



# ブラックホールの 発展

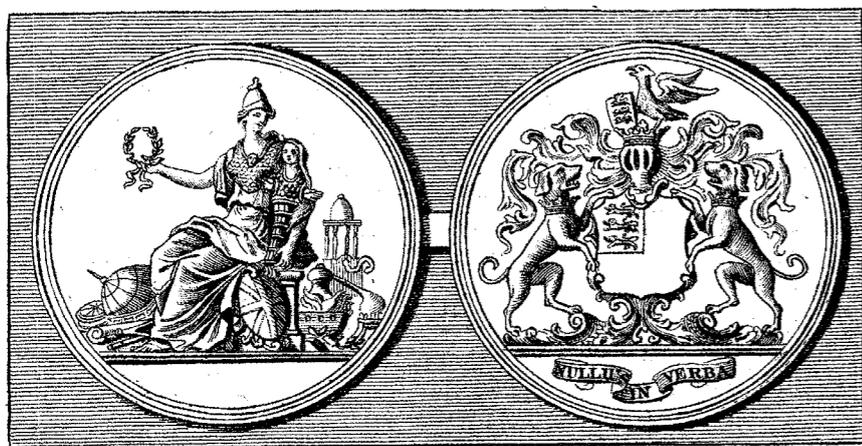
Nick Warner, Kyoto, November 22, 2015

# 最初にブラックホールを考えたのは

PHILOSOPHICAL  
TRANSACTIONS,  
OF THE  
ROYAL SOCIETY  
OF  
LONDON.

VOL. LXXIV. For the Year 1784.

PART I.



LONDON,

SOLD BY LOCKYER DAVIS, AND PETER ELMSLY,  
PRINTERS TO THE ROYAL SOCIETY.

MDCCLXXXIV.

John Michell (1783):

地質学者/物理学者

1784年の学術論文誌”*Philosophical Transactions of the Royal Society*”の一節

“**暗黒星**”は存在するのか？

重力が強すぎて自身の出す光すら抜け出せない物体はどんな性質を持つのか？

これこそがブラックホールにつながる本質的な物理的疑問である

Michellの**暗黒星**を理解するためには、我々は1784年における物理学を理解しなくてはならない...

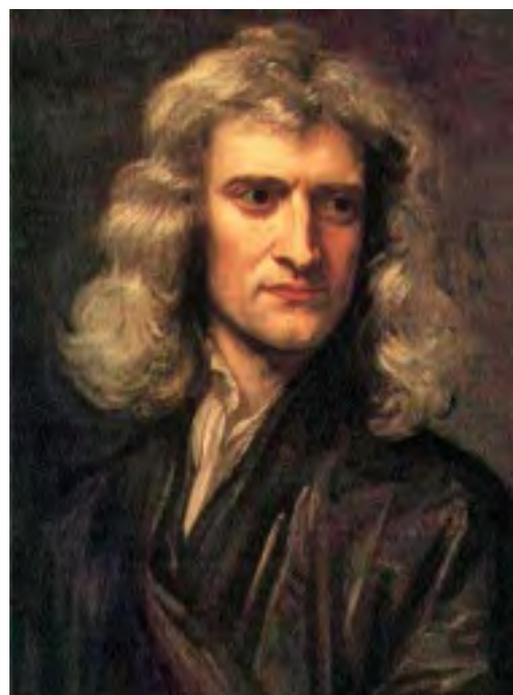
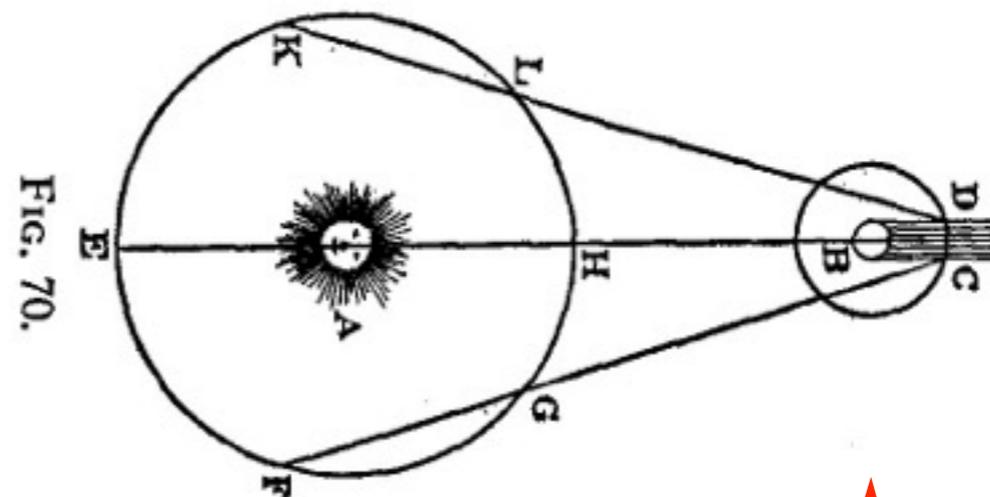
# 1784年における物理学



**Ole Rømer**

**1675: 光速度を初めて測定**

木星の衛星の軌道を  
注意深く観測して測定

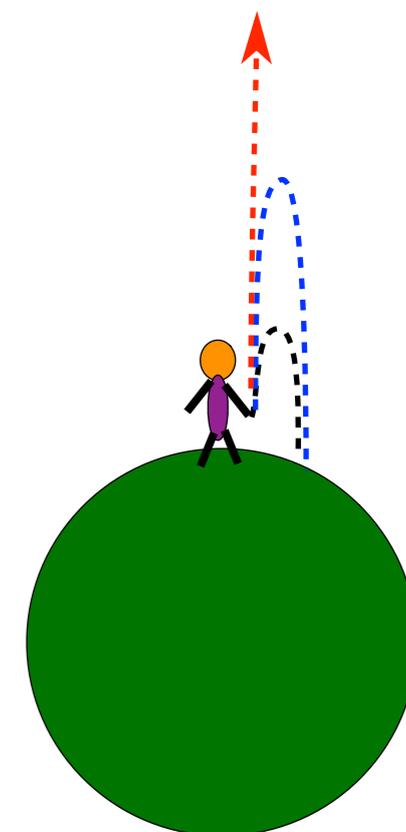


**1687: Newtonの万有引力:**

⇒ **脱出速度**

粒子が恒星や惑星の重力から抜けだせるようにするには、どれほどの速度で上に投げればよいのか？

地球: 11.2 km/s, 太陽の表面: 617 km/s



1801年以前: NewtonやMichellのようなイギリスの科学者は  
**光は粒子でできている**と考えていた。

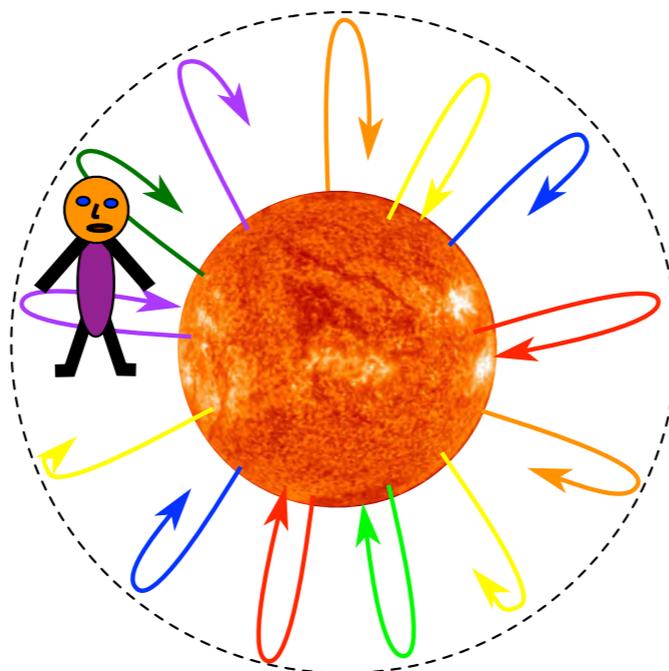
## Michellの暗黒星（1784）：

### 脱出速度が光速を上回るような星は存在するのか？

光の粒子が打ち上げられ、減速し落下する...星から離れることはできない

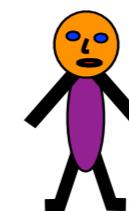
星からの光は近くにいる観測者には届く

⇒ 星は近くにいる観測者には見える



星からの光はより離れた観測者には届かない

⇒ 星は離れた観測者には見えない“暗黒星”



## 1865-1915: MaxwellとEinstein: 真空中で光は決して減速しない

真空での光速度は絶対不変である  $\approx 300,000$  km/s

⇒ Einsteinの特殊および一般相対性理論

暗黒星についての物理学的疑問はそれでもなお素晴らしい疑問である:

光を閉じ込めるのに十分な重力を持つ星は存在するのか？  
そのような暗黒星は一般相対性理論ではどう見えるのか？

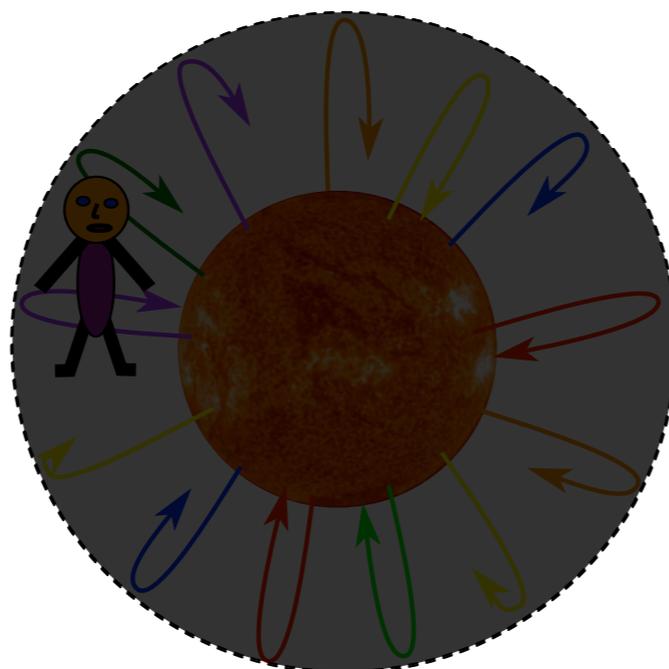
## Michellの暗黒星（1784）：

### 脱出速度が光速を上回るような星は存在するのか？

光の粒子が打ち上げられ、減速し落下する...星から離れることはできない

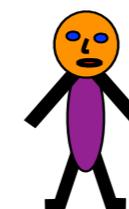
星からの光は近くにいる観測者には届く

⇒ 星は近くにいる観測者には見える



星からの光はより離れた観測者には届かない

⇒ 星は離れた観測者には見えない“暗黒星”



## 1865-1915: MaxwellとEinstein: 真空中で光は決して減速しない

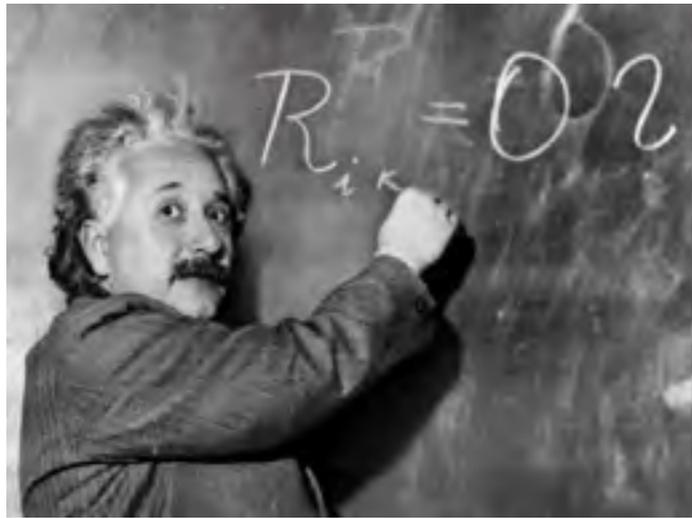
真空での光速は絶対不変である  $\approx 300,000$  km/s

⇒ Einsteinの特殊および一般相対性理論

暗黒星についての物理学的疑問はそれでもなお素晴らしい疑問である:

光を閉じ込めるのに十分な重力を持つ星は存在するのか？  
そのような暗黒星は一般相対性理論ではどう見えるのか？

# Schwarzschildブラックホール



**Albert Einstein**

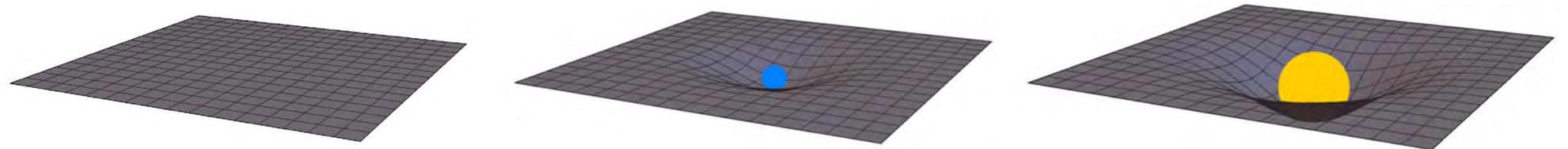
**1915: 一般相対性理論でのEinstein方程式  
現代の重力理論や宇宙論の基礎**

重力を時空の幾何学として表す



**Karl Schwarzschild**

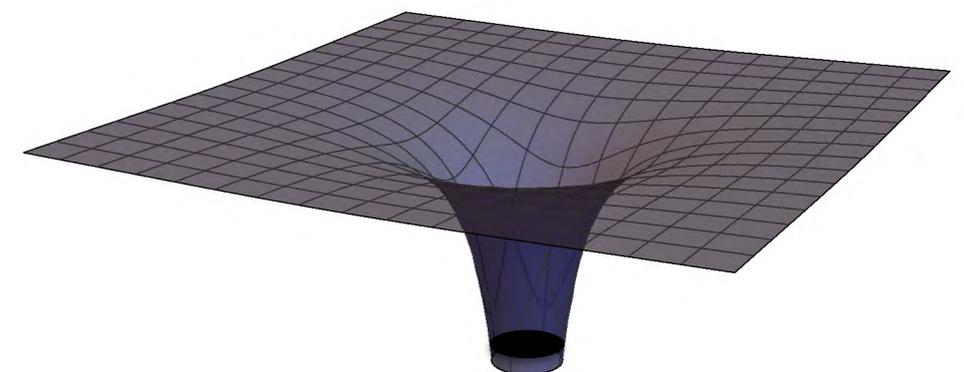
**1917: 球対称な星や惑星についてEinstein方程式を解いた  
それらの重力は時空の幾何学的な凹みとして表される**



より重い  $\Rightarrow$  より時空が歪む

ブラックホールの標準的な理論の基礎...

ブラックホール  $\Rightarrow$  極度(無限)の凹み

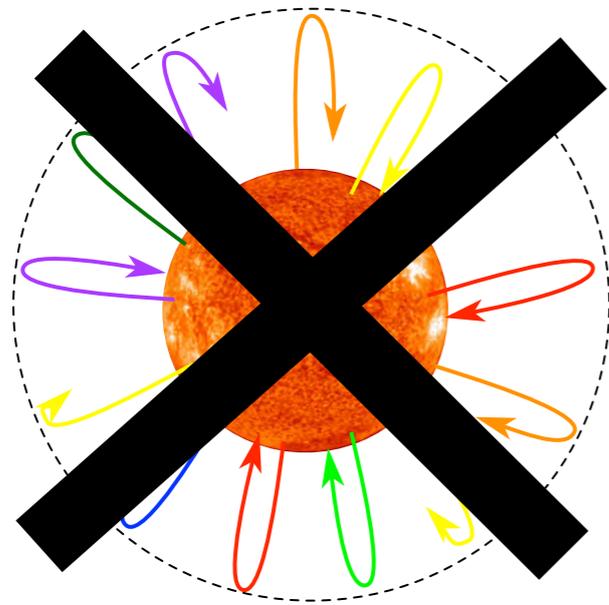


# 一般相対性理論におけるブラックホール

物理的疑問: 重力が強すぎて自身の出す光すら抜け出せない物体は  
どんな性質を持つのか？

Michell

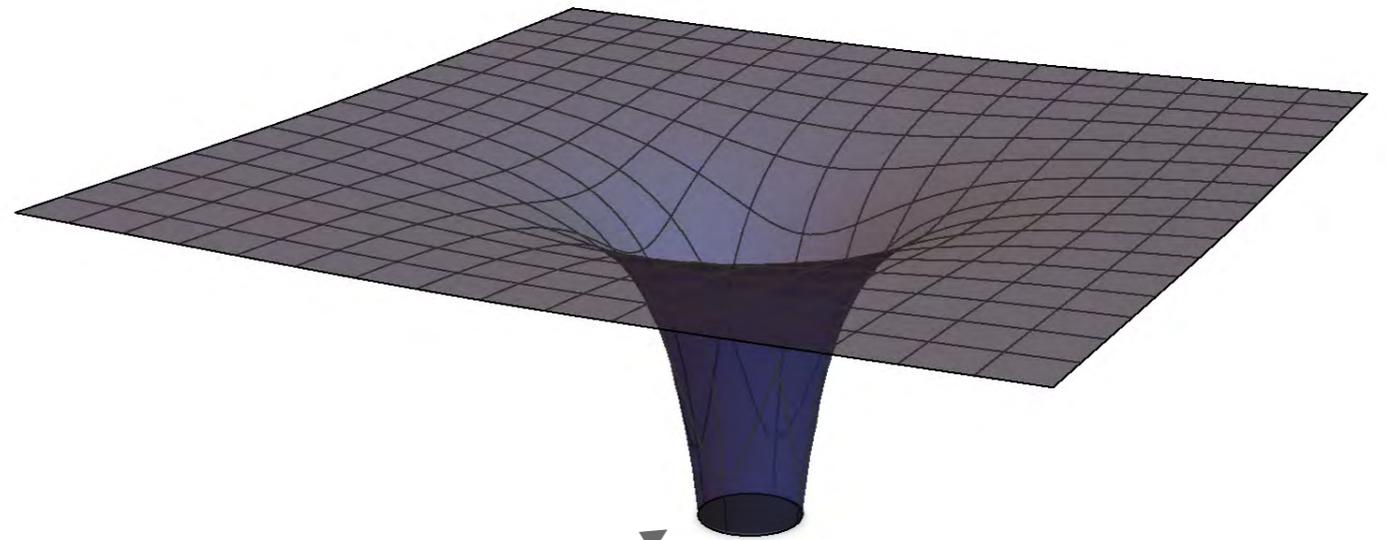
脱出速度が光速を上回るような  
星は存在するのか？



光は減速しない

一般相対性理論: Schwarzschild

光を捕らえてしまう程に時空を歪め  
てしまう様な物体は存在するのか？



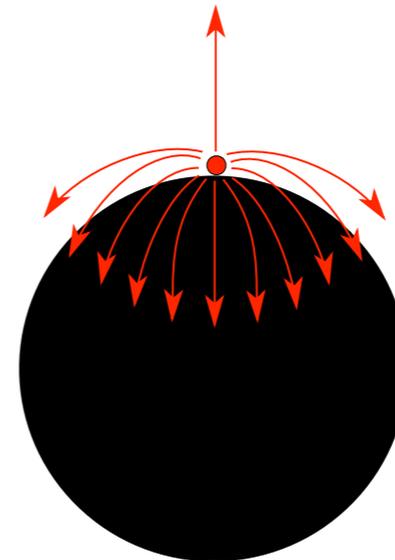
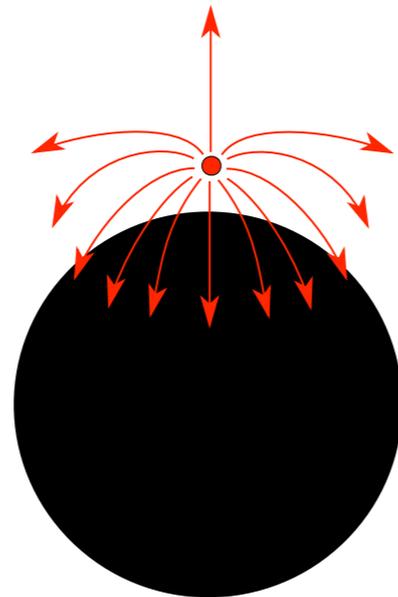
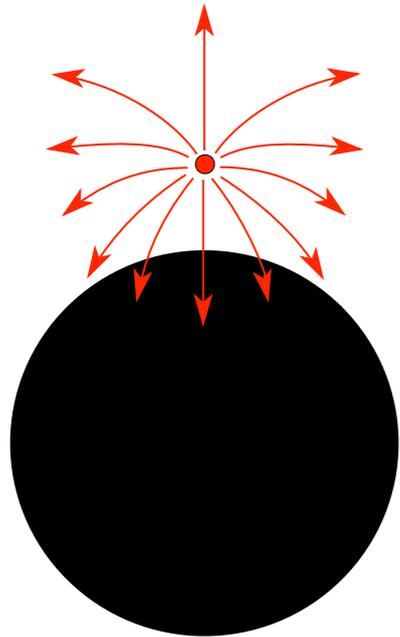
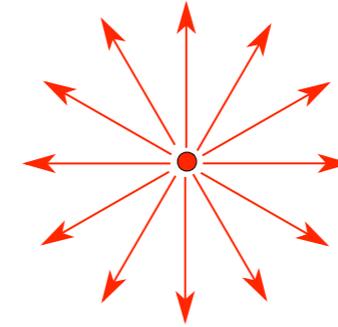
ここでは光を捕らえてしまうほどに時空が歪んでいる...

# 一般相対性理論でのブラックホール

## 光の捕獲はどのように「見える」？

光子を放出する光源を思い浮かべる...

それをブラックホールに落とすと仮定する



## ブラックホール：

**空間を歪め、そして光の軌道を歪める**

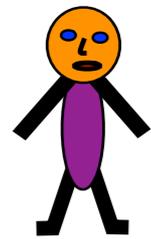
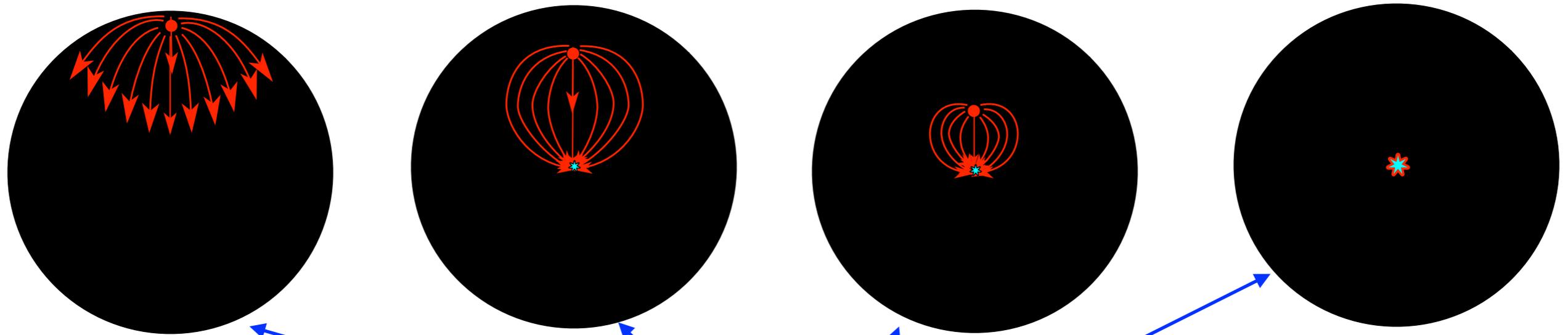
脱出できる光子もいれば、ブラックホールに落下する光子もいる

光源が近くなるほどに、光源から出た光子がどこを向いていたとしても  
より多くの光子が捕獲される：

より多くの光子がブラックホールへと曲がっていく.....

# ブラックホールの内側と外側

物体やエネルギーがブラックホールの表面/**事象の地平面** より内側に落下すると中心にある特異点へと非常に高速に落下する...



**事象の地平面**

どんな光や物質、情報も脱出できない

**外側から内側は絶対に観測することはできない**

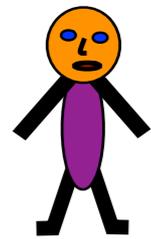
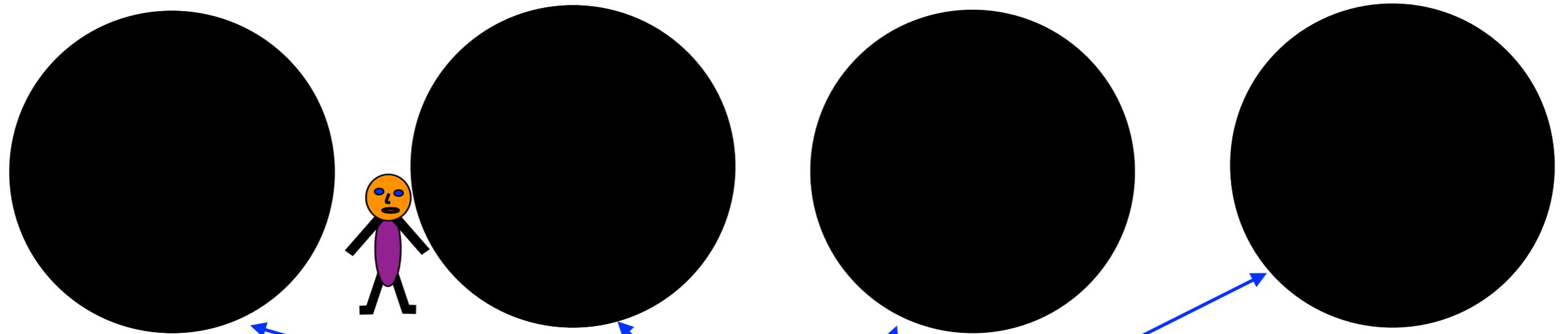
事象の地平面にどれだけ近づこうが、その内部を見ることはできない

事象の地平面は**ほとんど特徴がない**

外側から見えるのは ブラックホールの**質量、電荷、回転**のみ

# ブラックホールの内側と外側

物体やエネルギーがブラックホールの表面/**事象の地平面**より内側に落下すると中心にある特異点へと非常に高速に落下する...



**事象の地平面**

どんな光や物質、情報も脱出できない

**外側から内側は絶対に観測することはできない**

事象の地平面にどれだけ近づこうが、その内部を見ることはできない

事象の地平面は**ほとんど特徴がない**

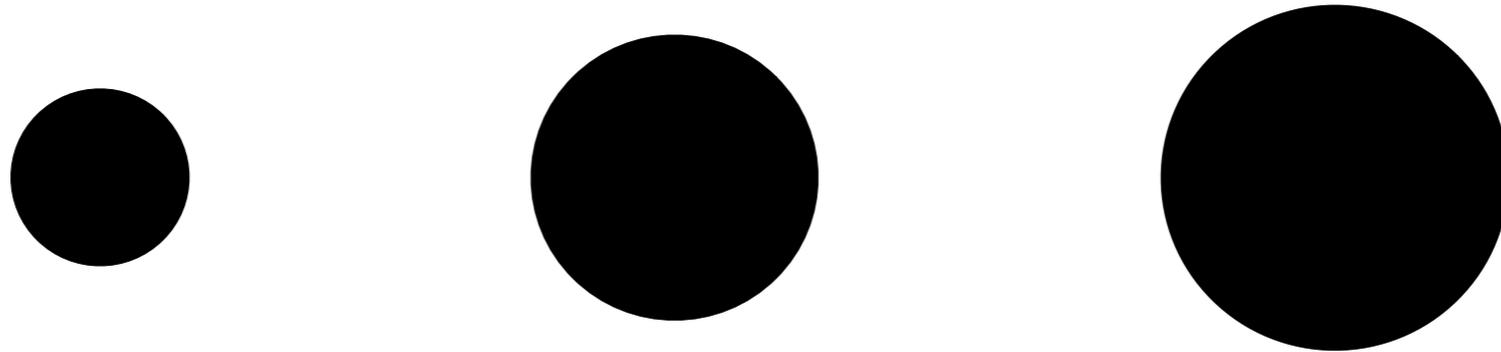
外側から見えるのは ブラックホールの**質量、電荷、回転**のみ

# ブラックホールの唯一性

一度ブラックホールが形成されると、外側から測ることができるのは：

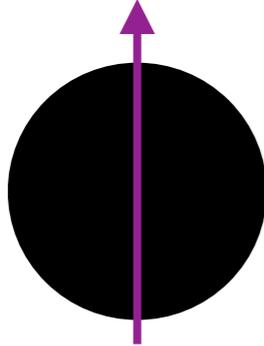
質量～大きさ

半径～質量

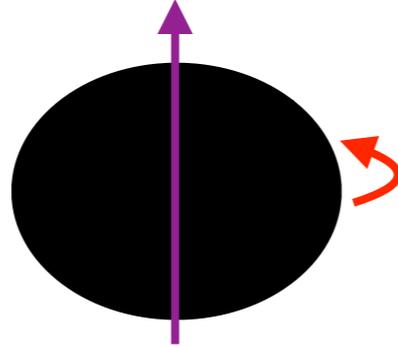


回転、もしくは角運動量 ～ 赤道面の楕円形の膨らみ

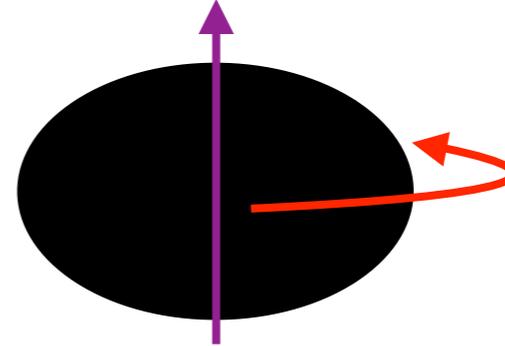
無回転



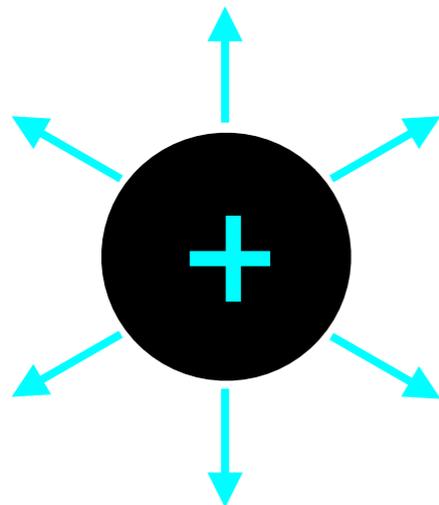
ゆっくり回転



速く回転



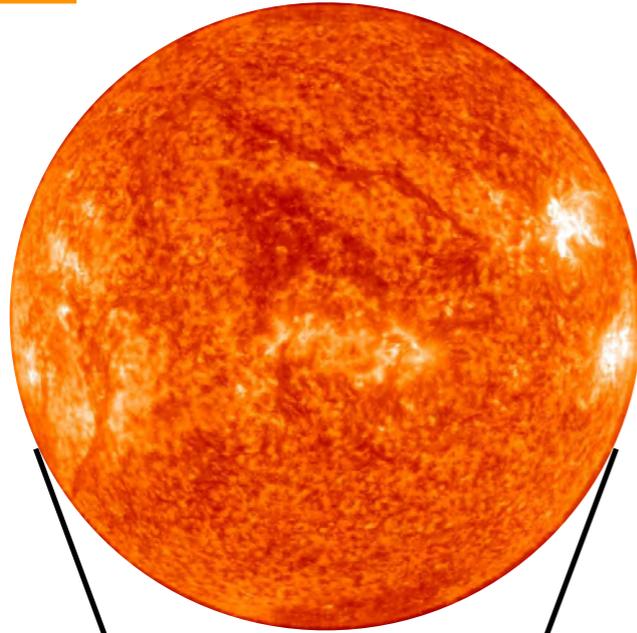
電荷



何がブラックホールを形成しても、事象の地平面はその単純な膨らみ、楕円形以外のどんな特徴も持っていない。

ブラックホールは物体/エネルギーが超高密度に圧縮されることで作られる...  
構成要素が何であっても、作られたブラックホールは区別できない：

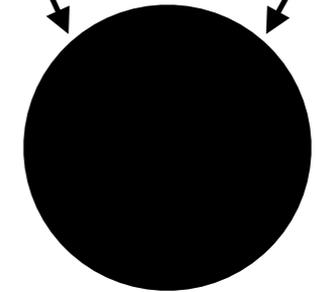
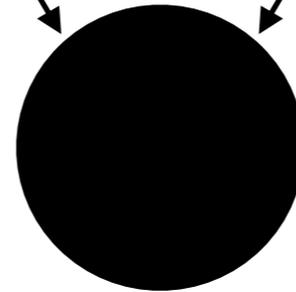
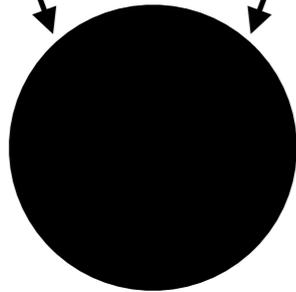
恒星



ゴミ



政治家たち



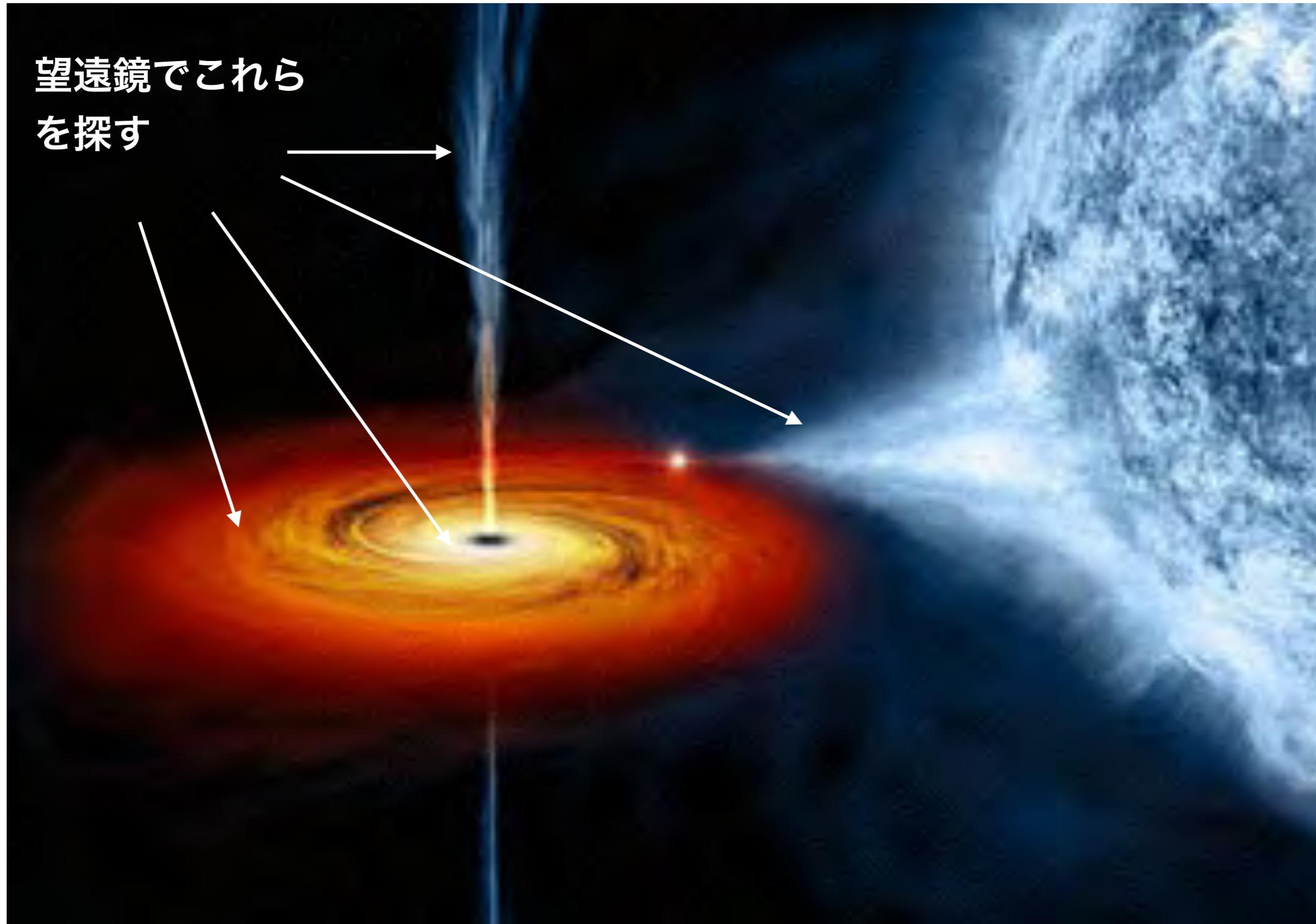
もし恒星,ゴミや政治家たちが同じ質量、電荷、回転を持っていたら  
ブラックホールは外側からは全く区別できない

ブラックホールをどうやって  
観測すればいいのか？

暗黒であることと特徴のなさから不可能に思われるが...

# 実際のブラックホールを「観測」する

我々はブラックホールが周りの物質に及ぼす影響を通じて検出する  
小さめのブラックホールは近くの恒星から物質を集めそれらを加熱する



**銀河の中心にあるような大きめのブラックホールは星そのものを崩壊させ、飲み込む**

**ブラックホール**



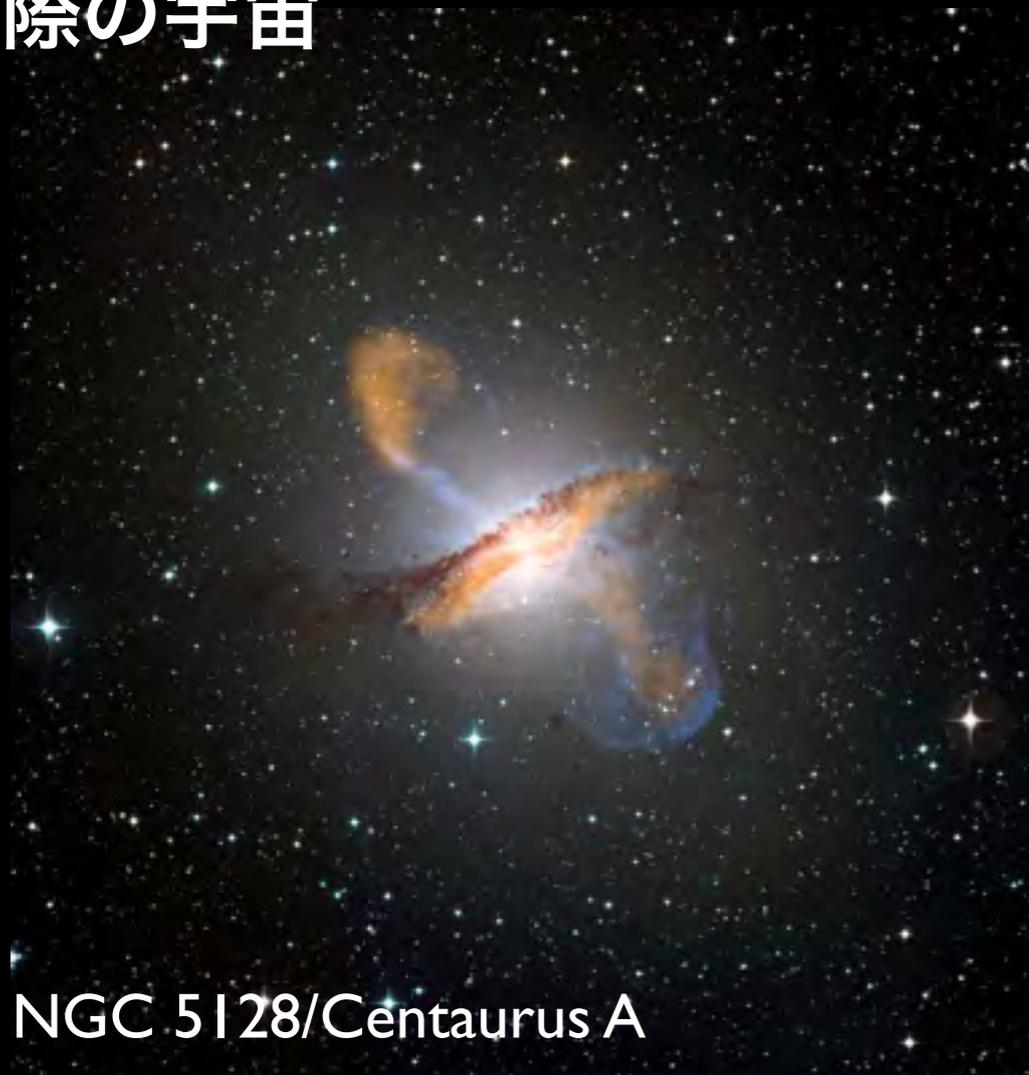
**これは宇宙の遠くからも見ることができる！**

***Credits: NASA's Goddard Space Flight Center***

# 一般相対性理論に基づいたブラックホールのシミュレーションとイメージ



## 実際の宇宙



NGC 5128/Centaurus A



Jet from M87

今や実際にブラックホールが存在する  
ことを示す圧倒的な量の証拠がある...

# 1974: Hawking放射 — ブラックホールの新たな一面

量子力学はブラックホールの描像をどう変えたか？

Stephen  
Hawking

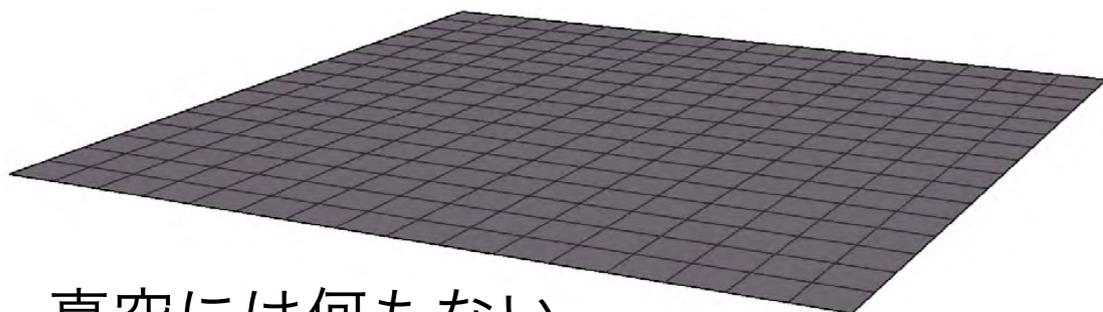


**Hawking:** 量子力学はブラックホールが実は放射をすることを示唆

**Hawking放射**がどのようにして作られるのかを理解するには、量子力学が何もない空間の「真空」という概念を完全に変えてしまうということを理解しなくてはならない...

# 何もない空間の「真空」

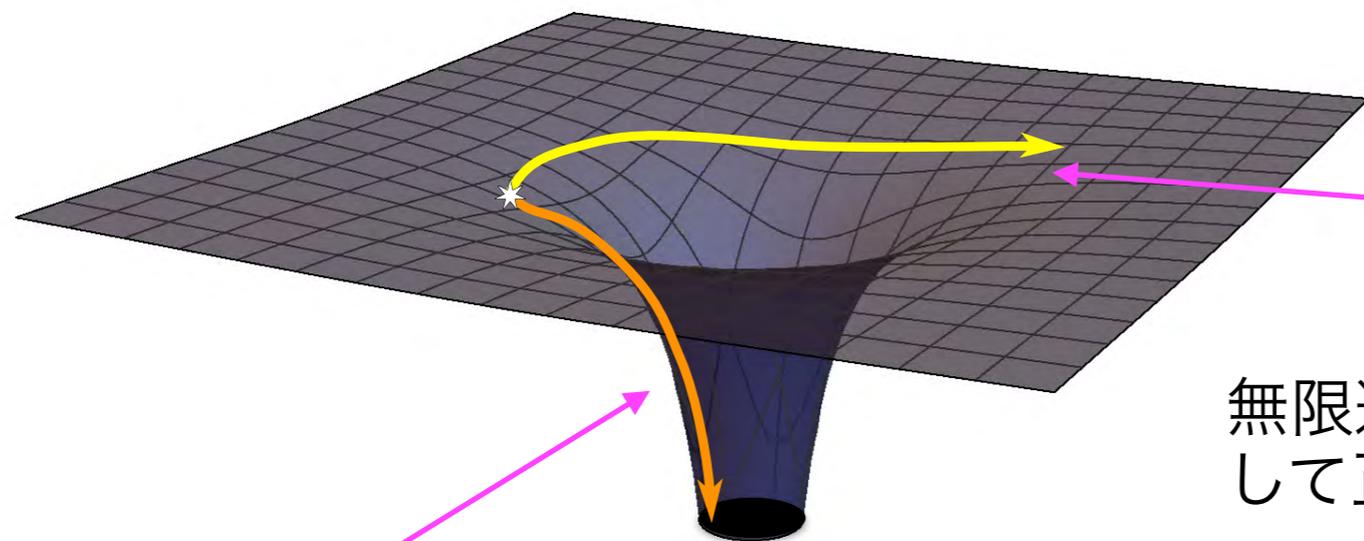
一般相対性理論



真空には何もない

真空のエネルギーは0

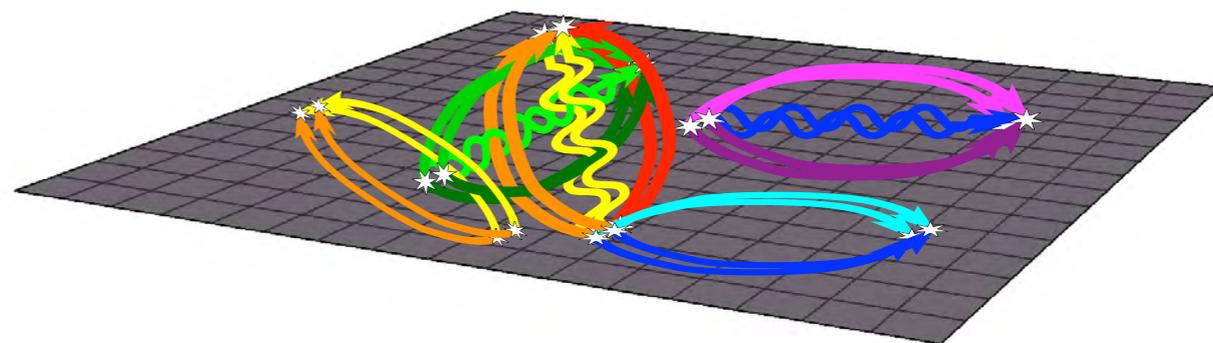
Hawkingの考え：



一時的な粒子の片方がブラックホールに落ちたと仮定する...

決して戻らない！

量子力学



量子揺らぎ: : 真空中ではHeisenbergの不確定性原理に反しない短い時間の間だけエネルギーを得て粒子と反粒子が瞬間的に現れ、消えている

真空のエネルギーは平均として0！

するともう片方の粒子はHawking放射として無限遠に脱出できる

無限遠に脱出する粒子は実在し、測定でき、そして正のエネルギーを持つ....

ブラックホールに落ちる粒子は**負のエネルギーを持つ！**そしてブラックホールの質量を減らす

Hawking放射はブラックホール近くの量子揺らぎとして現れ、そしてブラックホールから**エネルギーを持ち去る**

## ブラックホールからのHawking放射

ブラックホールからのHawking放射は通常の「**熱い**」物体からの放射と全く同じである ⇒ ブラックホールは**Hawking温度**を持つ

Hawking放射はブラックホールからエネルギーを取り出す

⇒ ブラックホールはゆっくりと質量/エネルギーを失う

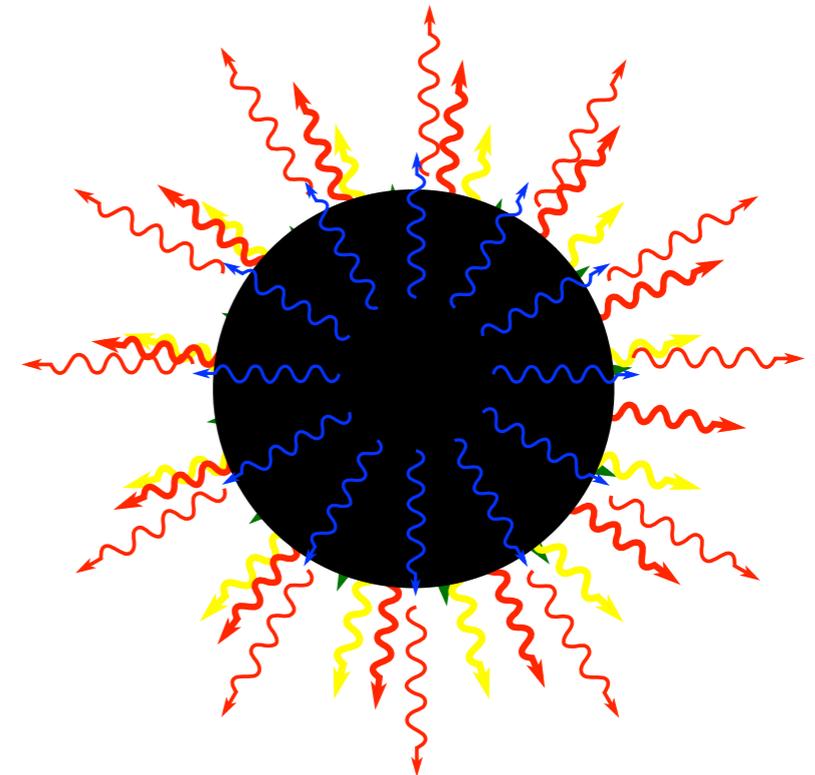
⇒ ブラックホールは徐々に小さくなる

Hawking温度： **小さいブラックホールほど熱い！**

⇒ ブラックホールが小さくなるほどより速く質量/エネルギーを失う...

⇒ **ブラックホールは最後に爆発し完全に蒸発する**

**Hawking放射を大量に残す**



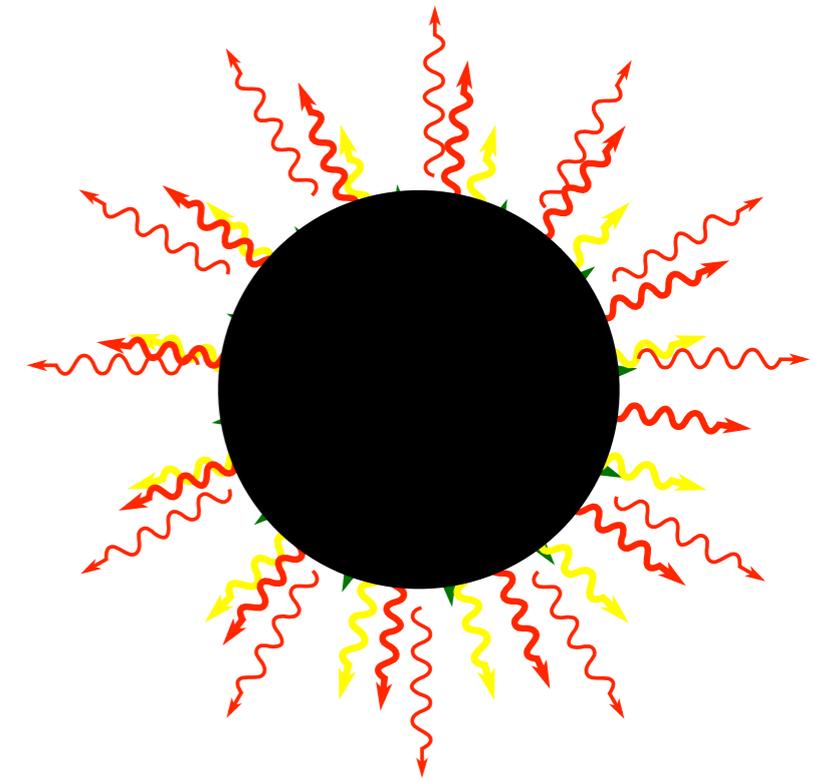
太陽と同じ質量のブラックホールのHawking  
温度は非常に小さい

⇒ブラックホールの蒸発は非常に遅い

太陽と同じ質量のブラックホールが蒸  
発するのにかかる時間は約：

**10,000,000,000,000,000,000,000,  
000,000,000,000,000,000,000,000,  
000,000,000,000,000,000,000 年**

**=  $10^{67}$  年**



しかしHawking蒸発がどれだけゆっくりしたものであっても、  
**この現象は量子力学の原理と根本的に矛盾する**

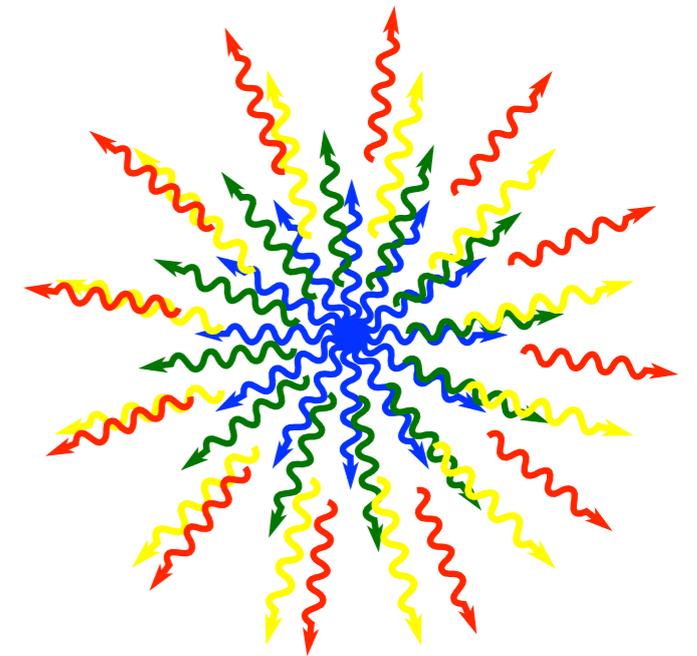
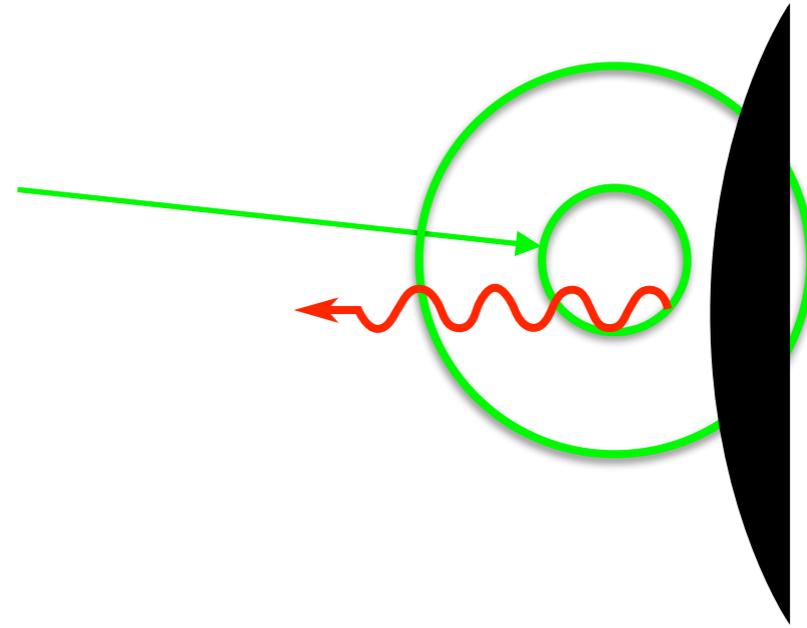
Hawking放射はこの矛盾を露わにする2つの重大な特徴を持っている...

## 2つの重大な点

- 1) **Hawking放射**は事象の地平面のすぐ外側での量子揺らぎにより生じる
- 2) 事象の地平面はほとんど特徴がない:  
それはブラックホールの**質量**、**回転**  
そして**電荷**のみを反映する

⇒ **Hawking放射も同様に特徴がない：**

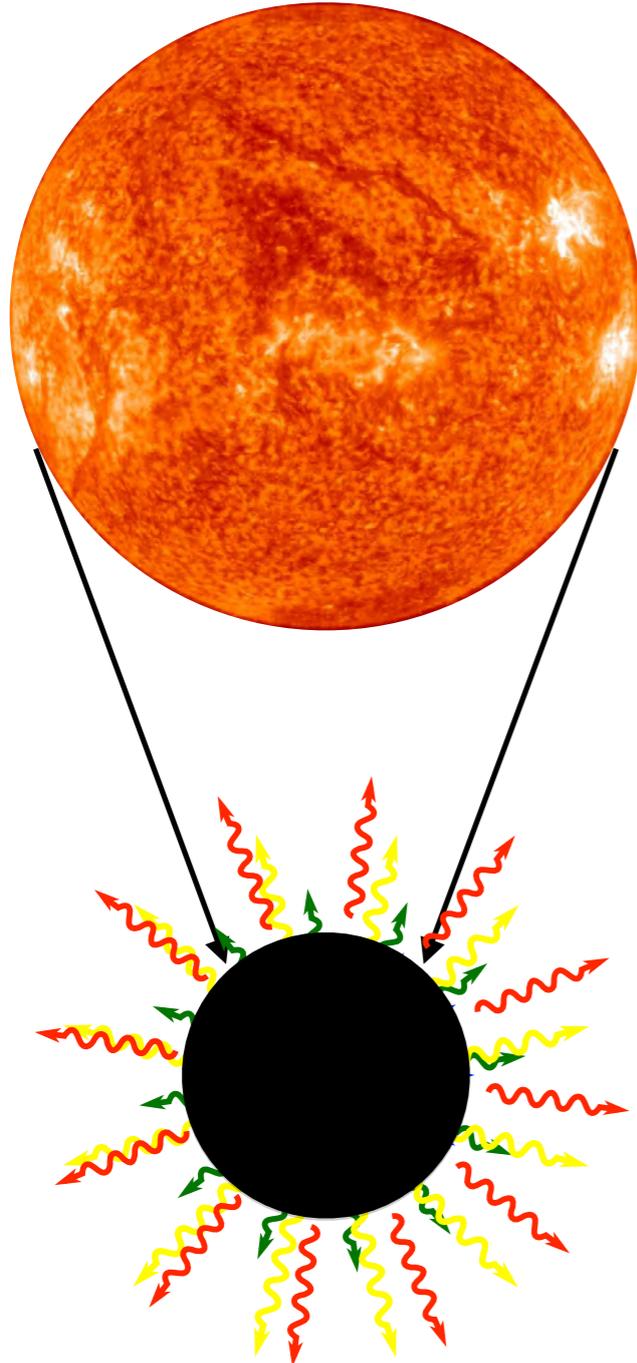
- ★ Hawking放射もブラックホールの**質量**、**回転**そして**電荷**のみを反映する
- ★ Hawking放射はこれらを放射の波長（色）の混ぜあわせで反映する



ブラックホールの唯一性 ⇒ Hawking放射は（ほとんど）特徴がない

# 何でブラックホールを作ろうとも、 結果生じるHawking放射は同じ

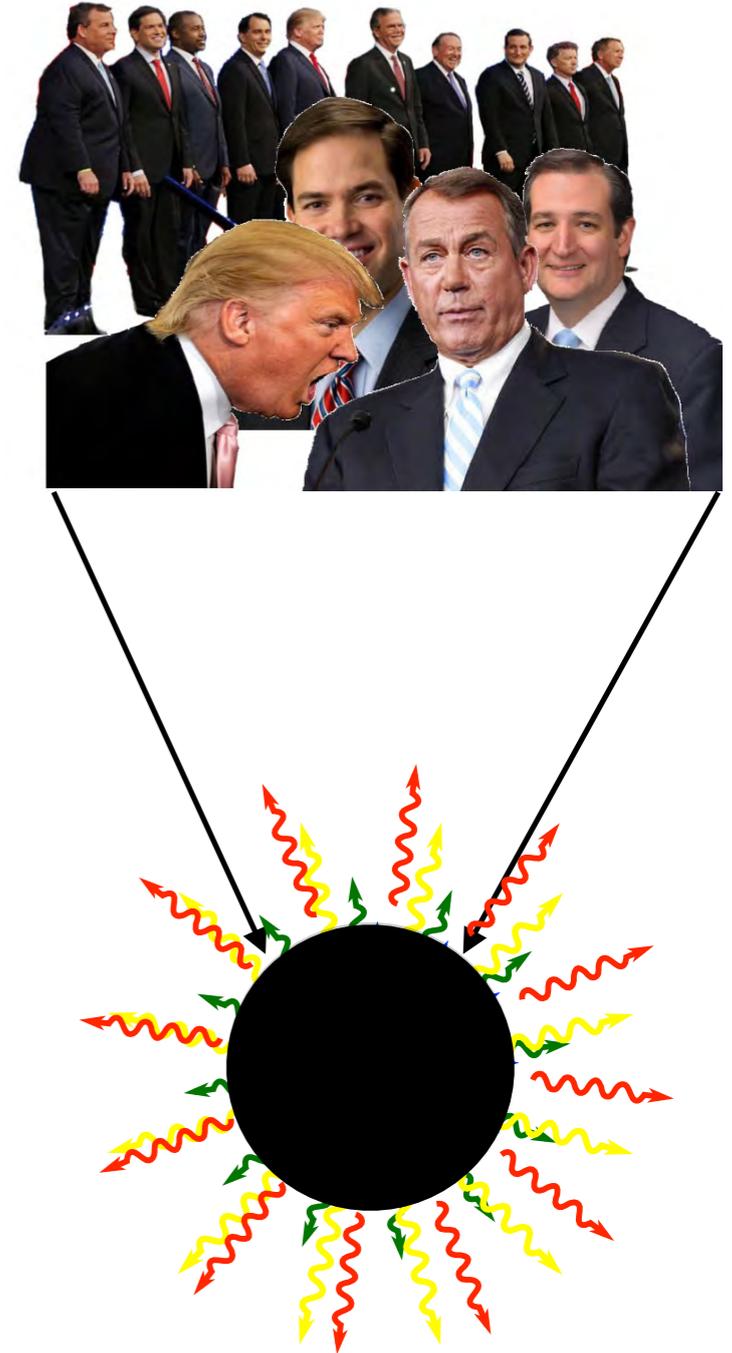
恒星



ゴミ



政治家たち



もし恒星、ゴミ、政治家たちが同じ質量、電荷、回転を持ってブラックホールになったら、Hawking放射は普遍的に同じである

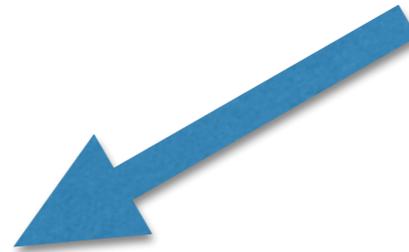
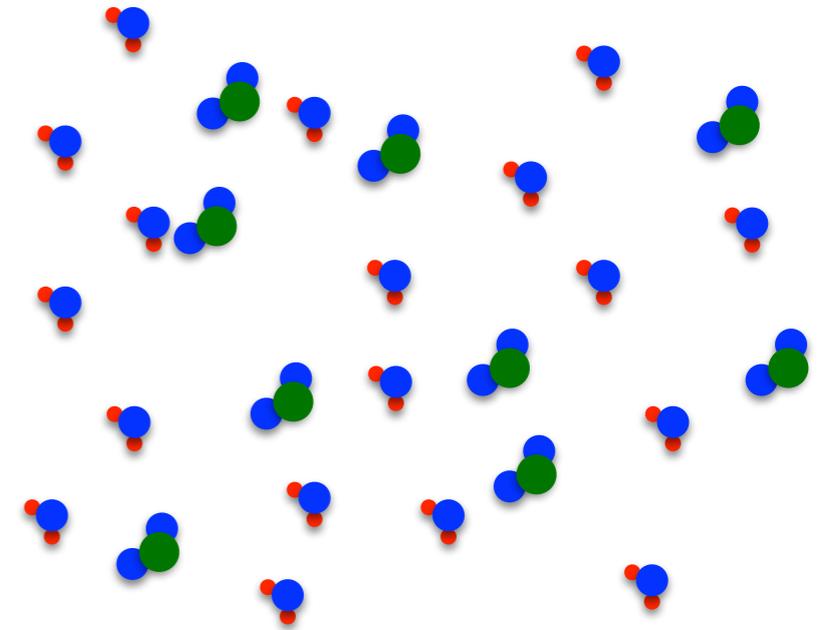
# 量子力学の基礎: “ユニタリ発展”

紙に載っている情報



分子となり飛び散る

紙が燃えると



**ユニタリ発展**とは、紙が燃えた後の分子の位置と速度を測定し多大な労力を払えば**元の紙とその情報を復元できる**ということを意味している

ユニタリ発展は時間発展が未来方向にも過去方向にも可能であることを意味する。

ジグソーパズルのように、ピースをバラバラにしても...  
多大な労力を払えばそれがもともとどういう状態だったかを計算でき、  
元の状態を復元できる



ユニタリ発展は時間発展が未来方向にも過去方向にも可能であることを意味する。

ジグソーパズルのように、ピースをバラバラにしても...  
多大な労力を払えばそれがもともとどういう状態だったかを計算でき、  
元の状態を復元できる



ユニタリ発展は時間発展が未来方向にも過去方向にも可能であることを意味する。

ジグソーパズルのように、ピースをバラバラにしても...  
多大な労力を払えばそれがもともとどういう状態だったかを計算でき、  
元の状態を復元できる



ユニタリ発展は時間発展が未来方向にも過去方向にも可能であることを意味する。

ジグソーパズルのように、ピースをバラバラにしても...  
多大な労力を払えばそれがもともとどういう状態だったかを計算でき、  
元の状態を復元できる

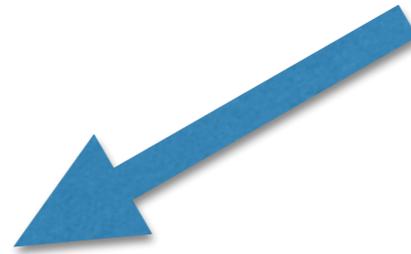
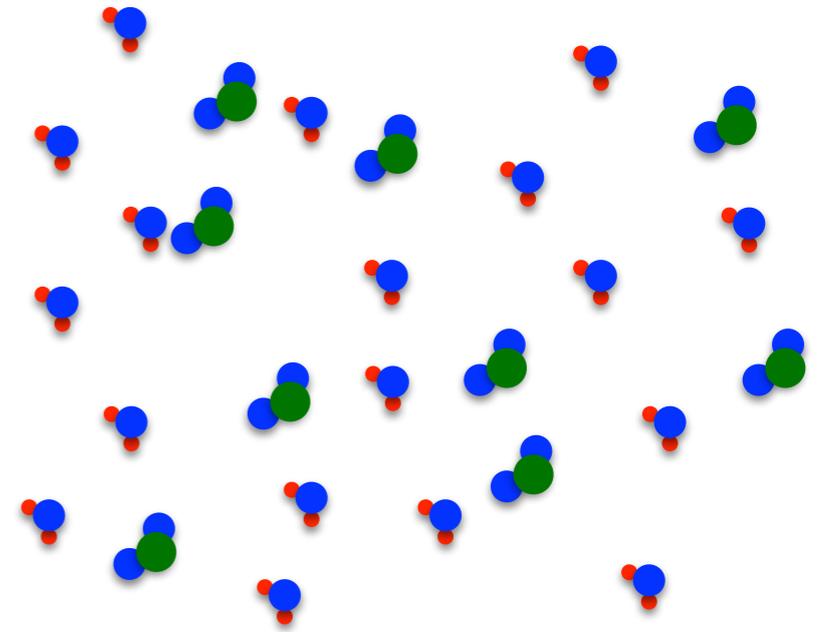


ユニタリ発展は時間発展が未来方向にも過去方向にも可能であることを意味する。

ジグソーパズルのように、ピースをバラバラにしても...  
多大な労力を払えばそれがもともとどういう状態だったかを計算でき、  
元の状態を復元できる



燃えた紙と全く同様に...



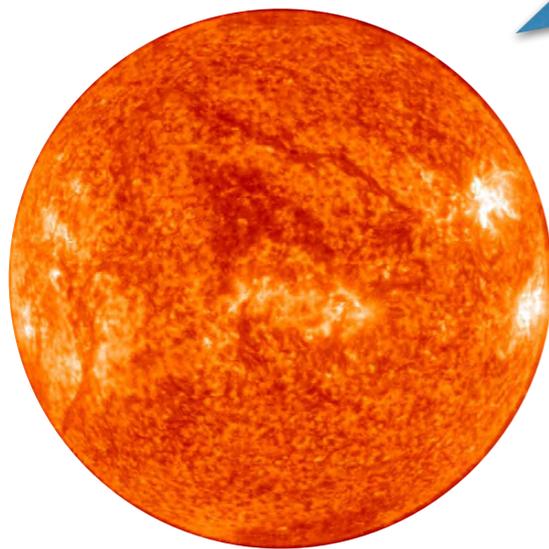
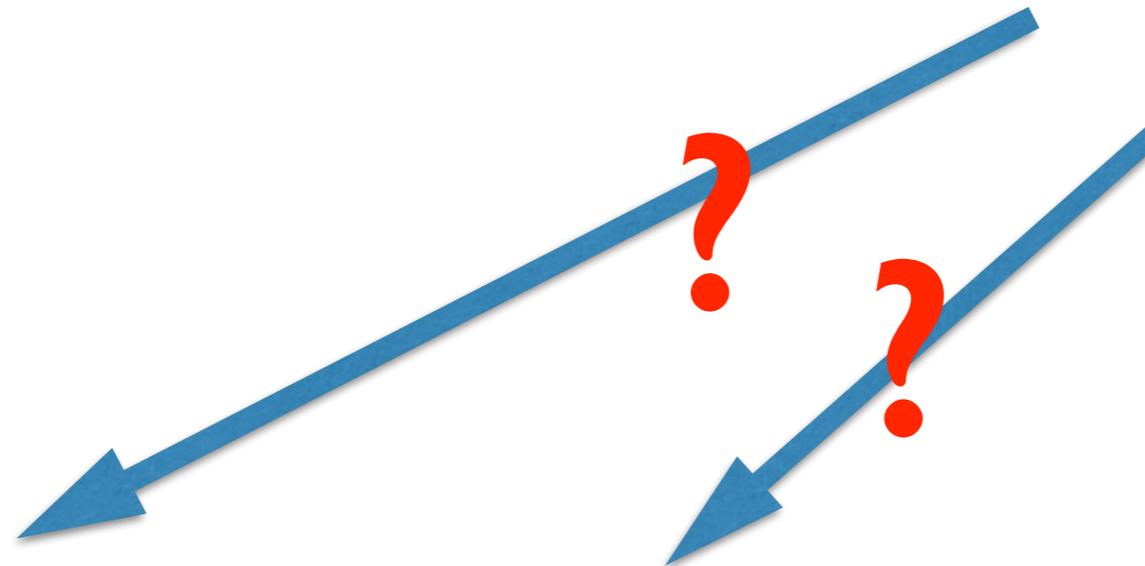
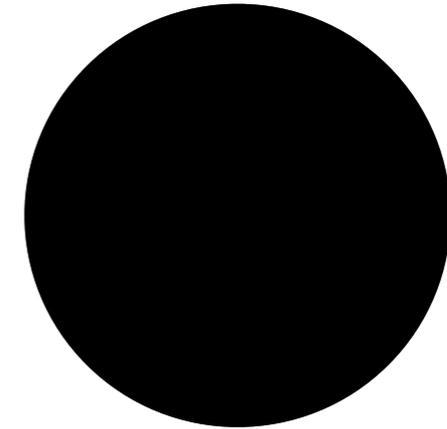
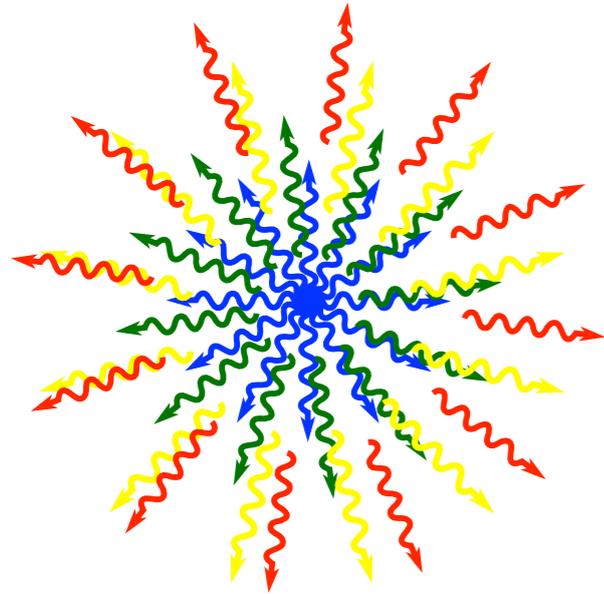
ブラックホールでも同様のことをしようとするとうどうなるか？

**Hawking放射**

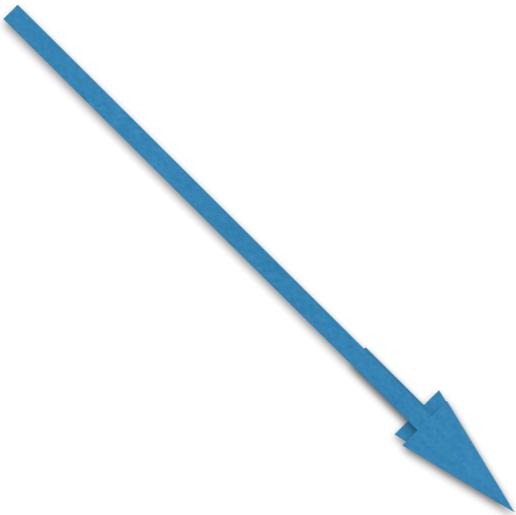
(ほとんど) 特徴がない

**再構成されたブラックホール**

(ほとんど) 特徴がない

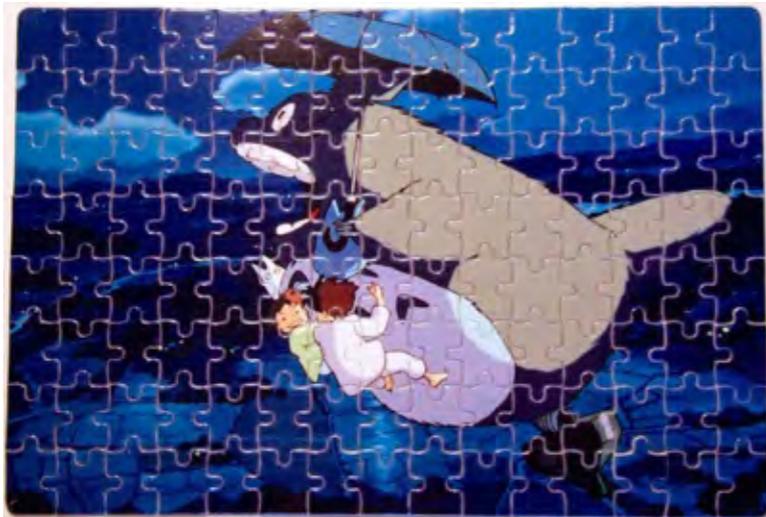


**元の状態を決定するのは不可能！**



通常はパズルをバラバラ  
にでき、そして初期状態  
に戻せる:量子力学の  
ユニタリ発展

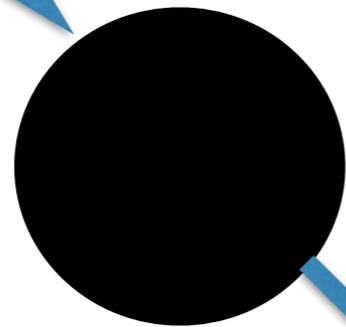




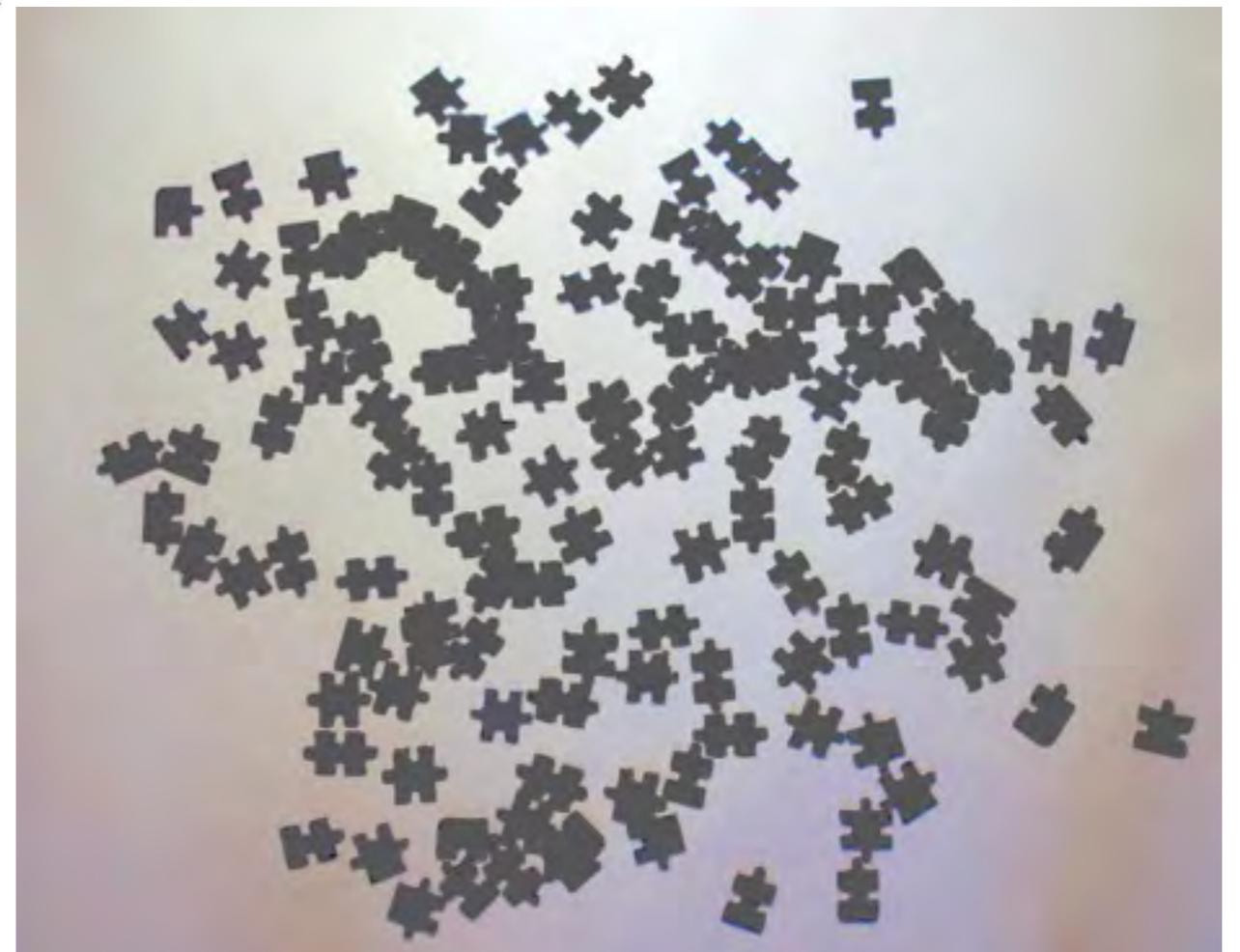
ブラックホールを間に挟むと  
全てのピースは情報を失う...

どのようにして復元を試みようと  
も結果として特徴の無い絵になる

ほぼすべての情報が失われる  
(ほとんど) 特徴のないピース



通常はパズルをバラバラ  
にでき、そして初期状態  
に戻せる:量子力学の  
ユニタリ発展

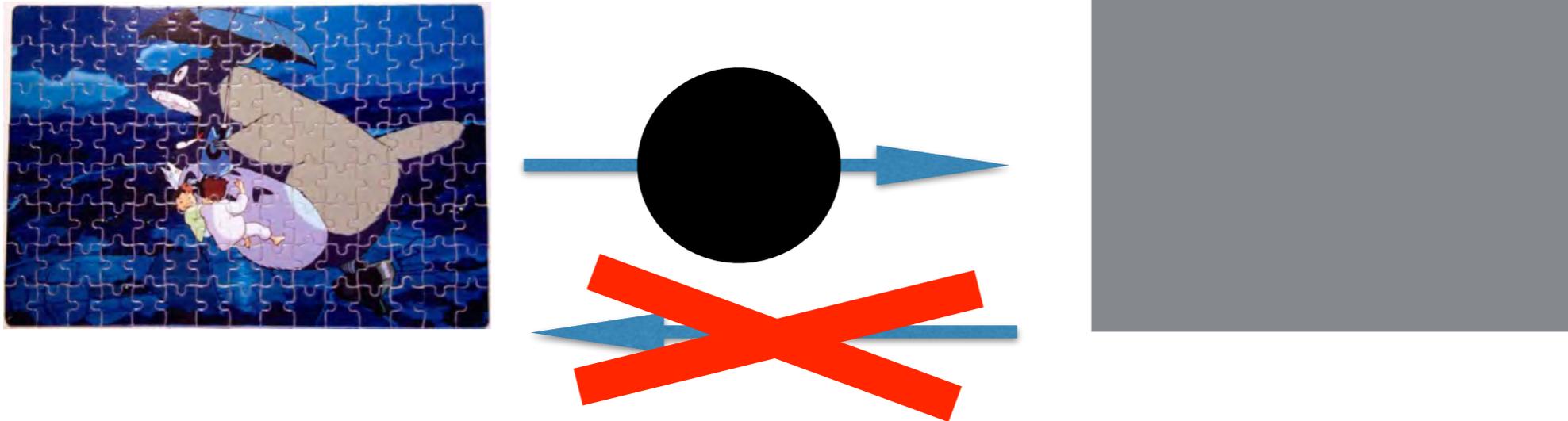


(ほとんど) 特徴の無い復元



一般相対性理論と量子力学はブラックホールが形成され、Hawking放射を経て蒸発することを示唆している

これは情報が失われることを示唆する:



これはユニタリ発展を要求する量子力学と完全に矛盾する！

しかし...

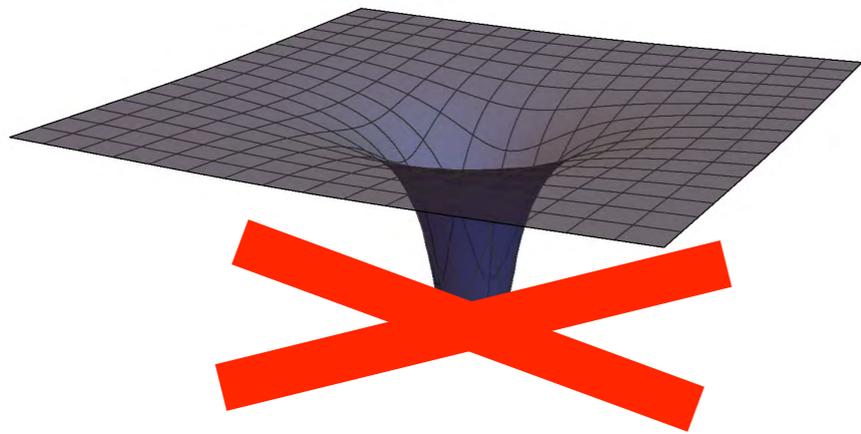
一般相対性理論と量子力学は共に現代の技術社会の土台となる理論であり、我々はそれを信頼している...なのにそれらの理論は合致しない！

**我々はこの問題を解決できるのか？**

# 我々は量子力学と重力を矛盾なく合体させた理論を必要とする

## 最有力候補：弦理論

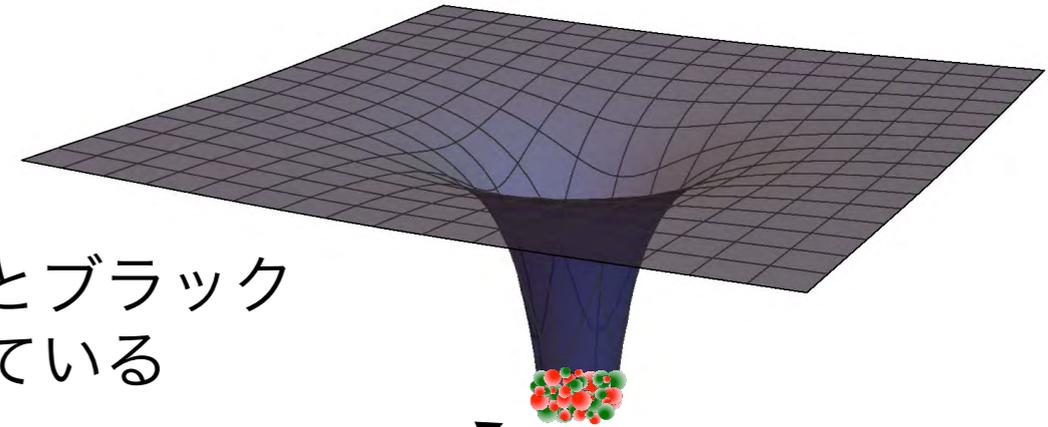
一般相対性理論: Schwarzschild



事象の地平面は量子力学との  
根本的な矛盾につながる

弦理論におけるブラックホール:

離れてみるとブラック  
ホールと似ている



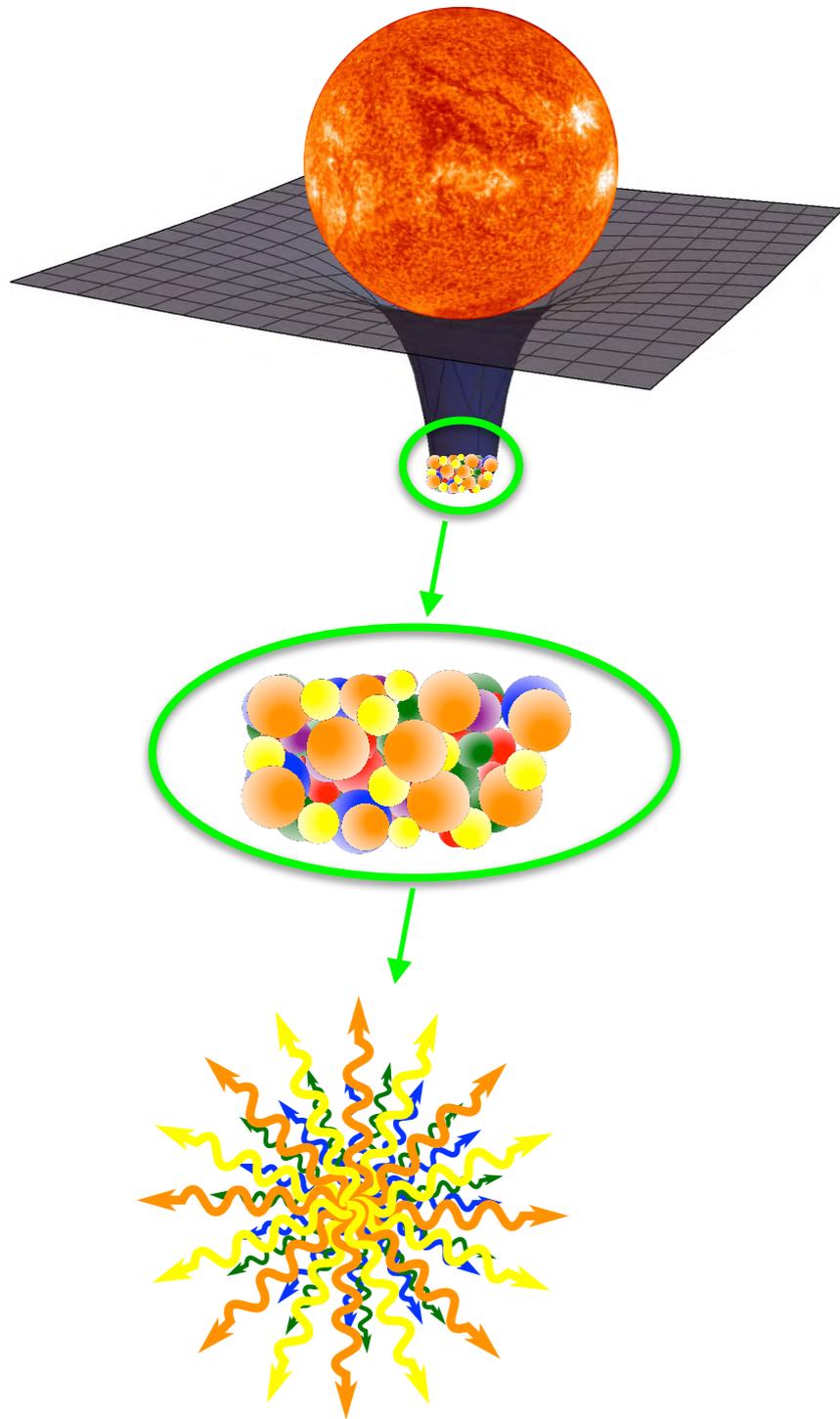
弦理論から物体の新たな状態や相、**余剰次元**といったものが導かれ、それらによってブラックホールが何で形成されたかの情報をすべて格納することができる

⇒ 重森さんの公演

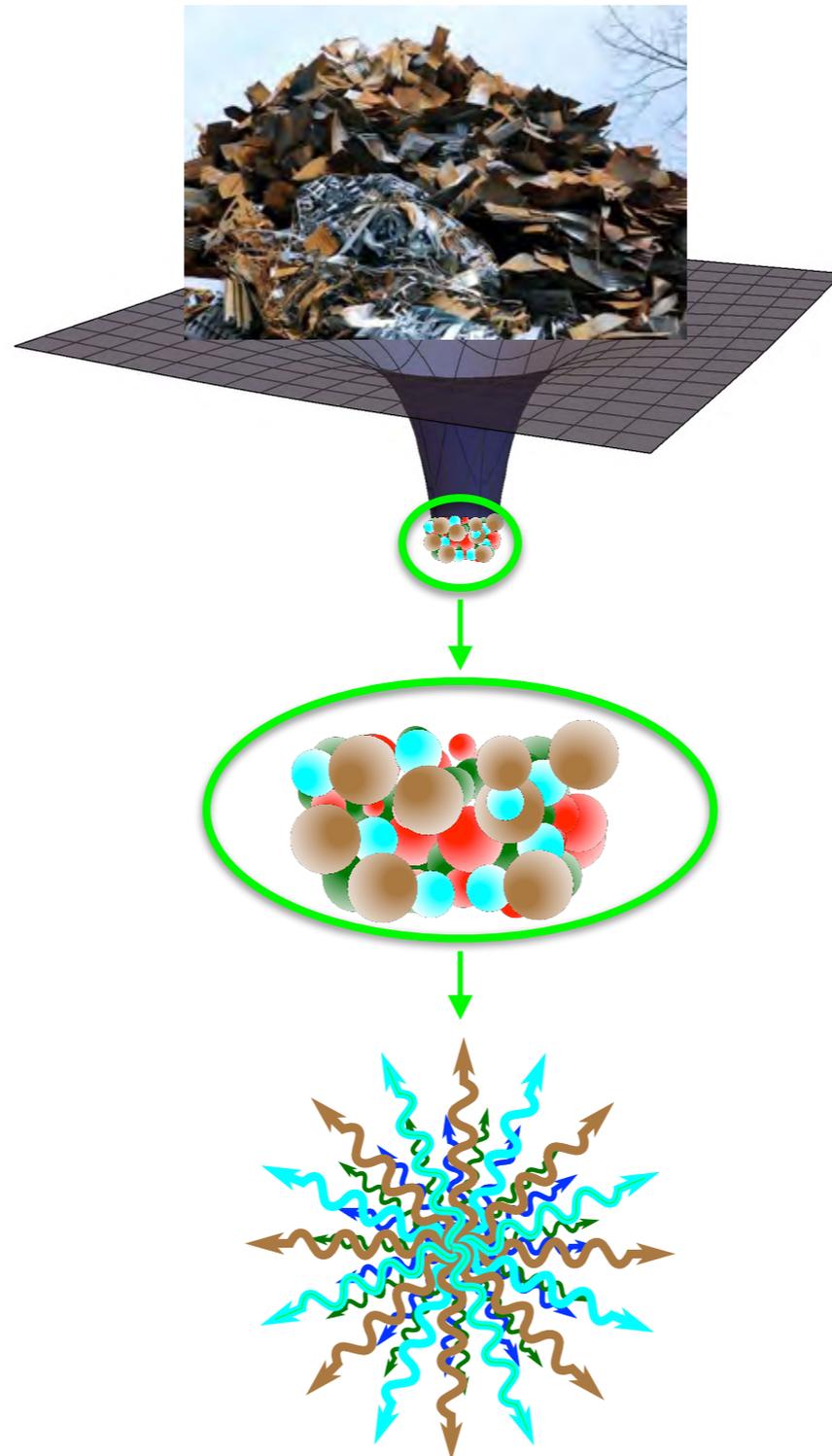
# 弦理論的なブラックホールを作る

何がブラックホールを形成したかの情報はブラックホール時空の底部に新たな弦理論的構造として格納される

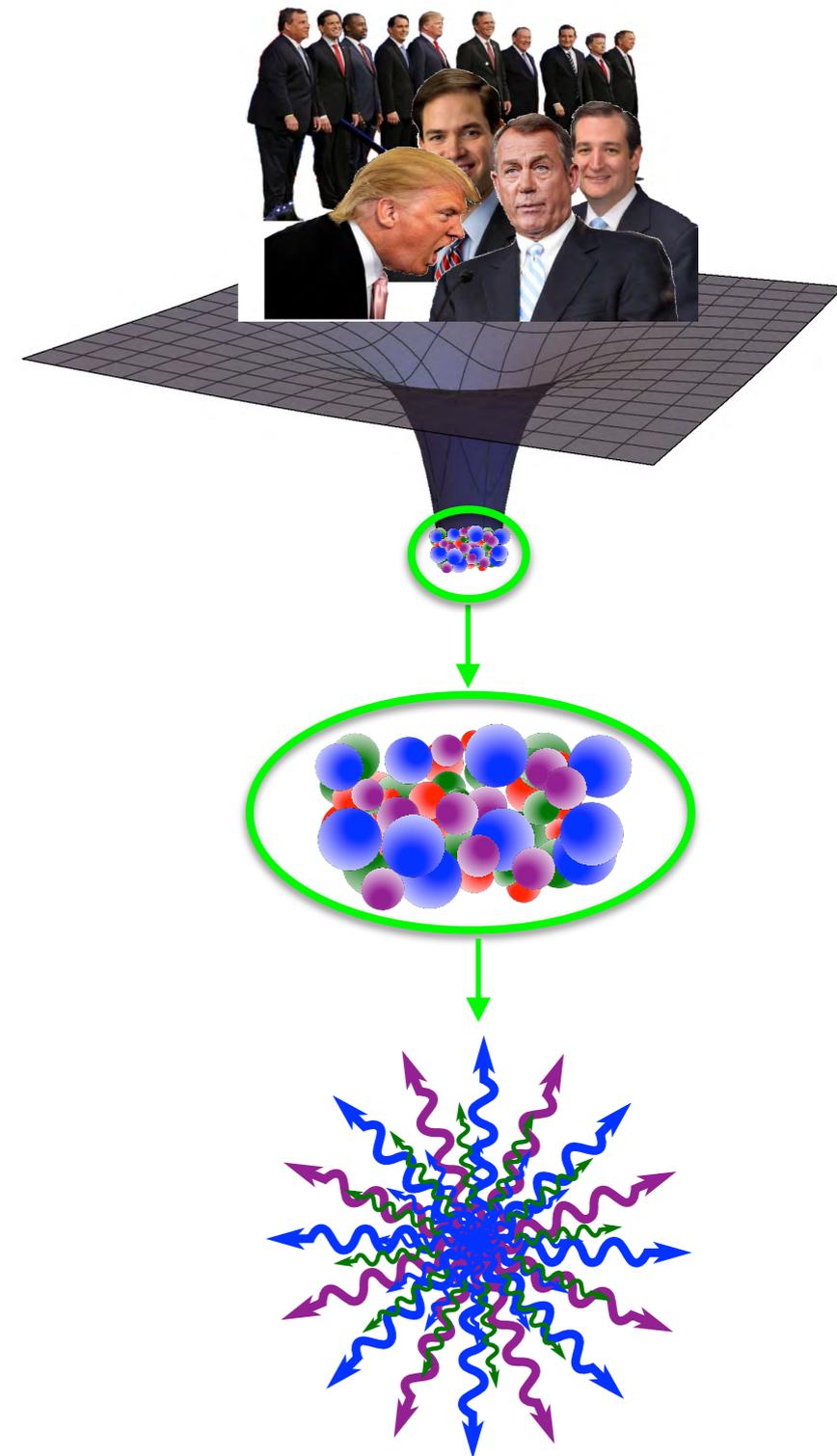
恒星



ゴミ



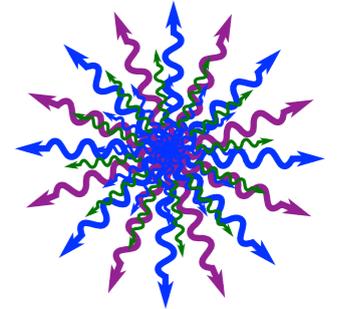
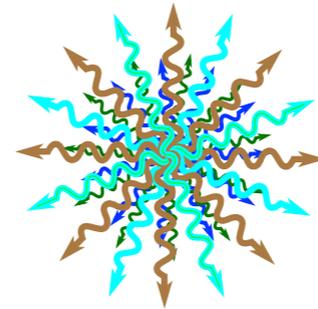
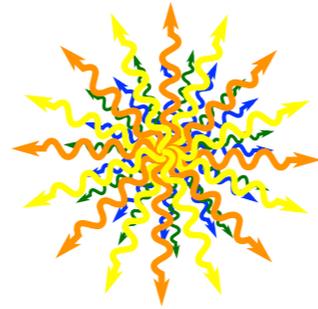
政治家たち



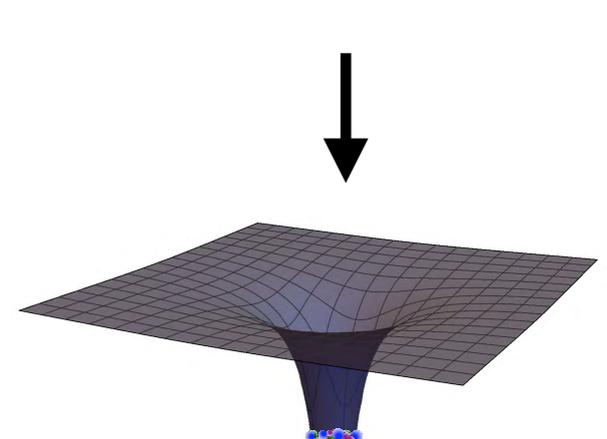
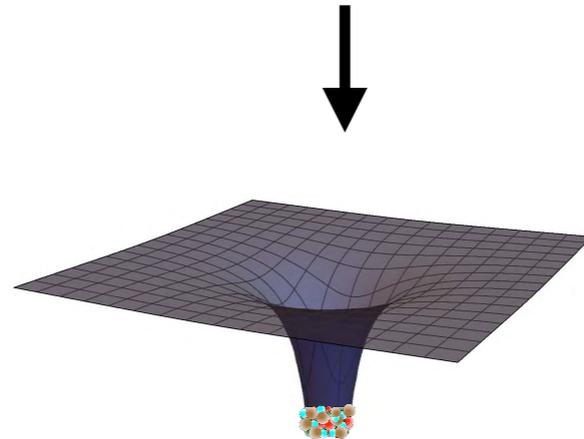
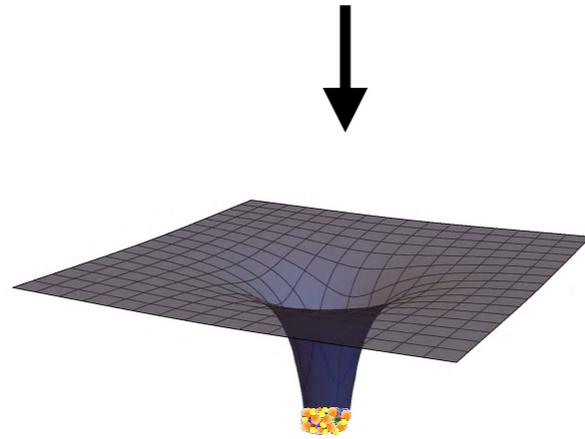
詳細な情報はHawking放射の違いとして再生される

目標：弦理論的なブラックホールは”ユニタリ発展”を持つことを示す

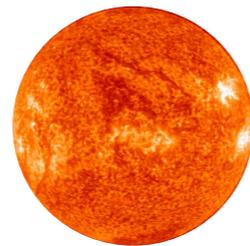
Hawking放射の違いから...



弦理論的なブラックホールを再構築できる



そこからブラックホールを形成した物体を再構築できる...



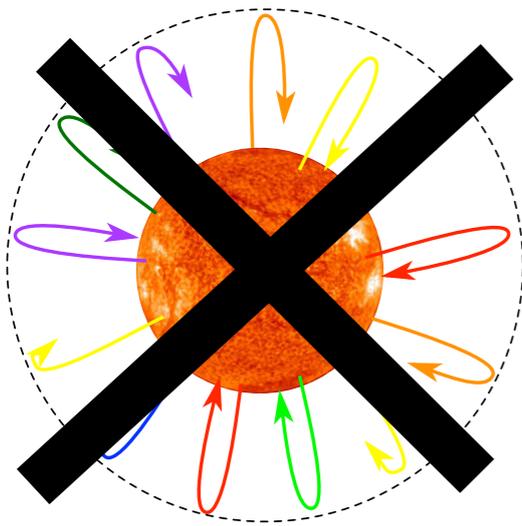
もしこの考えが弦理論で実現可能ならば、  
ついにEinsteinの重力理論と量子力学の原理とが調和させられる  
とても困難な問題だが、我々は答えに向かって前進し続けている...

もう一度1784年にJohn Michellが提唱した疑問に立ち返る：

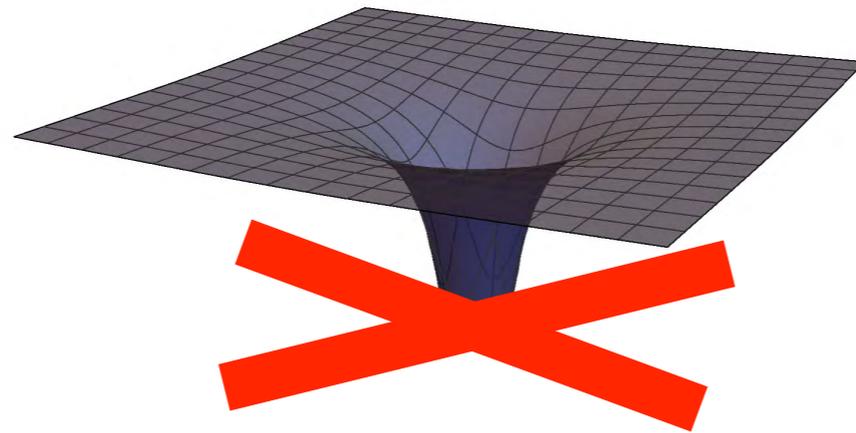
重力が強すぎて自身の出す光すら抜け出せない  
ような物体はどのような性質を持つのか？

今までの解答：

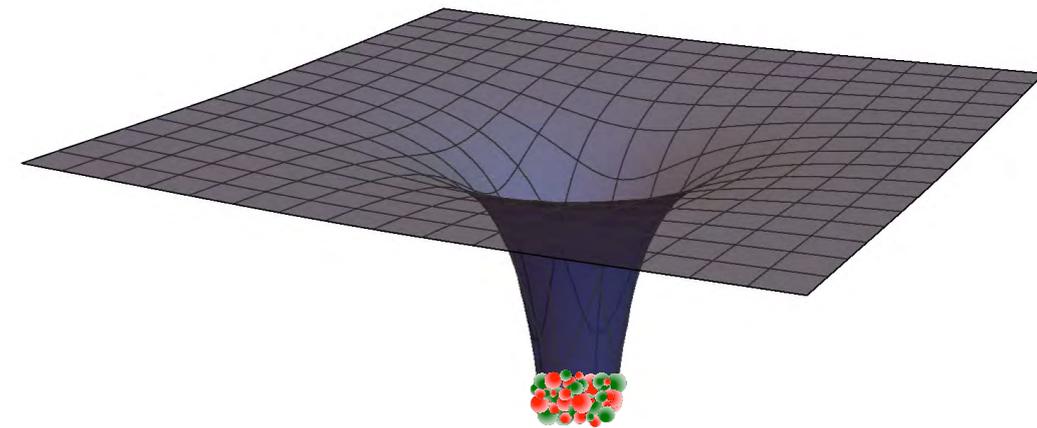
Michell



Schwarzschild



弦理論的ブラックホール



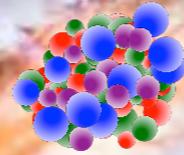
現在および次世代の理論物理学者への課題：

**弦理論**は量子力学と重力を完全に調和させることができるのか？  
(若しくは他の理論)

しかし我々は自然に関する重大な事実を常に心に留めておかななくてはならない：

とても大きなスケールでは、宇宙には一般相対性理論での  
ブラックホールのように振る舞う天体が多数存在する

しかし一般相対性理論でのブラックホールは量子力学と矛盾する...



ブラックホールについての研究を通して、我々は一般相対性理論と量子  
力学との間の矛盾を解決する方法を見つけ始めている

そしてこの研究は時空の革命的で新しい解釈へと繋がってゆく

.....重森さんの公演