

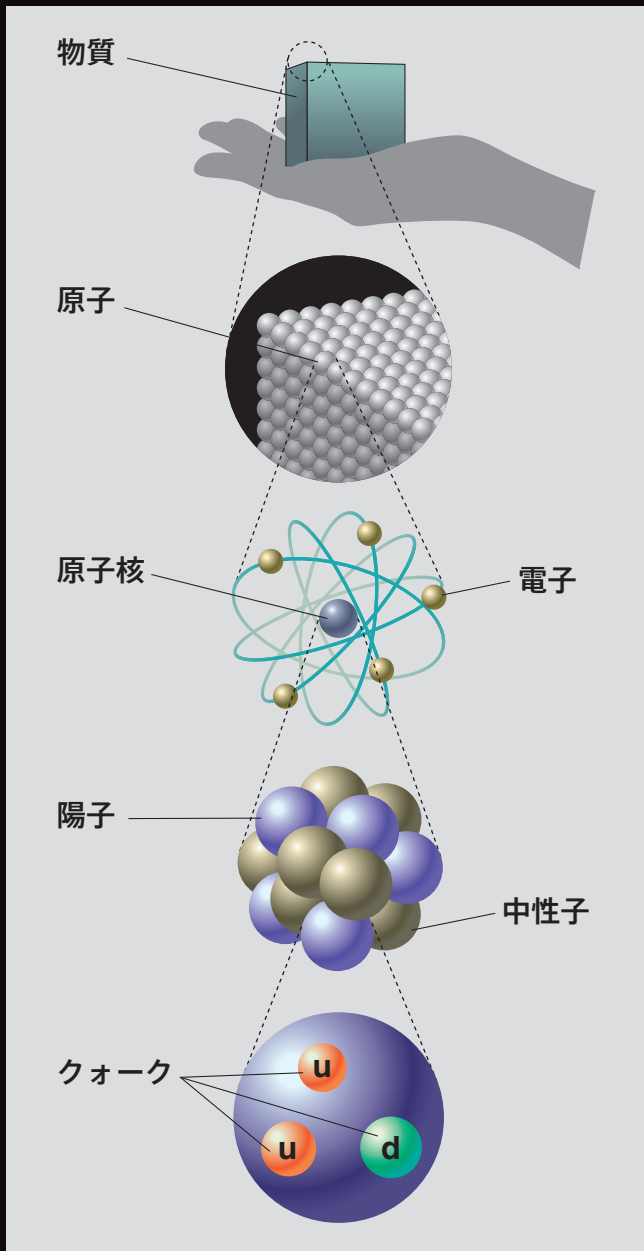
ハドロン 実験施設

—そこから始まる新しいサイエンス—

ハドロン実験施設へようこそ

ここでは「ハドロン」のビームを使って、原子核や素粒子の基礎的な研究をするための施設です。でも、この「ハドロン」や、「原子核」や「素粒子」って一体なんなのでしょう？ このパンフレットでは、できるだけわかりやすくこれらの概要について説明します。

宇宙の歴史と物質の成り立ち



物質の世界はたまねぎ構造！

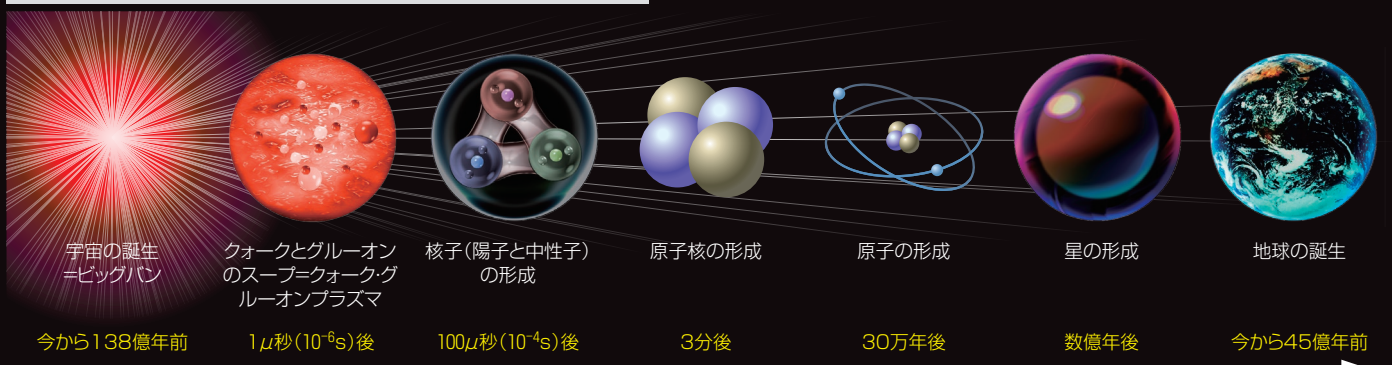
私たちの身の回りにある普通の物質は、細かく見ると**原子**で構成されています。例えば、1円玉の原料のアルミニウムの塊はアルミニウムの原子が金属結合という方法で結びついたものです。この原子をさらに細かく見ると、真ん中に正の電荷を帯びた**原子核**があり、周囲に負の電荷を帯びた**電子**がある、という構造がわかります。電子はこれ以上細かく分けることのできないという意味で「素」粒子ですが、原子核は**陽子**と**中性子**から構成されています。さらに、この陽子や中性子は**クォーク**から構成されていることがわかっています。現代物理学の知識では、このクォークこそは素粒子であると考えられています。

このように物質には階層構造があります。ハドロン実験ホールでは、階層構造の奥深くにある素粒子、陽子や中性子、そして陽子や中性子などからなる原子核を研究の対象としています。

原子核や素粒子の研究によって宇宙の歴史を遡る！

宇宙の歴史は、今から約138億年前の「ビッグバン」から始まったと考えられています。ビッグバン直後の宇宙はとて高温で、素粒子のクォークやグルーオンなどがスープのように動き回っている状態だったと考えられています。その後、宇宙の温度が徐々に冷えるに伴って、陽子や中性子が形成され、原子核、原子、そして今私たちの身の回りにあるような物質が形作られました。

原子核や素粒子の研究は、物質の階層構造を奥深くに辿っていく道のりでもあります。言い換えると、原子核や素粒子の研究は、宇宙の歴史を遡っていく研究であるとも言えます。




















原子核・素粒子とは？

クォーク・レプトン

現代物理学は素粒子の「標準理論」を作り上げました。そこでは、素粒子、すなわちそれ以上細かく分けることのできない物質の最小の構成単位は、6つのクォークと6つのレプトン、それに4種類の力を媒介するゲージ粒子、とされています。クォークとレプトンにはそれぞれの反粒子があります。例えば、ア

ップクォークの反粒子は反アップクォークと云います。4種類の力、とは、重力、電磁力、それに弱い力、強い力です。弱い力は、原子核が崩壊して別の原子核にかわるときに働いていますし、強い力はクォークを結び付けて陽子や中性子を作ったり、陽子や中性子を結びつけて原子核を作っている力です。

| クォーク | | | レプトン | | |
|---|--|------|--|--|--|
| アップ u  | ダウン d  | 第1世代 | 電子 e  | 電子ニュートリノ ν_e  | |
| チャーム c  | ストレンジ s  | 第2世代 | ミューオン μ  | ミューオンニュートリノ ν_μ  | |
| トップ t  | ボトム b  | 第3世代 | タウ τ  | タウニュートリノ ν_τ  | |

| 力を媒介する粒子 | | | | 標準模型に含まれる素粒子 |
|---|---|--|--|---|
| グルーオン 強い力 g  | 光子 電磁力 γ  | 弱ボソン 弱い力 W^+ W^- Z  | 重力子 重力  | ヒッグス粒子 H  |

核子・原子核

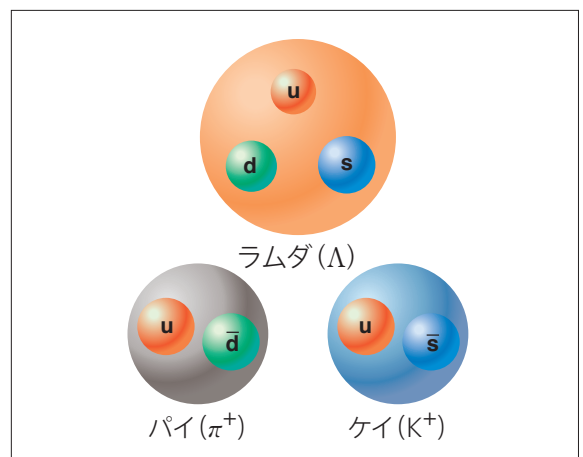
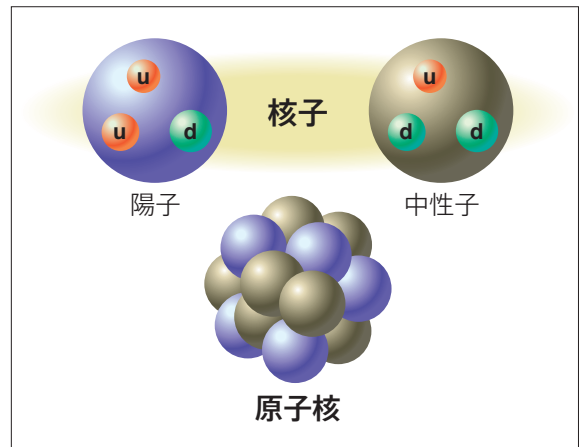
陽子と中性子はまとめて核子と呼ばれ、それぞれ3つのクォークからなっています。陽子は2つのアップクォークと1つのダウンクォーク、中性子は1つのアップクォークと2つのダウンクォークから構成されています。陽子と中性子が強い力で結びついたものが通常の原子核です。

通常物質とそれ以外の物質

私たちの身の周りには、通常の原子核（陽子と中性子のかたまり）を持った物質です。この通常物質はアップクォーク、ダウンクォーク、それに電子、という第1世代の素粒子からなっています。しかし、宇宙線や加速器で生じる粒子には、それ以外の素粒子からなる粒子（物質）が含まれています。

ラムダ (Λ) 粒子は、右図にあるように、アップクォーク、ダウンクォーク、ストレンジクォーク、それぞれ1つずつで構成されています。

また、湯川博士が予言しその後発見された粒子にパイ (π) 中間子があります。例えば、正電荷を持つ π^+ 中間子は1つのアップクォークと1つの反ダウンクォークで構成されています。中間子の仲間にもアップクォークとダウンクォーク以外のクォークからなるものがたくさんあります。正電荷をもつケイ (K^+) 中間子は1つのアップクォークと1つの反ストレンジクォークで構成されています。



ハドロンとは？

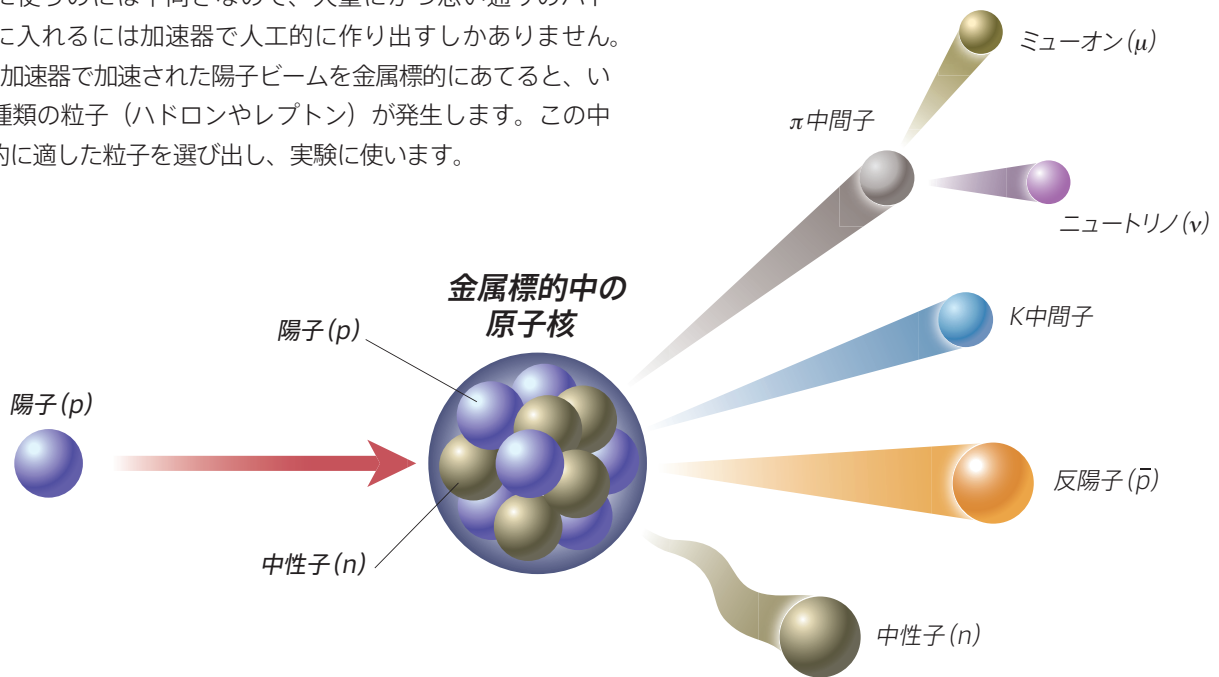
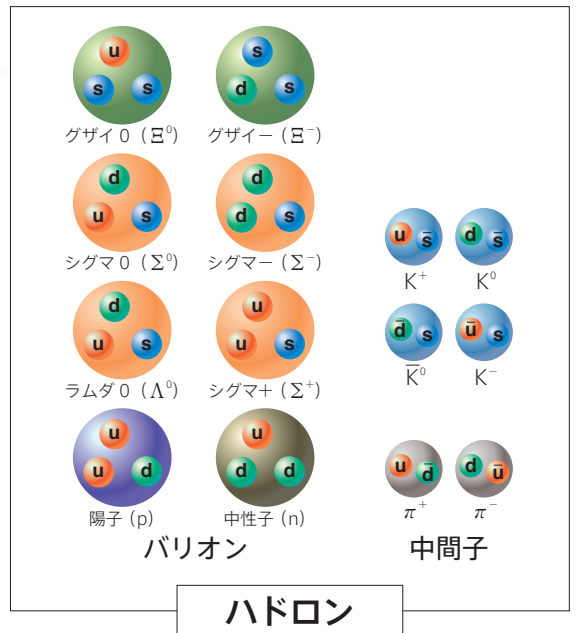
ハドロン・バリオン・中間子

これまでに登場した核子やラムダ粒子、中間子は、みなクォークが強い力で結びついた粒子です。このようにクォークが強い力で結びついた粒子を総称して「ハドロン」と呼んでいます。

ハドロンの中で陽子や中性子のようにクォーク3つで構成されている仲間をバリオンと呼んでいます。また、1つのクォークと1つの反クォークで構成される仲間を中間子と呼んでいます。

ハドロンの作り方

陽子や中性子は原子核の構成要素として私たちの身の周りにたくさんあります。その他のハドロンは、地球外から降り注ぐ宇宙線の中にみつけることができます。しかし、これらは数も少なく、制御して実験に使うには不向きなので、大量にかつ思い通りのハドロンを手に入れるには加速器で人工的に作り出すしかありません。J-PARCの加速器で加速された陽子ビームを金属標的にあてると、いろいろな種類の粒子（ハドロンやレプトン）が発生します。この中から、目的に適した粒子を選び出し、実験に使います。



ハドロンを使った研究

ハドロンを使ってどのような研究をするのでしょうか？ハドロン実験施設は産業応用などのための研究を直接目的とした施設ではありません。原子核や素粒子、そこに働く力の性質を研究し、私たちの宇宙の成り立ちを考える、基礎的な科学の場です。ハドロンや原子核は強い力が働いて成り立っていますので、強い力の性質の研究が1つの大きなテーマです。2008年にノーベル

賞を受賞された南部博士は物質に質量が生まれる仕組みを提唱されました。強い力でその仕組みの実験的な検証も大きなテーマです。また、同じく2008年ノーベル賞の対象となった小林・益川理論を検証する実験も準備されています。ハドロン実験施設ではいろいろな側面から原子核や素粒子の研究が繰り返されます。次ページから、そのうちの一部を紹介しましょう。

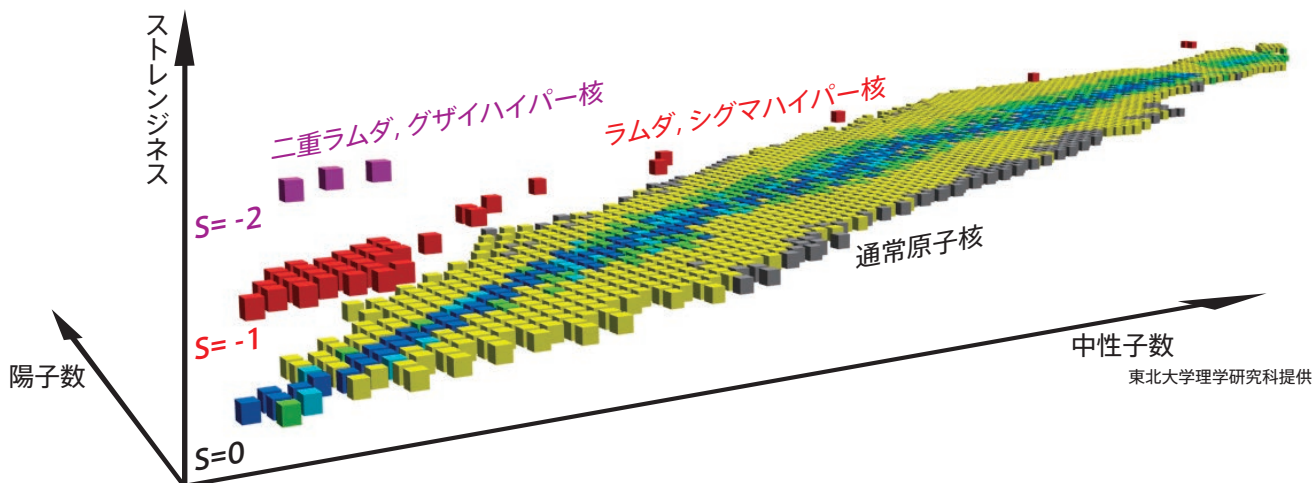
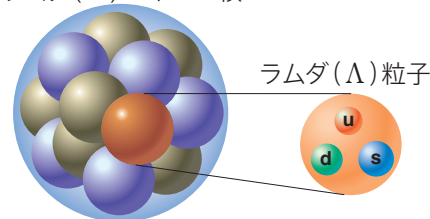
ハイパー核

—未知の物質世界へ—

ハイパー核とは？

陽子や中性子で構成される通常の原子核には大変多くの種類があります。実験室では、通常には無いストレンジクォークを含む原子核を作ることができます。これがハイパー核です。ハドロン実験施設では、アップやダウンクォークだけでなくストレンジクォークも含んだ多様な原子核の研究を進めています。

ラムダ(Λ)ハイパー核

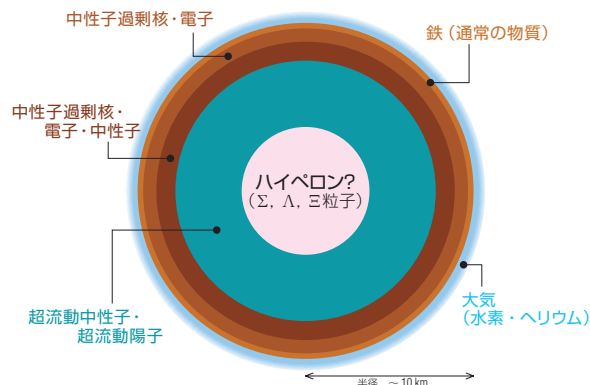
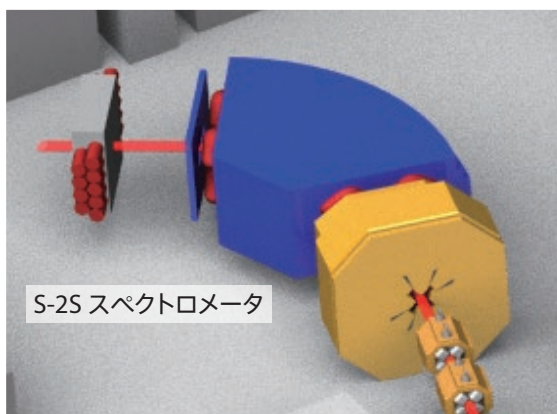


何がわかるの？

湯川博士は、原子核を作るために核子同士を結びつけている引力が π 中間子交換で説明できることを示し、ノーベル賞に輝きました。しかし、核子を近づけていくと大きな反発力が働くことが知られており、その起源を探る研究が続けられています。ハイパー核の性質を探ることにより、近距離の核力が調べられると期待されています。

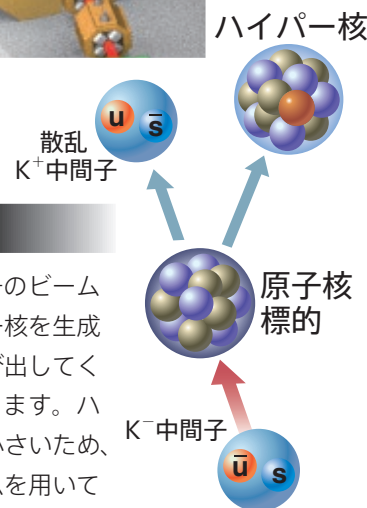
中性子星の中はどうなっているの？

中性子星は密度が太陽の 10^{14} 倍以上もある非常に重い星です。下の図のように、中性子星の最中心部ではラムダ粒子やグザイ粒子などのストレンジクォークを含む粒子(ハイペロン)が多く存在すると考えられています。ハイパー核によるハイペロンの相互作用の研究によって中性子星の成り立ちなども明らかにすることができます。



どうやって作るの？

ハドロン実験施設では、K中間子のビームを原子核標的に打ち込みハイパー核を生成します。この生成反応により飛び出してくる K^+ 中間子や π^- 中間子を測定します。ハイパー核ができる確率はとても小さいため、J-PARCの大強度のK中間子ビームを用いて初めてこのような実験が可能となります。

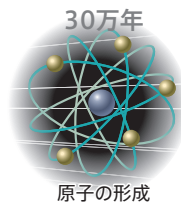
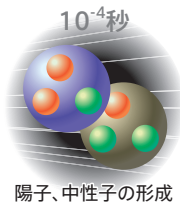
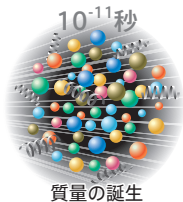
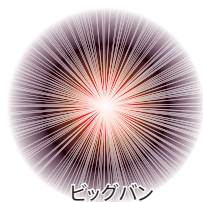


質量の起源を探る

—南部博士の理論を実験的に検証—

質量はどうやって生まれたの？

私たち自身や身のまわりの物質に質量があることは当たり前のように感じます。しかし宇宙が誕生した頃は、全ての粒子の質量はゼロであったと考えられています。では一体どうやって質量のない粒子から星のような重いものが生まれたのでしょうか？それを説明するのが南部博士が提唱した理論です。

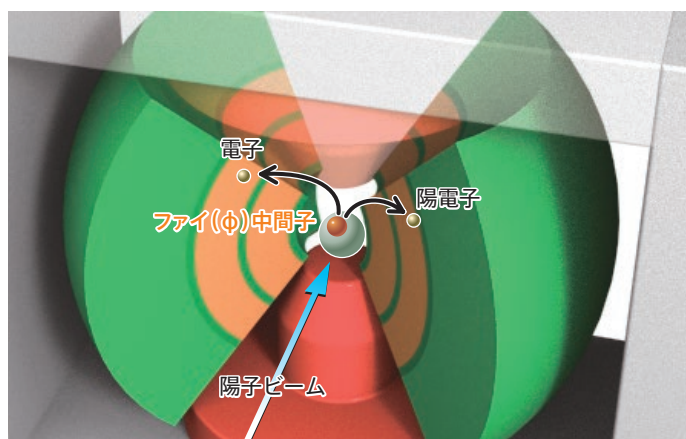
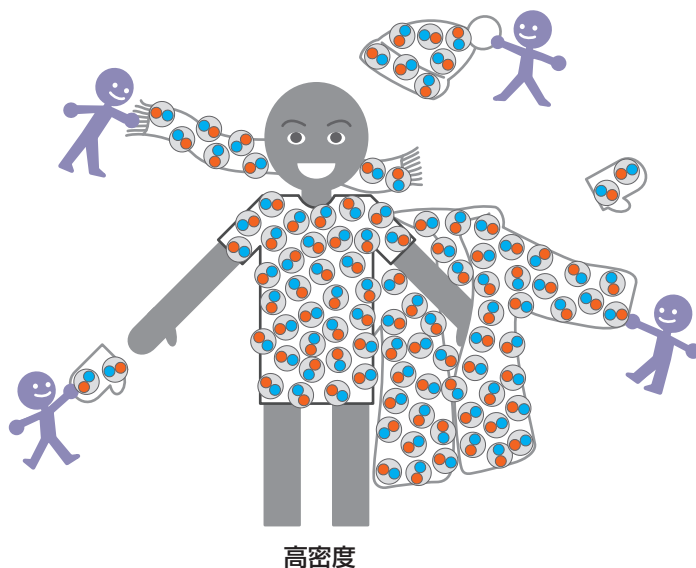
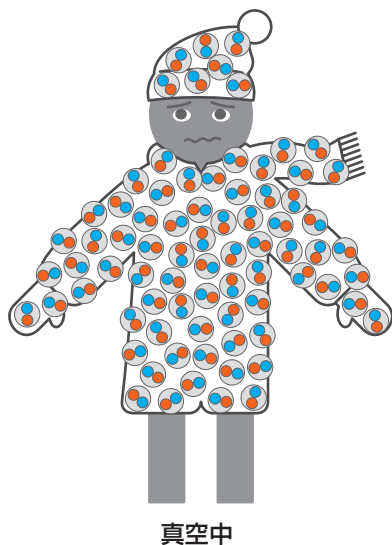


南部博士の理論

物質の最も小さな構成要素はクォークです。クォークは単体では取り出せず、すぐに反クォークとペア ($\bar{q}q$) をつくります。従って、真空中には $\bar{q}q$ がぎっしりと凝縮していると考えられています。この凝縮を起こす機構が、南部博士が提唱したカイラル対称性の自発的破れという仕組みでした。粒子は、凝縮した $\bar{q}q$ と相互作用することによって、大きな質量を獲得すると考えるのです。

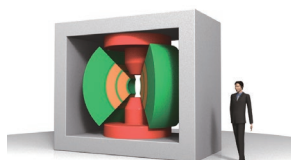
どうやって確かめるの？

では、この理論をどうやって検証すればよいのでしょうか？ 例えば粒子を高密度の状態に置くと、周りの物質と相互作用して粒子にまとわりついている $\bar{q}q$ が少なくなるため、質量が軽くなると予想されています。ハドロン実験施設では、原子核中でファイ (ϕ) 中間子を作り、原子核という密度の高い環境下で ϕ 中間子の質量がどのように変化するかを検証します。



質量は軽くなる！

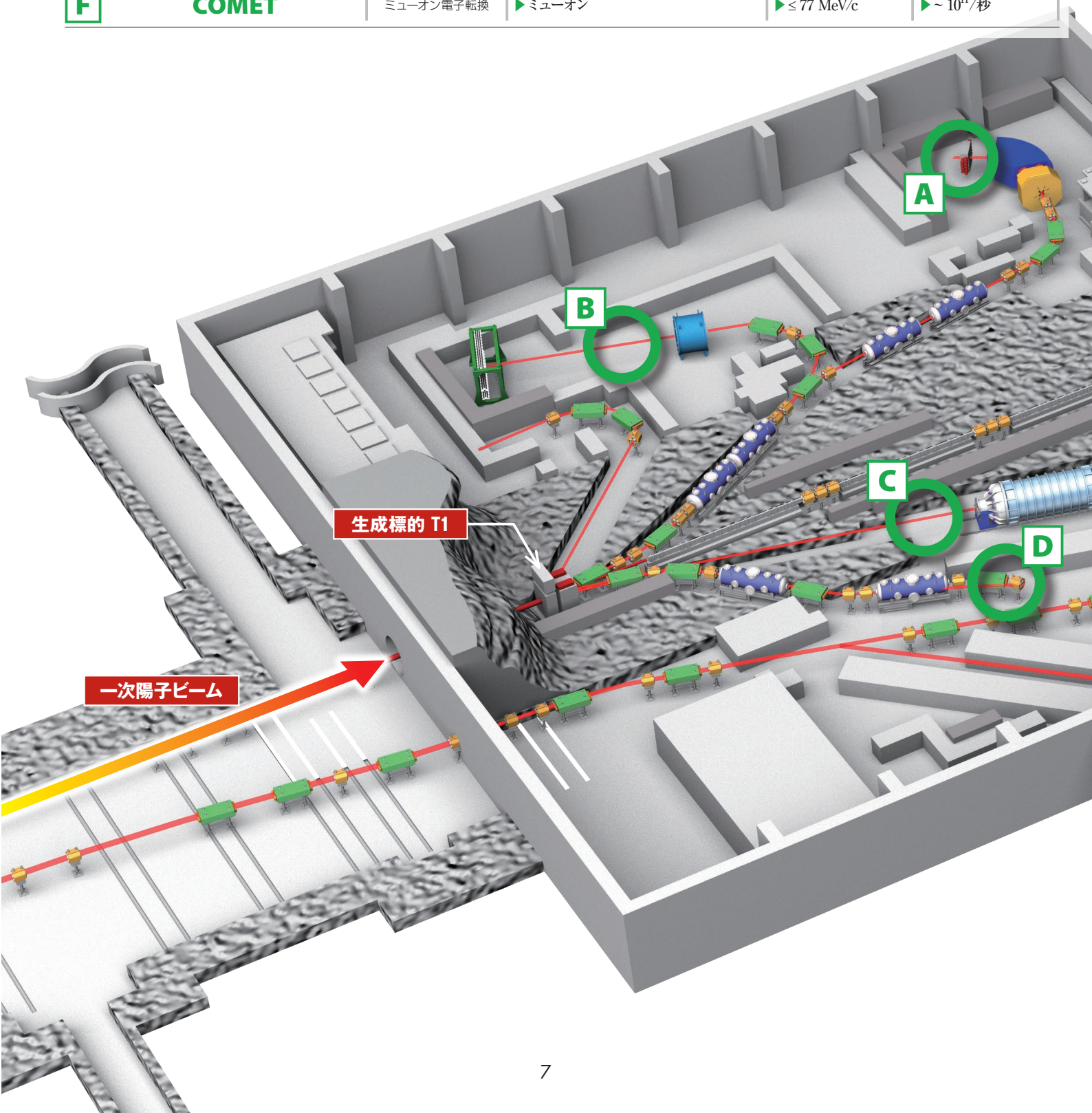
この実験では、一次陽子ビームを原子核標的にぶつけてファイ中間子を作り、ファイ中間子が壊れてできた電子および陽電子を検出器で測定します。理論が正しければ、原子核の中で軽くなったことが分かるはずです。これによって、本当にカイラル対称性の破れが質量を生み出すのかを実験的に明らかにすることができます。



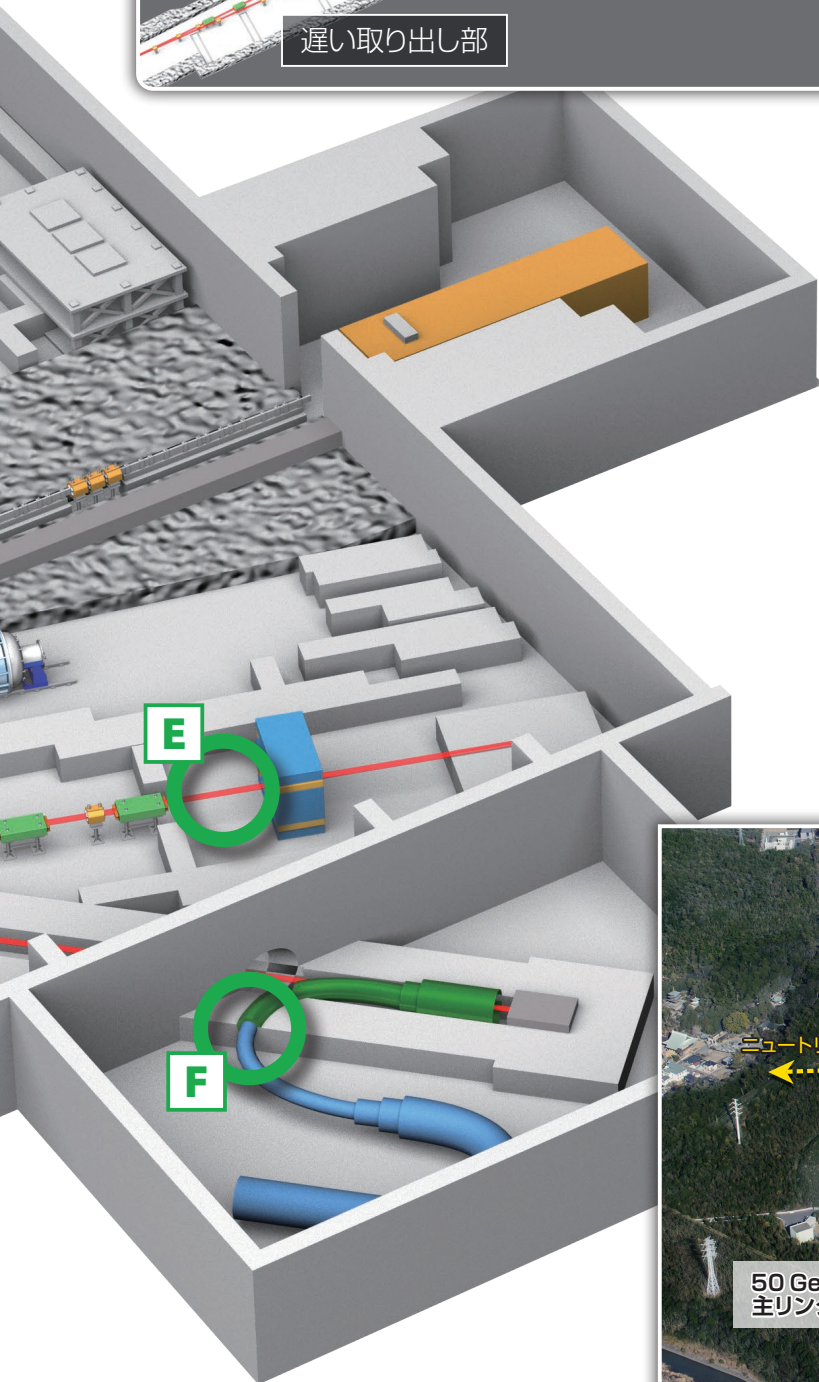
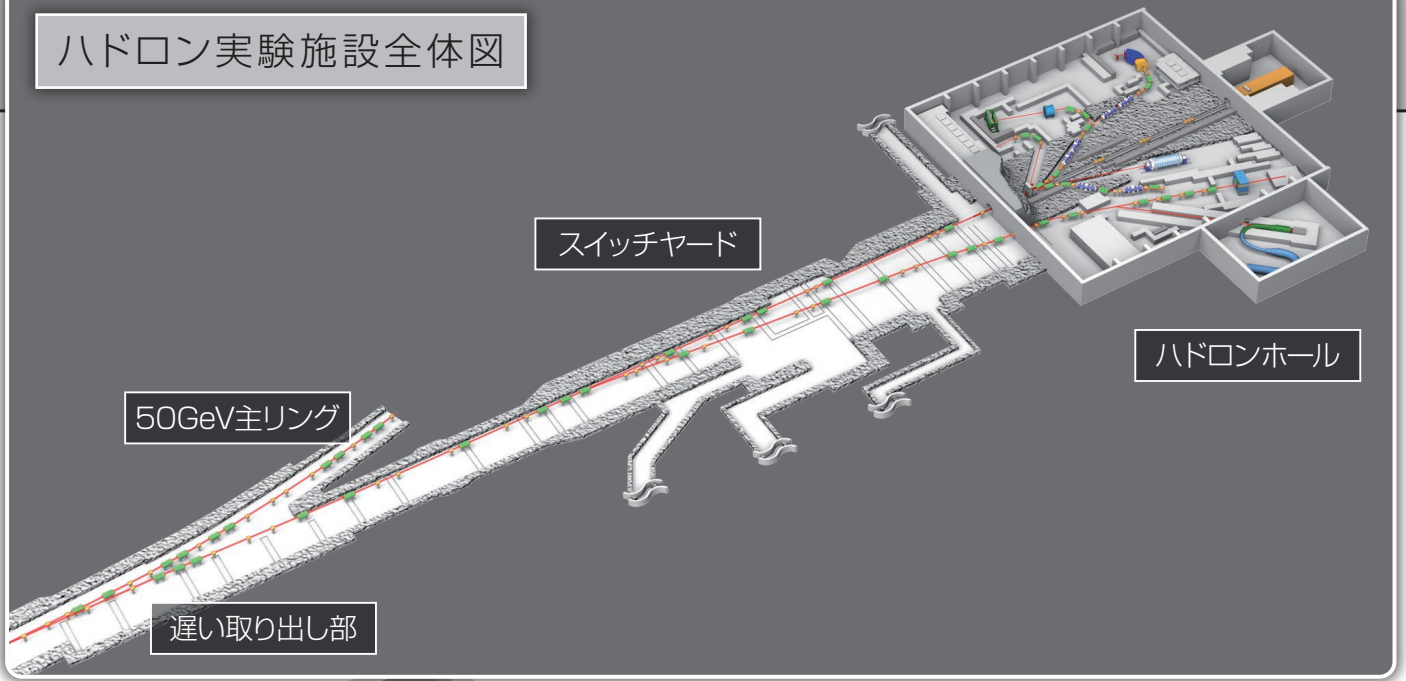
ハドロン実験施設

—多彩なビームで探る物質の起源—

| | ビームライン | | 粒子の種類 | 運動量 | 強度 |
|----------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------|
| A | K1.8 | ハイパー原子核 ($S=-2$) | ▶ π 中間子, K中間子, 反陽子, ... | ▶ ≤ 2 GeV/c | ▶ $\sim 10^6$ /秒 K^- |
| B | K1.8BR | ストレンジネス ハドロン物理 | ▶ π 中間子, K中間子, 反陽子, ... | ▶ ≤ 1.2 GeV/c | ▶ $\sim 10^6$ /秒 K^- |
| C | KL | CPの破れ | ▶ 中性K中間子 | ▶ ~ 2 GeV/c | ▶ $\sim 10^7$ /秒 K^0 |
| D | K1.1 | ハイパー原子核 ($S=-1$) | ▶ π 中間子, K中間子, 反陽子, ... | ▶ ≤ 1.1 GeV/c | ▶ $\sim 10^6$ /秒 K^- |
| E | 高運動量 (high-p) | 質量の謎, ハドロン物理 | ▶ 一次陽子, π 中間子, ... | ▶ ≤ 31 GeV/c | ▶ $< 10^{12}$ /秒 |
| F | COMET | ミュオン電子転換 | ▶ ミューオン | ▶ ≤ 77 MeV/c | ▶ $\sim 10^{11}$ /秒 |



ハドロン実験施設全体図

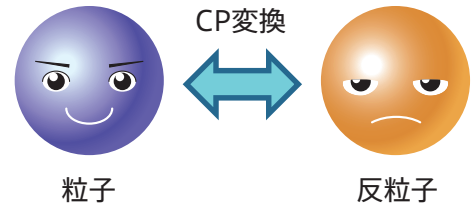


CP対称性の破れをみる

—小林・益川理論の検証から、新しい現象の探索へ—

なぜ反物質は存在しないのか？

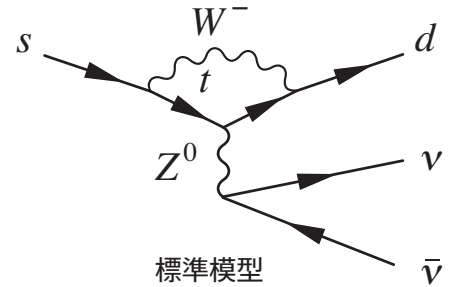
自然界では、反粒子から作られる反物質はほとんど存在しません。このような非対称性を“CP対称性が破れている”といいます。なぜこのような非対称が生まれたのでしょうか？



小林・益川の理論

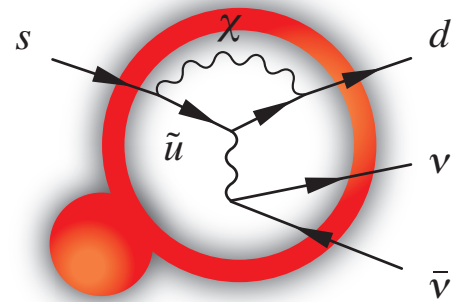
小林・益川両博士は、クォークは2種類で1つの世代を作り、この世代が3つあることを予言しました。この場合CP対称性が破れることが自然に説明できます。

粒子の崩壊事象や崩壊確率を測定することで、どの程度CP対称性が破れているのかを調べることができます。理論が正しいのか、あるいは標準理論では説明できない新しい現象があるのか、それを明らかにするための実験の一つにK中間子稀崩壊実験があります。



中性K中間子の稀崩壊探索実験

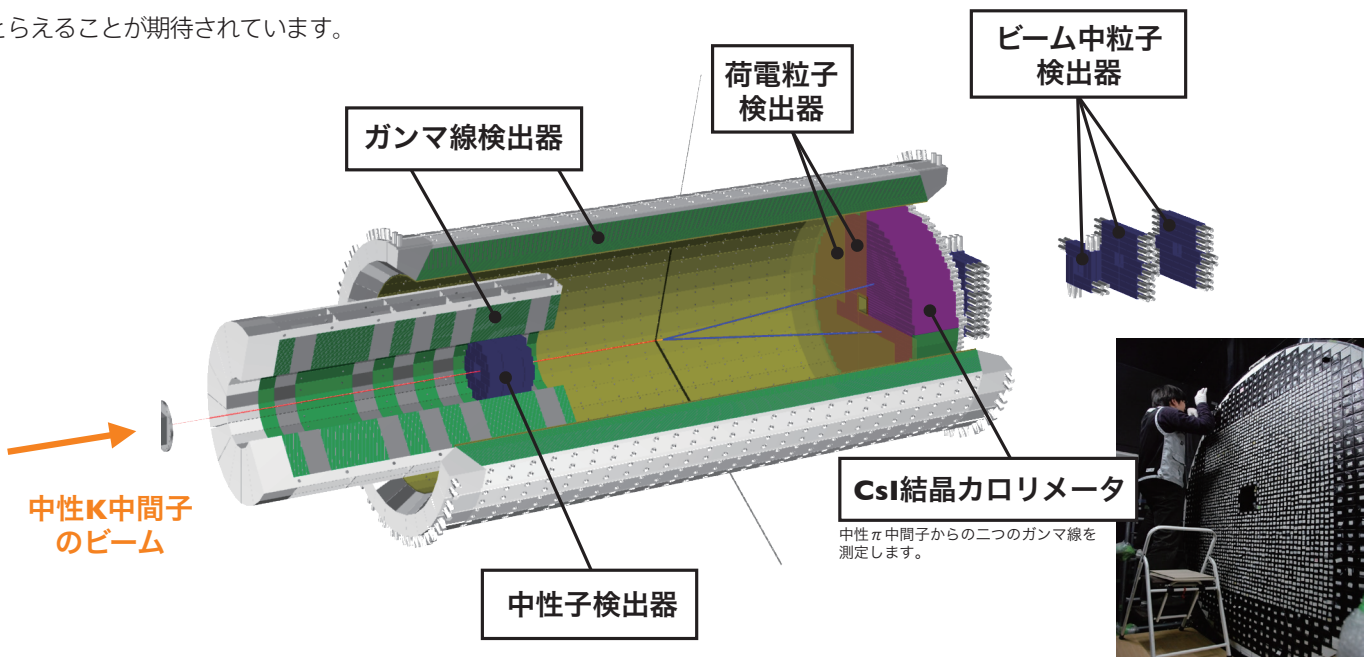
この実験では、長寿命の中性K中間子 (K_L^0) が中性の π 中間子 (π^0)、ニュートリノ (ν) および反ニュートリノ ($\bar{\nu}$) へ崩壊する様子をとらえます。もし、標準理論には現れない超対称粒子などが存在すれば、その影響が現れる可能性があります。



新しいCP対称性の破れ

稀な崩壊事象をとらえる

この現象は、予測される崩壊の確率が数百億分の1と、非常に稀にしか起こりません。J-PARCでは世界最高強度の陽子ビームを供給することができるため、多量の中性K中間子ビームを作ることが出来ます。過去に高エネルギー加速器研究機構の陽子シンクロトロンで行われた実験では数千万分の1の崩壊確率が測定できるところまで迫りましたが、J-PARCのE14 KOTO実験 (K₀ at Tokai) ではその千倍以上の感度を達成しようとしています。ここで初めて稀な事象をとらえることが期待されています。



ミューオン電子転換の探索

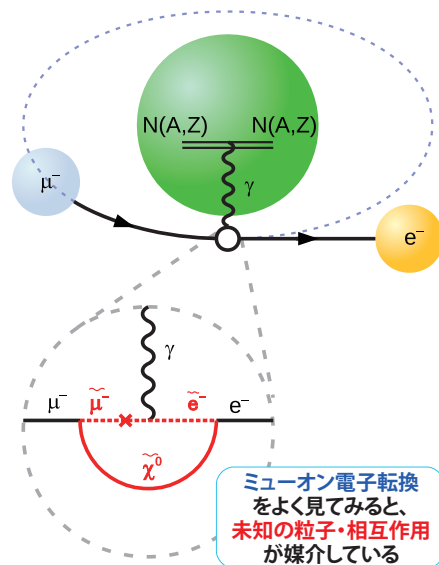
—標準模型の破れの直接的証拠をとらえる—

ミューオンの特徴

「標準模型」は現代の素粒子物理学の根幹となっている理論ですが、より基本的な未知の理論の低エネルギーでの近似に過ぎないと予想されています。

COMET実験で利用するミューオンは、標準模型における第2世代のレプトン(素粒子)であり、第1世代のレプトンである電子の約200倍の質量を持っています。ミューオンを含む電荷をもつレプトン族の粒子(他に電子、タウ)は、標準模型の枠内では単独で変化することはできず、必ず反応の前後にニュートリノを含みます*1。しかし、標準模型を超える理論では、ミューオンが電子に転換する事象が起きる可能性が示唆されており、それを実験的に見つけることは未知の理論の確実な証拠となります。

*1 ただし、近年発見されたニュートリノ振動という現象を介して、極めて低い確率で転換が起こり得ます。



COMET実験

COMET実験(Coherent Muon to Electron Transitionの略)は、ハドロン実験施設でパルスミューオンビームを生成し、ミューオン電子転換事象(ミューオンが電子に変わる反応)を探索します。ミューオン電子転換はこれまでに発見されていない希少な事象のため、大量のミューオンを必要とします。また、ビーム由来の背景事象(ノイズ)を避けるために、測定はビームのパルスとパルス間のタイミングを見計らって行わなければなりません。これらを両立させるために、非常に高い強度のミューオンビームを、きれいなパルス状に形成するという困難な技術を確立することが実験成功の鍵となります。ミューオン電子転換が起きたことを識別するためには、反応の終状態に現れる特徴的な運動量(エネルギー)をもった電子を捕えます。この信号となる電子を、既知の反応による電子と区別するために、高い分解能をもつ検出器で電子の運動量を選別します。COMET実験では、ビーム、検出器の双方において最先端の技術を駆使することで過去に行われた実験と比べて1万倍となる1京分の1に実験感度を目指しています。

