

論文の内容の要旨

論文題目

A Search for a Contribution from Axion-Like Particles to the X-Ray Diffuse Background Utilizing the Earth's Magnetic Field

(地球磁場を用いたアクシオン様粒子起因の X線背景放射の探索)

氏名 山本亮

1 本研究の背景と目的

強い相互作用を記述する量子色力学では、CPの対称性が破られる可能性を含んで居るが、実験的には対称性は保存されており (Baker et al., 2006)、これを強い CP 問題と呼ぶ。この問題の解決方法として、複素スカラー場を導入することが提案され、これによりアクシオンという新粒子が予言される (Peccei & Quinn, 1977; Weinberg, 1978)。単純な「標準アクシオン」は発見されていないが、これを拡張した多数の「アクシオン様粒子 (ALP; Axion-Like Particle)」の可能性が研究されている。アクシオンや ALP は、自発的崩壊、あるいは外部の電磁場による光子への変換 (逆プリマコフ過程) によって光子を生成すると考えられ (Sikivie, 1983)、太陽アクシオンの観測実験 (CAST) 等が行われているが未だ有意な検出例はない。一方、宇宙の観測から重力相互作用を行う物質の存在量が示され、そのエネルギー密度や分布について厳しい制限が得られており、「冷たい暗黒物質」が必要とされている。アクシオンや ALP は冷たい暗黒物質の候補の1つである。マイクロ波領域では、暗黒物質の全てがアクシオンであると仮定した探査実験もされているが、これも有意な検出には至っていない。暗黒物質の全部、または一部が ALP であれば、天球上の全天から放射があると考えられる。その場合、地球の磁場を用いることで地上観測より大きな逆プリマコフ過程を経た ALP 由来の光子を検出できる可能性がある。XMM-Newton 衛星の観測により、太陽アクシオン由来の可能性が高い X 線背景放射の季節変動が観測できたという報告があった (Fraser et al., 2014)。しかし、この強度は X 線背景放射のこれまでの理解とは矛盾し、これに対する否定論文も報告されている (Roncadelli & Tavecchio, 2015)。そこで、本論文では X 線天文衛星を用いて ALP 起源の X 線放射の検出を目指す。

2 本研究の方法

本論文では ALP を探る有効な手段として、地球磁場との相互作用によって X 線帯域に変換した光子を捉える方法を用いた。ALP から光子の変換係数は、運動量移行を $q = m_a^2/E_a$ 、ALP と光子の結合定数を $g_{a\gamma\gamma}$ 、ALP の地球磁場中を飛来する距離を L 、それと垂直な地球磁場の強度を B_\perp とすると、以下の様に書ける。

$$P_{a\rightarrow\gamma} = \left(\frac{g_{a\gamma\gamma} B_\perp}{2} \right)^2 2L^2 \frac{1 - \cos(qL)}{(qL)^2} \xrightarrow{qL < \pi} \left(\frac{g_{a\gamma\gamma} B_\perp L}{2} \right)^2 \quad (1)$$

$qL < \pi$ の場合、変換係数は $(B_\perp L)^2$ に比例する。地上実験での一例として CERN の CAST 望遠鏡による太陽アクシオンの探査では、 $B_\perp \sim 9.0$ T、 $L = 9.26$ m であり、 $B_\perp L \sim 83$ Tm 程度である (Arik et al., 2014)。一方で、地球磁場の強度は ~ 30 μ T 程度と小さいが、その範囲は地球半径 (約 6300 km) の数倍に広がっている。低地球軌道の衛星からの観測を仮定し、磁場の減衰まで考慮しても観測方向によっては $B_\perp L \sim 200$ Tm となり、CAST 実験よりも大きくなる。更に、人工衛星と地球磁場を使用する場合、衛星の軌道で地球に対する相対位置が変化するので、ALP から光子への変換係数も変化する。本研究では、この係数に依存する信号を検出することを目指す。

本研究では全天から $P_{a\rightarrow\gamma}$ に依存する信号を探すため、観測中の検出器のバックグラウンドの安定性が重要となる。現在使用できる X 線観測衛星を比較した結果、本研究では「すざく」衛星搭載の X 線 CCD カメラ「XIS」を用いた。

ALP 起源の光子のスペクトルの形として、単色スペクトル (e.g. Cicoli et al., 2014) とベキ関数に従う連続スペクトル (e.g. Asaka et al., 1998) が提案されている。X 線帯域で、一番深い感度の未知の単色スペクトルの探査として「すざく」/XIS を用いた Sekiya et al. (2016) による上限値が上げられる。我々はこの観測の $P_{a\rightarrow\gamma}$ を求めることで単色スペクトルになる ALP の変換係数に対する制限をつけることにした。一方で連続的な放射成分は、観測方向の違うデータを足し合わせる方法では X 線背景放射の強度変動に ALP 由来の信号が埋もれてしまう。そこで、連続成分の探査のためには、(1) 視野内に特定の天体を含まない、あるいは天体由来の X 線放射を取り除ける暗い空を、(2) 観測時間が長く、また複数回観測している、データを用いる必要がある。これに基づき、XIS の観測アーカイブ (2005-2014 年) から合計で 1.4 Ms である長期バックグラウンド観測の 4 天体を選び ALP 変換係数に依存する連続成分の信号探査を行った。

3 4 つの X 線背景放射の長期観測データの解析

本研究では、まず 4 つの観測データ (Lockman hole, MBM16, SEP, NEP) に対して、宇宙線のバックグラウンドレートが上がる南大西洋異常帯 (SAA) や、地没の観測を除去する通常のリダクションに加え、地球磁場によって宇宙線の侵入を妨げる能力を表した指標である COR (cut-off rigidity) が 8 GV/ であるデータを用い、Sekiya et al. (2016) と同様の方法で分解可能な X 線点源 (1.0×10^{-14} erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$) を取り除く、厳しいデータリダクションを行った。

次に、各観測に対して 60 秒ごとに「すざく」衛星の位置を計算し、そこから XIS の視線方向に垂直な磁場成分を求めた。軌道計算には、衛星の運用にも使用されている基本関数ライブラリーである *atFunctions* を、磁場モデルには IGRF-12 (Thébault et al., 2015) を用いた。地球磁場の強度は $L \sim 6 R_E$ で 1/100 以下となるため、 $B_\perp L$ は 1 % 以下の値に収束する。4 つの X 線背景放射の観測では $B_\perp L$ の値が 60 Tm から 300 Tm まで変動する (図 1)。「すざく」衛星の 3 台の XIS の合計の観測時間が 100 ks 程度は確保されるよう、 $B_\perp L$ の値で観測データを 4 つあるい 6 つに分類した。これらの $B_\perp L$ 値毎に、X 線背景放射に対して光子のカウントレートやそのスペクトルを比較した。

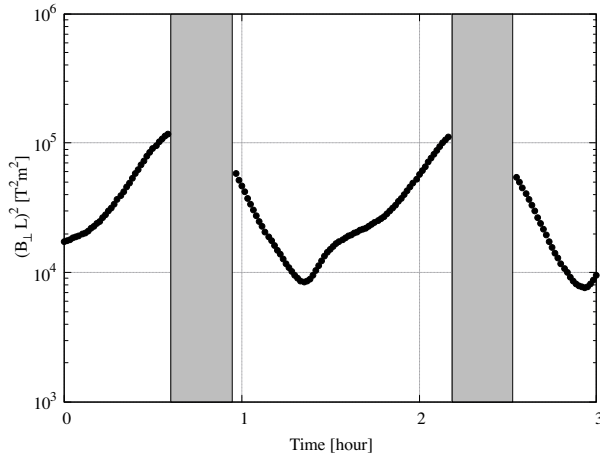


図 1: 2014 年の Lockman hole の観測の $(B_{\perp}L)^2$ の計算結果の例。 $B_{\perp}L$ が数 10 から数 100 Tm の変動が見られる。灰色の領域:衛星の視線方向が地球に遮られ、空を観測できない時間帯。

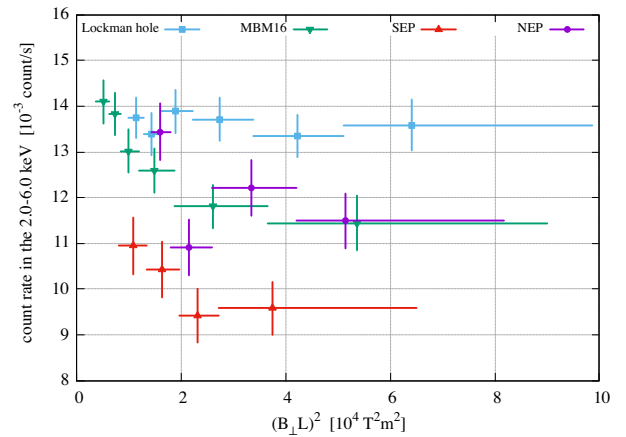


図 2: 位置 ID によるデータリダクション後の 2-6 keV カウンtrate。記号の形は観測方向を示す。 $(B_{\perp}L)^2 < 1.8 \times 10^4 \text{ T}^2\text{m}^2$ でカウンtrateの増加が見られるが、NXB の不定性である 30% よりも小さい変化なので、ALP 由来の信号であると考えすることはできない。

XIS の NXB は、連続成分については軌道上での平均的な宇宙線を種とした Geant4 によるシミュレーションで 20% 程度の精度で再現できており (Murakami et al., 2006)、輝線成分は衛星構造物からの蛍光 X 線であることが分かっている (Yamaguchi et al., 2006)。また、衛星での宇宙線強度の指標となる COR を用いて、50 ksec の夜地球の観測データから平均の NXB スペクトルを作り、観測時の NXB を推定する方法が提案され (Tawa et al., 2008)、すざく衛星の標準的解析方法に取り込まれている。COR も $P_{a \rightarrow \gamma}$ も地球上の衛星の位置に相関があり、 $P_{a \rightarrow \gamma}$ と NXB のどちら起源の揺らぎかを区別することができないため、本研究ではより注意深い解析が必要である。

本研究では、まず NXB の時間変動による系統誤差について評価した。年単位以上の長期変動を夜地球の観測から推定し、NXB を再現するためには前後 ± 150 日の夜地球データを用いることとした。また、X 線望遠鏡の有効面積は 12keV 以上で非常に小さいので、12-15 keV 相当のイベントを NXB の指標として用いることで、NXB の短期変動成分を推定した。12-15 keV での 60 秒毎のカウントレイトは、ポアソン分布の期待値よりも 30 % 程度変化することがわかったので、これを NXB の系統誤差とした。さらに、地球上の位置に依存する NXB の不定性を減らすため、地球上の座標を 234 分割し、光子イベントに対して検出時の衛星位置に対応する位置 ID を割り振った。夜地球の観測を収集する際に、COR の値でソートした後、局所的に X 線のカウンtrateの大小 ($< 3\sigma$) が見られる位置 ID を特定し、イベントを除去した。

位置 ID によるデータの絞り込み後、ALP のスペクトルの形や NXB の系統誤差等の様々な仮定を含まずに、X 線放射成分の $(B_{\perp}L)^2$ 依存性を調べるため、ALP の 4 観測について 2.0-6.0 keV のカウンtrateを求めた。図 2 に見られるように、 $(B_{\perp}L)^2$ に比例するような成分は見られず、むしろ $(B_{\perp}L)^2 < 1.8 \times 10^4 \text{ T}^2\text{m}^2$ でのカウンtrateが大きくなっていることから、 $(B_{\perp}L)^2$ が小さい場所は地球磁場の弱いところに衛星の位置が集中しており、NXB の再現性が悪いことが示唆される。

X 線背景放射は、3 温度の銀河系内高温プラズマ ($kT = 0.1-1.0\text{keV}$) の放射と系外の活動銀河核の放射 (CXB; 光子指数 = 1.4 のベキ関数) で説明できることが先行研究 (e.g. Yoshino, 2008; Sekiya et al., 2016) から知られている。本研究では、まず観測方向ごとに先述の X 線背景放射のモデルを決定し、そ

れに ALP 起源のベキ放射モデルが $(B_{\perp}L)^2$ に比例した強度で存在する、 $dN/dE \propto (B_{\perp}L)^2 E^{+0.5}$ 、と仮定してスペクトル解析を行った (Asaka et al., 1998)。本研究で得られた X 線背景放射のモデルは、先行研究と矛盾しない結果であった。また、NXB の系統誤差をスペクトル解析に反映させる方法として、観測データから NXB を差し引くのではなく、NXB をモデルとして取り込みスペクトルの形は変えずにフラックス全体を変化させる新しい手法を開発した。これらを組み合わせ、4 方向全ての観測について ALP 由来の X 線放射成分は CXB のモデルの不定性まで含めた統計誤差 90 % の範囲で 0 と一致した。以上から、本研究では $(B_{\perp}L)^2$ に比例する連続成分の放射の有意な検出には至らなかった。4 方向の解析結果より、2-6 keV で ALP での X 線表面輝度と CXB の表面輝度との信頼度コントラ (SEP の観測: 図 3) から、ALP の表面輝度の 99% の上限値として、 $2.8 \times 10^{-9} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} (100 \text{Tm})^{-2}$ の制限が得られた。

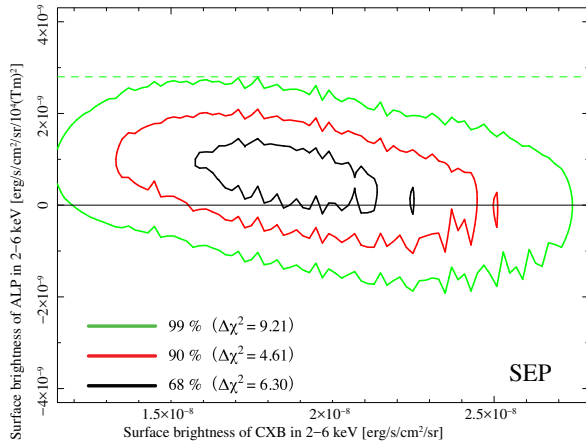


図 3: SEP の観測における NXB の不定性も考慮した CXB と ALP の表面輝度についての信頼度コントラ。信頼度レベルは黒: 68%, 赤: 90%, 緑: 99% である。点線が ALP の表面輝度に対する 99% の上限値を示す。

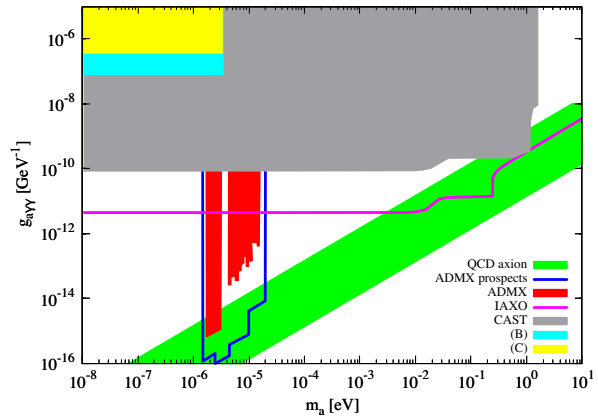


図 4: 本研究で得られた ALPs の結合定数の上限値を示す。(B) 太陽系近傍の暗黒物質が ALPs に崩壊し、地球磁場によって光子に変換される場合。(C) 宇宙に一様に分布している暗黒物質が崩壊して ALPs に変わり、地球近傍で光子に変換される場合。他の実験のまとめは Carosi et al. (2013) を参照した。

4 ALP 起源による X 線の観測結果とその意義

本研究では、ALP 起源の X 線放射を、地球磁場を用いて探査するというこれまでにない新しい方法として取り組んだ。その結果、連続成分の探査において有意な検出は無かった。2.0-6.0 keV の表面輝度の 99% の上限値として、系統誤差を考慮すると $2.8 \times 10^{-9} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} (100 \text{Tm})^{-2}$ という制限が得られた。これは、X 線背景放射の 15% 以下に相当し、2keV 以上の X 線背景放射の 75~80% は、遠方の活動銀河核等の重ね合わせに分解できていることは矛盾しない。また、Sekiya et al. (2016) から単色スペクトルについても、ALP についての限界検出強度が得られた。これらの検出限界強度は、ALP の存在密度と光子への結合定数の積に制限を与える。さらに X 線で検出可能は質量範囲を考慮し、連続成分については、宇宙全体の暗黒物質が ALP であるという仮定、また単色スペクトルについては、我々の銀河に付随する暗黒物質が ALP であるという仮定をおくことで、ALP の質量と結合定数に図 4 に示す制限を得ることができた。本研究は CAST や ADMX 等の他の実験が仮定している Axion や ALP とは、生成過程等の仮定が異なるが、ALP の物理パラメータについてこれ以上に強い制限とはならなかった。しかし、新たに独立した観測方法での制限が得られたと言える。