

サイエンストピックス

スピントロニクスとその熱効果

平成二十四年物理学専攻(博後) 修了 金属材料研究所 准教授 内田健一



電子は電荷 $-e$ とスピン $1/2$ を持つ素粒子である。現在のエレクトロニクスは電子のこの二つの自由度のうち電荷のみを利用しており、スピンの自由度はほとんど利用されてこなかった。その最大の理由は、電子スピン情報は固体中ではスピン拡散長と呼ばれるマイクロメートル以下のスケールで消失してしまうことにある。しかし、現代のナノテクノロジーの進展により、スピンの自由度が顕在化するサブミクロンスケールの人工構造を自在に設計・作製することが可能になり、スピン自由度も積極的に利用する新しい電子技術「スピントロニクス」の要素技術の開拓が急速に進展した。

エレクトロニクスが電流と電圧の制御に基づいて体系化されたように、スピントロニクスの発展にはスピン流(スピン角運動量の流れ)とスピン圧(非平衡スピン流の駆動力)の生成・検出・制御技術の拡充が必須であり、これには全く新しい物理概念・現象の開拓と理解が必要であることが近年の諸研究によって明らかになった。電流を伴わない純粋なスピンの流れは特に「純スピン流」と呼ばれ、スピントロニクス技術の基幹を担う。純スピン流が有する特徴としては、時間反転対称性が偶であること、物質の磁性そのものを直接変調可能であること、量子情報を伝送できること等が挙げられる。時間反転対称性が偶であることは、本質的にエネルギーの散逸を伴わない純スピン流伝送の可能性を示唆する。スピン流は磁気抵抗メモリ等のデバイスにおいてはすでに利用されているが、既存のデバイスにおけるスピン流は電流(すなわちジュール損失)を伴っており、上に挙げた純スピン流の特性を活かしきれていない。ゆえに、純スピン流を駆動できる新しいスピン圧生成原理の開拓は、スピントロニクス分野における急務の課題となっている。

2008年に我々は、強磁性体に温度差を付けることによりスピン圧が生成される「スピンゼーベック効果」を世界に先駆けて発見した。温度差から電圧が生成される現象は熱電効果と呼ばれており、その代表例が1820年代にドイツのトーマス・ゼーベックによって発見されたゼーベック効果である。スピンゼーベック効果は「スピン流版のゼーベック効果」であり、この現象を用いることで熱流による純スピン流生成が初めて可能になった。伝導電子によって駆動される従来のゼーベック効果は導電体でのみ生じる現象であるため、同様にスピンゼーベック効果も金属や半導体でのみ生じる現象であると信じられてきたが、2010年に我々はスピンゼーベック効果が磁性絶縁体においても発現することを見出した。絶縁体においてスピンゼーベック効果が観測されたことにより、この現象の起源が局在スピンの集団運動：マグノンの熱的

非平衡性であることが明らかになった。これはスピンゼーベック効果が、伝導電子輸送に基づくスピントロニクス現象や通常の熱電効果とは本質的に異なる現象であることを意味する。

スピンゼーベック効果は熱を利用した新しい純スピン流生成手法を提供する一方、新原理の熱電変換技術としても大きな注目を集めている。スピンゼーベック効果によって生成されたスピン流は、金属薄膜中の逆スピンホール効果と呼ばれる量子相対論的效果を利用することで、電圧に変換できる。すなわち、絶縁体中のスピンゼーベック効果と金属中の逆スピンホール効果を組み合わせることで、従来は不可能だった「絶縁体を用いた熱電変換」を実現できる。誌面の都合上、本稿では詳細は割愛するが、スピンゼーベック効果を用いた熱電変換素子は高い汎用性や設計自由度を有しており、従来の熱電変換素子にはない様々な特性を示す。スピンゼーベック効果の応用研究は始まったばかりであり、熱電変換能は従来素子よりもはるかに劣っているのが現状であるが、その出力は年々向上している。我々はスピンゼーベック効果の将来の応用・実用化を目指し、NEC社との共同研究開発を進めている。

筆者はこれまでに報告してきたスピンゼーベック効果に関する研究成果により、第5回泉萩会奨励賞の受賞者にご選考いただきました。ご審査いただいた先生方や泉萩会会員の皆様にも、心より感謝致します。また、これまで多くの御指導、御鞭撻を賜りました東北大学金属材料研究所・原子分子材料科学高等研究機構の齊藤英治教授や共同研究者の皆様にも、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。



サイエンストピックス

時間反転対称性破れの探索のための
レーザー冷却不安定原子生成工場の開発

東北大学学際科学フロンティア研究所 助教 川村 広和



我々が生きるこの宇宙はどのようにして成り立ち、現在の姿になったのか。こうした問いに、素粒子・原子核物理学の立場から、ひとつの答えを得ることを目指している。「時間反転」とは、物理法則における時間の符号を反転する操作で、ビデオカメラで撮影した動画を

逆再生することに相当する。我々人間が生活している様子を逆再生すると明らかにそうと分かり、時間反転する前後で区別できるが、素粒子の世界では時間反転しても区別できない、即ち、対称性が成立するとされている。2013年は、素粒子標準模型において最後の未発見だったヒッグス粒子が発見され、ノーベル賞が贈られたことでも話題になったが、確かに標準模型の枠内では時間反転対称性は成立する。その一方で、宇宙誕生時にちょうど同じ数だけ生成された粒子と反粒子が、何らかの原因で反粒子だけが無くなり、粒子だけが残って現在のような宇宙の姿を創るためには、対称性は破れている必要があるとされる。2008年にノーベル賞を受賞する理由になった小林・益川理論は、その破れの原因を説明するものだが、実は部分的にしか説明が付かず、さらに根源的な理論が必要になると考えられている。時間反転対称性の破れの探索は、標準模型では説明できない未知の現象の発見を目指した研究だ。

時間反転対称性の破れは、様々な場面で発現し得る。その中でも観測実現性が高いのが、素粒子がもつ電気双極子能率 (electric dipole moment, EDM) の研究である。EDM とは、ある距離に存在する正負の電荷対間に生じるベクトルのことで、電磁気学の講義では必ず登場する。この性質を素粒子が備えるとする、あたかも素粒子が内部構造をもつかのように見え、それは時間反転対称性を破る。一般に、素粒子はスピンをもつが、これは角運動量なので時間反転の下でその符号を反転する。しかし、EDM は負電荷から正電荷に向かうベクトルなので時間反転しても向きは変わらない。従って、スピンとEDMを備える素粒子という系で見たときに時間反転前後で不一致し、対称性を破ることとなる。素粒子が備えるEDMの発見を目指して、半世紀以上、世界中で多くの研究者が様々な手法をもって精度を改善しながら取り組んでいる。

電子EDMを測定するために常磁性原子を用いる手法がよく知られている。常磁性原子において不対電子のEDM効果は相対論効果によって増幅され、原子のEDMとして観測され得る。原子の陽子数が大きいほど増幅効果も大きくなるため、原子番号最大のアルカリ原子であるフランシウム (Fr) に注目している。Frは、次に大き

なアルカリ原子であるセシウムに比べて十倍も増幅効果が大きい、安定元素であるセシウムに対してFrは放射性元素だ。この困難は、サイクロトロン加速器を利用して大強度のFrを人工的に生成し、さらにレーザー冷却技術を適用してマイクロケルビンオーダーという超極低温の原子集団を生成することにより克服できると期待される。そのために建設しているのが、「レーザー冷却不安定原子生成工場」だ。

サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(CYRIC)では、レーザー冷却不安定原子生成工場の開発を行ってきた。工場は主に、Frイオンを生成する表面イオン化器、イオンを原子に変換する中性化器、中性原子をレーザー冷却技術の活用により捕獲する磁気光学トラップ装置から成る。表面イオン化器内部で酸素ビームと金標的との核融合反応によりFrを生成するが、これまでに、ビームスウィングシステムによる立体的なビーム輸送と融解するまで加熱した金標的を組み合わせて、大強度のFrを引き出す国際的にもユニークな手法を実現している。そして、生成したFrイオンを静電場によって輸送し、イットリウム標的との表面中性化過程を利用して中性原子へ変換することにも成功した。さらにFrと化学的性質がよく似たルビジウムを用いたテスト実験では、イオンから変換した中性原子を磁気光学トラップで捕獲するところまで達成している。このようなイオンビーム由来の原子の捕獲を、国内では初めて達成し、工場の原理検証に成功したと言える。

実際にFrの磁気光学トラップに成功することで本工場は一応の完成を迎えるが、絶えず改良を続けその性能を向上することが求められる。何より、本来の目的である電子EDMを探索するため、Fr-EDM測定用の実験装置を製作・実装する必要がある、現在既にルビジウムを使ったテスト実験の計画を進めている。多くの開発要素から構成される本研究であるが、各々の開発は着実に進展しており、会報が出版される頃にはまた新しい進展があることだろう。本研究はCYRIC測定器研究部を中心とする共同実験です。本研究課題による泉萩会奨励賞の受賞に際し、共同研究者の方々並びに泉萩会関係者の皆様方にご場を借りて御礼申し上げます。



サイエンストピックス

超新星のかたちを追って

平成6年天文及び地球物理学科第一(天文)卒
広島大学宇宙科学センター 准教授 川端 弘治

超新星とは恒星全体が吹き飛ぶ爆発現象です。90年代半ばには、軽い恒星のなれの果てである白色矮星がある限界質量に達する際に暴走的に燃焼して発生するもの(核爆発型)と、重い星において核融合が鉄まで達して進まなくなり間もなく発生する重力崩壊によるもの(重力崩壊型)とがあり、両型ともさらに複数のサブクラスを有することが判っていました。ただ、各サブクラスの親星がどのようなものなのか、つまり、どういった星がどのような超新星になるのかは、当時はまだよく判っていませんでした。その答えが、21世紀に入り、観測と理論モデルが飛躍的に進化して、ようやく見えてきたと思います。今回の受賞対象となった研究は、外層をはぎ取られた親星における重力崩壊型超新星に対するものです。外層を失う機構としては、単独星において輻射圧により恒星風として放出するモデルと、連星系において相手の星と質量交換をするモデルが代表的ですが、いずれの場合も、恒星質量の大部分を占める水素に富んだ外層が無くなった状態で爆発を起こすことで、内側をよりピュアな状態で観測することができる利点があります。

重力崩壊が起こると、まず中心付近に硬いコアを持つ原始中性子星が生成され、なおも秒速数万キロという速さで落ち込んでくる大気がコアに衝突することによって、外向きの衝撃波が発生すると考えられています。この衝撃波が恒星大気の外に突き抜けると超新星になる訳ですが、数値計算を行ってみると、どうも衝撃波のエネルギーは充分ではなく、落ち込んでくる大気に打ち勝つことができずにへたってしまう。つまり、爆発することなく潰れてしまいます。これは超新星「未」爆発問題として、現在もまだ完全には解決に至っていない理論天文学上の大きな謎のひとつです。これを解く鍵は、原始中性子星内で発生して抜け出していく大量のニュートリノにあると考えられており、そのエネルギーの1%程度でも衝撃波に与えられると爆発するはずですが、近年の多次元の流体シミュレーションにより、球対称(=1次元)モデルでは見出すことができなかった流体不安定性に伴う対流や、あるいは親星の角運動量、原始中性子星の強磁場といったものが、爆発を後押しする可能性のあることが判ってきました。実は、これらの効果はいずれも「非球対称的」です。また、2003年にはガンマ線バーストというほぼ光速に近いジェット(これも高度に非球対称的)による高エネルギー宇宙現象が、水素に加えヘリウムの外層まで失って爆発した超新星に付随して現れる例も見出されました。つまり、爆発を起こす機構と非等方性との間に本質的な関連があるらしいことが注目されつつありま

した。数千万光年以上むこうにある星のかたちを直接「見る」ことは到底不可能ですが、ある工夫をすることで非等方性を知ることはできます。

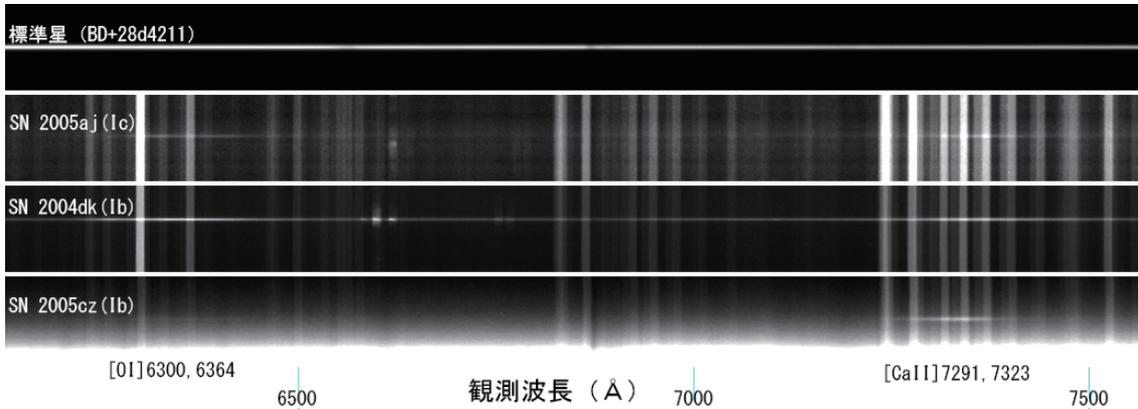
私は2000年頃より国立天文台の研究者として、すばる望遠鏡に装着されるFOCAS(微光天体撮像分光装置)の開発に参加し、偏光機能の立ち上げを担当しました。偏光観測を行うことで、光球面の形状が球対称的かどうか、つまり爆発が等方的かどうかを判定することが可能です。光球付近では偏光を引き起こす電子散乱が卓越していると考えられるからです。そして、ちょうど偏光観測を開始した頃に現れた超新星SN 2002apの詳細な偏光スペクトルを得て、光球がまん丸ではなく軸比で1割程度潰れていることや、表面上の元素分布が軸対称ではなく、非一様であることを見出しました。これはまさに、すばるの高い集光力とFOCASの安定した偏光測定性能の賜物でした。その後10年余りで複数の同型の超新星に対して高精度の偏光スペクトルが得られ、元素分布の非一様性が普遍的らしいことが判っています。また、我々は爆発から半年以上経った後期の観測にも取り組みました。爆発初期は放出物質がまだ濃いため、比較的外側を見ることとなりますが、半年も経つと光学的に薄くなり、中心核付近も見通すことができるようになります。つまりスペクトル輝線のプロファイルを観測することで、爆発中心付近の放出物質の運動の非等方性を知ることが可能となります。ただ、この時期には超新星そのものが非常に暗くなるため、これは8-10mクラスの望遠鏡が使えるようになってようやく本格化した分野です。このような観測を15個以上の超新星に対して行うことで、我々は、外層をはぎ取られた状態で爆発した重力崩壊型超新星がいずれも球対称から有意に外れていることを見出しました。やはり、重力崩壊型では爆発エンジン自身が押しなべて非等方と考えて良さそうです。

また、このような研究を通じて、一つの興味深い発見もありました。SN 2005czという初期に暗くて減光速度も大きかった、水素外層をはぎ取られたタイプの超新星の後期スペクトルにおいて、酸素の輝線は弱い一方、カルシウムの輝線が強いことを見出したのです。これは、太陽質量の10倍程度という重力崩壊をぎりぎり引き起こす程度の恒星における爆発の理論的予想と合います。このくらいの質量を持つ星は通常、水素に富んだ分厚い外層を伴ったまま爆発する型になると考えられており、爆発中心の測定は容易ではありませんが、外層をはぎ取られた型を選んで観測することで(2005czの場合はたまたま連星系をなしており、質量交換で外層を失ったと考えられる)、ほぼ確立していた恒星の進化計算が大筋で正しいことを大質量星で再確認することができました。

こうして振り返ってみますと、私はよくよくタイミン

グと環境に恵まれていたと思います。今回、このような栄誉ある賞を受けたことを励みにして、運頼みではなく、自ら環境を構築して周囲をけん引するよう、さらに精進したいと思います。どうも有難うございました。最後に、本研究を進めるにあたり多くの方々にお世話になりました

たが、特にすばる望遠鏡・FOCAS チームの皆様、超新星研究に導いて頂いた東京大学の野本憲一様、京都大学の前田啓一様、国立天文台の田中雅臣様、そして研究の基礎を磨いて頂いた東北大学の関宗蔵名誉教授に、心よりお礼申し上げたいと思います。



SN 2005cz の後期スペクトル画像を、標準星や他の同型の超新星と比べたもの。天体のスペクトルは横方向（波長方向）に伸びている。多数の縦縞は夜天光輝線で、主

に地球上層大気中の水酸基ないし酸素によるもの。SN 2005cz では酸素の禁制線 [O I] に比べてカルシウムの禁制線 [Ca II] が強いことが判る。

サイエンストピックス

小惑星探査機はやぶさのこれから

理学研究科 地学専攻 教授 中村 智樹



小惑星探査機はやぶさが地球に帰還してからもうすぐ4年になる。現在、筆者は後継機はやぶさ2の打ち上げ前の最終機器チェックのため飛びまわっている。この原稿も宇宙科学研究所の大きなクリーンルーム内に設置された、はやぶさ2探査機の機器開発ブースで

行っているテスト実験の合間に書いている。

はやぶさ2は初号機はやぶさと同じく小惑星に向かうが、今回は有機物や水といった生命の起源物質を含むC型小惑星JU3がターゲットである。C型小惑星からは、そのかけらが隕石や塵として地球に飛来している。太陽系の初期状態を保存したそれらの隕石試料は科学的に大変貴重な資料であり、多くの研究が進められてきた。しかしながら、隕石は地球に落下後、地球の有機物で汚染されてしまう。地球の有機物は太陽系の中で最も進化した有機物である。一方、隕石に含まれる有機物は太陽系の初期の原始的有機物であり、両者が混合してしまうと初期状態の有機物の情報を取りだすのは困難を極める。従って、はやぶさ2は地球の有機物に汚染されていないサンプルを、探査機に積んだ完全密封容器に回収して地球に持ち帰り、地球の環境（大気など）に晒さずに有機物などの分析を行うことを計画している。今年の12月に打ち上げられ、2018年に小惑星に到着しその上空に約1年半滞在する。その間に、探査機に搭載した各種分光機器を使って小惑星表面の分光観測を行い、小惑星の物質

（どのような岩石でできているかなど）を行う。その結果に基づいて着陸地点を選定し、小惑星表面に3回の着陸とサンプル回収を試みる。その後地球への帰路につき、2020年の後半（東京オリンピックのあとに）地球に帰還する予定になっている。筆者は探査機に搭載される各種分光計が小惑星上で分光観測を正しく行えるか調べている。探査機に積まれる直前の分光器を使って隕石サンプルを実験室で分光観測し、正しいスペクトルが得られるかどうかの最終確認を行っている。

論文発表準備中につき非公開

図1. 微粒子の断面の電子顕微鏡写真

一方、初号機のはやぶさは2010年6月10日の地球帰還時に、高層大気中で燃え尽きた。カプセルだけが地上に到達し、その中からS型小惑星イトカワの微粒子が多数発見された（図1参照）。泉萩会の講演の時に紹介した

通り、イトカワの微粒子の初期分析から、小惑星は太陽系の原始天体であることが確認された。また、S型小惑星は地球に最も多く落下する普通隕石の母天体であること（昨年ロシアに落下したチェラビンスク隕石もこのタイプ）や、イトカワはかつては現在よりも10倍以上大きかったことなどが判明した。微粒子の初期分析の成果は2011年8月26日号のサイエンスに論文6編として掲載され、その年の暮れにサイエンス誌が選んだ2011年の世界の10大科学成果の一つに選ばれた。その後、微粒子の一部は協力関係にあるNASAに配分された。また、2012年から審査を経て合格した世界中の研究者にイトカワ微粒子は配分され、今後も年1回のペースで微粒子が配分されていく予定である。研究を希望する研究者は10ページ程度の研究申請書を宇宙研に提出する。その申請書は世界の科学者により、配分した後にきちんと成果が出せるかなどをポイントに審査される。承認された研究者には完全密封した特殊容器に入れられて10粒子以内の微粒子が配分される。微粒子は30ミクロン程度の大きさであることが多く、目には見えない。目には見えない微粒子

を分析し成果を出す必要があるため、配分されてから研究者の苦闘が始まる。

はやぶさ初号機の成功のおかげで小惑星探査は世界の惑星探査の一つの大きな流れになった。今年のはやぶさ2の打ち上げに引き続き、アメリカの小惑星探査機オシリスレックスが2016年に打ち上がる予定である。この探査機も、はやぶさ2と同様に、C型小惑星（ベヌ）を目指し小惑星のサンプルを回収し2023年に地球に帰還する予定である。ヨーロッパでは先日ミッション最終候補に残らなかったが、小惑星探査計画が引き続き検討されている。アメリカのオシリスレックス計画は、日本のはやぶさ2の3倍の予算を投下し、回収するサンプル量もはやぶさ2の50倍を予定している。はやぶさ2は物量では勝負にならないので、少量のサンプルでも科学的に重要な研究を展開する必要がある。それには小惑星における分光観測で科学的に面白いサンプルの回収地点を特定し、そのサンプルを回収し確実に地球に持ち帰る必要がある。その一心で単調で無機質な機器のテストを現在も続けている。