

*ATLAS*でのBlackhole

LHC研究会@東京大学
「LHC が切り拓く新しい素粒子物理学」

東京大学素粒子センター
兼田 充

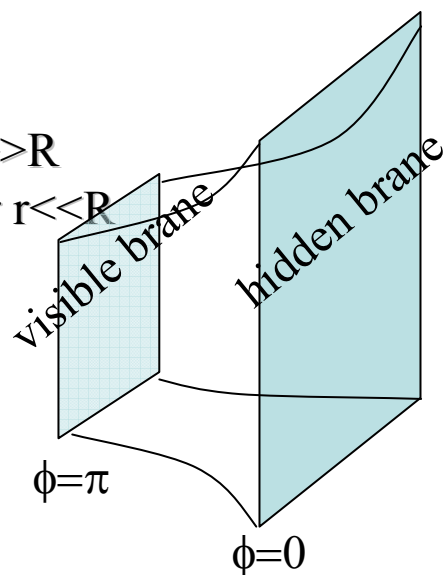
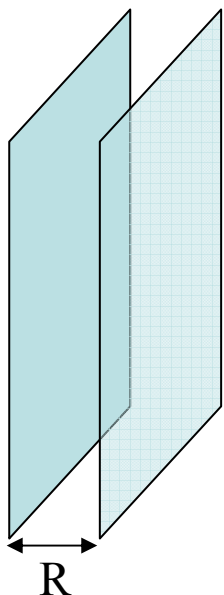
- 余剰次元
- Blackhole
- イベントの特徴
- イベントの再構成
- 発見能力
- 余剰次元の測定
- Non-Thermal Blackhole
- まとめ

余剰次元(ブレンワールド)

- 標準理論の階層性問題を解く一つの可能性: 余剰次元
 - 実はプランクスケールはTeV程度であるが、余剰次元の効果によって我々の感じる4次元では不自然に大きく見えている可能性がある
 - ADD, RSなどいくつか幾何学的に異なった理論がある

ADD

- バルクは平坦
- $V(r) \sim 1/(M_{\text{pl}}^2 r)$ for $r \gg R$
 $\sim 1/(M^{n+2} r^{n+1})$ for $r \ll R$
- $M_{\text{pl}}^2 \sim M_D^{n+2} R^n$



RS

- バルクは反ドジッター時空
- Scale $\phi = M_{\text{pl}} \exp(-kr\pi) = \text{TeV}$
 - $kr \sim 11-12$
- $c = k/M_{\text{pl}} \sim 0.01-0.1$
- $\tilde{M} = \Lambda_\pi c^{1/3}$
- KK resonance:
 - $m_n = kx_n \exp(-kr\pi)$ ($x_n = \sqrt{J_n}$)
 - $\sim \text{TeV} (n=1)$

- いろいろあるが、Blackholeを考える上で重要なのは $M_{\text{BH}} \gg 1/r_s \sim M_D(\tilde{M})$ が LHCで可能な範囲であること。

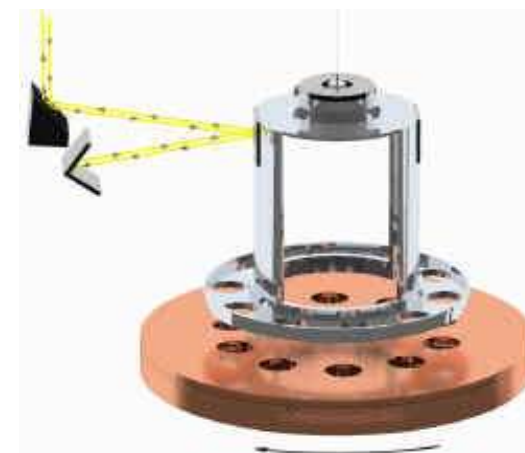
実験的制限 1

Tabletop:

ねじれ振子

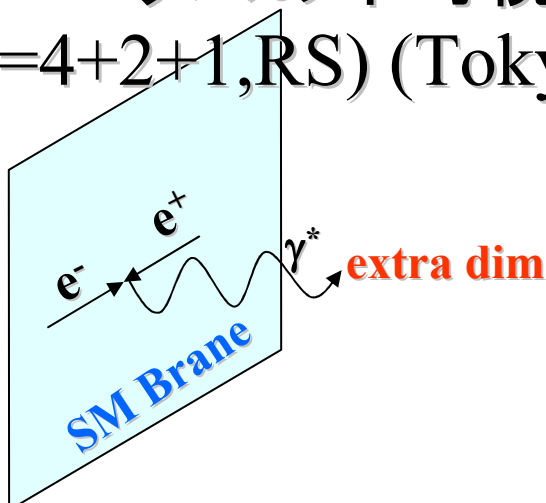
$: R < 44 \mu\text{m}, M_D > 3.2 \text{TeV} (n=2)$

(Washington)



オルソポジトロニウムの不可視崩壊:

$k > 0.42 \text{TeV} (d=4+2+1, RS) \text{ (Tokyo)}$



実験的制限2

➤ 加速器:

➤ $e^+e^- \rightarrow \gamma G$:

$M_D > 1.5 \text{ TeV} (n=2, \text{ADD})$ (LEP)

➤ $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ の散乱角度測定:

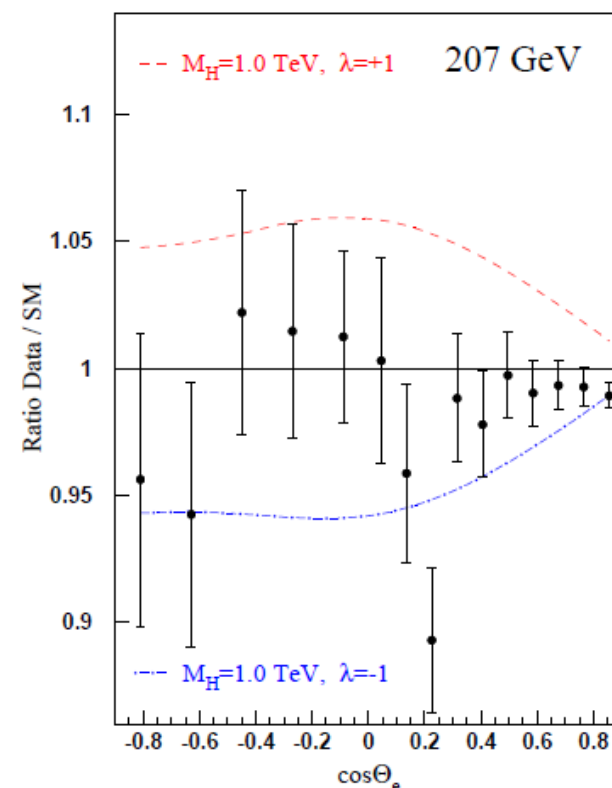
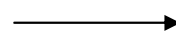
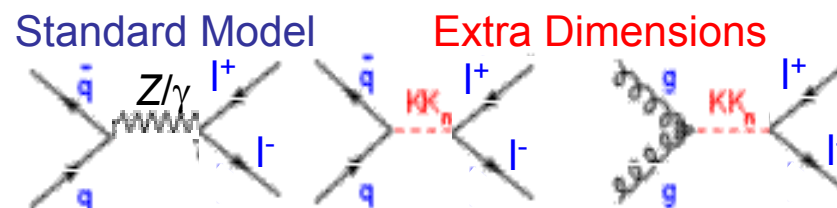
$M_D > 1.1 \text{ TeV} (\text{ADD})$ (LEP)

➤ Monojet + missing E_T :

$M_D > 1.33 \text{ TeV} (n=2, \text{ADD})$
(Tevatron)

➤ KK graviton (resonance) search:

$\tilde{M} > 0.5 \text{ TeV} (5\text{dim}, \text{RS})$
(Tevatron)



実験的制限3

宇宙線

- SupernovaのKK graviton放出:

$$M_D > 22 \text{ TeV} \quad (n=2, \text{ADD})$$

(Kamiokande and IMB)

- Ultra high-energy cosmic-ray neutrinosと大気の衝突でのBlackhole探索:

$$M_D > 1.0 \text{ TeV} \quad (n=5, \text{ADD})$$

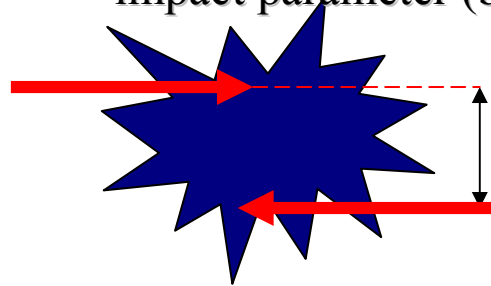
(AGASA, HiRes, RICE)

- これらは非常に強い制限がついているが、色々と仮定が多いので一概に加速器の結果とは比べられない

ブラックホールの生成

■ $\sqrt{s} = M_{BH}$ の粒子の衝突を考える。

■ impact parameter (b) がシュワルツシルト半径 (r_s) より小さい場合、BHは生成される



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

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

b: impact parameter

r_s : シュワルツシルト半径

M_D : (4+n)-dimでの

プランクスケール

n: 余剰次元の数

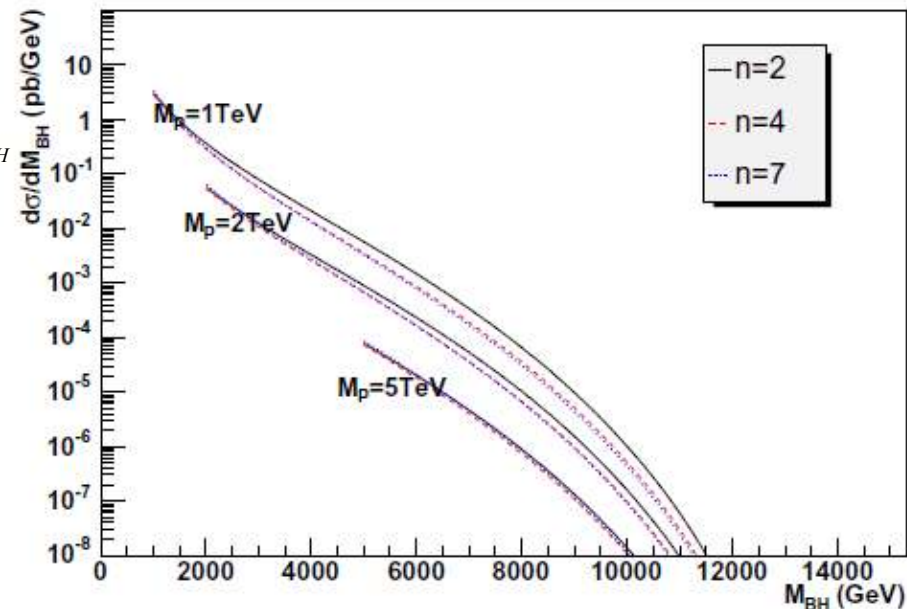
$\sim 100\text{pb} (M_D \sim M_{BH} \sim \text{TeV})$: 非常に大きい

■ 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)



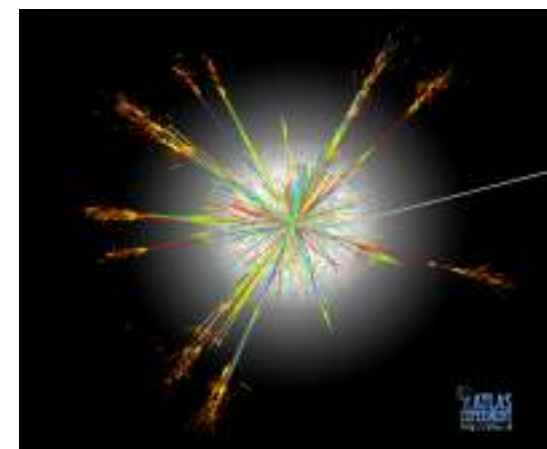
ブラックホールの崩壊

- $\sim 10^{-26}\text{s}$ のうちに崩壊し、大量の高エネルギー粒子を放出する
- 崩壊過程は次の4段階に分けられる
 - **Balding Phase**: ゲージ粒子や重力子を古典的過程で放出して、charge, spin, massだけで特徴付けられる状態になる
 - **Spin down Phase**: 衝突の際に生まれる非常に大きな角運動量を角運動量の大きな粒子を放出して失う
 - **Schwarzschild Phase**: Hawking radiationで粒子を放出し、縮小する
 - **Planck Phase**: $M_{\text{BH}} \sim M_{\text{D}}$ ではquantum gravityが必要
...Remnant?
- Hawking radiation以外はまだまだ理論的に難しい...

オッズ

LHC Stakes [Science 315 (2007)1657]

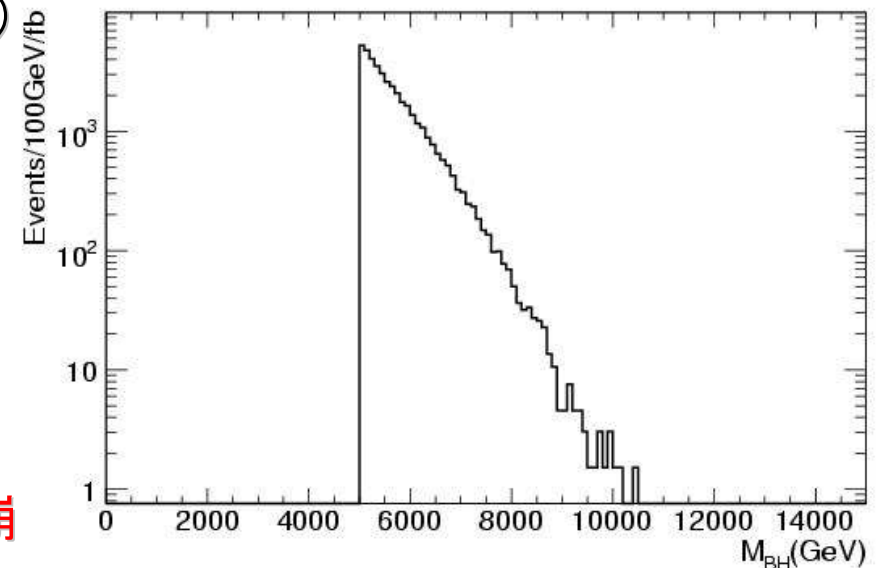
Discovery	Comments	Odds
SM Higgs	As good as discovered, some say	2-1
Big surprises	Expected the unexpected	2-1
Supersymmetry	Too beautiful to be wrong?	5-1
Extra dimensions	More an inspired guess than a prediction	14-1
Composite electrons, etc.	Bigger fleas have littler fleas...	14-1
Leptoquarks	Weird particles hinted at by another collider	49-1
Nothing	Be careful what you wish for	7-1



Fermiの300人の研究者に聞いた結果
(ちなみに、イギリスのブックメーカー(Ladbrokes,2004)では、
2010年までにCERNでHiggsが見つかる、に対するOddsが6-1)

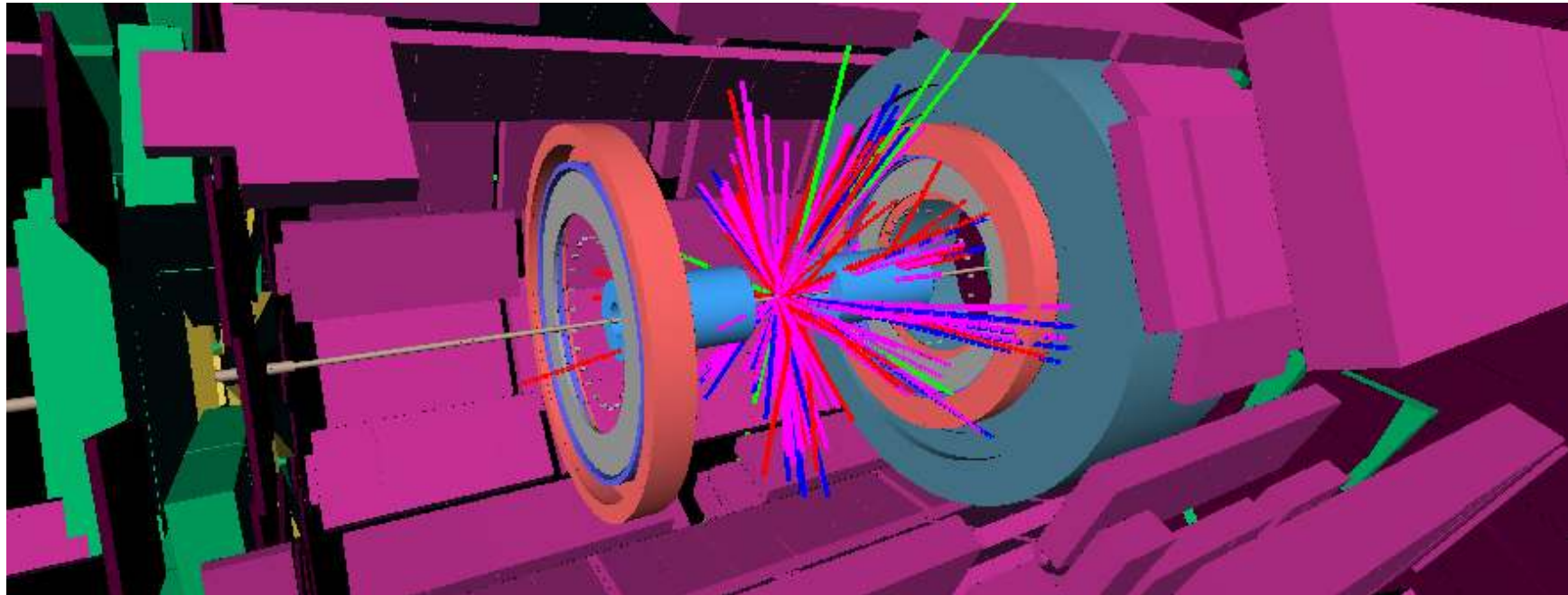
Charybdis: Blackhole Generator

- 現在ATLASで使用しているGenerator (CMSもこれ)
- $\sigma_{\text{BH}} = F_n \pi r_s^2$ (全てのnで $F_n = 1$ としている)
- BHの質量の下限値もパラメーター
- 崩壊過程でBalding phase, Spin-down phaseは無視
- Hawking radiationの際に、時間発展 (BHの質量の減少)、grey-body factorを考慮
- 重力子の放出や余剰次元空間への崩壊は出来ない
- Hawking radiationで、 $M_{\text{BH}} \sim M_{\text{D}}$ になった時、Remnant状態として、単純に2体崩壊させている



Charybdisで生成した
Blackholeの質量分布

ブラックホールイベント



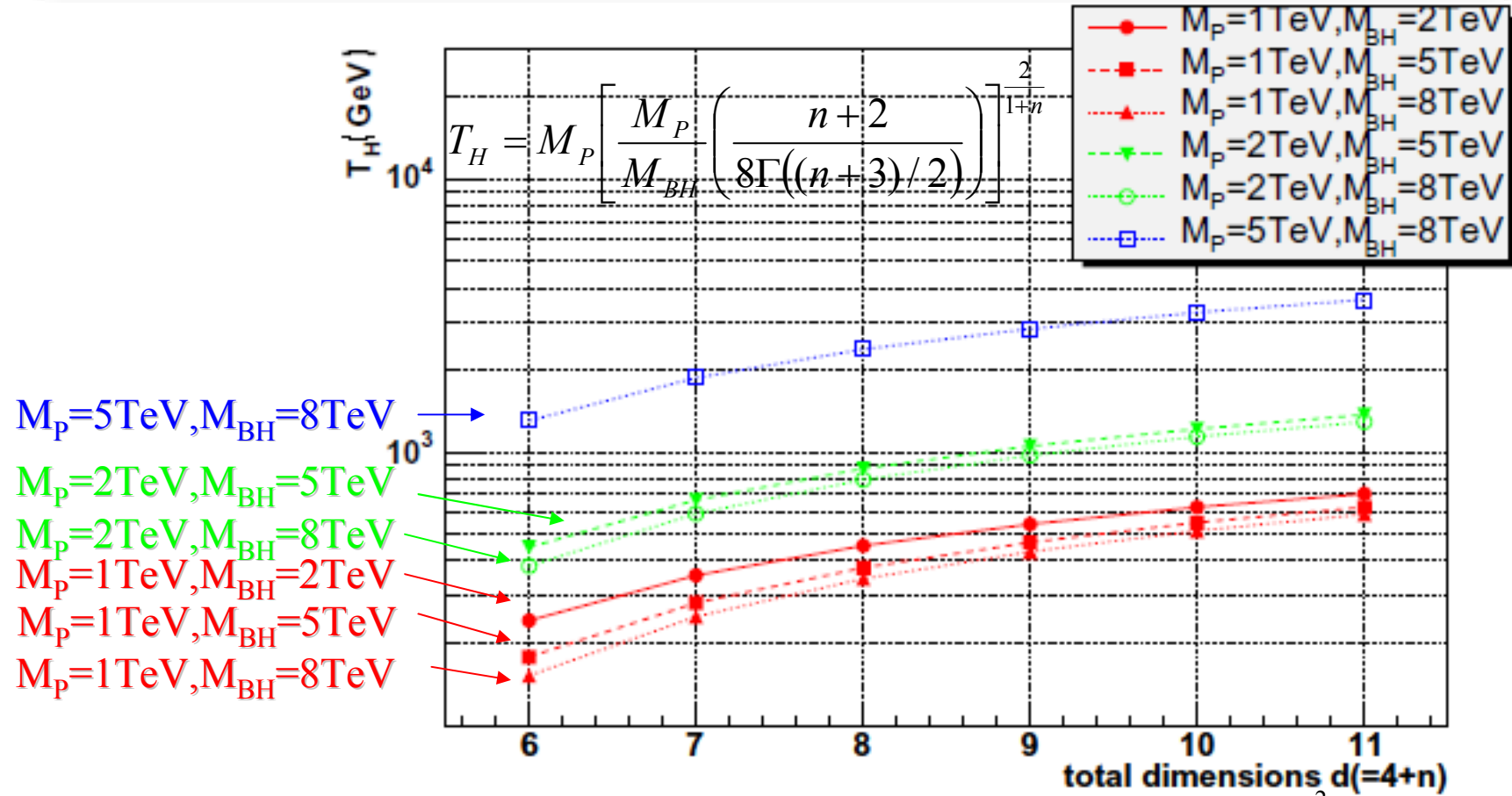
ブラックホールイベント($M_{\text{BH}}=5\text{TeV}$, $n=2$, $M_{\text{D}}=1\text{TeV}$)

(ATLASイベントディスプレイ, v-atlas)

大量の高エネルギー粒子を放出、非常に混み混みなイベント

Full simulationで1時間/event、、、

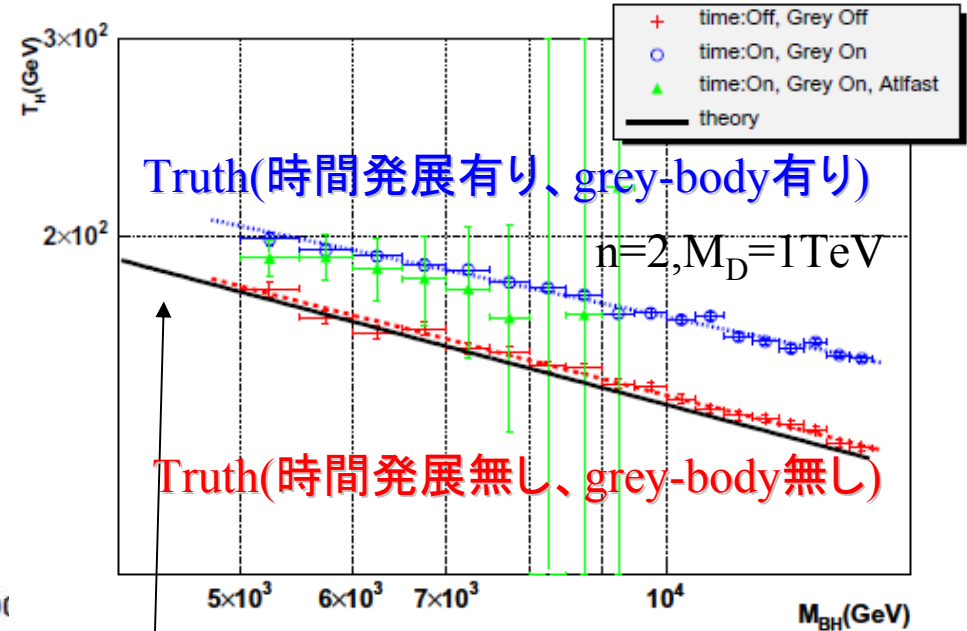
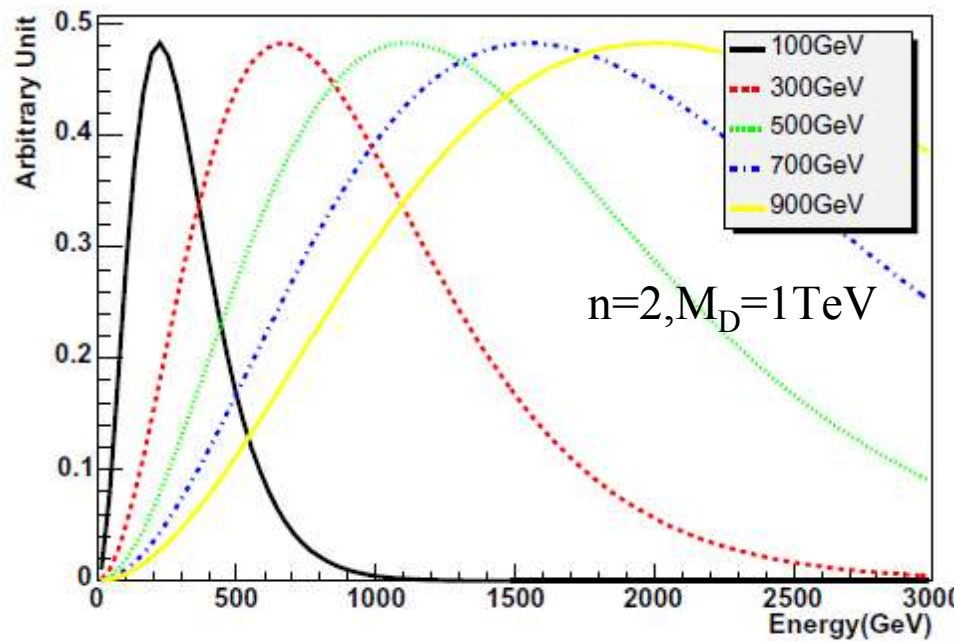
ホーキング温度



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)

Hawking radiation



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

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

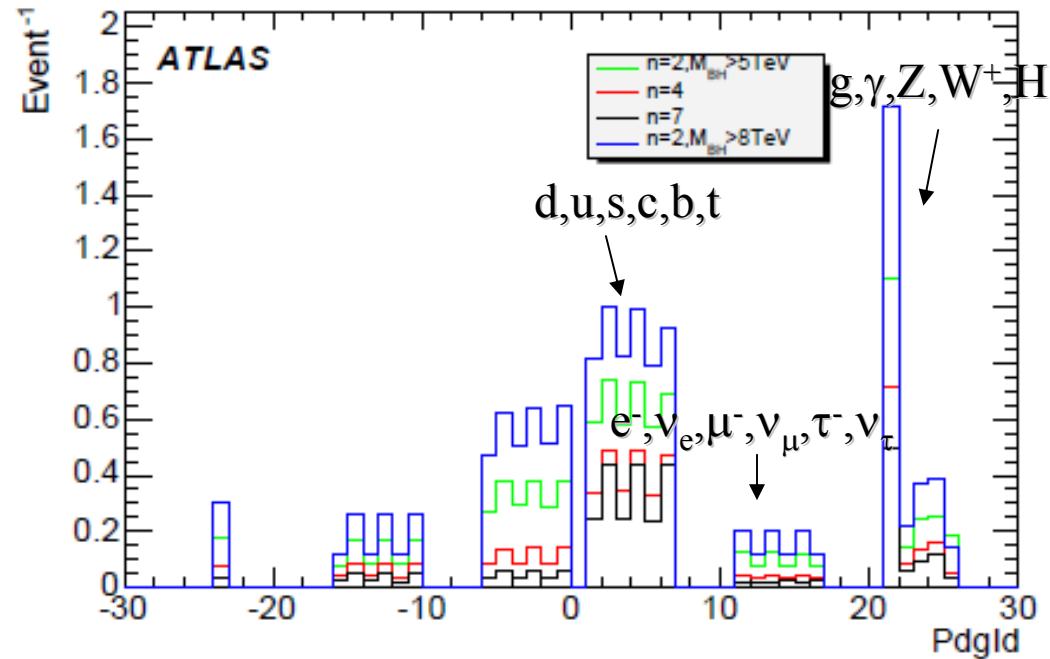
理論曲線

$$T_H \text{ vs. } M_{BH}$$

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

grey-body factor等の効果、さらに検出器の効果
まで考えるとこの曲線を単純にFitしてn, M_Dを求
めるのは難しい

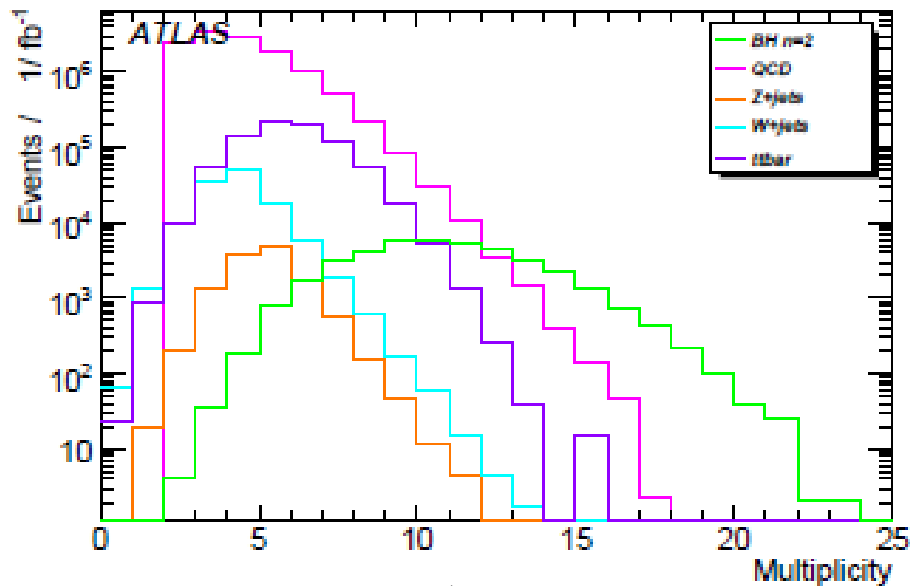
放出粒子



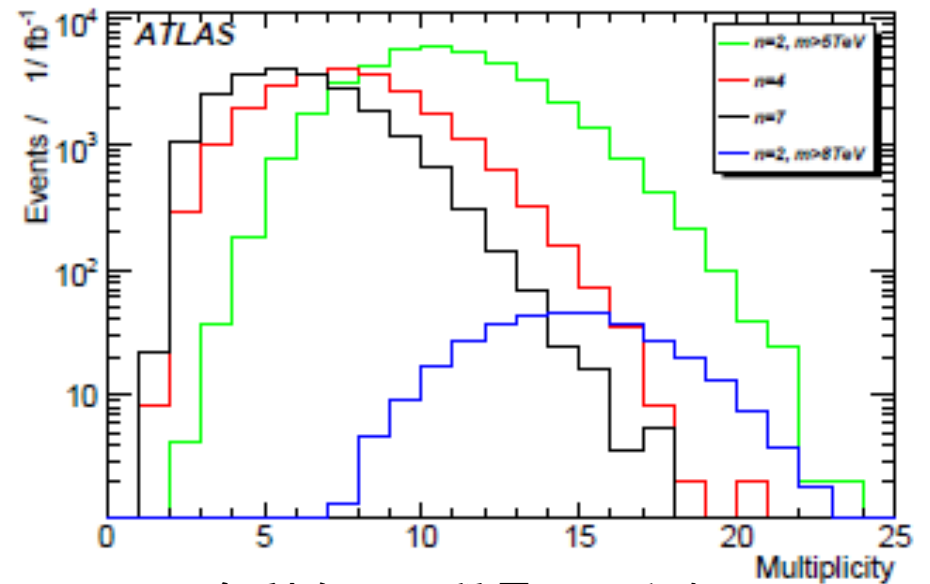
BlackHokeから放出される粒子の種類

- Charybdisでは全てのSM粒子(含Higgs)がランダムに選ばれて(自由度によってweightをかける)
 - 重力子や余剰次元への崩壊が無い**ため、missing E_T の起源は ν のみ**
- 衝突した粒子から、バリオン数、カラー、電荷が保存する様に放出される
- n が大きいほど T_H が大きい
 - 高エネルギーの粒子が放出されやすい
 - 放出される粒子の数は少ない

Multiplicity

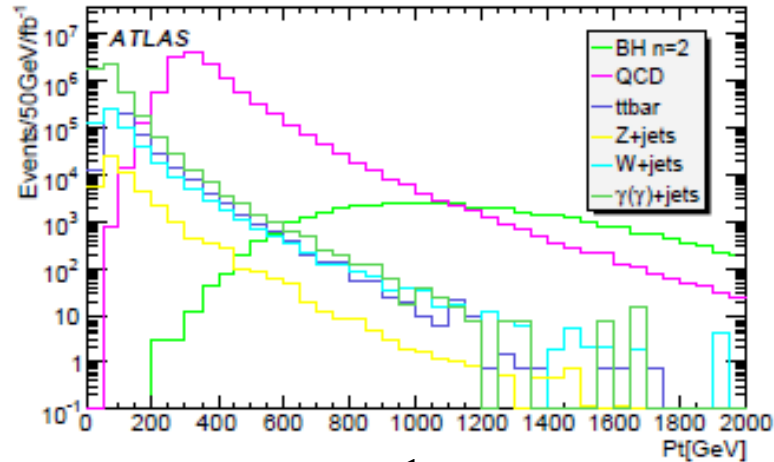


SMバックグラウンドとの比較

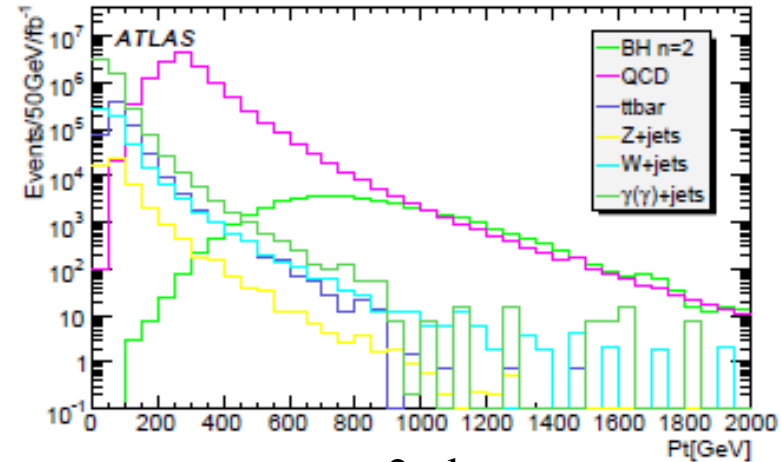


余剰次元や質量による違い

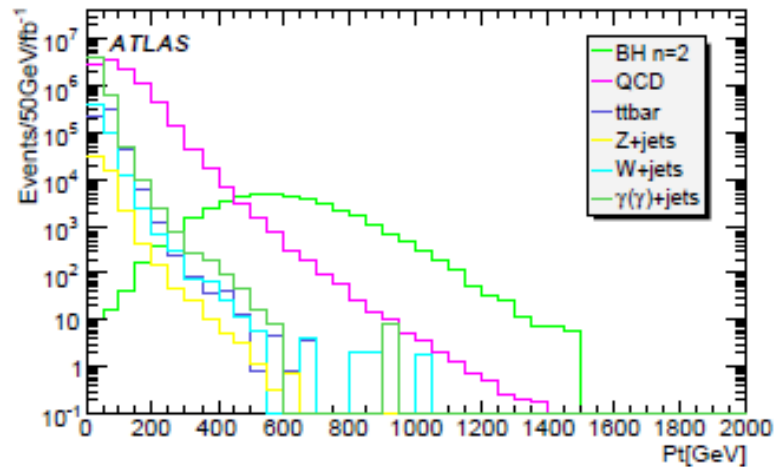
放出粒子の P_T



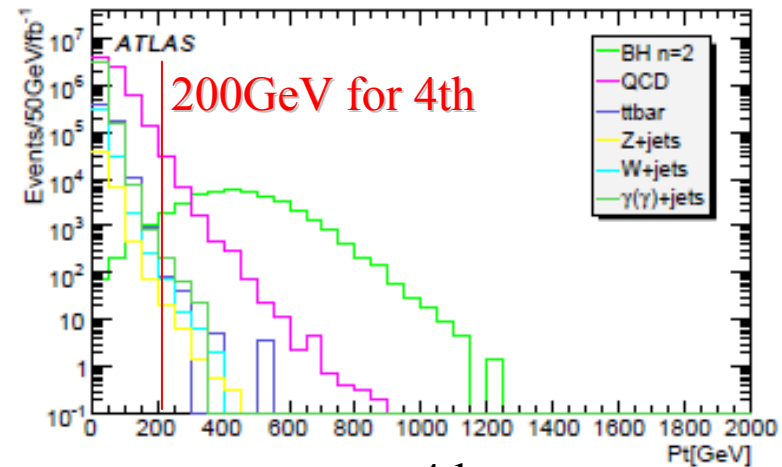
1st



2nd



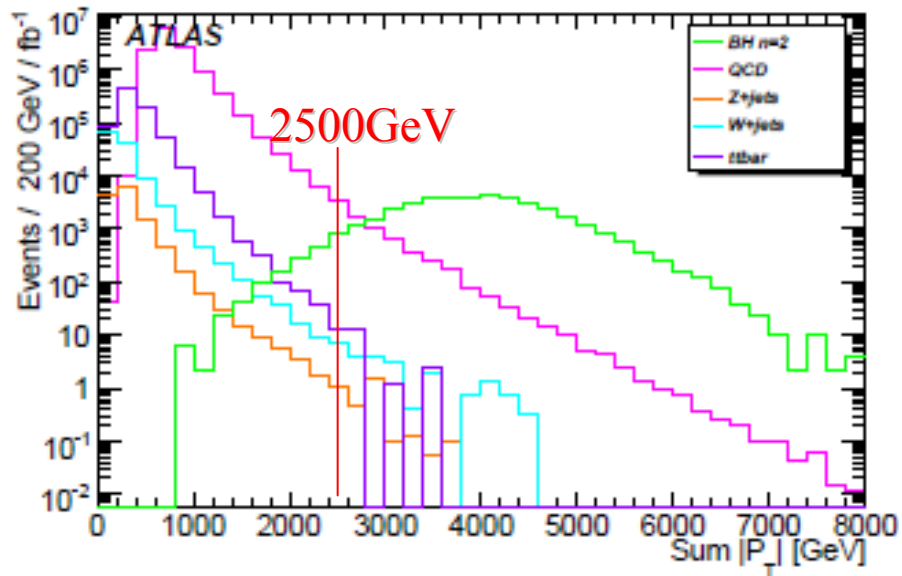
3rd



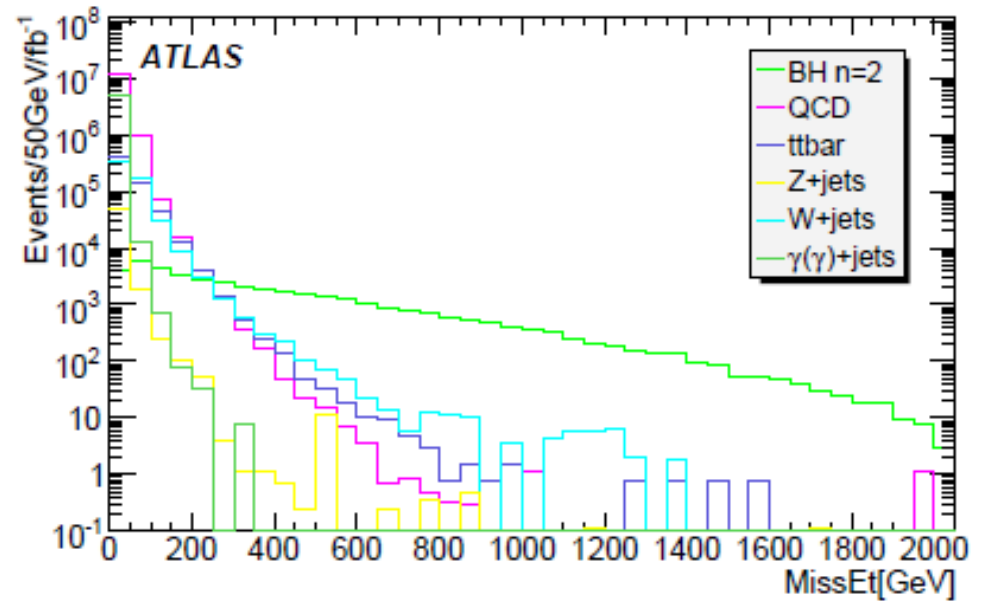
4th

4つ目の粒子も十分に大きな P_T の粒子を放出している

SumP_T, Missing E_T

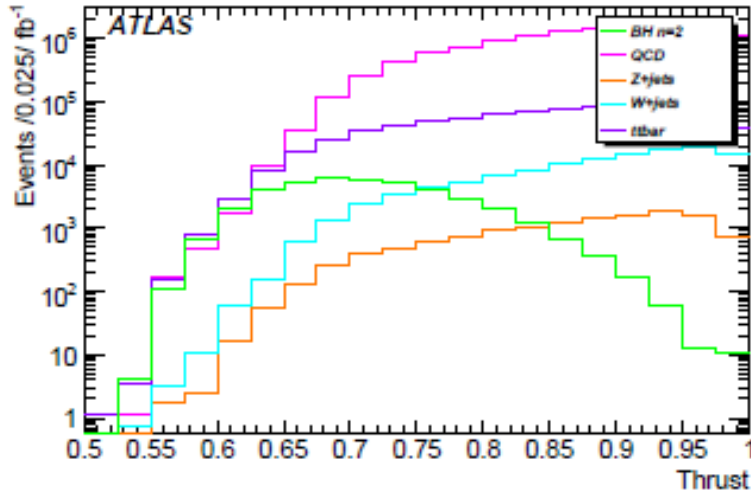


SumP_T(=Σ_{all part})

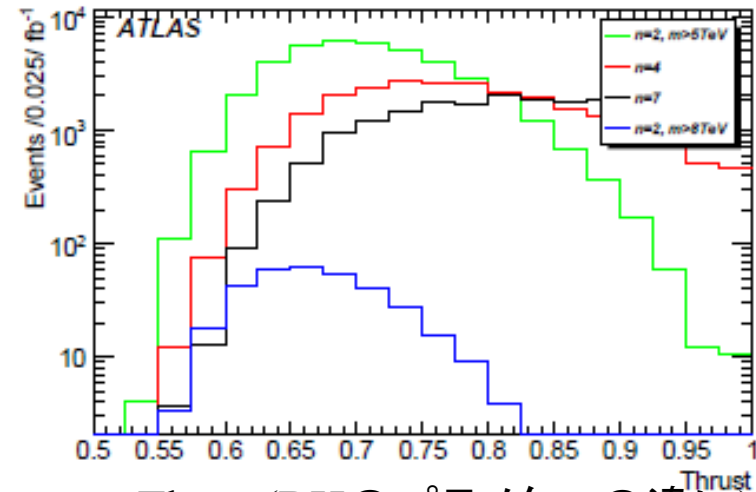


MissingE_T

Thrust, Sphericity

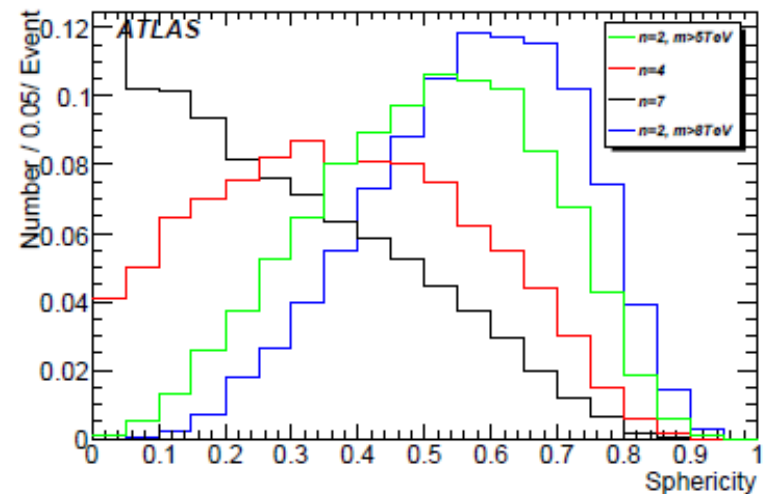


Thrust(BGとの比較)



Thrust(BHのパラメターの違い)

- $n=2$ の場合などは、multiplicityが高いため比較的丸いイベントである一方、 n が大きくなるとSMとあまり変わらない
 - 現在、イベントセレクションへはこれらの値は入れていない
 - 発見後の余剰次元の数の情報源となる可能性がある



Sphericity(BHのパラメターの違い)

トリガー

$n=2, M_D=1\text{TeV}, M_{\text{BH}}>5\text{TeV}$

Trigger	LVL1	LVL2	EF
Jet100	1	1	1
Jet400	0.997	0.997	0.997
3Jet100	0.998	0.998	0.998
3Jet250	0.972	0.971	0.971
4Jet100	0.985	0.985	0.985
4Jet250	0.865	0.862	0.862

$n=4, M_D=1\text{TeV}, M_{\text{BH}}>5\text{TeV}$

Trigger	LVL1	LVL2	EF
Jet100	1	1	1
Jet400	0.997	0.997	0.996
3Jet100	0.952	0.952	0.952
3Jet250	0.886	0.885	0.885
4Jet100	0.807	0.806	0.806
4Jet250	0.612	0.607	0.607

$n=7, M_D=1\text{TeV}, M_{\text{BH}}>5\text{TeV}$

Trigger	LVL1	LVL2	EF
Jet100	1	1	1
Jet400	0.990	0.987	0.985
3Jet100	0.807	0.806	0.805
3Jet250	0.710	0.704	0.704
4Jet100	0.525	0.522	0.522
4Jet250	0.343	0.341	0.341

▶ Jet400: Lumi = $10^{-31}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で SM process $< 0.1\text{Hz}$

▶ Prescaling 無しのジェットトリガー

▶ BH $\sim 5\text{mHz}$ 、Efficiency $\sim 100\%$

▶ トリガーは問題なし

Particle selection

Muon

- StacoMuon
- Combined Muon
- $|\eta| < 2.5, P_T > 15 \text{ GeV}$
- $\text{etcone}20 < \min(100, 0.2P_T + 20) \text{ GeV}$
- match $\chi^2 < 100$

Electron

- Egamma (not soft)
- $|\eta| < 2.5, P_T > 15 \text{ GeV}$
 - Except for $1.00 < |\eta| < 1.15,$
 $1.37 < |\eta| < 1.52$
- $\text{IsEM} \& \text{0x3ff} = 0$
 - Overlap removal: $\Delta R < 0.1$ with the following order
 - $\mu \rightarrow e \rightarrow \gamma \rightarrow \text{jet}$

Photon

- Egamma
- $|\eta| < 2.5, P_T > 15 \text{ GeV}$
- $\text{IsEM} \& \text{0xff} = 0$

Jet

- Cone4 Tower
- $|\eta| < 5, P_T > 20 \text{ GeV}$

Blackholeイベントでは、イベントに出てきた全ての粒子を基本的にBHから出てきたものとする。他のイベントに比べて非常に混んでるイベントなので、isolation等のカットを緩くする必要がある。

イベントセレクション

- ⇒ イベント中の全ての粒子(e, μ , γ , jet)を用いる
- ⇒ 現在は2種類のイベントセレクションを考えている

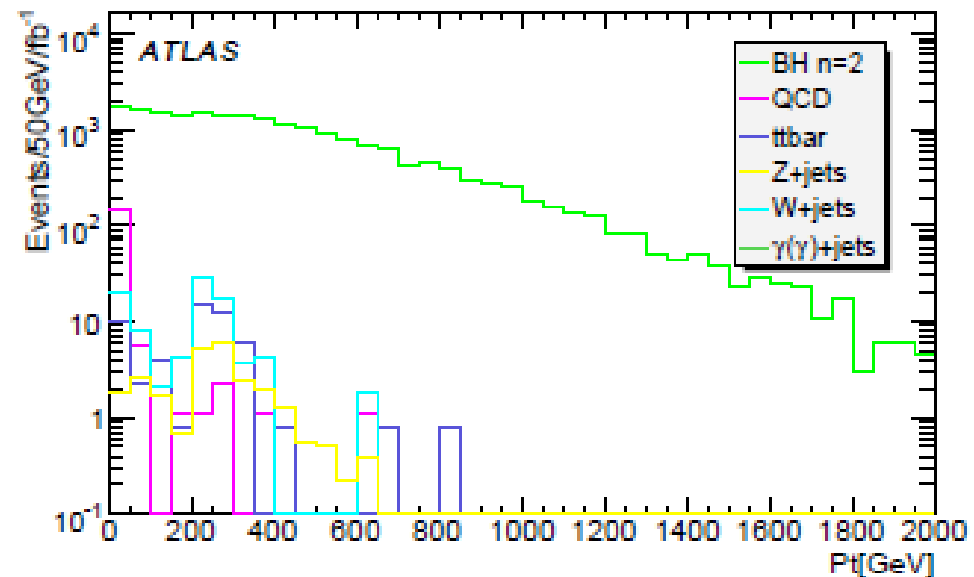
1. Sum Pt Cut

- ⇒ $\sum |P_T| > 2.5 \text{ TeV}$
- ⇒ At least one lepton $P_T > 50 \text{ GeV}$
 - ⇒ Multiplicityの低い物にも対応
 - ⇒ 最近指摘された、non-thermal BHにも対応(後述)

2. Multi particles Cut

- ⇒ Number of Particles ($P_T > 200 \text{ GeV}$) > 3 including at least one lepton
 - ⇒ ブラックホールの特徴である、高エネルギー粒子を大量に放出するイベントに対応

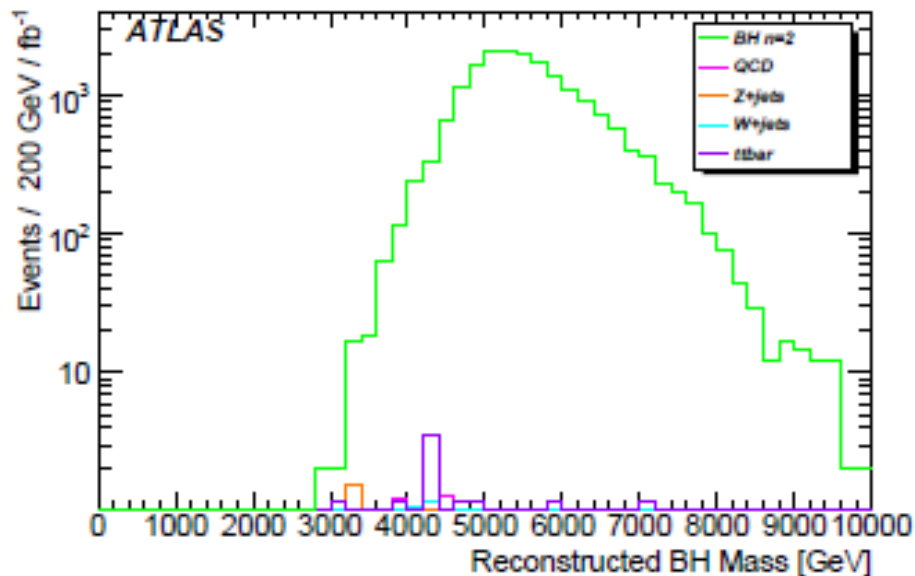
- ⇒ 共にleptonを要請することで、特にQCD BGを落としている



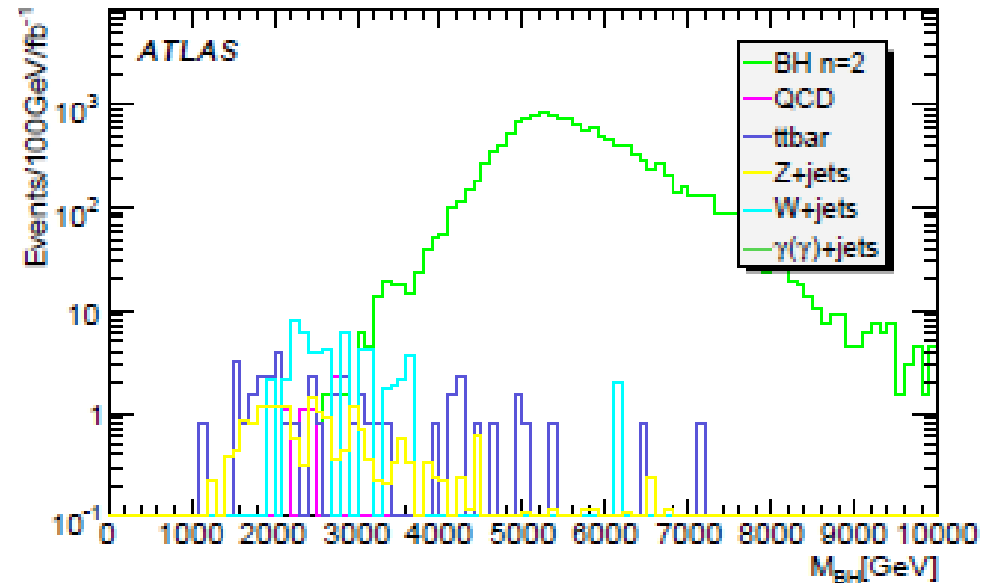
Leptonの P_T 分布 $N_{(P_T > 200 \text{ GeV})} > 3$ のカット後

ブラックホールの質量の再構成

1. Sum Pt Cut



2. Multi particles Cut



M_{BH} distributions after each selection (signal: M_{BH} > 5 TeV, n=2, M_D = 1 TeV)

M_{BH} is calculated as:

$$P_{BH} = \sum_{i=\text{all particles}} P_i + (\text{miss}E_T, \text{miss}E_{Tx}, \text{miss}E_{Ty}, 0)$$

$$M_{BH} = \sqrt{(P_{BH})^2}$$

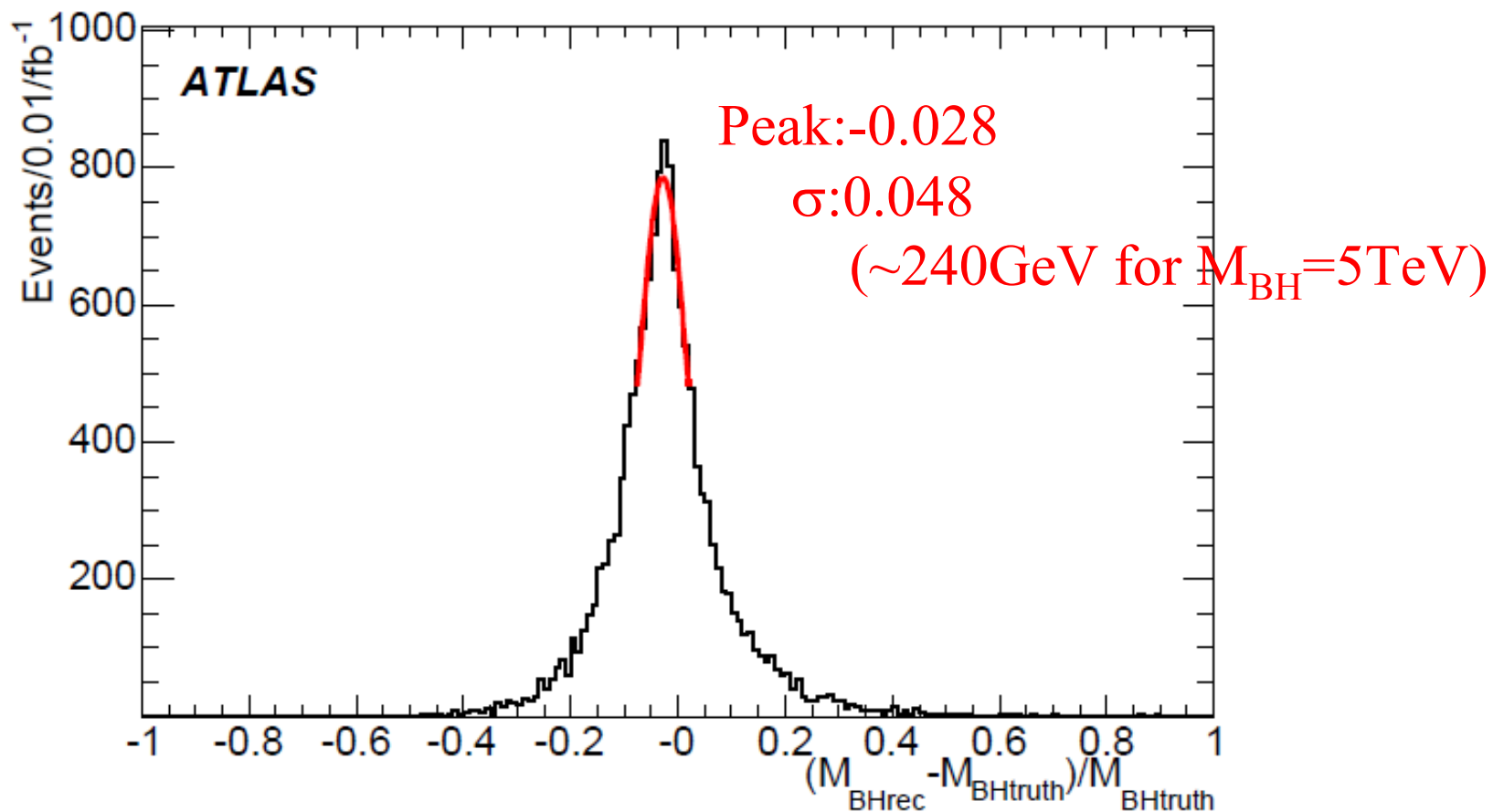
Cut後のイベント数

2.Multi particles Cut

Dataset	Events before cuts (1 fb^{-1})	Events passing multi-object cuts (1 fb^{-1})	Events passing lepton cut (1 fb^{-1})	Acceptance
$n=2, M_p=1 \text{ TeV}, M_{\text{BH}} > 5 \text{ TeV}$	40690	38860 ± 397	13999 ± 238	0.34
$n=4, M_b=1 \text{ TeV}, M_{\text{bu}} > 5 \text{ TeV}$	24320	17856 ± 251	4521 ± 126	0.19
$n=7, M_p=1 \text{ TeV}, M_{\text{BH}} > 5 \text{ TeV}$	22270	9953 ± 185	1956 ± 82	0.087
$n=2, M_p=1 \text{ TeV}, M_{\text{BH}} > 8 \text{ TeV}$	338	338 ± 4	164 ± 3	0.49
$t\bar{t}$	833000	129 ± 27	36_{-9}^{+12}	0.000043
QCD dijets	12836131	38938 ± 1899	6_{-3}^{+107}	5.6×10^{-7}
W+jets	560050	99_{-22}^{+28}	56_{-13}^{+24}	0.0010
Z+jets	51807	29_{-4}^{+90}	19_{-3}^{+90}	0.0004
$\gamma(\gamma)$ +jets	5070051	285_{-76}^{+87}	0_{-0}^{+40}	$< 10^{-5}$

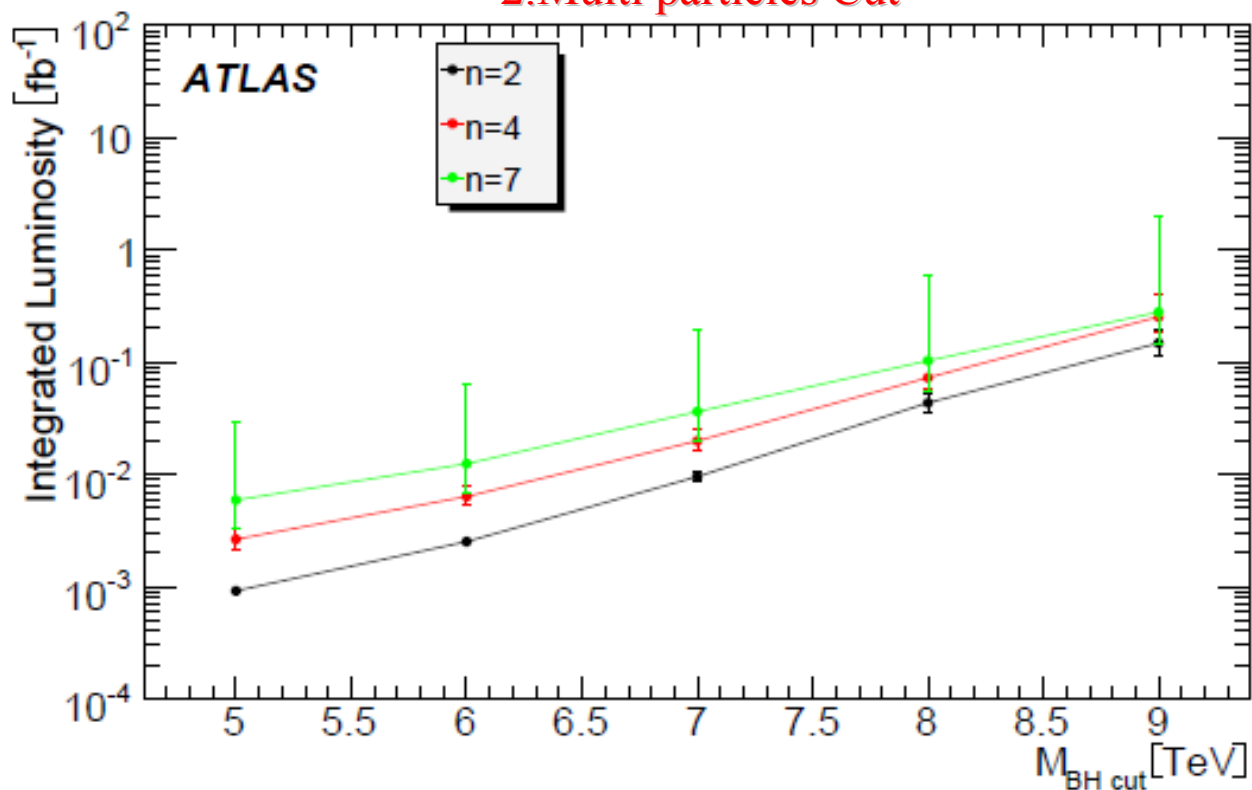
質量の分解能

2. Multi particles Cut



発見能力

2. Multi particles Cut



ブラックホール発見に必要なluminosity

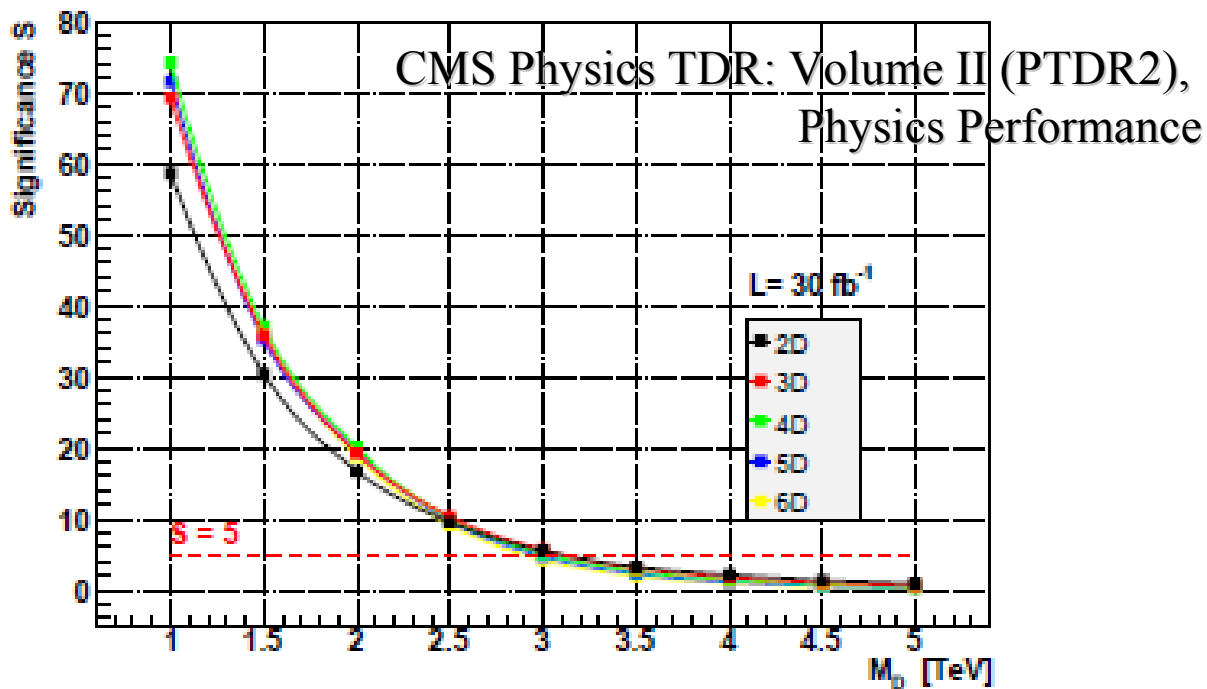
$M_{\text{BH cut}}$ は再構成された M_{BH} にかけるイベントセレクション($M_{\text{BH}} > M_{\text{BH cut}}$)

1日分のデータ量(10pb⁻¹)で十分発見可能である

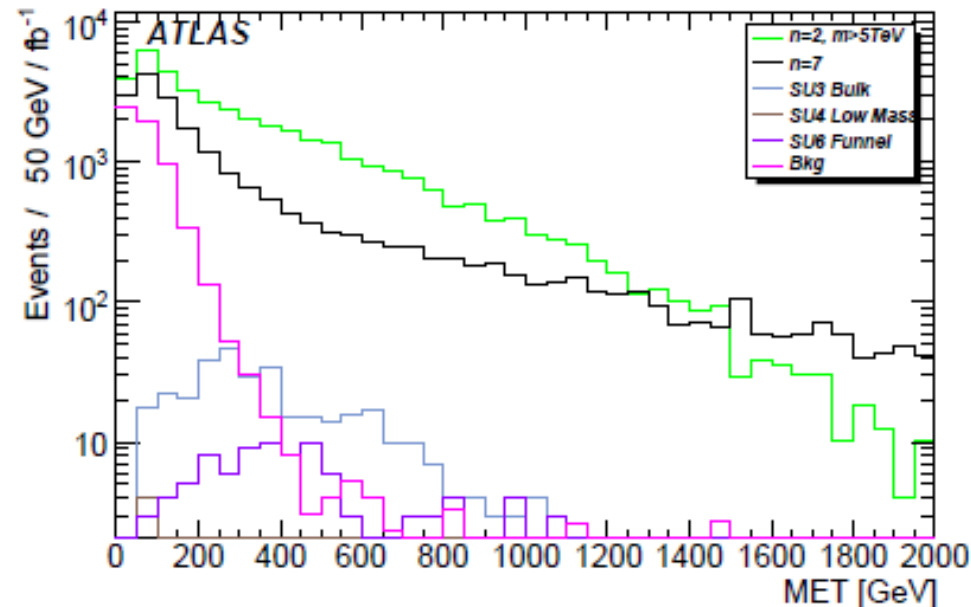
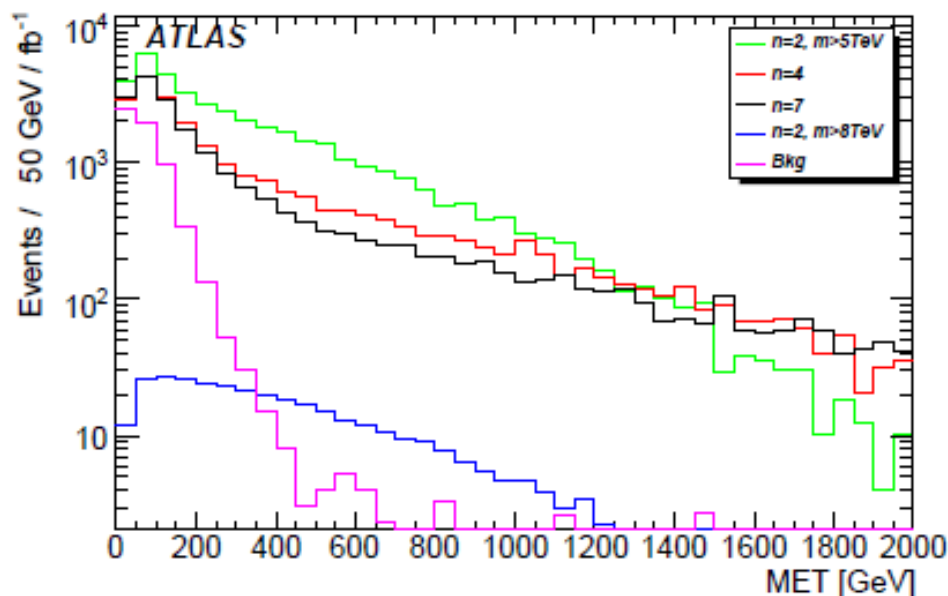
CMS

$M_D = 2\text{TeV}$
 $n = 2$
 $M_{BH} > 4\text{TeV}$

Cut	Signal	tt+nj	W+nj	Z+nj	QCD Dijet	WW+nj
Cross Section (pb)	18.85	371	896	781.84	33076.8	269.91
Events (10fb^{-1})	188500	3.71×10^6	8.96×10^6	7.82×10^6	3.31×10^8	2.70×10^6
$M_{Inv} > 2\text{TeV}/c^2$	18.71	13.29	6.53	3.85	2634.94	20.53
Tot. Multiplicity > 4	17.72	13.25	6.43	3.84	2613.18	20.42
Sphericity > 0.28	9.27	1.60	0.23	0.10	53.74	0.07
Final No.Events (10fb^{-1})	92740	15990	2328	982	537391	740



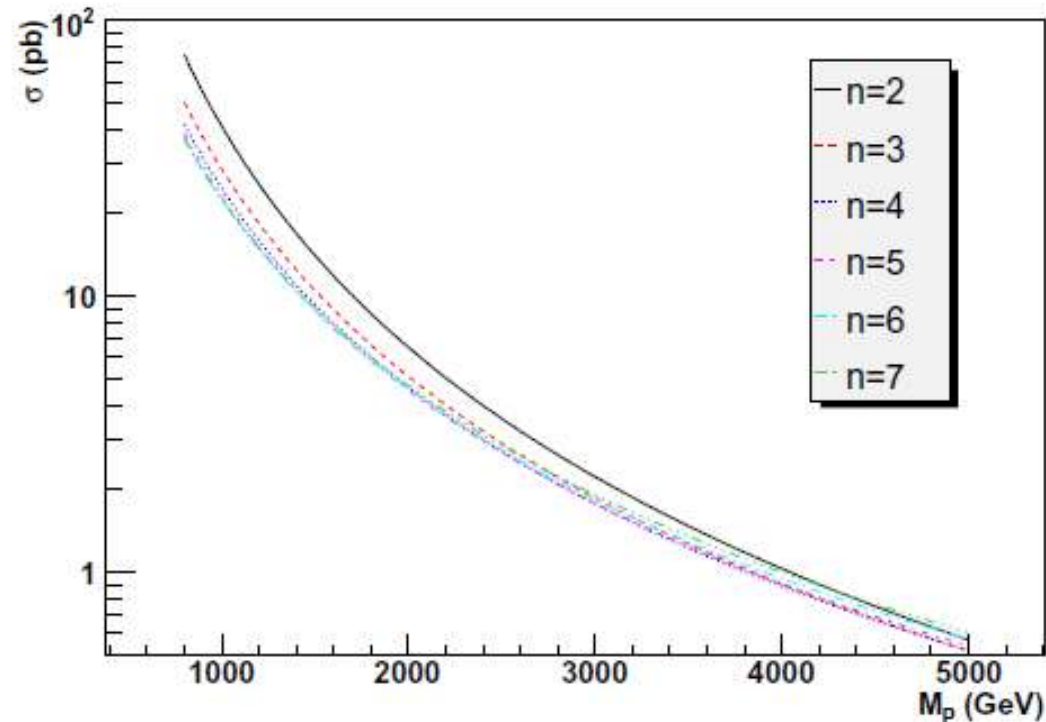
Missing E_T cutについて



Sum $P_T > 2.5$ TeVのカット後のMissing E_T 分布 (BHとBG(左)、BHとSUSY(右))

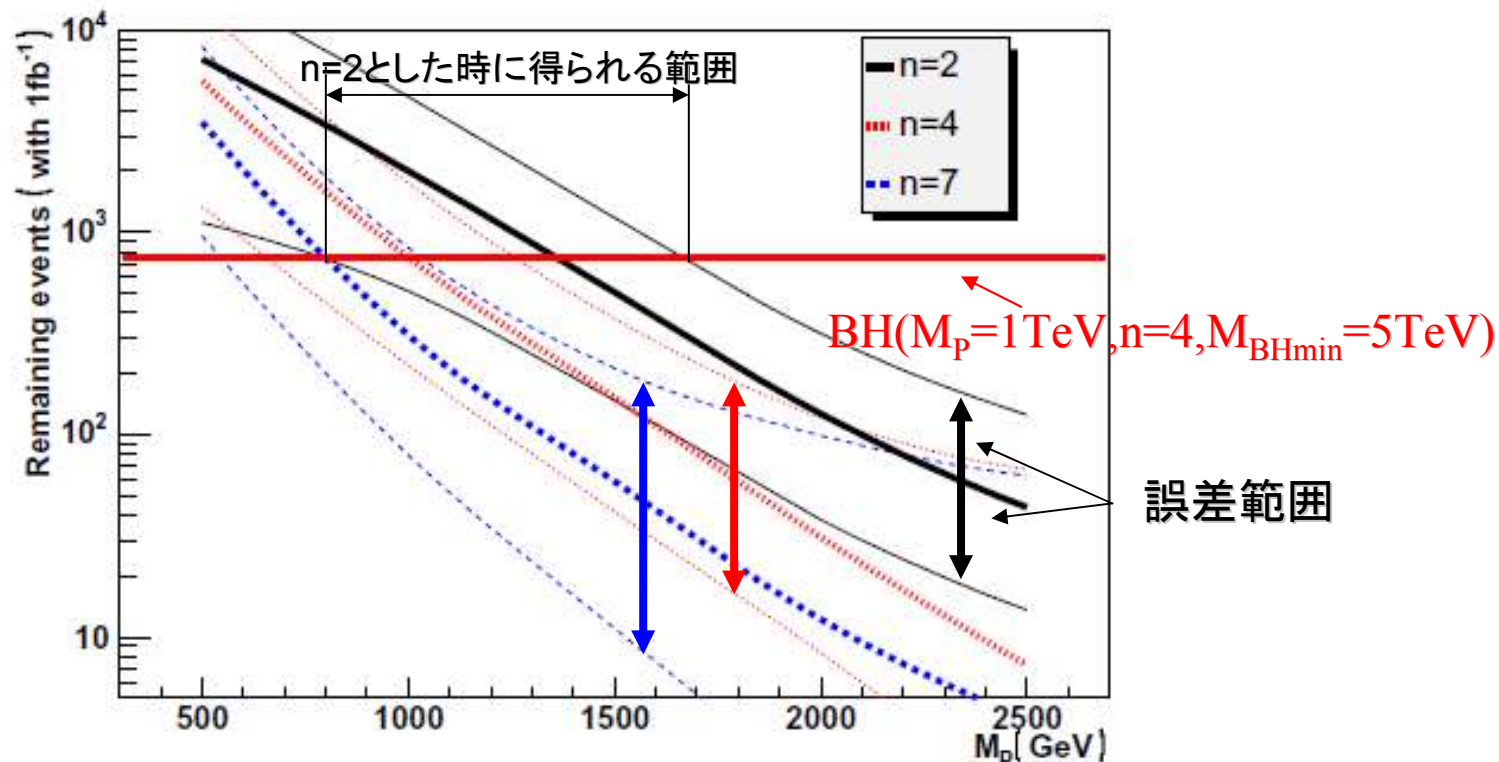
- 現在生成しているBHイベントでは、 ν だけがMissing E_T の起源
- しかしBHイベントには ν 以外にもMissing E_T の起源となり得るものはある
 - Gravitonの放出
 - 余剰次元への粒子の放出
 - Remnantの余剰次元への崩壊
- ν だけでも非常に大きなMissing E_T 起源となり、イベントセレクションとしては有効
- ただし、Missing E_T の大きなイベントは質量が正しく再構成出来無いので、慎重に使う必要がある

生成断面積のプランクスケール依存性



ブラックホールの生成断面積 ($M_{\text{BH}}: 5-14\text{TeV}$)
 余剰次元の数にはほとんど依らないが
 プランクスケールには強く依存する
 ->生成断面積からプランクスケールを求められる
 ->セレクションで残ったイベント数を用いる

全てのセレクション後のイベント数



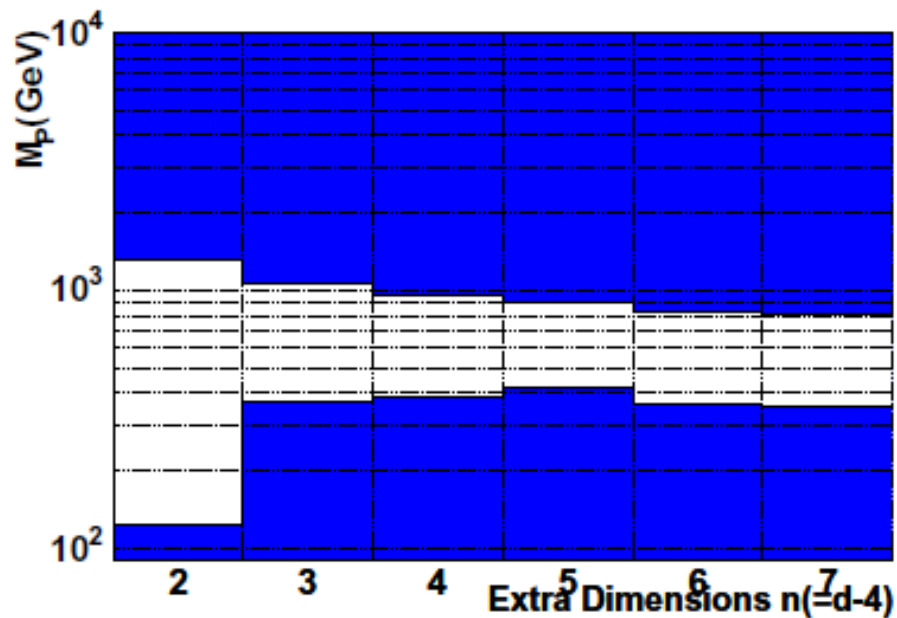
消失横運動量によるカットも含めた全てのセレクション後のイベント数の
プランクスケール依存性(M_{BH} :5-14TeV)

細い線は誤差の上下を表す

最も大きな誤差は M_{BHmin} の測定からくる生成断面積の評価の誤差

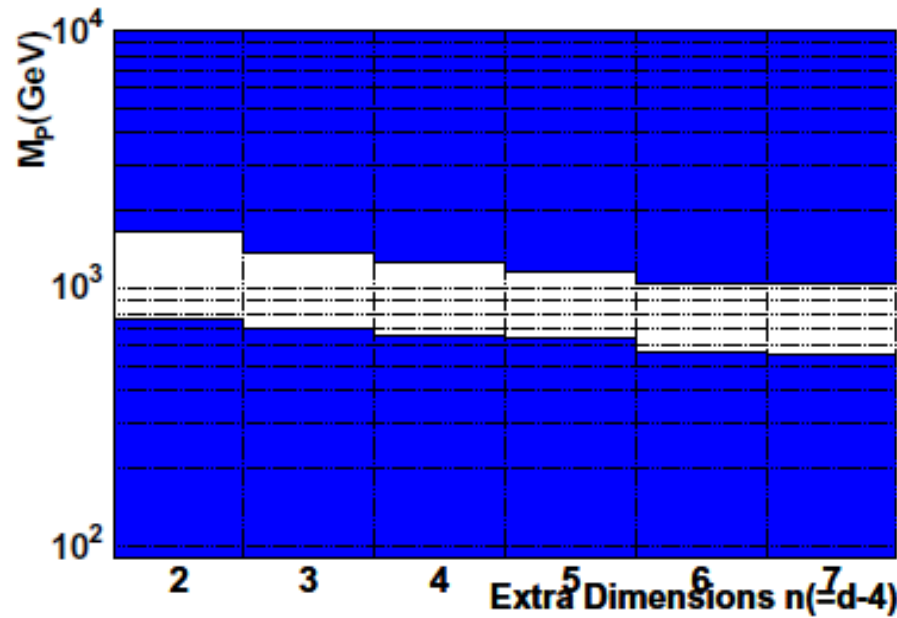
プランクスケールに対する制限

図の統計は 1fb^{-1}



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

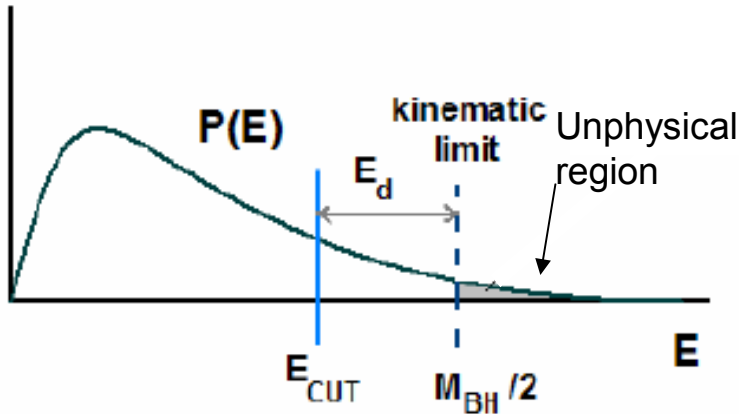
$$122\text{GeV} < M_p < 1306\text{GeV}$$



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

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

性質測定

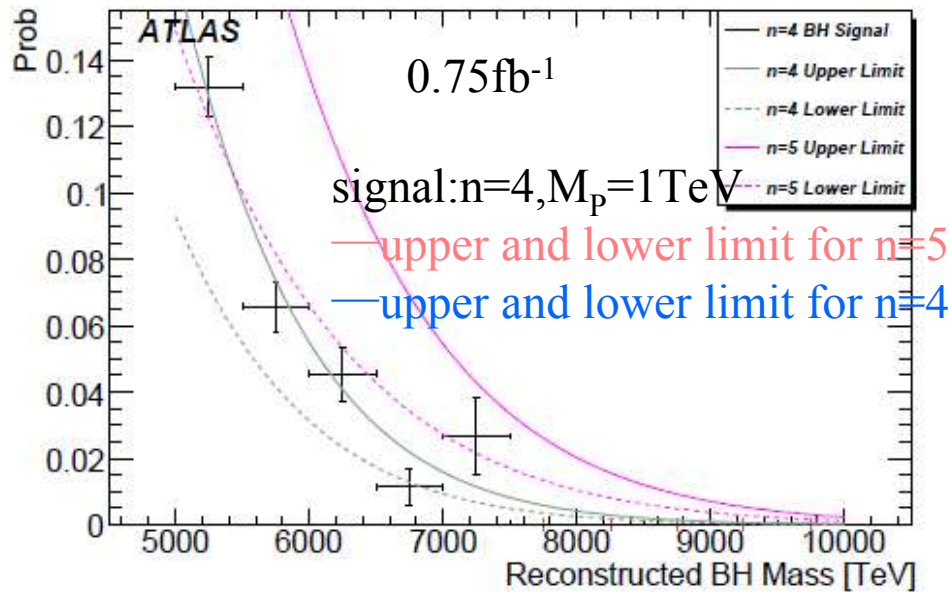


- $E \sim M_{\text{BH}}/2$ の粒子の数の情報を用いる
- この様な粒子はBHの崩壊で一番最初に放出された粒子

■ Hawking radiationを仮定すれば再構成された M_{BH} から各 n について E_{cut} 以上になる割合を求められる

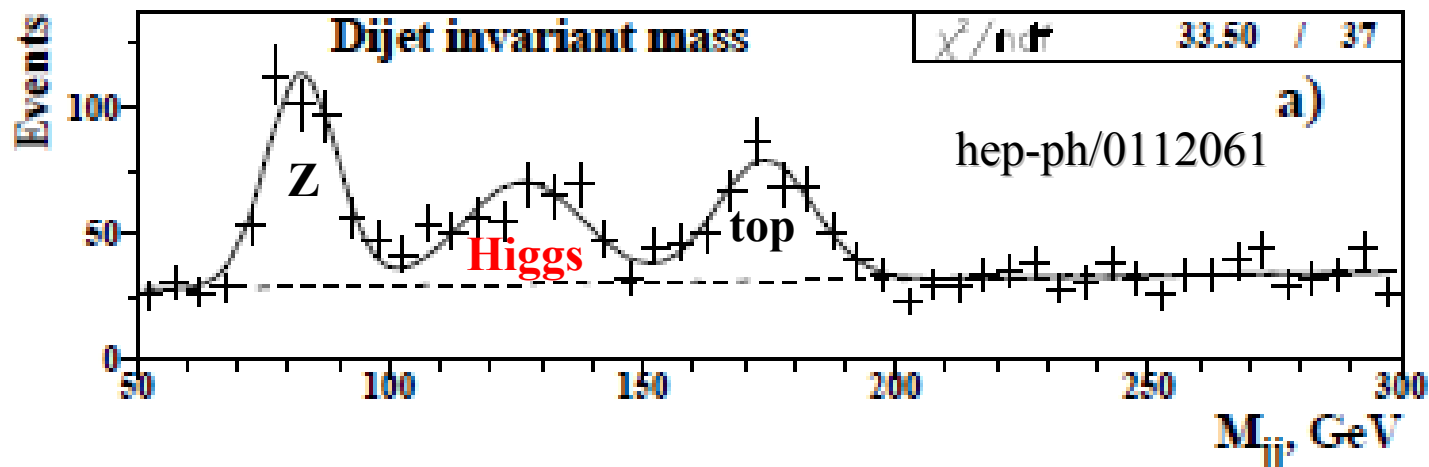
■ M_p については σ_{sec} の情報から求める

■ upper (lower) limitはunphysical regionを含む(含まない)量



その他、ブラックホールで出来そうなこと

- New physics search: Hawking radiationは粒子の質量には関係ない
 - ~100GeV程度の何か新しい粒子があれば、Blackholeイベント中で探すと見つかりやすい
 - BlackholeイベントはpureなサンプルとしてBGから分けることが可能なので



- 実際には、検出器の効果であまり単純には上手くいかなくて、何か工夫が必要

Blackholeの質量の下限値

Blackholeを生成する衝突粒子のcompton波長がSchwarzschild半径より小さい必要がある:

$$r_s > \lambda = 2\pi / (M_{BH} / 2)$$

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

Charybdisで使ってるconventionでは $L_N = M_D^{n+2} / 16\pi$
最近のもの, PDG convention: $L_N = M_D^{n+2} / 2(2\pi)^n$

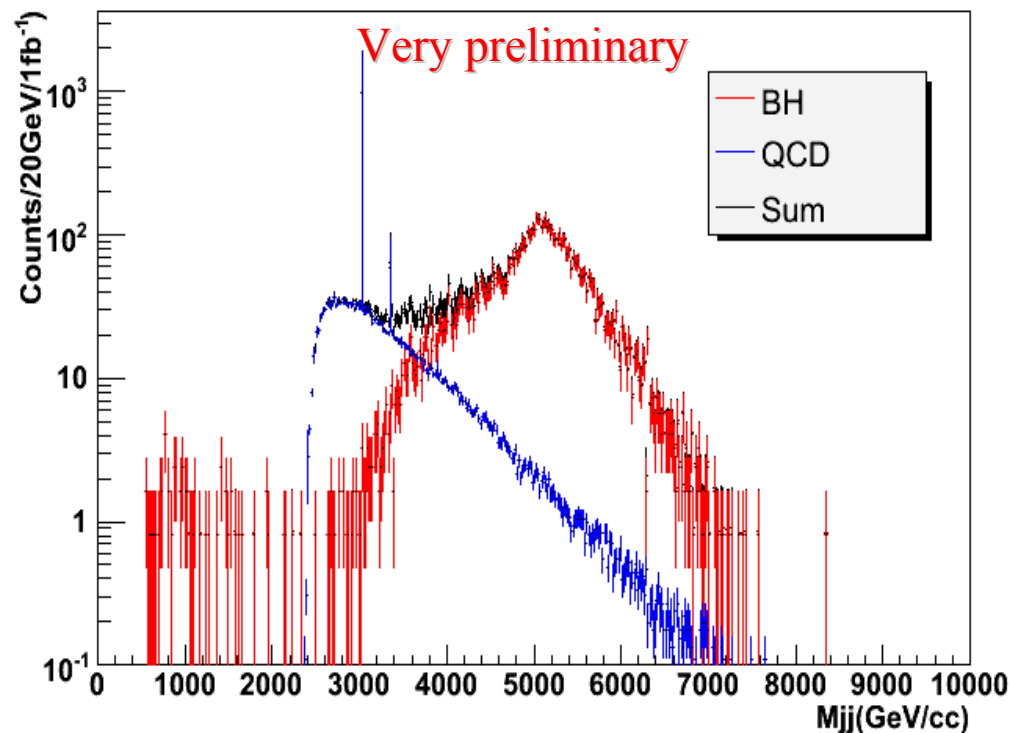
さらにRSの場合ではn=1について、上記の式が簡略化でき

$$r_s = \left(\frac{M_{BH}}{L_N 6\pi^2} \right)^{1/2} \quad L_N = \tilde{M}^3 / 2$$

これらから、 $M_{BH} > 4M_D$ for ADD, $M_{BH} > 16\tilde{M}$ for RSとなり、現在の実験のリミット ($M_D > 1\text{TeV}$, $\tilde{M} > 0.5\text{TeV}$) を考えるとADDでLHCでぎりぎり、RSの場合にはLHCではThermalなBlackhole発生しない(arXiv:0708.3017)

Non-Thermal Blackhole

Mjj



M_{JJ} 分布、signalとQCD BG

イベントセレクション: $P_{Tjet} > 1200 \text{ GeV}$ のジェットの2つの組み合わせを全てFill

Signal: RS, $n=1, M=1 \text{ TeV}, M_{BH} > 5 \text{ TeV}$

- RSでは完全にThermalなBlackholeは出来ない
- しかし、前頁の閾値以下付近のobject (Non-Thermal Blackhole)を考えることが出来る
- このようなBlackholeは2体崩壊する率が高い。
- di-jetsイベントはKK Gravitonを含め重力に関する情報を得るには非常にuseful
- BlackMax:この様な崩壊モードが出来るGenerator
 - Charybdisでは出来ない、回転Blackholeや、余剰次元への粒子の漏れなども計算出来る様になっている

まとめ

- 余剰次元は最近非常に盛んに研究されている分野であり、Blackhole等は一般受けも非常に大きい
- ~TeV程度に余剰次元が存在すればLHCでBlackholeが発生し、非常に大きなsignalが観測される：
 - σ が非常に大きい
 - 高いエネルギーの粒子を大量に放出するので非常に特徴的

未発見の物理としては、LHCで最も早く(~1日)分かる！
- Blackholeイベントからプランクスケールや余剰次元の数の情報が得られる可能性がある
 - ただし、現段階で用いている理論では非常に大きな仮定をいくつも置いているため、非常に大きな不定性が出る
- Non-Thermal Blackholeを始め、色々と新しい話が次々出ているので、LHCが始まるまでに準備を進めたい

"All the News
That's Fit to Print"

VOL. CLI . . . No. 52,018

The New York Times

NEW YORK, APRIL 9, 2007

Late Edition
New York: Today, partly sunny then
a few clouds, high 41. Tonight, in-
creasing clouds, low 33. Tomorrow,
increasing wind, high 40. Yesterday,
high 40, low 29. Details, Page 38.

THREE DOLLARS

Black Holes on Earth! Legendary proton collision experiment at CERN of Switzerland creates extra-dimensional, miniature black holes...

GENEVA, JULY 26: An ultimate physics experiment done at the Large Hadron Collider (LHC) of CERN (European Center for Nuclear Research) which produced first Earth-made black holes revealed important facts about the true structure of spacetime in small distance scales. Direct experimental information coming from the mass and decay temperature of black holes showed that spacetime has more than the four dimensions (length, width, height and time) that we perceive in everyday life. In recent years, many theoretical assumptions predicted the possibility for the existence of extra dimensions in spacetime, but till now these extra dimensions were not observed since firstly they open up at only very small distance scales and secondly, the particles from which objects of our daily encounter are made of are not able to penetrate the world of extra dimensions unless they reach very high energies. Theories also pointed out that existence of extra dimensions strengthened the gravitational force of extra dimensions, which means, in the presence of extra dimensions, force of gravitational attractions would be stronger. Such an enhancement of the gravitational force was the phenomena which enabled the production of black holes on Earth. Black holes produced at the LHC live in extra dimensions and any data coming from them gives direct information on the structure of spacetime. Once formed, the extra-dimensional black holes decay through a quantum mechanical process called Hawking radiation and the decay products could be studied

Particles collide in three dimensional space, shown below as a flat plane.

