
会場 E

素粒子論, 理論核物理, 宇宙線・宇宙物理 領域

E-4 ダイクォーク模型による T_{QQ} テトラクォークの構造

九州大学^A, JAEA^B, RIKEN^C 金龍熙^A, 岡真^{B,C}, 鈴木溪^B

ハドロンの実験観測の進歩とともに、クォーク・反クォーク合わせて4つ以上から成る「異種ハドロン」の候補とされるものが今世紀より発見されている。クォーク・反クォーク各々2つで構成される「テトラクォーク」の場合、 $X(3872)$, $Z_c^+(4430)$ が挙げられる。重いクォークを“ $Q = c, b$ ”、軽いクォークを“ $q = u, d, s$ ” とすると、これらの構成要素は“ $Q\bar{Q}q\bar{q}$ ” と表され、ダイクォーク構造もしくは中間子による分子的構造をとると予想されている。この他、2つの重いクォークと2つの軽い反クォークにより構成される“ $T_{QQ}(QQ\bar{q}\bar{q})$ ” テトラクォークも予想されており、実験のみならず理論的にも解析が進められている。

本研究では $T_{QQ}(=QQ\bar{q}\bar{q})$ テトラクォークについて、ダイクォーク模型によるクラスター構造のもとで解析・考察を行う。重いクォーク2つ (QQ) と反ダイクォーク1つ ($\bar{d} = \bar{q}\bar{q}$) の3体系と見なし、「ダイクォークのカイラル有効理論」から得られた非相対論的ダイクォーク-クォーク間ポテンシャルを用いて解析を進める。

3体系の計算手法として、少数系の数値計算法の一つである「ガウス展開法」を用いる。与えられたテトラクォークのエネルギースペクトルについては、他の理論結果と比較・考察する。

E-5

カノニカル法を利用した有限密度 QCD 物質の研究

福工大^A, 佐賀大理工^B 柏浩司^A, 河野宏明^B

本講演では、カノニカル法を利用した QCD 相図の研究について報告する。カノニカル法は、虚数化学ポテンシャル領域を利用して実数化学ポテンシャル領域をカノニカル分配関数を通じて議論する方法である。特に低温領域における虚数化学ポテンシャル領域での熱力学量や秩序変数の模型非依存な振る舞いを利用して、有限の実数化学ポテンシャル領域でのクォーク相やカラー超伝導相、カイラル相転移の振る舞いを議論する。具体的には低温において虚数領域での物理量の振動が強く抑制されることを利用し、実化学ポテンシャル領域でのカノニカル分配関数を含む様々な物理量の振る舞いを予測した。その際、バリオン数が小さいカノニカル分配関数からより大きいバリオン数のカノニカル分配関数に、主要な寄与が移り変わる領域がクォーク相と関係することを見出した。

(参考文献)

K.K., H. Kouno, Phys. Rev. D 100 (2019) 094023; Phys. Rev. D 103 (2021) 114020.

K.K., Symmetry 2021, 13, (2021) 1273.

K.K., H. Kouno, arXiv:2109.09273.

E-6

低温極限における有効ポリヤコフライン模型

佐賀大理工^A, 福工大^B, 出水中央高^C 河野宏明^A, 柏浩司^B, 開田丈寛^C

量子色力学 (QCD) の相図の探求は、素粒子原子核物理学だけでなく、宇宙論や天体物理学にかかわる重要な問題である。格子量子色力学によって、クォーク化学ポテンシャルが小さい領域の QCD 相構造は解明されてきた。しかし、クォーク化学ポテンシャルが大きな領域では、符号問題といわれる問題のため、確率解釈に基づくモンテカルロ法などのシミュレーションがうまくいかず、信頼できる結果が得られていない。一方、QCD の重クォーク極限の有効模型である有効ポリヤコフライン模型 (EPLM) においては、符号問題は QCD そのものよりも軽くなる事が知られている [1]。ここでは、低温極限における EPLM を準解析的な手法で解析し、特にポリヤコフラインの性質を議論する [2]。また、理論を Z3 対称化した場合の議論を行う [1,2]。

参考文献

[1] T. Hirakida et al., Phys. Rev. D 96, 074031 (2017), arXiv:1705.00665

[2] H. Kouno et al., Phys. Rev. D 104, 014012 (2021), arXiv: 2104.04732

E-7

Rindler 領域と Kasner 領域における Dirac 場の量子真空の解析

九大理^A 上田和茂^A

Unruh 効果は、一様加速度運動する観測者は、慣性系の真空状態をその加速度に比例する熱的状态として捉える、とする理論予言である。率直な導出法は、一様加速度系の時間一定面 (Rindler 時空の Cauchy 面) で定義されたスカラー場の演算子と、慣性系の Cauchy 面で定義されたスカラー場の演算子の対応関係 (Bogoliubov 変換) を与え、加速度系の観測者の視点から慣性系の量子真空の粒子数期待値を算出する手法だと思われる。我々は 4 次元の Dirac 場の演算子を用いて、Rindler 時空の演算子・Minkowski 時空の演算子間や、Kasner 時空の演算子・Minkowski 時空の演算子間の Bogoliubov 変換を行った。そして、それぞれの演算子に対応するモード関数 (スピノル) を解析接続することにより、一様加速度系で Unruh 効果を引き起こす Rindler モードや Kasner モードの対応関係を Dirac 場についてまとめた。この過程で与えられた Dirac 場の Rindler 時空における解析解は、広島大学の博士課程院生の Ar Rohim 氏によって、一様重力の下において境界面付近に束縛された極低温中性子のエネルギー状態の解析に応用された。本公演では、上述の Rindler 時空と Kasner 時空の Dirac 場の解析の詳細とその応用について紹介する。

E-8

Large-scale structure with superhorizon isocurvature dark energy

九州大学大学院 理学府 物理学専攻 宇宙物理理論研究室^A, 広島大学 大学院 先進理工系科学研究科 物理学プログラム 宇宙物理学研究室^B, 九州大学大学院理学研究院 物理学部門 基礎粒子系物理学^C, 九州大学大学院 理学府 物理学専攻 宇宙物理理論研究室^D 山下晃毅^A, 南岳^B, 山本一博^C, 杉山祐紀^D

標準的な宇宙論モデルでは、宇宙原理と呼ばれるように大スケールで均一で等方的な背景時空を持つ宇宙を仮定している。しかし、いくつかの観測結果では、大規模なスケールにて非均質で異方的な宇宙が存在する可能性が示唆されている。本論文では、Super horizon Dark Energy model を動機とした、超大規模スケールでランダムな不均一性と異方性を持つ宇宙のモデルを調査する。このモデルでは、現在の horizon scale よりも十分に大きなスケール (super horizon scale) に $O(1)$ の不均一性を持つスカラー場を導入し、そのスカラー場のポテンシャルエネルギーによって宇宙原理からわずかにずれた加速膨張が説明されている。本発表では、このモデルにおける物質成分の大規模構造に関する理論的予測を明らかにすることを目的とする。まずは先行研究で発表された super horizon scale の揺らぎ (super horizon-mode) の研究に基づいて、このモデルでの物質成分の大規模構造を表す方程式を紹介する。その後、大規模構造への摂動成分が従う方程式を宇宙論的摂動理論の一般化として導き出し、それを解くことで、大規模構造の形成に対する暗黒エネルギーの不均一性の影響を明らかにする。

E-9 ビッグバン元素合成におけるリチウム問題と早期暗黒エネルギー

佐賀大理工^A 高橋智^A, 山下青空^A

ビッグバン元素合成の理論により、宇宙初期における軽い元素の存在量を予言することができる。ビッグバン元素合成の理論は概ね成功しているが、重水素 D とヘリウム ^4He の観測結果と整合するようにバリオンの量を決定すると、リチウム ^7Li の観測と一致しない。この不一致は、標準的な宇宙モデルの拡張を示唆しているのか、観測における系統的な誤差に起因するもののかなどは明らかになっていない。これはリチウム問題と呼ばれる。

本講演では、元素合成の時期に時間変化をするような早期暗黒エネルギーが存在することを仮定した場合、各元素の存在量にどのような影響があるのか、リチウム問題の解決に繋がるかどうかを議論する。本研究では、早期暗黒エネルギーのエネルギー密度及びその時間変化を変えることにより重水素 D、ヘリウム ^4He 、リチウム ^7Li の存在量にどのような影響があるのか詳細に調べた。

E-10 ΛCDM 模型の拡張における H_0 問題

佐賀大理工^A 岡松郁弥^A, 高橋智^A

ハッブル定数 H_0 は宇宙論において基本的なパラメータであり、様々な観測により測定されている。近年、 H_0 の測定がより正確になってきたことにより、直接測定と宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) などの間接測定の間における不一致が明らかになってきた。これを「ハッブル定数問題 (H_0 問題)」という。現在、 ΛCDM モデルにおいて Planck collaboration (A&A 641, A6 (2020)) による H_0 の値は、 67.72 ± 0.40 km/s/Mpc である。一方、直接測定である SH0ES collaboration (Riess et al, Astrophys. J. Lett., 908, L6, (2021)) では、 $H_0 = 73.2 \pm 1.3$ km/s/Mpc となっており、 4σ 程度の不一致が存在している。

本研究では、 ΛCDM を超えたモデルにおいて、間接測定と直接測定の間 H_0 の値にどの程度の不一致が存在するか調べた。間接測定として、CMB, バリオン音響振動 (BAO)、Ia 型超新星 (SNeIa) を用いて、 ΛCDM モデルを超えたシンプルな拡張として、ダークエネルギーの状態方程式 $w = \frac{p_{\text{DE}}}{\rho_{\text{DE}}}$, 曲率パラメータ Ω_K , ニュートリノの世代数 N_{eff} などのパラメータによる様々なモデルにおける結果について報告する。モデルを拡張することにより、 H_0 の値の不整合の度合いは弱くなる。しかし、 H_0 の誤差が大きくなるだけで、 H_0 問題は本質的に解決しないことを示す。 H_0 問題を解決するために提案されている様々なモデルとの比較についても議論する。

E-11 観測的制限と整合する一般的な非最小結合インフレーション

佐賀大理工^A 児玉樹^A, 高橋智^A

観測的制限と整合しないインフレーションモデルであっても、非最小結合を導入すると観測的制限と整合するようになる場合がある。本公演では、どのような非最小結合を導入すると観測的制限と整合するモデルを構築できるか、いくつかの具体的なモデルの例、および、その一般論について議論する。ジョルダンフレームポテンシャル $V_J(\phi)$ と非最小結合の関数 $\mathcal{F}(\phi)$ の関係によってモデルを3つのクラスに分けることができる。1つ目のクラスはモデルに依存しないアトラクターが現れる。2つ目のクラスは V_J と \mathcal{F} のパラメータに依ったアトラクターが現れる。このクラスはジョルダンフレームとアインシュタインフレームの場の場合からさらに2つに場合分けすることができる。どちらの場合においてもモデルパラメータに依っており、スローロールパラメータがある一定値に落ち着く。3つ目は、一般的に非最小結合が大きくなるにつれてスペクトル指数 n_s とテンソル・スカラー比 r が小さくなるふるまいが現れる。これらの結果を用いることにより、観測的制限と整合しないインフレーションモデルに対して、どのような非最小結合を仮定すれば観測的制限と整合するようになるか具体的に議論する。

E-12 重力レンズパワースペクトルによる原始密度ゆらぎの制限

近畿大学^A, 佐賀大学^B, 東京工業大学^C 井上開輝^A, 篠原拓見^B, 須山輝明^C, 高橋智^B

原始密度揺らぎのパワースペクトルについて、およそ 1Mpc 以上の大スケールは宇宙マイクロ波背景放射や大規模構造の観測からその性質がある程度の精度で測定されているが、それよりも小さなスケールについてはまだよく分かっていない。小スケールの原始密度ゆらぎを探る方法については、これまでも様々な提案がなされているが、本研究では四重像を持つ重力レンズクエーサーのサブミリ波観測によって最近得られた重力レンズパワースペクトルの観測値 (Inoue+21, arXiv:2109.01168) を用いて、およそ 10kpc に対応する小スケールの原始パワースペクトルの振幅について、その制限を調べた。具体的には、原始密度ゆらぎの小スケールの振幅を変化させた場合の物質非線形パワースペクトルをハローモデルに基づいて計算し、それを用いて収束場、位置シフト、重力レンズポテンシャルの各パワースペクトルの観測値と比較することにより、小スケールの原始密度ゆらぎパワースペクトルの振幅に対する制限が得られる。本講演では、その結果について報告する。

E-13

パイオン生成過程が及ぼす降着中性子星の光度の影響

九大理^A, 理研 iTHEMS^B, 新疆大学^C 土肥明^{A,B}, Helei Liu^C

伴星をもつ中性子星の熱的進化は、主に中性子星内部からのニュートリノ放射による冷却過程と、伴星から物質が降ることによるクラスト加熱過程が同時に働く。一般に若い中性子星では内部温度が高いためニュートリノ冷却が支配的であるが、時間とともに温度が低下しニュートリノ光度がさがること、クラスト加熱が効くようになるため、ある年齢で降着中性子星は温度変化しなくなる。そうした静穏期の光度の観測が多くの降着中性子星で行われており、低光度の降着中性子星を始めとした多くの観測が従来の熱的進化モデルで説明できることが知られている。一方、軟 X 線トランジェント RX J0812.4-3114 を始め、いくつかの降着中性子星は従来の加熱・冷却機構では説明できないほどに熱いことが知られており、何らかの熱源の存在が期待されている。この問題を解決するために、我々はパイオン生成シナリオというものを考える。このシナリオは、降着物質により獲得される運動エネルギーがパイオンの生成エネルギーのしきい値 (290MeV) を超えることにより荷電パイオンが中性子星の大気中で生成され、それが崩壊して生じるニュートリノにより中性子星のクラストが温められるというものである。本講演では、まず従来の降着中性子星の熱的進化モデルに関して述べる。その後、パイオン生成を考慮した結果と、観測されている熱い天体 RX J0812.4-3114 の静穏期の光度の再現性に関して議論する。

E-14

光学機械振動子系のビームモデルに基づいた定式化

九州大学大学院理学府物理学専攻^A, 九州大学大学院理学研究院物理学部門^B, 学習院大学理学部物理学科^C 七條友哉^A, 杉山祐紀^A, 松村央^B, 松本伸之^C, 三木大輔^A, 山本一博^B

自然界には 4 つの力が存在し、電磁気力、強い力および弱い力は量子力学に従うが、重力が量子力学に従っていることが検証されていない。もし重力が量子力学の枠組みに従うならば、重力の量子力学的重ね合わせ状態が観測できるはずである。重力は他の力に比べ非常に弱い力であり、重力の効果を大きくするために物体を巨視化してしまうと環境との相互作用により、物体を量子力学的状態に保つことが難しくなる。光学機械振動子は、重力波の検出にも応用されている光共振器と振動子とを組み合わせた力学系で、振動子の量子力学的状態の制御が可能になりつつある。例えば、[1] では重力の量子性の検証に向けて、7mg の振動子についてエネルギー散逸を大きく低減することに成功し、従来の限界より 5 桁も重い巨視的振動子の量子制御が可能になっている。この光学機械振動子を用いた重力の量子性の検証は、将来有望な方法と考えられている。

この研究では、光共振器の片側の鏡を固定し、もう片側の鏡をひもでつるした振動子とする光学機械振動子の理論モデルを beam モデルへ拡張し、その量子制御に向けた理論解析を行った。beam モデルは、振動子をつるすひもや鏡が有限の大きさを持つ際に変形まで考慮したモデルであり、実際の実験により近い理論モデルである。beam モデルに基づいた光学機械振動子の理論モデルの作用積分から出発し、beam モデルを導入すると鏡の運動が複雑化するため、周波数が小さい領域だけを考え、近似を行うことで、鏡の重心運動と回転運動に帰着することを示す。また時間があれば、測定した光から鏡の揺らぎを推定する方法として、Wiener filter を用いた推定方法についても議論する。

[1] Seth B. Cata ñ o-Lopez, Jordy G. Santiago-Condori, Keiichi Edamatsu, Nobuyuki Matsumoto, Phys. Rev. Lett. 124, 221102 (2020)