

# Review of the Mysteries of Galactic Dark Matter

Jianqi Shen

College of Optical Science and Engineering, Yuquan Campus, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang  
Email: jqshen@zju.edu.cn

Received: Jun. 14<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2018; published: Jul. 9<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In galactic rotational dynamics, a galaxy cannot be gravitationally bound only by its luminous baryonic matter mass. There have been two mysteries in galactic rotation, *i.e.*, galactic flat rotation curves and baryonic Tully-Fisher relation. In order to interpret these two mysteries, physicists and astrophysicists have suggested three strategies for galactic rotational dynamics, *i.e.*, non-baryonic dark matter, modified dynamics and modified theories of gravity. We will briefly discuss these three strategies for the galactic dark matter mysteries.

## Keywords

Dark Matter, Galactic Rotational Dynamics, Modified Gravity

---

# 星系暗物质之谜及其研究现状

沈建其

浙江大学玉泉光电学院, 浙江 杭州  
Email: jqshen@zju.edu.cn

收稿日期: 2018年6月14日; 录用日期: 2018年7月2日; 发布日期: 2018年7月9日

---

## 摘要

由星系转动动力学可知, 星系中的发光重子物质其质量过于微小, 由它所产生的引力不足以束缚整个星系的转动, 由此导致星系平坦转动曲线之谜与星系重子Tully-Fisher关系之谜。为了解释此二谜, 物理学家和天文学家提出了三家应对之策, 分别是非重子暗物质解释、修改的动力学解释与修改的引力理论解释。本文简要评述了此三家学说之研究现状。

## 关键词

暗物质, 星系转动力学, 修改的引力理论

Copyright © 2018 by author 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

尽管爱因斯坦广义相对论在太阳系引力物理(如引力红移、星光弯曲、水星近日点进动、雷达回波延迟)以及现代天体物理(致密天体物性、引力波检测)和宇宙学中取得巨大成功,但目前在星系物理和宇宙学中还存在若干未解之谜,这些谜还无法用广义相对论来给出确定无疑的解释。在所有这些未解之谜之中,星系暗物质之谜无疑最为尖锐。由此,在引力物理学中造成了多家新理论之间的竞争,它们不但挑战广义相对论,而且彼此之间也战得不可开交。正当这些新理论之间竞争得难解难分之时,最近一个意外事件却对裁决这场竞争几乎有一锤之音之功。

2017年10月16日,美国和欧洲的引力波天文台合作组以及包括中国的空间X射线天文卫星慧眼望远镜和南极巡天望远镜在内的全世界70多家电磁波天文台联合宣布,位于美国的Advanced LIGO和位于意大利的Advanced Virgo两个激光干涉引力波探测仪合作组在2017年8月17日世界标准时间(UTC)12:41:04探测到了来自距地球40兆秒差距(大约1.3亿光年)外长蛇座内NGC4993星系内质量分别为0.86和2.26倍太阳质量的两个中子星合并所产生的引力波信号(称为GW170817) [1] [2] [3] [4]。自2015年9月14日起的两年内被美国LIGO引力波干涉仪探测到的几次引力波信号都来自双黑洞合并,故本次属人类历史上首次探测到来自双中子星合并的引力波信号。本次探测还有一个意外之喜,即在引力波信号到达后的1.7秒,美国宇航局NASA费米伽玛射线太空望远镜上的伽玛射线爆发监测系统GBM接收到了与本次双中子星合并事件有关联的伽玛射线爆发信号(称为GRB170817A) [4]。根据以上提示,此后几天,全世界多家电磁波天文台也相继探测到了该双中子星合并所发射的电磁波信号(如伽玛射线、X光、紫外、红外和射电等波段信号)。此表明来自双中子星合并产生的引力波与电磁波穿越1.3亿光年的星辰大海旅程造访了地球。我们知道,在1.3亿光年长途跋涉路程当中,宇宙本身也在加速膨胀,星系与星系之间的距离也一直在被拉离;这一广袤宇宙尺度分布有星系、星系群和星系团甚至可能包括宇宙空洞和星系长城等结构,牵涉尺度巨大,时空不再能被看作平直,电磁波及引力波的传播路径会因为这些时空结构发生弯曲导致“雷达回波延迟”效应和引力透镜效应,但是尽管如此,此次引力波信号与电磁波信号在宇宙空间传播了1.3亿年(折合为大约 $4 \times 10^{15}$ 秒),两者以仅仅相差1.7秒先后到达地球,这充分说明引力波与电磁波从1.3亿光年外的同一源点出发、以相等速度紧紧相随、高精度地沿着同一轨迹在传播着。这一看似简单的“双星使”事件,其影响却甚为深远,如它对当前喧嚣尘上、众说纷纭的诸引力理论有几乎一锤定音的判决意义!

诸引力理论主要起源于暗物质之谜。最近三四十年,面对着天体物理、宇宙学以及粒子物理学诸多之谜,如暗物质、宇宙暴涨、宇宙加速膨胀与暗能量等,各种其它引力理论都如雨后春笋一般冒出来,并与爱因斯坦广义相对论引力理论及基于此的标准宇宙学进行竞争。本文以星系暗物质研究为线索,将简述部分有代表性的引力理论。

本文内涉及理论和人名较多。对于常见人名用中文表示,对一般人而言属于非特别常见的人名则用

英文表示；一些新理论名称与关键术语由于并无名词审定委员会审定，故有时仍旧沿用英文。这样也有利于感兴趣的读者可以根据这些英文名词很快检索到对应文献。

## 2. 星系暗物质之谜与三家应对之策

1934年，瑞士天文学家兹威基发现，用引力的方法即维里定理计算出来的星系总质量(维里质量)远远大于用光度观察计算出来的光度质量，用这两种方法算出来的两种质量之间的比值可以达到160，也即说明星系中的99%以上的物质无处寻觅[5][6]。因此他宣称，星系中的大部分物质是看不见的。当时该问题被称为“失踪质量”之谜。经现代更高精度观察，虽然这个比值不再是兹威基所计算的160倍那么多，但也充分证明星系和星系团中八九成以上的物质确实是看不见的，即它们仅仅表现为强大的引力，但是并不辐射任何电磁波。利用多普勒效应可以测量星系转动速度。按照一般观点，如果牛顿引力定律正确，那么星系转动速度应该随半径增大逐渐下降(即开普勒转动曲线)。但是在1970年代美国女天文学家鲁宾发现星系内离星系中心不同半径距离处的气体围绕星系中心的转动速度几乎为常数，这也佐证了兹威基的发现，并造就了新谜，即星系平坦转动曲线之谜[7][8]。显然，星系这种高速转动也需要依靠“失踪质量”的强大引力来维持平衡。自1970年代超对称理论(即认为每一种费米子都有一种相同质量的玻色子与之对应)的建立以及对突破粒子物理学标准模型(弱电统一理论和量子色动力学)的渴望，天体物理学内的“失踪质量”之谜也被称为“暗物质”之谜。这种暗物质的特点是不参与电磁相互作用，因为它们不发光，也不发生其它任何电磁辐射，因此它们不可能由质子中子这样的普通重子构成的。我们对星系中九成以上的物质竟然一无所知。

在星系中，物质满足低速弱场近似条件，故而可以假设牛顿力学仍旧适用。我们先来初步考察这个星系暗物质问题。如果设星系质量为 $M(r)$ ，根据牛顿力学，星系中的受力物体(如恒星、气体和尘埃)遵守方程 $GM(r)/r^2 = f(a)$ 。这里 $a$ 为向心加速度( $a = v^2/r$ )。在牛顿力学中，方程右边 $f(a) = a$ 。一般先把 $M(r)$ 当作是星系光度质量，也即可见重子物质的质量。可见重子物质质量可以利用光学方法即探测物质的电磁辐射强度来获悉。根据兹威基的发现，我们知道左边的 $GM(r)/r^2$ 太小，右边的 $a = v^2/r$ 太大(右边的 $a = v^2/r$ 比左边的 $GM(r)/r^2$ 大一个数量级)，方程显然不能平衡，也即环绕星系中心公转的星系物质是会被高速公转甩出去的，但实际上星系转动是很稳定的。为了解决此谜，在20世纪物理学家和天文学家提出了三家应对之策，分别是(非重子)暗物质解释、修改的动力学解释、修改的引力理论解释。这实际上相当于是对上述无法平衡的运动方程 $GM(r)/r^2 = f(a)$ 进行三种不同方式的修改，以求其平衡。下面分别简述这三家应对之策：

第一种解释即(非重子)暗物质解释，其不颠覆传统经典力学与引力理论[9]，只是认为星系暗晕内有不发光的其它物质存在，也就是运动方程 $GM(r)/r^2 = a$ 左边的普通可见重子质量 $M(r)$ 上还应添加九倍以上的不可见的失踪质量。失踪质量参与引力相互作用，将整个星系或星系团束缚在一起。我们可以通过其引力效应知道其存在，但用光学电磁方法却测不到其存在。在兹威基时代，当时粒子物理学尚处于幼年时期，那时所能知道的物质也就是质子中子电子等普通物质粒子。当时认为这种星系失踪质量可能是由一些高度电离的气体构成(如氢氦离子)，它们因为电子被剥离，不再能发生电子跃迁，故不再发光。后来(在1970年代)场论中超对称被发现，认为这种失踪质量可能是超对称粒子，于是星系内的“失踪质量”概念被上升为“暗物质”概念。暗物质是不参与电磁相互作用(不发生电磁辐射故而不可见)但参与引力相互作用的物质，而且根据星系转动动力学以及宇宙学观察，它们属于冷暗物质(即它们是非相对论物质，至少应该有今天宇宙微波背景辐射2.7开尔文温度所对应的静止质量 $k_B T/c^2$ ，或至少要有0.1毫电子伏特质量)。暗物质解释可分为“重子暗物质说”与“非重子暗物质说”。重子暗物质说中的暗物质候选者包含各种死亡恒星、中子星、黑洞等所谓“大质量致密晕天体”以及高度电离(高温炽热)的氢氦离子气体

等;非重子暗物质说的暗物质候选者也即大质量弱作用粒子 WIMPs,例如最轻超对称粒子、惰性中微子、轴子与高维粒子等[9]。目前“重子暗物质说”已经被排除,但非重子暗物质(即大质量弱作用粒子)还未被探测到。

第二种解释是 MOND,其全称是 Modified Newtonian Dynamics 即修改的牛顿动力学。在这种理论中,不需要上述各种暗物质粒子假设,因此它需要修改、颠覆牛顿力学[10]-[16],也即在上述力平衡方程  $GM/r^2 = f(a)$  中,方程左边引力部分仍属于牛顿引力( $M$  为普通发光重子物质质量),要求方程右边加速度  $a$  的函数  $f(a)$  作修改:希望它在大加速度时  $f(a) \rightarrow a$  (这样仍旧与传统理论一致),但在小加速度时,  $f(a) \rightarrow a^2/a_0$ 。这里  $a_0$  是由 Milgrom 引入的一个特征加速度(常数,  $a_0$  的数量级为  $10^{-10} \text{ m/s}^2$ )。以色列学者 Milgrom 在 1983 年首先提出这样的方案。那么  $f(a)$  函数的具体形式是什么?很明显,我们随手就可以写出无穷多个满足这样性状的  $f(a)$  函数,如最简单的就是  $f(a) = a/(1+a_0/a)$ 。在星系中,引力加速度小于特征加速度  $a_0$ ,该  $f(a)$  函数可以得到 MOND 极限  $f(a) \rightarrow a^2/a_0$ 。我们经过简单的运算可以发现,在 Milgrom 的 MOND 理论中,星系转动速度平方为  $v^2 = \sqrt{GMa_0}$ ,它确实是一个常数,与星系中心的距离  $r$  无关,由此解释了 1970 年代鲁宾发现的星系平坦转动曲线规律;又由于该公式显示星系转动速度与可见重子物质质量  $M$  的平方根成正比,此也即星系 Tully-Fisher 关系。因此星系平坦转动曲线规律和星系 Tully-Fisher 关系都在 Milgrom 的 MOND 理论中自动得到解释,真可谓一举两得。前面我们指出,力平衡方程  $GM/r^2 = f(a)$  中,这样性状的  $f(a)$  函数有无穷多个,因此这类理论变得不确定、理论方案不具有唯一性,反而失去了魅力。克服这个问题的方法是要先将它相对论化,产生更多约束,从而得到几乎唯一的  $f(a)$  函数。直接要将“修正的牛顿力学”  $f(a)$  相对论化,是颇难的。所以,物理学家们反其道而行之,先求  $GM/r^2 = f(a)$  的反函数,得到  $a = F(GM/r^2)$ 。这里  $F$  是  $GM/r^2$  的函数。这个形式看起来仍旧保留了牛顿动力学(因而狭义相对论动力学也仍旧保留),但是引力理论要修正,也即  $F(GM/r^2)$  不再等于原先简单的牛顿引力场  $GM/r^2$ 。由于牛顿引力是爱因斯坦广义相对论的弱场近似,故要修改牛顿引力论,也等价于要修改广义相对论基本方程。这样的理论已经有,如以色列物理学家 Bekenstein 在 2004 年曾提出了一个相对论 MOND 理论,此理论属于张量-矢量-标量理论,引入了一些额外的标量、矢量场,使得与物质产生一些额外的耦合,对广义相对论动了一些手术,如推广了度规或在度规上添加了一些项,其形式颇为复杂,最终 Bekenstein 推出了 Milgrom 的 MOND 理论结果[17][18]。

第三种解释即要求修改广义相对论引力理论。在此类理论中,也不需要各种暗物质假设[19][20][21][22][23]。该类理论认为在星系尺度(十万光年距离)上牛顿引力论不再成立。读者需要注意此处的“修改的牛顿引力论”与前述第二种解释中的“修改的牛顿动力学”的区别。由于牛顿引力是爱因斯坦广义相对论引力理论的一级近似,既然要修改牛顿引力,那就要先修改广义相对论。虽然上面第二种解释(Milgrom 的 MOND 理论的相对论版本)也要求修改广义相对论引力理论,但这里所说的第三种解释却有修改引力理论的其它诸多原因和研究背景,方法路子也各出奇招;各路理论众说纷纭、喧嚣尘上,让人应接不暇[19][20][21][22][23]。这些理论往往在宇宙学中牛刀小试(这是起码的要求)后,就希望在“星系暗物质”这块硬骨头中再一显身手。它们中的一些理论确实证明,在一定的条件下,引力不再是与距离平方成反比,而是与距离的一次方成反比,如引力场强可以为  $g = A/r$ ,那么在转动力学中,它等于向心加速度  $v^2/r$ ,则星系转动速度  $v$  为常数,这就解释了星系平坦转动曲线。但是根据本人的调研发现这些理论基本上都在解释星系 Tully-Fisher 关系上纷纷跌落马来。在引力物理学中,Tully-Fisher 关系可以用  $v^2 = \sqrt{GMa_0}$  表示(这是物理学家表述。但在天文学和天体物理学中,一般是用直接可测的星系光度和多普勒红移来表示 Tully-Fisher 关系的)。1977 年 Tully 和 Fisher 利用氢原子 21 厘米光谱线的多普勒频率移动效应来研究涡旋星系转动,发现星系转动速度  $v$  与星系光度  $L$  的四分之一次方成正比,即  $v \propto L^{1/4}$ 。由于涡旋星系有普适的质光比,星系光度  $L$  与星系可见(发光)重子质量  $M$  成正比,所以 Tully-Fisher 关系

也可以写为  $v \propto L^{1/4}$  (故而在 Milgrom 的 MOND 理论中, 它被写为  $v^2 = \sqrt{GMa_0}$ )。星系 Tully-Fisher 关系背后之谜虽然还没有被解开, 但由于它的精确性, 它在测量遥远星系与我们太阳系之间的距离中用途很大: 由于星系转动速度可以用氢原子 21 厘米光谱线的多普勒频率移动效应来测量, 借助 Tully-Fisher 关系 ( $v \propto L^{1/4}$ ), 可以算出星系真实光度  $L$ , 我们在地球上可以测到星系表观光度, 将表观光度与真实光度比较, 可以算出遥远星系与我们之间的距离。但在星系暗物质模型中, 我们对 Tully-Fisher 关系感到匪夷所思。在涡旋星系中, 星系暗物质的总质量是星系发光重子物质  $M$  的六到十倍(在椭圆星系中, 这个比值可能还要更高), 按理来说, 星系转动速度大小 ( $v$ ) 主要由大质量的星系暗物质来决定, 但在 Tully-Fisher 关系  $v^2 = \sqrt{GMa_0}$  中, 星系转动速度  $v$  却是由小质量的星系发光重子物质  $M$  来决定, 这令人惊讶。这就好比一个人能不能买得起住房, 不由他的几百万财产决定, 而由其中的零头小钱决定。所以, 无论是暗物质模型还是修改的引力理论模型, 都无法解释 Tully-Fisher 关系。目前只有 MOND 理论可以解释 Tully-Fisher 关系, 但 MOND 理论只是一个假设, 要揭示出其本质, 至少也要先写为相对论版本。其背后的相对论版本虽然有, 如 Bekenstein 在 2004 年提出的张量-矢量-标量理论[17]。但该理论过于复杂而显得不自然, 看起来像是一个拼凑起来的理论。该理论与后面将要提及的由 Moffat 提出于 2005 年的标量-张量-矢量引力理论[19] [20] [21] [22] [23]有部分类似的数学结构。

由于星系平坦转动曲线之谜与星系重子 Tully-Fisher 关系之谜可能真的源于非重子暗物质, 并非一定属于“修改的引力理论”效应, 因此这些与广义相对论竞争的新引力理论[17]-[23]即使在解释 Tully-Fisher 关系上铩羽而归但并不丢脸, 它们完全可以宣称其它有场合(如引力-规范统一、引力场量子化等)需要它们这些理论, 因此它们可以继续死而不僵, 吸引一批信徒来追随。也有个别理论(如 Moffat 的标量-张量-矢量引力理论[19] [20] [21] [22] [23])自认为自己可以得到一个星系转动速度与可见重子质量关系如  $v^2 \propto M^\alpha$ , 最终虽无法确定  $\alpha$  就是 1/2 从而得到 Tully-Fisher 关系 ( $v^2 \propto M^{1/2}$ ), 但也算自认为自己取得了胜利。另外, 这些“修改的引力理论”在宇宙学中也有其活动范围。我们知道, 宇宙演化历史可以分为五个阶段: 量子宇宙学时代(从宇宙诞生时的  $10^{-43}$  秒到  $10^{-35}$  秒)、宇宙暴涨时代(宇宙时从  $10^{-35}$  秒到  $10^{-31}$  秒)、热辐射为主时代(宇宙时从  $10^{-31}$  秒到  $10^{12}$  秒)、零压物质为主时代(宇宙年龄从  $10^{12}$  秒即几万年到 60 亿年)、现今的宇宙加速膨胀时代(宇宙年龄从 60 亿年到当今 137 亿年)。其中甚早期暴涨时代与现今的加速膨胀时代的演化都由动态标量场控制。这些动态标量场分别被称作暴涨子和暗能量。形形式式的标量-张量引力理论因为自身有动态标量场, 因此它们跃跃欲试, 意图能取代或统一宇宙早期的暴涨子和宇宙中晚期的暗能量。

以上将各种关于星系反常引力(即暗物质引力)的解释理论分为三大类。由于各路作者才思敏捷、思想繁多, 其它还有部分理论无法被划入到以上几类。如 1990 年代 Wesson 等人提出的“几何化物质”引力理论[24] [25] [26] [27]。该理论引入了高维空间, 认为高维的空宇宙内的广义相对论引力在四维时空中会呈现等效的物质效应。该理论没有修改普通的力学, 没有修改爱因斯坦广义相对论引力场方程(只是将它推广到高维), 也没有引入暗物质(所谓“暗物质”的引力效应, 只是高维引力在低维时空内的效应罢了) [24] [25] [26] [27]。该理论在宇宙学中可以有一些积极的结论, 如它能解释为什么宇宙可以加速膨胀, 甚至也可以解释当前宇宙密度暗能量占七成、零压物质(或等效物质)占三成这个事实。在这种理论中, 暗能量也并非某种物质形态, 也是高维引力在低维时空内的效应。不过该理论在解释星系转动动力学问题(平坦转动曲线之谜与 Tully-Fisher 关系之谜)上似乎未见成功。

总之, 各路理论基于各种不同原因, 为了解释宇宙暗物质、星系暗能量、宇宙暴涨之谜, 为了建立引力规范理论、引力场量子化理论、基本相互作用的统一场论, 百家争鸣, 提出了数量繁多、众说纷纭的引力理论, 每种理论都有一大批追随者。不过, 正当众多引力理论逐鹿引力物理学界, 如火如荼、波诡云谲, 2017 年 8 月 17 日检测到的 1.3 亿光年外的双中子星合并导致的引力波、电磁波“双星使”同时到达地球这一事件, 敲响了以上相当一部分新引力理论的丧钟。

此次引力波信号与伽玛波段电磁波信号在广袤的宇宙空间传播了 1.3 亿年(折合为大约  $4 \times 10^{15}$  秒), 最终它们以仅相差 1.7 秒先后到达地球, 这充分说明引力波与电磁波从 1.3 亿光年外的同一源点出发、高精度地沿着同一轨迹、以相等速度紧紧相随着传播[1] [2] [3] [4]。之所以引力波比电磁波略早 1.7 秒到达地球, 原因可能是引力波先发射。双黑洞或双中子星合并包含彼此靠拢、螺旋式环绕、合并、振铃四个阶段, 只要两个中子星螺旋靠拢、即将合并但还未开始熔合时, 引力波即可发射; 但电磁波的发射需要当两个中子星更进一步熔合后方可, 故伽玛波段电磁波信号略迟一点到达。此外, 电磁波的 1.7 秒延迟也可能有其它物理来源, 例如一些新引力理论要求引力波与物质有额外的耦合, 一些理论如轴子暗物质理论也要求电磁波与轴子物质有耦合, 正是这类耦合导致引力波与电磁波的传播速度稍为不同; 也有可能是因为引力子与光子有各自的内秉的静止质量, 那么它们就不再以严格光速传播。因此这 1.7 秒延迟也给以上诸观点添加了很强的参数限制条件, 即这些效应(电磁波、引力波与物质的额外的耦合以及这两种波的内秉质量)即使存在, 它们也是极端微弱的。即使引力波与光波有速度偏差, 两者也仅仅相差  $10^{-15}$  倍光速。我们知道基本物理学常数光速( $c = 299,792,458$  米/秒)也仅有 9 位“有效数字”。它没有进一步的小数点后位数或误差, 这是因为这个物理数值是由科学家在 1983 年 17 届国际计量大会强制规定并立法确认的精确值, 宣称从当年 10 月 21 日起真空光速取如上数值(因此诸如“光速值的精确测量”就成为了伪课题)。既然现在引力波与电磁波“双星使”事件显示两者具有高度精确相等的传播速度, 那么我们用这个事实可以重新审定一批新引力理论。确实有一批解释暗物质之谜的新引力理论(如下面将要介绍的 Bekenstein 理论[17] [18]和 Moffat 理论[19] [20] [21] [22] [23])要求物质与引力有额外的耦合。正是这类耦合超过或取代了星系尺度上的广义相对论引力, 最终表现为了所谓的“暗物质”效应。这类等效的“暗物质”效应在星系中是如此之大以致将在电磁波和引力波“双星使”事件中产生非同凡响的效应, 因为电磁波和引力波与这类理论所引入的额外标量、矢量场的耦合项并不相同, 从而使得电磁波和引力波不再严格沿着同一轨迹传播, 从而违反“双星使”同时到达地球这一观察结果。下面介绍部分有代表性的新引力理论在这方面的研究现状。

### 3. 星系暗物质理论之“暗派”与“修派”之争

解释暗物质之谜主要有三家学说, 分别是暗物质派、修改的动力学派(典型代表是提出于 1983 年的 Milgrom 的 MOND 理论)和修改的引力派(凡是对爱因斯坦广义相对论引力进行修改的理论都属于该派)。修改的动力学派和修改的引力派不需要真正的暗物质, 它们认为所谓的星系“暗物质”效应乃由修改的理论中的额外耦合产生的。由于 Milgrom 的 MOND 理论的相对论版本即 Bekenstein 2004 年提出的张量-矢量-标量理论也属于修改的引力派, 因此修改的“动力学派”和“修改的引力派”可以划归为一派[28] [29] [30]。这样, 解释暗物质之谜的派别粗略可分为“暗派”与“修派”, 也即所谓 DM 派与 MD 派。这里, DM 即 dark matter 缩写, MD 即 modified dynamics 缩写。即使在每一派别内, 关于暗物质本质, 也是众说纷纭、莫衷一是。这两派之间自然更加形同水火, 互不相让, 如倡导“修派”的 Milgrom 甚至仿佛忍不住喊出“在椭圆星系中暗物质说已死(death)”的口号, 当然他实际喊出的话是“在椭圆星系中暗物质稀缺(dearth)” [29]。

“暗派”认为, 暗物质可以分为重子暗物质与非重子暗物质两大类。前者由普通物质构成(含质子、中子和普通原子核), 例如靠电子简并压维持的白矮星、温度较低缓慢辐射能量的红矮星以及黑矮星等死亡了的恒星, 还有无法发生核聚变的暗弱褐矮星(有的研究者认为其质量不到太阳质量的 8%, 其亮度不到太阳亮度的百万分之一, 其归宿是黑矮星)。这些死亡恒星以及中子星、黑洞等, 可以统称为 MACHO (全称为 Massive Compact Halo Objects), 即大质量致密晕天体。其它重子暗物质还可能包括各种大小行星、含有岩石和冰的彗星等类似的天体和尘埃。此外, 不能发生电磁辐射的星系内和星系际高电离气体(主要

由氢、氦原子电离而来)等也有可能是重子暗物质。我们已经知道,星系中有大量高电离气体,主要包括氢氦原子及其离子等。如温度达到上亿开尔文,它就可以辐射出 X 射线,被我们探测到。目前已经不断地探测到这种 X 射线辐射源气体。既然上亿开尔文的电离气体是存在的,那么温度为十万到千万开尔文的高温高电离气体也是可能存在的。它们因为外层电子已经被剥离,无法辐射较低频的电磁波(如可见光、红外光);它们因为温度还不够高(未达到亿开尔文),故而也不能让内层电子跃迁发射 X 射线,或者它们之间的碰撞也不足以产生 X 射线,因此它们无法被我们探测到,因此高温高电离气体也有可能是暗物质,且是普通重子暗物质。不过,威尔金森微波背景各向异性探测器(WMAP)探测结果认为重子暗物质在宇宙物质成分中所占比例很低,暗物质主要候选者应是非重子暗粒子。非重子暗物质因其几乎不发生电磁相互作用,也可以称呼为 WIMPs (全称是 Weakly Interacting Massive Particles, 弱相互作用大质量粒子)。目前一般认为的 WIMPs 理论候选者包括如下一些:超对称粒子(长寿命、最轻的超对称粒子以及光微子、引力微子等)、轴子、普通中微子、惰性中微子、量子零点涨落黑洞、磁单极子、卡鲁扎-克莱因高维粒子等。其实这些候选者曾首先是建立微观理论(如超对称、超引力、粒子物理)本身的需要。如果实验观察确实证明暗物质包含这类候选者,那么相当于打通了微观理论与大尺度的天体物理和宇宙学,一举两得澄清、解决两个尺度学科的疑难问题。例如,超对称理论认为,每一种普通的玻色子都对应一种同质量的费米子(如光子对应光微子),每一种费米子也对应一种同质量的玻色子(如旋量电子对应标量电子)。最轻的超对称粒子(可能是中微子的超对称伴侣),是稳定的,因此可以作为星系暗物质粒子的候选者。轴子是为了解决 QCD 量子色动力学中的强 CP 即电荷与宇称问题而提出的,同时它可能允许具有 0.1 毫电子伏特上下的静止质量,因此在今天的宇宙微波背景辐射(温度为 2.7 开尔文)中,它是非相对论性物质,可以作为冷暗物质的候选者。如果轴子真的是暗物质,那么相当于同时解决了天体物理、宇宙学和量子色动力学难题。在核物理学和粒子物理学中,普通中微子的质量一直难测,如果它有一点点质量(毫电子伏特),就可以与轴子一样,成为宇宙中的冷暗物质候选者。但是现在一般认为已经排除了这种可能性,因为尽管现在的中微子可以具有毫电子伏特静止质量,可以看作是合适的冷暗物质,但在宇宙早期星系形成时(宇宙年龄为几十万年),中微子却是热暗物质(暗辐射),它无法担任引力势阱促使星系形成。只有那时也承担着冷暗物质角色的粒子,才可以促使星系形成,故而作为我们所需要的暗物质,中微子没有达到这个要求。一些超越目前粒子物理标准模型(弱电统一理论和量子色动力学)的理论和统一理论(把强、弱、电相互作用统一为一种力)中预言了惰性中微子,它们也可以成为暗物质候选者。黑洞是广义相对论所研究的天体,它具有视界,在视界附近,时间可以变慢或停止。根据黑洞的统计物理学及量子黑洞理论,黑洞的温度与其质量成反比,高温能促发辐射,因此小质量黑洞因为发生霍金辐射而寿命短,稳定存在的黑洞都是大质量的,但是有一种所谓的“量子零点涨落黑洞”却是例外,它质量非常微小,是量子真空水平上的黑洞,但是却无法蒸发掉因而是稳定的,因此不少人建议它们是暗物质的候选者(这方面文献也有不少)。磁单极子是大统一理论所预言的,目前实验观察还没有磁单极存在的证据。在统一引力与电磁力(以及非阿贝尔规范力)的理论会产生卡鲁扎-克莱因粒子。这些粒子在高维度以驻波形式存在,这个驻波的能量在低维空间(我们现实的空间)看来,在效果上好像带上了一份较大的静止质量,因此卡鲁扎-克莱因高维粒子表现为暗物质粒子。过去十多年来,在粒子物理学实验和理论中也在研究这么一种与高维空间有关的卡鲁扎-克莱因粒子。假设高维是一个克莱因紧致化的微观圆圈,在高维中运动的粒子(形成驻波)的波数是量子化的( $k = n/a$ , 这里  $a$  为微观圆圈半径,  $n$  为自然数),那么该粒子在普通四维时空内就表现为携带了一份静止质量  $n\hbar/(ac)$ 。由于  $n$  是自然数,故而质量是量子化的,质量之间的间隔是常数( $\hbar/(ac)$ ),这样一系列粒子可以称为“卡鲁扎-克莱因塔”。不少粒子物理学家在用高能粒子加速器进行验证,希望能产生这种可能的卡鲁扎-克莱因激发态,但一直毫无所获。卡鲁扎-克莱因粒子假如真的存在,也可以用来作为星系冷暗物质的候选者,人们也希望在宇宙射线中能探测到它的衰变产物如正反电子或

缪子等。只要在某个能标的宇宙射线上发现正反电子等流量突然反常超出，或许这就是由暗物质粒子衰变或湮灭而来的。总之，暗物质粒子的理论候选者尽管有很多，但是没有一种是目前在粒子物理学标准模型框架下已经被探测到了的，它们即使存在，也属于未来的新物理范畴。

“修派”内部理论有几十种甚至上百种，这些理论中的大多数理论虽然也宣称与爱因斯坦广义相对论引力理论竞争，但是实际上它们也只是在爱因斯坦-希尔伯特引力作用量基础之上添加了一些额外项，因此只能算是对爱因斯坦理论打补丁(如果爱因斯坦理论的漏洞真的存在的话)。这些理论包括：1) 含有额外标量场的理论，例如各种标量-张量理论及 Scalar-tensor-vector 引力理论，如 Kaluza-Klein 理论(1921~1926)，Brans-Dicke 理论(1961)以及 Bekenstein 理论(2004)、Moffat 的 scalar-tensor-vector 引力理论(2005)和 Moffat 的 metric-skew-tensor-引力理论(2005)。这类理论雄心勃勃，往往都宣称要统一解决三大问题(宇宙早期暴涨起源、晚期加速膨胀根源及暗物质之谜)，因为这类理论有一个动态标量场，而对宇宙暴涨和加速膨胀一般恰恰是使用这种类似希格斯场的动态标量场来研究的；2) Modified Newtonian dynamics (MOND)，其相对论版本就是 Bekenstein 在 2004 年发表的理论；3) 高导数引力，包括 Lovelock 引力、 $f(R)$  引力、Gauss-Bonnet 引力，infinite derivative gravity 即无穷阶导数引力；4) 引力规范理论，包括 Einstein-Cartan 理论(及 Einstein-Cartan-Sciama-Kibble 理论)、Utiyama 引力规范理论纲要、Stephenson-Kilmister-Yang 引力理论，还有 Carmeli 的  $SL(2, C)$  引力规范理论(此理论其实等价于 Einstein-Cartan 理论)；5) 其它个别理论，如：massive gravity, bimetric theories, Teleparallelism (引入挠率)等。这些理论不引入前述额外的动态标量场之类，而是对爱因斯坦-希尔伯特作用量进行改造；6) 广义相对论的发展，如超引(supergravity)、弦(string)和圈量子引力(loop quantum gravity)等。我们下面主要介绍 Moffat 理论和 Bekenstein 理论，因为它们与 2017 年 8 月 17 日所探测到的引力波与电磁波“双星使”事件有紧密联系。

加拿大的 Moffat 在 2005 年提出 scalar-tensor-vector gravity 理论和 metric-skew-tensor gravity 理论。这属于“修改的引力理论”。这类理论不需要暗物质假设，它们认为所谓星系“暗物质”效应乃其引力理论中的新的修改项所致。这两个理论的共同点都是在爱因斯坦-希尔伯特标准引力作用量密度( $\ell = R/(2\kappa)$ ,  $\kappa = 8\pi G$ )基础之上添加了一些额外的标量场和矢量场作为新的“引力场”，与物质耦合在一起，从而让普通物质在产生额外的引力场的同时也让自己受到额外的引力。虽然这两种理论所添加的额外“引力场”大不相同，如 metric-skew-tensor gravity 理论包含了一种属于二阶张量场的斜场(skew field 即不对称场)且带有静质量，而 scalar-tensor-vector gravity 即标量-张量-矢量引力理论含有一种带质量的类似电磁场的矢量场和三种其它标量场，但对于中心点源，这两种修正的引力理论有(几乎)相同的引力场强公式，因此 Moffat 将它们合并研究。自 2005 年以来，Moffat 等发表了 20 余篇有关他的新引力理论的论文，将其理论应用到天体物理(星系转动动力学、球状星团、星系团)和宇宙学(宇宙加速膨胀和暗能量以及微波背景辐射)。与所有新引力理论的企图一样，Moffat 等也希望在三大宇宙学问题(宇宙的早期暴涨、中晚期暗物质问题、宇宙晚期加速膨胀以及星系暗物质动力学之谜)中能大显身手。我们知道星系暗物质动力学之谜包括星系平坦转动曲线与星系重子 Tully-Fisher 关系等。Moffat 等对上百个星系和星系团进行检验，发现无论在星系和星系团中都取得了成功。由于 Moffat 理论含有太多的动态标量场，因此他们的理论也可以用于解释宇宙加速膨胀。但是 Moffat 理论也并非完美，我们总结一下，主要有如下几个缺点：1) 理论的拉格朗日密度过于随意，Moffat 所引入的那么多额外场如斜场、矢量场、三个标量场的作用量密度的写法不具有唯一性，看似人为拼凑痕迹过于明显；2) Moffat 声称他的引力理论可以解释星系转动动力学中的硬骨头(Tully-Fisher 关系，该关系最重要的特质是涡旋星系转动速度平方正比于星系内可见重子物质质量的平方根)，但是实际上，该关系在他的多篇论文中都是人为假设的，目的是为了拟合观察结果，因此可以说，他的理论与 Tully-Fisher 关系虽然不矛盾，但也无法主动去推导出 Tully-Fisher 关系，这是因



为他的理论中存在一堆无法自定的自由参量, 可以允许去迎合 Tully-Fisher 关系; Moffat 的理论由于存在额外的斜场、矢量场以及几个标量场, 他让这些场与普通物质耦合, 那么普通物质(包括电磁场)就会受到比广义相对论更多的额外力。这些额外力会导致初始位置和传播方向一致的引力波与电磁波不会沿着相同的轨迹传播, 因为在星系和星系团中, Moffat 引力对普通物质的影响将远远大于广义相对论引力(由于 Moffat 理论不需要非重子暗物质假设, 他的额外相互作用将对引力波与电磁波产生不同的相互作用, 从而让引力波与电磁波轨迹大为偏离)。因此我们可以说, 2017 年 8 月 17 日被地球上的激光干涉引力波观察仪和费米望远镜分别观察到的来自 1.3 亿光年之外的双中子星合并所产生的引力波与电磁波同时到达地球这一“双信使”事件宣告了 Moffat 理论的死刑。另一件略具讽刺意味的事情是, Moffat 理论自称在解释先驱者号“反常加速”之谜中拔得头筹。Moffat 的合作者 Brownstein 在 2006 年告知《新科学家》(New Scientist)杂志记者, 他们已经研究和发表论文证明了他们的理论能解释美国先驱者号反常加速( $10^{-9}\text{m/s}^2$ , 1998 年)之谜, 并认为其他人如 Milgrom 的 MOND 理论无法解释该反常加速之谜, 因为先驱者号反常加速( $10^{-9}\text{m/s}^2$ )比起 Milgrom 特征加速度大一个数量级。但是实际上, 在 2012 年物理学界已经公认: 先驱者号反常加速是子虚乌有, 其实它来自航天器自身的热的各向异性辐射, 不具有基础物理学意义, 更不必妄谈其“新物理学革命”。

自 1998 年起的十余年, 先驱者号反常加速度之谜曾引发了新一轮“修改的引力理论”风。1998 年美国先驱者号导航小组安德森等人发表文章报道当时已经航行至太阳系边缘的先驱者号航天器似乎受到了一个指向太阳的反常加速度, 其数值为  $10^{-9}\text{m/s}^2$ , 该现象无法用现有的广义相对论理论解释。他们在之后几年又多次发表论文报道对该反常加速的观察结果。该反常现象引发了汗牛充栋的论文发表浪潮, 不少人从各个角度(暗物质、高维、超弦、第五种力)去解释, 希冀新一轮物理学革命的爆发。本文内提出的诸多引力理论包括各种标量-张量引力理论和标量-矢量-张量理论更是不甘心落后, 都曾经逐鹿先驱者号, 希望在解决该谜上一显身手。本作者认为该反常加速度玄就玄在其数值( $10^{-9}\text{m/s}^2$ )有很多蹊跷之处, 如它在数量级上可以与宇宙膨胀加速度相近(可以用哈勃加速度  $Hc$  量度, 其中  $H$  为哈勃参量), 似乎与宇宙学有关联; 它比 Milgrom 的 MOND 特征加速度仅仅大了一个数量级(由于 Milgrom 的特征加速度在星系团中本身要放大几倍, 那么先驱者号反常加速度就与 Milgrom 的特征加速度更加接近了), 该反常加速度与星系边缘引力加速度处于同一量级, 似乎又与星系物理学有关联。但是先驱者号反常加速度是在太阳系中表现的, 以上星系和星系团中的引力效应在太阳系中是可以忽略不计的。如果说这是一个普适的加速度(适用于宇宙内一切天体), 那么太阳系内所有星体(包括太阳与地球)都将受到该加速度, 因此无论以地球还是太阳为参考系, 应彼此抵消, 实际都应无法观察到该普适的加速度才是。这是另一诡异之处。如果这个反常加速度是其它数值, 也许我们可以将它当作是由其它非基础物理学因素导致, 但它的数值恰好处在宇宙学(暗能量)与星系(暗物质)有关的数值范围内, 是否暗藏什么天机? 不免令人产生无限遐想、欲罢不能, 实在没有理由不理睬该问题。本作者在 1998 年 10 月从当时的《参考消息》中获悉这一先驱者号反常加速信息后旋即找来美国《物理评论快报》当期该原始论文阅读, 对其数值的神秘蹊跷之处, 甚以为惑。先驱者号反常加速度如果用到宇宙学中, 可以折算为“时间加速度”(即时间的流逝也有加速度), 但这很正常, 因为广义相对论中时间和空间可以弯曲, 时间可被物质分布调控。关键是额外的加速度(或引力)到底来源于哪里? 也有一些人把该反常效应看作是一个纯应用物理的问题, 如认为它可能来自于太阳对航天器帆的光压、航天器漏气、热辐射等。直到 2012 年, 经过多方研究分析, 已经确认先驱者号反常加速是一个“乌龙”现象, 其原因就在于航天器各向异性热辐射所致。虽然它对基础物理学的发展没有帮助, 但是毕竟也是一个应用物理问题。在 2012 年之前的十余年, 大量新引力理论力图以“物理学新革命”的调子去解决该“乌龙”加速度, 因此不得不熄火了。Moffat 等曾用自己的新引力理论去解释先驱者号反常加速之谜的做法也就不必当真了。

在星系平坦转动曲线之谜和星系重子 Tully-Fisher 关系之谜上取得成功的 Milgrom MOND 理论 [10]-[16]最初在 1983 年提出时相当丑陋, 如它很难写出拉格朗日密度, 该理论也违反一些基本原理如动量守恒定律等。尽管该理论看似丑陋, 但本文前述已经显示, 它是以极简明的方式一举解决了星系转动力学两大谜, 这使得人们不得不认真看待这一理论设想。Bekenstein 就一直在为其构造拉格朗日密度而努力, 最终在 2004 年将其发展为一个(广义)相对论版本, 即所谓张量-矢量-标量理论, 但是它比爱因斯坦广义相对论方程复杂多了 [17]。该理论也是在爱因斯坦-希尔伯特引力作用量基础之上引入了两种标量场, 其中一种是动态的即有拉格朗日动能项, 另一种没有该动能项。除此之外, 他还引入了一种单位矢量场用来修正引力场度规, 还引入了一种类似电磁场的也具有电磁场拉格朗日密度的矢量场。在该部分中, 它与上面提到的 Moffat 2005 年标量-张量-矢量理论很相似, 只是后者还让该类似电磁场的矢量场带上了非零的静止质量、因此具有 Proca 电磁场的特色。Bekenstein 引入了一些拉格朗日势能项, 但是这些势能项还无法由该理论自身自定。与 Moffat 理论类似境遇, Bekenstein 理论也包含了标量场与引力度规张量场的耦合、普通物质场与标量场和单位矢量场等的耦合, 从而让引力场和电磁场方程中多了一些额外项, 以便解释“暗物质”效应, 但这会导致引力波与电磁波不能以相同速度、相同轨迹传播, 无法解释“双信使”同时到达实验结果。因此可以说, Bekenstein 理论在这次 2017 年 8 月 17 日探测到的双中子星合并事件中受到清洗、遭到了被淘汰的命运。

总的说来, 该类“修改的引力理论”即 Bekenstein 理论以及 Moffat 理论都很复杂, 看起来人为拼凑痕迹明显, 失去了理论的自然性。只要自己愿意, 理论研究者就可以在拉格朗日密度中免费添加他们需要的标量场矢量场, 为了迎合天体物理和宇宙学观察结果, 设计五花八门的耦合, 也将其加入到拉格朗日密度之中。基本自然定律的简洁优美在这里并不彰显, 相反, 它们显得比具体工程问题还复杂。很难相信暗物质之谜的解答会如此复杂。电磁波与引力波“双信使”事件对此给出了一个回应, “修派”理论可能不是暗物质之谜之解。

#### 4. 星系暗物质理论分道扬镳的“修派”

以上理论都把引力看作一种基本相互作用。但也有一个流派, 虽然也属于“修派”, 但是却与传统“修派”持不同观点 [31]。它们认为现在的爱因斯坦广义相对论引力理论是唯像的、非基本理论, 引力也并非基本力, 正如固体力学、流体力学内的弹性应力应变、摩擦力、粘滞力等不是基本力(它们是分子的电磁相互作用等的体现)。它们可以称为引力的力学解释, 包括 emergent gravity, entropic gravity 以及多种把引力现象看作热现象的热力学解释。这种观点把引力不再看作是基本相互作用, 虽然让人意外, 其实倒也很容易理解。举一个例子容易明白: 我们看到液态水或空气是连续的, 其流体内的物质运动可以用连续(而非离散)的流体力学方程来描述、其振动由声波方程来描述, 所有方程内所牵涉到的量都是连续函数。从流体力学层面来看, 这是一套基本方程。但是实际上, 我们知道水或空气毕竟是由离散的一个个分子组成, 流体力学和声学方程内的物质参数需要从分子层面来计算, 因此流体力学和声学方程并非基本, 分子结构和物性及分子之间相互作用才是更为基本的性质。类似推测, 连续时空流形内的引力场方程可能也像流体力学和声学方程那样不是基本的, 时空可能有其更为基本的微观离散结构, 甚至有非对易引力, 即在微观世界时空坐标相乘不可交换。在这方面, 把引力看作非基本相互作用的理论也有很多, 如荷兰的 Verlinde 在 2010 年提出了一个“熵力”的理论, 把引力看作类似溶液中的渗透压效应, 由此利用热力学定律等推出了牛顿引力公式。2016 年下半年他又提出了称为 emergent gravity 的新理论, 也属于把引力看作是某种热力学和弹性应变的呈展现象 [31]。在该理论中, Verlinde 研究了视界熵和微观德西特态对引力的影响, 认为物质会引起熵位移, 该位移有弹性记忆效应, 从而使得物质受到额外的力, 在星系和宇宙学尺度上, 该力可以看作是“暗物质”效应。因此在该理论中, 也不需要真正的暗物质。

如果说有“暗物质”，那也是等效的暗物质，或者说是由普通重子物质诱导出来的“暗物质”(把这种额外力看作等效的“暗物质”所产生的引力，乃是为了与真正的暗物质理论作比较时更为方便)。Verlinde 理论中的额外力在远距离上就转化为 Milgrom 的 MOND 理论，因此该理论能解释星系平坦转动曲线和 Tully-Fisher 关系；在近距离上表现为牛顿引力定律。荷兰天文学家 Brouwer 等人不久发文宣布 Verlinde 的新引力理论得到了实验观测的支持[32]他们用 33,613 个星系的平均光度质量密度分布检验了 Verlinde 的新引力理论中的核心公式，发现理论与观察符合很好。其实我们认为这并不稀奇，因为 Verlinde 的理论在小尺度上和大尺度上分别趋近牛顿引力理论和 Milgrom 的 MOND 理论。任何新引力理论只要在大小尺度极限上分别趋于这两个理论，必然都可以与 Brouwer 等人的几万个星系的数据符合很好。这方面的论文和报道在过去二十年太多了，以致失去公信力了。例如天体物理学家 McGaugh 也从星系观察中拟合得到一个新的 MOND 解析公式，其形式还有点优美，也宣称与大量星系转动现象符合很好，但 McGaugh 的公式与 Verlinde 的公式数学结构完全不同，对它们的计算数值比较，仅有一点点差别，因此他们都说自己符合大量星系观察结果，但在基础物理原理(即所谓真理层次)上谁真谁假，我们却无法判断。这些理论都号称与观察十分符合，因此理论物理的检验不像以前那么简单了，尽管有几万个星系检验作为例证，但理论仍旧有可能是错的(如 Verlinde 与 McGaugh 不可能都对)，因此例证不在数量多寡。事实上一个“暗物质”理论只要满足 Milgrom MOND 的极限和经典的牛顿力学极限，总是可以与大量星系观察事实符合。正如 Brouwer 对记者承认的，他们的实验观察结果也可以用真正的暗物质来解释，因此 Verlinde 理论并非是唯一解释。故我们只能说 Verlinde 的新引力理论通过了实验检测，但还谈不上得到证明。另外，Verlinde 的理论也存在几个缺陷，如他的等效的“暗物质”引力势可以不连续(即当普通重子质量密度不连续时，由重子质量诱导出来的“暗物质”质量及其引力势顿时也不连续，它们不再是空间坐标的连续函数)，引力势不连续将导致引力场强发散，这是不自然的，这也与场方程基本要求相违反。在 Verlinde 理论中，等效“暗物质”质量是普通重子物质密度的函数。我们知道，物理量分为广延(extensive)量与强度(intensive)量，前者(如质量)具有空间分布上的连续性，后者(如密度)不必具有空间分布上的连续性。如一个钢球内部质量密度为常数，但在钢球外部，密度为零，钢球表面就是密度发生突变的位置。由此，对于由普通重子构成的球体质量，由它诱导出来的等效“暗物质”质量必然也在球体表面突变，这就是 Verlinde 理论中的等效“暗物质”引力势不连续性问题之起源。

在 Verlinde 理论的框架下，我们纠正了 Verlinde 理论方程中的引力势不连续问题，得到了一个修正的重子-“暗物质”质量依赖关系[33]，该关系避免了“在普通重子质量密度不连续位置处”的等效“暗物质”引力势的不连续问题。该修正关系在小于一千万光年的星系团尺度下与 Verlinde 的关系一致或接近，因此也可以说它与 Brouwer 弱引力透镜天体物理观察结果[32]一致。在远大于一千万光年的星系团尺度下，我们的重子-“暗物质”质量依赖关系与 Verlinde 的关系不再相同，因此如果选取大尺度的星系团观察结果，则可以区分我们与 Verlinde 这两个关系之间的不同，从而遴选出可能正确的理论公式。但遗憾的是，在大尺度下，星系成团能力减弱，外加强引力透镜观察精度[32]也跟着下降，要寻找远大于一千万光年尺度的理想星系团比较困难。值得一提的是，我们的修正的重子-“暗物质”质量依赖关系[33]中的“暗物质”成分略少于 Verlinde 关系[31]中的“暗物质”成分。确实，在 Brouwer 弱引力透镜天体物理观察结果图(如其图三)中[32]，图片右下角即为一千万光年尺度下的结果，其实实验曲线比 Verlinde 的理论曲线略微低一些[32]，这意味着由我们所建议的修正的重子-“暗物质”质量依赖关系[33]可能更符合 Brouwer 的弱引力透镜观察结果[32]。当然，也因为我们的关系[33]避免了“暗物质”引力势不连续问题，因此该关系可能才是 Verlinde 呈展引力(emergent gravity)理论[31]的合理结果。

呈展引力理论[31]把引力看作是某种热力学熵或弹性应变的表面体现，传统引力只是它的一个宏观唯像结果。因此相对论引力理论只是它的呈展观点的一个宏观近似。我们也可以说，呈展引力理论只是进

一步诠释了引力的起源，但它本身并不违反传统相对论引力理论，正如从分子、原子层面解释了声压(声波)的起源，但这些新解释本身并不颠覆以往经典声学理论。呈展引力产生了比普通牛顿-爱因斯坦引力更多的额外引力。为了保持牛顿-爱因斯坦引力理论基本观念不变，呈展引力理论让普通重子物质“诱导”出了等效的暗物质，作为引力的新源。

对于“把引力看成非基本相互作用”这一思想，虽然我们无法否定其可能性，毕竟类似例子在现实中就存在(如流体力学方程和声波方程就不是基本相互作用，它们是电磁相互作用的体现)，但是如果把引力看作是某种更为基本的相互作用的类似渗透压、弹性记忆响应等，那么我们又要把该更为基本的相互作用挖掘出来，依次类推，该更为基本的相互作用可能又可以被后人研究成属于某种更为特别基本的相互作用的渗透压、弹性记忆效应，那么这种追踪可能会“子子孙孙无穷尽矣”。类似问题在固体物理学中的等效粒子上面也会出现：凝聚态体系是一个熔炉，可以产生各种准粒子如声子、等效的旋量粒子(Weyl粒子和 Majorana 粒子)等。有人认为凝聚态物理中的准粒子和粒子物理学中的真正的粒子没有实质性区别，唯一区别只是能标不同而已(粒子物理加速器现在的能标可在几千吉电子伏特，凝聚态物理中的能标仅在几个电子伏特以下)，并强调说这个能标区别根本不重要，因此认为对于粒子物理学中难以找到的粒子我们可以在凝聚态物理去造、去找。这种观点类似于说如果我们造不了飞机，那么造一个玩具飞机也行。这种观点会带来一个疑惑：凝聚态物理因为能标低，其理论仅仅遵守伽利略不变性，不必遵守洛伦兹不变性。但是在凝聚态理论中产生的等效的旋量粒子，它们却具有类似洛伦兹变换的不变性(当然这里的“光速”不再是基本常数那个光速了)，也就是说我们可以从伽利略不变性中产生等效的洛伦兹不变性，而根据上面观点，这种等效的洛伦兹不变性与现实真空中真正的洛伦兹不变性没有区别(仅有能标、“光速”不同等非实质性区别)，而我们知道伽利略不变性又是洛伦兹不变性的低速近似，现实真空中的洛伦兹不变性也有可能是由更为基本的熔炉中的伽利略不变性产生出来的，由此“父生子、子生父”也无法穷尽，不免在自然哲学或物质观中引来疑惑和矛盾。如果采纳超弦理论中的观点，也许可以解决该问题：现实真空中的每种基本粒子是弦振动的模式，可以说不再有基本结构，而凝聚态中的准粒子还可以有内部结构(因此不是基本的)，故凝聚态物理中的准粒子和粒子物理学中的真正的粒子其实还是有实质性区别的。同样的道理，既然弦理论中可以产生广义相对论，那么把引力看作是某种更为基本的相互作用的类似渗透压、弹性记忆响应等观点，也可以被排除。当然，这些仅仅是供探讨的观点，这里必定还有可供引力物理学界研究者商榷之处。但是，弦论可以终结上面“父生子、子生父”矛盾应该是可能的。

引力场有视界，一个事件刚好能允许被观察到的时空界面就是视界。视界有一些特性，譬如黑洞外的物质可以通过视界进入黑洞内部，但是黑洞外部的人观察不到发生在黑洞内的事件，也就是说黑洞内的物质和辐射不能穿越黑洞视界到达外部，黑洞视界是一个单向膜。视界的这些特性很容易与热力学熵联系起来，譬如孤立体系的熵总是增加的(在时间方向上)。很多人从不同途径、不同角度使用热力学来解释引力起源或引力本质。如 1995 年美国 Jacobson 研究熵与视界的关系，把时空看作热力学体系，他指出爱因斯坦广义相对论方程就是一个状态(物态)方程。2016 年他又研究时空内的纠缠熵，指出爱因斯坦方程保证了最大真空纠缠假设的成立，即当且仅当爱因斯坦方程成立时，真空纠缠是稳定的。他能从这种思想中推导出爱因斯坦方程。Faulkner 等人近来也研究全息共形场论中的纠缠熵，作为对引力的力学解释。提出“引力是熵力”的 Verlinde 证明自己这个观念不仅能推出牛顿引力定律，也能推出爱因斯坦广义相对论方程。惊讶之余，也觉得不十分稀奇，因为毕竟由相对论引力理论得到的结果(如视界、熵、能量等)能与热力学相容或类似热力学定律，那么把这些类似热力学的结果作为出发点，进行逆推，并作一些必要的假设(毕竟广义相对论是一个微分几何理论，与热力学语言还是相当有距离)，就可以“导出”爱因斯坦广义相对论方程。可以看出，这种推导过程多少亦有拼凑痕迹。譬如，在引力理论中，我们很容易验证一个关系式：

$$M = (1/(4\pi G)) \int \nabla \phi \cdot d\vec{A},$$

其中  $\phi = -GM/r$ ,  $d\vec{A}$  是面积微元。该方程左边的质量似可以化为  $T_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}T/2$  的体积分 ( $T$  是物质场能量-动量张量  $T_{\mu\nu}$  的缩并或迹), 而右边可以写为与 Ricci 张量  $R_{\mu\nu}$  有关的量的体积分。那么如此一来,  $T_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}T/2$  与  $R_{\mu\nu}$  就可以对等起来, 而这恰好就是爱因斯坦广义相对论方程。对于此类方法, 我们与其说是推导, 到不如说是类似“事后诸葛亮”式的预言或验证。那么引力与时空, 到底是否是热力学体系呢? 1970 年代, 在霍金从理论上发现黑洞的“霍金辐射”之前, 引力与时空只被当作是一个等效的热力学体系, 它们只是有相似的定律, 但这种相似性仅仅具有类比的意义, 不能看作是本质等同。但霍金辐射被论证后, 发现黑洞具有辐射的能力, 借助弯曲时空量子场论(与热力学无关), 却得到了量子统计热力学中的玻色分布和费米分布, 不由让人大为吃惊, 因此自那时起的四十多年来, 人们不得不承认时空在本质上就是一个热力学体系。那么这是否算揭示了引力的本质呢? 可能未必。因为热力学是一个框架, 并不对应任何基本相互作用, 它是普遍成立的一个理论体系。推而广之, 经济、文化以及各种社会现象, 都可以遵守广义的热力学, 如市场经济追求利润最大化, 就对应于热力学第二定律(熵增原理或熵极值原理)。因此, 所有基本相互作用应当都可以改写为热力学基本定律的形式, 这可能只是物理系统的普遍特征, 并不属于个性意义上的本质特征。

与 Verlinde 的“熵力”和“呈展引力”理论为引力提供力学解释(类似空间的渗透压、弹性记忆效应)不同, 印度的 Padmanabhan 提供了关于这类范畴理论的另一思路, 在他的著作“Gravitation: Foundations and Frontiers”(剑桥大学出版社, 2010)有具体叙述。我们知道, 在近代物理学中, 为得到物理学基本方程, 就要构造拉格朗日量密度, 其四维时空积分便是作用量, 然后利用作用量极值原理(哈密顿原理)对作用量就一些变量(如场量、度规)进行变分, 就得到基本场方程。Padmanabhan 把作用量看作是“熵”, 作用量极值原理就是最大熵原理(与热力学第二定律有关), 相当于把热力学与引力“统一”起来。他根据熵的一般性质利用黎曼曲率、克罗内科符号等构造引力场的“熵”, 最终得到新的引力场作用量。他发现他的引力作用量就是 Lovelock 理论(或 Lanczos-Lovelock 理论)的引力作用量。Padmanabhan 的理论由于不涉及“熵”背后的更为基本的结构、运动和相互作用, 只是通过表面上的猜测, 把一些物理量联系在一起, 因此他的方法是唯像的。

在很多不需要暗物质的“修改的引力”理论包括 Milgrom 的 MOND 理论以及 Verlinde 关于正常物质产生弹性记忆效应的力学诠释理论, 所谓的“暗物质”效应其实都是由正常物质所产生的, 因此“暗物质”引力分布重心与普通可见物质自身的重心(或牛顿-爱因斯坦引力重心)应该是重合的, 不能分离开来。而真正的星系暗物质理论允许暗物质的重心和普通可见物质重心不重合。因此, 所有这类“不需要暗物质”的引力理论在“子弹头星系团”观察事实中败下阵来。2006 年 8 月美国 Clowe 等人在对“子弹头星系团”进行几个月的观测后宣布看到了暗物质与普通正常物质之间的分离现象, 宣称观察到了暗物质存在的明显证据[34]。这是发生在一亿年前的碰撞现象。子弹头星系团包含一对一大一小两个亚星系团, 它们以高速迎面相撞, 大部分物质(即暗物质)彼此穿梭而过。作为两个星系团内的普通重子发光物质(恒星与气体)由于可以相互作用, 碰撞时会“粘接”在一起静止下来, 但两个星系团内的暗物质因为彼此不发生相互作用(除了引力外的其它相互作用都很弱, 如两个暗粒子之间的弱相互作用散射截面比两个原子之间的散射截面还要小 20 个数量级), 可以彼此呼啸而过, 继续前进。最终子弹头星团内每个亚星系团内的普通重子发光物质与暗物质被剥离了开来, 重子物质在后, 暗物质跑在前面。人们普遍认为“子弹头星系团”现象有力地显示了非重子暗物质的客观存在, 宣布了所有不需要暗物质的“引力修改派”的理论的死刑。但是, 也有一些修改派的理论还在负隅顽抗, 如上面所提的 Moffat 理论就宣称自己也能解释“子弹头星系团”碰撞现象。关于“子弹头星系团”现象是宇宙中的普遍现象还是个别偶然现象, 现今也在进一步研究之中。

## 5. 结论

面对星系暗物质之谜，过去几十年人们提出了几十种甚至上百种主要的理论。关于暗物质之谜之本质，目前喧嚣尘上、众说纷纭，但最为流形的主要还是两家：以非重子暗物质理论为代表的“暗派”和以 Milgrom 的 MOND 理论以及 Bekenstein 理论、Moffat 理论为代表的“修派”。当然，暗物质之谜的真正解答只能有一个，以上诸多学说最终大多都会被淘汰。2017 年 8 月 17 日检测到的 1.3 亿光年外的双中子星合并事件，敲响了以上相当一部分新引力理论的丧钟。被淘汰的理论的特征，正如有 MOND 理论之相对论版本 Bekenstein (2004) 理论和 Moffat (2005) 理论等的特征。那些不需要暗物质，但依靠额外的标量场、矢量场来解释星系和星系团中的“额外引力”来代替暗物质引力效应的一大批理论，将被淘汰。这正如词云：浪花淘尽英雄，是非成败转头空。

半个世纪或百年前创立物理学理论，理论往往有排他性，也可以很快被实验证认或否决，但如今的物理学理论往往无法自证唯一性，多家理论互相竞争，理论的证伪周期也更长，有时一个实验事实可以证认出多家不同的理论或多家理论纷纷冒出来宣称实验验证了自家理论。我们认为应提倡回归自然，不要用人拼凑痕迹明显的理论，因为这样的理论原则上有无穷多个，都可以宣称与几万个星系观察数据一致。尽管星系观察事实有大量，但解释此类事实的理论更有大量，都说自己是真理，人们反而感到困惑。面对这种众说纷纭的喧闹场景，我们期待有进一步的实验事实能让我们获得唯一确证的理论，正如去年八月双中子星合并导致的双信使事件排除了相当一批引力理论一样。

## 参考文献

- [1] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration *et al.* (2017) Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *The Astrophysical Journal Letters*, **848**, L12.
- [2] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration *et al.* (2017) A Gravitational-Wave Standard Siren Measurement of the Hubble Constant. *Nature*, **551**, 85-88.
- [3] Abbott, B.P., *et al.* (2017) GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Physical Review Letters*, **119**, Article ID: 161101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101>
- [4] LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration *et al.* (2017) Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A. *The Astrophysical Journal Letters*, **848**, L13.
- [5] Zwicky, F. (1933) Die Rotverschiebung von Extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, **6**, 110-127.
- [6] Zwicky, F. (1937) On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae. *The Astrophysical Journal*, **86**, 217-246. <https://doi.org/10.1086/143864>
- [7] Rubin, V.C. and Ford Jr., W.K. (1970) Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. *The Astrophysical Journal*, **159**, 379-403. <https://doi.org/10.1086/150317>
- [8] Corbelli, E. and Salucci, P. (2000) The Extended Rotation Curve and the Dark Matter Halo of M33. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **311**, 441-447. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03075.x>
- [9] Bertone, G., Hooper, D. and Silk, J. (2005) Particle Dark Matter Evidence, Candidates and Constraints. *Physics Reports*, **405**, 279-390. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031>
- [10] Milgrom, M. (1983) A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis. *The Astrophysical Journal*, **270**, 365-370. <https://doi.org/10.1086/161130>
- [11] Milgrom, M. (1983) A Modification of the Newtonian Dynamics—Implications for Galaxies. *The Astrophysical Journal*, **270**, 371-389. <https://doi.org/10.1086/161131>
- [12] Milgrom, M. (2009) Bimetric MOND Gravity. *Physical Review D*, **80**, Article ID: 123536. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.80.123536>
- [13] McGaugh, S. (2014) A Tale of Two Paradigms: The Mutual Incommensurability of  $\Lambda$ CDM and MOND. *Canadian Journal of Physics*, **93**, 250-259. <https://doi.org/10.1139/cjcp-2014-0203>
- [14] McGaugh, S. (2005) Balance of Dark and Luminous Mass in Rotating Galaxies. *Physical Review Letters*, **95**, Article ID: 171302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.171302>
- [15] McGaugh, S. (1998) Testing the Hypothesis of Modified Dynamics with Low Surface Brightness Galaxies and Other Evidence. *The Astrophysical Journal*, **499**, 66-81. <https://doi.org/10.1086/305629>

- [16] Gentile, G., Famaey, B. and de Blok, W.J.G. (2011) Things about MOND. *Astronomy & Astrophysics*, **527**, A76. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015283>
- [17] Bekenstein, J.D. (2004) Relativistic Gravitation Theory for the Modified Newtonian Dynamics Paradigm. *Physical Review D*, **70**, Article ID: 083509. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.70.083509>
- [18] Exirifard, Q. (2013) Gravito Magnetic Field in Tensor-Vector-Scalar Theory. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **4**, 034.
- [19] Moffat, J.W. (2006) Scalar-Tensor-Vector Gravity Theory. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **3**, 004. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2006/03/004>
- [20] Brownstein, J.R. and Moffat, J.W. (2006) Galaxy Rotation Curves without Non-Baryonic Dark Matter. *The Astrophysical Journal*, **636**, 721-741. <https://doi.org/10.1086/498208>
- [21] Brownstein, J.R. and Moffat, J.W. (2006) Galaxy Cluster Masses without Non-Baryonic Dark Matter. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **367**, 527-540. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.09996.x>
- [22] Moffat, J.W. and Toth, V.T. (2009) Fundamental Parameter-Free Solutions in Modified Gravity. *Classical and Quantum Gravity*, **26**, Article ID: 085002. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/26/8/085002>
- [23] Moffat, J.W. and Toth, V.T. (2008) Testing Modified Gravity with Globular Cluster Velocity Dispersions. *The Astrophysical Journal*, **680**, 1158-1161. <https://doi.org/10.1086/587926>
- [24] Wesson, P.S. and Ponce, de L.J. (1995) The Equation of Motion in Kaluza-Klein Cosmology and Its Implications for Astrophysics. *Astronomy and Astrophysics*, **294**, 1-7.
- [25] Overduin, J.M. and Wesson, P.S. (1997) Kaluza-Klein Gravity. *Physics Reports*, **283**, 303-378. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(96\)00046-4](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(96)00046-4)
- [26] Wesson, P.S. (1999) Space-Time-Matter, Modern Kaluza-Klein Theory. World Scientific, Singapore. <https://doi.org/10.1142/3889>
- [27] Wesson, P.S. (2006) Five-Dimensional Physics: Classical and Quantum Consequences of Kaluza-Klein Cosmology. World Scientific, Singapore. <https://doi.org/10.1142/6029>
- [28] Bekenstein, J. and Milgrom, M. (1984) Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity? *The Astrophysical Journal*, **286**, 7-14. <https://doi.org/10.1086/162570>
- [29] Milgrom, M. and Sanders, R.H. (2003) Modified Newtonian Dynamics and the Dearth of Dark Matter in Ordinary Elliptical Galaxies. *The Astrophysical Journal*, **599**, 25-28. <https://doi.org/10.1086/381138>
- [30] Bekenstein, J. (1977) Are Particle Rest Masses Variable? Theory and Constraints from Solar System Experiments. *Physical Review D*, **15**, 1458-1468. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.15.1458>
- [31] Verlinde, E. (2017) Emergent Gravity and the Dark Universe. *SciPost Physics*, **2**, Article ID: 016. <https://doi.org/10.21468/SciPostPhys.2.3.016>
- [32] Brouwer, M.M., Visser, M.R., Dvornik, A., Hoekstra, H., et al. (2017) First Test of Verlinde's Theory of Emergent Gravity Using Weak Gravitational Lensing Measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **466**, 2547-2559. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw3192>
- [33] Shen, J.Q. (2018) The Dark-Baryonic Matter Mass Relation for Observational Verification in Verlinde's Emergent Gravity. *General Relativity and Gravitation*, **50**, Article ID: 73. <https://doi.org/10.1007/s10714-018-2382-4>
- [34] Clowe, D., Bradac, M., Gonzalez, A.H., Markevitch, M., Randall, S.W., Jones, C. and Zaritsky, D. (2006) A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter. *The Astrophysical Journal Letters*, **648**, L109. <https://doi.org/10.1086/508162>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-0916, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

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

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