

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 7日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540278

研究課題名（和文）宇宙大規模構造形成に伴う超高エネルギー物理過程の研究

研究課題名（英文）Study of Ultra-High-Energy Physical Processes Associated with Large-Scale Structure Formation in the Universe

## 研究代表者

井上 進（INOUE SUSUMU）

東京大学・宇宙線研究所・協力研究員

研究者番号：80413954

## 研究成果の概要（和文）：

銀河・銀河団などの宇宙の大規模構造は、重力の影響で衝突を繰り返しながら形成されてきたと考えられているが、その際生じる衝撃波によって高エネルギー粒子の加速とガンマ線放射なども自然に起きると予想され、このような現象が、謎の超高エネルギー宇宙線や未同定ガンマ線源の起源となっている可能性もある。我々はこれらの物理過程の理論的研究を進めるとともに、現在のX線・ガンマ線観測を通じてその検証を試みたところ、少なくとも一部の予想を裏付ける結果が得られた。このような、宇宙の最大スケールにおける加速現象は、将来の高精度観測で一層理解が進むと期待される。

## 研究成果の概要（英文）：

Large-scale structures in the Universe such as galaxies and clusters of galaxies are thought to have formed through successive merging events driven by gravity, which are likely accompanied by formation of shock waves that can naturally accelerate particles to high energies and generate gamma-rays. Such phenomena may possibly be the origin of the mysterious ultra-high-energy cosmic rays or unidentified gamma-ray source. We have undertaken theoretical investigations of such physical processes, and also attempted to test them with current X-ray and gamma-ray observations, obtaining results that support at least some of the relevant predictions. Future observations with higher precision should provide a deeper understanding of particle acceleration phenomena on the largest scales in the Universe.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・宇宙線（理論）

キーワード：宇宙線、宇宙大規模構造、銀河団、ガンマ線、X線

1. 研究開始当初の背景  
現在の宇宙論で標準的な階層的構造形成の

考えでは、銀河・銀河団などの宇宙の大規模構造は、ダークマターが及ぼす重力を通じて

互いに合体と降着を繰り返しながら、小さい構造からより大きな構造へと階層的に形成されてきたと思われる。その際、構造に付随したガスには各階層で衝撃波が生じ、そこではガスが加熱されるとともに、高エネルギー粒子の加速とそれに起因した非熱的放射も自然に起きるはずである。このような宇宙大規模構造形成に伴う高エネルギー物理過程の研究はまだ初期の段階にあるが、様々な観点から新しい可能性を秘めている。第一には、未解明の高エネルギー宇宙現象に対する新たな理論的解釈で、例えば、最高エネルギー宇宙線、宇宙ガンマ線背景放射、銀河系内未同定ガンマ線源など謎の現象に対し、それぞれ銀河団降着、銀河間フィラメント構造形成、銀河ガス降着などに基づく新解釈が可能である。第二には、将来の高エネルギー観測による、宇宙大規模構造そのものの形成・進化に対する新情報の導出であり、例えば宇宙ガンマ線背景放射の詳細な観測に基づく銀河間物質の加熱過程に対する制限、系内未同定ガンマ線源の多波長観測に基づく銀河系へのガス降着過程及び銀河スケール以下でのダークマターの性質に対する制限などが挙げられる。これらの対象に関する観測的情報はまだ多くないが、昨今の高エネルギー観測技術の飛躍的向上により、近い将来大きな進歩が期待できる。

## 2. 研究の目的

銀河・銀河団などの宇宙の大規模構造の形成に伴って起きる高エネルギー粒子加速や非熱的放射などの物理過程について、以下の方針を基盤に多角的な理論研究を推進する。

(1) 最高エネルギー宇宙線、宇宙ガンマ線背景放射、銀河系内未同定ガンマ線源などの未解明の高エネルギー宇宙現象について、宇宙構造形成過程に基づく理論を構築し、観測と比較しながら発展させてゆく。

(2) 銀河・銀河団・銀河間フィラメントなどによる非熱的放射の予想を立て、それら大規模構造の形成・進化について、今後の高エネルギー観測から新たな知見を習得する方法を探究する。

(3) 進展著しいX線・ガンマ線・宇宙線・ニュートリノなどの最新の高エネルギー観測に常に配慮し、状況に応じて自ら新観測も提案する。また、将来観測計画で申請者が参加しているものについては、サイエンスケースの検討やデザインスタディへの進言を行う。

## 3. 研究の方法

まず、すでに提唱している最高エネルギー宇宙線の銀河団降着理論、宇宙ガンマ線背景放射の銀河間構造形成理論、系内未同定ガンマ線源の銀河ガス降着理論を各々発展させ、今後のX線・ガンマ線・宇宙線観測との比較に

備える。さらに、新たな課題として、構造形成衝撃波の準解析的理論を利用し、銀河団の硬X線・ガンマ線放射の詳細な理論予想に取り組む。そしてこれに基づき、最新のX線・GeVガンマ線観測も考慮しながら、MAGIC、HESS によ  $\text{TeV}$  ガンマ線での新観測を提案するとともに、CTA による将来観測の戦略も検討する。また、銀河団ニュートリノ放射理論の発展と IceCube による銀河団探査も進める。

## 4. 研究成果

当初想定していなかった任務として、CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画のガンマ線バースト (GRB) のサイエンスワーキンググループのリーダーを務めることとなったため、雑誌論文や学会発表も GRB に関するものが多くの割合を占めることとなった。本研究課題の主要な研究対象天体である銀河や銀河団は、GRB と比較すると相違点も多いが、一方で銀河系外天体であることと、超高エネルギー物理過程が起きる環境であることは重要な共通点であり、GRB を中心とした研究であっても、本課題にとって非常に有意義な成果が得られた。例えば、GRB における超高エネルギー宇宙線加速とそれに伴うハドロン放射過程の研究を進め、場合によってはX線や可視光でその兆候が現われることを示したが、類似の過程が銀河団での超高エネルギー宇宙線加速においても起きる可能性がある。また、GRB 起源高エネルギーガンマ線が銀河間空間を伝播中に吸収される割合の定量的な評価、およびその際生成される二次ガンマ線の観測可能性なども調べたが、同様の過程で銀河団周囲に生じるガンマ線ハローも大変興味深く、それを利用して銀河間空間の磁場を探れる可能性なども検討した。さらには、CTA 計画のガンマ線検出感度や様々な性能を熟知することができたため、将来のCTA による銀河団観測の具体的検討に向けた足がかりにもなった。

一方で、本研究課題の中核をなす、大規模構造における高エネルギー現象については、目標としていたいくつかの具体的課題に対して、以下のとおり総括する。

(1) 銀河系降着に伴う非熱的放射：観測されている未同定  $\text{TeV}$  ガンマ線源との関係を議論するに当たって一番の問題点であった、角度サイズの不一致について検討を進めた。high velocity cloud (HVC) に関する最新の電波観測結果をよく調べたところ、角度サイズが1度以下の compact HVC と呼ばれるものに注目すれば、未同定  $\text{TeV}$  ガンマ線源のおおよそ全ての性質が説明可能であり、今後の多波長観測によって銀河円盤との相互作用位置の距離を決定することで、これを検証できることも明らかにした。一方で、より大きなサイズ

のHVCに起因する非熱的放射も起きているはずであるが、このような現象を探するためには、TeVガンマ線より全天サーベイ観測があるGeVガンマ線の方が有利なため、Fermi衛星による公開データを調べながら対応天体を探索した。

(2)銀河団ガンマ線放射の統計的性質および銀河団ニュートリノ放射：Fermi衛星による新たな観測結果として、個々の銀河団からのGeVガンマ線は検出されなかった一方、ガンマ線背景放射については、従来の観測値が修正されるとともに、既知の天体では説明できない謎の成分が残ることが発表された。これを受け、以前の理論予想を修正しながら、銀河団によるガンマ線およびニュートリノの背景放射への寄与を慎重な再検討を試みた。

さらに、銀河団における高エネルギー物理過程について、すざく衛星による二つのX線観測結果を軸とし、重要な新成果をまとめることができた。まず、Coma銀河団外縁部の広域観測データを元に、電波レリク放射の領域で弱い衝撃波を発見し、そこにおける高エネルギー電子の起源は、既存の非熱的電子成分が衝撃波で再加速されたものである可能性が高いことを明らかにした (Akamatsu, Inoue et al., 論文番号11)。また、Fornax銀河団外縁部に存在する電波銀河 Fornax Aについて、詳細な広域観測データから、ジェットのプロブ領域内に多くの熱的プラズマが混入していることを発見し、電波銀河が銀河団ガスを加熱する際の具体的な物理過程について新たな知見が得られた (Seta, Tashiro & Inoue, 論文番号13)。

近い将来への展望としては、MAGIC Collaborationの提携メンバーとして、近傍銀河団のガンマ線観測計画提案に参加し、今後の観測へ向けての見通しを議論した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計17件) (全て査読有)

1. Seta, H., Tashiro, M., Inoue, S.  
“Suzaku Detection of Thermal X-ray Emission Associated with the Western Radio Lobe of Fornax A”  
Pub. Astron. Soc. J. (2013) in press
2. Takahashi, Y., Kataoka, J., Niinuma, K., Honma, M., Inoue, Y., Totani, T., Nakamori, T., Maeda, K., Inoue, S.  
“X-ray and Radio Follow-up Observations of High-Redshift Blazar Candidates in the Fermi-LAT Unassociated Source Population”  
Astrophys. J. (2013) in press  
<http://arxiv.org/abs/1306.3552>

3. Akamatsu, H., Inoue, S., Sato, T., Matsushita, K., Ishisaki, Y., Sarazin, C. L.  
“Suzaku X-Ray Observations of the Accreting NGC 4839 Group of Galaxies and the Radio Relic in the Coma Cluster”  
Pub. Astron. Soc. J. (2013) in press  
<http://arxiv.org/abs/1302.2907>
4. Takahashi, K., Mori, M., Ichiki, K., Inoue, S. and Takami, H.  
“Lower Bounds on Magnetic Fields in Intergalactic Voids from Long-Term GeV-TeV Light Curves of the Blazar Mrk 421”  
Astrophys. J. Lett. (2013) in press  
<http://arxiv.org/abs/1303.3069>
5. Inoue, Y., Inoue, S., Kobayashi, M. A. R., Makiya, R., Niino, Y., Totani, T.  
Extragalactic Background Light from “Hierarchical Galaxy Formation: Gamma-Ray Attenuation up to the Epoch of Cosmic Reionization and the First Stars”  
Astrophys. J. 768 (2013) 197 (17pp)  
[10.1088/0004-637X/768/2/197](https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/2/197)
6. Inoue, S., Granot, J., O'Brien, P. O. et al. (他23名)  
“Gamma-Ray Burst Science in the Era of the Cherenkov Telescope Array”  
Astropart. Phys. 43 (2013) 252-275  
[10.1016/j.astropartphys.2013.01.004](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.01.004)
7. Mazin, D., Raue, M., Behera, B., Inoue, S., Inoue, Y., Nakamori, T., Totani, T.  
“Potential of EBL and Cosmology Studies by the Cherenkov Telescope Array”  
Astropart. Phys. 43 (2013) 241-251  
[10.1016/j.astropartphys.2012.09.002](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.09.002)
8. Kakuwa, J., Murase, K., Toma, K., Inoue, S., Yamazaki, R., Ioka, K.  
“Prospects for Detecting Gamma-Ray Bursts at Very High Energies with the Cherenkov Telescope Array”  
M. N. R. A. S. 425 (2012) 514-526  
[10.1111/j.1365-2966.2012.21490.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21490.x)
9. Takami, H., Inoue, S. & Yamamoto, T.  
“Propagation of Ultra-High-Energy Cosmic Ray Nuclei in Cosmic Magnetic Fields and Implications for Anisotropy Measurements”  
Astropart. Phys. 35 (2012) 767-780  
[10.1016/j.astropartphys.2012.03.008](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.03.008)
10. Takahashi, K., Mori, M., Ichiki, K. & Inoue, S.  
“Lower Bounds on Intergalactic Magnetic Fields from Simultaneously Observed GeV-TeV Light Curves of the Blazar Mrk 501”  
Astrophys. J. 744 (2012) L7 (4pp)  
[10.1088/2041-8205/744/1/L7](https://doi.org/10.1088/2041-8205/744/1/L7)
11. Inoue, S., Takahashi, K., Mori, M., Ichiki, K.  
“Probing Intergalactic Magnetic Fields with Gamma Ray from Blazars”

Proceedings of Science AGN2011 (2011) 032 (10pp)

<http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=141>

12. Inoue, Y., Inoue, S., Kobayashi, M. K., Totani, T., Kataoka, J. & Sato, R.

“Searching for the Most Distant Gamma-Ray Blazars with the Fermi Gamma-Ray Space Telescope”

M. N. R. A. S. 411 (2011) 464-468

[10.1111/j.1365-2966.2010.17736.x](http://10.1111/j.1365-2966.2010.17736.x)

13. Takahashi, K., Inoue, S., Ichiki, K., Nakamura, T.

“Probing Early Cosmic Magnetic Fields through Pair Echoes from High-Redshift Gamma-Ray Bursts”

M. N. R. A. S. 410 (2011) 2741-2748

[10.1111/j.1365-2966.2010.17639.x](http://10.1111/j.1365-2966.2010.17639.x)

[学会発表] (計 56 件)

1. 井上進

「高赤方偏移 21cm 吸収線系から探る小スケール宇宙初期密度揺らぎ」

日本物理学会 (広島・広島大、2013/3/27)

2. Inoue, S.

“GRBs and Related Topics with CTA”

Extragalactic Gamma-Ray Astronomy with the Cherenkov Telescope Array (Muonio, Finland; Mar. 19, 2013)

3. Inoue, S.

“Probing the High- $z$  Universe with the Broadband Emission of GRBs” INVITED

GRBs and their Hosts as Tracers of the High Redshift Universe (Sesto, Italy; Jan. 22, 2013)

4. Inoue, S.

“The EBL at High Redshifts” INVITED

The CTA EBL and Cosmology Physics Case (München, Germany; Nov. 29, 2012)

5. Inoue, S.

“Gamma-Ray Bursts: Multimessenger Prospects” INVITED

CTA and the Origin of Cosmic Rays (Buenos Aires, Argentina; Nov. 11, 2012)

6. Inoue, S.

“MAGIC GRB Key Program”

MAGIC Collaboration Meeting (La Palma, Spain; Nov. 16, 2012)

7. Inoue, S.

“Particle Acceleration and Gamma Ray Emission from Blazars” INVITED

Exploring the Non-thermal Universe with Gamma Rays (Barcelona, Spain; Nov. 8, 2012)

8. Inoue, S.

“Probing the Small-Scale Power Spectrum of Primordial Fluctuations with 21cm Absorption in High- $z$  GRBs”

15 Years of Gamma-Ray Burst Afterglows (Marbella, Spain; Oct. 11, 2012)

9. 井上進

「活動銀河における粒子加速・ジェット形成について」

高エネルギー宇宙物理研究会 (八王子・首都大、2012/10/4)

10. 井上進

「 $z \sim 1-5$  の背景放射光について」

高エネルギーガンマ線でみる極限宇宙 2012 (柏・宇宙線研、2012/9/29)

11. 井上進

「Cherenkov Telescope Array による高時間分解能ガンマ線観測で迫るコンパクト変動天体・突発天体」

日本天文学会 (大分・大分大、2012/9/20)

12. 井上進

「CTA で明らかにする活動銀河核の物理」

日本物理学会 (京都・京都産業大、2012/9/13)

13. 井上進

「宇宙最初期の超高エネルギー宇宙線によるニュートリノとガンマ線放射」

日本物理学会 (京都・京都産業大、2012/9/11)

14. Inoue, S.

“High-Energy Gamma Rays from Galactic Accretion Events and Implications for Unidentified GeV-TeV Sources”

High-Energy Gamma-Ray Astronomy (Heidelberg, Germany; July 9, 2012)

15. Inoue, S.

“Probing Cosmic Radiation Fields and Magnetic Fields at Very High  $z$  with GRBs”

Gamma Ray Bursts in the Era of Rapid Follow-up (Liverpool, UK; June 18, 2012)

16. Inoue, S.

“Hadrons in Blazars: Acceleration, Emission and Variability”

CTA AGN Working Group Meeting (Paris, France; May 22, 2012)

17. Inoue, S.

“Gamma-ray Absorption in High-Redshift Objects and Cosmic Reionization” INVITED

Near Infrared Background and the Epoch of Reionization (Austin, USA; May 15, 2012)

18. Inoue, S.

“Probing Cosmic Radiation Fields and Magnetic Fields in the Reionization Epoch with Hard X-rays and MeV-GeV Gamma Rays from High- $z$  GRBs”

Gamma-Ray Bursts 2012 (München, Germany; May 9, 2012)

19. 井上進

「ガンマ線バーストにおける超高エネルギー原子核加速に伴う GeV-TeV ガンマ線放射」

日本物理学会 (兵庫・関西学院大、2012/3/26)

20. 井上進

「ブレーザーにおける超高エネルギー陽子起源 X

線・ガンマ線放射機構の再考」

(京都・龍谷大、2012/3/19)

21. 井上進

「ガンマ線で探る背景放射光と銀河間磁場」

高エネルギー宇宙物理研究会 (大阪・大阪大、2011/12/17)

22. Inoue, S.

“GRBs/Transients with Ground-Based Detectors” INVITED

Multi-GeV Astrophysics with Ground-Based Detectors (Dublin, Ireland; Dec. 13, 2011)

23. Inoue, S.

“Extragalactic Science with CTA” INVITED

CTA Consortium Meeting (Madrid, Spain; Nov. 28, 2011)

24. Inoue, S.

“High-Energy Gamma Rays from Galactic Accretion Events and Implications for Unidentified GeV-TeV Sources”

HEAP 2011 - Gamma-Ray Universe: From Fermi to CTA (Tsukuba, Japan; Nov. 14, 2011)

25. Inoue, S.

“Prospects for GRB Science with CTA” INVITED

CTA LST Meeting (München, Germany; Oct. 10, 2011)

26. 井上進

「CTA と多波長観測で明らかにするガンマ線バーストおよびその他トランジエント天体」

マルチメッセンジャー宇宙物理学と CTA (柏・宇宙線研、2011/9/29)

27. 井上進

「CTA (Cherenkov Telescope Array) による GeV-TeV ガンマ線観測で明らかにするガンマ線バースト」

日本天文学会 (鹿児島・鹿児島大、2011/9/22)

28. 井上進

「銀河系ガス降着に伴う宇宙線加速と高エネルギーガンマ線放射：系内 HI ガス構造と未同定 GeV-TeV ガンマ線源との関係」

日本天文学会 (鹿児島・鹿児島大、2011/9/19)

29. Inoue, S.

“Physics with the Northern Array: GRBs and EBL” INVITED

CTA Consortium Meeting (Toulouse, France; May 19, 2011)

30. Inoue, S.

“Probing Intergalactic Magnetic Fields through Blazar Gamma Rays” INVITED

AGN Physics in the CTA Era (Toulouse, France; May 7, 2012)

31. Inoue, S.

“Astrophysical Sources of UHECRs and Gamma-ray Diagnostics” INVITED

Multi-Messenger Astronomy of Cosmic Rays (Beijing, China; Apr. 4, 2011)

32. 井上進

「ブレーザー多波長放射における超高エネルギー宇宙線加速の兆候」

日本天文学会 (つくば・筑波大、2011/3/17)

33. 井上進

「ガンマ線観測でハドロン加速がどこまで押さえられたか？」招待講演

第24回 宇宙ニュートリノ研究会 (柏・宇宙線研、2011/3/9)

34. 井上進

「CTA で目指すガンマ線バーストのサイエンス：(超) 遠方宇宙」

ガンマ線天文学 - 日本の戦略 - (柏・宇宙線研、2010/11/17)

35. Inoue, S.

“GRBs with CTA: Detection Rates and Light Curves”

CTA Consortium Meeting (Oxford, United Kingdom; Nov. 9, 2010)

36. 井上進

「最高エネルギー宇宙線の起源とガンマ線による診断」招待講演

高エネルギー宇宙物理学研究会 (つくば・KEK、2010/10/13)

37. 井上進

「ガンマ線バースト X線残光の高分散分光による赤方偏移および元素組成測定の見込み」

日本天文学会 (金沢・金沢大、2010/9/22)

38. 井上進

「CTA の物理 1 : ガンマ線バーストと遠方宇宙背景放射」

日本物理学会 (北九州・九州工大、2010/9/14)

39. Inoue, S.

“Probing the High-Redshift Universe with the High-Energy Gamma-Ray and X-Ray Emission from GRBs”

38<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly (Bremen, Germany; July 19, 2010)

40. Inoue, S.

“GRB Science with CTA” INVITED

CTA-LST Meeting (Annecy, France; July 8, 2010)

41. Inoue, S.

“GRB Science with CTA”

CTA Consortium Meeting (Zeuthen, Germany; May 11, 2011)

42. Inoue, S.

“Deciphering the Ancient Universe with High-Energy Gamma-Rays from GRBs”

Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (Kyoto, Japan; Apr. 20, 2010)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上進 (INOUE SUSUMU)

東京大学・宇宙線研究所・協力研究員

研究者番号：80413954

(2)研究分担者  
( )

研究者番号：

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：