



記載の記事は宇宙線研究所ホームページ (<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ICRRnews>) からでも御覧になれます。

天皇皇后両陛下スーパーカミオカンデをご視察	1	Neutrino 2004 会議報告	森山茂栄 7
カンガルーⅢ望遠鏡システム完成.....	森 正樹 2	自己紹介.....	12
K2K 実験の新しい結果	金行健治 4	人事異動.....	13
		ICRR セミナー	14

天皇皇后両陛下スーパーカミオカンデをご視察

梅雨明けの7月13日、天皇皇后両陛下が神岡宇宙素粒子研究施設をご訪問になり、スーパーカミオカンデをご見学されました。御着に際し、稲葉文科副大臣、丸山官房審議官、佐々木総長、藤井副学長ら

が出迎えました。坑内では、小柴本学名誉教授や鈴木所長の案内で装置内部やコントロール室をご覧になりました。その後、研究棟におもどりになり、若手研究者と約30分にわたりお話をされました。



スーパーカミオカンデをご覧になる天皇皇后両陛下

カンガルーⅢ望遠鏡システムの完成

宇宙線研究所 森 正 樹

南オーストラリアの砂漠地帯にあるロケットの町、ウーメラの近郊に10m口径望遠鏡4台が屹立している(図1)。もっとも望遠鏡といっても通常の光学望遠鏡ではなく、天体ガンマ線観測用チェレンコフ望遠鏡である。名前はCANGAROO(Collaboration of Australia and Nippon for a GAMMA Ray Observatory in the Outback)といい、日豪共同のプロジェクトとして、都会から離れて空が暗く、晴天率の高いこの地で1992年より観測が続けられており、この4台のシステム(カンガルーⅢ)は当初使用された初代3.8m望遠鏡(カンガルーⅠ)、1999年に完成した二代目7m望遠鏡(現在の10m望遠鏡1号機の前身、カンガルーⅡ)に続く三代目として(木舟正/谷森達、ICRR ニュースNo.38、1999. 9. 1)、2004年3月から完全な形で200GeV領域ガンマ線の観測に供されている。

ガンマ線は非熱的な加速された粒子から放出され、銀河磁場に曲げられずに地球に到達するため、高エネルギー宇宙線の起源天体を直接指し示し、高エネルギー宇宙の強力な探針といえる。天体から地球に飛来する高エネルギーガンマ線は、地球大気中で粒子シャワー現象を引き起こし、シャワー中の荷電粒子が空気中の光速を超えて走るとチェレンコフ光を放射する。このチェレンコフ光は、ガンマ線の到来方向を保ち、直径300m・厚み1mほどの円盤状になって地上に到達するため、1台のチェレンコフ望遠鏡の観測面積はこの円盤程度の大きさ

になり、人工衛星に搭載可能な検出器の10,000倍の面積をもって、高エネルギーになるほど減少するガンマ線をとらえることが可能になる。ただし、電荷を持つ宇宙線もシャワーを起こし、同様にチェレンコフ光を発生するため、ガンマ線観測の圧倒的なバックグラウンドになる。電磁相互作用のみで発達するガンマ線シャワーと、核相互作用が絡む宇宙線シャワーとで異なるシャワー発達の様相から生じるチェレンコフ光イメージの差異(前者は後者より集中したイメージとなり、しかも像の軸が天体方向を指す)を利用し、ガンマ線事象を選び出すことのできる解像型チェレンコフ望遠鏡の開発によりTeV領域のガンマ線が高信頼度で検出できるようになったのは1980年代終わりごろであったが、初代3.8m望遠鏡は当時世界最高の解像度を持つチェレンコフ望遠鏡として南半球天体のパイオニアとなることができた。さらに高解像度の10m望遠鏡1号機を用いた観測結果については、すでに報告されているので、そちらを参照されたい(森正樹、ICRR ニュースNo.46(2001. 8. 31)、榎本良治、ICRR ニュースNo.50(2003. 3. 3)など)。

チェレンコフ光が放射されるのは地上数キロメートルの有限な高さであるため、チェレンコフ光を100m程度離れた複数台の望遠鏡でステレオ観測することにより、三角法を用いてシャワーの発生高度や到来方向を推定することが可能になり、角度分解能は0.2度程度から0.1度以下に、エネルギー分解能は



図1 カンガルーⅢ望遠鏡システム。左から2号機、4号機、3号機、1号機。

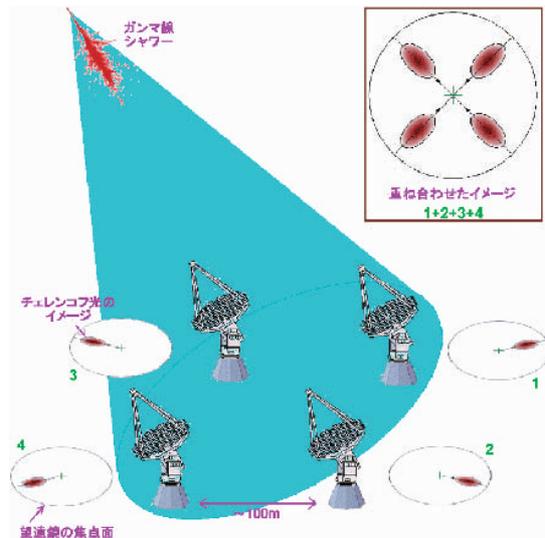


図2 チェレンコフ光のステレオ観測の概念図。

40%程度から20%以下に向上する(図2)。4台のシステムの完成により、カンガルーⅢ望遠鏡は当初想定した性能を発揮できるようになった。

望遠鏡はプラスチック基材の80cm直径の球面鏡114枚を放物面上に並べて焦点距離8mの反射鏡とし、経緯台型の架台に乗せたものであり、主焦点には427本の3/4インチ光電子増倍管を六角状に並べた解像型カメラを設置し、約4度の視野をカバーしている(図3)。光電子増倍管からの信号はカメラ内部で増幅された後、望遠鏡架台のベランダ部にある回路室に導かれ、ここでVMEベースのTDCとADCでデジタル化され、光量とタイミング、GPS時刻などのデータとしてローカルコンピュータのHDDに記録される。望遠鏡間には光ファイバーネットワークが張られており、複数望遠鏡の事象を再構成するためのID番号のやり取りや、デジタルデータ転送に用いられている。GPS時計を元に目標天体の天球上の位置を高度と方位角に変換し、望遠鏡駆動部への指令を刻々行うことによって天体を追尾する。望遠鏡とデータ収集の操作はネットワーク経由で一箇所から行えるようになっており、観測者の移動の手間を省くようにしている。(しかしまだ自動化は十分でなく、観測開始時と終了時は手動の手順が多く残っている。)観測できるガンマ線のエネルギーは、1号機の約400GeVから種々の改良の結果約200GeVまで下がり、ガンマ線の統計を向上させるとともに、より広範囲のエネルギー領域をカバーできるようになった。

観測者は二、三人組で、新月の前後一週間ずつの半月程度を基本に現地に滞在して観測に取り組む。月明のない晴夜に望遠鏡のある場所に車で出かけ、雲の動きを気にしつつ、望遠鏡システムを立ち上げ、



図3 主焦点のイメージングカメラ。光電子増倍管427本の前には集光力を上げるためライトガイドが取り付けられている。

データ収集のモニター画面をにらみながら薄明終了(あるいは月が沈んで)から朝まで(あるいは月が昇るまで)観測小屋で過ごし、昼間は車で15分の町に戻って宿舎で休養する(あるいは初期解析を行うとか、ノートPCで日本の仕事の続きに取り組むとかして過ごす)。銀河中心付近の濃い天の川や明るい星の多い南天の星空は見事であるが、観測中はのんびり眺めている時間はあまりない。残念ながらネットワークは常時接続ではなく、送れる量のデータでもないので、観測データは取り外せるHDDに入れて日本に持ち帰り、オフライン解析にかけられ、ガンマ線信号が探されることになる。

今後は以前の観測で得られた天体をステレオ観測により高精度で再観測し、より詳細な情報を得るとともに、南半球の地の利を生かし、超新星残骸などの銀河系内天体を系統的に観測して、宇宙線加速天体の基礎データを積み上げていくとともに、時間変動の大きい活動銀河核のモニター観測や、新種のガンマ線候補天体の観測を続けていく予定であるので、これからの成果に期待していただきたい。

この研究の主な経費は、日本側が5年計画の文部科学省科学研究費COEプログラム(後に特別推進研究)として望遠鏡本体と観測装置を受け持ち、オーストラリア側がAustralian Research CouncilのRIEF(Research Infrastructure Experimental Facility) grantとして望遠鏡土台と観測小屋などを供給することによって賄われた。また、宇宙線研究所の共同利用や学術振興会の日豪共同研究、東京大学の国際交流資金などから観測旅費などを援助していただいている。さらに望遠鏡本体は三菱電機が製作・組み立て指揮に当たったが、建設においては現地の業者の協力が大きかった。この場を借りて関係各位に謝意を表したい。

K2K 実験の新しい結果

宇宙線研究所 金 行 健 治

K2K 実験（つくば―神岡長基線ニュートリノ振動実験）は、1998年にスーパーカミオカンデにより発見された大気ニュートリノのニュートリノ振動を、加速器により作られたニュートリノを用いて検証することを目指している。今回、事象数とエネルギー分布の歪みから、99.99% (3.9σ) の信頼度でニュートリノ振動がおきているという結果を得、2004年のパリでおこわれたニュートリノ国際会議で発表したもので、これを報告する。

現在までのスーパーカミオカンデで観測された大気ニュートリノ事象は、Fully Contained 事象、Partially Contained 事象、上向き突き抜けミュー事象、上向きストッピングミュー事象の各データの天頂角分布が、 ν_μ - ν_τ 振動を仮定した Δm^2 、 $\sin^2 2\theta$ がそれぞれ $\sim (2-3) \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 、 ~ 1 の予想値と非常に良く合っており、1998年の高山のニュートリノ国際会議で、ニュートリノ振動を検出したことを報告した。

K2K 実験では、大気ニュートリノで観測されたミューニュートリノのニュートリノ振動を、加速器により作られたニュートリノにより検証することを目指している。ニュートリノ振動は良く知られているように、ニュートリノの飛行距離を L 、エネルギーを E とすると L/E の関数として記述される。大気ニュートリノでは天頂角分布を測定することにより、同じエネルギーのニュートリノに対して距離 L が変わるとどうなるかを主に調べ、ニュートリノ振動の広いパラメータ空間の中からニュートリノ振動を探索した。K2K や将来予定されている長基線ニュートリノ振動実験では、 L を固定してエネルギー分布を調べることにより、ニュートリノ振動パラメータの精密測定をめざしている。残念ながら K2K では事象数が多くないため $\sin^2 2\theta$ についてはあまり感度が無いが、 Δm^2 に対しては高い測定感度を持っている。

本実験では高エネルギー加速機構の12GeV陽子加速器で陽子を加速し、アルミのターゲットにぶつけ、生成されたパイ粒子をホーンで収束させることにより大強度のミューニュートリノビームを発生させている。次にターゲットから300m下流に設置した前置検出器で、ニュートリノ振動が起きる前のニュートリノの数、エネルギー分布、方向を測定す

る。そのニュートリノを250km下流のスーパーカミオカンデで測定するが、GPSを使い、KEKで生成したニュートリノが神岡に到着する時間のデータのみを使うことにより、バックグラウンドがほとんど無い状態で測定が行える。前置検出器で測定した結果とスーパーカミオカンデで測定した結果を比較することにより、ニュートリノ事象数の変化、エネルギー分布の違いを求めて、ニュートリノ振動の測定を行っている。

前置検出器はいくつかの異なる検出器から構成されている。宇宙線研の担当している1kt水チェレンコフ検出器は、スーパーカミオカンデと同じ動作原理で同じ光電子増倍管、エレクトロニクスを使い、システムティクスを良く押さえることができる。今回の解析では、スーパーカミオカンデでの事象数、1GeV以下のニュートリノエネルギー分布を押さえるために使われた（図1）。一方、シンチレーションファイバー検出器、ミューオン飛程検出器等からなるファイングレイン検出器は、準弾性散乱と非弾性散乱を分離しニュートリノ相互作用を押さえ、1GeV以上のエネルギー分布を求めるのに使われた。これらの前置検出器で測定したニュートリノ相互作用事象数からスーパーカミオカンデで予想される事象数を、ミューオンのエネルギーと方向分布からスーパーカミオカンデで予想されるエネルギー分布を精度良く求めた。

今回の解析では、1999年6月から2004年2月までのデータを用いた。1999年6月から2001年11月までの期間を K2K-I、スーパーカミオカンデの事故および47%の光電子増倍管を再配置、再建の後の2003年1月から2004年2月までの期間のデータを K2K-II と呼んでおり、スーパーカミオカンデのシステムティクスが異なっているため、別々に分けて解析を行っている。また K2K-II では新しい全感知型シンチレータ飛跡検出器を加え、より前置検出器のニュートリノエネルギー測定精度を向上させた。解析に使ったデータは K2K-I が 4.79×10^{10} P.O.T.、K2K-II が 4.12×10^{10} P.O.T. に対応している。

K2K-I + II で測定された事象の時間分布を図2に示す。ここで、 $T_{\text{diff}} = -0.2 \sim 1.3 \mu\text{s}$ が KEK で作られたニュートリノビームがスーパーカミオカン

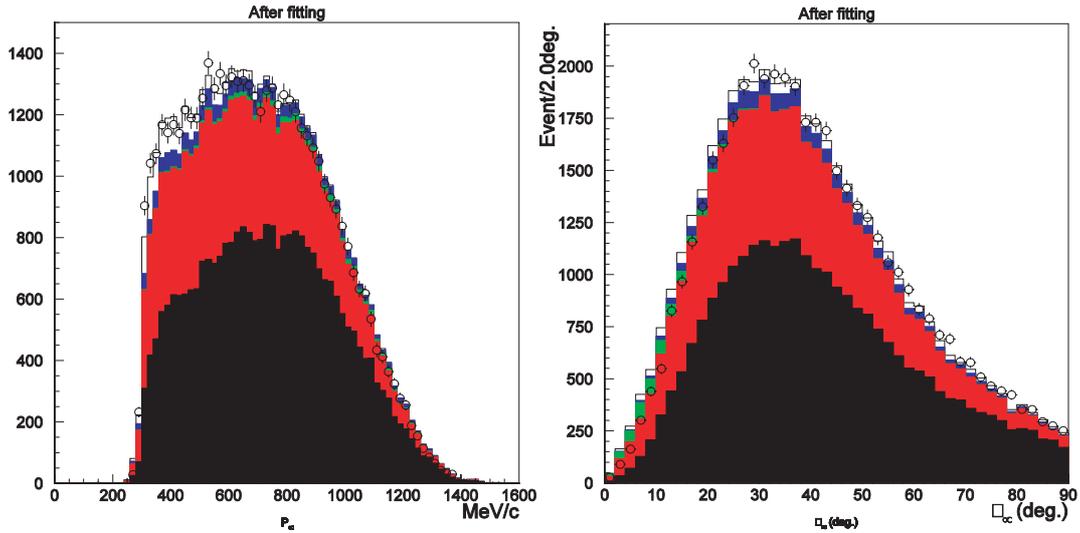


図1 1 kt 水チェレンコフ検出器で測定した1リングミュオン事象の運動量分布 (左図) と角度分布 (右図)。白丸がデータ、ヒストグラムがMCで、黒、赤、緑、青、白がそれぞれ準弾性散乱、 1π 生成反応、コヒーレント散乱、多 π 生成反応、中性カレント反応によるもの。

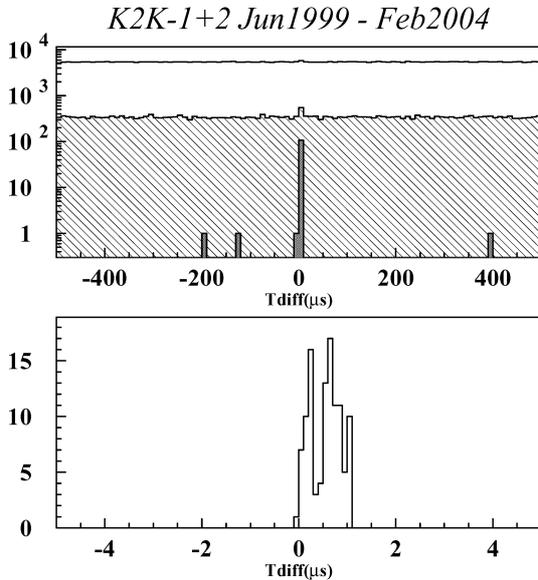


図2 KEKで作られたニュートリノビームがスーパーカミオカンデに届く時間を $T_{diff}=0$ とした時の、スーパーカミオカンデで観測された事象の時間分布。上図のヒストグラムは、それぞれミュオンからの崩壊電子カット後、 $E_{vis}>30\text{MeV}$ カット後及び有効体積内の Fully Contained 事象。下図は $T_{diff}=\pm 5\mu$ 秒の分布。

で測定される時間に対応している。この図からも明らかなように $T_{diff}=-0.2\sim 1.3\mu$ 秒に、Fully Contained 事象の鋭いピークがあり、バックグラウンドが非常に少ないことがわかる。(1ミリ秒に3事象)。また、このバックグラウンド数は大気ニュートリノ事象が偶然観測される期待値と矛盾は無い。 $T_{diff}=-0.2\sim 1.3\mu$ 秒に観測された Fully Contained 事象は108事象であった。それに対して前置検出器の測定結果から予想される、ニュートリノ振動が無

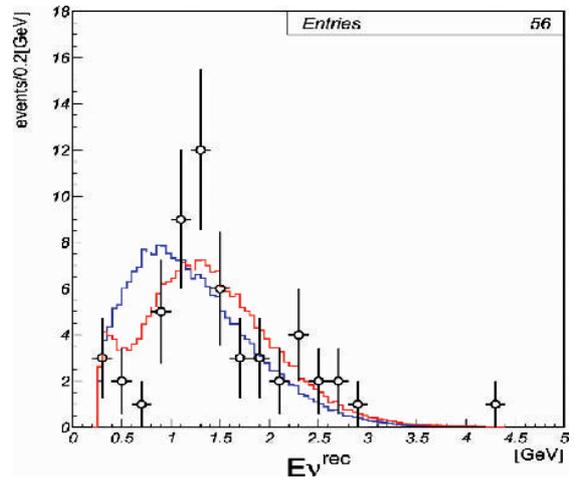


図3 1リングのミュオン粒子事象について、再構成されたニュートリノのエネルギー分布。白丸はデータ、青のヒストグラムはニュートリノ振動無を仮定したときの分布、赤はニュートリノ振動を仮定したときのベストフィットの分布。青と赤のヒストグラムでは面積を観測した事象数にあわせて、エネルギー分布のみを使って解析を行った。

いと仮定したときの期待値は $150.9+11.6-10.0$ 事象であり、観測値が有意に少ないことがわかった。次に観測された事象のうち、1リングのミュオン粒子が起こしたと思われる56事象については親のニュートリノのエネルギーを求めることができる。図3に示すように、再構成したニュートリノのエネルギー分布は、ニュートリノ振動が無いと仮定したときと比較して大きな差があった。これらの事からニュートリノ振動が無いのに統計的ふらつきで、スーパーカミオカンデで観測された結果を得る確率として、事象数に対して $0.33\%(2.9\sigma)$ 、エネルギー分布の歪

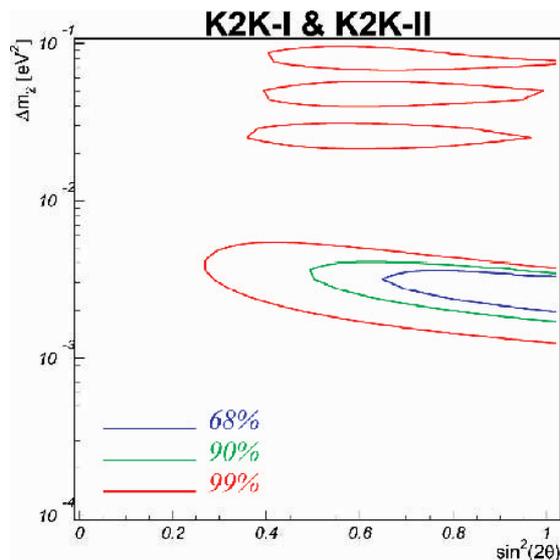


図4 K2K-I + IIのデータから求められた68% C.L. (青)、90% C.L. (緑)、99% C.L. (赤) $\nu_\mu - \nu_\gamma$ oscillation allowed region。

みに対して1.1% (2.5σ)、両方に対して0.01% (3.9σ)を得た。

さらに、ニュートリノ振動を仮定したときのニュートリノのエネルギー分布はデータと良くあっており (KS テストから確率52%)、そのときのニュートリノ振動のパラメータは $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1.0, 2.7 \times 10^{-3} \text{eV}^2)$ であった。図4に K2K-I + IIの結果 ($\nu_\mu - \nu_\gamma$ oscillation allowed region) をしめす。この結果はスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの観測結果と良く一致している (図5)。また、K2K-I + IIの数のみを使った解析結果とエネルギー分布のみを使った解析結果は、その両方を使った結果と良く一致している。K2K-I、K2K-IIに分けて解析した結果も同様に良く一致している。

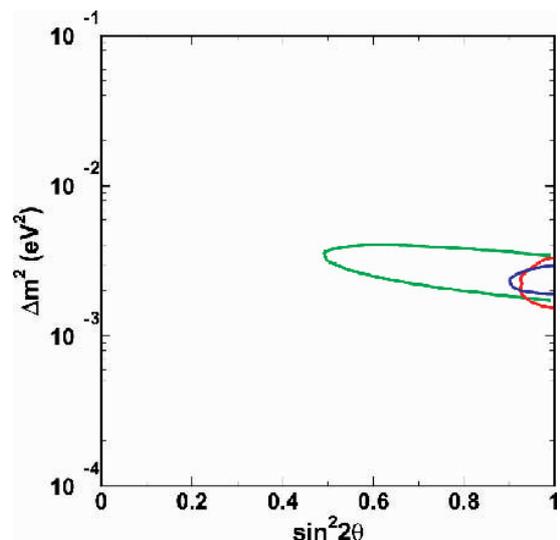


図5 K2K-I + II (緑)、スーパーカミオカンデの二世代解析 (赤)、スーパーカミオカンデのL/E解析 (青) から求められた90% C.L. $\nu_\mu - \nu_\gamma$ oscillation allowed region。

今回、1999年6月から2004年2月までのデータを用い、事象数と再構成したニュートリノエネルギー分布の歪みから、99.99% (3.9σ)の信頼度でニュートリノ振動がおきているという結果を得た。このことにより、1998年にスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ観測で発見されたニュートリノ振動を、加速器により作られたニュートリノを用いて検証した。今後、引き続きデータを増やし、ニュートリノ振動パラメータの測定精度を増やす事を目指す。さらに東海村に建設が始まっている大強度陽子加速器 (J-PARC) からスーパーカミオカンデに K2K 実験の50倍以上の強度のニュートリノビームを打ち込み、ニュートリノ振動パラメータの精密測定、およびまだ未発見の第一-第三世代間の振動の観測、CP対称性の破れの発見等をめざしたい。

Neutrino 2004 会議報告

宇宙線研究所 森山茂栄

第21回ニュートリノ物理学と宇宙物理学国際会議は、6月14日から19日までパリのクレージュド・フランスで開催された。参加者は総勢540名のほり、開催するたびに参加人員が増えてゆくことは、ニュートリノ物理へ関心の高まりを示すものであった。また、オンラインにて会議開催のビデオ映像が流されるサービスもあり、世界中の研究者が最新の研究結果に注目した。今回は会議直前に K2K 実験と KamLAND 実験が最新の結果を発表したこともあり、ホットで印象的な会議であった。会議のスライドは <http://neutrino2004.in2p3.fr/> にまとめられているので興味があれば是非ご覧いただきたい。

会議の冒頭を飾ったのは、SNO グループであった。今回期待されたのは、塩を重水に溶解させた Phase II 中性カレント測定データ全体の解析結果が期待された。しかし残念ながら、その結果は夏あたりに発表が予定されているらしく、まだその結果を

聞くことができなかった。ただし昨年9月以降、塩を重水から除去し、事象ごとに中性カレント事象かどうか判定するためのヘリウム中性子カウンターの設置が行われてきた。40本のカウンターが4月中に導入完了している。

次に KamLAND が登場した。彼らは会議直前に論文をアーカイブに出し (hep-ex/0406035)、大きな注目を浴びた。最初の論文から比べると、統計をおおよそ5倍に伸ばした。KamLAND は原子炉から飛来する反ニュートリノと液体シンチレータに含まれる陽子との反応で生じる陽電子と、遅延して別の陽子に捕獲される中性子の信号を同期して捕らえ、バックグラウンドを極めて小さいレベルに抑えている。今回のデータからは陽電子のエネルギー2.6 MeV 以上の事象が258事象、一方ニュートリノ振動がない場合の期待値は365 \pm 24 (系統誤差)、バックグラウンドは7.5 \pm 1.3事象と求められ、

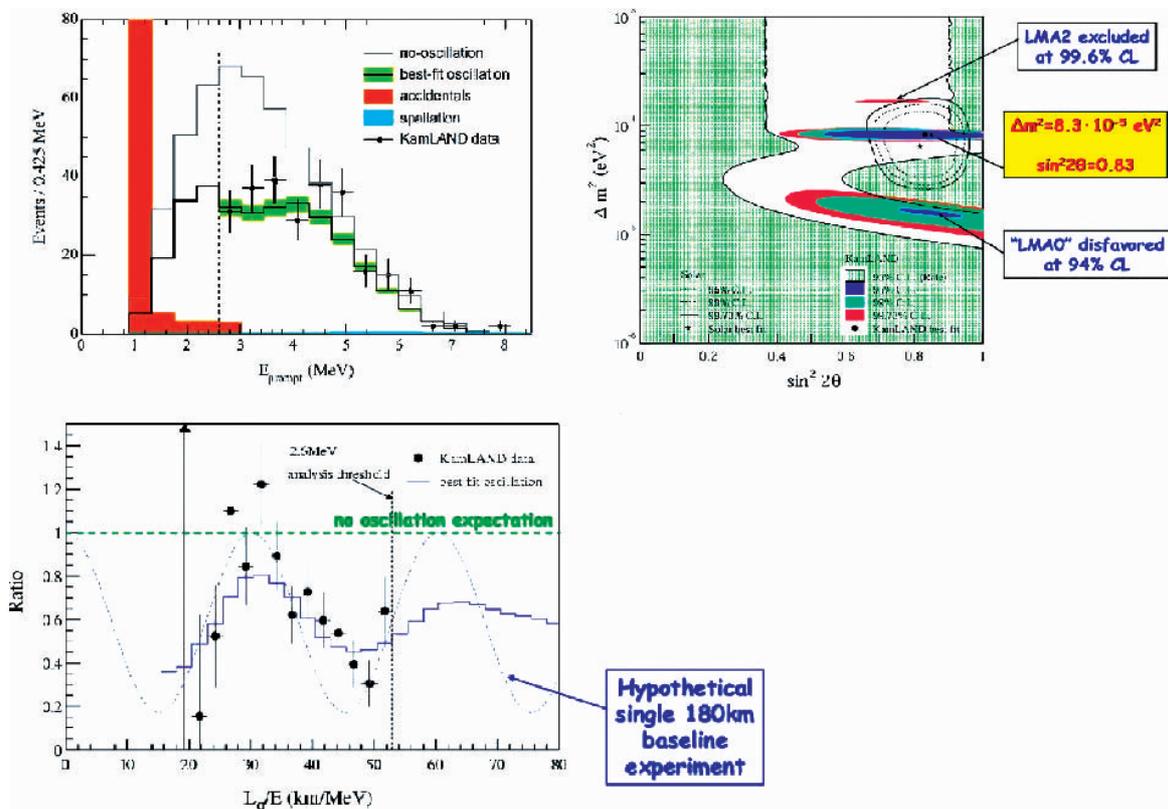


図1 KamLAND で得られたエネルギースペクトル、ニュートリノの振動パラメータ、 L_0/E 分布 (原子炉からの距離はばらばらだが、平均的に $L_0=180$ km の距離にあると仮定) G. Gratta による。

99.995%の信頼度で、振動がない解は除去された。今回大きな関心を集めていたのが、陽電子のエネルギースペクトルの変形が示されたことである。これにより所謂 LMA2は排除され、太陽ニュートリノの観測で高い信頼度で許容されるパラメータ付近と良く一致した。 $\Delta m^2 = 8.3 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ 、 $\sin^2 2\theta = 0.83$ がベストフィットであり、スペクトルの形だけを用いても同様の結果を得ている。これは最初の結果からは少し大きめの Δm^2 に相当する。もう一つ観衆を喜ばせたのは、 L_0/E のプロットであった。これは2月のスーパーカミオカンデ (SK) の大気ニュートリノによる発表に一步先んじられたが、ニュートリノが振動している直接の証拠につながる。原子炉からの平均距離を L_0 とし、ニュートリノのエネルギーを E としたのが先の式であるが、そのプロットは期待される振動のカーブに良く合っていた。会場が興奮しているのが伝わってくるようであった。

SKによる太陽ニュートリノ観測の解析結果が報告された。現在、日夜格差を1-2%の精度で感度良く決定することと、スペクトルの変形を決定することがさらなる情報を得る重要な方法だと認識されており、SKIの成果が発表された。SKIでは実に2万事象を超える5MeV以上の太陽ニュートリノが観測されており、データ数をBP2004で期待される数で割った値は $0.406 \pm 0.004 + 0.014 - 0.013$ と得られた。昼夜格差は $-0.021 \pm 0.020 + 0.013 - 0.012$ であった。事象ごとに振動確率を計算して評価する解析では統計誤差を減らすことができ、その場合LMAのベストフィット $6.3 \times 10^{-5} \text{eV}^2$ 、 $\tan^2 \theta = 0.55$ に対しては $-1.8 \pm 1.6 + 1.3 - 1.2\%$ が得られていた。いずれにしてもニュートリノ振動で期待される非対称性と無矛盾である。エネルギースペクトルもほとんど平らに見えた。加えてエネルギーしきい値を4.5MeVにまで下げたデータも示された。SKIIの解析も順調に進んでおり8MeV以上の1年弱のデータで既に2千事象以上観測されている。SKIIIに対する見通しも議論され、統計誤差、系統誤差をさらに低減することによりスペクトル形状を詳細に決定し、ニュートリノ振動のパラメータを決定する方針が示された。

次にBorexinoの報告があった。2002年6月から液体シンチレータ流出のために制限された作業しかできなくなっているのは知られているが、すでに構造体、純化装置、光電子増倍管、エレクトロニクスの準備は整っているとのことであった。2003年12月には、ラドンを溶解させた少量の液体シンチレータを検出器の中心においてデータを取ったようで、検

出器としては動作していることが示された。実験の開始はまだ見えていない。

太陽ニュートリノ観測の将来の意義と検出器開発について発表があった。LMA解をスペクトルの変形と昼夜差を観測することによって、より高い確度で確認するとともに、振動のパラメータの精密測定、宇宙物理学上の重要な成果を挙げることの重要性が強調された。スペクトルの変形は混合角に感度があるが、SKでもSNOでもまだ見えていない。メガトンスケールの水チェレンコフ検出器の場合、質量差の決定には単純な昼夜差の観測の感度が高い。低エネルギー太陽ニュートリノを観測することにより、混合角の精密な決定が可能であることも議論された。SNOに液体シンチレータを入れる計画とXMASSについて述べる。前者は、SNOの位置が極めて深いために、KamLANDでは宇宙線により放射性同位元素である炭素11が発生するために不可能な、 pep 、 CNO ニュートリノの観測を狙う面白い計画である。XMASSは液体キセノンを用いて低エネルギー太陽ニュートリノの観測を目指す実験である。現在研究開発が盛んに進められており、その実現可能性を示す測定データが得られている真っ最中である。

トピックが変わり、原子核とニュートリノの相互作用断面積を更に良く理解するために、ベータビームの利用が議論された。名前の由来は、ベータ崩壊原子核を加速して、そこから低エネルギーの(反)ニュートリノビームを取り出すことから来ている。CERNならば強力な純度の高いニュートリノビームを生成するポテンシャルがあり、それを利用すれば反応断面積のみならず、ニュートリノの磁気双極子などの探索も行える可能性がある。

KamLANDのおかげでようやく検証の可能性が見えてきた、地球ニュートリノの議論もあった。地球は30-40TWの熱源であるのだが、少なくともこの半分はウラン、トリウム、カリウムといった天然放射性元素によるものだと考えられている。カムランドの測定結果からはウラン、トリウムの熱出力に強い制限を与えず0-100TW相当と無矛盾である。

LFVの話として、ミューオンを用いた実験が紹介された。MEG、MECO、PRISM、Muon factoryの紹介があった。MEGはミューオンが電子と光子に崩壊するモードを探索するが、分岐比として 10^{-13} を狙っている。雑な表現であるが、同じ数字に換算すると、MECO、PRISMはそれぞれさらに1.5桁ほど高い感度を目指していると言っている。

2日目はSKの大気ニュートリノの結果で始まった。SKIIでは既に312日分のデータが解析され、SKI

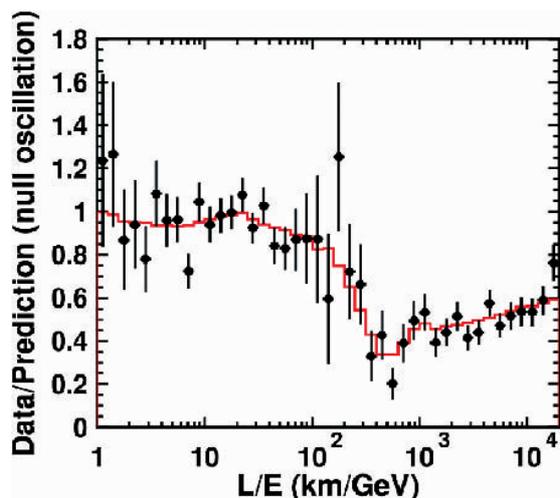


図2 SKで観測された、ニュートリノが振動している直接の証拠。ディップが見えるのが重要。大きいL/Eでは有限の分解能により振動が平均化されている。E. Kearnsによる。

と無矛盾な結果が出ており、K2K実験の検出器として問題なく活躍できていることを示している。SKIデータ全体の解析結果も最終的な形でまとめられている。論文も一月程度で発表されると言及があった。そこでは様々な改善が盛り込まれている。総数1万2千事象ほどがニュートリノ振動解析にかけられた結果、ベストフィットは $2.1 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 、 $\sin^2 2\theta = 1.02$ であった。ただしベストフィット付近では Δm^2 に対する χ^2 の振る舞いはかなり平坦なことから、ベストフィットの数字そのものには注意すべきであるとのコメントとともに、90%の信頼度では $1.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2 < \Delta m^2 < 3.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ 、 $\sin^2 2\theta$ は0.92以上という数字も出された。所謂L/E解析も報告された。これはニュートリノの振動パターンを直接観測するため特別に工夫された解析である。振動パターンを観測するために、荷電粒子の方向とエネルギーから飛行距離とニュートリノのエネルギーを精度良く推定できる事象を選別することが重要であった。ニュートリノが振動していることを直接示す大変インパクトの強い結果である。3世代解析もほぼ完成に近づいている。

さてK2K実験の登場となる。これも会議直前に記者会見が開かれ、一般にも注目されている。これについては別稿があるので図等を含めた本文を参照いただきたい。2002年には、ニュートリノ振動がない仮説は99%の信頼度で排除する結果を出していたが、今回は99.9%の信頼度でニュートリノ振動の存在を確認でき、かつスペクトルのゆがみも測定されたと報告した。現在までに、予定されている90%程度に相当するデータを得て解析され、SKでは108

事象が観測された。前置検出器を用いた測定に基づいて詳細な解析を行った結果、期待値は $150.9 + 11.6 - 10.0$ となった。解析は事象数、スペクトルの形、系統誤差のファクターの積で表現される最尤法で行われている。ニュートリノ振動が生じていない仮定は、事象数から2.9シグマで否定され、スペクトル形状から2.5シグマ（KSテストの結果は0.11%）で否定され、これらを併せた解析では3.9シグマなどという強い統計的信頼度で否定されることになった。ニュートリノ振動の解析の結果については、ベストフィットは $2.73 \times 10^{-3} \text{eV}^2 \sin^2 2\theta = 1.00$ が得られている。この振動のパラメータと測定結果が無矛盾であること、K2KIとK2KIIが無矛盾であること、そして大気ニュートリノの解析結果とも無矛盾であることが示された。隣に座っていたSmirnovが、思わずブラボー、と叫んだのも良く理解できる。今回の会議を彩る大きな発表であった。

加えてMiniBOONの報告があった。これはLSNDの結果を確認する実験であるが、距離とエネルギーを10倍にして、異なる系統誤差の下で測定を行うことを主眼にしている。すでに計画されているうちの28%ほどのデータが取得されており、ニュートリノ束、検出器特性、シミュレーションの調整が進められている。来年には結果を出すことを目標にしているようだ。

3日目からはニュートリノ質量の直接測定について紹介する。現在の所Mainzが 2.3eV 、Troitskが 2.1eV の上限値（それぞれ95%信頼度）を得ているが、統計とエネルギー分解能の向上が期待されている。ここで登場するのが計画中のKATRINである。0.2eVに到達することを狙う実験装置は、ビームライン70mの一部に10ギガベクレルほどのトリチウムガスを導入し、差動真空排気により窓なしの線源を実現する。目玉は直径10メートル、長さ22mにもわたる電子用静電分光計である。磁場と電場を用いて、興味のあるQ値付近の電子だけを通すことにより、高い統計を達成する。ただしこの分光装置の真空度は 10^{-9}Pa を達成する必要があるとのことであった。

4日目のトップバッターはMoとSeの結果を出してきたNEMO3であった。2003年2月からデータ収集を開始し、約7kgの ^{100}Mo と、約1kgの ^{82}Se が測定を中心となっている。ニュートリノを伴う2重ベータ崩壊は1.5分に1事象の頻度できれいなトラックとともに計測され、十数年前から考えると驚くばかりの装置である。ニュートリノ放出を伴わない2重ベータ崩壊については、V-Aの通常の理論

に対して Mo からは半減期 3.5×10^{23} 年以上、ニュートリノの有効質量に対しては $0.7\text{--}1.2\text{eV}$ 以下 (90%信頼度) が報告され、Se からは 1.9×10^{23} 年以上、 $1.3\text{--}3.6\text{eV}$ 以下 (90%信頼度) が報告された。今後、バックグラウンドの多数を占めるラドンを減少する改善が行われたため、さらに高い感度で計測が可能となる。

CUORECINO も NEMO と競争している 2 重ベータ探索実験である。酸化テルルのボロメータを用いた、エネルギー分解能の極めてよい (FWHM 3keV 程度) 検出器である。年を追うごとに酸化テルルの質量を指数関数的に伸ばし、現在は 40.7kg に達する。現在半減期 7.5×10^{23} 年以上、電子ニュートリノの有効質量換算 $0.3\text{--}1.6\text{eV}$ 以下 (90%信頼度) という結果を出している。今後装置を拡張して 750kg の酸化テルルを用いた CUORE が計画されている。電子ニュートリノの有効質量に対して一桁強の改善が期待されている。

Heidelberg Moscow は 2 重ベータ崩壊探索実験から電子ニュートリノの有効質量 0.3eV 程度に有意な信号が見られると報告してきた。この論争に関して筆者はすべてを記述する能力も紙面のスペースもないが、緊急にこの実験を凌駕する実験が待望されるのは明らかである。ニュートリノがマヨラナ性を持つのか、この質問は極めて大きな意義を持つため、是非早急に解決すべきことである。

さてここからは将来のニュートリノ振動実験のセッションとなる。MINOS は Fermilab の NuMI ビームを使った実験で、ニュートリノ振動そのものを捕らえ、 Δm_{23}^2 、 θ_{13} などの測定を目指している。ビームラインは着々と建設され、今年12月には最初の POT (proton on target) が記録されると期待されている。Soudan 鉱にある遠置検出器は昨年7月から運転しており、宇宙線ミューオンによる月の影、上向きミューオン、コンテインド事象などによる大気ニュートリノの観測が行われている。後者はまだ事象数が少ないが、ミューオンの電荷が測定できるため極めて面白い。来年早々には良いニュースを聞けるようである。

OPERA は2006年実験開始に向けて準備を進めている。ミューニュートリノが振動して発生するタウを観測するのだが、5年の測定で4シグマの有意味で見えると期待されている。ビームの側は、穴や崩壊パイプは問題なく建設されている。遠置検出器の二つのスーパーモジュールのうち、一つの磁石は建設完了。エマルジョンの側は名古屋大学とヨーロッパのチームの努力により自動スキャン装置が完成し

つつある。そのほかのコンポーネントに関しても着々と進んでいる印象であった。

ICARUS の最近の動向としては、この夏にはグランサッソのホール B に T600 を導入することになっているとのことであった。来年10月のコミッションングに向けて準備が進められている。

T2K 実験はご存知のように JPARC から神岡に向けた大強度のニュートリノビームを利用したニュートリノ振動実験である。ビームの軸をずらすことにより、単色に近いエネルギーを持った、しかも大強度のニュートリノを発生できる。この斜ビーム上および主ビーム上に、前置検出器を置いてビームをよく理解し、SK で検出した事象の解析を行う。 Δm_{23}^2 も混合角も、大気ニュートリノの観測より一桁良い精度で測定できる。また、 $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定も、 0.006 以上ならば感度がある。ビームラインでは、超伝導磁石を使ったアーク部、 60kJ/spill のショックを受けるターゲット、崩壊トンネルなどの設計、研究開発が急ピッチで行われている。2009年には物理ラングが開始される予定である。日本がニュートリノ物理で先頭を走り続けるためにも、極めて高い重要度を持つ計画である。

原子炉を用いた θ_{13} 測定実験の計画が報告された。同一の二つの検出器を、原子炉から違う距離に置くことによって高い精度で測定を行う計画である。世界中に候補地が7つほど挙げられ、検討が重ねられている。アメリカ、日本、ヨーロッパの候補地が細かく紹介された。この種の実験は、二つの検出器の同一性を如何にコントロールするかが重要である。ヨーロッパの Double Chooz は、2008年に実験を開始したいと考えており、フランス側から200万ユーロ程度の費用が認められたようだ。T2K などの加速器を用いた実験より先んじて結果を出すことができればインパクトが強いと思われる。

これに続いて、さらなる将来に期待されるニュートリノファクトリーに話題が移った。この場合、ニュートリノの純度が非常に高く、 θ_{13} の測定や、CP 非保存の成分の測定が可能になると考えられる。今後の研究開発に注意を注ぎたい。これとは違って、K2K 実験のように、パイオンを生成しそこからのニュートリノビームを作る方法で強度をさらに高いレベルに上げることによる実験計画の議論がなされた。これから10年ほどの間に、メガワットクラスのビームと、SK 程度の大きさの検出器を用いた第2世代実験、さらにその先の10年間には、第2世代実験の θ_{13} の結果をにらみながら数メガワット、メガトンクラスの検出器の組み合わせで CP 非保存や

ニュートリノ質量の階層性を探る実験が考えられている。ビームのみならず、検出器の系統誤差が十分コントロールされる環境が必要となる。

5日目はニュートリノ望遠鏡、大気を使った検出器が議論された。バイカル実験からは、大気ニュートリノ、WIMP、モノポール、GRB起源ニュートリノ探索などが報告された。AMANDAは宇宙線、暗黒物質探索、超新星モニター（ノイズの増加のように見えることが期待される）の報告があった。WIMP探索では、地球の中心から来るニュートリノを見るが、この解析結果はSKの最新の成果よりも感度が高い。他、いくつもの大規模ニュートリノ観測実験のR&Dが進められている。特にIceCubeはAMANDAよりも大きく、角度分解能、エネルギー分解能を高める計画である。ストリングと呼ばれる縦のPMT群を2010年までかけて80本投入する予定である。アメリカを始め各国の予算も順調についてきている。来年にはストリングを配置し、次のニュートリノ国際会議までには最初のデータを出すとのことであった。

Augerは大気蛍光と宇宙線粒子を同時に観測することにより、これまでのGZKカットオフの問題の解決を狙う。アルゼンチンに1,600個の水チェレンコフタンクと、4箇所の大気蛍光検出器を置く予定である。すでに341個の水タンクと、1/3ほどの望遠鏡が設置済みであった。実際2種類の検出器で同時に取れたステレオ事象も見せ、来年の夏までには最初の結果を出すとのことであった。EUSO実験は宇宙から地表を観測する広大な計画である。2010年には打ち上げを狙っているが、ESAの2012年までの優先順位リストにはEUSOが含まれていないらしい。これはAugerの結果を待てということだという。

暗黒物質については、レビューの後、CDMSIIの結果が発表された。CDMS実験は以前スタンフォードの浅い地下で実験を行ってきたが、昨年からはSoudan 鉱で実験を行っている。今回は1kgのゲルマニウム結晶の、53日分のデータの解析結果が発

表された。表面付近でエネルギーが付与されると、区別が曖昧になるため、もう一つの情報、温度上昇の時定数を用いた解析が行われている。解析は二通りあるのだが、いずれにしてもこれまでの暗黒物質探索で得られた原子核・WIMP散乱断面積に対する制限より4倍良い結果となっている。バックグラウンドがほとんどないので、これから結晶の量を増やして測定することにより、10倍から20倍の感度の上昇が期待されている。

最終日の最初のトークでは暗黒物質探索の、直接測定と間接測定の比較がなされた。暗黒物質がSUSY粒子であるとした場合、その質量と、ゲージ成分の2次元平面上で評価した場合、領域によっては直接検出が優位な場所や、間接検出が優位な場所が出てくる。関節検出の場合でも、どのような粒子を観測するかによって、有利な領域も変わってくる。要するにそれらの手法はかなり相補的であり、さまざまな手法を用いることにより広いパラメータ空間の探索が行えるということであった。

SKで超新星ニュートリノをさらに高感度で探索する提案があった。SKに塩化ガドリニウムを0.2%溶かし込むことにより、反電子ニュートリノが陽子と反応して発生する中性子を高い感度で検出し、ほぼバックグラウンドフリーな反電子ニュートリノ検出器にする提案であった。残骸超新星ニュートリノに対するSKの結果は、最新の計算結果ではあといくばくかで発見に至る可能性が高く、非常に興味が持たれている。特に超新星が生じる2日ほど前の、シリコン燃焼が開始する際に放出されるニュートリノが検出できる可能性は非常に興味深い。ただし水の光の透過率の問題、純水装置とどのように共存するのかなどの解決を待つ必要がある。

今回の会議では、KamLAND、K2K、SKといった日本勢が大活躍であった。ただし世界中の多数の実験がこの数年の間に走り始め、数年以内に結果が出始めるものがいくつかありそうである。次回の会議も白熱したものになりそうである。次回は2006年にメキシコのサンタフェで開催される。

自己紹介



亀田 純
(神岡助手)

今年4月より神岡宇宙素粒子研究施設に着任しました亀田純です。大学院で神岡において大気ニュートリノによるニュートリノ振動の研究を、

ポスドクとして引き続き約1年半を同じく神岡で研究をしていました。続く約1年半をつくば市の高エネルギー加速器研究機構において長基線ニュートリノ振動実験(K2K実験)およびJPARKに向けたR&Dに参加していました。宇宙線研究所の一員として、また一緒に研究する機会を頂き、大変に嬉しく思っております。よろしくお願いいたします。



川崎雅裕
(理論教授)

2004年5月1日付けで理論グループに来ました川崎雅裕です。約5年間本郷の大学院理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センターにいましたがその前は約7年間田無に

あった宇宙線研究所に在籍していました。場所は田無から柏に変わりましたが研究所メンバーは田無の頃からの知り合いも多く、とても懐かしく感じます。

理論グループは若い研究者が多数いてとても活気があります。私はもう若いとはいえない歳になってしまいましたが、若い人たちと一緒に努力して理論グループを発展させていきたいと思っております。所内の実験の方とも議論する機会を多く持ちたいと思っておりますのでよろしくお願いいたします。



吉越貴紀
(カンガルー助教授)

5月1日付でカンガルーグループに来ました吉越です。宇宙線研カンガルーグループは田無時代に研究員としてお世話になった古巣で、馴染みの顔も多く懐かしいのですが、

現在は柏に移転しているため生活環境はとても新鮮に感じます。

宇宙線研を離れた4年半の間は大阪市立大学に在籍し、インドで空気シャワーアレイ実験をやったり、アリゾナやニューメキシコでガンマ線観測実験をやったりと、様々な経験をさせていただきました。カンガルーを含め、一貫してガンマ線を探針とした宇宙線起源の研究に取り組んでいます。私が不在の間にカンガルーの方は4基の望遠鏡からなるステレオシステムを完成し、現在は良質のデータが出るようになりました。望遠鏡の建設にあまり貢献できなかった分、今後実りの収穫に精進していく所存です。よろしくお願いいたします。

人事異動

発令日	氏名	異動内容	現(旧)官職
H16. 3. 31	吉村 太彦	定年退職	所長
〃	赤石 眞	定年退職	経理課課長補佐
H16. 4. 1	亀田 純	採用	神岡助手
〃	鈴木 洋一郎	兼務	所長
〃	黒田 和明	兼務	副所長
〃	瀧田 正人	兼務	附属乗鞍観測所長
〃	福島 正己	兼務	附属明野観測所長
〃	鈴木 洋一郎	兼務	附属神岡宇宙素粒子研究施設長
〃	梶田 隆章	兼務	附属宇宙ニュートリノ観測情報融合センター長
〃	森 正樹	兼務	総長補佐
〃	中塚 数夫		企画課長(経理部主計課課長補佐)
〃	井上 幸太郎		庶務課長(学務課長)
〃	白勢 祐次郎		学務課長(総務部人事課課長補佐)
〃	日向 知実治		経理課副長(史料編さん所総務主任)
〃	羽野 敦子		柏図書館研究情報係長(庶務課学術情報掛長)
〃	羽田 勇雄	転出	情報基盤センター事務長(企画課長)
〃	覺 張 邦夫	〃	史料編さん所事務長(庶務課長)
〃	坏 陽子	〃	教養学部等事務部総務課庶務係長(庶務課人事掛主任)
〃	大橋 正浩	〃	生産技術研究所事務部総務課庶務係長(庶務課共同利用掛主任)
〃	篠田 恵美	〃	総務部企画課企画係長(学務課教務掛主任)
〃	守口 広美	〃	生産技術研究所事務部総務課国際交流係長(駒場事務分室総務掛主任)
H16. 5. 1	川崎 雅裕	配置換	宇宙基礎物理研究部門教授(大学院理学系研究科附属ビックバン宇宙国際研究センター教授)
〃	吉越 貴紀	採用	高エネルギー宇宙線研究部門助教授(大阪市立大学大学院理学研究科講師)
H16. 6. 1	塩澤 真人	昇任	神岡施設助教授(神岡施設助手)

ICRR-Seminar 2004年度

- 4月19日(月) 柿崎 充氏 (宇宙線研究所)
“Flavor structure in supersymmetric models”
- 4月22日(木) 浅岡陽一氏 (宇宙線研究所)
“Ashra 実験：検出器開発の現状”
- 4月23日(金) Alexei Yu. Smirnov (東京都立大学/
International Centre for Theoretical
Physics, Trieste/Institute for Nuclear
Research of Russian Academy of Sci-
ences)
“Toward precision measurements in solar neutrinos”
- 4月26日(月) 瀬波大土氏 (宇宙線研究所)
“Neutrino mass and Leptogenesis via multiscalar
field evolution”
- 5月10日(月) 高橋 智氏 (宇宙線研究所)
“Toward Understanding the Dark Side of the Uni-
verse”
- 5月13日(木) Dr. Ralph Engel (Institute of Nu-
clear Physics, Forschungszentrum
Karlsruhe)
“Status and Prospect of the Pierre Auger Project”
- 5月17日(月) 原田潤平氏 (宇宙線研究所)
“Hypercharge and baryon minus lepton number In E
_6 GUT
- 5月24日(月) 松本重貴氏 (宇宙線研究所)
“Explosive Dark Matter Annihilation”
- 6月9日(水) 金行健治氏 (宇宙線研究所)
“K 2 Kの新しい結果”
- 6月14日(月) 北野龍一郎氏 (プリンストン高等研
究所)
“Anomaly mediation, electroweak symmetry break-
ing and baryo/leptogenesis”

ICRR-Report 2004年度

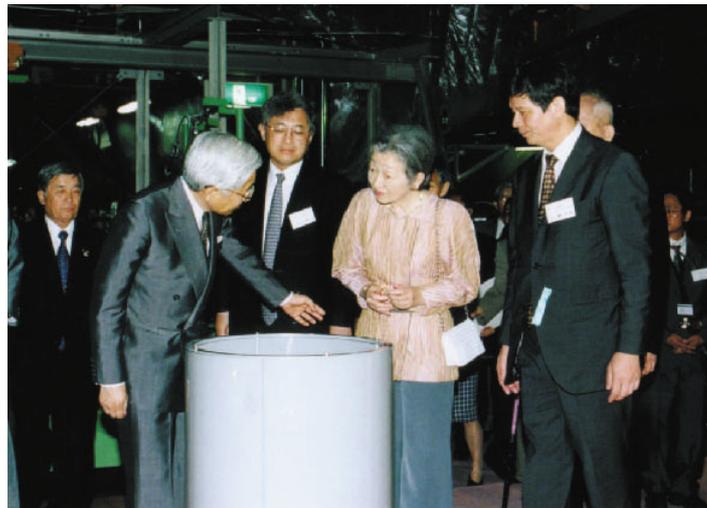
- ICRR-Report-503-2004-1 (February 4, 2004)
“L/E analysis of the atmospheric neutrino data from
Super-Kamiokande”
Masaki Ishitsuka
- ICRR-Report-504-2004-2 (June 20, 2004)
“Hadronic EDMs induced by the strangeness and
constraints on supersymmetric CP phases”
Junji Hisano and Yasuhiro Shimizu



コントロール室前で鈴木所長と小柴名誉教授による説明、ビデオ上映があった。



説明をお受けになる天皇皇后両陛下



装置内部をご覧になる天皇皇后両陛下

No.55

2004年 7月22日

東京大学宇宙線研究所

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉5-1-5

TEL (04) 7136-5106又は5137

編集委員 大橋正健 奥村公宏