

LHC(ATLAS・CMS) 最新の研究成果 I

東京大学大学院 理学系研究科

浅井 祥仁

shoji.asai@cern.ch

2010年11月15日

1 はじめに

本年3月30日にLHCは重心系エネルギー7TeVの実験を開始し、前人未踏のテラスケール(TeV)の直接研究が可能になった。これから目が離せなくなるので、高エネルギーニュースの場を借りて、年二回程度の頻度で最新のLHCの成果について持ち回りで紹介していく。初回である今回は、LHC加速器の今年の歩みを簡単にまとめた後、ATLAS/CMSの公式結果から抜粋して報告する。私の興味でテラスケールの新しい物理探索に話が偏ってしまう点と、まだ全実験データを解析した結果がグループで承諾されていないので、限定したデータの結果になってしまう二点はお許し願いたい。

2 LHC 加速器の状況

超伝導磁石のつなぎ目の接続不良[1]がまだ修理されていないため、本年は重心系エネルギー7TeVで実験がおこなわれた。本年の目的は、ルミノシティを $10^{32}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上で安定的に衝突させることにある。このルミノシティはLHCの最終デザインよりは2桁小さいが、2011年はこのルミノシティで安定的に実験を行おこない積算ルミノシティ $L > 1\text{fb}^{-1}$ を実現する。

陽子は約 10^{11} 個が集まってバンチを構成し、このバンチが複数個リングの中をまわり、検出器の位置で衝突するようになっている。ルミノシティを上げるには、バンチの形を絞り、バンチの数を増やすことが必要である。図1に2010年の積算ルミノシティを示す。3月30日におっかなびっくりで始めた時は、バンチの数も一つで $10^{27}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であったが、バンチ数を50まで増やして、ビームを少し絞って8月に $10^{31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで、実に4桁も増強した。あとfactor 10で目標達成である。しかし、これ以上バンチ数が増えると、不必要な箇所での衝突も起きてしまうため、衝突に角度(crossing angle $\sim 0.3\text{mrad}$)をつけて他の箇所での衝突が起きないようにする。9月にデータが増えていない1ヶ月の間は、加速器のcrossing angleの調整がおこなっていた。その後どんどんバンチ数を増やしていき、最終的にバンチ数は368にまで増強され、 $L \sim 2 \times 10^{32}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ が達成された。

図1に示すように、登り調子でルミノシティが増強され、10月いっぱいまで $L \sim 45\text{pb}^{-1}$ のデータが記録された。これで来年 $L > 1\text{fb}^{-1}$ のデータが十分期待できるようになった。

今年のプロトン・プロトン衝突の実験は10月31日終わり、現在は重イオンで衝突実験をおこなっている。

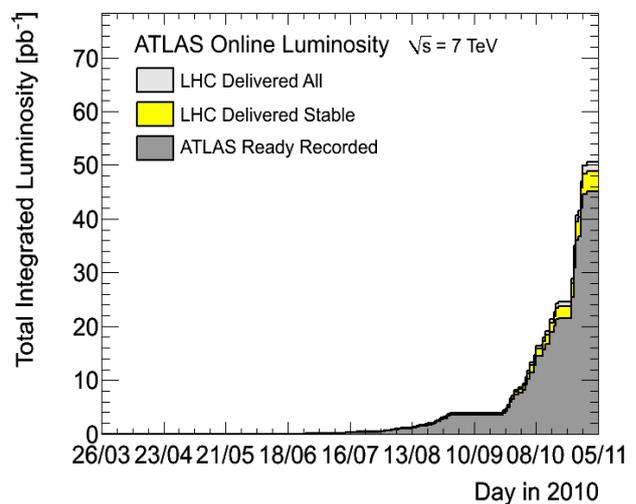


図1 積算ルミノシティの状況

淡い灰色はデリバリーされたデータ、濃い灰色はATLASで記録されたデータ量。

3 標準理論の検証

3.1 QCD ジェット事象

LHCでもっとも多い反応が、パートン同士がカラーを交換(t -channelの交換が主要)して二つのジェットが観測される事象(以後QCDジェット事象と呼ぶ)である。この反応はテラスケール領域での量子色力学の検証であると同時に、間接的に新しい物理を探ることができる。たとえばクォークが 10^{-20}m のスケールで点状でない場合や、 $O(10)\text{TeV}$ の未知の重い粒子が仮想的に交換する場合など、ジェットの高い運動量側の分布にQCDの予言からズレが生じる。

図2(a)は、ジェットの生成断面積を横方向運動量(P_T)の関数で示している[2]。黒丸が測定点(統計誤差とルミノシティの誤差をバーで示している)、淡い灰色(紫)バンドが系統誤差(エネルギースケールの不定性がおもてこの絵では

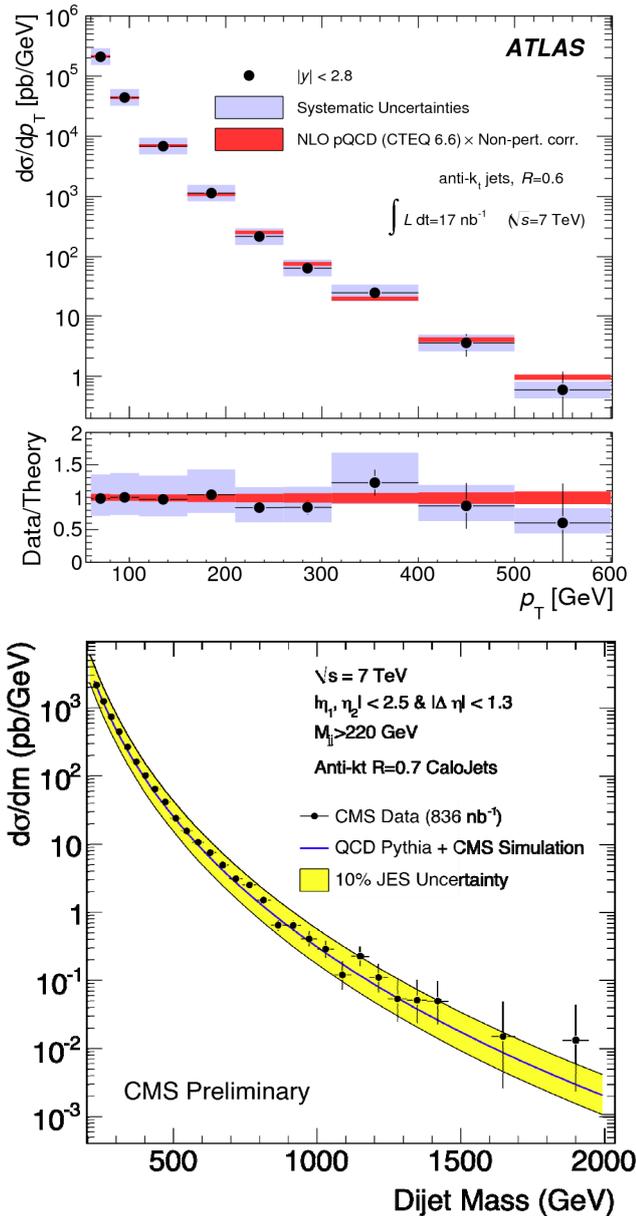


図2 (a) QCD 2 ジェット事象の生成微分断面積(ATLAS $L = 17 \text{ nb}^{-1}$) 黒丸: 実験データ, 淡い灰色(紫)バンド: 実験系統誤差, 濃い灰色(赤)バンド: 理論の系統誤差。下は実験データと QCD 予言の比をプロットしている。(b) 二つのジェットの不变質量分布(CMS $L = 836 \text{ nb}^{-1}$) 淡い灰色(黄)のバンドは実験系統誤差。

8%), 濃い灰色(赤)バンドで示すのが QCD の予言である。NLO(Next-to-Leading Order)まで計算した結果であり, renormalization, factorization scale(中心値はジェットの P_T を用いている)の不定性とその幅で示されている。実験データは, QCD の予言と 6 桁の非常に広いレンジで一致している。この図は $|y| < 2.8$ と広い rapidity での inclusive な結果であるが, y を細かく分けて比較しても, 超前方 ($|y| > 3.5$) を除くどの領域でも, 実験データと QCD の予言はよく一致している。超前方は, 計算の不定性が大きい上にエネルギー分解能も悪いため, 比較が難しい。エネルギースケールの不定性のうち, ハドロンシャワーがカロリメーターの

中でどの様に成長していくかの不定性が約 4% 占めている。他の系統誤差がデータの増加に従い比較的容易に抑えることが出来るのに対して, これはジェットと γ がバランスしたような事象 ($q\bar{q} \rightarrow q\gamma$) を用いて較正する。

将来エネルギースケールの不定性が 1% におさえられると, 10^{-20} m のスケールでクォークの構造や $O(10 \text{ TeV})$ の新粒子探索が可能になってくる。

図 2(b)は二つのジェットの不变質量の関数として生成断面積を表したものである。たとえば, excited quark の様な未知の重い粒子はクォークとグルオンの衝突で生成し, これらに崩壊するので高い P_T のジェット 2 本が観測され, その不变質量分布でピークとなる。また余剰次元がテラスケールに存在し, 二つの高いエネルギーを持ったパートンが反応すると, カラー交換以外にも重力の効果が効くようになり, 共鳴状態が存在する可能性がある[3]。この様に 2 ジェットはシンプルなものにいろいろな物理を探ることができる。図 2(b)に示すように, 実験データは PYTHIA (leading order) の予言する分布とエネルギースケールの不定性の範囲内で一致しており, 残念だけど高い領域でのずれは観測されなかった。これから, excited quark の下限質量 1.53 TeV (ATLAS $L = 3.1 \text{ pb}^{-1}$) [4], 重力共鳴の下限質量 2.1 TeV (CMS $L = 0.83 \text{ pb}^{-1}$) [5] が得られた。他にも応用が可能である。これらは, 今年の前データの 1/10 以下の少ないデータしか使っていない。今後はエネルギースケールの不定性や PDF などの理論の不定性を抑える研究が鍵となって来る。

3.2 W, Z 事象

電弱ゲージボソン $W(\rightarrow l\nu)$, $Z(\rightarrow \ell\ell)$ は断面積も大きく, 検出器の性能を理解する上で大事な役割を果たす。特にレプトンの検出・トリガー効率の測定や $Z \rightarrow \ell\ell$ を用いた検出器較正などに不可欠のプロセスである。同時にこれらの過程は, トップの研究や 4 章で述べる新物理探索のバックグラウンドとなるため理解が不可欠である。

事象選別には電子 (e) かミューオン (μ) のレプトン ($P_T > 20 \text{ GeV}$) 一つと, 横方向消失エネルギー ($m_{E_T} > 25 \text{ GeV}$) を要求する。カロリメーターで観測されたエネルギーのベクトル和にミューオンを加えたものの逆ベクトルが m_{E_T} ベクトルであり, ニュートリノの P_T に対応している。レプトンと m_{E_T} の二つから計算される横方向質量 $M_T (= \sqrt{2P_T m_{E_T}(1 - \cos \Delta\phi)}$: $\Delta\phi$ は x - y 平面でのレプトンと m_{E_T} のなす角) 分布を図 3 に示す。 W の崩壊は $M_T \sim 80 \text{ GeV}$ にヤコビアンピークを作り, $M_T = 40 \sim 80 \text{ GeV}$ に多く分布する。

同様に $Z \rightarrow ee, \mu\mu$ を選び出して, 生成断面積に焼き直した数字を表 1 [6] にまとめる。系統誤差は, 検出効率の不定性が一番効いている。ルミノシティの不定性は現在 11%

であるが、これらは今後改善していく。理論の不定性はおもに PDF である。測定結果は NNLO の予言と一致している。

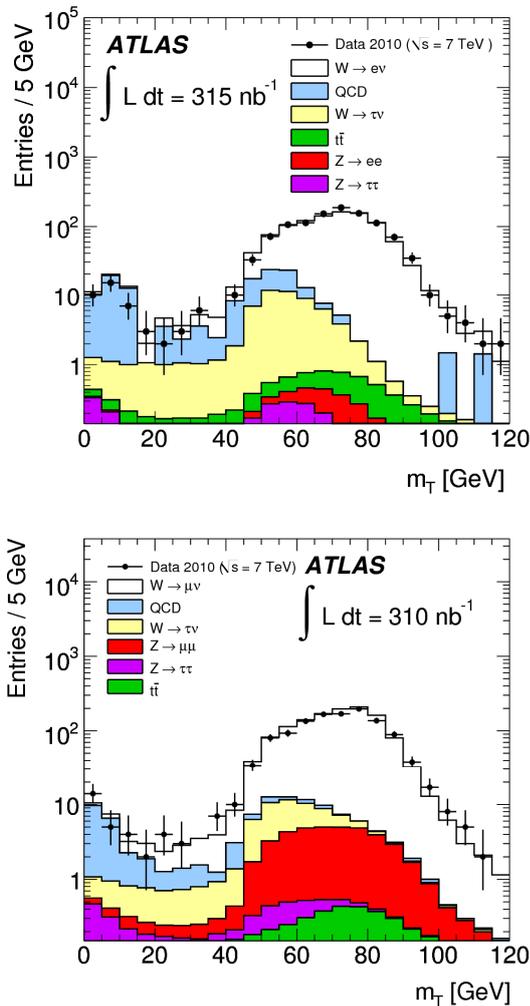


図3 M_T 分布 (ATLAS $L = 0.3 \text{ pb}^{-1}$)

(a)は電子、(b)はミューオン、白色ヒストグラムは $W \rightarrow l\nu$ シグナル、バックグラウンド過程は図中のレジェンド参照。

表1 重心系7TeVでの W, Z の生成断面積

e, μ への崩壊分岐比がかかった値、ATLAS ($L = 0.3 \text{ pb}^{-1}$)、誤差は統計・系統・ルミノシティを示す。

	測定値(nb)	NNLO 予言値(nb)
$\sigma(W) \cdot Br(W \rightarrow l\nu)$	$9.96 \pm 0.23 \pm 0.50 \pm 1.1$	10.46 ± 0.52
$\sigma(Z) \cdot Br(Z \rightarrow l\bar{l})$	$0.82 \pm 0.06 \pm 0.05 \pm 0.09$	0.96 ± 0.05

もし、未知のゲージ粒子 W' や Z' が存在すると、電弱ゲージ粒子 W や Z と同様に観測される。クォークやレプトンへの結合定数が標準モデルと同じであると仮定し質量だけ異なる場合は、図4が示すように M_T 分布の大きなところに新しいレゾナンスが観測される。この図は、電子チャンネルだけである。電子のエネルギー分解能は、高いエネルギーで $1/\sqrt{E_T}$ でよくなるが、一方ミューオンの運動量分解能は P_T で悪くなるからである。もし、 W' の崩壊幅が標準理

論からの外挿より大きい場合は、検出器の効果より物理の効果効く様になる。その場合は電子ばかりでなくミューオンの解析も重要になってくる。電子チャンネルだけ使って、ATLAS ($L = 0.3 \text{ pb}^{-1}$) のデータで W' への制限 465 GeV (95%CL) が得られている。今年全データ(100倍以上ある)を用いると、 1.1 TeV (95%CL) 付近まで探ることができる。これは Tevatron で得られた制限より厳しいものである。

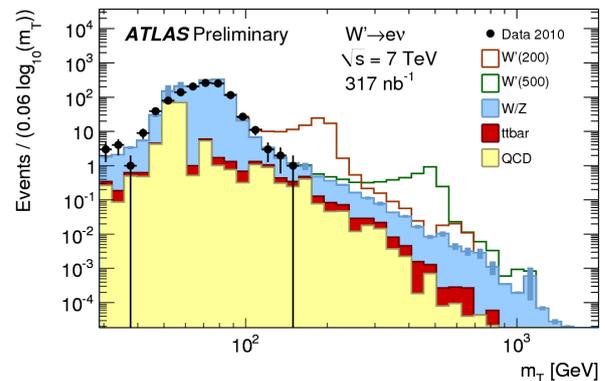


図4 M_T 分布 (ATLAS $L = 0.3 \text{ pb}^{-1}$)

黒丸：実験データ、灰色(水色)ヒストグラム： $W \rightarrow l\nu$ シグナル、バックグラウンド過程は図中のレジェンド参照。濃い灰色(赤)枠 ($W' = 200 \text{ GeV}$)、灰色(緑)枠 ($W' = 500 \text{ GeV}$) は、未知の W' ボソンがあった場合期待されるシグナル。

3.3 トップ事象

トップクォークは、他のフェルミオンと比べると桁違いに重く、電弱対称性の破れや、標準理論を超えた新しい素粒子現象などに何か新しいヒントを与えてくれる可能性がある。LHC でのトップの生成断面積は、 830 pb (NLO $E_{\text{CM}} = 14 \text{ TeV}$) とグルオンからの生成がおもになるため Tevatron と比べて2桁大きくなり詳細な研究が可能になる。

生成されたトップは直ちに b クォークと W ボソンに崩壊するので、トップペアーは、 $bbqqqq$ (ハドロニック)、 $bbqql\nu$ (セミレプトニック)、 $bbll\nu\nu$ (レプトニック) の三つのトポロジーが期待されるが、トリガーの問題などで、ハドロニックはなかなか難しい。質量測定などにはセミレプトニックモードが有用であるが、反面 W + ジェットのバックグラウンドが多い。レプトニックは分岐比が小さい点とニュートリノが二つあるため直接質量を較正できない点が弱点であるが、バックグラウンドが少なく綺麗である。

3.3.1 セミレプトニックモード

図5(a)は、 e, μ のレプトン ($P_T > 20 \text{ GeV}$) を要求して、 $m_{E_T} (> 20 \text{ GeV})$, $M_T (\text{lepton} + m_{E_T}) (> 60 \text{ GeV} - m_{E_T})$ を要求する。さらに最低一つ b ジェット ($P_T > 25 \text{ GeV}$) を要求した後のジェット数 ($P_T > 25 \text{ GeV}$) を示したものである。トップ事象 (OPEN ヒストグラム) は多数のジェットが期待される一方、淡い灰色(黄)の W + ジェットや黒(紫色)の QCD

ジェットはジェット数が少ない。斜線はバックグラウンド評価の不定性で、 W 事象の50%、QCD 事象の100%をザックリ計上している。データと標準モデルの予言はよく一致しており、ジェット数が $3, \geq 4$ の領域はトップの事象が有意に観測されている。たとえば、 ≥ 4 ジェットでは、バックグラウンドが 12.2 ± 5.1 のところに37事象観測され、トップクォーク対生成の予言までいれると一致する。

LHCのトップ生成の特徴は、運動学的に余裕があるため、トップの P_T が大きい点にある。従って、トップがハドロニック崩壊して出来た3ジェットを、観測された四つ以上のジェットの中から選ぶにも、三つのジェットのベクトル和をとった P_T が最大になる組み合わせが正しい確率も高

も高い。図5(b)は、こうして選んだ三つのジェットの不变質量分布である。トップの質量(172.5GeV)にピークが観測され、トップのシミュレーション(OPEN ヒストグラム)と一致した結果になっている。図6(a)に観測された事象の一例を示す。四つのジェットと電子と大きな m_{E_T} が観測されている。三つのジェットの不变質量はトップと一致する。

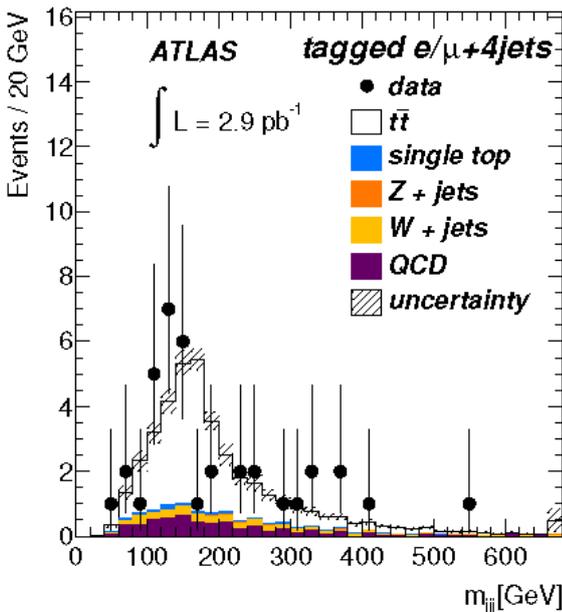
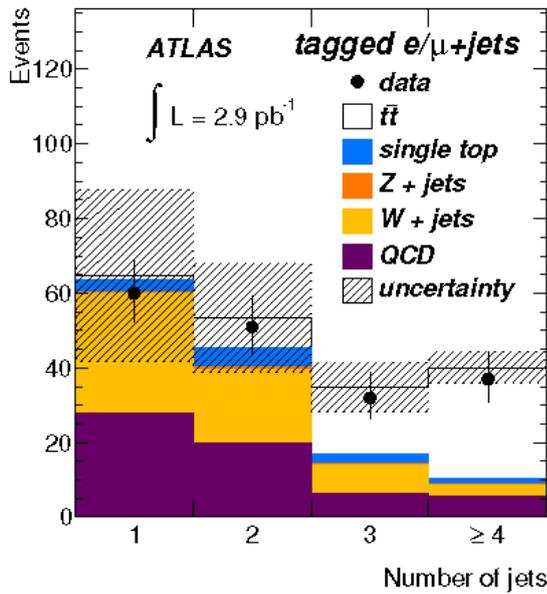


図5 (a) ジェット数の分布, (b) 3本のジェットの不变質量分布共に黒丸:データ, 白色:トップ事象, 淡い灰色(橙)・黒(紫): W や QCD のバックグラウンド事象, 斜線:バックグラウンド評価の不定性。

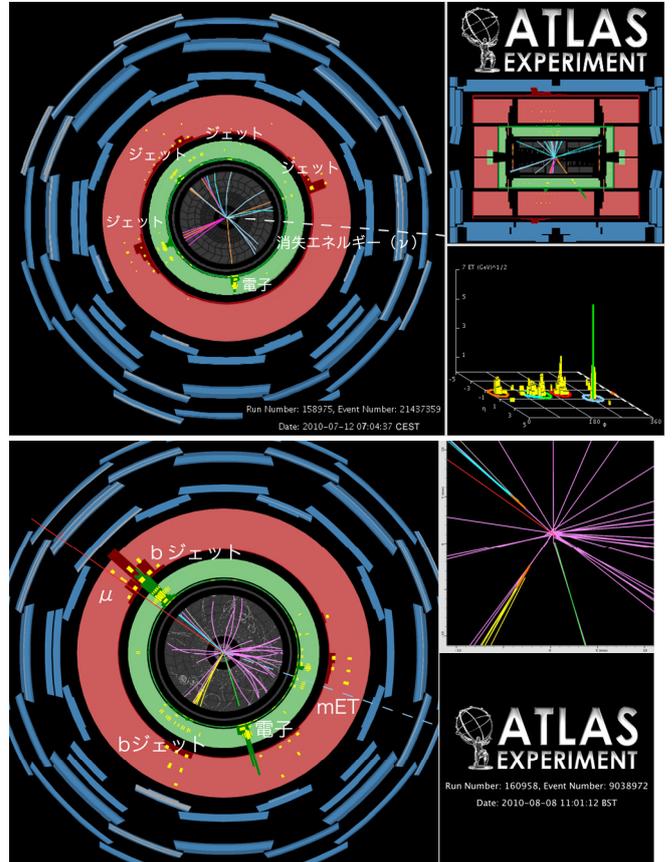


図6 観測されたトップクォーク対生成事象 (a) セミレプトニック事象(4ジェット+電子+ m_{E_T}) (b)レプトニック事象(2ジェット+電子+ミューオン+ m_{E_T}) 右上に示すように二つのジェットは綺麗な2nd vertexをもっている。

3.3.2 レプトニックモード

二つの電荷が逆のレプトン ($P_T > 20\text{GeV}$) と 2 本以上ジェット ($P_T > 20\text{GeV}$) がある事象を選ぶ。レプトンの組み合わせは以下の3通りあるが、バックグラウンドを落とすために、さらに以下のカットを加える。

- ($e\bar{e}$) Drell-Yan(DY)過程を除くため、電子不変質量がZボソン質量と5GeV以上ずれていること、また m_{E_T} が40GeVより大きいことを要求する。
- ($\mu\mu$) 同様にDY過程を除くために、Zボソンから10GeVずれていることと $m_{E_T} > 30\text{GeV}$ を要求する。
- ($e\mu$) $W/Z + \text{jet}$ のジェットを間違っレプトンと認識した過程がおもなバックグラウンドとなるため、レプトン P_T とジェットの P_T のスカラー和 (H_T) が150GeVより大きいことを要求する。

図 6(b)は、観測された事象を示す。電子とミュオン、二つの b ジェットが観測された綺麗な事象である。おもなバックグラウンドは、 W + ジェット + b ジェットで一本のジェットがレプトンと間違えて認識されたものであるが、レプトンに間違えるレートが小さいのでこの寄与は少ない。ジェットをレプトンと間違えた場合、この嘘レプトンの電荷はランダムであるので、same sign の組み合わせからこの効果は評価できる。

B ハドロンは長い寿命を持っているため、生成された点から離れたところに B ハドロンの崩壊に伴う頂点(secondary vertex)が観測される。図 6(b)右上に示す様に綺麗な vertex が再構成されている。 B ジェットタグをすることでバックグラウンドを大きく抑えることができる。

3.3.3 生成断面積の測定

二つのモードで測定したトップ事象を検出効率、ルミノシティ、崩壊分岐比で補正して求めた生成断面積と NLO の予言値を表 2 にまとめる[7]。

表 2 トップクォーク対生成断面積(統計・系統誤差)

測定値(pb)	145^{+33+40}_{-29-28}
NLO 予言値(pb)	164.5^{+8}_{-11}

測定値の統計誤差は 25%，系統誤差(バックグラウンド評価の誤差)は 20% である。まだ統計・系統誤差はともに大きいですが NLO まで取り込んだ予言値と一致している。予言の誤差は、renormalization, factorization scale の不定性と PDF の不定性がおもである。理論の研究もこれからますます進んでいくことが重要である。

4 新しい物理現象の探索

4.1 超対称性粒子探索 (mE_T がある場合)

標準理論を超えた新しい素粒子現象の中でもっとも期待されている理論が超対称性であり、テラスケールに連続の超対称性粒子の存在が予言されている。超対称性事象の大きな特徴は、一番軽い超対称性粒子(LSP)が暗黒物質であることが期待され、これが検出されないから大きな消失エネルギー(mE_T)が生じることである。カラーを持った重い超対称性粒子(グルイーノやスカラークォーク)の崩壊から、高い P_T を持った複数のジェットが放出されることが期待されるので、high P_T multijet + mE_T (+ X) が基本的なイベントトポロジーである。 X はカスケード崩壊の中で出てくるいろいろなオブジェクトであり、レプトン、タウ、 b ジェットなどである。これらを要求することで特定の崩壊パターンが選ばれ信号の数は減るが、バックグラウンドも大きく抑制することができる。おまけ(X)がないモード(no lepton

チャンネル)は信号数が大きく、感度が高い反面(今年のデータでグルイーノ・スカラークォークの質量で 700 ~ 800 GeV を探ることが出来る)、バックグラウンドの理解が重要になる。現在、 mE_T の理解とバックグラウンド解明に格闘している最中であり、残念ながら結果はお見せできない。 X がレプトン(one lepton チャンネル)と b ジェット(b ジェットチャンネル)の結果をまとめる。

4.1.1 One Lepton チャンネル

レプトン($P_T > 20$ GeV)とジェット 2 本以上を要求する。このままだと、 $W(\rightarrow l\nu) + 2jet$ やトップのセミレプトニックがそのまま残るので、レプトン P_T と mE_T で計算した横方向質量 $M_T > 100$ GeV を要求する。図 3 に示した様に W 起源の M_T は 80 GeV 以下になる。この M_T は便利で、 $M_T < 100$ GeV を要求することで逆にバックグラウンドを積極的に選び出すことが出来る。これら選び出されたバックグラウンドを用いているいろいろな分布の研究をおこなうことができる。

これらの後の mE_T 分布を図 7(a)(b)に示す。

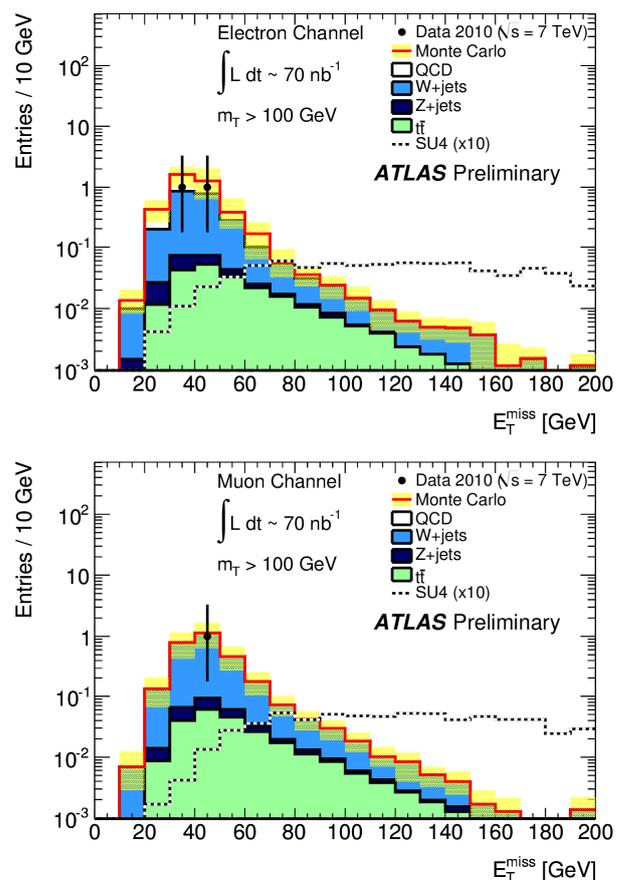


図 7 mE_T 分布

(a) 電子, (b) ミューオンを含むチャンネル。共に黒丸：データ、白色：QCD 事象、濃い灰色(青)・灰色(緑)： W ・トップのバックグラウンド事象、点線：SUSY の信号、淡い灰色(黄)バンド：バックグラウンド評価の不定性。

電子(a), ミューオン(b)について別々に解析をおこなっている。極めて初期の段階の結果で事象数は限られているが、大きな m_{E_T} の領域に観測された事象はなかった。 m_{E_T} の大きな領域でもなバックグラウンドは、 W + ジェットとトップ対生成である。 $W(\rightarrow l\nu)$ の W がオフシェルの時や、レプトニック崩壊したトップ対生成事象の一方のレプトンが (τ への崩壊, P_T が小さいなどの理由で) 観測されなかった事象で $M_T > 100\text{ GeV}$ をパスしてしまった。また、 10^{-4} (10^{-5}) 程度の確率でジェットを間違えて電子(ミューオン)としてしまう fake lepton があるため、QCD 事象が m_{E_T} の小さいところに寄与するが、信号領域ではその効果は小さい。

現在のデータは図7の約600倍あり、グルイーノ・スカラークォークに対して600~700 GeV程度の質量まで感度がある。これらは暗黒物質の現在の宇宙に残っている量を上手に説明することが出来る質量であり、非常にエキサイティングな結果であるが、次回のお楽しみ。

4.1.2 B ジェットチャンネル

第三世代のスカラークォークは湯川結合の効果や LR 混合効果で第一、第二世代の素粒子より一般的に軽くなる。この場合、グルイーノからの崩壊に b クォークが含まれる頻度が高くなる。さらに b ジェットを要求することでバックグラウンドも抑制できる利点もある。 b ジェットは、rejection power が高い secondary vertex を探す方法でおこなう。図8(a)は、再構成した primary vertex と secondary vertex との距離 L (崩壊長) をその分解能 (σ) で割った分布を示す。マイナス側に見える幅程度が測定精度であるのに対して、プラス側に長くテールを引いている。これが b ジェット (B ハドロンを含むジェット) の効果であり、実験データはよくシミュレーション結果を再現している。 $L/\sigma > 6$ を要求すると b ジェットの検出効率は約50%である。一方 u, d, s クォークおよびグルオンに対する rejection power は50~100である。

3本以上のジェット ($P_T > 50\text{ GeV}$) の事象を選び、そのうち最低一本以上は b ジェットであることを要求する。こうして選んだ事象の $m_{E_T} / \sqrt{\Sigma E_T}$ 分布を図8(b)に示す。検出された横方向のエネルギーをスカラーとして足しあげた量を ΣE_T とすると、 $\sqrt{\Sigma E_T}$ は m_{E_T} の典型的な分解能となる。 m_{E_T} の小さい領域は QCD ジェット過程が主要なバックグラウンドである。一方、 m_{E_T} の高い領域は、トップの対生成がバックグラウンドになる。点線に示すのは SUSY の信号の例であり、高い m_{E_T} 領域に信号が期待される。これは $L = 0.3\text{ pb}^{-1}$ の結果ではあるが、実験データはバックグラウンドの分布をよく再現しており、 m_{E_T} の高いところに有意なズレは見えていない。現在のデータは、この150倍あるので質量約700 GeV までのグルイーノを探ることができる。

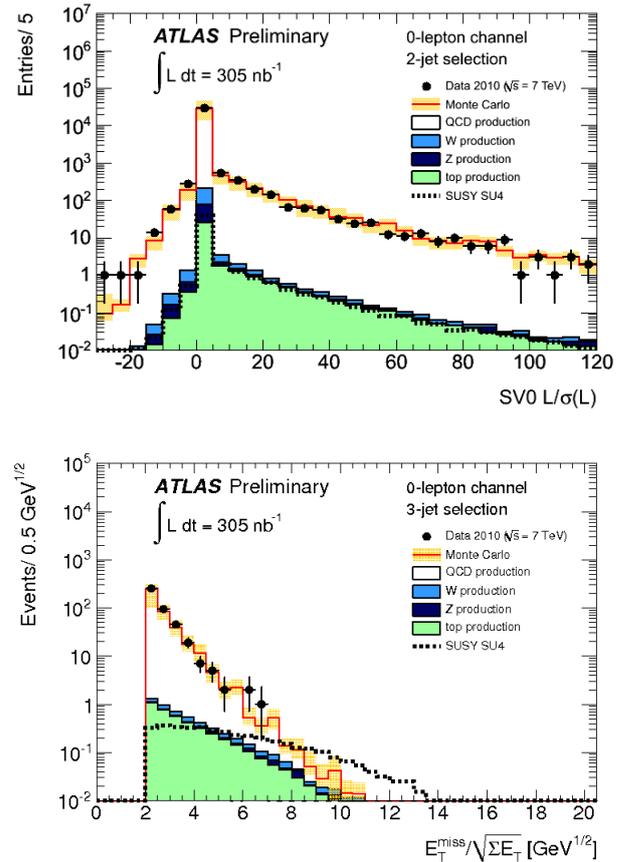


図8 (a) 崩壊長 L/σ 分布 (b) $m_{E_T} / \sqrt{\Sigma E_T}$ 分布

共に黒丸：データ、白色：QCD 事象、濃い灰色(青)・灰色(緑)： W ・トップのバックグラウンド事象、点線：SUSY の信号、淡い灰色(黄)バンド：バックグラウンド評価の不定性。

4.2 超対称性粒子探索(長寿命粒子を含む場合)

超対称性のモデルのなかには、長寿命粒子を含むものが多数ある。たとえば、gauge mediation モデルでは、一番軽い超対称性粒子(LSP)は、グラビティーノ(重力子のパートナー)であり、その結合は著しく弱い。このため二番目の軽い超対称性粒子(NLSP)であるスカラータウの寿命が長くなり、電荷を持った重い粒子になる。Anomaly mediation モデルでは、LSP, NLSP がウィーノ (W のパートナー) になり質量が縮退し、NLSP である荷電ウィーノは、検出可能な寿命 ($c\tau = O(1-10\text{ cm})$) を持つようになる。

またゲージノの質量は $\sim 1\text{ TeV}$ であるが、スカラー粒子の質量が 1000 TeV より重くなる (split SUSY model) と、生成されたグルイーノの寿命 ($\Gamma \sim 1/\text{scalar_mass}^4$) が長くなり、グルイーノが標準モデルクォークと結合して無色化した R-hadron とよばれる状態になる。

これらのへんてこな粒子探索の実験テクニックを以下にまとめる。

(1) Heavy Charged Particle (GMSB stau, R-hadron)

(1A) Energy Loss (dE/dx)

飛跡検出器を用いて測定。 $\beta < 1$ である場合は、ベータブロッホ公式の示すようにイオン化エネルギー損失が大きくなる。飛跡検出器(ピクセルやTRT(遷移輻射トラッキング)などのガスチェンバー)で観測された電荷(アナログ情報が保存)から dE/dx が測定出来る。

(1B) TOF(飛程時間)

ミュオン検出器, ハドロンカロリメータの時間情報を用いて測定。 $\beta < 1$ であるため, 外側の検出器に到達する時間 TOF が有意に遅くなるので, 時間分解能 $O(1\text{nsec})$ を持つミュオン検出器やハドロンカロリメータで測定する。運動量測定と β 測定で質量も測定することが可能である。

(2) Decay in Flight (AMSB chargino, GMSB stau)

飛跡検出器内 ($< 1\text{m}$) で崩壊した時, 荷電粒子の飛跡が折れたり消えたりしたようになる。連続飛跡検出器(ATLASには72層からなるTRT)で飛跡を追跡すると, 折れているようになる。また(1A)の応用で, ピクセルだけに大きなエネルギーデポジットがあるような事象で探ることが出来る。

(1A)と組み合わせて dE/dx から β も測定出来るため, 運動量とあわせて質量が測定できる。折れる点の分布から寿命も求めることが出来る。

(3) Stopping Particle in Calorimeter (GMSB stau, R-hadron)

電荷のある場合はイオン化損失, 中性 R-hadron は核子反応でエネルギーを損失し, 数%の heavy particle は密な物質であるハドロンカロリメータで止まる。止まった heavy particle が寿命をもって崩壊する現象を捉える。崩壊を捉えるトリガーが難しいが, いろいろ提案がある。

4.2.1 dE/dx を用いた Heavy Charged Particle 探索

上に述べた(1A)の技術を用いた結果をまとめる。ピクセル半導体検出器は, 通過した荷電粒子のイオン化エネルギー損失を測定しており, アナログ情報が保存されている。図9(a)は, 観測されたトラックの P_T と dE/dx の二次元相関を示している。電子, π , K , p , D (パラパラと見える点)と質量に応じて綺麗に分離されており, 運動量が大きくなるとこれら標準模型粒子は $\beta \sim 1$ となって minimum ionize 粒子となる。

図9(b)は, P_T 分布と dE/dx 分布である。見にくいですがデータとバックグラウンド(QCD ジェット)がよく一致していて, P_T 分布と dE/dx 分布はともに急激に落ちてゆく。一方, 濃い灰色(赤)で示す点はグルイーノ(質量200 GeV)が R-hadron を作った場合の分布を示している。 $P_T > 100\text{GeV}$ と大きい質量が重いため, $\beta < 1$ であり, 結果として大きな dE/dx になっている。 $L = 0.2\text{pb}^{-1}$ の中に candidate は観測されず, グルイーノ質量に 284GeV (95%CL) の下限が得られた。

バックグラウンドが増えてきたら, TOF(1B)を要求することでバックグラウンドを抑えることが可能であり, 本年のデータ ($L \sim 45\text{pb}^{-1}$) でグルイーノ質量 500GeV 付近まで探ることができる。ハドロンコライダーは汚くて解析が難しいと思われているが, (1)~(3)の様な exotic なシグナルをさがることが出来ることは特筆すべきことで, アイデア次第でいろいろな研究を拓けることができる。

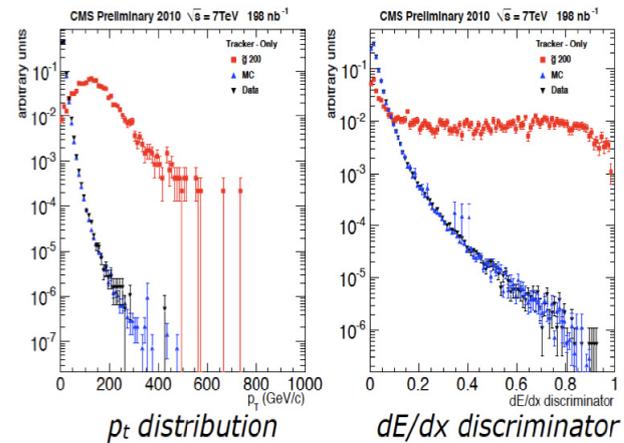
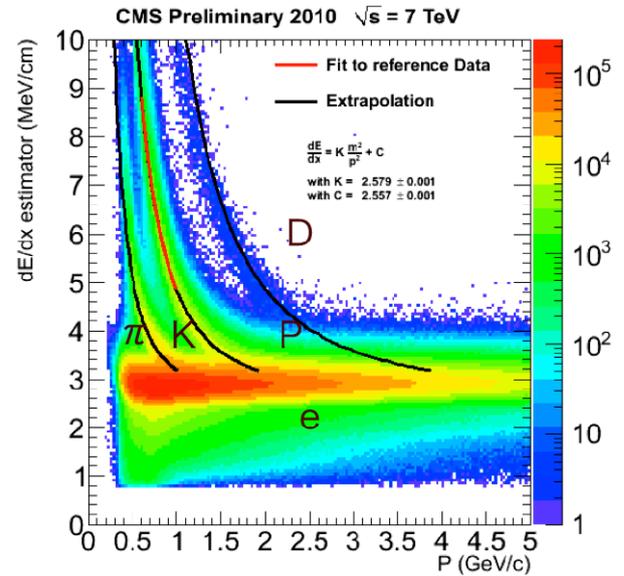


図9 (a) 運動量とピクセル半導体検出器で測定した dE/dx の相関(実験データ) 粒子の種類は図に示す。(b) P_T と dE/dx ヒストグラム(CMS $L = 0.2\text{pb}^{-1}$) 黒: データ, 灰色(青, 下の曲線): バックグラウンド・シミュレーション, 濃い灰色(赤, 上の曲線): gluino 200 GeV のシミュレーション。

4.3 ミニブラックホール探索 (high P_T multijet)

インドあたりで自殺者まで出した2008年のミニブラックホール狂騒は未だに記憶に新しいが, テラスケールに余剰次元が存在していたら, いろいろな現象が期待される。もっとも一般的には, 3.1章ですでに述べた2ジェットの高い P_T 領域でのズレである。余剰次元の曲率によってADD(フラット)とRS(曲がっている)のモデルがあり, ADDモデルの時の有力なシグナルが, グラビトンが逃げるモノジェット事

象である。一方RSモデルでは、カルツァ・クライン(KK)グラビトンやKKグルオンから出てくる大きな P_T をもった電子、トップが有望である。これらの研究も現在すすんでいる。

もし重力がテラスケール(10^{-19} m)で強くなれば、シュバルツシルト半径(R_S)もほぼこのスケールと同じになる。この時、二つのパートンがこの半径以下でぶつかった時ブラックホールが出来る可能性がある。ドブロイ波長程度にパートンが広がっているため、これが R_S 以下でないと全部のエネルギーがはいらないからブラックホールにならない。このため、ブラックホールの質量の下限はテラスケール重力スケールの5倍程度になるので、重心系7TeVの実験ではブラックホールの生成は難しい。この下限値以下の時に何が起るかは、われわれが量子重力を理解していないために予言できない。また string ball みたいな状態を予言するモデルもある。生成されたブラックホールやstring ballは、ホーキング輻射で直ちに崩壊する。温度は軽いブラックホールでは極めて高い($O(100)$ GeV)ため、高い運動量をもった粒子が複数放出される特徴がある。High P_T multiobject は特徴的であり、ちゃんと調べておく必要がある。高い P_T を持ったオブジェクト(電子, ミューオン, γ , ジェット)が複数(≥ 3)あり、それらの P_T のスカラ和 ΣP_T が700GeV以上の事象を選ぶ。これらの運動量に mE_T を加えて不変質量(M_{vis})を計算したものを図10に示す。バックグラウンドは、まだセレクションがルーズなので QCD ジェットがおもであるが、データの大きな M_{vis} 領域に超過はなく、標準理論のバックグラウンドと無矛盾である。データを増やして厳しいカットの開発やバックグラウンドの評価法(図10は過大評価している)の開発をおこなっている。

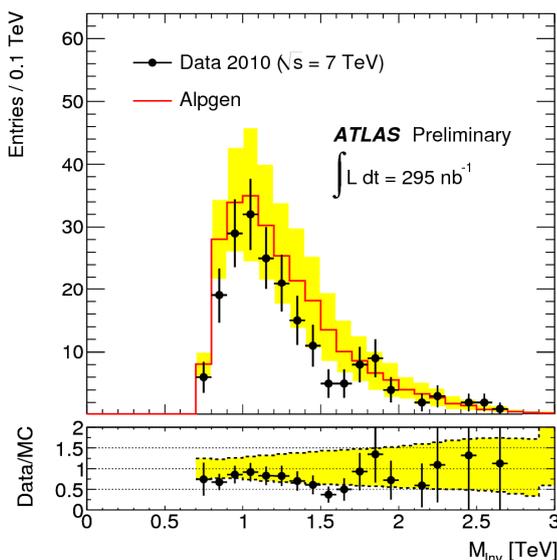


図10 不変質量分布(ATLAS $L=0.3\text{pb}^{-1}$)
赤(黒)はQCDバックグラウンドで淡い灰色(黄)のバンドは不定性を示す。

5 ヒッグスの探索

ヒッグス粒子の探索には $O(1\text{fb})$ のルミノシティが必要であり、来年以降が本番である。現在はバックグラウンドとなる標準モデルプロセスの研究や、実験データからこれらバックグラウンドを評価する方法の開発をおこなっており、ほぼ期待される結果が得られている。

図11(a)は、来年7TeVで $L=1\text{fb}^{-1}$ の実験をおこなった時の感度を示す。

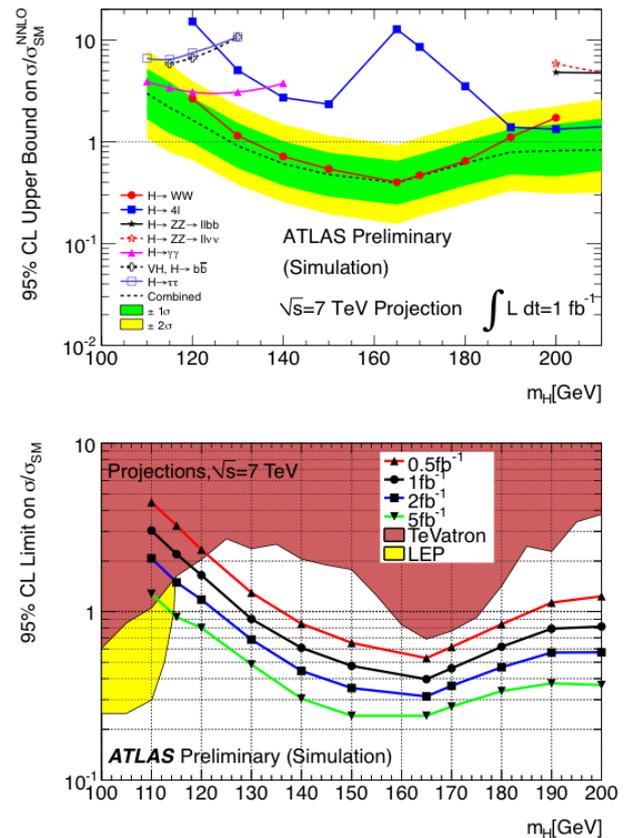


図11 (a) ヒッグスを95%CLで排除できる断面積を標準モデルヒッグスの生成断面積で割ったもの。仮定した条件は、7TeVで $L=1\text{fb}^{-1}$ の積算ルミノシティが蓄積されるとする。使ったチャンネルは図中参照。点線が合わせたもので、バンドは実験したときの統計的ふらつきの範囲をしめている。(b)は同じ感度の絵を様々なルミノシティで計算したものである。

縦軸は、95%CLで排除出来る断面積を標準モデルヒッグスの生成断面積で割ったもので、1以下の領域がexclude出来ることになる。 $H \rightarrow WW$ が質量 $>130\text{GeV}$ のヒッグスをカバーできる。質量115–130GeVの領域は $H \rightarrow \gamma\gamma$ と $\tau\tau$ の助けを借りても、まだfactor 2不足している。この領域をカバーするため、二つの秘策が考えられている。

1. 2012年もshutdownせずに走り続け、 $L \sim 5\text{fb}^{-1}$ 程度のデータを蓄積する。図11(b)は感度を様々なルミノシティで表したものであり、 5fb^{-1} で115GeVまで達成することが可能になる。

2. 重心系のエネルギーを7TeV から8~9TeV に上げる。
現在の7TeV はかなり安全をみたものであり、まだ上げる余地がある。9TeV にすると同じルミノシティで約5GeV 低いところまで感度を拡げることが出来る。

この二つを合わせ、ATLAS と CMS を合わせると来年、再来年あたりに 3σ 以上程度の兆候を捕まえることが可能になる(120GeV 以上は 5σ 程度)。

6 まとめ

5章に書いたように、来年の重心系エネルギーと2012年のshutdown(修理)をやめて実験を続けるか否かは、ヒッグス探索の重要な分岐点になる。また超対称性粒子の探索領域を1TeV 付近にまで2012年までに拡げることが出来るようになる。これらの判断は、2011年1月のシャモニーコンファレンス(LHC 加速器の会議)で決定される。

2010年のフルデータの結果は現在グループ内で議論されており、2011年の冬の国際学会や、3月末の日本物理学会で詳しく紹介されるのでご期待ください。

参考文献

- [1] 小林富雄「LHC 実験始動」, 高エネルギーニュース **28-4** (2010).
- [2] ATLAS Collaboration, CERN-PH-EP-2010-034 (accepted by EPJC) (2010).
- [3] L. A. Anchordoqui *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101** 241803 (2008).
- [4] ATLAS Collaboration, Phys. Rev. Lett. **105** 161801 (2010).
- [5] CMS Collaboration, CERN-PH-EP-2010-035 (2010).
- [6] ATLAS Collaboration, CERN-PH-EP-2010-034 (2010).
- [7] CMS Collaboration, CERN-PH-EP-2010-039 (2010).
- [8] 900GeV の衝突エネルギーでのデータを用いて調べた検出器のパフォーマンスについては, ATLAS Collaboration arXiv1005.5254 を参照。