

# ATLAS実験におけるミューオンチャ ンネルでのクォークoniumの測定

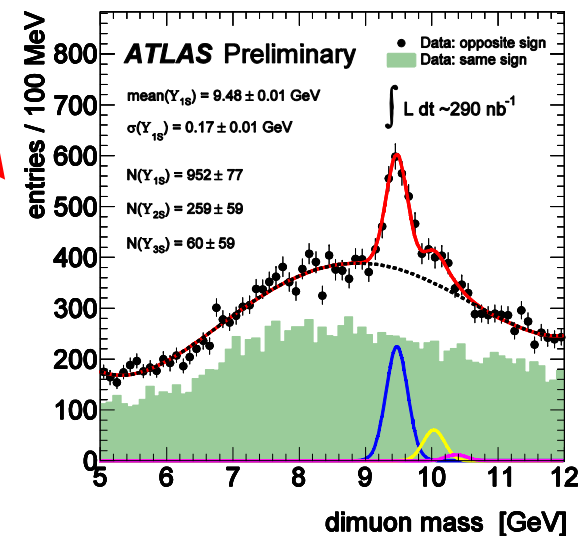
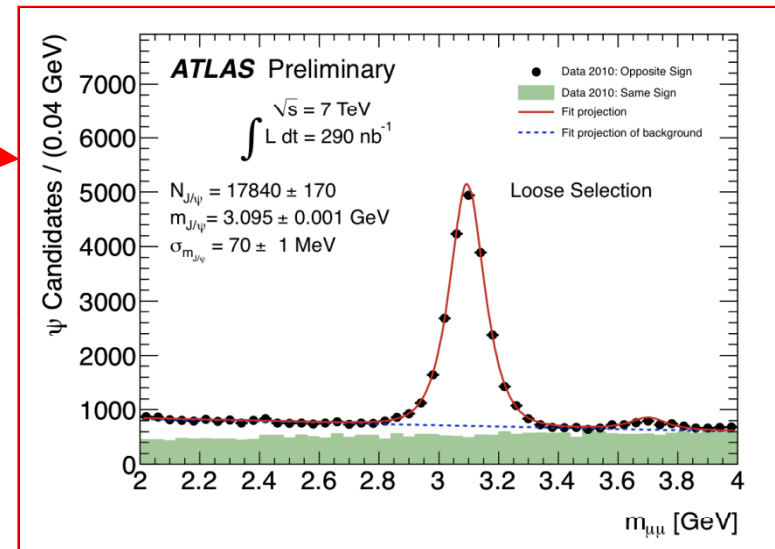
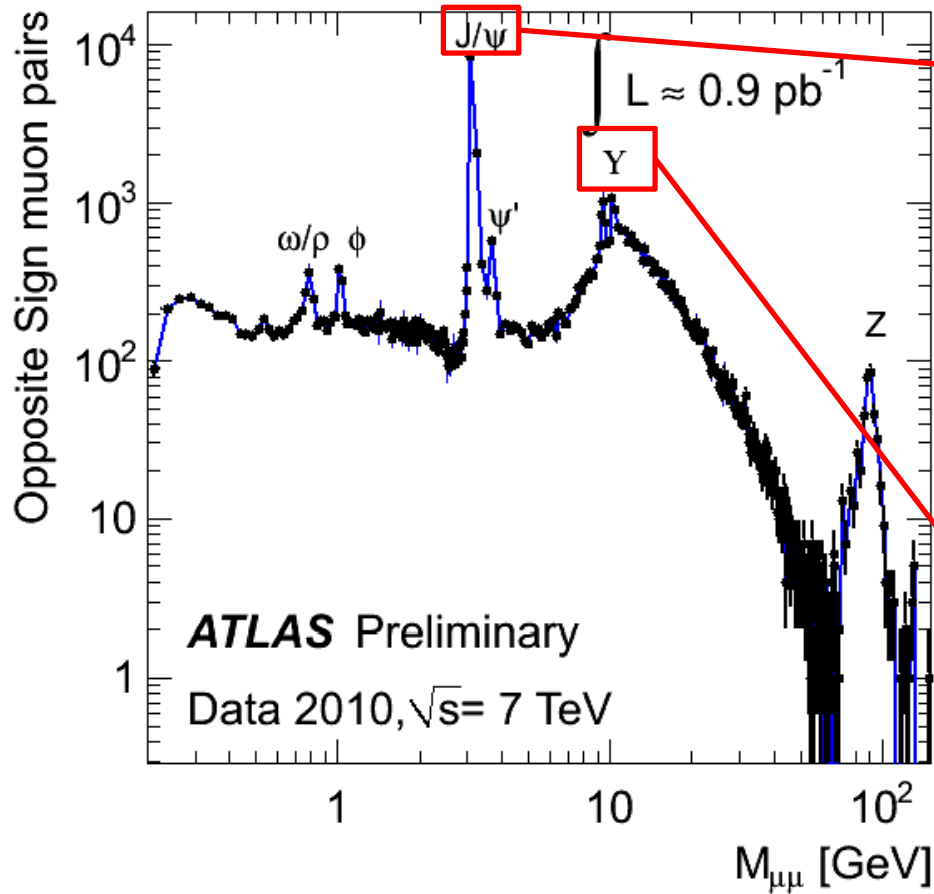
東大素セ, 神戸大理<sup>A</sup>

結束晃平, 坂本宏, 織田勸, 松下崇<sup>A</sup>, 久保田隆至,

他 ATLAS Collaboration

日本物理学会 2010年秋季大会 13pSK04

# 本講演では $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ の測定について発表します



# ATLASでの $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ の測定の目的

- 物理

- クォークoniumの生成メカニズムの理解
- ボトムクォークの生成断面積の測定

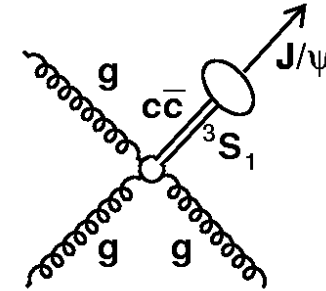
- 検出器

- ミューオンの検出効率の測定
- ミューオン検出器によるトリガー効率の測定
- 内部飛跡検出器のアライメント

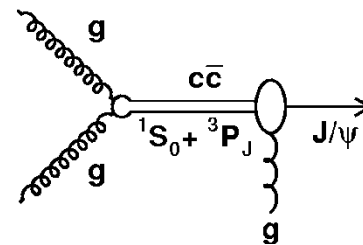
} 前講演

# クォーコニウムの生成メカニズムの理解

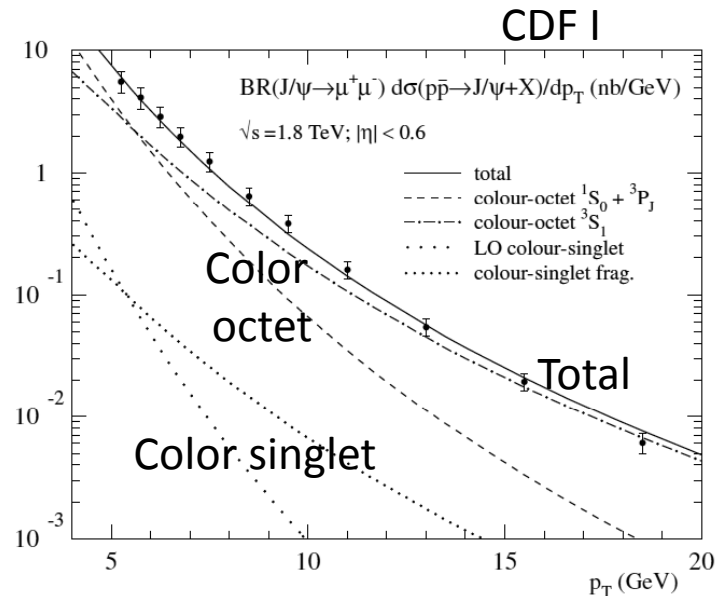
- 直接生成 (prompt production)
  - 主に  $gg$  衝突でできる
  - その次は  $q\bar{q}$ ,  $qg$
  - 中間状態が良くわかっていない
    - Color singlet だけか?
    - Color octet も含むか?
  - 断面積だけなら color octet を入れれば OK。
- b-hadron からの崩壊 (non-prompt production)



Color singlet



Color octet



# J/ $\psi$ のpolarization

- 崩壊レプトンの角度分布を測る

- $\lambda_\theta = +1$  : transverse polarization

- Helicity =  $\pm 1$

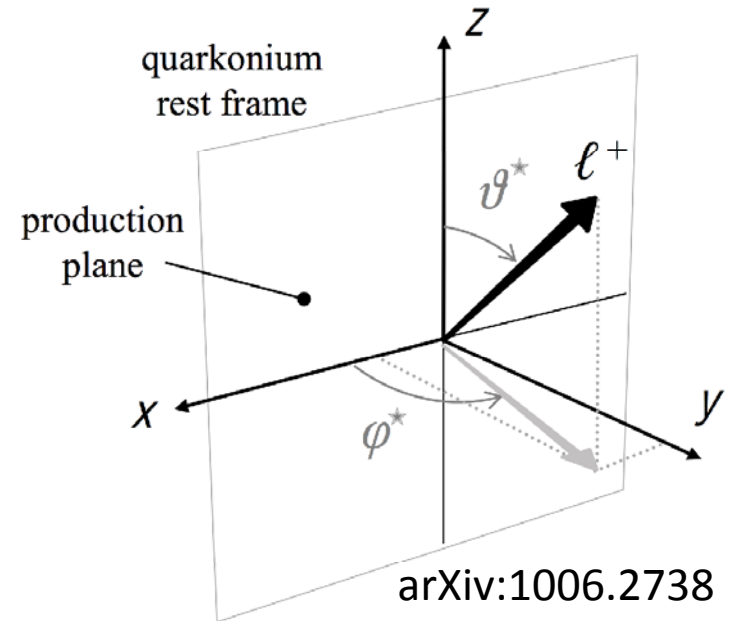
- $\lambda_\theta = -1$  : longitudinal polarization

- Helicity = 0

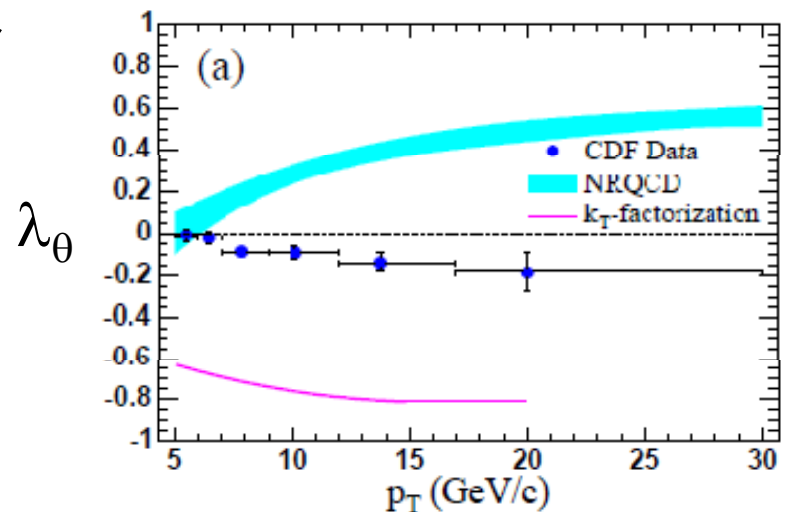
- Color Singlet Modelはおおむね longitudinal polarizationを予測

- Color Octet Modelはおおむね transverse polarizationを予測

- CDFの結果を再現する理論モデルはまだない。



$$\frac{d^2 N}{d \cos \theta^* d \phi^*} \propto 1 + \lambda_\theta \cos^2 \theta^* + \lambda_\phi \sin^2 \theta^* \cos 2\phi^* + \lambda_{\theta\phi} \sin 2\theta^* \cos \phi^*$$

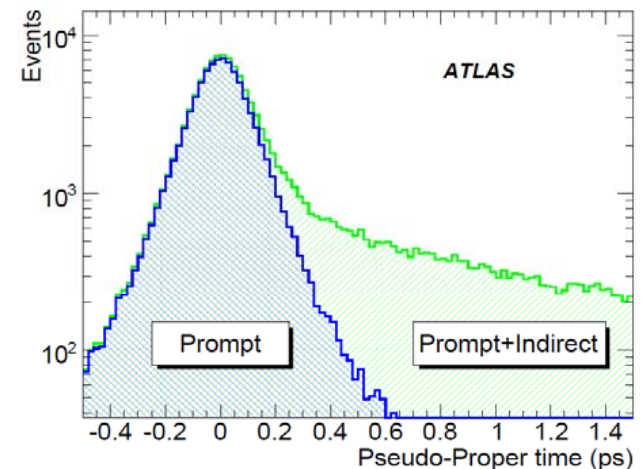
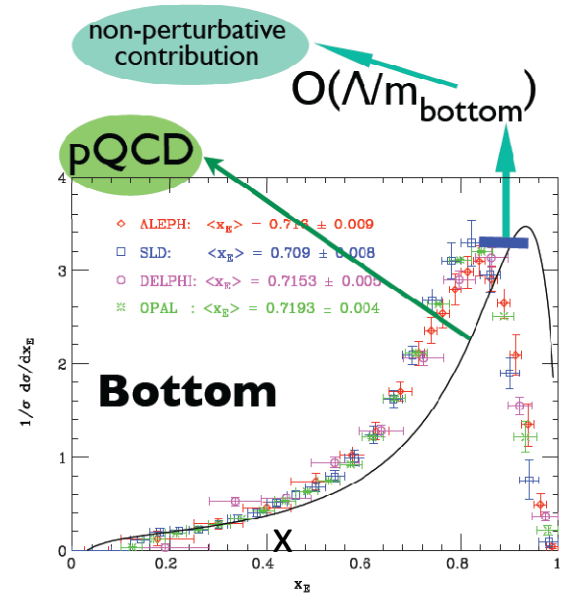


# ボトムクォークの生成断面積の測定

<http://cacciari.web.cern.ch/cacciari/talks/>

- $BR(b \rightarrow J/\psi X) = 1.16\%$
- Fragmentation functionもある程度わかっている
  - EvtGenなどのB decay generatorが存在する
- Decay lengthを測ることで分離できる
- ボトムクォークの微分断面積が測れる(に焼き直せる)
  - 横運動量
  - ラピディティ

$$e^+e^- \rightarrow QX \rightarrow H_Q X$$



# 使用した重心エネルギー7TeVでの 陽子衝突データ

- $J/\psi$ の生成断面積の測定
  - 横運動量とラピディティ依存性
  - トリガー: Level1 Minimum Bias Trigger ScintillatorトリガーとEvent Filter full scan muonトリガーのチェーン
    - 低い横運動量の $J/\psi$ を捉えるため。
  - データ取得期間: 2010年4月23日–6月4日
  - 積分ルミノシティ:  $\int L dt = 9.5 \text{ nb}^{-1}$
- $J/\psi$ の間接生成と直接生成の比
  - 横運動量依存性
  - トリガー: Level1 Muon Trigger (MU0, 一番低い横運動量しきい値)
    - 数多く $J/\psi$ を捉えるため
  - データ取得期間: 2010年4月23日–6月4日
  - 積分ルミノシティ:  $\int L dt = 17.5 \text{ nb}^{-1}$

# J/ψの生成断面積の測定

- イベント毎にacceptance, reconstruction efficiency, trigger efficiencyを補正するために重みを掛けた。  

$$w^{-1} := A(p_T, \eta; \lambda_i) * \varepsilon_{\text{reco}}(\mathbf{p}_{\mu+}) * \varepsilon_{\text{reco}}(\mathbf{p}_{\mu-}) * \varepsilon_{\text{trig}}(\mathbf{p}_{\mu+}, \mathbf{p}_{\mu-})$$
- Acceptanceの補正はJ/ψの横運動量、ラピディティ、**polarization**の関数。
- **Reconstruction efficiency**はシミュレーションで求めた値を用いた。
- **Trigger efficiency**はLevel1 Minimum Bias Triggerで取得したイベントから評価した。
  - $\varepsilon_{\mu}(p_T, \eta)$  : single muonに対する横運動量と擬ラピディティの関数としてのtrigger efficiencyを求め、
  - $\varepsilon_{J/\psi} = 1 - \{1 - \varepsilon_{\mu}(p_{T1}, \eta_1)\} \times \{1 - \varepsilon_{\mu}(p_{T2}, \eta_2)\}$  : J/ψに対するtrigger efficiencyをemulateした。
    - どちらかのmuonがトリガーを鳴らせば良い。



# Acceptanceのpolarizationに対する依存性

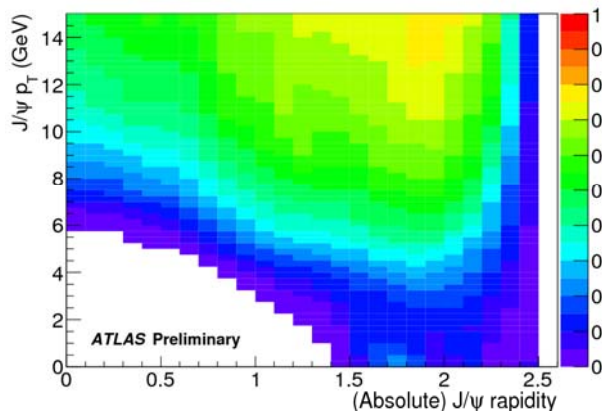
- J/ψ polarizationをまだ測定していないので、5つの極端な場合を考え、acceptanceの不確定性とした。
- Flatの場合を中心値として用いた。

$$\frac{d^2 N}{d \cos \theta^* d \phi^*} \propto 1 + \lambda_\theta \cos^2 \theta^* + \lambda_\phi \sin^2 \theta^* \cos 2\phi^* + \lambda_{\theta\phi} \sin 2\theta^* \cos \phi^*$$

Flat

$$\lambda_\theta = \lambda_\phi = \lambda_{\theta\phi} = 0$$

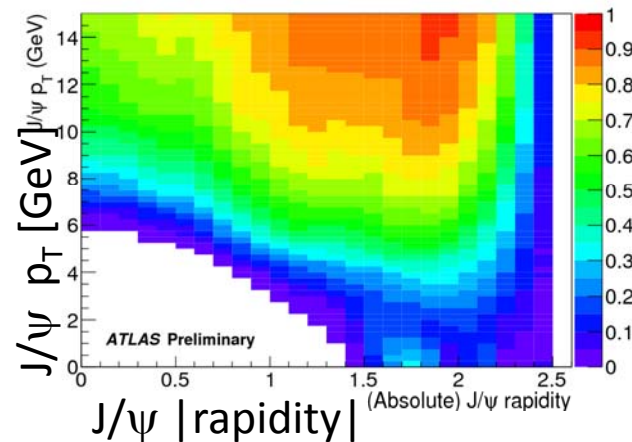
Acceptance map: polarisation hypothesis FLAT



Longitudinal

$$\lambda_\theta = -1, \lambda_\phi = \lambda_{\theta\phi} = 0$$

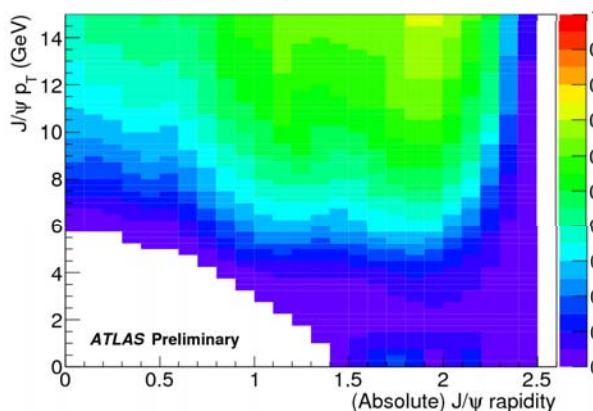
Acceptance map: polarisation hypothesis LONG



Transverse

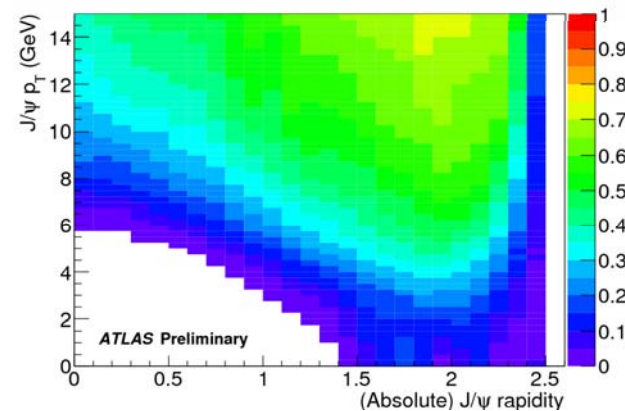
$$\lambda_\theta = +1, \lambda_\phi = +1, \lambda_{\theta\phi} = 0$$

Acceptance map: polarisation hypothesis TRPP



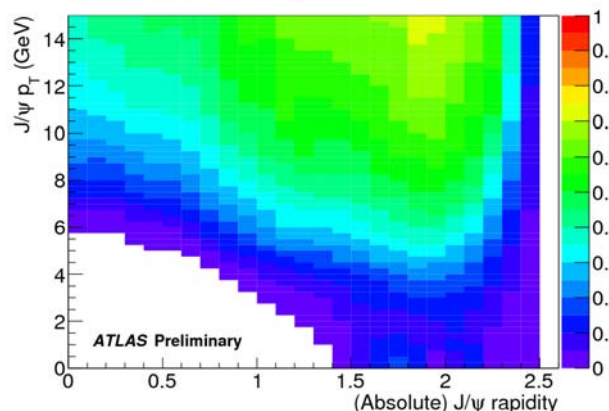
$$\lambda_\theta = +1, \lambda_\phi = -1, \lambda_{\theta\phi} = 0$$

Acceptance map: polarisation hypothesis TRPM



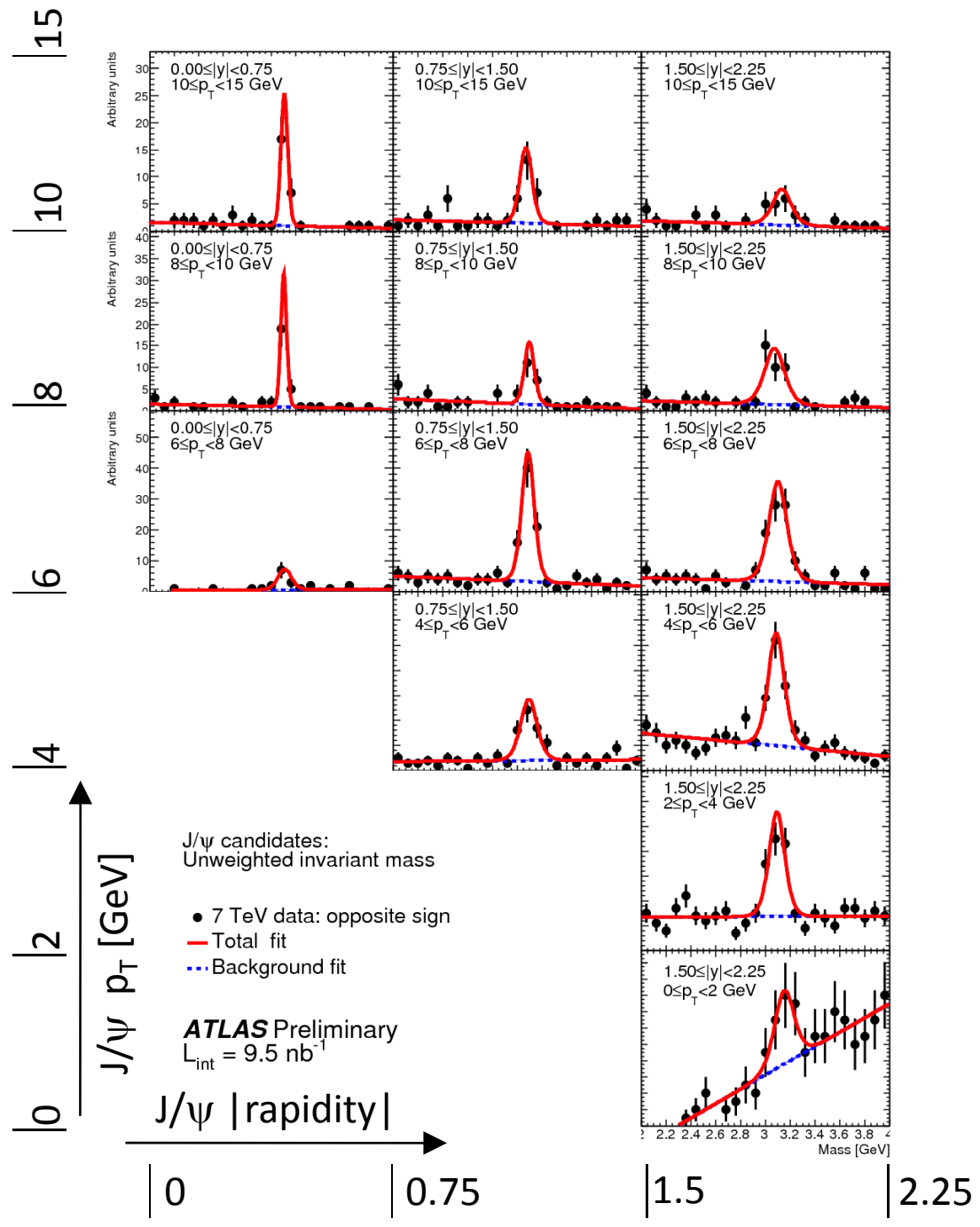
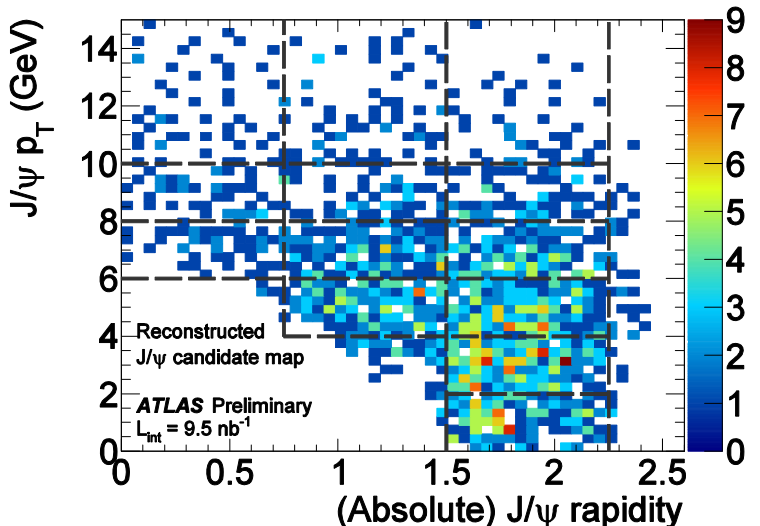
$$\lambda_\theta = +1, \lambda_\phi = \lambda_{\theta\phi} = 0$$

Acceptance map: polarisation hypothesis TRP0



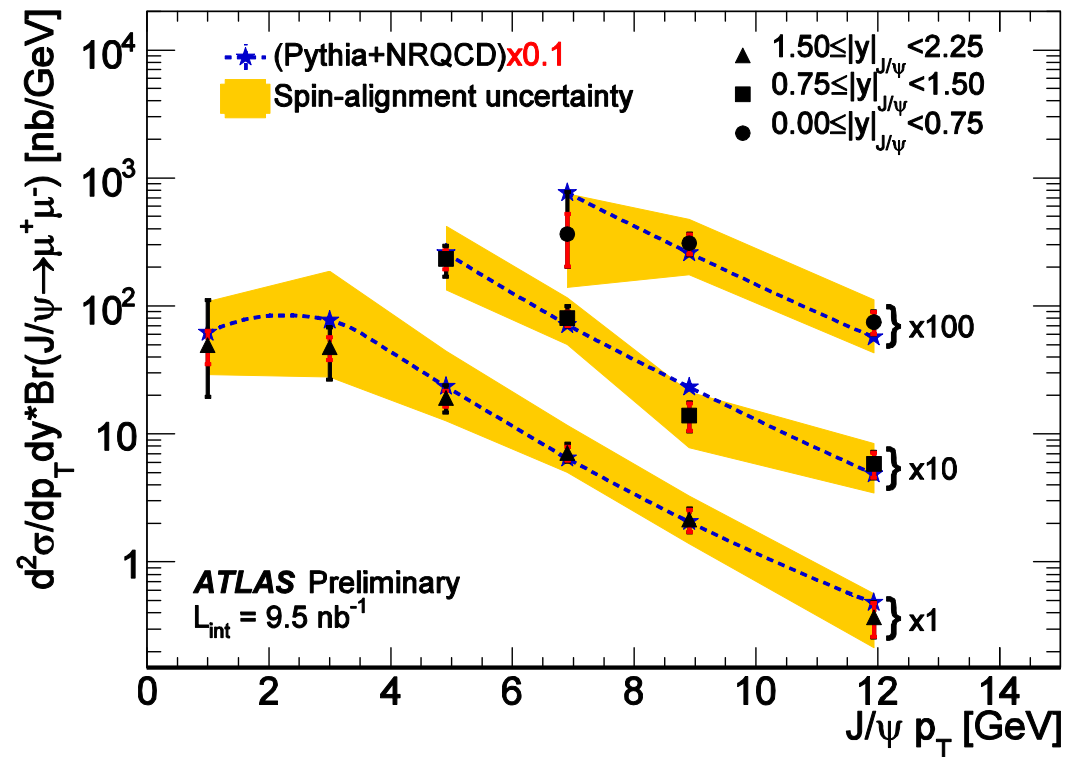
# 補正をする前の ミュオン対の 不変質量分布

- 赤い実線は unbinned maximum likelihood fit の結果。
- 信号は Gaussian
- バックグラウンドは 1次関数
- 再構成された質量が  $\pm 3\sigma$  以内にある  $J/\psi$  の候補の分布



# ATLASでの $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ の微分断面積

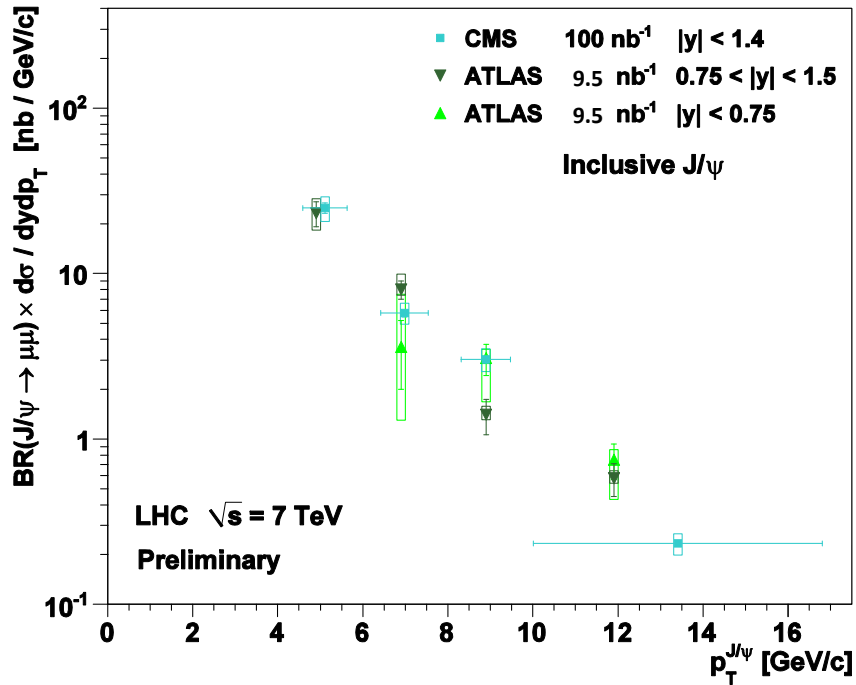
- 黄色いバンドは極端な polarization を考えた時の最大値と最小値を表す。
- 測定結果の横運動量とラピディティ依存性はColor Octet Modelを用いたPYTHIAの予測(青い点線)と一致している。
- しかし、このPYTHIAの予測は測定結果に合うように0.1倍してある。
- ATLAS実験によるPYTHIAの tuning、もしくは、用いたパートン分布関数に問題があるのだと考えられる。



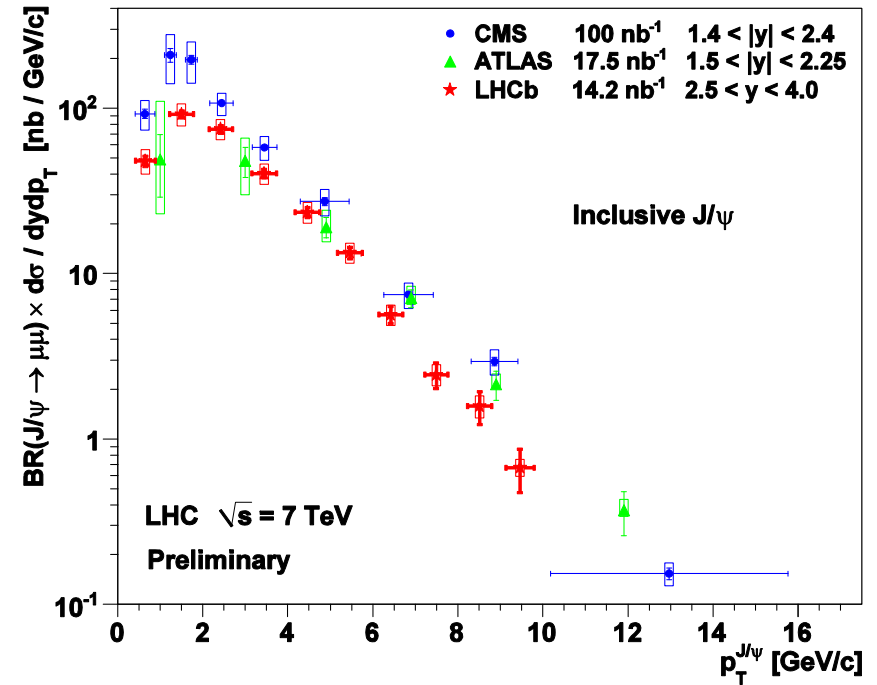
赤の誤差棒: 統計誤差  
 黒の誤差棒: 統計誤差と系統誤差

# LHCの他の実験による 微分断面積の結果との比較

## 中心ラピディティ領域



## 前方ラピディティ領域



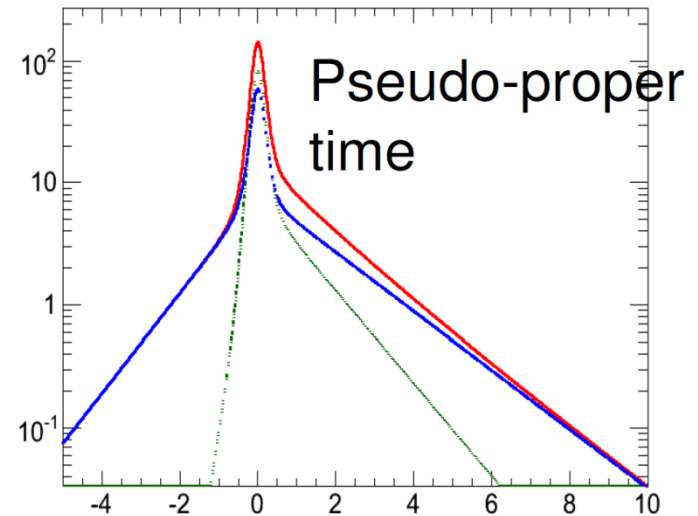
おおむね一致している。

# bクォークからの $J/\psi$ を分離するために pseudo-proper time( $\tau$ )を測定する

$L_{xy}$ はビームと垂直平面内での  
衝突点から $J/\psi$ の崩壊点までの距離

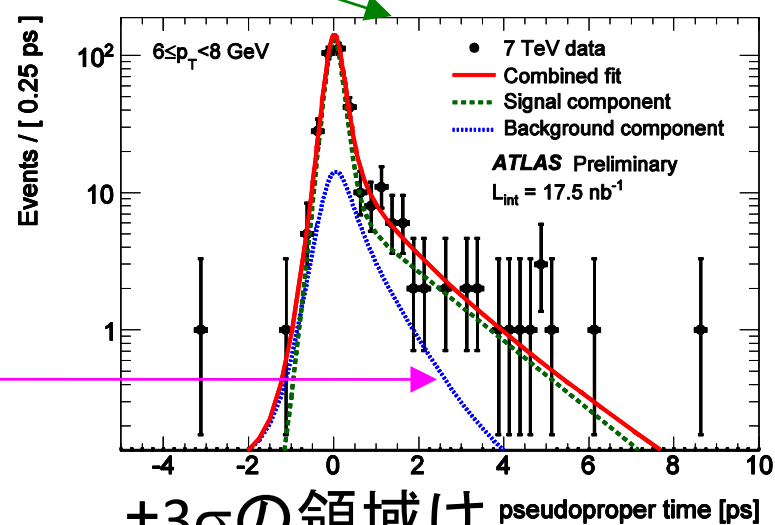
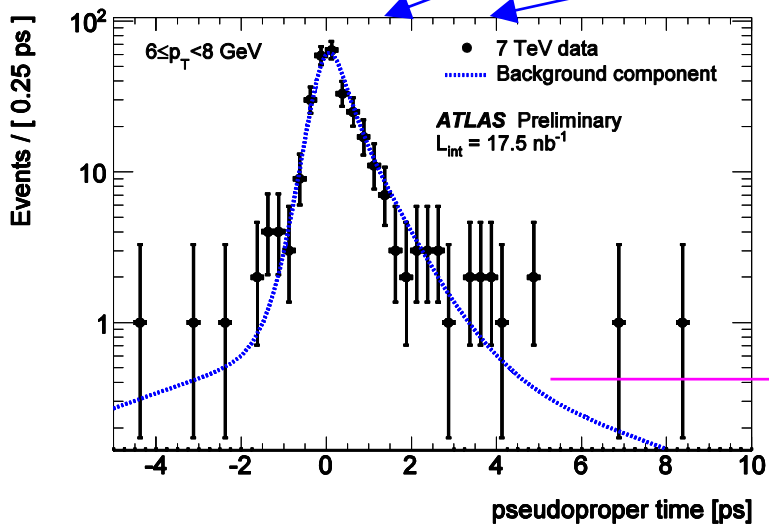
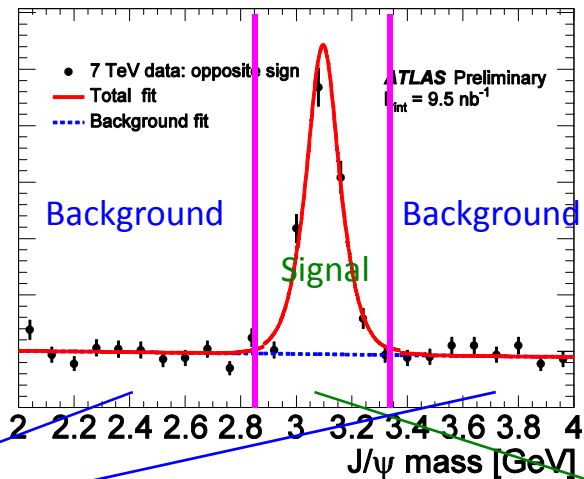
$$L_{xy} = \vec{L} \cdot \vec{p}_T(J/\psi) / p_T(J/\psi)$$

$$\tau = L_{xy} m(J/\psi) / p_T(J/\psi)$$



- 各横運動量ビンで不変質量とpseudo-proper timeを同時フィットで求めた。
- Pseudo-proper timeの確率分布関数
  - 信号:  $\delta$ 関数 (直接生成)と指数関数 (間接生成) をGaussian (tracking resolution)で畳み込み
  - バックグラウンド:  $\delta$ 関数と2つの指数関数 (1つは正の $\tau$ 側のみ、もう1つは正負の $\tau$ で対称な指数関数) をGaussianで畳み込み

# Pseudo-proper timeのフィットの例

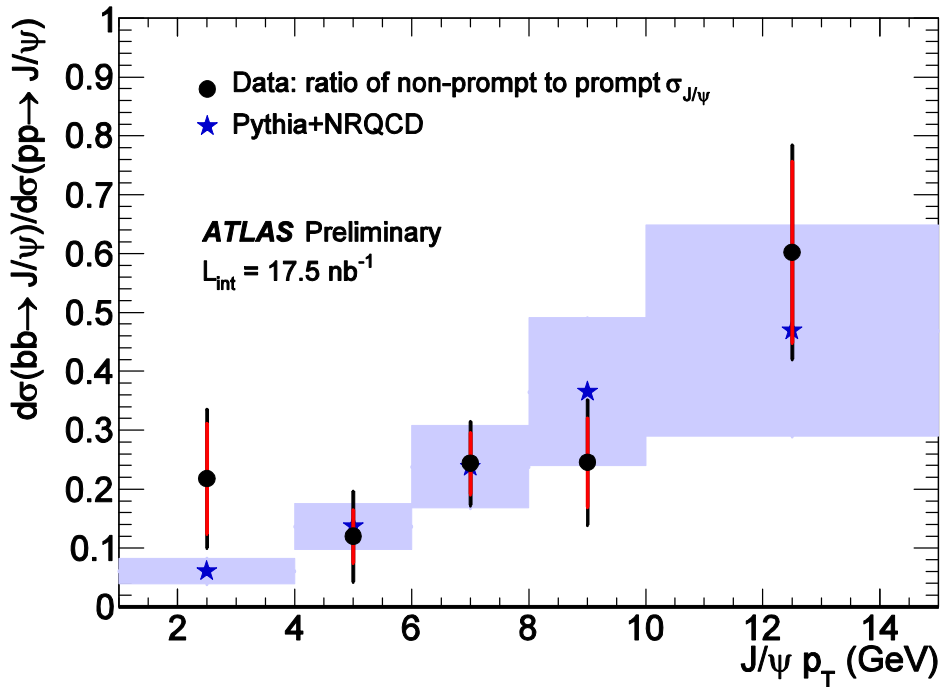


Side bandsから求めた  
バックグラウンド

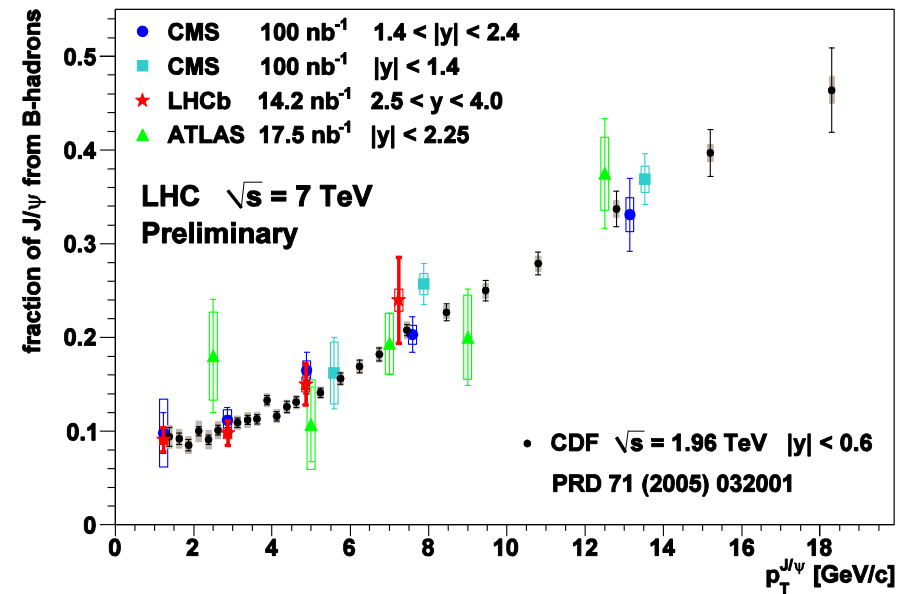
±3σの領域は  
信号+バックグラウンド  
でフィット

# J/ψの間接生成と直接生成の比

- 測定結果とPYTHIAの予測は誤差の範囲内で一致している。
- LHCの実験間でも一致している。



赤の誤差棒: 統計誤差  
 黒の誤差棒: 統計誤差と系統誤差



この図は比でなく、  
 間接生成の割合を表示している。

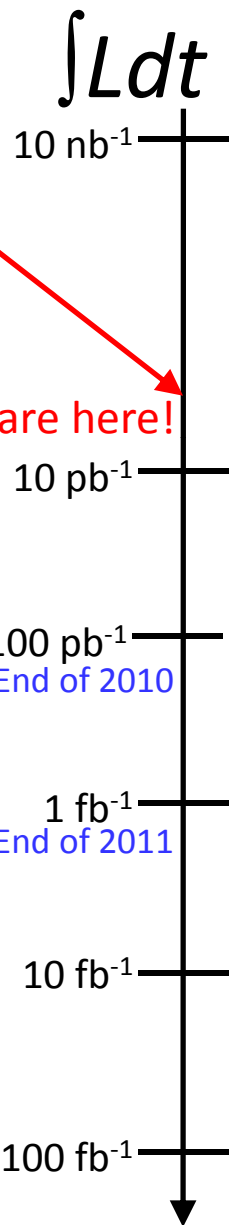
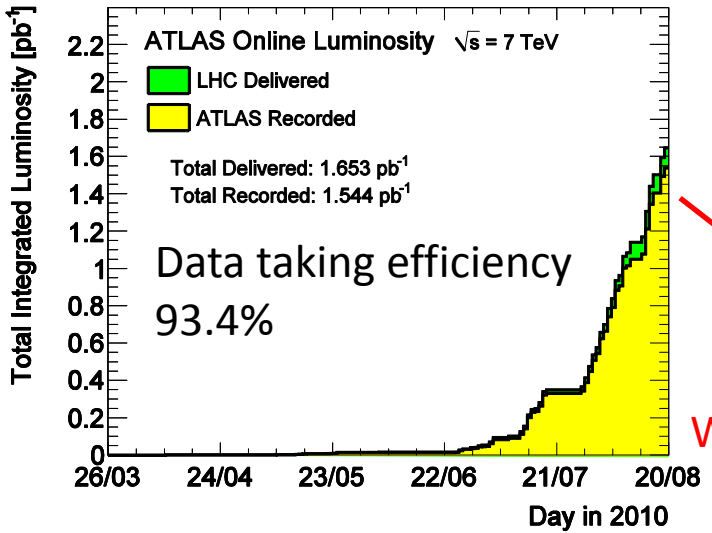
# まとめと今後

- ATLAS実験で重心エネルギー7TeVでの陽子衝突における $J/\psi$ の微分断面積と間接生成と直接生成の比を測定した。
- PYTHIAの予測と横運動量依存性、ラピディティ依存性はおおむね一致するが、断面積の絶対値に10倍の差がある。
  - おそらく、ATLAS実験によるPYTHIAのtuningの問題。
- LHC実験間ではおおむね一致している。
- $J/\psi$ の微分断面積と間接生成の割合からボトムクォークの微分断面積を求める。
- $J/\psi$ のpolarizationと微分断面積から生成メカニズムに制限を掛ける。
- この解析についてのATLAS Conference Noteが一般に公開されています。
  - ATLAS-CONF-2010-062
  - <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2010-062/>



# 予備スライド

# ATLAS B-physics program



Validation of tracking/trigger performance and alignment, data quality monitoring with  $J/\psi$  and  $\Upsilon$

Continuing performance studies: measurements of  $pp \rightarrow J/\psi$ ,  $bb \rightarrow J/\psi$  and  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$  cross sections

Collect larger numbers of the main B decays; start to contribute to world averages on B-hadron ( $B^+$ ,  $B_s$ ,  $B_c$ ,  $\Lambda_b$ ) properties; Onia polarization study; start to set limits on rare decay branching ratios

Searches for BSM CP-violation in weak decays of B mesons; rare decay searches;  $\Lambda_b$  polarization study

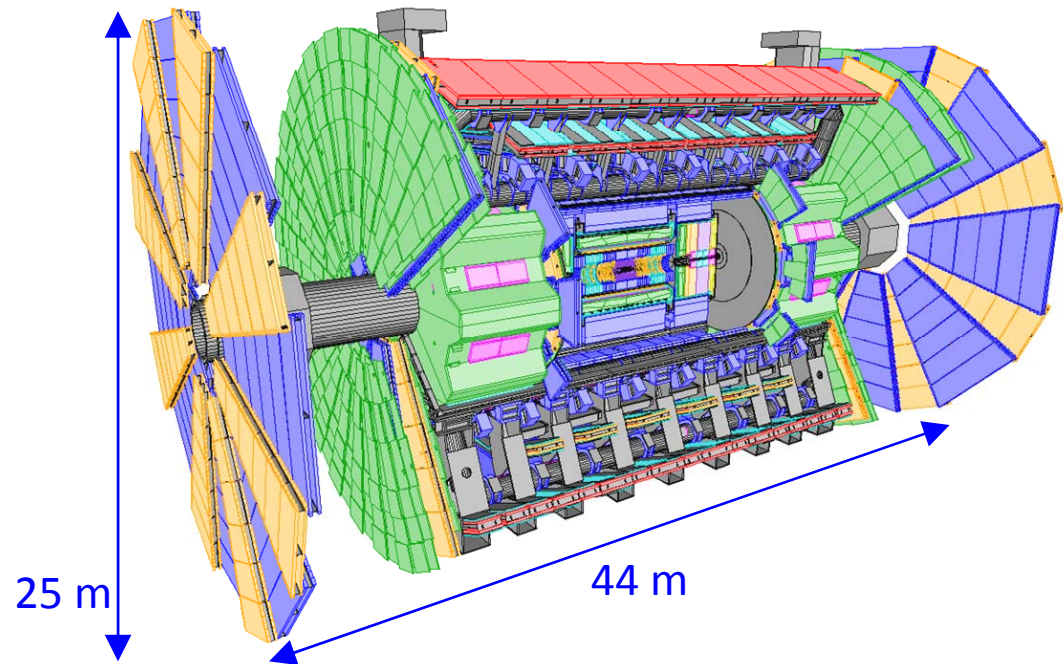
“High” LHC luminosity – main period for rare decay searches (such as  $B_s \rightarrow \mu\mu$ )

## Early program

- Understanding the detector performance using well understood b and c processes.
- Measurement of production cross sections for B-hadrons,  $J/\psi$  and  $\Upsilon$  to test QCD predictions for pp collisions at the LHC.

# ATLAS detector

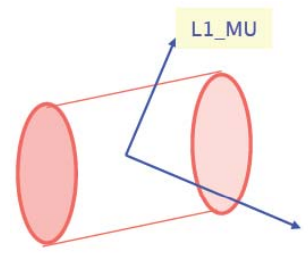
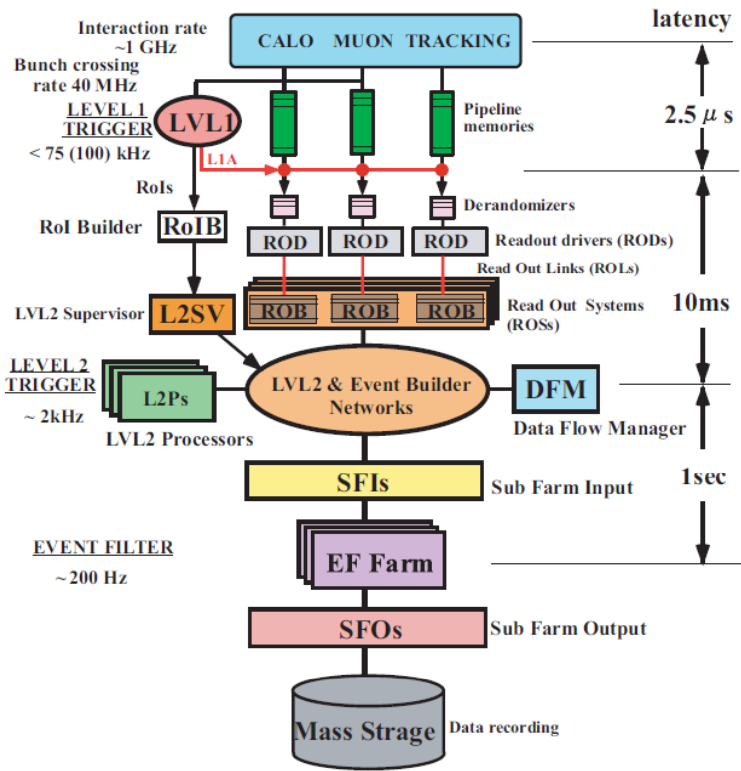
- A general purpose detector at the LHC.
- Complement the B-physics program of the dedicated LHCb experiment.
  - ATLAS and CMS :  $0 < |y| < 2.4$
  - LHCb :  $2 < y < 4.5$
- Inner Detector :  $|\eta| < 2.5$ , 2-Tesla Solenoid magnet
  - Si Pixels, Si Strips, Transition Radiation Detector
  - Precise tracking, vertexing,  $e/\pi$  separation
  - $\sigma_{p_T}/p_T \sim 3.4 \times 10^{-4} p_T [\text{GeV}] + 0.015$
- Muon Spectrometer :  $|\eta| < 2.7$ , Air-core toroid magnets
  - Gas-based muon chambers
  - Muon trigger and measurement with momentum resolution  $< 10\%$  up to  $p \sim 1 \text{TeV}$ .



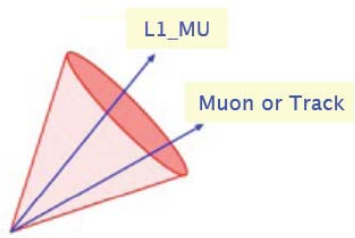
# ATLAS trigger

- Level1 : hardware trigger from muon, calorimeter and minimum bias scintillator
- Level2 : software trigger to confirm Level1 trigger decision
- Event Filter : perform event selection using more complex algorithms
- HLT B-Triggers are full scan trigger, single muon trigger and di-muon trigger.
- $M(\mu\mu) < 13\text{GeV}$  to cover  $J/\psi, \psi', \Upsilon \rightarrow \mu\mu$ , rare  $B_{sd} \rightarrow \mu\mu, B \rightarrow X_s \mu\mu$
- Trigger menu evolves with luminosity.
- Well-understood triggers are used for physics analysis.

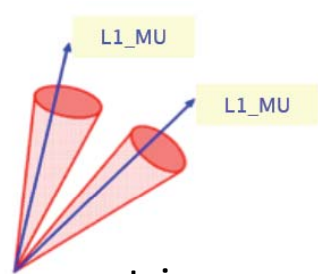
High Level Trigger



Full scan trigger with one L1 muon



Single muon trigger with one L1 muon

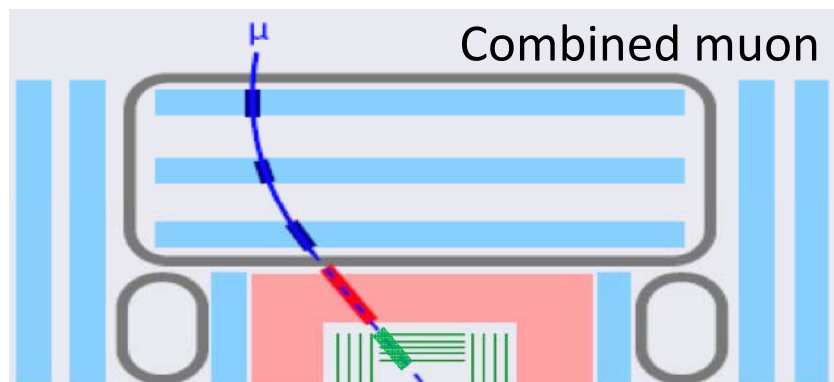


Di-muon trigger with two L1 muons

# Muon reconstruction

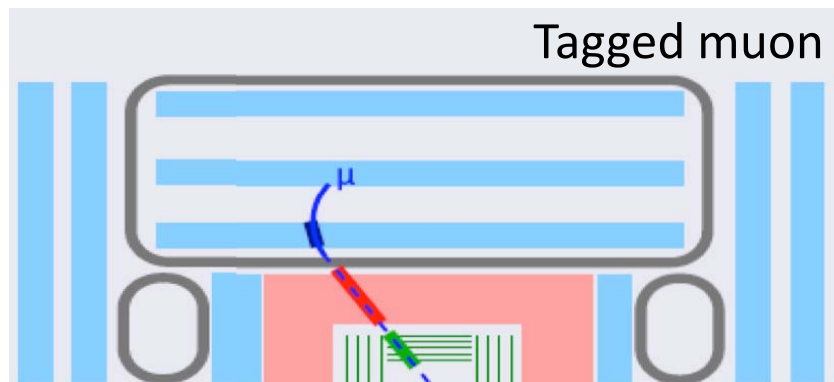
- Inner Detector tracking for momentum measurement
- Muon Spectrometer for muon identification and triggering
- Muons are reconstructed either fully or partially, “combined” or “tagged”.

Muon Spectrometer Calorimeters Inner Detector

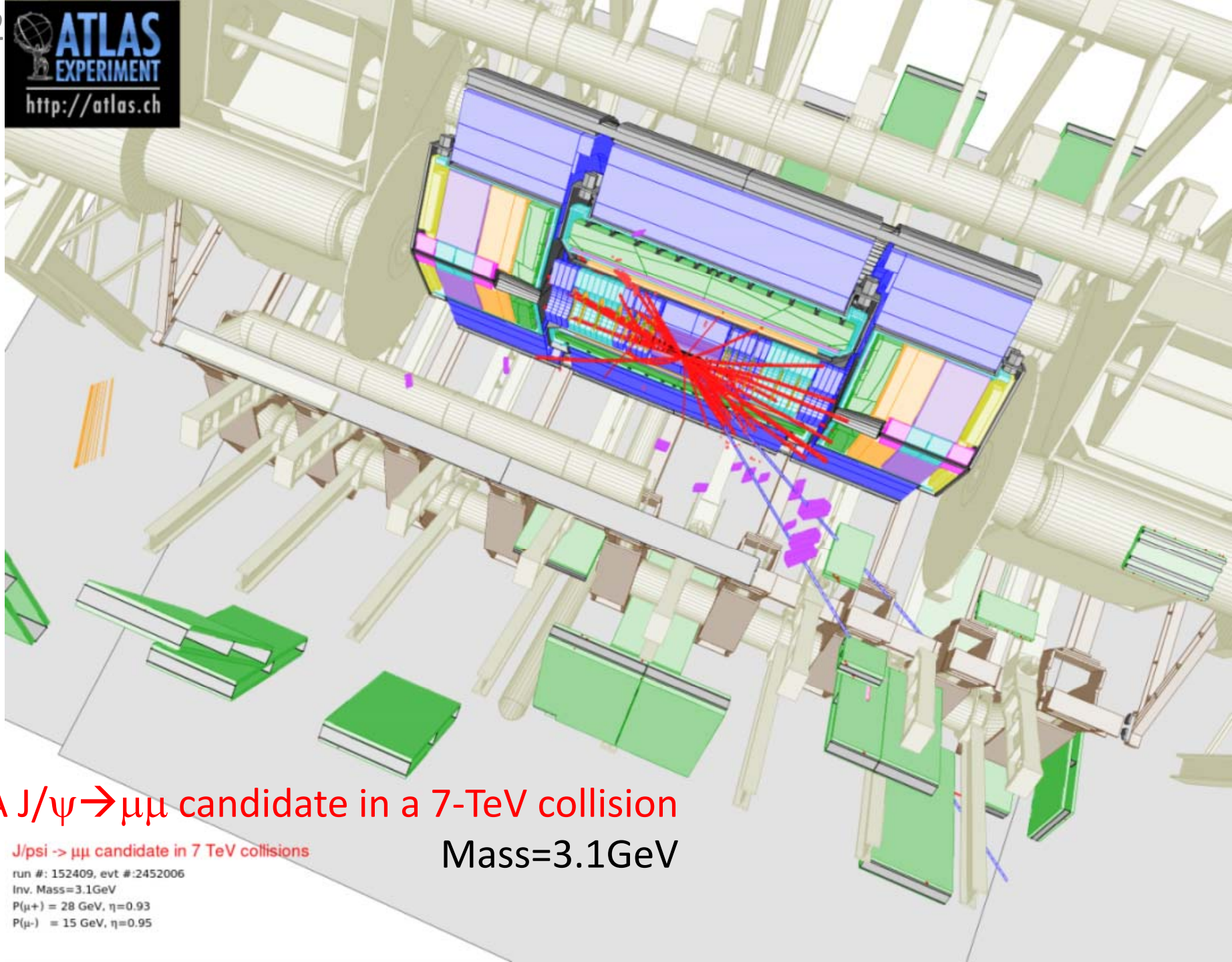


Combined muons have an ID track matched to an MS track and refitted through the detector to give the best measurement.

At least one muon in a pair must be combined in the selection of  $J/\psi$ .



Tagged muons are ID tracks matched to muon segments when extrapolated to the MS. Such muons generally have low momentum.



A  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  candidate in a 7-TeV collision

Mass=3.1GeV

J/psi ->  $\mu\mu$  candidate in 7 TeV collisions  
 run #: 152409, evt #:2452006  
 Inv. Mass=3.1GeV  
 P( $\mu^+$ ) = 28 GeV,  $\eta=0.93$   
 P( $\mu^-$ ) = 15 GeV,  $\eta=0.95$

- The coefficients,  $\lambda_\theta$ ,  $\lambda_\phi$  and  $\lambda_{\theta\phi}$ , are related to the spin density matrix elements of the  $J/\psi$  spin wave function.

arXiv:1006.2738

- Five spin alignment scenarios are considered
- $$|J/\psi\rangle = A_-|-1\rangle + A_0|0\rangle + A_+|+1\rangle$$

- Flat distribution:  $\lambda_\theta = \lambda_\phi = \lambda_{\theta\phi} = 0$
- Longitudinal:  $\lambda_\theta = -1, \lambda_\phi = \lambda_{\theta\phi} = 0$  ( $A_0=1, A_+=A_-=0$ )
- Transverse:
  - $\lambda_\theta = +1, \lambda_\phi = \lambda_{\theta\phi} = 0$  ( $A_\pm=1, A_0=A_\mp=0$ )
  - $\lambda_\theta = +1, \lambda_\phi = +1, \lambda_{\theta\phi} = 0$  ( $A_+=A_-, A_0=0$ )
  - $\lambda_\theta = +1, \lambda_\phi = -1, \lambda_{\theta\phi} = 0$  ( $A_+=-A_-, A_0=0$ )

- Polarization is expected to depend on production models.

