

素粒子物性 (Φ) 研究室

このページではホームカミングデイでの研究室紹介にあたり、本研究室(Φ研)が携わる研究テーマを紹介していきます。

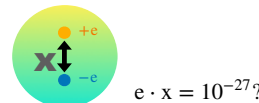
CP対称性の破れ探索

宇宙が原始からはじまり現在に至るまでに物質が生まれるには”CP”という量が変化していなければなりません。
このCPの変化が根源的な物理現象に現れている場合を、私たちは”CPの破れ”と呼んでいます。

以前からいくつかの素粒子実験においてCPの破れが観測されていますが、現在観測されているCPの破れだけでは、現在の宇宙の物質は説明できないと言われています。
CPの破れが起こる現象の候補はたくさんあり、世界中の研究者が探索しています。私たちの実験グループもその中のいくつかを探索しています。

EDM探索実験

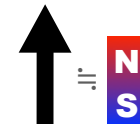
EDM (Electric Dipole Moment) とは、電氣的に中性な中性子そのものが持っている電氣的な分極のことです。EDMは一般的な理論では 10^{-32} 乗と言われており、未だ実験で発見されたことはありませんが、もしEDMが”CPの破れ”を生む根源的な物理現象に関わっているならば、予想されるEDMの値は 10^{-27} 乗程度に大きくなるという理論があります。



これを測定する方法として、電場と磁場の中に中性子を入れるという方法があります。
中性子にはスピン(=小さな棒磁石)が存在しており、スピンは磁場の中では常時回転しています。



矢印(スピン)は磁場中で回る



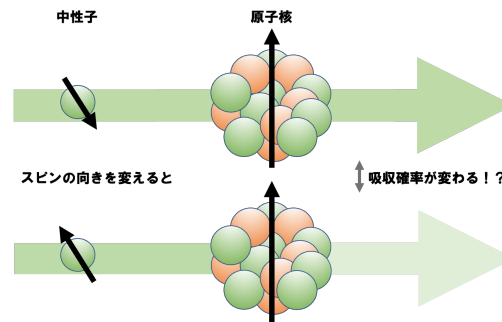
スピンの意味

EDMを持った中性子が電場の中に入ると、EDMの大きさに応じて回る速さが変化します。回る速さが速くなるか遅くなるかは電場の向きで決まるため、電場の向きを変えて回る速さを測定ことでEDMの大きさを測定することができます。

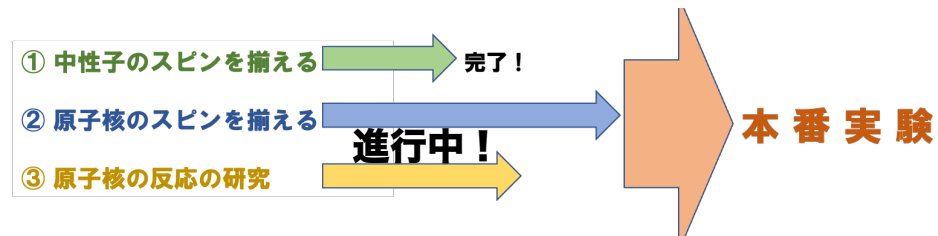
私たちは、強い電場を作る結晶に中性子を入射して出てくる中性子の回転を測定する方法と、スピンを揃えた中性子をためて中性子の回転を測定する方法の二つの方法を用いてEDMの探索を行なっています。

NOPTREX

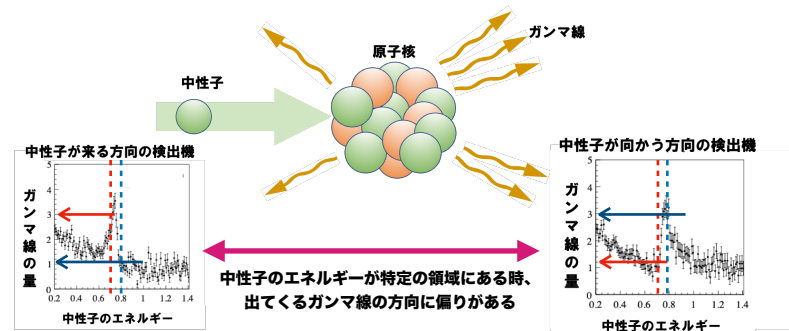
EDMと違う経路のCPの破れ探索方法として、スピンの向きを揃えた中性子を、スピンの向きを揃えた原子核に衝突させるという実験方法があります。もしこの反応の中にCPの破れがある場合、中性子スピンの向きに応じて原子核が中性子を吸収する確率が異なるためです。



この実験を行うには、①中性子のスピンを揃える、②標的原子核のスピンを揃える、③原子核反応の基礎研究、という3つのステップが必要です。現在①が完了し、②と③を進めています。



私たちの実験グループでは、③の原子核反応の基礎研究として、中性子と原子核のスピンを揃えずに衝突実験を行いました。その結果、特定のエネルギーの中性子が原子核に吸収される際に出るガンマ線の方向に偏りがあることを世界で初めて観測しました。



この結果を解析したことから、CP対称性の破れがあったときの本番実験の結果を見積もることができました。

Φ研ではCP対称性の破れの探索以外にも未知相互作用の探索実験や、
物理量の精密測定実験も行なっています。

未知相互作用探索

未知相互作用探索の背景

この表には、素粒子に働く4つの力のスケールが示されています。

4つの力	電磁気力	強い力	弱い力	重力
電磁気を1と1	1	60	10^{-4}	10^{-41}

重力は弱い力と比べて35桁も小さい↑↑

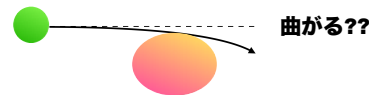
わたしたちに取っては身近な重力ですが、重力は他の基本相互作用よりも35桁も小さいことがわかります。
これを説明するためにさまざまな理論が提唱されていますが、その中の一つの理論では、ミクロスケールにおいては重力のポテンシャルに以下の様な項が加わるのではないかとされています。

$$V(r) = -G \frac{Mm}{r} (1 + \underbrace{\alpha e^{-r/\lambda}}_{\text{未知の力?}})$$

重力ポテンシャル

α、λの意味は下の図を参照

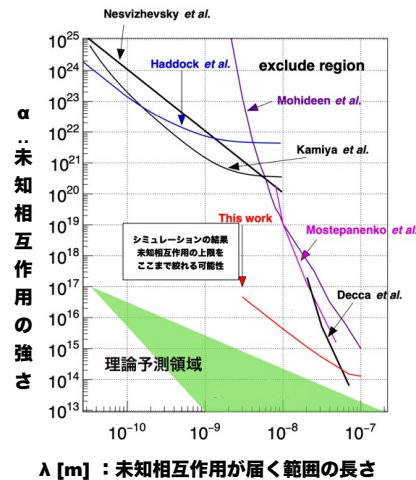
私たちの実験グループでは、ナノ粒子標的に中性子ビームを当て、未知の力を探そうとしています。



中性子をナノ粒子に衝突させ、未知相互作用の影響を調べる

未知の力はこれまでも以下の図の様な範囲で探索されています。

私たちの実験グループの実験では未知の力の探索範囲をここまで広げる可能性があることがシミュレーションによって示されました。

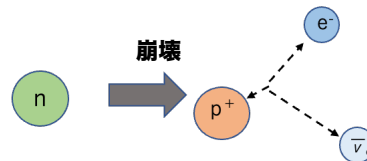


Φ研ではCP対称性の破れの探索以外にも未知相互作用の探索実験や、
物理量の精密測定実験も行なっています。

中性子寿命精密測定

中性子寿命精密測定の背景

原子核の構成要素である中性子は、単体ではあまり安定ではありません。単体の中性子は15分ほどで別の3つの粒子(陽子、電子、ニュートリノ)に崩壊することが知られています。

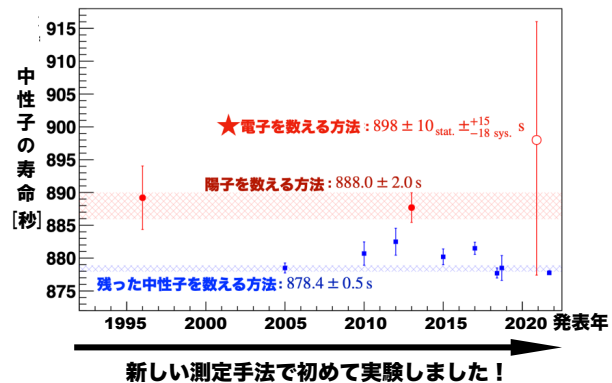


崩壊までの時間(中性子の寿命)を精密に測定することができれば、ビッグバンの際にどの様に原子核が合成されたのかを考える指標になりえます。中性子の寿命を測定するには

- 中性子を一定時間ためておいて残った中性子を数える方法
- 崩壊する際に出てくる陽子を数える方法

の主に2種類の方法があるのですが、この2種類の測定方法で測定される中性子の寿命が有意に異なるという問題があります。これは、どちらも数え落としがあるため、中性子をみる方法では寿命がより短く、陽子をみる方法では寿命がより長く見えてしまうためと考えられています。

私たちの実験グループでは、上記のどちらの方法でもない、崩壊する際に出てくる電子を数える方法で、中性子の寿命を測定することに成功しました。



新しい実験をすることで、誤差の評価、検討を行うことができるため、真の値を決定することに役立ちます。
また、電子を数える方法を精密に行うことができれば、崩壊の種類に見落としがないかを探ることができます。

ミューオン

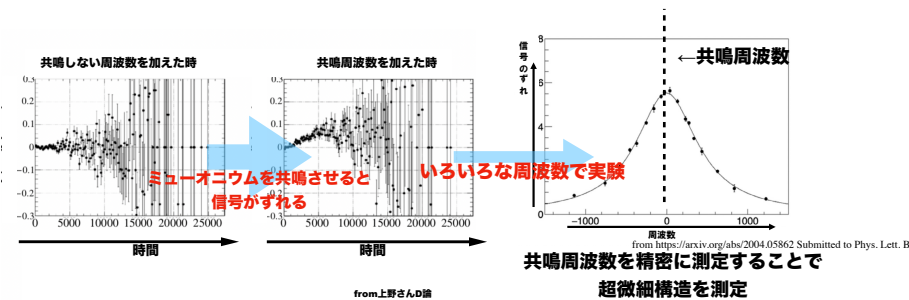
ミューオニウム超微細構造精密測定 ミューオニックヘリウム超微細構造精密測定

電子と同じ素粒子の仲間にミューオン(正、負)という電子に似た重い素粒子があります。ミューオンは宇宙からたくさん降ってきており、実は身近な素粒子です。
正ミューオンの周りを電子が回っている原子(ミューオニウム)、負ミューオンがヘリウム原子核の周りを回っている原子(ミューオニックヘリウム)において、原子の持つエネルギー構造(超微細構造)を精密に測定しています。

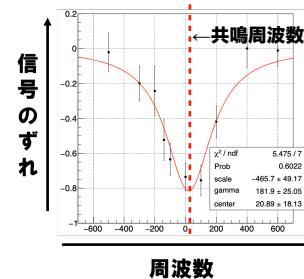


ミューオニウム ミューオニックヘリウム

超微細構造を精密に測定することで、ミューオンの重さを正確に調べたり、理論の精密な検証を行うことができます。私たちの実験グループではミューオニウムを共鳴させ、その共鳴周波数を精密に測定することで、ミューオニウムの超微細構造を測定しています。



超微細構造の測定には磁場を印加しない方法と強い磁場を印加する方法の2種類があり、測定できる量が少し違います。ミューオニウムのグループは磁場を用いない測定手法で世界記録を更新しており、さらに詳しく構造をみるために強い磁場を加えながら実験できるセットアップを開発しています。
ミューオニックヘリウムのグループでは前回の実験で世界記録に匹敵する精度の測定を行い、現在解析を進めています。



$\Delta\nu = 4464.95(6)$ MHz (Orth et al.) [13 ppm] zero field (ZF)
 $\Delta\nu = 4464.004(29)$ MHz (Gardner et al.) [6.5 ppm] high field (HF)
 $\Delta\nu = 4464.997(18)$ MHz (MuSEUM) [4 ppm] zero field

先行研究に匹敵する精度で測定を行いました！