

# Status of the Study of Interacting Dark Energy Models

Juanjuan Guo<sup>1\*</sup>, Jialin Song<sup>2</sup>, Sizhe Li<sup>3</sup>, Xingyu Nan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, College of Science, Northeastern University, Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>Dalian Yuming Senior High School, Dalian Liaoning

<sup>3</sup>Department of Senior High School, Northeast Yucai School, Shenyang Liaoning

Email: \*gjoishi@163.com

Received: Jun. 26<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 4<sup>th</sup>, 2017; published: Jul. 7<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In this paper, we briefly introduce the present status of the study of interacting dark energy (IDE) models. Firstly, we introduce several currently popular models of dark energy interacting with dark matter. Then, we analyze the research status in this field and development tendency at home and abroad. Note here that, in order to solve the large-scale instability of IDE, we describe the parametrized post-Friedmann (PPF) approach, which could handle the cosmological perturbations of IDE. It has been proved that the PPF framework of IDE can successfully solve the large-scale instability issue in the whole parameter space.

## Keywords

Interacting Dark Energy, Observational Constraints, Large-Scale Instability, Parametrized Post-Friedmann Approach

---

# 相互作用暗能量模型的研究现状

郭娟娟<sup>1\*</sup>, 宋佳霖<sup>2</sup>, 李思哲<sup>3</sup>, 南星宇<sup>3</sup>

<sup>1</sup>东北大学理学院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>大连市育明高中, 辽宁 大连

<sup>3</sup>东北育才学校(高中部), 辽宁 沈阳

Email: \*gjoishi@163.com

收稿日期: 2017年6月26日; 录用日期: 2017年7月4日; 发布日期: 2017年7月7日

---

\*通讯作者。

## 摘要

本文简要介绍了相互作用暗能量模型研究的最新进展。首先介绍了几种目前比较流行的相互作用暗能量模型，接着详细分析了国内外在该领域的研究现状及发展动态。其中，针对大尺度不稳定性问题，本文着重强调了用来处理相互作用暗能量宇宙学扰动的参数化后弗里德曼(parametrized post-Friedmann, 简称PPF)方法。研究表明该方法能够成功地在相互作用暗能量模型全部参数空间中消除其大尺度不稳定性问题。

## 关键词

相互作用暗能量, 观测限制, 大尺度不稳定性, 参数化后弗里德曼方法

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

宇宙学是目前研究最为活跃也是最吸引公众兴趣的研究方向之一。近年来，高速发展的空间探测技术以及不断进步的天文观测手段使人们能够以前所未有的高精度去探测宇宙深处的奥秘，这一切也随我们将我们带入了“精确宇宙学”的时代。尽管目前的科学研究已经取得了许多重大进展，人们对宇宙演化的基本规律也获得了初步的认知，但仍然有许多未知的领域需要我们进一步深入地探索。例如，我们所熟知的普通原子物质(重子物质)仅占宇宙总能量的 4.5% 左右，而余下约 95% 的部分则是人们尚未完全知晓的暗物质和暗能量。可见，在探索宇宙的征途上，人类仍旧任重而道远。当前，大量关于暗物质与暗能量的科研工作方兴未艾，一批批执着的科研工作者们正在努力揭开它们神秘的面纱。

如果把 21 世纪的现代物理学和天文学比作“晴朗天空”，暗物质和暗能量已然成为了现代物理科学中两朵新的“乌云”。值得一提的是，这两类新的物理概念的提出恰恰源自于人们对宇宙中物质的引力效应的最初观测。在上世纪 30 年代，瑞士天文学家 Zwicky 在研究 Coma 星系团的成员星系运动时发现，这些星系的运动速度异常的高，甚至远远超过了星系团内可见物质质量所能束缚物体的最大速度。也就是说如果没有数量庞大的看不见的物质存在，根据牛顿引力理论，星系团外侧的物质将因过大离心力而脱离星系。因此人们大胆推测，宇宙中应该存在着大量不发光的“暗物质”。此外，也有很多疑似信号表明这类物质正以一种新的粒子形态存在于我们的宇宙当中，并在宇宙早期大尺度结构形成的过程中发挥了不可或缺的作用。时间到了上世纪 90 年代，随着科学观测手段的不断进步，人们发展出了一套利用 Ia 型超新星作为宇宙“标准烛光”来测量遥远星系距离的方法，从而为人类在大尺度上研究宇宙的膨胀历史提供了新的技术支持。然而出人意料的是，在 1998 年，国际上两个实验团队通过对 Ia 型超新星的观测几乎同时得出了一致的结论：宇宙正在加速膨胀！这一颠覆性的结论也被誉为 20 世纪自然科学最伟大的发现之一。通常观点认为，在一个以物质为主导的宇宙中，我们所熟悉的重子物质、辐射甚至暗物质都具有非负压强，因此只能产生吸引力，致使宇宙的膨胀减速。这也间接告诉我们，若要得到一个加速膨胀的宇宙，就必须引入一种能够产生“斥力”作用的负压强的物质。为了同暗物质相区分，人们将这种看不见的、具有负压强的能量组分称为“暗能量”。

然而，对于暗物质与暗能量的基本性质，人类截至目前的所有认识都仅仅是通过其各自的引力效应而间接探测到的。事实上，自然界的物质之间是普遍存在相互作用的，因此我们并不能忽略暗物质与暗能量之间存在相互作用的可能。况且从粒子物理的角度考虑，如果单纯地认为暗物质与暗能量之间完全孤立而不存在相互作用反而显得很不正常。因此，为了不失一般性，人们很自然地提出一种假设：除引力效应之外，暗物质与暗能量之间还存在某种非引力耦合的相互作用[1]。在宇宙学领域，人们通常将这种包含暗物质与暗能量之间相互作用的宇宙学模型统称为相互作用暗能量模型。除此之外，考虑暗物质与暗能量之间的相互作用还有很现实的理论意义。首先，对暗物质与暗能量之间相互作用的引入能够帮助我们缓解抑或解决宇宙学当中的一些理论问题，譬如宇宙巧合性问题[2]，幽灵暗能量所导致的宇宙“大撕裂”问题[3]，古老类星体所引发的宇宙年龄问题[4]等。其次，在对宇宙学扰动问题的研究中，如果考虑暗物质与暗能量之间的相互作用，会使得暗能量在暗物质的结团以及运动的过程中施加一个除引力之外的作用，这也将会对宇宙大尺度结构的生长和形成产生一系列深远的影响。总之，研究暗物质与暗能量之间的相互作用将极大地促进我们对于二者物理本质乃至整个宇宙演化规律的深入理解。

## 2. 几种重要的相互作用暗能量模型

由于暗能量与暗物质性质的未知性，人们对二者之间相互作用的认识仍然仅仅停留在一些概念和唯象的层面上。因此，对于暗能量与暗物质之间的相互作用，绝大多数研究工作主要通过以下两种方式来进行处理：一种是引入一些能够描述相互作用的标量场，另一种则是采用唯象描述的方法。基于此，我们将目前文献中研究较多的相互作用暗能量模型大体分为以下两类：

第一类是耦合标量场模型，也是研究最早最深入的一类模型[2] [5] [6] [7] [8]。在暗能量的研究中，标量场暗能量模型一直以来都具有极大的吸引力，其主要原因在于它可以为解决(至少是缓解)宇宙巧合性问题。在这一类模型中，最为典型的当属耦合精质(Quintessence)模型，它为我们描绘了一个关于变质量粒子(Variable-mass Particle, VAMP)的图景，即精质场与冷暗物质粒子之间的耦合(相互作用)将迫使暗物质粒子的质量在宇宙演化的过程中发生改变，且这种改变将由整个耦合场系统的动力学所决定。此外，在该模型中，存在两种情况使得场系统存在吸引子解，即指数形式[2] [8]与幂律形式[5] [9]。在指数形式中，人们假设暗物质粒子的质量指数地依赖暗能量标量场变化，且标量场也具有指数势。同样，所谓幂律形式就是指暗物质粒子的质量幂律地依赖暗能量精质场，同时精质标量场的势也是幂律型的。在这两种情形中，暗能量与暗物质之间的相互作用通过改变暗物质粒子的质量使得系统在宇宙演化的晚期进入稳定的吸引子阶段，从而使暗能量与暗物质的能量密度之比成为一个常数项[8] [9]。因此从某种意义上讲，这种精质暗能量场与暗物质的耦合也为宇宙巧合性问题提供了一种积极而有效的解决方案[5]-[12]。另外，最新的 Planck 2015 报告的结果也提到了相互作用的耦合精质模型，详细介绍请参见文献[13]。当然，除了精质暗能量，幽灵(Phantom)暗能量与冷暗物质的相互作用模型也属于耦合标量场模型的一种。我们知道，在没有 Phantom 与物质相互作用时，Phantom 的能量密度会随着宇宙的膨胀而增大，在未来的某一时刻将导致宇宙“大撕裂”的出现。然而，如果我们对其与物质之间的相互作用加以考虑，Phantom 暗能量会在宇宙演化的过程中逐渐衰变成暗物质，进而使得暗能量和暗物质逐渐达到某种平衡状态。此时，Phantom 与物质将以相同的形式衰减，进而得到一个标度(Scaling)解，这样既可以缓解宇宙巧合性问题又避免了宇宙大撕裂的命运[14] [15] [16] [17]。此外，在大多数标量场暗能量模型中，除了像精质(Quintessence)模型和幽灵(Phantom)模型这样依靠势能的建立来引起宇宙后期加速膨胀的机制外，还有一类模型可以通过修改标量场的动能项来建立这样的机制。K-essence 模型就具有这样一种非正则动能项的标量场。因此，一种考虑 K-essence 与物质相互作用的模型自然也属于耦合标量场模型，具体相关介绍请参考文献[18]。

第二类是唯象模型。由于我们目前对于暗能量和暗物质的微观本质还知之甚少，因此从理论角度出发来计算出一个十分明确的相互作用项(通常记为  $Q$ )仍显得十分困难。现阶段我们只能通过唯象描述的方法构造一些合理的相互作用项，然后再以此为基础做进一步的理论分析和观测验证。当前，最流行且研究最广泛的相互作用唯象模型主要分为三大类，即分别假定  $Q$  正比于暗能量密度， $Q$  正比于暗物质密度以及  $Q$  正比于暗能量和暗物质的密度和。其中，每大类又可以细分为正比于哈勃膨胀率与哈勃膨胀率无关的两种模型。在形式上，由于一个包含哈勃膨胀率的相互作用模型的暗能量密度及暗物质密度能够被解析求解，因而在文献中被更多地研究讨论。但也有一些学者认为，暗能量与暗物质之间的相互作用考察的是一种微观物理过程，而哈勃膨胀率则是一种描述宇宙整体膨胀属性的宏观物理量，因此他们主张相互作用形式不应该包含宇宙的哈勃膨胀率[19]。然而，无论是与哈勃膨胀率成正比还是与宇宙各暗流密度成正比的相互作用形式，它们建立的前提都是假设宇宙在高能标、高密度时具有非常大的相互作用强度。尽管这么做有一定的道理，但其得到的结果往往会因为过强的先验假设而带来严重的模型依赖问题。或许，我们更应该把研究的焦点转移到观测上来，让观测数据直接告诉我们相互作用是如何演化的，进而推断出它的确切形式。因此，对相互作用项进行参数化处理将是一种十分有效的方式。

为此，中科院理论物理研究所的蔡荣根等人[20] [21]利用观测数据对一段特定红移范围内的相互作用项进行了深入探讨。通过对相互作用项进行分段参数化处理，他们发现相互作用项  $Q$  会改变其正负号(但相互作用项的大小仍然与哈勃参数成正比)，这也意味着暗物质与暗能量之间的能量迁移方向会随着宇宙的演化而发生变化。随后，东北大学的宇宙学教研组在文献[22]中着重讨论了能量转移率  $Q$  随时间演化的特征，提出了一种能够随着宇宙演化而改变正负号的相互作用项，具体做法就是引入的参数  $b_e$  和  $b_0$  分别代表相互作用在宇宙早期和宇宙晚期的值，用这两个参数将相互作用项  $Q$ (或无量纲耦合常数)进行直接参数化。然后利用观测数据来限制相互作用的演化，最后再根据重构出来的  $Q$  的演化历史为依据推测  $Q$  的唯象形式，进而构建相互作用暗能量的唯象模型。值得一提的是，在此模型中，我们并未考虑相互作用项正比于哈勃参数和暗流体密度的两类假设，而是仅仅利用实验观测的数据来重构相互作用项的演化历史，这也为正确写出  $Q$  的唯象表达式提供了充分的实验依据。

### 3. 相互作用暗能量的宇宙学观测效应及大尺度稳定性问题

上一节我们大致介绍了目前较流行的相互作用暗能量模型，在本节中，我们将主要介绍相互作用暗能量的宇宙学观测效应及大尺度不稳定性问题。

关于相互作用暗能量的宇宙学观测效应这一问题，一方面，从本质上讲，暗能量与暗物质之间的相互作用只是一种理论假设，该假设合理与否最终还需要我们用实验观测来验证；另一方面，到目前为止，人们已经提出了众多相互作用暗能量模型，到底哪一种模型最能反映二者间相互作用的真实物理过程，以及各模型中自由参数的大小是多少，这都需要借助观测数据来给出答案。随着科技的迅速发展，现代天文观测的意义不仅仅只是发现与探索，它们另一层更重要的意义就是对现有模型中众多自由参数进行观测限制，为理论提供更多有力的证据。在此，我们列举一些模型限制工作中常用的观测数据： $Ia$  型超新星(SNeIa)、哈勃常数直接测量( $H_0$ )、重子声学振荡(BAO)等距离测量信息及宇宙微波背景辐射(CMB)、红移空间畸变(RSD)、弱引力透镜(WL)等结构增长测量信息。在此需要说明的是，对包括暗能量与暗物质相互作用在内的宇宙中主要物理过程进行观测拟合时，各物理过程中的自由参数会不可避免的存在着补偿效应，这将导致参数限制结果存在一定的关联和简并。因此，为了打破这种简并，同时也为了减小观测数据的不确定性等，许多研究工作选择联合多类观测数据进行限制。例如，在探究相互作用大小的研究工作中，起初人们只考虑了宇宙背景层次上相互作用暗能量的演化，在限制相互作用耦合参数时所使用的观测数据主要来源于宇宙距离信息测量，北京理工大学的韦浩等人在这方面做了大量的研究工作

[23]。然而,由于相互作用暗能量与常规动力学暗能量模型在宇宙背景层次上是很难区分开的,人们总可以通过调节相互作用暗能量的参数大小来模拟出一个常规暗能量模型所给出的宇宙膨胀历史,因此仅仅使用距离信息来限制相互作用暗能量得到具有很强关联和简并的参数空间自然也就不难理解了。为了打破这种简并,就需考虑上文提到的宇宙大尺度结构增长测量信息。其中,红移空间畸变(RSD)恰好就是一种有效测量宇宙结构增长率的观测数据,并且在越来越多的参数限制工作中也发挥着重要的作用。大连理工大学的徐立新小组在此方面开展了许多相关工作[24] [25],东北大学宇宙学教研组在此方面也做出了许多有价值的工作[26]。

近年来,在人们努力寻找相互作用暗能量观测效应的过程中,大量研究发现,从宇宙的膨胀历史诸如超新星的观测数据、微波背景辐射的相关数据及大尺度结构的数据等可以推断出确实存在着这种相互作用。而且,观测也对这种相互作用的强度给出了一定的宇宙学限制。此外,在星系团的演化中,也已经对暗物质与暗能量相互作用带来的信号进行了分析研究。与此同时,研究还认为暗物质和暗能量之间的相互作用不仅仅只改变宇宙的演化历史而且还影响宇宙结构的形成。这些影响体现在宇宙微波背景辐射各向异性角功率谱和宇宙大尺度结构物质功率谱中,如 CMB 温度各向异性角功率谱中声学峰的位置与幅度,晚期积分的 Sachs-Wolfe (ISW)效应,大尺度结构物质功率谱的形状等,上海交通大学的王斌教研组在这一方面做出了很多重要研究成果[27] [28]。

正当相互作用暗能量的研究进入热潮之时,人们却发现该理论还存在着一些重大且亟待解决的理论问题。一般地,宇宙曲率扰动在超粒子视界应该是缓慢增长甚至停止增长而凝固在粒子世界之外的。但是, Väiviita 等人于 2008 年在文献[29]中指出,当考虑暗物质与暗能量相互作用时,在特定形式的相互作用暗能量模型中,宇宙的曲率扰动在早期会出现快速增长而在大尺度上发散问题。为进一步验证该问题是否是所有相互作用暗能量模型的共性问题,何建华、王斌等对该问题曾做过全面系统的研究。结果表明这种扰动不稳定性发生在宇宙早期,并与相互作用的具体形式、宇宙早期暗能量密度的大小以及暗能量状态方程都密切相关。当相互作用正比于暗物质密度且当暗能量的状态方程大于 $-1$ 时,早期宇宙将会出现大尺度不稳定性问题;而当相互作用正比于暗能量密度时,如果其参数满足一定条件,同样也会出现这样的不稳定性问题。这也说明大尺度不稳定性问题是相互作用暗能量模型的共性问题,是不能通过构造特殊模型的方法来消除的。由此可见,在相互作用暗能量模型的研究中,扰动的大尺度不稳定性问题显得尤为重要。研究发现,该问题主要源于暗能量压强扰动的计算方式。因为在标准的线性扰动理论中,为了使暗能量的声速的平方不为负值,人们通常将暗能量当作一个非绝热流体来处理,这样它的压强扰动就包含绝热压强扰动和非绝热压强扰动两部分。而暗能量的非绝热压强扰动是宇宙曲率扰动非绝热模式的来源。在暗能量与暗物质无相互作用时,暗能量非绝热压强带来的曲率扰动非绝热模式是随宇宙演化衰减的,因而不会带来任何问题。而一旦暗能量与暗物质发生相互作用,其相互作用将贡献一部分非绝热暗能量压强扰动,且在特定的参数取值下,该部分的非绝热压强扰动对宇宙曲率扰动的非绝热模式的演化起主导作用,使其由衰减模式变为快速增长模式,进而出现大尺度发散。值得一提的是,为了能够有效地解决这一问题,东北大学宇宙学教研组通过对该问题的深入分析,成功构建出一套通用且有效的、能够计算相互作用暗能量宇宙学扰动的理论方法,这一理论也被称作参数化的后弗里德曼(parametrized post-Friedmann,简称 PPF)方法。该方法的核心,可以概括为在大尺度上通过引入暗能量的动量与宇宙中其他物质的动量的关系来完备暗能量扰动体系,而不再通过定义暗能量声速的方式来计算暗能量的压强扰动[30]。研究发现,在利用宇宙学观测数据限制相互作用暗能量模型的工作中,该方法可以成功消除相互作用暗能量模型在某些参数取值下的大尺度不稳定问题。在文献[26] [31],他们选取了几种典型的相互作用暗能量模型为主要研究对象,利用 PPF 方法,首次得到这些模型在全部参数空间中的观测限制结果,分析表明,采用以往标准的线性扰动理论来处理相互作用暗能量模型的宇宙学扰动时,

所得到的参数限制结果并不能正确地反映出各观测数据的偏好。此外, 还有一些其他相关工作请参考文献[32] [33] [34]。以上这些工作不仅开辟了处理宇宙学扰动的新方向, 也为进一步开展研究, 取得突破性进展奠定了良好的基础。

#### 4. 结论

在本文中, 我们简要介绍了相互作用暗能量的最新研究进展。首先, 介绍了几种目前比较流行的相互作用暗能量模型: 耦合标量场模型和唯象模型。其次, 对相互作用暗能量的宇宙学观测效应及大尺度稳定性的问题做了简要分析讨论。最后, 针对大尺度不稳定性问题, 文中主要介绍了东北大学课题组提出的参数化的后弗里德曼方法。相关研究表明该方法能够有效地计算相互作用暗能量的宇宙学扰动并在其全部参数空间中可成功地消除其大尺度不稳定性问题。到目前为止, 相互作用暗能量研究正处于方兴未艾的阶段, 还远远没有到宣称收获的时候, 我们期待随着暗物质空间观测实验和地下探测实验取得重大进展以及暗能量探测计划和观测精度不断改进、提高, 未来对相互作用暗能量这一重大前沿领域定能够获得跨越式发展。

#### 基金项目

本项研究工作得到了辽宁省“百千万人才工程”项目(编号: L0201287)的支持。

#### 参考文献 (References)

- [1] Wang, B., Abdalla, E., Atrio-Barandela, F. and Pavón, D. (2016) Dark Matter and Dark Energy Interactions: Theoretical Challenges, Cosmological Implications and Observational Signatures. *Reports on Progress in Physics*, **79**, 096901. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/79/9/096901>
- [2] Amendola, L. (2000) Coupled Quintessence. *Physical Review D*, **62**, 043511. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.62.043511>
- [3] Li, M., Lin, C. and Wang, Y. (2008) Some Issues Concerning Holographic Dark Energy. *JCAP*, **0805**, 023. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2008/05/023>
- [4] Wang, S. and Zhang, Y. (2008) Alleviation of Cosmic Age Problem in Interacting Dark Energy Model. *Physical Review B*, **669**, 201-205. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2008.09.055>
- [5] Zhang, X. (2005) Statefinder Diagnostic for Coupled Quintessence. *Physical Review B*, **611**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2005.02.022>
- [6] Amendola, L. and Tocchini-Valentini, D. (2001) Stationary Dark Energy: The Present Universe as a Global Attractor. *Physical Review D*, **64**, 043509. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.043509>
- [7] Amendola, L. and Tocchini-Valentini, D. (2002) Baryon Bias and Structure Formation in an Accelerating Universe. *Physical Review D*, **66**, 043528. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.66.043528>
- [8] Comelli, D., Pietroni, M. and Riotto, A. (2003) Dark Energy and Dark Matter. *Physical Review B*, **571**, 115-120. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2003.05.006>
- [9] Zhang, X. (2005) Coupled Quintessence in a Power-Law Case and the Cosmic Coincidence Problem. *Modern Physics Letters A*, **20**, 2575. <https://doi.org/10.1142/S0217732305017597>
- [10] Amendola, L. (2003) Acceleration at  $z > 1$ ? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **342**, 221-226. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06540.x>
- [11] Pietroni, M. (2003) Brane Worlds and the Cosmic Coincidence Problem. *Physical Review D*, **67**, Article ID: 103523. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.67.103523>
- [12] Franca, U. and Rosenfeld, R. (2004) Age Constraints and Fine Tuning in VAMP Models. *Physical Review D*, **69**, Article ID: 063517. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.063517>
- [13] Ade, P.A.R., et al. (2016) [Planck Collaboration]. Planck 2015 Results. XIV. Dark Energy and Modified Gravity. *Astronomy & Astrophysics*, **594**, A14. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525814>
- [14] Guo, Z.K. and Zhang, Y.Z. (2005) Interacting Phantom Energy. *Physical Review D*, **71**, Article ID: 023501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.023501>

- [15] Guo, Z.K., Cai, R.G. and Zhang, Y.Z. (2005) Cosmological Evolution of Interacting Phantom Energy with Dark Matter. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2005**, 002.
- [16] Cai, R.G. and Wang, A.Z. (2005) Cosmology with Interaction between Phantom Dark Energy and Dark Matter and the Coincidence. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **2005**, 002.
- [17] Wu, P.X. and Yu, H.W. (2005) Avoidance of Big Rip in Phantom Cosmology by Gravitational Back Reaction. *Nuclear Physics B*, **727**, 355.
- [18] Wei, H. and Cai, R.G. (2005) K-Chameleon and the Coincidence Problem. *Physical Review D*, **71**, Article ID: 043504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.043504>
- [19] Valiviita, J., Maartens, R. and Majerotto, E. (2010) Observational Constraints on an Interacting Dark Energy Model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **402**, 2355. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16115.x>
- [20] Yang, T., Guo, Z.K. and Cai, R.G. (2015) Reconstructing the Interaction between Dark Energy and Dark Matter Using Gaussian Processes. *Physical Review D*, **91**, Article ID: 123533. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.123533>
- [21] Cai, R.G. and Su, Q. (2010) On the Dark Sector Interactions. *Physical Review D*, **81**, Article ID: 103514. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.81.103514>
- [22] Li, Y.H. and Zhang, X. (2011) Running Coupling: Does the Coupling between Dark Energy and Dark Matter Change Sign during the Cosmological Evolution? *The European Physical Journal C*, **71**, 1700. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1700-8>
- [23] Wei, H. (2010) Revisiting the Cosmological Constraints on the Interacting Dark Energy Models. *Physics Letters B*, **691**, 173.
- [24] Xu, L. (2013) Constraints on the Holographic Dark Energy Model from Type IA Supernovae, WMAP7, Baryon Acoustic Oscillation and Red Shift-Space Distortion. *Physical Review D*, **87**, Article ID: 043525. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.043525>
- [25] Yang, W., Xu, L., Wang, Y. and Wu, Y. (2014) Constraints on a Decomposed Dark Fluid with Constant Adiabatic Sound Speed by Jointing the Geometry Test and Growth Rate after Planck Data. *Physical Review D*, **89**, Article ID: 043511. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.043511>
- [26] Li, Y.H., Zhang, J.F. and Zhang, X. (2014) Exploring the Full Parameter Space for an Interacting Dark Energy Model with Recent Observations Including Red Shift-Space Distortions: Application of the Parametrized Post-Friedmann Approach. *Physical Review D*, **90**, Article ID: 123007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.123007>
- [27] He, J.H., Wang, B. and Abdalla, E. (2009) Stability of the Curvature Perturbation in Dark Sectors' Mutual Interacting Models. *Physics Letters B*, **671**, 139.
- [28] He, J.H., Wang, B. and Jing, Y.P. (2009) Effects of Dark Sectors' Mutual Interaction on the Growth of Structures. *JCAP*, **2009**, 030.
- [29] Valiviita, J., Majerotto, E. and Maartens, R. (2008) Instability in Interacting Dark Energy and Dark Matter Fluids. *JCAP*, **2008**, 020.
- [30] Zhang, X. (2017) Probing the Interaction between Dark Energy and Dark Matter with the Parametrized Post-Friedmann Approach. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, **60**, Article ID: 050431. <https://doi.org/10.1007/s11433-017-9013-7>
- [31] Li, Y.H., Zhang, J.F. and Zhang, X. (2014) Parametrized Post-Friedmann Framework for Interacting Dark Energy. *Physical Review D*, **90**, Article ID: 063005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.063005>
- [32] Li, Y.H., Zhang, J.F. and Zhang, X. (2016) Testing Models of Vacuum Energy Interacting with Cold Dark Matter. *Physical Review D*, **93**, Article ID: 023002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.023002>
- [33] Li, Y.H. and Zhang, X. (2014) Large-Scale Stable Interacting Dark Energy Model: Cosmological Perturbations and Observational Constraints. *Physical Review D*, **89**, Article ID: 083009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.083009>
- [34] Guo, Y.Y., Li, Y.H., Zhang, J.F. and Zhang, X. (2017) Weighing Neutrinos in the Scenario of Vacuum Energy Interacting with Cold Dark Matter: Application of the Parameterized Post-Friedmann Approach. *JCAP*, **2017**, 040.

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[aas@hanspub.org](mailto:aas@hanspub.org)