

ATLAS実験における ブラックホール探索の研究

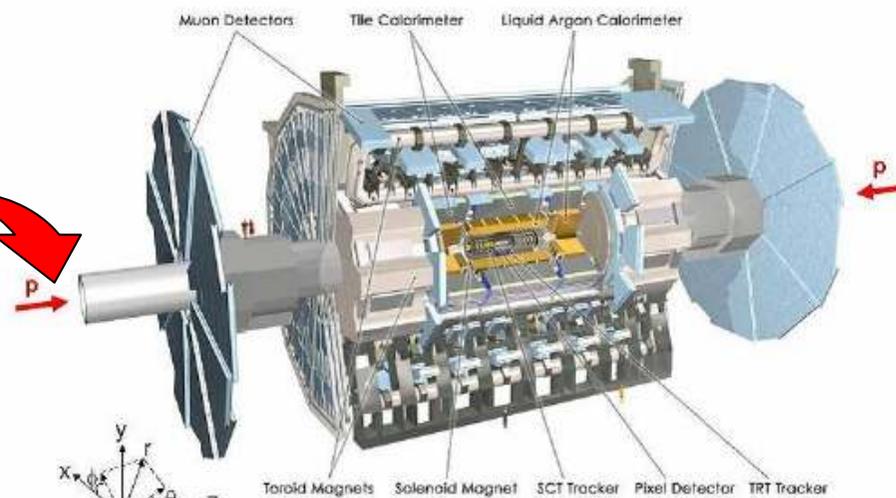
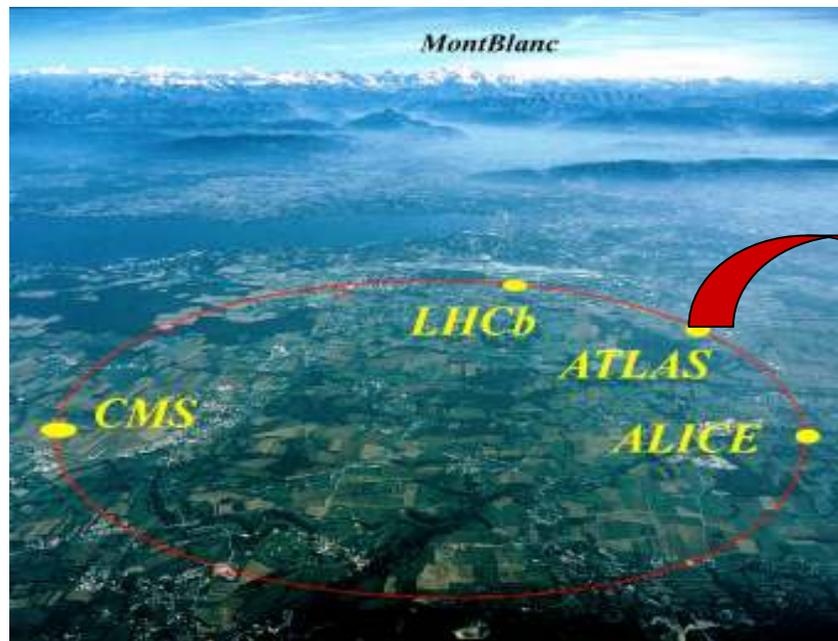
東大 ICEPP

兼田 充、小林富雄、
浅井祥仁、田中純一

概要

- イントロダクション
- ブラックホールの生成、崩壊
- ブラックホールの発見能力
- ブラックホールの詳細測定
- まとめ

LHC-ATLAS



直径22m、長さ44m、総重量7000t

LHC

- 2007年実験開始予定
- 陽子-陽子衝突型加速器
- 周長約27km
- 重心系エネルギー 14 TeV
- ルミノシティ $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

期待される物理

- 標準理論で予測される全領域でのヒッグス粒子の発見
- 超対称性粒子の発見
- **超対称性以外の、余剰次元を含む標準理論を超えた物理の発見**
- 標準理論の詳細測定

標準理論における階層性問題

- 電弱統一スケールに比べてプランクスケールが桁はずれに大きい

電弱統一スケール \ll プランクスケール

$O(100\text{GeV})$

$O(10^{19}\text{GeV})$

- これに伴って、ヒッグス粒子の自己エネルギーによる2次発散の問題が生まれる

$$M_H^2 \sim M_{H(\text{tree})}^2 - O(\Lambda^2)$$

もし上記の様なスケールの差があれば、 $O(M_H) = O(\text{EM})$ であるとして、カットオフスケールをプランクスケール程度であるとすれば、100程度の値を出すために十数桁の数の微細な調整が必要になる。

- > TeV程度のエネルギー領域に新しい物理が存在する可能性:
超対称性理論、**余剰次元**、など

余剰次元(Large Extra Dimensions)

- もともと重力も他の力と同程度(プランクスケールが~TeV程度)

- 重力だけが余剰次元にも伝播する
- 他の力に比べて極端に小さく見える

- 4次元でのプランクスケール M_{Pl} と
4+n次元でのプランクスケールの M_p 関係

$$M_{Pl}^2 \sim M_p^{n+2} R^n$$

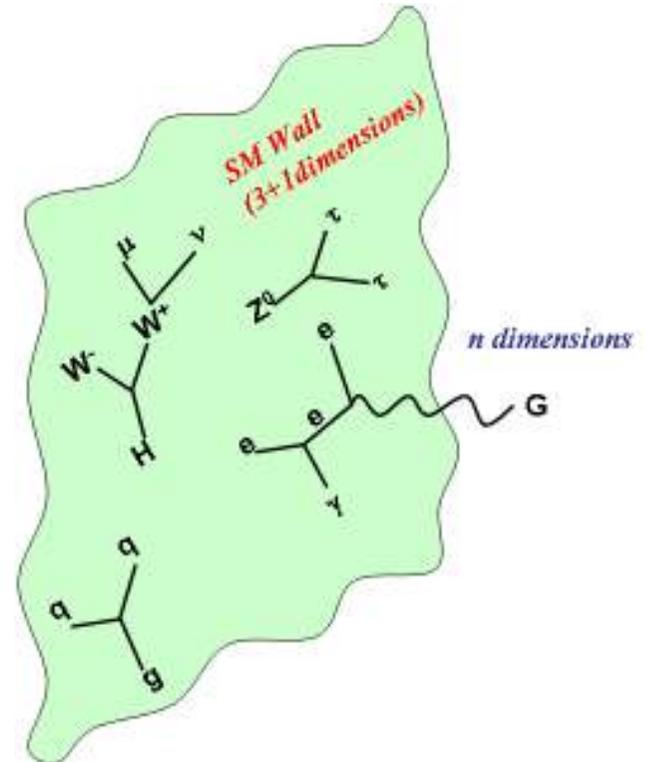
(R:余剰次元の大きさ)

- 加速器実験による M_p に対する制限: $M_p > 800 \text{ GeV}$

- M_p が~TeV程度であるとすると:

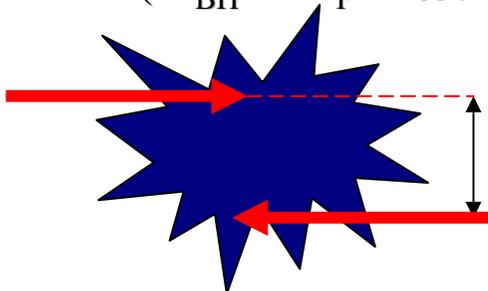
- n=1: $R \sim 10^{13} \text{ cm}$ × (この様なスケールでは余剰次元の効果は観測されていない)
- n=2: $R \sim 100 \mu\text{m}$ 実験的に完全に否定されてはいない
->この後では $n \geq 2$ のみを考える

- M_p が~TeV程度であれば、~TeV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

- $\sqrt{s} = M_{BH} \gg M_P$ の粒子の衝突を考える。
- impact parameter (d) がシュワルツシルト半径 (r_H) より小さい場合、BHは生成される ($M_{BH} \gg M_P$ の場合の古典的な近似)



$$d < r_H = \frac{1}{\sqrt{\pi} M_P} \left[\frac{M_{BH}}{M_P} \left(\frac{8\Gamma((n+3)/2)}{n+2} \right) \right]^{\frac{1}{1+n}}$$

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

d: impact parameter
 r_H : シュワルツシルト半径
 M_P : (4+n)-dimでの
 プランクスケール
 n: 余剰次元の数

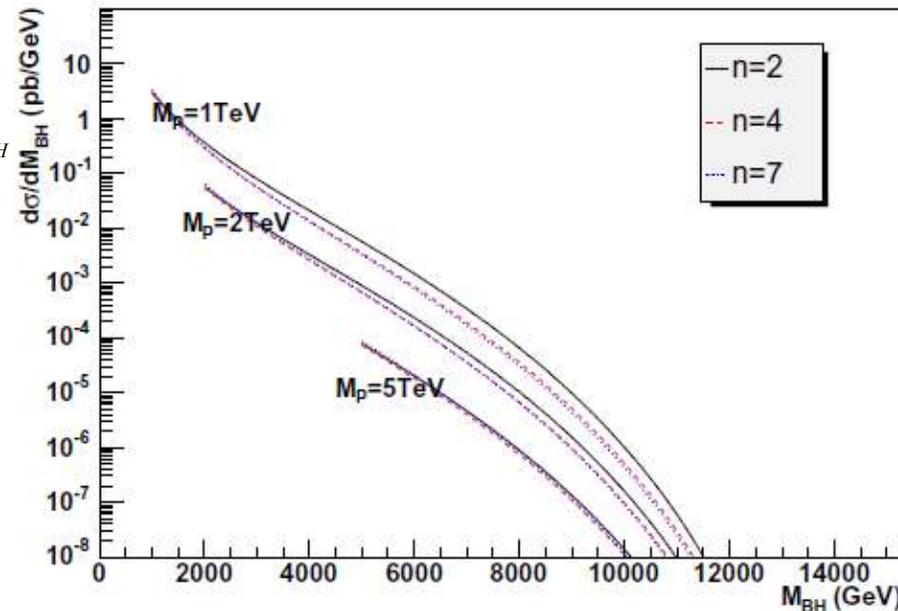
$\sim 100\text{pb} (M_P \sim M_{BH} \sim \text{TeV})$: 非常に大きい

- 陽子陽子衝突実験では...

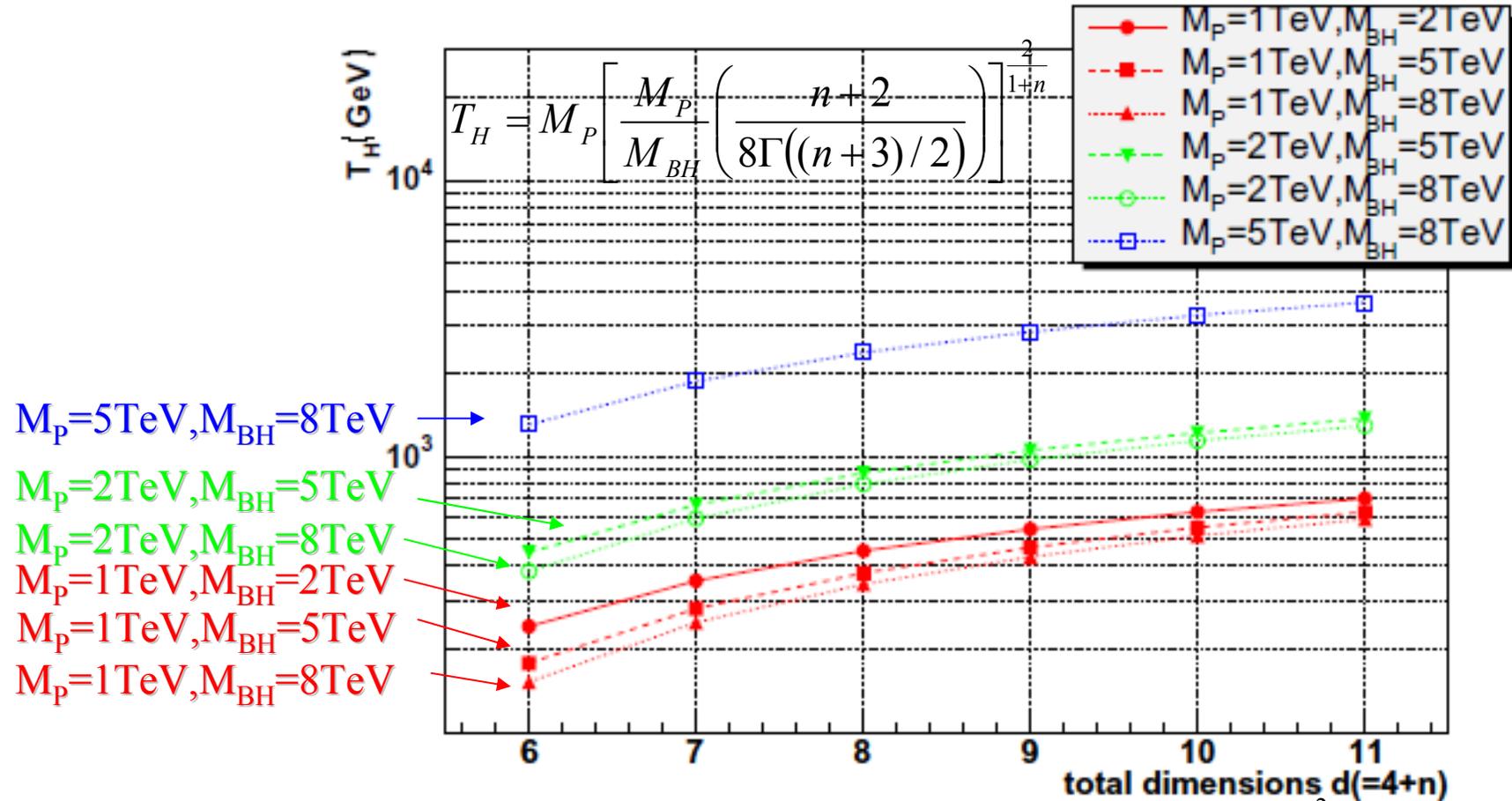
$$\frac{d\sigma(pp \rightarrow BH + X)}{dM_{BH}} = \frac{dL}{dM_{BH}} \hat{\sigma}(ab \rightarrow BH) \Big|_{\hat{s}=M_{BH}^2}$$

$$\frac{dL}{dM_{BH}} = \frac{2M_{BH}}{s} \sum_{a,b} \int_{M_{BH}^2/s}^1 \frac{dx_a}{x_a} f_a(x_a) f_b\left(\frac{M_{BH}^2}{sx_a}\right)$$

a and b are partons in protons and $f_i(x)$ are the parton distribution function (PDFs)

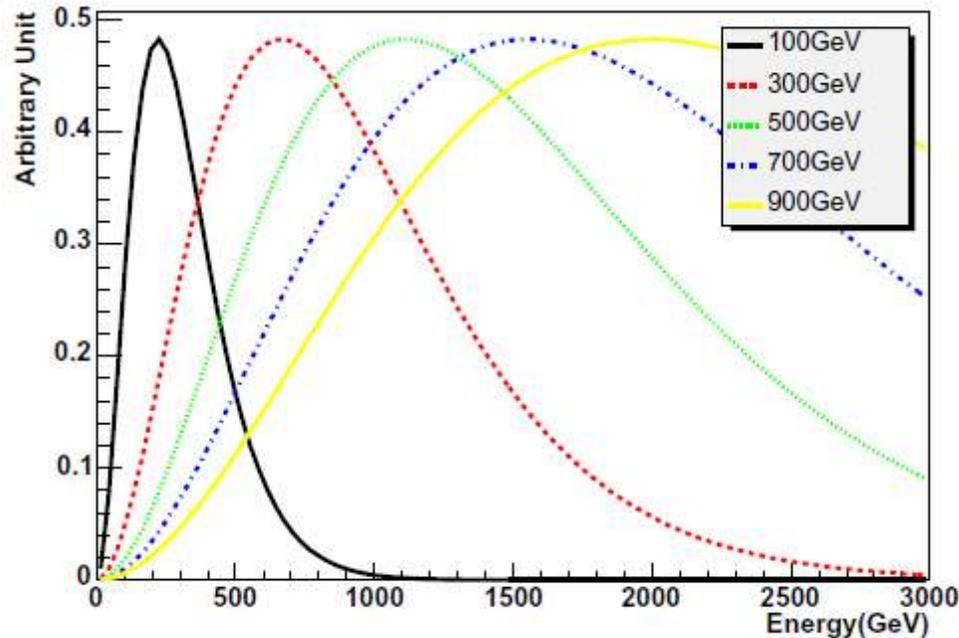


ホーキング温度



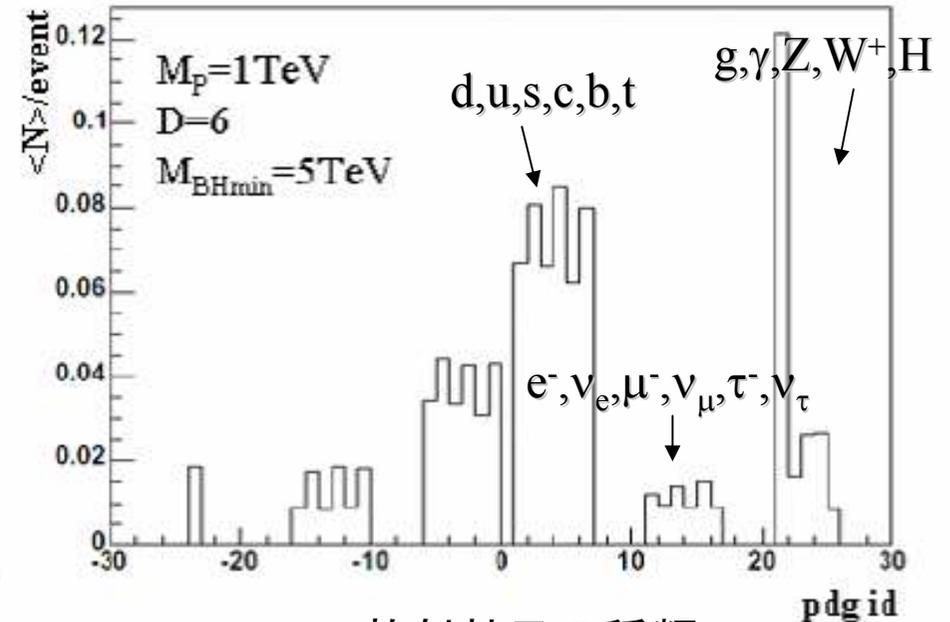
このホーキング温度に従い、ホーキング輻射する： $\frac{dN}{d\omega} \propto \frac{(\omega/T_H)^2}{\exp(\omega/T_H) + c}$
 ボソン(フェルミオン): $c = -1(1)$

放射される粒子



ホーキング温度の違いによる
放射粒子(フェルミオン)の
エネルギースペクトル

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



放射粒子の種類

PDG ID: 1-6=d,u,s,c,b,t

11-16=e⁻,ν_e,μ⁻,ν_μ,τ⁻,ν_τ

21-25=g,γ,Z,W⁺,H

マイナスの付くものはそれぞれ反粒子
衝突した粒子から、カラー、フェルミオン数
電荷が保存されるように放出される

モンテカルロサンプル

- signal: Charybdis + Jimmy
 - $M_p=1,2,5\text{TeV}$, $n=2-7$, $M_{\text{BHmin}}=2,5,8\text{TeV}$ (total 33sets)
 - example of xsec: 41pb at ($M_p=1\text{TeV}, n=2, M_{\text{BHmin}}=5\text{TeV}$)

- backgrounds: Alpgen + Jimmy

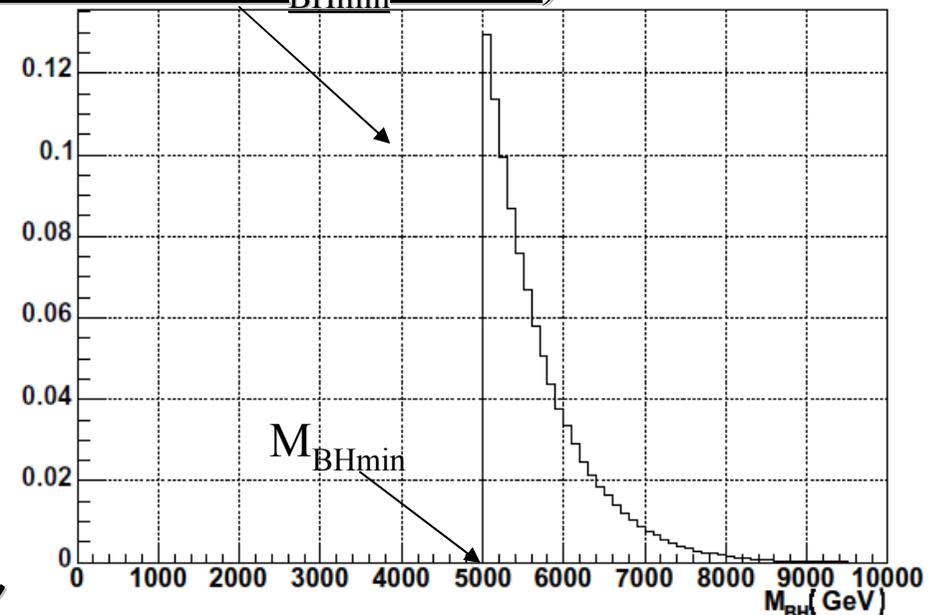
- Multi jets: $\sim 10^7\text{pb}$
- ttbar+jets : $\sim 10^3\text{pb}$
- W+jets : $\sim 10^5\text{pb}$
- Z+jets : $\sim 10^4\text{pb}$
- γ +jets : $\sim 10^5\text{pb}$

- ATLASのFast検出器シミュレーション

ATLFASTを使用

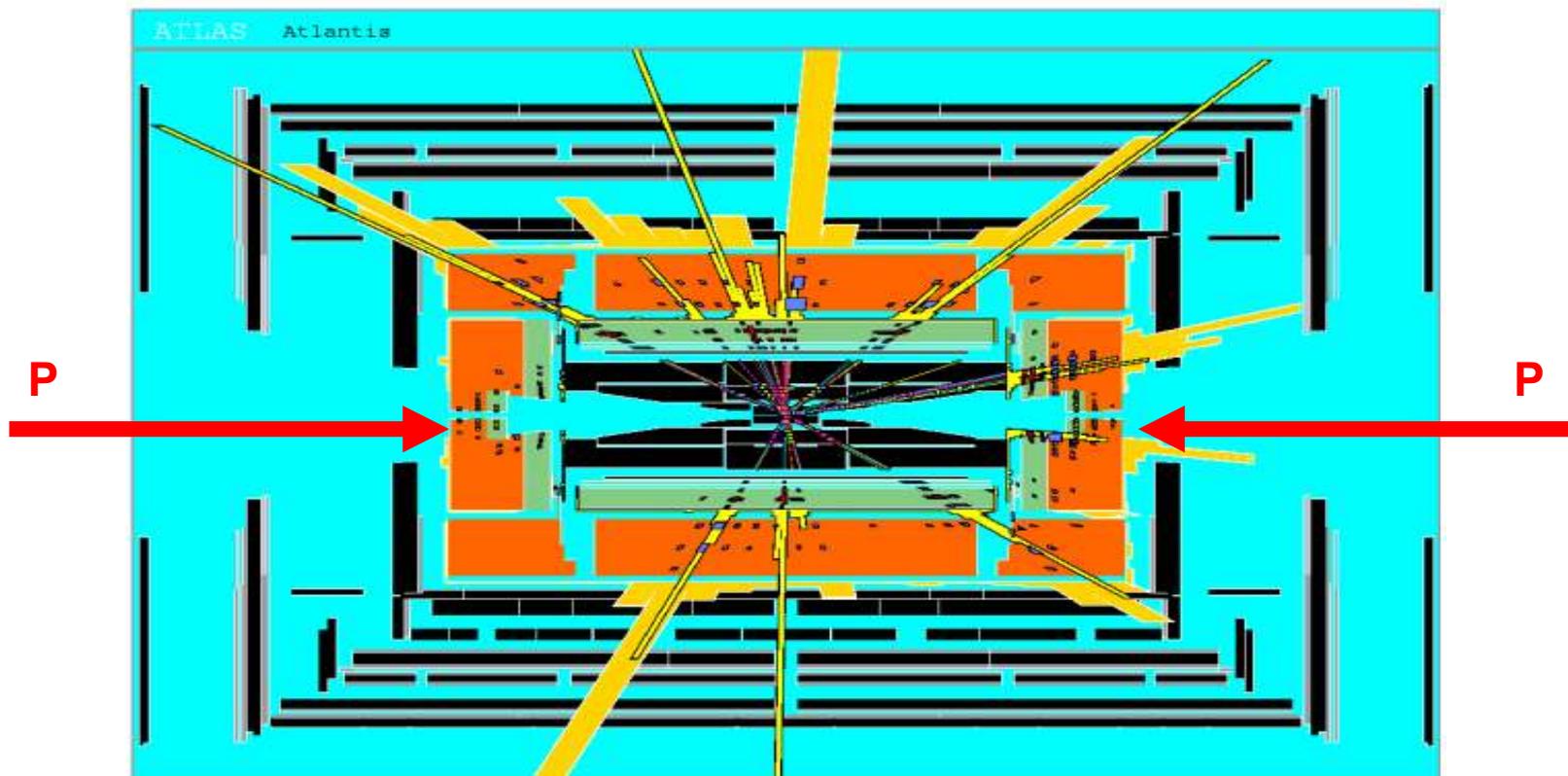
- ATLFASTでは入っていない効果として、

レプトンの検出効率やフェイクはGeant4を用いたFullシミュレーションを用いて見積もり、ATLFASTの結果に適用した



Charybdisで生成されたブラックホールの質量分布
($M_{\text{BH}} \sim M_p$ の領域は理論的に大きな不定性があるため
本研究では質量の下限值もパラメーターとしている)

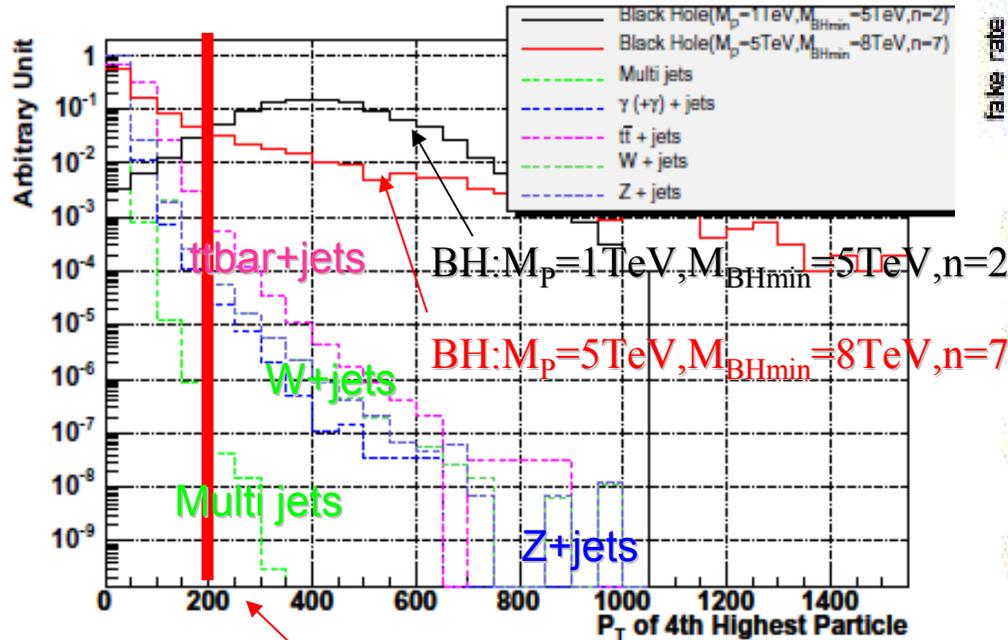
ブラックホールイベント



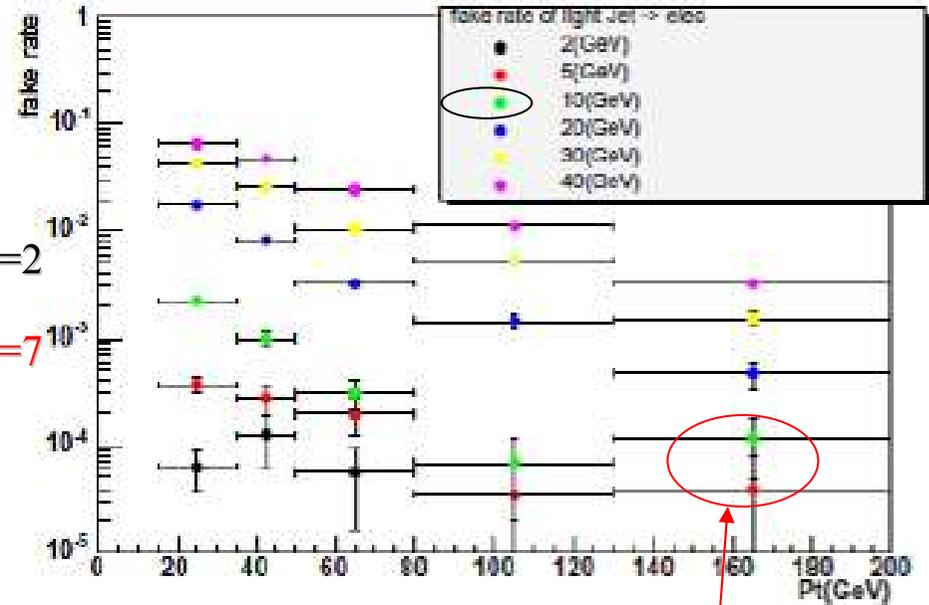
- ブラックホールイベントのイベントディスプレイ。大量の高エネルギー粒子を放射する
- 解析では、基本的にはイベント内の全ての粒子がブラックホール起源と考える。
- 実際には、ISR等の効果を除くため、前方方向に出るジェットは除く

$e, \mu, \gamma: P_T > 10 \text{ GeV}, |\eta| < 2.5, \text{jet}: P_T > 20 \text{ GeV}, |\eta| < 2.5$ の粒子のベクトル和でブラックホールを再構成

イベントセレクション



4番目に P_T の大きい粒子の P_T



ジェットから電子へのfake

Isolationは10GeVを用いた
200GeV程度で 10^{-4} 程度のfake

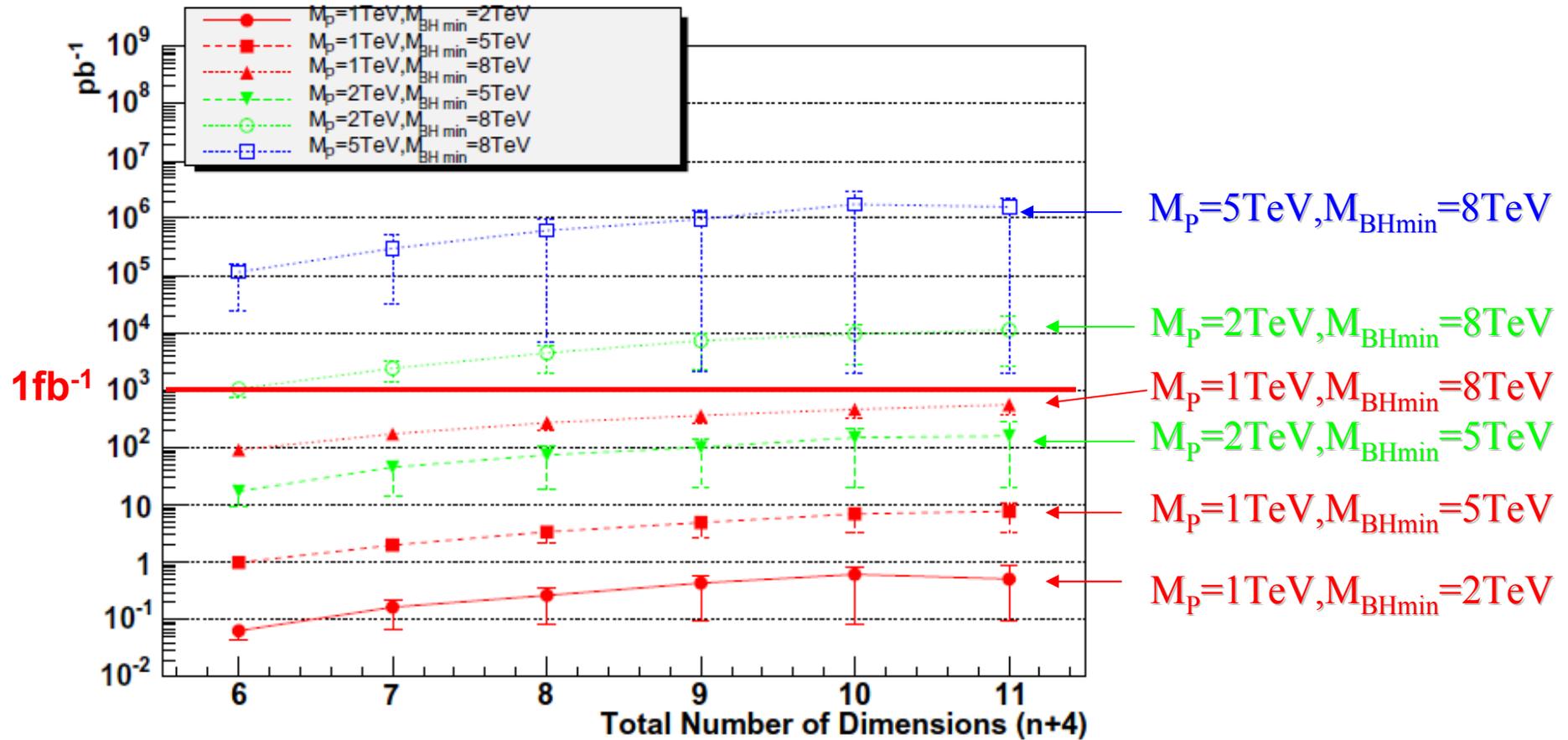
イベントセレクション

- $P_T > 200 \text{ GeV}$ の粒子が4つ以上を要請
- $P_T > 200 \text{ GeV}$ レプトンがイベントに含まれることを要請する → トリガーもOK
(QCD Multi jets イベントを落とすため)

イベントセレクション後のイベント数 (1fb^{-1})

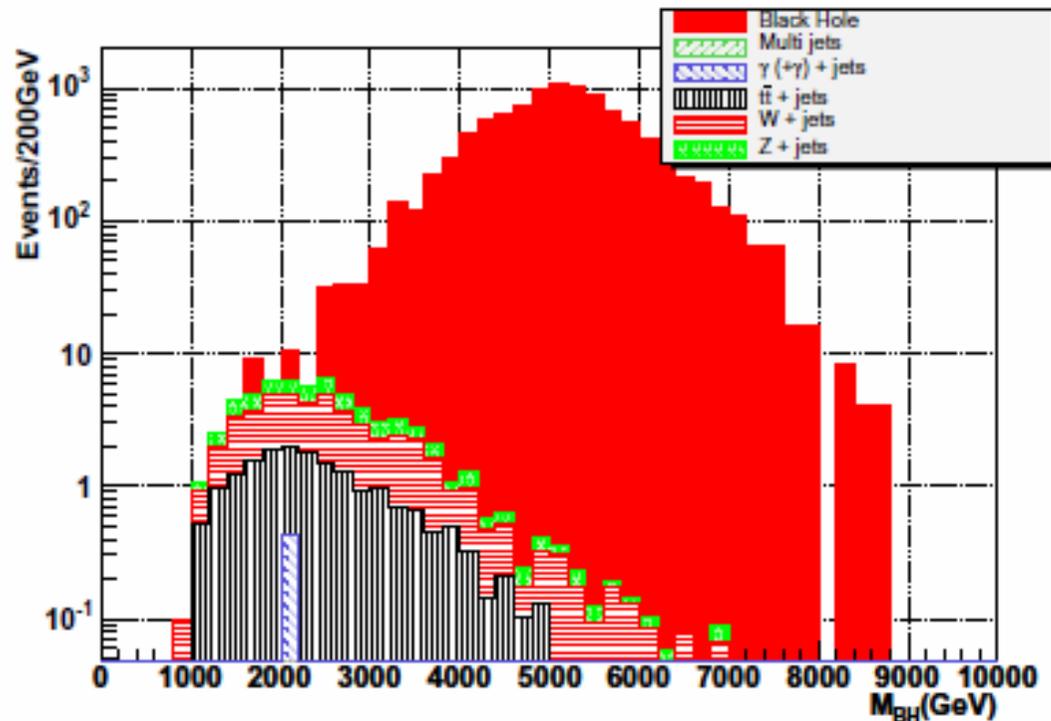
過程	$M_{\text{BH}} > 1\text{TeV}$	$M_{\text{BH}} > 5\text{TeV}$
ブラックホール		
BH($M_{\text{p}}=1\text{TeV}, n=2, M_{\text{BHmin}}=5\text{TeV}$)	10107	5770
BH($M_{\text{p}}=1\text{TeV}, n=7, M_{\text{BHmin}}=5\text{TeV}$)	1291	869
BH($M_{\text{p}}=2\text{TeV}, n=2, M_{\text{BHmin}}=5\text{TeV}$)	582	400
バックグラウンド		
Multi jets	0	0
γ +jets	0	0
tt+jets	18	0
W+jets	31	1
Z+jets	14	0

必要最小積分ルミノシティ



発見 (significance : $S/\sqrt{B} > 5$ かつ $S > 10$) に必要な最小限のルミノシティ

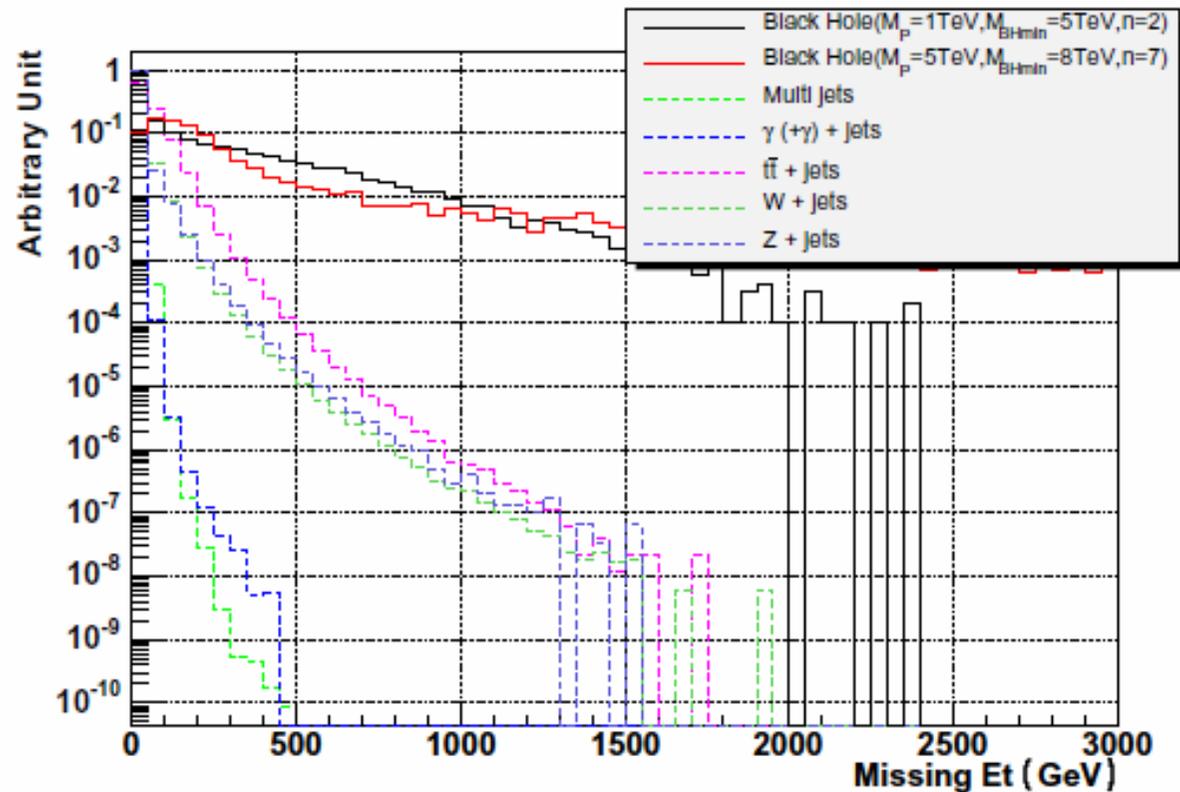
質量の再構成



- ▶ 非常に大きなexcessが見える。
- ▶ サンプルは5TeV以上の質量を持つブラックホールであるが、質量の小さい領域に大きくテールを引いている
- ▶ ニュートリノによる運動量損失が原因

セレクション後のブラックホール質量分布
 (サンプル: $M_p=1\text{TeV}, n=2, M_{\text{BHmin}}=5\text{TeV}$)

消失運動量

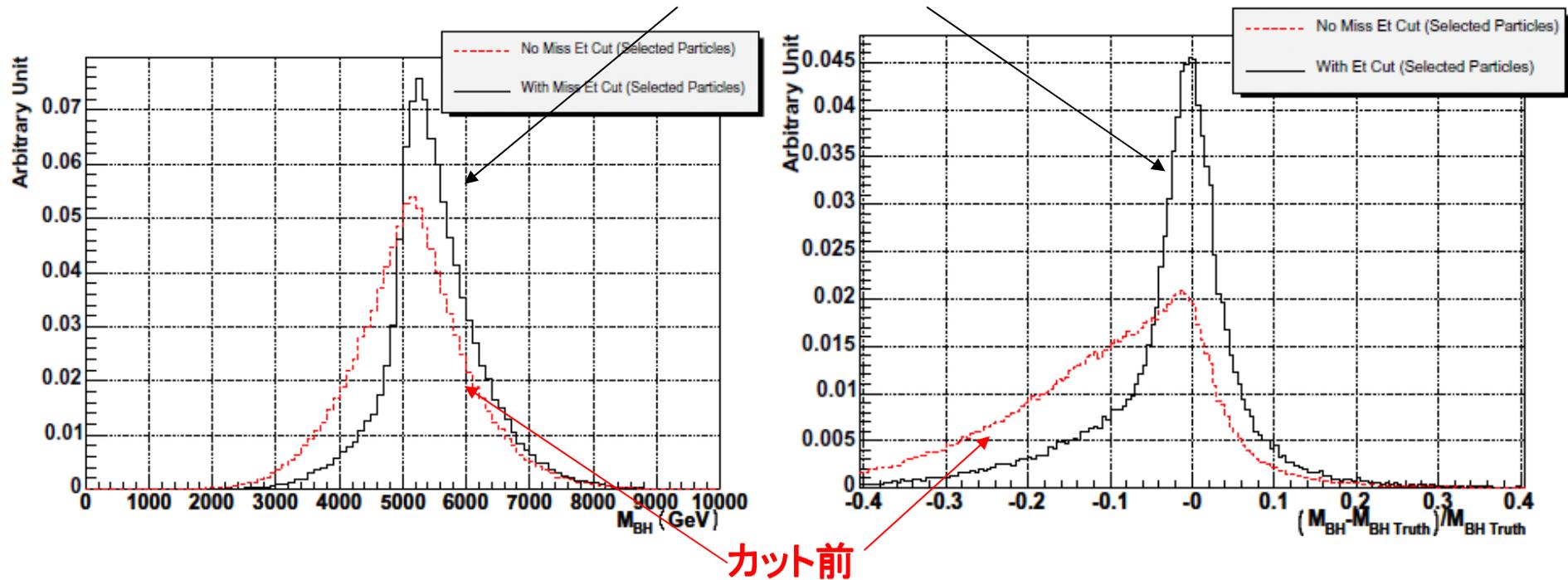


消失横運動量が大きい \rightarrow ニュートリノによって多くの運動量を持っていかれている
 \rightarrow 消失横運動量 $<100\text{GeV}$ のみを用いる

より正確な質量再構成

サンプル: $M_p=1\text{TeV}, n=2, M_{\text{BHmin}}=5\text{TeV}$

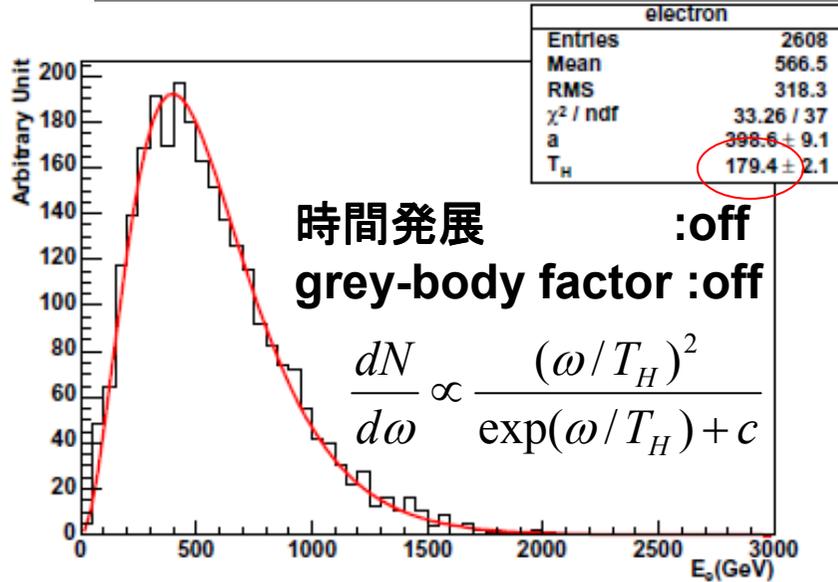
消失運動量カット後



ブラックホールの質量分布

ブラックホールの質量の分解能
(カット後 $\sigma \sim 3\%: 150\text{GeV}@5\text{TeV}$)

ホーキング温度の測定



時間発展 :off
grey-body factor :off

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

電子のエネルギースペクトル (Truth)
($M_P=1\text{TeV}, n=2, M_{BH}=5-5.5\text{TeV}$)

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

$T_H=179-173\text{GeV}$
($M_P=1\text{TeV}, n=2, M_{BH}=5-5.5\text{TeV}$)

ホーキング温度をブラックホールの質量分布として測定し、これを左下の式でフィットすることでプランクスケールや余剰次元を求める

実験の際に考慮しなくてはならない点:

■ 理論的側面

■ 時間発展、grey-body factor、remnant

■ 検出器の効果等

■ 粒子の検出効率、分解能

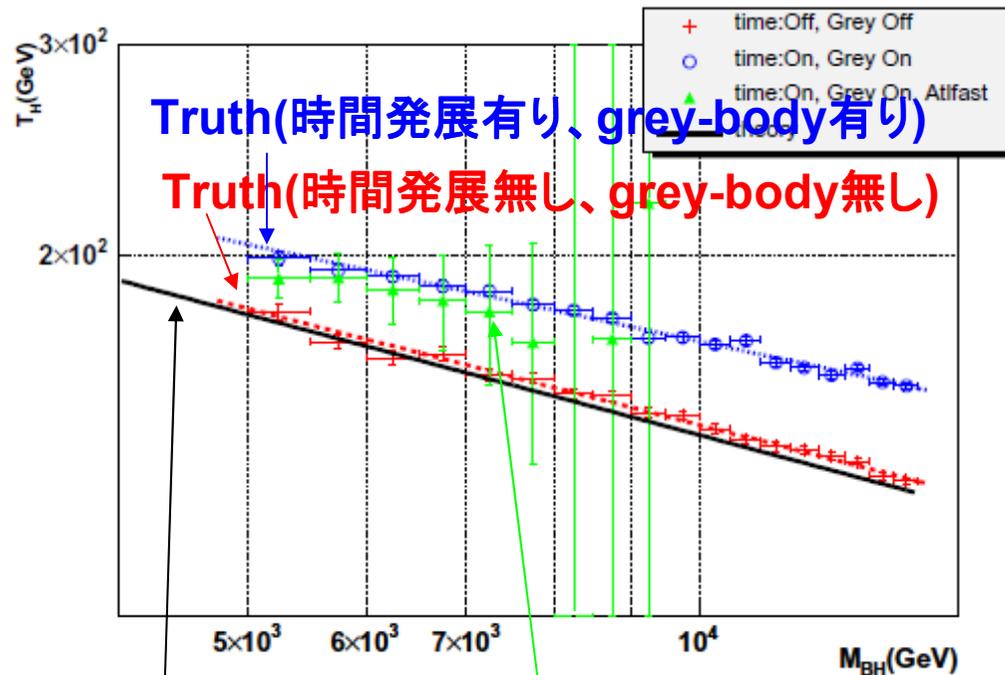
■ 再構成されたブラックホールの質量の分解能

■ イベントセレクションの効果

■ topやWの崩壊で来る2次粒子

これらの効果を全て補正する必要がある

M_{BH} vs T_H



Truth(時間発展有り、grey-body有り)

Truth(時間発展無し、grey-body無し)

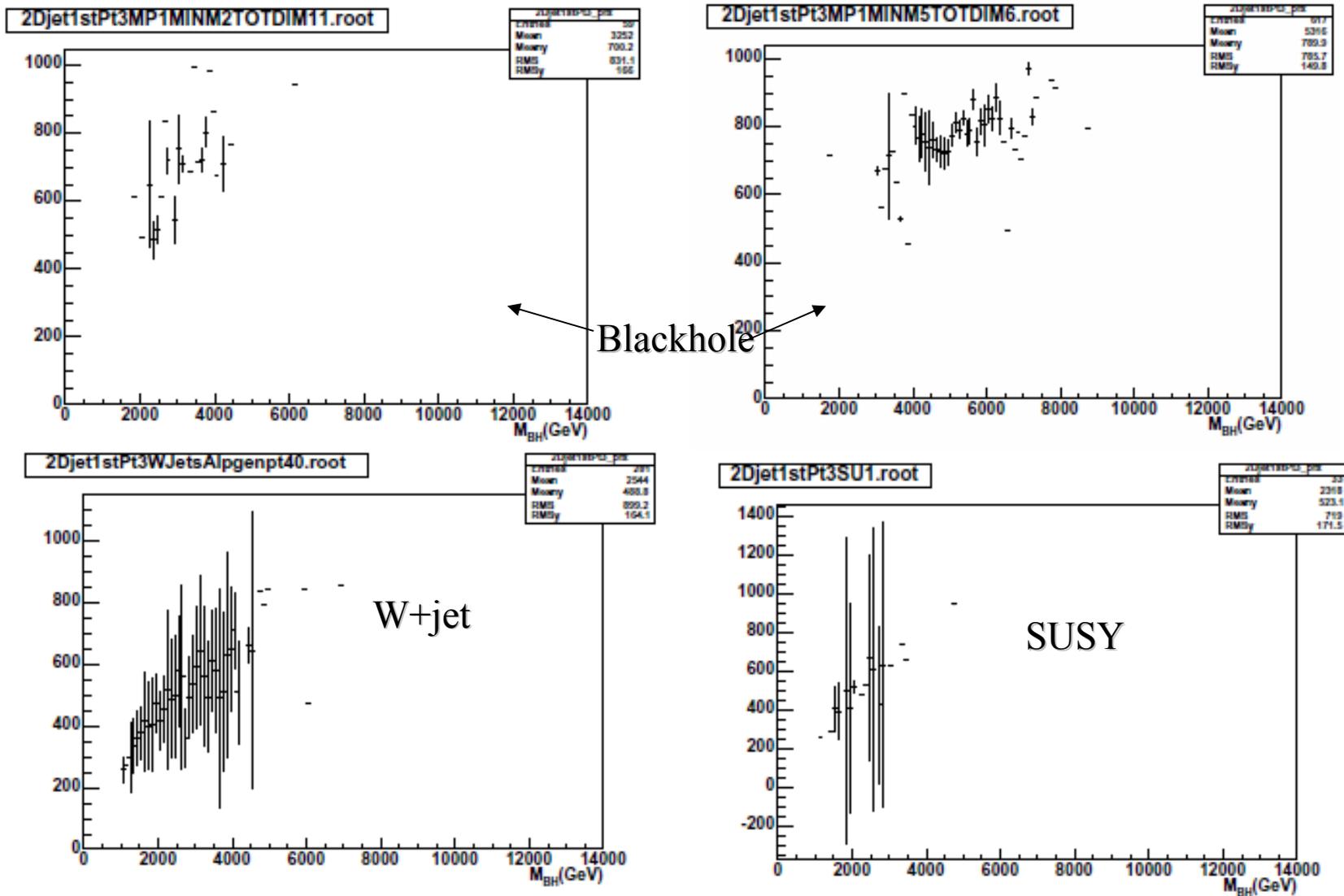
Atifast、イベントセレクション後(1fb⁻¹)
(時間発展有り、grey-body有り)

理論曲線

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

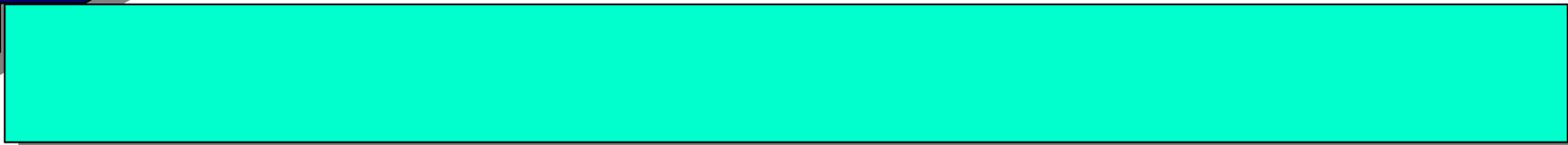
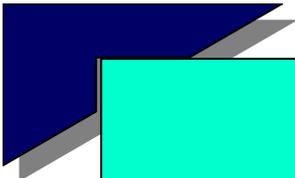
- 時間発展やgrey-body factorを考慮するとエネルギーの高い粒子が多くなり、ホーキング温度も高くなる(青)
 - 理論的にこれらが良く分かれば補正可能
- 検出器等の効果については、複数の効果があり、補正の研究がまだしっかりと出来てないので、今後の課題

M_{BH} vs Leading P_T Jet



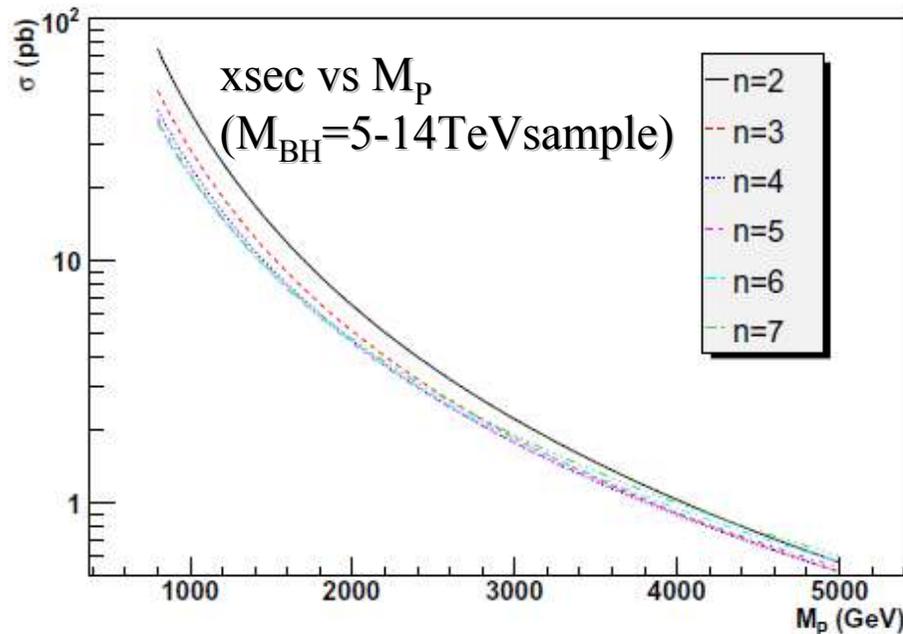
まとめ

- ATLAS実験におけるブラックホールの発見能力、発見後の性質の測定について研究を行った。
- 1fb^{-1} のデータ量(初期の一ヶ月分のデータ量)で $M_p \sim 1\text{TeV}$ の場合には十分な発見能力がある。
また、 10fb^{-1} (初期の一年分のデータ量)のデータ量があれば、 $M_p \sim 2\text{TeV}$ の場合でも発見可能である。
- 消失運動量カットを加えることにより、3%程度の質量分解能を得た。
- ブラックホールからの放射粒子は、ホーキング輻射により非常に特徴的なエネルギー分布を取る。
 - ホーキング温度を直接観測するためには理論起源、検出器起源の様々な補正を行なう必要があり、非常に難しい。
 - この特徴を用いて、ジェットの P_T の M_{BH} 依存性等を見ることにより他の標準理論や超対称性によるイベントで無い、と区別出来る可能性がある。



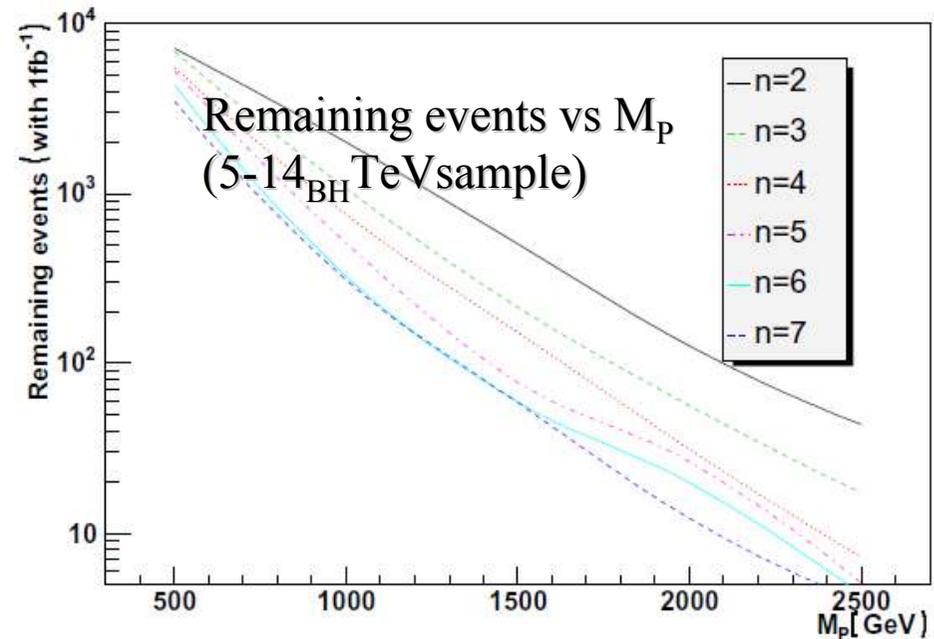
Back Up Slides

生成断面積とプランクスケール



生成断面積の M_p 依存性 ($M_{BH}:5-14\text{TeV}$)

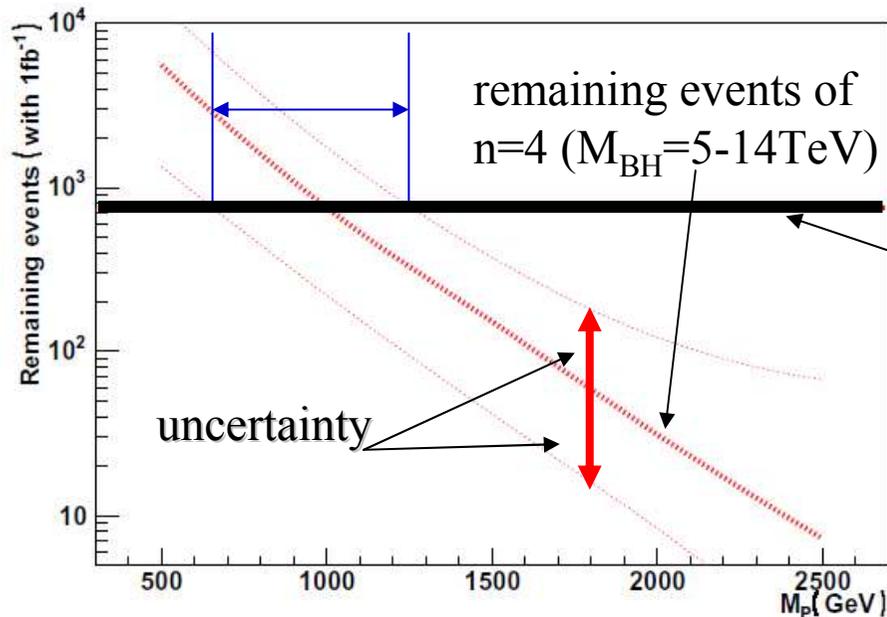
- M_p に強く依存
- n にはあまり依らない



イベントセレクション後の数(質量の分解能を良くするために消失運動量のセレクションも追加)

- n によってセレクション効率が違う
 - n が大きくなると T_H が大きくなり放出される粒子数が小さくなるため

プランクスケールの測定方法

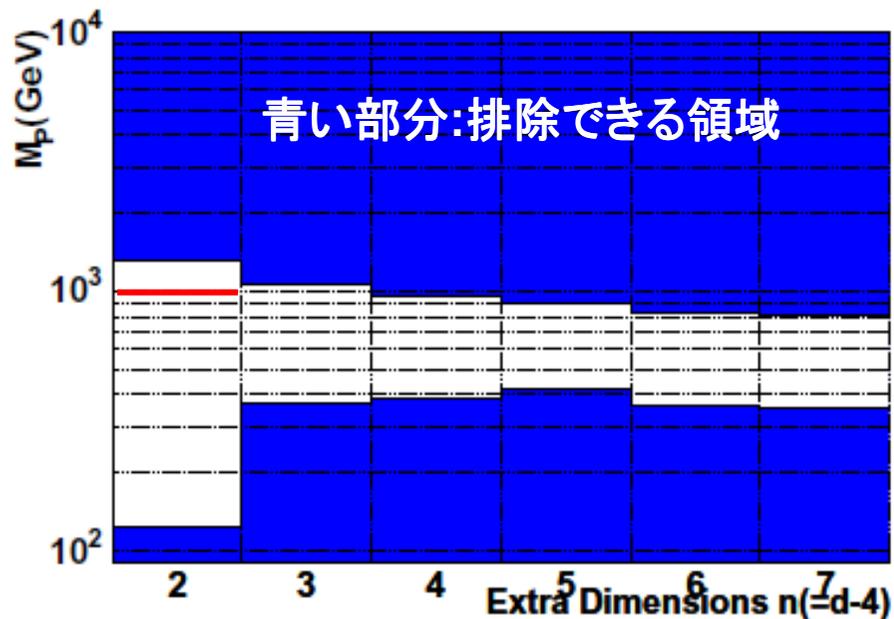


- 赤い太線は前のページと同じ残ったイベント数(前のページと同じ)
- 細かい線は誤差範囲

■ もし、例えば800イベント得られたとすると、(左の黒い太線)n=4に対して青い範囲でプランクスケールが得られる

プランクスケールに対する制限

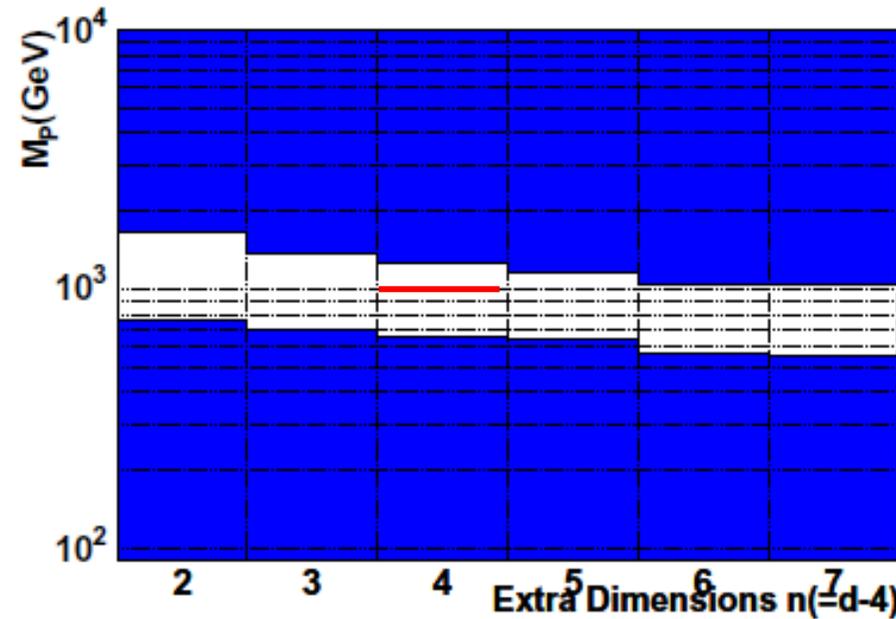
図の統計は 1fb^{-1}



$$\text{BH}(M_p=1\text{TeV}, n=2, M_{\text{BHmin}}=5\text{TeV})$$

$$122\text{GeV} < M_p < 1306\text{GeV}$$

過去に付けた制限と合わせれば
 $800\text{GeV} < M_p < 1306\text{GeV}$

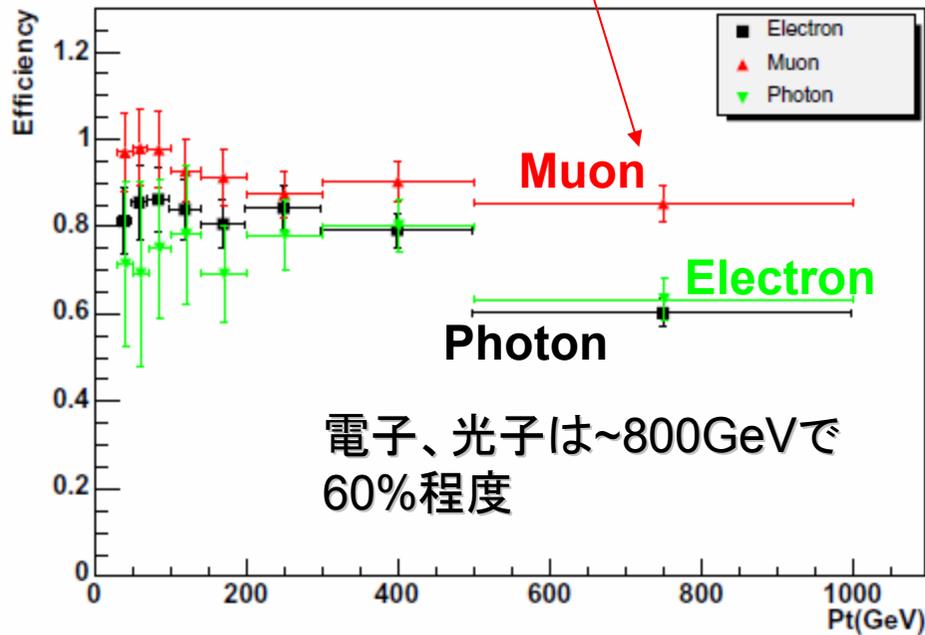


$$\text{BH}(M_p=1\text{TeV}, n=4, M_{\text{BHmin}}=5\text{TeV})$$

$$550\text{GeV} < M_p < 1672\text{GeV}$$

レプトン、光子のefficiency、fake

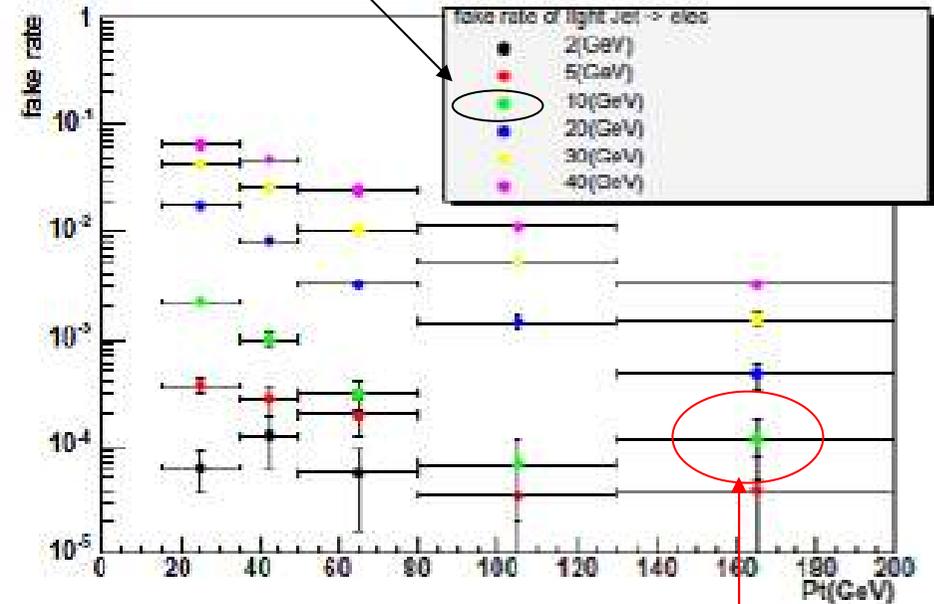
Muonは~800GeV程度で90%



電子、光子は~800GeVで60%程度

レプトン、光子のefficiency

Isolationのカットの閾値
今回は全て10GeVを用いている



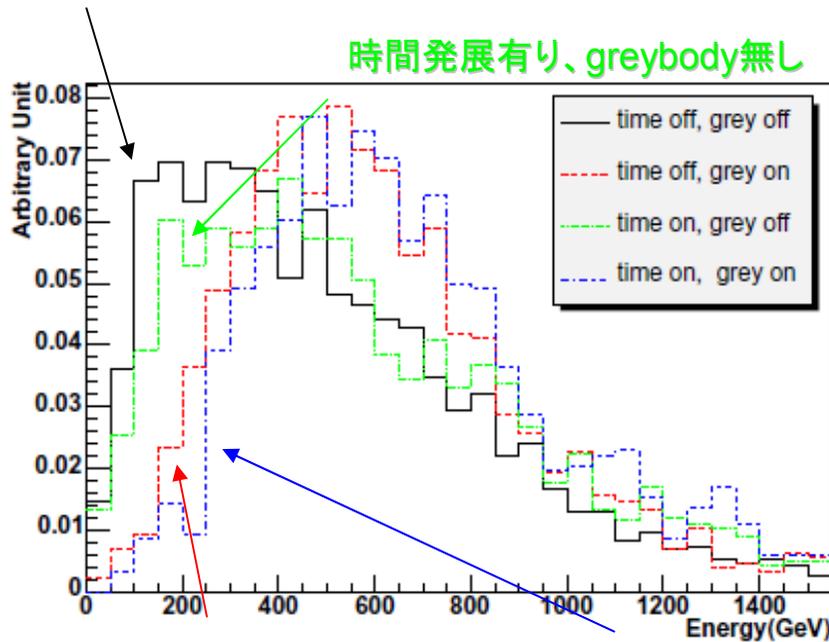
ジェットから電子へのfake

200GeV程度で 10^{-4} 程度のfake

時間発展、grey-body factor、Remnant

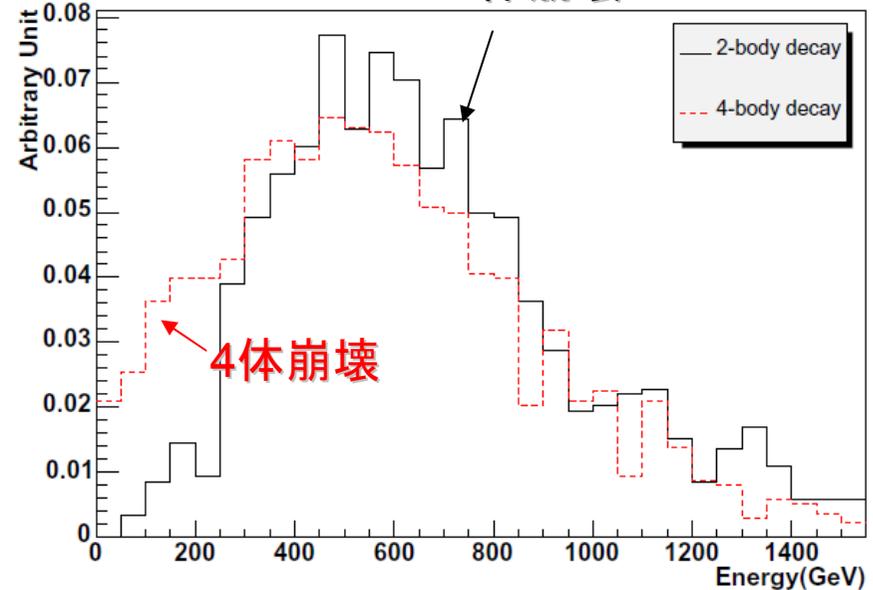
時間発展無し、greybody無し

光子のエネルギースペクトル



時間発展有り、greybody無し

2体崩壊



時間発展無し、greybody有り

時間発展有り、greybody有り

時間発展、grey-body factorの
有無による違い

Remnant崩壊による違い

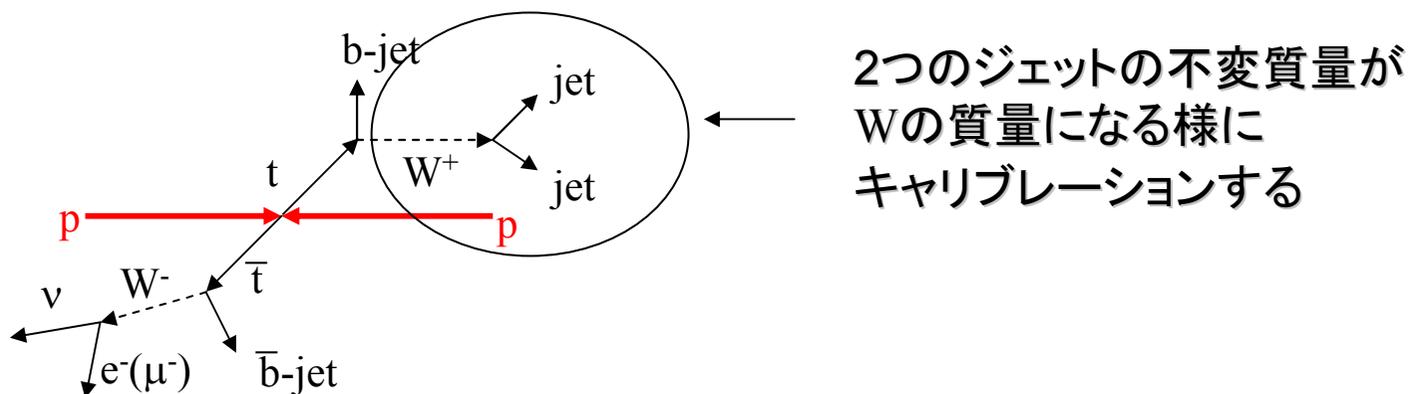
- 時間発展、grey-body factor共にエネルギースペクトルを高い方にシフトさせる
- Remnantからの崩壊数が多い方がエネルギースペクトルが小さい方にシフトする

誤差

- ルミノシティの測定誤差: $<5\%$
- ジェットのエネルギースケール(JES)の不定性: $\pm 10\%$ 動かしてみても見積もった
- レプトンのefficiencyの不定性による誤差
- バックグラウンドの見積もりで、ジェネレーターでのスケールの違いによる誤差: $+100\%$
- ブラックホールの生成断面積の理論的な不定性: 20%
- ブラックホールの崩壊違いによる誤差

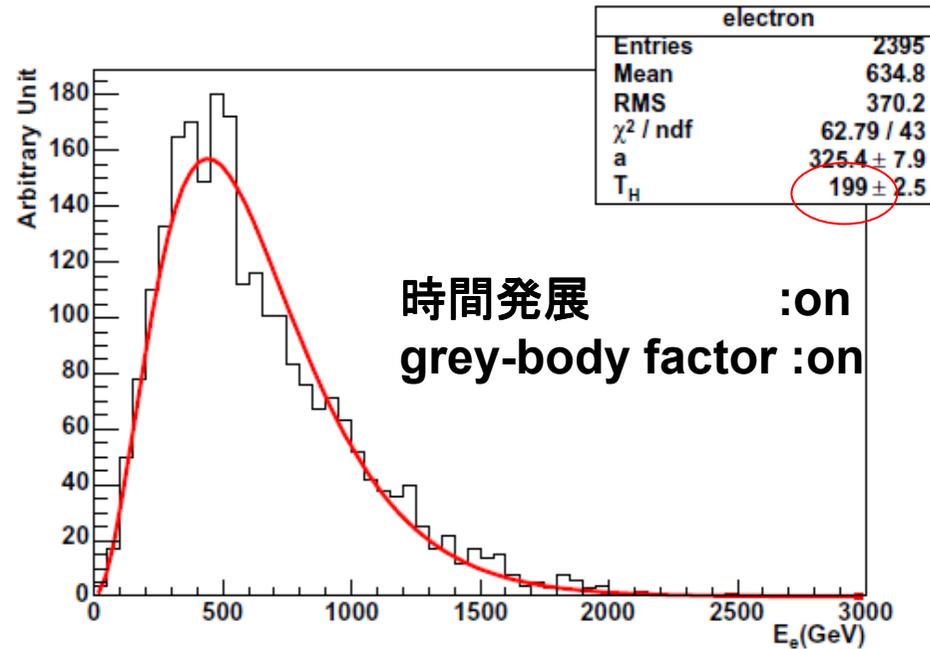
ジェットのキャリブレーション

- 40GeV < P_T < 200GeVの領域ではW->jjイベントなどにより、1%程度でJESのキャリブレーションが可能



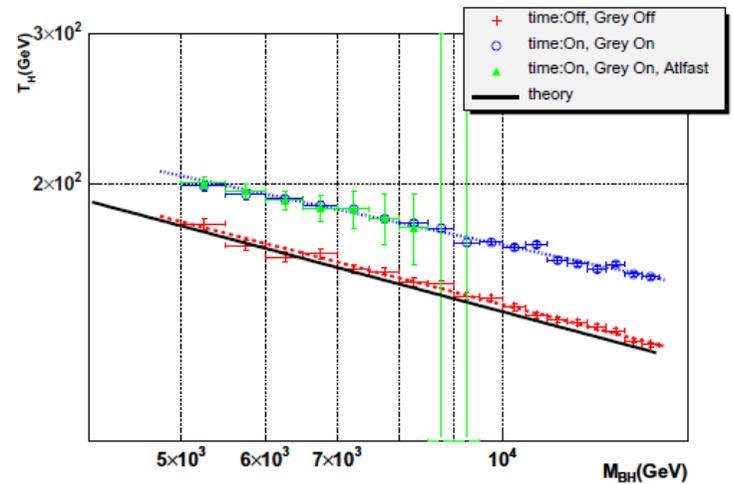
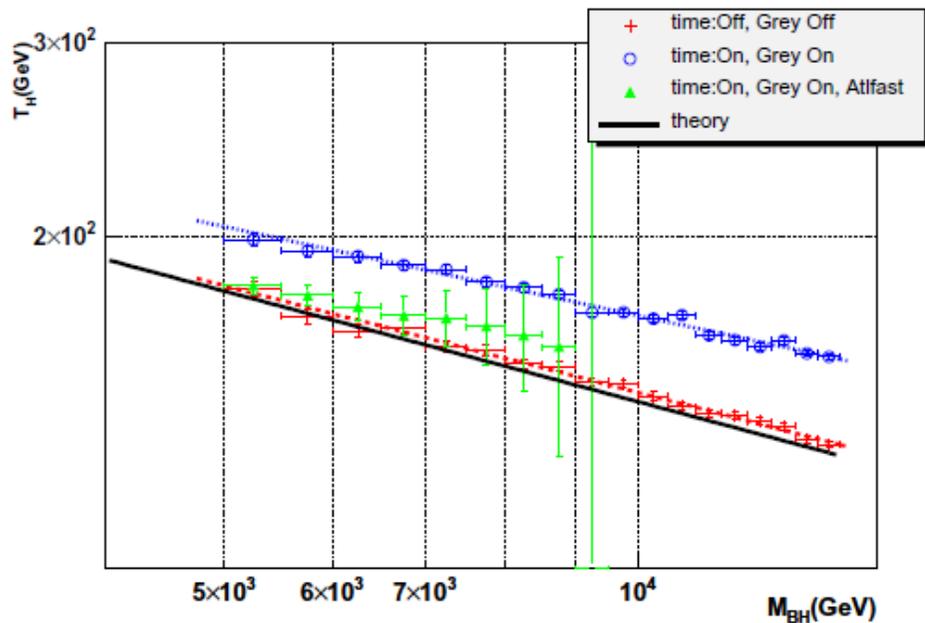
- 200GeV以上ではこの様なイベントが少ないためキャリブレーションに用いれない

ホーキング温度(時間発展やgrey-body factorの効果)

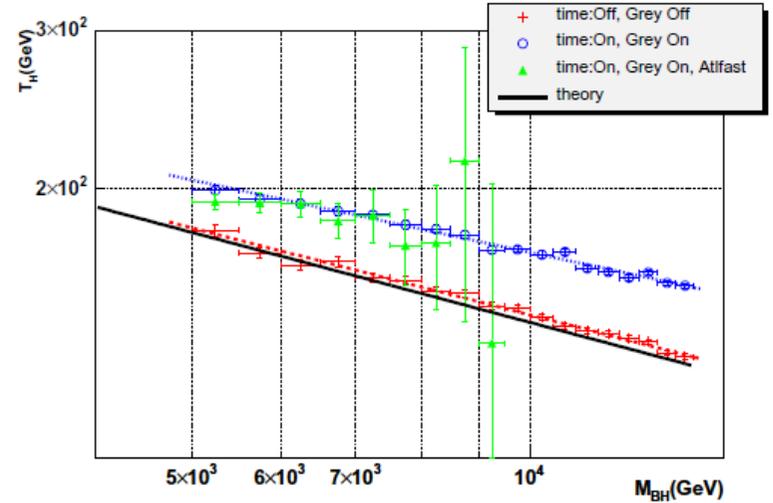


電子のエネルギースペクトル(Truth) ($M_p=1\text{ TeV}, n=2, M_{\text{BH}}=5-5.5\text{ TeV}$)

M_{BH} vs T_H (efficiency, smearingの効果)



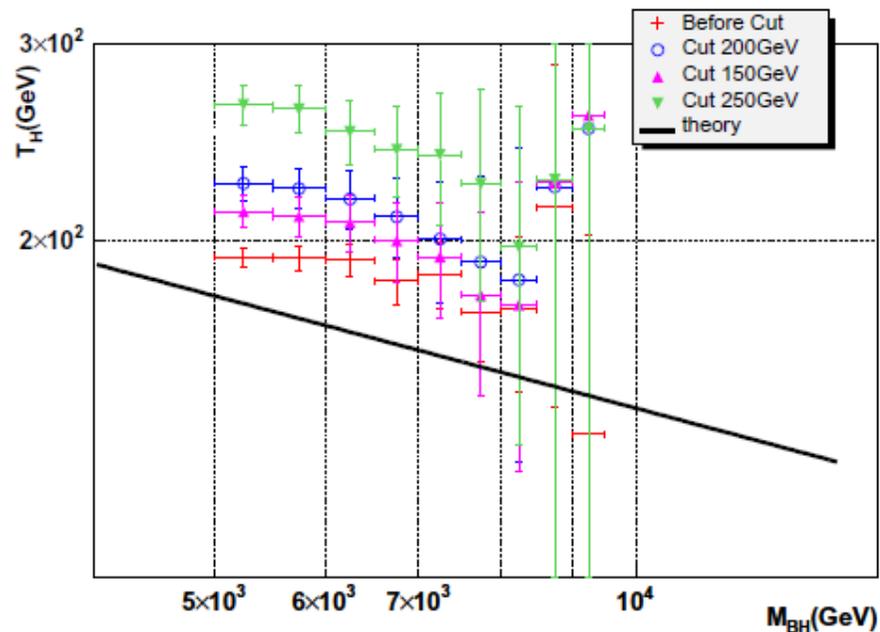
電子のefficiencyの効果を補正



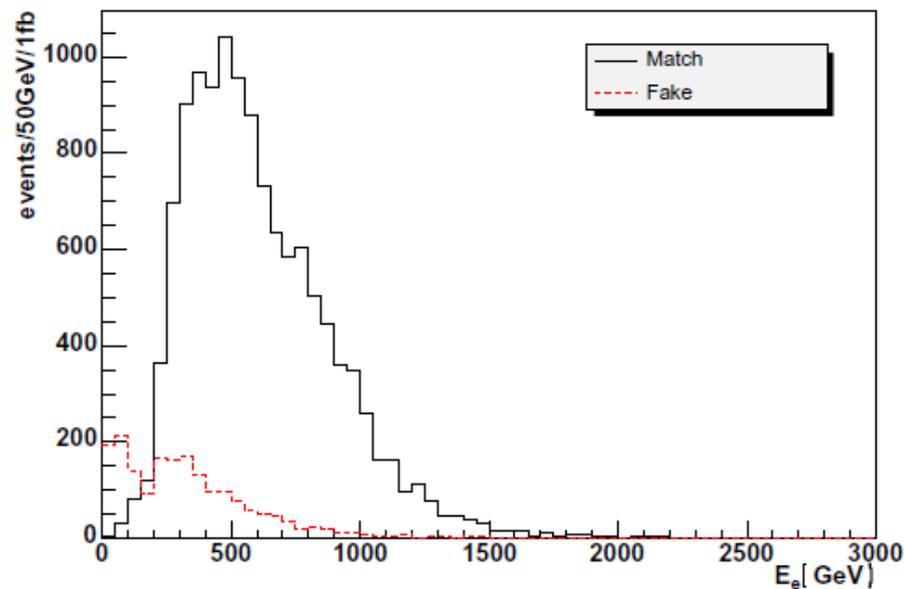
再構成された粒子と対応のついたTruthのみ
(電子のefficiencyの効果)

Smearing後

M_{BH} vs T_{H} (その他の効果)

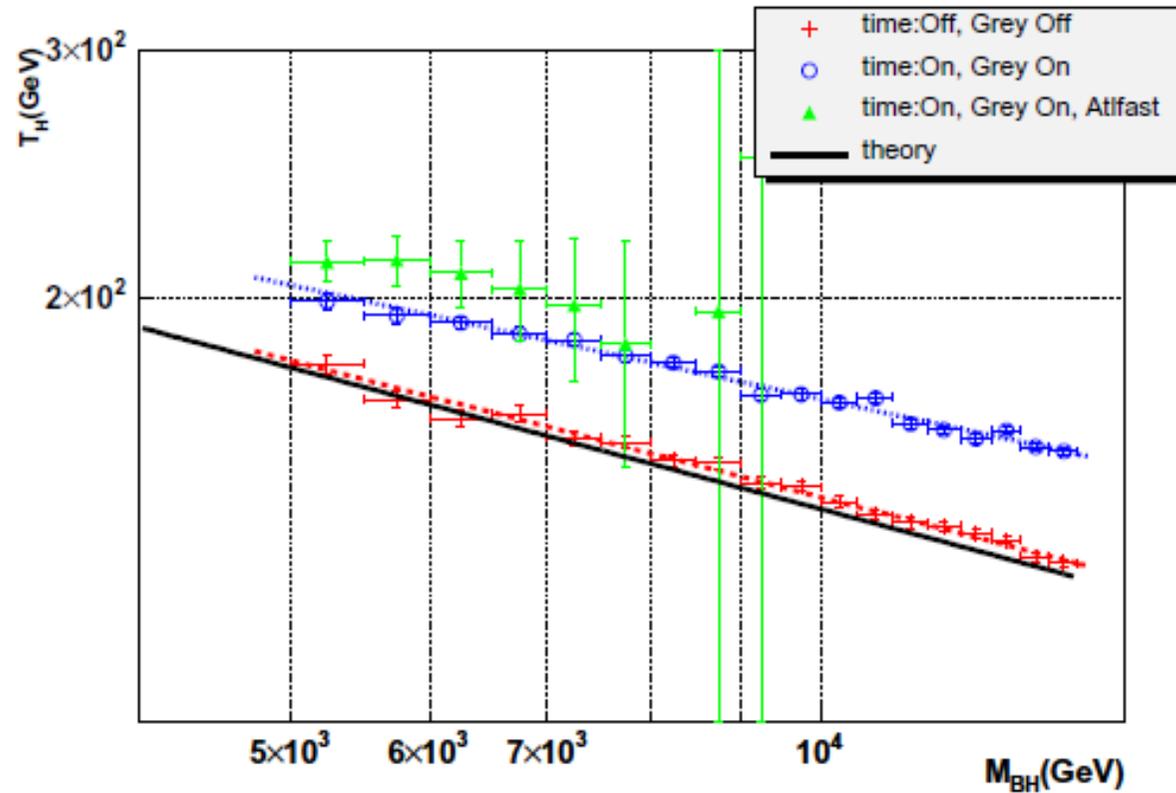


イベントセレクションの効果
(レプトンの横運動量に対するセレクション)



ブラックホールから直接放射された
電子とtop等の崩壊から来た電子の
エネルギー分布

M_{BH} vs T_{H}



電子のefficiencyだけを補正したもの
->他の補正をきちんとしないと難しい