



# 高次元ブラックホール

Astrophysics Group, OIT

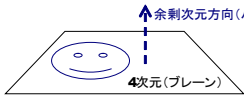
山田 祐太 (M2)

高次元ブラックホールには、4次元ブラックホールにはない特徴がある。我々は、高次元ブラックホールの性質を数値計算によって検証したいと考えている。今回は、高次元ブラックホールに関するレビューと、我々の研究テーマを紹介する。

## 1. 導入

### 高次元時空モデル (ブレンワールド)

- ・我々の住む4次元時空が高次元に埋め込まれているとするモデル。
- ・素粒子標準理論の階層化問題が解決されるかもしれないと期待されている。



※ 我々は4次元時空に拘束されているが、重力は別の次元に伝播できる。

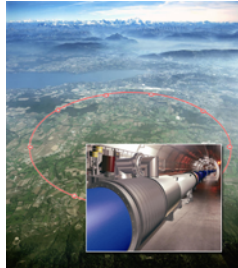


図: LHC. スイス・ジュネーブ郊外にフランスとの国境をまたいで設置されている

- ・時空が高次元であるならば、大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) でミニブラックホールが生成されるかもしれない。

高次元時空での重力の振る舞いを調べることが重要!

### アインシュタイン方程式 (重力場の式)

時空の曲がり具合 = 物質の分布

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

曲率テンソル

エネルギー運動量テンソル

$$\begin{aligned} \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} &\equiv \frac{1}{2}g^{\alpha\beta}(\partial_{\nu}g_{\beta\mu} + \partial_{\mu}g_{\beta\nu} - \partial_{\beta}g_{\mu\nu}) \\ R^{\mu}_{\nu\alpha\beta} &\equiv \partial_{\alpha}\Gamma^{\mu}_{\nu\beta} - \partial_{\beta}\Gamma^{\mu}_{\nu\alpha} + \Gamma^{\mu}_{\sigma\alpha}\Gamma^{\sigma}_{\nu\beta} - \Gamma^{\mu}_{\sigma\beta}\Gamma^{\sigma}_{\nu\alpha} \\ R_{ab} &\equiv R^{\mu}_{a\mu b} \equiv \partial_{\mu}\Gamma^{\mu}_{ab} - \partial_{\mu}\Gamma^{\mu}_{ab} + \Gamma^{\mu}_{\nu\mu}\Gamma^{\nu}_{ab} - \Gamma^{\mu}_{\nu a}\Gamma^{\nu}_{\mu b} \\ R &\equiv g^{ab}R_{ab} \end{aligned}$$

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_{\mu}u_{\nu} + pg_{\mu\nu}$$

- ・アインシュタイン方程式を解くということは、計量テンソル  $g_{\mu\nu}$  を計算すること。

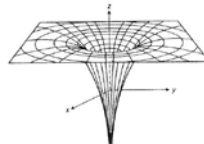
### 4次元ブラックホール

☆ 代表的なブラックホール解

- ・Schwarzschildブラックホール → 球対称、真空解

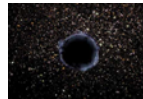
$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^2 c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$$

$r = 0$ 、特異点  $r = 2GM/c^2$ 、ブラックホールの半径



- ・Kerrブラックホール → 定常軸対称、真空解(回転してる)

☆ 4次元では**唯一性定理**より、定常軸対称、真空の仮定のもとでは、Kerr解に限られる。



☆ 4次元時空では球面のトポロジーをもつブラックホールしかない。

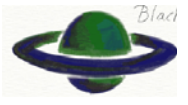
### 5次元ブラックホール (ブラック・オブジェクト)

☆ 5次元時空では、様々なトポロジーをもつブラックホール解が見つかっている。

☆ 5次元では**唯一性定理**が成り立たない。(軸対称、真空を仮定しても、解が一意に決まらない)



ブラック・リング



ブラック・サターン



ブラック・ダイリング

高次元時空ブラックホールはおもしろい!

## 2. 研究テーマ

### 5次元時空における重力崩壊と裸の特異点形成問題

- ・重力崩壊に関する2つの仮説

宇宙検閲官仮説 (cosmic censorship conjecture)

「特異点は事象の地平線によって必ず隠され、裸の特異点は自然界には発生しない」

ペンローズが提唱



本当に正しい?



フープ仮説 (キップ・ソーンが提唱)

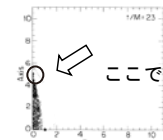
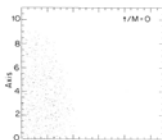
「ブラックホールは、物質形状がある半径 (フープ) に分布しているときに形成される」

ブラックホールは、物質がある程度コンパクトな領域に集まらないと形成されない。



例えば、極端に長い形状の物質が重力崩壊した場合、ブラックホールが形成されず、我々が観測できるような状態で特異点 (裸の特異点) が形成されるかもしれない。

- ・4次元時空では、1992年にシャピーロ、トイコルスキーが行った軸対称に分布したテスト粒子の崩壊シミュレーションにおいて、ブラックホールに隠されない裸の特異点が形成された。



ここで特異点形成

- ・我々は5次元時空で仮説の検証を行なう。

### 5次元ブラックホールの安定性問題

・5次元ブラックホール (ブラック・オブジェクト) の解は幾つも発見されているが、その動的安定性についてはわかっていない。

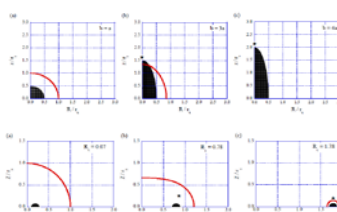
・現在のところ、解析的に安定性を調べることは難しいため、我々は数値計算で5次元ブラックホールの安定性を調べる。



## 3. 研究状況

- ・現在まで、5次元ダイナミクスを解析する準備段階として、一般相対性理論における5次元時空での初期値設定問題 (すなわち、4次元空間で Einstein 方程式の解を求める問題) に取り組んできた。

- ・5次元時空において、裸の特異点が形成される可能性があることがわかった。



CASE1 4次元楕円体  
・極端に長い楕円体の場合、ブラックホール (赤線) は形成されない。

・重力の強さを示す値の最大値は、物質分布の先端に現れる。

CASE2 4次元トーラス体  
・トーラス半径を広げると、ブラックホールはブラック・リングに変わる。

・重力の強さを示す値の最大値は、ブラック・リングに隠されない。

- ・今後は時間発展コードを開発し、ダイナミクスを検証する。