

Why is there more matter than antimatter?

宇宙正反物质不对称的起源

黄发朋^①, 李明哲^②, 顾佩洪^③, 张新民^{①*}

① 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

② 中国科学技术大学交叉学科理论研究中心, 合肥 230026;

③ 上海交通大学物理与天文系, 上海 200240

* 联系人, E-mail: xmzhang@ihep.ac.cn

2016-02-01 收稿, 2016-02-02 修回, 2016-02-02 接受, 2016-03-01 网络版发表

国家自然科学基金(11121092, 11033005, 11375220)和中国科学院战略性先导科技专项(B计划)资助

摘要 宇宙中正反物质不对称性的起源是粒子物理和宇宙学中极具挑战性的问题, 至今人们还不清楚该问题的本质. 随着实验观测的日益精确, 人们对这一未解之谜的研究日益深入. 本文首先简要介绍宇宙正反物质不对称性之谜的背景, 以及在理论上解释该问题所要满足的基本条件. 然后结合最新的理论和实验进展, 重点介绍了3种能自洽地解释正反物质不对称性并且能够在实验上进行验证的理论, 包括电弱重子数产生机制、轻子数不对称产生机制以及引力重子数产生机制. 期望未来更精确的实验能够验证究竟哪种机制才是宇宙正反物质不对称性的起源.

关键词 正反物质不对称性, 电弱相变, 电弱重子数产生机制, 轻子数不对称产生机制

大量的观测结果^[1,2]表明当今宇宙的主要物质组分是“暗”的, 包括26%的暗物质和69%的暗能量, 它们的物理本质和属性对人类的知识领域来说还是两块巨大的空白. 人们所熟知的普通物质都是由粒子物理标准模型中的基本粒子构成的. 这部分物质只占宇宙总物质成分的5%左右. 然而即使是我们自认为了解得很清楚的这5%的普通物质在宇宙中的表现也给人们带来了一个难解之谜, 它就是宇宙中的正反物质不对称的问题.

1928年伟大的英国理论物理学家狄拉克(Dirac)写下了微观粒子的相对论运动方程, 即狄拉克方程, 首次预言了反物质的存在. 几十年来粒子物理实验证实了每个粒子都有相应的反粒子(光子的反粒子是其自身), 物质如果与反物质相遇将湮灭为带有相应能量的一些光子. 但是把这个概念应用到宇宙中却造成了一个极大的困惑. 从微观粒子物理的角度来

看, 物质和反物质地位对等, 没有谁更优越, 因此在宇宙中物质和反物质应该一样多才是最自然的结果. 然而来自天文和宇宙学的观测证据都表明在宇宙中两者的地位严重失衡. 在浩瀚的宇宙里人们只观测到物质, 而没有看到反物质. 宇宙中的物质和反物质的不对称主要体现为正反重子的不对称, 这是因为当今宇宙中的普通物质的能量主要集中在重子部分. 假设宇宙中有反物质存在的区域, 这些区域与物质存在的区域的边界上由于湮灭效应会发射出很强的伽玛射线, 但是至今人们并没有观测到这种伽玛射线. 在高能宇宙线中观测到的反物质比如反质子是宇宙线传播过程中发生碰撞而产生的次级粒子, 并不是来自于宇宙深处的原初反物质. 详细的分析结果表明至少在我们可观测的宇宙范围内不存在反物质的区域^[3]. 在宇宙学中人们常常定义重子光子比 $\eta_B = (n_B - n_{\bar{B}})/n_\gamma$ 来定量地描述宇宙中的正反物质不

引用格式: 黄发朋, 李明哲, 顾佩洪, 等. 宇宙正反物质不对称的起源. 科学通报, 2016, 61: 1151–1156

Huang F P, Li M Z, Gu P H, et al. Origin of the matter-antimatter asymmetry of the universe (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1151–1156, doi: 10.1360/N972016-00003

对称性, (其中 n_B 和 $n_{\bar{B}}$ 分别表示重子和反重子的数密度, n_γ 为光子的数密度, 大约为每立方厘米413个光子). 经典大爆炸宇宙学告诉我们宇宙早期的物质处于高温的等离子体, 当宇宙温度足够高时, 正反重子不停地成对产生并很快湮灭. 但是当温度降到1 GeV以下时, 这些正反重子很快湮灭成光子, 而不再有正反重子对的产生. 如果宇宙是正反重子对称的, 最后的结果将是 $\eta_B=0$. 但这与观测结果是直接矛盾的. 宇宙早期大爆炸核合成以及微波背景辐射都对重子光子比有精确的测量. 两者的测量结果都给出 $\eta_B \sim 10^{-10}$. 注意, 这两个物理过程分别发生在温度相差一百万倍的不同时期, 却给出了几乎相同的结果, 这说明了标准大爆炸宇宙学模型的自洽性和成功之处, 并一致性地告诉我们至少从大爆炸核合成时期开始, 宇宙呈现出了明显的正反物质的不对称.

理论上讲, 这种正反物质不对称可能是宇宙创生的时候就有的. 然而, 近代宇宙学研究表明, 宇宙在早期经历了一个暴胀阶段. 暴胀解决了经典宇宙学中的平坦性、均匀性等问题, 但同时剧烈的膨胀也使得原始的重子数和反重子数密度趋近于零. 也就是说经历了暴胀之后, 宇宙应该处于 $\eta_B=0$ 的对称状态. 所有的物质和反物质都是在暴胀后的再加热(reheating)过程中产生, 所以正反物质的不对称也必须是暴胀后宇宙中的动力学演化的结果.

那么这种正反物质不对称是怎么产生的呢? 换句话说什么样的物理事件会使得宇宙由 $\eta_B=0$ 的状态演化为不对称的 $\eta_B \sim 10^{-10}$? 早在1967年, 前苏联科学家萨哈洛夫(Sakharov)就提出了动力学产生宇宙正反物质不对称, 即重子数产生(baryogenesis)机制所需要的3个条件^[4]. 第一是需要存在重子数不守恒的物理过程. 这一点是很显然的, 如果重子数守恒, 正反物质对称的宇宙将永远是对称的. 第二个条件是C和CP对称性的破坏. C不对称是正反粒子交换的不对称, CP不对称是正反粒子交换、左和右交换联合的不对称. 只要C或CP中的任意一个对称性存在, 重子数破坏的反应过程就会产生相同数量的重子和反重子. 第三个条件是脱离热平衡. 由CPT定理(T是时间反演)可知, 正反粒子质量相等. 如果处于热平衡, 重子与反重子将具有相同的热分布, 因而会有相同的密度和数量. 自20世纪70年代以来, 各种具体的实现萨哈洛夫3个条件的机制被物理学家们陆续提出来了^[5]. 典型的例子包括大统一重子数产生机制(GUT

baryogenesis)、Affleck-Dine机制、电弱重子数产生机制(electroweak baryogenesis)和轻子数不对称产生机制(leptogenesis)等.

最先被提出来的是基于粒子物理大统一理论的重子数产生机制, 因为这类理论一般都预言了譬如质子衰变等重子数破坏的过程. 但是人们仍然对能否在粒子物理的标准模型中实现自洽的重子数产生机制非常感兴趣. 到20世纪80年代末, 人们通过大量的研究认识到粒子物理的标准模型可以满足萨哈洛夫的3个条件. 在标准模型中, 经典拉氏量具有重子数和轻子数守恒的对称性, 但在量子层次, 反常效应和非阿贝尔规范场真空的特殊性破坏了重子数和轻子数. 这种效应在低温时是微不足道的, 所以质子是稳定的. 但当温度高于电弱能标(大致对应于 $T > \mathcal{O}(100)$ GeV)时, 重子数破坏作用将处于热平衡中. 决定这一反应率的一个重要因素是sphaleron过程, 它是标准模型的一个经典解, 它导致的重子数破坏实现了萨哈洛夫的第一个条件^[6,7], 如图1所示. 在标准模型中, C和CP对称性是破缺的, 这由卡比玻-小林-益川(CKM)矩阵给出. 萨哈洛夫的第三个条件即偏离热平衡可以由强一级电弱相变来实现. 如图2所示, 开始的时候电弱对称性 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 还没有破缺, 净重子数为零. 当宇宙冷却到大约100 GeV以下时, 发生电弱相变, 正反物质不对称就在这个相变过程中产生. 成功的正反物质不对称需要强一级相变. 在强一级相变过程中, 处于对称相中的等离子体中对称破缺产生的bubble逐渐膨胀、碰撞、合并, 最后完全的成为破缺相. 电弱重子数产生机制中重子在膨胀的bubble壁附近产生. 该过程分为3步: (1) 等离子体中的粒子和bubble壁散射. 如果理论中有CP破坏的因子, 那么在bubble壁前将产生粒子数密度的CP不对称性; (2) CP不对称性通过sphaleron过程产生比反重子多的重子; (3) bubble外产生的净重子数随着bubble的快速膨胀被纳入破缺相中.

但是定量的计算表明, 现有的标准模型中CKM矩阵给出的CP破坏量不够. 另外, 要产生强一级电弱相变, 标准模型中的希格斯粒子的质量必须小于 $\mathcal{O}(45)$ GeV, 2012年欧洲大型强子对撞机(LHC)发现希格斯粒子^[8,9]的质量为125 GeV(2013年诺贝尔物理学奖), 直接否定了在标准模型中实现电弱重子数产生机制的可能性. 因此, 现有的粒子物理标准模型不能解释宇宙中的物质和反物质不对称. 为了得到一

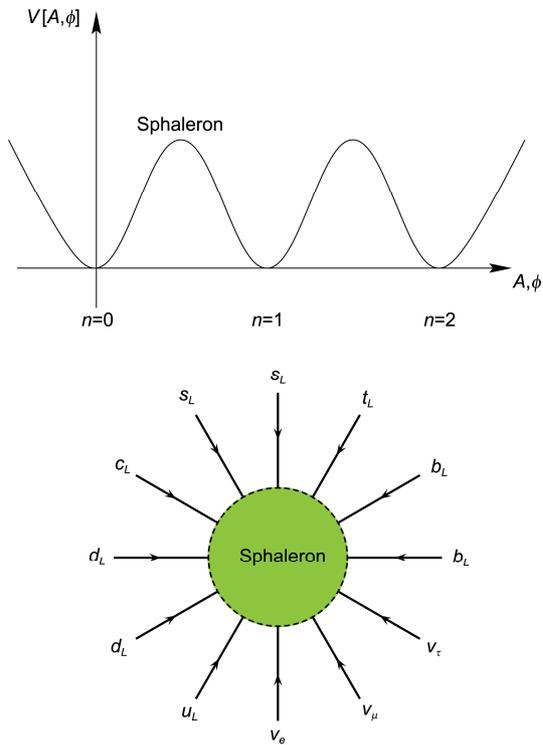


图1 (网络版彩色)标准模型中sphaleron产生重子数破坏的物理图像
Figure 1 (Color online) Baryon number violation from the sphaleron process in the standard model

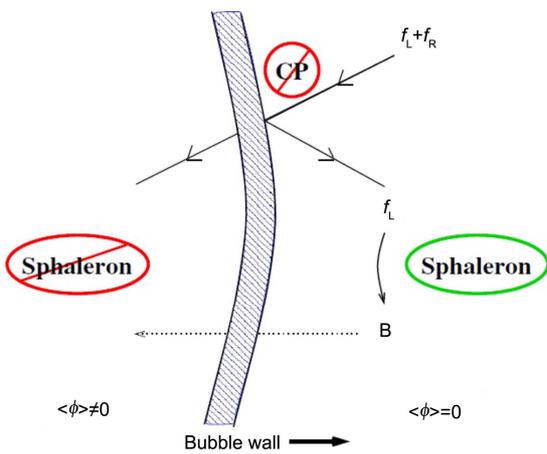


图2 (网络版彩色)电弱重子数产生机制图示
Figure 2 (Color online) Electroweak baryogenesis

一个成功的电弱重子数产生机制，我们必须对粒子物理标准模型进行扩充，尤其是需要对希格斯部分进行扩充。这方面一些常见的模型包括有效场论，多希格斯模型，左右对称电弱统一模型，以及超对称标准模型等。相对于现有的标准模型来说，这些扩展的模型有新的CP破坏源和更丰富的希格斯粒子。

电弱重子数产生机制最吸引人的地方在于它和希格斯粒子紧密联系在一起^[10-14]，可以在对撞机实验^[15,16]和引力波实验上验证。一般电弱重子数产生机制要满足强一级相变，标准模型中的三希格斯粒子相互作用顶点会被修改，可以通过在强子对撞机上测量希格斯对产生的不变质量分布来确定(可惜的是14 TeV的LHC的能力不足以测量这一耦合参数，未来中国可能制造的100 TeV的超级质子质子对撞机(SPPC)则可能验证这一预言)。当然，更精确的验证是在电子对撞机上测量希格斯粒子和Z玻色子联合产生的截面，比如中国正在积极筹划的环形电子对撞机(CEPC)和日本可能筹建的国际直线加速器(ILC)。另外，宇宙早期电弱重子数产生的相变过程中，伴随着bubble之间的碰撞以及bubble和等离子体的湍流作用，还会产生引力波^[17,18]，未来的空间引力干涉实验(比如eLISA)可观能测到这一信号。太空中的引力波实验和以及地球上的对撞机实验相互补充，将有助于我们去了解物质的起源、反物质的丢失以及希格斯粒子的本质。

近年来，由于中微子振荡物理的推动，轻子数不对称的产生机制^[19,20]备受关注。在标准模型中，重子数与轻子数分别由sphaleron过程破坏，如图1所示，但二者之差却是守恒的。这就将重子数的改变与轻子数的改变连在了一起，重子数的不对称可以由轻子数的不对称通过sphaleron过程转化而来。一般，轻子数不对称产生机制需要轻子数破坏过程、轻子部分的C和CP破坏以及非平衡态的实现。这些条件在一般的描述有质量中微子的模型中都可以实现。比如对于简单的跷跷板(see-saw)模型，中微子是马约拉纳(Majorana)型，破坏了轻子数对称性，重的右手中微子退耦提供了非平衡条件。然而，还没有任何实验证据表明中微子一定是马约拉纳型的。换言之，中微子有可能像其他带电费米子一样是狄拉克型的。在这种情况下，轻子数不对称的产生机制依旧可以实现。这是因为sphaleron过程只直接作用于左手费米子，而右手中微子和左手轻子之间在温度很低的时候才会进入热平衡，这时候的sphaleron过程已经不起作用。这样一来，如果有一个左手轻子的轻子数和一个相反的右手中微子的轻子数，尽管总的轻子数是严格等于零的，没有任何轻子数不对称，sphaleron过程可以把左手轻子的轻子数部分地转化成重子数，从而解释重子数不对称^[21]。这种轻子数守恒的轻子

数不对称产生机制在一些狄拉克中微子模型中可以实现^[22-24]。通常,轻子数不对称产生机制的标度很高,难于检验。在一些具体的模型里,轻子数不对称产生机制可以预言中微子的CP破坏和质量排序,从而可以在中微子振荡实验和无中微子双贝塔实验中进行检验^[25]。

前面提到实现正反物质不对称的萨哈洛夫3个条件的一个前提是CPT定理成立。如果有CPT破缺的话,也可以在热平衡过程中产生物质和反物质的不对称性。CPT对称性在粒子物理的标准模型中具有基础性的重要地位,并带来一系列重要的物理结果。它保证了粒子和反粒子具有相同的质量和自旋、相反的荷以及磁矩等。如今地面实验室尚未发现CPT破缺的信号,但是检验的精度已经非常高。也就是说在低能标下即使存在CPT破缺,也是非常小的。但是CPT破缺效应在宇宙的早期可以很大,膨胀的宇宙提供了这样一个破缺CPT对称性的框架。基于CPT破缺的思想,我们在21世纪初通过引入宇宙暗能量与重子或轻子的导数耦合提出了热平衡产生正反物质不对称的模型,即quintessential baryogenesis^[26,27]。在这个模型中,动力学暗能量(比如quintessence)的演化本身自发地破缺了CPT对称性,并扮演了双重角色:在早期暗能量的演化速度很快,带来足够大的CPT破缺效应,使得重子(轻子)与反重子(反轻子)在热平衡时具有不同的热分布,从而产生符合观测要求的物质和反物质的不对称;在晚期暗能量的演化非常缓慢,驱动宇宙的加速膨胀,其引导的CPT破缺效应非常小,远低于目前地面CPT检测实验可达到的精度,这与地面实验室检验CPT的结果是自洽的。此外

重子或轻子物质也可以与宇宙的引力场进行直接耦合,从而在热平衡产生足够大的正反物质的不对称,即gravitational baryogenesis^[28],在这里CPT破缺来源于宇宙时空本身的演化。这类CPT破缺虽然可以避开地面实验室里的CPT检测,却可以被宇宙微波背景辐射等观测和实验探测到^[29-31]。它的物理效应体现为光子在宇宙空间中传播时极化方向会发生偏转,人们可以通过微波背景辐射等光子的极化方向来测量这种偏转的大小,从而对CPT定理进行检验。由文献[29-31]发展起来的这种检验方法已经被多个大型微波背景辐射实验合作组所采用。虽然目前并没有发现明显的CPT破缺的信号,但是采用这种方法对CPT对称性的检验精度比地面实验室里开展的实验的精度要高出许多。

总之,目前对于在宇宙中观测到的正反物质不对称性的起源,人们仍然知之甚少。无论在粒子物理中还是宇宙学中,这都是一个重要的问题,而且它把粒子物理和宇宙学密切联系起来了。上面重点介绍了3种重子数产生机制,电弱重子数产生机制和轻子数产生机制侧重于从粒子物理的角度去解释正反物质不对称的起源。这两种机制都需要扩充粒子物理标准模型,都有可能粒子物理实验上得到验证,特别是电弱重子数产生机制。中国正在积极推动的CEPC和日本要推动的ILC是有能力来检验电弱重子数产生机制的。而quintessential baryogenesis则侧重于宇宙学解释,未来更加精确的宇宙学将进一步检验该机制。要彻底弄清楚正反物质不对称性到底起源于何种机制,还需要理论物理学家和实验物理学家的共同努力。

参考文献

- 1 Adam R, Ade P A R, Aghanim N, et al. [Planck Collaboration]. Planck 2015 results. I. Overview of products and scientific results. arXiv:1502.01582 [astro-ph.CO]
- 2 Ade P A R, Aghanim N, Arnaud M, et al. [Planck Collaboration]. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. arXiv:1502.01589 [astro-ph.CO]
- 3 Cohen A G, Rujula A De, Glashow S L. A matter antimatter universe? *Astrophys J*, 1998, 495: 539-549
- 4 Sakharov A D. Violation of CP invariance, c asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. *Pisma Zh Eksp Teor Fiz*, 1967, 5: 24-27
- 5 Dine M, Kusenko A. The origin of the matter-antimatter asymmetry. *Rev Mod Phys*, 2003, 76: 1-30
- 6 Kuzmin V A, Rubakov V A, Shaposhnikov M E. On the anomalous electroweak baryon number nonconservation in the early universe. *Phys Lett B*, 1985, 155: 36-42
- 7 Kajantie K, Laine M, Rummukainen K, et al. The electroweak phase transition: A nonperturbative analysis. *Nucl Phys B*, 1996, 466: 189-258
- 8 Aad G, Abajyan T, Abbott B, et al. [ATLAS Collaboration]. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys Lett B*, 2012, 716: 1-29

-
- 9 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al. [CMS Collaboration]. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys Lett B*, 2012, 716: 30–61
 - 10 Zhang X M. Operators analysis for Higgs potential and cosmological bound on Higgs mass. *Phys Rev D*, 1993, 47: 3065–3067
 - 11 Zhang X M, Young B L. Effective Lagrangian approach to electroweak baryogenesis: Higgs mass limit and electric dipole moments of fermion. *Phys Rev D*, 1994, 49: 563–566
 - 12 Zhang X M, Young B L, Lee S K. Electroweak sphaleron for effective theory in the limit of large Higgs boson mass. *Phys Rev D*, 1995, 51: 5327
 - 13 Zhang X M, Lee S K, Whisnant K, et al. Phenomenology of a nonstandard top quark Yukawa coupling. *Phys Rev D*, 1994, 50: 7042–7047
 - 14 Whisnant K, Young B L, Zhang X M. Unitarity and anomalous top quark Yukawa couplings. *Phys Rev D*, 1995, 52: 3115–3118
 - 15 Huang F P, Gu P H, Yin P F, et al. Testing the electroweak phase transition and electroweak baryogenesis at LHC and CEPC. 2015, arXiv:1511.03969 [hep-ph]
 - 16 Huang F P, Li C S. Electroweak baryogenesis in the framework of the effective field theory. *Phys Rev D*, 2015, 92: 075014
 - 17 Witten E. Cosmic separation of phases. *Phys Rev D*, 1984, 30: 272–285
 - 18 Hogan C J. Nucleation of cosmological phase transitions. *Phys Lett B*, 1983, 133: 172–176
 - 19 Fukugita M, Yanagida T. Baryogenesis without grand unification. *Phys Lett B*, 1986, 174: 45–47
 - 20 Mohapatra R N, Zhang X. Electroweak baryogenesis in left-right symmetric models. *Phys Rev D*, 1992, 46: 5331–5336
 - 21 Dick K, Lindner M, Ratz M, et al. Leptogenesis with Dirac neutrinos. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 4039–4042
 - 22 Gu P H, He H J. Neutrino mass and baryon asymmetry from dirac seesaw. *J Cosmol Astropart Phys*, 2006, 612: 010–019
 - 23 Gu P H, He H J, Sarkar U. Realistic leptogenesis with radiative vertex correction. *Phys Lett B*, 2008, 659: 634–639
 - 24 Gu P H. From Dirac neutrino masses to baryonic and dark matter asymmetries. *Nucl Phys B*, 2013, 872: 38–61
 - 25 Gu P H, He X G. Leptogenesis parametrized by lepton mass matrices. 2015, arXiv:1511.03835 [hep-ph]
 - 26 Li M Z, Wang X L, Feng B, et al. Quintessence and spontaneous leptogenesis. *Phys Rev D*, 2002, 65: 103511
 - 27 Li M Z, Zhang X M. k -essential leptogenesis. *Phys Lett B*, 2003, 573: 20–26
 - 28 Li H, Li M Z, Zhang X M. Gravitational leptogenesis and neutrino mass limit. *Phys Rev D*, 2004, 70: 047302
 - 29 Feng B, Li H, Li M Z, et al. Gravitational leptogenesis and its signatures in CMB. *Phys Lett B*, 2005, 620: 27–32
 - 30 Feng B, Li M Z, Xia J Q, et al. Searching for CPT violation with cosmic microwave background data from WMAP and BOOMERANG. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 221302
 - 31 Li M Z, Xia J Q, Li H, et al. Cosmological CPT violation, baryo/leptogenesis and CMB polarization. *Phys Lett B*, 2007, 651: 357–362

Origin of the matter-antimatter asymmetry of the universe

HUANG FaPeng¹, LI MingZhe², GU PeiHong³ & ZHANG XinMin¹

¹Theoretical Physics Division, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

²Interdisciplinary Center for Theoretical Study, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

³Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

The origin of the matter-antimatter asymmetry of the universe has been a long unsolved problem in cosmology and particle physics. Although it is challenging to solve this problem, our understanding on it becomes deeper with the improvement of the theoretical and experimental study. Firstly, we introduce the backgrounds of the matter-antimatter asymmetry of the universe and show the three necessary conditions to solve the problem. Then, we review the current status of our understanding on this problem with emphasis on those scenarios which can be tested in the experiments, including the electroweak baryogenesis, leptogenesis and gravitational baryogenesis. We hope the experiments in future can unravel the true baryogenesis scenario, which can explain the matter-antimatter asymmetry of the universe.

baryogenesis, electroweak phase transition, electroweak baryogenesis, leptogenesis

doi: 10.1360/N972016-00003



张新民

1991 年美国洛杉矶加州大学(UCLA)研究生毕业, 获博士学位. 1997 年入选中国科学院“百人计划”; 1999 年获国家杰出青年科学基金资助. 1998 年, 晋升为中国科学院高能物理研究所研究员, 博士生导师. 2004 年当选新世纪百千万人才工程国家级人选. 主要从事有效拉氏量和顶夸克物理, 中微子宇宙学、弱电相变及正反物质不对称的产生机制, 暗物质和暗能量等粒子物理和宇宙学的研究. 至今共发表学术论文 170 余篇, 共引用近 9000 次, 其中 21 篇论文单篇引用超过 100 次, 单篇(2004 年完成的)最高引用 800 余次.