

平成 22 年 5 月 17 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19549001
 研究課題名（和文） 有限温度格子 QCD によるチャーモニウム消失温度の研究
 研究課題名（英文） Study of charmonium dissociation temperatures
 in finite temperature lattice QCD
 研究代表者
 梅田 貴士（UMEDA TAKASHI）
 広島大学・大学院教育学研究科・講師
 研究者番号：40451679

研究成果の概要（和文）：この研究ではチャームクォークと反チャームクォークの束縛状態であるチャーモニウムがクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP) 相中で、それぞれが散乱状態としてバラバラになってしまう「チャーモニウム状態の消失温度」を有限温度格子 QCD 数値シミュレーションによって求める事を目的としている。これらチャーモニウムの消失温度は重イオン衝突実験での QGP 生成を示す重要なシグナルの一つである「 J/ψ 抑制」のシナリオを議論する上で必要となるパラメータである。主にクエンチ近似による計算により、 $2T_c$ 程度の温度までチャーモニウムの束縛状態が持続することを示すデータを得た。

研究成果の概要（英文）：Dissociation temperatures of J/ψ , ψ' , and χ_c states play key roles in the sequential J/ψ suppression scenario for high energy heavy ion collisions. We study charmonium dissociation temperatures in quenched lattice QCD. We then extract ground and first excited state masses by diagonalizing correlation functions among different source and sink operators. To distinguish bound states from scattering states, we first compare the charmonium mass spectra under different spatial boundary conditions, and examine the shape and the volume-dependence of their Bethe-Salpeter wave functions. From these studies, we found so far no sign of scattering states up to about $2T_c$.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	0	1,000,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	480,000	3,080,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：格子 QCD, QGP, チャーモニウム

1. 研究開始当初の背景

本研究の目標は、有限温度密度 QCD における新しい物質状態である QGP の性質を調べることである。この QGP を作り出し、その性質を調べる事を目的とする実験がブルックヘブン国立研究所の RHIC 実験などで行われている。終状態がハドロン粒子として観測される実験結果から QGP 生成の証拠を見出す「QGP 生成のシグナル」の問題はこれらの実験が始まる以前から長年議論されつづけてきた問題である。現在の所 RHIC 実験ではいわゆるジェットクエンチングなどが有力なシグナルの一つであるとされている。また、CERN の SPS 加速器で行われた同様の実験で QGP の発見を結論付けるもっとも有力な証拠として用いられたシグナルが、この研究で議論を行う J/ψ 抑制である。RHIC の実験では、現在の段階でこの J/ψ 抑制に関する十分な統計が無いが、SPS の実験結果と同程度の傾向を示すデータが報告されている。さらに、近い内に高統計のデータが出てくると期待されている。それらのデータを用いた QGP 生成に関する J/ψ 抑制の解釈について様々なモデルを用いた議論が行われるだろう。その為にも J/ψ 抑制の議論に必要な本研究テーマは早急に行われる必要がある。

2. 研究の目的

この研究ではチャームクォークと反チャームクォークの束縛状態であるチャーモニウム(特に J/ψ , χ_c , ψ' 状態など)がクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相中で、それぞれが散乱状態としてバラバラになってしまう「チャーモニウム状態の消失温度」を有限温度格子 QCD による動的クォークの効果を取り入れた full QCD 数値シミュレーションによって求める事を目的とする。これらチャーモニウムの消失温度は重イオン衝突実験での QGP 生成を示す重要なシグナルの一つである「 J/ψ 抑制」のシナリオを議論する上で必要となるパラメータであり、格子 QCD による第一原理計算、特に動的クォークの効果を検討した full QCD 計算での見積りが必要とされている量である。

3. 研究の方法

この研究では「有限体積中の質量スペクトルの境界条件依存性」の方法を用いる。これは最初ペンタクォーク状態の存在に関す

る研究で提唱されて、QGP 中での J/ψ 状態の有無に関する研究でも既に応用されている。その研究によっても同様に J/ψ 状態が QGP 相の比較的高温まで残ることが結論されている。ただし、ゼロモードの存在が考慮されていなかった為に χ_c 状態に関する境界条件を用いる手法はうまく行かなかった。さらにこれまでの研究ではクエンチ近似と呼ばれる動的クォークの効果を見捨てた近似の下での計算であり、動的クォークが QGP 相中でのチャーモニウム状態に及ぼす影響はほとんど分かっていない。

これらの状況を踏まえた上で、有限体積中のチャーモニウムの質量スペクトルの境界条件依存性から、チャーモニウム状態の消失温度を計算する研究を格子 QCD シミュレーションによって行いたい。ゼロモードの存在を考慮に入れた解析を行うと共に、新たに対角化のテクニックを用い、より信頼できる質量スペクトルの体積依存性を調べる事によって、消失温度に関する定量的な議論を行う事が目的である。これらの手法を用いて full QCD の計算まで行うことを本研究の最終目標とする。この研究で対象とするチャーモニウムは η_c , J/ψ , χ_{c0} , χ_{c1} そして J/ψ の励起状態である $\psi(2S)$ である。対角化の手法により、精度良い基底状態の計算に加えて、励起状態の計算を行うことも原理的には可能になる。これらの状態の質量スペクトルに対して、境界条件を変えた場合の変化を様々な温度、体積で議論する事によって、それぞれの粒子の消失温度を見積もる。さらに、これらの計算と同時にそれぞれのチャーモニウムの波動関数を計算することによって、空間方向の相関の強さからチャームクォークと反チャームクォークの束縛状態の有無に関する議論も行える。これらの波動関数を用いるアイデアと計算は研究代表者らによって既に行われているが、今回は χ_c , $\psi(2S)$ 状態についても行う点が新しい。対角化の手法によって励起状態の波動関数を求める計算はゼロ温度の場合でも計算された例が無く、ゼロ温度の場合でもこの計算は面白いテーマである。これらの計算は最終的には CP-PACS コラボレーションで研究されたゼロ温度ゲージ配位と同じパラメータを用いて行う。この時の温度は時間方向の格子点数によってコントロールする。これによって、非摂動改良されたウィルソン型クォーク作用による $2+1$ フレーバーでの格子 QCD シミュレーションを、ゼロ温度の基礎データをすべて CP-PACS で行われた計算で代用する事が可能になる。この信頼性の非常に高

いゼロ温度計算に基づいた有限温度の計算を可能にするアプローチがこの研究でもっとも独創的な点であるとも言える。

4. 研究成果

動的クォークの効果を見捨てた近似で計算を行った。固定格子間隔の計算でゼロ温度を含め、 $T/T_c=0.88-2.3$ までの6点の温度で(1)状態のエネルギーの境界条件依存性、(2)Bethe-Salpeter 波動関数の体積依存性、の計算を行った。状態のエネルギーの計算には相関関数行列の対角化を用いた方法を利用した。相関関数行列は異なるガウス分布のクォーク空間分布関数により 6×6 行列を計算した。

これらの計算により、 $T/T_c=2.3$ の高温までエネルギーの境界条件依存性が全てのメソンチャンネルで観測されなかった。また、波動関数の空間体積依存性を見ても $T/T_c=2.3$ で束縛状態を示す結果をしめした。 J/ψ 粒子を含むS波基底状態の場合は以前から知られていた結果であるが、 χ_c 状態を含むP波状態、さらに対角化の手法で求められた各励起状態に対しても同様の結果が得られた点が新しい。

有限温度でのチャーモニウム状態を規定するスペクトル関数の新しい計算法について検討した。これまでに行った対角化の手法を用いて、各エネルギー状態でのスペクトルウェイトの算出を行う事ができる。

さらに full QCD 計算の為に有限温度ゲージ配位の生成を引き続き行った。この計算ではCP-PACS/JLQCDによって行われたゼロ温度でのメソンスペクトラムの研究で採用されたパラメータを用いている。これらはそれぞれ 8000traj. ほど生成され、相転移温度や重いクォーク間の自由エネルギーなどを計算し、チャーモニウム消失温度に関する議論を行った。さらにチャーモニウム消失温度に関連深い状態方程式の計算の為にベータ関数や Trace anomaly の計算なども進めている。状態方程式の結果とチャーモニウム消失温度の結果を合わせて議論することによってクォークグルーオンプラズマの理解がさらに深まると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

1. Y. Maezawa et al. (他 6 名), Heavy-quark free energy at finite temperature with 2+1 flavors of improved Wilson quarks in fixed scale approach, PoS LAT2009 (2009) 165

(7pages). 査読有り.

2. K. Kanaya et al. (他 7 名), Towards the equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks in the fixed scale approach, PoS LAT2009 (2009) 190 (8pages). 査読有り.

3. K. Kanaya et al. (他 7 名), Fixed scale approach to the equation of state on the lattice, Nucl. Phys. A830 (2009) 801 (4pages). 査読有り.

4. Y. Maezawa et al. (他 7 名), Free energies of heavy quarks in full-QCD lattice simulations with Wilson-type quark action, Nucl. Phys. A830 (2009) 247 (4pages). 査読有り.

5. T. Umeda et al. (他 7 名), Fixed Scale Approach to Equation of State in Lattice QCD, Phys. Rev. D79 (2009) 051501 (5pages). 査読有り.

6. M. Cheng et al. (他 14 名), The Spatial String Tension and Dimensional Reduction in QCD, Phys. Rev. D78 (2008) 034506 (8pages). 査読有り.

7. T. Umeda, H. Ohno, K. Kanaya, Charmonium dissociation temperatures in lattice QCD with a finite volume technique, J. Phys. G35 (2008) 104157 (5pages). 査読有り.

8. T. Umeda et al. (他 7 名), Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing, PoS LAT2008 (2008) 174 (7pages). 査読有り.

9. H. Ohno, T. Umeda, K. Kanaya, Search for the Charmonium Dissociation Temperature with Variational Analysis in Lattice QCD, PoS LAT2008 (2008) 203 (7pages). 査読有り.

10. M. Cheng et al. (他 14 名), The QCD Equation of State with almost Physical Quark Masses, Phys. Rev. D77 (2008) 014511 (20pages). 査読有り.

11. T. Umeda, Constant contribution in meson correlators at finite temperature, Phys. Rev. D75 (2007) 094502 (11pages). 査読有り.

12. T. Umeda, Study of constant mode in charmonium correlators at finite

temperature, PoS LAT2007 (2007) 233 (7pages). 査読有り.

〔学会発表〕(計 17 件)

番号, 発表者, タイトル, 学会名, 発表日, 開催場所.

1. 梅田 貴士, ウィルソンクォークを用いた $N_f=2+1$ QCD熱力学の研究, 日本物理学会、第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 21 日, 岡山大学、岡山.

2. 梅田 貴士, ウィルソンフェルミオンを用いた有限温度格子 QCD の研究, KEK理論センター研究会「原子核・ハドロン物理」, 2009 年 8 月 13 日, KEK、茨城.

3. T. Umeda, Quarkonium correlators on the lattice, Joint CATHIE-INT mini program, 16 June 2009, INT, Seattle, USA.

4. T. Umeda, Hot wave function from lattice QCD, Topical Workshop (QHEC09), 19 May 2009, Univ. of Tokyo, Tokyo.

5. T. Umeda, Lattice study of charmonia in Hot QCD, Mini-Workshop on "Photons and Leptons in Hot/Dense QCD", 3 March, 2009, Nagoya Univ., Aichi, Japan.

6. T. Umeda, Hot QCD at fixed lattice scales, Kyoto Univ. GCOE Opening Symposium, 17 February, 2009, Kyoto Univ. Kyoto, Japan.

7. T. Umeda, Quarkonium Correlators at finite temperature, International Workshop on Heavy Quarkonia 2008 (QWG2008), 2 December, 2008, Nara Women's University, Nara, Japan.

8. T. Umeda, QCD Thermodynamics at fixed lattice spacing, The 2nd Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2008), 13 October, 2008, Univ. of Tsukuba, Ibaraki, Japan.

9. 梅田 貴士, Thermodynamics at fixed lattice spacing, 日本物理学会, 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 22 日, 山形大学, 山形.

10. T. Umeda, Thermodynamics of SU(3) gauge theory at fixed lattice spacing, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008), 14 July, 2008, Collage of William and Mary, VA, USA.

11. T. Umeda, The charmonium wave

functions at finite temperature from lattice QCD calculations, RIKEN-BNL workshop, Understanding QGP through Spectral Functions and Euclidean Correlators, 23 April, 2008, BNL, NY, USA.

12. T. Umeda, Lattice QCD study of charmonium dissociation temperatures, 日本物理学会 第 62 回年次大会, 23 March, 2008, 近畿大学、大阪.

13. T. Umeda, Charmonium dissociation temperatures in lattice QCD with a finite volume technique, The 20th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (QM2008), 9 February, 2008, Jaipur, India.

14. T. Umeda, Finite temperature lattice QCD with $N_f=2+1$ Wilson quark action, 日本物理学会 第 62 回年次大会, 20 September, 2007, 北海道大学、北海道.

15. T. Umeda, Constant mode in charmonium correlation functions, 基研研究会: 熱場の理論とその応用, 7 September, 2007, 京都大学, 京都.

16. T. Umeda, Study of constant mode in charmonium correlators in hot QCD, QCD in Extreme Conditins, 6 August, 2007, Frascati, Roma, Italy.

17. T. Umeda, Study of constant mode in charmonium correlators at finite temperature, Lattice 2007: The XXV International Symposium on Lattice Field Theory, 2 August, 2007, Regensburg, Germany.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅田 貴士 (UMEDA TAKASHI)
広島大学・大学院教育学研究科・講師
研究者番号: 40451679

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: