

# ブラックホールと超弦理論

超弦理論を考えることによって、それまでよく分からなかった物理がよりよく理解できるようになります。その例の一つがブラックホールです。このことは超弦理論が正しい量子重力理論になっていることを示唆しています。ここでは、超弦理論によってブラックホールの理解がどのように進んだのかを説明します。

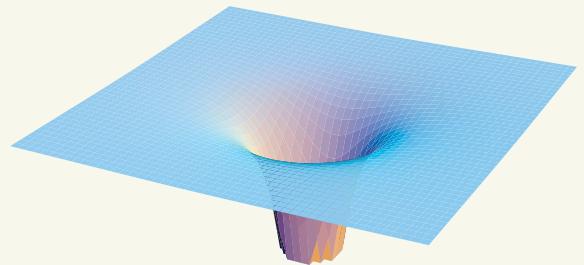
## ブラックホールとは？

皆さん、地球の「脱出速度」を計算されたことがあるでしょうか？脱出速度とは、ある天体の表面から無限遠方まで物体を飛ばすのに必要な速度で、高校物理の範囲内（ニュートン力学）で計算することができます。結果は、質量がM、半径がRの天体の脱出速度vは、重力定数をGとして、

$$v = \sqrt{\frac{GM}{2R}}$$

となります。したがって、質量Mが大きく、半径Rが小さい天体ほど、脱出速度は大きくなります。理論的には脱出速度が光速度を超えるような重くて小さな天体が存在することが可能です。特殊相対性理論によれば、あらゆる粒子は光速度を超えることは出来ないので、このような天体からはどんな粒子も出てくることはできません。このような天体を「ブラックホール」と呼びます。

ブラックホールは一般相対性理論を用いるより精密に扱うことができます。一般相対性理論によれば、ブラックホールには「地平面（ホライズン）」と呼ばれる境界が存在し、この境界の内側へ落ちた粒子は地平面を越えて出てくることはできません。

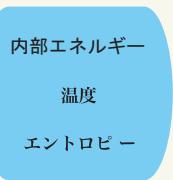


地平面の内側へ落ちた粒子は、地平面を超えて出てくることはできない。

## 熱力学

## ブラックホール

## ブラックホールは熱力学的性質をもつ！？



ブラックホールは熱力学の法則に従う。これはなぜか？

前段で「地平面に落ちた粒子は地平面から出てくることはできない」といいました。実は、量子論の効果を取り入れると、ブラックホールの地平面から粒子が放射される現象が起きます。この現象は発見者にちなんで「ホーキング放射」と呼ばれます。ホーキングは、「ブラックホールからは表面重力で定まる温度で粒子が放射される」と主張しました。このことは、私たちの身边にある物体がその温度に応じて熱を放射するのと同じことです。実は、私たちの身边にある物体が熱力学の法則に従うのと同じように、ブラックホールも熱力学の法則に従うことが一般相対性理論によって分かります。

この事実は素朴に考えると非常に不思議です。なぜかといえば、一般相対性理論という、熱力学とは無縁のように思われた理論で予言された物体（ブラックホール）が熱力学の法則に従うからです。

この謎の解決の鍵を握るのは、一般相対性理論を拡張した量子重力理論であると考えられていました。実際この謎に対する一つの解答が、超弦理論によって1990年代に与えられました。次項で超弦理論がこの謎に対してどのような解答を与えるのかを説明していきます。

## 超弦理論による解答：ブラックホール＝弦＆ブレーン！

そもそも、私たちの身边にある物体が熱力学の法則に従う（たとえば、熱は温度が高い方から低い方へ流れるなど）はどうしてでしょうか？この素朴な疑問に答えるための一つの考え方、「我々くらいの大きさの物体（マクロな物体）は、非常に小さな粒子（ミクロな物体）から構成されていて、マクロな物体の性質はそれを構成するミクロな粒子たちの性質によって決まる」という考え方です。

例として、気体、より具体的に、この部屋にある空気を考えてみることにします。マクロな見方だと、この部屋の空気の状態は温度や体積など、いわゆるマクロな量によって指定されます。一方、ミクロな見方をすると、この部屋の空気は、非常に大きな数の気体分子（窒素分子、酸素分子・・・）によって構成されていて、この部屋の空気を構成する気体分子の平均的な振る舞いがこの部屋の空気の状態を決める、と考えます。たとえば、温度であれば、気体分子の平均運動エネルギーが温度に相当します。この考え方には「気体分子運動論」と呼ばれています。もちろん、この考え方には気体以外のマクロな物体にも成立し、一般にこのような見方を定量的に扱う物理の分野は「統計力学」と呼ばれています。

ブラックホールが熱力学的性質をもつ謎に対して超弦理論が与えた解答は、まさに上で述べた考え方方がブラックホールにも当てはまる、ということでした。すなわち、ブラックホールは（この前のポスターでも扱われている）弦というミクロな「物体」とそれがくっつけることができるブレーンという物体によって実現されていて、莫大な数の弦とブレーンの状態がブラックホールの（マクロな）性質を決定するのだ、ということを超弦理論は定量的に実証して見せたのです。

超弦理論がブラックホールの熱力学的性質に関する謎を解明できたことは、超弦理論が現実の物理の理解に役に立つのと同時に、量子重力理論として正しい道を歩んでいることを示唆するものとして、大変意義深い結果だと考えられています。

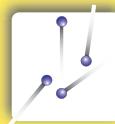
### マクロな見方

### 気体

### ミクロな見方



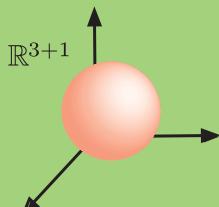
=



温度や体積などが気体の状態を決定する。

気体を構成する分子の状態が気体の状態を決定する。

### 一般相対性理論（マクロな見方）



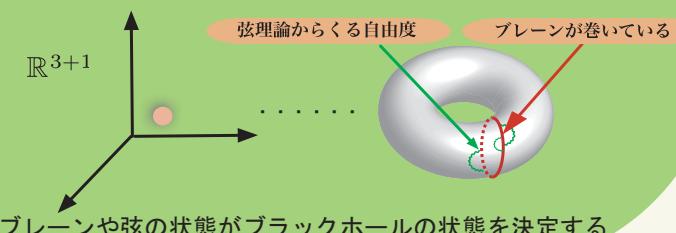
表面重力や地平面がブラックホールを決定する

### ブラックホール

### 超弦理論（ミクロな見方）

私たちの4次元空間

小さくなつて見えない6次元空間  
(拡大してみる)



ブレーンや弦の状態がブラックホールの状態を決定する