

ブラックホールの謎に迫る

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

夏梅 誠



「ホーキング、ブラックホールのパラドックスを解く」

Search news
Subscribe to our FREE newsletter

NewScientist.com
HOME | NEWS | HOT TOPICS | THE LAST WORD | OPINION | WEBLINKS | PRINT EDITION | SUBSCRIBE | ARCHIVE | JOBS & CAREERS

NEWS
ALL LATEST NEWS
SEARCH NEWS

The World's No.1 Science & Technology News Service

Hawking cracks black hole paradox
19:00 14 July 04
Exclusive from New Scientist Print Edition. Subscribe and get 4 free issues.

After nearly 30 years of arguing that a black hole destroys everything that falls into it, Stephen Hawking is saying he was wrong. It seems that black holes may after all allow information within them to escape. Hawking will present his latest finding at a conference in Ireland next week.

The about-turn might cost Hawking, a physicist at the University of Cambridge, an encyclopaedia because of a bet he made in 1997. More importantly, it might solve one of the long-standing puzzles in modern physics, known as the black hole information paradox.

It was Hawking's own work that created the paradox. In 1976, he calculated that once a black hole forms, it starts losing mass by radiating energy. This "Hawking radiation" contains no information about the matter inside the black hole and once the black hole evaporates, all information is lost.

MOTOR TECH
CLONING
ALCOHOL

ELSEWHERE TODAY
All the best science stories from the web
[Study of antidepressants finds little disparity in suicide risk](#)
New York Times (free registration required)
[Martian meteor discovered in Antarctica](#)
ABC News, Australia
['Reverse firewalls' proposed as an anti-spam tool](#)
Slashdot
[US clears botox to treat severe sweating](#)
Los Angeles Times (free registration required)
[Robots get bookish in libraries](#)

TOP NEWS STORIES
[Hawking concedes black hole bet](#)
[Army rations rehydrated by urine](#)
[Trillions more internet addresses may emerge](#)
[Tsunamis of gas hot up galaxy clusters](#)
[Yawning is catching in chimps](#)
[Speaker system late](#)



スティーヴン・ホーキング



17th International Conference on
General Relativity and Gravitation

『ホーキング博士「自説に誤り」近く発表』（朝日7/16）

『ブラックホール理論 撤回、新説発表へ』（毎日7/16）

『ホーキング氏「自説の誤り」修正』（日経7/22）

...



ホーキングの「誤り」について伝える国内各紙

この話で考えること

- ブラックホールのパラドックスとは何か？
- ホーキングのこれまでの意見は何だったのか？
- どうしてホーキングは意見を変えたのか？

ブラックホールとその謎

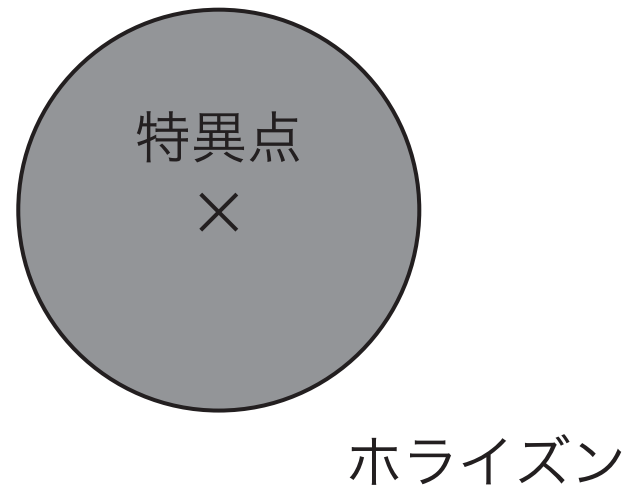
超弦理論



超弦理論とブラックホールの関係

1. ブラックホールとその謎

典型的なブラックホール



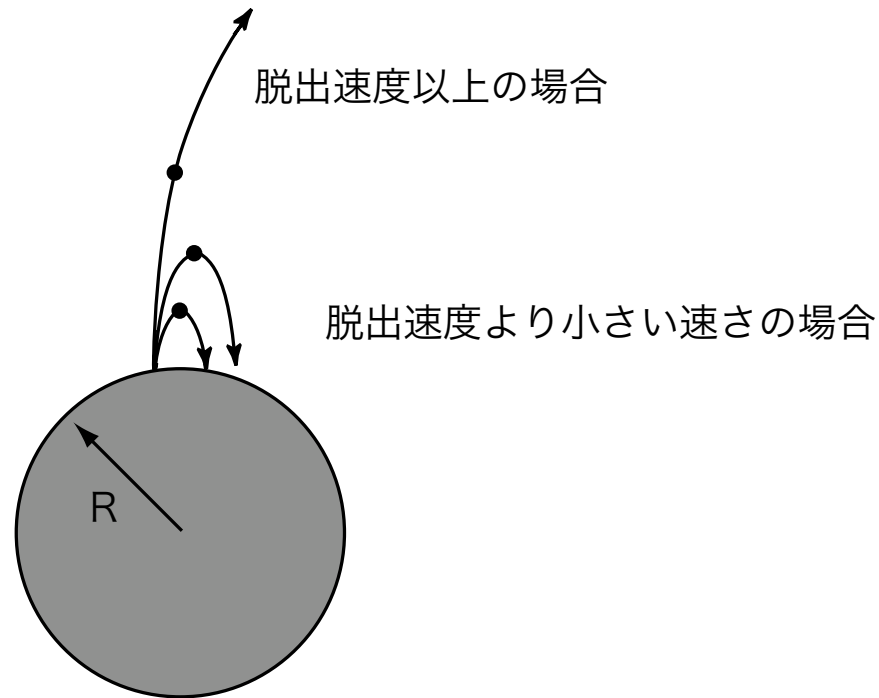
- ホライズン：脱出不可能な領域
- 特異点：無限大の重力



John Wheeler

ホライズンと脱出速度

重力から逃れるためには脱出速度を超えていなければならない



脱出速度

「星」の半径が小さいほど大きい

ホライズン

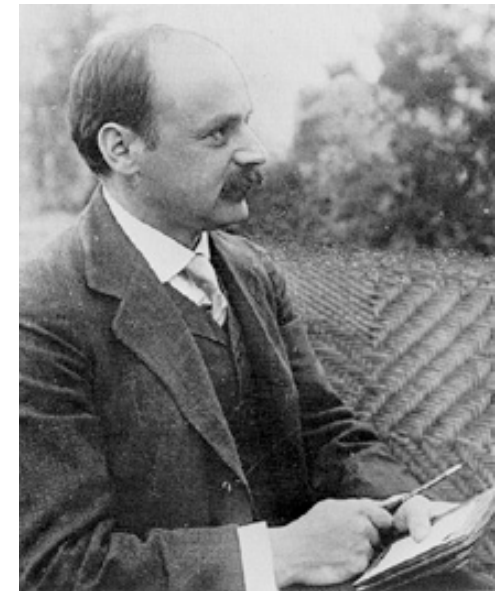
星が小さくなり重力が強くなって、**脱出速度が光速**になる場所
光さえも外には逃れられない

1 太陽質量 = 2×10^{33} g の場合 :

$$R_{\text{horizon}} = \frac{2GM}{c^2} \sim 3\text{km}$$

シュワルツシルト半径

cf. 太陽半径 $\sim 696,000$ km



Karl Schwarzschild

ホーキング放射

ブラックホール：単体で存在するわけではない

ブラックホールを作った物質→物質：量子力学で表される

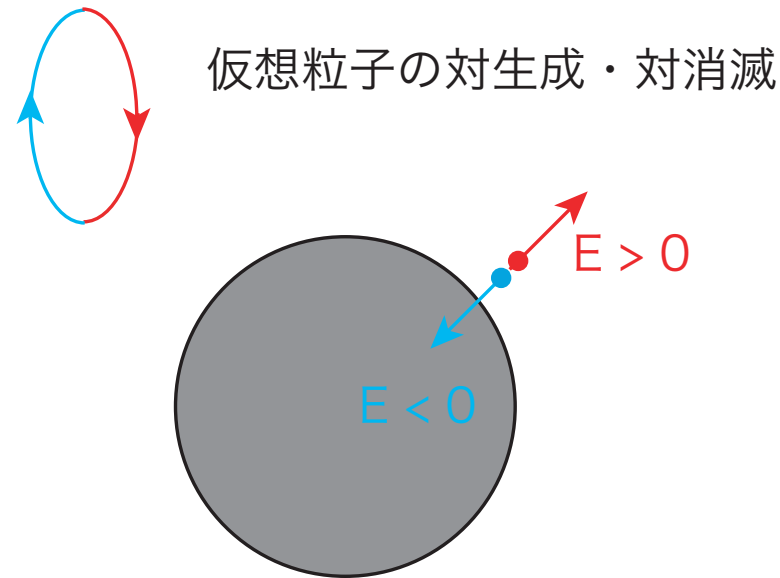
ブラックホールは物質の量子ゆらぎにより温度を持つ

ホーキング放射 (1974年)



物質の量子ゆらぎの影響は？

ホライズンの近くで仮想粒子の対生成



- 実際にブラックホールから何かが出ているわけではない
- ホーキング放射 \leftrightarrow 量子ゆらぎ
→ マクロな物体に対してきわめて低い温度

太陽質量の場合

ブラックホールの温度 $\sim 6 \times 10^{-8}$ ケルビン

ブラックホールはホーキング放射によりエネルギーを失う：蒸発

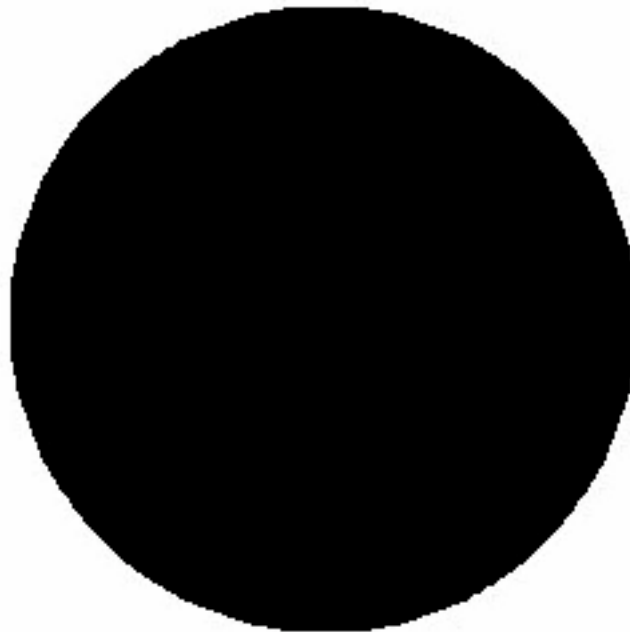
ブラックホールの寿命 $\sim 10^{59}$ 億年

通常の大きさのブラックホールの場合、この放射は観測不可能

しかしこの現象は原理的な問題を引き起こす

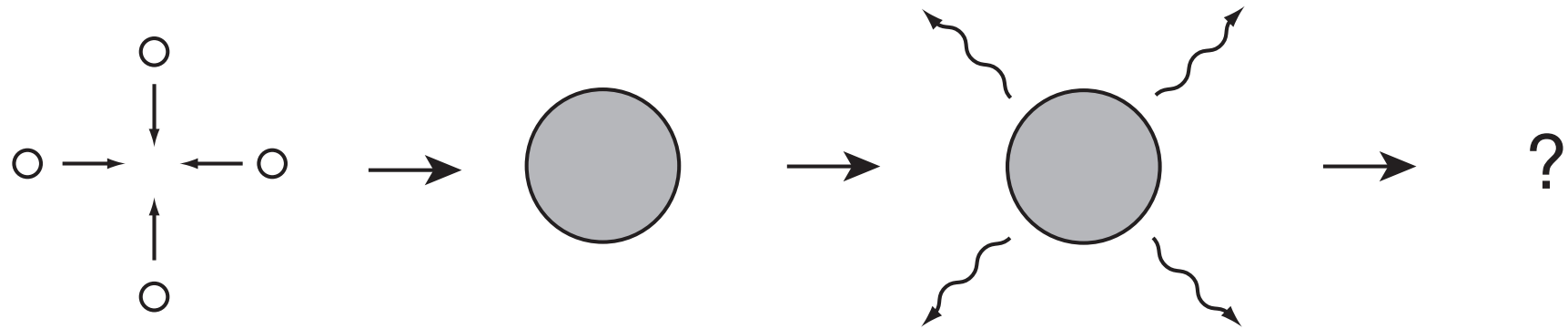
ブラックホールの蒸発の様子

1 太陽質量



0
 6.15822×10^{-8} Kelvin

ブラックホールの謎



物体：「情報」

ブラックホール

ホーキング放射

物体の「情報」はどこに消えた？

→ **インフォメーション・パラドックス** (ホーキング 1976年)

もう少し慎重に考えてみる

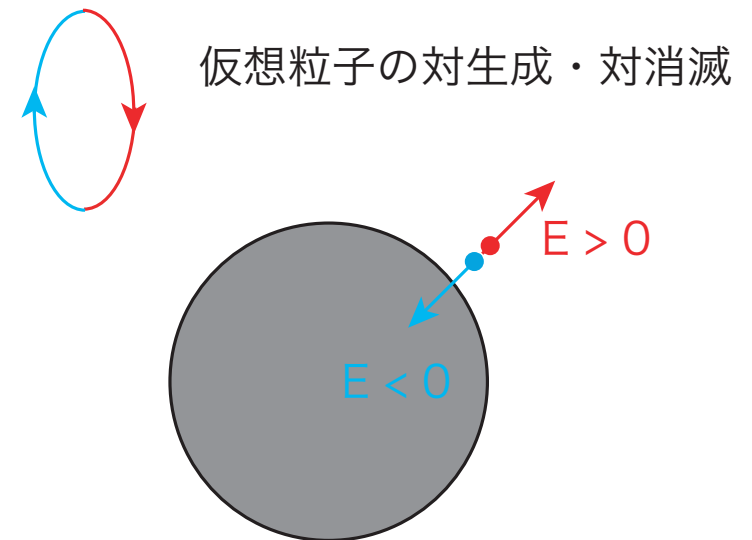
ホーキング放射：

ランダムな量子ゆらぎ

ホライズンから何かが出ているわけではない

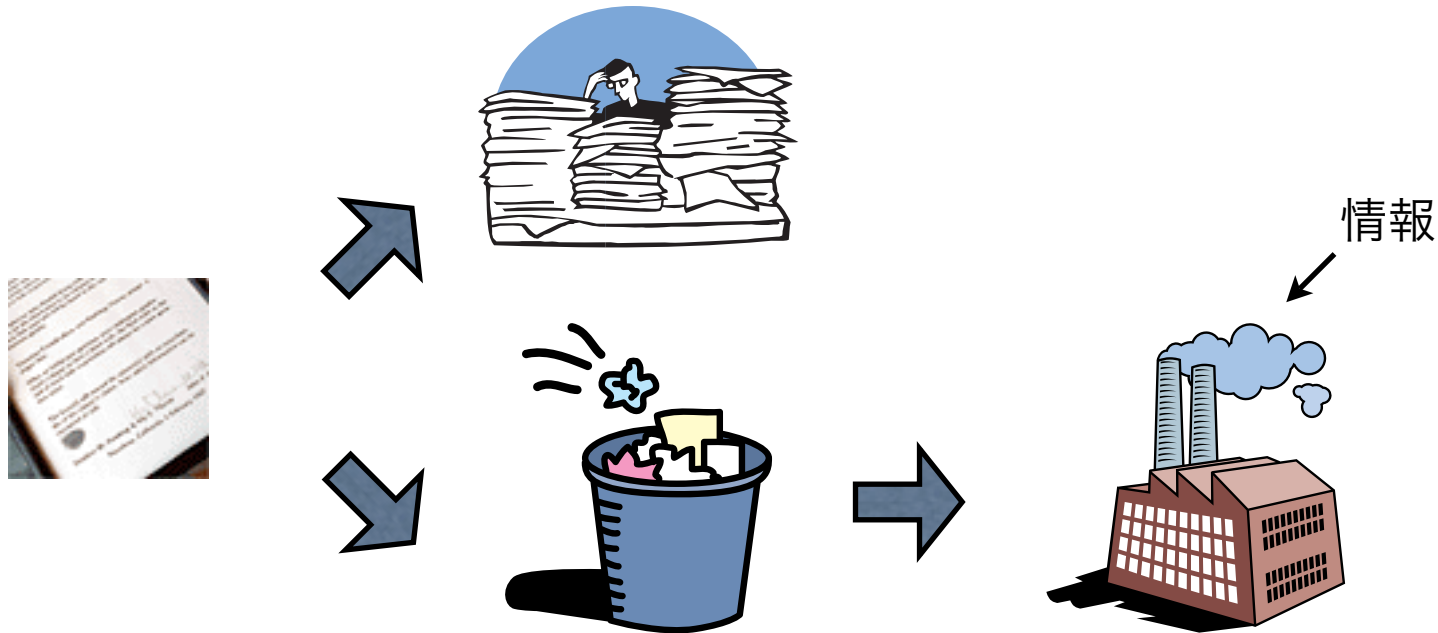
→ ホーキング放射に物体の「情報」は含まれない

でも情報が消えるとまずいのか？



なぜなら量子力学では情報は消えない

現実問題として情報がなくなることは珍しくないが、
原理的になくなったわけではない



これでも情報は消えない！

情報が失われると量子力学と矛盾！

それがどうした？

- ホーキング放射：低い温度
- 蒸発しきるまでに莫大な時間

矛盾 → 新しい物理法則

例：電磁気学、量子力学、特殊相対論、一般相対論、...

これらの法則と同様、このパラドックスの解決もこれまでの概念に变革を迫ると思われる

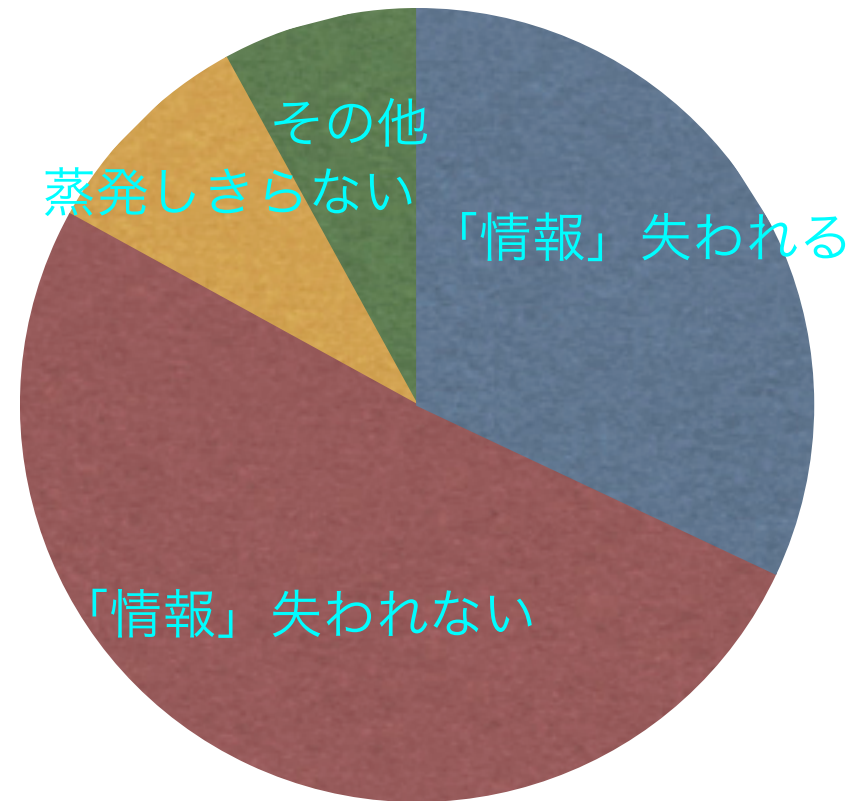
量子力学の破綻 ↔ 一般相対論の破綻

パラドックスへの反応

情報が失われる（量子力学が破綻）：一般相対論の研究者を中心

失われぬ：素粒子論の研究者を中心

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)



賭までおこなわれた

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:

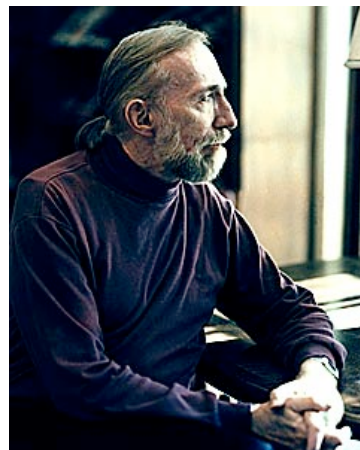
When an initial pure quantum state undergoes gravitational collapse to form a black hole, the final state at the end of black hole evaporation will always be a pure quantum state.

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

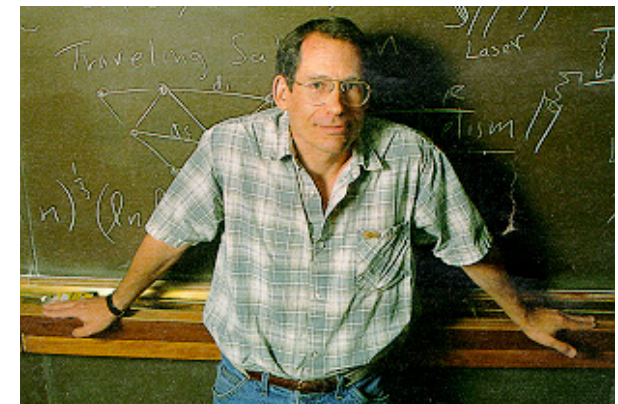
Stephen W. Hawking, Kip S. Thorne, John P. Preskill
Pasadena, California, 6 February 1997

インフォメーションが失われる

失われない



Vs



Kip Thorne

John Preskill

賭けはこれだけではない…

Whereas Stephen Hawking has such a large investment in General Relativity and Black Holes and desires an insurance policy, and whereas Kip Thorne likes to live dangerously without an insurance policy,
Therefore be it resolved that Stephen Hawking bets 1 year's subscription to "Penthouse" as against Kip Thorne's wager of a 4-year subscription to "Private Eye", that Cygnus X-1 does not contain a black hole of mass above the Chandrasekhar limit.

Stephen W. Hawking *Kip S. Thorne*
Witnessed this document
Day of December 1974
Hroakman Anna Zylker Werner JS

1974年


ブラックホールの存在をめぐる賭け
(ホーキングの負け)

Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds sterling to 50 pounds sterling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.

 *John P. Preskill Kip S. Thorne*
Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991

1991年

特異点をめぐる賭け
(ホーキングの負け)

Whereas Stephen W. Hawking (having lost a previous bet on this subject by not demanding genericity) still firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,


And whereas John Preskill and Kip Thorne (having won the previous bet) still regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist, unclothed by horizons, for all the Universe to see,

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

When any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, then

A dynamical evolution from generic initial conditions (i.e., from an open set of initial data) can never produce a naked singularity (a past-incomplete null geodesic from \mathcal{I}_+).

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable, truly concessionary message.

 *John P. Preskill Kip S. Thorne*
Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 5 February 1997

1997年

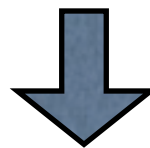
特異点をめぐる賭け (改訂版)

これまでのところホーキングの勝率は低い

超弦理論はこの問題に どうアプローチするのか？

- 超弦理論でのブラックホールはどういうものか？
- 超弦理論はブラックホールを量子論的にちゃんと扱えるのか？

もしそうならば、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

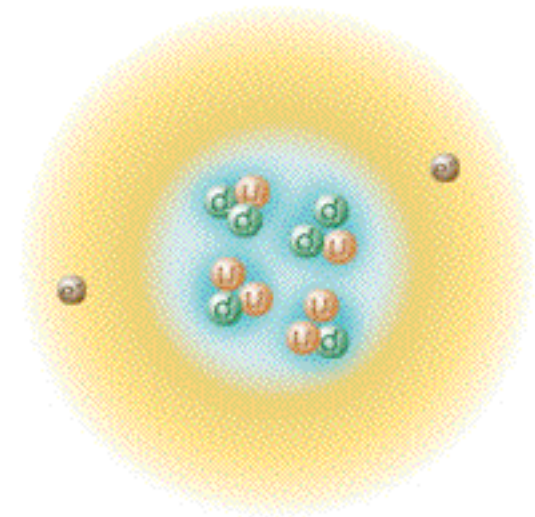


インフォメーションは失われない

2. 超弦理論の基礎

標準模型の基本的な要素

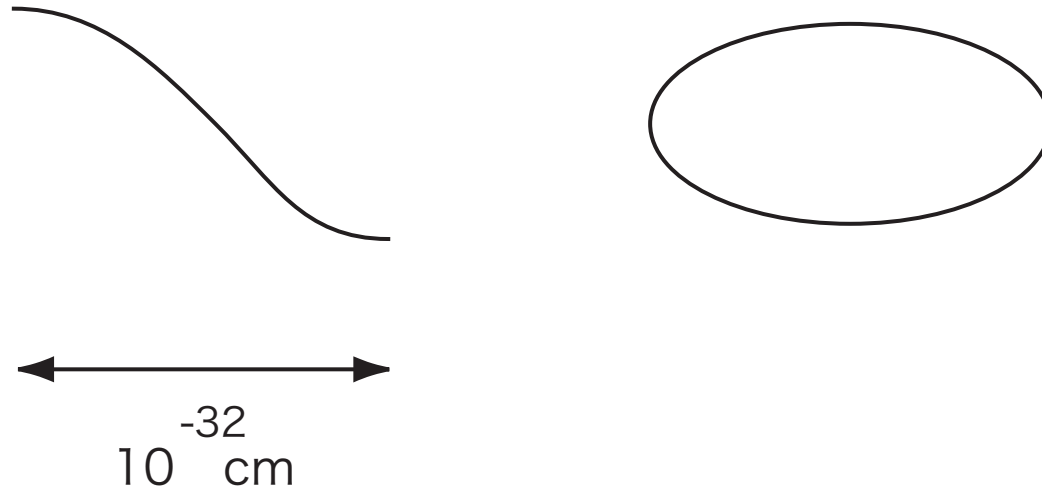
- 物質：クォーク 6 種類、
レプトン 6 種類、
ヒッグス粒子



- 相互作用：重力、電磁気力、弱い力、強い力

→ 超弦理論によって統一的に説明される

ストリング



cf. 実験で「見る」ことができる長さ = 10^{-15} cm



ストリング：巨視的には素粒子

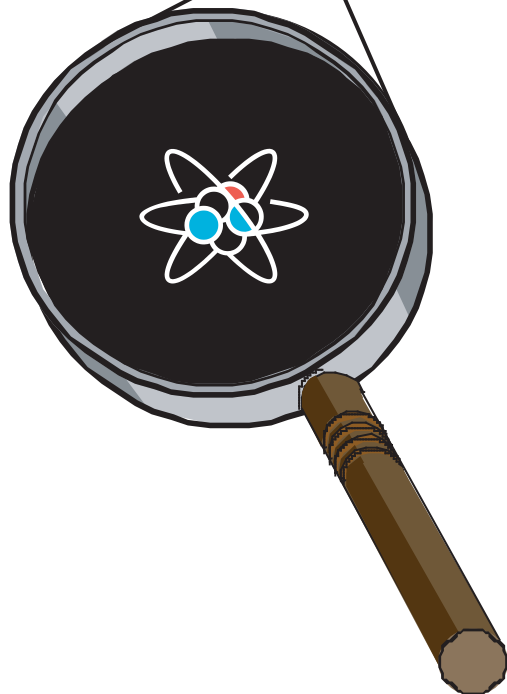
ストリングの長さはミクロな物体にとっても ミクロな長さ

原子を 10^{21} 倍拡大してみる

地球の大きさの原子核

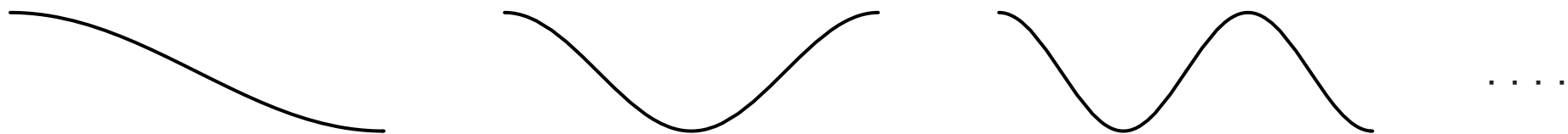


地球軌道に拡大した原子

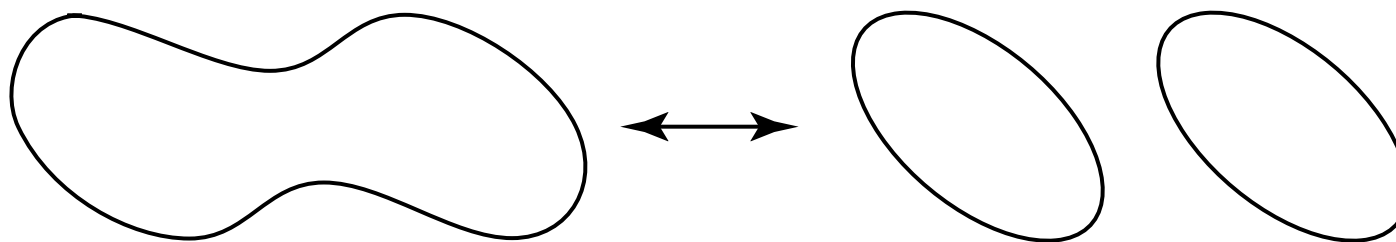


ストリングの長さは
原子核程度の大きさになる

さまざまな素粒子 → さまざまな振動



素粒子の相互作用 → スtringの合体など



日常的なストリングとの比較

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

バイオリンはA440に対する数値（「ラ」の音）

ストリングの特徴：相対論的

莫大な張力 → 大きな振動エネルギー ($\sim 10^8$ J)

→ ストリングの質量 $E = Mc^2$

振動するストリング：振動エネルギー分の質量を持つ素粒子

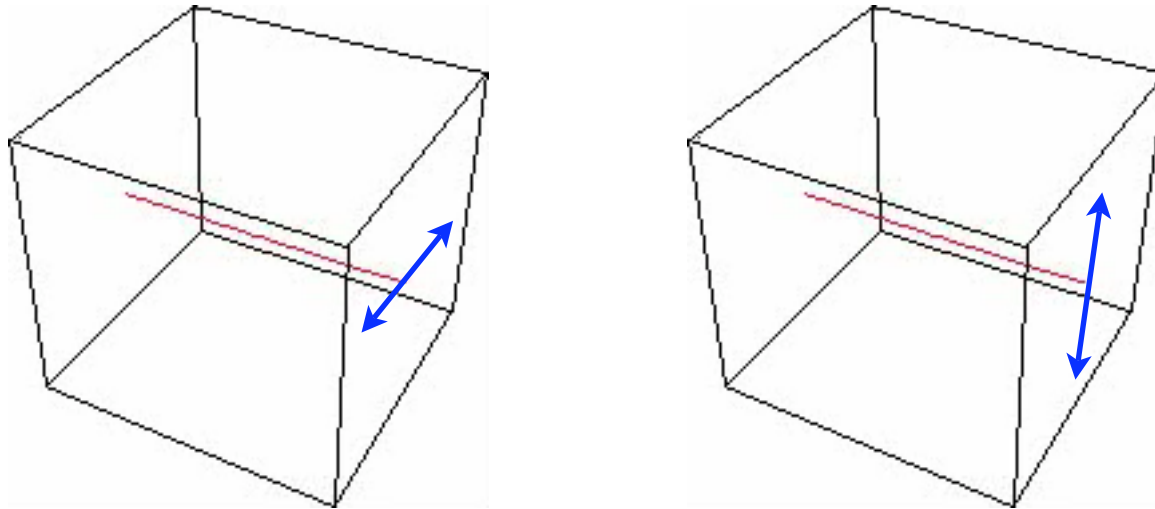
違う振動 → 違う質量の素粒子

質量：典型的には 10^{-6} g ($\sim 10^{18}$ GeV)

通常の素粒子はストリングのもっとも低い振動

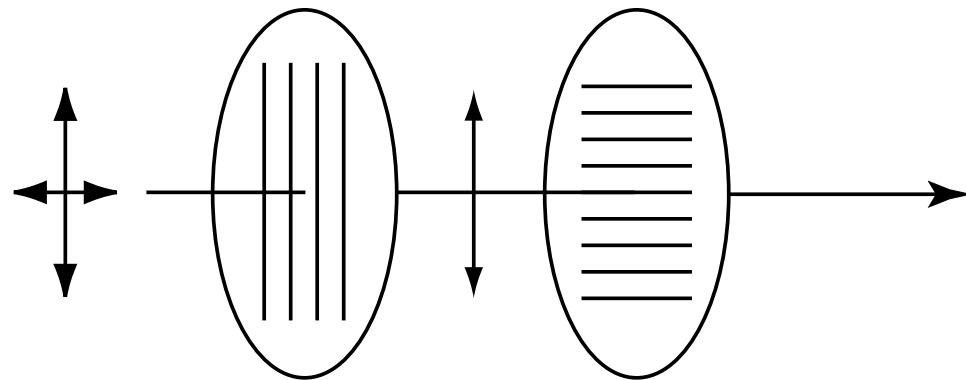
重い素粒子の存在も重要

ストリングの状態 (レベル1)



偏光フィルター

光子に相当 (自由度2)



ストリングの状態

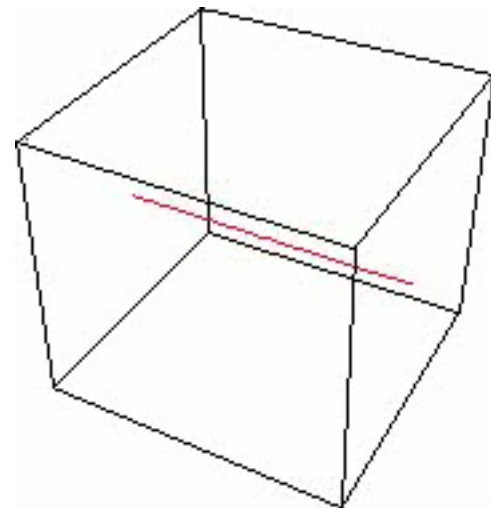
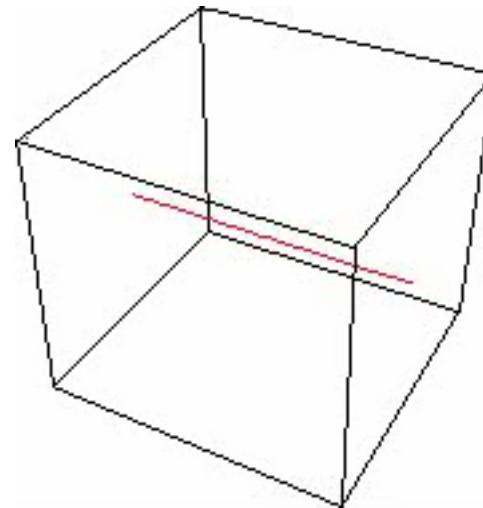
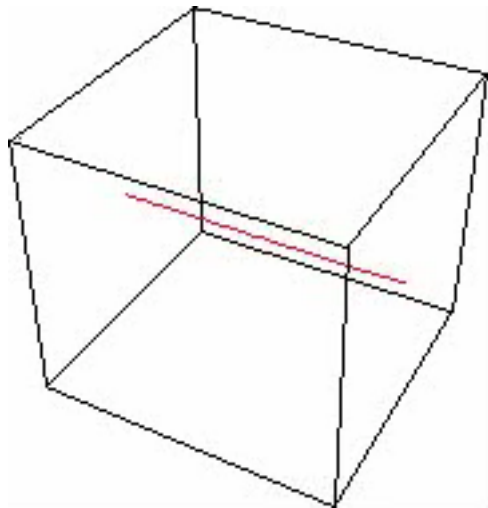
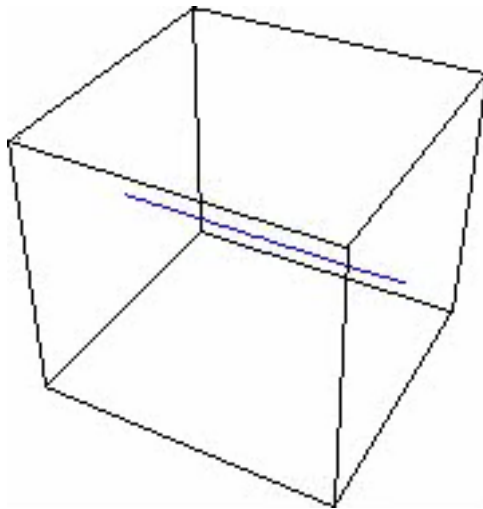
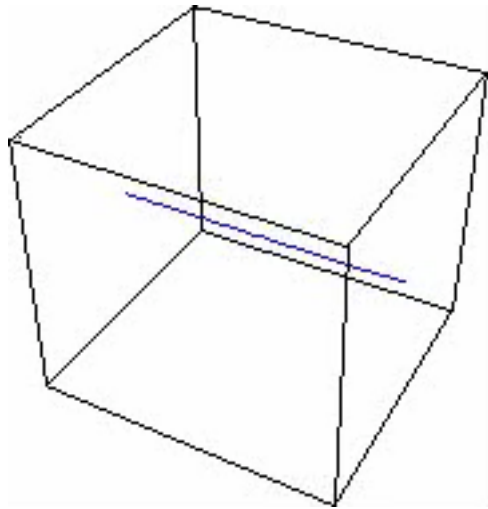
ストリングの質量を大きくするには

- 振動の節を増やす（倍音）
- 振幅を大きくする

量子論：振幅はとびとびの値を取る

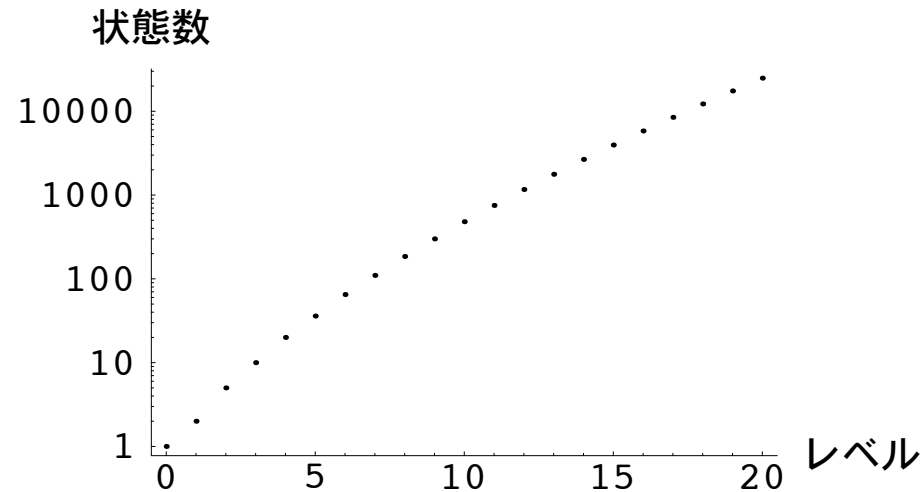
→ ストリングの質量もとびとびの値：「レベル」

ストリングの状態 (レベル2)



質量が大きければ大きいほど振動の仕方（状態数）は多い

端のあるストリングの場合（4次元）



状態数の莫大な増加



ブラックホールを考える上で決定的な役割

3. 超弦理論での ブラックホール

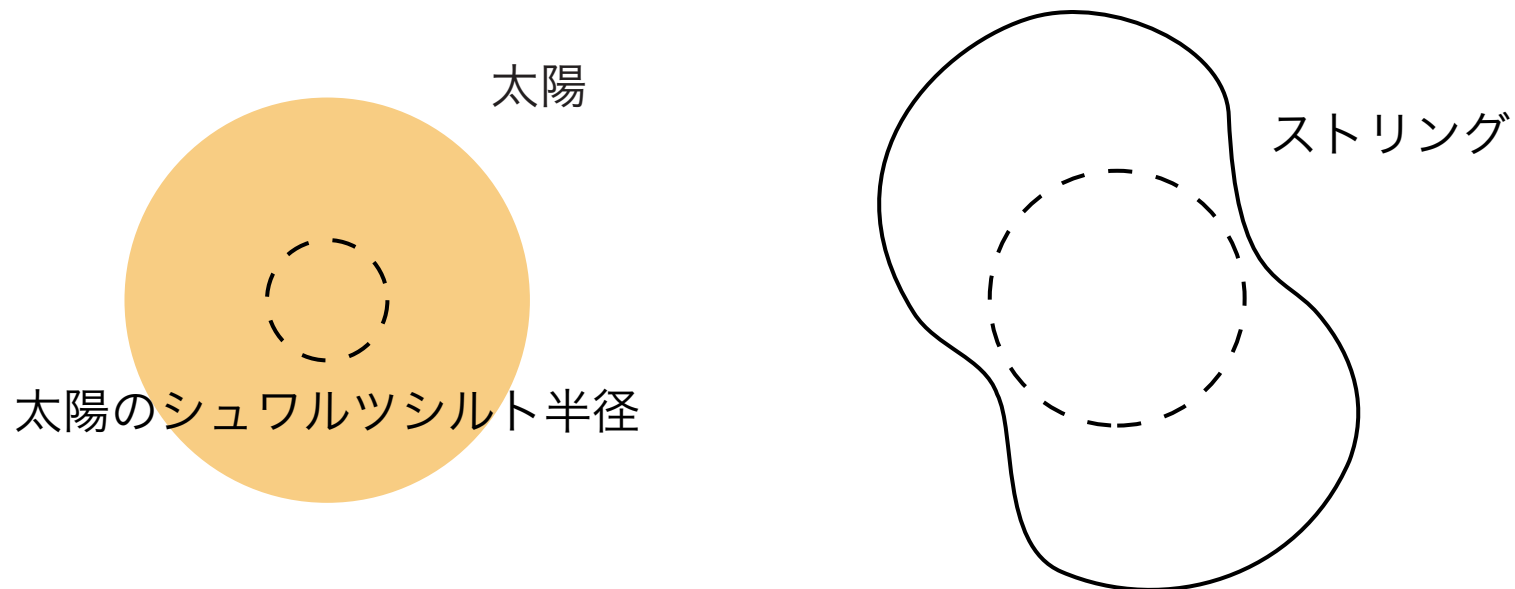
超弦理論でブラックホールを作る

太陽：ブラックホールではない

$$(\text{シュワルツシルト半径}) < (\text{太陽半径})$$

同様に、ストリング：ブラックホールではない

$$(\text{シュワルツシルト半径}) < (\text{ストリング})$$



思考実験を考える

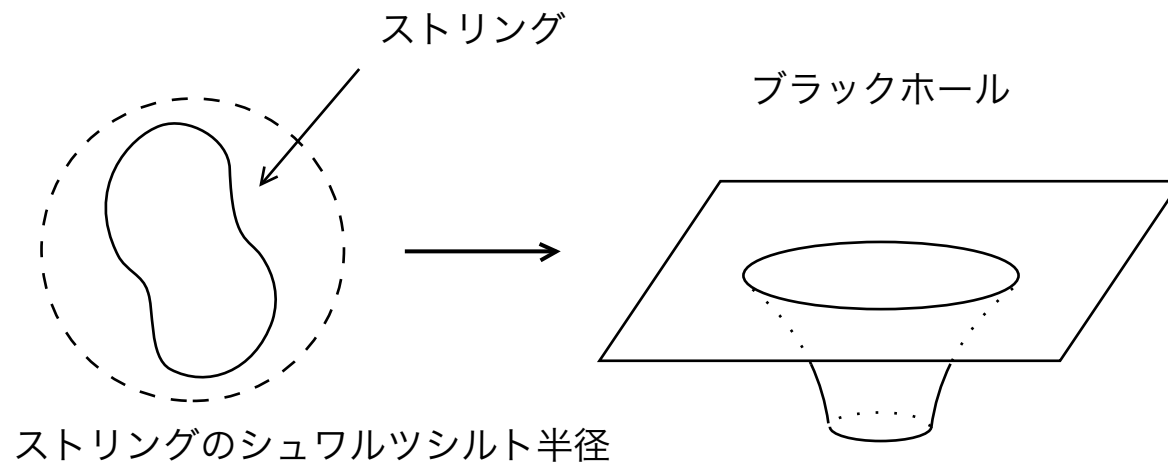
(シュワルツシルト半径) < (ストリング)

重力を強くする ニュートン定数Gを大きくする



シュワルツシルト半径=2GM : 大きくなり、ある時点で

(シュワルツシルト半径) > (ストリング)

ストリングはブラックホールになる



ストリングがブラックホールになることを どうやって確かめるのか？

-  詳しい構造を比べる
-  ストリングからホーキング放射を導く

ブラックホールの微視的構造

ストリング → ブラックホール

一つの質量を持つストリングの状態は複数存在
このような状態 → すべてブラックホール

同じ質量のブラックホール → ミクロなスケールではストリング
のさまざまな状態

ブラックホールは
ミクロなスケールでは莫大な状態数を取りうる

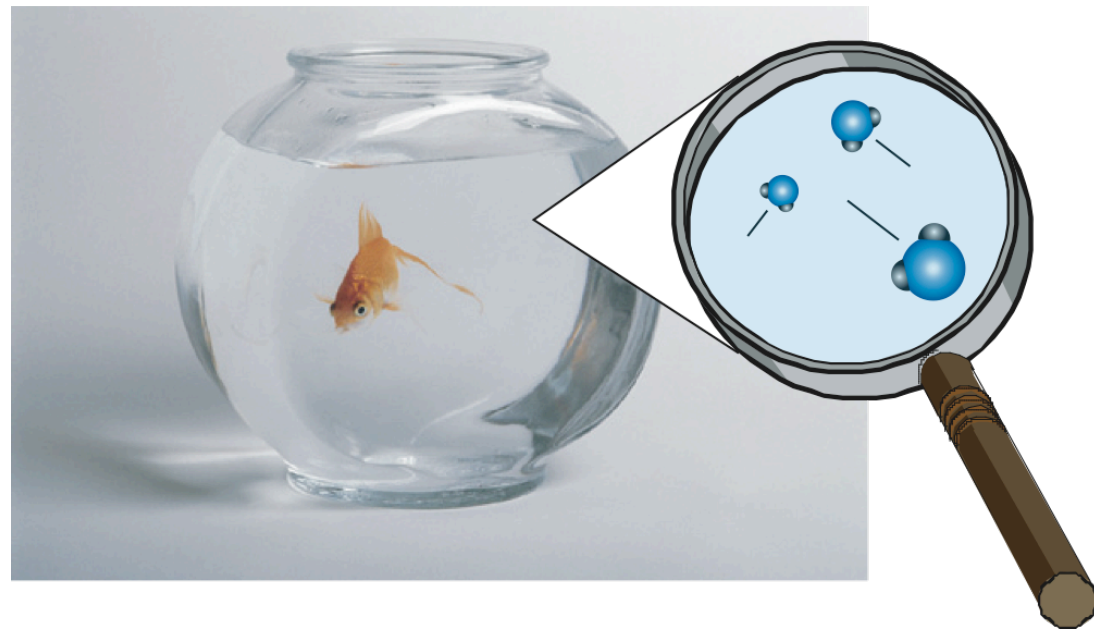
ブラックホール・エントロピーとして予想されていた

エントロピー：微視的構造のあらわれ

コップの水：温度などを決めれば十分

しかし微視的には多数の分子からなる。温度だけでは分子運動は決まらない。

→ 可能な微視的状态を数えるのがエントロピー



ブラックホールのエントロピー

$$\text{エントロピー} \sim (\text{ホライズン面積}) / (\text{プランク長さ})^2$$

$$\text{プランク長さ} = 1.6 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

$$\text{マクロな物体に対してきわめて大きい値} \sim 10^{77}$$

cf. 太陽のエントロピー： 10^{57}

→ ブラックホール：太陽 10^{20} 個分 = 10^8 兆個

～観測可能な宇宙（～100億光年）の星の数

莫大なブラックホール・エントロピー



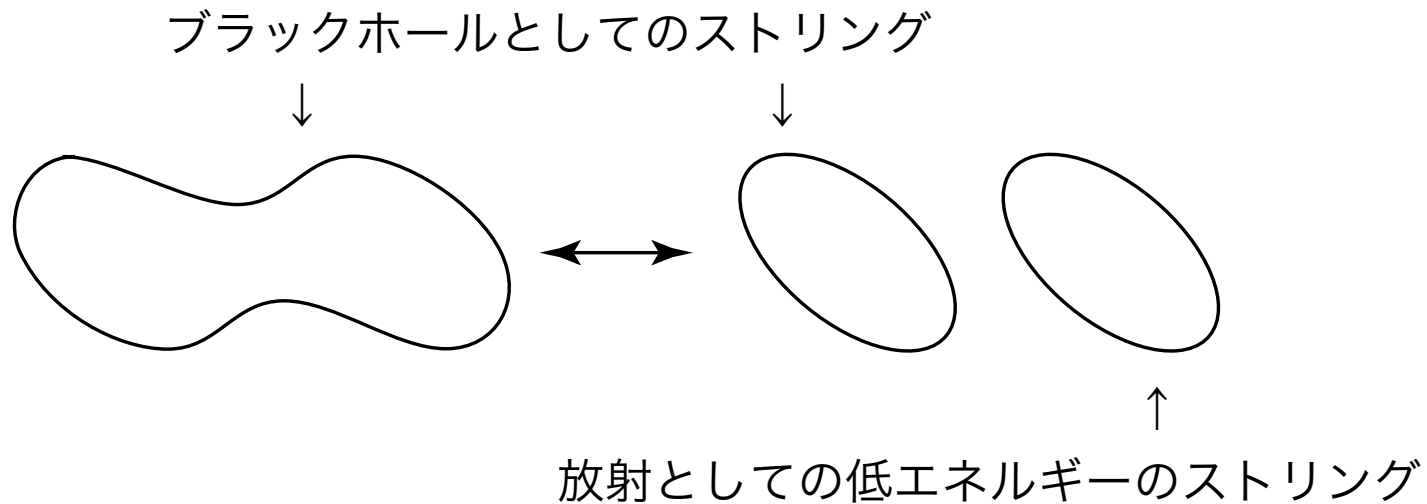
ストリングの莫大な微視的状态数

→ 超弦理論ではブラックホールが量子論的に扱えること
も意味する

↔ インフォメーション・パラドックス

ホーキング放射

超弦理論でのホーキング放射



通常の量子力学的プロセス



インフォメーションは失われないはず

パラドックスの解決？

過去数年間、さらに状況証拠を積み上げてきた (1996年～)
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い

しかし

- ホーキングの議論のどこが間違っていたのか答えていない
- 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

ホーキングがこれまで「説得されなかった」理由

ホーキングの今回の主張：これらの問題を解決

超弦理論を使い
ブラックホール・エントロピーやパラドックス
解決に迫った人々

Andy Strominger

(Paul Ginsparg)



Cumrum Vafa



Joe Polchinski

To be sung, and danced, to the tune of "The Macarena".
Lyrics © by Jeff Harvey.

**You start with the brane
and the brane is BPS**

**Then you go near the brane
and the space is AdS**

**Who knows what it means
I don't I confess**

Ehhhh! Maldacena!

**Super Yang Mills
With very large N**

**Gravity on a sphere
flux without end**

**Who says they're the same
holographic he contends**

Ehhhh! Maldacena!



Juan Maldacena
(彼をたたえる歌?とともに)

**Black holes used to be
a great mystery**

**Now we use D-brane
to compute D-entropy**

**And when D-brane is hot
D-free energy**

Ehhhh! Maldacena!

**M-theory is finished
Juan has great repute**

**The black hole we have mastered
QCD we can compute**

**Too bad the glueball spectrum
is still in some dispute
Ehhhh! Maldacena!**

1. 超弦理論によるブラックホール・エントロピーの導出
2. AdS/CFT の提案
3. ホーキングの今回の主張の「元ネタ」

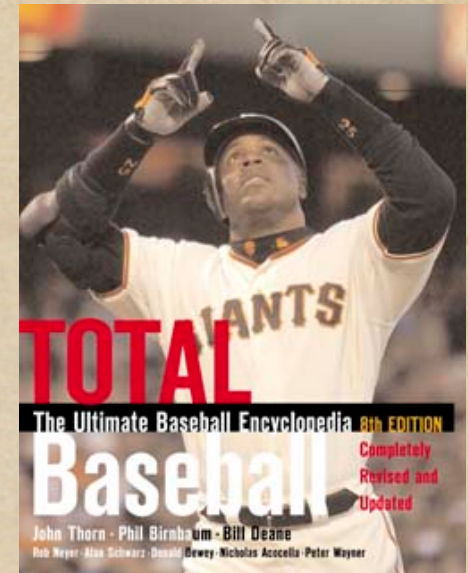
まとめ

インフォメーション・パラドックス → 量子論が破綻する可能性

超弦理論で調べたところ、通常の量子力学で
不十分である兆候はない

矛盾（一般相対論と量子力学） → 新しい物理法則
→ 一般相対論？ 超弦理論？

この問題の解決は時空に対する概念を一変させられる



パラドックスは解いたものの (?)
賭には負けたホーキング