

重力のホログラフィー

村山機構長は本誌前号のDirector's Cornerで、東西ドイツの統一をたとえにして、自然界にある様々な力の統一について語りました。この記事ではこれを引き継いで、力の統一とは何か、それは何をもたらすのかを考え、究極の統一理論の候補である超弦理論とそのホログラフィー原理についても解説します。

マックスウェル理論と電磁波の発見

19世紀の後半にマックスウェルは、それまで別々の現象と考えられていた電気と磁気を統一的に記述するマックスウェル方程式を発見しました。この方程式は、電場が変化すると磁場が生まれ、逆に磁場の変化が電場を引き起こすことを表現しています。マックスウェルはこの方程式を解くことで、電場と磁場が絡み合いながら光の速さで伝わっていく波、すなわち電磁波の存在を理論的に予言しました。その15年後にヘルツは電磁波を実験的に確認し、20世紀のはじめにはマルコーニが大西洋を横断する無線通信に成功するまでになりました。今日の情報産業があるのは、マックスウェルによる電磁気力の統一のおかげだと言えます。

時間と空間の幾何学

マックスウェルの理論では電場や磁場が電磁気力を伝えるのに対し、アインシュタインの一般相対性理論で重力を伝えるのは時間や空間の曲がり具合です。アインシュタインは友人の数学者グロスマンの協力によ

り、当時最新の数学であったリーマン幾何学を使うことで、物質が時空間を曲げる様子を表すアインシュタイン方程式に到達しました。そして、マックスウェルが電磁波を予言したように、アインシュタインは時空間のさざ波が光の速さで伝わっていく重力波を予言しました。その60年後に、ハルスとテイラーは、連星パルサーが重力波を放出している間接的証拠を発見しました。現在日本を含む世界各地で重力波を直接捉えることを目指す測定器が稼働しています。

アインシュタインの重力理論は、ブラックホールの存在を予言し、ビッグバン理論の基礎となるなど、宇宙の研究に欠かせない道具となっています。また、私たちの日常生活にも影響を与えています。カーナビなどに使われているGPSは、人工衛星に搭載されている原子時計からの信号を受けて現在地を決めますが、人工衛星が重力の弱い上空を高速で運動しているため時計に微妙な進みが生じ、相対性理論を使って補正をしないと使い物にならないのです。

くりこみ理論

一般相対性理論とならぶ20世紀の物理学のもう1本の柱は、ミクロの世界を記述する量子力学です。私たちが知っている自然界の力は、重力の他はすべて量子力学の枠組みに取り入れられています。たとえば、マックスウェルの電磁気理論と量子力学の統合は、ハイゼンベルグとパウリによって試みられ、ファインマン・シュビンガー・朝永の「くりこみ理論」によって

本の情報はどこに行ったのか？

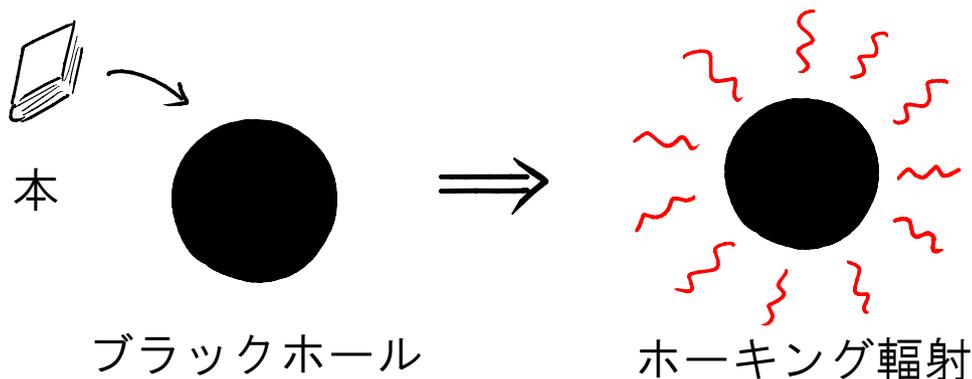


図1 ブラックホールの情報問題

一応の完成を見ました。

量子力学の記述する世界では、私たちが日常経験しないような不思議な現象が起きます。たとえば、ハイゼンベルグの不確定性原理によると、物体の位置や速度といった量も、量子力学の世界では常にゆらいでいます。そこで、マックスウェルの電磁気理論を量子力学と組み合わせると、電場や磁場の状態もミクロな世界でゆらぐこととなります。電場や磁場の方向や強さは場所ごとに変わることができるので、そのゆらぎの効果をすべて勘定に入れようとすると、いろいろな計算に無限大が現れて意味を成さなくなります。この問題を解決したのが、くりこみ理論なのです。

量子重力のパラドックス

さて、アインシュタインの重力理論を量子力学と組み合わせようとすると同じような理由で無限大が現れますが、これは電磁気の場合よりたちの悪い無限大で、くりこみの方法で解決することができません。また、アインシュタインの理論では、重力を伝えるのは時間や空間の曲がり具合なので、これに量子力学の考え方

を当てはめると、時間や空間の構造自身がミクロな世界でゆらぐこととなります。これが様々なパラドックスのもととなり、物理学者を悩ませてきました。

その中でも有名なのは、ブラックホールが量子力学的効果で熱を持ち、蒸発してしまうというホーキングの計算です。ホーキングはこの過程が決定論と矛盾すると主張しました。決定論とは、いま起きていることを全部知っていれば、自然界の基本法則によって未来や過去が完全に決定されるという、自然科学の基礎となる考え方です。

図1のように、ブラックホールに本を投げ入れることを考えてみましょう。ブラックホールの質量は本の分だけ一時的に増えますが、それは熱放射によって散逸してしまいます。ホーキングの計算によると、別な本を投げ入れても、本の質量が同じなら、全く同じ放射が返ってくるようになります。放射を観測しても、過去にどちらの本を投げ入れたのかが判別できなければ、過去の情報が再現できないので決定論に反していることになるのです。これがブラックホールの情報問題です[1]。

Feature

超弦理論

重力理論と量子力学の統合は、過去半世紀以上の理論物理学の最も重要な課題の1つであり、無限大の問題を解決するために、様々なアイデアが試みられてきました。そのなかで、理論として整合性を持ち、また現実的な素粒子モデルを再現する見込みがあるのは、これまでのところ超弦理論だけです。超ひも理論と呼ばれることもあります。名前が示すように、物質の基本単位が、ひものように広がったものであるとし、これによって量子重力の無限大の問題を解消しようとしています。

このひもは、バイオリンの弦のように振動し、その音色の1つひとつが様々な素粒子に対応すると考えられています。米谷民明は大学院に在学中に、この振動の1つが重力を伝えることを発見し、超弦理論が重力理論を含んでいることを示しました。これを独立に発見したシャークとシュワルツは、超弦理論を使ってすべての力を説明する究極の統一理論を構成することを提案しました。

しかし、超弦理論はその後10年ほど素粒子論の傍流に留まりました。その理由の1つは、素粒子の世界に特徴的な「鏡像対称性の破れ」を超弦理論に組み込むことができなかったからです。私たちが日常経験する現象は、鏡に映しても実現可能なように見えます。これを鏡像対称性と呼びます。しかし、この対称性はミクロのレベルで破れています。鏡像対称性の破れは、K中間子と呼ばれる素粒子の崩壊現象を説明するため

に、李政道（リー・ジュヨンダオ）と楊振寧（ヤーン・ジェンニン）によって予言され、呉健雄（ウー・ジエンシオン）の実験によって確認されました。

シュワルツはその後10年間、人気のなかった超弦理論をこつこつと研究し続け、グリーンとの共同研究で鏡像対称性の問題を解決して、超弦理論から素粒子のモデルを作る道筋をつけることに成功しました。今日、超弦理論は素粒子論の主要な研究分野の1つとなっています。

ホログラフィー原理

グリーンとシュワルツが突破口を開いてから25年間に超弦理論は大きな発展を遂げてきました。ここでは、その中で発見された「ホログラフィー原理」について解説しましょう。

量子力学には、「粒子と波の双対性」という考え方があります。たとえば、電磁波はマックスウェルの方程式にしたがう波ですが、マックスウェルの理論に量子力学を当てはめると、電磁波は1つひとつ数えられる粒子としての性質を持つようになります。逆に、電子は粒子と考えられてきましたが、量子力学ではシュレディンガーの方程式にしたがう波でもあります。量子力学史の初期には、電子は粒子なのか波なのかをめぐって論争がありましたが、今日ではこの2つの見方は矛盾するものではなく、これらが補い合って電子の全体像を表していると考えられています。これが粒子と波の双対性です。

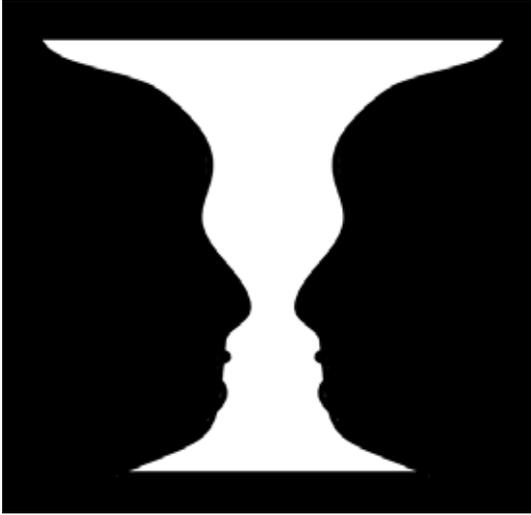


図2 ルビンの壺

図2はルビンの壺と呼ばれる錯視図形です。この絵では、白い部分に着目すると壺があるように、黒い部分に着目すると2人が向かい合っているように見えますが、どちらの解釈が正しいと言うことはありません。これも双対性の例です。

ホログラフィー原理も双対性の例です。ホログラフィーというのは、もともと光学の用語で、3次元の立体像を2次元面上の干渉縞に記録し再現する方法のことです。超弦理論では、量子重力のすべての現象は、空間の果てにおいたスクリーンに投影することができ、その上の重力を含まない量子力学理論によって記述できると考えられています。これを表現するのに光学の用語を借用して、ホログラフィー原理と呼ぶのです。

たとえば私たちは、縦、横、高さで指定される3次元の空間を実在のものだと感じています。しかし、空間の果てにおかれたスクリーン上の理論から見ると、3次元の空間も、そこに働く重力も幻影だということになります。ホログラフィー原理によると、この2つ

の見方のどちらがより本質的かという問いには意味がなく、これらは量子重力の異なる側面を表していることになります。

ホーキングのパラドックスのような量子重力の深いなぞも、ホログラフィー原理を使って、重力を含まない量子力学の問題に翻訳することで、解決できるようになりました[1]。これにより、重力を含む究極の統一理論の完成に向けた研究が大きく進みました。

また逆に、量子力学の難しい問題を重力理論に翻訳して、幾何学的方法で解くこともできるようになりました。これは超弦理論の応用の範囲を大きく広げ、クォーク・グルーオン・プラズマの熱力学的性質やハドロン物理、さらには物性物理学の量子相転移や量子流体などの強相関現象の研究にも新しい視点を与えています。このような研究が、20年来のなぞである高温超伝導の仕組みの手がかりになるかもしれないとの期待もあります[2]。

このように超弦理論には、素粒子の統一理論の候補としての側面と、素粒子物理学の枠を超えた物理学の様々な分野の問題を解く数学的道具としての側面があり、この2つはホログラフィー原理で結び付けられています。IPMUでは、気鋭の数学者や物性物理学者も巻き込んで、超弦理論の両方の側面について研究を押し進めています。

参考文献：

- [1] 大栗博司、量子ブラックホールと創発する時空間、バリティ 2009年6月号
- [2] S. Hartnoll, Lectures on holographic methods for condensed matter physics, arXiv:0903.3246