

壮大な物理実験室

宇宙

ケプラー、ニュートン・・・

古くから科学者は宇宙を観察することで「法則」を発見し、「物理学」という学問を築きあげてきました。

宇宙は物理学という厳密なシナリオにのっとり、私たちの想像を絶するドラマの舞台なのです。

そして、科学技術の進歩により、今や宇宙は科学者達の手近な実験室になりつつもあるのです。

写真：すばるが捕らえたオリオンKL領域

巨大望遠鏡で宇宙を探る

日本の科学者達によって設計された新世代の望遠鏡「すばる」。
世界に誇るそのすばらしい性能は、はるか120億光年先の銀河団をも見ることが可能です。
そしてこの「すばる」を通して新たな発見が次々と生まれています。

すばる展望鏡

国立天文台のすばる望遠鏡は、一枚鏡としては世界最大の8.2mの主鏡をもつ可視光および赤外線望遠鏡です。最も大気揺らぎの影響が小さく、湿度の極端に低いハワイ島マウナケア山（標高4200m）山頂に1997年建設され、角度分解能0.2秒の世界最高性能を達成し、現在、世界中の天文学者が観測を行っています。

マウナケア山頂のドーム全景（右）とすばる望遠鏡本体（下）



写真提供：国立天文台

すぐれた観測装置群

すばる望遠鏡には、可視光・赤外線用の7つの観測装置があり、様々な観測目的に応じて使い分けられています。その中のひとつOHS（OH夜光除去分光器）は、大学と国立天文台が共同で開発した、望遠鏡の赤外線での観測性能を6倍以上に高めることのできる、すばる望遠鏡だけが持つ特殊な観測装置で、特に宇宙遠方の天体の性質を詳しく調査する際に威力を発揮しています。



写真提供：国立天文台

120億光年のかなた

OHS の一部分は広視野の赤外線カメラとして使用する事ができます。このカメラを用いて、長時間同じ領域を観測し続けることによる遠方宇宙の探索や、可視光では塵に隠されて観測できないような星生成領域の観測が行なわれています。

左：遠方宇宙の赤外線画像

約120億光年彼方の宇宙初期の銀河を捕えている事が最近の観測結果と合わせて分かっています。

右：分子雲中で星生成が行なわれている領域 S106 の観測結果

すばる望遠鏡の高い分解能により、重く大きい星から軽く小さい星までどの程度の数の星が生まれているのかが詳しく分かりました。

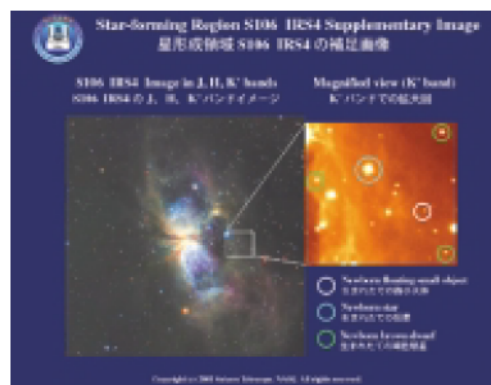


上：夜光除去分光器 OHS

下：OHS により取得された100億光年彼方の巨大銀河の赤外線スペクトル
酸素や水素などの可視光の輝線が赤方偏移して赤外線で観測されているものです。



写真提供：国立天文台（2点とも）



宇宙の始まりを見る

宇宙は今から**150 億年前**の「ビッグバン」によって生まれたといわれています。

つまり、**150 億光年**先から来る情報には、宇宙が生まれたその瞬間を教えてくれる「何か」が含まれているのです。

ALMA

世界の天文学者が共同で、南米チリ共和国の標高5000メートルのアンデス高地に大型サブミリ波干渉計（ALMA）を建設しています。周波数30GHzから1000GHzのサブミリ波を観測します。微弱なサブミリ波を観測するために、鏡面誤差が $20\mu\text{m}$ 以下の高精度パラボラアンテナや量子限界の低雑音超伝導受信機、そして超高速データ伝送技術などの最先端技術の開発もおこなわれています。直径12mアンテナを64台配置して、ハッブル望遠鏡の10倍以上高い解像度（0.01秒角）を実現します。



資料提供：国立天文台

Astro-F

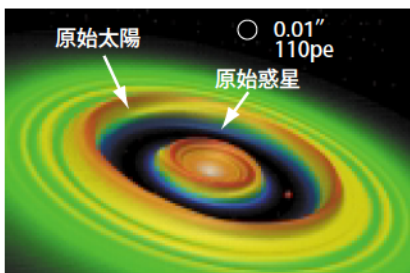
宇宙科学研究所を中心として、2004年2月打ち上げを目標に赤外線天文衛星Astro-Fの開発が進んでいます。口径70cmの冷却型望遠鏡により、波長2～ $200\mu\text{m}$ の過去最高の感度を備え、宇宙に存在する各種の天体の謎を赤外線観測により明らかにします。



資料提供：宇宙科学研究所

星や銀河の赤ちゃんを探す

Astro-FとALMAは可視光では見えない星間物質を捕らえます。この暗黒星間物質は、星を誕生させる材料となります。太陽のような恒星や地球のような惑星が生まれるようすを調べて、太陽系の起源を解き明かします。また、サブミリ波では、生命の起源に関連する有機分子の検出も可能です。



資料提供：国立天文台

さらに、Astro-FとALMAの観測する赤外線からサブミリ波は、生まれたばかりの銀河を探すのに適しています。原始の銀河の放射する光が宇宙膨張によって赤方偏移し、赤外線やサブミリ

波として観測されるからです。年齢が数億年の若い銀河が大量にみつかり、銀河がどのようにしてできたかがわかるでしょう。



資料提供：国立天文台

Astro-E2

宇宙科学研究所を中心としてX線天文衛星Astro-E2の製作が進んでいます。これはロケットの故障のため2000年2月に打ち上げに失敗したAstro-E衛星を再製作するもので、2005年2月の打ち上げを予定しています。絶対温度約0.06ケルビンで動作する高分解能X線分光器など4種類のX線観測装置を搭載し、過去最高のX線波長帯域と波長分解能を備えています。

Astro-E2は、ビッグバン直後には水素とヘリウムしか存在しなかった宇

宙で、酸素や炭素などの多くの元素がいつどこで作られ宇宙空間にどのように拡がっていったかを調べます。また、広い観測X線波長帯域を生かし、巨大ブラックホールの誕生の謎を解明します。

図は日本のグループが米国のチャンドラ衛星を使って発見したM82銀河の中質量ブラックホールです。巨大ブラックホールに成長すると考えられています。矢印は同時に発見された小型のブラックホールです。

ブラックホールに落ち込む物質は下図のように「降着円盤」と呼ばれるガス円盤を形成します。ガスはブラックホールの周りを激しく回転するため、膨大な摩擦熱を発生し1000万度に達する超高温となりX線を放射します。これを観測することでブラックホールを間接的に捉えられます。

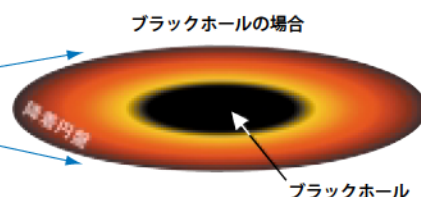
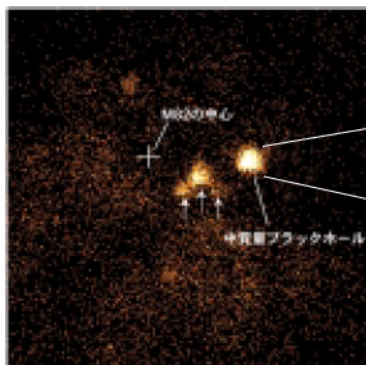
左：Astro-E2

右：ブラックホール

日本のグループが米国のチャンドラ衛星を使って発見したM82銀河の中質量ブラックホールです。巨大ブラックホールに成長すると考えられています。



資料提供：宇宙科学研究所



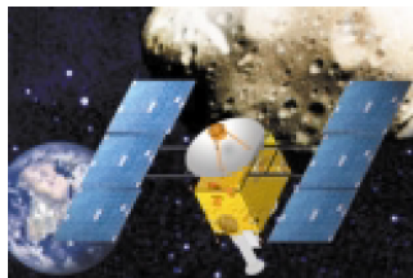
科学衛星による惑星探査

惑星探査計画

金星は太陽からの距離が地球に最も近く、また、惑星自体の大きさも地球とほぼ同じ惑星です。表面は高温の炭酸ガスの大気と硫酸の雲に覆われています。自転運動は非常にゆっくりとしています。自転運動は非常にゆっくりとしていますが、雲は毎秒100メートルもの高速で惑星の自転する方向に運動しています。スーパーローテーションと呼ばれるこの運動に代表される大気の力学を調べるために、宇宙科学研究所が中心となって2007年に金星を周回するPlanet-C衛星が打ち上げられる予定です。これにより、金星大気に雷現象が存在することの確認や、現在の地球の大気と著しい違いが生じた原因を探るために、金星の大気からどのようなものにまたどのくらい、外の空間に大気を構成する粒子が逃げ出しているかを調べる予定です。

また、探査機 Planet-Bが、今現在、火星到着を目指して飛行を続けており、小惑星のサンプルリターンを目的とするMuses-C衛星は2002年に打ち上げられる予定です。さらに、月探査を目的とする Lunar-A衛星やSELENE衛星などが次々と打ち上げられ、また、水星探査衛星をヨーロッパと協力して打ち上げることも計画されています。

科学衛星による惑星や月の探査が本格的に始まろうとしています。



左：Planet-B

右上：Muses-C

右下：Planet-C

資料提供：宇宙科学研究所

「見えない」宇宙を見る

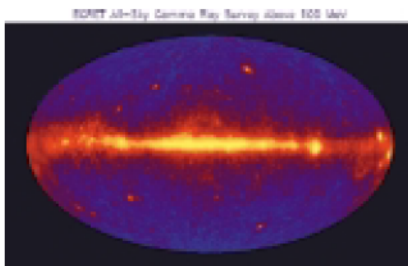
宇宙空間は「真空＝何もない」と思われがちです。

しかし、科学の目で見てみると、宇宙空間は「エネルギー」に満ちあふれた空間なのです。

いったい何があるのでしょうか？そしてそれはどこから来るのでしょうか？

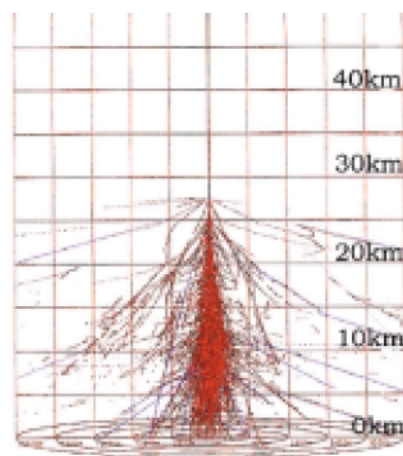
高エネルギー宇宙

下の写真は米国のComptonガンマ線衛星が捉えた銀河面からの1億電子ボルトガンマ線です。宇宙線が星間ガスと衝突して発生したガンマ線の放射と考えられ、銀河に宇宙線が満ちていることがわかります。



写真提供：NASA

宇宙線は宇宙からふりそそぐ高エネルギーイオンであり、10の20乗電子ボルトという、途方もないエネルギーにまで達します。大気と衝突して、いくつもの粒子を生成した電磁シャワーをつくり、地上に多くの粒子を降させます。

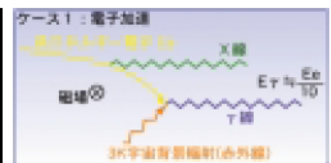
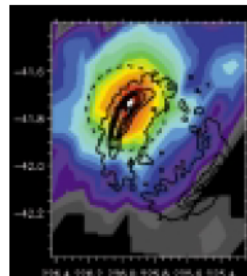
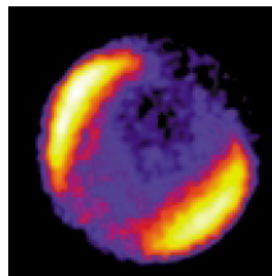


宇宙線が大気と衝突して生成される電磁シャワーの計算機シミュレーション

宇宙線を作る巨大加速器天体

宇宙線起源の天体は100年近く謎でした。最近、日本のX線天文衛星「あすか」が、超新星残骸SN1006から超高エネルギーに加速された電子が作るシンクロトロンX線（左図）を発見、さらに同時に生成されと考えられる超高エネルギーガンマ線（10兆電子ボルト以上）を地上の超高エネルギーガ

ンマ線望遠鏡（CANGAROO 日豪共同実験）が検出（中図）に成功、宇宙線起源天体と考えられる具体的な天体が初めて観測されたことになり、大きな反響を呼びました。



左：SN1006のシンクロトロンX線像

中：宇宙線起源天体

右：X線、γ線の発生のしくみ

宇宙線をいかにして捉えるか？

X線、ガンマ線は大気に吸収されるので、衛星観測が必要です。ただし100億電子ボルト以上になると、そのフラックスが極端に少なくなります。そのため右図のように大気を検出器と

して、高エネルギー粒子と大気との衝突でできるシャワーからの前方へのビーム状のチェレンコフ光を地上の望遠鏡で捉えることで、ガンマ線、宇宙線を測定します。

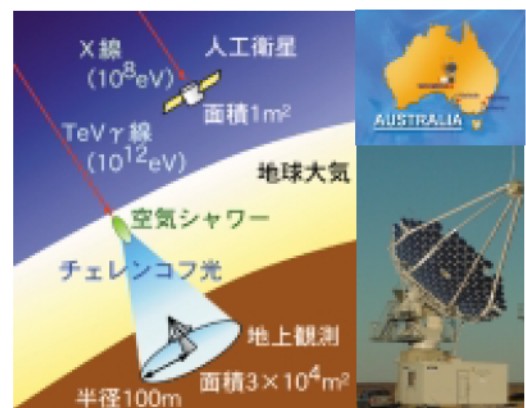


資料提供：宇宙科学研究所

左：X線観測衛星

右：X線、ガンマ線の観測施設

光が地上で広がって大きな面積の装置と同等になり、フラックスの弱い超高エネルギーガンマ線を捕らえることができます。右図はオーストラリアに最近完成したガンマ線望遠鏡です。



シミュレーション科学

科学者は様々な科学現象をつぶさに観察し、理論体系化してきました。

そして現在、この理論体系をコンピュータに入力することで、今まで肉眼では見ることはできなかった「その瞬間」を再現することが可能になりました。

スーパーコンピュータによる科学の創造

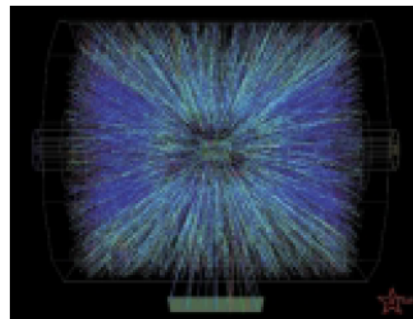
1990年代、パーソナルコンピュータの性能は格段に向上し、80年代のスーパーコンピュータをしのぐに至りました。さらにインターネットの出現はコンピュータを大衆化するとともに、世界中のコンピュータがインターネットを介してつながるようになりました。そのような技術の中から数千以上の計算機をひとつにする並列計算技術が急速に進歩し、従来不可能であった非常に多数の構成粒子の個々の運動から大きな全体をシミュレーションすることが可能になりました。

これにより理論式としてしか表現できなかった世界が可視化され、検証不可能と思われていた理論分野が実証可能になり、シミュレーション科学がひとつの科学分野として認知されるようになりました。

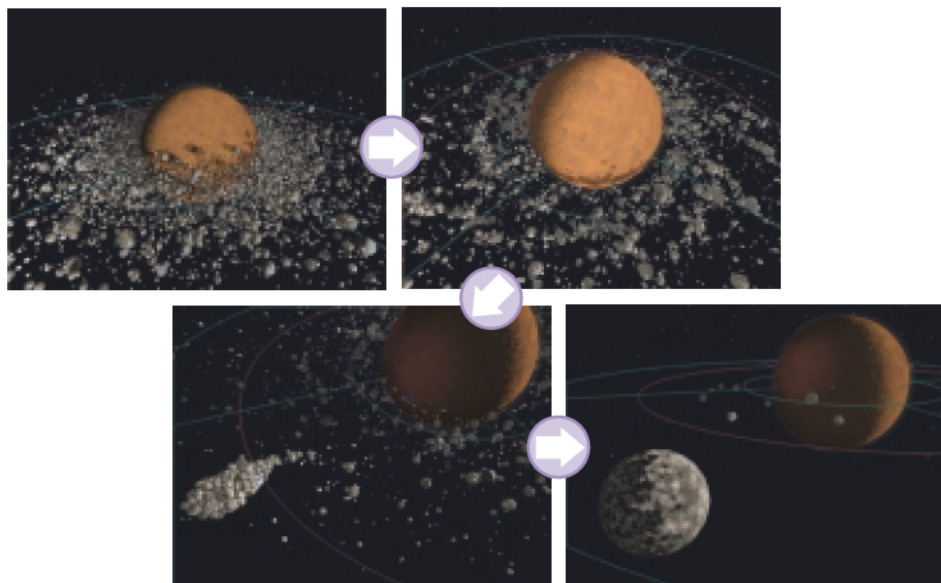
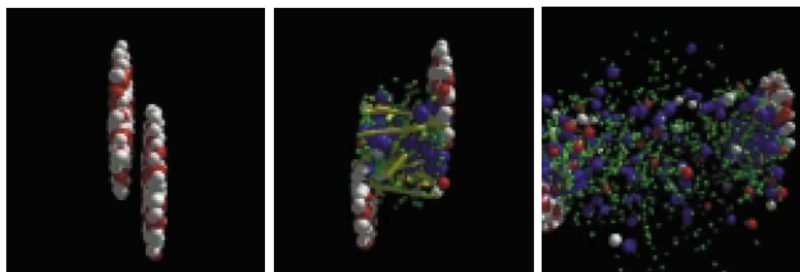
粒子の生成反応を見る

下の3点の写真は、金の原子核同士を200兆電子ボルトのエネルギーで正面衝突させ、反応の時間変化を追いかけたコンピュータシミュレーションです。最近ではコンピュータの進歩で、このようなたくさんの粒子の生成反応を計算することができるようになりました。静止している時は球形をしている原子核が、非常に高速で運動しているため特殊相対論の効果で収縮して板状に見えています。また非常にエネルギーが高く大量の素粒子が生み出される様子が手に取るようにわかります。

上の写真は、実際の金の原子核の200兆電子ボルトでの正面衝突の様子です。シミュレーションの予想どおり大量の粒子が飛び出しているのがわかります。このような反応では、宇宙が



生まれてから10のマイナス5乗秒というごく短い時間後の状態に相当する2兆度という超高温の状態をつくり出すことができると考えられています。この図のような反応結果を解析することによって、宇宙の初期状態に存在していた物質の状態を理解しようとする研究が進められています。



資料提供：国立天文台

月の誕生を見る

月がなぜあるか、実はこれも最近まで全くの謎でした。しかし、地球に衝突した惑星の破片と地球重力との相互作用をシミュレーションすることで、自然に現在の月の軌道、周期、重量などほとんどの物理量を再現することに成功し、惑星衝突説が最有力になってきました。左の図は、衝突からたった一ヶ月で現在の月ができた様子を示すシミュレーション画像です。



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。

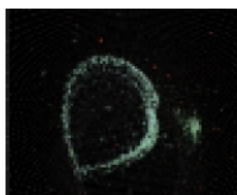
謎の素粒子「ニュートリノ」

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ません。

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ないでいましたが、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。



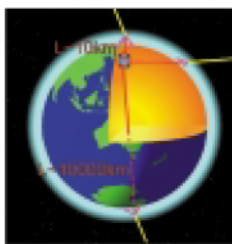
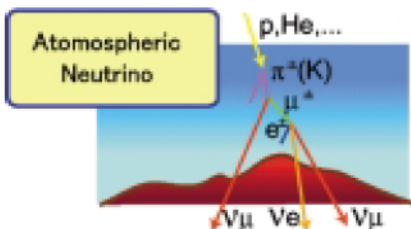
写真提供：東大宇宙線研究所

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

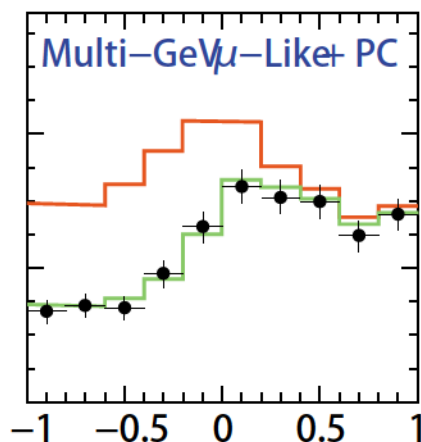
ニュートリノ振動が起こると、発生時と異なる成分比でニュートリノが観測にかかるため、ある種のニュートリノは減少し、別の種類のニュートリノは増加する現象が起こります。

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。

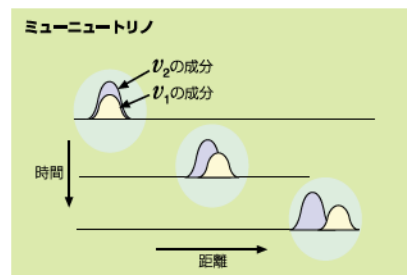
これはニュートリノ振動が起こっている場合の予想（右図：緑線）と非常に良く一致します。また2001年にはスーパーカミオカンデとカナダのSNO実験の観測から太陽から来るニュートリノもニュートリノ振動で減少していることが判明しました。

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

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

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

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。



資料提供：高エネルギー加速器研究機構

粒子・反粒子の謎

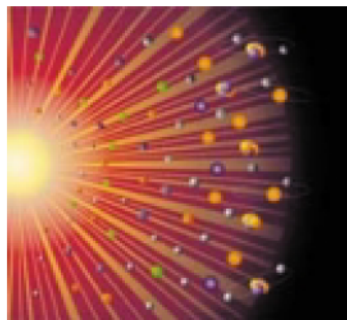
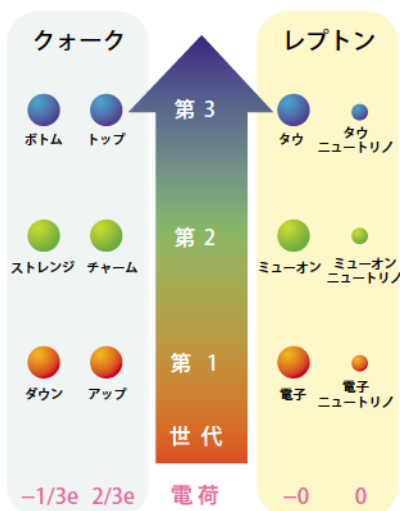
物質を細分化していった最後にたどり着く究極の粒子、それが素粒子です。

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

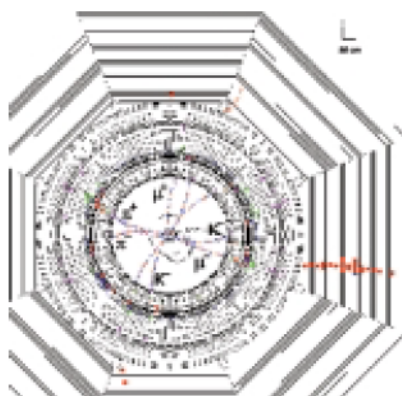
このページの写真・資料提供：高エネルギー加速器研究機構

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

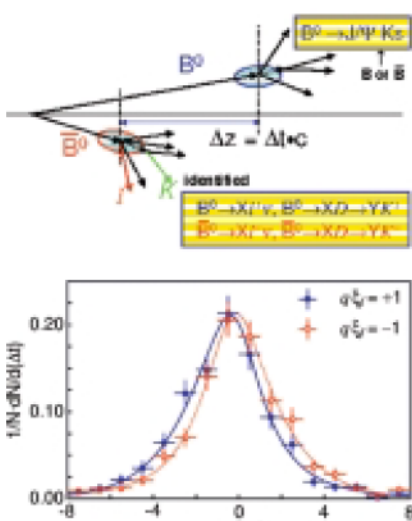
大量に生成されるB中間子を観測するための素粒子反応検出器、Belle（下写真）が建設されました。この検出器はB中間子が崩壊した地点を数十μmの精度で測定します。Belle検出器では右図のようにB中間子の崩壊が観測されます。



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」原子核の他にも、様々なタイプの存在が明らかになりつつあります。

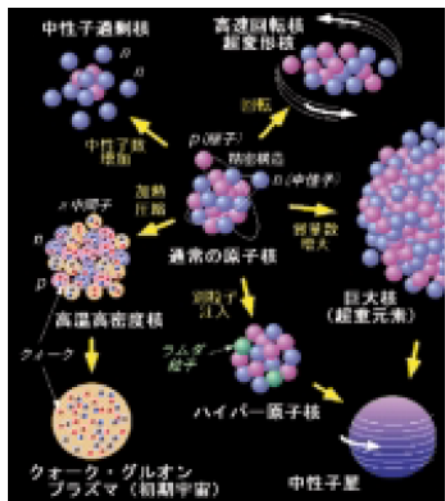
物質の基本的な要素でさえ、まだまだ知られていないことがたくさんあるのです。

新しいタイプの原子核

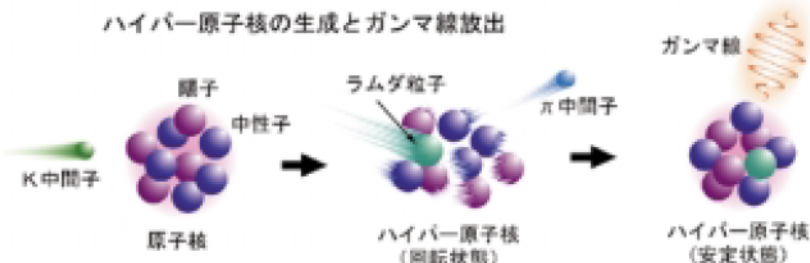
原子核は物質の基本要素です。陽子と中性子が集まってできた原子核が、まわりに電子をまわって原子となり、物質を形作っています。現在、約千種類の原子核が知られていますが、陽子や中性子がどういう力で結合してなぜこのような原子核になるのか、初期宇宙では物質はどういう姿で、そこからどのようにして原子核が作られてきた

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

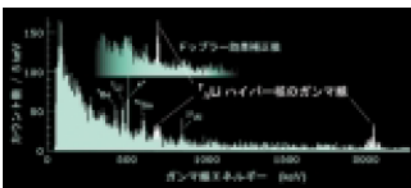
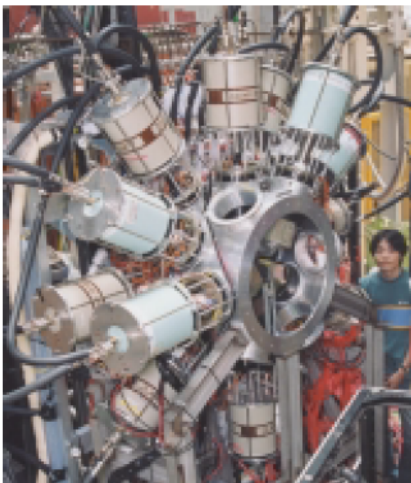


ハイパー原子核

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

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。



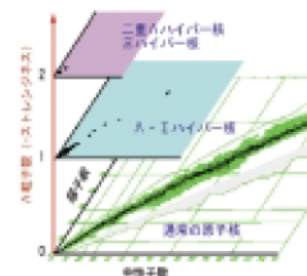
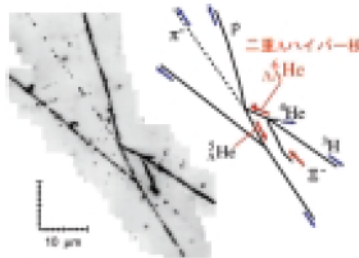
ハイパー原子核のガンマ線の検出装置と実験で得られたスペクトル

拡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

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。

物理



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 (μ)

π 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 (ν) 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。

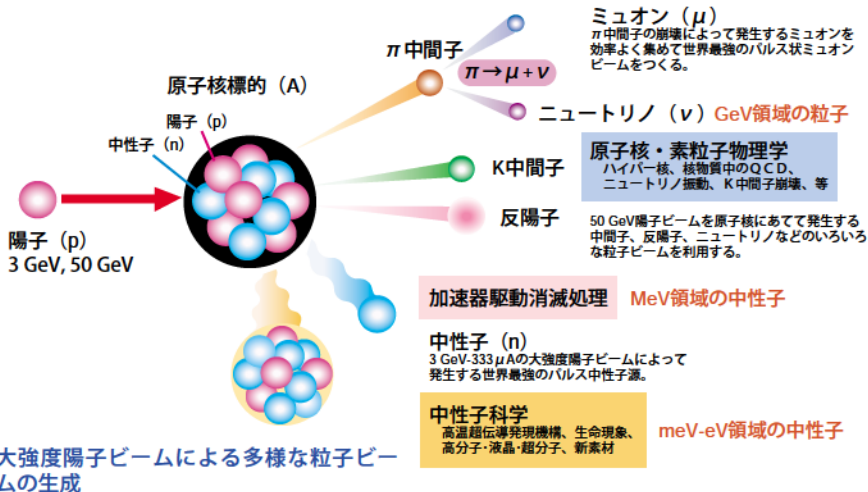
大強度陽子加速器施設

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索する物質・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。

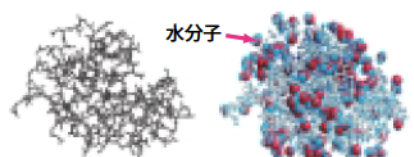


大強度陽子ビームによる多様な粒子ビームの生成

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

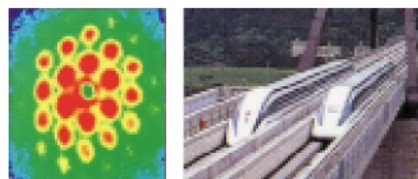
(C, N, O, S原子からなる骨組み構成)

中性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) と超伝導技術を応用し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。

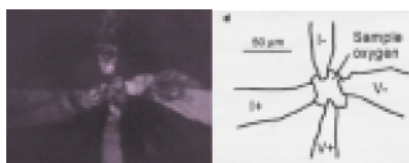
最近、これまでになかった新しい物質や新しい性質の超伝導体が次々と見つかりました。特に日本の大学での研究から多くの発見が生まれています。

2ホウ化マグネシウムの高温超伝導

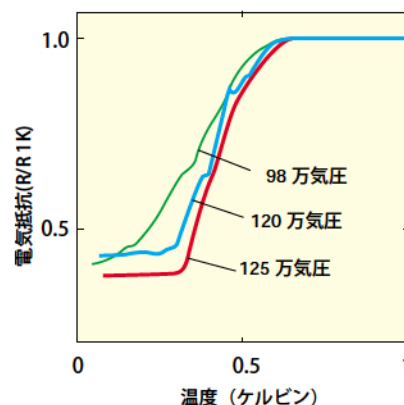
マグネシウムとホウ素が1対2の割合で結合した2ホウ化マグネシウムが、金属化合物としては従来の転移温度の記録を一気に16ケルビンも塗り替える39ケルビンで超伝導になることがわかりました。この物質は研究用の試薬として市販されていましたが、それが実

酸素の超伝導

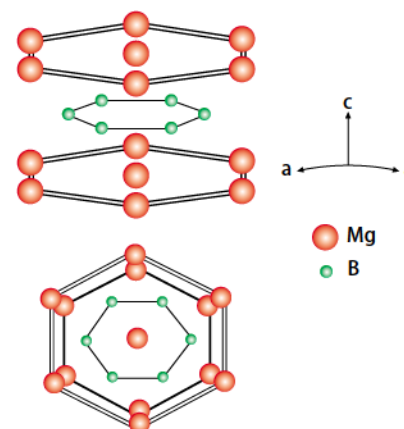
酸素は空気中に窒素について多く含まれ、身近な元素です。酸素に100万気圧もの超高压をかけて冷やしていくと、絶対温度で0.6ケルビン以下では超伝導になることが発見されました。この他、超高压力のもとでは、鉄も強磁性を失ったあと、超伝導になることがわかりました。



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

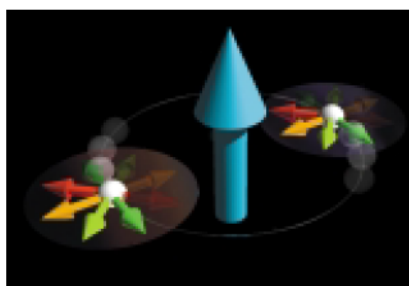


2ホウ化マグネシウムの結晶構造

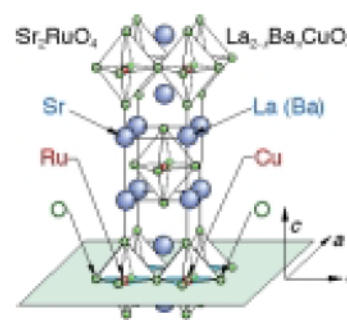
スピン・トリプレット超伝導

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・左向きの自旋に相当するような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、互いに逆向きの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

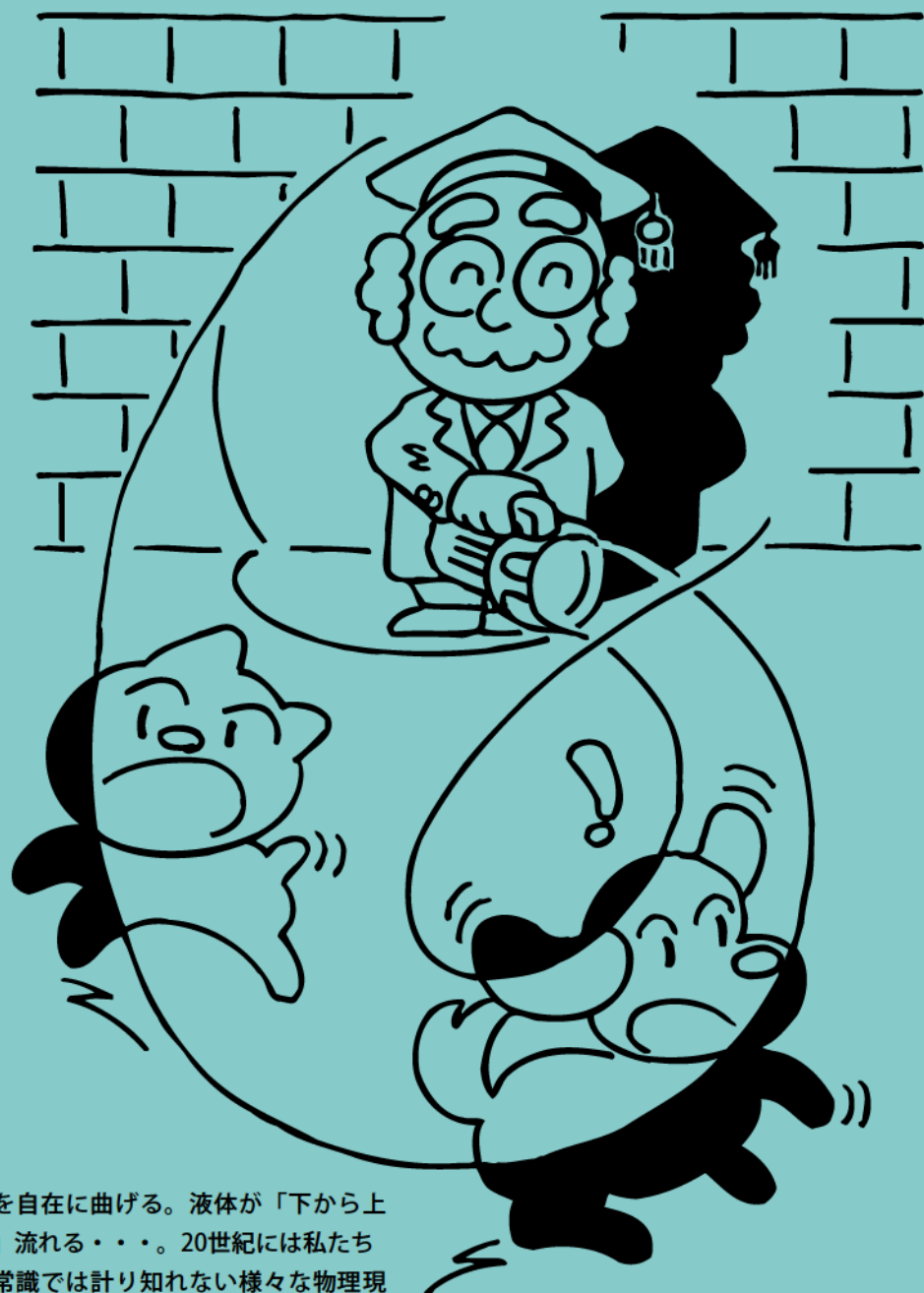


運動していることがわかりました。一方向に公転運動していることを上向きの大きな矢印で表現しています。



新しい物理学

量子力学



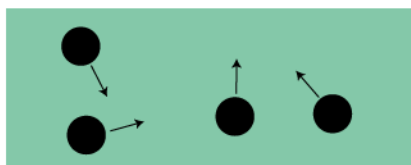
光を自在に曲げる。液体が「下から上へ」流れる……。20世紀には私たちの常識では計り知れない様々な物理現象が発明・発見されました。それは、木から落ちるリンゴを見て万有引力を発見したニュートンによる「古典物理学」とは全く異なる「新しい」物理学なのです。

「量子力学」といわれるこの新しい物理学の研究はまだ始まったばかり。無限の可能性を秘めた分野でもあります。

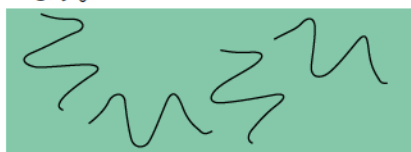
レーザー冷却原子のボース・アインシュタイン凝縮：巨視的量子現象の本質に迫る

レーザー冷却法を用いて、希薄原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体を作り出すことができますようになりました。これを用いて巨視的量子現象が観測でき、量子力学の本質に迫る興味深い研究が展開されています。

ボース・アインシュタイン凝縮とは？



高温：原子はランダムに熱運動をしています。



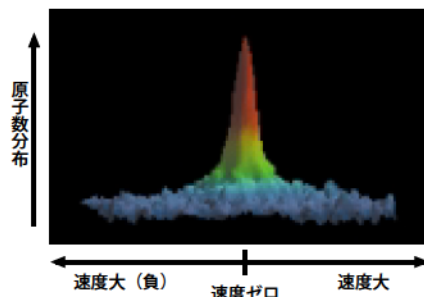
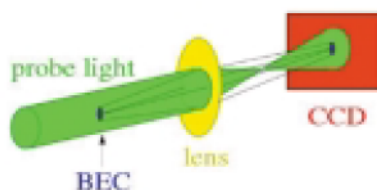
低温：レーザー冷却法により低温になった原子では、波動性が顕著に表れます。



極低温：さらに冷却されるとお互いの波が重なり合い、純粋に量子力学的な相転移が起きます。これがボース・アインシュタイン凝縮(BEC)です。集団となって巨視的な量子現象を起こします。

ボース・アインシュタイン凝縮の検出

ボース凝縮体にレーザー光を照射し、それをCCDカメラを用いて観察することで、凝縮体がどのような空間分布をしているかを測定することができます。



飛行時間法と組み合わせることで凝縮体がどのような速度分布をしているかを知ることができます。上図の中央部分の非常に低速度(低温)の集団がボース凝縮体です。

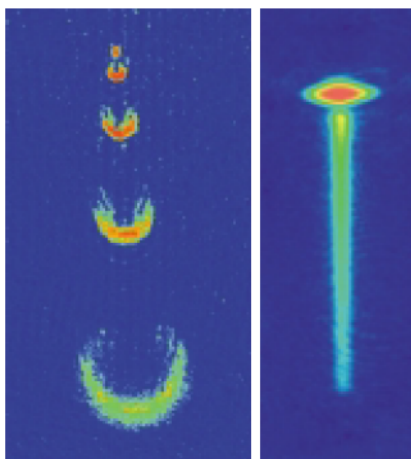
ボース・アインシュタイン凝縮を用いた様々な研究

レーザー冷却原子のボース凝縮体は、レーザー光や磁場を用いて多様に操作することが可能です。例えば、磁場によって閉じ込めていた凝縮体を、自由空間に開放することができ、これを原子レーザーと呼んでいます。これは、原子の波がレーザー光のように位相のそろった状態にあり、原子リソグラフィーや原子を用いた干渉計など様々な応用が期待されています。

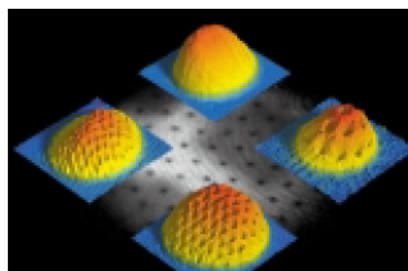
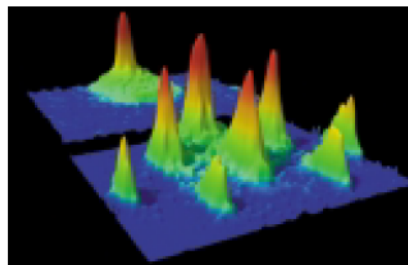
ます。また光との相互作用においては、光の波の増幅と同様に、物質波が増幅される効果が興味深い形で現れます(超放射)。さらに、原子間相互作用を斥力から引力にスイッチし、凝縮体が崩壊する現象(BOSENOVA)や格子状に並んだ多数の量子渦生成など基礎から応用にいたる様々な分野で精力的に研究が進められています。

レーザー冷却原子のボース・アインシュタイン凝縮の成功

中性原子気体をレーザー光を用いて数マイクロケルビン程度の極低温に冷却することが可能になりました。このレーザー冷却法などを用いて、アルカリ原子や準安定状態のヘリウム原子、水素原子のBECが達成されています。日本でも数グループがBECに成功しており、活発に研究が行われています。



上：原子レーザー
右上：超放射
右下：量子渦



フォトニック結晶によって「光子」を操る

光は非常に速く、直進し、制御できないものと思われていることでしょう。

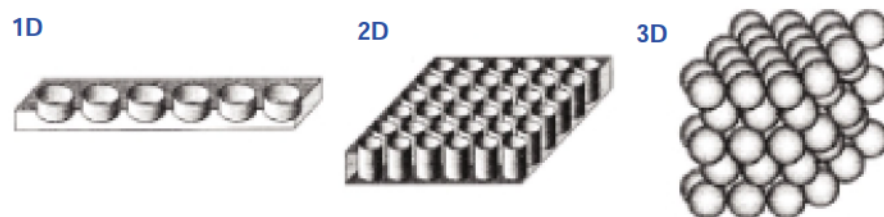
しかし今、光の速度を変え、物質中を思うままに曲げ、自在にあやつることが可能になりつつあります。そしてその先には「量子コンピュータ」という夢の光回路が見えてきました。

フォトニック結晶とは

真空中では光子は光速で伝播し、物質中では屈折率の分だけ光速は遅くなります。通常、物質境界面での屈折現象やプリズムは物質の屈折率の違いによって説明できます。ところがフォトニック結晶と呼ばれる物質中では、光速を車の速度ぐらいに遅くしたり、高効率に光子を閉じ込めたり、自由自在に光子を操れる可能性のあることがわかってきました。

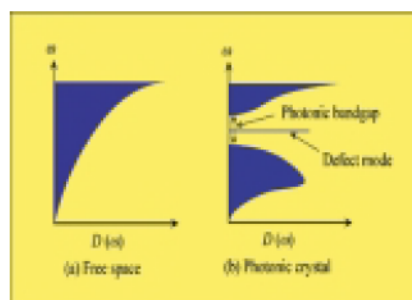
フォトニック結晶は複数の誘電体を光の波長程度の周期で交互に積層した構造物であり、積層の次元により1次元(1D)、2次元(2D)、3次元(3D)

フォトニック結晶 (Photonic crystal) と呼ばれます。3Dでは、通常の結晶のように、面心立方格子やダイヤモンド格子等の構造が作成されています。



フォトニック結晶のしくみ

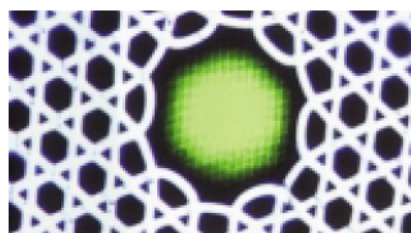
フォトニック結晶の大きな特徴の一つにフォトニックギャップ (Photonic bandgap) の存在があげられます。自由空間 (Free space) では、光の固有モードの状態密度 $D(\omega)$ は光の角周波数を ω に関して下図のように ω^2 の依存性がありますが、ある構造のフォトニック結晶中の状態密度は下図のようになり、光の固有モードの存在しない周波数領域が生じることがわかります。これは、原子が規則的に配列した通常の結晶中において、電子のエネルギー準位にバンドギャップが生じる場合があるのと同様に波の回折・干渉現象の現れとして理解されます。



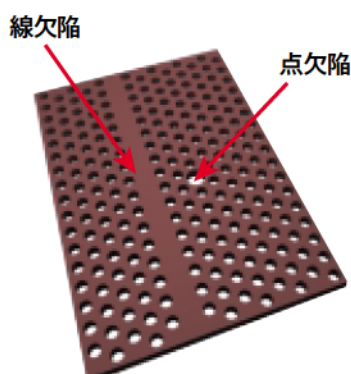
フォトニック結晶の中での不思議な現象

フォトニック結晶中では自由空間や通常の物質中では実現できない、各種の新現象が期待されます。例えば、フォトニックバンドギャップの周波数領域に発光波長を持つような原子をフォトニック結晶中に入れておけば、光の自然放出を制御できる可能性があります。また、光の異常な伝播も期待されることから、異常に遅い光伝播やスーパープリズムなどの新しい光学現象が次々と発見されています。

また、下図のように周期性の乱れ(欠陥)を導入することで、非常に光電場強度が強い領域をつくることが可能になるために、同じ場所を光が巡回しつづける光の局在現象や高効率な非線形光学現象が観測されています。そういった非線形光学現象の応用例とし



て上図にフォトニック結晶と光ファイバーを組み合わせた新しいデバイス(フォトニックファイバー)を示しています。白い部分はガラス、黒い部分は物質が存在していない穴を表しています。真ん中の大きい穴の上下方向に光が伝播しますが、フォトニック結晶の性質から弱い光でも非線形な相互作用が生じて、赤色の振動数の光子がエネルギーのずっと大きい緑や青の光子に変換されて、結果として白色光が観測されています。



フォトニック結晶の展開

フォトニック結晶には、下記のような物理学の基礎分野への応用も考えられています。

- 異常ラムシフトなどの電磁量子力学
- 高効率非線形光学現象
- 量子コンピュータ
- 超光速の有無の検証実験

超流動

通常の物質は低温で固化しますが、ヘリウムのように軽い原子は低温で量子効果が顕著に現れ、常圧では絶対零度まで固化しません。さらに絶対零度近くでは超伝導に似た「超流動状態」になります。そこは量子力学が支配する世界です。

「上」に流れる不思議な物質

ヘリウム4は2ケルビン程度で超流動状態になります。超流動状態は粘性がなく、どのような狭い隙間も通ります。これは超伝導で電気抵抗がないのと似ています。さらに壁をはい上がるなど、奇妙な性質を示します。これらは全て量子力学で説明されます。

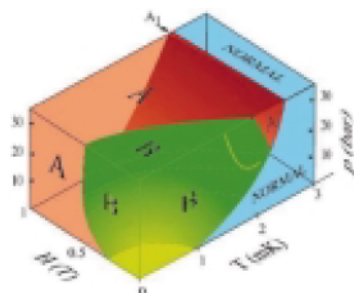


超流動ヘリウム4の噴水効果

超流動ヘリウム3の渦を見る

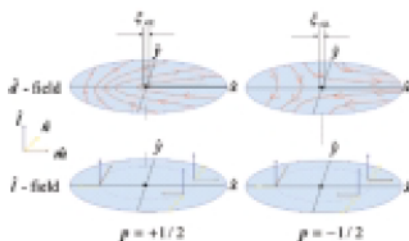
ヘリウム4の同位元素のヘリウム3も1/400 ケルビンという超低温度で超流動になります。超流動ヘリウム3の運動も量子力学で支配されます。そこにはできる渦は渦の強さ（循環と言います）がとびとびの値しかとれず、量子渦と呼ばれます。量子渦には2個がペアに

なったものなど、いろいろなタイプがあります。この量子渦を研究するには実験装置自体を回転させないといけません。現在、超低温で測定できる装置は東京大学物性研究所にしかありません。そこでは超流動ヘリウム3の量子渦の構造を調べています。

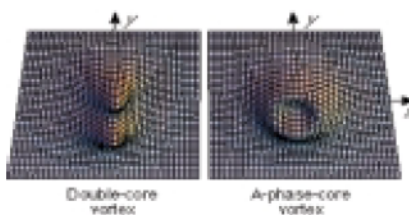


超流動ヘリウム3の相図

超低温で発現する超流動ヘリウム3には複数の相が存在します。相が違えばそこにできる渦の構造も違ってきます。

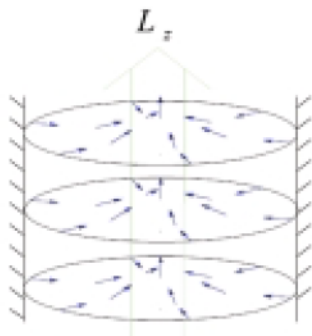


超流動ヘリウム3のA相を狭い平行平板に入れた時にできることが期待されている渦

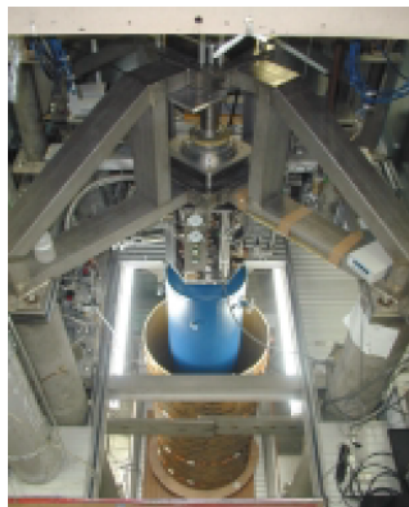


超流動ヘリウム3にできるとされている渦の計算結果

2つの渦が結合したもの(左)や芯のない渦(右)があります。



超流動ヘリウム3A相にできると期待されている芯のない Mermin-Hoの渦



東京大学物性研究所にある回転クライオスタット

1秒間に1回転することができます。データを測定する機器も同時に回転させます。