

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05465

研究課題名(和文)次世代暗黒物質探索検出器の高感度化

研究課題名(英文)Development of new techniques for next generation of dark matter search detectors

研究代表者

小林 兼好 (Kobayashi, Kazuyoshi)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：70466861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：物質表面に放射性不純物、特に²¹⁰Pbの付着のメカニズムの理解ができ、また付着のさせない方法の見通しがたった。エリア除電機により空気中のイオン化した放射性不純物が除去できることを利用し物質表面に²¹⁰Pbを付着させない新しい方法を確立する見通しがたった。また、放射性不純物のなかでもさまざまな実験でバックグラウンド源となる空気中ラドンの濃度測定の静電捕集型検出器のバックグラウンドを減らして感度向上を行うめどがたった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質は宇宙の質量の約4分の3を占めるがその正体はなぞのみである。この暗黒物質を探索実験では検出器部材に含まれる、または付着した放射性不純物が暗黒物質の信号を疑似的に作るため、放射性不純物の除去、付着させないことが実験を成功させるカギとなる。本研究により表面に放射性不純物を付着させない方法確立への見通しがたった。また、放射性不純物のなかでも重要なラドンの濃度測定の感度向上のめどがたった。

研究成果の概要(英文)：Mechanism of ²¹⁰Pb accumulation on surface of material was understood better and The prospect of an end to the survey was seen for no accumulation using area neutralization system. Also, the prospect of an end to the survey was seen for sensitivity improvement of radon concentration using the electrostatic collection type radon detector.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：暗黒物質探索 キセノン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質はその存在が指摘されてから 80 年経つが、未だに観測されていない。近年 WMAP や プランク衛星等による宇宙背景放射の観測により精密に宇宙の全エネルギー・質量における暗黒物質の占める割合が測定され、現在では暗黒物質は 27%、通常の物質はわずか 5% と判明し、我々の宇宙は 5 倍以上もの未知の物質である暗黒物質で満たされていることがわかった。しかし、暗黒物質は未だ直接観測されていない。暗黒物質は、標準理論のどの素粒子でも説明がつかず標準理論を超えた新しい粒子である考えられているので暗黒物質の謎は宇宙・素粒子物理学共通の最も重要な課題の一つである。直接観測による証拠を得ることで、その正体解明に迫ることは極めて重要であり、観測に成功すれば暗黒物質による宇宙観測が展開し、暗黒物質天文学の創成が期待される。ダークマターの有力候補である WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) を探す実験は近年世界各地で行われており、理論の予測する範囲をカバーしつつあるがいずれの実験でも未だ発見に至っていない。さらに検出器の感度をあげてダークマターを発見すべく XENONnT、LZ などの実験が計画、遂行されており、日本では XMASS 1.5 が計画中であった。

2. 研究の目的

検出器の感度をあげるために重要なことの 1 つはバックグラウンドの超低減である。ダークマターはほとんど物質と反応しない。XMASS 1.5 を例に挙げるとターゲットとなるキセノンの有効体積 1 トン中に見える信号領域での事象は 10 日に 1 事象以下である。このためバックグラウンドとなる放射性不純物を極限まで減らすことが実験成功のカギとなる。放射性不純物の中でも厄介になるものがターゲットに最も近い検出器表面に含有、付着する放射性不純物である。空気中のラドンが崩壊過程で検出器表面にくっつき崩壊を繰り返し、 ^{210}Pb になる。この ^{210}Pb は半減期が 2.2 年あり、付着すると ^{210}Pb やその娘核がバックグラウンドとなる (N.J.T Smith et al, Phys. Lett B485 (2000) 9)。本研究ではその ^{210}Pb を付着させないシステムの構築と空気中のラドンの微量測定機器の開発である。この ^{210}Pb は他のキセノン実験でも特に PTFE では (α, n) 反応により中性子を生成するため問題となり得るバックグラウンドで付着させないことは重要である。 ^{210}Pb はラドンが崩壊して生成される。また、ラドンそのものもバックグラウンド源であることからラドン濃度を測定することは重要で、ラドン濃度測定機器の感度が向上できれば暗黒物質探索検出器そのものの材料選定を迅速に行うことも可能になる。

3. 研究の方法

表面バックグラウンドを付着させない新しい方法の開発を行う。 ^{210}Pb を表面に付着する原因は ^{210}Pb の起源であるラドン娘核がイオン化しており表面に付着しやすいためである。そこで、市販の中性化する装置、特にその中でもエリア除電機に注目を改良することによりラドンの娘核イオンを中性化し付着させないようにする。このエリア除電機は他の一般的な除電機と違いコロナ放電をおこなわないので、塵を出さない。塵はさまざまな放射性不純物を含むので、エリア除電機が最適である。第二にラドン測定装置の高感度化を図る。静電捕集型ラドン測定装置においてバックグラウンドは $0.1\text{mBq}/\text{m}^3$ 程度であるが、このバックグラウンド源は測定装置の材料であるステンレスから湧き出るラドンである。ラドンを湧き出させない検出器の開発により高感度化を目指す。

4. 研究成果

(1) 表面バックグラウンドの除去

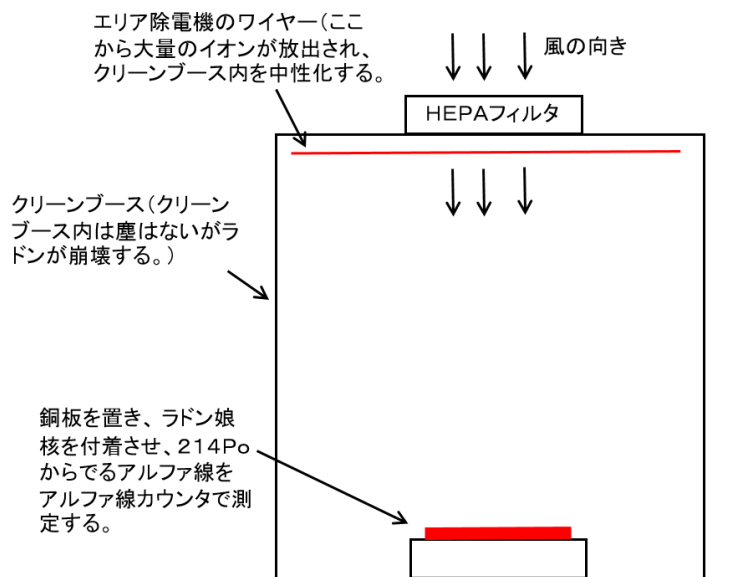
表面バックグラウンドは空気中に検出器を放置した場合に空気中のラドンが崩壊し、イオン化した娘核が付着する。ラドン娘核の崩壊は続き ^{210}Pb になると半減期が 2.2 年と長いことからそのまま付着し続け、検出器により暗黒物質探索の測定を開始した後も ^{210}Pb 崩壊が続き、バックグラウンドとなってしまう。特に検出器材料の加工等を行う環境での付着を抑える方法がこれまではなく作業を短時間で行うなどの方法しかとることができなかった。そこで比較的安価で持ち運びがしやすく、簡単にセットアップができる表面バックグラウンド除去を行うために検討しているのがエリア除電機で、イオン化したラドン娘核を中性化させてしまい表面への付着を抑える。中性化には岩谷産業から販売されているエリア除電機を使用した。このエリア除電機は特殊ワイヤーに高圧をかけイオンを大量に放出させることによりエリア内を空間的に除電し電氣的に中性にする装置である。通常のエオナイザーはコロナ放電させるため塵が発生する。この塵はラドン娘核を集めてしまうために逆効果になる可能性があるが、このエリア除電機はコロナ放電を起こさずにイオンを大量に放出するので本目的には最適である。

検証をするために下図のようなセットアップを組んだ。床付近に銅板をセットし、2 時間程度放置する。その後、付着量の測定はアルファ線カウンタを用いる。 ^{214}Po からのアルファ

線を測定する。この ^{210}Po は問題となる ^{210}Pb の1つ上流の原子核であるがラドンは ^{214}Po まで半減期約1時間で崩壊するため、迅速に測定が可能になる。予備実験の期待通り、そのままでは約半分に除去できることがわかった。

並行して環境中のイオン数とラドン濃度の関係性も経年モニタした。実験を行った神岡坑内はラドン濃度が高いがラドン濃度とイオンの数に大きな相関があり、ラドン娘核はある程度の時間、空気中でイオンのまま存在す

ることがわかり、坑内環境ではラドン娘核のイオンがイオンの主成分であることがわかった。そのためより効果的なパラメータ選択によりエリア除電により除去できる見通しがたった。



(2) ラドン測定装置の高感度化

検出器材料そのものからのラドン放出は保管する際やまた実験開始後にも問題になるので、材料そのものの選定を行う必要があるが、その選定に用いるラドン検出器の高感度化を行った。表面バックグラウンドを抑える上で保管の問題がある。検出器の保管を行うには空気中のラドンを通さない袋や箱を密閉させて入れておく必要がでてくるのだがもし、検出器自身もラドンを放出すると検出器自身からのラドンで表面に付着がおこってしまう。そのためラドンを放出しにくい材料の選定が必要になる。選定するにはラドン計を用いるがこのラドン計の感度も必要になってくる。静電捕集型のラドン測定装置のバックグラウンドは 0.1mBq 程度である。バックグラウンドとなるラドン放出する部材の候補としてはセンサーであるピンフォトダイオード、検出器、サンプル容器のステンレス、溶接部分のいずれかであるが、ステンレス以外の候補であったピンフォトダイオードからの放出量を測定したところ 0.0032mBq 以下ということがわかり、バックグラウンド源は検出器部材のステンレスであることがわかった。

ステンレスからラドン放出を抑える方法を検討した結果、ステンレス表面を銅電鍍で覆い、ラドンを放出させないことをテストした。銅を利用したのは銅自体の放射性不純物の含有量が少ないためである。しかし、1度目のテストでは銅電鍍をしたことでバックグラウンドが逆に増えた。銅自体は放射性不純物が少ないことから銅電鍍のやり方を改良することが必要と思われ、2度目のテストではスラグが付きづらくする改良を加えおこなったところバックグラウンドは銅電鍍なしと同程度までは減少した。残念ながらラドン放出を小さくすることができなかったが、今後さらに銅電鍍の方法を改良すればバックグラウンドが落ちることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Abe et al.	4. 巻 B789
2. 論文標題 A direct dark matter search in XMASS-I	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 45-53
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.10.070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 小林兼好
2. 発表標題 Dark matter searches in XMASS
3. 学会等名 XXXIX International Conference on High Energy Physics（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林兼好
2. 発表標題 液体キセノンを用いた暗黒物質探索
3. 学会等名 平成30年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林兼好
2. 発表標題 Recent results with XMASS
3. 学会等名 Exploring the Dark Universe（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林兼好
2. 発表標題 検出器表面バックグラウンド
3. 学会等名 新学術宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究：第9回B02班若手研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kazuyoshi Kobayashi
2. 発表標題 Surface and bulk Pb210/Po210 contamination study on copper and PTFE using low background alpha counter
3. 学会等名 Low Radioactivity Techniques 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuyoshi Kobayashi
2. 発表標題 Latest results from XMASS
3. 学会等名 15th international conference on the Dark Side of the Universe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>XMASS http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/index.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----