

論文内容の要旨

論文題目 Experimental search for celestial axions utilizing a dipole magnet and X-ray detectors (双極子磁石と X 線検出器を利用した 天体からのアクシオン探索実験)

氏名 難波俊雄

アクシオンは、量子色力学における「強い CP 問題」を解決するために考え出された「アクシオン模型」に付随して生じる擬南部ゴールドストーンボソンである。アクシオンの存在が予言されて以来、さまざまな実験が行われてきたがいまだに発見されていない。そのため、アクシオンが仮に存在しても、その物質との相互作用は非常に弱いと考えられるようになった。そして、地上でアクシオンを生成し検出する実験方法ではアクシオンの存在を確認することは非常に困難だと考えられている。

アクシオンの結合は非常に弱い、光子や核子と結合を持つ。また、アクシオンの模型によってはレプトンとも結合を持つ。このため、高エネルギー天体現象は非常に良いアクシオンの放出源になると考えられている。例えば、太陽から放出されるアクシオンの地上における流束は、

$$\Phi_a = 3.5 \times 10^{11} \times \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-10} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \quad (1)$$

程度になると考えられている。ここで、 $g_{a\gamma\gamma}$ はアクシオンと光子との結合定数である。また、その平均エネルギーは太陽の核の温度を反映して 4 keV 程度である。

われわれは、太陽からのアクシオンを検出する目的で「アクシオンヘリオスコープ」と呼ばれる検出器を開発し、これまでにアクシオンと光子との相互作用に対して制限をつけてきた。しかしながら、アクシオンを放出している天体は太陽だけではない。例えば、中性子星などのコンパクト天体は太陽光度の 10^3 – 10^4 倍程度のアクシオンを放出している可能性がある。本論文は、このアクシオンヘリオスコープを「アクシオンテレスコープ」として使用し、太陽以外の天体を観測した結果について述べたものである。アクシオンテレスコープの写真を図 1 に掲載する。

アクシオンを検出するために、われわれの検出器はアクシオンと光子との結合を利用する。具体的には、アクシオンの進行方向に垂直に磁場をかける事により逆プリマコフ効果 (図 2) を生じさせ、アクシオンをそれと同じエネルギーの X 線に変換する。そして、生じた X 線を検出する事によりアクシオンの存在を確認する。したがって、アクシオンテレスコープは大きく分けて三つの部分から成る。

● 4 T × 2 m の超伝導磁石

この磁石は Gifford-McMahon 冷凍機 2 台によって直冷されており、液体ヘリウムなどの冷媒は一切必要としない。また、永久電流スイッチを操作することにより、励磁後は電流ケーブルを外して使用することができる。この磁石の開口部がアクシオンの変換領域になっており、そのサイズは $92 \times 20 \times 2300 \text{ mm}^3$ である。



図 1: アクシオン望遠鏡

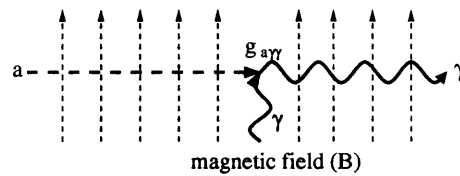


図 2: アクシオンを光子に変換

- 架台

アクシオンを変換するための磁場は、アクシオンの進行方向に対して垂直な成分しか有効ではない。このため、われわれは 2 m の磁石と X 線検出器の入った主筒を天体の方向に向けなくてはならない。われわれの検出器では、コンピューター制御の 2 台の AC サーボモーターによって主筒を水平方向にはほぼ 360°、上下方向には ±28° の範囲で動かす事ができる。

- X 線検出器

X 線検出器には、 $11 \times 11 \times 0.5 \text{ mm}^3$ のサイズのシリコンの PIN フォトダイオードを 16 枚組み合わせ合わせたものを用いている。この検出器は、天然の放射性元素からのバックグラウンドを抑えるために素材を選び、10 cm の厚さの鉛の遮蔽の中に入っている。また、振動によるノイズを防止するために固定 / データ取得方法にも工夫がされている。

このアクシオン望遠鏡を用いて、われわれはほぼ 20 日間にわたり天体からのアクシオン観測を行った。観測は次の 2 種類に大別される。

1. 天球面のスキャン

望遠鏡を真南に固定し、天球の動きにまかせてスキャンを行った。この測定では、天球上の各点での測定の積分時間は約 60 秒となる。そして、10 日間にわたり 1 日に一度望遠鏡の仰角を変化させることにより、天球上の約 10% の領域を観測した。

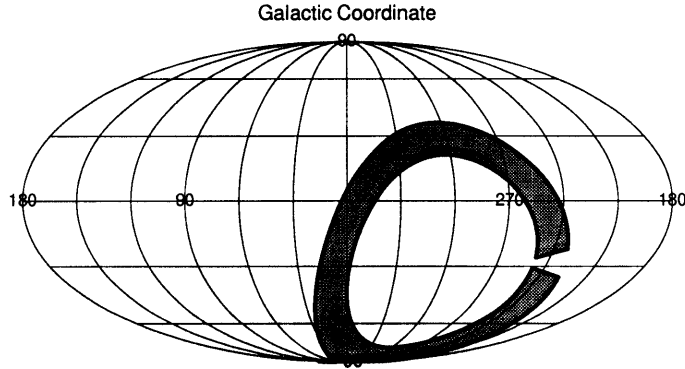


図 3: 天球面スキャンによって制限をつけられた領域。色の付いた部分が制限された領域である。

2. 天体追尾測定

銀河中心、さそり座 X-1、帆座 X-1 およびかに星雲に対して各 2 日間の追尾測定を行った。測定に際しては、約 6 時間または 12 時間ごとに追尾測定とバックグラウンド測定を交互に行い、それぞれの差をとった。測定対象を追尾したため、この測定の積分時間は非常に長く、58000 秒から 80000 秒程度である。

また、観測中はほぼ 5 日に 1 度 X 線検出器の安定性を試験している。

これらの測定の結果、アクシオンの飛来を確認できる信号は見つからなかった。しかしながら、この測定によって天体から飛来するアクシオンの地上での流束に対して制限をつけることができる。

まず、1. の天球面のスキャンに対しては、観測されたイベントがすべてアクシオンによるものであると仮定し、解析を行った。その結果、質量が 0.03 eV よりも軽いアクシオンに対してその地上での流束は 4-20 keV の範囲で

$$\frac{d\Phi_a}{dE_a} < 3.3 \times \left(\frac{10^{-10} \text{GeV}^{-1}}{g_{a\gamma\gamma}} \right)^2 \text{ keV}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \quad (2)$$

以下であるという制限が得られた (95 % C.L.)。なお、この制限が得られた銀河座標での領域を図 3 に示しておく。

一方、2. の天体追尾測定によって、スキャンよりも 2 桁ほど良い制限を対象天体からのアクシオン流束に対してつける事ができた。また、追尾対象のうち、帆座 X-1 とかに星雲に対しては中性子星の核からの制動放射を、さそり座 X-1 に対しては降着円盤からの黒体放射を仮定する事により、それらの天体のアクシオン光度に対して制限をつける事ができた。制限されたアクシオン光度領域を図 4 に示す。ここで、 L_{\odot} は太陽光度であり、 $L_{\odot} = 3.85 \times 10^{33} \text{ erg/s}$ である。

残念ながら、このような莫大なアクシオン光度を予言している天体およびアクシオンのモデルは存在しない。したがって、この測定ではアクシオンの性質に対して制限をつけることはできない。

しかしながら、この測定は各天体からのアクシオン放射に対するほぼ唯一の直接的な検証である。今まで天体からのアクシオン放射に対する実験的制限は、中性子星の表面温度からアクシオン放出による冷却を見積もったり、星間磁場によって変換された X/ γ 線の検出によるもののみであった。これらの制限のうち、前者は中性子星の個性や中性子星の内部モデルに非常に依存し、また、観測例も少ない。一方、後者は変換に長い距離を必要とするため、質量が 10^{-9} eV 以下の非常に軽いアクシオンに対してしか制限を与えることができない。以上のような理由で、われわれの実験は各天体からのアクシオン放射に対して

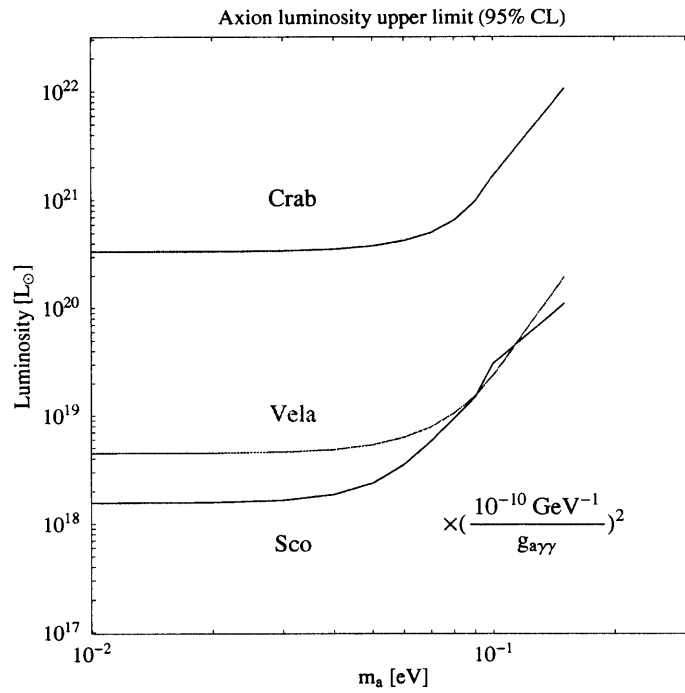


図 4: さそり座 X-1 (Sco)、帆座 X-1 (Vela) 及びかに星雲 (Crab) のアクシオン光度に対する制限。(横軸はアクシオンの質量。各天体に対して線の上側を制限)

直接的制限を与えた最初の実験であると言える。また、スキャン測定においては、全天の 10 % もの領域に対して制限を与えているため、今後何らかの天体モデルが提案される際に重要な拘束条件となりうる。