

負ミュオンを使った非破壊材料分析の最先端

012 Non-destructive analysis by negative muons

三宅 康博 yasuihiro.miyake@kek.jp

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所

負ミュオンが物質中の原子に捕獲される過程で 100%の確率で放出されるミュオン特性X線は其々の原子に固有のスペクトラムを持ち、しかも電子に比べて 200 倍重いこともあって、検出の容易な高いエネルギー(電子 X 線の~200 倍)を持っています。それ故に、負ミュオンを用いれば、リチウムをはじめとした軽元素であっても極めて高い収率で検出でき、原理的には、X線蛍光分析をはるかに凌ぐ超高感度の元素分析手段と考える事ができます。負ミュオン元素分析法のユニークな特徴を図 1 に示します。

これまで負ミュオンによる分析法は、非破壊分析法としてあまり使われてきませんでした。多分に、従来のミュオン施設では十分な負ミュオン収量が得られなかったからです。J-PARC/MUSE では、以下に示す 2 つの特徴を生かして、負ミュオン利用の実用化を図ろうとしています。

1) MUSE では、世界最高強度の大強度パルス負ミュオンが得られます。3GeV 陽子の負パイオンの生成断面積は 800MeV 陽子と比べ、“np 核反応”では 10 倍強、“pp 核反応”に至っては 200 倍にも及ぶからです。

2) MUSE の第 2 の特徴は、20MeV/c 以下の低運動量の負ミュオンを取り出す事ができるというものです。負ミュオンは、長尺の超伝導ソレノイドの中を負パイオンを飛行させ、飛行しながら崩壊して生まれる負ミュオンを効率良く捕獲し、運動量を選択して実験室に輸送し、実験に供しています。MUSE では、長尺の超伝導電磁石の断熱方式をウォームポア方式に変更し、ビーム輸送系で低運動量のミュオン損失の原因となる窓を取り除く改造を行いました。その結果、低運動量 2.6MeV/c (32keV) (最大 120MeV/c (54MeV)) のエネルギー可変の負ミュオンを得られるようになりました。従って、MUSE では、負ミュオンビームを物質中に打ち込み、任意の深さ(例えばグラファイト中で 100nm から 60mm の任意の深さ)に止めることができます。

シンポジウムでは、負ミュオンビームのユニークな特徴を生かした研究例として、リチウムイオン電池研究では、充放電の際に、Li 元素が、正極・負極間で移動するのかを非破壊で調べる研究を紹介し、歴史資料の研究では、地中での錆化や経年劣化、表面処理などの影響によって、表層部と深奥部では化学組成に大きな違いがあるような、銅鐸や、天保小判などの貴重な遺物の非破壊元素分析[1]を紹介し、また、宇宙線ミュオンの半導体に与える影響、負(正)ミュオンによる半導体のソフトエラー研究[2]についても紹介します。

今後の展望として、3D 元素分析高度化を目指した超低速負ミュオンの将来計画を紹介します。加速器から直接に得られる負ミュオンは、大きな空間的な広がり大きなエネルギー分散とを有し、高々ミリメートル程度収束させることしかできません。ミュオン特性 X 線による元素分析のナノスケール高分解能化や 3 次元高分解能化[3]のためには、空間コヒーレンスに優れていて(=エミッタンスの小さな)且つ、時間コヒーレンスに優れた(=エネル

ギー分散の小さな)負ミュオンビームが必要です。この為に超低速負ミュオンビームを生成し、打ち込み深さの精密化を図るプロジェクトが新学術領域研究の枠組みで新しく始まりました。実現すれば、元素情報に加え、同位体や化学結合の情報を 3 次元ナノスケールで明らかにすることができます。従来の計測法(例えば、電子線や X 線を用いる X 線蛍光分析 EDX や EDS)にはない全く新しい研究手段の誕生です。材料科学や生命科学に対して革命的な役割を果たすかもしれません。

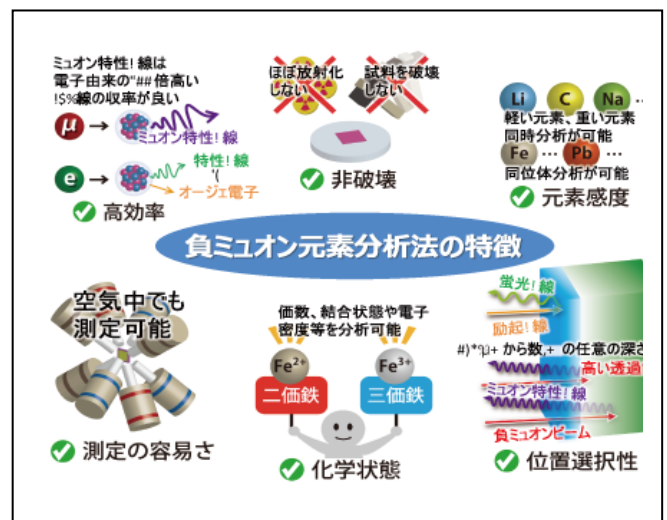


図 1 負ミュオン元素分析法の特徴

【共著者(所属)】反保元伸(KEK)、竹下聡史(KEK)、梅垣いづみ(豊田中研)、永谷幸則(KEK)、齋藤努(歴博)、沓名貴彦(科博)、久保謙哉(国際基督大)、二宮和彦(阪大)

【関連プロジェクト】

- ・平成 30 年度新学術領域 宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。
- ・新たな応用への架け橋-(領域代表 東大 IPMU 高橋忠幸)
- ・機構間連携・異分野連携研究 ミュオンによる歴史資料の非破壊内部元素組成分析

【参考文献】(最大 3 本)

- [1]“Development of non-destructive isotopic analysis methods using muon beams and their application to the analysis of lead”, K. Ninomiya et al., J. of Radi. Nucl. Chem., Vol.320,3(2019) 801-805
- [2]“Negative and Positive Muon-Induced Single Event Upsets in 65-nm UTBB SOI SRAMs”, S. Manabe et al., IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, 65, 8, AUGUST (2018),1742-1749.
- [3]“A compact imaging system with a CdTe double-sided strip detector for non-destructive analysis using negative muonic X-rays”, M. Katsuragawa et al., NIM A 912 (2018) 140-143.

【関連 WEB】(最大 2 本)

- [1]https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/planned-research/c02/index.html
- [2]<https://www2.kek.jp/imss/event/2019/12/2526sympo.html>