

# LHC-ATLAS実験における長寿命荷電粒子の探索

日本物理学会2011年秋季大会  
弘前大学文京町キャンパス

東裕也 (東大理)

山本真平(東大素セ)

陣内修(東工大)

浅井祥仁(東大理)

小林富雄(東大素セ)

## 超対称性から期待される長寿命荷電粒子

- Anomaly Mediated Supersymmetry Braking (AMSB)モデル  
超対称性の破れにおいて特別な機構を要求しないsimpleなmodel  
SUSYが存在すればAnomalyを介した超対称性の破れの機構は必ず起きる

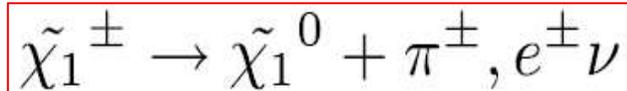
- gauginoの質量比

$m(\text{bino}) : m(\text{wino}) : m(\text{gluino}) \sim 3:1:7$

→ winoが最も軽いgaugino

NLSP (chargino), LSP (neutralino)の成分が主にwinoとなる

- charginoの崩壊



\* charginoとneutralinoの質量が縮退し、崩壊時の $\pi/e$ がソフトになる

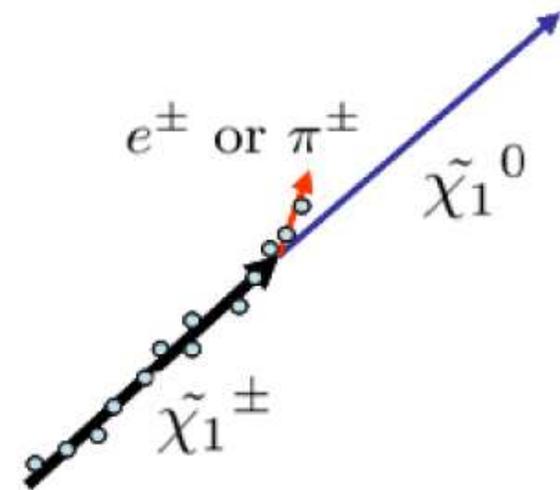
\* charginoの寿命が長くなり、ATLAS検出器でも観測が可能となる

- charginoの信号

\* 長寿命のchargino → 大きな運動量のtrack

\* neutralinoとソフトな $\pi/e$ に崩壊

→ 途中からhitが無く、消失したかのような信号

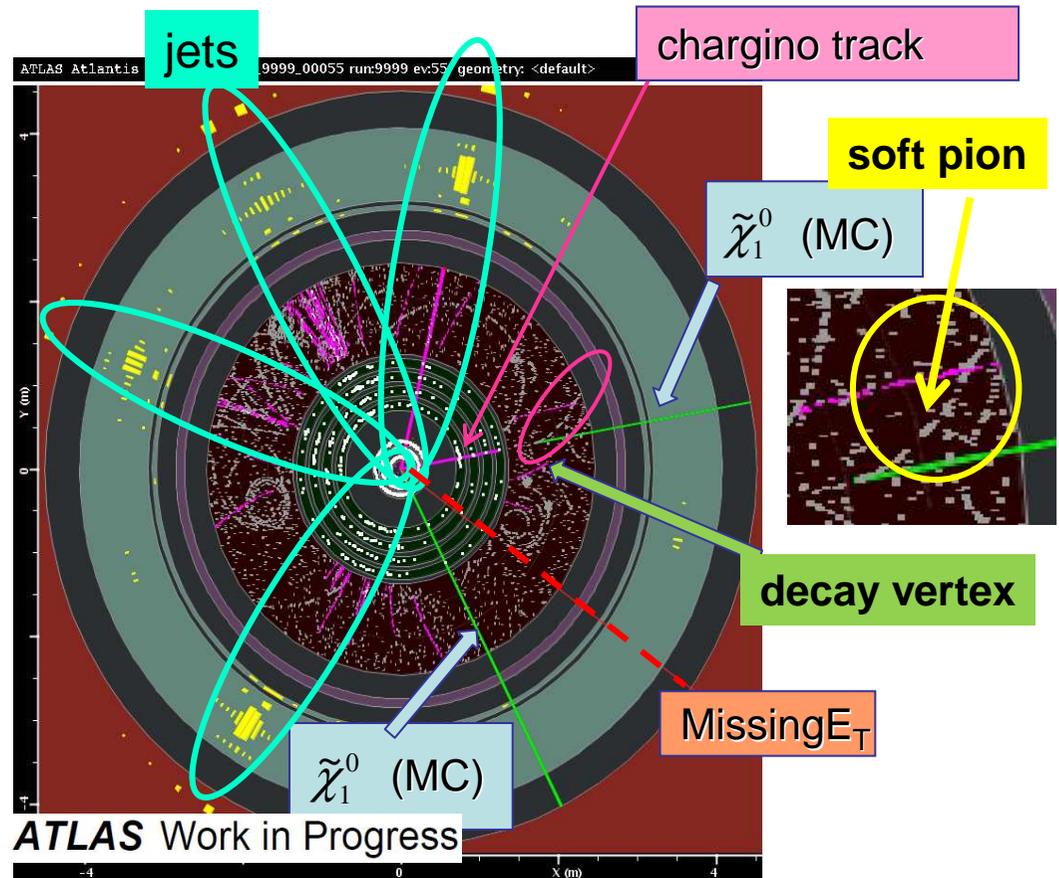
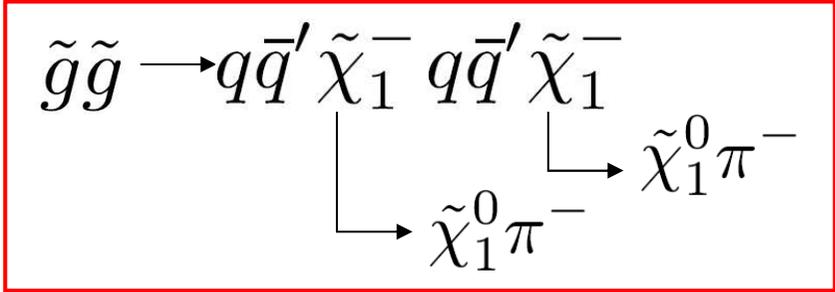


# AMSB事象のイベントトポロジー

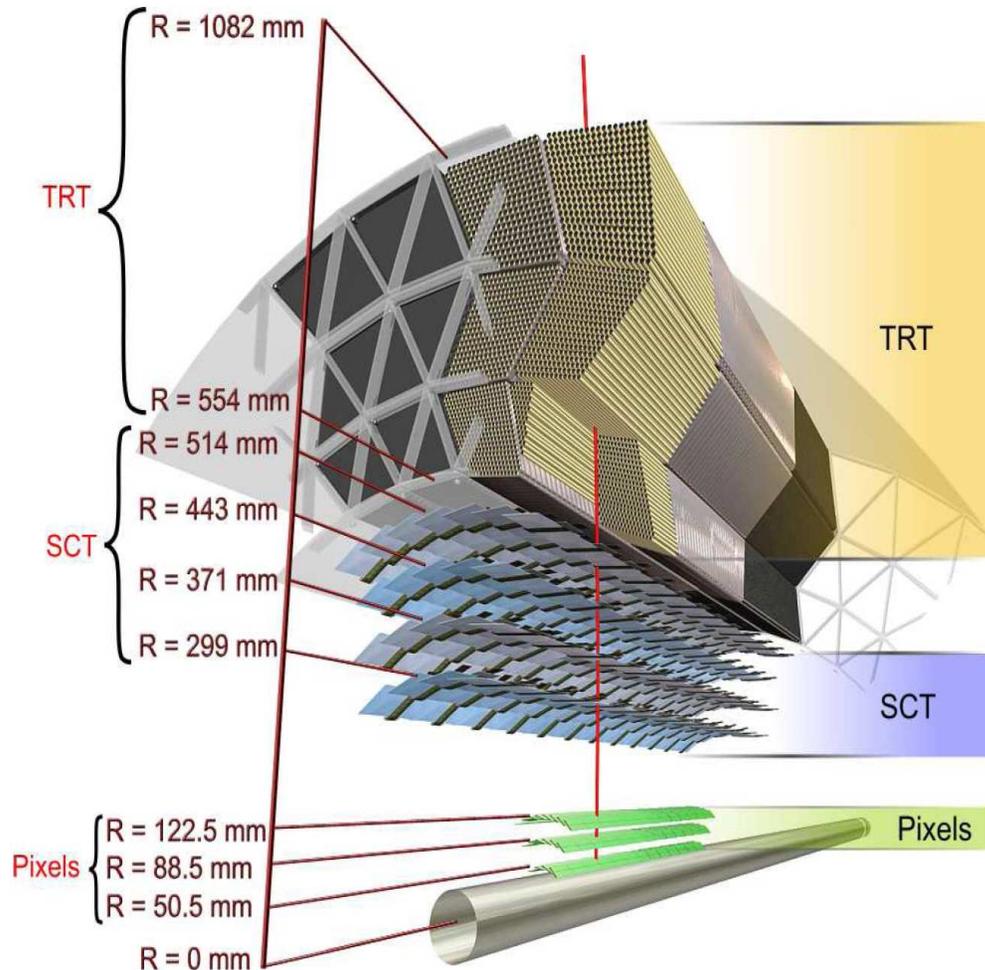
signal

- $m(\text{chargino}) = 90.2\text{GeV}$
- gluino対生成 process
- \* gluino崩壊時に多くのjetとcharginoが生じる
- \* cross-section =  $0.062\text{pb}$
- \* lifetime :  $\tau(\text{chargino})=1\text{ns}$

- a) chargino track
  - 高い運動量をもった,途中から消失したかのようなtrack
- b) 大きなmissing  $E_T$ 
  - neutralinoが大きなmissing  $E_T$ を作る
- c) 大きな運動量をもった多数のjet
  - gluinoの崩壊によって、大きな運動量をもったjetが多数生じる



# ATLASの内部飛跡検出器



ATLAS検出器は3つの検出器から構成

## 1. Pixel検出器

pixel センサーのモジュールが3層配置される

## 2. Semiconductor Tracker (SCT)

2枚のストリップ状のセンサーを重ね合わせたもので構成されるsilicon 検出器で4層配置される

## 3. Transition Radiation Tracker (TRT)

多数のdrift tubeからなる連続飛跡検出器であり、遷移輻射を用いて電子の粒子同定にも用いられる。

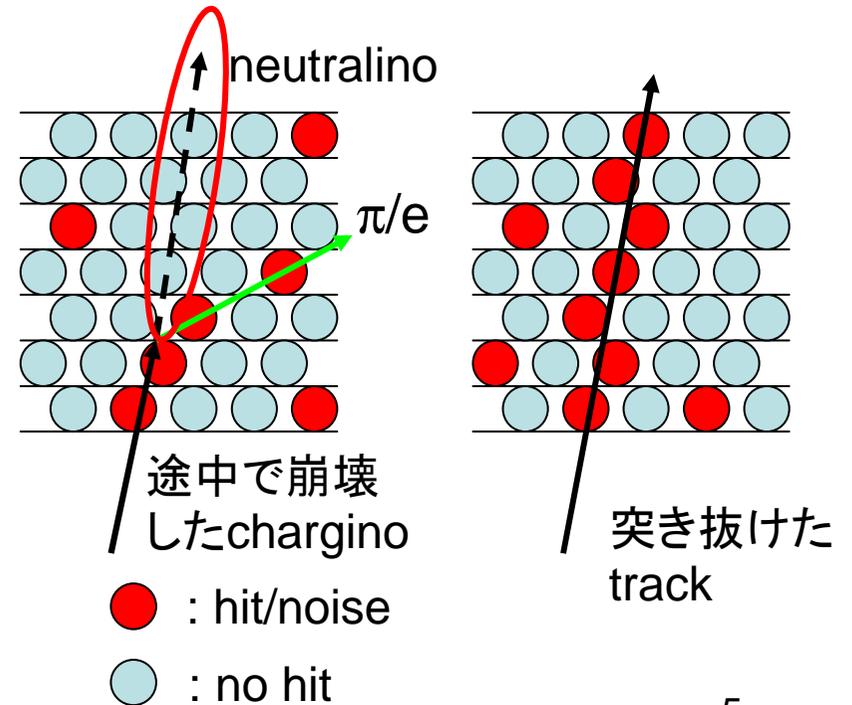
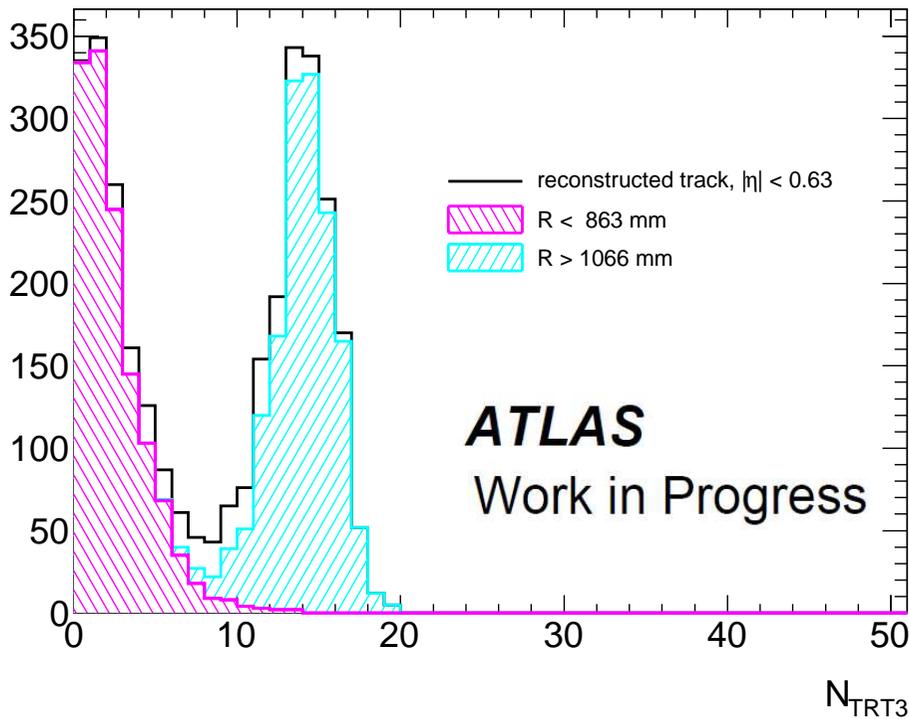
大きく3つのモジュールで構成され、内側から19,24,30のdrift tubeの層からなる

連続飛跡検出器をもつのはATLASの大きな特徴である

# charginoの検出方法

- chargino探索には連続飛跡検出器であるTRTを用いる  
 TRT3種類のモジュールのうち、最も外側のモジュールでのtrackのhit数( $N_{\text{TRT3}}$ )を計測すると、
  - 最外モジュールまでに崩壊したもの  $\rightarrow N_{\text{TRT3}} \sim 0$
  - 最外モジュールを突き抜けたもの  $\rightarrow N_{\text{TRT3}} \sim 15$

## chargino track selectionに $N_{\text{TRT3}} < 5$ を要求する



# データセット 及びイベントセレクション

## \* データセット

トリガー : Jet  $p_T > 75\text{GeV}$  && Missing  $E_T > 55\text{GeV}$   
積算ルミノシティ :  $1.02\text{fb}^{-1}$

## \* イベントセレクション

- Primary Vertex  
Leading primary vertex with  $>4$  tracks
- Lepton Veto  
Number of electrons == 0 && Number of muons == 0
- Kinematic selections
  - Missing  $E_T > 130\text{ GeV}$
  - 1st leading Jet  $p_T > 130\text{ GeV}$  && 2nd/3rd leading Jet  $p_T > 60\text{GeV}$
  - good isolated leading track (以下の条件を満たすtrackがあるイベントを要求)
    - $p_T > 10\text{GeV}$
    - $|\eta| < 0.63$  (バレル領域のTRTを通過したtrackを選択)
    - $|d_0| < 1.5\text{mm}$ ,  $|z_0 \sin(\theta)| < 1.5\text{mm}$
    - number of pixel hits  $\geq 1$ , number of SCT hits  $\geq 6$
    - number of tracks ( $dR < 0.05$ ,  $p_T > 500\text{ MeV}$ ) == 0 (isolationを要求)
  - chargino track selection ( $N_{\text{TRT3}} < 5$ )

# isolated leading track

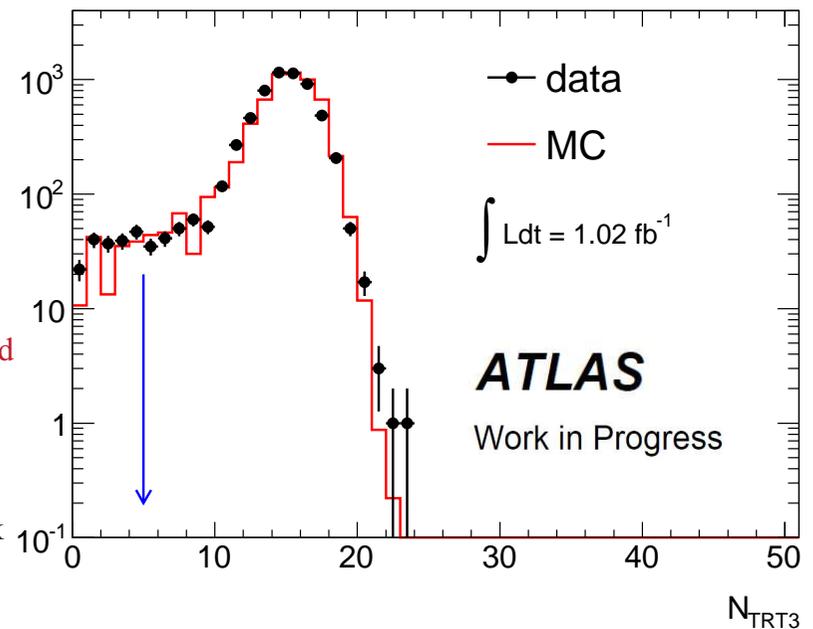
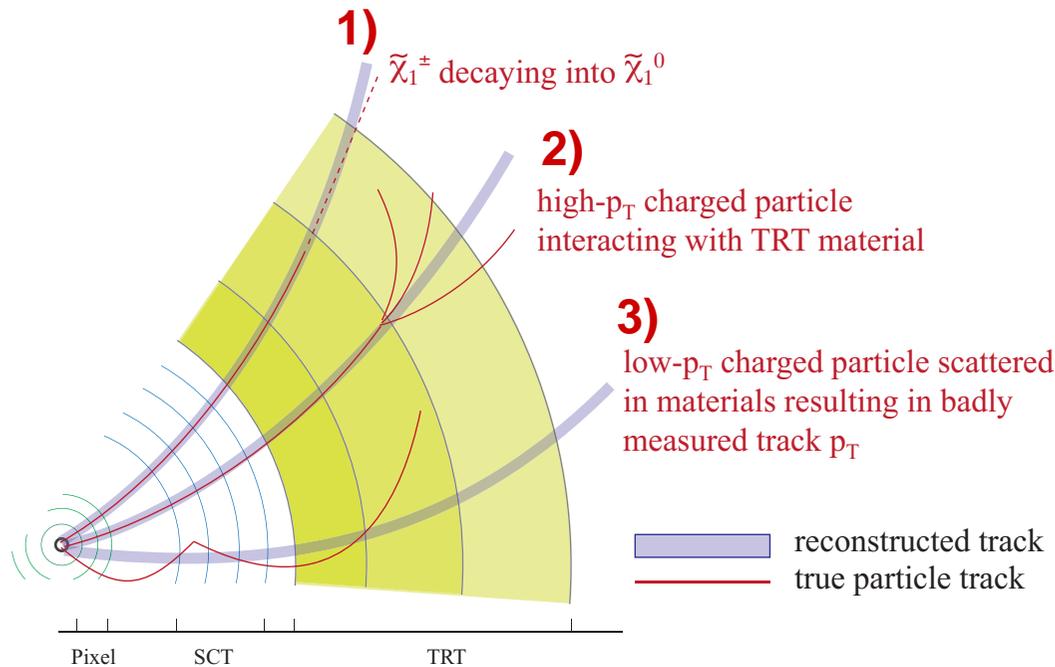
chargino selection ( $N_{\text{TRT3}} < 5$ ) 後のtrackは主に3種類ある。

- 1) chargino signal
- 2) high- $p_T$  hadron interaction track

検出器内でhadron interactionを起こしたtrack。多数の粒子がinteractionによって生じ、TRTの最外モジュールのhit数が少なくなる。バックグラウンドとしては殆どが hadron interaction track

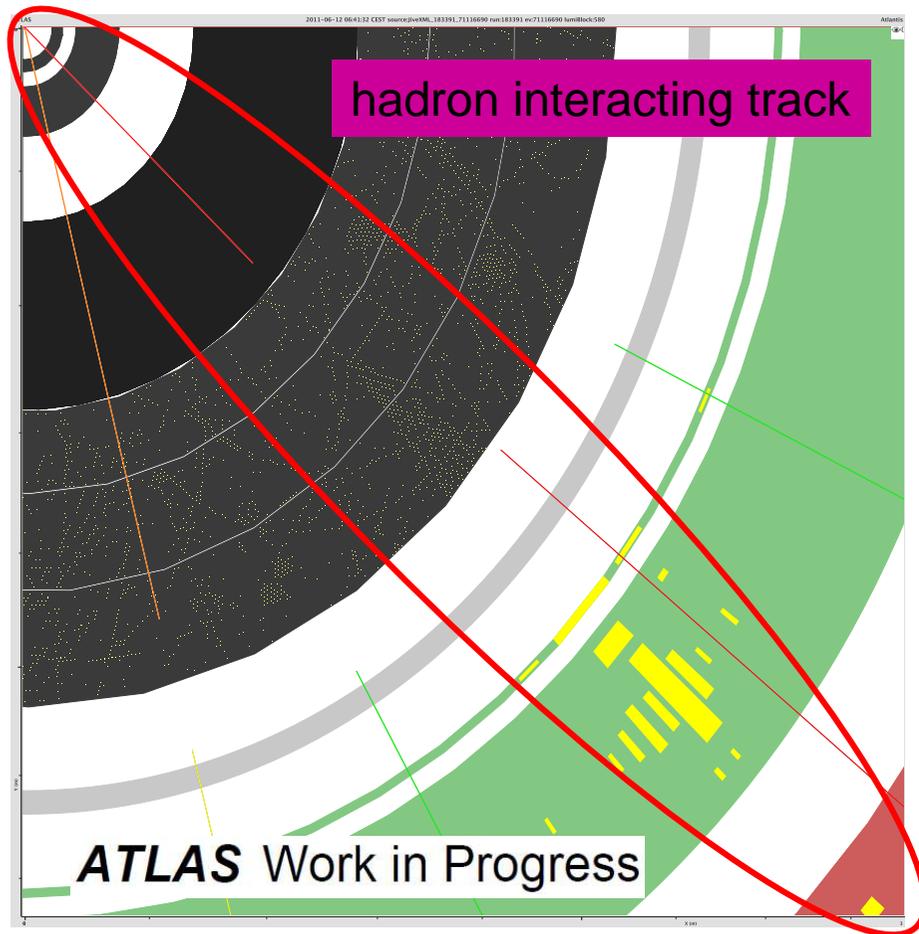
- 3) badly reconstructed track

low- $p_T$ のtrackが検出器内で散乱され、まれに間違ってhigh- $p_T$ のtrackとして再構成される。バックグラウンドの寄与の割合は小さい。

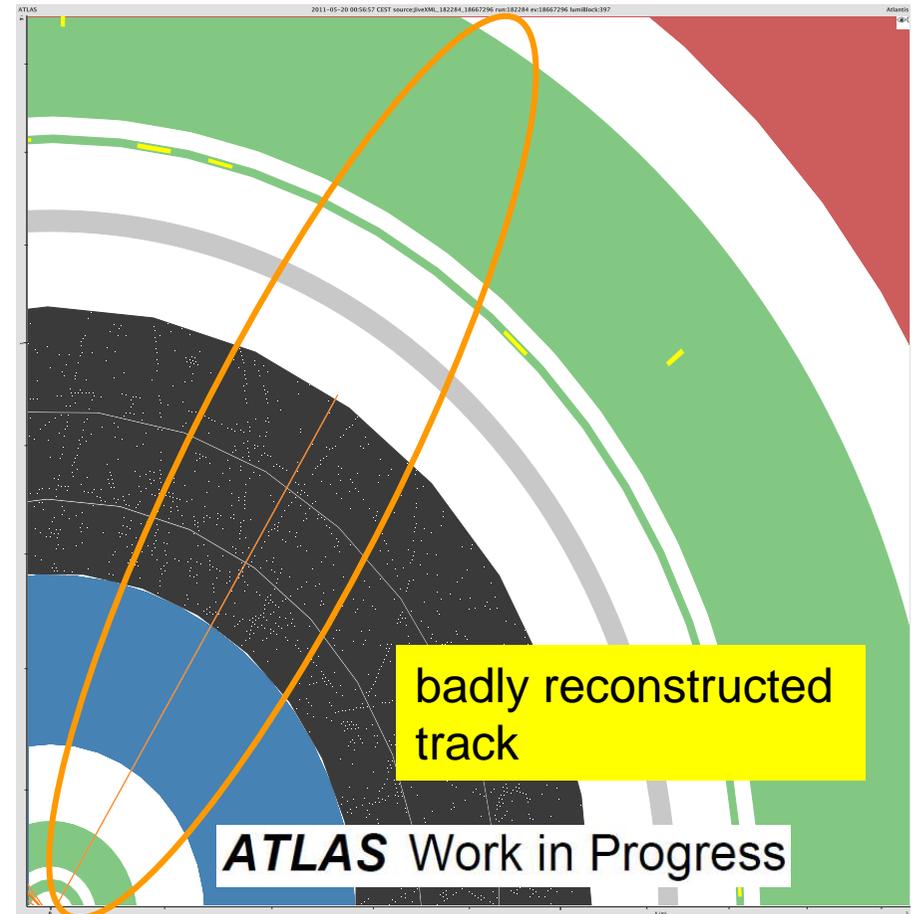


$N_{\text{TRT3}}$

# バックグラウンド事象(実データ)



多数の2次粒子が生じており、 $N_{\text{TRT3}}$ が少なくなる  
カロリメータのアクティビティは高い



実粒子の飛跡を反映していないtrackのため、 $N_{\text{TRT3}}$ が少ない。  
カロリメータのアクティビティもほとんどない

## データを用いたバックグラウンドの見積もり

- \* バックグラウンドのreduction rateが高い
- \* materialの効果、さらにbadly reconstructed trackの影響を正しく評価するためにbackgroundの見積もりは全て実データを用いて行う。

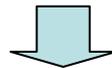
- コントロールサンプルの抽出

\* バックグラウンドは2種類

**hadron interaction track**

**badly reconstructed track**

} これらのコントロールサンプル  
をデータから抽出



- BG shape の抽出

\* コントロールサンプルからtrack  $p_T$  の分布を用いる

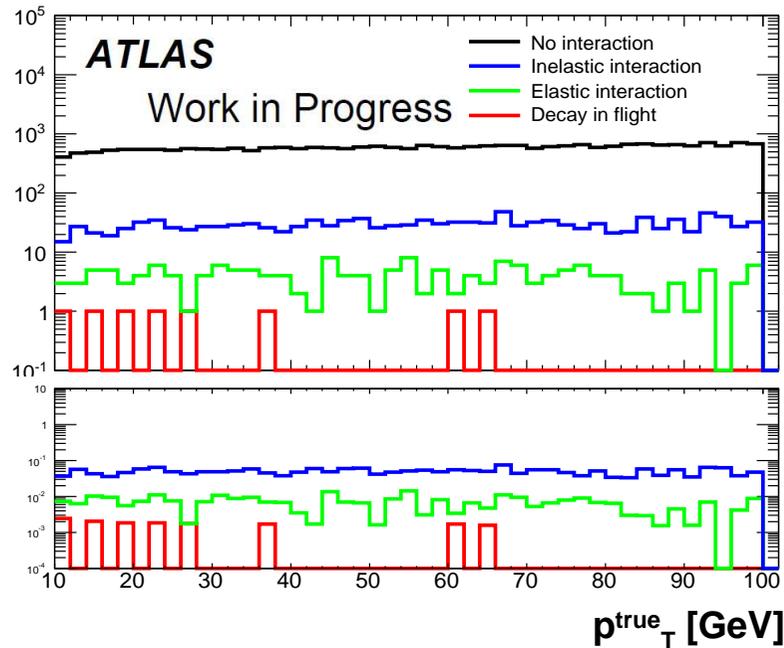
\* 観測されたtrack  $p_T$  分布からある関数形にfitを行いsmoothingをする。



- BG及びsignalの見積もり

\* fitしたBGの関数とsignalの $p_T$ 分布でcandidate track にsimultaneous fit  
を行う。

# コントロールサンプルの抽出(1) -hadron interaction track-



## pion trackの内訳

上図: pion trackの $p_T$ 分布 (single particle MC)

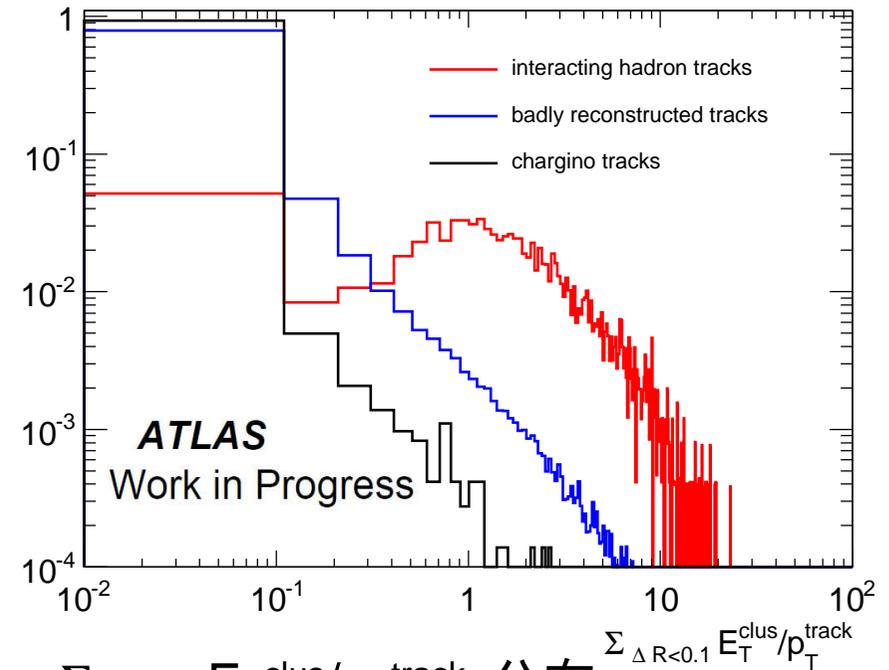
黒: 突き抜けたtrack 青: hadron interaction

緑: elastic scattering 赤: decay in flight

下図: 突き抜けたtrackに対するそれぞれの比

hadron interaction を起こす割合は高い $p_T$ 領域で track  $p_T$ に依存しないため、hadron interaction trackの $p_T$ 分布は突き抜けたtrackの $p_T$ 分布と同じ形になる

→ 突き抜けたtrackを選ぶため $N_{\text{TRT3}} > 10$ を要求

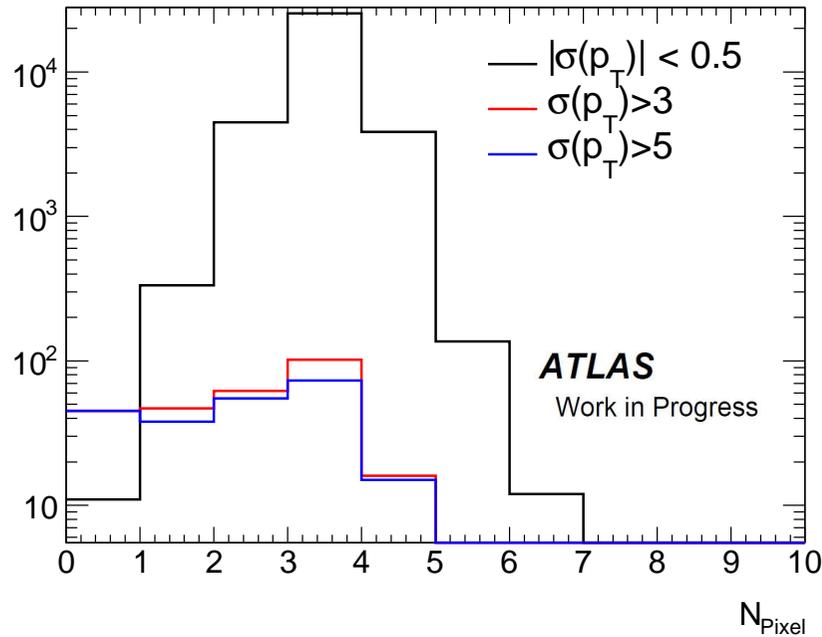


$\sum_{\Delta R < 0.1} E_T^{\text{clus}} / p_T^{\text{track}}$  分布

hadron interaction を起こした track はカロリメータに大きな アクティビティを作る

→  $\sum_{\Delta R < 0.1} E_T^{\text{clus}} / p_T^{\text{track}} > 0.3$  を 要求

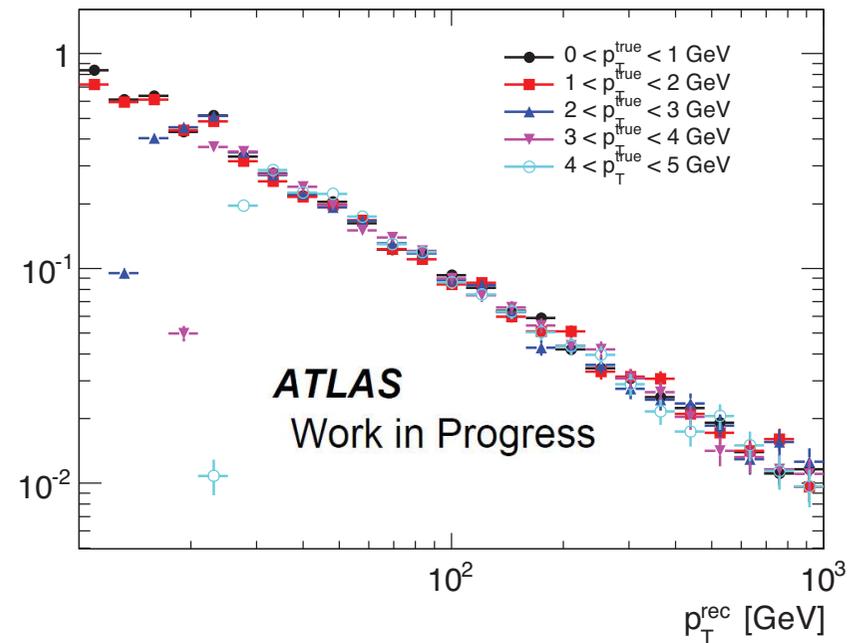
## コントロールサンプルの抽出(2) -badly reconstructed track-



$N_{\text{TRT3}} < 5$ を満たすtrackの  
number of Pixel hits

- $|\sigma(p_T)| = |(p_T^{\text{rec.}} - p_T^{\text{true}})/p_T^{\text{true}}| < 0.5$
  - $\sigma(p_T) > 3$
  - $\sigma(p_T) > 5$
- } badly reconstructed track

→  $N_{\text{pixel}} == 0$  を要求することで badly reconstructed trackを選ぶことが出来る



badly reconstructed trackの  
reconstructed  $p_T$ 分布

- $0 < p_T^{\text{true}} < 1 \text{ GeV}$  -  $1 < p_T^{\text{true}} < 2 \text{ GeV}$
- $2 < p_T^{\text{true}} < 3 \text{ GeV}$  -  $3 < p_T^{\text{true}} < 4 \text{ GeV}$
- $4 < p_T^{\text{true}} < 5 \text{ GeV}$

→ 再構成される $p_T$ 分布は実際の粒子の $p_T^{\text{true}}$ によらない

## コントロールサンプルの抽出(3) -セレクションのまとめ-

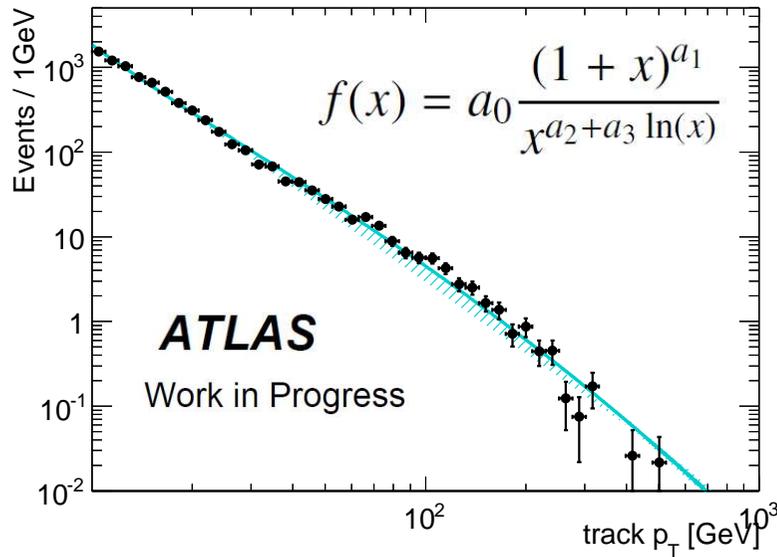
	Hadron interaction	Badly reconstructed
Kinematic selection		
Missing Et	Missing $E_T > 130$ GeV	Missing $E_T < 100$ GeV
Jet Pt	1st Jet $p_T > 130$ GeV	—————
	3rd Jet $p_T > 60$ GeV	—————
Track selection		
$N_{\text{pixel}}$	$\geq 1$	$= 0$
$N_{\text{TRT3}}$	$> 10$	$< 5$
付随するカロリメータ アクティビティ	あり $(\sum_{\Delta R < 0.1} E_T^{\text{clus}}/p_T^{\text{track}} > 0.3)$	なし $(\sum_{\Delta R < 0.1} E_T^{\text{clus}}/p_T^{\text{track}} < 0.3)$

\* Hadron interaction のtrackは,jet中のtrack及びhadronic decayを起こしたtauが起源なので、track pt分布はkinematicに依存する。そのため、同じkinematic selectionを要求した

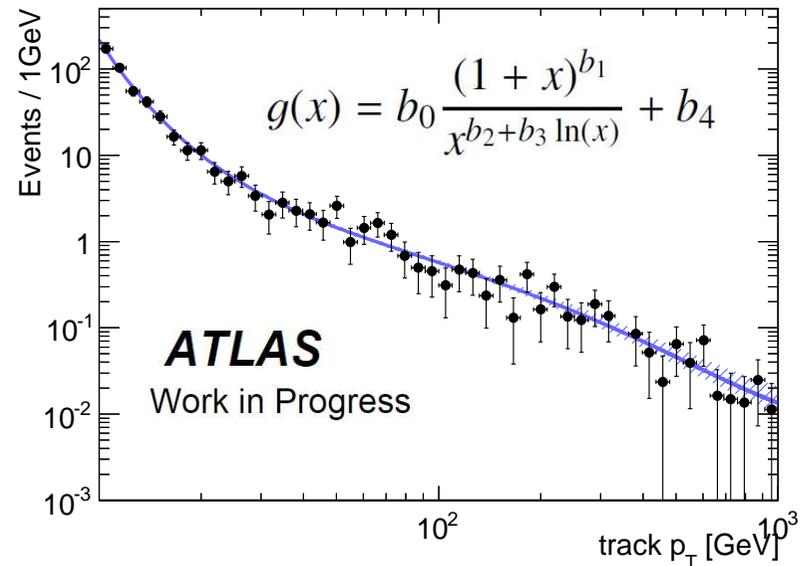
\* Badly reconstructed trackはkinematicに依存しないので、Missing  $E_T < 100$  GeVを要求し,jet のみのtriggerで取得されたsampleを用いた

# BG shape の抽出

## interacting hadron track



## badly reconstructed track

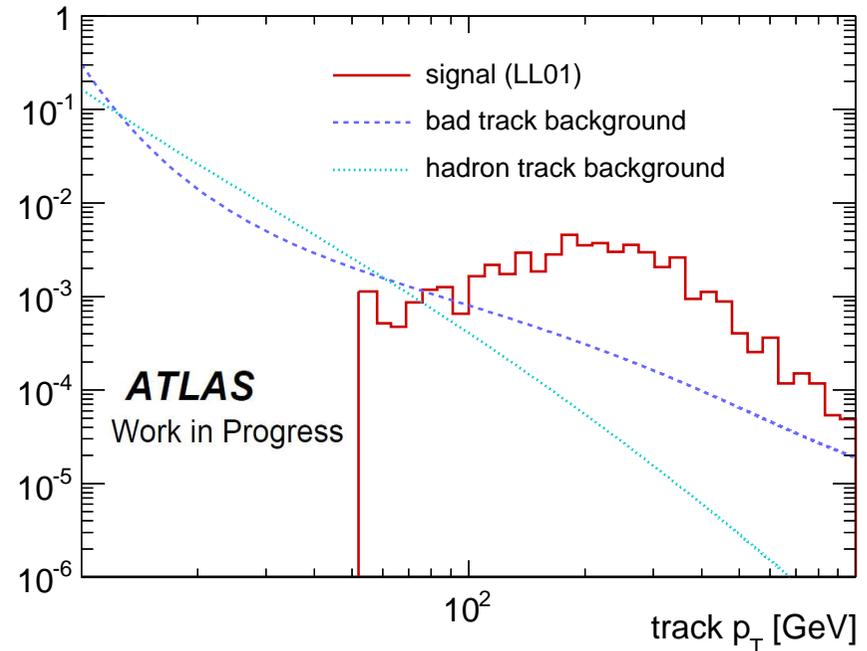


- data-drivenでバックグラウンドの見積もりを行うためにtrackの $p_T$ 分布を用いる
- 2つのバックグラウンドの形を見積もるために、冪の効果及びexponentialのテールを再現するような関数でfitting
- さらにbadly reconstructed trackは長いテールを引くため、その効果を再現するために定数の項を加える
- fit parameterのエラーは最後の見積もりでBG shapeのuncertaintyとして評価に加える

# BG及びsignalの見積もり(1)

左図は得られたバックグラウンド及びsignalのtrack  $p_T$  shape  
それぞれの形はまったく異なる

得られたBG及びsignalのtrack  $p_T$  shapeから、unbinned maximum likelihood 法を用いてbackgroundの数及びsignal yieldを見積もる



系統誤差として以下のものを計上する

	source	uncertainty
signal	Jet energy scale	+/- 9%
	Track reconstruction efficiency	+/- 2%
	Theoretical cross section	+/- 15%
	Luminosity	+/- 3.7%
background	Background shape	shapeの不定性としてfitのparameterのエラーを計上

# BG及びsignalの見積もり(2)

Background及びsignalの $p_T$ 分布を用いたfitの結果

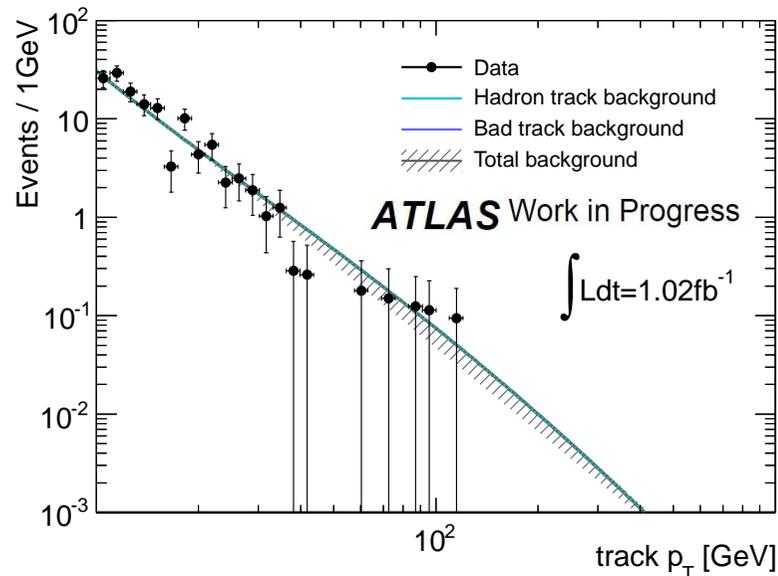
Candidate track数	185	
	Backgroundのみ	Background + signal
Signalの大きさ	_____	< 0.15
Bad trackの割合	< 0.04	< 0.04
P-value(帰無仮説)	0.5	_____

signalは最もアクセプト  
ランスの大きい、寿命  
1nsの点を用いた

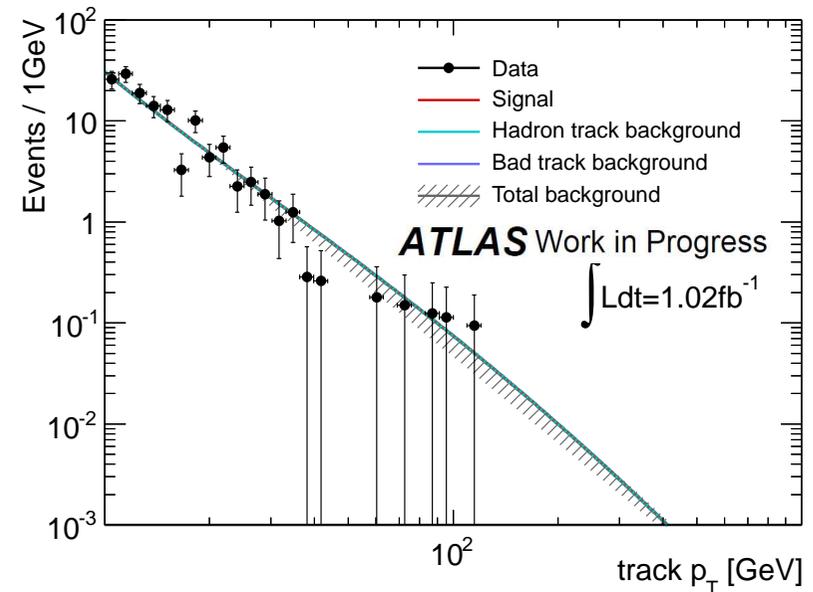
bad trackの寄与は  
小さい

有意なexcessは見られず、chargino trackは観測されなかった

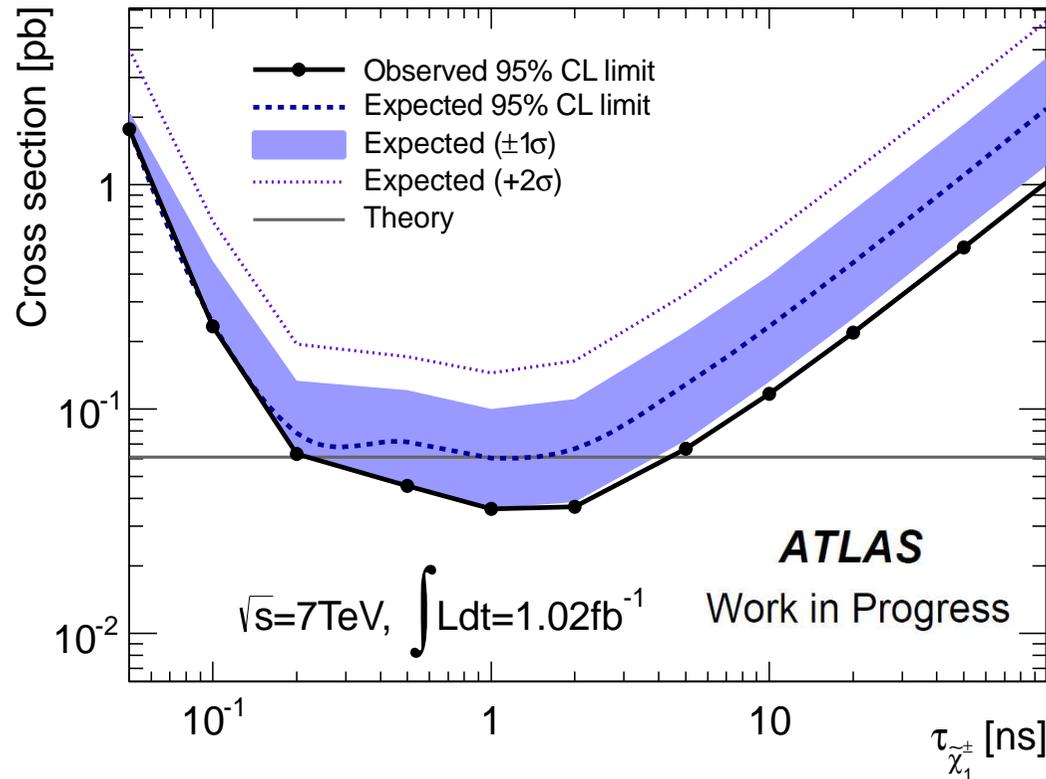
backgroundのみの結果



background + signalの結果



# AMSB charginoのcross-sectionに対する制限



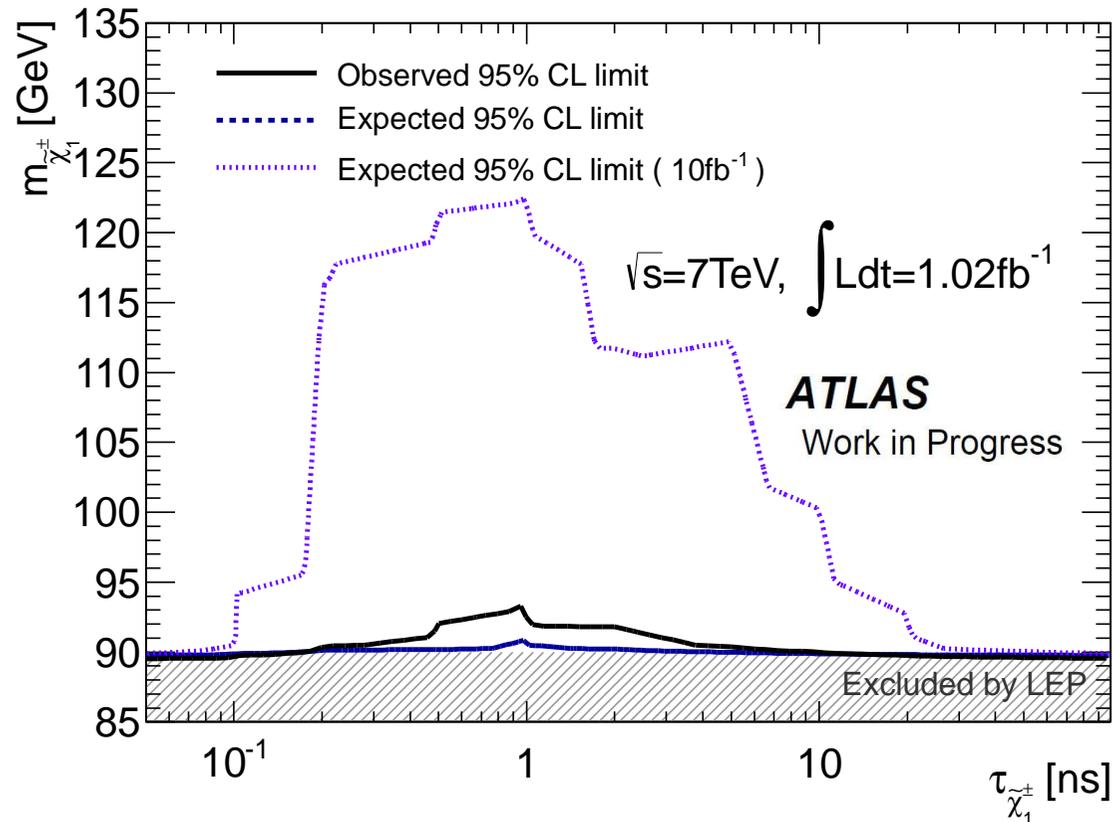
charginoの探索のsensitivityは、charginoの寿命に依存する

-寿命が短すぎる場合、trackが再構成されない

-寿命が長すぎる場合、内部飛跡検出器内で崩壊する数が少なくなる

1.02fb<sup>-1</sup>での探索において、上図の領域でAMSB charginoのcross-sectionに制限がつけられる(90GeVのcharginoなら寿命が0.2~5nsの範囲で排除)

# AMSB charginoの質量と寿命における制限



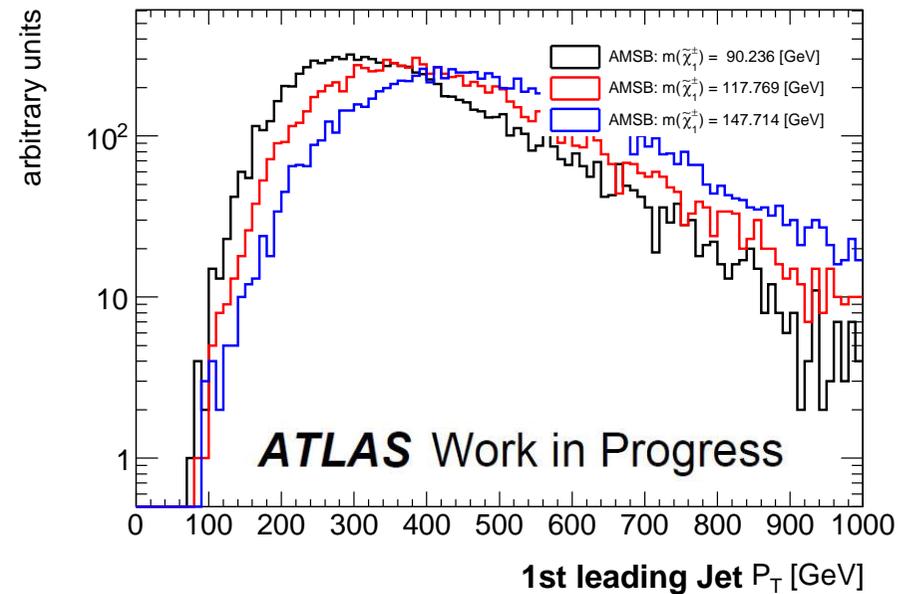
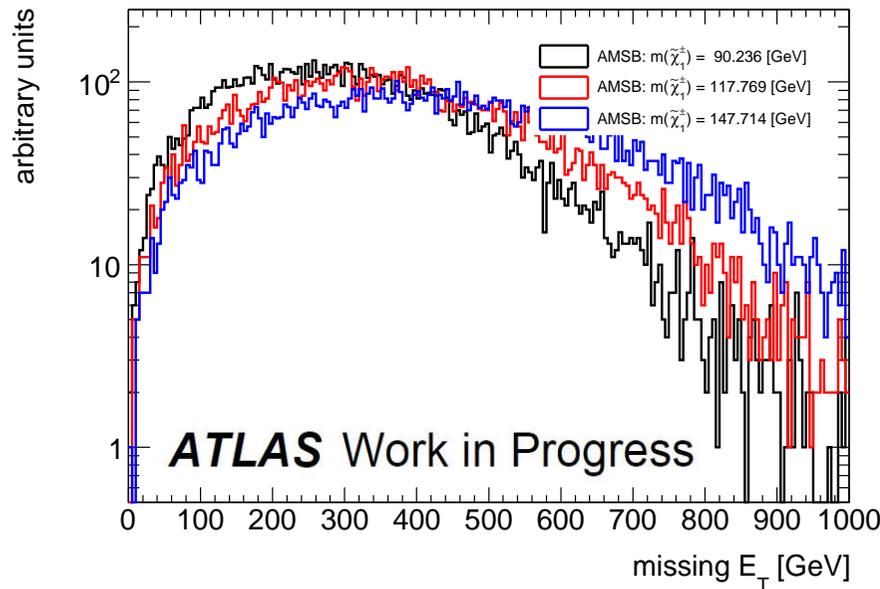
- $m(\text{chargino})$ の異なるMCを用いてupper limitを計算。各点の内分点をとって (spline補間)排除される領域を求めた。
- $1.02\text{fb}^{-1}$ の統計でLEP2の探索における制限に到達した。  
(LEP2のlimitは $m(\text{chargino})=90\text{GeV}$ )
- **0.2~5nsの範囲ではLEP2のlimitを超え、92GeVまでのcharginoを排除**
- さらなる統計でsensitivityも改善が見込まれる

## まとめ

- ATLAS検出器で取得された重心系エネルギー7TeV,積算ルミノシティ $1.02\text{fb}^{-1}$ のデータで、超対称性模型から予言される長寿命荷電粒子の探索を行った
- AMSBモデルにおいては長寿命のcharginoがあり、その信号の観測がATLAS検出器においても期待される
- 長寿命のcharginoは高い運動量を持ったトラックが、途中で消失したような特徴的な信号をつくる
- 実際の探索において、バックグラウンドとなるのはhadron interactionを起こしたtrack及び検出器内で散乱し、誤って再構成されたbadly reconstructed trackがある
- materialの効果、さらにbadly reconstructed trackの影響を正しく評価するためにbackgroundの見積もりは全て実データを用いて行った
- 探索の結果、chargino trackは観測されなかった
- charginoの寿命が0.2~5nsの場合において質量90GeVのcharginoが排除され、LEP2のlimitを超えた
- 更なる統計でsensitivityの改善が見込まれる

backup

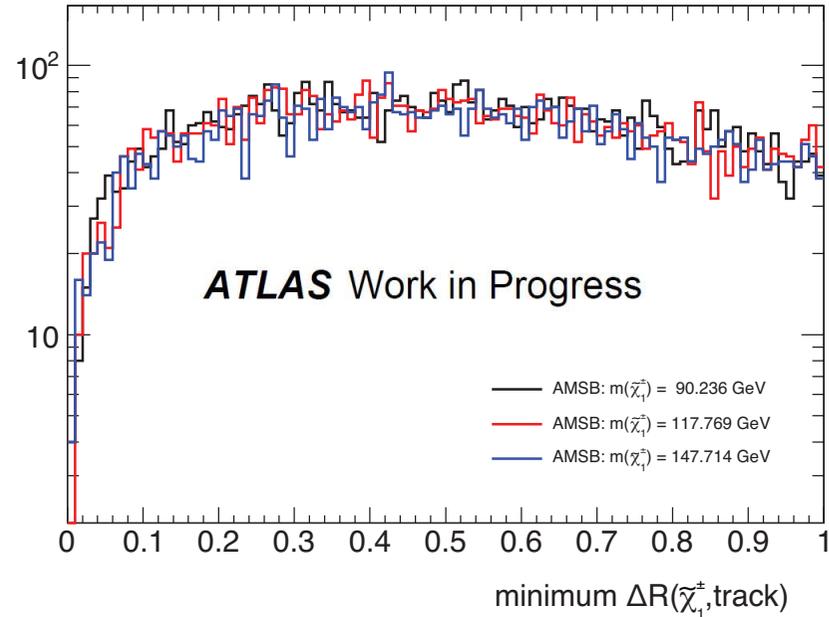
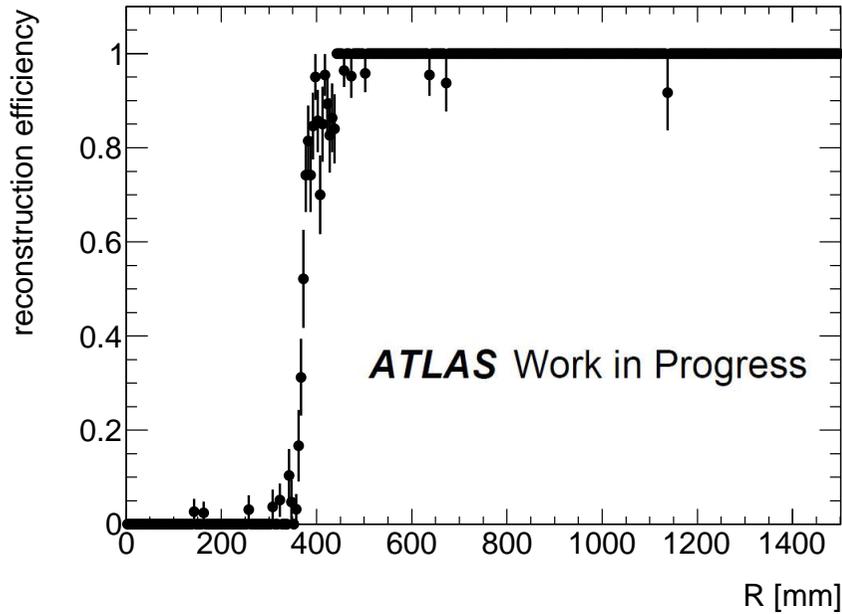
# AMSB事象(gluino対生成process)のmissing $E_T$ 及びJet



Sample	M0 [GeV]	M3/2 [TeV]	$\tau(\text{chargino})$ [ns]	m(chargino) [GeV]	Cross-section [pb]
LL01	1500	32	1	90.2	$6.10 \times 10^{-2}$
LL02	1800	41	1	117.8	$7.65 \times 10^{-3}$
LL03	2000	51	1	147.6	$1.00 \times 10^{-3}$

gluino対生成processでのAMSB事象は大きなmissing  $E_T$ 及び大きな運動量を持ったJetが生じる

# chargino track



## chargino trackのreconstruction efficiency

TRT内部で崩壊するcharginoのtrack reconstruction efficiency はほぼ100%となる

## chargino trackと他のtrackとのminimum dR

chargino のtrackは他のtrackと距離が離れており、isolateしている

# unbinned maximum likelihood法

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}(\mu, n_b, f_{\text{bad}}, \alpha, \vec{\beta}_{\text{bad}}, \vec{\beta}_{\text{had}}) &= \prod^{n_{\text{obs}}} \mathcal{L}(p_T; \mu, n_b, \alpha, \vec{\beta}) \\
 &= \prod^{n_{\text{obs}}} \left[ \frac{\mu n_s^{\text{exp}}}{n_b + \mu n_s^{\text{exp}}} \mathcal{L}_s(p_T; \mu, \alpha) + \frac{n_b}{n_b + \mu n_s^{\text{exp}}} \mathcal{L}_b(p_T; \vec{\beta}_{\text{bad}}, \vec{\beta}_{\text{had}}) \right], \\
 n_s^{\text{exp}} &= L \sigma_s \epsilon_s (1 + \alpha), \\
 \mathcal{L}_b(p_T; \vec{\beta}_{\text{bad}}, \vec{\beta}_{\text{had}}) &= f_{\text{bad}} \mathcal{L}_{\text{bad}}(p_T; \vec{\beta}_{\text{bad}}) + (1 - f_{\text{bad}}) \mathcal{L}_{\text{had}}(p_T; \vec{\beta}_{\text{had}}),
 \end{aligned}$$

unbinned ML法で用いたパラメータは以下の通り

$\mu$	the signal strength
$n_{\text{obs}}$	the observed number of events
$n_s^{\text{exp}}$	the expected number of signal events for a given model
$n_b$	the number of background
$L$	the integrated luminosity
$\sigma_s$	the signal cross section
$\epsilon_s$	the signal selection efficiency
$f_{\text{bad}}$	the fraction of bad track In the background
$\alpha$	the nuisance parameters representing the signal normalization
$\beta_{\text{had}}$	the nuisance parameters representing the pT spectrum of the hadron track
$\beta_{\text{bad}}$	the nuisance parameters representing the pT spectrum of the bad track