



变色龙场论及其唯象研究进展

陈华^{1*}, 桂川大志^{1*}, 邱涛涛^{2*}

1. 华中师范大学天体物理研究所, 武汉 430079;

2. 华中科技大学物理学院, 武汉 430074

*联系人, 陈华, E-mail: huachen@mails.ccnu.edu.cn; 桂川大志, E-mail: taishi@ccnu.edu.cn; 邱涛涛, E-mail: qiutt@hust.edu.cn

收稿日期: 2023-02-10; 接受日期: 2023-04-28; 网络出版日期: 2023-08-24

国家重点研发计划(编号: 2021YFA0718500)和国家自然科学基金(编号: 11875141)资助项目

摘要 变色龙场是标量张量理论中的一种标量场, 用以解释晚期宇宙的加速膨胀现象. 与一般标量场不同的是, 它与物质场的耦合使其有效质量如同变色龙一般随着周围环境(物质场能量动量张量的迹)的改变而改变. 这一独特的变色龙机制使得变色龙场论在众多研究领域具有广泛应用. 本文简要回顾变色龙场论, 依次探讨它在早期宇宙、引力波观测、暗能量和暗物质统一方案以及光子-光子散射实验等方面的最新进展.

关键词 引力理论, 场论, 变色龙机制

PACS: 04.50.Kd, 04.80.Cc, 11.10.-z, 95.36.+x, 98.80.-k

1 引言

20世纪90年代以来的宇宙学观测发现了宇宙正在加速膨胀, 这意味着存在负压强的暗能量主导宇宙的演化^[1]. 更早地, 星系的旋转曲线和引力透镜等观测也揭示了非重子暗物质的存在^[2]. 由暗能量和暗物质组成的宇宙黑暗面(Dark Side of the Universe, DSU)是粒子物理和天体物理领域的前沿课题之一, 尽管在唯象上已有众多进展和发现, 其物理起源和微观性质至今仍未揭晓. 最简单也是最成功的DSU唯象模型是 Λ CDM模型, 它在广义相对论(General Relativity, GR)框架中引入了作为暗能量的宇宙学常数(Λ)和非相对论性的冷暗物质(Cold Dark Matter, CDM). 尽管该模型与观测吻合得很好^[3], 它也存在一些理论缺陷. 宇

宙学常数在理论上用来调节真空能, 使之符合观测到的宇宙加速膨胀现象. 在量子场论中, 当紫外截断能标取普朗克能标时, 真空能的理论值比观测值大了120个数量级, 因此需要宇宙学常数的值在120位有效数字上与真空能的理论值互相抵消, 这称为宇宙学常数的微调问题^[4,5]. 此外, 随着宇宙膨胀, 物质密度呈负四次方衰减, 而静态的真空能密度应当保持不变, 但观测发现它们在当前宇宙时期恰好处于一个数量级, 这称为巧合问题. 由于真空能与普朗克能标相差了120个数量级, 初始条件的一个微小改变都将使我们所观测到的宇宙大不一样. 如果真空能大上一个数量级, 使它能够更早的时期主导宇宙演化, 那么宇宙的大尺度结构将无法形成; 如果真空能小一个数量级, 那个宇宙的年龄将比观测到的最古老恒星还要小.

引用格式: 陈华, 桂川大志, 邱涛涛. 变色龙场论及其唯象研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 290015

Chen H, Katsuragawa T, Qiu T T. Chameleon field theory and phenomenology (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 290015, doi: 10.1360/SSPMA-2023-0051

为了避免或缓解这两大问题, 人们提出了具有负压强和状态方程满足 $w < -1/3$ 的动力学暗能量来驱动宇宙的加速膨胀. 例如在对应于粒子物理标准模型的物质作用量中加入一个慢滚的标量场, 称为精质场(Quintessence)^[6]; 也可通过拓展对应于引力的几何部分, 引入新的动力学自由度, 这称为修改引力理论^[7,8]. 较为简单的修改引力理论是标量张量理论, 它相对于GR包含了额外的标量场自由度.

无论是何种标量场作为暗能量, 宇宙学对能量密度的观测要求其有效质量与哈勃常数相当, 即 $m \sim 10^{-33}$ eV, 这意味着该标量场能够传递一种新的长程相互作用, 称为第五力(Fifth Force). 因此, 修改引力往往借助某种屏蔽机制以满足太阳系的第五力实验限制^[9], 例如变色龙机制(Chameleon Mechanism)^[10,11]、对称子机制(Symmetron Mechanism)^[12]、K-mouflage机制^[13]和Vainshtein机制^[14]等. 本文探讨标量张量理论和 $F(R)$ 引力所依赖的变色龙机制, 即标量场的有效质量如同变色龙一般随着周围物质环境(物质能量动量张量的迹)的变化而变化. 例如, 在太阳系这样的大密度环境, 变色龙场的有效质量很大, 无法传递长程相互作用, 从而满足第五力实验限制; 而在宇宙学尺度这样的稀疏环境, 变色龙场的有效质量也很小, 第五力可以自由传播, 变色龙场因此作为暗能量驱动宇宙的加速膨胀. 变色龙场论的提出源于暗能量研究, 但由于变色龙机制的独特性, 它在其他领域中也有广泛的应用, 可以给出丰富的预言, 解释众多物理现象. 本文将简要回顾变色龙场论, 并逐一介绍它在早期宇宙、引力波观测、暗能量和暗物质统一方案以及光子-光子散射实验等方面的最新进展.

2 变色龙机制

我们考虑标量张量理论的作用量

$$S = \int d^4x \sqrt{-\tilde{g}} \left[\frac{M_{\text{Pl}}^2}{2} \tilde{R} - \frac{1}{2} \tilde{g}^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right] + S_M(g_{\mu\nu}^{(i)}, \psi_M^{(i)}), \quad (1)$$

其中 $\psi_M^{(i)}$ 表示物质场. 爱因斯坦框架度规 $\tilde{g}_{\mu\nu}$ 与(物理的)约当框架度规 $g_{\mu\nu}^{(i)}$ 之间存在如下共形变换:

$$\tilde{g}_{\mu\nu} = A^2(\phi) g_{\mu\nu}^{(i)} = e^{2\beta_i \phi / M_{\text{Pl}}} g_{\mu\nu}^{(i)}. \quad (2)$$

$g_{\mu\nu}^{(i)}$ 中的指标 i 表示不同物质场 $\psi_M^{(i)}$ 具有不同的耦合常数 β_i , $g_{\mu\nu}^{(i)} = e^{-2\beta_i \phi / M_{\text{Pl}}} \tilde{g}_{\mu\nu}$. 因此, 需要恰当考虑爱因斯坦框架下不同的物质场的守恒量. 我们所观测的是约当框架下的物理量, 其能量动量张量定义为 $T_{\mu\nu} := (-2/\sqrt{-g}) \delta S_M / \delta g^{\mu\nu}$, 满足能量守恒定律 $\nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0$, 迹为 $T^\mu_\mu = g^{\mu\nu} T_{\mu\nu}$. 对于理想流体, $p = w\rho$, $T^\mu_\mu = -(1-3w)\rho$. 爱因斯坦框架下的物理量具有类似定义, 不同的是, $\tilde{T}_{\mu\nu}$ 并非守恒量. 根据共形变换, 框架间的物理量满足 $\tilde{T}_{\mu\nu} = A^2(\phi) T_{\mu\nu}$, $\tilde{T}^\mu_\mu = A^4(\phi) T^\mu_\mu$, $\tilde{\rho} = A^4(\phi) \rho$. 而爱因斯坦框架中守恒的能量密度为 $\tilde{\rho}_{c,i} = \exp[-3(1+w_i)\beta_i \phi / M_{\text{Pl}}] \rho_i$.

变色龙场的运动方程为

$$\Box \phi = \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} - \sum_i \frac{\beta_i}{M_{\text{Pl}}} (1-3w_i) e^{-(1-3w_i)\beta_i \phi / M_{\text{Pl}}} \tilde{\rho}_{c,i}. \quad (3)$$

上式表明, 支配变色龙场动力学演化的不是其裸势能 $V(\phi)$, 而是一个有效势能(见图 1)

$$V_{\text{eff}}(\phi) := V(\phi) + \sum_i e^{-4\beta_i \phi / M_{\text{Pl}}} \rho_i. \quad (4)$$

原则上变色龙场与不同物质场之间具有不同的耦合常数 β_i , 但为了简单起见, 一般假定相同的耦合常数 $\beta = \beta_i$. 并且为了使有效势能拥有最小值, 要求 $\beta > 0$ ($\beta < 0$) 和随 ϕ 单调递增(单调递减)的裸势能 $V(\phi)$ 形式. 这样, 变色龙场的有效质量定义为

$$m_{\phi}^2 := \left. \frac{\partial^2 V_{\text{eff}}(\phi)}{\partial \phi^2} \right|_{\phi=\phi_{\min}}. \quad (5)$$

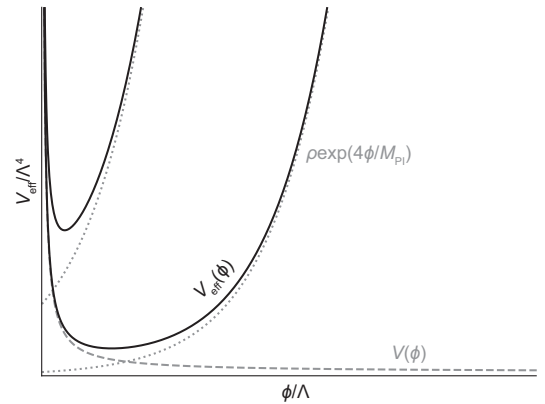


图 1 有效势能示意图, 其中 Λ 为暗能量能标

Figure 1 Schematic diagram of effective potential, where Λ denotes the dark energy scale.

如上所述, 有效质量项中显含变色龙场与物质场的耦合项, 这使得变色龙场具备所谓的变色龙机制——它的有效质量如同变色龙一般随周围物质分布的变化而变化. 物质密度越大, 则变色龙场的有效质量越大, 使得汤川势受到指数衰减. 假定变色龙场作为暗能量, 那么其裸质量由暗能量尺度决定, 应当是非常轻的(约 10^{-33} eV). 在宇宙学尺度, 物质密度与暗能量密度相当, 因此有效质量很小, 变色龙场可以自由传播. 而在太阳系, 物质密度远大于暗能量密度, 有效质量变得很大, 从而抑制了变色龙场的传播, 使其躲避太阳系的引力检验. 这反映了暗能量尺度和其他物理尺度之间的层级问题.

不仅仅是标量张量理论, $F(R)$ 引力也具备变色龙机制. 它将爱因斯坦-希尔伯特作用量中的曲率标量改写成其函数形式, 从而引入了新的标量场自由度, 称为标量子(Scalaron). 在共形变换下,

$$\tilde{g}_{\mu\nu} = F'(R)g_{\mu\nu} = e^{2\sqrt{1/6}\kappa\phi/M_{\text{Pl}}} g_{\mu\nu}, \quad (6)$$

$F(R)$ 引力也可以改写成标量张量理论的形式^[15], 其作用量与式(1)一致, 标量子在其中充当变色龙场. 不同的是, $F(R)$ 引力具有特定的耦合常数 $\beta = 1/\sqrt{6}$, 而且它的势能

$$V(\phi) := \frac{1}{2\kappa^2} \frac{RF'(R) - F(R)}{F'^2(R)} \quad (7)$$

取决于具体的 $F(R)$ 函数形式.

3 变色龙机制的应用

在宇宙学中, 变色龙模型首先应用于标量张量理论^[16]和 $F(R)$ 引力理论^[17–20], 用来解释晚期宇宙的加速膨胀现象. 近年来宇宙学领域出现了一个重要问题, 即哈勃紧张(Hubble tension)问题——与模型无关的超新星观测给出的哈勃常数数值比基于 Λ CDM模型的宇宙微波背景辐射数据得出的数值大了五个标准差^[21]. 最近有研究基于不均匀的物质分布, 提出变色龙场与局域大密度物质耦合形成有效的宇宙学常数, 使得局域的哈勃常数值大于背景值^[22].

除了大尺度结构, 修改引力理论还需要解释小尺度上观测结果. 大尺度的宇宙学观测与小尺度的天体物理学观测相结合, 能够更全面地约束和筛选可能的引力理论. 例如, 致密星作为物质的排斥力和引力的

吸引力之间的静力学平衡结果, 能够提供天然的强引力实验室. 给定致密星的状态方程, 我们可以通过求解托尔曼-奥本海默-沃尔科夫(Tolman-Oppenheimer-Volkoff, TOV)方程得到致密星的质量-半径关系等可观测量. 修改引力理论修改了TOV方程, 乃至质量-半径关系, 从而对GR的预言产生偏离^[23,24]. 因此, 我们可以反过来限制修改引力理论. 此外, 由于修改引力理论预言的引力波的传播速度和极化模与GR的预言并不相同, 引力波还可能检验现有的引力理论^[25].

即使在比天体物理尺度更小的尺度上, 变色龙机制也发挥着重要作用. 第五力搜寻实验在微观尺度上检验引力^[9,16,27], 使我们能够直接探索变色龙场的微观本质. 尽管还未探测到变色龙粒子的存在, 众多的第五力搜寻实验严格地限制了模型参数. 例如, 最近有研究设计了悬浮力传感器实验, 排除了暗能量模型 $V(\phi) = \Lambda^4 \left(1 + \frac{\Lambda^n}{\phi^n}\right)$ 的模型参数 $n = 1$ ^[26](见图2). 也有人提出了一种新的方法, 用暗物质搜索实验来限制变色龙场^[28].

4 变色龙场论的最新进展

4.1 早期宇宙的观测限制

我们研究了变色龙场在早期宇宙随时间的演化,

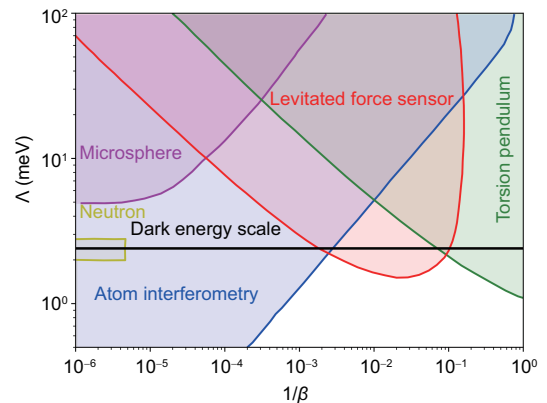


图 2 (网络版彩图)实验对 $n = 1$ 的暗能量模型 $V(\phi) = \Lambda^4 + \Lambda^{n+4}/\phi^n$ 的排除区域. 其中, $\Lambda = 2.4$ meV为暗能量能标, 对应于图中黑色的直线. 本图重绘自文献^[26]

Figure 2 (Color online) Excluded regions for dark energy model $V(\phi) = \Lambda^4 + \Lambda^{n+4}/\phi^n$, with $n = 1$. Here $\Lambda = 2.4$ meV is the dark energy scale, corresponding to the solid black line in the figure. This figure is reproduced from ref. ^[26].

通过原初核合成(Big Bang Nucleosynthesis, BBN)限制 $F(R)$ 引力的模型参数, 并对变色龙场在BBN时期的场值进行约束^[29]. 基于高阶曲率项对早期宇宙绝热演化的影响, 我们讨论了修改引力理论存在高阶曲率项的必然性. $F(R)$ 引力理论中的暗能量模型通常含有曲率奇点, 而众多研究表明引入高阶曲率修正可以解决这个问题. 高阶项也被当作早期宇宙中的暴胀起源^[30,31], 因而在高阶修正的暗能量模型中, 我们可以阐述从暴胀时期到暗能量主导时期的整个宇宙历史. 我们研究了这类 $F(R)$ 引力理论统一模型在后暴胀时期的动力学. 在重加热阶段之后, $F(R)$ 引力理论的变色龙场表现出了类受迫振荡行为. 在不含高阶曲率项的情况下, 这种受迫振荡使得标量场的有效质量发生巨大的非绝热改变, 从而使得微扰理论计算失效. 另外, 我们证实了高阶曲率项的存在使得非绝热性受到抑制, 从而确保了宇宙的绝热演化. 因此, 除了奇点问题和暴胀, 我们证明了高阶曲率项关于绝热性的第三个物理意义^[32].

4.2 变色龙场与标准模型粒子的耦合

在第2节我们通过宏观的理想流体描述定义了运动方程(3)和有效势能(4). 因为理想流体是由不同的基本粒子组成的, 我们仍需要从微观角度研究变色龙场与物质场耦合的起源. 变色龙场与无质量规范玻色子耦合经由迹反常产生^[33,34], 而变色龙场与含质量场的耦合则起源于变色龙场与希格斯场耦合, 因为普通粒子的质量来源于希格斯机制. 本文作者之一研究了在电弱对称性破缺时期通过变色龙场-希格斯耦合引发的变色龙场动力学. 由于无法获得理想流体图像, 该工作利用有限温度量子场论的方法研究了早期宇宙中变色龙场与物质场的能量动量张量的迹之间的关系^[35]. 结果表明希格斯场的准静态构型允许我们恢复式(4)所定义的有效势能.

4.3 引力波标量模

$F(R)$ 引力理论预言了三种引力波的极化模, 即两种张量模和一种标量模, 后者对应于变色龙场. 本文作者之一研究了在 $F(R)$ 引力理论中变色龙机制对引力波标量模的影响^[36], 讨论和证明了地基引力波观测对标量模的可探测性和难度. 结果表明, 当引力波的频率小

于质量, 引力波的标量模就会衰减, 且其振幅呈指数级减小. 在地球大气中标量模衰减为零, 因此无法被第五力实验探测到. 这一结果反映了变色龙机制的屏蔽作用, 也解释了地基引力波天文台没有探测到标量模的原因. 另外, 计划发射的天基引力波探测器能够避免地球大气层中的变色龙机制, 将有助于检验标量波和限制修改引力^[37-39].

4.4 统一暗能量和暗物质

当我们从粒子物理学的观点出发, $F(R)$ 引力理论中变色龙场可被诠释为超越标准模型的新粒子. 由于变色龙场起源于引力, 它与标准模型粒子的耦合非常弱. 综合以上特点, 有相关研究提出变色龙场可以作为暗物质的一个新的候选者. 最重要的是, 由于 $F(R)$ 引力理论在背景层面上可以解释宇宙加速膨胀, 因此暗物质和暗能量可以统一为同一变色龙场. 也就是说, 变色龙场的量子振荡作为暗物质, 而经典背景作为暗能量. 本文作者之一提出了在 $F(R)$ 引力理论中统一暗物质和暗能量的基本思路, 并提出了变色龙场与标准模型的基本粒子之间的相互作用^[40]. 评估了当前宇宙中的暗物质和暗能量的密度, 而且预测的能量密度和比值与观测结果相一致^[41].

4.5 光子-光子散射实验

修改引力理论预言了具有电磁相互作用的变色龙场, 我们据此提出新的地基实验来验证该粒子的存在, 并阐明其可行性. 除了主流的第五力搜寻实验, 本文作者之一提出了一个新的变色龙场搜寻实验, 以此探究基于 $F(R)$ 引力理论的暗能量的微观特征. 根据粒子物理, 变色龙场是一种超越粒子物理标准模型的新粒子. 由于迹反常诱导了变色龙场与两个光子的耦合, 本文作者之一基于最近提出的受激共振光子对撞机(Stimulated Resonant Photon Collider)^[42], 研究了一种全新的标量搜寻实验^[43]. 这项新实验旨在探测与光子相耦合的变色龙场以及克服普朗克尺度的抑制, 可达到高于以往实验10个数量级的精度. 此外, 利用变色龙场的变色龙机制, 即其有效质量依赖于实验环境, 我们证明了通过精细控制实验室气压, 变色龙场信号可以从其他新粒子中分离出来.

5 结论和展望

变色龙机制不仅保证了暗能量和第五力实验结果的一致性, 还在多个研究领域预言了有趣的物理现象. 事实上, 变色龙机制的有效质量概念也出现在其他物

理学的相互作用系统中, 例如粒子物理学中的中微子的物质效应和凝聚态物理学中的重费米子系统. 尽管变色龙机制是在修改引力理论研究和建立的, 变色龙场理论的研究及其应用并不局限于引力物理学的单一课题, 而是跨学科的前沿研究方向之一.

参考文献

- Huterer D, Shafer D L. Dark energy two decades after: Observables, probes, consistency tests. *Rep Prog Phys*, 2017, 81: 016901
- Bertone G, Hooper D. History of dark matter. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 045002
- Aghanim N, Akrami Y, Ashdown M, et al. Planck 2018 results-VI. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2020, 641: A6
- Weinberg S. The cosmological constant problem. *Rev Mod Phys*, 1989, 61: 1–23
- Padilla A. Lectures on the cosmological constant problem. arXiv: [1502.05296](#)
- Tsujikawa S. Quintessence: A review. *Class Quantum Grav*, 2013, 30: 214003
- Nojiri S, Odintsov S D, Oikonomou V K. Modified gravity theories on a nutshell: Inflation, bounce and late-time evolution. *Phys Rep*, 2017, 692: 1–104
- Shankaranarayanan S, Johnson J P. Modified theories of gravity: Why, how and what? *Gen Relativ Gravit*, 2022, 54: 1–35
- Brax P, Casas S, Desmond H, et al. Testing screened modified gravity. *Universe*, 2022, 8: 11
- Khoury J, Weltman A. Chameleon fields: Awaiting surprises for tests of gravity in space. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 171104
- Khoury J, Weltman A. Chameleon cosmology. *Phys Rev D*, 2004, 69: 044026
- Khoury K H J. Symmetron fields: Screening long-range forces through local symmetry restoration. arXiv: [1001.4525](#)
- Babichev E, Deffayet C, Ziour R. k-Mouflage gravity. *Int J Mod Phys D*, 2009, 18: 2147–2154
- Babichev E, Deffayet C. An introduction to the Vainshtein mechanism. *Class Quantum Grav*, 2013, 30: 184001
- Maeda K. Towards the Einstein-Hilbert action via conformal transformation. *Phys Rev D*, 1989, 39: 3159
- Burrage C, Sakstein J. Tests of chameleon gravity. *Living Rev Relativ*, 2018, 21: 1–58
- Hu W, Sawicki I. Models of $f(R)$ cosmic acceleration that evade solar system tests. *Phys Rev D*, 2007, 76: 064004
- Starobinsky A A. Disappearing cosmological constant in $f(R)$ gravity. *Jetp Lett*, 2007, 86: 157–163
- Tsujikawa S. Observational signatures of $f(R)$ dark energy models that satisfy cosmological and local gravity constraints. *Phys Rev D*, 2008, 77: 023507
- Elizalde E, Nojiri S, Odintsov S D, et al. Nonsingular exponential gravity: A simple theory for early- and late-time accelerated expansion. *Phys Rev D*, 2011, 83: 086006
- Di Valentino E, Mena O, Pan S, et al. In the realm of the Hubble tension—A review of solutions. *Class Quantum Grav*, 2021, 38: 153001
- Cai R G, Guo Z K, Li L, et al. Chameleon dark energy can resolve the Hubble tension. *Phys Rev D*, 2021, 103: L121302
- Astashenok A V, Capozziello S, Odintsov S D. Further stable neutron star models from $f(R)$ gravity. *J Cosmol Astropart Phys*, 2013, 2013: 040
- Katsuragawa T, Nojiri S, Odintsov S D, et al. Relativistic stars in de Rham-Gabadadze-Tolley massive gravity. *Phys Rev D*, 2016, 93: 124013
- Nishizawa A, Taruya A, Hayama K, et al. Probing nontensorial polarizations of stochastic gravitational-wave backgrounds with ground-based laser interferometers. *Phys Rev D*, 2009, 79: 082002
- Yin P, Li R, Yin C, et al. Experiments with levitated force sensor challenge theories of dark energy. *Nat Phys*, 2022, 18: 1181–1185
- Murata J, Tanaka S. A review of short-range gravity experiments in the LHC era. *Class Quantum Grav*, 2015, 32: 033001
- Vagnozzi S, Visinelli L, Brax P, et al. Direct detection of dark energy: The XENON1T excess and future prospects. *Phys Rev D*, 2021, 104: 063023

- 29 Chen H, Katsuragawa T, Matsuzaki S, et al. Big Bang Nucleosynthesis hunts chameleon dark matter. *J High Energy Phys*, 2020, 2020: 1–29
- 30 Motohashi H, Nishizawa A. Reheating after $f(R)$ inflation. *Phys Rev D*, 2012, 86: 083514
- 31 Yashiki M, Sakai N, Saito R. Local-gravity test of unified models of inflation and dark energy in $f(R)$ gravity. *Phys Rev D*, 2020, 102: 043504
- 32 Chen H, Katsuragawa T, Matsuzaki S. Towards a unified interpretation of the early Universe in R^2 -corrected dark energy model of $F(R)$ gravity. arXiv: [2206.02130](https://arxiv.org/abs/2206.02130)
- 33 Fujikawa K. Comment on chiral and conformal anomalies. *Phys Rev Lett*, 1980, 44: 1733–1736
- 34 Ferreira P G, Hill C T, Ross G G. No fifth force in a scale invariant universe. *Phys Rev D*, 2017, 95: 064038
- 35 Katsuragawa T, Matsuzaki S, Senaha E. $F(R)$ gravity in the early Universe: Electroweak phase transition and chameleon mechanism. *Chin Phys C*, 2019, 43: 105101
- 36 Katsuragawa T, Nakamura T, Ikeda T, et al. Gravitational waves in $F(R)$ gravity: Scalar waves and the chameleon mechanism. *Phys Rev D*, 2019, 99: 124050
- 37 Kawamura S, Ando M, Seto N, et al. The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO. *Class Quantum Grav*, 2011, 28: 094011
- 38 Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: A space-borne gravitational wave detector. *Class Quantum Grav*, 2016, 33: 035010
- 39 Amaro-Seoane P, Audley H, Babak S, et al. Laser interferometer space antenna. arXiv: [1702.00786](https://arxiv.org/abs/1702.00786)
- 40 Katsuragawa T, Matsuzaki S. Dark matter in modified gravity? *Phys Rev D*, 2017, 95: 044040
- 41 Katsuragawa T, Matsuzaki S. Cosmic history of chameleonic dark matter in $F(R)$ gravity. *Phys Rev D*, 2018, 97: 064037
- 42 Homma K, Kirita Y. Stimulated radar collider for probing gravitationally weak coupling pseudo Nambu-Goldstone bosons. *J High Energy Phys*, 2020, 2020: 1–26
- 43 Katsuragawa T, Matsuzaki S, Homma K. Hunting dark energy with pressure-dependent photon-photon scattering. *Phys Rev D*, 2022, 106: 044011

Chameleon field theory and phenomenology

CHEN Hua^{1*}, KATSURAGAWA Taishi^{1*} & QIU TaoTao^{2*}

¹*Institute of Astrophysics, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;*

²*School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*

The chameleon field is considered responsible for the acceleration of cosmic expansion in the current universe and is a new scalar field predicted in scalar-tensor theories. Due to the change in effective mass with the trace of the energy-momentum tensor of ambient matter fields, the chameleon field, in contrast to ordinary scalar fields, possesses the so-called chameleon mechanism, which makes it behave like a chameleon. Although the chameleon field theory is initially motivated by the dark energy problem, it has been applied to many research fields because of its unique chameleon mechanism. This paper reviews chameleon field theory, and its latest progress in early cosmology, gravitational detection, dark energy and dark matter unification, and photon-photon scattering.

gravitational theory, field theory, chameleon mechanism

PACS: 04.50.Kd, 04.80.Cc, 11.10.-z, 95.36.+x, 98.80.-k

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0051](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0051)