

少し長い「はじめに」

「ブラックホールの中」、「宇宙の始まり」、そして物理学

皆さんは「物理学」という言葉から何を連想するでしょうか？ 高校時代に受けた物理の授業を思い出す方がいるかもしれません。ニュートンやアインシュタインのような有名な物理学者を連想する方もいるかもしれません。科学ファンの方であれば、相対性理論や量子力学をイメージすることもあるでしょう。

私は物理学者で、宇宙物理学や素粒子物理学と呼ばれる分野の研究をしています。特に興味があるのは、「ブラックホールの中はどうなっているのか？」と「宇宙はどうやって始まったのか？」の2つです。

ブラックホールを観測するのは難しい

多くの方がご存じのように、ブラックホールは重力が非常に強い天体で、ひとたび吸い込まれると、光ですらそこから出てくることはできません。

2019年にイベント・ホライズン・テレスコープ（望遠鏡）というプロジェクトによって、ブラックホールの様子が初めて撮影されました。「イベント・ホライズン」とは、「事象の地平線」という意味で、光が脱出できなくなる境界のことです。そこで撮影されたのは、ブラックホールの外側に存在する物質から発せられた光です。ブラックホールを取り囲むように光の輪ができている画像を見たことのある方も多いと思います。

イベント・ホライズン・テレスコープで撮影されたのは、M87という銀河の中心にあるブラックホールです。太陽の65億倍もの質量を持つ巨大なブラックホールで、地球から5500万光年（およそ 5.2×10^{20} km）離れたところにあります。光年とは、真空中で光が1年かかって進む距離のことです（正確には「重力がない」という条件もつきますが、ここでは詳しく述べません）。 10^{20} とは、1000…00のように、1のあとに0が20個続いていることを表します。イベント・ホライズン・テレスコープはM87だけでなく、私たちの太陽系が属している天の川銀河の中心のブラックホールも観測しています。「いて座A*」と名付けられているそのブラックホールは、私たちからおおよそ2万7000光年（ 2.5×10^{17} km）離れています。M87よりはだいぶ近くにありますが、地球と太陽の間の距離（1億5000万 km = 1.5×10^8 km）に比べると、10億倍以上の距離があります。

中心だけでなく、銀河のなかのさまざまな場所にもブラックホールは存在していると考えられています。例えば、歴史上最初に「ブラックホールではないか？」と考えられた天体は「はくちょう座X-1」といいます。はくちょう座の首のあたりにある天体で、そこまでの距離は、およそ6000光年（ 6×10^{16} km）です。いずれのブラックホールも地球の「近所」ではないため、近くまで行って様子を観察することは（少なくともいまの技術では）できません。

仮に近くにあったとしても、ブラックホールの周辺や、その中の様子を調べるのは簡単ではありません。理由のひとつは、ブラックホールに近づくと、その強い重力によって物体が引き延ばされてしまうからです。どういうことか、順を追って説明しましょう。

重力の強さはブラックホールの質量によって変わります。また、重力はブラックホールに近いほど強く、遠ざかるほど弱くなります。この性

質は重力が一般的に持っているもので、ブラックホールの重力に限らず、地球や太陽からの重力も同じです。

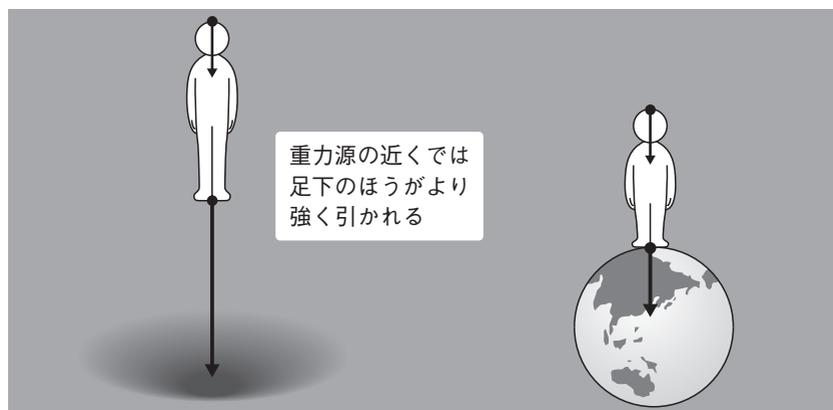
「近いほど強く、遠いほど弱い」というのは、私たちが地面に立っているとき、私たちの頭に働く重力と足に働く重力は強さが違うことを意味します。なぜなら、頭のほうが足よりもわずかに地球から遠いからです。ただしその差は非常に小さいため、私たちがそれを実感したり、それで不便を感じたりすることはありません。

ところがブラックホールでは話が違ってきます。例えば、太陽程度の質量を持つブラックホールの近くではそもそもの重力が強いため、もしあなたがブラックホールの近くに立ったとすると（立てるならば、ですが）、頭に働く重力と足に働く重力の差も非常に大きくなります。

足も頭もブラックホールに引かれることに変わりはないのですが、ブラックホールに近い足が頭より強く引かれるために、足に対して頭が取り残されるようになり、あなたの体は細長く引き延ばされてしまうのです。

ブラックホールの中心へ向かって引き伸ばすこの力を潮汐力ちようせきりょくといえます。ちなみに、細長く引き延ばされるこの現象は「スパゲッティ化」とよばれています。どのくらい引き延ばされるかはブラックホールの質量によりますが、潮汐力が大きければ、体はバラバラになってしまうでしょう。

意外に思われるかもしれませんが、銀河の中心にあると考えられている巨大なブラックホールの場合、その近くでの潮汐力は非常に小さくなります。これは、質量が大きい分、ブラックホールの半径も大きく、重力が強いブラックホールの中心部までの距離もまた大きくなるからです。



●ブラックホールのような強い重力源の近くでは、より重力源に近い足下のほうが強く引かれるため、体が引き伸ばされてしまう……。

□ ブラックホール内部に入れたとしても……

潮汐力がさほど大きくないブラックホールなら、ブラックホールの内部に探査機を送り込める可能性はあります（自分で入るのは誰しもイヤでしょうから、探査機にしておきましょう）。ただ、その場合も問題があります。というのも、せっかく調べたデータをブラックホールの外に送ることができないからです。

データ、すなわち情報は電波で送られますが、電波は「電磁波」という波の一種です。電磁波にはさまざまな種類のものがあり、それらは波の長さ（波長）で分類されています。電波よりも波長が短いものの中には、私たちの目に見える電磁波もあり、それは「可視光」といいます。赤や青など、いわゆる「虹の7色」が可視光です。可視光についてはあとで詳しく説明します。

さて、ブラックホールからは光でも出られないということは前に述べ

た通りですが、それは同じ電磁波の一種である電波も同様で、ブラックホールからは出てこれません。このため、せっかくブラックホール内部を詳しく観察することができたとしても、その情報を外へ送ることができないのです。ブラックホールの内部構造についてはわかっていないことがまだ多いのですが、相対性理論に基づく計算からは、ブラックホールに吸い込まれた物質は、中心に向かって引き寄せられていくという結論が得られています。引き寄せられたその先、すなわちブラックホールの中心には、物質の密度や圧力が無限大になっている「特異点」という場所がある可能性があります。

物理的に自然な仮定を置くと、ブラックホール内部には必ず特異点が存在することを相対性理論を用いて証明したのがロジャー・ペンローズです。この「特異点定理」をはじめとするブラックホールの理論的研究への貢献で、ペンローズは2020年のノーベル物理学賞を受賞しました。ちなみに、ペンローズが行なったのは相対性理論に基づく解析なのですが、ブラックホールの中心部では相対性理論では解析できないような現象が起きていて、特異点は存在しない可能性もあります。いずれにせよ、ブラックホールの中について知るのとは簡単ではなく、その方法を考えること自体が研究テーマになります。

□ 「宇宙の始まり」の前？

私のもうひとつの興味は、先ほども述べた「宇宙はどうやって始まったのか？」です。「宇宙の始まり」という言葉には魅力的な響きがあり、世界中で精力的に研究されているのですが、実はその「誕生」の瞬間そのものについてはほとんど何もわかっていません。

いくつかの観測により、宇宙はいまからおよそ138億年前に始まったと考えられています。そのように聞くと、「宇宙が138億年前に始まったというのなら、その前は何かだったのか？」ということが気になる方も多いのではないのでしょうか？ 宇宙があるとき始まったのであれば、その前には宇宙はなかったこととなります。「なかった」というのは、宇宙ではない、別の何かがあったということなのでしょう。だとするならば、それは何なのでしょう？ そしてその「何か」は、いつ、どうやって始まったのでしょうか？

これに対する、現時点での回答のひとつに、

「宇宙が始まったときに時間も流れ出したので、それより以前というものの自体がない」

というものがあります。煙に巻かれたような、ごまかされたような気がする方がほとんどではないのでしょうか？ 私たち研究者でも、この説明を理屈としては理解できても、体感として納得している人はほとんどいないのではないかと思います。「時間が流れていない状態というのはこんな感じか！」と、体感したことがある人はどこにもいないからです（たぶん）。実のところ、本当にこの答えで正しいのかどうかはよくわかっていません。あくまでいまのところはそう考えるしかないという程度のもので、これを検証する方法も明らかではありませんし、今後の研究で違った説明が出てくる可能性もあります。

このように、「宇宙はどうやって始まったのか？」とか「ブラックホールの中はどうなっているのか？」という、ある意味素朴な疑問については、まだわかっていないことだらけなのですが、逆にそれ以外のことについては、たくさんの方がわかってきています。例えば、宇宙が生まれてから3分くらい経った時期から現在までについてはよくわかってきていますし、ブラックホールについても、先に述べたイベント・ホライズ

ン・テレスコープで撮影されたブラックホール周辺の様子は、相対性理論から予想されたものと非常によく一致していました。

ブラックホールといえば、2015年には、2つのブラックホールが合体したときに放出される重力波が検出されたことをご存じの方も多いでしょう。重力波は「時空のさざ波」ともいわれますが、このさざ波の様子も、相対性理論を駆使して計算された予測とよく合っていました。この本の「表面的な」目標のひとつは、なぜそうしたことがわかったのか、そして、まだわかっていない「素朴」な疑問についてはどんなアプローチがなされているのかをお伝えすることです。そして、この本にはもうひとつの目標があります。

□ 物理はとっつきにくい？

本書のように宇宙やブラックホールについて書いた本はたくさんあります。現場の熱気がよく伝わってくる本や、研究の歴史を概観した労作、さらには初心者にもわかりやすくメカニズムを解説した本など、良書は数え切れません。それらに対し、この本のもうひとつの大事な目標として私が目指したのは「物理の考え方」を伝えることです。「物理のやり方」といってもよいかもしれません。ブラックホールや宇宙の始まりといった話題をより深く理解し、楽しむためには「物理の考え方」や「物理とはどういう学問なのか」を知っておく必要があるからですが、残念ながらそうした「物理の本当の基礎」はあまり知られていません。

私が所属している東京学芸大学は教員養成系の大学で、学生の多くは小中高校の教員を志しています。私の研究室の学生も、半数以上は小中学校の理科の先生や、高校の物理の先生を目指しています。将来教員になるにあたり、理科や物理について深く理解しておくことは当然必須で

すが、同時に「伝え方」についても習熟しておかなければいけません。特に物理は、他の科目に比べ、苦手意識を持つ生徒が多い科目です。

多くの人が物理に苦手意識を感じる理由はいろいろあるのですが、大学や高専の授業、一般の方向けの科学講座を通じた調査で共通してあげられたのは、

- 力やエネルギーなど、目に見えないものを扱っているのだからわかりにくい
- 数式が多く、何をやっているのかわからない
- 摩擦のない場合など、非現実的な設定が多いため想像しにくいし、現実とは関係のないことをやっているように思える
- 坂道を下るボールの速度や、バネにつけられたおもりの振動など、扱っているテーマが地味で興味を持ってない

などでした。これらは私自身の学生時代の経験からも、どれも納得がいくものばかりです。

□ 物理ではなぜ数式を使うのか

物理ではなぜ数式が多く登場するのか、そしてそれがどれだけ意味のあることかについて、私は拙著『ブラックホールと時空の方程式——15歳からの一般相対論』（森北出版）の中で説明しました。ブラックホール時空を表す数式から出発して、それを理解するために必要な物理学や数学を少しずつ集めるというスタイルで、数式を使って宇宙やブラックホールを「記述する」とはどういうことかを書いたものです。

数学と物理は切り離せない関係にあります、「物理 = 数学」というわけではありません。「物理は目に見えないものを多く扱うから難しい」という意見もありましたが、数学はそうした「見えない世界を観る」ときに強力な武器になります。私たちの直感の先へ行くための道具です。

「見えない世界を観る」ための方法は、数学以外にもあります。それらもすべて「物理の考え方」ですが、この考え方に慣れるまでは時間がかかります。なぜなら、普段私たちは「物理の考え方」をしないからです。例えば、机の上に置かれた物体には地球からの重力が働いていますが、「物体が机の中にめり込んでいかないということは、机からも重力と釣り合うような上向きの力（垂直抗力といいます）が働いているはずだ」とは考えないですよね？ ようは、「言われてみれば確かにそうだ」という程度のことなのですが、どんなことにも慣れというのは必要で、たとえ簡単なことであっても、初めて出会うときはしっくり来ないものです。ひとたび慣れてしまうと、「物理の考え方」には飛躍がなく、自然な考え方であるということもわかるのですが、残念ながら学校の授業や受験勉強の中だけでその考え方に慣れるのは難しく、慣れる前に物理から離れてしまう方がほとんどです。

□ 物理では非現実的なことを考えている？

物理に抵抗を感じる原因のひとつに、「非現実的な設定が多い」という意見もありましたが、たしかに物理では、「摩擦は無視するものとする」とか、「地球を密度が一定の球と仮定する」といった単純化を行なうことがしばしばあります。

もちろん摩擦がまったくないことなど現実にはあり得ませんし、地球

の密度も一定ではありませんから、大学以降はそうした現実的な設定で計算します。ところが、物理をある程度専門として使う方以外は、入試で問われるような単純化された状況設定にしか出会いません。「物理ではいつも非現実的な設定を考えている」と誤解する方がいても、無理もないと思います。

入試などで単純化した状況設定を考えるのは問題を簡単にするためですが、単純化や理想化そのものは、自然現象を理解するうえでとても有効な方法でもあります。なぜなら、一見複雑に要素が絡み合っているような現象も、ほとんどの要素はあまり大きな寄与をせず、幹となるメカニズムさえ取り出せれば現象の本質を説明できる場合が多々あるからです。そうした単純化や理想化は「うまいモデル化」であり、非現実的な設定どころか、本質をよくわかっているともいえるのです。

□「身の回りのもの = 身近なもの」とは限らない

また、「物理には非現実的な設定が多く、実生活につながっている感じがしない」ことから、物理が好きでなくなってしまう人もたくさんいます。これを防ぐため、身の回りの現象と結びついた例題を授業で取り上げるといった工夫もされています。しかし、身の回りの現象を取り上げることで物理が好きになるか（せめて嫌いにならないか）どうかはわかりません。身の回りの現象を取り上げれば物理が役に立っていることは実感できますが、それに興味を持つかどうかはまた別の話だからです。

これは物理嫌いの学生から聞いた話ですが、高校の物理の授業で、「ボウリングの球にピンポン球を当てて止めるには、どのくらいの速さのピンポン球を当てればよいか」という問題を出题されたことがあったそうです。ピンポン球はボウリングの球に比べてとても軽いため、ぶつけて

もボウリングの球の勢いはなかなか減少しません。もちろん、ボウリングの球の速さやその回転の様子、ピンポン球がぶつかった際にへこんだかへこまなかったかななどにもよりますが、いずれにしても、ボウリングの球を1回の衝突で止められるほどのピンポン球となると、相当の速度が必要です。

これは「運動量保存則」に関する問題です。運動量とは、物体の運動の勢いを表す物理量で、物体の質量と速度をかけたものです。運動量には「衝突の前後で、衝突する物体が持つ運動量の合計は変化しない」という性質（運動量保存則）があります。この性質と、ピンポン球の跳ね返り方を考慮すると、衝突後の物体の速度を求めることができます。

私にこのエピソードを教えてくれた学生は、「ボウリングの球を止めるのに必要なピンポン球の速さは人間が投げられるようなものではなかったし、そんな非現実的なことを考えて何になるのかと白けてしまった」と言っていました。ちなみに、私が適当な値を仮定して計算してみたところ、時速数万kmという答えが得られました。たしかに人間が投げられる速さではありませんし、この速さに耐えられるピンポン球もなさそうです。

運動量は物理のさまざまな分野で顔を出すのですが、小中学校では学習しません。そのため質量や速度、エネルギーといった量に比べると、あまり知られていない量です。そこでその先生は、少しでもイメージを膨らませてもらうと、ボウリングの球とピンポン球という、よく知られたものを取り上げたのだと思います。

ところが、身の回りのものを取り上げても、そこで教員が面白いと感じていることや、重要だと考えていることに共感してもらえなければ、

「どこか遠いところの話」にしかならないのです。これが野球のボールとテニスのボールだったとしても状況は同じだったはずで、学生からは「で？」という反応しか返ってこないと思います。「身の回りのもの」だからといって、気持ち的に「身近なもの」とは限らないのです。

□ 物理の面白さとは何だろうか

いろいろなところで言ってきたのですが、かつて私はお笑い芸人になるか、物理学者になるかを真剣に悩んだ人間です。だからというわけではありませんが、どんな話題が人を惹きつけ、逆にどんな話題には興味を持ってもらえないかがいつも気になっていました。

若いころは物理の本質とは違うところでウケを狙っていたこともありますが、多くの知識や経験を得たいまは、「物理そのもの」で勝負したほうが、学生や科学イベントに来てくれる方に楽しんでもらえることがよくわかりました（勢いだけで勝負できる年齢ではなくなったというのがあります……）。

その点では、宇宙にまつわる話題はうってつけです。私は、一般向けの講演会やイベントを数多くやらせていただいています。そうした中で「宇宙は好き！ でも物理や数学はちょっと……」という方に山ほど出会ってきました。むしろそうした方のほうが多いように感じます。

しかし、宇宙の始まりやブラックホール、次元や時空といった事柄と、学校で学ぶ物理は、実はシームレスにつながっています。私自身、それがはっきり見えるようになったのは、大学院に入り、深く物理学と付き合い合うようになってからですが、「宇宙の始まり」や「ブラックホールの中」といった「遠くの世界」で起きる現象が、身の回りで見かける現象

と本質的に同じであることがわかったときは、世界が変わって見えたような気がしました。

その具体例をこれからお話ししていきますが、この「世界の見え方が変わる体験」は、物理学に限らず、何かを学ぶ醍醐味ともいえるものです。せっかく学校でその入口まで来ているのに、その先の面白い世界を味わうことがないのは、たいへんもったいないと思うのです。

本書を通じてそうした「世界の見方が変わる体験」をしてもらい、そしてその「ついで」に、宇宙やブラックホールにも詳しくなってもらえれば、この本の目的は達成されたこととなります。1.1節から3.4節では、すべての節で小中高のいずれかで学ぶ基本的な物理の内容と、それらに関係した、発展的で宇宙にまつわるトピックをセットにしました。3.5節と第4章は、そこまでのまとめと、発展的な内容です。それぞれの節が（ほぼ）独立しているので、どこから読んでもらってもよいと思います。楽しんでいただけたら幸いです。