

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 13日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740144

研究課題名（和文） 暗黒物質探索検出器の3次元位置較正システムの開発

研究課題名（英文） Development of 3-dimensional position calibration system for dark matter search detector

研究代表者

竹田 敦（TAKEDA ATSUSHI）

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：40401286

研究成果の概要（和文）：

本研究により、液体キセノンを用いた暗黒物質探索用検出器の内部に γ 又はX線を放出する較正源を入れて発生するシンチレーション光の発生場所等を較正するシステムが製作され、実際に検出器の位置・エネルギー分解能やトリガー効率等を測定し、モンテカルロ・シミュレーションを用いて検出器物質の光学特性を決定した。この結果をもとに暗黒物質探索実験を遂行し、質量の軽い(約10GeV)暗黒物質に対して、既存の実験によって存在が許されているパラメータ領域の大部分を排除された。

研究成果の概要（英文）：

A calibration system that inserts gamma or X-ray sources into a dark matter search detector and calibrates mainly position where scintillation photons were generated inside the detector was produced. Position and energy resolutions and trigger efficiency were measured, and optical parameters of materials inside the detector were calculated using a Monte Carlo simulation. Based on the result dark matter search experiment was conducted and certain parameter region which is allowed by other experiments for light mass WIMP around 10 GeV was excluded.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
年度			
年度			
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

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、位置再構成、較正

1. 研究開始当初の背景

NASAのWMAP衛星による宇宙背景放射のゆらぎの観測から宇宙の物質全質量の約85%が正体不明の暗黒物質であることが示され(2013年現在、Planck衛星により、さらに高精度で同様の結果が得られている)、暗黒物質を直接検出しその正体を解明することが

宇宙・素粒子物理学の最重要課題の一つになっている。そこで、申請者が所属する実験グループでは、約1tonの液体キセノンと642本の光センサー(光電子増倍管)を用いた暗黒物質探索用としては世界最大の質量をもつ検出器(XMASS検出器)を製作した。

本課題研究の主目的は、このXMASS検出

器のエネルギーや位置再構成を校正するための装置を製作し、実際に装置を校正することにある。

本課題研究で行われた、液体キセノン検出器内部に光源を入れて検出器を校正する装置の開発、実際に装置の校正作業及び検出器応答の詳細な研究は、検出器で得られたデータから暗黒物質探索の可否や感度を定量的に算出するために非常に重要である。

2. 研究の目的

検出器の内部に放射性核種から成る光源を入れて、核種から放出されるガンマ線又はエックス線により液体キセノン中で発生するシンチレーション光が検出器に配置されている642本の各光センサーでどのように検出されるのかを詳細に調べ、検出器の位置・エネルギー分解能、検出効率等を定量的に求めるのが主目的である。

また、モンテカルロ・シミュレーションによる研究も同時にすすめることで、液体キセノンのシンチレーション光に対する吸収長・散乱長、検出器の光検出にかかわる部分の反射率等の光学パラメータを、測定で得られた実データと比較することで決定する研究も行う。

3. 研究の方法

(1) 光源を検出器内部に挿入するための装置の設計・製作

検出器内部は、キセノンを液体に保つため、マイナス100度Cに冷却されており(圧力は絶対圧で1.6気圧)、外界とは断熱真空容器により切り離されている。そのため検出器内部に光源を入れて任意の場所に移動させるためには、ゲートバルブ、モーション・フィードスルー、ステッピングモータ、金属ワイヤー等により外部から遠隔操作をする必要がある。その際、液体キセノンに不純物が混入すると、シンチレーション光に対する吸収長・散乱長が影響を受け、検出される光量が減少してしまうため、通常の動力機構に使用されるような油・グリス類は一切使用できない。また、装置から発生するアウトガスも液体キセノンの質を低下させる原因となるので、使用する材料は、表面を電界研磨したステンレス鋼か無酸素銅、またはテフロンに制限した。

そのため、グリスの使用が必須になるステッピングモータは真空容器の外部に設置し、モーション・フィードスルー(回転導入機)によって回転動力を真空容器内部に設置したステンレス金属製のドラムに伝え、直径0.3mmのステンレスワイヤーの送り出し・巻き取りによって、長さ約1450mm・直径12mmの無酸

素銅製のロッドを昇降させることで、ロッドの先端に設置した光源を検出器内部の任意の位置に移動させられるようにした。ロッドの先端に設置する光源は、検出器側をゲートバルブで封じることで、測定中であっても交換可能な構造になっている。

また暗黒物質探索のノイズになるため、使用する部材に含まれる天然放射性不純物(ウラン・トリウム系列、カリウム40、コバルト60等)は、あらかじめゲルマニウム検出器を用いて規定値以下に厳しく制限する必要がある。そのような特殊な要求を満たしながら装置を製作する必要がある。

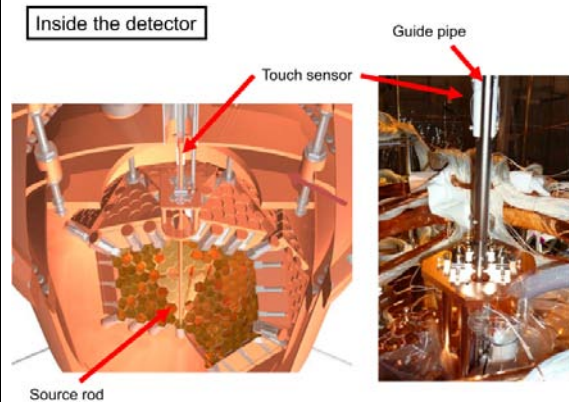
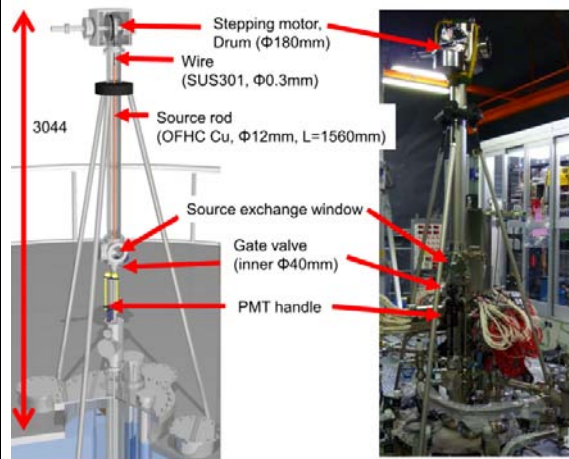


図1、光源を検出器内部に挿入するための装置を示す。上図が、液体キセノン部分から上方に約5m離れた水タンク上の部分を示しており、主としてステッピングモータを収納したモータボックス、光源を交換するためのsource exchange window、光源を検出器内部に挿入するためのsource rodからなる。下図が検出器内部の液体キセノン領域の間近部分を示しており、ロッドの位置を決めるためのガイドパイプとロッドが最下部にきたことを感知するtouch sensorが配置されている。

(2) 光源の開発

光源は、低いエネルギーのガンマ線またはエックス線を出す核種を小型の金属容器内に密閉し、マイナス100度、1.6気圧(絶対圧)という環境下でも核種が外に漏れ出すことのないようにする必要がある。また、光源自身が、発生するシンチレーション光の影になってしまう効果を最少にするため、例えば60keVの光源では、直径を200マイクロメートル程度まで小さくする必要がある。そのような小型の光源は市販されていないが、申請者は、特殊な放射性線源の製作の経験が豊富な韓国・KRISS研究所の研究者と共同で開発を進めた。核種が外に漏れださないことは、製作した光源を低温・高圧環境下に置いた後、ゲルマニウム検出器等を使用して厳重な試験を行った。図2に、Co-57を使用して製作した光源の写真を示す。

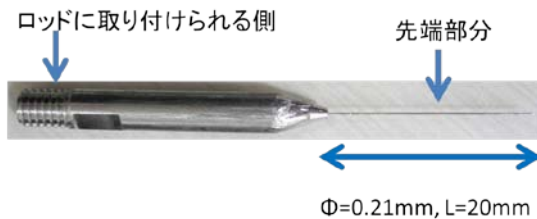


図2、KRISS との共同開発で製作された Co-57 を用いた光源。写真の右側の細い針形状の部分が、ステンレス金属製の中空チューブ(外径0.21mm、長さ20mm)になっており、その中に放射性核種である Co-57 が封じ込められている。

(3) 検出器校正用モンテカルロ・シミュレーションの開発

実際に製作した光源の形状・材質をシミュレーションプログラム内で定義し、発生したシンチレーション光がどのように各光センサーで検出されるのかを調べる。また、シミュレーション内の光学パラメータを変化させて実際に取得したデータとの比較をすることで、液体キセノンや検出器の各種光学パラメータの決定を行う。

(4) 実際のデータ取得と解析

製作した装置を実際に液体キセノン検出器に組み込んで、光源を検出器内部の様々な場所に入れてデータを取得し、解析を行う。光源を検出器内に入れる場合は、圧力変化や温度変化をそれぞれ0.005MPa、0.1度以下にするため、銅のロッドの速度を10mm/秒以下に制限し、装置が検出器環境に影響を与えないよう最大限の配慮を行った。

4. 研究成果

図3に、図2で示した Co-57 光源を用いて得られた 122keV(Co-57 からのガンマ線)と60keV(核種のハウジング部材に使用されているタングステンによるエックス線)のエネルギーに対する検出器の応答を示す。図の上がエネルギー分布、下が検出器のz軸上の各場所に光源を置いた場合の位置再構成の結果を表している。

この研究により、検出器のエネルギー・位置分解能を、数%以下の精度で求めることができた。実データは、モンテカルロ・シミュレーションによって良く再現されており、検出器応答の理解が良く進んでいることを示している。この結果を用いて、検出器の検出効率、エネルギーに対する非線形性の度合い、検出器を構成する物質の各光学パラメータ等の決定を行った。これにより、特定のパラメータ領域での暗黒物質探索が遂行され、結果が[雑誌論文]②の”Low mass WIMP search with XMASS”にて発表された。

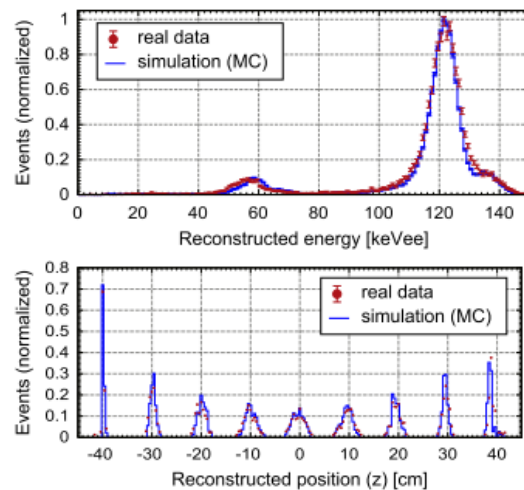


図3: 光源(Co-57)を液体キセノン検出器に入れて取得した実データ(赤点)とシミュレーション結果(青のヒストグラム)を示す。上は、再構成されたエネルギーを(光源の位置は、検出器中央である $z=0\text{cm}$)、下は様々な位置($z=-40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40\text{cm}$)で取得したデータの位置再構成された z 位置を示す。[雑誌論文]①の”XMASS detector”より引用。

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2件)

① K. Abe, …(14 名), A. Takeda, …, XMASS detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 716 (2013) 78–85 (査読有)
doi:10.1016/j.nima.2013.03.059

研究者番号 :

(3) 連携研究者
()

② K. Abe, …(14 名), A. Takeda, …, Low mass WIMP search with XMASS, Physics Letters B 719 (2013) 78–82
doi:10.1016/j.physletb.2013.01.001
(査読有)

研究者番号 :

[学会発表] (計 6 件)

① 竹田 敦 他 XMASS collaboration,
“XMASS 実験: 暗黒物質探索 I”, 日本
物理学会 秋季大会, 京都産業大学,
2012 年 9 月 14 日

② 竹田 敦 他 XMASS collaboration,
“XMASS 実験: バックグラウンド 2, 低
減”, 日本物理学会 第 67 回年次大会,
関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日

③ 竹田 敦 他 XMASS collaboration,
“XMASS 実験: 内部ガンマ較正源を用い
た検出器の応答評価”, 日本物理学会
秋季大会, 弘前大学, 2011 年 9 月 16 日

④ Atsushi Takeda for the XMASS
collaboration, “Status of XMASS”,
GLA2011: 2nd International Workshop
towards the Giant Liquid Argon Charge
Imaging Experiment, フィンランド,
2011 年 6 月 8 日

⑤ 竹田 敦 他 XMASS collaboration,
“XMASS 実験: 検出器キャリブレーション”, 日本物理学会 秋季大会 九州工業
大学, 2010 年 9 月 12 日

⑥ Atsushi Takeda for the XMASS
collaboration, “Low background
techniques in XMASS”, LRT2010: Low
Radioactivity Techniques 2010, カナダ,
2010 年 8 月 29 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹田 敦 (TAKEDA ATSUSHI)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号 : 40401286

(2) 研究分担者

()