スピンの歳差運動を微視的に視る

物理学専攻 准教授 南部 雄亮



物性物理学の分野では、電子の持つ自由度のうち、電荷に代わってスピン自由度の活用を目指すスピントロニクスが盛んに研究されています。既に実用化されている電荷の流れである電流に代わり、スピン自由度の流れである「ス

ピン流」で駆動する素子を作製できれば、ジュール 熱発生によるエネルギー損失の少ない省エネルギー 機器を実現できる可能性があります。スピントロニ クスではスピン流の生成と制御が重要な課題となっ ていますが、現在はその機構解明とスピン流の拡散 長と寿命を増幅させる安定化要因の探索が目標と なっています。

スピン流を生成する方法として、電磁気学的には スピンポンピングやスピンホール効果が、光学的に は円偏光が用いられます。これらに加えて、熱的に スピン流を生成する方法が永らく探し求められてき ました。スピン流を熱的に駆動することに成功すれ ば、電流や磁場を使わずに非常に小型なスピン流源 を作ることができる可能性があるためです。磁性体 に温度勾配を印加することでスピン流を生成するス ピンゼーベック効果が 2008 年に日本初の成果として 報告されて以来、スピントロニクス研究はスピン流 の生成方法の開拓から新たなフェーズに入りました。

スピン流の固体中における伝播過程は運動量 (Q) 空間全般にまたがります。しかしながら、これまで のスピン流の観測は、電磁気学的、光学的、熱的に 生成したスピン流を、逆スピンホール効果を通して 長波長極限 (Q = 0) の電圧に変換する巨視的測定 に限られてきました。しかしながら、スピン流の駆 動原理を探求し、より安定化と効率化を目指すので あれば、その微視的観点からの理解も欠かせません。 さらに、室温付近での実用化には熱活性化の影響、 つまりスピン流がどのようなエネルギー(E)依存 性を持つかも考慮に入れる必要があります。このよ うに、スピン流の全容を理解するには電圧測定では 不充分であり、運動量・エネルギー (Q, E) 分解し た情報が必要となりますが、これまでそのような測 定はありませんでした。特に、絶縁性の高い磁性体 においてスピン流はスピンの歳差運動によって伝播 されることは認識されていましたが、その微視的理 解は充分とは言えませんでした。

スピンの歳差運動は、準粒子であるマグノンが持つ極性の自由度に対応しています。マグノンの持つ極性自体は当然のこととして受け止められてきまし

たが、実はその直接検出はこれまでなされてきませんでした。今回、あまり一般的ではない稀有な偏極中性子散乱手法を適用することで、初めてスピンの歳差運動の様子を捉えることに成功しました。偏極中性子はこれまで主に核反射と磁気反射の分離に使われてきましたたが、歳差運動の検出には中性子偏極を散乱ベクトル方向に向ける特殊な測定環境が必要となります。この中性子偏極を非弾性散乱に適用するため、ビーム強度が弱くなるなど多くの問題が生じ、これまで試されてこなかったのだと推測されます。

偏極中性子散乱実験は、既知の磁性体で最も高寿 命なマグノンを持ち、それゆえスピントロニクスに 頻繁に使用されるフェリ磁性体 Y₂Fe₅O₁₂ (YIG) を 対象として、世界最高の中性子強度を誇るフランス の原子炉 ILL で行いました。測定の結果、YIG では 主要な音響モードと光学モードにおいて歳差運動の 回転方向が互いに反転していること、それらの磁気 励起分散関係、強度および回転方向が理論計算とほ ぼ完全に一致することが明らかになりました(図1)。 また、磁気励起モードの温度変化を追跡することで、 観測されたスピン流の温度変化を定性的に理解する ことができました。つまり、光学モードは音響モー ドと反対符号の回転方向を持つため、両モードが熱 活性化される温度領域ではスピン流の伝播方向の競 合を引き起こすことが微視的測定により明らかにな りました。

今回検出された歳差運動の回転方向は、スピン流の伝播方向を決定しており、スピン流の安定化機構やスピントロニクス物質の開発・設計指針には欠かせない微視的情報です。本測定手法は、反転対称性の破れた反強磁性体における運動量依存性を持った歳差運動の解明などにも適用可能であり、今後、スピントロニクスに限らず広く磁性体一般に展開できる可能性を持っています。

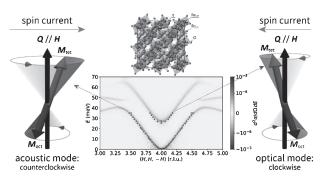


図 1 Y₃Fe₅O₁₂ の結晶構造と磁気励起分散、および歳差 運動の模式図

目に見えない暗黒物質の正体を科学で探る

平成 22 年物理学科卒 東北大学理学研究科 助教 殷 文



暗黒物質は宇宙に充満して いる物質ですが、相互作用を あまりしないためにその正体 が未だ解明されておりませ ん。光を放ったり、反射した りしないため、目に映らない 上に、触れることもできませ ん。我々の身の回りにあるに

もかかわらず、それを調べるのはとても困難です。 そんな幽霊のような物質が存在することは科学的に 証明されています。存在が示唆され始めたのは20世 紀前半ですが、20世紀後半には水素原子の放つ21 cm 線のドップラー効果の観測を用いて銀河回転速 度を見積もることによって暗黒物質が銀河の重力ポ テンシャルに大きく寄与していることが示されまし た。さらには、暗黒物質の重力によって背後の銀河 が歪められる重力レンズ効果の観測や数値シミュ レーションによる銀河生成において暗黒物質が果た す役割の研究から、暗黒物質の存在は確固たるもの であり、現代宇宙論において中心的役割を果たすこ とが分かりました。21世紀始めの頃には、宇宙背景 放射の精密測定により、宇宙における暗黒物質の存 在量が原子核や電子から成る通常の物質の約5倍に 達することが示されました。

暗黒物質は以下のような性質を持ちます:1)電気的に中性であり相互作用は探知できないほど弱い;2)宇宙全体に充満している;3)初期宇宙から存在し続ける程長寿命である;4)暗黒物質の乱雑運動が小さいという意味で冷たい物質である。

さて、暗黒物質は人類の知っている粒子でしょうか?知られている粒子の中で1と3の性質を持つものとしてはニュートリノがあります。しかし、ニュートリノはフェルミ粒子であり、「同じ状態には粒理・一つしか占有できない」とするパウリの排他原理・だいます。一方、トリチウムのベータ崩壊のエネー指失の測定によりニュートリノの質量は10電イン・指集の測定によりニュートリノの質量は10電イン・では、その正体は何でしょうか?

素粒子標準模型は電弱スケール(核子質量の100倍くらい)以下の物理を良く記述しますが、このスケールと量子論が矛盾しないためには、核子の1,000倍くらいの質量を持つ新粒子の存在が必要です。こ

の粒子はWIMPと呼ばれますが、それは暗黒物質のひとつの候補となります。WIMPに電弱相互作用のような力が働くならば、WIMPの残存量が暗黒物質の観測量と同じくらいになることが理論計算によって示されています。この一致は「WIMPmiracle」と称されています。しかし、暗黒物質生成を試みる加速器実験、暗黒物質による核子や電子の反跳を探る直接探索実験、暗黒物質の対消滅を探る間接探索実験のどれによってもそのような粒子の兆候を見出すことはできませんでした。WIMPの探究は現在でも活発に続けられておりますが、「WIMPが発見されていない」という知見から暗黒物質の正体の再検討も活発になされるようになりました。

私に対します奨励賞の対象となった業績は暗黒物 質が宇宙の始まりを記述するインフラトンであると する仮説の提唱です。一様等方で平坦な宇宙を実現 するためには「宇宙インフレーション」と呼ばれる 宇宙の指数膨張が必要ですが、それを引き起こす粒 子として導入されたものがインフラトンです。イン フラトンの崩壊によりビッグバンが起きます。イン フラトンが存在することについても理論と観測から の証拠は沢山あるものの、その正体は不明です。イ ンフラトンは暗黒物質の性質として先に挙げた4個 の性質のうち3を除いたものを満たします。暗黒物 質とインフラトンが同じ粒子で「アクシオン」のよ うな性質も持つのであれば、初期宇宙では物質効果 で崩壊するものの、現在では相互作用が電弱相互作 用より圧倒的に小さいため寿命が宇宙年齢を遥かに 超えることが私と共同研究者によって示されました。 私たちはこの物質効果により、インフラトンの崩壊 は完遂せず、一部残り、その残存量は暗黒物質の残 存量の観測値と近い値となることを示すことにも成 功しました。太陽で生成された暗黒物質が地球まで 届くことから、太陽アクシオン探索実験 IAXO に よって暗黒物質を探索することが可能です。IAXO や将来的な宇宙背景放射の観測により、私たちの仮 説が完全に棄却される可能性もあります。

多くの暗黒物質仮説の提唱と共に、最新の技術に 基づいた科学的探索方法も世界のあちこちで活発に 提唱、計画、実行されております。世界レベルで仮 説と検証が著しい速度で繰り返されているため、暗 黒物質の正体は近々明らかになると私は信じていま す。目に見えないものを探るのはとても大変なこと ですが、人々の協力のもとで、宇宙を構成する物質 の大部分を占める未知の正体に科学は着実に迫って いるのです。

量子が秩序を破壊する

平成 18 年物理学科卒 横浜国立大学大学院工学研究院 准教授 那須



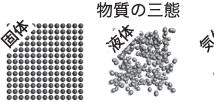
最近、ニュースでも「量子 | という言葉をよく聞くように なりました。量子コンピュー 夕関連の話がほとんどです が、ここでの話は、電気を流 さない磁性絶縁体についてで す。磁性材料のもつ磁性の源 は、結晶格子を形作る原子核

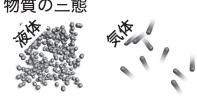
に局在した電子の持つスピンです。隣り合った原子 の間の電子スピンが磁気的な力を及ぼし合うことで、 隣同士で同じ向きや逆向きにスピンを揃えたいとい う力が働きます。この力によって、低温では、磁性 体における電子スピンが同一方向を向くといった秩 序(この場合は強磁性秩序)が生じます。この秩序 化機構の解明は物性研究の重要なテーマのひとつで あり、また、強磁性や強誘電性、超伝導といった有 用な性質も電子の秩序として理解されています。

物質の三態のうち、気体と液体は構成粒子が無秩 序に運動しているものですが、固体は粒子が周期性 を持って配列した秩序状態です。絶対零度近くまで 温度を下げれば、ほとんどの物質は固体になります (図1上段)。磁性絶縁体においても同様で、温度を 下げると必ず磁気秩序すると考えられてきました。 そうすると、極低温まで磁気秩序を示さない方が (応用があるかは分からないが理学的に) 面白いので はと考えられるようになってきました。物質の三態 における液体状態が絶対零度近くまで実現すること が知られている例のひとつがヘリウムであり、極低 温でも量子ゆらぎによって固体になることが阻害さ れます。磁性体においても同様に、強い量子ゆらぎ が存在すれば、磁気秩序が抑制され、絶対零度まで 電子スピンの「液体」状態が実現することが期待さ れます (図1下段)。これが量子スピン液体です。

量子スピン液体自体は、元来、銅酸化物高温超伝 導の母体として P. W. Anderson によって提案された もので、それからおよそ半世紀に渡って研究が続け られてきました。実験的には候補物質が無機化合物 と有機化合物の両方で数多く発見されてきました。 一方で、理論の側からは極低温で顕在化する量子効 果とスピンの間の相互作用に由来する多体効果を等 価に取り扱うことは非常に困難で、大胆な近似や簡 単化に頼らざるを得ないのが現状でした。

その状況を一変させたのが、2006年の A. Kitaev によるに量子スピン液体を基底状態に持つ厳密可解 な模型(キタエフ模型)の提案と、2009年のG. Jackeli と G. Khaliullin によるキタエフ模型が実現す





磁性絶縁体における磁性の三態



図1 物質の三態と磁性絶縁体へのアナロジー

る磁性絶縁体の提案です。この2つがブレイクス ルーとなり、現在もなお精力的な研究が進められて います。

候補物質の物性測定を行って、キタエフ模型で磁 性が記述できているかを検証するためには、キタエ フ模型の有限温度の性質を知る必要があります。 我々は、キタエフ模型における比熱や熱伝導、磁気 励起などの温度変化を新しい計算手法を開発するこ とによって網羅的に調べました。キタエフの量子ス ピン液体においては、それが持つ量子多体効果に よって、電子の持つ基本的な自由度であるスピンが マヨラナ粒子とエニオンに分裂したかのように振る 舞います。マヨラナ粒子とは粒子と反粒子が等価な フェルミ粒子であり、素粒子分野ではニュートリノ がその候補と考えられています。エニオンとはフェ ルミ粒子ともボース粒子とも異なる統計性を持つ粒 子です。我々の計算によってこの分裂現象が、比熱 や磁気励起など様々な物性に顔を出すことが明らか になりました。また、それとコンシステントな振る 舞いが候補物質の実験結果にも見られており、現実 の系でキタエフ量子スピン液体が実現している可能 性が高まっています。

キタエフ模型の提案者である A. Kitaev は量子情 報の専門家であり、キタエフ模型も元々マヨラナ粒 子とエニオンを使った擾乱に強い新しいタイプの量 子演算を実装するために提案されたものでした。磁 気秩序しない磁性体を探求するという極めて理学的 な研究の出口として、最近の流行りである量子計算 に繋がってきたということは、意外ではありますが 重要なことであると思います。

電波観測で迫る太陽・太陽圏

平成19年宇宙地球物理学科(地物)卒 名古屋大学宇宙地球環境研究所 准教授 岩井 一正



「宇宙空間」というと真空な空間をイメージしがちですが、厳密には宇宙空間は真空ではありません。そこは極めて希薄ではありますが、電子やイオンに電離した粒子からなるプラズマによって満たされ、それらが秒速数百kmも

の高速な風となって吹き荒れるダイナミックな世界 が広がっています。このプラズマ風を作っているの は太陽です。太陽の大気「コロナ」は100万度もの 高温で、そのプラズマ大気の一部は太陽の重力を振 り切り宇宙空間へ超音速の風となって流れ出ます。 これを「太陽風」と呼び、太陽風の影響下にある領 域を「太陽圏」と呼びます。太陽風は秒速 300 km から秒速 800 km 程度まで時々刻々と変化しながら 地球にも常に吹き付けています。それに加えて、太 陽では爆発現象「太陽フレア」が発生し、太陽大気 の一部が周辺の磁場構造と一緒に塊として宇宙空間 に向けて吹き飛ばされます。この塊は地球に到来す ると地球周辺環境に大きな擾乱をもたらし、電波通 信、人工衛星の運用、GPS 測位など、社会生活に 様々な影響を与えることがあります。宇宙空間の利 用が年々広まり、更には宇宙旅行まで計画されるよ うになった現代においては、太陽によって引き起こ される宇宙の嵐「太陽嵐」の到来を事前に予報する ことが極めて重要になってきました。

太陽表面で起きる爆発現象はX線から電波までの様々な波長で観測されます。爆発現象の過程で生成された高エネルギー電子は強い電波放射「太陽電波バースト」を発生させる特性があり、電波を使った太陽観測は地上から太陽で起きる爆発現象を調査をきる有効な手段です。筆者たちは東北大学の大型電波望遠鏡に搭載する特殊な太陽電波観測を置きる特殊な大陽電波でできる場所を電波のスペクトルデータが取得できるようになったことが特徴です。この観測で得られたデータの解析から、太陽電波バースト中に含まれるスペクトル微細構造の分解に成功し、太陽で起きる爆発現象や、それに伴う電波バーストの放射過程の理解が進んでいます。

太陽フレアは強い電磁波放射を伴いますが、そこから吹き飛ばされ、太陽から遠く離れた宇宙空間を 伝搬中の太陽嵐は希薄で、それ自体の放射現象を捉 えることは困難です。そこで、同じような電波望遠 鏡を用いるのですが、今度は太陽系外の天体(例え ばクエーサーと呼ばれる電波を放射する銀河)を観 測します。その観測中に太陽風や太陽嵐が天体と地 球との間を横切ると、天体からの電波を散乱します。 特に太陽嵐は周辺の太陽風よりも強く電波を散乱す る特徴があります。そのため、ある天体を電波で観 測中に、その電波強度が激しく変動すれば(=瞬け ば)、電波を強く散乱する媒質、つまり太陽嵐が地球 と天体の間を横切っていることがわかります。この 電波での瞬き現象を惑星間空間シンチレーション (Interplanetary scintillation: IPS) と呼びます。IPS 観測データが太陽嵐の検出に有効なのは古くから知 られていましたが、このデータから太陽嵐の地球へ の到来予測の精度を向上させるには、もう一手間必 要でした。そこで筆者らは、太陽圏を模した3次元 の磁気流体シミュレーションと IPS 観測を融合した 太陽嵐の予報システムの開発を行いました。シミュ レーション結果からは太陽嵐によって時々刻々と変 化する宇宙空間の密度分布が得られます。この結果 を用いて電波の散乱を計算することで、擬似的に IPS 現象を再現できます。太陽嵐の発生を察知した ら、あらかじめ様々な初期速度を持つ太陽嵐をシ ミュレーションし、それぞれの結果から擬似 IPS データを計算しておきます。その後、筆者らの電波 観測によって得られた IPS データの分布と、多数の 擬似的な IPS データの分布とを比較し、最も観測に 近い擬似 IPS データが得られるシミュレーションを 選択します。このシミュレーションが予測する太陽 嵐の到達時刻は最も正確なはずです。この予報シス テムを検証するために、2017年9月に発生した、近 年で最大規模の太陽フレアに伴う太陽嵐に対して予 測実験を行いました。その結果、実際の IPS 観測 データに最も近い擬似 IPS データを生成するシミュ レーションが、太陽嵐の地球への到来を最も正確に 予測でき、IPS データを用いることで太陽嵐の予測 精度を向上させることが可能であることを示しまし た。現在は、このシステムを実際の「宇宙天気予報」 に組み込み予報を出す試みも進められています。

これらの研究に対して、この度は泉萩会奨励賞をいただき、ご関係の皆様、共同研究者の皆様に心より御礼申し上げます。現在、太陽圏研究は新しい展開を迎えつつあります。世界各国が多数の太陽・太陽圏観測のための飛翔体ミッションを推進し、それに呼応するように地上観測・モデリングの整備も進んでいます。筆者らは現在、新しい太陽風観測用の電波望遠鏡の開発に力を入れています。この次世代装置を早期に実現し、これからの太陽・太陽圏研究をリードしていきたいと思います。