

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24年 5 月 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22654029

研究課題名（和文） 暗黒物質探索に向けた次世代キセノン固体検出器の開発

研究課題名（英文） Development of the next generation solid xenon detector for dark matter search

研究代表者

長谷部 信行 (HASEBE NOBUYUKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10127904

研究成果の概要（和文）：

- (1) 高真空及びガス純化装置を備えた固体キセノン製作クライオスタットの完成。
- (2) 気体から液体を経て固体とする固体作成法と気体から直接固体を製作する固体作成法の完成。
- (3) 基礎的な放射線物性の一つ、固体キセノンの発光現象の観測。

研究成果の概要（英文）：

- (1) Construction of a solid xenon fabrication cryostat with an evacuation system equipped with two gas purifiers to get highly purified gaseous xenon.
- (2) Establishment of methods to solidify gaseous xenon into clear solid xenon through liquid state and without liquid state of xenon in order to observe basic properties to radiation.
- (3) Observation of scintillation light of solid xenon among several basic radiation properties of solid xenon.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,700,000	0	2,700,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	120,000	3,220,000

研究分野：放射線物理

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：キセノン、固体キセノン、液体キセノン、暗黒物質、放射線、固体結晶、電離・発光

1. 研究開始当初の背景

宇宙の構成物質の約 23%は正体の分からない暗黒物質であるとされており、その検証は現代物理学の最重要課題の一つと言える。暗黒物質の有力候補としては WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) が挙げられ、実験的に検出する手段の一つとして直接探

索と呼ばれる方法がある。これは、WIMP と検出器媒体との弾性散乱によって発生する反跳原子核を捕らえることで暗黒物質の確認を行う手法である。反跳原子核は、100keV 以下の非常に低いエネルギーを持つと予想されるため、検出下限エネルギーを下げるのが一つの課題である。暗黒物質の直接探索

実験は世界中で行われているが、現在のところ暗黒物質に対する感度が優れているものとして、気液二相型キセノン検出器と極低温ゲルマニウム検出器がある。前者は反跳原子核による電離・発光信号、後者は電離・フォノン信号を同時観測し、粒子弁別を行う点に特徴がある。ただし、気液二相型キセノン検出器においては、低エネルギー反跳原子核がそのエネルギーのほとんどを熱として失うにもかかわらず、その熱エネルギーを信号として検出できないため、検出閾値を下げることは限界がある。そこで、本研究では、暗黒物質の新たな検出媒体として固体キセノンに注目し、電離・発光信号に加えてフォノン信号が観測可能な検出器の開発に向けた基礎研究を行った。

また、キセノンは、これまでに常圧または高压の気体、液体として放射線検出器に利用されてきた。密度の高い高压気体や液体は様々な応用に対して魅力的であるが、この領域では、エネルギー分解能が理論的な予測よりも10倍以上悪いという問題が残されている。この理由は現在も解明されていないが、原因の一つとして、高压気体や液体には局所的な密度揺らぎが存在し、W値や電子・イオン対の再結合確率が変動する可能性が指摘されている。このとき、固体キセノンを“きれいに”成長させることができれば、そのような密度揺らぎは存在しなくなり、結果としてエネルギー分解能が向上することが期待される。あるいは、フォノンによる信号を観測した場合のエネルギー分解能の検証も必要である。これらにより、固体キセノンでは、極めて高いエネルギー分解能を有する次世代検出器が実現される可能性があり、暗黒物質探索だけでなく、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の探索などにもつながっていくことが期待される。

固体キセノンを放射線検出器として利用することは、これまでに断片的な研究が数例なされているが、系統的な研究は皆無と言って良い。従って、まず固体キセノンの製法を確立させることから始め、その上で、気体や液体の場合と同様に、放射線に対する基礎物性値を測定し、検出器開発のための基礎データを系統的に取得することが必要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、固体キセノン放射線検出器の開発に向けて、固体キセノン製法の確立、および放射線に対する基礎物性値を取得することである。固体の製法としては、気体から液体を経由し固体を作る方法と、気体から直接固体を作る方法が考えられ、それぞれの場合について、固体の成長速度や出来上がった固体の質に関する知見を得る。また、

基礎物性値としては、シンチレーション発光量、電離電子生成量、電子・正孔の移動速度などが挙げられる。これらの物性値は、出来上がった結晶の質に依存することが予想されるため、上述した生成方法の違いによる物性値の変化も観測すべきと考えられる。

3. 研究の方法

初めに、固体キセノン製作装置の整備を行う。製作装置は、キセノンを冷却するクライオスタットと真空排気系から成り、外部から液体窒素による冷却ができるようにする。図1に示すキセノンの相図によると、約160K以下の温度まで冷却する必要がある。固体キセノン製作容器内は外部から見えるようにし、固体の成長の様子を観察する。また、高純度のキセノンガスを得るための純化装置を準備し、純化済みのガスで固体を製作する。製作容器内は平行平板電離箱の構造にし、電離信号の観測のために高压を印加できるようにする。さらに、製作容器の外部に光電子増倍管を設置し、ビューポートを通してシンチレーション光を観測できるようにする。製作容器内の温度は、銅のコールドフィンガーの部分にヒーターを取り付けて制御できるようにし、シリコンの温度センサーによりモニターする。

次に、真空容器内を十分に排気し、キセノンを充填・冷却して、固体キセノンの製作試験を行う。気体から液体を経由して固体を製作する場合と、気体から固体を製作する場合について、それぞれビデオカメラで製作容器内の様子を観察し、比較する。図1より、キセノンガスの圧力を1.5atm程度に保って冷却した場合に、気体から液体、固体へと変化する一方、約0.8atm以下に保って冷却した場合には、気体から固体へと変換することが分かる。

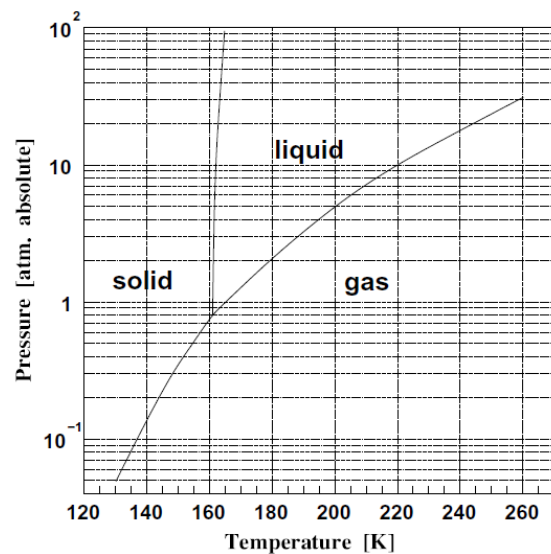


図1. キセノンの相図。

さらに、製作した固体キセノンで、放射線によるシンチレーション発光と電離電子の測定を試みる。放射線源として、 ^{207}Bi を製作容器内に設置する。

4. 研究成果

(1) 固体キセノン製作クライオスタットの整備

本研究で製作・整備した固体キセノン製作装置の概要を図2に示す。PMTは光電子増倍管、RP、TPはそれぞれロータリーポンプ、ターボ分子ポンプを示す。また、固体キセノン製作部の写真を図3に示す。

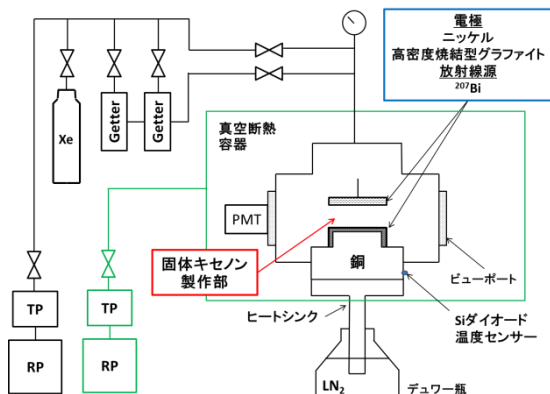


図2. 固体キセノン製作装置概要図。

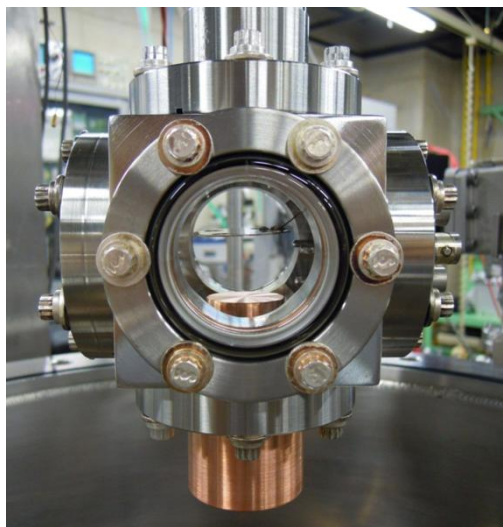


図3. 固体キセノン製作部拡大写真。

キセノン固体製造容器は、ステンレス製で容積約 $5 \times 5 \times 5 \text{cm}^3$ の立方体型とした。側面に石英のビューポートを4つ備え、目視による内部の観察が可能である。固体キセノン製作部の電極には、高密度焼結型グラファイトを用いている。これは、電極の横方向の熱伝導を良くし、一様に固体を成長させるためである。電極間隔は約2cmとした。キセノンの純化装置としては、ジルコニウム-バナジウムゲッターを2台導入した。セラミックヒーターにより、それぞれ 200°C 、 700°C で加熱して、キ

セノングスを流すことで純化を行った。キセノンの冷却は、容器下部に設置したデュワー内の液体窒素により行った。

(2) 固体キセノン製作試験

固体キセノンの製作試験として、まず、気体から液体、固体へと変化させる方法を試みた。この時のシリコン温度センサーの温度の時間変化を図4に示す。

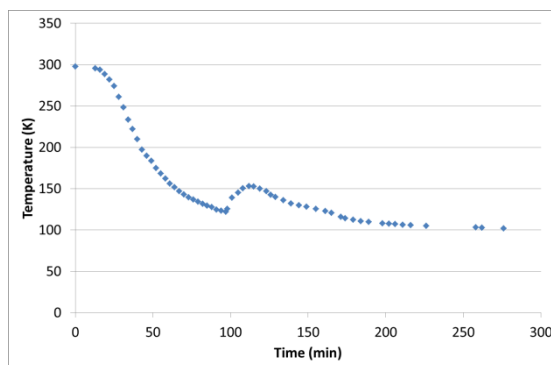


図4. 固体製作試験時の温度の時間変化

図4において、時刻0の時、真空状態で冷却を開始し、97分後、121Kの時キセノングスを充填し始めた。その後、圧力を1.5atm程度に保持すると、126分後、142Kの時液化が確認できた。さらに、226分後、104Kの時、キセノンが凝固し始めるのが観測できた。この時できた固体の様子を図5に示す。



図5. 製作した固体キセノンの写真 (I)。

次に、気体から固体へ変化させることを試みた。図6に、固体キセノンの成長する様子を約7分ごとに撮影したものを示す。ここでは、容器内の圧力を0.8atmに保持しながら固体を製作した。冷却を開始してから約100分で電極間に固体が成長しているのが分かる。この時のコールドフィンガー部の温度は約110Kであった。固体の様子を目視で観察すると、製作した直後は白く濁ったように見えた。その後、温度、圧力をほぼ一定に保ったまま約140分経過すると、固体キセノンの透明度が増すことが目視で確認できた。その時の写真を図7に示す。これは、時間経過とともに、固体キセノンの結晶構造が均一な状

態へと変化していくことを示していると考えられる。



図 6. 固体キセノン成長の連続写真。

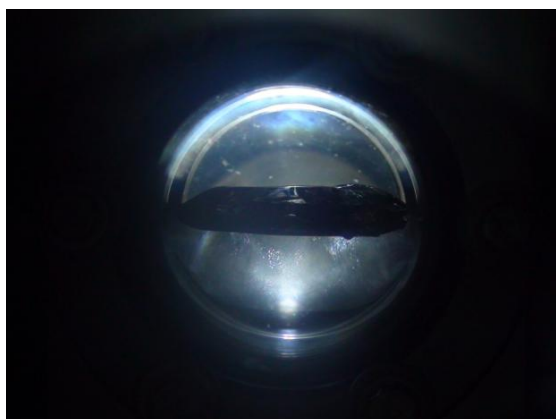


図 7. 製作した固体キセノンの写真 (II)。

(3) 固体キセノンのシンチレーション発光の観測

固体キセノン製作容器の側面に取り付けた光電子増倍管(浜松ホトニクス、R5900-06 AL12S ASSY)を用いて、シンチレーション発光の観測を試みた。入射させた放射線は、 ^{207}Bi からの 570keV のガンマ線である。図 7 の状態で、容器外部からの光を遮断して観測を行った結果、シンチレーション光と思われる信号をオシロスコープで観測することができた。ただし、エネルギースペクトルを取得したところ、ガンマ線エネルギーに対応するピークやコンプトン連続部などのスペクトル形状は観測されなかった。原因として、光電子増倍管が一つの側面にしか設置されておらず、個々のガンマ線イベントによる立体角の変動が大きいことが挙げられる。また、キセノン中の不純物の影響も考えられるので、今後検証していくことが必要である。さらに、固体の周囲が気体の場合、屈折率の違いにより光が外部に出づらくなることが考えられるため、固体の周囲が気体の場合と液体の場合での違いを確かめる必要があると考えられる。

(4) 今後の課題・展望

本研究により、固体キセノン製作装置の整

備、ならびに固体キセノンの製作を行うことに成功した。また、シンチレーション発光と思われる信号を観測したが、得られたエネルギースペクトルは十分なものではなかった。従って、今後の課題として、シンチレーション発光の定量的な観測を引き続き行う。現在、光電子増倍管を対面になるように2つ設置し、両者の信号を加えることで反応位置に対する依存性を低減することを行っている。また、本研究では電離電子による信号の観測まで進めることができなかったため、今後電離電子の読み出しを行い、定量的な測定を行っていくことを考えている。さらに、固体製作試験において固体の質の変化が観察されたが、この質の変化が各物性値に与える影響について検証する必要があるだろう。結果によって最適な固体製作方法について更なる検討を行って、次世代型検出器としての基礎を確立していくことを目指す。

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)

[学会発表] (計 2 件)

(1) 柴田元来、宮島光弘、佐藤悠太、草野広樹、長谷部信行、“固体キセノン放射線検出器”、2012年春季 第59回応用物理学関係連合講演会、2012年3月15日-18日、早稲田大学

(2) 宮島光弘、柴田元来、草野広樹、長谷部信行、“固体キセノン放射線検出器開発の試み”、2011年春季 第58回応用物理学関係連合講演会、2011年3月9日、2011年春季第58回応用物理学関係連合講演会講演予稿集

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷部 信行 (HASEBE NOBUYUKI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：10127904

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

宮島 光弘 (MIYAJIMA MITSUHIRO)
早稲田大学・理工学術院総合研究所 理工学研究所・客員研究員

草野 広樹 (KUSANO HIROKI)
早稲田大学・大学院先進理工学研究科・博士後期課程3年