



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/ICRR_news) からでも御覧になれます。

ケプラー超新星残骸は爆発後400年たっても
宇宙線を生成していないのか？

……………榎本良治・吉田龍生 1
チベット実験の近況報告……………瀧田正人 6

平成19年度共同利用研究成果発表会報告

……………早戸良成 11
ICRR セミナー …………… 16
ICRR レポート …………… 16

研究報告

ケプラー超新星残骸は爆発後400年たっても 宇宙線を生成していないのか？

(ICRR) 榎本良治
(茨城大) 吉田龍生

皆様は宇宙線の超新星残骸起源説をご存知でしょうか？以下にちょっと長い Introduction の後に CANGAROO-Ⅲ によるケプラー超新星残骸からのガンマ線の上限值に対する観測結果とそこからの邪推を述べますが我慢して読んでください。信号が見えなくても意義ある物理を CANGAROO-Ⅲ は出せるということを皆さんにも知ってもらいたいのです。そのために最初に宇宙線の超新星起源説について簡単な紹介から始めたいと思います。

宇宙線の超新星残骸起源説：アルペーンはプラズマ雲が静止している磁力線を通過するとあたかもプラズマ雲の運動エネルギーが磁力線の運動エネルギーに転化するという理論を打ち立てましてノーベル賞を受賞しました^[1]。これは実験室レベルでも検証されておりアルペーン波として知られています。アルペーン波は宇宙における分子雲の運動エネルギーから考え巨大なエネルギーを持った磁力線の複雑に運動する振動エネルギーになります。フェルミ（別な

仕事でノーベル賞）はこの巨大なエネルギーをもっていて乱雑に振動している磁力線間にプラズマが置かれた場合に粒子加速が行われることを示しました（フェルミ加速^[2]）。この粒子加速の効率は2つの磁力線が相対的に近づいている場合に最大になります。相対速度が大きく磁場が強い方が加速効率は上がります。すなわち超新星残骸におけるショック波が希薄なプラズマを通過する 때가それです。ショック波の速度がそこにあるプラズマの音速を超える場合に極限的な粒子加速が実現できます（ショック加速^[3]）。超新星残骸が吐き出すショック波の時間変化はセドフによって導出され超新星爆発から1万年後程度までこの状態が続きます^[4]。ただしこれらはあくまで類推の域を脱せず信用できる定式化は今後の課題です。太陽系における宇宙線のエネルギー密度は観測されています。これを超新星爆発頻度でわってみると爆発のエネルギーの10%^[5]が“アルペーン波→宇宙線加速”という連鎖においてエネルギー転化がなされていれば宇宙線の起源を

説明できます。これは21世紀の観測物理学におけるテーマのひとつです？はたしてこのパラダイムがなりたつのか？他にも宇宙線加速起源があるのか？であればそれはなにか？いまだ私たちはそれを知りません。これを知るために行っている Project が CAN-GAROO-III です^[6]。

それではこれまでに宇宙線の加速現場として同定された超新星残骸を見てみましょう。ただしそれを考えるためには距離と爆発時間がわかったもの（あるいは類推されたもの）が有益です。X線とかラジオとかの観測が多数あり、あたかも宇宙線の発生場所であるかのごとき論文が多数ありますが、X線もラジオも宇宙線の存在はいえるのですが星間磁場を仮定せずには宇宙線の密度を定量的に測定できません（シンクロトロン放射であるため）。10%という巨大なエネルギー効率があるのかないのかが最大の焦点なのです。星間磁場の測定は不可能ではないにしても現状の観測アイデアでは非常に難しいことは否めません。これらはあくまで類推に多くたよった議論なのです。TeV ガンマ線の観測は磁場による制約はありません。磁場というパラメーターの不定性を排除して、データを見ることが可能になります。TeV 観測を基本とした古代文献上に残された歴史的超新星残骸の報告をここに示します（表1）。歴史上というのは文献上に記されたといわれるものです。さらに爆発時間は極めて大事な物理量でありこれがわかれば基本的方程式を得るための大事な基本となります。ただし位置のわかっていないものと文献のはっきりしないもの、および等級のはっきりしないものを省きます。なお UL というのは TeV ガンマ線を観測したが有意な信号が得られていない天体です。

これを見るとかなりの超新星残骸が TeV ガンマ

表1：文献に記録されている歴史的超新星残骸。C1は CAN-GAROO-I、C2は CANGAROO-II、？は Preliminary 結果（=Unpublished）。UL はガンマ線が見えなくフラックスの上限値のみが示された場合（Upper Limit（上限値）の略）。

爆発時間	場所	等級	TeV 観測	文献国、備考
AD185	Cen	— 2	RCW86(C2 ^[7] 、HESS ^[8]) ?	中国
AD393/396	Sco	— 3	RX J1713(C1 ^[9] 、C2 ^[10] 、他)	中国
AD1006	Lup	— 9	UL (HESS ^[11])	日本
AD1054	Tau	— 6	Crab (Whipple ^[12] 、他)	中国、米、アラブ、日本
AD1081	Cas	— 1	—	中国、日本、3C58
AD1572	Cas	— 4	—	Tyco Brahe
AD1604	Oph	— 3	今回の結果	Keper

線により観測されているという事実がわかり今後の探査が期待されます。さらに超新星爆発はその時期に地球が夜であったときにしか発見されません（1年のうち数ヶ月）ので候補としてはこの2—3倍以上あるのは間違いないところです。事実として TeV で観測された Cas A (HEGRA^[13])、RX J0852.0-462 (CAN-II^[14]) の二つは表1には載っていませんが TeV ガンマ線が検出されているのは間違いないところです。

これに対して宇宙線の発生に関する大事な議論がなされております。TeV ガンマ線が観測された複数の天体に対して統一的に記述しているのが Berezhko、Ksenofontov、Voelk の議論です^[15]。この議論は他と少々違い、時間変化を含めた非線形加速理論に基づいております。非線形というのは極めて当たり前の話であり、プラズマがその運動エネルギーを宇宙線に転化する場合に方程式をたてる場合にはプラズマの状態が変化しなければ方程式は線形です。しかしその基本状態が解である宇宙線の状態に寄与している場合は非線形で、いっぺんに方程式を解くのが難しくなります。他の理論屋さんたちが追隨していない理由はここにあるかもしれません。もしもプラズマの運動エネルギーの10%近くが宇宙線に寄与するならプラズマに対する反作用も考慮しなくてはいけないわけでこれに対する理論的な努力を今後も怠ってはいけません。ともあれこの理論によれば HESS^[16] クラスのチェレンコフ望遠鏡で有意なガンマ線が検出できると言われています。GLAST^[17]や CANGAROO-III 望遠鏡でもやや性能は劣るが許されるパラメーター領域のかなりの部分において検出可能です。すなわちたとえガンマ線が検出できなくてもその上限値によりパラメータ空間に制約をかけることができるわけです。またこの理論は Cas A、RX J1713.7-3946、や RX J0852.0-4622 などからのガンマ線も統一的に説明している数少ない理論であり、これをテストすることは宇宙線物理学にとってかなり重要なテーマであります。

CANGAROO-III 望遠鏡は南オーストラリアの内陸部の砂漠の町ウーメラに建設された高エネルギーのガンマ線の観測施設です。口径10mの反射望遠鏡が4台100m間隔で設置されており受光部分は光電子増倍管による高速カメラが取り付けられています。宇宙から来るガンマ線は大気圏に突入すると高度10kmあたりでシャープな針状の電磁シャワーを形成します。さらに紫外線を一瞬の間放射しこれを

4 台の望遠鏡でステレオ観測することによりガンマ線の到来方向、エネルギーを測定できます（チェレンコフ望遠鏡）。

観測は2005年の4月11日から17日の期間に月のない晩に行われ約15時間分のデータが取得できました。4 台の望遠鏡による4つの光学イメージから電磁シャワーを立体再構成しその中からガンマ線らしき事象のみを選び出します。図1はガンマ線らしき事象の到来方向分布を示したものです。色はガンマ線の優位性を示しています。最大でも1シグマ程度（信号のない場合の平均的な統計的現象）であり視野の範囲内で有意なガンマ線は検出できませんでした。図中の白い等高線は電波観測によるケプラー超新星残骸であり黒の点線はCANGAROO-IIIの角度分解能です。

黒点線以内の領域にあるガンマ線の事象数からケプラー超新星残骸が発するガンマ線のフラックスの上限値を求めることができます。これを上記理論の予言と比べてみたものが図2および3です（黒実線）。それと異なるパラメーターを仮定した理論の予言が色分けされて示されています。

CANGAROO-IIIによる上限値が否定できるカーブは図2においては緑、青、黄色であり図3においては緑、赤です。ケプラー超新星残骸に関しては距離の不定性をもっとも大きく3.4kpc から7 kpc あたりとの類推がなされていますが多くの論文では4.8

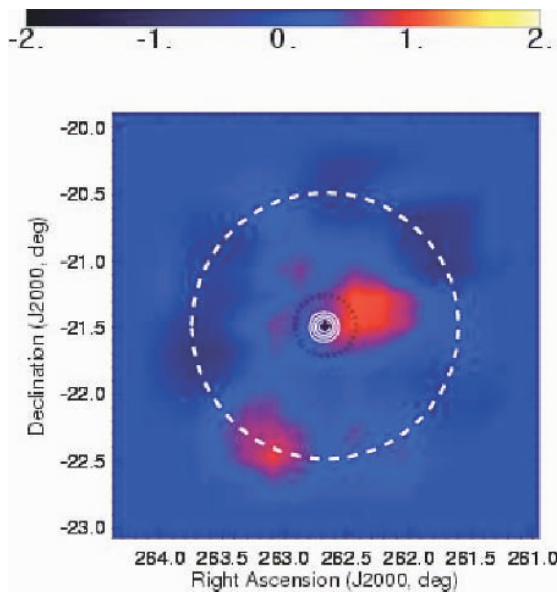


図1：ガンマ線の優位性を示す2次元マップ。視野前面にわたって有意な信号は検出できていない。黒の点線はCANGAROO-III望遠鏡の角度分解能を示す。白の等高線は電波による超新星残骸観測。白の鎖線はCANGAROO-IIIの有効視野を示す。

kpc を使っている例が多いようです（理由は明快とはいえない）。またケプラー超新星はType-Iaだと考えられているがType-Ia超新星の爆発メカニズムも実は諸説あり確定にはいたっていません。この不定性は爆発のエネルギー範囲の仮定が0.5—2（単位 10^{51} erg）の範囲にわたっていることでわかります。多くの論文では 10^{51} ergが使われています（明快ではないが信じたい）。（Type-Ia超新星は光度が一定であるということがわかっているのに爆発のエネルギーが確定できないというのは我々シロートにはなかなか納得しづらいのですが。）物質密度に関しては超新星残骸の年齢が確定している（400年）と見かけの大きさがわかっていることから距離を確定すれば一意的に求まります（なぜならType-Ia超新星爆発はチャンドラセカル限界=1.4太陽質量

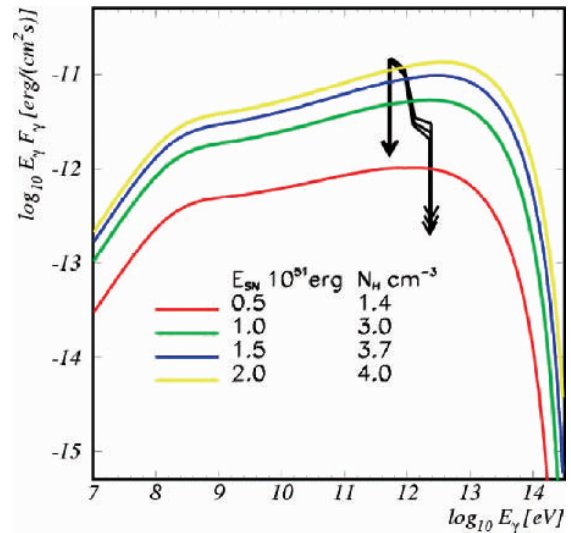


図2：CANGAROO-IIIによるガンマ線フラックスの上限値（黒）、および理論予言のカーブ。

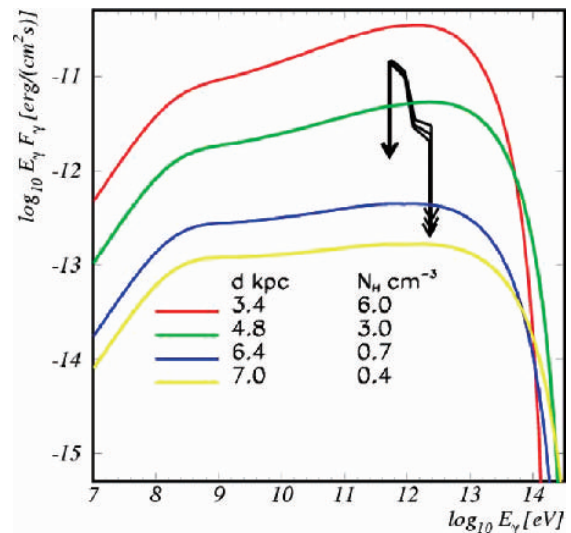


図3：CANGAROO-IIIによるガンマ線フラックスの上限値（黒）および理論予言によるカーブ。

(ノーベル賞)でおこるので吐き出す物質総量はわかっています^[18]。超新星残骸の衝撃波が時間的にいかなる速度で膨張するのかはセドフが示してわかっています。すなわちもっともよく使われているパラメータは図2—3における緑のカーブであり我々の上限値はこれと矛盾しています。すなわち理論になにか重要な変更が必要であることを示唆しています。

パラメータ空間を視覚的に示してみましょう。以下の手順および仮定を用います。衝撃波の膨張はセドフの理論を仮定します。宇宙線の生成に関しては^[15]を仮定します(図から大体読み取りました)。こうすると超新星までの距離と星間物質密度との間に図4のような関係が得られました。

銀線が爆発の運動エネルギーを 10^{51}erg (脚注1)としたもっともらしい仮定によるものであり細い実線が爆発のエネルギーの不定性を考慮した場合の許される範囲である。CANGAROO-IIIによるガンマ線の上限値はこの図上では太い実線に相当しこの太い実線より下の領域が許されます。ということは超新星と太陽系の距離は5 kpc 以上でなければなりません。

ケプラー超新星はType-Iaであるならばなぜ距離が不定なのでしょう、一般シロートの考えでは疑問があります。Type-Ia 超新星は観測的宇宙論の標準光源としてすでに使われているのに(脚注2)? 果たして本当にType-Ia だったのでしょうか?

爆発当時の明るさはケプラーその他の天文学者達により文献に記述されていますが、その中身は「1604年10月9日：金星くらい明るい」、「10月12日：木星

くらい明るい」、「10月15日：木星より明るく金星くらい」、「10月17日：木星の2倍明るい」……等という記述でした。ケプラーの時代には望遠鏡はなく(もちろん光電子増倍管もなければ、CCD もなかったわけです)これらは肉眼による観測でした。これをバーデは詳細な当時の惑星位置の解析と大胆な仮定を用いて光度曲線を捻出しました^[19]。これが見事にType-Iaの光度曲線と一致していたわけです(脚注3)。同様のことを現代の知識を用いて行うなら、すなわちType-Iaのテンプレート曲線を用いて超新星探査で行うようなフィットを試みることです^[20,21]。宇宙線研の安田さんにこれをやってもらうと距離が $4.0 \pm 0.4\text{kpc}$ という答えがでました。これは先ほど我々が出した5 kpc 以上という結論と矛盾します。すなわちこれまで使ってきたたくさんの仮定のどれかが間違っているということになります。

いったいどの仮定がまちがっていたのかこの観測だけでは知りようがありません。爆発後400年のこの超新星残骸には宇宙線がないのでしょうか? しかし推定年齢300年のCas Aにはすでに存在しています。推定年齢700年のRX J0852.0-4622にも確実に存在しています。あるいはケプラー超新星がType-Iaでないのかもしれませんが。また電波、X線では観測されておりますので高エネルギーの電子宇宙線が存在していることも確定です。ただし前にものべたように定量的にはわかりません。すくなくとも超新星探査で使用されている論理(=光度曲線からの距離の類推)を誰もが否定したくないはずだと思います。なぜならそれが宇宙のダークエネルギーの総量を%レベルで決定しているのですから。WMAP^[22]、SDSS^[23] 単独ではこの精度でそれを決定することはできません。Type-Ia 超新星の解明が大事なのです。そもそも爆発のメカニズム、エネルギーもわからないのに光度一定であると言い切ることができるものなのでしょうか。いったいどの仮定がまちがっていたのでしょうか?

ケプラー超新星残骸からのガンマ線の探査を続ける意義はあると思われます。たとえばより感度の高いHESSを使用して行えばより深いパラメータ空間の議論ができます。HESSの感度をもってしてもガンマ線が見えなければ距離7 kpc 以上までの議論が可能となり、ますますType-Ia 超新星説と矛盾が大きくなるか、あるいは宇宙線を生成していない超新星残骸を見つけたことになるのでしょうか? 将来計画であるCTA^[24]の感度をもってしても見えなけれ

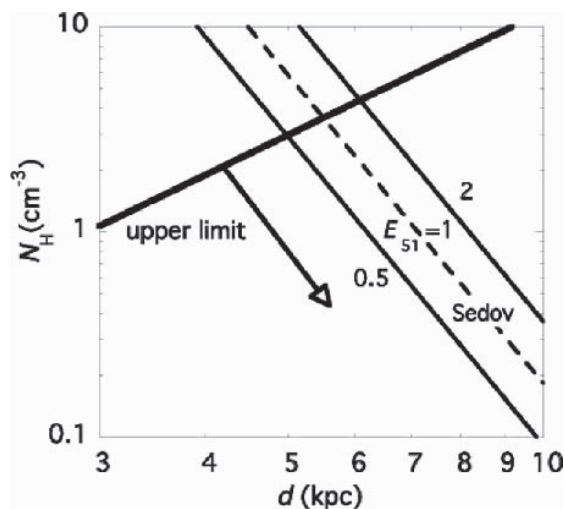


図4：星間物質密度と距離との間の関係。細い実線の間が理論の予言する範囲。太線がCANGAROO-IIIのガンマ線上限値から計算したリミット。

ばどういう結論になるのでしょうか？我々としてはもう少し低いレベルのガンマ線が HESS によって検出されてほしいと思っています。同様な考え方で SN1006^[25]も過去の明るさから考えれば Type-Ia あるいはそれ以上の爆発と考えるのが相当だと思われますが本当にここからもガンマ線は来ていないのでしょうか？感度を上げればいずれ見えてしかるべき天体ではないのでしょうか？5シグマで見えるなら20%でパラメータに制限を加えられるのです。

現状の宇宙線物理学は完璧でない。であるが、すべてが間違っているとも思えない。特別なモデルをもってきて説明できるといっても普遍的意味はないであろう。観測と合わない理由をひとつずつ解明していきたいものである。

脚注

- 1 カミオカンデによる超新星1987Aのニュートリノエネルギーは 10^{53} erg 程度（ただし Type-II であったが）。99%がニュートリノに使われ残りの1%が衝撃波の運動エネルギーになるといわれている。
- 2 宇宙のパラメータを決めている論理は Type-Ia 超新星が“ある”補正をした後に光度一定である（%レベルで）との“経験説”に大きくたよっている。この説に観測的および論理的な根拠を与えるのがこれからの宇宙論の最大のテーマではないのか？そもそも Type-Ia 爆発の起源は？なぜいまだに諸説あるのか？“爆発衝撃波の運動エネルギーを決定してほしい＝”光度一定なのに爆発のエネルギーは0.5倍から2倍までの不定性があるというのはブラック・ユーモアではないのか？
- 3 文献 [19]。大学院生諸君。よんで見てください。バーデのように科学を“ねた”にユーモアがいえるようになれば楽しい。

参考文献

- [1] H. Alfven, Arkiv. Mat. F. Astro., o. Fys. 29B (1943) 2
- [2] E. Fermi, Phys. Rev. 75 (1949) 1169
- [3] G.F. Krymsky, Dok. Akad. Nauk. SSSR 234 (1977) 1306; W.L. Axford, E. Leer, G. Skadorn, Proc. 15th ICRC, Plovdiv, 11 (1977) 132; R.D. Blanford, J.P. Ostriker, ApJ 221 (1978) 129
- [4] L.I. Sedov, J. Appl. Math. Mech. 10 (1946) 241
- [5] W. Baade, F. Zwicky, Phys. Rev. 46 (1934) 76
- [6] <http://vesper.icrr.u-tokyo.ac.jp/>、カンガルー・ホームページ
- [7] S. Watanabe et al., Proc. 28th ICRC, Tsukuba, (2003) 2397
- [8] http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/som/Som_7_07.htm
- [9] H. Muraishi et al., A & A 354 (2000) L57
- [10] R. Enomoto et al., Nature 416 (2002) 823
- [11] F. Aharonian et al., A & A 437 (2005) 135
- [12] T.C. Weekes et al., ApJ 342 (1989) 379
- [13] F. Aharonian et al., A & A 370 (2000) 112
- [14] H. Katagiri et al., ApJ 619 (2005) L163
- [15] E.G. Berezhko, L.T. Ksenofontov, H.J. Voelk, A & A 452 (2006) 217
- [16] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>、カンガルーの宿敵。現状では我々より感度が高い。
- [17] <http://glast.gsfc.nasa.gov/>、2008年度に打ち上げ予定のガンマ線衛星。チェレンコフ望遠鏡のカバーできない100GeV 程度以下までの感度がある。
- [18] S. Chandrasekhar, ApJ 74 (1931) 81
- [19] W. Baade, ApJ 97 (1943) 119
- [20] S. Jha, A.G. Riess, R.P. Kirshner, ApJ 659 (2007) 122
- [21] B.E. Shaefer, ApJ 459 (1996) 438
- [22] <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- [23] <http://www.sdss.org/>、宇宙線研もホスト研究所のひとつ。
- [24] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CTA/>、現状の感度を10倍以上上げようというもくろみ。国際協力によるいわゆるビッグ・サイエンスで日本の参加が望まれている。
- [25] K. Koyama et al., Nature 378 (1995) 255

チベット実験の近況報告

東京大学宇宙線研究所 瀧 田 正 人

1. 初めに

1990年より拡張を続けてきたチベット空気シャワー観測装置は、37,000m²のチベット空気シャワー観測装置（略称：Tibet-III、図1参照）として2002年秋に完成し（科学研究費補助金特定領域研究(B)「チベットにおける高エネルギー宇宙線放射天体の研究」）、連続観測を開始した。今回のICRRニュースでは、2002年以降のチベットグループの研究成果を中心にした近況報告を行いたい。チベット実験は、日中共同で中国チベット自治区の高原にある羊八井宇宙線観測所（標高4,300m）に空気シャワー観測装置を設置して高エネルギー宇宙線の広視野連続観測を行っている。この日中共同実験は1990年から現在まで続いている大変息の長い実験である。このチベット空気シャワー観測装置を用いた研究テーマは、TeV 領域宇宙ガンマ線放射天体の観測及び探索、Knee エネルギー領域（10¹⁴–10¹⁷eV）前後の一次宇宙線エネルギースペクトルと元素組成の研究、宇宙線中の太陽の影の観測による地球・太陽間磁場の大局的構造の研究、TeV 領域宇宙線異方性の精密観測の4テーマに大別される。チベット空気シャワー観測装置のユニークな特徴は、TeV 領域宇宙線中の月の影を用いてエネルギースケール較正（10–15%程度）、観測装置のポインティング（ズレは0.01度以下）、角度分解能（数TeVで0.9度）のチェックができることである。例えば、エネルギースケールを例にとると、従来の空気シャワー観測装置（100TeV以上）は飛翔体を用いた直接観測による低エネルギー宇宙線エネルギースペクトルか

らの外挿と空気シャワー観測装置によるエネルギースペクトルの重なり具合（宇宙線の微分エネルギースペクトルは宇宙線エネルギーの3乗に逆比例する）から空気シャワー観測装置のエネルギースケールを議論してきた。チベット実験では、地球磁場を用いた宇宙線の曲がり（西偏）を観測することにより、従来とは全く異なる spectroscopic な方法でエネルギー較正が可能である。宇宙線事例の頻度と月の影の双方を用いたエネルギー較正により、信頼度の高いエネルギースケールを実現した。（もちろん、加速器ビームによるエネルギー較正が可能になれば一番良いのだが、当分は望むべくもないであろう。）

2. 物理結果

2002年には、銀河面からの拡散ガンマ線の探索を行った。残念ながら有意な信号は観測されなかったが multi-TeV 領域で厳しいフラックス上限を与えることができた。

2003年には2000年と2001年に活発にフレアを繰り返していた活動銀河核 Mrk421からの multi-TeV ガンマ線を観測することに成功し、X線衛星（RXTE）で観測されたX線データと良い正相関を得た（図2参照）。

2004年には、地球の公転運動に起因する見かけの太陽時宇宙線異方性（約0.05%）を世界最高精度で観測することに成功し（図3参照）、そのエネルギー依存性を測定することができた。これにより、チベット実験の系統誤差が良くコントロールされていることを実証した。

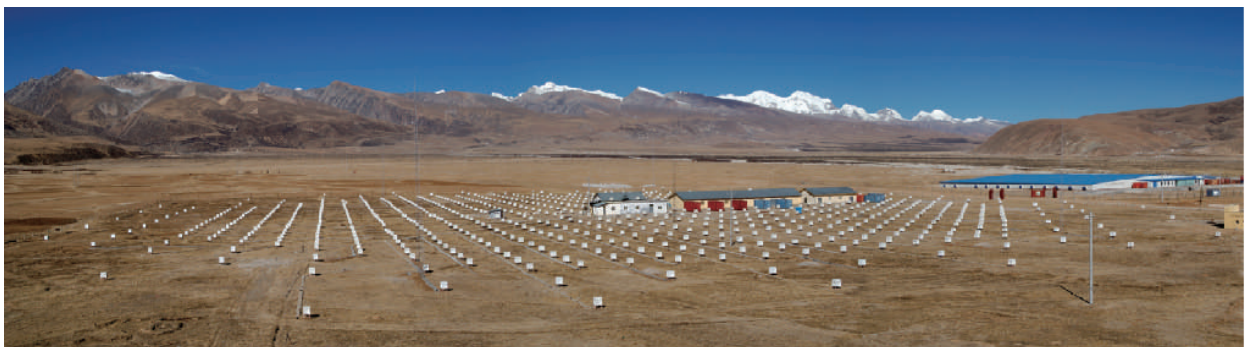


図1 チベット空気シャワー観測装置（標高4,300m、羊八井宇宙線観測所、チベット、中国）

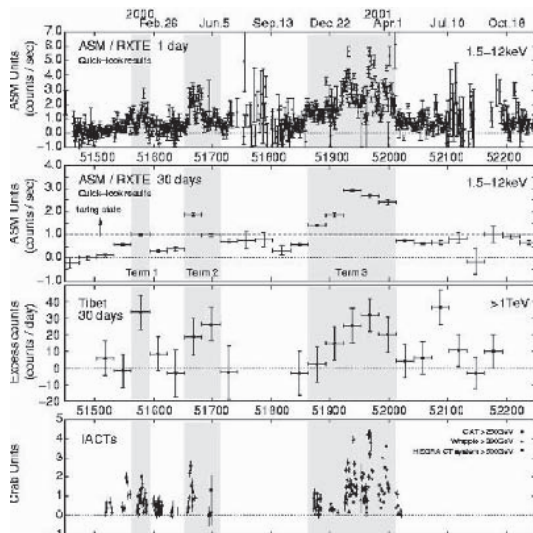


図2 Mrk421からの multi-TeV ガンマ線データと X 線データの相関

2005年には multi-TeV 領域ガンマ線点源の探索を行った。いくつかの候補天体は上がったが、かに星雲のように明るい TeV 領域ガンマ線点源は見つからなかった。また、この探索の副産物として multi-TeV 領域宇宙線恒星時異方性の 2 次元マップを世界で初めて描いた。チベット実験の高統計精度（現在は 1.7kHz）のおかげである。更に multi-TeV 領域の恒星時変動の 24 時間プロファイルを観測し、そのエネルギー及び declination 依存性を決定した。また、アルメニアのアラガツ山に設置された MAKET-ANI 実験が Monogem Ring から PeV 領域宇宙粒子信号を 6σ で観測したという ApJL の報告を受けて、チベット実験も探索を行ったが有意な信号は検出されず、約一桁下のフラックス上限値をつけた。

2006年には、Knee エネルギー領域の連動実験の結果がようやく纏まった。チベット実験は、空気シャワー観測装置の中心に設置した 80m^2 のコア検出器（エマルジョンチェンバーとプラスチックシンチレーター検出器からなる）と空気シャワー観測装置との連動実験を行い、陽子及びヘリウム成分を抽出してそれらのエネルギースペクトルを測定した。この結果は、6,000 枚の X 線フィルムで捕えたガンマ線ファミリーをイメージスキャナーを用いて自動解析することにより得られた。核相互作用モデルとして QGSJET と SIBYLL モデル、また、極端な 2 つの一次宇宙線化学組成（陽子成分の多いモデルと重粒子成分の多いモデル）を用いてエネルギースペクトルのモデル依存性を見積もったところ、高々 30% 程度であることが判明した。全粒子エネルギースペ

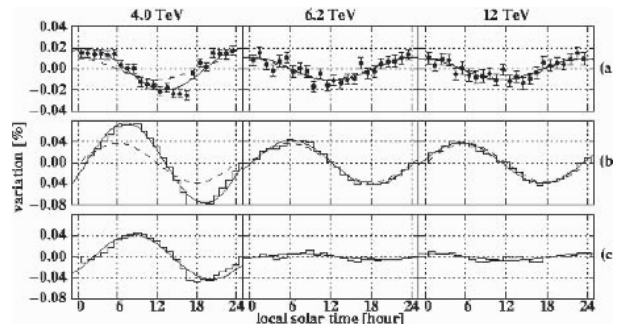


図3 multi-TeV 宇宙線太陽時異方性の観測（地球の公転運動による見かけの効果）真中の図参照。4TeV では太陽活動等のそれ以外の効果が重なっている。

クトルとの比をとることにより、Tibet 実験は Knee 領域を構成する化学組成は重粒子成分が優勢であることを示した(図 4 参照)。他方、ドイツの KASCADE 実験は観測された電子シャワーサイズとミューオン数を rigidity dependent なエネルギースペクトルの形を仮定してフィッティングすることにより、陽子、ヘリウム等のエネルギースペクトルを発表している。核相互作用のモデルとして良く引用される QGSJET モデルと SIBYLL モデルを用いて陽子、ヘリウム等のエネルギースペクトルのモデル依存性を確かめたところ、悪いところでは数倍程度モデル依存性があるために一次宇宙線の化学組成を決定することはかなり困難な印象を受けた。（これはミュー粒子数にモデル依存性が大きいことが一因であろう。）ただし、全粒子エネルギースペクトルの Knee はどちらのモデルを用いても軽い原子核成分の折れ曲がりによるもので説明できるという主張である。全粒子エネルギースペクトルの折れ曲がり (Knee) が軽元素により生じているのか、重元素により生じているのかがこれからの議論の焦点となると思われる。

さらに、数 TeV から数百 TeV のエネルギーを持つ宇宙線恒星時異方性を高精度で 2 次的に測定した(図 5 参照)。良く知られた恒星時の異方性 (Tail-in や Loss Cone) の他に、シグナス領域に新しい銀河宇宙線異方性を発見した。また、銀河回転運動に起因する見かけの恒星時異方性（約 1%）が観測されないことより、銀河宇宙線が局所的な銀河磁場と共回転していることが示された。さらに、シグナス領域に数個のホットスポットがあることが判明し、

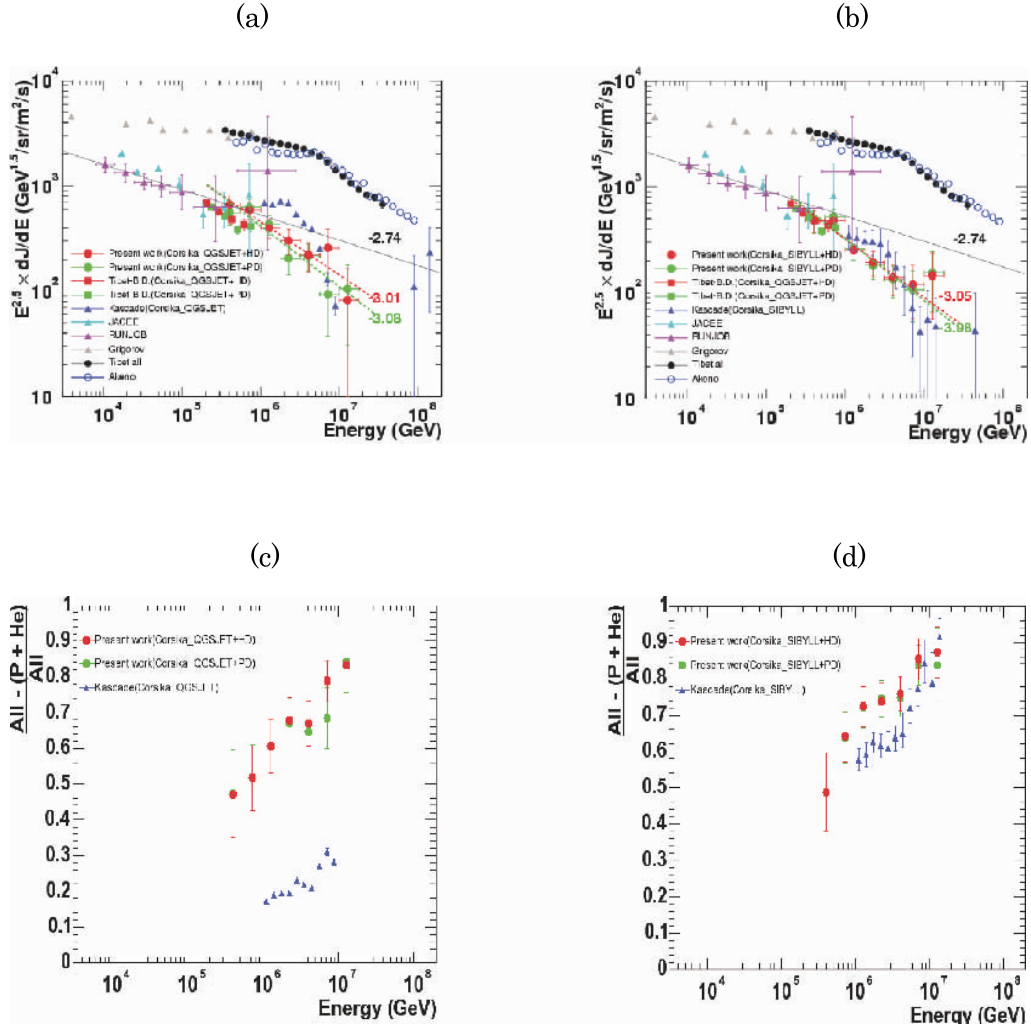


図4 宇宙線陽子成分エネルギースペクトル (a : QGSJET モデル、b : SIBYLL モデル) と (全粒子- [陽子+ヘリウム]) /全粒子の比 (c : QGSJET モデル、d : SIBYLL モデル)

ガンマ線放射天体の可能性が示唆された (図 6 d)、e) 参照)。そしてそれらは米国の Milagro 実験によって2007年に確認された。

2007年には宇宙線中の月の影を用いて、宇宙線中の反陽子成分を探索した。通常の宇宙線は正電荷を持っているため、月の影は地球磁場によって西に曲げられる。他方、宇宙線中に負電荷を持つ反粒子 (例えば反陽子) が混じっている場合、月の影は東方向に曲げられるので、通常の月の影に東偏成分が重なることになる。この現象を利用して宇宙線中の反陽子成分の探索を行った。3TeV 以上のエネルギーを持つ宇宙線空気シャワーを用いて約40 σ の月の影を観測した。月の影の見かけの位置は期待値通りに西に0.23度ずれており、反陽子による有意な成分は観測されなかった。その結果、通常の宇宙線に対する反陽子の割合に関する上限値7%を90%の信頼度で得た。また、宇宙線中の太陽の影の観測を1996

年から2006年に掛けて行い、太陽サイクル23をほぼカバーしたことになる。積年の課題であったシミュレーションに関しても、あるひとつの太陽磁場モデル (Radial Field Model) を仮定した場合のシミュレーションが完成し、データを良く説明できることが判明した (図7参照)。その他の太陽磁場モデルを仮定した場合の実験データとの系統的な比較が今後の課題である。

2008年には、約10TeV 以上の宇宙線を用いて、地球の公転運動による見かけの宇宙線太陽時異方性の精密測定を行った。期待値通りに観測された綺麗な正弦曲線の振幅から、地球の公転速度を代入することにより、宇宙線エネルギースペクトルの冪を求めることができた。この応用例として、例えば宇宙線エネルギースペクトルの折れ曲がりである Knee が非標準的なハドロン相互作用で生じているのではなく、加速源で生じているという標準的な見解を、

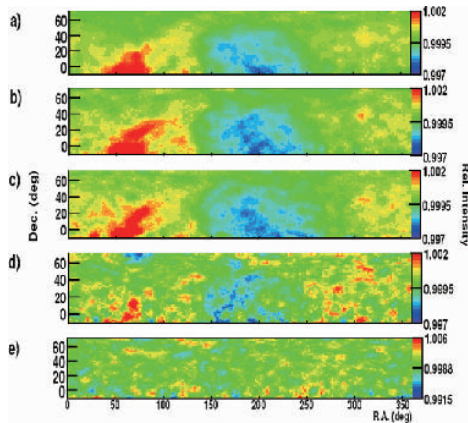


図5 恒星時宇宙線異方性 上から4、6.2、12、50、300TeV

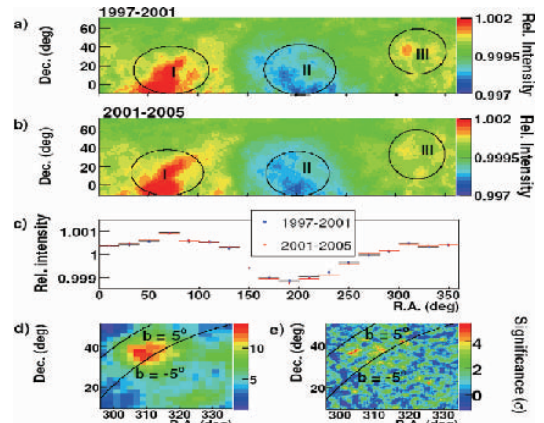


図6 シグナス領域 (Ⅲ) のガンマ線点源探索 e) のホットスポットに注目

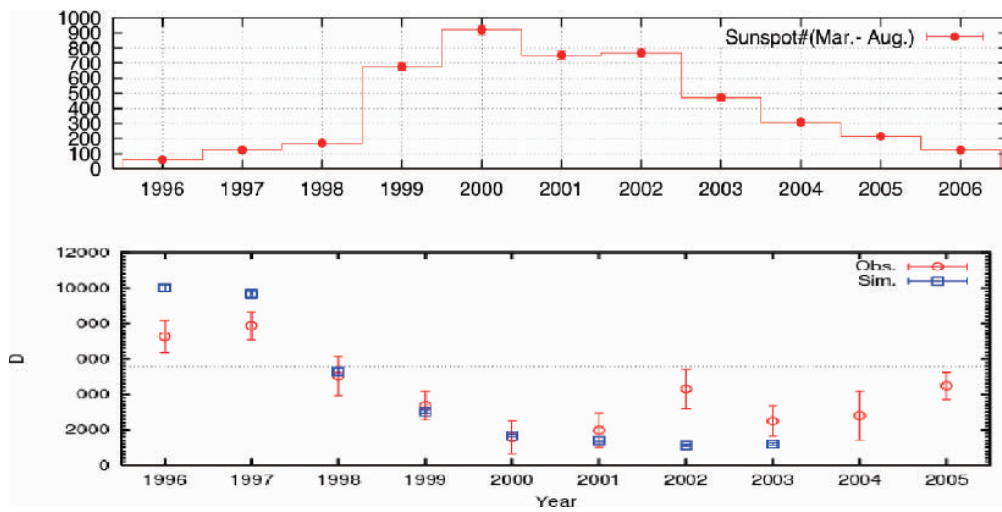


図7 上図は太陽黒点数の年変化、下図は観測された宇宙線中の太陽の影の深さに関するデータとシミュレーションの比較

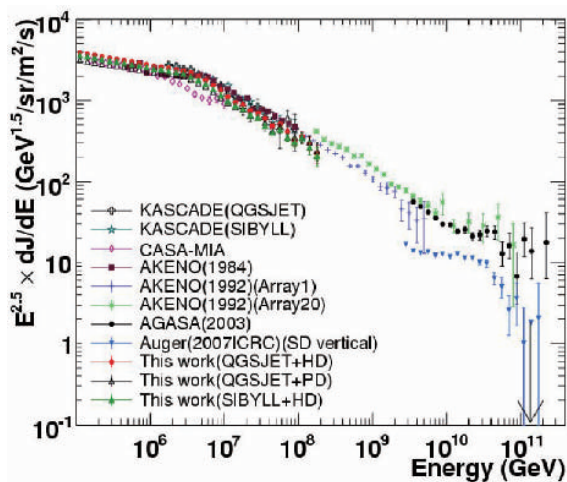


図8 Knee エネルギー領域以上の宇宙線全粒子エネルギースペクトル

ハドロン相互作用によらない本方法で確認することが原理的には可能になることを示唆している（現実

的には統計量の問題により、現状では不可能であるが…。さらに Tibet-III を用いた Knee エネルギー領域前後のエネルギースペクトルを 3 桁 (10^{14} - 10^{17} eV) に亘り、系統誤差が良くコントロールされた単一実験による高精度観測を行うことができた（図 8 参照）。チベット実験が空気シャワーの最大発達近辺の高度に設置されていることが成功の鍵であった。図 8 を眺めながら、最高エネルギー宇宙線観測データとの繋がり具合を空想するのも一興であろう。

3. 近未来

Knee 領域近辺の一次宇宙線観測に関しては、Knee 領域重粒子成分のエネルギースペクトル観測を目指す Tibet-YAC: Tibet air shower core detector array の新設を計画・予算申請中である（図 9 参照）。世界を見渡すと KASCADE 実験をスケールアップした KASCADE-GRANDE 実験は、鉄成分の Knee が 10^{17}

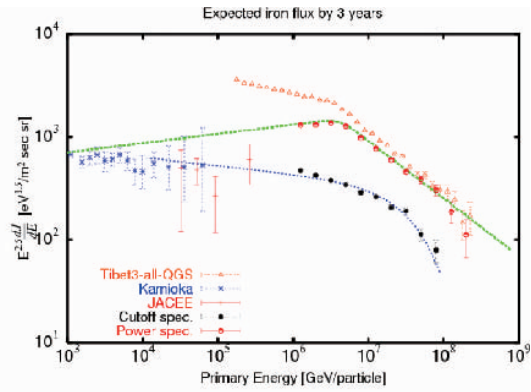
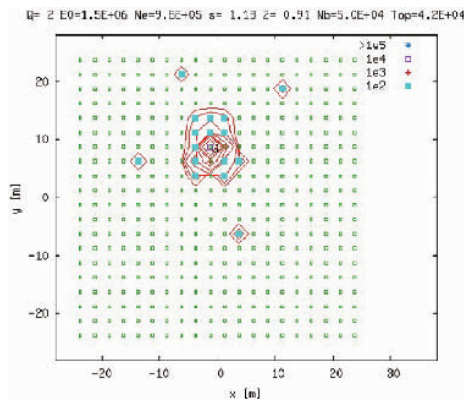


図9 Tibet-YAC 実験のポンチ絵 (左) と予想される鉄成分のエネルギースペクトル (右)

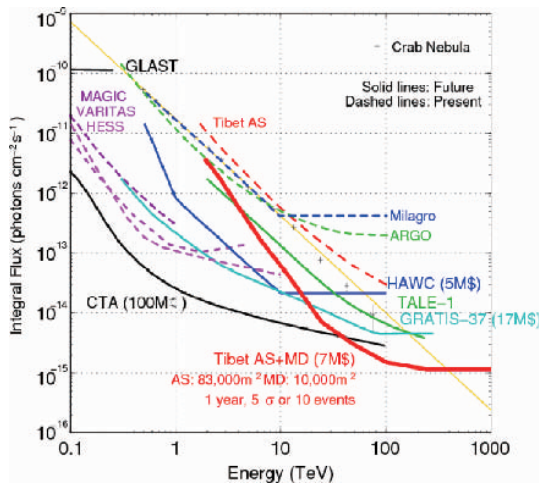


図10 Tibet AS+MD のガンマ線点源に関する予想感度

eV 領域 (second Knee!?) にあるかどうかを確認しようとしている。インドの Ooty 実験やボリビアの BASJE 実験も空気シャワー観測装置を拡張して KASCADE-GRANDE と同様なエネルギー領域 (10^{18} eV 程度まで) の観測に重点を移して行くようである。いずれにせよ、Knee 及びその前後のエネルギー領域における宇宙線の化学組成と折れ曲がりの問題の決定的解決にはまだかなりの時間がかかると思われる。

Tibet 実験のガンマ線観測に関する次期計画として地下大型水チェレンコフ型ミューオン観測装置 (Tibet-MD: Muon Detector array、約10,000m²) の追加による100TeV 領域 (10–1000TeV) ガンマ線天文学の開拓を計画・予算申請中である (図10参照)。2007年秋にはそのプロトタイプ検出器 (100m²) が完成し (図11参照)、技術面及び予算面においても我々の見通しが正しかったことが実証された。ガンマ線観測では我々の良きライバルである水チェレンコフ型空気シャワー観測装置 MILAGRO 実験 (米国) はその次期計画として HAWC 実験 (実験場所

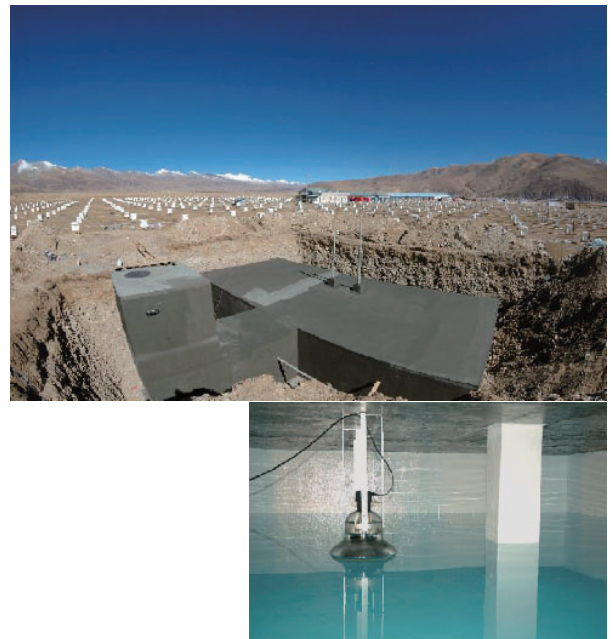


図11 Tibet-MD のプロトタイプ検出器 (100m²)

はメキシコで、10TeV 以下のガンマ線観測) の実現を目指している。

4. 終わりに

上記チベット実験の成果は、チベット実験共同研究者全体の仕事であり、編集委員の依頼によりたまたま私が報告させて頂いたことになります。もしも、取りこぼしや間違い等が見つかった場合は私個人の不注意であり、ご勘弁ください。また、読者の皆様からのご支援やご協力のおかげでようやくここまで来ることができたと思います。我々は世界最高感度/精度を有する2つの次期計画 (Tibet-MD と Tibet-YAC) の早期実現を目指しており、皆様からの更なるご支援を賜りますようよろしくお願い申し上げます。

平成19年度共同利用研究成果発表会報告

東京大学宇宙線研究所 早 戸 良 成

今年度の共同利用研究成果発表会が、平成19年12月14日(金)と15日(土)の2日間にわたって開催された。本発表会は、宇宙線研究所の共同利用研究として採択された課題の成果報告の場であり、発表内容の多様性は研究所の共同研究の幅広さを示している。今年度は29の成果発表のほか、共同利用実施専門委員会委員長から研究会開催に関する採択課題について

の報告も行われた。以下に当日のプログラムならびに各発表者より提出頂いた講演概要を付記する。なお、発表資料については、宇宙線研究所ホームページに掲載されているので、そちらを参照されたい。

(<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/information/workshop/2007/kyodoriyo/H19-Program.html>)

平成19年 宇宙線研究所 共同利用研究発表会 プログラム

12月14日

〈講演タイトル〉

〈名前〉

13:00~13:05	所長挨拶	鈴木洋一郎 (宇宙線研)
13:05~13:15	委員長挨拶、研究会報告	梶野 文義 (甲南大学)
13:15~13:30	地下実験室の環境連続計測・天然放射性核種 ^7Be ・ ^{210}Pb 降下量の季節変動に関する研究	大橋 英雄 (東京海洋大学)
13:30~13:50	XMASS 実験	小林 兼好 (宇宙線研)
13:50~14:05	液体キセノン検出器を利用した暗黒物質探索実験	鈴木 聡 (早稲田大学)
14:05~14:20	ガス飛跡検出器による方向に感度を持つ暗黒物質探索実験	身内賢太郎 (京都大学)
14:20~14:35	^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究	梅原さおり (大阪大学)
14:35~14:50	低エネルギー太陽ニュートリノ観測を目的としたインジウム・リン半導体検出器の開発研究	福田 善之 (宮城教育大学)
15:05~15:20	100万トン水チェレンコフ検出器 (ハイパーカミオカンデ) の開発研究	塩澤 真人 (宇宙線研)
15:20~15:35	宇宙の進化と素粒子模型	川崎 雅裕 (宇宙線研)
15:35~15:55	レーザー伸縮計と超伝導重力計で観測された地球の固有振動~2007年9月のスマトラ地震を例にして~	田村 良明 (国立天文台)
15:55~16:15	LCGT	黒田 和明 (宇宙線研)
16:15~16:30	Be-7、Na-22などによる宇宙線強度時間変化の検出・年輪中の放射線炭素測定と微量放射性同位元素分析による過去の宇宙線強度変動の研究	櫻井 敬久 (山形大学)
16:30~16:45	南極宇宙塵の科学的研究・少量南極隕石の ^{26}Al 放射能の測定	福岡 孝明 (立正大学)
17:00~17:20	CANGAROO 実験 (超高エネルギーガンマ線のオーストラリアにおける観測)	森 正樹 (宇宙線研)
17:20~17:35	ガンマ線バーストの迅速な発見、観測による宇宙形成・進化の研究	森 正樹 (宇宙線研)
17:35~17:55	TA 実験 (宇宙線望遠鏡の調整と観測)	常定 芳基 (東京工業大学)

12月15日

9：00～9：25	スーパーカミオカンデ	作田 誠（岡山大学）
9：25～9：40	大気ニュートリノフラックスの精密計算	本田 守広（宇宙線研）
9：40～9：55	ニュートリノ振動精密測定のためのニュートリノ原子核反応の研究	作田 誠（岡山大学）
9：55～10：10	加速器データを用いたニュートリノ相互作用シミュレーションの研究	金行 健治（宇宙線研）
10：10～10：25	チベット空気シャワーアレイおよびスーパーカミオカンデにおける10TeV 宇宙線強度の恒星時日周変動の観測	宗像 一起（信州大学）
10：40～11：00	ボリヴィア空気シャワー共同実験（BASJE）	常定 芳基（東京工業大学）
11：00～11：20	全天高精度素粒子望遠鏡計画 Ashra	佐々木真人（宇宙線研）
11：20～11：35	IceCube 実験	石原 安野（千葉大学）
11：35～11：50	長期間気球観測による高エネルギー宇宙線加速天体の研究	鳥居 祥二（早稲田大学）
11：50～12：05	Knee 領域および最高エネルギー領域での宇宙線反応の実験的研究（LHCf 実験）	増田 公明（名古屋大学）
13：05～13：25	チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究	片寄 祐作（横浜国立大学）
13：25～13：40	大型ミュオンテレスコープによる銀河宇宙線強度の観測	林 嘉夫（大阪市立大学）
13：40～13：55	第24太陽活動期における太陽中性子の観測	松原 豊（名古屋大学）
13：55～14：10	乗鞍岳におけるミュオン強度の精密観測	宗像 一起（信州大学）
14：25～14：30	閉会のことば	梶野 文義（甲南大学）
（当日未発表） 高山帯におけるハイマツとオオシラビソ褐変化葉の解剖学的特徴		池田 武文（京都府立大学）

「地下実験室の環境連続計測」

「天然放射性核種 ${}^7\text{Be}$ ・ ${}^{210}\text{Pb}$ 降下量の季節変動に関する研究」

東京海洋大学5号館屋上で自然放射性核種 ${}^{210}\text{Pb}$ と宇宙線生成核種 ${}^7\text{Be}$ の降下量と降水中濃度を一ヶ月間隔で測定し、過去5年分のデータと合わせて、これら核種の季節変動とその要因に関する考察を行った。

「XMASS 実験」

今年度から液体キセノン800kgを使う検出器の予算が下り、建設が始まった。計画は順調に進んでいる。放射性元素の含有率が低いPMTの開発を行った。またこのPMTを用い液体キセノン中で十分高い発光量が得られることを確認した。

「液体キセノン検出器を利用した暗黒物質探索実験」

15kg 2相型キセノン検出器のテスト実験を行なった。 γ 線源を用いて、検出器の位置決定精度ならびにエネルギー分解能を吟味した後、ゼロ電場でのバックグラウンド測定を行なった。ワイヤーの放電とキセノンの純度の問題に対する改善策に関しても議論した。

「ガス飛跡検出器による暗黒物質探索実験」

我々は独自に開発した三次元ガス飛跡検出器「マイクロTPC」を用いた方向に感度を持つ暗黒物質探索実験「NEWAGE」を提唱、平成17年度よりICRR共同利用研究を行っている。平成19年度には地上での暗黒物質探索実験を論文発表（PLB654（2007）58）、神岡地下実験室でのバックグラウンド測定を開始した。この結果検出器内部の放射性不純物によるバックグラウンドが暗黒物質への感度を制限して

いることが判明、平成20年度には対策を施して感度向上を行う予定である。

「 ^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究」

二重ベータ崩壊の測定のため、 CaF_2 シンチレータと液体シンチレータを用いた複合型検出器 CANDLES を開発している。本年度は、地上実験室において、バックグラウンド除去率を含めた検出器性能評価を行なった。また、来年度に予定している地下実験室への検出器移設の準備もあわせて進めている。

「低エネルギー太陽ニュートリノ観測を目的とした、インジウム・リン半導体検出器の開発研究」

$\text{pp}/^7\text{Be}$ 太陽ニュートリノ観測を目的として InP 半導体検出器の開発を行っている。本年度は VCZ 半絶縁性半導体を用いて $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ のサイズの半導体検出器を製作した。性能評価を行った結果、エネルギー分解能は $30\% @ 122\text{KeV}$ の性能を得た。

「100万トン水チェレンコフ型検出器（ハイパーカミオカンデ）の開発研究」

新たな中性子検出による陽子崩壊 $p \rightarrow e^+ \pi^0$ の感度向上の可能性と今後のスタディ計画、PMT の QE 向上や低価格化の現状、ハイパーカミオカンデ候補地での岩盤サンプル採取と、空洞の強度計算結果を報告した。

「宇宙の進化と素粒子模型」

WMAP のデータから示唆される密度揺らぎのスペクトル指数のスケール依存性を説明する超重力理論に基づくダブルインフレーションモデルで、太陽質量の100倍から観測的にも注目されている1万倍程度の中間スケールの原始ブラックホールが生成されることが分かった。

「レーザー伸縮計と超伝導重力計で観測された地球の固有振動」

超伝導重力計および2成分100m レーザー伸縮計では、安定して長期にデータが取得できるようになり、2006年11月の千島列島地震や2007年9月のスマトラ地震などの地震について地球の自由振動の解析を進めている。

「LCGT」

重力波研究に関して8つの共同利用研究が採択されており、大型重力波望遠鏡（LCGT）計画の現状

が世界のプロジェクトとの対比のもとで概観され、神岡地下施設におけるプロトタイプ低温レーザー干渉計 CLIO による試験観測、KEK における R & D 研究ならびに将来の感度向上につながる基礎技術の研究が紹介された。

「Be-7、Na-22などによる宇宙線強度時間変化の検出」

「年輪中の放射線炭素測定と微量放射性同意元素分析による過去の宇宙線強度変動の研究」

2000年から8年間の大気中宇宙線生成核種 Be-7、Na-22濃度の日変動、季節変動、年変動測定結果と太陽活動および大気運動の関連について報告した。また、古木年輪中の安定同位体の利用について報告した。

「南極宇宙塵の科学的研究」

「少量南極隕石の ^{26}Al 放射能の測定」

南極隕石（56個）の落下年代を求めるために ^{26}Al を用いて、宇宙線研柏キャンパスの微弱放射能測定施設と、東大工学部のタンデム加速器を用いて測定。隕石の種類によって ^{26}Al 含有量が異なることがわかった。

南極ドーム Fuji 基地での氷床コアの掘削時に生じる掘削クズ中から宇宙塵を取り出す作業手順をほぼ確立した。ドーム Fuji の氷床コアの年代は約80万年といわれているので、過去80万年間の降下率の時間変化についての情報を手に入れられる可能性が出た。

「CANGAROO 実験」

10m口径望遠鏡3台によるステレオ観測を継続的に行っている。パルサー星雲 MSH15-52、超新星残骸 RX J1713.7-3946、活動銀河 PKS2155-304、HESS unID J1804-216/J1303-631からのガンマ線の検出に成功した。また、活動銀河 Cen A・球状星団 ωCen 、超新星残骸 SN1987A、Kepler の超新星残骸、銀河団 A3667・A4038からのガンマ線放射には上限値を与えた。

「ガンマ線バーストの迅速な発見、観測による宇宙形成・進化の研究」

ガンマ線バースト（GRB）に即応して残光を検出する光学望遠鏡システムを開発し、明野観測所で運用している。2007年は15例の GRB を観測し、うち4例について残光の検出に成功した。また、GRB 以外の AGN など時間変動天体のモニター観測も

行っている。

「TA 実験（宇宙線望遠鏡の調整と観測）」

宇宙線望遠鏡実験（TA）では、大気蛍光検出器（FD）の建設とインストールが2007年7月に完了し、11月より定常観測に入った。また地表検出器アレイは485台（95%）の設置が完了し、年度中に観測開始の予定である。

「スーパーカミオカンデ」

2005年に始まった完全再建作業は、半年後完了し、PMT 校正作業、水純化も順調に進んだ。2007年には、水の透過率も90mを越し、SK3の大気ニュートリノや太陽ニュートリノの予備的な結果は2007年夏の国際会議でも報告された。2007年には、SK1-2時期の、超新星バースト探索結果、大気ニュートリノデータでのミュー型からタウ型ニュートリノ出現解析結果、SK1での太陽ニュートリノの最終結果等が新たに出版された。今後10年のSK実験での安定したデータ収集を実現する新回路製作も2008年秋の稼働に向け、順調に進んでいる。

「大気ニュートリノフラックスの精密計算」

AMS と BESS の一次宇宙線精密測定以降の、大気ニュートリノ計算の発展を報告した。相互作用の問題解決には、大気ミューオンが重要な役割を果たしている。

「ニュートリノ振動精密測定のためのニュートリノ原子核反応の研究」

この研究の目的は、ニュートリノ振動精密測定のためのニュートリノ原子核反応のシミュレーション手法開発である。特に、低エネルギー事象（超新星ニュートリノ等）にはバックグラウンドとなる100—500MeVの大気ニュートリノ事象の計算精度を改良することである。手法としては、関連するエネルギー領域で精密なデータが存在する電子原子核反応実験データを使い、モデルの精密化を図る。また、低エネルギー事象観測の高精度化に必要なPMTの校正実験も行う。

「加速器データを用いたニュートリノ相互作用シミュレーションの研究」

加速器を使ったニュートリノ相互作用の研究で、 $\Delta^- \rightarrow N + \gamma$ 崩壊を採り入れた。また、米国フェルミ研で昨年夏から実験が開始された、ニュートリノ核子散乱実験（SciBooNE 実験）の現状について報

告した。

「チベット空気シャワーアレイおよびスーパーカミオカンデにおける10TeV 宇宙線強度の恒星時日周変動の観測」

チベット空気シャワーアレイで観測された異方性の2次元マップが、大局的には1次と2次の異方性の重ねあわせでよく再現できることを明らかにした。現在、異方性のエネルギー依存性を解析し、その起源を解明すべく、研究を行っている。また、スーパーカミオカンデにおいてチベット空気シャワー実験と同じエネルギー領域をミューオンで観測し、異方性の2次元マップが大局的にはチベット実験の結果と一致していることを明らかにした。このことから、異方性がガンマ線ではなくて宇宙線陽子の強度分布に起因するものであることが判った。

「ボリビア空気シャワー共同実験（BASJE）」

ボリビア空気シャワー共同実験では、Knee 領域以上の宇宙線原子核組成研究のため、従来の100倍の観測面積を持つ空気シャワーアレイを建設した。またこれとは独立な手法、すなわちチェレンコフ光観測による研究も計画中であり、そのための大気モニタシステムの開発と予備観測も開始した。

「全天高精度素粒子望遠鏡計画 Ashra」

全天高精度宇宙線望遠鏡 Ashra は、広角高精度光学系と大気チェレンコフ光トリガ実証試験を経て、ハワイ島マウナロア観測地で主・副観測ステーションの建設工事が完了した。現在、読出し系装置の設置調整中である。連続読出しにて星由来の光学閃光監視を開始し、並行してトリガの開発配備を進め、超高エネルギーガンマ線、ニュートリノ、核子へと順次観測体制に入るようにする。

「IceCube 実験」

IceCube 実験は2008年2月までに完成時の半数を越える2,400個の光センサーの南極氷中への設置を成功させた。超高エネルギーニュートリノ観測を目指す千葉大グループは、高エネルギー領域におけるエネルギーの見積りや、氷中における光の伝搬のより正確な理解のため、光センサーの絶対校正を実験室内で行うとともに、絶対校正されたレーザーを用いた南極氷中におけるエネルギースケールの校正を行っている。これらの結果を踏まえた現時点でのIceCube 検出器の超高エネルギーニュートリノに対する5年間の観測における感度の見積りは、IceCube

完成時で1EeVのエネルギー領域で $3.16 \times 10^{-8} \text{GeV/cm}^2/\text{sec}/\text{sr}$ に達し、これはGZKニュートリノ観測頻度、約1事象/年にあたる。さらなる感度向上を目指し、現行の検出器の回りにさらに間隔を広げた光センサーを配置することによりGZKニュートリノに対する有効検出体積を最大化する拡張計画が進行している。

「長期間気球観測による高エネルギー宇宙線加速天体の研究」

平成18年度に実施した気球による電子、ガンマ線観測のデータ解析により、電子加速モデルの定量化、及び地磁気カットオフの効果に関する研究を実施するとともに、次年度以降の本格観測に向けた装置開発を実施した。

「Knee領域および最高エネルギー領域での宇宙線反応の実験的研究（LHCf実験）」

LHC加速器の7TeV陽子衝突によって生成される前方中性粒子の測定によってハドロン相互作用モデルの検証を行うLHCf実験の準備が進んでいる。モデルの違いによる $10^{17} \sim 10^{20} \text{eV}$ の宇宙線観測データの解釈に関してTAグループ等と検討及び議論を行う。

「チベット高原での高エネルギー宇宙線の研究」

宇宙線による月の影を用いたTeV反陽子探索、CG異方性を用いた全粒子スペクトル冪測定、100TeVから 10^{17}eV までの全粒子スペクトル、太陽活動周期に伴う惑星間磁場変動と太陽の影の相関等の研究結果とMDテスト検出器建設の進捗状況について

て報告した。

「大型ミュオンテレスコープによる銀河宇宙線強度の観測」

大型ミュオンテレスコープによる同時観測を明野とOotyで昨年に引き続き行っている。現在太陽活動が極小期なのでフレアによる大きな変動は観測されなかった。装置のパフォーマンスを調べるために短期変動（1時間以下）の解析を行い、雷雲によるものと思われる変動を見つけた。

「第24太陽活動期における太陽中性子の観測」

乗鞍での太陽中性子観測は、太陽光発電により、中性子検出部と到来方向測定部に電力供給している。今後の課題は高エネルギー測定部を低消費電力化し、そのデータも取得することと、曇天続きの場合に備え、風力発電を安定に稼働させることである。2005年9月7日の太陽中性子イベントは電子に比べ陽子加速が長時間にわたって行われていたことを示しており、2008年1月から始まった第24太陽活動期での中性子イベント検出が期待されている。

「乗鞍岳におけるミュオン強度の精密観測」

春先の電源復旧時に観測が自動的に再開するよう、冬季自立ミュオン観測システムを改良した。また汎世界的ミュオン計ネットワークによる観測データを解析して、太陽磁場のセクター構造に起因する宇宙線密度分布を明らかにすることに成功した。得られた分布は、ドリフトモデルから期待されるものと良く一致している。

ICRR-Seminar 2007年度

3月6日(木) 田中秀和氏 (Columbia University)

“The SciBooNE neutrino experiment at Fermilab”

3月14日(金) Johannes Bluemer 氏 (Karlsruhe Institute of Technology KIT / University and Forschungszentrum Karlsruhe)

“The Pierre Auger Observatory: results on ultra-high energy cosmic particles”

ICRR-Report 2007年度

ICRR-Report-525-2007-1 (February 15, 2008)

“Atmospheric neutrino oscillation analysis with solar terms in Super-Kamiokande”

Yumiko Takenaga

No.65

2008年3月31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) 7136-5121又は0578-85-9609(神岡)
編集委員 佐川宏行 安部 航