

大強度陽子加速器施設 J-PARC
Japan Proton Accelerator Research Complex

物質・生命科学 実験施設



国立研究開発法人
日本原子力研究開発機構 (JAEA)
大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

J-PARCセンター

〒319-1195
茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
<http://j-parc.jp>

MLFの装置・利用に関するお問い合わせ先
J-PARCセンター ユーザーズオフィス
〒319-1106
茨城県那珂郡東海村白方白根162-1
TEL 029-284-3398 / FAX 029-284-3286
<http://j-parc.jp/uo/>

2023年1月



ビッグバン
宇宙

惑星

地球外生命

化学
地球科学

ひと

都市工学

環境

病理学

生命誌

超伝導

中性子・ミュオンで探る 物質・生命の科学

物理学

エネルギー

MLF

Materials and Life Science
Experimental Facility

考古学
歴史

細胞

ナノテク

材料科学

J-PARC 物質・生命科学実験施設

パルス中性子とパルスミュオンの世界最高峰
～ 物質と生命の謎が、ここで明らかになる ～

世界最高クラスの大強度陽子加速器と、加速器が放つ大強度陽子ビームを利用する実験施設で構成されるJ-PARC。その中ほどに位置する物質・生命科学実験施設（MLF）は、加速器からの1 MWのパルス陽子ビーム（3Gev, 25Hz, 333μA）を利用して世界最高強度の中性子及びミュオンビームを造り出し、これらを用いて物質・生命科学研究を推進させることを目的とした施設です。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構と大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構の共同プロジェクトとして運営されるJ-PARCの一つの施設として、MLFは学術・基盤研究や産業利用に広く供用の機会を設けています。

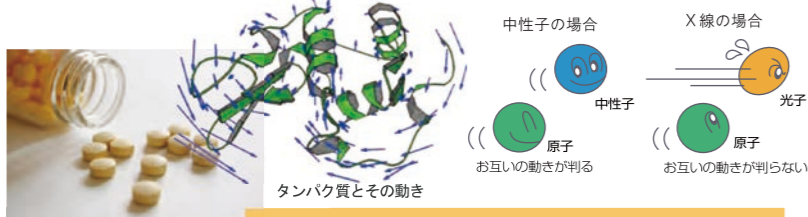


生命進化

創薬

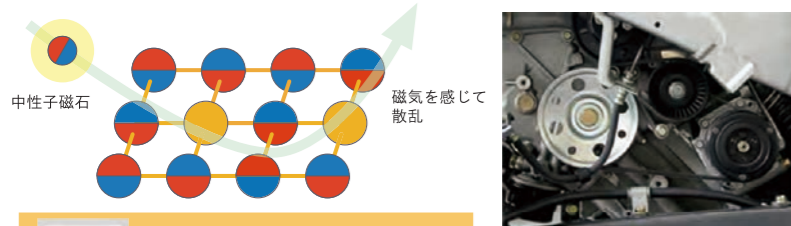
動を見る

中性子の質量は、水素原子とほぼ同程度です。原子の周囲をとりまく軽い電子雲と相互作用するX線と比べ、自分と同程度の重さの原子核と相互作用する中性子は、原子の動きを観測するのに適しています。このため、タンパク質の機能や超伝導現象の解明などの研究に利用されます。



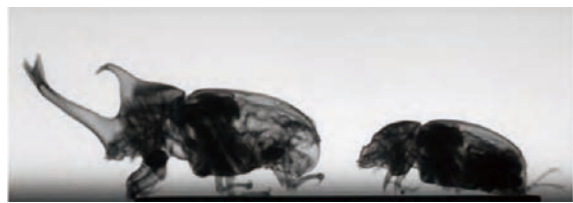
磁気構造を調べる

中性子は $\frac{1}{2}$ のスピンを持ち、微小な磁石として振る舞うため、物質内の磁場により力を受けます。この力で散乱された中性子の振る舞いを調べることで、物質中の磁気構造や磁場分布を知ることができます。省エネ化に貢献するモーターの強力磁石や高温超伝導送電材料の分析に威力を発揮します。



透かして見る

中性子はその名の通り電荷を持たない中性の粒子であり、ほとんど相互作用せずに物質を通り抜けることができるため、物質を破壊することなく内部構造を調べることができます。また、物質中の水素や水などが含まれる部分を識別することにも優れています。



元素を見わける

原子核と相互作用する中性子は、電子と相互作用するX線と比べ、軽い元素の観測や同位体の検出に適しています。このため、新しいエネルギーとして期待される燃料電池内部の水の動きの観察などに用いられます。また、中性子を照射して物質を放射化し、その放射能から組成を調べる放射化分析は、遺跡出土品の産地推定などにも利用されます。

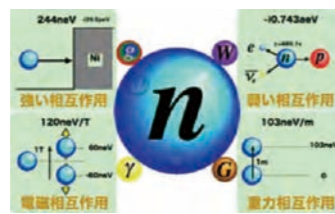


Photo by (c)TornaYun (http://www.yunphoto.net)

物質のなりたちを調べる

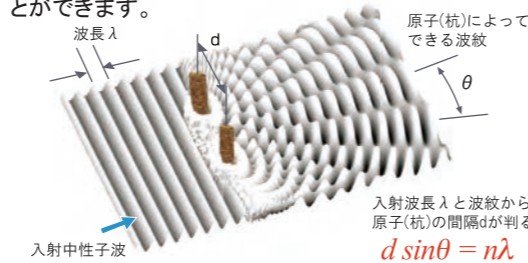
中性子の崩壊、中性子内部の電荷の偏り、原子との散乱には、未だ知の及ばない高エネルギー現象の影響がわずかに含まれています。これらを正確に計測することで新しい素粒子の証拠を探ることが可能であり、これは宇宙の歴史、特に反物質が失われ物質が残っている理由などを解き

明かす重要な手がかりとなります。



静を見る

粒子であると同時に波の性質も持つ中性子は、X線回折と同様に結晶中でブラッグ回折を起こすため、干渉現象を観測することにより結晶の構造を知ることができます。

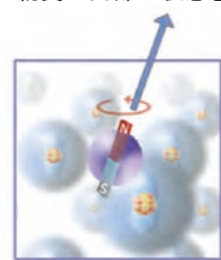


中性子 Neutron

質量: 1.67×10^{-24} g
電荷: 0
スピン: $\frac{1}{2}$
平均寿命: 約15分

静を見る

正の電荷を帯びたミュオンは、物質に注入されると原子と原子の間で止まり、物質の内部の状態を観測します。また、負の電荷を帯びたミュオンは原子核のすぐ近くに止まり、ミュオンを含めた原子を形成します。



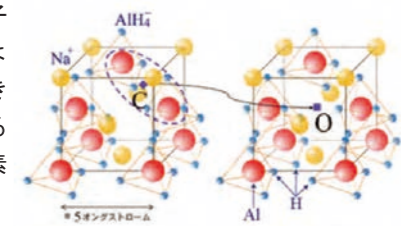
磁石の性質を持つミュオンを利用すれば、内部磁場の検出を通じて物質と生命をミクロな視点から解き明かすことができます。

ミュオン Muon

質量: 1.88×10^{-25} g
電荷: +e, -e
スピン: $\frac{1}{2}$
平均寿命: 約2マイクロ秒

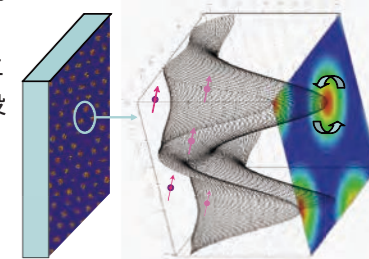
磁気構造を調べる

$\frac{1}{2}$ のスピンを持つミュオンは、小さな磁石として振る舞います。ミュオンを物質中に注入すると、周囲の電子や原子核の作る磁場を感じて歳差運動をし、やがて崩壊します。崩壊により放出される陽電子の方向を観測することにより、物質内部の磁気構造や磁場分布を知ることができ、磁性体や超伝導体の解明に役立ちます。



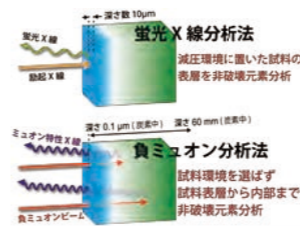
透かして見る

ミュオンは物質中で「電磁相互作用」と「弱い相互作用」のみを起こすため、透過性が高いのが特徴です。このため、ミュオンによるレントゲン写真撮影で、物体内部の状態や元素を選別した探索ができます。



元素を見わける

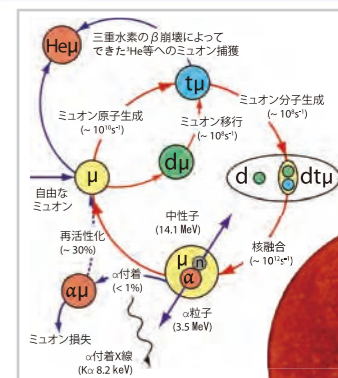
原子核の周りを回る電子が出す特性X線を分析することで、物質の組成を知ることができます。物質を構成する原子の電子をミュオンに置き換えたミュオン原子が放つ特性X線は、通常の原子が放射する特性X線に比べて高エネルギーで透過性が高いため、より深部の組成を知ることができます。



画像提供: JAXA、東大など

物質のなりたちを調べる

原子核の周りを回る電子を負ミュオンに置き換えたミュオン原子を利用すると、原子核の構造を知ることができます。また、ミュオンと水素同位体からなる小さなミュオン原子はミュオン触媒核融合を引き起こすため、将来のエネルギー源として期待されています。

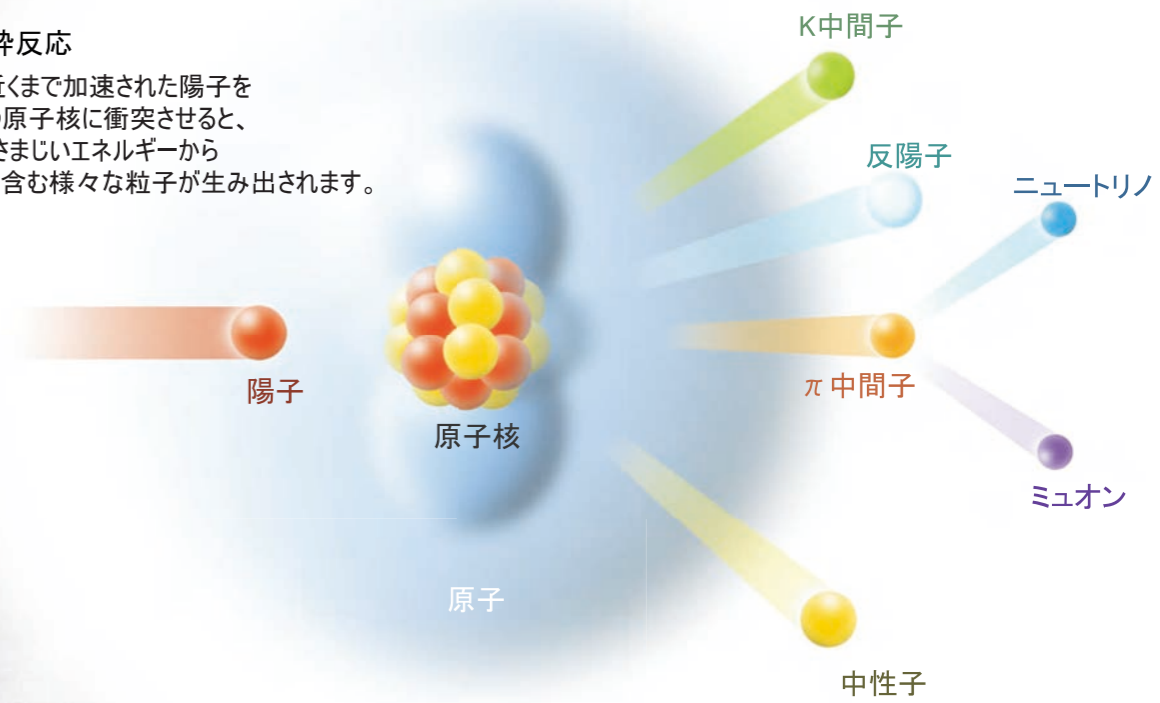


ターゲットとなる物質(標的)の原子核に
光速に近い速さに加速した陽子を衝突させることで核破砕反応が発生し、
中性子やミュオンなどの粒子が得られます。

中性子・ミュオンビームの発生

核破砕反応

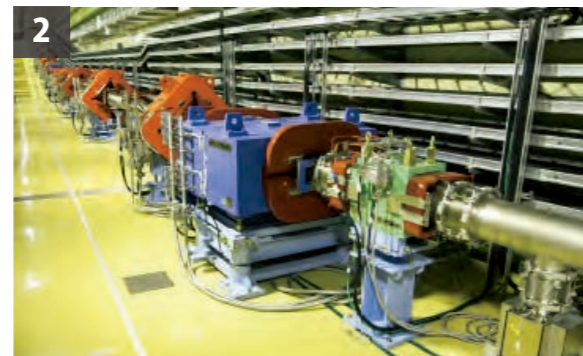
光速近くまで加速された陽子を
標的の原子核に衝突させると、
そのすさまじいエネルギーから
核子を含む様々な粒子が生み出されます。



線形加速器



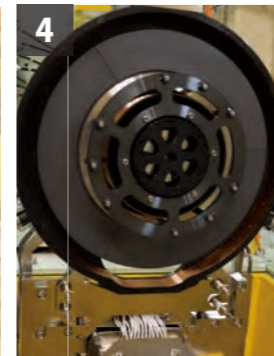
1 3GeV 陽子シンクロトロン
線形加速器から送り込まれる陽子を加速・周回するための電磁石がリング状にずらりと並ぶ陽子シンクロトロン。
陽子を30億電子ボルト(3GeV: 光速の約97%)まで加速します。



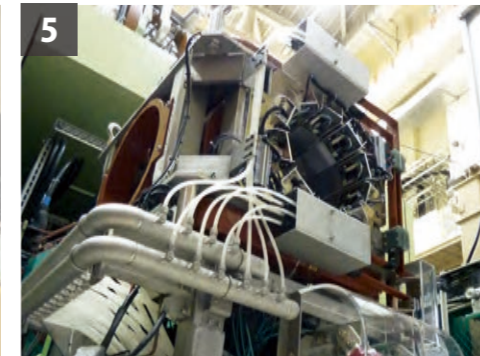
2 3GeV 陽子ビーム輸送ライン
超高真空のビームダクト内の3GeV陽子ビームを、地下に建設されたトンネル内を通して、300mほど離れた物質・生命科学実験施設まで導きます。



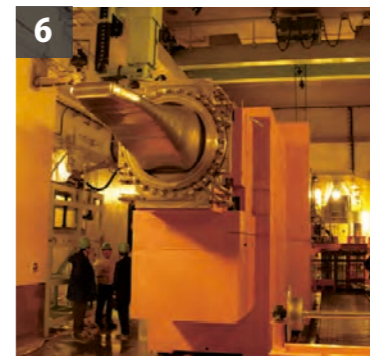
3 超高耐放射線電磁石
高エネルギーの陽子を標的に向かって撃ち込むための電磁石。陽子が放つ強い放射線を遮蔽するために鉄で囲われています。



4 ミュオン生成標的
陽子を衝突させミュオンのもととなるπ中間子を発生させるための標的。黒鉛でできた標的の周囲を放熱のための銅で囲っています。



5 ミュオン実験装置
ミュオンビームラインの最下流に位置する装置。ビームラインに沿って導かれ、試料内部に撃ち込まれたミュオンが崩壊する際に放出する陽電子をキャッチします。



6 中性子生成水銀ターゲット
中性子を発生させるための標的。水銀を内包しており、水銀自体が循環し放熱する仕組みです。



7 MLFの実験ホール
画面右の紺色の中性子源ステーションから左に向かって、遮蔽体に覆われた中性子ビームラインが伸びています。画面奥にはミュオンビームラインも見えます。

陽子から中性子へ

陽子ビームから中性子ビームを作り出す中核である核破碎中性子源は、次のような装置から構成されています。

- ・ 加速器から大強度陽子ビームを輸送する 3GeV 陽子ビーム輸送ライン
- ・ 陽子ビームを照射し中性子を発生する水銀ターゲット
- ・ 飛び散った中性子を集めるベリウム・鉄反射体
- ・ 研究に最適なエネルギーまで中性子を減速する液体水素モデレータ

これらの各装置が共にその機能を高めあい、世界で最も“明るい”中性子ビームを作り出します。

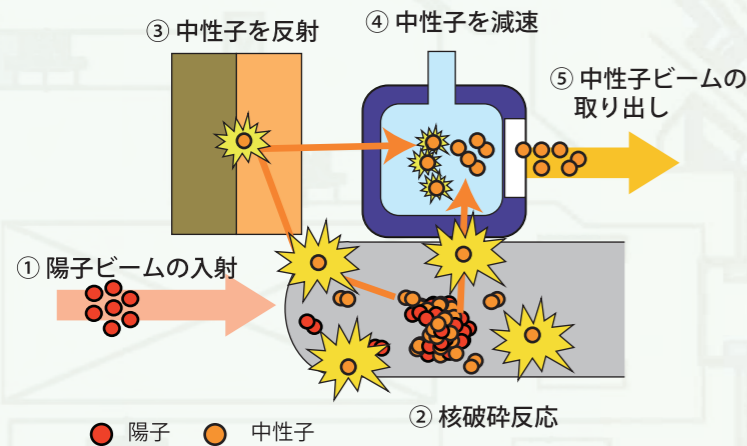
世界の核破碎中性子源の強度比較

中性子の強度は、出力だけではなく、パルスの繰り返し周期や線源の設計にも依存します。右の図は世界の主要な施設の1パルスあたりの中性子数を比較したものです。J-PARCで1MW定格出力を達成すると、ほかを大きく引き離す中性子強度となる予定です。

SNS: 米国オークリッジ国立研究所の施設
ISIS: 英国ラザフォード・アップルトン研究所の施設

施設名	出力	中性子強度 (1パルスあたり)
J-PARC	900 kW (2021)	16.5×10^{12}
設計出力 1 MW		18×10^{12}
SNS	1.4 MW	5.9×10^{12}
ISIS 2nd target	48 kW	4.0×10^{12}

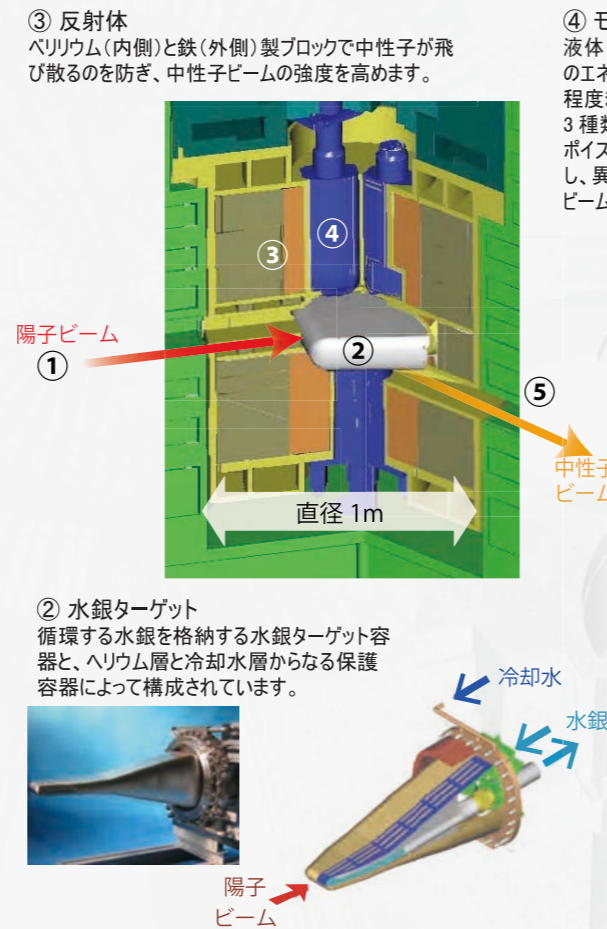
中性子ビームはこうして作られる



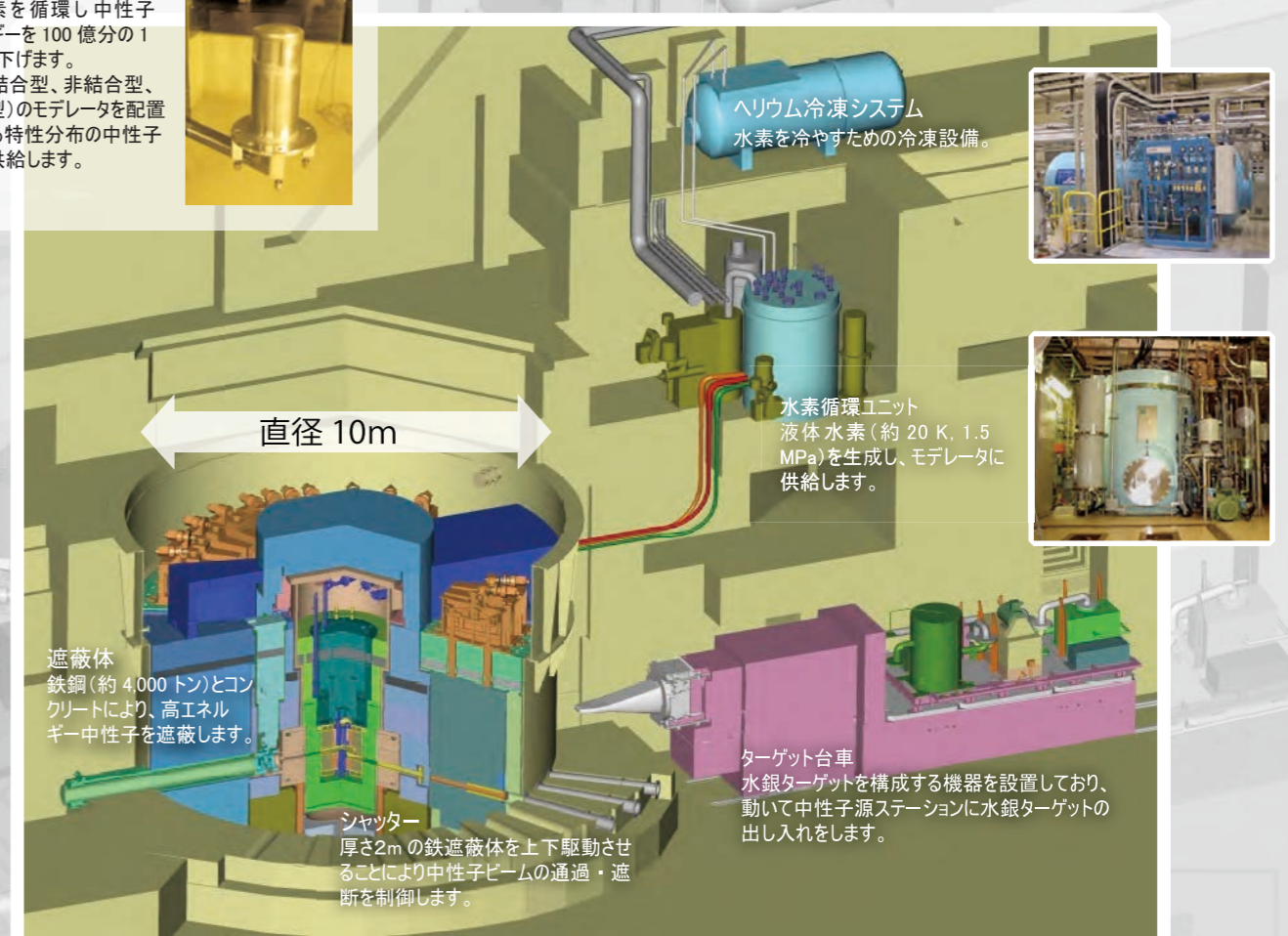
- 1 3GeVの陽子ビームを水銀ターゲットに照射します。
- 2 陽子が水銀の原子核と衝突し、原子核が破碎されます。その時、原子核を構成していた中性子が飛び出します。
- 3 中性子は反射体で反射されて、モデレータに集められます。
- 4 中性子はモデレータ内の水素と衝突を繰り返し、次第にエネルギーが下がります。
- 5 研究に最適なエネルギーの中性子となり、実験ホールの実験装置に導き出されます。

図中の番号は、各過程と機器の対応を示しています。

中性子源ステーションの中心部

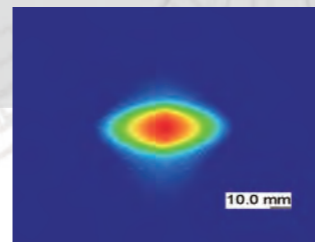
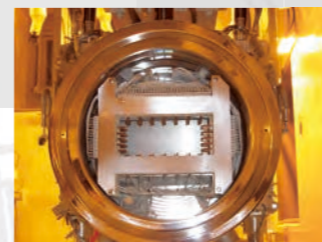
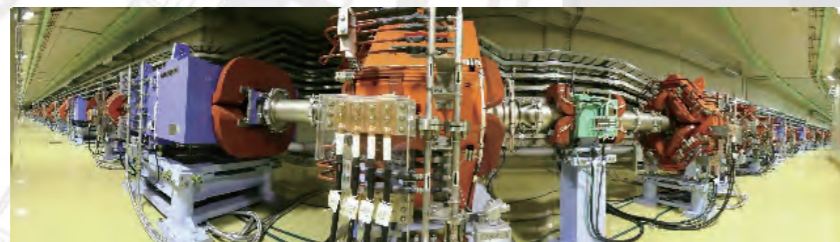


中性子源ステーション



3GeV 陽子ビーム輸送ライン

全長 300m にも及び、陽子ビームを曲げるための双極電磁石、陽子ビームを収束・発散させる四極電磁石、陽子ビームの軌道の微調整に用いる補正電磁石などの 108 台の電磁石が並べられ、3GeV 陽子シンクロトロン加速器から水銀ターゲットまで陽子ビームを輸送します。



左: 加速器超真空領域とターゲット周辺領域(ヘリウム層)を分離する陽子ビーム窓

右: 実際に計測した陽子ビームの形状

遠隔操作機器

放射化した機器に対して、マニピュレータ等を用いた遠隔操作によってメンテナンス作業を行います。右の写真は実際の交換作業の様子です。

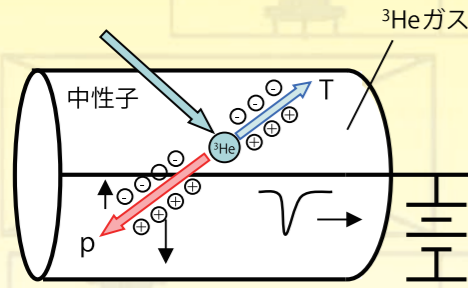


中性子を測る

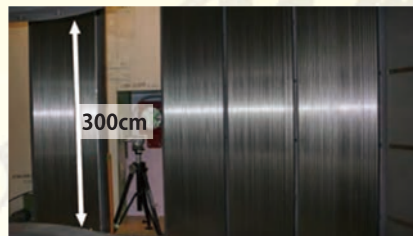
中性子はその名のとおり電荷をもたず、原子内の電子とはクーロン相互作用をしないため、原子核と直接相互作用を起こす粒子です。このため、中性子は原子核反応を通じて測定されます。中性子と良く反応する物質は数少なく、実際に使用されているのは数種類です。

MLFにおいて中性子測定に使用される検出器には、 ^3He を封入したガス型検出器や ^6Li 、 ^{10}B を中性子有感物質としたシンチレータ型検出器があります。ガス型検出器では2次荷電粒子の電離作用によって生じる電気パルスを、シンチレータ型検出器では2次荷電粒子のエネルギー付与によるシンチレータからの光信号を検出します。

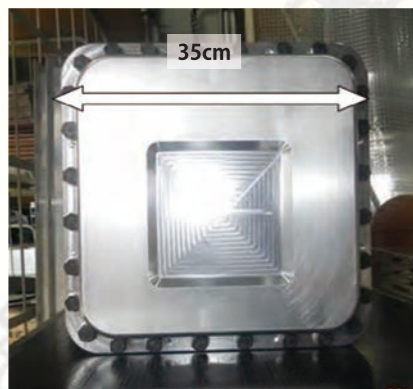
ガス型検出器



中性子 (neutron) とヘリウム (^3He) が反応し、2次粒子である陽子 (p) とトリトン (T) が生成します。
 $^3\text{He} + \text{neutron} \Rightarrow \text{p}(574 \text{ keV}) + \text{T}(191 \text{ keV})$
 この反応による2次荷電粒子により、ガスの電離作用が発生します。

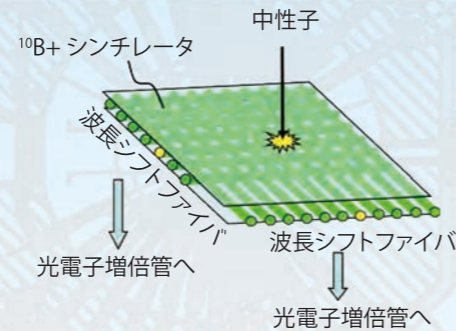


1次元ガス検出器

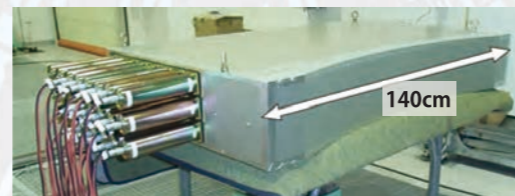


2次元ガス検出器

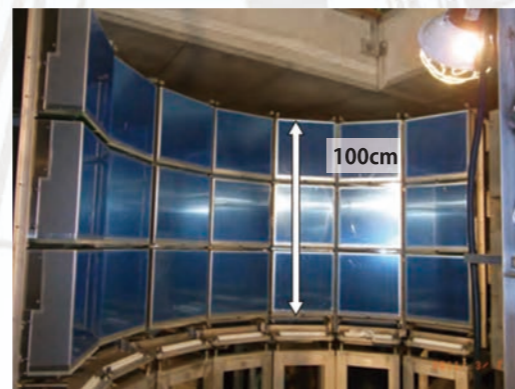
シンチレータ型検出器



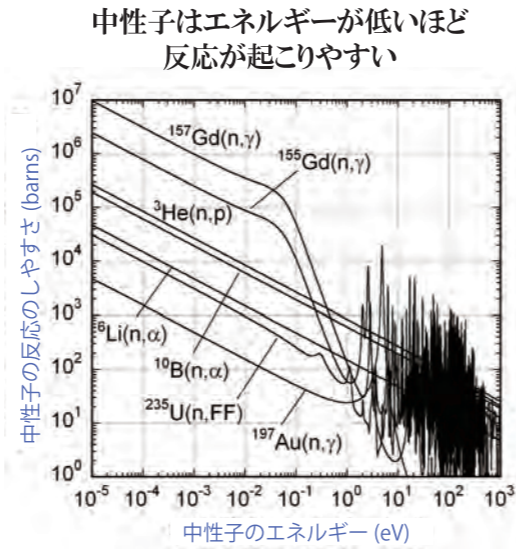
中性子 (neutron) とホウ素 (^{10}B) が反応し、2次粒子である α 粒子とリチウム (^7Li) が生成します。
 $^{10}\text{B} + \text{neutron} \Rightarrow \alpha(1.78 \text{ MeV}) + ^7\text{Li}(1.02 \text{ MeV})$
 この反応による2次荷電粒子により、蛍光を発生します。



1次元シンチレータ検出器



2次元シンチレータ検出器

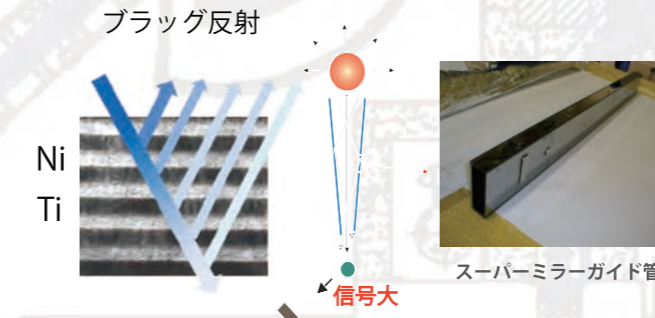


中性子はエネルギーが低いほど反応が起こりやすい

中性子を制御する

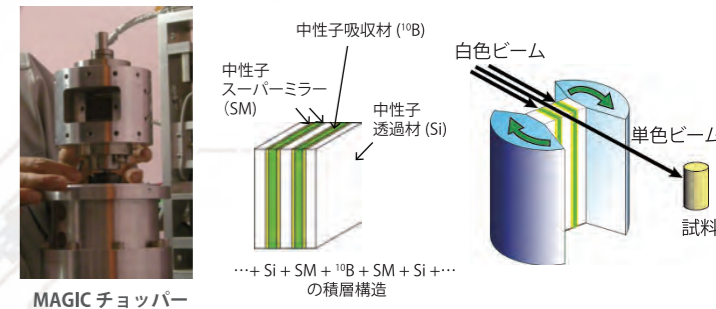
中性子を効率よく輸送するデバイス

効率よく中性子を反射するスーパーミラー



中性子発生源から実験試料まで、数mから数百mのあいだ中性子を効率よく輸送するスーパーミラーの開発を進めています。

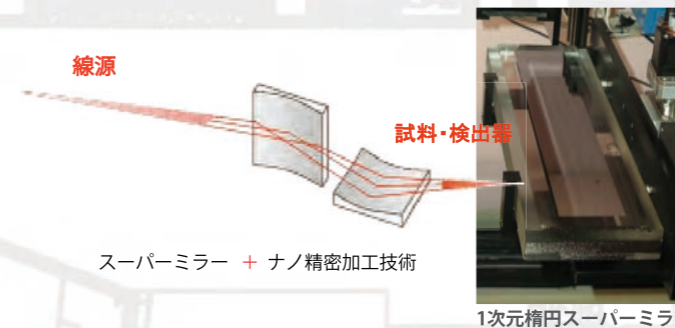
スーパーミラーを利用した高効率チョッパー



中性子非弾性散乱実験のさらなる測定効率向上を目的として、スリット部に中性子スーパーミラーを備えた新規フェルミチョッパー (MAGIC チョッパー) の開発を進めています。

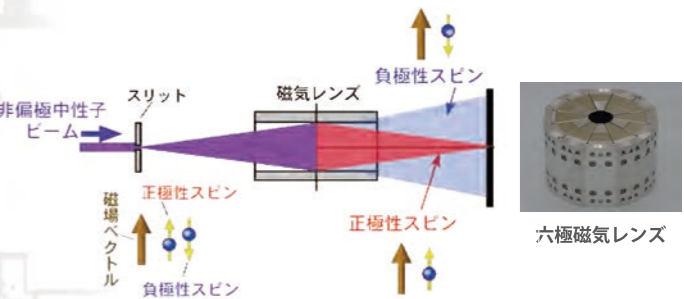
ナノ粒子を観測するための収束デバイス

スーパーミラーによる中性子収束



非球面スーパーミラーによって、広い波長域の中性子を実験試料や検出器に収束させて、実験効率を飛躍的に向上させる開発を進めています。

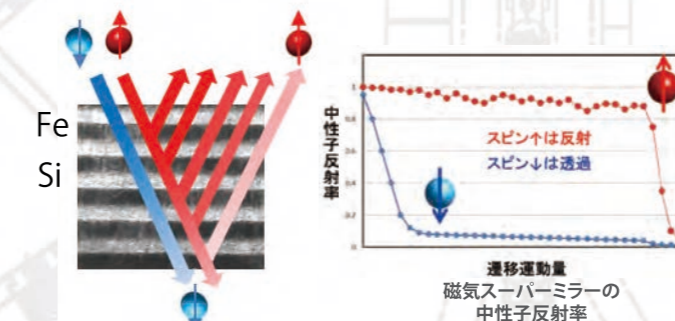
磁場による中性子収束



磁場勾配のある領域では、磁気モーメントをもつ中性子に力が働きます。この性質を利用して中性子ビームを収束する磁気レンズの開発を進めています。

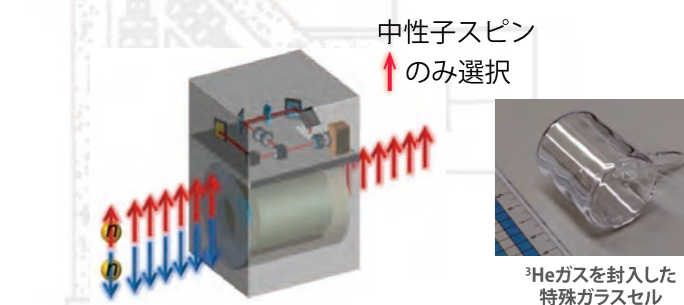
磁性や超電導を解明するための偏極デバイス

磁気スーパーミラーによる中性子偏極



中性子スピンの状態の違いで、磁性体ミラーの中性子反射率が異なることを利用して、広い波長域の中性子ビームを偏極させる手段の開発を進めています。

核スピン偏極 ^3He による中性子偏極



核スピンの偏極した ^3He ガスが核スピンと反平行なスピンの中性子のみをよく吸収する性質を利用して、広いエネルギー範囲の中性子を効率よく偏極する装置を開発しています。

大強度陽子加速器は、パルス状の陽子ビームをMLFの中性子及びミュオン生成標的に撃ち込みます。陽子ビームが標的に衝突して生み出される中性子やミュオンも、パルス状のビームとなります。

中性子パルスビーム

中性子で探る

中性子は粒子であると同時に波の性質も持ちます。

中性子の波長は中性子の速度に反比例するのですが、その長さが物質を構成する原子や分子の大きさ程度であれば、X線や電子線のように物質により散乱された中性子の波の干渉現象を観測することで、その物質の内部構造を調べることができます。

ほぼ同時刻に生み出されたパルスを構成する中性子の速度には、ある程度の幅があります。そのため、速度が速く、波長の短い中性子が先頭切って試料に飛び込み、速度の遅い、波長の長い中性子は遅れて試料に到達します。

中性子が同じ距離を飛行するのにかかる時間は、中性子の速度に反比例しますので、中性子が生み出され、試料により散乱され、検出器に到達するまでの時間を観測することで、中性子の速度(波長)を知ることができます。これを中性子飛行時間法といいます。

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

θ : 中性子の結晶格子に対する入射角度
 λ : 中性子の波長

非弾性散乱を利用した解析

色々なエネルギー(速度)を持つ中性子の中から、特定のエネルギーを持つ中性子だけを選び出し、試料に入射します。

試料に入射した中性子は原子や分子、スピンと相互作用します。運動量保存則とエネルギー保存則に従って試料からエネルギーを受け取った中性子は速度を速め、試料にエネルギーを与えた中性子は速度を落とします。

非弾性散乱により中性子が受け取ったり、与えたりするエネルギーは、エネルギーをやり取りする試料の原子や分子の置かれている状況を反映しています。これらを詳しく観測することで、物質中の原子や分子、スピンの振動や結合状態などを調べることができます。

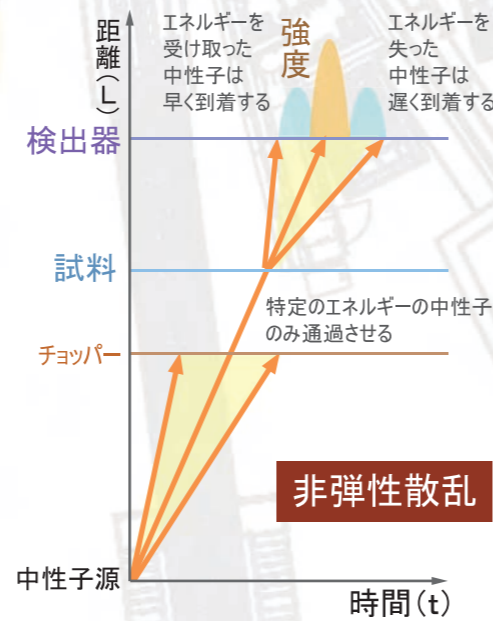
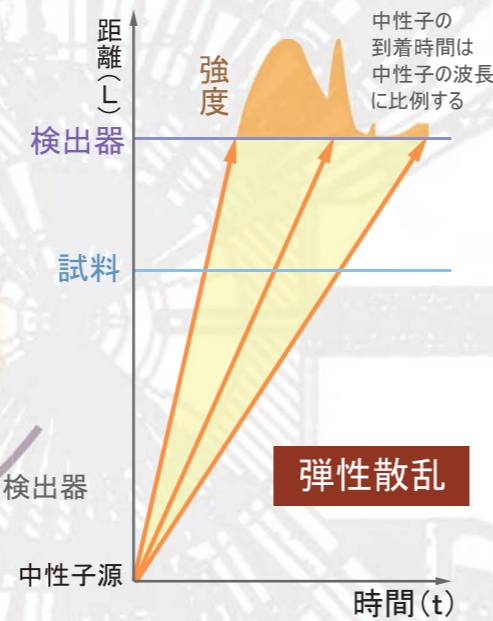
中性子パルスビーム

弾性散乱を利用した解析

試料に飛び込んだ中性子の波は原子や分子により散乱されます。

散乱された波は互いに重なり合うのですが、試料の内部構造を反映して強め合い、また弱め合いながら検出器に到達します。試料を取り巻く検出器は、飛び込んでくる中性子の数の時間変化を観測します。どの散乱角度(2θ)の検出器にどの波長(λ)の中性子がどのくらい飛び込んでくるか、その強度の分布から、試料の内部構造を調べることができます。

試料が磁性を持つ場合には、散乱中性子の強度分布は磁性原子の磁気モーメントの大きさや向きに関係するので、磁気構造を調べることもできます。また、広い散乱角度範囲における散乱中性子の強度分布を観測することで、原子レベルの構造情報だけでなく、タンパク質などの生体物質や高分子の構造を調べることもできます。



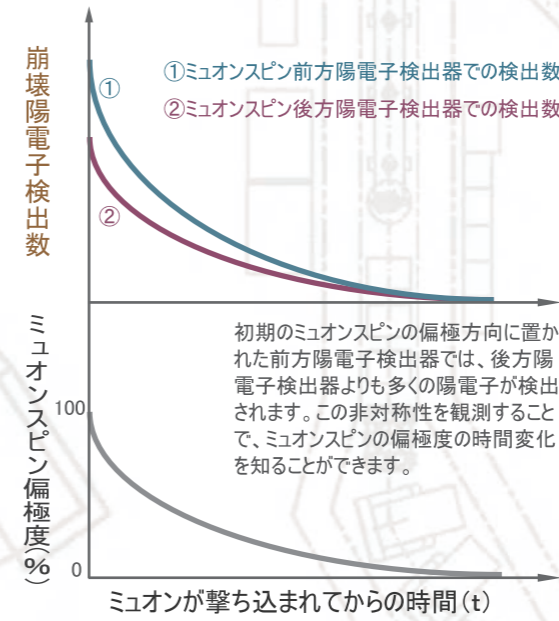
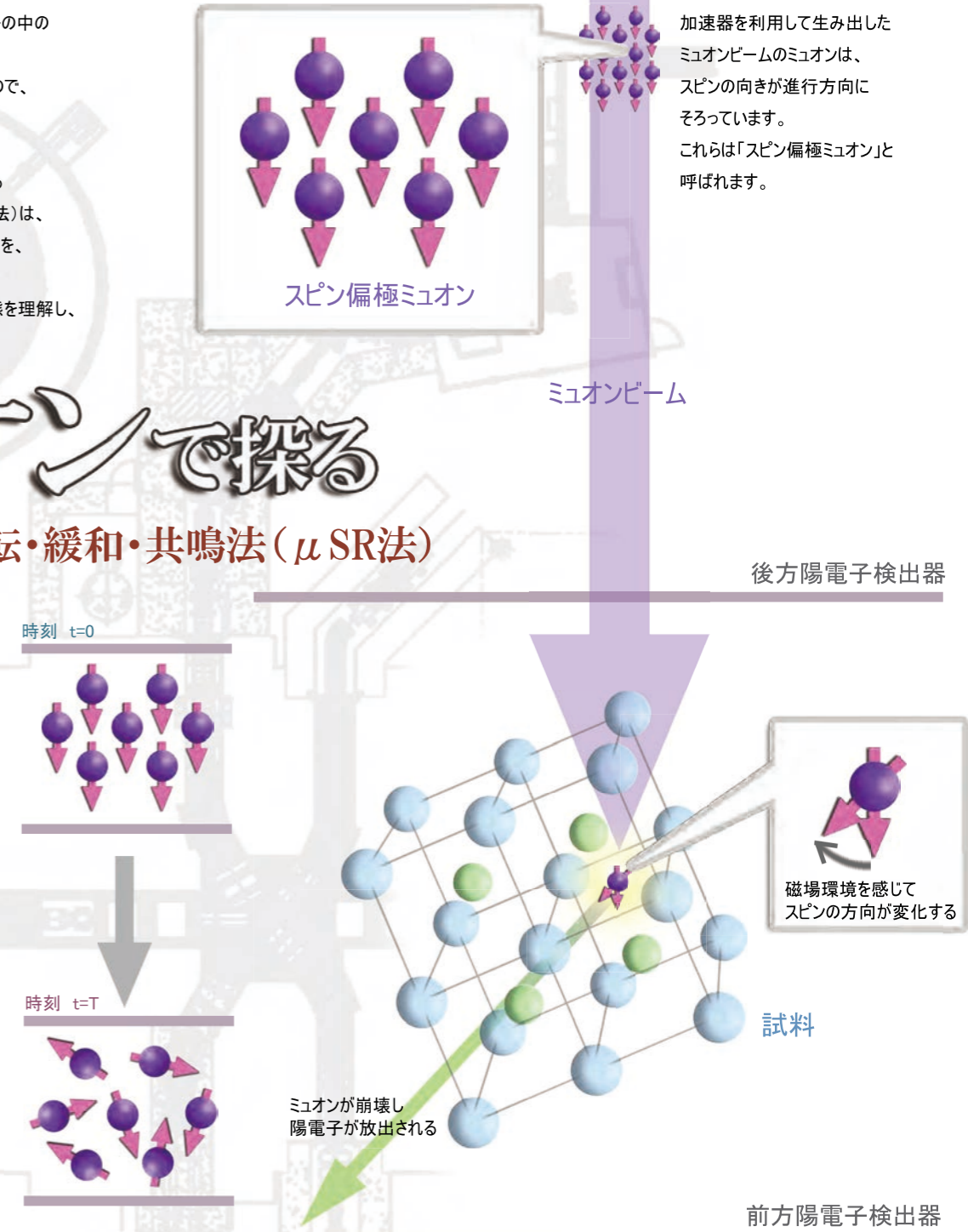
物質の性質は、その物質を構成する原子の中の電子の状態によって大きく左右されます。電子は磁石としての性質(スピン)を持つので、その磁石が作る磁場を観測することで電子の状態を調べることができます。ミュオンを用いた代表的な実験手法であるミュオンスピン回転・緩和・共鳴法(μSR法)は、物質の内部に存在する磁場(内部磁場)を、超高感度で観測できる実験手法です。この内部磁場の観測を通じて電子の状態を理解し、物質の性質を解き明かします。

ミュオンで探る

ミュオンスピン回転・緩和・共鳴法(μSR法)

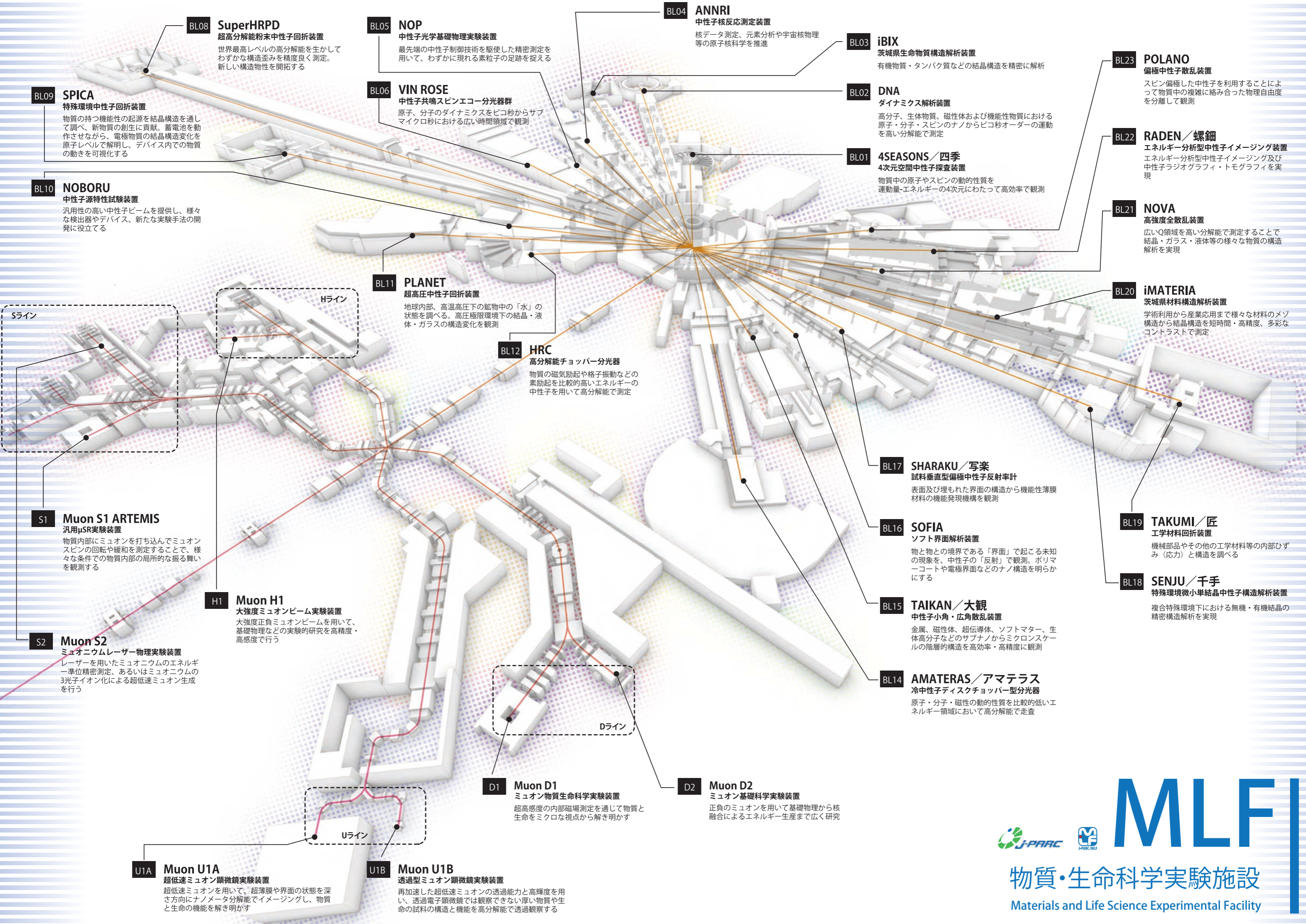
試料に撃ち込まれたミュオンは原子と原子の隙間に止まり、周りの電子の作る磁場を感じて歳差運動をします。そして約2マイクロ秒という短い平均寿命でミュオンは陽電子に崩壊します。その際、ミュオンのスピン方向への陽電子の放出確率が最も大きくなる原理(パリティ非保存と呼ばれます)により、陽電子の放出方向とその時間変化を調べることで、物質の内部でミュオンスピンのように運動したか、ひいては物質内部にどのような磁場が存在し、周囲の電子の状態がどのようなものであったかを知ることができます。

それぞれのミュオンは内部磁場を感じ、スピンの向きを変えます。そのため、全体として見た場合、初期のミュオンスピンの偏極度は時間とともに失われます。偏極度の時間変化を追うことで、物質内部の電子状態を調べることができます。



中性子やミュオンを用いて得られる情報には、他の手法では得ることができないユニークな情報が含まれています。それらは物質や生命の謎を解き明かす上で欠かすことができないものです。そのため、中性子やミュオンは基礎科学から産業応用に及ぶ幅広い分野で活用されています。

J-PARCのMLFは自然の謎を解明し、産業の発展に寄与することで、よりよい暮らしの実現に貢献します。



BL08 SuperHRPD
超高分解能粉末中性子回折装置
世界最高レベルの高分解能を生かしてわずかな構造歪みを精度良く測定。新しい構造物性を開拓する

BL05 NOP
中性子光学基礎物理実験装置
最先端の中性子制御技術を駆使した精密測定を用いて、わずかに現れる素粒子の足跡を捉える

BL04 ANNRI
中性子核反応測定装置
核データ測定、元素分析や宇宙核物理等の原子核科学を推進

BL03 iBIX
茨城県生命物質構造解析装置
有機物質・タンパク質などの結晶構造を精密に解析

BL23 POLANO
偏極中性子散乱装置
スピン偏極した中性子を利用することによって物質中の複雑に絡み合った物理自由度を分離して観測

BL09 SPICA
特殊環境中性子回折装置
物質の持つ機能性の起源を結晶構造を通して調べ、新物質の創生に貢献。蓄電池を動作させながら、電極物質の結晶構造変化を原子レベルで解明し、デバイス内での物質の動きを可視化する

BL06 VIN ROSE
中性子共鳴スピネコー分光器群
原子、分子のダイナミクスをピコ秒からサブマイクロ秒における広い時間領域で観測

BL02 DNA
ダイナミクス解析装置
高分子、生体物質、磁性体および機能性物質における原子・分子・スピンのナノからピコ秒オーダーの運動を高い分解能で測定

BL22 RADEN/螺鈿
エネルギー分析型中性子イメージング装置
エネルギー分析型中性子イメージング及び中性子ラジオグラフィ・トモグラフィを実現

BL10 NOBORU
中性子源特性試験装置
汎用性の高い中性子ビームを提供し、様々な検出器やデバイス、新たな実験手法の開発に役立てる

BL01 4SEASONS/四季
4次元空間中性子探査装置
物質中の原子やスピンの動的性質を運動量-エネルギーの4次元にわたって高効率で観測

BL21 NOVA
高強度全散乱装置
広いQ領域を高い分解能で測定することで結晶・ガラス・液体等の様々な物質の構造解析を実現

BL11 PLANET
超高压中性子回折装置
地球内部、高温高压下の鉱物中の「水」の状態を調べる。高压極限環境下の結晶・液体・ガラスの構造変化を観測

BL01 4SEASONS/四季
4次元空間中性子探査装置
物質中の原子やスピンの動的性質を運動量-エネルギーの4次元にわたって高効率で観測

BL20 iMATERIA
茨城県材料構造解析装置
学術利用から産業応用まで様々な材料のメゾ構造から結晶構造を短時間・高精度、多彩なコントラストで測定

BL12 HRC
高分解能チョッパー分光器
物質の磁気励起や格子振動などの素励起を比較的高いエネルギーの中性子を用いて高分解能で測定

BL17 SHARAKU/写楽
試料垂直型偏極中性子反射率計
表面及び埋もれた界面の構造から機能性薄膜材料の機能発現機構を観測

BL19 TAKUMI/匠
工学材料回折装置
機械部品やその他の工学材料等の内部ひずみ（応力）と構造を調べる

S1 Muon S1 ARTEMIS
汎用μSR実験装置
物質内部にミュオンを打ち込んでミュオンスピンの回転や緩和を測定することで、様々な条件での物質内部の局所的な振る舞いを観測する

BL16 SOFIA
ソフト界面解析装置
物と物との境界である「界面」で起こる未知の現象を、中性子の「反射」で観測。ポリマーコートや電極界面などのナノ構造を明らかにする

BL18 SENJU/千手
特殊環境微小単結晶中性子構造解析装置
複合特殊環境下における無機・有機結晶の精密構造解析を実現

H1 Muon H1
大強度ミュオンビーム実験装置
大強度正負ミュオンビームを用いて、基礎物理などの実験的研究を高精度・高感度で行う

BL15 TAIKAN/大観
中性子小角・広角散乱装置
金属、磁性体、超伝導体、ソフトマター、生体高分子などのサブナノからミクロンスケールの階層的構造を高効率・高精度に観測

S2 Muon S2
ミュオニウムレーザー物理実験装置
レーザーを用いたミュオニウムのエネルギー準位精密測定、あるいはミュオニウムの3光子イオン化による超低速ミュオン生成を行う

BL14 AMATERAS/アマテラス
冷中性子ディスクチョッパー型分光器
原子・分子・磁性の動的性質を比較的低いエネルギー領域において高分解能で走査

D1 Muon D1
ミュオン物質生命科学実験装置
超高感度の内部磁場測定を通じて物質と生命をミクロな視点から解き明かす

D2 Muon D2
ミュオン基礎科学実験装置
正負のミュオンを用いて基礎物理から核融合によるエネルギー生産まで広く研究

U1A Muon U1A
超低速ミュオン顕微鏡実験装置
超低速ミュオンを用いて、超薄膜や界面の状態を深さ方向にナノメータ分解能でイメージングし、物質と生命の機能を解き明かす

U1B Muon U1B
透過型ミュオン顕微鏡実験装置
再加速した超低速ミュオンの透過能力と高輝度を用い、透過電子顕微鏡では観察できない厚い物質や生命の試料の構造と機能を高分解能で透過観察する