

SATフォーラム2003  
2003年7月30日(水)開催  
基調講演

## 素粒子と宇宙

大型研究プロジェクトにおける個の発揮とリーダーシップ

小柴 昌俊  
東京大学名誉教授

2002年ノーベル物理学賞受賞



### 素粒子と宇宙を繋ぐもの

1963年に米国から本郷の物理教室に戻ったところ、宇宙線の講義をやれといわれ、20人くらいの学生を相手に黒板の前に立ちました。まず黒板の端に「宇宙」と書いた。ここ何年間かの中に宇宙に対する理解が急速に深まってきていました。黒板のもう一方の端に「素粒子」という言葉を書いた。小さい方の極限である素粒子に関する物理学的理解も急速に進んでいると。どうも究極において、宇宙を理解する物理学と素粒子を理解する物理学とは非常に緊密な関係があるのではないかと思われるが、具体的に何が間を取り持ってくれるのかは見当もつかない。そして「これは俺の山勘だが」と、黒板の真ん中に「ニュートリノ」と書き、「これが間を取り持ってくれるかもしれない」といった(図1)。40年経てみると、私の山勘はある程度当たっていたといえます。

まず1mから2mの大きさの人間があり、スケールアップ

すると、山、太陽、太陽系、銀河、グレートウォール(銀河の大構造)となっていく。望遠鏡の口径が大きいほど遠くが見えますが、今はおよそ130億光年くらいまで見えているようです。ここで注意しておきたいのは、望遠鏡で眺めている130億光年先の銀河の像は、現在の姿ではなく、130億年前の姿だということです。遠くを見れば、我々の宇宙の昔の姿が見えてきます。スケールアップしていった先が蛇のような大きな口を開けています(図2)。

一方、人間からスケールダウンしていくと、アメーバみたいな微生物になり、分子になり、原子になり、原子核と電子になり、原子核は陽子と中性子に壊れる。私が大学を出た頃は、陽子と中性子は素粒子だといわれていました。それがしばらくすると、複合粒子だと実験的に決まってしまった。そしてクォークが持ち込まれた。世界中でクォークの観測が試みられたが、誰も見る事ができない。しかし、間接結果がべらぼうに出てきて、



図1



図2

クォークが3個くっついて陽子や中性子をつくると考えるのがもっともらしい、ということになった。そうやってスケールダウンしていった尻尾の先を、スケールアップして出てきたあの蛇の口が飲み込む勢いを見せています。

蛇の口が意味するのはこういうことです。1920年代の終わりに天文学者のハッブルは、遠くの銀河をいろいろと観測し、銀河までの距離を測った。どうやって測ったか。天体物理学的な観測では、銀河や星の光をとらえると、それをエネルギーごとに分けますが、例えば、プリズムを通して赤い光や青い光に分けた時に、本来の波長からずれてしまっていることが起こる。赤い方に、つまり波長が長い方にずれているのは、光を出している源がこちらから遠ざかっていることを示します。本来の波長からどの位赤い方にずれているかを測れば、どれだけの速さでこちらから遠ざかっているのが求められます。そのようにして、距離と遠ざかる速度をいくつもの銀河について測ってみたら、とても簡単な関係式があることがわかった。これがハッブルの法則とよばれているものです。「遠くの銀河はそこまでの距離に比例した速さで遠ざかっている」という簡単な表現ながら、ものすごい結論を導き出しました。遠くの銀河も、どんどん過去に遡ると距離に比例した速度で近づいてくることになり、ある一定の過去の時刻には全部が同じ箇所に集まっていたということです。つまり、宇宙の銀河や星がどんどん押し縮められていき、桁違いに大きな密度、高い温度になり、最終的には約135億年ほど前のある時刻に大爆発を起こして今の我々の宇宙ができていていると考えざるをえなくなる。大爆発を起こしたごく初期の宇宙は、ものすごい

温度、ものすごい運動エネルギーで粒子が飛び回り、互いにぶつかって新しい粒子を作り、また消滅しあう、これは正に素粒子物理の世界です。そういう意味で、素粒子の物理と宇宙の物理は、究極的には同じものにたどり着くであろうと思われています。

### 素粒子の種類

この表(図3)は、現在分かっているとされている素粒子をまとめたものです。実際にはこれだけ、7つくらいの、素粒子があれば万物はできてしまう。なぜ余計なもの自然がつくったのか、それは分からない。ファミリーに関しては、我々も参加した欧州の電子と陽電子を衝突させる精密実験で、ニュートリノの数は3種類しかないと分かり、第3ファミリーまでだということがはっきりしました。

自然を理解するには、万物がどんな素粒子からできているだけでなく、それらの素粒子の間にどういう力が働いているか、を知らなければなりません。まず一番強い力「強い相互作用」は、先ほども出てきたクォークという素粒子の間に働く力で、これはグルーオンという粒子が媒介するとされています。その次に強いのは電磁的な力「電磁相互作用」で、これは電荷を持っている粒子には働く力です。我々の体の中のさまざまな機能を始め自然界の多くの現象は、電磁力の働きで生じています。これを媒介するものは光を量子化した粒子、光子だと考えられます。次いで弱い力「弱い相互作用」がある。例えば、放射性元素がベータ崩壊する時には弱い力が働いています。また、パイ中間子がミュー粒子とニュートリノに壊れるのも弱い力の働きです。この弱い力を媒介する粒子として、 $Z^0$ と $W^+$ 、 $W^-$ という粒子が見つかっています。不思議なことに他の力の媒介粒子と違い、 $Z$ と $W$ だけは大変に大きな質量を持っています。それから重力があります。ニュートンの万有引力の発見以来、かなりの精度で我々は重力を知っています。しかし、重力に関する究極的な理論、すなわち量子力学を組み込んだ重力理論というのはまだできていません。ただ、重力を媒介するの、質量ゼロの重力子だろうと考えられています。

次に素粒子をどう観測するかという話を簡単にしましょう。

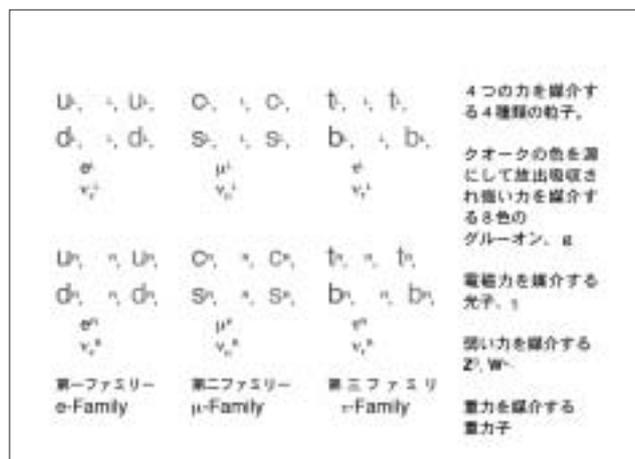


図3

### 電気をもった素粒子の観測

素粒子の中には、電気を持つもの(荷電粒子)と持たない中性のものがあります。荷電粒子が物質の中を通ると、物質中の原子の一番外側の電子をクーロン力で叩き出してイオンをつくるので、その通り道にはぼつんぼつんとイオンができます。イオンは原子1個の大きさですから、そのままでは見えません。見るためには、そこから雪崩のようなものを引き起こし、大きくせねばなりません。

例えばジェット機は小さくて見えないが、その飛行機雲を観測すればジェット機がどっちの方角へどの位の速度で走っていくかがわかります。しかし、ジェット機が通れば、必ず飛行機雲ができるというわけではない。そこで物理屋は飛行機雲ができる条件を見極めて、それを荷電粒子の観測に使う。空気中の水蒸気は塵や埃に凝縮して水滴になるが、重いので下に落ちる。そのため、水滴をつくるのが何回も行なわれると、埃や塵のない綺麗な空気になる。すると温度が下がっても、水蒸気は水滴になれない。こういう状態を「不安定な平衡状態」と言います。不安定な平衡状態の空気に、ジェット機が来てエンジンが何かで空気を細かく掻き回し、ほこりを出したり、小さな渦みたいなものができると、それを種にして水滴ができる。つまり、荷電粒子を観測するには、不安定な平衡状態をつくらなければならない。

これは、不安定な気体の平衡状態のところに、宇宙線のミュオン粒子が飛び込み通り道にイオンをつくらせた跡です。これも霧箱という不安定平衡を使った検出器で捕らえたものです。これは写真の乳剤を使っています。粒子が走った後のイオンを種にして銀粒子が集まり、現像すると黒い粒に見えます。宇宙線でつくられたパイ中間子の速度が遅くなって止まり、ミュオン粒子と見えない粒子(ニュートリノの例)に壊れる。ミュオン粒子も段々遅くなって止まり、電子を出して壊れる。これでは、鉄板を何枚も重ね、間にある気体から埃などきれいに取り除き、それぞれの間に100万分の1秒くらい高電圧をかける。すると、荷電粒子の通り道にできたイオンが引き金となり、そこだけ小さな放電が起き、光った道となって見えます。

### 電気をもたない素粒子「ニュートリノ」の観測

電氣的に中性の粒子は、イオンを残さないので観測が難しい。そこで、その中性粒子が持つ相互作用で荷電粒子と衝突させ、荷電粒子を観測し、それを動かした元の中性粒子がどうだったかを導き出す。例えば、強い相互作用を持つ中性子の場合、荷電粒子の陽子とすぐに衝突するし、原子核にもすぐにくっつくので、観測が楽です。一方、ニュートリノは弱い相互作用しかもたないので、太陽から来る毎秒1000億個、1兆個のニュートリノ(太陽ニュートリノ)が、我々の体を突き抜けていても何も起こらない。しかし、極々まれに1個のニュートリノが電子と衝突してくれる。こういう稀な現象を待つて観測するのです。

カミオカンデやスーパーカミオカンデでは、地下深くに置いた巨大タンクの水を使います。太陽ニュートリノが水の中にたくさんある電子の一つに衝突してそれを叩き出す。電子が走るとチェレンコフ光とよばれる光が円錐形になって出る。光がいつ何個届いたかを周囲の検出装置できちんと観測すれば、逆算により、電子がいつ、どこから走り出してどこで止まったか、どんなエネルギー分布をもっているのかが分かる。電子がわかれば、ニュートリノもわかる。入ってきたニュートリノは大体電子を前方に走り出させるので、ニュートリノが来た方向がおおよそ分かるし、ニュートリノが届いた時刻も1億分の1秒くらいの精度で分かる。電子のエネルギー分布とこれを叩き出したニュートリノのエネルギー分布とは1対1に対応するので、ニュートリノのエネルギー分布も分かる。



図4

図4はカミオカンデの内側を魚眼レンズで撮ったものです。輝いているのは、直径50cmの世界最大の光電子増倍管です。アメリカとの競争に勝つために、感度を桁違いに良くしようと浜松ホトニクスと共同で開発しました。図5は、第2世代のスーパーカミオカンデで、カミオカンデよりずっと大きく5万トンの水が貯められ、周りの光電子増倍管の数も1万1000個を超えています。

光電子増倍管によってどんなふうに検出されるのか。スーパーカミオカンデの展開図を表した表をお見せしましょう。宇宙線のミュオン粒子が地下深くの水槽に入りこんで光が出ると、光電子増倍管がそれを感じ取る。赤で表示された光電子増倍管はたくさん光を受けているし、他の色はそれほどでもありません。その後1億分の5(5/100,000,000)秒経つと、チェレンコフ光がこういうふうに広がる。さらに1億分の5秒経つとチェレンコフ光がここまで来る。チェレンコフ光というのは、光の衝撃波みたいなもので、それをつくり出している荷電粒子のスピードがチェレンコフ光の伝わる早さより早い時にだけ出ます。実際、この時のミュオン粒子はすでに底に届いて底の出口の所の光電子増倍管を光らしている。さらに1億分の5秒経つと、チェレンコフ光が底面にまで広がり、さらに1億分の5秒経つと、全体にチェレンコフ光が広がる。さて、水タンクの中で作られたミュオン粒子がチェレンコフ光を出して止まると、リングの形でチェレンコフ光が検出されます。同様に、水中で作られた電子が水の中で止まった時もチェレンコフ光のリングができます。しかし、質量の軽い電子の場合は、原子核のそばを走った時には制動放射が起きて電子がガンマ線を出します。ガン

マ線は次の原子核のそばを通る時に電子と陽電子の対に変換されます。これがカスケード・シャワーとよばれる現象です。このようにして電子の場合にはエネルギーの低い陽電子、電子がたくさん作られます。それらの遅い陽電子、電子は水の中で原子核に散乱されて色々な方向を向きますから、それらを作るチェレンコフ光は元の方向と離れて方々に飛び散ります。だから、半径方向に光の粒がどういうふうに分布しているかを測定すれば、電子によってつくられたリングか、ミュオン粒子によってつくられたリングかが、誤差率1%以下で判定できます。これができたために、後にニュートリノが振動している(ある種のニュートリノが他の種類のニュートリノに変わる)ということ、世界で初めて発見することができたのです。

#### ニュートリノ天体物理学へ

図6は、太陽ニュートリノを、方角だけでなく時刻もエネルギー分布も含めて観測できる、つまり天体物理学的に観測できることを示したものです。これでニュートリノ天体物理学を始めたのです。スーパーカミオカンデでのデータですが、周りからくる等方的なバックグラウンドの上に綺麗に太陽からのニュートリノが見えています。フォトグラフならぬニュートリノを使ったイメージ「ニュートリノグラフ」をつくりました。上が太陽のニュートリノグラフ、下がニュートリノで見た銀河座標の上での太陽の軌道です。太陽がやけにボケてデカイということに気づくでしょう。ニュートリノの方向と叩き出さ

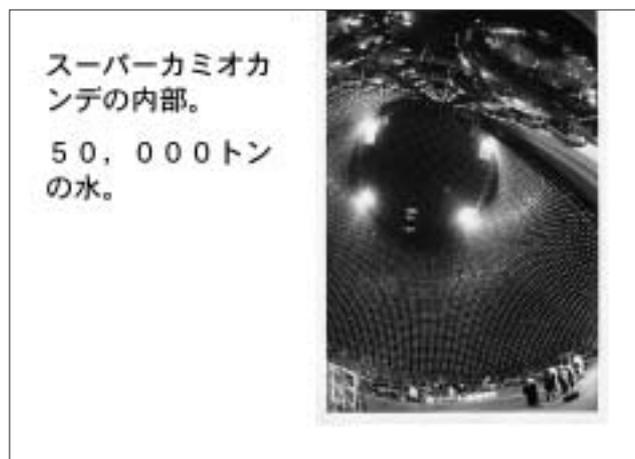


図5

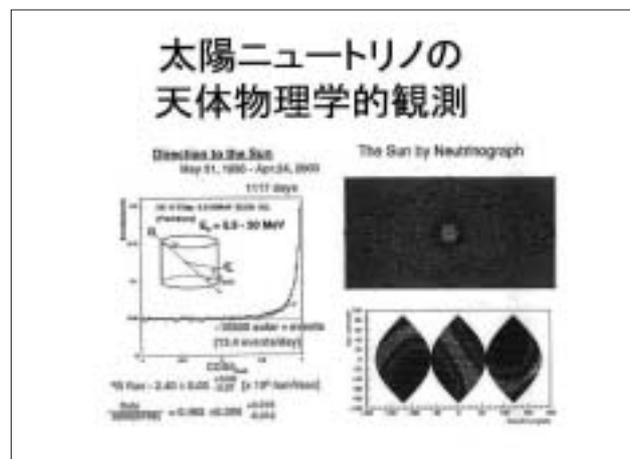


図6

れた電子の方向が必ずしも一致するわけではないので、叩き出された電子の角度を測る時に散乱誤差が入ってしまうからです。日本生まれのニュートリノ天体物理学はまだ赤ん坊ですが、そのうち若い人たちがもっと綺麗なニュートリノグラフを撮ってくれるでしょう。

さて、太陽ニュートリノの観測を始めて2ヶ月も経たないうちに世界中の天文学者から電話やファックスが飛び込んできて「南半球で超新星が爆発したから、あの時のニュートリノがお前の検出器に映っていないか？」と。大マゼラン星雲のこの星がこんなに光ってしまった(図7)。その日のデータテープを調べたらすぐに見つかりました。バックグラウンドの上にそびえるのが、超新星ニュートリノのシグナルです(図8)。たった11個ですが、それまで天文学者が考えていた第2種の超新星の爆発メカニズムをほぼ支持する結果を出している。また、このパ



ルスが10秒間も続いていたことで、それを出していた天体が非常に密度の大きい、中性子星になるちょっと前の状態にあることまで分かりました。

今日話さなかったことはたくさんありますが、日本のひなびた田舎町・神岡が今はニュートリノ研究のメッカになっていることを皆さんに知っていただきたいと思います。アメリカの研究者が交代で130人以上も参加しています。また、つくばの陽子加速器からニュートリノを神岡に送ってニュートリノ振動のさらに詳しいデータを取ろうという計画には、ヨーロッパの学者が参加したいと、各々の国の政府に研究費を要求したりしています。ニュートリノ研究はお金には繋がりませんが、世界の人気者にはなっています。

こしば・まさとし

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。カミオカンデに代表される宇宙線実験や、世界最高エネルギーの電子・陽電子衝突型加速器を用いた実験を行い、素粒子物理学において、常に世界の最先端を歩み続けてきた。その長年の業績により、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、文化功労者、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。2002年10月にノーベル物理学賞受賞。

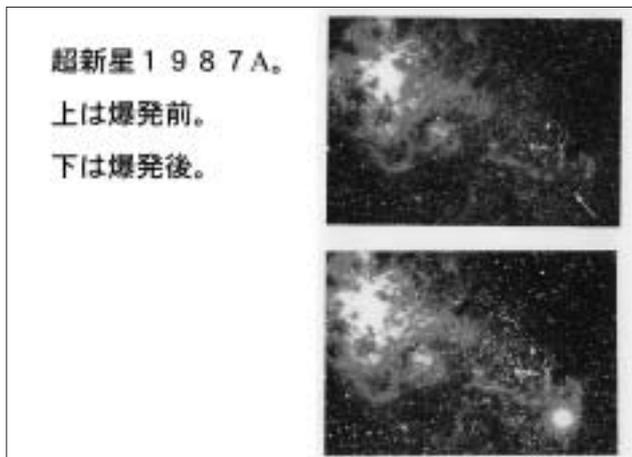


図7

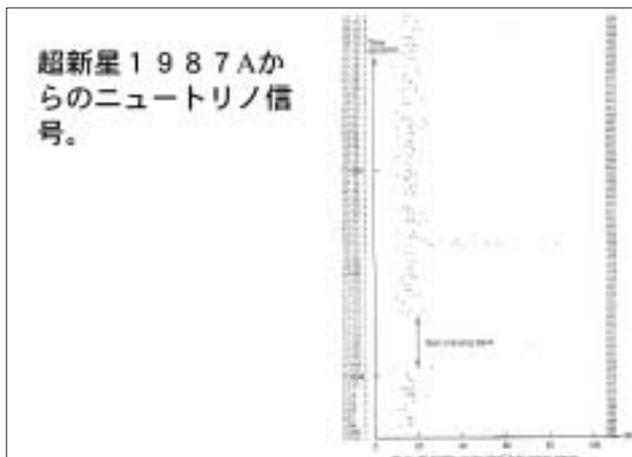


図8

## 会場との質疑応答

質問1：火星探査の科学的意味を小柴先生にお伺いします。

(森川/金融機関勤務)

小柴：生物がいるかどうかについてお答えします。火星には生物は見つからないであろうと私は思っているので、夢中にはなれません。

質問2：政治学が専門です。米ソ対立の頃、海の底何千メートルも深いところに核ミサイルを沈めておいて報復に備えていました。これの一番の欠点は通信ができないことですが、その克服手段としてニュートリノを使ったらどうだろうと考えております。(加藤榮一/筑波大学名誉教授)

小柴：そのようなことを、20年くらい前にアメリカの物理学者が言い出したことがあります。原子力潜水艦は深海に潜ると何十日も連絡が取れないので、例えば国立フェルミ研究所の加速器でつくったニュートリノのビームを使って信号を送ろうではないかと…。しかしながら、潜水艦の周囲に光電管を付けても、海の中の発光生物などがニュートリノによる光よりもずっと強力な光を出すので、雑音が入ります。実現は難しいでしょう。

質問3：ハッブルの研究成果によれば、1箇所から爆発して現在の宇宙になっているということでしたが、その1箇所、中心というのは測量して決めることができるのですか。(今村/産業技術総合研究所)

小柴：それは実は大変な問題なのです。私が考えているのはこういうことです。過去に空間の1点で大爆発が起き、それが広がってきて我々の宇宙になったということを認めることは、特別に臍負された座標系があることを意味している。つまり我々の宇宙が生まれた地点から爆発して行って、宇宙全体が静止している系が考えられる。宇宙にはマイクロ波が満ちていますが、これは宇宙が生まれてから2、30万年後の宇宙の姿を示しています。この10年間で、このマイクロ波の方向や強度を高精度に観測できるようになりました。その結果、1/10000くらいだが等方的でない成分があることがわかった。双極子異方性といい、ある方向で強くなりある方向で弱くなる。もし、我々が、ヴィルゴクラスターという天体の方向に、毎秒600キロ位の速度で走ったとすると、双極子異方性が消え、マイクロ波がすべて等方的に見える。つまり、その走っている系は宇宙が生まれて約20万年経った頃の宇宙の静止系だということになると理解している。宇宙では、どれもこれも動いていてすべて相対的な意味しかないというわけではな

く、観測事実からこれだけは宇宙の静止座標系だと思われるものがすでに見つかっているということだと。

質問4：ニュートリノの発見は、科学の世界だけではなく、芸術とか哲学とか宗教とかの世界でも何か新しい時代の到来のようなものを感じさせます。私は芸術なのですが、先生がテレビでモーツアルトと科学者という話をされていました。その辺の考えを伺いたい。(藤島)

小柴：アインシュタインとモーツアルトのどっちがより天才かに対して、モーツアルトではないかと私がいったことを指しておられると思います。科学で何か知見を得るとは、自分と客体をはっきり分けて観測あるいは実験を行い、その結果を得たということです。アインシュタインの導いた一般性相対性理論は確かに偉大な業績ですが、科学の成果である限り、仮にアインシュタインが発表しなかったとしても、何十年か経てば別の理論屋さんが同じ理論を出すであろう。だからこそ、その結果は人類共通の知識として貯めることができる。ところがモーツアルトの音楽の場合は、理論的にこうなるべきだということは一切ない。だから、モーツアルトが死んでしまうと、200年、300年経っても、私の心を同じように捉えることのできる音楽を作る人は出てこない。そういった意味で、私はモーツアルトの方が天才だと言ったのです。

質問5：講演の副題「大型研究プロジェクトにおける個の発揮」に興味があります。大きなプロジェクトに若い人が個人として参加する時、どういう心構えていたらよいのでしょうか。(米国ブルックヘブン国立研究所の加速器を使って実験を行っている研究者)

小柴：大きなグループで科学者として個をどう発揮するかは難しい問題です。私自身、あまりに大きいコラボレーションのものは、どう対処していいかわからないので、だいたい逃げ出してきました。カミオカンデの場合は最初は10名足らずで、最後でも10数名ですからまだ良かったのです。

私たちがヨーロッパでやっていた電子と陽電子の衝突実験とか、今準備しているアトラスという陽子と陽子の衝突実験とかは、すごい数の研究者が集まるプロジェクトです。願わくは、実験の責任者が「あなたはこの分野の責任を持ちなさい」と、責任の所在を個々の人たちにはっきりわかる形で分けることを期待したい。そうすれば、若い人たちが自分を発揮する場ができると思う。軍隊のように組織だけをきちんと締めてしまうと、皆一様であることを期待され、個の発揮はできないと思います。