

特集 2

ブラックホールをどう説明するか

～一般相対性理論から見るブラックホール～

市川京佑 (静岡大学)

1. はじめに

アインシュタインは 1915 年、重力の正体を空間のゆがみとする一般相対性理論を発表しました。その発表のわずか 2 か月後に、シュバルツシルトがブラックホールを表すシュバルツシルト解を発見しました。その後、ブラックホールの正確な意味を示したのがペンローズで、「ブラックホール形成が一般相対性理論における自然な帰結となることの発見に対して」、2020 年のノーベル物理学賞を受賞しました[1,2]。

ちなみに、ゲンツェルとゲズは、いて座 A* と呼ばれる銀河系中心の周りを回る天体の軌道を高精度に決めることで、いて座 A* が超大質量ブラックホールであることを観測的に示した業績で、ペンローズと同時にノーベル物理学賞を受賞しています[1,2]。

このように、天文学的にも重要なブラックホールに対して、多くの子どもたちが、興味・関心を持っています。例えば、「ブラックホールってなにか」とか「ブラックホールの中に入るとどうなるの」など、学校や科学館などで、よく質問される天体になっています。最近のノーベル物理学賞の受賞などで、ますます、ブラックホールについての質問が増えるでしょう。一方、質問を受ける私たち大人は、ブラックホールについて良く理解し、子供たちにわかるように説明する必要がありますが、このためには、いくつもの困難があります。

そこで、本発表では、(1) ブラックホール解の一つであるシュバルツシルト解を自ら導出して、その過程で難しいと感じた点を明らかにする、(2) ブラックホール (の数理と

物理) をどのように説明すればよいか検討する、(3) 子供たちへの説明と同時に、大人自身の理解や学習のための仕組みを考えてみることにした。

2. ブラックホールの理解のために

2.1 シュバルツシルト解の導出

一般相対性理論から導き出されるアインシュタイン方程式から、球対称かつ静的の状況に限定した真空解 (シュバルツシルト解) を導出してみよう[3,4,5]。アインシュタイン方程式はこのように書ける。

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

ここで、左辺は時空の曲率 (曲がり具合) を示す量であり、右辺は物質場の分布を表す量である。すなわち、(時空の曲がり具合) = (物質分布) という方程式である。

中心に質量 M の質点をおき、球対称・静的でかつ無限遠で平坦となる条件で、アインシュタイン方程式を解くと、極座標では、

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{r_s}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

上記のように書ける。これをシュバルツシルト解という。ここで、 $r_s \equiv 2GM/c^2$ がシュバルツシルト半径である。 r がシュバルツシルト半径 r_s に近づくにつれて、 dr^2 の係数が発散する。さらに、シュバルツシルト半径の内側から外側には光が到達できない境界面となっている。この内外を分けている境界面を「ホライズン」と呼び、このようなホライズンを持つ天体がブラックホールと呼ばれている。

2.2 理解の難しい点

私自身が理解に苦しんだ点を挙げてみよう(多くの方と共通していると想像している)。

第1に数学の複雑さです。曲がった時空を取り扱うため、物理的な内容以上に数学の複雑さがあり、実際の数式の導出には、高校数学以上の知識と根気強さが必要でありました。また、計算で使用する座標系により、見かけ上の発散が生じるなど、数式と物理現象の間の解釈を妨げるような状況が生じます。

第2に、観測者の立場によって、時間の進み方が異なる点です。例えば、「ブラックホールの外側から見ると、ホライズンの近傍の時間の経過がとても遅い」など、観測者の位置や運動の様子をはっきり区別しないと、物理的な解釈に混乱が生じる点です。

第3に、私たちの日常経験できないような現象が起きるので、経験をもとにした解釈ができない点です。

2.3 理解のための提案

先の2,3の問題点に対して、アニメーションやドラマを利用することを考えてみましょう。例えば、姿がそっくりな双子の片方がロケットに乗り高速移動して地球に帰ってくる。地球で暮らしているもう片方と再会時の姿にどのような変化があるかをシミュレーションしてアニメーション化します。すなわち、非日常的な現象の理解のために、アニメーションやドラマなどで疑似体験してもらおうというアイデアです。

一方、1の数学の問題など、理解に多くの学習が必要な場合は、その学習をサポートする学習アドバイザーの設置を提案します。今の時代スマホ一つでだれとでもつながることができます。だから、自学中に疑問に思ったら、そのことに関して直接聞くことができるシステムの構築することで、説明する大人の学習にも対応可能になると考えるのです。

3. おわりに

子どもたちが興味を持つ内容は、必ずしも簡単なことばかりではありません。説明のためには、多くの専門的な知識や学習が必要になります。今回、子供たちや解説しようとする大人たちの「知りたい、理解したい」という前向きな気持ちをどのようにしたらサポートできるか考えてみました。この一例として、今回はブラックホールの説明方法について考察してみました。これらは、いろんな分野でも適用できるでしょう。今後、私は、地方自治体の職員として、「誰もが学びたいときに学ぶことができる環境を構築する」をテーマに、積極的に進めていきたい。

参考文献

- [1] The Nobel Prize in Physics 2020
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/summary/>
- [2] 真貝寿明 (2020) 「ブラックホール」でまとめたノーベル物理学賞」論座
<https://webronza.asahi.com/science/articles/2020101000005.html>
- [3] 小林晋平 (2018) 『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.
- [4] ジェームズ B ハートル著 牧野伸義訳 (2016) 『重力 アインシュタインの一般相対性理論入門』, ビアソン・エデュケーション.
- [5] 編者 : 観山正見、野本憲一、二間瀬敏史 (2008) 『天体物理学の基礎 2』, 日本評論社.



市川 京佑