

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。

研究紹介

すばる望遠鏡で探る宇宙再電離

大内正己 【宇宙線研究所】

1. はじめに

宇宙再電離は137億年の宇宙史の中で最後の大イ ベントである(図1)。宇宙がビッグバンで誕生し、 膨張が進むにつれて宇宙の温度は下がっていった。 温度が3,000Kにまで下がった赤方偏移(z)1,100頃 で宇宙を満たす陽子と電子が再結合したと考えられ ている。これは宇宙の晴れ上がりと呼ばれ、光子の 最終散乱面が宇宙背景放射(CMB)として観測さ れている。晴れ上がりを経て、宇宙は主に中性水素 ガスからなる暗黒時代に突入していった。一方で、 クエーサー(QSO)に現れる吸収線を用いて最近の 宇宙(赤方偏移0-2程度)の銀河間ガスを調べる と水素がほぼ電離していることが分かっている。つ まり、z=1,100で中性になった水素が宇宙史のどこ かの時点で電離されたことになる。これが宇宙の再 電離である。そして、宇宙再電離は銀河の星形成活 動に伴って放出される紫外線で起こったと考えられ ている。

最近まで、宇宙再電離についての観測的知見は皆 無に等しかった。しかし、この数年間でスローン・ デジタル・スカイ・サーベイで検出された QSO や、 WMAP 衛星で得られた CMB を背景光として使い、 光源との間にある中性(もしくは電離)水素の量に 制限が加えられた。これにより宇宙再電離が赤方偏 移 6-15くらいに起こったことが分かってきた(Fan et al. 2006, Dunkley et al. 2009)。しかし、赤方偏移 6-15という長い期間において、いつどのように宇 宙再電離が起きたかは明らかでない。特に、宇宙再 電離が比較的短時間で終了する sharp reionization と その逆の extended reionization のモデルのいずれが 正しいかといった問題には答えられていない



図1:宇宙史の中での宇宙再電離 (z~6-15)。横軸が赤方偏移(宇宙時間)に対応する。左側が光子 の最終散乱面(赤方偏移1100)、右が現在(赤方偏移 0)。 Adapted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature (Robertson et al.), copyright (2010)

(Dunkley et al. 2009)。というのは、赤方偏移 6-15 の範囲で銀河間ガスの中性水素比率(x_{HI})がどの ように変化したかが分からない為である。これに加 えて、宇宙再電離の根本的な疑問である電離プロセ ス(大規模構造の中での電離の伝播;後述)の問題 に至っては、何ら解決の糸口はない。

QSO および CMB による宇宙再電離の研究には限 界がある。QSO による宇宙の $x_{\rm HI}$ への制限は、銀河 間ガスの水素がそのスペクトルにもたらす Ly a 吸 収線を元に調べられる。しかし、Ly a 光子に対す る散乱断面積が大きいために、 $x_{\rm HI}^{-10^{-3}}$ 程度の極微 量の中性水素が銀河間ガスに含まれているだけで Ly a 吸収線が飽和してしまい $x_{\rm HI}$ の測定が行えなく なる。そのため、QSO による測定は $x_{\rm HI}$ が非常に小 さい宇宙再電離の最終段階に限られ、赤方偏移で言 うと0-6 程度である。一方で CMB は、トムソン 散乱がもたらす偏光を元に z = 0 から1100までに存 在する電離ガス中の自由電子の量から制限を加えて いる。得られるのは視線方向にある電離水素の量の 積分値に対応するため、 $x_{\rm HI}$ の時間的変化の情報は 得られない。

このため、中性水素比率にして $x_{HI}^{-10^{-2}-1}$ の時 代が調べられ、かつ時間分解能が得られる手法を用 いなければ宇宙再電離の重要過程は理解できない。 これを可能にするのが中性水素がもたらす Ly a damping wing の吸収による手法である。Ly a damping wing 吸収とは、非常に強い Ly a 吸収線におい て natural broadening が Ly a の波長(1,216Å)より 長波長側にもたらす吸収である。初期の宇宙に多数 存在する銀河、特に検出が容易な Ly a 輝線を出す 銀河(LAE)を使い、その Ly a 輝線が受ける damping wing 吸収の量を銀河・宇宙再電離モデルと比べ ることで銀河間ガスの x_{HI} に制限を加えることがで きる。具体的には、中性水素の量が多く(つまり x_{HI} が大きく)なるにつれて、(a) damping wing 吸 収により LAE の Ly a 輝線が暗くなり観測される LAE が減る。また、(b) damping wing の吸収プロファ イルが掛け合わさることで LAEのLya 輝線の幅が 広くなる。さらに、(c) damping wing 吸収の空間的 疎密が大きくなるため、観測される LAE の空間分 布の疎密が大きくなる。さらに LAE の空間分布を 詳細に調べられれば電離度の空間分布、つまり電離 プロセスにも制限を加えられる。LAE 以外にもガ ンマ線バースト (GRB) のスペクトルに現れる Ly a damping wing の吸収から宇宙再電離に制限を 加えることができる (Totani et al. 2006)。この手法 は LAE よりも単純な理論モデルと比較することで x_mの制限が得られる点で優れている。しかし、空 間的に非一様に進む再電離過程を調べられるほど GRBの検出個数が多くないため、x_{HI}の見積もりに 強いバイアスがかかることが知られている(Mc-Quinn et al. 2008).

2. 大型光赤外線望遠鏡による探査

これらの問題を解決するため、我々、東京大学、 国立天文台を始めとする研究者は、宇宙再電離期(赤 方偏移6以上)にある星形成銀河の探査を行ってい る。宇宙再電離期は、現在の技術で天体が観測でき る限界に相当するため、調べるのが非常に難しい。 実際これまでに分光同定されている1番目、2番目 に高い赤方偏移の天体は、銀河で8.6と7.0 (Lehnert et al. 2010, Iye et al. 2006), GRB で8.2, 6.7 (Tanvir et al. 2009, Greiner et al. 2009)、QSO で 6.43, 6.42 (Willott et al. 2007) である。高赤方偏移を観測す れば宇宙再電離のより初期を捉えることができる。 そのため、なるべく高赤方偏移を狙いたいのだが、 銀河間ガスの電離の空間分布まで見るには100個を 超える LAE を非常に大きな体積で調べる必要があ る。このような観測は普通に考えると不可能なのだ が、我々はすばる望遠鏡の可視撮像装置 Suprime-Cam (図2; Miyazaki et al. 2002)のユニークな広視 野・高感度の性能を生かし、これを実現した。我々

は、可視域で最も長波長に位置する夜光輝線の谷間 (9,200Å)を中心とした波長幅130Åの狭帯域フィ ルターを用いた。この狭帯域フィルター内に赤方 偏移した Ly a 輝線を捉えることで、赤方偏移6.6の LAE を検出する。Suprime-Cam の広視野を生かし ながら宇宙再電離期の LAE を非常に高い効率で探 査できる。我々は、高銀緯方向にあり遠方宇宙観測 に適したブランクフィールド、すばる XMM-Newton Deep Survey (SXDS) 領域を狙って 2005年から 観測を始めた。途中2006年に起こったハワイ島沖の 大地震の影響で、観測機会を失うなどのトラブルに 見舞われたが2007年秋には無事観測が完了した。 データを解析した結果、207個のz=6.6 LAE を約 1平方度(10⁶Mpc³)の範囲で検出することに成功 した。また、一部の LAE に対しては2007-2010年に アメリカのケック望遠鏡およびチリのマゼラン望遠 鏡で分光追観測を行ってz=6.6にあることを確認 した。これにより、得られたサンプルの信頼性が十 分高いことが裏付けられた。今回の探査は、これま でに行われた宇宙再電離期の銀河(LAEを含む) 探査(例えばHu et al. 2006, Kashikawa et al. 2006, Bouwens et al. 2010b) より数倍以上大きい検出個数 および探査領域を実現した。宇宙再電離期を狙った 研究は、世界の研究グループが鎬を削っているが、 我々の得たサンプルは圧倒的に大きく、現時点で最 大である。特に、これまでの研究では LAE の典型 的光度がz=5.7から6.6まで変わらない (Malhotra & Rhoads 2004など) もしくは減少する (Kashikawa et al. 2006) という対立する 2 つの結果が出されて いた。前者と後者ではどちらが正しいかという疑問 は、Ly a damping wing の吸収の有無、さらには z =6.6で宇宙再電離が進んでいるかどうかという問



図2:すばる望遠鏡の主焦点ユニットに入れられた Suprime-Cam と筆者(試験運用時に撮影)。

題に直結するため重要である [(a)を参照]。次に述 べるように、我々は過去の探査と異なる天域におい て数倍のサンプルを取得することでこの問題に決着 をつけるとともに、これまで調べられなかった探査 領域のバイアスや LAE の空間分布を世界に先駆け て測定することができた。

3. 宇宙再電離史への制限

我々が得たサンプルを元に、z = 6.6 LAE の光度 関数と角度相関関数、Ly a 輝線プロファイルを求 め、(a)-(c) のテストを行った(詳細は Ouchi et al. 2010参照)。

まず z = 6.6の光度関数は、z = 5.7のものと比べ 減少していることが分かった。ただし、その減少量 はこれまで言われていた値よりも小さく、過去の対 立する2つの結果の中間に位置する。統計によるノ イズと領域間に見られるばらつきの量が今回の結果 で理解され、従来の結果の違いはこのばらつきを見 ていたことが分かった。我々の大サンプルに基づく 光度関数がこれまでの議論に終止符を打った。光度 関数に Schechter 関数 (Schechter 1976) をフィット させて、光度関数の典型的明るさ(L*)と個数密 度 (ϕ^*) がとりうる範囲を示したのが図3 (左) である。この図から90%以上の信頼度でz=6.6の 光度関数はz=5.7のものと異なることが分かった。 この結論はほぼ同時期に得られた他の観測結果とも 定性的に一致している (Ota et al. 2010, Hu et al. 2010)。また、z = 5.7から6.6までの光度関数の進化 を光度だけおよび個数密度だけが進化するという2 つの場合を考えた時、単純な個数進化では説明でき ず、むしろ単純な光度進化を支持する結果となった。 銀河進化の影響を差し引いた場合、Lya光度の減 少率は20%であり、宇宙再電離による効果は20% と少ないことが示唆された。ただし、宇宙再電離に よる damping wing 吸収が無いことと $1 \sigma o \nu \prec \nu$ で一致している。この Ly a 光度の減少率を宇宙再 電離モデルと比較すると、モデルの手法やパラメー タの取り方による不定性も含めて銀河間ガスの中性 度は x_{HI} = 0.2 ± 0.2 であることが分かった。

次に z = 6.6 LAE の角度相関関数を図3(真ん中) に示す。まず特筆すべきは、角度相関のシグナル検 出に成功したことである。宇宙再電離期の天体で相 関シグナルを検出した初めての例であり、宇宙再電 離だけでなく宇宙の構造形成への制限を得る上で貴 重な測定値である。そして、この角度相関の相関強 度を見るとバイアスの値にして b = 3-5であること が分かった。これは z = 5.7の LAE の値 b = 3.4±1.8



図3: (左)赤方偏移6.6と5.7の光度関数が取りうる Schechter 関数のパラメター、光度(L*)と個数密度 (ϕ^*)の範囲。等高線の内側と外側はそれぞれ68%および90%の信頼区間。(真ん中) z = 6.6 LAE の角度相関関数(上段)とバイアス(下段)。測定値は黒四角、上段の曲線および下段の目盛りは 各 x_{HI}に対応する理論モデル(それぞれ McQuinn et al. 2007および Furlanetto et al. 2006による予 測)。(右)平均のLy a 輝線プロファイル。赤方偏移6.6および5.7をそれぞれ赤太線と黒太線で示す。 それぞれの1 σ エラーの範囲が赤細線および灰色。(いずれも Ouchi et al. 2010より転載。These figures are reproduced by permission of the AAS.)

(Ouchi et al. 2005)と比べるとエラーの範囲で違い が見られない。つまりエラーの範囲で宇宙再電離に よって LAE の空間分布の疎密が大きくなったとい う傾向は見られなかった。図3(真ん中)にあるよ うに宇宙再電離モデルと比較した結果、弱いながら も $x_{\rm H} \leq 0.5$ という制限が得られた。ちなみに LAE の空間分布については、相関シグナルを検出するの がやっとのレベルだったため、 $x_{\rm H}$ の制限よりも高 い精度を要求する電離プロセスへの知見は得られな かった。

最後に、ケック望遠鏡の分光観測で得られた Ly a 輝線プロファイルの平均を図3(右)に示す。 これを過去に得られた z = 5.7 LAE の輝線プロファ イルの平均と比較したところ、こちらもエラーの範 囲で有意な進化が認められなかった。定量的には輝 線幅(FWHM)が14%以上変化していることは棄 却された。もっとも銀河間ガスの中性度 $x_{\rm H}$ が1に 近い場合でも輝線幅が10%程度しか増加しないの で、今回の結果からは $x_{\rm H}$ ~1であり、輝線幅が >14%程度広くなった場合のみが棄却されたこと になる。

これら3つの宇宙再電離テストの結果をまとめた ものが図4である。興味深いのは、全く独立な物理 量を用いたにも関わらず、3つのテストの結果が全 て一致してz~7では中性な宇宙を支持しないとい う点である。この3つのテストのうち、統計エラー が小さく最も強い制限を与えている光度関数の結果 に注目すると中性度はx_H = 0.2±0.2である。(これ を言い換えると銀河間ガスの80±20%の水素は既 に電離されていることになる。)図4にあるように、



図4:中性水素比(x_{III})の赤方偏移変化。(上段)赤方偏 移7付近にある黒四角、黒丸、および太線矢印がそ れぞれ光度関数と角度相関関数、Lya輝線プロファ イルから得られた制限。(なお、黒丸は黒四角のエラー バーと重ならないように赤方偏移方向に移動させて いる。)赤方偏移 5-6 の黒印は QSO によるもの (Fan et al. 2006など)、赤方偏移9付近の右向き三角は CMB から得られた結果 (Larson et al. 2010)、赤方 偏移 6-7 の白抜き印は GRB や過去の LAE 探査か ら得られた制限(Totani et al. 2006, Kashikawa et al. 2006など)。なお、今回得られた光度関数の結果(黒 四角)は過去のものよりも強い制限を与えている。 曲線は異なる理論モデルによる予言 (Choudhury et al. 2008)。(下段) 上段と同じだが log scale で表し、 宇宙再電離末期の様子を明示したもの。(いずれも Ouchi et al. 2010 より転載。This figure is reproduced by permission of the AAS.)

赤方偏移7の段階で中性度が低いとなると宇宙再電 離はかなり早い段階に始まったと考えられる。そう であれば、銀河の星形成が初期の宇宙から激しく行 われ、電離光子が大量に生産されたことになる。赤 方偏移7の宇宙でも星形成率密度が高いことが期待 される。

4. Missing Ionizing Photon 問題?

赤方偏移0-7における宇宙の星形成率密度を示 したのが図5(左)である。この図の赤方偏移7の 測定値は、我々のすばるによる探査に加え、ハッブ ル宇宙望遠鏡の最新装置 WFC3で観測された銀河か ら求めた星形成率密度である。これによると、宇宙 の星形成は赤方偏移2-3をピークにして、赤方偏 移7へ向けて単調減少していることが分かる。この 星形成率密度を元に銀河が生産する電離光子の放射 率密度を見積もったのが図5(右)である。赤方偏 移7へ向けて星形成率密度が減少するのに伴って、 電離光子の放射率密度も減っていく。赤方偏移7に なると、宇宙を電離するのに必要な電離光子の放射 量は無い。そればかりでなく、電離に必要な量の僅 か1/3以下しかないと見積もられた。つまり、z = 7で、電離光子の放射量が非常に少ないという結果 になった。一方で、前章で述べたように赤方偏移7 では80±20%の水素が既に電離されている。電離 光子の生産量少ないにも関わらず、宇宙の水素の大 半が電離されているのは何故だろか?

1つの可能性としては、中性度の測定の統計エ ラーが大きい($x_{HI} = 0.2 \pm 0.2$)ため、z = 7付近に おいて本当は大半の水素が中性($x_{HI} > 0.5$)なのか もしれない。実際、エラーの2 σ レベルで x_{HI} ~0.6 をとりうる。他の可能性としては、電離光子の放射 量が誤って小さく見積もられており、実際は電離光 子脱出率が低赤方偏移から増大していたり(Ouchi et al. 2009など)、銀河のダストが限りなくゼロに近 い (Bouwens et al. 2010a など)、観測できない暗い 矮小銀河が予想以上に多い(Yan et al. 2004など)こ とも考えられる。それとも、これはもっと重大な物 理現象の示唆かもしれず、例えば暗黒物質の対消滅 や大量の原始ブラックホールが存在して宇宙再電離 に大きな影響を与えた可能性も否定できない(Ricotti & Ostriker 2004)。

x_{HI}の測定精度は現在のところ統計で決まってお り、今日の Suprime-Cam による探査を桁で上回る 広領域観測が必要である。さらに、電離光子脱出率 や暗い矮小銀河を観測的に求めることは原理的およ び技術的に無理であるため、高精度の理論モデルに よるアプローチが不可欠である。

5. 問題解決と宇宙再電離プロセスの理解へ 向けて

Suprime-Cam よりさらに10 倍もの探査速度を誇 る次世代装置 Hyper Suprime-Cam (HSC;図6左) が2011年から稼働する予定である。東京大学、国立 天文台、プリンストン大学を始めとした探査チーム は、HSC の高い能力を生かした、従来の30倍にお よぶ広領域深宇宙探査を計画している。これにより 観測が難しい赤方偏移7でも合計30平方度(共動長 で一辺約1 Gpc)という宇宙論規模の範囲で従来の 10-100倍の LAE を検出できる。同時に、筑波大学



図5:(左) 宇宙の星形成率密度の赤方偏移変化。赤印が赤方偏移7の測定値。それ以外の点は赤方偏移 0-6の測定値。パネル上側の横軸には赤方偏移に対応する宇宙年齢が示されている。(右) 銀河が 生産する電離光子の放射率密度。赤印と黒印がそれぞれ赤方偏移7と3-6の見積値。曲線は銀河 間ガスが電離を保つのに必要な背景電離光子密度の理論値(Madau et al. 1999)。濃い灰色の部分 では宇宙を電離状態に保てない。(いずれも Ouchi et al. 2009より改変/転載。These figures are reproduced by permission of the AAS.)



図6: (左) Suprime-Cam の後継装置、Hyper Suprime-Cam のデザイン(国立天文台提供)。(右)スーパー コンピュータ T2K Tsukuba (筑波大学提供)。

の理論研究グループと協力し、この巨大な LAE デー タと比較可能な理論モデル構築を「T2K-Tsukuba」 (図 6 右)や次世代スーパーコンピュータ「京」で シミュレーションを行い達成する。巨大な LAE デー タと理論モデルを比較することで、赤方偏移 7 で x_{HI}を10%弱の精度で決定すると共に、星形成銀河 の電離光子脱出率、ダスト減光、矮小銀河の寄与の 不定性を含め、電離光子の収支の問題に決着を付け る。

この目標だけでなく、Suprime-Cam では達成でき なかった重要課題にも取り組む。宇宙再電離のプロ セスの理解である。宇宙再電離は、銀河間ガスの高 密度領域から始まり void 領域に伝搬していくのか (inside-out; Furlanetto et al. 2004)、その逆であるの か (outside-in; Miralda-Escude et al. 2000)、さらには 最近のモデルで提唱されているような中間密度領域 が最後に電離されるのか (filament-last; Finlator et al. 2009)といった重要課題には手がつけられていない。 電離の空間分布 (トポロジー) は Ly a damping wing の吸収度の疎密を空間的に与えるため、観測 される LAE の分布(相関関数)に如実に反映され る (McQuinn et al. 2007)。赤方偏移7では電離領域 の典型的大きさが100Mpc 程度と予想されるため、 それを桁で上回る HSC の広領域観測が必須となる。 HSCの探査により得られた計~1 Gpc 範囲の LAE の分布から世界に先駆けてトポロジーに制限を加 え、宇宙再電離プロセスが inside-out, outside-in, filament-last のいずれだったかを明らかにする。我々は 圧倒的で世界に追随を許さない巨大データと数値シ ミュレーションによってブレークスルーを目指して いる。

参考文献

Bouwens et al. 2010a, ApJ, 708, 69 Bouwens et al. 2010b, arXiv: 1006. 4360 Choudhury et al. 2008, MNRAS, 385, 58 Dunkley et al. 2009, ApJS, 180, 306 Fan et al. 2006, AJ, 132, 117 Finlator et al. 2009, MNRAS, 400, 1049 Furlanetto et al. 2004, ApJ, 613, 1 Furlanetto et al. 2006, MNRAS, 365, 1012 Greiner et al. 2009, ApJ, 693, 1610 Hu et al. 2006, Nature, 440, 1145 Hu et al. 2010, ApJ, 725, 394 Iye et al. 2006, Nature, 443, 186 Kashikawa et al. 2006, ApJ, 648, 7 Larson et al. 2010, arXiv: 1001.4635 Lehnert et al. 2010, Nature, 467, 940 Madau et al. 1999, ApJ, 514, 648 Malhotra & Rhoads 2004, ApJ, 617, 5 McQuinn et al. 2007, MNRAS, 381, 75 McQuinn et al. 2008, MNRAS, 388, 1101 Miralda-Escude et al. 2000, ApJ, 530, 1 Miyazaki et al. 2002, PASJ, 54, 833 Ota et al. 2010, ApJ, 722, 803 Ouchi et al. 2005, ApJ, 620, 10 Ouchi et al. 2009, ApJ, 706, 1136 Ouchi et al. 2010, ApJ, 723, 869 Ricotti & Ostriker 2004, MNRAS, 352, 547 Robertson et al. 2010, Nature, 468, 49 Schechter 1976, ApJ, 203, 297 Tanvir et al. 2009, Nature, 461, 1254 Totani et al. 2006, PASJ, 58, 485 Willott et al. 2007, AJ, 134, 2435 Yan et al. 2004, ApJ, 600, 1

研究紹介

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画

手 嶋 政 廣 【東京大学宇宙線研究所】

1. はじめに

宇宙は様々な高エネルギー現象に満ちており、X 線を放射するような高温のガスや非熱的につくられ た高エネルギー粒子を伴う様々な天文現象が観測さ れている。それらの中には短時間の激しい時間変動 を示すものやバースト的な爆発現象もある。近年、 人類の高エネルギー宇宙を見る目は、衛星による X 線、GeV 領域ガンマ線、さらに地上チェレンコフ 望遠鏡による TeV 領域ガンマ線にまで広がり、激 しく変動する極限状態にある宇宙の姿を明らかにし てきた。TeV ガンマ線は現在、電波からガンマ線に 至る電磁波を用いた人類の宇宙観測における高エネ ルギーフロンティアといえる。また、過去の例に習 えば、新しい観測は常に新しい謎を生み出してきて いる。宇宙には現在の装置の感度不足によりまだ発 見されていない未知の高エネルギー現象が多く存在 するはずである。また、宇宙線の起源、加速、伝播 など、長年の謎として残されている問題もある。こ うした問題に観測的に迫るには、高感度な装置によ り、数多くの天体を観測することが必要であり、高 エネルギー宇宙現象の普遍性・法則性の研究が必要



図1:上から、北半球の MAGIC 望遠鏡 (2 x 17m, La Palma, Canaries)³⁾、VERITAS 望遠鏡 (4 x 12m, Arizona, US)⁴⁾、南半球の H.E.S.S. 望遠鏡 (4 x 12m, Namibia)²⁾、CANGAROO 望遠鏡 (4 x 9m, Woomera, Australia)⁵⁾。

不可欠である。さらに、高エネルギー宇宙の観測は、 超高密度物質、ブラックホールなどの極限時空、超 高エネルギー宇宙線や暗黒物質粒子の対消滅ガンマ 線の探索など、宇宙論や基礎物理学の発展に重大な 貢献をもたらす可能性がある。こうした重要な科学 的課題に迫るため、我々はさらに高感度・高性能の Cherenkov Telescope Array (CTA)を提案している。

高エネルギーガンマ線天文学の現状、そして CTA へ

数10GeV から TeV にわたる高エネルギーガンマ 線による天体観測は、大気チェレンコフ光を用いた いわゆる地上チェレンコフ望遠鏡によって行われ る。地上チェレンコフ望遠鏡による高エネルギーガ ンマ線天文学の歴史は、1989年の Whipple 望遠鏡に よるカニ星雲からのガンマ線検出¹⁾に始まるが、そ



図2:高エネルギーガンマ線(>100GeV)スカイマップ。2010年11月現在、106の高エネルギーガンマ 線源(>100GeV)が観測されている⁶⁾。



図3:H.E.S.S.の銀河面サーベイ⁷⁾。およそ40の高エネルギーガンマ線源が銀河面上に発見された。 超新星残骸、パルサー星雲、X線連星、そして銀河中心が同定されている。しかし、この中 には未同定天体も多数存在する。

の後の技術的発展にともない、現在では、ステレオ 観測、高感度光センサー、超高速電子回路などのハ イテク技術をベースにする新しい世代の地上ガンマ 線望遠鏡 H.E.S.S.²⁾、MAGIC³⁾、VERITAS⁴⁾が、高エ ネルギーガンマ線天文学を牽引している。現在、銀 河系内、銀河系外に、多種多様な100を超える VHE ガンマ線源が発見されている⁶⁾。また、その天体数 のみならず、近傍の明るい天体に関しては、観測の 高精度化がすすみ、天体での物理現象をより詳細に 研究する事が可能になってきた。

現在のチェレンコフ望遠鏡は極めて限られた予算 により建設されており、空気チェレンコフ技術のす べてのポテンシャルを使いきっていない。これまで に確立された技術と経験をもとに、さらに空気チェ レンコフ技術を発展させ飛躍的に性能を向上する余 地が残っている。その観点から、これまでこの分野 をリードしてきた H.E.S.S. と MAGIC の 2 グループ が中心となり、世界で一つという大規模チェレンコ フ望遠鏡アレイ、Cerenkov Telescope Array (CTA) 計画⁸⁾を提案してきた。CTA は、大中小数十のチェ レンコフ望遠鏡群の設置により、感度を一桁向上 $(1 \text{ mCrab} \sim 10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} を 達成)$ するとともに、 観測可能なエネルギー領域を数10GeV-100TeVと拡 大し、高エネルギーガンマ線天文学を飛躍的に発展 させるものである。この計画が実現すれば、1.000 以上の TeV ガンマ線天体の発見が期待され、次の 時代の高エネルギー宇宙物理学全体を大きく牽引す ることになる。

天体数が1,000を越えるというのは、高エネルギー ガンマ線天文学が、天文学、宇宙物理学として創成 から発展に向かうもっともエキサイティングな フェーズであるといえる。単に天体数だけでなく、 CTA から得られる科学的成果は銀河系内外の様々 な高エネルギー天体、宇宙線や星間物理、可視赤外 宇宙背景放射と銀河形成進化、さらには暗黒物質や 量子重力理論の検証などの基礎物理にいたるまで広 がりをもつ。CTA はそれだけの高いサイエンスポ テンシャルと、豊富な経験、実績に裏打ちされた高 い技術、そして Feasibility をもちあわせる。建設予 算は、プロジェクト全体でおよそ200億円であり、 期待できる多くの物理成果を考えれば、コストパー フォーマンスは非常に高いといえる。日本グループ としては全体の20% の貢献をめざしている。

CTA は、ヨーロッパの物理天文分野の将来プロ ジェクト計画の中で非常に高い評価を得ている。 EU の ESFRI (European Strategy Forum for Research Infrastructure)⁹⁾, ASPERA (Astroparticle Physics Network)¹⁰⁾, ASTRONET (Astronomy and Astrophysics Network)¹¹⁾の三つの組織から出されている Roadmap において、重要な研究計画として高いプライオリ ティーで推薦されている。最近発表された米国での Astronomy and Astrophysics に関する Decadal Survey の報告¹²⁾においても、重要な地上大型計画として、 CTA が、LSST, GMST と共に強い推薦を受けている。

3. Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画

チェレンコフ光イメージにより、ガンマ線シャ ワーとハドロンシャワーを分離するというアイデア は1985年に M.Hillas により提案され¹³⁾、Whipple 望 遠鏡は、このイメージングチェレンコフ技術を最初 に採用し、1989年にカニ星雲からのガンマ線検出に 最初に成功した¹⁾。これは、歴史にのこる偉業である。



図4: CTA の想像図。大口径(~23m)、中口径(~12m)、小口径(~6m)のチェレンコフ望遠鏡群からなるアレイ。数10GeV から100TeV のエネルギー領域で宇宙からの高エネルギーガンマ線を高精度で測定する。



図5:X線源、ガンマ線源、VHE ガンマ線源の数を時間の関数として示したもの。 2010年現在、およそ100の VHE ガンマ線源が観測されている。源の数が指数 関数的に増えていることがわかる。CTA では、1,000を超える VHE ガンマ線 源が観測されると期待される。



図6:CTAの目標感度曲線(赤)と、MAGIC(青), H.E.S.S.(緑)の達成感度曲線。

CTAでは、一つのシャワーをより多くの望遠鏡 でステレオ観測することにより(色々な位置から チェレンコフ光のイメージすなわち角度分布を観測 することにより)ガンマ線と宇宙線シャワーの分離 度を向上し、またエネルギー・角度分解能をあげる ことができる。Monte Carlo シミュレーションによ れば、CTA では個々のシャワーのチェレンコフイ メージが平均6台の望遠鏡で観測される(現在、 HESS, VERITAS では、シャワーは平均2台の望遠 鏡で観測されている)。また、HESS, VERITAS のよ うな望遠鏡4台のアレイでは、80-90%のイベント は、アレイの外側にヒットしたものであるが、CTA ではアレイ内側(Sweet spot)にヒットする質の高 いイベントが主体になる。多くの望遠鏡により広い 面積を覆い統計を増やすのみならず、データの質を 格段に向上することができる。

また、三種類の大口径、中口径、小口径の三種類 の望遠鏡を中央から順に外にむかって設置すること により、広いエネルギーバンドをカバーすることが 可能となり、CTA では数10GeV から100TeV のおよ そ4桁のエネルギーをカバーする。さらにフェルミ 衛星¹⁴⁾のデータとあわせると、近傍の明るいガンマ 線天体に関しては、シームレスな6桁を超えるガン マ線エネルギースペクトルを得ることができる。

数10GeV 領域では、遠方 AGN、ガンマ線バース ト、EBL、そしてパルサーの研究が、重要なテーマ となる。100GeV-10TeV 領域では、銀河面、近傍銀 河のディープサーベイ、10TeV を超えるエネルギー 領域では銀河宇宙線の起源、伝播が、それぞれ重要 な研究テーマとなる。CTA はその観測エネルギー バンドを拡げることにより、銀河内宇宙線源から遠 方 AGN、ガンマ線バーストまで、多種多様な天体、 物理現象の研究を可能とする。

CTA では、1,000を超える既知タイプのガンマ線 天体が発見されると予測される。また、新しいタイ プの天体もその感度の向上にともない発見されるで あろう。特にエネルギー閾値を20-30GeV まで下げ ることにより、宇宙論的な距離にある多くの天体が 観測可能になるとともに、ガンマ線バーストの観測 が可能となる。 下図に、CTA 銀河面サーベイのシミュレーショ ン結果を示す。より多くの天体が、より精細に観測 されることがわかる。天体数が増えるのみならず、 エネルギー、角度分解能が向上し、エネルギーバン ドが拡がることにより、天体での物理素過程につい てより詳細で質の高い議論が可能となる。

4. CTA の基本性能

・感度(10倍向上)

CTA は現在稼働中の望遠鏡よりも全てのエネル ギー領域で10倍優れた感度をもつ。エネルギー領域 300GeV-3TeV では50時間の観測により 1 mCrab (10⁻¹⁴erg cm⁻² s⁻¹)の感度を達成する。これは銀 河内の最も明るいガンマ線源(Crab)の1.000分の 1の明るさまで、また活動銀河核の明るいフレアー の10.000分の1まで観測出来ることを意味する。こ の感度により、銀河内のCrab(距離~1kpc)程度 の明るさをもつ steady source は30kpc まで観測(銀 河内全体)が可能となり、Mrk421/Mrk501(距離~ 130Mpc)に代表される活動銀河核(ブレーザー) に関しては、EBL (Extragalactic Background Light) によるガンマ線吸収の効果を無視すれば、宇宙論的 な距離(~3Gpc)まで感度が伸びることになる。 すなわち、EBL 吸収により決まる距離まで宇宙を 見渡すことができ、逆に EBL の密度分布をシステ マティックに高い精度で測定出来ることを意味する。 ・広い有効観測エネルギー(20-30GeV から100TeV) CTAでは20-30GeVから100TeVの広いエネル



図7:(上) HESS 銀河面サーベイの銀河中心方向。(中) CTA 感度、角度分解能から予想される CTA 銀 河面サーベイ (シミュレーション計算)。(下) CTA 銀河面サーベイの一部ズームアップ。より多く の銀河内ガンマ線源がより高い確度分解能で観測されることがわかる。銀河内ガンマ線源が~400程 度観測されると期待される。

ギー範囲での観測を目指す。20-30GeV 領域では、 EBL (Extragalactic Background Light) によるガンマ 線吸収の効果がほとんど無視でき、この低いエネル ギー閾値により、CTA では z~2.5程度までの活動 銀河核、z~6程度までのガンマ線バーストの観測 が可能となる。また100TeV (10^{14} eV)の観測エネル ギーの上限により、我々の銀河内にある 10^{15} eV まで 宇宙線を加速している宇宙線起源天体 (Pevatron) を同定することを可能とする。

・全天観測(北、南2ステーション)

CTA は北半球と南半球とに、二つのステーショ ンを持ち、全天を観測する。銀河面をひろく観測で きる南半球のステーションでは、広いエネルギーレ ンジ(20-30GeV~100TeV)を覆うことが必要で、 大(24m)、中(12m)、小(7m)口径の三種類の 望遠鏡から構成される。銀河面の観測が限られる北 半球のステーションにおいては、低いエネルギーレ ンジ(20-30GeV~10TeV)に観測の重きがおかれ、 大(24m)、中(12m)の二種類の望遠鏡群から構 成される。CTA では、1% Crab 感度での全天サー ベイが1年間(1,000時間)で可能であり、TeV ガ ンマ全天マップを初めて提供できる。

•角度分解能(3倍向上)

現在の観測装置では、角度分解能は0.1度(6分角) 度程度であり、他の波長の観測機器と比べその分解 能はおとる、CTAでは多くの望遠鏡により一つの ガンマ線シャワーを観測することが可能となり、よ り高い分解能2分角を達成することができる。この 分解能は例えば X 線望遠鏡 SUZAKU の角分解能と ほぼ同等であり、より詳細な近傍天体の多波長での Morphology 研究が可能となる。例えば、いくつか のパルサー星雲において高エネルギー電子が放出さ れ、伝搬とともにそれらが徐々にエネルギーをうし なっていく姿が如実にみることができるであろう。 この2分角(0.03度 at 1 TeV)という高い角度分解 能は、Fermi 衛星の~1度(at 1GeV)と比較される ものであり、CTA は空間分解能が優れており銀河 内の宇宙線源の研究に極めて有効であることがわか る。

・時間分解能(数秒スケール)

活動銀河核 Mrk501、PKS2155においては、2-3 分の時間スケールで変動するガンマ線ライトカーブ が HESS¹⁶⁾、MAGIC¹⁵⁾によって観測されている。 CTA では、その広大な検出面積(30倍)と高感度 化(10倍)により、同様の早い時間変動を持つフレ アーに対して、数秒程度の時間変動までおいかける ことが可能となる。天体、ジェットを10光秒のスケー ルで調べることができるだけでなく、遠方の活動銀 河核、ガンマ線バーストからのガンマ線の飛来時間 のエネルギー依存性(真空中のガンマ線伝播の特性) から、真空の時空構造、ローレンツ不変性を、プラ ンクスケールを超えて調べることが可能となる。

・サーベイ能力

10mCrab(10⁻¹³ erg cm⁻² s⁻¹)の感度で全天サーベ イがおよそ1年(1,000時間)で可能である。初めて、 TeV ガンマ線の空をノンバイスでスキャンし、現在 の H.E.S.S., MAGIC の感度で全天図を作成すること ができる。予想もしない天体、他波長では見ること



図8: 左図 HESS J1826-1334 (パルサー星雲)。白い点がパルサーの位置。右図は、エネルギーバンド 毎に色を変えてガンマ線放射領域を示している。エネルギーが低くなるにつれてその放射領域 がひろがっていることがわかる。高エネルギー電子が外部に伝播していくにつれ、シンクロト ロン放射でクーリングしていることがわかる。CTA では、より高い角度分解能と感度により、 より詳細な (エネルギーに依存した) Morphology の研究をさらに進めることができる。



図9: Mrk501 (MAGIC)¹⁵⁾, PKS2155 (HESS)¹⁶⁾の非常に早いフレアー。どちらも数分スケールの時間 変動を示している。CTA では、このような巨大フレアーでは10秒スケールまで迫ることができる。

のできない天体が多数見つかってくるであろう。対 消滅によりガンマ線を放出していると期待される暗 黒物質クランプを効率的に探索できる。

・期待される天体数(1,000)

銀河内では、超新星残骸、パルサー星雲、パルサー、 連星系システム、分子雲などが300-400程度、銀河 外では、活動銀河核(HBL, LBL, FSRQ, FR-I)が 500-600程度観測されると予測される。また、Fermi の観測を外挿すると、年間数例程度のガンマ線バー ストが観測されるであろう。ガンマ線バースト観測 の統計数は限られるが、その科学的価値は高いとい える。

5. 大口径チェレンコフ望遠鏡

日本グループは、アレイの中心に配置される大口 径チェレンコフ望遠鏡への貢献を目指している。大 口径望遠鏡は20-30GeVから1,000GeVの低エネル ギー領域をカバーする。鏡の総面積は、十分なチェ



図10:マックスプランク物理学研究所(ミュンヘン)と MERO 設計の23m 大口径望遠鏡。カーボン ファイバーTube によるスペースフレーム構造。総重量50トン。

レンコフ光量を得るために、400m²以上が必要であ る。また、それぞれの光学エレメントに、高反射率、 高集光効率、高量子効率が要求される。また夜光の 影響を最小化するために、超高速のエレクトロニク スによりチェレンコフ光イメージの積分時間を最小 化する。また、集光された光の同時性を保証するた めに、鏡面全体としては放物面鏡の構造をとる。夜 光は、場所、観測条件に依存するが、50mm Entrance の Winston cone を取り付けた光電子増倍管の 場合、Single Photo Electron で300MHz 程度になる。 有効積分時間 4 nsec 相当の Digital Filter を考えれ ば、夜光による平均ノイズは 1.2 p.e. 相当におさえ ることができる。

大口径望遠鏡では、ガンマ線バースト等の種々の トランジェントな現象を捉えるために、高速回転に より瞬時に源を視野内に捕らえることが要求され る。現在、ベースラインデザインとして、マックス プランク物理学研究所(ミュンヘン)のグループが、 MAGIC 望遠鏡の経験をもとに23m口径の大口径望 遠鏡を提案しており、その詳細デザインが進められ ている。構造はカーボンファイバーtubeによるス ペースフレーム構造であり、軽量でかつ剛性を高め るデザインとなっている。ガンマ線バーストの follow up 観測を可能にするため総重量を~50トンと し、20秒で180度回転が可能である。

日本グループは、この大口径望遠鏡に搭載する光 センサー(光電子増倍管)、超高速読み出し回路、 分割鏡の開発、試作を進めている。

6. CTA と日本の貢献

CTA は EUの大型サイエンスプロジェクト (ES-FRI Project)の一つとして認められている。過去3 年間の Design Studyのフェーズを経て、2010年10月 より Preparatory Phase に入っている。この Preparatory Phase の目的は、装置の要求、仕様を明確化し、 予算がつけばすぐにでも建設が開始できるレベルま でプロジェクトを準備することである。すなわち、 企業とタイアップし、全てのエレメントの生産工程 を定義し、考えうる全ての技術的問題をクリアーし なくてはならない。このために、それぞれのエレメ ントのプロトタイプ、さらに望遠鏡本体のフルプロ トタイプのステップが必要不可欠である。このプロ トタイプでの日本の積極的な参加が、後々の建設で の役割分担、将来の CTA 運用時の時間配分に大き く影響を与えると考えられる。

国内組織としては、宇宙理論、X線、ガンマ線、 宇宙線等の分野から50名を超える研究者が集まり全

く新らたな組織 CTA-Japan コンソーシアムを結成 し、昨年度より CTA の正式グループとして活動を 開始している。メンバーも30代の若手が多く、非常 に頼もしい限りである。CTA-Japan コンソーシアム の代表は戸谷友則(京大理)、副代表は私が務めて いる。CTA-Japan は、世界的にトップクラスの高エ ネルギー宇宙物理の理論研究者を抱えており、井岡 (Physics コーディネター、KEK)の下、CTAの中 で Physics に関して非常に visible な貢献をすすめて いる。また、ハードウエアー関係では、我々は大口 径望遠鏡のカメラ、データ読み出し回路、分割鏡で 貢献することをめざし、それにむけての準備研究を 進めている。折戸(FPI コーディネーター、徳島大) の率いるワーキンググループは、光センサーまわり で、高量子効率の高電子増倍管、および低消費電力 の組み込み型高圧電源、組み込み型プリアンプ、ス ローコントロールボードの開発、試作、試験をおこ なっている。またデータ読み出し回路は、窪(ELEC コーディネーター、京大理)の率いるワーキンググ ループが、毎秒2GHz サンプリングの低消費電力 超高速読み出し回路を CTA 内ではじめて製作、デ モンストレーションに成功し、2010年11月のイギリ スでの CTA 会議で大きな注目を集めた。鏡に関し ても CTA-Japan は、はじめて1.5m サイズの6角形 分割鏡製作にコールドスランプ技術で成功し、日本 の大口径望遠鏡分割鏡への貢献もおおいに期待され ている。

高エネルギーガンマ線観測の現状、CTA とその 期待される性能、日本の貢献という内容を駆け足で 話をしてきました。 高エネルギー宇宙ガンマ線の 研究は凄まじいスピードで進んでいます。これは学 問の自然な発展といえますが、いまや全世界的な流 れで高エネルギー宇宙ガンマ線の実験規模、装置性 能をさらに次のステップへと(CTA へと) 高めよ うとしています。私は、その性能とサイエンスポテ ンシャルにおいて CTA を超える計画は次の10-20年 間出て来ることはないと想像します。V. HESS から はじまる長い宇宙線研究の歴史の中で、日本の宇宙 線研究はかなめかなめで重要でかつ Visible な貢献 を行ってきたと思います。その長い歴史の中で重要 な Chapter を作るであろう CTA 計画に、日本グルー プが主要なメンバーとして参加、貢献することを是 非支援して頂きたいと思います。

参考文献

- 1) T. Weekes et al., Astrophys. J. 342: 379–395 (1989)
- 2) H.E.S.S.: http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/

- 3) MAGIC: http://magic.mppmu.mpg.de/
- 4) VERITAS: http://veritas.sao.arizona.edu/
- 5) CANGAROO: http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp/
- 6) http://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources/ and http://tevcat.uchicago.edu/
- 7) F. Aharonian et al., Science 307, 1938–1942 $\left(2005 \right)$
- 8) CTA: http://www.cta-observatory.org/ and CTA Japan: http://cta.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html
- 9) ESFRI Roadmap: http://ec.europa.eu/research/ infrastructures/index_en.cfm?pg=esfriroadmap§ion=update-2008
- 10) ASPERA Roadmap: http://www.aspera-eu.org/images/stories/roadmap/aspera_roadmap.pdf
- 11) ASTRONET Roadmap: http://www.astronet-eu.org/ IMG/pdf/Astronet-Book.pdf

- 12) US Decadal Survey: http://sites.nationalacademies. org/BPA/BPA_049810 http://www.nature.com/news/2010/100813/full/ news.2010.410/box/1.html
- 13) M. Hillas, Proc. 19th ICRC (La Jolla), 3, 445 (1985).
- 14) Fermi Gamma Ray Satellite: http://fermi.gsfc.nasa. gov/
- 15) J. Albert et al., ApJ 669 (2007) 862, J.Albert et al., Phys. Lett. B 668 (2008) 253
- 16) F. Ahronian et al., Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 170402
- 17) CTA Japan: http://cta.scphys.kyoto-u.ac.jp/index. html

報告記事

2010年度宇宙線研究所一般公開の広報室の活動について

伊藤英男

今年の一般公開は、台風のために来客数が昨年に 比べて少なかった。そのため、昨年のような混雑に よる混乱が起きなかったと言える。しかし、例えば サイエンスカフェとして毎年行なっているコズミッ クカフェ等のイベント単体への参加者数を鑑みる に、天候に依って集客が出来なかったというのは単 なる言い訳に過ぎないのかもしれないと感じられ た。それというのも、コズミックカフェは昨年同様 に非常に多くの参加者に恵まれていたからである。 それとは対照的に、霧箱配布に関しては、昨年と同 様の人数体制で行なっていたにも拘らず、ほとんど 混乱と言えるような混乱は見られなかった。これは キャンパスへの来場者数に単純に比例して参加者が 減少していたからであろう。常に見ていたわけでは

ないが、パネル展示の方も同様の状況だったのでは ないだろうか。 コズミックカフェは今回、重力波グループ宮川特 任助教と、神岡グループの大林助教にスピーカーを して頂いた。重力波グループは予算も通り、非常に タイムリーな話題を提供して下さることを期待して のものであり、神岡グループはT2K実験による ニュートリノの初検出が話題となっていたので、こ ちらもタイムリーであると判断したことによる。金

曜日の宮川特任助教の回に関しては、大雨のために 参加者がほとんど居なかったらと心配をしていた が、蓋を開けてみれば大盛況となったので、ひと安 心であった。また、同様にアマチュアの相対論否定





派の方達が来て、場を荒らしていくかもしれない懸 念があったが、こちらも杞憂に終わった。土曜日の 大林助教の回に関しては、やはり知名度的にもスー パーカミオカンデの集客力に脱帽と言わざるをえな い感を受けた。そして、どちらの回もお二人とも非 常に一般人相手ということを見据えた話し方をされ ていて、ファシリテーターを務めていた私としては 非常にスムーズにコズミックカフェを進行出来たの で、本当にありがたいことであった。終わった後に 何人かの方から、「分かり易かった、ありがとう」 というような感謝の言葉を頂けたのは、お二人のス ピーカーのお力添えに依るものである。また、それ とともに、私自身もファシリテーターとして、トー ク中に一般人の立場に立って質問させて頂いていた のだが、アンケートに書かれた声を見る限り、この 方式も好評であったようである。昨年から私がファ シリテーターを務めている関係上、手探りで正解を 探している状態なのだが、これまでのアウトリーチ 活動の成果が出せたのではないかと思われる。

それから、コズミックカフェへの参加者から毎年 出ていたクレームとして、霧箱配布場からの雑音が あったのだが、これはドライアイスの粉砕場所を部 屋の外に設置することによりかなり改善出来たよう に思う。もちろん、完全にシャットアウト出来るも のではないし、子供達の声が入ってしまうが、参加 者は概ね多少の子供の声には寛容のようであった。 また、霧箱配布自体は、今回は子供達よりも年配の



方達が多く見えられていたような印象を受けた。昔 霧箱を作った事がある方が懐かしがって作っている のが印象的であった。雨のために来場者数が減った 事からそのようになっているのだと考えられるが、 毎年霧箱配布ばかりではやはり魅力的ではないのか もしれない。同じ霧箱を配布するにも、もう少し何 かを付加出来る可能性を模索することも必要である ので、今後の検討課題として、来年度までに何かし らの対策を練ってみたいと思う。

ビデオ上映に関しては、昨年作成した LCGT の 紹介アニメーションの上映を増やした。ビデオ上映 自体に参加者が僅かな印象が拭えないため、こちら も何かしらのテコ入れが必要と考えられる。毎年ほ とんど同じ映像を流しているのだから、当然の結果 であると言われても仕方ないからである。しかし、 映像作品は簡単に作れるような予算ではないので、 作品数を増やすのは難しいと言わざるをえない。 LCGT のアニメーションも、製作費として40万円が 掛かっていることを皆さんに知って頂きたい。この 金額は、私の個人的な知り合いに発注することで、



知り合い価格として今回に限り実現したものであ り、本来は最低でも100万円ほどの予算が必要と言 われていたものである。まして、現在流している他 の映像作品のような、ドキュメンタリータッチの映 像は極めて大きな予算が必要となるため、今後これ をどうするか、外部から予算を取ってくるなどの努 力が必要であることは間違いないので、こちらも今 後の検討課題である。

検討課題についてばかり書いてきてしまったが、 来場者の中には、過去に行なった展示会や、私が出 向いて話した出前授業や講演会等に来て下さった 方々も見えたことから、少しずつではあるがここ数 年で行なってきたアウトリーチ活動の効果が出てき つつあるのではないかと感じた。もちろん、その中 にはコズミックカフェを毎年聴きに来てくださる方 も居たのは、開催側としては嬉しい限りである。そ のような方々がより一層定着してくださるよう、そ してさらに広く宇宙線研の名前と研究内容の知名度 が上がるように、今後さらなる広報活動に力を入れ ていきたいと思う。

	人	事 異	動
発 令 日	氏名	異 動 内 容	職
H22. 10. 26	Menard Brice	新規採用	特任准教授
H22. 11. 1	川村静児	在籍出向(国立天文台より)	特任准教授
	高 橋 竜太郎	在籍出向(国立天文台より)	特任助教
	齊藤芳男	新規委嘱	客員教授
	木 村 誠 宏	新規委嘱	客員准教授
	鈴木敏一	新規委嘱	客員准教授
H22. 11. 2	Scholer Manfred	新規採用	特任教授
	Lee Martin Alan	新規採用	特任教授
H22. 11. 30	山田悟	辞職	特任助教
H22. 12. 1	岸本康宏	新規採用	准教授
H22. 12. 2	Scholer Manfred	任期満了	特任教授
H23. 1. 7	Menard Brice	任期満了	特任准教授
H23. 1.10	Lee Martin Alan	任期満了	特任教授
H23. 1.16	Laing Andrew Brian	新規採用	特任研究員

ICRR-Seminar 2010年度

2011年1月24日(月)	中谷 一郎(宇宙線研/愛知
	工科大学)
""Space Robotics"	(宇宙ロボット)"
2010年12月28日(火)	M.A.Lee (宇宙線研/U.New
	Hampshire)

"The Interaction of the Heliosphere with the Local Interstellar Medium: Interstellar Gas, Pickup Ions, Anomalous Cosmic Rays and the Solar Wind Termination Shock (太陽圏と局所星間物質の相互作用:星間ガス、ピッ クアップイオン、宇宙線異常成分と太陽風終端衝撃 波)"

2010年12月15日(水) 大久保修平(東大地震研) "固体地球科学と宇宙線・重力波研究"

ICRR-Report 2010年度

ICRR-Report-575-2010-8

"Prospects for Direct Detection of Inflationary Gravitational Waves by Next Generation Interferometric Detectors"

Sachiko Kuroyanagi, Takeshi Chiba and Naoshi Sugiyama

ICRR-Report-576-2010-9

"Running Spectral Index from Inflation with Modulations"

Takeshi Kobayashi and Fuminobu Takahashi

ICRR-Report-577-2010-10

"Evolution of String-Wall Networks and Axionic Domain Wall Problem"

Takashi Hiramatsu, Masahiro Kawasaki and Ken'ichi Saikawa

