

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82502

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14738

研究課題名（和文）キセノンガス検出器を用いた余剰次元を伝搬するアクシオン探索

研究課題名（英文）Search for Kaluza-Klein axion with xenon gas detector

研究代表者

小原 脩平（Obara, Shuhei）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・次世代放射光施設整備開発センター・技術員

研究者番号：70834711

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は開発中であった高圧キセノンガス検出器を改良し、未発見粒子KKアクシオンを探索することを目的としたものである。データ取得および読み出しのエレクトロニクスの改良やガスシステムの全般的な見直しにより運転時間が伸びたほか、有効体積を増量することができた。また、511keVの信号に対して1.73% (FWHM) のエネルギー分解能を達成することができた。一方で、これまでの実験環境では周囲の自然環境放射線および宇宙線によりトリガーがかかってしまうことで測定感度が制限されていたため、稀少事象探索実験としてよく用いられる岐阜県神岡鉱山内に、検出器を新たに設置し現在測定に向けて準備中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高圧キセノンガス検出器の開発は、本研究の物理目的以外にもニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索や暗黒物質探索などにも有用とされており、ヨーロッパや中国などでも類似の検出器開発が進められている。本研究で扱う物理では中でも低エネルギー側および飛跡取得に特化しており、高圧キセノンガス検出器のスケラビリティとマルチパス性が向上する。本研究での物理結果はまだ発表できていないものの、素粒子物理実験における検出器開発という観点で、エネルギーに対して最も大きなダイナミックレンジを保持し様々な物理探索に対応できる検出器を開発することができている。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to improve the under-development high-pressure xenon gas detector and explore the undiscovered particle, the KK axion. The operation time was extended by enhancing the data acquisition and readout electronics and conducting a comprehensive review of the gas system, and the effective volume could be increased. Moreover, an energy resolution of 1.73% (FWHM) was achieved for the 511 keV energy. However, the measurement sensitivity has been limited due to triggers caused by natural environmental radiation and cosmic rays. To address this, a new detector is being installed in the Gifu Prefecture's Kamioka mine, which is commonly used for rare event search experiments, and preparations for measurements are currently underway.

研究分野：素粒子物理実験

キーワード：キセノンガス検出器

1. 研究開始当初の背景

素粒子論におけるいわゆる標準理論はよく実験的検証が為され理解が進んでいるが、実験と理論の差異として強い CP 問題が知られている。また電弱相互作業に重力相互作用を統一することを成し遂げ 4 つの力の統一を行うためには電弱力と重力の間に残るゲージ階層性問題の解決も必要である。

強い CP 問題とは量子色力学において高い精度で CP 対称性が成立しているにもかかわらず実験的には CP の破れがそれ以上の大きさで見えていることを指す。これを解決するために導入される素粒子がアクシオンである。これまでの数々のアクシオン探索の実験から電弱作用と同等スケールのもは否定されており、質量は μeV — meV スケールであると考えられるが、実験において発見には至っておらず現在も様々な探索実験が進行している。一方で後述する余剰次元による効果で keV スケールの質量として観測される可能性があり、本実験ではこれの発見を目標とする。

ゲージ階層性問題については、電磁気力に比べて重力のスケールが格段に弱いことを指している。Kaluza-Klein 理論によれば余剰次元を考えることでこの階層性問題について解決できる可能性がある。余剰次元がある場合、重力子のみが高次元時空を伝播することで我々の観測する次元では弱く見える。ただし余剰次元にも制限があり、あまりに大きすぎると万有引力が働かなくなる。また重力波観測の結果からコンパクト形状の余剰次元以外は排除されている。超新星爆発後の冷却過程における観測結果からは次元数 $n=2$ ($M_{\text{P}} \sim 100 \text{ TeV}$) が許されている。この余剰次元を通過したアクシオン (KK アクシオン) は我々の観測系からは本来の質量よりも重く見えることで、 keV スケールの信号として観測しうる。

2. 研究の目的

次元数 $n=2$ の余剰次元を伝播したアクシオン (KK アクシオン) の質量は、我々の 4 次元時空から見た場合に重く見え、 keV スケールとなる。このため磁場を印可せずとも KK アクシオンは自発的に 2 本のガンマ線に崩壊する。崩壊頻度は $2.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3} \text{ day}^{-1} (g_{\text{avg}} / \text{GeV}^{-1})^2 (n_a / \text{m}^{-3})$ と表され、体積が大きい方が実験感度が高い。また keV スケールでは自然背景放射線が多数存在するため、事象弁別に課題がある。1 点から 2 本のガンマ線が生じるような飛跡を取得し、かつその他の放射線と見分けるためにエネルギーでの選別も必要である。

KK アクシオンの実験的観測に必要なキーは、大きな体積と飛跡検出能力、及び高いエネルギー分解能の 3 点である。近年、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索や暗黒物質探索のために先進的な高圧ガスキセノンガス検出器の開発が日本、中国、スペインなどで進められており、検出器の特徴が上記の 3 点とよく合致する。類似の検出器として液体キセノン検出器による実験も進んでいるが、本研究で取り扱う KK アクシオン探索においては低エネルギー帯での飛跡分析能力を保持しうるガス検出器が有利である。本研究では京都大学にて開発中であった高圧キセノンガス検出器を KK アクシオン探索も可能な検出器として改良し、KK アクシオンの初観測を目指した。

3. 研究の方法

純キセノンガスを用いた検出器であり、内部放電が比較的発生しやすい。このため検出器内部に用いる部品の素材や形状について再度見直しを行い、放電しにくい素材への変更や適切な GND 線配線、突起物の除去などの放電対策を施した。この際、放射性背景事象が低減できるよう、素材選択の時点で放射線スクリーニングを実施し、低 RI 素材を選択するようにした。ガスを高純度に保つためにゲッターを定期的に交換し、長時間連続でガス循環を行なってもよいように真空ポンプを増強した。またガス分析計を導入した。連続的なデータ取得が行えるようエレクトロニクスの改良も行い、遠隔からの制御が可能ないようにした。

ガス検出器内部に設置する光検出器の台数を増やすことで実効的に観測可能な立体角を増やして、実験感度を高めた。

放射線源を用いて検出器応答の較正も行った。この際に線源を高圧ガス内に封じ込めることが難しいため圧力容器の外側から放射線を照射した。キセノンガスに到達する前に圧力容器壁で一部エネルギーを落としてしまうため、粒子追跡シミュレーションを用いて検出器及び実験環境を再現して比較評価を行った。

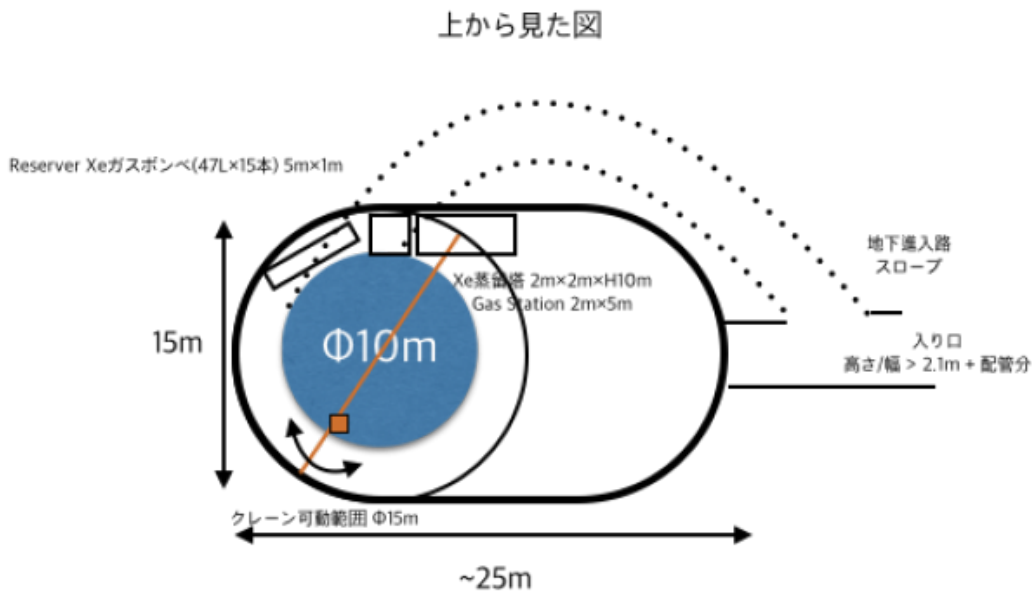
より大型でより低放射線環境下で実験を行うため、岐阜県神岡鉱山地下実験施設に新規の実験装置を設置し測定を行う。放射線シールドについても刷新を行い、鉛シールド、水シールドの他、シンチレーターを用いた動的放射線排除についても検討を行った。

4. 研究成果

ガス循環系およびエレクトロニクス改良によって連続的な運転を実現した。ガス分析を行うことで、連続運転中にガスの状態が大きく変化しないことが担保され、取得データの安定性が確認できた。放射線スクリーニングでは、元々検出器内部に電場形成するために用いていたフレームのアルミが、将来放射線背景事象問題になることが予測された。また飛跡検出部に用いている構造体は主に PTFE 及び PEEK で構成されているが、実験感度には大きな影響がないことも確認できた。最も影響が大きいのはガス検出器本体の金属であり、薄くすることで背景事象低減は可能であるものの、圧力容器として満たさなくなるため、複数の SUS サンプルを比較検討し、現状入手できる最も低い放射性不純物含有量のメーカーのものを将来の圧力容器用に選定した。

シミュレーションを用いた検出器応答と放射線源を用いた際の測定結果を組み合わせることで検出器応答の理解が進んだ。特に 511 keV に対するエネルギー分解能として $1.73 \pm 0.07\%$ (FWHM) を得ることができた。同型の高圧ガスキセノン検出器として先行開発が進んでいる競合実験と比べてほぼ同等のエネルギー分解能を達成することができている (PTEP Volume 2020 Issue 3 033H01)。

神岡地下実験施設で実験を行うことで、宇宙線ミュオンが地上にくらべて $1/1,000,000$ に低減される。放射線低減において、地下水を用いたシールドを構築する場合には、大型の水タンクおよびその設置のための大空洞を掘削する必要があり現実的ではなかった。旧カミオカンデ検出器のように掘削した空洞自体をタンクとする場合には最低でも $50,000 \text{ m}^3$ 程度の掘削が必要であり、空洞底にアクセスするためのスロープの作成が必要である (図 1)。金属製水タンクを広い空間に設置することを想定する場合は $90,000 \text{ m}^3$ 程度の空間を必要とする (図 2)。水シールドは 2-4 m 厚とすれば岩盤から生じる中性子を十分低減できる (図 3)。タンク素材を金属ではなくシンチレータ素材とした場合には水圧に耐えうるようにする設計が厳しいことがわかった。水タンク自体を加圧することで遮蔽能力を高めるとともに、ガス圧力容器の SUS を薄くしたり、耐圧性の低いシンチレータ素材を使ったりする案もあったが、いずれの場合も必要な空間を確保することが難しく、またガス検出器本体のメンテナンスを行う際に毎回水を抜く作業が発生することから、今回は断念し、鉛ブロックの積み上げによる放射線遮蔽を行うこととした。ガス圧力容器体積が $1,000 \text{ L}$ クラスであれば鉛のみの遮蔽でも実験感度は担保される。現在は地下実験施設にて新たな検出器の導入作業を進めており、測定に向けた準備を行っている。



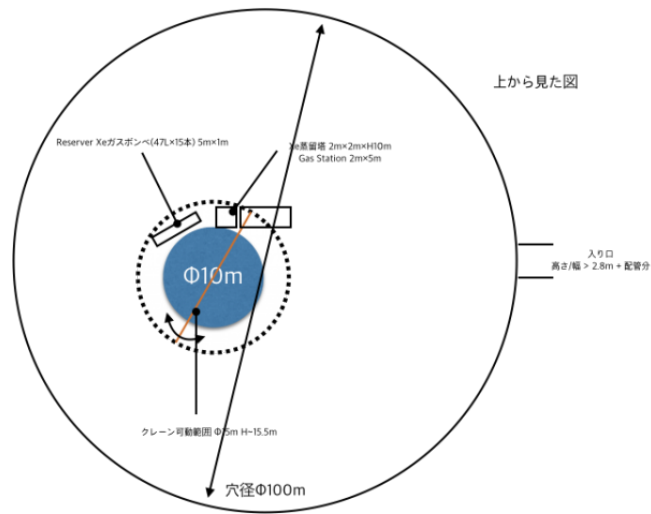


図 2

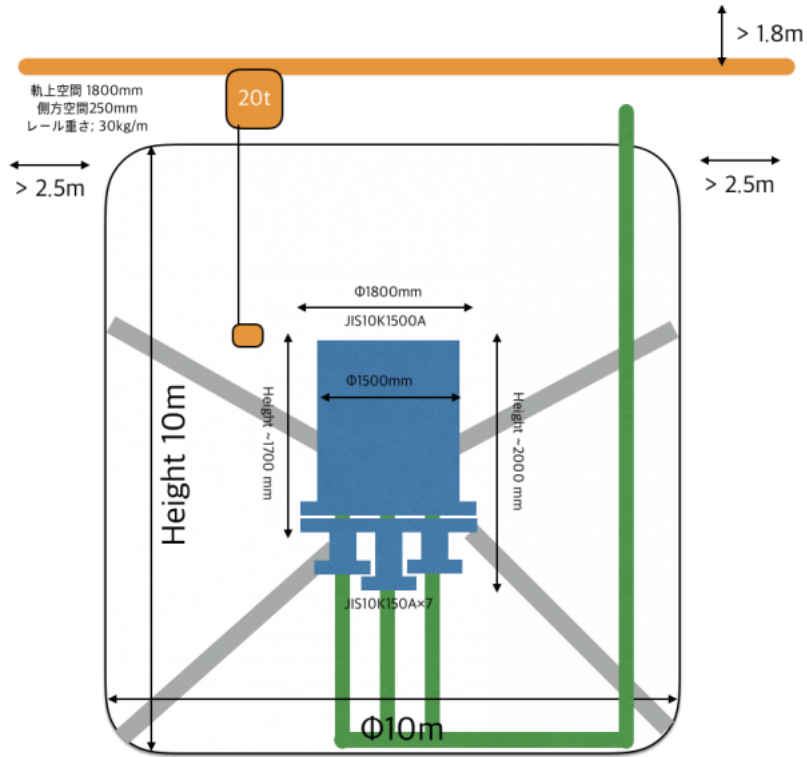


図 3

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 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 S Ban, M Hirose, A K Ichikawa, Y Iwashita, T Kikawa, A Minamino, K Miuchi, T Nakadaira, Y Nakajima, K D Nakamura, K Z Nakamura, T Nakaya, S Obara, K Sakashita, H Sekiya, B Sugashima, S Tanaka, K Ueshima, M Yoshida	4. 巻 2020
2. 論文標題 Design and performance of a high-pressure xenon gas TPC as a prototype for a large-scale neutrinoless double-beta decay search	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033H01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小原脩平
2. 発表標題 AXEL実験: 大型試作機による飛跡情報の評価
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------