

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400262

研究課題名(和文) 暗黒物質の物理と130GeVのガンマ線シグナル

研究課題名(英文) Physics of dark matter and 130GeV gamma-ray signal

研究代表者

小田 一郎(Oda, Ichiro)

琉球大学・理学部・教授

研究者番号：40265517

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：現代の素粒子物理学と宇宙物理学における大きな謎の一つに、暗黒物質に関するものがある。最近の観測技術の進歩によって、宇宙の全エネルギーの構成比が分かってきた。つまり、暗黒エネルギーが約75%を、暗黒物質が約25%を、そして既知の素粒子が残りの約5%を占めることが分かってきたのである。本研究の目的は、暗黒物質の物理的な意味を理解することであった。特に、フェルミ観測衛星のデータから130GeVという高エネルギーのガンマ線が観測されたために、このガンマ線の起源は、暗黒物質の対消滅から生まれたものではないかという考えに立って、暗黒物質の理論の構築を目指した。

研究成果の概要(英文)：One of the biggest mysteries in both modern elementary particle physics and cosmology is on physics of dark matter. Owing to the recent progress of observation, it turned out that the total energy of our universe is consisted of about 75% dark energy, about 25% dark matter and the remaining about 5% ordinary matters. One of purposes of our study is to clarify the physics of the dark matter on the basis of 130 GeV gamma-rays which were observed by the fermi satellite.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：暗黒物質 標準理論を超える理論

## 1. 研究開始当初の背景

最近の観測技術の進歩によって、暗黒物質は宇宙全体のエネルギーの約 25% を占めることが分かってきた。しかし、暗黒物質を構成している素粒子については、既知の素粒子ではないことを除けば全く分かっていない。本研究開始の背景は、素粒子物理学が専門の研究代表者と、宇宙物理学が専門の研究分担者の共同研究によって、暗黒物質の新しい理論を構築することであった。

## 2. 研究の目的

素粒子物理学の目的とは自然に存在する素粒子を分類し、さらにそれらの物理的な性質、例えば質量や相互作用などを明らかにすることである。最近の実験の進歩によって、自然は既知の素粒子に比べて、未知の素粒子が約 5 倍も存在することが明らかになった。この未知の素粒子は総称して「暗黒物質 (Dark matter)」と呼ばれている。本研究では、暗黒物質の理論的な側面を明らかにしたい。特に最近、フェルミ望遠鏡から得られたデータから、130GeV のガンマ線のピークが観測された。この結果から暗黒物質は従来考えられていた「弱い相互作用をする有質量粒子 (WIMP)」ではなくて、「軽粒子 (Lepton) とのみ相互作用をする有質量粒子 (LIMP)」であることが示唆される。この LIMP の考えを基にして暗黒物質の理論を構成することが本研究の目的である。

超新星や宇宙背景放射の観測から宇宙の全エネルギーの構成比率が明らかになった。全エネルギーの 75% を占める暗黒エネルギーについて諸説はあるものの、その物理的な性質や起源については全く分かっていないと言っても過言ではない。アインシュタインの一般相対性理論から分かるように、エネルギーとは本来、時空の性質に密接に関係した保存量である。また、量子力学に存在する真空のゼロ点振動が暗黒エネルギーに寄与することが分かっている。したがって、量子力学と一般相対性理論を統一した理論である「量子重力理論」が完成しない限り、暗黒エネルギーに対する物理的に完全な理解を得ることは難しいのではないかと思う。

一方、全エネルギーの 25% を占めている暗黒物質についても、これを構成する素粒子が電荷を持たない安定な未知の素粒子であることが分かっていることを除けば、あまり分かっていないと言える。ただ、暗黒エネルギーを理解するためにはエネルギー領域が非常に高いプランクスケール ( $10^{19}$  GeV) である量子重力理論が必要とされるのと比べて、暗黒物質については標準エネルギーを少し超えるエネルギー領域 ( $1\text{TeV} = 10^3\text{GeV}$ ) の新しい物理が関係しているのではないかと強く示唆されている。現在、CERN で稼働している LHC (Large Hadron Collider) の到達可能なエネルギーは 14TeV であるから、近い将来、LHC で暗黒物質の痕跡を発見できる可

能性がある。現在、世界中で暗黒物質の探索競争が激化している。暗黒物質の検出方法としては、LHC などの加速器を用いた「加速器実験」の他に、暗黒物質が元素を構成する原子核と衝突する際に発生する反跳エネルギーを観測する「直接実験」と、暗黒物質が対消滅したり、崩壊したりするときに行える 2 次的な生成物を検出する「間接実験」がある。しかし、暗黒物質は電荷を持たない中性で弱い相互作用しかしない未知の素粒子によって構成されているために、暗黒物質を検出することは想像以上に難しい。

しかし、最近「間接実験」の分野で大きな進歩があった。それはフェルミ人工衛星に積まれたフェルミ望遠鏡を用いて得られた 3 年半のデータを解析したところ、我々の銀河中心において、エネルギーが 130GeV 付近にピークを持つ高エネルギーのガンマ線が多数生成されているということが分かったのである (C. Weniger, JCAP 1208 (2012) 007)。この研究以前から、暗黒物質の対消滅から生ずる鋭いピークを持つガンマ線の存在は、暗黒物質の存在を証明する証拠であることが理論的に指摘されており、この解析結果はまさにこの理論的な指摘を裏付ける結果となったので、その後現在まで多くの研究者が活発にこの研究に取り組んでいる。私はこれまで「超光速ニュートリノ」の研究を通じて、暗黒物質の研究も行ってきた (I. Oda and H. Taira, Modern Physics Letters A 26 (2011) 2917; I. Oda, International Journal of Modern Physics A 27 (2012) 1250033; I. Oda, Modern Physics Letters A 27 (2012) 1250116)。このときに得られた知見を基にして、上記の暗黒物質の理論を構築したいと思うようになった。130GeV のガンマ線の理論はまだ作られていないが、理論を作るための二つのキーポイントは、

(1) 暗黒物質が従来の WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) から構成されていると考えた場合、散乱断面積が観測では理論より 2 桁ほど大きいこと

(2) 連続したスペクトラムを持つ背景場の 2 次的な光子の断面積が極めて小さいことである。本研究では、二つのキーポイントを踏まえて暗黒物質の理論を構成したい。我々の基本的なアイディアは、暗黒物質が従来考えられているような WIMP ではなくて、LIMP (Leptonically Interacting Massive Particle) ではないかと言う事である。LIMP に電荷を持った新しい素粒子を結合させれば、ツリーのレベルでの暗黒物質の対消滅が可能となり、散乱断面積が従来のワンループレベルでの断面積に比べて、2 桁ほど大きくできる。また、WIMP では 2 次的な光子としてはクォーク、ゲージボゾン、レプトンなどの対消滅から多量に発生するが、LIMP ではレプトンのみの対消滅から発生するので 2 次的な光子の生成断面積が極めて小さいことも説明可能である。

次に、LIMP の理論の構成に成功した場合は、この理論がもっと大きな理論体系、例えば、超対称性理論や超弦理論、の枠組みに埋め込むことは可能であるかという問題について考えたい。さらに、研究分担者の瓜生は宇宙物理学が専門なので、この理論を宇宙物理学にも応用したいと思っている。

### 3. 研究の方法

数年前のフェルミ衛星での観測によって、我々の銀河中心から 130GeV のガンマ線が生じていると考えられていた。我々は、このガンマ線の起源は 2 個の暗黒物質の対消滅ではないかというアイデアを基にして、暗黒物質についての新しい理論を作ろうというものであった。もちろん暗黒物質は既知の素粒子でないことは分かっていたので、標準理論を超える物理の中に暗黒物質を構成する素粒子を探すことになる。そのために (バリオン数) - (レプトン数) をゲージ対称性に格上げし、そのときに現れる新しい素粒子が暗黒物質を構成する素粒子ではないかと予想して、暗黒物質の新しい理論を構成した。

### 4. 研究成果

研究を開始した 1 年後に、フェルミ衛星グループから論文が発表され、銀河中心から発生したと思われていた 130GeV のガンマ線が実験の誤差の範疇に入ってしまう、間違っていることが分かった。そのために、我々は研究の方向を転換し、暗黒物質も含んでいられる標準理論を超える物理に集中した。この結果得られた新しい理論は将来の LHC での実験や宇宙観測衛星によって、その成否がチェックされると思われる。

### 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 10 件)

“Hawking Radiation inside Black Holes in Quantum Gravity”, Ichiro Oda, Advanced Studies in Theoretical Physics 9 (2015) 517–533, 査読有

“Hawking Radiation of a Charged Black Hole in Quantum Gravity”, Ichiro Oda, Advanced Studies in Theoretical Physics 9 (2015) 709–722, 査読有

“Conformal Higgs Gravity”, Ichiro Oda, Advanced Studies in Theoretical Physics 9 (2015) 595–608, 査読有

“New code for quasiequilibrium initial data of binary neutron stars: Corotating, irrotational, and slowly spinning systems”, Antonios Tsokaros, Kōji Uryū, Luciano Rezzolla, Physics Review D 91 (2015) 104030, 査読有

“Higgs Mechanism in Scale-invariant Gravity”, Ichiro Oda, Advanced Studies in Theoretical Physics 8 (2014) 215–249, 査読有

“Quadratic Inflation from Higgs Inflation”, Ichiro Oda and Takahiko Tomoyose, Advanced Studies in Theoretical Physics 8 (2014) 551–559, 査読有

“Conformal Higgs Inflation”, Ichiro Oda and Takahiko Tomoyose, Journal of High Energy Physics 09 (2014) 165, 査読有

“Equilibrium solutions of relativistic rotating stars with mixed poloidal and toroidal magnetic fields”, Koji Uryu, Eric Gourgoulhon, Charalampos

Markakis, Kotaro Fujisawa,

Antonios Tsokaros, Yoshiharu Eriguchi, Physics Review D 90 (2014) 101501, 査読有

“Classically Scale-invariant B-L Model and Dilaton Gravity”, Ichiro Oda, Physics Review D 87 (2013) 065025, 査読有

“Classically Scale-invariant B-L Model and Conformal Gravity”, Ichiro Oda, Physics Letters B 724 (2013) 160–164, 査読有

{ 学会発表 } (計 0 件)

{ 図書 } (計 0 件)

{ 産業財産権 }  
出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

{ その他 }  
ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

小田 一郎 (ODA, Ichiro)  
琉球大学・理学部・教授  
研究者番号：40265517

(2)研究分担者

瓜生 康史 (URYU, Koji)  
琉球大学・理学部・教授  
研究者番号：40457693