

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24105006

研究課題名(和文)冷却原子を用いた中性子過剰な低密度核物質の状態方程式

研究課題名(英文)The equation of state of neutron rich dilute nuclear matter investigated by ultracold atomic gases

研究代表者

堀越 宗一(Horikoshi, Munekazu)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：00581787

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 68,500,000円

研究成果の概要(和文)：地球とは異なり、中性子星は主に超流動状態の中性子から成る巨大な量子星であると言われている。密度が核密度よりも十分小さい内殻領域では、中性子物質はレーザー冷却で実現される極低温フェルミ原子気体と近い物性を示す可能性が高い。本成果報告書では、中性子過剰な低密度核物質の物性解明を目的とした、極低温フェルミ原子気体実験による中性子物質の量子シミュレーションに関する研究を報告する。主な成果として、希薄中性子物質の熱力学特性、近距離粒子相関、及び状態方程式(EOS)が決定された。我々はまた、得られた中性子物質のEOSを用いて中性子星核物質のEOSを得るため、中性子星の内殻構造を計算する手法も確立させた。

研究成果の概要(英文)：Unlike the Earth, neutron stars seem to be huge quantum stars consisting mainly of superfluid neutrons. In the inner crust region where the density is sufficiently smaller than the nuclear density, neutron matter may show physical properties similar to ultracold atomic Fermi gases realized by laser cooling. We report on quantum simulation of pure neutron matter by using such atomic gases for the purpose of understanding the fundamental physical properties of dilute neutron-rich nuclear matter. As a main result, the thermodynamic properties, the short-range particle correlation, and the equation-of-state (EOS) of dilute pure neutron matter were determined. We also established a method to calculate the inner crust structure of neutron stars in order to obtain EOS of neutron star matter by using the EOS of pure neutron matter.

研究分野：原子物理

キーワード：冷却原子 フェルミ超流動 中性子物質 中性子星

1. 研究開始当初の背景

(1) 【中性子星】

1974年のパルサーの発見以降、人類は中性子星の理解に挑み続けている。中性子星は太陽と同程度の質量を持つが半径が僅か 10km 程度のコンパクト天体であると言われている。そのため中性子星内部の密度は原子核密度に相当する高い密度状態に達し、原子から成る我々の地球とは異なり、中性子星は主に中性子から成る巨大な原子核星と見なせる。さらにその中性子はクーパー対を形成し超流動状態を実現していると予想されている。これまで原子核理論により中性子星核物質の状態方程式(EOS)が計算されてきたが、2010年に2倍の太陽質量を持つ中性子星が観測されたことにより矛盾が生じ、既存のEOSの不完全性が明白になった。これにより、核物質のEOSの見直しが大きな課題になっていた。

(2) 【冷却原子】

2010年、我々は極低温フェルミ原子気体(以下、冷却原子)を用いて、ユニタリー極限という粒子間のs波相互作用が非常に強い気体の熱力学特性の研究を行った(Science, 327(5964), 442-445.)。さらに2008年には、p波相互作用しているフェルミ粒子系の研究も行った(Phys. Rev. Lett. 101, 100401)。中性子星の外側で、密度が比較的小さい内殻領域では、主成分は中性子過剰な低密度核物質であると予想される。この領域を最も単純化すると希薄な中性子物質となり、中性子物質の物性が中性子過剰な低密度核物質の本質を与える。希薄な領域では中性子間の相互作用は散乱長  $a$  と有効長  $r_0$  というたった二つのパラメータに集約され、冷却原子系と同じ物理系に属するようになる。以上から、冷却原子実験による中性子物質のシミュレーションが、希薄領域の核物質のEOSの検証や、新たな中性子星へのアプローチとして期待されていた。

(3) 【当時の冷却原子研究の状況】

2010年以降、世界中で粒子間の散乱長に依存した熱力学特性等の研究が、s波相互作用しているフェルミ粒子系を対象に進められた。だが、異なるスピン間で弱く引力相互作用しているBCS(Bardeen-Cooper-Schrieffer)領域からユニタリー極限において、中性子物質の理解につながる実験データが乏しかった。 また、中性子物質の超流動性を特徴付ける超流動ギャップの大きさ(クーパー対の結合力)の理解も進んでいない状況であった。中性子密度が大きくなるにつれて重要になるp波相互作用の冷却原子実験に関しては、p波相互作用を増大させると3体衝突による非弾性散乱によって原子ロスが増大することが認識され、安定して強くp波相互作用する状況を実現することが難しい状況であった。

2. 研究の目的

「冷却原子で中性子物質の量子シミュレーションを行い、中性子過剰な低密度核物質のEOSを明らかにする」のが目的である。言い換えると、核物質の内部エネルギーをバリオン(中性子・陽子)密度の関数で与えることが目的である。具体的には以下の3つの課題で進めた。

- (1) s波相互作用している中性子物質の状態方程式の決定
- (2) p波相互作用している中性子物質の状態方程式の決定
- (3) 中性子星内殻構造の計算手法の確立

3. 研究の方法

(1) 【量子シミュレーションの原理】

冷却原子系の長さスケール(粒子間距離、熱的ド・ブロイ長)は数百ナノメートルに対し、中性子物質の長さスケールは数フェムトメートル、つまり5桁も異なる。さらに相互作用に関しては、原子は電磁気力に対し中性子は核力と異なる。だが絶対値や力の違いに惑わされる事無く、多体系の物性を決めるそれらの大小関係に注目することにより、両者とも接触型の相互作用をしている極低温のスピン1/2のフェルミ粒子と見なせることが解る。つまり、両粒子はフェルミ粒子の統計性を持った波として振る舞い、相互作用の影響は散乱波の対称性と位相シフトとして現れる。散乱波の対称性はs波散乱、p波散乱、d,f,...と低エネルギーから順次量子化されており、それぞれの散乱波の位相シフトは散乱長と有効長という二つのパラメータで与えられる。つまり、冷却原子系で中性子物質と同様の、散乱波の対称性と位相シフトを実現でき、その多体系の物性を測定できれば、中性子物質の量子シミュレータとして働く。

(2) 【フェッシュバツハ共鳴】

1958年に原子核物理学のFeshbachが、1961年に原子物理学のFanoが、それぞれ独立に束縛状態が引き起こす共鳴散乱の理論をまとめ、1998年によりやく冷却ナトリウム原子を用いてこの共鳴現象が確認された。この共鳴現象は、散乱波の対称性も選択する事が可能なため、例えば「p波の散乱を散乱長幾つで与る」等の制御が可能なのである。この様な制御性は他の多体系には現状存在せず、冷却原子系は粒子間の相互作用が制御できる唯一の量子系として注目され続けている。本研究ではフェルミ粒子の ${}^6\text{Li}$ 原子とそのs波、及びp波のフェッシュバツハ共鳴を用い、冷却原子間の相互作用を中性子物質に調整し、その多体系の物性を測定する。

(3) 【内部エネルギーの測定方法】

内部エネルギーの測定には主に2通りのアプローチが存在する。

- ① 熱力学量測定
- ② 近距離粒子相関の測定

ただし上記の方法が相互作用しているフェルミ粒子系において任意に適用できるわけではない。①の方法は、内部エネルギー以外の全ての熱力学量を測定できる必要があり、p波相互作用している粒子系では化学ポテンシャルを決定するのが難しい。②の方法は、分光実験によって行うが、 ${}^6\text{Li}$  原子の s 波相互作用している粒子系の場合、終状態効果という問題が生じ適用できない。一方、この手法は原子のロスが生じる時間よりも短い時間で原子間相互作用を検出できる手法であり、p波相互作用のようにロスによる影響が避けられない場合に有効な手法である。よって、**s 波相互作用している粒子系に対しては①の手法を用い、p波相互作用している粒子系に対しては②の手法を用いる。**

#### (4) 【中性子星内殻構造の計算手法】

中性子星核物質の EOS を得るためには、バリオン密度に依存した、バリオンの組成比、構造と内部エネルギーを知る必要がある。中性子星の内殻領域では、中性子過剰原子核とそれからドリップした中性子物質から成る。よって、中性子過剰原子核内の中性子と陽子、ドリップした中性子物質を含めた全エネルギーが最小になるような、組成比、構造を計算する必要がある。この時、中性子物質の EOS を計算に与える必要があり、EOS と内殻構造との関係を確認する事ができる。基底状態では中性子過剰核は周期構造を取ると予想されるため、**厳密な境界条件を扱う計算手法により中性子星内殻構造を計算する。**

### 4. 研究成果

#### 【全体の成果の概要】

縮退フェルミ原子気体を用い、s 波相互作用しているフェルミ粒子系の熱力学量を測定し、**普遍的な EOS を無次元形式で得た。**実験値は強結合理論（拡張 T 行列近似）と比較され、両者が一致する事を確認した。普遍的な EOS に中性子の散乱長と質量を与え、**中性子物質の基本 EOS を得た。**p 波相互作用の影響が顕著になる高密度領域に EOS を延長するため、p 波相互作用フェルミ系の物性研究を進めた。 **${}^6\text{Li}$  原子の p 波フェッシュバック共鳴のパラメータを決定し、p 波相互作用による近距離粒子相関の測定を行った。**近距離相関は粒子系の内部エネルギーを与えるため、将来的に高密度領域への EOS の延長が期待される。さらに p 波超流動の実現へ向け、**3 体ロスの普遍法則を確認した。**中性子物質の EOS を中性子星核物質の EOS に変換するため、中性子星の内殻構造の理論研究を展開した。周期的に配置された原子核を想定し、**周期ポテンシャル中のフェルミ超流動の平均場計算と厳密計算の計算手法を確立し、中性子星の内殻構造と希薄中性子星核物質の EOS の計算手法の確立が達成された。**さらに同時に進めていた**冷却原子とイオントラップの混合系を用いることにより、中性**

**子星内殻を実験的にシミュレートできる可能性を見出した。**代表的な個別の成果を以下に記す。

#### (1) 【s 波相互作用している中性子物質の状態方程式の決定に関する成果】

##### ① 【全光学手法を用いた ${}^6\text{Li}$ 原子のフェルミ対凝縮と ${}^7\text{Li}$ 原子のボース凝縮の混合状態の実現】

非常にシンプルな装置と手順で、ボース・フェルミ混合量子状態を実現した。蒸発冷却の過程では、フェルミ粒子は s 波のフェッシュバック共鳴の助けを得て効率よく冷却され、ボース粒子はフェルミ粒子との熱接触により冷却された。図 1 に混合状態にある (a) フェルミ対の重心運動量分布と (b) ボース粒子の運動量分布を示した。両者とも凝縮成分(青線)と熱的成分(赤線)のバイモーダル分布を示しており、フェルミ対とボソンの混合凝縮状態であることを示している。本成果により、**冷却原子による様々な量子シミュレーションの準備が整った。**本研究成果は、将来研究への重要性和可能性が評価され IOPselect に選出された。

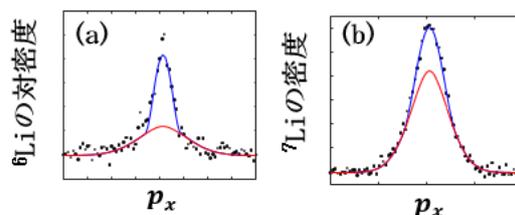


図 1: フェルミ対とボソンの混合凝縮状態

##### ② 【s 波相互作用しているフェルミ粒子系の基底状態における普遍的な EOS の決定】

希薄中性子物質に相当する量子多体系の物性をシミュレートするため、s 波相互作用している 2 成分フェルミ粒子系をゼロ温度極限で用意し、BCS 領域からユニタリー極限に渡って、**相互作用パラメータを変数に取り、内部エネルギー密度を無次元形式で決定した。**図 2 に、得られた無次元内部エネルギー密度の相互作用依存を示す。横軸が相互作用パラメータ (s 波散乱長と密度で決まるフェルミ波数との積)、縦軸が理想フェルミ気体の内部エネルギー密度で規格された相互作用しているフェルミ気体の内部エネルギー密度であり、 $1/k_F a = 0$  がユニタリー極限に相当し、 $1/k_F a \rightarrow -\infty$  が BCS 極限に相当する。赤で示した線が実験結果で、線の太さが実験から生じる系統誤差を示している。水色の線が ETMA による理論曲線で、実験結果と良く一致しているのがわかる。茶色の四角で示した点は量子モンテカルロ計算による値で、こちらも実験結果とエラーバーの範囲で合っている。その他の理論は我々の実験結果を説明できない。図 2 の曲線は、散乱長  $a$ 、粒子数密度  $n$  の内部エネルギー密度  $\mathcal{E}(n, a)$  を与える。すなわち

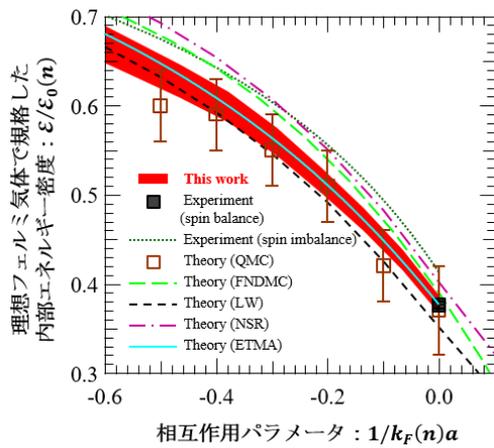


図 2: s 波相互作用しているフェルミ気体の基底状態の普遍的な EOS

本実験により、**s 波相互作用しているフェルミ粒子系の基底状態における普遍的な EOS を得た**のである。

③【中性子物質の基本 EOS の決定】

冷却原子実験で得られた普遍的無次元 EOS に、中性子の質量と s 波散乱長を与え、**希薄中性子物質の基本的 EOS を得た**。「基本的」とは、この EOS には中性子の有効長、p 波散乱以上の高次の相互作用、3 体力、特殊相対論的效果は含まれていないが、**この曲線は一樣の中性子物質の根本的な物性を示している**事を意味する。図 3(a)に得られた EOS を示した。赤線が冷却原子実験から得られた中性子物質の EOS である。比較のため APR という原子核理論モデルの 1 つを示したが、低密度領域で良く一致していることが確認された。さらに熱力学関係式を用いて、圧力に対する EOS を導出し、APR の計算結果と比較した(図 3(b))。こちらも低密度領域で良く一致していることが確認された。

ここで注意しなければならないのが、**冷却原子で得られた EOS が飽和各密度  $n_0$  の半分の密度表域まで原子核理論と一致したからと言って、中性子物質の物性が明らかになったと主張はできない**。何故ならば中性子物質は高密度に近づくにつれ有効長の影響が無視できないからである。冷却原子実験で得られた EOS はあくまで基本曲線である。冷却原子の EOS に有効長の影響を理論的に補正した場合、どのような EOS に変化するのかが興味深い。理論的に補正された EOS と原子核理論を比較する事により、新たな知見が得られるであろう。

(2)【p 波相互作用している中性子物質の状態方程式の決定に関する成果】

①【p 波フェッシュバッハ共鳴のパラメータ決定】

p 波相互作用しているフェルミ粒子系を研究するためには、6Li 原子の p 波フェッシュバッハ共鳴を正確に把握しておく必要がある。p 波散乱の散乱断面積変化を共鳴磁場近

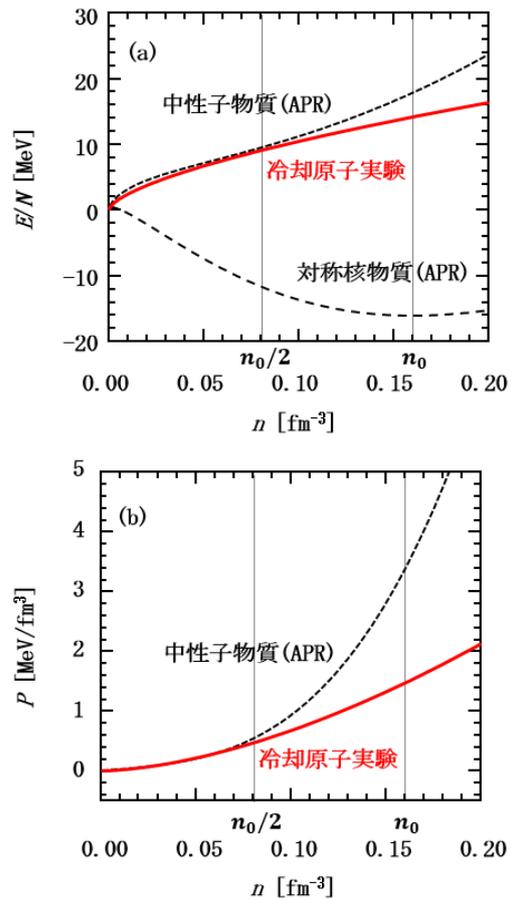


図 3: 中性子物質の EOS (a)内部エネルギーに対する EOS, (b)圧力に対する EOS

傍で詳細に調べるため、p 波相互作用を通して熱平衡に至る時間を様々な温度で測定し、測定データを散乱理論で解析する事により、**p 波フェッシュバッハ共鳴のパラメータを決定した**。これにより 6Li 原子を用いた、**p 波相互作用しているフェルミ粒子系の精密測定が可能になった**。図 4 に測定データと、散乱理論によるフィッティング曲線を示した。

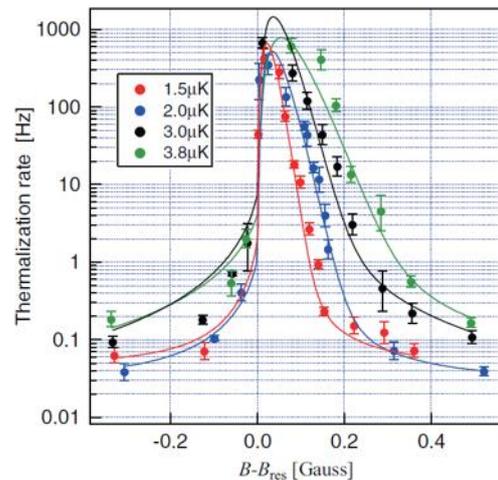


図 4: p 波散乱による熱平衡レートの磁場依存

②【**p波相互作用による近距離相関の測定**】  
RF 分光を用いて p 波相互作用による近距離相関 (p 波コンタクト) の測定を行った。この手法は 100 マイクロ秒程度の RF のパルスを用いて、ある内部状態にある原子を他の状態に遷移させ、その遷移レートの RF 周波数に対する依存性を計測するものである。図 5 に RF 分光の実験結果を示した。縦軸が原子の遷移レート、横軸が照射した RF の周波数の原子共鳴からの離調を示す。共鳴磁場から  $\delta B$  だけずらしたところ (49mG と 77mG) で高周波側 (100MHz 付近) に信号が表れており、これが p 波コンタクトに比例した信号となっている。現状では内部エネルギーを導出するに十分なデータ量が得られていないが、今後様々な条件 (原子系の温度、相互作用強度) でデータを集めることにより、**p 波相互作用しているフェルミ粒子系の EOS が決定できる見込み**である。

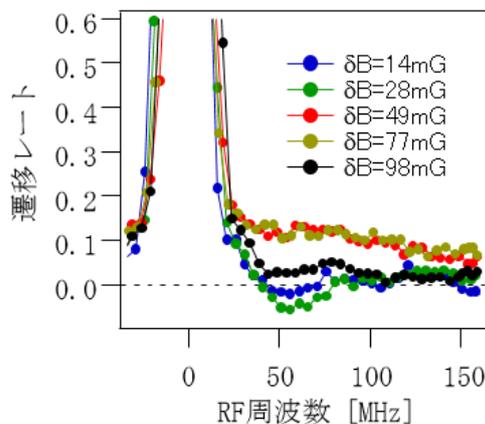


図 5: p 波相互作用しているフェルミ粒子の RF 分光

### ③【3 体ロス係数の測定】

p 波超流動の実現には、最大の障壁である原子ロスの性質を理解することが重要である。我々は 3 体ロスが磁場によってどのように増大するかを理解することによって、弾性散乱レートの非弾性散乱レートに対する比が最も大きくなる条件を見つけ出すことができ、これが p 波超流動の実現に最も重要なステップであると考えている。本研究によって p 波相互作用がフェッシュバッハ共鳴近傍でどのように 3 体ロスが増大するかが解明できた。さらに 3 体ロスの係数がフェッシュバッハ近傍でどのように磁場に依存するかを解明することができた。これらの知見と、さらに p 波超流動の相転移温度が磁場 (粒子間の相互作用強度) にどのように依存するかという情報を組み合わせることで **p 波超流動の実現に最適な条件が導き出せる**。

### (3)【中性子星内殻構造の計算手法の確立に関する成果】

#### ①【フェルミ超流動の平均場計算】

中性子星地殻領域では、超流動状態の中性子

が周期的に並んだ原子核の影響を受けながら動き回っていると考えられている。周期的ポテンシャル中のフェルミ粒子系では、**通常は Bloch 波動関数の周期性が現れるが、対凝縮による対ポテンシャルの効果によって倍周期や 3 倍周期といった状態が現れ、エネルギー的にも安定になる可能性を示唆した**。原子核の密度汎関数理論における理論の不定生の大きさも評価した。特に、超重元素領域の実験データとの比較や、理論同士の比較によって、これを評価し、現在の密度汎関数の問題点を明らかにした。

#### ②【周期ポテンシャルに対する厳密な境界条件を扱う計算手法】

低密度 EOS が直接影響する対象として考えられる中性子星の内殻 (inner crust) に現れると予想されているスラブ相 (slab phase) に対して、**厳密な境界条件を取り入れた自己無撞着バンド計算のコードを開発し数値計算を実行した**。低密度において、これまでの Thomas-Fermi (TF) 近似や Wigner-Seitz 近似と有意な差が現れることがわかった (図 6)。また、ブラッグ反射の効果で中性子の有効質量が重くなっており、パルサー・グリッチ現象への影響が示唆される。

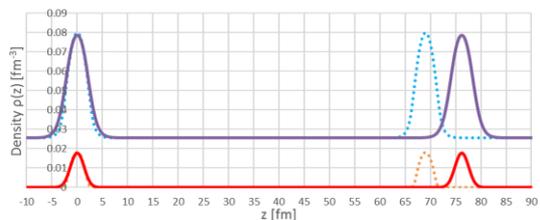


図 6: 平均核子密度  $0.03 \text{ fm}^{-3}$  でのスラブ相における陽子 (赤線)、中性子密度分布 (紫線)。点線は TF 近似の結果。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 10 件)

① H. Tajima, P. van Wyk, R. Hanai, D. Kagamihara, D. Inotani, M. Horikoshi, Y. Ohashi, “Strong-coupling corrections to ground-state properties of a superfluid Fermi gas.”, 査読有, Physical Review A, 95(4), 043625 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.043625>

② R. Saito, S. Haze, M. Sasakawa, R. Nakai, M. Raoult, H. Da Silva Jr, T. Mukaiyama, “Characterization of charge-exchange collisions between ultracold Li 6 atoms and Ca 40+ ions.”, 査読有, Physical Review A, 95(3), 032709 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.032709>

③ Y. Kashiwaba, T. Nakatsukasa, “Density Functional Calculations for the Neutron

Star Matter at Subnormal Density.”, 査読有, In Proceedings of the 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016) (p. 020801) (2017). DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JSPSC.14.020801>

④ H. Tajima, P. van Wyk, R. Hanai, D. Kagamihara, D. Inotani, M. Horikoshi, Y. Ohashi, “Zero-Temperature Properties of a Strongly Interacting Superfluid Fermi Gas in the BCS-BEC Crossover Region.”, 査読有, Journal of Low Temperature Physics, 1-8 (2016). DOI: 10.1007/s10909-016-1691-9

⑤ T. Ikemachi, A. Ito, Y. Aratake, Y. Chen, M. Koashi, M. Kuwata-Gonokami, M. Horikoshi, “All-optical production of dual Bose-Einstein condensates of paired fermions and bosons with 6Li and 7Li.”, 査読有, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 50(1), 01LT01 (2016). DOI:<https://doi.org/10.1088/1361-6455/50/1/01LT01>

⑥ 堀越宗一, “冷却原子実験から希薄中性子物質へ”, 査読有, 原子核研究 第61巻1号, 58-69 (2016年9月発行) <http://www.genshikaku.jp/backnumber.php?vol=61&issue=01>

⑦ M. Waseem, Z. Zhang, J. Yoshida, K. Hattori, T. Saito, T. Mukaiyama, “Creation of p-wave Feshbach molecules in selected angular momentum states using an optical lattice.”, 査読有, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 49(20), 204001 (2016). DOI:<https://doi.org/10.1088/0953-4075/49/20/204001>

⑧ S. Yoon, F. Dalfovo, T. Nakatsukasa, G. Watanabe, “Multiple period states of the superfluid Fermi gas in an optical lattice.”, 査読有, New Journal of Physics, 18(2), 023011 (2016). DOI:<https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/2/023011>

⑨ S. Haze, R. Saito, M. Fujinaga, T. Mukaiyama, “Charge-exchange collisions between ultracold fermionic lithium atoms and calcium ions.”, 査読有, Physical Review A, 91(3), 032709 (2015). DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.91.032709>

⑩ T. Nakasuji, J. Yoshida, T. Mukaiyama,

“Experimental determination of p-wave scattering parameters in ultracold 6 Li atoms.”, 査読有, Physical Review A, 88(1), 012710 (2013). DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.88.012710>

[学会発表] (計5件)

① Munekazu Horikoshi, “Dilute pure neutron matter investigated by cold atom experiments”, Neutron Star Matter 2016, 2016/11/23, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

② Munekazu Horikoshi, “From cold atoms to dilute neutron matter”, 12<sup>th</sup> Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, 2016/9/7, Changchun(China)

③ Munekazu Horikoshi, “Ground-state properties of superfluid fermions from the BCS region to the unitarity limit”, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, 2016/6/10, 理化学研究所(埼玉県・和光市)

④ Takashi Mukaiyama, “Interaction and decay of fermionic atoms near a p-wave Feshbach resonance”, The First Beijing-Tokyo Workshop on Ultracold Atomic Gases, 2016/4/12, Beijing(China)

⑤ Takashi Nakatsukasa, “Nuclear reaction as large-amplitude collective motion”, Heavy-Ion Accelerator Symposium on Fundamental and Applied Science, 2016/9/18, Canberra(Australia)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堀越 宗一 (Horikoshi, Munekazu)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 00581787

### (2) 研究分担者

向山 敬 (Mukaiyama, Takashi)  
電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授  
研究者番号: 70376490

中務 孝 (Nakatsukasa, Takashi)  
筑波大学・計算科学研究センター・教授  
研究者番号: 40333786

### (3) 連携研究者

水島 健 (Midushima, Takeshi)  
岡山大学・基礎工学研究科・准教授  
研究者番号: 50379707