(A2) 地上実験と理論による、 物質の起源の解明

1.現在までの進捗状況および達成度

以下に年度ごとの当初計画と比較しつつ、研究の進捗状況を評価する。

**平成２６年度計画**：理化学研究所のRIビームファクトリー（RIBF）のビームラインでの、陽子や中性子の分離エネルギーが０になるドリップライン近傍の不安定な原子核ビームの強度を調べる。そして、ウラニウムの原子核のクーロンフィッション法による中重核領域の新同位元素探索実験を開始する。同時に、中性子検出器を改良し、運動量分解能の向上を目指す。さらに、新たに導入する、イオン照射装置を設置・調整し、駆動させる。

**平成２７年度計画**：ドリップライン近傍の中性子過剰核の構造を明らかにするため、クーロン励起による脱励起γ線の測定を行うとともに、中重核領域の新同位元素探索実験を継続する。また、中性子検出器の性能試験を実施する。イオン照射装置を用いた低速イオンの計数効率の位置依存性の測定を開始し、イオン照射装置の性能を確認する。

**平成２８年度計画**：前年度までに開発した中性子検出器・γ線検出器を、RIBFの既存の検出器群への組み込み・置き換えを実施し、中性子過剰核の構造を明らかにするために、高効率・高分解能測定を開始する。中重核領域の新同位元素探索実験を継続する。また、イオン照射装置を用いてシンチレーターおよび半導体検出器によるイオンのエネルギー測定を行う。

**平成26年度**：理研RIBF加速器施設では核子あたり345 MeVまで加速されたウランに至る各種のイオンを入射核破砕または飛行核分裂を用いて安定線から遠く離れた原子核を生成し、それらを分析、分離することにより二次ビームを供給する。現在その能力は世界で飛び抜けており、例えば、新しい同位元素を130種あまり既に作り出して確認している。Z= 60～68領域の生成率はZ=20～50領域で比較的良く実験結果を再現していたAbrasion- ssion modelモデルによる生成率に比べて2桁以上大きな結果が得られることが確認されている。

魔法数を持つ原子核としての性質が失われたり、新しい魔法数が現われる、といった特異な現象が観測されている。2014年度は、中性子過剰な酸素、ネオン、マグネシウム同位体についての結果が得られ[2, 3, 4, 5, 6]、逆転の島の全容が明らかになりつつある。陽子過剰な錫同位体である。陽子数50が魔法数であり、中性子数も50である100Snを目標に様々な研究が進行中である。104Snに関する２つの論文[7, 8]は、100Snへ向かって核構造がどのように進化してゆくかについて、重要な情報を与えている[9]。

中性子検出器の開発としては位置検出改善のために６角形のシンチレータにWLSbarを貼り付けて使用し、MPPC読み出しによる試作器を完成させた。イオン照射装置については設計と部品の調達が完了し、装置組み立ての準備が整った。

物理計測については多数の論文を発表し計画を上回る成果を出すことができたが、検出器およびイオン照射装置の開発については順調に進んでいるものの計画に比べ稼働開始が遅れている。

**平成27年度**：中性子過剰核の構造解明のためのクーロン励起実験および中重核領域の新同位元素探索実験を継続してそれぞれ結果を論文として公表した[11,12,13,14]。クーロン励起実験では測定可能な偶偶核の2+励起状態をすべて決定するという野心的な計画をフランスのサクレー研究所との共同実験で開始した。

３次元位置感応型中性子検出器の開発ではシミュレーションからWLSbarの８面読み出しに改善して性能評価を行い結果を学会で報告した。

　SCRIT電子散乱実験において我々が主導して作成したバンチャーの性能が実験可能なレベルに達し、132Xeのデータ取得に成功した。安定核ながら未発表のデータでSCRIT実験からの最初の物理アウトプットといえる。その結果については学会報告を行った。一方、イオン照射装置の組み立てが完了し、ビーム量と位置・広がりをモニターするプロファイルモニターの開発を開始し、イオン電流をMCPで増幅ののちCsIシンチレーターで可視化する装置が完成した。

物質の起源を探る理論的側面からはクォーク、グルオンの系を理解する試みを進めた。非平衡系の非摂動効果を評価する方法の一つとして、実時間法における再帰的方程式がある。実時間法はミンコフスキー時空で定式化されており、直接再帰的方程式を解く方法について検討を行った[10]。

**平成28年度**：中性子過剰核の構造解明ではDALI2を用いた実験で30Ne,36Mgおよび132Snの論文を発表した。DALI2のNaI(Tl)検出器の増強も計画通り秋に行われて、実験精度を上げたデータ収集が可能となった。

　SCRIT実験においては132Xeを標的としてビームエネルギー200MeVと300MeVのデータを取得した。精度を上げた132Xe実験については国際学会にて結果を報告した。ルミノシティーの測定精度を上げることで、さらに原子核の大きさと表面のぼやけの変数の精度を格段に向上することができるので、校正データとして208Pbのデータを取得するとともにターゲット領域に存在している残留ガスイオンの存在状況を詳細に調べるためのイオン分析装置の増強が完了した。校正データの取得後は最終目的であった不安定核を標的とした実験に移行する予定である。

　３次元位置感応型中性子検出器については8画の大型シンチレーターバーの読み出しとシミュレーションを比較することによって位置精度を上げる努力を続けている。計画では実験に組み込み成果を出す時期ではあるが、現状を改善できる性能を達してからの導入する計画に変更した。

　イオン照射装置では検出器開発のために少量のビームでもその位置や広がりをモニターする必要がある。ビーム電流をMCPで増幅するモニターで105/s程度でも判別可能であることが分かった。今後、学会および論文でその結果を公表していく予定である。

　理論的側面では　ミンコフスキー空間における質量関数の非摂動計算を強結合量子電磁力学の場合に行った。虚数部も含めた計算を行った結果、有効質量の不安定性なども評価できるようになった。結果は、PTEPに掲載予定である。

2.問題点とその克服方法

　一部検出器開発が遅れている部分があるがおおむね計画通りに進んでいる。また、物理データの取得も順調に進んでいるが一部の論文公表に時間がかかっている。今後共同研究者間の連絡を密にとっていくことによって、その遅れを取り戻していく予定である。

3.今後の研究方針

　これまでの研究でA-2チームの物理成果を出す基盤は整ったと考えられる。今後は他の研究手法で1つの宇宙像解明に迫るチームとの連携を強めてその基盤の強化を目指していく予定である。

4.特に優れた研究成果（表彰、新聞記事、プレス発表等）

2015年度仁科記念賞受賞　本林　透

http://www.riken.jp/pr/topics/2015/20151113\_1/

5.研究成果の副次的効果（特許出願や、計画に無かった良い結果）

　特記すべきことなし

6.成果の公表(2014, 2015, 2016年度の物)

論文

[1] S. Takeuchi, T. Motobayashi, Y. Togano, M. Matsushita, N. Aoi, K. Demichi, H.

Hasegawa, and H. Murakami, Nucl. Instr. and Meth. A763(2014) 596.

[2] T. Nakamura, N. Kobayashi, Y. Kondo, Y. Satou, J.A. Tostevin, Y. Utsuno, N. Aoi,H. Baba, N. Fukuda, J. Gibelin, N. Inabe, M. Ishihara, Y. Kawada, T. Kubo, T.

Motobayashi, T. Ohnishi, N.A. Orr, H. Otsu, T. Otsuka, Y. Togano, and K. Yoneda,

Phys. Rev. Lett.112(2014) 142501.

[3] S. Michimasa, Y. Yanagisawa, K. Inafuku, N. Aoi, Z. Elekes, Zs. Fulop, Y. Ichikawa,N. Iwasa, K. Kurita, M. Kurokawa, T. Machida, T. Motobayashi, T. Nakamura, T.Nakabayashi, M. Notani, H.J. Ong, T.K. Onishi, H. Otsu, H. Sakurai, M. Shinohara,T. Sumikama, S. Takeuchi, K. Tanaka, Y. Togano, K. Yamada, M. Yamaguchi, and K. Yoneda, Phys. Rev. C89(2014) 054307.

[4] P. Doornenbal, H. Scheit, S. Takeuchi, Y. Utsuno, N. Aoi, K. Li, M. Matsushita, D.Steppenbeck, H. Wang, H. Baba, E. Ideguchi, N. Kobayashi, Y. Kondo, J. Lee, S.

Michimasa, T. Motobayashi, T. Otsuka, H. Sakurai, M. Takechi, Y. Togano, and K.

Yoneda, Prog. Theor. Exp. Phys.2014(2014) 053D01.

[5] N. Kobayashi, T. Nakamura, Y. Kondo, J.A. Tostevin, Y. Utsuno, N. Aoi, H. Baba,R. Barthelemy, M.A. Famiano, N. Fukuda, N. Inabe, M. Ishihara, R. Kanungo, S.Kim, T. Kubo, G.S. Lee, H.S. Lee, N. Matsushita, T. Motobayashi, T. Ohnishi, N.A.Orr, T. Otsu, T. Otsuka, T. Sato, H. Sakurai, Y. Satou, T. Sumikama, H. Takeda, S.Takeuchi, R. Tanaka, Y. Togano, and K. Yoneda, Phys. Rev. Lett.112(2014) 24250.

[6] K. Tshoo, Y. Satou, C.A. Bertulani, H. Bhang, S. Choi, T. Nakamura, Y. Kondo,

S. Deguchi, Y. Kawada, Y. Nakayama, K.N. Tanaka, N. Tanaka, Y. Togano, N.Kobayashi, N. Aoi, M. Ishihara, T. Motobayashi, H. Otsu, H. Sakurai, S. Takeuchi, K.Yoneda, F. Delaunay, J. Gibelin, F.M. Marques, N.A. Orr, T. Honda, T. Kobayashi,T. Sumikama, Y. Miyashita, K. Yoshinaga, M. Matsushita, S. Shimoura, D. Sohler,J.W. Hwang, T. Zheng, Z.H. Li, and Z.X. Ca, Phys. Lett. B

739(2014) 19.

[7] P. Doornenbal, S. Takeuchi, N. Aoi, M. Matsushita, A. Obertelli, D. Steppenbeck, H.Wang, L. Audirac, H. Baba, P. Bednarczyk, S. Boissinot, M. Ciemala, A. Corsi, T.Furumoto, T. Isobe, A. Jungclaus, V. Lapoux, J. Lee, K. Matsui, T. Motobayashi, D.Nishimura, S. Ota, E. C. Pollacco, H. Sakurai, C. Santamaria, Y. Shiga, D. Sohler,and R. Taniuchi, Phys. Rev. C90(2014) 061302.

[8] A. Corsi, S. Boissinot, A. Obertelli, P. Doornenbal, M. Dupuis, F. Lechaftois, M. Mat-sushita, S. Peru, S. Takeuchi, H. Wang, N. Aoi, H. Baba, P. Bednarczyk, M. Ciemala,A. Gillibert, T. Isobe, A. Jungclaus, V. Lapoux, J. Lee, M. Martini, K. Matsui, T.Motobayashi, D. Nishimura, S. Ota, E. Pollacco, H. Sakurai, C. Santamaria, Y. Shiga,D. Sohler, D. Steppenbeck, and R. Taniuchi, Phys. Lett. B

743 451.

[9] K. Li, Y. Ye, T. Motobayashi, H. Scheit, P. Doornenbal, S. Takeuchi, N. Aoi, M. Matsushita, E. Takeshita, D. Pang, and H. Sakurai,
"Relativistic Coulomb excitation in 32Mg near 200 MeV/nucleon with a thick target”,
Phys. Rev. C 92,  014608  (2015)

[10]H. Tanaka, PTEP2015(2015) 043B03.

[11]D. Steppenbeck, S. Takeuchi, N. Aoi, P. Doornenbal, M. Matsushita, H. Wang, Y. Utsuno, H. Baba, S. Go, J. Lee, K. Matsui, S. Michimasa, T. Motobayashi, D. Nishimura, T. Otsuka, H. Sakurai, Y. Shiga, N. Shimizu, P. -A. Soderstrom, T. Sumikama, R. Taniuchi, J. J. Valiente-Dobon, and K. Yoneda,
"Low-Lying Structure of 50Ar and the N=32 Subshell Closure”,
 Phys. Rev. Lett., 114, 252501 (2015)

[12]Zs. Vajta, Zs. Dombràdi, Z. Elekes, T. Aiba, N. Aoi, H. Baba, D. Bemmerer, Zs. Fülöp, N. Iwasa, Á. Kiss, T. Kobayashi, Y. Kondo, T. Motobayashi, T. Nakabayashi, T. Nannichi, H. Sakurai, D. Sohler, S. Takeuchi, K. Tanaka, Y. Togano, K. Yamada, M. Yamaguchi, and K. Yoneda,
"γ-ray spectroscopy of 19C via the single-neutron knock-out reaction”,
Phys. Rev. C 91, 064315 (2015)

[13]"Investigating nuclear shell structure in the vicinity of $^{78}$Ni: Low-lying excited states in the neutron-rich isotopes $^{80,82}$Zn”,
Y. Shiga, K. Yoneda, D. Steppenbeck, N. Aoi, P. Doornenbal, J. Lee, H. Liu, M. Matsushita, S. Takeuchi, H. Wang, H. Baba, P. Bednarczyk, Zs. Dombradi, Zs. Fulop, S. Go, T. Hashimoto, Honma, Ideguchi, K. Ieki, K. Kobayashi, Y. Kondo, R. Minakata, T. Motobayashi, D. Nishimura, Shimizu, D. Sohler, Y. Sun, A. Tamii, R. Tanaka, Z. Tian, Y. Tsunoda, Y. Utsuno, Zs. Vajta, T. Yamamoto, X. Yang, Z. Yang, Y. Ye, R. Yokoyama, and J. Zenihiro,
Phys. Rev. C 93 (2016) 024320

[14]One-neutron removal from Ne29: Defining the lower limits of the island of inversion, N. Kobayashi, T. Motobayashi et al., Phys. Rev. C 93(2016) 014613

[15]"Asymmetry dependence of reduction factors from single-nucleon knockout of 30Ne at ∼ 230 MeV/nucleon"
J. Lee, H. Liu, P. Doornenba1, M. Kimura, K. Minomo, K. Ogata, Y. Utsuno, N. Aoi, K. Li, M. Matsushita, H. Scheit, D. Steppenbec1, S. Takeuchi, H. Wang, H. Baba, E. Ideguchi, N. Kobayashi, Y. Kondo, S. Michimasa, T. Motobayashi, H. Sakurai, M. Takechi and Y. Togano,
Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 083D01

[16]Mapping the deformation in the `island of inversion'': Inelastic　scattering of $^{30}$Ne and $^{36}$Mg at intermediate energies:
P. Doornenbal, H. Scheit, S. Takeuchi, N. Aoi, K. Li, M. Matsushita, D. Steppenbeck, H. Wang,H. Baba, E. Ideguchi, N. Kobayashi, Y. Kondo, J. Lee, S. Michimasa, T. Motobayashi, A. Poves,H. Sakurai, M. Takechi, Y. Togano, and K. Yoneda,
Phys. Rev. C 93 (2016) 044306

[17]"First spectroscopic information from even-even nuclei in the region "southeast" of 132Sn: Neutron-excitation dominance of the 2+ state in 132Cd”
H. Wang, N. Aoi, S. Takeuchi, M. Matsushita, T. Motobayashi, D. Steppenbeck, K. Yoneda, H. Baba, Zs. Dombrádi, K. Kobayashi, Y. Kondo, J. Lee, H. Liu, R. Minakata, D. Nishimura, H. Otsu, H. Sakurai, D. Sohler, Y. Sun, Z. Tian, R. Tanaka, Zs. Vajta, Z. Yang, T. Yamamoto, Y. Ye, and R. Yokoyama
Phys. Rev. C 94 (2016) 051301

アーカイブ

S. Sasagawa and H. Tanaka ,  Schwinger-Dyson Equation in Minkowski Space beyond the IE Approximation arXiv: 1602.04291

学会発表

国際学会

4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan Tuesday–Saturday, October 7–11, 2014; Waikoloa, Hawaii

[1] Development of the electron spectrometer for the SCRIT experi-

ment

A. ENOKIZONO, Rikkyo University, M. HARA, RIKEN, Y. HARAGUCHI,

Nagaoka University of Technology, T. HORI, S. ICHIKAWA, RIKEN, K. KURITA,

S. MATSUO, Rikkyo University, T. OHNISHI, RIKEN, T. SUDA, T. TAMAE, To-

hoku University, M. TOGASAKI, Rikkyo University, K. TSUKADA, T. TSURU,

Tohoku University, M. WAKASUGI, RIKEN, S. WANG,

[2]Production yield measurement for neutron-rich nuclei around Z= 60 from in- ight ssion of a 238U beam at 345 MeV/nucleon

DAICHI MURAI, KAZUO IEKI, Department of Physics, Rikkyo University, TOSHIYUKI KUBO, NAOHITO INABE, DAISUKE KAMEDA, NAOKI FUKUDA, HIROYUKI TAKEDA, HIROSHI SUZUKI, KOICHI YOSHIDA, RIKEN Nishina Center, RIKEN, BIGRIPS COLLABORATION

[3]Shell structure studies in the vicinity of the doubly-magic

78Ni by in-beamγ-ray spectroscopy

YOSHIAKI SHIGA, Rikkyo University, RIBF030

COLLABORATIO

[4]The Performance Of The Scrit Detectors For Electron-RI Scattering Experiment

Akitomo ENOKIZONO (Assistant Professor, Rikkyo University)

Internatinal Nuclear Physics Conference 2016 11-16 Sep. 2016 Adelaid Convention Center, Austraria

2014年度第69回年次大会（東海大学）

[1]**SCRIT電子散乱実験における反跳核検出器の開発**
立教大理，理研仁科セA，長岡技科大工B　島倉優人，市川進一A，榎園昭智，大西哲哉A，栗田和好，鷲見洋平，戸ヶ崎衛，原雅弘A，原口祐司B，堀利匡A，松尾咲希，若杉昌徳A

[2] **次世代PSD型中性子検出器NiGIRIの開発**
立教大理，理研仁科セA　松澤秀之，西村俊二A，磯部忠昭A，家城和夫

2015年度第70回年次大会（早稲田大学）

[3] SCRIT実験における散乱電子スペクトロメーターの開発

立教大，理研A，東北大電子光B

松尾咲希，市川進一A，榎園昭智，大西哲哉A，栗田和好，須田利美B，玉江忠明B，塚田暁B，水流輝明B，戸ヶ崎徹，堀利匡A，原雅弘A，松田一衛B，森谷洋祐B，米山俊平B，若杉昌徳A

[4] SCRIT法を用いた電子・不安定核散乱実験に向けたルミノシティ決定精度の評価

立教大, 東北大電子光A, 理研B

榎園昭智, 市川進一B, 大西哲哉B, 栗田和好, 須田利美A, 玉江忠明A, 塚田暁A, 水流照明A, 戸ヶ崎衛, 原正弘B, 堀利匡B, 松田一衛A, 山田耕平, 若杉昌徳B, 渡辺正満B

2015年度秋季大会（大阪市立大学）

[5] SCRIT法を用いた電子・不安定核散乱実験に向けたルミノシティ決定精度の評価

立教大, 東北大電子光A, 理研B

榎園昭智, 市川進一B, 大西哲哉B, 栗田和好, 須田利美A, 玉江忠明A, 塚田暁A, 水流照明A, 戸ヶ崎衛, 原正弘B, 堀利匡B, 松田一衛A, 山田耕平, 若杉昌徳B, 渡辺正満B

[6] SCRIT実験のためのイオンビームクーラー・バンチャーの開発

立教大, 理研A, 長岡技科大B

戸ヶ崎衛, 大西哲哉A, 栗田和好, 鳥羽瞭太B, 原雅弘A, 山田耕平, 若杉昌徳A

[7] 大強度48Caビームを用いたF中性子ドリップラインの探索

立教大理, 理研仁科セA, 東北大理B, 東工大理C, NSCL/MSUD, GSIE

村井大地, 家城和夫, 久保敏幸A, 稲辺尚人A, 福田直樹A, 竹田浩之A, 鈴木宏A, 安得順A, 清水陽平A, 佐藤広海A, 佐藤優樹A, 日下健祐A, 柳澤善行A, 大竹政雄A, 吉田光一A, 大津秀暁A, 岩佐直仁B, 中村隆司C, Oleg B. TarasovD, Brad M. SherrillD, Dave J. MorrisseyD, Hans GeisselE

[8] 中性子過剰Zn同位体の低励起状態観測による二重魔法核78Ni近傍の核構造の研究

立教大, 理研仁科セA, 東大CNSB, 阪大RCNPC, 北京大D, INP PANE, MTA AtomkiF, 東工大G

志賀慶明, 米田健一郎A, D. SteppenbeckA, B, 青井考C, P. DoornenbalA, J. LeeA, H. LiuA, 松下昌史A, B, 武内聡A, H. WangA, D, 馬場秀忠A, P. BednarczykE, Zs. DombrabiF, Zs. FulopF, 郷慎太郎A, 橋本尚志C, 井手口栄治A, C, 家城和夫, 小林航太, 近藤洋介G, 南方亮吾G, 本林透A, 西村太樹A, 大津秀暁A, 櫻井博儀A, D. SohlerF, Y. SunD, 民井淳C, 田中隆己A, G, Z. TianD, Zs. VajtaF, 山本哲也C, X. YangA, Z. YangD, Y. YeD, 横山輪A, B, 銭廣十三A

[9] 大強度48Caビームを用いた中性子ドリップライン探索 II

立教大理A, 理研仁科セB, 東北大理C, 東工大理D, NSCL/MSUE, GSIF

村井大地A, B, 家城和夫A, 久保敏幸B, 稲辺尚人B, 福田直樹B, 竹田浩之B, 鈴木宏B, 安得順B, 清水陽平B, 佐藤広海B, 佐藤優樹B, 日下健祐B, 柳澤善行B, 大竹政雄B, 吉田光一B, 大津秀暁B, 岩佐直仁C, 中村隆司D, Oleg B. TarasovE, Brad M. SherrillE, Dave J. MorrisseyE, Hans GeisselF

2016年度第71回年次大会（東北学院大学）

[10] SCRIT法を用いたXe同位体標的における電子散乱のルミノシティ測定

立教大, 東北大電子光A, 理研B

榎園昭智, 足立江介, 市川進一B, 大西哲哉B, 栗田和好, 須田利美A, 玉江忠明A, 塚田暁A, 水流照明A, 戸ヶ崎衛, 原正弘B, 藤田峻広, 堀利匡B, 堀充希, 松田一衛A, 山田耕平, 若杉昌徳B, 渡辺正満B

2016年度秋季大会（宮崎大学）

[11] SCRIT 法を用いた Xe 同位体標的・電子散乱実験における ルミノシティ測定

立教大, 東北大電子光A, 理研B

藤田峻広, 足立江介, 市川進一B, 榎園昭智, 大西哲哉B, 栗田和好, 須田利美A, 玉江忠明A, 塚田暁A, 戸ヶ崎衛, 原雅弘B, 堀利匡B, 堀充希, 松田一衛A, 山田耕平, 若杉昌徳B, 渡邊正満B

7.その他研究成果等(6で書いたもの以外で、研究成果や企業との連携

　実施等)