

ブラックホールの 微視的状态と弦理論

重森 正樹
(名大KMI)

2012年3月27日
日本物理学会第67回年次大会

Partly based on work with I. Bena, J. de Boer, S. Giusto & N. Warner,
ArXiv: 1004.2521, 1107.2650, 1110.2781



Kobayashi-Maskawa Institute
for the Origin of Particles and the Universe



Why Black Holes, Why String Theory?

ブラックホール

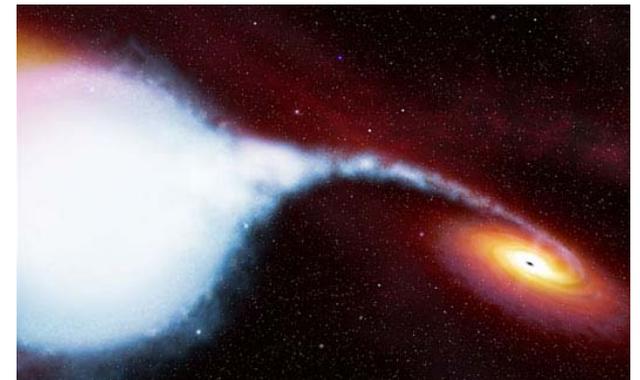
宇宙に存在する最も極限的な状況 (の1つ)

- ▶ 理論的発見: Schwarzschild 1917

- ▶ Einsteinの重力理論の解
- ▶ 脱出不可能な時空の領域

- ▶ 宇宙に普遍的に存在

- ▶ 恒星の燃えかす
(例) 白鳥座 X-1: $M \sim 8.7M_{\odot}$
- ▶ 銀河中心の超大質量 BH
(例) 天の川中心: $M \sim 3.7 \times 10^6 M_{\odot}$



BHの古典的／量子的側面

古典的 / 巨視的物理:

- ▶ 良くわかっている
- ▶ 概念的な問題無し

量子的 / 微視的物理:

- ▶ 良く分かっていない
 - ▶ 例: インフォメーションパラドックス
- ▶ 時空とは何か、等の深遠な問いと関連

情報を投入



ランダムな放射
(Hawking 放射)

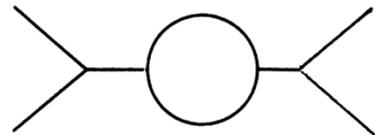


ユニタリティの
喪失??

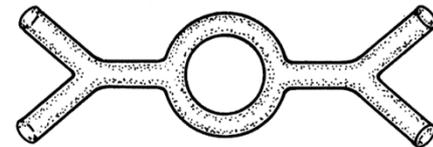
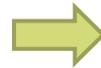
BHと弦理論

弦理論:

- ▶ 無矛盾な量子重力理論



点粒子



弦

- ▶ BHの微視的物理学を調べられる
- ▶ 弦理論自体の理解を深められる

ブラックホール熱力学

熱力学の法則

▶ 第0法則：

平衡系では温度一定

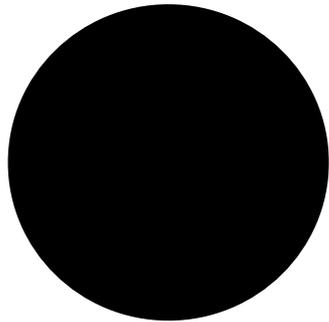
▶ 第1法則：

$$dE = T dS - P dV + \mu dN$$

▶ 第2法則：

$$dS \geq 0$$

BH熱力学 (1)



M : 質量 = エネルギー
 J : 角運動量
 Q : 電荷

- ▶ BH の「熱力学量」を定義できる

$$T_{\text{H}} \equiv \frac{\kappa}{2\pi} \quad : \quad \text{温度 (Hawking 温度)}$$

$$S_{\text{BH}} \equiv \frac{A}{4G_{\text{N}}} \quad : \quad \text{エントロピー} \\ \text{(Bekenstein-Hawking エントロピー)}$$

BH熱力学（2）

- ▶ 第0法則：

T_H は地平面上で一定

- ▶ 第1法則：

$$dM = T_H dS_{\text{BH}} + \Omega dJ + \Phi dQ \quad \ddagger$$

- ▶ 第2法則：

$dS_{\text{BH}} \geq 0$: 地平面の面積は常に増加

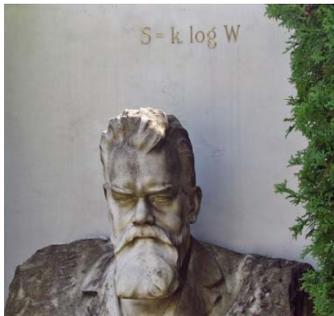


BH は熱力学の法則に従う！

アンサンブルとしてのBH

Boltzmann :

エントロピーとは微視的状态の数（の対数）である



$$S = \log N_{\text{micro}}$$



BH とは、背後にある微視的状态の統計力学的アンサンブルであるはず

$$S_{\text{BH}} = \log N_{\text{micro}}$$

弦理論による 微視的状態の数え上げ

微視的状態の数え上げ

BH は多数の微視的状態の
アンサンブル

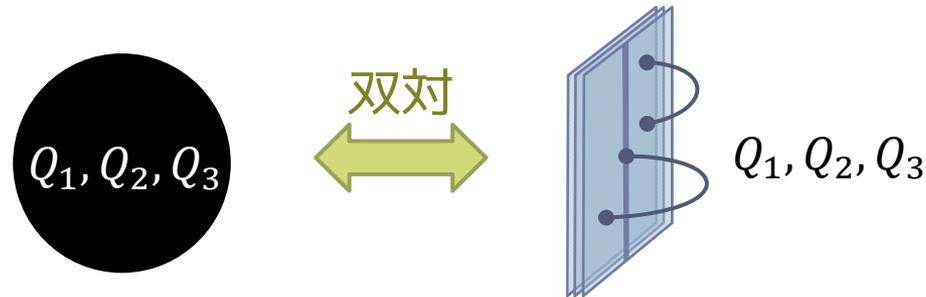


S_{BH} を微視的状態を
数え上げることにより再現したい

$$S_{\text{BH}} = \log N_{\text{micro}}$$

Strominger-Vafa

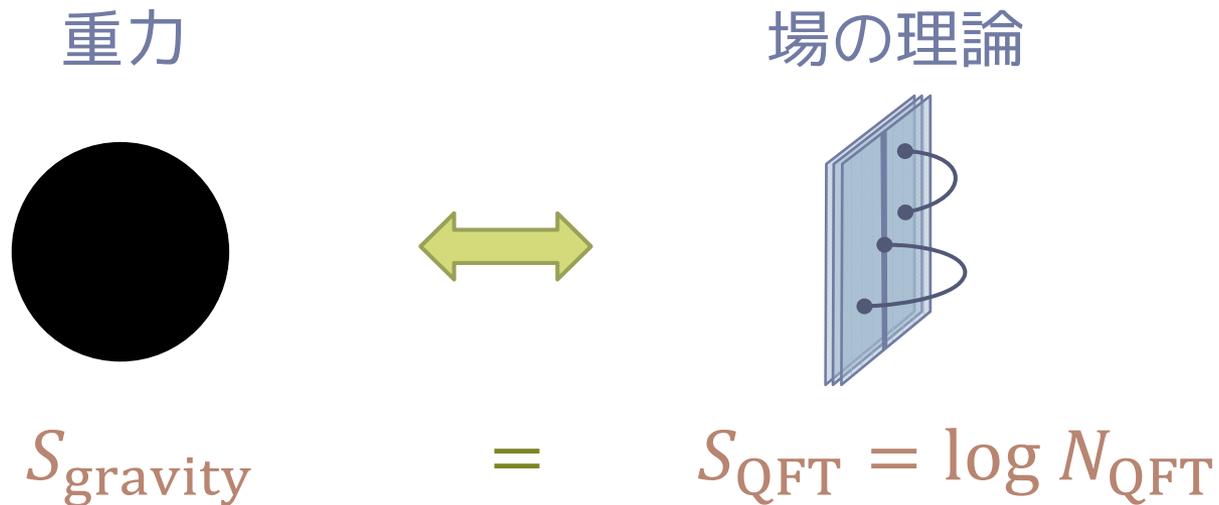
- ▶ 「3-charge ブラックホール」
 - ▶ Q_1 D1-ブレーン, Q_2 D5-ブレーン, Q_3 KK運動量
 - ▶ 超対称
- ▶ 重力と場の理論の双対性を利用



- ▶ エントロピーを状態の数え上げにより再現

$$S_{\text{BH}} = 2\pi\sqrt{Q_1 Q_2 Q_3} = \log N_{\text{QFT}}$$

問題点



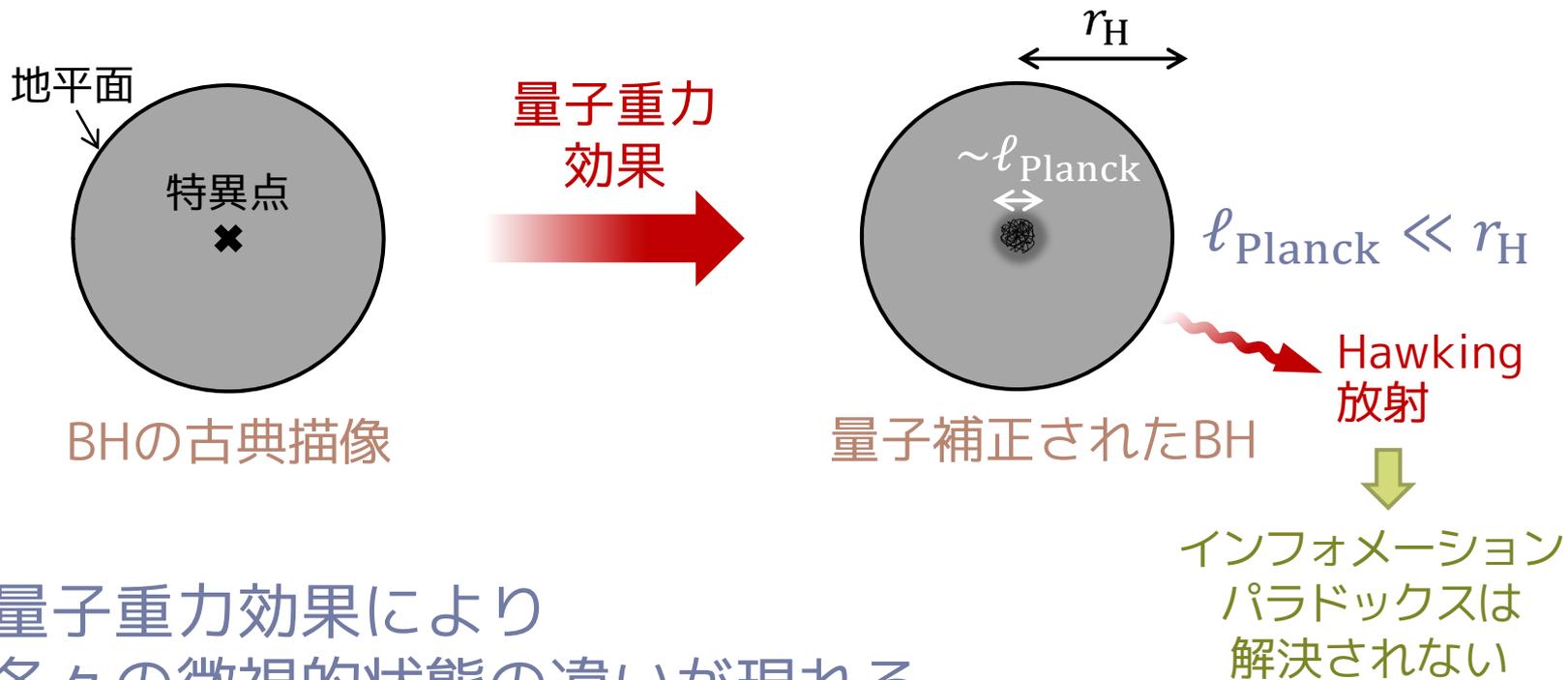
- ▶ 微視的状態の**数**は確かに再現された
- ▶ 微視的状態が**重力側**で**どう**記述されるのかが不明確
すなわち「**BH**は何でできているのか」が不明確

重力描像における微視的状态と Fuzzball 予想

問題:

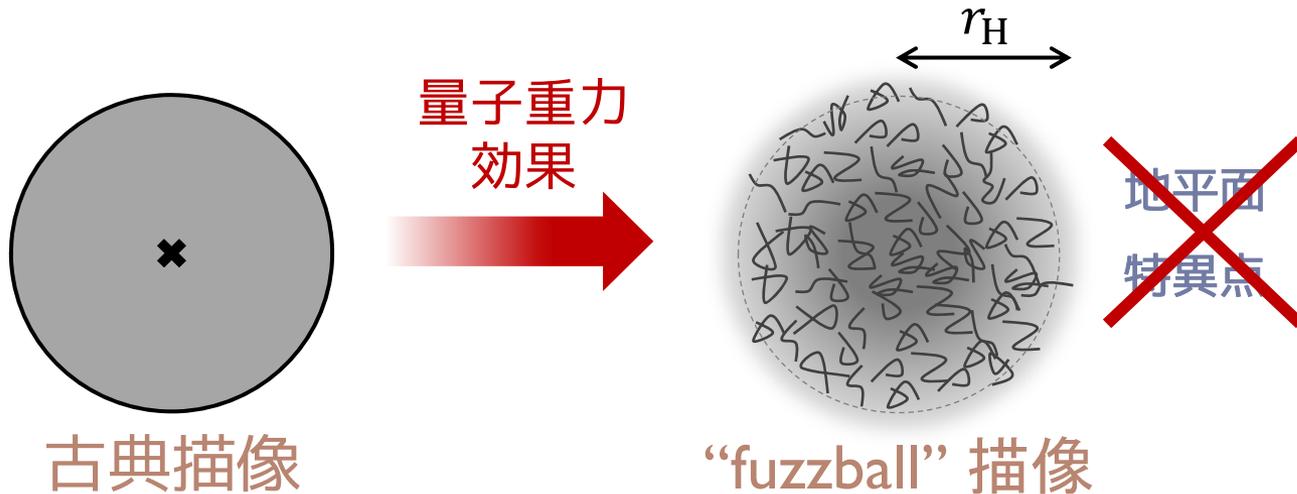
微視的状态は重力側では
どう記述されるのか？

量子重力効果: 従来の描像



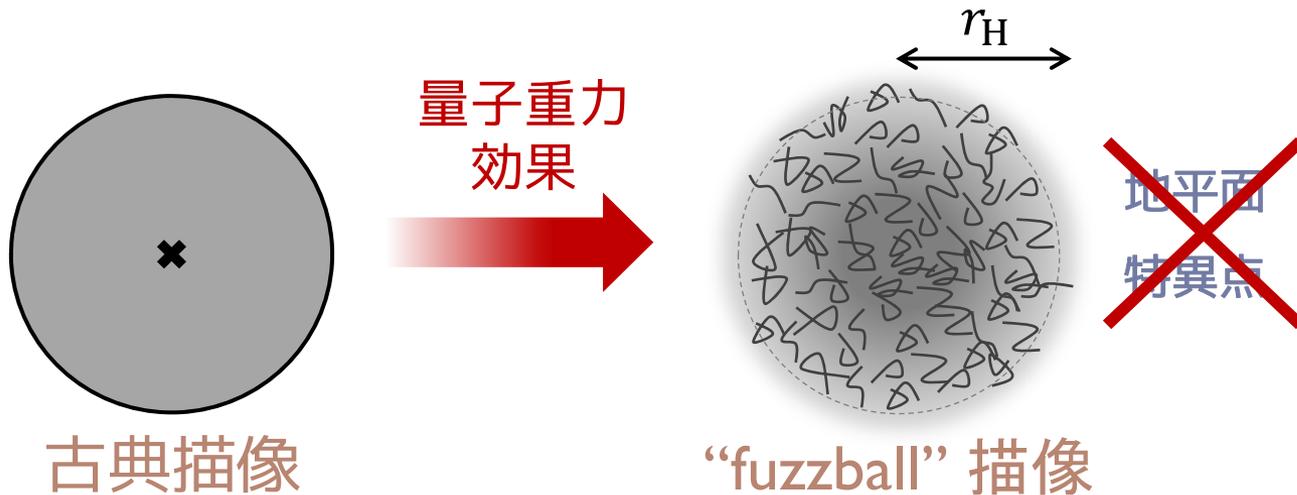
- ▶ 量子重力効果により
各々の微視的状态の違いが現れる
- ▶ 量子重力効果は特異点から ℓ_{Planck} 程の範囲に留まる
- ▶ 古典的描像は、ほぼ変更を受けない

Fuzzball 予想 [Mathur, ~2001]



- ▶ BH は r_H 程の範囲に広がる
量子重力的 / 弦理論的な “fuzz” で満たされている
- ▶ 地平面も特異点も存在しない
- ▶ 従来の描像を根本から変更

Fuzzball 予想 [Mathur, ~2001]



- ▶ BH の微視的状态 = fuzz の異なる配位
- ▶ 古典描像とは古典極限で得られる近似描像
- ▶ インフォメーションパラドックスは存在しない
- ▶ 証明・反証はまだ

Fuzzball の証拠: 2-charge 系

“2-charge 系”

- ▶ Q_1 個の D1-ブレーンと Q_2 個の D5-ブレーンから成る「ブラックホール」系
- ▶ 超対称
- ▶ 大きなエントロピーを持つ: $S = 2\sqrt{2}\pi\sqrt{Q_1 Q_2}$
- ▶ 6次元古典超重力理論の枠内で微視的状态が具体的に構成された

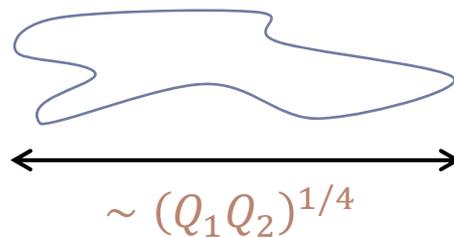
[Lunin+Mathur, 2001-02] [Lunin+Maldacena+Maoz, 2002]

2-charge 系の微視的状态

*

➔ Fuzzball 解が実際に存在!

- BH と同じ電荷 Q_1, Q_2 を持つ
- 地平面も特異点もない
- 任意の曲線でパラメトライズされる
- 広範囲に広がった配位
- 数え上げによりエントロピーを再現: $S_{\text{geom}} \sim \sqrt{Q_1 Q_2}$



[Rychkov, 2005]

▶ 全て古典(超)重力の枠内

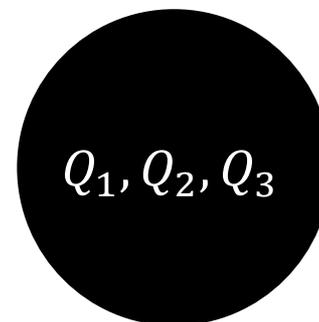
—— “幾何学的微視的状态”

▶ ただし、古典極限で BH の地平面は潰れてしまう
—— 通常の意味での BH ではない…

正真正銘のBHへ: 3-charge系

“3-charge 系”

- ▶ D1, D5, P 電荷から成る
正真正銘のBH系 (cf. Strominger-Vafa)
- ▶ 超対称
- ▶ 大きなエントロピーを持つ:



$$S_{\text{BH}} = 2\pi\sqrt{Q_1 Q_2 Q_3} \sim Q^{\frac{3}{2}} \quad (Q_{1,2,3} \sim Q)$$

3-charge系の幾何学的微視的状态

- ▶ やはり幾何学的微視的状态があるか?

- ▶ 非常に多くの幾何学的微視的状态が実際に発見された —— fuzzballs!

[Bena+Warner, 2005] [Berglund+Gimon+Levi, 2005]

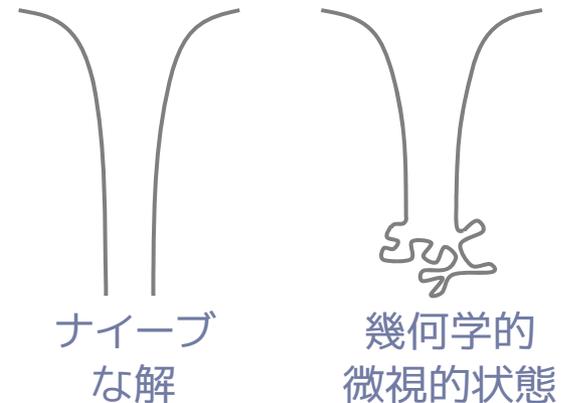
- ▶ しかし S_{BH} を再現するには数が不足

[de Boer+El-Showk+Messamah+Van de Bleeken, 2008]

[Bena+Bobev+Ruef+Warner, 2008]

- ▶ もっと多くの微視的状态が必要!

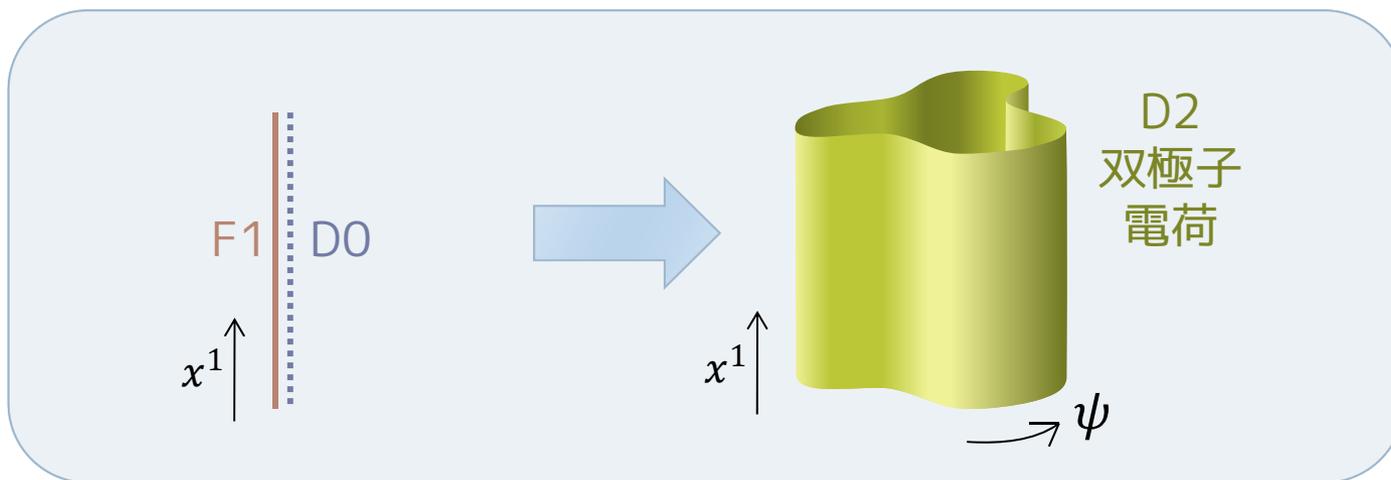
$$S_{\text{geom}} \sim Q^{\frac{5}{4}} \ll S_{\text{BH}} \sim Q^{\frac{3}{2}}$$



エキゾチックブレーンと 非幾何学的な微視的状态

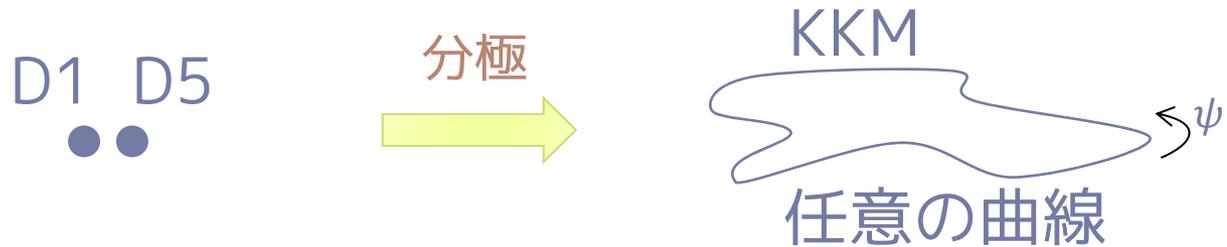
Supertube 効果

F1 + D0 $\xrightarrow{\text{分極}}$ D2 [Mateos+Townsend, 2001]



- ▶ 自発的な分極現象
- ▶ 新しい双極子電荷を生じる
- ▶ 断面 = 任意曲線

2-charge 系と supertube 効果



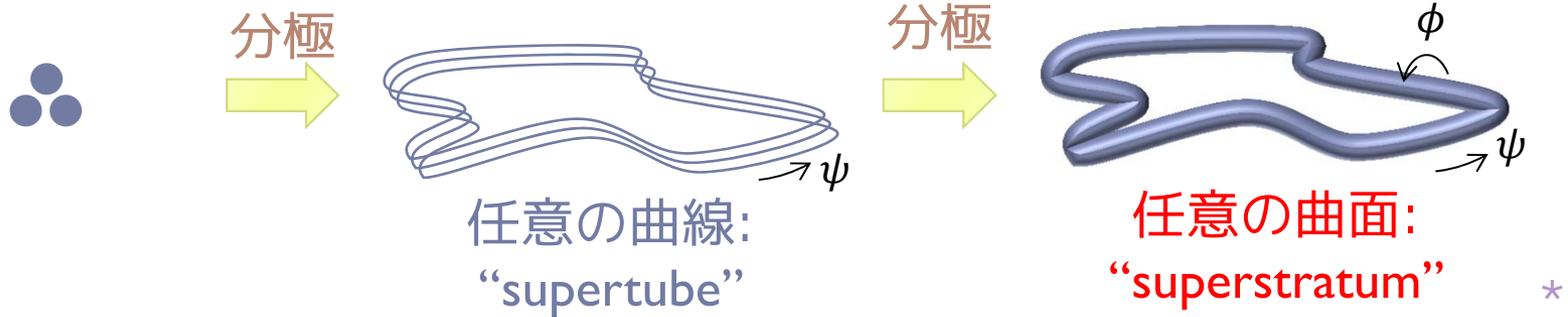
“幾何学的微視的状态”

- ▶ D1, D5 が KKM 双極子に分極
- ▶ KKM は任意の曲線に沿える
- ▶ 異なる微視的状态 = 異なる曲線

➡ 大きなエントロピー $S_{\text{geom}} \sim \sqrt{Q_1 Q_2}$

3-charge系とsupertube効果 (1)

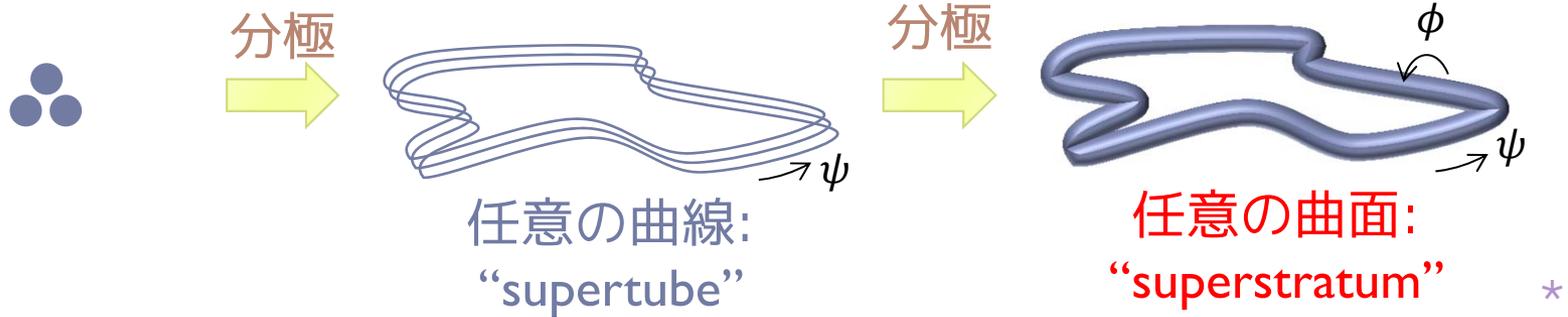
[de Boer+MS 1004.2521] [Bena+de Boer+MS+Warner 1107.2650]



- ▶ 3-charge 系でも 2-charge 系と同様に自発的分極が起こる
- ▶ もう一度自発的分極が起こるか？
→ 原理的に可能！

3-charge系とsupertube効果 (2)

[de Boer+MS 1004.2521] [Bena+de Boer+MS+Warner 1107.2650]



- ▶ 任意の曲面が $S_{\text{BH}} \sim Q^{3/2}$ を説明？
- ▶ 際限なく分極が可能？
- ▶ この過程で「エキゾチックブレーン」が生じる

エキゾチックブレーンとは

▶ 「忘れられた」ブレーン

[9707217 Elitzur+Giveon+Kutasov+Rabinovici]

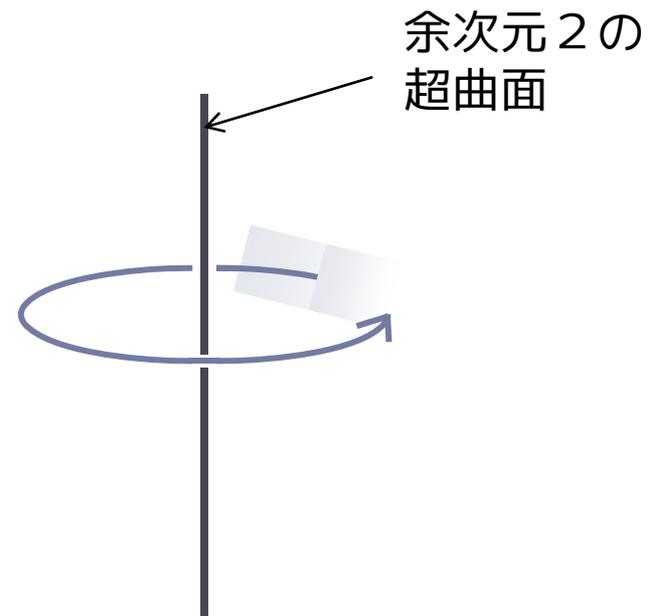
[9712047 Blau+O'Loughlin]

[9809039 Obers+Pioline]

▶ 余次元 2 (defect)

▶ 非幾何学的

[de Boer+MS 1004.2521]



弦理論における「双対性」

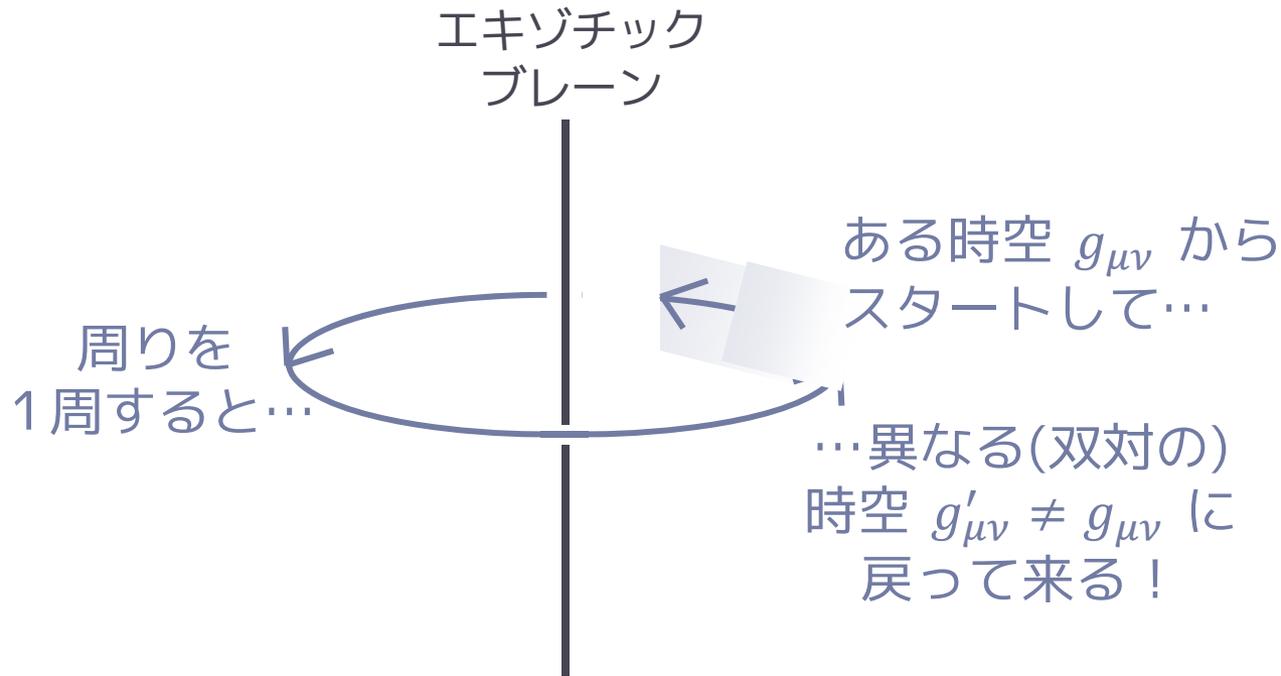
- ▶ 弦理論の持つ対称性
- ▶ 異なる時空を関連付ける

例: T-双対性



半径 R の S^1 と半径 $\tilde{R} = \frac{l_s^2}{R}$ の S^1 は
物理的に等価

エキゾチックブレーンの非幾何学性

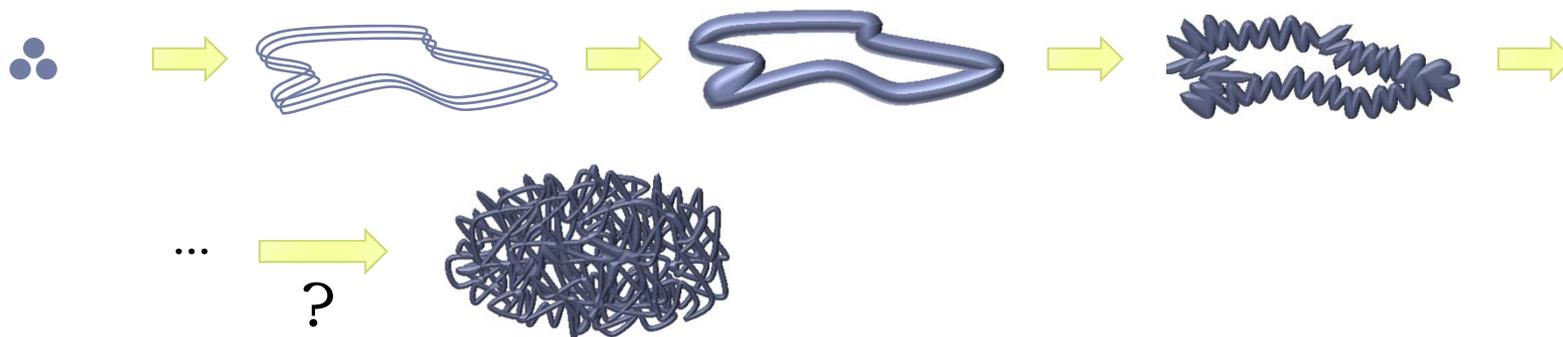


- ▶ 局所的には幾何学的、大局的には非幾何学的
- ▶ “Non-geometric backgrounds (U-fold)” の一例

Cf. 菊池さんの講演

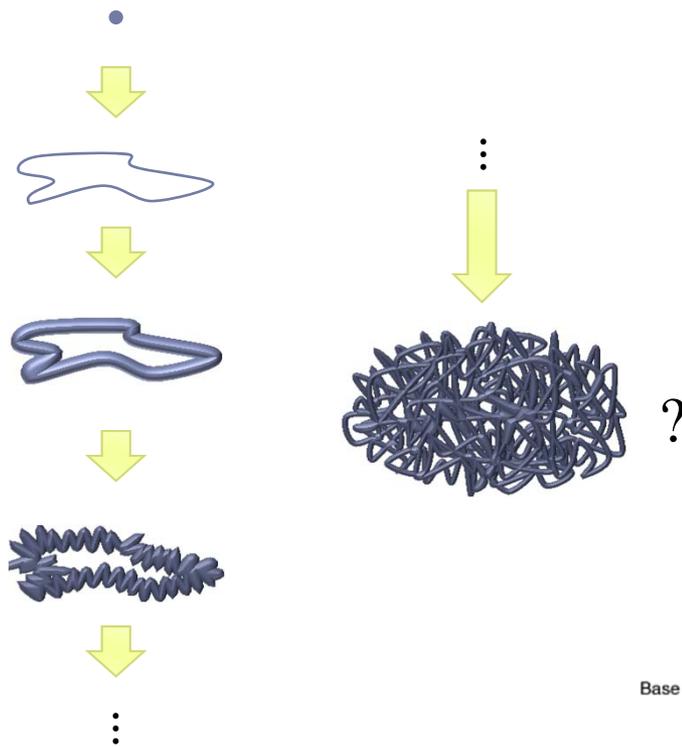
予想：

BH の一般的な微視的状态は、
エキゾチックブレーンを含む “fuzzball” で、
非幾何学的である

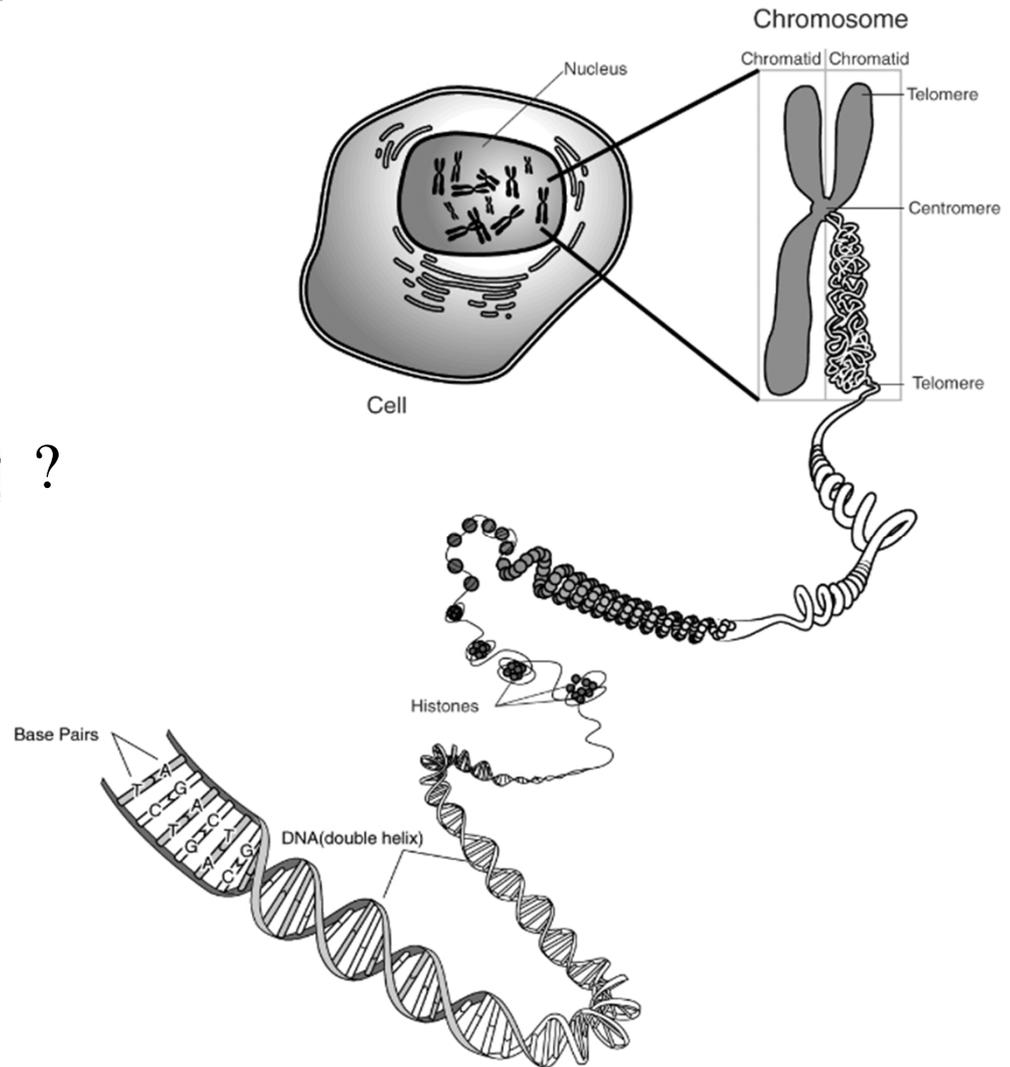


- ▶ 多段の自発的分極により必然的に生じる
- ▶ 幾何学的微視的状态では数が足りないことと辻褃が合う
- ▶ 証明はこれから (work in progress…)

アナロジー？

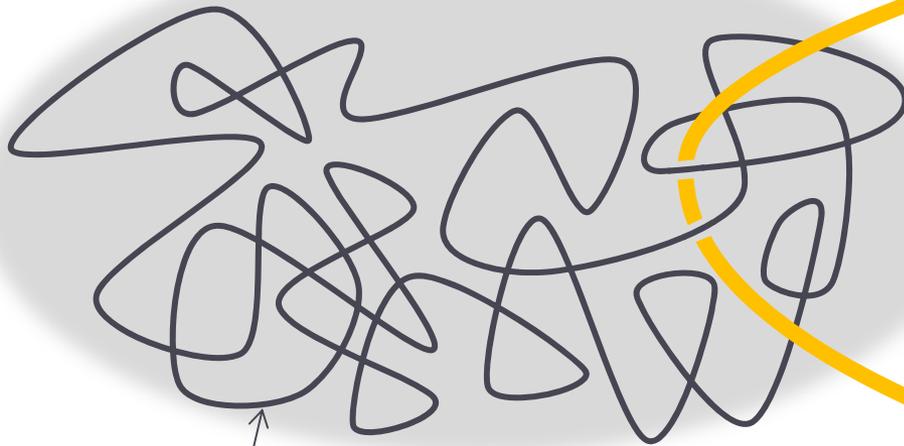
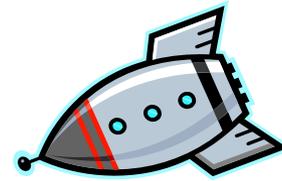


BHは非常にエキゾチックブーレン
から成る非常に複雑な
“fuzzball” で出来ているかも？



BHに落ちるとどうなるか？

ブラックホール



エキゾチック
ブレーン

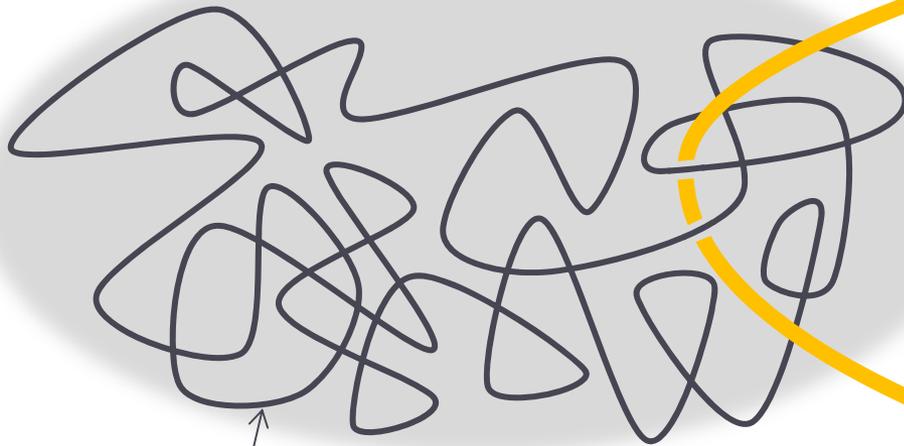
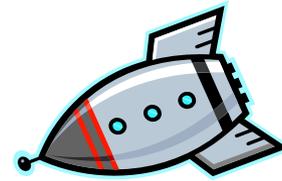
落ちた人にとっては違う
(双対の) 時空に出てくる



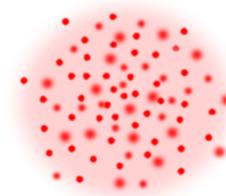
外から見ると違うもの (双対)
になって出てくる

BHに落ちるとどうなるか？

ブラックホール



エキゾチック
ブレーン



実際にはぐちゃぐちゃになって
Hawking 放射と区別がつかないであろう

Work in progress...

- ▶ エキゾチックブレーンを微視的状态に持つ系は確実に存在
D4-D4, D4-D4-D4-D0 (MSW)
- ▶ 多段の分極現象、任意の曲面？
 - 原理的には起こり得る [Bena+de Boer+MS+Warner | 107.2650]
 - 実際に起こるかは別問題。
実際に任意の曲面を持つ解を構成する必要。
 - 特別な、幾何学的な解を表す方程式を整備、
簡単な解を構成。 [Bena+Giusto+Warner+MS | 110.2781]

... Stay tuned!

まとめ

まとめ

- ▶ BH は微視的状态のアンサンブル
- ▶ 微視的状态は地平面も特異点も持たない
“fuzzball” かも？
- ▶ Fuzzball の正体は非幾何学的な
「エキゾチックブレーン」かも！？

