

ICRR

No. 41

2000.8.1

東京大学宇宙線研究所

ニュース

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

研究紹介

宇宙線生成核種による宇宙線永年変化と宇宙物質の研究

山形大学理学部 櫻井敬久

1. はじめに

宇宙線生成核種は、宇宙線が地球・大気、月、隕石、宇宙塵等のターゲットに衝突して生成する安定または放射性の同位元素である。従って地球物質も含めて宇宙物質は宇宙年代スケールで稼動している巨大な宇宙線の検出器である。放射性的宇宙線生成核種は、その半減期を利用して時間測定に利用できる。例えば、地球大気中で生成される ^{14}C の半減期は5730年であり宇宙線強度が一定で地球環境の状態に変化が無いという仮定のもと試料中の現在の ^{14}C 量の測定からその試料の生育年代を数万年程度まで推定できる。また、安定同位体と放射性同位体の比率を使って宇宙塵、隕石などの宇宙線照射年代を求めることができる。これは、ターゲットとなる宇宙塵が宇宙空間をさまよって入る間に宇宙線を照射され、安定同位体は照射時間の関数として増加し放射性同位体は、照射時間が半減期より十分長ければ飽和することを利用してしている。Hessによる宇宙線の発見から100年経った今、ニュートリノ、最高エネルギー宇宙線、高エネルギーガンマ線、重力波等現在の宇宙線を対象とした宇宙線研究の中にあって宇宙線生成核種の研究は、物質を利用した過去の種々の宇宙年代スケールでの宇宙線研究の側面を担っている。ここでは、 ^{14}C 、宇宙塵の研究の現状及び相微弱放射能測定設備について紹介をする。

2. ^{14}C 濃度の永年変化について

^{14}C による宇宙線の研究は、過去数万年の宇宙線強度の永年変化と太陽11年周期変動の探索が大きな目的である。太陽黒点の本格的観測データは1700年以後であり、それ以前の太陽の活動状態を測定する手段としては太陽系に進入してくる宇宙線をプローブとし宇宙線生成核種を使うことになる。特に木材

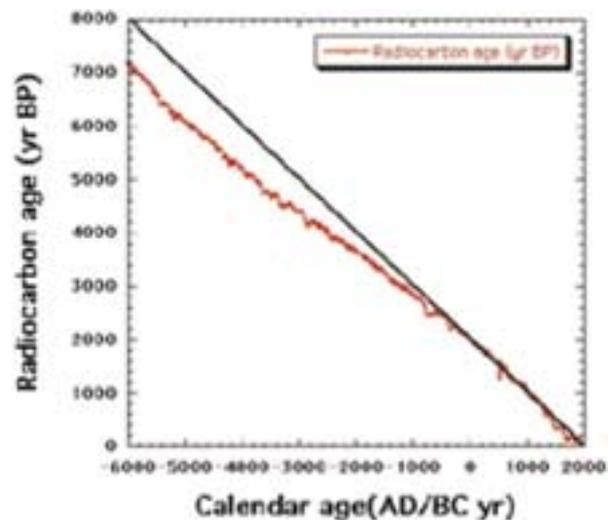


図1：木の年輪を試料として測定した、歴史年代に対する放射性炭素年代。直線（黒）は ^{14}C 濃度が歴史年代に対して常に一定の場合を表す。それに対して測定された放射性炭素年代（赤）はずれと種々の変動モードがある。

年輪は1年の時間分解能を有しており、 ^{14}C の測定は非常に有効である。

図1はStuiverによって木材年輪中 ^{14}C 測定から得られた大気中 ^{14}C 濃度の年代キャリブレーション曲線であり、AD1950年を基準として歴史年代に対して放射性炭素年代の関係を示している。宇宙線強度を一定とした場合に比べて直線からずれており、細かくみるといくつかの時間モードで変動している。大気中 ^{14}C 濃度の変動の要因としては、宇宙線発生源、宇宙線伝播、太陽磁場、地球磁場等の変動による入射宇宙線強度の変動と地球環境による変動が考えられる。

^{14}C は、宇宙線が大気中元素と衝突し発生した中性子と大気中窒素との原子核反応により生成され酸素と化合して $^{14}\text{CO}_2$ となり大気中 $^{12}\text{CO}_2$ と混合され地上植物に光合成により取り込まれる。大気中 CO_2 は、大きくみれば地上生物圏および海洋と交換をしており、海洋の上部混合層と深海層との交換もある。特に最近では深層海流の影響も考えられている。従って海洋と大気中の CO_2 の交換率の変化など地球環境の変化は、大気中 ^{14}C 濃度の変化に影響を与える。

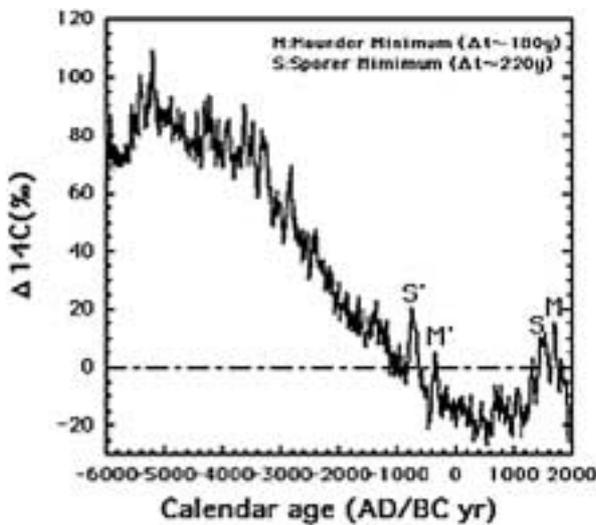


図2：木の年輪を試料として測定した、歴史年代に対する大気中の ^{14}C 濃度変動。Mは1645から1715年にかけて、Sは1416から1534年にかけて太陽活動が非常に静穏であった期間。SはMより長期である。M'、S'はそれぞれM、Sと似たような変動期間を表している。

図2は、図1のデータについてAD1950年の ^{14}C 濃度を基準として変動分を歴史年代に対して示したものであり $\Delta^{14}\text{C}$ と呼ばれている。BC6000年から現代までの大きなうねりは、地磁気の経年変化によるものであり木越等の日本の研究者が最初に指摘したものである。この中でマウンダー、シュペラーと呼ば

れているピークは太陽活動が極めて静穏であった時であり気候も寒冷であることが分かっている。マウンダー期についての11年周期変動の ^{14}C 測定データはあるが、まだ確定したとはいえない。シュペラー以前については、まだ1年毎の測定データは無く、太陽活動の静穏期における太陽磁場の様相がどのようなのかは太陽のダイナモ機構を詳しく調べる上でも極めて重要である。また、これらの太陽活動の過去についての研究は、これからの太陽活動を予測するための重要なデータとなる。



図3：屋久杉年輪試料

このような目的により、名古屋大学STE研では約700年の屋久杉(図3)を用いてシュペラー、マウンダーを中心として11年周期変動の測定を進めている。すでにシュペラー極小期50年分のデータが得られており平成12年度中にシュペラー期の測定が完了する見込みとなっている。山形大学では約2400年前

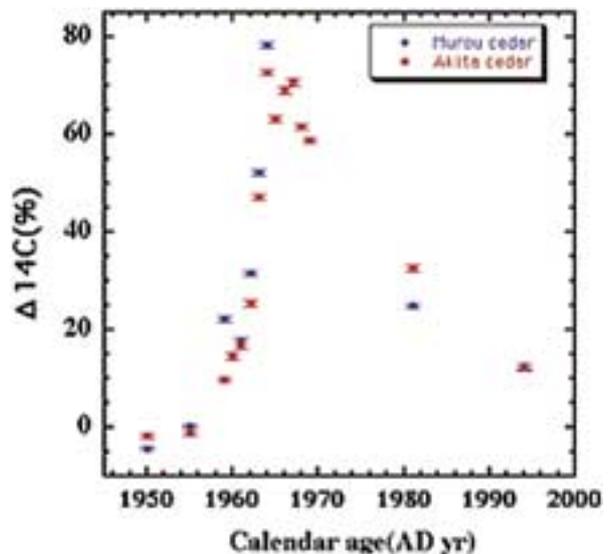


図4：秋田杉及び室生杉年輪試料の1950から1995年までの ^{14}C 濃度測定結果。1960年代大気中核実験の影響を明瞭に表しており、指数関数的減衰は大気と海洋との交換と化石燃料の燃焼による。

の鳥海神代杉を用いて第2のシュペラー期と呼ばれる期間についての11年周期変動の測定を進めている。これらの測定では誤差が0.2%という高精度が要求される。宇宙線の太陽活動によるモジュレーションは ^{14}C 生成では30%程度の変動が期待できるが、大気中 ^{14}C の濃度変動は海洋等との交換により0.6%程度の変動にうすめられてしまう。

図4は1960年代の大気中核実験で注入された ^{14}C に対する秋田杉年輪中の濃度変動であり、デルタ関数的変動に対する反応の様相の例示である。このとき注入された ^{14}C は宇宙線生成量の約100倍であるが、反応はピークで1.8倍程度である。このことと指数関数的減衰は海洋のような大きな貯蔵庫の影響を表している。

^{14}C の測定は、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \sim 10^{-12}$ 程度であるため極微量測定の技術が必要となる。近年、直接試料中の $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ を測定する加速器質量分析法(AMS)の精度が向上しているが系統誤差を含めて0.3%精度が現在の限界であり0.5%精度の測定でも良い測定といわれている。我々は極低レベル液体シンチレーションカウンターによるベータ線計測により測定を行っている。我々の測定系での系統誤差は0.1%程度におさえられることがわかっており0.2%精度での測定が可能となっている。

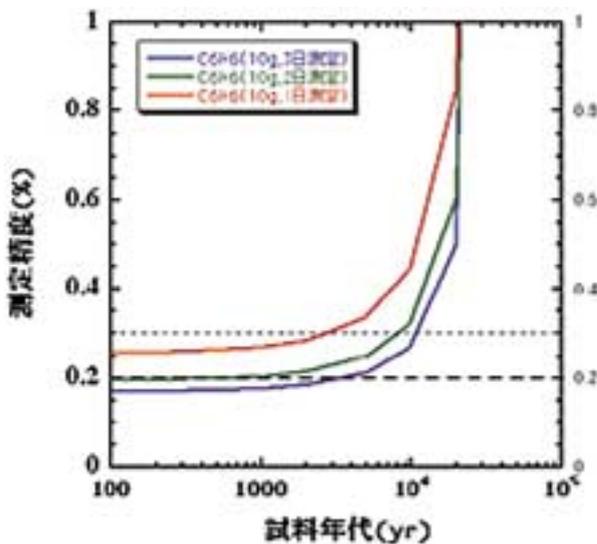


図5：極低レベル放射線測定とAMS測定の精度の比較。細い破線がAMSの現在の測定精度の限界。液体シンチレーション測定(赤、緑、青)は0.1%の系統誤差を含む。試料が一万年より若ければ、液体シンチレーション測定のほうが高精度である。

図5は試料年代に対して極低レベル放射線測定とAMS測定の精度の比較をしめしている。試料の量、測定時間にも依存するが約1万年までの試料では極

低レベル放射線測定の方が高精度測定を行えることが分る。



鳥海神代杉年輪試料



抽出した セルロース



1年輪毎の測距作業風景

図6：鳥海神代杉、年輪剥離、 α セルロースの写真。

山形大学での ^{14}C の実験について紹介する。鳥海神代杉は鳥海山噴火の際泥流中に埋没したもので図6にあるように現代の木材とほとんど変わらないぐらい保存状態が良い。年輪は1年毎に手作業で剥いており、年輪間を移動しないアルファセルロースを抽出している。

図7のベンゼン合成系でアルファセルロースは燃やして二酸化炭素とシアセチレンを経てベンゼンに合成される。合成ベンゼンにシンチレータを加え、現在市販されている中で最も低バックグラウンドの極低レベル液体シンチレーションカウンターQuantulusにより ^{14}C からのベータ線を測定する。図8に標準試料NISTシュウ酸、鳥海試料、バックグラウンド用の ^{14}C を含まないベンゼンの測定スペクトルを示す。channel軸は対数でとってあるが、両試料とも ^{14}C のベータ線スペクトルと良く合っておりスペクトル間のズレも無い。これは高純度のベンゼンが安定一様に合成されていることを示している。バックグラウンド計数率は鳥海試料に対して約百分の一である。



図7：ノンフリースベンゼン合成装置、極低レベル液体シンチレーションカウンターQuntulus。

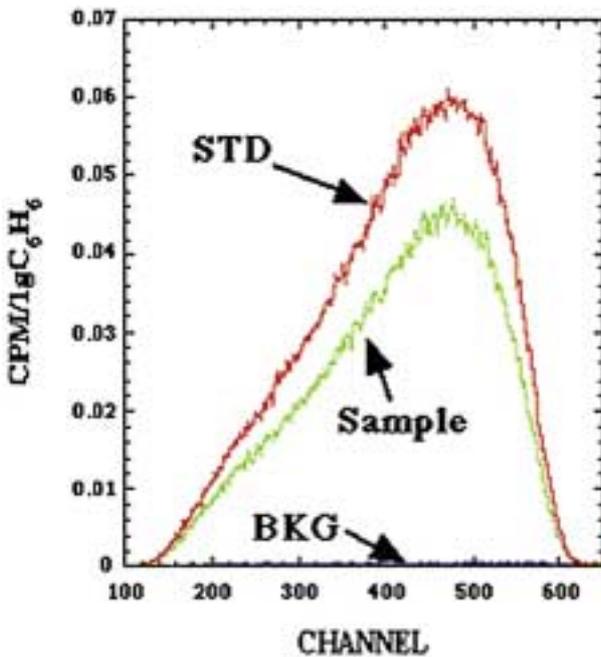


図8：標準試料 (STD)、鳥海年輪試料 (Sample)、バックグラウンド試料 (BKG) の測定スペクトル。

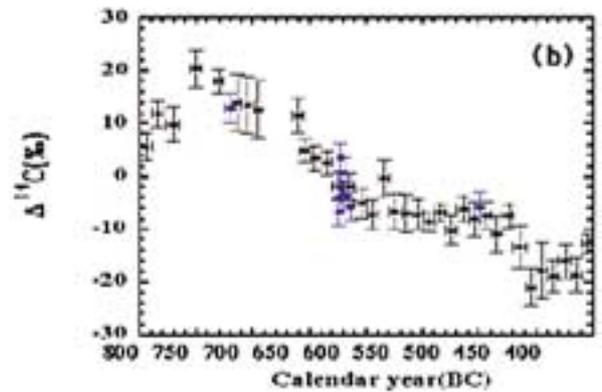
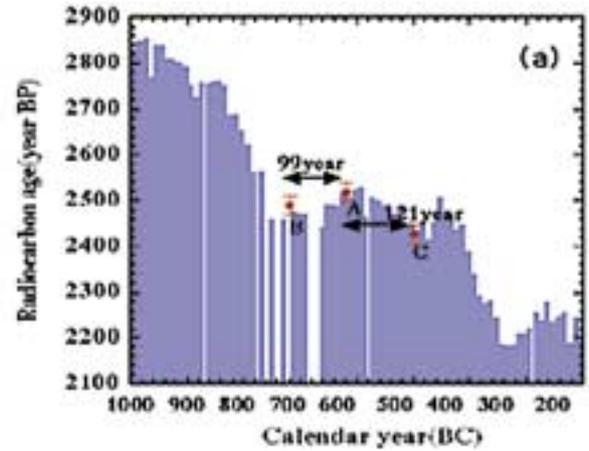


図9(a)：鳥海神代杉の年代を3つ年輪部分を測定して最小2乗法により推定した (BC500±15年)。図9(b)：その推定した年代における $\Delta^{14}\text{C}$ 。試料は第2スーパーラー付近にあるを示している。

鳥海山の噴火は年輪年代学から紀元前466年と言われているが、我々の試料3点の測定値を放射性炭素年代キャリブレーション曲線と最小2乗法で合わせたのが図9(a)であり、年輪外周部で紀元前500±15年が得られた。 $\Delta^{14}\text{C}$ で比較したのが図9(b)であり、第2スーパーラー期の年輪試料であることが分る。BC570年頃のデータは1年毎の測定であり1年毎のデータとしては最初のものである。図10は1年毎データを8点プロットしている、今年度中に3周期分測定が完了する予定である。

3年に1度開かれている放射性炭素国際会議が6月にイスラエルで行われた。宇宙線生成核種関連の発表について紹介しておく。話題は1万年から4万年の期間に集中しており、グリーンランドや南極の氷床コアを用いて ^{10}Be により調べた発表が多かった。 ^{10}Be は ^{14}C に比べ大気システムの影響を受けにくいいため生成プロセスをより反映している。どのデータも生成量としてはここ1万年に比べて増加しており、変動も大きいことを示しているが、その要因に大しては銀河宇宙線、太陽活動、地球磁場等が考え

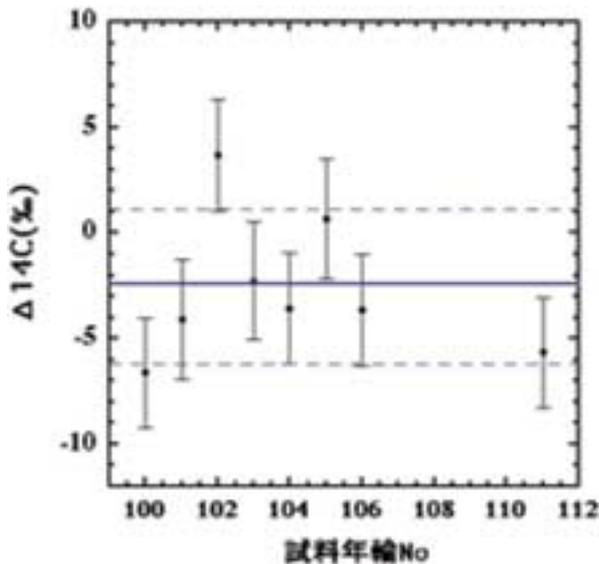


図10：鳥海年輪試料の1年毎の $\Delta^{14}\text{C}$ 濃度変動。

られるといった慎重な姿勢が多かった。やはり年輪は氷床などに比べて時間分解能はすぐれており1万年までの $\Delta^{14}\text{C}$ の確立したデータの蓄積があるため、宇宙線の興味から見れば変動の特徴のあるところに対して部分的でも ^{14}C により11年周期を調べ ^{10}Be と比較すべきだと思った。このためにはAMSが必要であるが、現在のAMSの最高精度の発表があり、0.2%以下の統計精度に対して系統的誤差を入れると0.3%であるということであった。

3. 宇宙塵

宇宙塵については深海底堆積物中より採取されたスフェールールおよび南極氷中の始源的宇宙塵について紹介する。

(1) ^{10}Be と ^{26}Al のAMS測定による惑星間塵の起源と運動 (東大原子力総合センター松崎浩之)

これは、深海底堆積物中より採取された、スフェールールと呼ばれる球粒中の ^{10}Be と ^{26}Al の含有量を測定し、そのデータから、太陽系内に漂う微細な塵の起源や運動、また、地球との相互作用について考察しようとするものである。

深海底スフェールールは、水深5000m程度の深海底堆積物中から見つかるサイズ $50\mu\text{m}$ ~ $500\mu\text{m}$ 程度の球粒である。化学組成がコンドライト隕石に類似しており、地球外の隕石または微小粒子が大気突入過程で溶融、球形化したものと考えられている。

太陽系内の固体粒子は、太陽を中心とする楕円運動を行っているが、惑星間塵のように粒子のサイズが小さい場合、太陽の放射圧により、その軌道は、

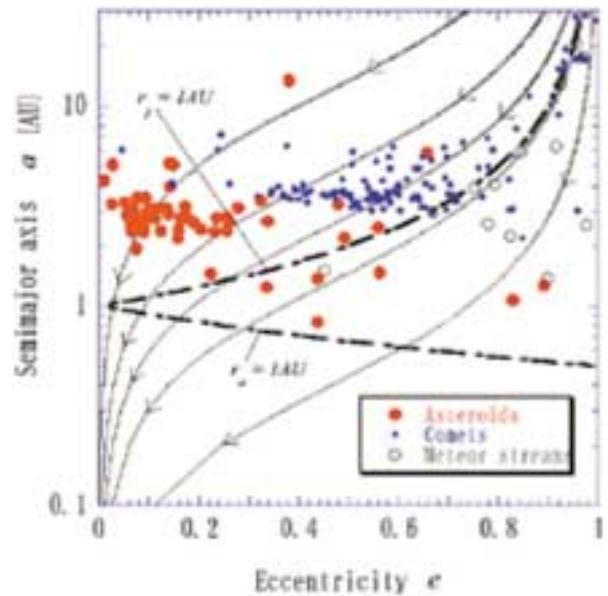


図11：小惑星、彗星の軌道と比較した、太陽系内における固体微粒子の軌道進化の方向（矢印付の線）。

軌道長半径 a 、離心率 e ともに、次第に小さくなる方向に変化する(図11)。このような軌道進化により、小惑星や彗星など、太陽から遠く離れた場所で生成した粒子が地球軌道近傍まで来ることが可能である。そのタイムスケールは、サイズ $300\mu\text{m}$ 、密度3程度の粒子で $10^5 \sim 10^7$ 年程度である。

一方、惑星間塵粒子は軌道進化を行う間、宇宙線の照射を受け、内部に ^{10}Be (半減期 1.5×10^6 年)、 ^{26}Al (半減期 7.1×10^5 年)などの宇宙線生成核種を蓄積する。これら宇宙線生成核種の生成量は、宇宙線の照射履歴を反映するが、それは粒子の起源や運動履歴に依存する。したがって、スフェールール中の ^{10}Be 、 ^{26}Al の含有量を測定すれば、それらが本当に惑星間塵粒子であったのか、あるいはさらに、それらが本当に彗星や小惑星を起源とするのか、といった情報が得られる。

東京大学原子力研究総合センターのタンデム加速器を用い、AMS(加速器質量分析)の手法により、現在までに40個の深海底スフェールール中の ^{10}Be 、 ^{26}Al の含有量を測定した(図12)。

その結果、測定されたスフェールール粒子は惑星間空間での軌道進化の途上で地球に捕獲されたものであること、すなわち、惑星間塵の粒子であることがわかった(4 pi SCR model)。さらに、モデル計算との比較から、(i) それら惑星間塵粒子は、その軌道の近日点距離または遠日点距離が1 AU、すなわち地球軌道と一致した場合に選択的に地球に捕獲される傾向にある、また、(ii) 惑星間塵の軌道運動に関しては、相互衝突、惑星による重力的散乱が大

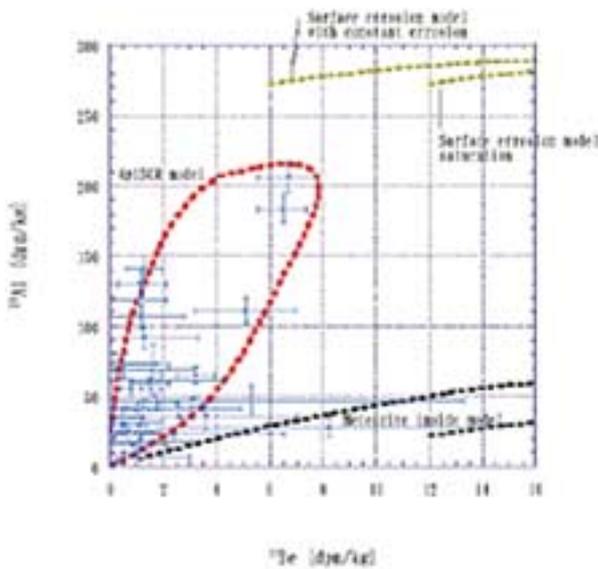


図12：深海底スフェール中の宇宙線生成核種の測定値の分布。

きな役割を果たしている、などのことが分かった。

(2) 南極の宇宙塵 (獨協医科大学 野上謙一)

地上で得られる宇宙物質といえば隕石で代表されるが、ずっと大きさの小さい宇宙塵も興味ある物質として研究の対象となってきた。深海底の堆積物や、高山の雪、極地の氷などの中から見つかる1mm以下の球状粒子(スフェール)はいち早く地球外のもものと確認され、隕石との違いなどが議論されてきたが、一度熱変成を受けている球状粒子よりも更に始源的な試料へと研究対象が移ってきた。地球上で孤立している南極大陸の膨大な量の氷の中には地球外から高速で飛び込んできたにもかかわらず、小さい(10 μ m以下)ため加熱されず、氷の中で風化作用も受けていない宇宙塵が大量にあるはずである。我々はコンソーシアム(共同)研究グループを設立し、このような「新鮮」な宇宙塵の大量採取計画を立て、採集、分離、予備分析、キュレーション方法の確立を行ってきた。

この計画で本格的な南極での宇宙塵採集に先立ち、始めに行ったのは、南極内陸の「ドームふじ」基地で使用する水を作る融雪槽に溜まった沈殿物を用いた予備実験であった。試料はフィルターを用いてサイズ分離し、その中から顕微鏡下で地球外物質とおぼしき物を拾い出し、分析型電子顕微鏡(EDS)で分析するという根気のいる作業を行った。この結果、あまりよい試料とはいえない融雪槽の沈殿物中にも宇宙物質が見出された(図13)。

この予備作業での他の重要な作業は、このように集め、分離、拾いだし、予備分析を行った試料を国

内外の研究者が利用できるようなキュレーション(配布)システム作りであった。これは極地研の隕石配布システム、NASAの飛行機集塵による宇宙塵配布システムを見習って作り上げた。試料の公開はWeb上でいき、個々の試料の走査電子顕微鏡写真、組成分析値、サイズなどの特徴をまとめてある。研究者は研究計画とともに、この中から希望の試料を請求し、審査を受け、その資料を手にすることが出来る。南極での本格的な試料採集は1998年 1999年の第39次南極越冬隊によって行われた。この隊では裸氷帯での隕石探査を行うとともに、同地点で氷の融解を行い、その中の微粒子を10、40、100、238 μ mの4段階のフィルター上に集めるという作業を行った。解かした氷は35.8tonで溶融にかかった時間は合計171時間であった。持ち帰った試料は、フィルターからはずし、顕微鏡下で拾いだしを行い、予備実験で行った手順で分析、キュレーションを開始した。また、この試料を用いた研究も始まり、2000年6月の南極隕石シンポジウムでもいくつかの発表があった。

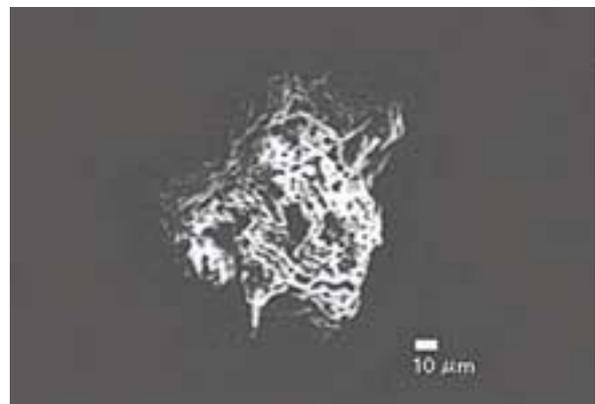
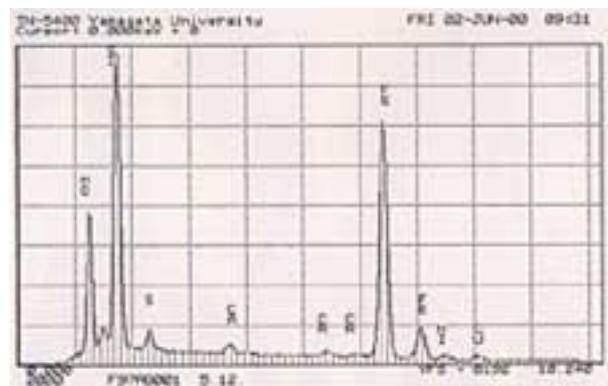


図13：山形大学において分析走査電子顕微鏡を使用して分析した試料の写真と元素組成である。この元素組成はNASAカタログで宇宙起源といわれているものと非常によく一致している(鈴木氏分析)。

4. 柏微弱放射能測定設備



図14：東大宇宙線研究所地下20mにある柏微弱放射能測定設備。

本年3月に東大柏キャンパスに宇宙線研究所が移転し建物が新設され、地下20mのところ到低バックグラウンド高純度Ge半導体ガンマ線検出器3台からなる柏微弱放射能測定設備が整備された(図14)。主な研究テーマとしては隕石・宇宙塵中の ^{26}Al や大気浮遊塵中の宇宙線生成核種 ^7Be 、 ^{22}Na の測定および宇宙塵の中性子放射化分析である。1例として山形大学で連続的に観測している大気中宇宙線生成核種 ^7Be 濃度の年変動と太陽黒点数の年変化の相関を示す(図15)。このように現在の太陽活動と宇宙線生成核種の関係を詳しく調べることは、過去の宇宙線生成核種の測定から昔の太陽活動を推定する場合に重要となる。

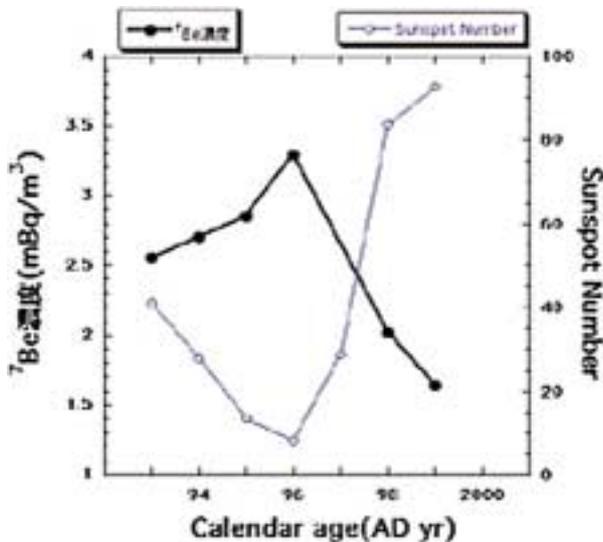


図15：大気浮遊塵中の ^7Be 濃度の年変動測定と太陽黒点数の年変化の相関。

これらの測定は微量試料で微弱放射能のため非破壊で行える低バックグラウンド測定システムが必要となる。このため、設置室は壁にマインガード塗料によりラドン対策をほどこしており、検出器材料は放射性不純物を含まないものを使用し検出効率を上げるために井戸型にしている。なお、検出器本体は約1.5トンの高純度鉛容器で遮蔽している。

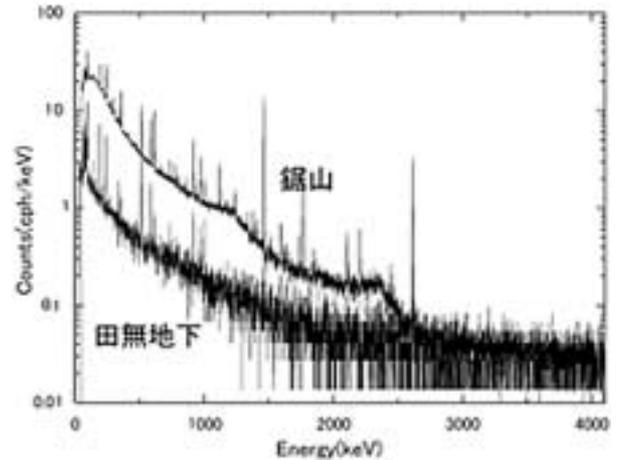


図16：鋸山と田無地下実験室のバックグラウンドスペクトルの比較。

図16は、鋸山および田無地下のバックグラウンドを比較したもので、 ^{208}Th と ^{40}K に起因するピークが小さくなったためコンプトンエッジを含む連続バックグラウンドが減少している。様々な放射性各種に起因するピークが減少していることがわかる。しかし511keVの消滅 γ は増加している。

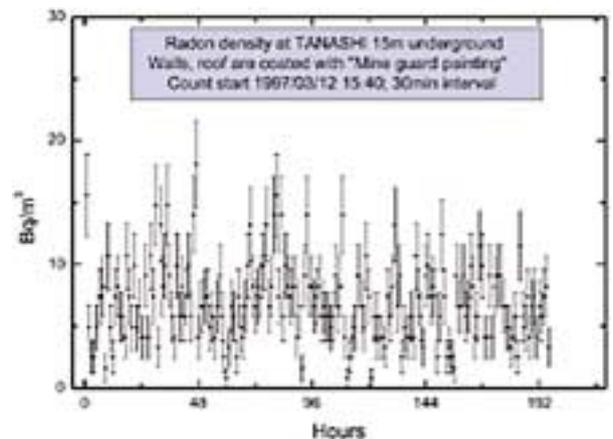


図17：田無地下におけるラドン濃度の時間変動。

図17は田無地下におけるほぼ9日間にわたるラドンの連続計測データである。平均値は 7Bq/m^3 であるが、約60時間の周期的変動が観察された。現在柏地下実験室において検出器の調整を進めている。

また、バックグラウンドレベルおよびラドン濃度の連続測定を行っており、まもなく微量試料の本格的測定が始まる。

この原稿を書くにあたり、名大STE研 増田公明

氏、東京水産大 大橋英雄氏、立正大 福岡孝昭氏、京都大 田澤勇二氏、山形大 鈴木善美に多くの御協力を頂いた。

会議報告

Neutrino2000国際会議報告

東京大学宇宙線研究所 福田善之、森山茂栄

第19回ニュートリノ物理学と宇宙物理学国際会議 (Neutrino2000) が6月16日から21日までカナダ東部オンタリオ州のサドバリで開催された。ここはSNO実験のお膝元ということもあり、excursion以外でもSNO実験施設の見学が連日盛り込まれていた。会議には30カ国以上から約350名が参加し、様々な報告や議論がなされた。初日は太陽ニュートリノ実験の現状と原子炉実験について報告があった。

まず、誰もが注目したSNOの結果だが、残念ながら太陽ニュートリノのフラックスは数値として報告されなかった。但し、弾性散乱反応及び荷電カレントによる太陽方向分布、そして荷電カレント事象のエネルギー分布が紹介された。後者に関しては、一応シミュレーションとの比較が行われ、7 MeV以上では実験と理論に大きな違いが無いように見受けられた。現在の実験は今年一杯まで継続し、荷電/弾性反応比を求める予定である。その後、Phase-IIとして塩を注入し、またPhase-IIIでは中性子カウンターを設置し、中性カレントを測定するそうである。

Super-Kamiokandeは1117日分のデータを公表し、 ${}^8\text{B}$ ニュートリノのフラックスは太陽標準モデルの $0.465 \pm 0.017 - 0.014$ 倍、エネルギー分布では5 MeV以上のデータを公開した。また、昼夜のフラックスの差は3.4% (1.3σ)であった。ニュートリノ振動の解に対しては、Global fitで許していた混合角の小さい解と質量差が 10^{-10}eV^2 付近の解が95% C.L.で許されなくなっているとの報告があった。また $\nu_e - \nu_s$ 振動も95% C.L.で許されなくなっていた。Ga実験ではSAGEとGNOの報告があった。SAGEは90年から99年までのデータを再解析した結果、最終的な捕獲率として $75.4 \pm 7.8 - 7.4$ SNUが得られた。将来的には2005年まで運転する予定である。GNOは30トンで既に実験が開始しており、Gallexの結果を追認した結果を得ていた。Gallex/GNO全体の捕獲率は $74.1 \pm 6.7 - 6.8$ SNUであった。将来的には60トンから100トンにまで拡大する予定

だという。Homestake実験は、 ${}^8\text{B}$ と ${}^7\text{Be}$ ニュートリノを区別するためのfast extractionの方法が紹介された。また、 ${}^{37}\text{Cl}$ と ${}^{127}\text{I}$ を併用した観測計画も報告があった。Borexinoは主な物品の搬入はほぼ終了し、建設が順調に進んでいると報告した。来年半ばまでに液体シンチレータの注入が開始するという。将来実験として、 ${}^{176}\text{Yb}$ を使ったLENSや ${}^{100}\text{Mo}$ 等のニュートリノ捕獲による実験、HeronやCLEANなどHeやNeを用いた弾性散乱反応実験が紹介された。

会議に先立って、6月15日に1 MeV以下の太陽ニュートリノ実験についての研究会が行われ、バックグラウンドの除去など技術的な課題について活発な議論がなされていた。太陽モデルとHelioseismologyについてレビューの後、太陽ニュートリノ実験のデータを使ったGlobal解析について報告があった。原子炉からのニュートリノ振動実験では、Palo Verdeの報告があり、Choozのexclude領域よりは小さい領域を除去していた。KamLANDは現在建設が順調に進んでおり、来年の実験開始を予定している。

この後、MUNU実験による μ の測定について報告があった。1 MeV付近の γ spectroscopyなので、 ${}^{222}\text{Rn}$ を 10^{-4} 除去しないといけないという。この他、Contributed PaperとしてLSNDの領域をカバーするOR-LaNDと地下原子炉からのニュートリノを2箇所の測定器で観測するKRASNOYARSK実験の説明があった。

2日目は、大気ニュートリノ実験と加速器によるニュートリノ振動実験についてのセッションであった。

Super-Kamiokandeは1144日分のデータを公表し、FC、PC及び上向き μ のデータをまとめた結果から $\nu_\mu - \nu_s$ 振動の許容解が示された。さらに、FC事象から得られた $\nu_\mu - \nu_s$ 振動の99%許容解は、multi-GeV、PC、上向き μ の事象の中で地球内部の物質効果が大きい事象を詳しく解析すると99% C.L.で排除されることが示された。LE n 依存性の解析では $n = -1.06 \pm 0.14$

であった。Soudan - 2 は5.1ktyのL/E分布から、Super-Kamiokandeと無矛盾な ν_μ - ν_τ 振動の許容解が得られたとの報告があった。MACROの高エネルギーサンプルからは ν_μ - ν_τ 振動に対してSuper-Kamiokandeと無矛盾な許容領域を出し、 ν_μ - ν_τ 振動についても2 σ で否定的な結果を報告した。

しかしBaksanでの15年近い観測の結果、MCと比較して $-0.7 < \cos\theta_{zenith} < -0.3$ 付近のデータにのみ40%程度の欠損が見られた。つまり、ニュートリノ振動ありなし関係なく、データは説明しづらいとのことであった。

大気ニュートリノの将来計画として、メガトンクラスの水チェレンコフ型検出器(UNO,AQUA-RICH)液体アルゴンTPC検出器(ICANOE)、磁場を掛けた飛跡検出器等(MONOLITH)が紹介されたが、振動パターンを精度良く測ることが本質であるとの指摘があった。また、加速器からのニュートリノとも合わせた実験(MONOLITH)やニュートリノファクトリを視野に入れた検出器が重要であると報告があった。

大気ニュートリノの理論計算では、3D計算の必要性が報告された。一方、大気ニュートリノによる振動の解析では3世代ニュートリノ振動だけではなくLSNDの結果を踏まえた4世代振動の解析が紹介された。また、振動のL/E依存性について言及があり、 ν -decay等でもL/Eによって確率が変動すると考えられるため、 τ のappearanceやL/Eのreconstructionが必要であるとの報告があった。

加速器による振動実験では、CHORUSが94年から97年までの解析を終了し、 ν_μ - ν_τ 及び ν_e - ν_τ のexcluded領域が示された。NOMADは95年から98年までのデータを解析し、 ν_μ - ν_τ についてはCHORUSより混合角の小さい領域を除外し、 ν_e - ν_τ では 10^{-2} まで感度があるとの報告があった。また、KARMEN anomalyを説明する33.9MeV/c²の質量を持つニュートリノの寿命に制限を与えた。KARMEN 2は、97年から今年3月までのデータを解析し、 $\Delta m^2 > 10eV^2$ の領域はLSNDの許容解を否定したが、それ以下の領域ではまだ完全にはexcludeしていないとの報告であった。Anomalyも消えたようだ。

LSNDは全データを新しい解析方法で見直したが、やはり $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$ 事象のexcessがあった。 $\Delta m^2 > 0.2eV^2$ のもと0.25%の割合でニュートリノ振動が生じている証拠であるとの報告であった。K2Kは99年6月から今年の3月までのデータを解析し、Super-Kamiokandeでの観測数が17事象、一方、振動なしでの期待値が29.7、及び大気ニュートリノの ν_μ - ν_τ 振動

のbest fitを仮定した場合の期待値が19.3であることから2 σ で振動無しの解は否定されるとの報告があり、会場が沸きあがった。Mini-BOONEはLSNDの領域を見るためのshort baseline実験で2001年12月に開始すると報告があった。

MINOS及びICANOE/OPERAのlong baseline将来計画の講演後、NUTEVの結果報告及びDONUTによる5個の τ の検出が報告された。

3日目はニュートリノファクトリについての理論的目的、加速器技術および観測側の現状が報告された。

特に3000 - 7000km離れて μ ビームと反対の符号の μ を測定すると、 $\sin^2 2\theta_{13}$ 、 $\sin^2 2\theta_{12}$ 、 Δm^2_{12} が大きければCPの破れの測定が可能になるとの見解が示された。

引き続き、 $\beta\beta$ 崩壊実験の現状及び将来実験についてのレビューがあった。現状の実験では⁷⁶Geが0.2eVの上限値をあたえているが、将来的に0.02eV程度の感度の検出器(NEMOやURANUS)が必要であるとの見解であった。ニュートリノ質量の直接測定実験では、Mainzが99年までのデータを解析し、 $m_\nu < 2.2eV$ (95% C.L.)を得ている。

将来的には更に規模を拡大して0.5eVの感度まで上げる予定である。また、GENIUSでは0.01eV以下の感度を目指すという。一方、Troiskでは $m_\nu < 2.5eV$ (95% C.L.)を得ているが、Troisk Anomalyと呼ばれるあるエネルギーを境に段階的にエネルギー分布が理論と異なる現象が見られると報告した。この現象は更に時間変化も観測されるらしい。この点について、Mainzグループとデータ収集時期をシンクロさせて観測するそうである。 ν_τ の質量の直接観測については、CLEO、OPAL及びALEPHの結果を総合した質量の上限值として15.5MeV/c² (95% C.L.)であると報告があった。将来的にはBARBARとBELLEにより3MeV/c²が期待されている。

この日の後半は、現象論と理論のトークであった。紙面の関係上、全てを紹介できないので詳細は公式サイトを参照して頂くとして、ここで興味があったのはニュートリノ振動の発見はニュートリノの質量によるものではなく、Extra Dimensionによるものだとの講演であった。実験家にとって内容は複雑であるが、興味深い報告であると思われる。

3日目のExcursionを挟んで、4日目は超新星ニュートリノとダークマターの報告であった。

超新星ニュートリノの観測では、SK、SNO以外に、高いZの物質によるニュートリノ捕獲によるOMINIS、LANDが紹介され、ニュートリノの質量

の制限やニュートリノ振動についての可能性、また Core Collapseのメカニズムに対する理論的な制限の可能性について報告があった。

一方、ダークマター (WIMP) の観測についてのレビューがあり、一般的な方法であるGeを使った IGEXやHDMS、Cryogenic検出器の紹介があった。いずれにしても、Galactic haloに局在しているWIMPを探索しているので、最終的には季節変化を見ることになる。DAMAの観測結果について報告があり、系統誤差を見積もっても 4σ の季節変動が観測され、 $M_w = 40 + 12 - 9 \text{ GeV}/c^2$ が得られるらしい。

現在もデータ収集中であり、さらに250kgのNaIを使いデータの質を向上するとのことであった。また、GeとSiを使い γ 線事象/原子核反跳事象を区別できるCDMSの紹介もあった。

98年には原子核反跳事象が13事象観測されたが、それらは中性子線である可能性が高いためにWIMPに対する制限をつけるという議論がなされている。その結果DAMAの許容領域の一部も否定されている。さらにHDMS等、他の実験の結果を待ちたい。

ダークマター - の将来実験として、MACHe 3、CRESST、CUORE、GENIUS等多数の実験が紹介された。非直接的観測として太陽や地球からのニュートリノ、銀河ハロー中でのダークマター - 対消滅による異常宇宙線の観測、銀河ハローからのガンマ線の観測が紹介された。

ダークマター候補のaxionに関する実験的・理論的なレビューもあった。宇宙論から宇宙の構成要素や幾何学に関するトークがいくつかあったが、要約すれば銀河ハロー中のMACHOはダークマターを説明するには十分ではなく、現在の問題点は非常に大きいスケールで広がっているダークエネルギーの正体を突き詰めることだと議論されていた。

最終日は、超高エネルギーのニュートリノ観測について講演があった。

AMANDAはAMANDA-IIのストリングを昨年夏に設置し、50,000m²の観測領域に達している。昨年までのデータを解析した結果、AGN、GRB等の点源探索を行ったがexcessはなかった。また、約170事象の大気ニュートリノ事象の候補が観測された。将来実験として、NESTOR、ANTARES、IceCubeが報告された。

また、Baikalは現在の状況を報告し、更に音波による超高エネルギーニュートリノの反応のR&Dが紹介された。将来計画のレビューの後、超高エネルギーニュートリノの発生機構やフラックスの理論的予想がなされた。また、超高エネルギーニュートリ

ノに関連して、GZK cut-offを超える最高エネルギーの宇宙線観測や高エネルギーガンマ線観測、またGRBでの粒子加速と超高エネルギーニュートリノの発生の説明等があった。更にAUGER、OWLの紹介もあり、最後にJ.EllisのConference Summaryをもって会議は終了した。

今回のトピックは、手前味噌で恐縮してしまうが、Super-Kamiokandeの太陽ニュートリノ解析によりLMAが支持されつつあることと、K2Kがニュートリノ振動を 2σ で支持したことはないかと思う。SNOは半年のデータであったことから、最初の結果を公表するには統計が少なすぎたと思われるが、事象率が大きいので近いうちに結果が公表されることを期待したい。次回は2002年、ドイツのミュンヘンで開催される。

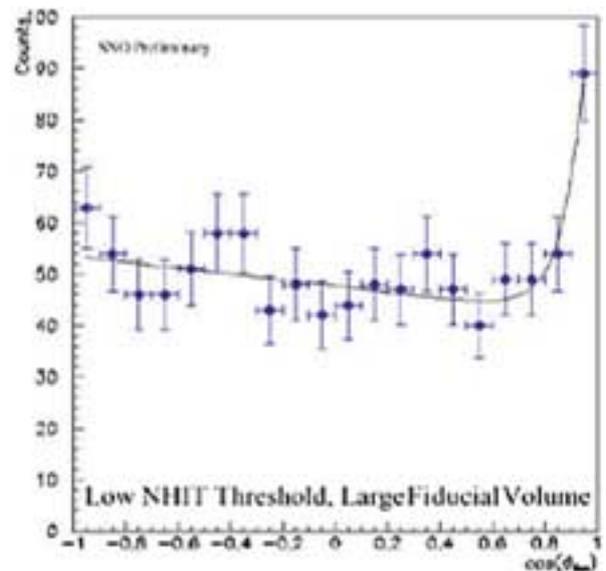


図1 . SNOの太陽ニュートリノ方向分布の観測結果。横軸は太陽方向からはかった角度の余弦。右に見えるのがニュートリノ・電子散乱による事象で、左あがりのなだらかな部分は電子ニュートリノと重水素の荷電反応による成分を含む。

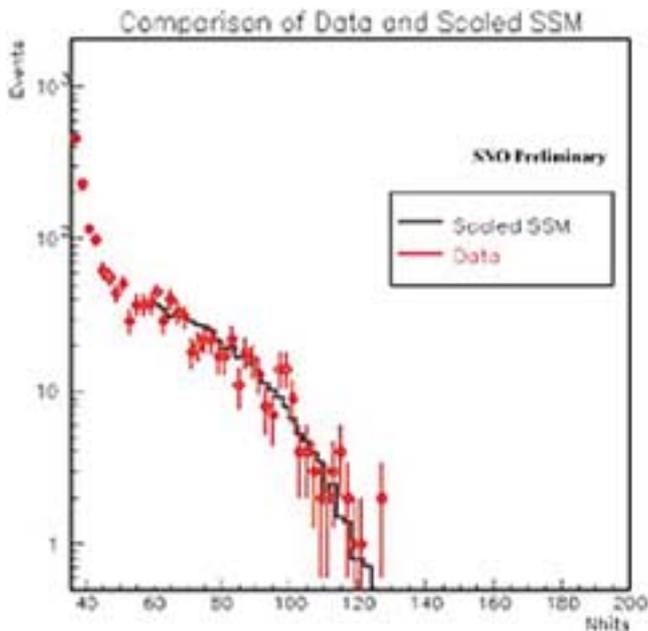


図2 . SNOのエネルギー分布の観測結果。横軸はPMTのhit数。9 hitが1 MeVに相当する。実線は標準太陽モデルから期待されるスペクトルをスケールしたものであるが、スケールの値は示されなかった。

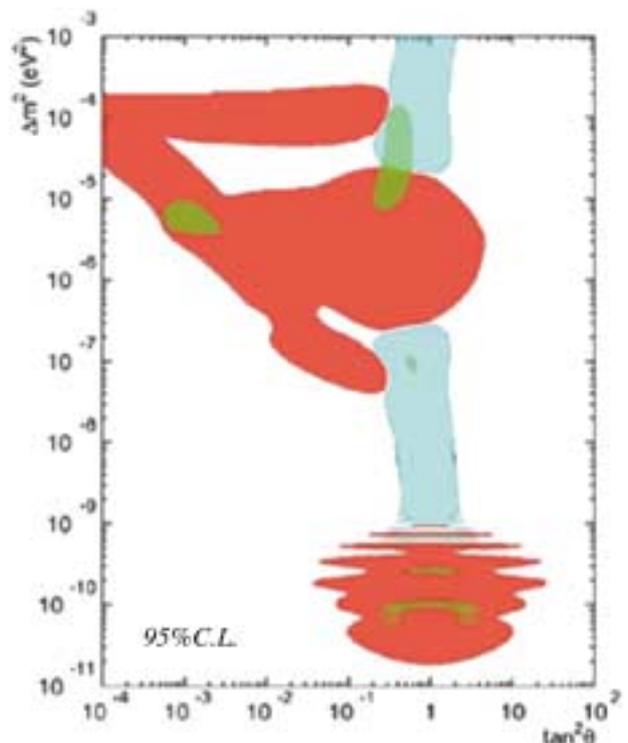


図3 . Super-Kamiokande (SK) の太陽ニュートリノ観測から解析されたニュートリノ振動の図。緑の部分はCl、Ga、Kamiokande、SKのフラックスのみを使いglobal解析した時に95% C.L.で許される領域。赤い部分はSKの昼および夜のエネルギー分布を解析したときに95% C.L.で得られる排除領域。水色の領域はSKのフラックスの制限を付けて昼および夜のエネルギー分布を解析した時に95% C.L.で許される領域である。global領域で混合角の小さい解と真空解は、今回のSKの結果により95% C.L.で許容されなくなった。

委員会報告

宇宙線研究所外部評価報告

東京大学宇宙線研究所 大橋正健、福島正己

2000年6月12日付けで出された宇宙線研究所外部評価委員会 (ICRR News No. 40参照) の報告書について以下にその概要を記す。ただし報告書は英文で書かれているので、詳細については、まもなく出版される原文を見ていただきたい。

要約 (全文)

本委員会は、今回の外部評価で報告された宇宙線研究所の際立った科学的成果を高く評価する。それには以下の成果が含まれる。

- スーパーカミオカンデによる、大気ニュートリノにおけるニュートリノ振動の確証と太陽ニュート

リノ問題への基礎的貢献 (最初のニュートリノ望遠鏡)

- AGASAによるGZK限界を超える超高エネルギー宇宙線の発見
 - CANGAROOによる銀河系起源のTeVガンマ線の検出
- 本委員会は、チベットでの空気シャワーアレイによるガンマ線観測の結果にも注目した。近い将来には、以下の実験からも成果が期待できる。
- K2K長基線ニュートリノ振動実験
 - CANGAROOの大型ステレオ望遠鏡への拡張
 - TAMAレーザー干渉計型重力波検出器

●スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) 計画

これらの科学的成果は学際的で、素粒子物理学、天文学および宇宙論に対して強いインパクトを与えるものである。同様に、本委員会は宇宙線研究所の将来計画2件を綿密に検討した。

●GZK限界を超える宇宙線を研究するための宇宙線望遠鏡計画 (TA)

●大型低温重力波望遠鏡計画 (LCGT)

本委員会は、これらの実験の物理的意義は重要であり、計画に責任を持つ研究者の、当該分野での競争力・経験ともに充分であると判断する。従って、宇宙線研究所に対し、計画の実現に向けて努力するよう強く勧告する。これらの計画を技術的に可能にするためには、それぞれにおける研究開発を増強することが大切である。TAに関しては、大気吸収の影響を系統的に評価するために、集中的な研究開発が必要であるが、この研究開発と平行してTAの建設予算要求を始めるよう勧告する。TAの米国共同研究者については、建設予算を得る為に他の同様な計画との厳しい競争をしなければならない。予算獲得にはSAGENAP委員会による徹底した評価を経ることが条件である。本委員会は、重力波を観測するレーザー干渉計としての運転達成に向けてTAMAが示した顕著な進展を高く評価する。一方LCGTの建設を始めるには、TAMAの予定性能を実現し、感度を決める雑音源、特にLCGTに固有な問題を理解することが必要である。

宇宙線研究所の人的資源と組織については、日本国内・国外の大学研究者と、リーダー的役割を担った宇宙線研究所の少数の研究者の連携が成功して、現在の成果が達成されたと本委員会は強調する。そ

れは、大規模実験において広範な科学者グループからの貢献を得るためには、実験に専心する科学者グループが有効に働くべきことを示している。この意味において、宇宙線研究所は、非加速器物理や天体物理の分野で、他には見られない本質的な役割を果たしている。宇宙線研究所においては、日本に固有な全国共同利用研究所の制度が適切に機能していると考えられる。しかし、本委員会は、宇宙線研究所が教官および技官の定員を増やす最大限の努力をすることを勧告する。現在進行中または予定されている実験の潜在的科学成果の大きさを考えるならば、国内外を問わず世界中から共同研究者を招聘する努力も怠るべきでない。

この後に、科学的成果 (スーパーカミオカンデとK2K実験、AGASA、CANGAROO、チベット空気シャワーアレイ、TAMA、理論、SDSS)、将来計画 (CANGAROO-3、TA、LCGT) 組織についての報告が続き、最後に以下の文章で締めくくられている。

スーパーカミオカンデやその他の実験がこの外部評価で示したように、基礎科学の価値は人間の生活や文化に対する貢献であることを、本委員会は強調する。宇宙線研究所が果たした役割は、この自然科学の営為の中でも非常に力強いものであり、これによって日本の物理学者は自然の基礎的な理解への貢献を果たすことになった。本委員会は、宇宙線研究所が専門外の人々に基礎科学の価値を伝える最前線に立つことも勧めたい。専門の作家や他分野の有識者の助力を得て、さらに広く一般に浸透することを望むものである。

ICRR Report 2000年度

4月25日(火) Prof. S. Schoenert (Max Planck Inst. at Heidelberg, & ICRR, Univ.of Tokyo客員)

"Real Time Spectroscopy of Solar Neutrinos at Low-energies : Borexino & LENS."

4月27日(木) 粕谷 伸太 (東京大学理学部ビッグバン宇宙国際研究センター、日本学術振興会特別研究員)

"Q-ball Formation through Affleck-Dine Mecha-

nism."

5月16日(火) 山本 常夏 (東京大学宇宙線研究所)

"活動銀河中心核からの高エネルギーガンマ線の観測"

5月23日(火) 幡中 久樹 (東京大学宇宙線研究所、日本学術振興会特別研究員PD)

"ゲージ階層性問題とExtra Dimension"

5月30日(火) 竹田 成宏 (東京大学宇宙線研究所、日本学術振興会特別研究員PD)

"AGASA : Results and Future Projects"

6月6日(火) 小山 勝二 (京都大学理学部教授)
"我々の銀河中心の高エネルギー活動：現在・過去"

6月13日(火) 曹 基哲 (お茶の水女子大学理学部講師)
"Supersymmetry versus precision experiments revisited"

6月27日(火) Vadim A. Kuzumin (ロシア科学アカデミー原子核研究所教授、現在京大基礎物理学研究所にCOE招聘外国人として滞在)
"Ultra-High Energy Cosmic Rays and Superheavy Particles"

7月3日(月) Livio Scarsi (パレルモ大学教授)
"BeppoSAX entering in the fifth year of operation
EUSO : opening a window on the Extreme Universe."

7月7日(金) 小玉 剛 (リオ大学)

"Entropy Based Relativistic Smoothed Particle Hydrodynamics—Application to Ultra High Energy Nucleus—Nucleus Collisions."

7月11日(火) 江澤 潤一 (東北大学理学部教授)

"場の理論に基づく量子ホール効果の新展開：巨視的コヒーレンス、SU(4)スカーミオン、ジョセフソン効果・・・"

7月18日(火) 福田 善之 (東京大学宇宙線研究所)

"ニュートリノ実験の現状と将来計画"

ICRR Report 2000年度

ICRR-Report - 460 - 2000 - 4 (March2000)

"Simultaneous Observation of Families and Accompanied Air Showers at Mt. Chacaltaya (II)
Study of Hadronic Component in Air Showers"

人事異動

(平成12年8月1日現在)

発令日	氏名	異動内容	現(旧)官職
平12.3.31	湯田 利典	停年退職	教授(エマルション)
"	"	乗鞍観測所長併任解除	
平12.3.31	佐々木 九美	定年退職	事務官(総務掛)
平13.3.31	井上 進	任用期間終了	研究所研究員(理論)
平12.4.1	福島 正己	乗鞍観測所長に併任	教授(空気シャワー)
平12.4.1	奥村 健一	研究所研究員(採用)(理論)	
平12.4.1	山本 常夏	研究所研究員(採用)(空気シャワー)	
平12.2.29	米原 徹也	辞職	乗鞍観測所(併施設掛員)
平12.4.1	葛西 邦明	工学系研究科等経理課専門職員(監査担当)	専門職員(契約担当)
平12.4.1	柳澤 知治郎	農学系経理課主計掛長	共同利用掛長
平12.4.1	阿部 義比古	医学部・医学系研究科厚生掛主任	総務掛主任
平12.4.1	中村 弘	共同利用掛長	教養学部等総務課教室事務掛長
平12.4.1	静井 さおり	総務掛員	医学部附属病院医事課医事掛員
平12.4.1	小幡 砂智子	総務掛員(図書室)	物性研究所総務課図書掛員
平12.7.1	高山 賢洋	人事課(併文部省大臣官房人事課審査班審査係員)	共同利用掛員
平12.7.1	蛭川 聖二	共同利用掛員	農学系経理課用度掛員

「ICRR International Symposium on Future Trends in Cosmic Ray Physics」のご案内

宇宙線研究者間で今後の宇宙線研究及び関連研究の方向に関して議論するため、標記シンポジウム開催を予定しております。プログラム及び開催の詳細は以下の通りです。皆様の積極的な御参加を期待しております。

日時：平成12年10月11日（水）、12日（木）

場所：宇宙線研究所 6階大セミナー室

定員：130人

参加費：8000円

参加申込締切：2000年9月30日（定員になり次第申し込みを締め切ります。）

申し込み方法：原則として、ホームページ

（<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/icrr2000/>）での申し込みといたします。

プログラム

10月12日

9:00 - 10:00 Registration, Coffee

10:00 - 11:00 Y.Totsuka: Cosmic Ray Physics: Past, Present, and Future.

11:00 - 12:00 H.Sobel: Search for Neutrino Mass with Non-accelerator Neutrino Experiments.

== Lunch ==

13:30 - 14:30 K.Nishikawa: Future of Neutrino Oscillation Studies with Accelerator Neutrino Beam.

14:30 - 15:30 H.Voelk: High Energy Gamma-ray Astrophysics.

== Coffee ==

16:00 - 17:00 F.Takahara: Theoretical Aspects of Gamma-ray Astrophysics.

18:00 - 20:00 <<<<< Party >>>>>

10月13日

9:00 - 10:00 Registration, Coffee

10:00 - 11:00 G.Farrar: Strong Constraints on Theory from Cosmic Rays above and below the GZK Cutoff.

11:00 - 12:00 M.Fukushima: The search for the origin of super-GZK cosmic rays experimental prospects.

== Lunch ==

13:30 - 14:30 K.Nakamura: Search for Proton Decay.

14:30 - 15:30 T.Nakamura: Review of Gravitational Wave Detection.

== Coffee ==

16:00 - 17:00 R.Savage: LIGO Current Status.

連絡先 277 8582 千葉県柏市柏の葉5 1 5 東京大学宇宙線研究所 梶田隆章

電話 0471 36 3138 FAX0471 36 3126 icrr2000@icrr.u-tokyo.ac.jp

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/icrr2000/>

尚、10月14日にはサテライトシンポジウムも予定されています。プログラム等は同じホームページからご覧になれます。

No.41

2000年8月1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 (0471) 36 - 3143又は5104

編集委員 佐々木 梶田