

XMASS 実験の紹介

東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設

● ダークマター（暗黒物質）とは？

宇宙が何でできているかを調べてみると、われわれが知っている、陽子や中性子など”目に見える”（観測されている）物質は全体の約4%にしかすぎません。その5～6倍は未知の物質（ダークマター）が占めていると考えられます。残りはダークエネルギーと呼ばれている正体不明のものです（図1）。これまで観測に利用されてきたのは、光やX線、赤外線などの電磁波ですが、”暗黒”物質というのは、電磁波での観測では見ることができないため、”暗黒（ダーク）”という呼び名がついています。

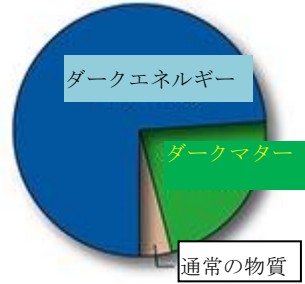


図1 宇宙の組成

ダークマターは様々な観測からその存在が示唆されてきました。1970年代後半、渦巻き銀河の回転速度分布を観測し、銀河内の明るい星や星間ガスではない、光では観測できないが重力を感じる物質の存在を立証しました（図2）。また、非常に重い物質（すなわち大きな重力）があると光が曲げられる、という「重力レンズ効果」からもダークマターの存在を示す証拠が得られています。

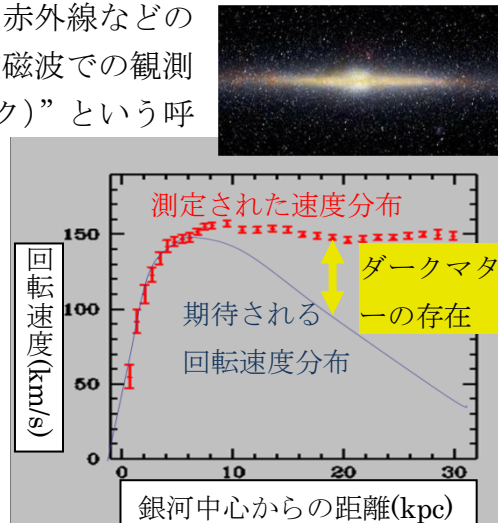


図2 渦巻き銀河の回転速度分布

さらに、現在の宇宙は、銀河、銀河団、何もない空洞などが複雑に連なった大規模構造を形作っていることがわかってきました。この成り立ちは次のように考えられています。初期の宇宙のわずかなゆらぎ（図3）からダークマターの密度に差が生じ、密度の濃いところは重力によってさらにダークマターを引き寄せていき、しだいに目

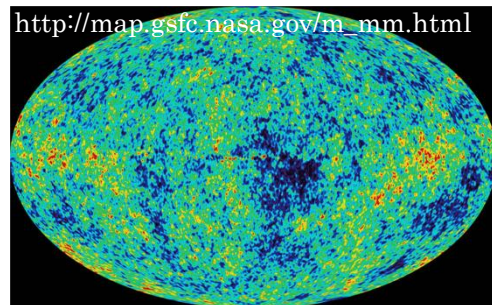


図3 宇宙誕生から約38万年の姿（今から137億年前。密度のゆらぎが生じている）

に見える物質であるチリやガスも引き寄せ、やがて星や銀河が形成されていきました。このようにダークマターは宇宙の成り立ちに非常に密接に関わっているのです。

ダークマターの正体は分かっていませんが、これらの観測事実からいくつかのその性質が推測されます。(1)電荷を持たず、(2)非常に重く、(3)安定である、ことです。このような物質は、現在われわれが知っている素粒子では説明ができません。新しい理論に基づく、未発見の素粒子が必要となります。その候補の一つがニュートラリーノと呼ばれる素粒子です。

われわれの身の回りにもダークマターはゆっくりした速度で飛来していると考えられています。しかし、いまだ実験的に直接捕えられていません。ダークマターの直接観測は、現在の宇宙物理の最も大きな課題の一つです。直接観測に成功すれば、その正体を解明する手がかりが得られます。そして、ダークマターの正体が分かれば、宇宙創成メカニズムの理解が大きく進展すると考えられます。

● XMASS 実験とは？

XMASS (エックスマス) 実験は、液体キセノン (約 -100°C) を用いてダークマターを直接探索することを目的としています。

液体キセノン検出器には、次のような特徴があります。(1)発光量が多く、(2)1トンクラスの大型化が容易、また、(3)液体、気体、固体の各相が利用できるため内部のバックグラウンドのもとであるウランやトリウムなどを極端に少なく出来ることです。ダークマターがキセノン原子核と弾性散乱する際にエネルギーの一部を落とし、液体キセノンがエネルギーに比例して発光します。発光された光は液体キセノンを囲んだ多数の光電子増倍管で捕らえます。

ダークマター直接探索実験は世界中で行われており、激しい国際競争の中にあります。図4は予想されるダークマターの質量を横軸としてダークマターと核子の反応率を示したものです。この検出器を用いれば、これまでの100倍の感度を持ち、いち早く超対称理論

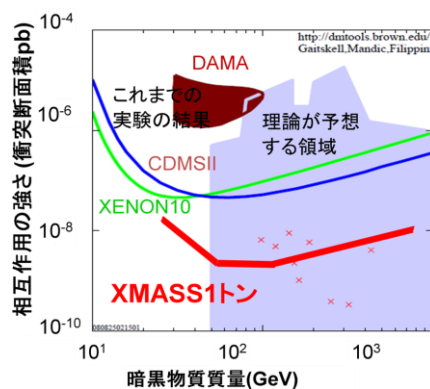


図4 WIMP と核子の散乱断面積の上限值曲線。世界中で 10^{-45}cm^2 以下を目指す実験が計画され準備が進められている。

で予想されるパラメータ領域（水色の領域）に大きく踏み込み、直接探索によってダークマターを発見する可能性が大きいと考えられています。

● 研究の現況

現在では、液体キセノン 1 トン検出器の制作に取りかかっています。図 5 はそのイメージ図で 1 トンの液体キセノンが約 650 本の光電子増倍管で球状に囲まれています。ダークマターからの信号は非常に稀で、なおかつ、非常に小さ

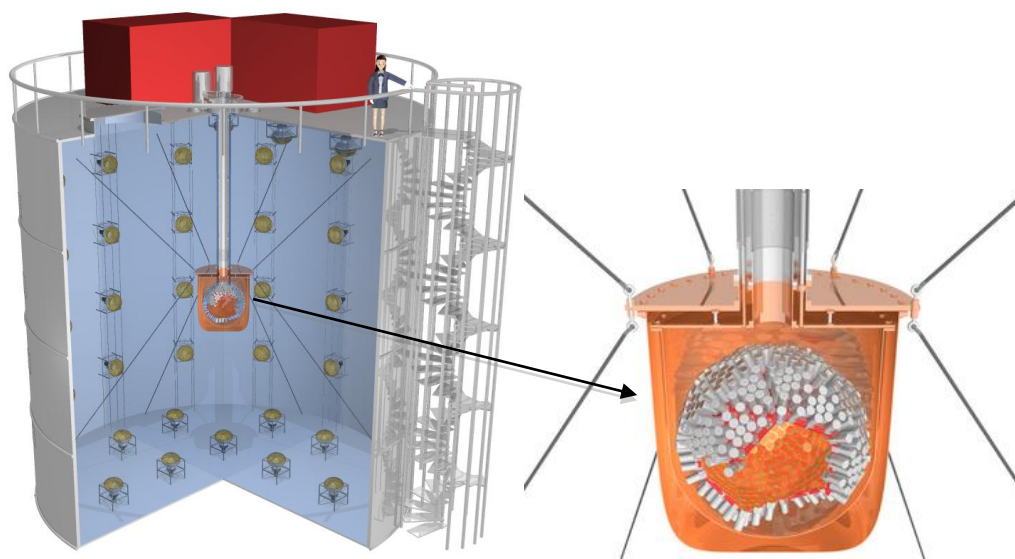


図 5 1 トン検出器とその放射線シールドの概観図。直径 10m・高さ 10mの水タンク側面に 20 インチ PMT を配置し、更に中央に液体キセノン検出器を吊り下げます。

いエネルギーであるため、放射線バックグラウンドを如何に落としてエネルギー閾値を下げるかにかかっています。XMASS グループでは、この実験に特化した“極低放射能”光電子増倍管を浜松ホトニクスと共同で開発しました（図 6）。この光電子増倍管は、効率良く液体キセノンからのシンチレーション光を検出するだけでなく、光電子増倍管自身に含まれるウランやトリウムが従来のものよりも 2 桁以上少ないものになっています。また、キセノンは原子番号が 54 と大きいので、“自己遮蔽”が有効で、外部からのガンマ線バックグラウンドを大幅に減らすことが可能です。

今秋から、水シールド用タンクの建設が開始され、2009 年夏には検出器が完成し、データ取得が開始されます。予想されるダークマターに対する感度は散乱断面積にして、 10^{-45}cm^2 と世界最高を目指し、ダークマターからの信号が期待されます。

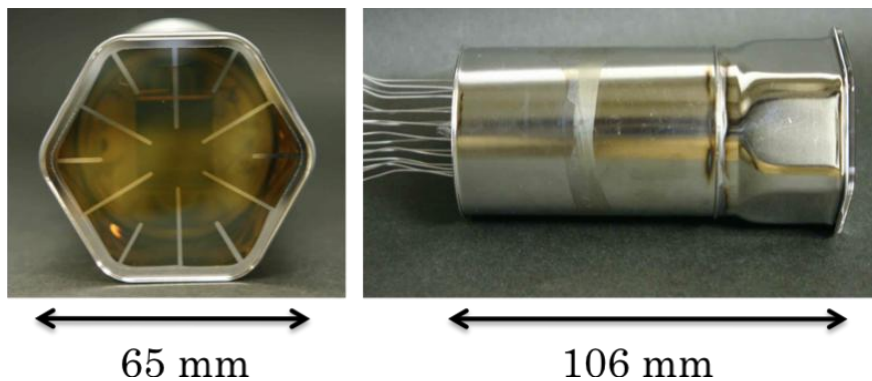


図 6 XMASS 実験用“極低放射能”光電子増倍管(Hamamatsu R8778-MOD)。
真空紫外光である液体キセノンからのシンチレーション光を効率よく捉えることができる。

● 今後の展開

XMASS 実験では今後、ダークマターだけでなく、スーパーカミオカンデでは観測できない低エネルギー太陽ニュートリノ実験やニュートリノの質量を測定する 2 重ベータ崩壊実験が展開されて行く予定です。例えば、10 トンの液体キセノンを用いると低エネルギー太陽ニュートリノを一日に約 10 事象観測できます。このように、XMASS 液体キセノン検出器は多目的の宇宙素粒子検出装置になると期待されています。

注釈)

XMASS(エックスマス)には次のような意味があります。

- Xenon detector for Weakly Interacting **MASS**ive Particles (ダークマター探索実験)
- Xenon **MASS**ive detector for solar neutrino (低エネルギー太陽ニュートリノの観測)
- Xenon neutrino **MASS** detector (2 重ベータ崩壊によるニュートリノ質量測定)

XMASS 共同研究グループ (2008年4月現在)

東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設

鈴木洋一郎、中畑雅行、森山茂栄、竹内康雄、山下雅樹、小汐由介、竹田敦、安部航、
関谷洋之、小川洋、小林兼好、南野彰宏、上島考太、池田一得、中島勇波

佐賀大学

大隅秀晃

東海大学

西嶋恭司、本木大資、西垣大理

岐阜大学

田坂茂樹

早稲田大学

鈴木聡、道家忠義、高橋智昭

横浜国立大学

中村正吾、佐藤友厚、宮本健司、藤井景子

宮城教育大学

福田善之

名古屋大学太陽地球環境研究所

伊藤好孝

ソウル国立大学

Soo-Bong Kim

セジョン大学

Y. D. Kim, J. I. Lee, S. H. Moon