

ガンマ線望遠鏡による Axion-like Particles の探索とパラメータへの制限

高橋 光成 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

超高エネルギーガンマ線観測の結果に基づいた、Axion-like Particles(ALPs) の存在およびパラメータの制限に関する議論をレビューする。Axion は強い相互作用の CP 対称性の不自然さから提唱され、その一般化である ALPs とともに理論的に存在が期待されている粒子である。これらはダークマターや超弦理論などとの関連からも関心を集めている。ALPs は標準模型の粒子との間に極めて弱い相互作用があり、特に電磁場との相互作用により光子と Axion が互いへと変化する光子-Axion 振動が起こる。この現象が AGNs などの遠方天体からのガンマ線のスペクトルの歪みとして捉えられる可能性が指摘されてきた。そして近年、実際に ALPs 無しには説明できないスペクトルが観測されており、このデータを用いて ALPs の光子との結合定数の下限が求められた。ただし観測やガンマ線の生成および伝搬に関する現在のモデルが誤っている可能性もあり、ALPs の存在が証明されたわけではない。本講演の最後に種々の制限や予測についてまとめ、今後の観測の戦略について考察する。

1 Introduction

強い相互作用の CP 対称性は非常に高い精度で成立していることが調べられている (Particle Data Group. 2012) が、理論的には破れている方が自然だと言われている。1977 年、Peccei と Quinn は新たな場を導入し、その場についての Peccei-Quinn 対称性と名付けられた対称性が自発的に破れることでこの問題が解決されるとした。この時生じる擬 Nambu-Goldstone ボソンが Axion である。Axion の質量は小さく、また標準模型における粒子との間に極めて弱い相互作用がある。

この Peccei-Quinn メカニズムは他の大域的な対称性へと一般化することが出来、性質が Axion に似た粒子、Axion-like particles (ALPs) を生じる (J. Jaeckel. 2010)。ただし Axion では光子との結合定数がどのモデルでも質量と相関を持つのに対して、ALPs ではそうではなく、結合定数がゼロであることもあり得る。多くの超弦理論が ALPs の存在を予言している。ALPs (以下では Axion を含むものとする) は存在すればダークマターとして振る舞うと考えられ、WIMPs と並ぶ有力候補となっている。一方で、ダーク

クエネルギーとの関係についても論じられている (J. Jaeckel. 2010)。以上の理論面からの期待の他に、観測された白色矮星のエネルギー減少率の予測からのずれが Axion によるものである可能性が指摘されている。

2 光子-ALPs 振動

ALPs の最も重要な性質として光子 2 個との相互作用があり、それと等価な現象であるが電磁場中で光子と ALPs は互いへと変化する。電磁場内を進む光子が ALPs になりまた光子に戻るといった現象は光子-ALPs 振動と呼ばれる (ニュートリノ振動と類似している)。

これを利用し、ALPs 発見のための実験と天文学的・宇宙論的考察が様々に行われてきた (Particle Data Group. 2012)。その結果、質量は $10^{-11}\text{eV} \ll m \ll 10^{-2}\text{eV}$ 、結合定数は $g_{a\gamma} < 10^{-10}\text{GeV}^{-1}$ という制限が得られている (the CTA Collaboration et al. 2012)。

3 AGNs のスペクトルの歪み

エネルギー E_γ の光子が ALPs に変化する (逆も同じ) 確率 P_0 は次式のように書ける.

$$P_0 = \frac{1}{1 + (E_{crit}/E_\gamma)^2} \sin^2 \left[\frac{Bs}{2M} \sqrt{1 + \left(\frac{E_{crit}}{E_\gamma} \right)^2} \right] \quad (1)$$

B は磁場の大きさ, s は磁場ベクトルがおおよそ一定である領域の長さ, M は結合定数の逆数である. 臨界エネルギー E_{crit} は次のように定義される.

$$E_{crit} \equiv \frac{m^2 M}{2B} \quad (2)$$

m は ALPs の質量 m_a に対して $m^2 \equiv |m_a^2 - \omega_{pl}^2|$ で定義される有効質量である. ω_{pl} はプラズマ振動数 $\omega_{pl} = 0.37 \times 10^{-4} \mu\text{eV} \sqrt{n_e \text{cm}^{-3}}$, n_e は電子密度である. 典型的には数百 GeV ほどのオーダーになる.

光子-ALPs 振動が重要になってくるのは E_{crit} 以上のエネルギーの光子についてである. 活動銀河核 (AGNs) は数十 TeV にまで達する高エネルギーのガンマ線を放射しており, z が 0.5 を超える遠方のもも観測されている. ガンマ線が横切る磁場の大きさは基本的に小さいが, 距離が長大なため有望なターゲットになると考えられている.

観測は地上のチェレンコフ望遠鏡もしくは人工衛星によって行われる. 前者は数十 GeV 以上のガンマ線を検出するもので, MAGIC, HESS, VERITAS が運用中で, 諸性能を格段に向上させることを目指した CTA が建設準備中である. 後者は決定版のプロジェクトと言われる Fermi 衛星 が運用されており, 300GeV までのガンマ線を観測している.

放射されたガンマ線は 1. ガンマ線源近傍の磁場, 2. 銀河団内磁場 (ICMF), 3. 銀河間磁場 (IGMF), 4. 銀河磁場 (GMF) を通過する. それぞれの磁場について述べると,

1. Hillas の基準から 光子-ALPs 振動を起こすのに十分な磁場領域を持つ AGNs が宇宙に存在すると考えられている (D. Hooper and P. Serpico. 2007).

2. 強さは μG のオーダー. シンクロトロン放射とファラデー回転の測定を基にしたディスク, ハロー, X の 3 成分から成るモデルがあり, それを用いる. 一様である長さは 100pc と仮定する (M. Meyer et al. 2013).

3. 強さはクエーサーのファラデー回転の測定から nG オーダーとみられるが, 0.01nG 程度とという異論もある. ここでは一様である長さは 50pc と仮定する (M. Meyer et al. 2013).

4. 銀河団の中に満ちており, 外側では弱くなる. μG , 10kpc (M. Meyer et al. 2013) オーダー.

これらの磁場との相互作用により, 光子のうちあるものはそのまま地球に到達し, あるものは途中で ALPs に変化して観測から漏れ, またあるものは ALPs から再びガンマ線に戻る.

一方で別な運命をたどるガンマ線もある. 宇宙には宇宙背景光 (EBL: Extragalactic Background Light) と呼ばれる, 恒星などに由来する光子が分布している. ガンマ線がこれと衝突・電子対生成を起こして消えてしまう場合がある. この EBL 吸収は 10GeV 以上で効き始め, 特に 100GeV 以上で重要である. つまり, 超高エネルギーのガンマ線に関して宇宙は透明ではないと考えられている.

ALPs が存在すれば, 存在しない場合に比べ, 多くのエネルギー領域においてはガンマ線のフラックスを減少させる作用をするが, EBL 吸収の寄与が大きい領域では逆に増大させると考えられている. これはガンマ線が ALPs に変化して EBL 吸収を受けること無く進み, 再び光子に戻ることによるものである. そして実際に複数の AGNs についてそのような増大が見つかっており, ALPs が無いとすると 4.2σ の水準で EBL 吸収に異常がある (M. A. Sanchez-Conde et al. 2013). EBL の詳細は研究途上であるが, 銀河の個数カウントと超高エネルギーガンマ線のスペクトルからそれぞれ下限と上限が求められている. 本講演ではこれを満たすもののうち, FRV モデル (A. Franceschini et al. 2008) と KD モデル (Tanja M. Kneiske and Herve Dole 2010) の 2 つを扱う. これ

らは比較的小さな結合定数で観測との矛盾を無くすことが出来、より慎重な下限を与えるからである。

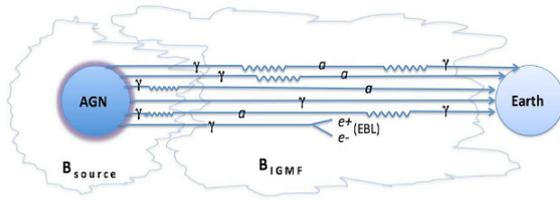


図 1: AGNs から放射されたガンマ線の変化の例 (M. A. Sanchez-Conde et al. 2009)

4 パラメータへの制限

2013 年 3 月, (M. Meyer et al. 2013) により, 初めて $g_{a\gamma}$ の下限, すなわちデータを説明できる最小の $g_{a\gamma}$ が求められた. 以下にその手法を述べる.

磁場パラメータの最適化

宇宙磁場が実際にどのような様態を取っているかは不明である. そこで, IGMF と ICMF について, 磁場の大きさの代表的な値 B_0 と, 磁場が一様である長さ λ_c をパラメータとし, パラメータ空間 (観測による制限内に限る) 上の各点についてブースト因子 $B \equiv \tilde{P}_{\gamma\gamma} / \exp(-\tau)$ を計算する. ここで $\tilde{P}_{\gamma\gamma}$ は光子が EBL 吸収を受けずに生き残る確率の中央値であり, τ は EBL 吸収による空間の光学的深さである. 計算して得られたブースト因子が最大となるパラメータ設定を採用する.

シナリオの用意

光子-ALPs 振動がどこで起こるかによって, いくつかのシナリオが考えられる. そこで, 単純化した 4 つのシナリオを用意し, 各々について $g_{a\gamma}$ の下限を求めることにする.

”general source” ガンマ線源近傍の磁場で光子が ALPs となり, 天の川銀河の GMF によって光子に戻るシナリオ. GMF へ入射する光子と ALPs の比は 2:1 に固定する. ALPs への転化はこの比が最大限である (D. Hooper and P. Serpico. 2007).

”optimistic ICMF” ICMF で光子が ALPs となり, 天の川銀河の GMF によって光子に戻るシナリオ. すべての AGNs が半径 2Mpc の銀河団の中心に位置していると仮定する.

”optimistic IGMF” 銀河団内での振動は無いとした上で, IGMF の作用を考えこれが最大になるとするシナリオ.

”fiducial” 以上のシナリオではパラメータが最適化の結果として観測的制限に近い値になってしまう. そこでより控えめな値を与えた枠組みを加える.

ALPs のパラメータ空間での有意性マッピング

用いる観測データはチェレンコフ望遠鏡によって得られた AGNs のスペクトルデータ 26 個である. 天体は Mrk 421, PKS2155-304, H2356-309, 3C 279 など 15 個で, 異なるエネルギー領域などで複数になっている天体もある. 距離は最も近い Mrk 421 で $z=0.031$, 最も遠い 3C 279 で $z=0.536$ である. さて, 磁場のパラメータは既に設定したが, これだけでは磁場の様態は定まらない. 磁場の向きは領域ごとにランダムになっていると考えられているためである. そこで, 各領域における磁場の向きをランダムに選んだ設定のセットを 5000 個生成する. これは各シナリオ, 各 AGNs, 各 EBL モデルのすべての組み合わせについて行われる. そして, ALPs のパラメータ空間 ($m_a, g_{a\gamma}$) 上の各点について生成した設定がデータを説明可能かどうかを統計的に解析する. 生成した設定の 95 % がデータに合致しないという有意水準を p_{95} とおく. ($m_a, g_{a\gamma}$) 空間上の各点に各々 p_{95} の値を持たせるわけである.

図 2 は結果のグラフである. 紙面の関係で optimistic ICMF シナリオ, EBL は FRV モデルの場合の結果のみ掲載した.

求める $g_{a\gamma}$ の下限として, $p_{95} = 0.01$ すなわち $-\log_{10}(p_{95}) = 2.0$ の等高線を採用する. その値は KD モデルに対して $g_{a\gamma} \sim 7.8 \times 10^{-11} \text{GeV}^{-1}$, FRV モデルに対して $g_{a\gamma} \sim 1.4 \times 10^{-11} \text{GeV}^{-1}$ であった. また, 質量 m_a についても 250neV 程度以下であることがわかる.

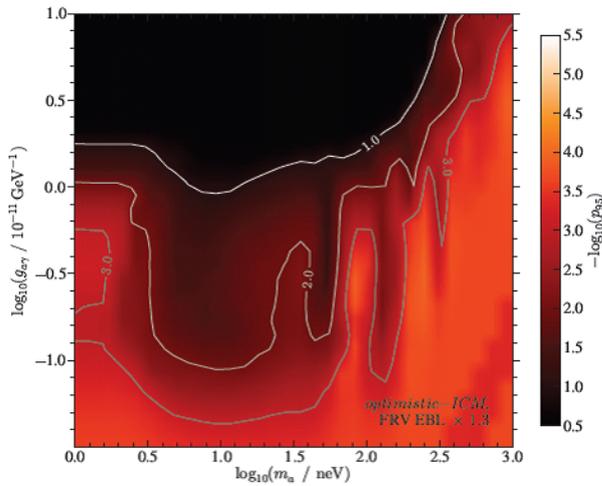


図 2: 光子-ALPs 振動の有意性マップ. $-\log_{10}(p_{95})$ の値が小さく明るい領域ほどデータとモデルが一致していない事を表す. optimistic ICMF シナリオ, EBL は FRV モデルの場合. (M. Meyer et al. 2013)

5 総括と今後

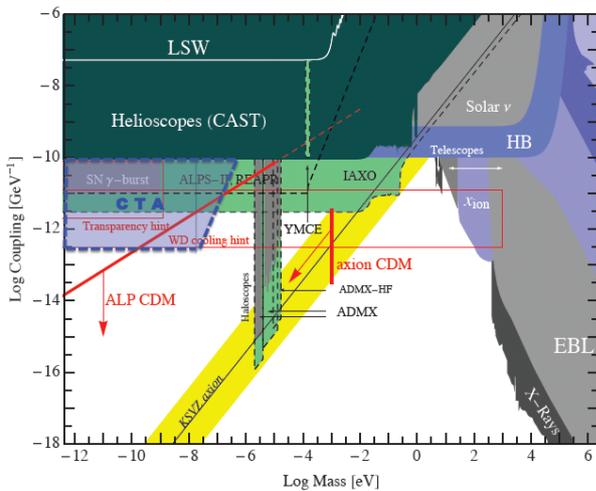


図 3: これまでに得られた ALPs に関する制限および示唆をまとめたもの. "Transparency hint" とあるのが今回制限された領域. "CTA" は次世代ガンマ線望遠鏡 CTA がカバーする領域. "LSW", "Helioscope" は現行の実験, "ALPS-II", "IAXO" は将来の実験がカバーする領域.(M. A. Sanchez-Conde et al. 2013)

今回得られた下限と CAST 実験などによる上限

を組み合わせると, $g_{a\gamma}$ の範囲は 10^{-12}GeV^{-1} から 10^{-10}GeV^{-1} のおよそ 2 桁に絞られてきた. 今後の観測により, データの誤差を小さくすればさらなる改善が見込める. しかしこの制限は AGNs の元々のスペクトル, 磁場, EBL に仮定を置いた上でのものであり, ALPs の存在が証明されたわけでもない. ALPs の有無を確認するためには EBL の影響が大きい範囲のガンマ線が重要だと考える. すなわち, フラックスの増大ではなく減少である. 減少分は最大でも $1/3$ にしかならないため, 多くの統計数と高いエネルギー分解能が要求される. CTA は稼働中の望遠鏡に比べ有効面積はおおよそ 20 倍であり, エネルギー分解能も 1TeV 以上で 10% 程と優れている. シミュレーションによると, 2010 年に MAGIC により 0.5 時間観測された $4C+21.35$ のフレアと同程度の強度・距離のものが 5 時間観測できれば ALPs の痕跡がはっきりと捉えられると期待できる (M. A. Sanchez-Conde et al. 2013) (MAGIC の観測は中断されたため実際に何時間続いたかは不明). 多数の天体を精度よく観測し, それらのスペクトルを統一的に説明出来れば ALPs の存在に説得力を持たせることが出来るだろう.

Reference

Particle Data Group. 2012. Regents of the University of California

the CTA Collaboration et al. 2012. arXiv:1208.5356v1

J. Jaeckel. 2010. arXiv:1002.0329v1

M. A. Sánchez-Conde, S. Funk, F. Krennrich, and A. Weinstein. 2013. arXiv:1305.0252v1

M. Meyer, D. Horns, and M. Raue. 2013. arXiv:1302.1208v3

M. A. Sánchez-Conde, D. Paneque, E. Bloom, F. Prada and A. Domínguez. 2009. arXiv:0905.3270v2

D. Hooper and P. Serpico. 2007. PhysRevLett 99, 231102

A. Franceschini, G. Rodighiero, and M. Vaccari. 2008. arXiv:0805.1841

Tanja M. Kneiske and Herve Dole. 2010. arXiv:1001.2132