

令和元年5月26日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03973

研究課題名(和文) 宇宙暗黒物質検出器高感度のためのラドンバックグラウンド低減の研究

研究課題名(英文) Study of Rn removal for dark matter search

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、XMASSなどの液体キセノンを用いた宇宙暗黒物質直接探索実験の内部に主な放射性バックグラウンド(BG)として存在するラドン放射能減らし、感度を上げることが目的である。それを達成するためにキセノン中ラドン吸着の開発研究を行った。吸着剤として様々な多孔質物質を用いて試験をし、A社ナノ素材や高純度シリカにおいてキセノンガス中のRnを約90%の除去率を低温(-100℃)にて達成することができた。また、この除去装置をXMASS-I実機に用いた観測では最も低いBGを達成したが、予想よりも効果が低く、このため検出器内ラドン発生源を特定できる可能性が分かり、将来に向けての指標となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では過去の活性炭に比べ数%から数十%の吸着剤の量で90%のキセノンガス中のラドン除去率を示すことができた。中でも高純度出できたシリカ多孔質は(1)高い機械的強度(2)耐熱性(3)化学的耐久性から粉塵のでやすい活性炭に比べ取扱が容易である。この技術は液体キセノンを用いた暗黒物質探索に効果があるだけでなく、ラドンを除去する技術は他の地下実験にそのまま適応できることが多く、空気や窒素などガスに適用でき、あらゆる実験で必須なラドンフリー空気の製造や国内外の暗黒物質探索またその他のニュートリノや2重ベータ崩壊実験にも適用できると期待される。

研究成果の概要(英文)：A radioactive Rn is one of the major background for the direct dark matter search experiment that uses a liquid xenon as a detector medium. The purpose of this study is to develop a Rn removal system in xenon gas to improve the detector sensitivity for the dark matter search. We tested several porous material and the result showed that nano-material (company A) and the porous silica achieved about 90% Rn removal at low temperature (-100℃). The radon removal system was adapted with XMASS-I detector and we could achieve a lowest background in the detector, however, the effect was not as good as we expected. Due to this fact, the origin of Rn source can be different location from we expected and think that this will become an important information for future search.

研究分野：宇宙線

キーワード：暗黒物質 液体キセノン ラドン

1. 研究開始当初の背景

宇宙物質の大半を占めるとされる暗黒物質は重力による観測事実から、その存在は揺るぎないとされている。しかしその正体は不明であり、80年もの長い間続いている大きな謎である。ヒッグス粒子の発見により標準理論で体系化された粒子はすべてそろったが、暗黒物質はどの粒子にも当てはまらない。これは未知の粒子の存在を示唆しているのだろうか？ 今や暗黒物質の謎は宇宙物理だけでなく、素粒子物理学にも密接な関係があり、21世紀物理学にとって最も重要な課題の一つである。

XMASは神岡地下実験室に設置された液体キセノン・シンチレーター(832kg)検出器で、暗黒物質の直接探索を目的としており、極低放射能バックグラウンドかつ、低エネルギーしきい値閾値を達成した世界に類を見ない大型検出器である。本実験ではこの特徴を生かし我々の周りにも存在していると考えられるWIMPをはじめ様々な暗黒物質候補の探索を行ってきた。暗黒物質による $^{129}\text{Xe}$ 原子核の非弾性散乱による探索やSuper-WIMP探索では世界で最も厳しい制限を与えたが、特に40-120keV領域に於いて大きなバックグラウンドの成分として放射性ラドンによることが報告された。このラドンは検出器内の部材から常に放出され、その濃度は $8.2 \pm 0.5 \text{ mBq/kg}$ (検出器全体で約7mBq)であった。一方、図1に示すように次世代の暗黒物質直接探索検出器では興味深い物理として暗黒物質だけでなく、pp太陽ニュートリノや二重ベータ崩壊なども視野に入ってくるが、これらの信号を観測するには現在の1/100程度までラドンを減らさなければならない。

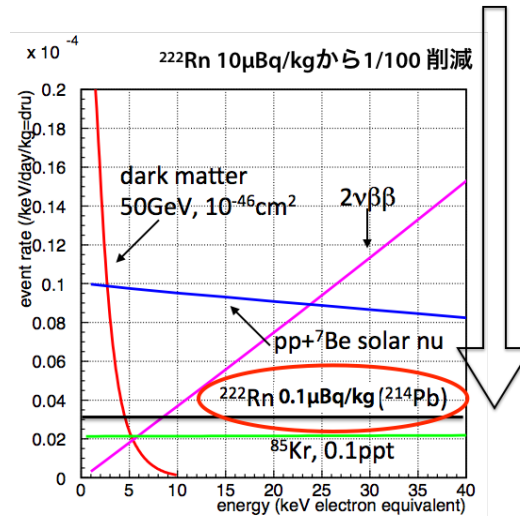


図1:暗黒物質、太陽ニュートリノ、二重ベータ崩壊による信号とラドンバックグラウンド

暗黒物質直接探索は国際競争が激しく、世界で20以上のグループが凌ぎを削っている。DAMAグループのNaI(Tl)を使った実験が14年のサイクルで季節変動観測した報告されているが、WIMPモデルではXMASS実験により世界で初めて季節変動によってその結果が否定され、その他LUX(米国)、XENON(欧米)など他の実験グループによっても反跳核による信号を粒子識別する方法で排除されている。LHCではまだ、SUSY粒子が発見に至っていない現在、今後SUSY-WIMPだけでなく、様々な暗黒物質候補を視野に入れた探索が必要とされ、そのモチベーションも高い。

2. 研究の目的

本研究は、宇宙暗黒物質直接探索実験の検出器内部に放射性バックグラウンドとして存在するラドン放射能を将来に向け $0.1 \mu \text{ Bq/kg}$ 以下に落とす目標を達成するために、キセノン中ラドン吸着の開発研究及び検出器感度向上を目的とする。現在運転を行っている液体キセノン832kgを用いたXMASS-Iでは様々な暗黒物質候補を探索し成果をあげてきたが、キセノン中に $10 \mu \text{ Bq/kg}$ 程度のラドンが存在することが判明し、40-120keVで一番大きなバックグラウンドになっており、次世代の検出器ではあらゆる暗黒物質だけでなく、太陽ニュートリノや二重ベータ崩壊探索において主なバックグラウンドになる。本研究においてキセノン中ラドンの除去装置の開発を行い、これをXMASSまたは将来の検出器の純化ラインに組み込むことでラドンによるバックグラウンドを低減し、検出感度を上げることが目的である。

3. 研究の方法

検出器の感度を上げるために(I)活性炭および(II)多孔質化合物に焦点を当て、キセノン中のラドンを除去する計画を進めた。具体的にはA社ナノ素材(論文執筆中)、UV光を照射させガスの吸着率を上昇させたactivated carbon fiber(UV-ACF)、シラス・ポーラスガラス(SPG)、高純度石英を用いた多孔質体シリカモノリス、また同様に酸化チタンを用いた。

特に、開発する多孔質化合物については以下の計画を進めた。

- (1) 地下実験室-高感度Ge検出器で放射能測定  
超高純度ラドン検出器を用いた多孔質ガラスのラドン放出率の測定
- (2) 高濃度ラドン装置を用いたキセノンガス中ラドン吸着率の測定
- (3) XMASS-Iによる観測

#### 4. 研究成果

##### (1) 高純度ゲルマニウム検出器による放射能測定, および放出率の測定

表 I 神岡における低バックグラウンドゲルマニウム検出器による測定

材料名	mBq/kg [226Ra] 上限値は 90% C. L.
A 社ナノ素材	< 11.4 mBq/kg
SPG	47.6 +/- 0.1 Bq/kg
TiO2	< 15.6 mBq/kg
シリカ	287 +/- 26 mBq/kg

表 I に材料に含まれる放射能の測定結果を示す。ラドンの親である 226Ra を利用している。最終的には低温に冷やした時に純化器からどのくらい放出されるかが問題となるが、材料選定においては大変有効である。材料の中から 100% 放出された場合を考え上限値と捉えることができる。除去率にもよるが、およそ 1kg の純化器を考えるとこの内、A 社ナノ素材や TiO2 が実際の実験でも問題ない可能性がある。

シリカに関しては、低温に冷やした後、実際のラドン検出器を用いて放出率を求めた。ラドン検出器システムのバックグラウンドは 1mBq 以下である、800g のシリカを -100°C 程度に冷やし測定した結果、0.84 mBq/kg となり実際には問題がないことが分かった。



図 2 本実験で用いたラドン除去のための材料

##### (2) 高濃度ラドン装置を用いたキセノンガス中ラドン吸着率の測定

本研究では吸着剤として A 社ナノ素材、UV-活性炭繊維、高純度シリカ、高純度チタニアに対して 80L 静電型ラドン検出器を用いてキセノン中ラドンの除去率の測定を行った。(SPG に関しては事前小型システムで 23% 程度の除去率で候補から外した。) 1Bq のラドンソースをキセノン循環ラインに組み込み、ラドン検出器、除去装置 (吸着剤) を 1SLPM で循環させた。ラドン検出器の検出効率はガスの露点に依存するため、ゲッターで常に純化をしており -90 から -100°C に保った。常温での高純度酸化チタンは優れた除去率が見られなかったものの、その他の材料では低温になるほど除去率が上がり、約 -100°C で 50-90% 除去率を達成することができた。(注 高純度酸化チタンは光触媒として知られており、UV 光に照射することで変化が見られるかを確認するため窓材が用いられているため (図 2) 今回冷却でのテストは行っ

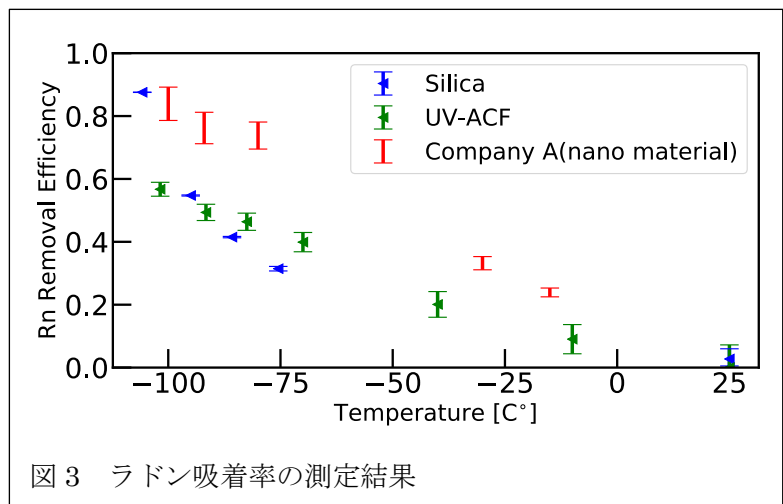


図 3 ラドン吸着率の測定結果

ていない。)

(3) XMASS-I による観測

効果の高かった A 社ナノ素材は神岡地下実験施設 Lab-C にて XMASS-I 検出器実機の純化システムラインに設置を行った。A 社ナノ素材は約 140g がステンレスハウジングに封入され、純化経路と流量を変え XMASS-I 検出器を用いてラドンバックグラウンドの定量評価を行なった。観測中のデータで最も低いラドンバックグラウンドを達成することができたが、(8.2 → 約 7  $\mu$ /kg) 予想よりも効果がなく、検出器内のラドン発生源としてあまり疑われなかった除去装置下流の冷却器システムが原因である可能性がある。これは、将来に向けての課題・指標となった。将来の検出器では除去装置の配置を循環方向に自由度を持たせる必要がある。また、この研究に関連し XMASS 検出器のバックグラウンドの理解としてガンマ線と  $\alpha$  線の波形弁別の研究[①]とのガス循環純化システムを稼働することによって最も低いバックグラウンドで安定した発光量を達成し、これに関連した暗黒物質季節変動の研究[②]が進み論文に投稿されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① M. Kobayashi, S. Tasaka, M. Yamashita et al. (XMASS Collaboration), "Search for sub-GeV dark matter by annual modulation using XMASS-I detector", arXiv:1808.06177 submitted to Phys. Let. B, 2018
- ② K. Abe, K. Hiraide, M. Kobayashi, S. Tasaka, M. Yamashita et al. (XMASS Collaboration), "A measurement of the scintillation decay time constant of nuclear recoils in liquid xenon with the XMASS-I detector", Journal of Instrumentation (JINST) P12032, 2018, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/12/P12032>

[学会発表] (計 8 件)

- ① 山下雅樹、XMASS 実験:暗黒物質探索検出器用 純化装置の総括とバックグラウンドの評価, 日本物理学会, 2019
- ② 山下雅樹、地下から探る暗黒物質, KEK セミナー (招待)、2018
- ③ K. Ichimura, Recent results from the XMASS experiment, 4th International Conference on Science, Application and Technology of Xenon radiation detector (Tokyo) (招待講演), 2018
- ④ 山下雅樹、XMASS 実験: XMASS 実験:暗黒物質探索の将来へ向けた開発研究, 日本物理学会, 2019
- ⑤ 山下雅樹、XMASS 実験: 2.7 年の観測データを用いた季節変動による暗黒物質探索とその展望, 日本物理学会, 2019
- ⑥ Masaki Yamashita, Rn removal for ultra-low background liquid xenon base detector 3rd International Conference on Science, Application and Technology of Xenon radiation detector (招待講演) (国際学会)
- ⑦ 山下雅樹、XMASS 実験:暗黒物質探索検出器感 度向上のためのラドン除去装置の開発, 日本物理学会, 2017
- ⑧ 田阪茂樹、新規活性炭素のキセノンガス雰囲気中のラドン吸着・脱着の性能、日本物理学会, 2016

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/index.html>  
[http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~yamasita\\_s/index.html](http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/~yamasita_s/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名： 田阪 茂樹  
ローマ字氏名： (TASAKA, Shigeki)  
所属研究機関名： 東京大学  
部局名： 宇宙線研究所  
職名： 協力研究員、 岐阜大学名誉教授  
研究者番号 (8 桁)： 60155059

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名： 竹田 敦  
ローマ字氏名： (TAKEDA, Atsushi)  
研究協力者氏名： 平出 克樹  
ローマ字氏名： (HIRAIDE, Katsuki)  
研究協力者氏名： 市村 晃一  
ローマ字氏名： (ICHIMURA, Koichi)  
研究協力者氏名： 竹内 康雄  
ローマ字氏名： (TAKEUCHI, Yasuo)  
研究協力者氏名： 小林 雅俊  
ローマ字氏名： (KOBAYAH, Masatoshi)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。