

# ①中性子とは

清水 裕彦

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構

物質構造科学研究所

hirohiko.shimizu@kek.jp

# 1. 中性子とは

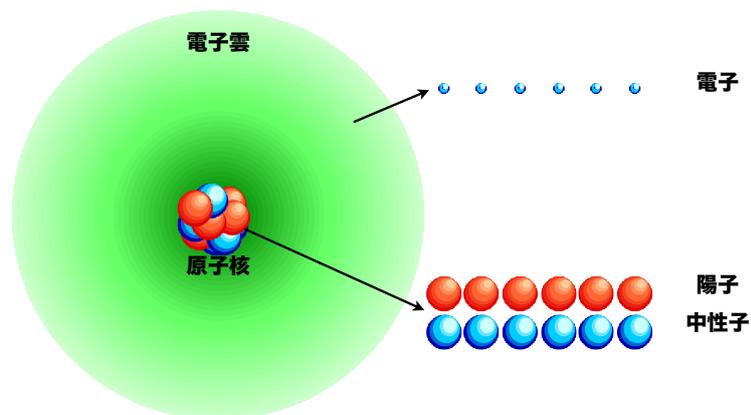
清水裕彦

高エネルギー加速器研究機構

1

## 1. 中性子とは

# 物質の質量の半分は中性子



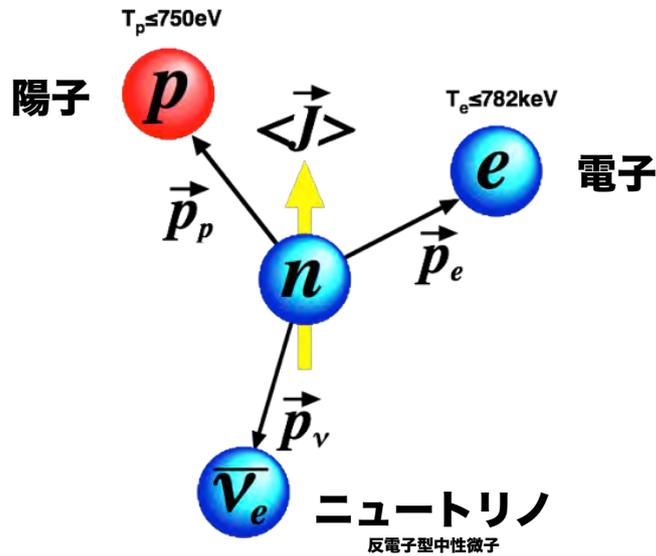
電子質量 =  $0.00091094 \times 10^{-27}$  kg

陽子質量 =  $1.67262158 \times 10^{-27}$  kg

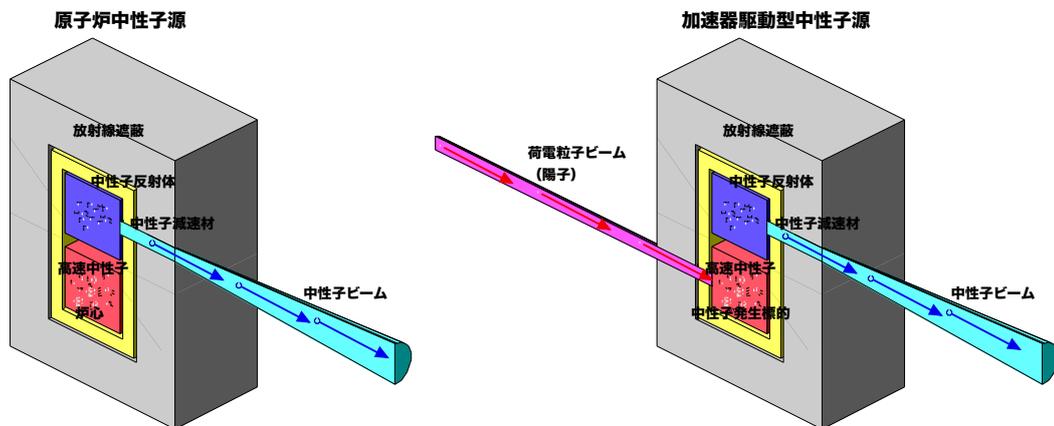
中性子質量 =  $1.67492716 \times 10^{-27}$  kg

2

# 平均寿命は15分



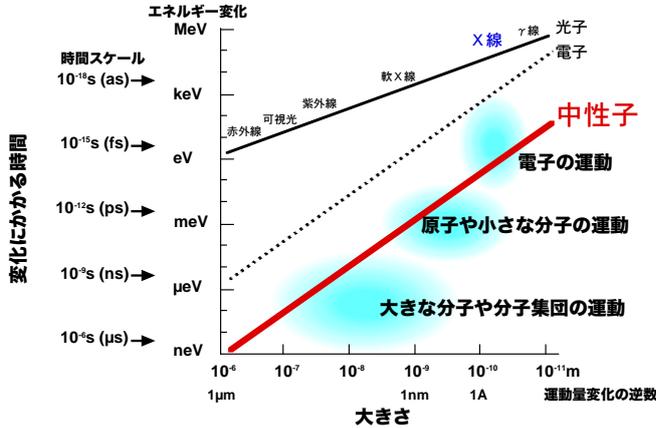
# 中性子の発生



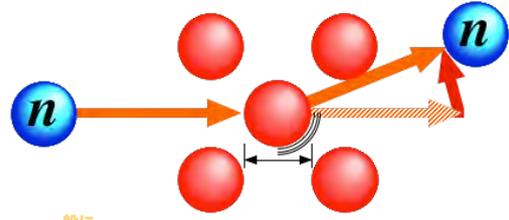
中性子は原子炉や加速器などを利用して、原子核反応によって生成されます。原子核反応で発生した高速中性子を、減速材の中で散乱を繰り返すことによって低エネルギー中性子を得ます。低エネルギー中性子をビームとして遮蔽体外に導き、中性子ビームとして利用します。

# 質量は陽子程度

中性子の運動量変化の逆数は、対象物の大きさに相当します。  
 また対象物をはじかれると、中性子のエネルギーが変化します。  
 中性子のエネルギー変化量の逆数は、対象物の変化時間に相当します。



例えば、10nmの対象物を見としましょう。ちょっとエネルギーの高い1nmの波長を入射粒子に選んだのなら、0.1rad(約5度)の方向に散乱される様子を観察すれば良いです。この時、エックス線ならエネルギーが1000eVくらいになります。これは温度に直したら1000万度にもなりますから、物質を破壊するだけの能力を持っており、試料の状態を大幅に変える危険性がつきまといまいます。しかし、中性子の場合にはエネルギーが0.001eV程度であり、温度に直すと絶対温度で100度(氷点下170度)に相当します。中性子は試料を破壊せずに観測することに大変適しています。



一般に  
 質量が同程度だとエネルギーが移行しやすい。  
 (質量が違うとどちらかがはじかれてしまってエネルギーはあまり移らない。)

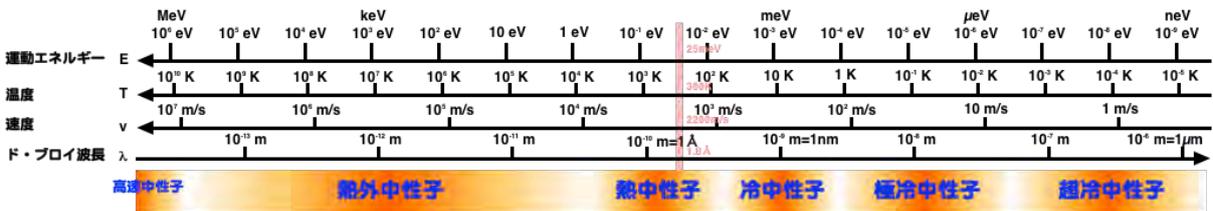
物質は原子できていますから、同程度の質量をもつ中性子が有利です。  
 (特に高分子や蛋白等の巨大分子やその集団を観察する場合に有利です。)

さらに、運動量とエネルギーの関係が光子や電子とは異なり、試料をマイクロに破壊することなく観察できます。

(\*) 静止質量がmの粒子の、運動エネルギーEと運動量pの関係は、 $(E + mc^2)^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$ 。

非侵襲・動的状態観察

# 中性子波動

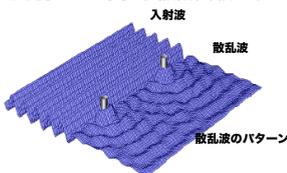


運動エネルギーが小さい粒子は、量子力学的な波の性質が顕著になります。

量子力学的波動の波長(λ:ド・ブロイ波長)は、 $\lambda = \frac{h}{p} = 0.286 E^{-1/2} [\text{Å eV}^{-1/2}]$  で与えられます。

中性子の波長は、熱中性子領域で、物質中の原子の間隔程度になります。

中性子の波動性は、中性子散乱実験によって、物質研究に利用されています。



一般に、研究対象物にある定まった波を入射させた時に散乱波が作るパターンから、対象物がどのような大きさでどのような配置をしているかを逆算できます。波の波長と対象物の大きさが近いほど、正確に逆算できます。

中性子の散乱パターンから、物質中の原子の配列等を観測することができます。

その他、中性子透過像撮影、中性子即発ガンマ線分析、中性子捕獲治療等に利用されています。

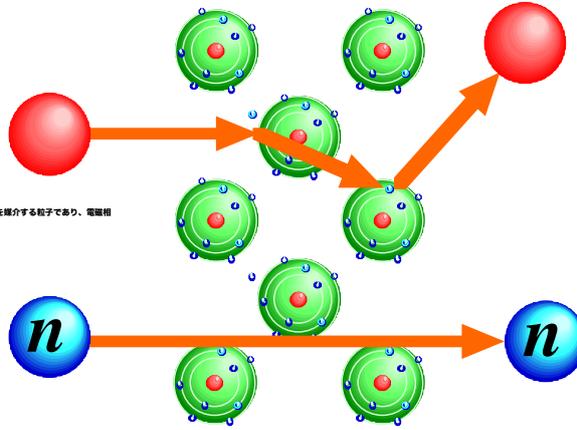
類似のことは、エックス線、電子線等の放射線でも可能ですが、特に中性子が期待されるのは、中性子の持つ特性が本質的に関わっています。

# 電荷を持たない

荷電粒子  
光子

光子は電荷を持っていませんが、それ自身が電磁気相互作用を媒介する粒子であり、電磁気相互作用をします。

中性子



物質中には大量の電子が存在します。電子は原子核に束縛されて原子の形をとっていますが、最外殻の電子はちょっとした電氣的相互作用で遊離します。電荷を持つ粒子が物質中に入ると、物質中の電子を擾乱することでエネルギーを使ってしまい、あまり深く侵入できなったり、まっすぐ進めなったりします。また、原子核の電荷で反発されたり散乱されることもありません。

# 散乱断面積

(電磁気力以外の原子核間の力)  
中性子は、物質から主に強い相互作用による散乱を受けます。

中性子散乱断面積

原子核構造によって複雑に変化します。

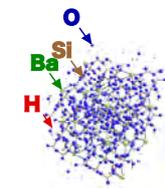


エックス線散乱能

原子番号に従って単調に変化します。

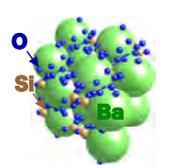


例えば、こんな物質を

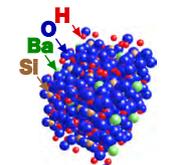


図ではAlは省略  
Ba2[Al4Si12O32] · 12H2O

エックス線で見ると  
重元素がよく見えます



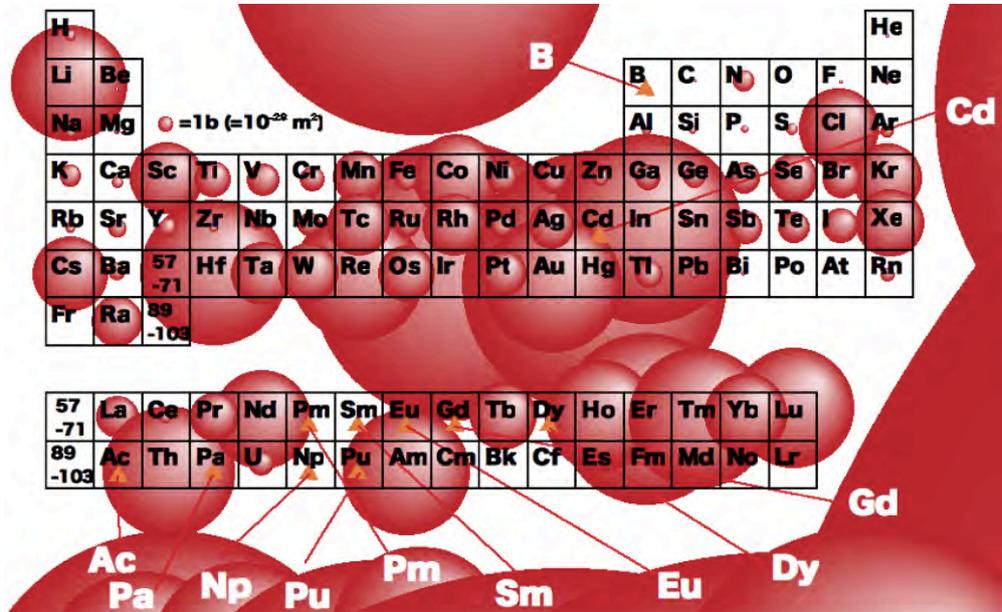
中性子で見ると  
軽元素がよく見えます



高い軽元素識別能力

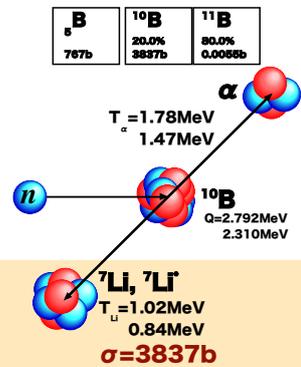
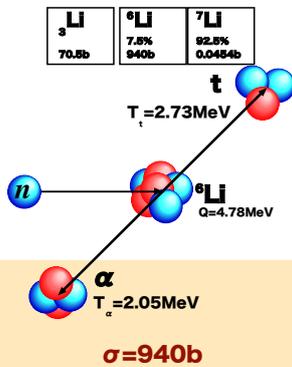
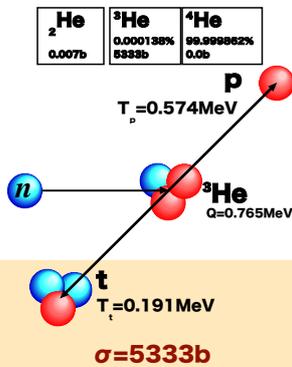
# 吸収断面積

吸収断面積も元素によって大きく異なります。  
 吸収断面積は中性子のエネルギーにも依存します。(1/vに比例)



# 検出器

## 核反応



# 物質の質量の半分は中性子

散乱断面積も吸収断面積も同位体によって大きく異なります。

散乱における同位体識別

例えば、水素を重水素に置換して中性子散乱パターンを比較すると、水素原子の情報を強調できます。

**同位体置換法**  
(isotope) contrast variation method

<sup>1</sup> H	<sup>2</sup> H
<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> He
<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Li
<sup>9</sup> Be	
<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> B
<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> C
<sup>14</sup> N	<sup>15</sup> N
<sup>16</sup> O	<sup>17</sup> O
<sup>19</sup> F	
<sup>20</sup> Ne	<sup>21</sup> Ne
	<sup>22</sup> Ne

吸収における同位体識別

吸収断面積が同位体こと異なることから同位体分析を行うことは不可能とは言えませんが、限られた核種のみが含まれている等の特殊な条件が重ならないと困難です。そこで、普通は次のようにします。

原子核が中性子を吸収すると、大半の場合、ガンマ線が発生します。ガンマ線のエネルギースペクトルを測定すると、原子核の種類が特定できるので、元素分析と同位体分析が同時に行われます。

<sup>1</sup> H	<sup>2</sup> H
<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> He
<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Li
<sup>9</sup> Be	
<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> B
<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> C
<sup>14</sup> N	<sup>15</sup> N
<sup>16</sup> O	<sup>17</sup> O
<sup>19</sup> F	
<sup>20</sup> Ne	<sup>21</sup> Ne
	<sup>22</sup> Ne

# スピン

中性子のスピンは1/2です。  
電荷を持っていませんが、中性子の内部構造に起因する異常磁気双極子能率を持っています。  
磁気双極子能率の向きはスピンと反平行です。

磁気双極子能率が受ける磁気散乱

中性子は磁気双極子能率を持つために、物質中の電子が作り出す磁場によって散乱を受けます。これを磁気散乱と呼びます。磁気散乱のパターンを観測することによって、物質中の磁気的な構造を知ることができます。

中性子磁気散乱は、物質中の磁気構造を直接観測する有力な手段であり、中性子科学の中で重要な研究分野の一つです。

0でないスピンを持つ原子核からの散乱は、中性子スピンと原子核スピンの平行な場合と反平行な場合で異なります。

試料中の水素原子核のスピンを偏極して、中性子スピンを平行及び反平行にした場合の中性子散乱パターンを比較すると、水素原子の情報を強調できます。

実際にはスピン反平行の場合の水素原子核の散乱長は負なので、球の大きさから読み取れる以上の差異があります。

**中性子磁気散乱**

**スピンコントラスト法**

spin contrast variation method

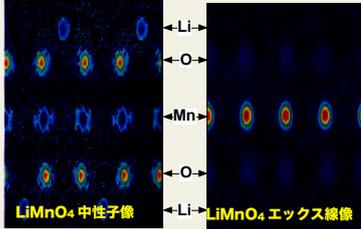
# 中性子の利用

## ①中性子散乱

構造解析：中性子回折

リチウム電池

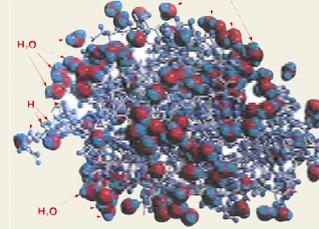
特性①：軽元素識別能力



LiMnO<sub>4</sub>中性子像  
LiMnO<sub>4</sub>エクセス線像  
エクセス線では確認が困難なリチウム原子の位置が、中性子では明瞭に観測されます。

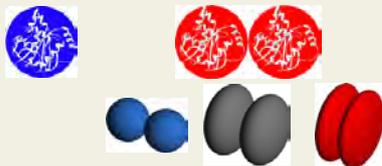
蛋白構造解析

特性①：軽元素識別能力  
特性②：同位体識別能力



水素や酸素に対する高い感度を用いて、重水素置換を利用しながら、蛋白分子の水素位置を実験的に決定したり、水和水位置を決定できます。

溶液中蛋白分子会合状態：中性子小角散乱



特性①：質量  
特性②：中性  
特性③：軽元素識別能力  
特性④：同位体識別能力

詳細な構造が未知だとしても、巨大な分子が取っているおおよその大きさや形状が分かります。重水中での状態であれば、目的の分子だけを強調して観察することが可能です。また、分子同士が対になっていたり、クラスター化している様子が観察できる場合があります。特に溶液中での蛋白分子の会合状態のような極めてゆるい結合の場合に、エクセス線で観察を試みると状態を変化させかねません。しかし、中性子は運動エネルギーが低いので、状態を変化させずに観察することが期待されます（非侵襲観察）。

高分子・ガラス：中性子準弾性散乱、非弾性散乱

特性①：質量 特性②：中性  
特性③：軽元素識別能力 特性④：同位体識別能力

磁性：中性子磁気散乱

特性①：スピン

表面・界面：中性子反射率測定

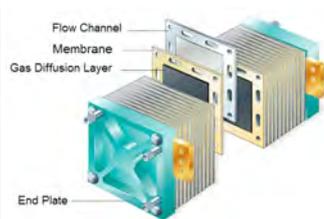
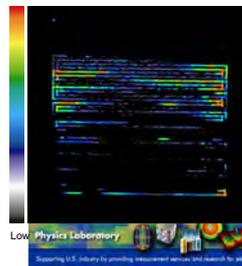
特性①：質量 特性②：中性  
特性③：軽元素識別能力 特性④：同位体識別能力

# 中性子の利用

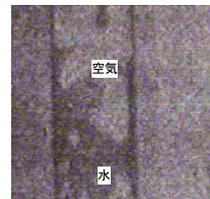
## ②中性子ラジオグラフィ

中性子を使って透視する手法を中性子ラジオグラフィと呼びます。

High 燃料電池の水排出



特性①：中性  
特性②：軽元素識別能力



空気  
水  
金属管中の水の透視が可能です。その他に、核燃料棒内部の透視、ロケット内の燃料、溶接部の内部歪み、エンジン内部の燃料の動きの観察等が可能だと言われています。

水素が燃焼してできた水がどのように流れてどこで滞っているかを、製品の状態でそのまま透視できます。

## ③即発ガンマ線分析

特性①：中性  
特性②：同位体識別能力

即発ガンマ線分析は、中性子が試料内の原子核に吸収された際に発生するガンマ線のエネルギースペクトルから、試料中に含まれる元素あるいは同位体を定量的に分析する、微量分析の一種です。中性子は物質透過力が強いので、表面だけでなく深部まで非破壊で分析できます。

## ④中性子捕獲医療

特性①：中性  
特性②：軽元素識別能力

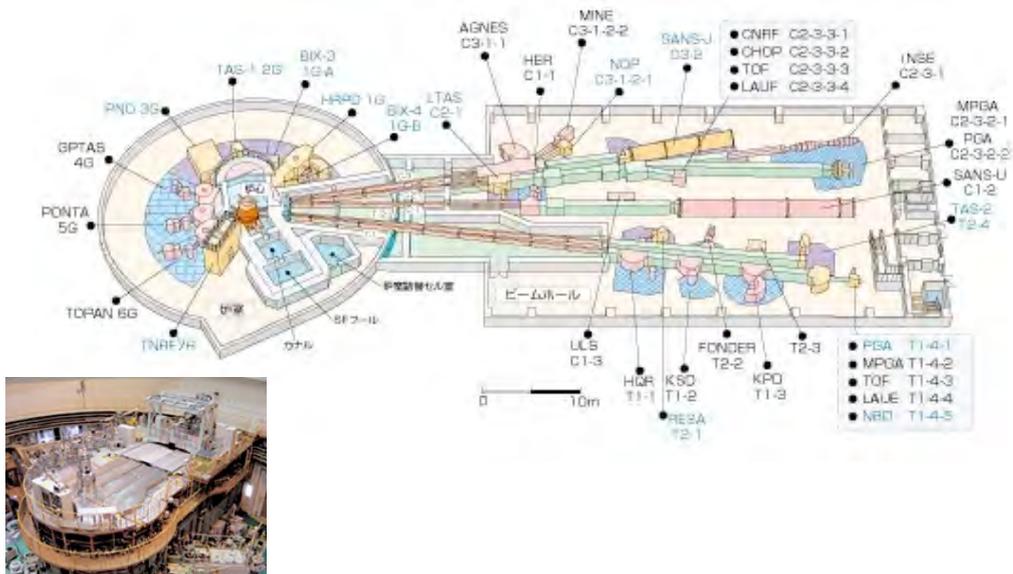
中性子が体内に吸収された時におこる中性子捕獲反応によって生じるエネルギーで、癌組織等を破壊することができます。中性子自身が持っている運動エネルギーは小さく、通過するだけなら人体組織に損傷をあまり与えません。中性子が吸収されて核反応が起こると、集中的にエネルギーが解放されます。患部に反応を起こしやすい元素を集中することで、効率的な治療が可能です。

## 1. 中性子とは

## 1. 中性子とは

# 大型中性子施設

## 研究用原子炉JRR3 (日本原子力研究開発機構)



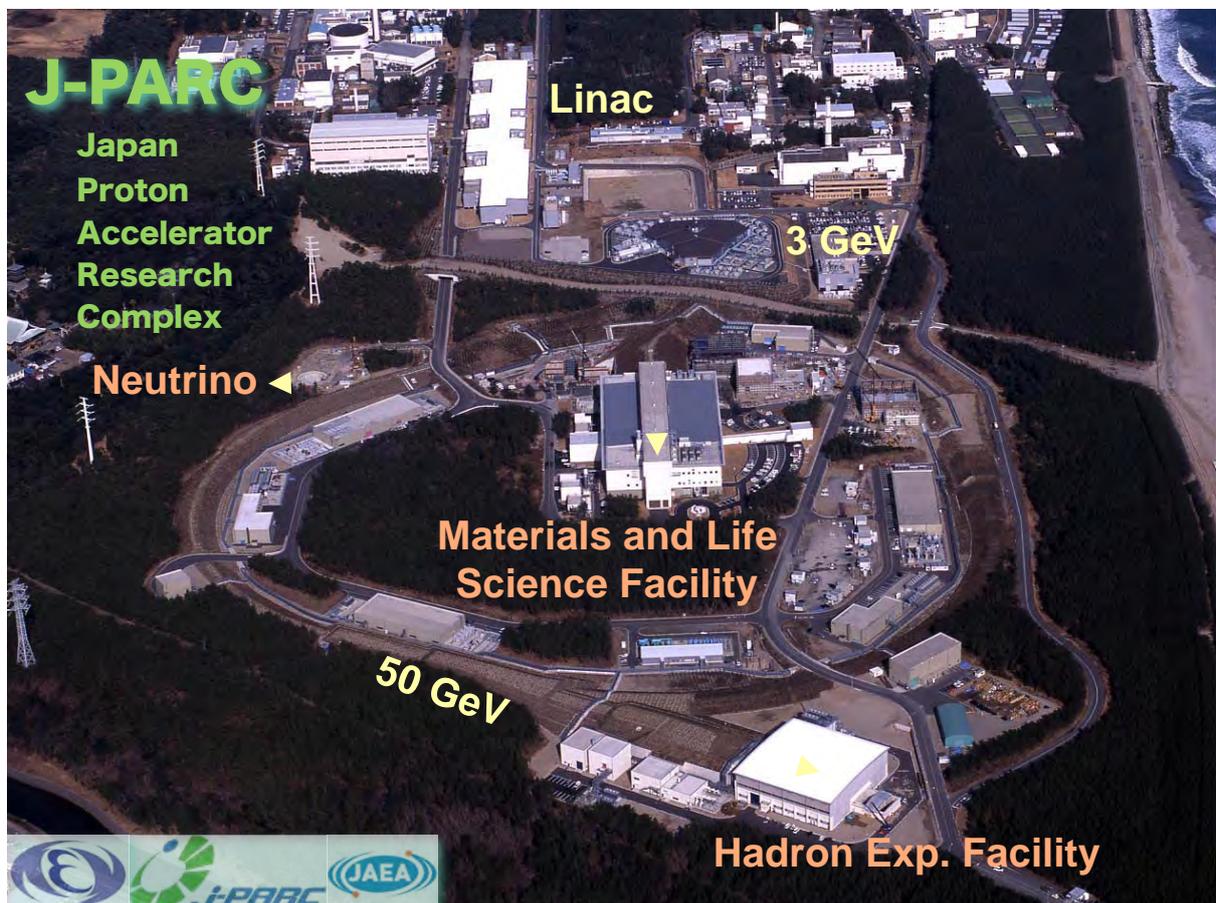
# 大型中性子施設

## 大強度陽子加速器施設 J-PARC

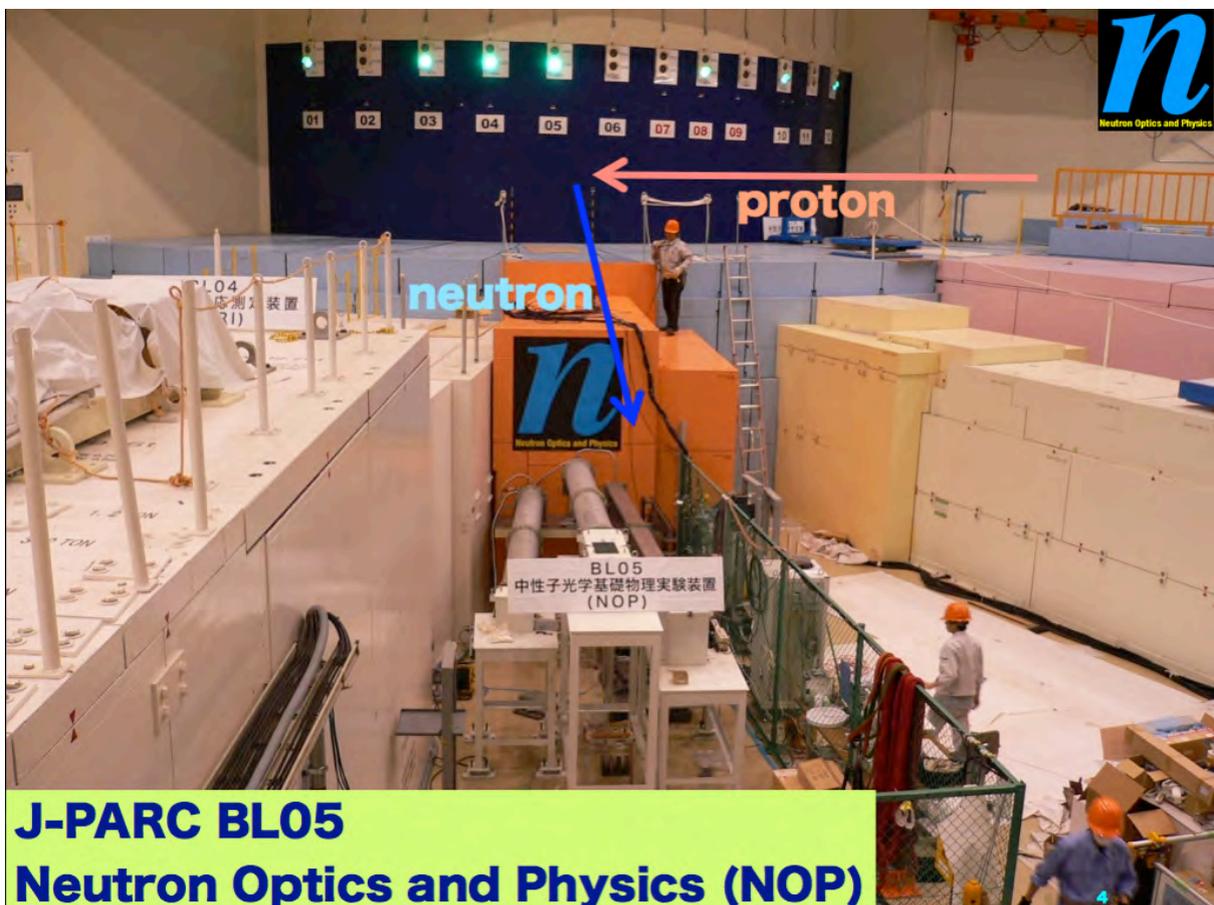
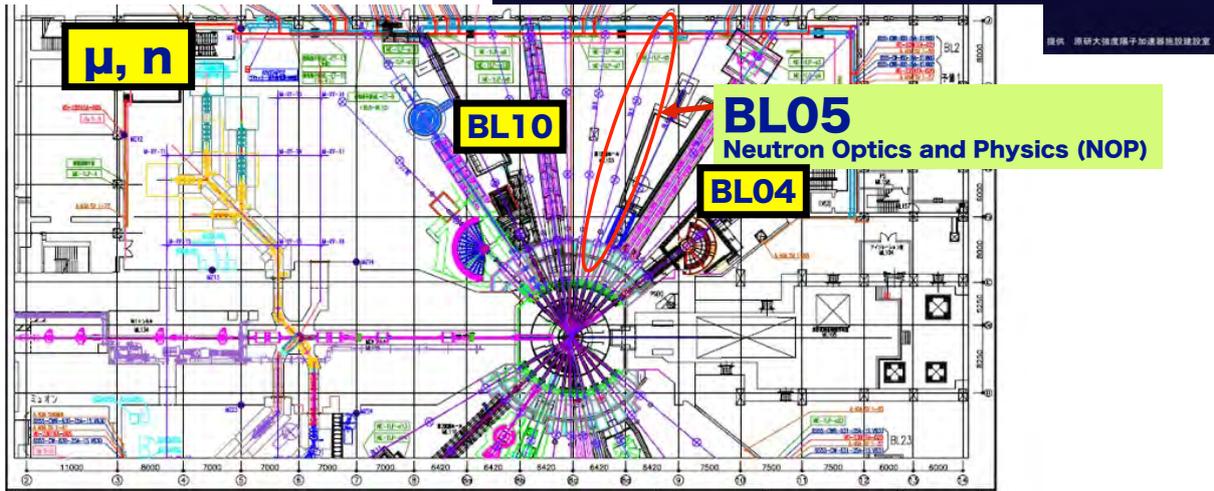
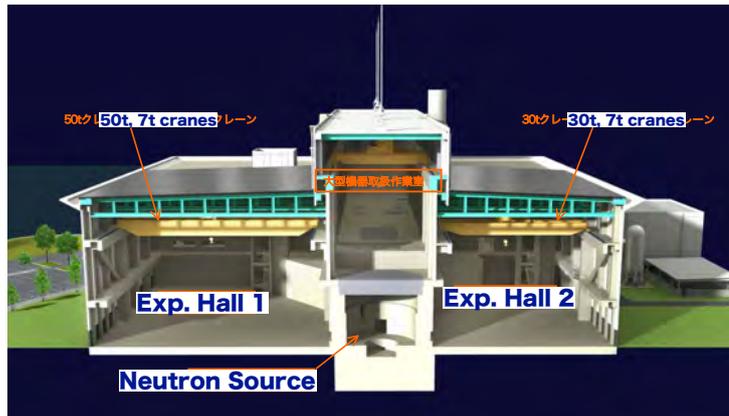
(高エネルギー加速器研究機構/日本原子力研究開発機構)



17



**J-PARC MLF**  
Material and Life-science Facility



# 1. 中性子とは

# 1. 中性子とは

# 中性子反射光学

# 中性子光学

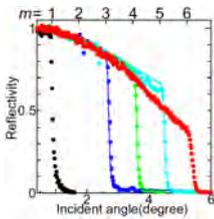
中性子反射光学は、物質界面における中性子の全反射を利用する光学系で、最も広く利用されています。波長依存性が小さいことを特徴とし、スーパーミラーが一般的です。

スーパーミラーのm値は、2000年代前半に急速に大きくなり、m=6までの実証がなされています。またm=10に匹敵する極薄多層膜を作成できる制御技術が実証されています。

曲面形状のスーパーミラーの試作も行われています。下の写真は、m=1.5の回転放物面スーパーミラーです。

**m=6**

m=6とは、面垂直方向に約40m/sの速度で入射した中性子を反射する能力を持つことを意味します。



## 中性子の全反射

中性子は、物質に入射する際に、“有効ポテンシャル”を乗り越える必要がります。“有効ポテンシャル”の値は100neVのオーダーですが、熱中性子や冷中性子の持つ運動エネルギーに比べれば大変小さな値です。しかし、熱中性子や冷中性子が界面にほぼ平行に入射する場合には、界面方向の運動量が小さく、“有効ポテンシャル”を超えられなくなり、全反射が起こります。

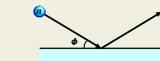


“有効ポテンシャル”は、原子核ポテンシャルを体積平均したもので、次式で表されます。

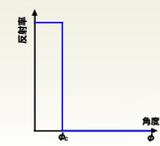
$$U = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} bN$$

$m_n$ : 中性子質量  
 $b$ : 散乱長  
 $N$ : 原子核数密度

## 全反射臨界角

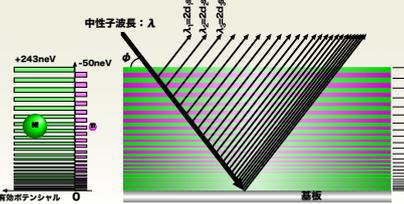


中性子が界面に上図のように入射したときの中性子の反射率は、下図のようになります。全反射の臨界の角度φを全反射臨界角と呼びます。



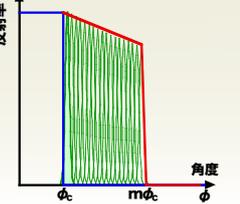
## スーパーミラー

“有効ポテンシャル”が異なる物質を積層させると、その周期に対応したブラッグ散乱が起こります。層の厚みを徐々に変化させると、ある角度範囲にブラッグ散乱を連続的に分布させることができます。これによって、通常の反射臨界角よりも大きな反射角で中性子を反射できるようにしたミラーをスーパーミラーと呼びます。



## スーパーミラーのm値

単層界面の場合に比べて、何層の角度まで反射できるようになったかという層mをスーパーミラーのm値と呼びます。またそのミラーをmQcスーパーミラーと呼ぶこともしばしばあります。



# 中性子光学

中性子物質界面屈折光学は、物質界面で中性子が屈折するという性質を利用する光学系です。小型で有効開口度の大きな光学系を構成できます。

両凹面物質レンズは、1990年代後半から実用的な冷中性子収束光学系として研究が進められました。2000年代に入ってからは、レンズ素材による中性子の減衰を抑えるために、レンズを薄くする開発が進められました。最も薄いマイクロプリズムは、熱中性子を屈折で曲げる能力を持っています。



## 中性子の屈折

中性子は、物質に侵入する際に、“有効ポテンシャル”を乗り越える必要があります。再度で屈折されます。“有効ポテンシャル”の値は100neVのオーダーですから、熱中性子や冷中性子の持つ運動エネルギーに比べれば大変小さな値です。したがって、屈折すると言っても、ごく小さな角度変化にとどまります。



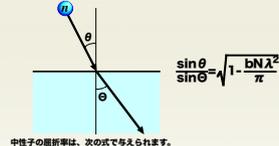
“有効ポテンシャル”は、原子核ポテンシャルを体積平均したもので、次式で与えられます。

$$U = \frac{2\pi\hbar^2}{m_n} bN$$

$m_n$ : 中性子質量  
 $b$ : 散乱長  
 $N$ : 原子核数密度

## 単一界面での屈折角

図のように物質界面に対して角度θで入射した場合、屈折角θ'との関係は次の通りです。



中性子の屈折率は、次の式で与えられます。

$$n-1 = -\frac{U}{2\pi} bN$$

大半の元素ではb>0なので、可視光用の凹レンズ形状のレンズが中性子を集光します。屈折率の値は、エックス線に対する屈折率とほぼ同程度です。n-1が負になるのもエックス線と似ています。

## レンズの素材

中性子は、レンズ素材を透過する際に、散乱及び吸収を受けます。散乱の中でも小角散乱は屈折現象と整合します。使用する中性子の波長範囲に応じて、散乱が小さな物質を素材に選ぶ必要があります。中性子の吸収は、素材に含まれる原子核の種類で決まりますので、素材は中性子吸収が少ない元素を選ぶ必要があります。よって、散乱散乱長の両方が大きく、透過が小さく、なかつ小角散乱が小さいという条件をすべて満たしたものが、中性子物質レンズとして使用できます。

	Re b [fm]	Im b [zm]
H	-3.741	92
He	3.07	2.0
Li	-1.95	1960
Be	7.778	2.1
B	5.34	210
C	6.6484	0.97
N	9.6	528
O	5.805	0.053
F	5.654	2.7
Ne	4.57	11

# 中性子光学

中性子磁気光学は、非一様磁場中で中性子が受ける加速度を利用した光学系です。正確な結像性能を最大の特徴とし、スピン偏極したビームを出力します。結像性能を重視する場合には六重極磁場が用いられます。



超伝導六極電磁石レンズ  
口径が大きいことが特徴です。



Extended Halbach磁極配列六極永久磁石レンズ  
コンパクトでメンテナンスフリー。実用上使いやすい、最も安価です。



パルス六極電磁石レンズ  
パルス中性子源に対応可能なパルス電磁石です。

## 磁場中での運動方程式

中性子は電荷を持っていませんが、磁気双極子磁率 (μ) を持っているため、磁場と相互作用します。中性子の磁場中での運動は、スピンのラーモア歳差運動と、磁場の非一様性が与える加速度の連立方程式として記述されます。ラーモア歳差運動は中性子の運動に比べて十分に速く、中性子スピンの環境に対する向きがほぼ固定され、歳差運動が磁場に追いつくようになります。この際、運動方程式は次の単一の方程式で記述できます。従って、スピンの向きが磁場の非一様性に応じて、反平行な場合があります。スピンの平行な場合は“正極性”、スピンの反平行な場合は“負極性”と呼ぶことができます。

$$\frac{d^2r}{dt^2} \pm \left| \frac{\mu}{m_n} \right| \nabla |B| = 0$$



## 中性子の軌道

z方向に無限に長い多重極磁場を考えます。2n重極の磁場強度は、磁石の軸からの距離をρとおく、次のように与えられます。

$$|B| = C_{2n} \rho^{-2n-1}$$

特に六重極(n=3)の場合には、運動方程式は次のようになります。

$$\frac{d^2x}{dt^2} \pm \omega' x = 0$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} \pm \omega' y = 0$$

この場合には、中性子の軌道は次のように解析的に求まります。

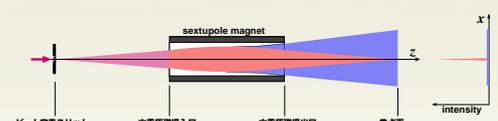
正極性の場合  
 $x = x_0 \cos \omega' t + (v_{x0}/\omega') \sin \omega' t$   
 $y = y_0 \cos \omega' t + (v_{y0}/\omega') \sin \omega' t$

負極性の場合  
 $x = x_0 \cosh \omega' t + (v_{x0}/\omega') \sinh \omega' t$   
 $y = y_0 \cosh \omega' t + (v_{y0}/\omega') \sinh \omega' t$

中性子のスピンの向きによって軌道が異なります。

## 磁気レンズの機能

非偏極中性子が入射した場合を例に説明します。簡単のために、中性子源は点光源とします。磁場がある空間に入ると中性子スピンの磁気量子数が量子化され、その値(近似的に)固定されます。正極性の成分は正弦曲線を描きながら磁石軸に近づき、磁石下流で一点に集まります。負極性の成分は双曲正弦曲線を描きながら磁石軸から遠ざかり、磁石内側面に当たって失われたり、磁石下流では散乱します。



レンズ内部には物質がありませんから、正極性成分の軌道は電磁学によって正確に記述され、損失無く下流に輸送されること、磁気レンズの大きな特徴です。また、スピンの向きによって選択的に集光されるため、出力ビームがスピン偏極を持つことも重要な特徴です。スピン偏極度は幾何学的に決まるので、正確なスピン偏極度を達成できます。このような機能は、六重極磁場に限らず、一般の多重極磁場が持っています。