

内2-27

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

希ガス液体検出器中の
イオン対再結合とエネルギー分解能

申請者

市之瀬 秀夫

ICHINOSE HIDEO

物理学及応用物理学専攻
原子核工学研究

平成 2 年 12 月

希ガス液体検出器中のエネルギー分解能は理論、実験両面から研究が行われてきた。1970年代にそれまでに得られた χ 値と理論的に与えられたファン因子から、液体アルゴン及びキセノン中での876keV電子線に対するエネルギー分解能が約4keV程度と推定された。一方実験では液体アルゴン、キセノン中での876keV電子線、568keV γ 線に対して最良値として各々約30keV, 25keVの値が得られている。この値は十分電場をかけ、電荷収集量がほぼ飽和値に達しているときに得られたものである。理論的な推定値と比べると実測値は約10倍も大きい。もしこれまでの実測値に問題があり改良によって推定値に近い分解能が得られれば希ガス液体検出器は非常に有望な検出器としてさらに注目されるだろう。またこの実測値の正当性を新たな方法で実証し、さらにその機構を解明することは放射線物理の分野において興味深い結果を提供することになる。

まず以上の差の説明として、最近 δ 線仮説が提示されている。それは δ 線のつまりがけのところで生成イオン対が強い再結合を起こし、その事象の統計的挿らぎがエネルギー分解能の劣化を引き起こしているという説である。この δ 線仮説の検証と分解能の向上をめざし、この研究では光電離現象を利用した実験を行った。イオン対が再結合するとシンチレーション光が発生する。このエネルギーは液体アルゴン、キセノンに対して、それぞれ約9.5, 7eVである。検出媒体にシンチレーション光のエネルギーより低いイオン化ポテンシャルを持つ有機物質を少量混入させると、光電離現象により有機分子は光をイオン対に変換できる。この様な光電離現象を利用した検出器(光電離検出器)では δ 線仮説が正しいならば再結合の挿らぎが減少し分解能は改善されるはずである。また再結合のために収集しきれなかったイオン対の寄与による電荷収集量の増加も期待される。

この様な観点からまず量子効率の高い物質の探索実験を5.3MeVのアルファ線を用いて行った。そして液体アルゴンに対してアレン、液体キセノンに対してTMA, TEAをこれまで調べた物質の中で最大効率を持つ物質として確認した。この場合の分解能の値は主に再結合の統計的挿らぎからの推定値とほぼ一致した。これはアルファ線による再結合光を十分に吸収、イオン化したことを示す。更にこの事は δ 線の末端において起こったイオン対の再結合は、シンチレーション光の発生及び光電離物質のイオン化に十分寄与していることを示している。

この様にして見いだされた物質を用いた液体アルゴン+アレン、液体キセノン+TMA電離箱に対して電子線又は γ 線の照射実験を行った。同液体の場合ともに、分解能の最良値はほとんど改善されなかった。これは δ 線仮説を否定するものである。本論文ではこれらの実験結果を中心に報告する。

本論文は全8章から構成されている。以下に、各章の概略を述べる。

第1章はその序論である。ここでは希ガス液体検出器の基礎特性を論じ、気体及び固体との比較から検出媒体としての特徴を明確にする。また液体検出器開発の

歴史について

述べ、どの様に再結合とエネルギー分解能の関連が問題となつたかを提示する。そしてその解決方法としての光電離現象の利用について述べている。

第2章は放射線による生成イオン対の再結合機構について述べる。放射線による生成電子は親イオンとのクーロン力及び外部電場などの影響により再結合または逃避の過程をたどる。この電子の逃避確率は電離箱での電場に対する電荷収集量の測定によって実験的に得られている。この事象は電子は拡散運動に従うと仮定したオンザガー理論を用いて解析されてきた。また最近(1980年代)平均自由行程がオンザガー半径に対して無視できないことが理論、実験両面から明らかにされ、これらを考慮した新たな逃避確率の考察が行なわれている。一方以上の様な考察に加えて検出媒体が液体の場合には、エネルギー分解能の理論値と実測値の差を説明するために上記に示されている δ 線仮説が提案された。入射粒子が電子の場合、 δ 線の末端付近で生成されたイオン対は入射粒子の飛跡付近の物と比べ密度が非常に高い。そのため δ 線の末端では強い再結合の影響を受け、それが電荷収集量に影響を与えるとした。Thomas等及びGiboni等は δ 線仮説に基づき電荷収集量の実験値の説明を試みた。本章ではこれらの様々なモデルについて説明する。

第3章は希ガス液体検出器におけるエネルギー分解能とイオン対再結合についての説明である。ここでは第2章で示した再結合の機構が検出器のエネルギー分解能に与える影響を中心に述べている。希ガス液体検出器のエネルギー分解能は理論上の推定値とくらべ約10倍も悪い実測値しか得られていない。これについての説明を与えているのは δ 線仮説である。Bolotnikov等はこの仮説に基づき解析を行い、エネルギー分解能は電場に反比例し、数十kV/cmもの高電場でのみ理論的な推定値に近い値が得られると予測した。さらにThomas等も同様な結果を得ている。これらの解析が推定しているエネルギー分解能に与える影響を中心に述べる。また過去に得られたエネルギー分解能の実験結果を示す。

第4章ではこれまでの光電離検出器の開発の状況について述べている。まず液体中の光電離の機構についてガスとの比較を基に説明する。さらに希ガス気体及び希ガス液体を用いた実験についてまとめてある。液体アルゴンに関しては初めにAndersonが実験を行い、TMA, TEA, アレンなどの有機物質を用いた研究を行った。しかしガスを純化しなかつたために、実験結果は不純物の影響を大きく受けた。その後Suzuki等は純化したガスを用いて実験を行ったが多線式電離箱を用いたため電場の値が曖昧で、また電気的雜音も大きかつたため、正確な分解能の測定はできなかつた。これらの実験結果を基に、何故本論文の実験を行うにいたつたかの過程を明かにしている。

第5章では本論文で報告されている実験を行うのに使用した実験機器及び実験手順についての説明を行つてある。検出器は平行平板電離箱、グリッド付き電離箱、単線式比例電離箱が用いられた。また実験に使用したガスの純化装置及び純化方

法について記述してある。

第6章では液体アルゴン及びキセノン電離箱の5.3MeVアルファ線に対する実験結果について報告している。まず始めに純粋な液体アルゴン及びキセノン電離箱の6.3MeVアルファ線に対する電荷収集量及びエネルギー分解能が述べられている。そこで両液体中での全電荷収集量に対する電荷収集量の割合は1~10kV/cmの電場範囲では大差なかったが、特に1kV/cm程度の電場でのエネルギー分解能は液体キセノンの場合が約3% FWHMと液体アルゴンの値より7.8倍程度優れていた。そしてそれはアルファ線の飛跡に沿った生成イオン対の密度が液体キセノンの方が数倍大きく、そのためアルファ線の放出角の違いによる再結合割合の変化の度合いが液体アルゴンと比べて小さくなることによって説明されている。また液体キセノンの場合の分解能は、ほぼ生成イオン対の再結合する時の統計的な揺らぎで決定されていることを明らかにした。

次に液体アルゴン+アレン中に6.3MeVアルファ線を入射させた場合の電荷収集量及びエネルギー分解能の測定について述べている。その結果、アレンは約80%の光電離量子効率を持つと推定された。このとき得られた分解能ではアレン濃度が4p pmの時に1.7% FWHMという値を得た。さらに液体アルゴン+エチレンを用いた実験では、電荷収集量は余り増大しなかったが分解能は液体アルゴン+アレン電離箱と同程度の最良値が得られた。

液体キセノン+TMA及びTBAに関して6.3MeVアルファ線を入射させ電荷収集量及びエネルギー分解能の測定を行った。そして両物質ともに約80%の光電離量子効率を持つと推定された。エネルギー分解能に関しては波高が揺らいだため改善されなかつた。その原因は有機分子の凝縮化などによると推定された。

第7章では電子線及び γ 線を光電離検出器に入射させた時の電荷収集量及びエネルギー分解能の測定について述べている。液体アルゴン+アレン電離箱に976keV電子線を入射させた時には低電場で分解能の改善はおこなわれたが、高電場ではエネルギー分解能の改善は見られなかつた。増幅器の雜音を差し引いた最良値として約30keV FWHMが得られた。液体キセノン+TMAに560keV γ 線を入射させた時には、増幅器の雜音を差し引いた分解能は約25keV程度にしか改善されなかつた。特に液体アルゴン+アレンの実験では、我々の知りうる検出器固有の電荷収集量の揺らぎ等を全て考慮してもなを約26.5keVの未知の要因が残された。現在この原因は不明であり今後の研究が必要である。また再結合イオン対の寄与による電荷収集量の増加は液体アルゴン、キセノンとともに誤差の範囲以内で通常の理論から期待された値と一致した。この実験結果から δ 線仮説による再結合機構は希ガス液体検出器の分解能を決定する要因ではないと結論されている。

第8章では本論文の結論で、以上に示したような希ガス液体検出器の電荷収集量及びエネルギー分解能実験結果から得られた生成イオン対の再結合機構がまとめられている。