

SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Centounesimo congresso nazionale

Ricerca di particelle a lunga vita media che decadono in jet adronici nel rivelatore ATLAS

PHYSICAL REVIEW D 92, 012010 (2015)

Roberto Iuppa
CERN

Università degli studi di Roma “Tor Vergata”

roberto.iuppa@cern.ch
roberto.iuppa@roma2.infn.it

Le particelle a lunga vita media

Numerosi modelli di fisica delle particelle oltre quello Standard ammettono l'esistenza di particelle a lunga vita media:

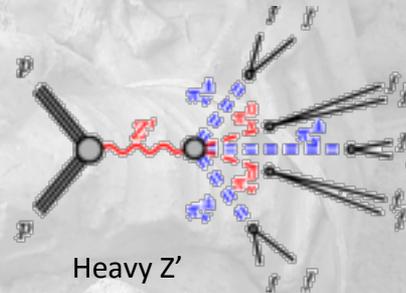
Hidden sectors, decadimenti RPV, Split-SUSY, GMSB, AMSB, interazioni inelastiche di materia oscura, 2HDM, modelli di bariogenesi.

Le variabili fisiche su cui basare l'osservazione dipendono dalla natura della particella considerata:

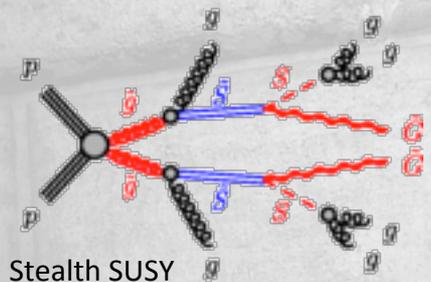
- lenta → misure di tempo di volo
- altamente ionizzante → misure dE/dx
- carica che decade → misure di sparizione o tracce particolari
- neutra che decade → **vertici spostati**, misure di MET



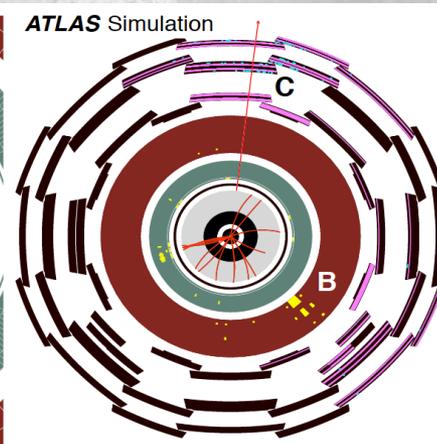
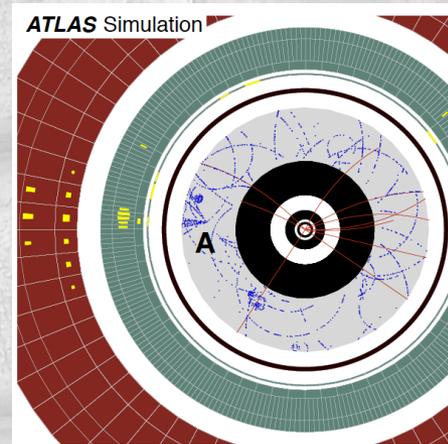
Higgs boson or scalar
boson model



Heavy Z'
boson model

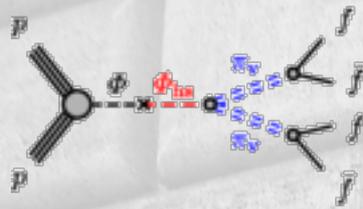


Stealth SUSY
model

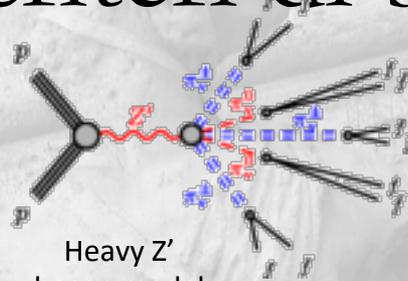


Due eventi $H \rightarrow \pi_\nu \pi_\nu$ con differenti segnature di decadimento in jet adronici. A sinistra: un π_ν decade nel rivelatore interno (A). A destra: un π_ν decade nel calorimetro adronico (B) e un secondo π_ν nello spettrometro a muoni (C).

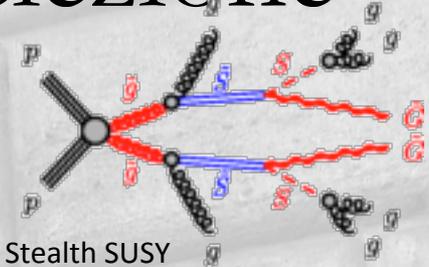
Dati e criteri di selezione



Higgs boson or scalar
boson model



Heavy Z'
boson model



Stealth SUSY
model

20.3 fb⁻¹ di luminosità integrata nel run 2012 di LHC (19.5 fb⁻¹ per il canale Muon Cluster).

Due canali di analisi, sulla base del trigger.

Muon ROI Cluster trigger, preseleziona eventi con vertici spostati nello spettrometro a muoni.

Canale utile per lo studio dei modelli Higgs/ scalare in π_ν e Stealth SUSY. In questi modelli i decadimenti sono in direzioni praticamente opposte, quindi c'è pochissima energia trasversa mancante (MET).

Jet + MET trigger, utile per lo studio del caso Z' , in cui manca l'isolamento richiesto dal Muon ROI Cluster trigger. Si sfrutta la caratteristica di numerosità dell'evento Z' . Tra le numerose particelle a lunga vita media, qualcuna decadrà tanto presto da generare un jet e qualcun'altra abbastanza tardi da contribuire all'energia trasversa mancante.

Per ridurre ulteriormente il background si richiede la presenza di **due vertici spostati**.

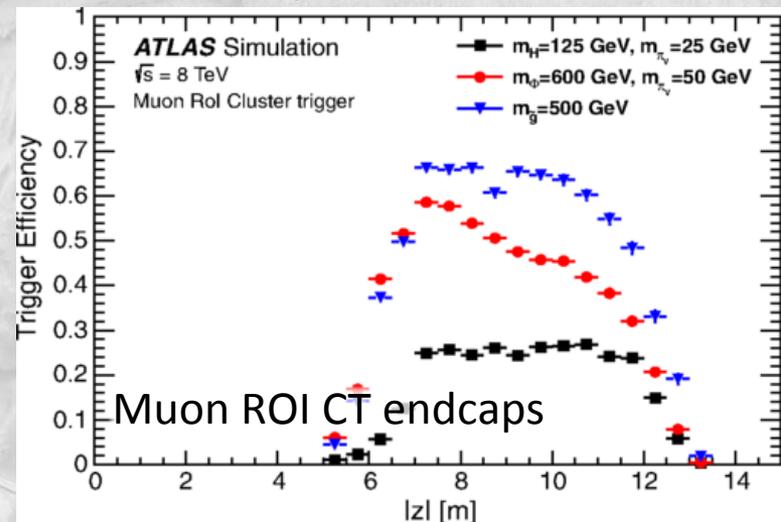
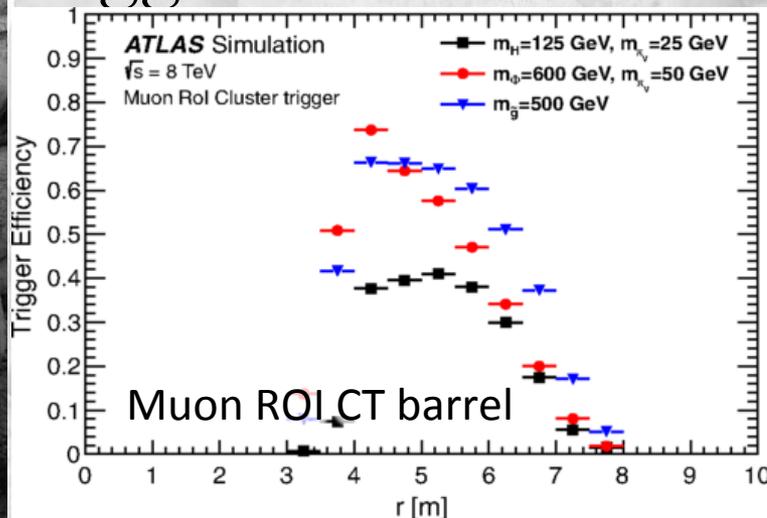
Trigger	Applicable topologies	Benchmarks
Muon ROI Cluster	IDVx + MSVx, 2MSVx	Scalar boson, stealth SUSY
Jet + E_T^{miss}	2IDVx, IDVx + MSVx, 2MSVx	Z'

Scalar boson mass [GeV]	π_ν mass [GeV]
100	10, 25
125	10, 25, 40
140	10, 20, 40
300	50
600	50, 150
900	50, 150

Z' mass [GeV]	π_ν mass [GeV]
1000	50
2000	50, 120

\tilde{g} mass [GeV]	\tilde{S}, S mass [GeV]
110	100, 90
250	100, 90
500	100, 90
800	100, 90
1200	100, 90

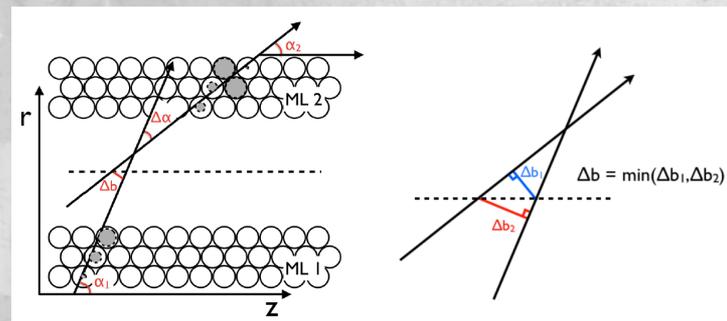
Spettrometro a muoni: trigger e ricostruzione di tracce/vertici



Trigger: Cluster di tracce nel MS isolate in $\Delta R=0.4$ (sia da depositi nei calorimetri che da tracce nel tracciatore interno. Efficienza 20-70%.

Algoritmo di ricerca di tracce e vertici:

1. costruzione dei segmenti nei singoli multilayer (ML) MDT (ottenuti minimizzando χ^2 , se la probabilità è $P > 5\%$);
2. combinazione di segmenti contigui (ML1 e ML2) in tracklet sulla base di specifici criteri su Δb e $\Delta \alpha$ (barrel ed endcap);
3. raggruppamento conico ($\Delta R < 0.6$) delle tracklet
4. candidato vertice: almeno 3 tracklet nel cono, diretto verso il punto di interazione e t.c. $|\eta| < 2.2$
5. "buon vertice": isolamento da tracce ID con $p_T \geq 5 \text{ GeV}/c$ ($\Delta R > 0.4$) e da jet con $E_T > 15 \text{ GeV}$ ($\Delta R > 0.7$).

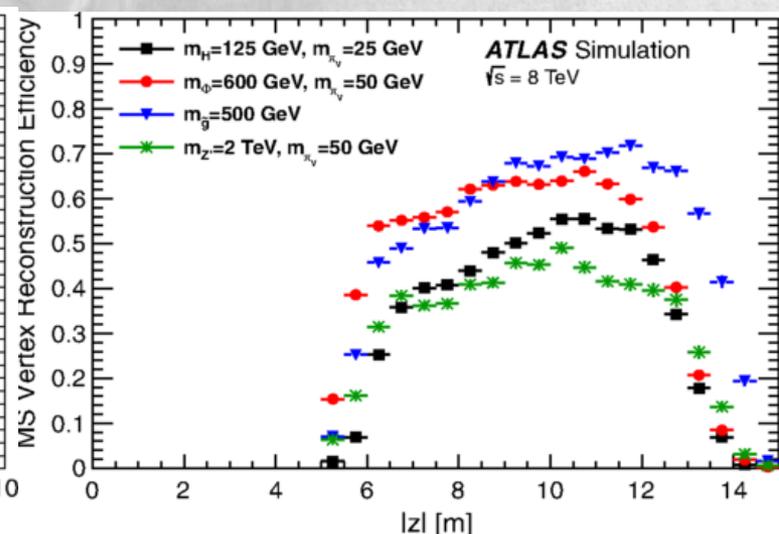
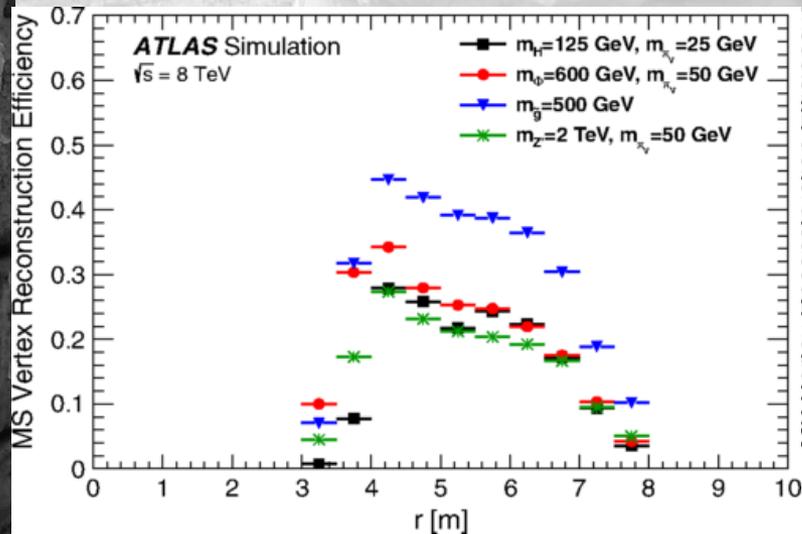


JINST 9 (2014) P02001

Spettrometro a muoni: ricostruzione degli eventi

Ricostruzione: tracce tramite algoritmo dedicato; vertici accettati come buoni se soddisfano i criteri sotto indicati. Efficienza nel barrel 20-40%.

Requirement	Barrel	Endcap
MDT hits	$300 \leq n_{\text{MDT}} < 3000$	$300 \leq n_{\text{MDT}} < 3000$
RPC/TGC hits	$n_{\text{RPC}} \geq 250$	$n_{\text{TGC}} \geq 250$
Track isolation	$\Delta R < 0.3$	$\Delta R < 0.6$
Track Σp_T	$\Sigma p_T < 10 \text{ GeV}$	$\Sigma p_T < 10 \text{ GeV}$
Jet isolation	$\Delta R < 0.3$	$\Delta R < 0.6$

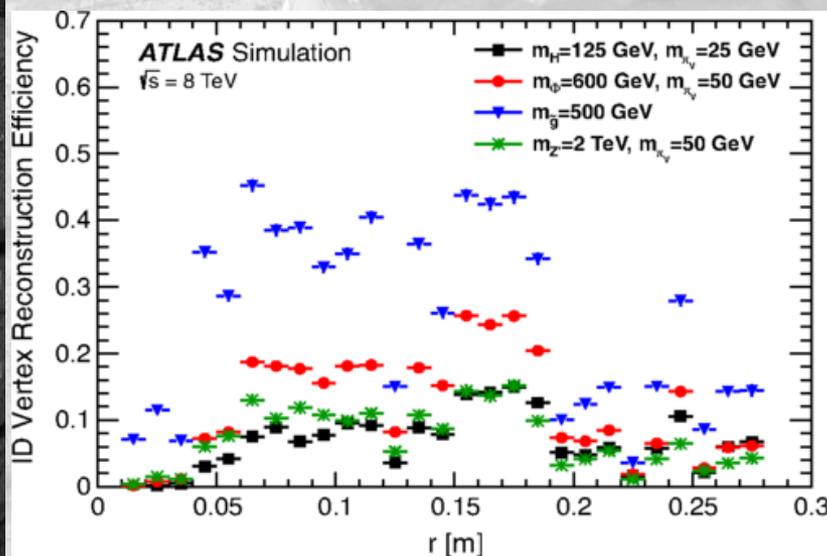


Tracciatore interno: trigger e ricostruzione di tracce/vertici

L'efficienza del trigger jet(>110 GeV) + MET(>75 GeV) è praticamente 100% (85-100% dopo l'indurimento di secondo livello jet(>120 GeV) + MET(>200 GeV)).

La ricostruzione delle tracce avviene applicando a tutti gli hit rimasti non associati ad alcuna traccia il medesimo algoritmo utilizzato per trovare tracce "standard", modificando adeguatamente i parametri di selezione.

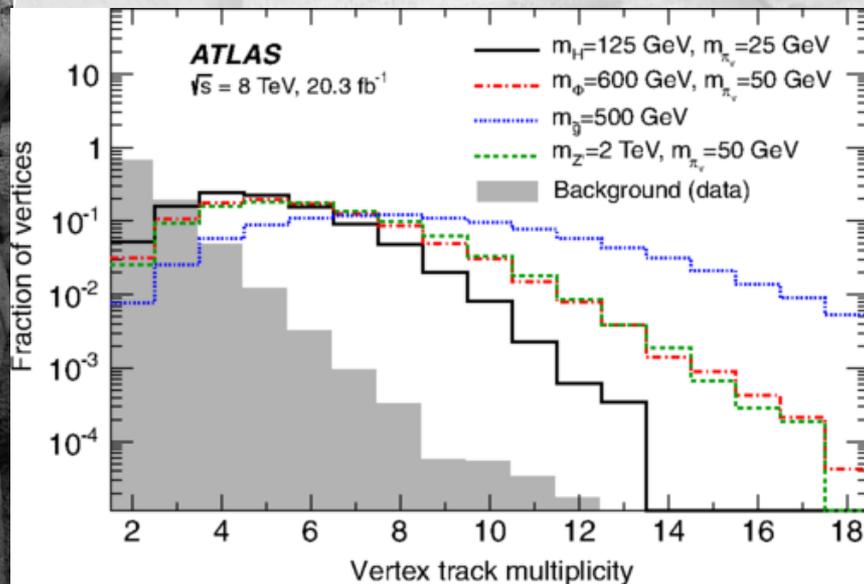
Anche la ricostruzione dei vertici spostati segue l'algoritmo "standard", i cui parametri d'applicazione sono modificati.



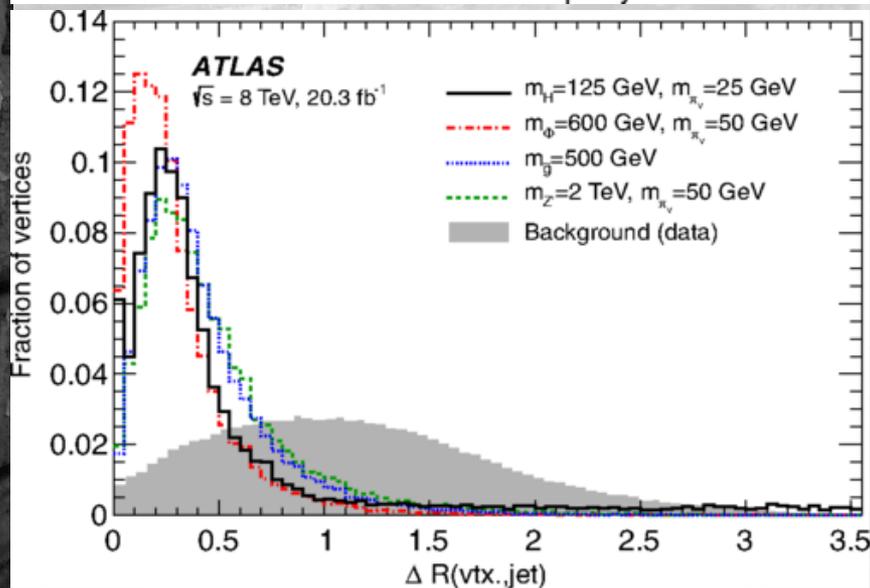
Track reconstruction		
Parameter	Default value	Modified value
Maximum d_0	10 mm	500 mm
Maximum $ z_0 $	320 mm	1000 mm
Minimum number of silicon hits	6	2
Maximum number of shared hits	1	2

Tracks for vertex reconstruction		
Parameter	Default value	Modified value
Minimum d_0	–	10 mm
Maximum $d_0/\sigma(d_0)$	5	–
Maximum $ z_0 /\sigma(z_0)$	10	–
Minimum number of silicon hits	6	4
Minimum number of pixel hits	1	0
Minimum number of SCT hits	4	2
Maximum track $\chi^2/d.o.f.$	3.5	5

Tracciatore interno: ricostruzione degli eventi



Requirement	Muon Cluster channel	Jet + E_T^{miss} channel
d/σ from material	≥ 6	≥ 6
Vertex χ^2 probability	> 0.001	> 0.001
Number of tracks	≥ 5	≥ 7
$\Delta R(\text{vtx}, \text{jet})$	< 0.4	< 0.6



I criteri per l'accettazione di un candidato vertice spostato nel tracciatore interno riguardano il veto su vertici secondari provenienti da interazioni con il materiale, numero di tracce ed isolamento.

Incertezze sistematiche

Tracciatore interno. Incertezze stimate tramite un campione di controllo di eventi a multijet (dati e Montecarlo). Decadimenti KS determinano l'incertezza sulla ricostruzione delle tracce e la rimozione casuale di tracce determina quella sulla ricostruzione del vertice. Incertezze da pileup, JES, ISR/FSR sono trascurabili.

Spettrometro a muoni. Incertezze stimate tramite un campione di controllo di eventi con jet punch-through (dati e Montecarlo). 9% (barrel) e 6%(endcaps) è l'incertezza sul *trigger*. 5% (barrel) e 11% (endcaps) è l'incertezza sulla ricostruzione. JES, pilup e ISR sono meno importanti.

TABLE VI. Summary of the systematic uncertainties on displaced vertex reconstruction efficiencies in the ID and MS.

m_{Φ} [GeV]	$m_{\pi_{\nu}}$ [GeV]	IDVx [%]	MSVx [%]	
			Barrel	Endcaps
100	10	2.7	6.8	11.2
100	25	2.1	6.4	10.4
125	10	2.5	7.0	9.9
125	25	2.5	6.8	9.7
125	40	2.4	6.5	8.0
140	10	2.7	7.0	9.6
140	20	2.7	6.6	9.6
140	40	1.6	6.6	7.9
300	50	2.7	6.9	6.3
600	50	2.9	6.8	5.4
600	150	3.1	6.6	4.0
900	50	3.5	6.6	5.7
900	150	3.0	5.9	3.8

$m_{\tilde{g}}$ [GeV]	IDVx [%]	MSVx [%]	
		Barrel	Endcaps
110	3.8	5.6	4.0
250	2.3	5.8	3.8
500	2.4	6.3	3.8
800	2.7	6.5	3.5
1200	1.5	6.6	3.8

$m_{Z'}$ [TeV]	$m_{\pi_{\nu}}$ [GeV]	IDVx [%]	MSVx [%]	
			Barrel	Endcaps
1	50	2.5	6.8	6.3
2	50	2.6	7.0	6.6
2	120	2.2	6.6	5.2

Stima del fondo

CASUALI NEL TRACCIATORE INTERNO

Canale Muon Cluster. Il campione di controllo è costituito da eventi con jet leading con $p_T > 230$ GeV.

Frazione di casuali attese: da 2×10^{-5} a 3×10^{-4} a seconda del campione (incertezza 20%).

Canale jet + MET. Regioni di controllo con $MET < 75$ GeV (minima contaminazione con la regione di segnale).

Frazioni di casuali attese: da 4×10^{-6} a 3×10^{-5} a seconda del campione (incertezza 20%).

TABLE VIII. The numbers of events necessary to calculate the background prediction. N^{1cl} , N_{1UMBcl}^{2cl} , and N_{1UMEcl}^{2cl} are the numbers of events with only one MS vertex containing either one muon RoI cluster (1cl) or two muon RoI clusters (2cl) with one matched to the MS vertex and a second unmatched and located in the barrel/endcaps (1UMBcl/1UMEcl). N_T^{JEmiss} is the number of events that pass the Jet + E_T^{miss} trigger and contain one MS vertex.

Quantity	Value
N^{1cl}	$(1.04 \pm 0.03) \times 10^5$
N_{1UMBcl}^{2cl}	9_{-3}^{+4}
N_{1UMEcl}^{2cl}	4_{-2}^{+3}
N_T^{JEmiss}	29 ± 5

CASUALI NELLO SPETTROMETRO A MUONI

Stima della probabilità

- di ricostruire un vertice MS nonostante in eventi non selezionati dal trigger Muon Cluster su un campione di controllo minbias (osservati 0 eventi).
- di ricostruire un vertice MS in un evento selezionato dal trigger Muon Cluster.

Quantity	Value
P_{noMS}^{vx}	$(0_{-0}^{+5}) \times 10^{-7}$
P_{Bcl}^{vx}	$(1.289 \pm 0.006) \times 10^{-2}$
P_{Ecl}^{vx}	$(8.00 \pm 0.03) \times 10^{-2}$

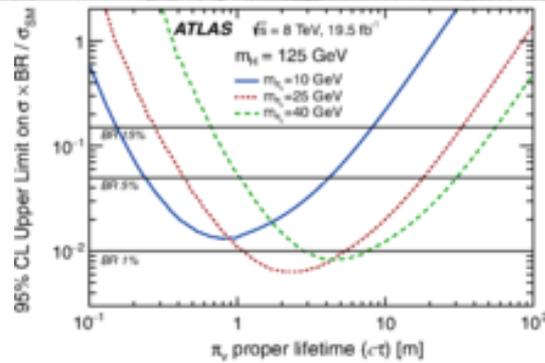
TABLE IX. Number of events predicted for different final-state topologies.

Trigger	Topology	Predicted
Jet + E_T^{miss}	2IDVx	$(1.8 \pm 0.4) \times 10^{-4}$
Jet + E_T^{miss}	IDVx + MSVx	$(5.5 \pm 1.4) \times 10^{-4}$
Jet + E_T^{miss}	2MSVx	$(0.0_{-0.0}^{+1.4}) \times 10^{-5}$
Muon RoI Cluster	IDVx + MSVx	2.0 ± 0.4
Muon RoI Cluster	2MSVx	$0.4_{-0.2}^{+0.3}$

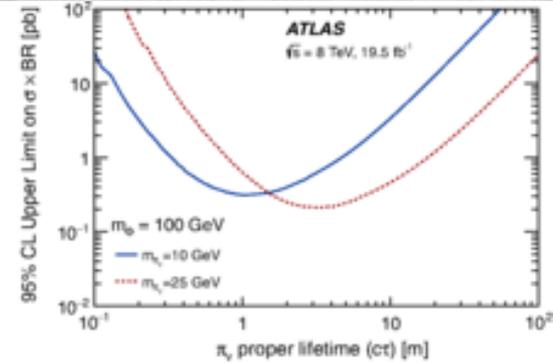
Risultati

TABLE X. Expected number of signal events at 19.5^{-1} fb for the scalar boson benchmark model with $m_H = 125$ GeV and $\text{BR}(H \rightarrow \pi_v \pi_v) = 100\%$, at a π_v proper lifetime of $c\tau = 2$ m. The SM Higgs boson cross section for gluon-fusion production, $\sigma_{\text{SM}} = 18.97$ pb [47], is used to compute numbers of signal events. Also shown are the numbers of expected background and observed events. Uncertainties on expected signal events are statistical only.

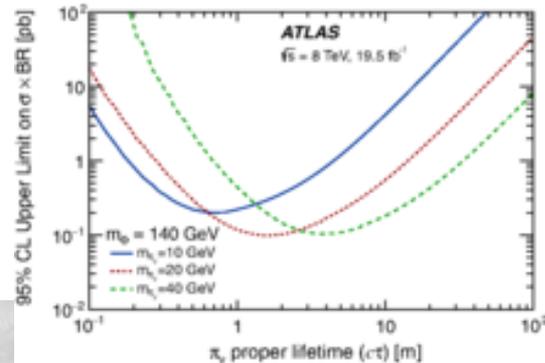
Topology	m_{π_v} [GeV]	Expected events		Observed events
		Signal	Background	
IDVx + MSVx	10	1.9 ± 1.4		0
	25	62 ± 8	2.0 ± 0.4	
	40	41 ± 6		
2 MSVx	10	234 ± 15		2
	25	690 ± 26	$0.4^{+0.3}_{-0.2}$	
	40	313 ± 18		



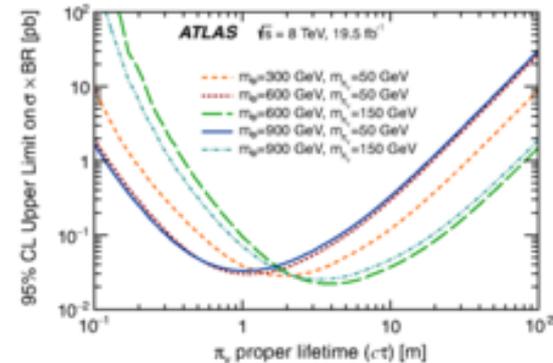
(a)



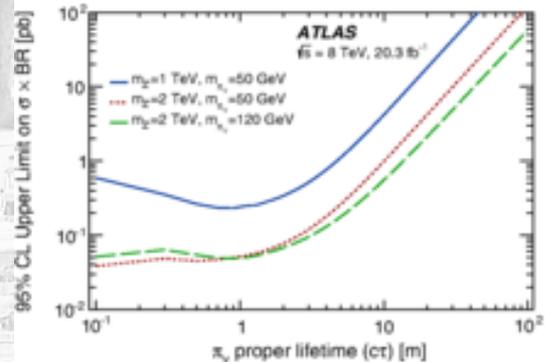
(b)



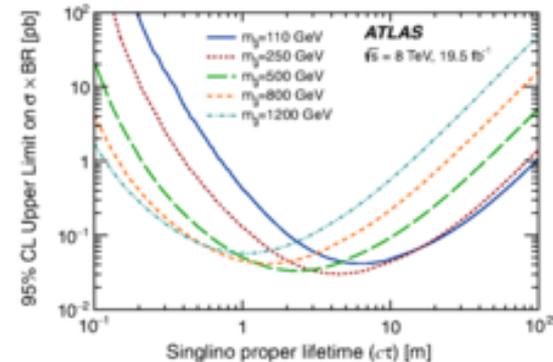
(c)



(d)



(e)



(f)

Conclusioni

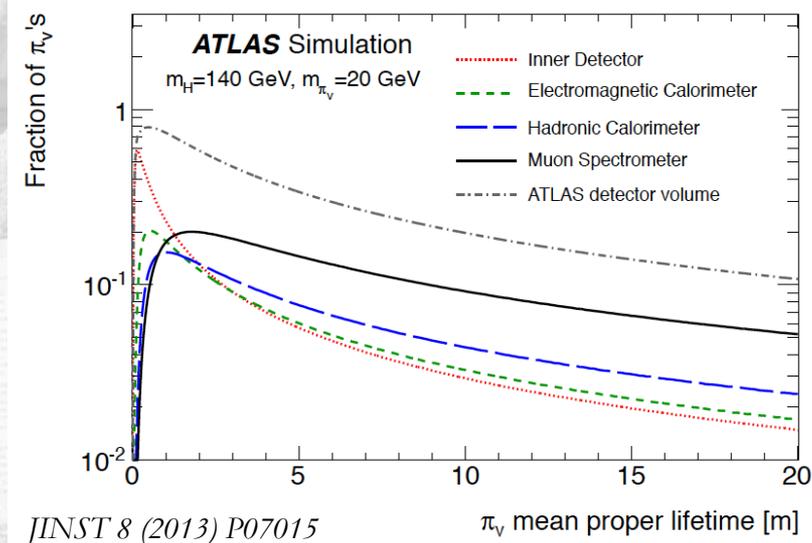
- L'esperimento ATLAS ha esteso la propria ricerca di particelle neutre a lunga vita media non previste dal modello standard.
- E' stata presentata l'analisi dell'insieme di dati raccolto da ATLAS nel 2012, all'energia nel centro di massa di 8 TeV e con luminosità integrata 20.3 fb^{-1} .
- Non è stato osservato nessun segnale significativo e sono stati posti dei limiti alle distanze di volo delle particelle non standard, ovvero alle loro vite medie, per ognuno dei tre modelli considerati (scalari/Higgs con decadimenti nascosti, bosoni vettori pesanti Z' con decadimenti nascosti, Stealth SUSY).
- I limiti posti sono attualmente i più stringenti disponibili per i modelli considerati.

Trasparenze aggiuntive



Simulazione

- PYTHIA per simulare la produzione via gluon fusion $gg \rightarrow h^0$ e il decadimento $h^0 \rightarrow \pi_\nu \pi_\nu$.
- Massa h^0 : 120 GeV/c² e 140 GeV/c².
- Massa π_ν : 20 GeV/c² e 40 GeV/c².
- Sezioni d'urto di produzione previste (risultato pubblicato il 19 giugno 2012):
 - $\sigma(m_{h^0}=120 \text{ GeV}/c^2) = 16.6^{+3.3}_{-2.5} \text{ pb}$
 - $\sigma(m_{h^0}=140 \text{ GeV}/c^2) = 12.1^{+2.3}_{-1.8} \text{ pb}$
- Branching ratio $h^0 \rightarrow \pi_\nu \pi_\nu$ assunto essere 100%.
- Risposta del rivelatore simulata con GEANT4.
- Pile-up riprodotto sovrapponendo all'evento di segnale alcuni eventi di minimum bias.

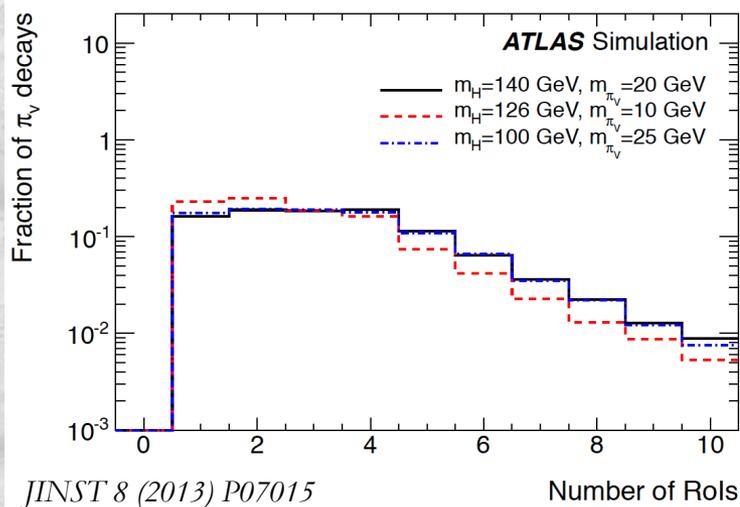


Costruzione del trigger (1)

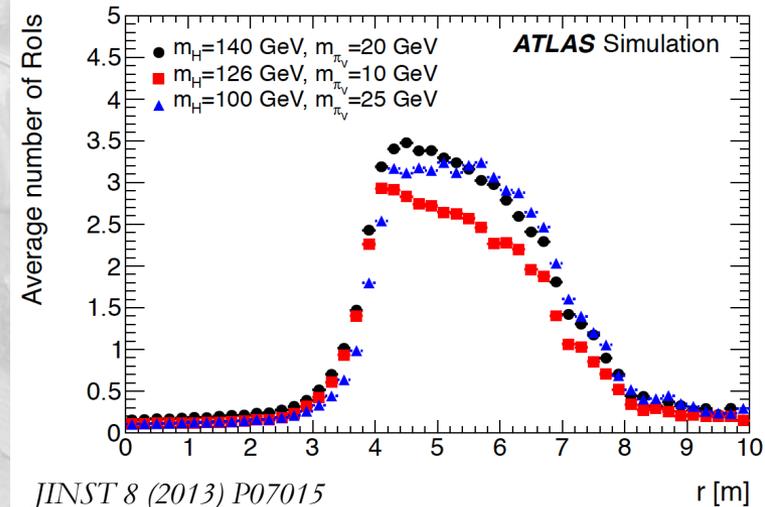
Modelli di test usati per la costruzione dei trigger (vite medie scelte in modo tale da massimizzare il numero di decadimenti entro il volume fiduciale di ATLAS):

Higgs boson mass [GeV]	π_ν mass [GeV]	π_ν mean proper lifetime [m]
100	25	0.125
126	10	0.35
140	20	0.63

JINST 8 (2013) P07015



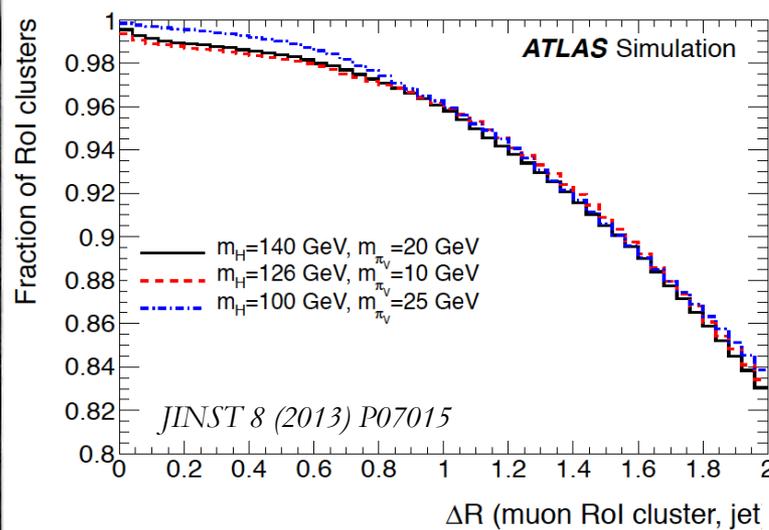
Distribuzione del numero di RoI dei decadimenti di π_ν nel barrel.



Numero medio di RoI in funzione della distanza radiale di decadimento del π_ν nel barrel.

muon cluster: almeno 3 RoI

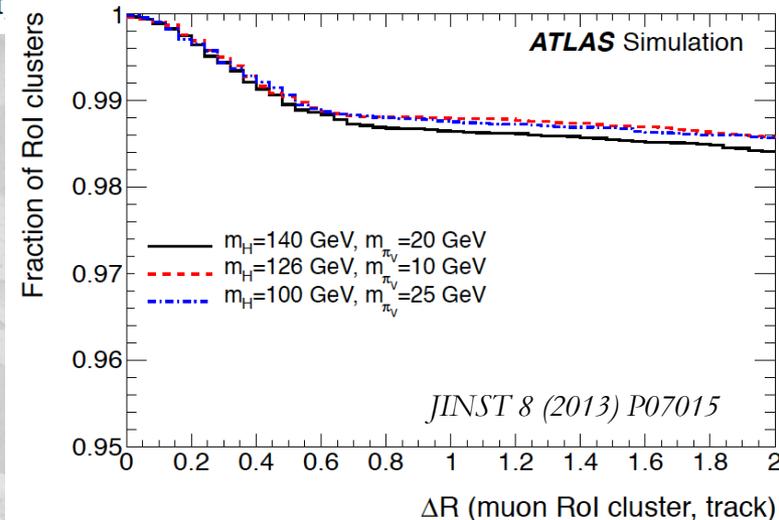
Costruzione del trigger (2)



$\Delta R(\text{m.cl.,jet}) > 0.7$
(perdita di segnale inferiore a 3%)

Frazione di cluster di RoI distanti più di ΔR da qualsiasi traccia del rivelatore interno di trigger L2 tale che $p_T \geq 5$ GeV

Frazione di cluster di RoI distanti più di ΔR da qualsiasi jet di trigger L2 tale che $\log_{10}(E_H/E_E) < 0.5$ (calorimetro calibrato su scala EM) ed $E_T > 30$ GeV.



$\Delta R(\text{m.cl.,track}) > 0.4$
(perdita di segnale inferiore a 1%)

Trigger

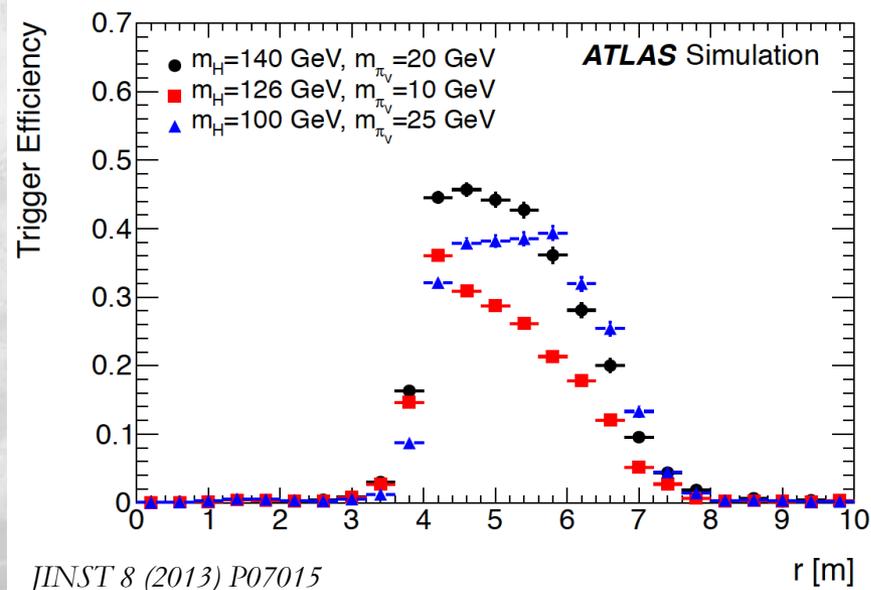
Per la misura di eventi con almeno un decadimento π_{ν} nello spettrometro a muoni è stato sviluppato il *Muon RoI cluster trigger*.

cluster di 3 o più muon RoI nelle camere di trigger del barrel entro un cono $\Delta R < 0.4$

Vengono quindi selezionati eventi un π_{ν} decade nel barrel dello

spettrometro, mentre l'altro può decadere ancora nel barrel o negli endcap. Ulteriori criteri di selezione per abbattere il fondo dovuto a punch-through jet o muon bremsstrahlung:

1. nessun jet con $E_T > 30$ GeV nel calorimetro entro $\Delta R < 0.7$;
2. nessuna traccia con $p_T \geq 5$ GeV/c entro $\Delta \eta \times \Delta \varphi = 0.2 \times 0.2$.



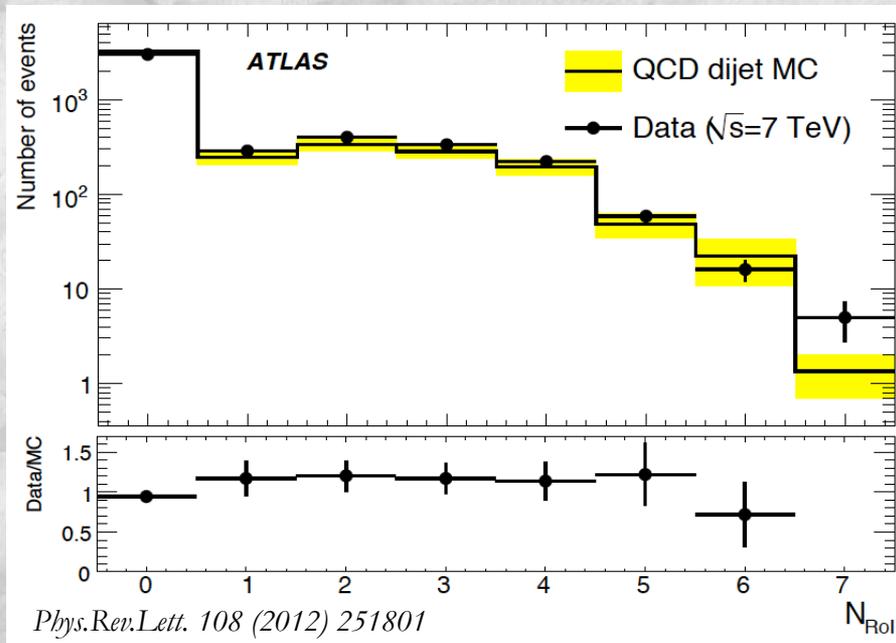
Efficienza di trigger in funzione della distanza radiale di decadimento del π_{ν} (barrel).

Incertezza sistematica sul trigger

Stimata dai dati usando un campione di eventi contenenti jet punch-through (molto simile al segnale per la presenza di fotoni di bassa energia e adroni carichi).

Selezione:

1. nel barrel ($|\eta| < 1.4$)
2. $ET > 20$ GeV
3. almeno 4 tracce con $p_T \geq 1$ GeV/c nell'detector interno
4. almeno 20 GeV di impulso trasverso mancante allineato con il jet.
5. jet sufficientemente popolato: almeno 300 hit MDT in $\Delta R = 0.6$.

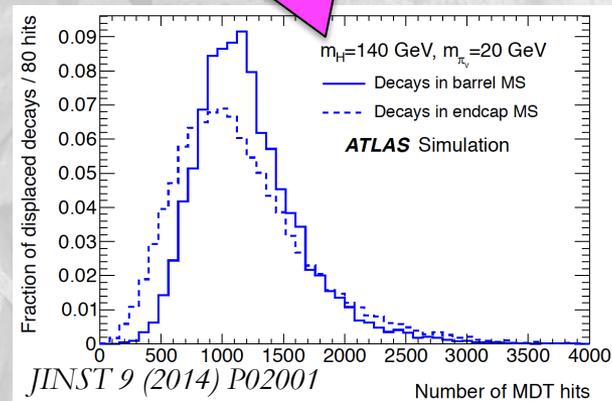
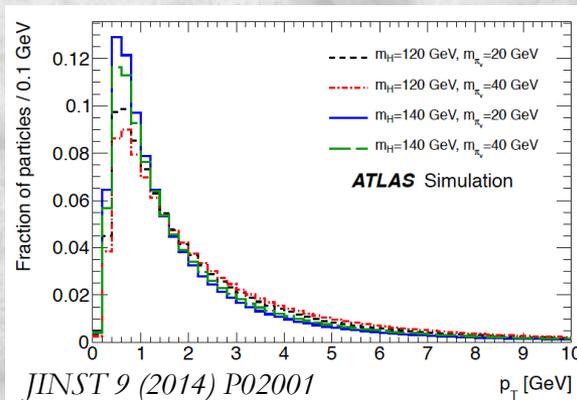
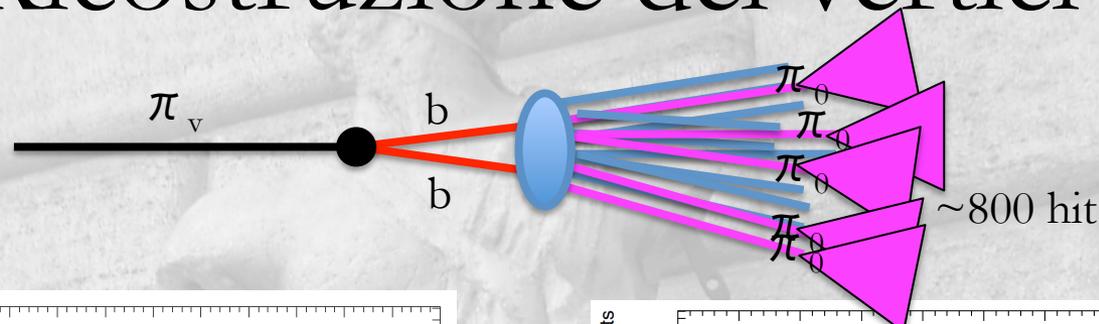


Confronto delle distribuzioni del numero di eventi vs numero di muon RoI per jet punch-through all'interno dei cluster di muon RoI (errori statistici).

Rapporto dati/MC: 1.14 ± 0.09

Incertezza sistematica associata: 14%
(dominante sulle incertezze indotte dalla calibrazione dei jet (JES) e dalla radiazione dello stato iniziale (ISR))

Ricostruzione dei vertici

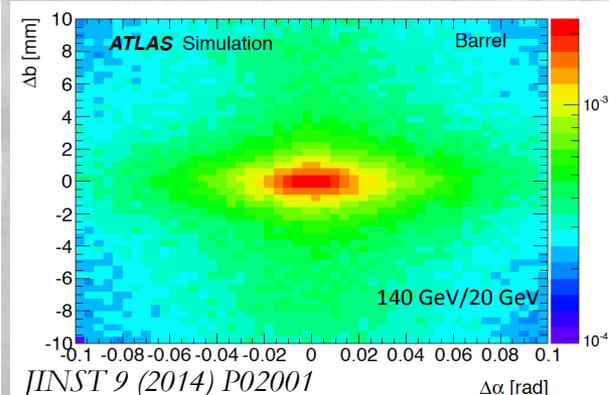
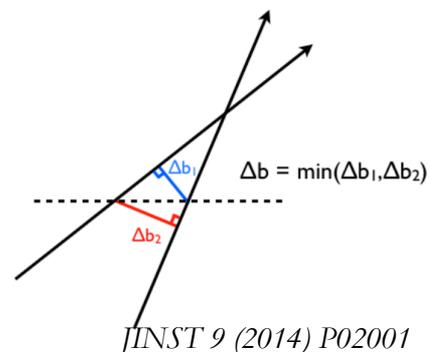
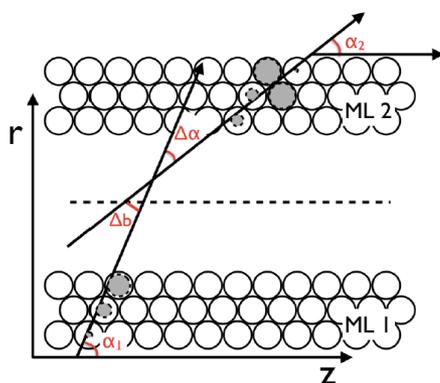


- Il decadimento di un π_0 produce in media ~ 10 particelle cariche e ~ 5 π_0 in uno stretto cono ΔR dello spettrometro, di energia 1-5 GeV.
- Se il decadimento avviene prima dello spettrometro, il calorimetro assorbe la maggior parte delle tracce, quindi decadimenti attesi tra la fine del calorimetro e la fine dello spettrometro a muoni.
- In media lo spessore di materiale nel barrel dello spettrometro è 1.3 lunghezze di radiazione, quindi i π_0 danno luogo a grandi sciami elettromagnetici.
- ogni decadimento produce in media 1000 hit MDT, il 75% dei quali dovuto agli sciami elettromagnetici.

Ricostruzione dei vertici

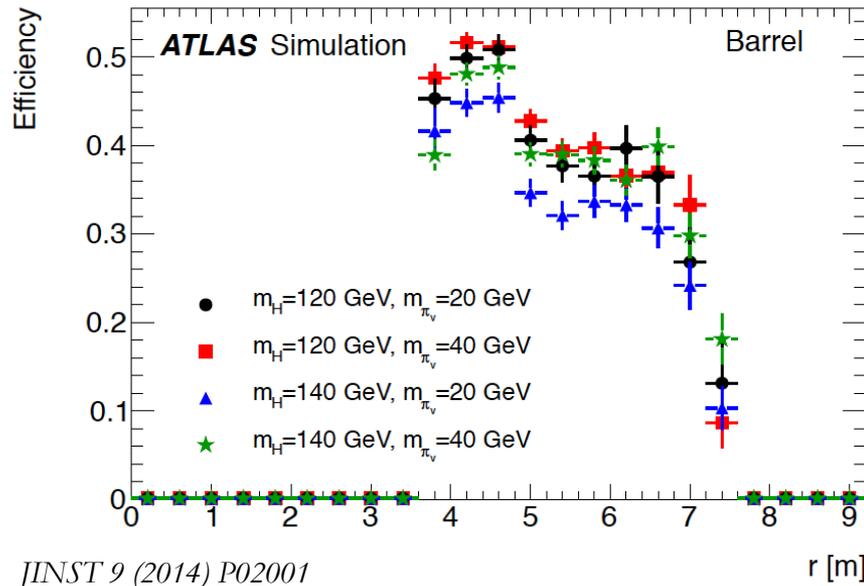
Algoritmo di ricerca:

1. costruzione dei segmenti nei singoli multilayer (ML) MDT (ottenuti minimizzando χ^2 , se la probabilità è $P > 5\%$);
2. combinazione di segmenti contigui (ML1 e ML2) in tracklet sulla base di specifici criteri su Δb e $\Delta \alpha$ (barrel ed endcap);



3. raggruppamento conico ($\Delta R < 0.6$) delle tracklet
4. candidato vertice: almeno 3 tracklet nel cono, diretto verso il punto di interazione e tale che $|\eta| < 2.2$
5. “buon vertice”: isolamento da tracce ID con $p_T \geq 5$ GeV/c ($\Delta R > 0.4$) e da jet con $E_T > 15$ GeV ($\Delta R > 0.7$).

Ricostruzione dei vertici

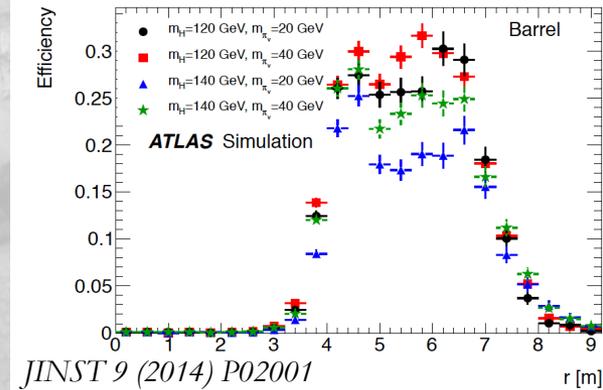


JINST 9 (2014) P02001

Efficienza di ricostruzione dei vertici nel barrel in funzione della distanza radiale di decadimento del π_ν , per eventi che passano (in alto a sinistra) e *non* passano (in alto a destra) il muon RoI cluster trigger.

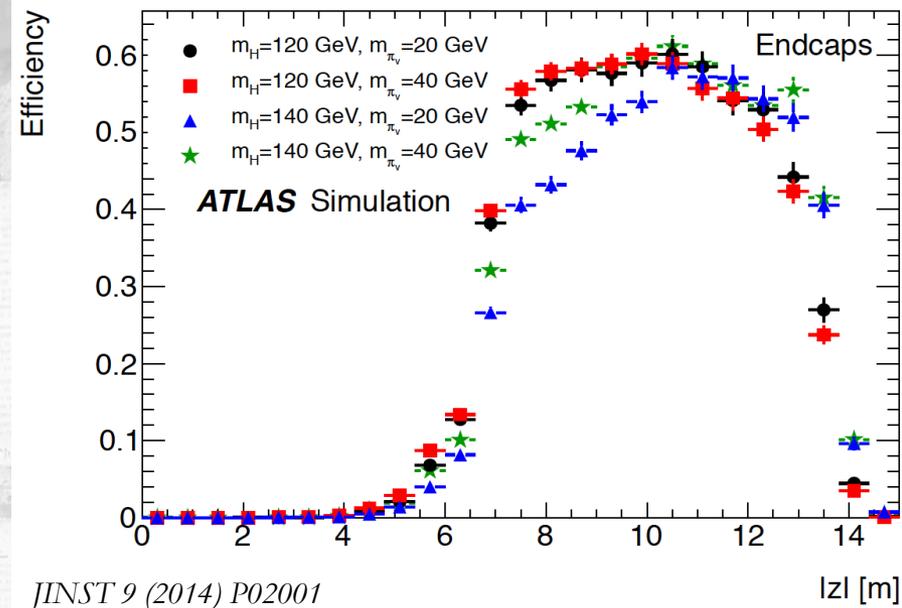
Alla fine risoluzioni di:

- 20 cm in z ,
- 32 cm in r ,
- 50 mrad in φ



JINST 9 (2014) P02001

Efficienza di ricostruzione dei vertici nell'endcap in funzione della distanza di decadimento del π_ν .



JINST 9 (2014) P02001

Incertezza sistematica sulla ricostruzione dei vertici

Usato lo stesso approccio di confronto dati/MC e lo stesso campione MC dello studio della sistematica sul trigger.

JINST 9 (2014) P02001

Number of MDT hits	QCD dijet Monte Carlo	Data
$300 \leq N_{\text{MDT}} < 400$	$10.1 \pm 2.2 \%$	$9.1 \pm 0.5 \%$
$400 \leq N_{\text{MDT}} < 500$	$9.2 \pm 2.8 \%$	$10.5 \pm 0.7 \%$
$500 \leq N_{\text{MDT}} < 600$	$13.1 \pm 5.4 \%$	$13.0 \pm 0.9 \%$
$N_{\text{MDT}} \geq 600$	$16.5 \pm 4.5 \%$	$16.7 \pm 0.7 \%$

Frazione di eventi jet punch-through con un vertice ricostruito nello spettrometro a muoni in funzione del numero di hit MDT. Confronto dati – MC (QCD dijet).

Rapporto dati/MC punch-through:	15%
Calibrazione della scala di energia dei jet (JES):	3%
Radiazione dello stato iniziale (ISR):	3%
Pileup:	2%
TOTALE	16%

Valutazione del fondo di eventi casuali – 7 TeV analysis

Selezione finale degli eventi: **separazione dei vertici $\Delta R > 2$** .

Fondo dominante: eventi casuali che passano trigger e selezione.
Stimabile quindi **a partire dai dati**.

- P_{vertex} : probabilità che un evento qualsiasi contenga un vertice ($(9.7 \pm 6.9) 10^{-7}$ da dati zero-bias)
- $N(\text{MS vertex, 1 trig})$: numero di eventi con 1 muon RoI cluster trigger e un vertice isolato (**15543**)
- P_{reco} : probabilità di ricostruire un vertice se l'evento ha passato il muon RoI cluster trigger ($(1.11 \pm 0.01) 10^{-2}$)
- $N(\text{MS vertex, 2 trig})$: numero di eventi con 2 muon RoI cluster trigger e un vertice isolato (**1**)

$$\begin{aligned}
 N_{\text{FAKE}}(\text{2MS vertex}) &= N(\text{MS vertex, 1 trig}) \times P_{\text{vertex}} + \\
 &= N(\text{MS vertex, 2 trig}) \times P_{\text{reco}} = \\
 &= 0.03 \pm 0.02
 \end{aligned}$$