

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20549001

研究課題名（和文） 核種依存性を用いた暗黒物質直接探索検出器の開発

研究課題名（英文） Study of developing dark matter search detector by using multi target materials.

研究代表者

山下 雅樹 (YAMASHITA MASAKI)

東京大学・宇宙線研究所・特任准教授

研究者番号：10504574

研究成果の概要（和文）：

大きな課題の一つである暗黒物質は様々な観測から存在は揺るぎないものなりつつある一方でいまだその正体は謎である。世界中で暗黒物質を直接探索する実験が行われており、暗黒物質に由来する季節変動を観測したと報告があるものの他の実験ではそれを否定する結果がでている。この季節変動は夏と冬で僅か数%違いであるが、本研究課題ではより強い証拠が得られるように観測頻度が2倍以上異なる検出器媒体原子核を変えることのできる将来に向けての技術の研究を行い、その可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：

Dark Matter is one of the biggest problems in our universe, however, whose existence is supported by several observations. Many of direct dark matter search experiments are undergoing and one group reported the annual modulation due to dark matter signal, although this result was excluded by several experiments. The difference rate in summer and winter is a few percent. The goal of this study is to establish more robust signature of dark matter signal by using different detector materials that enables us to see more than two times difference in the rate and the study supports this possibility in the future.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
2008年度	2,000,000	0	2,000,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	450,000	3,950,000

研究分野：暗黒物質、宇宙線

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：暗黒物質、液体希ガス検出器

#### 1. 研究開始当初の背景

宇宙の暗黒物質は、WMAP マイクロ波背景放射の観測により宇宙全体質量の約 20%を占めるとされ、これは私たちにとって”見えるもの”つまり星やガスなどの約 5 倍もの質量

に相当するとされている。暗黒物質の存在を示すものとしては、この他にも銀河同士の衝突をみた Bullet Cluster の重力レンズによる観測などがある。このような状況の中、暗黒物質を直接観測することの意義はますます

す高まっている。暗黒物質の太陽系での局所的な密度は約  $0.3\text{GeV}/\text{cm}^3$  でおよそ光の1000分の1程度の速度で飛来していると考えられている。過去15年においては、heavy Dirac neutrino や Cosmions などが暗黒物質候補から排除されてきたが、現在、この”見えない”物質の有力候補は、Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) と呼ばれ、SUSY で予想される新しい粒子ニュートラリーノである。

このミステリアスで物理にとって意義深い暗黒物質探索は、現在10以上の探索グループが激しい国際競争を繰り広げており、まさに21世紀の大きなチャレンジの一つである。しかし、これら従来の方法で本当に”暗黒物質の証拠”をつかめるだろうか？この分野では過去に暗黒物質検出というニュースが報告された。それはイタリアの DAMA グループによるもので、1998年と今年2008年である。いずれも NaI を用いた実験で2008年の結果は LIBRA と呼ばれる50kgから250kgにスケールアップしたものであった。

彼らの主張は暗黒物質フラックスの”季節変動”によるものである。これは地球の公転により暗黒物質に対する相対速度が変わることで生じる物で、その季節変動による違いは7%以下と考えられている。DAMA グループの報告によると11年間に渡って約2%の季節変動が DAMA/NaI と DAMA/LIBRA を合わせて報告された。それにも関わらず、この結果はまだ素直に受け入れられていないのが現状である。その理由は主に2つ考えられる。

一つ目は複数の他の実験によって散乱断面積の領域が既に排除されているからである。一つはこの研究代表者が携わった XENON10 であり、もう一つは Ge 検出器を用いたアメリカの CDMS グループである。これらの検出器は DAMA よりも約2桁感度が良いにも関わらず WIMP からの信号は得られなかった。

2つ目は、この僅か2%の変動が本当に WIMP からの季節変動によるものかどうか証拠が弱いことである。彼らの信号とバックグラウンドの比はおよそ1:3と考えられるが、バックグラウンドの詳細は公表されておらず、信頼性の低いものとなっている。また WIMP からの信号は反跳核に起因するが XENON10 や CDMS ではそれを電子反跳と識別して観測可能だが DAMA グループではそれができず、真に WIMP による反跳核によるイベントが季節変動して

いるかどうかを示すことはできない。

欧米では現在、数百kgから1トンサイズの検出器が計画、進行され、現在の結果よりも1桁以上良い感度を目指している状況にあるが、今後、季節変動を観測してさらに、強い証拠が望まれる。

## 2. 研究の目的

季節変動の他に、WIMP の証拠となる信号の特徴をあげると、まず、気圧の低いガス検出器等を用いて反跳核の方向から WIMP の向きを捉える方法がある。非常に興味深いアイデアではあるが、現在最も厳しい制限を与えている XENON100 の結果よりも5桁以上悪く、検出器のさらなる技術進展が必要である。

もう一つは、本研究課題の目的であるターゲット原子核による散乱断面積の違いを利用する方法である。スピンに依存しない核子と WIMP の散乱断面積はコヒーレントであるため、検出器ターゲットの質量数を  $A$  とすると  $A^2$  に比例する。しかし、実際にはこの他にエネルギーの閾値や核子のフォームファクターなどによって必ずしもこの比にならないので、それをすべて含めたエネルギースペクトルとそれを積分したスペクトルで計算する。なお、ここでは WIMP の質量は  $100\text{GeV}$  を仮定している。例えばエネルギーしきい値を  $25\text{keV}$  とすると Xe と Ar ではその検出頻度が2倍以上異なる。(発光量の多い液体キセノンでのエネルギーしきい値を下げればその差はさらに広がる。)単純にターゲットを変えと言っても Ge 検出器と NaI 検出器を用いることはテクノロジーに大きな差があり、またコストもかかる。しかし、例えば液体 Ar と液体 Xe を用いれば検出器の容器は同じで、ターゲットの液体を変えるだけでその違いを見ることができる。同じ場所、同じ容器を用いることで系統誤差を低く押さえることができる。ただ問題は検出器のテクノロジーは似ているとは言え、シンチレーション光の発光波長が液体 Xe では  $175\text{nm}$ 、液体アルゴンでは  $128\text{nm}$ 、その温度がそれぞれ  $165\text{K}$  と  $87\text{K}$  と異なり、光電子増倍管を含めたシンチレーション光の読み出しを両方の検出媒体で使える装置を用意しなければならない。本研究ではこの問題を解決すべく、液体キセノンと液体アルゴンのシンチレーション光を

波長変換材や光電子増倍管を用いて両方の温度・波長で観測できるように研究を進める。

### 3. 研究の方法

液体Xeと液体Arのシンチレーション光が真空紫外であるため、本研究では波長変換材及び光電子増倍管を用いてそれを読み出す検出器を開発、その特性を調べる。目的を達成するには光電子増倍管が液体アルゴン温度でも十分に動作すること。また、波長変換が液体キセノン、液体アルゴンで変換できることが必要である。また、研究協力者として当時、東京大学宇宙線研に所属する博士課程・上島考太氏と共に進めた。

#### (1)光電子増倍管の低温特性

①液体キセノン温度(約-100度)で動作し、175nmの波長で高い量子効率を持ち、かつ低放射性不純物なものはXMASS実験グループで実現されている(Hamamatsu R10789)。しかし、液体窒素温度に近い液体アルゴン(約-186度)では光電面の面抵抗が上昇し線形性が保たれないことが分かっている。本研究では浜松ホトニクスによって試作されたR8778LArを用いてテストが行われた。このPMTはまだ液体アルゴン温度で動作を確認されたことがないが、光電面に工夫がこらされ低温でも

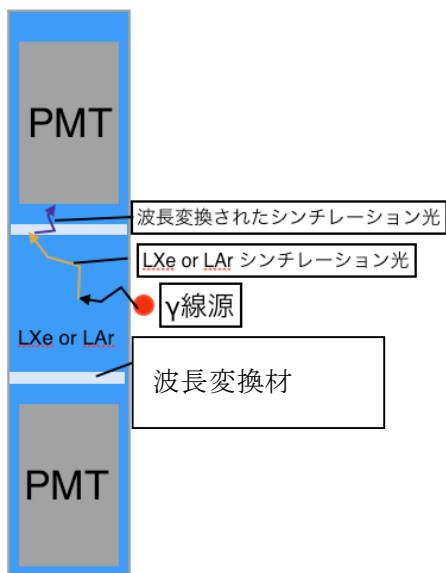


図1 希ガス液体中でのテストを行う検出器のセットアップ。上下ある2つのPMTによって波長変換されたシンチレーション光を捉える。

動作することが期待されるものである。

②2つのPMTが真空容器内に固定され、真空引きした後に窒素ガスを封入する。この真空容器は液体窒素デュアーに入れられ真空容器の外から液体窒素を用いて冷却される。真空容器の上側(液体窒素に浸らず、常に常温)に青色LEDが設置され、石英の窓を通して光が入り、中に設置されたPMTによって観測される。常温でLEDを用いて一光電子のスペクトラムを取りゲインを測定したあとおよそ10光電子の光がそれぞれのPMTに入るように光量を調節しデータをとり続け、常温から-185度まで徐々に2時間ほどかけて冷却をする。このときにはPMTに備え付けられた温度計でモニターを行った。-185度まで冷却された後に一光電子の観測することによって再び、ゲインを測定し、PMTの低温におけるゲインの変化と量子効率の変化を求めた。

#### (2) 液体キセノンによる測定

①40mm x 40mm x 40 mmの立方体アクリルの内側に0.17mg/cm<sup>2</sup>の厚みでTPBを真空蒸着した容器を用意し、HFB7100を冷媒として-100度まで液体窒素で冷却しアクリル内に液体キセノンを液化してその応答を調べた。  
②また、本研究の将来と関係するとおもわれるので波長変換材を用いない場合の液体キセノンの波形時定数の測定も行った。これは



図2 検出器の写真。図1のセットアップは真空容器に封入される。

将来波長変換材の用いた測定をしたときと

の比較のために重要であり、中性子による反跳核のイベントとガンマ線によるイベントの粒子識別の調査を含む。これには液体キセノンをHamamatsuR8778で囲むことで行った。

(3) 波長変換材を用いた液体アルゴンのシンチレーション光の測定

図1に示すようR8778LArを上下に設置し、PMT窓前に波長変換材を含有したプラスチックシンチレータを置いた。図2にその写真を示す。上下のステンレスはPMTを固定するホルダーで、中央に白色のテフロン筒が備え付けられている。これは反射材としても働く。

波長変換材を溶媒に溶かし、スプレーを用いる方法で行った経験があるが、波長変換としては働くものの、一部がはがれ落ち、安定性にかけるものであった。それ故、本研究では、研究の過程で思い立った波長変換材をプラスチックシンチレータに溶かしこんだものを用いた。2%のp-テニフェニルが溶かしこんである。

4. 研究成果

(1) 光電子増倍管の低温特性

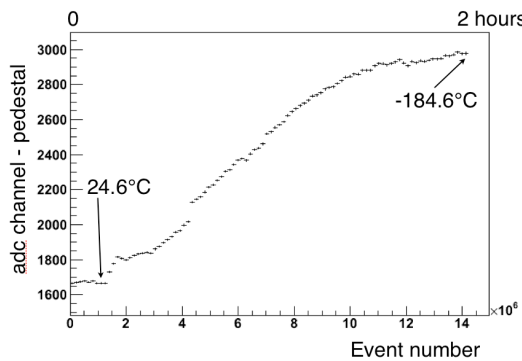


図3 温度による光量の変化。

PMTのゲインは常温で  $3.8 \times 10^6$  で adc count にして 63.0channel であり、-184.6度 のときはゲインにして 96.1channel となり、低温にすることでゲインが 1.5 倍になった。低温でゲインに関しては問題ないことがわかった。図3に温度を変えていった際の光量

	ゲイン (低温/室温)	光電子 (低温/室温)
PMT1(上)	1.16	1.33
PMT2(下)	1.50	1.16

表1、常温と低温におけるゲインと光電子の変化。

の変化を示す。ゲインを考慮すると常温では 26.5 光電子、低温では 30.9 であることから量子効率が 1.16 と 16%上がるのが分かり、低温であるとはより有利になることがわかった。もう一つのPMTと合せ結果を表1にまとめる。一定光量のもと光電子数が変化したので量子効率が上がったことが分かる。

(2) 液体キセノンによる測定

アクリルにTPBが蒸着された測定では662keVの(137Cs線源)照射に対して413光電子得ることができた。分解能にすると8.8%であった。暗黒物質探索では低いエネルギーしきい値が必要となるが光電子増倍管を多く敷き詰めたXMASS検出器の形を取れば被覆率が大きくなり、十分だと考えられ、PMTも問題なく動作することが分かった。

波長変換材を用いずに行った液体キセノンの波形時定数の結果では図4に示すように低エネルギーにおいてガンマ線(137Cs照射)に対して35nsec、反跳核(252Cf照射)に対して25nsecが得られた。液体キセノンでも低エネルギーで波形弁別が可能であることが分かり、これは今後の研究の参考にする。

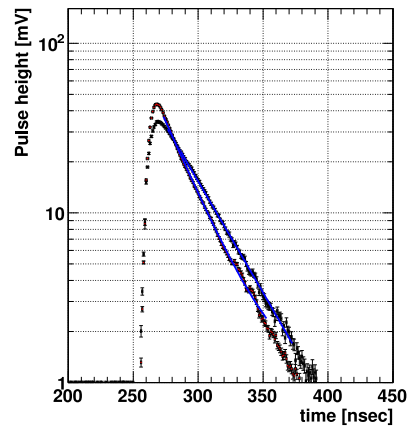


図4 4.8-7.2keVにおけるガンマ線(黒)または中性子(赤)を照射したときの波形分布

(3) 波長変換材を用いた液体アルゴンのシンチレーション光の測定

プラスチックシンチレータとR8778LArを組み合わせることで液体アルゴンのシンチレーション光を読み出すことに成功した。図5にその際の液体アルゴンのシンチレーション光をオシロスコープで測定した波形を示す。黄色、マゼンタはそれぞれPMT1(上), PMT(下)に相当する。波形から分かるように液体キセノンとは違い、1μsec以上にわたり、長い時定数が観測された。

以上にわたり、PMT の低温における動作や波長変換材を用いて液体キセノン、液体アルゴンの読み出しをテストしてきたが、光量を増やす改善が必要となるものの、原理的に動作することに成功し、今後の核種依存性を用いた暗黒物質探索に生かせるものとなった。

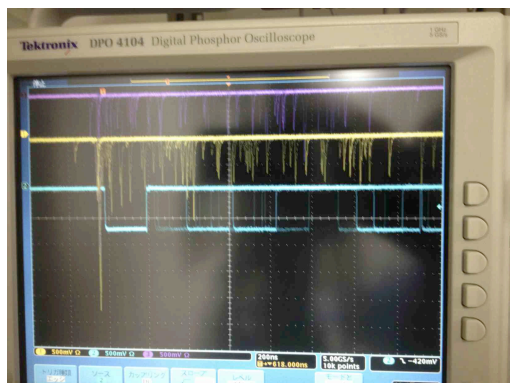


図5 液体アルゴンシンチレーション光による波形

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Scintillation-only Based Pulse Shape Discrimination for Nuclear and Electron Recoils in Liquid Xenon

K. Ueshima, K. Abe ... M. Yamashita.. (37人中18番目)

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 659 (2011) 161-168 (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

1. 山下雅樹、”核種依存性を用いた暗黒物質直接探索検出器の開発” 物理学会秋季大会, 2010/09/13, 九州工業大学戸畑キャンパス

2. M. Yamashita, “XMASS”, 6th Patras Workshop on Axions, WIMPs, 2010/07/07, スイス

3. M. Yamashita, XMASS at Kamioka Large Scale Cryogenic detector in the underground laboratory,

WONDER2010, 2010/03/23, Gran Sasso, Italy

4. 山下雅樹、「液体キセノンを使った暗黒物質直接探索」電離及びシンチレーション検出器の基礎物理と暗黒物質探索への応用、2009年9月18日 早稲田大学

[その他]

ホームページ等

XMASS home page

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/>

index.html

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山下 雅樹 (YAMASHITA MASAKI)

東京大学・宇宙線研究所・特任准教授

研究者番号：10504574

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：