

論文内容の要旨

論文題目:

Experimental Search for Hidden-Photon Cold Dark Matter
Signatures in the $O(10)$ keV mass range with XMASS-I

(XMASS-I検出器を用いた数10 keV質量領域の
hidden-photon cold dark matterの探索)

氏名 高知尾 理

人工衛星プランクの宇宙観測によると宇宙全体のエネルギー密度のうち通常の物質は4.9%、暗黒物質と呼ばれる未知の物質が26.8%、暗黒エネルギーが68.3%であると示されている。暗黒物質は現代物理学の中で最もその解決が望まれているトピックの一つである。暗黒物質の解決には既存の素粒子理論の枠を超えた更なる理論の発展が不可欠であると考えられている。超対称性理論の枠組みで説明できるニュートラリーノはその中でも、これまでに精力的に探索が行われてきたが、その存在を裏付ける決定的な証拠は得られていない。このような背景から、ニュートラリーノだけにとらわれずその他の可能性についても探索網を拡げることの重要性が増している。

一般相対性理論と量子力学を統一する弦理論を始めとする多くの理論ではしばしば、更なるゲージ対称性が導入されてきた。その中でも最も単純な拡張は $U(1)$ ゲージに対応するものであり、その際、通常的光子と kinetic mixing を通じて混合する「hidden photon」という新しいゲージボソンが提案されている。

Hidden photon は暗黒物質以外にも実験的・観測的なアノマリーを解決する解である可能性から広い波長域(質量領域)で探索が行われてきた。観測手段としては光子と hidden photon が混合するという性質を用いたもの、hidden photon の存在によりクーロン力の逆二乗則に修正が加えられることからその精密測定によって探索を行うものに分かれる。これまでの所、hidden photon の存在を示す結果は得られていない。

今回、我々が注目したのは数10 keVの質量領域の hidden photon である。

この領域では宇宙初期に熱的に生成された hidden photon が温かい暗黒物質(super WIMPs と呼ばれる)を説明できる可能性が考えられた。2013年、XMASS 実験のコミッションング運転時のデータを用いた解析で、その可能性が強く制限された。この領域では他にも赤色巨星のエネルギー損失の精密測定、hidden photon から 3γ への崩壊によるガンマ線の観測から制限が付けられている。

一方、最近の論文でアクシオン生成との類推で傾斜機構(misalignment mechanism)を用いると、非熱的に生成された hidden photon も冷たい暗黒物質を説明できる可能性が、示唆された。この場合、これまで制限されていない広い mass - kinetic mixing のパラメータ領域で hidden photon が暗黒物質を説明できる可能性が残る。

XMASS 実験はニュートラリーノの直接探索を目指した大質量液体キセノンシンチレーター検出器であり、神岡地下実験施設に設置されている(図 1)。有感領域は球形に近い形状をしており、中心部分の有効体積で発生したイベントのみを選別することで、検出器外部からのバックグラウンドを減らすことができる。ところが、2011年のコミッションング運転開始以降、予想以上のバックグラウンドが観測され検出器の部材部分に混入した放射性物質がその主な原因であることが判明した。XMASS 実験では2012年5月から2013年11月までバックグラウンドを削減するための検出器改修を自らの手で行った。

今回は改修後に得られた252.9日分の新しいデータセットを用いて50 – 120 keV_{ee}質量領域の非熱的に生成された hidden photon dark matters (HPDMs)の信号探索を行った。有効体積は全有感領域のおよそ40%にあたる327.8 kg(半径30 cmの球形領域に相当)と設定した。探索質量領域における有意なエネルギーピークを探索する方法で解析を行った結果、残念ながら HPDM を示す信号は見られなかった。そのため、各質量で kinetic mixing に対する90%信頼度での上限値を求めた。結果として、探索を行った質量領域においてこれまでに得られている他の実験結果と比較して、最も厳しい上限値を得ることができた(図2)。

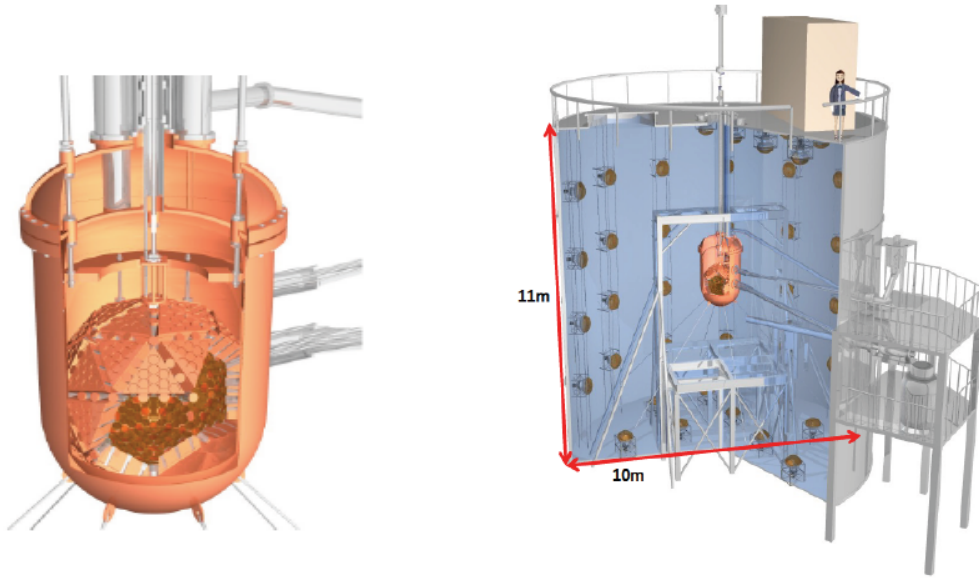


図 1. 液体キセノンを満たし HPDM 信号の反応を検出するための内部検出器 (左図)。半径 40 cm の球体に近い構造に 642 本の光電子増倍管が内向きに取り付けられている。内部検出器は外部からの中性子などのバックグラウンドの影響を抑えるために純水で満たされた水タンクの中に収められている (右図)。

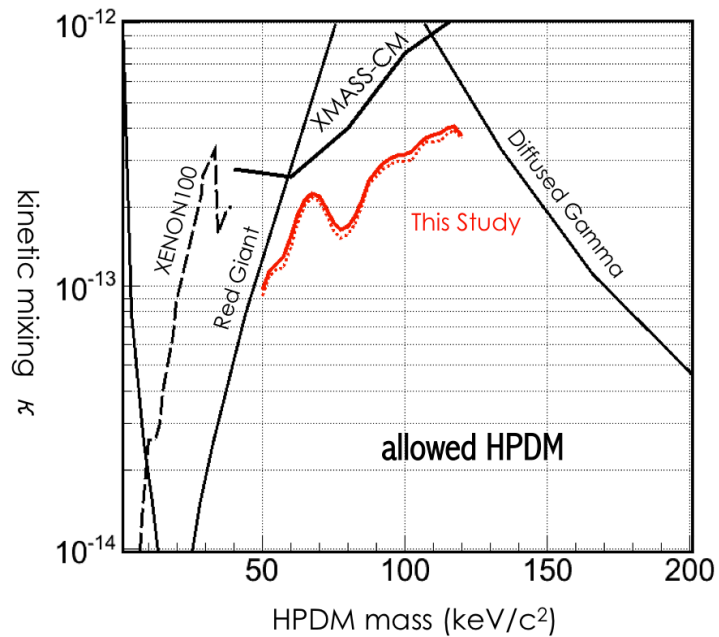


図 2. 本研究で排除した hidden photon の mixing parameter に対するパラメーター領域 (赤実線 : 90% C.L.)。赤色巨星、拡散 γ 線の観測で得られた制限、XENON100 実験のアクシオン探索から推定される制限、改修前の XMASS 実験による super WIMPs 探索で得られた制限も示す。80keV/c²の質量を持つ HPDM に対しては、改修前の 2 倍以上の感度で探索し、非熱的に生成された HPDMs が冷たい暗黒物質を説明できる領域に踏み込んでいる。