从热质能到暗能量——暗能量起源的再探索

王海东, 过增元*

清华大学航天航空学院工程热物理研究所, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084

* 联系人, E-mail: demgzy@tsinghua.edu.cn

2020-01-30 收稿, 2020-03-20 修回, 2020-03-23 接受, 2020-03-23 网络版发表

国家自然科学基金(51976096)和国家千人计划青年项目资助

摘要 暗能量构成了我们已知宇宙物质的68%, 被成功用于解释目前标准宇宙模型中的宇宙加速膨胀现象. 但是, 学界对于暗能量的起源这一基本问题尚存在较大分歧, 成为宇宙学中最重要难题之一. 本文试图从热质理论出发, 基于能量守恒原理探索暗能量的起源. 热质理论是近年来传热学中发展的新理论, 其中包括热质、热质速度和热质能等新物理量. 热质是热量的相对论性质量, 热质能是相对论性能量. 在地球上的温度和压力条件下, 热质和热质能的量级远远小于物体的静质和静质能, 但在宇宙大爆炸后的初期, 温度可以达到 10^{15}°C 以上, 此时热质能可以与静质能相当, 甚至更大. 高品位的能量形式, 如电能、光能、机械能等在传递过程中会耗散为低品位的热能, 因此在热量(热质)的传递过程中, 热量(热质)的总量是守恒的, 但是热质能会耗散为一种更低品位的, “不可见”的能量. 该能量具有四个特点: 可以充盈整个空间, 具有极低的能量密度, 负压力, 随着时间逐渐增加. 这些特性与暗能量的性质吻合, 因此可以猜测暗能量来自于热质能的耗散, 它是宇宙加速膨胀的动力来源并构成了目前宇宙的主体.

关键词 暗能量, 热质, 热质能, 能量守恒

暗能量研究是目前宇宙学研究的前沿热点, 揭示暗能量的特性和起源有助于深刻理解宇宙的组成结构和演化规律. 宇宙中的能量传递和转换无处不在, 从能量传递的角度来思考暗能量的起源可以获得新的发现. 本文在热质理论的框架下阐明热质能和暗能量之间的关系, 提出了一种暗能量起源的合理途径.

1 宇宙中的暗能量

为了更好和较为完整地认识我们所生活的宇宙, 科学家们付出了巨大的努力. 从1609年伽利略最初仰望星空的简易望远镜^[1]到1990年发射入轨的哈勃望远镜(<https://www.nasa.gov/hubble-highlights>), 从1937年无线电工程师雷伯建立的第一台射电望远镜([http://abyss.](http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/radio_telescope.html)

[uoregon.edu/~js/glossary/radio_telescope.html](http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/radio_telescope.html))到2016年中国建成的世界最大500 m单口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope, FAST, <https://www.space.com/33357-china-largest-radio-telescope-alien-life.html>), 人们对浩瀚的宇宙看得更远也更清晰. 绚丽多彩的星云和早期的星体结构观测促使人们深入思考宇宙的构成和起源, 此时宇宙学同物理学紧密地联系在一起. 正如2019年度诺贝尔物理学奖获得者皮布尔斯教授在其*Principles of Physical Cosmology*(《物理宇宙学原理》)中所说: “Behind physics is the more ancient and honorable tradition of attempts to understand where the world came from, where it is going, and why^[2].” 物理学最本质的问题就是追寻宇宙的起源

引用格式: 王海东, 过增元. 从热质能到暗能量——暗能量起源的再探索. 科学通报, 2020, 65: 1610–1617

Wang H D, Guo Z Y. From thermomass energy to dark energy: Re-exploration to the origin of dark energy (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1610–1617, doi: 10.1360/TB-2020-0085

和演化规律。

物理宇宙学的里程碑式发展起源于爱因斯坦在1915年提出了著名的广义相对论场方程^[3]：

$$G_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu}, \quad (1)$$

其中 $G_{\mu\nu}$ 和 $T_{\mu\nu}$ 分别是爱因斯坦张量和能量-动量张量， G 是牛顿引力常数。场方程(1)说明了物质与能量如何决定时空的几何结构，确定空间如何弯曲。为了确保广义相对论场方程描述的是一个静态的宇宙模型，爱因斯坦在方程(1)的左边人为加入了宇宙常数项 $\lambda g_{\mu\nu}$ 来抵消引力收缩的趋势，形成了“有限无界的静态宇宙”模型。但是，1929年，哈勃发现了星系红移现象，并且星系的红移量与该星系的距离成正比关系，说明距离我们越远的星系在以更快的速度远离我们(<https://cosmology.carnegiescience.edu/timeline/1929>)。这个结果显然和静态宇宙模型不符，爱因斯坦思考后果断抛弃了宇宙常数项。20世纪末，人们对宇宙膨胀有了新的认识。三个独立的天文小组对标准烛光的Ia超新星亮度进行了观测，发现了宇宙加速膨胀的物理事实。因为发光物体的亮度与距离的平方呈反比例关系，如果超新星的亮度比均匀膨胀宇宙模型中距离平方的预测亮度更高，说明宇宙在减速膨胀，相反则说明宇宙在加速膨胀。1998年的观测结果显示，Ia超新星的亮度比均匀膨胀宇宙的预测更暗，证实了宇宙正在加速膨胀^[4]。1965年，美国贝尔实验室的工程师彭齐亚斯和威尔逊测量得到了充盈空间并且各向同性的宇宙微波辐射，宇宙背景辐射的存在与大爆炸理论相互契合，它就是由大爆炸后遗留火球发射的光子传递到地球而引起的，由微波背景辐射计算得到的宇宙能量密度与之前Ia超新星的观测结果一致(<https://www.space.com/33892-cosmic-microwave-background.html>, <http://www.jb.man.ac.uk/distance/frontiers/cmb/node11.htm>, <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/D/Density+Parameter>)。2013年，欧洲航天局用于测量宇宙微波背景辐射的普朗克卫星给出了较为精确的宇宙构成：4.9%的可见物质(宇宙中所有的恒星、原子气体、星系团高温气体等)、26.8%的暗物质和68.3%的暗能量(<https://newscenter.lbl.gov/2013/03/21/planck-results/>)^[5]。其中，暗能量不仅是造成宇宙加速膨胀的原始推动力，更是主宰未来宇宙命运的唯一参数^[6]。

虽然暗能量对于我们的宇宙如此重要，但是暗能量的重要性仅在宇宙尺度下才会显现出来。现代物理

宇宙学计算出维持宇宙加速膨胀的临界密度为 $\rho_c \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3$ ^[5,6]。暗物质和暗能量是宇宙的主要组成部分，其能量密度远远小于我们所熟悉的各种形式的能量。目前，用于观测宇宙大尺度结构、微波背景辐射、引力透镜效应等的诸多大实验装置都无法直接找到暗能量存在的证据。虽然缺乏实验数据，不过现代宇宙学模型给出了暗能量的基本特性：充满整个宇宙空间，能量密度极低，负压力和随时间逐渐积累。研究者对于暗能量的本质和起源还缺乏统一的理解和认识，真空能是解释暗能量本质的候选者之一^[7]。诺贝尔奖得主李政道教授曾解释过真空的物理含义：“真空是物理的相对论性的凝聚态，它虽然没有物质的态，但却是有作用的，也是可以激发的。”该理论认为，存在一种真空，能充斥整个宇宙并且占据主导地位，我们对暗能量的认识则与它相符合。另外，也有研究者认为，可以在宇宙学状态方程中引入一种标量场，用于解释宇宙加速膨胀^[8]。标量场理论允许暗能量存在不均匀，宇宙形成早期的辐射能密度下降到某一临界值以下将促使标量场产生作用，推动宇宙逐渐加速膨胀。还有研究者认为，光压也是暗能量的候选者之一。光压方程指出，光压的大小与加速度的四次方成正比，这意味着到达宇宙边缘的光压会驱动宇宙加速膨胀，从而符合目前的实验观测结果(https://www.science20.com/grand_unified_theoriesguts/blog/light_pressure_best_candidate_dark_energy-103541)。但很显然，目前任何一种暗能量的理论都还很很成熟，甚至也有科学家怀疑暗物质和暗能量是否真的存在，可能它们仅仅是我们把相对论原理无约束地推广到宇宙大尺度条件下而导致的矛盾^[9]。人们对于暗能量的起源和特性充满好奇，不断地探索造成暗能量源源不断地产生，抵消引力的同时造成宇宙膨胀的原因。

上述各种暗能量的理论都来自于对天体物理的研究，本文则是从地球上的自然现象出发，在研究热量传递规律时发现了新的能量形式，并与宇宙大爆炸演化过程相联系后，提出了关于暗能量来源的猜想。具体来讲，通过导热过程与导电过程的比拟，基于爱因斯坦的质能关系式提出了热质和热质能的概念，前者是相对论性质量，后者是相对论性能量，它是一种新的能量形式，从而揭示了热量具有能、质二象性，提出了传热学中的系列新物理量，并建立了相应的分析原理^[10-14]。在不可逆的传热过程中，热量(热质)守恒^[15,16]，热质能因耗散而不守恒。不同形式的能量具有不同的品位，在传

递过程中高品位的能量会耗散转换为低品位的能量, 这里所说的能量具有三个档次: (1) 电能、光能、机械能等; (2) 热能、热质能; (3) 暗能量. 它们的能量品位依次降低. 高品位的能量会转换为低品位的能量, 并且总量保持守恒, 因此热质能必然会耗散为另一种比热质能的品位更低的新能量. 李惕碚^[17]也曾介绍过“在热耗散过程中, 热质能到哪里去了”的问题. 宇宙演化过程中总是存在着热量传递过程, 从而不断产生由热质能耗散而来的这种品位更低的新能量, 我们猜想它就是宇宙中的暗能量.

2 热质和热质能

爱因斯坦相对论中给出了著名的质能关系式^[3]:

$$E = Mc^2 = \frac{M}{\sqrt{1-u^2/c^2}} \approx M_0c^2 + \frac{1}{2}M_0u^2, \quad (u \ll c), \quad (2)$$

其中 E 、 M 、 c 分别是能量、质量和真空中的光速, M_0 和 u 分别是物质的静质量和运动速度. 物体的质量等于静质量和相对论性质量之和, 物质的总能量是静质量具有的能量和相对论性能量之和. 对热能而言, 相对论性质量被定义为热质 M_h ^[10]:

$$M_h = \frac{E_{D0}}{c^2}, \quad (3)$$

其中 E_{D0} 是物质的内能, 下标 $D0$ 表示物质的体积; 热质 M_h 是物质内能的相对论性质量, 具有质量的单位(kg). 当物体的运动速度远小于光速的时候, 地球上热能的相对论性质量也远小于静质量. 因为热能具有相对论性质量, 当物体的温度升高时, 其质量(重量)会略有增加^[18]. 热质依附于静质量物质存在, 在导热过程中, 静质量物质可以认为是骨架, 热质气在其中发生定向运动形成热流. 不同材料(如气体、金属、电介质)具有不同的热质气压强和温度的关系式, 即热质气状态方程. 在电介质材料中, 由固体材料的德拜模型可以推导出固体中热质气的状态方程为

$$P_h = \gamma \frac{\partial E_{D0}}{\partial V} = \gamma p_h CT = \frac{\gamma \rho}{c^2} (CT)^2, \quad (4)$$

其中 P_h 是热质气压强, 单位是Pa; $\rho_h = \rho CT/c^2$ 是热质密度, 单位是kg/m³; C 、 ρ 和 T 分别是静质量物质的比热、密度和温度; γ 是材料的Grüneisen系数.

在传热过程中, 如果热流密度极高或者加热脉冲极短, 将导致热质的惯性作用不可忽略, 从而出现非傅里叶导热现象. 传热过程中热量守恒和非傅里叶导热

现象揭示了热量具有能、质二象性, 即热量在与其他形式能量转换的过程中表现为能量属性, 在传递过程中表现为质量属性. 热质理论把导热过程等效为热质的运动过程, 可以应用流体力学的分析方法描述热量传递(热质运动)的规律, 获得普适导热方程. 从方程(4)中可以看到, 热质的压力与温度的平方成正比, 因此温差将导致热质压力梯度的出现, 从而驱动热质气在多孔介质中的运动形成热流. 相比物体的静质量, 热质的质量很小, 热质压力和热质压力梯度也很小, 引起的影响通常难以被察觉. 热质压力梯度是导致热量传递的驱动力:

$$\frac{q}{c^2} = \rho_h u_h = \frac{\rho CT}{c^2} u_h, \quad \rho_h = \rho CT/c^2, \quad q = \rho CT u_h, \quad (5)$$

其中 u_h 是热质气的迁移速度, 单位是m/s; 热流 q 实际上就是热质气的质量流量, 可以理解热流的本质就是热质气的定向运动. 利用流体力学的分析方法, 可以写出热质气的质量和动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_h u_h) = 0, \quad (6)$$

$$\rho_h \frac{d}{dt} (\rho_h u_h) + \nabla P_h + f_h = 0, \quad (7)$$

其中 f_h 是热质运动的阻力项, 可以由多孔介质渗流的达西定律给出热质阻力的表达式, 即 $f_h = u_h 2\gamma c^2 \rho_h^2 C/\lambda$. 在一维条件下, 热质气的动量守恒方程可以简化为

$$\tau_h \left(\frac{\partial q}{\partial t} - \frac{q}{T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{q}{\rho CT} \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{q^2}{\rho CT^2} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + q = 0, \quad (8)$$

其中 λ 是材料的热导率, $\tau_h = \lambda/(2\gamma \rho C^2 T)$ 是热质运动的弛豫时间, 具有时间的单位(s), 方程(8)也被称为普适导热方程^[19]. 质能关系式和流体力学分析方法不受能量形式和传递过程等条件的限制, 由此建立的普适导热方程将明显区别于基于傅里叶导热定律等经验性方法建立的导热理论, 不会出现负温度和热扰动速度无限大等物理悖论, 可以适用于纳米材料、超快速加热、极高热流密度等多种极端导热条件下的热分析和热设计. 方程(8)中包含空间和时间惯性项, 如果空间惯性项被忽略, 它将退化为可以用来描述热波现象的Cattaneo-Vernotte模型:

$$\tau_h \frac{\partial q}{\partial t} + \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + q = 0. \quad (9)$$

如果时间惯性项被忽略, 它将成为稳态的非傅里

叶导热方程:

$$\lambda \left(1 - \frac{q^2}{2\gamma\rho^2 C^3 T^3} \right) \frac{dT}{dx} + q = 0, \quad (10)$$

其中等号左侧括号中显示的是热质的空间惯性项。在常规的热流和温度条件下, 热质的空间惯性作用通常可以被忽略, 但是在纳米材料中, 热流密度可以达到 10^{10} W/m^2 以上, 此时热质运动的惯性作用将不可忽略, 导致稳态条件下也出现显著的非傅里叶导热现象。如果方程(8)中的时间和空间惯性项都被忽略, 它将退化为经典的傅里叶导热方程:

$$\lambda \frac{dT}{dx} + q = 0, \quad (11)$$

这也说明热质理论与现有的热波模型、傅里叶导热模型是相容的, 揭示傅里叶导热方程的物理本质是忽略热质惯性作用条件下, 热质驱动力和阻力的平衡方程式。

由于地球上物体的温度不可能很高, 因此物体中的热质质量很小, 无法通过直接测量的方法验证热质的存在。但是, 纳米材料在极高热流密度条件下因为热质惯性作用的存在将出现非傅里叶导热现象, 通过测量非傅里叶导热效应就能间接证明热质的存在。我们加工制备了 76 nm 厚、300 nm 宽、10 μm 长的金纳米线, 放置于 3 K 的低温环境中通电, 实现了最大 $1.83 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ 的热流密度。金纳米线的平均温度测量值比傅里叶导热定律的预测值高出约 20 K, 出现了明显的非傅里叶导热现象, 这是由热质气的空间惯性作用导致的, 间接证明了热质理论的正确性^[20]。

热质作为一种相对论性质量, 同静质量一样, 放置于“场”中拥有势能, 当它运动时拥有动能。温度为 T 、比热常数为 C 、静质量为 M_0 的物质所拥有的热质为 $M_h = M_0 CT / 2c^2$ (分母中系数 2 是为了同公式(14)中的“焓”类比而引入的)。和静质量 M_0 一样, 相对论性质量 M_h 在温度场中拥有的热质势能可以计算为

$$E_{hp} = M_h CT = \frac{E_{D0}}{2c^2} CT = \frac{M_0 CT}{2c^2} CT, \quad (12)$$

其中下标 p 表示势能。类似地, 相对论性质量 M_h 拥有的热质动能为

$$E_{hk} = \frac{M_h u_h^2}{2} = \frac{E_{D0} u_h^2}{2c^2} = \frac{M_0 CT u_h^2}{2c^2}, \quad (13)$$

其中下标 k 表示动能, E_h 具有能量的单位(J)。 E_{hp} 和 E_{hk} 均为相对论性能量, 并且可以相互转换。这完全类似于重

力场中的水流: 水从高处流下时, 势能减小, 动能增加, 水流的总能量保持守恒。热质在具有温度梯度的热场中运动时, 热质的势能减小, 动能增加, 在可逆条件下总热质能保持守恒。

根据能量的守恒和梯级利用原理, 在热量传递过程中, 热质能的耗散必然形成另一种比热质能的品位更低的未知形式的新能量。地球上的热质能绝对数量极少, 难以被直接测量, 因此由热质能耗散形成的未知形式能量也无法被直接识别或探测, 故可称其为地球上的“暗能量”。由于宇宙演化过程中总是存在着温度不均匀导致的热量传递过程以及热质能的耗散, 因此我们猜想宇宙中的暗能量就是由热质能不断耗散而来的品位更低的新能量。

鉴于熵产分析不适用于传热过程的分析与优化, 通过把导热过程与导电过程类比, 引入了一个新物理量“焓” G , 单位是 JK:

$$G = E_{D0} T / 2 = M_0 CT^2 / 2. \quad (14)$$

对比公式(12)和(14)可以发现, 热质势能同焓的定义式仅相差一个常数 C/c^2 , 所以焓就是热质势能的简化表达式。焓的耗散率是传热过程不可逆性的度量, 焓耗散热阻最小时, 传热过程的性能最优。最小焓耗散(热质能耗散)热阻原理已经被广泛用于换热器及其网络的优化设计, 取得了良好的经济效益, 因此也间接地证实了热质势能的存在及其应用价值^[21-24]。

3 宇宙大爆炸理论和热质能耗散

虽然地球表面的热质和热质能在量级上远小于静质和静质能, 但当我们把视线投向宇宙尺度时, 在宇宙形成的初期, 热质和热质能在量级上同静质和静质能可以相当甚至更大。宇宙大爆炸理论是目前被普遍接受的宇宙学模型, 获得了科学观察最为广泛且精确的支持(<https://www.livescience.com/65700-big-bang-theory.html>)。本文在第一部分中提及的红移现象、宇宙背景微波辐射、暗能量等均与大爆炸的宇宙学模型紧密相关。大爆炸的观点认为, 宇宙在过去的有限时间之前, 由一个密度极大、温度极高的奇点爆发演变而来。目前普朗克卫星得到的精确观测结果指出, 宇宙大爆炸距今约 138 亿年, 其间宇宙在不断膨胀和演化。

图1显示了宇宙大爆炸后时间和温度的演化过程, 其中 $\varepsilon = E_h / E_0$ 是热质能与热能之比。可以看到, 在大爆炸初期, 宇宙中心奇点的温度极高, 达到 10^{32} K , 此时宇宙

图1 (网络版彩色)宇宙大爆炸后的时间和温度演化(<https://www.universetoday.com/54756/what-is-the-big-bang-theory/>)

Figure 1 (Color online) Evolution of time and temperature after the Big Bang (<https://www.universetoday.com/54756/what-is-the-big-bang-theory/>)

处于密度和温度极高的相态, 能量密度极大, 原子、电子等基本粒子都尚无形成。此时热质能远大于热能, 其比值 ϵ 达到 10^{18} 。随后, 宇宙在极短的时间内呈指数级膨胀, 温度和密度迅速下降, 热质能同热能的比值也迅速下降。此时基本粒子已经形成, 各种粒子都在发生高速随机的运动和碰撞。随着温度继续降低, 宇宙的能量水平也继续下降, 重质量的粒子得以形成, 经过漫长的演化最终形成了气体云、恒星、星系等我们可观察到的宇宙结构。在宇宙大爆炸的演化过程中, 各种高能物质和粒子之间必然发生热量的传递和转换, 而在传热过程中热质能将不可避免地耗散为品位更低的其他形式的新能量。由热质能耗散而来的能量形式应该具有以下几个特点: 充满宇宙空间, 能量密度极低但总量巨大, 随着宇宙爆炸膨胀而具有斥力(负压)特性, 随时间演化不断累积增加。以上几个特点与宇宙中的暗能量属性相符合, 因此可以合理地猜测热质能耗散形成的能量就是暗能量, 它构成了目前我们已知宇宙的主

体, 并且随着热质能的耗散而不断累积, 从而成为造成宇宙加速膨胀的根本原因。

图2所示为基于热质理论给出的暗能量起源猜想。宇宙大爆炸的初期, 温度和能量密度极高, 随后空间迅速膨胀, 辐射(光子)可逆地转换为各种实物粒子, 温度和能量密度快速下降, 热质能在重子物质间的传热过程中不可逆地耗散成为暗能量。在宇宙不断演化的进程中, 伴随着传热过程, 热质能源源不断地耗散为具有斥力(负压)的暗能量, 促使宇宙加速膨胀。热质能的耗散为暗能量的起源提供了一个较为合理的依据, 也成功地揭示了热质能耗散的去向, 形成理论自洽。同现有的几种暗能量起源的解释(如真空能、标量场理论、光压等微观的粒子理论)相比, 热质势能耗散模型是基于宇宙中普遍存在的, 但未被考虑的热量传递过程而提出的宏观理论, 具有更加明确的物理意义。这是因为热质理论在非傅里叶导热实验、换热器结构设计和传热过程优化等工程领域中获得了证实和应用, 具有可

靠的工程实验基础。未来我们将继续建立热质势能耗散和暗能量之间的定量数学模型, 深入探索暗能量的基本属性, 可望进一步完善宇宙尺度下的热质理论。

4 小结

本文基于热质理论, 从能量传递的角度对暗能量的起源提出了新的见解, 结论总结如下:

(1) 暗能量问题的相关研究成为目前探索宇宙起源、了解宇宙结构和本质的关键问题, 但是无论是天文观测, 还是理论研究, 对暗能量的起源及其性质都还没有达成广泛共识。

(2) 热量本质的进一步研究表明, 热量具有能、质二象性, 即热量在同其他形式能量转换的过程中表现为能量属性, 在传递过程中则表现为质量属性。热质在热场中具有热质势能, 在传递时具有热质动能, 它们都是相对论性能量。

(3) 在不可逆的传热过程中, 热质(热量)守恒, 而热质能则因耗散而不守恒。根据能量的守恒原理, 热质能必然耗散为一种更低品位的, “不可见”的, 并且因数量级很小而难以直接测量的能量, 故可称其为地球上的“暗能量”。然而, 在大爆炸初期, 热质能的数量级很大。

图2 (网络版彩色)暗能量起源的猜想

Figure 2 (Color online) Supposition of the dark energy origin

(4) 现有宇宙演化理论都只是讨论辐射逐渐转换为实物粒子、气体和星体, 涉及热量的传递。然而, 在宇宙演化过程中, 各种物质之间和物质内部温度必然不均匀, 必然存在热量的传递, 从而导致热质能的耗散。

(5) 同样在宇宙尺度下, 热质能必然耗散并转换为另一种能量形式, 而且它具有充满整个空间、能量密度极低、负压力和随时间不断积累等属性, 因而猜想暗能量的来源是热质能的耗散。

参考文献

- 1 This Month in Physics History, May 1609: Galileo First Hears About the Telescope. APS News, APS Physics, 2001, 10
- 2 Peebles P J E. Principles of Physical Cosmology. Princeton: Princeton University Press, 1993
- 3 Einstein A. Relativity: The Special and the General Theory, A Clear Explanation That Anyone Can Understand. Newton: Gramercy, 1988
- 4 Kirshner R P. Supernovae, an accelerating universe and the cosmological constant. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, 96: 4224–4227
- 5 Hodson R. The dark universe. *Nature*, 2016, 537: S193
- 6 Xiao Y. Capture dark energy: Dark energy dominates the universe's destiny (in Chinese). *Nat Tech*, 2014, 1: 24–31 [小月. 捕捉暗能量——暗能量主宰宇宙命运. *自然与科技*, 2014, 1: 24–31]
- 7 Lee T D, Liu H Z. Anthology of Tsung Dao Lee (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang Literature and Art Press, 1999 [李政道, 柳怀祖. 李政道文录. 杭州: 浙江文艺出版社, 1999]
- 8 Chang H Y. Scalar field models for dark energy. Doctor Dissertation. Nashville: Vanderbilt University, 2014
- 9 Wu X P. The origin and perplexity of dark matter and dark energy in astronomy (in Chinese). *Physics*, 2015, 44: 411–417 [武向平. 天文学中的暗物质和暗能量问题之由来和困惑. *物理*, 2015, 44: 411–417]
- 10 Wang H D. Theoretical and experimental studies on non-Fourier heat conduction based on thermomass theory. In: Recognizing Outstanding PhD Research. New York: Springer, 2014
- 11 Wang M R, Cao B Y, Guo Z Y. General heat conduction equations based on the thermomass theory. *Front Heat Mass Transf*, 2010, 1: 013004
- 12 Dong Y, Guo Z Y. Entropy analyses for hyperbolic heat conduction based on the thermomass model. *Int J Heat Mass Transf*, 2011, 54: 1924–1929
- 13 Dong Y, Cao B Y, Guo Z Y. Thermomass theory: A mechanical pathway to analyze anomalous heat conduction in nanomaterials. In: Vakhurshev A, ed. *Nanomechanics*. Rijeka: IntechOpen, 2017
- 14 Dong Y, Cao B Y, Guo Z Y. General expression for entropy production in transport processes based on the thermomass model. *Phys Rev E*, 2012, 85: 061107
- 15 Kenney W F. Energy Conservation in the Process Industries. Cambridge: Academic Press, 1984
- 16 Martin H S. Continuum Mechanics Modelling of Material Behavior. Cambridge: Academic Press, 2018

- 17 Li T P, Wu M. Photons, thermodynamics, and expanding universe (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3306–3312 [李惕碚, 吴枚. 光子、热力学与膨胀宇宙. 科学通报, 2015, 60: 3306–3312]
- 18 Feynman R P. *The Feynman Lectures on Physics*. New York: Pearson P T R Press, 1970
- 19 Dong Y, Cao B Y, Guo Z Y. Generalized heat conduction laws based on thermomass theory and phonon hydrodynamics. *J Appl Phys*, 2011, 110: 063504
- 20 Wang H D, Liu J H, Guo Z Y, et al. Non-Fourier heat conduction study for steady states in metallic nanofilms. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 3239–3243
- 21 Liang X G, Chen Q, Guo Z Y. *Entransy Theory for Heat Transfer Analysis and Optimizations* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2019 [梁新刚, 陈群, 过增元. 传热熵理论及其应用. 北京: 科学出版社, 2019]
- 22 Yu Z Q, Wang P, Zhou W J, et al. Study on the consistency between field synergy principle and entransy dissipation extremum principle. *Int J Heat Mass Transf*, 2018, 116: 621–634
- 23 Cheng X T, Liang X G, Guo Z Y. Entransy decrease principle of heat transfer in an isolated system. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 847–854
- 24 Guo Z Y, Zhu H Y, Liang X G. Entransy—A physical quantity describing heat transfer ability. *Int J Heat Mass Transf*, 2007, 50: 2545–2556

Summary for “从热质能到暗能量——暗能量起源的再探索”

From thermomass energy to dark energy: Re-exploration to the origin of dark energy

Haidong Wang & Zengyuan Guo^{*}

Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Institute of Engineering Thermophysics, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

^{*} Corresponding author, E-mail: demgzy@tsinghua.edu.cn

Dark energy constitutes 68% of the matter of our universe, which has been successfully used in the standard cosmological model to explain the phenomenon of cosmic acceleration. However, the scholars still have different opinions in the origin of dark energy, making it one of the most important unsolved problems in the modern cosmology. There are several candidates to explain the origin of dark energy, such as vacuum energy, scalar field theory, light pressure, etc. However, all these models are still in debate and we are far from a commonly agreed theory to understand the true nature of dark energy. In this report, we intend to re-explore some fundamental properties and the origin of dark energy from the perspective of thermomass theory in the framework of energy conservation principle. Thermomass theory is a newly developed theory in the field of heat transfer, including some new physical quantities, such as thermomass, thermomass velocity, thermomass energy, etc. Thermomass is the relativistic mass of heat and thermomass energy is the relativistic energy. Based on the thermomass theory, the heat transfer can be understood as the direct flow of thermomass under a certain temperature gradient. Then the principle of fluid mechanics can be used to solve the heat transfer problems and a general heat conduction law has been established. Some non-Fourier heat transfer phenomena under the extreme conditions, such as ultrafast laser heating, ultrahigh heat flux at nanoscales, can be well explained by using the general heat conduction law. Meanwhile, a simplified expression of thermomass energy was defined as entransy. Guided by a minimum entransy dissipation principle, the structure of a complicated heat exchanger network can be optimized to increase the energy efficiency. Both the general heat conduction law and entransy model have been experimentally validated. The thermomass theory have been widely accepted and applied in the field of thermal science. But a question still remains: The thermomass energy dissipates during the heat transfer process, where does it go? Actually, we find an answer that the dissipated thermomass energy is closely related with the dark energy. Under the normal temperature and pressure conditions, the order of magnitude of thermomass and its energy is much smaller than that of the static mass and its energy. In the beginning of the Big Bang, the temperature exceeds 10^{15}°C and the thermomass energy equals to or even is larger than the energy of static mass. According to the energy conservation principle, the energy at high level, i.e., electrical energy, optical energy, mechanical energy, etc., will dissipate into the energy at low level, i.e., heat. But in the heat transfer process, heat (thermomass) is conserved, while the thermomass energy will dissipate into a lower level, “invisible” energy. This kind of energy has four features: Filling the whole space, ultra-low energy density, negative pressure and gradually accumulated with time. All these features are in consistence with the performance of dark energy. Hence, we hypothesize that the dark energy comes from the dissipated thermomass energy, which is the motivating force of the cosmic acceleration and forms the main body of our universe.

dark energy, thermomass, thermomass energy, energy conservation

doi: [10.1360/TB-2020-0085](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0085)