



PRESS RELEASE



報道関係各位

2023年11月16日

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

J-PARCセンター

国立大学法人 茨城大学

国立大学法人 室蘭工業大学

大強度パルスミュオンで過渡現象を追う

～Transient μ SR の開発～

本研究成果のストーリー

●Question

素粒子ミュオンを試料に照射して行うミュオンスピン回転/緩和/共鳴 (μ SR) 実験と呼ばれる手法では、大強度のビームを用いることで短時間で試料の構造を調べることができます。しかし試料の温度など環境調整に時間がかかり、調整中は測定が行えないことが問題でした。

●Findings

試料環境の情報をリアルタイムで同時に取り込み、そのデータを測定後に整理する新手法で従来と同じ結果を得られることがわかりました。この新手法を Transient μ SR と命名しました。

●Meaning

この手法は日本が誇る世界最高強度のミュオンビームで絶大な効果を発揮し、試料環境を変化させながら高速に μ SR 測定が可能になり、また過渡的な現象も測定できるようになります。例えば、電池などを破壊せずに動作したまま測定することで電池研究の加速が期待できます。

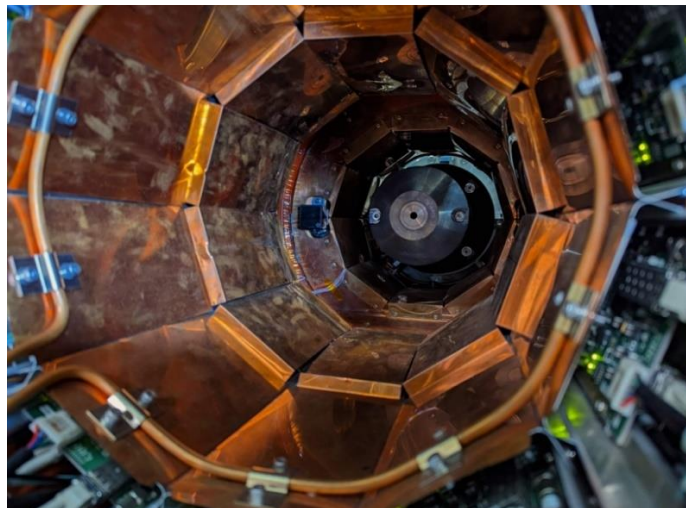


図1 Transient μ SR の開発に利用された S1 エリアの μ SR 測定装置「ARTEMIS」紙面奥に見える穴からミュオンが入射し、試料と温度計は装置の中心に写真の右または上から設置する。



J-PARC の大強度ミュオンビームを有効活用する新しい測定手法、Transient μ SR を開発しました。これにより、ミュオン測定(μ SR)を使った過渡現象の解明が可能になるなど、世界の μ SR 研究を先駆ける成果が期待されます。

概要

大強度陽子加速器施設 (J-PARC ※1) 物質・生命科学実験施設 (MLF) のミュオン科学実験施設 (MUSE) S ラインを使って、大強度パルスミュオンビームの利点を生かした測定手法である Transient μ SR を開発しました。ミュオンスピン回転/緩和/共鳴 (μ SR ※2) は、以前から物質の性質を調べる手段の一つとして用いられてきましたが、Transient μ SR の発明によって試料環境の調整と測定を交互に行う必要がなくなり、例えば、物質の温度・磁場応答を高速に調べることが可能になり、また、経時変化する試料など過渡現象に対しても μ SR 実験が可能になります。Transient μ SR は世界最高強度のビーム出力でこそ真価を発揮し、世界の μ SR 研究をリードする成果が期待されます。

※1. 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が茨城県東海村で共同運営している大型研究施設で、素粒子物理学、原子核物理学、物性物理学、化学、材料科学、生物学などの学術的な研究から産業分野への応用研究まで、広範囲の分野での世界最先端の研究が行われています。J-PARC 内の物質・生命科学実験施設では、世界最高強度のミュオン及び中性子ビームを用いた研究が行われており、世界中から研究者が集まっています。

※2. ミュオンスピン回転/緩和/共鳴 (μ SR)

ミュオンはスピンという性質を持っており、スピンの方向が磁場を感じるとスピンの向きが回転する。正ミュオンは約 2.2 マイクロ秒の寿命を持って崩壊し、スピンの方向に多く陽電子を放出するため、前後左右に飛んでいく陽電子数の違い (非対称度) を測定することでスピンの運動が分かり、物質内部の局所的な磁場構造を調べることができる。

研究グループ

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系 西村昇一郎 特別助教
東北大学金属材料研究所 材料物性研究部 量子ビーム金属物理学研究部門 岡部博孝 特任助教
茨城大学 理工学研究科 量子線科学専攻 平石雅俊 研究員

室蘭工業大学 しくみ解明系領域 物理物質科学ユニット 宮崎正範 助教

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系 中村惇平 技師

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系 幸田章宏 教授

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 ミュオン科学研究系 門野良典 特別教授

研究者からひとこと



KEKの西村 昇一郎 特別助教

これまで培ってきた解析技術と J-PARC 大強度ビームでの μ SR 測定が出会い、新測定法である試料環境の変化と非同期のデータ収集法を確立しました。これを Transient μ SR と名付けました。この手法は世界最高のビーム強度を誇る J-PARC にこそ相応しい手法です。

なぜこの研究を始めたのですか

ミュオンを使って物質の性質を調べる μ SR ですが、測定を精密に行うためには、測定に使うミュオンの数が重要になります。大強度ビームを使うと必要なミュオンの数があったという間に蓄積されるので、短時間で測定を行うことが可能です。

ところが、J-PARC のビーム強度は非常に強力で、ビームを使っている測定時間が短くなったのは良いのですが、物質の温度制御などにかかる時間の方が長くなってきました。調整中に照射しているミュオンビームのデータは使うことができないので、無駄になってしまいます。

ひらめいたところはどこですか

J-PARC のミュオンビームは 25Hz のパルス状になっています。これを写真に例えるとストロボ写真のようなもので、1 秒間に 25 回のイメージが得られます。最近の画像ファイルには位置など様々な情報が含まれていますが、それと同じ様に μ SR の測定データに試料環境の情報を組み込んでおきます。幸いなことに、 μ SR の測定データはパルスごとに保存されていたので、後段のデータ処理にパルス解析処理の技術を応用することで組み込みが実現します。そうすることで、測定終了後に試料環境の情報を元にデータを並び替えて、好きなようにデータを統合・切り出しすることが可能となります。

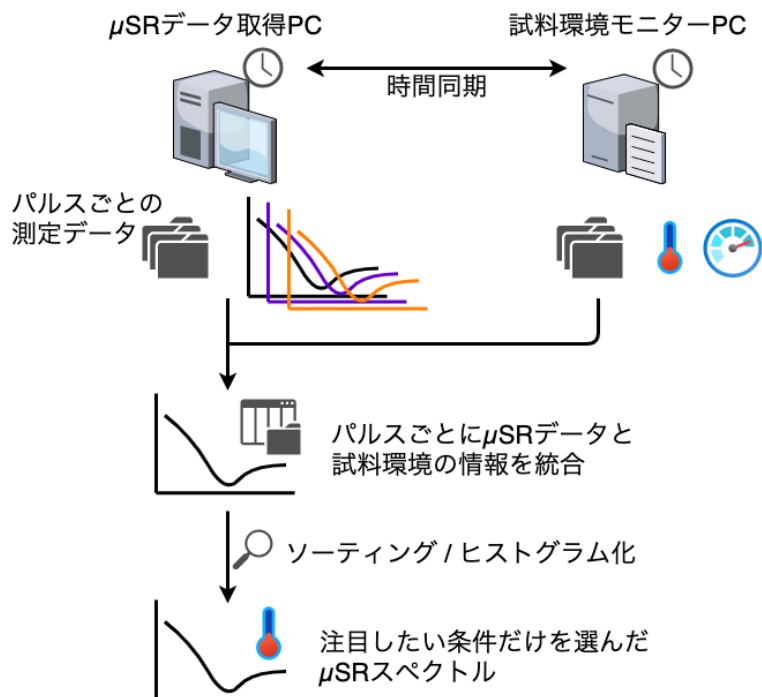


図 2 Transient μ SR のデータ処理のしくみ。 μ SR のパルスごとの測定データ、試料環境の情報を統合・整理することで、注目したい条件に絞った結果が得られる。

努力したところはどこですか

J-PARC では様々なユーザーが来て実験を行うため、幅広いユーザーにも新しい Transient μ SR を使っていただけるようなソフトウェアが必要でした。そこで、Transient μ SR の肝である情報統合がクリックひとつで行えるソフトウェアを開発しました。カーソルを載せるだけで従来と同じ μ SR の測定結果を描画させるなど、ユーザーが直感的にデータ処理を行えるように工夫しました。

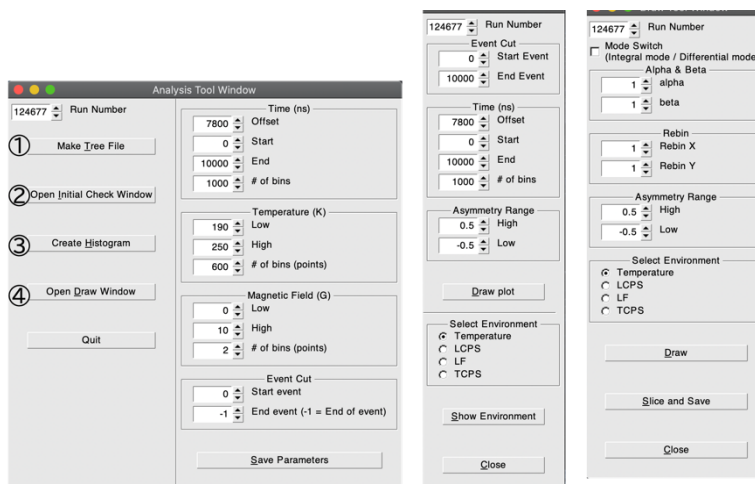


図 3 新たに開発した Transient μ SR 解析ソフトウェアの様子。ボタンが用意されており、上から順番にクリックするだけでデータの並び替えが実行される。

何がわかったのですか

新しい Transient μ SR で得られた結果が、従来の μ SR で得られる結果と一致しているかどうかは非自明です。そこで、過去に μ SR 測定の例がある物質を使って、Transient μ SR と差があるかどうか比較しました。1 つ目は温度により磁気構造が変化する酸化銅(CuO)を測定しました。図 4 に示す通り、230 K (ケルビン) と 214 K 付近で色の様子が変化していることが分かります。これこそが磁気構造が変化する温度 (転移温度) で、過去の文献と一致することが分かりました。

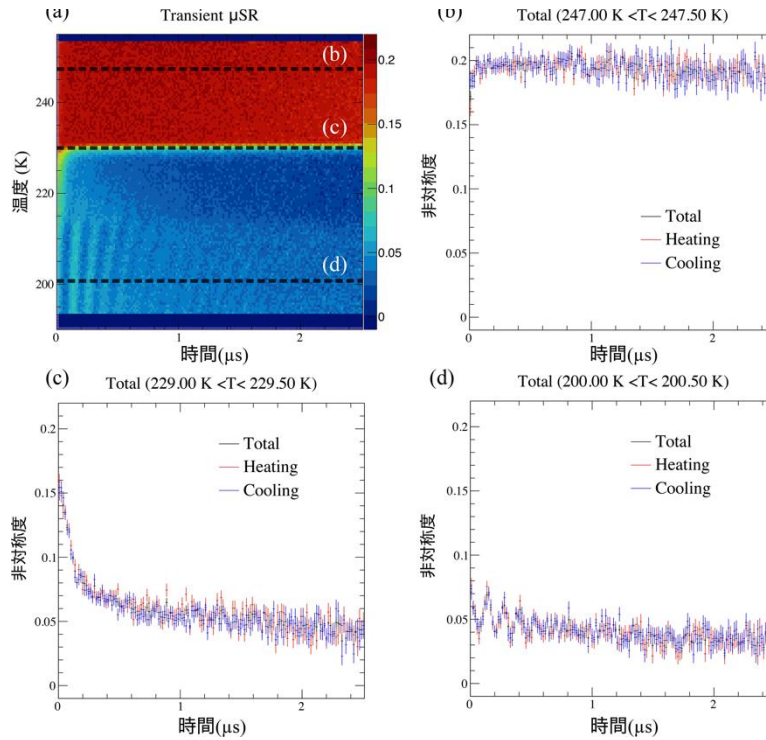


図 4 Transient μ SR 専用ソフトウェアの描画機能。描画すると最初に(a)の図が表示される。(a)では縦軸に試料環境 (温度)、横軸に μ SR 測定的时间、色は μ SR 測定における非対称度を表している。(b), (c), (d)はそれぞれ線の位置で切り出した μ SR スペクトルで、コンピュータのカーソルを(a)のそれぞれの位置に持っていくと自動的に描画される。温度によって形が大きく異なっていることが分かる。

もう一つは磁場を変化させる測定で、銅(Cu)を用いて準位交差共鳴という測定を行いました。図 5 は測定の結果で、ピンク色の線は磁場がゼロのときにおける理論的な線を表しています。磁場が上昇するに連れて谷底がなくなっていく様子が分かります。この予想される線を磁場ごとに解析していくことで共鳴磁場を探し出します。結果は 8 mT (テスラ) で共鳴によるスピン緩和が観測され、過去の測定と一致することが分かりました。温度と磁場を変化させる 2 つの測定から、データ収集中に試料環境が変化しても問題なくデータを整理することができる事が明らかになりました。

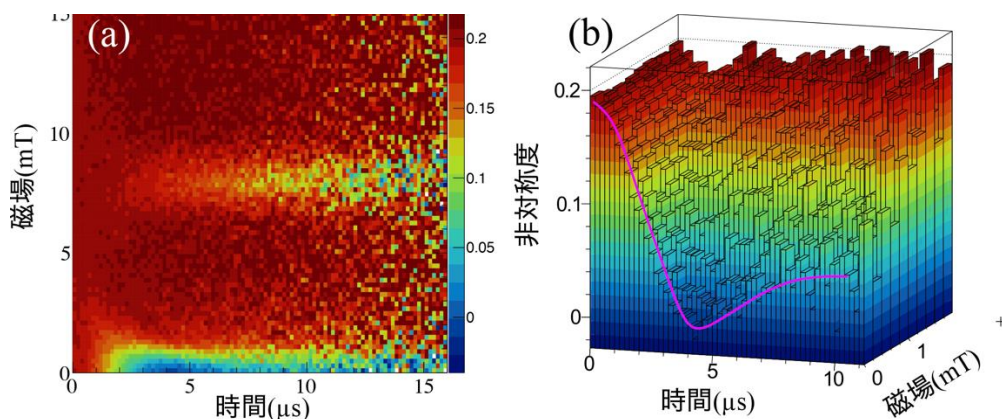


図 5 (a)Transient μ SR で測定した Cu の準位交差共鳴測定の結果。(b)は低磁場領域を切り取って 3次元描画した図で、横は時間、高さは非対称度、奥行きは磁場の強さを表している。(a)において、8 mT 近辺の時間の遅い領域で非対称度が下がっており、共鳴現象が捉えられている。

それで世界はどう変わりますか

従来の μ SR 実験では試料環境とデータ収集が交互に行われていましたが、Transient μ SR の登場によって、これらが完全に独立します。例えば、従来は冷却に 30 分程度かけて最低温度にした後、調べたい温度まで上げて各測定に 15 分程度かけていましたが、最初の冷却だけで網羅的に測定することが可能になります。つまり、データ収集はずっと動かし続けたまま、試料環境や試料の状態そのものを変化させることができます。例えば、電池などを破壊せずに動かしたまま測定するオペランド測定などで電池開発が加速します。また、経時変化する試料などに対しても μ SR 実験が可能になります。今後 J-PARC では、従来の μ SR の測定システムが Transient μ SR と置き換わっていくと予想しています。Transient μ SR は大強度ビームである



J-PARC だからこそ使える手法であり、世界の μ SR 研究をリードする成果が期待されます。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP20K05312, JP19K15033, JP19K20595、文部科学省の「元素戦略プロジェクト< 研究拠点形成型 >」(助成番号: JPMXP0112101001) の助成を受けたものです。また Transient μ SR の実験は、J-PARC MLF の実験課題 (課題番号 2019B0411, 2020MI21) として行われました。

論文情報

Shoichiro Nishimura, Hirotaka Okabe, Masatoshi Hiraishi, Masanori Miyazaki, Jumpei G. Nakamura, Akihiro Koda, and Ryosuke Kadono, Development of transient μ SR method for high-flux pulsed muons, Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A 1056 (2023) 168669.

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168669>