

2016 年度 第 46 回  
天文・天体物理若手夏の学校

講演予稿集  
宇宙素粒子分科会

# 宇宙素粒子分科会

宇宙線観測・理論研究の最先端

日時	7月26日 15:15 - 16:15(分科会別ポスター) 7月27日 9:00 - 10:00(分科会別ポスター), 16:00 - 17:00 7月28日 10:15 - 11:15(招待講演:高原 文郎氏), 13:30 - 14:30(招待講師:山崎 了氏)
招待講師	高原 文郎氏 (大阪大学)「宇宙線の起源」 山崎 了氏 (青山学院大学)「ガンマ線バースト」
座長	野上雅弘 (青山学院大学 M2)、小林瑛史 (青山学院大学 M2)、岩村由樹 (東京大学 M2)、加藤翔 (東京大学 M2)、谷川俊介 (京都大学 M2)
概要	<p>Hess によって宇宙線が発見されてから約 100 年にわたり宇宙線について、多くの研究がなされてきています。その起源として超新星残骸 (SNR) や活動銀河核 (AGN) などが候補に挙げられていますが、非常に高エネルギーの粒子を実現する物理過程は未だに明確な解が得られていません。また、ガンマ線バースト (GRB) のようにその正体が謎に包まれたままの現象も存在しています。さらに、宇宙線の研究はそれが伝搬してきた空間の様子やダークマターの正体となる新たな素粒子の探査においても重要な役割を果たします。「宇宙素粒子」とはニュートリノやガンマ線、ダークマター候補の粒子など、あらゆる観測粒子を扱う意味から名づけられています。理論面からはこれらの謎に関して日に日に新たなモデルが提唱されており、非常に活発な状況にあります。実験的には、近年高エネルギー宇宙線やガンマ線、ニュートリノ、そして未知のダークマター粒子を狙ったプロジェクトが次々と始動、または数年以内に観測開始を予定しています。また、天体现象を実験室内で再現し直接観測するという実験室宇宙物理学という新たな研究手法も確立されてきており、これから大きく謎の解明が進むと期待されています。過去も将来も宇宙を観る基盤となるであろう宇宙素粒子について、理論・観測の分け隔てなく活発な議論や交流が行われることを期待しております。</p> <p>注) 宇宙線としてのニュートリノは宇宙素粒子分科会で扱います。コンパクトオブジェクトからの高エネルギー粒子の放射・伝播・加速機構に関しては宇宙素粒子分科会で扱います。</p>

---

高原 文郎 氏 (大阪大学)

7月28日 10:15 - 11:15 B会場

## 「宇宙線の起源」

近年詳細な宇宙線観測が進み、陽電子異常、H,Heのスペクトル異常、TeV宇宙線の非等方性など従来の枠組みでは理解困難な発見が相次いでいる。本講演では宇宙線の起源をめぐるいくつかの理論的問題についてレビューする。

1. 超新星残骸衝撃波における宇宙線加速と逃走
2. 加速源における2次粒子生成と陽電子・反陽子問題
3. 宇宙線加速と輸送機構における自己散乱の役割
4. knee から ankle までの宇宙線の起源

1. I.S.Grenier, J.H.Black and A.W.Strong Ann.Rev.A.Ap. 53, 199 (2015)
2. A.R.Bell MNRAS 353, 550 (2004)

---

山崎 了 氏 (青山学院大学)

7月28日 13:30 - 14:30 B会場

## 「ガンマ線バースト」

ガンマ線バースト等の高エネルギー天体現象について解説する。ガンマ線バーストの研究の歴史を振り返ると得られる教訓があるのでそれらについても紹介したい。また、最新の観測や理論からガンマ線バーストの起源にどう迫るか、また、類似の天体現象との関連についても解説したい。

1. T. Piran, Phys. Rep. 314, 575 (1999)
2. P. Kumar and B. Zhang, Phys. Rep. 561, 1 (2015)

## 宇素 a1 相対論的衝撃波中での宇宙線加速シミュレーション

野上 雅弘 (青山学院大学大学院 M2)

衝撃波加速によって加速された電子から放射されるシンクロトロン光子の最高エネルギーは、加速時間  $T_{acc}$  とシンクロトロン放射による冷却時間  $T_{cool}$  の釣り合いから 160MeV 程度になると期待されている。しかし衝撃波による粒子加速を考える場合、加速領域と冷却領域が異なる可能性があるため、160MeV という値が本当に実現されるのか？ それより大きな、または小さなシンクロトロン光子の最高エネルギーになるのかわかっていない。相対論的衝撃波では衝撃波面のごく近傍で荷電粒子がジャイロ運動をすることにより加速を行う。シンクロトロン放射による冷却が効く最高エネルギー付近の電子の場合、輻射反作用が粒子の運動に大きく寄与する。

本講演では、相対論的衝撃波による粒子加速を加速機構としたときのシンクロトロン光子の最高エネルギーを正確に調べるために、シンクロトロン放射の反作用を考慮した電子の運動方程式を数値的に解いた結果を報告する。数値計算で得られた相対論的衝撃波中で加速する電子の最高エネルギーやシンクロトロン放射の最高エネルギー、加速時間が磁場の揺らぎの強度や衝撃波速度を変えた場合にどうなるのか発表する。

1. E.J.Summerlin and M.G.Baring ApJ 745:63 ,2012 January 20
2. M.Hussein and A.Shalchi ApJ 785:31 , 2014 April 10
3. P.Dirac, Proc. R. Soc. A 167 148 (1938)

## 宇素 a2 大型レーザーを用いた磁化プラズマ中を伝播する無衝突衝撃波の生成実験

富谷 聡志 (青山学院大学大学院 M1)

地球には、宇宙空間から宇宙線とよばれる高エネルギー粒子が絶えず飛来している。その加速源として最も有力視されているのが、超新星残骸の無衝突衝撃波である。超新星残骸の無衝突衝撃波における粒子の加速機構として、粒子が衝撃波面を行き来することでエネルギーを得るフェルミ加速というものが考えられている。しかし、最初に加速過程に注入される粒子がどのような機構で作られ出されているのかという未解明問題がある。

無衝突衝撃波の粒子加速については、宇宙物理学の従来の研究手法として観測やシミュレーションによる検証が行われているが、決定的な観測事実はこれまでなく、また理論計算も実際とは異なる条件下で計算が行われるなど、完全な解明には至っていない。そこで、本研究では天体観測研究や理論研究に次ぐ第三の研究手法として、大型レーザーを用いた実験室宇宙物理学という新たな研究分野に着目し、地上実験で無衝突衝撃波を生成し、その測定を通じて粒子加速の理解に迫ることを目指す。

昨年度我々の実験グループは大阪大学の激光 12 号レーザーを用いて実験を行った。当面の目標は、地上の実験室で低マッハ数の磁化プラズマ中の無衝突衝撃波を生成することである。本実験の準備として、1 次元流体シミュレーションコードを用いてターゲット起源のイジェクタの速度を算出した。これより、ターゲットの物質の種類をアルミニウム、雰囲気ガスを水素ガスとする実験セットアップを決定した。

昨年度の実験は、磁場発生装置 TopB の動作不良により、すべてのショットを外部磁場なしで行った。計測器として自発光計測 (プラズマ

自発光強度の時空間発展)、Shadow 計測、協同トムソン散乱計測を用いて、その実験結果からアルミプラズマの速度を算出した。また、自発光計測と Shadow 計測の結果から、水素ガスをチャンバー内に封入した際

に大きな密度変化があることを確認した。本講演では、昨年度の実験結果の報告に加え、今年度の実験の展望について議論する。

## 宇素 a3 超高エネルギーガンマ線と CTA 計画

黒田 隼人 (東京大学宇宙線研究所 M1)

チェレンコフ望遠鏡アレイ (Cherenkov Telescope Array, 以下 CTA) 計画とは TeV 領域の超高エネルギーガンマ線を観測するための地上望遠鏡を多数配置するプロジェクトであり、大中小 3 種類の口径を持つ望遠鏡の設置が予定されている。地上設置型のガンマ線望遠鏡はフェルミ衛星や AGILE といったガンマ線宇宙望遠鏡による直接観測とは異なり、地球へと降り注いできたガンマ線と地球大気との相互作用によって発生する空気シャワーのチェレンコフ光を用いた間接観測を行う。宇宙の観測を行う際、その波長域により観測対象は様々であるが、TeV ガンマ線の観測では超新星残骸や活動銀河核、ガンマ線バースト等が観測対象となる。いずれの対象も発生機構や宇宙線の加速機構等の謎が残されており、CTA ではこれらの謎に答えるため、MAGIC や H.E.S.S といった既存の地上ガンマ線望遠鏡と比べ望遠鏡数の増加による一桁以上の感度上昇及び 3 種類の口径を持つ望遠鏡を配置する事による観測可能エネルギー領域の拡大が行われる。これらの性能向上により TeV 領域のガンマ線源が 1000 以上発見されることが予見されており、次世代の高エネルギー天文学を牽引することが期待されている。本発表ではこうした CTA 計画の概要を紹介する。

## 宇素 a4 超高エネルギーガンマ線による活動銀河核の解明及びその応用

櫻井 駿介 (東京大学宇宙線研究所 東京大学理学系研究科物理学専攻 M1)

長年に渡る電磁波観測は宇宙の多様な性質を明らかにした。ガンマ線は電磁波の中でも最も高いエネルギーを持ち、宇宙の非熱的な現象と深く関わりを持つ。超高エネルギーガンマ線天文学は 100,GeV から 10,TeV に渡るエネルギー領域のガンマ線天体を標的とし、ここ 30 年で約 180 の天体の発見に至った。これらの多くは未だにその詳細が判明しておらず、今もなお継続して研究が進められている。本講演では、超高エネルギーガンマ線観測による検証が行われている現象の中で、活動銀河核 (AGN) に注目しレビューを行う。AGN はその光度が母銀河全体に匹敵、あるいは上回るほどの明るさをもつ銀河中心核である。その変動性や相対論的ジェットの有無、観測方法でいくつかの種類に分類されており、この内ジェットを真正面から観測している天体をブレーザーと呼ぶ。ブレーザーでは数分から数日という短い時間変動のガンマ線放射 (フレア現象) が確認されている。相対論的ジェットの特性上、放射されるガンマ線は強く指向性を持ちジェットの情報を色濃く反映している。そのためガンマ線によるブレーザーの観測によって、ジェットの駆動機構、フレア現象の解明 (ガンマ線の放射機構、放射の時間変動) の解明が可能となる。更に、AGN が銀河系外にある事を利用すると、超高エネルギーガンマ線が可視や赤外線領域の光と反応し、減光されることか

ら、光、赤外背景光の密度を見積もることが可能になる。これらの電磁波は星や銀河の形成時に放射されるため、星や銀河の宇宙論的進化を検証することに繋がる。以上のテーマについて最新の研究成果を紹介した後、現在建設中である CTA の超高エネルギーガンマ線天文学に対する寄与を述べる。

### 宇素 c1 密度行列を用いた超新星ニュートリノの振動計算

藤井 貴之 (東京理科大学 鈴木研究室 M2)

超新星爆発で生成されたニュートリノは、コアから表面に到達するまでにさまざまなものと相互作用する。ひとつは超新星を形成している物質であり、これは線形効果であるため解析的に解くことができる。もうひとつはコア近傍においてニュートリノが大量に存在することに起因する、ニュートリノ自己相互作用である。こちらについては、非線形効果であり、観測結果にどのような影響を与えるのか分かっていない。

そこで今回、数値シミュレーションで得られた超新星爆発モデルに対して、密度行列を用いた新しい計算コードを開発することでニュートリノ自己相互作用について過去の研究結果と比較して発表する。また、それに伴い CP 対称性の破れを考慮した際、ニュートリノの観測結果がどう変わるのかについてまとめ、発表する。

1. Y. Zhang and A. Burrows, 2013

### 宇素 c2 現実的星間媒質中を伝播する超新星残骸衝撃波での宇宙線加速効率の測定についての理論研究

霜田 治朗 (青山学院大学大学院 D2)

宇宙線加速の現場と考えられている超新星残骸 (SNR) では、*Halpa* 放射フィラメントの固有運動と 1 次元の衝撃波接続条件が予言する下流の温度と実際の下流の温度を比較して宇宙線加速効率が調べられており、SNR での高効率宇宙線加速が示唆されている。一方で、最近の多次元磁気流体シミュレーションによって、SNR の衝撃波は星間媒質がもつ密度揺らぎとの相互作用によって波打ち、ほとんどの領域で斜め衝撃波となることが示されている。このとき、下流の温度は 1 次元の衝撃波接続条件の予言よりも低くなるので、宇宙線加速効率は大きく見積もられる可能性がある。

我々は 3 次元磁気流体シミュレーションを用いて、SNR での *Halpa* 輝線放射の固有運動と衝撃波接続条件から見積もられる宇宙線加速効率が大きく見積もられることを明らかにした (Shimoda et al. 2015)。さらに、宇宙線加速効率を準解析的に評価したところ、加速効率は上流の密度揺らぎの振幅程度の不定性を持ち、数値計算の結果と大まかに一致した。しかしながら先行研究では衝撃波上流の密度揺らぎの振幅は限られた場合でしか計算していない。実際の SNR の周囲の環境は多様であり、例えば SN1006 は銀河面から離れているので、他の SNR よりも周辺媒質の揺らぎの振幅が典型的な星間媒質よりも小さいことが予想される。本研究では、密度揺らぎの振幅が典型的な星間媒質のものより小さい場合のシミュレーション結果と、より広いパラメータ領域をしらべるために行っている線形解析の結果について報告する。

1. Shimoda et al. ApJ 803, 98 (2015)

2. Helder et al. sci 325, 719 (2009)
3. Helder et al. MNRAS, 435, 910

### 宇素 c3 流星の電波観測と日周変動の解析

小林 瑛史 (青山学院大学大学院 M2)

宇宙初期の星や銀河が放射した光が、宇宙膨張とともに赤方偏移して、宇宙赤外線背景放射として地球で観測されているが、太陽系近傍に存在するダストは太陽からの電磁波により温められ、一部は赤外線を放射する。この黄道光の影響により、宇宙赤外線放射の正確な見積りは未解決問題となっている (赤外線超過問題)。私たちは流星を電波を用いて観測した解析したデータから流星のカウント数の周期変動を調べることで、太陽系近傍に存在するダストの分布を解明をすることができると考えている。流星の起源は宇宙空間に存在する約 0.1mm~数 cm の小さな塵である。この小天体が大気中の物質に衝突すると高温プラズマとなって発光現象を起こし、これを流星として観測することができる。今回、私たちは牡羊座流星群に焦点を当てて、プラズマによって反射 (トムソン散乱) された電波エコーを受信し、データ解析を行うことでピークが昼間と明け方に観測されることを確認した。昼間のピークは牡羊座が極大であることを示し、明け方は散在流星の影響と考えられる。今後の展望としては、黄道付近に存在するダスト分布を精査する事で宇宙赤外線背景放射の正確な見積もり、超高エネルギー宇宙線 (UHECR) の観測に応用することである。

### 宇素 c4 大型レーザーを用いた磁化プラズマ中の無衝突衝撃波の生成実験

正治 圭崇 (青山学院大学大学院 M2)

銀河系内宇宙線 ( $\sim 10^{15.5}$  eV) の加速源の最有力候補として、超新星残骸における無衝突衝撃波が挙げられる。その加速メカニズムとして、粒子が電磁波で散乱されて衝撃破面を往復することでエネルギーを得る、フェルミ加速などの理論的モデルが考えられている。しかし、フェルミ加速には注入問題や粒子を散乱させるための電磁波の励起方法等の問題が指摘されている。注入問題の解決方法としては、波乗り加速といった加速機構がシミュレーションによって示唆されている。宇宙線の加速メカニズムの研究として、理論的研究および観測的研究が主な方法として行われてきたが、我々は第三の方法として、大型レーザーを用いた地上実験によって宇宙線加速のメカニズムを解明する。我々の第一目標は磁場中の無衝突衝撃波を生成することである。

実験の準備として、イオンのジャイロ半径・Alfven マッハ数・クーロン散乱の平均自由行程より無衝突衝撃波生成の条件を考えた。その条件を満たすためのターゲットを決めるために輻射流体シミュレーションである ILESTA1D を用いて計算を行ったところ、Al の 10~15  $\mu\text{m}$  の厚さが最適であるとわかった。そして考えたパラメータ条件を用いて、実験を行った。昨年度及び一昨年度の実験では、無衝突衝撃波の生成には至らなかったが、結果より求めた ejecta の速度が生成条件を満たすことを確認しトムソン散乱計測によってプラズマの温度を計測することに成功した。また、生成条件を満たすための実験のセットアップを変更した。

1. Hoshino & Shimada, 2002

.....

## 宇素 c5 Gravitational Leptogenesis

安藤 健太 (東京大学宇宙線研究所 M1)

宇宙における物質と反物質の非対称性の起源は、宇宙論と素粒子論の両者で議論される興味深い問題である。素粒子スタンダードモデル (SM) でも、カイラルアノマリーによってバリオン数 (B) やレプトン数 (L) が生成され得るが、B-L は保存される。これにより、スファレロン機構という熱的な機構で B や L は洗い流されてしまう。右巻きニュートリノを導入する leptogenesis は、重い右巻きニュートリノの崩壊で B-L を破って L が作られ、これがスファレロンによって B にも転換されるという理論である。一方、gravitational leptogenesis では、重力アノマリーによって、L が作られる。

レプトン数、あるいはフェルミオン数への重力アノマリーは次のように表される。

$$\partial_{\mu\nu} j_L^{m\nu} = \text{frac} N_{l-r} 16\pi^2 R \tilde{R} \quad (1)$$

where

$$j_L^\mu = \bar{l}_i \gamma^{m\nu} l_i + \bar{\nu}_i \gamma^\mu \nu_i, \quad R \tilde{R} = \frac{1}{2} \epsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} R_{\alpha\beta\rho\sigma} R_{\gamma\delta\rho\sigma} \quad (2)$$

この機構でレプトン数が生まれるには、 $N_{l-r}$  と  $R \tilde{R}$  が共にノンゼロの寄与をすることが必要である。ここで、 $N_{l-r}$  は左巻きと右巻きのフェルミオンの自由度の差であり、SM では左巻きのみニュートリノが3世代あるので、 $N_{l-r} = 3$  であるが、右巻きニュートリノの質量スケール ( $10^{14}$ , GeV) より高温では  $N_{l-r} = 0$  である。また、 $R \tilde{R}$  は Pontryagin density と呼ばれ、一様等方の Robertson-Walker 計量では0だが、そこからの揺らぎを二次まで入れると、カイラルな (左巻きと右巻きが非対称な) 重力波からはノンゼロの寄与がある。これは、Sakharov の条件のうち、CP の破れを反映している。そのような CP の破れは、修正重力の相互作用

$$\Delta \mathcal{L} = P(\phi) R \tilde{R} \quad (3)$$

から得られる。ここで、 $\phi$  は CP odd なインフラトン場、 $P$  は  $\phi$  の奇関数である。この相互作用の痕跡を CMB に観測できる可能性もある。

1. S. H. -S. Alexander, M. E. Peskin and M. M. Sheikh-Jabbari  
Phys. Rev. Lett. 96, 081301 (2006)
- .....