

# LHCでのブラック ホール生成の可能性

はまだ生きているか？

尾田 欣也

Kin-ya Oda

(大阪大学)

# 真のプランク・スケールは TeVかもしれない

- 大きな/ワープした異次元があると、プランク・スケールがLHCで直接検証できるスケール (~TeV) でも、今までの観測と矛盾しない。
- プランク・スケールより上の散乱ではブラックホール生成が不可避である。
- LHCがブラックホール工場となる可能性がある。

# 構成

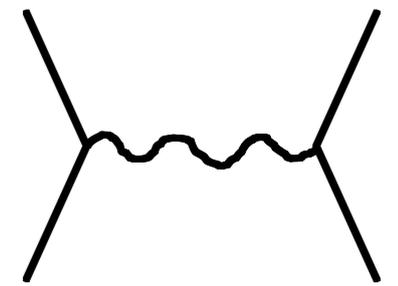
1. B H研究は**量子重力**へのパスポート
2. TeV重力シナリオ
3. **LHC**で何が見える（かもしれない）のか？

# エネルギー・運動量・質量 と長さ

- 以下**自然単位系**  $\hbar = c = 1$  で話をする。
- (エネルギー)  $\sim$  (運動量)  $\sim$  (質量)  $\sim$  (長さ)<sup>-1</sup>
- **場の量子論**の智慧:
  - 場の量子論は低エネルギーの**有効理論**。
  - **結合定数**は走る。(繰り込み)
  - **相互作用の強さ**が1になるあたりで**ユニタリ性**  
(確率の保存) が破れる。(例: カイラル理論、4フェルミ理論)
- その先は? より深い理論に置き換わるべし。

# プランク・スケールとは

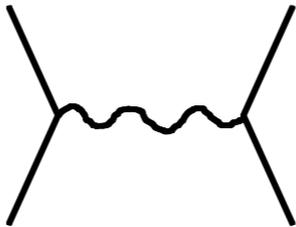
- アインシュタインの**一般相対論**もまた、量子重力の**低エネルギー有効理論**（古典極限）であろう。
- 重力の**結合定数**はニュートン定数  $G \sim (\text{質量})^{-2}$ 
  - 電磁気力:  $L_g \sim \frac{1}{e^2} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \Rightarrow V_C \sim e^2 \frac{q_1 q_2}{r}$
  - 重力:  $L_G \sim \frac{1}{G} R \Rightarrow V_G \sim -G \frac{m_1 m_2}{r}$
- エネルギー  $E$  の散乱での**結合の強さ**  $\sim G E^2$
- $E \sim G^{-1/2} \equiv M_P$  (プランク質量) で (有効理論だけでは) **ユニタリ性** (確率の保存) が破れる。

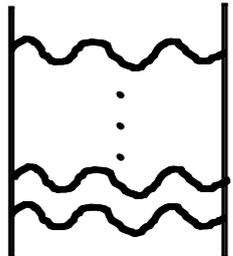


# 超プランク散乱

- $E \gg M_P$  の散乱では何がおこるのか？
- 実は**ブラックホール生成**が起こる！
- 古典粒子の散乱でBH生成が起こる事は一般相対論の枠内で**証明**されている。(後述)
- 古典近似の正当性:  
**BHコンプトン波長 < 事象の地平面**のサイズ
- 傍証: 無限個の閉弦の交換 (~重力子の交換) を**アイコナール近似**で足しあげ → **BHによる散乱**に見える。マンガ的には:

Amati, Ciafaloni, Veneziano  
87, 88, 89, 90, 92, 93, 07


$$\sim -\frac{GM}{r}$$

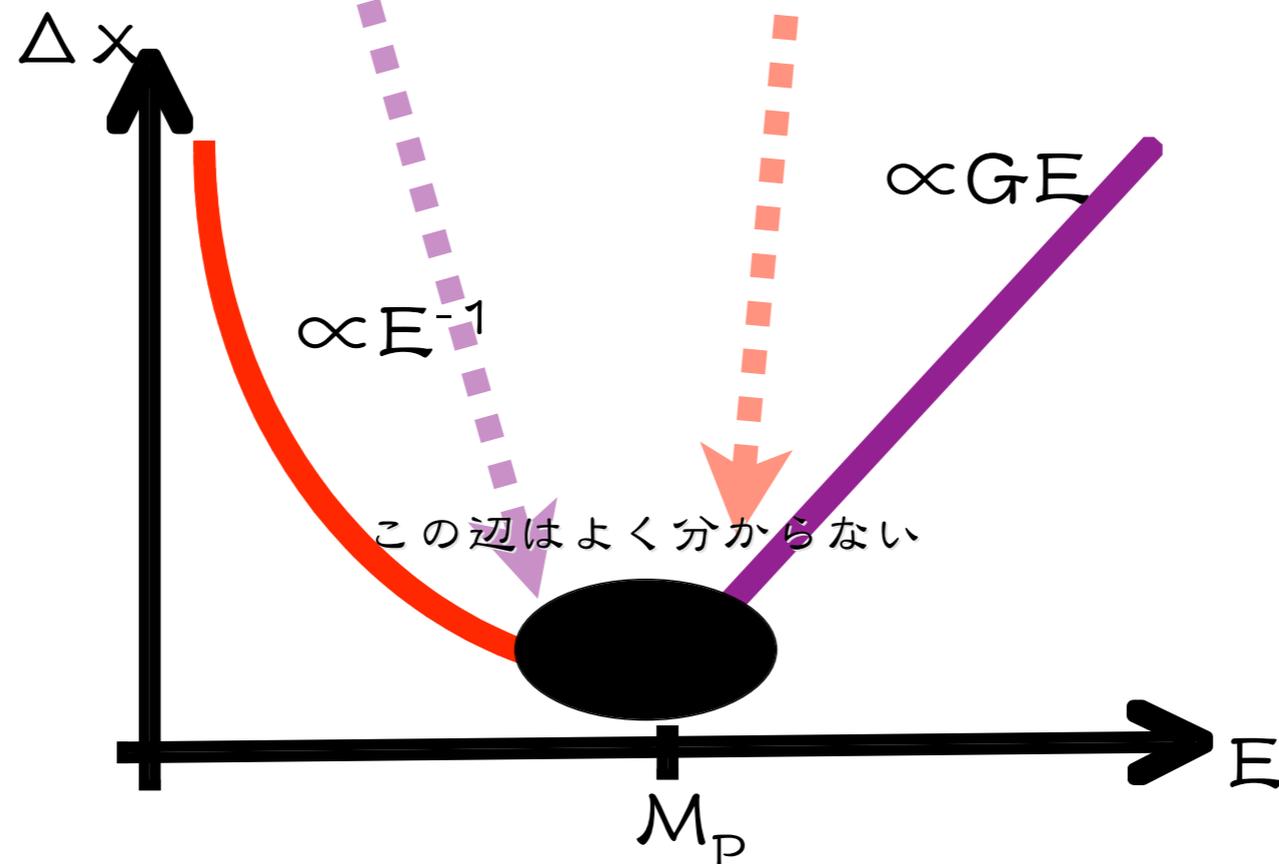

$$\sim \frac{-1}{1 - \frac{GM}{r}}$$

# 短距離物理の終焉

- 場の量子論の枠内では、(エネルギー)  $\sim$  (長さ)<sup>-1</sup>
- 過去一世紀にわたる素粒子物理のパラダイム：  
どんどん**エネルギーを上げて**ゆくとどんどん**小さな領域**を探れる。
- 超プランク領域 ( $E > M_P$ ) のBH生成過程では、
  - (事象の地平面のサイズ)  $\propto$  (エネルギー)
  - どんどん**エネルギーを上げ**ても、 どんどん**大きな事象の地平面**により短距離の構造は全て**覆い隠される**。

# 重力の赤外・紫外双対性

- プランクスケールにおいて、長さエネルギーの関係がひっくり返る。まとめると、 $M_P$  とは、
  - **有効理論**の紫外（高エネルギー）切断
  - **BH描像**の赤外（低エネルギー）切断



# 弦とBHの対応原理？

- 他に (長さ)  $\propto$  (エネルギー) となるものがあるか？
- **弦**がまさにそう！ (長いほど重い)
- (1つのBH)  $\sim$  (同じ重さの1本の弦) とすると、ある「**対応スケール**」  $\sim M_P$  で、
  - エントロピー・温度 (Susskind 93; Holowitz, Polchinski 96)
  - サイズ (Holowitz, Polchinski 97, Damour, Veneziano 99)
  - 生成断面積 (Dimopoulos, Emparan 01)
  - 微分生成断面積の幾何的ふるまい (Matsuo, **KO** 08)  
(次頁)
- 等々、色々な量のオーダーが両者で一致する。

# 微分断面積の幾何的 ふるまい (宣伝)

- 弦の散乱が大きな角運動量  $J$  について超ソフト  $\sigma_J \propto e^{-J^2/s \ln s}$  であることは知られていた。
- 我々は領域  $1 \ll J \ll (s \ln s)^{1/2}$  において  $\sigma_J \propto J^{D-3}$  と重い閉弦の生成断面積を求めた。 (Matsuo, KO 08)
- これはBH断面積の幾何的ふるまい (Ida, KO, Park 02)  $d\sigma/dJ \propto J^{D-3}$  と対応しているのでは、という議論を行った。
- 興味ある方は呼んで貰えばセミナーに行きます。

# ここまでのまとめ

- 一番欲しいのは**量子重力**の**非摂動的**定式化

	摂動的	非摂動的
古典論	簡単	一般相対論
量子論	弦理論	未踏領域

対応原理？

- もしBHを作れたら、**BH描像からのずれ**を調べる事で**未踏領域**に**実験的**に迫る事ができる！

# 構成

1. B H研究は量子重力へのパスポート
2. TeV重力シナリオ
3. LHCで何が見える（かもしれない）のか？

# 真のプランク・スケール

- 今までの議論でプランク・スケールは  $M_P = G^{-1/2} \sim 10^{19} \text{ GeV}$  であった。
- これは LHC のエネルギー  $14 \text{ TeV} \sim 10^3 \text{ GeV}$  の一兆倍よりまだ大きい。
- がっかりだ。
- **真のプランク・スケール**が実は  $\sim \text{TeV}$  という事はないだろうか？

# 我々はどこまで短い距離を知っているか

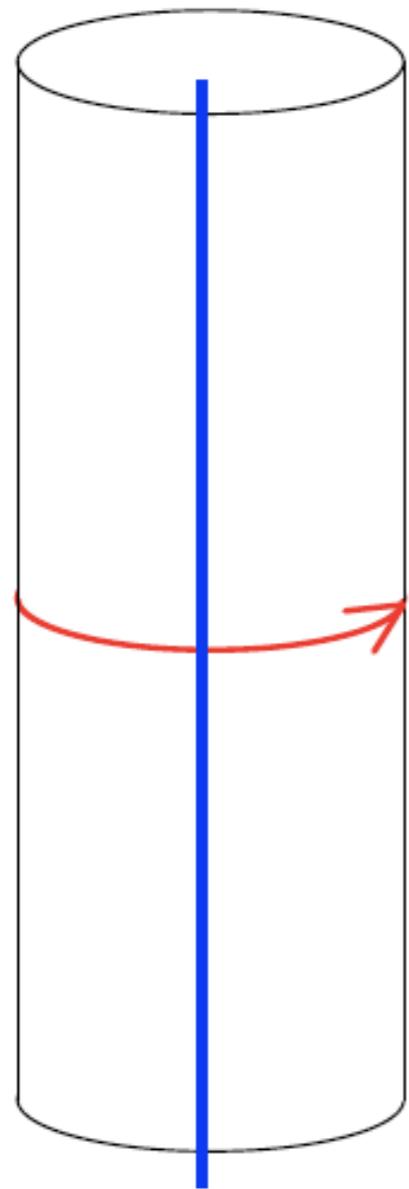
- 超弦理論において矛盾のない平坦時空は10次元。
  - 残りの6次元は小さく丸まっていなと。
  - どれくらい小さく？
- 実は我々の理論の正しさが検証されている距離は
  - ゲージ相互作用で  $\text{am} = 10^{-18} \text{ m}$  ぐらい、
  - 重力で  $0.1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$  ぐらいまで。
- 重力は4次元に棲んでなくてもよい！

# ブレーン・ワールド

Akama 82

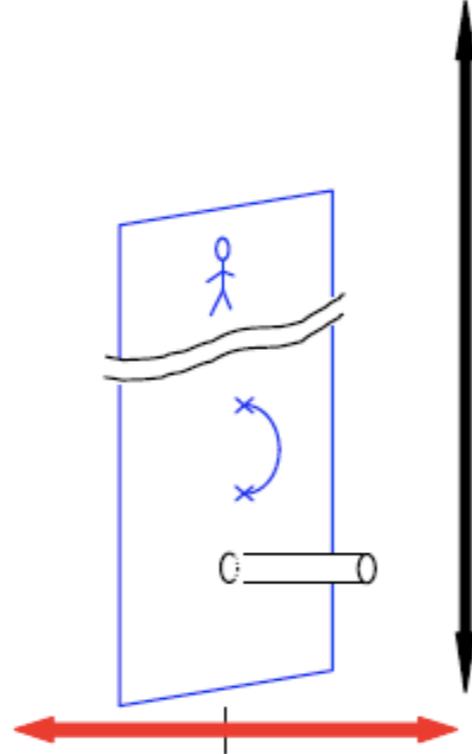
Rubakov, Shaposhnikov 83

Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali 98



Dブレーン

我々の4次元方向



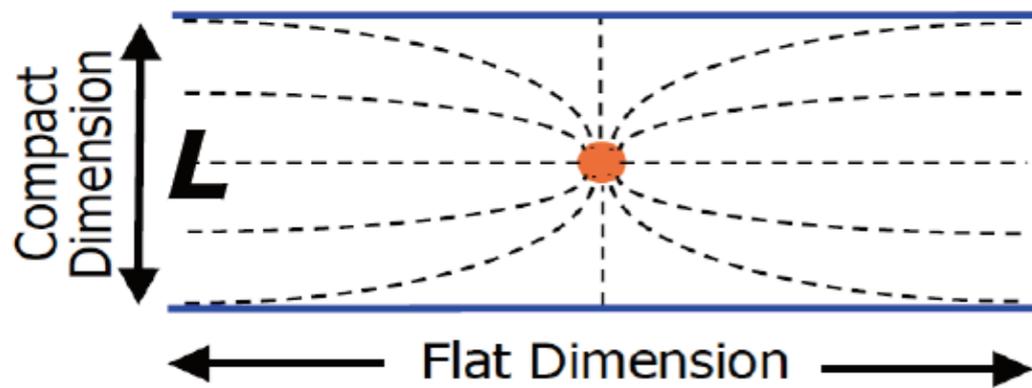
余n次元方向

- 我々は**ブレーン**上に住んでいる。
- **ゲージ相互作用** (開弦) は**ブレーン**上に。
- **重力** (閉弦) は全体 (**バルク**) に。

弦理論の現時点での定式化においては、**異次元が丸まる長さ**は決められない**自由パラメタ**。

# TeV重力シナリオ

※絵は Landsberg



- $n$ 個余分な次元があると、距離  $r < L$  では重力が薄まる。

$$F(r) = G_4 \frac{m_1 m_2}{r^2} \rightarrow \begin{cases} G_D \frac{m_1 m_2}{r^{2+n}} & (r \ll L) \\ G_D \frac{m_1 m_2}{L^n r^2} & (r \gg L) \end{cases}$$

- $F \propto r^{\widehat{2+n}}$

- $F \propto r^{\widehat{2}}$

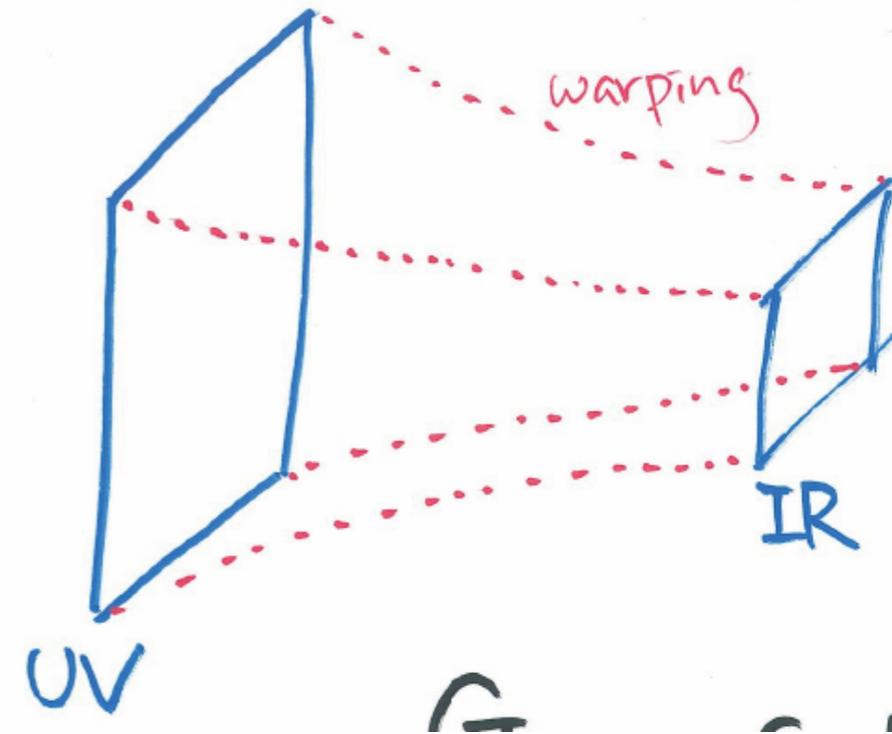
- $G_D \sim G_4 / L^{\widehat{n}}$

- **真の** (短距離で見た) **プランクスケール** は見かけのソレより小さい。

- 例:  $n=3, 6$  の時:  $L \sim \mu\text{m}, \text{fm}$  なら  $M_D \sim \text{TeV}$  となる。

# and/or ワープ・コンパクト化

- 一般に D ブレーンの存在の下で余分な次元をコンパクト化すると、我々の 4 次元計量は、余分な次元の方向の依存性を持ち **ワープ** する。
- このとき (前述した重力の **低エネルギー描像** の **紫外 (高エネルギー)** 切断としての) **プランク・スケール** は、異次元の **位置によって異なる**。
- ある位置では **TeV** でありうる。



# ここまでのまとめ

プランク・スケールは  
~TeV でありうる！

# 構成

1. B H研究は量子重力へのパスポート
2. TeV重力シナリオ
3. **LHC**で何が見える（かもしれない）のか？
  - 生成
  - 崩壊

生成

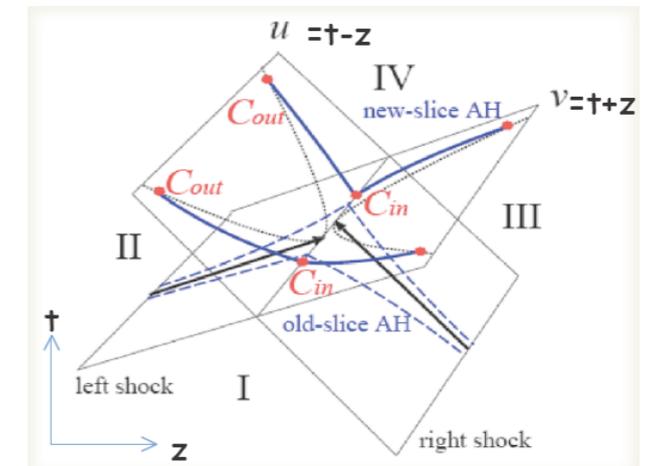
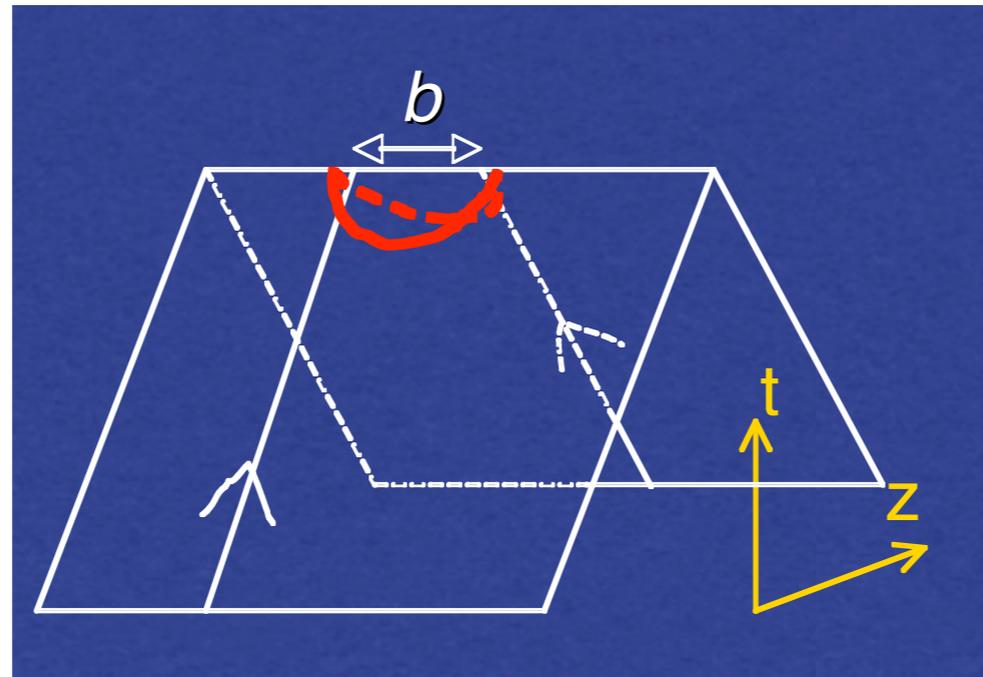
# TeV BH@LHCの生成

- 古典的なBHの生成は**証明**されている。 (次頁)
- 確かに**増える断面積**:  $\sigma \propto s^{\{正巾\}}$
- $M_P = 1\text{TeV}$ で、BH (的な物) は $\sim 1$ 秒に1個生成
- 但し、生成の際の**重力放射** (Yoshino, Nambu 02, Emparan, Mayers 03)、J大の時の**重力子輻射**等の影響によりそれより小さくなる可能性。
- 量子重力の効果でBH的にならない可能性は？
- 保守的に  $M > 10\text{TeV}$  を要請しても年に100個くらい (10fb) は作れる。 (5TeVなら200pb)

# BH生成の証明

4次元: Eardley, Giddings 02  
高次元: Yoshino, Nambu 02

- **Aichelburg-Sexl 解:** Schwarzschild解から  
E固定の上で、ブースト  $\rightarrow \infty$  (だいたい  $v \rightarrow c$ )、  
質量  $\rightarrow 0$  の極限をとる。



Yoshino, Rychkov 06

- $b < b_{\text{max}}$  で束縛面が存在  $\rightarrow$  **事象の地平面**
- $b_{\text{max}} \sim M = s^{\{1/2\}}$  のBH半径が示せた。

# 余談

- 「満州事変が始まり、次第に**戦時体制色**を濃くしていく時代相の中で、科学技術振興策への**軍事的産業的要請**によって昭和七年組織された**日本学術振興会**」
- 宮田新平 『「科学者の楽園」をつくった男—大河内正敏と理化学研究所』 （日本経済新聞社） より

# BHは「大きな」角運動量 とともに作られる

(Ida, KO, Park 02)

- 衝突パラメータ  $b \sim$  角運動量  $J$

angular momentum  
 $J = bM/2$

$$\frac{d\sigma}{dJ} = \begin{cases} 8\pi J / M^2 & (J < J_{\max}) \\ 0 & (J > J_{\max}) \end{cases}$$
$$d\sigma = 2\pi b db$$
$$(J_{\max} = b_{\max} M/2)$$

- 「大きい」といっても典型的にはLHCで  
 $J_{\max} \sim 3, 10$  for  $D=5, 10$
- LHCは半古典的BH描像成立ぎりぎりの領域

龍 璽

# BHの一生

## 1. 禿相 (balding phase)

- 動的にBHが作られる。BHは「毛」を失う。

## 2. 減転相 (spin-down phase)

- ホーキング輻射により質量と角運動量を失う。

(この相の重要性を我々が指摘。Ida, **KO**, Park 02, 06)

## 3. シュヴァルツシルト相 (Schwarzschild phase)

- BHは角運動量 $\sim 0$ 。質量をホー輻で失う。

## 4. プランク相 (Planck phase)

- $T \sim M_{\text{P}}$ 。量子重力の効果が重要に。未だ理論なし。おそらく最後は少数の粒子に崩壊する。

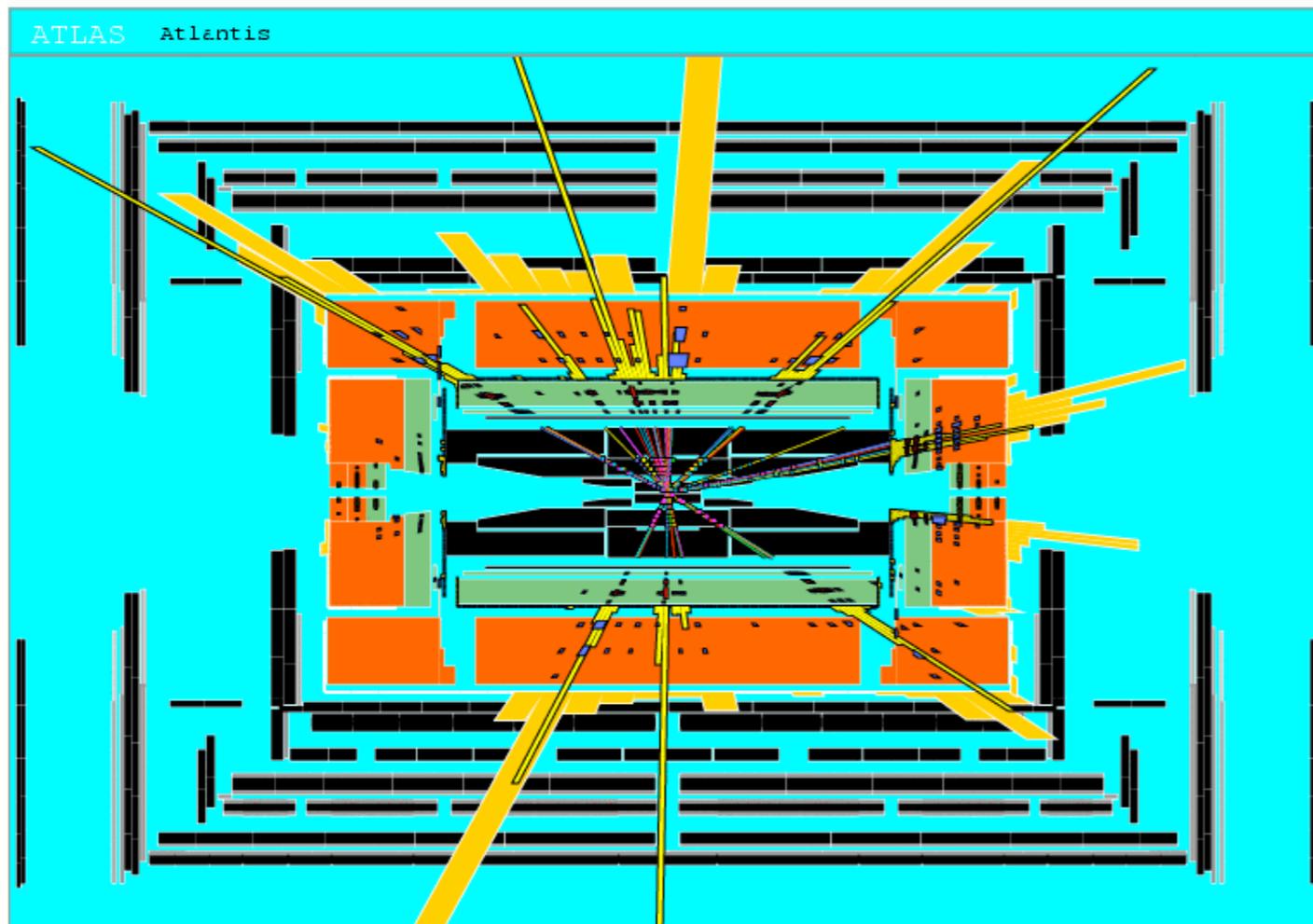
ホーキング温度は上がる一方

# TeV BH@LHCの崩壊

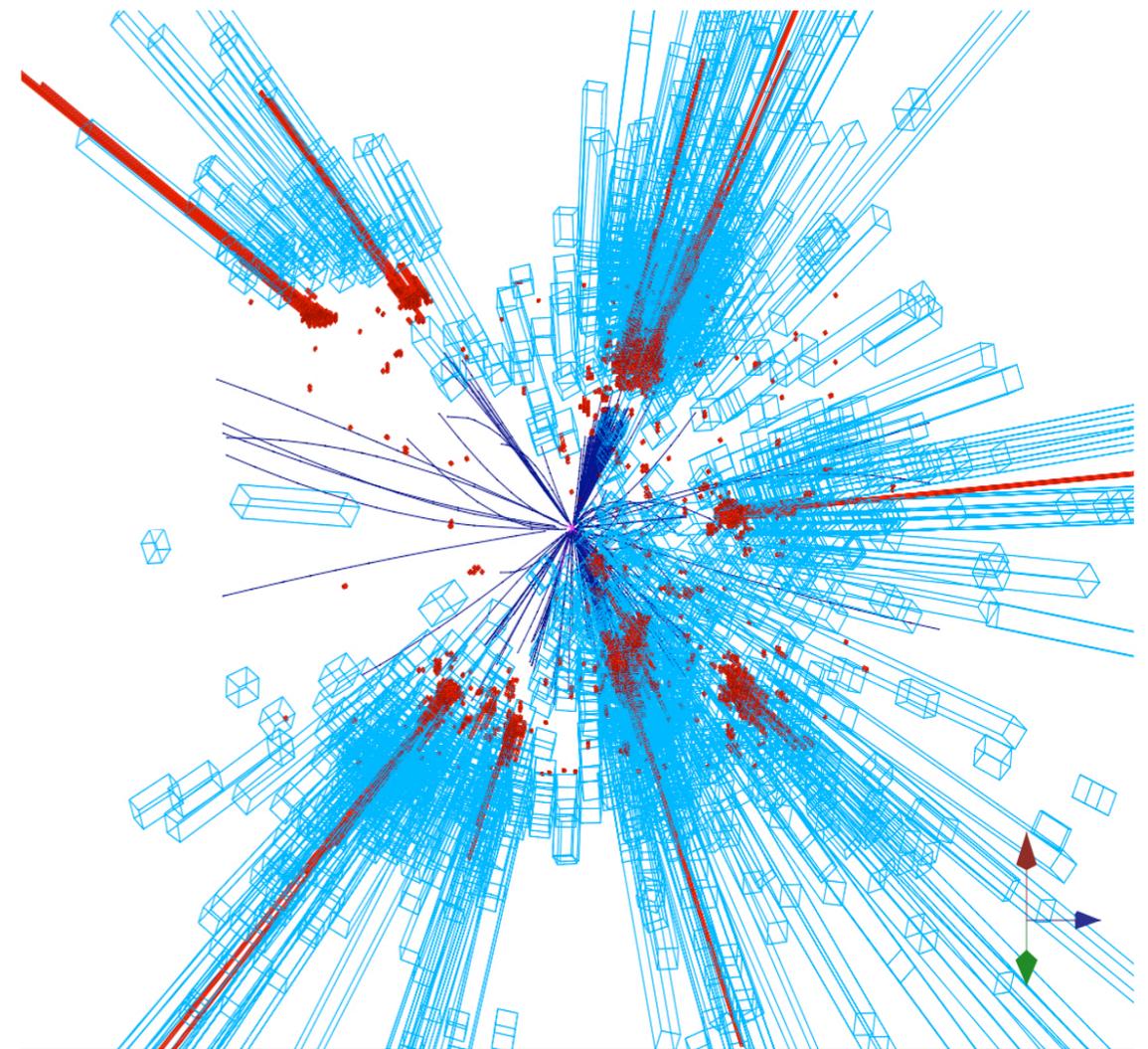
- **ホーキング放射**を通じて崩壊する。(崩壊幅やスペクトラムを完全に計算可)
- 崩壊先は主に、**ブレーン上**の知ってるSM物質:  
クォーク・レプトン・ゲージ場・等々。  
(Emparan, Horowitz, Myers 00)
- 崩壊比 = SMの自由度。  $10^{-27}$  秒で  $E >$   
100GeV のSM粒子 ~ 数十個に崩壊 (Giddings, Thomas 02;  
Dimopoulos, Landsberg 02)
- 崩壊先は多ジェットだが、エネルギーが大きいためBHの崩壊粒子がQGPを作る事はない。 (Alig, Drees, KO 06)

# はっきりしたシグナル

Simulation with  $M_{BH} \sim 8$  TeV in ATLAS



... and in CMS



from Kobayashi DPF/JPS 06

# TeV BHの ホーキング放射

(Iida, **KO**, Park 02, 05, 06; Kanti et al. 02, 03, 05, 06, 07)

- ブレーン上の場の方程式 (Iida, **KO**, Park 02) から
  - **灰体因子** (～BH自身により曲げられた時空が輻射を跳ね返す効果) を計算する事で、
  - BHの崩壊先の粒子達の**エネルギー・スペクトラム**が完全に求まる。
  - →BHの**時間発展**も完全に求まる。 (Iida, **KO**, Park 06)
  - LHCのためのBHイベント・ジェネレーターも開発されている。 BlackMax [arXiv: 0711.3012]
- CHARIBDIS ver. 2 (under development)

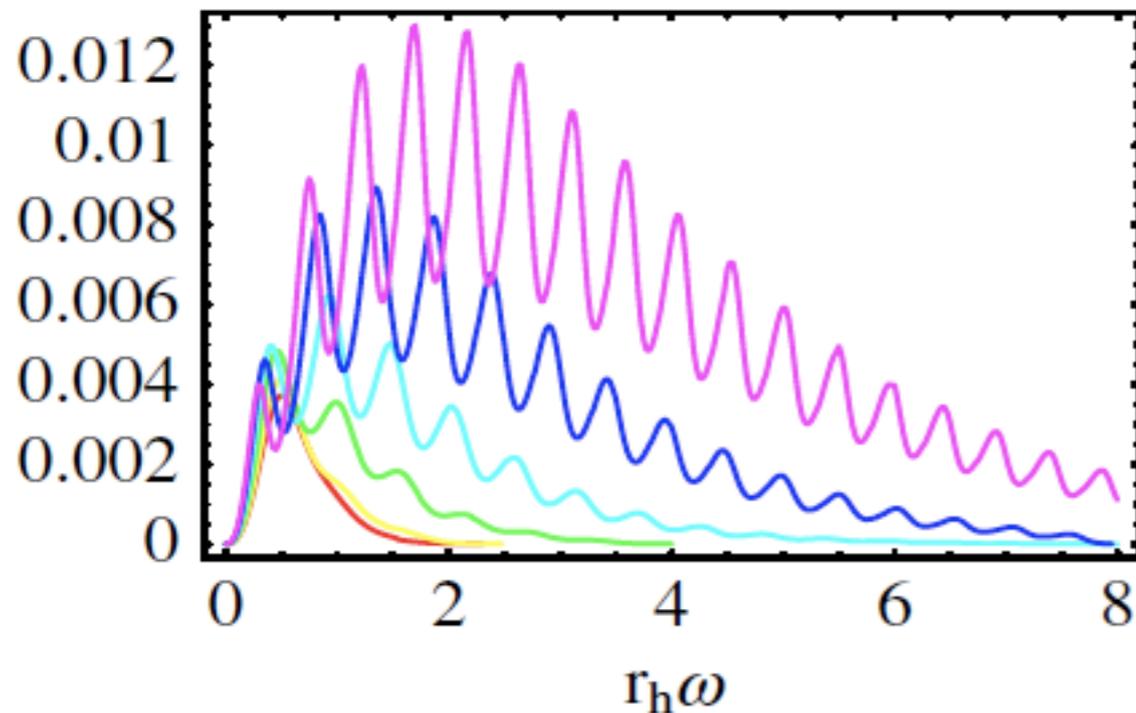
# クォーク・レプトンの ホーキング放射

(Iida, KO, Park 06)

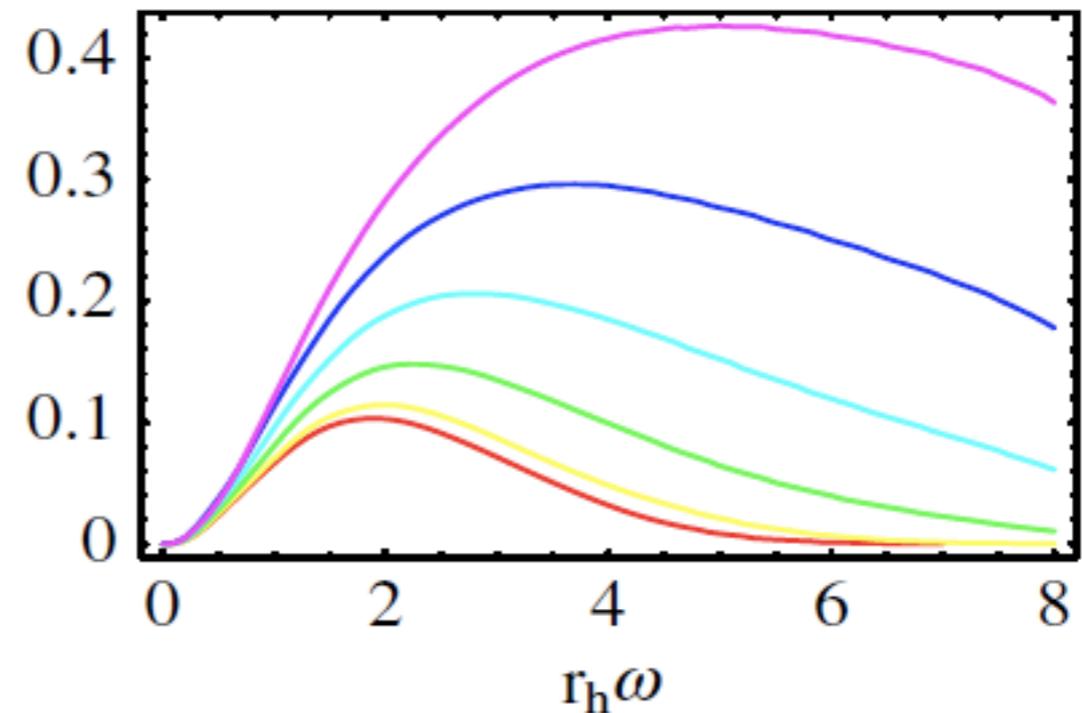
ランドール・サンドラム

大余次元

power spectrum (D=5)



power spectrum (D=11)



無回転から高回転まで

$a_* = 0, 0.3, \dots, 1.5$  from lower left to upper right.

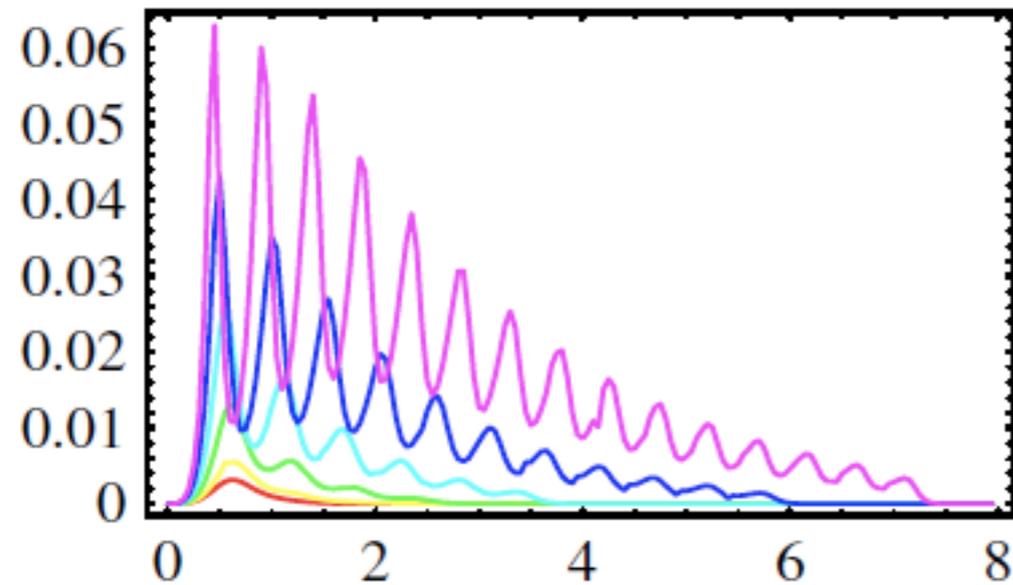
# ゲージ場の ホーキング放射

(Iida, KO, Park 06)

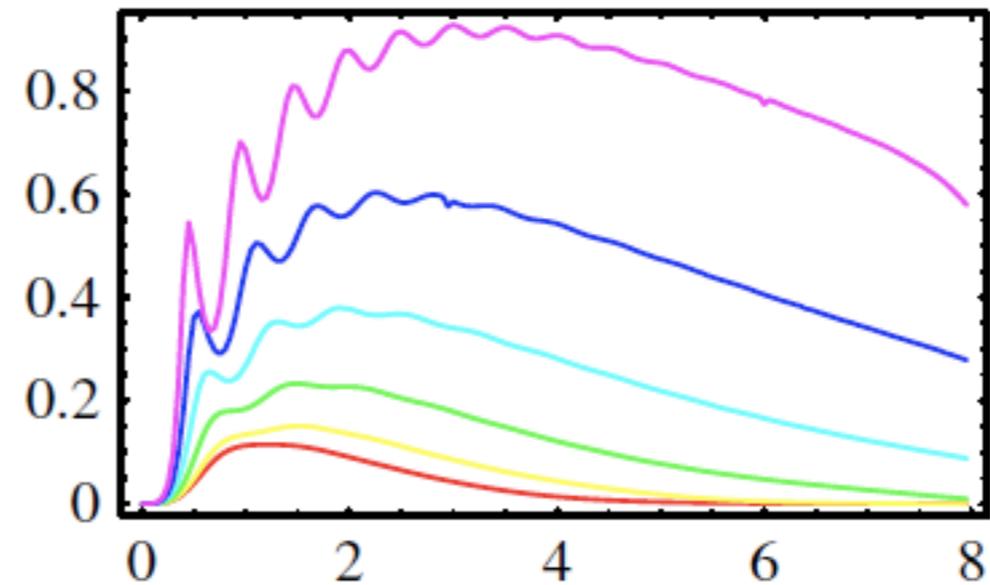
ランドール・サンドラム

大余次元

power spectrum (D=5)



power spectrum (D=11)



無回転から高回転まで

$a_* = 0, 0.3, \dots, 1.5$  from lower left to upper right.

# ギザギザの起源は角モード

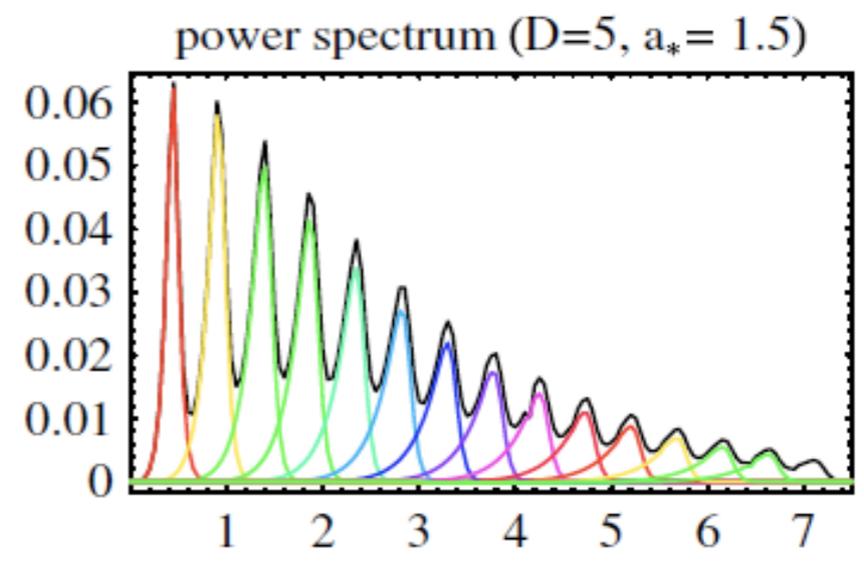
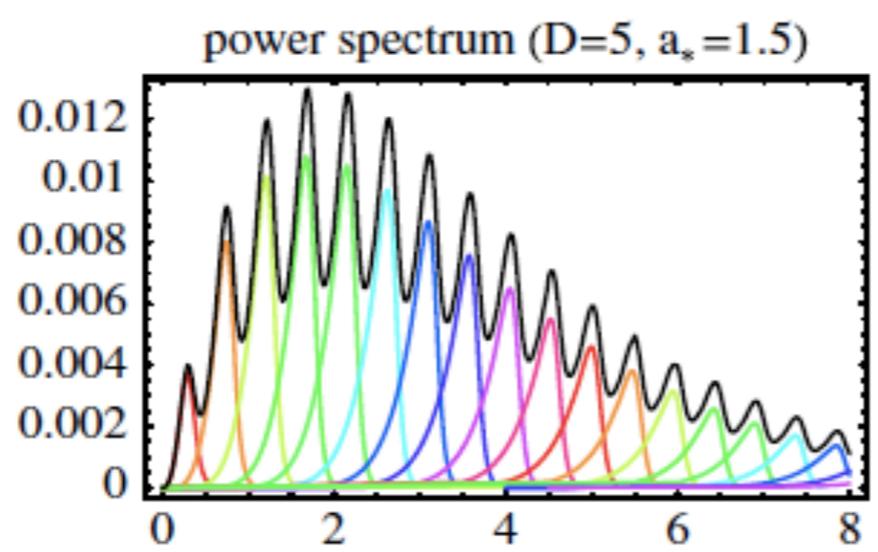
(Ida, KO, Park 06)

いずれも前頁の **高回転** の場合

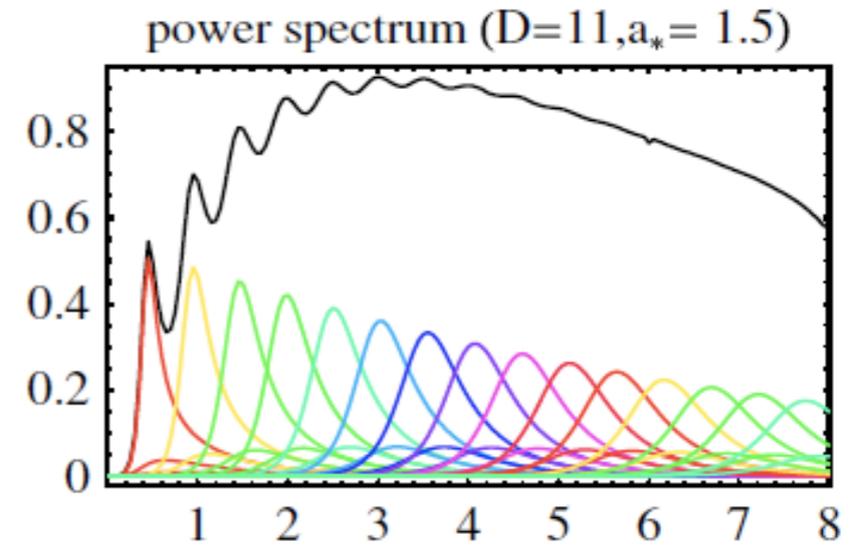
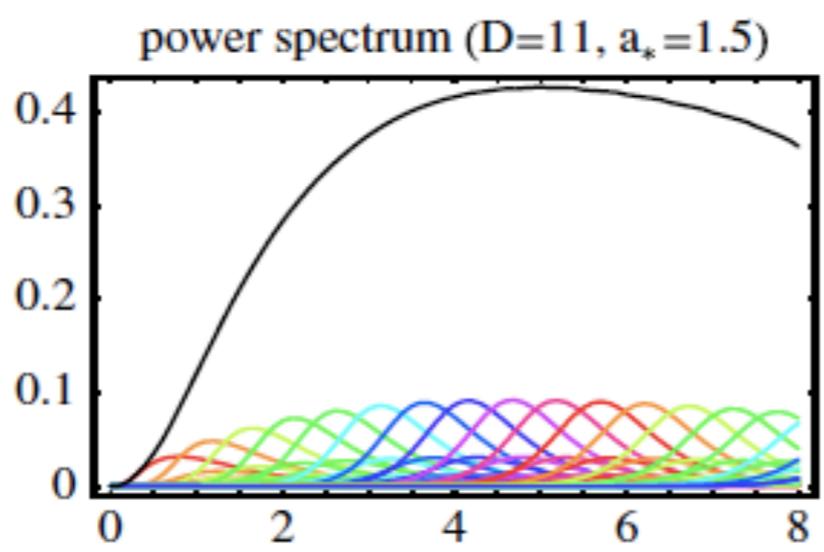
クォーク・レプトン

ゲージ場

R S



大余次元



# ホーキング放射の角依存性

(Casals, Doran, Kanti 06 からの図)

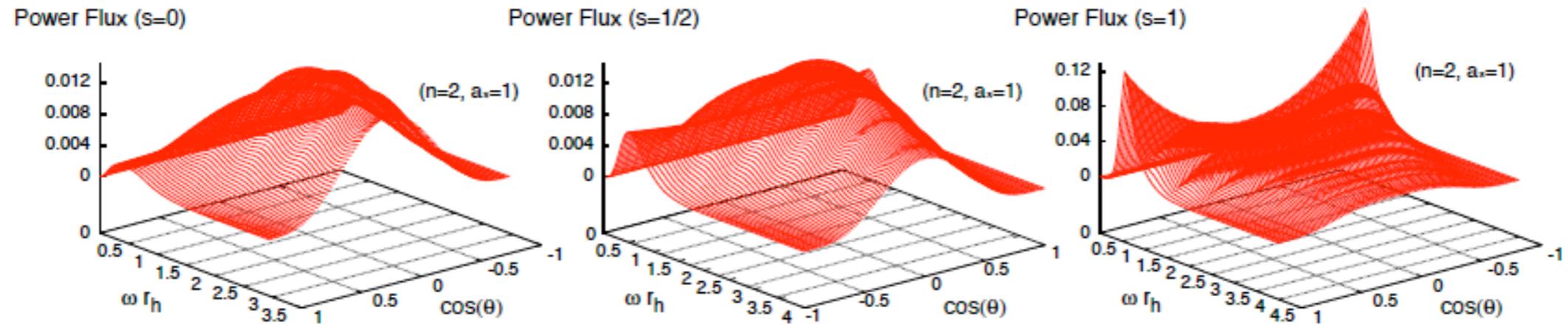
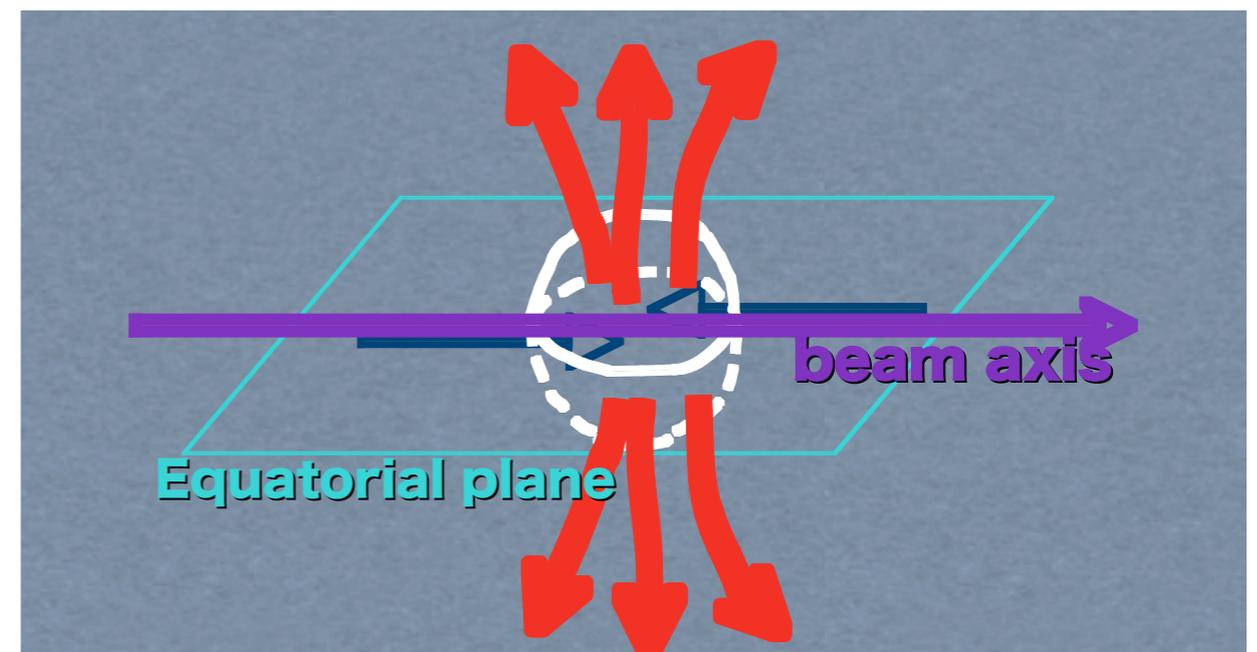


Figure 16: Angular distribution of the power spectra for (a) scalars, (b) fermions, and (c) gauge bosons on the brane from a 6-dimensional black hole with  $a_* = 1$ .

ゲージ場はビーム軸と垂直な極方向に放射される。

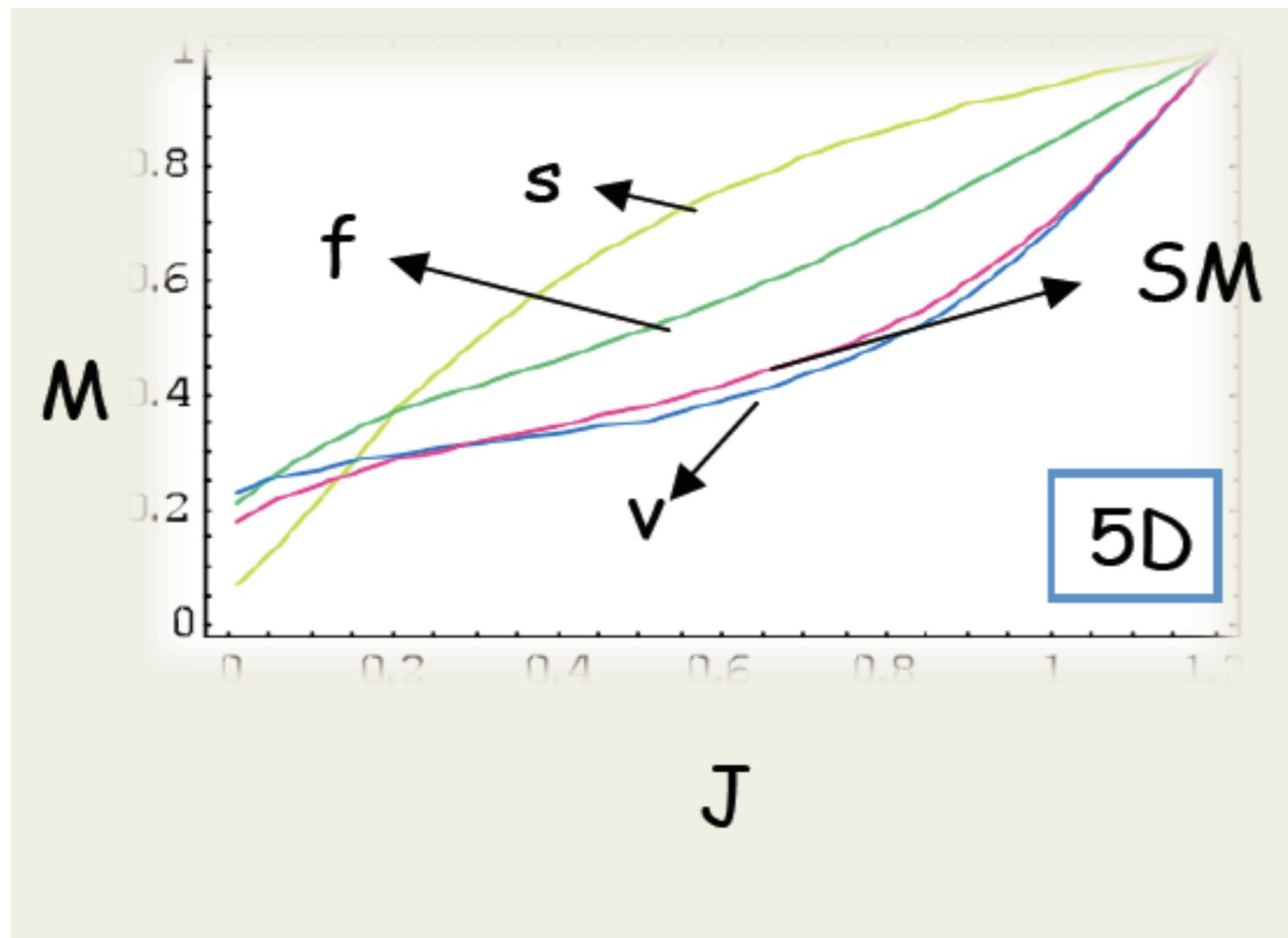
(Ida, KO, Park 02, Casals, Doran, Kanti 06)



# BHの時間発展

(Ida, KO, Park 06)

- 高回転時はゲージ場の放射 ( $\nu$ ) がほとんど。
- 減転相 (Spin-down phase) が重要。



More than half of total mass is radiated during spin-down phase

# まとめ

- BH研究は**量子重力**へのパスポート。  
→ 距離とエネルギーの関係のひっくり返し。
- プランク・スケールは**TeV**でありうる。
- 超プランク散乱では**BH生成**が全てを凌駕する。  
→ 非常に大きな生成断面積。
- TeV BHはホーキング輻射でたくさんのSM粒子に崩壊する。 → 非常にはっきりしたシグナル。
- BH描像の詳細なふるまいの計算をしておく事により、本当に欲しい**量子重力**の効果が、そこからのズレとして実験的にテストできる。

# まだ分かっていない事

- BH生成の際 (balding phase) の古典的重力放射。
- BHの micro state による量子的取扱い。
- 弦理論で、(AdS/CFT等も援用した) 状態勘定によるエントロピーの計算などが成功しているのは、extremal でホーキング輻射のない、事象の地平面の半径=0の非常に特殊な場合だけ。
- つまり地平面を超えて落ちてゆく観測者の問題が存在しない特殊な場合だけ。
- 普通の Schwarzschild が一番難しい。
- 関連してユニタリ性、確率の保存、情報ロス。

# おまけ: 安全性

- 安全です。
- 既に大気上層でLHCの何万倍も大きなエネルギーの衝突が起こっています。
- **仮に** BHが崩壊しないとすると、
  - 宇宙線由来のBHは地球を飛び出してゆく。
  - LHC由来のが地球に留まり飲み込む可能性？
- **それでも** 白色矮星・中性子星が存在する事から、BHが溜まって地球を飲み込む可能性は排除される。  
(Giddings, Mangano, arXiv:0806.3381)