No. 89

2014.6.30

CONTENTS

正己

ハッブル宇宙望遠鏡と アルマ電波望遠鏡で 観測され<u>た宇宙初期の</u>

KAGRA トンネル掘削工事

パルサー磁気圏での 電場遮蔽機構と電波放射

巨大天仗

P4

P 10.

P 16.

人事異動

P 17.

P 17.

ICRR Report

ICRR Seminar

東京大学宇宙線研究所 ICRRNEWS

MASAMI OUCHI, ICRR - Observational Cosmology Group





_{宇宙線研究所} 大内 正己

ハッブル宇宙望遠鏡とアルマ電波望遠鏡 で観測された宇宙初期の巨大天体

初期宇宙に存在する巨大天体が、3つの銀河の合体を 伴う形成途上の銀河だと分かった。さらに、非常に弱 い炭素輝線などから、ビッグバン直後に生成される原 始ガスで構成される第一世代の銀河に近い天体の可能 性もあり、銀河形成の初期を理解する上で鍵となる天 体かもしれない。

本研究所観測的宇宙論グループが主導する日 米の国際研究チームは、赤方偏移 6.595 に存在 する巨大天体に対して、ハッブル宇宙望遠鏡と アルマ電波干渉計による近赤外線およびミリ波 観測を行った。その結果、この天体は3つの 銀河の合体を伴う形成中の銀河であったことが 分かった。さらに、炭素輝線が極めて弱く星間 物質の電離状態や密度もしくは金属量が現在の 銀河とは大きく異なることが明らかになった (ref.1)。これらの結果は、銀河形成の初期を 理解する上で新たな手がかりとなるものである。 この巨大天体はヒミコと呼ばれる天体で、す ばる望遠鏡 Suprime-Cam の広領域撮像深宇宙 探査により発見された (ref.2)。赤方偏移が 6.595、差し渡しが 17kpc と非常に大きく、同 時代の宇宙初期の銀河と比べて 10 倍程度にお よぶものである。スピッツアー宇宙望遠鏡によ る赤外線観測により明らかにされた星質量は数 百億太陽質量であり、こちらも同時代の平均的 な銀河より桁で大きい。大質量星起源の静止系 紫外線、さらには電離ガス起源と考えられる水 素のライマンアルファ輝線などの光度もこれま で検出されている同時代の銀河の中では突出し て大きい。このような巨大で質量および光度が 著しく大きい天体は、ACDM の構造形成シナ リオで作ることは一般的に難しい。このシナリ

"炭素輝線が弱い理由は明らかではないが、3つの可能性が考えられる"

オでは宇宙の初期密度揺らぎが重力的に成 長し、小さな構造が最初に作られ、それら が合体集合を繰り返して大きな天体ができ るので、初期の宇宙では宇宙年齢が短く、 巨大な天体の形成が間に合わない。もちろ ん、どの程度の巨大な天体だと赤方偏移 6.595 で形成されないか、といった定量的 な評価は今なお数値シミュレーションなど で調べられているところである(ref.3)。 この天体の正体は明らかでなく、巨大ガス 雲から銀河が出来る現場であったり、二つ の若い銀河が衝突している姿なのかもしれ ないといった予想があった。また、輝き続 ける巨大ガス雲のエネルギー源が何である かという疑問も残されていた。

我々はまずこの巨大天体に対して、ハッ ブル宇宙望遠鏡 WFC3 カメラで観測を行 い、近赤外線 1.0-1.6μm バンドにおいて、 空間分解能が約 0.2 秒角と高い撮像データ を取得した。これを図1に示す。この撮 像データには、10kpc 程度の範囲に一直線 に並んだ3つの銀河が検出されていた。1

つ1つの銀河は、同時代(赤方偏移7)の 典型的な銀河と同じくらいの光度を持って いることが分かった。さらに巨大な水素電 離ガス雲がこれら3つの銀河を覆ってい る。際立って明るい光源がないことから、 ヒミコの活動性の原因が、AGN などの超 大質量ブラックホール起源でないと考えら れる。さらに、3つの銀河は異なるスペク トルエネルギー分布(SED)をしているの で、重力レンズ効果により、この天体が見 かけ上大きくなっている可能性は無い。こ のような消去法で様々な可能性を排除する と、この天体では非常に稀な三体合体が起 こっているという説明が最も自然であるこ とが分かった。また、巨大なガス雲を輝か せるエネルギーも三体合体が引き起こす星 形成活動で説明できる。この天体の SED に最も合う星の種族合成モデルを最小二乗 法で決定したところ、星形成率が約100 太陽質量/年であることが分かった。星形 成により生産される電離光子が、巨大ガス 雲全体を電離するのに使われてライマンア

ルファ輝線に変換されるとした場合、この 巨大天体のライマンアルファ輝線の光度 4x10⁴³erg/sを説明することができた。こ のように三体合体により引き起こされる星 形成活動がこの巨大な天体のガス雲を輝か せるエネルギー源だということが分かった。

さらに、アルマ電波干渉計 Band 6 によ る観測を行った。静止系波長が 158µm の 炭素の微細構造線、[CII] 輝線を狙ったも のである。同時に観測波長に入る炭素や酸 素、ケイ素などの重元素からなる固体微粒 子、ダスト起源の黒体放射の観測波長 1.2mm 連続光も観測された。このアルマ の観測データはこれまでに得られていた同 種のデータと比べて一桁程度感度が良く連 続光の RMS で 17µJy に達する画期的なも のである。高い感度によりこの天体の星間 物質の重元素ガスおよびダスト放射をとら え、星形成の性質さらには [CII] 輝線に 基づく力学構造を調べる計画だった。しか し、実際に得られたアルマのデータには 5σを越える有意なシグナルは見られな かった。図2はこの巨大天体の[CII]輝 線光度の上限値と星形成率について、現在 の銀河と比較したものである。現在の銀河 (赤方偏移 0) は [CII] 輝線光度と星形成 率の間には相関関係があることが知られて



鏡のデータから作成された赤方偏移 6.595 の巨大天体とミコの カラー合成画像。左側のパネルはハッブル宇宙望遠鏡データ による巨大天体とその周辺領域。ここで巨大天体は中心の四 角形の中に位置する。右側の2つのパネルは巨大天体の拡大 画像で、上がハッブル宇宙望遠鏡の画像、下がハッブル・す ばる・スピッツァー望遠鏡の画像。ハッブル宇宙望遠鏡の画 像ではWFC3 カメラにより撮影された 0.98, 1.25, 1.6 ミクロン の近赤外線 3 バンドのデータをそれぞれ青、緑、赤で表示し ている。ハッブル・すばる・スピッツァー望遠鏡の画像では、 ハッブルWFC3 カメラの 3 バンドで合成した近赤外線を緑、 すばる Suprime-Cam で捉えたライマン・アルファ輝線を青、 スピッツァーIRAC カメラで得られた 3.6 ミクロンの赤外線を 赤で示している。 クレジット: NASA, ESA, 東京大学(大内正己)



図2: [CII] 輝線光度(L_{[CII}) と星形成率(SFR)について、巨大天体 ヒミコ(z=6.595;四角)と現在の銀河(z~0;十字)を比較した ものである。現在の銀河は[CII] 輝線光度と星形成率の間には 相関関係があり、この相関の平均と分散をそれぞれ直線と灰色 で示す。(Ouchi et al. 2013より転載。These figures are reproduced by permission of the AAS.)

研究紹介

いる。これは星形成に伴う炭素原子電離光 子がその光子量に応じた星間物質に C⁺ 領 域を作り出し、その結果 [CII] 輝線が放 射されるためだと理解される。図2上で、 赤方偏移 6.595 の巨大天体を現在の銀河と 比較すると、星形成率に対して [CII] 輝 線光度が極めて低く、30分の1かそれ以 下ということが分かる。星間物質から出さ れる [CII] 輝線が弱い理由は明らかでは ないのだが、3つの可能性が考えられる。 1つ目は、この天体内のガス密度が高く、 衝突脱励起により [CII] 輝線放射に必要 な 2P 3/2 準位にある C⁺の量が減ってし まっているかもしれない。2つ目は高い星 形成率に見られるように大質量星が多いた め、電離状態が高く C⁺ がさらに電離して しまい、炭素の大半が2階以上の高階電 離の状態でしか存在していない可能性もあ る。3つ目は、そもそもガス雲の中に炭素 が多く存在せず、その結果 [CII] 輝線が 弱くなっていることである。この3つの 可能性のうちいずれが正しいかは現在の データで結論付けることはできない。ただ、 ダスト起源の連続波も検出されておらず、 非常に弱いという結果も合わせて考える と、そもそもこの天体を構成するガスの重 元素量が低いという可能性が有力となる。 もしそうであれば、この巨大天体はビッグ バン後に水素とヘリウムなどの軽元素しか ない原始ガスに近い物質から構成されてお り、超新星爆発などの恒星進化末期にもた らされるガスの重元素汚染があまり進んで いない天体の可能性がある。第一世代星や 銀河といった天体に近い性質をもってお り、銀河形成を理解する上で鍵となる天体 かもしれない。

参考文献

- [1] Ouchi et al. 2013, ApJ, 778, 102 http://adsabs.harvard.edu/ abs/2013ApJ...778..1020
- [2] Ouchi et al. 2009, ApJ, 696, 1164 http://adsabs.harvard.edu/ abs/2009ApJ...696.11640
- [3] Vallini et al. 2013, MNRAS, 433, 1567 http://adsabs.harvard.edu/ abs/2013MNRAS.433.1567V

宇宙・素粒子 スプリングスクール 2014

イベント報告



3月4日から5日間、東京大学宇宙線研究所にて全国の大学3年生を対象とした「宇宙・素粒子スプリングスクール2014」を開催しました。スプリングスクールは、宇宙・素粒子分野で大学院進学を目指す大学生に最先端研究を紹介するとともに、研究の一端を経験してもらうという主旨で開催されており、今年で3回目を迎えます。

昨年12月初旬に参加者募集を開始してから、わずか3週間で定員を超える 多数の応募があり、例年にも増して大学生向けのサイエンススクールへの期待 を実感しました。北は北海道から南は九州までの8大学から、モチベーショ ンの高い大学生31名を迎えました。今年は、参加者全員が柏キャンパスゲス トハウス、または県民プラザに宿泊し、連日夜遅くまで研究に励んでいました。

スクールの内容は、例年好評の講義、最先端研究、プロジェクト研究の3本 柱から構成されています。午前中には、基礎的な知識を得るための講義(高エ ネルギー天文物理学、一般相対論、ビッグバン宇宙)、また、最先端の研究紹 介(ニュートリノ物理、高エネルギーガンマ線天文学、観測的宇宙論、重力波 天文学、最高エネルギー宇宙線、ガンマ線・宇宙線物理、暗黒物質)の10コ マの講義・授業がありました。午後は、6つのプロジェクト研究グループ(高 エネルギー天体物理学、高エネルギーガンマ線天文学、最高エネルギー宇宙線、 観測的宇宙論、ニュートリノ物理、重力波天文学)に分かれ、スーパーバイザー、 ティーチングアシスタントの指導のもと、論文読み・実験・データ解析・物理 解釈を行ないました。また、午前と午後に設けられたコーヒブレークでは、学 生どうしの議論・情報交換や、講師・スーパーバイザーとの質疑応答・議論が 活発に行われていました。

最終日には、各プロジェクト研究グループが1週間の研究成果を発表しま した。どのグループもレベルの高い研究成果で、チャレンジ精神にあふれハキ ハキとした元気な発表に、研究所の教員、研究員も感銘を受けた様子でした。 閉校式では、梶田所長より、最後まで粘り強く工夫を凝らして実験装置の精度 を高めた重力波プロジェクト研究グループに、最優秀グループ賞が授与されま した。閉校後には Graduation Party が開かれ、全力で取り組んだ5日間を振 り返りました。

参加した学生からは、最先端の研究を体験でき、興味のある研究室を知る貴 重な機会となった、他大学の仲間や最先端で活躍する研究者と議論できて濃い 時間が過ごせた、などのコメントが目立ち、今後の進路を考えるうえでも有意 義な時間となったことがうかがえました。講師、インストラクター、準備委員 会のメンバーが一丸となって取り組む研究所をあげた取り組みとして、活気に あふれたスクールとなりました。

宇宙・素粒子スプリングスクールの講義、最先端研究、プロジェクト研究の 内容、開催中の様子について以下をご覧ください。

スプリングスクールウェブページ http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ss/ スプリングスクール報告 http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ss/2014data/



宇宙線研究所

隆

内山



大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は、神岡で建設が進んでいる腕の長さ3キロ メートルのレーザー干渉計型重力波検出器である。地面振動を低減するた め、キロメートル・クラスの重力波検出器としては世界で初めて、地下空 間に設置される。そのため、全長7,697m、全掘削量156,301m³におよぶ長 大なトンネルを神岡鉱山内部に建設する計画をたてた。そしてこのトンネ ル掘削工事は、鹿島建設㈱の施工により2012年5月に開始し、2年にも満 たない約22ヶ月の工期をもって2014年3月末に無事完了した。2014年度 からは、実験室の建設、真空機器の搬入・設置など本格的な干渉計構築が 行われる予定である。

1 KAGRA

KAGRA は重力波の直接検出を目的とし て設計された、腕の長さが 3km のレーザー 干渉計型の重力波検出器である^[1]。米国の LIGO (4km)^[2]、イタリアの VIRGO (3km)^[3] と装置の規模してはほぼ同等であるが、神 岡鉱山の内部に設置する事で地面振動の影 響を下げ、さらに鏡を 20K に冷却して熱 雑音を低減することにより、他よりも優れ た感度の実現を目指している。

図1に示すのは、神岡の坑内(CLIO)と、 千葉県柏市(宇宙線研究所)で測定された 地面振動の比較である。そこで示されてい る通り、都市部と比べて1/100程度の地 面振動レベルを誇る神岡坑内は、懸架され た鏡の微小振動検出を命とするレーザー干 渉計にとって、極めて有利な環境である。 このような静かな地面振動環境を持つ地下 空間に、レーザー干渉計を建設するという アイディアは、鏡の冷却とともに、これま で日本が独自に研究を進めてきた。その初 めての試みが、1999年に始めた LISM 計 画である。LISM 計画とは、国立天文台(東 京三鷹)で研究開発が行われていた 20m のレーザー干渉計プロトタイプを、神岡の 坑内に移転し、地面振動低減による感度向 上を目的とした計画である。LISM 計画で は、図2に示す感度の向上のみならず、

長時間にわたる安定な運 転の実現など、多岐にわ たる地下利用のメリット を証明する事に成功し た^[4]。その後、2002年 からは、Cryogenic Laser Interferometer Observatory(CLIO)の建設が始 められた。CLIOは腕の 長さ100mのレーザー 干渉計である。KAGRA のプロトタイプとして、 LISMと同様に神岡の坑 内に建設され、最大の目 的である鏡の冷却による 熱雑音低減の実証に 2010 年の 3 月に成功 した^[5]。そして、2010 年 6 月に最先端基 盤事業の一つとして KAGRA プロジェクト が始まったのである。





2 KAGRA 地下実験室

図3に示すのが、KAGRA トンネルの位置図である。スーパー カミオカンデや CLIO のある、岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山(池 の山)に、L字に直交する片腕約3kmのトンネルを掘削する。 北東に延びる片腕を Xarm、北西に延びるもう片腕を Yarm と呼 んでいる。Yarmの北からのずれは半時計回りに約30度である。 L字の交点および、各腕の端に実験室群が設けられ、それぞれ、 中央エリア、Xend エリア、Yend エリアと呼んでいる。地下空 間で期待される静かな地面振動環境を確保するため、実験室は地 表から 200m 以上離れるように位置取りがされている。この 200m という距離は、神岡鉱山内で行った予備測定結果から導か れた数字である。KAGRA トンネルには、新規に設けた新跡津坑 口(図4)と、既存の茂住坑口から入坑する事が出来る。新跡津 坑口からは、中央エリアに向けて 459.4m のトンネル(新跡津作 業坑)が延びている。新跡津作業坑の途中から、Xarm に接続す るバイパス坑道(125.3m)が2013年に追加された。茂住坑口か らは既存のトンネル約 680m 地点に新規のトンネル(茂住作業 坑) 315.4m をつなげ、Yend エリアに接続している。

神岡鉱山は、カミオカンデやスーパーカミオカンデ等、水を活 用する検出器が運用されてきた実績の通り、湧水の多い事を特徴 とする山である。KAGRA トンネルでは予想される湧水の処理の ため、装置としては水平面に建設する事が理想ではあるが、全体 にわたり 1/300 の傾斜つけている。これは、神岡鉱山の地下に 建設した事のデメリットである。最も標高が高いのが Xend エリ アで約 382m。そこから 3km ある Xarm を下った先にある中央 エリアでは約 10m 標高が下がり、約 372m になる。そして、 Yend エリアは最も低い約 362m に位置している。両腕トンネル には、排水管が埋め込まれ、そこに湧水を集めて流すようになっ ている。最終の湧水処理方法は現在検討中である。

図5にKAGRAトンネルの概要図、また、図6に中央エリアの 3次元モデルを示す。新跡津坑口から幅4m、高さ4mの幌形を した新跡津作業坑を抜けると、幅15m、高さ7.5mの大空間が待 ち受けている(図7)。そのまま進み、駐車場と前室が設けられ "特殊な実験室構造を可能 にした事は、地下空間に 干渉計を建設する事のメ リットである"



図2:20mレーザー干渉計の変位感度比較。変位感度とは鏡の微小 振動の測定限界を表し、線が下へ下がるほど、より微小な振 動を測定出来ることを示す。20mレーザー干渉計を神岡地下 に移設したことで、東京三鷹に設置されていた時と比べ、低 周波から感度が改善している。



図3: KAGRA トンネル地図。KAGRA は、スーパーカミオカンデや CLIO のある池の山(岐阜県飛騨市神岡町)に、L字に直交す る片腕約3kmのトンネルを新規に掘削し、そこに建設される。 北東に延びる片腕をXarm、北西に延びるもう片腕をYarm と 呼んでいる。Yarmの北からのずれは半時計回りに約30度で ある。L字の交点および、各腕の端に中央エリア、Xend エリア、 Yend エリアと呼ぶ実験室群が設けられる。KAGRA トンネルに は、新規に設けた新跡津坑口と、既存の茂住坑口から入坑す る事が出来る。茂住坑口から登った場所にある増谷堆積場が、 トンネル掘削工事で出たズリの処分場である。



図 4:新跡津坑口。幅 4m、高さ 4m。KAGRA トンネルの標準的な断 面である。

る 30m 区間をすぎると、天井はさらに高 さを増し 9.5m になる。ここからが中央実 験室 A、奥行き 40m におよぶ KAGRA 最 大の空洞空間である。中央実験室 Aには、 入射 したレーザーを 2 分割 する Beam Splitter (BS) が設置される。その場所ま で進めば、左手には中央実験室B、C、前 方には Yfront 低温鏡室、そして延びる Yarm トンネル、右手には Xfront 低温鏡室、 そして同じく奥に延びる Xarm トンネルが 見渡せるだろう。KAGRA のレーザー光源 は、奥行き 32m の実験室Bの端に置かれ、 中央実験室A、B、Cには干渉計を構成す る光学系を内蔵する 10 台を超える真空タ ンクが設置される。

Xfront、Yfrontの各低温鏡室は幅 12m、 高さ7.5m、奥行きがそれぞれ 30.5m、 26.5mの実験室である。そこは、20K に冷 却されるサファイア鏡(直径 22cm、厚さ 15cm)がインストールされるクライオス タットが置かれる実験室である。クライオ スタットの設置場所から直上を望めば、直 径 1.2m の縦穴が開いている事に気がつく であろう。この縦穴は約 5m の厚さの岩盤

を貫き、2層にある防振 装置室(幅8m、高さ 7m、奥行き12m) につ ながっている。KAGRA トンネルの特徴とも言う べき、この2層構造は、 図8に示す全高15mに およぶサファイア鏡の防 振懸架装置を内蔵する真 空系を構築するために設 計された。2層構造を採 用する事により、強固な 防振装置室の床岩盤上 に、この巨大な防振懸架 装置の基礎をとる事が可 能になっている。このよ うな特殊な実験室構造を

可能にした事は、地下空間に干渉計を建設 する事のメリットである。

2層は各低温鏡室の直上に位置する防振 装置室とそれにつながる防振装置準備室で 構成されている。1層の前室と2層の防振 装置準備室の間にはスロープトンネル(幅 4m、高さ4m、全長約90m、傾斜約



図6:中央エリア3次元モデル。1:駐車場、2:中央前室、3:中央 実験室A、4:中央実験室B、5:中央実験室C、6:Xfront低 温鏡室、7:テストマスタンク、8:ゲートバルブ、9:Yfront 低温鏡室、10:テストマスタンク、11:ゲートバルブ、12: 鏡機械室、13:防振装置準備室、14:Xfront防振装置室、 15:Yfront防振装置室。



図7:中央エリア。奥に中央実験室Aが見える。

14%)があり、重量物の運搬等に利用する 事が出来る。また、防振装置準備室には直 径 2m の縦穴が直下にある鏡機械室に延び ている。この縦穴には螺旋階段が取り付け られ、2 層へのもう一つのアクセス手段と なる。鏡機械室(幅8m、高さ4m、奥行 き8m)は、両低温鏡室につながる、鏡の



図5: KAGRA トンネル概要図。矢印は掘削工事の進行方向を示す。 複数の作業班を編成し、複数箇所の掘削を同時に進めて行 く事が基本となっている。既設の茂住坑道から入坑した作 業班は、茂住作業坑を掘削した後、Yend エリア、Yarm ト ンネルへと掘削を続けた。Yarm トンネルを約1,200m 掘削 したところ(Beam Splitter から1,818m 地点)で茂住側か らの工事を完了とし、撤収した。新跡津坑口から入坑した 作業班は、新跡津作業坑を掘削した後、中央エリアの掘削 を開始した。中央エリア1層の掘削完了後、Xarm トンネル、 Yarm トンネルの掘削を始めた。バイパス坑道は2013 年に 追加され、Xend エリアとともに最後に掘削が行われた。

研究紹介



図8:低温鏡室のイメージ図。トンネルの2層構造を活かして、全高約15mの真空系が構築される。内部に低温鏡防振懸架装置が内蔵される。1層の床面と2層の床面の高低差は約13m。サファイア鏡の防振懸架装置の基礎は2層の床岩盤にとられる。そこから多段の重りとバネで構成される防振懸架装置がつり下げられ、その最終段に20Kに冷却されるサファイア鏡が懸架される。



図9: Yarm トンネル。幅4m、高さ4mの標準断面である。

冷却に用いる冷凍機用コンプレッサー等を 置くための場所である。コンプレッサーは 騒音・振動源になるため、鏡機械室には防 音壁をたてるとともに、床コンクリートに 縁切りを入れ、低温鏡室への影響を極力低 減するように工夫される。

Xfront、Yfrontの各低温鏡室からさらに 進み、常温テストマスタンクおよびゲート バルブが置かれる拡幅を通過すると、約 3,000mの長さを持つXarm、Yarmの各腕 トンネルに入る事が出来る(図9)。腕ト ンネルは、新跡津作業坑と同じ幅4m、高 さ4mの幌形を基本断面とし、既述の通り、 排水のために約1/300の傾斜がつけられ ている。そこには、2種類の真空ダクトが 敷設される。一つは、KAGRAのレーザー 干渉計のビームが走る、直径800mmの真 空ダクトである。これは、中央エリアと各 end エリアに置かれる真空容器をつなぐた

めに、3,000mの全延長にわたり敷設され る。もう一つは、地球物理の研究を目的と した、地面のひずみを測定するレーザー干 渉計(地物干渉計)のための直径 400mm の真空ダクトである。地物干渉計の長さは 1,500m あり、BS から各腕の 500m 地点お よび 2,000m 地点の全 4 箇所を拡幅し、光 学系をおさめる真空容器を設置する。地物 干渉計の鏡は、重力波検出器のそれとは相 反し、地面に出来るだけ強く固定する事が 重要である。そのために、トンネル掘削時 に現れた岩盤の面を平滑に仕上げ、そこに 花崗岩を固着させる。真空容器はこの花崗 岩の上にアンカーボルトで固定される。地 物干渉計は2015年に完成し、観測を開始 する予定である。

腕トンネルの終点の先には、Xend エリ アと Yend エリアがある。図 10 に最終設 計とは異なるが Xend エリアの 3 次元モデ



図 10: Xend エリア 3 次元モデル。1:テストマスタンクおよびゲートバルブ、2:低温鏡室、3:鏡機械室、4:防振装置準備室、 5: Xend 防振装置室。最終設計では2層が拡大されており、 居室および緊急時避難室が設けられている。



 図11: Yend エリア 3 次元モデル。1:テストマスタンクおよびゲートバルブ、2:低温鏡室、3:鏡機械室、4: Yend 居室、5: Yend 駐車場、6:防振装置準備室、7: Yend 防振装置室。

ル、図 11 に Yend エリアの 3 次元モデル を示す。中央エリアと同様に、ゲートバル ブおよび常温のテストマスタンクが置かれ る拡幅地を経て、クライオスタットが置か れる低温鏡室(幅12m、高さ7.5m、奥行 き20m) につながる。Xfront、Yfrontと 同様に、全高15mにおよぶサファイア鏡 の防振懸架装置を内蔵する真空系を構築す るために、低温鏡室の直上に防振装置室が 作られる2層構造になっている。低温鏡 室の横に鏡機械室が置かれ、そこに2層 につながる螺旋階段がとり付けられる構造 も中央エリアと同様である。Xend エリア には、低温鏡室の手前約 100m 地点から 2 層へ上がるスロープトンネルが取り付けら れ、2層居室、防振装置準備室を経て、防 振装置室に入る事が出来る。2層居室に は、防爆扉で仕切られた緊急時避難室が付 属している。Yend エリアには低温鏡室の

TAKASHI UCHIYAMA - KAGRA GROUP

研究紹介

先に、幅8m、高さ4mの断面を持つ実験 室、居室、駐車場スペースが40mの奥行 きで設けられ、茂住接続坑道へとつながっ ていく。Yendエリアの2層へ上がるス ロープトンネルはYend前室に接続し、防 振装置準備室を経て、防振装置室に入る事 が出来る。

3 工事

トンネル掘削工事の入札は、2011年11 月に行われ、鹿島建設㈱(以下、鹿島)に よって落札された。鹿島の選択した掘削方 法は、 発破を 用いた NATM 工法 (New Austrian Tunneling Method) である。 22ヶ月の工期で 8,000m 近いトンネルを掘 り上げる、その鍵となった技術が長孔発破 である。通常の発破が1回に1.2mから 1.5m 進行するのに対して、本工事で用い た長孔発破では一度に 4m の進行を稼ぐ事 が出来る。NATM 工法の基本サイクルは、 削孔、火薬装填、発破、ズリ出し、コンク リート吹付であるが、作業内容によって、 重機の入れ替えが必要である。長孔発破の メリットは、この重機の入れ替え回数の低 減による時間短縮である。デメリットとし



図 12: Yend 低温鏡室。クライオスタットを設置するピットと、 その直上に縦穴が見える。

"発破の回数は 2,952 回、用いた火薬の総量は 518,318kg におよんだ。"

ては、掘削長の比以上に大量の火薬が必要 なこと、そのため抗壁を痛めたり、よぼり が多く発生しやすい点が挙げられる。また、 岩質によっては崩落が起こりやすい点も挙 げられる。しかし、本掘削工事では安全第 一なのは当然としても、工期短縮も極めて 重要な要素である。本工事では、大型重機 を活用した各作業時間の短縮、換気設備の 充実による発破後の換気時間の短縮といっ た工夫を取り入れ、一つの作業場所で、1 日4回の長孔発破を基本として掘削を進 めた。これらの取り組みにより、2013年 9月には、Xarm の掘削において 359.4m、 Yarm にて 301.2m、KAGRA 全体で 660.6m の月進を達成する事が出来た。Xarm の月 進 359.4m は NATM 工法の日本記録と考 えられている。本掘削工事での発破の回数 は 2,952 回、用いた火薬の総量は 518,318kg におよんだ。

しかし、掘削工事は山の状態によって大 きく左右され、進行が延びない苦しい状況

> がたびたび発生した。特 に影響が大きかったの が、湧水である。大量の 湧水が発生すると、吹き 付けコンクリートがはが れてしまう、削孔した穴 から装填した火薬が流れ 出してしまう、火薬自体 も通常使用している ANFO爆薬とは別のもの を用意する必要がある 等、長孔発破を行うには

難しい状況になり、進行が落ちてしまう。 また、一度の発破で大量の湧水が発生して しまうと、大量の濁水の発生につながり、 処理が難しくなる。そのため、湧水が予想 される箇所では、短く刻んで掘削を進めて 行く必要がある。また、断層を通過するよ うな場合は、湧水だけでなく岩質自体が弱 い事が問題を難しくする。岩質が弱い箇所 では、事前に薬剤を岩盤に注入し固化させ る補助工法や、発破後に鋼製支保工の構築 やロックボルトの打設等の追加工事が不可 欠であり、さらに進行が落ちてしまうので ある。本掘削工事の工程は、図5に示し たように、複数の作業班を編成し、複数箇 所の掘削を同時に進めて行く事が基本と なっている。本掘削工事初の発破は、既設 の茂住坑道から入坑した作業班による茂住 作業坑(315.4m)の掘削で行われた。 2012年5月22日の事である。この作業班 は、茂住作業坑を掘削した後、Yend エリア、 Yarm トンネルへと掘削を続けた。Yarm トン ネルを約1,200m 掘削したところ (BS から 1,818m 地点) で池の山断層に到達し、約 180t/hの湧水が発生した。この水量は当時 の濁水処理能力の限界に相当する。そこで、 水抜きのためのボーリングを打ち込み、茂 住接続坑道から始まった掘削をここで完了 とした。その後、仮設設備の撤収等の作業 を行い、2013年4月27日に撤収した。 残された Yarm トンネルの掘削は中央エリ アから掘り進められ、2013年12月5日 に貫通する事になる(図13)。

茂住作業坑の掘削開始から約一月遅れの



図 13: Yarm を貫通する発破の瞬間。

"掘削工事は山の状態によって大きく左右され、 進行が延びない苦しい状況がたびたび発生した"

2012年6月18日に新跡津作業坑 (459.4m)の掘削が始まった。6月20日 には本工事の安全祈願祭が執り行われてい る。約3ヶ月の掘削を経て、2012年10月 1日より中央エリアの掘削が開始された。 年内に中央エリア1層の掘削を完了し、 2012年12月24日から Xarm トンネル、 少し遅れて 2013 年 1 月 9 日より Yarm ト ンネルの掘削を始めた。既述の通り、 Yarm トンネルは 2013 年 12 月 5 日に貫通 し、完成を果たした。一方の Xarm は 2014年3月1日に掘削を完了した。約 3,000mのトンネルを約14ヶ月で掘削した 事になる。これは平均すると210m/月の 掘削速度である。引き続き行われた、 Xend エリアの掘削は 2013 年 3 月 25 日に 完了した。Xend の掘削と並行して、バイ パス坑道の掘削を行った。延長は 125.3m だが、全てにわたって岩質が弱く、鋼製支 保工をたてながらの工事になり、多くの時 間を要した。そして 2014 年 3 月末日にト ンネル掘削工事の全ての作業を完了した。

トンネル掘削工事にはズリ捨てと水処理 が不可欠である。本掘削工事で発生したズ リは、一部を除き、神岡鉱業の増谷堆積場 で処分された。重金属を含むズリは区別さ れ、増谷堆積場のさらに上流に運搬し、重 金属成分が溶出しないように処理された。 重金属を含むズリの量は、全体の約8%弱 になった。茂住側の工事で出たズリは、既 存の茂住坑道から神岡鉱業の敷地内を通っ て運搬された。跡津側の工事で出たズリは、 市道跡津線および国道41号を通って運搬 された。トンネル坑内の運搬には25t ダン プトラック、坑外の運搬には10t ダンプト ラックが用いられた。この10t ダンプト ラックののべ台数は約54,000 台になる。

水は濁水と清水の二種類に分け、濁水は 濁水プラントを通して、清水は必要ならば PHを調整した後、河川に放流される。本 掘削工事では、濁水の量を減らすため、掘 削がある程度進行したところで、排水管を 埋めその上に路盤コンクリートを打設し た。こうする事により、湧水として出続け る水は、排水管を通って清水として処理す る事が出来る。一方、発破やその後のコン クリート吹付等で生じた濁水は、濁水プラ ントにつながる排水系統に流す事で適切に 処理された。工事開始当初は、茂住側、跡 津側ともに濁水を神岡鉱業(㈱の濁水プラン トに送り処理していた。しかし、2013年 3月に茂住側から進めていた Yarmの掘削 が池の山断層に到達した事で、約180t/h の湧水が発生した。ほぼ同時に、跡津側の 現場でも300t/hの湧水が発生する事態に なり、掘削が完全に停止した。結果として、 既述の通り茂住側の掘削は停止。跡津側に 濁水プラント(最終処理能力250t/h)を 新設することで、4月から工事を再開する 事が出来た。

4 これから

KAGRA のトンネル掘削工事は無事完了 した。2014 年度からは、地下実験室建設 工事とともに真空容器、真空ダクト、クラ イオスタット等の真空機器の搬入が進めら れる。実験室建設は年内、真空関係の設置 と接続は年度内完了予定である。また、9 月にはレーザーが置かれるクリーンブース がいち早く完成し、レーザー干渉計建設の 端緒がついにきられる。2015 年末の常温 干渉計の完成、2018 年の低温干渉計の完 成および重力波の検出を目指し、一層の努 力を続けて行きたい。

5 最後に

本掘削工事を進めるにあたり、多くの方 にご不便、ご心配、ご迷惑をおかけしまし た。ズリの運搬では、長期間にわたり、数 多くの 10t ダンプトラックが市道跡津線お よび国道 41 号を行き来し、ご不便をおか けしました。特に地元の方、土の集落の皆 様には大変なご迷惑をおかけしました。 KAGRA のトンネルはスーパーカミオカン デ等地下研究施設のあるレベルより約 10m から 20m 高い位置に設定されていま すため、掘削中に既存の坑道の上を通過す る事がたびたびありました。その際には、 長孔発破を避け、短く刻んで掘削を進める 事を基本としてきましたが、神岡鉱業㈱に は頻繁な点検作業等、安全確保にご協力い ただきました。地下研究施設に通じる跡津 坑道や、スーパーカミオカンデの水源につ ながっている第二南東坑道の上を通過する 際には、跡津坑道の通行規制や第二南東坑 道の監視等、さらなるご迷惑を関係者にか けてしまいました。実際に、スーパーカミ オカンデで用いる水を汚してしまった事も あり、大変申し訳なく思います。また、発 破によって飛散した岩が高圧ケーブルを損 傷し、その影響で地下研究施設を含む周辺 地域に停電を引き起こした事故をについて も、多くの方にご迷惑をおかけしました。 また、事故とは別にトンネル掘削工事を行 うために幾度か坑内の停電を行いました が、その都度、神岡宇宙素粒子研究施設に リーダーシップをとっていただき、多くの

関係者に対応していただきました。以上の ように、本掘削工事は、非常に多くの方の ご協力の下に進める事が出来ました。本当 にありがとうございます。

図 6、図 10、図 11 は岩崎詩子氏から提 供していただきました。図 8 は小池重明 氏より提供していただきました。ここに感 謝いたします。

参考文献

- [1] K. Kuroda, et al., "Status of LCGT,"
 Class. Quantum Grav. 27 (2010) 084004 (8pp)
- [2] B. Abramovici, et al.: "LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory," Science 256 (1992) 325-333
- [3] C. Bradaschia, et al.: "The VIRGO project: a wide band antenna for grav-itational wave detection," Nucl. Instrum. Methods Phys. Sect A 289 (1990) 518–525
- [4] M. Ohashi, et al.: "Design and construction status of CLIO," Class. Quantum Grav. 20 (2003) S599–S607
- [5] T. Uchiyama, et al., "Reduction of thermal fluctuations in a cryogenic laser nterferometric gravitational wave detector," Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 141101 (5pp)



パルサーの磁気圏では、非常に強力な電磁場により高エネルギーの粒子が 生み出されていると考えられていますが、その詳細はまだ分かっていませ ん。近年、高エネルギー粒子が放出するX線やガンマ線の観測が急速に発 展し、磁気圏での高エネルギー現象について理解が進みつつあります。こ こでは、最近のガンマ線観測と粒子シミュレーションの結果から得られた、 パルサー表面近くでの物理的描像について紹介します。

1 はじめに

研究紹介

高エネルギー天体グループでは、宇宙線 粒子の加速・生成機構などについての研究 を行っています。宇宙線の加速過程・放射 過程の舞台となる高エネルギー天体現象に は、身近な太陽のフレア現象から大質量星 の爆発などに伴う相対論的ジェットからの 放射、ガンマ線バーストまで様々です。本 稿では、そのうちの一つであるパルサーに ついて紹介します。

パルサーとは、およそ1ミリ秒から数 秒の周期で点滅して見える天体です。この パルス状の信号が持つ周期の短さと正確さ から、パルサーの正体は高速で自転する中 性子星であることが確立しています⁽¹⁾。ま た、パルサーは星の表面で典型的に1兆 ガウス程度の磁場を持っていることもわ かっています。パルサーの研究は、本質的 には高速回転する強力な磁石が宇宙空間に あると何が起こるかを調べることです。

これまでに得られている描像について以 下で述べていきます。中性子星を導体かつ 強力な磁石とみなせるとします。この磁石 を回転させると、内部の荷電粒子の分布が 非一様になり、結果として内部と外部に電 場ができます(単極誘導)。外部には磁場 に対して平行な電場の成分 E₁ができ、こ れが荷電粒子を加速されることになりま す。粒子加速は、電場と磁場の方向を垂直 にするセンスに働きます。仮に荷電粒子を うまく分布させ、すべての領域で電場と磁 場が垂直になる状況が実現されたとします (図1 左側)。このときの電荷密度分布は

Goldreich と Julian の 仕 事にちなんで GJ 電荷密 度と呼ばれます^[2]。もし ある点での電荷密度の値 ρ が GJ 電荷密度 ρ_{GJ} に一 致していなければ、その 点には加速電場 E_{\parallel} が存 在していることになりま す。

GJ電荷密度の分布が 実現された場合、磁力線 に沿った方向への加速は 起きません。ただし、磁 場に垂直な電場成分が存 在することから、E×B ドリフトによって荷電粒 子は星と共に回転しま す⁽³⁾。回転速度は、外側 ほど大きくなります。すると、ある半径よ り外側の領域では回転速度が光速より大き くなります。この領域では、もはや粒子は 星と共に回転することができません。結果 として、粒子は外に向かって流出してしま います。共回転速度が光速に一致する半径 を、光円柱半径と呼びます(図1左側の 破線)。図1左側の水色の領域に対応する



閉じた磁力線上の粒子は、星と共に回転す ることが可能です(閉じた領域)。しかし、 光円柱を横切る磁力線上の粒子は、光円柱 半径から流出してしまいます(開いた領 域)。すると、せっかく作った加速電場を 遮蔽する GJ 電荷分布を維持しようにも、 粒子が不足してしまいます。この不足に よって電場が発生し、粒子を加速させます。 このとき、パルサーの磁気圏では電磁カス ケードが発展します。具体的には、次のよ うなプロセスです。(1)粒子が電場で加速さ れて高エネルギーのガンマ線を放出。(2)ガ ンマ線が周囲のX線光子と衝突、もしくは ガンマ線が非常に強い磁場を横切ること で、電子陽電子対を生成。(3)生成した粒子 は電場により加速。(4)生成したそれぞれの 粒子がまたガンマ線を放出し、さらなる電 子陽電子対が生成。この(1)から(4)のプロセ スの繰り返しにより、大量の粒子を生成し ます。結果として荷電粒子の不足を補い、 加速電場を遮蔽しようとします。光円柱か ら連続的に粒子が流出するため、電磁カス ケードも常に起きていると考えられます。 電磁カスケード過程で放出されるガンマ 線、粒子の生成時などに放出されるX線や 可視光などが、パルスとして地球で観測さ れます。

上記の描像を電気回路で考えると、開い た領域に電流が流れ、粒子加速が起こる領 域が電気抵抗に対応します(図1右側)。 電気抵抗は、一部が光円柱の中に、大部分 は光円柱よりずっと外側に存在すると考え られています。ただし、その電気抵抗が具 体的にどこに位置しているのかわかってい ません。この理由から、図1の左側には 電気抵抗を記していません。電池に対応す るのは、パルサー表面が非一様な電荷分布 であるために作られている電位差です。観 測されるガンマ線がパルス状であること、 その形状に時間進化はあまりみられないこ とから、磁気圏のある一部の決まった領域 で粒子加速が起きていると考えられます。 これは、ある一定の電流が流れる電気回路 が維持されているとも言うことができそう です。

磁場を持った中性子星が自転することで 作る磁気圏では、上述したように領域の一 部で粒子加速、粒子生成や電磁波放射が起 きています。粒子の加速や生成の過程は、 磁気圏の電荷分布、電流分布を維持しよう "高速回転する強力な磁石が宇宙空 間にあると何が起こるか"

というセンスに働きます。これが、パルサー 磁気圏の物理的描像として考えられている ことです。しかし、例えば具体的にどこで、 どのくらいのエネルギーまで、どれくらい の数の粒子が加速、生成、そして宇宙線と して放出されているのかなどについては、 まだ諸説あるのが現状です。

2 星表面での電場の 遮蔽

近年、フェルミ衛星によるガンマ線観測 でいくつかの進展がありました。その一つ として、得られたガンマ線のエネルギース ペクトルなどから、磁気圏の比較的外側に 粒子加速領域が存在するという考えが確立 しました(図 2)⁽⁴⁾。さらに、ガンマ線とX 線のパルスの波形の比較から、粒子が生成 している領域も粒子加速領域とほぼ同じ位 置であることが明らかとなりました⁽⁵⁾。一 方で、表面近傍に粒子の加速領域が存在す る場合に期待されるガンマ線は検出されて いません。よって、表面近傍で電磁カスケー ドを起こして大量の粒子を生成し、磁気圏 に供給するというモデルに対しては否定的 な結論が得られました。ただし、表面近傍 からはコヒーレントな電波放射が検出され

ています (図 2)。よって、 電波放射の起源となる機 構は表面近傍で働いてい るはずです。

もし表面近くで電磁力 スケードが発展している 場合、そこで大量に生成 された荷電粒子が外側に 向かって流出します。外 側の粒子が流入してしま してしまうでしょう。 こうなるとガンマ線観測 と矛盾してしまいます。 そのため、表面近くから のガンマ線が検出されな いことは、当然期待される結果であるよう に思えます。しかし、逆に外側で粒子加速 が起きることだけから、表面で十分な粒子 加速が起きないことを示すことはできませ ん。この問題点について以下で説明します。

ここで、舞台を表面近傍の領域に移しま す。この領域で、電場を遮蔽するための GJ 電荷密度と、電気回路を維持するため の電流密度が、両方同時に供給できるかに 注目します。簡単のため、外側から星表面 に粒子は供給されていないとします。ただ し表面には、電子やイオンなどの荷電粒子 が存在します。この荷電粒子は、表面に電 場が存在する場合に表面から引き出される ことになります。電場で引き出すため、電 場の符号に応じてある決まった符号の電荷 を持つ粒子のみが供給されます。具体例を 考えてみます。後述しますが、磁力線上を 流れる電流密度」の値はわかっていませ ん。そこで、ある2つのJoの値に対する 振る舞いを考えます。まず最初の例では、 ある磁力線上の電流密度 Joの値が GJ電荷 密度 ρ_{G} に光速 c をかけたものの 2 倍の大き さ、つまり $J_0=2\rho_{GI}c$ とします [図 3 (a)]。 磁気圏では電流密度を維持しようとするた め、値しからずれると粒子を加速させる 電場が発生します。表面から供給される粒 子がつくる電流密度がJ_{NS}=J₀となってい



研究紹介







れば、電流密度に対する要求が満たされて 電場が遮蔽できそうです。ここで添字「NS」 は Neutron Star を表しています。また、 電流密度は J_{NS}= $\rho_{NS}U_{NS}$ と書け、 ρ_{NS} 、 U_{NS} は星表面から流出する粒子の電荷密度を平 均速度としています。しかし一方で、電荷 密度について考えてみます。表面から流出 する電流密度が J_{NS}= $2\rho_{GI}c$ ということか ら、たとえ速度がほぼ光速 ($U_{NS}\sim c$)であっ ても、表面からの粒子の電荷密度が $\rho_{NS}=2\rho_{GJ}$ となる必要があります。その結 果、電荷密度は $\rho=\rho_{NS}\neq\rho_{GJ}$ となりGJ電 荷密度と一致しません。この場合、加速電 場を遮蔽できずに粒子が加速され、電磁力 スケードを誘発することになります。

常に粒子加速が避けられないわけではあ りません。磁気圏から要求される電流密度 が $J_0=0.5\rho_{GJ}c$ の場合を考えてみます[図 3(b)]。電荷密度 $\rho_{NS}=\rho_{GJ}$ の粒子を光速の 0.5倍の速度($u_{NS}=0.5c$)で供給すれば、 $J_0=J_{NS}$ となることができます。これは電 流密度と電荷密度両方の要求を満たしてい るので、加速電場が遮蔽されます。より一 般には、要求される電荷密度が $0 < J_0 < \rho_{GJ}c$ ならば、十分な粒子加速なしで電場 を遮蔽できます。しかし、要求される電流 密度 J_0 は磁気圏全体の電流密度分布から 決まります。電流密度分布を決めるのは、 例えば電気抵抗が全体としてどのように分 布しているかといったことです。つまり、 電気抵抗の一部である表面の電磁場構造だ けからは決まらないことを意味します。 よって、表面で電磁カスケードが起きない ような値をとるべき理由はありません。こ のことについては、すでに多くの先行研究 で指摘されています⁽⁶⁾。

次に、外側の加速領域の影響を考えます (図4)。外側の加速領域で十分加速され、 速度が十分光速とみなせる粒子が表面近傍 の領域に流入するとします。外側から流入 する粒子の電流密度を J_{OG} 、電荷密度を ρ_{OG} とします。添字「OG」は、外側の加速領 域 Outer Gap を意味しています。外側か らの粒子の速度が光速 c であるため、2つ の値には $J_{og} = \rho_{og} c$ の関係があります。電 流密度と電荷密度の両方の要求を満たすに は、 $J_{NS}+J_{OG}=J_0$ 、 $\rho_{NS}+\rho_{OG}=\rho_{GJ}$ となる必 要があります。外側から流入する粒子の電 流密度 Jog と全体で要求される電流密度 Jog の間には、まだ相互の関係は存在の有無を 含めて知られていません。そこで、ここで は Jo と Jog はそれぞれ独立に決まるとしま す。この2つをある値に固定した場合、 電荷密度と電流密度の2つの方程式に対 して、未知数は U_{NS} と ρ_{NS} の 2 つだけです。 よって、解の組み合わせは一つに決まりま す。しかしUNSのとり得る値には光速 cより小さいという制限があります。このため、常に2つの方程式を満たす pG が存在するとは限らないことになります。外側から供給がない場合と同じ結果です。表面近傍からのガンマ線放射が観測されていないことから、任意の電流密度 Jo Jog の値に対して、表面近傍の電場を遮蔽して電磁カスケードの発展を防ぐ何らかの機構が必要です。

3 あたたかい粒子の 存在

最近のプラズマ粒子シミュレーションに より、新たな電場遮蔽の描像が指摘されま した。これまでの研究では、扱いやすさか ら粒子の温度、つまり粒子ごとの運動量の ばらつき $\Delta \gamma mc$ は平均の運動量に比べて十 分小さい($\gamma mc \gg \Delta \gamma mc$)という仮定のも とで解析が行われてきました。しかし、こ の粒子で電場を遮蔽させようとする場合 は、プラズマ不安定を起こして別の運動量 分布の構造を作ることがシミュレーション によって示されました⁽⁷⁾。Timokhinらと同 様のシミュレーション結果の一例を図5 に示します。要求される電流密度は J_{e} = 0.5 $\rho_{GI}c$ としています。外側の加速領域か



e⁻ or p⁺ パルサー p_{NS} $J_{OG,1} = \rho_{OG,1}$ $\rho_{OG,2} = 0$ $v_{OG,2} > 0$ e⁻ and e⁺ $J_{OG,2} = 0$ Fig. 6.—シミュレーションを行う状況の概念図。星の表面からは電

子またはイオンが流出します。外側からは、2 成分の粒子が 流入します。1 つ目の成分は加速された電子または陽電子 で、電荷密度と電流密度は ρ_{0G1} と J_{0G1} です。粒子の速度は 領域内でほぼ光速とします。もう一つの成分は、速度の遅 い電子陽電子で、境界で注入されるときの平均速度は < u_{0G2} >=0、運動量分布は mc の広がりを持つとします。この成 分の電荷密度と電流密度をそれぞれ p_{0G2}、 J_{0G2} とします。

らの粒子の流入は考慮していません。まず 図5のパネル(a)に注目します。これは粒 子の運動量分布を表しています。パネル(a) において、運動量が p/mc~4の細くて濃 い成分と、広い運動量分布を持つ成分の2 つに分けて考えます。前者を「冷たい」成 分、後者を「あたたかい」成分とここでは 呼ぶことにします。冷たい成分の速度はほ ぼ光速で、この成分が J₀ = 0.5ρ_G c の電流 密度を作っています。ただし、冷たい成分 の電荷密度は 0.5 p_G であり、GJ 電荷密度 ρ_{G} と一致していません。一方、あたたか い成分は平均の速度が0です。よって、 この成分は電流密度に寄与しません。しか し電流密度には寄与し、冷たい成分の電荷 密度と GJ 電荷密度のずれ 0.5 pGJ を作って います。このようにして、要求される電流 密度と電荷密度を同時に満たしています。 図5のパネル(b)は電場を表します。ここ では、縦軸の値が1より十分大きい値で あれば、電磁カスケードを起こす可能性の ある強い電場に対応します。パネル(b)から、 両方の境界以外では値が1より十分小さ く、遮蔽されていることがわかります。 0<*J*₀<*ρ*_{GI}*c* 以外では、上記のようなシ ミュレーションでも電磁カスケードが起き ます。しかし、電磁カスケードが起きて一

"広い運動量分布のあたたかい粒子 の存在が、粒子加速領域の構造を 決めていることがわかります。"

時的に電場が遮蔽されるときの運動量分布 は、やはり冷たい成分とあたたかい成分の 2 成分で構成されるという結果が確認され ました⁽⁷⁾。よって、パルサー磁気圏内で電 場が遮蔽されている領域では、粒子の運動 量分布はすべて上記の2成分の構造に なっていると考えられます。これは、磁気 圏ではすべての粒子が相対論的速度で運動 しているという従来の考えと大きく異なる 描像です。

ここで、図2の描像に戻ります。外側 の加速領域は、星の表面までは達していま せん。つまり、星と外側の加速領域の間で、 いったん電場が遮蔽されています。このこ とは、ガンマ線の波形にみられるピークの 数が2本以下であることからも示唆され ます。もし内側まで加速領域がのびている と、ガンマ線の波形に3、4つのピークを 持つパルサーが多く検出されるはずです。 しかし、フェルミ衛星が発見した 100 個 以上のパルサーの中には、そのような天体 はいません⁽⁹⁾。図 2 のように赤色の加速領 域が星にまで達していないため、この加速 領域の境界で速度が遅く広い運動量分布を 持つ(あたたかい)粒子が作られていると 考えられます。この粒子も、星の表面に向 かって流入してくると考えるのが自然で しょう。

上記の状況を調べるため、粒子シミュ レーションを行いました⁽⁸⁾。図6のような 状況を考えます。外側から流入する粒子の 成分を2種類とします。一つは、前のセ クションの最後で扱った加速された粒子で す。ここで、これらの粒子の電荷密度と電 流密度をJ_{0G1}、ρ_{0G1}と定義しなおします。 もう一つの外側から流入してくる成分とし て、平均の速度が十分小さいが運動量分布 が広い(あたたかい)電子と陽電子を考え 研究紹介

ます。これらの電荷密度と電流密度を $J_{0G,2}$ 、 $\rho_{GJ,2}$ とします。また、このあたたか い成分の注入する粒子数nをパラメー ターとします。ただし、注入する電子と陽 電子は同数、つまり電気的には中性としま す ($\rho_{0G,2}=0$)。シミュレーションの結果 の一例を、図7に示します。左側の3枚 のパネルは粒子の運動量分布を表します。 上から、表面から流出する電子(青色)、 外側から流入するあたたかい成分の電子 (黄緑色)、陽電子(水色)に対応します。 十分加速された粒子は、計算領域内で速度 が常に光速 c のままであるため、図7には 示していません。もしあたたかい粒子を注 入しなければ、表面からの電子が十分加速 される電流密度」の組み合わせを選 んでいます。しかし、図7右側の上のパ ネルから、電場が十分遮蔽されていること がわかります。あたたかい粒子の役割を見 ていきます。結論からいうと、これらの粒 子の一部が電流密度、残りが電荷密度を調 整する役割を果たしています。図7の右 側の真ん中、下のパネルがそれぞれ電荷密 度と電流密度を表しています。図の赤い成 分は、外側からの加速された粒子の寄与 ρ₀₆₁、J₀₆₁です。黒線が全体の電荷密度、 電流密度を表しており、これが平均的に要

求される値を満たしていることがわかりま す。電流密度分布のパネルに注目します。 外側からの加速された粒子(赤色)と表面 からの電子(青色)の足し合わせでは、J₀ には到達しません。このずれを、あたたか い成分の陽電子(水色)が埋めています。 一方、電荷密度に注目すると、電流密度に は寄与していなかった外側からの電子(黄 緑色)が、p_Gへ調整の役割を果たしてい ることがわかります。得られた粒子の運動 量分布は非常に安定で、定常的な描像であ ると言えます。もし注入されるあたたかい 成分、特に今回は電子の注入数が少ない場 合、電子が星に向かって加速され、陽電子 は外側の境界から計算領域に入って来れま せん。結果として、電場が遮蔽できません。 逆に注入されるあたたかい粒子が多い場合 は、外側の境界付近にできる弱い電場が電 荷密度と電流密度にわずかなずれを作り、 簡単に全体の電場を遮蔽できます。以上の 結果から、広い運動量分布のあたたかい粒 子の存在が、粒子加速領域の構造を決めて いることがわかります。

ただし、上のような一例にすべて落ち着 くわけではありません。ある条件のもとで は、振動の挙動を示します。外側から流入 する粒子は電子陽電子を考えています。一 方で、表面大気に存在する粒子は電子とイ オンです。イオンと電子陽電子が非線形な 相互作用する場合、質量差が大きく影響し ます。外側から流入するあたたかい成分の 速度は遅いことから、表面の粒子との相互 作用が予想されます。イオンが表面から流 出する場合のシミュレーション結果を図8 に示します。このとき、先ほどと同様に外 側からは加速された粒子、あたたかい成分 の電子陽電子を注入しています。図の左側 では、表面から流出するイオンの運動量と 電場のみを示しています。ある3つの時 間のスナップショットですが、この振る舞 いは繰り返されます。もう少し詳細に挙動 を説明します。あたたかい電子陽電子が、 イオンを引き抜いていた電場を遮蔽しよう とします。そのため、非相対論的な速度の イオンが表面から流出しています(t= 16.0)。しかし、遮蔽される前の表面の電 場は、イオンを相対論的速度に加速させて その他の領域の電流を調整する役割を果た していました。よって、表面の電場が遮蔽 されてしまうとイオンを加速できなくな り、イオンが担っていた電流密度がなくな ります。外側からの電子陽電子が代わりに 電流を作ろうとしますが、すぐに不足して しまいます。その結果、イオンを再び加速



Fig. 7. シミュレーションにおける、ある時刻のスナップショット。 横軸はすべてパルサー表面からの距離で、10²c/ω_ρで規格化 しています。(左上)表面から流出する電子の運動量分布。(左 中央)外側から流入するあたたかい成分の電子の運動量分 布。(左下)外側から流入するあたたかい成分の陽電子の運 動量分布。(右上)電場の分布。ほとんどの領域で電場が遮 蔽されていることがわかります。(右中央)、(右下)電荷密 度と電流密度の分布。それぞれ、電場遮蔽のために要求さ れる値ρ_G、J₀で規格化しています。表面からの電子(青色)、 外側からの加速された陽電子(赤色)、外側からのあたたか い成分の電子(黄緑色)と陽電子(水色)の寄与、全体の 値(黒色)をそれぞれ示してします。





するために電場が発展します。イオンは重 いので、電場がある程度大きく発展するこ とになります(t=17.1)。一方、非相対論 的速度で流出したイオンは速度が遅いた め、個数密度が増加します。このイオンが 作る電荷密度の調整のために、電子陽電子 の個数密度が局所的に大きくなります。こ の高密度の粒子は、最終的にイオンに引き ずられて外側に流出していきます(t= 19.3)。図8の右側は、計算領域の外側の 境界を通過する粒子数の時間変化です。非 常に高い密度の粒子の放出が周期的に起こ ることがわかります。複数の実線は、注入 する粒子数 n の違いに対応しています。 ある決まったnの値の範囲のみ、このよ うな現象を起こすことがわかります。この 粒子の固まりからの放射を評価すると、パ ルサーからのコヒーレントな電波放射を説 明できる可能性があることがわかりまし た。これは、表面近傍で電磁カスケードを 起こさずに電波放射を説明できる可能性の ある機構の初めての提案になります。

4 おわりに

パルサーの研究分野では、観測が大きく 先行しています。これまでほとんどの現象 は電波のみによる観測から得られたもので した。電波のみでは現象のエネルギーの低 さなどから、パルサー磁気圏でおこる現象 の本質的な部分にまで迫ることが一般に難 しいと考えられます。近年、回転エネルギー の損失に対して比較的大きな割合を占める X線、ガンマ線の観測が急速に進展してき ました。これにより、理論的理解が進みつ つあるのが現状です。

今回は、ガンマ線パルサーから表面近傍

起源のガンマ線が検出されないという観測 事実を取り上げました。この観測事実と粒 子シミュレーションで明かされたプラズマ のダイナミクスの新たな理解をもとに理論 的考察を行った結果、星の表面には外側か ら速度の遅い粒子が流入している可能性を 見いだしました。この状況のもとで粒子シ ミュレーションを行った結果、任意の電荷 密度に対して星表面での電場を遮蔽できる 条件がわかりました。これは、表面からガ ンマ線が観測されないという観測結果と無 矛盾です。さらに、ある条件のもとでは、 粒子の塊を形成する振動的振る舞いの存在 も明らかにしました。これは電波放射の起 源として重要な機構である可能性がありま す。

もし上記の描像が正しければ、外側から 粒子を供給している粒子加速領域と電波放 射の間にはなんらかの関係が期待されま す。外側の加速領域からは、ガンマ線、X 線、可視光が放射されていることから、電 波と可視光・X線・γ線とに相関関係が見 つかる可能性があります。実際、最近になっ てこのような相関が複数報告され始めてい ます。高エネルギー天体グループでも、現 在電波とX線の観測データを用いて相関関 係の調査を行っています⁽¹⁰⁾。この理解が進 展すると、電波観測からパルサー磁気圏の 構造に対する多くの情報の「使い方」を手 に入れることができ、理論的理解が一気に 進展する可能性を持っています。

また、パルサーからのコヒーレントな電 波放射は、近年報告された宇宙論的距離か らの高速電波バースト(Fast Radio Burst; FRB)^{III}の機構の解明に向けても非常に重要 と考えられています。電波の放射機構が働 く条件を明らかにできれば、電波の吸収を 受ける程度によって粒子数などの環境、そ して FRB の起源の解明に大きく迫ること も期待できます。このように、電波帯域か らパルサーの理解が大きく進展し始めた段 階であり、高エネルギー天体グループは観 測的・理論的に様々な角度からアプローチ を続けています。

参考文献

- (1) 柴田晋平、1993、天文月報 86 (6)、 250
- (2) Goldreich P., Julian W.H. 1969, ApJ, 157, 869
- (3) 浅野勝晃、2005、天文月報 98 (4), 250
- (4) Abdo A.A., et al. 2009, ApJ, 696, 1084
- (5) Takata J., Chang H.-K., Shibata S. 2008, MNRAS, 386, 748; Kisaka S., Kojima Y. 2011, ApJ, 739, 14 例えば、Mestel L., Robertson J.A., Wang Y.-M. Westfold K.C. 1985, MNRAS, 217, 443
- (6) Timokhin A.N. 2010, MNRAS, 408, 2092
- (7) Kisaka, S., Asano, K., Terasawa, T. in preparation
- (8) Abdo A.A., et al. 2013, ApJS, 208, 17
- (9) Mikami R., et al. 2014, JPS Conf. Proc., 1, 015106
- (10) Lorimer D.R., et al. 2007, Science, 318,
 53 ; Thornton D., et al. 2013 , Science, 341, 53
- (11) This preprint was prepared with the AAS L^ATEX macros v 5.2.

人事異動

発 令 日	氏 名	移動内容	職
H26.3.31	鈴木洋一郎	早期退職	教授
H26.3.31	齊藤 芳男	任期満了	客員教授
H26.3.31	芝田 達伸	任期満了	特任助教
H26.3.31	川田 和正	任期満了	特任助教
H26.3.31	木坂 将大	任期満了	特任研究員(研究所研究員)
H26.3.31	木戸 英治	任期満了	特任研究員(プロジェクト研究員)
H26.3.31	齋藤 浩二	任期満了	特任研究員(研究所研究員)
H26.3.31	林 将央	任期満了	特任研究員(研究所研究員)
H26.3.31	百瀬莉恵子	任期満了	特任研究員(研究所研究員)
H26.3.31	西田恵里奈	受入終了	協力研究員
H26.3.31	宮本 英明	受入終了	協力研究員
H26.3.31	東谷千比呂	退 職	技術職員
H26.3.31	岩崎 詩子	任期満了	技術補佐員
H26.3.31	上泉 真裕	任期満了	技術補佐員
H26.3.31	阪田紫帆里	任期満了	技術補佐員
H26.3.31	鈴木 政雄	任期満了	技術補佐員
H26.3.31	小林 孝英	任期満了	技術補佐員
H26.3.31	岡村 宜子	任期満了	学術支援職員
H26.4.1	大橋 正健	昇 任	教授
H26.4.1	齊藤 芳男	出向受入	特任教授
H26.4.1	都丸 隆行	着 任	客員准教授
H26.4.1	川田 和正	採 用	特任助教
H26.4.1	金田 邦雄	採用	特任研究員(研究所研究員)
H26.4.1	木戸 英治	採用	特任研究員(研究所研究員)
H26.4.1	久保真理子	採用	特任研究員(研究所研究員)
H26.4.1	百瀬莉恵子	採用	特任研究員(プロジェクト研究員)
H26.4.1	大嶋新一	受 入	協力研究員
H26.4.1	川上 悦子	受入	協力研究員
H26.4.1	齋藤 浩二	受入	協力研究員
H26.4.1	斎藤 智樹	受 入	協力研究員
H26.4.1	長岡 洋一	採用	技術補佐員
H26.4.1	上泉 真裕	採用	特任専門職員
H26.4.1	近藤 仁美	転 入	総務係長へ
H26.4.1	入交 亜樹	転 出	法学部教務係へ
H26.4.30	谷村菜穂子	退職	事務補佐員
H26.5.1	得能 久生	採用	特任助教
H26.5.1	野口 司	採用	学術支援専門職員

 $(H_{26,3,2} \sim H_{26,5,1})$

ICRR Report



2013年度

ICRR-Report-666-2013-15

"Mixed (Cold+Warm) Dark Matter in the Bino-Wino co-annihilation scenario"

Masahiro Ibe, Ayuki Kamada, Shigeki Matsumoto.

ICRR-Report-667-2013-16

"Decay rates of Gaussian-type I-balls and Bose-enhancement effects in 3+1 dimensions"

Masahiro Kawasaki, Masaki Yamada.

ICRR-Report-668-2013-17

"Baryon Asymmetry, Dark Matter, and Density Perturbation from PBH"

Tomohiro Fujita, Keisuke Harigaya, Masahiro Kawasaki, Ryo Matsuda.

ICRR-Report-669-2013-18

"Critical constraint on inflationary magnetogenesis" Tomohiro Fujita, Shuichiro Yokoyama.

ICRR-Report-670-2013-19

"Probing small-scale cosmological fluctuations with the 21 cm forest: effects of neutrino mass, running spectral index and warm dark matter"

Hayato Shimabukuro, Kiyotomo Ichiki, Susumu Inoue, and Shuichiro Yokoyama.

ICRR-Report-671-2013-20

"Dark Matter Production in Late Time Reheating" Keisuke Harigaya, Masahiro Kawasaki, Kyohei Mukaida, Masaki Yamada.

ICRR-Report-672-2013-21

"Baryogenesis from the Gauge-mediation type Q ball and the dark matter New type Q ball" Shinta Kasuya, Masahiro Kawasaki.

Shinta Kasuya, Masahiro Kawasaki.

ICRR-Report-673-2013-22

"Neutrino masses, leptogenesis, and sterile neutrino dark matter"

Takanao Tsuyuki.

ICRR-Report-674-2013-23

"Compensation for large tensor modes with iso-curvature perturbations in CMB anisotropies"

Masahiro Kawasaki, Shuichiro Yokoyama.

ICRR Report



ICRR-Report-675-2014-1

"Isocurvature perturbations and tensor mode in light of Planck and BICEP2"

Masahiro Kawasaki, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi, Shuichiro Yokoyama.

ICRR-Report-676-2014-2

"Curvaton in large field inflation"

Tomohiro Fujita, Masahiro Kawasaki, Shuichiro Yokoyama.

ICRR-Report-677-2014-3

"Affleck-Dine Baryogenesis and Dark Matter Production after High-scale Inflation"

Keisuke Harigaya, Ayuki Kamada, Masahiro Kawasaki, Kyohei Mukaida, Masaki Yamada.

ICRR Seminar

2013年度

2014.3.11

早戸良成(東京大学宇宙線研究所) "T2K 実験の最新結果"



宇宙線研究所(柏)

柏キャンパスに本拠地をかまえる宇宙 線研究所は、宇宙ニュートリノ研究部 門、高エネルギー宇宙線研究部門、宇 宙基礎物理学研究部門の三部門から構 成され、日本国内に複数の世界的研究 施設を持つのみならず、世界各地で多 岐にわたる観測・実験プロジェクトを 展開しています。

No. 89 東京大学宇宙線研究所

2014.6.30

〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 TEL (04) 7136-5148 編集 林田 美里