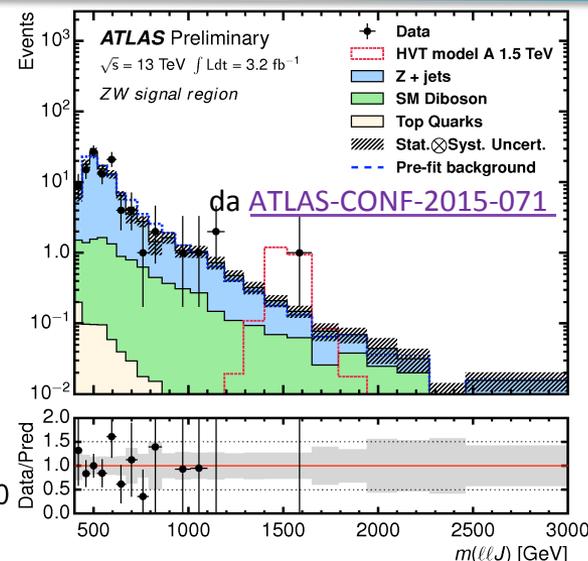
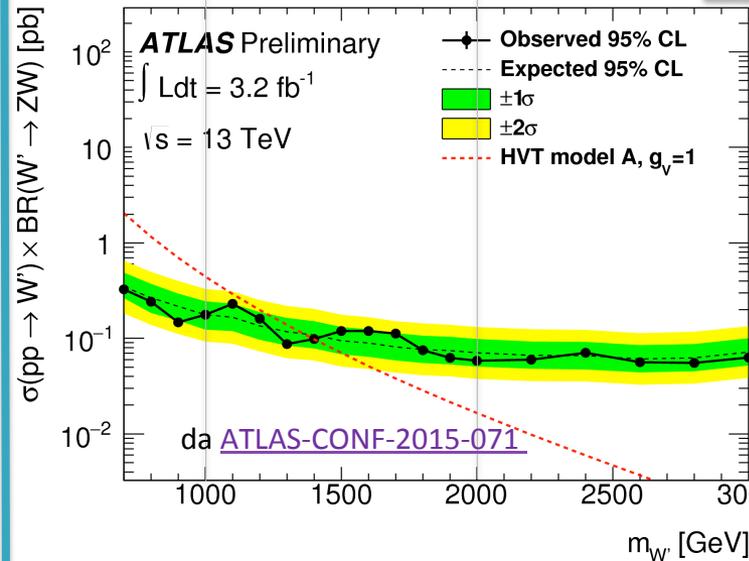
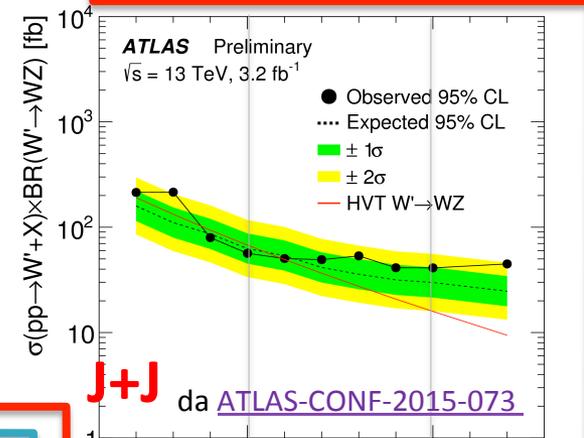
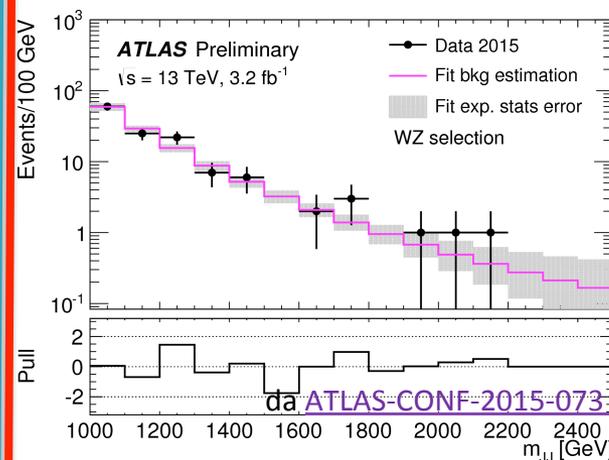
da [Eur. Phys. J. C \(2015\) 75:69](#) (ATLAS)



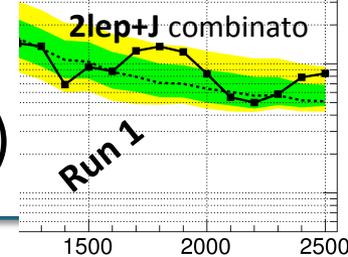
Run1:
energia
minore
statistica
maggiore

Run2:
energia
maggiore
statistica
minore

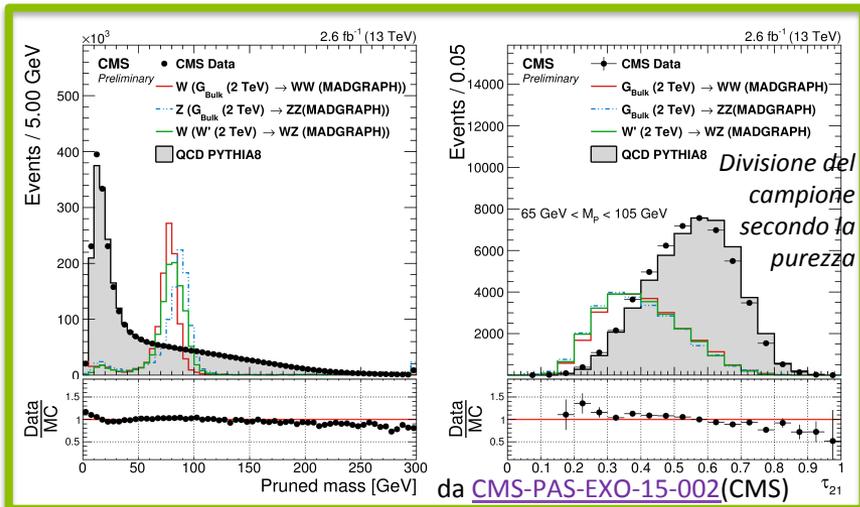
2lep+J



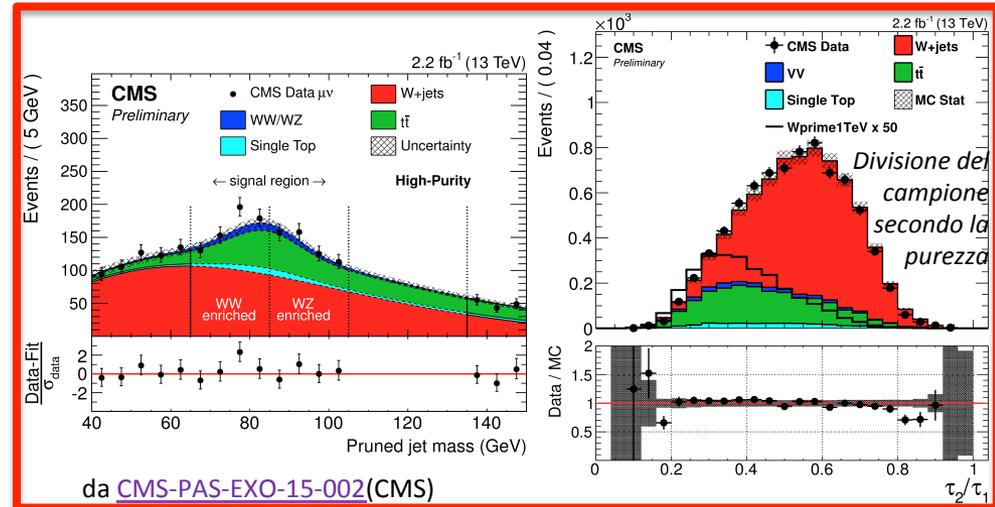
Run 2: sul luogo del delitto... (lvqq e 4q)



CMS ha effettuato un'analisi combinata nei canali lvqq e qqqq, ovvero **lep+MET+J** e **J+J** M_G [GeV]

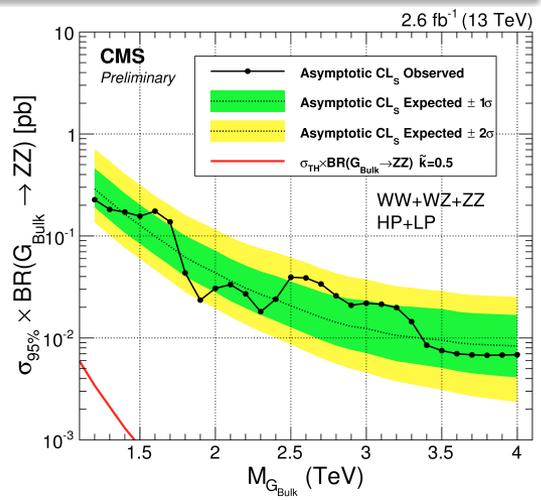


da [CMS-PAS-EXO-15-002](#)(CMS)



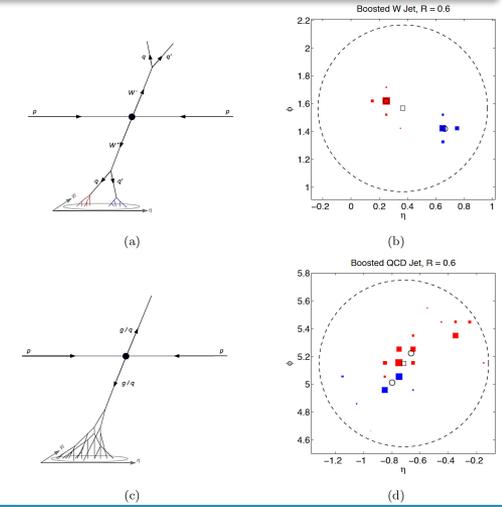
da [CMS-PAS-EXO-15-002](#)(CMS)

Anche in questo caso la statistica raccolta non è sufficiente per migliorare la sensibilità sopra 1.5 TeV. Comunque non sono presenti eccessi sopra 1.5 sigma.



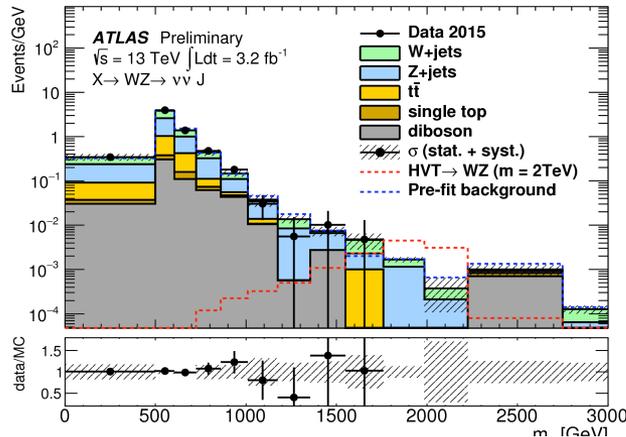
La ricostruzione globale dell'evento ("Particle Flow"), consente l'uso efficace della "N-subjettiness" (nella forma del rapporto τ_{21}) per discriminare segnale e fondo.

da [arxiv 1011.2268](#) (CMS)



Run 2 ATLAS: llqq, lvqq, vvqq, comb.

Roberto Iuppa



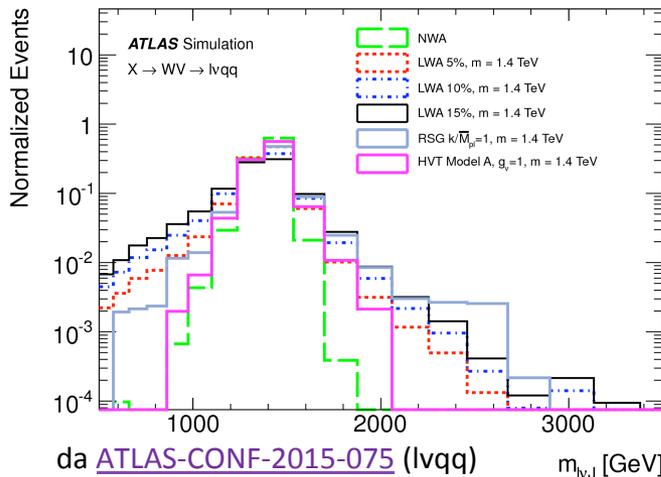
Ad alti valori di massa (o massa trasversa nel caso vv) il fondo è notevolmente ridotto e si ha la massima sensibilità.

da [ATLAS-CONF-2015-068](#)(vvqq)

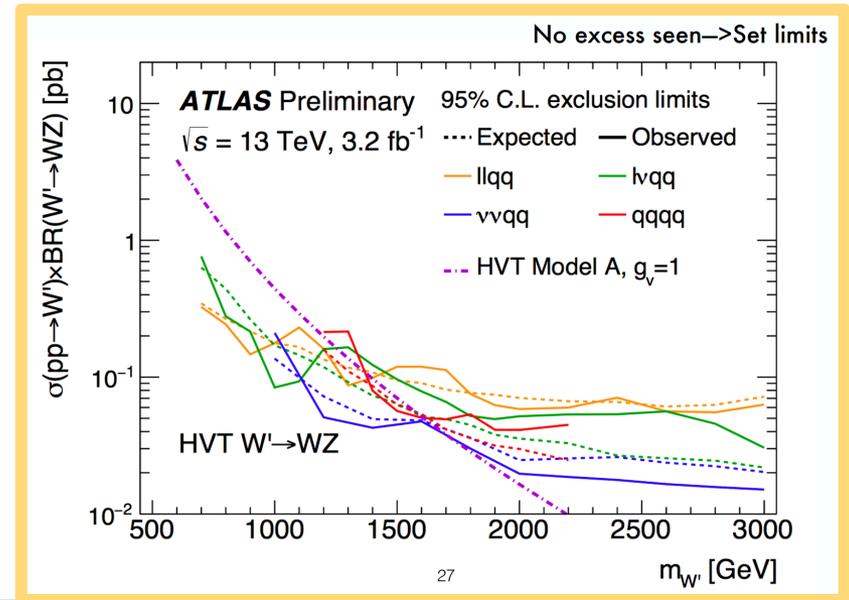
	WZ signal region	ZZ signal region
Z+jets	361 ± 13	394 ± 26
W+jets	251.6 ± 7.3	250 ± 12
single top	18.1 ± 1.0	15.4 ± 1.9
t \bar{t}	139.4 ± 7.5	126.7 ± 4.8
diboson	71.2 ± 2.8	59.7 ± 2.5
Total background	841 ± 18	855 ± 36
data	850	848
HVT → WZ → vvqq (mass = 1.6 TeV)	0.3 ± 1.2	-
G → ZZ → vvqq (mass = 1.6 TeV)	-	1.0 ± 1.2

Pur tuttavia, la statistica accumulata resta troppo bassa per trarre qualsiasi conclusione. **Si può cercare di combinare al meglio l'insieme dei risultati.**

$$M_T^2 = \left(\sqrt{p_T(\ell)^2 + M(\ell\ell)^2} + \sqrt{E_T^{\text{miss}^2} + M_Z^2} \right)^2 - (\vec{p}_T(\ell) + \vec{E}_T^{\text{miss}})^2$$



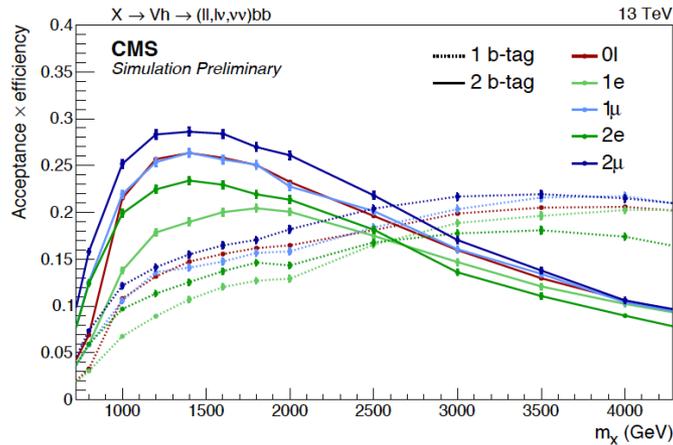
La larghezza del segnale dipende molto dal modello considerato. L'effetto è accentuato in signature con alta MET.



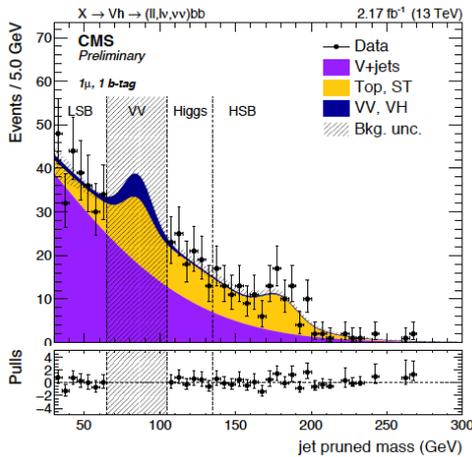
27

Run 2 CMS: risonanze ($\nu\nu, l\nu, ll$) bb di alta massa

$X \rightarrow Vh \rightarrow (\nu\nu, l\nu, ll)bb$ non è un decadimento VV , ma utile per illustrare il ruolo del b-tagging in queste analisi.



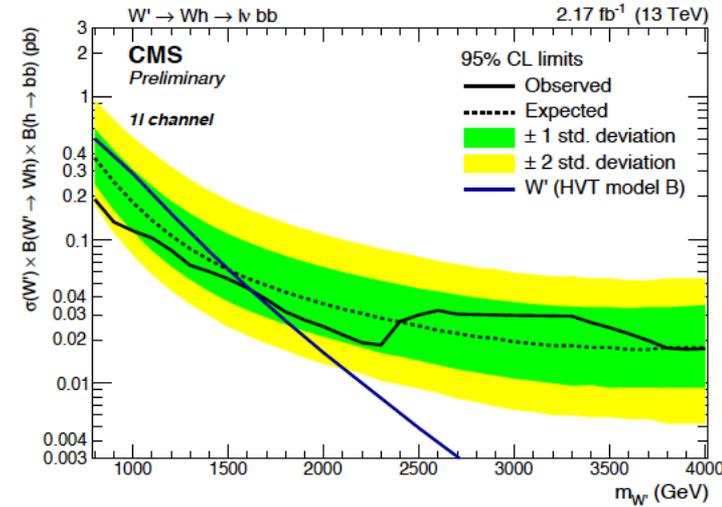
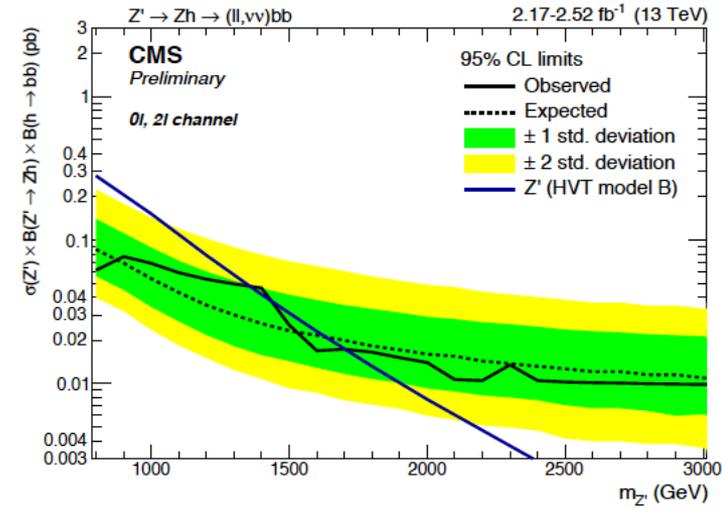
Valori tipici di $\text{accett.} \times X_{\text{eff}}$ nel caso di risonanze di alta massa: 5%-30%. Il b-tagging è uno strumento discriminante importante.



Normalizzazione del fondo stimata dai dati attraverso un fit del MC nelle regioni laterali di massa dei J (esempio 1 μ , 1 b-tag). Forma del fondo ("shape") stimata dal MC.

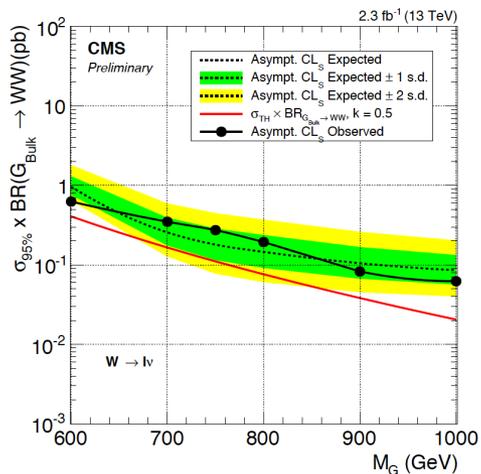
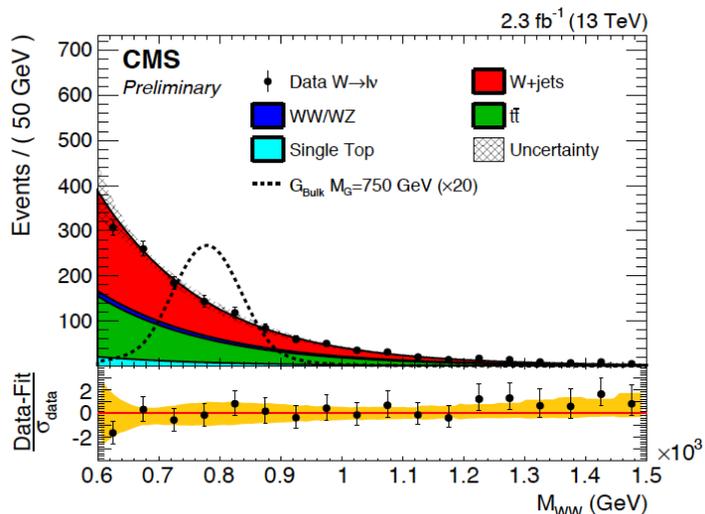
CMS-PAS-B2G-16-003

Roberto Iuppa



Run 2: bassa massa ("intorno" a 750 GeV)

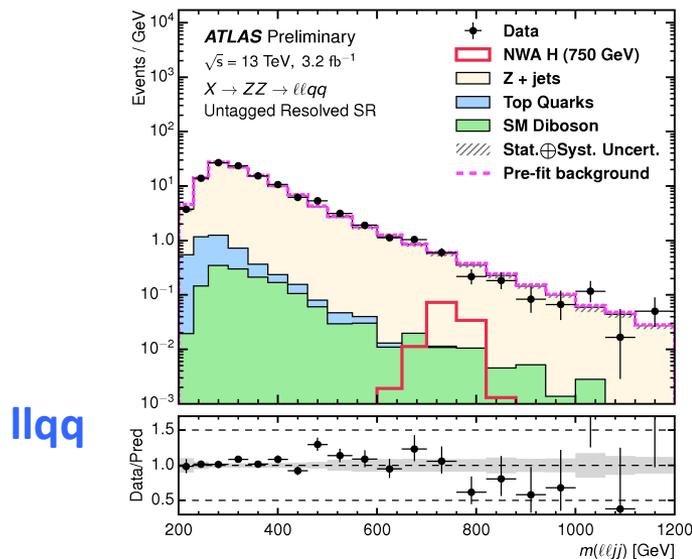
CMS-PAS-B2G-16-004



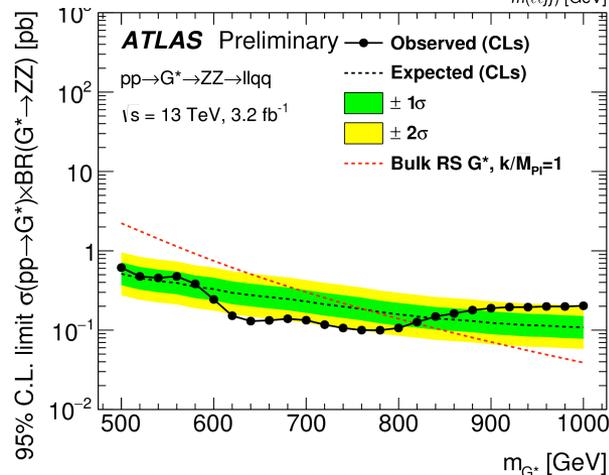
lvqq

ATLAS-CONF-2016-016

Roberto Iuppa

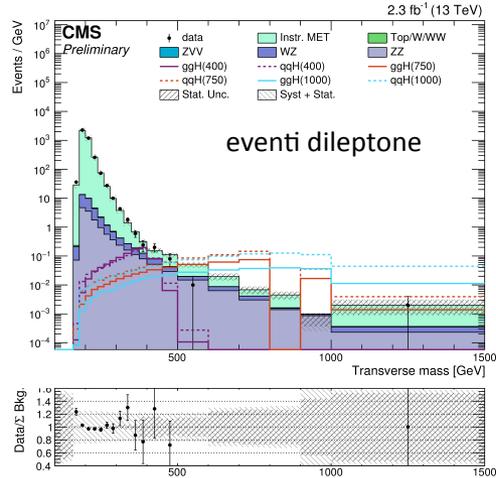


llqq

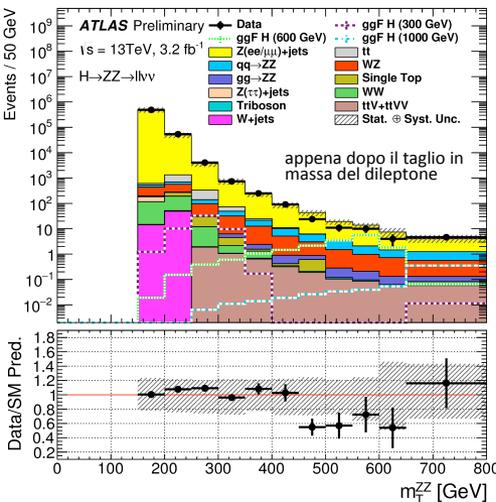
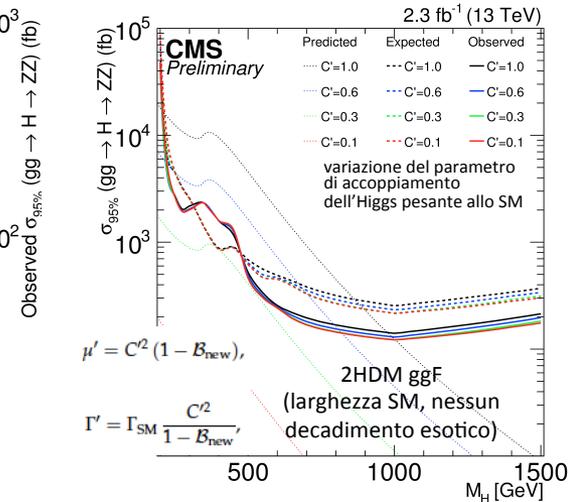
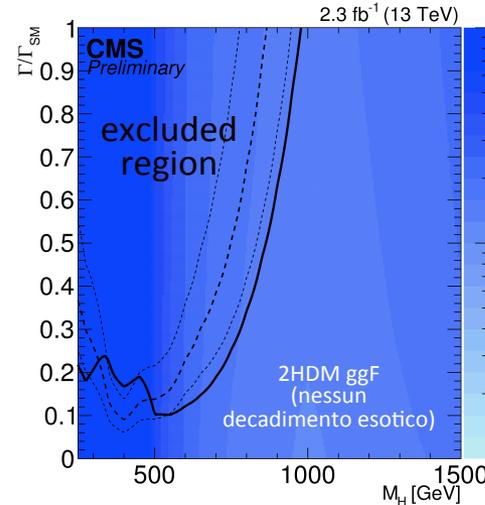


Run 2: ricerche a basa massa in llvv

Sia ATLAS che CMS hanno effettuato importanti analisi dei dati a 13 TeV nel canale llvv ([CMS-PAS-HIG-16-001](#) [Roberto Iuppa](#) e [ATLAS-CONF-2016-012](#))



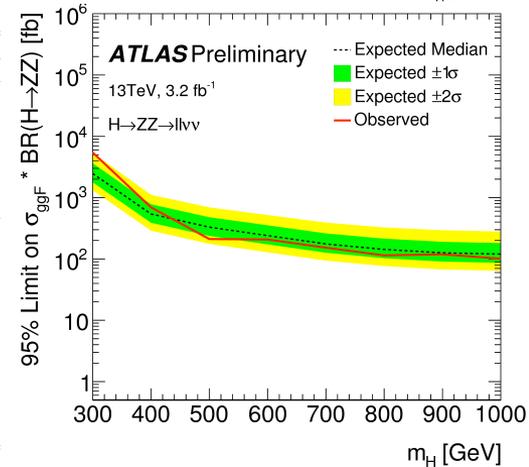
CMS: Fondo Z+jets ("Instr.MET") *stimato dai dati*, ripesando il campione di eventi γ +jets in funzione di p_T e del numero di jet (ATLAS: dai dati ma in regioni di controllo indipendenti).



CMS e ATLAS: Gli altri fondi (non risonanti: ttbar, tW, WW) *stimati dai dati*, ripesando secondo il numero di eventi con due leptoni di sapore differente al di fuori della finestra di massa.

Eventi sopravvissuti alla selezione completa:

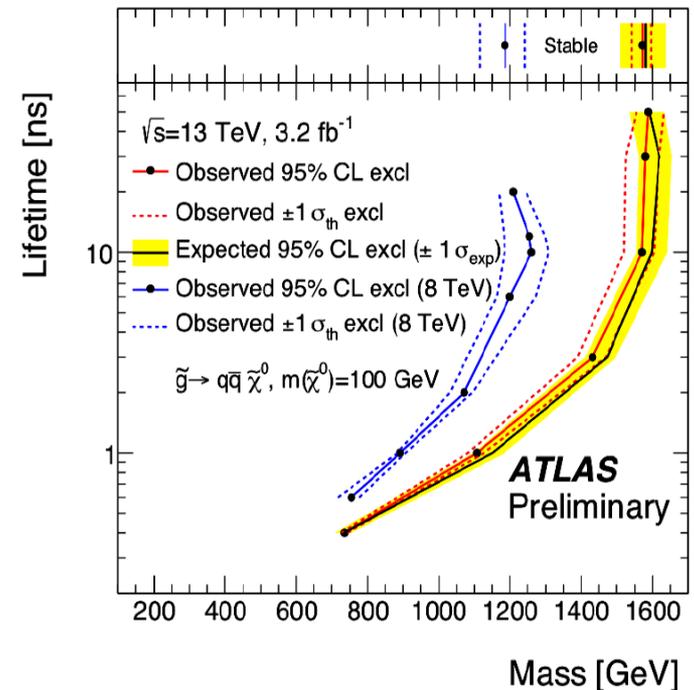
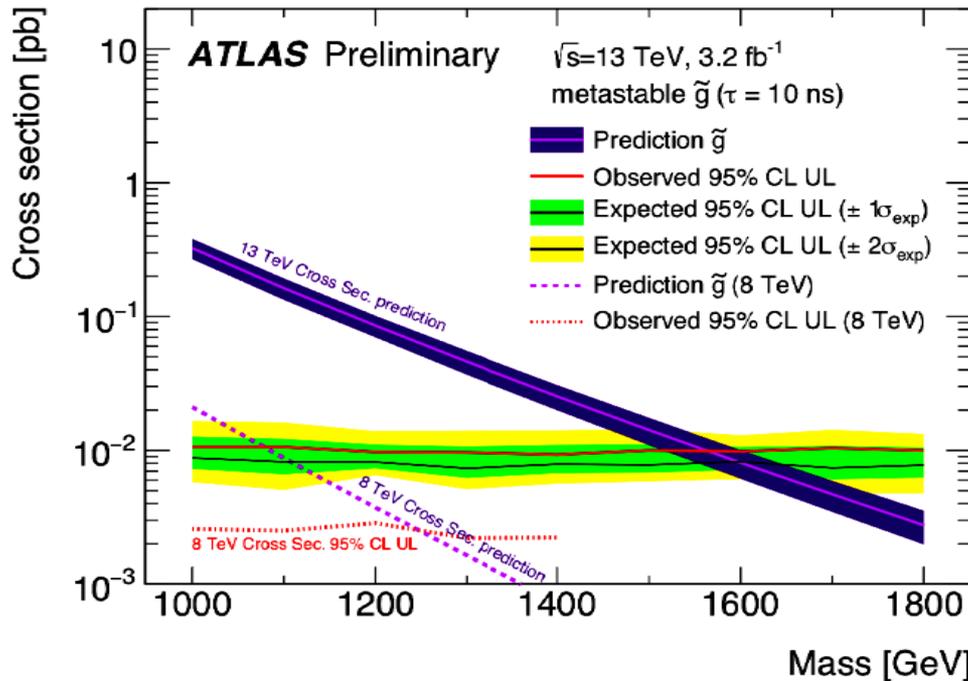
	$ee\nu\nu$	$\mu\nu\nu$
3.2 fb ⁻¹		
Data	33	33
Signal:		
H(m _H = 300 GeV)	4.1±0.3±0.7	4.6±0.3±0.5
H(m _H = 600 GeV)	6.9±0.2±0.5	6.1±0.2±0.4
H(m _H = 1 TeV)	0.61±0.01±0.05	0.49±0.01±0.04
RS Graviton (m _{G*} = 600 GeV)	16.1±0.7±1.3	13.4±0.6±0.9
RS Graviton (m _{G*} = 800 GeV)	3.3±0.1±0.3	2.6±0.1±0.2
Backgrounds:		
q \bar{q} → ZZ (MC)	16.1±0.3±1.3	16.8±0.3±1.4
gg → ZZ (MC)	1.5±0.03±0.5	1.5±0.03±0.5
WZ (data-driven)	8.4±0.5±1.0	8.8±0.6±1.0
Z(→ ee, μμ)+jets (data-driven)	2.8±2.0±1.9	1.9±1.7±1.9
WW/ττ/Wτ/Z(→ ττ) (data-driven)	0.4±0.5±0.05	0.5±0.5±0.05
Fake lepton (data-driven)	0.02±0.01±0.01	<0.06
Tri-boson	0.08±0.01±0.01	0.08±0.01±0.01
t \bar{t} + V/j \bar{t} + VV	0.02±0.01±0.01	0.03±0.01±0.01
Total background	29±2±3	30±2±3



R-adroni altamente ionizzanti

da ATLAS_SUSY_2016_0301

Particelle metastabili cariche, pesanti e lente → appaiono come "elettroni" con dE/dx insolitamente alto.



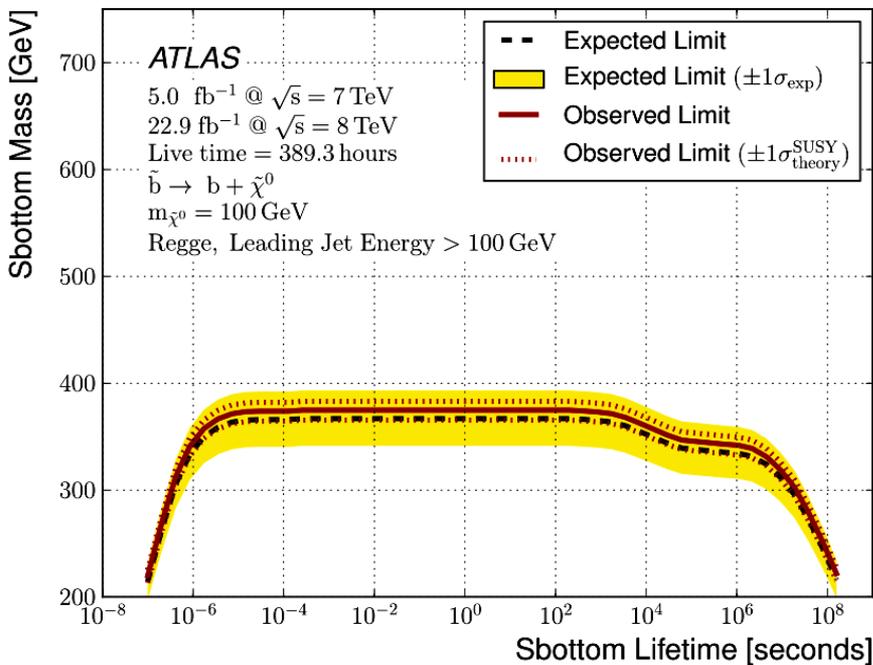
Nel modello **Split-SUSY** lo squark più leggero ha massa di 10^3 - 10^5 TeV e quindi il gluino (1 TeV compatibile con Higgs 125 GeV) è l'unica particella SUSY accoppiata forte al Modello Standard producibile a LHC. Viene prodotta in R-adroni che poi decadono in $q\bar{q} + \chi_0$. La vita media dipende solo dalla differenza di massa tra gluino e neutralino.

L'analisi riportata considera anche altri modelli (chargino da AMSB).

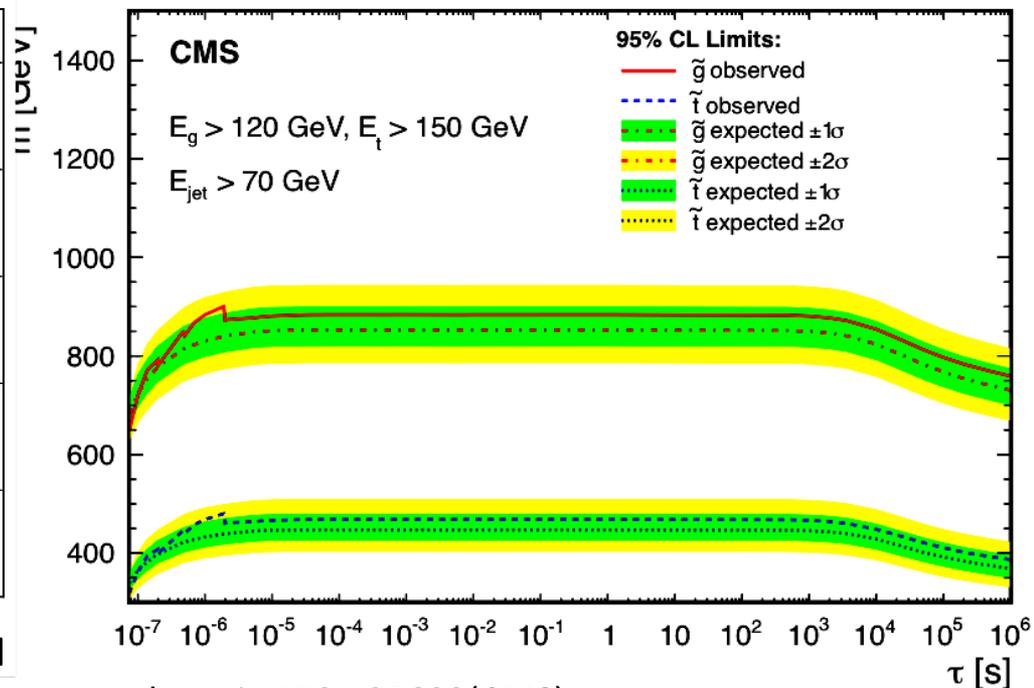
R-adroni “a scoppio ritardato”

Analisi di Run 1

18.6 fb⁻¹(8 TeV)



da [arxiv 1310.6584](https://arxiv.org/abs/1310.6584) (ATLAS)

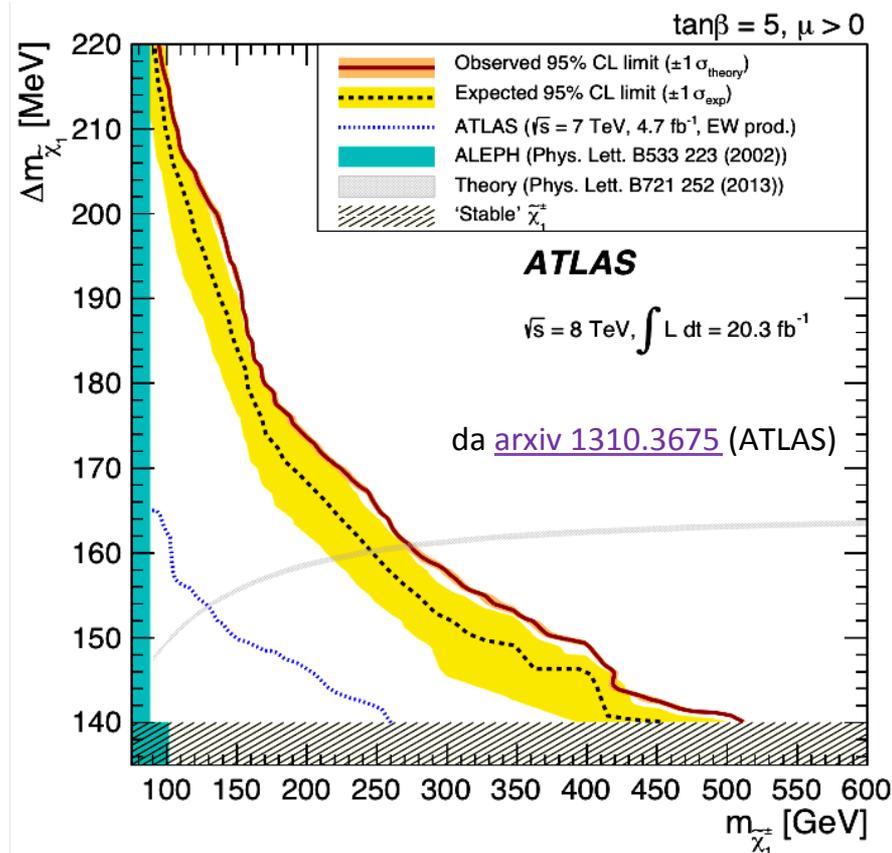
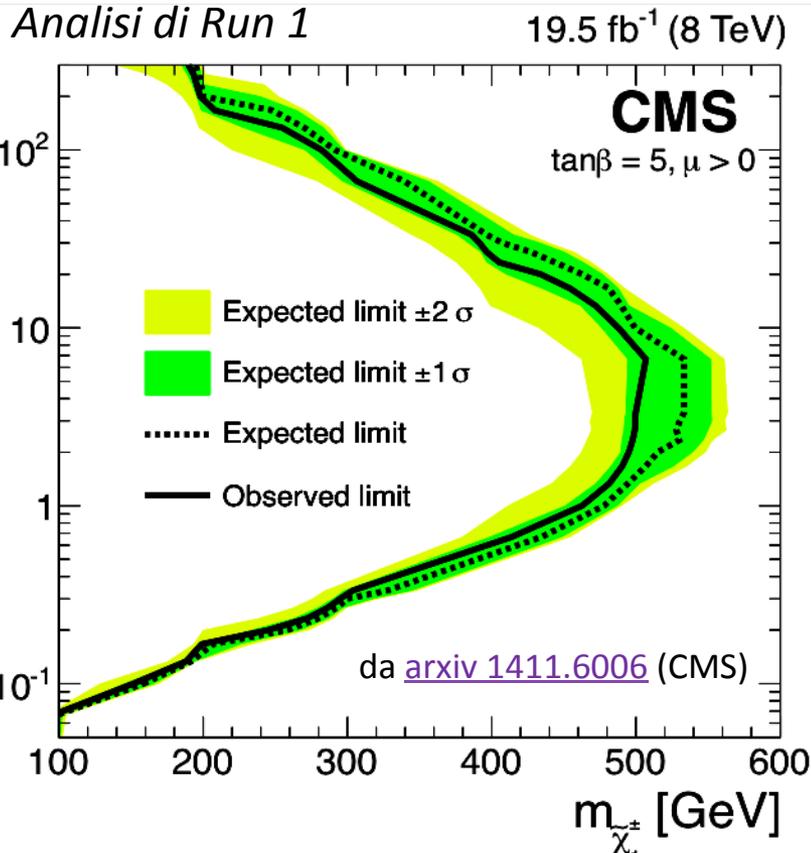


da [arxiv 1501.05603](https://arxiv.org/abs/1501.05603)(CMS)

Ancora nell’ambito del modello **Split-SUSY** è assai studiata la topologia degli “stopped R-hadrons”, dove gli R-adroni perdono presto tutta la loro energia per ionizzazione e si fermano nel calorimetro. Dopo un intervallo di tempo legato alla loro vita media decadono in neutralino+jet. Segnatura: attività nel calorimetro durante intervalli di tempo in cui non ci sono bunch-crossing.

Sparizione di tracce

Roberto Iuppa

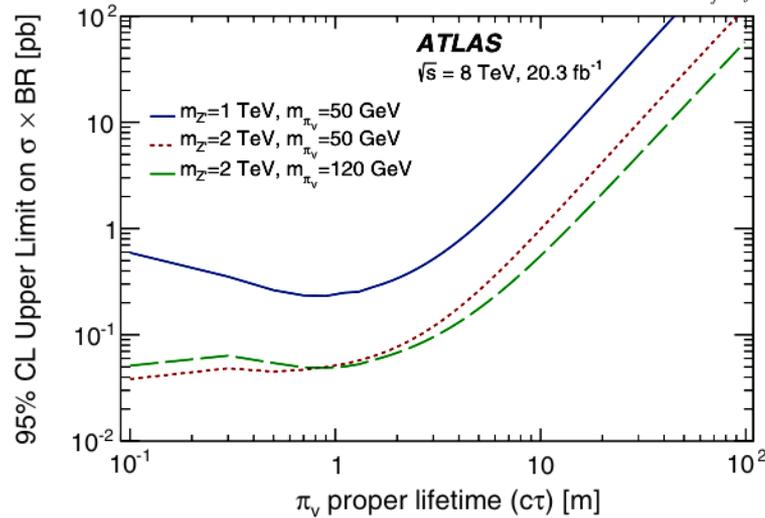
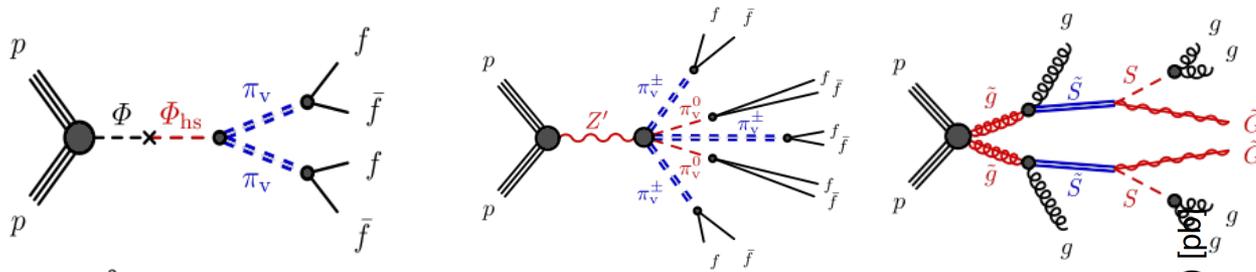


In modelli come AMSB, il chargino ha massa appena maggiore del neutralino. Poiché la vita media è sempre inversamente proporzionale alla differenza di massa, il chargino può viaggiare nel rivelatore (ionizzando) prima di decadere in neutralino e pioni carichi. Il pione però ha troppo poco impulso per essere ben ricostruito. Segnatura: traccia nel rivelatore interno senza segmenti associati nelle camere a muoni, con minima attività associabile nel calorimetro, (magari) senza hit negli strati più esterni del rivelatore interno.

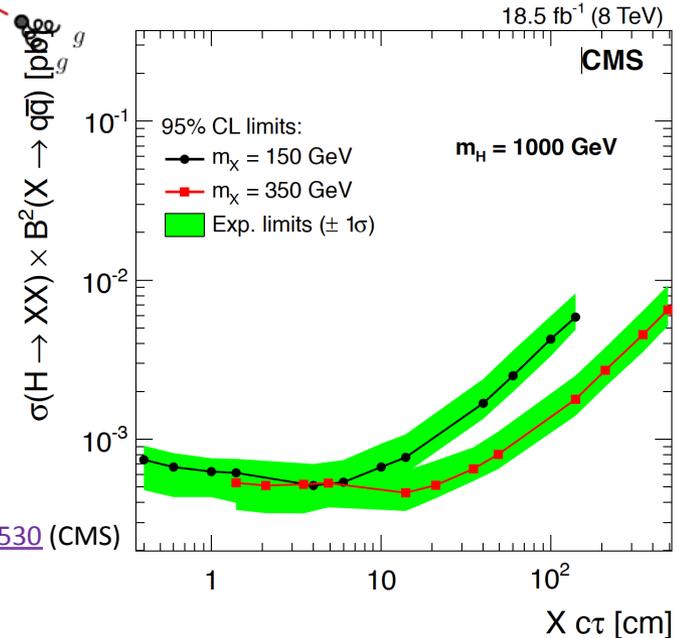
Vertici discosti

Roberto Iuppa

Analisi di Run 1



da [arxiv 1504.03634](https://arxiv.org/abs/1504.03634) (ATLAS)



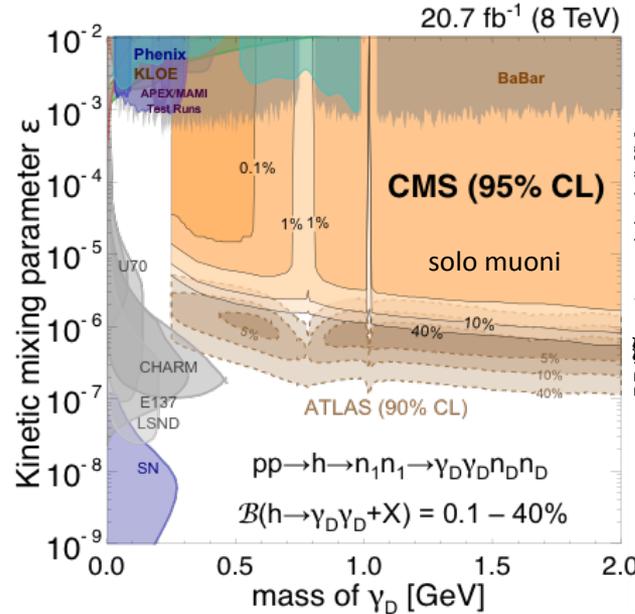
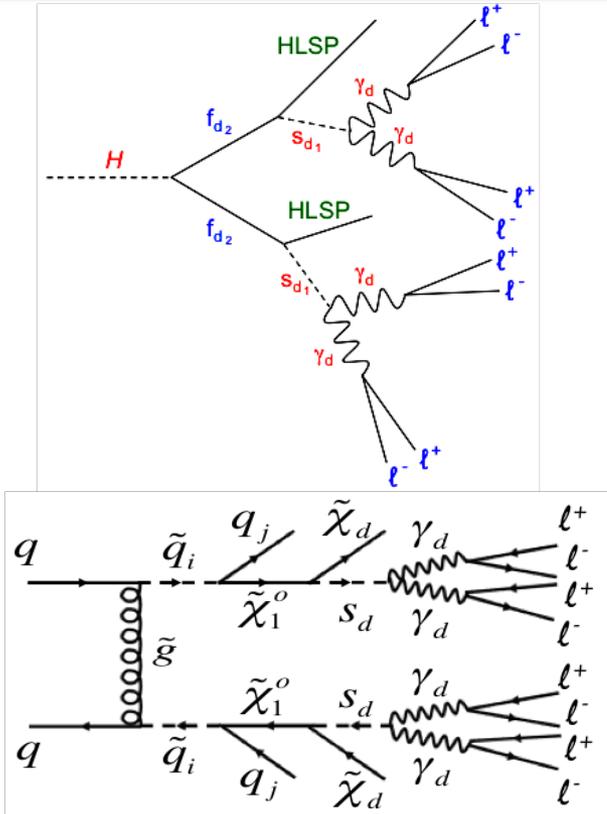
da [arxiv 1411.6530](https://arxiv.org/abs/1411.6530) (CMS)

In numerose estensioni del Modello Standard (Hidden Valley, Stealth-SUSY) è prevista la produzione di particelle neutre a lunga vita media che decadono in jet adronici.

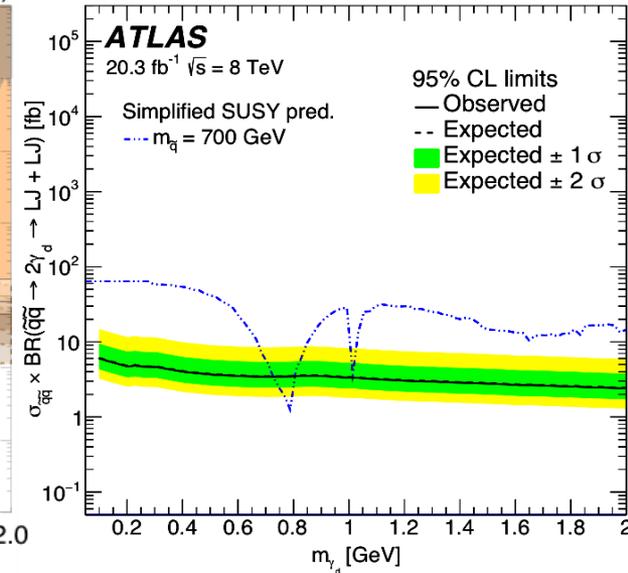
La topologia dell'evento dipende dal rapporto di massa tra la particella esotica generata nell'interazione pp ("prompt") e i suoi prodotti di decadimento esotici ("long lived") che poi danno luogo ai jet adronici. Segnatura: abbondanti gruppi di tracce da un unico vertice molto distante dal punto di interazione (1 cm – 15 m), isolato rispetto a tutto ciò che lo precede.

Jet di leptoni

Roberto Iuppa



da [arxiv 1506.00424](https://arxiv.org/abs/1506.00424) (CMS)



da [arxiv 1511.05542](https://arxiv.org/abs/1511.05542) (ATLAS)

Analisi di Run 1

La ricerca di jet di leptoni assume particolare importanza nel caso dell'esistenza di un fotone pesante γ_D ("dark photon") in mixing con il fotone SM. Poiché γ_D ha bassa massa, viene prodotto con alto boost e lunga vita media, per poi decadere in coppie di leptoni molto collimati.

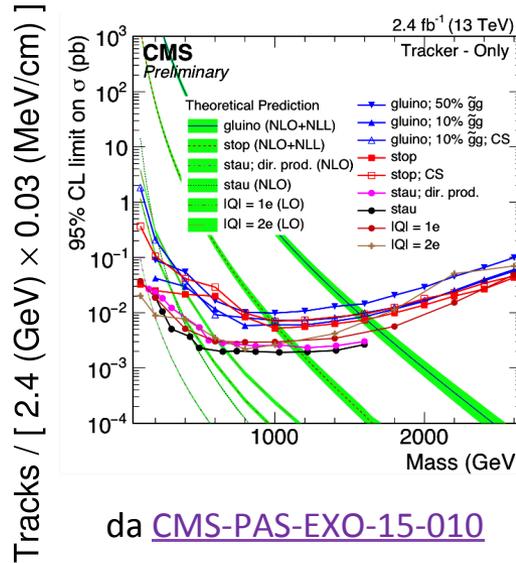
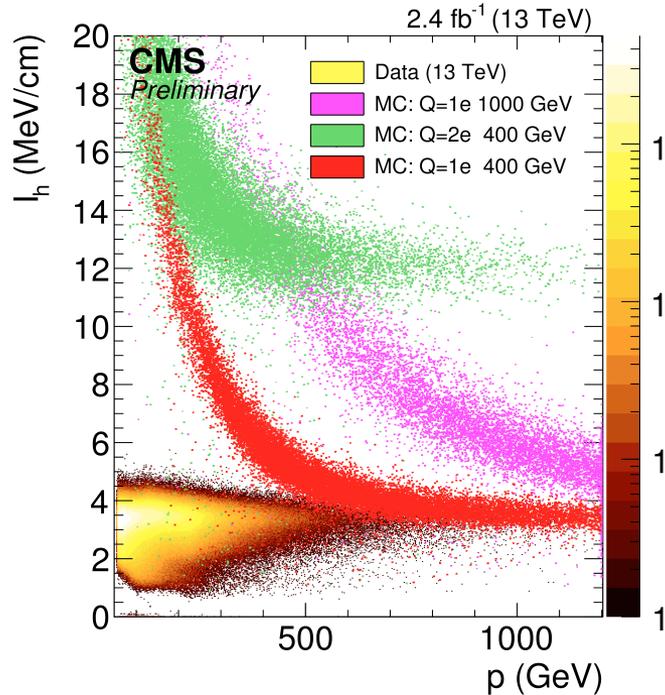
Segnatura: coppie di leptoni molto collimati (jet di leptoni) prompt ma non solo. Modelli considerati: Hidden Sector con Higgs come mediatore, SUSY + hidden sector.

LLP pesanti e stabili

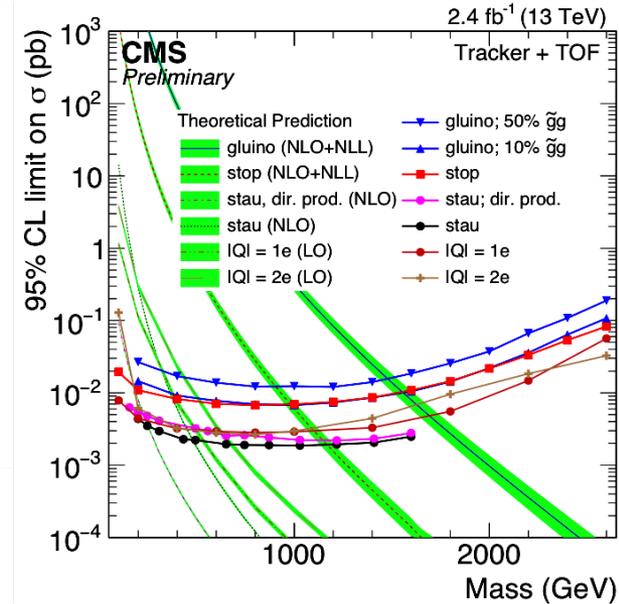
Scenari nei quali è prevista l'esistenza di LLP di alta massa e vita media molto lunga (stabili):

- **SUSY**: produzione di stau diretta o attraverso GMSB
- **SUSY**: squark (stop, il più leggero)
- **Split-SUSY** con R-adroni da gluino

Possibile anche la ricerca generica di particelle a lunga vita media con carica 1e o 2e.



da [CMS-PAS-EXO-15-010](#)



Segnatura: particella lenta, massiva e altamente ionizzante. Misura possibile con il solo tracciatore al silicio in campo magnetico (dE/dx e p), ma per basse masse l'uso del TOF con le camere a muoni aumenta notevolmente la sensibilità.

Conclusioni



[Roberto Iuppa](#)

- Sono stati riportati grafici e risultati da ventisette pubblicazioni di ATLAS e CMS, nell'ambito della ricerca di risonanze di due bosoni e di particelle esotiche stabili o metastabili.
- Nel primo tipo di ricerca, la **bassa statistica accumulata finora nel Run 2** non consente di trarre conclusioni certe sull'eccesso di eventi a circa 2 TeV osservato al termine del Run 1.
- Anche per via dell'interesse suscitato dai risultati delle analisi in due fotoni, le ricerche di **eccessi di due bosoni a valori di massa invariante inferiori al TeV** sono state avviate e cominciano ad essere disponibili i primi risultati preliminari: **nessun eccesso significativo** in $l\nu q\bar{q}$ (CMS), $l\bar{l}q\bar{q}$ (ATLAS), $l\nu\nu$ (ATLAS/CMS).
- Continua ad ATLAS e CMS la ricerca di nuove particelle stabili/metastabili che diano signature esotiche: **ionizzazioni anomale, sparizioni di tracce o apparizioni di vertici discosti risultano essere tuttora eventi la cui frequenza è compatibile con le aspettative di fondo**: i nuovi risultati pongono limiti sempre più stringenti a modelli di supersimmetria e Hidden Valley.
- **In ogni caso**, risultati importanti attesi per IFAE2017.

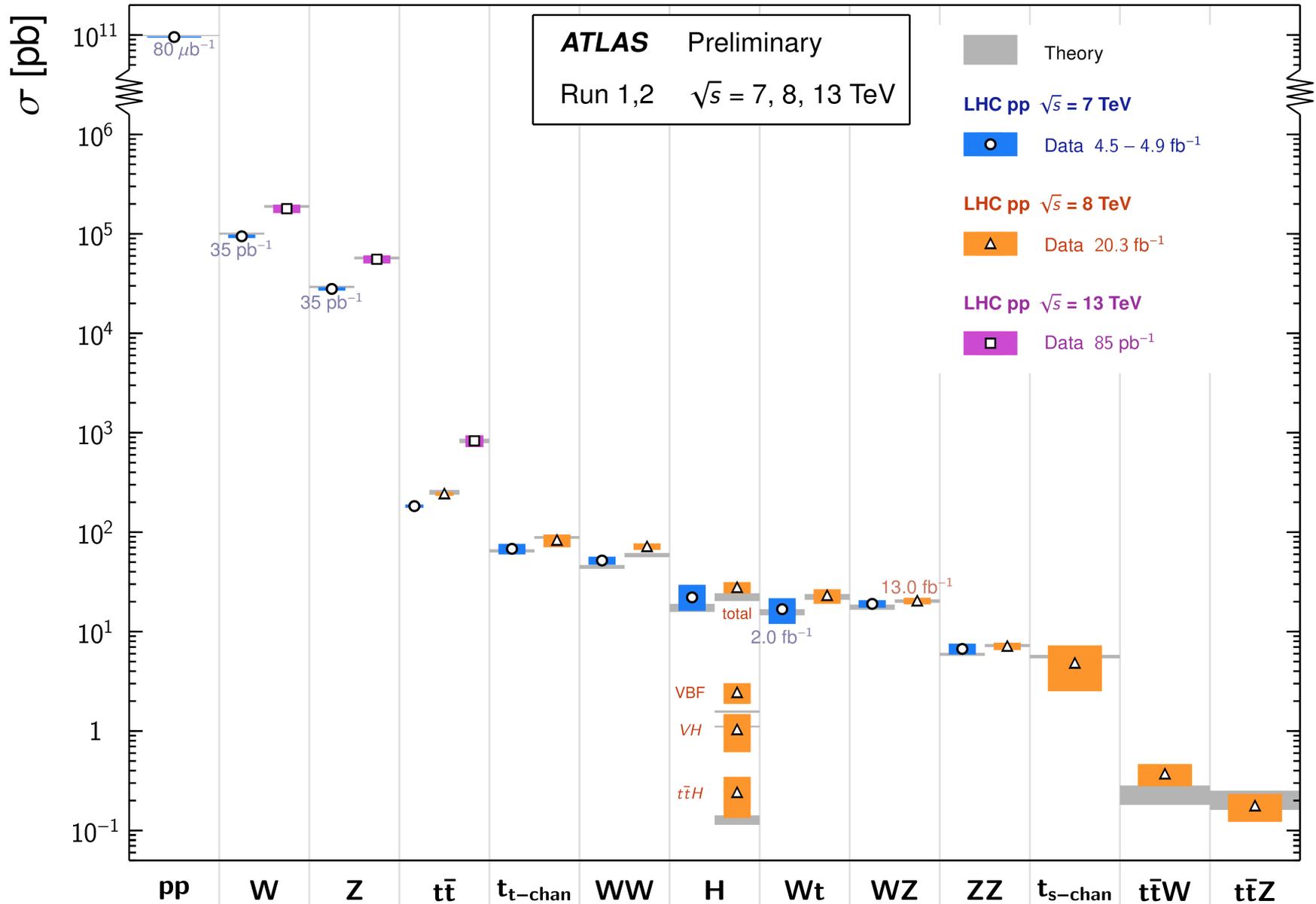
Altro materiale



[Roberto Iuppa](#)

Standard Model Total Production Cross Section Measurements

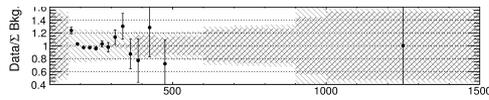
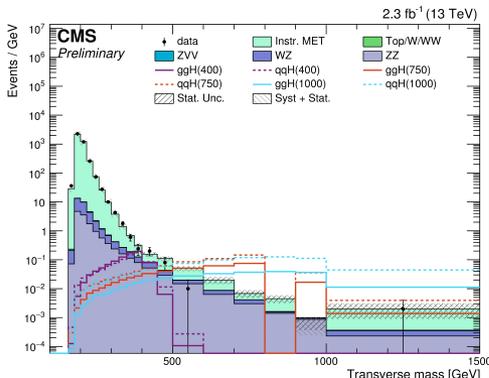
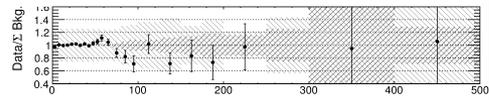
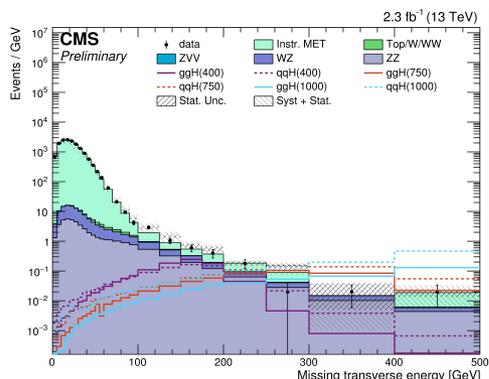
Status: Nov 2015



Run 2 CMS: llvv

Roberto Iuppa

CMS ha effettuato un'importante analisi dei dati a 13 TeV nel canale llvv ([CMS-PAS-HIG-16-001](#))



Fondo Z+jets ("Instr.MET") *stimato dai dati*, ripesando il campione di eventi γ +jets in funzione di p_T e del numero di jet.

Gli altri fondi (non risonanti: ttbar, tW, WW) *stimati dai dati*, ripesando secondo il numero di eventi con due leptoni di sapore differente al di fuori della finestra di massa.

