

氏名 (本籍)	PHYO MYAT LIN (ミャンマー連邦共和国)
学位の種類	博士(工学)
学位授与番号	甲第651号
学位授与日付	令和5年3月25日
専攻	工学専攻
学位論文題目	Statistical and systematic errors on kinetic energy of charged particles from the density of nuclear emulsion detector (原子核乾板検出器の密度校正による荷電粒子運動エネルギーの統計および系統誤差)
学位論文審査委員	(主査) 教授 宇佐美 広介 (副査) 教授 吉田 弘樹 教授 仲澤 和馬

論文内容の要旨

本申請論文は、原子核乳剤を用いた写真乾板（以下、乾板）を用いた超原子核の研究における、乾板中の荷電粒子の飛程（飛跡の長さ）と運動エネルギーとの関係を、その較正に用いる乾板中の α 崩壊事象を用いて統計誤差および系統誤差を論じたものである。これまで較正用の α 線は、ヒトが光学顕微鏡下で探査していたためその事象数が限られていたため、検討が困難であった。そこで最近、超原子核を顕微鏡画像に機械学習モデルを適用して直接検出する手法を用いて、大量の α 線飛跡の検出に至り、上記の2種の誤差の議論を可能としたものである。

第1章では、超原子核研究の歴史が論じられ、導き出される物理量と原子核物理学や中性子星との関係について論じられている。その上で、本研究の課題である「誤差」重要性について論じられている。

第2章では、超原子核研究および飛程と運動エネルギー較正に用いる α 線検出を実施する乾板の、ビーム照射、乾板の現像および解析までの概要が述べられている。またこの実験で検出された超原子核により初めて得られた、超原子核の内部構造などについても触れられている。

第3章では、本研究の主目的である、飛程とエネルギーとの関係が測定される物理量の関数として定義され、着目すべき α 線の性質が述べられている。その後、本研究を可能とした、 α 崩壊事象の高速な検出手法である、全面探査 (overall scanning) と機械学習モデルの適用、そして α 線の飛程測定による解析手法について述べられている。

第4章では、まず飛程の観測値に乾板ごとにずれがないことを確認した。その上で、過去の実験ではいくつかの α 線飛跡を用いればよいかの議論もなく較正されてきた飛程とエネルギーの関係を、少なくとも150事象あれば、運動エネルギーが100 MeVの水素、ヘリウム、およびリチウム原子核の飛跡に対して統計誤差を0.15 MeV程度に抑えられることを示した。この統計誤差は、電磁散乱による飛程のばらつきによって生じるエネルギーの誤差よりも数分の一と小さいことが示された。一方、他の単一エネルギーを持つ α 線の飛程—エネルギー関係を求め、エネルギーの相違によって生じる飛程—エネルギー関係の相違から生じる系統誤差は、5~9 MeVの α 線において最大で25 keV (0.025 MeV)、1例の超原子核の飛程 (14 MeV) に適用したところ22 keVとなり、いずれにしても統計誤差の10%程度でしかないことを示した。

第5章では、第4章までの実験の動機、実験および解析手法、および解析による新たな知見がまとめられている。

論文審査結果の要旨

本論文では、数多く検出できるようになった超原子核事象を、原子核物理の統一的な理解や中性子星の理解を進める上で重要となってきた、実験データの統計誤差と系統的誤差を明らかにする解析手法とその結果が述べられている。その成果の主要な点は以下のとおりである。

- (1) 乾板中に記録された荷電粒子の飛程と運動エネルギーの関係を較正する、機械学習モデルを適用

- し、 α 線飛跡の必要な事象数を初めて定量的に求めたこと。
- (2) この手法により、ある粒子の運動エネルギーに対応する到達しうる統計誤差を得たこと。
 - (3) α 線事象の検出に膨大な時間を費やしたため、これまで議論できなかった飛程—エネルギー関係における系統的誤差を得て、統計誤差に比して10%程度でしかないことを見出したこと。

本論文の主たる部分および成果に関連する部分は査読付き論文として発表されていることを確認した。基礎となる学術論文は1.と2.であり、その他本論文の参考論文として3編が発刊されている(いずれも査読付き)。以上から本論文は博士(工学)の学術論文として価値あるものと認められる。

最終試験結果の要旨

令和5年1月26日に学術論文公聴会を開催し、質疑・討論を行った。またその終了後に、主査・副査3名の出席のもとで口頭試問を行い、これを最終試験とした。その結果、論文提出者が博士(工学)の取得に必要な学力を有していることを確認できたので、最終試験に合格とした。

発表論文(論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ)

1. “First observation of a nuclear s-state of a Ξ hypernucleus, $^{15}_{\Xi}\text{C}$ ”, M. Yoshimoto, A. Kasagi, P. M. Lin, K. Nakazawa, A. N. L. Nyaw, J. Yoshida, 42 others, Prog. Theor. Exp. Phys., **2021**, 073D02 (2021).
2. “Energy uncertainties of charged particles with respect to the density error and range straggling in nuclear emulsion sheet”, P. M. Lin, A. Kasagi, K. Nakazawa, N. Nishimura, A. N. L. Nyaw, J. Yoshida, M. Yoshimoto, Bull. Soc. Photogr. Imag. Jpn., **32**, 10 (2022)
3. “Observation of double-strangeness nuclei using nuclear-emulsion technology”, A. N. L. Nyaw, H. Ekawa, M. Fujita, S. Hayakawa, A. Kasagi, P. M. Lin, K. Nakazawa, J. Yoshida, M. Yoshimoto, Bull. Soc. Photogr. Imag. Jpn., **30**, 22 (2020).
4. “High-resolution measurement of hypernuclear events in a nuclear emulsion with hard X-ray microscopy”, A. Kasagi, K. Hayashi, P. M. Lin, K. Nakazawa, N. Nishimura, A. N. L. Nyaw, T.R. Saito, J. Yoshida, M. Yoshimoto, Eur. Phys. J. A, **58**, 190 (2022).
5. “ Ξ^- atomic X-ray spectroscopy using a counter-emulsion hybrid method”, M Fujita, H. Ekawa, S. Hayakawa, A. Kasagi, P. M. Lin, K. Nakazawa, A. N. L. Nyaw, J. Yoshida, M. Yoshimoto, 33 others, Prog. Theor. Exp. Phys., **2022**, 123D01 (2022).