

# ATLAS実験におけるTeVスケール重力の探索

兼田充、小林富雄<sup>A</sup>

東大理、東大素七<sup>A</sup>

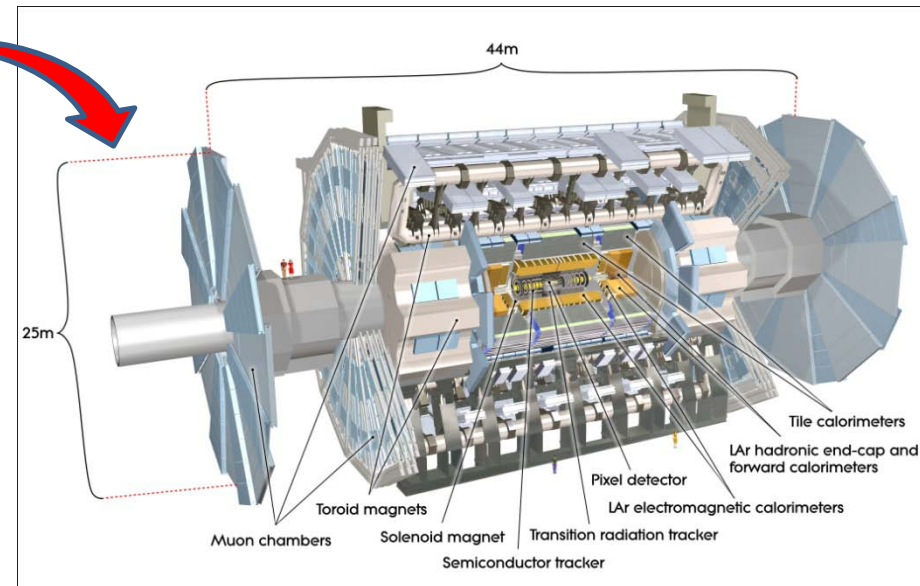
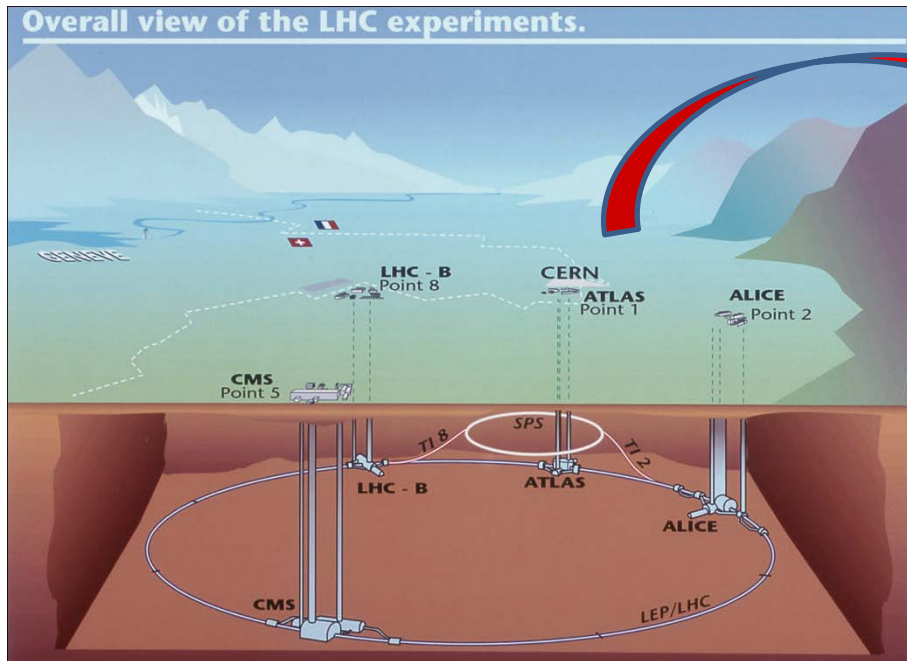
2010年9月14日、日本物理学会 2010 年秋季大会

14aSL08

# 概要

- LHC・ATLAS
- 余剰次元、TeVスケール重力について
- ブラックホールの生成、崩壊、イベントの特徴
- データセット
- 解析方法
  - バックグラウンドの見積り
  - Sensitivity
- 結果、ブラックホール生成に対する制限
- まとめ

# LHC、ATLAS

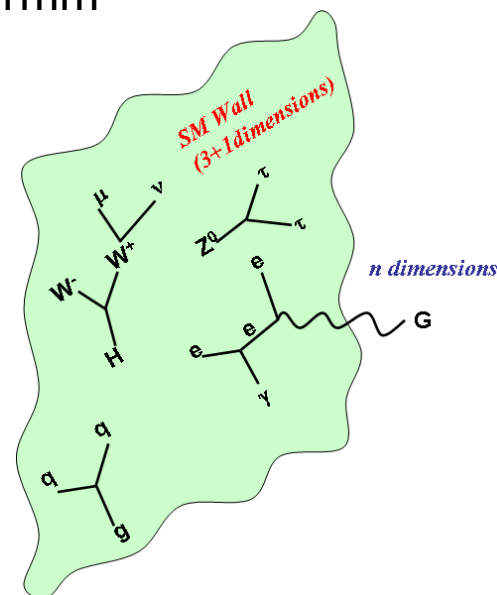


直径22m、長さ44m、総重量7000t

- LHC(Large Hadron Collider)
  - 陽子陽子衝突型加速器
  - 周長約27km
  - デザイン: $\sqrt{s}=14\text{TeV}$ 、 $L=10^{-34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
  - 2010年: $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ 、 $L\sim 10^{-31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)
  - LHC上に設置されている汎用検出器
  - 8月までのデータで $\sim 3\text{pb}^{-1}$ のデータを取得済み

# 余剰次元、TeVスケール重力

- 余剰次元:階層性問題( $M_{Pl} \gg M_W$ )を解ける1つの解
  - 重力だけが余剰次元に伝播出来るため、他の力に比べて極端に小さく見える
    - 4+n次元プランクスケール $M_D$  実は他の力のスケールと同様の大きさである (~TeV)
- ADD Model (Arkani-Hamed, Dimopoulos and Davali)
  - 平坦な余剰次元
  - $M_{Pl}^2 \sim M_D^{n+2} R^n$  (R:余剰次元の大きさ)
  - 距離 $r \sim R$ から急激に重力が強くなるが直接観測では $\sim 0.1\text{mm}$ 
    - $n=2$ ,  $M_D > 3.6\text{ TeV}$  ( $n$ が大きい部分では感度が低い)
  - これまでの加速器実験により $M_D > 800\text{GeV}$ の制限がついている
  - LHCでは直接探索が十分に可能な領域
    - 特に、この様な余剰次元が存在するとき、TeV程度のブラックホールが発生する可能性がある

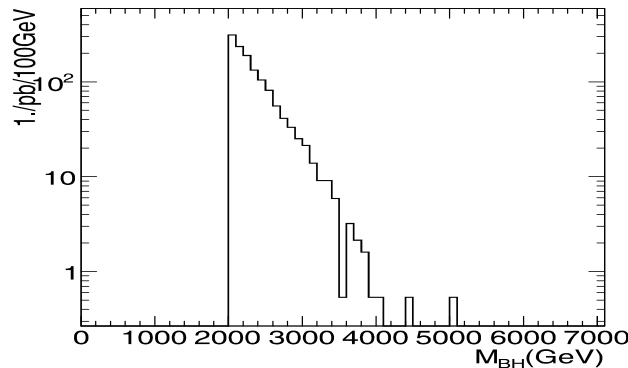


# ブラックホールの生成

- $\sqrt{s} = M_{\text{BH}} > M_{\text{D}}$  の衝突を考え、もしこの系の Schwarzschild 半径( $r_s$ )より impact parameter( $b$ ) が小さければブラックホールが発生する

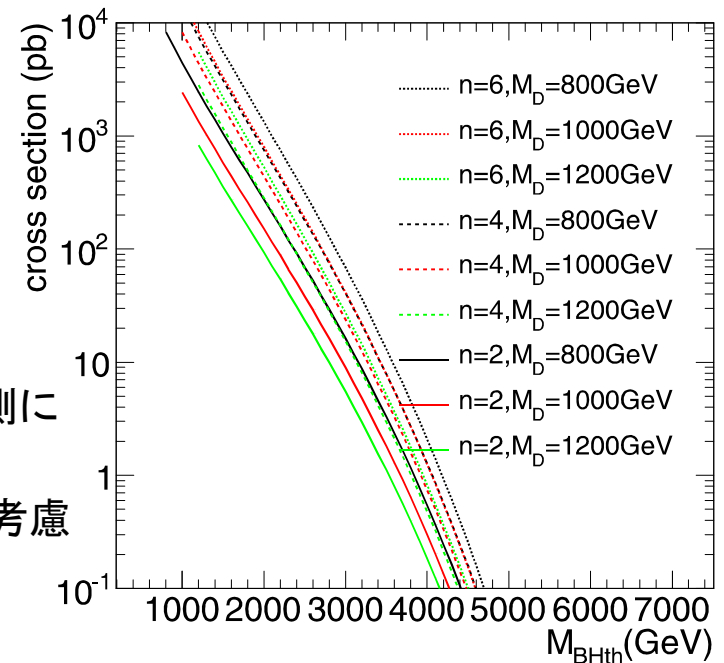
→  $r_s \sim \sqrt{s} / M_{\text{D}}^2$

→ 生成断面積  $\sim \pi r_s^2 \sim 100 \text{ pb}$  (for  $M_{\text{D}} \sim M_{\text{BH}} \sim \text{TeV}$ )



$n=6, M_{\text{D}}=0.8 \text{ TeV}, M_{\text{BHth}}=2 \text{ TeV}$

- ブラックホールは上記の様にある閾値( $>M_{\text{D}}$ )から上側に連続的な質量分布で生成される
- LHCでの生成断面積は  $\pi r_h^2$  に陽子中粒子のPDFを考慮し右図の様になる
- 生成断面積は  $n, M_{\text{D}}$  に多少依るが

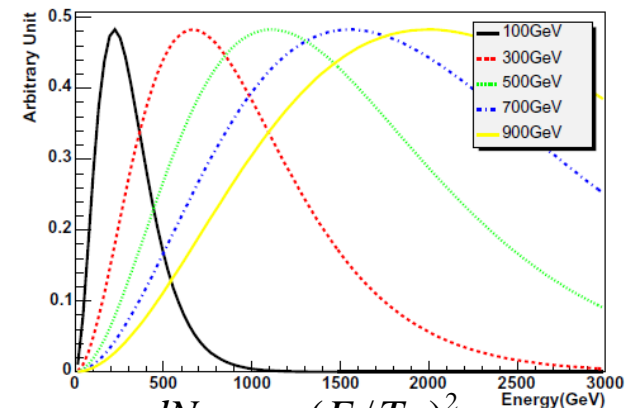


$M_{\text{BHth}} = 2 \text{ TeV}$  で  $\sim 100 \text{ pb}$ ,  $3 \text{ TeV}$  で  $\sim 10 \text{ pb}$  程度  $\rightarrow$  非常に大きい

# ブラックホールの崩壊

- LHCで出来るような~TeV程度のブラックホールは瞬時( $\sim 10^{-26}$ s)で崩壊する
- 主に4つの段階で崩壊:
  - **Balding Phase:** 重力子を放出し、多重極モーメントを失いcharge, spin, massだけで特徴つけられる状態に落ち着く
  - **Spin down Phase:** 非常にエネルギーの高い粒子同士の衝突のため、生成されるブラックホールは大きな角運動量を持つが角運動量の大きな粒子を放出し、急激に角運動量を失う
  - **Schwarzschild Phase:** ホーキング輻射により粒子を放出
  - **Planck Phase:**  $M_{BH} \sim M_D$ の時点。量子重力が支配する領域 (良くわかっていない領域)

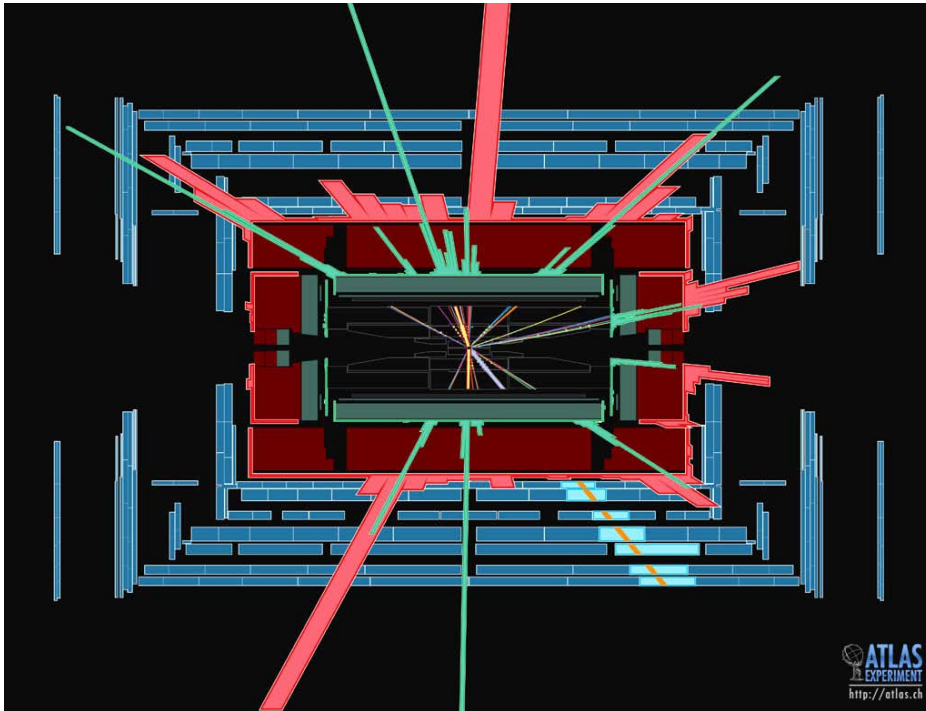
- 本解析ではこれらの生成、崩壊を扱うに当たり、BlackMaxと言うブラックホールジェネレーターを使用
- Planck Phaseに関しては $M_{BH} \sim M_D$ になった時点で物理量を保存するように多体崩壊させる
- 今回の解析では、Balding Phaseの影響は小さいとし、重力子は放出させないモデルで考える



$$\frac{dN}{dE} \propto \frac{(E/T_H)^2}{\exp(E/T_H) + c}$$

$$T_H = M_D \left[ \frac{M_D}{M_{BH}} \left( \frac{n+2}{8\Gamma((n+3)/2)} \right) \right]^{1/n}$$

# ブラックホールイベント



ATLAS Event display: Simulation of Black Hole event

- $\sim$ TeVで生成されるブラックホールは大量の高エネルギー粒子を放出して崩壊する
- 本解析ではトリガーとしてjet trigger 55GeV (カロリメーターで得られたEMスケールのエネルギーのジェット)を用いるが、3TeVのBHで $>99.9\%$ のイベントがパスする
- レプトンも放出するが、今回はレプトンの検出効率等の不定性が大きいため、ジェットのみでイベントを見る
- ブラックホールの質量は、イベント中の全ジェットのvector sumと消失運動量を用いて再構成できる

**非常に生成断面積が大きく、特徴的なイベントのため  
LHCでもっとも早く発見できる可能性のある重要な新しい物理のひとつ**

# データ, モンテカルロサンプル

- データ:今年3月-8月で得られた7TeVでの衝突データ $3.12\text{pb}^{-1}$
- モンテカルロサンプル
  - ブラックホールシグナルサンプル
    - Generator: BlackMax + Herwig (hadronization)
    - $M_D > 800\text{GeV}$  ( $n=2-7$ )の領域
    - Spin-down Phase, Schwarzschild Phaseで崩壊させ、最後は多体崩壊
  - バックグラウンドサンプル
    - QCD (AlpGen+Herwig, Pythiaの2種類)
    - 本解析ではmulti-jetイベントを見るため、 $t\bar{t}$ ,  $V\text{B}+\text{jets}$ などの寄与は十分小さい

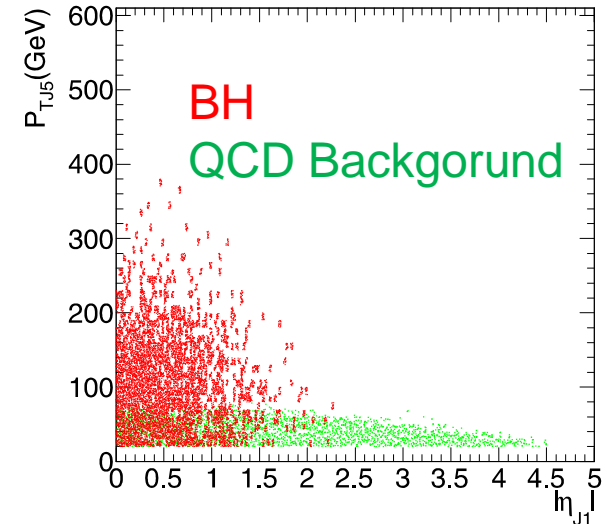


# 解析方法

- イベントセレクション
  - プレセレクション
    - Leading Jet  $P_T > 200\text{GeV}$   
(trigger efficiency > 99.9%)
    - $P_T > 50\text{GeV}$ のジェットを5本以上要求
  - シグナル領域の選択
    - Leading jet pseudo rapidity  $|\eta_{J1}| < 1$
    - 5th jet  $P_T > 100\text{GeV}$

multi-jet、BHに対するacceptance ( $\text{pb}^{-1}$ )

	QCD	BH ( $M_{\text{BHth}}=3\text{TeV}$ )
no Cut	10e8	69.6
Leading Jet $P_T > 200\text{GeV}$	1.43e4	67.4
5 jets $P_T > 50\text{GeV}$	286	50.3
$ \eta_{J1}  < 1$	155	47.1
5th jet $P_T > 100\text{GeV}$	5.0	36.4

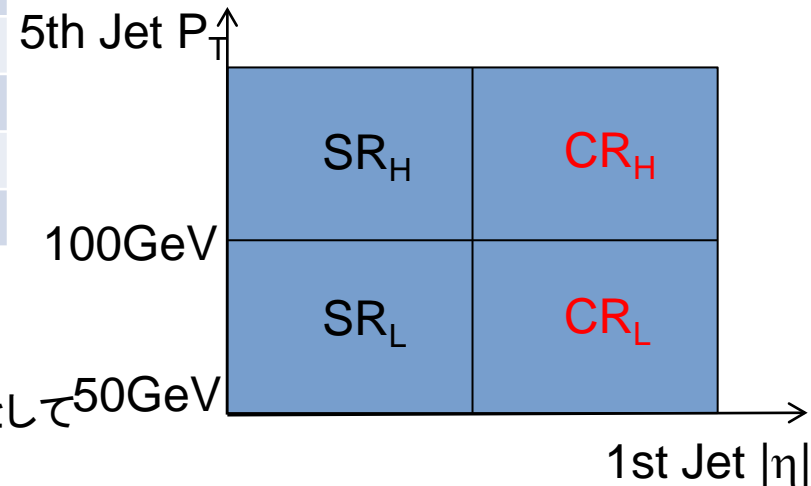


モンテカルロを用いたブラックホールイベントとQCDイベント(バックグラウンド)のleading jetの $\eta$ と5th jetの $P_T$ の比較図

- バックグラウンドの見積もり

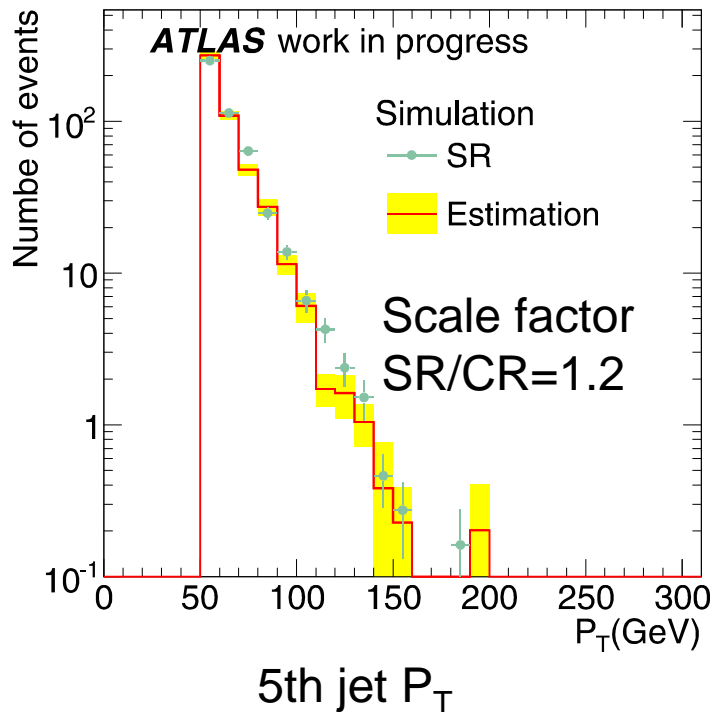
→  $|\eta_{J1}| > 1$ の領域はバックグラウンドが主な領域として50GeV  
選べる

→ この領域を利用して、 $|\eta_{J1}| < 1$ のシグナル領域( $\text{SR}_H$ )  
でのバックグラウンドを見積もる



$$\text{SR}_H = \text{CR}_H \times (\text{SR}_L / \text{CR}_L)$$

# バックグラウンドの見積もり方法



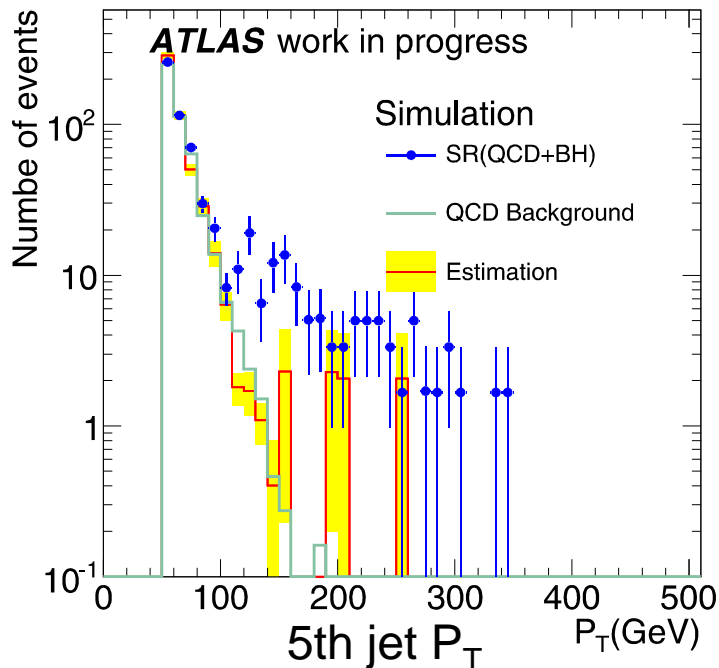
- モンテカルロ(QCD, Alpgenサンプル) を用いた見積り方法の検証
- シグナル領域は $3.12\text{pb}^{-1}$ 分にスケール
- コントロール領域は $P_T < 100\text{GeV}$ の部分でシグナル領域に合うようにスケールしてある
- 最終的なイベントセレクションである  $P_T > 100\text{GeV}$ 領域での数が下表

Events in  $P_{TJ5} > 100\text{GeV}$

	Events
Estimation <sub>H</sub>	$11.4 \pm 1.6$
SR <sub>H</sub>	$15.8 \pm 1.6$

- ~40%程度の見積り誤差がある
- さらに、系統誤差として他のhadronizationモデル(Pythiaサンプル)での検証、jetのスケールの不定性が~10%あるためこの範囲で動かして検証  
 → 最大で57%の見積り誤差がある

# 見積りへのシグナルの影響



シグナル込での各領域での数  
(カッコ内がBHシグナルの数)

	SR	CR
$P_{TJ5} > 100\text{GeV}$	132(117)	16(6)
$P_{TJ5} < 100\text{GeV}$	496(28)	400(3)

- 特に、コントロール領域のhigh  $P_T$  領域への染み込みが効いてくるが、シグナル領域に比べ十分小さいため、十分シグナルとの違いが見える

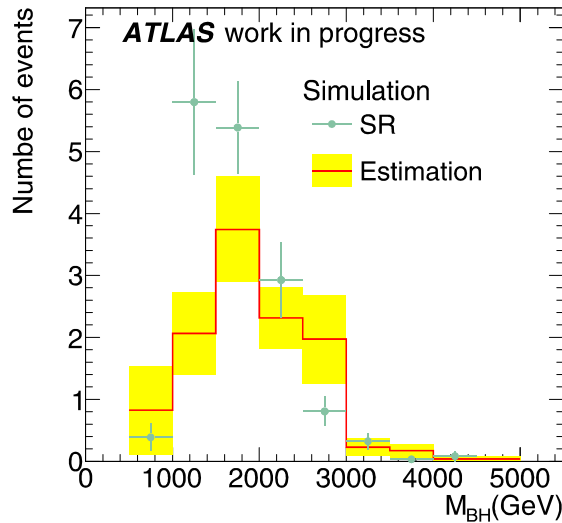
QCD+BH(Mth3000)での見積り  
Events in  $P_{TJ5} > 100\text{GeV}$

	Events
Estimation <sub>H</sub>	$20 \pm 4$
SR <sub>H</sub>	$132 \pm 14$

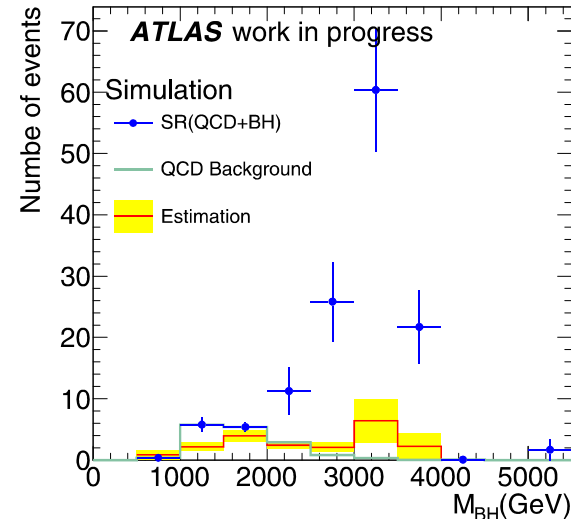
シグナルが無い場合の見積り(前ページの数字)

	Events
Estimation <sub>H</sub>	$11.4 \pm 1.6$
SR <sub>H</sub>	$15.8 \pm 1.6$

# $M_{BH}$ 分布



QCD only



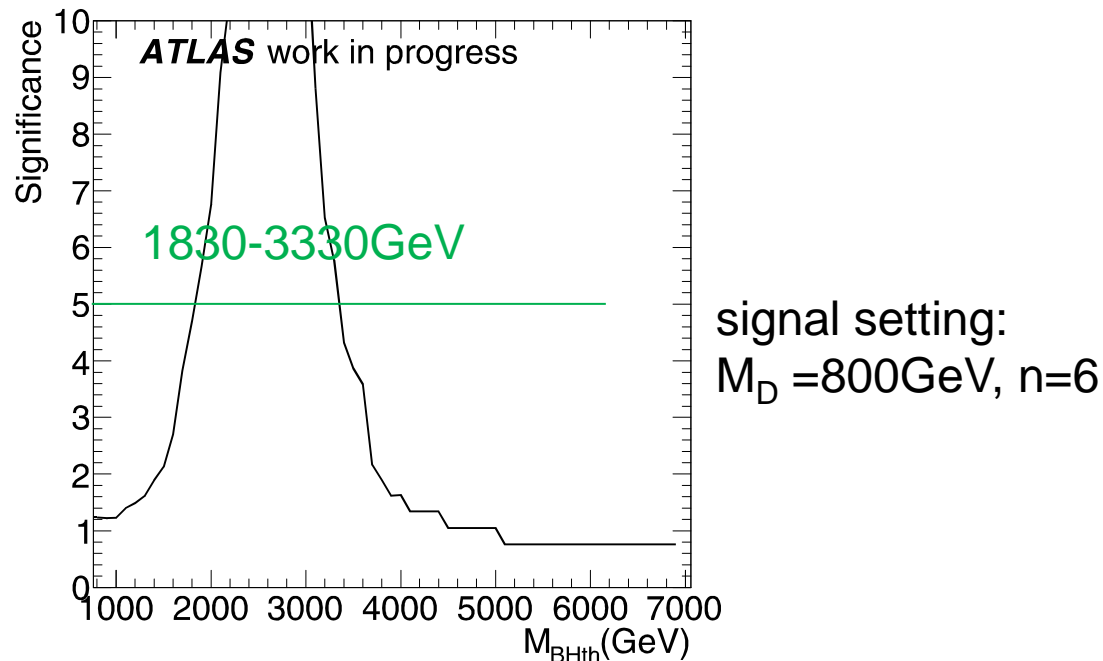
QCD+BH(3TeV)

- 最終カットをかけた後のシグナル領域とコントロール領域の  $M_{BH}$  分布の比較

$$P_{BH} = \sum P_J + (MissE_x, MissE_y, 0, \sqrt{(MissE_x^2 + MissE_y^2)}), M_{BH} = |P_{BH}|$$

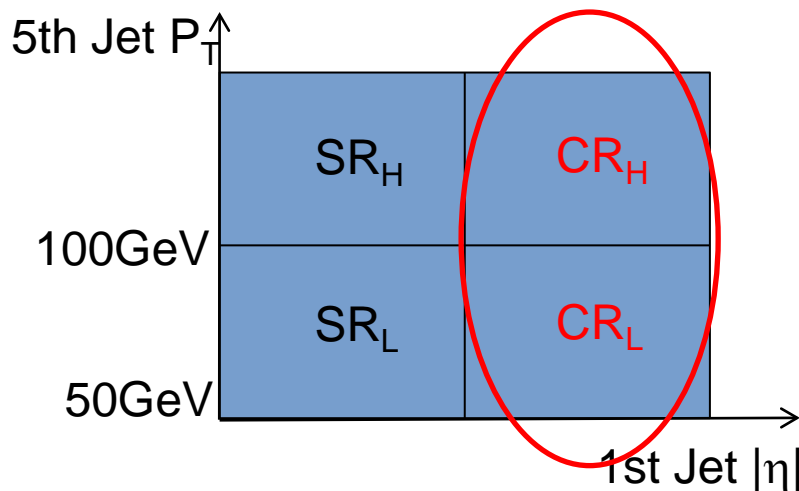
- バックグラウンドだけの場合はシグナル領域の方が少し低い領域の多く残る

# Signal sensitivity



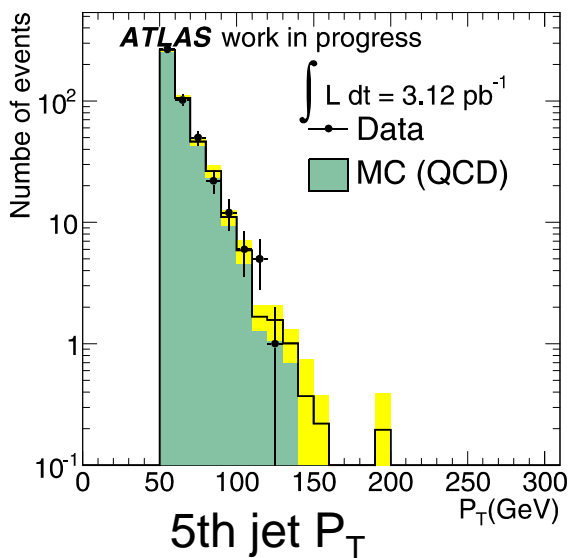
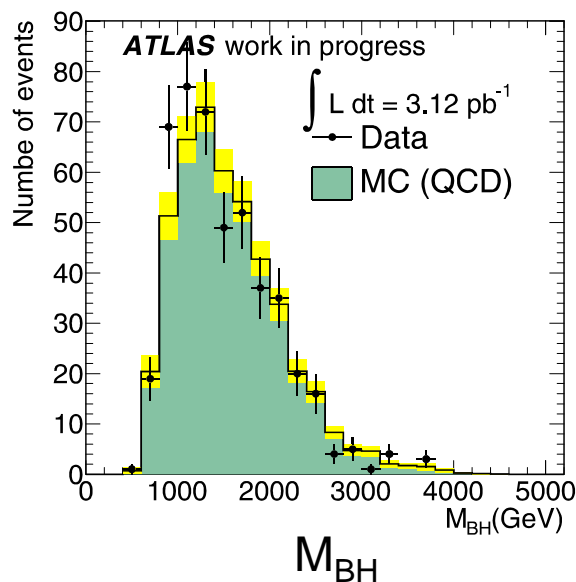
- ブラックホールの生成下限ごとのSignificanceの見積り  
→  $\text{Significance} = (N_{\text{SR}} (\text{BG} + \text{Signal}) - N_{\text{Estimation}}) / \sigma$   
→  $\sigma = \sigma_{\text{sys}} (57\%) \oplus \sigma_{\text{stat}} (\text{for } 3.12 \text{ pb}^{-1})$
- 緑の線が $5\sigma$ の線でありこの $M_D = 800 \text{ GeV}$ ,  $n=6$  場合で  
 $M_{\text{BHth}} = 1830 \text{ GeV} - 3330 \text{ GeV}$ の領域に感度があることがわかる

# コントロール領域でのdataとMC比較

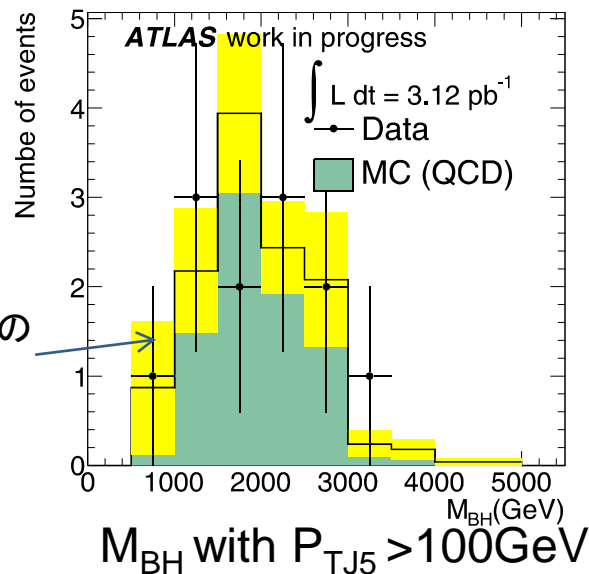


- モンテカルロは5th jet  $P_T < 100\text{GeV}$ の領域あるようにスケール

14

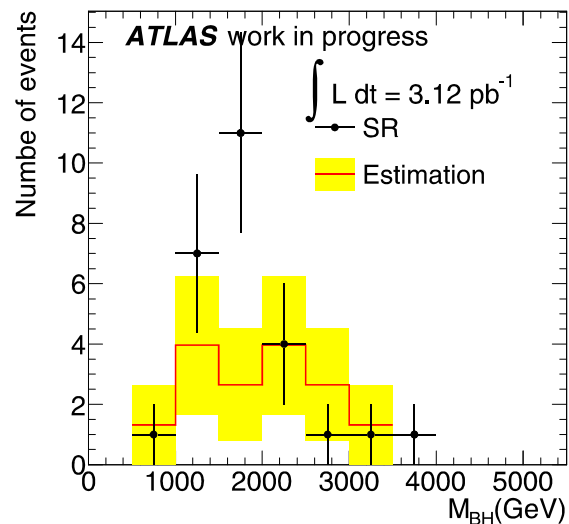
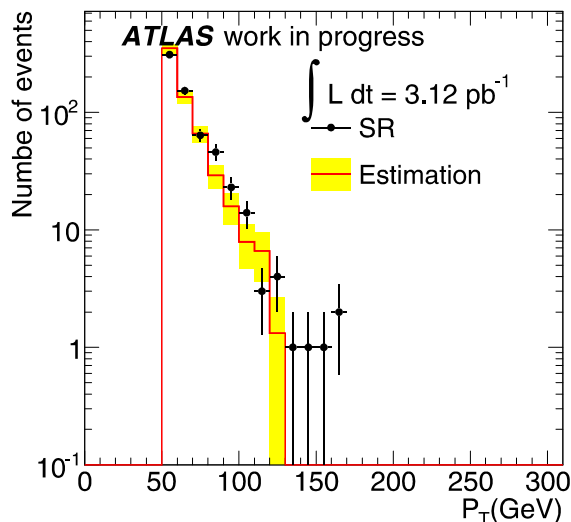


黄色のバンドはMCの統計エラー



# 結果

data 3.12 pb<sup>-1</sup>



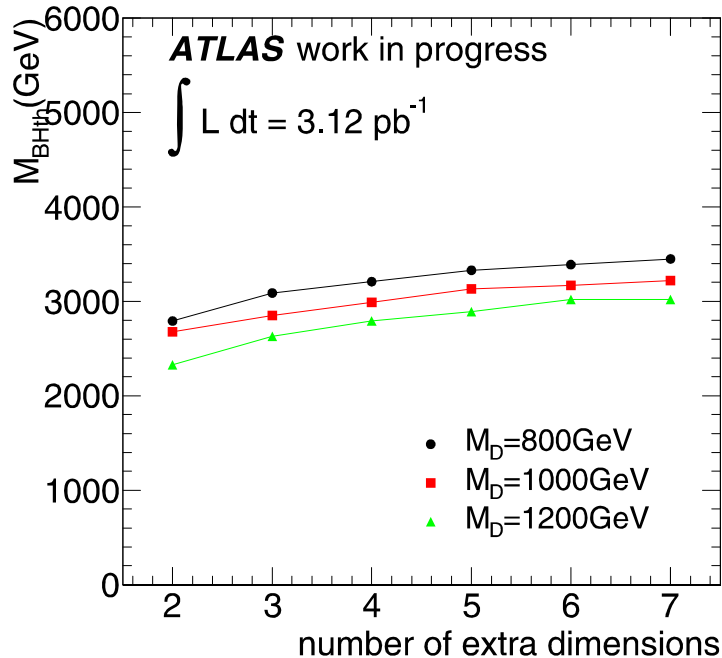
Events in  $P_{TJ5} > 100\text{GeV}$

	Events
Estimation <sub>H</sub>	$15.8 \pm 4.6(\text{Stat}) \pm 9.0(\text{Sys})$
SR <sub>H</sub>	26

- 最終的に残ったイベントは見積もり  
15.8に対し26イベント  
→バックグラウンドイベントの見積りに  
比べ有意な差は出ていない  
→ 95%CLでsignalの数は<34.5

# ブラックホール生成への制限

•95CL limit on signal:34.5 events



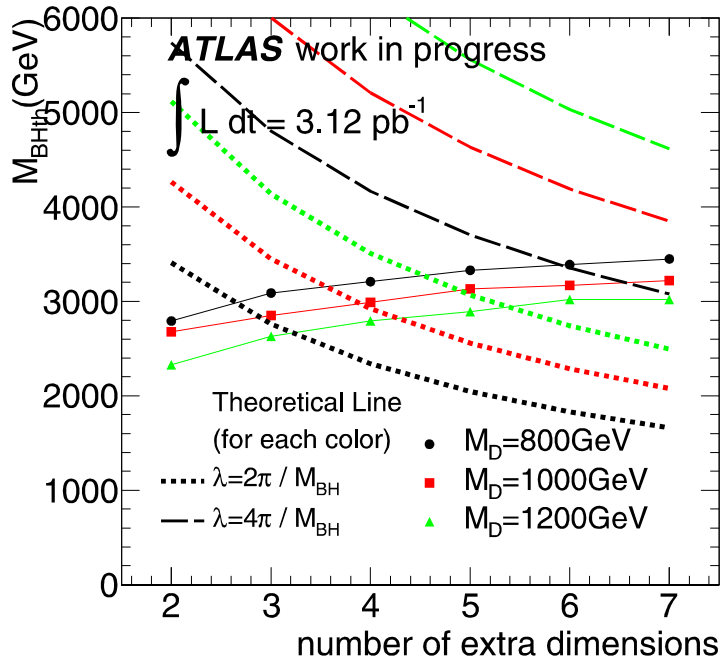
各 $n$ ,  $M_{\text{D}}$  を決めた際の $M_{\text{BH}}$  への制限

- 系統誤差:
  - Luminosity Uncertainty:11%
  - Jetのスケールの不定性によるシグナルのアクセプタンス誤差:~10%
- 各 $M_{\text{D}}$ ,  $n$ ,  $M_{\text{BHth}}$ での生成断面積とモンテカルロシミュレーションによるアクセプタンスから上記イベントを超えない領域へ制限を付けると
  - $M_{\text{BH}} > 2990 \text{ GeV}$  for  $M_{\text{D}}=1000 \text{ GeV}$ ,  $n=4$
  - $M_{\text{BH}} > 3220 \text{ GeV}$  for  $M_{\text{D}}=1000 \text{ GeV}$ ,  $n=6$



# ブラックホール生成への制限

•95CL limit on signal:34.5 events



- 系統誤差:
  - Luminosity Uncertainty:11%
  - Jetのスケールの不定性によるシグナルのアクセプタンス誤差:~10%
- 各 $M_D$ 、 $n$ 、 $M_{\text{BHth}}$ での生成断面積とモンテカルロシミュレーションによるアクセプタンスから上記イベントを超えない領域へ制限を付けると
  - $M_{\text{BH}} > 2990\text{GeV}$  for  $M_D=1000\text{GeV}$ ,  $n=4$
  - $M_{\text{BH}} > 3220\text{GeV}$  for  $M_D=1000\text{GeV}$ ,  $n=6$

各 $n$ 、 $M_D$ を決めた際の $M_{\text{BH}}$ への制限

- さらに、 $M_{\text{BHth}}$ について、コンプトン波長 $\lambda < r_s(M_D, n, M_{\text{BHth}})$ になる条件から $M_{\text{BHth}}$ を求めたのが図の破線、各 $\lambda$ は
  - \* $\lambda=2\pi/M_{\text{BH}}$ :ブラックホールのコンプトン波長
  - \* $\lambda=4\pi/M_{\text{BH}}=2\pi/(\sqrt{\hat{s}}/2)$ :衝突粒子のコンプトン波長
- もし、前者を仮定すると、 $n=6$ で $M_D=1200\text{GeV}$ まで、 $n=4$ では $M_D=1000\text{GeV}$ まで棄却

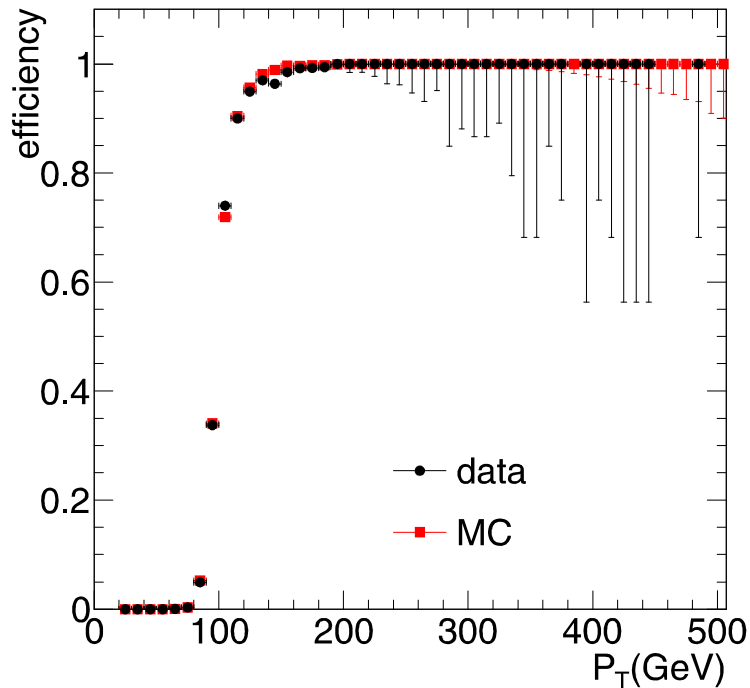
# まとめ

- ATLAS実験において今年3月から8月までで得られた $3.12\text{pb}^{-1}$ のデータを用いて、TeVスケール重力の探索を行った
  - 本講演では、Multi-jetイベントを用いて、ブラックホールの探索を行った
- 主なバックグラウンドはQCDイベントであるが、5つの高い横運動量を持ったジェットを要求することにより、十分落とすことができ、シグナルは十分残る
- Leading jetのpseudo rapidityによりバックグラウンドが主となるコントロール領域を作ることが出来、これを用い、実際にデータからバックグラウンドの数を見積もれる
  - 現在の方法ではモンテカルロによる検証から方法自体の系統誤差が57%程度ある
- この見積もりの結果、 $3.12\text{pb}^{-1}$ のデータで、  
見積り量 $15.8 \pm 4.6(\text{Stat}) \pm 9.0(\text{Sys})$  に対し、シグナル領域に26イベント  
→ 優位な差はない、95%CLでシグナル $< 34.5$
- これをブラックホールの生成領域へ焼きなおすと
  - $M_{\text{BH}} > 2990\text{GeV}$  for  $M_{\text{D}} = 1\text{TeV}$ ,  $n=4$
  - $\lambda = 2\pi/M_{\text{BH}} < r_s$  の仮定をおけば $n=4$ の $M_{\text{D}} = 1\text{TeV}$ までは棄却



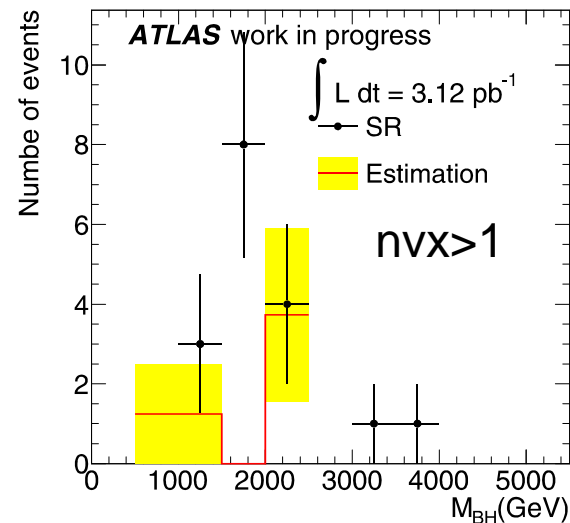
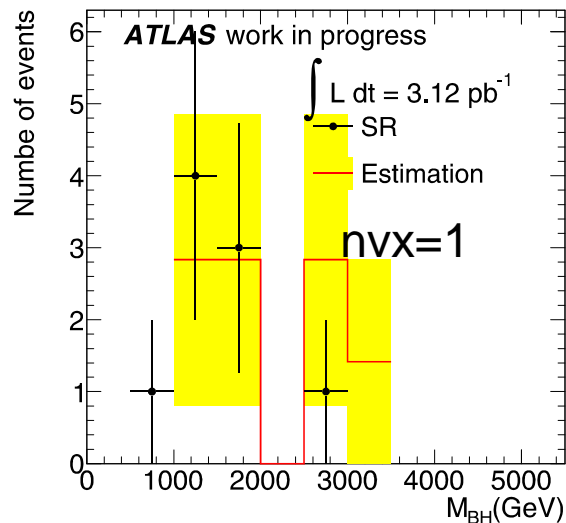
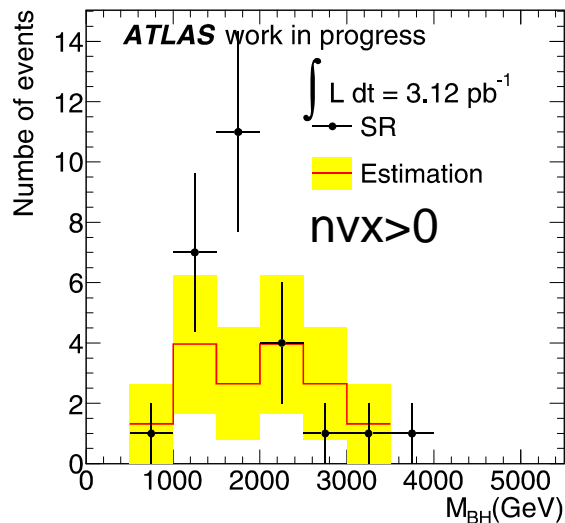
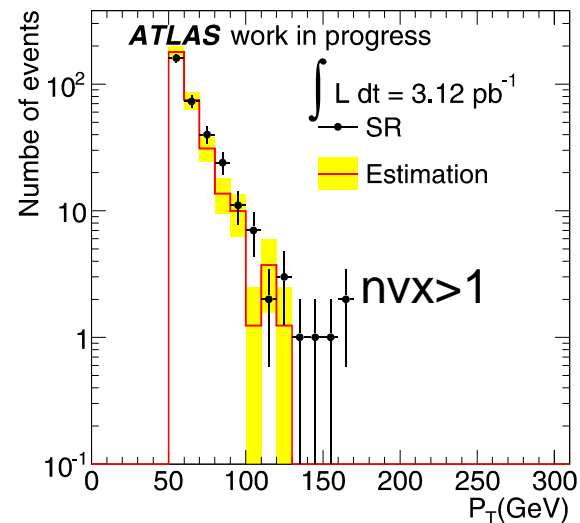
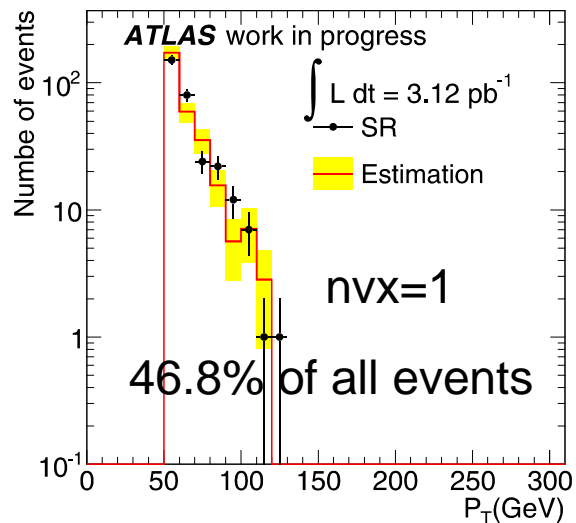
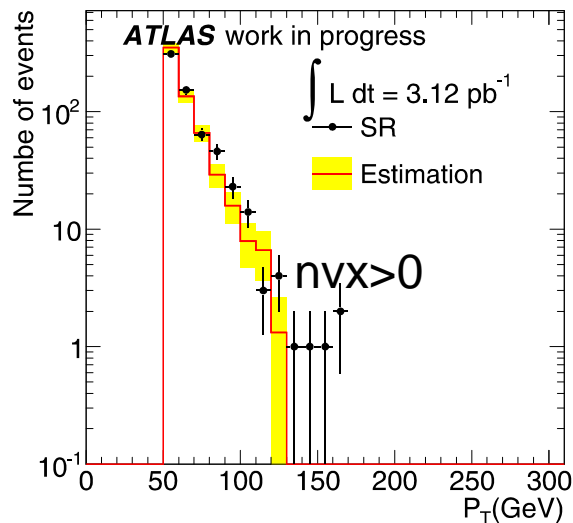
**Vacip**

# L1\_J55 trigger

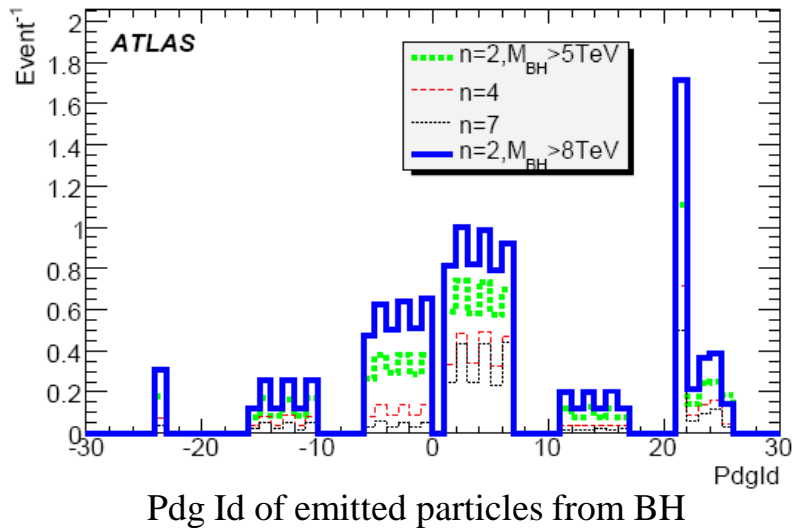


- The plot shows the efficiency dependency on leading jet  $P_T$ 
  - efficiency=
$$\frac{\text{events with L1\_J5\&\&L1\_J55}}{\text{events with L1\_J5}}$$
- Leading jet  $P_T$  200 GeV events shows >99.9 % efficiency

# Pile Up Effect



# Decay Particles from Black Hole

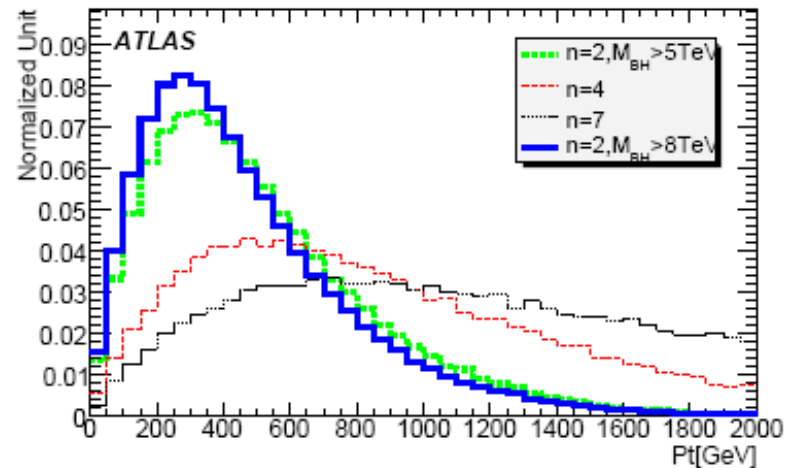


- Emit very high  $P_T$  particles
- Higher  $n$  shows higher  $P_T$  because Hawking temperature is higher

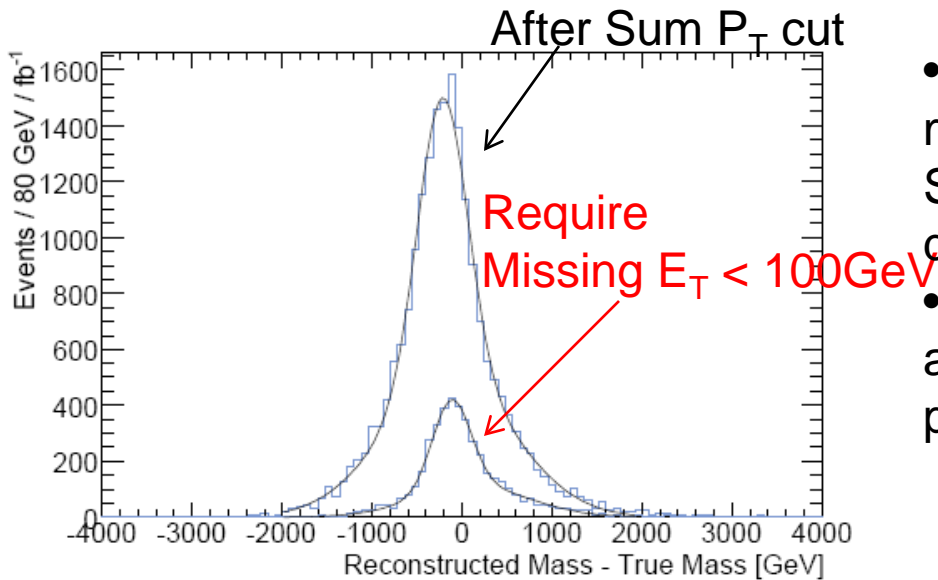
$$\frac{dN}{dE} \propto \frac{(E/T_H)^2}{\exp(E/T_H) + c} \leftarrow \begin{matrix} \text{Hawking Temperature} \\ = -1(1) \text{ for boson(fermion)} \end{matrix}$$

$$T_H = M_P \left[ \frac{M_D}{M_{BH}} \left( \frac{n+2}{8\Gamma((n+3)/2)} \right) \right]^{1/n}$$

- Particles are emitted by Hawking radiation
- Emission probability depends on degree of freedom of quantum variables
- A break of perfect democratic decay comes from conservation of charge, color, etc.



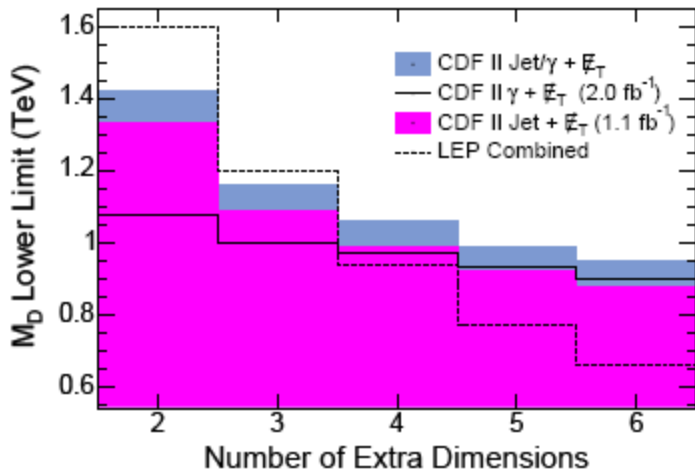
# Mass Reconstruction



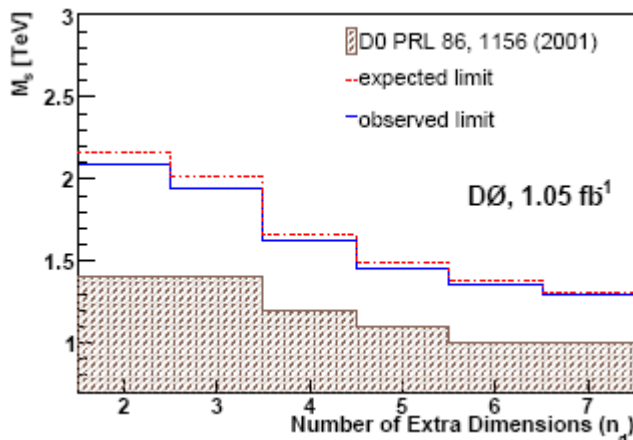
- Mass information is important for more study: cross section, Planck Scale and number of extra dimensions
- A part of mass information is missed as a momentum of an undetected particle
  - A requirement of small missing  $E_T$  can improve the center value and also the resolution

		Normalisation	Mean (GeV)	Resolution (GeV)
Without $E_T$ requirement	Narrow	$1018 \pm 26$	$-217 \pm 5$	$276 \pm 9$
	Wide	$276 \pm 30$	$-148 \pm 9$	$722 \pm 13$
With $E_T$ requirement	Narrow	$318 \pm 12$	$-116 \pm 8$	$215 \pm 9$
	Wide	$108 \pm 7$	$118 \pm 18$	$635 \pm 16$

# 余剰次元への実験的制限



$j/\gamma + \text{miss } E_T$ , CDF: Phys. Rev. Lett. 101, 181602(2008)



di-e/g, DØ: arXiv:0809.2813v1

## • 余剰次元の探索実験

### • 加速器 (Tevatron, LEP)

- 重力子サーチ ( $\gamma$  or  $j + \text{missing } E_T$ )
- KK graviton
- dijet角度

### • Tabletop

- ねじれ振り子で直接短距離重力の測定

### • 宇宙線

- 超新星爆発のKK graviton生成 (KK gravitonが運ぶエネルギー量、崩壊物の計測によるリミット)
- Ultra high-energy cosmic ray neutrinosと大気との衝突によるブラックホール探索



# 余剰次元への実験的制限

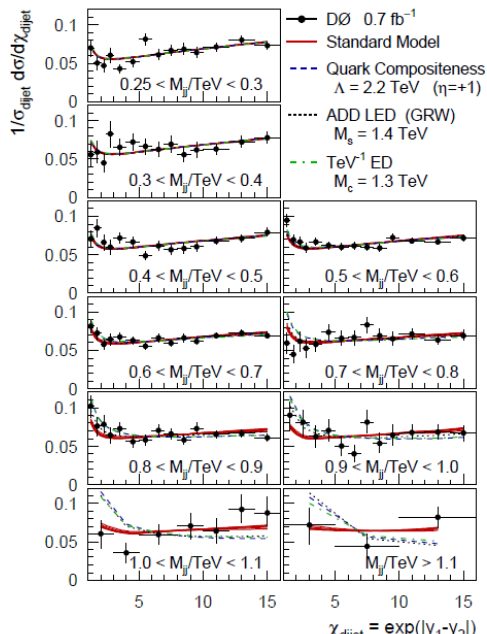


TABLE I: Expected and observed 95% C.L. limits in units of TeV on various new physics (NP) models for different Bayesian priors, and for the  $\Delta\chi^2$  criterion.

Model (parameter)	Prior flat in NP Lagrang.		Prior flat in NP x-section		$\Delta\chi^2 = 3.84$ criterion	
	Exp.	Obs.	Exp.	Obs.	Exp.	Obs.
Quark comp. ( $\Lambda$ )						
$\eta = +1$	2.91	3.06	2.76	2.84	2.80	2.92
$\eta = -1$	2.97	3.06	2.75	2.82	2.82	2.96
TeV <sup>-1</sup> ED ( $M_C$ )						
	1.73	1.67	1.60	1.55	1.66	1.59
ADD LED ( $M_S$ )						
GRW	1.53	1.67	1.47	1.59	1.49	1.66
HLZ $n=3$	1.81	1.98	1.75	1.89	1.77	1.97
HLZ $n=4$	1.53	1.67	1.47	1.59	1.49	1.66
HLZ $n=5$	1.38	1.51	1.33	1.43	1.35	1.50
HLZ $n=6$	1.28	1.40	1.24	1.34	1.25	1.39
HLZ $n=7$	1.21	1.33	1.17	1.26	1.19	1.32

## • 余剰次元の探索実験

### • 加速器 (Tevatron, LEP)

- 重力子サーチ ( $\gamma$  or  $j + \text{missing } E_T$ )
- KK graviton
- dijet角度

### • Tabletop

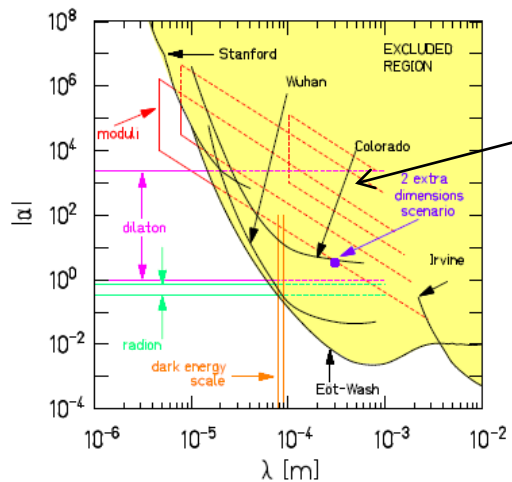
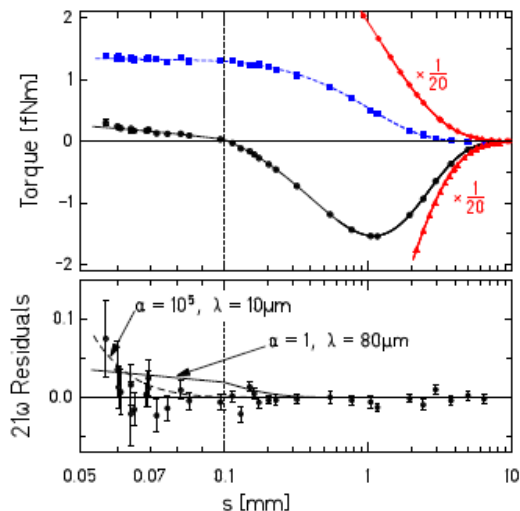
- ねじれ振り子で直接短距離重力の測定

### • 宇宙線

- 超新星爆発のKK graviton生成 (KK gravitonが運ぶエネルギー量、崩壊物の計測によるリミット)
- Ultra high-energy cosmic ray neutrinosと大気との衝突によるブラックホール探索

dijet, D0:arXiv:0906.4819

# 余剰次元への実験的制限



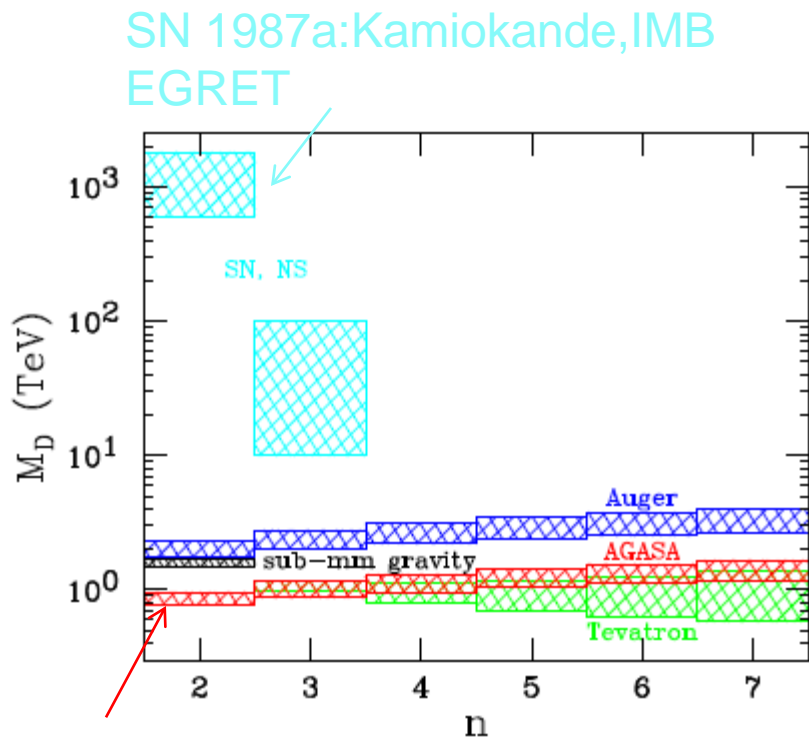
ADDでは  
 $\alpha=8n/3$ の時の $\lambda$ が  
 余剰次元のサイズ  
 $R$ に相当  
 リミット for  $n=2$ :  
 $R < 37 \mu\text{m}$   
 $M_D > 3.6 \text{TeV}$

## 余剰次元の探索実験

- 加速器 (Tevatron, LEP)
  - 重力子サーチ ( $\gamma$  or  $j + \text{missing } E_T$ )
  - KK graviton
  - dijet 角度
- **Tabletop**
  - **ねじれ振り子で直接短距離重力の測定**
- 宇宙線
  - 超新星爆発の KK graviton 生成 (KK graviton が運ぶエネルギー量、崩壊物の計測によるリミット)
  - Ultra high-energy cosmic ray neutrinos と大気との衝突によるブラックホール探索

Torsion Blance, Washington:  
 Part. Nucl. Phys. 62, 102(2009)

# 余剰次元への実験的制限



Phys. Rev. D. 65 124027(2002)

## 余剰次元の探索実験

### ➤ 加速器 (Tevatron, LEP)

- 重力子サーチ ( $\gamma$  or  $j + \text{missing } E_T$ )
- KK graviton
- dijet 角度

### ➤ Tabletop

- ねじれ振り子で直接短距離重力の測定

### ➤ 宇宙線

- 超新星爆発の KK graviton 生成 (KK graviton が運ぶエネルギー量、崩壊物の計測によるリミット)
- Ultra high-energy cosmic ray neutrinos と大気との衝突によるブラックホール探索

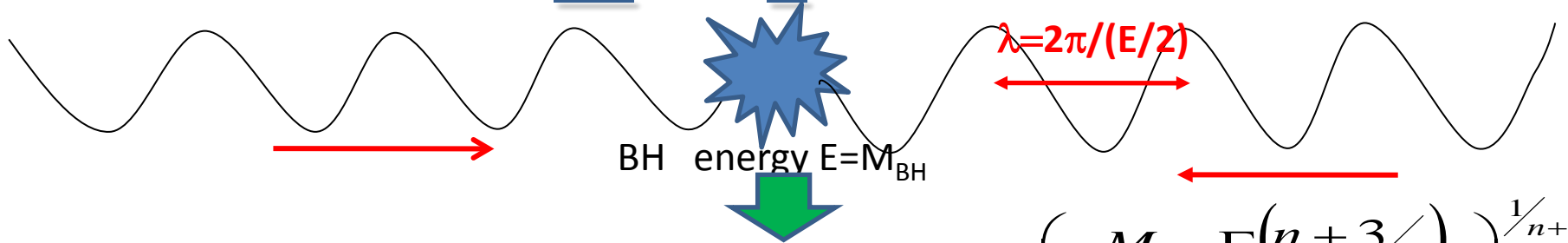
# Black Hole Generator

- **TRUENOIR**
  - Schwarzschild Phase , Planck Phaseのみ。Planck Phaseは単に2体崩壊
- **CHARYBDIS**
  - Gray-body factor やtime dependenceを含む
- **CATFISH**
  - 上記に加え、Black hole生成時のエネルギー損失( $ij \rightarrow BH+X$ ,  $X$ :event horizonに捕えられなかったもの), graviton emission, remnantオプション
- **BlackMax (1,2)**
  - 上記に加え、Black holeの角運動量(spin-down phase)、split brane model
- **CHARYBDIS 2**
  - CHARYBDISにエネルギー損失や角運動量、remnantの扱いのオプション
- 最近のアップデートでstring ballのシミュレーションも上記のそれぞれで出来る様になった(今現在のofficial releaseに入ってるのはCHARYBDIS2だけ)

# $M_{BH}$ と $M_D$ の関係

$$r_s = \left( \frac{M_{BH} \Gamma\left(\frac{n+3}{2}\right)}{L_N (n+2) 2\pi^{\frac{n+3}{2}}} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$
$$L_N = \frac{M_D^{n+2}}{2(2\pi)^n}$$

# $M_{BH}$ と $M_D$ の関係



$$r_s(M_D, n, M_{BH}) > \lambda = 4\pi / M_{BH} \quad r_s = \left( \frac{M_{BH} \Gamma(n + 3/2)}{L_N (n + 2) 2\pi^{n+3/2}} \right)^{1/n+1}$$

(ぶつかる粒子が作られるBHの  
シュワルツシルト半径領域  
を見ることが出来る条件)

$$L_N = \frac{M_D^{n+2}}{2(2\pi)^n}$$