

平成 29 年 度

京都大学大学院理学研究科

修士課程

修士論文アブストラクト

(平成30年2月1日、2日)

物理学 第二分野

# 修士論文発表会

日時 平成30年2月1日(木)9時～  
2月2日(金)9時～  
場所 理学研究科5号館 525号室  
発表時間 15分+5分(質問)

---

---

## 《目次》

2月1日(木)

1. 電子・陽電子対測定のための鉛ガラスカロリメータの開発 足利 沙希子(9:00)
2. 時間-エネルギー同時測定検出器系の開発と放射光メスbauer吸収分光法への応用 石橋 宏基(9:20)
3. 大規模流体計算のためのTemporal Blockingと相性のよい高精度メッシュ陽解法スキームの開発と検証 石原 陽平(9:40)
4. 原子核内におけるベクター中間子質量測定のためのトリガー中継モジュール開発 市川 真也(10:00)
5.  $^{24}\text{Mg}$ におけるアルファ凝縮状態探索実験のためのTPCの開発と性能評価 稲葉 健斗(10:20)
6. J-PARC MR加速器における16電極モニターの処理回路・データ取得システムの開発 宇野 亘(10:40)
7. AdS/CFT対応におけるEntanglement EntropyとEntanglement of Purification 梅本 滉嗣(11:00)
8. レプトン数対称性としての、PQ 対称性に関する研究 大島 隆弘(11:20)

9. LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けたミューオントリガーの改良とハードウェアへの実装 岡崎 佑太(11:40)

.....午後.....

10. 変形された Jackiw-Teitelboim 模型 における 重力解 奥村 傑(14:00)

11. 超新星残骸 W28 における過電離プラズマの成因と鉄輝線の検出 尾近 洸行(14:20)

12. 古典重力双対を持つ共形場理論の理解 楠亀 裕哉(14:40)

13. ABJM行列模型における2点関数の解析 久保 尚敬(15:00)

14.  $\Xi$ ハイパー核精密分光実験に向けたアクティブ標的の開発 越川 亜美(15:20)

15.  $^{10}\text{Be}$ における低エネルギー双極子励起モードの研究 四方 悠貴(15:40)

16. 粒子軌道に基づくダークマターハロー位相構造の解析 杉浦 宏夢(16:00)

17. Lorentz型経路積分による宇宙の波動関数 杉田 強(16:20)

18.  $^{12}\text{C}$ 原子核における稀ガンマ崩壊モードの探索実験 高橋 祐羽(16:40)

2月2日(金)

19. 制動放射  $\gamma$  線を用いた $^{18}\text{F}$ 及び $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  医療用放射性同位元素の製造に関する研究 武田 朋也(9:00)
20. 次世代広帯域X線撮像分光衛星に向けた X線SOIピクセル検出器多層化システムの開発 立花 克裕(9:20)
21. Micro Pixelガス検出器の高計数率化および 高利得化の研究 谷口 幹幸(9:40)
22. 二重ベータ崩壊探索実験AXELのための MPPCのキャリブレーションシステムの開発 中村 和広(10:00)
23. 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける 充填ガスの改良とガス純化システムの開発 中村 優太(10:20)
24. 次世代ガンマ線天文台 CTA 大口径望遠鏡用 GHz 波形サンプリング回路の性能評価 野崎 誠也(10:40)
25. カイラルゲージ理論の非摂動的定式化の研究 濱田 佑(11:00)
26. X線天文用SOIピクセル検出器の大面积化と イベント駆動読み出しの評価 林 秀輝(11:20)
27. フェムト秒レーザー予備照射金属のアブレーションに 関する研究 古川 雄規(11:40)

.....午 後.....

28. 中性子照射放射化法による原子分解能メスbauer 分光法の開発研究 細川 修一(13:00)
29. グラズマの熱化に伴うフォン・ノイマンエントロピー生成 松田 英史(13:20)

- 30 . 質量欠損分光のための多芯式ドリフトチェンバー  
読み出し系の開発 松本 翔汰(13:40)
- 31 . Distance between configurations in MCMC  
simulations and the emergence of AdS geometry 松本 信行(14:00)
- 32 . 極短パルスレーザーを用いたレーザーイオン源における  
ガス密度測定 宮脇 瑛介(14:20)
- 33 . スーパーカミオカンデにおける超新星爆発観測用DAQの  
開発と遠い超新星爆発探索の最適化 森 正光(14:40)
- 34 . 積分経路の変分による符号問題の最適化 森 勇登(15:00)
- 35 . ニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊探索に向けた高圧Xe  
ガスTPC AXELのための高電圧ドリフト電場形成の研究 吉田 将(15:20)
- 36 . LEPS2実験のための2 m長 高抵抗板検出器の開発 渡邊 憲(15:40)
- 37 レーザーイオン化法の導入に向けたガスジェット輸送  
模擬装置の改良 小川 雄司(16:00)

# 電子・陽電子対測定のための鉛ガラスカロリメータの開発

原子核ハドロン研究室

足利 沙希子

**Abstract** A lead-glass calorimeter is used to identify electrons for di-lepton measurement in the J-PARC E16 experiment. The performance of one module is evaluated with electron and pion beams. In this thesis, the results of research and development of the calorimeter is described.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

高強度陽子加速器施設 J-PARC において原子核中で軽いベクター中間子である  $\rho$ 、 $\omega$ 、 $\phi$  中間子を生じ、その電子対への崩壊を利用して核媒質中での質量スペクトルを測定する実験 (J-PARC E16 実験) が計画されている [1]。レプトンである電子を利用した測定を行うことにより、強い相互作用の影響を受けず、核媒質中の中間子の状態を直接測定することが可能である。J-PARC E16 実験においては、高統計の測定を行うために大角度を覆うスペクトロメータを建設し、高強度陽子ビームを利用するため、高計数率に耐えうる検出器の開発が不可欠である。

測定においては、ベクター中間子の電子対への崩壊の分岐比が  $\sim 10^4$  と非常に小さく、また、 $\pi$  中間子が電子の 100 倍程度バックグラウンドとして存在することから、 $\pi$  中間子を電子として誤認することが大きな問題となる。従って、電子検出効率を高く保つと同時に、高確率で  $\pi$  中間子を棄却することが重要である。J-PARC E16 実験では、電子識別に鉛ガラスカロリメータを使用する。鉛ガラスカロリメータは鉛ガラスを輻射体として用いた電磁カロリメータであり、電子検出に対する感度が非常に高い。一方、 $\pi$  中間子をはじめとしたハドロンに対する応答は電子に比べ非常に弱いため、閾値の設定によって電子検出効率とその時の  $\pi$  中間子棄却率を主体的に選択できることが大きな特徴である。J-PARC E16 実験で使用される鉛ガラスカロリメータの性能としては、90% の電子検出効率を保った際に 95% の  $\pi$  中間子を棄却可能であると見積もられており、この性能を高計数率の環境下で達成することを目標としている。



Fig.1 A module of the lead-glass calorimeter.

高計数率耐性を実現するため、セグメントを細分化し (Fig. 1)、1 セグメントあたりの計数率を 1MHz 程度に抑える。1 セグメントは  $\sim 150\text{mm}$  四方の大きさの鉛ガラスを使用し、光電子増倍管で光を検出する。また、光電子増倍管はスペクトロメータ中での磁場の影響を考慮し、磁場耐性の高い fine mesh タイプのものをを用いる。信号の読み出しにはアナログメモリ ASIC である DRS4 チップ [2] を使用した DRS4 FADC モジュールを使用し、1GHz で波形取得を行うことでパイルアップした信号を波形解析し能動的に識別する。

本修士論文ではこの鉛ガラスカロリメータ 1 セグメントについて電子と  $\pi$  中間子に対する応答の粒子入射位置・角度依存性を詳細に評価し、 $\pi$  中間子棄却率の粒子入射条件依存性と電子検出効率との関係性を評価した (Fig. 2)。また、シミュレーションとの比較も行い、カロリメータの性能の粒子運動量依存性の評価についても報告する。これらの結果よりカロリメータ全体の設計を決定し、実機的设计を行なった。

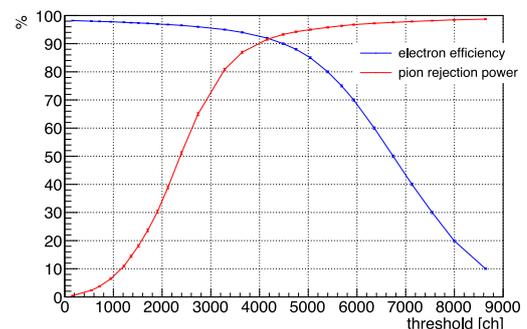


Fig.2 The relation between electron efficiency and pion rejection power.

## References

- [1] S. Yokkaichi et al., J-PARC proposal No.16 [http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac\\_0606/pdf/p16-Yokkaichi\\_2.pdf](http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_0606/pdf/p16-Yokkaichi_2.pdf) (2006).
- [2] Stefan Ritt. Design and performance of the 6 GHz waveform digitizing chip DRS4. In Nuclear Science Symposium Conference Record, 2008. NSS '08. IEEE, pp.1512–1515, October 2008.

# 時間-エネルギー同時測定検出器系の開発と 放射光メスbauer吸収分光法への応用

核放射物理学研究室 石橋宏基

**Abstract** We have developed a fast detector system with simultaneous acquisition of time and energy information for synchrotron-radiation-based Mössbauer spectroscopy. This method enables us to obtain the Mössbauer spectra by discrimination of nuclear resonant scattering from electron scattering in an arbitrary time window. Simultaneously, we developed an acquisition system in order to measure the energy-resolved Mössbauer spectra by choosing a certain energy window.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

原子核の無反跳共鳴現象(メスbauer効果)は物質中の元素(同位体)を特定した磁性や電子構造の測定に非常に有効な手法として様々な分野の研究で精力的に利用されている。一方、1980年代より電子加速器を利用した放射光科学が急速に発展しており、我が国でも1997年より第3世代放射光施設SPRING-8が稼働を始めるようになった。我々はこれまでにSPRING-8でメスbauer効果と深く関連した実験手法である核共鳴散乱法を用いた研究を行っており、最も応用が期待されている手法の一つが放射光メスbauer吸収分光法である。この手法は放射光を用いて測定試料のメスbauer核を励起し、その先に配置した散乱体試料にドップラー速度を与えることでエネルギー分光を行うものであり、これまで適切な放射性同位体が存在しないためにメスbauerスペクトル測定が困難だった核種にも対応出来るようになった。

放射光メスbauer吸収分光法では、試料による核共鳴散乱を観測することによってメスbauerスペクトルを測定するが、放射光の照射により核共鳴散乱だけでなく電子による散乱も生じるため、観測されたシグナルから核共鳴散乱部分と電子散乱部分を区別する必要がある。従来はVETO回路により放射光の入射と同時に起こる電子散乱部分をあらかじめ除去してから核共鳴励起によって生じる時間遅れ成分だけをカウントする回路で測定していた。それに対して、高速MCS(Multi Channel Scaler)を用い、シンクロトロンRF信号をスタート信号として全ての散乱による信号を時系列に記録することで、時間スペクトルをドップラー速度毎に測定する回路系を本研究で構築した。それによって任意の時間領域で、電子散乱部分と核共鳴散乱部分をMCSの時間分解能0.1 ns単位で決定できるようになり、核共鳴散乱部分をロスすること無く測定終了後に最適なメスbauerスペクトルを構成できるようになった(Fig. 1)。また、ATC(amplitude to time converter)と呼ばれる、入力された波高に比例して時間が遅れて出力されるモジュールを介して、MCSに入力する事で時間情報と同時に波高(エネルギー情報)を記録する回路(Fig. 2)を構築した。これにより、核共鳴散乱の時間と波高の二次元データを抽出することができるようになり、エネルギー弁別したメスbauer分光法への応用が可能になった。

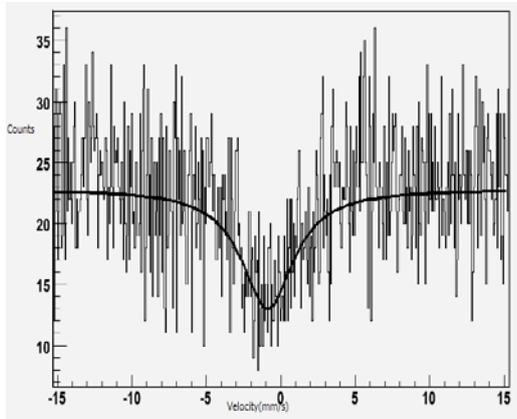


Fig. 1. Measured  $^{151}\text{Eu}$ -Mössbauer spectrum.

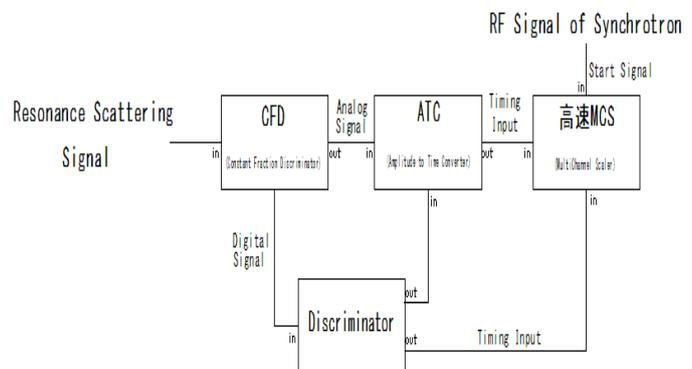


Fig. 2. Schematic diagram of the system for simultaneous acquisition of time and energy information.

# 大規模流体計算のためのTemporal Blockingと相性のよい高精度メッシュ陽解法スキームの開発と検証

基礎物理学研究所 石原 陽平

**Abstract** We present a fourth-order accuracy numerical scheme worked well with temporal blocking. For shock capturing, we use a tensor form of von-Neumann-Richtmyer artificial viscosity. We solve the shock tube problem and the point expansion problem by the scheme.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

年々計算機の性能は向上している。現在世界最高の性能を持つスパコンでは、1秒におよそ $10^{17}$ 回の浮動小数点演算が可能になっている。しかし、CPUの演算速度の向上に比べメモリのアクセス速度はそれほど向上していない。計算機のメモリ転送性能の指標となるB/F (Byte per Flops) は年々減少する傾向にある。先端のスパコンではB/Fは0.1より小さい。その結果、演算回数に対してメモリアクセスが多い(つまり、B/Fが大きい)アプリケーションはメモリアクセスがボトルネックとなり計算機の性能を十分に引き出すことができない。

偏微分方程式の陽解法のB/Fを小さくする手法としてTemporal Blockingというものが知られている[1]。偏微分方程式の陽解法では、ある点を1ステップ更新するときその点のまわりの点の情報を参照して次の値を計算する。以下では、1格子点の量を更新するときに必要なまわりの格子点の数を袖サイズと呼ぶ(図1での $N_s$ )。Temporal Blockingはキャッシュを活用し時間方向にブロッキングすることでB/Fを下げる手法であり、ブロッキングする段数が多いほどB/Fを小さくできる。ブロッキングできる段数はスキームの袖サイズと計算機のキャッシュの大きさによって決まり、袖サイズが小さいほどブロッキングできる段数が多くなる。そのためTemporal Blockingを十分に活用するには袖サイズの小さなスキームが必要とされる。

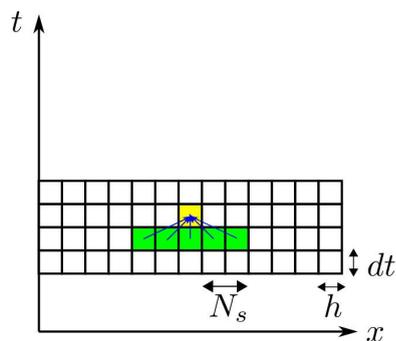


Fig. 1. Image of stencil computation.

本研究の目的は、先端の計算機での大規模な流体計算(惑星形成における乱流場のDirect Numerical Simulationや太陽全球の対流計算など)を念頭に置き、Temporal Blockingを活用できる袖サイズの小さい高精度メッシュ陽解法スキームを作成することである。既知の袖サイズの小さい高精度メッシュ陽解法スキームとしてIDO法[2]がある。IDO法は袖サイズ1で4次精度のスキームであるが、多次元での定式化には成功していない。一方で、多次元でも定式化されている4次精度スキームとして4次中心差分と4次ルンゲクッタ法の組み合わせがあるが、このスキームの袖サイズは8である。本研究では、多次元で使用できる4次精度スキームで、できる限り袖サイズが小さいものの開発を目指す。

本研究では、4次中心差分と4次PEC (Predict-Evaluate-Correct) 法を組み合わせ、4次精度で袖サイズ2のスキームを開発した。このスキームを開発する中で、CIP法やIDO法のような空間導関数を保持するスキームでは、次数にコンシステントな空間高次化を行った場合、斜め方向の衝撃波で数値不安定が起こることを示した。このスキームでは、IDO法と同様に人工粘性を用いて衝撃波を扱う。1次元ではvon-Neumann-Richtmyer型の人工粘性を使用し、多次元ではそれをテンソル化した人工粘性を使用して定式化した。そして衝撃波管問題と点源爆発問題を使ってこのスキームの実用性を検証した。

## References

- [1] T.Muranushi and J.Makino, In Procedia Computer Science **51**, 1303-1312 (2015).
- [2] T.Aoki, Computer Physics Communications **102**, 132-146 (1997)

# 原子核内におけるベクター中間子質量測定のための トリガー中継モジュール開発

原子核ハドロン物理学研究室 市川真也

**Abstract** An experiment to measure an invariant mass of vector mesons in nuclear medium is planned as the J-PARC E16 experiment. We reconstruct the invariant mass of detecting electron positron pairs produced in decays of vector mesons. We use a trigger merging module to deal with a large number of trigger channels. In this thesis, the development and the result of performance test of the module are described.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

我々は、J-PARC 高運動量陽子ビームラインにおいて、原子核内におけるベクター中間子の質量測定を行う[1]。本実験では、30GeV p+A 反応によって原子核標的中にベクター中間子を生成する。そして、その崩壊によってできた電子・陽電子対の運動量から、不変質量法によって元の中間子の質量を再構成する。原子核密度中でのハドロン質量スペクトルは、真空中と比較して変形が起こることが理論的に予測されている[2, 3]。本実験の前身である KEK E325 実験では、質量分解能約  $11\text{MeV}/c^2$  で測定を行い、質量の減少傾向を観測した[4]。本実験では質量分解能約  $8\text{MeV}/c^2$  の下で E325 の百倍の統計量を収集し、質量変化に関する確定的な情報を得る。

実験に用いる検出器群は反応点の実験室系での前方領域を覆うように設置し、運動量測定のための飛跡検出と電子識別を行う (Fig. 1)。トリガーに用いるチャンネル数は約 2,500 チャンネルと多く、直接一つのモジュールで受信することはできない。そのためトリガーを決定するモジュールの前段に、トリガーを中継するモジュールを設置することとした。

トリガー中継モジュールは本実験のために新作されたモジュールであり、LVDS 信号の入力コネクタ、データ処理を行う FPGA チップ、SFP+ と呼ばれる光トランシーバーからなる (Fig. 2)。このモジュールでは、1 モジュールあたり 256 チャンネルの LVDS 信号から粒子検出の時間情報を取得し、シリアルライズして後段モジュールへと送信する。

本研究では、FPGA のファームウェアを開発し、入力部分と合わせた性能評価を行った。評価は時間分解能、積分非直線性、微分非直線性、Double Pulse Separation、Minimum Pulse Width について行い、いずれも実験に十分な性能が得られていることを示した。また、実験でモジュールへ入力される信号についてシミュレーションを行い、ファームウェアで採用しているロジックのレート耐性について考察した。

本論文では、トリガー中継モジュールのファームウェア実装、性能評価、シミュレーションの詳細について述べる。

## References

- [1] S. Yokkaichi *et al.*, J-PARC E16 proposal.
- [2] T. Hatsuda and S.H. Lee, Phys. Rev. C **46**, R34 (1992).
- [3] P. Gubler and W. Weise, Nucl. Phys. A **954**, 125-148 (2016)
- [4] R. Muto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 042501 (2007).

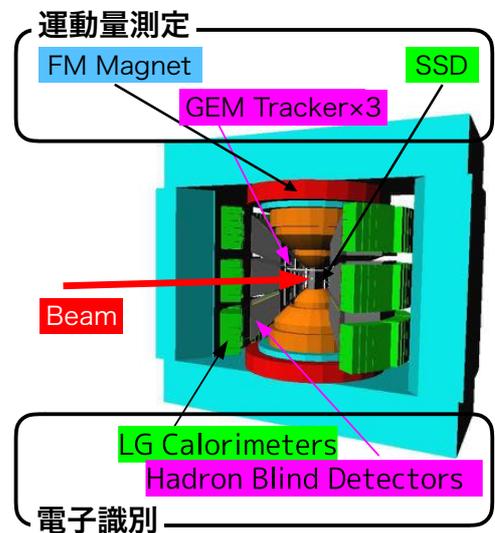


Fig. 1: The design of detectors



Fig. 2: trigger merging module (P+)

# $^{24}\text{Mg}$ におけるアルファ凝縮状態探索実験のための TPC の開発と性能評価

原子核・ハドロン物理学研究室 稲葉 健斗

**Abstract** Since alpha-condensed states are related to low-density nuclear matter and to astrophysical phenomena such as neutron stars or supernovae, it is very important to examine the condensed states. In the present work, we developed and tested a new time projection chamber (TPC) to search for alpha-condensed states, especially in  $^{24}\text{Mg}$ .

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

超新星爆発や中性子星といった天体現象の理解のためには、原子核物質の広範囲な密度領域における振る舞いについての理解が欠かせない。しかし、通常の原子核においては密度が標準核子密度付近 ( $\rho_0 \sim 0.17 \text{ fm}^{-3}$ ) で飽和しているため、実験的に得られてきた核物質に関する知見は、標準核子密度付近に限定されている。しかし、近年の理論計算によると、原子核の励起状態には  $\alpha$  凝縮状態と呼ばれる特異な低密度状態が発現するとの指摘があり、 $\alpha$  凝縮状態の性質を明らかにすることで低密度核物質の物性への洞察が得られると期待されている。本研究では、 $^{24}\text{Mg}$  原子核の  $\alpha$  凝縮状態に着目して、これを探索する実験に必要な Time Projection Chamber (TPC) の開発と性能評価を行った。TPC は荷電粒子の飛跡を 3 次元的に構築できるガス検出器であり、 $^{24}\text{Mg}$  から崩壊粒子を広い角度範囲にわたって測定することが可能である。また、 $\alpha$  凝縮状態の同定のために、TPC による崩壊粒子測定と同時に、RCNP の高分解能スペクトロメータ (Grand Raiden) を用いて  $^{24}\text{Mg}$  の励起エネルギーの測定を行う。凝縮状態を精度よく同定するためには、着目する事象を十分な統計で測定し、それ以外のバックグラウンドをできるだけ低減する開発が必要となる。本研究では以下の 2 つに注目して TPC の開発を行った。

- ① バックグラウンド削減のための水素ガスで運用可能な条件の探索
- ② 高レートビーム耐性獲得のためのビームマスクの開発

①について、水素ガスを用いて TPC を運用することは物理的なバックグラウンドを減らすという点で重要である。しかし、水素ガスはガス増幅率が小さいため、今まで我々が使用してきた TPC では  $\alpha$  線源からの信号を確認することができなかった。そこで、我々は増幅機構として用いている Gas Electron Multiplier (GEM) を多段に重ねて使用することで増幅率の向上を図り、Fig. 1 に示すように 1 気圧の水素ガスを用いて線源から放出される  $\alpha$  線の飛跡を測定することに成功した。さらに、純粋な水素の他にも複数のガスで、増幅電圧とともに増幅率がどう変化していくかについての試験を行った。

②について、注目する事象を十分な統計で測定するためには、 $10^{10}$  cps 程度の高レートビームを使って実験を行う必要がある。通常 TPC を安定に運用することのできるビームレートは  $10^6$  cps 程度であるため、ビームによる電離電子を不感にするマスクを導入することによって、TPC 内に入射できるビームレートを向上させる必要がある。そこで、本研究では Fig. 2 に示すようなマスクを備えた新しい TPC のドリフトケージを開発し、 $\alpha$  線源からの信号を不感とできるかの否かの確認を行った。

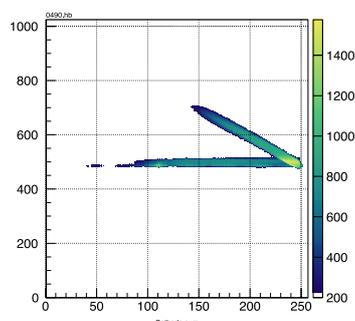


Fig. 1. Images of tracks of collimated alpha source in pure  $\text{H}_2$  gas at 1 atm.

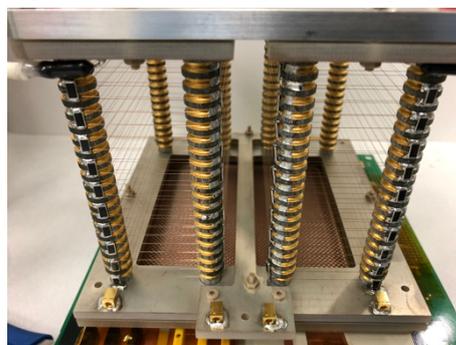


Fig. 2. New TPC drift cage with the mask to screen out electrons along primary beam trajectories..

# J-PARC MR 加速器における 16 電極モニターの処理回路・データ取得システムの開発

高エネルギー物理学研究室 宇野 亘

**Abstract** A new beam monitor with 16 electrodes was installed at J-PARC Main Ring in 2016 to measure beam moments. In this study, I developed the algorithm to calculate beam moments from the data. I made its processing circuit with ADC and FPGA. In addition, I developed the data acquisition system.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

長基線ニュートリノ振動実験 T2K では、茨城県東海村の加速器 J-PARC で生成したニュートリノビームを使い、ニュートリノ生成点から 280m 先の前置検出器と 295km 先の後置検出器(スーパーカミオカンデ)でニュートリノを観測することにより、ニュートリノ振動の観測を行い、ニュートリノ振動のパラメータの測定を行っている。特に、現在、ニュートリノと反ニュートリノでの振動確率の違いを測定することにより、レプトンでの CP 対称性の破れを  $3\sigma$  で発見することを目標としている。この目標を達成するため、測定精度の向上が必要であるがそのためにはニュートリノビームを増強しニュートリノイベントの観測数を増やすことによって測定における統計誤差を削減する必要がある。

ニュートリノビームの増強のために J-PARC 加速器の出力を現状の 475kW から 750kW へのパワーアップが計画されている。そのために、加速器内でのビームロス削減が必要である。ビームロス削減の手段として J-PARC の最終段加速器である Main Ring の入射部分での mismatches を小さくすることが考えられている。入射 mismatches を測定するための検出器として 2016 年夏に 16 電極モニターが J-PARC MR 加速器にインストールされた。本研究では 16 電極モニターからの波形データからビームの横方向モーメントを算出する方法を考えた。また、そのアルゴリズムに従い、実際にモニターからのデータをリアルタイムで処理する回路を ADC と FPGA を用いて開発した。加えて、データ取得システムを整備した。これにより、16 電極モニターが文字通り、モニターとしての役割を發揮することが出来るようになり、加速器ビームのさらなる理解に繋がる。

本論文では、はじめにニュートリノ振動、T2K 実験、J-PARC について紹介したのち、16 電極モニターの詳細を述べ、波形データからビームのモーメントを算出する方法を示す。その後、製作した処理回路と性能について報告する。

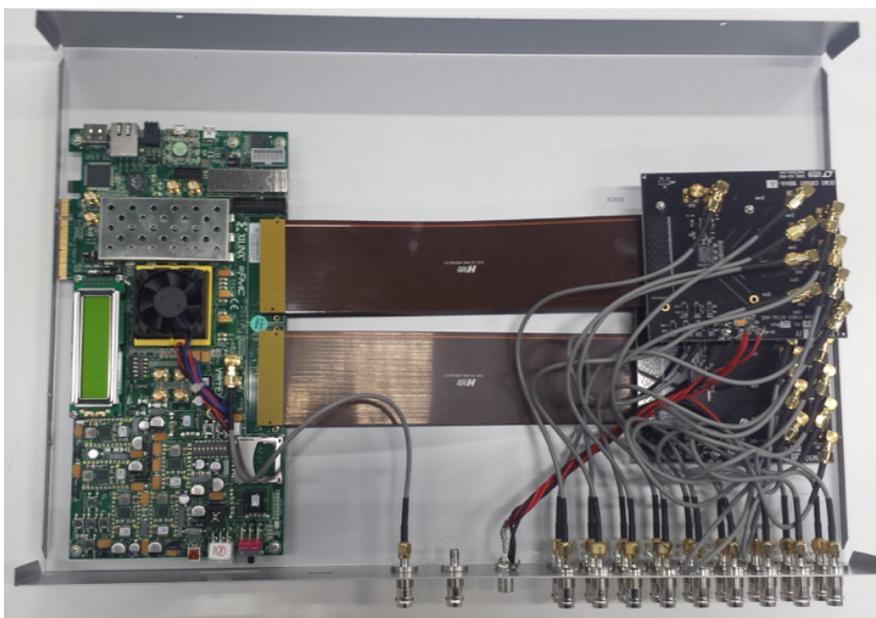


Fig.1. The processing circuit for the monitor

# AdS/CFT 対応における Entanglement Entropy と Entanglement of Purification

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 梅本滉嗣

**Abstract** We study the holographic entanglement entropy and mutual information on generic time slices in relativistic or non-relativistic field theories. We propose that a minimal cross section of entanglement wedge is dual to the entanglement of purification. This generalizes the Ryu-Takayanagi formula and predicts an information-theoretic feature of holographic conformal field theories.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

量子重力理論におけるホログラフィー原理は Bekenstein-Hawking によるブラックホールエントロピーの発見に促される形で提唱された。これは後に超弦理論の研究から具体的な models が多数発見され、現在では AdS/CFT 対応と呼ばれている [1]。AdS/CFT 対応は、D+1 次元 Anti de Sitter (AdS) 時空上の量子重力理論と、あるクラスの D 次元共形場理論 (holographic CFTs) が等価であることを主張する。この対応は AdS 時空と CFT のそれぞれの計算に基づいた数多の実証を持つ一方、その導出自体は発見的な方法に依っており、双対性が生じるメカニズムは現在解明が進められている。

AdS/CFT 対応の研究では、量子情報理論との融合によるアプローチが盛んに行われている。この嚆矢となったのが Ryu-Takayanagi 公式の発見である [2]。これは AdS 時空のある幾何学量と CFT のエンタングルメントエントロピーが等価であることを主張しており、後に AdS/CFT 対応の仮定の下で証明された [3]。Ryu-Takayanagi 公式は Bekenstein-Hawking 公式の拡張を与えており、これによりブラックホールエントロピーをエンタングルメントエントロピーの一例として理解することが可能になった。エンタングルメントエントロピーは純粋状態の量子相関を測る情報量であり、素粒子理論、宇宙論、物性理論などに幅広く現れる。この情報量は一般の量子系では計算の実行が困難であるが、Ryu-Takayanagi 公式を用いると、AdS 時空上のある超曲面の面積として比較的容易に求めることができる。我々は [4] において、Ryu-Takayanagi 公式の非静的な時空に対する拡張である Hubeny-Rangamani-Takayanagi 公式を応用して、holographic CFTs における Lorentz boost を受けた部分系に関するエンタングルメントエントロピーを導出した。その応用として、情報論的な相関測度の一つである相互情報量が時空の因果関係を反映することを示した。

AdS/CFT 対応において、時空全域の双対性ではなく、それぞれの部分的な時空領域に注目した双対性は subregion/subregion duality と呼ばれている。近年では、CFT の部分領域上の量子状態やそれに掛かる演算子の情報は、Ryu-Takayanagi 公式に現れる超曲面によって囲まれた“entanglement wedge”と呼ばれる AdS 時空の部分領域に対応すると考えられている [5]。その証拠の一つとして、量子誤り訂正符号の議論を援用することで、entanglement wedge 上の局所演算子は CFT の部分領域上の演算子のみから再構成できることが最近証明された。我々は [6] において、entanglement wedge に内在するある幾何学量 (最小断面積、entanglement wedge cross section) を新たに定義し、その性質に関して調査および証明を行った。それらの観察に基づいて、この幾何学量が entanglement of purification と呼ばれる量子・古典を合わせた相関を定量化する情報量と等価であることを提案した。これは Ryu-Takayanagi 公式の混合状態に対する相関測度への拡張になっている。さらにこの双対性の帰結として、holographic CFTs の相関は strong superadditivity と呼ばれるある種の量子性を満たすことを示した。

## References

- [1] J. M. Maldacena, *Int. J. Theor. Phys.* **38**, 1113-1133 (1999); *Adv. Theor. Math. Phys.* **2**, 231 (1998).
- [2] S. Ryu and T. Takayanagi, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 181602 (2006).
- [3] A. Lewkowycz and J. Maldacena, *J. High Energy Phys.* **08** (2013) 090.
- [4] Y. Kusuki, T. Takayanagi and K. Umemoto, *J. High Energy Phys.* **06** (2017) 021.
- [5] B. Czech, J. L. Karczmarek, F. Nogueira and M. Van Raamsdonk, *Class. Quant. Grav.* **29**, 155009 (2012).
- [6] T. Takayanagi and K. Umemoto, Preprint at arXiv:1708.09393 [hep-th] (2017).

# レプトン数対称性としての, PQ 対称性に関する研究

物理学第二教室 素粒子論研究室 大島 隆弘

**Abstract** We propose a model which explains the strong CP problem and the small neutrino mass. In our model, a colored fermion in the Peccei-Quinn mechanism is identified as a mediator in the radiative seesaw model, and the large seesaw scale causes the Peccei-Quinn symmetry breaking.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

素粒子標準模型は現在, TeV スケールまでの物理を記述することに成功している. 然しながら, 素粒子標準模型は暗黒物質問題や, ニュートリノ質量問題, 強い CP 問題など, 未だ数多くの問題を抱えている. 本研究は, これらの問題の多くを同時解決することを目標としたものである.

ニュートリノ質量問題を解決する最も有力な模型として, シーソー模型が知られており, 電弱スケールと, それと比べて十分重い mediator (右巻きニュートリノなど) の質量との比によってニュートリノ質量の小ささを説明している. 更にこの模型では, レプトン数の破れも発生する.

一方, 強い CP 問題を解決する有力な模型としては, 見えないアクシオン模型が知られている. この模型では, 重い Colored フェルミオン, 及び Peccei-Quinn (PQ) 対称性が, 標準模型の拡張として新たに加えられている. PQ 対称性が自発的に破れることで, 擬 NG ボソンであるアクシオンが発生し, その力学的な効果によって QCD  $\theta$  項が 0 となり強い CP 問題が解決される. さらにアクシオンが暗黒物質の候補にもなる.

模型	アクシオン模型	シーソー模型	統一模型
破れる対称性	PQ 対称性	レプトン数対称性	→ 統一 [1][2]
追加のフェルミオン	重い colored フェルミオン	重い mediator	→ 統一 [2]

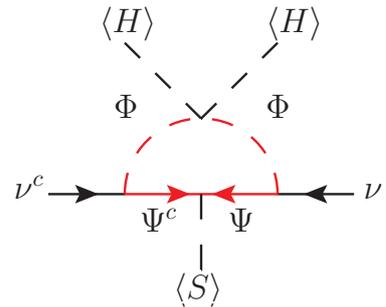


Fig. 1: the neutrino mass in the radiative seesaw model

Tab. 1: The unification of the axion model and the seesaw model

この二つの模型での, PQ 対称性とレプトン対称性とを同一視した模型が, 1987 年に Shin に依って提唱された[1]. そこでは, シーソー模型で導入される右巻きニュートリノと, アクシオン模型での重い colored フェルミオンが別々のものとして導入されている (Tab. 1 参照). この模型に対して, 我々が提唱した模型[2]では更に, シーソー模型での重い mediator とアクシオン模型での重い colored フェルミオンとの同一視にも成功した. この模型は輻射シーソー模型を, アクシオン模型として拡張したものになっている (Fig. 1, Tab. 2 参照).

	$S$	$\Psi_R^A$	$\Phi^A$
$SU(3)_C$	1	8	8
$SU(2)_L$	1	1	2
$U(1)_Y$	0	0	1/2
$U(1)_{PQ} = U(1)_L$	-2	1	0
spin	0	1/2	0

Tab. 2: the field contents of our model

## References

- [1] Michael Shin, Phys. Rev. Lett. 59, 2515 (1987); Erratum Phys. Rev. Lett. 60, 383 (1988)  
 [2] Ernest Ma, Takahiro Ohata, and Koji Tsumura, Phys. Rev. D 96, 075039 (2017)

# LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けた ミュオントリガーの改良とハードウェアへの実装

高エネルギー物理学研究室 岡崎佑太

**Abstract** The ATLAS Level-1 muon Endcap trigger will be upgraded to cope with the higher luminosity expected in LHC Run-3. I have developed new trigger decision logics implemented in an FPGA, using information from the muon detectors: including the new inner detectors to be installed in Run-3.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

ATLAS 検出器は、欧州原子核研究機構の陽子陽子衝突型加速器、Large Hadron Collider (LHC)の衝突点の1つに設置された汎用検出器である。LHCは重心系エネルギー13 TeVの $10^{11}$ 個の陽子の塊同士を40 MHzという高頻度で衝突させ、TeV領域までの新粒子の直接探索やヒッグス粒子の精密測定などの手法で、標準模型を超えた物理にアプローチしている。

データ記録速度の限界により、LHCでの40 MHzの陽子同士の衝突の全事象を記録することはできない。また新物理に由来するような事象は稀にしか起きないため、全衝突事象の中から興味のある事象を選別し記録するために多段階のトリガーシステムを使用している。本研究で扱うLevel-1ミュオントリガーは初段のトリガーである。2.5  $\mu$ s以内に高速で事象選別を行うためハードウェアで実装され、ミュオンの横運動量に閾値を設けて事象選別を行う。

LHCは2018年末から2021年まで加速器のアップグレードを行い、アップグレード後のRun-3では重心系エネルギー14 TeV、瞬間ルミノシティは現在の約1.5倍の $3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で運転する予定である。ルミノシティの増加に伴い、トリガーレートが増加する。しかしLevel-1ミュオントリガーの許容値15 kHzは変化しないので、このままでは横運動量の閾値を上げるなどの対策が必要になるが、その場合物理に対する感度を失ってしまうため高輝度環境を活かせない。現在のミュオントリガーの問題点は、衝突点由来でない荷電粒子によってトリガーが発行されてしまう点である。そのようなバックグラウンド事象を減らしつつ、興味のある物理事象の取得効率を維持するトリガーロジックの開発が必要となる。私はRun-3から新たにATLAS検出器に導入されるNew Small Wheel(NSW)とRPC BIS 7/8(Fig.1)の検出器の情報と現行のトリガー検出器であるThin Gap Chamber(TGC)の情報を組み合わせるトリガーロジックの開発を行った。

1つ目の研究として、シミュレーションデータを用いてRPC BIS 7/8の位置情報と角度情報を用いる新ロジックを考案し、性能評価を行った。新ロジックを用いることでコインシデンスをとる領域で最大80%のトリガーレートの削減が可能であることを示し、先行研究[1]の結果と合わせてトリガーレートの要求値を満たしていることを確かめた。

2つ目の研究として、Level-1ミュオントリガー判定ボードであるNew Sector Logicの開発を行った。開発したトリガーロジックを実装するため、自由に回路設計ができ、変更が容易な大規模ロジックを実装することができる集積回路FPGA(Field-Programmable Gate Array)を用い、そこに実装するファームウェアのデザインを行った。同様にNSWとTGCの情報を組み合わせたトリガーロジックを実装するファームウェアのデザインも行った。これらのファームウェアが正しく動き、Run-3で要求された時間内に正しくトリガー判定されていることを確認した。

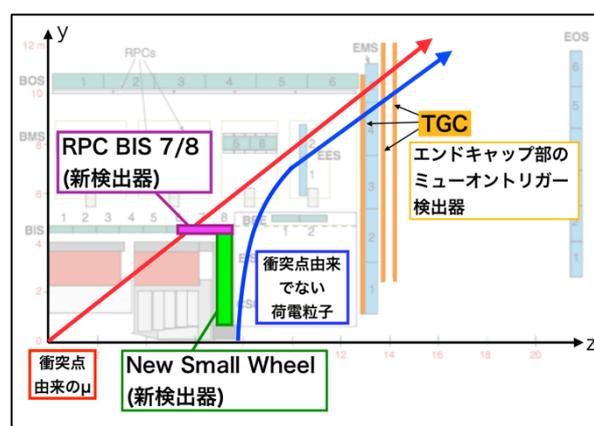


Fig. 1. Cross-Section of the ATLAS muon system

## References

[1] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-I Upgrade of the ATLAS TDAQ System (2013).

# 変形された Jackiw-Teitelboim 模型における重力解

素粒子論研究室 奥村 傑

**Abstract** In this thesis, we study a deformation of a particular 1+1 dimensional dilaton gravity model, so called the Jackiw-Teitelboim model. In general, solutions of this deformed system are singular. However, we show that considering a certain Weyl transformation, we can derive regular solutions including conformal matters, which preserve conformal symmetry exactly. Then the thermodynamic behavior of the solutions is studied. In addition, towards clarifying a possible relation to the (conformal) SYK model, a pedagogical review of the (conformal) SYK model is also included in this thesis.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

1997年にMaldacenaによって発見されたAdS/CFT対応は、「ある曲がった時空(AdS時空)上の超重力理論」と「時空の境界上の共形場の理論(CFT)」がある特定の極限で等価であると主張する[1]。この異なる次元の理論の間の対応関係はホログラフィーと呼ばれ、場の理論による重力の定式化を与えることから、重力の量子論的な性質を理解する上で重要な概念である。しかし高次元の重力理論は解析が非常に困難なため、ホログラフィー原理の完全な検証を実行するためには、まず簡単な低次元の模型を用いるのが望ましい。ホログラフィー原理が実現しうる最も低次元の模型は2次元重力と1次元量子論とのAdS<sub>2</sub>/CFT<sub>1</sub>対応である。しかし、2次元のEinstein重力はトポロジカルなため曲率と結合したスカラー場(ディラトン)を加える必要があるが、ディラトンは境界での共形対称性を破る問題があった。またAdS<sub>2</sub>時空は非常に不安定であり、他の物質場を加えると一般には変形されてしまう。

2014年以降、AdS<sub>2</sub>/CFT<sub>1</sub>に関して、重力理論側・境界理論側の双方で大きな発展が相次いでいる。重力理論側では、AlmheiriとPolchinskiによってAdS<sub>2</sub>時空を解にもつディラトン重力模型(Jackiw-Teitelboim(JT)模型)がホログラフィーの文脈で新たに議論しなおされ、物質場によるバックリアクションの評価やブラックホールエントロピーのホログラフィックな再導出が示された[2]。他方境界理論側では、KitaevによってLarge N極限で可解な1次元模型が提案された(Sachdev-Yee-Kitaev(SYK)模型)[3]。近年、このSYK模型とJT模型の関係について盛んに議論がなされているが、未だ具体的な関係は明らかにされていない。

本修士論文では、初めにSYK模型の主要な計算結果についてまとめた後、共形対称性を保つように修正されたconformal SYK模型についてレビューする。次にAlmheiriとPolchinskiによるJT模型のバックリアクションやブラックホールエントロピーについて紹介する。その後、自身の研究成果であるAdS<sub>2</sub>時空の変形理論[4, 5]についてまとめる。まずYang-Baxter変形された時空を背景に持つディラトン重力模型を導入し、Weyl変換を通じてLiouville理論と密接に関係することを示す。新しく得られた理論における重力解は一般に変形によって特異性が生じることが知られていた[4, 5, 6]が、最近の研究成果[7]により、1) 変形による特異性がなく、2) 物質場を含み、更に3) 境界での共形不変性を保つ重力解を構成することに成功した。この新しく発見された重力解について、その熱力学的性質や対応する境界の理論について考察する。

## References

- [1] J. M. Maldacena, *Int. J. Theor. Phys.* 38 (1999) 1113[*Adv. Theor. Math. Phys.* 2 (1998) 231].
- [2] A. Almheiri and J. Polchinski, *JHEP* 1511 (2015) 014.
- [3] A. Kitaev, “A simple model of quantum holography.”  
<http://online.kitp.ucsb.edu/online/entangled15/kitaev/>  
<http://online.kitp.ucsb.edu/online/entangled15/kitaev2/> Talks at KITP, April 7, 2015 and May 27, 2015.
- [4] H. Kyono, S. Okumura and K. Yoshida, *JHEP* 1703 (2017) 173.
- [5] H. Kyono, S. Okumura and K. Yoshida, *Nucl. Phys. B* 923, 126 (2017).
- [6] V. P. Frolov and A. Zelnikov, “On the Liouville 2D dilaton gravity models with sinh-Gordon matter”  
arXiv:1712.07700
- [7] S. Okumura and K. Yoshida, “A regular solution in a deformed Jackiw-Teitelboim model,” in preparation.

# 超新星残骸 W28 における 過電離プラズマの成因と鉄輝線の検出

宇宙線研究室 尾近 洸行

## Abstract

With the Suzaku observations of W28, we find evidence of thermal conduction between molecular cloud and hot plasma, which may be the production process of recombining plasma. We also detect the Fe I K $\alpha$  line would be inner shell ionization of Fe in the cloud by cosmic-ray particles accelerated in W28.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

X線天文衛星すざくによる超新星残骸(SNR)の観測から再結合連続放射成分が検出され、これまでのSNRの進化の描像に反する再結合が優勢な過電離プラズマ(RP)の存在が明らかになった。近年、RPを持つSNRは続々と発見されてきている一方で、肝心なRPの物理的な成因については明らかになっておらず議論が続いている。過去の研究からRPの成因解明には、周囲のガス環境と比較して領域ごとのプラズマの電子温度、電離状態を調べることが鍵を握ると指摘されている[1, 2]。

W28(G6.4-0.1)はRPの成因解明に最も適したSNRの一つである。これはW28がRPの見つかっているSNRの中でも、地球からの距離が約2 kpcと近くに位置し、年齢が3.3-4.2 kyrと大きいため視野直径が約48分と大きく、領域ごとの解析が可能であることによる。W28は北東領域に特徴的なリム状の構造を持ち、そこで周囲の分子雲と相互作用していることがわかっている。また、これまでのすざく衛星の観測から、中心領域でRPが見つかっている[3]。したがって、中心から北東領域にかけて、W28の構造と周囲の分子雲の分布に沿った解析を行うことでRPの成因に迫ることができると期待される。我々はすざく衛星を用いてW28の中心部と北東部の長時間観測(それぞれ、73 ks、100 ks)を行い、領域ごとにスペクトルの解析を行った(Fig. 1)。その結果、中心領域から、強いFe He  $\alpha$ 輝線を初検出し(Fig. 2)、スペクトルをこの輝線を説明する高温のRPモデル( $kT_e \geq 0.3$  keV,  $n_e t \sim 4 \times 10^{11}$  cm $^{-3}$ s)と低温のRPモデル( $kT_e \sim 0.2$  keV,  $n_e t \sim 10^{12}$  cm $^{-3}$ s)の組み合わせによって再現することに成功した[4]。そして、北東のリム領域のスペクトルは単一RPモデル( $kT_e \sim 0.25$  keV,  $n_e t \sim 10^{12}$  cm $^{-3}$ s)で再現できた。これらの結果は、周囲の分子雲からの熱伝導によって高温プラズマが冷却され、過電離状態になったことを支持する[4]。我々はまた分子雲と相互作用する北東のリム領域から、強いFe I K $\alpha$ 輝線を検出した(Fig. 2)。W28はGeVからTeV帯域にかけて明るいことから、衝撃波面で粒子が加速されていることが示唆される。したがって、この輝線は、分子雲中の鉄原子が、W28で加速された宇宙線粒子により内殻電離を起こしたのち放射される蛍光X線である可能性が高い[4]。

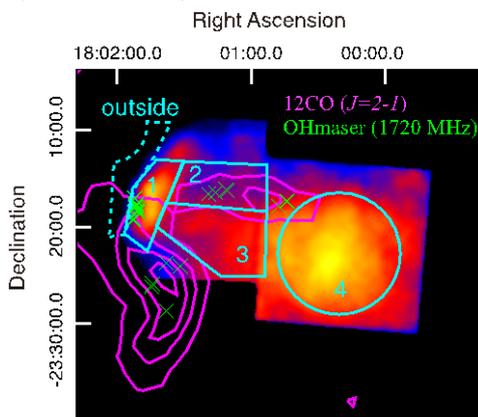


Fig. 1. Image of W28 in the energy band of 0.65–4.0 keV.

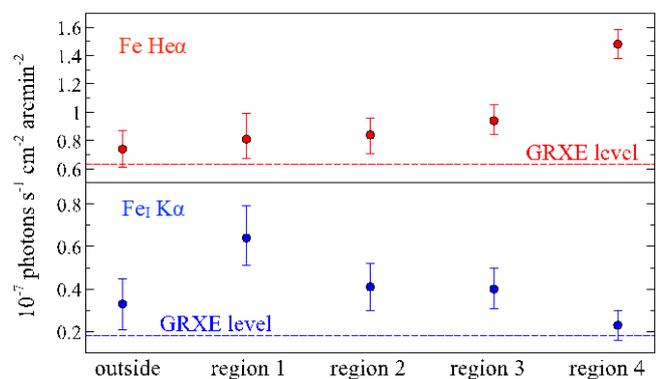


Fig. 2. Intensities of Fe-K $\alpha$  lines of the five regions.

## References

- [1] Kawasaki, M. T., et al. 2002, ApJ, 572, 897. [2] Itoh, H., & Masai, K. 1989, MNRAS, 236, 885. [3] Sawada, M., & Koyama, K. 2012, PASJ, 64, 81. [4] Okon, H., et al. in prep.

# 古典重力双対を持つ共形場理論の理解

基礎物理学研究所 素粒子論研究室 楠亀裕哉

**Abstract** We confirm that entanglement entropy for local quenches can be used to probe whether a CFT is dual to Einstein gravity and also that it is related to chaos. We conjecture many properties of conformal blocks and reach Renyi entropy for states excited by any primary operator in holographic CFT.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

量子重力理論を非摂動的に理解するうえで AdS/CFT 対応は重要なカギである。ここで、AdS/CFT 対応とは、 $d+1$  次元の AdS 時空上の量子論とその境界上の  $d$  次元共形場理論が等価であるという予想である。共形場理論は任意のエネルギーで well-defined (UV complete) であるため、量子重力理論の完全な理解に大きく貢献すると期待するのは自然な成り行きだろう。しかし、現状ではまだ AdS/CFT 対応を利用するには大きな障害が存在する。AdS/CFT 対応がどのようなカラクリで成り立っているのか、その理解が十分に得られていないのである。本研究の目的はこの対応機構を明らかにしていくことである。特に、「CFT にどのような条件を課したときに重力双対は古典的になるのか？」という部分を明らかにすることを目的としている。

古典重力双対を持つ CFT (以下、ホログラフィック CFT) の性質を調べる上でエンタングルメント・エントロピーが役立つ。AdS/CFT 対応の文脈で、エンタングルメント・エントロピーの重力双対が非常にシンプルな幾何的量に対応するためである[1]。特に局所励起状態に対するエンタングルメント・エントロピー[2]が興味深い。なぜなら、その振る舞いにはホログラフィック CFT に特有と見られるユニバーサルな性質が見られるためである[3]。

以上の背景の下で、本研究では局所励起状態に対するエンタングルメント・エントロピーの振る舞いがホログラフィック CFT を特徴づけるという予想をたて、これを支持する結果を示した。さらに、局所励起状態に対するエンタングルメント・エントロピーがカオスと関連づいているという予想の裏打ちも与えた[4]。また、これに関連して非時間順序相関関数(OTOC)の late time での振る舞いもまたカオスと関連するという予想も与えた[5]。

ホログラフィック CFT の理解を深めるうえで共形ブロックの性質を明らかにすることも重要な課題である。これは以下の理由による。

- ① エンタングルメント・エントロピー (レンニ・エントロピー) を計算する際に必要となる。
- ② 共形ブロックそのものが重力双対を持つ。
- ③ 共形ブーツトラップを介して理論の構造を決定する。

しかし、ホログラフィック CFT での共形ブロックは限られた場合でかつ摂動的にしか知られていない[6]。そこで本研究では一般の場合かつ非摂動的に解析する事が可能な Zamolodchikov 再帰方程式を用いることで、共形ブロックの性質を数値的に解析した[7]。その結果、共形ブロックの級数展開係数がシンプルな表式を持ち、かつその振る舞いに興味深い転移があることを示唆する結果が得られた。

これを用いて、今まで謎であった重い励起状態に対するレンニ・エントロピーを調べると、その結果は励起に用いた場のエネルギーに依存しないユニバーサルな結果になることが分かった。また、あるエネルギーとレプリカ数について限られたパラメタ領域でのみ知られていた既存の結果達がどのようにつながっているのかも明らかにした。

## References

- [1] S. Ryu and T. Takayanagi, *Phys.Rev.Lett.* **96**,181602 (2006).
- [2] M. Nozaki, T. Numasawa and T. Takayanagi, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 111602 (2014).
- [3] M. Nozaki, T. Numasawa and T. Takayanagi, *JHEP* **05** (2013) 080.
- [4] P. Caputa, Y. Kusuki, T. Takayanagi and K. Watanabe, *J.Phys. A* **50** (2017) no.24, 244001.
- [5] P. Caputa, Y. Kusuki, T. Takayanagi and K. Watanabe, *Phys.Rev. D* **96** (2017) no.4, 046020.
- [6] A. L. Fitzpatrick, J. Kaplan and M. T. Walters, *JHEP* **1408** (2014) 145.
- [7] Y. Kusuki and T. Takayanagi, [arXiv:1711.099].

# ABJM 行列模型における 2 点関数の解析

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 久保尚敬

**Abstract** ABJM theory, which is expected to be the holographic dual of M-theory on  $\text{AdS}_5 \times (\text{S}_7/\text{Z}_k)$ , can be reduced to ABJM matrix model by using localization technique. In this model, we introduced two point function which can be seen as the generalized Wilson loop, and studied them numerically.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

超弦理論は量子重力理論であると考えられているが、その定式化が摂動的であるという問題点がある。そこで非摂動的な量子重力理論が求められているが、その候補の一つに M 理論[1]と呼ばれる理論がある。この理論はいまだに定式化されていないが、様々な手法を用いて調べられている。そのうちの一つに、AdS/CFT 対応を用いるものがある。これは、large N 極限と呼ばれる極限において、ある AdS 時空中の重力理論とある CFT の状態が対応するというものである。従って、M 理論に対応する CFT の発見が求められた。これに該当する理論として、2008 年に Aharony らによって ABJM 理論と呼ばれる CFT が発見された[2]。

AdS/CFT 対応においては様々な物理量同士の対応関係も調べられているが、例えば CFT 中のウィルソンループは AdS 側ではその表現に依って基本弦やブレーンに対応することが知られている。このような非摂動的な物体が出てくることからわかるように、CFT 側でこのような量を調べることは量子重力理論を解明するうえで重要である。ABJM 理論は非自明な相互作用をする場の量子論であり、解析は難しいものであった。しかし、ABJM 理論の発見後さまざまな計算手法が開発され、分配関数や一本のウィルソンループが計算できるようになった。まず、局所化[3]という計算手法により、これらの物理量は ABJM 行列模型と呼ばれる 0 次元量子力学系の分配関数や一点関数に帰着することがわかった。さらに、これらの物理量は Fermi gas formalism[4]という手法(とそれを拡張したもの)を用いて理想フェルミ気体(やそれに類するもの)に帰着されることがわかった。この手法により、これらの物理量の large N 極限における摂動的・非摂動的な振る舞いが計算された。ただし非摂動的な効果については、どのような項が出てくるかまでは判明したが、その係数の同定には至らなかった。

その後、Fermi gas formalism は数値計算可能な形に書き換えられることが判明した[5]。これにより、原理的に ABJM 行列模型が持つパラメータの任意の値に対して分配関数や一点関数の厳密値が計算可能となり、これは低い次数の非摂動的な項の係数の決定などの成果を挙げた。このように、数値計算の手法は非摂動的な効果まで含めた物理量を計算できるという点で重要である。

ここまでで分配関数や一本のウィルソンループの計算に大きな進展があったことを見た。しかし、より一般的な物理量については局所化法を用いることができず、したがって上記の一連の手法を適用した計算はできていない。そこで、[6]らは、ABJM 行列模型において一点関数の自然な一般化と考えられる二点関数を導入した。さらにこの物理量の解析には Fermi gas formalism を一般化した手法が適用できることを示し、それをもとに様々な表現に対する二点関数の数値計算による解析を行った。その結果、二点関数にはウィルソンループ演算子の積との非自明な関係があることがわかった。また、AdS 側においてブレーンの干渉のような現象が起きていると示唆される関係式も得られた。

本修士論文では、ABJM 理論や上記の計算手法などのレビューを行った後、我々の仕事[6]の解説を行う。

## References

- [1] E. Witten, Nucl. Phys. B **443**, 85 (1995).
- [2] O. Aharony, O. Bergman, D. L. Jafferis and J. Maldacena, JHEP **0810**, 091 (2008).
- [3] A. Kapustin, B. Willett and I. Yaakov, JHEP **1003**, 089 (2010).
- [4] M. Marino and P. Putrov, J. Stat. Mech. **1203**, P03001(2012)
- [5] P. Putrov and M. Yamazaki, Mod. Phys.Lett. A **27**, 1250200 (2012)
- S. Matsumoto and S. Moriyama, JHEP **1403**, 079 (2014)
- [6] N. Kubo and S. Moriyama, in preparation.

# Ξハイパー核精密分光実験に向けたアクティブ標的の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 越川亜美

**Abstract** We are developing an active fiber target for a spectroscopy of  $\Xi$  hypernucleus with much better energy resolution than those of previous studies. Energy resolution of a fiber has been measured and energy straggling of the whole target has been estimated with the experimental result.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

Ξハイパー核の研究は、SU(3)フレーバー対称性の下で拡張したバリオン間相互作用や、高密度核物質中におけるストレンジネスの振る舞いを理解するために重要である。KEK-PS や BNL-AGS で探索実験が行われた[1][2]が、エネルギー分解能が乏しかったため、Ξハイパー核の束縛状態をピーク構造として観測することができず、束縛閾値近傍のスペクトルの形状からΞの一体ポテンシャルの深さを  $V_{\Xi} \sim 14$  MeV と見積もられたただけだった。

我々は、J-PARC において  $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$  反応を用いた Ξハイパー核の精密分光実験を計画している[3]。質量欠損法によって Ξハイパー核の束縛状態をピーク構造として観測するためには、エネルギー分解能を向上させることが必須である。特に  $^{12}_{\Xi}\text{Be}$  のコア核である  $^{11}\text{B}$  の状態を分離して観測するためには、分解能を 2 MeV (FWHM) 以下に抑えなければならない。(K<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>) 反応の分解能に寄与するのは、入射 K<sup>-</sup>, 散乱 K<sup>+</sup> の運動量決定精度だけではなく、標的中でのエネルギー損失のふらつきも含まれる。そこで、炭素を含むプラスチックシンチレータを標的にすることで、標的中における入射 K<sup>-</sup>, 散乱 K<sup>+</sup> のエネルギー損失をイベントごとに補正し、物質量の多い標的でもエネルギー損失のふらつきを小さく抑えることを着想した。Fig. 1. にアクティブファイバー標的の概念図を示す。エネルギー損失の補正では、入射 K<sup>-</sup>, 散乱 K<sup>+</sup> に加えて Ξハイパー核の崩壊で生じる荷電粒子を弁別する必要があるため、セグメント化されたシンチレーティングファイバーを用いる。

今回我々は、アクティブファイバー標的のエネルギー分解能を評価するため、世界最高分解能を有する Grand Raiden 磁気スペクトロメータを用いて、1本のファイバーにおける発光量とエネルギー損失の関係、ならびにエネルギー分解能の直接測定を RCNP で行なった。

本研究では、3 mm 径、1 mm 径の丸型、角型それぞれ4種類のファイバーについて、1本あたりの発光量とエネルギー損失の関係を評価し、今回開発しているアクティブファイバー標的には 3 mm 径の丸型ファイバーが適切であると結論づけた。さらに、この 3 mm 径の丸型ファイバーのエネルギー分解能の入射位置依存性を精査する。また、得られた1本当たりの分解能から標的全体でのエネルギー損失のふらつきを評価する。

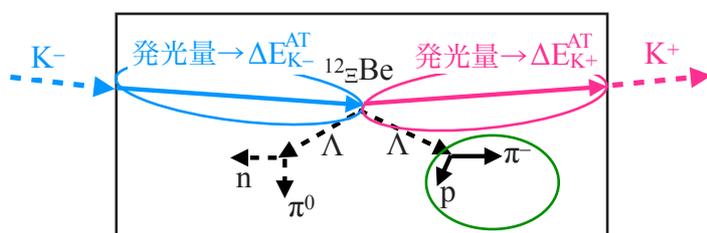


Fig. 1. Concept of the active fiber target.

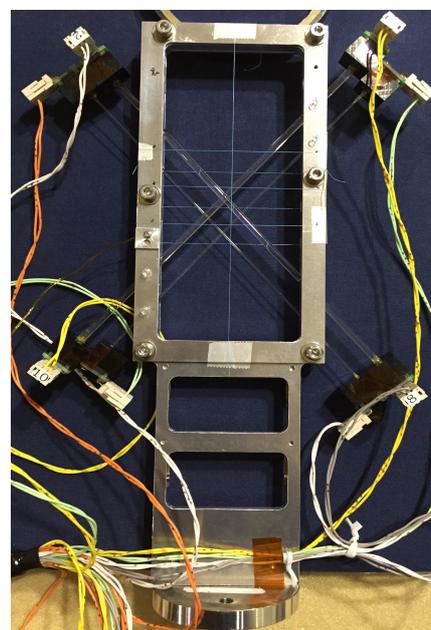


Fig. 2. Scintillating fibers mounted on a target ladder.

## References

- [1] T. Fukuda *et al.*, Phys. Rev. C **58** (1998) 1306.
- [2] P. Khaustov *et al.*, Phys. Rev. C **61** (2000) 054603.
- [3] T. Nagae *et al.*, J-PARC proposal E05, [http://j-parc.jp/NuclPart/Proposal\\_e.html](http://j-parc.jp/NuclPart/Proposal_e.html).

# $^{10}\text{Be}$ における低エネルギー双極子励起モードの研究

原子核理論研究室 四方悠貴

**Abstract** Low-energy dipole (LED) excitation modes in  $^{10}\text{Be}$  are investigated with cluster model. As a result, two LED states are found. One is a toroidal mode described by rotation of a deformed  $^6\text{He}$  cluster. The other is a cluster mode with the strong E1 strength.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

1980年代から RI beam が発展したことにより中性子過剰核の研究が理論的にも実験的にも盛んに行われている。中性子ハロー、中性子スキン、魔法数の破れ、巨大共鳴のフラグメントなど特異な現象の数々は多大な興味を集めている。その中で、特に興味深い現象として、巨大共鳴よりも非常に低いエネルギーに出現する「低エネルギー双極子励起」がある。低エネルギー双極子 (LED) 励起の存在は中性子捕獲反応の断面積を大きく強めることから宇宙論における  $r$ -過程に重要な情報を与える [1]。LED は励起エネルギー、強度の強さ、励起モードの観点から多くの理論研究がなされてきた [2]。

LED に寄与する励起モードとして複数の候補が考えられている。古くから提唱されているモードは  $N=Z$  コアに対して余剰中性子が逆位相で振動するモードである [3]。実際、微視的構造計算の解析によると、核内部で陽子と中性子が同位相で遷移し、核表面では中性子のみが逆位相で振動している結果が得られ、このモードが起こっていると考えられてきた。しかし、観測事実は多数の異なる励起モードが LED に寄与することを示唆している。そのため、他の候補として例えば、「トロイダルモード」が挙げられた [4]。このモードは流体的な渦構造をもつモードで、密度の飽和性を破らないため低エネルギーで励起可能と考えられる。その存在を予言する理論研究もあるが [5]、励起エネルギーがまだ説明できないなど、その発現機構についてはまだ解明されていない。

一方、アイソスカラー双極子 (ISD) の低エネルギーの遷移強度に寄与する有力なモードとして、最近、クラスター相対運動によるモードが指摘されている [6]。中性子過剰核におけるクラスター構造は理論および実験研究で知られており、中性子過剰核においてクラスターモードが LED として出現する可能性は大いに考えられる。

本研究では、我々は LED とクラスター構造との関係を明らかにするため  $^{10}\text{Be}$  における LED 励起をクラスター模型を用いて研究した。励起モードを解析するために渦的、圧縮型、E1 の三つのモードの対する双極子演算子に対する遷移強度を計算して状態を分類した。その結果、約 15 MeV までの低エネルギー領域にいくつかの強い LED 励起強度を持った状態が得られた。渦的演算子による強度が強い状態を遷移カレントを用いて解析したところ、「トロイダルモード」が出現した。さらに、我々はこの研究で、トロイダルモードが変形した  $^6\text{He}$  クラスターが回転することにより生じるという新しい解釈を与えた。また、圧縮型演算子による強度が強かった状態を解析したところ、 $^6\text{He} + \alpha$  クラスター共鳴状態であることを明らかにした。つまり、中性子過剰核においてもクラスター励起による ISD 遷移強度のエンハンスが起こる事を明らかにした。

本論文では、まず、LED の特徴や  $^{10}\text{Be}$  のクラスター構造についての研究のレビューを行う。そして、今回用いたクラスター模型や双極子演算子についての定式化を行った上で、遷移強度や励起モードの解析結果を紹介し、 $^{10}\text{Be}$  における LED 励起モードについて議論する。

## References

- [1] S. Goriely *et al.*, Nucl. Phys. A **739**, 331 (2004).
- [2] N. Paar *et al.*, Rep. Prog. Phys. **70**, 691 (2007).
- [3] K. Ikeda, INS Report JHP-7 (in Japan) (1988).
- [4] S. F. Semenko, Sov. J. Nucl. Phys. **34**, 356 (1981).
- [5] V. O. Nesterenko *et al.*, Phys. Atom. Nucl. **79**, no.6, 842-850 (2016).
- [6] Y. Chiba *et al.*, Phys. Rev. C **93**, 034319 (2016).

# 粒子軌道に基づくダークマターハロー位相構造の解析

天体核研究室 杉浦 宏夢

**Abstract** Using particle trajectories, we analyze the phase-space structures of dark halos in N-body simulations. We find that radial caustic structures in simulations are consistent with those predicted by spherically symmetric self-similar solutions, and that they produce observable imprints on radial density profiles.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

近年の急速な宇宙論的観測の進展により、コールドダークマター (cold dark matter, CDM) と呼ばれる電磁場とほとんど相互作用しない未知の物質が宇宙の物質の大部分を占めること、そして CDM に加えてダークエネルギーを仮定する宇宙論モデル ( $\Lambda$ CDM モデル) が観測を極めてよく説明することが明らかになった。  $\Lambda$ CDM モデルに基づく、宇宙の構造形成はダークマター密度揺らぎが重力不安定性により成長する過程であり、自己重力により束縛されたダークマターの塊 (ダークハロー) が銀河、銀河団形成の舞台となる。それ故にダークハローの構造および形成過程を明らかにすることは宇宙の構造形成を理解する上で基本的であり、これまでに N 体シミュレーションによってハロー質量関数や密度プロファイルなどがよく調べられてきた。また、現在では弱い重力レンズ効果によるダークマター分布の直接測定が可能であり、その観測結果と比較するためにもシミュレーションに基づいてダークハローの構造を定量的に調べることは重要である。

Diemer & Kravtsov (2014) は、N 体シミュレーションに基づいて、ダークハロー外縁部の密度プロファイルに特徴的なシグナルが存在すること、そしてそのシグナルが位相空間上のコースティクスに対応することを指摘した [1]。このシグナルに対応する半径をスプラッシュバック半径と呼ぶ。従来ハロー内外の明確な境界が存在するのか明らかではなかった中で、スプラッシュバック半径は物理的意味のあるハロー境界を与えるものとして注目を集めており、重力レンズによってこれを観測しようという試みが進行している。

本修士論文は、スプラッシュバックつまりハローに降着した物質の最初の遠点通過という概念を拡張し、降着物質の軌道に基づいてハロー外縁部の位相構造を明らかにしようとするものである。本研究では、最初の遠点通過のみを特定する Diemer (2017) の方法 [2, 3] を応用して、各々の N 体粒子のハロー内での運動を追跡し続けて遠点通過数を計算するアルゴリズムを開発し、N 体シミュレーションにその方法を適用した。さらに、シミュレーションの解析から得られた遠点通過数に基づいて、スプラッシュバック質量と質量降着史の関係、ハロー動径位相構造と Fillmore-Goldreich-Bertschinger の球対称自己相似解 [4, 5] の比較、密度プロファイルと位相構造の関係、ハロー非球対称性という点について系統的に解析を行った。その結果、スプラッシュバック半径 (第一遠点) と質量降着率の関係については過去の研究と同様の傾向を確認した上で、より内部の遠点通過の構造に関しても N 体シミュレーションに自己相似解と同様の振る舞いが見られること、従って非球対称ハローであっても球対称自己相似解がハロー外縁部に関しては動径位相構造をよく説明すること、スプラッシュバック半径に限らず他の遠点通過も密度プロファイルに反映されていること、などが明らかになった。特に外縁部の密度プロファイルに複数の遠点通過の痕跡が存在することは球対称自己相似解と整合的であり、将来の重力レンズサーベイによって現実のダークハローに関してこれが検出される可能性を示唆するものである。

## References

- [1] B. Diemer & A. V. Kravtsov, *Astrophys. Jour.*, **789** (1), 1 (2014).
- [2] B. Diemer, *Astrophys. Jour. Suppl. Ser.*, **231** (1), 5 (2017).
- [3] B. Diemer, *et al.*, *Astrophys. Jour.*, **843** (2), 140 (2017).
- [4] J. A. Fillmore & P. Goldreich, *Astrophys. Jour.*, **281**, 1 (1984).
- [5] E. Bertschinger, *Astrophys. Jour. Suppl. Ser.*, **58**, 39 (1985).

# Lorentz 型経路積分による宇宙の波動関数

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 杉田強

**Abstract** The wave function of the universe is calculated by using Lorentzian path integral. Picard-Lefschetz theory avoids the problem of oscillatory integrals. I take the spatial volume as the quantized variable and calculate the wave function in minisuperspace models without and with matters or perturbations.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

重力や時空を量子論的に扱う素朴な方法のひとつは、我々を含めた宇宙全体の波動関数を考える事である。計量  $g$  を変数にした経路積分形式では、宇宙の波動関数は

$$\int \mathcal{D}g e^{iS[g]/\hbar}$$

のように表される。一般にこの積分は指数部にある虚数単位のために振動してしまい、計算が困難である。また現在の宇宙の波動関数を知るためには初期条件が必要であるが、どのような条件を課すべきかは自明でない。

Hartle と Hawking はこの 2 つの問題を解決する策を提唱した[1]。まず積分が振動する問題には、本来 Lorentz 型である時空を虚時間の採用により Euclid 型として扱うアプローチをとっている。これによって被積分関数は  $e^{-SE/\hbar}$  という形になり、積分の振動を回避できる。初期条件としては no-boundary 条件を提唱した。これは宇宙が点から始まり、Euclid 型多様体としてある時刻の空間スライス以外に境界を持たない事を要請するものである。彼らは一様等方宇宙の波動関数として  $e^{12\pi^2/\hbar\Lambda}$  なる因子を含むものを得た。しかし Euclid 重力理論には、作用が下にバウンドしないという難点がある。

今年になり Turok らによって Lorentz 型における経路積分の定式化がなされた[2]。積分が振動してしまうという問題を、彼らは Picard-Lefschetz 理論を用いて回避している。これは虚時間を採用する代わりに積分経路そのものを複素平面上に変形し、作用関数の鞍点を適切な方向から通過する事で振動なしに計算を行うものである。この観点では、Lorentz 型と Euclid 型の計算は異なる積分経路をとる事に対応し、計算結果として異なるものが生じる可能性がある。これまでに一様等方宇宙モデルでの真空重力場[2]や重力場+スカラー場[3]、一様等方からの計量の摂動を含む場合[4]などで波動関数の研究がなされている。[2]で得られた波動関数は  $e^{-12\pi^2/\hbar\Lambda}$  なる因子を含み、丁度 Hartle-Hawking の波動関数の逆数となっている。[4]では波動関数が計量の摂動に対して逆ガウシアン的に増加するという振る舞いを示した。これは波動関数の初期条件として no-boundary 条件が適当ではなく、初期宇宙の半古典的な記述が破綻するという事を示唆している。

本論文では上の議論をレビューした後、異なる変数の取り方によるアプローチを試みる。具体的には空間次元を 3 から  $d$  に一般化し、スケール因子の  $d$  乗、即ち宇宙の空間体積を変数として経路積分を計算する。3次元特有のラプスの再定義など、Turok らの変数の扱いには技巧的な部分があるが、本論ではより自然で一般的な変数の扱いをしている。空間体積を変数としたときの重力場の作用は、正準テンソル模型の作用と特殊な場合に一致するという特徴もある[5]。一様等方な重力場の波動関数は概ね Turok らのものと一致したが、重力場+スカラー場の波動関数は先行研究[3]と異なる結果を得た。

## References

- [1] J. B. Hartle and S. W. Hawking, Phys. Rev. **D28** 2960-2975 (1983).
- [2] N. Turok *et al.*, Phys. Rev. **D95** no.10, 103508 (2017)
- [3] J. B. Hartle *et al.*, Phys. Rev. **D96** no.4, 043505 (2017)
- [4] N. Turok *et al.*, arXiv:1708.05104 (2017)
- [5] N. Sasakura and Y. Sato, Phys. Lett. **B732** 32-35 (2014)

# $^{12}\text{C}$ 原子核における稀ガンマ崩壊モードの探索実験

原子核ハドロン物理学研究室 高橋 祐羽

**Abstract** The gamma decay probabilities of highly excited states in  $^{12}\text{C}$  are an important quantity in nucleosynthesis, but there is no accurate measurement. We measured the gamma decay probability of  $3_1^-$  state in  $^{12}\text{C}$  in the present work.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

宇宙での元素合成過程において、トリプルアルファ反応は重要な役割を果たしている。トリプルアルファ反応とは、3つのアルファ粒子の共鳴状態を経由して  $^{12}\text{C}$  が生成される反応である。この共鳴状態は大半がアルファ崩壊して3つのアルファ粒子に戻るが、稀にガンマ線を放出して  $^{12}\text{C}$  の基底状態へ崩壊する。質量数 12 以上の元素はこの反応を経由して生成されるため、 $^{12}\text{C}$  の励起状態のガンマ崩壊確率を測定することは宇宙における元素合成過程を理解する上で重要である。一般的に、トリプルアルファ反応への寄与が大きいのは  $0_2^+$  (7.65 MeV) 状態であるが、 $10^9$  K 以上の高温ではそれ以上の高励起状態の寄与が大きくなり、その後の重元素合成に大きな影響を与えることが指摘されている[1]。例えば、超新星爆発時の vp 過程における重元素の生成比率を計算すると、 $3_1^-$  (9.64 MeV)、 $2_2^+$  (9.84 MeV) といった高励起状態の寄与の有無によって質量数 80 以上の元素の存在量が大きく変化する[2]。しかし、 $3_1^-$ 、 $2_2^+$  状態のガンマ崩壊確率は未だに測定されていない。

そこで、我々は  $3_1^-$  状態のガンマ崩壊確率を測定するための実験を行った。逆運動学反応  $^1\text{H} (^{12}\text{C}, ^{12}\text{C} \text{ p})$  において散乱  $^{12}\text{C}$  と反跳陽子を同時測定することで、ガンマ線を測定することなくガンマ崩壊確率を決定する。本実験のセットアップを図 1 に示す。 $3_1^-$  状態のガンマ崩壊確率は約  $10^{-7}$  と非常に低確率であり、低バックグラウンドでの測定が必要となるため、バックグラウンドを減らすために様々な対策を実施した。

主要な対策の 1 つとして、固体水素標的を開発した。標的に含まれる水素以外の不純物はバックグラウンドの原因となるため、不純物の少ない標的として固体水素を導入した。標的中のビームのエネルギーロスによりエネルギー分解能が悪化するため、標的は薄くする必要がある。そこで、ノーマル水素より熱伝導率の良いパラ水素を用いて 0.5 mm の薄型固体水素標的を開発した[3]。

また、Si 検出器と GAGG 検出器を組み合わせた反跳陽子検出器 Gion を開発した。イベントの重畳を削減するため、CsI(Tl) 結晶よりも減衰時間の短い GAGG 結晶を使用した。さらに、エネルギー分解能を向上させるため、各結晶を反応点に向けて円弧状に配置するような架台を開発した。

その他、アクシデンタルイベントを除くための Tagger など、多数の対策を施して実験を行った。実験は大阪大学 RCNP のサイクロトロン施設において行われ、固体水素標的に 261.2 MeV の  $^{12}\text{C}$  ビームを照射した。各種対策により、バックグラウンドの少ない全励起スペクトル、ガンマ崩壊スペクトルを得ることができた。今後、検出効率をシミュレーションによって決定し、 $3_1^-$  状態のガンマ崩壊確率を決定する予定である。

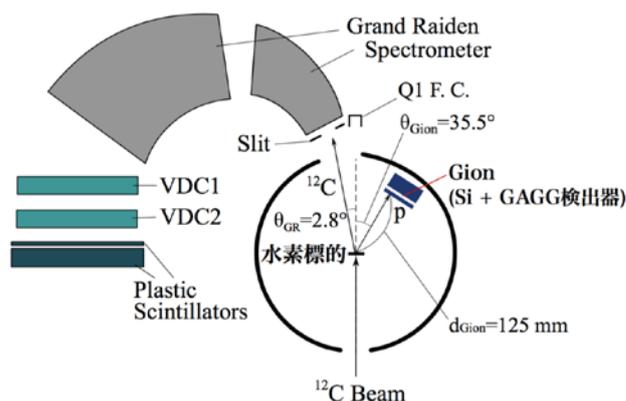


Fig. 1. Set up of this experiment

## References

- [1] F. Hoyle and W. A. Fowler, *Astrophys. J* **132**, 565 (1960).
- [2] S. Wanajo, H. T. Janka, and S. Kubono, *Astrophys. J* **729**, 46 (2011).
- [3] Y. Matsuda, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **643**, 6 - 10 (2011).

# 制動放射 $\gamma$ 線を用いた $^{18}\text{F}$ 及び $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ 医療用放射性同位元素の製造に関する研究

原子核・ハドロン物理学研究室 武田 朋也

**Abstract** There are serious problems on the production of  $^{18}\text{F}$  and  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  medical radioisotopes for cancer imaging diagnosis. Therefore, we have developed new methods of the production with bremsstrahlung  $\gamma$ -ray. From decay  $\gamma$ -ray spectrum measured at KURRI, the amounts of radioactivity of  $^{18}\text{F}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and radioactive impurities were analyzed.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

癌は日本人の死因第1位の病である。癌の症状を自覚した時には既に手遅れの場合が多い。そのため癌による死亡率を減少させるには定期的な癌検査による早期発見が必要であり、近年PET検査とSPECT検査が広く行われている。

PET (Positron Emission Tomography) 検査では、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ などの $\beta^+$ 崩壊する核種が使用されている。中でも、 $^{18}\text{F}$  ( $T_{1/2} = 109.77$  分) はグルコースと置換反応した $^{18}\text{F}$ -FDG (フルオロデオキシグルコース) を用いた検査が保険適用されているため、よく使用されている。癌細胞はグルコースを著しく吸収するので、患者に投与された $^{18}\text{F}$ -FDGは癌患部に集積される。癌患部に集積された $^{18}\text{F}$ -FDG中の $^{18}\text{F}$ は $\beta^+$ 崩壊して対消滅による511 keVの $\gamma$ 線を180°反対方向に2本放出する。この2本の $\gamma$ 線を同時検出し、複数のトラックを引くことで癌患部を精度よく特定することができる。

$^{18}\text{F}$ は小型サイクロトロンを用いて加速された陽子ビームを $^{18}\text{O}$ に照射し、 $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ 反応によって製造されている。しかし、この製造方法では、(1)  $^{18}\text{O}$ 濃縮水標的の価格が高い、(2) 大強度陽子ビーム使用による放射化によって作業者が被曝する、(3) 目的外の長寿命のRIが生成されるといった点が問題視されている。

SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) 検査では単一の $\gamma$ 線を放出する核種が使用されている。同時測定ができないのでPET検査に比べると精度は下がるが、PET検査で使用される核種よりも半減期が長く取り扱いやすい核種を用いることができる。中でも140.5 keVの $\gamma$ 線を放出する $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ( $T_{1/2} = 6$  時間) が広く使用されており、心筋血流イメージングには $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -テトロホスミン、脳機能イメージングには $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -エキサメタジムといった薬剤が用いられている。

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ は $^{99}\text{Mo}$ の $\beta$ 崩壊によって生成される。 $^{99}\text{Mo}$ は半減期が66 時間と長く、海外の原子炉にて $^{235}\text{U}(n, f)$  反応で製造され、日本に輸入されている。しかし原子炉の老朽化に伴う運転停止が計画されており、さらにテロ対策のために $^{235}\text{U}$ 高濃縮燃料を使用できなくなる可能性があり、今後の供給不足が想定される。

そこで我々の研究グループでは、制動放射 $\gamma$ 線を照射して $^{18}\text{F}$ 及び $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ を製造する方法を考案した。 $^{18}\text{F}$ は、 $^{nat}\text{Ne}$ ガス標的を用いて、 $^{20}\text{Ne}(\gamma, pn)^{18}\text{F}$ 反応及び $^{20}\text{Ne}(\gamma, 2n)^{18}\text{Ne}(\beta^+)^{18}\text{F}$ 反応で製造し、 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ は、 $^{nat}\text{MoO}_3$ 標的を用いて、 $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ 反応で製造する。

この製造方法を検証するため、京都大学原子炉実験所の電子線型加速器施設においてテスト実験を行った。原子炉実験所の電子線型加速器を用いて加速された電子を白金標的に照射し、制動放射 $\gamma$ 線を発生させた。 $^{18}\text{F}$ は、制動放射 $\gamma$ 線を我々が開発した循環型Neガス標的に照射して製造し、CdZnTe検出器で崩壊による $\gamma$ 線のエネルギーを測定した。 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ は、制動放射 $\gamma$ 線を $^{nat}\text{MoO}_3$ 標的に照射して製造し、Ge検出器で崩壊による $\gamma$ 線のエネルギーを測定した。 $^{18}\text{F}$ の測定は100 秒、 $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の測定は1時間ごとの測定を繰り返し行い、半減期を求めた。それぞれ測定したエネルギーと半減期から $^{18}\text{F}$ と $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ を同定し、得られた放射能の量を求めた。また放射性不純物に関しても、測定したエネルギーと半減期から核種を同定して放射能の量を求めた。

最後に、我々が考案した方法で医療利用に必要な量を製造できるか検証し、今後に向けた改善点について議論した。

# 次世代広帯域 X 線撮像分光衛星に向けた X 線 SOI ピクセル検出器多層化システムの開発

宇宙線研究室 立花克裕

**Abstract** We develop the system of stacked event-driven silicon-on-insulator (SOI) pixel sensors, named “XRPIX”. As a prototype, we design a circuit board with “XRPIX5b”, which has a large imaging area (24.6 mm × 15.3 mm), and we successfully obtain X-ray spectra.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

超巨大ブラックホールや超新星残骸など宇宙の多くの天体は 0.5 keV から 10 keV またはそれ以上の、広い帯域にわたって X 線を放射している。したがってその性質を解明するには広帯域での X 線観測が必要である。~10 keV 以上の帯域では非 X 線バックグラウンド (NXB) が支配的となるため、検出器の周りをアクティブシールドで取り囲み、時間分解能の高い素子による反同時計数法で NXB を除去する必要がある。これまでに Si と CdTe 両面ストリップ検出器を積層したハイブリッド構造の検出器が実現されている (e.g., 「ひとみ」 HXI (Hard X-ray Imager) [1]) が、5 keV 以下の検出が難しい。そこで我々は X 線 SOI ピクセル検出器「XRPIX」を多層化するシステムを提案する。

XRPIX は SOI (Silicon On Insulator) 技術を用いた検出部・読み出し回路一体型の検出器である。各ピクセルにイベントトリガー機能を備えることで、 $< 10 \mu\text{s}$  の時間分解能を実現する[2]。また裏面照射型とすることで ~0.5 keV から感度を持ち、広帯域撮像分光が可能となる。さらに、複数の層が反応したイベントを読み出すコンプトンカメラとしても利用でき、コンプトン散乱する際の散乱異方性から、コンプトンイベントを再構成することで X 線偏光観測も期待される。

コンプトンイベントを効率よく取得するためには、大きな面積の検出器を近づけて積層する必要がある。そこで我々は 24.6 mm × 15.3 mm の大面積素子「XRPIX5b」を開発した。さらに多層化システムのプロトタイプとして制御基板、フレキシブルプリント基板 (FPC)、チップ実装用基板を設計した (Fig.1 & Fig.2)。汎用読み出し基板にコネクタを用いてチップ制御基板を積層し、FPC でチップ実装用基板と 1 対 1 に接続する。各制御基板に 1 つの FPGA を搭載し、複数の素子を並列に制御することが可能である。汎用読み出し基板の FPGA が全素子を統括し、各素子のイベント情報から読み出す領域を決定し、PC へのデータ送信を行う。最大 8 層の積層が可能で、チップ間距離は最小で 9 mm である。また汎用読み出し基板の NIM 入出力を用いることで、シンチレータなど外部の検出器と同時・反同時計数をとることも可能である。シミュレーションを行い複数の FPGA が設計通りの動作をしていることを確認し、実機での X 線スペクトルの取得に成功した。

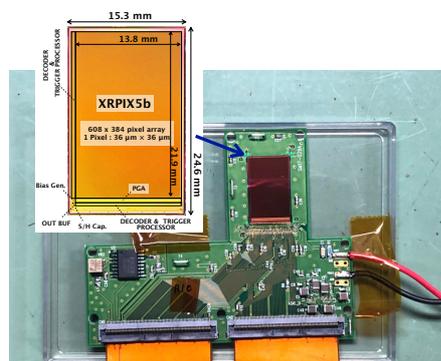


Fig. 1. Chip board.



Fig. 2. Data acquisition system.

## References

- [1] M. Kokubun, et al., SPIE **8443**,844325 (2014)
- [2] T. G. Tsuru, et al., SPIE **9144**, 914412 (2014)

# Micro Pixel ガス検出器の高計数率化および高利得化の研究

宇宙線研究室 谷口幹幸

**Abstract** A Micro Pixel Chamber, which is used in various experiments, is a two-dimensional imaging gaseous detector having a fine position resolution. However, we need to improve its gas gain and position resolution to achieve our goals. In this study, we evaluated the new Micro Pixel Chambers developed by two different approaches.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

Micro Pixel Chamber ( $\mu$ -PIC)は、プリント基板技術によって製造された二次元イメージングガス検出器であり、400  $\mu\text{m}$  ピッチという細かな電極構造によって約 120  $\mu\text{m}$ (RMS)の位置分解能を実証[1]、Time Projection Chamber の読み出しとして用いることで荷電粒子の詳細な飛跡(方向)を取得できる。 $\mu$ -PICは、MeVガンマ線望遠鏡[2]や中性子イメージング[3]、到来方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験[4]など、特に荷電粒子の方向が重要となる多くの実験に応用されている。

一方で、現在の MeV ガンマ線望遠鏡の角度分解能は 662 keV で約 15 度であり、長期気球や衛星を用いた将来計画では 5 度以下にまで向上させることが求められている。MeV ガンマ線望遠鏡の角度分解能を大きく制限しているのは、ガンマ線によって反跳された電子の反跳方向の決定精度である。したがって、その方向を決定している  $\mu$ -PIC の性能の向上は将来計画に向けた重要な要素のひとつである。本研究では、 $\mu$ -PIC の性能向上に 2 つの方法で挑んだ。

1 つ目は、製造方法を Micro Electro Mechanical System (MEMS) 技術に変更する方法である。これにより電極の短ピッチ化や基板を厚くすることによる高利得化が期待できる。先行研究ではシリコン基板の絶縁性という観点から、絶縁層である  $\text{SiO}_2$  膜の厚みと利得の関係を調査 (Fig. 1(a))、15  $\mu\text{m}$  時に従来の約 2 倍の利得を得た。本研究では絶縁層パラメータと利得との関係をさらに深く理解するために、新たに 2 種類の素子を試験した (Fig. 1(b))。その結果、 $\text{SiO}_2$  膜が 1  $\mu\text{m}$  の素子では十分な利得が得られず、15  $\mu\text{m}$  の素子では先行研究と同等の利得を得た。この結果から、本研究で用いた基板構造では  $\text{SiO}_2$  膜による絶縁性が極めて重要であることを改めて示した。また、実用化に向けて  $\text{SiO}_2$  膜 10  $\mu\text{m}$  を有する 5 cm 角の素子を開発し、MEMS 技術による  $\mu$ -PIC では初めて領域ごとの性能評価および比較を行った。

2 つ目は、プリント基板技術による 3 軸読み出し可能な  $\mu$ -PIC の開発である。従来の  $\mu$ -PIC はアノードとカソードの 2 軸ストリップ読み出しであるが、この構造では荷電粒子の飛跡が真の飛跡に比べて広がって再構成され、方向決定精度を悪化させている。本研究では、飛跡の方向決定精度を向上させるだけでなく、中性子イメージング等で重要となる高計数率化を目指し、アノードストリップの下に 3 軸目のストリップを 45 度回転させて挿入した 3 軸読み出し可能な  $\mu$ -PIC を世界で初めて開発した。動作試験の結果、3 軸目からの信号を取得し、原理検証の大きな一歩を踏み出すことに成功した (Fig. 2)。

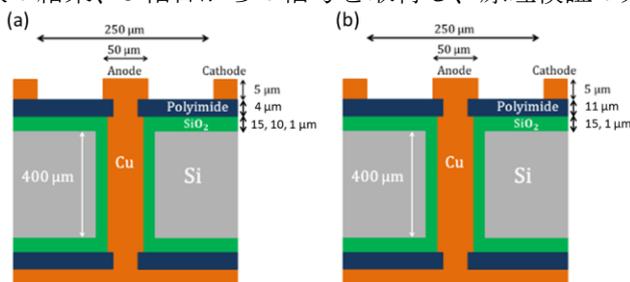


Fig. 1. The substrate structure of the MEMS  $\mu$ -PIC in the previous study (a) and in this study (b).

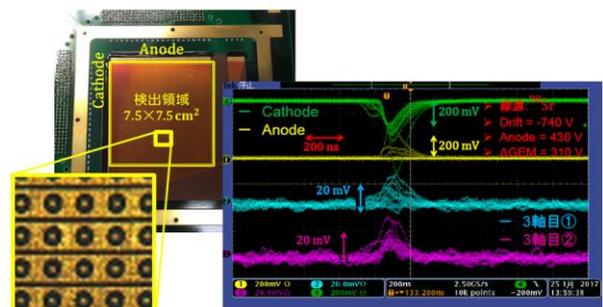


Fig. 2. The photograph of the 3rd axis  $\mu$ -PIC and signals from each strip.

## References

- [1] T. Nagayoshi, Doctor thesis, Kyoto University, Japan (2004).
- [2] T. Tanimori *et al.*, *Sci. Rep.* **7**, 41511 (2017).
- [3] J. D. Parker *et al.*, *NIM A* **697**, 23-31 (2013).
- [4] K. Nakamura *et al.*, *PTEP* 043F01 (2015).

# 二重ベータ崩壊探索実験 AXEL のための MPPC のキャリブレーションシステムの開発

高エネルギー物理学研究室 中村和広

**Abstract** We are developing a new detector AXEL for searching neutrinoless double beta decay. Since nonlinearity of the photo detector under the large amount of light becomes a problem, I developed a calibration system for MPPCs to evaluate the nonlinearity and correct it efficiently.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノはその発見からすでに 60 年以上が経つ素粒子であるが、反応の少なきゆえに未だに謎多き粒子である。ニュートリノの謎のひとつに「ニュートリノはマヨラナ粒子か否か」という問題があり、この問題を明らかにすることは、宇宙・素粒子物理学において非常に重要なテーマである。ニュートリノが標準模型の他の素粒子に比べて 7 桁から 9 桁も軽い理由を説明するシーソー機構[1]や物質優勢宇宙を説明するレプトジェネシスモデルはいずれもニュートリノが粒子と反粒子が同一粒子であるマヨラナ粒子を前提としており、このニュートリノの性質（マヨラナ性）を明らかにすることは、宇宙や素粒子に対する我々の理解を大きく前進させる可能性がある。

ニュートリノのマヨラナ性を検証するほぼ唯一の方法に、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の観測がある。我々はこの現象を世界で初めて観測すべく、高圧キセノンガス TPC (Time Projection Chamber) を用いた AXEL 検出器の開発を進めている。AXEL 検出器は高圧キセノンガスによる崩壊核の大質量化・飛跡検出による背景事象の除去、さらにはエレクトロルミネッセンス増幅過程による高エネルギー分解能 (FWHM0.5%@二重ベータ崩壊の Q 値) の達成が原理上可能であり、完成すれば今後のニュートリノ物理学の発展を担う、究極の検出器となる可能性がある。現在、10L 程度の小型試作機による原理実証と並行して今後の本格的な物理探索を見据えた 180L 程度の容積をもつ中型試作機の開発を進めており、大型化に向けた技術の確立が急務となっている。

AXEL 検出器では、ベータ線のエネルギー測定を小型半導体光検出器 MPPC が担っている。MPPC には  $1\mu\text{s}$  の間に最大で数万個の光子が入射するため、入射光量の増大に伴ってゲインの非線形性が問題になっている[2]。大光量下における MPPC のゲインの非線形性は補正を行うことが可能であることが先行研究から明らかになっていたが、補正のための測定を AXEL 検出器内で用いられる全て MPPC に対して現実的な時間内で終わらせるためには、測定から解析にかけて一貫したシステムを開発し、効率化することが不可欠である。

本研究では測定から解析までを行うシステムとして、5 個の同時測定を可能にしたキャリブレーションシステムの本体設計・製作を行った。また、製作したキャリブレーションシステムを用いて可視光用 MPPC と現在 10L 検出器で用いられている 65 個の真空紫外光用の MPPC に対して評価および解析方法の改良を行なった。

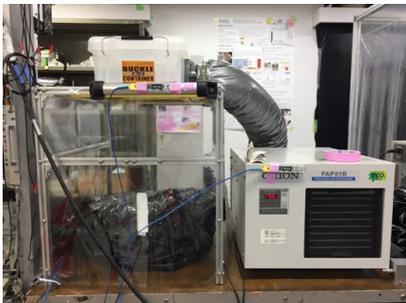


Fig. 1. Calibration system to evaluate MPPCs.

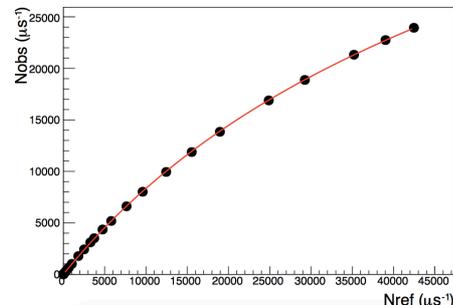


Fig. 2. Saturated gain of MPPC and fitted gain curve.

## References

- [1] T.Yanagida, *Horizontal Symmetry and Masses of Neutrinos*, Progress of Theoretical Physics 64(3), 1103-1105 (1980)
- [2] Saori Yanagita, 修士論文“AXEL 実験における高エネルギー分解能を達成するための MPPC および読み出し回路についての研究”, (2016)

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける 充填ガスの改良とガス純化システムの開発

宇宙線研究室 中村優太

**Abstract** An Electron-Tracking Compton Camera (ETCC) is developing for exploring the MeV gamma-ray astronomy. I studied a purification system for the long-term stable operations. This system kept the performance of the ETCC for over 3 weeks. In addition, I optimized the gas filled in the ETCC. Ne(69.72%)Ar(0.28%)CF<sub>4</sub>(30%) is the best performance gas in this study ( $\Delta E/E=20\%$  @31 keV).

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

数百 keV から数十 MeV までの MeV ガンマ線帯域は原子核壊変に由来するラインガンマ線の帯域であるため、元素合成・銀河内での物質循環の理解の上で重要なエネルギー帯域である。しかし、MeV ガンマ線観測技術の開発は他の帯域に比べて遅れており、<sup>26</sup>Al (1.81 MeV) や <sup>60</sup>Fe (1.17, 1.33 MeV) など由来する銀河面拡散ガンマ線分布の構造を理解するのに十分な精度は得られていない。その原因としては従来のコンプトン法やコーデッドマスク法では入射光子の到来方向を統計的にしか推定できなかったことが上げられる。我々の開発している電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) では散乱体としてガスを用いることでコンプトン反跳電子の飛跡を検出することにより到来方向をイベントごとに決定することができる。

2018 年 4 月に豪州 Alice Springs において銀河中心からの電子-陽電子対消滅ガンマ線 (0.511 MeV) を主な観測対象とする気球観測実験 SMILE-2+ を予定している。SMILE-2+ 用 ETCC での設計変更に伴うアウトガスの発生のために、対策なしでは 3 日程度で運用不可能となることが判明した。また、気候や地上・上空の風向きによる放球タイミングの制約のために 1 カ月にわたって検出器を万全な状態に保たなければならない、ガス純化システムが必要となる。そこで、充填ガスに適した吸着剤としてシリカゲル系とゼオライト系の二種類を選定した。ゼオライト系吸着剤を用いることで SMILE-2+ 用 ETCC 実機の 3 週間以上にわたる継続運用に成功した (Fig. 1)。

さらに、従来の 2 倍以上の感度達成を目標とする次期気球観測実験 SMILE-3 へ向けた ETCC 充填ガスの改良を行った。ETCC に適しているガスとは構成元素の核電荷 Z が小さく、1 分子当たりの電子数の多いガスであり、このようなガスでは他の相互作用に比べコンプトン散乱が優位となる。そこで、低 Z である Ne を主体としており比例計数管において 11.6 % (@5.9 keV) [2] の良いエネルギー分解能が報告されている Ne (99.5%) Ar (0.5%) と電子数の多い CF<sub>4</sub> を組み合わせた Ne-Ar-CF<sub>4</sub> 混合ガスの試験を行った。CF<sub>4</sub> を 30% まで加えても要求ガスゲイン ( $\sim 1.2 \times 10^4$ ) が得られ、安定動作することが確かめられた。この混合比では光電吸収断面積を約 1/10 に低減することができ、X 線に由来する不必要なトリガーを削減する効果が見込める。特に SMILE-3 ではシンチレータトリガーから TPC トリガーへの変更を予定しているため、この効果は大きい。さらに最適な Ne-Ar 比についても試験を行い、Ar:1% 以下で十分なガス増幅が起き (Fig. 2)、Ar:0.4% にて  $\Delta E/E$  が最良 (20% @31 keV) となる結果を得た。

## References

- [1] T. Tanimori *et al.*, *ApJ* **810**, 28-39 (2015).
- [2] H. Sipila., *NIM*, **133**, 251-252 (1976).

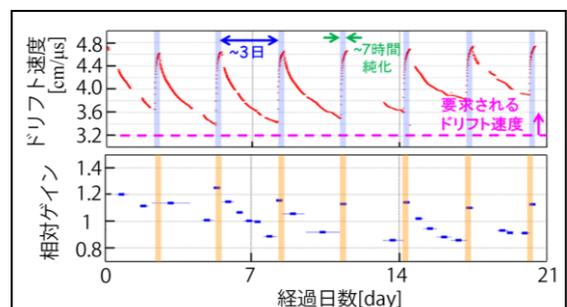


Fig. 1. Performance recovery by the gas purification system. Drift velocity(up) and Relative gain(down)

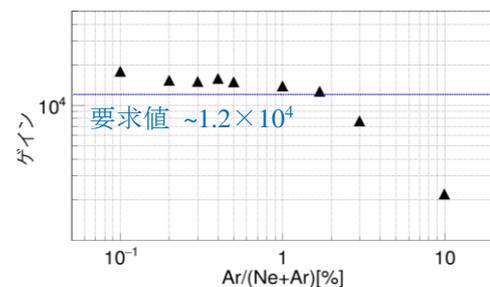


Fig. 2. Gas gain characteristics by Ar concentration (CF<sub>4</sub>:30%).

# 次世代ガンマ線天文台 CTA 大口径望遠鏡用 GHz 波形サンプリング回路の性能評価

宇宙線研究室 野崎誠也

**Abstract** The Cherenkov Telescope Array (CTA) is a ground-based observatory for gamma-ray astronomy at very high energies. We have developed a readout board of the focal plane instrument for the Large-Sized Telescope of CTA. We report the results of the performance test of the readout system.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

天体から放射される超高エネルギーガンマ線の観測には、地球大気と相互作用して形成される空気シャワーからのチェレンコフ光を地上の望遠鏡で検出することで、入射ガンマ線の到来方向とエネルギーを間接的に観測する手法を用いるのが一般的である。この手法を用いた次世代ガンマ線天文台が Cherenkov Telescope Array (CTA) [1]である。CTA は、口径の異なる三種類の望遠鏡を南北サイトに計約百台設置し、20 GeV から 300 TeV のガンマ線を現行の望遠鏡よりも 10 倍良い感度で全天観測を行う国際共同計画である。2018 年に初観測を迎える、口径 23 m の大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST) は、7 本の光電子増倍管 (PMT) と 1 枚の読み出し回路基板で構成される光検出器モジュール (Fig. 1) を 265 台使用し、その読み出し回路には、低消費電力で GHz 高速波形サンプリングを可能とするアナログメモリの DRS4 チップ[2]を採用している。

CTA-LST 運用開始に向け、解析手法の確立や実際に搭載する読み出し回路の全数性能評価が必要となる。本研究では、まず、データ解析の際に注意すべき DRS4 の特性を調査した。DRS4 には、局所的な電圧の増加により偽パルスが現れる問題や、キャパシタの残留電荷によりペDESTALが変化する問題があるが、これらの規則性を発見し、データ解析に取り入れることができた。次に、焦点面検出器システムに組み込んだ状態で読み出し回路が要求性能を満たしているかを確認するため、19 台の光検出器モジュールで構成されるミニカメラでの統合試験を行った。この結果、ノイズレベル 0.2 光電子以下などの要求性能を 236 台のモジュールが満たしていることを確認し、試験済みの 38 台を含め、LST 初号機で必要な台数分の全数性能評価を完了した。

今後行う予定のフルカメラでの試験では、DRS4 のサンプリング時間間隔の較正も行う。信号の電荷量は電圧×時間で求めるので、これにより電荷分解能の向上などが期待され、ミニカメラ試験よりも詳細に性能評価を行うことができる。そこで、較正用のサイン波を生成可能な読み出し回路基板を新たに開発し、時間較正手法を検証した。この結果、30 MHz のサイン波データの周期間隔を求める試験で、標準偏差を約 300 ps から約 15 ps に改善でき、時間較正が十分できていることを確認した (Fig. 2)。

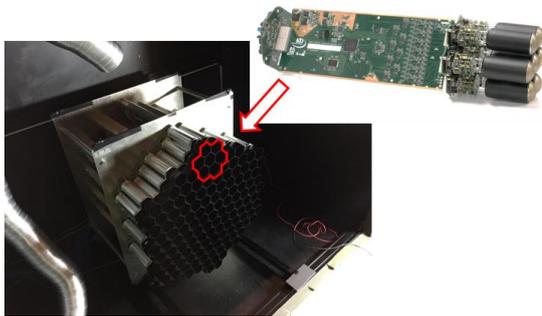


Fig. 1: Photographs of the camera module and the mini camera system composed of 19 modules.

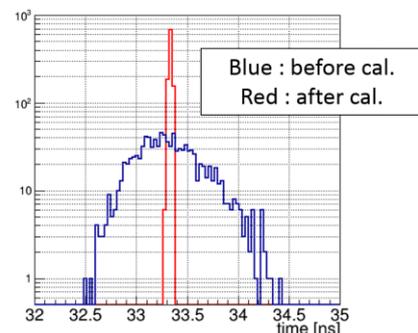


Fig. 2: Results of the period time test to verify the time calibration method for DRS4.

## References

- [1] Actis *et al.*, *Experimental Astronomy* **32**, 193-316 (2011).
- [2] Stefan Ritt *et al.*, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A* **623**, 486-488 (2010).

# カイラルゲージ理論の非摂動的定式化の研究

素粒子論研究室 濱田佑

**Abstract** Recently, a non-perturbative formulation of chiral gauge theories was proposed. In this thesis, we investigate the conservation of the axial  $U(1)$  current in the formulation and propose a correct definition of such a current. We also argue a novel gauge-invariant regularization for perturbative chiral gauge theories.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

素粒子標準模型は重力を除く3つの相互作用を非常にうまく記述していることがこれまでの実験事実からわかっている。しかしながら、標準模型はカイラルゲージ理論であるために、摂動論を超えた定式化が今のところ存在しない。非摂動的な定式化が完成した暁には、標準模型の抱える問題のいくつかが解決されると期待されている。

カイラルゲージ理論の非摂動的定式化が難しいのは、ニールセン-二宮の定理[1]により、カイラルなゲージ対称性を保つ単純な格子正則化が存在しないためである。この問題は30年以上にわたり未解決であったが、近年、ドメインウォール・フェルミオンとグラディエント・フローと呼ばれる手法を組み合わせてカイラルゲージ理論を格子上で定式化する方法が提案された[2]。この定式化ではドメインウォール・フェルミオンから生じる余分なカイラルフェルミオン(ミラーフェルミオン)を、グラディエントフローによってゲージ対称性を保ったまま decouple させる。これに関連して、このミラーフェルミオンが完全には decouple せず、非摂動的効果によって強いCP問題を解決しうることや、ダークマターの候補になりうることも報告[3]されており興味深い。しかしながら、この定式化において標準模型のQCDセクターの軸性 $U(1)$ カレントを素朴に定義すると、軸性アノマリーを再現せず保存してしまうことが指摘された[4]。

一方で、連続時空上の摂動論的なカイラルゲージ理論についても、ゲージ対称性を保つ定式化は知られていない。どの定式化を用いたとしても、フェルミオンループを計算して得られる有効作用にはゲージアノマリーとは別でゲージ対称性を破る項が生じてしまう。そのために、ラグランジアンに有限の相殺項を加えゲージ対称性を手で回復させる必要がある。上述のような非摂動的定式化を完成させるためにも、まずは摂動論的にゲージ不変な定式化を完成させることは重要である。

本修士論文では、まずカイラルゲージ理論を格子上で定式化する試みをいくつか解説する。その後、ドメインウォール・フェルミオンとグラディエント・フローを用いた方法についてのレビューを行う。さらに、その定式化における軸性 $U(1)$ カレントについて解析し、保存のメカニズムを明らかにした後、正しくアノマリーを再現するような定義を提案する[5]。最後に、連続時空上のカイラルゲージ理論について、ゲージ対称性を保つ新しい定式化について議論する。

## References

- [1] H. B. Nielsen and M. Ninomiya, Nucl. Phys. B 185 (1981) 20, Nucl. Phys. B 193 (1981) 173.
- [2] D. M. Grabowska and D. B. Kaplan, arXiv:1511.03649 [hep-lat], arXiv:1610.02151 [hep-lat].
- [3] K. Okumura and H. Suzuki, arXiv:1608.02217 [hep-lat].
- [4] H. Suzuki and O. Morikawa, private discussion at KEK Theory Workshop 2016
- [5] Y. Hamada and H. Kawai, arXiv:1705.01317 [hep-lat].

# X線天文用 SOI ピクセル検出器の 大面積化とイベント駆動読み出しの評価

宇宙線研究室 林 秀輝

**Abstract** We have been developing event-driven X-ray astronomical SOI pixel sensors, named “XRPIX”. We successfully obtain X-ray spectra from all the pixels with XRPIX5b, which has 608 x 384 pixels. Furthermore, we achieve the energy resolution of 350 eV (FWHM) at 6.4 keV with XRPIX6D in the event-driven readout mode.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

近傍宇宙の銀河に普遍的に存在する超巨大質量ブラックホールが、いかに形成され、宇宙形成史にどのような役割を果たしてきたのか、という謎の解明には、塵やガスに深く埋もれた活動銀河核の探査が有効である。この探査には高感度かつ広帯域 (0.5-80 keV) 観測が必須であり、その実現を図る次世代 X 線天文衛星「FORCE」を我々は推進している。X 線 CCD は現在主流のピクセル検出器であるが、時間分解能が数秒と悪いことに起因して ~ 10 keV 以上の帯域で非 X 線バックグラウンド (NXB) が高いため、FORCE には適していない。そこで、我々は X 線 SOI ピクセル検出器「XRPIX」を開発している。XRPIX は、SOI 技術を用いたセンサー部・読み出し回路一体型の半導体検出器である。各ピクセルにトリガー回路を備えているため、X 線がヒットしたタイミングでヒットしたピクセルのみを読み出す「イベント駆動読み出し」を可能とし、 $< 10 \mu\text{s}$  の時間分解能と  $> 1 \text{ kHz}$  のスループットを実現する。この高時間分解能により、NXB を除去する反同時計数法を用いることができ、広帯域撮像分光が可能となる。

先行研究で、トリガーに用いるデジタル信号とセンサー層との干渉がイベント駆動読み出しでの分光性能を悪くすることがわかっているが[1]、トリガーを用いない「フレーム読み出し」においては XRPIX3b で 320 eV (FWHM) @ 5.9 keV を達成している[2]。32 x 32 ピクセルの XRPIX3b をベースに、今回、608 x 384 ピクセルの大面積素子 XRPIX5b を開発し、フレーム読み出しによる性能評価を行った。XRPIX5b の全面で X 線スペクトルの取得に成功し、520 eV (FWHM) @ 6.4 keV の分光性能を持つことがわかった。また、この分光性能の劣化は、電荷収集効率の悪いピクセル構造が原因であることを発見した[3]。

XRPIX5b によるイベント駆動読み出しを行ったところ、X 線イメージの取得には成功したが (Fig. 1)、X 線スペクトルにおいて異常が見つかった。しかし、この異常が、トリガー回路のコンパレータとセンサー層との干渉によって引き起こされることを突き止めた。この干渉を抑えるものとして、回路層とセンサー層との間に、電磁シールドの役割を果たすシリコンの電位固定層を入れる、Double SOI 構造がある[4]。Double SOI 構造を導入し、さらに、電荷収集効率が良くなるようピクセル構造にも工夫を加えた XRPIX6D を新たに開発し、その評価を行った。XRPIX6D でイベント駆動読み出しによる X 線スペクトルの取得に成功し、干渉が抑えられていることを実証するとともに、350 eV (FWHM) @ 6.4 keV というイベント駆動読み出しで過去最高の分光性能を達成した (Fig. 2)。

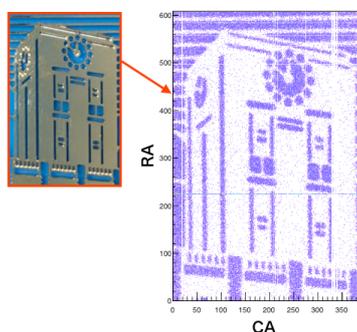


Fig. 1. X-ray image obtained with XRPIX5b in the event-driven readout mode.

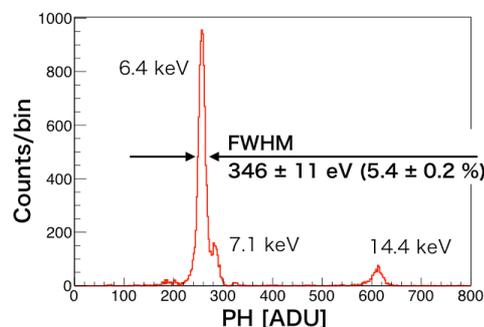


Fig. 2. X-ray spectrum of an  $^{57}\text{Co}$  radioisotope obtained with XRPIX6D in the event-driven readout mode.

- References** [1] A. Takeda, et al., PoS (TIPP2014), 138 (2014). [2] A. Takeda, et al., JINST **10**, C06005 (2015).  
[3] H. Hayashi, et al., NIM A in prep. [4] Y. Lu, et al., NIM A **831**, 44-48 (2016).

# フェムト秒レーザー予備照射金属の アブレーションに関する研究

レーザー物質科学 古川雄規

**Abstract** The femtosecond laser nano-ablation has been investigated by morphological studies for the titanium plate pre-irradiated by a femtosecond laser pulse. We have found that there are irradiation parameters (fluences and temporal interval of two laser pulses) under which the ablation is significantly suppressed.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

破壊閾値を超えるパルスレーザーを金属や半導体などの固体標的に照射すると表面層が剥離、飛散され Fig.1 に示すような照射痕が形成される。この剥離、飛散する現象を「アブレーション」といい、破壊閾値を「アブレーション閾値  $F_{th}$ 」とよぶ。これまで報告されてきたアブレーションの基礎物理に関する研究では、異なるレーザーの照射条件（フルエンス、波長、パルス幅など）により形成された照射痕の形状を調べることで物理機構が論じられてきた [1]。しかし、アブレーションの始状態（レーザー照射前）と終状態（照射痕形成後）を比較するだけでは、フェムト～ナノ秒でエネルギー吸収や熱拡散が進行すると考えられているアブレーションの動的変化を理解するのは難しい。そこで、筆者らは、一つのレーザーパルスを標的へと予備照射し、その後時間差をつけてもう一つのレーザーパルスを照射する「ダブルパルス照射」に取り組んでいる [2, 3]。特に、パルス幅の短いフェムト秒レーザーを用いると予備照射後フェムト～ピコ秒経過した固体表面状態を反映したアブレーションが行われる。本研究ではフェムト秒レーザーを用いて様々なフルエンス、2パルスの時間間隔でのダブルパルス照射を行い、一つのパルスのみ照射（シングルパルス照射）によるアブレーションとの比較を行った。

実験では時間間隔0.3-1000psのダブルパルスのフェムト秒レーザー（中心波長810nm, パルス幅80fs, 繰り返し周波数10Hz）を用いた。Fig.2 に表面研磨したチタン板にダブルパルス照射した際のアブレーション率（1照射あたりの掘る深さ）の時間間隔依存性を示す。アブレーション率が0nmとなるフルエンスをアブレーション閾値  $F_{th}$  として、第一パルス+第二パルスの順にダブルパルス照射のフルエンスを示す。第一パルスのフルエンスがアブレーション閾値以下 ( $0.3F_{th}$ ) である場合（赤実線）時間間隔を変えてもアブレーション率はほとんど変化しないが、アブレーション閾値以上 ( $1.0F_{th}$ ) である場合（青一点鎖線）は時間間隔を変えるとアブレーション率が大きく変化した。特に時間間隔100ps付近ではアブレーション率が第二パルスのみ照射（フルエンス  $1.7F_{th}$ 、紫点線）よりも小さくなり、アブレーションの抑制が起きることを発見した。

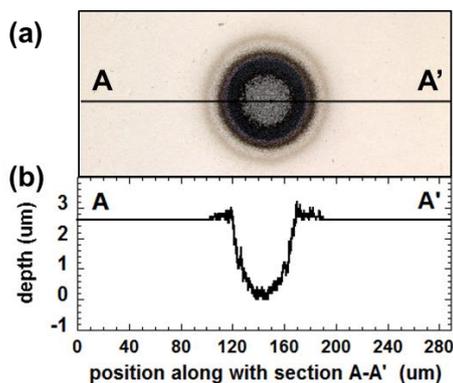


Fig. 1 (a) Typical image of laser-produced crater on a titanium plate taken with a confocal laser microscope and (b) depth profile along with section A-A'.

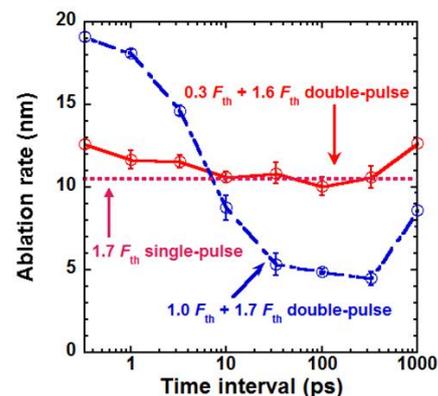


Fig. 2 Time interval dependences of ablation rate for double-pulse irradiation. Horizontal dotted line shows ablation rate for single-pulse irradiation with fluence  $1.7 F_{th}$ .

## References

- [1] S. I. Anisimov and B. S. Luk'yanchuk, Phys.-Usp **45**, 293 (2002).
- [2] M. Hashida *et al.*, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering **9**, 234 (2014).
- [3] Y. Furukawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. **108**, 264101 (2016).

# 中性子照射放射化法による原子分解能メスバウアー分光法の開発研究

核放射物理学研究室 細川修一

**Abstract** The deposited thin Er and Gd films were irradiated by neutrons to produce Mössbauer radioactive sources. Although the thickness of each film was below 1  $\mu\text{m}$ , their Mössbauer spectra were successfully obtained. By using enriched isotopes, Mössbauer spectroscopic study of the atomic layers in films is promising.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

固体中の原子核が同種の励起核からの  $\gamma$  線を反跳なしに吸収/放出する現象は、無反跳核  $\gamma$  線共鳴効果(メスバウアー効果)と呼ばれる。反跳を無視できることで原子核の励起準位の neV 程度の線幅がそのまま  $\gamma$  線に保持され、それにより原子核とその周囲の電子系との電磁相互作用である超微細相互作用による準位の分裂をきわめて高精度に決定することができる。これを利用し電子構造や磁気的な性質の情報を得ようという手法がメスバウアー分光法である [1, 2]。

メスバウアー分光法には特定の同位体のみが測定可能であるという特徴があり、その同位体(あるいはそれを含む元素)の電子状態を選択して測定することができる。例えば、物質中の任意の場所のみを感度のある  $^{57}\text{Fe}$  で、残りを感度のない  $^{56}\text{Fe}$  で同位体置換することで原子一層単位、すなわち原子分解能での情報が得られる [3]。これにより既存の方法では困難であった原子分解能での研究が可能となるが、様々な対象の測定を行うために多くの元素(同位体)での測定を実現することが重要である。特に希土類は、その多くがメスバウアー効果を測定可能であり、原子層単位でメスバウアー効果を測定できれば、希土類を含む物質での同位体置換や磁性薄膜/多層膜などへのプローブとなる。これを目標とし、その第一歩として希土類元素である Gd 及び Er の薄膜でのメスバウアー効果測定についての研究を行った。

通常メスバウアー分光測定では、超微細相互作用による準位分裂のない線源からの単色  $\gamma$  線を測定対象の試料に透過させて、試料の核準位のエネルギープロファイルを調べるが、十分な吸収のためには同位体成分として  $\mu\text{m}$  程度の試料厚が必要であり、nm オーダー以下の原子層では測定が難しい。そこで京都大学原子炉実験所の研究用原子炉(KUR)を利用し、Gd 及び Er 薄膜を中性子照射で放射化することで薄膜内部にメスバウアー親核である  $^{161}\text{Tb} \cdot ^{169}\text{Er}$  を生成した。これらの親核から放出される、薄膜の電子状態に由来する超微細構造を反映した  $\gamma$  線のエネルギープロファイル、超微細構造のない単色な吸収プロファイルを示す  $^{161}\text{Dy}$  及び  $^{169}\text{Tm}$  の吸収体を用いて分光することで、メスバウアースペクトルを測定することに成功した。

本論文では、Gd 及び Er 薄膜の成膜過程や放射化条件について報告し、また得られたメスバウアー吸収スペクトルを分析した結果と今後の研究の展望について述べる。

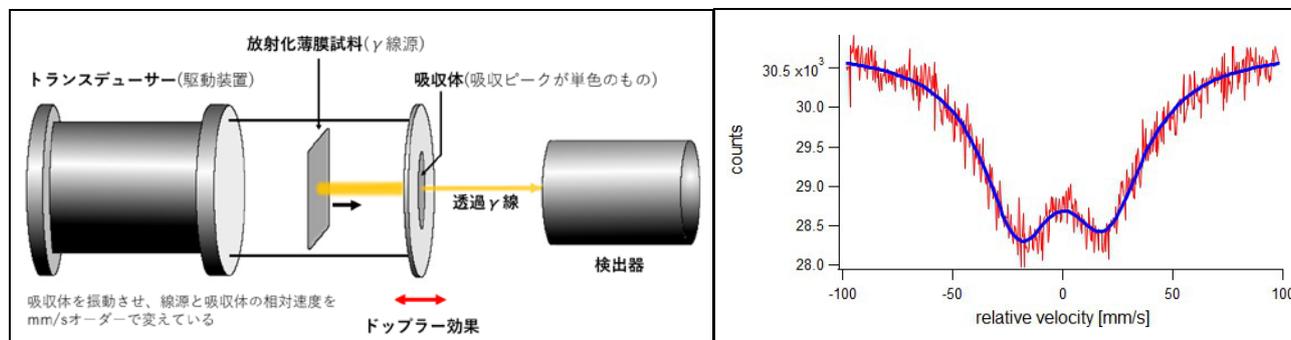


Fig. 1. Schematic drawing of the measurement system. Fig. 2.  $^{169}\text{Tm}$  - Mössbauer spectrum of irradiated Er film.

## References

- [1] N.N. Greenwood, T.C. Gibb, "Mössbauer Spectroscopy", (Chapman and Hall Ltd, 1971).
- [2] 佐野博敏, "メスバウアー分光学—その化学への応用—" (講談社, 1972).
- [3] J. Landes, Ch. Sauer, R.A. Brand, W. Zinn, S. Mantl and Zs. Kajcsos : J. Magn. Magn. Mater. **86**, 71 (1990).

# グラズマの熱化に伴うフォン・ノイマンエントロピー生成

原子核理論研究室 松田英史

We study thermalization in relativistic heavy ion collisions in the early stage. We evaluate the von-Neumann entropy by assuming that the classical Yang-Mills field represents a coherent state which decoheres at a certain time. We find that entropy production and pressure isotropization take place in a similar time scale.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

量子色力学(QGP)は、物質の高温領域に色電荷を持つ素粒子で構成されるプラズマ、通称クォーク・グルーオンプラズマ(QGP)の存在を予言する。QGPを実験で作り出すことは20世紀の物理学にとって悲願の1つであった。2000年にRelativistic Heavy Ion Collider(RHIC)で行われた相対論的重イオン衝突実験の結果は、衝突後0.6 fm/c程度の時間にQGPが生成されていることを示唆した[1]。このRHIC実験はQGP探索初期の非常に重要な結果であり、大きな驚きであったが、同時にいくつかの疑問を物理学者に投げかけた。そのうちの1つがQGP生成時間に関する問題である。0.6 fm/c程度という熱化時間は、摂動的QCDを用いて見積もられた熱化時間[2]に比べて非常に短いことから、この問題は「早い熱化の問題」と呼ばれている。「早い熱化の問題」を解決するためには、相対論的重イオン衝突の熱化過程をより深く理解することが必要である。

相対論的重イオン衝突の熱化過程を大きく2つに分けると、1つは高運動量のパートン・パートン散乱過程、もう1つは高運動量パートンが作り出すコヒーレントな古典グルーオン場の崩壊過程である。摂動的QCDによる計算が着目しているのは、高運動量のパートン・パートン散乱過程であるが、コヒーレントな古典グルーオン場が崩壊して粒子を生成する過程の重要性が指摘されている[3]。衝突直後、古典場は非等方であり、非等方性に起因する不安定性を有している[4-7]。さらに、不安定性によるゆらぎの急速な成長とともに圧力や場の等方化が起きることが知られている[5, 8-9]。

本研究では、古典ヤンミルズ場の等方化に伴って起こると期待される重イオン衝突初期の熱化について研究する。熱化の指標の1つとして対角成分のみを残した密度行列を用いて量子論的なエントロピーであるフォン・ノイマンエントロピーを評価する。フォン・ノイマンエントロピーは密度行列 $\rho$ を用いて、 $S_{VN} \equiv -\text{Tr}(\rho \ln \rho)$ と定義される。定義より、純粋状態に対しては $S_{VN} = 0$ であり、有限の $S_{VN}$ を得るためには、何らかの粗視化により「混合」型の密度行列を使う必要がある。例えば、対角成分のみを残した $\rho_{\text{dec}}$ を用いると $S_{\text{dec}} \equiv S_{VN}(\rho_{\text{dec}})$ は有限となる。 $S_{\text{dec}}$ をデコヒーレンスエントロピーと呼ぶ。 $S_{\text{dec}}$ をグラズマの熱化に適用するために、古典ヤンミルズ場 $(A, E)$ を期待値として持つコヒーレント状態 $|\alpha\rangle$ を古典ヤンミルズ場に対応する量子系とみなすことにする。その時の密度行列は1自由度について、 $\rho^{(1)} = |\alpha\rangle\langle\alpha|$  ( $\alpha = (\sqrt{\omega_k} A_k + i E_k / \sqrt{\omega_k}) / \sqrt{2}$ )となる。 $|\alpha\rangle$ は様々粒子数固有状態 $|n\rangle$ の重ね合わせであり、ここでは $|n\rangle$ を基底とした $S_{\text{dec}}$ を計算する。

$S_{\text{dec}}$ と同時に、分布関数のボルツマン分布への緩和と圧力の等方化も計算し比較する。結果、急速な圧力の等方化とほぼ同時に分布関数の緩和と $S_{\text{dec}}$ の生成が見られた。

## References

- [1] Ulrich W Heinz and Peter F Kolb, Nucl. Phys. A **702**, 269 (2002) [arXiv:hep-ph/0111075].
- [2] R Baier, Alfred H. Mueller, D Schiff, and DT Son, Phys. Lett. B **502**, 51 (2001).
- [3] Rainer J Fries, Berndt Müller, and Andreas Schäfer, Phys. Rev. C **79**, 034904 (2009).
- [4] Peter Arnold, Jonathan Lenaghan, and Guy D Moore, JHEP **2003**, 002 (2003).
- [5] Paul Romatschke and Raju Venugopalan, Phys. Rev. D **74**, 045011 (2006).
- [6] Hirotsugu Fujii and Kazunori Itakura, Nucl. Phys. A **809**, 88 (2008).
- [7] Shoichiro Tsutsui, Teiji Kunihiro, and Akira Ohnishi, Phys. Rev. D **94**, 016001 (2016).
- [8] T. Lappi and L. McLerran, Nucl. Phys. A **772**, 200 (2006).
- [9] Thomas Epelbaum and Francois Gelis, Phys. Rev. Lett. **111**, 232301 (2013).

# 質量欠損分光のための多芯式ドリフトチェンバー 読み出し系の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 松本翔汰

**Abstract** A data acquisition (DAQ) system for multiwire drift chambers (MWDCs) has been developed by implementing in the standard DAQ software at RIBF. It will enable us to open new research programs at the RIKEN RIBF facility, such as precision spectroscopy of pionic atoms and search for double Gamow-Teller giant resonances.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

本修士論文における目標は、新たに開発した多芯式ドリフトチェンバー(MWDC)と、理化学研究所 RI ビームファクトリー(RIBF)の既存検出器系の信号を合わせて読み出し、実験に必要なレート耐性をもつデータ収集(DAQ)システムを構築することである。RIBFにおいて、 $\pi$ 中間子原子分光[1]と二重ガモフテラー巨大共鳴探索[2]の2つの実験を計画しているが、両実験はRIBFの大強度ビームと分散整合ビームラインを活用して統計量の増大と分解能の向上を図る点で共通している。本論文では、DAQシステムの開発内容と性能評価に加え、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(CYRIC)にて本DAQシステムを新規MWDCに適用して行ったテスト実験の結果について報告する。

MWDC読み出しの高速化およびRIBF既存検出器系との連動を実現させるため、ASD、FADC、TDC一体型MWDC読み出しボード[3]をRIBF汎用DAQソフトウェア[4]に組み込む開発を行った。まず最初に $^{90}\text{Sr}$ - $\beta$ 線源を用いて、DAQのレート耐性とイベント同期の整合性を調べた。 $\pi$ 中間子原子分光の先行研究では、MWDCとシンチレータからの信号を同一のVMEバスで読み出したことにより、全不感時間 $420\mu\text{s}$ のうち $170\mu\text{s}$ をMWDCの読み出しに費やしていた[5]。そこで、MWDCをボード毎に並列に読み出すことにより不感時間を分散させた結果、両実験で期待される最大 $1\text{kHz}$ のトリガーレートに対して約80%のデータ取得効率を達成した。また、MWDC読み出し系と既存VME系間のイベント同期が保証されるよう、以下の2つの方法を用いた。まず各モジュールでトリガーを共有させ、取得したイベントの総数を揃えた。加えてイベント番号配布・受信モジュールを導入し、イベント番号をデータとして記録することで、データの順序逆転や欠損がないことを確認した。

本番実験を想定し、CYRICの930型AVFサイクロトロンで加速した $30\text{MeV}$ 陽子ビームを用いて、MWDCとDAQシステム全体の性能評価を行った。PMTをシンチレータの両端に取り付け、陽子通過によるシンチレーション光の波高とタイミングをVMEモジュールで読み出し、MWDC読み出し系とのイベント同期を確認した。Figure 1は、MWDCから求めた粒子の飛跡とシンチレータの交点を横軸に、2つのPMTで検出した信号の時間差を縦軸に取ったものである。トリガーレート $1\text{kHz}$ の下で取得した20万イベントについて正しく位置の相関が現れ、イベント同期を含むDAQシステムの健全性が示された。今回開発した不感時間が短く既存検出器と同期のとれるDAQシステムは、計画中の $\pi$ 中間子原子分光実験やガモフテラー巨大共鳴探索実験からの要求を満たすことが確認できた。

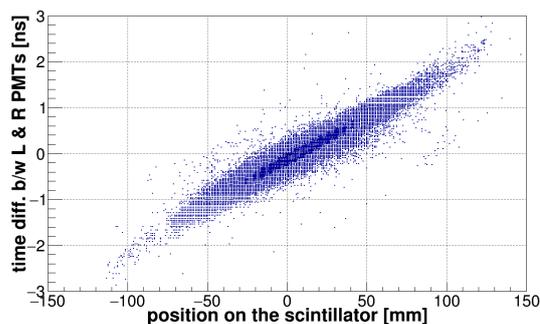


Fig. 1. Correlation between the reconstructed hit position at a plastic scintillator using MWDC (abscissa) and the TDC value difference of two PMTs on both sides of the scintillator (ordinate).

## References

- [1] K. Itahashi *et al.*, NP1512-RIBF135 (2015).
- [3] H. Yamakami, Master's thesis, Kyoto Univ. (2015).
- [5] T. Nishi, Ph. D. thesis, Univ. Tokyo (2015).

- [2] T. Uesaka *et al.*, NP1512-RIBF141 (2015).
- [4] H. Baba *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **616**, 65 (2010).

# Distance between configurations in MCMC simulations and the emergence of AdS geometry

素粒子論研究室 松本信行

**Abstract** For a given Markov chain Monte Carlo algorithm we introduce a distance between two configurations that quantifies the difficulty of transition from one configuration to the other configuration. We show that the optimization of tempering parameters in simulated tempering algorithm gives an anti-de Sitter geometry in the extended configuration space.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法) を用いてシミュレーションを行う際、配位間のポテンシャル障壁のために目的の平衡分布がマルチモーダルである場合には、系が平衡分布に到達するまで非常に長い計算時間を要する。実際には、このような事態を避けるため、過緩和法[1]や、テンパリング法[2]などのアルゴリズムが併用されるが、過緩和法はいつでも適用できるものではなく、またテンパリング法はパラメータの高度な最適化が必要となる。

そこで、考えている MCMC 法のアルゴリズムに対して、2つの配位間がどの程度離れているかを評価する指標があれば有用である。これまで、系が大域的平衡へ到達する速さを評価するために用いられてきた指標には、2つの確率分布のずれを計る  $L_1$  距離や、演算子の自己相関時間などがあったが、2つの配位間の遷移の難しさを直接計る指標は今まで存在しなかった。

我々は[3]において、与えられた MCMC 法のアルゴリズムに対し、ある配位から別の配位へ遷移する難しさを定量化する「配位間の距離」を導入した。この距離は、距離の公理を全て満たすと同時に、配位空間の中で局所的な遷移を生成するアルゴリズムに対して普遍的な表式を与える。我々は、ランジュバン法を用いて、幾つかの例について距離の具体的表式を導出し、この距離が確かに配位間の遷移の難しさを表す指標になっていることを確認した。さらには、マルチモーダルな分布に対してシミュレーテッドテンパリング法 (ST 法) を用いると、元々大きかった 2 点間の距離が、劇的に減少することを示した。

さて、このような距離の導入により、MCMC 法における緩和過程を、配位空間の幾何を用いて調べることが可能になる。特に、パラメータの最適化を幾何学的に行うことができる。

我々は特に、平衡分布が著しくマルチモーダルで、多数の真空が縮退している系の ST 法についてその幾何を詳しく調べ (Fig. 1. 参照)、2 点間の距離が最小となるようにテンパリングパラメータを最適化すると、拡大された配位空間が反ド・ジッター空間の幾何を持つことを示した [3, 4]。

本修士論文では、上記の研究を詳しく基礎から解説する。

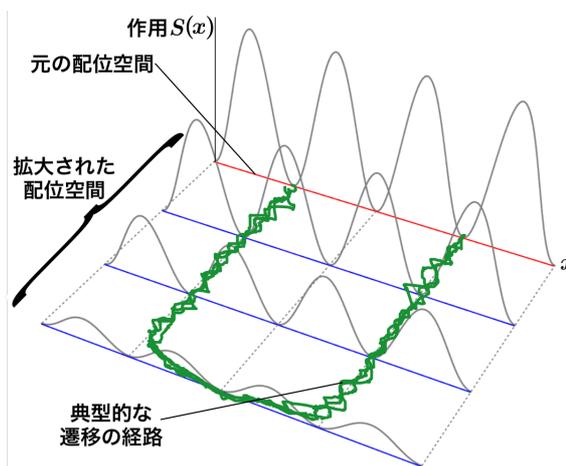


Fig. 1. simulated tempering

## References

- [1] M. Creutz, *Overrelaxation and Monte Carlo Simulation*, *Phys. Rev. D* **36**, (1987) 515.
- [2] E. Marinari and G. Parisi, *Simulated tempering: A new Monte Carlo scheme*, *Europhys. Lett.* **19**, (1992) 451.
- [3] M. Fukuma, N. Matsumoto, N. Umeda, *Distance between configurations in Markov chain Monte Carlo simulations*, *JHEP* **12** (2017) 001.
- [4] M. Fukuma, N. Matsumoto, N. Umeda, in preparation.

# 極短パルスレーザーを用いたレーザーイオン源 におけるガス密度測定

ビーム物理学研究室 宮脇瑛介

**Abstract** We are developing a laser ion source with a new scheme. The repetitive ultrashort laser pulses can generate a microbunch train of short ion-pulses. Gas density, which is an important parameter, is to be measured by Rayleigh scattering. We carried out some experiments such as gas density measurement in order to investigate of the fundamental process of the plasma generation.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

加速器は原子核実験推進のため発明され、以来、素粒子・原子核実験を支える重要な装置として発展を続けてきた。その利用は今後さらに広がっていくことが予想され、従来のような大型かつ複雑な構成を持つシステムから、よりシンプルで扱いやすい汎用型の加速器への展開、発展が必要である。

イオン加速器の前段加速部に RFQ(Radio Frequency Quadrupole)を用いることが現在の主流となっている。一般的なイオン源ではバンチ化されていないビームが生成されるので、バンチングセクションが必要になるが、これは RFQ 全体の多くの部分を占める。従って、入射時点ですでにバンチ化されていればバンチングセクションが不要となり、RFQ 加速器における加速効率の向上や RFQ の小型化が見込まれる。そこで我々はパルス幅が fs 程度の極短パルスレーザーを用いて ns 程度の時間構造をもったイオンを生成することを試みた。その結果、短マイクロバンチのイオンが生成したプラズマから引き出し可能であることが分かった[1]。このイオン発生機構の分析には、イオン温度やガス密度など重要なパラメータの測定が必要である。

そこで本研究では、まずプラズマ発生の素過程の解明に必要なガス密度の測定を試みた。プラズマはガスをパルスガスバルブでジェット状に出し、そこに数十マイクロン程度の空間に絞ったレーザーを照射して生成させるため、時間的、かつ空間的に局在化した空間での測定が必要である。一方、発生したプラズマからイオンを引き出す高電場をかけるために、発生領域は壁に挟まれており、その大きさは 1 mm 程度である。このような状況下での測定には、同様に絞ったレーザーによる測定が合理的で、干渉法や散乱法が考えられる。Mass Flow Meter を用いたガス流量測定結果から、実験条件下における瞬時ガス流量は～400 SCCM であることが分かった。また、ガスノズルとガス照射部の形状からガス密度を見積もったところ、ガス分子密度は～ $10^{22}$   $1/m^3$  であり、散乱法による計測が可能である[2]。散乱法では散乱断面積が小さいため散乱光以外の迷光を減らす必要がある。また、測定領域が狭いため、ビームハローを極力取り除くための光学系を組んだ。

本発表ではレーザーイオン源の現状を説明し、ガス密度測定をはじめとした様々な実験結果について発表する。

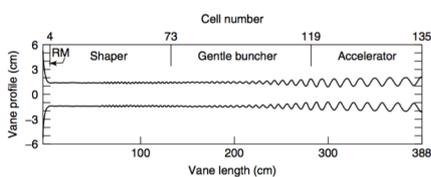


Fig.1: Schematic drawing of the pole tips of an RFQ with adiabatic bunching[3].

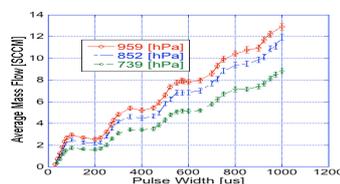


Fig.2 Result of Average Mass Flow Measurement

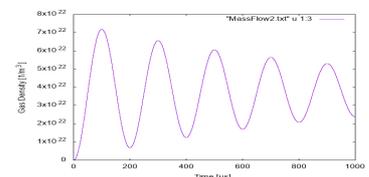


Fig.3: Simulation of gas density

## References

- [1] Y. Fuwa, Y. Iwashita, H. Tongu, S. Inoue, M. Hashida, S. Sakabe, M. Okamura, A. Yamazaki, "RF synchronized short pulse laser ion source", Review of Scientific Instruments **87**,02A911(2016).
- [2] Sheffield, J, "Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation", Academic press, New York, 1975.
- [3] T. P. Wangler. RF Linear Accelerators. Wiley-VCH, 2nd, completely revised and enlarged edition, 2008.

# スーパーカミオカンデにおける超新星爆発観測用 DAQ の開発と遠い超新星爆発探索の最適化

高エネルギー物理学研究室 森正光

**Abstract** The current DAQ of SK may be overflowed by nearby a supernova, so a new DAQ system has been developed to prevent this. In addition, search criteria for distant supernova have been studied using SK-IV MC.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

太陽質量より 8 倍以上重い星は、その進化の最終段階で超新星爆発という大爆発を起こす。超新星爆発は、 $10^{53}$ erg もの莫大な重力エネルギーを数秒の間に放出する、宇宙でも最大規模の現象である。超新星爆発の爆発機構には重力、電磁気力、弱い力、強い力の自然界の 4 つの相互作用がかかわる非常に複雑な現象であるために、その爆発機構はいまだに謎が多い。超新星爆発はそのエネルギーの 99% をニュートリノとして放出するだけでなく、重力崩壊の開始から停滞した衝撃波の加熱までニュートリノが深くかかわってくる現象のため、ニュートリノでの観測が望まれている。しかし、実際に観測できたのは 1987 年の一度きりである [1]。水チェレンコフ型のニュートリノ観測装置スーパーカミオカンデ（以下 SK）でも、引き続き観測を行っている。本研究の目的は、SK の超新星爆発観測用 DAQ の開発と SK での超新星爆発探索である。超新星爆発からは大量のニュートリノイベントが予測されるため (Fig. 1) 超新星爆発が非常に近傍で起こった場合（例ベテルギウス 距離 640 光年）、現在の SK の DAQ（QBEE）では、処理が追い付かなくて、内部のバッファがオーバーフローを起こしてしまう可能性がある。そこでそのような場合でも対応できる新しい DAQ（SN module）の開発を行った。SN module は QBEE からヒットを記録したこの DAQ は QBEE がデータをとれていない間にデータをとるだけでなく、イベントレートを監視して QBEE のオーバーフローが起きそうになったらオーバーフローを防ぐために veto 信号を送る役割がある。本研究はこの veto 信号を出すモジュール(veto module)の開発である。

Veto module は FPGA を用いて開発した。QBEE でとることのできるデータを最大限にするために、適切なタイミングで veto 信号を出さなければならない。この veto を出すタイミングを決定するために、SK のタンク内でレーザーダイオード（以下 LD）を光らせて、疑似的に超新星爆発を再現する LD バーストテストを複数回行った。QBEE がエラーを出すバーストの調査とその上で veto 信号を決めるためのテストと、veto module を取り付けて実際に QBEE のオーバーフローを抑えることができるかのテストを行った。このテストの結果 veto module を導入すれば、合計イベント数 30M イベントのバースト（ベテルギウス相当）でもオーバーフローを抑えることができることを確かめた。

SK での超新星爆発探索は、2008 年からの SK-IV のデータを使用した。この期間のデータを使っての超新星爆発探索は比較的近い場合は行われているが、イベント数の少ない遠い場合は行われていない。探索方法はある time-window 内に入ったイベント数を数えてある閾値以上のイベントのクラスターを探しだし、そのあとでそのクラスターの分布の一様度を調べて超新星爆発のものであるかどうかを判定した。イベントのカット条件の決定には MC を使って超新星爆発が起こった時の SK でのイベントを調べて最適化を行っている。

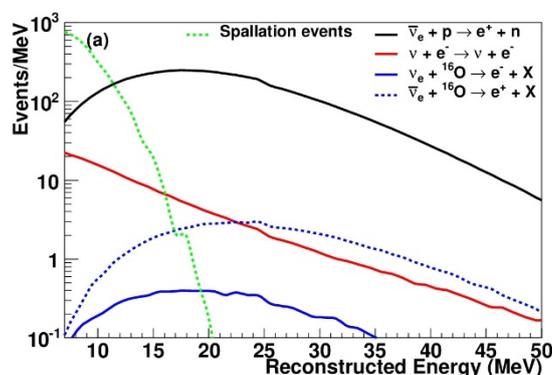


Fig.1. Expected neutrino spectrum in SK from a supernova at 10kpc[2]

## References

- [1] K.Hirata *et al.*, Physical review letters **58** (1987) 1490-1493
- [2] Super Kamiokande Collaboration, Astroparticle Physics **81** (2016) 39-48

# 積分経路の変分による符号問題の最適化

原子核理論研究室 森勇登

**Abstract** We propose a new method, the path optimization method, to avoid the sign problem which arises in some field theories, such as finite density lattice QCD. We demonstrate that the method works well in two models with a serious sign problem, one-dimensional integral and complex scalar field theory on lattice.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

符号問題は経路積分を数値的に評価する際に、被積分関数が激しく振動することによって生じる問題である。振動する関数の積分には打ち消しあい起きるため、物理量の期待値の計算精度が著しく悪化する。符号問題は化学ポテンシャルが有限の量子色力学においても現れ、高密度領域における数値シミュレーションを困難にしていることから、重要な課題の一つである。符号問題を解決するために様々な方法が提案されているが、近年、勾配流によって生成される Lefschetz thimble 上での積分が注目を集めている。thimble 上では作用の虚部が一定となり、打ち消しあいを弱めることが期待されているが、作用の正則性を仮定しているため、特異点やカットが存在する場合の振る舞いは非自明である [1]。

そこで、本研究では Lefschetz thimble とは異なるアプローチで符号問題の弱い経路を選び出す方法として経路最適化法を提案した [2]。経路最適化法では積分経路を試行関数で与え、打ち消しあいを定量化するような関数を最小化するように試行関数を変分することで適切な経路を得る。このように符号問題を最適化問題と見なすことで、変分空間の制限等、様々な応用が期待できる。

本論文ではまず、経路最適化法を文献[3]で用いられた Gaussian 模型への適用を行った (Fig. 1)。結果として、1次元の場合は特に停留点周りで thimble と強い重なりを持ち、元の経路に比べて符号問題が弱まることを確認した。

また、場の理論への適用では、試行関数の関数形の与え方が問題となる。この問題に対して、機械学習の分野でよく用いられているニューラルネットワークを用いて最適化をすることを提案した [4]。場の理論への適用の第一歩として、計算自体は単純であるが、符号問題が存在する有限密度の複素スカラー場の理論 (Lefschetz thimble による解析は文献[5]を参照) に、ニューラルネットワークを用いた経路最適化法を適用し、最適化前の経路に比べて計算精度を向上させられることを確認した (Fig. 2)。

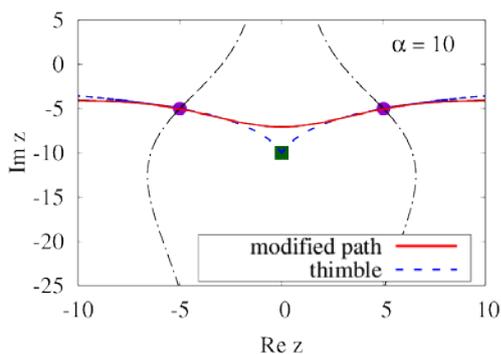


Fig. 1. The optimized path (red solid line) and Lefschetz thimble (blue dashed line) for the Gaussian model.

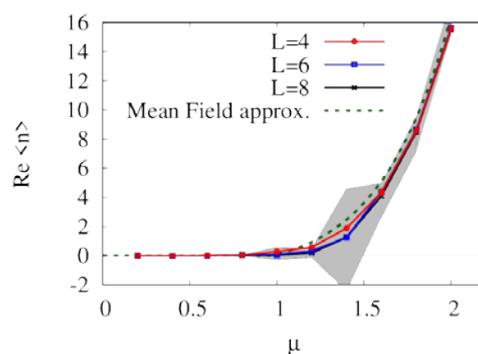


Fig. 2. The expectation values of number density for the complex scalar field. The lines with symbols (shaded area) show the expectation values on optimized (original) path.

## References

- [1] Y. Mori, K. Kashiwa and A. Ohnishi, arXiv:1705.03646.
- [2] Y. Mori, K. Kashiwa and A. Ohnishi, Phys. Rev. **D96**(11), 1115001 (2017).
- [3] J. Nishimura and S. Shimasaki, Phys. Rev. **D92**, 011501 (2015).
- [4] Y. Mori, K. Kashiwa and A. Ohnishi, to be published in PTEP, arXiv:1709.03208.
- [5] H. Fujii, D. Honda, M. Kato, et al., JHEP, **1310**, 147 (2013).

# ニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊探索に向けた高圧 Xe ガス TPC AXEL のための高電圧ドリフト電場形成の研究

高エネルギー物理学研究室 吉田将

**Abstract** AXEL is a high-pressure xenon gas TPC for a neutrino-less double beta decay search. It requires strong and uniform drift field of  $1 \text{ kV/cm} \pm 5\%$  to achieve high energy resolution. I developed a Cockcroft-Walton circuit and designed a field-cage which satisfy the requirement.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノ振動の発見[1]によりニュートリノが微小な質量を持つことが明らかになった。しかしながら各質量固有値は判明しておらず、その大小の順序も未解明である。さらには質量の総和に付けられている上限値が他のフェルミオンの質量に比して極めて軽く[2]不自然であるという問題もある。

ニュートリノが粒子と反粒子を同一視できるフェルミオン、マヨラナ粒子であると、質量の極端な軽さを自然に説明できる可能性がある。ニュートリノのマヨラナ性を検証する方法に、ニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊( $0\nu\beta\beta$ 崩壊)の観測がある。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊とは、原子核で2つの $\beta$ 崩壊が同時に起こる際に、一方の中性子から生じた反電子ニュートリノがマヨラナ性により他方の中子に電子ニュートリノとして吸収され、原子核からは2つの電子しか発生しないという反応で、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見はニュートリノのマヨラナ性の証明となる。さらに、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の寿命からはニュートリノ質量についての情報も得られる。

AXELは高圧キセノンガス TPC を用いて  $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu\beta\beta$  崩壊の探索を目指す実験である。起こるとしても極めて稀な現象である  $0\nu\beta\beta$  崩壊を観測するため、高圧ガスによる大質量化・飛跡検出による背景事象除去・高エネルギー分解能の3点を同時に達成する。

飛跡検出と高エネルギー分解能の実現のためには、電離電子の再結合やドリフト中の拡散、不純物分子との結合を抑える必要があり、そのために  $1 \text{ kV/cm} \pm 5\%$  という強く一様なドリフト電場の形成が重要となる。

現在開発中の 180 L 試作機ではドリフト領域は 50 cm ありドリフト領域の電位差は 50 kV、ドリフト領域末端の電位は 60 kV に至る。さらに将来の大型検出器においては 200—300 kV にも及ぶ電圧が必要だが、10 気圧のキセノンガスの気密を保ちつつこのような高電圧を放電しないように圧力容器内に導入するのは非常に難しい。そこで容器内への電圧導入は比較的低電圧の交流(振幅 0.5–1 kV)で行い、容器内で整流型電圧増倍回路である Cockcroft-Walton 回路により昇圧する方法を採用した。2 種類の試作回路を製作し、この方法によって必要な電圧の供給が可能であることを確認した。また、10 L 小型試作機でのテストのためにフレキシブル基板製回路を製作した。

一様ドリフト電場は電場形成電極と支持構造体(あわせてフィールドケージ)によって形成する。 $\phi 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$  という領域にわたって  $1 \text{ kV/cm} \pm 5\%$  の電場を維持し、かつキセノンのシンチレーション光を反射し PMT に届ける機能を付与するために 4 種類のフィールドケージ構造を比較検討し最適な構造(Fig. 1)を決定した。この構造で 10 L 小型試作機用のフィールドケージを設計し、Cockcroft-Walton 回路と合わせて実現可能であることを確認した。

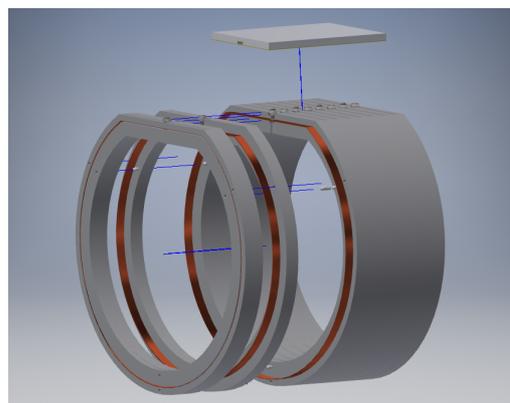


Fig. 1. A 3D CAD image of the field cage.

## References

- [1] Y. Fukuda *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], Phys. Rev. Lett. **81** 1562—1567 (1998).
- [2] P.A.R. Ade *et al.* [Planck Collaboration], Astron. Astrophys. **594** A13 (2016)

# LEPS2 実験のための 2 m 長 高抵抗板検出器の開発

原子核ハドロン物理学研究室 渡邊 憲

**Abstract** We have developed a 2-m long resistive plate chamber (RPC) for LEPS2 experiment at SPring-8. RPCs are used for the time of flight measurement. Our goal is to achieve 75 ps time resolution for particle separation between  $\pi$ , K, p. It was confirmed that a new RPC satisfy this requirement already.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

SPring-8 で建設中の LEPS2 実験はハドロン物理の研究を目的としている。高輝度・高エネルギー・高偏極度の  $\gamma$  線ビームを標的に当て、光生成された粒子を測定する。測定には極角 5-120 度の大立体角を覆うソレノイド型スペクトロメータを用いる (図 1)。スペクトロメータでは高抵抗板検出器 (RPC) とエアロジェルチェレンコフカウンター (AC) を用いて、極角 30-120 度に飛来する  $\pi$ , K, p を識別する予定である。RPC は高時間分解能・磁場中で動作可能・安価といった特徴を持つ飛行時間検出器である。RPC と SPring-8 蓄積リングの RF の信号の時間差から飛行時間を測定し、飛跡検出器の TPC、DC で得る運動量と合わせて、K, p と 1 GeV/c 以下の運動量の  $\pi$ , K を区別する。RF 信号の時間分解能は 20 ps 以下と非常に良く、飛行時間の分解能は RPC によって決まる。RPC は標的を覆うように円筒状に設置されるが、標的と RPC 間の距離は 85 cm と短いため、K, p を  $3\sigma$  の識別能力で区別するには 75 ps の高時間分解能が必要になる。先行研究[1]では 1 m 長 RPC において約 60 ps の時間分解能を達成している。さらに先行研究[2]では読み出しチャンネルを少なくするため、その 2 倍の 2 m 長 RPC の開発を行い、時間分解能 70 ps の以下の性能を有することがわかった。しかし[2]の RPC はノイズや発振のため、安定した操作ができないという問題点を持っていた。本研究ではアース部分などの構造を再設計し、このノイズの問題点を改善した。また、さらなる時間分解能の向上のための研究を行い、実機の開発と性能評価を行なった。

時間分解能向上のため、本研究では RPC のストリップ上の信号伝搬における分散の効果に着目した。文献[3]の著者らは信号の分散は RPC の内部構造の静電容量とインダクタンスの結合が悪いことに由来すると指摘している。そこで本研究では先行研究の RPC 内部の材質を G10 からテフロンに変え、結合を調整することで信号伝搬の周波数帯域の向上を計った。試作機においてネットワークアナライザを用いた測定により、実際にバンド幅が 2 倍程度向上したことを確認した。時間分解能の顕著な改善は見られなかったが、安価なテフロンでも十分な時間分解能を得られることが分かったため、テフロンでの実機製作を行うことを決定した。

実機製作にあたりノイズ対策としてグラウンドの強化を行い、結果プリアンプの出力後で RMS 2 mV 以下のノイズに抑制することができた。また本研究の RPC は 2 m と長いため、機械的構造を強化する必要がある。そこで RPC の多層構造をハニカムサンドイッチで挟む構造に変更した (Fig. 2)。

製作した実機 RPC の性能評価を行った。SPring-8/LEPS2 ビームラインにおいて電子ビームを照射し、検出効率、時間分解能の印加電圧依存性や、ヒット位置依存性、入射角度依存性を調べた。また、磁場中での性能評価も行った。結果、検出効率 99 %以上、時間分解能 65 ps であり、LEPS2 実験の要求性能を満たすことが分かった。今後は LEPS2 実験に必要な台数を揃え、全ての RPC が要求性能を満たすかを試験する予定である。

## References

- [1] N. Tomida, et al., JINST 11 (2016) C11037
- [2] S. Tanaka, Osaka-Univ., Master thesis (2016)
- [3] D. Gonzalez-Diaz et al., Nucl. Inst. and Meth. A, 648 (2011) 52

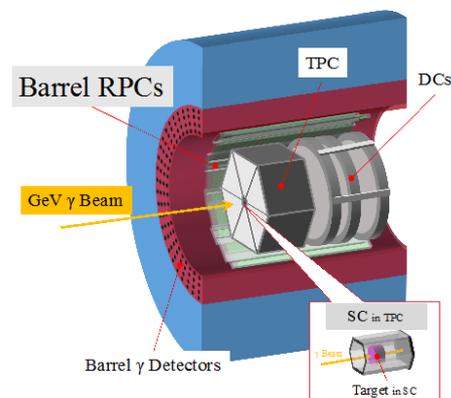


Fig. 1. Solenoid Spectrometer



Fig. 2. Side View for RPC

# レーザーイオン化法の導入に向けた ガスジェット輸送模擬装置の改良

核ビーム物性学研究室 小川 雄司

**Abstract.** The gas-jet equipment constructed for the feasibility test of the laser ionization method in KUR-ISOL has been improved in the capturing process of atoms by aerosol and thereby the transportation of the atoms by aerosol has been successfully confirmed.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

不安定核の研究には、不安定核ビームを生成する装置の利用が有効である。そのような装置の1つに、原子炉で発生する熱中性子を利用した京都大学原子炉実験所のガスジェット型オンライン同位体分離装置 (KUR-ISOL) がある [1]。KUR-ISOLは、キャリアとなる $\text{PbI}_2$ のエアロゾルを含んだ $\text{He-N}_2$ ガス流で核分裂生成物 (FP) を捕集・輸送し、表面電離型イオン源でイオン化した後、加速・質量分離してRIビームとして取り出す装置である。表面電離型イオン源ではイオン化できる元素に限られることから、原理的にすべての元素をイオン化可能であるレーザーイオン化法の適用が検討されている。エアロゾルはFPの輸送に欠かせないが、レーザー照射によるイオン化の際に障害となるため、レーザー照射前にヒーターで加熱分解してFPをエアロゾルから分離する必要があると考えられる。この手法が確立すれば、ガスジェット方式を採用しているオンライン同位体分離装置にレーザーイオン化法が適用できるはずである。

この方式の適用可能性を検証するため、以前KUR-ISOLを模擬したガスジェット装置が構築された [2]。この装置では、FP代替物としてIn原子を用いる。Heガス流でエアロゾルをIn気化装置に運び、気化したIn原子を捕集させて、最下流のヒータまで輸送し、加熱してFPの分離とレーザー照射を試みるものであった。最下流までの物質輸送は確認されたものの、エアロゾルによってInが輸送される事象は未確認であった。

本研究では、この構築されたガスジェット装置について、まず、輸送物のICP発光法による元素の定量分析を行い、エアロゾルによるInの輸送効果を調べた。その結果、この装置では、エアロゾルが高温のIn気化装置内を通過する際に熱分解を起こしている可能性が高く、キャリアとしての役割を果たしていないことが判明した。そこで、エアロゾルを含むHeガスがIn気化装置内を通らないように、インジウム気化装置とエアロゾルジェネレーターを分岐させた上で、エアロゾルにインジウムを捕集させるためのミキシングチェンバーを新たに設けた。(Fig. 1)。この改良により、Heガスジェット中のエアロゾルの量に応じてInの輸送量が増加するという結果が得られ (Fig. 2)、エアロゾルによるInの輸送効果を確認することができた。

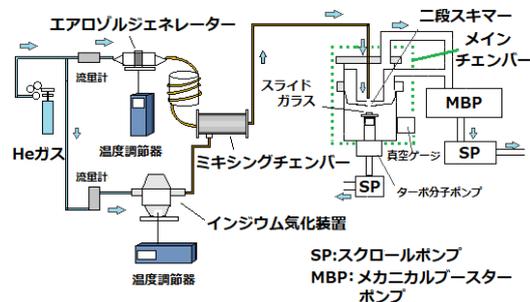


Fig. 1. Improved gas-jet equipment

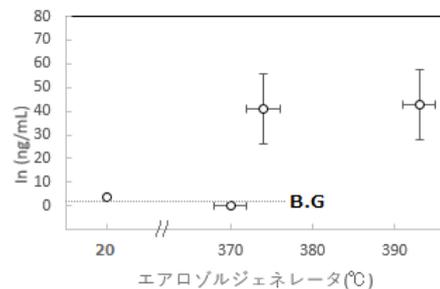


Fig. 2. Dependence of the indium transport efficiency on the temperature of the aerosol generator

## References

- [1] K. Okano and Y. Kawase, Bull. Inst. Chem. Res., Kyoto Univ., **68**, 139-155, 1990.
- [2] 谷口良徳, 京都大学大学院理学研究科修士論文 (2014年度).