

ニュートリノ研究のこれまでとこれから

宇宙線研究所 梶田 隆章

関：前のお話と違って、強い相互作用ではなく加速器は使っていない実験のお話を、東大宇宙線研究所の梶田さん、よろしくお願いします。

東大宇宙線研の梶田です。「ニュートリノ研究のこれまでとこれから」ということで、話すようにと、確か8月だと思うのですけれども、坂東さんに言われて、11月だったら暇そうだからと思って、返事をしました。いい機会をいただいて光荣ですが、でもこの研究会では何を話すのか、全然わからなくて、去年の報告書を送ってもらったのを、夜、寝る前に必ず読むようにして、勉強をしてまいりました。

それから、関さんから、僕が実験の代表者と言っていたいたのですが、そういうことはないんです。でも、一応実験にかかわっていますので、一員として話します。

ニュートリノ研究の これまでとこれから ＝昔（8割） ＝未来（2割） 東大宇宙線研究所 梶田隆章	ニュートリノの実験が（超新星の観測は偶然だったかもしれないが）ここまで世界をリードしたのは、いろいろとそれなりに苦労があっただろうが、理由があった筈である。 先進的なスピリット・苦労と喜びを語って頂きたい。 話の内容 ・ カミオカンデが始まる頃 ・ 太陽ニュートリノ観測に向けて ・ 大気ニュートリノの異常 ・ 今後（1例だけ）
---	---

[Slide 1]

[Slide 2]

[Slide 1] 去年の報告書を読ませていただいて、なんとなく感じとして、分配はこのくらいでいいのかなと思ひまして、こんな感じで話します。かなり昔の話が多くて、あと、ほんのちょっとだけ、これからの話を含めるという話でいきたいと思ひます。

[Slide 2] 今日、配られているものを読むと、「ニュートリノ実験が（超新星の観測は偶然だったかもしれないが）ここまで世界をリードしたのは、いろいろとそれなりに苦労があっただろうが、理由があった筈である。先進的なスピリット・苦労と喜びを語って頂きたい」ということが書いてありました。難しいのですが、苦労の一端ぐらいは話せるかなと思ひます。

あと、今朝のコーヒーの時間に、ニュートリノグループは、えーと言葉を忘れちゃったな。

坂東：こころざし。

そう、「志を持ってやっている」と。またそれも難しいのですけれども、一応、昔話のなかからそれを読み取っていただけたらと思ひます。

話の内容ですけれども、現在のスーパーカミオカンデのことはよく知られていますので、それより前の、カミオカンデの頃と、特にそのうちの太陽ニュートリノの観測に向けての話とか、大気ニュートリノの異常の話を、ちょっとさせていただきます。で、現在の話は飛ばして、今後のことを一つだけ、話させていただくというかたちで進めます。

実は僕のトークが1時間だということを少し前に知って、これは1時間もちません。30分ぐらいです。

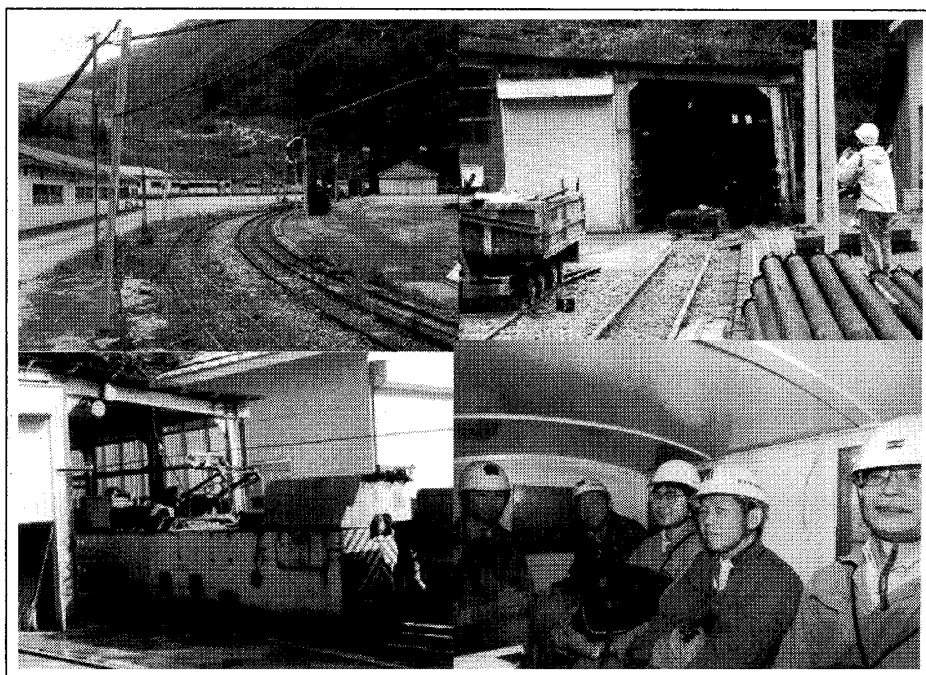
カミオカンデの始まる頃



[Slide 3]

[Slide 3] カミオカンデの始まる頃ですが、この写真は、日付は残っていないのですが、1983年の春に、神岡鉱山の茂住坑の坑口で撮った写真です。即わかんと思いますけど、ここに小柴（昌俊）先生がいて、ここに戸塚（洋二）先生がおりまして、その偉い先生方の後ろで小さくなっているのが、有坂さん、私、中畑（雅行）さんと瀧田くん。あと、井森さんと田中さんというのが、素粒子センターからこの建設のために手伝いに来てくださった方で、これは木舟先生です。なんでこれを見せるのかという、意味もあまりないのですが、このような人たちが、カミオカンデの最初の頃、建設をやっていたということをまず最初に示しておきたいということです。

実はこれが全員ではないので、そういう意味もあって、もう少しほかの写真も見せます。

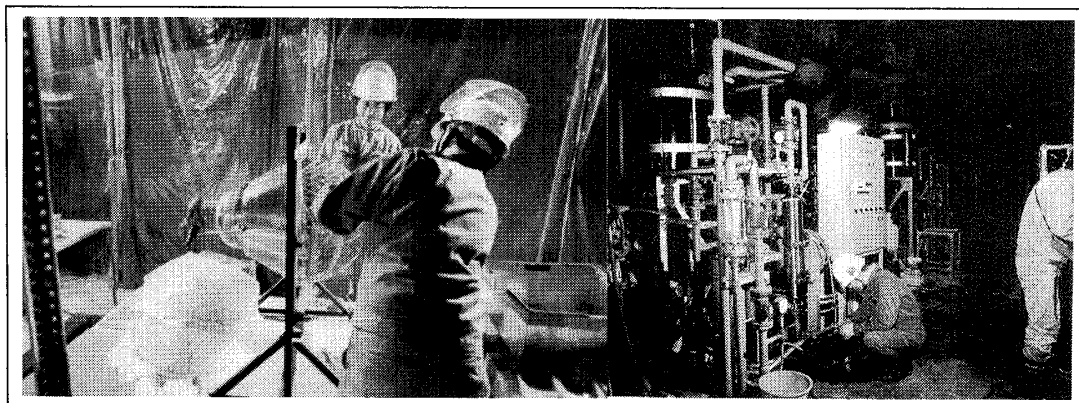


[Slide 4]

[Slide 4] これは神岡鉱山の昔の入り口のあたりなんです。いまのスーパーカミオカンデというのは、これと反対側の入り口から、車で気楽にぱっと入れます。気楽と言ったら嘘ですけども、これに比べたら気楽に入れるのです。昔はこんな感じで、当時、鉱山のトロッキを使って入ったわけです。

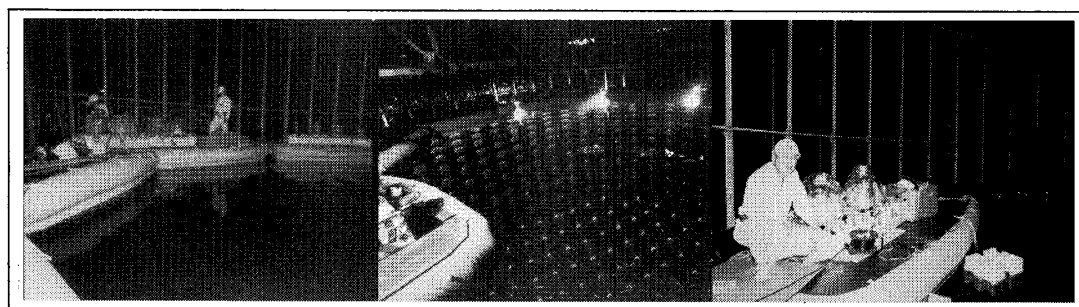
これを見せた一つの理由というのは、先ほどの写真に須田（英博）先生が写っていないくて、須田先生というのはカミオカンデの建設のときに、本当に重要な人物だったので、まず、須田先生を見せたかったということです。

ちなみに、カミオカンデの建設の頃と言ったのですが、実はこれには嘘があります。この写真は確かにその頃なんだけど、あとの三つはわりと近頃の写真です。これは鉱山が、こちら側からの仕事をやめたあとの写真です。明らかにわかるように、もう、レールの脇がこんなに草がぼうぼうになっている。多分、2000年頃の写真だと思います。いずれにしても、草が生えている以外は同じなのですが、われわれはこのようなところから、だいたい毎朝7時10分という便で入っていきまして、建設の頃はだいたい5時18分、構内発というので出てきていたのかな。そうだけど、何かトラブルがあると、次の便まで残るわけで、次の便は夜の10時十数分という、そんなことをやっていたわけです。



[Slide 5]

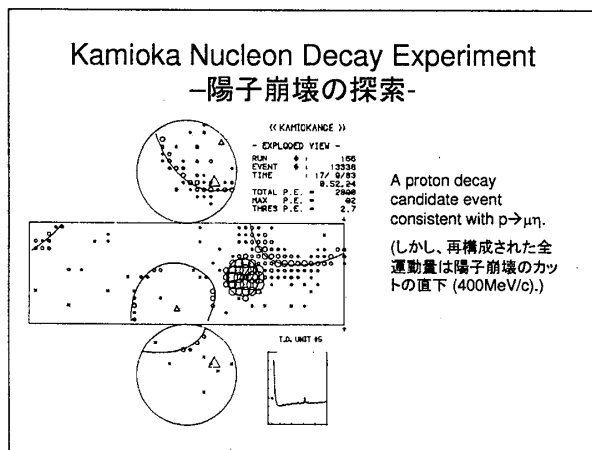
[Slide 5] さらに実は、ほかに大切な方がこの二つの写真に写っていないので、これを持っています。ここに写っていらっしゃるのが、現機構長の鈴木厚人先生ですね。これは確実ではないのですが、新潟大学の宮野先生のはずです。だいたいこれが当時の主要メンバーです。この写真はべつにたいした意味がないのですが、建設の頃、こんな鉱山の真っ暗の中に、こんなテント部屋をつくって、カミオカンデに取り付ける光電子増倍管を、タンクに取り付けるための金具をつけてみたり、あるいは光電子増倍管を地球磁場から遮るための、 μ メタルのシールドをつけてみたりと、そんなことを坑内でやっていたわけです。これが有坂さんです。



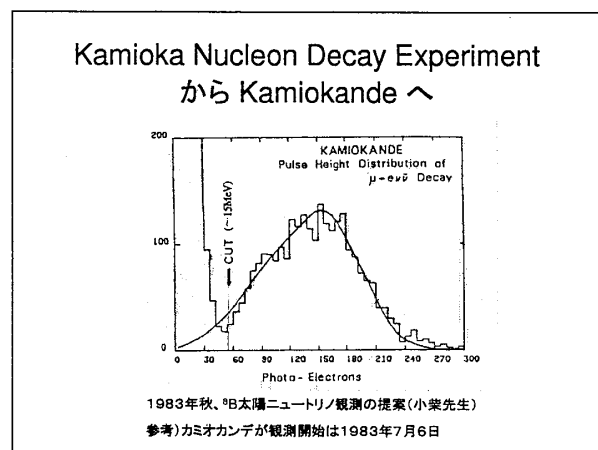
[Slide 6]

[Slide 6] タンクの中の写真というのは、多分みなさん、わりとよく見かけることと思います。これはよく、われわれが昔、見せた写真で、建設が終わる頃、1983年の6月頃だと思います。下から光電子増倍管をつけていって、水を上げていって、ボートに乗って作業していって、ほとんど上までできたときです。これはわりと水面が下の頃ですけれども、こんなことを延々と、春から6月末、7月初めまでやっていました。ここでボートに乗っているのは小柴先生です。

こんな感じで、われわれは1983年の春、3月ぐらいから7月初めまで作業をやりまして、7月の6日からカミオカンデで data taking が開始されたわけです。カミオカンデというのは、最初のご存じのとおり、Kamioka Nucleon Decay Experiment だったのです。陽子崩壊の観測という目的で、この実験を始めたわけです。



[Slide 7]



[Slide 8]

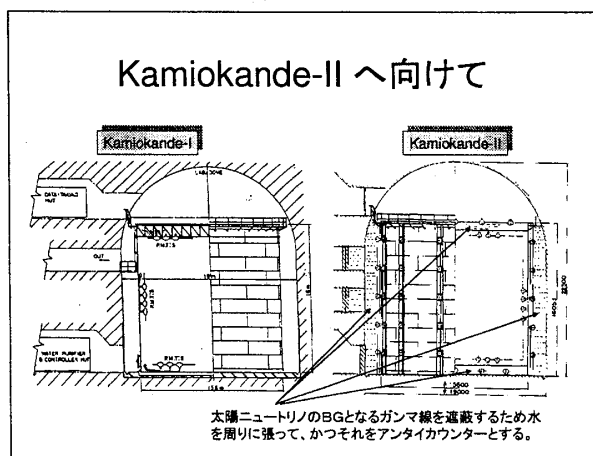
[Slide 7] 覚えていらっしゃる方もいるかもしれませんが、この event というのは、カミオカンデが最初にできた頃、9月17日という日付に観測された、陽子崩壊の候補です。覚えていないですか。

坂東: そうですね、こんなのもあったかな。

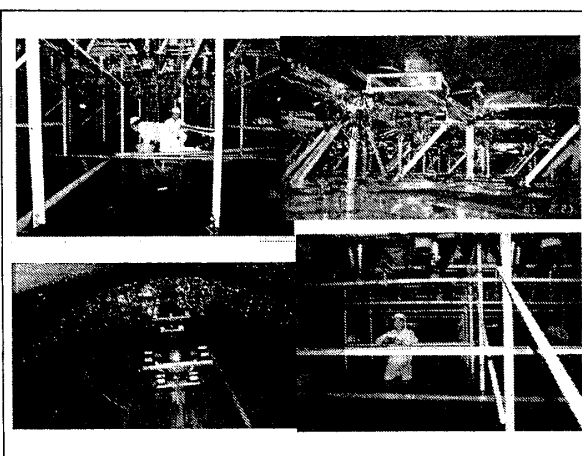
梶田: これは Proton が μ と η に崩壊したのと consistent だったんですよ。

ただし、その後、いろいろと解析していくと、厳しい点も出てきました。reconstruct した momentum は、400MeV 以下という cut を設けていて、それ以下と以上で proton decay と background を区別するとしていたんだけど、その直下だったので、ぎりぎりだったのです。このように実験を開始して、実際に非常にうまく、data taking は開始できたわけです。

[Slide 8] 精神的なスピリットのところなんだけれども、「Kamioka Nucleon Decay Experiment」から「Kamiokande」と書きました。どういうことかという、NDE というのは、もちろん Nucleon Decay Experiment で、最初は「陽子崩壊実験」としてスタートしたのですけれども、そのうちみんな、単に「カミオカンデ」と言うようになった。それは explicit に Nucleon Decay Experiment じゃなくて、ほかのことをやるようになった。それはもちろん、ご存じのとおり、特に太陽ニュートリノ実験なんですけれども、それについて、この絵で示しているのです。これは、正確な日付はもうわからないのですけれども、多分1983年の秋の頃。早いですよね。7月に data taking を始めて、やっと実験が始まった、その頃に、小柴先生が言い出した。これは muon decay の electron の spectrum なんですけど、これがだいたい 50MeV 近くで、ここが 10MeV あたりです。これを見て、もうちょっとエネルギーを下げれば、 ^8B の太陽ニュートリノができる と言い出したわけです。実験が始まってわずか数カ月後に、カミオカンデに陽子崩壊だけではなくて、太陽ニュートリノ実験の機能を加えるということ、言い出しているわけです。



[Slide 9]



[Slide 10]

[Slide 9] 実際に何をやったかということですがけれども、太陽ニュートリノというのは、10MeV,あるいはそれ以下ですから、明らかに自然界のいろいろな background が問題になっています。まずは、これがカミオカンデ1の最初の configuration ですがけれども、鉱山の穴の中に、鋼鉄製のタンクをつくって、水を入れて、光電子増倍管で見る。だけど、岩から、岩というのはウラン、ポリウムをたくさん含んでいますから、 γ 線がたくさん飛んできます。この内部の水槽の周りを、全部水で覆うということをやることにしたわけです。絵で描けば簡単ですが。

坂東：最初からそれを狙っていたわけじゃないから、水を入れるのは、あとから？

梶田：そう。あとから。

坂東：あんな外側に。

梶田：そうです。そうなんです。ここに資料を何も用意してこなかったのですけれども、あとからだったので、実は大変なんです。例えば岩盤に何らかの防水をして、水を貯め込むわけなんだけど、岩盤に防水なんてできないわけです。漏れがだいたい1時間に10トンなので、15トン入れておけばいいとか、そういう世界です。そのような感じで大変だったんですけど、それらのことを示す写真とかを持っていない。

実を言うと僕は、その頃の写真を、引っ越しのときに、一式全部なくしてしまっていて、だいたいほかの人がスキャンした写真を持って来ているのです。

[Slide 10] いずれにしても、そういうことで、内水槽の周りに水を入れて、さらにそこは、anti-counter にして、例えば宇宙線の veto も取れるようにする。それは陽子崩壊の検出方法とかにも関連するのですけれども、そのようなことをやりました。

これは側面に光電子増倍管を取り付けて、anti-counter にしているというところです。これは上か下か、多分こちらが上ですね。これが上面です。この下に内水槽があって、その上面、本来は60センチ、70センチ、地震対策のために、水の層よりも上に、これぐらいの層を取っておかないと、地震があったときに、水が溢れ出ちゃうので、好ましいことではないのですけれども、そこを水の層にしまいました。ここらへんは銀紙で、けっこうきれいなのですけれども、われわれがやっていたのは何かというと、こうやって地底の底のタンクの、さらに底で、天井高1.2メートルくらいのところに入って、へばりついて掃除をしていた。これを1984年の暮れくらいにやっていたんですが、これは鈴木厚人先生です。こんなことでやっていたんですけど、こういう苦労をしていました。1983年の春には、カミオカンデをつくって、やっとデータを取り始めたと思ったら、太陽ニュートリノをやるぞと言って、1984年はこんな、せっかくなかったタンクの底にへばりついて、掃除をやっていた。それでもやっぱり物理があったから、みんな頑張っていたのです。

この頃....

- 「 ^8B 太陽ニュートリノを観測する」の一言で、作業開始(たぶん)。(つまり、たぶん詳細なBGの見積もりなどはなし。)

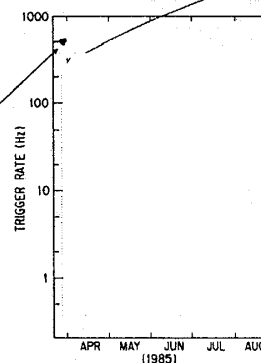
[Slide 11]

バックグラウンド

1985年春アンタカウンタ準備完了。

また、新しいトリガーを入れた。(Threshold = 約8.5MeV)

約500Hzのバックグラウンド(太陽ニュートリノ反応レイトの約1億倍)。



$t_{1/2} = 3.8\text{days}$
ラドンが
問題である
ことの発見!

[Slide 12]

[Slide 11] 一言言っておくといいかと思うんですけど、これはいまの研究のスタイルとの違いです。この頃は、「太陽ニュートリノを観測する」、その一言で、基本的に開始なのです。いまだったら、こういうことを言うと、そのプロトタイプをつくれだとか何だとかで、大変なわけだけれど、まだやっぱり、二十数年前というのは、わりと気楽に、リーダーシップでやれた時代みたいですね。これはもちろん危険だけれども、こういうことがあったので、ある意味、世界よりも早く研究ができたのでしょう。それで、僕が知る限り、詳細な background の見積もりなんかもなかった。signal の見積もりはあったのです。cross section とその flux が書ければ計算できるから、background は、多分見積もっていなかったですね。

[Slide 12] それで background を測ってみるとどうなっていたかということ、こんな感じでした。

先ほどのタンクの底にへばりついているような作業が終わって、1985年の春に、anti-counter の準備が全部できた。その頃、太陽ニュートリノの観測に向けてということで、新しいトリガーシステムを入れてみたわけです。最初のカミオカンデというのは 30MeV、太陽ニュートリノも関係ないし、放射能も関係ないところに、threshold を置いてデータを取っていたんだけど、threshold を下げましょうというので、新しいトリガーシステムを入れて、8.5MeV にセットしたわけです。

ここにぼちぼちとあるのは、ごみじゃなくて、これがデータポイントで、約 500Hz なわけです。これは何かというと、だいたい太陽ニュートリノ反応 rate の 1 億倍です。

坂東 : 1 億倍って、どういう意味ですか。

梶田 : 太陽ニュートリノのイベントはだいたい 1 週間に 1 個なんだけど、500Hz でできているんだから、つまり、1 億倍の Background があるということです。Background の評価なんか、きちんとしないで進んでいるから、こうなっちゃったわけです。だけどわりとラッキーで、すぐに下がりました。exponential に decay していきました。

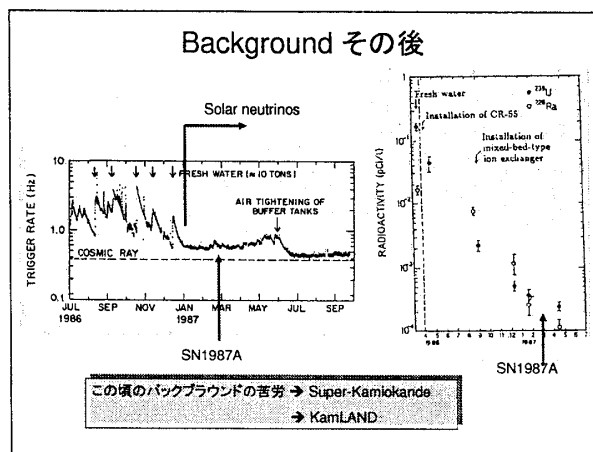
私を含めて、多くの大学院生が、このとき初めて、世の中にラドンがあるということを知りました。

坂東 : ラドンは水の中やったっけ。

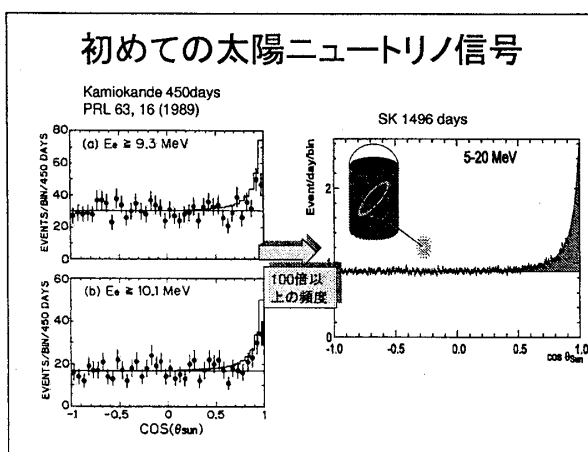
梶田 : 水の中に非常によく溶けます。地下なので、もちろん空気中のラドン濃度も高いのですけれども、同様に水中にも高い濃度のラドンがあります。

[Slide 13] いずれにしても、最も大きい background 源というのは、ラドンであることがわかったので、あとはわりと順調に進みました。それでもやっぱり、このときまでわれわれは、世の中にラドンがあるということを知らないわけですから、純水装置だって何だって、ラドンが入ってこないようになって、全然考えていなかった。例えば 1986 年というのは、何か失敗があるごとに新

しい水を入れないといけなくて、そうするとラドンが入ってきちゃって、こんなふうにトリガーレイトが一瞬で上がって、3.8日で崩壊して、というのを何度も繰り返していました。



[Slide 13]



[Slide 14]

だいたい、そんなすったもんだが終わるのが、1987年の正月ぐらいです。そしてご存じの、有名な超新星がここで起こる。

坂東：ラッキーや。

もちろん同様にウラン、トリウムというのが問題だというのはわかったから、あとは純水中から取り除くために、イオン交換などを使いました。これらも下がってきて、太陽ニュートリノの観測というのは、ここからスタート、そういう感じになりました。

あとはわりと気楽なものです。

一つ言い忘れました。大切なのは、この頃の background の苦労というのは、スーパーカミオカンデ及びKamLANDにとって、やっぱり essential だと思います。自分たちでいろいろと細かいことまで、苦労をしているから、やっぱりここらへんはスーパーカミオカンデ、KamLandの二つの実験の成功にとっては、essential だったと思います。

[Slide 14] 1989年にカミオカンデで最初の太陽ニュートリノ信号というものを発表しましたが、それがこのくらいで、多分、50イベントぐらいだったと思います。いまはご存じのとおり、スーパーカミオカンデの統計というのは、多分、22,000ぐらいあります。とにかく1日あたりでも100倍以上の頻度で、いま、スーパーカミオカンデは太陽ニュートリノを観測していますから、ここ20年ぐらいで観測は大きく進歩しています。

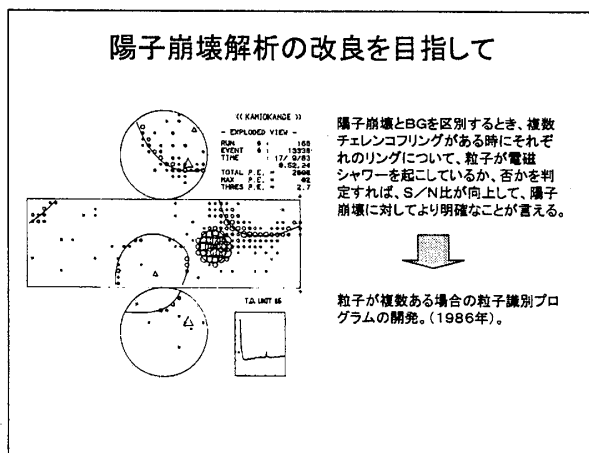
こんな感じのすったもんだをやりながら、カミオカンデは太陽ニュートリノに向けて、進んでいったのですけれども、もう一つ、同じ頃、別のことをやり始めていました。

[Slide 15] これから、大気ニュートリノの話をするんだけど、あんまり精神的なスピリットではないのですが、どんな感じだったのかというのを話します。

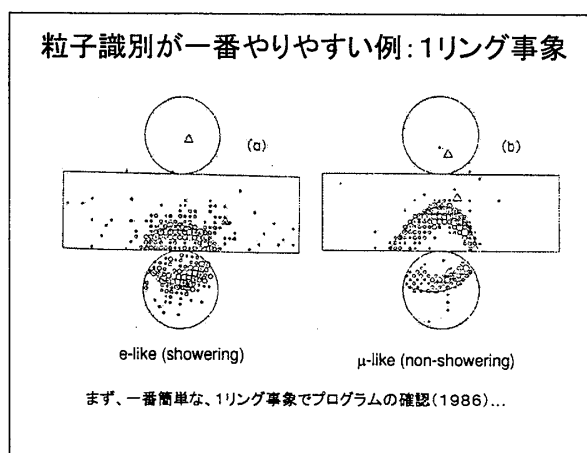
「陽子崩壊の改良を目指して」。それはどういうことかということ、陽子崩壊と大気ニュートリノの background を区別するとき、あるいは陽子崩壊がもし本当に起こっているのであれば、その陽子崩壊のモードを決定する際に、このように複数のチェレンコフのリングがある場合、それぞれのリングについて、粒子が電磁シャワーを起こしているか、あるいは起こさないミューオンのような粒子であるかを判定すれば、もちろん陽子崩壊と background の比、シグナルとノイズ比が向上して、陽子崩壊に対して、より明確なことが言えるというわけです。

最初、1983年、84年、85年の頃というのは、もう最低限のデータ解析をするのに忙しくて、このようないくつものチェレンコフリングがあって、さらにはときには二つのリングがオーバーラップ

しているという場合に、それぞれのリングについて、粒子を識別しようというのは手がつかなかった。これは、なかなか大変な話で、相当システムティックなプログラムを書かないといけないので、なかなかそれができなかった。少し余裕ができてきた 1986 年頃に、このような複数の粒子がある場合の、粒子識別のプログラムを開発したわけです。



[Slide 15]



[Slide 16]

坂東: いまので、結局、background が大気ニュートリノなんですか？

梶田: そうです。陽子崩壊の background が。

坂東: だから本当にみたいもののごみだったということですね、その当時。

[Slide 16] マルチリングのイベントに対する particle identification を開発したんだけど、やっぱりテストしたい。テストするのに一番簡単な例というのは、1リングの現象です。当たり前ですよ、1リングの現象について言えば、ほかのチェレンコフリングの background の光は、ここにはないわけですから、一番やさしい。

これは典型的な、カミオカンデのときのイベントなんですけれども、これが1リングの electron like というシャワーを起こしているイベント、こちらがミューオン like、シャワーを起こしていないイベントなんですけれども、これとこれを区別しようというわけです。

そんなことの確認を、すでに 1986 年にやっています。

[Slide 17] この間を全部省略すれば、1988 年にミューオンが少ないという論文になるのです。結果はこのとおりですけど、よく言っていたとおり、charged current の ν_e に関しては、ほぼ予想どおり観測されているけど、charged current の ν_μ に関してははるかに少ない。

このときに、一応、可能性として、「ニュートリノ振動」ということを、この論文では書いています。

坂東: ニュートリノ振動だ、と最初に思ったのは、誰なんですか。

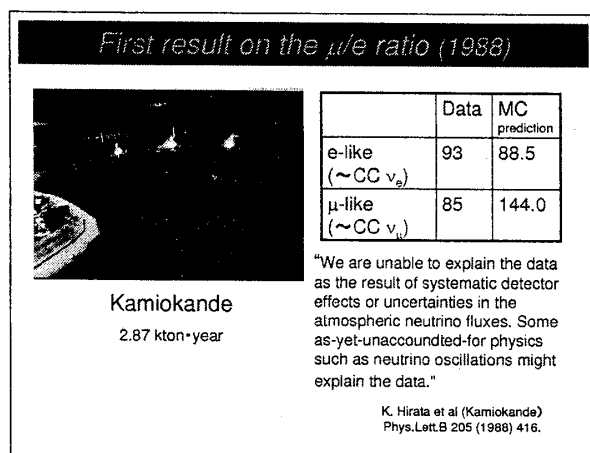
梶田: これは、言えないんじゃないんでしょうか。録音されている。

青木: すみません、これはインターネット中継されています。

坂東: 要するに、理論的には、振動がそんなに大きいはずがないと思っていたわけですよ。それでも振動かもしれないというのは、すごくやっぱり、そのさっきの世論じゃないけど、それに反することですよ。

そう思います。そこらへんのストーリーをちょっとだけ言いますと、まず、明らかに μ と e の比というのは、robust な量なわけですよ。上のほうで pion ができて、 μ に壊れて e に壊れる。それによって得られる比が合わないというのはおかしいはずで、最初にわれわれが思ったことは、この particle identification のプログラムというのは、確かにモンテカルロにかけると 98 パーセントぐら

い合うのです。ただでかしてないけど、data では合わない。なにか particle identification のプログラムがおかしいのかなとも思ったんですけど、そうじゃないと、98 パーセント、本当に正しいんだと確信したのは、結局は physicist の目ですね。目で実際にイベントをスキャンしてみて、particle ID の結果と合わせると、確かに particle ID は正しいことをやっていそうだということで。実はものすごく凝りに凝ったプログラムなんだけど、結局は、目で正しいというふうに確信を、この段階で持ちました。ただ、particle ID は正しいことはわかったけど、そうは言ってもどこかにミスがあるだろうというわけで、いろいろなことをチェックするのに、1 年以上かけていました。1986 年の暮れの段階では、少なくとも目では particle ID は間違っていないということを確認している。ただやっぱり large mixing angle ですからね。何かしら、trivial な mistake がないかということをチェックするのに、1 年以上かけて、最終的には間違いないと思って、出したわけです。



[Slide 17]

- データではうまくはたらかない？
- 目
- 大きい混合角

[Slide 18]

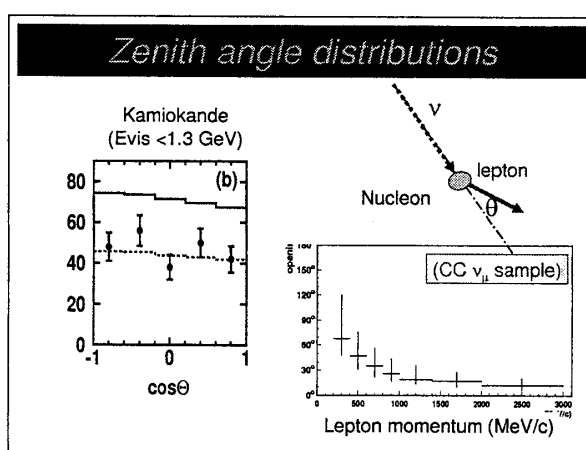
[Slide 18] それとともに、ここに「大きい混合角」と書きました。やっぱり、実験屋として、これは面白いと思ったのは、理論屋さんが predict したものでないことを、やっぱり見つけたいという点です。もちろんニュートリノ振動は、それはそれで素晴らしいのですが。

当時理論屋さんで真面目に large mixing angle だと大声で言っていた人は、僕はいないと思います。けれども実験データを見るかぎり、明らかに large mixing angle なので、これは面白いなと思いました。多分、大きい混合角の物理が、ある意味われわれがその後 10 年、あるいは現在に至るまで、大気ニュートリノを真剣にやってきている、大きな原動力になっていると思います。

更に証拠を求めて

- 一つの数 $((\mu/e)_{\text{data}}/(\mu/e)_{\text{MC}})$ だけでは不十分。
- 間違えようのない証拠を。
- また、 $((\mu/e)_{\text{data}}/(\mu/e)_{\text{MC}})$ だけでは Δm^2 の上限値は不明。
- また、 $((\mu/e)_{\text{data}}/(\mu/e)_{\text{MC}})$ だけでは、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ か $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ も不明。

[Slide 19]



[Slide 20]

[Slide 19] そうは言っても、これはミューオンが少ないというだけで、一つの数ですから、おそ

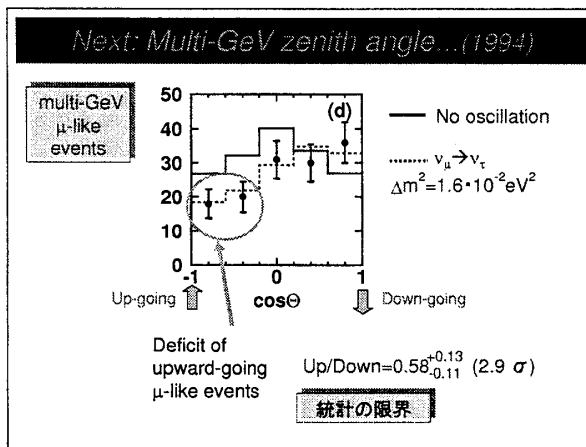
らくこれだけでは、いくら頑張っても統計上げても、不十分だろうということも、最初から思っていました。もうわれわれとしては、間違いようのない証拠を出したい。

さらにちょっとこれで、frustrating だったのは何かというと、ニュートリノの質量の2乗の差、 Δm^2 を決めようとしても、lower limitは決められますけど、upper limitは決められない点です。つまりニュートリノの質量が非常に大きくなって、べつに ν/e 比は小さくなるので、これはfrustratingでした。やっぱりどうにかして、この値を決めたい。

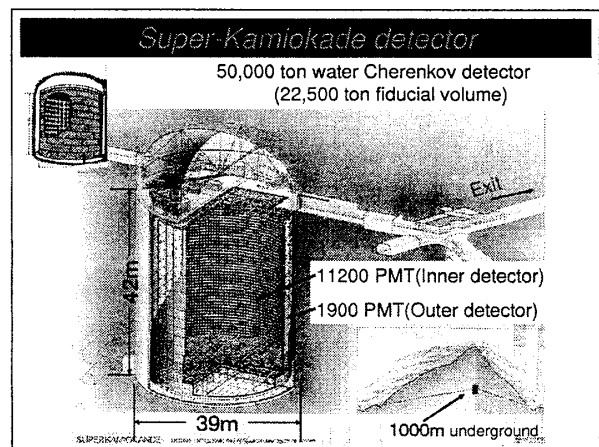
さらにもう一つは、これもfrustratingだったのは、 ν/e 比が小さいということ言うだけでは、実は、ニュートリノ振動がどうかかわからないことももちろんfrustratingなんだけど、ニュートリノ振動だとしても、 ν_μ と ν_e の振動なのか、 ν_μ と ν_τ の振動なのかわからないということがあって、非常にfrustratingに感じたわけです。

[Slide 20] そのような理由から、明らかに、次にやることは決まっています、天頂角分布を見ようというわけです。これはカミオカンデの終わりの頃のデータですけど、カミオカンデは陽子崩壊のために大気ニュートリノを集めていた、そのためのselection criteriaだったので、visible energyで1.3GeV以下というcutがかかっています。そういう低エネルギーではflatだった。それは、あまり悲観する必要はなくて、何故かということ、ニュートリノとleptonの散乱角をplotしてみますと、こんな感じで1GeV以下だったら、90度とはいかないけれども、散乱角が大きいので、ちょっとぐらいニュートリノのzenith angleに上下非対称性があってもwash outされるはずだということです。こんなことは非常に簡単なkinematicsだからわかるわけです。

そうすると、結局何をやったらいいかというと、もっとhigh energyのイベントを見なさいというわけです。



[Slide 21]



[Slide 22]

[Slide 21] それでカミオカンデでは、それを真剣にやったわけです。それを1994年にpublishしました。これがカミオカンデ約10年のデータですが、いわゆるMulti-GeVといって、1.3GeV以上のミューオンと、partial contained eventsを合わせて、天頂角分布を示したものです。なんとなく、下向きに比べて上向きに欠損が見える。

ただ、やっぱりこれは統計の限界で、このUp/Downの比を取って、それが1からどれだけずれているかというのを、non-Gaussianなので、ちゃんと正しく統計的にみつめると、 3σ ってない、 2.8 か 2.9σ です。

ということで、早くからカミオカンデの中では、zenith angleで、Up/Downの比を測るというのがおそらくかなり決定的になるだろうと思っていました。

もう一つ言い忘れたけど、基本的にこのエネルギー領域では、フラックスはUp/Down symmetryです。そのためsystematic errorは、大きくはないと思っていたので、こちらへんが決定打になる

んじゃないかと思っていました。ただ、いずれにしても、カミオカンデは小さすぎた。

それでももちろん、スーパーカミオカンデを、われわれは、待たないといけなかったわけです。

もちろん、みなさんいまのデータは知っているから、べつに現在のデータを言うつもりはないんですけれども、ただここで。

坂東：スーパーカミオカンデに grade up するときは、一言ではすまなかったですよ。

梶田：はい。

坂東：もう超新星は済んでいたんですか。

梶田：そうです。超新星は。

坂東：要するにそうすると大気ニュートリノをどうしても調べたいと大気ニュートリノを調べようと思ったら、どうしてももっとイベントがいるということで、計画を立てたということですか。

梶田：いえ、むしろ太陽ニュートリノですね。

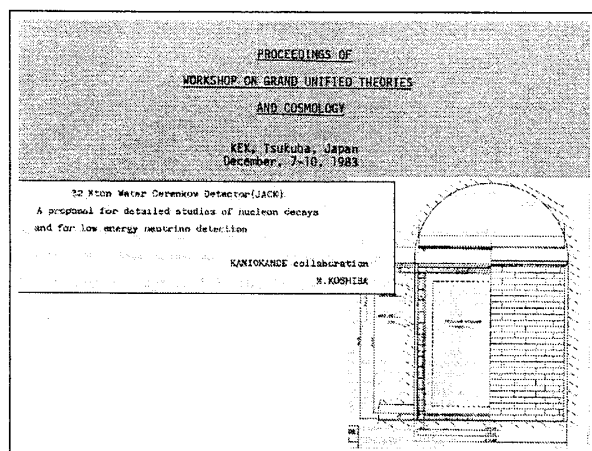
坂東：でも、太陽ニュートリノはもっと前から謎だったんですよ、国際的にね。

梶田：[Slide 23] いや、実は次に言うんだけど、スーパーカミオカンデが最初に言われたのというのは、ずいぶん古いのです。1983 年の 12 月に、KEK が「WORKSHOP ON GRAND UNIFIED THEORIES AND COSMOLOGY」というものをおこなったのですが、ここで小柴先生が、もうほぼ現在のスーパーカミオカンデのことを言っているのです。このときには、陽子崩壊と太陽ニュートリノ、超新星ニュートリノといっています。

坂東：そのときはまだ、陽子崩壊がけっこう。

梶田：そうですね。

でもやっぱり、精神的なスピリットに対することですごいと思うのは、カミオカンデが始まってから半年後ですけども、もうそのときにスーパーカミオカンデという絵を描いて、プレゼンテーションしているのです。このときは「スーパーカミオカンデ」とは言わないで、別の名前で言っているんだけど、でも、やっぱりこの頃このようなことを言っていたがために、スーパーカミオカンデは非常にタイムリーなカタチでできて、世界に対してリードできたんだと思います。



[Slide 23]

坂東さんからの宿題：宇宙線実験は概して信頼されないものだったが、なぜ信頼される結果を出すという、カルチャーの一新ができたのか？

・ 時代：既に加速器実験で全てできると思われなくなっていた。

→ 陽子崩壊

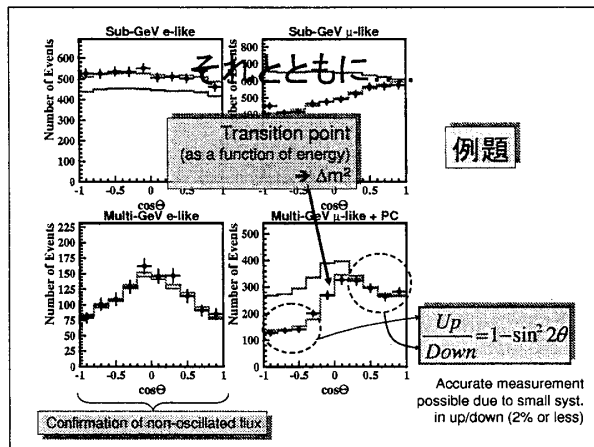
→ MSWのsmall mixing solution なら地上での実験は不可能

[Slide 24]

[Slide 24] 坂東さんからの宿題があつて、「宇宙線実験は概して信頼されないものだったが、なぜ信頼される結果を出すという、カルチャーの一新ができたのか？」答えなさいと。

私の話はほとんど終わりなんですけど、多分、ほかの宇宙線実験のことについて、僕はこう言う立場にないと思いますので、カミオカンデにほぼ絞って言います。まず、時代が general に変わってきていたんじゃないかと思います。つまり 1980 年代というのは、やっぱりもう、加速器実

験ですべてができると思わなくなっていたんじゃないかと思います。というのは、まず明らかな例は陽子崩壊ですね。誰も Grand Unification を probe する加速器をつくれるなんて、絶対に思わないですね。陽子崩壊もそうだったし、あともうひとつ、やっぱり MSW の small mixing solution, これも 1986 年ぐらいです。結局それが自然が選んだ解ではなかったけど、でもこれだって、もしもこれが本当だったら、これは絶対に地上の実験では、どうやったってできない。というわけで多分、だんだん、時代が変わってきた。そういうなかにわれわれがいたんだというのが、まず一つあると思います。



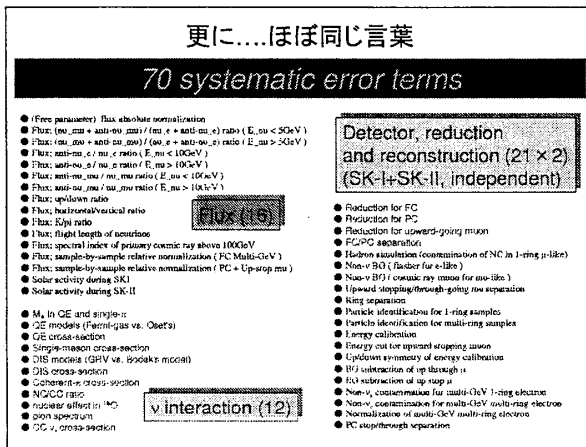
[Slide 25]

[Slide 25] それとともに、大気ニュートリノの例題ですけど、これは、明らかにビーム実験で require されるものを、基本的にすべて備えている。例えば、ご存じのとおり、上からくるやつは flight length が短くて、下からくるやつは flight length が長い。つまり同じ detector で、下向きのイベントというのは、これは near detector の役割を果たして、上向きのイベントというのは、long baseline で言う far detector のデータになっているというわけです。さらに independent なモニター装置がある。これはミュオンほうですけど、こちらは電子のほうですね。電子ニュートリノを測定した independent なモニターでは、ちゃんと予想どおりのモニターができています。このようなことで、基本的に加速器などの実験でやっている logic を備えている。

[Slide 26] 最後に「更に...ほぼ同じ言葉」と書きましたけれども、これは何かというと、systematic error. われわれはやっぱり、かなり正直に systematic error を見積もって、それをちゃんと analysis に組み込んでいます。例えばいまのスーパカミオカンデの analysis で、neutrino oscillation parameter を求めようと思ったときに、実際に何をやっているかということ、増えるばかりで困るんですけど、70 個の systematic error terms を入れてやって、それぞれを独立だと仮定しています。それで χ^2 の minimization をやっています。これは、ほかの加速器などの実験でも、同じことをやっています。ここらへんが、ほかの宇宙線のことは知りませんが、少なくともわれわれは、同じ言葉で話しているということで、坂東先生の質問に対しての、私の答えです。

[Slide 27] それから、ニュートリノのこれまでとこれからと言ったら、本来、K2K 実験と KamLAND 実験について、話さなきゃいけないんだと思います。しかしおそらくこの研究会の主旨からして、深くそれにかかわっていないと、多分話せないで、これはこの研究会が続くものでしたら、次回などに、それと深くかかわっている方々から、直接聞いていただいたほうがいいと思いますので、私は話しません。

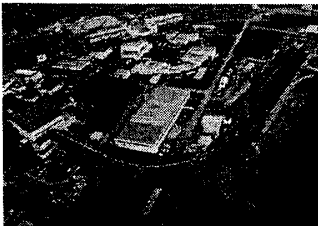
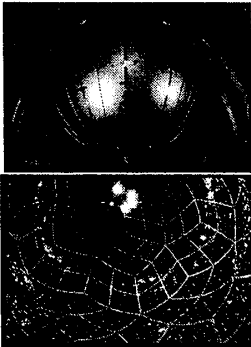
[Slide 28] ニュートリノのこれからということですけど、一つだけ。先ほど関さんから、何だっけ、数億円、数十億円、数百億円あったらどうしますかというやつですが、これはあえて答えるなら、数百億円よりもうちょっといっぱいあったらなあということです。もちろん物理の深い理由は



[Slide 26]

あるんだけど、それとはちょっと別の観点から話します。

K2K と KamLAND

・今日のスピーカーは十分よく、これらの実験のいきさつなどを知らないで、これらの実験については、別な機会によりよいスピーカーに聞いてもらおうということで、今日はパス。

[Slide 27]

ニュートリノのこれから(将来)

(一つの例だけ。。。)

[Slide 28]

わかったこと

- ・今まで予想しなかった結果:
 - θ_{23} は約 45° (大きい)
 - θ_{12} は約 34° (大きい)

↓

$$J_f = c_{12}s_{12}c_{13}^2s_{13}c_{23}s_{23} \simeq 0.2 \cdot s_{13} \text{ (大きい)}$$

それとともに

- $\Delta m_{12}^2 / \Delta m_{23}^2$ は約 $(1/30)$ (大きい)

↪

いかに、CP非保存をはかれと自然が言っている？

[Slide 29]

たぶん、この測定はニュートリノと反ニュートリノがきちんと分離できる必要あり。

↓

この測定に関しては大気ニュートリノはあまり役に立たない。

[Slide 30]

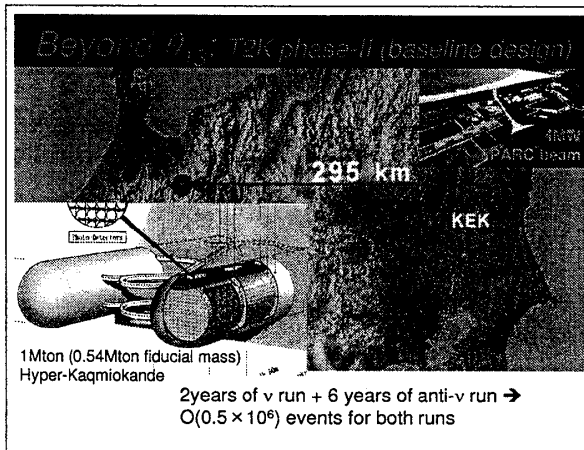
[Slide 29] これまで何がわかったかということですが、三つの **mixing angle** のうちの、23 角は約 45 度で大きい。で、12 角も約 34 度で、これもわりと大きい。 s_{13} はわかりませんが、2つの角はほぼ考えられる最大です。そうすると、Jarlskog は大きい。さらに Δm_{12}^2 と、 Δm_{23}^2 の比ですけれど、これも $\frac{1}{30}$ で大きい。すべて大きいんですね。そうするとこれは何かということ、いかにニュートリノの CP 非保存を計れと、自然がわれわれに催促しているような、いかにそんな感じです。だから、物理の深い理由は別としても、いかに流れとしてはそういう感じなのです。

[Slide 30] じゃあ、どうやって測るかなんですけど、ただし、やっぱりこの場合には CP なので、ニュートリノと反ニュートリノがきちんと分離できる必要があります。これに関しては、大気ニュートリノはあんまり役に立たないと思います。実際、ちょっと大気ニュートリノでやれるかなってということで調べてみたら、少しは、sensitivity があるようなんだけど、よくわからない。もしかしたら統計的な手法が悪いのかもしれない。いずれにしても、これに関しては、大気ニュートリノはあまり役に立ちそうもない。

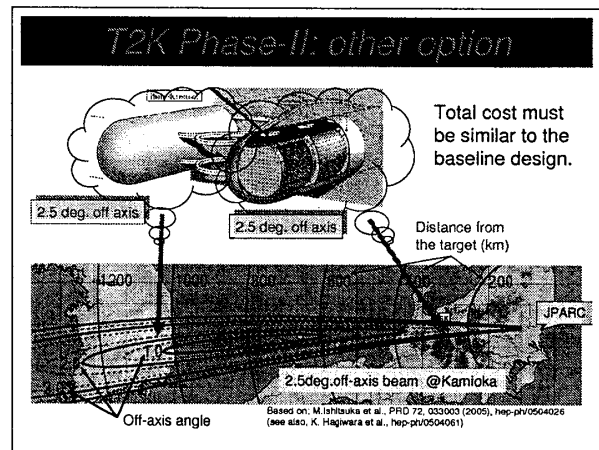
[Slide 31] じゃあどうしたらよいだろうと思うと、やはり beam でやるとなります。いま、T2K の phase-1 を construction していますけど、そこで残りの θ_{13} 角が見つかったとしたら、何をやるかと考えるわけです。

我々が思っているのは、beam power を上げられるだけ上げて、大きい測定器をつくってというようなことを夢見ています。大きいというのは、スーパーカミオカンデが小さく見えるくらいな大

きさで、だいたいスーパーカミオカンデの、建設のサイズで 20 倍ぐらいかな。なので、数百億円ではちょっとたらないかもしれない。

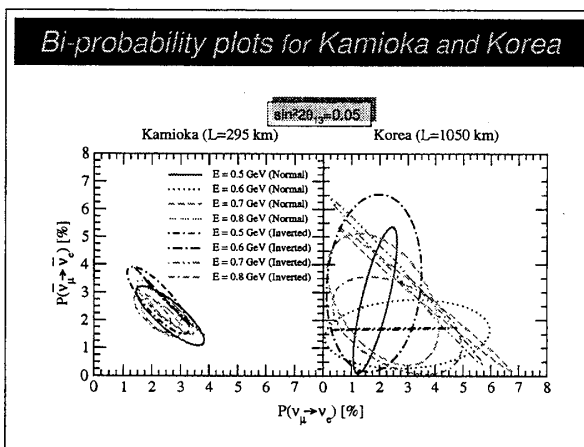


[Slide 31]

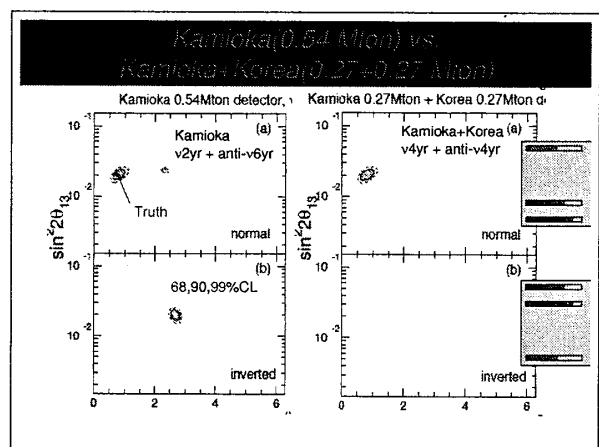


[Slide 32]

[Slide 32] だけど、もうちょっとほかにも考えていて、たまたまですけど、この JPARC の現在つくっている beam なんですけど、off-axis beam というテクニックを使っています。実はニュートリノビームの中心方向をずらして、それとちょっとずれたところに detector を置いて、low energy の、わりと mono-energetic なビームを得るというテクニックでつくったんです。その beam ですが、たまたま韓国まで飛んでいっているのです。さっきのをよく見てみると、ここに detector が二つあって、これは最初、神岡に置くことで考えていたんだけど、じゃあこれを分けて 1 つずつ両方に置いてみたらなんていうことも考えています。それだったら、コストは全体としては上がることはないだろうし。



[Slide 33]



[Slide 34]

[Slide 33] 先ほど、 θ_{12} , θ_{23} , 二つの Δm^2 の比がみんな大きいと言いましたが、そうするとやっぱり、CP の effect というのは大きくなります。これが神岡で見える CP の effect ですが、こちらに ν_μ から ν_e への振動の確率、それからこちらが anti-neutrino の振動の確率です。この図はいま、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.05$ と仮定していますが、CP phase の効果はこのような構造になっている。さらに、もちろん mass hierarchy によっても変わりますが、神岡ではその効果は小さく、こんなものです。

同じことを韓国でやると、こんなことになって、結局これは距離が 3 倍になっているので、CP の効果が基本的に 3 倍になってしまうということからきています。なんかもう、完全に CP の term

が dominant と言ったらいいのか、非常に大きい CP の効果が見える。

[Slide 34] このようなことで、例えばもうちょっと定量的なことをやってみます。例えば神岡だけに大きい detector を置いた場合で、どのくらいの感度があるかというのを見てみます。こちら側の axis が、CP の phase です。こちら側が $\sin^2 2\theta_{13}$ 。もしも自然がここの点を取っているとする、と、実際、このように constraint ができる。だけど実は、神岡に置くというのは、そんなに良くないかなとも思っています。確かにここで CP phase は良く決まるんだけど、実を言うと、ニュートリノの mass pattern を知らないのですから、truth がこちらにあったとき、非常に多くの場合に、mass pattern を変えると、反対の面に異なった CP phase の解が出てきちゃうんです。ところが、もし、detector を神岡と韓国に置くとすると、多くの場合、この mass hierarchy を知らないということからくる ambiguity がなくなって、mass hierarchy も決めて、CP も決められる。基本的に全部の、残りのパラメーターは決められるというわけで、ニュートリノ実験の将来の可能性の一つとして、このようなことを真剣に考える価値があるのではないかと思います。

私の話は以上です。

関：それでは質疑応答をお願いいたします。じゃあ中野さん、どうぞ。

中野：最後のプロジェクトで、日本に置く場合、二つタンクを用意されていましたよね。それはどうしてですか。

梶田：実を言うと、ある程度どこに置くかという survey をしたんですね。なかなか、更地をさがすのは難しいので、一応、神岡鉱山という constraint を置いて、候補地を見てみますと、現在、スーパーカミオカンデを置いてある山には候補地はありません。しかし、神岡鉱山が持っているもう一つの鉱山がありまして、そちらに候補地があるんです。すでに断層の様子とか、実はかなりわかっていて、一本の長い測定器が入らないということがわかっています。いま、そういうことで、その断層に囲まれた中に置こうとすると、このように二つにせざるを得ないのです。

中野：systematics を良くするとか、そういう意味じゃないんですか。

梶田：そんな高尚なものじゃないです。

日置：さっき、1980 年代の後半に、ミューオン ニュートリノが電子ニュートリノに比べて少ないということで、もしかするとなんか、large mixing があるかもしれないけども、でもそれは常識に反するから、なかなか言いにくかったというようなことを、坂東さんもおっしゃったけども。

ちょっと不思議に思ったんですけども、その 10 年ほど前に、今日も名前が出ました Rubbia のグループが、いわゆる neutrino anomaly といって、スタンダードモデルでは全然説明できないようなモデルが出たときに、じゃあというので理論屋というか、現象論屋が、large mixing をいっぱい放り込んだような模型をつくったんですね。基研研究会でも、日本のグループもいくつかやっていたけども、けっこう理論屋といってもいろいろあって、特に現象論屋は見境がないところがあって、逆にめちゃくちゃ言うから、ときどき実験屋さんに「めちゃくちゃ言いやがって」と怒られることがあるんですけども、そうすると、それも慎重にみんながなったというのも、不思議な気もするんですけども、そのあたりの事情というのは、どうだったんですか。

梶田：僕はその 1970 年代の話は知らないんですけども、やっぱりわれわれが思ったのは、その頃、large mixing だと声を挙げて、第一原理から言っている人なんていないし、われわれもなんとなく、quark のミキシングと、lepton サイドのミキシングは、きっと同じようなんだろうなと吹き込まれていましたから。ということで、やっぱりそうかもしれないし、だけど本当かもしれない。

ただ、やはりわれわれとして、ある意味できちがいみたいな結果ですから、そこはきちがい
がきちがいな結果を出したんじゃないということを証明するためには、ちゃんとやれるだ
けのことはやってと思いました。

佐藤_x：坂東さんは、宇宙線は昔、信用できないと言った、なんでこうなったのかと。それは宇宙
線1と宇宙線2と、全然違うグループなわけです。僕らは長いこと、宇宙線研のいろいろな
委員をしているから、まったく、だから全部みな、彼らの世代からあととか、木舟さんあた
りとかというのは、いわゆる宇宙線は信用できないというときの宇宙線の人は誰もいない。
そこを全部、宇宙線研究所に乗り込んで、全部入れ替えたんです。

坂東：これ、全国に聞こえております。

佐藤_x：それはいいと思います。僕は宇宙線の、それまでは実際、小柴さんも出ているような宇宙
線研の委員会というのは、正式の、ちゃんと事務長とか全部出て、取っ組み合いをやってい
たわけですから。僕と小柴さん、西村さんぐらいしか知らない時代があつて、ちょうど宇宙
線研も有馬さんが学部長か学長になるあたり、理論研と基研が一緒になった、あの頃、研究
所の統廃合が盛んにやっていて、宇宙線研はリストに載っていて、どうもそこにばら撒いた
みたいな。そこにまず行っていたんです。

それで SuperNova があつて。そうしたら急に、昔の神岡へ行ったら、「宇宙線は天啓であ
る、有馬」。急にこれまで宇宙線は潰すと言っていたのに、いつの間にか宇宙線は天の恵み
かというのが、有馬って書いてあるでしょう。学長のときか。一夜にして変わったんです。
それでむしろ、研究所を、だから入れ替えということになるわけやな。それであの頃は、た
いへん、理学部にあったわけですから、それを宇宙線研に持っていくときの、もうちょつと
時間が経ったらいろいろありますけども。だからそこでがらっと変わったわけです。

坂東：それもあるんですけども、やっぱりその前の歴史もきちんと評価しないと。前回、「丹生イ
ベント」というのがありましたよね。丹生イベントというのは、日本で宇宙線の中から見つ
けた。それはだけど、国際的にもあんまり認めてくれなかったというか、それはいろいろ理
由があると思うんですけど、それはそのいまの喧嘩しているのとは関係がないんじゃないで
すか。

佐藤_x：そんなすっきりと分離できるような話ではないですよ。だからあとでゆっくり。

要するに、あの頃世界的に、彼も言っていたように、加速器の実験が一段落、標準理論、
あれというので、その加速器の実験で、いろいろなノウハウのある人が、非加速器実験とい
うのに、世界的に移ってきていた、そのちょうど時期でもあったわけですね。

坂東：やっぱり測定器っていうか、それがもう格段と精度をあげたということ....

佐藤_x：データテキングは全然量が違いますけどね。

坂東：でもね、いまでも加速器の将来計画を立てますよね、KEK でもどこでも。そのときに、宇
宙線っていうのは、どれぐらいの感じで位置付けられているかというのが、もうひとつ私な
んかにはみえないです。加速器と宇宙線との関係っていったら、もっと連携してもいいと思
います。多分、将来計画を考えるとときに、国際的に言ってもですけど、そこらあたり問題が
あると思うんですけども、なんとなく加速器は加速器っていうような感じが、まだあるん
じゃないですか？

梶田：それはでも、institute が別だつていうのも大きいんですよ。宇宙線は宇宙線研究所があつ
て、高エネルギーは高エネ研があつてと。やっぱり institute としての将来計画という意味
合いが、どうしても出ちゃいますよね。

坂東：でも、例えば ICFA とかありますよね。

梶田：あれはでも、加速器の委員会ですよ。

坂東 : だからそういうときに、そういう将来の物理というのは、どういうかたちで collaborate するかが、もうちょっと話があってもいいんじゃないかなという。なんか ICFA の話をきいたとき宇宙線実験との関係をきいたらきょんとされた経験がありましたけど。

梶田 : でも、本来だったら、ICFA に対応するのはパナジクというのがありますけど、パナジクはあんまり役に立っていない。役に立っていないというのは誤解されるかもしれないですけども。

佐藤_x : わりと桁が違うよ。

坂東 : 桁が違うということは、宇宙線は安いということでしょう？

佐藤_x : そうです。

坂東 : そんなんだったら、宇宙線でやったらいいじゃないかということに、私から言わせればなりますよね。

関 : いまの質問に関して、知りたいと思っていたことが一つあって、どうして日本でできて、アメリカでできなかったのか。多分、いまのお話に関係があると思うんですけどね。

梶田 : アメリカでできなかった....

坂東 : 太陽ニュートリノなんか、一番最初はアメリカでディビスが始めたんですよ。

上田 : その前に、佐藤さんのお話との関係で、私が多少、関係したところですけども、原子核研究所ができたのが、1957 年ですかね。それでその前のころ、基研でもそのための研究会で、非常に長期にわたって、2 週間にわたってやったことがあります。その研究会というのは、午前中は話す人が話して、あとは計算するなり、あるいはもう京都の街に散歩に出掛けるなり、そういう非常にゆったりした研究会でした。

私は宇宙線の multi production の cascading のようなことを、友だちのところでやっていた。その動機は、私の関係したことで申しますと、要するに加速器を壊されてしまった。それで武谷先生が、それに代わって、宇宙線でやろうというようなことを非常に強調されたのは、私は覚えています。

坂東 : それは日本が戦争に負けたから多少強化されたということですよ。日本の特殊な。

上田 : そうです、そういう事情です。ですから原子核研究所では、air shower と、それから写真乾板のグループと。写真乾板のほうは、西村純さんたちですね。それから宇宙線の地上に降ってくるやつは、小田さんとか管さんとか三浦さんという、もう 3 人とも亡くなられましたが、そういった方が中心になって、スタートしたのです。

だから宇宙線の、先ほどの信用できないという話では、丹生さんの見つけれられたイベントというのは、現象ですからね、ひとつのね。ところが cascade shower のあれになると、ものすごい統計で、だからかすんでしまうわけですね。

これは最近亡くなられた中野董夫さんという方がおられましたね、あの方が、理研の研究会で私が話したとき、帰りにあの方が飲み連れて行ってくださいますて、それで「あんたたちのやっているのは、犯人を街中に逃したあとで、犯人を見つけろと言うようなもんじゃないか」って、そういう印象を持って、これは非常に適確なあれだなと。

私自身が、だから宇宙線関係から手を引くようになったんですけども、あと、残ったのは計算機を使えるということだけだったので、他の方に移ったんですけど、それがだから、1959 年かな、『Progress』か何かの supplement にも、西村さんが主張された、 P_t constant という、横モーメントがだいたい constant になっているというのを測ろうということも、いろいろと計画されていたのです。それは藤本陽一さんなんかが来ておられたというのを、ちょっとコメントとしてですけども、私の知っている範囲でですけども。

田中₋ : いまのお話とはまったく違うことなのですけども、データ処理に関して、統計データを

処理されるのに、普通の帰無仮説を立てて、 χ^2 を求めて、そしてその帰無仮説の評価水準を求める、通常の方法を用いられているのでしょうか。

梶田 :そうです。

田中₋ :私も詳しく知っているわけではないんですけども、僕は統計学の勉強をして、いつもそこで行き詰まって、あまりよくわからなかったのですが、去年のある仕事で、どうしてもその点を勉強しなくちゃならなくなったのですけれども、いくら勉強してもわからないものですから、統計基礎論の専門家のところに、相談をしに行ったのです。

そうすると、普通、統計学で、いま載っている χ^2 から帰無仮説の評価水準を求めるという方法は、根拠がないということが、現在の統計基礎論の研究者のあいだでは、通念になっている。

しかしながら、非常に不思議なことに、統計学の教科書には、一言もそれを載せないのです。実に不思議な現象なのですから、ということをお教えてもらいまして、それで僕はどうしていいかわからなくなって、その方法はもちいないで、別の処理の仕方をしたのです。

聞いてみますと、それではその χ^2 fit の方法以外に、適当な方法ができているんですかと聞いたら、「いくつかの提案はあるんだけど、まだみんながこれでいいと、統計基礎論の研究者のあいだで、一般に承認された方法はまだないんですよ。」それからもう一つは、「いままでの方法で、おかしいんじゃないかという例も、いくつか出ているんです」と。そういう話で、僕はそれっきり、ああそうですかと帰ったんですけども、一度、通常の教科書を書いている統計学者じゃなくて、統計基礎論の方の話を、参考のために、何かの機会に聞いてみられるのが、適当かなという気がしたものですから。

梶田 :ありがとうございます。実は、確かに、例えばこのニュートリノコミュニティでも、じゃあ、2次元面で Δm^2 と $\sin^2 2\theta$ の allowed parameter region を求めましょうといったときに、スタンダードには χ^2 4.6 飛ばすというところで、90 パーセント値を決めるのですけれども、実はもうちょっと複雑で、この場合、 $\sin^2 2\theta$ には bounday condition があります。いまのベストフィットは 1.0 という、まさにそこにきているわけです。

そういう場合に、どういう手法が正しいのかというのは、実は多分、やっぱりこのコミュニティでも結論はないと思います。

結局、どうやっているかというと、われわれはこういうふうに定義して、こうやりましたということを論文に書くという、そんなスタイルで、いまのところはしょうがないですね。

田中₋ :しょうがないですね。ですけど、とにかくこれは error bar がこのぐらいで、この中に入る確率は何パーセントであるという、そのパーセンテージに関して、いろいろと問題が起きているという、統計基礎論の研究者のあいだでは、あれはその通りに受け取ってはいけないということが、通念になっておりまして、びっくりしたのですけれども。

梶田 :多分そんな、定義の使い方によって、べらぼうな違いはないと思うんですけども。

田中₋ :そうであることを期待します。

関 :それでは時間が少々、超過いたしましたので、これでこのセッションを終わらせていただきます。ありがとうございました。