

高エネルギー加速器研究機構 一般公開講座

講演タイトル：『ニュートリノで探る宇宙』

講演日2002年9月1日

講師：中畑 雅行氏（東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設在籍）

末尾に参考資料がついています。

<参照：【参考1】>等の個所はそちらをご覧ください。内容は「高エネルギー加速器研究所サイト」、「東京大学宇宙線研究所サイト」等によります。

司会

高エネルギー加速器研究機構の一般公開をご覧頂きましてありがとうございます。当研究所は科学の広い分野の基礎的な部分に深く関係した様々な研究をしています。それをまとめると宇宙、物質、生命ということになります。今回は宇宙のお話です。当研究所と東京大学宇宙線研究所は共同でニュートリノの実験を行っています。

今日は、そのニュートリノが宇宙の謎を解く重要な鍵を我々に与えてくれるというお話を、東京大学宇宙線研究所、神岡宇宙素粒子研究施設の中畑雅行先生からお伺いします。最後に質疑応答の時間があります。素朴な質問がとても重要です。私が今まで聞いた中で一番印象に残った質問は、デービスという研究所で「ニュートリノというのはおいしいのですか。」と聞いたジャーナリストがいらっしまったことです。最高の質問でした。ぜひ素朴に質問をしてください。

講演：講師 中畑 雅行先生

今日は一般公開のために宇宙について話をして欲しいと言われていています。私自身は天文学者ではなくニュートリノを研究している者です。宇宙と深く関係する素粒子という学問を研究しています。この筑波の地から神岡に向けてニュートリノを飛ばす実験にも参加しています。今日は素粒子に関係した話の中で、ニュートリノを使った観測方法から見えてきた宇宙のことをお話ししたいと思います。

まず最初に、ニュートリノというのはどんな素粒子なのかについてです。ニュートリノは宇宙に満ち満ちています。ですから先ほどの質問にお答えするならば、味わおうと思えばいつでも味わえるのです。

岐阜県の神岡町にある「大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置スーパーカミオカンデ」では5年間実験を行ってきました。そこにおいて「ニュートリノには重さがある」という世界的にも非常に重要な発見がなされました。

実験には大気ニュートリノ、太陽ニュートリノ、人工ニュートリノの3種類を使用しました。<参照：【参考1】>

人工ニュートリノというのは、筑波から神岡へ人工的に作ったニュートリノを

飛ばす実験、「K2K実験」に使われたニュートリノのことです。筑波の「高エネルギー加速器研究機構」と「神岡」の頭文字をとって「K to K」。これを「K2K実験」と呼んでいます。この実験によりニュートリノは重さを持っていることがわかりました。〈参照：【参考2】〉

本日の最後には超新星という星の現象についてお話しますが、ニュートリノは我々生命自身とかなり深く関係しているのです。

まず素粒子としてのニュートリノについてです。素粒子とは何かということから始めます。ギリシャの昔から、物はどんどん細かくしていくと何からできているのだろうという非常に素朴な疑問がありました。水の分子は酸素と水素からできており、酸素の中には原子核と電子があり、原子核の中には陽子と中性子があります。最近の詳しい研究では陽子や中性子の中にはクォークというものが入っていると考えられています。このクォークは陽子の中に3つ入っており、中性子の中にも3つ入っています。このようにどんどん分割していくと、現在の理論および実験ではこのクォークというもの、それから原子核の周りを回っている電子、これらが素粒子であると考えられています。素粒子というのは、それより細かく分割できない物質のことです。

現在知られている素粒子は全部で12個です。その内の6個はクォークと呼ばれています。陽子を作っているのはダウンクォーク、アップクォークですが、その仲間です。大型の加速器の実験により6個みつかりました。当、高エネルギー加速器研究機構でもクォークの種類の一つ、ボトムクォークを作る施設があり詳しく研究されています。その施設は頭文字をとって「ビーファクトリー」と呼ばれています。素粒子12個のうち残り6個はレプトンです。電子の仲間電子と似たような性質を持っているのですが、質量が少しずつ重くなっています。その内3つは電子、ミュー粒子、タウ粒子です。そして残りの3つがそれぞれの粒子とペアの電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノです。〈参照：【参考3】〉

ニュートリノが何かということ、電子は負の電化を持っていますが、そこから電気をはぎ取った物質、それがニュートリノだと思ってください。

素粒子の分類についてですが、ここで非常に重要なのが、そこにどうい力が働くかということです。現在確認されている力は「強い力、弱い力、電磁気力、重力」の4種類です。強い力というのは陽子の中でクォークを結び付けている力です。具体的にはグルオンと呼ばれる粒子が交換されて力がはたらきます。弱い力というのは馴染みが薄いかもしれませんが、原子核のベータ崩壊という現象があります。これは中性子が陽子に変わったり、陽子が中性子に変わるなど、原子核の中での現象のことです。これを司る力が弱い力です。名前の通り弱い力ですので頻度の低い現象です。次に電磁気力。これは電気を持ったものを引く力です。そして重力。この4種類です。

素粒子と、それに働く力についてですが、6種類あるクォークの間には強い力が働いています。それからレプトンのうちの電子の仲間、これらには電磁気力が働きます。ニュートリノは電気をはぎ取った電子ですから電磁気力も働き

ません。強い力も当然働かないので、結局弱い力だけが働きます。ニュートリノには弱い力しか働かないということから、ほとんど物を素通りしてしまう、非常に観測しにくい粒子です。

このようなニュートリノが宇宙にたくさんあるという話をします。その前に宇宙の歴史についてお話します。百数十億年前に宇宙はビッグバンで生まれました。このときの状態は、ほとんど素粒子がプラズマ状態でぐちゃぐちゃでものすごいものでした。この研究所で行なわれている研究、さらにそれを拡張するJHF（Japan Hadron Facility：大強度陽子加速器施設）などでも、こういった宇宙の最初の瞬間をとらえようという研究が行なわれています。

宇宙が生まれた後、宇宙には非常に高速度で膨張した時期があったらしいことがわかっています。宇宙はどちらを見ても同じように一様に見えます。一様な宇宙を作るにはインフレーションという時期があったと考えられています。この宇宙の腫れ上がりによって電子が原子核にまとわりつくようになり、宇宙の中に光が通れるようになりました。そして数十億年経ち銀河が形成され、その百億年後の現在があるのです。

この間の過程を温度の分布で見えます。宇宙が生まれた瞬間はだいたい10の30乗という高温状態でした。そして10のマイナス33乗秒後というとても短い時間の後、それは温度的にいうと10の20乗というときに宇宙の急激な膨張が起きたと思われます。そして宇宙が生まれて10のマイナス3乗秒後、1ミリ秒、つまり0.001秒後くらいにやっと素粒子のクォークから陽子と中性子が形成されたと考えられています。そして、よく「宇宙が生まれて3分後」という話がありますが、その「3分後」くらいに水素やヘリウムなどのいろいろな元素が生まれたと考えられています。

宇宙の腫れ上がりというのは30万年ほど経った後にやっと行なわれたのです。それにより宇宙の中を光が自由に通れるようになりました。そしてそのあと温度が下がり、銀河や星が形成され、太陽系が形成され、現在に至るのです。このように宇宙のビッグバンによっていろいろな粒子が生まれたのです。

宇宙は、銀河系の外側にいけば真空状態です。太陽系でも、地球を出ればほとんど真空状態です。宇宙にあるいろいろな物質を全部平均してそれを均等に振りまいたとします。陽子や電子は2メートルの立方体の箱の中にだいたい1個ずつの密度です。それに比べてニュートリノは10億個です。ニュートリノの種類は3種類あるのでその3倍です。もう少し小さい単位で見ますと1センチ立方体に100個あり、3種類なので300個です。

では、スーパーカミオカンデで捉えたニュートリノの話に移ります。このスーパーカミオカンデというのはニュートリノを捉える非常に大きな観測装置です。岐阜県神岡町の鉱山の中、地中深く1,000メートルのところにあります。高さ約42メートル、直径約40メートル、体積が5万トンの巨大な水タンクです。建設当初は11,146本の増倍管が取り付けられていました。非常に捉えにくい物質ですのでこれほど巨大な施設が必要なのです。1996年の4月に実験を開

始し、今までいろいろな成果を上げてきましたが、まず1998年6月に大気ニュートリノを使い、ニュートリノは振動するという現象を発見しました。次に2001年の6月、太陽ニュートリノを使いやはりニュートリノは振動する、つまり質量を持つということを発見しました。2002年の5月には筑波から人工的なニュートリノを飛ばすことにより振動を確認する実験が行なわれています。このように世界的な成果を数々上げてきています。

実は2001年の11月12日、この観測装置内の増倍管11,146本のうち6割程度にあたる6,777本が割れてしまうという大事故が発生しました。まずタンクの底にある増倍管が爆縮し、その非常に大きなエネルギーが隣の増倍管を破壊し、また隣の増倍管を破壊するという連鎖反応によります。その結果、約5秒間に7,000本近い増倍管が壊れてしまうという大事故になりました。現在装置を再建する作業を行なっていますが、残った増倍管は5000本程しかありません。そこで増倍管を1本おきに取り付けることにしました。元々は70センチ間隔だったのを、1本おきに抜いて密度を半分にする作業を現在行なっています。さらにたとえ1本が割れたとしても衝撃波を周りに出さない、周りから受け付けられない、衝撃波防止ケースを使用することにしました。グラスファイバーと13ミリのアクリルの組み合わせにより作られています。これをつけることにより、2度と大事故を起こさないようになります。現在作業は順調に進んでいて2002年9月末までには完了し、超純水をタンクに満たしていく予定です。そして12月には実験を再開することができると思います。ただし、元の47%の増倍管の数しかないのでエネルギーの低い現象はなかなか掴みにくいと思いますが、筑波から神岡へ飛ばすような高いエネルギーの現象は問題なく掴まえます。そのような実験装置で今後引き続いて実験を行なっていきます。

実験の細かい話に入ります。まずスーパーカミオカンデとはどういう実験装置かについてです。スーパーカミオカンデはチェレンコフ光を捉えることにより粒子を検出する観測装置です。超音速の旅客機が空を飛ぶと、ある角度に向け衝撃波が発生します。それと同じ現象が光でも起きます。水中の光速度（通常の光速度を水の屈折率1.33で割った速度。通常の約7割くらいの速度）よりも速く粒子が走ると特殊な光が出ます。これをチェレンコフ光といいます。角度が45度くらいのリング状の光です。例えばニュートリノが飛んできたとします。それに反応して電気をもつ粒子が発生するとチェレンコフ光が出て、この装置でパターンとして観測できるのです。たくさんの増倍管がこのパターンを捉えます。そのパターンからこの粒子がどこで発生してどちらへ飛んで行ったのかがわかります。ニュートリノが非常に反応しにくいことから、この実験は体積が命なのです。体積が大きければ大きいほどたくさん現象をつかまえることができます。そのために直径42メートル、高さ40メートルという巨大な装置があるのです。

我々は観測の初期の頃から大気ニュートリノを見てきました。宇宙からは一次宇宙線というものが降ってきます。陽子やヘリウムがそれです。こうした一次宇宙線は大気中で反応し、パイ中間子とケイ中間子を生みます。これらはさ

らに崩壊してパイ中間子はミュー粒子とミューニュートリノになり、更に電子とミューニュートリノ、電子ニュートリノに変わります。これはよく知られているプロセスで、このような反応は加速器の研究施設でも非常に詳しく研究されています。先ほども話しましたように宇宙というのはどちらを見ても一樣なので、宇宙線は上からも下からも、どちらからも一樣に降ってきます。ですから当然ニュートリノも一樣に降ってくるはずなのですが、スーパーカミオカンデではそれが実は一樣ではなかったことを発見しました。

スーパーカミオカンデで捉えたニュートリノ現象を角度分布グラフにしてみました。下、つまり地球の裏側から来るニュートリノと空から来るニュートリノをグラフ化したものです。理論的にいえば上下対称的に上からも下からもニュートリノが来るはずですので、グラフには上下平均的な分布が期待されます。しかし実際には下から上がって来るニュートリノは期待値の約半分に減っていることがわかりました。これは地球の裏側から来るニュートリノが地球を通る間に振動して、種類を変えてしまったと考えられています。大気ニュートリノ振動というのは電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノ、この三つのうちのタウニュートリノとミューニュートリノ、この二つの変換、この間で振動している現象であることがわかりました。

次に太陽ニュートリノの話です。太陽というのは核融合反応で燃えています。具体的には4個の水素を原料として、ヘリウム原子核、2個の陽電子、2個の電子ニュートリノを作る反応が太陽の中で起きています。ニュートリノは太陽の中で大量に発生しています。皆さんの周りにも太陽からたくさん降ってきています。1平方センチメートルの中に1秒間に660億個も降ってきているのです。太陽ニュートリノが観測装置の中の電子を弾き飛ばすことによりエネルギーの高い電子が出ます。この電子が走ることによりチェレンコフ光を作り、それを検出することでスーパーカミオカンデは太陽ニュートリノをつかまえるのです。一日あたりに観測される現象というのはたった14個くらいです。1秒間に660億個も通りぬけているのですがなかなか反応してくれません。

これはスーパーカミオカンデで見た太陽です。

<映像：太陽が光って、周りにもやがかかった写真。これは太陽を中心として測定した写真なので、時間をかけて撮影しても太陽の位置は常に中央にある。

>

地下にあってもニュートリノを使えば太陽はよく見えるのです。

<映像：太陽が空を移動する様子を固定位置で観測した結果の写真。移動する太陽の軌跡を360度捉えてある。天球状の観測結果を軸を中心に三つ割りにして表している。丸い地球を世界地図にするとき、経度で二つ、三つ等に切り平面化して表現するのと同じ手法による。>

こちらは固定した天球座標計での太陽の軌跡です。このように太陽が動いていることをニュートリノを使えば地下から見ることができます。

最初に太陽ニュートリノを掴まえたのはディビスがアメリカのホームステークで行った実験です。ディビスが最初に結果を出したのは今から30年くらい前

なのですが、驚くべきことに、観測した強度が予想値の3分の1しかないという結果でした。その後スーパーカミオカンデの前身であるカミオカンデでの観測においても期待の約半分しかない、ガリウムを使った観測がロシアやイタリアで行なわれたのですがそこでも数が少ないという結果でした。どの観測においても太陽のモデルとニュートリノの実験結果が合わないという結果が出てきたのです。そしてやっと最近になりスーパーカミオカンデでの観測と、カナダのSNO実験施設での観測結果の比較からニュートリノが変化することが原因であることがわかったのです。昔のカミオカンデも現在のスーパーカミオカンデもタンクの中の水(H₂O)を使い電子の散乱を観測することによりニュートリノを見ているのですが、SNOでは重水(D₂O)を使用します。水を使用すると3種類のニュートリノの測定ができますが、重水を使うと電子ニュートリノのみの測定になります。もし電子ニュートリノが他のものに変化しているとすればスーパーカミオカンデよりもSNOでの電子ニュートリノの測定値のほうが少なくなるはずです。2001年にSNOが重水を使つての観測結果を発表したことにより、スーパーカミオカンデとSNOの差からニュートリノが他のものになるということが証明されました。以上のことから、太陽ニュートリノ振動というのは三つあるニュートリノのうちの電子ニュートリノとミューニュートリノが振動する現象ということがわかりました。

こうしたニュートリノ振動現象をきちんとした実験によって確実に証明しようとしたのがK2K実験です。先ほどの実験は自然界に存在するニュートリノを使って結果を出しましたが、自然界に存在するものというのは起源がよくわかっていない場合もあります。我々はニュートリノ振動が原因であると考えていますが、もしかしたらもっと別の理由があるかもしれない。そこで起源のはっきりした、意図的に作られたニュートリノを使って行なうのがK2K実験です。そのような確認作業を我々は「実験」と呼ぶのです。筑波の当施設、高エネルギー加速器研究機構より陽子シンクロトロンで作ったニュートリノを250キロ離れたスーパーカミオカンデに向けて飛ばします。この間にある北アルプスなどいろいろなところを通り抜けて行きます。この実験は1999年の4月に始まり約2年間データを取りました。

陽子加速器から出た陽子ビームをまず90度曲げて神岡の方向へ向ける必要があります。電気の力の働かないニュートリノになってしまつてからでは方向制御が不能になります。そこで陽子ビームのうちに神岡へ方向を向けるのです。その後高エネルギーの陽子がアルミニウムのターゲットに当たりパイ中間子を作ります。このパイ中間子がミューとニュートリノに崩壊します。崩壊させるための約200メートルのトンネルがあり、その先には前置検出器があります。これは筑波で生まれたニュートリノの状態を精密に求める装置です。そこにはいろいろな検出器があります。その一つに1,000トンの水が入った検出器もあります。このような装置により、筑波で発生した時点でのニュートリノの状態をはっきり把握したうえで、それが飛んで行った先のスーパーカミオカンデではどうなっているかを比較研究するのです。このK2K実験の意義は、ミュー

ニュートリノとタウニュートリノの振動を加速器を使って検証することにあります。1999年から2001年の6月まで2年間で取ったデータによるK2K実験によると、スーパーカミオカンデで観測されたニュートリノ現象の数は56個です。ニュートリノ振動がないとして期待される数が80個くらいですので、あきらかに少ない数です。これによりほぼ99パーセントの確率でニュートリノ振動というのは間違いないということが検証されています。まだデータの質がそれほどよくないのでスーパーカミオカンデが再建したのちにはいち早く更により良いデータを取っていかうと考えています。

このようにしてニュートリノ振動という現象を観察してきました。なぜニュートリノ振動が質量に結びつくかというのは難しいのですが、ニュートリノが変わりうるためには質量が必要だと思ってください。このニュートリノ振動がどのくらいの周期で振動するかは質量の値に対応するのですが、それによりニュートリノの質量のたいたいのところは見当がついてきています。クォークや電子というのはおおまかにいえば同じくらいの質量です。それに比べてニュートリノは何桁も小さいのです。6桁も7桁も小さく、質量はあるのだけれど非常に軽いことが最近わかってきています。

ここで、ニュートリノの質量は宇宙の進化に影響を与えるのかについてお話します。1立方センチメートルあたり陽子の数というのは宇宙の中に0.0000001個あります。それに対しニュートリノは1種類あたり、同じく1立方センチメートルの中に100個あります。3種類ですので3倍です。陽子の質量というのはゼロを9つ並べた数の電子ボルトです。電子ボルトとはエネルギーの単位です。最近の研究ではニュートリノの質量は0.05から2くらいではないかと思われています。そこから宇宙の中にどれくらいの粒子が質量を担っているかを計算しますと、陽子は1立方センチメートルの中に約100電子ボルトがあることになります。それに対しニュートリノは5から600くらいです。これも3種類分合計しています。それと比べるべき数として宇宙が収縮するために必要な臨界質量密度というのがあります。もし物質の密度が5,000電子ボルトより大きければ宇宙はやがて収縮すると考えられます。この数を調べてみますと、この関係ではニュートリノのほうが軽いことになります。ですので宇宙がニュートリノの重さにより収縮してしまう可能性はないようです。ただし宇宙には暗黒物質という他の物質もあり、それによって宇宙が収縮する可能性はあります。しかしニュートリノが宇宙の運命を決めていることはないようです。ただし陽子の質量密度とニュートリノの質量密度の類似点から見れば、宇宙、銀河、そういった星の進化においてはニュートリノは意味のあることを行なっているかもしれません。それは今後のいろいろな研究によりあきらかになっっていくと思われれます。

話題を変えます。超新星とよばれる星のある現象のお話です。1987年の2月23日16時35分35秒に超新星SN1987Aとよばれる星が爆発をしました。この星までは17万光年あるので、本当に爆発したのは17万年前ですが。これは大マゼラン星雲にある星ですが、このときはまだカミオカンデが観測をしていまし

た。この観測装置は体積3,000トン、増倍管の数は約1,000本と、スーパーカミオカンデより一桁小さいサイズでした。1983年から1996年まで稼動していた装置です。

カミオカンデが捉えた超新星のニュートリノ現象データを見てみます。爆発の瞬間の前後2分にデータを絞ってあります。超新星の爆発で約11個くらいのニュートリノ現象が起きたのですが、このとき約10秒間くらいで一気に星が潰れた様子を捉えています。星というのは延々と何億年も存在しているのですが、最後に潰れる瞬間は10秒くらいの非常に短い時間です。

星の一生についてももう少し詳しく説明します。星は元々持っている重さにより運命が若干異なります。太陽より軽い星はエネルギーの放出が少ないので長らく静かに生き続けます。太陽のような星は質量があるので自分で収縮しようとしています。それに対し太陽の中心部では核融合反応による熱と圧力が発生し、収縮しようとする力をこらえています。そのバランス関係に成り立っているのが星なのです。陽子4つからヘリウムを作っていますが、陽子の燃料が無くなったら星の燃料は終わり、やがて最後になります。太陽くらいの星の場合、時間が経つと膨らみ赤色巨星になります。仮に太陽が今そのようになったとすると地球も飲み込まれてしまいます。その程度に大きくなります。そして最後には新星と呼ばれる爆発を起こします。星の中心には白色矮星（はくしょくわいせい）という小さな星が残り、周りにはもやもやとしたカケラが飛んで行きます。それが惑星状星雲と呼ばれるものです。さらに重い星になるとまた少し違います。例えば太陽の10倍くらい重い星は星自身も早く燃えてしまい、最後には赤色超巨星という非常に大きい星になり超新星爆発を起こします。そしてこの爆発によって残った星の中心は1ミリリットルで何億トンもあるといわれる非常に密度の高い中性子星となります。更に重い星の場合は中心部が中性子の星にはならず、ブラックホールになると理論上は考えられていますが、まだはっきりとはわかっていません。

NASAのホームページではハッブル宇宙望遠鏡の捉えたいろいろな星の最後を見ることができます。太陽程度の星の最後は様々な元素が吹き飛ばされ星の周りでいろいろな色に輝き、非常に綺麗な姿を見せてくれます。惑星状星雲という名前についてですが、発見された当初はどういうものかよくわからず惑星状星雲などと名づけられました。しかし実際には惑星や星雲とはまったく無関係で、いわゆる一つの星の最後の姿なのです。

次に我々生命と超新星との関係をお話します。我々の周りには水素から始まり、ヘリウム、リチウム、ベリリウム、酸素、炭素等、いろいろな元素があります。現在109個までみつかっています。原子力発電所で燃料に使われているウランなどもそうです。このような元素はいつどこで生まれたのだろうと疑問がわきます。もしかしてビッグバンのときに生まれたかもしれないと考えられるかもしれません。しかし、ビッグバンのときは宇宙が非常に早い速度で膨張していったのでなかなか元素を作る時間がなかったようです。ビッグバンが起こってから10秒後、100秒後、1,000秒後にそれぞれの元素がどのくらい有っ

たかということについてお話しします。

ヘリウムができたのがだいたい100秒か200秒後くらい、それから500から1,000秒後くらいに重水素が作られています。非常に微量ながらベリリウムやリチウムなども作られたようですが、水素に比べたら約10桁少ないです。ビッグバン直後に生まれたのは水素、ヘリウム、重水素程度で、これより重い元素は作られていないと思われます。

ではいつ作られたのかということをもう少し詳しく探ってみます。太陽のスペクトルを見ると、いろいろな光を吸収する吸収線があります。これはいろいろな元素があるという証拠です。太陽の中の元素を分類してみますと、水素、ヘリウム、炭素、窒素、酸素、いろいろなものが入っています。太陽は、そういった重い元素が豊富に入っている星です。最近、非常に古い星をいろいろな大口径の望遠鏡で見ることができるようになってきました。みずがめ座にも120から150億年前に生まれた非常に古い星がありますが、こういった星のスペクトルを見ると吸収線はあまり見られません。古い星は元素の種類が少ないのです。特にヘリウムより元素番号が大きい元素はほとんどありません。太陽に見られるいろいろな元素の誕生はやはりビッグバンではなく、それ以降の何らかのプロセスが作ったように思われます。実は重い星というのは元素を作った場所なのです。太陽と同程度の重さの星の中心では4個の水素からヘリウム原子核ができるという反応が起きてきます。もう少し温度、密度を上げると今度は10の8乗度、10の4乗密度くらいのとときに3個のヘリウムから炭素ができ、そして次にこの炭素がヘリウム原子核、アルファ線を吸うことにより酸素ができ、炭素が2つ核融合反応を起こすとネオンやナトリウム、マグネシウムなどができます。さらにどんどん温度、密度を上げていくと酸素から珪素ができ、最後は鉄になります。酸素が2つ反応しますとシリコン、マグネシウムができます。こういう反応は我々が地球上で作ることはできません。ものすごく高密度、高温状態で初めてできる反応です。最終的にはシリコン2つが核融合反応を起こして鉄やクロムやニッケルができます。このようにして最終的には鉄までいきます。なぜ鉄かというと、核子を寄せ集めてきて原子核を作る場合、そのときエネルギーがどれくらい余るかという量に関係あり、その点からみると鉄が一番安定しているのです。これより軽いものは核融合反応によって鉄に向かい、それより重いものは核分裂をして鉄のほうに近づいていきます。このような反応は非常に高温、高密度で起こりますので重い星の中心ということになるのです。

これは爆発直前の星の内部構造の図です。

<映像：玉ねぎを横に切ったような図。中央から何層にも色わけされている。

>

一番内側には鉄がありその外側にはシリコン、珪素、酸素、炭素、ヘリウム、水素があります。このような玉ねぎの構造を持っています。そして超新星爆発では鉄のコアの部分が一気に潰れ中性子の星やブラックホールになります。そのときに位置エネルギーが開放され、これが星を吹き飛ばす力学的なエネルギー

ーに変わります。それが超新星爆発です。超新星爆発によりいろいろな元素が宇宙に吹き飛ばされる現象が起きます。爆発によって極端な高エネルギー、高密度状態になりそこで初めてウランや金といった鉄よりも重い元素が生まれます。ですから超新星爆発というのが我々の周りの様々な物質の源泉になっているのです。

カニ星雲は1054年に超新星爆発を起こし、それによって周りの物質が吹き飛ばされました。この星の真ん中に1秒間に30回転するパルサーと呼ばれる星があることがわかっています。エックス線での観測により、パルサーは高速回転しながらジェットを噴き出しているのではないかと考えられています。最近の超新星の様子をいくつかご紹介します。1994年にハッブル宇宙望遠鏡が撮影した超新星1987Aについてです。元々の星があった周りに3重のリング状のものが撮影されています。外側二つが大きく、その中央に小さめのリングがあります。このリングは星が爆発する以前からあった物質のようですが、なんらかの理由により輝き出したのではないかと考えられています。リングが歪んで見えています。見る方向を調整してみますと実際には二つのお碗の底を合わせたような形に物質が存在していると考えられています。外側の輪二つと中央の合わせ目の一つ、合計三つのリングが見えるわけです。ただしこのリング自身の誕生の謎はまだ解明されていません。この星は定期的に毎年ハッブル望遠鏡で観測されていますが1996年、爆発から9年たった頃に星の中央部分の合わせ目部分が爆発により広がりつつあるのが観測され、98年の観測では爆発によって飛ばされた粒子により一部が輝くホットスポットという現象も現れ始めています。さらに2000年の2月にはホットスポットが何ヶ所も見えてきています。爆発によって飛ばされた粒子の影響が最近になりやっと見えてきたのです。

このような星は他にもあるのでしょうか。銀河中心の方向を見てみるといろいろな星があります。赤い星というのは星の最後の頃の姿です。銀河の中心方向にはたくさんの星があるので、この赤い星のうちどれかが爆発するかもしれません。何年待てばスーパーカミオカンデで超新星爆発現象が観測できるのかはわかりません。しかしそうなるとスーパーカミオカンデでは非常にいいデータが取れます。1987年に最初に捉えたニュートリノの数はたかだか11個くらいなのですが、もし銀河中心で超新星が爆発したとすると、ニュートリノがたくさん飛んでくるのがかなり期待できます。ちなみに超新星爆発のときのエネルギーの99パーセントはニュートリノが宇宙へ持ち去ります。残りの1パーセントは星が光ったり、星を吹き飛ばしたり、そういったエネルギーに使われます。ですからほとんど全体像をニュートリノによって把握することができます。

もし銀河中心に超新星爆発が起これば4000ほどの現象の数が期待されます。爆発のときの現象の数ですが、約2秒間でニュートリノの数が減り、10秒間くらいかけて別のニュートリノが出てくるのが観測できると予想されています。さらにどの方向に超新星があるかということもわかります。このように、もしうまく起きてくれればスーパーカミオカンデのパワーによって超新星爆発

の瞬間を非常に精度よく捉えることができ、爆発のメカニズムをよく解明できるようになると思います。

まとめに入ります。素粒子の一種であるニュートリノは宇宙に満ち満ちています。スーパーカミオカンデの観測によってニュートリノは質量を持つということがわかりました。ただし宇宙全体にあるニュートリノの重さは宇宙を収縮させるほどには大きくはないのですが、陽子の重さに匹敵するようです。それはもしかして銀河の進化に関係しているかもしれません。そして超新星爆発という現象は我々の周りの物質を作る源泉になっているのです。スーパーカミオカンデはその瞬間を捉えることができ、超新星爆発のメカニズムを克明に解明することが期待されています。このようにニュートリノというのはなかなか掴まえにくく味わいにくい粒子なのですが、様々な方法によって宇宙を垣間見ることができ、力の大統一理論など、素粒子の根源にも関係すると思います。ニュートリノの研究は今後もいろいろな発展を遂げていくと思います。以上です。

司会

非常に興味深い話が散りばめられていました。質問はありますか。

Aさん

ニュートリノの振動についてです。電子ニュートリノからミューニュートリノに変わる場合にそれぞれ質量が違おうと思うのですが、小さいのから大きいのに、大きいのから小さいのに変わる場合に、足りない質量とか余った質量とかいうのはどうなるのですか。

中畑先生

非常に難しいところです。ニュートリノが生まれたときには決まった質量を持っていないようです。電子ニュートリノが太陽の中心で生まれます。正確にいうと観測の理論、量子力学の理論にかかわるので非常に難しいのですが、電子ニュートリノを観測した場合に50パーセントの確率で重い状態になり、50パーセントの確率で軽い状態になります。そういう混合した状態が電子ニュートリノです。エネルギーや質量の定まりがないので、余ったエネルギーという概念もないのです。

Bさん

普通、物は物に当たると跳ね返されます。ところがニュートリノは通り抜けてしまうようです。素人的に考えると、ニュートリノと普通の物質、跳ね返る物質、レントゲンにはどのような違いがあるのですか。

中畑先生

レントゲンは透過します。しかし、骨にぶつかると透過しなくて白く写ります。その当たる強さがもっと弱いのがニュートリノなのです。ですからニュートリノを使って人間の写真を撮るとほとんどすべて透過してしまうので骨もな

にも見えないことになります。光に比べてニュートリノは十何桁も反応が弱いからです、ほとんど素通りしてしまうのです。

Cさん

お話を伺うと、ニュートリノはまっすぐ飛んで来る、直進して来るイメージです。しかし一方では質量があるという。質量があるなら重い物の近くを通ったら曲がるのではないかと思うのですが、それでもまっすぐ飛んで来ると思っているのですか。

中畑先生

光でも重い物質の近くを通ると一般相対論の法則によって曲がります。ほとんどニュートリノも光とさせていただいて結構です。通常はほとんどまっすぐ走りますが一般相対論の法則に従い重い物の近くでは曲がります。しかし普通に我々がいるような重い物質があまりない空間状態ではまっすぐ走ります。ようするに、普通はまっすぐだと思させていただいて結構です。

Dさん

カミオカンデやスーパーカミオカンデは陽子崩壊実験のために作られたと思います。ならば、ニュートリノが入ってきたときのチェレンコフ光と陽子崩壊のときの光というのは区別できるのでしょうか。

中畑先生

陽子が崩壊してできる粒子、パイ中間子や電子はお互い反対方向に飛ぶのです。ニュートリノは飛んできて物に当たって前に弾き飛ばすので前方に出ます。そのパターンによって区別できます。

Eさん

ニュートリノはあまり何とも反応しないものということですが、星が作られるたびにどんどん増えてくると、宇宙が進化するたびにどんどん増えていって、そのうちニュートリノだらけになってしまうことにはならないですか。

中畑先生

非常に面白いご指摘です。もしかして陽子も崩壊するかもしれません。ちなみに陽子の寿命は10の34乗年以上なのですが、今宇宙の寿命は10の10乗年ですから、さらに先の話です。陽子が崩壊するとニュートリノとK中間子、または電子とパイゼロなどになるのですが一番最後に至った後というのはニュートリノと光です。もしかして宇宙は、10の34乗年後の頃には、光とニュートリノだけの宇宙になってしまうかもしれません。これは宇宙が収縮しないとした場合の話です。途方もなく先の話です。

Fさん

ここ筑波でニュートリノを人工的に陽子シンクロトロンで生成してカミオカンデのほうへ飛ばしていますが、正確に制御するためにコントロールする必要がありますと思うのです。弱い相互作用しかないニュートリノを、具体的にはどの

ようにコントロールしているのですか。

中畑先生

ニュートリノになってからでは方向を決めることはできません。具体的には、まず陽子を神岡の方向へ向けます。陽子とアルミウムの衝突でできたパイ中間子が崩壊してニュートリノになるのですが、パイ中間子の段階ではまだ電気を持っていますので方向制御ができるのです。ホーンというシステムで、広がったパイ中間子を神岡の方向へ向けます。そのようにしてパイ中間子を前方へ向けるのですが、その後崩壊したニュートリノはいろいろな方向へ飛んで行ってしまいます。でも元々エネルギーを持っているので前方が一番多いのです。いろいろな方向へ飛んでいってしまったニュートリノは集めることはできません。そのままです。神岡方面へのニュートリノが多くなるような努力をしているだけであって、ニュートリノをコントロールはしていません。

Gさん

結局ニュートリノというのは何でしょうか。電子、ミュー、タウという三つのニュートリノは本質的には一つなののでしょうか。ニュートリノが生まれたのは宇宙の腫れ上がり以降でしょうか。

中畑先生

ニュートリノが生まれたのは宇宙が腫れ上がるよりももっと前です。ビッグバンのときにはニュートリノ、電子、光、いろいろな粒子が生まれるのです。数秒か数分のうちにニュートリノは生まれています。ニュートリノは何かと言われると非常に難しいのですが、一言でいえば、電子から電荷をはぎ取った粒子と置いていただければいいです。電気を持たないひよろひよろの粒子です。ニュートリノというのは理論的に予言された粒子です。ベータ崩壊のときに電子のエネルギーは連続スペクトルです。ある原子核が崩壊してある原子核になるのだから、決まったエネルギーの電子が出るだろうと置いていたら電子とともに別の粒子が生まれました。ですが、普通の反応では電子だけ放出するというのは許されなくて必ずニュートリノが伴わないといけないのです。ですから、電子とパートナーになって生まれる粒子がニュートリノです。ただしニュートリノは電気を持たない。つまり、電気を持たない電子と置いていただければいいです。

Hさん

筑波から神岡までニュートリノを飛ばすという実験にはどういった価値があるのですか。

中畑先生

まず力の大統一理論<参照：【参考4】>というのがあって思われていました。力の大統一理論が正しければ陽子も電子もニュートリノもすべて同じ質量を持つはずなのです。しかし、陽子、電子はある意味で似たりよったりの質量を持っているのですが、ニュートリノというのは6桁も7桁も質量が小さいの

です。なぜそんなに質量が小さいのかを解明しようとしています。その理由として、どうもニュートリノ自身には非常に重い粒子のパートナーがいるらしい、それとペアになって初めてニュートリノというのは生まれているかもしれないと思われてきています。そうすると、重いニュートリノが存在するという事は非常にエネルギーの高い状態の素粒子の理論が何かあるのだろうということを示しているのです。このニュートリノの質量を探るといことが力の大統一理論を探るといことに対応します。

Iさん

超弦理論<参照：【参考5】>、素粒子の別の理論、標準模型と違う理論などあるのですが、それとニュートリノは関係あるのでしょうか。

中畑先生

今おっしゃった超弦理論というのは「強い力、弱い力、電磁気力、重力、」の四つの力を統一した最終的な理論と思われるものですね。もしニュートリノの質量が解明されるか、あるいは陽子崩壊が解明されれば強い力、弱い力、電磁気力統一により大統一理論までは正しいことが証明されるのです。このさきの超弦までいくには重力まですべてを統一しなければならないのですが、まだ現状では難しいです。まだ我々の素粒子の研究ではやっと弱い力と電磁気力を統一するところまで辿り着いたばかりです。超弦理論にまで辿り着くにはニュートリノ質量は非常に軽いということを証明して、非常に重いニュートリノがいることを示して、かつ陽子が崩壊するという事で陽子とニュートリノは同じ粒子ということを証明するというたくさんのステップがあります。そこに到る一つ前のステップを我々はしているのです。

Jさん

ニュートリノの実験でカミオカンデと筑波が緯度経度という点でまっすぐになっています。距離は250キロと伺いました。これは一番ニュートリノが来やすいとか250キロが計算しやすい距離とか、そのあたりに関係するのでしょうか。

中畑先生

スーパーカミオカンデの建設場所ですが、日本の中で一番深くて、操業していた鉱山で、水があるということで神岡の地が選ばれました。筑波については、ニュートリノ実験をやるとういうときに加速器が必要なのですが、日本で高エネルギーのニュートリノを作る加速器は筑波にしかなかったのここしかありませんでした。ですから二つの地点はそれ以外になかったのです。そこでこの250キロという前提のもとに、なるべく実験しやすいように工夫をしました。距離が長いければニュートリノエネルギーが大きくても振動という現象が見やすくなるのですが、距離が短い場合にはあまり振動はしないのです。そこで対策としてニュートリノエネルギーを十分下げて低いエネルギーにして振動周期を早くしました。ここ筑波で行なうことに一つ運が良かった点がありま

す。我々が必要だったニュートリノエネルギーは1ギガ電子ボルトで、陽子の質量くらいのエネルギーです。このエネルギー量というのが筑波にある陽子加速器が一番作りやすいニュートリノエネルギーだったのです。

Kさん(子供)

宇宙からは無限にエネルギーをとることができるかと科学の本に書いてあったのですが、本当にできるのですか。

中畑先生

今の素粒子の理論だと、どうしてもエネルギーの保存則という原則があるので無理だと思います。でも、もしかして宇宙というのはワームホールとかで他の宇宙に繋がっているかもしれません。ですから、「無限に宇宙からエネルギーをとれる」というのは、他の宇宙からエネルギーをとり出しているということなのかもしれないです。よくわからないけれど、できたら面白いですね。

司会

どうもありがとうございました。

【参考1】〔実験に使用したニュートリノの種類は3種類〕

- ・大気ニュートリノ
- ・太陽ニュートリノ
- ・人工ニュートリノ

(高エネルギー加速器研究機構サイトより)

【参考2】〔ニュートリノの質量について〕

従来正しいとされている素粒子の標準理論はニュートリノの質量をゼロとしています。「ニュートリノ振動」の存在が精密に確認されれば、標準理論で説明できない現象の発見から物理学の根幹を変える大きな成果につながります。

(高エネルギー加速器研究機構サイトより)

【参考3】〔ニュートリノの型は3タイプ〕

- ・電子ニュートリノ
- ・ミューニュートリノ
- ・タウニュートリノ

(高エネルギー加速器研究機構サイトより)

【参考4】〔力の大統一理論〕

物質に働く力として確認されている「強い力、弱い力、電磁気力、重力」の四つの力のうち、現在(2002年)理論的に統一されているのが「電磁気力と弱い力」。

それに「強い力」をプラスし三つの力を統一させることが「大統一理論」。これには「陽子崩壊」の観測、その他証明が必要であり、スーパーカミオカン

デには陽子崩壊を観測する機能がる。

【参考5】〔超弦理論〕

単に「弦理論」とも呼ばれる。弦とは「ひも」のこと。＜参考：4＞の「大統一理論」にさらに「重力」をプラスし、4種類の力すべてを統一すること。これにより全ての物理現象をたった一つの方程式で記述できるという最終理論だがまだ証明はされていない。この理論からは全てのものは非常に小さな「ひも」から成り立っていることになる。非常に複雑な計算が必要とされ証明が難しいことから物理学の間では「最終理論の本命」とも「疑わしい」ともされている理論。（2002年現在）

以下、本稿作成にあたり参考にしたサイトです。

<http://www.kek.jp/>

（高エネルギー加速器研究機構）

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/index_j.html

（東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設）

http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index_j.html

（東京大学宇宙線研究所サイト内、スーパーカミオカンデ公式HP）

<http://www.kek.jp/newskek/2002/mayjun/k2k-2.html>

（高エネルギー加速器研究機構サイト内 K2K実験ページ）

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/info/k2k-j.html>

（東京大学宇宙線研究所サイト内 K2K実験ページ）