’99 年度 高エネルギーグループ報告

報告：後田、稲垣
記録：加藤、本田

1　研究室の活動

高エネルギー研究室が関わっている主なプロジェクトは以下の通りである。

KEK-E162 (CP) (笹尾、坂本、野村、末廣、武内、村上)
1997 年 6 月にデータ収集を終えた K_L の稀崩壊実験。いくつかの結果はすでに論文発表済みで、残り 1–2 の物理解析を残すのみである。
[参照] http://jsdsn1.kek.jp/cp/index.html

BELLE (笹尾、坂本、後田、湯村、西田、本田)
大量の B 粒子の崩壊を観測することにより、CP 非保存現象を研究する実験。1999 年 5 月に検出器がビームライン上にロールインされ、本格的に実験が開始された。研究室ではトリガーやデータ収集系の開発に携わってきた。
[参照] http://bsunsrv1.kek.jp

KEK-E362 (K2K) (西川、笹尾、中家、稲垣、向井、横山、加藤、島)
KEK-PS で人工的に作り出したニュートリノを 250km 離れた岐阜県神岡にある Super-Kamiokande で検出することによりニュートリノ振動現象の有無を検証する。1999 年春から実験が開始され、順調に走っている。研究室では主に前置検出器の管理・解析を行っている。
[参照] http://neutrino.kek.jp

BNL-E926 (笹尾、野村、藤原)
CP 対称性を直接破る稀崩壊 $K_L \to \pi^0\nu\bar{\nu}$ を 6×10^{-13} の感度で測定する実験。現在は検出器開発期で、研究室ではビーム中で動作可能な光子 veto カウンターを開発している。
[参照] http://sitka.triumf.ca/e926

BNL-E949 (野村、藤原)
稀崩壊 $K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu}$ を 10^{-11} の感度で測定する実験。2002 年より物理ラン開始予定。研究室ではメインカウンターのゲインモニターの開発、及び、前実験 (E787) のバイプロダクトの解析を行なっている。
[参照] http://www.phy.bnl.gov/e949

ATLAS (笹尾、坂本、西田、新家)
CERN で建設される大型陽子陽子衝突型加速器 LHC での実験。Higgs / SUSY 粒子の探索など、エネルギーフロンティアをめざす極めて大規模な実験で、2005 年に開始予定である。研究室ではミューオントリガー検出器のエレクトロニクスの開発を行っている。
[参照] http://atlas.kek.jp/

ATF (笹尾、阪井、新家、本田)

電子陽電子衝突型の加速器で TeV の領域を目指す JLC (Japan Linear Collider) のための加速器テスト。研究室では電子ビームのプロファイル測定のためのレーザーワイヤの開発を行なっている。

[参照] `http://lcdev.kek.jp/ATF`

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の二大実験である BELLE 実験と K2K 実験は、これまで着々と準備が進められてきたが、今年度ついに実験が開始され、データの収集が始まった。以下ではこれらの 2 つの実験について詳しく報告する。

2 KEK-B/BELLE 実験

2.1 概要

KEK-B/BELLE 実験は、B メソンを大量に生成し、その崩壊を測定することによって、CP 非保存に関する研究を行おうとする実験で、その最大の目的は、小林益川行列のパラメータの決定及び小林益川機構の検証である。

KEK-B 加速器は、旧トリスタン加速器のトンネルを利用した周長 3016 m の電子陽電子衝突型加速器である。電子 (e^-) のエネルギーが 8 GeV、陽電子 (e^+) のエネルギーが 3.5 GeV と非対称になっている。そのため $\Upsilon(4s)$ を経て生成される $B\bar{B}$ 対はブーストされており、B と $\bar{B}$ の崩壊点の差から両者の寿命の差を知ることができる。この $e^+e^- \to \Upsilon(4s) \to B\bar{B}$ の断面積は 1.1 nb である。KEK-B 加速器では HER (High Energy Ring：電子リング) の電流を 1100 mA、LER (Low Energy Ring：陽電子リング) の電流を 2600 mA にまで上げ、10^{34} $\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ のルミノシティを実現にすることにより、1 年間に 10^8 個の $B\bar{B}$ 対を生成する予定である。

BELLE 検出器の模式図を図 1 に示す。最も内側には荷電粒子のトラックを正確に測定するための Silicon Vertex Detector (SVD) が設置されている。その内側には荷電粒子のトラックの測定、磁場を用いた運動量測定、エネルギー損失 dE/dx から粒子識別を行なう Central Drift Chamber (CDC) がある。Aerogel Cherenkov Counter (ACC) は主に K/π の識別を行なう。Time Of Flight Counter (TOF) はシンチレーションカウンターで粒子識別の他、イベントの時間情報を与える。その外側には電磁カロリーメータである CsI Calorimeter (ECL) があり、ここまでの検出器は 1.5 T のソレノイド磁場の内部にある。最も外側の KLM Detector は Resistive Plate Chamber で、K_L と μ の識別を行なう。

KEK-B/BELLE 実験は 10ヶ国、50 研究機関の共同研究で、現在約 300 人の研究者が精力的に実験に取り組んでいる。

2.2 BELLE 実験の現状

BELLE 検出器は 1998 年度中にインストールが完了し、宇宙線を用いたテストが行なわれていたが、1999 年 5 月にビームライン上に検出器がロールインされ、ビームを用いたデータ収

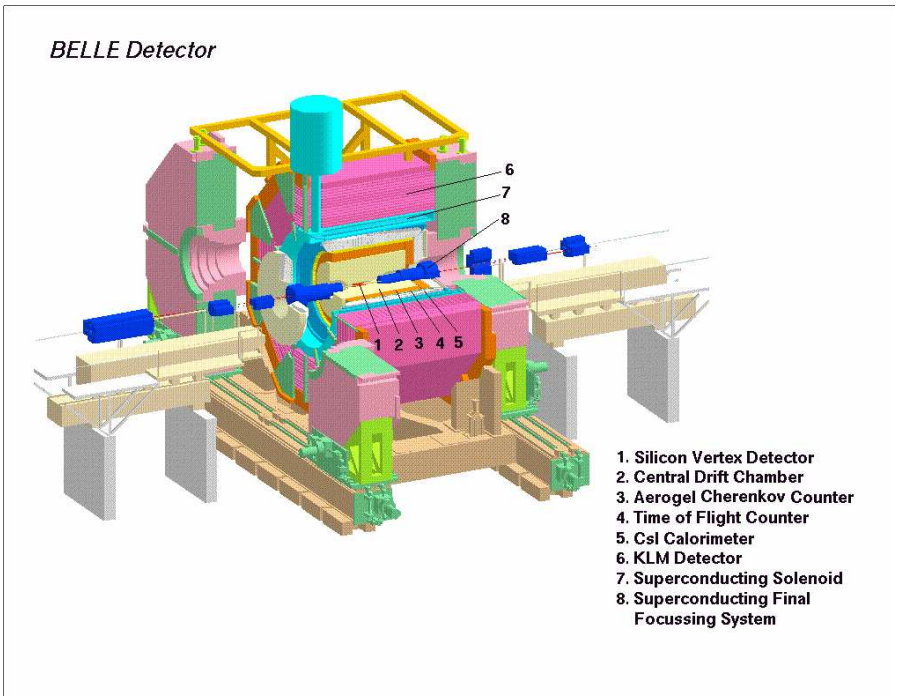


図 1: BELLE 検出器の模式図

集が開始された。実験当初はビームのバックグラウンドが大きく、SVD に大きなダメージを与えていたが、マスクを入れるなどしてバックグラウンドは大幅に押えられるようになってきた。1999 年夏のシャットダウン中に取り替えられた SVD は、今のところさほど深刻なダメージを受けていない [1]。その後、表 1 に示すように真空漏れなどのトラブルに見舞われながらも、図 2 に示すように加速器は少しずつルミノシティを上げ、2 月 18 日にはピークルミノシティ 10^{33} $\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$ を達成した。3 月の時点で 1 日あたり 30 pb^{-1} から 50 pb^{-1}のルミノシティが得られるようになってきた。2000 年度は、7 月に大阪で行なわれる ICHEP2000 までは、1 日 20 pb^{-1} 以上のデータをとり、余った時間を加速器スタディに回すという方針でデータ収集が行なわれる。これにより、7 月までには最低でも 3 fb^{-1}の積算ルミノシティが得られるはずである [2]。

今後 BELLE 実験が十分な成果を挙げるためには、ビームの強度を上げ、ルミノシティを 10^{34} $\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$に近付ける必要がある。そのために KEK-B 加速器が克服しなければならない問題としては、可動マスクの発熱やクラブキャビティの導入なども挙げられるが、目下ビーム強度の増大の最大の障壁となっているのが、LER の垂直方向のビームサイズの増大である。このビームサイズの増大 (blow up) の特徴として、以下のことが分かっている。まず、LER をマルチバンチで運転した時に、HER に電流が流れているかどうかに関わらず起こる。また、この blow up はビームのトレイン間の間隔が比較的大きい時には一つのトレイン内だけに制限される。さらに、blow up には電荷密度によってきまる閾値がある。これらのことなどから、この blow up

[1] さらに、2000 年の夏のシャットダウン中に放射線耐性のよい新しい SVD に取り替えられる予定である。
[2] 2000 年 5 月の時点で、1 日あたり 80 pb^{-1} が達成された。すでに、積算では 3 fb^{-1}を達成している。

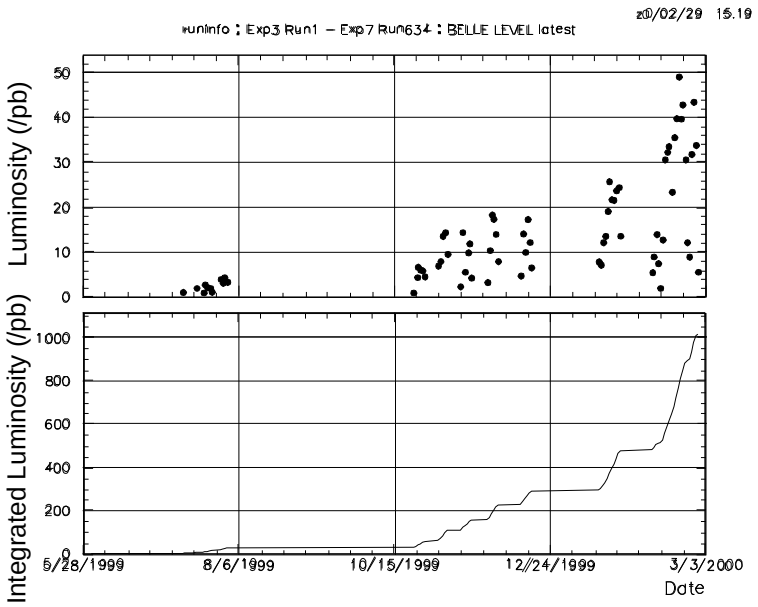


図 2: BELLE 実験における 1 日あたりのルミノシティ (上) と積算ルミノシティ (下)

1999 年	4 月	1st stage コミッショニング完了
	5 月 1 日	BELLE 検出器 Roll-in
	6 月 1 日	初のハドロニックイベント (exp3)
	6 月 11 日	IP (衝突点) 付近で真空漏れ
	8 月 5 日	夏の shutdown
	10 月	exp5 開始
	12 月 6 日	QC1LE コイル燃える
	12 月 27 日	movable mask で真空漏れ
		年末年始 shutdown
2000 年	1 月	exp7 開始
	1 月 30 日	movable mask で真空漏れ
	2 月 14 日	積算ルミノシティ 30 /pb/day 達成
	2 月 18 日	ピークルミノシティ 10^{33} $cm^{-2}s^{-1}$達成

表 1: 1999 年度の BELLE 実験の主な出来事

は多バンチ列により生成された光電子雲を媒介とする頭尾不安定性であると考えられている。

2.3 トリガー及び DAQ の現状

実験が進むにつれ、日々のデータ収集用のシステムも次第に整備されてきた。BELLE 実験のオペレーションは、二人のシフトと KEK-B のコントロール室に滞在する BCG によって行なわれる。その他、安全シフトが安全確認のための見回りを行ない、またデータ収集システムがトラブルを起こした時に対処するためのオペレーションシフトと呼ばれる DAQ の専門家が常に控えている。加速器、DAQ、検出器、バックグラウンド等に関する主な情報は常にオンラインでモニターされており、コントロール室で見ることが出来る。

実験の運転中のデータの損失は、

- ランの開始及び終了処理で数パーセント
- 200 Hz のトリガーレートで数パーセントのデッドタイム
- CDC の HV トリップにより 10 パーセントのデータ損失
- DAQ のトラブルやオペレーションの間違いで 10 データ損失

という状況であった。しかし、CDC のトリップはカレントリミッタモジュールの導入によって、劇的に回数が減った。また、DAQ のトラブルも着実に解消されており、これらによるデータ損失も減ってきている。これら全てのデッドタイムの合計が 10 % 以下になることを目標に改良が重ねられている。

トリガーに関しては、現在のところ大きな問題はない。図 3 にトリガーレート及びビーム電流の移り変わりを示すが、ビーム電流が増えてきているにもかかわらず、トリガーレートは 100 Hz から 200 Hz の間を維持している。当面は 250 Hz 程度がデータ収集の限界であるので、トリガーレートが増加した場合には、トリガー条件を厳しくすることによって対処する必要がある。

最後に、データ収集についてみてみる。現在は 100 Hz から 250 Hz のトリガーレートで運転しているが、宇宙線でのテストから 480 Hz までは正しく動作することが確認されている。但し、本実験中は、イベント当たりのデータサイズが大きくなることから限界が来てしまう。現時点では 1 イベントあたりのデータサイズが平均 28.5 KB である。その内訳は SVD 9.5 KB、CDC 9.2 KB、ECL 3.5 KB、KLM 2.0 KB というようになっているが、SVD のデータは 4 つのサブシステムに分けて収集されているので、現時点では CDC のデータの読み出しがボトルネックになっている。しかし、CDC に関しても複数のサブシステムに分けてデータ収集を行なうように改良される予定であり、今後はさらに高いトリガーレートでもデータ収集が可能になるであろう。

但し、SVD の読み出しに伴うデッドタイムが、トリガーレートが 100 Hz 増えるごとに 1.5 % 上昇してしまい、250 Hz のときには 4 % 程度である。従って、当面の間は 200 Hz 程度でデータ収集を行なうことになると思われる。

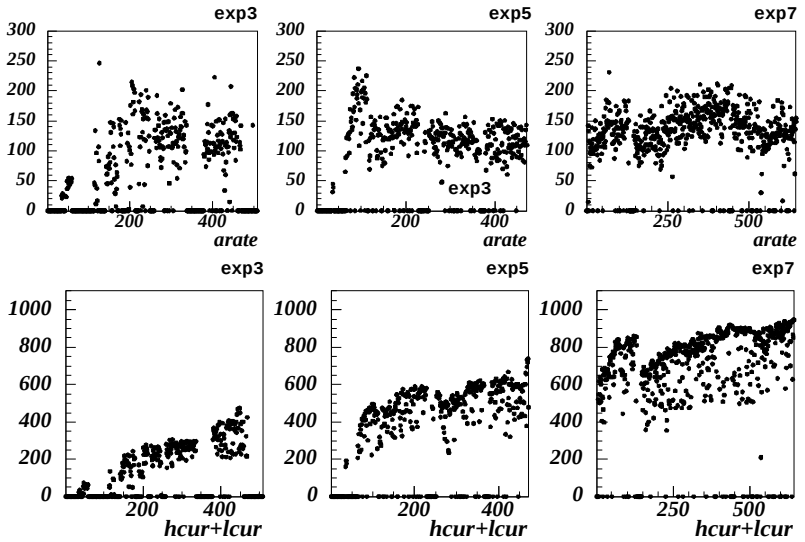


図 3: BELLE のトリガーのレートとビーム電流。横軸はランナンバー。縦軸は、上がトリガーレート (単位 Hz)、下がビーム電流の和 (単位 mA)

Inclusive charmonium reconstruction

$J/\psi \to \mu\mu$	235 ± 17 events
$J/\psi \to ee$	324 ± 60 events

Exclusive reconstruction

$B \to J/\psi K_S$	5 events (2 flavor tagged)
$B \to J/\psi K^{\pm}$	22 ± 6 events
$B \to J/\psi K_*$	10 events
$B \to J/\psi K_S$	6 events (5.8 sig. + 4.5 bg. expected)

表 2: Indirect CP Violation に関連する事象の再構成の現状

2.4 解析の現状

解析の現状について簡単に触れておくこととする。$B \to J/\psi K_S$ の崩壊モードは小林益川行列のユニタリー三角系の角度のひとつである $\phi_1(\beta)$ の測定のための最も重要なモードであるが、現時点では 5 イベントほど発見されている。その他、Indirect CP Violation に関しては、表 2 に示したような数のイベントが再構成されている。

問題点としては、トラッキングによる p_T の分解能がシミュレーションより悪いことが挙げられる。これは CDC や SVD の位置の調整、キャリブレーション、フィットのアルゴリズムなどが原因とされている。その結果、例えば、$J/\psi \to \mu\mu$ の σM がモンテカルロでは 11 MeV であるのに、実データでは 14 MeV であるなど、mass peak 等がシミュレーションより悪くなってしまっている。また、粒子識別に関しては、efficiency はおおかたモンテカルロと一致してい

Inclusive $B \to J/\psi X$
Exclusive $B \to$ *charmonium* decays and measurement of $\sin 2\phi_1$
Exclusive $b \to c$ decays ($D^{(*)}\pi, D^{(*)}\rho, D^{(*)}K^{(*)}$)
Inclusive semileptonic B decays
Time dependence of $B\bar{B}$ mixing
$B \to \pi^0 X$ decays
Penguins ($B \to K^*\gamma$ etc)
CP, T violation search in τ decay
Two photon collisions

表 3: ICHEP2000 に向けて解析が行なわれている主なトピック

るが、inclusive な事象のレプトンのスペクトラムに不一致が見られる。

その他、2000 年 7 月の大阪で開かれる ICHEP2000 に向けて表 3 に挙げたような解析が精力的に行なわれている。

2.5 PEPII/Babar との比較

このように BELLE 実験はそれなりに進んでいるのであるが、気になるのは良き競争相手の SLAC の PEPII/Babar 実験の動向である。PEPII/Babar も KEK-B/Belle と同じ非対称 e^+e^- 加速器を用いた B ファクトリー実験である。

1999 年 12 月に台湾で行なわれた International Conference on B Physics and CP Violation では、LHC-B のスポークスマンである T. Nakada 氏による summary として、PEPII と KEKB を比べると、"Impressively rapid increase in luminosity ... PEP-II is ahead of KEKB at the moment" との評価が下されている。一方、検出器に関しては、"Impressive performance of both detectors only after half a year of data taking ... BELLE detector appears to be better understood at the moment ... e.g. π^0 width." との評価が下されている。

PEPII は、6 日間の physics run と 1 日の加速器スタディを交互に行なうという方針で実験を行なっている。3 月の時点で、HER 920 mA、LER 1720 mA、ピークルミノシティ 1.45×10^{33} $\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$、ルミノシティ 74 /pb/day を達成しており、KEK-B の一歩先を進んでいることは否めない。

ただ、図 4 に示したように、KEK-B はここのところルミノシティが上昇している。積算ルミノシティでは差がついてはいるものの、Babar は昨年は粒子識別検出器の 1 つである DIRC が全てインストールされていなかったので、PEPII/Babar のデータの一部は不完全なものである。従って、KEK-B/Belle と PEPII/Babar 間の競争は、かなり拮抗しているといってもよいであろう。

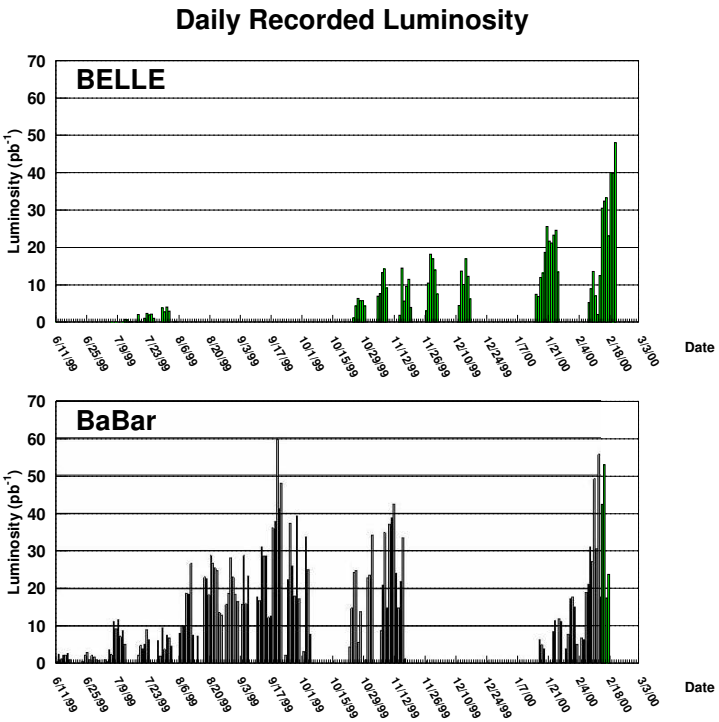


図 4: KEK-B/BELLE と PEPII/Babar の一日当たりの積算ルミノシティの比較

2.6 高エネルギー研究室の貢献

高エネルギー研究室では、これまでトリガーとデータ収集の分野で BELLE 実験に貢献してきた。データ収集に関しては松尾 (故人) がイベントビルダー (事象構成器) の開発を行なった。また、M2 の湯村がネットワークベースの事象構成器の研究を行なってきた。トリガーに関しては、後田が中央トリガーシステム GDL (Global Decision Logic) の開発を行なってきた。その他、西田が HV 制御を担当している。研究室からシフトに参加しているメンバーは 5 名、オペレーションシフトに参加しているのは 2 名である。

今後も、トリガーと HV 制御については研究室として続けていくつもりであるが、事象構成器に関しては研究室の手を離れつつある。専属のスタッフがいず、学生も数名という状況では、やむを得ないであろう。

質疑応答

延與: 7 月の終りくらいの段階で integrated luminosity で (Babar と) コンパラなところまでいくと思うんですけど... 。

後田: いや。Babar の方がやっぱり今までに貯めた分が大きくて... 。去年の分を足すと多分厳しいんじゃないかなと思います。ただ実はミューオンディテクターの HV が掛かっていなかったりとか、PID が全部入っていなかったりとか、データの quality としても悪いので、これを使えるかどうかわからないです。だから 2000 年に入った部分だけで比べたら結構いい勝負になるとは思いますが。

延與: Belle でも何か動いてないのもあったりするわけですよね。

後田: そうですが... 。dead channel はあっても、たとえば PID がごっそり無いとかいうことはないので、それとは level が違う quality の悪さだと思います。

西川: SLAC も KEKB も 10^{34} というのは遠い先の話のようですね。

後田: 遠いですね。SLAC はもともとターゲットにしてないんですけど... 。

坂本: SLAC は 33 乗で KEK は 34 乗。

西川: 3×10^{33} で何年走ったら asymmetry なんて出るんですか? SLAC と KEK が競争してる間に CDF が結果出したりして... 。

後田: ちょっと CDF はわかりません。

中家: 質問を変えて、例えば $5\ \mathrm{fb}^{-1}$で flavor tagging の効率が 40%の時 $\sin 2\phi_1$ の測定精度はいくらですか ?

後田: 僕はその解析をやっていないのですぐには答えられないんですが... 。

坂本: さっきので、tag できたのが 2 イベントあるというのが何 fb^{-1}の結果か、ということから計算できるよね? 1 fb^{-1}ぐらい?

後田: 1 fb^{-1}じゃないと思う、400 pb^{-1}ぐらい。

中家: 10 倍で 20 イベントになれば、$\sin 2\phi_1$ が 0.75 ぐらいだとある程度の確率で言えるかもしれない。

後田: まあ、5 あれば結果が出ると思う。夏までですねやっぱり。夏まで順調に動けば出せるんじゃないかなと思いますけどね。少なくとも Tom Browder はそう言っている。

石野: 加速器が非対称にできていることで、B の tagging performance などがすごく良くなったりとかいうような劇的な差は、CLEO とかに比べると実感できたりするものなのでしょうか ?

後田: 何の performance？

石野: asymmetric であることの意義というのは、解析している時に実感できているような良いことだったりするのでしょうか?

後田: おそらく indirect の解析をしている人は実感していると思います。僕は direct の方をしていて、あまり恩恵に預かってないんですが... 。

一同: 笑。

笹尾: 今のコメントだけど、加速器の観点からという質問の答えならば、2 リングであることです。そのため multi-bunch operation ができる。CESR の proceeding を見れば奇妙奇天烈な multi-bunch operation をしているので、9 個とかしか入らない。でも KEKB はすごくたくさんの数を入れてそれで 33 乗近くにいきなり到達している。

坂本: それともちろん vertex。

後田: vertex を見てる人は、たぶん実感している思いますけど... 。

坂本: SVD の状況はどうなの?

後田: SVD は結構高価な使い捨て detector かなという気がしてますが... 。一応使い捨てる限りは順調。最近ではビームのコンディションが良くなったので、そう使い捨てというわけでもなくなりました。Version 1.0、1.1 あたりは使い捨てになってしまったのですが、今後は大丈夫じゃないかと思います。

座長: 他に質問良いですか? じゃあ押してますんで... 。

3　つくば– 神岡間長基線ニュートリノ振動実験 ~ K2K 実験 ~

高エネルギー研究室では、西川、笹尾、中家、横山、向井、加藤、島、稲垣の 8 名が、K2K 実験 (KEK-PS-E362[1]) に参加している。K2K 実験とは、ニュートリノの質量の有無の検証と弱混合角の測定を目的とする実験である。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 12GeV 陽子加速器でニュートリノを生成し、250km 離れた東京大学宇宙線研究所のスーパーカミオカンデ検出器にて飛来するニュートリノを測定し、その間でのニュートリノ振動現象の有無を研究する。1999 年より加速器を運転しての実験を開始し、順調にデータ収集および解析が進行しつつある。本稿では、まず K2K 実験の目的、構成を要約し、次に現在までの測定状況と解析結果を報告する。そして最後に、K2K 実験のなかで京都大学グループが貢献してきた成果と、今後の方針について報告する。

内容は 2000 年 3 月の発表に準じるが、解析結果等は 2000 年 6 月 3 日現在の最新のものを記す。

3.1　K2K 実験の目的

ニュートリノに質量があり、質量の固有状態 (ν_1、ν_2、ν_3) と、弱い相互作用の固有状態 (ν_e、ν_μ、ν_τ) とが、クォークの小林益川行列のように混合しているとき、「ニュートリノ振動」が起こると示唆されている。例えば、ν_μ と ν_τ が混合角 θ で混合しているとき、$t=0$ に 100% の ν_μ が作られたとしても、ν_1 と ν_2 で異なった時間発展をするため、t 秒後に ν_μ を観測する確率は、

$$P(t) = |\nu_\mu(t)|^2 = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\frac{\Delta m^2 t}{4E_\nu}) \quad (1)$$

$$= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\frac{1.27\Delta m^2(\mathrm{eV}^2)L(\mathrm{km})}{E_\nu(\mathrm{GeV})}) \quad (2)$$

となり、ニュートリノのエネルギー E_ν と、時間 t または飛行距離 $L=ct$ の関数になる。これがニュートリノ振動である。式 (2) からわかるように、もしニュートリノ振動が観測されれば、質量差 $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ および混合角 θ がゼロでないことを示し、ニュートリノのうち少なくとも 1 つのものは、ゼロでない質量を持つことを証明する。

ニュートリノ振動の存在を示す決定的な観測事実が、ご存じスーパーカミオカンデ実験における大気ニュートリノの観測である [2]。ν_μ/ν_e の比が理論予想に比べて小さいこと、とくに地球を貫通して飛来する上向きのもの (L が大きい) に、違いが顕著に現れることが、$\nu_\mu \to \nu_\tau$ 間のニュートリノ振動によって説明される。最新の発表によると、ν_μ と ν_τ の間の混合角 $\sin^2 2\theta \sim 1$、質量差 $\Delta m^2 \sim 3\times 10^{-3}\mathrm{eV}^2$ 付近の領域を示唆している。

しかし、大気ニュートリノの生成過程は一次宇宙線に由来するので、そこに大きな不定性が存在する。K2K 実験は、加速器で人工的にニュートリノ (ν_μ) を生成し、300m 下流の前置検出器で振動前のニュートリノ分布を、250km 離れたスーパーカミオカンデ検出器で振動 (するでしょうか？) 後のニュートリノ分布を同時測定することにより、

- この間でのニュートリノ振動 $\nu_\mu \to \nu_x$ を確実に観測し、
- 混合角 θ と質量差 Δm^2 を高精度で決定する

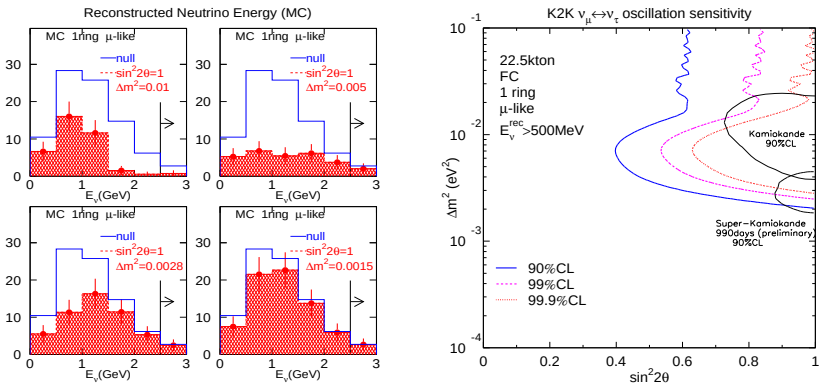


図 5: 10^{20} 陽子を入射したときの、(左図) スーパーカミオカンデ検出器で予想されるニュートリノスペクトル。ニュートリノ振動しなかった場合は白抜、した場合は色塗になる。(右図) K2K 実験における感度領域。90%、99%、99.9% の各信頼度にて、線の右側の領域を測定できる。スーパーカミオカンデ実験、カミオカンデ実験で示唆された領域も、併せて示す。

ことを目的にしている。

前置検出器として「ミニスーパーカミオカンデ」または水標的、鉄と検出器のサンドイッチ構造のレンジ測定型検出器を設置し、ニュートリノの反応数とエネルギースペクトルを求める。また、前置検出器とスーパーカミオカンデ検出器との、立体角補正係数 $R = \left(\frac{F_{SK}}{F_{FD}}\right)$ を、$\pi \to \mu\nu$ 崩壊前の π 中間子の運動量と方向分布を測定することにより、決定する。こうして、

$$N_{FD}(E_\nu) \cdot R(E_\nu) = N_{SK}(E_\nu) \tag{3}$$

と、スーパーカミオカンデで観測されるべきニュートリノスペクトルが求められる。振動があった場合は、式 2 により、$\sin^2 2\theta$、Δm^2 のパラメータに対応した、$\sin^2$ に従う振動模様を示す。(図 5 参照。) 実際に観測されるニュートリノ分布を、これらと比較することによって、ニュートリノ振動を検証する。この解析手法 (ν_μ の disappearance 測定) により、計画している 10^{20} 個の陽子を入射したときに、探索されるパラメータ領域を、図 5 に示す。

また、前置検出器において、

- 1GeV 付近のニュートリノの反応の種類とそれぞれの断面積

を精密測定することも、重要な目的である。1GeV 付近での ν_μ と核子との散乱には、(準) 弾性散乱 $\nu_\mu + N \to \mu(\nu) + N'$ に加えて、π を余分に放出するデルタ共鳴散乱、非弾性散乱がある。(準) 弾性散乱の断面積を決定する Axial vector mass m_A は、泡箱実験などによって測定され 20% ほどの不定性を持つが、圧倒的にイベント数の多い本実験によって、精度良い測定が可能である。また、非弾性散乱によって生じる $\pi^\pm$ は、大気ニュートリノ観測において大きな系統誤差を生んでいるが、K2K 実験においてこれらの反応割合を調べることにより、理解が進むものと期待される。

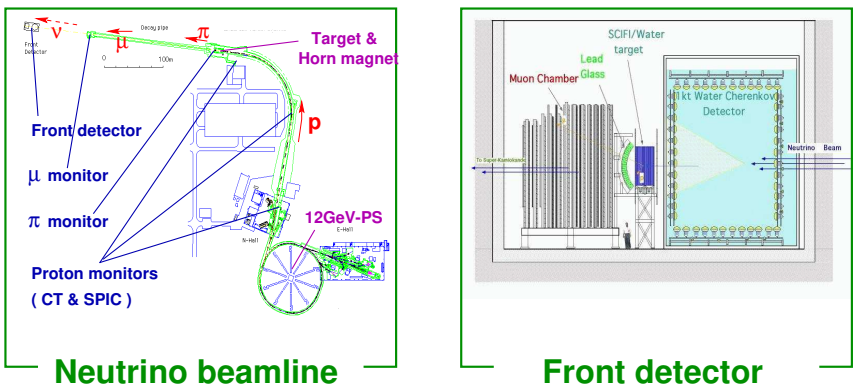


図 6: (左図) ニュートリノビームライン、(右図) 前置検出器

3.2 K2K 実験の構成

K2K 実験では、図 6 左に示すニュートリノビームラインによって、ニュートリノを生成する。KEK の 12GeV 陽子シンクロトロンから陽子を取り出し、神岡の方向に向けた後、長さ 64cm のアルミニウム標的に衝突させて、まず π を生成する。そして直ちに、標的と一体となった 2 つのホーンマグネットを用い、トロイダル磁場によって π^+ のみを収束して崩壊トンネルに送る。崩壊トンネルは全長 200m、ヘリウム充填されており、この中で $\pi \rightarrow \mu\nu_\mu$ の崩壊を起こさせ、ν_μ ビームを得る。陽子ビームラインの十数ヵ所で、Current Transformer (コイル) により強度を、Segmented Plate Ionization Chamber により空間分布を、絶えずモニターしている。また、崩壊トンネル末端のシールド後方に、μ モニターと呼ばれるイオンチェンバーおよびシリコン検出器を置き、μ の量および空間分布を測定することにより、標的での π 生成、収束、ν ビームの方向を常にモニターしている。そして、長期安定運転につき必ず、スペシャルランとして π モニターを導入して測定し、崩壊直前の π の運動量・方向分布を測定し、ニュートリノビームのスペクトルと方向分布を求め、前述の立体角補正係数 R を決定する。

前置検出器 (図 6 右) は、以下の検出器群より成る。上流側より

- 1kt 水チェレンコフ測定器
  スーパーカミオカンデ検出器と同じ水チェレンコフ型の検出器である。水を標的 (51ton) にしたニュートリノ反応事象数の測定や、水チェレンコフ型検出器特有の系統誤差の見積りを行なう。

- シンチレーションファイバー検出器
  直径 0.7mm のシンチレーションファイバーを層状にし、水標的と交互に重ねてトラッカーとする。水標的 (4ton) で起こったニュートリノ反応の、種類および運動学を精度良く測定する。

- トリガーカウンター
  4.2cm 厚のシンチレーションカウンター。シンチレーションファイバー検出器で観測したトラックに、時間情報を与える。また、信号量により、$e^\pm$ の識別をする。

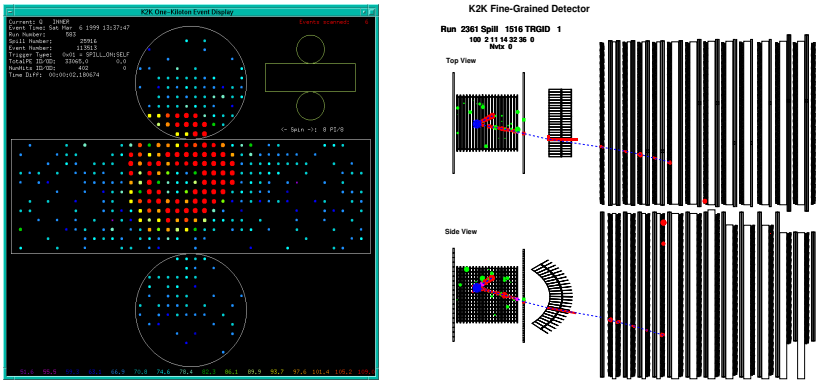


図 7: 典型的なニュートリノ事象。(左図) 1kt 水チェレンコフ検出器で発生したもの。(右図) シンチレーションファイバー検出器の水標的で発生したもの。

- 鉛ガラスカロリーメータ
  ニュートリノ反応で生成した $e^{\pm}$ のエネルギーを測定し、μ やハドロンと粒子識別をする。

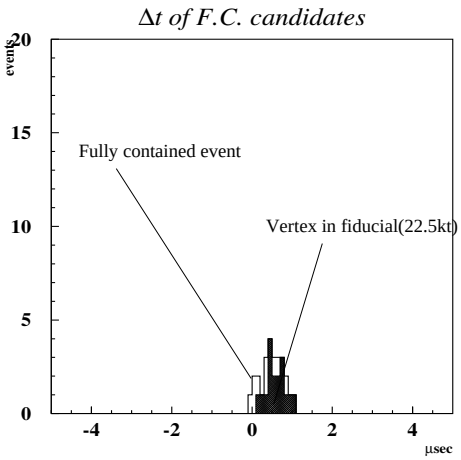
- μ チェンバー
  10cm あるいは 20cm 厚の鉄板とドリフトチェンバーの多層構造。鉄板を標的 (310ton) としたニュートリノ事象について、生成 μ のエネルギーを測定する。質量が大きく反応イベント数が多いので、反応数や空間分布の安定性を測定するのに適している。また、上流の水標的で生成した μ のエネルギーを測定する。

実際に K2K 実験で観測した典型的なニュートリノ事象を、図 7 に示す。

そして、つくばより 250km 離れた岐阜県神岡町の山中にあるのが、スーパーカミオカンデ検出器である。直径 39m、高さ 41m の円筒水槽に、約 11,000 本の光電子増倍管が取りつけられている。内水槽の壁面より 2m 以内を有効領域とするので、この水標的の質量は 22.5 kton となる。スーパーカミオカンデ検出器で、宇宙線 μ などのバックグラウンド中からニュートリノ事象を観測するには、外水槽にヒットのないこと、リングの始点が内水槽内にあることを要求することにより、確実にニュートリノ事象を選ぶことができる (図 8 参照)。また、GPS(Global Positioning System) により、加速器でビームを打ち込んだ時間と観測ニュートリノ事象のタイミングを 100ns ほどの精度で見ることができる。これにより、K2K 実験によるニュートリノ事象であることがわかる。実際に初めて観測された、有効領域内発生イベントを、図 8 に示す。

3.3 現在の測定結果

K2K 実験は、1995 年にプロポーザルが承認を受け、土木工事、各検出器の開発、建設を経て、1999 年 1 月より陽子ビームの取り出しを開始した。2 月に取り出し陽子ビームの調整を行ない、3 月よりホーンマグネットの運転、前置検出器の測定を開始、4 月より物理解析に使用するデータの蓄積を開始した。



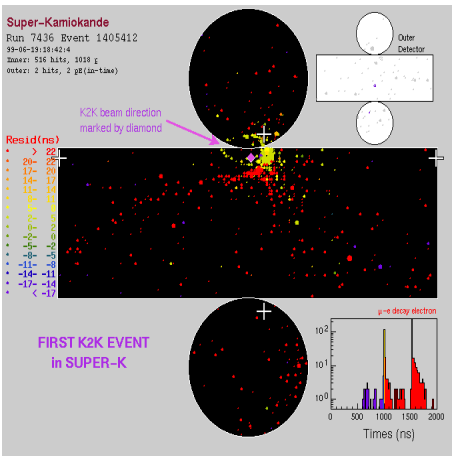


図 8: （左図）1999 年 6 月より 2000 年 3 月までに、スーパーカミオカンデ検出器で観測されたニュートリノ事象の、ビーム到達時刻との時間差分布。内水槽内に反応が全て含まれるもの（contained event）を表示し、網掛けのものが、有効領域内で発生した 17 イベントである。（右図）スーパーカミオカンデ検出器で観測された、初めての有効領域内発生イベント。中央の図が内水槽の展開図で、右上が外水槽の展開図、右下が光電子増倍管のシグナルの時間分布である。

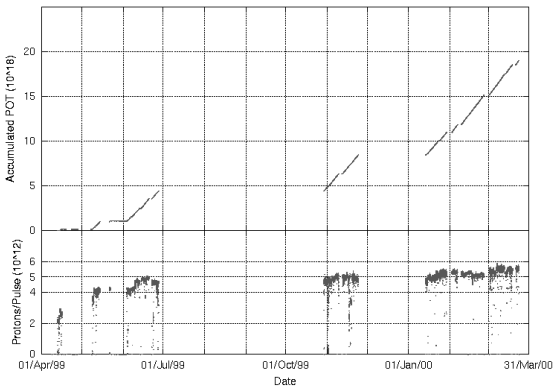


図 9: 積分陽子ビーム強度（上図）、および 1 パルスあたりの陽子ビーム強度（下図）。解析に用いる用いらないに関わらず、標的まで取り出された陽子の数を示す。

図 9 に、1999 年 3 月よりの陽子ビームの蓄積を示す。2000 年 3 月末までに、およそ 2×10^{19} 陽子を標的に入射した。このうち、調整ラン等を除き、陽子ビーム分布や μ モニターでの μ 分布の安定している定常ラン 1.7×10^{19}POT(proton on target) を、以下の解析に用いた。

ここでは、6 月 3 日現在での主要な解析結果をまとめる。

- まず、ニュートリノビームの方向については、μ モニターの分布をスピルごとに測定し、また前置検出器において、μ チェンバーでの鉄反応イベントと、1kt 水チェレンコフ検出器での水反応イベントにより、ニュートリノの空間分布を確認した。いずれの検出器とも、常に ± 0.7mrad 以内で神岡方向に向かっていることを保証している。ニュートリノビームは、π の崩壊角により広がりを持っており、± 1mrad 方向がずれたとしても神岡でのニュートリノフラックス及びスペクトルには影響を与えないことがわかっているので、± 0.7mrad 以内というのは十分な精度である。

- 次に、ニュートリノ生成の安定性については、陽子ビーム強度とμ チェンバーでの鉄反応事象の比をとることにより、統計エラーの範囲以内 ($< 4\%$) で安定であることを確かめた。

- 陽子 1 個あたりのニュートリノ反応割合について、モンテカルロシミュレーションと比較を行なった。1kt 水反応イベント、μ チェンバー鉄反応イベントともに、$(\mathrm{DATA/MC}) = 0.81 \sim 0.88$ であった。違いの原因には、標的での衝突効率の不定性、π 生成率、ニュートリノ散乱の断面積の不定性などが考えられる。しかし、この不定性は、前置検出器とスーパーカミオカンデの比をとることにより相殺されるので、以下の振動解析には影響しない。

- μ チェンバーおよび 1kt 水チェレンコフ検出器にて観測された生成 μ のエネルギー分布を、図 10 に示す。シミュレーションはデータをおおむね再現しているが、わずかな違いについては、ニュートリノ反応過程の検討も含めて、現在研究が進められている。

- 1999 年 11 月までの間に、π モニターの測定を数度行ない、崩壊直前の π の運動量分布、方向分布を測定した。これより、スーパーカミオカンデ検出器および前置検出器に入射するニュートリノのエネルギー分布を求めることに成功した。図 10 右に、求めたエネルギー分布を、モンテカルロシミュレーションとともに示す。これより、モンテカルロシミュレーションがかなり良く、ニュートリノフラックスを再現していることがわかる。また、前置とスーパーカミオカンデでフラックスの比をとることにより、前述の立体角補正係数 R を求め、スーパーカミオカンデ検出器でのイベント 数予想に用いた。

- ここまでの解析結果により、ニュートリノは期待通りに生成され、またモンテカルロシミュレーションにより、イベント数の絶対値以外は良く再現されることがわかった。そこで、1kt 水チェレンコフ検出器で観測されたイベント数に、立体角補正と検出効率補正を行ない、振動がなかった場合、スーパーカミオカンデで検出されるはずのニュートリノの数を見積もった。1999 年 6 月より 2000 年 3 月まで 1.7×10^{19}pot に対して、$29.2 \pm 0.1(\mathrm{stat.})^{+3.5}_{-3.3}(\mathrm{syst.})$ である。系統誤差は $10 \sim 16\%$ と見積もられている。

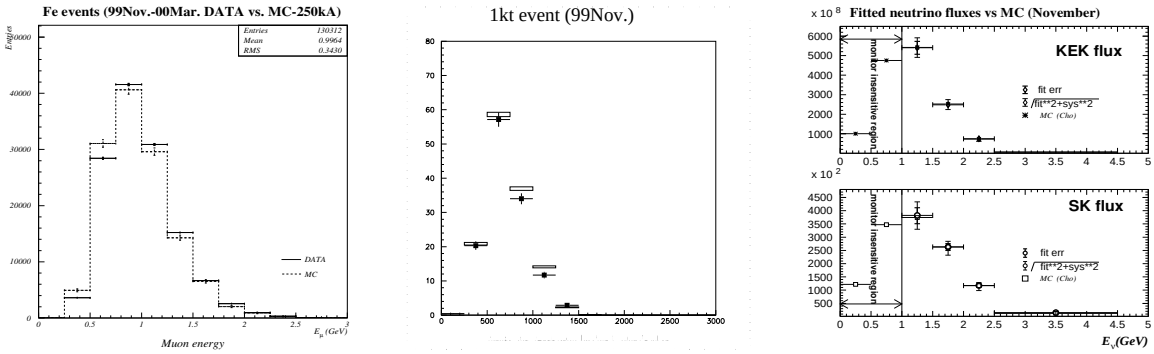


図 10: (左図) μ チェンバーで観測された、鉄反応事象からの μ のエネルギー分布。1999 年 11 月から 3 月までの 1.2×10^{19}pot 分の観測データと、モンテカルロシミュレーションを併せて示す。(中図) 1kt 水チェレンコフ検出器で観測された、リング数 1 で μ-like のリングのエネルギー分布。1999 年 11 月の 2.6×10^{18}pot 分の観測データと、モンテカルロシミュレーションを併せて示す。ともに、観測イベント数で規格化している。(右図) π モニターより求められた、前置検出器、スーパーカミオカンデ検出器でのニュートリノ分布 (1999 年 11 月測定)。併せて、モンテカルロシミュレーションの結果も示す。全体の規格化は、前置検出器でのニュートリノフラックスによって行なった。

- さて、実際にスーパーカミオカンデ検出器で観測したイベントの解析を行なう。先に述べたように、イベント発生の時間情報によって、K2K 実験からのニュートリノ事象ははっきりと判別される (図 8 参照)。1999 年 6 月より 2000 年 3 月までのデータで、リングの始点が有効領域 22.5kt に含まれるイベントの数は、17 イベントである。

- 振動がなかった場合の予想イベント数 29.2 に対して、観測数は 17 イベント [3]なので、観測にかかるニュートリノがわずかに減っていそうな期待をさせる。しかしまだ、統計誤差、系統誤差ともに大きく、ニュートリノ振動が起こっていると断言したり、そのパラメータを議論したりするのは、時期早尚である。

K2K 実験では、この 5、6 月に 1ヶ月半ほど実験を行ない、また来年 1 月よりさらにデータを蓄積して、解析を続ける。計画では、2004 年までに 10^{20}pot 以上のデータを蓄積し、予想イベント数 200 イベント程度に達する予定である。

3.4 京都グループの貢献、今後の予定

K2K 実験において京都グループは、実験代表者の西川をはじめとして 8 名も参加し、人数のうえでも大きな割合を占め、しかもそれぞれ重要な仕事を担当している。

[3] 3 月発表の時点では、1999 年 4 月より 1999 年 11 月まで 7.2×10^{18}pot で、予想数 $12.3 \pm 0.1^{+1.7}_{-1.9}$ イベントに対して、観測数 3 イベントであった。

- 西川は、実験代表者としてもちろん実験全体の総括を行ない、責務を負っている。
- ニュートリノ生成ビームラインの各装置、とくにπ モニター、μ モニターの製作から測定、解析を、西川、稲垣、横山、中家、島、向井が行なってきた。新たな検出器の導入や現有の装置の改良も考慮に入れつつ、ニュートリノビーム生成までを完全に理解できるよう、研究が期待されている。
- 1kt 水チェレンコフ検出器の保守、較正、解析を、島、中家が中心となって行なっている。現在もまだ、較正と解析が進められ、水チェレンコフの利点を生かし欠点を補うような、多くの研究課題と取り組んでいる。
- 前置検出器のトリガーカウンターと鉛ガラスカロリーメータの改良、測定と解析を、加藤、中家が行なっている。彼らの働きのお陰で、現在安定にデータ収集が行なわれている。
- μ チェンバーの建設とニュートリノ事象の解析を、これまで稲垣、加藤が精力的に行なってきた。さらに今後、ニュートリノ反応に対する理解が進み、ニュートリノエネルギー分布の導出などの解析が進むものと期待される。
- そして、スーパーカミオカンデ検出器の解析を稲垣が、彼の博士論文のために始めたところである。今後イベントの増加とともに、博士課程の学生を中心に解析に携わる者が多くなるだろう。
- さらに、新たなニュートリノ検出器の開発を、中家、横山、加藤を中心として行なっている。アイデアとしては、液体シンチレーターと光ファイバーの組合わせにより、大容量かつすべての荷電粒子のエネルギーが測定できる検出器や、鉛ガラスでのチェレンコフ光を測定する RICH 型の検出器を考えている。また、これらの検出器に使用する、安価で安定な光検出器も開発を進めている。

参考文献

[1] K.Nishikawa *et. al.*, KEK-PS proposal; K.Nishikawa, Nucl.Phys.B (Proc. Suppl.) 59, 289 (1997)

[2] Y.Fukuda *et. al.*, Phys.Lett.B 433, 9 (1998); Y.Fukuda *et. al.*, Phys.Lett.B 436, 33 (1998); Y.Fukuda *et. al.*, Phys.Rev.Lett. 81, 1562 (1998); Y.Fukuda *et. al.*, Phys.Rev.Lett. 82, 2644 (1999)

質疑応答

延與: atmospheric の 90% C.L. の範囲で振動があったとするといくつ... ? with oscillation の計算で。

稲垣: with oscillation ですか？今ぱっとした値は持っていないんですが、おそらくこれがスーパカミオカンデのベストフィットのポイントなんですが、青の線から赤の線に移るときに...

延與: 6 割ぐらい?

稲垣: 5/8 とかそういうもんなので、そう、6 割くらいです。

中村: かなり初等的な質問なんですけど、神岡に向いてるのは ν_μ の絶対数とか、それが期待値からどれだけ減っているかとか言っているんですか？

稲垣: はい。

中村: そうするとニュートリノビームがハズレていたり拡がってしまっていて、見かけ上イベントが減っているのではないかという疑いも... 。

稲垣: ビームの profile に関しては一番気になるところなんで、front detector でニュートリノビームが必ずスーパーカミオカンデに向かっているという事を確認しています。ニュートリノビームというのは decay angle によってかなり拡がっているので、それが 0.7mrad の精度で行っているすると、おそらくパーセントも影響は無いと思います。

石野: fiducial cut というのをスーパーカミオカンデの方でもやっているようですが、1μs 以内という狭い time gate 内に来る event だけを見れば良いという非常に clean な実験状況にもかかわらず、fiducial cut をしなければいけない理由はなんですか？

稲垣: それは、あまりに壁に近いと ring の数の ID が厳しくなるからです。これはかなり理想的な analysis をしていて、例えばこの spectrum については、ring 数が 1 個で、かつ、μ-like な ring であるという事を要求しているのです。このような analysis をするためにはあまり壁際だともう ring かなんだかわからなくなってしまう。

石野: 手前の岩盤まで target mass である、という様な気持ちになって有効体積をあえて増やして統計をあげるという発想はあるのですか？

稲垣: ええ。もちろんそれも行なわれています。

石野: そうするとビームタイムも短くて済むし... 。うち (KEK-PS の他のユーザ) にとってもまあうれしいかな... ということは常々思っていたんですが... 。

一同: 爆笑。

西川: だけど最終的に間違ったを事していないというのは spectrum distortion は本当に $\sin^2$ の形になっているかということを示さないといけません。そのためにはエネルギーが測れないとだめですから。数勘定をしているだけならば factor 2 ぐらいのを全部入れれば統計が稼げますが、数だけでは皆さん信用しないし。そういうのをやるためには fiducial で cut しなければいけない。

延與: fiducial cut をしないと 6 ですよね。何にもしないとこの time window にどのくらいいるのですか？感じを知りたいだけで申し訳ないんだけど。

西川: 残っているのは beam associate なものだけです。$\pm 50\mu$s くらいはそれだけしかない。

川畑: oscillation 無かったら期待値 12. いくつという値があって統計エラーがすごく小さいなあと思ったんですけど、こんなものなんですか？ まあ systematic は... 。

稲垣: ええ。実際の統計エラーというのは front detector において観測されたニュートリノ量の統計エラーなんですよ。1kt tank での event 数というのは 17,000 events で、そのルートくらいですね。

川畑: 3 events の方の統計エラーと見たらまだまだわからない。

稲垣: ええ、もちろんそれは Poisson のエラーですけど。

川畑: 3 events って proton 何個で 3 events ですか？

稲垣: およそ 7.2×10^{18} ですね、解析 proton 数。

座長: 他になければ午前中はこれで終わりましょう。