



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/cat-icrr/>) からでも御覧になれます。

CONTENTS		
運搬体搭載用精密重力勾配計の開発状況の報告.....	潮見 幸江	1
テレスコープ・アレイ (TA) 実験の絶対エネルギー較正のための小型電子線形加速器の始動.....	芝田 達伸	6
平成21年度技術職員研修の報告.....	佐川 宏行	10
T2K 実験開始.....	塩澤 真人	12
人事異動.....		16
ICRR-Seminar.....		16
ICRR-Report.....		16

研究紹介

運搬体搭載用精密重力勾配計の開発状況の報告

潮見 幸江

【宇宙線研究所】

1. 背景

重力加速度の局所的変化を高精度で測定することは、ジオイドの決定や地殻構造、地震断層、火山活動調査など測地・測量、地球物理・地質学研究において重要な課題である。現在主流の測定は、飛行機や船などの運搬体上にバネ型重力計を搭載して行われている。バネ型重力計はバネの伸び縮みによって重力の相対変化を決定するが、バネを通しておもり（テストマス）が運搬体と接触しているため、運搬体上での測定値には運搬体の加速度が含まれる。測定する重力変化と運搬体の加速度の周期が異なる場合は、適切なフィルター処理を行うことによって二つの項を分離することが可能であるが、一般的には運搬体の加速度を測定し、測定値から差し引く必要

がある。そのため運搬体の加速度の測定限界である数百 μGal より良い精度で重力変化を求めることができないという問題点があった。この測定限界を打開すべく、宇宙線研究所では弱い等価原理（自由落下の普遍性）の検証に利用された測定原理^{1,2)}（第2章参照）を応用することによって、原理的に運搬体の運動の影響を受けない重力勾配計が考案された³⁾。その重力勾配計の測定原理と開発状況を以下に報告する。測定感度としては、運搬体上の測定で既存のものより約2桁よい数 μGal ($= 10^{-8} \text{ m/s}^2$) の分解能を目指す。

2. 測定原理

本研究で開発する重力勾配計の測定方式は自由落下型干渉計である。自由落下型干渉計は、レーザー

干渉計の腕の一つを構成する光学素子（一般にコーナーキューブプリズムあるいはコーナーリフレクターが使われる）を搭載したテストマスを真空中で自由落下させ、落下距離の時間変化を干渉計で測定する。現在、測地学・地球物理学分野に関わる絶対重力測定で多く利用されているのは Micro-g LaCoste 社の自由落下型干渉計 (FG5)⁴⁾である。 μGal レベルの高い精度で重力の絶対値を決定することができるが、振動のない実験室での使用が前提となっている。またバネ型重力計と同様に、原理的に運搬体上での測定値には運搬体の加速度が含まれるた

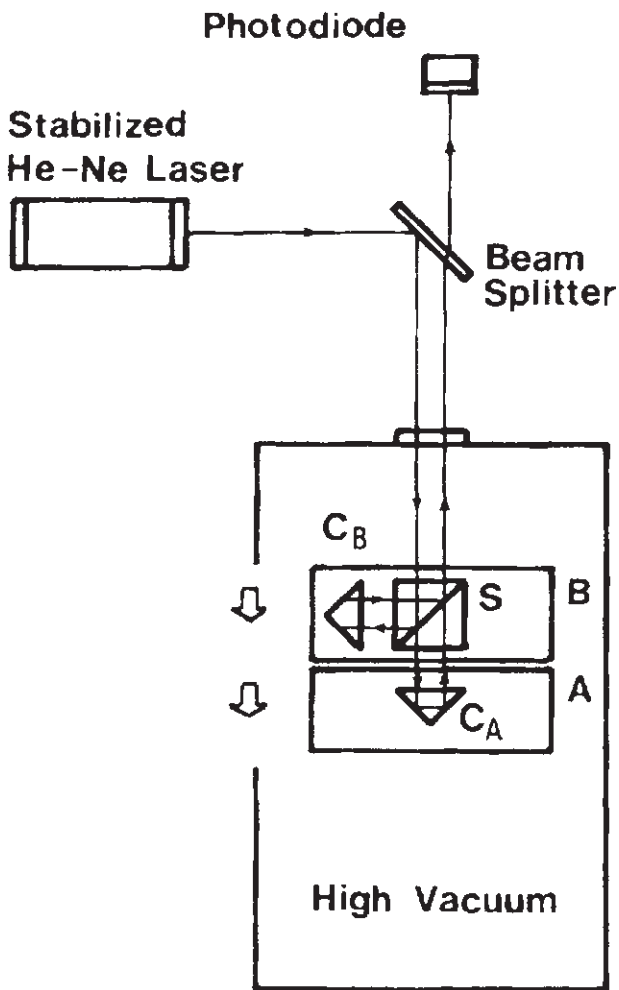


図1：重力勾配計の概念図（参考文献1）より引用

二つの落下体 (A と B) を自由落下させ、その自由落下加速度の差をレーザー干渉計で測定する。落下体 A にはコーナーキューブプリズム (C_A) が固定され、落下体 B にはビームスプリッター (S) とコーナーキューブプリズム (C_B) が固定されている。 C_B と S 間の距離は固定されているため変化しないが、 C_A と S 間の距離は自由落下中に局所的な重力場の影響を受け変化する。この変位の時間変化に伴う干渉縞の位相のずれを Photodiode で検出することによって重力勾配を求める。

め、装置そのものも高精度での測定をすることは難しい。

本重力勾配計では、レーザー干渉計の腕の一つを構成する光学素子（コーナーキューブプリズム）を搭載したテストマス（落下体 A）と他方の腕を構成する光学素子（コーナーキューブプリズムとビームスプリッター）を搭載した基準系（落下体 B）を同時に自由落下させ、自由落下に伴う基準系に対するテストマスの変位の時間変化を干渉計で測定することによって、二つの落下体の落下加速度の差を求める（図1参照）。差を求めることによって、二つの落下体に共通する効果（例えば、運搬体の加速度や地球重力場の効果）は差し引かれ、局所的な質量分布による重力勾配を求めることができる。このように差動測定を行うことによって二つの落下体に共通する効果を相殺し、原理的には運搬体の運動の影響を受けない点が本重力勾配計の特徴である。

この測定原理は化学組成の異なる二つのテストマスの自由落下加速度に差異がないことを検証する（弱い等価原理の検証実験）ために黒田・三尾によって用いられた手法に基づいている^{1,2)}。弱い等価原理の検証実験では重力勾配の影響を避けるために二つの落下体の重心が一致するように工夫されていたが、本重力勾配計では鉛直方向の重力勾配を測定するため、二つの落下体の重心を約70 cm 上下に分離した設計となっている。装置の詳細は第3章に述べる。

3. 装置の概要

重力勾配計の概略を図2に示す。二つの落下体 A と B を鉛直方向に約70 cm 離して台に置き、その台を電磁アクチュエータを用いて上下に駆動し、台の上下運動に伴う抗力を受けた落下体 A と B は上方に投げ上げられるという仕組みになっている。落下体 A にはコーナーキューブプリズム (CCP) が一個固定されており、落下体 B には CCP が一個とビームスプリッター一個が図2のように固定されている。周波数安定化 He-Ne レーザーからの入射光は落下体 B に固定されたビームスプリッターで2分割され、一つは落下体 B に固定された CCP で反射され、もう一つは落下体 A に固定された CCP で反射される。投げ上げ運動中にこの二つの反射光の干渉縞をフォトダイオードで検出することによって、落下体 AB 間の距離の時間変化を測定する。投げ上げ機構と投げ上げ機構を設置した真空槽の外観を写真1に示す。

本重力勾配計の特徴の一つとして、投げ上げ式を

採用している点がある。黒田・三尾による等価原理の検証実験では単純自由落下型のリリース機構が用いられたが、本重力勾配計では運搬体上での測定を

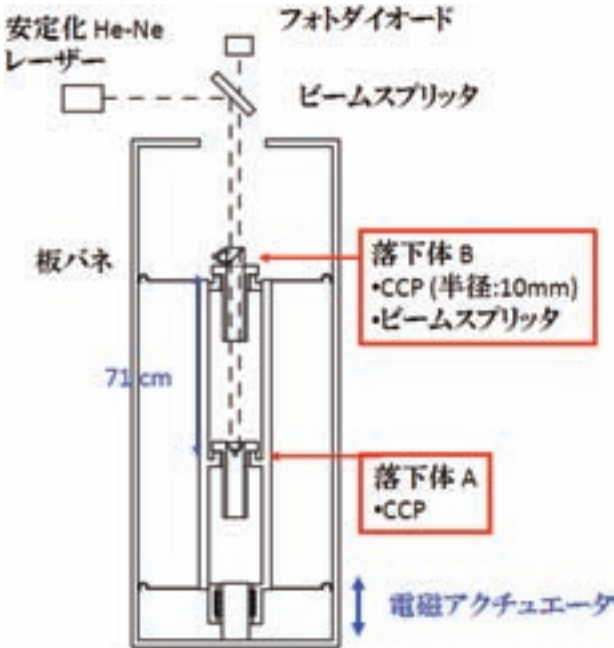


図 2：開発中の重力勾配計の概略図

コーナーキューブプリズム (CCP) を固定した落下体 A と CCP とビームスプリッタを固定した落下体 B を台の下段と上段に置き、その台を電磁アクチュエータで上下に運動させることによって落下体を投げ上げ、落下加速度の差をマイケルソン干渉計で測定する。板バネは台の運動を上下方向に制限する役割をする。(詳細は本文を参照)

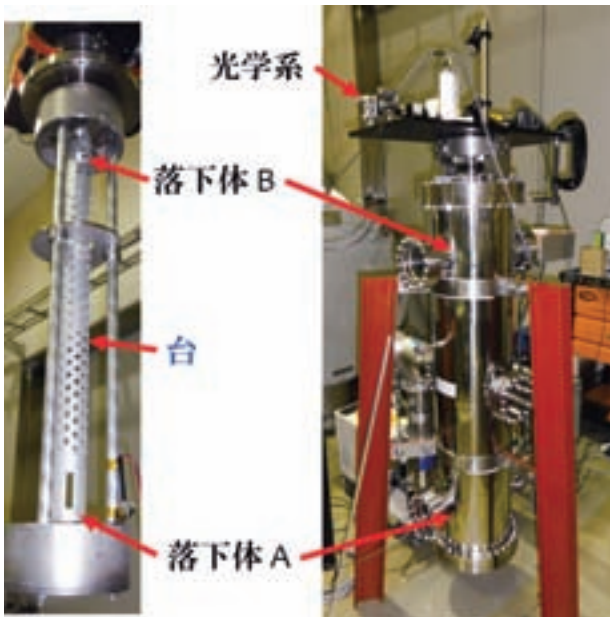


写真 1：投げ上げ機構（左）と投げ上げ機構を挿入した真空槽の外観（右）。落下体は矢印で示された位置に設置されている。

想定しているため、離陸に伴う落下体姿勢の振れが小さく短時間で離陸のセットアップをすることができる投げ上げ機構を採用した⁵⁾。投げ上げ式重力計は1970年代から佐久間らによって開発された(6)中の参考文献参照)。投げ上げ時の姿勢制御が難しいという問題点があるが単純自由落下に比べて(1)落下体の上昇時と下降時で等しいノイズ(残留気体の抵抗など)を相殺することができ高真空の必要がない(2)投げ上げ距離を短くすることができるため小型化が可能である(例えば2cmの投げ上げの測定時間は8cmの自由落下に相当する)などの装置設計上の利点がある。

4. 主なノイズ源

黒田・三尾による等価原理の検証実験では、振動の少ない静かな実験室での測定で二つの落下体の加速度の差を μGal レベルの精度で決定した。その際の実験セットアップの主なノイズを表1にまとめる。真空系及び電磁気的影響による環境ノイズは $0.3 \mu\text{Gal}$ 以下であるが、落下体の速度の水平成分の影響が測定結果に $1 \mu\text{Gal}$ 程度の誤差を与えた。重力勾配計に於いても同様に環境ノイズは十分に小さくすることが可能であるが、落下体の姿勢に関わるノイズは運搬体上での測定では実験室の測定以上に十分な注意を払う必要がある。そこで、落下体の回転と速度の水平成分に関わる誤差を $1 \mu\text{Gal}$ 以下に収

表 1：黒田・三尾による等価原理の検証実験における主なノイズ源(参考文献2)より引用)

ノイズ源	誤差の大きさ
真空系 ・ 残留気体 ・ 圧力勾配	$< 0.3 \mu\text{Gal}$ $< 0.3 \mu\text{Gal}$
静電力	$< 0.01 \mu\text{Gal}$
磁気力	$< 0.1 \mu\text{Gal}$
光学系(落下体の姿勢) ・ 落下体の回転(角速度) ・ 速度の水平成分に因ると考えられる	約 $0.1 \mu\text{Gal}$ 約 $1 \mu\text{Gal}$ (統計誤差)

表 2：落下体の投げ上げに関わる許容誤差

ノイズ源		許容誤差
落下体の回転	重心と光学中心のずれ	$50 \mu\text{m}$
	角速度	14 mrad/s
速度の水平成分	投げ上げ距離 2 cm	0.001 m/s
	ビームの非鉛直性	0.1 度

めるための装置設計上の許容誤差を評価した(表2)。

落下体の回転による加速度ノイズは角速度の二乗及び落下体の重心と光学中心のずれに比例する。花田の報告によるとそのずれを50 μm 以内に一致させることが可能である⁷⁾。1 μGal の分解能に達するには、ずれが50 μm の場合は落下体の角速度が14 mrad/s 以下である必要がある。速度の水平成分 (v_x) については、投げ上げ距離が2 cm、ビームウエスト2 mm、検出器半径1 mm の場合を仮定してシミュレーションを行った結果、 $v_x=0.001$ m/s 以下である必要があることがわかった。この速度の水平成分は光学系のビームの進む方向と自由落下の方向が0.1度以下である必要があることを示唆している。

5. 角速度の測定

前述の通り、落下体の角速度が誤差の主要因の一つとなると考えられるため、まず市販の電磁スピーカーを用いて台を駆動する初歩的な投げ上げ機構を製作し角速度の測定を行った。その後製作した

電磁アクチュエータと板バネを用いた投げ上げ機構(写真1)でも同じ手法で角速度の測定を行った。その結果を表3にまとめる。

角速度は、投げ上げに伴う鏡の傾きの時間変化を落下体の下部に接着した鏡に外部よりレーザー光を入射し、その反射光の位置を4分割フォトダイオードで検出することによって求めた(図3)。測定は大気中で行われた。

測定結果の一例として、図4に7.5 Hz のサイン波を電磁アクチュエータに入力して台を上下に駆動することによって落下体を投げ上げた際のフォトダイオードの出力電圧を示す。赤線は落下体の y 軸まわりの回転、青線は x 軸まわりの回転に比例した出力電圧の大きさの時間変化を表す。赤線に注目すると、離陸後 y 軸まわりの傾きが時間に比例して大きくなり、その後空気抵抗の影響でふら付き、着陸する様子がわかる。x 軸まわりに関しては離陸直後の時間に比例した回転はほとんど見られなかった(青線)。空気抵抗の影響を受ける以前の y 軸まわりの回転の

表3：角速度の測定結果

市販の電磁スピーカーを用いて駆動した旧投げ上げ機構と第3章に記述した新しい投げ上げ機構を用いて台を上下に駆動した場合の比較。台の傾きは、台が下にある時と上に移動した時の水平レベルの差を表す。台の傾きの測定は落下体の投げ上げが起こらない(落下体が台を離陸しない)低周波のサイン波(3 Hz)で台を駆動して行った。角速度の予測値は測定した台の傾きによって付与される角速度の大きさで、実測値は図3にある手法で測定した結果を示す。

	上下運動に伴う台の傾き (サイン波 3 Hz で駆動)	角速度 (サイン波 7.5 Hz 1.4V で駆動)	
		予 測 値	実 測 値
旧投げ上げ機構 (市販の電磁スピーカーで駆動)	0.33 mrad (駆動信号の振幅 1.4 V)	10 mrad/s	8.0 mrad/s
新投げ上げ機構 (第3章に記述)	0.09 mrad (駆動信号の振幅 2.4 V)	2.7 mrad/s	2.4 mrad/s



図3：角速度測定実験のセットアップ

レーザー光源より落下体下部に接着した鏡に光を入射し、その反射光を4分割フォトダイオードで検出することによって落下体の傾きを測定する。

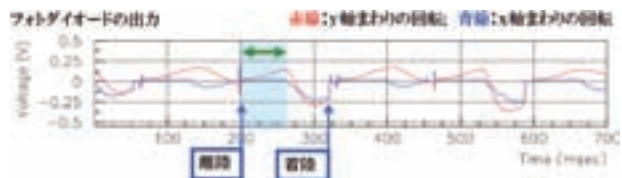


図4：角速度の測定結果

電磁アクチュエータに7.5 Hz のサイン波を入力して台を上下に駆動することによって落下体を投げ上げた際の落下体の傾きに比例したフォトダイオードの出力電圧の時間変化を示す。落下体の離陸後、y 軸まわりの傾き(赤線)は時間と共に増加し空気抵抗の影響を受け着陸するが、x 軸まわりの傾きはほとんど見られなかった(青線)。離陸後の y 軸まわりの時間に比例した傾きの増大(矢印)から角速度を求めた。

時間変化から角速度を求めた結果、2.4 mrad/s であった。電磁スピーカーを用いた旧投げ上げ機構でも同様の手法で8.0 mrad/sを得た。旧新ともに許容角速度の14 mrad/s(表2)より十分小さい値を得た。

落下体の投げ上げが起こらない(落下体が台を離陸しない)低周波のサイン波(3 Hz)で台を駆動して上下運動に伴う鏡の傾きを調べることによって、台が上にあるときと下にあるときの水平レベルの違い(つまり、上下運動に伴う台の傾き)を求めた。表3にある角速度の予測値は、測定した台の傾きによって付与される角速度の大きさを推定したものである。実測値と推定値が大幅にずれていないことから角速度の主な原因が台の傾きであると考えられる。

旧新の投げ上げ機構を比較して、上下運動に伴う台の傾きと落下体の角速度は共に約30%以下に改善されており、台の傾きを小さくすることによって、落下体の角速度の大きさを削減できることがわかる。

6. 現状と今後の課題

現在新しい落下体の投げ上げ機構⁵⁾を搭載した重力勾配計の試作品(写真1)を用いて、真空中で投げ上げを行い干渉縞の観測をすることができる状態にある(図5)⁸⁾。今後、投げ上げ挙動の最適化を

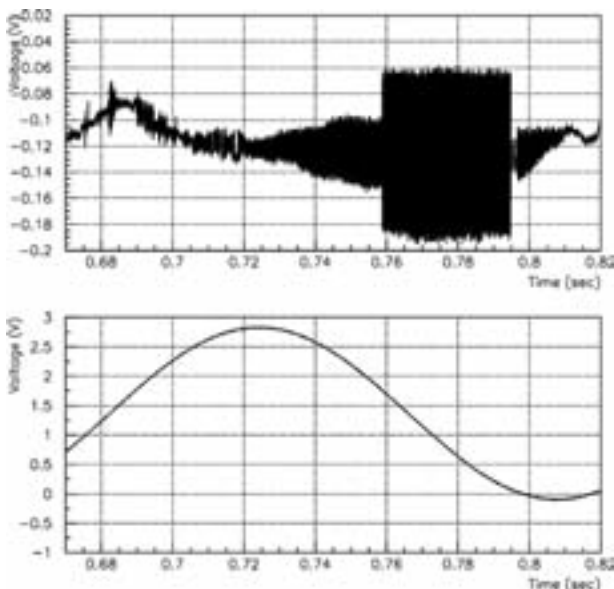


図5：真空中での投げ上げ試験で観測された干渉縞(上)と投げ上げ機構の駆動信号(下)
台が上方に駆動して落下体が投げ上げられ、干渉縞を形成している。

行い、実験室の測定で目標感度に到達することを目指す。その後は、運搬体上の測定においても目標感度に到達するために、落下体の落下方向と光学ビームの進行方向を一致させる制御システムを開発し、目標感度を達成する重力勾配計の試作品を完成することを目指す。

7. 展望

この重力勾配計が実用化されると、運搬体上での重力変化の測定精度が既存のものより約2桁向上するため、ジオイドの精度向上、地下資源の探索、海底地質学、海底断層・火山活動調査、海洋潮汐モデルの開発などの測地学・地球物理学関連の研究に多面的に貢献することが期待される。特に、世界有数の火山・地震国である日本では防災のための火山噴火予知や地震予知は重要な課題であるため、本重力勾配計を用いた日本全土に及ぶ継続的な測定体制を整えることは重要であると考えられる。需要が多いと考えられる測地学・地震研究関係者らの要望を汲みいれた仕様の開発を行い、較正方法の確立や耐久性の試験など長期観測の実用化に向けた体制を整えていきたい。

本研究は科研費基盤研究(A)によって支援されている。

参考文献

- 1) K. Kuroda and N. Mio, Physical Review Letters 62, 1941 (1989).
- 2) K. Kuroda and N. Mio, Physical Review D 42, 3903 (1990).
- 3) 黒田和明・西村純 重力勾配計測装置 特開2009-115525.
- 4) <http://www.lacosteromberg.com/>
- 5) 2010年6月特許申請.
- 6) 坪川恒也、測地学会誌 50(4)、281-294、2004-12-25 (2004).
- 7) H. Hanada, Applied Optics, Vol. 27, No. 16 (1988).
- 8) S. Shiomi, S. Telada, K. Kuroda, T. Tsubokawa, and J. Nishimura, oral presentation at the 19th international conference on general relativity and gravitation, at Mexico city, Mexico (5-9 July 2010).

研究紹介

テレスコープ・アレイ(TA)実験の 絶対エネルギー較正のための小型電子線形加速器の始動

芝田 達伸

【宇宙線研究所】

1. はじめに

近年、極高エネルギー宇宙線 (Ultra High Energy Cosmic Rays; UHECRs)¹ 観測実験は大きな節目を向かえている。UHECRs は1つの粒子が持つエネルギーとしては人類が観測している中で最も高い領域の一次宇宙線である。しかし UHECRs の核種、生成場所や加速機構は全くの謎である。その謎に迫る実験として、北米・ユタ州にて日米韓露が共同で行っているテレスコープ・アレイ (Telescope Array; TA) 実験、南米・アルゼンチンにてピエール・オージェ (Pierre Auger; Auger) 実験が観測中である。また既に観測は終了しているが、北米・ユタ州で行われていた HiRes 実験の最終結果も報告されており、各実験結果の比較は重要で且つ興味深いものとして注目されている。UHECRs の観測実験で重要な研究課題は UHECRs のエネルギースペクトル解析、発生源の探索²と核種特定である。他にも超高エネルギーガンマ線の探索もある。TA 実験の最新結果については [1] を参照されたい。

2. UHECRs 観測実験におけるエネルギー較正

UHECRs 観測実験において重要な物理量は UHECRs が地球に飛来する時に持っていたエネルギーである。エネルギースペクトル解析は勿論の事、核種特定にもエネルギーの高精度測定が不可欠である。また、将来 UHECRs の発生源が発見された後には発生源からの UHECRs のエネルギースペクトルが重要になる。

UHECRs のエネルギー測定方法は観測方法に依るが、TA 実験、Auger 実験、HiRes 実験が行っている大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector; FD) を用いたエネルギー測定について簡単に示す。宇宙線が

地球に入射した際に空気中の分子と衝突して引き起こす巨大カスケードシャワー中で発生する紫外領域の発光現象 (通称この発光光子を大気蛍光と呼ぶ) を地上に設置された FD で撮像し、検出された光子数からエネルギーをカロリメトリックに測定する。但しこの測定方法には大きな不定性が含まれている。大気蛍光発光量については多くの実験によって測定されているが各実験値にはそれぞれ10%以上の系統的誤差があるばかりか、系統的誤差以上の大きな相違がみられ、統一された発光量というものはない [2]。また大気蛍光は紫外領域の光であるため FD に到達するまでに光子数は大気中での散乱吸収を受け減少する。大気分子によるレイリー散乱が主な原因であるが、ナノメートルからマイクロメートルサイズの大気エアロゾルによるミー散乱の効果も無視できない。この効果に対する系統的誤差は約10%である。そして FD を構成している反射鏡、紫外線通過フィルター、光電子増倍管に対する全系統的誤差は約10%である。これらの不定性によってエネルギーの測定値に対する全系統的誤差は約20%になる [3] [4] [5]。そのため絶対エネルギー較正が非常に重要になるが較正方法はなく、大気蛍光発光量、大気中の減衰、FD それぞれ独立に較正を行うのが一般的である。大気蛍光発光量は実験室で測定された発光量を用いる [3] [5] [6]。大気中での減衰量はレーザーを用いた大気モニターシステムによって決定する [7] [8]。FD については LED や鉛直向きレーザーのような光源を用いて較正を行う [9] [10] [11]。

TA 実験では、大気蛍光発光量は Kakimoto 実験 [12] と Flash 実験 [13] の結果を用いている。大気中の減衰係数はライダーシステムや Central Laser Facility (CLF) によって測定される [14]。また最近になって FD の光子数較正が可能になる可搬式レー

¹ ここでの UHECRs とは 10^{18} eV 以上のエネルギーを持った第一次宇宙線を意味する。

² 発生源探索についてはエネルギーが 10^{20} eV に近い UHECRs に対して可能である。

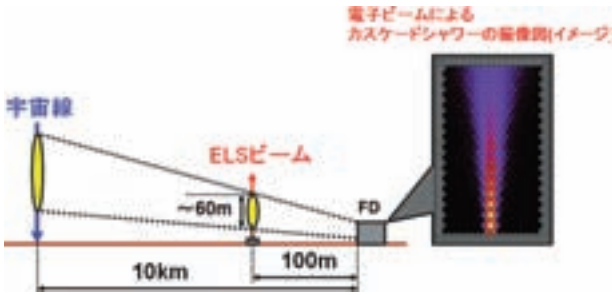


図1：ELSによる空気中の電磁シャワーは10km先の宇宙線によるカスケードシャワーにスケーリングすることができる。但し大気中での光減衰は無視する。

ザーシステムやCLFに追加される新ライダーシステムによる大気モニターシステムの実用化が進んでいる。FDについても鏡の反射率測定の定期的測定を行い、PMTの較正は光源を用いて行っている[15]。

そしてTA実験では大気中の減衰係数を除く大気蛍光発光からFDまでを含めた全ての較正值を一括して較正するための小型電子線形加速器（Electron Light Source; ELS）が製作された。地上に設置された宇宙線望遠鏡を較正する目的で加速器を使用するのはTA実験が世界で初めての試みである。ELSはFDから100mの距離に設置され、加速電子ビームの定格出力は $40\text{MeV} \times 10^9\text{e}^-/\text{pulse} \times 0.5\text{Hz}$ であり、加速電子ビームは空気中に垂直上向きに射出できるように設計されている。エネルギー較正に電子ビームを使用する理由はレーザーシステムでは実現できない空気中の電子のエネルギー損失から大気蛍光発光量も含んだ一括較正が可能になるからである。ELSを用いたエネルギー較正の概要を図1に示す。ELSは2005年4月から高エネルギー加速器研究機構（KEK）にて開発が開始され、2008年1月に完成した。その後、10カ月間はKEK内で試験運転による性能評価を行い、翌年3月、北米・ユタ州のFDサイト（Black Rock Mesa サイト）に移設された。ELSの詳しい構造、開発、性能評価の結果については[16]を参照して頂きたい。

3. ELS 運転のための環境整備

2009年4月から2009年9月末にかけて電力供給の整備、ELS 収納コンテナ、冷却水ユニット収納コンテナ、制御室用コンテナに対する断熱処理、冷却水用配管の整備が行われた。

2009年10月電子銃の真空漏れの有無を確認し、真空漏れがない事を確認した後、真空引きを開始した。真空引きは順調に進み、数日後にはスパッターイオンポンプを用いた超高真空引きの段階に入った。一方、ビームライン上では真空漏れが発見されたため

詳細な真空漏れ箇所の探索を行った。その結果、電子ビームの位置測定をするためのスクリーンモニターに使用されている真空配管の溶接部分が1箇所断裂している事が判明した。断裂した配管はその後KEKに戻され、再溶接を行った。KEKで行った理由は、再溶接によって配管のサイズが僅かに変化する事で新たな真空漏れを引き起こさないよう、真空機器の扱いに慣れた業者に溶接を依頼するためである。配管の修理は無事完了し、配管の再インストールも問題なく完了した。

ELSが移設された直後の2009年4月、ELSに使用されているクライストロンに真空漏れの症状が確認された。クライストロンの真空漏れは即ち交換が必要である事を意味する。しかし全長約1.5m、集束電磁石を含めた総重量は約550kgもある非常に精密な構造体であるために、交換にはKEKのスタッフの協力が不可欠な状況になった。新しいクライストロンはKEKから提供した頂き、2009年12月にはFD観測サイトへの輸送が完了した。交換は後にも述べるが2010年6月に行った。

その他にはELSの制御・監視を行うためのネットワークの構築が行われた。ELSとFD間のネットワークは光ケーブルによって接続され、インターネットを通してELSの監視が可能になった。ELSの制御・監視用のプログラミングの開発も行われた。

ELSは放射線発生装置であるため、放射線管理体制が整えられた。ELSはユタ大学の管理の下で運用され、ユタ大学のスタッフを中心にした放射線管理委員会が組織された。そしてELSサイトの外部フェ

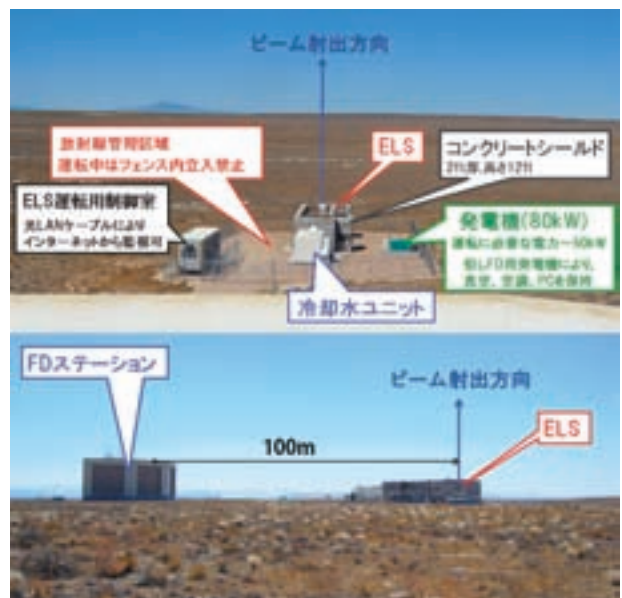


図2：完成したELSの写真(上)とFDとの位置関係の写真(下) 2010年9月5日撮影

2010年9月3日 電子ビームの初の空中射出、及びFDによる初観測

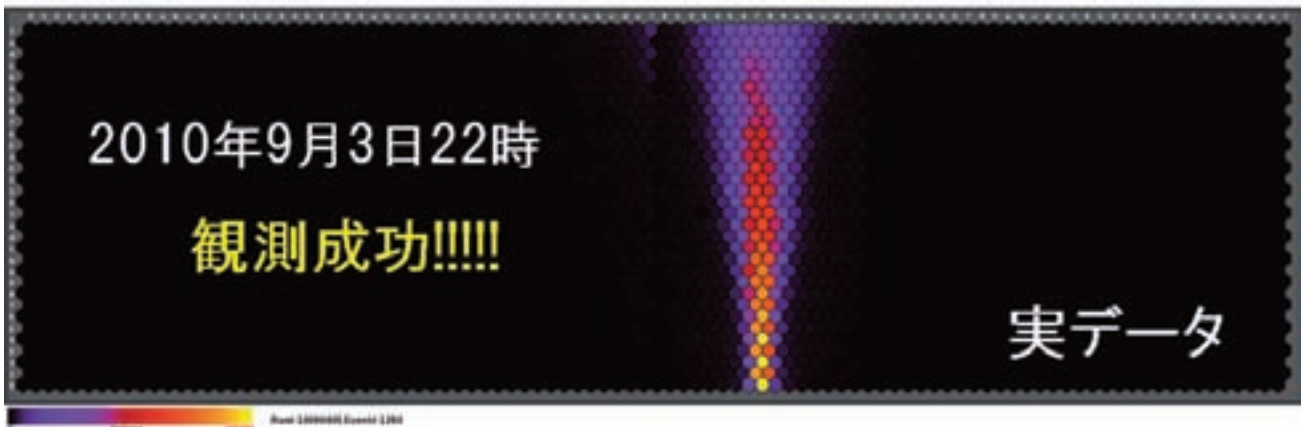


図3：FDで検出した ELS の加速ビームによる大気蛍光発光現象の撮像図

ンスより内側を放射線管理区域として扱い、運転中の立ち入りを禁止し、警告表示を充実させる等、安全にするルールが作られた。また ELS 運転に携わる作業員はユタ大学が取り決めている放射線従事者の資格を得る必要があり、資格を得るための特別講習会が開講された。また、放射線防護用のコンクリートブロックを設置した。これら放射線管理体制は2010年5月末までに整い、翌月から本格的なビーム運転の準備が開始された。完成した ELS サイトの写真を図2に示す。

4. ELS の立ち上げ作業

立ち上げ作業は2010年6月と8月末から9月上旬の2回に分けて行われた。6月の作業では KEK から3名、三菱電機システムサービス(株)から1名の協力を得て行った。作業はまずクライストロンの交換を行った。その後、導波管とビームラインの真空引きを行い、真空値が 10^{-6} Pa に達した後でクライストロンの動作確認が行われた。ELS のビーム運転に必要な出力高周波電力は約20MW であるが、最大27MW の出力を確認した。次に電子銃の単体試験を行い、100keV の電子ビームを確認した [17]。8月末からは加速ビーム試験を行った。初の加速ビームは9月2日に確認する事ができた。翌日には90度偏向電磁石による偏向ビームの取り出しに成功した。ビームチューニングを行う際、KEK での最終チューニングパラメータを初期値として使用した所、ほぼ同じ値で加速ビームの取り出しに成功した事は正直驚きであった。取り出しビームのエネルギーは偏向電磁石の磁場によって決定され、41.4MeV であった。また取り出しビームの電荷量は最下流に設置されているファラデーカップで測定

され最大で約140pC/pulse であった。加速ビームの安定した取り出しに成功した後、空中射出を行った。その結果、加速ビームが引き起こす空気中の電磁シャワーによる大気蛍光発光現象を FD によって観測する事に初めて成功した。ビーム射出は9月3日、4日の2日間行われた。今回のビーム出力は $41.4\text{MeV} \times 40\text{-}140\text{pC/pulse} \times 0.5\text{Hz}$ であった。図3にFDで検出した初めての加速ビームによる発光現象の撮像写真を示す。

5. 今後の展望

ELS によって UHECRs 観測実験は大きな進展を迎えると期待されている。今後 ELS を用いた絶対エネルギー較正の具体的な方法についての研究が本格的に進む。エネルギー較正の方針としては観測とシミュレーションの比較である。そして実データとシミュレーションデータの相違を補正する形で大気蛍光発光量に依存しない絶対エネルギー較正を行う。今後 ELS によるエネルギー較正方法を確立し、更に可搬式レーザーシステムの実用化、新大気モニター用ライダーシステムの実用化が進む事で FD によるエネルギースケールの決定精度は飛躍的に向上し、全系統的誤差を10%以下にする事が可能になると考えている。そして将来 ELS のような加速ビームを用いたエネルギースケール決定法が一般的な方法として確立する事も期待できる。

参考文献

- 1) ICRR ニュース第73号 p6~12
- 2) F.Arqueros et al., NIM A597, (2008), 1-22
- 3) D.Ikeda, Doctor Thesis, University of Tokyo (2010)
- 4) The Pierre Auger Collaboration, Phys.Letters B

- 685, 239 (2010)
- 5) R. U. Abbasi, et al, PRL 100, 101101 (2008)
- 6) J. Abraham et al., Phys. Rev. Lett. 101, 061101 (2008)
- 7) J.T. Brack et al., Astropart.Phys.20,653 (2004)
- 8) R.U. Abbasi et al., arXiv: astro-ph/0512423 v1
- 9) J. Abraham et al., Astropart Phys, 33, 108 (2010)
- 10) R. Knapik et al.. Proceedings 30th ICRC (2007), arXiv: astro-ph/0708.1924v1
- 11) R.U. Abbasi et al., Astropart. Phys. 23, 157 (2005).
- 12) F. Kakimoto et al., NIM A372, 527 (1996)
- 13) R.U. Abbasi et al., Astropart. Phys. 29,77 (2008).
- 14) T. Tomida et al.. Proceedings 31st ICRC (2009),
- 15) H. Tokuno et al., NIM A 601, 364 (2009)
- 16) ICRR ニュース 第69号 p12~14
- 17) T. Shibata et al., Proceedings of 7th PASJ (2010)

研究紹介

平成21年度技術職員研修の報告

佐川 宏 行

【宇宙線研究所】

昨年度、宇宙線研究所が柏に移ってから初めて宇宙線研究所の技術職員研修が行われました。研修内容としては以下の通りで、講義4回と見学研修2回が行われました。

2009年

12月15日 講義：重力波による宇宙の観測
(講師：黒田和明先生)

12月21日 J-PARC 見学研修

2010年

1月19日 講義：空気シャワー実験40年の歩み
(講師：林田直明先生)

2月22日 講義：宇宙線の起源を求めて
(講師：榎本良治先生)

3月11日 講義：T2K 実験開始
(講師：金行健治先生)

3月16日 浜松ホトニクス見学研修

講義は、質問を含めて1時間半程度で、宇宙線研究所の先生に、これまでの研究及び今後の計画について話をいただきました。5月末に亡くなられた金行先生は、3月の講義の際には体調が良くない状態であったと思いますが、座って話をいただきました。

12月21日には大強度陽子加速器施設 J-PARC の見学研修を行いました。マイクロバスを貸し切り、宇

宙線研究所に集合して、茨城県東海村へ行きました。午前中に J-PARC の近くにある日本原子力研究開発機構 東海展示館「アトムワールド」を見学し、核燃料サイクルを中心とした原子力の開発・利用・安全管理についての説明を聞きました。午後に J-PARC を訪れて、まず J-PARC の概況の説明を受けました。その後で、物質・生命科学実験施設（写真1）、ハドロン実験施設、およびニュートリノ施設を見学しました。ちょうどニュートリノビームが神岡に向けて出始めたところでした。

3月16日には静岡県にある浜松ホトニクスの見学



写真2：浜松ホトニクス豊岡製作所で展示の説明を受けている様子。



写真1：茨城県東海村にある J-PARC の物質・生命科学実験施設で説明を受けている様子。



写真3：浜松ホトニクス豊岡製作所での参加者の集合写真。

研修を行いました（写真2、写真3）。技術職員の他に、宇宙線研究所事務室から3名が同行しました。最寄りの駅に集合し、初めに電子管を製造している豊岡製作所へ行きました。光電子増倍管を実際に製作しているいくつかの工程や展示コーナー、超高感度撮像などを見学しました。またその場において、電子管製品、固体製品についてディスカッションを行い、光電子増倍管や Multi-Pixel Photon Counter

（MPPC）など最近の光半導体の紹介もありました。その後そこから30分ぐらいかけて移動し、光技術の基礎研究、応用研究を行っている中央研究所を見学しました。ポジトロンイメージング装置（PET）など健康・医療に関わる分野およびバイオ分野の研究・開発に関わる展示の説明を受けました。

今回6名の技術職員の方が研修を修了されました。

研究紹介

T2K 実験開始

塩澤 真人

【宇宙線研究所】

1. はじめに

2010年2月24日朝6時40分頃、富山空港で搭乗時間を待っているところで携帯電話が鳴った。T2K (Tokai-to(2)-Kamioka) 長基線ニュートリノ振動実験のスーパーカミオカンデデータ解析担当者からの電話で、6時ちょうどに発生した最初のニュートリノ反応候補を見つけたとの連絡であった。当日昼までには観測事象の詳細、特に反応時刻がニュートリノビーム到来時刻の5マイクロ秒間の範囲に入っていること、前後でのGPS時間測定装置の安定性、スーパーカミオカンデ検出器の安定性などを確認し、J-PARC加速器ニュートリノの反応事象で間違いないとの結論を得た。図1にこの最初のニュートリノ反応を示す。観測された三つのチェレンコフリングには、中性パイオンからの崩壊ガンマ線と思わ

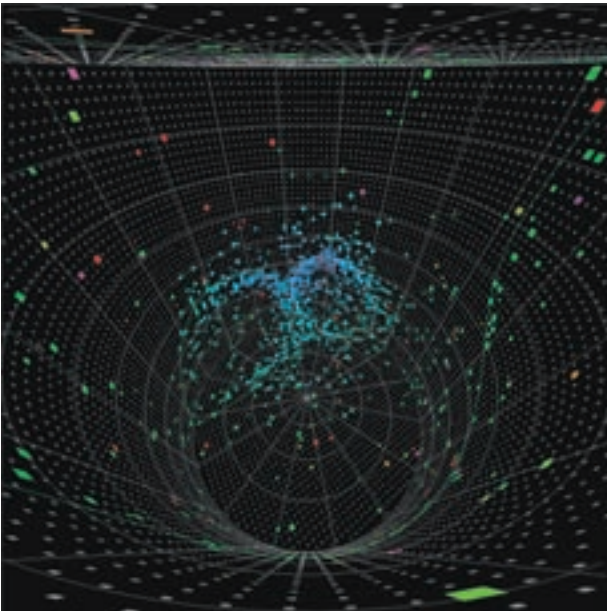


図1：スーパーカミオカンデで最初に観測されたJ-PARCニュートリノ反応事象。検出器の円柱形内水槽上方から斜め下を見た視線で、チェレンコフ光を検出したPMTを色付き正方形で表示している。各色は光の到達時間を表し、時間の早い方から青、緑、オレンジ、赤色の順番である。三つのチェレンコフリングのうち、正面の二つは中性パイオンと不変質量が一致し、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ からの二つの崩壊ガンマ線だと思われる。

れる二つのリングが含まれる。待望のJ-PARCニュートリノ反応をスーパーカミオカンデ検出器で捉えたマイルストーンであった。遠隔検出器としての最初の義務が果たせてほっとした事を記憶している。

T2K 実験はその後ニュートリノ反応データの統計を上げ、6月末までの最初のランを完了した。現在最初の物理結果を出すべく、共同研究者が一丸となった解析作業が日夜進行中である。本稿ではT2K実験の背景とその概要、これまでに収集した最初のニュートリノデータを紹介する。T2K実験の詳細は多くの国際会議でも報告されており、関心のある方はそちらも参照されたい [1]。

2. T2K 実験の背景

ニュートリノの質量の固有状態 $\nu_i (i=1, 2, 3)$ と弱い相互作用のゲージボソン W^\pm と結合する状態 $\nu_\alpha (\alpha=e, \mu, \tau)$ は、 $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)^T = U_{MNS} (\nu_1, \nu_2, \nu_3)^T$ と混合行列を介した基底変換により結ばれる。ここで 3×3 のユニタリー行列である牧・中川・坂田混合行列は、

$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23}-c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23}-s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23}-c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23}-s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$$|U_{MNS}| \cong \begin{pmatrix} 0.834 & 0.788 & 0 \sim 0.2 \\ 0.439 \sim 0.557 & 0.479 \sim 0.701 & 0.707 \\ 0.439 \sim 0.557 & 0.479 \sim 0.701 & 0.707 \end{pmatrix}$$

と表わすことができる。式中 $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$, $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$ であり、行列要素の絶対値の範囲は未知の混合角 $\sin\theta_{13}$ と CP フェーズ δ 由来のもののみを考慮した。このレプトンセクターとの対比のためにクォークセクターの行列要素も併せておく。

$$(d', s', b')^T = U_{CKM} (d, s, b)^T$$

$$|U_{CKM}| = \begin{pmatrix} 0.97419 & 0.2257 & 0.00359 \\ 0.2256 & 0.97334 & 0.0415 \\ 0.00874 & 0.0407 & 0.999133 \end{pmatrix}$$

クォークセクターの小林・益川行列が単位行列に近いのに対し、レプトンセクターは非対角成分が非常に大きいという際立った違いを持つ。この違いを説明する仕組みとして様々なモデルが提唱されてい

るが確立するには至っておらず、素粒子物理学上の大きな未解決問題として残っている。またクォークセクターの各行列要素の測定精度はほとんどが1%以下であるのに比較して、レプトンセクターは未測定パラメータが残っていることもあり5~20%程度の精度であり、精度改善が今後の実験的な課題となっている。ここで、T2K実験の最大の目標は未知の混合角 θ_{13} の測定である。実は θ_{13} は世界的な競争の対象となっており、T2K実験以外にも複数の原子炉実験が θ_{13} の有限値発見を目指してフランス、韓国、中国で建設中（例えばフランスでは、まさに実験が開始するところ）である。もう一つの未測定パラメータであるCPフェーズ δ の測定には、メガワット級のニュートリノビームとメガトン級の巨大ニュートリノ検出器が必要になると予想されているが、実現されれば、物質支配宇宙の生成機構の理解や、混合行列のユニタリー性の検証などが視野に入ってくる。ただし上の基底変換式からわかるように、 $\theta_{13} = 0$ の場合には δ の項は全て消えてしまいニュートリノ振動現象に痕跡を残さない。さらに θ_{13} の値は、ベータ崩壊によるニュートリノ質量の直接測定実験や二重ベータ崩壊探索実験の感度を決める要素でもある。従って θ_{13} の大きさは、今後のニュートリノ実験の道標となる重要性を持つ。

ニュートリノには大きな混合角以外に、極微の質量を持つという際立った特徴もある。他のフェルミオン質量との比は 10^6 以上にもなる小ささであり、その理由を説明する機構の確立も今後の課題である。ニュートリノ振動実験では、混合角と同時に質量の二乗差を測定し、質量情報を引き出す。

3. T2K 実験概要

T2K実験は日本における二世代目の長期線加速器ニュートリノ振動実験であり、東海村に建設された大強度陽子加速器J-PARCにより生成されるニュートリノビームと、295km離れたニュートリノ検出器スーパーカミオカンデを用いた実験である。

陽子シンクロトロンで30GeVまで加速された陽子ビーム（設計値750kW）は、約3秒に一回、5マイクロ秒の間にニュートリノビームラインに取り出される。この時間構造を用いるだけで、加速器ニュートリノ以外のバックグラウンドを100万分の1に減らす事ができる。超伝導磁石により約90度曲げられた陽子ビームをグラファイトターゲット（直径26mm、長さ900mm）に衝突させ、生成した π^+ を特殊な電磁石で収束させた後に、約100mのDecay Volume内で $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ と崩壊させてミューオンニュートリノビームを生成する。（図2参照）ここで陽子とパイオンビームをスーパーカミオカンデから2.5度ずらした方向に向けるオフアクシスビームというアイデアが採用されており[2]、低エネルギーでかつエネルギーの広がり小さいニュートリノビームが生成される。ニュートリノスペクトルは約650MeVにピークを持ち、振動確率が295kmの飛行距離で最大になるエネルギーに調整されている。ミューオンやK崩壊からの電子ニュートリノの混入はピークエネルギーで0.5%程度とおさえられ、電子ニュートリノのappearance探索が高感度で行えると期待されている。Decay Volume 終端にはミューオン検出器が、ターゲットから280mの距離にはニュートリノ検出器群が設置され、ミューオンやニュートリノのビーム方向や強度、ニュートリノスペクトルが測定される。295kmの遠隔地であるスーパーカミオカンデ検出器では、GPSによるビーム出射時刻情報を約0.01秒後に受信し、ニュートリノ到来時刻時の反応データを記録するトリガーを生成する。

T2K実験では、ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動を発見する事により、 θ_{13} の世界初の有限値測定を行うことを目指している。図3にニュートリノ混合角 θ_{13} に対する期待感度を示す。T2K実験全データにより、 $\sin^2 2\theta_{13}$ で0.01以下の領域までの探索が可能である。

ミューオンニュートリノからタウニュートリノへ

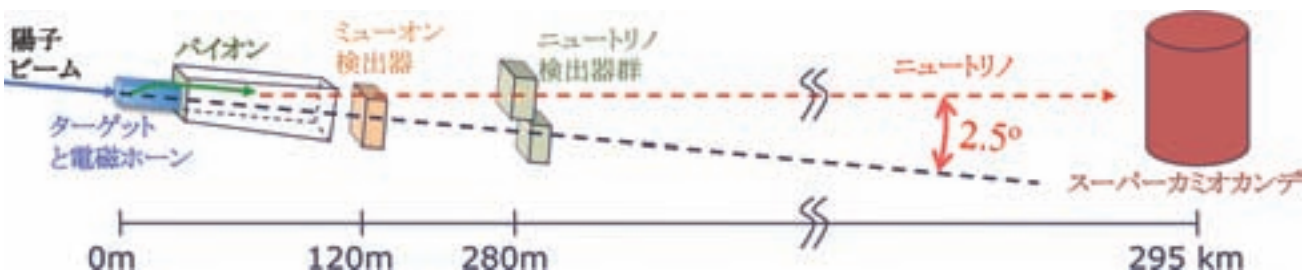


図2：T2Kニュートリノの生成。大強度加速器J-PARCにより加速された陽子ビームをグラファイト標的に打ち込むことにより、ミューオンニュートリノを生成する。詳細は本文を参照。

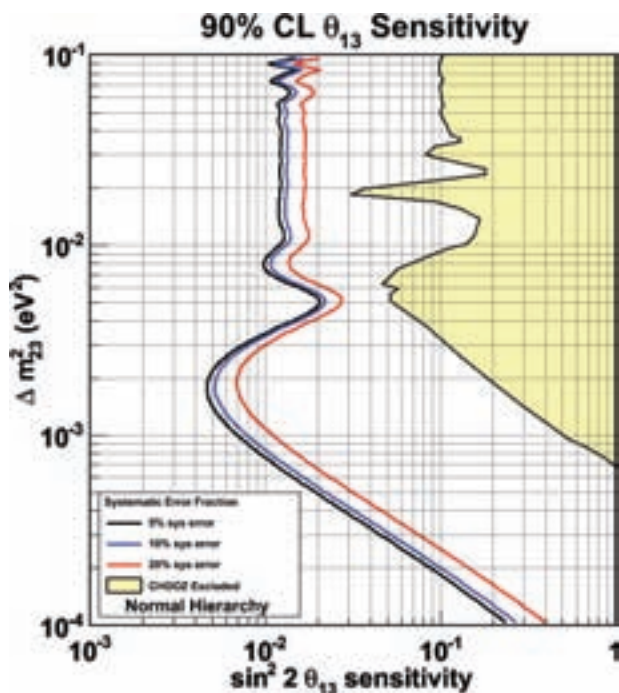


図3： θ_{13} に対する期待感度。 $\Delta m_{23}^2 = 2 \sim 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ において $\sin^2 2\theta_{13}$ の値で0.01以下（CHOOZ 実験の上限値より一桁以上小さい）の領域まで感度を持つと期待されている。

の振動モードでは、ニュートリノエネルギーがタウ粒子質量に比べて低いために τ 生成反応は起きず、ミュオンニュートリノの欠損として観測される（disappearance）。期待される精度は、 $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) \sim 1\%$ 、 $\delta(\Delta m_{23}^2) \sim 1 \times 10^{-4} \text{eV}^2$ であり、大気ニュートリノでの測定精度を5倍程度改善する。混合角 $\sin^2 2\theta_{23}$ が本当に最大（=1）であるかどうかを1%の精度で検証する予定であり、もし本当に1であれば背後にあるなんらかの未知の対称性が要請されることになる。

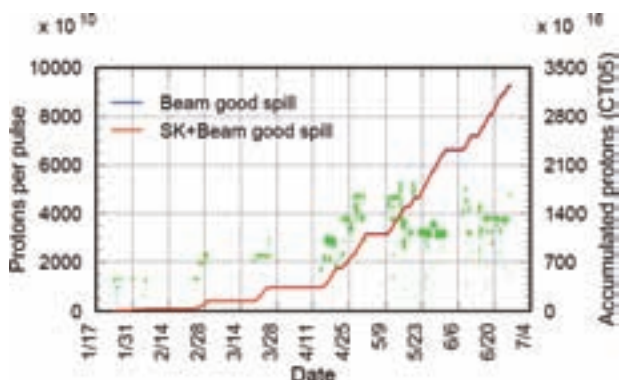


図4：T2K 最初の物理ラン（2010年）の陽子ビーム強度（緑点と左のY軸ラベル）とターゲットに照射した陽子数の積分値（青線と右のY軸ラベル）の時間変化。赤線は物理解析に用いるスーパーカミオカンデデータ量。青線との差（データロス）は1%以下である。

4. 最初のランデータ

T2K 実験では今年の1月から6月までに物理解析用の最初のビームランを行った。この間スーパーカミオカンデでは、ビームデータロスを防ぐため、キャリブレーション作業や緊急性の低い保守作業はビームタイムの間をぬって行うルールが実行されている。図4に陽子ビーム強度とターゲットに照射した陽子数の積分値の時間変化を示す。当初ビームパワー20kW程度で開始し、6月までには50kWの定常ビームを供給する事に成功した。これまでに収集したビームニュートリノデータは陽子数換算で 3.2×10^{19} 個に達する。図中の赤線は物理解析に用いるニュートリノデータ量を示しているが、ニュートリノデータの取りこぼしや光電子増倍管の放電などによるデータロスは小さく、99%以上の高い効率で達成された。

図5はスーパーカミオカンデで観測されたニュートリノ反応の時間分布である。ニュートリノビームの到来時刻を基準とし、縦に種類分けした観測反応数を示している。LE(電子の光量換算で25MeV以下の低エネルギー事象)、OD(外水槽で発生または外水槽にミュオンが突入した事象)と共にニュートリノ振動解析データであるFC(Fully Contained Event：内水槽内だけに光が観測された事象)が赤で示されている。ビーム到来時刻のみに集中して観測されており、GPSを用いたビーム出射時刻の測定とニュートリノ反応時刻の測定が正確であること、また時間差の大きな事象がないことからバックグラウンドが非常に少ないこともわかる。図5下はFCイベント発生時刻の拡大図であり、581ナノ秒間隔の6個のビームバンチ構造が見られる。

ここまで陽子数 3.2×10^{19} 個に対応するデータとして、FCイベント33個、そのうち有効体積（内水槽の壁から内側に2メートル以上離れた領域）で発生したニュートリノ反応は23個観測された。事象の発生頻度、検出器内の発生位置分布、方向分布、チェレンコフリング数、粒子識別分布（電子またはミュオン）など詳細にわたる解析が進行中である。図6は一例としてニュートリノ反応の検出器内発生位置とチェレンコフリングの方向を同時に表したものである。リングの方向すなわち二次粒子の散乱方向はニュートリノビームの進行方向に偏っていることが見てとれる。

5. 最後に

今回紹介したデータを用いたニュートリノ振動解

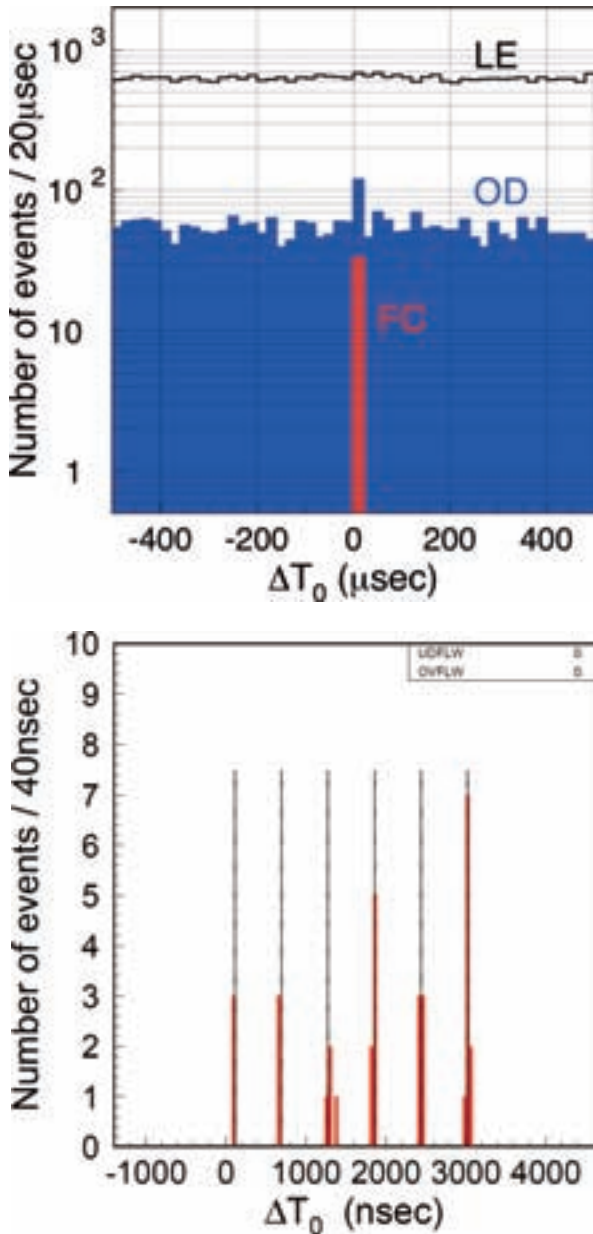


図5：スーパーカミオカンデにおいて観測されたJ-PARCニュートリノ反応の時間分布。ビーム到来時刻を基準としている。上図はビーム到来時刻前後500マイクロ秒を、下は約6マイクロ秒の幅に拡大してFC (Fully Contained Event)のみを表示したものである。

析が現在急ピッチで進められている。ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの appearance 探索結果とミューオンニュートリノからタウニュートリノへの disappearance 測定結果を近々に発表する予定である。T2K 実験ではこれまで以上の高精度エネルギー測定や、高効率バックグラウンド除去

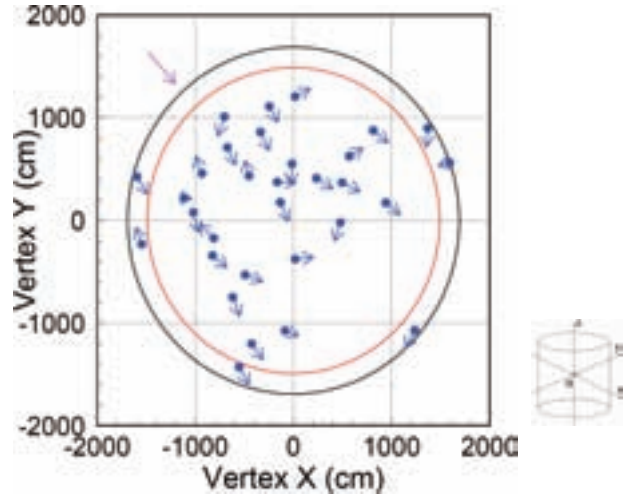


図6：ニュートリノ反応事象 (30MeV 以上のみ) の発生位置と方向分布。発生点からのびる矢印は、チェレンコフリングの方向の2mのベクトルを水平面 (X-Y 面) に投影したものを示す。黒円が内水槽の壁、赤円は壁から2m離れた物理解析領域を示す。左上のピンク矢印がニュートリノビームの進行方向である。右図はスーパーカミオカンデ検出器の座標の定義を示す。

とその定量的理解が要請されるため、一つ一つの系統誤差の注意深い見積もりが必要となる。ニュートリノビームやニュートリノ反応断面積の詳細な予測とその不定性を見積もり、280m に設置されたニュートリノ検出器群のデータ解析が平行して行われている。最初の物理結果を期待されたい。

ニュートリノ実験という山登りは、まだまだ山頂は見えない。しかし、未来に対する新しい景色が展開されるのは間もなくであると期待したい。

参考文献

- 1) 例えば、T. Kobayashi, 「Status of T2K」, talk given in the XXIV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO 2010): Ken Sakashita, 「Super beams」, talk given in the XXIV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO 2010): Antonin Vacheret, 「T2K:status and prospects」, talk given in the Neutrino Oscillation Workshop (NOW 2010).
- 2) D. Beavis et al., 「BNL-E889 proposal: Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment at the AGS」 (1995).

人 事 異 動

発 令 日	氏 名	異 動 内 容	職
H22. 10. 1	手 嶋 政 廣	新規採用	教授

ICRR-Seminar 2010年度

2010年7月30日(金) 佐川宏行 (宇宙線研)
 “テレスコープアレイ実験の最近の結果”
 2010年7月23日(金) 長滝重博 (京都大)
 “数値シミュレーションによる高エネルギー宇宙
 線/天体物理学”

ICRR-Report 2010年度

ICRR-Report-570-2010-3
 “Gluon contribution to the dark matter direct detection”
 Junji Hisano, Koji Ishiwata and Natsumi Nagata
 ICRR-Report-571-2010-4
 “Non-Gaussianity from Lifshitz Scalar”
 Keisuke Izumi, Takeshi Kobayashi and Shinji Mukohyama
 ICRR-Report-572-2010-5
 “Decaying Dark Matter in Supersymmetric Model and Cosmic-Ray Observations”
 Koji Ishiwata, Shigeki Matsumoto and Takeo Moroi
 ICRR-Report-573-2010-6
 “Inflation from a Supersymmetric Axion Model”
 Masahiro Kawasaki, Naoya Kitajima and Kazunori Nakayama
 ICRR-Report-574-2010-7
 “Kähler moduli double inflation”
 Masahiro Kawasaki and Koichi Miyamoto

No.74

2010年11月30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)7136-3143又は04-7136-5148
 編集委員 佐々木真人 伊藤英男