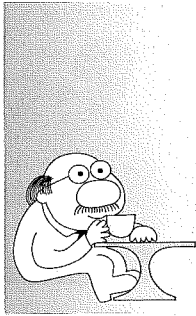


# 物性と素粒子 —— 多様性と統一の 物理的世界像の対話



東京大学大学院理学系研究科 青木秀夫

カリフォルニア工科大学物理学数学天文学部門 大栗博司

この対談は、素粒子物理学理論を専攻する大栗と物性物理学理論を専攻する青木が、互いの分野の方法論や研究の現状について忌憚ない議論を交わすことにより、物性物理学の多様性と素粒子物理学の統一への志向からいかに物理学の世界像が構築されるか、また将来どのような発展が期待されるかを、個人的な立場から語り合った記録です。実際の対談は、大栗が21世紀 COE プログラム「極限量子系とその対称性」の客員教授として2007年春に東京大学大学院理学系研究科物理学専攻に滞在した折に、約3時間にわたって行われました。録音テープを文字化したものに、口調を忠実に残して、必要最低限の編集を行っています。タイトルは、ガリレオ・ガリレイの“*Dialogue Concerning the Two Chief World Systems*”になっています(どちらが天動説に対応しているかという議論は無しにして...)。なお、「固体物理」の読者に馴染みの薄いと思われる用語(本文中で\*印)の解説を後に掲げました。

## バビロニア人とギリシャ人

A(青木) 初めてお会いしたのは助手の頃でしたっけ?

O(大栗) 私は1986年に東大の助手になりました。その頃、青木先生も東大に移られたように憶えています。

A 同じ年に筑波大から移ってきました。

O その頃には、すでに分数量子ホール効果のお仕事をなさっていました。

A ええ。まず整数量子ホール効果をやっている、1983年に分数量子ホール効果の実験で見つかった、それで分数量子ホール効果もやり始めたわけですね。だから、もう20年前ですか。

まず話の糸口として、Caltech(カリフォルニア工科大学)の話からしましょうか。たまたま今、ファインマン(Richard Feynman)と一緒に仕事をした人が書いた本<sup>1)</sup>を読んでいます。ファインマンはCaltechを非常に気に入っていて、彼がコーネル大学に引き抜かれそうになった時の話ですが、当時、天文学に地球の年齢の方

が宇宙の年齢より古いというパラドックスがあった。ところが、実は宇宙の年齢の計算が間違っていて、星には2種類あることを考慮しなければいけないということをCaltechの人が見つけて、「こういうわけだったんだよ」とファインマンに話した。それで彼は「こういうアクティブなキャンパスに居続けたい」と言ったという。今のCaltechの雰囲気って、どうですか?

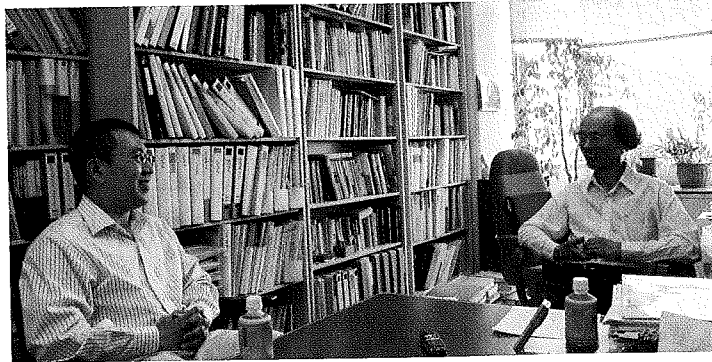
O Caltechは小さい大学です。比較のために、東大には学部学生は何人ぐらいいますか。

A 一学年3,000人ぐらい。

O すると4学年で12,000人いるわけですね。Caltechは4学年合わせて900人ぐらいです。ですから、学生数のサイズからすると、ちょっと大きめの高校のような感じです。教授、准・助教教授らの教員は全部で280人ぐらいで、これもこの半世紀ぐらいほとんど変わっていません。

小さいというのは欠点もありますが、いい面としていろいろな人とすぐ知り合いになれるこ

とがあります。今お話しになったファインマンの例にあるように、異分野の人と気軽に学問的な話ができる雰囲気があります。また大学のサイズが小さいから学内行政も柔軟です。たとえば、ファインマンとかゲルマン(Murray Gellmann)なんていうのはかなりわがままな科学者だったと思うんですが、そういうことにも柔軟に対応できたということも、彼が気に入っていた理由ではないかと想像します。



- A 今、ファインマンとゲルマンの話が出ましたけれども、さっき言った本に面白いことが書いてあって、「物理屋さんには2種類ある、バビロニア人とギリクだ」と。これは考え方で分類しているんですが、どういう意味かというところ、数学や自然科学の歴史を見たときに、普通は西洋の自然科学の発祥地はギリクだと思われそうですね。だけど、本当はバビロニア人が最初にやって。
- O たとえば、バビロニア人はピタゴラスの定理を知っていたという説もありますね。
- A そうそう。彼らの考えは、とにかく使い物になればいいというので、実用的にやった。一方、ギリク人は根本的に考え方が違って、数学や自然科学を厳密科学にした。つまり、厳密性や論理を気にするとか、証明とは何かという、それをちゃんとやったので、発祥はギリクだということになった。さっきの本が言うのは、同じように物理屋さんを見ると、バビロニア人というのは現象が説明できればいいと思う人、一方、ギリク人というのは、そうじゃなくて、理論の枠組みがしっかりしていなきゃ駄目で、厳密でなきゃ駄目だと考える。当然、ファインマンはバビロニア人で、ゲルマンはギリクだと(笑)。
- O 彼ら2人のライバル関係にはいろいろな逸話がありますが、なるほど、そういうことですか。
- A もちろん、両方が大事で、厳密性ばかりでも

しょうがないし、現象論だけでもしょうがないでしょうが。

- O でも面白いですね。ファインマンは、場の量子論のファインマン則を定式化するなど、ギリク流の普遍性のある業績をあげた人でもあるのに。
- A 本当は、だけど、ファインマンは彼自身も、「おれはファインマン・グラフを提唱したといっても、あれは道具みたいなもので、新しい物理を創始したわけではない」と言っていたそうです。
- O ファインマンの興味は多様な物理現象を実用的な方法で理解するというところにあったのかもしれない。でも彼は本質的に数学的な才能がある人だったから、自分自身の意図とは関わり無く、彼のやる仕事は普遍的な価値を持ってしまう。ファインマン則にしてもそうです。もともとQEDを理解するのに作られたのですが、場の理論の基本的な言語として多様な分野に使われています。

さっきのギリクの数学とバビロニアの数学の対比というのも面白い話だと思いました。ギリクの数学に世界的なインパクトがあったのは、公理的な方法を発明したことで数学に普遍性を持たせた、誰にでも理解できるようにした、ということが大きいですね。ファインマンは、自分の意図することではなくても、そういう普遍的なものをつくってしまった、ということだと思います。

## Theory of everything

- A 最近の素粒子論を見ると、現象論とマイクロな

超弦理論とがオーバーラップし始めてきたという感じですね。

○ 私が東大におりました頃は、現象論的な素粒子論と超弦理論の研究とはかなり離れていたような印象があります。当時は、超弦理論が素粒子の統一理論として登場したばかりだったので、これはいったいなんだろうということ、まず「理論の基本構造を理解する」というところに興味が集中していたわけです。それから20年ぐらいたって、理論の構造が豊富にわかるようになってきて、それで素粒子の現象論を含めて理論物理学の様々な分野との接点も現れてきた、ということなのではないかと思えます。

A 今のいわゆる“Theory of everything”と皆さんが称しているやつが、超弦理論から始まって、ブレーンの理論を通じて本当に実験検証ができるぐらいまでに至るかというのは、どうなんでしょうか。

○ これは重要な問題ですから丁寧に説明したいと思えます。物理的な世界は階層構造を持っています。エネルギーや長さのスケールを決めるとそのスケールの物理を記述するのに適切な理論がある。ただし、より短距離すなわちより高エネルギーの物理に当てはまる理論というのはより基本的であって、低エネルギーの理論は原理的にそれから導かれるという還元主義が、ここ数百年の物理学の発展によって確認されてきました。

では、超弦理論ではどのくらいのエネルギー・スケールを問題にしているのかを説明します。便利な指標としてナノスケール、 $10^{-9}$ ですね、というのがあって、人間の大きさを1mのオーダーとすると、面白い量子力学的な現象が起こるのはそれよりもナノ行った所( $10^{-9}$ m)なのです。このナノスケールはちょうど物差しとして都合良く、このナノスケールから、もう一回ナノ( $10^{-9}$ )行ってみましょう。そうすると、ちょうど素粒子の標準理論を越えるような理論が現れてくるのではないかとされるスケールが出てきます。今から数ヶ月先に、ジュネーブのCERNでLHC(Large Hadron Collider)という世界最大の加速器を使った実験が始まることにな

っていますが、その実験が探索するエネルギー・スケールは、まさしくナノの2乗のスケールです。たとえば質量の起源であるヒッグス粒子\*が観測されたり、標準理論を越える理論の候補である超対称性理論とか、素粒子の新しい物理が見つかるであろうしきい値がちょうどナノ・ナノのエネルギーになっているわけです。

では、超弦理論が自然に記述するようなエネルギー・スケールというのは何かというと、それからもう2つナノを行った所、ナノの4乗( $10^{-36}$ )のスケールです。どうしてそうなるのか。重力理論というのはニュートン定数というのが一番基本的な定数で、これを光速や量子力学のプランク定数と組み合わせると、プランクの長さ\*というものが決まります。その長さのスケールというのがナノの4乗です。ですから、超弦理論は基本的にそのスケールでの現象を自然に記述している。もちろん、そのスケールの現象を直接見る実験があれば超弦理論が最も適切に記述するはずですが、実際にはそうではないから、超弦理論の予言を導こうとすると、そこからナノの2乗だけ戻ってこなければいけないわけです。

違うエネルギー・スケールの現象をより基本的な現象から導くというのは、一般に難しい問題です。たとえば、強結合電子系の現象を記述する有効ラグランジアンを電子間の基本的な相互作用から導くという問題とか、素粒子理論でいえば強い相互作用の基本理論であるQCDを第一原理としてハドロンとかメソンといったクォークの束縛状態のスペクトルを計算するとか、そういうのも非常に難しい強結合の問題です。

ですから、ナノ・ナノ・スケールを越えてプランク・スケールから現在の加速器物理のところにもっていくのはなかなか困難です。もちろん、全くアイディアがないわけではなくて、超弦理論に特有の余剰次元が加速器実験で観測される可能性や、また最近では天体物理学の観測・実験が非常に精密に行われるようになってきているので、宇宙初期の現象から超弦理論の兆候を探すとといった研究も盛んになされています。

けれど、私の考えでは、とにかく難しい。難しいけれども、人類が自然界の基本法則に興味があるのであればこれはやらなければいけない問題です。

- A 確かに難しいのは止むを得ないと思うんですが、この辺からそろそろ、物性屋さんと素粒子屋さんの「面白い対話」にしましょうか。

## 還元主義と多世界

- O そうですね。たとえば、このように実験の手の届かないスケールのことを考えることは科学といえるかとか、そういう問題が起きてくるわけです。

- A そこに行きたいわけです。さっき還元主義と言われましたが、どんどん究極のほうに行ってしまうかを探る、それはもちろん王道の一つだと思うんですが、最近見ていると、あまりにもそれが数学的というか人工的な感じの理論になっていて、本当に自然に密着しているかという問題が無視できなくなっているように感じます。まさに今言われたように、どんどん先のほうに行くと、それを検出するためには、それを、より低いエネルギー・スケールで何が起こるかという有効理論や現象論に落とすという作業が必要で、それが結構大変というわけです。有効理論への落とし方はいろいろあるかもしれないけれど、より高いエネルギー・スケールでは唯一の理論を探そうという意味で、とにかくやっていることは一つのことです。Theory of everything が複数あったら困るので。

一方、物性の世界を見ると、いろんな世界があって、場の理論でいえば、「有効理論」としてはいろんな場の理論が、桁違いに低いエネルギー、典型的に 1 eV から meV のエネルギー・スケールで実現している。それはもう枚挙にいとまがないほどで。量子ホール効果<sup>2)</sup>だったらチャーン・サイモンズ (Chern-Simons) ゲージ場\*の理論だし、高温超伝導でもいろんな場の理論が提案されている。その他、磁性体でもそうだし、超流動でもそうです。

そういう非常に豊かな世界があるので、一つの考え方は、還元主義というのは必ずしも唯一

の方向ではなくて、実は、別に還元しなくてもいろんな世界があって、それが面白いのでは、ということ、物性物理屋さんが強調し始めているんですね。

- O それは、重要な点だと思います。素粒子理論をやっている人と物性理論をやっている人の中には、お互いに協力関係もあるし、緊張感もあるわけで、それはどういうところから来ているかという、一つには学問としての目標が異なるということだと思います。

先ほど申しましたが、素粒子論の人の興味は、まず第一に自然界の基本法則を発見することです。素粒子の世界にも非常に豊富な現象がありますが、それを理解するというよりは、その現象自身に興味があるというよりは、むしろそういう現象を介して基本理論を特定したい、基本理論の候補をそれによって検証したいからやっているのです。たとえば強い相互作用からどういうふうにメソン、ハドロンが出てきて、それらがどのように相互作用をするかを理解することもそれ自身面白い問題なわけですが、素粒子をやっている人の興味の主流は基本法則を発見したいということなのです。

これに対して、物性理論をなさっている方の興味は、自然界の多様な現象を理解したいということがあると思います。それが今おっしゃっていたことだと思います。

そういう意味で、目的がシャープに一つにあるような分野と、多様なものに興味がある分野は、価値観が違う。でも、もう一つ面白いのは、価値観は違うんだけど、少なくとも理論の分野においては技術的にオーバーラップがあるわけです。どちらの分野も、場の量子論が基本的な言語としてあるわけで、無限自由度の物理系を扱うような技術は両方の分野に基本的なものなわけです。

- A だから、私はよく物性関係の授業なんかで強調するんですが、「場の理論というのは素粒子論の専売特許と思っているかもしれないけど、全然そうじゃなくて、物性も含めた普遍的なツールなんだ」と。

- O 実際、素粒子で開発された技術が物性理論

で有効になったり、あるいは物性理論で開発されたような技術が素粒子で有効になったりということは、よくある。歴史的にも、自発的対称性の破れであるとか、くりこみ群のアイデアなんていうのはそういう例です。もっと最近にも、たとえば共形場の理論とかいろいろあります。

A 凝縮系物理、より遡れば統計力学では最初に何を言うかという、 $10^{23}$ 、ほとんど無限の自由度があるときには特有に面白いことがありますよと。

O “More is different” であると(笑)。

A そうそう、アンダーソン(Philip Anderson)のこの言葉は、さっき言った還元主義に対するアンチテーゼなわけですよ。とにかく、物性でいろんな場の理論が実現されているというのは当たり前といえは当たり前で、そういう無限自由度の世界。

O それは、還元主義に対する反論というよりは、有効理論には豊富な世界があって、それをすべて高エネルギーの基礎理論から導くことは技術的に易しくないということを描いているのではないのでしょうか。還元主義というのは、私はあくまで正しいと思います。物理学でこれまでわかってきた階層構造では、より基本的な高エネルギーの理論から低エネルギーの理論が原理的に導かれ得る。それを否定するような根拠は無いと思います。

A もちろんそうです。ただ、誤解されやすいのは、物性の人が「いろんなことをやっている」と言うと必ず受ける反論は、「何か知らんけど、ごちゃごちゃいろんなことをやっているだけで、統一原理がないんじゃないの」と言われるので。しかし、もちろんそんなことはなくて、統一原理を求めるといふ目的は同じで、ただそれを、いろんな有効理論に対して「こういう統一原理があるんだ」ということを言うわけですよ。

今、私の助手(現在助教)をしている岡隆史さんがいるのですが、修士課程の時まで素粒子理論でしたが、物性理論に移ってきたんですが、彼は最初の研究室セミナーで、物性の基本的問

題を分類できるかという話をしました。いろんな物性の問題がありますね。高温超伝導の問題とか、近藤問題とか、スピン系の問題とか。そういうものに対するハミルトニアンを書いたときに、そこで、場の理論に落としたりして何らかの繰り込みができたとしましょう。どんどん繰り込んでいくと、繰り込みの固定点ハミルトニアンに到達する。そうすると、そういった固定点ハミルトニアンがそんなに多数あるわけではないので、固体物理の分類学というのはもしかしたら、(繰り込み可能性は別として)固定点ハミルトニアンの分類学になっているのだろうか、という問題提起です。それも一つの考えであるほど、と思ったんだけど。

## 数学と物理学

A 研究のアプローチについて、南部先生が昔からよく言われていること<sup>3)</sup>、物理屋さんの思考形態は南部先生によれば3つに分類できる。1つ目は「湯川モード」。何か新しい、説明できない現象があったときに、法則を変えるのではなくて、たとえば新しい粒子を導入すれば説明できるだろうか考える。2つ目の「アインシュタイン・モード」では、そうじゃなくて、やっぱり原理原則が一番大事だから、とにかく原理を変えるべきかどうかを議論する。3つ目が、アインシュタイン・モードにちょっと似ているんだけど、「ディラック・モード」。原理原則が大事なのはもちろんんだけど、可能ないろいろな原理があって、それを選択しなければいけないわけです。そのときに、数学的に非常に美しい理論があれば、これは自然界が採用していないはずはないだろう、といって美しさによって選択するのがディラック・モード。

最近の超弦理論を見ていると、確かに数学的には素晴らしくて、あれは本当に一つの偉大な建築物だと思うんだけど、現実には密着しているかどうかということよりは、数学的にこうやれば非常に美しくできる、というか、「コンシステントに実行できるのはほとんどこの方法しかない。やればやるほど、いろいろ面白い数学的関係がわかってくる。だから、自然はこれ

を採用していないはずはないだろう」, そういうような感じに見えるんですね。

- 人間の想像力は限られているので, これしか思い付かなかったからこれしかないというのは確かに根拠薄弱だと思います。

一方で, 素粒子物理学における数学の役割は非常に大きなものがあるというのもまた事実です。物理学の他の分野でも様々な数学を使う場面があると思いますが, 素粒子理論における数学の役割には特別なものがあります。それはどうしてかという, 今まで全く人類が経験したことがないようなスケールの物理をどんどん開拓していこう, というのが素粒子物理学だからです。そうすると, それまでの現象を記述するためにある言語はデフォルトでは使えないわけです。たとえば日本語や英語といった自然言語は, 人間が日常的に経験するようなものを記述するために進化してきたものなわけですから, 新しい, 今まで経験したことのないような現象を記述するのに使えるという根拠がないわけです。

数学は自然言語より普遍的なものなので, ウィグナー (Eugene Wigner) が “unreasonable effect-iveness of mathematics in the natural sciences” と呼んでいます, そういう威力があります。素粒子物理を理解・記述するためには数学, 特に今までにない新しい数学をつくっていく必要があるのです。

また, 素粒子論の投げかける問題は数学に対しても本質的なものであって, たとえば数学の最も重要な賞としてフィールズ賞<sup>4)</sup>というのがあります, 1990年から今までの間にフィールズ賞を得た18人のうち7人は素粒子論に関係のある分野で仕事をしています。素粒子論の研究はこのように本質的に新しい数学を必要としていて, また逆に素粒子から現れてきた新しいアイデアが数学の進歩に強いインパクトを与えているわけです。

一方で, このような学問では, どういう問題が重要でそれに対してどういふ数学を作っているかなければいけないか, 目指すものは何であるかがはっきりわかっていないと, バロックにな

りがちだという問題点はあると思います。

- A 数学が物理の言語であるのは, もちろんそれ以外あり得ない。それに物理屋さんがむしろ数学者に教えるぐらい物理において発達している数学は目覚ましいものだと思います。だけど, たとえばストリングとかブレーンとは全然違うことがもしかしたら存在して, 今言われたように, そういうことをやった物理屋さんがいなかったということだけかもしれない。だから, この理論は数学的に美しいし, 奇跡的にうまくいっていて, こんな奇跡的にうまくいったやつがポジャるわけがないという考え方だけでいいかという問題は残るんじゃないでしょうか。
- それだけでは, もちろん駄目でしょうね。しかし, 学問が進歩している間はその方向でどこまでいけるか突き詰めてみよう, ということは有効な戦略だと私は思います。

重力の理論と量子力学を統合するというのは, 今までの物理学の系統的な進歩とは定性的に違う問題です。ですから, そのようなことを可能にするような理論体系があるということ自身が, 驚くべきことだと思います。

それはどういうことか, これまでも何度も出てきましたが, 物理的世界というのは階層構造を持っている。より短い距離の現象を記述するような理論はより基本的な理論であるということが了解されていると思います。これがどこまで続くかということはよく話題になります。原子は電子と原子核からできていて, 原子核は陽子, 中性子や中間子からできている。さらにこれらはクォークとグルーオンからできている。では, そのクォークとグルーオンは何から…。いつまでもこのような階層が続くのかどうかという疑問がわくのは当然です。

ところが, そのような階層構造は, もし重力と量子力学の統合ができるとそこで打ち止めになると考えられています。それはどうしてか。重力理論は時空の構造すら力学変数として扱っています。したがって, 重力と量子力学が統合されるような長さの領域までいくと, それより先にいくという概念がそもそも無くなってしまからです。

## 階層構造と究極の理論

○ 具体的な例を挙げましょう。短距離の物理を探索するために加速器を造るわけですが、加速器のエネルギーをどんどん上げていけば、より短い距離のより基本的な現象が見つかるというふうにして、素粒子物理学は発展してきたわけです。では思考実験としてプランク・エネルギー以上の加速器を造って、粒子をぶつけてプランク・スケールよりも短い距離の物理が探索できるかということ、どうもそうではない。どうしてかということ、プランク・エネルギーぐらいの粒子をぶつけ合うと、粒子の周りの時空が歪んで事象の地平線ができてしまう。それよりもどんどんエネルギーを上げていっても地平線が広がって行って、その内側の現象は全く見えない。

量子力学ではハイゼンベルクの不確定性原理というのがあって、位置と運動量の同時観測に原理的な限界がありますが、これと同じように、量子力学と重力を統合すると、距離自身について、より短距離への探索についての原理的な限界ができると予想されているわけです。

そうすると、今まで物理学の発展の礎であった還元主義が、少なくとも私たちが今まで考えてきたような意味では終わってしまう。超弦理論を「究極の理論」であるとか“Theory of everything”と呼ぶことには私も賛成ではありません。プランク・スケールまでいったときに、その先には物理の新しいフロンティアはないと言い切れるのか。でも、少なくとも人類が今まで理解してきた意味での、より短い距離の現象を探索することでより基本的な理論を見つけるという方向は、そこで終わる。そこまでいったら、違う方向に新しいフロンティアが見つかるかもしれないが、少なくともこれまでの意味の物理の階層構造は打ち止めになる。プランク・スケールは定性的に違う場所であるわけです。だから、そこを理解したい。そこを理解するための理論的な枠組みをつくることに努力するというのは、私は科学的に意味のある、今までの物理学の進歩から見て自然な流れだと思います。

A それには私ももちろん賛成します。今言われた、階層構造が「原理的に断ち切れるんだ」というのは概念的に非常に面白くて、それは物理の歴史に残ると思います。

## D ブレーンのもたらしたものの

A ただ、それをテクニカルに見てみると、超弦理論から始まって、Dブレーンとかいろいろな双対性を使うとかして、ウルトラC級のことをやらなければいけないわけです。余剰次元については、余剰次元が余分なものではなくて、実は面白い働きをしているという示唆<sup>9)</sup>があって、それ自体は概念的に面白いと思うんだけど、やっぱりそういうテクニカルティニーにやっているわけですね。

だから、さっきの問題に戻ってしまう。数学的に美しいから本当だとしたら面白いんだけど、自然がそれを採用しているというチェックの方法はあるのかという。

○ そうですね。それは、先ほど言ったように、ナノ・ナノのスケールを越えなければいけないわけですから、技術的に難しい。ただ、超弦理論の研究からブレーンという構造が出てきた背景は、小手先の技術の問題ではなくて、学問の進歩の大きな流れの中でそういうものが現れてきたということは強調しておきたいと思います。

1980年代後半の頃は、統一理論としての超弦理論が脚光を浴び始めた頃でしたが、その頃は理論を解析する手だてとして摂動論的な方法しかなかったわけで、私もそういう摂動論的な技術を開発することに努力していたわけです。Dブレーンというのは、そういう摂動論を越えた、超弦理論の非摂動効果を理解する最も基本的な言葉として現れてきたわけです。ですから、摂動論を越えた物理を理解したいという欲求から自然に出てきた発展だと思っわけです。

たとえば1980年代に摂動論的な超弦理論をやっていた頃には、そういう摂動論的な方法では量子重力の一番面白いミステリー、たとえばブラックホールの情報問題は解けないんじゃないかという批判がありました。それが、Dブレーンの方法が開発されることによって、たとえば