

Round Table Talk : 梶田隆章教授ノーベル物理学賞受賞記念座談会

梶田 隆章 かじた・たかあき
Kavli IPMU主任研究員

村山 斉 むらやま・ひとし
Kavli IPMU機構長

福来 正孝 ふくぎた・まさたか
Kavli IPMU教授

柳田 勉 やなぎだ・つとむ
Kavli IPMU主任研究員

カミオカンデで陽子崩壊の研究に携わる

村山 ノーベル賞、おめでとうございます。ものすごく忙しいのではないですか。

梶田 そうですね。メールがすごく増えてますし…

村山 しばらくは大変ですね。そういう中でこの座談会にお出でいただき、ありがとうございます。最初にお聞きしたいのは、大学院で東大に入ってなぜ小柴研に行こうと思ったのですか？

梶田 素粒子の実験はやろうと思っていたのでチョイスは2つ、藤井・釜江研か小柴研でした。どっちにしようかよく分からないというのが正直なところでした。

村山 素粒子実験をやろうと思った理由は何？

梶田 若かったので、素粒子とかファンダメンタルなことをやりたいという思いがありました。

村山 入って、すぐにカミオカンデ建設の時期ですか？

梶田 まだ現場には全く行っていませんでした。入ったのはちょうど20インチの光電子増倍管の最初のものでできた頃でした。

福来 設計には関与していなかったのですか？

梶田 全然関与していません。



村山 斉



梶田 隆章



柳田 勉



福来 正孝

村山 では、その時には既にカミオカンデの構想はあって、小柴先生がそれを進めていて、大学院に入って、それに参加するという形ですね。

梶田 そうです。

福来 大学院は何年ですか。

梶田 1981年の4月です。

村山 当時、小柴研はまだ DESY の実験もやっていたんですか。

梶田 やってました。

村山 では、どっちに行くかというのは誰が決めたのですか。

梶田 それはよく分かりません。有坂勝史さんが1981年のはじめにモンテカルロ

シミュレーションで修士論文を書いていました。僕は有坂さんにそそのかされていつの間にか陽子崩壊をやることになりました(笑)。

村山 そのときはもうIMBはあったのですか？

梶田 建設していました。

村山 小柴先生は、IMBと競争しなければいけない、というので20インチの光電子増倍管開発に取り組んだとよく言われていますが、本当にそうだったのですか？

梶田 そこは皆さんと同じで、伝え聞いているレベルです。

村山 それから建設が始まって、当時は

チームはすごく少なかったんですね。鈴木厚人さんと有坂さんと梶田さんと。

梶田 宇宙線研の須田英博先生。他に数人でした。

村山 その頃は、戸塚さんはいなかったのですか？

梶田 戸塚先生は私が修士1年に入った春、5月頃だと思うのですが、ドイツから帰って来てLEPのOPAL実験の開発研究をやっていたのですが、余りにもカミオカンデが悲惨なので助けてくれていました(笑)。

村山 そのときは、カミオカンデは純粋に本郷の物理教室で進めていたのですか？

梶田 いや、宇宙線研で須田さんが入っていたし、理論で助けてくれた荒船先生もその頃宇宙線研で、それから東工大に移りました。

村山 カミオカンデが完成したのはいつでしたか？

梶田 1983年の7月です。

太陽ニュートリノ観測へ改造されたカミオカンデ、そこに超新星爆発

村山 それから1987年の超新星まではどんな感じだったのですか？

梶田 その辺は小柴先生がすごいのですが、もう1983年の秋には、何月かは分からないのですが、太陽ニュートリノ観測に向けてカミオカンデを改造すると言い、そうは言ってもカミオカンデでは太陽ニュートリノには小さすぎるので、スーパーカミオカンデをやるべきだと言いました。カミオカンデの改造工事は1984年ぐらいから始まったと思います。

福来 小柴さんがそうした一番の理由は、太陽ニュートリノも狙っていたけれども、陽子崩壊はもうカミオカンデでいくらやっても見つからない、大きくしない限りダメだということをはっきり認識していたからですよ。

村山 そう思ったのはIMBのせいですか？ $\rho \rightarrow e\pi$ の最初のリミットがIMBから出たのはいつでしたか？

梶田 あれは1982年でした。

村山 では、その時はもう大統一理論は駄目だという雰囲気になっていたんですか？

福来 まだ駄目とは言わないけれど…

柳田 もっと大きくしなくてはいけないという雰囲気でした。

福来 あの頃、 $\rho \rightarrow \nu K$ の方ではないかという話は随分あった。

村山 超対称大統一理論ですね。

梶田 柳田さんが νK が重要だと言ったのは、1981年ぐらいですか？

柳田 そうですね、ワインバーグと坂井-柳田。その辺から小柴さんには νK が視野に入っていたのかな。小柴さんは理論をキャッチするのがとにかく早いですね。面白いから話をしろとニュートリノ質量のシーソー機構で僕が小柴さんからセミナーに呼ばれたのが1981年か82年の前半ぐらいです。その時、セミナーで小柴さんは非常に感心したけれど、他の人は全然感心しなかった(笑)。

村山 センスが良いんですね。

福来 センスはすごく良い。

柳田 ものすごく良いですね。直感力…あれは何と言ったら良いのだろう。

村山 すると、陽子崩壊はもっと大きくしなくてはダメだから太陽ニュートリノにスイッチするということになって、アンタイカウンターを作り、スレッシュールド(閾値)を下げ、それから太陽ニュートリノと超新星爆発を目指す時期に入ったわけですか？

梶田 いや、超新星は意識して目指してはいませんでした。

福来 偶然の産物で、スレッシュールドの下がったところにちょうど超新星爆発が起こったのです。

村山 だから、ひと月前まではラドンのレベルが高すぎて見られなかったのでしたか。小柴さんはひと月したら定年退官ですから、ふた月しかウインドウがない(笑)。ふた月のど真ん中の、ちょうど16万年前に超新星が爆発していた。あり得ないですよ。

柳田 ものすごい確率だ。

福来 あの前、実はスレッシュールドはもともと100 MeVに近かったですよ。

梶田 いや、30 MeVです。解析は多分100 MeVぐらい。それも電子についてです。

福来 そこに、モノポールがあると陽子崩壊を引き起こすというルバコフの話があった。

村山 ああ、ありましたね。Callan-Rubakov。

福来 そう、Callan-Rubakov。そうすると30 MeVのミューニュートリノが出るから、それが測定できるようにするべきだと、僕は戸塚さんに随分言ったことがあります。

村山 そういう話があったのですか。

福来 そう。そこまでだったら下げられると戸塚さんが言って、戸塚さんと鈴木厚人さんが一生懸命それを考えていたのです。だから、スレッシュールドを6 MeVにする前にその途中段階があったんですよ。30 MeVのニュートリノを測定すると。

柳田 それは知らなかった。実験屋さんがCallan-Rubakovを知っているとは思えないから、どうしてそれを狙ったのか分からなかったけれど、そうか、福来さんが…

福来 それでスレッシュールドを下げることに成功して…

村山 でも、そこからまた10 MeV以下にするのは大変ですね。

福来 それは大変。特にラドンが。

村山 それはどんな感じだったのですか、ラドンを除去するプロセスは。



梶田 まず、世の中にラドンがあるということを知らなかったわけです。偶然計数だけを考える限り、新しいハードウェアでスレッシュホールドは十分5、6、7 MeV 辺りまで下げられるかなと思っていたら、トリガーレートが1,000ヘルツを超えるわけです。「何だろう?」というところから始まって…

村山 それでは、理解するところがまず難しかったわけですか。

梶田 やはり鈴木厚人先生が偉かったです。1,000ヘルツになってしまったから、取りあえず純水装置を止めてみた。すると急激に下がっていくので、その寿命から「これ、ラドンかな」ということを見つけました。

村山 水から不純物を取り除く話はどうやって進んでいったのですか?

梶田 ラドンだと崩壊するし、あとはどこからか入ってくるので、それを止めれば良い。カミオカンデの最初のときには、鉱山の水が結構きれいなので、単にそれをフィルタリングして入れていたんです。

村山 そうか、循環ではなかったのですか。

梶田 はい。純水装置がそれ程良いものではなかったんで、そこから結構大変でした。カミオカンデのレベルでは、単に純度を保ったまま水を循環させれば良いのですが、そこまでもっていくのが大変でした。

村山 それで、超新星のひと月前にやっとならラドンのレベルが下がって、スレッシュホールドが10 MeVくらいになったのです

か。

福来 12月の終わりぐらいには下がったのではなかったかな。1月には6 MeVとか7 MeVになっていたから。

梶田 もう忘れたけれど、そのくらいです。

村山 それで、スレッシュホールドが下がって、ひと月、ふた月後にいきなりニュートリノバーストがあった。その時はどんな感じでしたか?

梶田 その時はCERNにいたので、知らないのです。私は公式にはICEPP（東京大学素粒子国際センター）の所属だったので、職務として向こうに行つてOPALを手伝ってました。

村山 モーリス・ゴールドハーバーが引退する前にたまたまディナーパーティーで話を聞いたら、スライドでまずカミオカンデのイベントを出して、それからIMBのイベントを出して、「IMBのイベントはエネルギーが高い。ということは、カミオカンデよりもちょっと後のバーストを見たことになるので、小柴が（ノーベル賞を）もらっても仕方がない」と言ったのですが(笑)。その辺、どういう関係だったんですか?

福来 IMBがバーストのタイミングを問い合わせてきたわけです。IMBはノイズレベルが高いから、情報を得たところを探してイベントを見つけた。

村山 カミオカンデのタイミングを知らなかったらIMBは見つけられなかった?

福来 難しかったでしょうね。いずれ見つかったかもしれないけれど、あんなに

早くはできなかったでしょう。

村山 それは重要ですね。

福来 そう、ものすごく重要な情報です。

ミューニュートリノのフラックスが不足

村山 超新星騒ぎがあった後、やっと太陽ニュートリノを観測する時代に入ったわけですね。太陽ニュートリノの解析には参加されていたのですか?

梶田 いや、していません。

村山 その頃から、大気ニュートリノの方をずっと?

梶田 はい。

福来 あの頃から、大気ニュートリノがおかしいというのは、既に皆言っていたよね。

梶田 いや、1987年の春はまだ研究グループ外には一切言っていないです。

福来 足りないというのは聞いていますよ。1987年よりはるかに前に、1984、5年頃。

梶田 それはミューオン崩壊が足りないということです。

福来 ミューオン崩壊、いや、ミューオンフラックスが足りないといふ1984、5年に戸塚さんからいつも聞いていました。ミューニュートリノが μ 粒子をつくり、 μ 粒子が崩壊して電子を出す。それを見たらレートが足りないということに、陽子崩壊を一生懸命やっている時、既に気がついていたのです。

村山 でも、大気ニュートリノフラックスの絶対値なんて、その頃そんなに信頼性なかったですよ。

梶田 その頃チェレンコフ光のシングルリングを一応ミューニュートリノと電子ニュートリノというように分けていたのですが、 μ とeの比は別におかしくはないように見えていたのに、 μ から崩壊した電子の数が少なすぎるという問題があり

ました。

福来 一番最初にミュオンフラックスが足りないと言ったのは、南アフリカで実験していたライネスたちで、1978年に60%しかないと…

梶田 彼らの実験に使われたのは、突き抜けていくミュオンしか見られない測定器なのですが、それが足りない。いや、足りないとは言っていないですね。データ分のモンテカルロという変な比で、1.6と書いてあるんです。

福来 だから予測の60%なので、値自身はその頃からあったけれども、そんなフラックス、どうして信用できるのだと誰も真面目に取る人はいなかった訳です。その後、IMBも少し足りないというのを先に出していますね。

梶田 論文を投稿した日は、実は数日違いなんです。カミオカンデとIMB両方ともシングルリング中で崩壊電子が少ないというデータは出しています。

柳田 ニュートリノ振動があるかなと思ったのはいつ頃かな？

福来 神岡の1988年の大気ニュートリノの論文¹には、たくさんディテールが書いてあって、その最後にニュートリノ振動の可能性も書いてあるのだけれど、僕がこれはニュートリノ振動が見つかったと信じたのは1992年の論文²だね。

梶田 でも1992年の論文というのは、データ自体は倍ぐらいに増やして、ニュートリノ振動パラメータの許容領域を書いたというレベルですけれども。

福来 あの時に ν_μ と ν_e の比の測定値をモンテカルロ予測で割った double ratio を書いたでしょう。 ν_μ と ν_e の比を取って、それが予測通りの2対1になるのではなくて、1.2対1くらい。つまり ν_μ のフラックスが予測の60パーセントくらい。Double ratioなので、フラックスの不定性が除かれている。



村山 でも、あの頃 Frejus とか、カロリメータでは見えてなくて…

福来 そう、Nusex も Frejus も ν_μ の不足は無いと言っていた。

村山 水チェレンコフだけが見えていて、あれは水チェレンコフの粒子識別が間違っているのではないか、みたいなことを言っていましたね。

福来 そう。その頃、戸塚さん「間違ったら信用を失う、これは本当に諸刃の剣だ」とものすごく気にしていました。

カミオカンデの粒子識別アルゴリズム：作った本人は正しいと信じていた

村山 粒子識別のアルゴリズムを最初にカミオカンデで作ったのは梶田さんでしたか？

梶田 はい、そうです。マルチリングの場合にそれぞれのリングが電子型である確率とミュオン型である確率を計算して粒子識別をするようなアルゴリズムを作りました。それを一番簡単なシングルリングに適用してみたら、予想と違ってミュオンの数が有意に足りないという結果になりました。1986年の秋頃でしたが、それで私は初めて大気ニュートリノがおかしいのではないかと気がつきました。

村山 その頃本当にミュオンのきれいなシングルリングと電子のぼやとしたリングの区別をちゃんとできるとは、皆思っていなかったのですか？

梶田 宇宙線ミュオンはミュオンであると98%以上で識別できるので、私は信じていましたが…

村山 周りの人はどうだったのですか？ コミュニティーとしては？

梶田 その辺は良く分かりません。やはり Frejus と Nusex の論文がすぐに「 ν_μ の不足は無い」と出たので、皆相当混乱していたのでしょね。

村山 では、カミオカンデのグループの中でも結構いろいろな意見があったという状況だったのですか？

梶田 そうです。1992年の論文が出せたのは、やはり小柴先生がいたからです。

村山 これは面白いと？

梶田 と言うより、小柴先生が、「中途半端なままなので、ちゃんと次のバージョンの論文を書かなくてはダメだ」と勧めてくれました。

福来 あれは極めて重要な論文だった。

柳田 我々がニュートリノ振動の論文³を割と早く書いたのは、やはり神岡グループのそばにいたからですね。これは間違いないと思った。それでは、モデルが作れないかと…

福来 1993年に書きました。カミオカンデの1992年の論文があったから、その半年ぐらい後。皆が一番信じなかったのは、混合が最大に近いことで、「あれをどうしてくれるのか」と思っていた。

村山 偏見があったわけですよ。

福来 普通は、混合角 ($\sin \theta$) は質量の比のルートくらいだろうと思っているから、そんなに大きいはずがないのに、大きいからね。柳田さんのシーソー機構にすれば、もう一度ルートを取れるわけ。どんな小さい数でも4乗根は1に近くな

る。

柳田 あれはシーソーの特技だね、ルートのルートは1であると。

村山 1991年に私は大学院を卒業して東北大に行ったのですが、柳田さんにすぐ言われたのは、大気ニュートリノのモンテカルロを本当に信じて良いのかということでした。それで、本当に2対1になるのかとシミュレーションしました。

柳田 そうでしたか？

福来 あの頃ミューオンの偏極を考えると比が2対1からずれるのではないかという話もあったけれど、計算してみるとその効果はそんなに大きくなかった。

村山 確かにどう頑張っても2対1にしかなりませんでした。天頂角に対する依存性が見えたのはいつでしたか？

梶田 見え始めたのが1994年の論文⁴です。

村山 すごく時間がかかっていますね。

梶田 あれは本当に時間がかかりました。始めたのが1988年ですから。6年間データをためて、「もう駄目だ。これ以上待っても仕方ない」と論文にしました。

村山 やはりカミオカンデは1000トンだったから大変でしたね。しかも、天頂角分布を見ると、一番上のピンだけボンと上がっていて、あとの4つのピンは真っすぐ引いてもおかしくなくて、本当に天頂角依存性があるのかどうか、あれを見ると不安だったですね。

梶田 μ/e 比の測定データとモンテカルロ計算を比べる double ratio を取ると、どうしても電子のイベント数が少ないので良く分からないけれど、ミューオンだけ見ていると、一応アップ/ダウンの非対称が99%くらいの確率で出ています。でも、99%というのは 3σ に届いていない。

村山 カミオカンデで上向きミューオンはできなかったのですか？

梶田 それも出しているのですが、遅れ

て、多分1998年ではなかったかな。

村山 そんな後ですか。

梶田 そうです。

村山 IMB は上向きミューオンを見て、ストップと突き抜けの比で、この振動パラメータ領域にはないと言いました。

福来 それは1994年くらいではなかったかな。

村山 今見ると本当にすごくきれいに…

梶田 ドンピシャなところを二重に否定していました。

村山 あれは何だったんですか？ バックグラウンドですか？

梶田 あれは何か少し変なことをやっていたと思います。もう忘れましたが。

村山 そういうことが続いてきて、スーパーカミオカンデの建設が始まりました。

梶田 1991年からです。完成してデータを取り始めたのは1996年4月1日です。

村山 IMB の主立ったメンバーが入って来たのはいつ頃ですか？

梶田 それは1992年頃だと思います。

村山 建設が始まってすぐですね。IMB のタンクが水漏れして直せなかったの…

梶田 はい、向こうの都合でした。

村山 日本のグループとしては、それをすぐ受け入れたのですか？

梶田 基本的にはそうです。

スーパーカミオカンデで得られた決定的なデータ

村山 1996年にデータを取り始めて、それからは急激でしたね。どんどんデータがたまってきて、すぐミューニュートリノのアップ/ダウンの非対称が見えてきて、その時はすごく盛り上がったでしょうね？

梶田 その時は内心はすごくうれしかったです。

村山 1997年の終わり頃、パークレーに

ハンク・ソーベルがコロキウムに来て、データを見せました。アップ/ダウンの非対称が大きく出ていて、「もう 5σ 以上あるのどうして発見と言わないの。」と言ったら、「いや、これは共同研究だから私個人の意見で言うことはできません。」と言われました（笑）。これは本当に発表するんだというところまでどういうふうに乗れんしていったのですか？ データはずっと見せていましたね。全然隠していませんでした。

梶田 ええ、スーパーカミオカンデはデータをまとめると必ず見せてしまう。全然隠していませんでした。

村山 1998年の高山の国際会議でこれはエビデンスと言うところまでいくのは、どういう議論がそこにあったのでしょうか。

梶田 忘れてしまったのですが、多分上向きミューオンとか、全部がコンシステントに説明できるかどうか、きちんと確認が取れるまで待っていたのではなかったでしょうか。

村山 では、multi-GeVの天頂角依存性だけでは不十分で、他のサポートエビデンスがあって初めて… あの会議の時、私は感動しました。高山の会議については、もともとカナダのサドベリーで予定されていたのが、SNOの建設が遅れていたために急遽高山で開催になりました。日本で引き受けたのは大正解でした。

福来 あの頃、僕はもうニュートリノ振動は当たり前だと思っていたので、そんなに感激しなかった（笑）。僕にとってはものすごく重要だったのはカミオカンデの1992年の論文。ニュートリノ振動はあるんだということを完全に知り得たから。

村山 でも、1998年に初めて本当に実験的に標準模型ではダメだということを 5σ 以上で示しました。で、1998年にデータが出て、その後梶田さんに対して周りか

らの、コミュニティー全体からの反応はどうでしたか？私の印象では、皆すぐこれは本当だと信じた印象ですが。

梶田 思った以上に受け入れられたという印象でしたね。

村山 思った以上というのは、かなり抵抗を予想していたのですか？

梶田 あるかと思っていました。10年間ずっとそういうのを見てきましたから(笑)。

福来 1998年以前のプレヒストリーがなかったら、ちょっと分からなかったのでは… それがあったから、前から「ひょっとしたら大気ニュートリノで大きな混合角のニュートリノ振動があるかもしれない」と皆思っていたところに1998年の発表が決定的なデータだったから、それを見て、「あっ、これでいいんだ」と安心したのだと思う。

村山 確かにだんだん収束していった感じですね。Soudanもカロリメータだけど double ratio が低いと言いはじめたし、粒子識別も KEK で水タンクをつくって調べましたね。確かに不安要因は除いていったというのはそうですが、そのころの印象で今でも覚えているのは、コライダーの人たちは、水チェレンコフみたいないいかげんな測定器でそんなこと分かる訳ないみたいなことを言っていた人が結構いました。私はスーパーカミオカンデのウェブサイトに載っていた誰かの博士論文で、本当にいろいろな系統誤差を調べたものを全部読み、高山の国際会議の後でしたがCERNにたまたま滞在していた時に、大気ニュートリノで本当にどこまで分かっているのかというセミナーをしました。自分で理解したなりに、ここはどのぐらいまではっきりしているとか、これは間違いないだろうとか。結構CERNの実験の人たちがやってきて、まだその時は懐疑的でしたね。

福来 高山の後でも、ジョン・バコール

は非常に懐疑的だったと思う。“Is their experiment reliable?”と、僕は何回も聞かれました。

ニュートリノ物理はこれからどこへ行くか？

村山 さて、ニュートリノ物理はこれからどこに行くのでしょうか。

福来 (ニュートリノを出さない) 2重ベータ崩壊ですね。

村山 カムランド禅が今世界でトップで頑張っていますね。

福来 ただ、今出している有効質量の制限が、核行列要素で非常に不確かなところがあるけれども、それを考慮してカムランドで出したリミットが120ミリ電子ボルトから250ミリ電子ボルトの間くらい。ところが、ニュートリノの質量階層のノーマル (normal hierarchy) では、5ミリ電子ボルト…

村山 ノーマルは厳しい。ゼロもありますしね。

福来 CP が逆になっていてキャンセルしたらゼロだけれども、一応それは除外するとしても、50倍違う。ということは、測定器のボリュームで2,500倍必要。

梶田 バックグラウンドがなければ2,500倍だけれども、あるとさらに悪くなります。

福来 インバーテッド (inverted hierarchy) でも40から50ミリ電子ボルトだとすると、今の5倍良くなるにはいけないから、ボリュームで25倍。カムランドを大きくせよというのは難しいですね。

村山 スーパーカミオカンデの中にバルーンをつるすというアイデアも出ていましたけれど。

福来 それをやっても、ノーマルの場合2重ベータ崩壊を発見するというのは、僕が生きているうちは無理ですね。

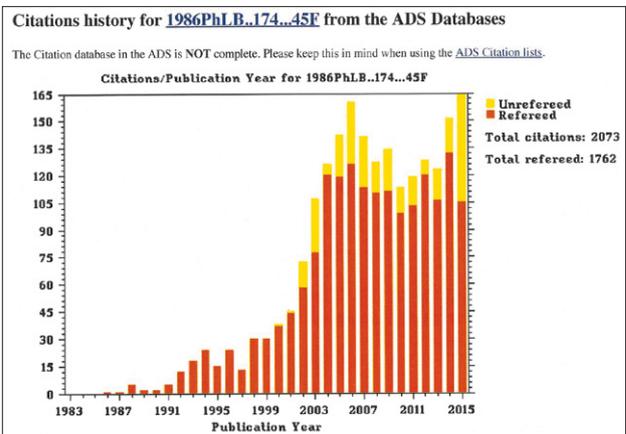
村山 レプトジェネシスは証明できると思いますか？

福来 難しいですね。あれはルバコフたち⁵が普通のバリオジェネシスで作ったバリオンは全部消えてしまうと言っていたことが動機でした。初めは不審に思っていたけれど、そのうち納得して何とかしないとイケないと…

面白いものを1枚持ってきました。柳田さんと論文⁶書いたのは1986年だったのですが…

村山 1986年でしたか。まだニュートリノ振動が見つかるずっと前ですね。

福来 これが年ごとのレプトジェネシスの引用数なんです。ここで論文を出した訳だけれど、初め評判は非常に悪かったんです。ニュートリノ振動が皆に受け入れられた1998年以降上がってきて、最近はコンスタントに1年当たり百数十回引用されています。これはADS (Astrophysics Data System) なので、SPIRES (素粒子物理の文献データベース)



だともうちょっと多いんですが…

村山 本当だ(笑)。やっぱり信憑性が高まったから。

梶田 2000数年辺りから、将来のニュートリノのCP非保存をどう調べようか一生懸命議論するようになって、その関係でレプトジェネシスが前面に出てきました。

柳田 これは非常にうれしいですね。つまり、理論物理学が実験によってものすごく発展したということを表しているわけですよ。こんなことは余りない。これで2重ベータ崩壊が見つければ、もう…(笑)。

福来 引用数が増えてくるのにどのくらいの遅れがあるかというのも、これを見ればすぐ分かる。このレプトジェネシスの論文は、一番初め、Physical Review Lettersに投稿して掲載拒否されたんです。

村山 え、そうだったのですか!

福来 そのころ柳田さんはDESYにいたので、ヨーロッパの雑誌のPhysics Lettersに投稿したらすぐ通った。

柳田 そう。すぐ通ったね。

福来 それで出版が3ヶ月か4ヶ月遅れたのだけれど、さっき言ったように、初め評判は非常に悪かったです。だから長い目で見ないとダメですね。

柳田 いい実例だね。しかし、これは実験がなければズルズルと注目されないうまま。神岡のニュートリノ振動という実験があったから、こんなにバーンと行ったので、そこが僕には非常にインプレッションです。

レプトジェネシスというのは、サハロフの宇宙の物質創生の3条件、バリオン数の破れ、CPの破れ、それから熱平衡の破れの、バリオンのところをB-Lに換えただけです。つまり、サハロフの枠組の1つだけを換えたものですが、それによってニュートリノがマヨラナ質量をもつという予言ができてしまった。これはサハ

ロフが陽子崩壊を予言したのに対応しているのではないですか。レプトジェネシスは本当にチェックできなくても、ニュートリノが質量をもつことは実験で証明されました。

福来 しかも質量がいいところに来たね。面白いのは、レプトジェネシスが成り立つためには、ニュートリノ質量の和と云うか、平均値が100ミリ電子ボルトくらい以下でなければならない。質量がそれより大きすぎるとバリオン数を作れない。

村山 そうですね。消えてしまいますからね。

柳田 それは非常に重要だね。

福来 ブッフミュラーたち⁷がやった計算なのですが、それは非常に重要な話で、100ミリ電子ボルトという値が、すべてのもものとコンパラブルなんです。2重ベータ崩壊が出しているのが上限120ミリ電子ボルトでしょう。逆に、もし2重ベータ崩壊がそこで見つかってしまったら、レプトジェネシスは非常に厳しくなる。それから宇宙論からの制限が、ニュートリノ質量を3つ足したものが現在200ミリ電子ボルト以下だね。

村山 まあ解析によって違いますが。

福来 解析は難しく、僕が信じられるのは、3つ足したものが600ミリ電子ボルト以下というものです。これは信じてもいい。それはCMB(宇宙マイクロ波背景放射)だけしか使っていないから。200ミリ電子ボルトの方は、BAO(バリオン音響振動)を使っている。それはともかく、200ミリ電子ボルトというのは、3で割ると、60ミリ電子ボルトで、それは2重ベータ崩壊でも目標にするところだし、宇宙論的制限でも目標値のところ。次の目標値というのは、大体50ミリ電子ボルト。

柳田 そういう意味では、レプトジェネシスはこれからシリアスなチェックを受

ける訳ですね。100ミリ電子ボルトか50ミリ電子ボルトか分からないけれど、ニュートリノ質量の上限がその辺のところから下がっていくかどうか。この辺の質量が有限値として残ることになればレプトジェネシスは強い制限を受けることになる。

福来 今のところすべてがここ(上限値)以下にあると言っているだけで、太平洋で沈没船を探すようなものですね。

柳田 そういう認識をした方が良いでしょう。本当に下がっていくかどうか、非常に重要ですね。

福来 その制限を少しでも良くするにはどうすれば良いかというのは、ドラステックでなくても意味があると思う。もちろん2重ベータ崩壊が一番良いのだけれども、ノーマルだと届かない。

梶田 インバーテッドならどうですか。

福来 それでも難しい。40ミリ電子ボルトだから、ファクター5小さくしなければいけない。

柳田 ファクター5なら、できそうな気がします。生きていうちはきっとどうにかするのではないのでしょうか。

ニュートリノで次のサプライズは何か?

村山 では、これからニュートリノでサプライズがあるとすれば何でしょう?

柳田、梶田 インバーテッドですね。

村山 ステライルニュートリノは?

福来 そんなものはないと思う。

柳田 “I don't believe”だね。

村山 インバーテッドだったら仰天しますか?

柳田 インバーテッドだと驚きですね。DESYで会議した時だったか、ウィッテンが「ニュートリノは、ラージアングルは非常にサプライズであった。もう一度サプライズがあるかもしれない」と言

って言って終わってしまったけれど、何がサプライズなのだろう？やはりインバーテッドかな？

福来 インバーテッドとなったらサプライズだ。なぜそうなっているか考えるというのは、ほとんど不可能…

柳田 それなりのへりくつをつけることはできるのですが、私が(笑)。

福来 そこが柳田さんの素晴らしいところで、何でもかんでもへりくつを作るとするのがね(笑)。

柳田 やはり重要なのは2重ベータ崩壊ですかね。

村山 2重ベータ崩壊と宇宙論ですね。

福来 宇宙論が難しいのは、CMBだけだというのが一番信頼できる場合だけでも、再結合のところから非相対論的になっているということから制限が来ているのですね。だから、CMBだけを使うと今の値より余り小さいところには行かない。

村山 では、驚きという意味では、これから当面目標にするべきなのは、宇宙論を使ってニュートリノ質量が大きいことを示して、レプトジェネシスを排除することですね(笑)。

KAGRAとスーパーカミオカンデの超新星同時観測を期待

村山 梶田さんご自身は、これからニュートリノにどう関わっていくのですか。今は重力波のKAGRAですごく忙しいと思いますが。

梶田 ニュートリノのコミュニティーはハイパーカミオカンデをやりたいので、一生懸命後押ししたいと思います。

村山 KAGRAの展望はどうですか、ご自身としては。

福来 見える可能性は？

梶田 十分あると思います。

村山 天文学になりますね。超新星爆発は、重力波で見えて光学的には見えない

こともあるし。

福来 超新星爆発は余り重力波を出さなと思っていますので、重力波で見えたらこれは明らかに驚きです。

村山 例えば、重い星は重力崩壊で超新星にならずにブラックホールに落ち込んでしまって望遠鏡で見えない、ニュートリノと重力波でしか見えないという話が十分あり得るわけですね。それこそ神岡でKAGRAとスーパーカミオカンデで同時に受かって、望遠鏡で見えない、というのは非常に面白いと思います。

福来 そういうことがあれば、それは素晴らしい。それから、日本でしか受からないというのもますます面白い(笑)。

村山 神岡から第3のノーベル賞ですよ。

福来 もう1つ重力波の検出器をどこかに作って、コインシデンスを取れるようにしておかないと。重力波検出器では 10σ 離れたシグナルなんていくらもありますから。

村山 コインシデンスが大事ですね。

梶田 アメリカのLIGOとのコインシデンス。LIGOはもう動いています。

村山 では時間ですので、この辺で。梶田さん、これからも頑張ってください。本当にうれしいです。我が事のようにうれしいです。

梶田 ありがとうございます。

Electroweak Baryon-Number Non-Conservation in the Early Universe. Phys. Lett. **155B** (1985) 36.

⁶ M. Fukugita and T. Yanagida, "Baryogenesis without Grand Unification," Phys. Lett. B **174** (1986) 45.

⁷ W. Buchmüller, P. Di Bari, and M. Plümacher, "The Neutrino Mass Window for Baryogenesis," Nucl. Phys. B **665** (2003) 445.

¹ K.S. Hirata et al., "Experimental Study of Atmospheric Neutrino Flux," Phys. Lett. B **205** (1988) 416.

² K.S. Hirata et al., "Observation of a Small Atmospheric ν_μ/ν_e Ratio in Kamiokande," Phys. Lett. B **280** (1992) 146.

³ M. Fukugita, M. Tanimoto, and T. Yanagida, "Phenomenological Lepton Mass Matrix," Prog. Theor. Phys. **89** (1993) 263.

⁴ Y. Fukuda et al., "Atmospheric ν_μ/ν_e Ratio in the Multi-GeV Energy Range," Phys. Lett. B **335** (1994) 237.

⁵ V.A. Kuzmin, V.A. Rubakov, and M.E. Shaposhnikov, "On Anomalous