

私の講義に対して、たくさんの「リアクション」を頂き、ありがとうございました。講義の中で、「高エネルギー天文学」に関する問題を20問、出題しました。ぜひ、皆さんには、そのすべてに正しく回答できるようになって頂きたいと思っています。その問題と解答も含め、「板書」した講義ノート（関連するサイトへのリンク付き）を、私の研究室 HP 下で公開しましたので、それを参考に復習してみてください¹：

<https://www.isas.jaxa.jp/home/ebisawalab/ebisawa/TEACHING/20231027Rikkyo.one> (OneNote)

<https://www.isas.jaxa.jp/home/ebisawalab/ebisawa/TEACHING/20231027Rikkyo.pdf> (PDF)

以下、頂いたいくつかの「リアクション」に対して、コメントします。同様のリアクションはまとめて要約し、ゴシック太字で示しています。

1 自然界における三つの定数についてのリアクション

- 多くの方から、光速、万有引力定数、プランク定数の三つだけで宇宙のすべてを表せることを初めて知った、それが面白いと思った、というようにリアクションを頂きました。そうなんです、高校の物理の教科書にも出てくる c , G , h (または $\hbar \equiv h/2\pi$) の3つだけで、宇宙のすべてが記述できちゃうんですよ。それって、すごいことだと思いますか？ その驚きが伝われば本望です。
- その三つの定数をすべて組み込んだ量子重力理論 (TOE; Theory of Everything) がどのようなものなのか気になり、自分で調べてみようと思った。いいですね、調べてみてください²。量子重力理論 (=重力場の量子化) は、素粒子間の重力が無視できないような状況で「のみ」、必要になります。自然界においてそのような状況にあるのは、「ブラックホールの中心」と「宇宙の誕生時」という特異点だけです、その二つを説明できないと、宇宙のすべてを説明したことにはなりませんね。「重力場の量子化」を定式化することは、人類が100年以上必死で取り組んできて、まだ解決できていない大問題です。
- 高校の時に今回の内容を聞いていたら、さらに、物理学に興味を持つ人が増えるのではないかと感じた、というようにリアクションを頂きましたが、嬉しい言葉ですね。私もまさに同じように感じています。高校物理の段階で、自然界全体、宇宙全体を見渡すような授業ができればいいですね。私も出身校で、そのような講義をしようと考えているところです³。
- 電磁気学も、時間、長さ、質量だけで記述できるのだろうか？ いい質問ですね。電磁気学ではいくつかの異なる単位系が使われますが、素粒子論などでは「自然単位系」を使うことが多いです。そこでは、距離 r だけ離れた二つの電荷 q_1, q_2 の間に働く力 F を表すクーロンの法則は、以下のように書けます⁴：

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

単位 (次元) を書き出すと、力は、質量 × 加速度 = 質量 × 長さ / (時間)² なので、 $q_1 q_2$ は、質量 × (長さ)³ / (時間)² という次元を持つことがわかります。よって、電荷と磁荷は、(質量)^{1/2} × (長さ)^{3/2} / 時間という次元を持つことになります。電荷や磁荷の大きさを、 $[\text{kg}^{1/2} \cdot \text{m}^{3/2} \cdot \text{s}^{-1}]$ という見慣れない単位で表せる、っていうことです。皆さんが慣れ親しんでいる MKSA 単位系ではアンペア、ボルト、ワットなどの単位が出てきますが、それらは電気を利用した日常生活に便利な単位を導入しているわけで、自然界を記述するためには必要ないものです。自然界 (宇宙) において、すべての物理量は、質量、長さ、時間の組み合わせで記述できることを覚えておいてください。

¹講義のペースが速すぎた、というリアクションもありましたので、時間をかけて復習してください。ついでに私の研究室の大学院生たちの楽しそうな様子も見ていってくださいね。 (<https://www.isas.jaxa.jp/home/ebisawalab/ja/diary/>)

²ただし、成果が得られず、一生を棒に振る危険性もあるので、十分にお気を付けて…。私が京大の学部生の時、量子力学の「観測問題」の大家の先生が、若いうちからそういう「哲学的な」テーマには取り組まないほうが無難だって、仰ってました。その気持ちはよくわかります。若手研究者は、まず具体的な問題を解いて、目に見える成果をあげないと。

³神奈川県立厚木高校の SSH 運営委員をやっています。

⁴右辺に係数がないことに注意してください。磁荷で考えても同じ式になります。自然単位系では、電荷と磁荷は同じ単位になります。

- c, G, \hbar の三つを使って、 $(\hbar G/c^5)^{1/2}$ の単位が時間となったが、それは物理的意味を持つのか？はい、それがプランク時間、 $\sim 5 \times 10^{-44}$ 秒ですね。自然界における時間の単位です。
- プランク長やプランク時間が、なぜ自然界で最小の長さ、時間であると言えるのかわからなかった。「最小」という説明はあまり良くなかったかもしれません。時間を秒で表したり、長さをメートルで表すのは、たまたまこの地球に住む人間が勝手に決めたことですよ⁵。いっぽう、 c, G, \hbar は自然界に備わっているものなので、それを基準にした、宇宙で普遍的な単位系を考えることができます。つまり、 $c = G = \hbar = 1$ としてしまう、と。そうすると、プランク時間 ($\sqrt{\hbar G/c^5}$)、プランク長 ($\sqrt{\hbar G/c^3}$)、プランク質量 ($\sqrt{\hbar c/G}$) はどれも 1 になり、これらを自然界における時間、長さ、質量の普遍的な単位と考えることができます。
自然界において、時間と長さに関しては普遍的な単位より短い時間、長さというのは考えにくいですが、質量については下限はありません。光子のように質量がゼロの素粒子が存在するので。

2 ブラックホールに関するリアクション

- ブラックホールへの質量降着におけるエネルギー効率が核融合エネルギーと比較するととても大きいことに驚きました、という反応はいいですね。宇宙における高エネルギー現象の主な起源が、ブラックホールへの質量降着による重力エネルギーの解放であることを覚えておいてください。
- 銀河の中心にそんなに巨大な質量のブラックホールがあると 中心近くの星々はどんどん吸い込まれていつか銀河の相当量の星が吸い込まれてしまう ということはあり得ないのですか？ はい、普通にあります。銀河中心の超巨大ブラックホールは、周辺の星や物質を吸い込んで、その質量を増やしていきます。宇宙の進化とともに超巨大ブラックホールがどのように成長してきたかを調べるのは、現代天文学の主要テーマの一つです。
- ブラックホールの半径を表すシュバルツシルト半径が光速の関数 になっているのが不思議に感じた。強い重力によって光速に近い運動が生じるような状況は、一般相対性理論で説明され、そこには c と G が現れるのでしたね。質量 M の天体の半径 R を小さくしていくと表面重力は強くなり、そこから脱出するのに要する脱出速度 $\sqrt{2GM/R}$ は大きくなっていきますが、決して光速は超えられない。その限界に対応する半径が、シュバルツシルト半径 $2GM/c^2$ に対応しているのです。よく覚えておいてください。これが自然界の法則なので、アタリマエといえばアタリマエですが、不思議と言えば不思議でしょうか⁶。
- ブラックホールは観測することができない上にシュバルツシルト半径は測ることができないのに、なぜ計算する必要があるのか、というようなリアクションがありました。ブラックホールのシュバルツシルト半径は観測から決定できますよ！講義でも紹介しましたが、Event Horizon Telescope チームは、M87 という活動的銀河中心のブラックホール周辺に光のリングを観測しました⁷。このリングの半径は、これ以上光がブラックホールに近づけないという、“photon capture radius” に対応しています。一般相対性理論を使って計算すると、それは $\sqrt{27}GM/c^2$ になります (シュバルツシルト半径の $\sqrt{27}/2$ 倍ですね)。光のリングの観測から photon capture radius を測定し、M87 までの距離を用いて実際の半径に直すことによって、ブラックホールの質量を太陽質量の 70 億倍と決定することができました。

3 宇宙論に関するリアクション

- 近年の研究の進展により、宇宙の年齢が、137 億年から 138 億年に更新されたということだが、その違いは誤差の範囲内ではないのか？ それで研究の精度が高くなったと言えるのか？ 重要なポイントですね。リアクションありがとうございます。講義では述べませんでした。補足しておきます。宇宙の年齢は、宇宙背景黒体放射 (約 2.7 K) の場所による「温度揺らぎ」の測定を宇宙論モデルと比較することによって、決定されます。その測定精度が、新たな装置により、どんどん良くなってきているわけです。WMAP 衛星による 2013 年の論文では、宇宙の年齢は、

⁵ 「秒」と「メートル」は、それぞれ一日の長さ (=地球の運動)、地球の大きさを基準として定めたことを思い出してください。

⁶ それを言ったら、自然界、全部不思議ですよ。なぜ宇宙があって、私たちがいるのでしょうか？

⁷ <https://www.doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>

137.72 ± 0.59 億年⁸。Planck 衛星による 2020 年の論文では、138.30±0.37 億年です⁹。両者が誤差の範囲で一致していること、後者の方が誤差が小さくなっていることに注意してください。このように、観測の精度が上がっていくと、宇宙を記述する物理量の誤差がだんだん小さくなっていくのです。将来的には、宇宙の年齢もより正確に決定されるはずで

- 宇宙背景放射の観測スペクトルをみて、黒体輻射の理論値だと思ったが観測値であることを聞き驚きを隠せなかった。物質と輻射が熱平衡状態にあるときに放出されるのが黒体輻射、というのは大学二年生くらいで習うんだっけ？宇宙初期ほど、物質と輻射が完全な熱平衡状態にあったときはなかったから、宇宙背景放射が完全な黒体輻射であるのはアタリマエなんだけど、やっぱり、これだけ理論と観測が一致すると、驚きますよね。まあ、ここまできちんと物理学を確立し、技術を進歩させて、人工衛星から精密な測定を実施した人類がよく頑張った、ということだ。
- JAXA の衛星 LiteBIRD が世界で初めて B モード偏光の観測ができれば、インフレーションの証拠になるということだが、どうやってそれを裏付けることができるのか気になった。宇宙誕生時のインフレーションによって、「原始重力波」が発生したはずで、それを直接観測できれば、もっとも確実なインフレーションの証拠になります。しかし、その検出は技術的に大変難しい。もし実現するとしても、30 年以上は先だろうなあ。原始重力波は、宇宙背景放射光に特徴的な B モード偏光のパターンを刻み込んだと考えられています¹⁰。インフレーションを起源とする、宇宙背景放射光中の B モード偏光の強さは、「テンソルスカラー比」と呼ばれる観測可能な物理量 (小文字の r で示されることが多いです) で表されます。インフレーションモデルは、 $r \approx 0.01$ を予言していますが、最新の観測・解析では、その上限値だけが得られていて¹¹、 $r < 0.037$ 。つまり、現状では、インフレーションがあったともなかったとも、言えない。LiteBIRD では、確実に $r \approx 0.01$ を検出するために、 $\delta r < 0.001$ 以下の誤差で r を精密測定することを目指しています。

4 シンクロトロン放射に関するリアクション

- シンクロトロン放射が意図的に幅の広い波長範囲の電磁波を発生させる機構が面白いと思った。人工的にシンクロトロン放射光をどのように発生させているのでしょうか？電子が加速度運動をすると、電磁波が発生しますね。携帯電話でも、その中にアンテナがあり、そこに電流を流すと、電子が加速度運動をしたことになって、電波が発生するわけです。電子が円運動したときに発生する電磁波が「サイクロトロン放射」。大きなリングを作って電子に円運動させて、磁場を利用してどんどん加速して行って、その速さが光速近くになったときに発するのが「シンクロトロン放射」です。
- シンクロトロン放射施設が日本にいくつも存在することは知らなかった¹²。いつか兵庫県にある Spring8 に行ってみたい。Spring8 を始めとするシンクロトロン放射施設は、様々な産業分野に広く応用されています。また、巨大施設で多くの人を要するので、天文学や物理学を学んだ人の就職先の一つでもあります。この講義を受講している方の多くは、将来なんらかの科学技術の分野に進まれることと思いますが、シンクロトロン放射施設で働いたり、それを利用したりする機会があるかもしれません。

5 JAXA に関するリアクション

- 研究室の大学院生には重要な物理定数を暗記するよう言っていると仰っていましたが、JAXA で大学院生が研究しているということですか？はい、そうですよ！ISAS の教育職員は、JAXA 職員ですが、総研大や東大を始め様々な大学院の教員を兼ねています。ISAS では、常にやる気のある大学院生を募集していますので、宇宙科学に興味がある方はぜひ大学院に進学して、ISAS/JAXA で研究することを検討してみてください。お待ちしております。

⁸<https://www.doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/20>

⁹<https://www.doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>

¹⁰その機構をちゃんと理解するには、どうしても一般相対性理論と宇宙論の専門的な勉強が必要になります。興味のある方は勉強してみてください。

¹¹<https://www.doi.org/10.3847/1538-4357/ac9ea3>

¹²東北大学で、新しいシンクロトロン放射光施設を作るみたいですよ：<https://www.sris.tohoku.ac.jp/outline/facility/>