# 平成 25 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26年2月3日、4日)

# 物理学第二分野

### 修士論文発表会

日時 2014年2月3日(月)9時00分~ 2月4日(火)9時00分~ 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3日(月)

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索に向けた
 キセノン比例シンチレーション検出器の開発

### 秋山 晋一 (9:00)・・・1

2. (K<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>)反応のための陽子抑制用水チェレンコフ検出器の開発

天野 宣昭 (9:20)・・・2

3. 薄膜標的を用いたレーザー加速電子線源の放射特性池田 大記(9:40)・・・・3

4. D-brane model building and its phenomenological aspects

上村 尚平 (10:00)・・・4

5. LHC-ATLAS 実験におけるボトムクォークジェットのエネルギー系統誤差の研究

加茂 直之(10:20)・・・5

 ブラックホール・中性子星連星合体のブラックホールスピンの傾きに対する 依存性の研究

川口 恭平 (10:40)・・・6

7. Cosmological constant problem and Multiverse 川名 清晴(11:00)・・・・7 8. フェムト秒レーザーによる金属着色に関する基礎研究

川本 真央 (11:20)・・・8

9. ローテーティングコイルによる多極磁場評価システム 北原 龍之介(11:40)・・・9

10. X線天文衛星 Suzaku による超新星残骸 3C397 の観測的研究

菅原 隆介 (13:00)・・・10

11. クォーク・グルーオンプラズマの生成過程における不安定モードと 粒子生成に関する研究

筒井 翔一朗(13:20)・・・11

12. 鉄中 Pm 不純物の超微細磁場

常山 正幸 (13:40)・・・12

13.<sup>12</sup>C原子核における稀ガンマ崩壊モードの探索

津村 美保(14:00)・・・13

14. QCD におけるクォークの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れの関係の研究 土居 孝寛 (14:20)・・・14

15. アイソスピン拡散を使った核物質の対称エネルギー測定のための実験的研究 中塚 徳継(14:40)・・・15

16.気球搭載電子飛跡検出型コンプトンカメラの疑似かに星雲線源を用いた画像試験
 中村 祥吾(15:00)・・・16

 17.磁場中の非一様カイラル凝縮についての研究

 西山
 和也(15:20)・・・17

18.場の理論の自由度と量子エンタングルメント 沼澤 宙朗(15:40)・・・18 19. CTA 計画大口径望遠鏡初号機搭載版 PMT 波形 GHz サンプリング回路の開発

畑中 謙一郎 (16:00)・・・19

20.300 MeV/u<sup>16</sup>Cビームを用いた陽子弾性散乱微分断面積の測定
 馬場 辰雄(16:20)・・・20

21. KOTO 実験上流部 beam pipe 内側に設置する荷電粒子検出器の開発及び性能評価
 日根野 貴晶(16:40)・・・21

22. 大質量星の崩壊時のニュートリノ風における元素合成過程についての研究藤林 翔(17:00)・・・22

23. μ-PIC を用いた不安定核実験のためのアクティブ標的の開発と性能評価
 古野 達也(17:20)・・・23

### 2月4日(火)

24. 高強度レーザーとクラスターとの相互作用による THz 波発生 森 一晃 (9:00)・・・24

25. 離散的フレーバー対称性による安定なダークマターの探究とレプトン混合角の導出 安原 大貴(9:20)・・・25

26. X線天文衛星「すざく」による超新星残骸 G350.1-0.3 と G349.7+0.2 の観測研究 八隅 真人 (9:40)・・・26

27. de Rham-Gabadadze-Tolley bigravityの高次元重力理論への埋め込み 山下 泰穂(10:00)・・・27

28.<sup>32</sup>Sの<sup>28</sup>Si+αクラスター構造における<sup>28</sup>Si芯の構造変化とαの崩れ 吉田 侑太(10:20)・・・28

29. 宇宙初期における低金属量ガスからの銀河形成条件

渡辺 拓 (10:40)・・・29

### ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索に向けた キセノン比例シンチレーション検出器の開発

高エネルギー物理学研究室 秋山晋一

**Abstract** To use for the neutrinoless double-beta decay search, we have started to develop a xenon proportional scintillation counter with a new read out method: electroluminescence light collection cell (ELCC). We have made prototypes and evaluated the energy resolution. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

素粒子の一つであるニュートリノが発見されて半世紀たつが、その性質については未だ不明のことも 多い。その一つとして質量が極端に小さいことがあげられる。ニュートリノ振動現象の発見により、ニ ュートリノが数 meV から数百 meV の質量を持つことが示されたが、これは同じレプトンである電子に対 して 7 から 9 桁も小さい。このような性質を説明する方法としてシーソー機構が提唱されているが、こ れはニュートリノが実は粒子と反粒子が等しいというマヨラナ粒子であることを前提としている。その ためニュートリノがマヨラナ粒子であるかを検証することは素粒子物理学の大きな課題の一つであり、 検証方法として現在唯一可能な方法がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊事象を観測することで ある。この反応は起こるとしても非常に稀であり(寿命>10<sup>25</sup>年)現在まで観測された例はない。

この二重ベータ崩壊探索実験を目標として、キセノンを用いたガス検出器の製作とエネルギー分解能 の評価を行った。キセノンは二重ベータ崩壊を起こす核種を持ち、それ自体が検出器として利用できる。 また信号としてエレクトロルミネッセンス(比例シンチレーション)と呼ばれる現象を用いることで半 導体並みのエネルギー分解能を得ることができるという利点を持っている。これは放射線によって生じ た電離電子が電場によって加速され、キセノン原子に衝突し次々に励起することによる脱励起光である。 さらに本研究では読み出し部分を工夫した Electroluminescence light collection cell (ELCC)を開発 した。これはエレクトロルミネッセンスを起こす領域をセル構造化し各セルを光検出器 MPPC で読み出 すもので、光の収集効率と一様性の向上が期待される。キセノンの発光波長は紫外であり、通常の MPPC では検出が不可能であるが、現在同じくキセノンを用いた実験である MEG 実験と浜松ホトニクスが共同 で紫外光に感度のある MPPC を開発中である。

本研究では MPPC による研究の前段階として、読み出しに紫外光に感度のある PMT、MEG 実験で用いられている低アウトガスの PMT を用いてエネルギー分解能の評価を行った。また分解能を決定づける要因についての考察を行った。



Fig. 1. Prototype detector



Fig. 2. Measured spectrum obtained when irradiated by a <sup>241</sup>Am gamma source. Peaks at 60keV and 30keV can be seen.

# (K⁻, K⁺) 反応のための 陽子抑制用水チェレンコフ検出器の開発

原子核ハドロン物理学研究室 天野宣昭

**Abstract** We plan to obtain the spectrum of  $\Xi$ -hypernuleus through the <sup>12</sup>C(K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>) reaction, by constructing a new magnetic spectrometer "S-2S". Protons are main trigger backgrounds. A new water Cherenkov counter is needed to suppress protons. We have made a prototype of the water Cherenkov counter, and carried out a test experiment using K<sup>-</sup> and anti-proton beams at J-PARC. The performance of this counter is reported together with cosmic ray studies. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

我々は J-PARC において Ξハイパー核の分光実験を行う(J-PARC E05 [1])。この実験では <sup>12</sup>C(K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>)反応を用いて Ξハイパー核を生成し、ミッシングマス分光により、Ξハイパー核の束縛状態を観測する。これまでのハイパー核研究は Λハイパー核を中心にストレンジネス(S) = -1の系に関して行われ、スピン依存項を含めて ΛN 相互作用に関して詳細な理解が得られている。一方で、S=-2の系についてはほとんど未開拓であり、特に ΞN 相互作用についてはほぼ何もわかっていない。過去の実験[2][3]の(K<sup>-</sup>,K<sup>+</sup>) スペクトルと理論計算との比較によって、Ξ核ポテンシャルの深さが 14 MeV 程度ではないかと示唆されているのみである。E05 実験ではΞハイパー核の存否を初めて確定する。それを足掛かりとして、ダブル Λ ハイパー核の直接生成実験などへと発展させていくことで、S=-2の系を含むバリオン間相互作用の統一的理解に大きな役割を果たす。

この実験のために、1.3 GeV/c~1.4 GeV/c の運動量帯域で十分な運動量分解能を持ち、同時に大きい 立体角を持つスペクトロメータ "S-2S" を新たに建設している。ミッシングマスのエネルギー分解能は 1.5 MeV で、1 か月程度のデータ取得で十分な統計量をためることが可能となる。

この実験ではπ<sup>+</sup>、陽子がバックグラウンドとしてスペクトロメータ下流に散乱されると予想される。 したがって、π<sup>+</sup>、陽子をトリガー段階で抑制するための検出器をスペクトロメータ下流に設置する必要 がある。そこで我々は、陽子抑制用水チェレンコフ検出器の開発を行った。試作機を制作して、2013 年 5月に J-PARC で K 中間子、反陽子ビームを用いた実験を行い、加えて、宇宙線を用いた実験も行った。 その結果から光電子数の荷電粒子入射位置、入射角度依存性を評価し、期待していた程度にそれらが小 さい事が分かった。また、予想される陽子除去効率を見積もった。

本論文では、上に述べた水チェレンコフ検出器の性能評価を行う。



Fig. 1. The configuration of the spectrometer "S-2S" and PID counters. A water Cherenkov counter will be installed in the most downstream of the beam line.

#### line. References

- [1] T. Nagae et al, J-PARC E05 proposal
- [2] T.Fukuda et al., Phys. Rev. C 58,1306 (1998).
- [3] P.Khaustov et al., Phys. Rev. C 61,054603 (2000).



Fig. 2. A picture of the water Cherenkov counter prototype we have been in development.

### 薄膜標的を用いたレーザー加速電子線源の放射特性

レーザー物質科学分科 池田大記

**Abstract** We have measured energy-resolved spatial distribution of laser-produced plasma electron sources by electron microscopic imaging using an electron lens. For low contrast laser pulses, the electron source becomes larger as the laser intensity is higher. For high contrast laser pulses, the electron source is as large as the laser irradiated area.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

現在、電子線源として熱陰極や光電陰極(フォトカソード)などが用いられているが、いずれの場合 にも電子を抽出するには加速器を付加する必要がある。電子線源にはエミッタンスがより小さなものが 求められ、光電陰極RF電子銃では、0.1mm.mrad程度まで達成している[1]。一方、高強度短パルスレー ザーと固体との相互作用により発生する電子線は高輝度・短パルス・点源の特徴を有しおり、レーザー 強度を十分高くできれば加速器を必要としないので、低エミッタンス、装置の小型化の可能性がある。 レーザー加速電子線源を新しい電子線源として開発するためには、その放射特性を調べる必要がある。 我々は、電子レンズを用いた電子光学系によりプラズマ中から発生する電子線源の空間構造を高分解能 で直接観測し、レーザープラズマ高エネルギー電子線源の生成に関する研究を行ってきた。今までに、 永久磁石の電子レンズを用いた線源観察を行い、レーザーの強度の増加と共に線源が大きく(エミッタ ンスが悪く)なることを報告している[2]。本研究では、線源が大きくなる機構解明とエミッタンスの改 善手法を探るために、新たに電磁石による電子レンズを自作し、レーザー加速電子の放射特性を調べた。 実験配置の概略図をFig.1に示す。パルス幅40fs、パルスエネルギー最大360mJ、中心波長810nmのレーザ ーパルスを軸外し放物面鏡で厚さ10umのポリエチレン膜および、厚さ11umのアルミニウム膜に45°方向 より集光照射し放出される高速電子線(100,500,1000KeV)を電子レンズにより測定した。集光点にお けるレーザー強度は最大で4.5×10<sup>19</sup>W/cm<sup>2</sup>である。レーザーのパルスコントラストの制御にはプラズマミ ラーを用いた。ここでコントラストとは、メインパルスの強度と、メインパルスの1ns前のプリパルスの 強度の比である。低コントラストでは、その比が10<sup>7</sup>で、高コントラストでは10<sup>10</sup>になる。低コントラス トのレーザーを薄膜ターゲットに照射したとき、電子線源の大きさは、照射するレーザーの強度の増加 とともに大きく観測され、特にAlターゲットにおける100keV(低エネルギー)の電子線源で、この傾向 が顕著であった(Fig.2)。一方、高コントラストレーザーを薄膜ターゲットに照射したとき、ターゲット によらず、レーザーの強度を上げても電子線源の大きさは大きく変化しなかった(Fig.2)。Alターゲット に低コントラストレーザーを照射したときに、低エネルギーの電子線源が大きくなる原因として、強度 の高いプリパルスにより、メインパルスが到達する前にターゲット表面がプラズマ化され、そのプリプ ラズマとレーザーが集光位置より手前の領域で相互作用をするためと考えられる。







Fig.2 The size of electron sources at 100keV for the low and high contrast laser pulses. (a)Al target, (b)PE target

### References

[1] K. Nemeth, et. al, Phys. Rev. Lett. 104, 046801 (2010).

[2]井上峻介. 高強度短パルスレーザーからの電子線発生領域に関する研究. 修士論文, 京都大学大学院 理学研究科, 2010.

# D-brane model building and its phenomenological aspects

素粒子論研究室 上村尚平

**Abstract** We review type II superstring theory and the way of model building using D-branes. We build some semi-realistic D-brane models systematically and study phenomenological aspects, especially flavor symmetry. We classify patterns of neutrino Majorana mass matrices and calculate them. In a class of models, we realize Tri-maximal mixing matrix. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

超弦理論は自然にスピン2の粒子を含み、量子重力理論として最も有望な候補である。また超弦理論 には自然にゲージ対称性が現れ、物質場も導出することができるため統一理論としても有望である。し かし、超弦理論の中には摂動論的に縮退した大量の真空が存在しており、そのどれがこの宇宙で実際に 実現されている真空なのかはわからない。それを調べることは興味深い問題である。

Ⅱ型超弦理論において真空を具体的に定義し、低エネルギー有効理論を具体的に構築する方法として、 intersecting D-brane と magnetized D-brane という手法が知られている。これらの方法では、D-brane に端点を持つ開弦の Ramon sector が質量ゼロのフェルミオンとして現れる。このフェルミオンをクォ ーク、レプトンとみなし、ゲージ対称性を D-brane の対称性として実現することで、低エネルギーの有 効理論としてカイラルフェルミオンを含むヤン-ミルズ理論を実現することができる[1]。

本論文の一つの目的は、この手段を用いて標準理論のような理論を低エネルギーで実現する摂動論的 真空を具体的に構築することである。そのような試みは今までも何度も行われてきたが([2]など)、こ こでは理論の満たすべき条件として、

(I)SU(3)×SU(2)×U(1)ゲージ群

(II)右手巻きニュートリノ以外の、標準模型に含まれない軽い粒子を含まない

(III) コンパクト化は $(T^2 \times T^2 \times T^2)/Z_2$ 

と明示し、その条件を満たす真空をすべて、系統的に構築した。また、それらの模型の持つ現象論的 な側面、特にフレーバー対称性について議論した。その結果、摂動論の範囲ではフレーバーの対称性と してΔ(27)という大きな離散群の対称性があることが示された[3]。

ー方、標準模型の特徴の一つとしてレプトンセクターの混合が上げられる。クォークセクターの混合 行列はほとんど対角的である。それに対して、近年のニュートリノ振動の観測などから、レプトンセク ターは大きく混ざっていることがわかってきた。その混合行列を近似的に表した行列として、Tri-Bimaximal mixing matrix といわれる行列が知られている[4]。この行列には $\Delta$ (27)のような巨大な対 称性は存在しない。しかし D-brane model building において、D-brane instanton[5]という非摂動論 的効果を導入し具体的に計算を行ったところ、あるモデルでは元の対称性が破れ、この混合角の特徴の 一部が自然に実現できることを示した。また同時に、より一般の場合のニュートリノマヨラナマスマト リックスのパターンの分類も行った。

#### References

[1] G. Aldazabal, S. Franco, L. E. Ibáñez, R. Rabán and A. M. Uranga, J. Math. Phys. 42, 3103 (2001) [hep-th/0011073].

[2] L. E. Ibanez, F. Marchesano and R. Rabadan, JHEP 0111 (2001) 002 [hep-th/0105155].

[3] H. Abe, K-S. Choi, T. Kobayashi and H. Ohki, Nucl. Phys. B 820, 317 (2009) [hep-ph/09042631].

[4] P. F. Harrison, D. H. Perkins and W. G. Scott, Phys. Lett. B530: 167, 2002 [arXiv:hep-ph/0202074].

[5] L. E. Ibanez and A. M. Uranga, JHEP 0703 (2007) 052 [hep-th/0609213].

### LHC-ATLAS 実験における ボトムクォークジェットのエネルギー系統誤差の研究

高エネルギー物理学研究室 加茂直之

**Abstract** I report a measurement of systematics uncertainty in energy scale of jets originated from bottom quarks in the ATLAS experiment. I estimate the systematics uncertainties from Monte Carlo simulations, and I validate them with the data in 2012, using a method based on the balance of Z-boson and jets. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

Large Hadron Collider (LHC) は CERN に設置された世界最高エネルギー陽子陽子衝突型加速器である。LHC の 2012 年での運転状況は重心系エネルギー8 TeV、バンチ衝突頻度 20 MHz である。

ALTAS は LHC の衝突点の一つに設置された汎用検出器で、陽子陽子衝突によって生成された粒子を検 出することによる新粒子の直接検出や、標準理論を超えた物理の検証を目的としている。2012年の7月、 ATLAS 実験、CMS 実験の両実験は LHC の一つの目的であったヒッグス粒子を発見した。

ヒッグス粒子の崩壊事象は現在までのところ、ボソンモードのみが発見されており、フェルミオンモードは見つかっていない(タウ粒子、反タウ粒子対への崩壊は 4.1 g で観測されている)。フェルミオンとヒッグス粒子の結合定数は湯川結合定数とよばれ、ヒッグス粒子の性質を検証する上で重要である。 このためフェルミオンモードの発見は ATLAS 実験の次なる課題である。

ヒッグス粒子の崩壊分岐比の予想値はボトムクォーク、反ボトムクォーク対への崩壊が57.7%と大き な値をもつが、ボトムクォークに伴うジェットのエネルギー分解能の悪さがこのモードの発見を難しく している。このため、このエネルギー分解能の向上が今後重要である。そこで本研究ではボトムクォー クに伴うジェットに着目し、そのエネルギー系統誤差の評価を行った。

ジェットはクォークやグルーオンの生成に伴って大量のハドロンなどの粒子が検出される現象である。ジェットのエネルギーを測定することにより、クォーク、グルーオンのエネルギーを測定できる。

ハドロンは電子や光子に比べてカロリーメータで可視化されるエネルギーの割合が低いため、検出されるジェットのエネルギーは現実より小さく見積もられる。このため元のジェットのエネルギーを正しく測定するには補正が必要である。基本的にジェットの真のエネルギーは不可知であるため、そのエネルギー較正にはモンテカルロシュミレーション(MC)を利用した方法をとる。まず MC において検出器で得られた情報からジェットを再構成し、シミュレーション内の粒子の真のエネルギーから計算したジェットのエネルギーと検出器情報から再構成したジェットのエネルギーを比較することで、エネルギーの補正係数を得ることができる。こうして得られた補正係数を実データにも適用する。

MC では、使用した事象生成モデルのパートン分布関数や破砕関数の違い、ハドロンシャワーモデル、 検出器の不感物質の見積もりなどによってジェットのエネルギーに不定性が生じる。これらは理論的に 決定することができないため、条件を変えた複数の MC サンプルを作成し、測定されるエネルギーの差 を系統誤差として評価する必要がある。本研究ではこの系統誤差を評価した上で、さらにジェットに対 してボトムクォーク起原であることを要求した場合の系統誤差の評価を行った。この方法での系統誤差 は各エネルギー領域で約3%として見積もられた。

また MC による評価だけでなく、2012 年の ATLAS 実験で得られた実データを使用した系統誤差の評価 についても報告する。本研究では Z ボソンを伴うジェット事象を利用した。この事象では Z ボソンがジ ェットと横方向空間で反対方向に検出されるため、横方向運動量は等しくなると考えられる。これを利 用し Z ボソンの 4 元運動量を崩壊先のレプトンから再構成し、Z ボソンの横運動量に対するジェットの 横運動量の比率を計算することで、実際のジェットのエネルギーに対する較正をすることができる。こ の比率を MC シミュレーション、実データ両方を用いて求め、値の差を系統誤差として評価した。この方 法での系統誤差は各エネルギー領域で約1%として見積もられた。

# ブラックホール・中性子星連星合体のブラックホールスピン の傾きに対する依存性の研究

基礎物理学研究所 川口 恭平

**Abstract** We performed three-dimensional general relativistic simulation of black hole - neutron star binary merger for the case the black hole spin is not aligned to the orbital angular momentum. We studied how spin misalignment effect modifies the dynamics of merger process and emitted gravitational waveform.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

現在、世界初の重力波直接観測を目指し、Advanced LIGO, Advanced VIRGO, 日本の KAGRA といった次 世代検出器の建設が行われている。ブラックホール・中性子星連星の合体は、重力波観測のメインター ゲットの一つとされている現象であり、これら重力波の検出は、一般相対論の検証にとどまらず、超高 密度、強重力場における物理現象を直接観測する手段となる。また合体後形成されるブラックホール・ 降着円盤系はショートガンマ線バーストの中心エンジンの有力な候補として考えられている。さらに合 体に伴って放出される物質は重元素合成・放射性崩壊過程を経て光る現象である Kilonova/Macronova を引き起こすと考えられている。このようにブラックホール・中性子星連星合体は電磁波観測において も重要な現象である。

ブラックホール・中性子星連星の合体は強い重力場の中で起こるため、放出される重力波波形、降着 円盤形成過程、放出される物質の質量などの定性的/定量的な理解のためには、アインシュタイン方程 式並びに流体力学方程式を近似無しに解く必要がある。特にブラックホールの質量、スピン、中性子星 の状態方程式の観測的制限はあまり強くないため、これらのパラメータが合体のダイナミクスや重力波 波形に与える影響を系統的に調べることが重要である。これまでの数値相対論を用いたシミュレーショ ン研究から、合体の過程や放出される重力波の波形はブラックホールの質量やスピン、中性子星の状態 方程式に強く依存し、これらのパラメータによって定性的に変化することが分かっている[1,2]。

これまでのブラックホール・中性子星合体の研究の多くは、ブラックホールスピンと軌道角運動量の 方向が揃っているものについて主に行われてきた。しかしスピン傾斜角が0だとする観測的根拠は特に なく、スピン傾斜角が広く分布しうることを示唆する理論研究も存在する[3]。こうしたスピン傾斜角 は連星合体過程を定性的に変えうることが分かっている[4,5]。しかしながら、スピン傾斜角 0 でない 場合の合体過程の研究は、[4,5]においてごく限られたパラメータに対して数例行われたのみであり、 そのダイナミクスや放出される重力波波形のスピンの傾きに対する定性的/定量的な依存性はまだ明ら かでない。

本研究の目的はブラックホールの質量、ブラックホールスピンの大きさ、状態方程式といった、今ま で研究されてきたパラメータに加え、スピン傾斜角というパラメータに対するブラックホール・中性子 星合体過程の依存性を定量的に明らかにし、合体のダイナミクスや重力波の波形からそれらパラメータ の情報を読み取る方法を提案することである。本修士論文では特にスピン傾斜角に対する依存性を調べ るために、ブラックホールと中性子星の質量を5:1、中性子星の質量を1.35 太陽質量、無次元化された ブラックホールスピン大きさを0.75 に固定し、スピン傾斜角を0°、30°、60°、90°としたブラック ホール・中性子星連星合体のシミュレーションを、核物理から提案された4種類の状態方程式のモデル を用いて行い、合体のダイナミクスと合体時に放射される重力波波形の依存性を調べた。その結果、ス ピン傾斜角に対する降着円盤質量や放出される質量の依存性と、潮汐破壊の条件を初めて明らかにした。

### References

[1,2]K. Kyutoku et al. Phys. Rev. D 82, 044049-1--24 (2010), 84, 064018-1--32 (2011).

[3]Belczynski et al. Astrophys.J. 682:474-486 (2008).

[4,5]F. Foucart et al. Phys. Rev. D 83, 024005 (2011), 87, 084006 (2013).

### Cosmological constant problem and Multiverse

素粒子論研究室 川名清晴

**Abstract** Recently, by H Kawai and T Okada, there was a development about the Coleman's idea that solves Cosmological constant problem in the context of the multiverse. Their proposal is based on the Lorentzian path integral. In this presentation, I will review and discuss their proposal. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

宇宙の観測結果から分かる我々の宇宙の臨界密度は、

 $\rho_{Cr}\simeq 10^{-29}\text{g/cm}^3\simeq 10^{-48}\text{Gev}^4$ 

であり、この内の約70%をダークエネルギーという未知の存在が占めている。このダークエネルギーが 真空のエネルギーであるかどうかはまだ分からないが、どちらにせよ我々の宇宙の真空のエネルギーは 場の理論から予想される量よりも遥かに小さい。これが宇宙項問題(Cosmological constant problem) である。この問題は通常の場の理論の枠組みの中では解決は難しく、従ってそれを抜け出す必要がある。 超対称性などは(新しい対称性という意味で)その典型的な例であるが、現実の宇宙では超対称性は存在 しているとすれば破れてしまっているので、解決にはならない。私は、本修士論文において宇宙項問題 に対する代表的な解決案をその問題点と共にまとめた。その中でも、Coleman によって最初に提案され た Multiverse を用いた解決法[1]は、量子論的に正しく宇宙項問題を解決できる可能性があり、非常に 魅力的である。Coleman 自身の理論では問題点がいくつか存在したが、最近それらを克服する形の仕事 が川合氏・岡田氏によってなされた[2][3]。しかし、その理論も非自明な仮定を用いている点があり、 私自身その点を improve できないかと考えている。だが、それもなかなか難しく、発表できるような結 論はまだ得られていない。そこで、本発表会では川合氏・岡田氏による宇宙項問題の解決を、それが抱 える問題点と共に解説する。この発表を聞いて興味をもってくれる人がいれば幸いである。

#### References

[1] S.Coleman, Nuclear Physics B, 310(3-4):643-668, 1988

[2] H.Kawai, T.Okada, arXiv:1110.2303

[3] H Kawai, Int.J.Mod.Phys.A, Vol.28, Nos.3&4(2013)1340001

# フェムト秒レーザーによる金属着色 に関する基礎研究

レーザー物質科学分科 川本真央

**Abstract** Femtosecond laser coloring on titanium is demonstrated under the control of laser fluence and the scan speed of laser irradiation. The relation between the chromaticity and the morphology for colorized Ti surface is discussed to clarify the chromaticity space in which femtosecond laser can color. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

チタンやステンレス等の金属にフルーエンスや走査速度を適切に制御したレーザーを照射すると表 面が着色される。レーザーによる金属着色は、種々の金属製品に適用できることから産業界において新 しい表面修飾技術として期待されている。レーザーによる金属着色の機構として二つが考えられている。 一つは、レーザー照射による表面酸化膜の形成である。酸化膜の形成により光の干渉が起こり、干渉色 が見える。ナノ秒レーザーを用いた着色機構は酸化膜であるとされており、様々な研究がなされている。 もう一つは、レーザー照射による金属表面の微細構造形成である。ナノメートル単位の構造物が形成さ れ、光の吸収や散乱が生じ、構造色が現れる。このようなナノ構造はフェムト秒レーザーを用いた場合 に見られる[1]。しかしながらフェムト秒レーザー着色では、その機構を議論するための基礎データ、例 えば、酸化膜の膜厚と着色された色との関係や、微細構造の大きさや密度などの表面状態と着色された 色の関係は、定量的に明らかにされていない。本研究では、レーザーによる金属着色機構解明を最終目 標として、着色実験により達成可能な色領域と表面構造を測定・分析し、着色と表面状態との関係を議 論した。

実験ではパルス幅 150fs、周波数 1kHz、波長 800nm のフェムト秒レーザーを金属表面に対して入射 角度 0°で集光照射した。Ti 表面は鏡面研磨を施してあり、自動ステージに取り付けられている。レー ザー照射中に自動ステージを水平、垂直方向へ走査させ 2×2mm の範囲に着色した。レーザーフルーエ ンス(J/cm<sup>2</sup>)と自動ステージの走査速度(mm/s)を変化させて着色実験を行った。着色金属の色は白色光 の反射光スペクトルを測定し、色度座標値に変換することで評価した。着色された表面の状態は FE-SEM を用いて観察した。

フェムト秒レーザーの照射条件を変化させチタンに対して青、緑、橙、黄色の着色に成功し、フェムト秒レーザー着色により達成できる色領域を明らかにした。着色面の表面状態は、色によって表面微細構造のサイズ分布が異なっていた(図1)。図2には、緑色に着色された表面からの反射スペクトルと酸 化膜モデルによる計算結果を示す。長波長側において実験結果はモデル曲線からのずれが大きい。青、 橙、黄色に着色された反射スペクトルも同様に長波長側においてモデルとのずれが大きいことから、微 細構造による寄与の可能性が高い。微細構造が反射スペクトルに与得る影響について FDTD 計算より 明らかにし、色領域拡大のための表面形状を考察した。



Fig. 1. FE-SEM image of colored surfaces

Fig.2. Spectrum of colored Green Ti

#### References

[1] A. Y. Vorobyev and Chunlei Guo, Appl. Phys. Lett. Vol.92, pp.1-3 (2008)

### ローテーティングコイルによる多極磁場評価システム

### ビーム物理研究室 北原龍之介

**Abstract** A rotating coil system has been developed in order to evaluate magnetic fields of the permanent magnet quadrupole (PMQ) that is made development for final focusing of ILC. The system provided consist result with those obtained at KEK. The system accelerates the development of the PMQ at Kyoto-u.

Higgs 粒子の存在は 1964 年に Peter Higgs によって初めて提唱され、2013 年に CERN の LHC(Large Hadron Collider)で ATRAS グループと CMS グループが実証し、同年 Englert と共にノーベル物理学賞を 受賞した。この粒子の性質をより詳しく調べるためには、ハドロン加速器である LHC では陽子と反陽 子の衝突の際に多くの素粒子反応が起こるため素反応の同定が難しく、Higgs 粒子の解析には不向きで ある。そこで、素粒子反応が簡単なレプトンの加速器である ILC(International Linear Collider)計画が現在 進行中である。

ILC(International Linear Collider)は実験室系で1TeVの衝突エネルギーを得るために500GeVのエネル ギーで電子と陽電子を加速、衝突させる線形加速器である。ILC 実現のためには低エミッタンスビーム の生成や、ビームモニターの開発など様々な新技術が生み出されており、これらの要素技術は TDR(Technical Design Report)として 2013 年に完成された。ILC など加速器は多くの磁石を用いてビーム を制御する。ビーム衝突時には四極磁石などを組み合わせた最終集束系によって nm サイズまでビーム を絞る必要がある。最終集束系磁石は超電導磁石によるものと永久磁石によるものが考えられている。 超伝導磁石は強力な磁場勾配を発生させることが出来、調整が容易であるが、コイルは全長 2m の細長 い形状となる。極低温領域への熱流入を削減するために一般に、このコイルを支えるサポートは細く、 数も少なくするため剛性が大きくなければ振動に弱くなることが予想される。ILC のように、nm スケー ルまでビーム径を絞る際にはそのレンズの振動が致命的になる可能性がある。対して、永久磁石では常 温で動作するため、剛性を上げることが容易で、また、発熱もないため冷却のための冷媒からの振動も ない。さらに超伝導磁石と同程度の磁場を発生できるため、コンパクトかつ微細振動の少ない最終集束 系を構成することができる。また、永久磁石を使う利点として、磁場の発生に電力を必要としない事が 挙げられ、冷却などの負荷も減り、運転コストを下げることもできる。

当研究室では永久磁石を用いた最終集束用四極磁石のテスト機(5-ring PMQ)を作成し、KEK(高エネル ギー加速器研究機構)にある ATF2 でビームテストを行った [1]。その結果、多重極磁場成分の磁場が要 求される磁場を超えていることがわかり、改善が必要であることが分かった。KEK のローテーティング

コイルシステムで測定したところ六極成分が他の高次成分に対し て明らかに大きい値をとっている。この改善のためには研究室内に ローテーティングコイルシステムを設置し、試行錯誤を繰り返す必 要がある。

本研究の目的は永久磁石による四重極磁石開発のために必要な 多極磁場測定器としてローテーティングコイルシステムを整備す ることである。また、測定精度向上のために必要なコイルの位置に ついてマイクロメートルスケールでの評価に成功した。また、試作 した5-ring PMQの磁場評価を行い、KEKでの測定結果と照らし合わ せることで測定器の性能評価を行い、十分な性能が得られているこ とが分かった(Fig. 1)。今後この測定器を用いて有効に磁石開発を推 し進めていく。



Fig. 1. Magnetic field gradient of 5 ring PMQ by measurement at KEK or Kyoto-u.

#### References

[1] Y. Iwashita, H. Fujisawa, M. Ichikawa, H. Tongu, S. Ushijima, M. Masuzawa, and T. Tauchi, IPAC'10 3380 (2010).

### X線天文衛星 Suzaku による超新星残骸 3C397 の観測的研究

宇宙線研究室 菅原 隆介

Abstract We carried out a 100ks observation of the supernova remnant 3C397 and detected Ni K line from this SNR, and Ti K line from an SNR for the first time. We estimated the abundance pattern of the ejecta and found overabundances of Fe-peak elements.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

3C397 は銀河面上に存在する超新星残骸(SNR)である。この SNR は強い Fe 輝線をもち、Suzaku 衛星の 観測ではCrとMnの輝線も発見されている[1]。Chandra 衛星の観測結果によると、3C397 は星間物質(ISM) 由来の電離平衡(CIE)プラズマと ejecta 由来の電離非平衡(NEI)プラズマの二成分で記述され、ejecta の電離状態は東西で異なることが示唆された[2]。しかし、Chandra では Fe 周辺エネルギーでの感度が 低いため、アバンダンスを決めるのに必要なプラズマの電離状態について統計誤差が大きい。

我々は、Fe 周辺のエネルギーバンドで高い感度をもつ Suzaku 衛星を用いて 3C397 の 100ks の観測を 行った。今まで観測されていた 69ks のデータも加え、Fe 周辺では今までに無い高い統計のスペクトル を得ることができた。その結果、今まで検出されていた Mg、Si、S、Ar、Ca、Cr、Mn、Fe に加えて新し く Ni の K α 輝線を発見した。3C397 からの Ni の検出はこれが初めてである。

フィッティング解析の結果、SiやSなどの輝線に比べてFe輝線は有意に広がっている(~80eV)こと がわかった。この広がりを説明するには、少なくとも二つの ejecta 由来の NEI プラズマが必要であっ た。3C397 のスペクトルはこの二つの NEI プラズマに加え、ISM 由来の CIE プラズマの計三成分で再現 できることがわかった。温度と電離状態から Ejecta の組成を推定すると、Si に対する Fe アバンダンス は Fe/Si~7 と高いことがわかった。また、Fe に対して Cr/Fe~5、Mn/Fe~8、Ni/Fe~8 と非常に高い Fe-peak 元素アバンダンスをもつことも判明した。

二つの ejecta 成分の空間的な分布を調べるため、SNR を東西南北の領域に分けた解析も行った。しか し、Fe 輝線のエネルギーはどの領域でもほぼ一定であり、空間的な電離状態の偏りはほとんどなかった。 また、この領域別解析において、SNR の南側で新しく Ti の輝線を~3σの有意度で検出した。SNR にお ける Ti の検出はこれが初めてである。この領域における Ti のアバンダンスは Cr とほぼ同等と推定さ れた。南側では、Ti だけでなく Cr、Mn、Fe、Ni の等価幅も他の領域に比べて大きく、爆発の際に親星 の中心付近で合成された元素が南に偏って放出されたことが示唆される。



Figure 1. 0.8-10.keV spectrum of 3C397. Black, red, blue lines shows ISM, low-ionization and high ionization ejecta respectively.



Figure2. Abundance pattern of the ejecta of 3C397. Dotted lines show some theoretical models.

#### References

[1] Yang et al. 2013, ApJ 766, 44

[2] Safi-Harb, et al. 2005, ApJ, 618, 321

# クォーク・グルーオンプラズマの生成過程における 不安定モードと粒子生成に関する研究

原子核理論研究室 简井翔一朗

**Abstract** Particle production under the time dependent classical background fields plays an important role in the thermalization process of relativistic heavy-ion collisions. We apply a non-equilibrium quantum field theory to the initial stage evolution and that show the Nielsen-Olesen instability affects the gluon distribution. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

量子色力学が支配する物質の多体系には、高温領域においてカラー非閉じ込め相であるクォーク・グ ルーオンプラズマ(QGP)と呼ばれる状態が存在する。RHIC、LHC などにおける相対論的重イオン衝突 実験で得られた種々の観測量は、完全流体模型によってよく再現することができるが、このことは、局 所熱平衡に達した QGP が実際に生成されたことを示唆している。一方で、QGP は衝突から 0.6fm/c 程 度の極めて短い時間で生成されると言われており[1]、その生成機構には不明な点が多い。

系の熱化を議論する上で重要と考えられる物理的機構は主に2つある。ひとつは、ハードなグルーオンの散乱によるエントロピー生成[2]であるが、これだけでは上述の「早い」熱化を説明することはできない。もう一方は、プラズマ不安定性による系の急速な等方化が、間接的に熱化を促進するという機構である[3]。熱化過程初期には、強い背景カラー磁場が存在するために、カラー磁場の大きさに比べて小さな運動量を持つモードが不安定になる。この現象は Nielsen-Olesen 不安定性として知られており、熱化のシナリオのひとつとして注目されている[4]。



Fig. 1. The time evolution of the gluon statistical function. The right figure corresponds to the later one.

これらの機構について系統的に議論するためには、非平衡系の場の理論に基づいた第一原理的な定式 化が必要である。本論文ではまず、そのような定式化を実現する方法のひとつである 2PI 法[5]について 述べ、グルーオン粒子分布の時間発展方程式を導出する[6]。また、線形近似の範囲内で数値的に解いた 結果についても議論する。Fig. 1 は、背景カラー磁場の下でのグルーオン相関関数の時間発展を、運動 量の関数としてプロットしたものである。この結果は、Nielsen-Olesen 不安定性により低運動量モード が指数関数的に成長し、非等方な粒子分布が形成されることを示唆している。

- [1] U. W. Heinz, AIP Conf. Proc. 739 (2004) 163.
- [2] R. Baier, A. H. Mueller, D. Schiff and D. T. Son, Phys. Lett. B 502 (2001) 51.
- [3] S. Mrowczynski, Phys. Rev. C 49 (1994) 2191.
- [4] H. Fujii and K. Itakura, Nucl. Phys. A 809 (2008) 88.
- [5] J. Berges, AIP Conf. Proc. 739 (2005) 3.
- [6] Y. Hatta and A. Nishiyama, Nucl. Phys. A 873 (2012) 47.

### 鉄中 Pm 不純物の超微細磁場

核ビーム物性学研究室 常山正幸

**Abstract** There are few reliable experimental values of hyperfine magnetic fields (HFF) of lanthanide impurities in iron. In this study, we measured the HFF of Pm impurity in iron by the time-differential perturbed angular correlation (TDPAC) method. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

本研究では強磁性体である鉄中の希土類不純物 Pm が受ける超微細磁場を測定した。超微細磁場とは、 原子核の周りの電子が原子核位置につくる磁場のことである。超微細磁場は原子核の核磁気モーメント の決定に重要な情報であるとともに、物性理論検証のためにも重要である。一般に、鉄中の超微細磁場 は大きく、特に不純物が希土類である場合には人工磁石(~10 T)を大きく超える数 10 T~数 100 T の実 験値が報告されている。

現在、鉄中あるいはニッケル中の不純物での超微細磁場については、遷移元素及び典型元素に関して は理論計算値と実験値は良い一致を示しているが、希土類である場合にはそうではない。Torumbaらに よって鉄中の希土類元素の超微細磁場に関する理論計算が報告されているものの[1]、その一方で信頼 性の高い実験値が少ないのが実情である。たとえば、鉄中の Pm 不純物の超微細磁場の実験については 過去に核整列実験(γ線検出)による2つの測定が報告されており、それぞれ B<sub>HFF</sub> = 406±100 T [2]、284 ±35 T [3]と非常に大きい値を示し、誤差も大きいものである。これらは two sites モデルという単純化さ れたモデルに依存して決定されているが、そのモデルの妥当性は保証されていない。

以上から、本研究では鉄中の Pm 不純物の超微細磁場をγ-γ摂動角相関法(time-differential perturbed angular correlation、略称 TDPAC)を用いて測定することとした。超微細磁場を感じる原子核の歳差振動数を TDPAC 法で求め、その振動数と既知の核磁気モーメントから超微細磁場を求めることができる。 TDPAC 法を用いる利点は、核整列実験(γ線検出)と異なり解析にモデルを仮定する必要がないことと、 超微細磁場の符号の決定が可能なことである。一方、欠点は検出器系の有限の時間分解能のため、観測 できる歳差振動数の大きさに上限があることで、鉄中の Pm の超微細磁場が数 100 T である場合は TDPAC 法による歳差運動の観測は困難となる。しかし、理論計算にはモデルによって約 100 T から約 400 T までの大きな幅があり、100 T 程度であれば TDPAC 法で観測できる可能性がある。

試料の作製は京都大学原子炉実験所のオンライン同位体分離装置(KUR-ISOL)を用いて行った。<sup>147</sup>Pm の親核である<sup>147</sup>Ndを100 keV に加速し、厚さ0.1 mm、純度 99.995%の鉄箔に打ち込んだ。<sup>147</sup>Pm の 440 keV-91 keV のカスケード崩壊によるγ線の TDPAC 測定をを、BaF<sub>2</sub>シンチレーション検出器を3台(相関角 $\theta$ =±135°)用いた場合と4台( $\theta$ =90°、180°)用いた場合とで独立に行った。中間準位の91 keV 励起状態は半減期 2.5 ns、スピン・パリティ 5/2<sup>+</sup>で、核磁気モーメントは+3.22(16)  $\mu$ N [4]である。測定の結果、超微細磁場は  $B_{\rm HFF}$  = +30±6T (3 カウンター)、(+)48±13T (4 カウンター)とそれぞれ得られ、これらの加重平均をとって+33±5T となり、理論の予想よりも小さな値が得られた。得られた結果について考察する。

- [1] D. Torumba. et al., Phys. Rev. B 74, 014409 (2006).
- [2] Singleton. et al., Hyp. Interact. 75, 471 (1992).
- [3] J. Goto. et al., Hyp. Interact. 136/137, 561 (2001).
- [4] R. B. Firestone and V. S. Shirley, Table of Isotopes, 8th ed. (John Wiley & Sons, New York, 1996).

### <sup>12</sup>C 原子核における稀ガンマ崩壊モードの探索

原子核・ハドロン物理学研究室 津村 美保

**Abstract** At high temperature, highly excited states in <sup>12</sup>C might play a part of the triple  $\alpha$  reaction, but the radiative decay widths of these states have not been determined. We planned the measurement of <sup>1</sup>H(<sup>12</sup>C, <sup>12</sup>C\*p) reaction to determine the radiative width of the 3<sub>1</sub><sup>-</sup> in <sup>12</sup>C state and examined the feasibility of the plan. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

<sup>12</sup>C 原子核は宇宙での元素合成過程において重要な役 割を担っている。<sup>12</sup>C は Figure 1 に示すようにトリプルα 反応により 3 つの $\alpha$ の共鳴状態を経て生成されることが 知られており、この過程は主に 0<sub>2</sub>+(7.65 MeV)状態を経由 する。10<sup>9</sup> K 以上の高温条件下では 0<sub>2</sub>+より 2 MeV ほど 高い励起状態である 3<sub>1</sub>-(9.64 MeV)や 2<sub>2</sub>+(9.84 MeV)状態 の寄与が高まると指摘されている[1]が、これらの励起状 態のγ崩壊幅は未だに決定されていない。これが高温度 領域での炭素の反応率を計算する際に大きな不確定要 素となっており、これらの状態のγ崩壊幅が 2 倍変わる だけで質量数 100以上の核種では生成率が 10 倍以上変 わることが指摘されている[2]。



Figure 1 Schematic diagram of the triple  $\alpha$  reaction.

過去には、3<sub>1</sub>-状態の基底状態へのγ崩壊幅の測定実験が、炭素標的にα粒子を入射し標的中の<sup>12</sup>Cを励起させるという方法で実施されている[3]が、3<sub>1</sub>-状態のγ崩壊幅は全崩壊幅に比べ非常に小さく、これらの状態が同位体濃縮された<sup>12</sup>C標的に含まれるごく微量の<sup>13</sup>Cのバックグラウンドに埋もれてしまったため、 正確な測定は困難であった。

今回我々は、逆運動学反応<sup>1</sup>H(<sup>12</sup>C,<sup>12</sup>C\*p)について反跳陽子と散 乱<sup>12</sup>Cを同時計測し、反跳陽子の測定から得られる<sup>12</sup>C 励起状態 の全生成数と散乱<sup>12</sup>Cの測定から得られるγ崩壊イベント数を比較 することにより、3<sub>1</sub>-状態の基底状態へのγ崩壊幅を測定することを 計画した。γ崩壊確率は確率 10<sup>-7</sup>以下と非常に小さいため、γ崩壊 幅を決定するためには S/N を良くすることが必要不可欠であり、

アクシデンタルコインシデンスイベントをいかに除去するかが重要 な鍵となる。アクシデンタルイベントとは、Figure 2 右のように別々 のイベントに由来する粒子をあたかも同一のイベントから発生した

<sup>12C or α</sup> 検出 標的 12C ビーム 12C ビーム 12C ビーム 12C ビーム

Figure 2 Schematic diagram of accidental coincidence events.

ものと取り違えてしまう事象のことである。そのため本研究では、アクシデンタルイベントの影響を考慮して、実験条件の最適化のための詳細なモンテカルロシミュレーションを行った。その結果、タグ用検出器と固体水素標的を導入し、さらに<sup>12</sup>Cの散乱角を精度よく測定すれば、γ崩壊確率について 10<sup>-8</sup>の感度を持つ実験ができることが確認できた。

本研究では、上記の稀ガンマ崩壊モード探索計画のもと、大阪大学核物理研究センター(RCNP)のサイクロトロン施設においてテスト実験を行った。テスト実験ではポリエチレン中の水素を標的とし、タグ用検出器、<sup>12</sup>Cの散乱角の測定精度を上げるためのHe ボックスと物質量の少ないヘリウム+エタンを用いたワイヤーチェンバーを導入した。本論文ではテスト実験のデータ解析を行い、アクシデンタルイベントを除去するための数々の仕組みについてその有効性を検証した。さらに探索計画の実現可能性を評価し、改善すべき点について議論した。

- [1] F. Hoyle and W. A. Fowler, Astrophys. J 132, 565 (1960).
- [2] S. Wanajo, et al., Astrophys. J 729, 1 (2011).
- [3] D. Chamberlin, et al., Phys. Rev. C 10, 909 (1974).

# QCD におけるクォークの閉じ込めと カイラル対称性の自発的破れの関係の研究

原子核理論研究室 土居孝寛

**Abstract** In the lattice QCD formalism, we derive an analytical relation between the Polyakov loop and Dirac modes on a temporally odd-number lattice. This relation indicates that low-lying Dirac modes have little contribution to the Polyakov loop. Thus, there is no one-to-one correspondence between confinement and chiral symmetry breaking in QCD. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

カラーの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れなどの低エネルギー領域における量子色力学(QCD) が示す非摂動的現象の解析は一般に困難であるが、素粒子・原子核物理の重要な課題の1つである。

クォークの閉じ込め・非閉じ込め相転移の代表的なオーダーパラメータはポリヤコフ・ループである [1]。また、Banks-Casherの関係式[2]などから、カイラル対称性のオーダーパラメータであるカイラル 凝縮は Dirac 演算子のゼロ固有値密度と深く関わっている。

これらの非摂動的現象はそれぞれ興味深いが、その関係性もまた興味深い研究対象である[3]。閉じ 込め・非閉じ込め相転移とカイラル相転移の転移温度がほぼ同じである事[4]や、最大可換ゲージでの QCD モノポールの研究[5]等の多くの研究から、閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れには強い相関が ある事が示唆されていた。ところが、近年の格子 QCD を用いた数値的解析により、低ディラック・モー ド(low-lying Dirac mode)を QCD 真空から取り除いても閉じ込めの性質が変わらない、つまり QCD にお いてクォークの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れに単純な1対1対応は成立しない事が示され た[6]。

本研究では、時間方向のサイズが奇数の格子を用いてポリヤコフ・ループとディラック・モードの解析的な関係式を導出し、クォークの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れの関係を議論する[7,8]。 正方格子を用いる場合奇数個のリンクの積では周期境界条件を用いたポリアコフ・ループ以外の閉じた ループを作ることができない事と、Elitzurの定理を用いる事により、ポリヤコフ・ループ((L))とディ ラック・モード( $\hat{P}|n\rangle = i\lambda_n|n\rangle$ )の間の解析的な関係式

$$\langle L \rangle = \frac{(2i)^{N_4 - 1}}{12V} \sum_n \lambda_n^{N_4 - 1} \langle n | \hat{U}_4 | n \rangle \quad (N_4 : \text{odd})$$

(Û4はリンク変数演算子、Vは4次元体積)が得られる[7,8]。この関係式はフル QCD で成立し、更には有限温度・有限密度領域でも成立する。この関係式から、低ディラック・モードが他のディラック・モードに比べてポリヤコフ・ループの値にほとんど寄与を持たない事がわかるので、クォークの閉じ込めと カイラル対称性の自発的破れの関係が1対1対応ではない事が示される。

また、格子上でディラック演算子をスピノルの添字に関してブロック対角化する Kogut-Susskind formalism は格子サイズが偶数の場合のみ適用可能である[1]が、本研究では時間方向のサイズが奇数の格子に対しても適用できるように Kogut-Susskind formalism を一般化したので紹介する[8]。

#### References

[1] H.J. Rothe, "Lattice Gauge Theories" (World Scientific, 2012), and its references.

- [2] T. Banks and A. Casher, Nucl. Phys. B169, 103-125 (1980).
- [3] H. Suganuma, S. Sasaki and H. Toki, Nucl. Phys. B435, 207-240 (1995).
- [4] F. Karsch, Lect. Notes Phys. 583, 209-249 (2002), and its references.
- [5] O. Miyamura, Phys. Lett. B353, 91-95 (1995); R.M. Woloshyn, Phys. Rev. D51. 6411-6416 (1995).
- [6] S. Gongyo, T. Iritani and H. Suganuma, Phys. Rev. **D86** 034510 (2012).
- [7] H. Suganuma, T.M. Doi and T. Iritani, PoS (Lattice 2013), 374 (2013); EPJ Web of Conferences (2014).
- [8] T.M. Doi, H. Suganuma and T. Iritani, PoS (Lattice 2013), 375 (2013).

# アイソスピン拡散を使った核物質の対称エネルギー測定の ための実験的研究

原子核ハドロン研究室 中塚 徳継

**Abstract** We performed the experiment to measure the isotopic distribution of projectile residues from the collision of cocktail beams, in which 107In and 112Sn beams are on 124Sn and 112Sn targets at 70MeV/u respectively. Preliminary results of isotopic distribution are presented to determine symmetry energy of nuclear matter.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

核物質の状態方程式は、中性子星の内部構造を知るうえで重要である。状態方程式のうち、アイソス ピン非対称度に依存する項を対称エネルギー項と呼ぶ。対称エネルギー項については、さまざまな実 験的、理論的研究が行われているが、いまだ不定性が残っており、さらなる研究が必要である。 Y.Z.ZhangらはImQMDモデルを用いた原子核衝突シミュレーション[1]を行い、全アイソスピンの異な るいくつかの衝突系を比較すると、対称エネルギーに依存したアイソスピン拡散が起こることで、入射 核破砕片のアイソスピン分布が異なると予想した。Y.Z.Zhangらが計算に使用したEvaporative and Multifragment Decay Theoryによると、アイソスピン拡散はビーム原子核と標的原子核のアイソスピ ン非対称度の差 $\Delta$ のに比例して起こる。

ここで、ビーム原子核、標的原子核の中性子数をそれぞれ $N_b$ 、 $N_t$ 、陽子数を $Z_b$ 、 $Z_t$ 、とすると、 $\Delta \delta t(1)$ で定義される。

 $\Delta \delta = |(N_b - Z_b/N_b + Z_b) - (N_t - Z_t/N_t + Z_t)| (1)$ 

したがって△♂が大きい衝突系ほど対称エネルギーを精度良く決定出来ると予想される。アイソスピ ン拡散は安定核ビームを使った原子核衝突を用いた実験的研究が行われており[2]、その効果は実証さ れている。本研究では、安定核ビームよりも△♂の大きな陽子過剰な不安定核ビームと中性子過剰な安 定核標的の組み合わせで原子核衝突を起こすことで、対称エネルギーをさらに精度よく測定する実験 を計画した。原子核衝突では、Pre-equillibrium Emission、クーロン力、Sequential Dacayなどの現 象が起こり、アイソスピン拡散の効果と混合する。これらのアイソスピン拡散以外の効果を系統的に調 べるため、原子核衝突を∆δの異なる2つのビームと標的の組み合わせで行うことにした。アイソスピ ン分布は、スペクトロメータを用いた入射核破砕片の粒子識別と収量の測定を行うことで決定する。 さらに、衝突のセントラリティを決定するために、標的周辺に荷電粒子の多重度を測る検出器を設置 することにした。マルチプリシティ検出器として、ワシントン大学のMicroball[3]を用いた。実験は理 化学研究所仁科加速器センターのRIBF施設にあるBigRIPS破砕片分析器とZeroDegreeスペクトロメー タ[4]を用いて行った。342MeV/uの124Xe<sup>52+</sup>ビームをBe標的に当てて、核破砕反応を用いて70MeV/u の107Inと112Snビームを生成した。107In(ビーム)+124Sn(標的)、112Sn(ビーム)+112Sn(標的)の2つ の組み合わせで原子核衝突を起こし、入射核破砕片の粒子識別とアイソトープの収量、および衝突のマ ルチプリシティを測定した。入射核破砕片の粒子識別はBρ-ΔE-TOF法を用いて行った。本論文では、 入射核破砕片の粒子識別と収量を決定するための解析方法とその暫定的な結果について述べる。ここ からさらに粒子識別と収量の系統誤差を評価する必要がある。そのためにはチャージステート、バッ クグラウンドの評価法に対する詳細な議論を行う必要がある。

- [1] Y.Z. Zhang et al., Phys. Rev. C, 85, (2012) 024602.
- [2] T.X. Liu et al., Phys. Rev. C 76, (2007) 034603.
- [3] D.G.Sarantitiesetal., Nucl.Instrum.MethodsPhys.Res., Sec. A 381, (1996) 418.
- [4]T. Kubo et al., Prog. Theor. Exp. Phys. (2012) 03C003.

# 気球搭載電子飛跡検出型コンプトンカメラの 疑似かに星雲線源を用いた画像試験

宇宙線研究室 中村祥吾

**Abstract** For astronomical observations, we are developing the MeV gamma-ray Compton camera. To detect the Crab Nebula in a balloon experiment, we have calibrated Pixel Scintillator Arrays and the micro Time Projection Chamber, and tested the performance of the Flight Model camera with the gamma-ray source similar to the nebula. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

我々は次世代の MeV ガンマ線望遠鏡として電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron-Tracking Compton Camera, ETCC)の開発を行っている。ETCC は散乱体としてガスを封入し、micro pixel chamber[1] ( $\mu$ -PIC) と gas electron multiplier[2] (GEM)を増幅器兼二次元読み出し器とした micro Time Projection Chamber ( $\mu$ -TPC)を使用し、また吸収体として無機シンチレータを用いた Pixel Scintillator Array (PSA) を $\mu$ -TPC の周囲に配置している。 $\mu$ -TPC で反跳電子の三次元飛跡とエネルギーを、PSA で散乱ガンマ線の吸収点とエネルギーを測定することで、入射ガンマ線のエネルギー及び到来方向を一光子毎に決定することができる。さらに、電子飛跡の dE/dx を考慮することによりバックグラウンドとなる荷電粒子などの雑音事象を除去し、環境ガンマ線と線源からのガンマ線のみを残すことができる。

我々は 2006 年 9 月、岩手県三陸において小型 ETCC を用いた第一回気球実験 Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment I (SMILE-I)を行い、高度 35 km で宇宙拡散ガンマ線と大気ガ ンマ線の観測に成功した[3]。現在は次期気球実験 SMILE-II として、かに星雲を高度 40 km、5 時間程度 の観測により 5  $\sigma$ の有意度で検出すべく検出感度、角度分解能の向上を目的とした改良を行っている。 SMILE-II 用 ETCC では有効面積が 300 keV において 0.5 cm<sup>2</sup>以上必要であり、それを満たすために  $\mu$ -TPC を 30 cm 角に大型化し、PSA にも 8×8ch のマルチアノード PMT である H8500 を 108 個使用している。 ただ、H8500 には各 ch でゲインにばらつきがあるため、108 個の PSA のエネルギー較正を <sup>139</sup>Ce、<sup>133</sup>Ba、 <sup>22</sup>Na、<sup>137</sup>Cs、<sup>54</sup>Mn の 5 つの線源を用いて行った。

較正した PSA を SMILE-II 用 ETCC に組み込んだ後(Fig.1)、実際の天体観測を模し、バックグラウンド優位な状況下でのガンマ線源の測定を行った。<sup>22</sup>Na を厚さ 2 mm の鉛で包み線源強度を 31 kBq とし、 ETCC から距離 2 m の位置に置くと、ガンマ線源の強度は 2  $\pi$  の立体角でバックグラウンドに対して 2 % となった(Fig.2)。これはかに星雲観測時に予想される S/N 比の数倍程度であり、PSA を TPC の底面 36 個分のみ使用して測定すると、26 時間の観測により 19  $\sigma$  の有意度での検出に成功した(Fig.3)。PSA を 108 個使用した場合、検出感度は 5 時間の観測で 7  $\sigma$  程度と考えられる。この結果から、現在開発して いる ETCC が SMILE-II で要求される性能を満たすことを実験的に確かめることに成功した。



Fig. 1. A photograph of the ETCC.





Fig. 3. A reconstructed image of <sup>22</sup>Na.

### References

[1] A.Ochi et al., *NIM*, A 478 (2002) 196.

- [2] F. Sauli., *NIM*, A 386 (1997) 531.
- [3] A.Takada et al., *ApJ* **733** (2011) 13.

### 磁場中の非一様カイラル凝縮についての研究

### 原子核理論研究室 西山和也

**Abstract** We discuss inhomogeneous chiral phase in quark matter in the external magnetic field. It is shown that there is 1<sup>st</sup> order phase transition between different types of the inhomogeneous phase. We show that homogeneous condensate is unstable in the magnetic field. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

自然界に存在する基本的な相互作用は、重力相互作用、電磁気相互作用、弱い相互作用、強い相互作 用である。このうち、クォーク物質の性質を考えるときに最も重要な相互作用は強い相互作用である。 強い相互作用を記述する基礎理論は量子色力学(Quantum Chromodynamics)と呼ばれるSU(3)ゲージ 理論である。QCDのラグランジアンは簡潔であるが、有限温度・有限密度領域にはさまざまな相が現れ ることが、格子QCDや摂動QCD、いくつかの模型を用いた解析によって示唆されている。

ここでは、特にカイラル相転移について議論する。QCD相図の研究では秩序変数を空間一様と考える ことが多い、しかし近年では秩序変数が空間的に変化することを許した場合の相図の研究が行われてい る[1][2]。非一様相は物性系では以前から知られており、例えば低次元電子系でのスピン密度波や、磁 場中の第二種超伝導物質のFFLO状態などがある。QCD相図においてもモデルを用いた解析や、QCDの Schwinger-Dyson方程式を用いた解析などで実際に非一様構造が有利になる領域が相図に現れることが 知られている。秩序変数を、スカラー凝縮の大きさを実軸、擬スカラー凝縮の大きさを虚軸にとったも のに拡張する。典型的な非一様構造として、秩序変数が平面波のような空間依存性を持つものと、sin 関数のような空間依存性を持つものがある。これらはそれぞれDCDWとRKCと呼ばれる。非一様構造とし てDCDWのみを考えた場合とRKCのみを考えた場合のどちらにおいても、相図のある領域で非一様相が表 れる。このような非一様構造は理論的な興味だけではない。非一様構造の現れる密度は中性子星の内部 で実現されていると考えられており、現象との関連でも興味深い。

ー方で、重イオン衝突実験や、マグネターと呼ばれる非常に磁場の強い中性子星への興味から、磁場 中のクォーク物質の性質に興味が持たれている。重イオン衝突では(300MeV)<sup>2</sup>程度の磁場が、マグネタ ーの内部では(100MeV)<sup>2</sup>程度の磁場が存在していると考えられている。これらの磁場は構成子クォーク 質量と比較すると無視できない大きさである。磁場中のQCDの性質は格子QCDによっても計算されてお り、たとえば零温度・零密度ではカイラル対称性の破れが磁場によって促進されることが示されている。 また、マグネターの内部では強磁場・高密度であり、磁場中の非一様構造の解明はマグネターの性質を 調べるためには重要である。このように磁場中においても、非一様構造は純粋に理論的な観点だけでな く、現象的な観点からも興味深い。すなわち、T-μ 平面での相図をT-μ-H空間内での相図に拡張するこ とは理論的・現象的に重要である。

1+3次元ではRKCが非一様構造として現れることが示されている。しかし、強磁場中で系の性質が 1+1次元的に近づくことや、先行研究[3]での示唆から、有限磁場の相図ではDCDWが有利になる領域 が現れると考えられる。したがって、DCDWとRKCの両方を扱った枠組みでの解析が必要である。

本研究では、有限磁場における非一様凝縮の相図で、磁場の効果によって相図がどのように変更されるか、磁場中でDCDWがなぜ有利になるのかを明らかにする。具体的な計算はQCDの有効理論である Nambu-Jona-Lasinio模型を用いて行うが、カイラル対称性のみに基づく模型によらない特徴も明らかにする。

### References

[1] E.Nakano, T.Tatsumi, Phys. Rev. D71 (2005) 144006

- [2] D.Nickel, Phys. Rev D80 (2009) 074025
- [3] I. E. Frolov, V. Ch. Zhukovsky, K. G. Klimenko, Phys. Rev. D 82, 076002 (2010)

### 場の理論の自由度と量子エンタングルメント

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 沼澤宙朗

**Abstract** There is a relation between central charges of CFT's and the entanglement entropy. This is a universal property of the entanglement entropy of vacuum states in CFT's. There is also a universal property in the entanglement entropy of excited states in CFT's. We discuss these in context of both QFT and holography.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

場の量子論は素粒子を記述する言語であり、また物性の量子多体系の記述にも用いられ、現代物理学には書かせない道具となっている。その場の量子論の基本的な問いとして、繰り込み群が可逆かどうかという問いが挙げられる。1+1次元の場合、ザモロドチコフのc定理と呼ばれる定理が成立し、場の理論の自由度の数を与える量であるセントラル・チャージが繰り込み群の流れに沿って単調減少するため、繰り込み群は不可逆であることが知られている[1]. 共形場理論のセントラル・チャージは偶数次元の時空の共形場理論に対して定義することができるため、2次元の時と同様の定理が成り立つという予想が立てられる.

一方で,近年 AdS/CFT 対応と呼ばれる, d 次元の共形場理論と d+1 次元の重力理論の対応が知られている.この AdS/CFT 対応を用いることで,この対応が適用できるクラスの理論に対して次元に依存しない c 定理の証明が得られた[2].特にこの証明は,セントラル・チャージが存在しない奇数次元の共形場理論にもセントラル・チャージと同様の場の理論の自由度を数える量が存在し,それが繰り込み群の流れにそって単調減少することを示唆している.

以上の結果は、エンタングルメント・エントロピーと呼ばれる量を考えることで統一的な視点を与え ることができる. エンタングルメント・エントロピーは、量子的なエンタングルメントを定量化したも のであり、素粒子理論や物性物理、量子情報の分野で近年盛んに研究されている量である. 場の理論に おけるエンタングルメント・エントロピーは、理論の無限自由度に起因する発散が生じるために、この 発散を除去(正則化)する必要がある. しかし、エンタングルメント・エントロピーには正則化に依存し ない普遍的な項が存在する. この普遍的な項は、偶数次元の場合には共形場理論のセントラル・チャー ジに比例していることがわかる. 実は、エンタングルメント・エントロピーの AdS/CFT 対応を用いて得 られた奇数次元におけるc定理は、エンタングルメント・エントロピーの普遍的な項が単調減少してい ると捉えることができる. つまり、どの次元についても、c定理はエンタングルメント・エントロピー の普遍的な項の単調減少として理解できる.

以上は基底状態のエンタングルメント・エントロピーの普遍的な性質に関連した話題である.一方で, 励起状態のエンタングルメント・エントロピーに対してもなんらかの普遍的な振る舞いがあることが期 待される.1+1 次元の共形場理論の場合には励起状態のエンタングルメント・エントロピーの時間発展 を調べることができる.しかし,1+1 次元以外では実際に計算を行うことが難しい.そこで,我々はあ る励起状態のモデル(局所量子クエンチ)の AdS/CFT 双対を構成し,1+1 次元よりも高い次元でも計算を 行い,振る舞いを調べた[4].

以上のことを踏まえて、本修士論文では、前半では主にエンタングルメント・エントロピーとの関連 に注目して、c定理の最近の発展について場の理論の視点と AdS/CFT に基づいた視点の両方から考察し、 レビューする.後半では、励起状態に対するエンタングルメント・エントロピーの最近の発展と我々が 行った研究結果をまとめる.

#### References

[1]A.B. Zamolodchikov, "Irreversibility" of the flux of the Renormalization Group in a 2-D Field Theory, JETP, Lett.43, 730-732

[2] R.C. Myers and A. Sinha, Holographic c –theorem in Arbitrary Dimensions, JHEP 1101, 125 (2011)

[3] M. Nozaki , T. Numasawa and T. Takayanagi, Holographic Local Quenches and Entanglement Density, JHEP 1305 (2013) 080

# CTA 計画大口径望遠鏡初号機搭載版 PMT 波形 GHz サンプリング回路の開発

宇宙線研究室 畑中謙一郎

**Abstract** We have developed the readout electronics to sample waveforms of photomultipliers at GHz for the first large-size telescope of CTA which is the next generation VHE gamma-ray observatory. The new version of the electronics improved in bandwidth and adopts the new trigger system.

#### © 2014 Department of Physics, Kyoto University

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画[1]は、次世代の大規模大気チェレンコフ望遠鏡群建設計画で、 大(23m)、中(12m)、小(4m) 口径の望遠鏡を合わせて数十台配置することで、20GeV~100TeV の超高エネ ルギー領域の天体ガンマ線を、現行の望遠鏡の 10 倍の感度、3 倍の角度分解能で観測を行うことを目指 す。

チェレンコフ望遠鏡では、大気中に入射したガンマ線により生成されるシャワー中の電子・陽電子から放出されるチェレンコフ光を集光し、焦点面に多数並べた光検出器のカメラによってシャワーを撮像する。このシャワーの像から、入射ガンマ線のエネルギー、到来方向が再構成される。大気チェレンコフ望遠鏡による観測での主なノイズである星の光などの夜光は、焦点面カメラの各ピクセルに100MHz 程度のレートでランダムに入ってくる。この夜光をできるだけ除くために、トリガー回路によって隣り 合った数個のカメラピクセルに同時に来た光信号のみを選び出し、また、光検出器に時間特性の早いものを用い、読み出し回路の波形信号サンプリングも高速で行い信号の積分時間を短くする。

我々が開発を行っている大口径望遠鏡では、光検出器の光電子増倍管 (PMT)からのチェレンコフ光の 信号の時間幅は数 nsec であり、GHz でのサンプリングが読み出し回路に求められる。また、焦点面 PMT は一台あたり 1855 本使用されるため、カメラ内での発熱を考慮すると、読み出し回路は GHz サンプリ ングを低消費電力で行わなければならない。我々は、アナログメモリ ASIC の DRS4 を用いることで、 2.4W/PMT という低消費電力で2GHz までのスピードでサンプリング可能な波形読み出し回路を開発した。 この回路では、1 枚の回路で 7 本の PMT の信号を読み出すことができる。これまでの性能評価試験では、 概ね要求仕様は満たしていることが確認されたものの、周波数帯域の要求値 300MHz (-3dB) は満たしてお らず、海外グループの開発しているトリガー回路の最新版にも対応していなかった。

本修士論文では、望遠鏡の初号機に搭載するため読み出し回路のバージョンアップを行った。この回路では新しいトリガー回路に対応し、周波数帯域の改善を目指したアンプ部分の改良や、クロストークなどのノイズ耐性の向上を狙った改良を行った。新バージョンのトリガー回路と組み合わせてのPMT波形取得などの基本動作に成功し、周波数帯域の測定を行ったところ100mVの入力に対し310 MHz(-3dB)という性能が得られた。



Fig. 1. Readout electronics for the first large-size telescope of CTA. **References** 

[1] http://www.cta-observatory.jp/



Fig. 2. Measured bandwidths of the readout electronics.

# 300 MeV/u<sup>16</sup>C ビームを用いた 陽子弾性散乱微分断面積の測定

原子核ハドロン物理学研究室 馬場辰雄

**Abstract** The angular distribution of the cross section for the proton-<sup>16</sup>C elastic scattering at 300 MeV/u was measured with a recoil proton spectrometer. The measured cross sections were compared with RIA calculations using AMD, and RMF density distributions. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

核子あたり300 MeVの陽子弾性散乱は、インパルス近似が使えること、プローブとなる陽子の平均自 由行程が長いことから、原子核の核子密度分布を探るのに適している。安定核では電子散乱測定によっ て得られた電荷分布の情報を用いることで中性子密度分布を抽出することにも成功している<sup>[1][2]</sup>。我々 はこの手法を不安定核に応用するために、逆運動学にて弾性散乱測定が可能な装置を開発し、放射線医 学総合研究所や独国GSIにおいて炭素、酸素、ニッケル同位体の測定を行ってきた。

炭素同位体は質量数ごとに中性子の密度分布が大きく変化することが理論的に予想されており、系統的な測定が必要である。そこで、本研究では放医研で行った<sup>9,10,11</sup>Cの測定<sup>[3]</sup>に続き、中性子過剰核の<sup>16</sup>Cの測定を行った。中性子過剰核の測定にあたり、高強度ビームが必要となったため、理化学研究所RI Beam Factory (RIBF)にて測定を行った。RIBFでの陽子弾性散乱測定は本測定が初の試みとなる。

測定に用いたセットアップを Fig. 1 に示す。345 MeV/u<sup>18</sup>0 を<sup>9</sup>Be 標的に照射し、不安定核ビームを生成した。<sup>16</sup>C の選択には入射核破砕片分離装置 Big Rips を用いた。<sup>16</sup>C ビームの軌道は標的前方に配置した 2 台の Beam line Drift Chamber (BDC)を用いて決定した。標的には 1 mm 厚の固体水素を用い、標的から放出される反跳陽子を 2 台の Recoil Drift Chamber (RDC) とプラスチックシンチレーター( $p \Delta E$ ) 及び 14 本の NaI (T1) シンチレーターで構成された Recoil Proton Spectrometer を用いて測定した。陽子の反跳角度とエネルギーから<sup>16</sup>C の励起エネルギーを決定して弾性散乱事象を同定することができる。更に、標的後方に配置したプラスチックシンチレーター( $\Delta E$ )を用いて散乱粒子の電荷測定を行い、Z=6 の粒子を選択してバックグラウンドの軽減を図った。

Fig.2に、<sup>16</sup>Cの励起エネルギースペクトルを示す。用いた検出器の立体角と検出効率の評価を行い、 弾性散乱事象の収量から微分断面積の角度分布を運動量移行約 1~2 fm<sup>-1</sup>の範囲で決定した。得られた 結果は、Anti-symmetrized Molecular Dynamics と Relativistic Mean Field モデルの密度分布を用い た Relativistic Impulse Approximation 計算と比較し、議論を行った。



Fig. 1. Experimental set up.

- [1] S. Terashima et al., Phys. Rev. C77, 024317 (2008).
- [2] J. Zenihiro et al., Phys. Rev. C82, 044611 (2010).
- [3] Y. Matsuda et al., Phys. Rev. C87, 034614 (2013).



Fig. 2. Excitation-energy spectrum of the  $H({}^{16}C, p)$  reaction at 300 MeV/u.

# KOTO 実験上流部 beam pipe 内側に設置する 荷電粒子検出器の開発及び性能評価

高エネルギー物理学研究室 日根野 貴晶

Abstract KOTO experiment searches for the rare  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  decay and plans to measure the branching ratio of this decay. I designed and developed a veto detector called "Hinemos" which detects charged particles coming from  $K_L$  decay in the upstream region of KOTO detector, and confirmed its performance.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

KOTO 実験は、長寿命中性 K 中間子の崩壊モードのひとつ  $K_L \rightarrow \pi^0 vv$  を世界で初めて観測、またその分岐比を測定することを目的とした実験で、茨城県東海村に建設された J-PARC の大強度陽子シンクロトロンを用いて行われている。この崩壊は CP 対称性を破る崩壊で、その分岐比は標準理論における CKM行列の複素パラメータηの2 乗に比例しており、またその理論不定性が小さいため、標準理論を超える物理のよい検証を行うことができる。KOTO 実験のシグナル事象は、 $\pi^0$ から生成する 2 つの  $\gamma$ 線のみが検出され、他に何も検出されない事象である。この分岐比の予測値はおよそ 2.4×10<sup>-11</sup> と非常に小さいため、シグナルの発見にはバックグラウンドを低く抑えることが非常に重要となる。

KOTO 実験でバックグラウンドとなる事象のひとつに、上流部 での  $K_L$ の崩壊によって生成した  $\pi$ が beam 周辺の物質に含まれ る陽子と荷電交換反応  $\pi$ +p→ $\pi$ <sup>0</sup>+n を起こし、そこで生成した  $\pi$ <sup>0</sup> からの  $2\gamma$  があたかも崩壊領域からのシグナルのように振舞う事 象がある。特に、崩壊領域の上流に設置される NCC 検出器に は、構造を支えるための CFRP 製 beam pipe が中心に設置され ており、この beam pipe と  $\pi$ が反応することでバックグラウン ドを生成する恐れがある(Fig. 1)。



本論文で述べる検出器"Hinemos"は、この CFRP 製 beam pipe をプラスチックシンチレータで覆うことにより(Fig. 2, Fig. 3)これに入射する πを検出し、上述したバックグラウン ドを抑制することを目的としている。

Fig. 1. Position of Hinemos in KOTO detector and image of background event

まずはシミュレーションに基づいたバックグラウンド数の予測、及びそこから要請される Hinemos の性能について説明する。その結果 beam pipe 周辺との相互作用によって発生するバックグラウンド数 は標準理論における分岐比から予測されるシグナル数の数倍であることが分かり、99%程度の検出効率 があれば十分バックグラウンドを抑えられることが分かった。

次に、この要求を満たすために必要とされる設計、及びそれを実現する製作工程を説明した後に、線 源を用いた測定に基づく性能評価、及び KOTO beam line へのインストール後に行った、K<sub>L</sub> beam と宇宙 線を用いた性能評価について述べる。最後に、今後予定される beam intensity の上昇に対しての応答の 予測や、実際のインストール環境下でのバックグラウンド数見積りについて説明をする。



Fig. 2. Hinemos and NCC beam pipe



Fig. 3. Hinemos on the beam pipe stacked with NCC, viewed from upstream

# 大質量星の崩壊時のニュートリノ風における 元素合成過程についての研究

天体核研究室 藤林翔

**Abstract** We investigate the nucleosynthesis processes in the collapse of massive stars using "neutrino-driven winds" as the background of the nucleosynthesis calculation. We find that the r-process and the vp-process can occur. Interestingly, neutron-rich elements can be produced via the vp-process because the high neutrino-luminosity can make many neutrons from protons. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

我々や、我々の身の周りの物質を形作る数多くの元素は今までの宇宙の歴史の中で作られてきた。太 陽系の元素組成の多くを占める水素やヘリウムはビッグバンにおいて作られたと思われている。また、 炭素・酸素などの比較的軽いものから鉄までの元素は、星の中の核融合反応によって作られ、最終的に 超新星爆発によって宇宙へばら撒かれることが今までの研究からわかっている。

金・銀・鉛などの鉄より重い元素は、一部を除いて超新星や中性子星連星の合体などの爆発的な天体 現象時に生成されたと思われている。しかし、数々の元素合成計算を用いた研究の結果は太陽系の重元 素組成を完全に再現するには至っておらず、これらの重元素を生み出した天体については未だによくわ かっていない。

本論文では、これら重元素の起源の一つとして、非常に重い星の重力崩壊を提案する。太陽質量の100 倍という大質量星の重力崩壊の数値シミュレーション[1]によれば、重力崩壊を起こした後、星の中心 では太陽質量の3倍ほどの原始中性子星が形成され、10<sup>53</sup> erg/s を超える大きな光度でニュートリノが 放出されることが示唆されている。

本論文では、このような極限状況における元素合成過程として、ニュートリノ風と呼ばれる質量放出 過程[2]での元素合成過程を調べた。ニュートリノ風とは、物質がニュートリノによる後押しを受けて 原始中性子星から放出される現象である。ニュートリノ風は[3,4]に従って球対称・定常流として扱い、 中性子星の質量や、半径などをパラメータにして数値的に解を構成した。そして、この解での温度・密 度の時間発展の上で元素合成計算を行い、生成された元素の組成のパラメータの依存性を調べた。

パラメータを動かしながらニュートリノ風における元素合成計算を行った結果、中性子捕獲反応が非 常に早く進む元素合成過程である r-process が起きる可能性があることがわかった。また、(p,γ)と(n,p)反 応を起こしながら質量数を増やしていく vp-process という元素合成過程が起こる可能性があることもわ かった。vp-process では通常、陽子過剰核が生成される。しかし、今考えるニュートリノ光度が非常に 大きい状況では、陽子が反電子ニュートリノを吸収( $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$ )することで中性子が供給され続け る。従って、vp-process においても強い中性子捕獲(n,γ)が起こり、結果的に中性子過剰核が形成される可 能性があることがわかった。

- [1] Sekiguchi *et al. PTEP*,01A304 (2012)
- [2] Y.-Z.Qian and S.E.Woosley. ApJ,471,331(1996)
- [3] Otsuki et al. ApJ,533,424(2000)
- [4] Wanajo et al. ApJ,554,578(2001)

### μ-PIC を用いた不安定核実験のための アクティブ標的の開発と性能評価

原子核ハドロン物理学研究室 古野 達也

Abstract Active target system, where detection gas also plays a role of target gas, can detect very low energy particles and enables to perform missing mass spectroscopy at forward angles in RI beam experiments. We are developing the active target with Micro-PIxel Chamber ( $\mu$ -PIC) to achieve high position resolution. We studied detector performances using  $\alpha$  source and accelerated beam at RCNP. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

アクティブ標的は低エネルギー粒子の検出が可能なため、これまで不可能とされてきた不安定核実験 における前方角度での質量欠損分光法を可能にすると期待されている。我々は不安定核実験に求められ る高い位置分解能(6 mrad)、レート耐性(~100 kHz)を実現するために、μ-PIC[1]を用いた Time Projection Chamber (TPC)をアクティブ標的として用いる。TPC は荷電粒子の飛跡を 3 次元的に構築出来るガス検 出器である。検出器の開発においては、TPC 電場の一様性等の性能を最適化するために、Garfield を用 いて 3 次元的な電場計算を行った上で TPC の製作を行った。アクティブ標的の標的・検出ガスはα非弾 性散乱を行うために He が主成分となっている。しかし純粋な He ガスを用いると、検出器が放電しやす くなる、電子の拡散により位置分解能が下がる等の問題が生じる。そのため検出器を安定に動作させる



ために、He ガスに少量のクエンチガスを混入させる。 本研究ではクエンチガスとして、CF4, CO<sub>2</sub>, iso-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>に ついて性能を試験し、ガスの最適化を行った。

はじめにα線源を用いて TPC のドリフト速度、μ-PIC のガス増幅率等の検出器の基本性能を評価した。測定は 検出器の電圧やガス圧を変えながら行い、それらの結果 はシミューレーションによって定性的に理解された。

検出器の性能を更に深く研究するために大阪大学核 物理研究センターにおいて 50 MeV のα粒子ビームを用 いた試験も実施した。試験の目的は

①検出器の性能のビーム強度依存性を調べる。

②散乱イベントを取得し、散乱の飛跡構築アルゴリズム を開発する。

である。ビームエネルギーは 62 MeV/u<sup>12</sup>Be ビームと TPC 内でのエネルギー損失が同じになるように設定し た。<sup>12</sup>Be は我々のアクティブ標的初の不安定核実験で用 いる予定である。

①についてはクエンチガスとして iso-C4H<sub>10</sub> を用いる と不安定核実験で想定される 100 kHz のビーム強度でも 安定に動作し、ビーム飛跡構築の分解能が 350 µm の非 常に高い性能を持つことが確認された。さらに 1000 kHz の強度でも安定に動作させることに成功した。②につい ては 200 個程の散乱イベントを取得することが出来た。

Fig. 1. Schematics of the active target.

### References

[1] A. Ochi, et.al, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A 478, 196 (2002)

# 高強度レーザーとクラスターとの相互作用による THz 波発生

レーザー物質科学分科 森一晃

**Abstract** We have studied THz emission from argon cluster plasmas produced by intense femtosecond laser pulses. The property of THz radiation has been measured for laser pulse durations of 40 - 1000 fs. It has been found that the THz energy can be increased by optimizing the laser pulse duration. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

THz 波は発生、検出、制御の困難のため未開拓の分野であったが、近年のレーザー技術の飛躍的な発 達により、産業・科学分野などで多くの応用研究・開発が進んでいる。我々は、レーザー生成プラズマ が新たな高強度 THz 波光源となることを実証すべく、高強度レーザープラズマ相互作用より発生する THz 波を調べている。プラズマ源としては気体と固体の長所を併せ持つと考えられるクラスターを対象とし

ており、アルゴンガスからアルゴンクラスターへプラ ズマ源を変えることで 600 倍程度 THz 波のエネルギー が向上したことを報告した[1]。我々は更なる THz 波の 高強度化に向けて照射条件を最適化するべく、入射レ ーザーのパルス幅の変化によって放射 THz 波の特性が どのように変化するかを調べた。

実験では、高真空ガラスチャンバーの中心に高圧ア ルゴンガスを注入することで直径約 10 nm のアルゴン クラスターを生成し、そこにレーザー(中心波長 810nm、 パルスエネルギー10mJ、パルス幅 40 - 1000 fs)を集 光照射した。発生した THz 波はポリスチレンレンズで 平行光にした後、InSb ボロメータでエネルギーを測定 した。入射レーザーのパルス幅はレーザーシステムの パルス圧縮器の格子対間隔を変えることで変化させた。 偏光はワイヤーグリッドを使用して測定した。Fig. 1 は THz 波エネルギー測定の実験配置図である。

パルス幅を40 fs から広げていくと200 fs 付近で THz 波のエネルギーが強められ、さらにパルス幅を広げて いくと弱くなっていくことが判明した(Fig. 2)。レ ーザーのクラスターによる吸収にも最適パルス幅があ ることが確認でき、これは J. Zweiback らの報告結果 [2]と一致する。レーザーの吸収率が大きくなるパルス 幅と THz 波エネルギーが大きくなるパルス幅が近いこ とからレーザーの吸収と THz 波の放射機構が密接に関 係していることが予想される。まだ、THz 波の放射機構 を明らかにするには至っていないので、放射特性の詳 細測定が今後の実験課題となる。

#### References

F. Jahangiri *et al.*, Appl. Phys. Lett. **102**, 191106 (2013)
 J. Zweiback *et al.*, PhysRevA **59**, R3166 (1999)



Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup to measure THz emission from laser plasma with a bolometer.



Fig. 2. Angular distributions of THz emission for the laser pulse durations of 40 - 1000 fs.

# 離散的フレーバー対称性による 安定なダークマターの探究とレプトン混合角の導出

物理学第2教室 素粒子論研究室 安原 大貴

Abstract Discrete flavor symmetries and their breaking are useful to understand mixing structure of the lepton sector, and such residual symmetries can stabilize dark sector particles. We argue that right-handed neutrinos in [5] can be a dark matter candidate and show that non-zero  $\theta_{13}$  can be introduced as correction.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

最近のニュートリノ振動に関する詳細な実験や観測によって、ニュートリノ混合角についての多くの 情報が得られるようになった。レプトンセクターのフレーバー構造は特徴的であり、ニュートリノの混 合行列は tri-bi-maximal 混合

$$\sin^2 \theta_{12} = \frac{1}{3}, \ \sin^2 \theta_{23} = \frac{1}{2}, \ \sin^2 \theta_{13} = 0$$

によってよく近似される[1]。このことは離散的フレーバー対称性の存在を強く示唆する。特にフレー バー対称性の群として $A_4$ を仮定し、tri-bi-maximal 混合を導出するようなモデルが多く提出されてきた [2][3][4]。

一方、宇宙論の観測からダークマターの存在は古くから指摘されてきたが、未だにその候補として決定的なものが見つかっていない。ダークマターの候補となりうる粒子は、宇宙の質量密度分布に多くの寄与を与える程度に大きな質量をもつ未知の粒子でなくてはならない。しかし、重い粒子が標準模型の粒子と相互作用を持つと容易に軽い粒子に崩壊してしまうので、非常に弱い相互作用しか持たないか、軽い粒子への崩壊を禁止する何らかの対称性を課す必要がある。

フレーバー対称性として便利なA<sub>4</sub>は部分群としてZ<sub>2</sub>を持っている。A<sub>4</sub>フレーバー対称性が破れた後に 残るこのZ<sub>2</sub>対称性によってダークセクターの粒子を安定化することが可能であり、特にダークセクター の粒子の中で最も軽いものはダークマターの候補として適当である[5]。

本論文では、まずニュートリノとダークマターについてのいくつかのよく知られた事実をレビューした後、[5]で提唱されたモデルに沿ってレプトンセクターのフレーバー混合行列とダークマターの安定性の両方が $A_4$ 対称性からどのように導かれるかを示す。次いで[5]の中で著者たちが調べなかったパラメータ領域について詳細に論じて、モデルが同じでもダークマターの候補の違いによってどのように現象論が異なってくるかを調べる。最後に、実際には観測によりゼロでないことが確認されている混合角 $\theta_{13}$ を補正として組み入れることを試み、TBM 近似を超えてニュートリノ混合角の実際の観測値へのfitting が可能であることを示す。

- [1] P.F.Harrison, D.H.Perkins, W.G.Scott Phys.Lett.B530,167(2002)
- [2] E.Ma,G.Rajasekaran Phys.Rev.D64,113012(2001)
- [3] K.S.Babu, E.Ma, J.W.F.Valle Phys.Lett. 552, 207 (2003)
- [4] G.Altarelli, F.Feruglio Nucl. Phys. B720, 64(2005)
- [5]M.Hirsh, S.Morisi, E.Peinado, J.W.F. Valle "Discrete dark matter" arXiv:1007.0871[hep-ph]

### ×線天文衛星「すざく」による超新星残骸 G350.1-0.3とG349.7+0.2の観測研究

宇宙線研究室 八隅真人

Abstract We present Suzaku results of the two Galactic supernova remnants, G350.1-0.3 and G349.7+0.2. We discovered Al and Ni K  $\alpha$  lines from both the SNRs for the first time. The abundance patterns of the ejecta components are similar to those of core-collapse supernovae with the progenitor mass of 15-25 solar masses.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

G350.1-0.3とG349.7+0.2は、天の川銀河内にある超新星残骸(SNR)である。X線天文衛星「Chandra」 と「XMM-Newton」による観測[1,2,3]が行われ、どちらのSNRも分子雲と相互作用しており、かつ、爆 発後に残る中性子星候補が見つかっていることから、重力崩壊型のSNRであることが示唆されている。 そこで我々は、「すざく」衛星を用いて、G350.1-0.3とG349.7+0.2の長時間観測を行った。得られた X線スペクトル(Fig.1)からは、これまでに検出されていたMg、Si、S、Ar、Ca、FeのK輝線の他に、二 つのSNRから初めてA1とNiのK輝線を初めて発見した。

観測した二つの SNR は、銀河面リッジ X 線放射 (GRXE) がバックグラウンドとして強く寄与するためその取り扱いには注意しなければならない。そこで我々は、GRXE のモデル[4]を用いて、G350.1-0.3 とG349.7+0.2 のバックグラウンドを定量化した。

フィッティングの結果、SNR の X 線スペクトルは、低温の電離平衡プラズマと、高温の電離非平衡プ ラズマの二成分で再現されることが分かった。低温プラズマのアバンダンスは太陽組成と矛盾無く、星 間物質由来であると解釈される。一方の高温プラズマは、高いアバンダンスを示し、親星の成分のイジ ェクタ由来であることが分かった。二つの SNR のアバンダンスのパターンからは、親星の質量が、太陽 の 15-25 倍の重力崩壊型爆発をしたことが示唆された。また、どちらの SNR に対しても Fe に対して異 常に高い Ni のアバンダンス(Z<sub>Ni</sub>/Z<sub>Fe</sub>~8)を検出した。この結果は、超新星の爆発が非対称であった可能 性を示唆する。

さらに我々は、SNR と GRXE の星間吸収量を比較することで、G350.1-0.3 と G349.7+0.2 の距離をそれ ぞれ、~9kpc、~12kpc と算出した。導出したイジェクタの質量はどちらの SNR も、太陽の~18 倍であ り、アバンダンスパターンから示唆される質量と、矛盾しない結果を得た。



Fig. 1. Spectra of G350.1–0.3 and G349.7–0.2. The spectra from the source and background regions are shown in black and gray, respectively.

- [1] Lovchinsky, I., et al. 2011, ApJ, 731, 70
- [2] Gaensler, B. M., et al. 2008, ApJL, 680, L37
- [3] Lazendic, J. S., Slane, P. O., Hughes, J. P., Chen, Y., & Dame, T. M. 2005, ApJ, 618, 733
- [4] Uchiyama, H., Nobukawa, M., Tsuru, T. G., & Koyama, K. 2013, PASJ, 65, 19
- [5] Yasumi, M., et al., PASJ, submitted.

### de Rham-Gabadadze-Tolley bigravityの 高次元重力理論への埋め込み

基礎物理学研究所 山下 泰穂

**Abstract** We investigate whether or not recently established healthy bimetric theory called dRGT bigravity can be embedded into higher dimensional gravity. We consider DGP two-brane model with radion stabilization, and show that its low energy effective theory can reproduce dRGT bigravity at linear level.

© 2014 Department of Physics, Kyoto University

近年、二つの計量を含み、かつゴーストの存在しない重力理論が確立された[1]。二つの計量が相互 作用する重力理論は、一般に余分なゴーストモードが現れ、量子的不安定性を避け得ないことが知られ ていた[2]が、相互作用の形を制限することによってこのようなゴーストを消し去ることが可能となり、 病的でない理論が得られることが示された。これが de Rham-Gabadadze-Tolley(dRGT) bigravity と呼 ばれるモデルである。しかし、このモデルは ghost を消去するという条件のみから技巧的に構成された ものであり、その第二の計量や相互作用の形がより基本的な理論からどのように導かれるかについての 理解は得られていない。

そこで、本研究では、この dRGT bigravity を高次元重力理論の枠組みに埋め込むことを試みること とした。高次元重力理論では、余剰次元方向に重力子の運動エネルギーが漏れ出すため、その四次元有 効理論はKaluza-Klein(KK)重力子と呼ばれる無限個の質量をもった重力子を含む。したがって、低エネ ルギー有効理論として bigravity を得るためには、二つの重力子のみが低エネルギーに残るように KK 重力子の質量に階層性を持たせねばならない。このために、本研究では Dvali-Gabadadze-Porrati (DGP) モデル[3]と呼ばれる二枚のブレーンが存在する五次元ブレーンワールドモデルを考えた。このモデル の四次元有効理論における質量スペクトルを決める固有値問題は、一次元ポテンシャル中を運動する量 子力学的粒子のエネルギー固有値問題と類似している。DGP モデルはブレーン上に誘起された四次元計 量に対するアインシュタイン-ヒルベルト作用項を持つため、この寄与から来る重力による二つのポテ ンシャルの井戸のそれぞれの基底状態として二つの小さな質量を持つモードが存在し、その重ね合わせ によって質量ゼロのモードとブレーン間のポテンシャル壁によって抑えられた小さな質量を持ったモ ードが得られる。また、他のさらに重いモードの質量はブレーン間の距離によって決まる。したがって、 十分ポテンシャルを深くし、ブレーン間の距離を小さくとることにより階層性を実現できると考えられ る。一方、二枚のブレーンを持つモデルにはブレーン間の距離に対応する質量ゼロの自由度(radion)が 存在し、bigravity を再現するためにはこれを消去する必要がある。このため、ブレーン間の距離を固 定する目的で Goldberger と Wise によって考案されたスカラー場による安定化機構[4]を導入した。

このモデルを解析することによって、実際に質量スペクトルとして質量ゼロモードと最も低い KK モ ードのみの質量が小さく、他のモードの質量は大きいモデルが得られることを確認し、このようにして 得られた bigravity が dRGT bigravity と一致することを線形レベルで示した。さらに、これら二つの bimetric モデルにおける不安定性について調べ、その結果、ブレーンワールドモデルにおいては比較的 低エネルギーの領域でタキオンによる不安定性が生じて安定化メカニズムが破綻し、二つのモデルの対 応が崩れることがわかった。

- [1] C. de Rham, G. Gabadadze and A. J. Tolley, Phys.Rev.Lett. 106, 231101 (2011).
- [2] D. G. Boulware and S. Deser, Phys. Rev. D 6, 3368 (1972).
- [3] G.R. Dvali, G. Gabadadze and M. Porrati, Phys.Lett. B485, 208 (2000).
- [4] W. D. Goldberger and M. B. Wise, Phys.Rev.Lett. 83, 4922 (1999).

# <sup>32</sup>Sの<sup>28</sup>Si+αクラスター構造における <sup>28</sup>Si 芯の構造変化とαの崩れ

原子核理論研究室 吉田侑太

**Abstract** We studied the <sup>28</sup>Si+alpha cluster structure to investigate alpha-cluster state in <sup>32</sup>S by using an extended cluster model. We found that the structure change of the core nuclei is important while alpha cluster breaking is not significant in the <sup>28</sup>Si+alpha system. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

原子核構造の理論研究では、平均ポテンシャル内を核子が運動する独立粒子描像(シェル模型)が良く 知られている。一方でいくつかの核子が強く相関した集合体(サブユニット:クラスター)を作り、それ らが弱く結合した描像が成り立つ場合もある。クラスター構造は主に原子核がそれらのサブユニットに 分解するエネルギー閾値近傍に励起状態として見つかっている。特に原子核から $\alpha$ クラスター(<sup>4</sup>He)が一 つ励起し芯原子核+ $\alpha$ クラスター状態を作る $\alpha$ クラスター状態は、古くから実験と微視的なクラスター 模型を用いた理論計算から<sup>16</sup>0[1]や<sup>20</sup>Ne[2]などで見つかっており、クラスター模型によって研究されて きた。また系の類似性から<sup>40</sup>Ca、<sup>44</sup>Ti[3]でも $\alpha$ クラスター励起状態は研究され議論されている。そして 近年では<sup>32</sup>S の $\alpha$ クラスター励起状態を示唆する実験結果[4]が報告されるなど、軽い原子核における  $\alpha$ クラスター励起状態の研究が進んでいる。原子核の基底状態からクラスター的な構造が発達し $\alpha$ クラ スター励起が起きる機構を系統的に理解するには、 $\alpha$ クラスター状態が発達した際の原子核表面での崩 れた $\alpha$ クラスターとその $\alpha$ クラスターが存在することによる芯原子核の構造変化を詳しく調べる必要 があるが、そのようなクラスター自体の構造変化は従来の2体クラスター模型の多くで考慮されていな かった。そこで本研究では実験から示唆のえられている<sup>32</sup>S原子核での $\alpha$ クラスター励起状態の理解に 向けて、<sup>28</sup>Si+ $\alpha$ クラスター構造における $\alpha$ クラスターの崩れと<sup>28</sup>Si 芯原子核の構造変化の効果について 研究を行った。

αクラスターの崩れについては板垣氏らによるLS力によるαクラスターの崩れの効果を取り入れ る方法[5]を用いた。また、<sup>28</sup>Si芯原子核の構造変化を取り入れるためにBrinkの7αクラスター模型[6] を拡張することにより、<sup>28</sup>Siにおける jj-coupling 殻模型極限である球形の(0d<sub>5/2</sub>)<sup>12</sup>配位と、そこから オブレートに変形した配位の両方を記述することができる<sup>28</sup>Si模型を用いた。以上よりαクラスターの 崩れと芯原子核の構造変化を取り入れた、拡張されたαクラスター模型(拡張Brink model)による<sup>28</sup>Si+ αクラスター模型を構築し、今回はこの模型において核表面にαクラスターが存在した場合に、そのα クラスターの崩れと芯原子核の構造変化がどのように影響するのかを調べた。

<sup>28</sup>Si+αクラスター模型のエネルギー期待値を解析した結果、<sup>28</sup>Si 芯原子核表面におけるαクラスターの崩れは小さいことが確認され、対して芯原子核である<sup>28</sup>Si の構造変化がより重要になることがわかった。特に<sup>28</sup>Si 芯原子核単体では球形とオブレート変形がほぼ縮退しているが、αクラスターが <sup>28</sup>Si 芯原子核の表面から形成される場合においては、<sup>28</sup>Si 芯原子核は球形よりもオブレートへの構造変化を好むことが見られ、パウリ原理による効果が強く影響していることがわかった。

- [1] Y. Suzuki, Prog. Theor. Phys. 55, 1751 (1976).
- [2] F. Nemoto and H. Bandô, Prog. Theor. Phys. 47, 1210 (1972).
- [3] F, Michel, G. Reidemeister and S. Ohkubo, Phys, Rev. Lett. 57, 1215 (1986).
- [4] T. Lönnroth et al., Eur. Phys. J. A 46, 5 (2010).
- [5] N. Itagaki, J. Cseh and M. Płoszajczak, Phys. Rev. C 83, 014302 (2011).
- [6] W. Bauhoff, H. Schultheis, and R. Schultheis, Phys. Rev. C 26, 1725 (1982).

### 宇宙初期における低金属量ガスからの銀河形成条件

### 天体核研究室 渡辺拓

**Abstract** The properties of galaxies that form under the existence of metals and dust are investigated by computing chemical and thermal evolution of gas clouds. We find they play an important role in the formation of metal-poor galaxies which enable us to study the nature of the early Universe. © 2014 Department of Physics, Kyoto University

我々の銀河系内に存在する低金属量星は、初期宇宙で誕生した星や銀河の生き残りであると考えら れている。その星が持つ化学組成や形成の歴史を調べることで、初期宇宙で起きた諸現象についての 情報を得ようとする試みを、星考古学や銀河考古学という。金属の少ない初期宇宙で形成される銀河 は、長寿命の星で構成されており、ほとんどその内部での星形成を起こしていないため、その化学組 成は、初期宇宙における星形成史を反映していると考えられている[1]。近年、Sloan Digital Sky Survey (SDSS)による銀河サーベイによって、この銀河考古学の候補天体として有力な低金属量の Ultra Faint Dwarf Galaxies が発見され[2]注目を集めており、低金属量環境で誕生する銀河の形成 過程についてのさらなる研究が必要となっている。

銀河が形成されるためには、ガスが十分早く冷却されることが重要な条件となる。金属を持たない ガスから誕生する銀河についての研究はさかんに行われており、初代星が生まれる銀河や、その初代 星からの紫外線輻射の影響を受けたガスから誕生する星で構成される銀河の形成条件についてはこれ までによく調べられている[3][4]。初代星は短命であるため、輻射場を形成したのち、すぐにその一 生を終え超新星爆発によって重金属を周囲にばら撒く。しかし、超新星爆発による重金属汚染の進ん だ宇宙で誕生する銀河の形成条件についてはあまり調べられていない。

これらのことを考慮して、本研究では、微量の金属を含むガスから銀河が形成される条件を、ガス の化学進化と温度進化を計算することによって調べた。銀河形成にガス中の金属が与える影響を調べ るため、状況として

- (1)背景輻射あり、ガス中金属なし
- (2)背景輻射あり、ガス中金属あり
- (3)背景輻射あり、ガス中金属あり、ダストあり

の以上3つの場合について考えた。(3)のダストが存在する場合では、ダスト粒子の光電効果による加熱の影響[5]を考慮した。その結果、金属を含むガスから形成される銀河の最小質量は、金属がない場合に比べて減少するが、同時に紫外線輻射場が存在する場合、H2分子による冷却が効かないために、銀河形成ができなくなる質量帯が存在することがわかった。また、ダストが存在する場合、光電効果による加熱の影響によりガス中に金属のみが存在する場合よりも銀河の質量は上昇することがわかった。

- [1] Bromm & Yoshida, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 49, 373-407 (2011).
- [2] Kirby et al., Astrophys.J. 685, L43-L46 (2008).
- [3] Tegmark et al., Astrophys.J. 474, 1-12 (1997).
- [4] O'Shea & Norman, Astrophys.J. 654, 66-92 (2007).
- [5] Wolfire et al., Astrophys.J. 443, 152-168 (1995).