

サイエンスピックアップ

ブラックホールジェットの謎に迫る

天文学専攻 准教授 当真 賢二



ブラックホールは、重力が極限的に強く、一度入れば光さえも出てこれない領域です。これまでの天文観測によって、ブラックホールの候補天体が高質量（あるいは高エネルギー）密度の領域で数多く発見されています。それらには太陽質量程度のものと、銀河中心に存在する太陽の100万倍以上の質量の超巨大なものがあります。ブラックホールはすべての物質を吸い込むというイメージがありますが、実はその近傍からプラズマが細く噴き出しているのが観測されています。これを「ブラックホールジェット」と呼んでいます。これらは莫大なエネルギーを放出しており、遠方宇宙の探査手段や重力波観測に関連して非常に活発に研究されています。しかし「ジェットがどう駆動されるのか?」「ジェットがいかにして光るのか?」という基礎的な問題が未だ解明されていません。

ガンマ線バーストは宇宙一明るい天体現象であり、突発的に誕生した太陽質量程度のブラックホールによるジェットが引き起こすと考えられています。このガンマ線の放射機構は、主に観測される強度スペクトルを手掛かりに理論研究が進められており、偏光を利用した研究はあまり発展していませんでした。この状況で私は2009年の論文において、主要な3つのガンマ線放射モデルについて、予測される偏光度分布が異なることを解析的計算とモンテカルロシミュレーションによって示し、偏光観測によりモデルの一つに絞り込めることを示しました。それによって世界でいくつかの観測衛星計画が立ち上がり、私も参画しました。その流れで2011年、日本のIKAROSソーラーセイル実証機に搭載された検出器GAPが、世界初のガンマ線偏光検出に成功。私は限られた観測データから、ガンマ線放射機構とジェット駆動機構は熱的モデルより電磁的モデルが有力であるという結論を導きました。この成果に触発されて、スイス・中国の共同開発検出器やインドの観測衛星が新たに打ち上げられました。

ガンマ線バーストについてはさらに、可視光の円偏光の発見（2014年）やALMA望遠鏡による電波偏光の初検出（2019年）があり、偏光に関する発見が相次いでいます。天体からの偏光は、CPT対称性の破れの検証やアキシオン暗黒物質仮説の検証などにも利用でき、観測の精度を上げることが求められています。

ジェットを駆動する電磁場は、ブラックホールそ

のものによって作られるというのが有力な説です。この駆動機構はいくつかの場合に数値シミュレーションで例証されています。私は解析的に一般相対論的電磁流体理論を発展させ、この機構が一般的に起こることを証明しました。

近年は、この理論を観測的に確認することが研究の焦点となっています。その研究を飛躍的に進めると期待されるのがEvent Horizon Telescopeです。それは超巨大ブラックホールの影の撮像（図1下）を成功させ、2019年4月10日に世界的なニュースとなりました。私もこの国際共同研究に理論解釈メンバーとして参加し、観測された輪がブラックホール周りの高温プラズマによるシンクロトロン放射であり、その光がブラックホールの重力で曲げられた結果であることを確認しました。そして輪の大きさからブラックホールの質量が太陽の約65億倍であるという結論に達しました。ただ、ブラックホールは質量の他に自転角運動量という特徴量があり、それは今回の画像だけでは制限できません。そこで私はジェット（図1左上、右上）の性質を組み合わせると自転速度や磁場の強さを推定できるという議論を推し進めました。その結果、このブラックホールは回転しているのが尤もらしく、角運動量ベクトルは地球から見て向うむきであるという示唆を得て、論文の中心的な主張の一つになりました。

Event Horizon Telescopeは電波望遠鏡の数を増やし、次の観測でブラックホールのごく近傍のジェット放射を検出することを目指しています。それによりジェット駆動機構が確定できるかもしれません。ジェット研究は、いま非常に面白い局面にあります。

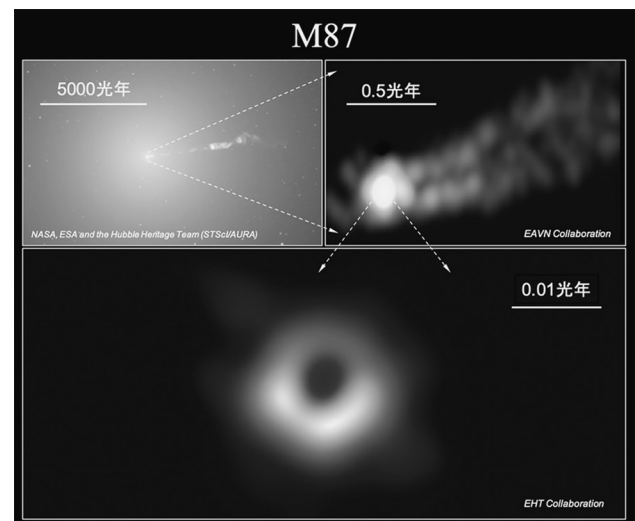


図1 M87銀河の可視光画像（左上）、43 GHz電波画像（右上）、EHTによる230 GHz電波画像（下）

サイエンスピックアップ

摂動論から強結合の物理に迫る

平成 24 年物理学科卒 高エネルギー加速器研究機構 研究員 高浦 大雅



素粒子標準理論では、よく知られた電磁気力の他にも基本的な素粒子間の相互作用として強い相互作用があることが知られています。強い相互作用は量子色力学 (QCD) という場の理論により記述されますが、そのダイナミクスは

他の理論に比べて格段に複雑です。例えばクォークやグルーオンはこの理論の基本的な粒子になっていますが、実際に観測可能なのはこれらの複合粒子 (陽子・中性子など) だけです。この閉じ込め現象に関する理論的理解はいまだに十分ではありません。QCD を含め、理論的に厳密に解けない系に対しては摂動論に基づく解析を行うのが最も一般的です。しかし、摂動論は相互作用が小さいことを前提条件としており、QCD のような強結合理論においてはその妥当性は限られたものになります。特に QCD では漸近自由性という性質により高エネルギーでのダイナミクスは摂動論により正確に記述できる一方で、低エネルギー側の挙動は摂動論での記述は信頼できません。しかしながら現在までのところ、理論的な手法として摂動論は最も系統的で成功を収めてきている解析手段であると言えます。そこで筆者の研究では摂動論をベースにして従来までの予言能力を向上・改善することを目指しています。特に理論予言の誤差を減らすこと、より低エネルギー側まで予言の能力を拡張することを目指しています。このような試みは理論的な理解が不十分な QCD のダイナミクスの解明のみならず、素粒子標準理論を超える未知のモデル探索にも重要となってきます。

摂動論の改善を行うには、摂動論という手法に固有の不可避な誤差に対処することが必要です。摂動論は、相互作用のパラメータに関する級数展開で物理量を評価する手法ですが、実はこの級数は発散級数になっていることが知られています。これに由来して摂動論による予言には不可避な誤差 (リノーマロン誤差として知られる) が生じます。しかし面白いことにこのような摂動論の不可避な誤差は、場の理論に内在する非摂動効果と同程度の大きさを持っています。そのため非摂動効果まで考慮した場合には誤差が打ち消された理論予言が得られると期待されています。そこで予め相殺されるとわかっている不可避な誤差、リノーマロン誤差を理論予言から分離し、誤差を持たない部分を抜き出すことを考えます。こうすることで安定した摂動予言が得られるとともに、系統的に非摂動効果を取り入れる基礎が得

られます。このような性質を実現することは、より低エネルギーの現象まで理論的に記述しようとする試みに不可欠です。このような方法論はこれまで確立しておらず、筆者らはこれを実現する解析的手法の開発を行いました。

筆者らは上記の改善された摂動的手法を応用し、素粒子論の最も基本的なパラメータの一つである強結合定数の精密決定を行いました。素粒子は直接的・間接的に QCD の影響を受けるため、強結合定数は幅広い現象の解析精度に影響する重要なパラメータです。この決定には理論的インプットとして摂動論が不可欠であり、そのため摂動論の理論的誤差がそのまま強結合定数の精度に影響します。筆者らが用いている理論予言の特長は、予言の誤差が小さいこと、また図 1 に示されているように予言の有効領域がこれまでの理論予言より 3 倍程度広いことです。このような理論予言を用いることで、従来までの決定よりも広いフィット領域を確保し、信頼性の高い決定ができました。またこの研究は強結合定数の精密決定だけでなく、これまで解析的に理解できていなかった QCD の比較的低エネルギー領域を定量的に探ることができることを示すものになっています。

このような手法を用いた更なる研究により QCD の真空構造などの非摂動的な側面を探ることも可能になります。このような試みを通じて閉じ込め現象などの大きな謎の解明に立ち向かいたいと思っています。

ここに記した研究成果に対し、泉萩会奨励賞を授与して下さいました。審査に関わっていただいた方々の励ましのお気持ち、また共同研究者の皆様にも厚く御礼申し上げます。

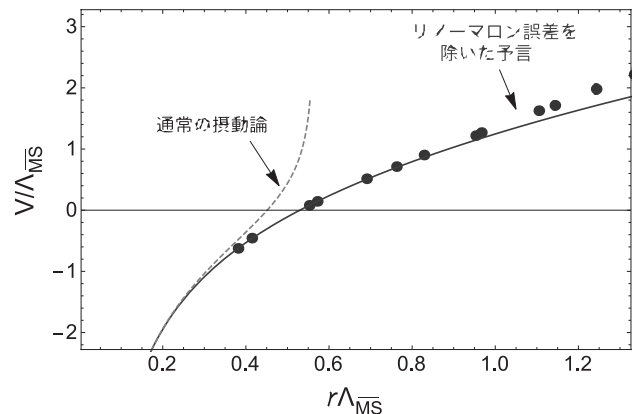
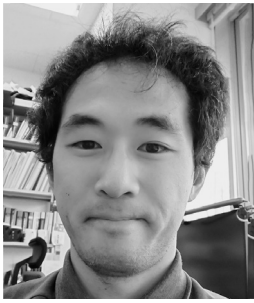


図 1 クォーク・反クォーク間の距離 r に対するポテンシャルエネルギー。点は格子 QCD を用いた数値シミュレーションの結果。通常の摂動論に比べ、リノーマロン誤差を除いた予言はより大きな r (低エネルギー側) まで有効であることがわかる。

サイエンスピックアップ

宇宙はどのように進化してきたのか？

平成24年 宇宙地球物理学科 (天文) 卒 国立天文台 特任助教 杉山 尚徳



“宇宙はどのように始まったのか？”“宇宙を満たす構成成分とは何か？”“宇宙はどのように進化してきたのだろうか？”このような我々の住む世界における根源的な問いに答えるため、有史以来、人々は空を見上げ宇宙を観測し続けてきました。その結果、現在では実に様々なことがわかっています。

私たちは通常、宇宙からやってくる光を観測します。光は秒速30万キロメートルという速度で動いています。これは、1秒間で地球を7周半回ることができ、東京-大阪間ならば0.0017秒で辿り着くという驚異的な速度です。地球上に暮らしている限り、私たちは光の速度というものを意識することはありません。しかし一度宇宙に出れば、光の速度をもってしても移動するのが困難なほど、宇宙は広大であることがわかっています。例えば、太陽から地球までおおよそ光の速度で8分かかります。言い換えれば、私たちはあくまで8分前の太陽を見ているといえます。私たちが夜空の星々を見上げた時、常に“過去の”宇宙の姿を見ているのです！

現在私たちが観測できる最遠の、すなわち最古の光は「宇宙マイクロ波背景放射」と呼ばれています。この光はおおよそ現在から138億年昔の宇宙からやって来ていることがわかっています。この宇宙マイクロ波背景放射を調べることで、私たちは“宇宙の始まり”の様子を知ることができます。宇宙の最初期にはまだ単純な構造しか存在せず、光や電子、水素ヘリウムなど単純な構造の物質しかできていませんでした。そしてそれらが一体となったプラズマ、すなわち高温高密度の光の玉となっていたと考えられています。これをいわゆるビッグバンと呼びます。

宇宙マイクロ波背景放射を調べることで、さらに私たちは“宇宙の構成成分”についても知ることができます。なぜなら、宇宙最初期には宇宙が非常に単純な構造をしていたため、それを記述するための数学的なモデルを非常に正確に作るからです。例えば、現在の私たちの周りを見渡してみても、机があり壁があり、天井があり、そして周りには他の人もいる、そのような極めて複雑な状況を、完全に数式で表すことは決してできません。そもそも、生物というものを物理学で取り扱うことは現在の科学力ではできていません。ところが、宇宙最初期には当然生物もいませんし、現在の私たちの身の回りのような複雑さは存在していませんでした。結

果、宇宙の最初期は数式を用いて説明できるほどに簡単なものとなっています。宇宙の始まり、という遠い過去のことこそ、私たちは良く理解することができるなんて、なんだか不思議に思われるかもしれませんが。しかし逆に言えば、私たちが現在住む地球は、それほど奇跡的に複雑な星なのだと言えるかもしれません。

驚くべきことに、宇宙マイクロ波背景放射の観測によって、現代の物理学の常識を覆す事実が知られるようになりました。それは、宇宙の大部分の成分は、既存の地球に存在する物質と相互作用しない「ダークマター」と、宇宙膨張を加速させる謎のエネルギーである「ダークエネルギー」で占められていることがわかりました。しかしながら、私たちはそのどちらのダーク成分の物理的起源も特性も理解しておらず、宇宙物理学、ひいては現代物理学における最大の謎となっています。この謎を解き明かすことは、現代物理学の枠組みを超えた新たな物理を探る上で、最も重要なものです。

このように、宇宙マイクロ波背景放射は私たちに非常に多くのことを教えてくれますが、しかしそれだけではなかなか分からないことがあります。それは“宇宙の進化”です。宇宙マイクロ波背景放射はあくまで宇宙の最初期の情報を与えてくれるものであり、そこから現在まで宇宙がどのように変化してきたかを教えてはくれません。特に、ダークエネルギーのような宇宙の膨張に大きな影響を与えるものを調べるためには、宇宙が始まりから現在までどのように膨張してきたかを詳細に調べることが必要不可欠です。このような宇宙の時間進化の様子は、宇宙の様々な時期において、宇宙を漂う多数の銀河を調べることで探ることができます。

ダークエネルギーの詳細を調べるために、私の所属する国立天文台は、ハワイに所有している「すばる望遠鏡」を用いて世界最大規模での銀河探査を行うプロジェクトを推進しています。これは、「Prime Focus Spectrograph (PFS)」プロジェクトと呼ばれ、国立天文台を筆頭に日本の研究機関が主導する、一大国際プロジェクトです。具体的には、2022年から観測を始めるために、どんどん準備を進めているところです。私自身も、このPFSプロジェクトにささやかながら関わらせていただいております。今後も出来る限り貢献をしていきたいと考えています。もしかしたらほんの5年の間に、ダークエネルギーの謎に迫る大発見が起こってもおかしくはありません。そのような未来に期待して、ここで筆を置きたいと思っております。

サイエンストピックス

地球温暖化と海洋の科学

昭和53年地球物理学科卒 東北大学 名誉教授 花輪 公雄



【はじめに】

昨年（2019年）発生した台風は29個と多く、そのいくつかは強大な勢力まで発達した。中でも10月12日に伊豆半島に上陸し東日本を縦断した台風19号は、広範囲に豪雨をもたらし、土砂災害や河川の氾濫により多くの尊い人命が奪われる事態となった。そのため、この台風には42年ぶりに「令和元年度東日本台風」と固有の名前が付けられた。気象や海洋の研究者は、この強大な台風の出現には、日本南方海域の高い海面水温が関係しており、この背景には地球温暖化の進行があると受け止めている。

本稿は、泉菽会報編集委員会からの「地球温暖化に伴う個別現象の説明」ではなく、「地球温暖化に関する科学を海洋科学の方から眺めた内容を紹介してください」との要望に応えるべく、地球温暖化と海洋の科学の関係を述べることを目的としている。なお、文献を挙げて論ずべきところが多々あるが、本稿の性格と分量の制限からすべて省略したことを了承願いたい。

【地球温暖化とは】

地表面から平均すれば十数kmの高さまでの対流圏下層の気温が、長期的に全球にわたり上昇する現象を地球温暖化（以後、単に温暖化と記載）と呼ぶ。その最大の要因は大気組成の変化、すなわち温室効果気体（後述）の増加である。18世紀後半に蒸気機関の実用化を起点として産業革命が起こった。以後、人類が石油や石炭、天然ガスなどの化石燃料を大量に消費したことにより、二酸化炭素やメタンなどの気体が大気に残留することとなった。さらに、爆発的な人口増加を背景に、森林から畑作地・牧草地への転換などや、人工物の建設などによる地表面の改変や、さらには牧畜による家畜の増加なども要因の一つと考えられている。

【温室効果気体と地表面気温】

地球は太陽からの可視光線で熱エネルギーを獲得し、赤外線と同じ量の熱エネルギーを宇宙空間へと放射している。もし、地球を取り巻く大気が可視光線や赤外線に反応しない（分子運動が励起されない）とすれば、放射平衡から地表面温度は平均 -19°C となる。ところが、現在の地球の地表面温度はおおよそ $+14^{\circ}\text{C}$ である。この差をもたらしているのは、大気に含まれる水蒸気、二酸化炭素、メタンなど、赤外線に反応する気体の存在である。これらの気体により、地表面と大気との間に赤外線が熱エネルギーが循環するループができ、結果として地表面は太陽

からの可視光線と大気からの赤外線の双方によって温められて温度が上昇する。このような状態が‘温室’に喩えられたので、この効果を温室効果、この効果をもたらす気体を温室効果気体と呼ぶ。

すなわち、現在の地球が生物生存に適した温度環境となっているのは、水蒸気を除くと全てを集めても体積で0.1%にも満たない温室効果気体の存在なのである。

なお、水蒸気は最大の温室効果を担っているが、時間的・空間的にほぼ0%から数%と変動が大きく、人為的に制御できないので、温暖化を抑制する議論の対象にはなっていない。

【温暖化問題とは】

温室効果気体の存在により地表面気温が上昇し、地球環境はより温和なものとなっている。では、現在進行している温暖化はどこが問題なのだろうか。それは、温室効果気体が短期間に著しく増加しているため、動物や植物などをはじめとする生態系が、その適応能力を超える速度で気温が上昇していることにある。

ガラスでできたコップを水の中に入れてゆっくりと温めたら、沸騰するお湯になってもコップは壊れない。ところが、煮えたぎるお湯の中に常温のコップを入れたらどうだろう。入れた瞬間に壊れてしまうに違いない。現在の温暖化の急激な進行では、地球の生態系は煮えたぎるお湯の中に入れられたコップなのである。

国連の「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」は、産業革命以来既に温暖化により地表面気温は約 1°C 上昇したと評価している。このような短期間の急激な気温上昇に対して生態系が適応できず、異変が起こっているとの指摘が既に数多くなされている。IPCCは、産業革命以前の気温よりも 2°C 高くなると、破滅的な環境破壊が起こるとしている。この 2°C の閾値を、ポイントオブノーリターン（帰還不能点）、あるいはティッピングポイント（転換点）と呼んでいる。そのため、現在温暖化抑止の目標も 2°C 以内、できれば 1.5°C 以内にするのが国際的な合意となっている。

【海洋の特徴】

気候の形成とその変動や変化には、気候を具現化している気圏（圏(sphere)：地球を取り巻いているという意味）に加え、地圏、海洋を含む水圏、雪氷圏、生物圏、そして人間圏が複雑に関与している。気圏だけでは長期の変動は作ることが出来ず、他の圏との相互作用が重要となる。中でも、地表面の70%を占め、地球表層の水の97%を貯える海洋は、気候に変動や変化を作り出す主要要素である。