解説シリーズ

ミュオン科学への招待

日本に誕生した大強度ミュオン源

高エネルギー加速器研究機構 河村 成肇

茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設(J-PARC)は複数の実験施設で構成され、様々な分野の研究が実施されている。ミュオン科学実験施設はJ-PARCを構成する施設の一つで、世界最高強度のミュオンビームを生みだしている。ミュオンの利用範囲は基礎から応用まで幅広く、素粒子物理学から物質・材料研究にまでおよぶ。本稿では多くの読者にとっておそらく耳慣れない素粒子“ミュオン”の解説から始め、ミュオンビームを生み出すための施設を概観し、実際にミュオンを使った研究例を紹介する。

KEYWORDS: *muon, accelerator, non-destructive elemental analysis, nuclear fusion*

I. ミュオンとは

ミュオンは電子などと同じくレプトン(軽粒子)に分類され、2.2マイクロ秒で電子と2つのニュートリノに崩壊する不安定な素粒子である。負の電荷をもつ粒子(負ミュオン, μ^-)と、正の電荷をもつ反粒子(正ミュオン, μ^+)が存在することが知られている。その認知度は物理の研究者に限ったとしても低いものと思われるが、一方でわれわれの日常に最もありふれた存在の素粒子でもある。地表には常に宇宙線が降り注いでいるが、その7割をミュオンが占め、 1m^2 の面積に毎秒170個程度のミュオンが降り注いでいる。つまり、手のひらを上に向けると、毎秒1個程度のミュオンが通りぬけていることになる。宇宙空間を飛び交う陽子などの1次宇宙線が地球に飛来し、それが大気(窒素や酸素)の原子核と反応し π 中間子が生成される。その π 中間子が崩壊することでミュオンとなり、地表に降り注いでいる。

固有のスピン、質量、寿命を持つミュオンはその特徴を生かして、物理学や化学などの分野で広く用いられてきた。ただし、実験で用いるには宇宙線由来のミュオンではその数が少な過ぎ、現実的な時間内でデータを取ることができない。そこで人工的に作ったミュオンビームが必要となる。ミュオンを人工的に作るには、宇宙線と同様に高エネルギーの陽子が必要となる。すなわち、ミュオンビームを作るには加速器施設が必要になる。

余談だが、宇宙線ミュオンには現在の加速器技術では

到達できないほど高いエネルギーをもつものが含まれ、岩石ならば数km程度を貫通することが可能である。この特徴を生かして、宇宙線ミュオンによる火山のトモグラフィなどが行われてきた¹⁾。また、福島第一原子力発電所の炉内の燃料位置の測定などへの応用も検討されている。

1. J-PARC ミュオン科学実験施設

日本初のミュオンビームラインは東京大学理学部中間子科学研究施設に建設され、後に改組され高エネルギー加速器研究機構(KEK)の一部となった。KEKの施設では多くの先駆的な研究が成されたが、一方で世界の他のミュオン実験施設(カナダ TRIUMF 研究所、スイス PSI 研究所、英国 Rutherford 研究所など)と比べるとビーム強度(生成されるミュオン数)は著しく劣っていた。多くのデータを得るためには、より大強度のミュオンビームが必要になる。大強度ビームを生み出す施設を国内に建設することはミュオンを用いた研究に携わるものの長年の夢であった。同様にビームの大強度化を望む核破砕中性子やK中間子などのKEKの他の施設とともに、大強度陽子加速器施設の提案がなされてきた。一方、日本原子力研究所でも放射性廃棄物の消滅処理や中性子利用のため、大強度陽子加速器施設の提案がなされていた。それぞれ独立に提案された計画であったが、それらはJ-PARC計画として統合され、2000年に建設予算の内示を受けるに至った。両研究所の監督官庁である文部省と科学技術庁の文部科学省への再編という流れの中で、J-PARCは省庁統合の象徴として位置付けられるとい

Invitation to Muon Science : Naritoshi Kawamura.

(2015年2月3日 受理)

う幸運にも恵まれ、2002年に建屋建設が始まった。

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、日本原子力研究開発機構 (JAEA) と KEK が共同で建設を行った加速器施設で、2008年に稼働を始めた。J-PARC はその名が示すように複合加速器施設で、3つの加速器 (400 MeV (メガ電子ボルト; エネルギーの単位, 1eV (電子ボルト) $= 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$) リニアック, 3 GeV (3 ギガ電子ボルト) シンクロトロン, 50 GeV シンクロトロン) と3つの実験施設 (物質・生命科学実験施設, ハドロン実験施設, ニュートリノ実験施設) で構成される。第1図にJ-PARCの外観図を示す。陽子はリニアックと3 GeV シンクロトロンで加速され、50 GeV シンクロトロンリングの中心付近に建設された物質・生命科学実験施設へと導かれる。また、3 GeV シンクロトロンから射出された陽子の一部は50 GeV シンクロトロンに導かれ、50 GeV (現在は30 GeV) まで加速されハドロン実験施設またはニュートリノ実験施設に送られ、実験に供されている。ミュオン科学実験施設 (Muon Science Establishment の頭文字を取り、愛称は MUSE) は物質・生命科学実験施設内にあり、3 GeV シンクロトロンで加速された陽子を黒鉛に当てることでミュオンビームを作りだしている。

2. ミュオンビームライン

3 GeV シンクロトロンで加速された陽子ビームは物質・生命科学実験施設に導かれ、核破碎中性子を生成するための水銀標的に打ち込まれる。その手前30mの位置にミュオンを生成するための黒鉛標的は設置されている。厚さ20mmの黒鉛を3 GeVの陽子が通過する際、その5%が炭素の原子核と反応して π 中間子が生成され、そ

れが崩壊してミュオンとなる。生成された π 中間子やミュオンは荷電粒子であるため、電磁石の磁場による収束や発散が可能であり、これにより生成標的から20m以上離れた実験用のエリアまでミュオンビームを輸送することが可能となる。標的の周囲には合計で4本のビームラインが設置可能で、現在、そのうちの3本までが建設を完了している。

標的により生成されたミュオンが持つ運動エネルギーは幅広く分布するが、実験では必要とする特定の運動エネルギーのミュオンのみを使用する。ビームラインに設置された電磁石の磁場を調整することによりミュオンが持つ運動エネルギーを自由に選択することができる。3本あるビームラインのうち、崩壊ミュオンビームライン (Dライン) は調整できる運動エネルギーの幅が最も広く、数 keV から50 MeV 以上のミュオンを利用者に供給することができる。現在、Dラインのみが大学共同利用に供せられ、年間70組以上のグループが実験を行っている。

超低速ミュオンビームライン (Uライン) では、その名が示す通り、非常に低いエネルギー (数 eV から10 keV 程度まで) のミュオンを供給することが可能である。この超低速ミュオンは、物質の表面に停止させることも可能であり、表面や界面 (層状物質の境界) などの研究への応用が期待され、調整が進められている。表面ミュオンビームライン (Sライン) のエネルギーは約4 MeVに固定だが、同時に4つの実験エリアにビームを振り分けることが可能であり、そのうち1つの実験エリアまで建設が完了し、現在は調整を行っている。最後に残った未完成のビームライン (Hライン) は基礎物理研究に特化したものとなる予定である。それらの研究では現在知られ

第1図 J-PARCの加速器と実験施設 (©J-PARC)

ている物理法則(標準理論)では説明できない事象の探索や、観測値と理論値との僅かなズレを捉えるため、大量のミュオンを必要とする。そのため、長期間にわたり占有可能な専用のビームラインが必要となる。第2図に物質・生命科学実験施設における各ミュオンビームラインの配置を示す。

余談だが、崩壊ミュオン、表面ミュオンという名は、ミュオンの生成方法に由来する。ミュオンは π 中間子の崩壊により生成される。崩壊ミュオンビームラインでは、標的から飛び出した π 中間子はビームライン中に設置された6mの長さの超電導ソレノイド電磁石に導かれ、その磁場中で螺旋運動をしながら、途中でミュオンへ崩壊する。そのミュオンを集めたものが崩壊ミュオンビームとなる。超電導ソレノイド電磁石に入射する π 中間子のエネルギーを変えることで、得られるミュオンのエネルギーも変えることが可能である。一方、生成された π 中間子のうちエネルギーの低いものは標的中に停止

する。標的の表面付近に停止した π 中間子が崩壊すると約4MeVのエネルギーを持ったミュオンとなる。このミュオンは表面ミュオンと呼ばれ、比較的簡易な電磁石の構成で強度の強いビームが得られ、また4MeVという数値は物質研究では扱いやすいものであるため、世界中のミュオン施設で最も多く利用されている。ただし、負の電荷を持った π 中間子はミュオンへ崩壊する前に標的の原子核と反応してしまうため表面ミュオンは生成されない。表面ミュオンは正の電荷をもった π 中間子からのみ得られ、ミュオンも正の電荷をもったもののみとなる。第3図は、表面ミュオンと崩壊ミュオンの生成方法の違いを模式的に表したものである。

II. ミュオン科学

本章では、ミュオンを用いた研究、特にJ-PARCミュオン科学実験施設(MUSE)の特色である負ミュオンを用いた研究を中心に紹介したい。

1. ミュオン原子と特性X線

MUSEの特色の一つに、負ミュオン(μ^-)のビーム強度が他の施設と比べて高いことが挙げられる。これは、J-PARCが世界の他のミュオン実験施設と比べ3GeVという高いエネルギーの陽子を用いているためで、負電荷の π 中間子、すなわち μ^- の生成量が多いことに由来する。世界の他の施設での μ^- のビーム強度は μ^+ と比べ1桁程度小さいのに対して、MUSEではほぼ同程度となっている。MUSEの前身、KEKのミュオン実験施設でも μ^- を用いた様々な研究が行われていたが、原理検証的なレベルにとどまり、実用化レベルに至ったのはMUSEからと言っても過言ではない。

冒頭で述べたようにミュオンは電子と同種の素粒子であって、電荷などの値は等しい。ただし、ミュオンは電子と比べて200倍の質量を持つ。つまり、 μ^- は重い電子とみなすことができる。電子と原子核で構成される普通の原子に μ^- が近づくと、まず外殻電子との入れ替わりが起こり(原子捕獲)、軌道上の電子やX線を放出することでエネルギーを失いながら、基底状態へと0.1ナノ秒程度の時間で落ちていく(脱励起)。 μ^- の質量が200倍重いので、 μ^- と原子核で構成されるミュオン原子の軌道半径は普通の原子と比べて1/200小さくなり、また束縛エネルギーは200倍高くなる。ミュオン原子の脱励起過程で放出される特性X線はミュオン原子X線と呼ばれ、普通の原子の特性X線と比べて200倍高いエネルギーを持つ。例えば水素原子の場合、2p励起状態から1s基底状態への遷移で約10eVの特性X線を放出するが、ミュオン水素原子の場合は2keVのX線を放出する。比較的大きな原子核では、X線のエネルギーは数MeVに達する。なお、ミュオン原子の特性X線は電子の遷移に相当するため、エネルギーが数MeVに達して

第2図 物質・生命科学実験施設北側、ミュオン実験科学施設(MUSE)

第3図 表面ミュオン(左)と崩壊ミュオン(右)

第4図 ミュオン原子の生成と特性 X 線の放出過程

も γ 線ではなく X 線と呼ばれる。第4図にミュオン原子の生成から特性 X 線の放出過程を模式的に示す。

2. μ^- による非破壊元素分析

未知の物質に含まれる元素の分析を行う際には、 μ^- が有効である。ミュオン原子 X 線はエネルギーが高いため透過力が高く、物質の内部から放出されても外部で容易に検出することができる。蛍光 X 線分析では感度が悪いナトリウムより軽い核に対しても、ミュオン原子 X 線ならば容易に分析が可能である。また、入射する μ^- のエネルギーを変えることで、物質への打ち込み深さを調整し、 μ^- を任意の深さに自由に停止させることが可能である。これにより、物質内部の3次元元素マッピングを非破壊で作成することが可能となる。なお、ミュオン原子中の μ^- は電子と2つのニュートリノに崩壊する場合(元の原子核は不変な場合)と、原子核に吸収されて陽子を中性子に変える場合(元の核種を変える場

合)がある。比較的重い原子核では後者の反応が主になる。例えば、 ^{28}Si の場合、約 2/3 の μ^- が原子核に捕獲され ^{28}Al の励起状態になり、その後、核子や γ 線などを放出することが知られている²⁾： $\mu^- + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{28}\text{Al}^* + \nu_\mu$ (ν_μ はミュオンニュートリノ)。したがって、科学的な意味では対象物質を“改変(破壊)”していることになるが、分析に必要な μ^- の数は対象物の原子数(アボガドロ数程度)と比べて 10 桁以上少なく、実質的には非破壊といつて差し支えない。

MUSE では、 μ^- による非破壊元素分析の手法確立を目指し、様々な試験研究が行われている。天保小判の分析では、小判の表面は金、内側に入るほど銀の成分が多く含まれることが確認された。これは色揚げ(色付け)という江戸期に発達した技法により作られた小判の特徴で、従来は破壊検査でのみ知ることができたが、 μ^- により初めて非破壊元素分析に成功した。また、隕石³⁾や考古学的に重要な遺物、電池などの実用製品の分析など期待される応用分野は多岐にわたり、基礎データの取得などの研究が続けられている。

3. μ^- の核融合触媒作用

μ^- を水素に打ち込んだ場合には、前節で述べたものとは異なる特異な反応を示す。水素やその同位体(重水素・三重水素)から成る系に μ^- が入射すると、まず前節と同様にミュオン水素原子(μ^- と水素原子核の2体系)が生成される。そのミュオン水素が周囲の他の水素分子と衝突することで、ミュオン水素分子(μ^- と2個の水素原子核の3体系)が作られる。この分子中での2個の水

素原子核は通常の水素分子の1/200の距離にまでお互いに近づき、核融合を起こす。この核融合反応自体は2個の原子核の間に働く核力(強い相互作用)によるもので、 μ^- は直接的には関わっていない。そのため、核融合反応により生じたヘリウム原子核や中性子などが飛び散ると、残された μ^- は自由になり、再び次の核融合反応を誘発する。この反応は μ^- が不純物などの水素より重い原子核に捕獲されなければ、その寿命の限り続く。一連の反応は μ^- があたかも触媒のように働くことからミュオン触媒核融合(μ CF; muon catalyzed fusion)と呼ばれている。

一つの μ^- により引き起こされる核融合反応の回数は、ミュオン水素分子がいかに効率よく作られるかに依存する。重水素のみの系または重水素と三重水素の混合系では、ミュオン水素原子と周囲の水素分子の衝突により共鳴的に(高速に)ミュオン水素分子が作られることが知られている。実際に、英国 Rutherford 研究所のミュオン実験施設では、理化学研究所などのグループにより1つの μ^- あたり100回以上の核融合反応が起こることが確認されている⁴⁾。ミュオン水素分子の共鳴的生成過程は、ミュオンを打ち込む水素標的の密度やミュオン水素と水素分子の衝突時の運動エネルギー、すなわち水素標的の温度などに依存する。つまり、核融合という数 MeV のエネルギーの反応が温度という数 meV のエネルギーにより制御されていることになる。この9桁の開きは μ CF 研究の面白さを端的に表しているものと言える。

MUSE では μ CF に関する研究は未だ実施されていないが、ミュオンビームの大強度化に伴って μ CF 研究の新たな展望が開けてきた歴史を鑑みると、今後の重要な研究テーマの一つと言える。

III. おわりに

本稿では、J-PARC ミュオン実験施設(MUSE)の特色

である負ミュオン(μ^-)を用いた研究を話題の中心に据えたが、これはミュオンを用いた科学の一部であり、実は正ミュオン(μ^+)を用いた研究の方が盛んである。現在、多くの研究者が MUSE を訪れ、 μ^- や μ^+ を用いた様々な研究を行っているが、従来にはなかった手法による研究が増えてきている。これは、ビーム強度という“量”の変化が研究内容という“質”の変化を促したことによるものと言え、 μ^- ビームによる非破壊元素分析の実現はその端的な例と言える。

筆者がミュオンを用いた研究に出会ったのは今から20年以上前、大学院修士課程に入学したときである。当時、KEK にあった施設で初めてミュオンビームに“触れ”、その後、博士課程・ポスドク時代を英国 Rutherford 研究所に作られた理化学研究所のミュオン実験施設で過ごした。KEK のものと比べ数10倍のビーム強度がある理化学研究所の施設を利用し、ビーム強度の重要性を痛感した。そのビーム強度をさらに大きく上回る MUSE の建設に携わることができたのは、非常に幸運なことであったといえる。本稿の読者がミュオン科学に興味を抱き、ミュオンビームを利用したいと思っていただければ幸いである。

— 参考資料 —

- 1) <http://www.u-tokyo.ac.jp/ja/utokyo-research/feature-stories/a-window-into-the-earths-interior/>
- 2) D.F. Measday, Physics Reports, 354, 243 (2001).
- 3) K. Terada, et al., Scientific Reports, 4, 1 (2014).
- 4) <http://meson.riken.jp/ja/research/nphysics/mucf.html>

著者紹介

河村成肇 (かわむら・なりとし)

高エネルギー加速器研究機構

(専門分野/関心分野) ミュオン科学, 原子核物理