

機関番号：12401

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19204023

研究課題名（和文）多価イオン状態核の電子捕獲／束縛状態 β 崩壊半減期と価電子スピンの研究研究課題名（英文）Study of the EC and bound state β decay and its half-life on the highly charged ions.

研究代表者

鈴木 健 (SUZUKI TAKESHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：10196842

研究成果の概要（和文）：

水素原子様ヨウ素同位体 $^{122}_{53}\text{I}^{52+}\text{EC}$ 崩壊半減期実験の結果：電子捕獲崩壊曲線は常識となっている指数関数からの変調を示し振動していた。その振動周期は約6秒であった。この振動現象の理由の一つとしてニュートリノ振動を考えるとニュートリノ質量自乗差 $\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$ が、 $2.0(2) \times 10^{-4} \text{eV}^2$ となる。この値はカムランド実験のそれに較べて2.9倍程大きい。ヘリウム原子様プロメシウム同位体半減期実験の結果：現在鋭意解析中

研究成果の概要（英文）：In order to test the M -dependence of T_{Lab} required by the "neutrino hypothesis" we investigated the EC decay of H-like $^{122}\text{I}^{52+}$ ions. They exhibit a well-pronounced modulation with a period of $T_{\text{Lab}} \sim 6$ s superimposed on the exponential decay. This period, being in perfect agreement to the predicted scaling with the mass of the parent ion M , corroborates the "neutrino hypothesis", if verified in the final data evaluation. The data analysis on the EC decay of He-like $^{142}\text{Pm}^{60+}$ is in progress.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	19,000,000	5,700,000	24,700,000
2008年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2009年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
総計	33,700,000	10,110,000	43,810,000

研究分野：実験原子核物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：多価イオン状態核・EC崩壊・束縛状態 β 崩壊・束縛状態 α 崩壊

1. 研究開始当初の背景

ドイツ・重イオン科学研究所(GSI)では電子がひとつだけ付いた水素原子様の多価イオン状態核 $^{140}\text{Pr}^{58+}$ と $^{142}\text{Pm}^{60+}$ とを生成し、蓄積リング内で γ 因子 1.43 の相対論的速度で周回させながらそれぞれの娘核 $^{140}\text{Ce}^{58+}$ と $^{142}\text{Nd}^{60+}$ への電子捕獲崩壊(EC)を観測した。通常の崩壊曲線は指数関数となるが変調としての振動が観測された。その振動周期からニュートリノ質量2乗差や量子ビート／全角運動量保存則との関連が議論されていた。

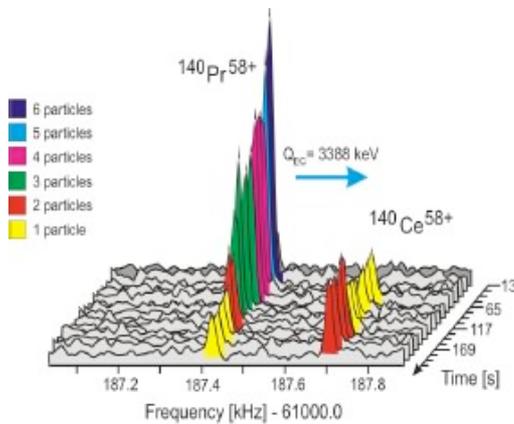
2. 研究の目的

この振動現象の有無を確認し、振動周期の親核質量依存性を調べる為に水素原子様 $^{122}_{53}\text{I}^{52+}$ からのEC崩壊と電子を2個まとったヘリウム原子様 $^{140}\text{Pm}^{59+}\text{EC}$ 崩壊曲線(半減期)とを測定する事。

3. 研究の方法

電子を1個つけた水素原子様ヨウ素同位体 $^{122}_{53}\text{I}^{52+}\text{EC}$ 崩壊半減期実験をドイツ重イオン科学研究所(GSI)で行った。実験は重イオ

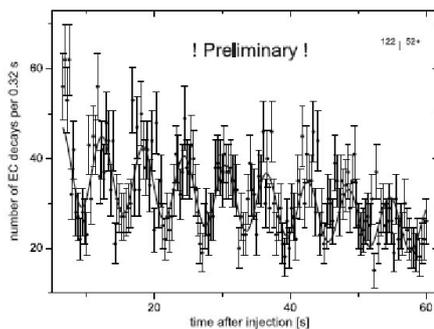
ン加速器からの核子あたりエネルギー 592MeV の ^{134}Xe ビームを 2513 mg/cm 厚みの ^9Be 標的に照射し入射核破砕反応で EC 崩壊核 $^{122}_{53}\text{I}^{52+}$ を 400 A MeV で生成分離し、蓄積リングに磁気剛性率 8.0Tm で入射させた。入射された核破砕片は確率冷却によって予備的に冷却され更に電子冷却を用いて運動量広がり を 10^{-6} 程度にまで冷やしてこれをショットキー法で検出した。下図は横軸にイオンの周回周期を反映した周回周波数を縦軸には蓄積リング入射後の時間を Z 軸方向は粒子の強度を、3次元にプロットしたものである。この図の場合には親核 $^{140}\text{Pr}^{58+}$ が時刻 65 秒後に 1 個崩壊し、娘核 $^{140}\text{Ce}^{58+}$ が生成され



たことが分かる。更にこの崩壊時刻をイオン 1 個 1 個について積算し表示したものが下図である。

4. 研究成果

① 水素原子様ヨウ素同位体 $^{122}_{53}\text{I}^{52+}$ EC 崩壊半減期実験



親核の崩壊曲線と娘核の増加から陽電子崩壊確率、EC 崩壊確率、及びリング中でのイオンの損失率を独立に決定した。その結果、① $^{122}\text{I}^{52+}$ の陽電子崩壊定数 λ_{β^+} を $2.345(93) \times 10^{-3} [\text{sec}^{-1}]$ 、② EC 崩壊定数 λ_{EC} を $0.680(5) \times 10^{-3} [\text{sec}^{-1}]$ と決定した。陽電子崩壊定数は中性状態 ($^{122}\text{I}^0$, $2.451 \times 10^{-3} [\text{sec}^{-1}]$) のときよりも 4%ほど小さくなっている。軌道電子のスクリーニング効果と荷電状態に依る Q 値の変化によって理解できる。EC 崩

壊定数 λ_{EC} については中性状態 ($0.605 \times 10^{-3} [\text{sec}^{-1}]$) のときよりの 12%ほど寿命が短くなっている。このことは EC 崩壊においてその崩壊定数は周囲の電子数だけでは決まらず全角運動量保存に関する量子力学的スピン選択則が関わっていることを示唆している。

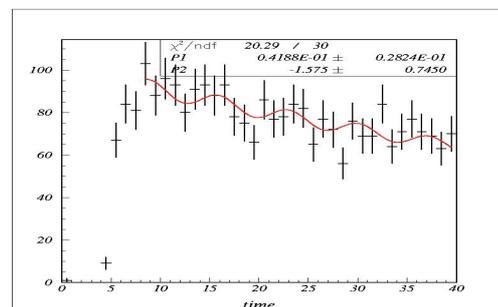
また、振動周期の親核質量 M 依存性は

$T_{\text{lab}} = h\gamma 2M / \Delta m_{12}$ を反映して $M \sim 140$ から 120 となって 7 秒から 6 秒となってニュートリノ振動仮説と矛盾しない事が分かった。

② 価電子スピンの状態を変えて電子が 2 個ついたヘリウム様原子 $^{140}\text{Pm}^{59+}$ 半減期実験の崩壊曲線は指数関数 $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ 、及び指数関数 + 三角関数 $N(t) = N_0 [1 + A \cos(\omega t + \phi)] e^{-\lambda t}$ でフィットする解析をそれぞれ行った。振幅を水素様イオンの結果に固定した解析ではフィットの良さ・周波数の値が一致しなかった。一方周波数を水素様イオンの結果に固定した解析では振幅の値が 1 桁ほど小さくなっていた。

振幅 A : 0.23 に固定の場合、周波数 ω : $0.754 [\text{s}^{-1}]$; 周波数 ω : $0.885 [\text{s}^{-1}]$ に固定の場合、振幅 A : $0.026(23)$ であった。小さな振幅は水素様イオンとヘリウム様イオンでの電子数の違いによる遮蔽 (スクリーニング) 効果の為と考えられる。指数関数からの変調の理由としてニュートリノ振動・量子変化 (quantum beam) ・全角運動量則などが考えられる。

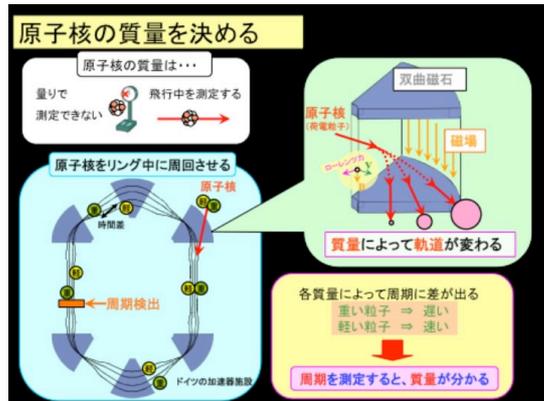
下図は ω : $0.885 [\text{s}^{-1}]$ 固定の場合振幅 A : $0.026(23)$ のフィットの一例を示した。この振動周期は約 7 秒であり、この振動現象の理由の一つとしてニュートリノ振動を考えた場合の核質量 M 依存性 $T_{\text{lab}} = h\gamma 2M / \Delta m_{12}^2$ とは矛盾が無い事がわかった。ただしここで解析に使用したデータは全体のごく一部であり、結論は全データの解析後となる事を強調



しておきたい。研究の進捗は従って若干遅れているがこの理由は、当初の 4 年計画では実験は 2 年目と 3 年目を予定していたが、加速器を使うビームタイムが 3 年目にアサイン

されなかった為である。

③実験ではドイツ重イオン科学研究所 (GSI) の加速器施設 ESR を使用したので数多くのバイプロダクト論文も生成された。【雑誌論



文の項参照】同じ実験手法(ショットキー検出法)で数多くの未決定の原子核質量を世界で初めて決定する事ができた。図は図: 質量が既知と未知各種を同時にリングを周回させ、周回周波数(周期)から質量を同定する。

重イオン蓄積リングでの質量決定の原理の様子を表したものである。質量が未知の原子核の質量を決定する事の意義は宇宙初期に起こったビッグ・バン元素合成では説明のつかない重元素合成の道筋(r-過程)が明らかになる事である。米国 Discover 誌にも採り上げられたように物理学の上の大きな11個のミステリーの一つである【鉄からウランまでの元素はどうやって生まれたのか?】に解答を与えることができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

【雑誌論文】(計14件)

1. Direct mass measurements of short-lived $A=2Z-1$ nuclides ^{63}Ge , ^{65}As , ^{67}Se and ^{71}Kr and their impact on nucleosynthesis in the rp process, X. L. Tu, T. Yamaguchi 31 番目, 他 38 名, Phys. Rev. Lett. accepted. 査読有

2. Density distribution of ^{17}Ne and possible shell-structure change in the proton-rich sd-shell nuclei

K. Tanaka, T. Suzuki 11 番目, T. Ohtsubo 12 番目, T. Izumikawa 13 番目, T. Yamaguchi 15 番目, 他 14 名, Phys. Rev. C 82, 044309/1-1 (2010). 査読有

3. Energy-dependent charge changing cross sections and proton distribution of ^{28}Si T. Yamaguchi 1 番目, T. Ohtsubo 15 番目, T. Suzuki 17 番目, 他 15 名, Phys. Rev. C 82, 014609/1-6 (2010). 査読有

4. Discovery and Investigation of Heavy Neutron-Rich Isotopes with Time-Resolved Schottky Spectrometry in the Element Range from Thallium to Actinium, L. Chen, T. Ohtsubo 32 番目, T. Yamaguchi 45 番目, 他 42 名, Phys. Lett. B 691 (2010) 234-237. 査読有

5. Discovery of Highly Excited Long-Lived Isomers in Neutron-Rich Hafnium and Tantalum Isotopes through Direct Mass Measurements, M. W. Reed, T. Yamaguchi 39 番目, 他 38 名, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 172501/1-5. 査読有

6. Observation of a large Reaction Cross-Section in the Drip-Line Nucleus ^{22}C , K. Tanaka, T. Yamaguchi 2 番目, T. Suzuki 3 番目, T. Ohtsubo 4 番目, T. Izumikawa, 10 番目, 他 33 名, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 062701/1-4. 査読有

7. Direct measurement of the 4.6 MeV isomer in stored bare ^{133}Sb ions, B. Sun, T. Ohtsubo 27 番目, T. Suzuki 33 番目, T. Yamaguchi 37 番目, 他 33 名 Phys. Lett. B 688 (2010) 294-297. 査読有

8. Reaction cross sections at intermediate energies and Fermi motion effect, M. Takechi, T. Ohtsubo 13 番目, T. Izumikawa 14 番目, T. Suzuki 16 番目, T. Yamaguchi 17 番目, 他 19 名 Phys. Rev. C 79 061601(R)/1-5 (2009). 査読有

9. Schottky mass measurement of ^{208}Hg isotope implication for the proton-neutron interaction strength around doubly magic ^{208}Pb , L. Chen, T. Ohtsubo 33 番目, T. Yamaguchi 46 番目, 他 43 名, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 122503/1-4. 査読有

10. New scheme for precision mass measurements of rare isotopes produced at RI Beam Factory, S. Nakajima, T. Yamaguchi 2 番目, T. Suzuki 3 番目, T. Ohtsubo 14 番目, 他 10 名, Acta Physica Polonica B Vol.39 (2008) 457-462. 査読有

11. Rare-RI Ring project at RIKEN RI Beam Factory, Y. Yamaguchi, T. Ohtsubo 9 番目, T. Suzuki 11 番目, T. Yamaguchi 13 番目, 他 11 名, Nucl. Instr. Methods B 266 (2008) 4575-4578. 査読有

12. Measurement of reaction cross section

of ^{18}C and observations of fragments from ^{17}C and ^{18}C at 80A MeV,

A. Ozawa, T. Izumikawa 5 番目, T. Ohtsubo 10 番目, T. Suzuki, 13 番目, 他 13 名, Phys. Rev. C78, 054313/1-6 (2008). 査読有

13. Nuclear structure studies of short-lived neutron-rich nuclei with the novel large-scale isochronous mass spectrometry at the FRS-ESR facility, B. Sun, T. Ohtsubo 24 番目, T. Suzuki 30 番目, T. Yamaguchi 35 番目, 他 31 名, Nucl. Phys. A 812 (2008) 1-12. 査読有

14. Status of the Experimental Program on Mass Measurements of Stored Exotic Nuclei at the FRS-ESR Facility,

Yu. A. Litvinov, T. Ohtsubo, 26 番目, T. Suzuki 33 番目, T. Yamaguchi 38 番目, 他 35 名, Nucl. Phys. A 787 (2007) 315-320. 査読有

[学会発表] (計 5 件)

1. Decay curve study in a standard electron capture decay

D. Nishimura, T. Izumikawa 3 番目, T. Ohtsubo 10 番目, T. Suzuki 11 番目, T. Yamaguchi 13 番目, 他 9 名, AIP conference proceedings 1235 (2010) 219-222. The 7th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, Tsukuba, Japan, 9-13 Nov. 2009. 査読有

2. Measurements of nuclear radii for neutron-rich Ne isotopes $^{28-32}\text{Ne}$,

M. Takechi, T. Ohtsubo 2 番目, T. Suzuki 6 番目, T. Yamaguchi 7 番目, 他 39 名, Nucl. Phys. A834 (2010) 412-415.

The 10th Int'l Conference in Nucleus · Nucleus Collisions (NN2009), Beijing, China, 16-21 Aug. 2009. 査読有

3. Electron Screening effects on α -decay,

A. Musumarra, T. Ohtsubo 36 番目, T. Suzuki 49 番目, T. Yamaguchi 56 番目, 他 53 名, AIP conference proceedings, accepted. Nuclear Structure and Dynamics (NSD09), Dubrovnik, Croatia May 4-8, 2009, 査読有

4. Large-scale mass measurements of short-lived nuclides with the isochronous mass spectrometry at GSI,

B. Sun, T. Ohtsubo 26 番目, T. Suzuki 33 番目, T. Yamaguchi 38 番目, 他 35 名, Int'l J. of Phys. E, Vol. 18, No. 2 (2009) 346-351. Proceedings of the 7th International Conference on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI'08), Lanzhou, 14-18 Sep. 2008, 査読有

5. ECT workshop "Mass Olympics 26-30 May, 2008, Trento, Italy Storage-ring mass spectrometry, T. Yamaguchi (invited) 査読無

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.ne.phy.saitama-u.ac.jp/~suzuki/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 健 (SUZUKI TAKESHI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 10196842

(2) 研究分担者

山口 貴之 (YAMAGUCHI TAKAYUKI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 10375595

大坪 隆 (OHTUBO TAKASHI)

新潟大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 70262425

泉川 卓司 (OHTUBO TAKASHI)

新潟大学・アイソトープ総合センター・准教授

研究者番号: 60282985

(3) 連携研究者

()

研究者番号: