

■ 研究紹介

Axion Helioscope 実験

東京大学大学院理学系研究科物理学教室

蓑輪 眞

minowa@phys.s.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

われわれは、「axion helioscope」と名づけた超伝導電磁石を建設し axion 探索実験を行なっている。名前から察せられる通り、太陽から放射される axion を探索する目的で作ったものであるが、その他の天体を狙うことも可能である。この研究は、東京大学物理学教室の蓑輪研究室と KEK の山本明氏の共同研究である。

Axion とは強い相互作用の CP 問題の解決のために考えられた Peccei と Quinn たちのモデル [1] が予言する中性の軽い pseudoscalar 粒子で、数々の探索実験にもかかわらずいまのところ未発見である。理論からは axion の質量は決まらないが、これまでの各種実験や宇宙物理学的考察などにより制限がつけられている [2]。そのうち、もし質量が $10^{-5} \text{eV} < m_a < 10^{-3} \text{eV}$ 程度であれば、宇宙の初期に宇宙を閉じるのに十分なくらい axion が作られて、現在も暗黒物質として残っていると考えられている。このような軽い axion は、磁場中に置いたマイクロ波空洞共振器を使って京都大学 [3] や米国のグループ [4] により探索されている。

一方、 m_a が数 eV の場合は、暗黒物質にはならないが理論モデルによっては宇宙物理学的制限を逃れて興味深い質量領域となっている。Axion と光子の結合定数はその質量に比例するが、このくらいの質量になると太陽の中の黒体放射光子による Primakoff 効果によって axion が大量に作られる。このようにして作られる axion のエネルギー分布は、太陽中心の温度を反映した黒体放射光子のエネルギー分布とほぼ等しいものとなり、平均約 4keV となる。太陽から放射された axion は、地上の実験室の強力な磁場の中で逆反応により光子に変換してやることのできる [5, 6](図 1)。

変換の確率は、

$$P_{a \rightarrow \gamma} = \frac{g_{a\gamma\gamma}^2}{4} \left| \int_0^L B e^{iqz} dz \right|^2 \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $g_{a\gamma\gamma}$ 、 z 、 B 、 L 、および $q = |(m_\gamma^2 - m_a^2)/2E|$ はそれぞれ、axion と photon の結

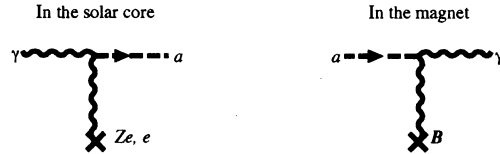


図 1. 太陽中での axion の発生と磁場中での光子への変換

合定数、axion 入射方向にとった座標、磁場の強さ、 z 軸に沿った磁場領域の長さ、磁場の仮想光子が受ける運動量移行である。Axion が化けてできた光子の有効質量 m_γ は真空中では零なので、質量が零に近い axion の場合は $q \sim 0$ となり磁場の全領域が変換に有効になる。しかし、axion の質量が大きくなると有限の q により coherence が失われ変換確率が小さくなる。この場合、水素やヘリウムなどの媒質（バッファーガスという）を磁場領域に充填すると、光子の有効質量が微細構造定数を α 、電子質量を m_e 、バッファーガスの電子数密度を N_e として、

$$m_\gamma = \sqrt{\frac{4\pi\alpha N_e}{m_e}} \quad (2)$$

と表される有限な値を持つようになるので、この値を axion 質量に合わせてやれば $q = 0$ とすることができて、coherence を回復することができる。

2. Axion helioscope

われわれの axion helioscope の概略図を図 2 に示す。Axion helioscope は、超伝導コイル、X 線検出器、追尾装置から構成される。追尾装置はいわゆる経緯儀で、コイルの入っている 3m 長の円筒形真空容器を鉛直軸の周りに 360°、仰角で -28° から $+28^\circ$ まで動かすことができる。位置制御は各軸についている AC サーボモーターとロータリーエンコーダーを使ったフィードバック

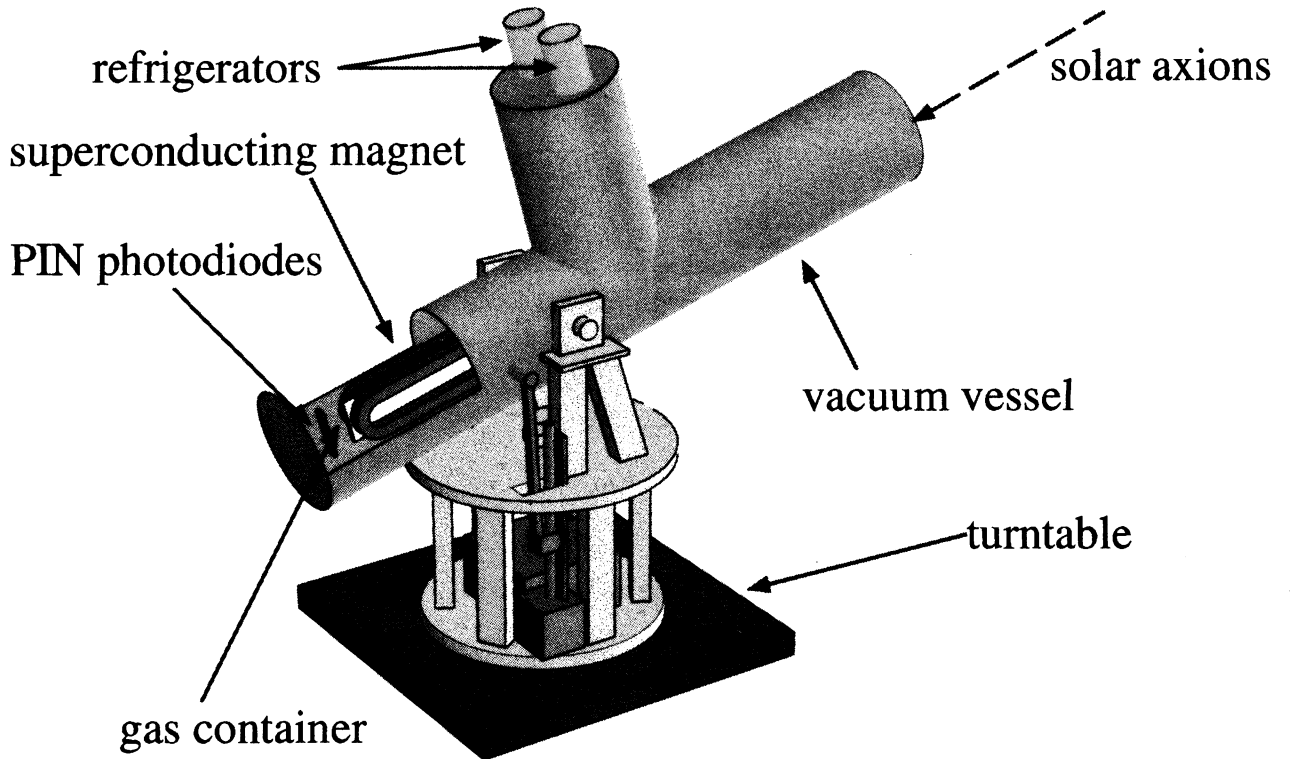


図 2. Axion helioscope の概略図。右上方から入射してきた axion は磁場中である確率で X 線に変換され、左下の PIN photodiode で検出される。

による。この範囲動かすことができれば、東京では大体 1 日のうち 50% の時間太陽を追尾することができる。残りの 50% はバックグラウンド測定をすることになる。axion はニュートリノと同様に地球を横切ってもほとんど反応しないので、太陽が水平線の下にあるとき、つまり夜も追尾を行うことができる。

レーストラック形のふたつの超伝導コイルの間の開口部は $2300(\text{L}) \times 92(\text{H}) \times 20(\text{W})\text{mm}^3$ で 4 T の磁場を発生する。コイルは、2 台の Gifford-McMahon 冷凍機により直接 5K - 6K に冷却されるので、液体ヘリウムなどの冷媒は全く必要ない [7]。コイルには永久電流スイッチがついており、励磁後は給電線はずして観測できる。

X 線検出には浜松ホトニクス の PIN photodiode S3590-06 を 16 個用いている [8]。ひとつの素子の大きさは $11 \times 11 \times 0.5\text{mm}^3$ で、窓はなくチップが露出している。この素子は本来は光検出用だが、X 線検出にも有

効である。6keV の X 線に対して 0.8 - 1keV のエネルギー分解能が得られている。検出器は放射熱シールド上に装着されており、温度 60K で動作させている。

3. 太陽 axion 探索実験

この axion helioscope による最初の観測は、簡単のためにバッファーガスなしで行われた。このため十分な感度のある axion 質量はおよそ 0.03eV 以下となっている。axion シグナルが観測されなかったことより、図 3 の「Previous limit」 [9] として示す曲線のように、axion-photon 結合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < 6.0 \times 10^{-10}\text{GeV}^{-1}$ (95% CL) ($m_a < 0.03\text{eV}$ に対して) の上限値が得られた。図中に「SOLAX」 [10] として示してある上限値は、ゲルマニウム検出器を使用した二重ベータ崩壊実験の副産物として得られているものである。

「Solar age」 および「Helioseismological」と書かれた線は、太陽モデルに axion の存在が及ぼす影響からつけられた [11] 上限値であり、この質量領域でこれらの太陽モデルによる上限値より強い制限を与えているの

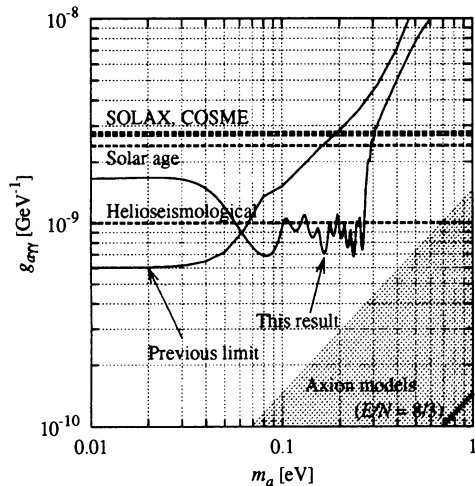


図3. 観測によって得られた axion-photon 結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$ の上限値

はわれわれの実験だけである。

次に、われわれの axion helioscope の磁場領域にバッファーガスを封入する管を装着した。封入したヘリウムガスの圧力を変えながらスキャンして 0.26eV までの質量の axion に対して感度が得られるようになった。これにより得られた上限値は、同じ図に「This result」[12] として示した。

図の右下の斜線領域は axion model が満たすべき $g_{a\gamma\gamma}$ と m_a の関係を示しているが、この質量領域まで感度を得られるようにするには、バッファーガスの圧力をさらに上げなくてはならない。最終的には温度 5K で 0.13MPa (ほぼ 1 気圧) まで加圧し質量 2.6eV までの領域をスキャンする予定である。現在、磁石がクエンチしてガス温度が急上昇して圧力が増加した場合の安全装置の開発を行っている。

4. 他の天体からの axion 探索

われわれの axion helioscope は、何も太陽しか観測できないわけではない。太陽以外の天体で、axion を放出する可能性のあるものを同様に観測することができる。太陽の場合と同様な議論でいろんな天体から飛来している axion のフラックスも計算されている [13, 14, 15]。しかし、太陽よりもはるかに遠距離にあるような天体では、フラックスが距離の自乗に反比例して減少するのでその天体の axion luminosity がそれに打ち勝つくらい明るいものでなくては観測は難しいであろう。

われわれは、これまでに全天球の 10% をスキャンして、axion の点源を探した。また、銀河中心、Scorpius X-1、Vela X-1、Crab nebula をそれぞれ追尾観測した。いずれも、negative result であるが、axion フラックスの上限値を与えている [16]。

はげしい活動天体で axion 放出の可能性のありそうなものの中では、超新星 [17, 18, 19]、ガンマ線バーストなどが観測対象としては魅力的である。これらは事前に現象を予測することはできないが、活動の残光を観測することは可能である。

5. まとめ

超伝導磁石を望遠鏡のように振り回せるようにして、天体の追尾観測を可能にした。太陽からの axion を探索して、質量 0.26eV 以下の領域で axion と photon の結合定数に対して $g_{a\gamma\gamma} < 6.0\text{--}10.9 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ の制限を与えた。また、太陽以外の天体についても観測を行い、axion フラックスの上限値を与えた。

このような実験装置は、現在のところわれわれのものが唯一のものである。したがって、上記の制限値はすべて世界で最良の値である。

謝辞

この研究は、文部科学省「中核的研究拠点 (COE) 形成プログラム」および松尾学術振興財団の援助を受けて行われたものである。また、研究の初期に支援をいただいた KEK 菅原機構長に感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] R.D. Peccei, H.R. Quinn, Phys. Rev. Lett. 38 (1977) 1440; Phys. Rev. D 16 (1977) 1791; S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 40 (1978) 223; F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. 40 (1978) 279.
- [2] J.E. Kim, Phys. Rep. 150 (1978) 1; M.S. Turner, Phys. Rep. 198 (1990) 67; L.J. Rosenberg, K. van Bibber, Phys. Rep. 325 (2000) 1; G.G. Raffelt, Phys. Rep. 333-334 (2000) 593.
- [3] I. Ogawa, S. Matsuki and K. Yamamoto, Phys. Rev. D53 (1996) R1740; K. Yamamoto *et al.*, Proc. of The Third International Conference on Dark Matter in Astro- and Particle Physics, DARK 2000, pp 638 - 645, eds. H. V. Klapdor-Kleingrothaus and Y. Ramachers, (Springer, 2001).

- [4] C. Hagmann *et al.*, Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 2043.
- [5] P. Sikivie, Phys. Rev. Lett. 51 (1983) 1415.
- [6] K. van Bibber *et al.*, Phys. Rev. D 39 (1989) 2089.
- [7] Y. Sato, K. Makishima, S. Mizumaki, A. Yamamoto, S. Moriyama, Y. Inoue, M. Minowa, T. Namba, Y. Takasu, Development of A Cryogen-free Superconducting Dipole Magnet, *the 15th International Conference on Magnet Technology* (MT-15, Beijing, October 20–24, 1997), and KEK-PREPRINT-97-202.
- [8] T. Namba, Y. Inoue, S. Moriyama, M. Minowa, astro-ph/0109041, accepted for the publication in Nucl. Instr. Meth. A.
- [9] S. Moriyama, M. Minowa, Y. Inoue, T. Namba, Y. Takasu, and A. Yamamoto, Phys. Lett. B 434 (1998) 147.
- [10] A.O. Gattone, *et al.*, Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.) 70 (1999) 59.
- [11] H. Schlattl, A. Weiss, and G. Raffelt, Astropart. Phys. 10 (1999) 353.
- [12] Y. Inoue, T. Namba, S. Moriyama, M. Minowa, Y. Takasu, T. Horiuchi, and A. Yamamoto, astro-ph/0204388, accepted for the publication in Phys. Lett. B.
- [13] E. D. Carlson, Phys. Lett. B 344 (1995) 245.
- [14] N. Iwamoto, Phys. Rev. D 53 (1984) 1198.
- [15] D. E. Morris, Phys. Rev. D 34 (1986) 843.
- [16] T. Namba, 東京大学大学院理学系研究科 博士論文 2002年.
- [17] J. W. Brockway, E. D. Carlson, and G. G. Raffelt, Phys. Lett. B 383 (1996) 439.
- [18] E. Massó, hep-ph/9704056.
- [19] J. A. Grifols, E. Massó, and R. Toldrà, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 2372.