

詳細：2002 年度ノーベル物理学賞

ニュートリノの巻

福江 純（大阪教育大学）

2002 年度のノーベル賞の“速報”については、既に 2002 年 11 月号で報告したが、今回は各受賞者の業績に詳しく報告したい。インタビューなどは別に報告があるはずなので、ここでは、スウェーデン王立科学アカデミーの公式的な詳細（<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/phyadv02.pdf>）を訳出することにした。なお、ニュートリノという幽霊粒子についての補足説明は付録につけた。また [] 内は訳注である。



図 0 スウェーデン王立科学アカデミー

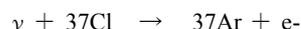
### パート I ニュートリノ天文学

太陽ニュートリノと超新星ニュートリノという、地球外起源の 2 種類のニュートリノが観測された。そしてそれらのニュートリノの測定されたエネルギー流束とスペクトルは、宇宙物理学と素粒子物理学の上に新たな光を投げかけたのだ。光子と異なり、ニュートリノは質量ゼロである必要はない。ニュートリノに、非常に小さくてもゼロでない質量があれば、その事実は物理学と宇宙物理学に重大な帰結をもたらす。というのも、宇宙には膨大な量のニュートリノがあるので、ほんのわずかでもニュートリノに質量があれば、宇宙の質量密度に対して大きく寄与できるからだ。またニュートリノの質量がゼロでなければ、素粒子物理学の標準モデルを修正しなければならないような新しい物理的意味が必要

になるだろう。

### 1 デービスの放射化学実験

ニュートリノは、原子核の  $\beta$  崩壊で放出される電子の連続的なエネルギースペクトルを説明するために、1930 年にパウリが仮定した粒子である。[  $\beta$  崩壊とは、中性子が電子と陽子に崩壊する現象。かつて電子を  $\beta$  線と呼んだ名残。] 弱い相互作用に対するフェルミの理論は 1930 年代の間に発展した。当時、ニュートリノの相互作用の断面積はあまりにも小さいために、ニュートリノを検出することは無理だと考えられていた。しかしながら、その後、原子炉によって非常に大きなニュートリノ流束が利用できるようになり、ニュートリノ物理学の分野が開拓されたのだ。すなわち、1955 年のコーワン (Cowan) とライネス (Reines) の実験によって、ニュートリノが実験的に検証されたのである。ポンテコルヴォ (Pontecorvo) とアルバレス (Alvarez) (Pontecorvo 1946 ; Alvarez 1949) は、



という反応を利用した原子炉実験を提案した。その当時はニュートリノと反ニュートリノをはっきり区別できなかったのだ。この反応は Davis-Pontecorvo 反応として知られている。反応の閾値エネルギーは 0.81MeV で、アルゴンの同位体は電子捕獲によって 35 日の半減期で崩壊する。

重力は長い間にわたり太陽のエネルギー源だと信じられてきた。ところが、1920 年までに、太陽は大部分が水素とヘリウムからできていることがわかり、さらにエディントン (Eddington) は核融合がエネルギー源であろうと提案した。ただし、太陽内部の核反応に関する完全な理論が出たのは 1938 年になってからだ (Bethe and Chritchfield 1938 ; Bethe 1939)。つぎなる目標は、たしかに核反応が太陽のエネルギー源であることを、実験的に証明することだ。

レイモンド・デービス・ジュニア (Raymond Davis Jr) は、1950年代初期にブルックヘブンで、原子炉を使った最初の塩素-ニュートリノ実験を行った。彼は標的として、3900 リットルの四塩化炭素 CCl<sub>4</sub> で満たしたタンクを使った。[先の反応過程によってニュートリノが塩素と反応してアルゴンが生成された後で]、タンクにヘリウムが通されて少量のアルゴン原子を抽出し、そのヘリウムガスをヘリウムは通すがアルゴンは吸収する液体窒素に浸した木炭で濾過することによって放射性アルゴンを抽出した。そしてアルゴンの崩壊によって生じた電子を比例計数管で検出した。実験の結果は 1955 年に発表され (Davis 1955)、核反応に伴う反ニュートリノの断面積は上限値が 1 原子あたり  $2 \times 10^{-42} \text{cm}^2$  ほどで、また太陽からの高エネルギーニュートリノの流束は上限値が  $10^{14} \text{cm}^2/\text{s}$  ぐらいなことがわかった。この 1955 年の論文で、デービスはすでに太陽ニュートリノの検出可能性について論じているのである。

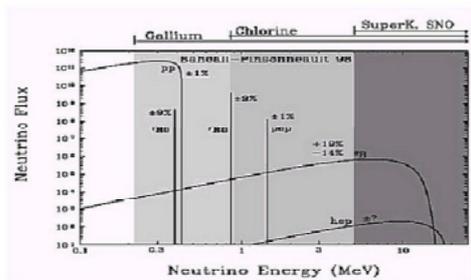


図1 太陽ニュートリノ流束 (Bahcall 2000)。縦軸にはガリウム、塩素、水チェレンコフ技法 (スーパーカミオカンデと SNO) を用いた実験の感度範囲が示してある。太陽の内部においては、2つの陽子が融合して重水素となり最終的にヘリウム 4He になる陽子陽子連鎖反応 (pp chain) で、電子ニュートリノが生成される。ベリリウム 7Be の軌道電子捕獲は 0.4MeV と 0.9MeV の2本の線スペクトルを生じる。陽子電子陽子反応 pep ( $p + e + p \rightarrow 2H + \nu$ ) では 1.4MeV のニュートリノ

スペクトルが生まれる。ホウ素のベータ崩壊では、約 15MeV まで達する連続的な電子ニュートリノスペクトルが生じる。なお、縦軸の単位は、連続的なスペクトルに対しては  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{MeV}^{-1}$  であり、線スペクトルに対しては  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  である。

ニュートリノは宇宙には非常に豊富に存在している。事実、宇宙ではニュートリノは核子 (陽子と中性子) の約  $10^9$  倍もあるのだ。地球では主要なニュートリノ源はわれわれの太陽である (図1)。身のまわりでは、1平方センチの単位面積を毎秒あたり 100 億個ものニュートリノが通過している。太陽ニュートリノの大部分は 0.4MeV 以下の低エネルギーのものだが、わずか 0.01% ほどは 5MeV よりも大きなエネルギーをもっている。

デービスと彼の放射化学実験にとって重要なステップは、ヘリウム 3 とヘリウム 3 の核融合反応 ( $3\text{He} + 3\text{He} \rightarrow 4\text{He} + 2p$ ) と同じくらいの割合で起こる、ヘリウム 3 とヘリウム 4 の核融合反応 ( $3\text{He} + 4\text{He} \rightarrow 7\text{Be} + \gamma$ ) の結果を使えるようになったことだ。後者の反応では、太陽内部ではさらに、ベリリウムからホウ素が生成される ( $7\text{Be} + p \rightarrow 8\text{B} + \gamma$ )。そしてホウ素 8B のβ崩壊で、14MeV にも上るエネルギーをもったニュートリノが生まれるのだ。これは塩素反応の閾値エネルギーよりも十分に高い。この新しくて正確な実験によって、以前に思われていたよりも 1000 倍も高い反応断面積の値が得られた (Holmgren and Johnston 1959)。ファウラー (Fowler) とカメロン (Cameron) はデービスに当たった手紙の中で、ホウ素から生まれた高エネルギーのニュートリノなら、塩素-アルゴン法によって検出できるのではないかと提案した。

デービスの放射化学法とパーコール (Bahcall) の計算した  $40 \pm 20 \text{SNU}$  という理論値に基づいて、新しく 100 倍も大規模な実

験が提案された (Davis 1964 ; Bahcall 1964)。ここで SNU (Solar Neutrino Unit) というのは太陽ニュートリノ単位のこと、 $10^{26}$  個の標的原子に対して毎秒 1 個の捕獲が生じることを意味する。デービスの実験装置は、サウスダコタ州リードのホームステーク金鉱 (深さ 1500m、海拔 4200m) に設置された。タンクは 615 トンの四塩化エチレン  $C_2Cl_4$  で満たされた (これはふつうドライクリーニングに使われる溶剤である)。1967 年にはデータを取得する準備が整った。ヘリウムからアルゴン抽出する作業は、アルゴン  $^{37}Ar$  の半減期 (約 50 日) に一致する 2 ヶ月毎におおむね行われた。

デービスの最初の成果は、150 日間のデータ取得に基づいて、1968 年に発表された (Davis et al. 1968)。そこで提出された太陽ニュートリノ流束の上限値 3SNU は、その後計算された値 20SNU よりもはるかに低かったのだ (Davis et al. 1968)。この 1968 年の論文では、感度を改善するいろいろな可能性や、とくに背景ノイズを減らす方法が検討された。実験的な挑戦によって、2 ヶ月毎に、タンクにある  $2 \times 10^{26}$  の塩素から平均でたった 17 個のアルゴン原子が抽出されることになっていた。

重要な進展は、比例計数管の捕捉パルス反応時間の測定を導入したことだ (Davis et al. 1971)。アルゴン  $^{37}Ar$  の軌道電子捕獲による電子は、2.82keV の全エネルギーをもち、それらの範囲は比例計数管のガス内ではほんの 0.1mm ほどに過ぎず、比例計数管の直径の 3-5mm に比べれば十分に小さい。したがって、これらの反応電子の励起時間は背景パルスに比べて短いのだ。

デービスの結果の信頼性はアルゴンの抽出効率に大きく依存している。この点については大変注意深く調べられた。既知の量のアルゴンの同位体  $^{36}Ar$  を導入してみたところ、その抽出効率は 95 %であることが決定され

た。放射性アルゴン  $^{37}Ar$  はタンクの中で生成されるが、その抽出効率も非常に高いことがわかったのだ。アルゴン原子による分子生成も調べられて、非常に小さいことがわかった (Davis et al. 1972)。宇宙線によるアルゴン  $^{37}Ar$  の背景生成量は、1 日につき  $0.047 \pm 0.013$  原子だと見積もられた (Cleveland et al. 1998)。岩石中の中性子による背景生成量は、1 日あたり  $0.03 \pm 0.03$  ほどであると見積もられた。タンク外壁のアルファ粒子による背景生成量は、1 日につき 0.017 原子を越えることはない。大気中で生じるニュートリノがもたらす背景生成量は、1 日あたり 0.0004 原子だと計算された。

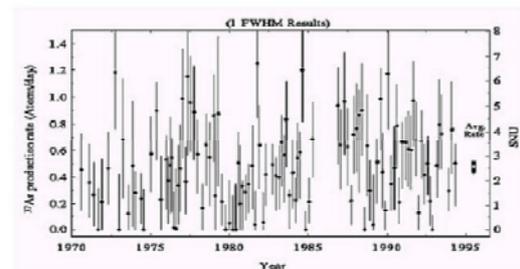


図 2 デービスの実験の最終結果 (Cleveland et al. 1998)。この結果から得られた、約 2.5SNU という平均的な生産率は、理論計算から導かれた 8.6SNU という値よりはるかに小さかった。

デービスの実験は 1970 年から 1994 年までほぼ連続して実施された。最終的な結果は 1998 年に出版された (図 2、Cleveland et al. 1998)。この間にタンク中では全部で 2200 個のアルゴン原子が生成されたと見積もられている。このうち 1997 個が抽出され、そして比例計数管では 875 個のカウントがあった。この 875 個のうち、776 個は太陽ニュートリノによって生じ、109 個は他の背景過程で生じたものだと見積もられた。したがってタンク中では、1 日あたり  $0.48 \pm 0.03$  個のアルゴン原子が生成されたことになり、そのことは、太陽ニュートリノ流束として、

2.56 ± 0.16SNU

を意味した。デービスは真の先駆者であり、 $10^{30}$  個もの中から数個の原子を抽出する匠の技は、ニュートリノ物理学という新しい分野を誕生させたのである。

太陽ニュートリノの生成の計算は、多くのパラメータをもった太陽モデルに基づいている。太陽ニュートリノの詳細で注意深い計算は、とくにバーコールによって、長年にわたって行われてきた(たとえば、Bahcall 2002a)。時と共に計算の不確定性は減少してきた。塩素実験に対するもっとも最近の計算結果では、予想値は、

8.6 ± 1.2SNU

である (Bahcall 2002b)。

デービスは太陽ニュートリノを発見した。そして彼が測定した太陽ニュートリノ流束の値は、計算される予想値よりも常に低かったのだ。この不一致は「太陽ニュートリノ問題」として知られている。1978 年の段階ですでに、この問題に対する“解答”を示した 400 以上もの論文が出版されている。太陽ニュートリノはホームステーク鉱山の地下の検出器までやってくる途中に消え去ってしまうようにみえる。これはニュートリノの新しい性質を示しているのかもしれない。素粒子の標準モデルではニュートリノの質量はゼロだと仮定されている。もしそうでなくてニュートリノが質量をもつなら、観測されたフレーバー状態の電子ニュートリノ、 $\mu$ ニュートリノ、 $\tau$ ニュートリノは、質量の固有状態の線形結合になっているだろう。そうすると、ニュートリノはそれらの異なったフレーバー状態の間を振動することになる [「ニュートリノ振動」と呼ばれる]。太陽で生成されるのは電子ニュートリノだが、ニュートリノ振動のために他のフレーバー状態に変化したために、その一部が消滅したようにみえるのかもしれない。もしそうなら、デービスの結果と理論予想の不一致は説明できる。今日、ニュート

リノ振動仮説を確認するために、多くの実験が実施中あるいは計画中である(総合報告は、たとえば、Bahcall 2002b)。

## 2 小柴とカミオカンデの実験

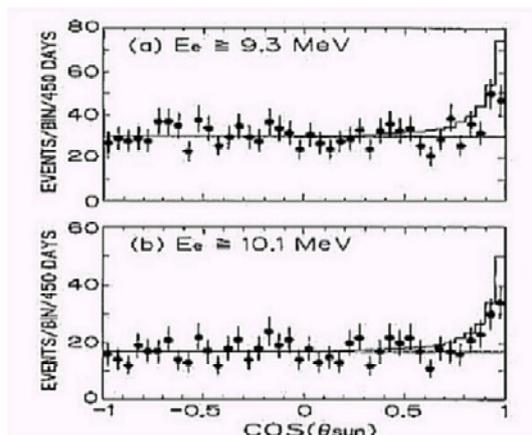
### 2.1 太陽ニュートリノ

1980 年前後に、陽子の崩壊 ( $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ ) を調べるためにいくつかの実験が行われた。素粒子の大統一理論 GUT (Grand Unified Theories) によれば、陽子の寿命は  $10^{32}$  年かそれ以上だと期待できる。したがって陽子の崩壊を調べるためには非常に大量の陽子が必要であり、かつ背景ノイズを減らすために地下へ行かなくてはならない。<小柴昌俊 (Masatoshi Koshihira)> が設計したカミオカンデの実験は鉱山の中に置かれたタンクを用いた。そのタンクは 2140 トンの水で満たされ、崩壊した陽子から放射されるチェレンコフ光を測定することによって、陽子の崩壊事象を探知するために初めて設計されたものだった。陽子崩壊では放出されるエネルギーは非常に高く、約 940MeV もあり、必要な検出エネルギーの下限値は太陽ニュートリノの場合より十分に大きかった。しかし小柴は、水で満たされたカミオカンデ検出器のエネルギー閾値を下げるように求め、大きな直径をもった感度のいい光電子増倍管の開発に着手した。光電子増倍管は単一の光子を検出する。水タンクのまわりを直径 50cm もの光電管が約 1100 個も取り囲み、検出エネルギー閾値は当初 30MeV ほどだった。小柴は宇宙ニュートリノを捕らえるための水中チェレンコフ技法を使った先駆者であった。

デービスの結果と“太陽ニュートリノ問題”は小柴を刺激し、指向性感度をもつ水中チェレンコフ技法を用いて太陽ニュートリノを検出する試みをさせた。太陽ニュートリノは、ニュートリノが電子に衝突したときのニュートリノの弾性衝突によって検出できるだろ

う。水中に存在する低エネルギーの電子と陽電子の全強度は、それらのエネルギーに比例する。したがって散乱電子を検出するエネルギー閾値をさらに下げることが必要だった。これは背景放射を減らすことによって達成された。水はきわめて純水化されて、その結果、放射性の背景が 1000 倍も減らされた。背景放射を弁別するための障壁と新しい電子回路が取り付けられた。改良されたカミオカンデ検出器—カミオカンデ II は、1986 年末には太陽ニュートリノを検出する用意が整ったのだ。閾値エネルギーは 50% の効率で約 8MeV まで下げられた。ホウ素 8B の崩壊によって生じるニュートリノだけが検出可能だった。デービスの実験では pep 反応 ( $p + e \rightarrow p + \nu$ ) などからのエネルギーの低いニュートリノに対しても感度があった。しかし小柴のカミオカンデ実験は、リアルタイムで走らせることができ、しかもニュートリノの到来方向を決めることができたのだ。

図 3 カミオカンデの実験で測定で得られた太陽からの電子ニュートリノの角分布 (Hirata et al. 1989)。電子エネルギーの 2 種類の下限に対するデータが示してある。折れ線グラフは太陽モデルから計算された分布を示している。デービスの結果を裏付ける太陽方向 (図の右端) での不足に注意して欲しい。



到来方向の感度により、カミオカンデ II の実験は太陽ニュートリノの最終的な実証を与えた (図 3、Hirata et al. 1989, 1990, 1991)。すなわち太陽がたしかにニュートリノを放射していることを証明し、したがって核融合が太陽におけるエネルギー生産の基本であるというデービスの結果を確認したのである。実験は同時に、太陽モデルから計算されるよりも観測されるニュートリノ流束が小さいというデービスの結果も裏付けた。すなわち計算値に対する観測値の割合は  $0.46 \pm 0.13$  程度であり、よって、ニュートリノ振動はさらに支持されることになったのである。ところで大気圏内で生じるニュートリノは、地球外起源のニュートリノに対しては背景ノイズになるという点は興味深い。実際的に、それらは新しい物理学に対して新たな手がかりになったのだ。 $\pi$  中間子の崩壊 ( $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$ ) は、さらにミューオンの崩壊 ( $\mu \rightarrow e + \nu_e + \nu_\mu$ ) をもたらし、この反応過程は大気圏でのニュートリノを生成する。そして単純に数えれば、その過程で電子ニュートリノの 2 倍の  $\mu$  ニュートリノが生成されるのだ。詳細な計算によれば、その比率はもう少し増加する。もし検出器に到達する前にあるタイプのニュートリノが消滅するなら、それは新しい物理学の兆しであるわけだ。カミオカンデの成果によると、電子ニュートリノに対する  $\mu$  ニュートリノの割合は、予測値の  $46 \pm 12\%$  だった (Hirata et al. 1990)。

## 2. 2 超新星 1987 A

17 万光年の距離にある大マゼラン銀河の中で起こった超新星 1987A (SN1987A) が可視光で観測されたのは 1987 年 2 月 24 日だった。1604 年に起こったケプラーの超新星以来、肉眼で見える最初の超新星だった。カミオカンデ実験施設は SN1987A に由来するニュートリノバースト現象を、1987 年の 3 月 10 日に発表することができた (図 4 および図

5)。そしてそのことは、一日後に、別の地下実験施設 IMB (Irvine-Michigan-Brookhaven experiment) によって確認されたのだ (Bionata 1987)。カミオカンデのニュートリノバーストの発見は、小柴が新しい光電子増倍管を開発しニュートリノ検出のエネルギー閾値を下げているからこそ可能になったものだ。

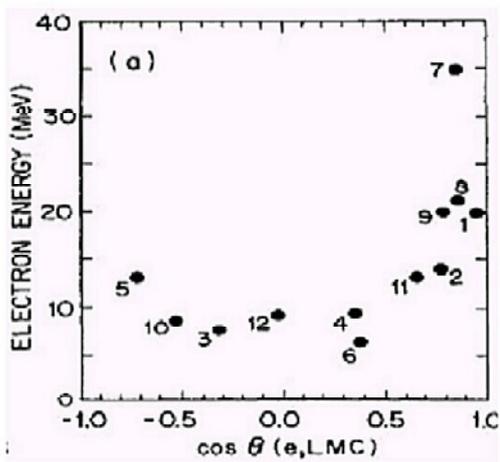


図4 電子の到来方向と大マゼラン雲の方向の間の角度の余弦の関数として、検出された電子のエネルギーをプロットした図。番号は検出された時間順を示す。なお、反ニュートリノ反応で発生する陽電子の方向は、ニュートリノの到来方向とはほとんど無関係になる。Hirata 他 (1987) より。

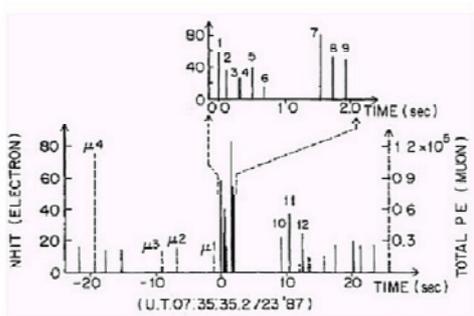


図5 ミューオン(破線)および電子(実線)の相対的なエネルギー。図中のμ1からμ4は、時刻0での電子バーストに先立つミューオンイベントである。NHITが20より小さな背景イベントは、大部分が、(ラドン 222Rnの崩壊によって生じた) ビスマス 214Biの崩

壊によるもの。Hirata (1988) より。

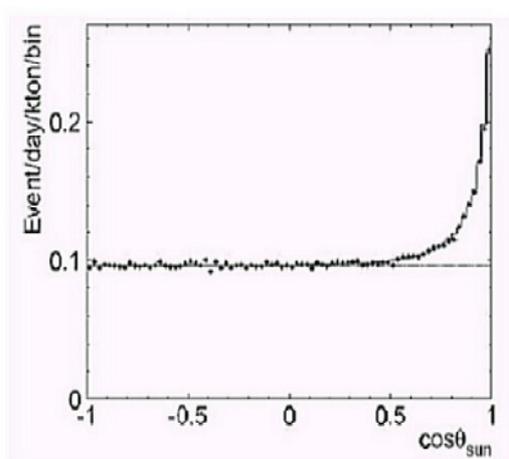
もし核燃焼を終えた星の中心核がチャンドラセカール質量の約 1.3 倍を超えると、中心核は重力崩壊を引き起こし、すべての核子が原子核物質の状態までぎゅうぎゅうに詰まった段階になって停止する。このとき、 $e + p \rightarrow n + \nu$  という反応によってニュートリノバーストが起きる。また対消滅反応によって反ニュートリノも生成される。崩壊した中心核の最終的な半径は約 10km になり、解放される全エネルギーはおおよそ  $3 \times 10^{46} \text{ J}$  ( $3 \times 10^{53} \text{ erg}$ ) である。このエネルギーはほとんどニュートリノが持ち去る。そのニュートリノの平均エネルギーは 10 から 20MeV である。[超新星爆発では約  $10^{58}$  個のニュートリノが放出された。] カミオカンデの実験装置を通過した  $10^{16}$  個ものニュートリノのうち、12 個が検出された。観測されたニュートリノバーストは、膨大な数のニュートリノが放出されるという超新星理論を確認したのだ。超新星の観測はまた同時に、ニュートリノの質量の上限が 24eV であることも示したのである。

### 3 今後の見通し

放射化学実験とカミオカンデ実験の成果によって、ニュートリノ物理学の新しい時代がはじまった。いまや宇宙起源や加速器で生成されたニュートリノに対して多くの新しい実験が行われているのだ。ニュートリノの基礎的な性質や宇宙物理学に対して光を投げかけた。小柴と共同研究者たちは、50000 トンもの水をたたえ 10000 本もの光電子増倍管を配置した実験装置—スーパーカミオカンデを立案し建設した。スーパーカミオカンデ実験は 1996 年にスタートし、1998 年にはニュート

リノ振動の最初の形跡を捕らえ、さらにまた太陽ニュートリノの詳細な情報も与えた（図6、Fukuda et al. 1998）。最近になって、地下の巨大な重水検出器 SNO（Sudbury Neutrino Observatory in Canada）により、太陽ニュートリノがフレーバーを交替していることを示している（Ahmed et al. 2002）。この事実はスーパーカミオカンデの結果を確認するもので、このようなニュートリノ振動の実証により、素粒子物理学の標準モデルは修正を余儀なくされるだろう。核反応炉でのニュートリノ実験装置や加速器実験そして宇宙ニュートリノ実験装置など、他にも多くの実験設備が後を追いかけ、また建設中である。

図6 スーパーカミオカンデの実験から再構成された 5-20MeV の電子の 1258 日におよぶデータに対する角分布。折れ線グラフは信号＋背景の最適線。図の右端のピークが太陽ニュートリノによるもの。スーパーカミオカンデ共同研究（2001）。



つづく

参考文献

（省略）

参考 URL

★ノーベル賞の Information to the Public のホームページ (<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/public.html>)

★詳しい情報 Advanced Information の PDF ファイル (<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/phyadv02.pdf>)

★過去の受賞者などの The Nobel Prize Internet Archive の ページ (<http://almaz.com/nobel/nobel.html>)

■付録：ニュートリノについて

身のまわりの物体や生物の体など、いわゆる物質は、水素や炭素や酸素などさまざまな種類の原子や、水やタンパク質など原子が集まった分子からできている。ギリシャ語で“もうそれ以上は分割できないもの”という意味でアトムと名づけられた原子は、実はまだまだ分割できて、プラスの電荷を帯びた陽子と電荷をもたない中性子がいくつか集まった原子核と、そのまわりをまわるマイナスの電荷を帯びた複数個の電子からできている。たとえば、通常の水素原子は陽子 1 個＋電子 1 個からできた一番単純な原子だし、通常炭素原子は陽子 6 個＋中性子 6 個＋電子 6 個から、通常酸素原子は陽子 8 個＋中性子 8 個＋電子 8 個からなっている。ここで、“通常”と書いたのは、中性子の個数が異なる“同位体”と呼ばれる原子があるためだ（中性子が 1 個ある重水素とか、中性子が 7 個ある炭素 13 などがある）。ともあれ、こうして原子は全体としてプラスの電荷を帯びた原子核とマイナスの電気を帯びた電子が電磁氣的に結びついてできていて、また同じく、原子同士が電磁氣的な力「電磁相互作用」で結びついて分子ができています。

これらの陽子、中性子、電子などが、物質を構成するいわゆる物質粒子である。またこ

これらの物質粒子にはそれぞれ、電荷などの量子力学的性質がまったく逆の反粒子が存在する。たとえば、陽子と反陽子、中性子と反中性子、電子と陽電子などだ。

物質粒子にはこれら以外にもまだまだ多数の種類がある。たとえば、パイ中間子など中間子（メソン）の仲間だ（図）。原子核はプラスの電荷を帯びた陽子と電荷をもたない中性子からできているが（陽子と中性子を合わせて、核子ということもある）、そのままだと陽子のプラスの電荷によって原子核はバラバラに壊れてしまうだろう。原子核がバラバラにならないためには、核子同士を結びつける作用が必要だが、そのような働きをしているのがパイ中間子なのだ。電磁氣的な力に反して核子同士をつなぎとめておくためには、この力—核力—は非常に強くなければならない。ただし電磁氣的な力は無限遠まで届くが、核力は原子核の大きさ（約  $10^{-13}\text{cm}$ ）程度しか届かない。これが「強い相互作用」である。ちなみに中間子という名前は、電子よりは重い核子よりは軽い、という程度の意味合いである。

ところで、中性子は原子核の中にある間は安定なのだが、核分裂などで原子核の外に出ると、15分ほどで崩壊する。このとき、1個の中性子は、1個の陽子+1個の電子+1個の反ニュートリノに崩壊する。やっとニュートリノが出てきた。かつて電子のことをその正体が不明だったときにベータ線と呼んでいたのだが、この崩壊過程は、電子（ベータ線）が放出されるので「ベータ崩壊」と呼ばれる。このベータ崩壊で放出される反ニュートリノはニュートリノの反粒子だが、どちらも、電荷をもたず、核力も働かない、質量もほとんどゼロの素粒子だ。この中性子の崩壊には核力は関与していないので、中性子の崩壊を引き起こす力を「弱い相互作用」と呼ぶのである。

はじめてベータ崩壊が発見されたとき、ニ

ュートリノの存在はまだ知られていないし観測もされなかったので、中性子が陽子と電子の崩壊するように見えた。ところが、崩壊の前と後で、質量や電荷はほぼ保存されているようにみえるのだが、運動量がどうしても保存されない。そこで量子力学の風雲児ウォルフガング・パウリは1930年に、質量はおそらくゼロで電荷ももたない何か非常に小さな粒子が運動量はもちさるのだろうと考えた。そしてその（当時は）仮想的な粒子に、イタリア語で“中性の小さなもの”という意味の「ニュートリノ（neutrino）」という名前を付けたのだ。

fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp