

# 物構研におけるマルチプローブ利用研究のすすめ

～放射光、低速陽電子、中性子、ミュオンを使って新しい世界を見てみよう～

PF News はユーザーの皆さまと施設スタッフが協力して発行する雑誌として、放射光コミュニティを盛り上げるのにお役に立てて来ていると思います。皆さまに日頃から面白い研究内容など多数ご執筆頂いているお陰とっており、ここに改めて感謝申し上げます。

さて、物構研の誇る他の量子ビームの特徴とその BL や実験装置の紹介記事を連載することになりました。皆さまが放射光実験に加えて、これらの量子ビームを使った実験も展開されるきっかけになれば幸いです。それでは、これら量子ビームの世界をお楽しみ下さい。

## 1. マルチプローブ利用に寄せて

### 「和して属さず」マルチプローブを利用しよう

物質構造科学研究所長 山田和芳

物構研は、放射光、低速陽電子、中性子、ミュオンという4つのプローブが利用できる世界的に見てもユニークな研究所です。是非いろんなプローブを使い、「わあ、すごい！」あるいは「なんだ、この程度。」を体験しましょう。そのことで、自分が普段使っているプローブに対する見方も変わるはずで、4つのプローブの特徴を活かし、相補的に利用することによって、研究対象を多面的に捉え、新しいサイエンスを発掘できる可能性があります。物構研では複数のプローブを利用した協奏的研究を「マルチプローブ利用研究」と名付け、積極的な展開を推進したいと考えています。とは言っても「行方は難し」で、PFがあるKEKつくばキャンパスと、中性子、ミュオンを利用できる東海村のJ-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) は約80 km 離れており、実験の合間に気軽に立ち寄るのは困難です。そのため一般的なマルチプローブ研究は、サンプルのたらい回しによる研究になりがちです。しかし、いろんなプローブを自分で使うマルチプローブ体験も大変貴重だと思います。私も未踏の低速陽電子実験をいつかやってみたいと思っています。本連載では、PF ユーザーの皆さまになじみが薄いかもしれない中性子やミュオン、また、装置が整いつつある低速陽電子について、どのような装置でどのような実験ができるのか紹介していく予定です。初回は、中性子、ミュオンの特徴と物構研が運営する実験装置の簡単な紹介をします。

私が着任した際に座右の銘として掲げた言葉、「和して属さず、本質を語る」。この具現化の一つが、今回皆さまに提案するマルチプローブ利用研究です。それぞれの施設が、プローブとしての特徴を活かして和しつつも、互いに属さず切磋琢磨することで先端性の高い設備を整備し、PF ユーザーの皆さまにも新たなサイエンスが展開されることを期待しています。

### マルチプローブで協奏しよう

放射光科学研究施設長 村上洋一

物構研の山田所長より、PF News を通じて皆様に中性子、ミュオンを紹介して欲しいという申し出がありました。これは、物構研が掲げる、4つのプローブを協奏的に利用した「マルチプローブ利用研究」の推進に繋がるものです。PF 施設長としても、ユーザーの皆様に放射光や低速陽電子で得られた成果が中性子やミュオンを利用することによってさらに発展することは大きな喜びです。逆に中性子やミュオンを用いた研究が放射光によって大きく花開く可能性に大きな魅力を感じております。実際、私がセンター長を努めます構造物性研究センター (CMRC) でもマルチプローブ利用研究を積極的に展開すべしとしています。

物構研の誇る4つのプローブ、放射光、低速陽電子、中性子、ミュオンはそれぞれに特徴があり、互いに相補的な面を持ちます。1つのプローブで切り開いた研究を他のプローブでさらに切り出すことで、より立体感のある研究にできます。物構研の共同利用実験者の中で、放射光ユーザーの数は群を抜いて多くなっていますが、「マルチプローブ利用研究」により大きく発展する可能性を秘めた研究課題も数多く見られます。皆様が積極的に中性子やミュオンを利用した研究を展開して頂くことは、放射光コミュニティのみならず、広く量子ビーム利用研究コミュニティの活性化に繋がると期待しております。

そこで、中性子、ミュオンの特徴、その装置や実験手法等について、中性子、ミュオンの方々に紹介記事の連載をお願いすることにしました。また、装置の整備が飛躍的に進みつつある低速陽電子についてもこの機会に併せて紹介を致します。

既にお知らせしていますように、今年度の第30回PFシンポジウムは、物構研シンポジウム、KENS・MSLシンポジウムと発展的に統合し、物構研サイエンスフェスタとして3/14-15の日程で開催します。物構研サイエンスフェスタでは、中性子、ミュオンの方々と顔を合わせる機会があると思います。今号の記事がお互いのコミュニケーションのきっかけとなり、協奏の和が広がることを願っています。

## 2. 放射光との基本的な性質の違い

### 中性子と放射光の違い

中性子科学研究系研究主幹 大友季哉

#### はじめに

中性子は、回折や散乱により物質中原子の配列を解析するという点では、X線と比べて大きな違いはないと考えてよい。実験技術やデータ補正方法には様々な違いがあるが、原子核により散乱される中性子と、電子により散乱されるX線は相補性が高い量子ビームである。

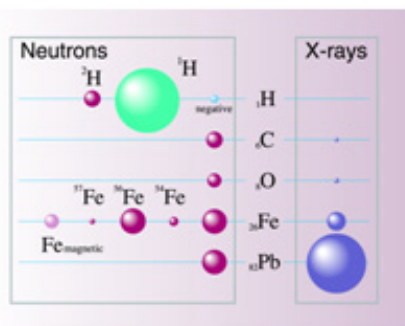


図1. 中性子とX線の散乱断面積の比較。

#### 中性子の特徴 – 波長とエネルギー –

中性子は、電気的に中性であり、スピン1/2、磁気モーメント  $\mu_n = -1.913 \mu_N$ , ( $\mu_N = 5.051 \times 10^{-27}$  J/T: 核磁子), 質量  $m = 1.675 \times 10^{-27}$  kg をもつ。電気的に中性であることから、物質内の原子核により散乱される。電子により散乱されないため、物質透過率が高く、バルク情報を得るのに適している。中性子はド・ブロイ波であるので、速さ  $v$  の中性子の波長は  $\lambda = h/mv$  ( $h = 6.626 \times 10^{-34}$  Js: プランク定数), 運動エネルギーは  $E = mv^2/2$  で与えられる。  $E = k_B T$  ( $k_B = 1.381 \times 10^{-23}$  J/K: ボルツマン定数,  $T$ : 温度) により、室温 ( $T = 300$  K) 程度のエネルギーを持つ中性子 (熱中性子) の波長は  $\lambda = 1.8 \text{ \AA}$  程度, エネルギーは  $E = 25 \text{ meV}$  程度である ((1) 式)。つまり、物質中の原子間距離程度の波長を有する中性子は、格子振動やスピン波などの固体中の素励起と同程度のエネルギーを有する。一方で、X線の場合は、 $\lambda = 1.8 \text{ \AA}$  のエネルギーは  $6.8 \text{ keV}$  となり、6桁高いエネルギーとなる ((2) 式)。

$$E = 81.8 / \lambda^2 \quad (1)$$

$$E = 1.24 \times 10^7 / \lambda \quad (2)$$

これより、中性子では原子相関や磁気スピン相関の空間的相関 (運動量に関する情報) または時間的相関 (エネルギーに関する情報) のいずれかを対象とする研究のみならず、その両方を同時に扱った時空相関の研究も比較的容易に実施できる。つまり、フォノンやスピン波の分散の測定が容易である。ただし、波長が  $1.8 \text{ \AA}$  の中性子の速度は  $2200 \text{ m/s}$  であり、伝播速度の速い素励起の分散関係の観測は難しくなる。

#### 中性子の散乱断面積

X線は電子によって散乱されるため、その散乱断面積は電子密度分布に起因した原子形状因子 (散乱モーメントの関数) の自乗に比例し、原子番号に従って単調に増加する。一方、中性子は原子核によって散乱され、その散乱断面積は散乱モーメントには依存しない。その際、中性子の散乱

断面積は原子核構造に依存し、水素やリチウムといった軽元素でも比較的大きな散乱断面積を有している他、原子番号が近い元素でも強いコントラストを得ることが可能である。また、磁気モーメントを持つことから、磁性原子と相互作用し、物質の磁気構造を調べることもできる (図1)。

また、同位体によっても散乱断面積が変化するため、特定の元素に着目した部分相関を実験的に得る「同位体置換法」も広く行われている。とくに水素については、軽水素と重水素で大きく散乱断面積が異なる。軽水素は、非干渉性散乱断面積が大きく、原子振動状態密度分布の測定には極めて有利であるが、干渉性散乱断面積が小さいため、個別原子間の相関を測定するのは不利である。このため、原子間相関を測定するためには重水素が用いられることが多い。元素毎の中性子散乱断面積の値については、<http://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/> を参照されたい。

表1. 水素の散乱断面積

	散乱長 [ $10^{-15}$ m]	干渉性散乱断面 積 [ $10^{-24}$ cm <sup>2</sup> ]	非干渉性散乱 面積 [ $10^{-24}$ cm <sup>2</sup> ]
<sup>1</sup> H	-3.7406	1.7583	80.27
<sup>2</sup> H	6.671	5.592	2.05

非干渉性散乱断面積の大きさは、水素原子核のスピン乱雑さに起因しており、水素原子核スピンを偏極できれば、非干渉性散乱をゼロにすることが可能である。紙面の都合で割愛するが、今後、中性子のスピンを利用した実験技術の開発を進め、新たな実験の可能性が開拓することが中性子を利用した物質科学研究に必須と考えている。

#### おわりに

中性子は、放射光と異なり、発散が非常に大きなビームを使う必要があり、電荷が無いため、中性子ビーム集光は容易ではない。現状では、マイクロメートル程度でエミッタンスの小さなビームを生成することは、世界トップクラスのビーム強度を誇る J-PARC においても困難である。ビームサイズの違いは、中性子と放射光X線における最も大

きな違いかも知れない。しかし、サブミリメートルサイズの試料を用いた実験は、J-PARCにおいて実施されており、さらに多くの実験が行われると期待される。この機会に

PFユーザーの方々にも、是非、中性子を研究に活用していただければ幸甚である。

## ミュオンと放射光の違い

ミュオン科学研究系研究主幹 門野良典

### ミュオンは「量子ビーム」？

X線や中性子線に慣れ親しんだ研究者にとって、ミュオンが何をしているのか分かりにくい理由の一つは、ミュオンが散乱や回折現象を通して情報をもたらす手法ではないことに由来しているようです。

「量子ビーム」という言葉に託された意味の一つとして、電磁波でない中性子、ミュオンといった有限の質量を持った粒子も量子力学的な「波」として振る舞うことが挙げられます。この性質が、X線や中性子線で物質内部の構造を探るための基本原理である波の干渉とそれによる回折現象

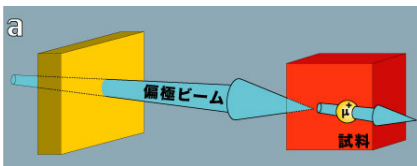
と表裏一体の関係にあることはよく知られています。

このような回折現象がきれいに見える（情報として取り出すことが出来る）状況では、対象となる物質の状態を「波」の波長やエネルギーといった物理量と直接関係する「逆格子空間」で記述・理解する方が便利であり、用いられる概念や専門用語もそれに最適化されています。

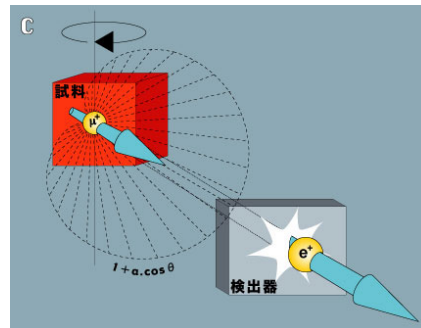
ところが、現在ミュオン利用で最もよく使われるミュオン・スピン回転法では、ミュオンを見たい試料物質の中に注入後、一旦そこで停止させてしまいます（図 a）。回折現象では、入射した波が原子との相互作用により変化しながら出てくる様子を（干渉効果を通して）見るわけですから、試料中に留まってしまうミュオンにこのような効果は期待できません。それでは、ミュオンをあえて「量子ビーム」と呼ぶ理由はあるのでしょうか？

### ミュオンスピン回転／緩和／共鳴 ( $\mu$ SR) の原理

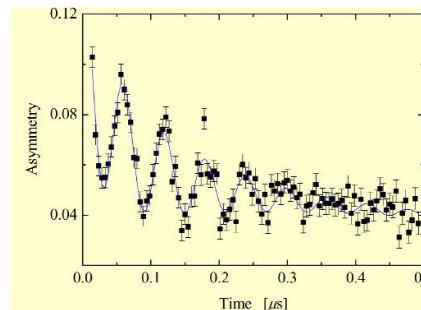
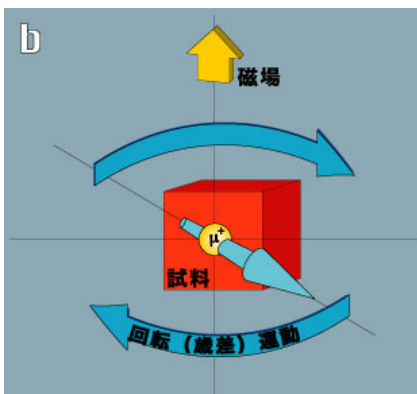
(a) ミュオンビームを試料に注入



(c) ミュオンの崩壊／陽電子の検出



(b) ミュオンスピンの歳差運動



(a) 陽子ビームを固体標的に照射すると大量の  $\pi$  中間子が発生し、その自然崩壊により得られるミュオンを集めてビームとして試料に注入します。この時すべてのミュオンのスピン（磁気モーメント）がほぼ完全に揃っているのが特徴です。(b) 試料に注入されたミュオンは原子の隙間に止まり、その瞬間からそれぞれ隣接する原子からの磁場（外部の磁場がある場合にはそれとの合成磁場）を感じて、その大きさに比例した周波数で回転（歳差）運動します。(c) ミュオンは平均約 2.2 マイクロ秒の寿命でいろいろな時刻に崩壊して高エネルギーの陽電子を放出します。陽電子はもとのミュオンのスピンの向きに飛び出しやすいため、それぞれのミュオンが崩壊した時刻でのミュオンスピンの向きを知ることができます。

### ミュオンスピン回転法

物質中に注入したミュオン（以後、正電荷を持つミュオン  $=\mu^+$  の場合に話を限りますが）は、単位格子の中で核の正電荷を避けた最も安定な格子間位置（ミュオンサイト）に停止し、その瞬間からミュオンのスピンがミュオンサイトでの内部磁場（専門的には「超微細相互作用」と呼ばれます）に比例した周波数で歳差運動を始めます（図 b）。そして、ミュオンが平均 2.2  $\mu$ s（マイクロ秒）で  $\beta^+$  崩壊する瞬間に、スピンの向いていた方向に高い確率で高エネルギーの陽電子を放出し、スピンの向きを教えてください（図 c）。自然の摂理によって、ミュオンは生成時に運動の進行方向に 100% スピンが偏極しているため、同じ偏極を持つミュオンを多数（繰り返し）試料に注入し、そこから  $\beta^+$  崩壊により放出される陽電子計数の時間変化を見ていけば、ミュオンスピンの運動を手にとるようになることが出来る、というわけです。



ここでのポイントは、ミュオンが陽子の約九分の一の重さと単位電荷 ( $e^+$ ) を持った素粒子であることで、これは例えば STM/STS 等で用いられる人工的な「探針」をどんなに小さく作ろうとしても数十 nm 程度のメソスコピックな大きさであるのに比べれば、文字通り「量子」である水素原子の同位体として、単位格子中の特定位置での情報を得ることが出来るわけです。従って、ミュオンが「量子ビーム」の一員と数えられる理由は放射光や中性子とは異なり、それ自身が物質中で「量子力学に従う（原子のような存在）」であるから、と言うことが出来ます。

### 実空間の局所プローブとは？

物質中に注入されたミュオンが、「局在」した水素原子同位体と見なされることは前述の通りですが、実はこれだけで探針としての「局所性」が担保されるわけではありません。実際、類似の実験手法である核磁気共鳴(NMR)では、格子点にいる核スピンと伝導電子の間の相互作用（フェルミ接触項）が大きく、これにはフェルミ面全体の情報が関わっています。

一方、ミュオンはスピン 1/2 で単位電荷しか持たず、しかも格子間位置にいることから、内部磁場の起源はほとんどの場合に磁気双極子相互作用のみに帰せられます。よく知られているように、磁気双極子からの磁場は距離の三乗に比例して減衰します。従って、ミュオンは主に最隣接の局在電子が持つ磁気モーメントからの双極子磁場しか感じない、つまり「単位格子内の最隣接原子の磁気状態」という実空間における局所的な情報を与えます。

ミュオンが単位格子内のどの位置に居るかを知らずともそれほど容易ではありませんが、実験的にある程度絞り込むことは可能です。また、この情報と内部磁場の大きさから最隣接の原子が持つ「局所的な」磁気モーメントの大きさを評価することが出来ます。放射光や中性子の磁気弾性散乱では、これらの「波」が通過した試料で生起している「向きの揃った」磁気モーメントの全体積での平均値しか知ることが出来ないわけですが、ミュオンでは「観測時間（マイクロ秒程度）中に最隣接原子の磁気モーメントがほぼ静止している」場合、その原子が持つ磁気モーメントを、その向きに関わらずフルに見ることに出来ます。

### 水素原子同位体としてのミュオン

先にも触れたように、ミュオンはその質量が陽子の約九分の一ですが、これは原子を構成するもう一方の荷電粒子である電子に比べると、およそ二百倍も重いことが分かります。つまり、同じ正電荷をもつ粒子を比べた場合、ミュオンは陽電子 ( $e^+$ ) よりも陽子 ( $p^+$ ) の方に圧倒的に近いというわけです。

非金属材料に注入されたミュオンは、周りの電子を一つ束縛して「ミュオニウム」と呼ばれる水素原子と同じような原子状態を形成する場合があります。これは、端的には金属中と異なって伝導電子による静

電遮蔽効果が弱いためですが、この点も含め、物質中でのミュオンの振る舞いは、同じサイトにいる陽子と基本的に同じであると考えることが出来ます。なぜならば、ミュオニウムに束縛された電子の換算質量と水素原子のそれとはわずかに 0.4% の違いしかなく、水素原子の「電子状態」とミュオニウムのそれとは実質的に同じであると見なせるからです（一方、陽電子と電子の束縛状態であるポジトロニウムでは全く事情が変わります）。

従って、注目している物質中で、特に「格子間位置」での水素（陽子）がどのような電子状態を取っているかを知りたいと思った場合、その物質中に注入したミュオンがどのような電子状態を取っているかを調べるのが有力な情報源となります。これは、放射光にとって水素が最も見えにくい元素であることを考えると、放射光の利用者にとってもミュオンが重要な相補的手法となりえることを意味します。

### ついでに中性子との違いも少々

現在、水素を見る手段としてよく語られるのは中性子の利用です。実際、中性子は物質中で水素が占める位置やその運動を知るための強力な手段であることは間違いありません。しかしながら、中性子にもいろいろと弱みはあります。

例えば、水素（陽子）自身は中性子に対して大きな非干渉性散乱の断面積を持っており、実際に中性子で水素の状態を見ようとする場合、これによるバックグラウンドを避けるために、往々にして見たい物質中の水素を重水素で置き換える必要に迫られます（つまり、水素「そのもの」を見ることが出来ない、という皮肉な状況になります）。また、中性子散乱・回折の感度を考えると、対象物質中には最低でも数%の量の水素が含まれている必要があり、微量の水素を見たいとなった場合には対応することが難しくなります。加えて、水素の位置や運動状態はよく分かる一方で、残念ながら水素がどのような電子状態を取っているかについての情報は得られません。

その点、ミュオンは自分自身で水素の状態をシミュレートしてくれる上に、「放射性」同位体として原理的には 100% の検出効率を持っています。つまり、物質中のミュオンの電子状態を調べれば、「希薄濃度極限」での格子間水素の電子状態を知ることが出来るというわけです。もちろん、ミュオンは重水素に比べても水素との質量差が大きく、拡散といったダイナミクスが絡む現象では大きな同位体効果を背負うことは言うまでもありません。

### おわりに

以上、PF ユーザーを念頭に、そもそも「量子ビーム」プローブとしてのミュオンをどう理解すればよいのかについて、放射光や中性子と比較しながらの簡単な説明を試みました。これによって読者が少しでもミュオンを使ってみよう、という気になって頂ければと思います。

## 低速陽電子と放射光の違い

放射光科学第一研究系 兵頭俊夫

### 陽電子の基本的性質

陽電子は電子の反粒子である。物質中に入射すると、そのうちに電子と対消滅して $\gamma$ 線になる。「そのうちに」がミソで、陽電子は電子と衝突しても（弾性／非弾性）散乱されるだけでなかなか消滅しない。消滅する前に非局在状態の基底状態に落ち着いたり、動き回っているうちに格子欠陥や不純物クラスターにトラップされたりする。

このために消滅 $\gamma$ 線の運動量分布から金属のフェルミ面や、格子欠陥の生成エネルギーなどの情報が得られる。

### 発生法

放射光は、電子を加速したときに生じる光である。陽電子はコンバータと呼ばれる重金属（たとえば Ta）に高速の電子を当てて作る。コンバータ内ではまず電子が制動放射 X線を発生し、その X線が同じコンバータ内で電子陽電子対生成を起こすので、そこからの陽電子を利用する（図 1）。

### 単色化

放射光の単色化には分光器を用いるが、陽電子は分光や静電場でエネルギーをそろえようとすると強度が極端に減少する。そこで、陽電子に対する仕事関数が負であるような金属（たとえば W）をモデレータとして用いて単色化する。モデレータ内でエネルギーを散逸して熱化した陽電子のうち表面に戻ってきたものが、仕事関数の絶対値（1 eV 程度）のエネルギーをもって自発的に放出される。図 2 には、そのような金属に入射した陽電子が、内部で消滅したり原子空孔にトラップされてから消滅したりして $\gamma$ 線になる過程のほか、表面に戻ってきて低速陽電子

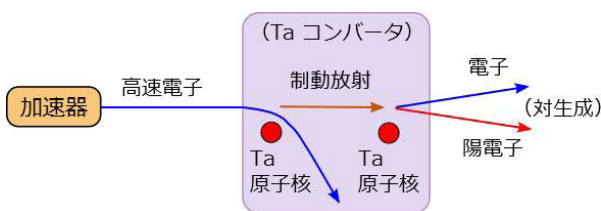


図 1 加速された電子が Ta コンバータ中で陽電子を生成する過程。

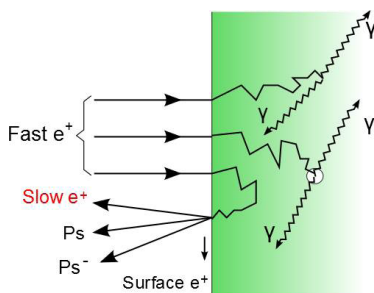


図 2 陽電子仕事関数が負の金属に入射した陽電子のたどる過程の例。

(slow  $e^+$ ), ポジトロニウム (Ps), ポジトロニウム負イオン ( $Ps^-$ ) などとして放出される様子を描いてある。このうちの低速陽電子を任意のエネルギーに加速することで、エネルギー可変単色陽電子ビームが得られる。

### DC ビームとパルスビーム

一般に実験に用いられる陽電子ビームには DC ビームとパルスビームがある。DC ビームとは、陽電子が時間的に一様に試料に入射するビームであり、大学の実験室等で用いられている放射性同位元素  $^{22}\text{Na}$  を陽電子源とするビームはその典型である。

電子ライナック（電子線形加速器）を用いて作る陽電子ビームは基本的にパルスビームであり、そのパルス構造は、放射光と同じく、ライナックのパルス構造で決まる。CW (continuous wave) 運転のライナックでは周波数の非常に高い高周波で電子を加速するので、生成した陽電子も、パルス幅とパルス間隔が同程度の規則正しいパルス状になっている。しかしこれは陽電子の寿命 ( $\sim 100$  ps) のスケールで見ると一樣なので、DC ビームとみなせる。一方、パルス運転のライナックからは、幅に比べて間隔が非常に長いパルスの陽電子ビームが得られる。現在、低速陽電子実験施設では、繰り返し周波数最大 50 Hz (パルス間隔最小 20 ms) のパルス運転で陽電子を生成している。パルス幅はロングパルスモードで 1  $\mu\text{s}$ 、ショートパルスモードで 1~10 ns 可変である。前者で世界最大級の低速陽電子ビーム強度  $5 \times 10^7/\text{s}$  が得られている。後者では  $5 \times 10^6/\text{s}$  程度になる。

残念ながら、現在のこのようなパルスビームは、そのままでは、冒頭に述べたフェルミ面の研究や格子欠陥の研究には使えない。というのは、基本的な手法である 2 光子角相関法 ( $\gamma$  線の同時計測) や消滅光子のドップラー広がり法 (Ge 検出器による  $\gamma$  線のエネルギー分析) のためには DC ビームが必要だからである。パルスビームで同時計測をすると偶然同時計測のバックグラウンドが大きくなりすぎる。また、パルスビームでエネルギー分析をしようとすると、一度に 2 個以上の  $\gamma$  線が検出器に入りパイルアップのために正確な分析ができない。

もう一つの典型的な手法である陽電子寿命法にも使えない。この手法のためには、パルス幅が 100 ps を切るパルスが必要であり、現在のパルス幅は長すぎる。

そこで、現在は、パルス構造に関係なく強度の大きさを活かす実験か、パルス幅が 1 ns 以上でも可能な実験を選ぶ工夫をしている。

施設では、なるべく早い将来に、ビームの DC 化と短パルス化のための予算を得て、これらを実現したいと希望している。DC 化は、1 パルスごとの陽電子をペニングトラップ（軸方向に磁場がある長い空間に電場で閉じ込める）にトラップして次のパルスが来る 20 ms 後までの間に少しずつ下流に放出することで可能である。ビームライン建設当初から将来の DC 化は想定されていたようであり、そのための電極はすでに組み込んである。また、短パルス化は、DC 化したビームを再バンチすることで容易に実現できる。

## 低速陽電子実験施設で現在使用可能なビーム

本施設は KEK 入射器棟にあり、テストホールと呼ばれる地下の実験室に、他からは独立した専用の電子ライナックが置かれている。このライナックに始まるビームラインは、基本的に 1 本で、ライナックの運転モードを切り替えることによって、ロングパルスまたはショートパルスの低速陽電子ビームがソレノイドコイルまたはヘルムホルツコイルによって輸送される。真空中では直進しかしない放射光に比べて、ビームの輸送ははるかに容易である。下流でそれを分岐して、分岐ごとに特徴のあるステーションを接続し、マシンタイムごとに切り替えて利用している。

高強度であることと並んで強調されるべき本施設のビームラインの特徴は、陽電子をその発生部で設定した最高 35 keV までのエネルギーで輸送できることである。このためビームラインのダクト（真空度は  $10^{-9}$  Torr 台）と実験ステーションはすべて接地電位であり、真空焼きだしが容易であるほか、自由な発想で任意の実験装置を気楽に接続できる。また、5 keV 程度のエネルギーでの入射を必要とする、陽電子特有の輝度増強にも便利である。このような高強度ビームは、世界唯一である。ほかの施設の高強度ビームはこの特性がないために、数 keV 以上のエネルギーで陽電子を入射するときは試料に負電圧をかけることになる。この時に実験槽を接地電位に保とうとすると、光子（消滅  $\gamma$  線）を検出する実験しかできない。陽電子、電子、イオンなどの荷電粒子を検出する実験をするには、ビームダクトの途中に絶縁管を配置して、ステーション自体を高圧に浮かせる大がかりな工夫が必要になる。

本施設では、2012 年度冬の停止期間に、新しい分岐の製作とステーションの再配置を行った。ライナックが置かれた空間であるテストホールのビームライン分岐は、SPF-A1 と SPF-A3 である。新配置では SPF-A3 に全反射陽電子回折ステーションが接続されている。他にひとつの分岐テストホールから上に向かって伸びており、途中で分岐して、以前透過型陽電子顕微鏡がつながっていた分岐 SPF-A2 に至る。上向きのビームラインはそのまま天井を貫いて 1 階のクライストロンギャラリー実験室に導かれる。そこには以前からの分岐 SPF-B1 と新しく作られた分岐 SPF-B2 がある。新配置では前者にポジトロニウム負イオン実験ステーション、後者にポジトロニウム飛行時間ステーションが接続されている。

なお、ここではビームライン構造を明確にするために「分岐」と呼んだが、ビームライン管理上は、それぞれの分岐を陽電子発生部に始まる個別の「ビームライン」として扱っている。一部を共有する複数のビームラインという位置づけである。これらのビームライン+ステーションで、前述のように、高強度を活かす実験か、現在のパルス幅を有効に利用できる実験を工夫して行っている。

### (1) パルス構造に関係なく、高強度だけを利用する実験

SPF-A3 の全反射陽電子回折はその例である（図 3）。ここでは、再減速・再放出という陽電子特有の方法を用いた輝度増強を行って、回折実験に適した陽電子ビームをつ

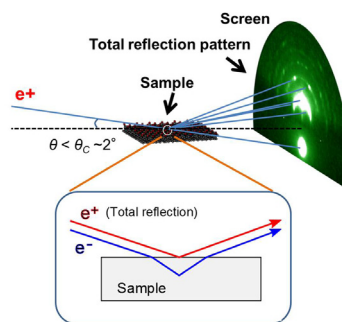


図 3 全反射陽電子回折。

る。それを臨界角以下の視射角で表面に入射すると、陽電子に対しては結晶ポテンシャルが負であるために、全反射が生じ、表面から 0.1 nm 程度しか侵入しない。このため、表面第 1 層のみからの回折像を明確に観測できる。放射光も結晶表面で全反射するが、その際、どうしても結晶表面下に数十 nm 程度侵入してしまう。また、電子線では結晶ポテンシャルが正であるために全反射は起こらず、むしろ、すれすれの視射角で入射しても 1 nm 程度侵入する。

この全反射陽電子回折は、反射高速電子回折（RHEED）の陽電子版である反射高速陽電子回折（RHEPD）の、全反射を積極的に活かす使い方であるが、低速電子回折（LEED）の陽電子版である低速陽電子回折（LEPD）ステーションも 2013 年度に整備する予定である。

### (2) 現状のパルスビームが有効に使える実験

電子と陽電子が水素原子のようにクーロン力で束縛しあった「原子」をポジトロニウム (Ps) という。ポジトロニウムには、電子と陽電子のスピンのによって、全スピンの 3 (3 重項状態) のオルソポジトロニウム (o-Ps) と 0 (1 重項状態) のパラポジトロニウム (p-Ps) がある。真空中では、前者は寿命 142 ns で  $3\gamma$  に、後者は寿命 125 ps で  $2\gamma$  に消滅する。これらの生成の割合は、特殊な事情がないかぎり 3:1 である。このうち、o-Ps の寿命はショートパルスモードの陽電子ビーム幅より十分長い。そこで、SPF-B2 では、10 ns 幅の陽電子パルスを試料に入射したときに生成し表面から放出される o-Ps の飛行時間を測定する Ps 飛行時間法の実験を行っている。物質中では o-Ps の寿命は短くなるが、1 nm 程度以上のサイズの孔を持つ多孔性物質では依然として 1 ns より十分長い。そこで、幅 1 ns のショートパルスモードのビームを用いれば、o-Ps の寿命を利用する細孔サイズ評価が可能である。2013 年度にはこの種の測定もできるように整備する。

o-Ps 飛行時間測定と同じく 10 ns 幅の陽電子パルスを活用する実験として、Ps<sup>-</sup> イオンを生成し、パルス・レーザー光を照射して起こす光脱離、すなわち電子を 2 個持つ Ps<sup>-</sup> イオンから電子を 1 個はがして Ps を作る実験がある。SPF-B1 で行われているこの実験では、光脱離過程の断面積の測定とともに、荷電粒子であるイオンの間に加速してから光脱離することによる、エネルギー可変 Ps ビーム生成も実現された。ただし、現在はまだこのビーム自体の基礎的な研究を行っている段階であり、それを物質科学に応用するのは今後の課題である。



### 3. 各ビームライン／ステーション紹介

#### BL08: 粉末中性子回折装置 (SuperHRPD)

中性子科学研究系 神山 崇, 鳥居周輝

J-PARC には分解能や目的の異なる 6 台の粉末 (多結晶) 中性子回折装置が稼働している [1-3]。すなわち世界最高の分解能  $\Delta d/d = 0.035\%$  を持つ SuperHRPD (KEK) [4], 産業利用促進を目的に開発された iMATERIA (茨城県 & 茨城大, 最高分解能 0.15%), 最高強度を持ち液体や非晶質の構造解析を得意とする高強度全散乱装置 NOVA (KEK, 0.5%), 残留応力解析等を目的とした工学回折装置 TAKUMI (JAEA), 超高压下での回折実験に特化した超高压回折装置 PLANET (JAEA), 蓄電池研究を目的に開発された SPICA (KEK) である。これらのうち iMATERIA は茨城県, NOVA と SPICA は NEDO, PLANET は科研費で建設された。SuperHRPD はこれらの粉末装置の中でもっとも高い分解能を持つ装置であり, 複雑な構造の解析や僅かな構造変化の解明に従来の装置以上に威力を発揮する。

SuperHRPD で得られた回折データ (シリコン) をつくばで稼働していた中性子回折装置 *Sirius* のデータとの比較した図を示す (図 1)。世界的にも高分解能装置として知られた *Sirius* と比較して, SuperHRPD は分解能 1/3 以下を達成しただけでなく, ブラッグ回折線に大きな裾がなくなり, 1/10 線幅では 10 倍以上改善されている。図 2 には開発を進めてきた粉末回折データ解析ソフトウェア Z-Code によるリートベルト解析結果を示す。SuperHRPD の実現により, PF BL-4B2 多連装型粉末回折装置並の分解能で, SPring-8 BL02B2 並の広い  $Q$  範囲, 広い温度領域 (現状で 4 K-1273 K (1000°C)), 標準測定時間 1-5 時間 (1 MW 達成時にはさらに 5 分の 1) での中性子回折実験が可能になった。

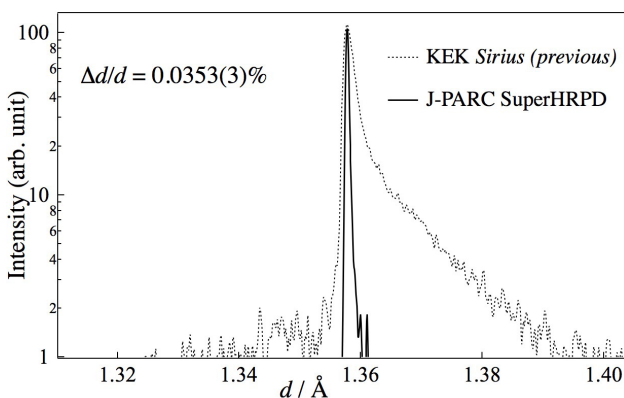


図 1 SuperHRPD 及び旧粉末回折装置 *Sirius* を用いて測定されたシリコンのブラッグ反射。SuperHRPD は *Sirius* と比較して分解能 1/3 以下を達成した。従来のパルス中性子回折装置では, *Sirius* のブラッグ反射回折パターンに見られるように非対称で大きな裾があるのが常であるが, SuperHRPD ではそれがなく, 1/10 線幅では *Sirius* に比べて 10 倍以上改善されている。

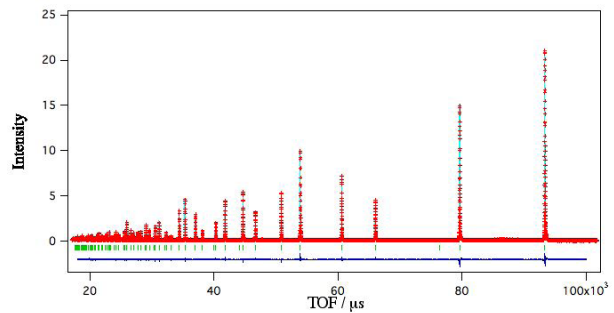


図 2 シリコンの回折パターンへの Rietveld 解析。SuperHRPD で測定されたデータを Z-Rietveld で解析した。

SuperHRPD の高分解能と高強度による高い測定精度を利用して, 相転移等による極めて微少な歪みの検出が可能である。しかし, 結晶性の悪化 (歪み, 欠陥, 有効結晶子サイズが小さい等) によりブラッグ反射がブロードニングを起こさないように, 結晶性の高い試料の準備に十分な留意が必要である。実際, 持ち込まれる試料の多くはブロードニングを起こして SuperHRPD の分解能を利用できていない。ブロードニングによるピーク強度の低下が著しい場合には, 強度の強い iMATERIA や NOVA, SPICA 等を用いる方が賢明である。一方で, プロファイル解析等の研究を行うには分解能の高い SuperHRPD は有効である。これは単に分解能が高いだけではなく, ブラッグ反射のプロファイルの対称性が高くシンプルであるためである。

SuperHRPD の理想的な試料サイズは直径 6 mm, 高さ 30 mm であるが, 加速器パワーが増大するまでは直径 10 mm, 高さ 40 mm を標準的試料サイズとしている。

**測定例:** 世界最高のリチウムイオン導電率 (室温で  $12 \text{ mS cm}^{-1}$ ) を持つ  $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$  の結晶構造を解明し導電機構を明らかにした [5]。

**測定例:** 非鉛強誘電体 BFO-BKT の開発において相境界, 結晶構造等を解明した [6]。

不明な点は装置責任者の神山 <takashi.kamiyama@kek.jp> までご相談ください。

#### 文献

- [1] 神山 崇: 日本結晶学会誌, 50 (2008) 306.
- [2] 石垣 徹, 他: 日本結晶学会誌, 50 (2008) 18.
- [3] 社本真一, 他: プラズマ・核融合学会誌, 84 (2008) 323.
- [4] S. Torii, *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) SB02.
- [5] N. Kamaya, *et al.*, Nature Materials 10 (2011) 682.
- [6] Y. Ohshima *et al.*, ECS Transactions, 45 (2012) 195, H. Matsuo, *et al.*, Journal of Applied Physics 108 (2010) 104103.

## BL12: 高分解能チョッパー分光器 (HRC)

中性子科学研究系 伊藤晋一

HRCはフェルミチョッパーと呼ばれるデバイスでパルス中性子を単色化して実験試料に入射し、飛行時間法により、マグノンやフォノン等の中性子非弾性散乱を測定するための装置です。

- ◆ 10 meV – 2.5 eV の範囲のエネルギーで入射中性子を単色化して利用できる (入射中性子エネルギー:  $E_i$ )。
- ◆ 散乱角: 水平方向  $-10^\circ - 42^\circ$ , 垂直方向  $\pm 20^\circ$  をカバーする位置敏感型中性子検出器を搭載。
- ◆ フェルミチョッパーは、中性子発生に同期してスリットが回転するデバイスであり、スリット幅の違いにより、大強度用と高分解能用の2台がある。大強度用・高分解能用の選択、及び、回転数 (100 – 600 Hz) の選択により、エネルギー分解能 ( $\Delta E$ ) 及び中性子束を調節する。

### 測定方法 1 (図 1(a))

- ◆ 散乱角が  $3^\circ$  から  $42^\circ$  に設置された検出器 (直径 3/4 インチ長さ 2.8 m の位置敏感型検出器 128 本を搭載) を用いて、連続した広いエネルギー運動量空間を観測。
- ◆  $E_i = 10 - 500$  meV では  $\Delta E/E_i = 3 - 10\%$ ,  $E_i > 500$  meV では  $\Delta E/E_i$  はそれ以上。
- ◆ 測定例: 単結晶磁性体の磁気励起, 粉末反強磁性体の磁気励起, フォノンや原子・分子の振動モード。

### 測定方法 2 (図 1(b))

- ◆ 散乱角が  $0.5^\circ$  から  $2.8^\circ$  に設置された検出器 (直径 1/2 インチ長さ 0.8 m の位置敏感型検出器 20 本を搭載) を用いて、比較的高い  $E_i$  を用いて、運動量 (波数) 領域が  $Q = 0.1 - 0.5 \text{ \AA}^{-1}$  で、数 – 10 数 meV のエネルギー領域を観測 (いわゆる中性子ブリルアン散乱)。
- ◆  $E_i = 100 - 300$  meV で  $\Delta E/E_i = 2\%$
- ◆ 測定例: 粉末強磁性体のスピン波, 液体・非晶質物質の音響フォノン。

不明な点は装置責任者の伊藤 <shinichi.itoh@kek.jp> までご相談ください。

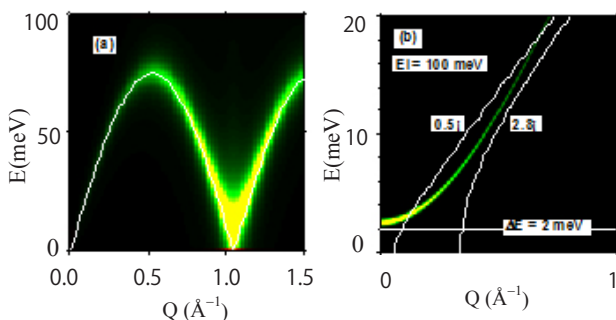


図 1 HRC でのスピン波の測定例: (a) 単結晶低次元反強磁性体, (b) 粉末強磁性体。

## BL16: ソフト界面解析装置 (SOFIA)

中性子科学研究系 山田悟史

SOFIA は試料水平型の中性子反射率計で、試料表面で反射された中性子の干渉を解析することによって散乱振幅密度の深さ分布を観測することができます (装置名は「ソフト界面」となっていますが、高分子薄膜だけでなく金属薄膜も測定可能です)。観測可能な空間スケールは数 nm~数百 nm 程度で、以下のように中性子の長所を生かした測定が可能です。

- ◆ 同位体置換 (H/D 置換など) により観測したい箇所のラベリングが可能。
- ◆ 中性子の高い透過率を利用し、深く埋もれた界面の構造を観察することが可能。
- ◆ 中性子飛行法を用いて広い波長幅の中性子を使用するため、一度に広い  $Q$  空間を走査することが可能。
- ◆ ビームを下向きに取り出しているため、液体のような自由界面の測定も可能。
- ◆ 2次元検出器による多次元構造解析が可能。

試料は固体の場合、通常 2 インチか 3 インチのシリコン基板上に作成した薄膜を使用します。試料作成にあたっての注意点としては

- ◆ 試料は大きいほど測定時間が短い (10 mm 角でも時間さえかければ測定は可能)。
- ◆ 平滑かつ均一な試料が望ましい (試料の一部のみに照射するような場合、測定時間が長くなる)。
- ◆ 基板が薄いと応力でたわむ可能性があるので注意 (特に蒸着膜)。

といったことが挙げられます。

また、気液界面、固液界面については備え付けの試料セルが利用可能です (気液界面については 2012 年冬以降)。200 kW 運転時の典型的な測定時間は以下の通りです。

- 重水素化高分子 (3 インチ) : 5 分 ( $Q_z < 1 \text{ nm}^{-1}$ ), 15 分 ( $Q_z < 2 \text{ nm}^{-1}$ ), 1 時間 ( $Q_z < 4 \text{ nm}^{-1}$ )
- 軽水素高分子 (3 インチ) : 2 時間 ( $Q_z < 2 \text{ nm}^{-1}$ )
- シリコン/重水界面 (3 インチ) : 2 時間 ( $Q_z < 2 \text{ nm}^{-1}$ )

不明な点は装置責任者の山田 <norifumi.yamada@kek.jp> までご相談ください。

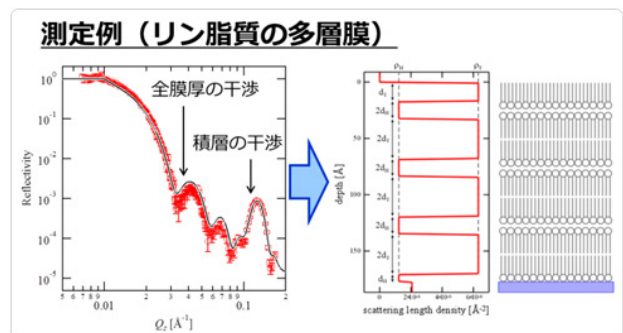


図 1 実験により得られた中性子反射率プロファイルと解析により得られる散乱振幅密度プロファイルの例。



## BL21: 高強度中性子全散乱装置 (NOVA)

中性子科学研究系 大友季哉

中性子全散乱法は、静的構造因子  $S(Q)$  を測定し、 $S(Q)$  のフーリエ変換によって得られる実空間二体分布関数 ( $g(r)$ ) により構造解析を行う回折法です。ここで、 $Q$  は逆格子空間における波数ベクトル  $k$  の変化 (運動量遷移) を表す散乱ベクトルです。 $g(r)$  は、原点に位置する原子から距離  $r$  だけ離れた位置に他の原子を見出す確率を表し、この関数の解析によって、液体やガラスにおいても原子間距離や配位数などの局所構造決定が可能です。 $g(r)$  における  $r$  分解を高めるため、主に熱外中性子領域 (0.5 ~ 10 eV, 0.09 ~ 0.4 Å) 迄の比較的エネルギーの高い (波長の短い) 中性子を利用することによって、可能な限り大きな  $Q$  まで正確に測定することが装置の特徴です。なお、結晶の場合には、原子対相関関数 (Pair Distribution Function, PDF) が用いられることが一般的です。構造解析には、リートベルト解析, PDF 解析 (大雑把には PDF によるリートベルト解析), リバースモンテカルロ法などを用います。NOVA の特徴を以下にまとめます。

- ◆一度に測定できる検証済みの  $Q$  領域は、 $0.026 \text{ \AA}^{-1} \leq Q \leq 60 \text{ \AA}^{-1}$  です。装置スペックとしては、 $0.01 \text{ \AA}^{-1} \leq Q \leq 100 \text{ \AA}^{-1}$  となっています。
- ◆標準的な試料容器は直径 6 ミリ、ビーム高さは 20 ミリなので、試料容積としては約 0.6 cc です。容器としては、直径 3 ミリ及び直径 10 ミリも用意されています。
- ◆実験に必要な試料量については、上記の容積に重点さ

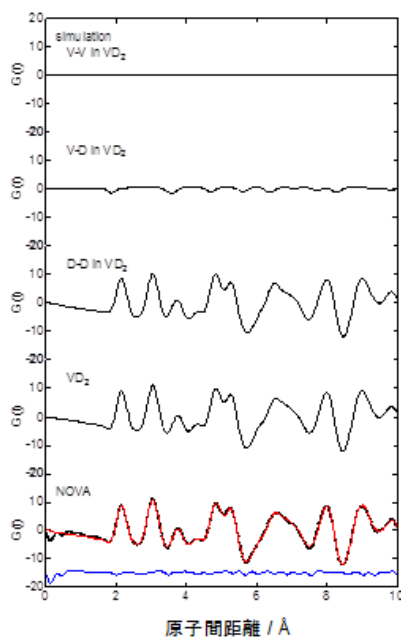


図1 NOVA による VD2 の原子対相関導出例。一番下が実測値 (黒) と PDF 解析結果 (赤)。PDF 解析により得られた構造パラメータから、重水素-重水素 (D-D) 等の部分相関の導出が可能。なお、中性子散乱断面積から、バナジウム-バナジウム (V-V) 相関はほとんど観測されない。

れることが目安ですが、試料組成、実験目的や試料作製の困難さにより変わります。ブラッグ反射の位置の観測が目的の場合には、1 mg での実績があります。また  $S(Q)$  解析を目的とする場合、60 mg が最小実績となります。

◆1条件あたりの測定時間も、試料の散乱強度や実験目的により大きく変わり、最大で8時間、最小では数秒です。

試料環境としては、試料交換器 (室温のみ。最大 10 試料の自動測定が可能)、水素ガス (H/D) 雰囲気 (最大水素ガス圧力: 10 MPa, 温度範囲: 50 K ~ 473 K)、高温炉 (最高測定温度: 1373 K) 等が整備されています。いずれの試料環境においても、経時変化測定が可能です。

不明な点は装置責任者の大友 <toshiya.otomo@kek.jp> までご相談ください。

## D1: ミュオン物質生命科学実験装置

ミュオン科学研究系 小嶋健児

D1 実験エリアには、DQ-1 と名付けたミュオンスピン緩和分光器があります。これは、バルク試料 (物質質量=比重×厚さ ~100 mg/cm<sup>2</sup> 程度以上) のミュオンスピン緩和 ( $\mu$ SR) を測定できる装置です。 $\mu$ SR は物質中のミュオンスピンの時間発展が計測出来る手法で、これによって、試料中の

- 水素状態と
- 磁性の発現に関する情報

を得ることができます。ただし、回折法と異なり局所スピンプローブなので、波数空間を分解した情報は得られませんが ( $Q$  積分)、核磁気共鳴 (NMR) と違ってスピン偏極の絶対量が分かっているので、磁性領域と非磁性領域が入り交じった不均一磁性体の磁性領域の体積分率など、実空間の分布を分解する能力があります。

具体的に、磁性に関して、銅酸化物高温超伝導体 YBCO の不足ドーパ試料の  $\mu$ SR スペクトルを図1に

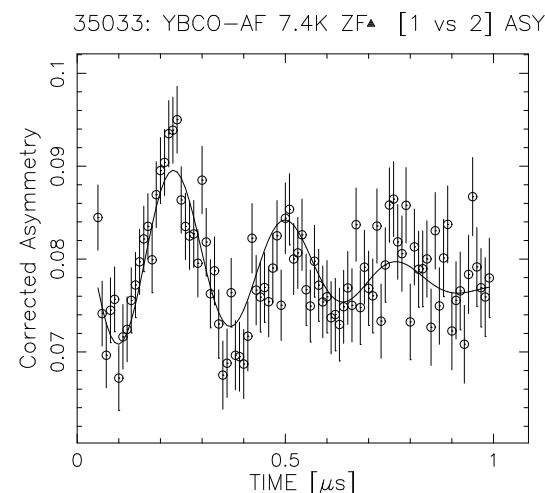


図1 実際の  $\mu$ SR スペクトル。銅酸化物高温超伝導体 YBCO の磁性による、ゼロ磁場中のミュオンスピン回転が観測される。

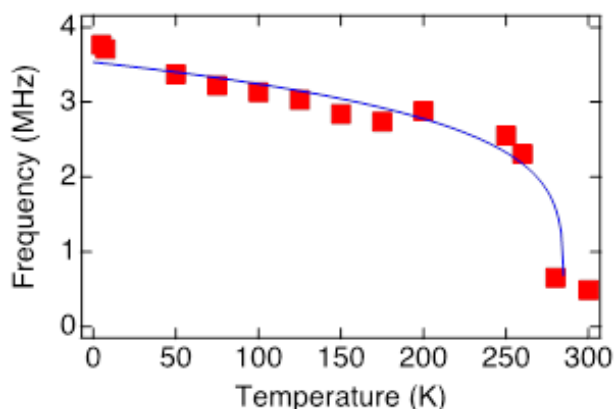


図2 図1の回転周波数(∞秩序化した磁気モーメント長さ)の温度変化。実線は臨界発散指数モデル(1-T/T<sub>N</sub>)<sup>β</sup>による解析。

載せます。反強磁性秩序により、ミュオンサイトに磁場が立ち、ミュオンスピンのラーマー歳差運動が観測されます。その回転周波数の温度変化を図2に載せました。ラーマー回転周波数は秩序化したモーメントの長さに比例するので、反強磁性秩序変数の温度変化を追いかけることができます。このミュオンの使い方は磁気散乱ブラッグピーク強度(∝モーメント長さの自乗)と似ています。実線は臨界発散モデルによる解析です。

### 必要な試料サイズと形状

今のところ、直径10 mm ぐらひは必要です。中性子・放射光回折と異なり、ミュオンを試料中に止めるので、円柱状より板状の形状がビームに対する表面積を稼ぐことができ測定しやすいです。粉末試料の場合は、アルミフイルで簡易パックして円盤ペレット状にして測定します。

### 試料環境

4 K~300 K のミニクライオスタットが簡便ですが、試料を熱伝導で冷やすため、試料に平らな面とある程度の熱伝導性が必要です。また、同じく熱伝導型の希釈冷凍機(最低温度20 mK)もあります。試料が熱交換ガス中に置かれるタイプのクライオスタットとしては、2 K~300 K のものと10 K~300 K のものがあり、後者はレーザーのような光励起を導入する窓が付いています。

高温は、ミニクライオスタットで400 K ぐらひまで到達でき、それ以上は800 K までの電気炉があります。NMR と異なり、高温でも信号強度が変わらないのがμSR の利点です。

### 測定時間

200 kW 運転時の典型的な測定時間は、必要な統計量と試料サイズによりますが、1点20分~2時間程度です。

不明な点は装置責任者の三宅 <yasuhiro.miyake@kek.jp> か、μSR 実験グループの小嶋 <kenji.kojima@kek.jp>、幸田 <akihiro.koda@kek.jp> までご相談ください。

## D2: ミュオン基礎科学実験装置

ミュオン科学研究系 三宅康博

D2 エリアでは、固定した汎用スペクトロメータを設置せず、実験によって装置を入れ替えることができる自由度の高いビームエリアである。

### 実験例1: 負ミュオンの利用, 非破壊分析

負の電荷をもつμ<sup>-</sup>は、電子より200倍も重いので、原子に捕獲・束縛される過程で、電子の場合に比べて200倍もの高いエネルギーの特性X線を放射する。この特性X線は元素の種類に応じたエネルギーを示すため、蛍光X線分析のように元素分析を行うことが可能で、以下のような特徴を有している。

1. ミュオンが物質の奥深くで反応した場合でも、特性X線はエネルギーが高いため透過力が高く、検出が可能。
2. 軽い元素から重い元素に至るまで、非破壊で同時に調べる事が可能。
3. μ<sup>-</sup>の入射エネルギーを調節することによって、深さ方向の元素の分布を調べる事ができるため、物質内部の3次元的元素分析が可能。

J-PARC/MUSE では、ミュオン原子X線法の非破壊分析手法としての性能を調べる為に、天保小判や青銅銭の非破壊元素分析[1]の試験研究などを始めている。隕石や、考古学上、壊すことができない貴重な遺物の非破壊検査法として期待されており、実際に中国の古銭「半両」の測定を行った。図1は得られたミュオン特性X線スペクトルで、ここから半両の内部の組成比を決定することができる。

### 実験例2: 熱 Mu, Mu<sup>-</sup> 発生実験

D2 エリアでは、大強度超低速ミュオン源に向けて、金属箔等からのMuならびにMu<sup>-</sup>生成の研究も行われている。図2は、D2 エリアに設置された熱ミュオニウム(μ<sup>+</sup>と電子が結合した水素原子の同位体)発生チェンバーである。超高真空(~10<sup>-8</sup> Pa)中で、タングステン箔を約2000 K にまで昇温し(図2右下)、その金属表面から熱エネルギーで蒸発してくるミュオニウムをとらえる装置である。本チェンバーの側面は薄いAl窓となっており、崩壊陽電子をホドスコープ(すだれ状のシンチレータアレイ)

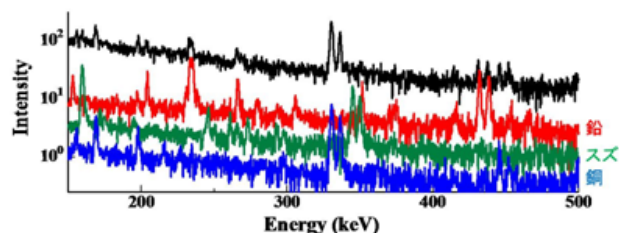


図1 青銅銭試料から得られたミュオン特性X線スペクトル。半両の内部の組成比を銅:72±3%, スズ:9±2%, 鉛:19±3%と決定することができた。

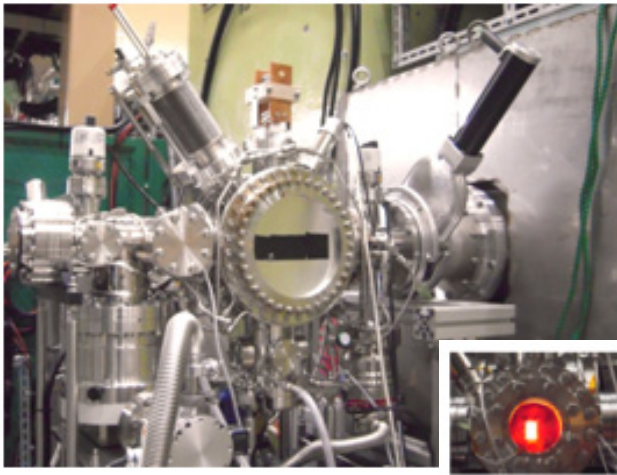


図2 D2 エリアに設置された熱ミュオニウム ( $\mu^+$  と電子が結合した水素原子の同位体) 発生チェンバー。

で測定し熱ミュオニウムの崩壊位置を決定することで、真空中へ拡散の様子を観察する。

その他にも、実験に応じて自作の測定機器を持ち込むことができます。D2 実験エリアの詳細については、装置責任者の三宅 <yasuhiro.miyake@kek.jp>, 実験グループの下村 <koichiro.shimomura@kek.jp>, 河村 <naritoshi.kawamura@kek.jp> までご相談ください。

## 低速陽電子の装置紹介

放射光科学第一研究系 兵頭俊夫

### SPF-A3 全反射陽電子回折装置

この装置は原子力機構の河裾グループの協力を得て入射器棟地階テストホールに設置したもので、反射高速電子線回折 (RHEED) の陽電子版である反射高速陽電子回折 (RHEPD) 測定に用いられる。ライナックのロングパルスモード運転で得られる  $1 \mu\text{s}$  幅の陽電子ビームを利用して、これは最大の陽電子強度を得るためであり、現在のところパルスビームの特性は利用していない。

#### 何がわかるか

どのような固体でも陽電子に対する結晶ポテンシャルは正であるため、高速陽電子を表面にすれすれの視斜角で入射すると、ある角度以下で全反射が起きる。この全反射条件下では、他の量子ビームでは不可能な、最表面の原子のみからの回折パターンが得られる。視斜角を次第に増加させて全反射条件を外すと、第2層、第3層からの情報も含む回折パターンが得られる。高輝度陽電子ビームを用いた RHEPD 実験で初めて可能になったこのユニークな表面解析法を、全反射陽電子回折 (total reflection positron diffraction, TRPD) 法と命名した。

#### 原理

明瞭な TRPD パターンを得るには、高輝度の陽電子ビームが必要である。リュービウの定理により保存場では荷電粒子ビームの輝度を変えられないが、陽電子の場合には、陽電子に対する仕事関数が負である W, Ni などの薄膜中での不可逆過程を利用した輝度増強が可能である。本装置では、15 keV 程度のエネルギーで輸送した陽電子ビームを磁界レンズで絞り、10 kV の電位にした W 薄膜に入射する。陽電子は薄膜中でのエネルギー散逸で熱化した後、ほぼ同じ径を保って反対側の面に拡散し、その一部が、負の仕事関数で決まるエネルギーで放出される。これにより高輝度化された陽電子ビームは、アース電位に対して 10 keV に加速され、磁気レンズで細いビームにして試料に入射される。

得られる回折パターンを用いた表面原子配置の標準的解析法は、ロッキング曲線 (正反射強度の視斜角依存性)、ラウエゾーンに沿った回折スポットの強度変化、全反射条件の回折パターンなどを、モデルを仮定した理論計算と比較する。

#### 装置の特性

- ◆陽電子ビームエネルギー：~10 keV
- ◆輝度増強後のビーム強度：~ $5 \times 10^5 \text{ e}^+/\text{s}$
- ◆装置内真空度：~ $10^{-8} \text{ Pa}$
- ◆試料角度調整：視斜角  $< 5^\circ$  程度, 方位角  $\pm 60^\circ$  程度
- ◆回折パターン測定：蛍光板付 MCP + CCD カメラ
- ◆測定時間：~1 hour (回折パターン) ~3 hours (ロッキング曲線)
- ◆試料サイズ：10 mm  $\times$  5 mm  $\times$  ~0.5 mm (短冊形)
- ◆試料測定温度：30 K~600 K 程度 (GM 冷凍機, 液体窒素冷却および試料通電加熱)
- ◆試料作製機構 (RHEED, EB 蒸着源, Ar イオンスパッタリング, 試料交換用ロードロック)

### SPF-B1 低速陽電子ビーム汎用ステーション

このビームライン (分岐) は入射器棟1階のクライストロンギャラリー実験室にある。共同利用グループが装置を持ち込んで使用するためのビームラインである。ほかのビームライン同様、基本的には、現在のパルスビームで可能なような実験のステーションも接続可能である。ただし、クライストロンギャラリー実験室のビームラインである SPF-B1 と SPF-B2 は、ショートパルスモードを用いる実験を優先することになっている。

現在は、東京理科大学長嶋グループのポジトロニウム負イオン実験ステーションが接続されている。ここでは、この装置について説明する。

#### 何のための装置か

ライナックをショートパルスモードで運転して得られる



パルス幅 10 ns の低速陽電子を用いて、ポジトロニウム負イオン ( $\text{Ps}^-$ , 電子 2 個と陽電子 1 個の束縛状態) を生成し、それにレーザー光を照射し光脱離させてその断面積を測定する研究と、光脱離によってエネルギー可変ポジトロニウムビームを生成する研究に使われている。

## 原理

陽電子を金属に入射すると、熱化したのちに表面に戻ってきたものが、低速陽電子として放出されるか、ポジトロニウム ( $\text{Ps}$ ) として放出されるか、表面状態にトラップされるかのいずれかの過程をたどる。ただし、低速陽電子が放出されるのは、陽電子に対する仕事関数が負であるような金属のみであり、放出エネルギーは仕事関数の符号を変えた値である。 $\text{Ps}$  の放出エネルギーは、電子の仕事関数と、陽電子の仕事関数と、 $\text{Ps}$  の束縛エネルギーで決まり、それが正であれば放出される。同様に  $\text{Ps}^-$  の放出エネルギーを計算すると、ある種の金属で正である（すなわち  $\text{Ps}^-$  が放出されるはずである）ことがわかる。タングステンはそのような金属のひとつであり、長嶋らが実際に測定してみると、確かに、ごくわずかであるが  $\text{Ps}^-$  が生成した。さらに、タングステン表面にアルカリ金属を蒸着して仕事関数を変化させたところ、収率が 1% を超えた。

この大量に生成できるようになった  $\text{Ps}^-$  イオンを本施設のショートパルスモードの幅 10 ns の低速陽電子ビームを用いて生成し、同じく幅 10 ns の YAG レーザーパルス同期して照射し光脱離を起こす。この過程の原子物理学的研究を実施する他、荷電粒子である  $\text{Ps}^-$  の間に電場で任意のエネルギーに加速し、その後光脱離することで、エネルギー可変  $\text{Ps}$  ビームをつくる。

## 装置の特性

- ◆陽電子輸送エネルギー：4.2 keV
- ◆入射陽電子パルス幅：10 ns, 繰り返し周波数 50 Hz
- ◆レーザー：Nd:YAG レーザー（スペクトラフィジックス GCR290）
- ◆レーザーパルス：幅 10 ns, 繰り返し周波数 25 Hz
- ◆ $\text{Ps}^-$  イオン検出：青方変移消滅  $\gamma$  線スペクトル測定（2 台の Ge 検出器による）
- ◆エネルギー可変  $\text{Ps}$  ビーム検出：検出器に MCP もしくは 2 次元 PSD を用いた飛行時間法
- ◆基準時刻：試料内での消滅からの消滅  $\gamma$  線の MCP による検出

## SPF-B2 ポジトロニウム飛行時間測定装置

この装置は東京理科大学長嶋グループの協力を得て完成されたもので、入射器棟 1 階のクライストロンギャラリー実験室に設置されている。ライナックのショートパルスモード運転で得られる 10 ns 幅の陽電子ビームを利用する。

## 何がわかるか

固体表面から放出されたポジトロニウム ( $\text{Ps}$ , 電子と陽電子の水素原子様束縛状態) のエネルギー分布を  $\text{Ps}$  の飛行時間を通じて測定する。

金属では  $\text{Ps}$  は表面でしか生成しないので、陽電子と 2 次元電子気体との相互作用の情報が得られる。絶縁体では内部で生成して表面から放出された  $\text{Ps}$  と表面で生成した  $\text{Ps}$  の両方、あるいは片方が観測される。内部で生成した  $\text{Ps}$  は励起子に類似の複合粒子なので、絶縁体中の複合粒子の相互作用を統一的に理解するのに必要な情報が得られる。多孔性物質では孔が外部に通じているかどうか、その割合はどの程度かなどの情報が得られる。

## 測定の原理

低速陽電子ビームを物質に入射すると、熱化した後に一部が表面に戻ってくる。さらにその一部が表面で 1 個の電子と結合して  $\text{Ps}$  になり、真空中に放出される。このとき合成スピンの 1 (3 重項状態) のオルソポジトロニウム ( $o\text{-Ps}$ ) と 0 (1 重項状態) のパラポジトロニウム ( $p\text{-Ps}$ ) が 3 : 1 の割合で生成する。前者の真空中の寿命は 142 ns, 後者の寿命は 125 ps である。 $o\text{-Ps}$  の寿命は十分長いので、10 ns 幅のパルス陽電子ビームを用いて  $\text{Ps}$  を生成すれば、TOF 測定が可能になる。1 eV の  $\text{Ps}$  は 142 ns の間に約 6 cm 進む。そこで、試料位置から数 cm の位置に設置したスリットの前を通る時に消滅した  $o\text{-Ps}$  からの  $\gamma$  線を検出して、その時間分布を解析する。

## 装置の特性

- ◆パルス幅：1 ns~10 ns 可変
- ◆陽電子輸送エネルギー：4 keV 以上（低エネルギーで輸送するとパルス幅が広がる。）
- ◆時間分解能：10 ns（入射陽電子パルス幅 10 ns, 輸送エネルギー 4.2 keV のとき）
- ◆スリット位置と幅：試料から 4 cm の位置のスリットの幅は 2 mm, 12 cm の位置のスリットの幅は 6 mm
- ◆基準時刻：試料内での消滅による消滅  $\gamma$  線の一部を鉛シールドを通して検出。
- ◆ $\gamma$  線検出器：10 × 10 × 1 cm<sup>3</sup> のプラスチックシンチレータと HAMAMATSU-H6614-70（高磁場対応 PMT）
- ◆データ収集・保存：ライナックのタイミング信号をトリガーとして光電子増倍管からの信号をデジタルオシロスコープ（Lecroy WaveRunner 64Xi-A）で収集し、ハードディスクに保存する。収集の後、オフラインで解析してポジトロニウム飛行時間スペクトルを得る。
- ◆エネルギー E のポジトロニウムの速さ

$$v = 4.2 \times 10^5 \sqrt{E/\text{eV}} \text{ [m/s]}$$

※いずれの装置についても、不明な点はビームライン責任者の兵頭俊夫 <toshio.hyodo@kek.jp> までご相談下さい。

## 4. 中性子、ミュオン、低速陽電子の実験装置利用手引き

### 中性子、ミュオンの実験装置の利用

今回ご紹介しました中性子、ミュオンのビームラインは J-PARC の MLF に設置された装置で、PF と同様に実験課題を申請することによって利用が可能です。課題にはいくつもの区分がありますが、ここでは通常の利用方法である「一般利用課題」について、その申請手順を簡単に説明いたします。

### 装置の選定

J-PARC/MLF では 16 台の中性子実験装置、2 台のミュオン実験装置が利用可能です (2013 年 2 月現在)。今回は KEK の物性実験用ビームラインをご紹介しましたが、他にも日本原子力研究開発機構 (JAEA)、総合科学研究機構 (CROSS)、茨城県により運営されているビームラインを利用することが可能です。

#### ◆中性子実験装置のスペック一覧

[http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ns\\_spec.html](http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ns_spec.html)

#### ◆ミュオン実験装置のスペック一覧

[http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ms\\_spec.html](http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/instrumentation/ms_spec.html)

運営する組織によって細かな違い (KEK のビームラインは大学共同利用制度の適用により旅費の補助があるが、他では自己負担) がありますが、窓口は一元化されています。また、装置によって利用可能な実験オプション等が異なりますので、申請する際は装置担当者に事前相談されることをお勧めします。

### 利用区分の選定

J-PARC/MLF では、成果を公開し社会に還元することをもってビーム利用料金を無償とする概念に基づく「成果公開」型利用と、利用者が経済的に利益を得ることを想定し、成果を専有できる対価としてビーム利用料金を支払う「成果非公開」型利用の 2 種類の利用区分が設けられています。ここで言う「成果の公表」の定義は PF とほぼ同じで、企業秘密に関わる実験など、実験成果の取り扱いに注意を要する場合は後者の成果非公開型利用に申請されることをお勧めします。なお、成果公開型利用の場合には、実験終了日の翌日から起算して 60 日以内に J-PARC センターに実験報告書を提出していただくことが義務づけられます。

### 実験課題の申請

実験課題の公募は年に 2 回 (通常は 5 月頃と 11 月頃) 行われており、J-PARC 課題申請システム < <https://gamusha1.j-parc.jp/j-pas/auth/menu.jsp> > を利用して電子申請していただくことになります。詳細は公募要領のページ < <http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/applying/koubo.html> > に記載されていますので、こちらをご参照ください。

### 実験課題の審査

J-PARC/MLF に申請された成果公開型利用課題は全て課題審査部会で審査を行い、その結果に応じて以下のように区分されます。

- 採択課題：実験に必要なビームタイムが配分され、申請者の希望に応じて実験が可能な課題。
- 留保課題：決まったビームタイムは配分されないが、運転状況に応じて実験が可能な課題。
- 不採択課題：ビームタイムが配分されない課題。

成果非公開型利用については、J-PARC センターが安全性の確認及び実施の技術的可能性を確認しますが、審査部会による課題審査は受けません。

詳細は PF と異なる箇所もありますが、課題を出して実験を行うという一連の流れはほぼ同じです。一般利用課題以外の区分や審査、利用の流れについての詳細については <http://j-parc.jp/researcher/MatLife/ja/applying/index.html> をご参照ください。

### 低速陽電子実験施設の利用

今回ご紹介した低速陽電子実験施設の装置は、共同利用に公開されています。申請された実験課題は、PF のビームラインと同様に、放射光共同利用実験審査委員会 (PF-PAC) で審査されます。また、低速陽電子実験の経験のない方は、PF の経験者であっても、P 型 (初心者型) 課題を申請することができます。

詳しくは「放射光共同利用実験課題募集要項 (低速陽電子実験施設も含む)」< [http://pfwww.kek.jp/users\\_info/pac\\_application/index.html](http://pfwww.kek.jp/users_info/pac_application/index.html) > を参照ください。