

まずはじめに、タブレットとPCの接続に遅延があって、手書きの板書 (=OneNote の描画機能) がうまくいなくて、大変失礼しました。昨年度の講義はリモートでスムーズにできたのですが…。久しぶりに対面の講義で、慣れない機器を使ったせいかも知れませんが、十分リハーサルしておくべきだったと反省しています。しかし、みなさんの解答とリアクションペーパーを見て、大体講義内容を理解してくださっていることが分かり、安心しました！講義の中で、問題を20問、出題しました (昨年度とほぼ同じです)。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が、問題と解答も含め、板書した講義ノート (リンク付き) を、私のHP下から公開していますので、ぜひ時間をかけて復習してみてください。高エネルギー天文学に対する理解が深まると思います：

<https://www.isas.jaxa.jp/home/ebisawalab/ebisawa/TEACHING/20232024Rikkyo.one> (2023/2024年度 OneNote)

<https://www.isas.jaxa.jp/home/ebisawalab/ebisawa/TEACHING/20231027Rikkyo.pdf> (2023年度 PDF)

以下、順不同に、頂いたリアクションにコメント、あるいは質問に回答します。また、昨年度のリアクションペーパーに対するリアクションも私のHPから公開しているので、参考にしてください。

- ノーベル賞の対象となった研究の解析記事がノーベル賞委員会から公開されていることを知らなかった。
<https://www.nobelprize.org/> 以下の解説記事等は大変役に立つので、ぜひ活用しましょう²。講義では触れられなかったが、今年のノーベル物理学賞にはビックリしましたね。まさか AI(人工知能) が物理学賞の対象になるとは… (こりゃ物理じゃないだろ!)。私はある意味、そこに現代物理学の行き詰まりを感じてしまいました。重力場の量子化は100年以上かかってもまだできないし、ダークマター³の発見から40年くらい経っても、その正体がわからない。そこに「ダークエネルギー」まで出てきて (2011年のノーベル物理学賞)、ますます物理学 (だけ) では自然界のことがわからなくなってきた、みたいな…。
- 宇宙背景黒体放射が偶然発見されて、それでノーベル賞を受賞したことが面白いと思った。
他にも、1974年のノーベル物理学賞 (の半分)、パルサー⁴の発見も偶然です。また、1993年のノーベル物理学賞は、連星パルサーを長期的にモニター観測していたら、なぜか公転周期がだんだん短くなっていること (=連星間の距離が短くなっていること) に気づいた⁵。それが、「重力波」によるエネルギー放出の理論予測とぴたりと一致した (=重力波の間接的発見)、と言うものです。そういう思いがけない発見があるから、天文学は面白いですね。
- 太陽は超新星爆発を起こしますか？
起こしません。星の一生は、その質量で決まります。太陽質量くらいの軽い星は、やがて (あと50億年くらい)、低温で大きく膨れた赤色巨星となり⁶、その後、芯だけが白色矮星として残ります。恒星の進化は、原子核物理学の応用で、天文学の中でも十分に理解されている分野です。講義でも紹介した、天文学辞典の記述を参考に。ノーベル物理学賞では、1983年の授賞が、星の進化に関連したものです。
- 可視光の天文学と比較して、電波天文学や X 線天文学は比較的新しい学問ですか？
その通りです。目で見て星の運行を調べたり、星の発生を記録したりする天文学は、文明の黎明期から存在していました。電波が発見されたのは19世紀、太陽を始めとする天体が電波を放射していることがわかってきたのが、20世紀です。第二次大戦後、アンテナや受信機の技術的進歩によって、宇宙からの電波観測の精度が上がり、電波天文学が発展してきました。1974年のノーベル物理学賞 のもう半部分が、電波天文学の技術的発展に対する貢献です。宇宙からやってくる X 線を観測するには大気圏外に出ないといけないので、X 線天文学の発展には宇宙開発の進歩を待たなくてははいけませんでした。1962年、観測ロケットで、偶然、全天で一番明るい X 線天体「さそり座 X-1」をとらえたのが、「X 線天文学」の始まりです (2002年のノーベル物理学賞の半分)。1970年、X 線天文学衛星 Uhuru の打ち上げによって、X 線天文学は飛躍的に発展しました。その後、ロケット技術の向上により、よ

¹URLにはリンクを貼ってあります。頂いたコメントまたは質問はゴシックにしています。同様のコメントや質問は、一つにまとめました。

²ここでは、そこから、本講義に関連した過去の様々な授賞を紹介することにします。

³2019年の物理学賞の半分はダークマターに関連しています (それだけじゃないけど)。もう半分は太陽系外惑星の発見。

⁴回転しながら周期的な電磁波を放出している中性子星。

⁵ニュートン力学ではこのようなことはありえないことに注意してください (中心力場ではエネルギーが保存される)。一般相対性理論によって重力波の存在がわかり、こういう現象が理解できるようになったのです。

⁶膨れた太陽大気の摩擦の影響を受けて、地球は太陽に落ちてしまうでしょう。50億年後のことなので、恐がらなくてもよいですが。

り大きく重い衛星を打ち上げ、より高性能な装置を搭載できるようになるにつれて、ますます発展してきたわけです。その最先端が、JAXA が 2023 年に打ち上げた XRISM 衛星、というわけです。

さらに、近年の技術の発展により、あまりにも弱くて検出するのが難しい信号、宇宙からやってくるニュートリノや重力波を捉えることによって宇宙現象を研究する「ニュートリノ天文学」や「重力波天文学」がはじまりました。2002 年のノーベル物理学賞の 1/4 は太陽からのニュートリノの発見 (1950 年代から実験開始)、1/4 は、超新星爆発時のニュートリノの検出 (1997 年) です⁷。そして、2015 年、アインシュタインがその存在を予言してからちょうど 100 年後、ついに重力波が直接検出され、それが 2017 年のノーベル物理学賞の対象になりました。

- ブラックホールは可視光では見えないが、X 線で見えると思ってよいですか？

ちょっと違いますかね。ブラックホール自身は電磁波を出さないの、X 線でも見えません。ブラックホールに物質が落ち込む際、ブラックホール周辺に形成される降着円盤が電磁波を放出し、それが X 線や電波を放出するので。どのような電磁波を強く放出するかは、降着円盤の物理状態に依ります。1000 万度以上の高温だったら X 線で明るく光ります (白鳥座 X-1 など)。低温で、比較的強い磁場があれば、シンクロトロン放射によって、電波で明るく観測されます (EHT による M87 など)。

- ブラックホール連星や巨大ブラックホール (活動的銀河中心核) が重力エネルギーを解放して強い X 線源になることは分かりました。ではなぜ銀河の集団である銀河団が X 線を放射するのですか？

Good Question です (:) 銀河団内に、X 線を放射する 1000 万度以上の高温プラズマが束縛されているからです。高温プラズマ中のイオンと電子は激しく熱運動しているので、強い重力がなければ、散逸してしまいます。銀河団内、可視光では何も無いように見える銀河間空間にダークマターが存在し (その質量は光っている物質の 10 倍以上です)、その強い重力で高温プラズマを束縛しているのです。逆に、X 線で銀河団を観測することにより、ダークマターの分布や、高温プラズマの起源を調べることができます。こちらの解説記事がわかりやすいかも。

- 望遠鏡や観測装置を自分で作って、先端的な天文学研究を行うことはできますか？

はい、テーマによっては可能です。天文衛星は数 100 億円以上のプロジェクトで、なかなか実現するのが大変です。また、大きなプロジェクトの中では個人個人の貢献は見えにくく、自分の好きな天体を観測する時間をゲットするのも困難です。それよりも、手作りで自分の装置を開発し、好きな天体や現象を観測して、自分だけのデータを取得し、第一線の成果を挙げている研究者もいます。星は、星の数ほどあるので (笑)、天文学においては、小さな観測装置でも工夫すれば、いくらでも研究する対象はあるのです⁸。それもまた天文学の面白いところです。

- QFT、CFT の数学に興味があります。

思わず、おお、とのけぞってしまいましたよ！QFT=Quantum Field Theory (場の量子論)、CFT=Conformal Field Theory (共形場理論) です。QFT は、講義でも紹介した通り、 c と \hbar が出てくる理論で、量子電磁力学など、ミクロの世界で素粒子が光速に近い運動をする状況を記述するのに使われる (フツウの) 理論です (難しいけど; まあ日本語教科書もあるし)。一方、 c と \hbar と G が出てくる確立した理論はまだ存在しない、という話をしました。重力場を量子化し、素粒子間に働く、ごくごく微小の重力を記述するような理論はまだ存在しないのです。そのような理論の候補として「超弦理論」が提唱されていることを紹介しました。私もこころへんになると、Wikipedia、ChatGPT レベルの知識しかないのですが、『共形場理論は、超弦理論の数学的基盤として不可欠であるだけでなく、AdS/CFT 対応を通じて弦理論の理解を深め、量子重力や高次元時空の研究に大きな影響を与えています。この関係は、理論物理学の統一的理解において非常に重要な役割を果たしています』ということだそうです⁹。

AdS/CFT 対応、というのは良く耳にしますね。アルゼンチン出身の天才物理学者が 20 代で発表したその論文は、物理学の世界でもっとも多く引用されているそうです。今までは実験的に検証不可能と思われていた超弦理論のような四次元時空の量子重力理論と、三次元空間で超高密度物質を扱う量子多体系の理論が、ある条件下では完全に等価であること (=AdS/CFT 対応) を発見したそうです。不思議ですねー。それによって、超弦理論を使って、物性物理の具体的な問題を解けるようになったとか。そこに自然界の奥深い神秘が隠れていることは間違いありません。それを明らかにするために、若い世代の活躍を期待しています。CFT の勉強、頑張ってください。

⁷ 東大の小柴先生が中心となって神岡鉱山に建設したカミオカンデ (Kamioka Neutrino Detection Experiment) の元々の目的は陽子崩壊現象の検出ですが、これはできませんでした (どうやら陽子は崩壊しないみたいです)。そこでたまたま、太陽系近傍で超新星爆発が起きてニュートリノが検出されたので (Kamioka Neutrino Detection Experiment)、素晴らしい運が良かったですね。

⁸ PONCOTS な装置で楽しそうに研究している人もいますね;)

⁹ 鍵括弧内の文は ChatGPT によります。AI を使って文章を作成する際は、どの部分が AI によるものか、示さなくてはなりません。