

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/>

概要

ブラックホールには理論上のミステリーがあり、長年にわたって問題になってきた。ブラックホールがあると量子力学と矛盾するように思えるというものである。一般相対論も量子力学も現代物理学の基礎となっているため、この問題はその基礎を深刻に揺るがしている。しかし近年、素粒子論、特に超弦理論の進歩によってこの謎が解明されつつある。

2004 年 7 月 21 日、一般相対論と重力の国際会議 GR17 (17th International Conference on General Relativity and Gravitation) は 3 日目を迎えていた。この分野での最大規模の国際会議とされており、4 年に一度開催されている。今回はアイルランドのダブリンでおこなわれた。この会議の一番の目玉が、スティーブン・ホーキングの講演だった。ホーキングは車椅子の研究者として有名だが、約 30 年前ブラックホールにまつわるパラドックスを発表して、長年にわたって物議を醸してきた。



図 1: ダブリンの会議でのホーキング。

彼の講演は、一種独特の雰囲気をつたえている。講演はコンピューターが読み上げるため、人工的な平板なスピーチになることが影響しているのだろう。また、講演後の質問の数は限られており、さらに発言者は簡単に答えられるような質問をするよう意識している。質問に答えるには、不自由な体でコンピューターを使って文章を作らなければいけないからだ。それでも、ホーキングが質問に答えるのに 2 ~ 3 分かかるとは珍しくなく、その間聴衆はじっと待ち続けることになる。コミュニケーションが限られているため、ホーキングが何を考えているのかよくわからないこともしばしばあり、往々にしてじっくりと考えてみなければいけない。これらの傾向によって、ホーキングの話す言葉は託宣めいて響く傾向にある。

ダブリンでのホーキングの講演は急遽プログラムに加えられたもので、当初から予定されていたわけではなかった。第一報は、17日付けのイギリスの科学雑誌ニュー・サイエンティスト（電子版）で報じられた。記事によると、ホーキングはこのパラドックスについての自分の考えが誤っていることがわかり、講演でそれを正すのだという。

この章では、

1. ブラックホールのパラドックスとは何か？
2. ホーキングのもともとの立場とは何だったのか？
3. ホーキングはなぜこれまでの意見を変えたのか？

を中心に解説していきたい。そうすることで一見ブラックホールとは関係がないように思える素粒子論、特に超弦理論と呼ばれる統一理論との関係も見えてくる。¹

1 ブラックホール

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2）：

- ホライズン
- 特異点

これら2つの場所は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。

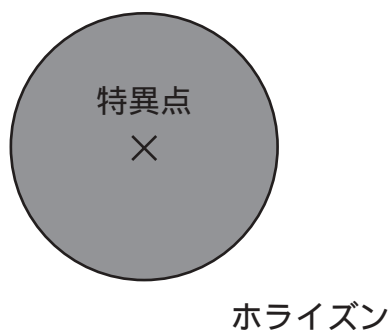


図2: ブラックホールの模式図。中心に特異点、そしてそれを取り囲むホライズンがある。

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3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

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、??章を読んでいただきたい。

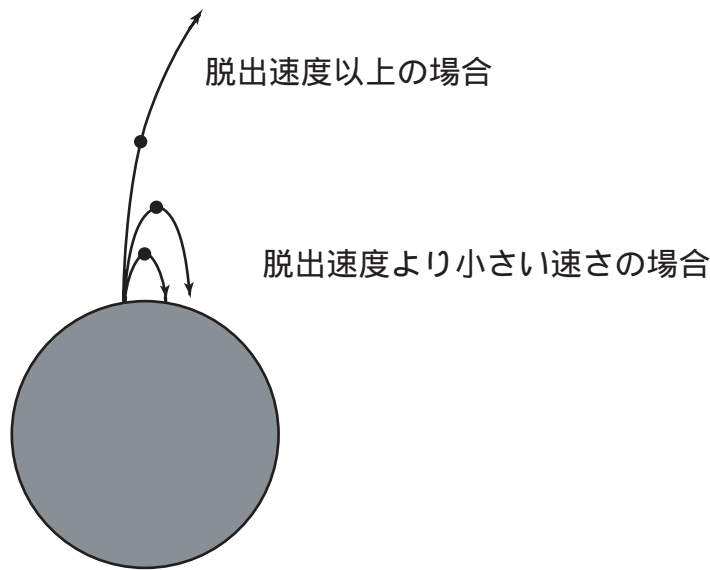


図 3: 脱出速度

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。

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

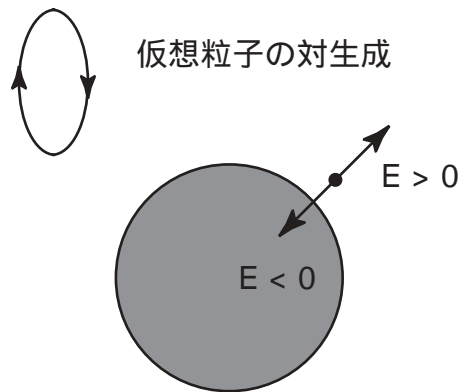


図 4: ホーキング放射

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。しかし今回は紙面の関係で、ホライズンに関連した未解決問題についてだけ議論することにする。

2 ブラックホールのパラドックス

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4)。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。

もっとも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

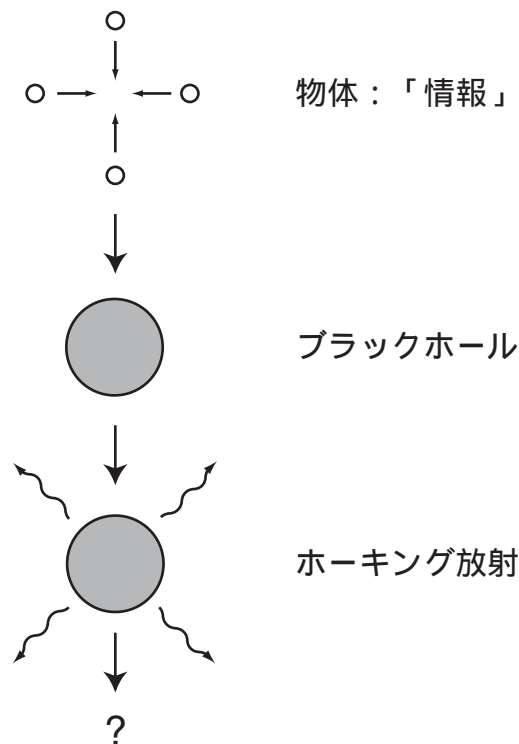


図 5: インフォメーション・パラドックスはブラックホールが量子力学を破る可能性を秘めている。

現象が原理的な問題を起こすからである²。

この問題こそが、ホーキングによって発見されたブラックホールのパラドックスである。これはインフォメーション・パラドックスと呼ばれている（図 5）。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。

$$\text{(青の状態)} \rightarrow \text{(黒の状態)} \quad (2)$$

$$\text{(赤)} \rightarrow \text{(黒)} \quad (3)$$

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「重ね合わせた」状態も存在しなければいけない。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

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。

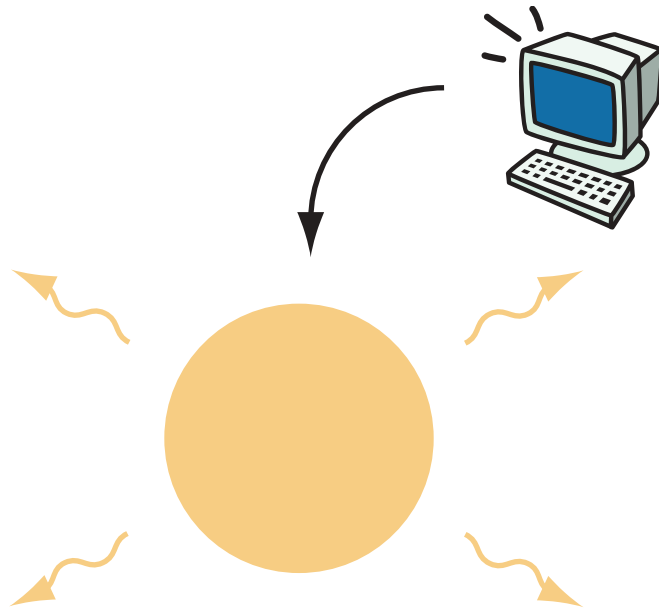


図 6: インフォメーション・パラドックスと太陽。太陽は量子力学に矛盾しないのか？

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う。) 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と矛盾する問題である。

この問題は太陽とどう違うのだろうか？(図 6) 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。

3 パラドックスに対する反応

このパラドックスに対する反応は、大きく 2 つの立場に分かれた。

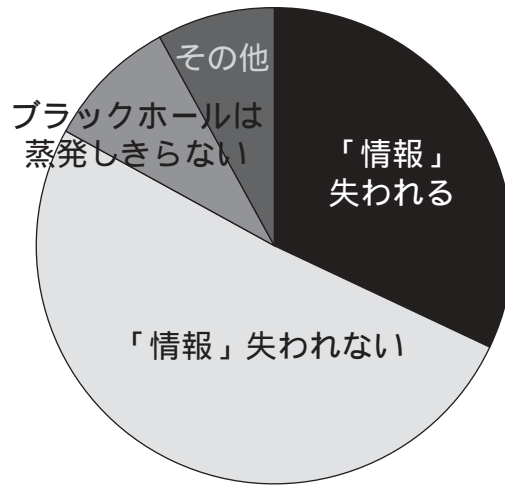


図 7: 1993年カリフォルニア大学 サンタバーバラ校で開かれた 国際会議における「投票結果」(回答数:77人)。結果は、情報は失われるという立場と、失われないという立場に二分された。(第3の考えは、ブラックホールは完全には蒸発しきらずに何か微視的なものが残るとする意見である。物体の情報はこれが蓄えているというのだが、最近では否定的な見方が多い。)

(立場1) 量子力学は破綻し、情報は実際に失われる。

(立場2) 量子力学は破綻しない。ホーキングの議論は誤っており、情報は失われない。

このパラドックスが発見されて約20年後の1993年7月、カリフォルニア大学サンタバーバラ校の国際会議でこの問題についてのアンケートが行われた。「投票結果」は1と2の立場で2つに分かれた。20年たってもこの問題に対する反応が真っ二つに分かれるということが、この問題の深刻さを物語っている。つまり20年間というもの、どちらの立場にとっても決定的な証拠は出なかったのである。

この膠着状態をふまえて、研究者の中には賭けを始める者まで出てきた。

(立場1) ホーキングとキップ・ソーン(アメリカの相対論の大御所)

(立場2) ジョン・プレスキル(量子論・素粒子論の専門家)

の3人で、どちらが正しいのか賭けたのである(1997年)。賭けに勝ったものは、好きな百科事典がもらえることになった。以下は賭けの全文である:

Whereas Stephen Hawking and Kip Thorne firmly believe that information swallowed by a black hole is forever hidden from the outside universe, and can never be revealed even as the black hole evaporates and completely disappears,

And whereas John Preskill firmly believes that a mechanism for the information to be released by the evaporating black hole must and will be found in the correct theory of quantum gravity,

Therefore Preskill offers, and Hawking/Thorne accept, a wager that:

When an initial pure quantum state undergoes gravitational collapse to form a black hole, the final state at the end of black hole evaporation will always be a pure quantum state.



図 8: インフォメーション・パラドックスをめぐる賭けをした3人。左より、プレスキル、ソーン、ホーキング。

The loser(s) will reward the winner(s) with an encyclopedia of the winner's choice, from which information can be recovered at will.

Stephen W. Hawking, Kip S. Thorne, John P. Preskill

Pasadena, California, 6 February 1997

もっとも彼らが賭けをしたのは、これが初めてではない。³ 1974年にはホーキングとソーンがはくちょう座 X-1 がブラックホールであるかどうかをめぐる賭けがおこなわれた（ホーキングの負け）。また 1991年には、「裸の特異点」と呼ばれる物体が存在するかどうかをめぐる賭けがおこなわれた。これもホーキングが負けたのだが、ホーキングはめげることなく、賭けの文言を厳密にしなかったことがいけなかったのだと主張した。そこでより厳密な条件の下、新たな賭けに挑んでいる。この結果はまだ出ていないが、これまでの結果を見るとホーキングの勝率は低いようである。

このような賭けがおこなわれた一方で、この問題に対するカギは実は既に間近に迫ってきていた。それは一般相対論からではなく、素粒子論の方向であった。

そ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。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。

4 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 9）。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

³このへんの事情については、参考文献に挙げたソーンの著書に詳しい。

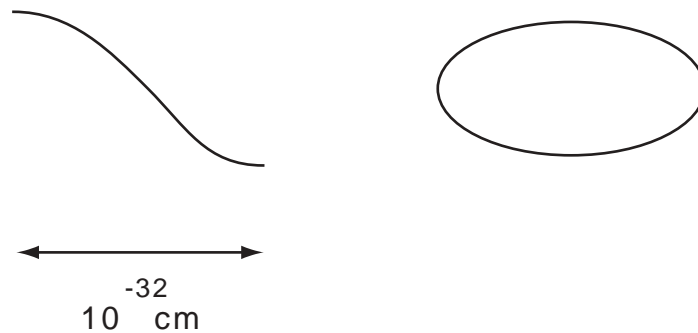


図 9: ストリングには2種類ある。左は端のあるストリングで、右はループ状のストリング。

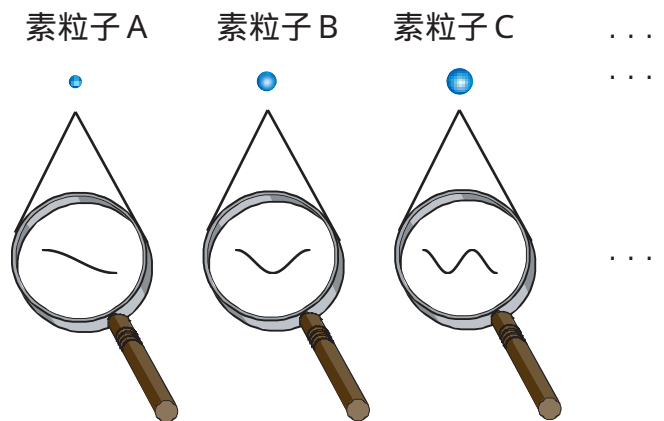


図 10: さまざまな素粒子は、ストリングのさまざまな振動である。

- 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 10)。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 11 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

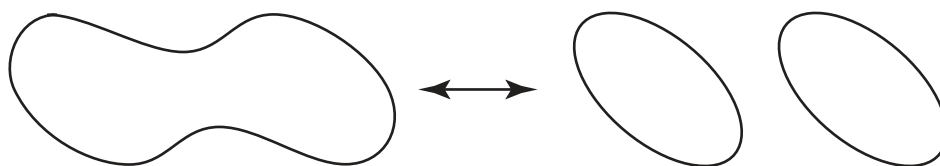


図 11: ストリングがちぎれたり、つながるプロセスは、素粒子の相互作用をあらわす。

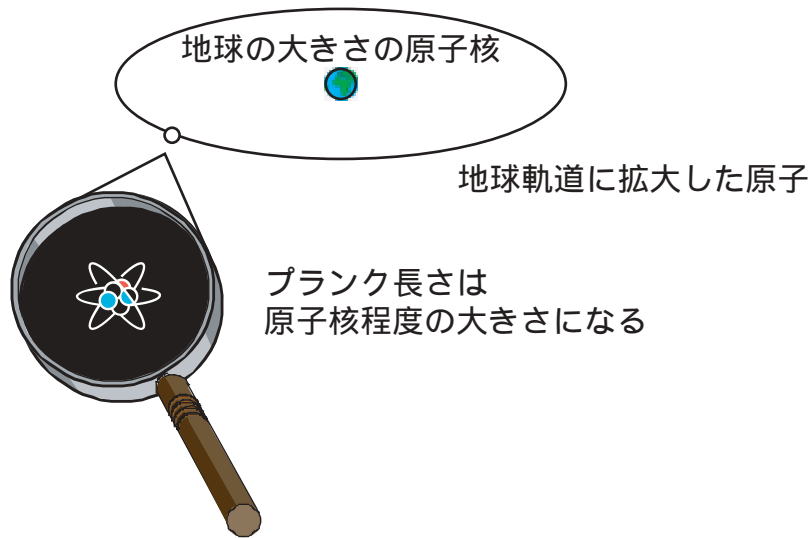


図 12: 原子を 10^{21} 倍拡大してみる。

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 12）。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、

	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。このためオーケストラで最初に音あわせで使う音になっている。) いずれの値も目安である。(特にバイオリンは強制振動であり、また倍音が励起されるなど複雑である。)

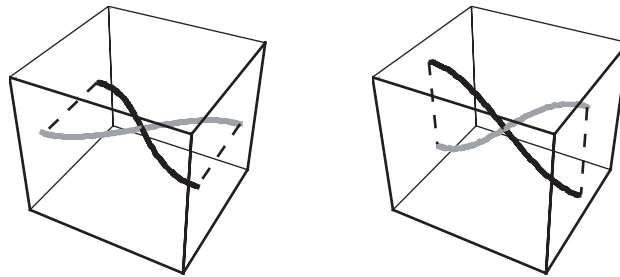


図 13: ストリングのもっとも低い振動状態 (レベル 1)。太線のストリングが半周期後にグレーの線の形を取る。「箱」は単に 3 次元での振動を見やすくするために描いたものである。

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 13 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)⁴。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 種類取りうるできるので、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 14)。(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。

⁴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、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。

偏光フィルター

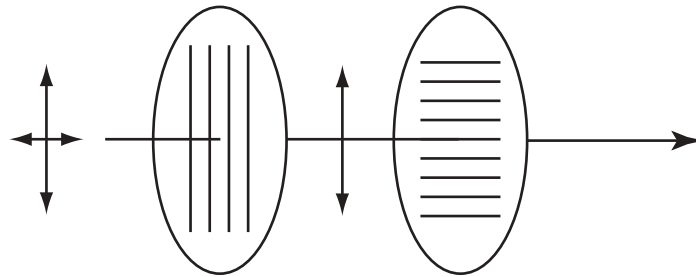


図 14: 光に2つの状態があることは、偏光フィルターを2枚使って確かめることができる。

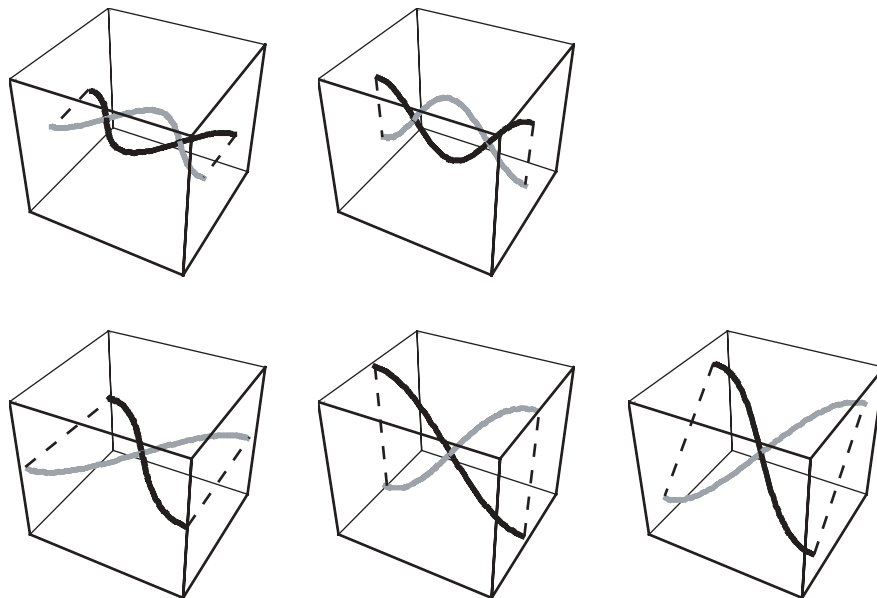


図 15: スtringの状態(レベル2)。最初の2つは節を増やすことをエネルギーが高くなっており、後の3つは振幅を大きくすることでエネルギーが高くなっている。

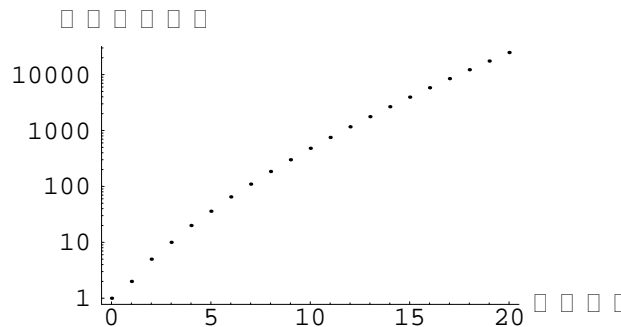


図 16: スtringの状態数が増大する様子 (4次元での端のあるStringの場合)。Y軸は対数目盛であることに注意。グラフより状態数は指数関数的に増大することがわかる。

ここでStringの質量を大きくしよう。String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

String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、String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 15)。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 16 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Stringの重い状態は、素粒子論の通常の応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。

5 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Stringでできているはずだから、String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を考えよう。

まず、String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ルト半径と比べてみれば良い (図 17)。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、Stringは通常String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⁵。

⁵String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。

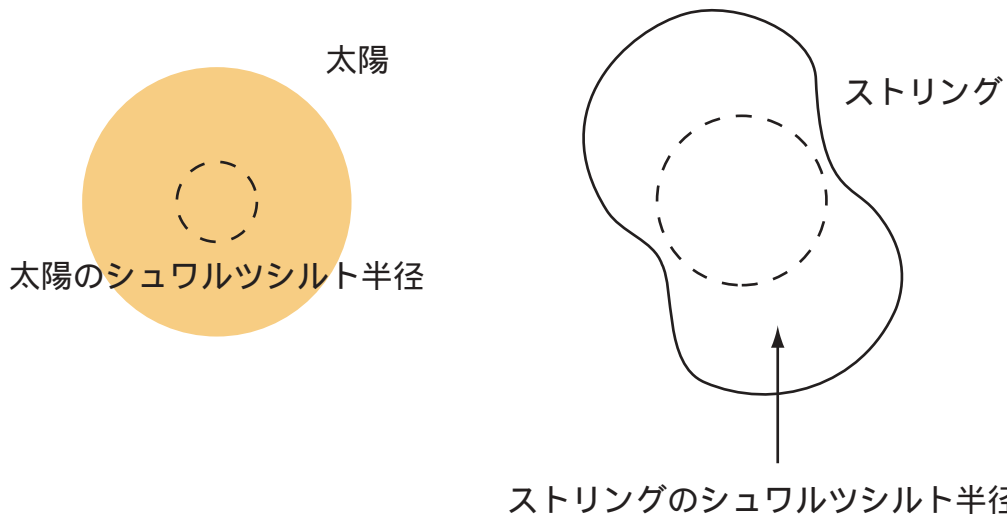


図 17: ある物体がブラックホールかどうかを見るにはシュワルツシルト半径と比べればよい。

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 18)。

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

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

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かうことで、これは

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

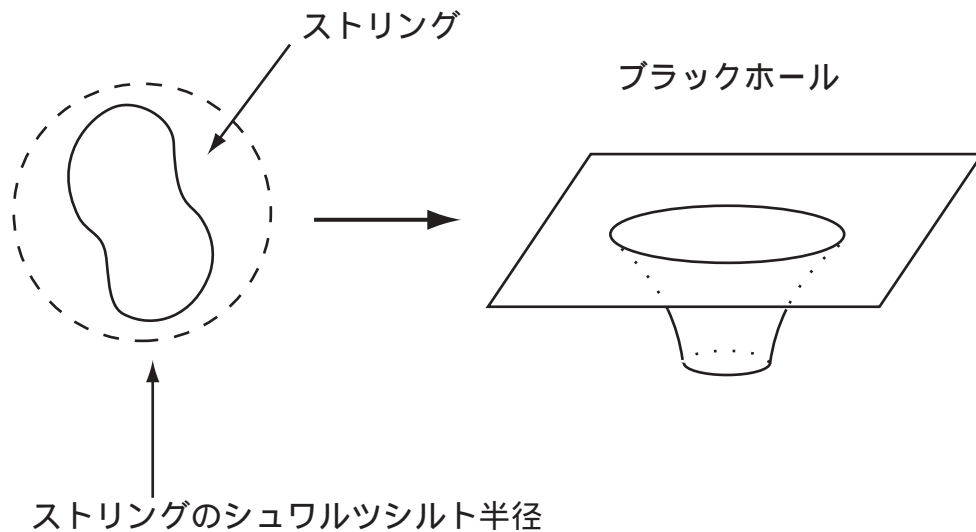


図 18: ストリングからブラックホールを作る。ストリングが自分自身のシュワルツシルト半径より小さくなると、ブラックホールになるはずである。

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⁶。

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。

指数表示で書くと、58 も 77 も大して変わらないように見えるかもしれないが、これは途方もない違いだ。これは要するにブラックホールのエントロピーは、太陽 10^{19} 個分ということである。銀河系には星が約 100 億個 ($\sim 10^{10}$ 個) あるとされており、観測可能な宇宙にはそのような銀河が約 100 億あるといわれている (我々から半径約 100 億光年内が、観測可能な宇宙である)。したがって、(観測可能な) 宇宙全体の星を全部集めてやっと 10^{20} 程度のエントロピーになる。たった半径 3 km のブラックホールが、宇宙の星全体に匹敵するエントロピーを持つということである。

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状态に対応するのが、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、ストリング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・エントロピーを導けたことが、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

⁶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。

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 11 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。

6 パラドックスの終章？

このように 1996 年以降、超弦理論の研究者達は情報が失われないという状況証拠を積み上げてきた。このためホーキングが間違っていたこと自体は驚くべきことではなかった。しかし気づいた方もおられると思うが、超弦理論での議論は間接的なものである。特に

1. ホーキングによるパラドックスのもともとの議論で、どこが間違っていたのか答えていない
2. ストリングが実際にブラックホールになったときに、何が起きているのかわからない(例えば情報が実際にどうブラックホールから漏れだしているかなど)

という問題がある。このため超弦理論での近年の進展にもかかわらず、ホーキングは自分の立場を変えてこなかった。

ホーキングの新しい議論は、直接には超弦理論と関係がないように見えるのだが、これまで議論したような超弦理論の話と密接な関係がある。特にストリングとブラックホールの関係を突き詰めた *AdS/CFT* 双対性という発展を踏まえたものである。ただしまだまだわかっていないことも多く、最終的にこのパラドックスが決着するにはまだまだ多くの研究が必要であろう。

さて話をホーキングの講演に戻すと、今回ホーキングは情報は失われないという立場が変わった。賭けに勝った(?) プレスキルは、壇上で野球事典を受け取った。(“Total Baseball: The Ultimate Baseball Encyclopedia”) これはちょうど最新版が出たばかりで、この講演のためにカナダから取り寄せたのだという。賭けに負けたもう一人、ソーンはホーキングの話が理解できなかったということで、賭けに負けたとは納得しなかった。ホーキングの話が確実なものと納得したら、ホーキングに事典代を支払うことになった。一方、プレスキルは賭けをしただけなのに、マスコミに騒がれてとまどったと言っている。自分の名前が後世に残るとしたら、業績ではなくホーキングと賭けをしたことであろうと述べている。

初稿を読んでコメントを寄せていただいた多くの学生に感謝します。

参考文献

1. 超弦理論の入門書としては、



図 19: パラドックスは解いたものの(?)賭けには負けたホーキングと、景品を獲得したプレスキル。

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)。

著者のページ：

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