

氏 名 竹内 章博

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2143 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 He-Xe 混合ガスの電離・蛍光収量の測定と検出器への応用

論文審査委員 主 査 教授 波戸 芳仁
教授 佐々木 慎一
教授 佐波 俊哉
助教 岸本 祐二
准教授 齋藤 究
助教 寺沢 和洋
慶應義塾大学医学部

博士論文の要旨

氏名 竹内 章博

論文題目 He-Xe 混合ガスの電離・蛍光収量の測定と検出器への応用

希ガスは放射線検出器の媒体として、電離箱、比例計数管、GM 計数管などに広く用いられている。希ガスと放射線の相互作用には電離と励起があり、これに伴う電離電子と蛍光（シンチレーション）が放射線検出に利用できる。希ガスのうちヘリウムの同位体であるヘリウム 3 は大きな中性子吸収断面積と正の Q 値を持つという特徴があり、中性子検出用ガスとして用いられている。ヘリウムガスのシンチレーションは、その波長が短いことからこれまで利用されていなかったが、少量のキセノンを混合させることにより、波長を長くできることが知られている。本研究では、ヘリウム 3・キセノン混合ガスに着目し、これを中性子検出器へ応用するために必要となる、ヘリウム・キセノン混合ガスにおける電離とシンチレーションを記述する物理量を実験的に決定し、この結果を基に中性子検出器を構成して基本的な動作の確認を行うことを目的とする。この目的を達成するために、希ガスにおける荷電粒子の電離・励起作用からシンチレーションの発生に至る過程を記述し、1 組の電離電子・イオン対を生成するために必要とされる平均エネルギーを示す物理量である W 値と励起現象により生成する励起原子数 N_{ex} の電離原子数 N_i に対する比 (N_{ex}/N_i) をヘリウムガスについて実験的に求めた。そして、ヘリウム・キセノン混合ガスの電離・シンチレーション収量について、混合比の関数として実測データを取得した。これらの測定データを踏まえ、ヘリウム・キセノン混合ガスを用いた中性子検出器の設計・製作を行い、基本的な特性について確認を行った。

希ガスシンチレーションは 2 種類の過程により起こる。1 つは励起発光と呼ばれ、放射線によって励起された原子が起源となる発光過程である。もう 1 つは、再結合発光と呼ばれ、電離電子とイオンの再結合が起源となる発光過程である。混合ガスにおいては励起エネルギーの移行によるシンチレーションの波長シフトが起こるうえ、励起原子が他の原子を電離するペニング効果も起こる。この現象の記述に N_{ex}/N_i が用いられるが、理論値と実験値が異なっている現状がある。また、本研究で着目しているヘリウムガスは、その W 値の実験値についても複数の値が報告されており定まっていない。

ヘリウムガスの W 値の測定においては、グリッド電離箱を作成し、実験を行った。 ^{241}Am による α 線を 40 kPa のヘリウムガスに入射させ、生成した電離電子数と有効領域へのエネルギー付与から W 値を決定する。ヘリウムガスは高いエネルギー準位の準安定励起状態を有し、特に不純物の影響を受けやすいため、測定チェンバー内で発生する不純物ガスを低減させるために、Zr-V-Fe ゲッター合金による純化装置と Ni 化合物によるガス精製器を導入し、循環ポンプを用いて連続的に純化を行った。また、測定チェンバーを真空状態にした時の不純物ガスを質量分析計で測定し H_2O が主成分であったことから、露点計によるヘリウムガス中での水蒸気圧を代表値として純化ガス中の不純物濃度を評価した。ヘリウムガスの純化の循環流量を調整することで、水蒸気圧を変化させ電離収量の変化を求め

た。純化を行わない測定で水蒸気圧が高い領域まで測定し、水蒸気圧に対する電離収量の変化を求め水蒸気圧 0 の状態を外挿する手法により、不純物の影響を受けていないヘリウムガスの W 値 45.0 ± 0.9 eV を得た。この値はこれまでの先行研究で測定された圧力より低い条件で行った実験値であり、先行研究が明確にしていなかった不純物の影響も考慮した、新しい手法で得られたものである。

ヘリウムガスの N_{ex}/N_i の測定は、ヘリウムとキセノンの混合ガスを用い、ヘリウムの励起原子によるペニング効果でキセノン原子を電離させ、電離電子の増加分により求める手法により測定した。この測定ではヘリウム・キセノン混合ガスの電離・シンチレーション収量も同時に得ることができる。電離電子とシンチレーションを同時に測定するためにコレクター電極をワイヤーメッシュとして、光電子増倍管に光を導けるグリッド電離箱を用いた。測定時にガス中に電場を印加することで電子が収集され、イオンと電子との再結合が抑制されるので、再結合発光を含まない励起発光のみを測定することができる。

ヘリウム・キセノン混合ガスの全圧 1.0 MPa と 0.657 MPa に対してキセノンの混合比を 1~15 % に変化させ電離・シンチレーション収量を測定した。ペニング効果によりヘリウムの励起原子が電離に寄与するため、キセノンの混合比 1 % で電離収量は純ヘリウムガスの 1.59 倍に増加することが明らかとなった。混合比 10 % では電離収量は純ヘリウムガスの 1.78 倍、純キセノンガスの 0.884 倍となった。この電離収量の変化からヘリウムガスの N_{ex}/N_i を求め、 0.541 ± 0.005 という値を得た。シンチレーション収量は、混合比 3 % で 100 kPa の純キセノンガスと同程度が得られることを明らかにした。混合比 10 % 以上では収量は飽和し、純キセノンガスの 1.1 倍となった。この結果はキセノンの混合比による電離・シンチレーション収量の変化を詳細に調べた実験値であり、ヘリウムガスの N_{ex}/N_i はキセノン混合ガスを用いて得られた初めての結果である。

これらの測定結果に基づき、電離・シンチレーション収量が混合比によって急激に変化しないキセノン 10 % 以上の混合ガスを用い、有感領域の体積が $\phi 80$ mm \times 100 mm である、電離とシンチレーションを同時に測定できる機構を有する、グリッド電離箱と光電子増倍管で構成された中性子検出器を立案し、設計・製作を行った。 ^{241}Am による 5.49 MeV の α 線を用いて製作した検出器の動作試験を混合比 1:1 の全圧 300 kPa のヘリウム 4・キセノン混合ガスで行い、電子とシンチレーションの信号の同時測定に成功した。このシンチレーションと電離電子のコレクター信号との時間差から電離電子の流動時間を求めた。流動時間から導出した流動速度は先行研究と一致しており、シンチレーションの利用による早いタイミング測定と、電離信号による良好なエネルギー分解能に加え、2 つの信号の時間差による位置決定能力が同時に得られることを示した。5.49 MeV の α 線により測定した電離・シンチレーション収量から熱中性子とヘリウム 3 の反応により生成される陽子と三重陽子の付与エネルギーに対しても、十分な信号強度で測定が可能であることを示した。

以上よりヘリウム・キセノン混合ガスによる検出媒体で中性子検出を行うために、ヘリウムガスの放射線との相互作用を特徴づける W 値と N_{ex}/N_i の測定に成功し、キセノンの混合比に対する電離・シンチレーション収量の変化をヘリウム・キセノン混合ガスの測定により明らかにした。これらのデータを用い中性子検出器の設計・製作を行い ^{241}Am による α 線とヘリウム・キセノン混合ガスによる動作試験を行い、電離・シンチレーション信号を用いた時間応答の良い、粒子エネルギー測定が可能で、反応位置が取得できる中性子検出

器が実現可能であることを実験的に示すことができた。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 竹内 章博

論文題目 He-Xe 混合ガスの電離・蛍光収量の測定と検出器への応用

希ガスは放射線検出器の媒体として、広く用いられている。その電離収量や蛍光収率は、放射線物理の基礎となるデータであり、検出器の設計・校正に重要である。本研究は中性子検出に有用なヘリウムとこの励起状態を効率的に光に変換できるキセノンに着目し、その混合ガスの電離収量や蛍光収率を決める機構を実験的に求め、電離と蛍光の信号を同時に用いることのできる中性子検出器の設計に応用しようとしているものである。

竹内氏は、ヘリウム・キセノン混合ガスの電離収量を測定し、ヘリウムの電離原子数と励起原子数の比を 0.541 ± 0.005 と求めた。2番目に、ヘリウム・キセノン混合ガスの蛍光収率を再結合発光を抑制しつつ測定し、先行研究の値の再現を確認するとともに、先行研究で測定されていなかった混合比でも測定を行った。3番目に純ヘリウムの電離収量を不純物の低減を図りつつ測定し、 $W=45.0 \pm 0.9 \text{eV}$ を得た。このように積極的に不純物濃度を制御しながら W 値を測定したのは、本研究が初めてであり、この W 値は先行研究に比べて高い値であった。これらの結果を基に、ヘリウム・キセノン混合ガスを中性子検出器の有感物質として用いる場合の望ましい混合ガスの比率の考察を行い、これを実験的に確認した。

出願者は先行研究の再現を確かめたうえで、独自の工夫により新しい混合比領域での蛍光収率の測定し、不純物濃度を制御しながらの W 値の測定を行い、これを検出器として応用する道筋を示したものであり、博士論文としての成果に値するものである。出願者は、この研究内容についての原著論文を学術誌に投稿済みであり、編集者から基本的に掲載する価値があるとの返信を得ている。国際会議での発表および質疑応答も行っており、研究発表に係る英語力は十分であると認められる。審査会では研究の背景、先行研究、研究方法と結果について発表を行い、質疑応答を行った。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると全一致で判断した。