

jh180058-NAH

格子ゲージ理論によるダークマターの研究

飯田 英明 (慶應大学)

概要 現在の宇宙はその全エネルギーの 27% が正体不明の暗黒物質で構成されていることが、様々な観測・理論よりわかっている。本研究では暗黒物質の良い候補である隠れた Yang-Mills 理論 (YMT) における暗黒物質の相互作用を調べることでその正体に迫る。YMT における暗黒物質はグルーボールであるが、グルーボール間相互作用を調べるためには格子ゲージ理論シミュレーションを行う必要がある。ハドロン間相互作用を格子上で計算する方法として、近年、HAL QCD Collaboration によって開発された南部・ベータ・サルペーター振幅の方法を用いる。YMT のカラー数に関しては $N=2,3,4$ の計算を行い、大きな N の極限に外挿することで全ての YMT に対するグルーボール間ポテンシャルを求めることを目指す。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

大阪大学サイバーメディアセンター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

- ・飯田英明 (慶應大学、現東京大学) 代表
研究の統括・計算・議論
- ・若山将征 (大阪大学、現釜慶大学) 副代表
計算・議論
- ・中村純 (大阪大学)
計算・議論
- ・山中長閑 (理研、現京都大学基礎物理学
研究所)
計算・議論

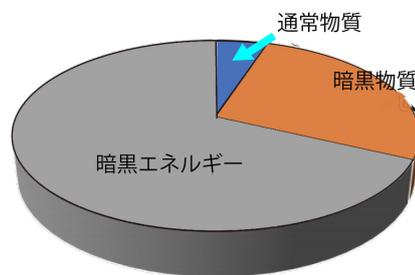


図 1 宇宙のエネルギー構成比

また、多くの研究から暗黒物質は現在の宇宙や銀河系の構造の形成に必要な不可欠であることも明らかになっており、その正体の解明は我々の起源にも関わる最も重要な課題の一つである。

[1]R. Massey, T. Kitching, J. Richard, Rep. Prog. Phys. 73 (2010) 086901.

[2]P. A. R. Ade et al. (Planck Collaboration), Astron. Astrophys. 571, 66 (2014).

2. 研究の目的と意義

現在の宇宙はその全エネルギーの 27% が正体不明の暗黒物質で構成されていることが、様々な観測・理論よりわかっている [1, 2]。

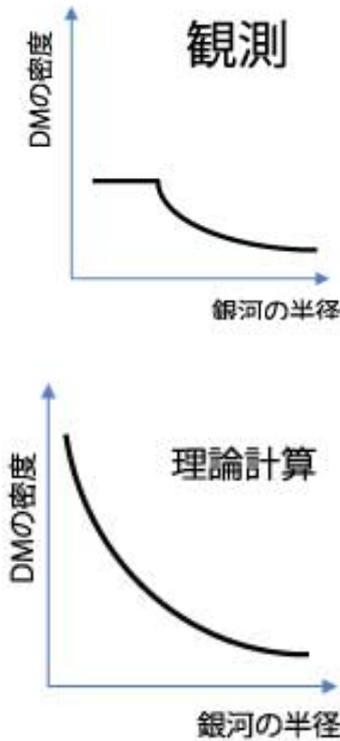


図 2 銀河系ハロー内の暗黒物質(DM)密度分布

最近の研究により暗黒物質は素粒子起源である可能性が高いと考えられている。しかし、素粒子物理学の標準模型にはその候補の粒子が存在しない。これは、暗黒物質を説明できる標準模型を越えた新しい物理の存在を強く示唆している。

暗黒物質の粒子間の相互作用として重力のみを仮定したシミュレーション研究は宇宙の大規模構造形成の説明に成功している。しかし一方で、暗黒物質の銀河における質量分布や矮小銀河の個数の観測から、重力のみでは銀河系以下のスケールの構造形成は難しいことも知られており、暗黒物質は互いに重力以外の相互作用もしていることが強く示唆されている[3]。図 2 参照。これは、暗黒物質の分布の情報等によりその相互作用の情報が得られ、暗黒物質の素粒子物理学的な起源を探ることが可能であることを意味する。

暗黒物質を説明できる有力な候補としてこれまで超対称模型が研究されてきたが、直接探索や加速器実験において多くが否定されてきた。そこで、我々は暗黒物質の別の候補である隠れた Yang-Mills 理論 (Hidden YMT) における暗黒物質の相互作用を定量的に調べることでその正体に迫る。YMT は場の理論の中でも階層性の問題が小さい理論の一つであり、素粒子物理学において暗黒物質を説明する上で特に好ましい候補である。

隠れた YMT において現れる暗黒物質は、ゲージ理論特有の性質である閉じ込めにより生じる複合粒子、グルーボールであると考えられ、近年暗黒物質の有力な候補になっている[4]。しかし、グルーボールをはじめとしたハドロンの性質の研究にはゲージ理論の強結合領域の計算が不可欠であり、そのような非摂動的な計算は解析的には著しく困難なため、このシナリオの研究・検証はこれまで活発な研究がなされてこなかった。我々は、格子ゲージ理論という数値計算の手法を使い、隠れた YMT におけるグルーボールの性質を特にハドロン間相互作用に着目して研究し、最終的に観測データとの比較から隠れた YMT を決定することを目指す。格子ゲージ理論は、現在のところ非摂動的領域で信頼のおける計算を行う唯一の方法である。数値計算を通し、未知の暗黒物質の正体を探る。

[3] D. N. Spergel and P. J. Steinhardt, Phys. Rev. Lett. 84, 3760 (2000).

[4] J.M.Cline, Z.Liu, and G.D.Moore, Phys. Rev. D90, 015023(2014).

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

格子ゲージ理論においてハドロン間相互作用を数値的に計算する方法として、近年、

HAL QCD Collaboration により強力な手法が開発された[5]。Nambu-Bethe-Salpeter 振幅が次の式を満たすことを利用し、格子ゲージ理論のシミュレーションからポテンシャル U を引き出すものである。

$$(E - H_0)\Psi_{BS}^{S\text{-wave}}(\vec{r}) = \int d\vec{r}' U(\vec{r}, \vec{r}') \Psi_{BS}^{S\text{-wave}}(\vec{r}')$$

そこで、我々はグルーボール 2 体ポテンシャルをこの HAL QCD の方法において計算した。

格子ゲージ理論では、経路積分という非常に多自由度の重積分をモンテ・カルロ法で行うため、大きな計算資源を必要とする。更にグルーボールに関連した量はシグナルが見えにくいことが知られている。特に本研究ではグルーボールの 4 点関数という従来計算されていない大変ノイズの大きい量を測るため、より多くのサンプルが必要であると予想される。実際、我々が過去行った計算ではシグナルを得るために 100 万ゲージ配位を要し (SU(2)ゲージ理論の場合)、この予想を裏付けるものとなった。このゲージ配位生成のベクトル率は 97% となっている。(使用コードは高エネルギー加速器研究機構の松古栄夫氏による)

また隠れたゲージ理論にはカラー数というパラメータがあり、本研究では複数のカラー数において計算を実行する必要がある。カラー数が多い程自由度は大きくなり、サンプルの生成には計算コストがかかる。更に、グルーボール間ポテンシャルの近距離領域の精度を上げるため、複数の格子間隔で計算する必要もある。このような大規模計算を行うため、当拠点公募型共同研究として大阪大学サイバーメディアセンターの SX-ACE のような大型計算資源を用いることが必要不可欠であった。

[5] N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda,

Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007).

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本研究は 2017 年度に萌芽型研究課題 (課題番号: EX17707) の「格子ゲージ理論によるダークマターの研究」を発展させたものである。2017 年度における研究では、SU(3)YMT におけるグルーボール間相互作用を格子ゲージ理論の数値シミュレーションを通して行なった。その結果、グルーボール間相互作用

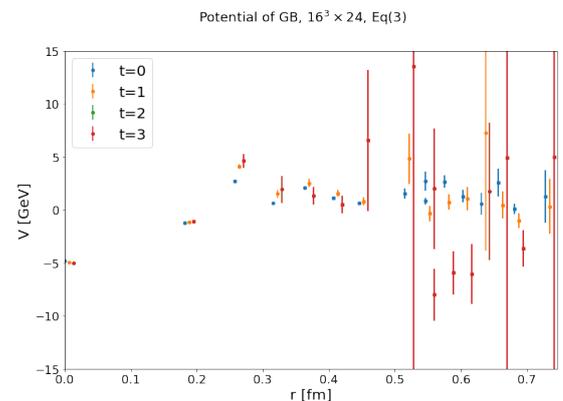


図 3 グルーオン間ポテンシャル(SU(3))
beta=5.7

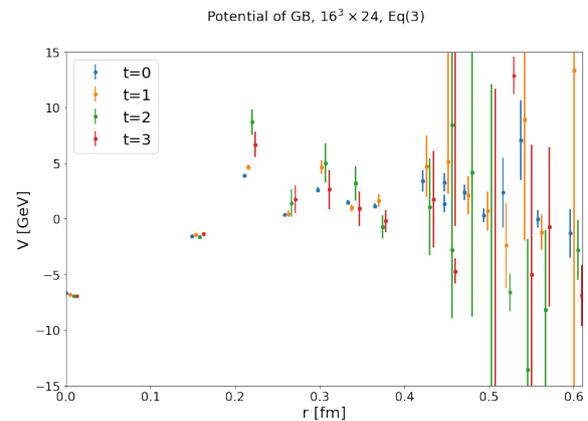


図 4 グルーオン間ポテンシャル
(SU(3))beta=5.8

用が近距離領域において斥力的であることを示唆する結果が得られた。計算の手順や用いた技術は本年度のものと同じである。

5. 今年度の研究成果の詳細

我々は 2018 年 JHPCN 研究課題として採択された課題研究において、SU(2) および SU(4) YMT におけるグルーボール間ポテンシャルの計算を行った。SU(2) は比較的計算コストが軽いので精度の高い計算が可能である。グルーボール間ポテンシャルの解析用のプログラムをさらに効率化し、ゲージ配位の生成と比較してほぼ無視できるレベルまで計算コストを落とすことができた。SU(2) YMT の計算において 100 万ゲージ配位を一つの格子間隔において生成し、解析した結果、グルーボール間ポテンシャルのシグナルが十分に見えた (図 5)。特に、SU(2) YMT におけるグルーボール間ポテンシャルは近距離領域において斥力的であることが分かり、前年度の SU(3) YMT や今年度行なった SU(4) YMT の解析の結果から示唆されていた振る舞いと整合性のある結果であることが分かった。本研究の結果は 2018 年 11 月に開催された国際会議 QNP2018 および 2019 年 3 月に開催された日本物理学会年次大会において発表された (研究成果リスト参照)。

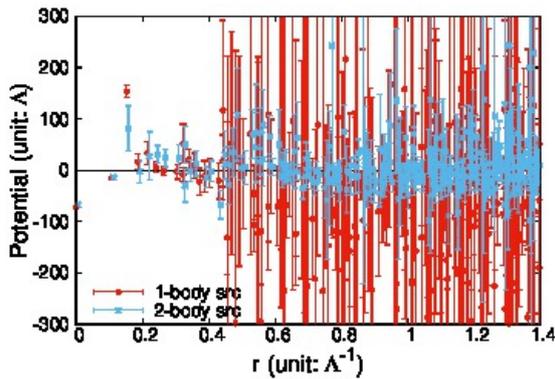


図 5 グルーオン間ポテンシャル(SU(2)) 近距離領域(0.2 A^{-1} 付近)においてグルーボール間ポテンシャルが斥力的になっている挙動がはっきりと見える。

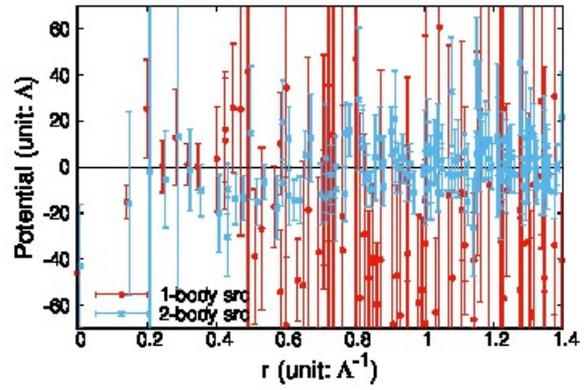


図 6 グルーオン間ポテンシャル (SU(4))
beta=10.789

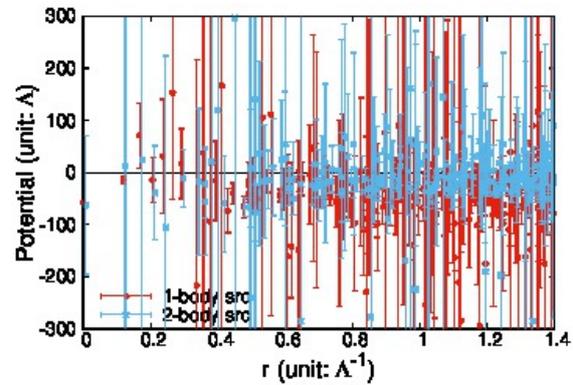


図 7 グルーオン間ポテンシャル (SU(4))
beta=10.9

グルーボールの 2 点相関関数から、その有効質量を求めることができる。グルーボール質量はゲージ理論の基本的な量であり、いろいろなグループによる計算が行われている [6]。図 8, 9 に見られるように我々の計算はこれらの先行研究と一致している。

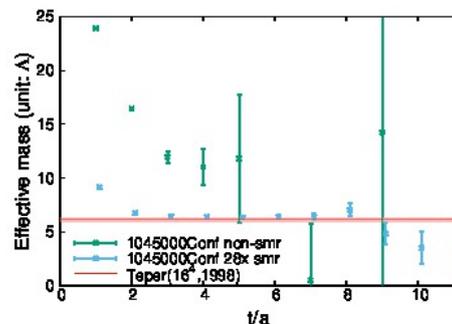


図 8 グルーボールの有効質量 (SU(2))

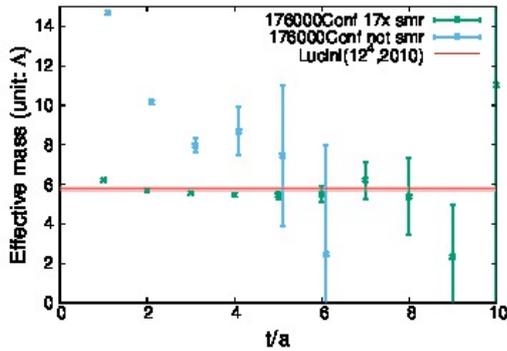


図 9 グルーボールの有効質量 (SU(4))

[6] Biagio Lucini, Antonio Rago and Enrico Rinaldi, JHEP08(2010)119.
M. J. Teper, hep-th/9812187.

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

これまでにグルーボール間相互作用が斥力的であることが分かったが、グルーボール間ポテンシャルを定量化するためには統計誤差をさらに縮小する必要がある。そのため、我々はクラスタ分解性原理に着目し[7]、相関関数（南部・ベーテ・サルペーター振幅）の計算にカットオフを設けることで高精度化を目指している。この方法のメリットとして、ゲージ配位の数が少なくとも定量化ができることにある。定量化の達成後は、実際にグルーボール間の散乱断面積を計算し、暗黒物質としての SU(N)YMT に現象論的な制限を与えることが可能となる。その結果が確定し次第、論文において公表する。また、今年度開催される国際会議 Lattice 2019 において本研究の進捗状況を発表する予定である。

[7]Keh-Fei Liu, Jian Liang, Yi-Bo Yang, Phys. Rev. D. 97. 034507 (2018).

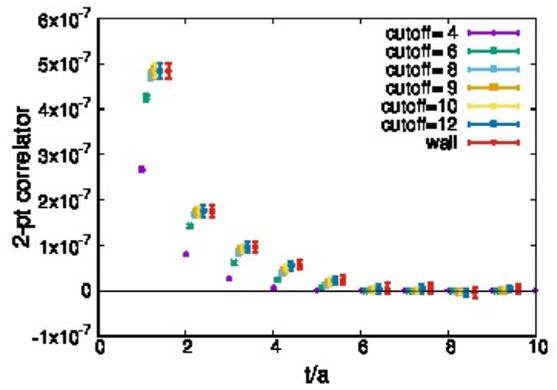


図 10 クラスタ分解性原理によるカットオフを SU(2)グルーボールの二点関数に対して適用した。カットオフを上げると、あるカットオフで相関関数の増大が飽和し、その後は統計誤差が増大していく様子がうかがえる。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

なし。

(2) 国際会議プロシーディングス

なし。

(3) 国際会議発表

Hideaki IIDA, Atsushi NAKAMURA, Masayuki WAKAYAMA, Nodoka YAMANAKA,
"Study of dark matter from lattice gauge theory",
8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP2018), Tsukuba, Japan, Nov. 2018.

Hideaki IIDA, Nodoka YAMANAKA, Masayuki WAKAYAMA, Atsushi NAKAMURA,
"Glueball for Dark Matter",
Workshop on "Development of simulation by GPU for the study of quark-hadron matter at high temperatures and densities", RCNP, Osaka Univ., Osaka, Japan, Nov. 2018.

(4) 国内会議発表

飯田英明、若山将征、中村純、山中長閑

「格子ゲージ理論によるグルーボール間相互作用
の研究 [2]」、

日本物理学会 第 74 回年次大会、九州大学、2019
年 3 月

(5) その他（特許，プレス発表，著書等）

Hideaki IIDA,

“Study of dark matter from lattice gauge
theory”,

RCNP theory seminar, Osaka Univ., Osaka, Japan,
July 2018.