

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03696

研究課題名(和文) タリウム205-裸イオンの束縛状態ベータ崩壊とニュートリノフラックスの研究

研究課題名(英文) Study of the neutrino-flux via bound state beta-decay of bare 205Tl ions

研究代表者

鈴木 健 (SUZUKI, Takeshi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10196842

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,000,000円

研究成果の概要(和文)：コロナの影響でドイツ渡航&実験は叶わなかった。ドイツ人研究者のみで205タリウムの束縛状態崩壊の半減期を決めるべく実験データを重イオン蓄積リングESRにて取得した。現在鋭意データ解析中である。半減期は $229 \pm 36$  daysと判明した。この値は理論予言値122days と3% で一致する。半減期決定のあとは ニュートリノ捕獲断面積の導出 ニュートリノフラックスの決定という流れになる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

束縛状態崩壊の半減期測定から得られる核遷移行列要素を用いてニュートリノ捕獲断面積を精密決定しこれまでできて居なかった低エネルギーに於ける太陽ニュートリノフラックスを決定する基データが得られた。ニュートリノ振動で解決したと考えられている「太陽ニュートリノ問題」が実は解決していない「標準太陽モデル」の検証に繋がる。

研究成果の概要(英文)：Due to COVID-19, it was impossible to visit GSI for the experiment. Measurement was performed only by on-site researchers to deduce the lifetime of bound state beta decay of 205Tl, using ESR. Data analysis is in progress. The half-life has been found to be  $229 \pm 36$  days. It agrees with the theoretical prediction of 122 days within 3%. After determining the lifetime, neutrino capture cross-section thus neutrino flux will be fixed.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理学

キーワード：太陽ニュートリノフラックス ニュートリノ捕獲断面積 束縛状態ベータ崩壊 標準太陽モデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ捕獲反応  $^{205}\text{Tl} + ^{205}\text{Pb} + e^-$  においてニュートリノのエネルギー閾値は  $E_e \geq 52 \text{ keV}$  であり、太陽ニュートリノ検出器としてしばしば用いられるガリウム  $^{71}\text{Ga}$  の閾値  $E_e \geq 232 \text{ keV}$  と比べて小さい。この  $52\text{keV}$  という閾値は既知のニュートリノ原子核反応の中で最も小さく太陽ニュートリノフラックスの評価においてエネルギーの低いニュートリノにも敏感で有利であると考えられた。

2. 研究の目的

$^{205}_{81}\text{Tl} - ^{205}_{82}\text{Pb} + e^-$  という束縛状態ベータ崩壊の半減期 ( $= \ln 2 / \lambda$ ) をドイツ重イオン科学研究所にて測定し、得られる核遷移行列要素を用いてニュートリノ捕獲断面積の精密評価をする事とこれによりこれまで、できていなかった低エネルギーにおける太陽ニュートリノフラックス ( $E_e \geq 52\text{keV}$ ) を精密に決定する事である。このことは、ニュートリノ振動で解決したと考えられている太陽ニュートリノ問題が、実は解決していない「標準太陽モデルの検証」に繋がる。

3. 研究の方法

イオン源で 1 次ビーム  $^{206}\text{Pb}$  イオンを生成し線型加速器 UNILAC にて核子当たり 8 MeV まで前段加速ののち重イオンシンクロトロン SIS にて約 500 MeV/u まで加速後、ビームを取り出し核破砕片分離装置 FRS へと導く。(図1) FRS では入射核破砕反応で生成する  $^{205}_{81}\text{Tl}^{81+}$  イオンを分離し、重イオン蓄積リング Experimental Storage Ring[ESR] (図2左)へ入射させる。親核  $^{205}_{81}\text{Tl}^{81+}$  のみ入射となるように娘核  $^{206}_{82}\text{Pb}^{82+}$  はスリットで切る。 $^{205}_{81}\text{Tl}^{81+}$  は入射核破砕反応で生成されるためその速度(運動量)に 1% 程度の運動量の拡がり  $\Delta p$  がある。そこで電子・確率冷却法によってイオンの運動量の拡がりを  $\Delta p/p \sim 10^{-6}$  程度まで冷却する。図3中のElectron Coolerはこの為に設置されている。娘核  $^{206}_{82}\text{Pb}^{82+}$  のK殻電子を剥ぎ取り  $^{206}_{82}\text{Pb}^{82+}$  として粒子識別する目的で、ガスジェットターゲットと位置検出器MMPC等をリング内で双極子電磁石下流に設置した(図2右)。測定の流れ(時系列)を図3に示した。

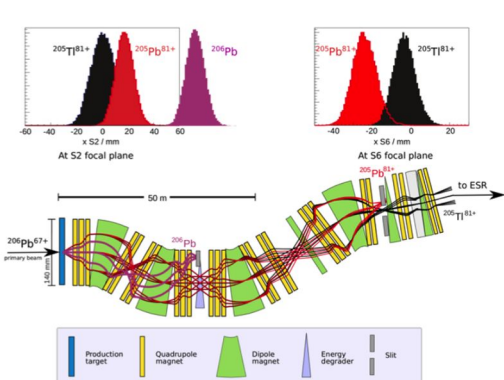


図1：核破砕片分離装置 FRSと中間焦点面S2及びS6での親核  $^{205}_{81}\text{Tl}^{81+}$  と娘核  $^{206}_{82}\text{Pb}^{82+}$  の分離の様子(B - E-B 法に基づく)

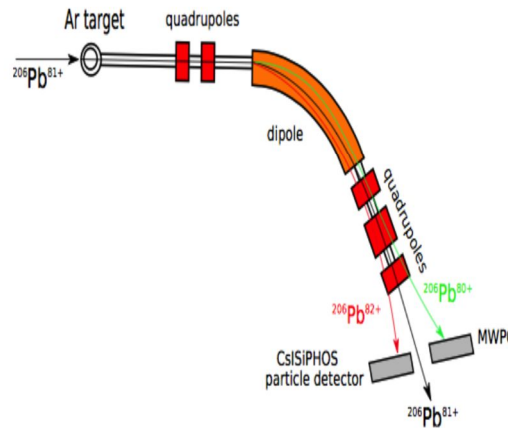
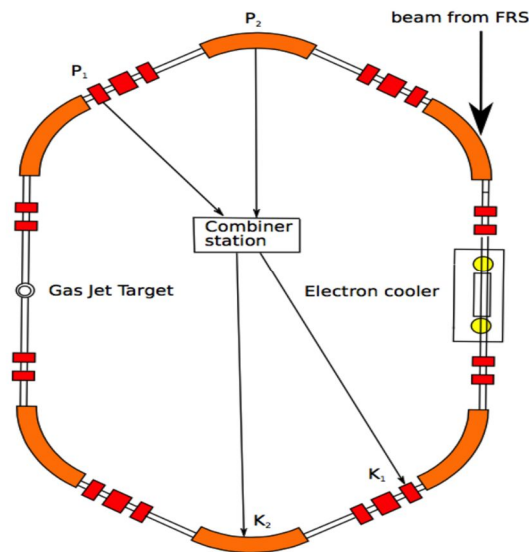


図2 (左) 重イオン蓄積リングESRと電子冷却装置 (Electron Cooler) 及びガスジェットターゲット (Gas Jet Target) (右) リング内に設置のガスジェット噴出装置と粒子位置検出器

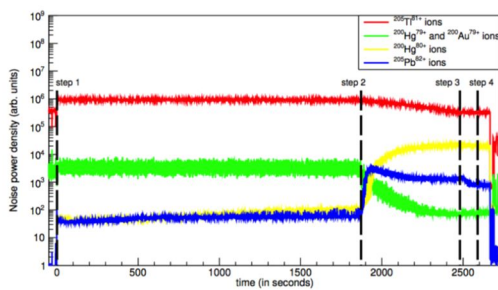


図3 測定の時系列を示した図。赤は親核 $^{205}\text{Tl}^{81+}$ 、青はガスジェットで電子を剥ぎ取った娘核 $^{205}\text{Pb}^{82+}$ の個数をそれぞれ表す。蓄積開始がステップ1(横軸), ガスジェットオン・オフがそれぞれステップ2・3でステップ4で測定が行われる。緑色は比較の為の $^{205}\text{Hg}^{79+}$ と $^{209}\text{Au}^{79+}$ を黄色はガスジェットで電子が1つ付いた $^{205}\text{Hg}^{80+}$ を表す。

#### 4. 研究成果

研究目的に掲げた成果であるニュートリノフラックス( )の決定には至って居ないが束縛状態ベータ崩壊半減期は $T_{1/2} = 2.29 \pm 3.6$  daysと得られている。理論の予想値1.22 days (  $b = 6.6 \times 10^{-8}$  s ) と比較すると長いが、3 の範囲内で一致する。ニュートリノ捕獲反応の核行列要、従ってニュートリノ捕獲断面積は理論値よりも小さくなる事が予想される。

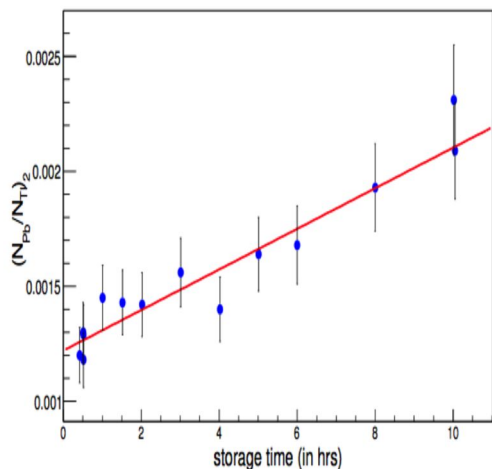


図4 蓄積時間の関数(  $t$  )として表した親核 $^{205}\text{Tl}$ に対する娘核 $^{205}\text{Pb}$ の比。赤線は束縛状態崩壊の崩壊定数  $b$  を求めるためのフィット:  $(\text{NPb}/\text{NTl}) = b/t$ 。ここで  $b$  は親核イオンPbの静止系での崩壊定数を求めるための相対論的因子を表す。崩壊定数  $b$  と半減期 $t_{1/2}$ とは  $t_{1/2} = 0.693 / b$  なる関係がある。誤差は  $t_{1/2} = \dots / b$  より求まる。縦軸の添字2は図3のステップ“ 2 ”に対応する。  
 $(\text{NPb}/\text{NTl})_2 = (\text{NPb}/\text{NTl})_4 \cdot \exp(-\lambda_{205}\text{Tl}t) / [1 - \exp(-\lambda_{205}\text{Pb}t)] \cdot (I_{\text{Pb}} + I_{\text{C,Pb}}) / I_{\text{Pb}}$  である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Moriguchi, M. Amano, A. Ozawa, W. Horiuchi, Y. Abe, T. Fujii, R. Kagesawa, D. Kamioka, A. Kitagawa, M. Mukai, D. Nagae, M. Sakaue, S. Sato, S. Suzuki, T. Suzuki, T. Yamaguchi and K. Yokota	4. 巻 1643
2. 論文標題 Measurements of total reaction cross sections for $^{17}\text{Ne}$ using a solid hydrogen target	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012099/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1643/1/012099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Fukuda, N. Tadano, S. Yamaoka, M. Tanaka, J. Ohno, D. Nishimura, M. Takechi, R. Wakabayashi, H. Du, S. Fukuda, T. Izumikawa, T. Suzuki et al.	4. 巻 32
2. 論文標題 Possibility to Employ Nucleon Pickup Cross Sections to Look into Nucleon Momentum Distributions in Nuclei	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 010044/1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.32.010044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 A Homma, M Tanaka, M Takechi, T Ohtsubo, M Fukuda, T.Suzuki et al.	4. 巻 32
2. 論文標題 Development of a Method to Deduce Point-proton Radii from Charge Changing Cross Sections Possibility to Employ Nucleon Pickup Cross Sections to Look into Nucleon Momentum Distributions in Nuclei	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 010032/1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.32.010032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Tanaka, M. Takechi, A. Homma, M. Fukuda, D. Nishimura, T. Suzuki, Y. Tanaka, T. Moriguchi;他 63名	4. 巻 124
2. 論文標題 Swelling of doubly magic $^{48}\text{Ca}$ core in Ca isotopes beyond $N = 28$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 102501/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.102501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T.Moriguchi, M.Amano, A.Ozawa, W.Horiuchi, Y.Abe, T.Fujii, R.Kagesawa, D.Kamioka, A.Kitagawa, M.Mukai, D.Nagae, M.Sakaue, S.Sato, S.Suzuki, T.Suzuki, T.Yamaguchi, K.Yokota	4. 巻 A994
2. 論文標題 Energy dependence of total reaction cross sections for $^{17}\text{Ne}$ on a proton target	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 121663/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2019.121663	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 F.C.Ozturka et al., FRS-ESR, ILIMA, SPARC, and TBWD Collaborations,	4. 巻 797
2. 論文標題 New test of modulated electron capture decay of hydrogen-like $^{142}\text{Pm}$ ions: Precision measurement of purely exponential decay	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Lett. B	6. 最初と最後の頁 134800/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.134800	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 N. Burtebayev, Zh.K. Kerimkulov, Maulen Nassurlla, J.T. Burtebayeva, Marzhan Nassurlla, S.B. Sakuta, T. Suzuki, K. Rusek, A. Trzcaska, M. Woliska-Cichock	4. 巻 B50
2. 論文標題 STUDY OF THE $^7\text{Li}(d, t)^6\text{Li}$ REACTION AT THE ENERGY OF 14.5 MeV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Physica Polonica	6. 最初と最後の頁 703-707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5506/APhysPolB.50.703	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 D.Nishimura, M.Fukuda, S.Yagi, T.Sugihara, T.Suzuki, 他41名	4. 巻 931
2. 論文標題 Development of prototype RICH detector with multi-anode photomultipliers for radioactive ions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instr & Meth.	6. 最初と最後の頁 23-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.03.085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M. Sato, R. Kusumi, S. Hamashima, S. Kobayashi, S. Sasaki, Y. Komiyama, T. Izumikawa, M. Conrad, and H. Sato,	4. 巻 9
2. 論文標題 The ferroptosis inducer erastin irreversibly inhibits system xc <sup>-</sup> and synergizes with cisplatin to increase cisplatin's cytotoxicity in cancer cells	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 D.T. Tran, M. Fukuda, 他41名	4. 巻 9
2. 論文標題 Evidence for prevalent Z = 6 magic number in neutron-rich carbon isotopes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1594/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-018-04024-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 生越瑞揮, 鈴木健, 他66名
2. 発表標題 Ni同位体の陽子標的荷電変化断面積
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福留美樹, 福田光順, 鈴木健, 他22名
2. 発表標題 Sn同位体の荷電変化断面積と荷電半径
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Fukutome, M. Fukuda, M. Tanaka, D. Nishimura, M. Takechi, T. Ohtsubo, 他
2. 発表標題 One neutron removal cross sections for the $^{16}\text{N}$ isomeric state
3. 学会等名 The 8th Asia-Pacific conference on Few-Body problems in Physics, 1-5 Mar. 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高山元, 福田光順, 西村太樹, 鈴木健, 泉川卓司他10名
2. 発表標題 Be同位体の荷電半径と中性子分布半径
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会, 2021年3月 【優秀発表賞受賞】
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田光順
2. 発表標題 重イオンビームによる断面積測定と核半径・密度分布・核変形
3. 学会等名 ELPH 研究会 「電子散乱による原子核研究; 原子核の電荷密度・陽子・中性子の分布と半径」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田光順, 武智麻耶, 田中聖臣, 若林諒, 福留美樹, 三原基嗣, 松多健策, 西村太樹, 鈴木健, 山口貴之, 坂上護, 大坪隆, 富田瑞樹, 茂住圭一, 山口滉太, 泉川卓司, 佐藤真二, 福田茂一, 北川敦志
2. 発表標題 荷電変化断面積の中性子数依存性
3. 学会等名 日本物理学会(2019)山形大学大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	細井駿, 鈴木健, 山口貴之, 大轟舜一郎, 荒川裕樹, 猪股玖美, 小林孝彰, 稲田康人, 坂上護, 横田健次郎, 山口由高, Naimi Sarah, 小沢頭, 向井もも, 森口哲朗, 上岡大起, 景澤怜央, 長江大輔, 阿部康志, 北川敦志, 佐藤眞二, Ge Zhuang, Li Honghu
2. 発表標題	稀少RIリングのためのファイバーシンチレーション検出器の開発
3. 学会等名	日本物理学会(2019)山形大学大会
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	M. Tanaka, M. Fukuda, M. Takechi, A. Homma, T. Ohtsubo, M. Mihara, T. Suzuki, K. Matsuta, ET AL.
2. 発表標題	Measurements of Interaction Cross Sections and Charge-changing Cross Sections for Ca and Ni Isotopes at RIBF
3. 学会等名	The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, November 18-23, 2018, Huizhou, (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	M. Tanaka, M. Fukuda, M. Takechi, A. Homma, T. Ohtsubo, M. Mihara, T. Suzuki, K. Matsuta, ET AL.
2. 発表標題	Nuclear Matter Radii of Ca Isotopes across the Neutron Magic Number $N = 28$ Via Interaction Cross Section Measurements
3. 学会等名	Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018), Omiya, Saitama, 4-8 Dec. 2018 (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	A. Homma, M. Takechi, M. Tanaka, M. Fukuda, T. Suzuki, et al.
2. 発表標題	Development of a Method to Deduce Point-Proton Radii from Charge Changing Cross Sections
3. 学会等名	Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018), Omiya, Saitama, 4-8 Dec. 2018 (国際学会)
4. 発表年	2018年



1. 発表者名 M. Fukuda
2. 発表標題 Recent progress of reaction cross section studies at RIBF and HIMAC
3. 学会等名 Workshop on ' Proton and Neutron Densities and Radii in Nuclei and Related Topics ', December 17-19,2018, Beihang University, Beijing (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 若林諒, 福田光順, 大西康介, 田中聖臣, 松多健策, 杉原貴信, 八木翔一, 中村翔健, 堀太地, 柳原陸斗, 鈴木健, 山口貴之, 加藤郁磨, 藤井朋也, 三ツ井俊也, 西村大樹, 大坪隆, 武智麻耶, 本間彰, 宮田恵理, 西塚賢治, 池田彩夏, 高野健太, 塩田柁貴, 星野寿春, 泉川卓司, 森口哲朗, 佐藤真二, 福田茂一, 北川敦志
2. 発表標題 中性子過剰N(窒素) 同位体の反応断面積測定
3. 学会等名 日本物理学会第74 回年次大会 (2018 年) (於九州大学)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西村 太樹  (Nishimura Daiki)  (30612147)	東京都市大学・理工学部・准教授    (32678)	
研究分担者	福田 光順  (Fukuda Mitsunori)  (50218939)	大阪大学・理学研究科・准教授    (14401)	
研究分担者	泉川 卓司  (Izumikawa Takuji)  (60282985)	新潟大学・研究推進機構・准教授    (13101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大坪 隆  (Ohtsubo Takashi)  (70262425)	新潟大学・自然科学系・准教授   (13101)	
研究分担者	武智 麻耶  (Takechi Maya)  (40570172)	新潟大学・自然科学系・助教   (13101)	削除：2019年9月17日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
ドイツ	重イオン科学研究所			