

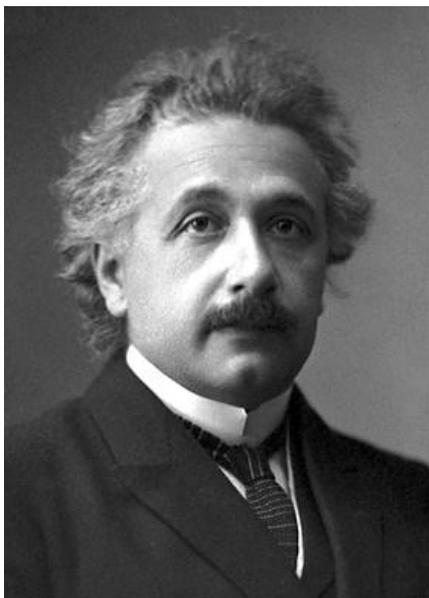
ブラックホールの中は どうなっているのか？

重森 正樹

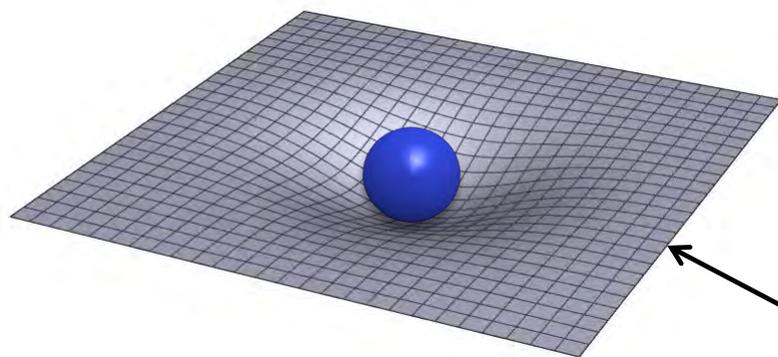
京都大学基礎物理学研究所

基礎物理学研究所 市民講演会
一般相対性理論100年とブラックホール
～ ブラックホール理論の最前線 ～

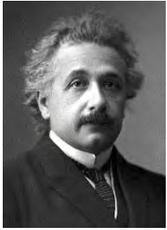
一般相対性理論とは



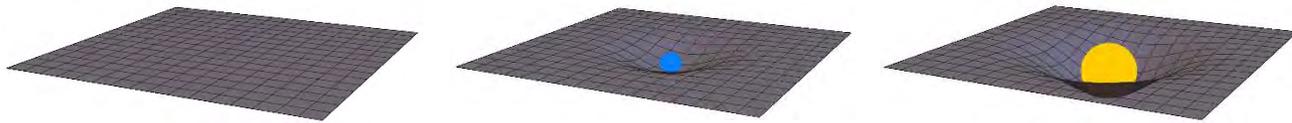
「物質」だけでなくその入れ物である「時空」もれっきとした物理的実体であり、動いたり曲がったりする。



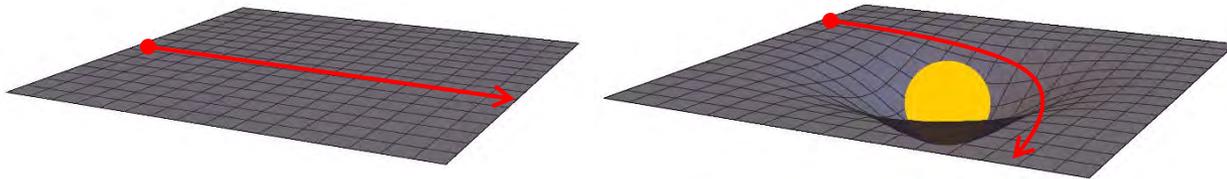
時空の
イメージ



物質は時空をゆがめる。
逆に、ゆがんだ時空は物質の運動に影響する。



重い物質の周りの時空はゆがむ。



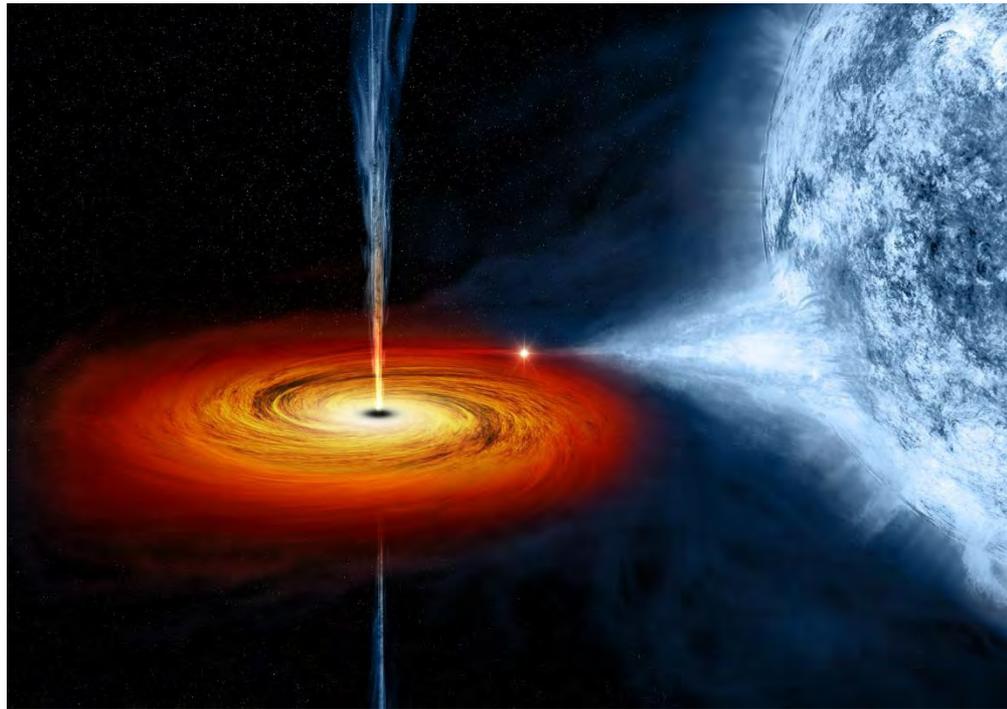
ゆがんだ時空の中では物質の運動は曲げられる。

“アインシュタイン方程式” (1915/11/25)

時空のゆがみ $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$ 物質のエネルギー

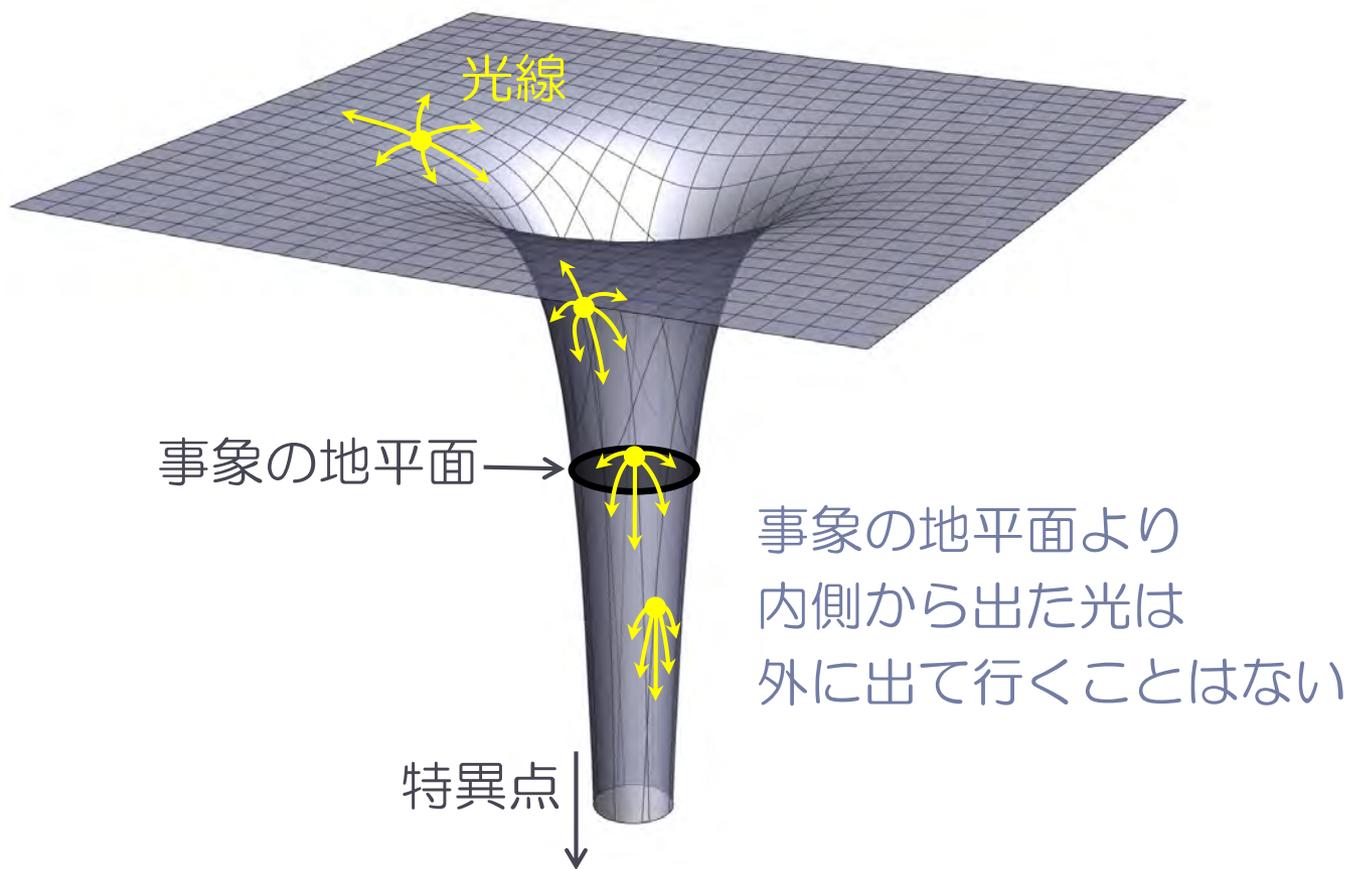
ブラックホールとは

- ▶ 強い重力のため光すら抜け出せない物体



宇宙のいたるところに存在

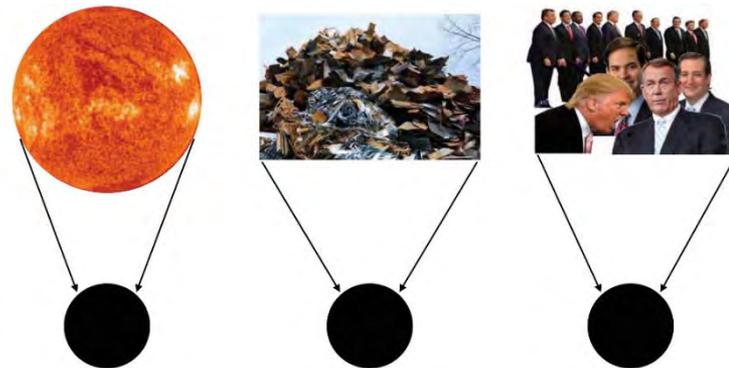
- ▶ 一般相対性理論におけるブラックホールの像：
極度に曲がった時空



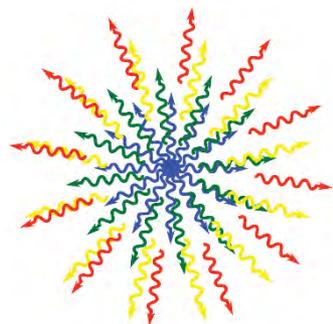
ブラックホールは量子力学と矛盾？

1. 唯一性：何から作っても
ブラックホールは**皆同じ**

その情報をしまうところがない。



2. 量子力学を考慮すると
ブラックホールは**皆同じ**
放射をし、蒸発して消える



ホーキング放射

ブラックホールが何から
作られたかという
情報が失われてしまう。

「情報パラドックス」

量子重力理論

一般相対性理論

矛盾

量子力学

2つを矛盾なく統一する理論（量子重力理論）が必要。

そうすればパラドックスを解決できるはず。



最有力候補：超弦理論（超ひも理論）

超弦理論について

- ▶ 元になる理論は、1960年代後半に南部陽一郎（2008年ノーベル賞）らが発展させた
- ▶ 1980年代に量子重力理論であることが判明
- ▶ 自然界の力を統一する理論の最有力候補として現在も活発に研究されている
（基礎物理学研究所は日本最大の研究拠点の1つ）
- ▶ さまざまな驚くべき予言



Wikipedia commons

超弦理論の予言 1 : 余剰次元

- ▶ 時空は4次元ではなく10次元。余りの6次元（「余剰次元」）は「コンパクト化」されて見えない。

「コンパクト化」とは？



小さなアリにとっては2次元的なホースも…



大きい目で見ると1次元的な線にしか見えない

▶ 余剰次元があると何が可能になるのか？



高次元で滑らかな空間



空間が突然終わっているように見える。
「特異的」。

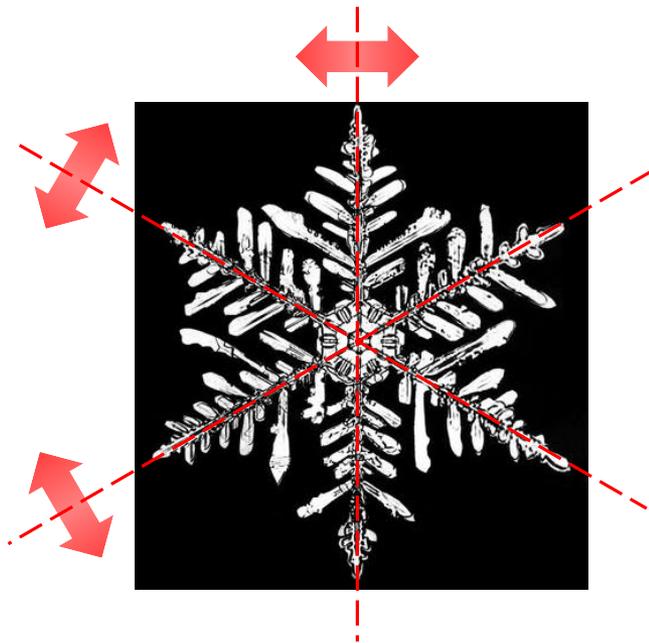
低次元で見ると滑らかでなく見える

➡ 逆に言えば、低次元では許されない特異的な時空が高次元の観点からは許される！

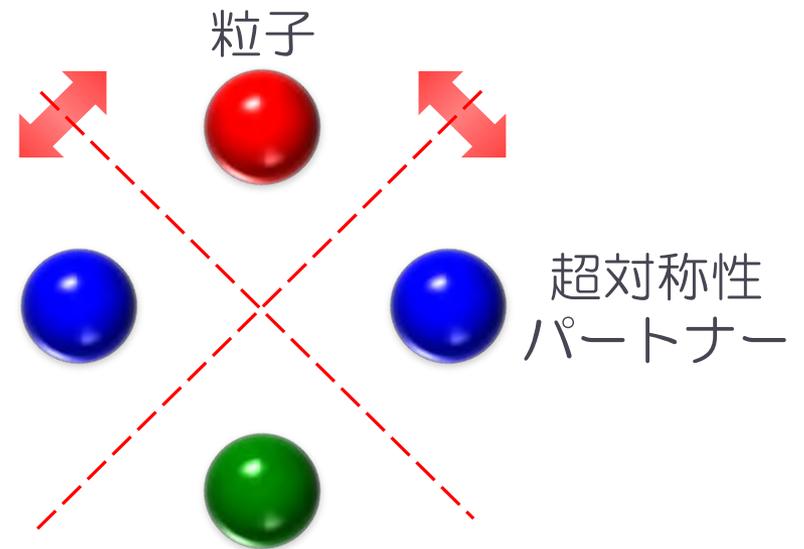
➡ 高次元に「ブラックホールが何から作られたか」の情報をしまう余地が出てくる。

超弦理論の予言2：超対称性

雪の結晶の対称性



超対称性



粒子には超対称性パートナーが存在する。

→ 重力理論は**超重力理論**に拡張される

重力理論

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G_N T_{\mu\nu} \quad \text{アインシュタイン方程式}$$



 重力子

超重力理論

「超」アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G_N T_{\mu\nu} + 2(g_{\mu\nu}\nabla^2\Phi - g_{\mu\nu}(\nabla\Phi)^2 - \nabla_\mu\nabla_\nu\Phi) + \dots$$

$$R - \frac{1}{12}H_3^2 = 4(\nabla\Phi)^2 - 4\nabla^2\Phi$$

$$dH_3 = 0, \quad \nabla_\alpha(e^{-2\Phi}H^{\alpha\mu\nu}) = \frac{1}{2}G_{\alpha\beta}G^{\alpha\beta\mu\nu} + \dots$$

$$dG_2 = 0, \quad \nabla_\alpha G^{\alpha\mu} = \frac{1}{3!}H_{\alpha\beta\gamma}G^{\mu\alpha\beta\gamma}$$

$$dG_4 = H_3 \wedge G_2, \quad \nabla_\alpha G^{\alpha\mu\nu\rho} = \dots$$

重力子の超対称性パートナーを含む
拡張された理論。ずっと豊かな物理。

 重力子

 グラビティーノ

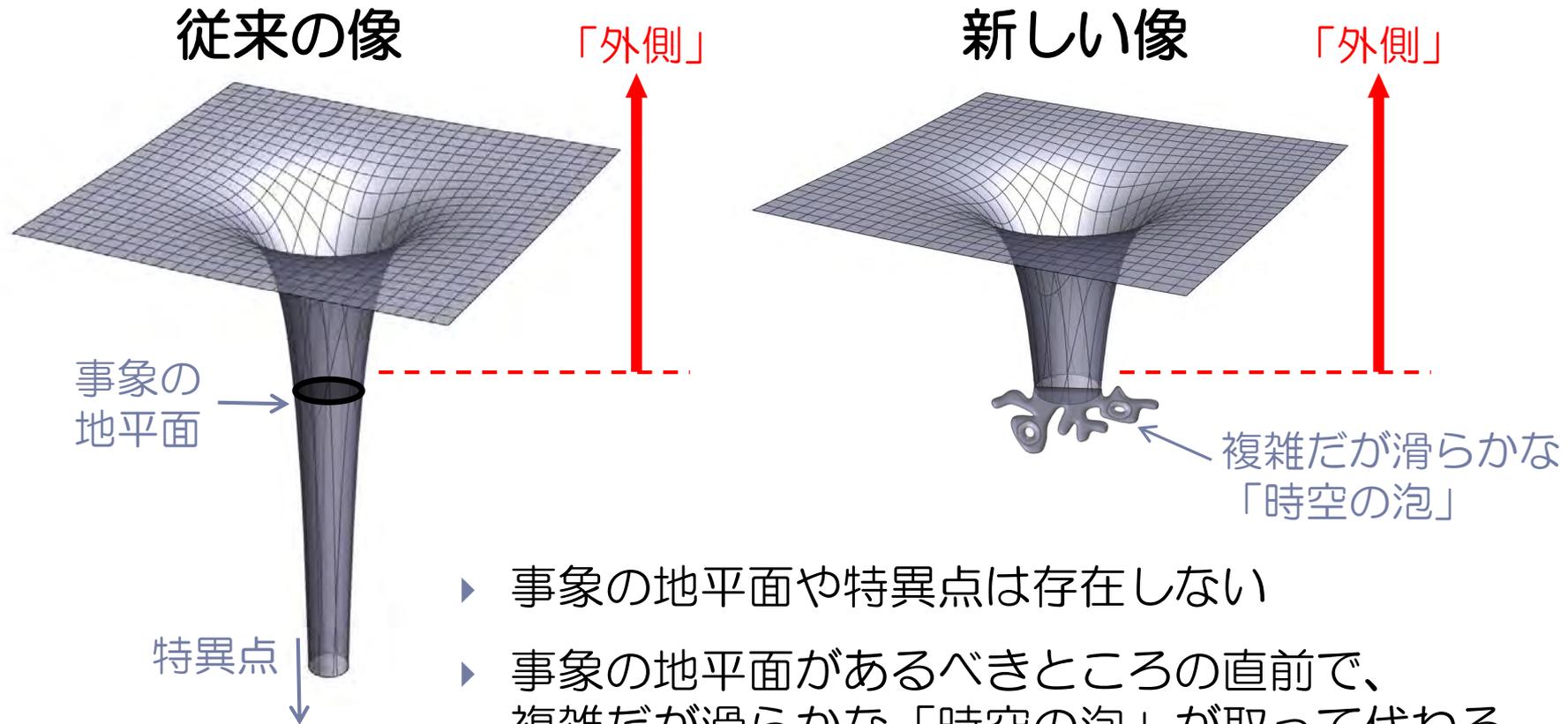
 ゲージ粒子

 ...

余剰次元 + 超対称性

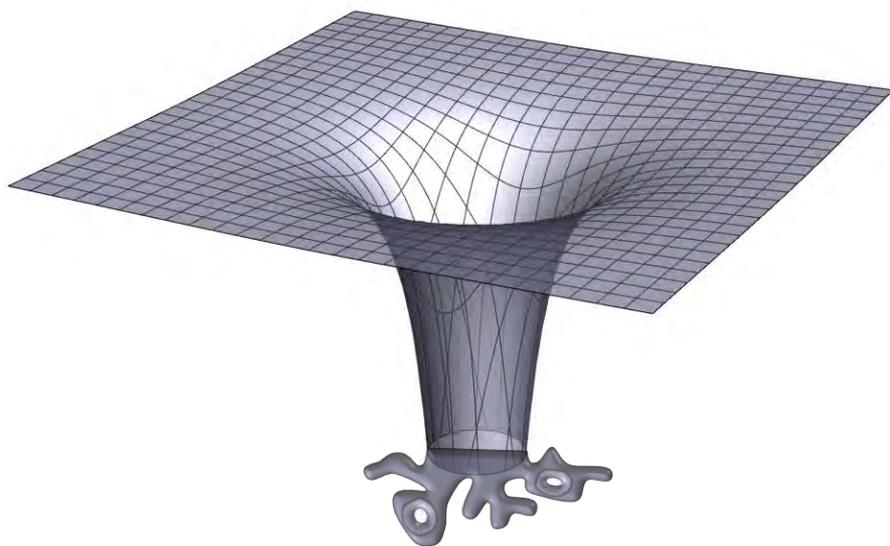
超弦理論は、従来とは全く異なる
ブラックホールの像を示唆する。

超弦理論が示唆するブラックホール像



- ▶ 事象の地平面や特異点は存在しない
- ▶ 事象の地平面があるべきところの直前で、複雑だが滑らかな「時空の泡」が取って代わる
- ▶ 「外側」は従来の像と区別がつかない

「時空の泡」



▶ 「時空の泡」

- ▶ 高次元の意味で滑らか。
4次元では不可能。
- ▶ 超重力理論・超弦理論の
様々な励起によって安定化
- ▶ 「ファズボール」と呼ばれる



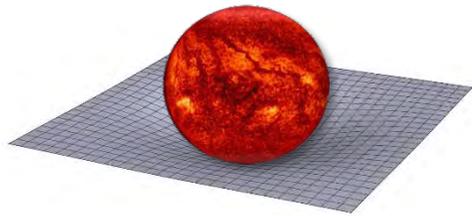
マサア教授

www.physics.ohio-state.edu

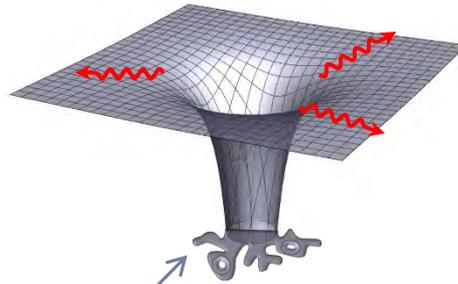
- ▶ 多くの証拠が集まりつつ
あるが、まだ仮説段階。

ブラックホールの生成と蒸発（予想）

星が崩壊



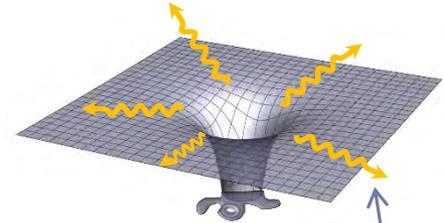
ブラックホール
を生じる



ファズボールに
元の星の情報が
格納されている



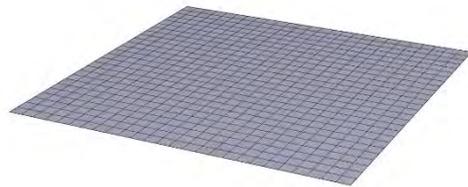
放射により
小さくなる



放射はファズボールから
出てくるので、元の星の
情報が含まれている



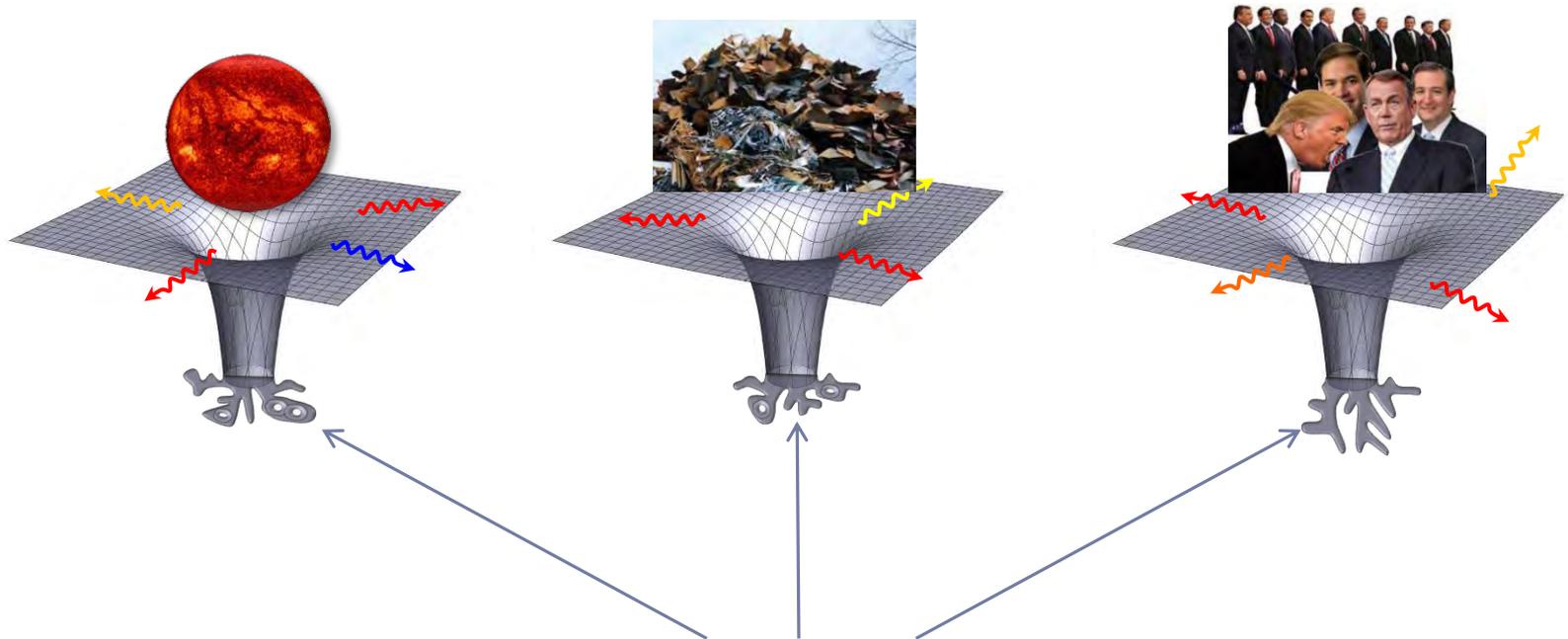
蒸発して無くなる



元の星の情報は
全て放射となっ
て飛び去った

放射に含まれる情報から
元の星を再構成できる。
情報パラドックスは存在しない！

ブラックホールが何から作られたかの情報は
ファズボールに格納されている

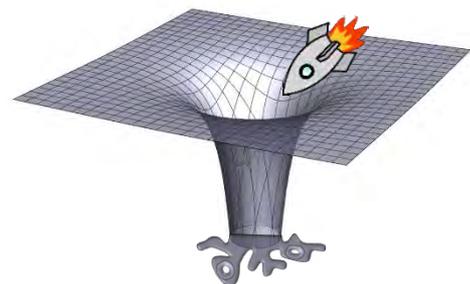


ブラックホールが何から作られたかによって異なる形

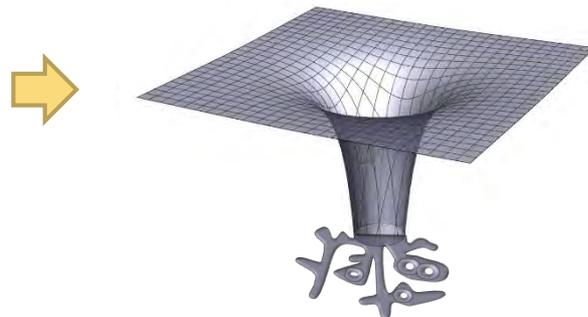
情報は再構成可能

ブラックホールに落ちるとどうなる？

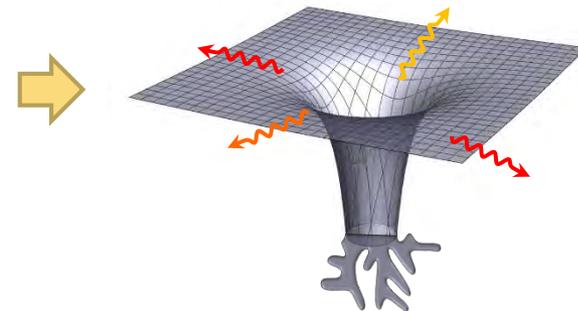
ブラックホールに
宇宙船が落下



ロケットは溶けて
ファズボールの一部となる



放射となって
出てくる



放射から
落ちたロケットの情報を
再構成することが可能。

質量に応じて物質は様々な形態を取る

白色矮星



ヘリウム・炭素・酸素などの原子



チャンドラセカール限界（太陽質量の1.4倍）

中性子星



中性子



トルマン・オッペンハイマー・ヴォルコフ限界
（太陽質量の3倍？）

ブラックホール



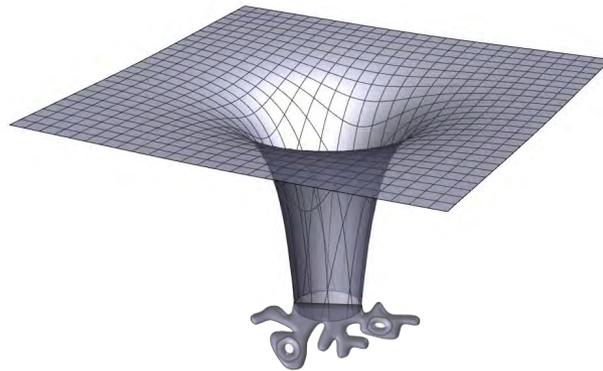
ファズボール

限界を超えると、物質では質量を支えられなくなり、
時空を溶かして質量を支える。それがファズボール。

まとめ

Q. ブラックホールの中はどうなっているのか？

A. 時空が溶けて泡だっている（ファズボール）。
事象の地平線の直前で溶けてしまっているので、
単純な意味での「中」は存在しない。



アインシュタインが時空を「発見」してから100年。
私たちは、一般相対性理論が予言する最も不可思議な
物体であるブラックホールの謎を、超弦理論を用いて
解き明かしつつあります。

時空に関する理論と観測の両輪が揃う21世紀は
「時空の世紀」となるに違いありません。
予想もつかない知の冒険が私たちを待っているでしょう。

ご清聴ありがとうございました！

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G_N T_{\mu\nu}$$