

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800132

研究課題名(和文) 低閾値・高精度化した液体キセノン検出器を用いた季節変動による暗黒物質探索

研究課題名(英文) Improvement of a liquid xenon detector for low threshold and high accuracy and search for annual modulation signals caused by dark matter particle using the 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究により、暗黒物質用液体キセノン検出器において重要となる10keV以下の低エネルギー事象に対する検出器の応答の理解を可能にする新しい低エネルギーX線源を開発し、検出器を構成する液体キセノンの吸収長・散乱長、検出器容器表面の反射率等の光学パラメータの決定を行うことで検出器の低エネルギー領域での不定性を小さくし高精度化することに成功した。
このように低エネルギー事象に対するエネルギー決定精度等を改良した液体キセノン検出器を一年以上安定運転させることで、暗黒物質粒子によって引き起こされると期待される検出事象頻度の季節による変動を探索することで暗黒物質探索を行った。

研究成果の概要(英文)：We developed a new X-ray source which makes it possible to understand responses of a liquid xenon detector for low energy (< 10 keV) events expected to be caused by dark matter particles. We evaluated several optical parameters that are absorption and scattering lengths of liquid xenon and reflections of surface of detector vessel. Owing to deep understanding of detector, uncertainties for energy scale were drastically reduced by this study.
By operating above improved detector stably for more than a year, we conducted dark matter search experiment using annual modulation signals.

研究分野：実験素粒子物理学

キーワード：暗黒物質 高精度化 低エネルギー線源 季節変動

1. 研究開始当初の背景

最新の宇宙物理学分野の研究結果によると、水素やヘリウムなどの通常の物質が我々の宇宙全体に占めるエネルギーの割合は 4.9% しかなく、暗黒物質がその 5 倍以上である 26.8% をも占めていることが明らかになっている。暗黒物質は存在すること自体に疑いを入れる余地はないが、その正体については現在までのところ全く不明である。暗黒物質の候補としては、素粒子の標準理論の枠組みを越えた超対称性粒子が有力であり、暗黒物質の直接観測は宇宙物理学と素粒子物理学の両方にまたがる最重要課題となっている。現在、暗黒物質による信号を直接検出し、その正体を明らかにするための実験が世界各地で勢力的におこなわれており、激しい競争が繰り上げられている。

暗黒物質による信号を原子核反跳により検出する場合、期待される反跳エネルギーが 10 keV 以下に集中するため、この低エネルギー領域における検出器の応答理解が非常に重要となる。また、暗黒物質から期待される信号のレートは非常に低いため (1kg の検出器を準備して 1 年で 1 事象程度かそれ以下)、検出器中にわずかにふくまれる自然放射能に起因する事象 (バックグラウンド事象) を低減し、その影響を差し引く必要がある。そのため検出器のバックグラウンド事象源の理解が必要不可欠となるが、そのためにも検出器の低エネルギー事象に対する応答理解が非常に重要となる。

暗黒物質探索に用いられる検出器としては、比較的大質量化や純化が容易で、暗黒物質粒子に対する反応断面積が大きいと期待される質量数の大きな原子核を標的とした液体キセノンを用いた検出器が世界で主流となっている。そこで、液体キセノン中における約 -100 度の環境下でも使用可能な 10 keV 以下の低エネルギー放射性線源の開発が広く望まれている状況である。

2. 研究の目的

本研究では、液体キセノン検出器に使用可能な 10 keV 以下の低エネルギー放射性線源を新たに開発し、実際に製作した線源を暗黒物質用液体キセノン検出器 (XMASS 検出器) に使用することで、検出器の低エネルギー事象に対する応答を詳細に調べ、暗黒物質信号に対するエネルギー決定精度等を改善し、暗黒物質探索を高感度で遂行することを目的とする。

特に暗黒物質から期待される信号の季節変動を観測することは、暗黒物質によ

る信号の同定に大きな信頼性を与えてくれるが、この季節変動信号はあるパラメータについて、低エネルギー領域で変動の正負があるエネルギーで反転するという大きな特徴がある。この特徴的な信号を観測するためには、検出器の低エネルギー領域におけるエネルギー決定精度の向上が必要不可欠となる。

また、検出精度の向上した検出器は暗黒物質だけでなく素粒子物理学における強い CP 問題を解決するために存在が提唱されている未発見の仮設粒子であるアクシオンの探索にも大きな力を発揮することが期待されている。特に液体キセノンを利用した大型検出器では、太陽から飛んでくると期待されているアクシオンを、光電効果に似た反応を利用することで探索する方法が大きな感度を持つが、そのためにも低エネルギー領域における検出器の応答理解が必要不可欠である。

3. 研究の方法

本研究により、10 keV 以下の低エネルギー線源として、以下の 2 種類の開発を行う。

(1) ^{55}Fe 線源

鉄の放射性同位体 ^{55}Fe が崩壊する際に最終的に放出される、主として 5.9 keV のエックス線と、そこから液体キセノンの L-shell エックス線 4.1 keV 分が線源自体に吸収されて残る 1.8 keV の事象が液体キセノン検出器で利用可能となる。

(2) $^{241}\text{Am} + \text{Al}$ 複合線源

1 次線源である ^{241}Am からのアルファ線が 30 μm ほどの薄いアルミ膜中でアルミ原子を励起し、脱励起時にアルミから放出される 1.5 keV のエックス線が利用可能となる。

以上の線源は、いずれもエネルギーが、5.9 keV, 1.8 keV, 1.5 keV と低く、液体キセノン中での吸収長が 5.9 keV に対して数 μm と非常に小さいため、キセノンのシンチレーション光は線源表面の数 μm 以下の近傍で起こる。そのため、発生した光の半分は線源表面で反射されてから検出器で観測されることになり、線源表面のシンチレーション光波長 (約 170 nm) に対する反射率が観測光量に大きく影響する。また、線源表面の微小なでこぼこ構造もシンチレーション光の反射に大きく影響する。それらの系統誤差をキャンセルするために、全く同じ線源表面構造を持った異なるエネルギーの線源 (^{241}Am からの 60 keV ガンマ線を利用。60 keV に対しては線源表面の反射率がほとんど影響しない直径 200 μm 以下の極小線源が既に存在しており、そ

の線源で得られた光量と比較することで今回製作した線源表面の反射率が求められる)を同時に製作するという事を行った。また表面のでこぼこ構造については、線源表面を十分に研磨してレーザマイクロ顕微鏡および電子顕微鏡で確認をすることで 1 μm 以下に調整した。

製作した線源に対しては、実際に液体キセノン環境化である約-100 度、約 0.07 MPa(ゲージ圧)の中で使用しても、線源物質が漏れ出さず、また液体キセノンの吸収長や散乱長などの質を劣化させるような不純物が液体キセノン中に溶け出さないといった厳しい条件が課せられる。このような条件を満たしているかを判断するため、容積約 3 リットル、2 本の 2 インチ光電子増倍管からなる小型の液体キセノンチェンバーを用いた試験を行った。

線源物質の漏れ出しについては、線源強度を液体キセノンテストチェンバーに入れる前後でシリコン検出器を用いて測定すると同時に、液体キセノンチェンバー自身で観測される線源からの低エネルギー事象の強度が時間とともに変動しないことを、チェンバー圧力を予定使用圧力より高い状況である 0.15 MPa(ゲージ圧)において長時間にわたり試験をした。

参照用に製作した 60 keV ガンマ線源に関しては、液体キセノンに浸す前後の線源強度をゲルマニウム検出器で測定すると同時に、キセノンチェンバーを構成する部材表面に漏れ出した放射線が付着していないことをゲルマニウム検出器で確認した。

4. 研究成果

(1) の線源については実用化に成功し、実際に暗黒物質探索用液体キセノン検出器(XMASS 検出器)の内部に線源を投入し、低エネルギー事象の測定を行った。測定は検出器内の 1 軸上 80 cm にわたる領域について、10 cm 刻みで線源を移動させることにより行われた。各場所において測定されたデータを詳細に解析し、モンテカルロ・シミュレーションの結果と比較することで、液体キセノンの吸収長・散乱長、検出器の内側表面の無酸素銅の反射率や光電子増倍管の光電面の反射率といった光学パラメータの決定誤差を小さくすることが可能となり、検出器の低エネルギー領域におけるエネルギー決定精度を大きく改善することに成功した。

(2) の線源については、1 次線源である ^{241}Am の強度と薄膜アルミの厚みの最適化についてモンテカルロ・シミュレーシ

ョンを用いて求めることを行った。その結果に基づいて、 ^{241}Am 線源とアルミの薄膜からなるテスト線源を製作し、そこから放出される 1.5 keV のエックス線をシリコン検出器で実際に観測することで、線源の原理実証に成功した。あとは液体キセノンの環境下で使用可能なようにハウジングをすれば良い状態になっている。

このように(1)の線源により高精度化した液体キセノン検出器を用いて、暗黒物質信号による季節変動の観測や、様々な物理結果を出すことが可能になり、その成果は学術論文[1], [2] (5. 主な発表論文等の[雑誌論文]の項目を参照)にまとめられ、また素粒子物理分野の国際会議において(1)~(5) (同[学会発表]の項目を参照)のように発表された。

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, K. Hieda, K. Hiraide, ... , A. Takeda (16 番目), ... , K. Fujii, I. Murayama, S. Nakamura (全 45 人), “Search for Bosonic Superweakly Interacting Massive Dark Matter Particles with the XMASS-I Detector”, *Physical Review Letters* 113, 121301 (2014),
査読有り.

[2] H. Uchida, K. Abe, K. Hieda, ... , A. Takeda(17 番目), ... , K. Fujii, I. Murayama, S. Nakamura (全 46 人), “Search for inelastic WIMP nucleus scattering on ^{129}Xe in data from the XMASS-I experiment”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2014, 063C01,
査読有り.

[学会発表] (計 5 件)

(1) 竹田 敦,
“XMASS実験: 有効体積内事象を用いた暗黒物質探索”,
日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 24 日、早稲田大学早稲田キャンパス.

(2) 竹田 敦,
“XMASS experiment”,
Joint Winter Conference on Particle Physics, String and Cosmology (YongPyong-High1 2015),
28th of Jan. 2015, 韓国江原.

(3) 竹田 敦,
“XMASS実験: 有効体積領域での暗黒物質探索”,

日本物理学会秋季大会、2014年9月18日、佐賀大学本庄キャンパス。

(4) 竹田 敦,

“XMASS 実験：光量・時間情報を用いた有効体積内の暗黒物質探索”，
日本物理学会秋季大会、2013年9月20日、高知大学朝倉キャンパス。

(5) 竹田 敦,

”Dark Matter Search at XMASS”,
2013 Shanghai Particle Physics and
Cosmology Symposium (SPC2013),
5th of Jun. 2013, 中国上海.

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