

論文の内容の要旨

Search for Sub-GeV WIMP dark matter by annual modulation using XMASS-I detector

(XMASS-I 検出器を用いた Sub-GeV 暗黒物質に由来する季節変動の探索)

氏名：小林 雅俊

近年の天文観測から、我々の宇宙の全エネルギー密度において水素、ヘリウムなど通常の物質が占める割合はおよそ 5% にすぎないことが明らかになっている。およそ 70% は宇宙の加速膨張のエネルギーであり、残りの 25% は暗黒物質と呼ばれる正体のわからない質量である。暗黒物質の有力な候補は Weakly Interactive Massive Particles (WIMPs) と呼ばれる未知の素粒子であり、標準模型にはその候補は存在しない。しかし標準理論を超えた新物理の理論においては、超対称理論などで候補となる粒子が存在している。超対称理論による予言は 100 GeV 程度の質量で、 $10^{-(36-50)} \text{ cm}^2$ 程度の断面積を予想するが、同時に GeV 以下のような質量の WIMPs に対する探索も重要である。これまでの実験では、WIMPs は主に原子核反跳を観測することで探索されていたが、近年、WIMPs と検出器の原子核反跳の際におこる制動放射による γ 線の放出が指摘された。これにより、キセノン検出器を用いて Sub-GeV 領域の WIMPs を探索することが提案されている。

検出器の放射性バックグラウンドから信号を探し出すのに有用な方法のひとつが、季節変動による暗黒物質の直接探索である。一般的な銀河のハローモデルにおいては、暗黒物質は Maxwell 分布をしていると考えら

れている。太陽系の公転方向と地球の公転方向が季節によって変化すると、検出器と暗黒物質の相対速度も変化し、スペクトルの歪みが観測できると期待される、暗黒物質の季節変動は20年以上にわたって行われてきた。特に DAMA/LIBRA 実験は2008年にレートの季節変動を観測し、それが暗黒物質によるものと主張した。彼らのデータは前身の DAMA/NaI 実験と合わせて 1.33 ton year に及び、明確な季節変動が観測された。

この論文の目的は、XMASS-I 検出器のデータを用い、Sub-GeV WIMPs を制動放射スペクトルと季節変動観測によって探索することである。このような方法で Sub-GeV WIMPs を探索する試みは、本研究が初めてとなる。XMASS-I 検出器は1トンのキセノンを用いた低放射能バックグラウンド検出器で、感度領域には 832 kg の質量をもつ。宇宙線の影響を避けるため、岐阜県飛騨市神岡鉱山内で運転を行なっている。XMASS-I 検出器は2010年に運転を開始したのち、検出器改造を行い、2013年11月から再度運転を開始した。XMASS-I 検出器のしきい値は当初 4 hit であったが、2015年12月より低しきい値トリガーが導入され、3hit のデータが取得された。本研究には、2017年6月までのデータを用いている。

解析における主な系統誤差は、検出器応答光量の安定性、エレクトロニクスモジュールの安定性、PMT のシングルレートによる影響などである。まず検出器応答光量の安定性は二つの面からスペクトルの形状を変化させる。一つは透過率の変化によるスペクトルの歪みであり、もう一つはイベントセレクションの効率の変化である。検出器光量の時間変化に応じてこれらが変化するため、定期的なキャリブレーションと検出器シミュレーションに基づいて補正值の計算を行なった。次に DAQ トリガーにおいてはディスクリミネータのベースライン安定性が系統誤差となる。これは定期的なオシロスコープによる測定とチューニングによって系統誤差を抑えた。最後に PMT のシングルレートの変化は、3hit のイベントに影響を与えている。シングルレートによるアクシデンタルな影響は小さいが、シングルレートに付随して PMT が微弱に発光する場合があります、この現象によりシングルレートの変化にコリレートしたイベントが生じている。これに関してはクロックトリガーによる測定を行い、発光事象の時間分布と角度分布からイベントセレクションを作ってカットを行なった。

季節変動の信号は、 χ^2 フィットに基づいておこない、フィットの結果、優

位な信号は観測されなかった。信号がない場合に対する p-value はデータの統計に基づいた Toy MC を解析することによって計算を行ない、制動放射による探索に対してはもっとも小さい質量で 0.15 となり、原子核反跳による探索では 0.08 となった。探索の結果を図 1 に示す。この研究により、

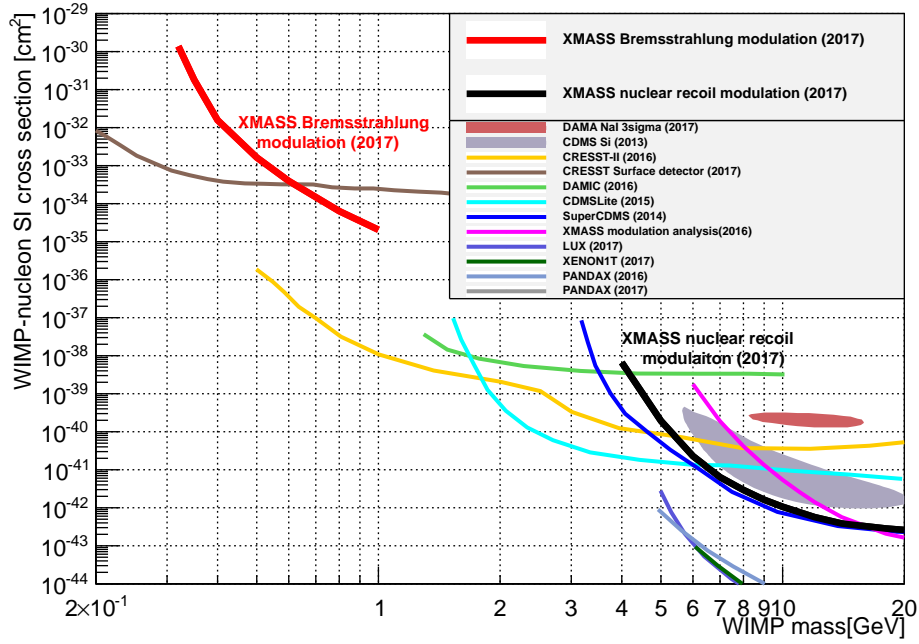


図 1: 本研究の結果と、他実験との比較。

0.5 GeV WIMPs にたいして $1.6 \times 10^{-33} \text{ cm}^2$ という値で 90% confidence level upper limit を得た。また、8 GeV WIMPs にたいして $2.9 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$ という値で 90% confidence level upper limit を得た。また、スペクトル形状を仮定しない場合に対するフィットも行なった。図 2 に、その結果を示す。横軸がエネルギー、縦軸は観測された振幅を信号の efficiency で補正したものである。この研究で特に独創的な点は、これまで半導体や結晶を用いた検出器で探されてきた Sub-GeV WIMP に対して、制動放射スペクトルの季節変動という方法でキセノン検出器による実験的な制限をつけたことである。今後の発展としては、より長い期間のデータを用いた探索を行うこと、また Migdal effect など、制動放射とはまた別の現象による Sub-GeV WIMPs 探索を行うことなどが期待される。

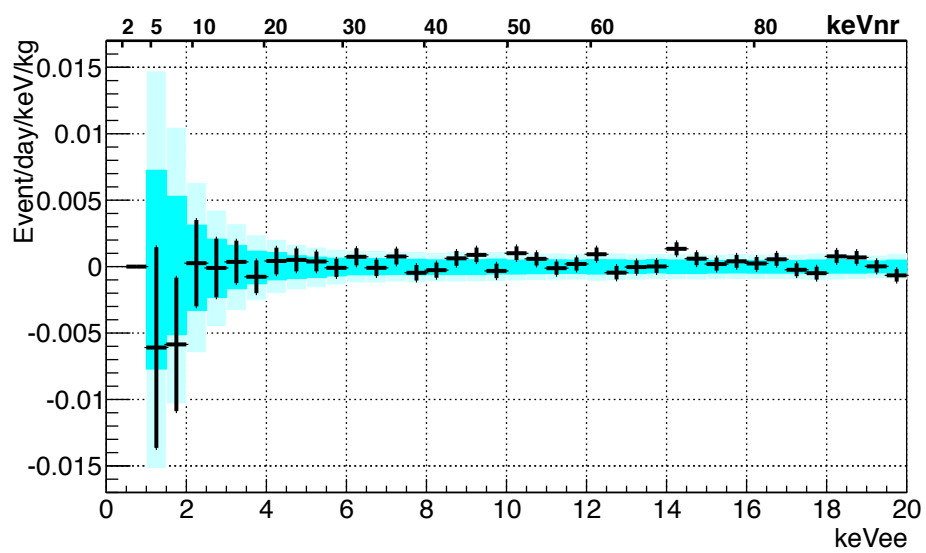


図 2: スペクトル形状を仮定しないフィットの結果。