

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目： 若手スタートアップ
 研究期間：2007～2008
 課題番号： 19840047
 研究課題名（和文） 放射線を用いた気体から液体にわたるキセノン物性変化の解明
 研究課題名（英文） Study of the change of xenon properties from gas to liquid phase by irradiating alpha ray.

研究代表者

小林 進悟 (KOBAYASHI, Shingo)
 早稲田大学・理工学術院・助手
 研究者番号：10434325

研究成果の概要：低圧から高圧までの気体キセノンに α 線を照射し、シンチレーション発光量及び電離電子数の測定を行うことでキセノンの密度変化に伴う物性の変化を探った。そのためにまず密度 0 におけるキセノンの放射線に対する物性を把握した。これまで低圧キセノンでは、一励起原子を生成するのに必要な平均エネルギー (W_{ex}) が不明で測定が困難であったが、様々な不確定因子を実験的に検討・確認した結果、密度 0 に外挿した値は 34.1 ± 2.4 eV と決定した。また W 値は、 20.9 ± 0.4 eV と決定した。この W_{ex} 、 W の結果はキセノン原子の電離・励起断面積から求まる値に非常に近く、また 0.15g/cm^3 までの密度領域では W_{ex} 、 W 値は一定であり、キセノンの原子的な振る舞いが主に支配していることがわかった。 0.15g/cm^3 以上の密度領域ではシンチレーション発光量は徐々に減少してゆくことが測定され、液体キセノンで観測されている消光効果が起こり始めている可能性が高い。キセノンの α 線に対する性質は密度が 0.15g/cm^3 まではほぼ理想気体と同様の性質を示すが、 $0.15 \sim 0.8\text{g/cm}^3$ の密度領域になると α 線による電離・励起後の緩和過程が重要な役割を担いはじめると推測される。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2007 年度 | 1,350,000 | 0 | 1,350,000 |
| 2008 年度 | 1,350,000 | 405,000 | 1,755,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,700,000 | 405,000 | 3,105,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：キセノン、高密度、放射線検出器

1. 研究開始当初の背景

Doke et al. (1976) は、ファノ因子の計算から液体キセノン検出器 (3g/cm^3) の最高エネルギー分解能はゲルマニウム検出器と同

程度の $1.5\text{keV}@1\text{MeV}$ が得られるとしたが、実際には 50keV 程度であり、これまで様々な検証が行われたが未だ解決には至っていない。一方、液体キセノン検出器の問題を探ってい

たLevin et al. (1993)によって高圧キセノン検出器の優れたエネルギー分解能が見出された。分解能は10 keV程度と液体キセノンに比べずっと良い。しかしキセノン密度が0.5 g/cm³を超えるとエネルギー分解能が劣化することを示している。このようにキセノン検出器の動作には、不可解な点が残されている。

Bolotnikov and Ramsey (1997, 1999)は、高圧キセノン検出器の動作を把握するため、気体キセノンのW値、W_s値の密度変化について測定を行い、密度と共にW値の減少とW_s値の上昇を報告している。彼らは、キセノン密度0.3~0.5 g/cm³でのW値の減少の理由は、密度の上昇に伴う平均原子間距離の減少の結果、第一電離準位以下に電離ポテンシャルが生じバンド構造が形成され、電離が促進されるとしている。しかしLevin et al. (1993)はW値に密度変化がないと主張しており、Bolotnikov and Ramseyの結果と相反している。

W_s値はキセノンシンチレーションの最大発光強度に関係する量である。申請者ら[Kobayashi et al. (2004)]は、W_s値の上昇を定量的に評価するために独自に測定を行い、Saito et al. (2002)やBolotnikov and Ramseyの結果を合わせる手法を見出し0-0.8 g/cm³にわたるW_s値の導出を試みた。しかし、密度0.1 g/cm³以下では測定が困難なため正確な値が得られておらず、W_s値の密度依存性を理解する上で妨げとなっている。また密度と共にW_s値が上昇する理由は誰にもわからない。

このようなキセノンのW・W_s値の密度変化は、低圧~高圧~液体でのキセノン物性の変化を表している。W・W_s値の密度依存性を検証し直し、キセノン物性の連続的変化の理解を深めることが、高圧・液体キセノン検出器の不思議な挙動の解明につながる。

W値：放射線の作用により1つの電子・イオン対を作るのに必要な平均エネルギー

W_s値：放射線の作用により1つの光子を作るのに必要な平均エネルギー

2. 研究の目的

キセノンのW・W_s値の密度依存性を実験測定を通して解明し、キセノンの物性の密度依存性を明らかにし、キセノン検出器の発展に寄与することが目的である。

3. 研究の方法

(1)低圧キセノンでのW値の決定

大気圧のキセノンのW値には、確立された値(= 21.9 eV)があり、多くの研究では実測せずに用いられているが、WやW_s値はキセノンガスの純度に大きく依存することが知られるため、高純度キセノンでW値の再確認測定を行なった。

線源(²⁴¹Am)が固定された一対の平行平板電極を有するチェンバー内に、Ba-Tiゲッタで純化したキセノンガスを充填した。平行平板電極間に高電場を印加して、線によって電極間に誘起される信号を観測した。電極間の信号は、前置増幅器、主増幅器を経て、多チャンネル波高分析器(MCA)に導いた。Siの値(= 3.62 eV)に較正された水銀パルサーを回路系と接続した。水銀パルサーが生成する電荷量で平均波高値を較正することで、波高値を電離電子数N_eに変換し、W値を得た。

(2)低圧キセノンでのW_s値の決定

(1)と同様の純化されたキセノン及びチェンバーを用いて、線により発生するシンチレーションを、MgF₂窓を通して光電子増倍管(PMT)で観測した。PMTからの出力は、前置増幅器、主増幅器を経て、MCAに導いた。較正された水銀パルサーを回路系と接続した。水銀パルサーが生成する電荷量で平均波高値を較正し、PMTから出力される電子数N_{pmt}を決定した。

シンチレーション発光量N_pは、以下の式から導出した。

$$N_p = \frac{N_{PMT}}{Q_{PMT} G_{PMT} \Omega_{PMT}}$$

ここで、Q_{pmt}はPMTの量子効率、G_{pmt}はPMTの増倍率、 Ω_{pmt} はPMT窓でのシンチレーション収集効率を表す。Q_{pmt}及びG_{pmt}は、浜松フォトニクス社の保有する標準光源に対して較正した。

Ω_{pmt} は、線源の配置と線のエネルギー損失から算出した光源分布から、チェンバー内の幾何学的構造を考慮して光子輸送計算を行い、決定した。W_s値は、線のエネルギーE_c(= 5.49 MeV)を、N_pで割ることで得た。測定は無電場及び高電場下にて行った。

(3)W_s値及びその最小値の密度依存性

Kobayashi et al.(2004)の結果、Bolotnikov and Ramsey (1999), Dolgoshein et al. (1954)の結果を(1),(2)の結果で較正することで、0.8 g/cm³までの無電場でのW_s値の密度依存性を得た。また、シンチレーション発光光子数と発生電離電子数の電場依存性を(1),(2)の結果で較正し、W_sの最小値(W_{s(min)}=(W⁻¹+W_{ex}⁻¹)⁻¹)を密度ごと、電場ごとに

求めた。

4. 研究成果

(1) 低圧キセノンでの W 値の決定(H19)

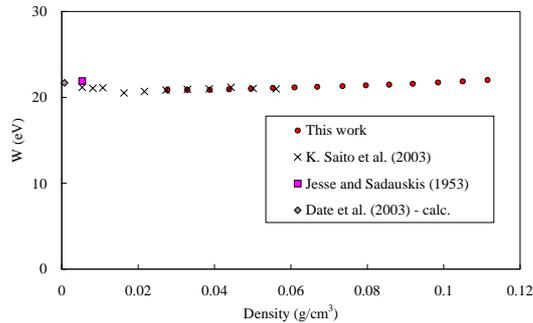


図1. W 値の密度依存性。

図1に W 値の密度依存性を示す。本研究の結果は、密度0での外挿値で、 20.9 ± 0.4 eVとなり、ICRU Reportに掲載されているJesse and Sadauskis (1953)の報告(= 21.9 eV)と比べわずかに小さい値となった。また、およそ 0.1 g/cm^3 までの密度領域で密度依存性は見られなかった。

(2) 低圧キセノンでの W_s 値の決定

低圧キセノンのシンチレーション発光の大きさは、放射線検出器等の応用分野で重要である。またキセノンの高密度物性を考える上で密度0に外挿したシンチレーション発光量は基準となるため、把握すべき重要な物理量である。

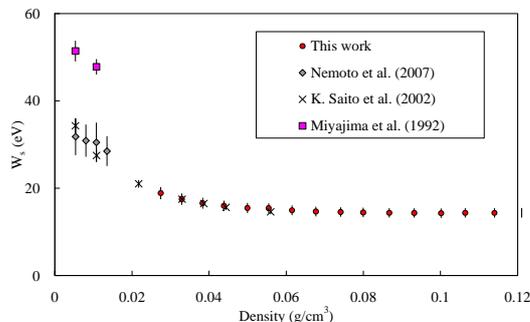


図2 無電場にて測定した W_s 値の密度依存性。本研究では 50 マイクロ秒の波形整形時定数 (~ 光子収集時間) で測定した。

図2、図3に無電場及び高電場で測定した W_s 値をそれぞれ示す。シンチレーションには、励起原子に起因する励起発光と電子イオン対に起因する再結合発光があり、高電場下では電子イオン対が電極に収集されるため、励起発光のみ生じる。高電場下において測定された W_s 値は、一励起原子を生成するのに必要な平均エネルギー W_{ex} 値を意味する。

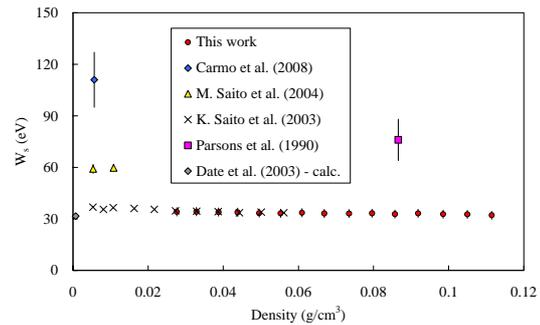


図3. W_{ex} 値 (=高電場にて測定した W_s 値) の密度依存性。

低圧キセノンでの線に対する W_s 値の報告は、Miyajima et al. (1992) 及び K. Saito et al. (2002) により無電場にて同様の手法でなされていたが、図2に示すように相反する値を示していた。また、この他に、Nemoto et al. (2007) は、液体と気体キセノンの W_s 値の比を測定し、Doke et al. (1999) によって報告されている液体キセノンの W_s 値が K. Saito et al. (2002) の測定結果と一致すると報告していた。

一方、 W_{ex} 値は、線において K. Saito et al. (2003) 及び M. Saito et al. (2004)、線において Parsons et al. (1990)、X線において Carmo et al. (2008) により報告されていたが、図3に示すように全て相反する値となっていた。

本研究の実験手法は、Miyajima et al. (1992) や K. Saito et al. (2002) と同様のものだが、様々な実験的因子の再現性を確認し、信頼性の高い実験をおこなった。

図2に示すように、無電場での W_s 値は、K. Saito et al. (2002) の結果とほぼ一致するものとなった。大気圧付近の無電場で測定した W_s 値は、高密度下での値に比べ大きくなる傾向があるが、これは低圧では再結合発光が長い時間発光をしつづけるため、光子が十分に収集されないことが一つの理由であり、低圧Xeでの W_s 値は一般的に測定回路系に依存する。この影響を受けない $0.09\text{--}0.15 \text{ g/cm}^3$ の密度領域で、 W_s 値を 14.2 ± 1.0 eV と決定した。

一方、図3に示すように、 W_{ex} 値は、ほぼ密度に依存せず一定の値となり、密度0での外挿値は 34.1 ± 2.4 eV と決定した。この値は、K. Saito et al. (2003) の報告とほぼ一致する。本研究により、線に対する W_{ex} 値はほぼ統一の値が得られたと言える。

図1、図3に示すように Date et al. (2003) がキセノン原子の電離・励起断面積から数値計算で求めた W 、 W_{ex} 値は、本研究の結果と非

常に近い値となった。これは、キセノンが $0-0.1 \text{ g/cm}^3$ の密度領域ではXe-Xe間の相互作用による電離・励起ポテンシャルの変化は効かず、キセノンの原子的な振る舞いが主に支配しているということが出来る。一方で同密度領域でのキセノン中の電子の移動度、拡散係数はわずかに密度に依存するため、そのようなメカニズムを今後検討してゆく必要がある。

Carmo et al. (2008) や Parsons et al. (1990) が我々の測定結果と一致を示さなかった。Date et al. (2003) の結果や荷電粒子に対してW値が変化しないことから考察すると、線やX線に対する W_{ex} 値も線と同様の値となると考えられるが、実験的には大きく異なる値を示している。これらの値は、本研究と異なる複雑な手法を用いて得られており、大きな系統誤差があるためと考えられる。

(3) W_s 値及びその最小値の密度依存性

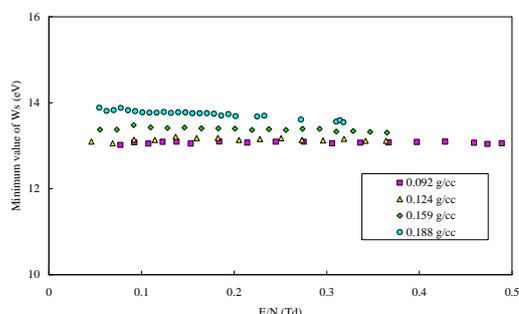


図4 . W_s の最小値の電場依存性。

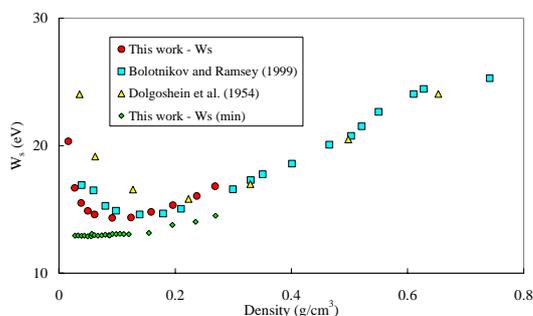


図5 . 高密度での W_s 値及び $W_{s(\min)}$ の密度依存性。

図4に、実験から推定される $W_{s(\min)}$ の電場依存性を示す。既知の低密度キセノンの発光過程から予測すると、励起原子1つは1つの光子を生成し、電離原子1つは再結合を起こすと1つの光子を生成すると考えられる。従って、電場が変化して収集される電離電子数が変化しても、 $W_{s(\min)}$ は一定になると考えられる。図4に示すように、 0.15 g/cm^3 以下の低密度な領域では $W_{s(\min)}$ は電場によらず一定となり、予想が裏付けられた。

一方で、 0.15 g/cm^3 以上の高密度な領域では、 $W_{s(\min)}$ の増加と共に緩やかな電場依存性が見て取れる。この傾向は、電場が低いとシンチレーション光子に転換される効率が低下しているとすると説明が付き、シンチレーション過程に変化が生じてきた可能性がある。

図5に、高密度での無電場において測定された W_s 値及び $W_{s(\min)}$ (0.2 Td 電場下での値) の密度依存性を示す。 W_s と $W_{s(\min)}$ には差が存在するが、拡散により再結合を起こさないXeイオンが存在するためである。また、 0.15 g/cm^3 以上の密度領域で、密度増加にともない W_s 値と共に $W_{s(\min)}$ が増加していることが見てとれる。

液体キセノンの研究では、密度の増加によって、発光量が減少する物理現象として、励起キセノンの二体衝突による消光効果が広く受け入れられている。気体キセノンでも、 0.15 g/cm^3 以上では線によるシンチレーション発光では消光効果が起こり始めている可能性が高い。キセノンの線に対する性質は密度が 0.15 g/cm^3 まではほぼ理想気体と同様の性質を示すが、 $0.15 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$ の密度領域になると線による電離・励起後の緩和過程が重要な役割を担いはじめると推測される。

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)

M. Mimura, S. Kobayashi, N. Masuyama, M. Miyajima, and N. Hasebe, "Average Numbers of Scintillation Photons and Electrons Produced by an Alpha Particle in High-Density Xenon Gas", Jpn. J. Appl. Phys., 印刷中, 2009, 査読有

M. Mimura, S. Kobayashi, S. Asano, N. Masuyama, M. Miyajima, and N. Hasebe, "PRESSURE DEPENDENCE OF W_s -VALUE IN XENON GAS", KEK Proceedings, 2008-14, pp. 126-132., 2009, 査読有

[学会発表](計4件)

三村光輝、小林進悟、石川智弘、宮島光弘、長谷部信行:「キセノンガスの再結合発光中に含まれる遅い成分の密度依存性」、研究会「放射線検出器とその応用」(第23回) 2009年1月27~29日、高エネルギー加速器研究機構

M. Mimura, S. Kobayashi, M. Miyajima,

and N. Hasebe: "Absolute Numbers of Scintillation Photons and Electrons Produced by Alpha Particles in High-Density Xenon Gas", IEEE Nuclear Science Symposium, 19-25 Oct. 2008, Dresden, German.

三村光輝、小林進悟、浅野翔太郎、益山直樹、宮島光弘、長谷部信行:「キセノンガスのシンチレーション発光の時間発展」、2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会、2008年3月27~30日、日本大学

三村光輝、小林進悟、浅野翔太郎、益山直樹、宮島光弘、長谷部信行:「気体キセノンの W_s 値の圧力特性」、研究会「放射線検出器とその応用」(第22回)、2008年2月5~7日、高エネルギー加速器研究機構

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 進悟(KOBAYASHI SHINGO)
早稲田大学・理工学術院・助手
研究者番号: 10434325

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

三村光輝(MIMURA MITSUTERU)
早稲田大学・理工学研究科・D3