

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

高密度気体キセノン中の電子輸送過程の研究  
—電子の流動及び拡散の密度依存性—

Studies on electron transport processes in  
high-density gaseous xenon  
—Dependence of electron drift and diffusion on  
gaseous density—

申請者

草野	広樹
Hiroki	KUSANO

物理学及応用物理学専攻 宇宙放射線物理学研究

2012年7月

本研究の目的は、近年研究開発が進められている高密度気体キセノン放射線検出器のために、放射線検出媒体としての高密度気体キセノンの基礎パラメータを測定し、基礎過程に関する新たな知見を得ることである。

キセノンは放射線の検出媒体として優れた特性を有し、キセノンを利用した検出器は様々な分野で利用されている。近年、キセノンを高密度気体の状態で利用することにより独自の利点を持つ放射線検出器を構築できることから、高密度気体キセノン放射線検出器の研究開発が進められている。利点の一つとしては、検出器内に生成された電荷の三次元的な位置情報を取得できる点が挙げられ、適切な気体密度を選べば荷電粒子の飛跡を得ることも可能である。この検出器の実現のためには、高密度気体キセノン中での放射線による電離・発光過程、さらに電場による電子輸送過程に対する理解が必須であると言える。

しかしながら、高密度気体キセノン中での電子輸送過程には多くの未解明な点が残されている。移動度に関しては過去に数件の報告があるが、拡散係数、励起係数、電離係数に関してはほとんど知られていない。一方でシンチレーション発光過程については、比較的低密度の領域ではシンチレーション発光量や時間特性についての知見が得られているが、高密度領域における発光量の絶対値や電場下での電離電子収量とシンチレーション光子収量の関係に対する理解は不十分である。次世代の高密度気体キセノン放射線検出器開発のためには、それらのデータの取得は大変有益であると考えられる。本研究では、高密度気体キセノン中での基礎パラメータとして、電子の移動度、縦拡散係数、電離係数、さらにアルファ線によるシンチレーション発光量に焦点を当てる。本論文は6章から構成されており、以下にその概要を示す。

第1章では、キセノンの放射線検出媒体としての特性、キセノン放射線検出器の開発動向について述べるとともに、本研究の目的を示した。高密度気体キセノン検出器は、原子番号が大きいこと、密度が高いことからガンマ線検出に対して有利である。また、大きな電離電子収量を持つとともにエネルギー分解能に優れ、希ガスであるために放射線損傷に強く、検出器の大きさ・形状について比較的自由度が高いなどの特徴を持つ。さらに独自の特徴として、放射線による電離電子とともにシンチレーション光子が観測可能であることが挙げられる。シンチレーション光子から時間情報を、電離電子から二次元の位置情報を取得することで、荷電粒子により生成された電荷の三次元的な位置を読み出し、タイムプロジェクトチェンバー(TPC)として動作させることができる。高密度気体キセノンを用いたTPCは、ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索やMeV領域のガンマ線観測において次世代の検出器として期待されている。高密度気体キセノンTPCの実現のために必要な基礎パラメータは多岐にわたるが、電子の輸送係数、特に電場による電子の移動度と拡散係数は重要である。なぜなら、移動度は電子の収集

時間を決定し、拡散係数は位置分解能を制限するパラメータであるためである。また、電子が高電場により加速された場合の電離係数も重要なパラメータである。入射荷電粒子の飛跡を決定するために、荷電粒子によって電離された電子を複数の電極で分割して観測する場合、各電極での電荷の観測を容易にするために収集電荷を増幅する電荷増幅の過程が必要となり、その増幅率などの制御に電離係数が重要な役割を果たす。さらに、シンチレーション発光量は、検出器の幾何的な設計、受光素子の選定、検出効率の決定などの点で不可欠なパラメータである。本研究では、電子輸送係数並びにシンチレーション発光量の測定を行い、高密度気体キセノンの放射線検出器としての基礎過程に関する知見を得ることを目的とする。

第2章では、放射線検出媒体としてのキセノンの性質について、過去に行われた研究で得られた知見を示した。特に、電子輸送係数及びシンチレーション発光量の結果について論じた。移動度については、低密度では広い電場範囲にわたって精度の高い結果が得られており、換算移動度（気体数密度と移動度の積）と換算電場（気体数密度で除した電場）との間に密度に依存しない関係が成立することが示されている。また、高密度での移動度の測定も二例報告されている。一方で拡散係数に対する研究例はほとんどない。特に高密度での報告は、横拡散係数に関するものが一例あるのみで縦拡散係数については皆無と言って良い。また電離係数についても、高密度気体を用いた比例計数管での研究が一例報告されているが、一般的には希薄気体中での値が用いられており、高密度領域での電荷増幅の研究はまだ不十分であると言える。シンチレーション発光量は、比較的低密度では統一見解が得られつつある。一方、高密度においては二例の報告があるがいずれも相対値であり、その再検証も含めてより高密度までの研究を行うことで、シンチレーション過程の全体像を解明する必要がある。

第3章では、電子の移動度、縦拡散係数、電離係数、及びシンチレーション発光量を測定するための実験装置および実験方法、データ解析方法について示した。本研究においては4つの異なる装置が用いられている。装置1は、キセノンフラッシュランプと光電陰極を組み合わせた平行平板型電離箱であり、比較的low密度における移動度、縦拡散係数測定に使用した。装置2は、アルファ線源を内蔵した平行平板型電離箱であり、高密度における移動度、縦拡散係数測定に使用した。装置3は円筒型比例計数管であり、電離係数測定に使用した。装置4はアルファ線源を内蔵した平行平板型電離箱で、外部に光電子増倍管を備えており、シンチレーション発光量測定に使用した。装置1、2の測定原理は同一であり、電子源で作られた電子群は極板間の一様電場から力を受け、気体キセノン中を流動する。電子群が陽極に到達した時間とその時の電子群の広がりから、移動度と縦拡散係数を同時に決定することが可能である。装置3は、中心に細い陽極線が張ってあ

り、陽極周辺に高電場の印加が可能である。外部からガンマ線を入射して電荷増幅率を測定することで、電離係数を導出した。装置4は、アルファ線によって生成される電離電子とシンチレーション光子の同時測定が可能である。全ての装置において、高純度に精製されたキセノンを用いて実験を行った。

第4章では、電子輸送係数、シンチレーション発光量の測定条件、測定結果とその誤差をまとめた。測定条件は、移動度と縦拡散係数について密度  $4.19 \times 10^{19}$ - $1.73 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 、換算電場 0.01-0.2 Td、電離係数について密度  $1.26 \times 10^{20}$ - $8.68 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 、陽極表面の換算電場 105-420 Td、シンチレーション発光量について密度  $5.51 \times 10^{20}$ - $6.07 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 、換算電場 0-0.7 Td である。ただし、 $1 \text{ Td} = 10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$  である。本研究により、縦拡散係数、電離係数およびシンチレーション発光量については、過去の研究よりも高密度の領域で初めての実験結果を取得した。

第5章では、測定結果から電子輸送係数とシンチレーション発光量の気体密度依存性を中心に考察を行った。換算移動度は、密度約  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  以上で密度依存性が現れ、特に換算電場 0.04 Td 付近で増加が見られた。換算縦拡散係数（気体数密度と縦拡散係数の積）は、移動度より低密度な領域から密度依存性が現れ始め、密度とともに大きく増加することが分かった。特に換算電場 0.04 Td 付近で大きく変化しており、これは移動度が変化する領域と一致している。この変化は、密度上昇によって電子-キセノン原子散乱に対する実効的な運動量移行断面積が減少することに起因すると考えられる。また、換算電場 0.06 Td 以上の比較的高い電場領域では、換算移動度と換算縦拡散係数は密度によらずほぼ一定であることが明らかになった。過去の横拡散係数の測定では、密度範囲  $1.25 \times 10^{20}$ - $2.57 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  において、換算電場 0.1 Td 以上で密度依存性がないことを報告しており、本研究の結果はそれに整合すると考えられる。換算電離係数（気体数密度で除した電離係数）は、密度約  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上で、等しい換算電場に対する値がわずかに増加する傾向が観測され、密度依存性が存在するような兆候が見られた。81.0 keV のガンマ線に対するエネルギー分解能も同時に取得し、その密度依存性に関する議論も行った。シンチレーション発光量は、無電場において密度約  $4.6 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  までは減少し、それ以上ではほぼ一定になった。また、電離電子とシンチレーション光子の同時測定の結果から、観測される電子と光子の総数が密度とともに減少していることが明らかになった。これは低密度では見られなかった傾向であり、高密度化による電離・発光過程の変化を示していると考えられる。

第6章では、本研究によって得られた知見をまとめ、高密度気体キセノン放射線検出器開発のための研究の今後の展望について述べた。本研究により、キセノンを用いた放射線検出器を開発する際に必要不可欠なデータが得られており、高密度気体キセノン検出器の発展に大きく寄与することが期待される。

## 早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名 草野 広樹 印

(2012年 10月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文(学術誌)	<u>H. Kusano</u> , J.A.M. Lopes, M. Miyajima, E. Shibamura, and N. Hasebe: “Electron mobility and longitudinal diffusion coefficient in high-density gaseous xenon”, Jpn. J. Appl. Phys. (accepted)
○論文(学術誌)	<u>H. Kusano</u> , J.A.M. Lopes, M. Miyajima, E. Shibamura, and N. Hasebe: “Scintillation and ionization yields produced by $\alpha$ -particles in high-density gaseous xenon”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 683 (2012) 40-45.
○論文(学術誌)	<u>H. Kusano</u> , J.A.M. Lopes, M. Miyajima, E. Shibamura, and N. Hasebe: “Density dependence of the longitudinal diffusion coefficient of electrons in xenon”, Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 048001.
論文(国内学会・査読有)	T. Ishikawa, R. Miyazawa, <u>H. Kusano</u> , M. Mimura, N. Hasebe, M. Miyajima, and S. Kobayashi: “Correlation between numbers of scintillation photons and liberated electrons on recombination luminescence processes in high pressure xenon”, Proc. of the 24th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, 2010, 204-213.
論文(国際学会・査読有)	M. Mimura, <u>H. Kusano</u> , S. Kobayashi, M. Miyajima, and N. Hasebe: “Xenon time projection chamber for next-generation planetary missions”, J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) Suppl. A, 157-160.
論文(国内学会・査読有)	<u>H. Kusano</u> , S.-T. Kobayashi, M. Mimura, S. Kobayashi, M. Miyajima, and N. Hasebe: “Gas amplification in high-pressure pure xenon proportional counters”, Proc. of the 22nd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, 2008, 133-139.
論文(学術誌)	<u>H. Kusano</u> , M. Mimura, S. Kobayashi, M. Miyajima, and N. Hasebe: “Measurements of electron drift velocity in $^3\text{He}$ gas”, Jpn. J. Appl. Phys. 47 (2008) 6475-6477.
講演(国際学会)	<u>H. Kusano</u> , J. A. M. Lopes, M. Miyajima, and N. Hasebe: “Longitudinal and transverse diffusion of electrons in high-density gaseous xenon”, 14th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Figueira da Foz, Portugal, 1-5 Jul., 2012.
講演(国際学会)	M. Mimura, <u>H. Kusano</u> , S. Kobayashi, M. Miyajima, and N. Hasebe: “Xenon time projection chamber of next generation for planetary remote sensing”, International Workshop on Advances in Cosmic Ray Science, Tokyo, Japan, 17-19 Mar., 2008.

## 早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演(国内学会)	<u>草野広樹</u> ，宮島光弘，長谷部信行，“高密度キセノンガス中における電子の縦拡散”，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
講演(国内学会)	<u>草野広樹</u> ，宮島光弘，長谷部信行，“キセノンガスの密度増加に伴う $\alpha$ 線によるシンチレーション光子数と電離電子数の変化Ⅲ”，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
講演(国内学会)	大山裕輝，長谷部信行， <u>草野広樹</u> ，児玉拓郎，天野嘉春，G. Klingelhöfer, J. Brückner, D. Schmanke, M. Blumers, K. J. Kim，“月惑星探査に向けた能動型蛍光 X 線分光器の基本特性”，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
講演(国内学会)	柴田元来，宮島光弘，佐藤悠太， <u>草野広樹</u> ，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
講演(国内学会)	<u>草野広樹</u> ，宮島光弘，長谷部信行，“高密度キセノンガス中の電子増幅特性”，研究会「放射線検出器とその応用」（第26回），2012年1月24日－26日，高エネルギー加速器研究機構
講演(国内学会)	<u>草野広樹</u> ，石川智裕，宮島光弘，長谷部信行，“キセノンガスの密度増加に伴う $\alpha$ 線によるシンチレーション光子数と電離電子数の変化Ⅱ”，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
講演(国内学会)	宮島光弘，柴田元来， <u>草野広樹</u> ，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
講演(国内学会)	<u>草野広樹</u> ，石川智裕，宮島光弘，長谷部信行，“ $\alpha$ 線による高密度キセノンガスのシンチレーション発光量”，2010年秋季 第71回応用物理学学会学術講演会，2010年9月14日－17日，長崎大学
講演(国内学会)	宮澤良一，石川智裕， <u>草野広樹</u> ，三村光輝，長谷部信行，宮島光弘，小林進悟，“高密度気体キセノンの再結合発光過程におけるシンチレーション光子数と電子数の関係”，研究会「放射線検出器とその応用」（第24回），2010年1月26日－28日，高エネルギー加速器研究機構
講演(国内学会)	<u>草野広樹</u> ，三村光輝，宮島光弘，長谷部信行，“キセノン反跳核による、キセノン中での電離、蛍光収量の研究”，研究会「電離及びシンチレーション検出器の基礎物理と暗黒物質探索への応用」，2009年9月18日，早稲田大学

## 早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演（国内学会）	<u>草野広樹</u> ，三村光輝，小林進悟，宮島光弘，長谷部信行，“高圧キセノンガス中の電子増倍特性の測定”，2009 年春季 第 56 回応用物理学関係連合講演会，2009 年 3 月 30 日－4 月 2 日，筑波大学
講演（国内学会）	<u>草野広樹</u> ，小林昭太，三村光輝，小林進悟，宮島光弘，長谷部信行，“高圧領域における純キセノンのガス増幅特性”，2008 年春季 第 55 回応用物理学関係連合講演会，2008 年 3 月 27 日－30 日，日本大学
講演（国内学会）	<u>草野広樹</u> ，小林昭太，三村光輝，小林進悟，宮島光弘，長谷部信行，“高圧領域における純キセノンのガス増幅特性”，研究会「放射線検出器とその応用」（第 22 回），2008 年 2 月 5 日－7 日，高エネルギー加速器研究機構
講演（国内学会）	三村光輝，長谷部信行， <u>草野広樹</u> ，小林昭太，小林進悟，道家忠義，宮島光弘，宮地孝，柴村英道：“MeV $\gamma$ 線イメージング型キセノンタイムプロジェクトンチェンバー”，2007 年秋季 第 68 回応用物理学学会学術講演会，2007 年 9 月 4 日－8 日，北海道工業大学
講演（国内学会）	<u>草野広樹</u> ，長谷部信行，小林進悟，三村光輝，宮島光弘：“ $^4\text{He}$ 及び $^3\text{He}$ 中の電子のドリフト速度”，2007 年秋季 第 68 回応用物理学学会学術講演会，2007 年 9 月 4 日－8 日，北海道工業大学
講演（国内学会）	高橋智昭，菊池順，道家忠義，鈴木聡，海老塚泰， <u>草野広樹</u> ，根本慎平，“キセノンガスのシンチレーション光の $\alpha$ 線に対する W 値の推定”，2007 年春季 第 54 回応用物理学関係連合講演会，2007 年 3 月 27 日－30 日，青山学院大学
講演（国内学会）	鈴木聡，菊池順，道家忠義，海老塚泰， <u>草野広樹</u> ，高橋智昭，根本慎平，“ガスキセノンの $\alpha$ 線に対する W 値の測定”，日本物理学会 2007 年春季大会，2007 年 3 月 18 日－21 日，鹿児島大学
講演（国内学会）	根本慎平， <u>草野広樹</u> ，高橋智昭，海老塚泰，鈴木聡，菊池順，道家忠義，“1～2.5atm Xe ガスの $W_s$ -値”，ガスカウンター及びシンチレーションカウンターの基礎と応用に関するシンポジウム，2007 年 3 月 2 日，早稲田大学
報告書	<u>草野広樹</u> ，三村光輝，宮島光弘，長谷部信行，“キセノン反跳核による、キセノン中での電離、蛍光収量の研究”，研究会「電離及びシンチレーション検出器の基礎物理と暗黒物質探索への応用」報告書，2009 年，58-63.
報告書	S. Nemoto, <u>H. Kusano</u> , T. Takahashi, Y. Ebizuka, S. Suzuki, J. Kikuchi, T. Doke: “ $W_s$ -values in 1-2.5 atm xenon gases”, Proc. of Workshop on Ionization and Scintillation Counters and Their Uses, 2007, 11-15.