

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24年 4月20日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540277

研究課題名（和文） 高密度天体における量子輸送現象の研究

研究課題名（英文） Studies on the Quantum Transport Phenomena in and around Dense Astrophysical Objects

研究代表者

伊藤 直紀 (Itoh Naoki)

上智大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20103939

研究成果の概要（和文）：逆コンプトン散乱（光子・電子の弾性散乱）は、最も基本的な素粒子反応であり、かつ宇宙物理学における様々な量子輸送現象の重要な反応過程の一つである。それらは、（1）宇宙背景放射光子の銀河団中電子との逆コンプトン散乱によるスペクトルの歪み（スニャーエフ・ゼルドビッチ効果）や、（2）超新星残骸からの高エネルギーのガンマ線放射機構などがあげられる。本研究では、宇宙背景放射光子・電子の量子輸送方程式を解析的・数値的に解くことにより、これら2つのテーマについての理論的研究を行った。

研究成果の概要（英文）：The inverse Compton scattering (the photon-electron elastic scattering) is one of the most fundamental reactions which have a variety of applications to the quantum transport phenomena in astrophysics and cosmology. They are, for example, (1) the inverse Compton scattering of cosmic microwave background photons from electrons in galaxy clusters which makes the distortion of the spectrum (the Sunyaev-Zeldovich effect), and (2) the radiation mechanism of high-energy gamma-rays from supernova remnants. In the present research project, we have made theoretical investigations on these two subjects by solving the quantum transport equation of the cosmic microwave background photons and electrons both analytically and numerically.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙物理（理論） 高エネルギー宇宙物理学

1. 研究開始当初の背景

研究代表者のグループは、これまで長年に渡り、高密度星内部における量子輸送現象（電気伝導、熱伝導、粘性輸送など）に関する理論的研究を行ってきた。その一方では、量子輸送現象の一つとして、銀河団における放射過程に関する理論的研究も精力的に行ってきた。それらは、銀河団電子による熱制

動放射過程に関する研究と銀河団における Sunyaev-Zeldovich (SZ) 効果に関する研究である。本研究においては、これまでの研究の過程で獲得した計算手法（解析的計算手法や数値計算プログラムなど）や研究成果を生かして、高密度あるいは高エネルギー物理現象への拡張を目指した理論的研究を試みることにした。

2. 研究の目的

(1) 研究代表者のグループがこれまでに行ってきた銀河団における SZ 効果の研究は、CMB 光子の量子輸送方程式において銀河団の光学的厚さ（電子密度に比例する）が小さい場合に限定されていた。本研究では、高い電子密度の場合においても適用可能な方程式を導くとともに、それらの解析解ならびに数値解を求める。

(2) 研究代表者のグループがこれまでに行ってきた銀河団における SZ 効果の研究は、CMB 光子の量子輸送方程式において電子ガスの温度が 15keV 程度であった。本研究では、超相対論的エネルギー電子による CMB 光子の逆コンプトン散乱に適用可能な方程式を導き、高エネルギーガンマ線放射に関する計算を行う。

3. 研究の方法

(1) CMB 光子に関する量子輸送方程式において、光学的厚さ (τ) が 1 に比べて十分小さい場合は、 τ の 2 次以上の項を無視することができるが、本研究で取り扱う $\tau \gg 1$ の場合は、すべての項を考慮する必要がある。本研究では、はじめにオペレータ表示による展開近似のない形式解を求める。次に、 τ に関する数値解を求める。

(2) これまでの研究では、電子の速度 β ($=v/c$) が小さい場合、 $\beta \ll 1$ の近似を用いてきた。本研究では、はじめに超相対論的電子の場合に適用するために、 $\beta \sim 1$ の場合において成り立つ方程式を導く。さらに、超相対論的極限における数値解を求める。

4. 研究成果

(1) 高密度電子 ($\tau \gg 1$) に対応した SZ 効果に関する研究成果は、文献 4 (Physical Review D79, 123007, 2009) に発表された。図 1 は電子温度 20keV の銀河団に対する SZ 効果の大きさ示している。横軸 $x = \omega/kT$ は CMB の温度を単位とした CMB 光子のエネルギーである。図 1 において、実線、1 点破線、破線、点線がそれぞれ $\tau = 0.01, 1, 10, 20$ に対応している。図 1 で示されるように、 $\tau \gg 1$ の場合には、高エネルギー光子 ($x \gg 1$) の寄与が大きいことが示された。

また、本研究では、熱平衡電子分布の場合 (図 1) と非熱平衡電子分布の場合についての計算を行った。これまでにも他の研究グループによる計算が発表されているが、本研究の計算結果は彼らの数値結果とよく一致していることが示された。

さらに、本研究では、CMB 光子の量子輸送方程式に対して、3つの手法 (多重散乱表示、オペレータ表示、フーリエ変換表示) を

用いた解析的な形式解を導出しており、その有用性が期待される。

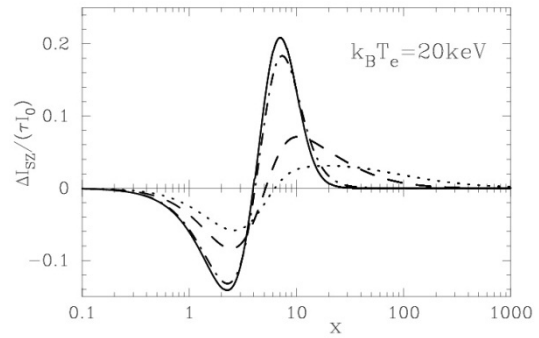


図 1

(2) 高エネルギー電子に関する研究成果は文献 1 ~ 3 (Physical Review D81, 043003, Physical Review D81, 043003, Physical Review D81, 083007, D82, 103009) に発表された。

文献 3 では、高エネルギー逆コンプトン散乱過程において、エネルギースケール則が成り立つことを示した。本来、逆コンプトン散乱断面積のスペクトルは光子のエネルギー x と電子分布の下限值 γ_{\min} の 2 変数の関数として与えられる。本研究では、電子分布として $1 \ll \gamma_{\min} \ll \gamma_{\max}$ が成り立つ場合においては、CMB 光子の強度スペクトルが 1 変数 $X = x / (2 \gamma_{\min})^2$ だけの関数で表すことができることを示した (図 2 を参照)。図 2 において、実線、1 点破線、破線はそれぞれ、冪乗電子分布の傾き $\sigma = 4.5, 3.5, 2.5$ の場合に対応している。これにより、keV 領域から MeV 領域における逆コンプトン散乱が図 2 で表される一つの表式で記述出来ることを示した

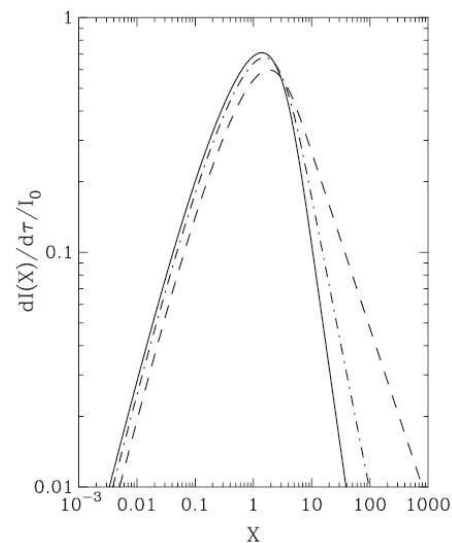


図 2

実際に、図3に keV 領域から MeV 領域におけるエネルギースペクトルを示した。図3から分かるように、 γ_{\min} の値を変化させることにより、keV 領域から MeV 領域までのエネルギー領域を統一的に取り扱うことが出来ることが示された。

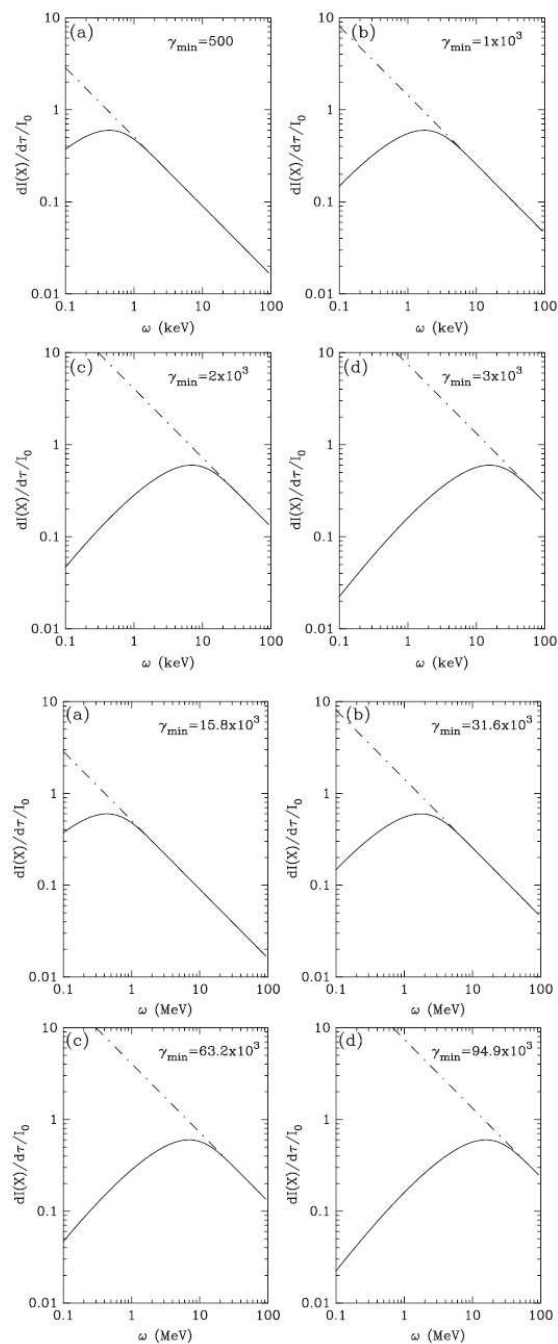


図 3

また、文献2では文献3を拡張し、銀河団および観測者が CMB 系に対して特異速度を持って運動している場合についての研究を行った。その結果、両者の特異速度による効果は小さく、文献3で示したエネルギースケールリング則がよい近似で成り立つことが示

された (図4を参照)。図4において、実線は文献3におけるエネルギースペクトルで、破線が観測者の特異速度 (β_s) による効果である。図4から分かるように、観測者の運動による効果 (破線) は小さく無視することが出来るため、文献3のエネルギースケールリング則がそのまま成り立つことが示された。

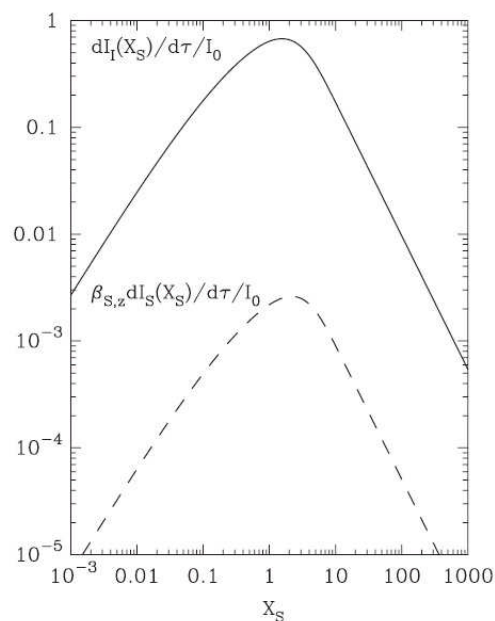


図 4

さらに、文献1においては研究代表者のグループが行ってきた相対論的に共変な手法による研究と近年、他のグループによってなされた類似の手法についての比較を行った。本研究で、Thomson 近似が成り立つ範囲においては、2つのグループによる理論的取り扱い手法は数学的に同等であることを示した。

今後の展望としては、本研究を Thomson 近似が成り立たない高エネルギー領域に拡張することを目指す予定である。

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 4 件)

1. Satoshi Nozawa, Yasuharu Kohyama and Naoki Itoh, Analytical Study on the Sunyaev-Zeldovich effect for clusters of galaxies. II. Comparison of covariant formalisms, Physical Review D82, 103009 (2010), 査読有
2. Satoshi Nozawa, Yasuharu Kohyama and Naoki Itoh, Scaling laws in high-energy Compton scattering. II.

Effect of bulk motions, Physical Review D81, 083007 (2010), 査読有

3. Satoshi Nozawa, Yasuharu Kohyama and Naoki Itoh, Scaling laws in high-energy Compton scattering, Physical Review D81, 043003 (2010), 査読有
4. Satoshi Nozawa, Yasuharu Kohyama and Naoki Itoh, Study on the solutions of the Sunyaev-Zeldovich effect for clusters of galaxies, Physical Review D79, 123007 (2009), 査読有

[学会発表] (計 15件)

1. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Institute Colloquium, 2012 March 2, Dublin Institute for Advanced Study, Dublin, Ireland
2. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Seminar, 2011 April 12, Department of Physics, Stanford University, Stanford, California, USA
3. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Seminar, 2011 April 11, Department of Physics, University of California, Berkeley, California, USA
4. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Colloquium, 2011 April 8, Department of Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, USA
5. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Laboratory Colloquium, 2011 April 4, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, USA
6. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Institute Colloquium, 2010 November

3, Institute for Astronomy, University of Hawaii, Hawaii, USA

7. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Colloquium, 2010 September 3, Department of Physics, Oxford University, Oxford, United Kingdom
8. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Colloquium, 2010 May 4, Department of Physics, University of Goettingen, Goettingen, Germany
9. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Colloquium, 2010 April 8, Department of Physics, University of Trino, Torino, Italy
10. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Colloquium, 2010 February 5, Department of Physics, University of Melbourne, Melbourne, Australia
11. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Colloquium, 2010 February 4, Department of Physics, Monash University, Melbourne, Australia
12. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Colloquium, 2010 February 1, Department of Physics, University of Sydney, Sydney, Australia
13. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Departmental Colloquium, 2009 November 2, Department of Physics, University of Hong Kong, Hong Kong

14. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, KEK Seminar, 2009 October 20, KEK, Tsukuba, Japan

15. Naoki Itoh, Seeing Galaxy Clusters through Cosmic Microwave Background: Sunyaev-Zeldovich Effect, Galileo Lecture, 2009 September 17, Department of Physics "Enrico Fermi", University of Pisa, Pisa, Italy

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 直紀 (Itoh Naoki)

上智大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20103939

(2) 研究分担者

野澤 智 (Nozawa Satoshi)

城西短期大学・ビジネス総合学科・教授

研究者番号：00258914