

# 博士論文審査報告書

## 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 10月

放射線の検出媒体として優れた特性を有し、放射線検出器として様々な分野で利用されているキセノンは、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することができる。そのため近年、日本を含むいくつかの国で研究開発が進められている。この大きな特徴の一つとして、荷電粒子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信号を同時に測定することで、検出器内に生成された電荷の三次元的な位置情報の取得が可能となることが挙げられる。この高密度気体キセノンを用いた次世代型の検出器システムは、ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索や MeV 領域のガンマ線イメージングへの応用が期待されている。

このような検出器の設計・開発のためには、高密度気体キセノンにおいて、放射線入射後の基礎過程を詳細に理解することが極めて重要である。特に、放射線による電離・発光、電場による電子輸送は最も基礎的な過程である。

しかしながら現状では、高密度気体キセノンにおいて放射線入射後に引き起こされる基礎過程には未解明な点が多く残されている。電子輸送過程は、電子の移動度及び拡散係数は三次元的な位置の再構成において重要な役割を果たすが、これまでの研究は主に大気圧付近あるいはそれ以下の気体キセノンにおける電子輸送を対象としており、拡散過程に関する研究は高密度領域ではほとんど例がなかった。また、シンチレーション発光量は受光素子の選定や検出効率の決定のために重要であるが、高密度領域での発光量や、電場による電離電子及びシンチレーション光子の収量の変化など、重要な情報が得られてない状況であった。

このような背景を踏まえ、申請者は、高密度気体キセノン中の電子の移動度、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、広い密度範囲で高精度の測定を行い、その密度依存性を明らかにしている。また、アルファ線によるシンチレーション発光量についても、高密度領域での電離電子収量との同時測定も行い、密度が低い場合とは異なる挙動を示すことを明らかにしている。

本論文は、以上の成果を全 6 章でまとめている。以下に、各章の概要と評価を述べる。

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、本研究の目的とその動機を示した。次世代型の放射線検出器の構築のためには、高密度気体キセノン中での電子輸送係数、特に電場による電子の移動度と拡散係数、並びにシンチレーション発光量の把握が必要不可欠であることを指摘している。

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、過去の研究で得られた知見を示し、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ている。これまでの研究で、大気圧以下の条件下では、電子輸送係数は密度に依存せず換算電場（気体密度で除した電場）によって一

意に決定されることが分かっているが、高密度領域における電子の移動度ではその関係が成り立たないこと、さらに拡散係数や電離係数には高密度領域での研究がほとんど無く、密度依存性が不明であることを指摘している。また、アルファ線によるシンチレーション発光量は密度の増加とともに減少していくことが明らかになっているが、その原因の解明のために電離電子収量の測定など多角的な検討が必要であることを指摘している。

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及び実験方法、データ解析方法について述べている。本研究においては4つの異なる装置が用いられている。移動度、縦拡散係数の測定には、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及びアルファ線源を内蔵した平行平板型電離箱を、装置の耐圧強度によって使い分けており、両者とも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。電離係数の測定には円筒型比例計数管を使用しており、陽極周辺に高電場の印加が可能である。シンチレーション発光量測定には、アルファ線源を内蔵し外部に光電子増倍管を備えた平行平板型電離箱を使用しており、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。全ての測定において、高純度に精製されたキセノンを用いて、純度をモニターしながら実験を行うことでデータの信頼性を向上させている。

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ている。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  $0.01 - 0.2 \text{ Td}$ 、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  $105 - 420 \text{ Td}$ 、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  $0 - 0.7 \text{ Td}$  である。本研究により、縦拡散係数、電離係数及びシンチレーション発光量について、過去の研究では行われなかった高密度の領域で、初めて精度のよい測定結果の取得に成功している。

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ている。換算移動度（気体数密度と移動度の積）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  $0.04 \text{ Td}$  付近で増加が見られる一方で、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、同じく換算電場  $0.04 \text{ Td}$  付近で密度とともに大きく増加することを明らかにしている。この変化から、密度上昇に伴う電子・キセノン原子散乱に対する実効的な運動量移行断面積の減少が示唆されることを述べている。一方で、換算電場  $0.06 \text{ Td}$  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には有意な密度依存性がないことを明らかにしている。また、換算電離係数（気体数密度で除した電離係数）には、密度約  $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上で密度依存性が存在する兆候を

見出している。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、それ以上の密度ではほぼ一定になることを明らかにしている。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を明らかにしている。これらは低密度領域で確認されている結果とは異なる新たな結果であり、高密度領域での電離・発光過程の理解において重要な手掛かりとなる。

第6章では、本研究によって測定された高密度気体キセノンの基礎パラメータについてまとめ、得られた知見を評価し、高密度気体キセノン放射線検出器開発に向けた研究の今後の展望について述べている。

以上のように、本論文では、高密度気体キセノン放射線検出器開発のための基礎研究として、放射線入射後に引き起こされる種々の基礎過程の解明を目的とした研究が進められ、極めて精度のよい多くの情報を得ることに成功している。具体的には、これまで実験されていなかった高密度気体キセノン媒体中の電子輸送過程について、広い密度領域で実験を行い、高精度のデータ取得に成功している。その結果、低電場の電子の換算縦拡散係数には密度依存性があることを実験的に初めて見出し、それが密度の増加による実効的な運動量移行断面積の減少で説明できることを指摘している。さらに、従来の研究よりも高密度領域に及ぶアルファ線による電離・発光量の測定を行って、低密度の場合とは異なる新たな傾向を見出し、高密度領域での電離・発光過程の解明において重要かつ興味深い基礎データを得ている。

本研究で得られた高密度気体キセノンの基礎データは、次世代型放射線検出器を開発する際の定量的な検討に不可欠であり、また非加速器物理学、惑星科学、天体物理、医療分野などでの将来の応用の面からも本研究の成果は高く評価できる。従って、本論文は、博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

2012年9月

#### 審査委員

(主査)	早稲田大学教授	理学博士（早稲田大学）	長谷部信行
	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	鷺尾方一
	元福井大学教授	理学博士（早稲田大学）	宮島光弘
	元埼玉県立大学教授	理学博士（早稲田大学）	柴村英道