



じつきょう 理科資料

NO. 53

サイエンス・プラザ

ノーベル物理学賞受賞・小柴昌俊先生について

東京大学宇宙線研究所 中畑 雅行

小柴昌俊先生が2002年ノーベル物理学賞を受賞された。小柴先生は、岐阜県神岡町の神岡鉱山内に「カミオカンデ」という実験装置を建設し、超新星や太陽から飛んでくるニュートリノを捕らえた。この業績により、「天体物理学とくに宇宙ニュートリノの検出にパイオニア的貢献」という理由でノーベル賞を受賞された。本解説では、「ニュートリノとは何か」、「どのような現象を捕らえたのか」、「今後どのように発展していくのか」といったことについて、小柴先生の研究に対する姿勢についても触れながらお話しする。

1. ニュートリノとは何か

ニュートリノは、「素粒子」の1種である。「素粒子」とは、物質を形作るもっとも基本的な単位となる粒子であるが、現在の素粒子物理学において素粒子と考えられているものは、図1に示した12種類である。このうち、6種類はクォークと呼ばれる粒子であり、原子核を構成する陽子や中性子の中にある粒子やその仲間である。例えば陽子は2つのuクォークと1つのdクォークから作られている。図1の

	電荷	第1世代	第2世代	第3世代	
レプトン	0	ν_e	ν_μ	ν_τ	弱い力 電磁力
	-1	e	μ	τ	
クォーク	2/3	u	c	t	強い力
	-1/3	d	s	b	

図1 素粒子の種類とそれらの間に働く力

上半分の素粒子は、レプトンと呼ばれる。そのうち電荷を持つ粒子は、電子の仲間であり、電子、ミュー粒子、タウ粒子の3種類である。ニュートリノは、電荷を持たないレプトンとして位置づけられる。電荷を持ったレプトンから電気をはぎ取った粒子がニュートリノであると考えると理解しやすい。ニュートリノには3つの種類があり、それぞれ電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノと呼ばれている。図1で縦にならんだ粒子は、同じ「世代」に属する。素粒子には、3つの世代があり、

◆ も く じ ◆

サイエンス・プラザ
ノーベル物理学賞受賞・小柴昌俊先生について…1

トピックス
ノーベル化学賞受賞・田中耕一氏の研究について…9

授業実践
手軽にできるDNA抽出実験……………11

高校生へ私が選んだ1冊の本
成功にはわけがある「創造力」の正体……………15

世代が1から2，2から3とあがるに従ってクォークや荷レプトンの質量は大きくなっていく。(ニュートリノの質量については後述する。)

素粒子の分類は，それに働く力によってなされる。力には，「強い力」，「弱い力」，「電磁気力」，「重力」の4種類がある。「強い力」は，クォークの間に働く力であり，陽子の中でクォークが固く結びついていることや，原子核の中で陽子や中性子がバラバラにならずに結びついていることの源となっている。「弱い力」は，原子核のベータ崩壊をつかさどる力であり，原子核の中の中性子が陽子に転換したり，ニュートリノが電子に変わったりする時に働く力である。「電磁気力」は，最も身近な力であり，電気を持った粒子の間に働く力である。原子核の周りに電子が飛び回って，原子を構成するために必要な力である。「重力」は誰でもよく知っている力であるが，素粒子ひとつひとつを議論しているときには，ほとんど無視してもいいほど弱い力である。ニュートリノは電気を持たないレプトン粒子であるため，ニュートリノに働く力は「弱い力」のみである。従って，物質と反応する強さが極めて小さい。反応の強さを素粒子物理学では「断面積」という値で示すが，例えば，太陽から飛んでくるニュートリノと電

子が衝突する断面積は 10^{-43}cm^2 程度であり，これは仮に地球の密度で物質が満たされているところをニュートリノが走っていったとすると約7光年の距離走ってやっと一回衝突するぐらいの弱さである。したがって，ニュートリノを捕らえるためには，なるべくたくさんの物質を必要とする。

2. カミオカンデ建設とその改良

カミオカンデが神岡鉱山内に建設されたのは，1981年から1983年にかけてであった。カミオカンデの当初の目的は，陽子崩壊を観測して，力の統一理論を実証するということであった。前節で力には4つの種類があるという話をしたが，これらの力を統一する理論が1980年頃提唱されていた。実際，4つの力のうち，「電磁気力」と「弱い力」を統一するワインバーグ・サラム理論が正しいことは，実験的にも証明されていた。この理論に更に「強い力」まで取り入れた「大統一理論」では，クォークもレプトンも同種の粒子と考えられるため，今まで未来永劫安定であると考えられていた陽子が電子やパイ中間子などの他の物質に崩壊してしまうと予言した。当時の理論では，陽子の寿命が 10^{30} 年程度であることが予測され，数千トンの物質を集めれば，年間数



図2 カミオカンデ内部の様子（建設最終段階の写真）

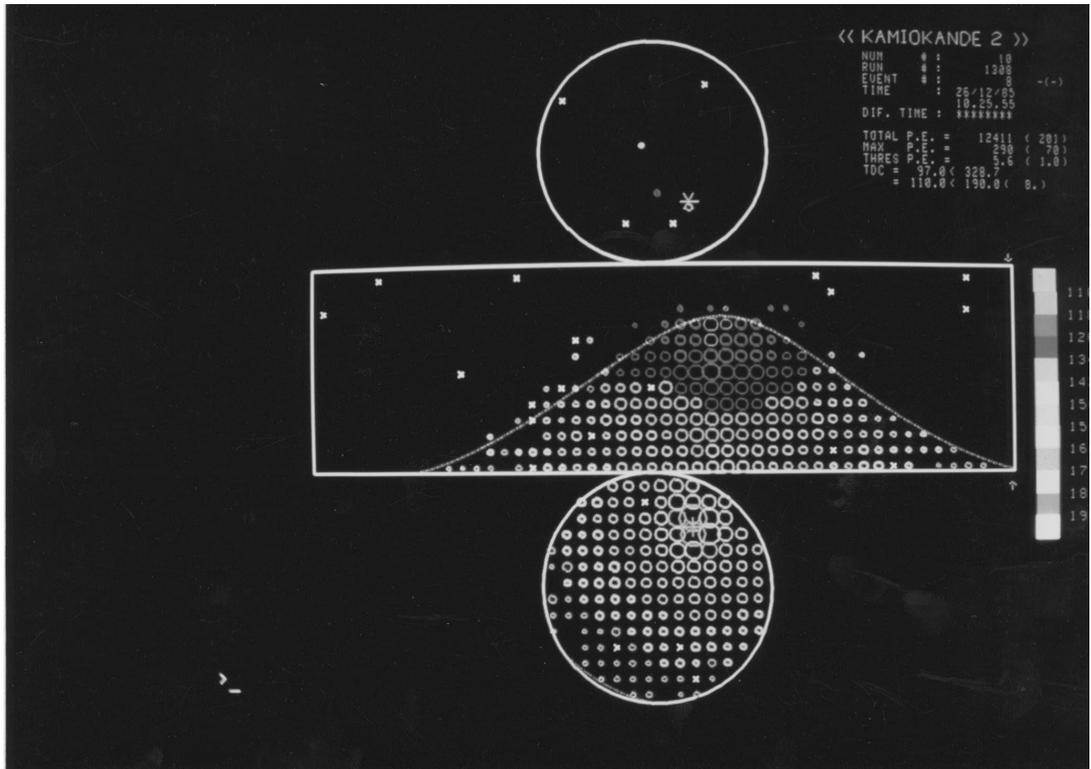


図3 カミオカンデで捕らえた典型的な宇宙線ミュオン粒子の現象

百個の陽子崩壊現象がつかまるはずであった。小柴先生は、大きな水のタンクとその内面に光の検出器（光電子増倍管）を取り付けて、陽子の崩壊現象を捕らえるという装置を思いついた。水を使う理由は、最も安く多量の物質が手に入るからである。このような装置は、宇宙線によるバックグラウンドを避けるために地下に作る必要があった。日本の国内で（1）地下深い場所で、（2）きれいな水が湧き出ており、（3）岩盤が固く大きな地下空洞を作れる場所、が探され、岐阜県神岡町の神岡鉱山にこれらの条件を満たす場所をみつけた。実際に実験装置が置かれた場所は、池の山（標高1368m）の山頂直下約1000mの場所であった。

陽子崩壊実験を始めるにあたり小柴先生は、「陽子崩壊を発見することは大切だが、更に一步進めて、物理学が進歩するためにはどのような大統一理論のモデルが正しいかを調べる必要がある。そのためには、ある特定の崩壊モードだけを捕らえるような実験装置ではなく、様々な崩壊モードを調べることができるような装置でなければならない。それを行うためには、エネルギーの決定精度が良く、また粒子の種類がわかるような測定器でなければなら

ない」と考え、当時常識的には考えられないような直径50cmの巨大な光電子増倍管を浜松テレビ（当時、現在の浜松ホトニクス）との共同で開発した。カミオカンデでは、この50cm光電子増倍管が1000本使われた。カミオカンデ実験装置は、直径16m、高さ16mのタンクに、3000トンの水が蓄えられた装置である。1983年7月に完成し実験が開始された。図2は、カミオカンデ建設当時の写真である。カミオカンデという名前の語源は、Kamioka Nucleon Decay Experimentであり、陽子崩壊探索を目指した実験という意味である。

カミオカンデ実験装置は、水中の光の速度よりも速く荷電粒子が走る場合に放出される光（チェレンコフ光と呼ばれる）を捕らえることによって粒子を検出する。水の屈折率は約1.33であるので、荷電粒子が光速度の $1/1.33 (=0.75)$ 倍以上の速度で運動する場合にその進行方向に対して約42度の頂角をもつ円錐状に光が出る（図3参照）。したがって、この円錐状の光パターンを光電子増倍管が捕らえることによって、粒子の進行方向がわかる。また、この光の大きさから元の粒子のエネルギーもわかる。更に、光パターンの形状からその粒子が電子なのかミ

ユー粒子なのかを区別することもできた。これは、小柴先生が直径50cmという巨大な増倍管を開発したことによって初めて可能になったことである。陽子が崩壊した場合には、静止していた陽子が崩壊するため、前方、後方に同じぐらいのエネルギーを持つ粒子のチェレンコフ光が放出されるはずである。実験を開始してから、何ヶ月もデータを解析してみたが、残念ながらこのような陽子崩壊の兆候を示す現象は見つからなかった。

カミオカンデの初期のデータを解析していく過程で小柴先生は、装置の中で通常起きているある現象に着目した。カミオカンデには、約3秒に一度宇宙線のミュオン粒子が飛んできていた。そのうちのあるものは、タンクの中でストップし、電子に崩壊した。この電子のスペクトルを見てみると、カミオカンデは10メガ電子ボルト程度の低エネルギー現象をも捕らえる能力をもつことがわかった。その時、小柴先生は、太陽からのニュートリノを捕らえることができるかもしれないと直感的に洞察された。しかし、太陽ニュートリノ観測を実際に行うためには、当初のカミオカンデでは不十分であった。まず周りの岩石などから放出されている環境ガンマ線などを除去しなければならなかった。カミオカンデのタンクは、

岩盤をくりぬいた空洞に鉄製のタンクが作られ、そこに3000トンの水が貯められていた。そこで、岩盤に水が漏れないような表面処理をして、岩盤とタンクの間を水で貯めて岩盤からのガンマ線を吸収させることにした。また、太陽ニュートリノを捕らえるためには、増倍管に光が到達した時間も測定できなければならなかった。それを行うことができる電子回路をアメリカのペンシルバニア大学グループとの共同で導入した。さらにタンクの内部で発生するバックグラウンドを取り除くために純水製造装置の改良も行った。こうしたカミオカンデの改良作業が1984年から1987年始めにかけて行われた。

3. 超新星ニュートリノの観測

装置の改良作業がほぼ終わりに近づき、太陽ニュートリノ観測の準備がととのったのが、1987年初めであった。その年の2月23日に大マゼラン星雲で超新星爆発が観測された。大マゼラン星雲は、南半球で見ることができる星雲で、地球から約16万光年の距離にある。したがって、超新星爆発は16万年前に起きた現象であり、その時に放出されたニュートリノや光がやっと地球にたどり着いたのである。「超新星」とは、「新」という文字が入っていることと



図4 超新星1987Aが爆発する前と後の姿

反して、実は星の最後の過程である。星は宇宙に漂う塵が重力的に集まって形成され、その中心部での核融合反応によってエネルギーを作り出す。太陽の8倍以上重い星は、この中心部での核融合反応がどんどんと進み、最後には鉄が星の中心部に作られる。鉄は、すべての元素の中で最も質量欠損（元素を構成する陽子、中性子の質量の総和と元素の質量との差）が大きい元素であるため、核融合過程の最終段階として鉄が作られるのである。超新星爆発は、この鉄の中心核が重力によって押しつぶされて直径が10kmぐらいの中性子の星になる過程であると考えられていた。図4は、1987年2月23日の超新星(SN1987Aと呼ばれる)の爆発前と爆発後の姿である。

図5は、カムイオカンデが捕らえた超新星ニュートリノのデータを示す。図は、横軸が時間で縦軸は各現象のエネルギーである。約13秒の間に11個のニュートリノ現象が捕らえられた。このように、鉄の中心核が中性子星へとつぶれる時間スケールは、10秒程度であることがこの観測からわかった。超新星爆発を起こした瞬間の星は、まだ周りに多量の物質があるため、唯一ニュートリノだけが星から外へ飛び出ることができる。そのため、ニュートリノが爆発エネルギーの99%を担って放出され、残りの1%が物質を吹き飛ばす力学的なエネルギーや星を輝かせる光のエネルギーとなるのである。実際、この超新星が光り輝き始めたのは、カムイオカンデがニュートリノを観測した時刻から約3時間経ってからであった。

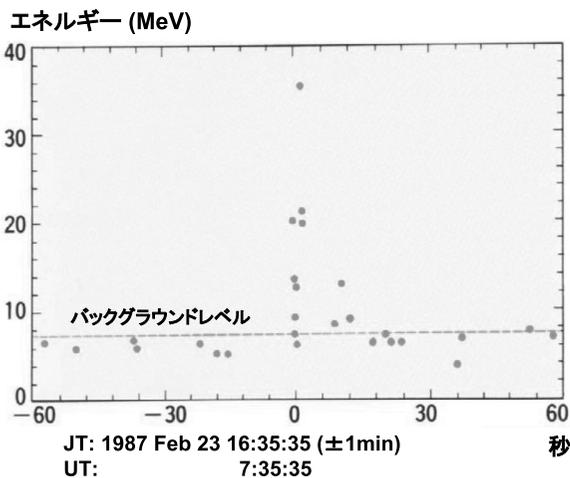


図5 カミオカンデが捕らえた超新星ニュートリノの信号

この超新星からのニュートリノの数とそれらのエネルギーから、超新星爆発で解放されるエネルギーを計算してみると約 3×10^{53} erg (ergはエネルギーの単位であり、 10^7 erg=1ジュールである)であった。この値は、太陽が今の明るさのまま3兆年かかって放出されるエネルギーに相当する。このように巨大なエネルギーがたった十数秒間に放出されるメカニズムとしては、中性子星の形成以外に考えられない。観測された現象の数は、たった11現象であったが、カムイオカンデの観測によって、超新星爆発の基本的なメカニズムが解明されたのである。

4. 太陽ニュートリノ

1987年から数年間のデータ取得により、カムイオカンデは太陽から飛んでくるニュートリノを捕らえることにも成功した。

太陽の中心部では図6に示すような核融合反応によりエネルギーが生み出されている。太陽ニュートリノを最初に捕らえた実験は今回ノーベル賞を小柴先生と同時受賞したデイヴィスが行った実験であった。デイヴィスの実験は、塩素の化合物（4塩化炭素）約600トンタンクに入れて、数十日間太陽ニュートリノに曝し、塩素とニュートリノとの反応によって生じるアルゴン原子をタンクから回収し、その数を数えるという方法であった。一回の回収で集められるアルゴン原子の数は、高々10個程度であった。このデイヴィスの実験は、1968年頃から行われたが、実験が観測した太陽ニュートリノの強度が太陽モデルからの予想値とくらべて1/4ぐらいしか

ないという結果を与えた。これは、「太陽ニュートリノ問題」としていろいろな側面から議論されてきた。中には、アルゴン原子の回収方法に疑問をもつ研究者もいた。

デイヴィスの実験と異なり、カムイオカンデでは、太陽ニュートリノを一つ一つの現象としてリアルタイムで捕らえた。太陽ニュートリノが水の中の電子と散乱し、その電子が発生するチェレンコフ光を捕らえるというのが、カムイオカンデの測定原理である。上記のようにこのチェレンコフ光のパターンからニュートリノの進行方向を捕らえることができる。したがって、現象の方向が太陽からの方向かを調べることによって太陽ニュートリノ現象を見極めることが

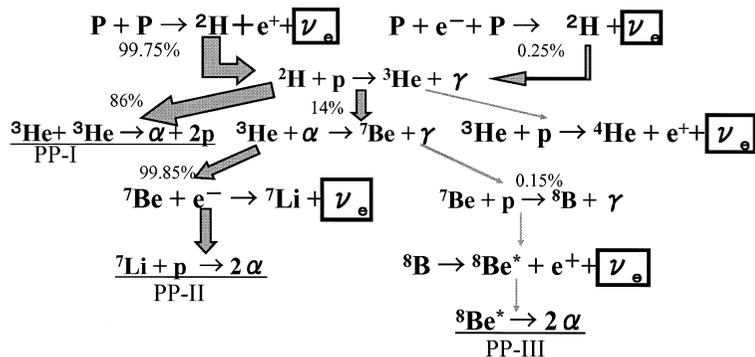


図6 太陽中心部で起きている核融合反応

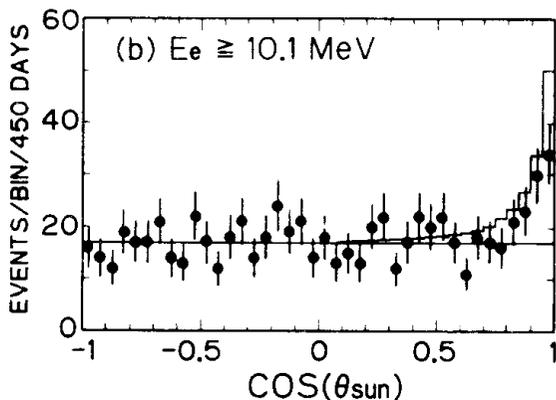


図7 カミオカンデが450日間の観測により捕らえた太陽ニュートリノ現象。図は、太陽との方向分布であり、右端に見られる現象の超過が太陽ニュートリノによる現象を示す。

できた。また、カミオカンデではチェレンコフ光の強度からニュートリノのエネルギースペクトルをも測定できた。これは、デイヴィスの実験ではまったく不可能であったことである。図7は、カミオカンデが1987年1月から450日分のデータを使って太陽との方向分布を見たものである。太陽方向に有意な現象の増加が見られたが、太陽ニュートリノ強度は太陽モデルが予想する値の約50%しかなかった。カミオカンデは、デイヴィスの実験が示した「太陽ニュートリノ問題」を再確認したのである。この結果は、1989年に論文として発表した。

5. カミオカンデからスーパーカミオカンデへ

陽子崩壊観測を目的として建設されたカミオカン

デだったが、主目的の陽子崩壊現象は捕らえることができなかった。陽子崩壊を捕らえるためには、もっと大きな装置が必要であると小柴先生は既に1983年に考えられ、スーパーカミオカンデの建設を提案されていた。カミオカンデによる太陽ニュートリノ観測によって、「太陽ニュートリノ問題」が確認されたが、その原因をつかむためには、もっと統計量を増やした精密な実験装置が必要であった。また、カミオカンデが捕らえた超新星ニュートリノの数は高々11個であったが、超新星爆発メカニズムを詳細に解明するには、装置を大きくしてもっと多くのニュートリノを捕らえる必要があった。こうした多目的な最先端研究を目指して、50,000トンの実験装置、スーパーカミオカンデが1991年から建設された。5年間の建設期間を経て、

1996年から観測が始まった。スーパーカミオカンデは、高さが41.4m、直径40mのタンクであり、光電子増倍管はカミオカンデの時と同じ大きさのものを11,146本使用した(図8参照)。スーパーカミオカンデのスタートと共にカミオカンデの運転は終了した。

カミオカンデの成果は、超新星ニュートリノの発見、太陽ニュートリノの観測のみならず、実はもう一つ重要な成果があった。宇宙から到来する陽子やヘリウム等の宇宙線は大気中で反応して、「大気ニュートリノ」と呼ばれるニュートリノを発生する(図9)。このニュートリノは、ミューニュートリノと電子ニュートリノが2:1の数の比で生成されると予想されていた。しかし、カミオカンデは、この

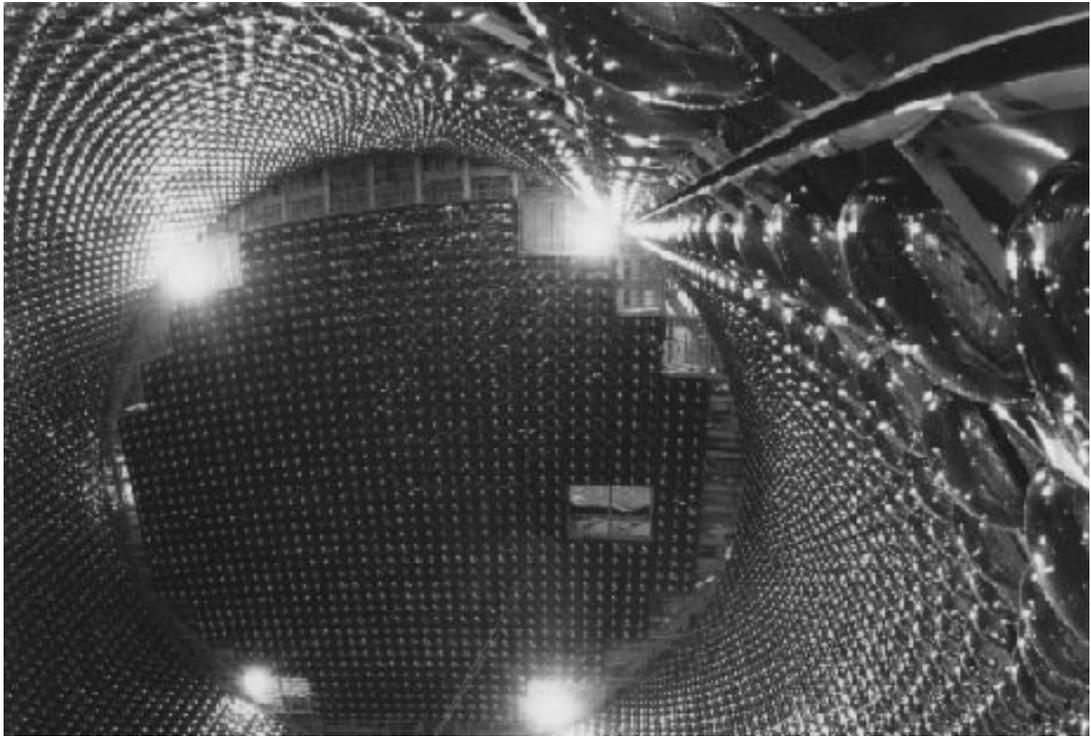


図8 スーパーカミオカンデ

数の比が1.2：1ぐらいであり、何か異常があるという論文を1988年に発表していた。スーパーカミオカンデは、この大気ニュートリノの観測を詳しく行い、このカミオカンデが見つけた異常の理由を1998年に解明した。ミューニュートリノの角度分布を観測したところ、地球の裏側でできたニュートリノは長い距離を飛行してくる間にタウニュートリノに変わってしまうことがわかった。タウニュートリノは、他のニュートリノと比べて反応率が小さいために、あたかもミューニュートリノが減ってしまったかのように見えていたのである。この飛行中にニュートリノの種類が変わってしまう現象を「ニュートリノ振動」と呼んでいるが、それが可能になるためには、ニュートリノが質量をもっていなければならない。いままでの素粒子理論では、ニュートリノは質量をもたないとして扱われてきたが、このニュートリノの質量の発見は素粒子理論にその変更を迫るのであった。

また、2001年には「太陽ニュートリノ問題」にも解も与えられた。スーパーカミオカンデは、20,000現象以上もの太陽ニュートリノを捕らえ、その強度、エネルギースペクトルを精密に測定した。2001年に重水を用いて太陽ニュートリノを捕らえたカナダの

実験（SNO実験）が結果を発表した。SNO実験は電子ニュートリノのみの強度を測定したが、スーパーカミオカンデにおいては電子とニュートリノの散乱を捕らえるために、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノのすべてが寄与した。スーパーカミオカンデの結果とSNO実験の結果とを比較したところ、もともとは電子ニュートリノである太陽ニュートリノが地球に飛んでくる間にミューニュートリノやタウニュートリノに変わっていることがわかった。つまり、「太陽ニュートリノ問題」の原因もニュートリノ振動だったのである。

さらにスーパーカミオカンデでは、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構にある陽子シンクロトロンで人工のミューニュートリノを作り、それを250km離れたスーパーカミオカンデで測定するという実験も行っている。これも世界で最初の試みである。この実験は、1999年にスタートし、今までの約2年間に取られたデータから大気ニュートリノ観測の結果を確認する結果を出しつつある。スーパーカミオカンデは、2001年11月12日に大きな事故があり、多数の増倍管を失ってしまったが、残された約5,200本の増倍管を使って実験をほぼ1年後に再スタートさせた。今後も、人工ニュートリノ実験、超

新星ニュートリノ観測，更なる大気，太陽ニュートリノ観測などを通して，素粒子物理学，天体物理学に対して更なる成果をあげていく。

まとめ

小柴先生が神岡の地下で行ったカミオカンデ実験は，超新星ニュートリノ観測，太陽ニュートリノ観測によって「ニュートリノ天文学」という新しい分野を切り拓いた。また，カミオカンデは，太陽ニュートリノの測定値が予想値に比べて小さい（「太陽ニュートリノ問題」）ことや大気ニュートリノのミューニュートリノ成分と電子ニュートリノ成分の比

が予想値とずれていること（「大気ニュートリノ異常」）を指摘したが，後にこれらはスーパーカミオカンデによって「ニュートリノ質量」が原因であることが示された。小柴先生が始めたニュートリノ天文学は，今後も大きく発展していくと考えられる。特に，ニュートリノ研究は，素粒子物理学，天体物理学にたいして，重要な情報を提供したことであろう。

このような研究の基礎を築いて頂いた小柴先生に心から感謝します。

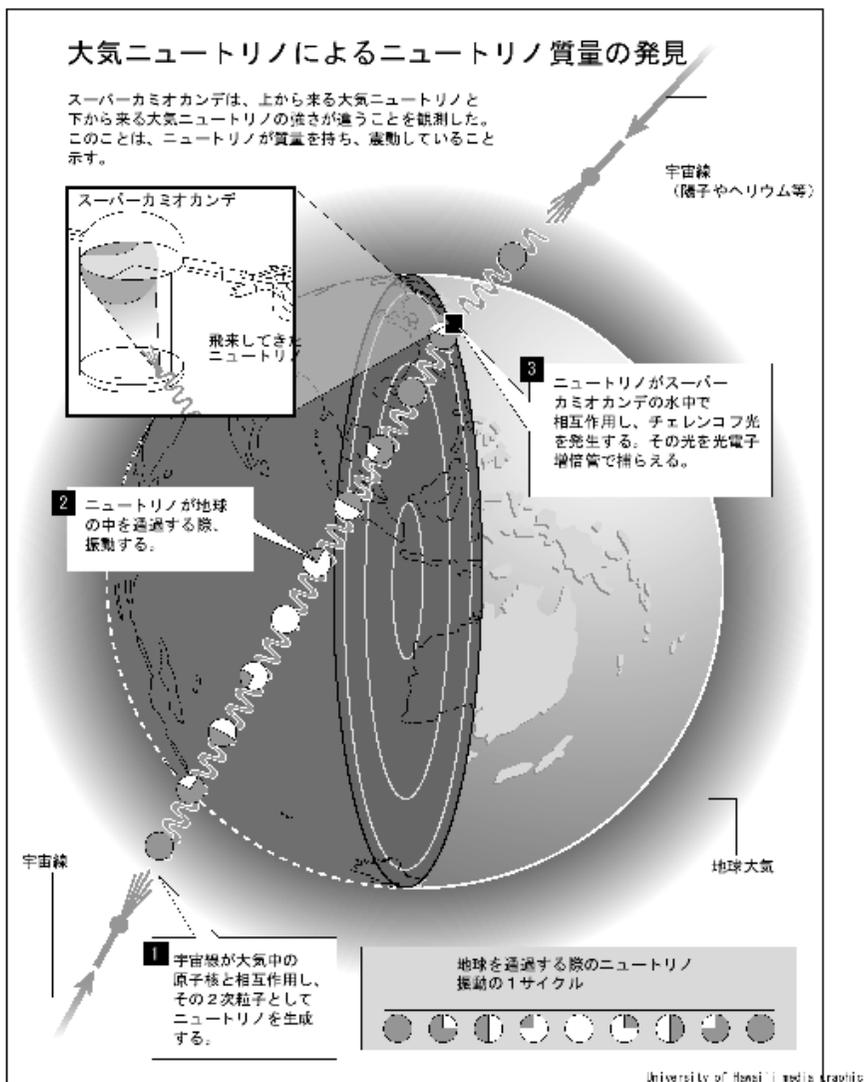


図9 大気ニュートリノとニュートリノ質量の発見