

論文内容の要旨

論文題目:

Dark Matter Search by Single Phase Liquid Xe Detectors

(一相式液体キセノン検出器による暗黒物質探索)

氏名: 南野彰宏

最近の宇宙観測の発展により、宇宙の全エネルギーの約 30 %が物質のエネルギーで、その約 80 %が暗黒物質であることが明らかになった。その暗黒物質の正体はいまだ謎であるが、超対称性理論で存在が予言されるニュートラリーノが有力視されている。ニュートラリーノは原子核と弱い相互作用を通じて弾性散乱すると理論で予言されており、この散乱された原子核を測定することによりニュートラリーノを直接探索することが可能である。

XMASS コラボレーションはこの暗黒物質としてのニュートラリーノの直接探索を目的に液体キセノン検出器の開発を行っており、現在神岡地下実験施設で 800kg の液体キセノンを使った一相式液体キセノン検出器 (800 kg 液体キセノン検出器) の建設を進めている (図 1 参照)。(液体キセノンのシンチレーション光のみを測定する実験は一相 (液相) のみを検出器として用いる為、一相式検出器と呼ぶ。) 図 1 に 800 kg 液体キセノン検出器の概念図を示す。800 kg 液体キセノン検出器は次のような暗黒物質探索に最適化された特徴を持つ。

- 大きな光電面被覆率 (約 70 %) と大きな光電子収率 (約 5 p.e./keV)。
- 厚い自己遮蔽体積 (約 20 cm) と大きな有効体積 (約 100 kg)。
- 低バックグラウンド光電子増倍管 (後に述べるプロトタイプ液体キセノン検出器に使われている光電子増倍管に比べて放射性不純物含有量が約 1/10 倍)。
- 約 4 m の厚さの超純水によるガンマ線と中性子の遮蔽。

この 800 kg 液体キセノン検出器を用いれば、図 2 に示されるように現在達成されている感度を約 2 桁程度向上させて暗黒物質としてのニュートラリーノ探索が行える。



図 1. 800kg 液体キセノン検出器の概念図。検出器の直径は約 1 m で、約 800 本の低バックグラウンド光電子増倍管で液体キセノンを取り囲み測定を行う。

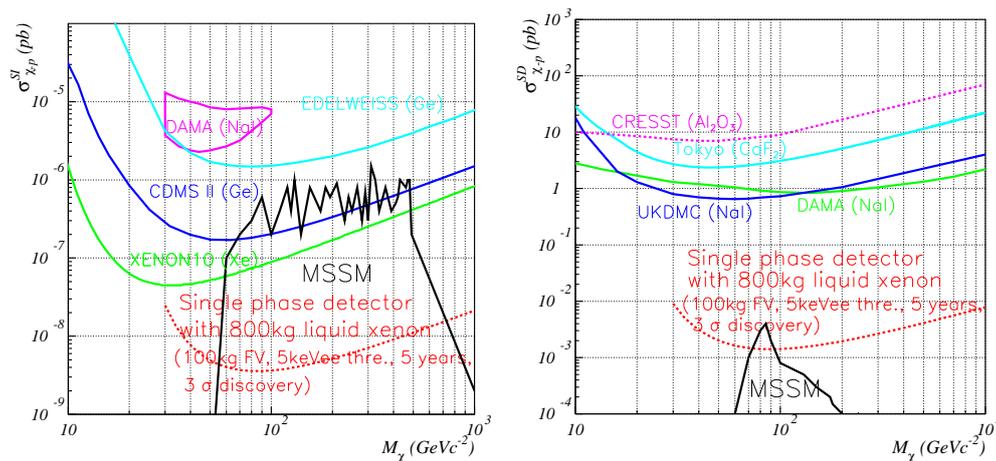


図 2. スピンに依存しない場合 (左) とスピンに依存する場合 (右) のニュートラリーノと陽子の散乱断面積。実線の上側が実験により 90% の信頼度で排除されている。赤い点線が 800kg 検出器で期待される探索感度で、既存の実験より約 2 桁よい感度で暗黒物質の発見を目指す。

我々は、一相式液体キセノン検出器の性能を確認することを目的に、一相式プロトタイプ液体キセノン検出器 (プロトタイプ検出器) の開発を神岡地下実験室で行った。プロトタイプ検出器は約 80 kg の液体キセノンが無酸素銅製のチェンバーに導入して測定を行い、シンチレーション光は、フッ化マグネシウム窓を通して 54 本の低バックグラウンド光電子増倍管で読みだす。図 3 に我々のプロトタイプ検出器の写真と断面図を示す。このプロトタイプ検出器を用いて液体キセノンの特性測定および一相型液体キセノン検出器の性能評価を行い、次のような結果を得た。

- 液体キセノンのガンマ線バックグラウンドに対する自己遮蔽能力はシミュレーションと一致し、期待通りであった（図4参照）。
- 液体キセノンシンチレータは $dE/dx = \infty$ の時、 $80.6(\pm 4.0)$ photons/keV と十分に大きな発光量を持つことを確認した。
- 液体キセノンはシンチレーション光に対して、 $66(\pm 10)$ cm と十分に長い吸収長を持つことを確認した。
- 光電子増倍管の光量分布を用いたイベントの位置とエネルギー再構成の結果はシミュレーションと一致し、期待通りの性能を得た。

プロトタイプ検出器は、暗黒物質探索を目的に開発されたものではないので本来は暗黒物質探索に感度はないが、できる限りの改良を試み暗黒物質探索を行った。2006年11月からの約1カ月間の測定の結果、暗黒物質の信号を見つけることはできなかったが、図5に示されるニュートラリーノと陽子の散乱断面積に対する制限曲線を得た。我々の実験は、相互作用がスピンに依存しない場合は $62 \text{ GeV}/c^2$ のニュートラリーノに対して $1.70 \times 10^{-5} \text{ pb}$ 、相互作用がスピンに依存する場合は $60 \text{ GeV}/c^2$ のニュートラリーノに対して 6.74 pb の制限をつけ、期待された感度に近い結果を得た。以上のプロトタイプ検出器を用いた測定により、一相式液体キセノン検出器は暗黒物質探索に優れた性能を有していることが明らかになり、 800 kg 液体キセノン検出器は期待される感度で暗黒物質探索が行えることが実証された。

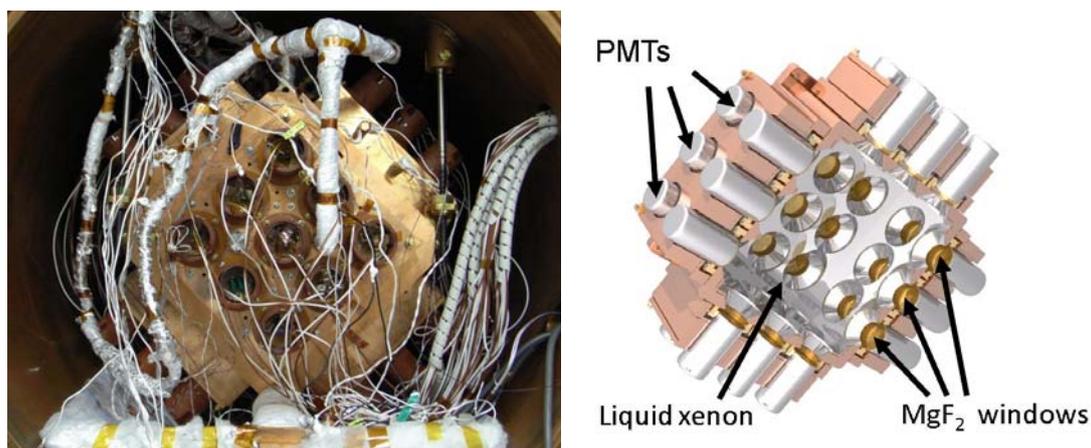


図3. 一相式プロトタイプ検出器の写真(左)と断面図(右)。プロトタイプ検出器は一辺が30cmの無酸素銅製の立方体型チェンバーで、内部に約90kgの液体キセノンを導入して測定を行う。液体キセノンのシンチレーション光は、 MgF_2 窓を通して54本の低バックグラウンド光電子増倍管で検出する。

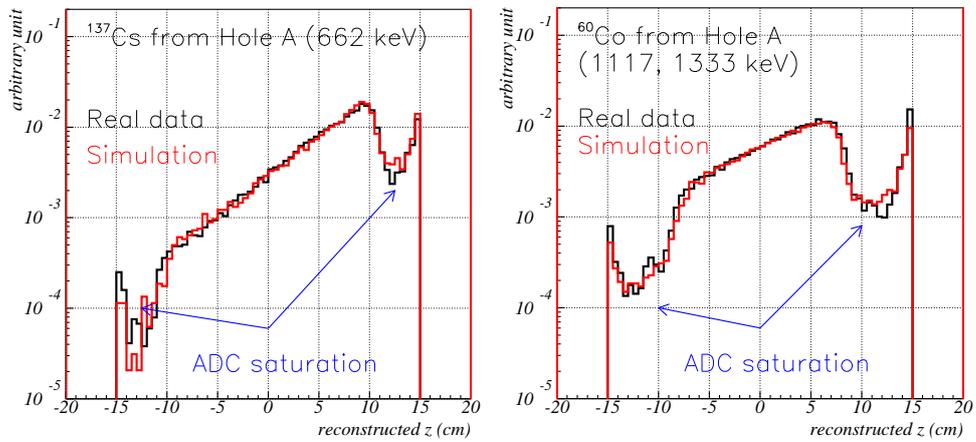


図 4. ガンマ線入射軸に射影したイベントの位置 (黒線が測定データ、赤線がシミュレーション)。2 種類のガンマ線源、 ^{137}Cs (左) と ^{60}Co (右) について調べたところ、測定データとシミュレーションの結果が一致した。この結果より、液体キセノンはガンマ線バックグラウンドに対して期待どおりの自己遮蔽能力を持つことを確認した。

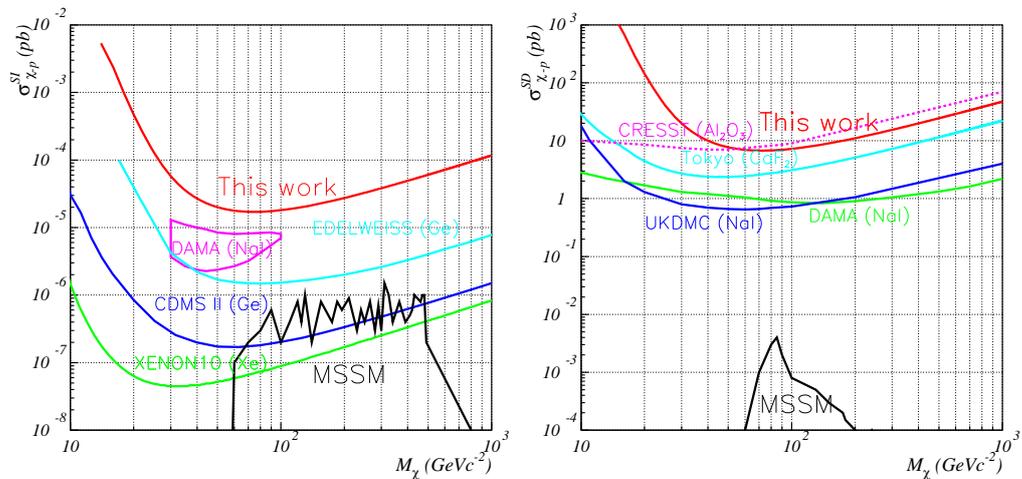


図 5. スピンに依存しない場合 (左) とスピンに依存する場合 (右) のニュートラリーノと陽子の散乱断面積。実線の上側が実験により 90 % の信頼度で排除されている。赤線 (This work) が一相型液体キセノンプロトタイプ検出器による制限曲線。