

XENON10 暗黒物質直接探索実験

東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子施設

山下 雅樹

2008年8月31日

1. はじめに

2007年4月に米国物理学学会にて暗黒物質直接探索実験 XENON10 結果が発表された[1]。これは気体 - 液体 2 相型 キセノンをを用いた検出器でここ5年ほどリードしてきた Ge 検出器を用いた CDMS グループよりも暗黒物質と核子の断面積にして数倍よい結果であった(2008年現在では CDMS も新しい結果を発表した 後述参照)。結果はもとより、短期間になし得たこと、さらに将来の暗黒物質探索検出器としてポテンシャルの高さを示したことにインパクトがあったようである。本稿では私が XENON グループ参加していた 2003 年から 2007 年の間、XENON10 の始めから終わりまでを現場の雰囲気織り交ぜながらお伝えしたい。

2. 暗黒物質

最近の観測で明らかにされた非バリオン暗黒物質の証拠は多岐に及ぶ[2]。たとえば WMAP 衛星の宇宙背景マイクロ波観測によると非バリオン暗黒物質は宇宙の質量の約 23% を占めているとされ、その正体を解き明かそうと暗黒物質直接検出の意義はますます高まっているといえる。暗黒物質の存在が指摘され始めたのは 1933 年の F. Zwicky に遡る。彼はかみのけ銀河団の赤方偏移による観測から目に“見える物質”だけでは銀河団が平衡状態にあるのは難しく、重力を感じるが“目に見えない”物質の必要性を示した。この“目に見えない”物質が暗黒物質と呼ばれる。

このような様々な観測や計算から暗黒物質の正体は次のような性質を持つ粒子だと考えられている。

- 電荷を持たない
- 冷たい(非相対論的速度)
- 安定している

冷たい暗黒物質の正体については、過去 20 年 heavy Dirac neutrino (標準理論の第 4 世代粒子) や Cosmions (太陽ニュートリノ問題を解決するために提案された粒子) などが候補から排除されてきた。最近の暗黒物質の有力候補の一つは、Weakly Interacting Massive Particle (弱い相互作用をする大質量粒子: WIMP と略する) と呼ばれ、超対称理論で予想されている新しい粒子、ニュートラリーノである。ニュー

トラリーノは、光子、ヒッグス、または Z ボソンのフェルミオン超対称粒子の重ね合わせからなる粒子である。この粒子は“目に見えない”(つまり、電磁波を放出吸収しない)ため、弱い相互作用または重力によってその存在を確かめることになる。ニュートラリーノの質量は超対称粒子の中でもっとも小さく(陽子質量の 100 倍程度)安定していると考えられている。そういう意味で暗黒物質問題は、宇宙物理学だけでなく素粒子物理学にとっても重要な課題といえる。現在のところ、実験の規模が数億円以下と、大型加速器や大型ニュートリノ実験よりもかなり小さいこともあり、現在 10 以上の探索グループが存在し、激しい国際競争の真っ只中にある。

3. 暗黒物質をどう捕まえるか?

太陽系での暗黒物質の局所的な密度は、約 $0.3 \text{ GeV}/c^2/\text{cm}^3$ と見積もられる。この粒子は光の速度の約 1000 分の 1 で飛んでいると考えられ、1 秒間に百万もの数人が人間サイズの体積を通過しているが、通常の物質との相互作用は非常に稀にしか起こらない。超対称論に 10^{16} GeV で力が統一するという制限を加えた Constrained MSSM に基づく計算によると、通常の物質と相互作用するイベント頻度は、0.1 から 0.00001 events/kg/day と非常に少なく、核子との散乱断面積にして $10^{-42} \sim 10^{-46} \text{ cm}^2$ と探索する領域はかなり広い範囲が予想されている[3]。

WIMP と核子の弾性散乱はイベント頻度が稀である上に、反跳核のエネルギーが 10 keV 程度と小さい。その断面積は原子核のスピンに依存しない項と依存する項に分けられる。スピンに依存しない場合は、コヒーレントに相互作用するため、散乱断面積は検出器媒体の質量数を A とすると A^2 に比例する。また、スピンに依存する場合は検出媒体に奇数の質量数を持つ原子核が必要で、断面積はその核構造に左右される。図 1 に典型的な検出媒体と WIMP の弾性散乱(スピンに依存しない場合)の反跳エネルギースペクトルを示す。なお、WIMP の質量を $100 \text{ GeV}/c^2$ 、散乱断面積を $1.0 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$ と仮定してある。図 1 から分かるように、エネルギー閾値を十分に下げることができれば、キセノンのような大きな質量数の検出媒体が有効である。

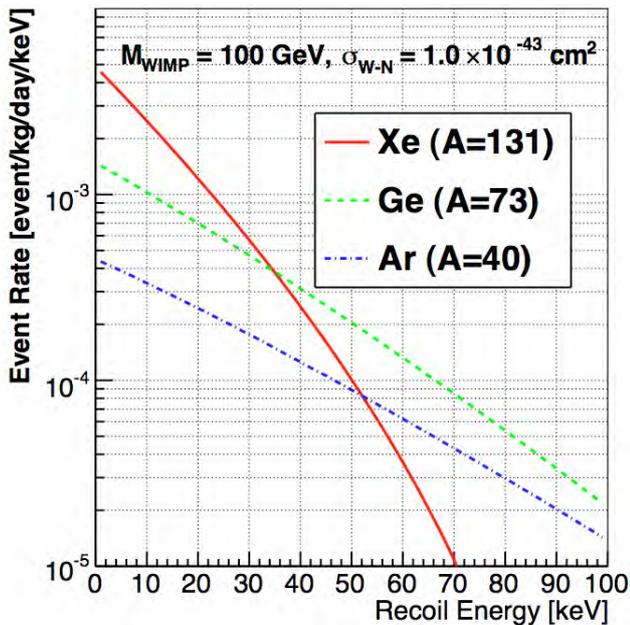


図1 WIMPによる原子反跳エネルギースペクトラム
WIMP 質量 100 GeV, 散乱断面積 $1.0 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$ を仮定し, 検出媒体がそれぞれ Xe, Ge および Ar の場合を示す。

イベント頻度が稀であるので 実験ではいかに放射性バックグラウンドの海をかいくぐるかにかかっている。通常, 外部からの放射線バックグラウンドに対して, ガンマ線を遮蔽する鉛や銅, 高速中性子に効果的なポリエチレンや水を使用する(図 2)。



図 2 グランサッソに設置された XENON10 のシールド内側ポリエチレン 20 cm は高速中性子のため, さらに鉛 20 cm で外から来るガンマ線を防ぐ。

しかし, 要求される感度は高く, 細心の注意を払って選定したとしても, そもそも検出器の素材に含まれるウラン・トリウムなどの天然放射性物質からの内部雑音だけでも限界に達してしまう。この問題を解決するために, おもに検出器自身から来るガンマ線による「反跳電子」と WIMP に散乱された「反跳核」をイベント毎に識別して除去できれば, 実験を大変有利に進めることができる。たとえば,

CsI などのシンチレータ検出器実験ではこのために波形弁別が応用されている。一方, Ge と Si 半導体を用いた CDMS 実験では, 電離信号と非熱的フォノン信号を使ってバックグラウンドの識別を行っている[4]。これから紹介するのは, 気体 - 液体 2 相型希ガス検出器で, 希ガスとしてはキセノンやアルゴンが応用されている。この方法では直接蛍光と電離信号を同時に測定し, イベント毎の粒子弁別を行う。

4. 気体 - 液体 2 相型希ガス検出器

大型化しやすいこと, 質量数の大きい物質は検出感度が高いこと, 発光光量が多いことなどの理由から希ガス液体, 特に液体キセノン(密度 3 g/cc, 約 -100°C) は暗黒物質探索検出媒体として優れている。希ガス液体検出器はシンチレータとしてだけでなく, 電離箱としても動作する。入射電子が液体キセノン中で蛍光光子または電離電子 1 個を作り出すのに必要な平均のエネルギーは, それぞれ 21.6 eV と 15.6 eV である[5]。液体キセノン検出器の使い方として, MEG 実験[6]や XMASS[7]のように蛍光だけで使われることが多いが, 2 相型検出器はこの直接蛍光と電離電子の両方の信号を用いるので Time Projection Chamber(TPC)として用いる。その際, 液体中で発生した電離電子を気体層で比例蛍光に変えて読み出すところに特徴がある。電離電子が気体層で多数の比例蛍光を発生させるため, 信号の閾値を数電離電子相当まで下げることが可能になり, 低エネルギー領域の感度が飛躍的に向上する。さらに, 電離電子信号の読み出し用の前置増幅器が不要になり, PMT のみで容易に信号の読み出しができる。

図 3 に検出器の動作原理を示した。まず入射粒子が検出器内(多くは液層)で相互作用し, 30 nsec 以下で減衰する直接蛍光(S1)が光電子増倍管(PMT)で捉えられる。続いて再結合を免れた電離電子は電場(E_d)によって Z 方向に移動する。液体・気体 2 相間には約 0.7 eV のポテンシャル層が存在するため, 外部から約 10 kV/cm の高電場(E_g)を掛け, 電離電子を液体層から気体層へ引っ張りだす。気体層の境界部分では, 電離電子数に比例した比例蛍光(S2)が発生し, この信号を PMT で読み取る。比例蛍光の増幅率は一個の電離電子に対し約 200 光子である。XENON10 のデータを見ると, なんと 1 電離電子信号まで見てとることができる(30 光電子相当!)。

電離電子は液層中を図 3 の Z 軸に平行に移動し, その速度は約 $2 \text{ mm}/\mu\text{sec}$ である。S1 と S2 の時間差は電離電子の移動時間であるが, S2 は, ほぼ境界面で発生するため, この時間差が S1 発生位置の Z 方向情報に相当する。この方法による位置の決定精度は 1 mm 以下である。また, 反跳核のイベントは反跳電子に比べ電離密度が高いので, 媒質中で

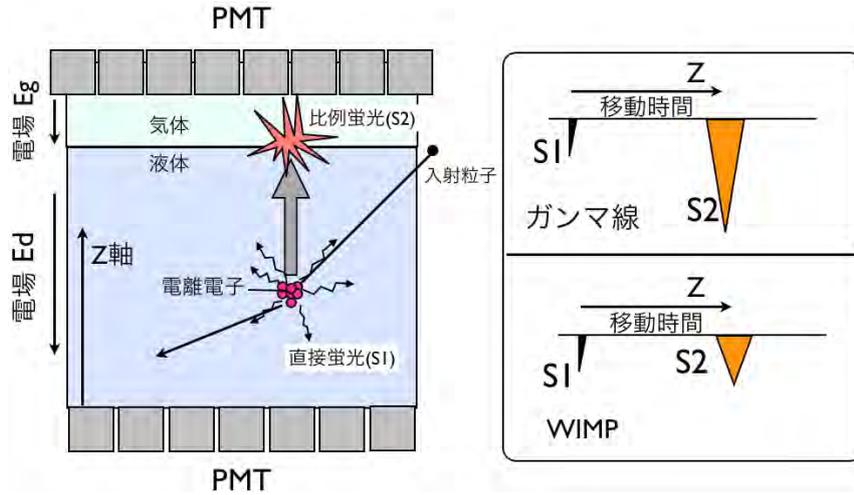


図3 2相型検出器の概念図

検出器は液層と蒸気の気層からなり、上下に並べられたPMTによって信号が読み出される。S1とS2の時間差は電離電子の移動時間に相当し、Z方向の位置情報となる。

再結合する割合が多く、S2信号は反跳電子より小さくなる。よって図3のように、S1とS2の比を見ることによって、反跳粒子を弁別することができる。

5. XENON10

5.1 Ciao Gran Sasso!

XENON10実験は2002年からfundがつき、NSFとDOEにサポートされた、アメリカ、スイス、イタリア、ポルトガルが参加する国際共同実験で、約30人の共同研究者からなる(図4)。私自身は2003年から参加していた。様々な基



図4 XENON コラボレーション
後ろには美しいグランサッソの山々がそびえる。

礎特性の試験を経て、われわれは、2005年後半からニューヨーク・コロンビア大学 NEVIS Laboratory というマンハッタンから車で30分ほどの実験ホールにてXENON10検出器の建設を始めた。ライバル実験は多く、またよい結果ができるのは十分期待できていたので、建設は猛スピードで行われた。建設から基礎動作を確認し、FEDEXで輸送するまで約4ヶ月。2006年3月初めに、まだ雪の降るイタリア・

グランサッソ地下実験施設に移動した(ちなみにグランサッソはイタリアの冷蔵庫と呼ばれるらしい)。振り返れば2007年3月には解析が終了していたので移設からたった一年で結果を発表したことになる。

グランサッソはローマの東、美しいアペニン山脈に位置し、国立公園にも指定されており、スキーや登山で賑わう場所だ。地下実験施設へは高速道路のトンネルを途中右折して入る。深さは1400m(3100m水深相当)あり、地上と比べミュオン流束が約6桁少ない環境である。XENON10実験の感度でもミュオンを起源とするバックグラウンドは無視できる。

幸運なことにXENON10ではオペレーションと解析の責任者を任された(解析はR. Gaitskell ブラウン大学と兼任)。メンバーの出身国は、中国、イタリア、ポルトガル、メキシコ、フランス、ロシア、アメリカ、カナダ、ブラジル、イギリスと、てんでんバラバラだったが、みな一丸となって仕事を進めた。しかし、他の苦勞も多く、たとえば、グランサッソに来た当初は美味しい食事、美しい風景でみんなエキサイトしていたが、学生などは数ヶ月たつと大抵ガールフレンドや家族などとホームシックにかかりアメリカに帰りたがったので、そんな学生たちを励まして仕事に向かわせるのも任務の一環だった。片言のイタリア語でのマシンショップのテクニシャンとのやり取りも、今となってはよい思い出である。

5.2 XENON10 検出器

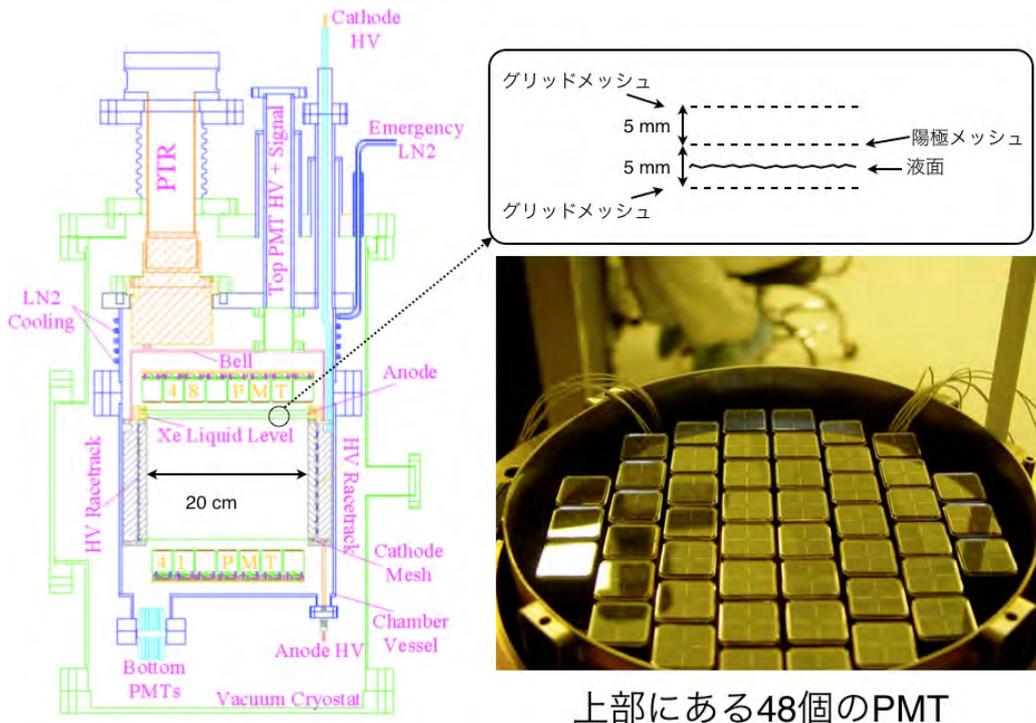
図5はXENON10検出器で、図6にその断面図と上部PMTアレイの様子を示す。液体キセノンは、直径20cm、高さ15cmの円筒形のPTFEテフロン反射材で囲まれている。有感体積の質量は14kgである。通常キセノンガスには数

ppm レベルの Kr が不純物として混入しているが、この実験に使用されたキセノンは、⁸⁵Kr からの β 崩壊によるバックグラウンドを避けるために、Kr 含有量が 10ppb 以下のものを使用している。テフロン反射材両端の上部と下部には



図5 シールド内に設置された XENON10 検出器

メッシュ状の陰極、陽極がそれぞれ備え付けてある。メッシュは 180 μm 幅のステンレススティールを 2mm 間隔で並べたもので、陰極、陽極の電圧はそれぞれ -12kV と +3.1kV である。上部気体層に高電場を掛けるため、陽極は二つのグリッド電極(それぞれ -1.1kV が掛けられている)に 5mm 間隔で上下を挟まれている(図6右の拡大図)。陰極 - グリッド間に相当する移動領域の電場は -Z 方向に 0.73kV/cm である。S1 と S2 蛍光は検出器上下それぞれに敷き詰められた 1 インチ PMT (Hamamatsu, R8520-06-A1) によって読み出される。上部 48 本の PMT は気層にあり、下部 41 本の PMT は液体キセノンに浸っている。液体キセノンの屈折率は 1.6 で、液体中で発生した蛍光 S1 の多くは、液面で全反射する。このためほとんどの直接蛍光は下部の PMT で検出される(余談ではあるが、同時期に同じ 2 相型で実験を行っていた ZEPPLIN-II という実験があったが、彼らは下方に PMT を置かなかったので、XENON10 よりも光量にして数分の一程度しかなかった)。一方、S2 信号は気層で起こるため、全光量の半分以上は上部 PMT で検出され、残りは下部 PMT で捉えられる。上部 PMT アレイの信号分布からは、S2 信号を起こした電離電子の X-Y 座標が数 mm の精度で決定され、電子移動時間から求まる Z 方向の情報と合わせて、イベントの位置情報が三次元で再構成される。この高い位置分解能を生かして、有感体積中で起こった中性子やガンマ線の多重散乱イベントを判別できる他、PMT やステンレス製真空容器などからのバックグラウンドを決定精度よく fiducial cut することができる。



上部にある48個のPMT

図6 XENON10 検出器の断面図(左)と上側に配置してある 48 本の PMT の写真

冷却には、長期安定運転できるよう、液体キセノン用に KEK-岩谷瓦斯で開発された 90 W のパルス管冷凍機が用いられ[8]、液体キセノンを約 -93°C に維持した。この時のキセノン蒸気圧はおよそ絶対圧 2.3 気圧である。検出容器は断熱真空のために二重構造になっている。運転中は常時ダイアフラムポンプを用い、キセノン蒸気は流量 3 l/min で、ゲッター純化装置を通して循環させた。

データ取得システムは 105MHz Flash ADC (Struck, model SS3301)を用い、すべての PMT からの波形を記録した。WIMP 探索データの収集では、上部 PMT の 1 本を除いて全チャンネルが順調に稼働した。トリガーには上部中央 34 本の PMT からの S2 信号が使用された。ハードウェアの閾値は 100 光電子で、反跳核エネルギー 1 keV 以下に相当する。

5.3 データ解析

2006 年 10 月 6 日から 2007 年 2 月 14 日までの間に 58.6 日分の WIMP 探索データを取得し、“blind analysis”を行った。WIMP 信号が期待される領域のデータは、選択するパラメータ領域を決定するまでは見ることができず、解析にバイアスがかからないようになっている。選択パラメータ決定には、ガンマ線源 ^{137}Cs と高速中性子線源 AmBe をそれぞれ用いた較正データと、最終解析用データとは別の、40 日分の“オープンな”WIMP 探索データが用いられた。

図 7 に Y 軸方向に平行な点線で示された WIMP 信号の期待される反跳核エネルギー領域 ($4.5 - 26.9\text{ keV}$)において、まず ^{137}Cs 線源を用い、ガンマ線による反跳電子イベントを約 10,000 イベント取得した。中央 5.4 kg の有効体積内で起

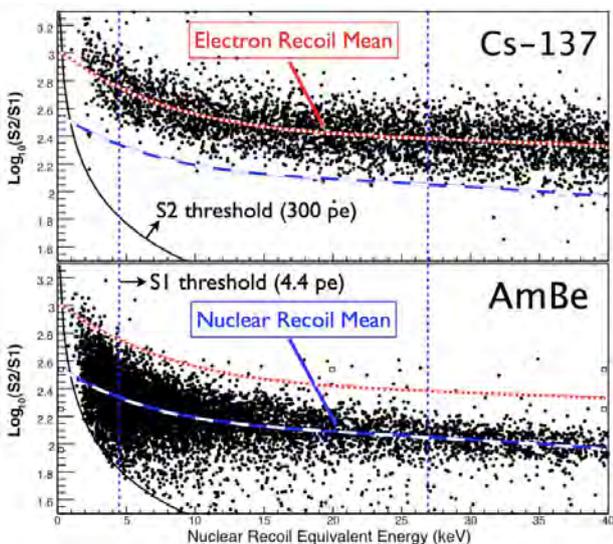


図 7 ^{137}Cs 線源(上段)と AmBe 線源(下段)を照射したときの $\log_{10}(S2/S1)$ のエネルギー依存性

二つの曲線はそれぞれ反跳電子、反跳核における分布の平均値。反跳核エネルギー 4.4 keV から 26.9 keV 、反跳核での平均値を $\log_{10}(S2/S1)$ を上限として WIMP 信号領域を決定した。

きたのは約 2,400 イベントで、最終解析データの 1.3 倍に相当する。反跳核に対する較正データは、200 中性子/秒の放射能を持った AmBe 線源を用い、データを 12 時間取得した。グランサツソでは DAMA や WARP など他にも暗黒物質探索実験が行われているので、中性子線源の取り扱いには細心の注意が払われ、地下実験室内の輸送ルートや時刻を含め綿密なスケジュールが組まれた。図 7 にそれぞれの較正データの様子を示す。S1 と S2 の解析閾値は、それぞれ 4.4 光電子(反跳エネルギー 4.5 keV 相当)と 300 光電子(10 電離電子相当)であり、検出効率とはともに 99% である。バックグラウンドガンマ線の識別能力は、反跳電子(図 7 上段)と反跳核(図 7 下段)それぞれの応答で S2 と S1 の比が異なることから決まる。反跳電子、反跳核それぞれの $\log_{10}(S2/S1)$ 分布の平均値の差は、エネルギーが小さくなるにつれてわずかに広がる。また、反跳電子の場合、エネルギーが小さくなるほど $\log_{10}(S2/S1)$ の分布の拡がりそのものが小さくなっている。WIMP による反跳核イベントとして、 $\log_{10}(S2/S1)$ 分布で、反跳核較正データの平均値より下側の領域を選択する。この時ガンマ線の除去効率は、エネルギー範囲全体の平均で 99.7%、低エネルギー側では 99.9% に達する。このエネルギー依存性は、飛跡構造や電離密度の違いが再結合の過程に影響しているためだと考えられている。

6. 結果とまとめ

58.6 日分のデータを解析した結果、WIMP 信号領域に 10 個のイベントが残った。図 8 はその様子を示したもので、図 7 と基本的に同じだが分かりやすいように反跳電子のイベント $\log_{10}(S2/S1)$ の平均を 0 と規格化しその値からの差 $\Delta\log_{10}(S2/S1)$ に Y 軸を変えてある。 $\log_{10}(S2/S1)$ の統計分布を考慮すると、この領域へバックグラウンドからしみ出すイベント数は 7 個と見積もられ、実際、観測された 10 個

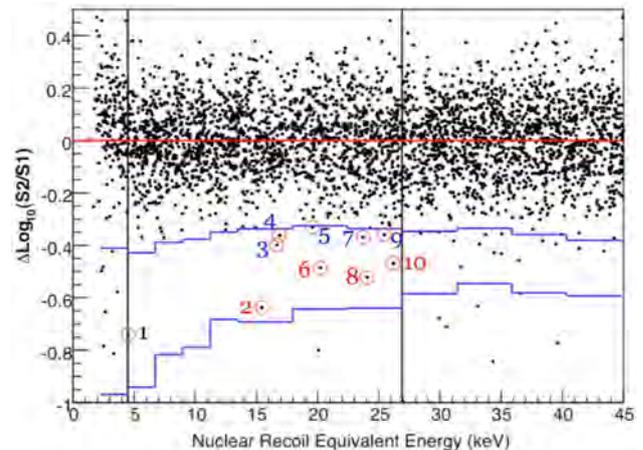


図 8 58.6 日分の観測データ

ジグザクで囲まれた領域が WIMP 信号の期待される領域。計 10 個のイベントが残った。

のイベントのうち反跳核 $\Delta \log_{10}(S2/S1)$ 分布の平均値付近にある5個(図8の3, 4, 5, 7, 9)はS2:S1比から見てガンマ線バックグラウンドとしても矛盾がなかった。1番はエレクトロニクスからのノイズ, 残りの4個のイベント(2, 6, 8, 10)は, 信号比の値はよかったが, 検出器の下方に集中しており, WIMP信号とするには疑問の残るものであった。検出器の有効領域外である陰極より下の下部PMT周囲(S2信号は観測されない)と有効領域で多重散乱した, つまりガンマ線のコンプトン散乱イベントと考えられる[1]。今思うとちょっと間抜けな設計であった。外からの光はPTFEなどで容易に遮断することができるからである。

散乱断面積上限値としてより慎重な値を見積もるために, ここではバックグラウンドからの染み出しも含め残った10個すべてのイベントを考慮にいった。スピンの依存しない場合として計算した WIMP-核子散乱断面積上限値曲線と, CMSSM のモデルで予想されるパラメータ領域を図9に示した。今回得られた上限値は WIMP 質量が $30 \text{ GeV}/c^2$ で $4.5 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$, $100 \text{ GeV}/c^2$ の場合は $8.8 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ となり, CMSSM 理論の領域に大きく踏み込むことができた。

また, スピンに依存する場合の WIMP-neutron と WIMP-proton の散乱断面積を図10に示す。キセノンの場合, 天然存在比にして, 26.4%の $^{129}\text{Xe}(\text{spin } 1/2)$ と21.2%の $^{131}\text{Xe}(\text{spin } 3/2)$ の同位体が存在する。キセノンは原子番号が54であるので中性子が余り, WIMP-neutron で特に感度

がある。感度は核の構造因子の計算にも依存するので, モデルの不確定性を知るためにも, ここでは点線と実線で二つのモデルで制限曲線を引いた。いずれにせよ, WIMP-neutron ではもっとも厳しい制限曲線を与えることができた。

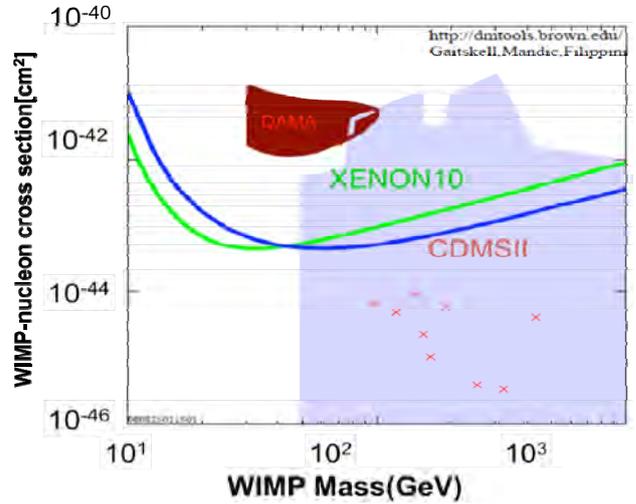


図9 スピンに依存しない場合の WIMP-核子散乱断面積の上限値曲線とCMSSMのモデルで予想されるパラメータ領域。

XENON10, CDMSとDAMAによる信号領域。

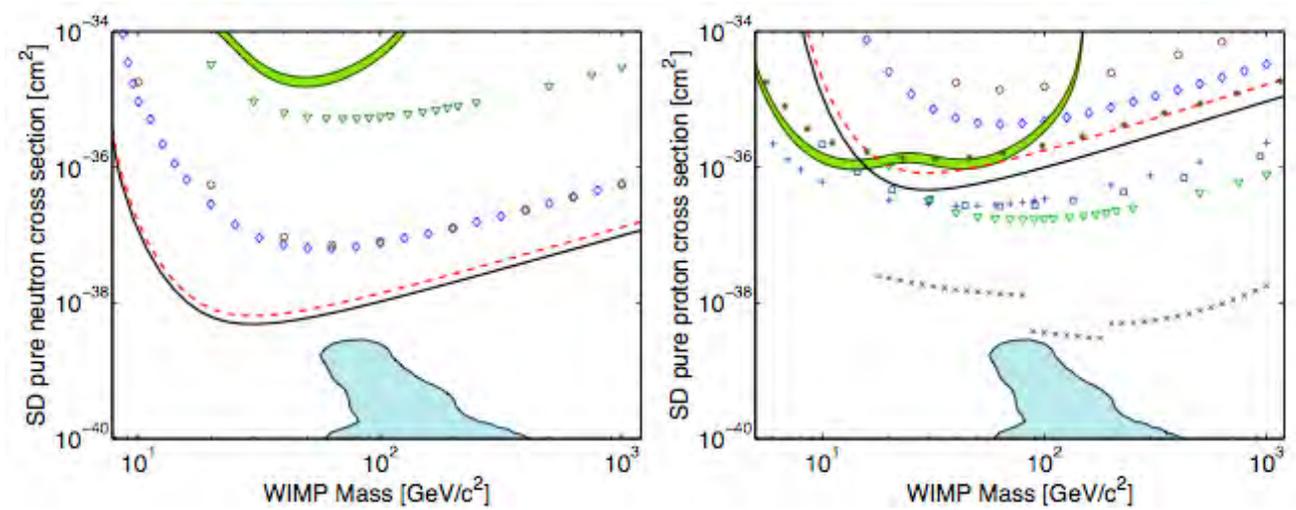


図10 スピンに依存する場合の WIMP-neutron(左), または WIMP-proton(右) 散乱断面積

実線と点線が XENON10, 帯線は DAMA 実験によるもの。CDMS(ダイヤモンド: \diamond), ZEPLIN-II(丸: \circ), KIMS(三角: \triangle), NAIAD(四角: \square), PICASSO(星: $*$), COUPP(十字: $+$), Super K(クロス: \times)。領域は CMSSM モデルで計算されたもの[9]。

7. 終わりに

液体キセノンは真空容器を大きくしてさえ行けば、液体であるがゆえに形状を選ばず、容易に大型化することができる。液化温度も -100°C と CDMS の様な mK レベルのボロメータ温度に比べ格段に取り扱いやすい。将来の暗黒物質探索検出器として大いに期待できることが示せたと思う。

現在欧米では、散乱断面積にして 10^{-45} から 10^{-46} cm^2 の領域を狙う複数の実験が提案されている。これは SUSY で Focus Point 領域に対応する。感度をさらに上げる一方で、ここでは詳しく触れなかったが DAMA の季節変動による信号と他の実験と相反する結果も解決していかなければならないという課題も残る。

XENON10 に続く XENON100 実験はグランサツソで準備が進められており、2008 年の秋頃には動き出すであろう。XENON100 はバックグラウンドをさらに押さえ、XENON10 よりも 40 倍よい感度を目指す。

日本でも 1 トンサイズの液体キセノン検出器の準備が XMASS グループによって進められている[7]。実験室の空洞も完成し、2009 年の夏頃に検出器完成を目標に準備が進められている。暗黒物質直接探索実験は非常に楽しみな時期を迎えているといえるだろう。

References

- [1] J. Angle, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 021303,
山下雅樹：『パリティ』3月号 (2008) 33.
- [2] D. N. Spergel, *et al.*: Astrophys. J. Suppl. **170** (2007) 377,
M. Tegmark, *et al.*: Phys. Rev. D **74** (2006) 123507.
- [3] L. Roszkowski, *et al.*: JHEP **07** (2007) 075,
hep-ph/0705.2012,
J. Ellis, *et al.*: Phys. Rev. D **71** (2005) 095007.
- [4] D. S. Akerib, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 011302,
astro-ph 0802.3530v2.
- [5] T. Doke, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1538.
- [6] 三原 智：高エネルギーニュース **26** No. 1, 9-15, 2007.
- [7] XMASS 実験：<http://www-sk1.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/>
- [8] T. Haruyama, *et al.*: Cryocoolers **13**, Springer, (2005) 689.
- [9] J. Angle, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 091301.