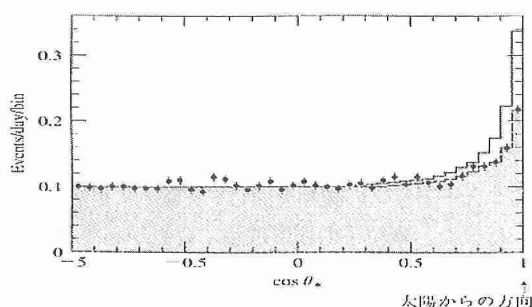
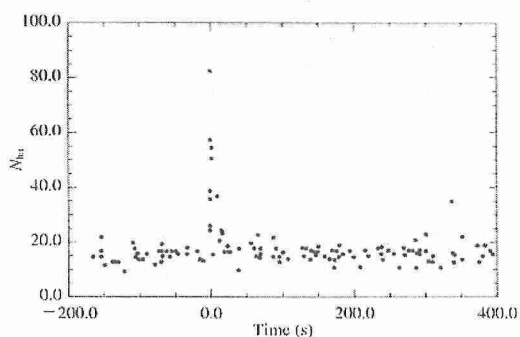


2002年度ノーベル物理学賞は、本学理学部名誉教授の小柴昌俊先生、アメリカのR. デービス博士、およびアメリカのR. ジャコーニ博士の3名に贈られることが決まりました。ジャコーニ博士は、それまで光・赤外線と電波という2つの窓のみから宇宙を眺めてきた人類に、新たにX線という窓を開く上で主導的な役割を果たしました。そして小柴・デービス両博士は、そうした電磁波の窓さえも超えた宇宙観測の窓として、ニュートリノを用いた新しい天文学の手段を開いたものです。小柴先生の受賞は日本のノーベル賞の中で、ビッグサイエンスに贈られた第1号でもあります。

小柴先生は本理学部（物理学教室）に所属するとともに、理学部附置の高エネルギー実験施設（素粒子物理国際研究センターの前身）を創設、それらをベースに、加速器実験と非加速器実験の両面から、素粒子物理学の研究を精力的に推進しました。とくに陽子崩壊の実験のため岐阜県神岡町の地下に建設した水チェレンコフ装置「カミオカンデ」（神岡 Nucleon Decay Experiment の略）を用い、1987年2月23日世界時7:35過ぎ、大マゼラン星雲に発生した超新星SN1987Aから、爆発に伴う約11個のニュートリノを検出することに成功し、ニュートリノ天文学の幕を開けました。

小柴先生の略歴

1926年愛知県生まれ。1951年東京大学理学部物理学科卒業、1955年ロチェスター大学大学院修了。1970年東京大学理学部教授、1987年定年退官、東京大学名誉教授となる。その後1997年まで、東海大学理学部教授。素粒子物理学における長年の業績により、1985年のドイツ連邦共和国功労勲章大功労十字章受章をはじめ、仁科記念賞、朝日賞、文化功労賞、日本学士院賞、藤原賞、文化勲章、Wolf賞など、数多くの賞を受賞している。



小柴昌俊先生のノーベル物理学賞受賞を祝う

理学系研究科長 佐藤勝彦

2002年度のノーベル物理学賞を理学系研究科名誉教授の小柴昌俊先生が受賞されました。理学系研究科を代表し心から小柴先生にお祝い申し上げます。

この度の受賞は、1987年2月に起こった超新星からのニュートリノを神岡鉱山に設置したカミオカンデによって検出したことにより、ニュートリノ天文学という新たな研究分野を開拓した業績が高く評価されたことによります。カミオカンデは小柴先生をセンター長として理学部に設置されていた素粒子国際研究センターが建設運用していたもので、この成果は同時に理学部・理学系研究科の成果であるといえます。この成果がノーベル賞に値するものであることは、超新星ニュートリノの検出直後から、広く認識されていたことであり、今年まで15年間待ち続けていた受賞であったといえましょう。

この成果の後、小柴先生の後継者は当初の目的の一つである太陽ニュートリノの観測を続けその量は理論値の半分程度しかないことを明確に示し、標準理論と観測にははっきりと矛盾があることを明らかにしました。さらに小柴先生の後継者たちはカミオカンデを発展させたスーパーカミオカンデを建設し、太陽ニュートリノの観測と大気ニュートリノの精密な観測によりニュートリノが質量をもち、異なったタイプのニュートリノと入れ替わりながら振動することを明確に示しました。このように小柴先生の研究は大きく発展し、さらにノーベル賞の対象となる研究成果があがっております。

理学系研究科は2002年4月に理学系研究科憲章を定め、「自然界の構造や進化を明らかにし自然界に働く法則や基本原理を探求し、人類社会を支える技術の基礎を築くと共に文化としての科学を創造する」ことを謳っております。小柴先生の受賞は、すぐ実利につながる応用的研究を重視し基礎研究を軽視する傾向が強い世情において、理学系研究科の教職員、学生のみならず、基礎科学を研究、また学ぶものにとって、この上もない励ましとなりました。小柴先生は基礎科学の重要性についてしばしば発言されておりますが、今後とも基礎科学分野のリーダーとして広く社会に発信していただきますようお願い申し上げます。

最後に、先生のますますのご健勝を祈念いたします。

左の図：(上) カミオカンデが捉えた、超新星SN1987Aからのニュートリノの津波。横軸は時間、縦軸はニュートリノのエネルギーで、1つの点が1つの事象を表わす。(下) 太陽を基準に表わした、低エネルギーニュートリノの到来方向の分布。小柴昌俊著、「KAMIOKANDEのこと」(日本物理学会誌1996年5月号)より、許可を得て転載。

心からお祝いを申し上げます

物理学専攻、素粒子物理国際研究センター長（併）
駒宮 幸男

小柴先生、受賞に対し心からのお祝いを申し上げます。先生が「ニュートリノ天文学」という新しい学問分野を創成された事に対する当然の評価であると考えます。ニュートリノは弱い相互作用しかしないので受賞が遅れたというのが研究者の間でのもっぱらのうわさです。

1987年2月、16万光年のかなたにある大マゼラン星雲の超新星1987Aの大爆発が生じ、そこからのニュートリノを、先生が考案されたKamiokande測定器が捉えました。それは小柴先生が東大を退官されるわずか1ヶ月前のことであり、先生がこのような「幸運」を呼び込まれたことは我々には大変な驚きでした。あたかも、宇宙が先生の直観力に屈して、16万年後の退官にまにあうように時空を超えて爆発のタイミングを微調整したかの如くに見えました。

その後、神岡での実験はSuper Kamiokandeへと発展し、大気ニュートリノと太陽ニュートリノの観測によりニュートリノが質量を持つことを発見するなど、さらに多くの成果を生み出しました。

一方で先生は、1960年代の終わりから、当時は海のものとも山のものともわからなかった高エネルギーの電子・陽電子衝突実験の重要性を直観的に見抜き、その道の大家であったブトケル教授をロシアのノボシビルスクに訪ねられました。

1974年には海外において国際協力で電子・陽電子衝突実験を行なうため、素粒子物理国際研究センター（全学附置）の前身である高エネルギー実験施設を新設されました。これが、先生や故折戸周治教授の努力によりドイツの電子シンクロトロン研究所（DESY）におけるDASP、JADEの国際協力実験、さらにCERNにおけるOPAL実験へと発展しました。これらエネルギーフロンティアにおける一連の実験では、グルーオンの発見、素粒子の世代数の決定など多くの成果をもたらしました。先生が開拓されたこの道は、現在CERNで建設中の加速器LHCを用いたATLAS実験、そして我国での建設を目指している国際プロジェクト電子・陽電子リニアコライダーJLCへとさらに大きく発展しております。

先生は学生や若い研究者に対して、「将来大きく育つかも知れないアイデアのタマゴをいくつもかかえてあたたためておけ。そして、タマゴを時々取り出して、機が熟したかどうか気をつけていなさい」という事をよく言っておられました。先生のかかえられていたタマゴはいくつも孵化して、大きな学問へと成長しました。

これからもお元気で、御指導くださります様お願い申し上げます。

お祝いの言葉

東京大学名誉教授（1991年3月東京大学退官）
東京理科大学理学部教授 上村 洸

小柴昌俊先生、2002年ノーベル物理学賞受賞、誠におめでとうございます。

1987年2月に、カミオカンデで大マゼラン星雲の超新星爆発によるニュートリノを観測されたビッグニュースに物理学教室が喜びの興奮に包まれたとき、私は、「太陽以外の天体からのニュートリノを初めて観測した」世紀の大発見に巡り会えた教室主任として、嬉しさ一杯で興奮したのを良く覚えております。そして、1988年のノーベル物理学賞を先生に受賞して頂きたいという願望が物理教室に漲って参りました。残念ながらその年は私どもの願望は実現しませんでした。しかし、先生はその後折に触れて、ニュートリノ天文学への夢を科学的好奇心に溢れた口調で語り続けてこられ、その夢が最近のスーパーカミオカンデにおけるニュートリノ振動の観測へと発展して、再びカミオカンデが世界の物理学者の話題に上ることが多くなりました。この度これらの業績が高く評価されてノーベル物理学賞を受賞され、陰ながら応援してきた応援団の一員として、こんなに嬉しいことはありません。

先生には、これからもご自愛の上、若い人たちの物理学への夢を育てていただきますようご指導を賜りたいと願っております。

ニュートリノとは

物質を構成する素粒子の1グループで、電子型、ミューオン型、タウ型、およびそれぞれの反粒子の、合計6種類がある。ニュートリノの存在は1930年、パウリにより理論的に予言されたが、電氣的に中性できわめて反応しにくいいため、原子炉で発生するニュートリノが直接に検出されたのは、ようやく1955年になってからである。

太陽内部の原子核反応に伴って発生するニュートリノは、今回のノーベル賞受賞者の1人であるデービスが1970年代に初めて捉えたが、その数が理論予測の約1/3しかないこと（太陽ニュートリノ問題）が指摘された。これはカミオカンデおよび後継のスーパーカミオカンデ（宇宙線研究所）により、さらに高い精度で検証された。

太陽ニュートリノ問題は、ニュートリノが種類ごとに異なる微小な質量をもち、その結果ニュートリノの種類が時間とともに入れ替わるという、「ニュートリノ振動」が原因と考えられるようになった。この考えは1998年、スーパーカミオカンデにより、大気中で発生するニュートリノの観測を通じて実験的に検証された。これはまた、素粒子の標準理論に変更が必要なことを意味している。

小柴先生のノーベル賞を祝して： 小柴先生とカミオカンデ

宇宙線研究所 梶田 隆章

小柴先生、ノーベル物理学賞受賞おめでとうございます。

今回の受賞理由の一つである超新星爆発時のニュートリノ観測のエピソードについては佐藤先生が詳しく書かれていますし、私はちょうどその現場には居合わせなかったということもあるので、カミオカンデ実験開始当時学生として実験に参加できるという幸運に恵まれた者として、ここでは少し別な観点から小柴先生とカミオカンデやニュートリノのことを書きたいと思います。

今回の受賞理由となった超新星ニュートリノ観測、太陽ニュートリノ観測を成し遂げたカミオカンデ実験は、1983年に観測を開始しました。カミオカンデが建設された当初の目的は「陽子崩壊の探索」でした。小柴先生は、「陽子崩壊を発見することは大切だが、更に一歩進めて、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ことが必要となる。そのためには、ある特定の崩壊モードだけでなく、様々な崩壊モードを調べ、どの崩壊モードにどれだけの割合で崩壊するかまで測定できなければならない。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。」と考えて、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）との共同で開発されました。陽子崩壊は残念ながら見つかりませんでした。上で述べた、先生の研究に対する基本的な考えがその後の研究の発展に不可欠でした。

カミオカンデでは、当初、高いエネルギーの現象（30MeV以上）のみしか観測を行っていませんでした。小柴先生は、カミオカンデの観測が開始されるとすぐに、宇宙線ミュオンが測定器内で止まり、崩壊して生成された電子のスペクトルが10MeV以下まできれいに見えていることから、もっとエネルギーの低い現象も観測できるに違いないということを見抜きました。これは陽子の崩壊モード決定のためにと開発した巨大な光電子増倍管の威力です。このため、1984年から太陽ニュートリノ観測を目指して装置の改良が行われました。ただ装置の改良を行いましたと書くとそれだけですが、我々にとっては未知の低エネルギーと低バックグラウンドのフロンティアであり、数々の驚きに満ちた経験と失敗の繰り返しで、ある意味楽しい毎日でした。その改良が最終段階に達した1987年2月23日に大マゼラン星雲で起きた超新星爆発からのニュートリノを世界で初めて捕らえました。小柴先生の東京大学定年退官の1ヶ月前ということで、「運がいい」とよく言われていますが、先生が「運は、よく準備されている実験装置に訪れるものだよ」とおっしゃっていたことを付け加えます。太陽ニュートリノを捕らえようとする努力をしていなかったら超新星爆発ニュートリノは捕らえられな

かったでしょう。

目的の太陽ニュートリノは、約2年分のデータを集めて1989年に観測結果が発表されました。先生は、「方向性が測れなければ、天文学ではない」とおっしゃっていました。今年のノーベル物理学賞を同時受賞されたデービス博士は、塩素と太陽ニュートリノが反応し、発生するアルゴン原子の数を数えるという方法により世界で初めて太陽ニュートリノ観測を行いました。それに対して、小柴先生がカミオカンデにおいて考えられた方法は、太陽ニュートリノと電子との散乱を捕らえるということであり、ニュートリノの到来方向を捕らえることができました。それにより、観測されている現象が確かに太陽からきているということを示したのです。さらに、デービスが言ってきた「観測されたニュートリノ強度が標準太陽モデルに予想値に比べて有意に小さい」（太陽ニュートリノ問題）ということを確認しました。

小柴先生はこれらの観測をカミオカンデで成功させましたが、それと共にカミオカンデ装置の大きさからくる限界にも早くから気づかれていました。本格的にニュートリノ天文学の観測を行い、また陽子崩壊探索の感度も向上させるための装置として、すでに1983年暮れころにはカミオカンデの約30倍の有効体積を持つスーパーカミオカンデ装置を提唱されました。スーパーカミオカンデは1996年に完成し、1998年には「大気ニュートリノ観測によるニュートリノ振動の発見」という大きな成果をあげ、また、2001年にはカナダのSNO実験とスーパーカミオカンデの太陽ニュートリノデータを比較することにより、積年の太陽ニュートリノ問題の解はニュートリノ振動であることを解明しました。このように小柴先生が開拓してきた「ニュートリノ天文学」は今まさに花開き、日本が世界をリードしている形ですが、これも小柴先生の先見の明の功績によるものと言って過言ではないでしょう。

我々カミオカンデやスーパーカミオカンデに参加したものは、小柴先生のおかげで今まで何度も「物理を楽しむ」ことができました。これからも新たな発見を目指して、がんばっていききたいと思います。これからもお元気で、御指導くださりますようお願いいたします。

ノーベル賞受賞記者会見の動画や、フルカラー版の解説記事などが、

<http://www.s.u-tokyou.a.c.jp/koshiba/>

にてご覧になれます。

となりの理論屋が見た 超新星ニュートリノ検出の現場

物理学専攻 佐藤 勝彦

今でも我々の伴星雲である大マゼラン雲に、超新星が現れたというニュースを聞いたときの、緊張感と興奮を忘れることはない。私の大学院学生の頃からの大きな研究テーマが、超新星ニュートリノだったからである。超新星が我々の天の川銀河の中心で爆発すれば、カミオカンデで200～300発のニュートリノが見つかるはずだということは常に考えていたので、5倍ほど遠い大マゼラン雲なら、10発程度のニュートリノが受かるだろうと、すぐ予想はたった。この後の1～2週間で、それまでやってきた理論的な超新星ニュートリノの研究が支持されるのか、潰されるのかわかる。もっとも大マゼラン雲に超新星が現れるとは、私も含めて予想した人はこの業界には、ほとんど居なかったであろう。マゼラン雲は、伴星雲なので近いが、親である天の川銀河に比べれば何桁も星の数が少ないので、超新星の起こる確率は低いはずだとして、考えたこともなかった。

私が超新星1987Aの出現を知ったのは、2月24日(火)、天文コミュニティの口コミからである。超新星の出現が、IAUサーキュラー4316号で報じられたが、これをチェックしているのは小惑星、彗星、新星探しをしている人くらいで、その分野の方が教えてくれたのである。私は早速、戸塚さんに電話した。彼はすでにアメリカの共同研究者からの連絡で、超新星が現れたことは知っていた。私は戸塚さんに、まあ10発くらい見つかるのではないのでしょうかと話し、彼も同じような推定をしていたが、超新星からのニュートリノが受かるなど半信半疑で、ともかく神岡から磁気テープを取り寄せて調べることにしましたとのことだった。私は当然、神岡にいる大学院生が磁気テープを抱えて空港に向かっていくものだと信じていた。しかし後で実はテープは宅急便で送ったと聞いて仰天した。ニュートリノが検出できる装置は、カミオカンデほど大規模なものはアメリカのIMBしかないが、イタリアのモンブランやソ連のバクサンにもあり、彼らは世界中で一番乗りを目指して解析しているはずである。モンブランは90トンの液体シンチレータ、バクサンは200トンの同じく液体シンチレータで、カミオカンデには及ばないものの、先に見つける可能性はある。それなのにカミオカンデはなんと悠長なことか。

この週の27日(金)は、小柴先生の物理教室での最終講義の日である。物理の大講義室、1220号室はほぼ満席で、小柴先生のユーモアある講義を拝聴した。小柴先生の今もしばしばおっしゃる言葉、「税金を使って夢を見させて頂いているのだ。業者の言いなりで買う馬鹿がいるか」、「実験家は、

常に時期が来れば孵すことのできる卵を抱えておけ」などの名言はこの頃からおっしゃっている言葉である。小柴先生は、米国から帰国、原子核研究所の助教授から、本郷物理教室に研究室を構えてからの研究の歴史を詳しく話された。小さな研究室から、次第に予算を獲得し、現在の素粒子物理学国際研究センターの前身である施設の立ち上げ、発展、ソ連、ドイツ、CERNでの研究、カミオカンデの建設にいたる苦勞話など話された。この講義が終わりに近づくと、感極まって男泣きに泣きながらの講義となった。先生がいかに東大物理教室を愛しておられたのか、私にも強く感じられた。しかし、超新星1987Aの話は残念ながら小柴先生の最終講義には出てこなかった。

実際磁気テープは、この日に到着したのだった。最終講義の後には、恒例にしたがって物理の会議室、1320号室でのパーティーである。なくなられた折戸先生が小柴先生のお弟子さんを代表し、挨拶された。パーティーに参加していた院生の中畑雅行さんや平田慶子さんに、いまテープの解析を始めたところだと、ビールを飲みながらその場で聞いた。とにかく泊まり込みで徹夜の覚悟でやるとのことだった。頑張ってくださいと、お願いした。

翌日、ひょっとしてもう見つかっているのではないかと考え、お昼ごろ戸塚さんに電話した。まだ解析中ですという返事だったが、すごく機嫌の良い明るい声だった。戸塚さんはいつも歯切れの良い、明るい声で話す方なので、素直にその返事を信じ、まだ見つけていないと言うのならどの時刻あたりを見ているのか聞いた。超新星爆発はコアの重力崩壊でニュートリノが放出されるが、そこで発生した衝撃波が表面まで達するのに、赤色巨星なら1日かかる。つまり可視光で見えだした時刻の一日前から解析しなければならない。私は老婆心で、見つからないならそこまで遡って見なければならぬとコメントしたのである。後で知ったことであるが、戸塚さんはすでに中畑さんや平田さんからその朝に報告を受け、私が電話をしたときには、確かにカミオカンデが超新星からのニュートリノを検出していたことを知っていたのである。にやにや笑いながらの電話対応だったのである。そして小柴先生により、この検出は、きちんとした解析が終わり論文を投稿するまでグループ外には絶対漏らすなという箝口令が出されたのである。

そんなことを知らない私は、まったくイライラする毎日だった。ただでさえ解析の開始が他のグループより遅れているのに、いったい何をモタモタしているのだろうと。

じっさい、次の週になると、予想されたとはいえ大ニュースが入ってきた。3月2日の月曜日、なんとモンブランのイタリアグループが超新星からのニュートリノを5発検出したというニュースが入ってきたのだ。発表日は前週の28日であった。私はこのニュースを、あわてて平田慶子さんに伝えた。すると半時もたたないうちに、小柴先生から電話がかかっ

てきた。ニュースはIAUサーキュラーからのものだったと記憶しているが、小柴先生はその検出の時刻などを聞いてなんだかホッとしたような気持ちになっているような雰囲気を感じた。今では広く知られているように、モンブランが検出したという時刻は、日本時間で23日の2時52分で、カミオカンデの検出した時刻より4時間半前ということになる。モンブランの結果は今では信用する人はほとんどいないが、モンブランの研究者や一部のヨーロッパの理論家は今もって、これも本当に検出したのだと言い続けている。爆発は2回起こったというのである。一度は通常の超新星爆発、2回目は作られた中性子星がクオーク星になったときであるというもっともらしい理屈もつけてである。しかしカミオカンデのその時刻には何も検出されていない。私もカミオカンデのメンバーの動きや、私への対応などから、うすうすカミオカンデは超新星ニュートリノを検出したに違いないと感じるようになった。また小柴先生や戸塚さんのイタリアグループの結果をまったく無視する言動などから、その時間にはカミオカンデは何もシグナルはないのだと考えざるを得なくなった。

私は当時、大学院生だった鈴木英之君（現在、理科大）と、超新星の中でのニュートリノの伝搬の研究を進めていた。その12年前、ポストドク時代に、私はCERNのガルガメールによって発見された弱い相互作用の中性流相互作用によって、電子型ニュートリノは超新星のコアにトラップされるという理論を出していた。もし中性流相互作用が存在するとニュートリノは原子核とコヒーレントな散乱を起こすため、その散乱断面積が100倍も大きくなり、単にコアが不透明になるだけではなくニュートリノの拡散時間が長くなり、ニュートリノは超新星のコアにわずか10秒程度であるが、閉じこめられる、つまりトラップされることを示したのである。実際、超新星コアの中でニュートリノはトラップされ、そのフェルミエネルギーは150MeVを越えることも示していた。鈴木君はコンピュータシミュレーションでこの拡散を計算し、実際このようにニュートリノが逃げ出すのは長い時間がかかることを示していたのである。

それでは、実際カミオカンデが捕らえたニュートリノバーストはどのくらいの時間持続しているのだろうか？ともかく早くニュートリノデータをいただき理論家の立場から解析したかった。そこで、2人で準備を始めることにした。どうせ10個前後の数のニュートリノが何MeVかのエネルギーで検出されたというデータが出るのはわかっているので、その数値をたたき込めば結果が出るようになっておけばよい。3月2日からの週は、鈴木君と泊まり込み体制になった。眠くて頭がもうろうとしてどうしようもなくなったときは、毛布にくるまってソファで眠った。6日ころ、カミオカンデのグループの論文が完成し投稿するあたりで小柴先生からデータをいただいた。直ちに我々はプログラムに入力し、全放出エネル

ギー、平均エネルギーを計算し、その少し前に受け取っていた、ローレンスリバモアグループのコンピュータシミュレーションとも比較した。ニュートリノの質量の上限も、ニュートリノバーストの幅から制限を付けた。

小柴先生から、次の週の月曜日、3月9日に文部省で開催される記者会見に同席するように言われた。出席するつもりでいたが、論文の作成に手間取って、完成し投稿したのは9日の朝となった。国際ビジネスメールでPhysical Review Lettersに投稿したときには、記者会見の時間になってしまっていた。翌日の新聞の1面はもちろん、カミオカンデのニュートリノ検出の発表で飾られた。小柴先生が立って図を指し説明している写真がどの新聞にも載っていた。記者会見はすっぽかし、小柴先生にはたいへん申し分けないことをしたけれど、我々の論文は、超新星ニュートリノの解析論文としては、1、2番の速さだった。

その後、カミオカンデの検出時刻のあたりを調べることで、IMBグループが8発を見つけ、またバクサンも5発を見つけた。カミオカンデの検出は独立な2つのグループによって確認された。しかしモンブランのデータはどうしても矛盾する。それどころか、さらに驚くべきことに、ローマ郊外にある重力波検出装置が、まさにモンブランの検出時刻に重力波を検出したと発表したのである。常識的には、この感度の悪い装置で大マゼラン雲からの超新星重力波が観測されるためには、星の全質量を重力波に変えても及ばないほどの強い重力波が放出されなければならない。

鈴木君とはこのニュートリノバーストの解析の論文を2つほど書いた。超新星1987Aからはその後、これまた打ち上げ直後の日本のX線天文衛星「ぎんが」によってX線が検出されるなど、次から次へと新しいことがわかってきた。近代的な光電技術を持つようになって初めて現れた超新星として、歴史に残る発見が数多くあったが、ニュートリノの検出とは比べようもない。

1987年の10月以来、15年の間、毎年ノーベル賞発表の頃になると必ず、新聞社から電話や訪問取材を受けた。ある新聞社からは、発表前に受賞お祝いの原稿を書くように求められ書いたこともある。そしてこの10月8日、今年のノーベル賞の発表となった。スーパーカミオカンデやSNO検出器の活躍で、今や後押しも強い。今年こそ間違いない。理学系研究科長として本部と協議の上で記者会見もセットし、受賞のパーティーも発表の翌日の9日夕方に開くことを決めた。小柴先生にも、前もってこのスケジュールを進めることをお願いした。そして、その日がまさに来た。小柴先生、おめでとうございます。

超新星ニュートリノ検出の科学的意義

物理学専攻教授 佐藤勝彦

はじめに

1987年2月23日、日本時間午後4時35分、およそ10兆個を越えるニュートリノが私たちの体を貫き再び宇宙に飛び去っていった。このニュートリノは我々の住んでいる天の川銀河の伴星雲であるマゼラン雲（写真1）から飛来したものである。

15万年の昔、この星雲の中にあった1つの青い超巨星、タランチエラ星団のとなりにあるSK-69・202がその一生を終え大爆発をおこした。この超新星爆発によって放出されたニュートリノが15万年の旅を終えて地球に降りそいだのである。この超新星SN1987A（写真2）はケプラー以来383年ぶりの肉眼で観測することのできる超新星として可視光や、X線、電波などあらゆる波長の電磁波によって今日も精力的に観測が続けられている。



写真1

我々の天の川銀河の伴星雲である大マゼラン雲。
(MACHO project)

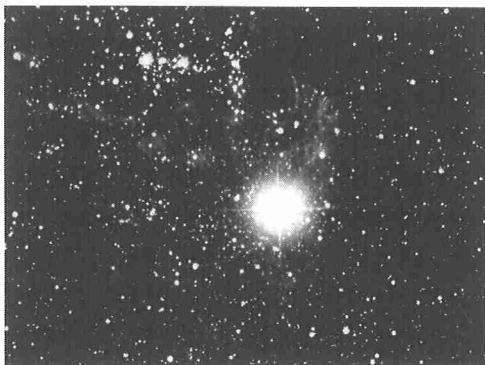


写真2

大マゼラン、タランチエラ星団の横に現れた超新星1987A
(photographed by D.F.Malin, Anglo-Australian Telescope Board, 1987)

星の進化と超新星

よく知られているように、太陽のように自ら輝くことのできる星、恒星は天然の核融合炉であり、核反応によって解放されたエネルギーによって輝いている。星はその一生のほとんどは水素を燃やして輝いているが、やがてその燃えかすであるヘリウムがたまり中心にヘリウムのコアが形成される。ヘリウムコアは自分の重みで収縮をおこし、中心の温度や密度が上昇する。その結果、中心でヘリウムの核燃焼が始まる。このように、星は重力収縮によって中心の温度や密度を上昇させることにより、前の段階での核燃焼の灰を新たな燃料としながら進化するのである（図1）。しかし核燃焼の最後の燃えかすである鉄のコアが中心に形成された時、もはや収縮によって新たなエネルギー源を得ることはできない。それでは星は以後どのような進化をたどるのだろうか？中心温度が100億度を越えると鉄の原子核が熱によって分解されるようになる。分解が起こるとき大量のエネルギーを吸うことになる。もはや収縮によって圧縮されても十分圧力が高くないので、星はさらに収縮を続けることになる。また物質密度が1立方センチメートルあたり30トンより高くなると原子核の電子捕獲反応がはじまる。電子はフェルミ粒子と呼ばれる種類の素粒子で、このような高密度に圧縮されると、例えば温度がゼロ度でも高いエネルギーを持つのである。このような密度の高い星が自らの重みで崩壊しないように支えていたのは電子の縮退圧と呼ばれる圧力である。しかし電子捕獲反応で電子の数が減少すると星が収縮しても十分高くないのでさらに収縮を続けることになる。このようにして星の中心の鉄のコアはカタストロフィックに急激に収縮を続けることになるのである。

鉄のコアの質量が太陽の質量の2倍程度までなら、この収縮は密度が原子核の密度の2、3倍程度になったところで止まり、中心には中性子星と呼ばれる星が残される。原子核の密度を超えると陽子や中性子の間に働く核力が強い斥力となるため、収縮が止まるのである。中性子星が形成される様子を計算機シミュレーションによって示したものが図2である。星をタマネギの皮のように分割し、一般相対論に基づいて収縮、バウンスを計算したものである。この図の時刻ゼロで星のコアはバウンスし、衝撃波が作られる。もしこの衝撃波が十分強ければ、外層を宇宙空間にはじき飛ばすことができる。もしそれに失敗すると上からどんどん上の層が落下し、中性子星は結局ブラックホールになってしまう。ここで重要な役割を果たすのがニュートリノである。鉄のコアが中性子星まで収縮したとき解放される重力のエネルギーはおおよそ10の53乗エルグであるが、このエネルギーの99%はニュートリノとして宇宙空間に放出される。衝撃波として外層に運ばれ、可視光などで見えるエネルギーはその1%程度なのである。このシミュレーションでは、衝撃波が発生した初期段階では弱く、このままでは落下してくる外層のために消えてしまうような状況にあったが、コアから漏れだしてくるニュートリノが後押しをすることで衝撃波は生き残り、爆発に成功している。しかし星全体の質量が太陽の30倍を超

えるような星では、衝撃波は弱く結局落下してくる外層も含めて星はブラックホールになってしまう。それでは爆発した場合どのようにニュートリノは放出されるのだろうか？ 図2に示すようにニュートリノの種類によって時間的変化は異なるが、およそ10秒にわたってニュートリノは放出される。このニュートリノバーストの持続時間はニュートリノがコアの中で拡散しながら出てくる時間に相当する。

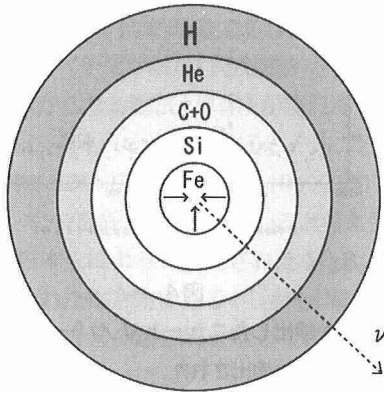


図1
超新星爆発をおこす寸前の星の構造

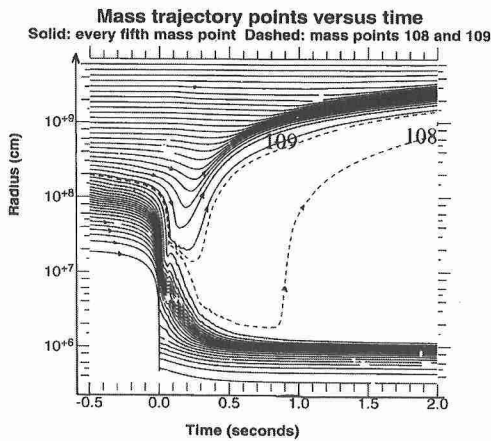


図2
星のコアの重力崩壊と超新星爆発のシミュレーション。
主系列で太陽の15倍の質量を持った星の場合。
(Totani, Sato, Dalhed, Wilson, 1998)

ニュートリノバーストの観測

小柴先生をリーダーとするグループは1983年、本研究課題に係る3000トン水チェレンコフ装置「カミオカンデ」を神岡鉱山の地下1000メートルに建設した。同型の8000トン水チェレンコフ装置が前年の1982年にアメリカでIMBグループによって設置され既に稼働していたが、カミオカンデはチェレンコフ光の集光率等で圧倒的な性能を誇る。同装置の当初の目的は、素粒子物理学の最大の問題の一つである力の統一理論、大統一理論を実験的に検証するため、この理論が予言する陽子崩壊を探索することであった。しかし、2年余の探索によっても陽子崩壊は観測されず、陽子は

崩壊するとしてもその寿命は当初の大統一理論の予言よりはるかに長くなければならないことが明らかになった。小柴先生のグループはさらに、太陽からのニュートリノを観測するために、この装置の改良を1985年から2年間かけて行った。水チェレンコフ装置で10MeV程度の低エネルギーニュートリノを観測した例はそれ迄なく、多くの研究者がその成功を危ぶんでいた。しかし環境ノイズを落とす大幅な装置改造は1986年末に成功裏に終了し、1987年初頭から太陽ニュートリノの観測を開始することができた。観測を開始して2カ月後に、大マゼラン星雲に超新星が出現し、ここからのニュートリノ検出に成功したのである。そして米国のIMBグループは小柴先生から知らされた検出時刻あたりのデータを調べることで、8個のニュートリノが検出されていることを確認したのである。

まず細かな点は考慮せずバーストの全体的性質を見てみよう。まず始めに、神岡やIMBの装置で検出されたニュートリノは総て反電子型ニュートリノだと見なそう。図3で示した超新星爆発の数値実験によれば全ての種類のニュートリノはほぼどれも同じ様に放出される。しかし水チェレンコフカウンターの中でもっとも検出され易いのはこの反電子型ニュートリノだからである。水の酸素原子核である陽子と反応すると陽電子が放出される。この陽電子は光の速さに近い速さで運動するのでチェレンコフ光という光を放出する。これを観測することによってニュートリノのエネルギーがわかるのである。

もっとも基本的な性質の1つはバーストの持続時間である。神岡のデータでは13秒、IMBでは6秒である。現在常識となっているニュートリノが超新星コアに一時的に閉じこめられるというニュートリノトラッピング理論では超新星コアからのニュートリノの拡散時間はおよそ10秒であり、またそれに基づいた計算機シミュレーション(例えば、図3)もそのような結果となっている。したがって持続時間はどちらのデータも理論と良く一致している。第2の基本的性質はニュートリノの平均エネルギーである。神岡、IMBでそれぞれ検出されたニュートリノのエネルギーから、その装置の特性を補正してニュートリノの平均温度を求めると神岡2.8MeV、IMB 4.6MeVとなる。IMBのデータがやや高い温度をあたえるのはその検出のしきいエネルギーが高いためである。いずれにせよこの値は数値計算の予言とほぼ一致している。第3の、そしてもっとも重要なバーストの性質はその全放出エネルギーである。いま求めたニュートリノの温度と、神岡、IMBそれぞれ11個、8個のニュートリノが検出されたことから $2.9(+0.6, -0.4) \times 10^{53}$ エルグ(神岡)、 $1.5(+1.2, -0.6) \times 10^{53}$ エルグ(IMB)と推定できる。重力崩壊によって放出されるエネルギーと良く一致している。

このように、小柴先生をリーダーとするカミオカンデの超新星ニュートリノ検出は、これまで理論的にしか語ることでできなかった、星の最後の大往生である超新星爆発の理論を観測的に実証したのである。ニュートリノで宇宙を観測し、天体の進化、宇宙の進化を明らかにするニュートリノ天文学を

創始したと言えるのである。

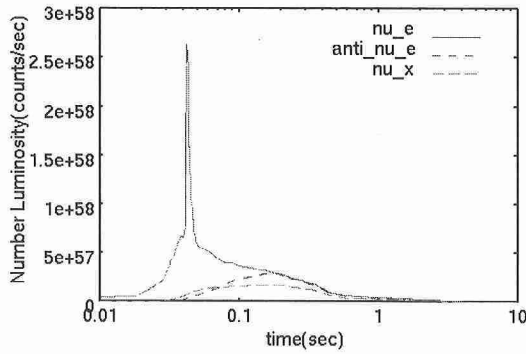


図3

図2に示されたシミュレーションで計算された超新星からのニュートリノの輝度の時間変化。十数秒にわたってニュートリノは放出される。

(Totani, Sato, Dalhed, Wilson, 1998)

ニュートリノ天文学の進展

超新星からのニュートリノが検出されてから、もうすぐ16年となるが、世界には多くのニュートリノを検出することができる装置が稼働している。その代表が、カミオカンデの後継装置であるスーパーカミオカンデと、カナダのSNO (Sudbury Neutrino Observatory) である。スーパーカミオカンデは太陽からのニュートリノと宇宙線が大気の上空で作る大気ニュートリノを観測することにより、ニュートリノが質量を持ち、異なった種のニュートリノが互いに入れ替わるとい現象、ニュートリノ振動も明確に示した。言うまでもなくこれまたノーベル賞の対象となる大きな業績である。SNOは重水を用いたチェレンコフカウンターである。SNOは太陽ニュートリノ観測を進め、中性流相互作用を通じての事象も捕まえ、さらに明確にニュートリノ振動を確認した。

ニュートリノが振動することになると、超新星からのニュートリノもまた振動を起こす。超新星のコアから放出されたニュートリノはまず超新星の外層で、共鳴現象を起こし他の種類のニュートリノに転換する。さらに超新星ニュートリノが地球の中を通過して検出器に達する場合は、地球の中でも振動を起こすため、ニュートリノのエネルギースペクトルは大きく変形されることも起こる。もし超新星爆発が我々の天の川銀河の中心で起こったとすると、スーパーカミオカンデはおよそ1万個のニュートリノを、またSNOは300個余りを検出することができる。これらの超新星からのニュートリノデータを用いて爆発のメカニズムも解明することができるが、その場合はこの共鳴や、振動を考慮して解析しなければならない。また、超新星ニュートリノのデータ、特にエネルギースペクトルなどを解析することで、ニュートリノの質量差やニュートリノ間の混合角に関するデータも得られる。クエーサーと呼ばれる天体など活動的な銀河核には巨大ブラックホールがその中心に鎮座し落下する周りのガスからガンマ線が放出されている。かならず同時にエネルギーの高いニュートリノも放出されているはずである。これらを検出す

る装置も稼働している。新たな検出装置の計画も進んでいる。数年以内にはこのような天体からのニュートリノも必ず検出されるはずである。

小柴先生によって創始されたニュートリノ天文学は今大きく進みつつある。

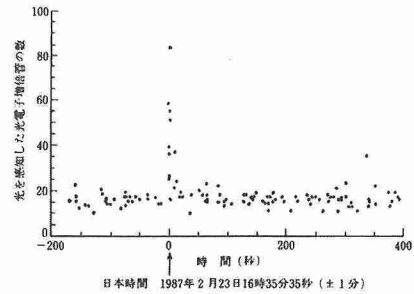


図4

カミオカンデが検出したニュートリノバースト。13秒の間に11個のニュートリノが検出された。

(戸塚、1991)

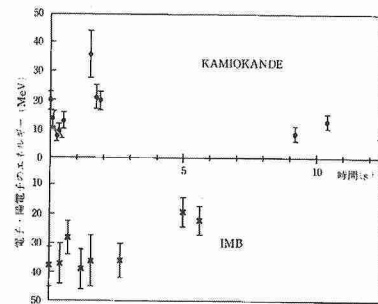


図5

カミオカンデとIMBグループの検出の比較。IMBグループは小柴先生より知らされた検出時刻あたりのデータを調べ、8個を検出している。神岡のデータでは2-9秒間にはニュートリノは検出されていないが、IMBのデータがその間をうめている。

(戸塚、1991)

参考文献

1. 戸塚洋二、超新星からのニュートリノを捕まえた！「現代の宇宙像」、日本物理学会編、倍風館、1991年
2. T. Totani, K. Sato, H. E. Dalhed, J. Wilson, *Astrophys. J.* 496, 216 (1998).
3. S.Fukuda et al., SuperKamiokande Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 86, 5656 (2001).
4. Y. Fukuda et al., SuperKamiokande Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 82, 2644 (1999).
5. Q.R. Ahmad et al., SNO Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 89, 011301 (2002).
6. K. Takahashi, M. Watanabe, K. Sato and T. Totani, *Phys. Rev. D* 64, 093004 (2001).