様式Ｃ－１９

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成２５年　５月３１日現在

機関番号：８２４０１
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2010～2012
課題番号：２２６８４０１１
研究課題名（和文）　元素合成に関わる中性子過剰核領域の核データ収集

研究課題名（英文）　The collection of nuclear data on neutron rich nuclei relating to nuclear synthesis

研究代表者
馬場　秀忠（BABA HIDETADA）
独立行政法人理化学研究所・情報処理技術チーム・仁科センター研究員
研究者番号：１０４１５２６８

研究成果の概要（和文）：
本研究は核物理が担う重要テーマである元素の起源を解明するために、元素合成に関わる中性子過剰核の核データを広い範囲で測定することを目標としている。核データの中でも特に中性子捕獲断面積およびピグミー双極子状態の強度分布についてスポットをあてている。本研究では高効率で核データを収集するために高速データ収集システムを開発した。また、ピグミー双極子状態からの高エネルギーγ線を測定するために大型γ線検出器を開発した。理化学研究所 RI ビームファクトリーでは現在､世界的にも最大強度で中性子過剰核ビームを供給しており、本研究で開発された高速データ収集システムおよび大型γ線検出器を組み合わせることで、広い範囲の核データ収集が可能となった。

研究成果の概要（英文）：
This project is aiming to obtain nuclear data over a wide range of neutron-rich nuclei relating to nuclear synthesis that is one of the important subjects in nuclear physics. Within nuclear data, the neutron capture consecution and the strength distribution of pygmy resonance are focused. To archive high-efficient data taking, the high speed data acquisition system has been developed. And, to measure the high energy gamma ray from pygmy resonance, large gamma ray detector has been developed, too. RIKEN RI beam factory is providing neutron-rich beams with the highest intensity in the world. Now the measurement of wide nuclear data can be done by application of developed data acquisition system and large gamma ray detector.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2010 年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2011 年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
総　計	18,800,000	5,640,000	24,440,000

研究分野：数物系科学
科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理
キーワード：不安定核、核データ、データ収集システム、γ線検出器

１．研究開始当初の背景

本研究は元素合成にかかわる核データを効率よく収集していくことが目的である。これまでの不安定核を用いた原子核実験では、例えば１週間かけて１つの不安定核について研究することが一般的であった。平成 19

年から稼働した理化学研究所 RI ビームファクトリーでは、本研究開始当初（平成 22 年）にはすでに世界最高の不安定核ビーム供給能力を有していた。その後、さらなる大強度不安定核ビーム供給を目指し、加速器施設のアップデートが進められていた。これにより 1～2 ケタ多いビーム強度が得られるため、1 週間かけて 1 つの核をじっくり研究する時代から、短期間にさまざまな核種についてデータを得られる時代へと移り変わろうとしていた。RI ビームファクトリーが供給する大強度不安定核ビームを余すところなく生かすためには、既存の信号処理系ではとうてい処理時間が間に合わないと予想されていた。そのため本研究では、高速データ収集システムを開発し、短期間に様々な核データを取得するための土台を提供しようとしていた。取得すべき元素合成にかかわる核データのうち、β崩壊の寿命測定については他にプロジェクトが進行していた。そこで本研究では、中性子捕獲断面積とピグミー双極子状態にスポットをあてることにした。

２．研究の目的

地球・太陽系上には約 100 種類の元素が存在し、そのすべてが宇宙の進化に伴い生成されてきた。ビックバン直後には水素やヘリウムといった軽い元素のみが作られ、星の進化によって鉄程度の中重核が作られた。鉄からウランにいたるまでの多数の元素は超新星爆発中に起こるｒ過程と呼ばれる合成過程で生成され、宇宙空間にばらまかれたと考えられている。ｒ過程では爆発が作り出す高温・高密度の環境によって中性子捕獲反応が連鎖的に起こり、瞬時にウランにいたるまでの原子核が誕生したとされている。このｒ過程を調べることは元素の起源を解明することに必要不可欠である。

これまで重い中性子過剰核は実験的研究を行うことはできず理論研究に頼ってきた。しかし理化学研究所 RI ビームファクトリーの完成により、人類はついに元素合成にかかわる中性子過剰核を人工的に作りあげることが可能となった。

r 過程で最も重要となる核データは核の寿命と中性子捕獲断面積である。また、最近では中性子過剰核の低励起エネルギー領域に現れるピグミー双極子状態の有無によって、その後の元素合成が大きく左右されるという報告がされている。ピグミー双極子状態があればそれだけ中性子捕獲断面積が増えるはずであり、この関係を明らかにすることが求められている。そこで本研究では RI ビームファクトリーの大強度中性子過剰核ビームを用いて様々な中性子過剰核の中性子過捕獲断面積およびピグミー双極子状態を一挙に測定することを目標としている。例えば、中性子捕獲断面積に関する実験では、100kcps のトリガーレートでデータ収集ができれば、100 核種測定するのに必要な時間は 10 日で済んでしまう。今まで不安定核実験では 1kcps 程度で実験を行ってきが、RI ビームファクトリーの大強度ビームを生かすために 100kcps トリガーに耐えうる超高速のデータ収集システムの構築が必要となる。

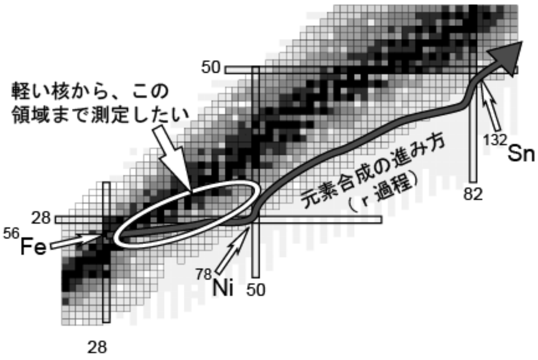
３．研究の方法

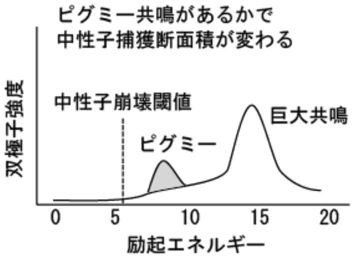
中性子捕獲断面積を測定する手法としては、安定核の場合は中性子ビームを対象核に照射しγ線を検出する(n, γ)反応が直接的である。逆にγ線を照射し放出中性子を測る(γ,n)反応は　　(n, γ)の逆過程であり、この断面積からも中性子捕獲断面積を得られる。寿命が短い不安定核を用いた実験の場合はクーロン分解反応を用いる。この手法は鉛などクーロン力が強い標的に不安定核を照射することにより、仮想光子によって(γ,n)反応を大断面積で引き起こすことができる。

中性子捕獲断面積の測定ではこのクーロン分解反応を採用する。例えば 68Ni を測定する場合 68Ni(γ,xn)67Ni,66Ni,65Ni といった出射粒子が入射 68Ni より軽い Ni 同位体の生成断面積を足し上げればよい。しかしこの反応で同時にピグミー双極子状態も得ようとすると、放出される多数の中性子を同時測定する必要があり、当然実験装置は巨大なものとなり核データ収集効率は悪い。そこでピグミー双極子状態を効率的に測る方法として(γ, γ')反応を用いる。これは例えば 68Ni の場合、68Ni(γ, γ')68Ni という反応式となり、入出射 68Ni 粒子および放出γ線を同時測定すればよい。ピグミー双極子状態は中性子崩壊閾値より上に現れるため（閾値エネルギーにも依存するが）99%は中性子崩壊する。しかし約 1%程度はγ線を放出し基底状態へ脱励起する。このγ線崩壊率は直接崩壊による崩壊率と複合核状態からの崩壊率の合計となる。直接崩壊部は光子吸収断面積に比例した量であり、これは和則から求まる。一方で複合核状態からのγ線崩壊は統計モデルに従う。トータルとして鉄～ゲルマニウムの中重核領域ではピグミー双極子状態からのγ線崩壊は 0.8～1.2%となる（0.8%は閾値エネルギーが 5MeV、1.2%は閾値エネルギーが 0.5MeV の場合)。この崩壊確率の場合 100kcps ×0.1 日データを測ればピグミー双極子状態を十分な量得られる。

本研究では Be～Mg といった軽い核から鉄～ゲルマニウムまでの核種についての測定を目指している。ｒ過程において特に注目されている核は 2 重魔法数をもつ 78Ni および 132Sn である。78Ni の場合 2 重魔法数を持つが故に 78Ni→79Ni という中性子捕獲が起こりにくいと考えられている（ウェイティング

ポイント)。しかし実際に 78Ni まで r 過程で到達できるかは、56Fe から 77Ni までの中性子捕獲断面積に依存しており、この領域で中性子捕獲断面積とピグミー双極子状態の関係を系統的に調べることは非常に重要なことである。また、本研究の有効性を示した上でさらに A=100 の領域、A=150 領域といったように次々と核データ収集を行っていきたい。





４．研究成果

本研究では、RI ビームファクトリーの大強度中性子過剰核ビームをもて余すことなく核データ収集を行うために高速データ収集システムの開発を行った。また、ピグミー双極子状態からのγ線を測定するために大型高エネルギーγ線検出器の開発を行った。

○高速データ収集システムの開発

本研究開始時点で、RI ビームファクトリーでのデータ収集系(発表論文 4 参照)のボトルネックは、20 年来使われてきた古典的な ADC 等の処理速度であった。当時は 1 イベントあたり 200μs の処理時間がかるため、2kcps のトリガーレートまでしか対応できなかった。本研究では最大 100kcps トリガーでの実験を想定し、1 イベントあたりの処理時間を 4us におさめるための開発を行った。方針は、

１．TDC に Delay Line のものを使う

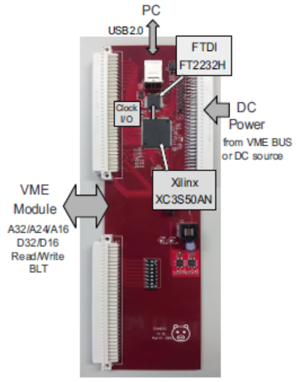
これは近年 KEK や CERN で用いられているもので、入力信号と TDC 内部クロックの AND を取りバッファへ保存するという方法であり、AD 変換にデッドタイムが生じないのが特徴である。時間分解能としては 50ps を実現しており、TOF や位置情報を得るのに十分である。

２．電荷量検出には QTC モジュールを使う

QTC は電荷量を時間差に変換するものであり最近カミオカンデ実験で採用された。ダイナミックレンジが 0～2000pC と広く、また 500ns 程度で変換可能である。したがってプラスチックシンチレータやγ線検出器の信号を QTC へ通せば上記 TDC と組み合わせて高速でかつ広ダイナミックレンジでデータ収集可能である。

３．ADC/TDC モジュール毎に読み出しコントローラを用いる

一般的に用いられる VME 規格の ADC/TDC モジュールから 1 データを取得するために、ブロック転送を用いた場合 0.2us 時間がかかる。このデータ転送時間の他に、VME コンピュータが応答する時間(約 20us)がかかり、1 イベント毎にコンピュータを用いて読み出し処理をしていては処理時間がかかりすぎる。そこで本研究では、安価に VME 規格の ADC/TDC からデータ読み出しができる FPGA を用いたコントローラを開発した(下図、発表論文 2 参照)。



この読み出しコントローラではコンピュータの代わりに FPGA を用いることで 20us かかっていた応答時間を 0.02us まで短くすることに成功した。これにより、イベント毎にデータ読み出しを行っても応答時間を無視することが可能となった。また、この読み出しコントローラは原価 2 万円であり、一般的な VME コンピュータにくらべて圧倒的なコストパフォーマンスである。

このように 1～3 を組み合わせることにより最大 100kcps トリガーでの実験に耐えうる高速データ収集システムを開発することができた。通常の RI ビームファクトリーでの実験では最大 10kcps トリガーで十分なため、定常的には 1 および 2 を積極的に用いて実験を行っている。

○大型高エネルギーγ線検出器

ピグミー双極子状態を測定するために必要な大型γ線検出器を開発した。ピグミー双極子状態からの放出γ線は 0.3MeV～10MeV までの広いエネルギー範囲を測定する必要があり、またドップラーシフトの影響をうける

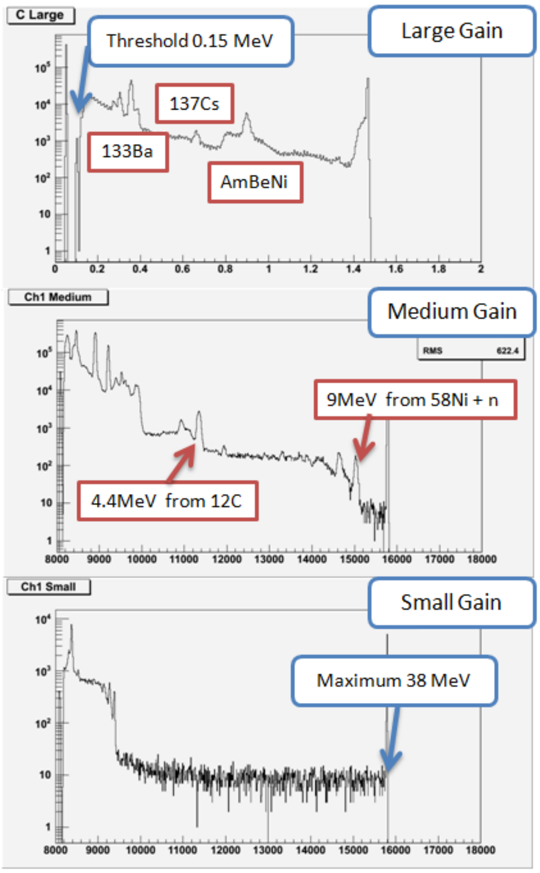
ため、位置情報取得可能かつ高分解能の高エネルギーγ線を検出できる新しい検出器が必要となる。高エネルギーγ線向けの検出器としては BGO、GSO 結晶が代表的であるが、分解能は良くない。中エネルギー領域（～2MeV）では NaI 結晶が程良い分解能を持っているが、比重か軽いため高エネルギーγ線に対して検出効率が非常に悪い。最近ではエネルギー分解能が良い LaBr が注目を集めており、原子核実験のみならず医療（PET）の分野でも利用が広まりつつある。LaBr は他の結晶と比較して価格が高いのが問題であるが、本研究を遂行するにあたり LaBr 以外に必要条件を満たす検出器はない。LaBr のメリットは以下のとおりである。
・比重が重く大型の結晶も作れる（→高エネルギーγ線に対する検出効率が高い）
・分解能が良い（→BGO、GSO に対して 3 倍、NaI に対しても 2 倍程度分解能が良い）
・信号が早い（→BGO の蛍光減衰時間が 300ns に対し LaBr は 20ns 程度であり高係数率に適応）
ピグミー双極子状態からのγ線は、高速の約60%で飛行している粒子から放出されるので角度分布は前方に集中する。その時、ドップラーシフトの影響をうけるため、要求される分解能によってはγ線入射位置情報を取得する必要がある。こうした条件のもと、本研究では 3 インチφ×6 インチの LaBr 結晶を用いて位置感応型の大型高エネルギーγ線検出器を開発した（下写真）。

この検出器では位置情報取得のため両端に光学面を持っており、光量差から位置情報を取得できる工夫がしてある。また、マルチアノードの光電子増倍管を用いれば三次元的な位置情報も取得可能である。

この開発した大型高エネルギーγ線検出器と同型の検出器を用いたテスト実験の結果を右図に示す。ここでは前述の QTC モジュールを用い、分解能およびダイナミックレンジの確認を行った。γ線源としては 133Ba、137Cs を用いた。また高エネルギーγ線として Am+Be の中世線源からの熱中性子を Ni に照射し、その中性子捕獲時にでる 9MeV のγ線を用いた。同時に 9Be+alpha→12C+n の 4.4MeV γ線も測定されている。

QTC モジュールでは 1 つの入力に対し 3 つの異なる Gain 出力があり、下図ではスペクトルが 3 つにわかれている。この実験の結果、QTC モジュールを用いて 0.15MeV～38MeV という必要十分なダイナミックレンジを達成していることが確認された。

この開発はイタリア INFN Milano の A.Bracco 教授、F. Camera 準教授、O. Wieland 研究員と協力して進めた。



○核データ収集

開発した高速データ収集システムを用いて中性子過剰核の中性子捕獲断面積に関連する実験が行われた。特に 14Be, 18B, 19B, 21C, 22C, 26F, 27F, 27Ne, 28Ne といった軽い核の中性子崩壊の断面積が測られている（雑誌論文 1,3 参照）。これら測定は主に東京工業大学と理化学研究所の研究グループによって行われている。今後は大型高エネルギーγ線検出器を組み合わせて 20,22,240、70,72Ni およびその周辺核を対象として中性子崩壊断面積およびピグミー双極子状態の測定を予定している

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 3 件）
1. N.Kobayashi, T.Nakamura, J.A.Tostevin, Y. Kondo, N.Aoi, H.Baba, S.Deguchi, J. Gibelin, M.Ishihara, Y.Kawada, T.Kubo, T.Motobayashi, T.Ohnishi, N.A.Orr, H.Otsu, H.Sakurai, Y.Satou, E.C.Simpson, T.

Sumikama, H.Takeda, M.Takechi, S.Takeuchi, K.N.Tanaka, N.Tanaka, Y.Togano, K.Yoneda、One- and two-neutron removal reactions from the most neutron-rich carbon isotopes、Phys.Rev. 、査読有、C 86, 054604 (2012)

2. H. Baba, T. Ichihara, T. Ohnishi, S. Takeuchi, K. Yoshida, Y. Watanabe, S. Ota, and S. Shimoura、Development of mountable controller for VME modules 、 RIKEN Accelerator Progress Report 2011、査読有（紀要)、 p.ix (2012)

3. N. Kobayashi, T. Nakamura, Y. Kondo, N. Aoi, H. Baba, S. Deguchi, N. Fukuda, G. S. Lee, H. S. Lee, N. Inabe, M. Ishihara, Y. Kawada, R. Kanungo, T. Kubo, M. Famiano, M. Matsushita, T. Motobayashi, T. Ohnishi, N. A. Orr, H. Otsu, R. Barthelemy, H. Sakurai, S. Kim, T. Sako, T. Sumikama, Y. Satou, K. Takahashi, H. Takeda, S. Takeuchi, R. Tanaka, N. Tanaka, Y. Togano, and K. Yoneda、Inclusive breakup cross sections of the neutron-rich nuclei 29Ne,33,35,37Mg, and 39,41Si 、 RIKEN Accelerator Progress Report 2011、査読有（紀要)、p.6 (2012)

4. H. Baba, T. Ichihara, T. Ohnishi, S. Takeuchi, K. Yoshida, Y. Watanabe, S. Ota, S. Shimoura、New data acquisition system for the RIKEN Radioactive Isotope Beam Factory、Nuclear Instrum. And Meth.、査読有、616, 65, (2010)

〔学会発表〕(計１件)
H. Baba、Off-line event building、Advanced School and Workshop on Nuclear Physics Signal Processing、2011年11月23日、イタリア、Acireale

６．研究組織
(1)研究代表者
馬場　秀忠 (BABA HIDETADA)
独立行政法人理化学研究所・情報処理技術チーム・仁科センター研究員
研究者番号：１０４１５２６８

(2)研究分担者
　なし
(3)連携研究者
　なし
(4)研究協力者
Milano大学 A.Bracco教授、Milano大学 F. Camera 準教授、INFN Milano 研究所 O. Wieland研究員