

小柴昌俊教授に聞く

聞き手：井上邦雄



負けるに決まっている
実験はできない

井上 小柴先生はカミオカンデでニュートリノ研究を始められて、そのあと、スーパーカミオカンデとカムランドが発展しましたし、K2K、T2Kも発展しまして、ニュートリノ研究という意味では日本は世界で中心的な役割を果たしていると思います。カミオカンデでニュートリノ研究を始められた経緯と、なぜカミオカンデからこのように発展できたのかということについて、お聞かせいただきたいのです。

小柴 難しい質問で、答えるのは易しくないけれど、カミオカンデというのは最初は、陽子崩壊を探すためにデザインした実験装置なのです。ところが、それが一応文部省の予算がつきそうだとということになると、アメリカのIMBの計画が急に出てきて、それは予算もうんと多いし、貯める水の量もうんと多いし、周りに取り付ける光電子増倍管の光に対する感度も同じだと。そうすると、陽子崩壊だけ探すのでは負けるに決まってい

るんだと。じゃあ、国民の税金を使って、そんな負けるに決まっている実験をやるわけにはいかないだろうと。どうしたらいいかということで一所懸命に考えて出した結論は、要するにこの段階で、予算を大幅に増やしてくれと言って通るはずないでしょう、だから、何とかして、球の数は増やせないけれど、一つ一つの球の光に対する感度を桁違いに上げてしまえと。

そういうことを考えて、当時の浜松テレビ（今の浜松ホトニクス）の社長を呼んで。その社長は、私どものグループがドイツで電子・陽電子衝突の時に使うフォトマルを新しく開発するので、その前10年くらいの付き合いがあったのです。だから、その会社はやる気があるなということは知っていたんです。そこで、その社長を呼んでくいたのです。おたくの技術部とうちの研究室の連中と共同で、でっかい直径20インチの球を開発しようじゃないかと。でも、なかなか「うん」とは言わないのです。連れてきた会社の技術主任も、「社長、そんなのは到底、無理ですよ」と反対するわけ。

それで結局、3時間以上かけてようやくくどき落として、やることになって、うちのグループからは須田、鈴木厚人、それから有坂★1。有坂というのは、今カリフォルニア大、ロサンゼルスにいる人。そういう人

小柴昌俊さんは東京大学の特別荣誉教授で、「天体物理学に対する先駆的貢献、特に宇宙ニュートリノの検出」により、レイモンド・デービス氏と共に2002年のノーベル物理学賞を受賞しました。小柴さんには他にも1997年に天皇陛下から文化勲章を授与される等、多くの輝かしい受賞歴があります。

をこっちから開発チームとして送り出して、そうしたら、うまくそれが開発できて、よい球ができた。それが1983年の春だな。

早速取り付けてみて、8月にはだいたい取り付けが終わったの。9月頃から実際に水を満タンにしてデータを取って見たら、想像以上にいいデータが取れた。それはどういう意味かというと、いろいろな意味でキャリブレーションしなきゃならないからというので、3000tの水の中で止まった μ 粒子の崩壊電子のエネルギースペクトルを見よう。そうしたら、きれいによく見えるわけ。だいたい12 MeVくらいまできれいにスペクトルが見える。ただ、その下がバックグラウンドがバーッと来て、その下は隠されて見えない。

そこでね、私がすぐ感じたのは、さっきも言ったように、陽子崩壊だけだったらいわば国民の税金で宝くじを買うような研究でしょう。だけれども、もしもこういうふうに電子が小さなエネルギーでもちゃんと観測できるなら、何とか努力して12 MeVまで被さっているバックグラウンドを桁違いに下げて、電子が10 MeV以下のエネルギー

一まできれいに観測できるようになれば、太陽からのニュートリノが散乱した電子を観測することによって、そのニュートリノの到着した時刻、到来方向、それからエネルギースペクトルが全部わかる形で観測できるんじゃないかと。

若手を責任ある ポストにつける

それで当たってみると、中に1000tの有効質量を考えたとしても、だいたい1週間に1度くらいしかそういうイベントは起きそうもないということはすぐわかるわけ。そうなってくると、毎秒何発とある雑音、バックグラウンドをどうやって減らすかというのが問題。雑音を減らすというのは、まず水をきれいにしなければいけない。それで鈴木厚人に、「世界で一番透明な水をつくれ」と彼を責任者にした。そうしたら彼は、素人のくせにいろいろなことを調べて、1年経たないうちに世界一透明な水をつくっちゃった。

僕はよく、日本の会社の社長たちの集まりに呼ばれて、話をしてくれということで、その時

★1：須田は、故須田英博神戸大学理学部教授、当時は東京大学宇宙線研究所助教授。鈴木厚人は、現在高エネルギー加速器研究機構長、当時は東京大学理学部助手。有坂は有坂勝史UCLA教授、当時は東京大学理学部の大学院生。

井上邦雄さんはIPMUの主任研究員の一人で、また東北大学ニュートリノ科学センター長でもあります。

に、あなた方の部下の中に「これは」と思う人がいたら、若過ぎるなと思って、思い切って責任ある地位につけなさいと。そうすると、その人が責任ある地位についたということで、ぐんぐんと成長しますよと。そういうのは神岡の実験でも実例がいくつもあるのですと。ひとつが鈴木厚人だよ。

神岡の成功というのは、若い人でも一人一人のメンバーに「あれをこうしろ」「こうしてはだめだ」とか、ぎゃあぎゃあうるさく言わないの。たくさんいる人それぞれにやる気が起きて、それで言われなくてもどんどんやるようにするというのが、そういうプロジェクトをうまく進めることではないかと、僕自身は思っているのです。

井上 神岡が発展した秘訣というのは、うまく若手を登用して、責任を持たせて成長させたということですか。

小柴 僕はそう考える。それともうひとつは、カミオカンデという名前をなぜ付けたか。最初の陽子崩壊の実験にしろ、太陽ニュートリノの観測にしろ、これは地味な仕事で、何年も何年も続けてやらないといけない。そうすると、ああいう田舎の何も知らない町の人々が親しみを持ってくれなければ、仕事がやりにくくてしょうがないのですよ。だから僕は、少しでも住んでいる神岡の人たちに親しみを持ってもらいたいと思って、まず「カミオカ」と付けた。その後に、ニュークレオン・ディケイ・エクスperiment（核子崩壊実験）の頭文字の「NDE」というのを付けた。

あなたも知っているように、その後、カミオカンデはニュートリノのことばかり出しているから、世界の他の人は「NDE」

というのはニュートリノ・ディテクション・エクスperiment（ニュートリノ検出実験）のことだと思っているらしいけれど、それでも構わない。どちらでもいいよね。

太陽ニュートリノ観測の可能性を打ち出す

それで、お金がもう少しどうしても必要になった。それはさっきも言ったように、太陽からのニュートリノをその方法で測ろうと思うと、1週間に1発くらいイベントを1秒間に何個というような雑音から拾いださないとイケない。それをやるためには、雑音を桁違いに落とさなければいけない。

そのためにはまず最初に、今まで用意していなかった全部を取り囲む 4π のアンタйкаウンターというのをどうしても設置しなければいけない。それからもうひとつは、お金が足りないからパルスハイト・アナライザー（ADC）しか付けていなかった。信号のタイミングをちゃんと測るデジタイザー（TDC）を付けなければ精度のよい測定はできない。そういうことを考えると、お金が要る。ところが、文部省からお金を取ってくる当てはない。そうすると、他からお金を取ってこなければいけない。

それからもうひとつは、その時はそんなにカミオカンデのコラボレーター数は多かったわけじゃないけれど、けっこう反対があった。

井上 内部で、ですか。

小柴 内部で。つまり、太陽ニュートリノを観測できるようにしようとすると、今言ったように 4π アンタйкаウンターを作らなければいけないでしょう。そうすると、せっかくインストールした球を、下のほうなどを

外して底上げするようなこともするというと、うんと時間をロスするし、それから内部の有効質量というのもぐっと減ってしまうわけ。そうすると、たとえば陽子崩壊を探す時の有効質量がさらに減ってしまう。そういうことへの反対がけっこう根強くあった。

だけどそれは、俺がボスだということで押し切って。さて、それではどこでTDCとかアンタйкаウンターを設置するための費用をひねくり出すかということで、その3カ月後、1984年1月にイコバン（ICOBAN）という国際学会があった。それはバリオンノンコンサベーション（バリオン数非保存）の国際学会。それがユタ州のパークシティというところであった。その会議に出て、僕はカミオカンデの予備的なデータを見せるのと同時に、プロポーザルを2つしたのですよ。

ひとつは、カミオカンデは新しい感度のよい球を付けたために、10MeV以下の電子まできれいに観測できると。ついては、この電子を観測するという方法で太陽ニュートリノをアストロフィジカルに観測するという可能性を追究したいと。ついては、TDCと必要なエレクトロニクス、プラスアルファを持って共同でやる人はいないかと持ち掛けた。そうしたら、ペンシルバニア大学のマン【★2】たちが、ぜひ一緒にやりたいと言ったわけ。

もうひとつのプロポーザルは、このカミオカンデで太陽ニュートリノのアストロフィジカルなオブザベーションがうまくいったとしても、それがやれるというフィージビリティを示すだけだ。つまり、大きさが足りないとか。だから、フィージ

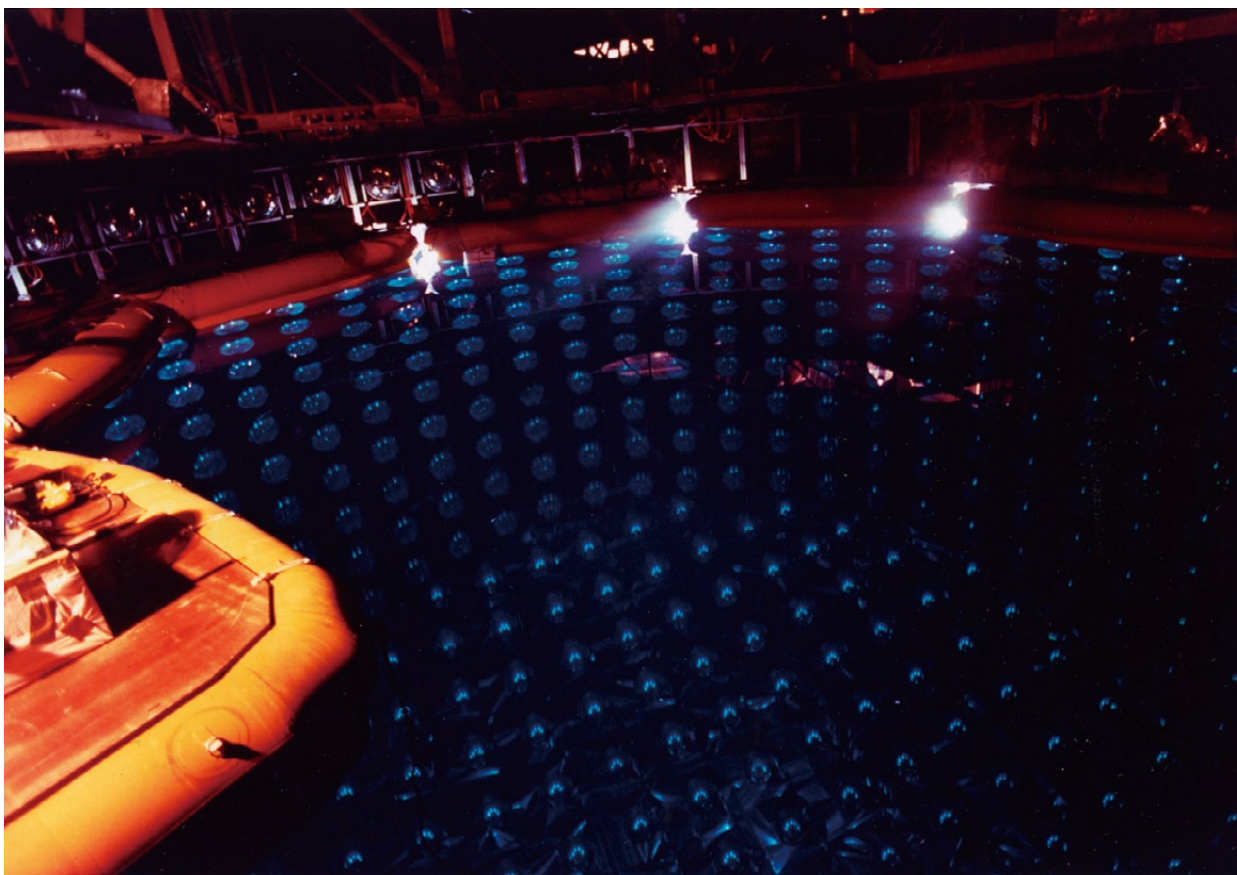
ビリティ・エクスperimentはやれるけれど、本格的に太陽ニュートリノをこの方法で測ろうと思ったら、これでは全然足りない。だから、5万tの水を貯えるスーパーカミオカンデと一緒に作らないかという提案をしたわけ。

観測開始後2ヵ月足らずで超新星が出現

井上 ずいぶん早くから構想があったのですね。

小柴 だから、84年1月に。だけど、それに対しては誰も「一緒にやろう」と言う人は出てこなかった。だけど、その2つの提案をして、それは1月の最初の週だった。マンたちは、すぐ次の2月に日本に神岡を見に来て、ぜひ一緒にやりたい。そういうことで、彼らはTDC1,000チャンネルと新しいコンピュータを持ってくるようになった。我々は、金を都合して底をかき上げて、 4π アンタйкаウンターを作るとか、水をさらにきれいにして。あなたご存じと思うけど、神岡の山の中というのは、重元素の鉱山だったからラドンがうんと多い。他のトンネルの穴よりも、10倍くらいラドンの濃度が高い。そうすると、ラドンは水にどんどん溶けてしまうので、水温上昇を避けるために冷たい地下水を補給すると、ラドンがどんどん雑音を出す。それを何とかしようということで、別にしばらく取っておくためのタンクとか、それから鈴木厚人がつくったフィルタリングシステムをさらに改良するとか、いろいろなことをやって雑音を何とか何とか抑え込めて、このくらいな

★2：Alfred Mann ペンシルバニア大学名誉教授、当時は教授。



カミオカンデの内部。神岡鉱山の地下1,000mに直径15.6m、高さ16mの円筒形タンクを設置して3,000トンの純水を貯え、世界最大の直径50cmの光電子増倍管948本で素粒子反応を観測した。スーパーカミオカンデの建設に伴い、1995年に観測を終えた。カミオカンデを撤去した跡地にカムランドが建設された。(©ICRR)

ら太陽ニュートリノの観測を始めてもいいんじゃないかという時期が1987年の1月だった。1月早々にラドンが山なんか全部消えた。だから、ニュートリノのデータを「さあ、取り始めよう」と言ったわけ。そうしたら2カ月もしないうちに、いろんなところから電話がかかってきて、南の空に超新星が爆発した。その最初の引き金で発生したはずのニュートリノ・パルス

はおまえのところで見つかったんじゃないかという問い合わせがあった。そこで神岡に電話して、当番の人に、その日の磁気テープを東大に送れと。東大のコンピュータで解析したら出ていたと。そういうことです。

井上 すばらしいですね。実験を始めた当初から、陽子崩壊の実験、カミオカンデ-Iの最初から太陽ニュートリノとかを目指そうとしていたのですか。

小柴 あなた方はご存じないだろうけど、84年、つまり1月のユタの会議の時には、太陽ニュートリノはこの方法で少なくともやれるということだけは示そうということを決めていましたから。だから、84年の春に、85年の概算要求をするのに説明書を付けるでしょう。小さなパンフレットをひとつ。そこでは、太陽ニュートリノをこういうふうに観測するという計画の

他に、もし銀河系で超新星が爆発したとすれば、このくらいのイベントが見られるはずだと。さらにニュートリノ振動も見える可能性があるという書いたわけ。

井上 なるほど、すべてお見通しという感じですね。

小柴 それはやっぱりね、僕はその頃の連中といろいろなことを議論していますからね。だから、僕が考えついたというわけではなくて。本気になって、こ

れで何ができるかということを含めて詰めて考えると、やっぱりいろいろな可能性というのが見えてくるんですね。

井上 その時に相談された相手というのは、同じ研究グループの方なのか、それとも、もっと広い分野の方なのでしょうか。

小柴 僕が定年になったのが87年3月ですね。84年から87年までという、その頃は戸塚ももうグループの中に入っていたし、それから須田、荒船も宇宙線研でいろんな会に顔を出していますから★3。

ニュートリノ物理は次なる飛躍へ

井上 そういうところで議論されて。そうですか。ニュートリノ天文学というものを小柴先生が開拓されて、その後でスーパーカミオカンデでは太陽ニュートリノのものすごい精密測定をやっていますし、カムランドでも地球ニュートリノをやったり、ちょっと向きは変わりますが南極の実験とか海水の実験とかがあるわけですが、ニュートリノ研究が他の分野と連携していくことに関して、何かお考え、

ご意見はありますか。勿論メリットはあると思うのですが。

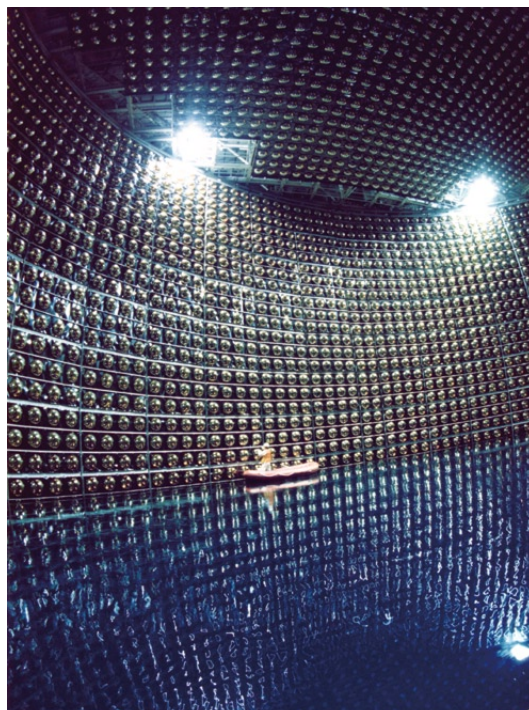
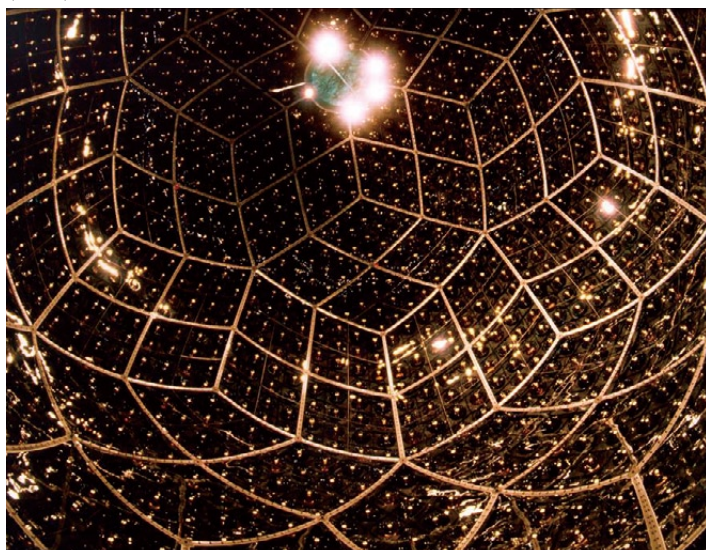
小柴 ニュートリノというのは、今まで素粒子実験物理というのは何10年にわたってやられているのですが、一番遅れていたでしょう。その一番の理由は何かという、素粒子の中で電気を持たないのはニュートリノだけなのです。電気を持っている素粒子は観測が実に楽だと。だけど、電気を持たないものは、一度相互作用させて電気を持っている粒子の運動に焼き直さないと観測は絶対にできな

い。そういう点でやっぱり難しいのです。

だから、質量がゼロだと思っていたら、ニュートリノには質量があるというようなことが、ようやくこのごろになってはつきりわかったり。だから、僕はニュートリノ物理というのは新しい段階に入ったとは思いますが、まだまだわからないことがたくさんある。あなた方もご存

★3：戸塚は、戸塚洋二東京大学特別名誉教授（当時は東京大学理学部助教授）。荒船は、荒船次郎東京大学宇宙線研究所名誉教授（当時は教授）。

左：カムランドの内部。内壁に1,879本の大型光電子増倍管が取り付けられた直径18mのタンクの下から上を見上げた写真。タンクの中央には1,000トンの液体シンチレーターを詰めた直径13mの透明な球形バルーンが設置されている。（この写真の撮影時には、まだ設置されていない）。(©RCNS)
右：スーパーカミオカンデの内部。50,000トンの純水を貯える円筒形水タンクの内壁に、直径50cmの光電子増倍管11,146本が取り付けられている。(©ICRR)



じのようにオシレーション・パラメータでも、 θ_{13} はまだはっきり捕まっていない。それから、CPバイオレーションのパラメータもわかっていない。そういうことがわかれば、宇宙の最初のビッグバンの時にどうして粒子が残って、反粒子が全部消えてしまったかなどということに関係があるのかもしれない。

だけど、僕が言いたいことは、ニュートリノ天体物理学と言っても、結局、実は太陽ニュートリノの場合でもわかるように、観測結果をちゃんと理解するには、ニュートリノ・オシレーションのことをちゃんと知らなければ正確な解釈はできない。そうすると、たとえば、あなた方良くご存じのはずなのですが、COBEが宇宙のマイクロウェーブを観測して、ビッグバンから37万年後の宇宙はどうなったかという情報を得たでしょう。あれと同じことを、バックグラウンドニュートリノをちゃんと観測できれば、できるはずですよ。

だけど、それをどうやってやったらよいのかというのは、本当に難しい問題。僕はここ何年来、僕が尊敬する理論屋さんに、ニュートリノもうんとエネルギーが低くなったら全反射するのじゃないかと。その可能性を、ヤマ勘だけどこれ本当かな、どう思うかといういろんな人に聞いたのです。南部さんにまず聞いたら、南部さんは「当たっていると思うよ」と2ページくらいの返事をくれたのです。ところが、南部さんの2ページというのは難しくわからない。しょうがないから、仙台の武田さんに詳しく説明してくれと頼んだ

★4：南部は、南部陽一郎シカゴ大学特別名誉教授。武田は、武田暁東北大学理学部名誉教授。

★4。そうしたら、武田さんは南部さんの返事は「だいたいにおいて正しい」ということを説明してくれたのだけど、さらに僕はもっとちゃんとやってほしいと。

武田さんと荒船さんもずっとやっていて、ようやく論文をまとめて。これは結局、電磁波のような簡単な性質のものではなくて、3種類のニュートリノがお互いに振動して入れ代わったりするわけでしょう。だから、電磁波が物質の中を通る時の方程式などと比べると、桁違いに難しいディフュージョン方程式になってしまうわけだ。だから、それは大変に難しい問題なのだけど、ある程度の見通しが得られたということで、それは今度、東大の素粒子センターのプレブリントにして出るはずですよ。

スーパーカミオカンデの安定稼働を目指せ

井上 最後に、IPMUとしては、神岡でスーパーカミオカンデ、カムランドというのを推進しているのですが、スーパーカミオカンデではこれからT2Kで先ほどおっしゃった θ_{13} とかCPを測るでしょう。あとはガドリニウムを入れてレリックスーパーノバニュートリノ（過去の超新星爆発からのニュートリノ）というのを測ろうとしています。カムランドでは、CNOサイクルニュートリノの観測とか、キセノンを足して二重ベータ崩壊というのを観測しようとしているのですが、スーパーカミオカンデとかカムランド、あるいはニュートリノ全般でも結構なのですが、今後に期待されることは何かありますか。

小柴 僕はさっきも言ったように、レリックスーパーニュートリノの問題で少しでも手掛かりが得られ

れば、これはすごいことだと思うんだけど。

井上 ビッグバン起因のバックグラウンド、1.9Kのレリックスーパーニュートリノですね。

小柴 ええ。でもそれはものすごく難しいことだと思う。だから、うっかり気安くそれにめり込むというのね、何10年という時間を無駄にする恐れがあるという心配がありますね。

それから、いろいろあるけれども、僕はこれをひとつ忘れないようにしないと。この間も梶田君に言ったのですが、梶田君が宇宙線研究所の所長になったでしょう★5。それはどういうことを注意したかということ、スーパーカミオカンデの球を全部付け替えて、ちゃんとフルに動かしだしたと。これから相当に長い期間、データテイキングは続けるはず。それはひとつには、太陽ニュートリノを本気で続ける。太陽ニュートリノのオブザーバトリーとしての役目の他に、銀河系内で超新星が爆発したら、スーパーカミオカンデが取れるデータというのはものすごく重要な意味を持つ。世界で他に比較できるような検出器はないのだから。

井上 ないですね、大きき的にも。小柴 そうでしょう。これは非常に大事なこと。だから、宇宙で超新星が爆発するのをね、いつ爆発してもいいんだというつもりで、データを落とさないでちゃんと取れるように、いつも安定稼働させてほしい。それがひとつ。

もうひとつは、一番最初の目的の陽子崩壊。これはグラショウの言ったSU(5)の预言だけではなくて、他のディケイモードというの、スーパーカミオカンデで押さえられるディケイモードというのはいくつかある

わけです。そのスーパーカミオカンデで押さえられるディケイモードすべてにわたって全部、部分寿命の下限をびしっと押さえて、それで発表しなければいけない。それは、たとえば今年の末とかそのくらいを目安にして、きちんと出したらいいでしょ。こうも言っておいたのだけだね。

井上 カムランドにも何か期待されることはありますか。

小柴 あれば僕は、鈴木厚人が非常に立派に大きく育ててくれたと思ってうれしいのだけど。僕は講演を頼まれた時によく言うのだけど、カムランドが地球の中からの放射性元素の反電子ニュートリノを捕まえられる可能性を示したと。これを本当に活用して、同じような検出器を適当な世界の何力所かに配置して何年間か測定すれば、これは埋蔵の場所とか量とかいうのが全部トモグラフィとしてデータが出てくる。これはものすごくいいことで、地球物理学の革命だと思う。

だから、これは何としてでも世界共同の研究として実施すべきことだと、僕は講演で言うのですよね。たとえばハワイでもやりたいと言っているし、SNOのグループが考えているらしい。ヨーロッパでも、何とかそれをやりたいという動きがありますよね。僕はカムランドは、僕自身が反電子ニュートリノということの本気になって考えなかったのを鈴木厚人が実際に実現したわけで、僕はよいことをやったと思っています。

井上 どうも今日はありがとうございました。

★5：梶田隆章東京大学宇宙線研究所長（2008年4月から）はIPMUの主任研究員。