

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。

宇宙の「夜明け」に発見された極めて活発な銀河	正己	1			
EGADS プロジェクト 現状報告					
重力波で探る初期宇宙物理					
人事異動	•••••	14			
ICRR-Seminar	•••••	14			
ICRR-Report	•••••	14			

研究紹介

宇宙の「夜明け」に発見された極めて活発な銀河

大内正己 【宇宙線研究所】

本研究所観測的宇宙論グループが主導する広領域 深宇宙探査により、ビッグバン後わずか7.5億年の 宇宙に、きわめて活発に星を生み出す銀河 GN-108036が発見された (ref 1、図 1)。この発見は、 宇宙再電離史を調べる探査の中で見つかった言わば 研究の副産物であり、まだ誰も行ったことの無い物 理パラメター空間の観測(高赤方偏移宇宙の広域観 測)がもたらした結果とも言える。

我々がケック望遠鏡を用いて行った分光観測によ り、GN-108036は赤方偏移で7.2、距離にして129.1 億光年だと判明した(注1)。一般にこのような遠 い銀河までの距離を正しく求めるには、銀河が発す る非対称な形をした「ライマンα輝線」を見つけな ければならない。GN-108036ではこの「ライマンα 輝線」が確認され、疑いの余地なく距離が決まった。 このようにして距離が正確に決まった銀河の中で、 GN-108036 は最も遠い銀河である(注2)。さらに、 ハッブル宇宙望遠鏡やスピッツァー宇宙望遠鏡、す ばる望遠鏡などで得られた赤外線データを組み合わ せて解析をしたところ、GN-108036で活発な星形成 が起きていることもわかった。この銀河では毎年太 陽100個分のガスから星が生まれており、同時代の 宇宙で見つかっている他の銀河より桁で大きい。「ガ スが重力で集まり始め、ようやく銀河で星が生まれ るようになる宇宙の『夜明け』において、これほど 活発な銀河が存在することは驚くべき事実である。

我々はまず、「すばる・ディープ・フィールド」 と「グッズ・ノース・フィールド」と呼ばれる系外 宇宙観測に適した高銀緯天域を、すばる望遠鏡に搭 載された主焦点カメラ Suprime-Cam で詳しく観測 し、天体の色を手がかりにして遠方銀河の候補を絞 り込んだ。そして2010年にそのうちの11天体をケッ



図1:GN-108036の擬似カラー画像。青色と緑色はそれぞれ ハッブル宇宙望遠鏡のカメラACSによる0.6、0.9µm データ。赤色はハッブル宇宙望遠鏡のWFC3カメラ の1.6µm データによる。右上ピンクのパネルで示さ れているのはスピッツァー宇宙望遠鏡の3.6、4.5µm データでそれぞれ緑色と赤色に対応している。GN-108036 が疑似カラー画像上で赤く見えるのは、1µm 以下の可視光では全く検出されていないからである。 GN-108036が非常に遠い宇宙にあり、宇宙膨張の影響 で大きく赤方偏移していることを示している(クレ ジット:NASA, ESA, JPL-Caltech, STScI, and the University of Tokyo)。

ク望遠鏡の分光器 DEIMOS で観測した。その結果、 本物の遠方銀河であることの決め手となる非対称な 形をした「ライマンα輝線」と呼ばれる光が、GN-108036を含む3天体で検出された。ただ、GN-108036からのライマンα輝線は1マイクロメート ルに迫る波長にあり、検出に疑いの余地があった。 この波長帯での分光観測は、現存の可視分光装置で 最高性能を誇る DEIMOS をもってしても困難だか らである。データの中から輝線を最初に発見した小 野宜昭君(本学理学系研究科博士課程3年)はGN-108036の輝線検出に確信が持てず、たまたま連なっ たノイズが輝線のように見えているだけかもしれな い、と考えていたほどである。しかし我々は幸運に も、翌2011年に再びケック望遠鏡で観測する機会を 得た。新たな観測で得られたデータでも同じように 非対称な輝線が写っているのを確認し、結局輝線は 6 σの信頼水準で検出された。このようにして GN-108036が間違いなく赤方偏移7.2の黎明期の宇宙に ある銀河だと判明した(図2)。

さらに幸運なことに、GN-108036があるグッズ・ ノース・フィールドは、ハッブル宇宙望遠鏡の新し い高感度カメラ WFC3で撮影されたばかりだった。 チームメンバーの Mark Dickinson 研究員(アメリカ



図2:ケック望遠鏡の分光器 DEIMOS を使って得られた GN-108036の分光スペクトル。赤矢印で示された 998 ナノメートル付近にライマンα輝線が6σの信頼水準 で検出されている。この輝線は波長の長い方へ裾野 を引く非対称な形をして(skewnessの統計から5σ 以上の信頼性で確認されて)おり、疑いの余地なく ライマンα輝線であることが分かった。赤線は観測 された輝線の形によく合うモデル曲線である。灰色 の影の部分は地球大気からの強い夜光輝線が重なっ てしまっているため除いている。なお図の縦軸は相 対的なフラックスを意味する。(クレジット:NAOJ, Keck Observatory)

国立光学天文台)が急いでそのデータを解析したと ころ、確かに GN-108036が写っていた。その画像か ら、GN-108036 は紫外線で極めて明るく、誕生間も ない星が多く含まれることが分かった。また興味深 いことに、その大きさはおよそ5千光年で、天の川 銀河の20分の1程度と非常に小さかった。

これに加えてスピッツァー宇宙望遠鏡の赤外線カ メラ IRACと、すばる望遠鏡の近赤外線カメラ MOIRCS で得られたデータも組み合わせることで、 GN-108036の星形成率を求めることができた。その 結果、GN-108036では、同時代で見つかっている銀 河と比べておよそ10倍以上もの星形成が行われてい ることが分かった。このような銀河が宇宙の黎明期 に存在していたことには驚かされる。というのは標 準的な宇宙論モデルにおいて、この時代は構造形成 がまだ十分に進んでおらず大規模な星の形成を容易 に行うことができないからである。宇宙の早い時代 において、このような銀河を宇宙論モデルで再現す ることは、今後の課題となるだろう。

近年、赤方偏移2程度(ビッグバンから数十億年 後)の宇宙にきわめて重く年老いた銀河が見つかっ てきている [ref 2] が、それらがどのようにできた かはまだよくわかっていない。この活発な星形成を 行う GN-108036は、そのような銀河の祖先にあたる のかもしれない。いずれにしても、GN-108036をさ らに詳しく調べることで、現代宇宙論で大きな位置 を占める銀河形成の謎に迫れる可能性がある。この ような研究上の重要性から、今回の発見は NASA によりプレスリリースされ(図1)、我々の成果が 広く世界に伝えられた。一方で、我々の研究の目標 は宇宙再電離史を明らかにすることである。した がって、今回の発見は目標達成へ向けた1つの通過 点に過ぎないことも強調しておきたい。

(注1) 宇宙論パラメター (ハッブル定数 H_0 = 71km/s/Mpc、 Ω_m =0.27、 Ω_Λ =0.73)を採用

した場合。このパラメターによる宇宙年齢 は約136.6億歳となる。

 (注2)最近赤方偏移が8以上の可能性がある銀河 候補が報告されているが、その多くは銀河 の色から推定されたものであり、非対称な 形状を示す「ライマンα輝線」の条件を満 たすものについては一つも見つかっていな いのが現状である。

参考文献

- [1] Ono, Ouchi, et al. 2012, Astrophys. J. 744, 830
- [2] van Dokkum et al. 2008, Astrophys. J. 677, 5

EGADS プロジェクト 現状報告 中 畑 雅 行 【宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設】

EGADS とは Evaluating Gadolinium's Action on Detector Systems の略であり、将来スーパーカミオカ ンデに0.1% のガドリニウムを溶解させ、反電子 ニュートリノの物理を展開させる計画(GAD-ZOOKS! 計画)に向けた開発研究プロジェクトであ る。研究は宇宙線研,数物連携宇宙研究機構(IPMU)、 岡山大学、神戸大学、カリフォルニア大学アーバイ ン校、マドリッドオートノマ大学、清華大学、ボス トン大学の共同で進められている。本報告では、 GADZOOKS! 計画が目指している物理、EGADS プ ロジェクトの現状について報告させていただく。

1. GADZOOKS! 計画

研究紹介

GADZOOKS! 計画は、スーパーカミオカンデ(SK) の50,000トンの水にガドリニウム(Gd)を50トン溶 かし(0.1%重量濃度)、反電子ニュートリノと陽子 が反応した際に生成される陽電子と中性子とを同時 計測する計画である。Gd は中性子の吸収断面積が 非常に大きい物質であり、かつ吸収後に総計8 MeVのガンマ線を放出する。そのためGd を添加す ることによって、水チェレンコフ検出器においても 中性子をひとつひとつの事象として検出することが できるようになる。図1にガドリニウムの濃度と捕 獲効率との関係を示す。ガドリニウムの主成分であ る¹⁵⁷Gd(存在比15.7%)は254,000barn、¹⁵⁵Gd(存在比 14.8%)は60,900barn、の中性子吸収断面積をもち、





それらは水素原子の0.332barn に比べて圧倒的に大 きいため、0.1%の Gd 濃度でも90% 近い捕獲効率 を有する。また、吸収後の反応はほとんどが Gd(n, y)Gd であり、¹⁵⁷Gd の場合7.9MeV、¹⁵⁵Gd の場合 8.4MeV の総エネルギーをもつ数個のガンマ線に よって放出される(¹⁵⁷Gd、¹⁵⁵Gdの相対的な寄与は 82%と18%である)。こうした特長をもつ元素は唯 一Gdのみである。中性子検出の方法としてSNO 実験と同様に塩(具体的には塩素)を溶かすことも 考えられたが、塩素の吸収断面積は33barnしかない ため、20%塩を溶かしたとしてもやっと塩素による 捕獲効率が50%になる程度である。(SNOが0.2% の塩で中性子捕獲ができたのは重水素の吸収断面積 が0.0006barnしかないためである。)「GADZOOKS!」 は、Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super!(文献1)の略で あり、高統計の反電子ニュートリノの物理がその主 目的である。

1.2 GADZOOKS! で目指す物理

最も重要なテーマは、過去の超新星爆発からの ニュートリノ(超新星背景ニュートリノ(supernova relic neutrino (SRN)) と呼ばれる) である。宇宙に は約10¹⁰個の銀河があり、それぞれの銀河には約 10¹⁰個の恒星があるので、宇宙には10²⁰個の恒星が ある。これらのうち0.3%は質量が太陽質量の8倍 以上の星であり超新星爆発を起こすと考えられてい る。したがって、今までに10¹⁷回の超新星爆発が起 きてきたことになる(宇宙年齢で平均すると1秒に 1回)。こうした数多くの超新星爆発からのニュー トリノが SRN である。超新星爆発によって生まれ るエネルギーの99%はニュートリノによって星から 放出される。したがって、SRN を観測することが できれば、超新星爆発によるエネルギーの本質を探 ることができる。また、SRN は宇宙の始めから今 までに起きた超新星爆発を積分したニュートリノで あるので、宇宙における大質量星の歴史についても 探ることができる。図2は理論から予想される SRN のエネルギー分布を示す。いろいろなモデル によって強度の大小はあるが、数一数十 /cm²/sec 程 度の強度であり、太陽ニュートリノと比べて桁違い に小さい (^{8}B 太陽ニュートリノの5-6ケタ下)。 しかし、太陽ニュートリノは正のニュートリノなの で反電子ニュートリノが同定できればバックグラウ ンドとはならない。我々の周りで反電子ニュートリ ノの源としては、10MeV以下では原子炉からの ニュートリノ、30MeV 以上では大気ニュートリノ があるが、その間の10-30MeVには図2が示すよう に SRN を観測できる窓が開かれている。しかし、 極めて小さい強度から予想されるように期待される イベントの頻度は、22.5キロトンの SK の有効体積 をもってしても年間0.8-5イベント程度である。今



図2.SRNの予想されるエネルキースペクトルと他の ニュートリノ(原子炉/太陽/大気ニュートリノ) との比較。



図3:SK における10年間の観測で予想される SRN のスペ クトル(赤点)。スペクトルのうちバックグラウンド の成分を黒の実線で示し、その内訳として「見えな いミュー粒子」を点線、大気ニュートリノの反電子 ニュートリノ成分を破線で示す。SRN 信号の強度は 文献3のモデル、中性子の同時計測の効率として67% を仮定。

までに SK で SRN を探索する解析が行われてきた が反応の際の陽電子のみを探索する方法であったた め、宇宙線起源のバックグラウンドに阻まれて発見 はできなかった(文献2)。また、本来ならばバッ クグラウンドが無いはずの16-30MeV のエネルギー 領域でも、大気ニュートリノ起源でエネルギーが チェレンコフ光しきい値以下のミュー粒子(「見え ないミュー粒子」)が発生し、その崩壊電子がバッ クグラウンドになってしまっていた。図3は GAD-



図4: (文献4より) 中性子を同定できる効率の関数として、 超新星方向の決定精度 (95%効率)。線の色は爆発モデ ルの違い (GがGarching, LがLivermore)、線種は ニュートリノ振動パラメータの違い (a は正階層で $\sin^2 \theta_{13} > 10^{-3}$ 、b は負階層で $\sin^2 \theta_{13} > 10^{-3}$ 、c は $\sin^2 \theta_{13} < 10^{-3}$) をあらわす。

ZOOKS! で10年間の観測を行った場合に予想される エネルギー分布を示す。

反電子ニュートリノの同定は、我々の銀河でおこ る超新星爆発に対してもご利益がある。我々の銀河 で超新星爆発が起きたとすると約8,000事象の ニュートリノ反応が予想されるが(10kpcの距離の 場合)、そのうち方向性を持った事象(ニュートリ ノと電子との散乱事象)は300事象程度であり、そ れ以外は方向性をあまりもたない反電子ニュートリ ノと陽子との反応である。超新星の方向決定精度を 決めているのは反電子ニュートリノによる「バック グラウンド」である。しかし、GADZOOKS! によっ て反電子ニュートリノの事象を同定することができ れば、それらを外して方向分布を作ることにより方 向決定精度を向上させることができる。図4は Tomas ら(文献4)による計算であるが、中性子同 定効率が0%から90%にあがるに従い、方向決定 精度が6-7度から3度程度まで向上する。

また、反電子ニュートリノ反応による中性子を 使って「超新星爆発の予知」ができる可能性が示唆 されている(文献5)。大質量星は、水素燃焼、ヘ リウム燃焼、ネオン燃焼、酸素燃焼、ケイ素燃焼と いう過程を経て、コアの重力崩壊=超新星爆発を迎 える。最後のケイ素燃焼の期間は2日程度であるが、 その間に5x10⁵⁰ergのエネルギーがニュートリノに よって放出されると考えられている。このニュート リノは3 MeV 程度以下の低エネルギーであるた め、陽電子の方は捉えることができないが、中性子 の方は Gd に捕獲されてガンマ線事象として観測さ れる。もし0.2kpc の距離にあるベテルギウスが超新 星爆発を起こす場合には、ケイ素燃焼の二日間に中 性子による事象が一日あたり1,000事象ほど期待さ れる。

GADZOOKS! では原子炉ニュートリノも数多く 捉えることができる。KamLAND 実験は1,000トン の液体シンチレータを使って原子炉ニュートリノを 捉えたが、それを22,000トンの有効質量で捉える。 もちろん SK では低エネルギー部分は見えないが、 KamLAND に比べて約6倍の統計量を得ることがで きる。統計量による見積もりではニュートリノ振動 パラメータ(特に Δm_{12}^2)の精度を格段に向上させ ることができるはずである。

1.3 Gd ガンマ線のチェレンコフ光試験

Gd は昔の原子炉ニュートリノ実験や最近の θ₁₃原 子炉実験などにおいて液体シンチレータに溶かして 使用されており、たいへん馴染み深い物質であるが、 いままで水チェレンコフ検出器では使われてことが なく、信号がどのように見えるかわかっていなかっ た。液体シンチレータでは放出されるガンマ線の総 エネルギーが見えるが、水チェレンコフ検出器では ガンマ線がコンプトン散乱や電子陽電子対生成など の反応をおこしてエネルギーの高い電子や陽電子を 生成し、これらがチェレンコフ光を出すことになる ため、実際にどのように見えるかは自明ではなかっ た。そこで、図5に示すようなアクリル容器内に 0.2% 濃度の塩化ガドリニウム溶液を満たし(Gdの 濃度としては0.1%)、容器の中央に BGO で囲んだ Am/Be線源を配置した。そして、このアクリル容 器をSKタンクに沈めて測定を行った(文献6)。 Am/Be 線源はAm 崩壊の α 線が $\alpha + {}^{9}Be \rightarrow n + {}^{12}C*$



図5:0.2%GdCl₃溶液(0.1%のGdに相当)を入れたチェレ ンコフ光試験用アクリル容器。これを容器ごとSKタ ンク内につるしてテストデータが取られた。



図6:Gd (n, y)Gd 事象の発生場所分布(左)と電子に換 算した全エネルギー分布(右)。

(→¹²C+y)と反応して、中性子とガンマ線を同時 に出す線源である。y線はBGOでの蛍光を使って 先発信号とし、後発のGd(n, y)Gdによる信号を捉 えた。図6にイベントを再構成した時の発生場所分 布と電子換算での全エネルギー分布と示す。図が示 すようにGd(n, y)Gdの電子換算エネルギーは平均 4.3MeVであり、発生位置は92%の効率で2m以内 に求められることが分かった。また、Gd(n, y)Gd 事象は複数のガンマ線からチェレンコフ光が発せら れるために1粒子のリングパターンとは異なること がわかり、このパターンによる情報も信号選出に使 えることもわかった。これらの測定から、将来 SRNを捉えるための選択条件を以下のように見積 もった。

- (1) 後発事象(中性子候補)の再構成された場所 は先発事象(陽電子の場所)から2m以内。
- (2) 後発事象のエネルギーは3 MeV 以上。
- (3) 先発事象と後発事象の時間差が60マイクロ秒 以下。
- (4) 後発事象のリングパターンが Gd(n, γ)Gd 事 象にあっている。

これらの選択条件による効率は74%であり、 0.1%Gdによる捕獲効率90%と合わせて、中性子同 定の効率は67%となる。一方、この条件によりバッ クグラウンドを約2x10⁻⁴まで落とすことができ、核 破砕事象によるチャンス同時計測バックグラウンド を SRN の観測に問題が無いレベルまで下げること ができる。(核破砕原子核には実際に中性子の発生 を伴う⁹Li があるが、これは半減期が0.18秒と短い ため特別な条件を設けて落とす予定である。)

1.4 実現に向けて必要とされる R&D

SK に Gd を溶かす前にいくつか確認/開発しなければならないことがある。

Gd 水の透過率
 SK では大気 / 太陽ニュートリノの精密観測、

T2K 実験が継続的に行われている。これらの物 理解析を行うためには70m 以上の水の透過率が 必要であり、0.1% 濃度の Gd 水はこの条件を満 たさなければならない。

(2) 純水装置の改良

現在の純水装置はあらゆる不純物を取り除くように設計されているため、Gdを溶かした水を流した場合には Gd はすべて樹脂等で取り除かれてしまう。Gd を保持したまま水を純化させる方法を開発しなければならない。(その詳細は次節にて紹介。)

(3) Gd 化合物による腐食の可能性

SK タンクの中には、壁や構造体のステンレス、 光電子増倍管のガラス、衝撃波防止ケースのアク リル、FRP、その他各種シート類のプラスチック などの材料が使われているが、これらが Gd に よって (Gd は化合物の形で溶解させるので実際 には Gd 化合物によって)、腐食するようなこと があってはならない。

- (4) Gdの導入方法/除去方法 Gdを溶解させる方法や除去する方法を開発す る必要がある。特に除去方法はイオン交換樹脂を 使って取り除くと多額の経費がかかるので、固化 して回収する方法を確立しなければならない。(詳 細は次節)
- (5) 中性子バックグラウンドの影響
 Gd を溶かすと SK タンクの構造体や PMT 周りからくる中性子のバックグラウンドが「みえる」ようになる。この新たなバックグラウンドは太陽ニュートリノ観測に影響を与えてはならない。

(6) SK タンクの水密性 Gd 化合物は危険化学物質ではないが、危険性 があまり研究されていないこともあり、不用意に 環境へ排出されることがないように管理しなけれ ばならない。SK タンクの水密性を完璧にして、 タンク水が環境へ漏れ出ることがないようにする 必要がある。

EGADS プロジェクトでは、これらの確認/開発 をおこなっている。

2. EGADS プロジェクト

2.1 EGADS 実験施設

EGADS 実験施設は神岡坑内の SK タンク、SK 純 水装置から約50m の場所にある。実験場は10m×15 mの床面積をもち、SK を模擬した「200m³ステン レスタンク」、Gd を溶解させるための撹拌機付き「15



図7: EGADS セットアップの概念図。200m³ステンレスタンク(右)、Gd 溶解槽/前処理装置(中)、Gd 水循環装置(左)、透過率測定器(右端)が主要なコンポーネント。



図8:200m³ステンレスタンク(右)、Gd 溶解槽(左)と前 処理装置(左端)。



図9:実験室の様子。Gd 水循環装置(右)、200m³ステンレ スタンク(奥)とGd 溶解槽(左)。

m³溶解槽」、Gd 溶液をフィルター、ウラン除去樹脂 を通してきれいにする「前処理装置」、Gd を含んだ 水を循環させる「循環装置」、そして「透過率測定 装置」が配置されている。図7に実験施設全体のイ メージ図を示し、図8、9に実験施設の写真を示す。 以下、各部の詳細を紹介する。

2.1. 1 200m³ステンレスタンク

タンクは直径6.5m,高さ6.2mで、中には240本の 20インチ光電子増倍管を取り付けられるように構造 体が組まれている。タンクの材質はSKと同じ SUS304である。タンクは気密構造であり、微圧 (50mmAq) ラドンフリーエアが供給されている。

2.1. 2 15m³ Gd 溶解槽

Gd 溶解槽は粉の状態である Gd 化合物を純水に 溶かすための水槽であり、15m³の容積を持ち、槽 内には撹拌機がついている。タンクの材質はポリエ チレンである。この溶解槽において約1%の Gd 化 合物溶液(Gd 濃度は0.5%)を作り、それと純水と を1:4の比でブレンドして、0.1%Gd 溶液を200m³ タンクに給水する。現在は、次節で述べるように 0.2%Gd 化合物溶液を Gd 溶解槽で作り循環試験を 行っている。

2.1.3 前処理装置

溶解槽で Gd 化合物を溶かした水は前処理装置に おいて、3 ミクロンフィルター、Amberjet4400 (AJ4400)樹脂、紫外線殺菌灯、0.2ミクロンフィ ルターを通して純化される。フィルター類は未溶解 の粉を取り除くためであり、紫外線殺菌灯は水中の バクテリアを殺すためである。AJ4400は、Gd 化合 物を保持したまま、ウランを取り除くことができる 特殊なイオン交換樹脂である。ウランは自発核分裂 によって、ベータ・ガンマ線を出すとともに中性子 も発生する。これは SRN 信号のバックグラウンド になる可能性があるため取り除く必要がある。

2.1.4 循環装置

1.4節に書いたように水を循環させる装置はGd を保持したまま水を純化させる必要がある。それを おこなうのが循環装置であるが、まずその設計概念 について説明をする。膜を用いて水を純化させるエ レメントには、ウルトラフィルター (UF)、ナノフィ ルター (NF)、逆浸透膜 (RO) といったものがある。 UFは、膜に微細な穴を開けたフィルターであり、 分子量が数千から一万ぐらいの分子を分離すること ができる。NF、RO は浸透速度の違いによって水と 不純物を分離する膜であり、ROは1価のイオンも 含めてすべてのイオンを分離できるのに対して、 NF は価数の大きいイオンのみを分離することがで きる。Gd は水中で3価のイオンになっているので、 NFでは排除ラインへと進む。そこで、図10に示す ような UF、NF、RO の組み合わせを考える。まず、 UF で大きいサイズの不純物は取り除かれる。次に NFにおいて排除ラインへ行く Gd はそのまま素通 しするが、NFの透過ラインに行った水(そこには 1価、2価の不純物イオンが含まれている)は通常 の純水精製手法に従ってRO、イオン交換樹脂を 使って純化する。こうした設計概念に基づいてデザ



図10:Gd を保持しながら水を純化する装置の基本設計概念。



図11:水循環装置の構成図。

インした Gd 水循環装置の構成図を図11に示す。

2.1.5 透過率測定器

100m 近い透過率を10m 弱の基線長で測定する装 置を開発した。装置の原理を図12に示す。長さ8.6m、 直径225mm のポリプロピレン (PP) 製のパイプを 垂直に立て、そのパイプ中に満たす水の高さを変え ながら、パイプ上から入射した光がパイプ下のアク リル窓を透過した光量を測るというのが測定器の原 理である。入射する光の波長は、337、375、405、 445、473、532、595nmの7種類であり、窒素レー ザー光源、レーザーダイオード光源、パルス化レー ザーポインター光源を使用している。入射光はハー フミラーにより PP パイプに送られる光とモニター 光に分けられ、光の強度は4インチ積分球とフォト ダイオードによりモニターされる。8.6mのPPパイ プの下部 UV 透過アクリル窓の下では、12インチの 大口径積分球が透過光を受け、フォトダイオードに より光強度を測定する。図13に測定結果の一例を示 す。横軸は PP パイプ中のサンプル水の高さ、縦軸 はモニター光量で規格化した透過光の強度であり、



図12:透過率測定装置の概念図。



測定値を高さの関数として指数関数でフィットする ことにより透過率が求められる。測定において変化 するものは PP パイプ中の水の高さのみであり、水 面での反射や他の光の伝播に係るオプテックスは共 通であるため、非常に系統誤差の小さい測定を行う ことができ、100m近い透過率においても測定の誤 差は1m程度以下に抑えられている。

2.1. 6 Gd 回収システム

Gd 溶液は pH を10.5以上にあげると Gd(OH)₃と して沈殿する。沈殿物をフィルタープレスという方 法で固化することにより、大部分の Gd を回収する ことができる。そして、液中に残留する Gd を RO やイオン交換樹脂を使って完璧に取り除く。このシ ステムは UCI で試験が行われており、完成後は神 岡の EGdS 実験施設に設置されることになってい る。現在の EGADS 実験施設には、とりあえずイオ ン交換樹脂で Gd を回収するシステムが設置されて いる。

2.2 Gd 化合物の選択

EGADS 実験施設で実験を始める前に SK で使用 されている部材が Gd 溶液によって溶けだしたり、 腐食したりすることがないか試験をおこなった。特 に構造体であるステンレスについては、タンクを 作った三井造船㈱により詳細な腐食試験が行われ た。ガドリニウムには何種類か化合物があり、塩化 ガドリニウム (GdCl₃)、硝酸ガドリニウム $(Gd(NO_3)_3)$ 、硫酸ガドリニウム $(Gd_2(SO_4)_3)$ な どがある。いずれの化合物もステンレス構造体の強 度を弱めるような腐食性はなかったが、GdCla溶液 では鉄イオンの溶出により黄色に変色する可能性が あることがわかった。一方、 $Gd(NO_3)_3$ 、 $Gd_2(SO_4)_3$ 溶液ではそうした色の変化は見られなかった。しか し、Gd(NO₃)₃溶液には光の吸収において問題があ り、350nm以下の波長を光を強く吸収し、チェレン コフ光を30%近く吸収してしまう。Gd₂(SO₄)₃溶液 にはステンレスからの溶出や光の吸収において特に 問題はみつかっておらず、そこで Gd₂(SO₄)₃を選択 することとした。Gd₂(SO₄)₃溶液の詳しい浸漬試験 は我々でもおこなった。SK のタンク内で使われて いる部材(全部で31種類)を溶液に何カ月も浸し、 透過率の変化などを測定した。ほとんどの部材につ いて問題はなかったが、PMT を固定しているゴム バンドだけは Gd 溶液により何からの溶出物があり 変色することがわかった。(実は、比較テストをお こなった純水でも若干の変色があった。)しかし、 サンプル量と溶液の比を SK タンクでの場合にス

ケールすると、観測に障害となるほどの影響はない ことがわかった。また、ゴムの弾性率も測定し、変 質していないことも確認した。

2.3 開発研究の現状および予定

前節で述べた開発研究に必要とされるセットアッ プは2011年3月までに完成した。その後、以下のよ うな手順で研究を進めている。

- (ステップ1)光電子増倍管を取り付ける前に、純 水を使って200m³タンクと循環装置 との間で水をまわし、循環装置の基 本的な性能を試験する。
- (ステップ2) Gdを15m³溶解槽に溶かし、循環装置を使って Gd水を循環させ、透過率を測定する。これにより Gd水自身(ステンレスや PMT 材料などの影響をうけない)の透過率を評価する。
- (ステップ3) 200 m³タンクに0.1%Gd 溶液を貯め、 循環装置を通して循環させることに より、ステンレス材料の影響を評価 する。
- (ステップ4) 200 m³タンクの Gd 水を Gd を回収 しながら排水し、その後タンク内を 洗浄する。
- (ステップ5)240本の光電子増倍管、ブラックシー トなどをステンレスタンクに取り付 ける。
- (ステップ6) 再び200m³タンクに0.1%Gd 溶液を 貯め、透過率の測定、中性子測定の 評価など、総合的な試験を行う。

今現在(2011年12月時点)は、ステップ2の途中 である。ステップ1において循環装置で純水を回し 水の透過度の変化を図14に示す。図の縦軸はチェレ ンコフ光の波長分布をもった光が20m伝播し20イン チ PMT の量子効率にしたがって捉えられる光の相 対強度を示し、SK タンク水の場合その値は約78% である。時間とともに透過度が向上し、最終的に SK のタンク水とほぼ同等のレベルまで純化できる ことがわかった。ステップ2において0.1%Gdを溶 解させ(正確には0.2%のGd₂(SO₄)₃)、最初の測定 した透過率の結果は図15の縦軸のスケールで60%、 つまり SK タンク水に比べて0.75倍程度、であった。 現在、このロス分が何に起因するのか調べていると ころである。ステップ2、3、4を2012年の5月頃 までに終えて、ステップ5 (PMT 取り付け) を7 月頃におこない、2012年の後半にはステップ6(総



図14:ステップ1(純水を200m³タンクを通して循環)にお ける水の透過度の時間変化。茶、青、赤は水の採取 場所で、それぞれタンクの中央、上部、底部。縦軸 は20mチェレンコフ光が伝播して20インチ PMT で光 を受けた場合の強度に相当する値。SK タンクの純水 はこの値が78%(図中の黒の水平線)。

合試験)へと進む予定である。

3. まとめ

スーパーカミオカンデにガドリニウムを溶解させ ることにより、反電子ニュートリノによる物理が展 開できる。特に、超新星背景ニュートリノの世界初 観測が期待されている。EGADS はその開発研究を おこなう実験装置であり、主要な機器の設置はほぼ 完了した。現在、Gd 水の透過率測定など基本的な 試験を行っているところである。2012年後半までに は光電子増倍管も取り付け、総合的な試験をおこな う予定である。

参考文献

- J. F. Beacom and M. R. Vagins, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 171101
- 2. K. Bays et al. (Super-Kamiokande collaboration), submitted to Phys. ReV. D., ArXiv: 1111. 5031[hep-ex].
- 3. S. Ando, Astrophys. J. 607: 20–31, 2004, flux revised in NNN05.
- 4. R. Tomas et al., Phys. Rev. D68 (2003) 093013.
- 5. A. Odrzywolek, M. Misiaszek and M. Kutschera, Astropart. Phys. 21 (2004) 303–313.
- H.Watanabe et al. (Super-Kamiokande collaboration), Astropart. Phys. 31, 320–328 (2009), arXiv: 0811.0735.



1. はじめに

これまで長年に渡って世界中で取り組まれてきた 重力波検出のための取り組みであるが、2010年代に 入りいよいよ初検出が現実味を帯びてきた。

日本の将来実験として神岡鉱山で建設を開始した 大型低温重力波望遠鏡 LCGT は、連星中性子星か らの重力波を一年に数回のオーダーで捉えることが 期待されている。また現在アメリカの LIGO、イタ リアの VIRGO も感度向上のための改良工事中であ り、LCGT と同レベルの感度での観測が期待される。 これら世界中の重力波検出器はネットワークを構成 し、重力波天文学の新時代を切り開いてくれるはず である。

天体起源の重力波だけに注目されがちな重力波実 験であるが、宇宙論にとっても LCGT の始動はう れしいニュースであった。本稿では宇宙論において 重力波実験ができること、特に宇宙ひも起源の重力 波について紹介したい。

2. 重力波で初期宇宙を探る

初期宇宙にはインフレーション、宇宙再加熱、宇 宙相転移など重力波を生成しうる現象が理論的にい くつか存在する。現在の標準的な初期宇宙モデルで は、宇宙誕生直後にインフレーションと呼ばれる宇 宙の急速な大膨張が起こり、再加熱と呼ばれる輻射 生成により宇宙が温められ、その後真空の状態が変 化する相転移を何度か繰り返しながら進化してきた と考えられている。インフレーションは時空の量子 揺らぎを空間的に引き延ばし、そのとき古典化され た揺らぎが重力波として現在も残っていると考えら れている[1]。またその後に起こる再加熱が劇的に 起こった場合、激しく振動する物質場の揺らぎが重 力波を生成する[2-5]。相転移が一次の場合、相転 移は偽真空の中に真の真空のバブルが生じそれが広 がることによって進む。その際バブル同士が衝突す る衝撃が重力波を生成する[6]。

こうして初期宇宙に生成された重力波は、背景重力 波として現在も宇宙全体に漂い続けていると考えられ る。初期宇宙を探る観測手段としての重力波の魅力は 何と言っても透過性の強さにある。電磁波(光子)の 場合、宇宙の晴れ上がり(CMBの時代)前は電子と の散乱が頻繁に起こるため、それ以前に起こった上述 の初期宇宙現象の情報はかき消されてしまう。一方、 重力波は電磁波とは違って生成されると物質とほとん ど相互作用せずに我々のところまで届くため、電磁波 では他の物質に邪魔されて届くことのなかった情報が 直接届けられる。つまり重力波は宇宙の極初期を直接 観測する唯一の手段なのである。(図1参照)



図1:宇宙の進化の概念図





しかしながら初期宇宙に生成された重力波は宇宙 膨張により薄められてしまうため強度が極端に低 い。モデルによって重力波の大きさは異なるが、図 2に典型的な初期宇宙起源の重力波の強度と将来実 験の感度曲線を示した。図を見てわかる通り、 LCGT のような地上検出器では上に挙げた起源の重 力波の検出は特殊なモデルを考えない限り難しい。 もちろん特殊なモデルを排除するという意味で地上 検出器の役割は大きいが、標準的な初期宇宙モデル の検証には日本の DECIGO 計画 [10] のような宇 宙衛星を用いた超高感度の重力波検出実験を待つ必 要がある。

一方でこれから紹介する「宇宙ひも」ならば地上検 出器での検出も期待できる強度の重力波を予言する。

3. 宇宙ひもからの重力波

前述した初期宇宙で起こる相転移の際に、エネル ギーの高い真空が低い真空の中に空間的に取り残さ れると位相欠陥として残ったまま宇宙空間を漂い続 ける。この取り残されたエネルギーの高い部分が1 次元のひも状につながっている場合は宇宙ひもと呼 ばれる (図3参照)。また、それとは全く異なる起 源で超弦理論からも宇宙ひもが予言される。超弦理 論の枠組みでインフレーションを考えると、インフ レーション後に自然に宇宙論的な大きさの弦が取り 残される。この場合の宇宙ひもは相転移起源の宇宙



図3:宇宙ひもができる例。場の対称性が破れることによっ て真空がエネルギーの高い位置(黄色)から低い位 置(青)へと落ちてくる。しかし対称性が破れたポ テンシャルでは真空は円周を一周する自由度を新た に持つため、その中心にエネルギーの高い部分が取 り残される状況が必ず発生する。このようなエネル ギーの高い点が一次元的につながったものが宇宙ひ もになる。 ひもと違って組み替え確率(ひも同士が衝突したと きに繋ぎ変わる確率)が低いのが特徴である。

現時点でこういった宇宙ひもの観測的証拠はない がその存在を探ることで相転移や超弦理論といった 関連する初期宇宙物理の情報を得られることが期待 される。しかし多くの場合宇宙ひもは宇宙論におい て重力的な効果しか及ぼさないため、光学観測でそ の存在を探るのは難しい。そこで宇宙ひもの探索手 段として期待されているのが重力波である。

宇宙ひもは生成された後、衝突を繰り返し繋ぎ変 わることで"スケーリング則"に従いながら進化し ていくことがシミュレーションの結果からよくわ かっている [11]。宇宙ひものネットワークは無限 に長いひもとループで構成され、スケーリング則に よれば無限に長いひもはホライズン内(我々の観測 できる領域)に数本ある状態が常に維持される。一 方、ループになった宇宙ひもは重力波を放出しなが らエネルギーを失いやがて消滅する。中でもループ 上の波同士が重なる際に時折形成されるカスプと呼 ばれる特殊な構造はバースト状の大きな重力波を放 出する。バーストの強度は宇宙ひもを特徴づけるパ ラメータに依るが、パラメータの値次第で地上検出 器でも十分検出できる可能性がある(図4参照)。 逆に言えば、もし宇宙ひも起源の重力波が検出でき た場合、宇宙ひものパラメータをある程度推定する ことができ、関連する初期宇宙物理に示唆を与える ことが可能になる。

宇宙ひもの進化がスケーリング則に従うことを仮 定すれば、どのくらいの強度の重力波がどのくらい の頻度で地球にやってくるか理論的に予言すること ができる。図5は宇宙ひものパラメータを $G\mu=10^7$ (張力)、 $\alpha=10^{-16}$ (ループの形成時の大きさ)、p =1(組み換え確率)とした場合の地球にやってく る重力波バーストの強度分布予測である。重力波の うち検出器の感度より十分強度が大きいもの(図の 青色の領域)はバーストとして観測される一方、小 さくて数が多いもの(オレンジ色の領域)は様々な ループから放出されたものが重なり合った背景重力 波として検出される。

このバーストと背景重力波の2種の観測量をそれ ぞれ独立に測ることは宇宙ひものパラメータを推定 する上で重要である。なぜならバーストは近くで、 つまり比較的最近に放出された重力波、一方背景重 力波は昔に放出された重力波で構成されるため、こ れら2種は異なる時代の情報を持つ独立な観測量に なるからである。さらに言えば、バースト検出に基 づく宇宙ひものパラメータ推定は重力波の強度対頻



図4:将来の地上重力波実験(Advanced-LIGO、LCGT な どによる重力波検出ネットワークを仮定)で探るこ とが可能な宇宙ひものパラメータ領域。横軸が宇宙 ひものループの形成時の大きさα、縦軸が宇宙ひもの 張力 Gµ。組み換え確率は p = 1 を仮定。黄色の点線 より上の領域がバースト探索で探れるパラメータ領 域、実線より上が背景重力波探索で探れる領域。他 の色のついている領域は他の宇宙論的観測からすで に排除されている領域。



図5:地球にやってくる宇宙ひもからの重力波バーストの 頻度の理論予想。横軸が重力波の強度、縦軸がその 頻度。パラメータは Gμ=10⁷ (張力)、α=10⁻¹⁶ (ルー プの形成時の大きさ)、p=1 (組み換え確率)を仮定。

度分布を観測量として用いるのに対し、背景重力波 は強度×頻度の足し合わせを観測量として用いるた め、情報の質が異なる。つまりこれら2種の観測か ら宇宙ひもの性質を特徴付けるパラメータを推定し た場合、パラメータ同士の縮退(相関)の方向が異 なることが期待される。

図6にLCGTやLIGO等の地上重力波検出器で宇 宙ひも起源の重力波が検出できた場合を想定して、 予想されるパラメータ推定の一例を示した[12]。背



図6:将来の地上重力波実験(Advanced-LIGO、LCGT など) による宇宙ひものパラメータ推定の一例。横軸は組 み替え確率 p、縦軸は張力 Gμ で、黒と赤の線の内側 が地上重力波検出器による観測から2σで許される領 域を表す。黒線がバースト観測のみの情報を使って パラメータを制限した場合、赤線がそれに背景重力 波の情報も加えてパラメータ推定した場合の制限。 想定したパラメータは Gμ=10⁷、α=10⁻¹⁶、p=1。

景重力波の場合、観測で得られるのは強度の情報の みなので、1つの情報から複数のパラメータを推定 した場合、パラメータ同士に非常に強い縮退が見ら れる。そこにバースト観測の情報を加えることでそ の縮退を解き、パラメータにより厳しい制限を課す ことができる。

図から今回想定したパラメータの値の場合には宇 宙ひもの張力、組み替え確率と共に地上検出器で非 常に良い精度で決められることがわかる。特に組み 替え確率が1であるかどうかを判別することは宇宙 ひもが相転移起源のものか超弦理論起源のものか判 別するのに非常に重要である。また張力は相転移起 源の宇宙ひもの場合、相転移の起こったエネルギー スケール、超弦理論起源の場合はひものエネルギー スケールやワープファクターと呼ばれる余剰次元の 情報に結びつく。そのため観測からこういったパラ メータが良い精度で決まれば関連する理論に大きな 発展をもたらすことが期待される。

4. おわりに

重力波検出を通して宇宙ひもの基本的性質を調べ ることができれば、素粒子論や超弦理論の検証に大 きく貢献する。このような極初期宇宙の物理は加速 器では到底届かないような高エネルギーに対応し、 重力波実験はこういった高エネルギー物理にユニー クな観測的制限を与えてくれる。また宇宙ひもに限 らず、初期宇宙物理には重力波でしか探れない現象 が多くある。LCGTの始動を皮切りに今後日本の重 力波検出技術が発展し、重力波で様々な初期宇宙物 理を検証できる時代が訪れることを期待したい。

参考文献

- [1] A. A. Starobinsky, JETP Lett. 30, 682 (1979); V.
 A. Rubakov, M. V. Sazhin and A. V. Veryaskin Phys.
 Lett. B 115, 189 (1982); L. F. Abbott and M. B.
 Wise, Nucl. Phys. B 244, 541 (1984).
- [2] S. Y. Khlebnikov and I. I. Tkachev, Phys. Rev. D 56, 653 (1997).
- [3] R. Easther and E. A. Lim, JCAP 0604, 010 (2006);
 R. Easther, J. T. Giblin and E. A. Lim, Phys. Rev. Lett. 99, 221301 (2007).
- [4] J. Garcia-Bellido and D. G. Figueroa, Phys. Rev. Lett. 98, 061302 (2007); J. Garcia-Bellido, D. G.
 Figueroa and A. Sastre, Phys. Rev. D 77, 043517 (2008).
- [5] J. F. Dufaux, A. Bergman, G. N. Felder, L. Kofman and J. P. Uzan, Phys. Rev. D 76, 123517 (2007); J. F. Dufaux, G. N. Felder, L. Kofman and O. Navros, JCAP 0903, 001 (2009).
- [6] C. Caprini, R. Durrer and G. Servant, Phys. Rev. D 77, 124015 (2008); JCAP 0912, 024 (2009); C. Caprini, R. Durrer, T. Konstandin and G. Servant, Phys. Rev. D 79, 083519 (2009).
- [7] S. Kuroyanagi, T. Chiba, N. Sugiyama, Phys. Rev. D 79, 103501 (2009).
- [8] M. R. DePies and C. J. Hogan, Phys. Rev. D 75, 125006 (2007).
- [9] M. Kawasaki, K. Miyamoto, K. Nakayama, Phys. Rev. D81, 103523 (2010).
- [10] N. Seto, S. Kawamura, and T. Nakamura, Phys. Rev. Lett. 87, 221103 (2001).
- [11] D. P. Bennett, F. R. Bouchet, Phys. Rev. Lett. 60, 257 (1988); Phys. Rev. Lett. 63, 2776 (1989); Phys. Rev. D41, 2408 (1990); B. Allen, E. P. S. Shellard, Phys. Rev. Lett. 64, 119–122 (1990).
- [12] S. Kuroyanagi, K. Miyamoto, T. Sekiguchi, K. Takahashi, J. Silk, in preparation

	人	事異	動
発 令 日	氏 名	異動内容	職
H23. 11. 25	Daniel Dieter FRIEDRICH	新規受入	学振特別研究員
H23. 11. 30	神戸富雄	任期満了退職	技能補佐員
H23. 12. 1	田守幸雄	新規採用	技能補佐員

退職

ICRR-Seminar 2011年度

H23. 12. 31

2012年2月8日(水)	中村卓司	(極地研)				
" 南極の大気計測 "						
2012年1月25日(水)	常田佐久	(国立天文台)				
" 太陽の最新像 "						
2011年12月21日(水)	川村静児	(宇宙線研究所)				
"LCGT による重力波天文学の創成 "						
2011年12月14日(水)	灰野禎一	(INFN Perugia)				
"AMS の状況報告 "						
2011年12月5日(月)	Thierry Lasserre (CEA-Saclay)					
"Testing the Reactor	Antineutrino	o Anomaly with a 10g				
144Ce-144Pr source deployed inside a Large Liquid						
Scintillator Detector"						
2011年11月30日(水)	Alexande	r Kusenko (UCLA/				
	IPMU)					
"Cosmic connection	s: from cos	smic rays, to gamma				
rays, to cosmic backgrounds"						
0011左11日05日(人)	て接てま	(市吉丁娄上兴研丁				

大林由

尚

2011年11月25日(金) 石塚正基(東京工業大学理工 学研究科) "Double Chooz 実験によるニュートリノ振動解析 の最新結果 "

2011年11月9日(水) 井上進(宇宙線研究所)

助教

"Multi-Messenger Quest for the Origin of High Energy Cosmic Rays"

ICRR-Report 2011年度

ICRR-Report-600-2011-17

"Resonant annihilation of long-lived masive colored particles through hadronic collisions"

Motohiko Kusakabe, and Tomohiro Takesako.

ICRR-Report-601-2011-18

"The Lightest Higgs Boson Mass Pure Gravity Mediation Model""

Masahiro Ibe, and Tsutomu T. Yanagida.

ICRR-Report-602-2011-19

"Hubble Induced Mass in Radiation Dominated Universe"

Masahiro Kawasaki, and Tomohiro Takesako.

