

反物質に新たな光を当てる

早野 龍五 (物理学専攻 教授)

堀 正樹 (物理学専攻修了, マックス・プランク量子光学研究所 研究員)

陽子と電子の質量比は重要な基礎物理定数である。われわれはスイスの CERN (欧州原子核研究機構) において「反陽子ヘリウム原子」、すなわち通常のヘリウム原子の二個の電子のうち一個を陽子の反粒子である反陽子で置換した奇妙な原子の二光子レーザー分光を行い、反陽子と電子の質量の比率を、 $1836.1526736 \pm 0.0000023$ という、陽子・電子質量比の最新値に匹敵する精度で決定した。この結果は最近改定された基礎物理定数推奨値 (CODATA2010) の決定にも用いられた。

反物質は、約 70 年前にディラック (Paul Dirac) が存在を予言して以来、物理学における基本的な問題として研究が続けられてきた。とくに、物質と反物質の対称性 (たとえば両者の質量は厳密に等しいかなど) の研究は、素粒子物理学の理論の根幹に関わる重要問題であることから、スイスの CERN にある反陽子減速器 (AD) では、反物質研究が精力的に行われている。われわれは AD が完成した 2000 年以來「反陽子ヘリウム原子」のレーザー分光によって、反陽子質量の精密測定を行ってきた。

反物質は物質と出会うとたちまち対消滅するが、「反陽子ヘリウム原子」は数マイクロ秒の寿命をもつ準安定原子で、いわば「反陽子の量子トラップ」として働く。これにレーザーを照射することで、反陽子原子のエネルギー状態を精密に測定できる。その結果と、量子電磁力学の精密計算から、反陽子と電子の質量比を、高精度で決定できるのである。

われわれはこれまでも反陽子線形減速器や光周波数コムを用いたレーザー装置を開発するなどして、反陽子ヘリウム原子の分光精度を高めてきたが、すべて「単光子分光」であったため、原子の熱運動によるドップラー幅が分光精度の限界要因となっていた。

そこでわれわれは今回、反陽子ヘリウム原子の両側から二つの光子を同時にぶつけて熱運動の効果を打ち消す「二光子レーザー分光」を開発して分光精度を高めた。二光子レーザー分光法は、通常の原子中の電子を励起する方法としては確立されているが、質量の大きい反陽子に適応されたのは世界初である。

図 1 が装置概略図である。とくに、今回の実験のため、世界最高水準の精度をもった高出力レーザー装置を開発し、二光子遷移を効率よく起こすことを可能にした。

その結果図 2 に示すように、反陽子・電子質量比を陽子・電子質量比の最新値に匹敵する精度で決定し、基礎物理定数推奨値 (CODATA2010) の決定に貢献することができた。また、仮に陽子と反陽子の質量が異なっていたとした場合の相対質量差の上限値として 7×10^{-10} を得た。われわれは現在、反陽子ヘリウム原子を、これまでの絶対温度 10K から 1.5K に冷却するとともにレーザーの一層の安定化をはかり、測定を行っている。これにより、反陽子・電子質量比の決定精度が陽子・電子決定精度を凌駕できる見通しである。本研究は、M. Hori *et al.*, *Nature* 475, 484 (2011) に掲載された。

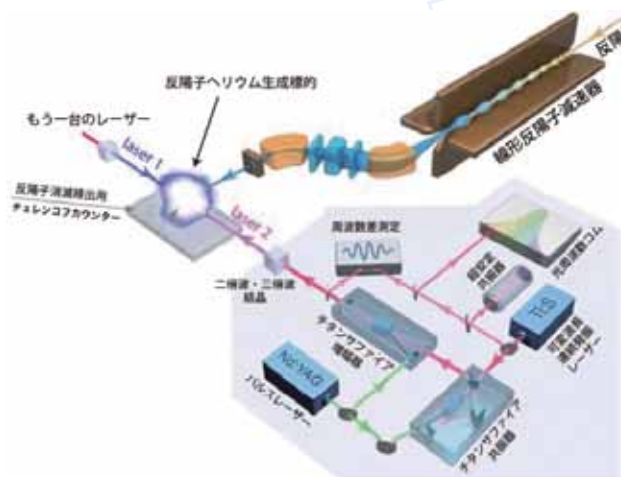


図 1: 今回の研究で用いた実験装置概要

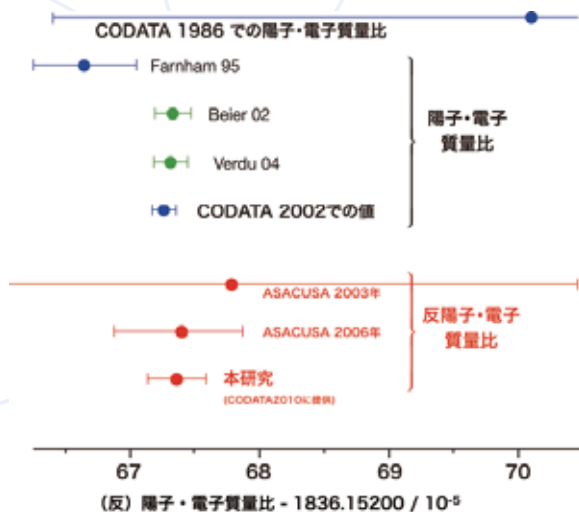


図 2: 陽子・電子質量比と、反陽子・電子質量比の比較。本研究の結果は、陽子・電子質量比の最新結果に匹敵する精度をもち、基礎物理定数の決定に貢献した。

(2011 年 7 月 28 日プレスリリース)

目に見えるようになった金属原子の触媒作用

中村 栄一 (化学専攻 教授)
松尾 豊 (化学専攻 特任教授)

人々にとって長年、分子や化学反応というものは想像上の存在であった。今回、私たちは籠状の構造をもつカーボンナノチューブを試験管代わりにして、金属の1原子の引き起こす触媒反応の映像化に初めて成功した。

化学反応の研究をするにはどれくらいの数の分子が必要だろうか。最新の微量分析の装置を使っても10万個くらいの分子がないと、研究ができなかった。また、いろいろな分子が混じった混合物を使ったのではシグナルが混じってしまうので、ゴミを取り除いてきれいに精製しないと研究できなかった。私たちは科学技術振興機構の「中村活性炭素クラスター」ERATO研究プロジェクトで、2007年に、籠状の構造をもつカーボンナノチューブを試験管代わりにして、ここに炭化水素分子を閉じ込めて有機分子1分子の構造を調べられるばかりではなく、その動きや振る舞いを電子顕微鏡でつぶさに観察する手法を世界で初めて開発し、分子の映像と共に発表した。分子を試験管に入れて、ひとつひとつその挙動と反応を研究する手法、全く新しい科学のフロンティアが出現した。その後、アミド、ペプチドや天然有機化合物の動きの撮影にも成功。今回、さらに金属の1原子の引き起こす触媒反応の映像化にも成功した。

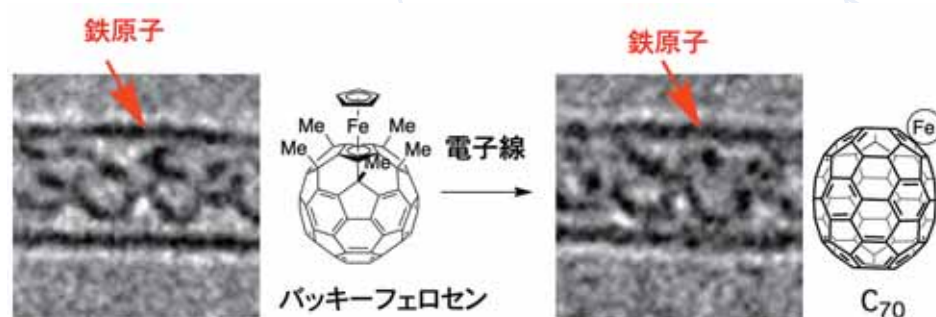
具体的に取り上げたのは、鉄の触媒反応である。金属鉄を用いた炭素-炭素結合組換え反応は、フィッシャー・トロプシュ反応やカーボンナノチューブやグラフェンなどの合成法として重要である。フィッシャー・トロプシュ反応は、第二次大戦前にドイツで開発された。石炭からガソリンを合成する反応であり、エネルギー資源確保のための古くて新しい手法として注目を集めている反応であるが、その反応の機構は全くわかってい

なかった。一番根源的な問題は、固体の鉄が触媒作用に必須なのか、1原子の鉄原子でも反応が進むのかどうか、ということであった。

私たちが研究対象としたのは、「バッキーフェロセン」とよばれる鉄原子とフラレンが結合したモデル化合物である。その結果、この分子の中にある1つの鉄原子が炭素-炭素結合を組換える触媒となって、フラレンC₆₀ (サッカーボール)とその周りの有機分子との反応により、一回りサイズの大きなC₇₀ フラレン (ラグビーボール)のような構造をもった新しい分子へと成長する様子を目で見る事ができた。つまり、フィッシャー・トロプシュ反応やナノチューブ成長反応の触媒サイクルの少なくとも一部は、ひとつの鉄原子で触媒されることがわかった。このような結論は、これまでに知られているいかなる方法を使っても導き出すことはできない。

量子論的存在である分子が、古典物理学的存在である分子模型と同じように動くことを見られるだけでも痛快である。今後、このような分子の映像は、化学、生物、工学などの研究、さらには学校教育や社会教育の場でも間違いなく大きな役割を果たすと思われる。

本研究は産業技術総合研究所の越野雅至、斎藤毅、新見佳子、末永和知らとの共同研究により行われ、E. Nakamura *et. al.*, *J. Am. Chem. Soc.* 133, 14151 (2011) に掲載された。



■ こんな化学反応あるでしょうか。 $\text{Fe}[\text{C}_{60}(\text{CH}_3)_5]\text{C}_5\text{H}_5 = \text{C}_{70} + 10 \times \text{H}_2 + \text{Fe}$

(2011年8月23日プレスリリース)

銀河系の中心に灯台となる変光星を発見!

松永 典之 (天文学教育研究センター木曾観測所 特任研究員)

銀河系の中心は、大質量ブラックホールやひじょうに密集した星の大集団などが混在する興味深い場所である。われわれは、そこに存在する「セファイド変光星」という星を世界で初めて見つけることに成功した。セファイド変光星は、その周期性から距離や年齢が分かるという天文学上たいへん便利な天体である。今回発見したセファイド変光星の年齢を調べた結果、約 2500 万年前に銀河系中心で「星のベビーブーム」の起きていたことが示唆される。

銀河の中でどのように星が作られてきたのかという問題は、宇宙の歴史を探る上でもたいへん重要である。とくに、銀河系の中心領域のように特殊な環境での星形成については多くの研究が行われているが、未解明の課題が数多く残っている。銀河系は、太陽を含む数千億個の星が集まった銀河であり、いて座の方向にあるその中心領域は、(とくに 1960 年代以降)さまざまな方法で観測が行われてきた。しかし、一般に星の年齢を推定することは容易ではなく、星形成の詳細な歴史は分かっていない。

そこで私たちはセファイド変光星 (以下、単にセファイド) という周期的に明るさの変わる星に着目した。セファイドは、距離を求めることのできる「宇宙の灯台」として知られており、エドウィン・ハッブル (Edwin Hubble) が宇宙の膨張を発見

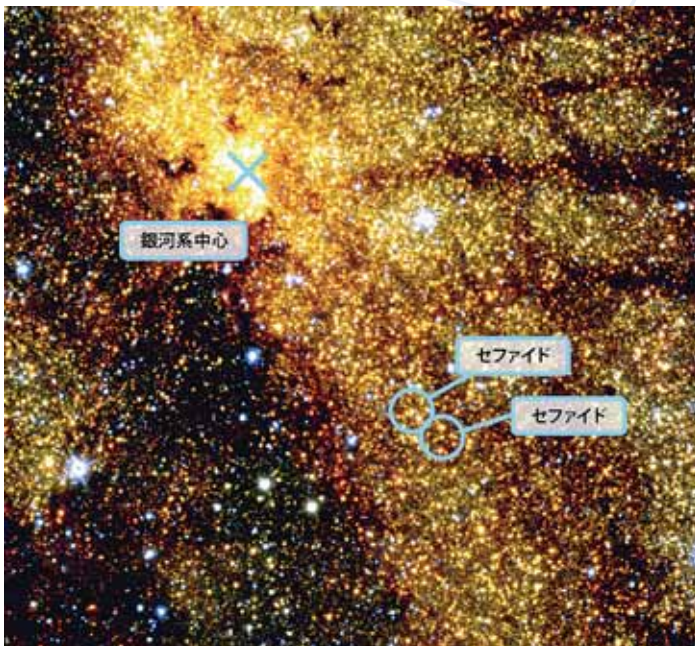
するのに利用したことで有名である。さらに、その周期と星の年齢との間に関係があり、観測で求めた周期からそれぞれの星が何万年前に生まれたのかを推定することができる。銀河系中心の方向は大量の塵にさえぎられているため、伝統的に多く観測が行われてきた可視光線ではそこにある星を見ることができない。現在、塵の影響を受けにくい赤外線波長域での銀河系中心の観測が行われてきているが、まだまだ観測も不十分であり、この領域にあるセファイドは過去に見つかっていなかった。

そこで、私たちは南アフリカ天文台にある IRSF 望遠鏡と SIRIUS 近赤外線カメラを用いて、8 年間にわたって銀河系中心をくりかえし観測した。その結果、近赤外線画像に写った 10 万個近くの星の中から 3 個のセファイドを発見した。星の明るさから見積もった距離 (約 25,000 光年) も銀河系中心までの値と一致しており、世界で初めて銀河系中心に存在するセファイドを見つけることに成功した。

しかも、今回見つかったセファイドの周期はいずれも 20 日に近く、これは約 2500 万年前にその場所で生まれた星であることを示している。いっぽう、それより周期の短いセファイドが見つからなかったことから、3000 ~ 7000 万年前に生まれた星の少ないこともわかった。これは、数千万年ごとに星の形成が活発になる「星のベビーブーム」の起こることを示唆している。銀河系中心に対して、このように数千万年前の星形成の歴史を詳しく調べることができたのは初めてのことである。

本研究は、筆者と天文学専攻の小林尚人准教授のほか、京都大学、自然科学研究機構国立天文台、名古屋大学、イタリア・ローマ大学、および南アフリカ・ケープタウン大学の研究者とで行った共同研究である。その成果は、N. Matsunaga *et al.*, *Nature* 477, 188 (2011) に公刊された。

(2011 年 8 月 25 日プレスリリース)



赤外線で見ると数多くの星がひしめく銀河系中心の近くにセファイド変光星を発見した。この図は、銀河系中心の周囲約 5 分角四方の範囲について、われわれの取得した近赤外線画像から作成した疑似カラー合成図である。図中にある 2 つのセファイドのほか、この範囲の外でさらに 1 つのセファイドを発見した。

太陽風と宇宙線を浴びた「はやぶさ」粒子

長尾 敬介 (地殻化学実験施設 教授)

◆ ◆ ◆
 昨年6月13日に帰還した小惑星探査機「はやぶさ」が持ち帰った試料の初期分析の一環として、微小粒子3個の希ガス同位体分析を行い、これらの粒子が確かに小惑星イトカワの表面に存在していたこと、およびイトカワの寿命が太陽系の年齢に比べてはるかに短いことを明らかにした。
 ◆ ◆ ◆

はやぶさは、2003年5月9日に宇宙航空研究開発機構(JAXA)内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられ、2005年に小惑星イトカワに着陸して表面試料を採取した。試料のほとんどが100ミクロンより小さい粒子であったが、イトカワ起源と見られる1500個を超す粒子が昨年末までに確認された。イトカワは地球への落下頻度の高い隕石である普通コンドライトと似ていることが事前の反射スペクトル観測から知られていた。サンプルリターンの成功は、特定の小惑星試料を実験室で精密分析して隕石との関連を検討することを初めて可能とした。

希ガス同位体を測定した3個のはやぶさ試料は40から60ミクロンサイズのかんらん石結晶であった。小さすぎて個々の重量を測定できないため、形状と密度から0.06、0.12 μgと推定した。このような微小試料に含まれる希ガス分析を行うため、われわれは10年ほど前から宇宙塵などの分析を通して希ガス質量分析装置と測定技術の改良を重ねてきた。

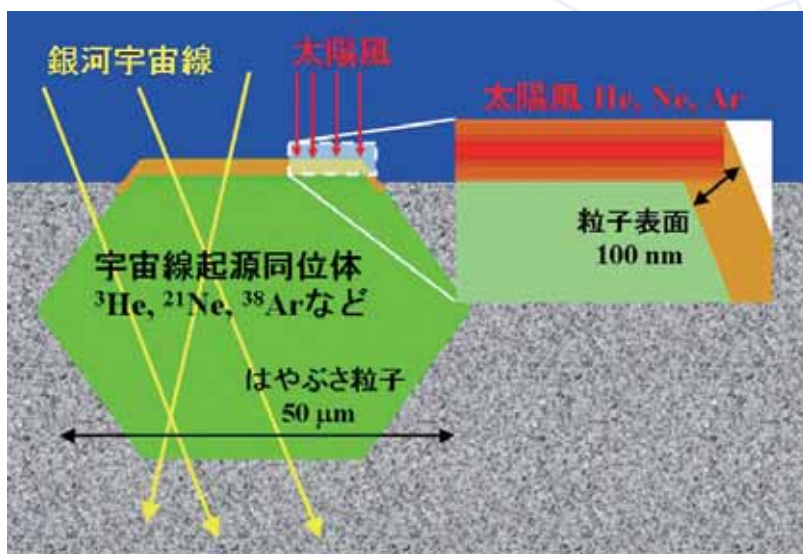
はやぶさ粒子をレーザーで段階的に加熱して各温度段階で放出された希ガスを分析したところ、測定した微粒子のすべてに、地球とはまったく異なるが、太陽とほぼ同じ元素および同位体

比をもつ、ヘリウム、ネオン、アルゴンが検出され、加熱温度による希ガス放出割合は粒子ごとに異なっていた。この結果は、これら粒子が大気をもたないイトカワ表面に存在して、砂地中を移動しながら少なくとも数100年間は太陽風に直接曝された歴史をもつことを明らかにした。この比較的エネルギーが低い太陽風は固体表面から100 nm程度のごく薄い層に打ち込まれているため、地球へ落下するときに大気圏で加熱される隕石や宇宙塵からは失われ、観測されていなかった。

太陽風よりエネルギーの高い銀河宇宙線に固体物質が照射されると、天体の表面から1 m程度の深さまでは、核反応によって特有の同位体比をもつ宇宙線照射起源希ガス(^3He , ^{21}Ne , ^{38}Ar など)が固体内に生成される。これらの濃度を測定すれば、宇宙線に照射された期間を推定できる。太陽風希ガスを含むことからイトカワ表層に存在したことが確実である微粒子は銀河宇宙線照射も受けていたにもかかわらず、宇宙線起源同位体が測定精度内では検出されなかった。この事実は、イトカワ表層物質は数100万年に満たない期間しかイトカワ表層に存在しなかったことを示している。長い照射期間をもつ月の表層

粒子や月起源隕石と異なり、最大長が約500 mの小天体であり、重力をほとんど持たないイトカワでは表層物質は容易に太陽系空間に失われる。破壊された母天体の破片が集積してできたと考えられているイトカワの形成が数100万年以前ならば、この天体の寿命は10億年以下で、太陽系の年齢(46億年)に比べるとはるかに短いと推測される。本成果はK. Nagao *et al.*, *Science* 333, 1128 (2011) に掲載された。

(2011年8月26日プレスリリース)



大気の無い小惑星表面にある粒子は、その表面のごく薄い層に希ガスを含む太陽風が打ち込まれるとともに、高エネルギー宇宙線による核反応で内部に希ガス同位体が生成する。