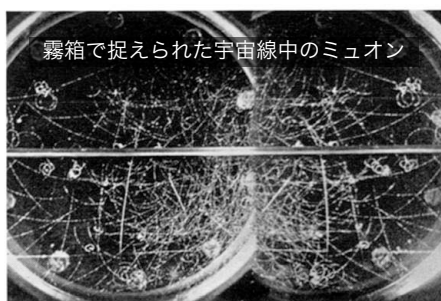




世界最強のパルス状ミュオンビーム施設が拓く新しい科学の地平

真に学際的なミュオン科学

ミュオンという粒子が宇宙線の中から発見されたのが1937年。当時、その数年前に湯川博士によって予言された「中間子」と重さがよく似ていたことからそれと間違われてしまいました。実はその中間子が短い時間で崩壊して生まれてくるのがミュオン（ミュオン粒子、ギリシャ文字 μ で表記）です。中間子



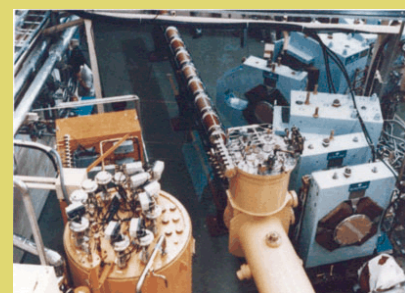
霧箱で捉えられた宇宙線中のミュオン

が原子核という狭い空間に陽子や中性子とともに閉じこもっているのに対して、ミュオンは電子や光と同じように物質と相互作用するため、原子の集合体としての物質の状態を調べるのに大変都合の良い粒子です。もちろん、ミュオンはこれら従来の探針では得られないような情報を与えてくれます。ミュオンはいわば光、電子線に次ぐ新しい「顕微鏡」を私たちに与えてくれるのです。

光や電子を用いる顕微鏡が過去一世紀以上に渡って物理学、化学から生物学までを幅広く幅広い科学の分野で強力な研究手段となってきたように、ミュオンにも幅広い応用の可能性があります。実際、約30年前にミュオンが陽子加速器によって人工的な「イオンビーム」として得られるようになって以来、素粒子物理学から始まって物質科学における

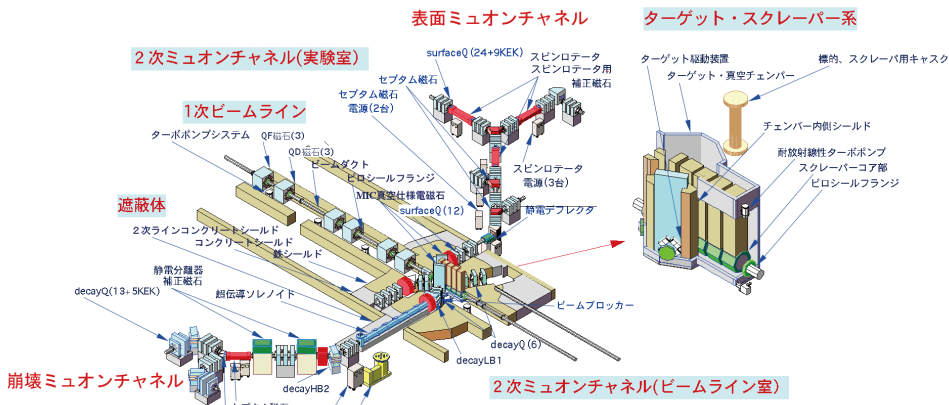
磁性、超伝導の研究、半導体における水素同位体の電子状態の研究、物理化学における水素同位体の化学反応の研究、負ミュオンが触媒する核融合反応の研究などが精力的に展開され、この間、超低速ミュオンビームの開発などビームの性質を劇的に改善する開発研究も進められました。さらに生物物理学や医学応用を含む非破壊分析などへの応用研究なども少しずつ進み始めています。このように、ミュオン科学は真に学際的な研究分野を形成しています。

これまでKEK-MSLは国内唯一のミュオン施設として、また世界初のパルス状ミュオン源として、20年以上に渡りこの分野に大きな寄与をして参りました。J-PARCにおけるミュオン施設はそれをさらに飛躍的に発展させる、文字通り世界最強のミュオン源です。



世界に先駆けた日本のパルス状ミュオン源(KEK-MSL)

世界最初のパルス状ミュオンは1980年に東京大学のチームによって高エネルギー物理学研究所（当時）ブースターシンクロトロンに設けられた施設でその発生に成功しました。既に世の中に連続状のミュオンビームを供給する施設がカナダ、スイス等複数存在し、当時それらの利用者の大半は「パルス状」ビームの有用性に対して懐疑的であったと言われていました。そのような予想を覆し、東大チームはパルス状ミュオンビームが連続状ビームと相補的に強力な実験手段であることを様々な実験を通して世界に知らしめました。この成功が後に英国ラザフォード・アップルトン研究所(RAL)でのパルス状ミュオン源の誕生、さらには理研RALミュオン施設の建設へとつながることになります。



世界最強のミュオン源へ

現在、日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で茨城県東海村に建設中のJ-PARC施設では、3ギガ電子ボルトに加速された大電流の陽子ビームを固体標的に照射することにより、より汎用性の高いプラスの電荷を持ったミュオン (μ^+) について、KEK-MSLに比べ桁近く強度の高いミュオンビームを供給できるようなミュオン研究施設の建設が進行中です。これは現在、同様のパルス状ビーム源として世界最高強度を誇る英国ラザフォード・アップルトン研究所で得られるビーム強度と比べてもおよそ50倍と見積もられており、現在計画されているものもふくめ、世界中全てのミュオン施設に比べても格段に高い強度であることを意味しています。さらにミュオン触媒核融合などの研究で期待される負の電荷をもったミュオン (μ^-) については、3ギガ電子ボルトという従来にない高エネルギーの陽子ビームを利用することにより、おそらく革命的とも言える強度の増大が期待されています。このような世界的に前例のない高強度ミュオンビームがどのような可能性を秘めているのかを以下にご紹介しましょう。

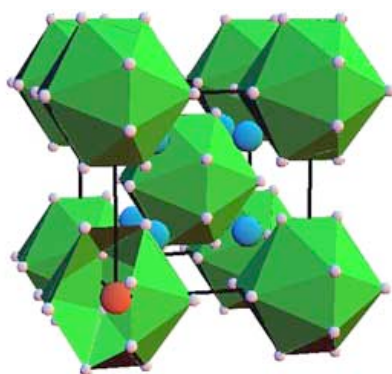
物質科学における新たな展開

ミュオンは磁気モーメントという磁石のような性質をもち、文字通り原子スケールでの方位磁石に相当しますが、ミュオンの生成過程ではそれが完全にそろっているという大変便利な性質を持っています。従って、他の磁気共鳴法のように外部から磁場をかけなくても、物質に注入した瞬間にそろっていたスピンのように変化していくかを調べることができる、という大きな特徴を持っていま

J-PARC 物質生命実験棟内部に建設中のミュオン施設

す(右コラム参照)。これはミュオンスピン回転/緩和/共鳴 (μ SR) と呼ばれ、物質の内部の磁気状態を原子スケールで知ることができる「磁気顕微鏡」ということができるでしょう。その誕生から30年余り、 μ SRは今や物性評価の重要な手段と位置づけられ、多くのユーザーが利用しています。

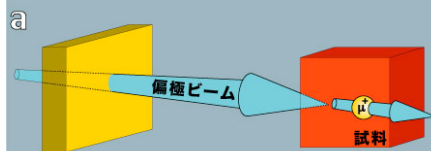
J-PARCで実現される高強度のミュオンビームは μ SRにとって大なる福音となります。まず、その強度を生かした迅速で正確な物質の評価が可能になり、従来一週間かかっていた実験が半日で済むようになるでしょう。これは新物質の合成⇔評価のサイクルを飛躍的に効率化し、新物質の開発に大きなインパクトをもたらすと考えられます。また、高強度のビームを大胆に絞ることにより従来実質的に不可能であったような微小試料、特殊条件での測定が可能になり、ミュオン利用の幅が大きく広がるでしょう。さらに、同じ物質生命実験棟内では中性子回折・散乱施設が利用可能、という大きなメリットもあります。中性子が基本的に物質の平均的な性質に敏感であるのに対し、 μ SRは局所的な不均一性に極めて敏感であることから、両者の相互利用による絶大なシナジー効果が期待されます。



ミュオンスピン回転/緩和/共鳴 (μ SR) の原理

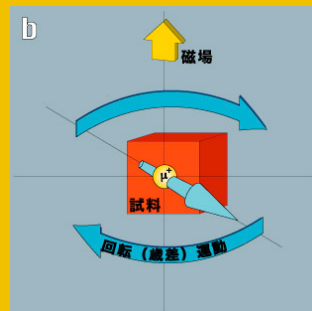
a) ミュオンビームを試料に注入

陽子ビームを固体標的に照射すると大量の π 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。このときすべてのミュオンのスピン(磁気モーメント)がほぼ完全にそろっているのが特徴です。



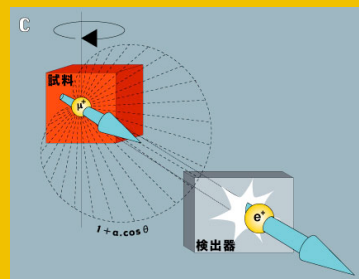
b) ミュオンスピンの歳差運動

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。

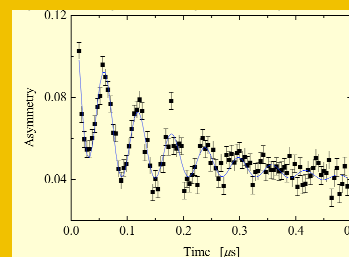


c) ミュオンの崩壊/陽電子の検出

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。



銅酸化物中のゼロ磁場 μ SR信号の例



ミュオン科学

J-PARCにおけるミュオン利用の可能性は基礎科学から応用に至るまで広範囲に渡っており、これらの分野においてJ-PARCミュオン施設は世界的研究拠点として中心的な役割を果たすことが大いに期待されます。

基礎科学

物性物理学

銅酸化物超伝導体の物性
量子臨界点近傍の物性
第二種超伝導の磁束格子状態
半導体中の水素同位体中心

化学

ラジカル化学
水素化反応のダイナミクス
超臨界状態の化学

素粒子物理

超対称性とミュオン稀崩壊
量子電磁気学

学際分野

μ触媒核融合

アルファ捕獲と媒質効果
超微細相互作用効果
ミュオン原子

生物物理

材料としての生命体構成物質
電子状態と分子機能

応用

非破壊分析

バルク敏感元素分析
トモグラフィ
ラジオグラフィ

ビーム開発

超低速ミュオンビーム
ミュオンビーム冷却/再加速

産業利用

水素エネルギー利用関連
磁性材料評価

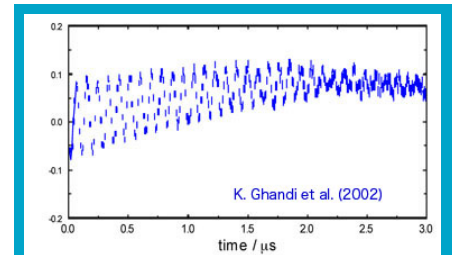
基礎科学：別の近道

ミュオンはいまだにその存在自体が謎めいている素粒子です。素粒子とは「点」のような存在で、それ自体には構造がないと考えられていますが、ミュオンは「重たい」と「有限の寿命で崩壊する」という2点を除いて、私たちがよく知っている素粒子である電子と全く同じに見えるのです。そのような粒子がなぜこの世に存在しなければならないのか、誰も答えられないでいます。実はミュオンと同じような性質をもち、ミュオンよりさらに重たいタウオン（ギリシャ文字τで表記）という素粒子が知られていて、e、μ、τ、で「三世代」を構成しています。これが何を意味するのかを調べる研究の一つとして、「世代間に混じりはしないか？」を調べる実験があります。ミュオンがニュートリノを伴わずに電子に崩壊したような例は今のところ実

験では見つかっていませんが、もしそのようなことが稀にでも実際に起こることが確かめられれば素粒子物理学全体にとって大きなブレークスルーになります。このような「稀崩壊」を検証する実験に対して連続状ビームは強度を活かす上で原理的な困難を抱えており、今後はJ-PARCのような高強度のパルス状ミュオンビームこそが大きな威力を発揮するでしょう。その他にも、物質・反物質の対称性の検証、物理基礎定数の精密測定など、高エネルギー物理学が目指すエネルギーフロンティアとは相補的な、様々な興味深い精密実験—別の近道—が可能になると期待されます。

化学：超高感度の「軽い水素」

ミュオン (μ^+) は陽子の約9分の1の重さを持ち、電子を1つ束縛すると水素原子と同じような「ミュオニウム」と呼ばれる状態になります。いわば水素の軽い同位体に相当します。ミュオニウムはミュオンと同じように崩壊陽電子によって一つ一つ検出できるので、大変高感度な放射性的トレーサーとして様々な応用が可能です。同じような同位体として三重水素（トリチウム）がありますが、ミュオニウムはトリチウムに比べると遥かに寿命が短いため、極めて短い時間（～ナノ秒）の変化を捉えることができます。この性質を利用して、水素に関わる様々な化学反応過程＝電子状態の変化をリアルタイムで追いかけることができます。微量の水素ほど

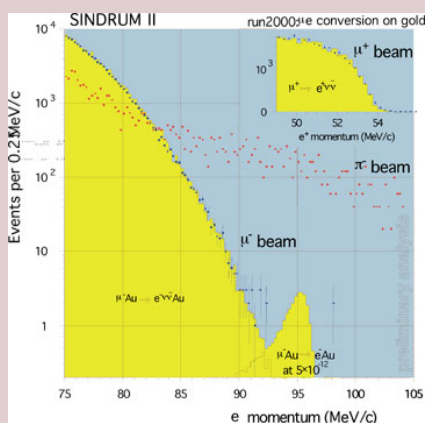


超臨界水中のミュオニウムの信号

捕まえにくい原子はない、という意味でミュオニウムはそのような研究の強力な切り札となるでしょう。残念ながら、現状ではこのような化学における興味深い応用の可能性はまだその一部分が試みられた段階にあると言っても過言ではありません。これはミュオンビーム利用が主に物理学の研究者により推進されてきたという歴史的な事情による部分もありますが、今日までに至るビームタイムの絶対的な不足もその大きな原因の一つです。J-PARCミュオン施設はこの「ビームを利用する機会の絶対的な不足」を解決するために必要不可欠な施設なのです。



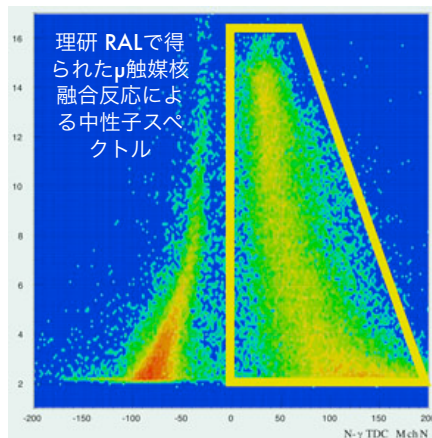
PSIでのミュオン稀崩壊の実験結果



ミュオンが触媒する核融合

負の電荷を持ったミュオンは物質中で文字通り「重たい電子」として振る舞います。すなわち、正の電荷を持った原子核のまわりに束縛されて原子の一部になります。この場合、負ミュオンは電子の200倍も重たいのでその分電子より200倍も原子核に近い距離を周回することになり、周りの他の原子から見ると、あたかも負ミュオンによって原子核の電荷が一価だけ減少したように見えます。

(それまで原子番号Zだった原子が負ミュオンを束縛することで原子番号Z-1に化ける、ということの意味です。)これはZが1である水素原子とその同位体にとってはZ-1がゼロ、すなわち「中性原子になる」ことを意味し、それまで相互に近づくことが出来なかった水素同位体同士が従来の200分の1の距離まで近づくことができるようになります。実際、重水素と三重水素(どちらもZ=1)の混合物に負ミュオンを照射すると、これらの核が近づき合って**常温以下の通常環境で簡単に核融合反応が起きることが確かめられました**。しかも大変面白いことに、そうやって核融合反応を引き起こした負ミュオンは反応後に自由になり、次々と重水素-三重水素反応を媒介する、いわば**循環的な反応が起こる**ことも分かったのです。東大チームはこの循環過程で律速段階となるアルファ附着率(負ミュオンが核融合反応生成物であるアルファ粒子[ヘリウムの原子核]に束縛されて反応に寄与しなくなる確率)を、パルス状ミュオンを用いることにより実際に測定することに初めて



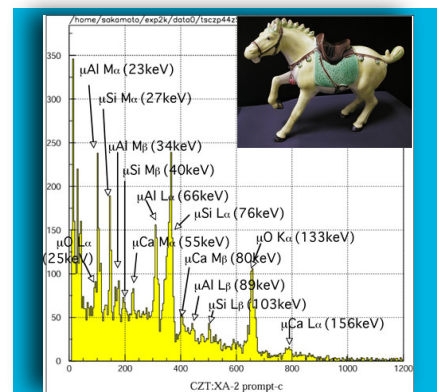
成功しましたが、これはビームの時間構造をうまく利用することでバックグラウンド信号を押さえられたことが鍵になりました。

現在、通常の条件で一つの負ミュオンが自然崩壊するまでに触媒する核融合反応は150回程度との実験結果が出ており、律速過程を制御することでその回数を増大させることを目指した研究が行われています。**J-PARCの高強度パルス状ビームを用いることにより、今まで実際に不可能であった様々な条件を試すことが出来るようになります**と期待されています。一つの負ミュオン当りの循環回数が300回になればミュオンを発生させるために必要なエネルギーと釣り合う(サイエンティフィック・ブレイクイーブン)と言われており、さらにこれを大きく超えられれば実際のエネルギー源として利用可能になるかもしれません。

非破壊分析

考古学資料から生きた動植物まで、対象に損傷を与えることなくその構成元素の種類や含有率を調べたい、という要求は広範な分野に渡ります。この目的のために使われる手法として最も普及しているものの一つに蛍光X線分析があります。これは分析対象にX線を照射して原子を励起し、その原子が励起状態から元に戻る際に放出する二次X線が元素の種類を反映することを利用して分析を行なうものです。ところがこの手法にはナトリウムより軽い元素に対して感度が悪く、またX線の性質上、感度があるものについては対象のごく表面の情報しか分からない、という欠点

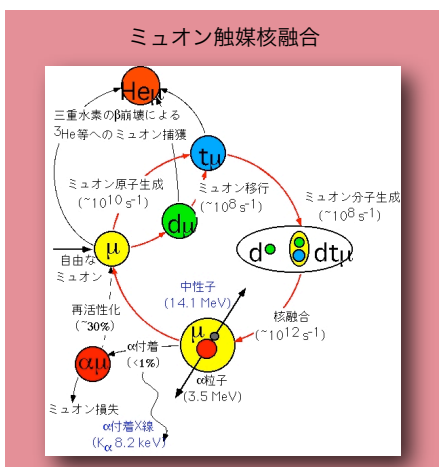
があります。そこで登場するのが負ミュオン捕獲に伴う特性X線を用いた非破壊元素分析です。前節でも触れたように、負ミュオンは通常の電子に比べて200倍も重たいため、原子に捕獲・束縛される過程で放出するX線のエネルギーも桁違いに高いのです。この高いエネルギーのおかげでミュオンの特性X線は数mm~数cmという厚みを通って検出器に到達でき、**ミュオンを試料深くに注入して試料内部の元素分析を行なうことが可能**になります。加速器からのビームを必要とするため、動かせないような大きな試料の分析には向きませんが、負ミュオンは最後には自然崩壊で消滅するため対象物の放射化もほとんどなく、軽元素を含む全ての元素が分析可能な非破壊元素分析法として期待されています。**J-PARCの高強度ビームを用いれば、今まで実質的に不可能であったような小さな試料の分析が可能になる**など、大きな進展が期待されます。



唐三彩の負ミュオン捕獲X線スペクトル

産業利用

21世紀は脱石油、水素エネルギー利用の時代と言われています。従来学術研究のみに使われてきたミュオンも、水素同位体として水素吸蔵材料の微視的な情報を提供する、ということで産業界の注意を引き始めています。この他にも、前出の非破壊元素分析など材料開発などでミュオンが役立つ局面は今後益々増えていくと予想されます。**J-PARCミュオン施設はこのような可能性に対しても大きく開かれている**、と言えるでしょう。



J-PARC プロジェクトチーム ミュオンサブグループ

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 大強度陽子加速器推進部
独立行政法人 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門

URL: <http://www.j-parc.jp/>

December, 2005