

超ひも理論と物質の究極の姿

大阪大学教授 橋本 幸士

宇宙のすべてを形作る「素粒子」

この宇宙、星、そして人間、すべての物質、これらは、何からできているのでしょうか？小さく小さく切り刻んでいくと、結局は、最も小さい構成要素まで行きつくのでしょうか？そもそも、そのような物質が入っている入れ物である「空間」は、何で作られているのでしょうか？空間はなぜ、縦・横・高さの三次元で構成されているのでしょうか？

これらの問いは大変突拍子もないものに聞こえます。しかし、実はこれらは、基礎科学の最も先端に位置する「素粒子物理学」で研究されている、科学の問いなのです。素粒子物理学の研究は、これらの究極の問いに答えるべく、素粒子の性質を解き明かしていくことです。

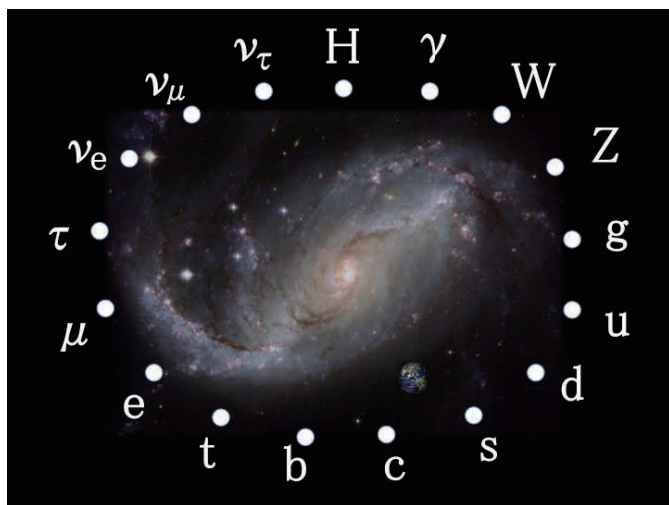


図1.17種類の素粒子

そして、素粒子とは何なのか、空間はどうやってできているのか、といった問いは、お互いに、関係しているということがわかってきました。この科学は、素粒子が小さな「ひも」からできているという理論仮説である「超ひも理論」から、近年、大きな発展を見せています。

ここでは、素粒子と超ひも理論を説明しながら、物質の究極の姿をめぐる最先端科学へとみなさんをお連れしましょう。

素粒子と宇宙はたったひとつの数式から

我々人類は、この1世紀の間に、宇宙を構成する物質の起源について、驚くほど英知を発展させてきました。宇宙にある物質は原子から成り、原子は原子核と電子から成っています。原子核は陽子と中性子から成り、そして陽子と中性子はク

オークから成っています。それ以上分割することが実験的にできていない構成要素のことを、我々は「素粒子」と呼んでいます。現時点で、17種類の素粒子が発見されています。真に驚嘆すべきは、この宇宙のすべての物質（暗黒物質と呼ばれるものを除く）が、発見された17種類の素粒子で構成されているはずであると我々人類が信じる段階まできており、そしてそれら17種類の素粒子は、たった一つの数式で表されていることを人類が知っていることです。

この、宇宙を記述するたった一つの数式は、一言で言うと、それぞれの素粒子の「運動方程式」を与える親玉の数式のようなものです。名前を「素粒子の標準理論の作用」と呼んでいます。この数式はあらゆるものを支配しています。今この文章を読んでいるあなたの手の動きや脳の中の信号も、すべてです。そのような、たった一つの数式を、人類はすでに知っているのです。

宇宙のすべてを記述する数式

$$S = \int d^4x \sqrt{-\det G_{\mu\nu}(x)} \left[\frac{1}{16\pi G_N} (R[G_{\mu\nu}(x)] - \Lambda) - \frac{1}{4} (F_{\mu\nu}^{(1)}(x))^2 - \frac{1}{4} \text{tr}(F_{\mu\nu}^{(2)}(x))^2 - \frac{1}{4} \text{tr}(F_{\mu\nu}^{(3)}(x))^2 + \sum_f \bar{\psi}^f(x) i \not{D} \psi^f(x) + \sum_{g,h} y_{gh} \Phi(x) \bar{\psi}^g(x) \psi^h(x) + |D_\mu \Phi(x)|^2 - V[\Phi(x)] \right]$$

「素粒子の標準理論の作用」
(アインシュタイン重力の部分を追加したもの)

図2. 宇宙のすべてを記述する数式

素粒子の残された謎

では、素粒子物理学は完成したのでしょうか？その答えはノーです。素粒子物理学はさらに新しいステージを迎えているのです。すなわち、初めに述べた問いを科学的に考え答えを出せるステージにきている、ということです。

この宇宙には17種類の素粒子があることがわかっています。しかし、なぜ17種類なのでしょう？17種類には、電子や光も含まれますが、ご存知のように、電子と光は全く性質が違います。例えば、電子は電流の元となり、消え失せることはありません（電子の反粒子として知られている陽電子との対消滅過程を除けば）。しかし、光は放出されたり吸収されたりします。このような違いは、どこから来

ているのでしょうか？

実は、これらの違いはすでに「素粒子の標準理論の作用」と呼ばれる数式に書き込まれているのですが、問題は、なぜその「素粒子の標準理論の作用」が、そのような形をしているのか、ということなのです。この問いに答えた人は、いません。

この世界を構築しているのは、素粒子の間に働く「力」です。力の中で代表的なものに、電磁気力と重力があります。知られている力は四種類だけであり、そのうち二つの力が、これらのものなのです。実は、力は素粒子が飛び交うことによって生ずることが知られています。電磁気力は、磁石と磁石の間に働く力であり、また、電荷と電荷の間に働く力です。電磁気力は、実は光の素粒子である「光子」が間を飛び交うことで発生していることが知られています。つまり、力は素粒子なのです。宇宙の力の代表選手である電磁気力や重力は、光子や重力子といった素粒子が飛び交うことにより生まれているのです。

素粒子物理学の謎は、「それでは、なぜ、光子や重力子がこの宇宙にあるのか？」という問いなのです。

超ひも理論が解決する素粒子の謎

素粒子が小さな「ひも」からできているという仮説があります。この「ひも」はとても小さくて、点のようにしか見えない。

この仮説を「超ひも理論」と呼んでいます。

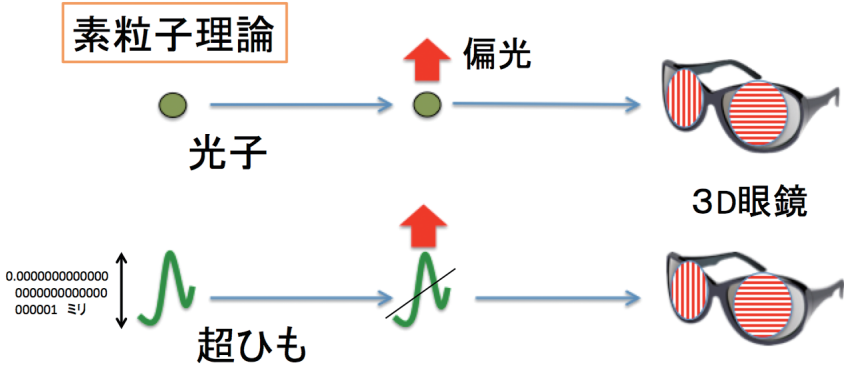
なぜ、素粒子を小さなひもであると考えなければならないのでしょうか。それは、先ほど述べたような疑問点が、解決されるかもしれない、と物理学者たちが考えているからです。ただ、現在のところ、素粒子を測定して実際にひもであると確認した科学者はいません。つまり、超ひも理論は、理論的な仮説であり、これからの検証を待っているのです。

それでは、なぜ物理学者たちは超ひも理論を研究しているのでしょうか。それは、例えば、世の中に「光」があることを超ひも理論は予言するからです。このことを見ていくことにしましょう。

光とは何でしょうか。みなさんは、3D映画を見たことがあるでしょう。映画館で3Dメガネをかけて映像を見ると、あたかも立体的に映像が浮き上がって見える映画のことです。3Dメガネのしくみは、簡単です。メガネの右目と左目のところに、異なる偏光フィルターが入っているのです。光には、偏光という性質があります。これは、光が直進するときに、直進する方向とは直交する、ある「向き」を持っているという性質です。左目用の映像と右目用の映像で、偏光を変えておけば、3Dメガネのフィルターにより、左目と右目にそれぞれ異なる映像が届けられ、あたかも立体的な映像に見えてしまうのです。この「偏光」と呼ばれる性質が、光にはなぜあるのでしょうか。

さて、光を伝えている素粒子「光子」が小さなひもだったとしましょう。ひもには、点状の素粒子と違って、ひもが振動する方向がありえます。このことが、点に偏光という性質を付け加えているのです。

もう少し科学的に正確に言えば、小さなひもの運動を数式で調べると、そこからちょうど、偏光を備えた光の伝搬の方程式が導かれるのです。すなわち、超ひも理論なら「光の存在が自動的に証明できる」ということなのです。このように、超ひも理論は、素粒子の性質を解き明かす可能性を秘めています。



超ひも理論(未検証)

図3. 超ひも理論は光の存在を自動的に導く。

重力と超ひも理論

宇宙をつかさどる力として、もう一つ、重力があります。重力は、アインシュタインによれば、空間と時間が曲がっていることを示す力です。アインシュタインはおよそ100年前に、空間と時間の歪みが伝わる波があるはずだと予言しました。それが、重力波と呼ばれるものです。

ご存知の方も多いと思いますが、2016年に世界で初めて重力波が実験的に検出されました。宇宙からやってくる極めて微弱な重力波が空間を歪める様子が、確認されたのです。この検出方法は、大変面白いものです。一つのレーザー光を二つに分け、直交する方向にそれぞれ進むようにします。その先に鏡を置いておき、反射して戻ってきたときに、それらが同時に帰ってくるか、それともずれて帰ってくるか、を観測するのです。もしずれていれば、空間の距離が、二つの経路で異なったことを示すのですから、確かに、空間がゆがんでしまっています。

重力の波が光の波と異なる点は、重力が二つの「偏光」を持つということです。

経路が二つあり、一方が伸びて一方が縮むので、違いがわかります。直交する方向に、二つの「偏光」を持つのが重力波なのです。

さて、この性質は超ひも理論で説明できるのでしょうか。超ひもには、さきほどの光子を説明した際の「開いたひも」の他に、「閉じたひも」を考えることができます。その振動の様子を見てみましょう（図4）。ちょうど、ある方向に伸びるとそれに直交する方向が縮むような振動をすることがわかります。つまり、閉じたひもの「偏光」は、ちょうど重力波の性質を再現してくれるのです。

さきほどと同様、より科学的に正確に言えば、閉じたひもの運動を解析すると、重力を支配するアインシュタイン方程式を導くことができます。この意味で、「超ひも理論なら重力も自動的に」導くことができるのです。

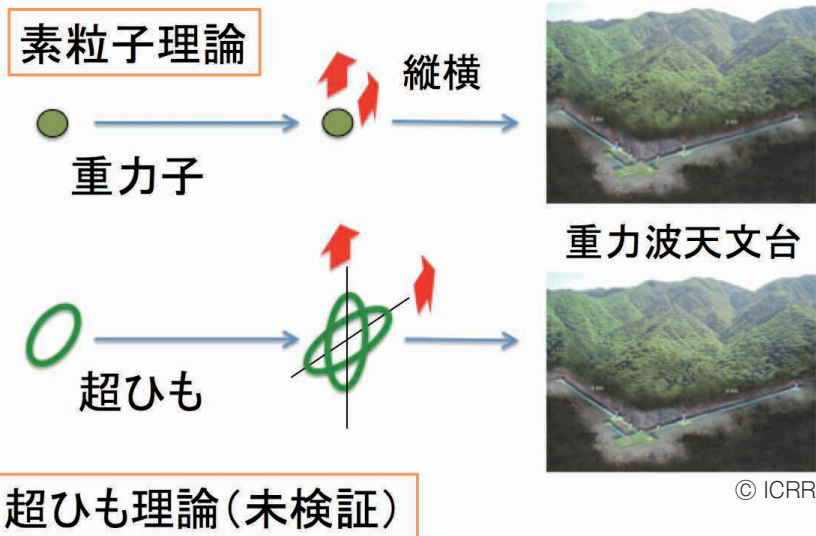


図4. 超ひも理論は重力の存在も自動的に導く。

超ひも理論と素粒子物理学の将来

このように、超ひも理論は、素粒子の不思議な性質を説明する力があります。超ひも理論がより進展すれば、17種類の素粒子の性質が明らかになってくるかもしれません。さらに、素粒子の実験や宇宙の観測から、素粒子がひもであるという兆候が見えてくるかもしれません。現時点では「超ひも理論」は理論上の仮説です。したがって、実験的に排除されるかもしれません。しかし、研究者は、ひも理論の痕跡を様々な実験や観測で確かめようとしています。

また、最近、素粒子物理学の研究はさらに飛躍的に進んできています。空間の

次元を与える問題について、実は「次元とはそもそも状況によって数が異なり、違う次元の物理現象が全く同じものである」というホログラフィー原理と呼ばれるものが発見され、理論的に確かめられています。この問題は、

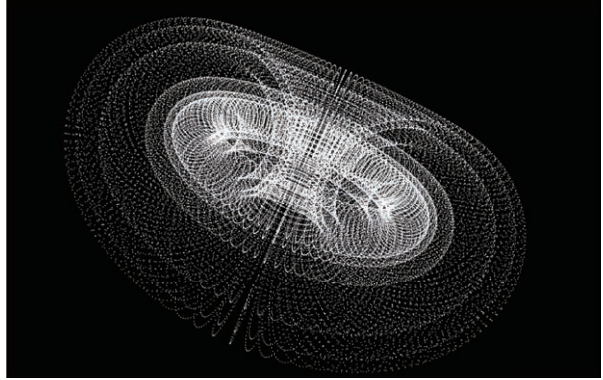


図5. 高次元空間を可視化したもの(6次元のドーナツ型の空間の切り口)。(「超ひも理論可視化プロジェクト」より)

量子力学を統合する、という前世紀からの物理学の宿題を解決すると考えられています。これらの、素粒子とは一見異なるアプローチは、超ひも理論から導出されてきました。超ひも理論は重力を含んでいるため、空間自身の構造やそのゆえんを解明する可能性があります。

物理学の究極の目標の一つは、超ひも理論を用いて、空間自身がどのように出来上がるのか、を解き明かすことです。様々な空間次元の現象がどのように関係しているのか、それが一つ一つ解き明かされるのに、研究者はワクワクしています。

2012年には、素粒子に質量を与える「ヒッグス粒子」が実験で発見され、2016年には、重力を伝える波である「重力波」が観測されました。ヒッグス粒子の発見は、素粒子の標準模型の数式を、確固たるものにしました。これからも、驚くべき理論実験の発見が我々を待ち構えていることでしょう。素粒子物理学は、人類の究極の問いに答えを与える段階に来ているのです。そして、超ひも理論は、人類の新しい挑戦なのです。

著者紹介 橋本 幸士(はしもと こうじ)



大阪大学 大学院理学研究科 教授。1973年生まれ、大阪育ち。2000年京都大学大学院理学研究科修了、理学博士。超ひも理論、素粒子論を中心にさまざまな物理学の現象と数理構造を対象にした研究を行う。著書に『マンガ 超ひも理論をパパに習ってみた』(大阪大学出版会)など。