

# ミニ・ブラックホールと string ball の理論

尾田欣也 (大阪)

[Kin-ya Oda] (Osaka)

with

松尾俊寛 [T. Matsuo], PRD79 (2009)

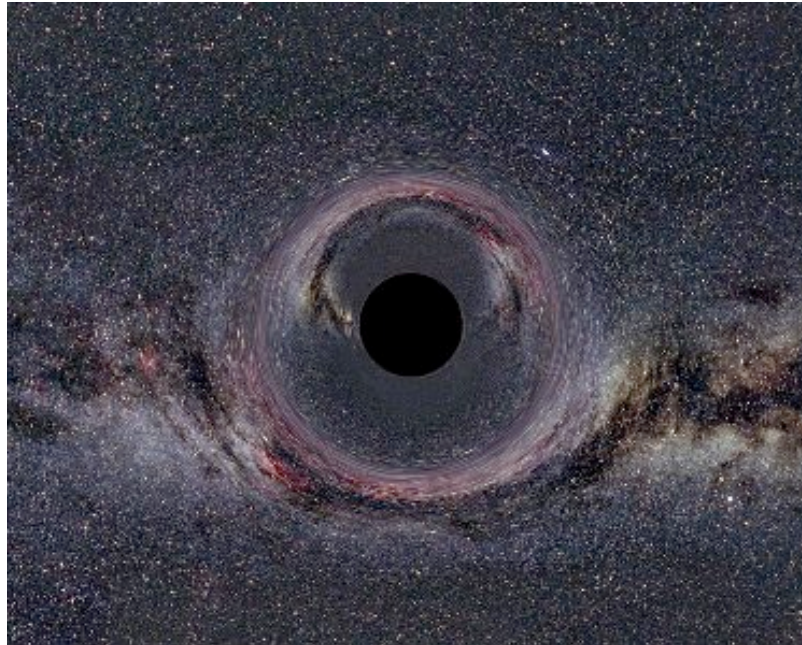
C. Alig & M. Drees, JHEP0612 (2006)

井田大輔 [D. Ida] & 朴盛燦 [박성찬, S. C. Park], PRD67 (2003); 71 (2005); 73 (2006)

岡田宣親 [N. Okada], PRD66 (2002)

# ブラックホールとは？

- ある領域に物質がとってもぎゅっと集まると、

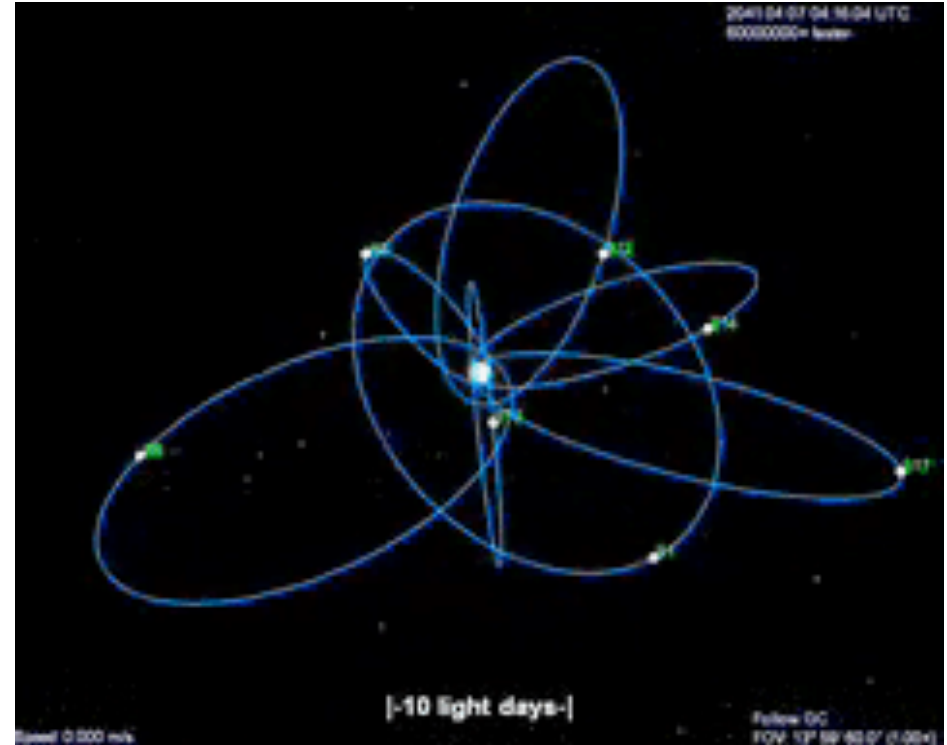


[断り無きときは図は  
ウェブから拝借]

- 時空が大きく曲げられ、
- 光さえも脱出できない領域が生まれる。
- その境界は**事象の地平面**と呼ばれる。

# BHの存在の証拠

- 我々の**銀河の中心**を見てみよう。
- **中心の質量**は周囲の星の動きの**直接観測**から確定。
- 中心にある物の**最大半径**も確定。
- 知られているどんな相互作用も、**BHへの重力崩壊**を妨げられない！



16年間の観測の果実 [Gillessen et al. 08]

# メッセージ：

ブラックホールは単なる理論上の人工物ではない。そこにある物！

# 構成

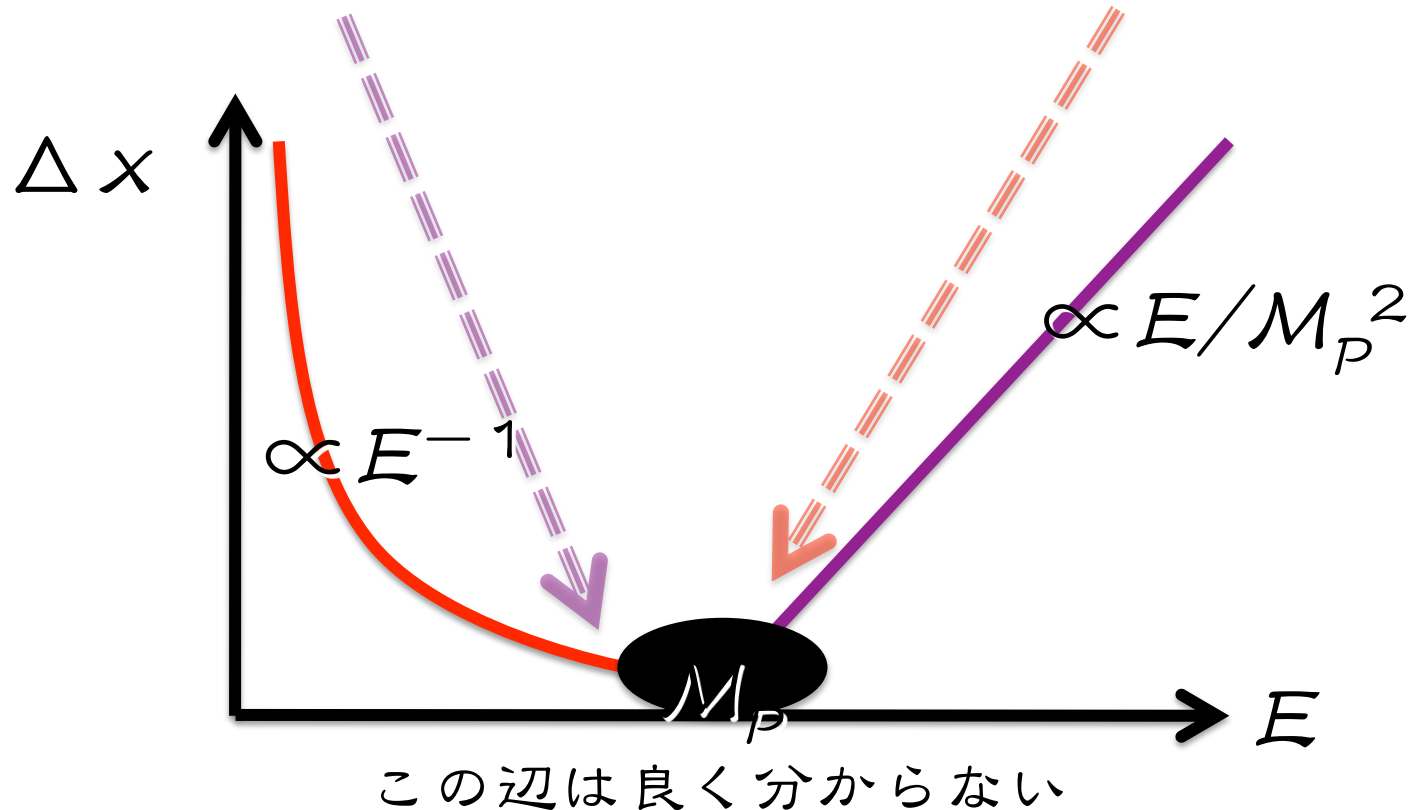
1. BHは**量子重力**へのパスポート。
  - String ball と対応原理。
2. TeV重力シナリオ。
3. BH生成は**証明**されている。
4. LHCにおけるBH崩壊。
  - **角運動量**の重要性。

# 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) $^{-1}$ 。
- 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 ( $E \gg M_p$ ) 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**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は、長さエネルギーの関係がひっくり返る。 $M_P$ とは、「有効理論の紫外切断」と「BH描像の赤外切断」



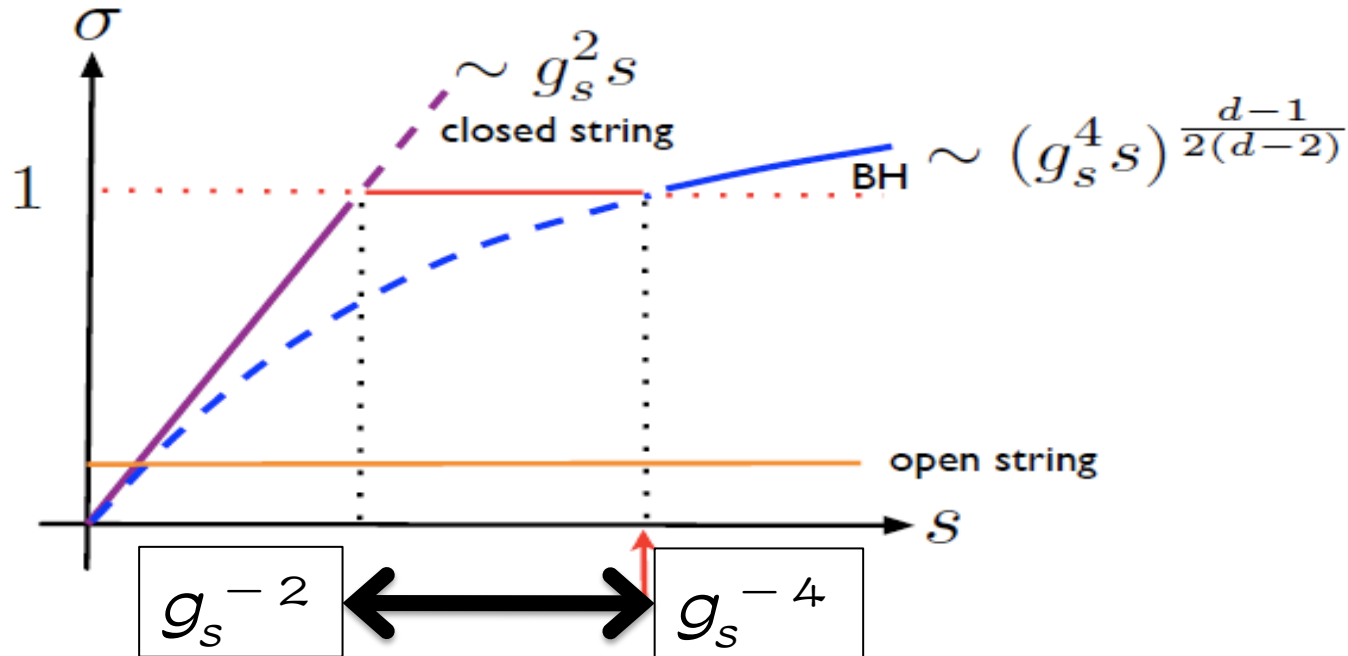
# 弦とBHの対応原理？

- 他に (長さ)  $\propto$  (エネルギー) となる物がある？
  - 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]
  - 大きさ [Holowitz, Polchinski 97; Damour, Veneziano 99]
  - 生成断面積 [Dimopoulos, Emparan 01] (次頁)
  - 微分断面積の**幾何的**ふるまい [Matsuo, KO 08] (次々頁)
- 等々、色々な量のオーダーが両者で一致する。



# String ball 生成断面積

[Dimopoulos-Empanan]



- このへんがstring ball 生成の領域。
- とはいふものの、 $g_s \sim g_{YM}^2 \sim \alpha(1)$  とすると、  
実際は直接 BH しか**見えな**いのではないだろうか。

# 微分断面積の幾何的ふるまい

[Matsuo, KO 09]

- 弦の散乱が大きな角運動量  $J$  に対して超ソフト:

$$\sigma_J \propto \exp(-J^2/s \ln s)$$

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**を得た。 [Matsuo, KO 09]

- これは**BH断面積**の**幾何的**ふるまい [Ida, KO, Park 02]

$$d\sigma/dJ \propto J^{D-3} \quad (\text{後述})$$

と対応しているのでは、という議論を行った。

- 興味もたれた方はセミナーに呼んで下さい。

# 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？

- 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. BHは**量子重力**へのパスポート。

■ String ball と対応原理。

2. TeV重力シナリオ。

3. BH生成は**証明**されている。

4. LHCにおけるBH崩壊。

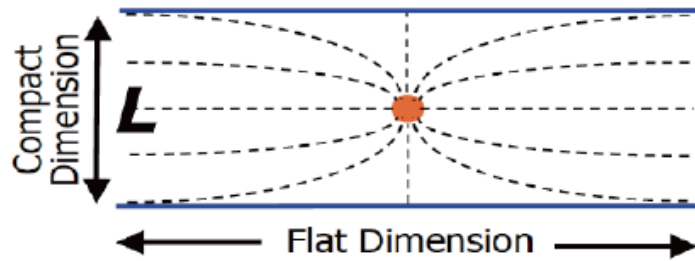
■ **角運動量**の重要性。

# 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  
 $M_p = G^{-1/2} \sim 10^{18} \text{GeV}$   
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？

# 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。

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

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

- $G_D \sim G_4 / L^n$

- 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。

# 我々はどこまで短い距離を知っているか？

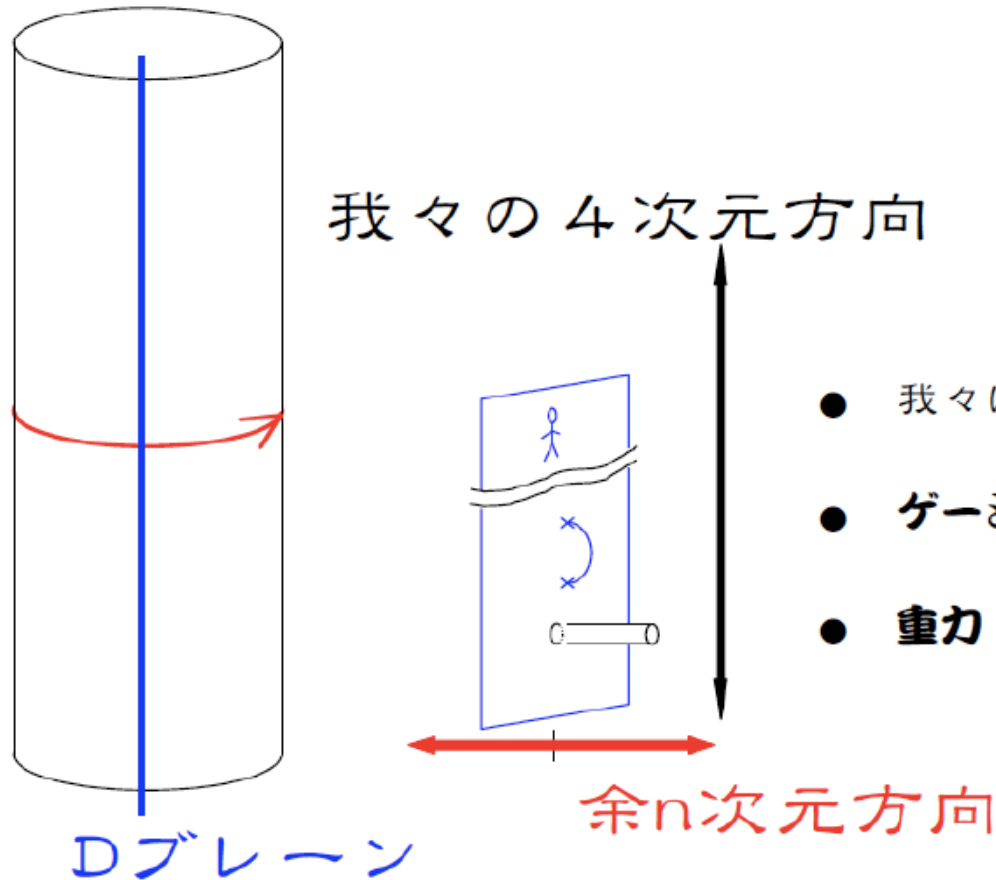
- 超弦理論において矛盾のない平坦時空は10次元。
  - 残りの6次元は小さく丸まっていなと。
  - どれくらい小さく？
- 実は我々の理論の正しさが検証されている距離は
  - ゲージ相互作用で  $\alpha m = 10^{-18} \text{ m}$  ぐらい、
  - 重力で  $0.1 \text{ mm} = 10^{-4} \text{ m}$  ぐらいまで。
- 重力は4次元に棲んでなくてもよい！

# ブレーン・ワールド

Akama 82

Rubakov, Shaposhnikov 83

Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali 98



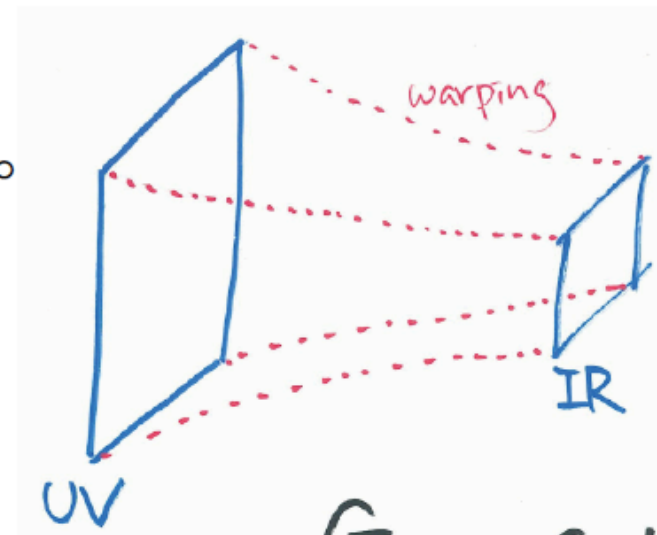
- 我々は**ブレーン**上に住んでいる。
- **ゲージ相互作用** (開弦) は**ブレーン**上に。
- **重力** (閉弦) は全体 (**バルク**) に。

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**。



# 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。



# Further Models in Warped Space

◆ Sufficient to put Higgs at IR brane for gauge hierarchy.

◆ E.g. in **gauge-Higgs unification** model:

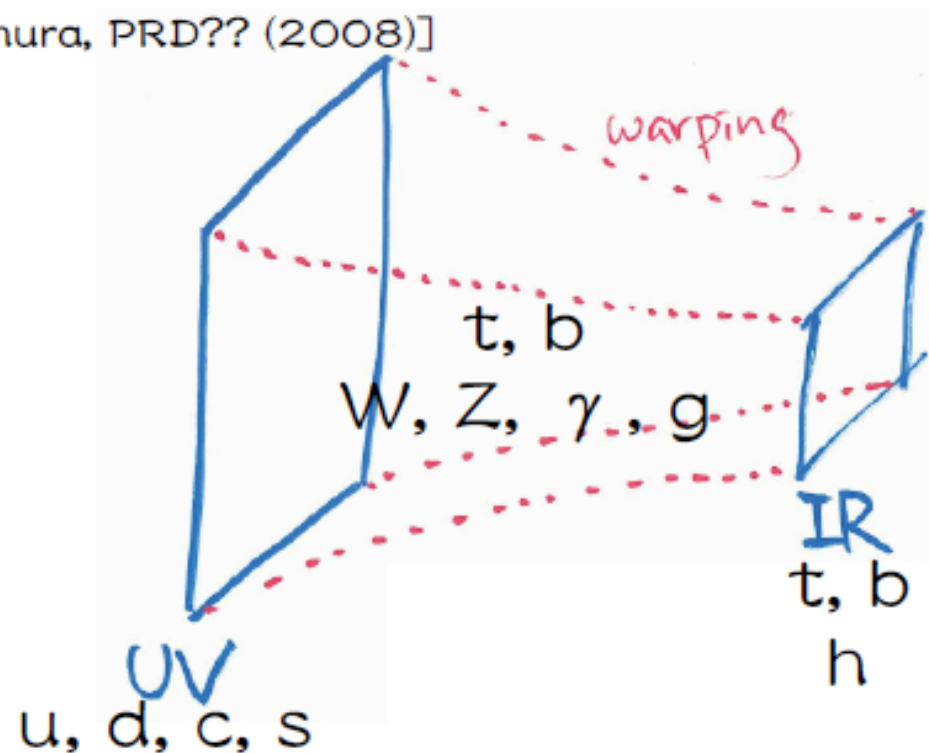
Higgs as **Wilson-line phase  $A_5$**

[...; Hosotani, **KO**, Ohnuma, Sakamura, PRD?? (2008)]

◆ BH production by

◆  $gg \rightarrow BH$ ,  $bb \rightarrow BH$ ?

[Park, **KO**(?) in progress]



ここまでのまとめ

真のプランク・

スケールはTeV

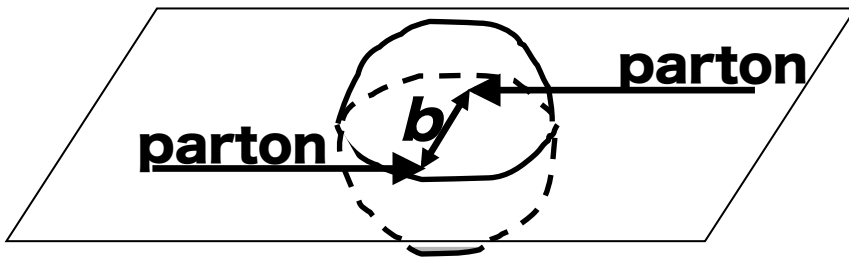
でありうる！

# 構成

1. BHは**量子重力**へのパスポート。
  - String ball と対応原理。
2. TeV重力シナリオ。
3. BH生成は**証明**されている。
4. LHCにおけるBH崩壊。
  - **角運動量**の重要性。

# BH生成断面積

- 単純には、 $b < R_S(\sqrt{s})$  ならBHになるだろう。  
(Hoop conjecture)



$$R_S \sim \frac{1}{M_P} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{M_P} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

$$M_{\text{BH}} = \sqrt{\hat{s}}$$

$(M_P \sim \text{TeV})$

$$\sigma_{\text{prod}} = \pi R_S^2 \propto \hat{s}^{\frac{2}{n+1}}$$

(for  $R_S \ll L$ )

- エネルギーと共に増える断面積！

# Froissart Bound? (Backup)

- BH cross section proven to rise:  $\sigma_{\text{BH}} \sim R^{D-2} \sim E^\#$
- What about Froissart bound?  $\sigma_{\text{tot}} < \# (\log E)^2$ 
  - E.g., consider Yukawa potential:  $V(r) \sim g e^{-mr}/r$ .
  - With impact parameter  $b$ ,
    - ◆ Practically no scattering when  $|g e^{-mb}| < 1$ .
    - ◆ Practically complete scattering when  $|g e^{-mb}| > 1$ .
  - $\sigma \sim b_{\text{max}}^2 \sim (1/m^2) \ln^2 |g| \sim (\#/m^2) (\ln E)^2$
- When there are long range force due to massless particle exchange, Froissart bound does not apply. (Cf.  $\sigma_{\text{Coulomb}} = \infty$ )

# BH生成の証明

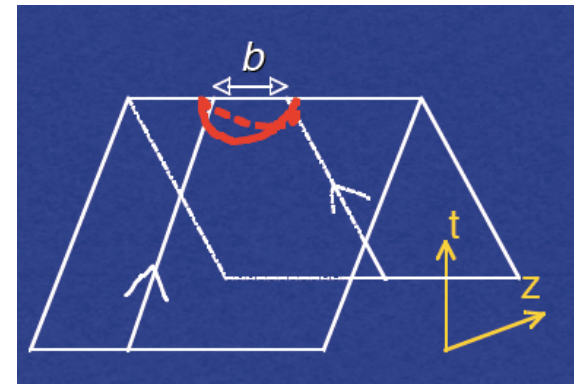
[4次元 Eardley, Giddings 02; 高次元 Yoshino, Nambu 02]

## ● Aichelburg-Sexl 解。

■ Schwarzschild 解から、

◆  $E$  固定

◆ ブースト  $\rightarrow \infty$  ( $v \rightarrow c$ )



■ により質量  $\rightarrow 0$  の点粒子のつくる重力場を得る。

■ 性質:  $z=t$  のみに重力ポテンシャル (上図 左の板)

● 上図のように衝突径数  $b$  で2枚ぶつけると、

■  $b < b_{\max}$  で東縛面が存在  $\rightarrow$  事象の地平面

■  $b_{\max} \sim$  「 $M = \sqrt{s}$  に対応するBH半径」が示さる。

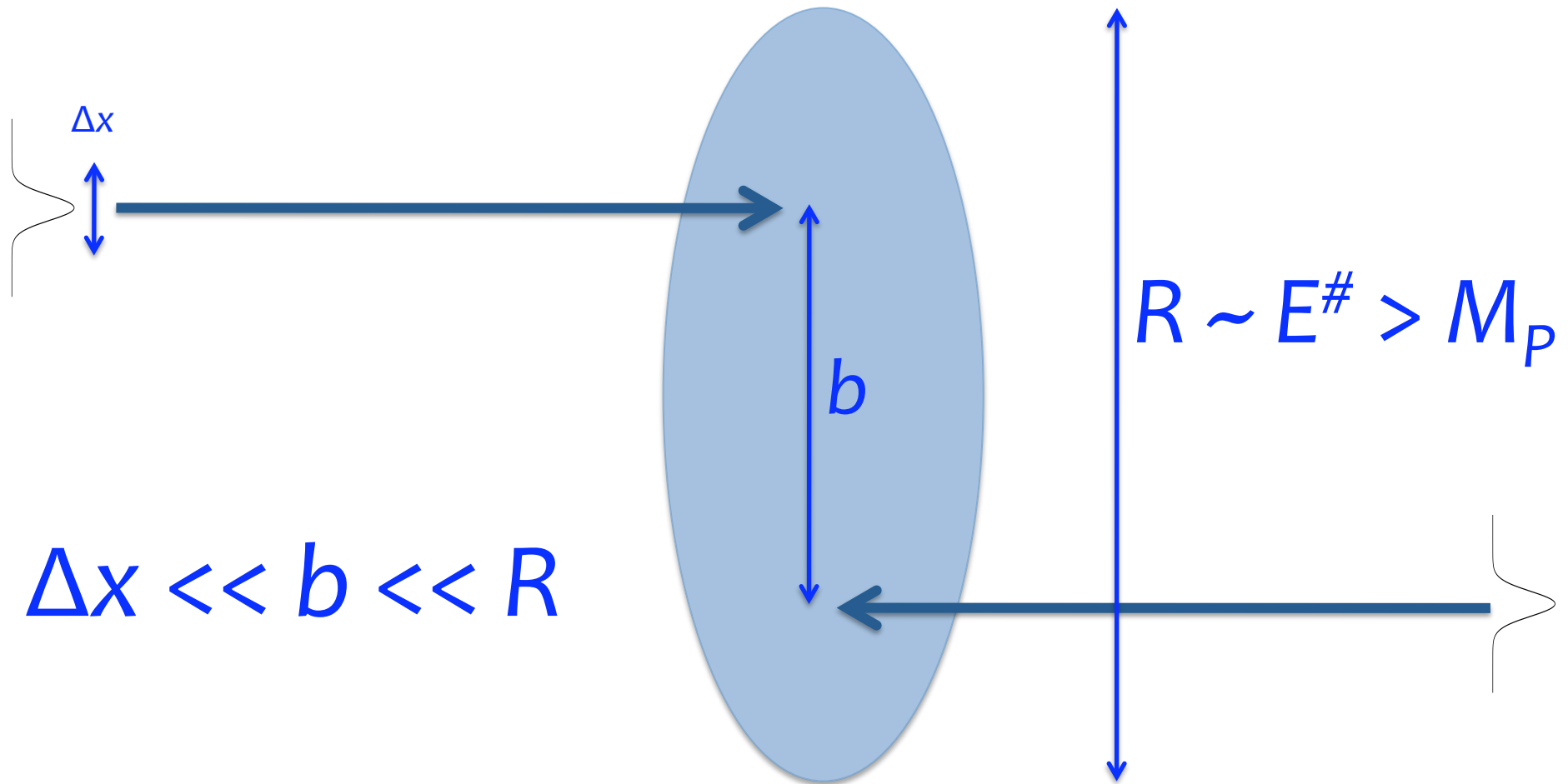
● すなわち、 $\sigma_{\text{BH}} \sim R_{\text{Sch}}^2 \sim E^{\text{正巾}}$  が証明された。

# 他の証拠

- 古典重力の範囲でBH生成が証明されたわけだが、他には？
- 量子力学的**波動**でやっても同じ結果になる  
(であろう) 事をチェック。 [Giddings, Rychkov 04]
- 弦との対応原理。 (既述)
- 数値相対論で2BH→1BHを直接検証。 [Shibata, Okawa, Yamamoto 08]
- 2ソリトンの正面衝突。 [Choptuik, Pretorius 09]



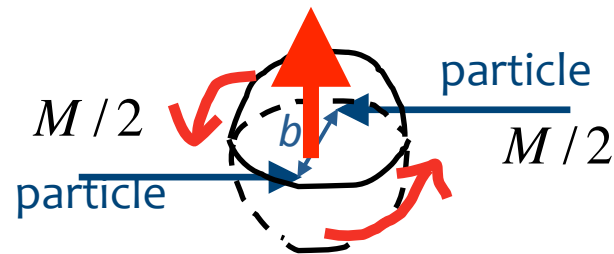
# 注: 我々の扱える領域



# BHは大きな角運動量と 共に作られる

[Ida, KO, Park 02]

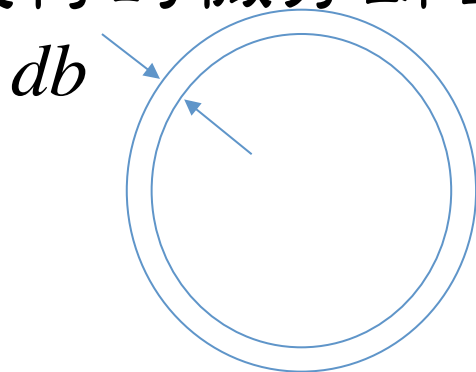
- $s=M^2$ を固定すると、衝突径数  $b \propto$  角運動量  $J$



angular momentum

$$J = bM/2$$

- 幾何的微小断面積は **角運動量と共に増える。**



$$d\sigma \approx b^{D-3} db \propto J^{D-3} dJ$$

# 注: 古典BH描像は LHCではあまりよくない

- 「大きい」角運動量といっても典型的には  
LHCで  $J_{\max} \sim 3, \dots, 10$  for  $D=5, \dots, 10$ 。
- LHCは半古典BH描像ぎりぎりの領域。

# ここまでのまとめ

- BH生成断面積は
  - **幾何的**（「散乱のエネルギーで決まる Schwarzschild半径」を持つ黒円盤）。
  - エネルギーと共に**増える**！  $\sigma_{\text{BH}} \sim R_S^2 \sim S^\#$
- BHは、**古典**重力の**非摂動**動力学でできる。
- BHは、**大きな角運動量**と共に作られる。

# 構成

1. BHは**量子重力**へのパスポート。
  - String ball と対応原理。
2. TeV重力シナリオ。
3. BH生成は**証明**されている。
4. LHCにおけるBH崩壊。
  - **角運動量**の重要性。

# BHの一生

ホーキング温度は上がる一方

## 1. 禿相 (balding phase)

- 古典重力の動的なBH生成過程。「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。[Iida, KO, Park 02, 06]

## 3. Schwarzschild 相

- 角運動量 $\sim 0$ 。質量をホーキング輻射で失う。

## 4. プランク相 (Planck phase)

- $T \sim M_p$ 。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へ崩壊。



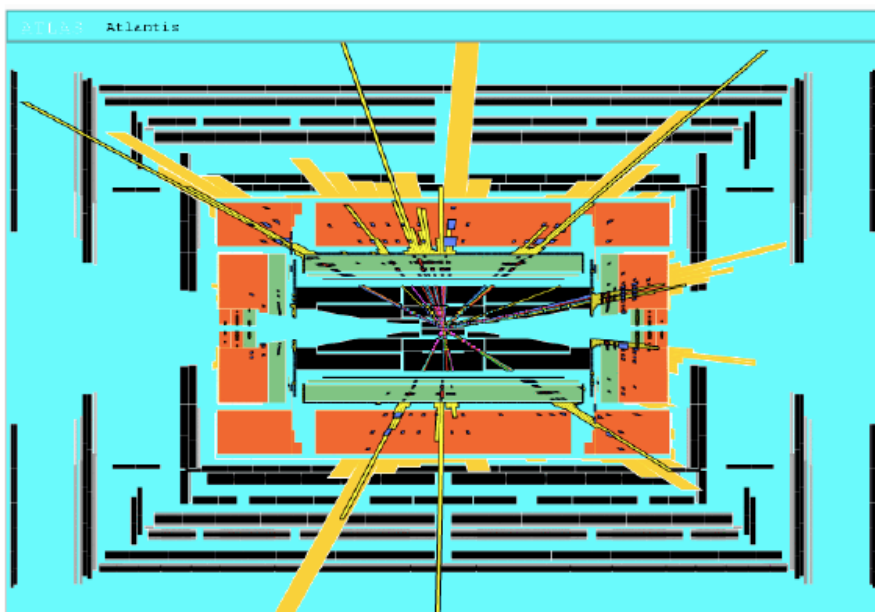
# TeV BH@LHCの崩壊

[詳しくは兼田さんのトーク]

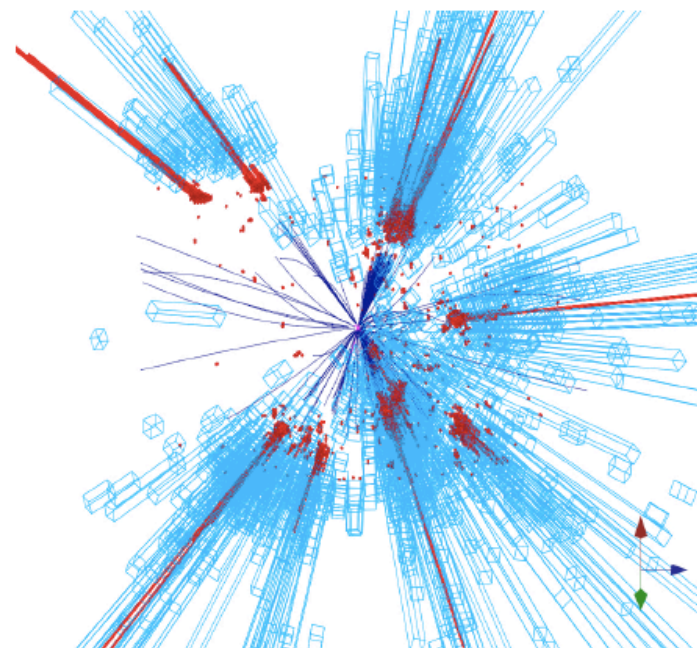
- **ホーキング放射**を通じて崩壊する。(崩壊幅やスペクトラムを完全に計算可)
- 崩壊先は主に、**ブレーン上**の知ってるSM物質:クォーク・レプトン・ゲージ場・等々。  
[Empanan, Horowitz, Mayers 00]
- 崩壊比 = SMの自由度。  $10^{-27}$  秒で  $E >$   
~100GeV のSM粒子数十個に崩壊 [Giddings, Thomas 02; Dimopoulos, Landsberg 02]
- 崩壊先は多ジェットだが、エネルギーが大きいためBHの崩壊粒子がQGPを作る事はない。  
[Alig, Drees, **KO** 06]

# はっきりしたシグナル

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



... and in CMS



from Kobayashi DPF/JPS 06

● → 兼田さんのトーク



# TeV BHのホーキング放射

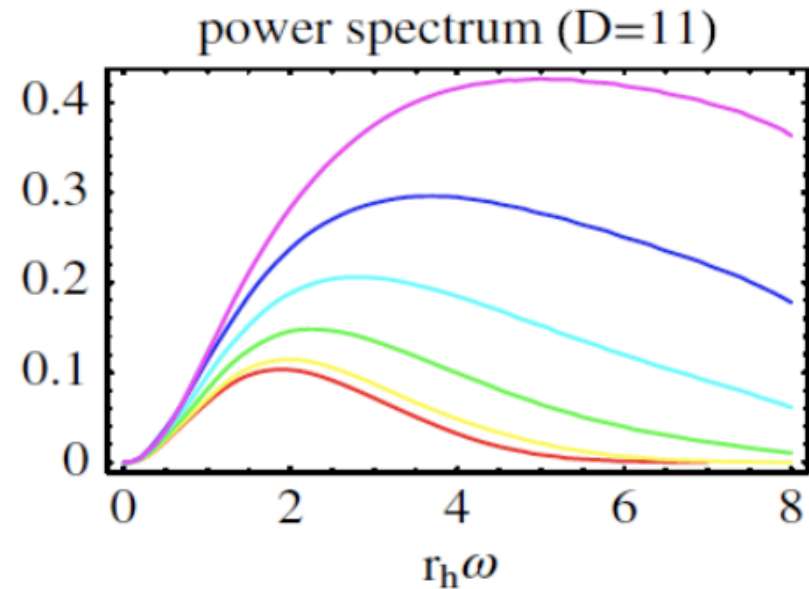
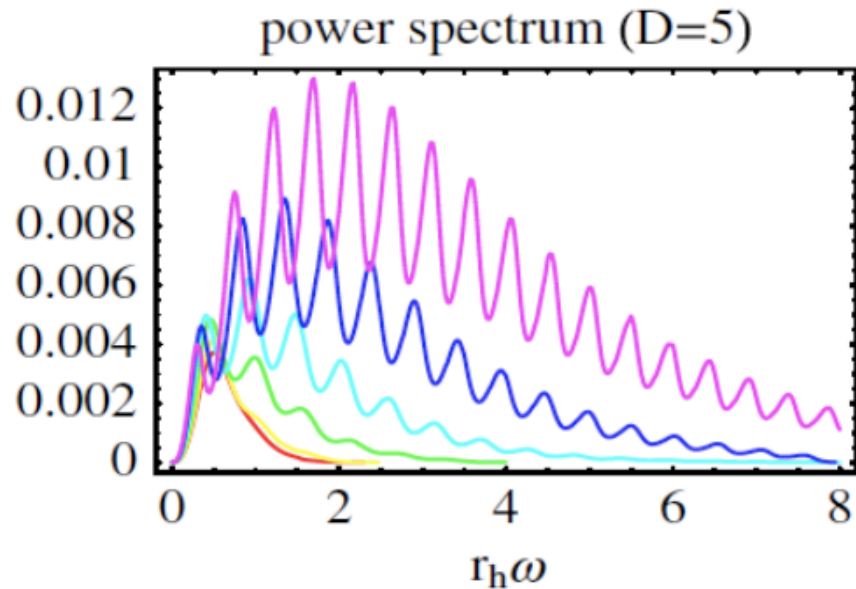
[Ida, **KO**, Park 02, 05, 06; Kanti et al. 02, 03, 05, 06, 07, 09]

- ブレーン上の場の方程式 [Ida, **KO**, Park 02] から
- **灰体因子** (~BH自身により曲げられた時空が放射を跳ね返す効果) 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。 [Ida, **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:0902.3577 [hep-ph]. “It includes all of the black-hole gray-body factors known to date and incorporates the effects of black-hole rotation, splitting between the fermions, non-zero brane tension and black-hole recoil due to Hawking radiation (although not all simultaneously).”

# クォーク・レプトンへの ホーキング放射 [Ida, KO, Park 06]

ランドール・サンドラム

大余次元



無回転から高回転まで

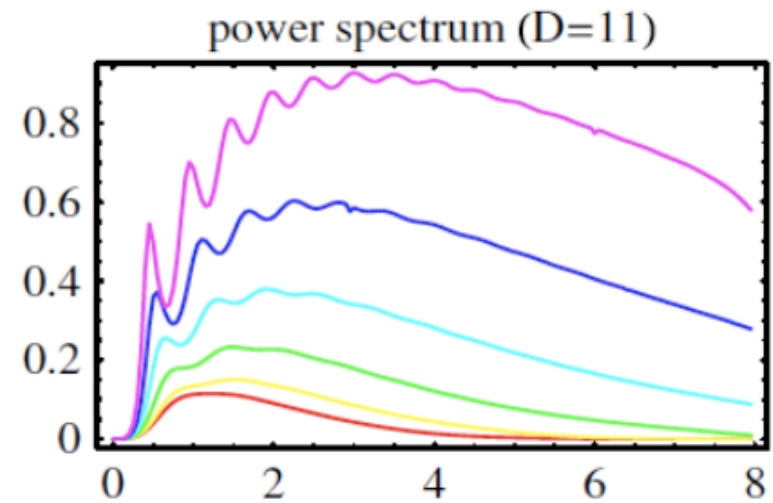
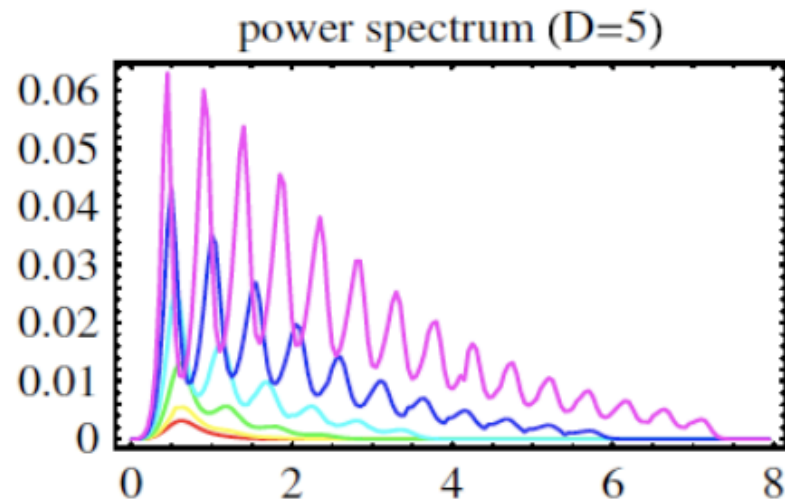
$a_* = 0, 0.3, \dots, 1.5$  from lower left to upper right.

# ゲージ場へのホーキング放射

[Ida, KO, Park 06]

ランドール・サンドラム

大余次元



無回転から高回転まで

# ギザギザの起源は角モード

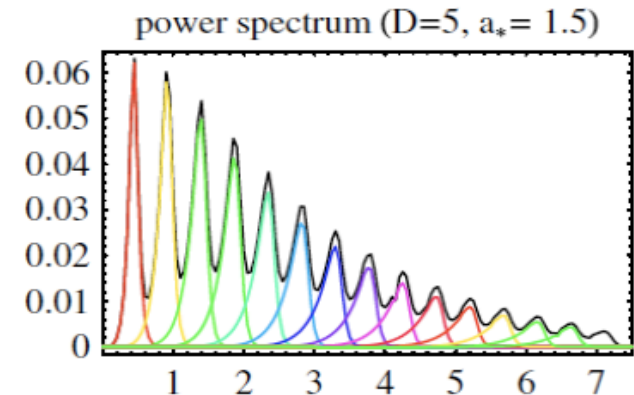
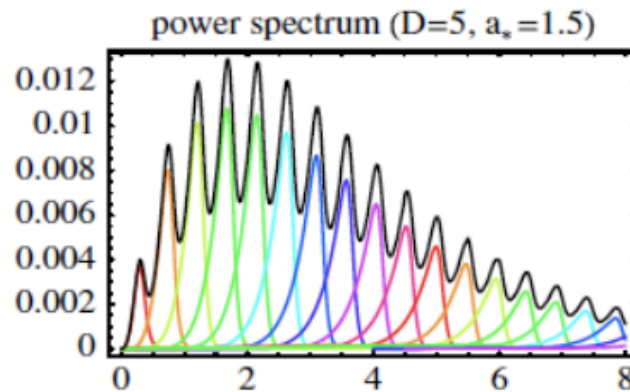
[Ida, KO, Park 06]

いずれも前頁の高回転の場合

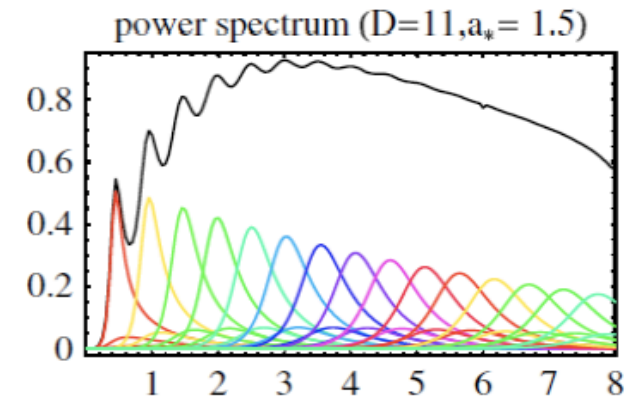
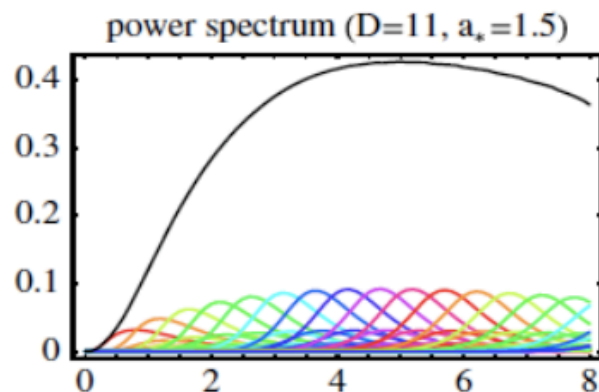
クォーク・レプトン

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)

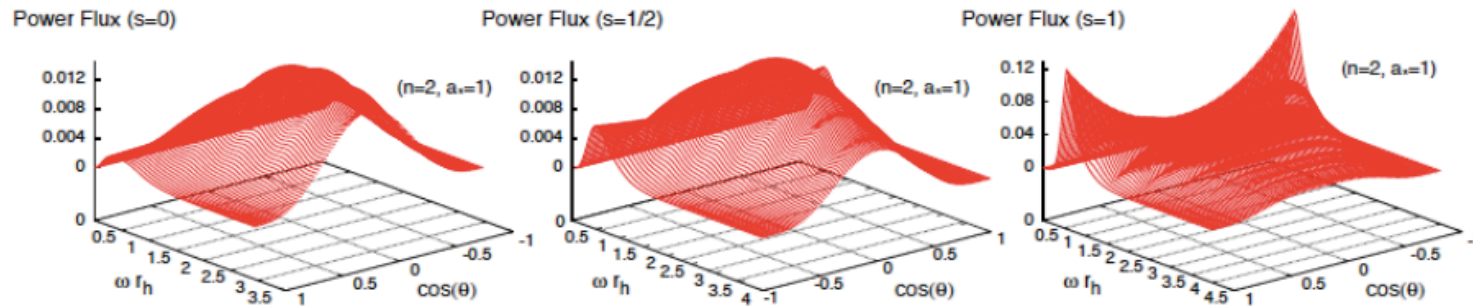
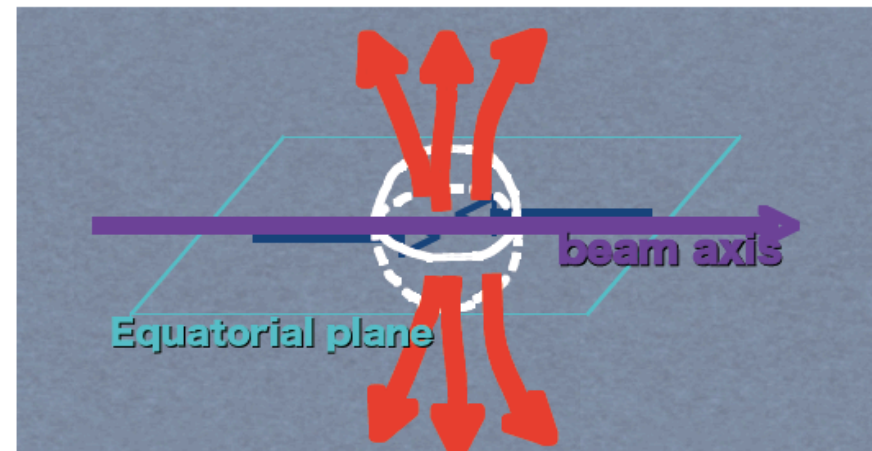


Figure 16: Angular distribution of the power spectra for (a) scalars, (b) fermions, and (c) gauge bosons on the brane from a 6-dimensional black hole with  $a_* = 1$ .

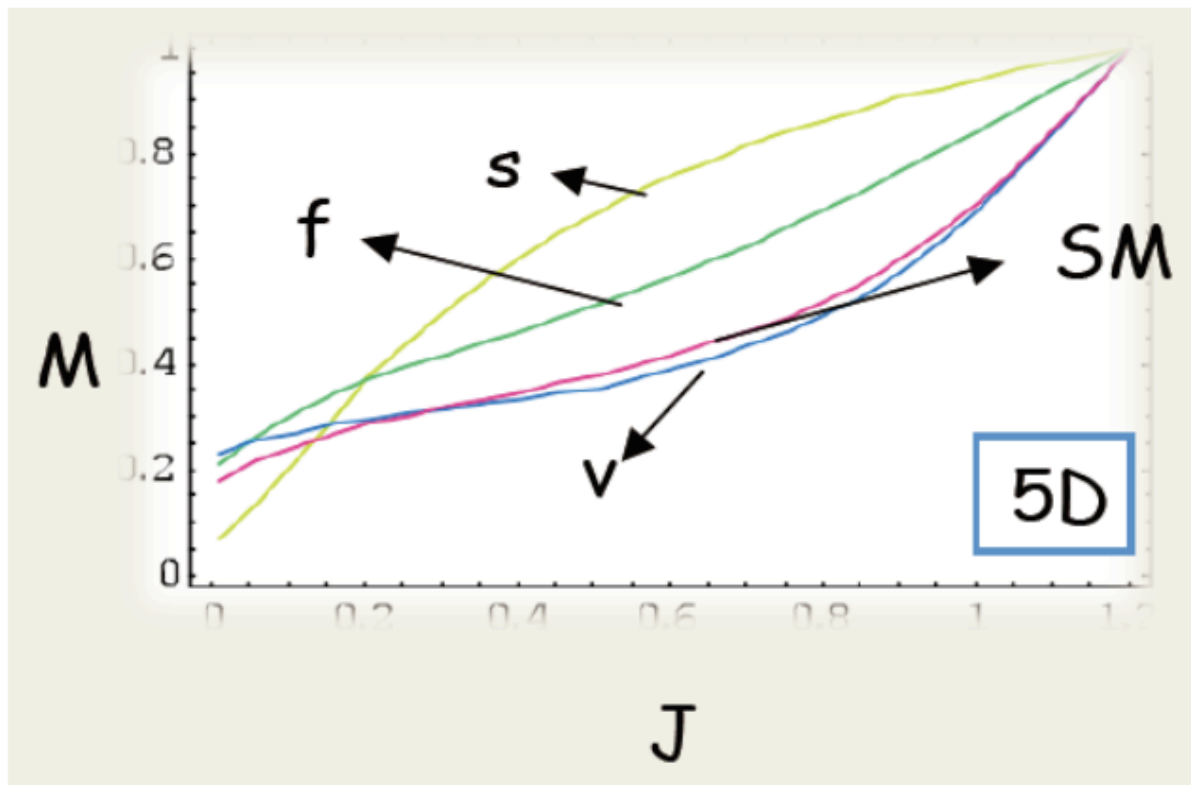
ゲージ場はビーム軸と垂直な極方向に放射される。

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



# BHの時間発展

- 高回転時はゲージ場への放射 ( $\nu$ ) 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

# ここまでのまとめ

- BHは主としてSMの見える粒子に崩壊する。
- ホーキング輻射は完全に計算できる。
- **角運動量**重要。
- LHCではBHによる半古典的な扱いはそんなに  
よくない領域。
  - 良くいえば、量子重力の効果が実験的に見られる。

# 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)



# 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 でホーキング放射のない、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。

# 全体のまとめ

- 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。
  - 色んなところで**角運動量**の重要性。