

サイエンスピックアップ

地磁気嵐による GPS 測位誤差の研究

平成 21 年宇宙地球物理学科 (地物) 卒 Boston University Research Associate Professor 西村 幸敏



この度は第二十回森田記念賞を頂き、指導教員の先生方や共同研究者の皆様にご多大感謝申し上げます。ここでは私の最近の研究の中から、皆さんの日常生活に関わりの深い、宇宙環境による GPS (Global Positioning System)

の測位誤差の研究をご紹介します。

GPS など人工衛星を用いた位置情報は、スマートフォンや航空機など私たちの生活の中で広く利用されています。GPS 信号は地球大気を通過する際に、電離圏と呼ばれるプラズマ (荷電粒子) の層により影響を受けます (図 1)。すると信号の乱れにより GPS 受信機の測位誤差を生じます。

電離圏は太陽活動によって引き起こされる地磁気嵐の影響を強く受けます。2024 年 5 月に発生した大規模な地磁気嵐では、日本でもオーロラが観測され、GPS 測位誤差が拡大したことで、アメリカの農業機器が使用できなくなったり、航空機の航行システムに大きな誤差が生じたりするといった問題が発生しました。このような、宇宙空間の自然現象が私たちの生活に与える影響を研究する分野を宇宙天気と呼びます。そして、どのような宇宙天気が GPS 測位誤差の増大を引き起こすのか、という問題は、この分野における重要な研究課題の一つです。

図 2 は、2024 年 5 月の地磁気嵐が発生した際に、アメリカ・コロラド州デンバー近郊で観測された電離層のプラズマ量 (全電子数) と、GPS 受信機の位置の測位誤差を示しています。通常プラズマの量は $30 (\times 10^{16} \text{ 個}/\text{m}^2)$ 程度ですが、この時は数倍にまで急激に増加し、その後急速に減少しました。測位誤差も、プラズマ量とほぼ同時に 8 メートル程度にまで拡大し、プラズマ量が急激に減少し始めるとさらに大きくなり、最大で 40 メートルに達しました。この測位誤差の拡大は、地磁気嵐によるプラズマ量の急激な変動が原因であることが明らかになりました。

地磁気嵐時の中緯度電離圏プラズマ構造は主に次の 3 つの過程に影響を受けます。(1) 電場による輸送がもたらすプラズマ量増大。図 2 の協定世界時 (UTC) 21 時までに見られるプラズマ量の増大で、時折数メートルの測位誤差をもたらしました。この領域ではプラズマの時間変化はゆるやかでした。多量のプラズマ中を伝搬する電波が屈折して受信器に届き、直進した場合と比べて伝搬遅延が生じるため測位誤差が生じたと考えられます。(2) 中性大気との衝突によるプラズマ量の減少。協定世界時 21 時以

降に見られるプラズマの急激な減少はこの過程によるもので、この時間帯に最も大きな測位誤差が見られました。プラズマ量は不規則に変化し、それがもたらす電波の擾乱が測位を困難にします。(3) オーロラに伴うプラズマ量の増大。図 2 の時間帯には見られていませんが、夜になりオーロラが光り出すとプラズマ量が増大します。この際にも電波の擾乱が発生し、10 メートルほどの測位誤差が生じました。

今回の研究では、地磁気嵐が GPS 測位誤差に与える影響を明らかにしました。しかし、まだ多くの謎が残されています。今後は、様々な種類の地磁気嵐や、異なる GPS 測位方法を用いた研究を進めることで、より正確な予測モデルの構築に繋がると考えています。

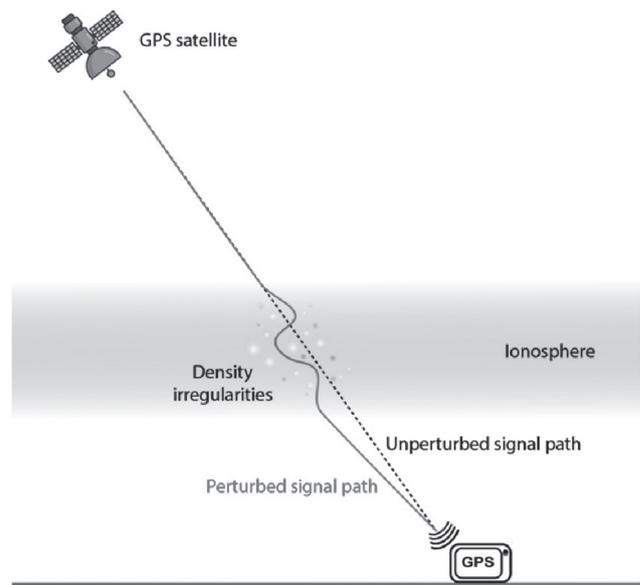


図 1. GPS の信号が衛星から受信器に到達する様子。通常は点線のように信号が直進するが、電離圏の擾乱が起ると伝播経路が乱され、測位誤差を生じる。

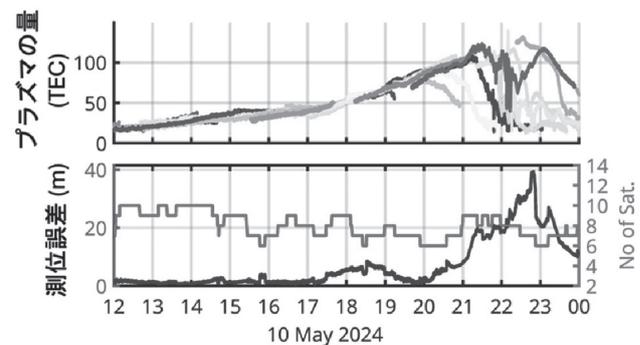


図 2. 地磁気嵐時のプラズマ量と GPS 測位誤差。プラズマ量が急変する際に測位誤差の上昇が見られる。上段の線の色は個々の GPS 衛星のデータを表す。横軸は協定世界時 (UTC) を示す。

サイエンスピックアップ

大気及び加速器ニュートリノの振動から物質の起源に迫る

東北大学理学研究科 助教 ベルンス ルカス



私たちの宇宙は物質で溢れていますが、それに対し反物質はほとんどないことが観測的に知られています。世界中で行われている数多くの実験で検証されてきた素粒子物理学の標準モデルですが、この物質と反物質の非対称性を説明するには不十分です。電子の弟分のような存在であるニュートリノという素粒子があるのですが、1998年スーパーカミオカンデなどでの実験により、この粒子に質量があることが発見され、物質と反物質の非対称性を生成できる、ニュートリノに関連した新しい機構がある可能性が浮上しました。

この機構が働くためにはニュートリノと反ニュートリノの性質に違い（CP対称性の破れ）が必要で、ニュートリノが生成されたあと数100 km後に検出器内で散乱して観測される荷電粒子の種類（電子またはミュー粒子）の割合を精密に測ることで探索可能です。Tokai-to-Kamioka (T2K) 実験では加速器を用いてミュー・ニュートリノと反ミュー・ニュートリノのビームをそれぞれ生成し、Super-Kamiokande検出器（SK）での観測を用いてこの違いを探っているのですが、同じく未解決であるニュートリノの質量差の符号（質量順序）の効果と縮退しているため分別するのが難しく、感度が限られています。

一方、同じSKで観測される大気ニュートリノの観測データを用いると、この質量順序を独立な方法で制限することが可能であるため、T2Kの加速器ニュートリノとSKの大気ニュートリノの合同解析からCP対称性の破れに対しより強い制限がかけられると期待されていました。このような同時解析においては二つの実験データのニュートリノ反応及び検出器性能に関する系統誤差の相関を正しく評価するのが鍵となる他、解析モデルの上で二つの実験データに整合性があるのかを確認するのが重要となります。

本研究ではこれらの効果を考慮に入れ、初めて両実験グループ合同で解析を実現しました。現在T2K実験のデータは質量順序の縮退が遅良く解けているため合同解析でCP対称性の破れへの制限が大きく変わったわけではないのですが、共通の系統誤差モデルにおける実験データの整合性を確認できた他、検出されうる実験データを用いた感度計算において縮退の解消による大幅な感度向上を確認しました（図1）。この系統誤差の相関を考慮した解析は現在建設が進められていて、CP対称性の破れの確かな発

見を目指しているHyper-Kamiokande実験（HK）の可能性を最も引き出せる大気・加速器ニュートリノ合同解析実現のための重要な第一歩でもあります。またCP対称性の破れの評価方法に関して従来の統計解析手法がその強さを過小評価していたことを発見し、指定の有意性をより忠実に再現する新しい方法を導入することによって約1.5倍の統計量増加に相当する感度向上を実現しました。

これらの統計解析は計算技術的にも難しく、膨大な計算量を伴うことも課題でした。CP対称性の破れの解析で用いている統計解析は期待される多くの実験結果をそれぞれ解析し、結果のばらつきを地道に評価する必要があります。将来実験データが増えるごとにこの計算量は指数関数的に増えていくため、抜本的な改善が必要とされていました。そこで計算している統計量の統計学的な性質を上手に利用した新しい手法を開発し、この指数関数的な計算量の増大を防ぐことに成功しました。一方SKの大気ニュートリノの解析においてはニュートリノ振動確率の計算が複雑な積分を伴い、計算量的にも、そもそもの正確性を担保するという意味でも難しいです。そこで従来の数値的な積分方法に代わり、量子摂動論に基づく解析的な積分を一部併用することにより双方の改善を実現することにも成功しました。

観測確率が非常に低いため、CP対称性の破れをはじめニュートリノが物質の起源に関係している可能性を確認できるまであと10年以上はかかると思われます。長い道のりですが、今回の成果もさらに発展させ、多くの優秀な共同研究者と一緒に宇宙の仕組みを少しずつ紐解けることを楽しみにしています。

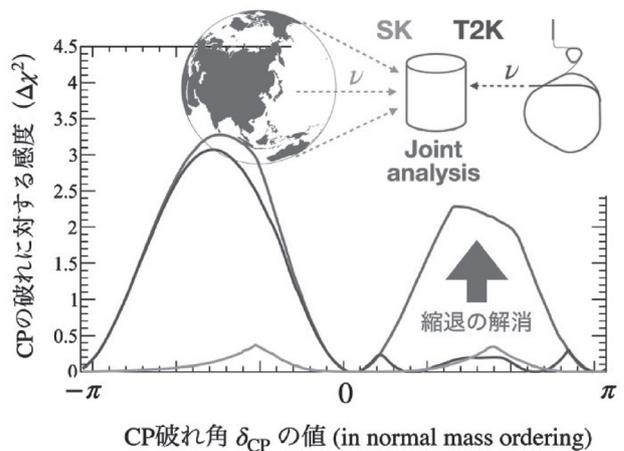


図1. SK（黄、大気）、T2K（青、加速器）および合同解析（赤）から期待されるCPの破れに対する感度（縦軸）。感度の大きさはCP破れ角の値（横軸）に強く依存するが、特に0～πの場合感度が飛躍的に向上する。
出典：K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. **134**, 011801 (2025)

サイエンストピックス

光で磁性を制御する

平成26年物理学科卒 物理学専攻 助教 小野 淳



光照射による物性制御は、光と物質の相互作用という基礎物理学的な問題と密接に関わっているだけではなく、その産業的応用の可能性からも多くの関心を集め、現在まで精力的に研究が続けられています。その中でも1990年代に

発見された光誘起相転移は、光照射によって巨視的な結晶構造や電子構造等の変化が生じる劇的な現象であり、この研究分野に大きな進展をもたらしました。この現象は、光によって電子系や格子系が励起され、その緩和過程においてドミノ倒しの巨視的秩序が融解・形成されるという描像で理解されます。

近年、高強度のレーザー光や放射光、およびサブフェムト秒にまで迫る超短パルス光源等の開発によって、光物性研究の舞台は従来の光誘起相転移現象とは質的に異なる新たな光誘起現象や量子状態制御へと拡大しつつあります。その顕著な例の一つはフロケ (Floquet)・エンジニアリングと呼ばれるもので、系のハミルトニアン自体を光で有効的に制御することで望む電子構造や物性を実現しようという研究です。ここで重要と考えられているのは、従来の光による実励起 (エネルギー注入) ではなく、電子をコヒーレントに駆動するという点です。

私が注目したのは、遍歴強磁性の起源の一つとして古くから知られている二重交換相互作用です。これは、局在電子と遍歴電子のスピント同士が強く結合した系において、遍歴電子の運動エネルギー利得のために局在電子スピントが強磁性的に整列するという機構です。研究開始当時、反強磁性絶縁体への光励起によって強磁性金属への転移が生じることが知られていましたが、これは光キャリアによって二重交換相互作用が媒介されたものと考えられています。

これに対して私は、もともと二重交換相互作用によって強磁性金属状態となっている系を考え、遍歴電子を光電場で駆動することで生じるダイナミクスの実時間シミュレーションを行いました。その結果、強磁性から反強磁性状態への転移が生じることを見出しました (図1)。これは、十分な強度の (実験的にも到達可能な) 光電場のもとでは、強磁性的な二重交換相互作用が反強磁性的なものへと大きく性質を変えることを示唆しており、非平衡状態特有の極めて非自明な現象といえます。

もっとも、これは一つの数値計算の結果にすぎず、その妥当性は慎重に検討されなければなりません。そこで私は別のアプローチとして、強磁性金属状態に光

電場を印加した際の定常状態における局在スピントの励起スペクトル (分散関係) を、非平衡グリーン関数法を用いて計算しました。その結果、光強度の増大に伴って、反強磁性揺らぎに対応する波数のマグノンがソフト化することが明らかになりました。これは、平衡系の二次相転移に相当するものが光で誘起されることを意味しており、実時間シミュレーションの結果とも整合的です。詳しく解析を行うと、フェルミ・ディラック分布と異なる非平衡状態特有の電子分布によって波数 (π, π) のストーナー励起過程が増強され、それが反強磁性揺らぎの増大を引き起こしていることが分かりました。これらの解析から、強磁性的な二重交換相互作用が光照射下では真逆の反強磁性的な相互作用に転じることは、少なくとも理論的には確かなものであると考えています。

この知見をもとにさらに研究を進めたところ、反強磁性転移の過渡状態では非零のトポロジカル数で特徴づけられる反強磁性スカーミオンが誘起されることも明らかになりました。また、三角格子系においては、光照射下の定常状態でスカラーカイラル構造が安定化することも見出されました。このような非共面的な磁気構造は、通常、平衡状態ではジャロシンスキー・守谷相互作用のような反対称相互作用の存在が本質的役割を果たします。今回の結果は、そうした反対称相互作用を持たない系でも、光照射によって非共面的な磁気構造が実現可能であることを示しています。これは、(トポロジカル) スピントテクスチャの光制御の舞台として反転中心を持つ磁性体も有望な候補になり得ることを示唆するものです。

以上の一連の研究に対して、このたび泉菽会奨励賞を賜りましたことを大変光栄に存じます。共同研究者の方々に厚く御礼申し上げます。本研究を通じて、コヒーレントな光駆動によって生じる非自明な現象の一端を垣間見ることができましたが、平衡から遠く離れた非平衡状態には、我々の想像の及ばない未知の物理がまだ無数に潜んでいるはずです。今回の受賞を励みに、今後も研究を一層深化・拡大させていきたいと考えております。



図1. 光照射による反強磁性転移の概念図

サイエンスピックアップ

超大質量ブラックホールの起源解明に向けて

平成 24 年宇宙地球物理学科(天文)卒 大阪大学宇宙進化グループ 特任助教 豊内 大輔



ブラックホールは太陽の数
十倍もの重さを持つ星が一生
を終える時、自身の重力に耐
え切れず潰れてしまうことで
誕生します。このようなブラ
ックホールは、天の川銀河
だけでも数億個存在すると推
定されています。一方で、全

ての銀河の中心には必ず一つ、太陽の数百万から数億倍もの質量を有する「超大質量ブラックホール」が存在することが知られています。これらは、もともと小さなブラックホールが周囲のガスを降着することで成長したものだと考えられていますが、詳しい形成過程については、まだ多くが謎に包まれています。

2000年代に入ると、超大質量ブラックホールの観測探査が活発になり、その形成史に関する様々な知見が得られるようになりました。中でも注目すべきは、宇宙の誕生からわずか10億年足らずの時期に、すでに超大質量ブラックホールが存在していることです。これは種となるブラックホールが極めて急速にガスを降着させ、成長してきたことを示しています。私が研究を始めた2017年ごろ、このようなブラックホールの急速成長を理論的に説明するのは困難でした。数値シミュレーションを行うと、ブラックホールにガスが降着する際、解放される電磁放射による輻射圧や光加熱がガスの流れを妨げ、ガス降着が自己抑制されることが知られていたのです。しかし、この頃の数値シミュレーションは空間等方性を仮定した球対称計算が主流でした。この場合、放射が全方向に均等に影響を与えるため、自己抑制効果が過大評価される恐れがありました。そんな中、私は初めてのポストドク先である京都大学で、星形成の分野ですでに多次元輻射流体計算を駆使していた細川隆史准教授と共に研究する機会を得ました。細川氏のサポートの下、私はコード開発に取り組み、ブラックホールへのガス降着過程を3次元輻射流体シミュレーションで再現することに成功しました(図1)。

実際に計算してみると、3次元でも放射による自己抑制効果は依然として無視できず、ガスの一部はブラックホールに降着する前に重力を振り切って流出することが明らかになりました。特に、ガス密度が十分に高い場合、降着流の中に放射が溜まり、対

流不安定が生じることで大規模なガス流出が引き起こされることがわかりました。一方で、大局的な空間非一様性が強まると、ガスと放射の通り道が自然と分かれるため、球対称の場合よりも効率よくブラックホールにガスが降着することも確認されました。このように、ブラックホールへのガス降着には、正と負の両方の3次元効果があることが明らかになったのです。

さらに私は、これらのシミュレーション結果を基に、ブラックホールへのガス降着率を周囲のガスの性質(密度、温度、金属量など)に応じてモデル化しました。その結果、初期宇宙における典型的な環境下でも、観測から指摘されるようなブラックホールの急速成長が理論的に可能であることを示しました。この成果は、超大質量ブラックホール形成に関する理論的なボトルネックをひとつ乗り越えたという点で大きな意義があると言えます。

そして現在、超大質量ブラックホールの研究はジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(James Webb Space Telescope, JWST)の登場によって、新たな局面を迎えています。JWSTによる極めて高感度の観測によって、超大質量ブラックホールの形成初期にあたる天体が次々と発見され、その性質が詳しく調べられています。観測結果の中には、これまでの理論では説明がつかないものも少なくありません。私はこうした新しい謎に対しても、柔軟な視点を持ちながら取り組み、天体形成理論のさらなる発展を目指していきたいと考えています。

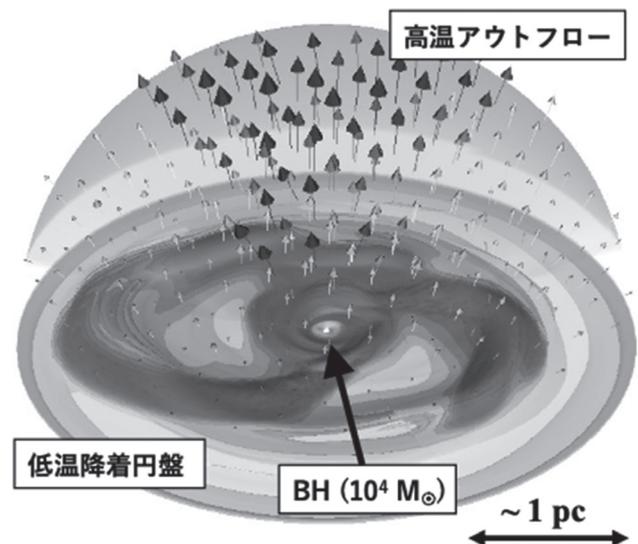


図1. 3次元輻射流体シミュレーションで得られたブラックホールへのガス降着の様子