



素粒子  
原子核

# 「物質」とは何か？

これは、岐阜県神岡町の地下1,000mにある「スーパーカミオカンデ」という研究装置です。

直径40m、深さ40mの巨大な水槽の内部に11,200本の光検出器（写真の中の点々ひとつひとつが光検出器です）を備え、ニュートリノと呼ばれる目に見えない素粒子の検出を行っています。

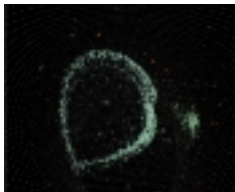
# 謎の素粒子「ニュートリノ」

超新星爆発や太陽からは「ニュートリノ」と呼ばれる素粒子が放出されます。

このニュートリノを観測することで、光では観測不可能な星の中心部を直接研究することが可能になり、ビッグバン直後の超高温の宇宙の様子をはじめ、様々な謎を解明できるかもしれないのです。

## スーパーカミオカンデ

ニュートリノは電荷を持たない、非常に軽い素粒子です。その質量は長い間測定できていませんでしたが、1998年東京大学宇宙線研究所を中心としたスーパーカミオカンデ実験により初めて質量が測定されました。



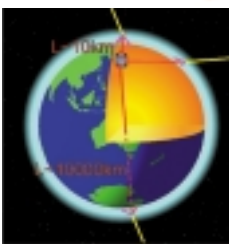
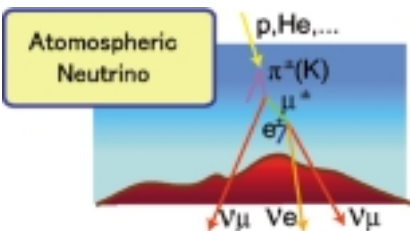
写真提供：東大宇宙線研究所

スーパーカミオカンデ検出器は約5万トンの純水を使い、ニュートリノが水と反応する現象を観測します。ニュートリノ反応はリング状の光として観測される(上図)ため、スーパーカミオカンデ検出器は水槽内に50cm径の光検出器11,200本を設置しています。

## ニュートリノの正体

ニュートリノは宇宙線によって大気中で生成されます(上図)。ニュートリノは地球を通り抜けることができるので世界中の空で発生したニュートリノがスーパーカミオカンデで観測できます(下図)。

この観測を通しスーパーカミオカンデはニュートリノに質量がある場合の特有な現象であるニュートリノ振動の観測に世界で初めて成功しました。



ニュートリノは地球を通り抜けることができます。

資料提供：高エネルギー加速器研究機構

## ニュートリノ振動

ニュートリノ振動が起こると、発生時と異なる成分比でニュートリノが観測にかかるため、ある種のニュートリノは減少し、別の種類のニュートリノは増加する現象が起こります。

スーパーカミオカンデではミューオン型ニュートリノが地球の反対側から来る場合(右図：-1の点)、日本の上空からくる場合(右図：+1の点)よりも減少していることを観測しました。

これはニュートリノ振動が起こっている場合の予想(右図：緑線)と非常に良く一致します。また2001年にはスーパーカミオカンデとカナダのSNO実験の観測から太陽から来るニュートリノもニュートリノ振動で減少していることが判明しました。

ニュートリノ振動：ニュートリノは3種類存在し、それぞれ異なる質量を持つと考えられています。その数

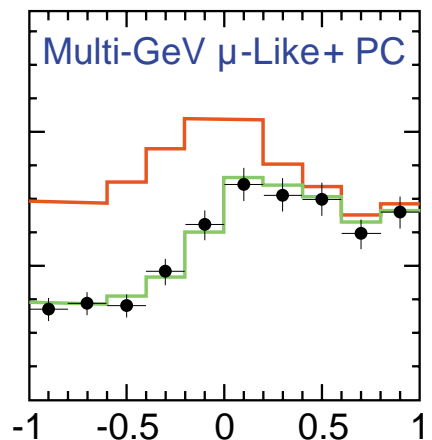
## 日本横断の実験

ニュートリノ振動をより詳細に研究するため、人工的に加速器でニュートリノを発生させる長基線ニュートリノ振動実験が現在進行中です。ニュートリノはつくばで生成され日本を横断し、250km離れたスーパーカ

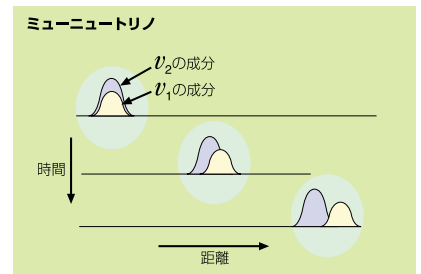


資料提供：高エネルギー加速器研究機構

種類のニュートリノが混合した状態でニュートリノは発生し、観測されます。その場合、発生した時に同じ地点にいた各種ニュートリノ成分は、飛行中に分離されてしまいます(下図)。



資料提供：東大宇宙線研究所



資料提供：高エネルギー加速器研究機構

ミオカンデで検出されます。ニュートリノ研究は宇宙の解明、素粒子物理学者が目指している全ての力の統一理論の進展等に大きな貢献をすることが期待されています。

# 粒子・反粒子の謎

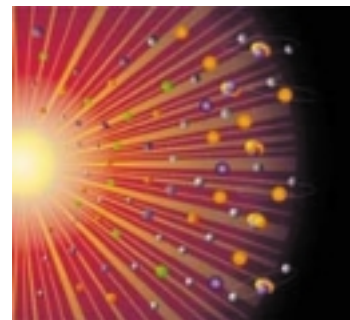
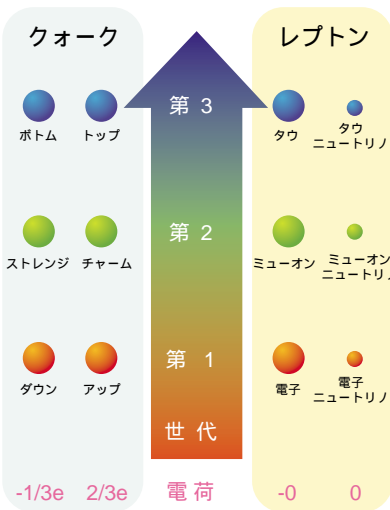
物質を細分化していった最後にたどり着く究極の粒子、それが素粒子です。

宇宙の創世記「ビッグバン」では、この素粒子とともに「反粒子」というものも同じ数だけ生まれたといわれています。

では、「反粒子」はどこにいってしまったのでしょうか？

## 粒子・反粒子

我々の世界は、主に陽子・中性子・電子で構成されています。現在の素粒子物理学で、物質を構成する素粒子（クォークとレプトン）には下図に挙げる12種類の粒子と電荷が反対の反粒子があることが判っています。宇宙創生期、ビッグバンにおいては粒子反粒子は同数作られたと考えられています。ではその反粒子は反物質を作ることなく何故消えてしまったのでしょうか？その鍵は、日本人物理学者小林・益川氏が提案した理論により第3世代のボトムクォークが担っていると考えられています。



ビッグバンのイメージ

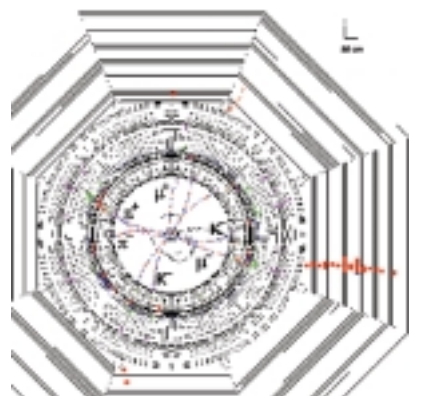
このページの写真・資料提供：高エネルギー加速器研究機構

## 小林・益川理論

小林・益川理論によると、ボトムクォークから構成されるB中間子では粒子・反粒子の大きな差異が観測されると予想されています。このためB中間子を大量に生成できる加速器、B-ファクトリー（全景：右上図、本体：右下図）がつくばの高エネルギー加速器研究機構で建設され、多数の大学の研究者が粒子・反粒子の研究に取り組んでいます。

## 素粒子反応を検出する

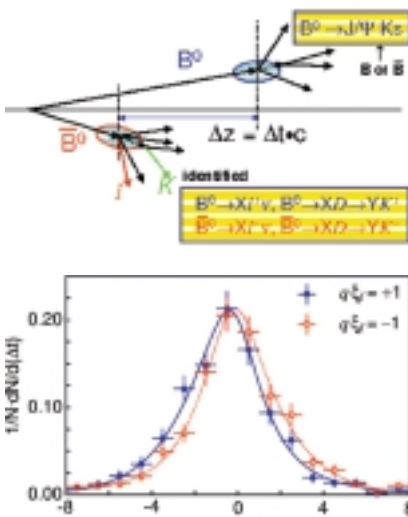
大量に生成されるB中間子を観測するための素粒子反応検出器、Belle（下写真）が建設されました。この検出器はB中間子が崩壊した地点を数十μmの精度で測定します。Belle検出器では右図のようにB中間子の崩壊が観測されます。



Belle検出器の正面図と観測された粒子の飛跡

## 粒子だけが生き残るわけ

Belle実験では粒子と反粒子がある特殊な状態（CP固有状態）に崩壊する際の寿命の違いを測定します。つまり、粒子と反粒子はどちらが長生きかを調べているわけです。B-ファクトリーではB中間子と反B中間子が対で生成され、その寿命の差を測定します（左上図）。2001年夏、ついにB中間子と反B中間子の間でCP固有状態に行く場合に大きな寿命差があることが判明しました（左下図：青線CP=1, 赤線CP=-1）。



# 原子核物理学

原子核とは文字通り原子の核をなす要素です。

原子核には、今まで知られていた「普通の」原子核以外にも、様々なタイプの存在が明らかになりつつあります。

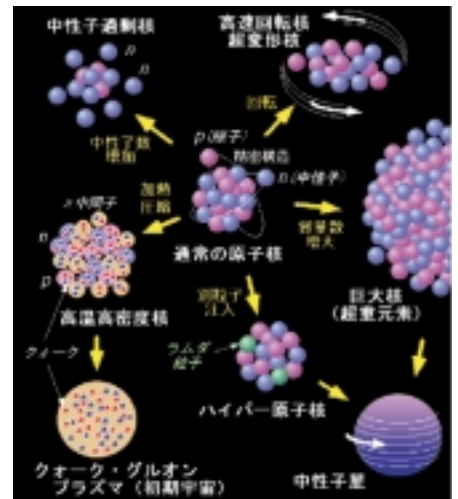
物質の基本的な要素でさえ、まだまだ知られていないことがたくさんあるのです。

## 新しいタイプの原子核

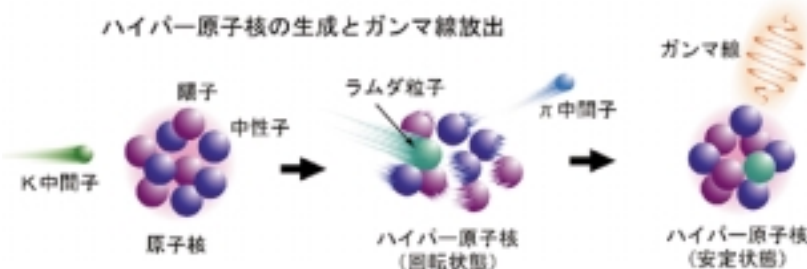
原子核は物質の基本要素です。陽子と中性子が集まってできた原子核が、まわりに電子をまわって原子となり、物質を形作っています。現在、約千種類の原子核が知られていますが、陽子や中性子がどういう力で結合してなぜこのような原子核になるのか、初期宇宙では物質はどういう姿で、そこからどのようにして原子核が作られてきた

のか、まだよくわからないことばかりです。つまり、我々人間は物質の本質をまだ理解していないのです。

原子核は、ほぼ同数の陽子と中性子が球形に集まったものというのが従来の常識でしたが、最近では右図のような様々な新しいタイプの原子核の存在が明らかになり、この常識は覆されました。

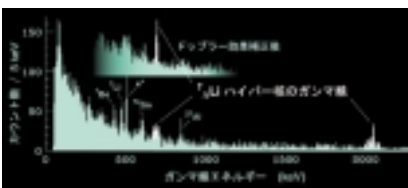
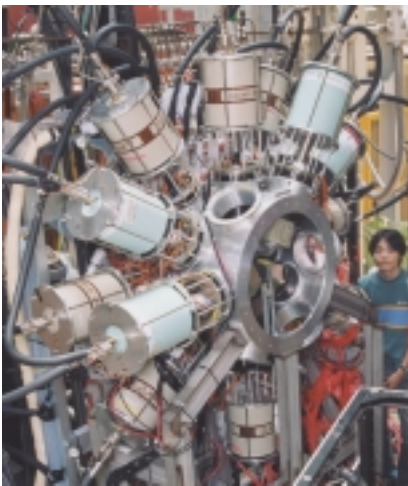


物理



## ハイパー原子核

ここでは、陽子、中性子、ラムダ粒子の三種類の粒子からなる「ハイパー原子核」の研究を紹介します。上図のように、加速器で人工的に作った「中間子」を原子核に当てると、中性子がラムダ粒子に変化し、ハイパー原子核が作られます。このハイパー原子核の



ハイパー原子核のガンマ線の検出装置と実験で得られたスペクトル

## 広がるハイパー原子核の世界

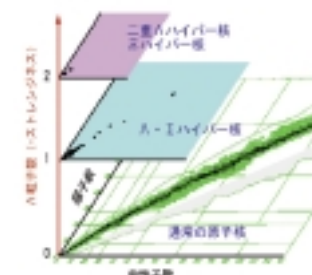
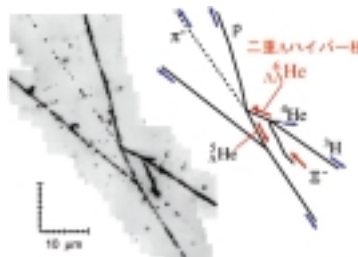
さらに、別のKEKの実験では、ラムダ粒子を2つ含む二重ラムダハイパー原子核の決定的な証拠が写真乾板の中に捉えられました(下図左)。こうして、これまで陽子の個数と中性子の個数で区別されていた原子核は、下図右

構造を調べると、従来調べられなかった原子核の深部の様子や、陽子や中性子の間に働く力の詳しい性質を知ることができます。

ハイパー原子核の研究は、実験・理論の両面で日本の研究者が圧倒的に世界をリードしています。最近、つくば市の高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、世界で初めてハイパー原子核の発生する光(ガンマ線)の精密測定に成功しました。こうしてハイパー原子核の精密構造が次々と解明されています。

のように第三の軸を加えて3次元的に表されることになりました。

ハイパー原子核は単なる人工的な物質ではなく、中性子星の内部に存在するとされています。こうして我々の物質観も拡張されるのです。



# 素粒子と生命の融合

私たち人間の体も、行き着くところは素粒子の集まりです。

つまり、宇宙空間にある物質や身の回りのものと、ある意味「同じ」だといえます。

「物理」というと、一見、無機的なものを扱う学問と思われがちですが、「素粒子的な見方」をすればそのような垣根は存在しないといえます。



ニュートリノ質量からレプトン族の混合測定まで

電子ボルト以下の領域のミュオン

## ミュオン科学

物質の磁性、表面界面物性、ミュオン触媒核融合、等

## ミュオン ( $\mu$ )

中間子の崩壊によって発生するミュオンを効率よく集めて世界最強のパルス状ミュオンビームをつくる。

## ニュートリノ ( $\nu$ ) GeV領域の粒子

原子核・素粒子物理学  
ハイパー核、核物質中のQCD、ニュートリノ振動、K中間子崩壊、等

50 GeV陽子ビームを原子核にあてて発生する中間子、反陽子、ニュートリノなどのいろいろな粒子ビームを利用する。

## 加速器駆動消滅処理 MeV領域の中性子

中性子 ( $n$ )  
3 GeV-333  $\mu$ Aの大強度陽子ビームによって発生する世界最強のパルス中性子源。

## 中性子科学

高温超伝導発現機構、生命現象、高分子・液晶・超分子、新素材

## meV-eV領域の中性子

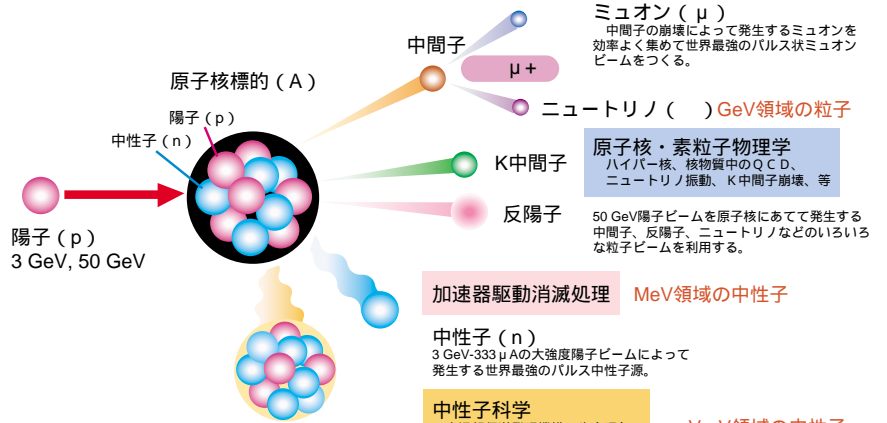
## 大強度陽子加速器施設

大強度陽子加速器施設は、高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所が共同で建設を進めている多目的加速器施設です。平成18年度末の完成を予定しています。

建設される加速器は、陽子リニアック、30億電子ボルトシンクロトロン、500億電子ボルトシンクロトロンという世界最高強度を誇る陽子加速器群から成り立っています。

これらの加速器群から供給される大強度陽子ビームという共通の道具を基に、中性子、ミュオン、K中間子、反陽子、ニュートリノなどの様々な二次粒子を発生させて、これを利用した広い範囲の科学分野の研究が行われます。

その範囲は、ミクロの世界を探索する原子核・素粒子物理学から、より身近な物質の基本的性質や生命の機構を探る物質・生命科学、あるいは人類の未来のための新しい技術開発など、様々な分野をカバーしています。むしろ、従来の学問領域にとらわれない21世紀の新しい科学・技術分野の創成へとつながることが期待されています。

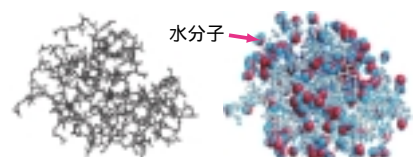


大強度陽子ビームによる多様な粒子ビームの生成

## タンパク質の3次元構造の解明

中性子散乱は、X線と比較すると水素などの軽い元素に高い感度を持っています。この特徴を生かして、複雑な3次元構造をもつタンパク質の全体像をとらえることができます。

最近では、このようなタンパク質の形が、生体内での働きと深い関わりを持つことが知られてきています。



X線で見えたタンパク質の構造

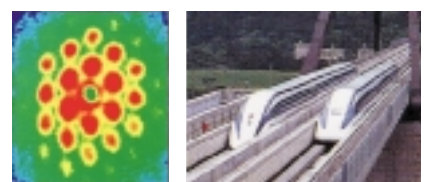
(C, N, O, S原子からなる骨組み構成)

中子で見えたタンパク質の構造

X線では見えない水分子がよく見える

## 新しい超伝導物質の構造解明・開発

中性子は、ミクロな磁石としての性質も持ち、磁性体の構造の研究にも大いに役立っています。例えば、新しく開発された超伝導材料の性質を理解し、実用化に向けた開発を進める上でも重要な役割を果たしています。



超伝導の渦構造の観測(左)と超伝導技術を用いて動くリニアモーターカー(右)

# 超伝導の新しい潮流

ある温度以下で電気抵抗がゼロになる状態を示す物質のことを「超伝導体」といいます。最初に発見された超伝導体は、4.15ケルビン（-269℃）の水銀でした。

その後、より高い温度で超伝導となる物質が世界中の研究機関で探し求められています。

## 超伝導とは

現代社会の営みは、通信・輸送・家庭生活の全般にわたって電気を利用した機器に強く依存しています。物質に電気を流すと電気抵抗が生じるため、電気エネルギーの多くは熱として消費されています。ところがある種の金属のなかには、冷やしていくと電気抵抗が突然、完全に消失するものがあります。これを「超伝導体」といいます。超伝導状態では、電気を運ぶ電子は2個ずつ対を作り、それらの電子対がボース・アインシュタイン凝縮（18ページ参照）を起こしています。

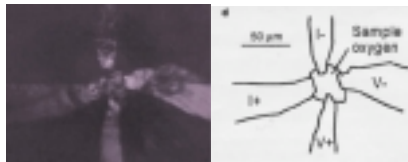
最近、これまでになかった新しい物質や新しい性質の超伝導体が次々と見つかりました。特に日本の大学での研究から多くの発見が生まれています。

## 2ホウ化マグネシウムの高温超伝導

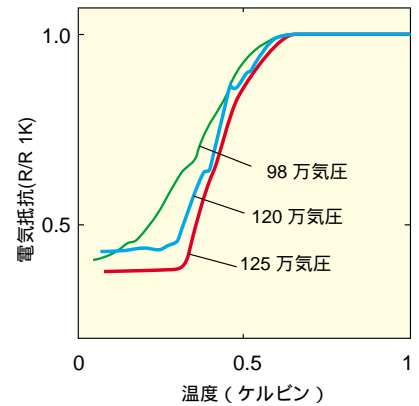
マグネシウムとホウ素が1対2の割合で結合した2ホウ化マグネシウムが、金属化合物としては従来の転移温度の記録を一気に16ケルビンも塗り替える39ケルビンで超伝導になることがわかりました。この物質は研究用の試薬として市販されていましたが、それが実

## 酸素の超伝導

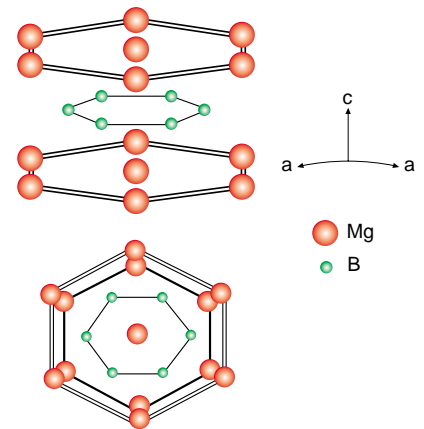
酸素は空気中に窒素について多く含まれ、身近な元素です。酸素に100万気圧もの超高压をかけて冷やしていくと、絶対温度で0.6ケルビン以下では超伝導になることが発見されました。この他、超高压力のもとでは、鉄も強磁性を失ったあと、超伝導になることがわかりました。



120万気圧における固体になった酸素。電気抵抗測定のための電線が取り付けられている。



超高压のもとでの酸素の電気抵抗



2ホウ化マグネシウムの結晶構造

## スピン・トリプレット超伝導

超伝導体の中では、電気を運ぶ電子は2個ずつ対をつくっています。電子には右向き・左向きの自転に相当するような2種類のスピンという状態がありますが、従来の超伝導体ではすべて、互いに逆向きスピンの電子が対を作っています。ところが最近、同じ向きのスピンの電子対による画期的な超伝導体も見つかりました。これが「スピン・トリプレット超伝導体」と呼ばれるもので、ストロンチウムとルテニウ

ムの酸化物超伝導体はその例です。この超伝導体では電子の対（白い球で表現）は小さい矢印で表されたように同じ向きのスピンをもち、お互いに公転



運動していることがわかりました。一方に公転運動していることを上向きの大きな矢印で表現しています。

