

ブラックホールの謎に迫る

2004 年日本物理学会科学セミナー
「アインシュタインと21世紀の物理学」テキスト
(2004年8月5日-6日)

高エネルギー加速器研究機構
夏梅 誠

<http://research.kek.jp/people/natsuume/>

1 はじめに

現代物理学はたいいていのものを原理的には説明できるだけの力があると考えられている。しかし現代物理学をもってしても説明できないものがある。その一つがブラックホールである。現実のブラックホールは一般相対論で大変よく説明されているものの、ブラックホールを突き詰めて考えると、どうしても一般相対論では説明できない点に突き当たってしまう。この講義ではどのような意味でブラックホールを説明できていないのか、そして超弦理論として知られている統一理論の候補がどうブラックホールを説明するのかを議論してみたい。¹

まずブラックホールについて簡単に紹介しよう。典型的なブラックホールには2つの特徴的な場所がある(図1)：

- ホライズン
- 特異点

これから見るように、これら2つの場所がそれぞれブラックホールの未解決問題を生み出す。そこで、これらの場所についてそれぞれ説明しておくことにする。

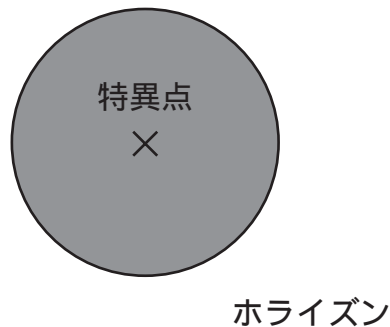


図1: ブラックホールの模式図。中心に特異点、そしてそれを取り囲むホライズンがある。

ホライズンとは、重力が強くなり光さえも外には逃れられない領域のことである。図2にあるように、ある物体を星の表面から投げ上げたとき、速度が小さすぎると星の重力によって星に戻ってき

¹なお、ブラックホールや超弦理論をきちんと議論するには一般相対論や量子力学の知識が不可欠である。しかし、時間の都合でこの講義ではしばしば初歩的な議論にとどめることにする。また、ブラックホールがなぜ存在すべきなのか、実際の宇宙でどのようなブラックホールが知られているかについては、本書の牧島一夫氏の解説を読んでいただきたい。

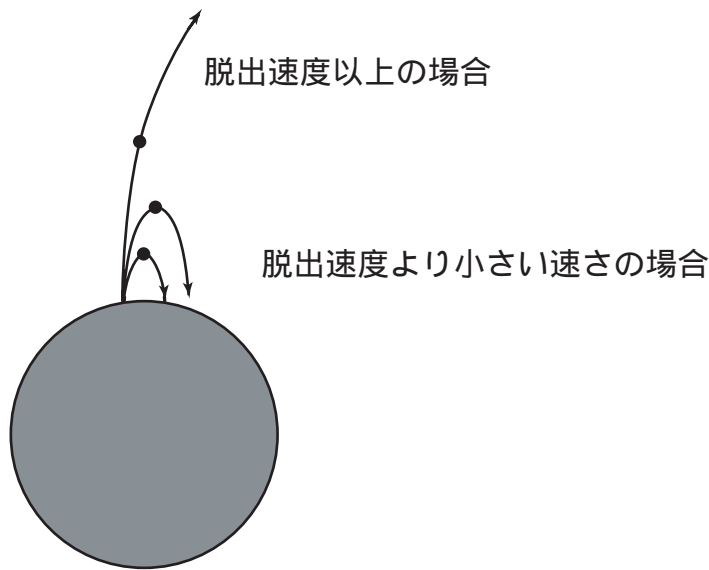


図 2: 脱出速度

星の半径	脱出速度
太陽半径	618 km/s
太陽半径の1/100 (6960 km ~ 白色矮星)	6,200 km/s
太陽半径の1/50000 (14 km ~ 中性子星)	14 万 km/s
太陽半径の1/235700 (3km)	30 万 km/s ~ 光速

表 1: 太陽質量の物体の脱出速度。

てしまう。ニュートン力学によると、星の重力から逃れるためには脱出速度という速度を超えていなければいけない。地球の場合は 11 km/s であり、太陽では 618 km/s である。質量が同じ場合、脱出速度は星の半径が小さければ小さいほど増えていく (表 1)。これは表面における重力が強くなっていくためである。星の半径がきわめて小さくなり、脱出速度が光の速度になると脱出速度は限界に達したことになる。これがブラックホールであり、脱出速度が光速になる場所がホライズンである。このホライズンの半径 (シュワルツシルト半径) は

$$(\text{シュワルツシルト半径}) = \frac{2GM}{c^2} \quad (1)$$

になる。ここで $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{N m}^2 \text{kg}^{-2}$ はニュートン定数、 M はブラックホールの質量、 $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ は光速である。太陽程度の重さの場合、シュワルツシルト半径は 3 km 程度になり太陽半径の 24 万分の 1 でしかない。

正確にはこのような議論は誤りである。まず、ニュートン力学的な議論では光の速さは任意である。その結果として、このような議論ではブラックホールから離れるにつれて光の速さが減ることになる。しかし特殊相対論では光の速さは絶対速度であり、どの観測者にとっても一意的な値を持つ。また、そもそもニュートン力学では重力が光にどう影響するのかが決められない。さらに、ニュートン力学では光が脱出できず戻って来るにせよ、一時的にホライズンから脱出できないわけではない。しかし、一般相対論によると、ホライズンから光が一時的にせよ脱出することはない。このようにニュートン力学的な議論には多々問題があるものの、シュワルツシルト半径の式 (1) は一般相対論に

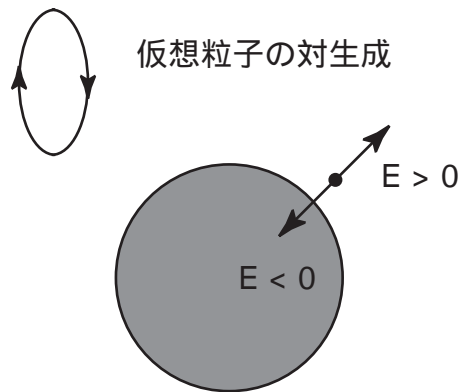


図 3: ホーキング放射

おいてもそのまま成り立つ。

さて、いったん星がホライズン程度まで縮んだとすると、強い重力のため星はますます縮んでいく。重力が強すぎて、いかなる手段をもってしても縮むことを止めることはできず、後は勝手に縮んでいくのである。縮んでいけば重力は強くなる一方なので、星の収縮は一層止まらない。最終的にはブラックホールの中心まで縮んで重力は無限に強くなる。これが特異点である。

ホライズンと特異点は、それぞれ一般相対論の未解決問題を生み出す。ホライズンに関連した未解決問題については次の節から、特異点問題については 5 節で考えてみる。

2 ブラックホールの謎：インフォメーション・パラドックス

ところで、ブラックホールはこの宇宙に単独で存在するわけではない。たとえばブラックホールを作り出す物体があるはずであり、このような物体はミクロなスケールでは量子力学に従っている。そこで物質を量子化してみよう。

量子論の特徴の一つは、からっぽの空間というものがないことである。一見からっぽに見えても、ミクロなスケールでは常に正エネルギーと負エネルギーの仮想粒子の対生成がおこなわれている。この対生成がホライズンの外で起きたとしよう（図 3）。正エネルギーの粒子はエネルギーを持っているため、エネルギーが大きければブラックホールから逃れることができる。一方、負エネルギーの粒子はブラックホールに吸い込まれる。負エネルギーの粒子が吸い込まれるため、結果的にはブラックホールのエネルギーは減り、ブラックホールは次第に小さくなっていく。ブラックホールが「蒸発」していくのだ。

遠方の観測者には、ブラックホールから正エネルギーの粒子が届く。この時ブラックホールは、あたかも温度を持った物体のようにエネルギーを発する。温度を持った物体は、温度だけで決まる普遍的な放射をする。放射は、その物体が何からどうできているかには左右されない。太陽の放射もこのような熱放射である。ブラックホールからの放射が普遍的な放射になるのは、これがランダムな量子ゆらぎから来ているからだ。

光さえもブラックホールからは脱出できないので、ブラックホールからは何も出てこないはずであるが、このように量子ゆらぎを考えるとブラックホールは熱放射を起こす（ホーキング放射）。ただし図からもわかるように、ブラックホールから実際に何かが出てきているわけではない。実際、放射は温度だけで決まるので、放射にはブラックホールを作り出した物体の「情報」は反映されない。この点が後々問題になってくる。

もともとブラックホールが温度を持つと言っても、普通のブラックホールの温度は大変低い。太

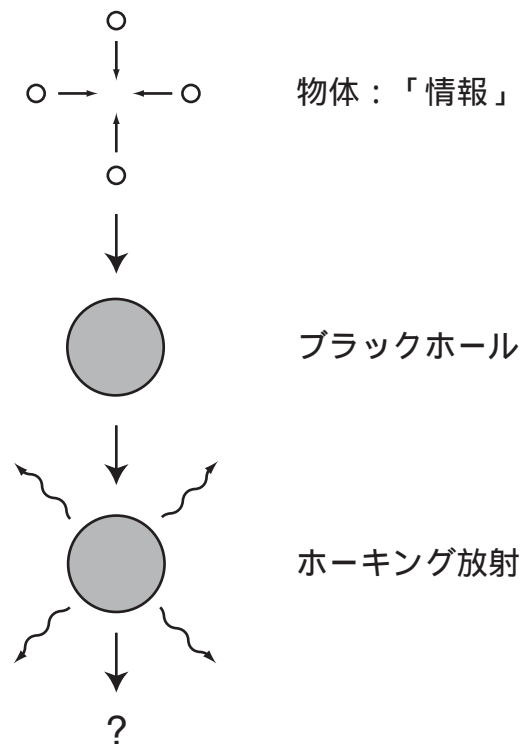


図 4: インフォメーション・パラドックスはブラックホールが量子力学を破る可能性を秘めている。

陽質量のブラックホールの場合、絶対温度で 10^{-6} 度にすぎず、とても観測できない。また蒸発しきるまでの時間、ブラックホールの寿命も 10^{59} 億年と宇宙年齢約 140 億年と比べて桁違いに長い。ブラックホールは小さいものの、マクロな物体である。ホーキング放射は量子ゆらぎの効果なので、マクロな物体に対するゆらぎの効果は微々たるものだ。ではなぜこの現象を気にするかと言うと、この現象が原理的な問題を起こすからである²。

この問題はインフォメーション・パラドックスと呼ばれている（図 4）。ブラックホールはホーキング放射により蒸発していく。ところがホーキング放射は熱放射であるので、ブラックホールを作り出した物体の性質にはよらない。ブラックホールが何も残さずに完全に蒸発しきると、物体の情報はどこに消えたのだろうか？

量子論的に考えてみよう。ここで起こったことは、ブラックホールを作った物体が何であるかによらず、同じ状態になったということである。しかし始めの状態が違うにもかかわらず、終わりの状態が同じになるようなプロセスは量子力学と矛盾する。このことを簡単な例で考えてみよう。今、「青」の状態と「赤」の状態があるとする。これは同じブラックホールを作る 2 種類の物体をモデル化したものである。最終的にはブラックホールが熱放射だけを残して蒸発すると仮定しているので、それぞれが同じ「黒」の状態に変化するとする。

(青の状態) → (黒の状態) (2)

(赤) → (黒) (3)

最初青があり、青はいつも黒になるので、このことを最初は青の状態の確率が 100%、これが黒の状態になる確率を 100% と言ってもいい。ところで量子力学では「重ね合わせした」状態も存在しなけ

²またブラックホールが小さければ小さいほど、ブラックホールの温度は高くなるので、このような場合があれば観測可能かもしれない。

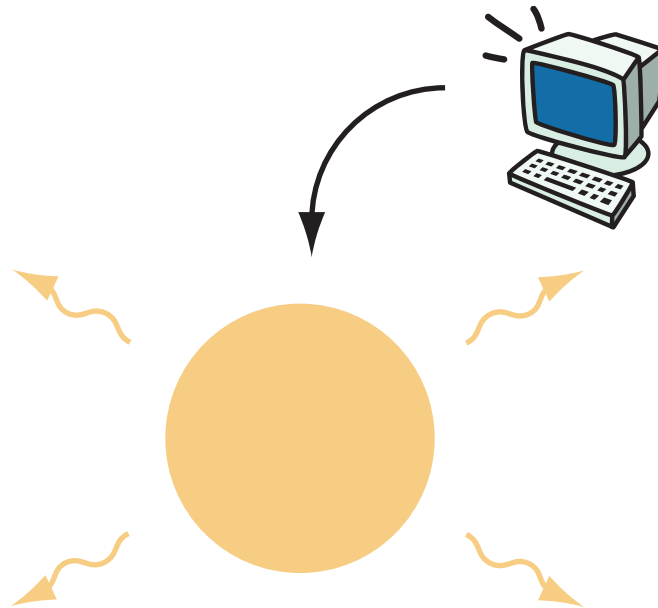


図 5: インフォメーション・パラドックスと太陽。太陽は量子力学に矛盾しないのか？

ればいけない。具体的には、上の二式を足したり引いた場合も意味をなさなければいけない。たとえば足してみた場合、

$$\frac{(\text{青}) + (\text{赤})}{\sqrt{2}} \rightarrow \sqrt{2}(\text{黒}) \quad (4)$$

まず左辺を見てみよう。これはこの状態を観測すると、ある時は「青」ある時は「赤」であり、それぞれの確率は 50% であると読む。1/√2 の係数は、それぞれの確率が 100% ではなく、50% だという事情を反映している。ところが右辺は、量子力学の標準的な解釈では 200% の確率を意味してしまう。「黒」になる確率が 200%。いったいどういう意味かと聞かれても困る。量子力学で意味づけできるものではないからである。全確率が 100% でなければ、確率という概念は意味をなさない。したがってこれでは量子力学の確率解釈が破れることになる。(専門的には、ユニタリー性を破るといふ。) 要するにインフォメーション・パラドックスとは、ブラックホールが量子力学を破る危険性のことである。

この問題は太陽とどう違うのだろうか？(図 5)たとえば、太陽にコンピューターを投げ込んだとすると、コンピューターは燃え尽き太陽からは熱放射のみが観測される。このためブラックホールと同じく、現実的にはコンピューターの「情報」は失われてしまう。太陽は量子力学に矛盾しないのだろうか？これは太陽からの放射は、実は厳密には熱放射ではないからである。そして熱放射からのズレの知識から、原理的にはコンピューターの「情報」を再構成できる。つまり熱放射からのズレが「情報」を運んでいるのである。太陽の放射を熱放射と言うのは、太陽の可能なあらゆる状態に対して統計的な平均をとった上のことである。

ブラックホールの場合はそうは言えない。第一に、ホーキング放射は厳密に熱放射である。第二に、ブラックホールに落とされたコンピューターはホライズンを横切るはずである。ところがホライズンの中からは外に信号を送ることはできない。したがって、この場合もホーキング放射が厳密には熱放射ではなく、情報を運んでいると結論することはできない。

ここでブラックホールの問題を離れて、超弦理論がこの問題にどうアプローチするのかを考えることにする。特に、超弦理論でのブラックホールはどういうもので、超弦理論がブラックホールを量子論的にちゃんと扱えるかどうかといった点に注目することにしよう。もしも超弦理論がブラックホールを量子論的に扱えるのであれば、ブラックホールがあっても量子論は破れていないことになる。

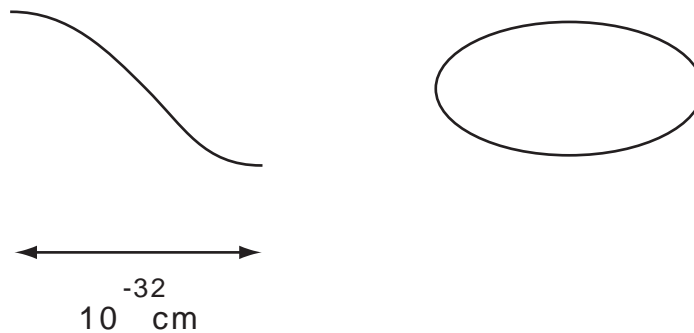


図 6: ストリングには 2 種類ある。左は端のあるストリングで、右はループ状のストリング。

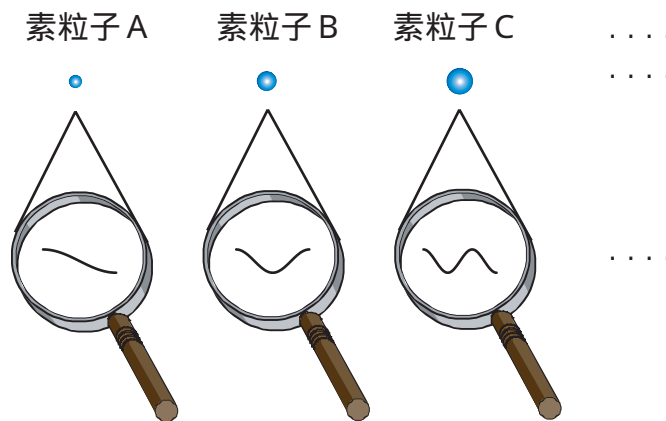


図 7: さまざまな素粒子は、ストリングのさまざまな振動である。

したがってインフォメーション・パラドックスの問題もないはずである。

3 超弦理論の基礎

普通の素粒子論では、素粒子は点粒子と考えられている。しかし超弦理論での基本的な物体は、伸び縮みするきわめて小さい長さのストリングである（図 6）。このストリングはきわめて小さく、 10^{-32} cm 程度であると考えられている。これに対して、現在実験で「見る」ことができる長さは 10^{-15} cm にすぎない。このため巨視的にはストリングは素粒子と見なせる。素粒子論では

- 物質：クォーク 6 種類（陽子、中性子の構成要素）、レプトン 6 種類（電子など）、ヒッグス粒子
- 相互作用：重力、電磁気力、弱い力、強い力

とさまざまな粒子が登場するが、超弦理論ではこれらの素粒子はすべてストリングという一つの物体で統一的に理解される。これから見るようにストリングはいろいろな形で振動できるが、さまざまな素粒子はストリングのさまざまな振動として解釈される（図 7）。ストリングがとても小さいので、違う振動が違う素粒子に見えるのだ。さらに図 8 にあるように、ストリングは 2 つのストリングへとちぎれたり、つながったりできる。素粒子の相互作用は、このようなプロセスによって表わされる。

ストリングの性質を詳しく見てみよう。このストリングの長さは、プランク長さとして知られる長さに近い。プランク長さはほぼ 10^{-33} cm であり、時空の量子論的なゆらぎが効いてくる長さだと

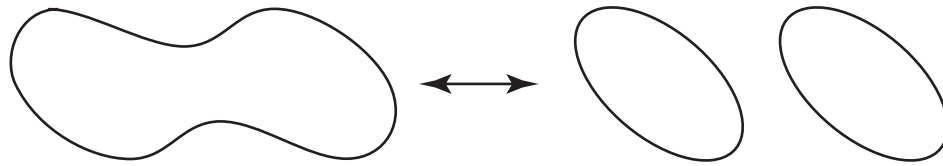


図 8: ストリングがちぎれたり、つながるプロセスは、素粒子の相互作用をあらわす。

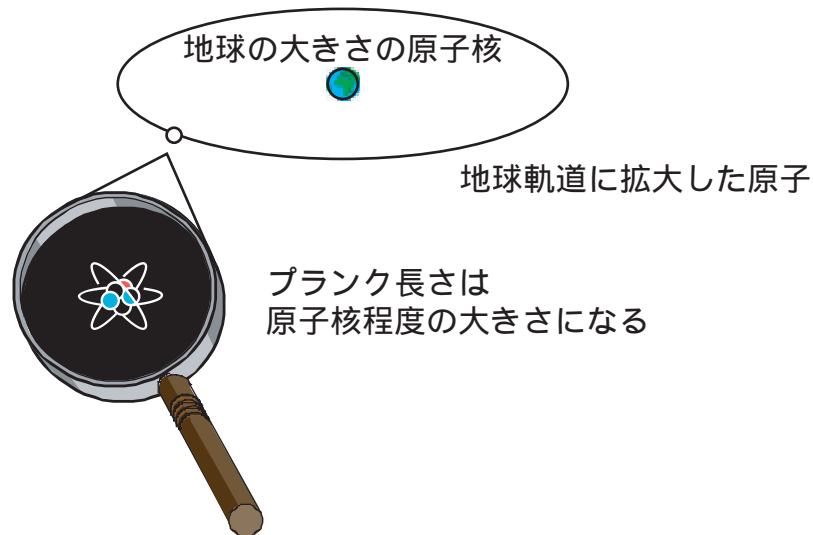


図 9: 原子を 10^{21} 倍拡大してみる。

されている。前節までの話では時空、ブラックホールそのものの量子ゆらぎは考えに入っていなかった。しかしブラックホールも十分小さくなると、量子ゆらぎからまぬがられない。この場合、時空そのものを量子論的に扱わなければいけない。量子ゆらぎの大きさは、コンプトン波長と呼ばれる量が目安になる。質量 m の物体に対して、コンプトン波長の一つの定義は $\hbar/(mc)$ である。ここで、 $\hbar = 1.05 \times 10^{-34}$ J s はプランク定数である。ブラックホールの大きさが

$$(\text{プランク長さ}) = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \quad (5)$$

程度になると、量子ゆらぎの大きさ（コンプトン波長）がブラックホールそのものくらいになってしまう。超弦理論は、このようなスケールで時空の量子ゆらぎをも記述する理論である。

これらの長さはあまりに小さく、なかなかイメージしづらい。初等的な扱いでは、原子はよく太陽系になぞらえられるので、原子を地球軌道まで拡大したとしよう。ところがこれほど拡大してもプランク長さは原子核の大きさ程度にしかならない。またこの時、原子核は地球程度のサイズである（図 9）。プランク長さは、いわばマイクロな物体に対してもマイクロなスケールなのである。

表 2 は日常的な弦とストリングを比べたものである。ストリングのもう一つの特徴は、そのきわめて大きい張力である。張力が大きいひもは、振動すると大きな運動エネルギーを持つ（ストリングの場合 10^8 J 程度）。アインシュタインの有名な関係式 $E = mc^2$ から、エネルギーと質量は表裏一体の関係にあるので、この莫大な振動のエネルギーはストリングの質量とみなすことができる。したがって振動するストリングは、巨視的には振動エネルギー分の質量を持つ素粒子として見える。さらに振動の仕方が違うとエネルギーも違うので、違う振動のストリングは異なる質量を持つ素粒子とし

	バイオリン	ストリング
長さ	32.5 cm	10^{-32} cm
1 m あたりの質量	0.7 g	10^{28} g ~ 地球質量
周波数	440 Hz	10^{42} Hz
振動の速さ	290 m/s	光速度 $\sim 3 \times 10^8$ m/s
張力	57 N	10^{42} N
振動のエネルギー	10^{-3} J	10^8 J

表 2: バイオリンの弦とストリングの物理的諸量。バイオリンについては A440 の音階に相当する値 (通常の「ラ」の音。この音は国際規格で 440 Hz として定義されている。) いずれの値も目安である。

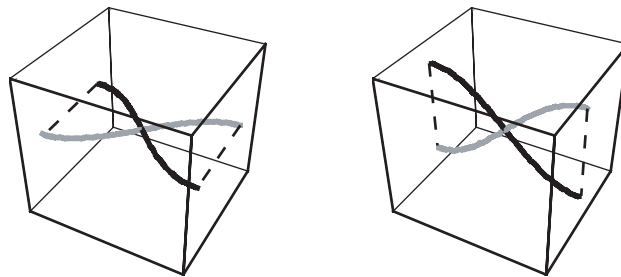


図 10: ストリングのもっとも低い振動状態 (レベル 1)。太線のストリングが半周期後にグレーの線の形を取る。「箱」は単に 3 次元での振動を見やすくするために描いたものである。

て見えるはずである。ストリングの振動の仕方は無限にあるので、超弦理論は無限個の素粒子の存在を予言することになる。

この質量は、典型的には 10^{-6} g ($\sim 10^{18}$ GeV/ c^2) 程度である。これは日常的な重さとしてはたいした質量ではなく、単細胞生物としては大きいゾウリムシ程度の重さである。しかし素粒子としては大変重い。ストリングはすぐ後に見るように、日常的な物体—古典論的な物体—ではなく、量子論的な物体である。量子論的な物体が、ゾウリムシという古典論的な物体に匹敵するほど重いというのはきわめて異例である。このような重い素粒子は未発見なので、素粒子論の応用では普通あまり重要ではない。一方、通常知られている素粒子、物質場の粒子や光子などは、ストリングのもっとも低い振動である。しかし、重い状態が存在することはさまざまな意味で重要になる。

ストリングがこれほど小さいと量子ゆらぎが無視できない。ストリングの典型的な重さに対して、コンプトン波長はストリングの長さ程度となる。したがって、ストリングには量子ゆらぎも大きく効くはずである。(ただしこの講義では、簡単のため古典論的なストリングを主に扱う。)

ここまでをまとめると、ストリングは日常的な弦と比べて 2 つの大きな違いがある：

1. 相対論的
2. 量子論的

相対論的とはストリングの張力がきわめて大きいことを指す。

さて、具体的にストリングの振動の様子を見てみよう。ここでは端を持つストリングの振動を考えてみる。図 10 はストリングのもっとも低い振動状態を描いたものである (4 次元の場合)³。これは、ストリングが一つだけ「節」を持つ場合である。振動は X 方向と Y 方向の 2 種類取り

³実際には、量子論によると超弦理論は 10 次元でしか存在できない。このためこれから議論する状態数の増え方は、

偏光フィルター

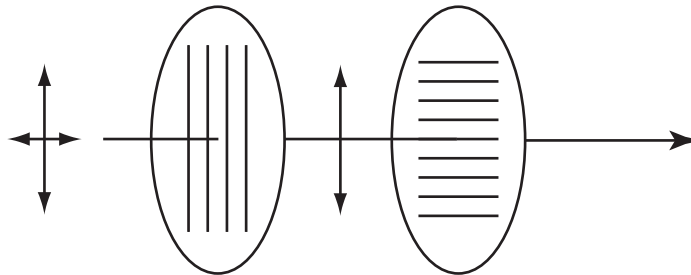


図 11: 光に2つの状態があることは、偏光フィルターを2枚使って確かめることができる。

うることができるので、この質量を持つ状態は2つあることになる。超弦理論ではこれは光である。光は X 方向と Y 方向の振動2つの状態からなる。これは偏光フィルターを使えばわかる(図 11)。(偏光していない)光を一枚の偏光フィルターを通して光は完全には遮断されないが、向きが 90° 違うフィルターを2枚使えば光は完全にブロックされる。2つのフィルターでそれぞれの振動状態がブロックされるからである。

ここでストリングの質量を大きくしよう。ストリングの質量を大きくするには、2通りの方法がある：

- a. 振動の節を増やす(楽器で言えばオクターブ高い音)
- b. 振動の振幅を大きくする

ストリングの振動を考える上で、もう一つ注意点がある。古典論的には振幅は自由な値を取りうるが、量子論によれば振幅はとびとびの値しかとれない。したがって、ストリングの取る質量もとびとびの値を取る。このとびとびの質量を軽い状態からラベル付けしたものを「レベル」という。節を増やしたり振幅を変えることで、次の「レベル」では5つの状態がある(図 12)。このように、状態の数は質量が大きくなれば大きくなるほど多い。図 13 は状態数が増大する様子を最初の20のレベルについてプロットしたものである。図からもわかるように、状態の数は指数関数的に増えていく。このようなストリングの重い状態は、素粒子論の通常的应用としてはあまり重要ではない。しかし、ブラックホールを考える上では決定的な役割を果たす。特に、状態数の急激な増加を心にとめておいてほしい。

4 超弦理論でのブラックホール

超弦理論でブラックホールにまつわる問題を議論するためには、まず超弦理論でブラックホールはどうあらわされるのかを考えておかなければいけない。普通の物体もストリングでできているはずだから、ストリングを狭い領域に十分多く集めることでブラックホールを作れるはずである。しかし、このようなプロセスを計算できるほどには、超弦理論の理解は進んでいない。そこで理論的にもっと安易にブラックホールを作ること考えよう。

まず、ストリングそのものは現実世界ではブラックホールではない。これは太陽がブラックホールではないのと同じような意味である。ある物体がブラックホールかどうかを見るにはシュワルツシ

4次元の場合よりさらに急速である。これらの状態数は余分なものではなく、超弦理論が現実をあらわすためにも欠かせない。一番低い振動はなじみのある素粒子に対応しており、これから議論するように特に光子に対応するが、他のなじみ深い素粒子も超弦理論であらわすには、4次元では足りないことは明らかである。

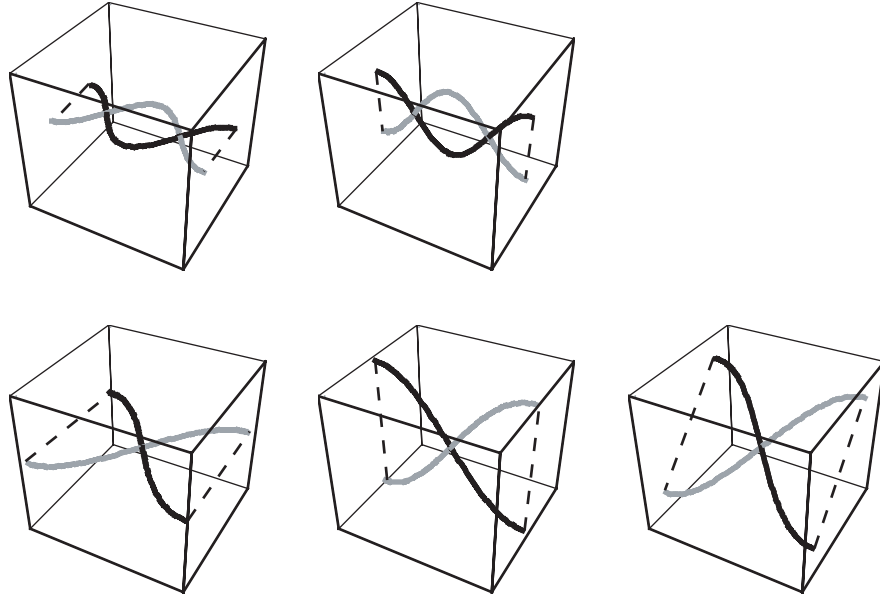


図 12: スtringの状態 (レベル2)。最初の2つは節を増やすことをエネルギーが高くなっており、後の3つは振幅を大きくすることでエネルギーが高くなっている。

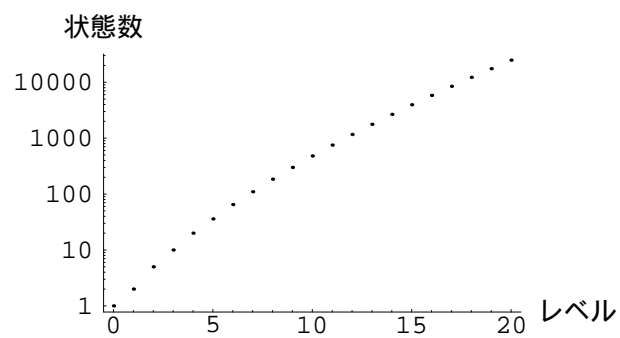


図 13: スtringの状態数が増大する様子 (4次元での端のあるStringの場合)。Y軸は対数目盛であることに注意。グラフより状態数は指数関数的に増大することがわかる。

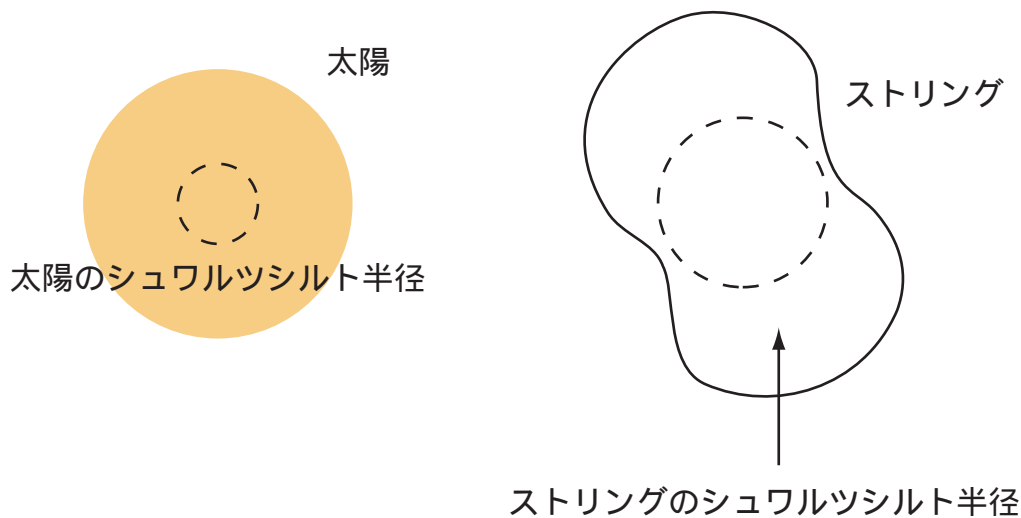


図 14: ある物体がブラックホールかどうかを見るにはシュワルツシルト半径と比べればよい。

ルト半径と比べてみれば良い(図 14)。太陽は、太陽のシュワルツシルト半径 3 km よりはるかに大きい。このため太陽はブラックホールではない。同様に、ストリングは通常ストリングのシュワルツシルト半径より大きく、したがってブラックホールではない。超弦理論はそもそもブラックホールではなく素粒子をあらわす理論なのだから、これは当然である⁴。

しかし今、ひとつの思考実験を考えてみよう。現実世界では重力の強さは一定だが、今重力を強くしていってみよう。これはニュートン定数 G を大きくすることである。ニュートン定数が大きくなると、(1) 式より対応するシュワルツシルト半径は大きくなる。重力を十分強くして、シュワルツシルト半径がストリングのサイズよりも大きくなると、ストリングはブラックホールになるはずである。ブラックホールとは自分自身のシュワルツシルト半径より小さい物体に他ならない。このようにして、重力の強さを調整することでブラックホールができるはずである(図 15)。

しかし、さきほど見たように一つの質量を持つストリングの状態は複数存在する。上での議論から、一般にこのような状態は全てブラックホールになるであろう。したがって同じ質量のブラックホールと言っても、ミクロなスケールではストリングのさまざまな状態に対応する。つまり、

一つのブラックホールは、ミクロなスケールでは莫大な状態をとりうる

実はブラックホールが多くの状態数を持つことは以前から推測されており、ブラックホール・エントロピーと呼ばれてきた。そしてブラックホール・エントロピーをミクロなスケールで理解することが、四半世紀にわたるブラックホールの謎の一つであった。

どうしてブラックホール・エントロピーという名前が付いているのかを知るために、ホーキング放射に戻ってみよう。ブラックホールが熱放射を起こすということは、何らかの意味でブラックホールが熱平衡にあることを示唆する。熱平衡の物理は熱力学・統計力学としてよく知られており、一つの特徴は系の巨視的な状態が少数のパラメーター(たとえば温度)を指定するだけで定まるという点にある。しかし、たとえば同じ温度のコップ一杯の水であっても微視的には多数の分子・原子が運動しており、それら分子・原子の状態は巨視的な状態量だけでは決まらない。微視的な状態は、コップの水ごとに少しずつ違っていてもいい。したがって同じ巨視的な状態を取る微視的な状態は多数ありう

⁴ストリングは太陽と違い量子論的な物体なので、素粒子、たとえば陽子などと比べた方が比喩は正確である。陽子のコンプトン波長($\sim 10^{-14}$ cm)は、陽子のシュワルツシルト半径よりはるかに大きいので、ブラックホールではない。

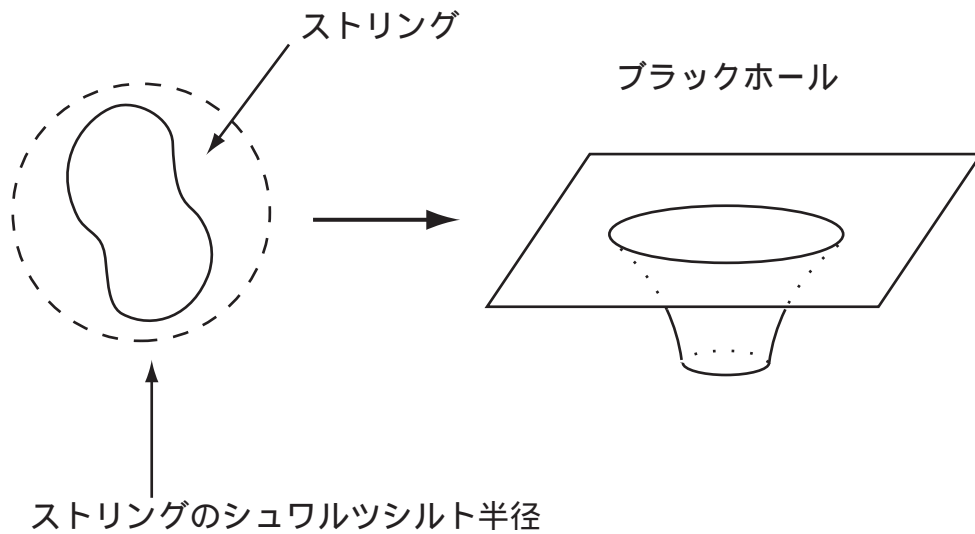


図 15: ストリングからブラックホールを作る。ストリングが自分自身のシュワルツシルト半径より小さくなると、ブラックホールになるはずである。

る。統計力学では、この数のことをエントロピーという。エントロピーは

$$(\text{エントロピー}) = \log (\text{同じ巨視的な状態を取る微視的状态の数}) \quad (6)$$

として定義される。エントロピーは系の統計的な振るまいを理解する上で重要な役割を果たす。

ブラックホールが熱力学的な物体であるならば、エントロピーが定義できるはずである。ブラックホールを熱力学ふうにあつうことで、これは

$$(\text{ブラックホール} \cdot \text{エントロピー}) = \frac{1}{4} \frac{(\text{ホライズン面積})}{(\text{プランク長さ})^2} \quad (7)$$

で与えられる。実際、熱力学の第2法則によればエントロピーは常に増大するが、ホライズンの面積もそうである。シュワルツシルト半径 (1) はブラックホールの質量とともに増大するので、物質がブラックホールに落ち込むとホライズンの面積は増大する⁵。

エントロピーの式 (7) で一つ注目したいことは、巨視的な面積をきわめて小さい面積で割っている点だ。このため、ブラックホール・エントロピーは巨視的な物体に対してきわめて大きい値を取る。たとえば1太陽質量の場合、ブラックホール・エントロピーは 10^{77} となる。これに対して、太陽のエントロピーは 10^{58} にすぎない。

エントロピーは微視的状态数をあらわしているので、ブラックホール・エントロピーから期待されることは、ブラックホールの微視的状态数が

$$(\text{微視的状态数}) \sim e^{10^{77}} \sim 10^{10^{76}} \quad (8)$$

であることである。対数自体 (エントロピー) が莫大なので、微視的状态数はさらに莫大である。この数 (8) は、1の後にゼロを (観測可能な) 宇宙全体の陽子数に匹敵するだけ並べた数である。つまり、この数を印刷するには宇宙全体の陽子が必要になってくる。

⁵ブラックホールが蒸発していくと、ホライズンの面積は減少する。しかし、ブラックホール・エントロピーと放射のエントロピーを足したものは常に増大する。

巨視的なコップの水は同じように見えても、微視的には水分子はさまざまな微視的状态を取っている。この微視的状态の可能な数がエントロピーである。超弦理論によると、ブラックホール・エントロピーもこのようなエントロピーと変わらない。巨視的な見方であるコップの水に対応するのは、ブラックホールである。一方微視的な見方、水分子のさまざまな微視的な状態に対応するのが、ストリングのさまざまな状態である。そしてブラックホール・エントロピーは、ブラックホールを作るストリングの微視的状态数だということになる。前の節で、ストリングは莫大な状態数を持つと述べたが、この莫大な状態数はブラックホールの莫大なエントロピーを説明するために正に必要とされる性質である。

ここではブラックホール・エントロピーの話詳しく紹介した。この話を紹介したのは、ブラックホール・エントロピーを導いたことが、インフォメーション・パラドックスを解く上でヒントになるからである。インフォメーション・パラドックスは、ブラックホールに対しては量子力学が成り立たないかもしれないという問題であった。しかしエントロピーを数え上げることは、量子論を使って微視的状态を数え上げることに他ならない。したがって、超弦理論でブラックホール・エントロピーを数え上げられたことは、ブラックホールも量子論的に扱えることを暗示している。

このようにブラックホール・エントロピーでの進展は、インフォメーション・パラドックスを解く上で勇気づけられる。しかし具体的にこのパラドックスが解けたわけではない。具体的に解くためには、このパラドックスのカギとなるホーキング放射を、超弦理論の言葉で書き直すことが必要である。図 8 にあるように、ストリングはちぎれたり、つながったりできる。ホーキング放射は、(ブラックホールである)ストリングが、(放射である)低エネルギーのストリングを放出する過程として再現できることがわかっている。しかし、超弦理論は量子力学に従っているため、このプロセスで量子力学が破れているわけではない。熱放射は太陽と同様、統計的な平均を取って始めて出る。この意味で、ホーキング放射も太陽の放射と変わらないようである。

ただし、このような計算をするためには今のところ信頼できる解析はなく、インフォメーション・パラドックスが完全に解決されたわけではない。特に、情報がいかにしてブラックホールから漏れ出ているのかについてはまだわかっていない。しかしブラックホールの問題を部分的にせよ解決できたことは、ブラックホールといえども通常の量子力学に従っていることを強く暗示するものと考えられる。

5 ブラックホールの謎：特異点問題

さて、ブラックホールにはもう一つの問題がある。ブラックホール中心にある特異点で、重力は無限に強くなる。宇宙の始まりもこのような特異点で始まったと考えられており、宇宙の始まりを考える上でも特異点を理解しなければいけない。特異点問題については超弦理論でようやく活発な議論がされてきたばかりであり、最終的にどのような方向に進むのかはまだよくわからない。しかし、多くの興味深い観察がえられている。紙面も尽きてきたので、ここではそのうちの一つを簡単に紹介しよう。

まず現実に重力が無限に強くなるとは考えられない。むしろ特異点とは、一般相対論がそこで破綻していることを示していると考えべきである。特に、特異点での時空の量子ゆらぎが考慮に入っていない。特異点では、何もかもが強い重力によりゼロ・サイズにまで縮む。しかし、プランク長さに近づくと、時空そのものも量子的に大きくゆらぐ。このような効果が入っていない一般相対論だけで、特異点を議論するのは片手落ちであろう。

超弦理論による基本的な観察の一つは、何が特異点を作っているのか？という単純な疑問に対するものである。物体が重力崩壊により特異点まで縮むことから、重力崩壊した物質が特異点を作っていると解釈したくなる。しかし後で触れるように、普通のブラックホールではこのような解釈はできない。

残念ながら超弦理論は技術的にまだ未完成であり、ブラックホール特異点を研究できるほどではない。しかし、さいわい超弦理論で研究可能な時空もあり、なかには特異点を持つものもある。そしてこのような時空の特異点は、ストリングが作ったものとして解釈が可能である。これは特異点問題

を解いたわけではないが、特異点は何ら特殊な問題ではないことを示している。

この点について理解するために、似たような状況が出てくる電磁気学の場合を考えてみよう。クーロン力も $1/r^2$ の形をしており、原点で電磁気力は無限に強くなる。しかし、クーロン力のこのような振るまいは問題にされない。これは時空特異点とは違い、

クーロン力は電子のような点電荷が作っている

からであり、またそう見なせるからである。そう見なせるのは、専門的にはクーロン力がポアソンの方程式を満たしているからである。だからと言ってクーロン力が無限になることを解決するわけではないが、これはそもそも点電荷という理想的なケースを考えていることに問題がある。点電荷といっても、実際には量子論では電子が完全に点だと考えられるわけではない。結局、クーロン力の問題は、電子も含めて量子化することで解決された。

ストリングが作る特異点の場合、特異点時空はクーロン力と同じポアソンの方程式を満たす。このため状況としては、電磁気学の場合と全く変わらない。つまり、ストリング自身がその特異点を作っていると解釈ができる。これに対して、普通のブラックホール時空はポアソンの方程式としては書けない。このためブラックホール特異点は、物質によって作られているとは解釈できないのである。時空自身がひどくつぶれて特異点を作っているとしか言いようがない。通常の物理的な意味で「解釈」できるものではないのだ。(だからこそ、クーロン力と違って問題になるのだが。) 言い方をかえれば、

超弦理論での特異点は意味をなす

特異点がストリングによって作られると解釈できるのは、特異点問題解決への一步にすぎない。しかし最終的にはクーロン力と同様、量子効果などによってこのような特異点が解消されると考えるのは理にかなっているように思われる。

(実際に特異点がどう解消されると考えられているか、一言だけ触れておこう。カギとなる考えは、「何らかの意味で、プランク長さより短い距離は存在しない」というものだ。このため特異点のように、時空が完全につぶれることはないようである。ただし、どういう意味でプランク長さより短い距離が存在しないかは、現時点では不明である。しかし、超弦理論ではさまざまな状況でこのような考えが繰り返し現れてきている。この点については、本書の磯暁氏の解説を読んでいただきたい。)

6 まとめ

この話ではブラックホールの2つの問題

- インフォメーション・パラドックス
- 特異点問題

について紹介した。これらの問題が重要なのは、前者では量子論が破綻する可能性をはらんでいるからであり、後者では一般相対論が破綻し、より正確な理論での解析が必要とされるからである。

これらの問題について、超弦理論でもまだ最終的な解決までは見ていない。特に信頼できる解析方法がないため、現実的なブラックホールを議論することはできない。しかし、理論的なブラックホールなどに対しては超弦理論として信頼できる解析ができ、これらを詳しく調べた限りでは上のような問題はないようである。すなわち、これまでのところブラックホールを議論するのに通常の量子力学で不十分である兆候はない。

ただし超弦理論の議論でも、インフォメーション・パラドックスの議論のどこが間違っていたのかまではまだ教えてくれない。また特異点問題も完全に解決されたわけではない。さらに現実のブラックホールは、これらの場合と大きく違う。このような問題を解くことが、残された問題である。しかし上述の進歩は、現実のブラックホールも量子力学で記述できることを示唆する。

参考文献

1. 超弦理論の入門書としては、
B. グリーン：エレガントな宇宙、草思社 (2001).
この本のTV版がアメリカPBSで放映された。以下のURLから放送も視聴できる（ただし英語）。
<http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/>
2. ブラックホールの解説書は多数書かれているが、最近のものとしては、
キップ・S・ソーン：ブラックホールと時空の歪み、白揚社 (1997).
3. この発展についての解説としては、
G.P.コリンズ：「D - ブレーンおよび弦との関係がわかってきた量子ブラックホール」、パリティ 12 No. 9 (1997).
夏梅誠：「超弦理論はブラックホールの謎を解けるか？」、日本物理学会誌 1999年3月号.
夏梅誠：「ブラックホールの謎に迫りつつある超弦理論」、パリティ 2000年7月号.
夏梅誠：超弦理論と時空、現代物理最前線7、共立出版 (2002).