

诸引力理论喧嚣尘上 中子星合并一扫乾坤

沈建其

(浙江大学光电学院 310058)

一、引子

弱电统一理论主要创建者之一、1979年诺贝尔物理学奖获得者温伯格曾讲过一件颇发人深省的事情。他在20世纪60年代曾与一位年轻博士后聊天,他问对方在研究什么课题,对方回答在研究广义相对论和天体物理学等问题,温伯格问他为何不研究具有更为丰富的理论和实验内容的粒子物理学。年轻博士后认为,粒子物理学中目前各路理论众说纷纭、零散杂乱,几百种“基本”粒子性质杂多,令人眼花缭乱。相比之下,他更喜欢研究引力理论,因为那里只有爱因斯坦广义相对论一家一统天下,一切都透明澄清,令人惬意。但温伯格并不这样认为。他的观点类似“乱世出英雄”,认为大乱之时,才更有机会可遇。的确,在20世纪60~70年代,经过盖尔曼的夸克模型、格拉肖-温伯格-萨拉姆弱电统一理论以及珀里策-格罗斯-威尔切克量子色动力学的提出,几百种“基本”粒子被归纳为少数几种夸克的复合粒子,各路诸侯理论都被收编进上述比较紧凑的统一理论当中,取得重大丰硕成果,至此粒子物理学中的大乱现象也不再存在。弱电统一理论与量子色动力学合称为粒子物理标准模型,它是20世纪下半叶物理学少数最重要的成果之一。正如温伯格本人所认为的,后世的粒子物理学研习者就不必特别辛苦地学习前几辈人所积累的零碎理论知识,只要学了上述这几个标准理论就可以了。

但一波刚平,一波又起。在20世纪70年代,粒

子物理学开始大治了,但引力理论却开始大乱了,各路新理论不断涌现。当时引力理论群雄并起有如下原因:统一场论要求、引力量子化要求、星系引力异常如失踪质量(暗物质)之谜以及引力规范理论要求等。最后一个要求也属广义相对论本身内在要求,如广义相对论虽然是一个规范理论,但是其数学形式并非如杨-米尔斯方程结构一般,杨-米尔斯理论的耦合常数无量纲但广义相对论引力常数却有量纲;广义相对论方程与量子场论也有抵触,如量子真空零点涨落能具有近乎发散的真空能量密度导致的巨大引力潮汐力却无法在引力理论中合理体现或合理消除。虽然广义相对论本身美轮美奂,但这些问题也暗示广义相对论背后可能隐藏着一个更为基本的理论。这些均导致20世纪70年代之后广义相对论引力理论受“挑战”或有了要求改进和发展的呼声和行动,于是之后三、四十年至今,诸引力理论喧嚣尘上,令人目不暇接。本文将结合目前天体物理学与宇宙学最大谜(暗物质、暗能量本质之谜)以及近来双中子星合并与引力波、电磁波“双信使”信号事件(2017年8月17日)来介绍以上研究现状,其中包含了一些启迪,希望抛砖引玉,供相关研究者参考。

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,故有时仍旧沿袭用英文。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。值得一提的是,本文所涉及的引力理论有的文献汗牛充栋,部分早期理论文献浩如烟海。本文只是挂一漏万地提供一个梳理,希冀有助于引力物理学(广义相对论)、天体物理与宇宙学门类之中部分研习者了解相关研究动态。

二、星系暗物质两大谜

1934年瑞士天文学家兹威基发现,星系中的大部分物质是无法用光学手段观察到的。由于在星系尺度,广义相对论效应还比较弱,因此人们可以假设牛顿引力定律仍旧适用,兹威基用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。兹威基最早计算得到的两者比值甚至高达100到400倍。随着探测技术的发展,这个比值虽然下降了很多,但是仍旧有十倍量级之多。观察到的大量星系的转动速度远超出了理论上的预期速度;位于星系边缘的恒星绕星系中心本该有比较小的转动速度,但是实际速度巨大。这样高速转动的星系竟然没有瓦解,说明星系中必然存在观察不到的物质维持了星系的引力稳定性。这种用光学电磁探测手段也看不见的星系质量被称为“失踪质量”。在同一时代,荷兰天文学家奥尔特也在观测中得到了以上结论。观察表明,明亮物质(即普通重子物质)主要分布在星系中心,那么按照牛顿引力理论可以预期,星系内不同半径处(与星系中心的距离为 r)的气体及恒星围绕星系中心的转动速度 v 应该随公转半径 r 增大而逐渐下降,即 $v \propto 1/\sqrt{r}$ (此为开普勒转动曲线)。但是,在20世纪70~80年代美国女天文学家鲁宾观察了100多个星系,发现转动速度 v 在一个给定星系内几乎为常数,且随着 r 增大,这个常数转动速度并无减小的趋势。鲁宾一生研究了200多个星系,验证了这个星系规律。这被称为星系平坦转动曲线之谜。那么失踪质量到底是什么物质或者什么物理效应呢?

自20世纪70年代超对称、超引力理论被提出后,人们认为超对称粒子可能就是失踪质量的候选者,之后“失踪质量”被称呼为“暗物质”。这种超对

称暗物质的特点是不带电荷,也没有电(磁)偶极矩,不参与电磁相互作用,因此它们不发射电磁波;作为物质,它们有能量-动量张量,因此它们是引力之源,将一个个星系、星系群或星系团、超团等束缚在一起。虽然我们无法借助光学电磁方法探测到其存在,但是可以通过其表现出来的万有引力效应获悉其存在。暗物质粒子可以包括最轻(因此寿命长)的超对称粒子和光微子、引力微子外,还包括其他新理论所假设的编外粒子,如轴子、惰性中微子、大统一理论中的磁单极子、引力-规范统一理论中的卡鲁扎-克莱因高维粒子等。有不少人指出量子真空能黑洞也可能是暗物质的候选者。我们知道,黑洞质量越小,温度越高,因此越容易蒸发,小质量黑洞寿命也就越短,但是由于量子真空零点涨落能的存在,可能也存在着量子真空零点能水平的黑洞,它是稳定的,那么它也有可能扮演星系暗物质的角色。

对星系平坦转动曲线之谜,除了用以上的非重子暗物质来解释外,还有其他解释,如MOND解释,其全称是Modified Newtonian Dynamics即“修改的牛顿动力学”。它对牛顿力学动了大手术。原始的星系内力平衡方程是 $GM/r^2 = a$,其左边引力部分系牛顿引力(M 为可测的普通重子物质如氢、氦等各种元素的原子离子的总质量),右边部分的向心加速度为 $a=v^2/r$ 。在“修改的牛顿动力学”MOND理论中,新的星系力平衡方程是 $GM/r^2 = f(a)$,右边 $f(a)$ 是加速度 a 的函数。该函数应当具有如下特性:在向心加速度 a 较大时, $f(a) \rightarrow a$ (这样仍旧与传统理论一致),但在当加速度 a 比较小的时候, $f(a) \rightarrow a^2/a_0$ 。这里 a_0 是一个特征常数,称为Milgrom特征加速度(a_0 具有 10^{-10} m/s^2 量级)。Milgrom是以色列学者,他在1983年首先提出这样的方案。显然,我们很容易写出满足这样性状的 $f(a)$ 函数,如 $f(a) = a/(1 + a_0/a)$ 、 $f(a) = a/[1 + (a_0/a)^n]^{1/n}$ 等。当然,这样的函数有无穷多个。在星系中,引力加速度小于特征加速度 a_0 (a 远小于 a_0),因此有极限 $f(a) \rightarrow a^2/a_0$ 。在力平衡方程 $GM/r^2 = a^2/a_0$ 中,将圆周运动向心加速度 $a = v^2/r$ 代入,我们可以发现星系转动速度平方为 $v^2 = \sqrt{GMa_0}$,

即星系内各点恒星或气体绕星系中心的转动速度确实是一个常数,它与恒星或气体在星系中的位置 r 无关。因此MOND理论可以解释20世纪70~80年代由美国鲁宾所观察到的星系平坦转动曲线规律;又由于它得到的星系转动速度平方与普通重子物质(明亮物质)质量 M 的平方根成正比,因此它也成功解释了20世纪70年代观察发现的星系Tully-Fisher关系。Tully-Fisher关系是星系光度(发光能力) L 与谱线宽度间的关系。谱线宽度是由于星系内恒星绕星系中心转动所导致的谱线多普勒效应而产生的,谱线宽度与星系内恒星公转速度 v 成正比。Tully-Fisher关系大致为 $L \propto v^4$ 。因为星系发光强度 L 与星系内普通重子物质(明亮物质)质量 M 成正比,那么Tully-Fisher关系就等价于 $M \propto v^4$,此恰好与上面得到的 $v^2 = \sqrt{GMa_0}$ 在结构上一致,在数值上也相近。于是 $L \propto v^4$ 可以称为天文学家的Tully-Fisher关系,而 $v^2 = \sqrt{GMa_0}$ 可以称为物理学家的Tully-Fisher关系。但是MOND理论仅仅是一家之言。虽然Tully-Fisher关系背后的物理机制还没有公认的解释(目前MOND理论是最佳解释),但是Tully-Fisher关系对于测定遥远星系到我们观察者的距离却十分有应用意义。由于星系自身的转动速度可以由多普勒效应测定,那么由Tully-Fisher关系也就可以计算出星系的重子物质质量 M 、发光能力 L 。将在地球上观察到的遥远星系的表观光度与星系实际发光强度 L 比较,就可以定出遥远星系与我们之间的距离。所以,Tully-Fisher关系用处很大。以上是关于涡旋星系的Tully-Fisher关系。对于椭圆星系,也存在类似的光度-谱线宽度(星系转动速度弥散)关系,它叫Faber-Jackson关系。值得一提的是,上面介绍的非重子暗物质假说(如超对称粒子、轴子、惰性中微子等)并不能解释星系Tully-Fisher关系。因为按照该假说,星系内非重子暗物质质量应当是重子物质质量的六到十倍(甚至更多),显然星系转动速度应当主要与非重子暗物质质量有关,但根据Tully-Fisher关系,星系转动速度却与星系内占质量比更少的重子明亮物质质量直

接有关。这就好比说一个人是否有能力购买房子,并非是由他的银行巨量存款决定,而是由他的零用钱决定。似乎非重子暗物质假说败下阵来,而MOND理论(修改的牛顿动力学)可以用极其简单的方式解决星系平坦转动曲线之谜与Tully-Fisher关系之谜,真是可谓一举两得。但是,MOND理论也有它的软肋。前面我们已经指出,在MOND理论的力平衡方程 $GM/r^2 = f(a)$ 中,这样性状的 $f(a)$ 函数可以有多个(甚至无限多个),因此这类理论变得有点不确定,理论模型不具有唯一性。对于理论物理而言,这样的理论失去了该有的魅力。当然,你我都想到了,为了克服这个问题,只要将它相对论化,从第一性原理推导出来,尽可能将 $f(a)$ 函数唯一地确定下来。2004年以色列引力物理学家贝肯斯坦(Bekenstein)提出了一个复杂的相对论MOND版本,即所谓张量-矢量-标量理论。该理论在爱因斯坦-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的标量场,另一种没有这样的动能项),该理论还引入了一种单位矢量场(类似带静止质量的Proca电磁场),从而借助它来修正引力场度规,让新引入的标量场、矢量场与普通物质场耦合起来,从而让普通物质受到更强的引力,用以解释星系“暗物质”效应。该理论是本文将要评述的理论之一。

三、诸引力理论

面对着星系暗物质以及宇宙暗能量之谜,过去几十年,尤其是最近二十年来,理论物理学家与天体物理学家等提出了几十种主要的理论。粗略地分,这些理论可以分为“物质说”与“非物质说”。“物质说”又可分为“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不再发光的恒星如中子星与黑洞等。那些高度电离的氢氦离子气体因为不再发生能级跃迁故而不发光,因此高温炽热普通物质的星系或星际离子气体也可以被列为重子暗物质;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

(其全称是 weakly interacting massive particles), 包括最轻的稳定的超对称粒子、惰性中微子、轴子与卡鲁扎-克莱因(Kaluza-Klein)模型中的额外维度粒子等。目前倾向于认为星系暗物质不可能是重子暗物质,而非重子暗物质却还没有被公认探测到,尽管屡有孤例报道。

下面来看“非物质说”。“暗物质”之“非物质说”认为造成星系强大的束缚力并非真实的物质(暗物质)的引力效应,而是因运动学(如牛顿力学或相对论力学定律)或动力学(牛顿引力或爱因斯坦引力理论)在大尺度上需要修改。其他还有各种杂说,如高维空间说,它什么暗物质粒子也不需要、什么理论也不修改,仅仅引入一个额外的高维度(当然,比起形式式、莫衷一是的假设和假说来,引入高维度确实是最方便、最经济也是最自然的做法)。高维空间说认为所谓的星系“暗物质”效应其实来自于高维空间内的引力效应或者高维空间内的物质之引力在我们普通的三维空间内的投影效应。这个方案主要由 Wesson 等人在 20 世纪 90 年代倡导。

总之,关于星系“暗物质”之谜之本质,众说纷纭。不过最为流行的主要还是两家:以非重子暗物质理论为代表的“传统派”和以 Milgrom 的 MOND 理论为代表的“修改派”。非重子暗物质“传统派”内部比较安静,因为它们候选者(如最轻超对称粒子、惰性中微子、轴子与高维粒子等统称为“弱相互作用重粒子”)的理论本身已经确定,只要坐等实验结果来遴选即可。但是,动力学或引力理论的“修改派”内部却喧嚣不止。面对着天体物理、宇宙学以及粒子物理学诸多之谜,如星系暗物质、宇宙甚早期暴涨、现今宇宙加速膨胀与暗能量本质等亟待解决的问题,各种新引力理论都如雨后春笋一般冒出来,让人目不暇接。每一类理论又可以衍生出形形色色的变种,同一作者也会提出多种方案。这些理论中的大多数虽然也宣称与引力的标准理论(爱因斯坦广义相对论引力理论)进行竞争,但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(如添加了一些额外的

标量场、矢量场和张量场等),因此看上去它们其实也只能算是对爱因斯坦广义相对论引力理论进行修补或推广。总的说来,这些理论可以分为如下几大类:

第一类理论(对广义相对论进行温和推广),可以分为三个亚类:a) 高维引力理论如卡鲁扎-克莱因理论(1921~1926)和 Wesson 引力理论(1990 年代);b) 高导数引力,包括 Lovelock 引力、 $f(R)$ 引力、Gauss-Bonnet 引力、无穷阶导数引力(infinite derivative gravity);c) 含有新引入的额外场的引力理论,例如各种标量-张量(scalar-tensor)理论及标量-张量-矢量(scalar-tensor-vector)引力理论,如卡鲁扎-克莱因理论(1921~1926),布兰斯-迪克(Brans-Dicke)理论(1961)以及贝肯斯坦的张量-矢量-标量理论(2004)、莫法特(Moffat)的标量-张量-矢量引力理论(2005)和莫法特的度规-不对称张量(metric-skew-tensor)引力理论(2005)。这类理论有雄心壮志,竭力要一统宇宙学之谜,主要是解决三大问题(甚早期宇宙暴涨起源之谜、现今宇宙加速膨胀之谜及星系与宇宙学暗物质之谜)。这是因为这类理论往往有一个或多个动态标量场,这种类似希格斯场的动态标量场对解释宇宙暴涨和加速膨胀有借鉴意义。第二类理论(对传统力学理论的颠覆性推广),包括 a) “修改的牛顿动力学”(MOND),如以色列 Milgrom 在 1983 年所提出的理论及其相对论版本(贝肯斯坦在 2004 年发表的理论);b) 引力的力学解释理论如荷兰 Verlinde 在 2009 年提出的熵力(entropic gravity)理论和在 2016 年所提出的呈展引力理论(emergent gravity)。在熵力理论中,引力被看作类似渗透膜上的渗透压现象;在呈展引力理论中,引力被看作类似时空的弹性记忆效应。其他还有多种把引力现象看作统计物理学或热力学现象的理论,如 Jacobson 在 1995 年把爱因斯坦广义相对论方程看作是热力学的物态方程,Padmanabhan 从热力学角度诠释爱因斯坦广义相对论方程。由于热力学平衡态满足最大熵原理,而引力场方程满足最小作用量原理,热力学与引力理论之间有某些类

比,也是正常的。也有多人把引力场看作是时空晶体(具有最小晶胞结构)内的旋错、位错现象等。第三类理论(引力规范理论),其目的是要把引力场方程写成类似杨-米尔斯方程形式。引力规范理论包括1956年的Utiyama理论(它只是一个引力-规范理论纲要)、20世纪50~70年代的Stephenson-Kilmister-Yang引力理论、国内郭汉英等人在20世纪70~90年代提出的一系列引力规范理论等。这些理论把曲率平方项也引入进引力作用量密度,把自旋联络(洛伦兹联络)当作动力学变量,但仍旧把爱因斯坦-希尔伯特作用量密度当作领头项。1922年的爱因斯坦-嘉当(Einstein-Cartan)理论(及四十年后的Einstein-Cartan-Sciama-Kibble理论)也应该被归入引力-规范理论范畴。虽然在爱因斯坦-嘉当理论中,引力作用量密度中没有曲率平方项,但是在理论中有挠率,将挠率与度规张量当作变量,自旋流密度成为挠率之源。此外,还有等价于Einstein-Cartan理论的由Carmeli提出的 $SL(2, C)$ 引力规范理论,也属于引力规范理论大类。第四类理论包括其他个别理论,如重引力(massive gravity)、双度规理论(bimetric theories)、绝对平行理论(Teleparallelism)。在绝对平行理论中,研究者引入了挠率,因此它的几何不是纯黎曼几何,而是黎曼-嘉当几何。该理论要求黎曼-嘉当曲率张量处处为零。这样一来,无挠的黎曼曲率张量可以用纯挠率表达出来。爱因斯坦广义相对论理论(原本是一个只有曲率、没有挠率的理论)现在被改写为了一个只有挠率、没有曲率的理论。爱因斯坦在20世纪40年代提出过这样的理论。这些理论不引入上述动态标量场、矢量场之类等额外场,只是对爱因斯坦-希尔伯特作用量进行改造。第五类理论属于广义相对论的发展,如超引力(supergravity)、超弦(superstring)与M理论、圈量子引力(loop quantum gravity)理论等。以上分类是比较粗糙的,事实上有些理论同时拥有多类特征。

为了解释宇宙暗能量与宇宙加速膨胀现象、宇宙暴涨起源、星系暗物质之谜,以及也基于理论上

的原因,如需要建立引力规范理论、基本相互作用的统一场论、量子引力理论,物理学家们百花齐放,提出了大量新引力理论方案,每种理论或多或少都有各自的追随者。众说纷纭、莫衷一是。正当众多引力理论群雄并起,逐鹿广义相对论、量子场论、规范理论和宇宙学而风起云涌之时,在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使得“丧钟”敲响,以上相当一部分新引力理论为此而被观察事实排除,顿时玉宇纯澄、乾坤晴朗。

四、双中子星合并中的“双信使”事件

根据广义相对论,时空弯曲代表引力,时空并非刚性,它会振荡。时空坐标就像水中的鱼网一样能随着水波摇曳,引力波就是这样一种时空涟漪,引力波所到之处,物质就像哈哈镜内的镜像一样变形,如横向压缩、纵向伸长。人类经过半个世纪的努力,利用大迈克尔逊干涉仪和激光干涉技术,于2015年9月14日、12月26日、2017年1月4日由位于美国的LIGO(激光干涉引力波天文台)合作组观察到了三次来自遥远黑洞合并发射的引力波信号。这些引力波信号仅由两台位于美国的激光干涉引力波观察仪观察到。2017年8月14日,美国LIGO引力波天文台和欧洲Virgo引力波天文台观察到了第四次引力波事件,此来自20亿光年外的引力波首次被地球上美国与欧洲共三台引力波观察仪观测到。以上引力波信号都来自几亿或十几亿、二十亿光年外的“双黑洞碰撞合并”事件。之后在第五次引力波事件中,“双中子星合并”登场。

2017年10月16日,美国和欧洲的引力波天文台合作组以及全世界70多家电磁波天文台(也包括中国的空间X射线天文卫星慧眼望远镜和南极巡天望远镜)联合宣布,在2017年8月17日世界标准时间(UTC)12:41:04,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星系所产生的

引力波信号(被称为GW170817)。经推断,此引力波信号由质量介于0.86倍与2.26倍太阳质量之间的两个中子星合并所产生。这是人类历史上首次探测到来自双中子星合并的引力波信号。据论文和新闻报道,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)接收到了伽玛射线爆发信号,它与本次双中子星合并事件有关联。此伽玛射线爆发被称为GRB170817A。此后几天,全世界多家光学与电磁波天文台(一般根据以上提示)也探测到了该1.3亿光年外的双中子星合并所发射的电磁波信号如伽玛、X光、紫外、红外和射电等波段信号等。

此次引力波信号之源与地球相距1.3亿光年,引力波信号与电磁波信号在宇宙空间传播了大约 4×10^{15} 秒,但是它们两者以仅仅相差1.7秒的时间差先后到达地球,这充分说明引力波信号与电磁波信号从同一点源出发、沿着精确相同的轨迹、以几乎完全相等的速度传播。但毕竟引力波比电磁波略早1.7秒到达地球,原因可能包括如下几条:引力波先发射,因为只要两个中子星螺旋式靠拢、即将合并但还未开始熔融为一体时,引力波就可以开始发射;但电磁波的发射需要两个中子星更进一步熔融方可,故电磁波略微晚一点发射。当然,电磁波的1.7秒延迟也可能有其他物理来源,如MOND理论和“修改的引力理论”要求引力波与各种额外标量场、矢量场有耦合或一些理论要求电磁波与物质有额外耦合,如电磁波与轴子暗物质粒子之间的耦合、卡鲁扎-克莱因理论要求电磁波与胀缩子(dilaton)标量场的耦合,导致两者的波动方程略微有所区别,从而两者传播速度稍微不同;又或者引力子或光子有各自的内秉的静止质量,那么引力子或光子就不再以光速传播。但无论如何,这1.7秒延迟也给以上各种新理论观点强加了一些参数限制条件。这些额外耦合效应或静止质量效应即使存在,它们也是极端微弱的,因为我们已经看到,引力波与光波即使有速度偏差,两者也仅仅相差 10^{-15} 倍光速而已。

根据狭义相对论,如果粒子(物质波)携带静止质量 m_0 ,那么它的速度将慢于光速。如要传播距离 L ,它的延迟时间是 $\Delta t = [m_0^2 c^4 / (2\hbar^2 \omega^2)] (L/c)$,其中 ω 为该物质波的角频率。显然频率越高,静止质量所导致的延迟效应越不明显,延迟时间越小。我们从上面的该延迟公式可以估算得到:如果假设引力波以标准光速传播,延迟时间 Δt 来自电磁波(伽玛射线)的光子静止质量 m_0 ,并设其角频率 ω 为 10^{20} /秒,那么根据双中子星合并检测中的双信使之间的延迟时间(1.7秒),我们可以估算得到该光子静止质量上限为(即不大于) 10^{-48} 千克。目前在地球上用其他实验手段如用扭秤测量静磁场力矩等方法测到的光子静止质量上限其实是 10^{-54} 千克,远比这个估算小。这说明用该双中子星合并事件来估算光子静止质量,其实其精度远低于地球上已有实验(用扭秤测量静磁场力矩的方法)。但是如果假设光波以标准光速传播(电磁规范对称性要求光子静止质量 m_0 严格为零),那么再来估算引力子静止质量,设美国LIGO探测到的引力波频率为10/秒量级左右,可以估算出引力子静止质量上限数值为 10^{-58} 千克量级(这是一个相当微小的数值,比电子质量小28个数量级)。这对于赋予引力子以静止质量的某些重引力理论(massive gravity)的参数以极强的限制。

有人可能会问:你上面似乎使用了平直背景时空下的电磁波方程和引力波方程来分析,实际宇宙时空是弯曲的,1.3亿光年已经属于大尺度,那么必须要考虑星系团尺度上的弯曲时空度规,而在弯曲时空度规背景下,电磁波传播轨迹是弯曲的,要发生类似“星光弯曲”和“雷达回波延迟”等效应,那么引力波也具有这些效应吗?答案是肯定的。虽然爱因斯坦引力场方程与麦克斯韦方程在表面形式上是如此不同,但是在弱引力场近似下,引力波微扰振幅的方程与麦克斯韦方程其数学结构精确一致。这种证明其思想如下:弯曲时空中的无源麦克斯韦方程是 $\nabla_\mu F_\nu^\mu = 0$,弯曲时空中无源引力场方程是 $R_{\nu\sigma} = 0$ 。前者显式为 $\partial_\mu F_\nu^\mu + \Gamma_{\mu\tau}^\mu F_\nu^\tau - F_\tau^\mu \Gamma_{\mu\nu}^\tau = 0$,后者显式为 $\partial_\sigma \Gamma_{\nu\mu}^\mu - \partial_\mu \Gamma_{\nu\sigma}^\mu + \Gamma_{\nu\mu}^\tau \Gamma_{\tau\sigma}^\mu - \Gamma_{\nu\sigma}^\tau \Gamma_{\tau\mu}^\mu = 0$ 。再利用

弱引力场近似,可以显示两者在数学结构上确实是一致的。事实上,这应当是显然的事实,读者也许记得历史上的一个五维卡鲁扎-克莱因统一理论。该理论曾企图将引力场与电磁场统一起来,其中电磁规范势就起源于第五维度规分量。虽然它最终没有获得公认,但至少在理论表观上获得了“成功”。总之,根据广义相对论和电动力学,来自双中子星合并的引力波与电磁波信号必须在传播轨迹上每时每刻精确同步。这个本应该是显然的结果,在2017年8月17日探测到的双中子星合并事件中得到了证明,还是让物理学家们十分激动。它不但证明了广义相对论和麦克斯韦电动力学在几亿光年尺度上仍旧精确成立,而且还有一个意外的功能,那就是1.3亿年前的双中子星合并导致的电磁波和引力波“双信使”同时到达地球这一事件给目前很多众说纷纭、言人人殊的新引力理论带来了“灾难”,这对于厘清目前引力物理学界各路理论有特殊意义。

五、代表性理论简述

本节我们介绍部分有代表性的暗物质理论和引力理论,评估双中子星合并中的引力波和电磁波“双信使”事件对其之影响和意义。“双信使”事件可以帮助我们遴选有前途的新引力理论,排除一批可能被淘汰的理论,或者对其理论参数给予强有力的限制。

“双信使”事件有助于否定“轴子作为暗物质”的理论假说。轴子一开始是在量子色动力学中为了解决强相互作用中的强CP问题而引入的,后来被当作天体物理学中暗物质粒子的候选者。寻找轴子,是一些粒子物理学家和天体物理学家共同的目标。轴子与电磁场也有轻微耦合,因此轴子的存在,会修改麦克斯韦电磁场方程组。该理论的电磁拉格朗日量密度是 $\ell_{\text{em}} = -F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}/4$,轴子 ϕ 的拉格朗日量密度是 $\ell_{\phi} = (\partial_{\mu}\phi\partial^{\mu}\phi - m^2\phi^2)/2$ (都是普通的作用量密度),但总的拉格朗日量密度中多了轴子与

电磁场的耦合项 $\ell_{\text{cm}} = -\xi\phi\tilde{F}_{\mu\nu}F^{\mu\nu}/4$ ($\tilde{F}_{\mu\nu}$ 为 $F_{\mu\nu}$ 的对偶张量)。于是新的麦克斯韦电磁场方程是 $\partial_{\mu}(F^{\mu\nu} + \xi\phi\tilde{F}^{\mu\nu}) = 0$ 。写成三维矢量形式便是 $\nabla \times (\vec{B} + \xi\phi\vec{E}) = \partial(\vec{E} - \xi\phi\vec{B})/\partial t$ (广义的安培环路定律)和 $\nabla \cdot (\vec{E} - \xi\phi\vec{B}) = 0$ (广义的库伦-高斯定律)。根据该拉格朗日量密度或其场方程组,我们可以获知,一个光子在静态的强磁场中会转化为轴子 ϕ 。这是因为轴子场 ϕ 是一种赝标量场(当空间坐标反向一下,其数值会增加一个负号),而我们知道电场是矢量场(当空间坐标反向一下,其数值会增加一个负号),而磁场是赝矢量场(当空间坐标反向一下,其数值不变)。故在强磁场(赝矢量场)辅助下,一个光子可以变为一个轴子(赝标量场)。之所以需要强磁场,乃是为了增大光子与轴子之间的耦合强度,增大转换几率。但是目前人们用这类实验机制并没有探测到轴子,这既有可能是因为轴子不存在,也有可能是因光子-轴子的耦合强度实在太弱故而测不到。对于一个自由传播的电磁波而言,轴子的存在,在效果上让光子也带上了一份有效静止质量,从而电磁波的传播速度轻微偏离光速常数 c 。如果轴子就是宇宙中的暗物质粒子,显然其无所不分布,且来自双中子星合并的电磁波要旅行1.3亿光年这么远的星际距离到达地球,那么即使轴子与电磁波耦合相当弱(至于弱到何种程度,这也许需要依靠量子色动力学等来估算),也可能对电磁波延迟有比较大的累积效应,最终导致电磁波与引力波无法同时达到地球。所以,这一电磁波与引力波“双信使”事件有助于我们确定轴子与电磁波之间的耦合系数上限,甚至否定轴子的存在。如果通过双信使事件和星系的轴子暗物质假设所计算出来的耦合系数远比量子色动力学等理论估算所要求的耦合系数还要小,那么这意味着否定了轴子的存在,至少星系暗物质粒子不可能是轴子。轴子作为暗物质粒子,可以被排除,还有一个理由:轴子的质量被认为是0.1毫电子伏特量级,在今天的2.7K宇宙微波背景辐射环境中,它是冷暗物质,但是在宇

宙早期原初核合成时(宇宙时为1~100秒量级),它是相对论性粒子,因此它有很大的辐射能量密度,从而会修正宇宙膨胀速率,这会影响到原初氦核丰度,使得理论值与观察值不符合。从这个角度讲,我们不希望轴子大量存在。

与轴子类似,统一引力与电磁力的五维时空卡鲁扎-克莱因理论中的伸缩子(dilaton)标量场也与电磁场有耦合,因此上述电磁波与引力波“双信使”事件也有助于我们确定伸缩子标量场与电磁波之间的耦合系数上限,甚至否定卡鲁扎-克莱因理论,包括其高级版本如非阿贝尔(non-Abelian)卡鲁扎-克莱因理论。在1919年,卡鲁扎在当时爱因斯坦等人倡导的“统一场论”风尚影响下,增加了一个空间维度(第五维),将爱因斯坦的四维时空广义相对论推广到五维时空,将第五维的度规分量 $g_{5\mu}$ 看作四维电磁势 A_μ , 而第五维度规分量 g_{55} 化身为伸缩子标量场 ϕ (对应关系为 $g_{55} = \phi^2$), 从爱因斯坦广义相对论引力场方程中获得了麦克斯韦电磁学方程,从而将电磁力与引力统一起来了,电磁力只不过是第五维引力在普通四维时空中的表现。这一模型在当时震撼了爱因斯坦。据说卡鲁扎将论文寄给了爱因斯坦,爱因斯坦思考了两年后回信表示自己确实没有想到这一思想,并表示审慎同意该理论中所包含的成功要素,虽然后来爱因斯坦在后半生一直沿着其他路子(如非对称度规理论、复数度规理论、绝对平行引力)继续创建新的“统一场论”。卡鲁扎1921年发表了他的五维统一场论方案后,瑞典克莱因在1926年也独立地得到了类似的五维统一理论,虽然他在发表前也了解到了卡鲁扎几年前的理论,但克莱因用维度紧致化方案(即把第五维看作是一个闭合的周期性的小圆圈)代替了卡鲁扎的第五维“柱条件”。克莱因还发现物质波在第五维度中的动量会修正粒子电荷,因此他假设第五维是闭合圆圈,物质波在第五维度中的驻波使得五维动量量子化,因此克莱因用该理论探讨了电荷量子化的起源。后来,此二者理论被合称为卡鲁扎-克莱因理论。这样的理论因为存在伸缩子标量场 ϕ 与电磁规范场

A_μ 的耦合(即电磁场方程是 $\nabla_\mu F^{\mu\nu} + (3/\phi)(\partial_\mu \phi)F^{\mu\nu} = 0$, 其中 $F^{\mu\nu}$ 是传统电磁场张量),故而会影响电磁波的传播,在理论上可能会改变引力波与电磁波“双信使”信号同时达到地球这个观察结果。卡鲁扎-克莱因理论中的引力场方程是 $G_{\alpha\beta} = (\kappa^2 \phi^2/2)T_{\alpha\beta} - (1/\phi)(\nabla_\alpha \partial_\beta \phi - g_{\alpha\beta} \square \phi)$, 其中 $T_{\alpha\beta}$ 为电磁场的能量-动量张量,空框 \square 为二阶微分波算符(达兰伯算符);伸缩子标量场 ϕ 的波动方程是 $\square \phi = (\kappa^2 \phi^3/4)F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta}$ 。我们可以看出,引力场方程在经过弱场近似后,因为标量场 ϕ 的存在导致引力波与电磁波的波动轨迹将有较大不同,不再沿着同一轨迹传播。况且双信使事件中的电磁波(伽玛射线)频率与引力波(1赫兹到100赫兹量级)频率相差18到20个数量级,那么伸缩子标量场 ϕ 的波动频率又处于哪个量级呢,其坐标梯度 $\partial_\beta \phi$ 数值又是什么量级? 无论取什么量级,它对引力波与电磁波信号的贡献肯定不同,由此也会强烈引发两者不同的传播路径,所以卡鲁扎-克莱因理论有可能受“双信使”事件牵连。因此,从一定程度上讲,细致研究(非阿贝尔)卡鲁扎-克莱因理论中的电磁波传播,有助于我们遴选该类理论或者否定该类理论。高维引力理论除了卡鲁扎-克莱因理论外,还有Wesson等人在20世纪90年代倡导的理论。该理论认为高维空间的纯引力场在普通四维时空中可以具有类似物质的效应,这些物质可以使得四维时空中的宇宙加速膨胀。Wesson的五维引力场方程是 $G_{\mu\nu} = 0$ ($G_{\mu\nu}$ 是五维的爱因斯坦张量),把普通四维时空度规及其导数项分离出来留在方程左边,把与第五维有关的量都挪到方程右边去,那么方程右边的项就具有类似物质的功能。不过,本作者钻研了Wesson理论,重复了其数学推导,看起来该理论无法解释星系转动动力学之谜(包括平坦转动曲线之谜与星系Tully-Fisher关系之谜)。但用以解释宇宙加速膨胀,该理论是有可能做到的,即五维空空如也的宇宙允许其四维子时空加速膨胀。当然Wesson理论也只是一家之言。虽不能否定Wesson理论,但也说明Wesson理论对于解决星系暗物质之谜没有用途。

提出于1961年的布兰斯-迪克标量-张量理论

与1921~1926年的卡鲁扎-克莱因理论在历史上曾经具有渊源关系,在理论结构上有部分类似要素。布兰斯和迪克在广义相对论中的爱因斯坦-希尔伯特引力作用量密度($\ell = R/(2\kappa)$,其中 $\kappa = 8\pi G$)基础上,引入了一种额外的标量场 ϕ ,其作用量数学形式与卡鲁扎-克莱因理论有类似结构(例如布兰斯-迪克理论和卡鲁扎-克莱因理论的标量场作为引力源,其能量-动量张量都含有 $(\nabla_\mu \partial_\nu \phi - g_{\mu\nu} \nabla_\lambda \partial^\lambda \phi)/\phi$ 这一部分),因此这两个理论可以合并研究,尽管两者理论出发点思路不同(卡鲁扎-克莱因理论是为了利用第五维度去统一引力与电磁力,出现了与第五维度度规有关的伸缩子标量场;布兰斯-迪克理论中的标量场起着可变引力常数的作用,因此自称体现了马赫原理,即所谓物质的惯性来源于全宇宙所有其他物质对它的影响)。布兰斯-迪克理论的作用量密度是 $\ell = (\phi R - \omega \partial_\lambda \phi \partial^\lambda \phi)/16\pi$,这里标量场 ϕ 与里契曲率标量 R (即爱因斯坦-希尔伯特引力场作用量密度)乘在一起,意味着标量场 ϕ (是时间和空间的函数)起着可变引力常数的作用。在20世纪曾有多次引力物理实验似乎显示引力常数确实可能在时间上和空间上都是可变的。如果引力常数随着宇宙演化在时间上确实可变小,那么月球会离地球远去,早期星系以及恒星内因引力常数过大而大大修改其核聚变速率,会影响宇宙内元素丰度,也会影响宇宙演化早期的引力红移;如果引力常数在空间上可变,那么也许可能可以解释星系、星系团中的所谓“暗物质”效应以及今天的宇宙加速膨胀效应,毕竟布兰斯-迪克理论有动态标量场,选取适当的拉格朗日势能项,可以让动态标量场具有负压,从而布兰斯-迪克标量场可能是一种动态暗能量。不过近来更明确的观察其实并无证据显示包括引力常数在内的很多基本物理常数如基本电荷、光速和普朗克常数随着宇宙年龄而变化。这就对该理论内有关参数作了很强的限制。与卡鲁扎-克莱因理论有所不同的是,在布兰斯-迪克理论中,普通物质(如电磁场)并不与其引入的标量场 ϕ 耦合,因此不影响电磁波传播速度和轨迹。但是在布兰斯-

迪克理论的作用量密度 $\ell = (\phi R - \omega \partial_\lambda \phi \partial^\lambda \phi)/16\pi$ 中,曲率标量 R 与标量场 ϕ 有耦合,因此其引力波方程在星系尺度上要得到修正,从而偏离电磁波传播轨迹,因此布兰斯-迪克理论在这次中子星合并“双信使”事件中受到了牵连。

2013年Minazzoli与Hees提出了一种含有“压力子”(pressuron)标量场 Φ 的暗能量引力理论,其理论基础是弦论,所引入的标量场 Φ 是弦伸缩子(string dilaton),它能与引力场和物质场耦合,如与物质场耦合的拉格朗日作用量密度是 $\ell_{m\Phi} = \sqrt{\Phi} \ell_m$ (其中 ℓ_m 是物质场的作用量密度),它与爱因斯坦引力场的耦合作用量密度是 $\ell_{g\Phi} = \Phi R/(2\kappa)$ 。该理论要求在物质无压时,压力子标量场能与物质脱耦,但有压时它与引力场和普通物质都有耦合。值得一提的是,从其拉格朗日量看,该理论也是在爱因斯坦-希尔伯特引力作用量密度($\ell_{g\Phi} = \Phi R/(2\kappa)$,其中 $\kappa = 8\pi G$)基础上添加了一些额外项,整个理论的拉格朗日量和场方程在表面上很像布兰斯-迪克理论,而且引力常数 G 也受到了标量场 Φ 的修正。压力子自身的作用量密度是 $\ell_\Phi = -[(\omega(\Phi)/\Phi)(\partial_\mu \Phi)^2 + V(\Phi)]/(2\kappa)$ 。该理论设计了一些压力子标量场势能项 $V(\Phi)$,因此该理论其实也是一个动态(标量场)暗能量理论,有助于解释现今宇宙的加速膨胀之谜(即宇宙暗能量之谜)。但由于该理论中的标量场与引力场和物质场都有耦合(且耦合结构不同,即 $\ell_{m\Phi} = \sqrt{\Phi} \ell_m$ 与 $\ell_{g\Phi} = \Phi R/(2\kappa)$ 之间的区别),因此该理论在这次中子星合并“双信使”事件中会受到牵连,至少“双信使”事件对其耦合参数的选取有了很强限制。

从上面的作用量密度可以看出,布兰斯-迪克(Brans-Dicke)理论和压力子(pressuron)引力理论是十分相似的,他们理论的标量场都具有引力常数的功能。不同点主要在于布兰斯-迪克理论中的标量场不与普通物质耦合,而压力子理论中的标量场与普通物质可以耦合。它们都是比较简单的一类标量-张量引力理论。其他还有各种推广的标量-张量理论版本,下面还将评述两个更复杂的流行的理

论,即贝肯斯坦(2004)和莫法特(2005)的理论,他们对爱因斯坦广义相对论颇动了一番手术。相较于为解决暗物质之谜而对广义相对论大动手术这一行为,为了解决暗能量之谜(或宇宙加速膨胀之谜),人们对爱因斯坦引力理论倒没有开刀。这是因为在爱因斯坦理论中,宇宙学常数项可以天然解释宇宙加速膨胀问题。另外,添加简单的动态标量场后标量场的非线性自作用势能项也有宇宙学常数项的功能。可能正因为如此,在1998年才发现的宇宙加速膨胀现象因为有比较靠谱的理论支撑而很快在2011年获得了诺贝尔物理学奖。但鲁宾在四十多年前就发现的星系平坦转动曲线现象,因为没有公认的、靠谱的理论去解释(实际上是候选理论多如过江之鲫变得理论解释反而不确定)而没有获得诺贝尔奖。但爱因斯坦说过:“好把戏不能玩两次。”动态标量场在基本粒子希格斯机制、宇宙早期暴涨之谜中已经运用过,现在要在宇宙加速膨胀之谜中使用第三次了。动态标量场的涨落也是一种粒子,那么在宇宙早期原初核合成阶段,它的能量密度也会影响宇宙膨胀速率从而改变原初核丰度。动态标量场的这些效应也需要考虑。

引力理论中的挠率也可以被“双信使”事件否定。传统的爱因斯坦广义相对论是一个有曲率但无挠率的理论。爱因斯坦本人在晚年也考虑过有挠率的引力理论,甚至无曲率但有挠率的引力理论。广义相对论的数学是黎曼几何,黎曼几何中由黎曼曲率张量刻画时空弯曲;黎曼几何后来在1920年代初被发展为黎曼-嘉当(Riemann-Cartan)几何,其中用挠率代表时空扭曲。例如,一个粒子本来在一个平面上运动,轨迹也在平面上。当时空内有挠率时,粒子轨迹就会从平面上站起来,跃出平面。第一个从物理上研究挠率的人,是20世纪20年代初的数学家嘉当(Cartan),他提出了爱因斯坦-嘉当引力理论。他将挠率引进爱因斯坦-希尔伯特作用量中(或者说,他的引力场作用量密度是黎曼-嘉当曲率标量)。在该理论中,粒子的能量-动量张量决定时空的曲率(这与爱因斯坦广义相对论同),而粒

子的自旋流密度张量决定时空的挠率(这是当时嘉当的新观点)。所以,爱因斯坦-嘉当引力理论是爱因斯坦广义相对论的推广,后者是前者在物质自旋流密度可以忽略时的近似结果。从规范理论的角度讲,爱因斯坦-嘉当引力理论有一些问题。实际上,曲率是局域洛伦兹转动对称性所对应的规范场强,洛伦兹转动(规范)对称性的规范势是自旋仿射联络(洛伦兹联络),按此理,曲率的源应是粒子的自旋流密度;挠率是局域时空平移对称性所对应的规范场强,时空平移(规范)对称性的规范势是标架场(vierbein),按此理,挠率的源应是粒子的能量-动量张量。可是,在嘉当于1922年提出的爱因斯坦-嘉当引力理论中,这种对应关系却被颠倒了过来:曲率的源是粒子的能量-动量张量,挠率的源是粒子的自旋流密度。从规范理论角度讲,这是张冠李戴的。这里的根源是因为爱因斯坦-嘉当引力理论的引力作用量密度仅仅只包含爱因斯坦-希尔伯特作用量密度($\ell = R/(2\kappa)$,其中 $\kappa = 8\pi G$),没有包含像杨-米尔斯规范理论中的曲率平方项。过去几十年,有大量文献(包括下面要讲的几种引力规范理论)研究了挠率在引力理论中的可能效应。挠率的存在,也有可能影响引力波的传播,从而使得引力波与电磁波“双信使”无法同时达到地球。值得一提的是,在最小耦合理论中,挠率并不直接与电磁波耦合起来,这是规范对称性所要求的。由此比较,我们认为,在引力理论中,即使挠率存在,它也应该不与引力波有直接的耦合。只有这样的引力理论,才有存活的可能;其他引力理论(如果普通引力与挠率有太强的耦合),将被淘汰出局。因此,电磁波与引力波“双信使”事件有助于我们遴选有挠引力理论。

虽然爱因斯坦广义相对论方程也包含一些规范对称性如局域洛伦兹转动对称性以及时空平移对称性,但其方程不具有杨-米尔斯非阿贝尔规范场方程结构形式。杨-米尔斯方程 $D_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu$ 左边是曲率张量即规范场强 $F^{\mu\nu}$ 的协变导数,而爱因斯坦广义相对论方程 $R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}R/2 = \kappa T_{\mu\nu}$ 左边却包含

里契(Ricci)曲率张量 $R_{\mu\nu}$ 和曲率标量 R , 但不含协变导数, 因此作为基本相互作用, 两者结构有很大不同。是否爱因斯坦方程背后还隐藏着更深的理论呢? 能否也将引力理论改写为具有杨-米尔斯方程结构形式呢? 引力规范理论就是基于这一目的而发展的。不过引力规范理论有很多家, 虽众说纷纭, 但理论结构还算大同小异。第一个引力规范理论就是上面所说的建立于1922年的爱因斯坦-嘉当引力理论, 后来在20世纪60年代又有发展(被合称为 Einstein-Cartan-Sciama-Kibble 理论), 由于其最初目的其实也并非是为了建立引力规范理论, 因此规范性不彻底。在该理论中, 物质的能量-动量张量是度规曲率的源(仍旧与爱因斯坦广义相对论差不多), 但是多了一个关于挠率的方程, 物质场的自旋流密度张量是挠率之源。其实这个方案与引力的规范场论思想还是有很大区别。该理论的引力作用量密度没有曲率平方项; 挠率本该是时空平移规范场强, 其源应该是物质的能量-动量张量; 曲率本该是时空转动规范场强, 其源应该是物质的自旋流密度张量。但是在爱因斯坦-嘉当引力理论中, 物质源与引力场(曲率与挠率)关系却反了一下。以色列 Carmeli 提出过一个具有 $SL(2, C)$ 规范群不变性的引力规范理论。二维特殊复线性群 $SL(2, C)$ 其实就是洛伦兹群的魏尔(Weyl)旋量表示。我们观察 Carmeli 的该理论, 可以认为, 它其实与爱因斯坦-嘉当引力理论(相当于是洛伦兹群的矢量表示)是等价的。日本 Utiyama 在1956年首先探讨了引力场的规范性特点, 但是没有提出新的引力场方程。20世纪70年代至90年代, 国内郭汉英等人以及国外 Carmenzind 等多人发展了多个引力规范理论。这些理论的共同特点是: 模仿杨-米尔斯规范理论(其拉格朗日量密度是曲率平方项), 于是在爱因斯坦-希尔伯特作用量密度 ($\ell = R/(2\kappa)$, $\kappa = 8\pi G$) 基础上添加了各种曲率平方项(诸如 $R_{\alpha\beta\mu\nu}R^{\alpha\beta\mu\nu}$ 、 $R_{\alpha\beta\mu\nu}R^{\mu\nu\alpha\beta}$ 、 $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$ 、 $R_{\mu\nu}R^{\nu\mu}$ 、 R^2 等); 由于他们把物质场的自旋流密度张量看作了曲率的源, 把能量-动量张量看作挠率的源, 因此他们在引力作用量中也

把挠率的平方项(如 $T^{\lambda\mu\nu}T_{\lambda\mu\nu}$ 、 $T^{\mu\nu}T_{\lambda\mu\nu}$ 、 $T^{\lambda}_{\lambda\mu}T^{\sigma\mu}_{\sigma}$ 等)也引入了进去。当然, 在这样的理论中由于要把以上各平方项加起来就需要引入很多不确定的系数, 这是一个瑕疵。由于爱因斯坦引力场方程已经在太阳系中得到了很好的检验, 因此自然要求这些理论在弱场近似、太阳系尺度中能退化为爱因斯坦引力理论的结果。可是, 在这类理论中有的在考虑几乎发散的量子真空零点涨落能之后, 就会脱离爱因斯坦的广义相对论引力场方程。因为根据引力规范理论, 能量-动量张量是挠率之源, 这样一来, 无穷大密度的真空能将产生巨大挠率, 理论就不再能退化为爱因斯坦引力理论。

爱因斯坦引力理论只包含度规的一阶与二阶导数。不少人基于各种理由(例如要求量子引力理论的可重整性、解释“暗物质”效应等)提出高阶导数引力理论, 也即在爱因斯坦-希尔伯特引力作用量基础之上添加了黎曼张量和里契曲率张量平方项、三次方项和高次方项或者里契曲率标量 R 的任意函数项。添加曲率张量平方项的理论除了上面已经介绍过的引力规范理论外, 还有 Gauss-Bonnet 引力(它引入了一个额外的拓扑作用量密度项 $R_{\alpha\beta\mu\nu}R^{\alpha\beta\mu\nu} - 4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + R^2$ 。该项在当时空为四维或低于四维时, 是没有贡献的, 但当时空维数大于四时就有效应; 该拓扑作用量密度关于自旋联络的变分恒为零)。一个经常被不少人研究的理论是 $f(R)$ 引力, 它是爱因斯坦-希尔伯特作用量的朴素推广, 其作用量密度中的函数 f 是曲率标量 R 的任意函数(当 f 为常数时就是宇宙学常数项; 当 f 是线性函数时, 就是爱因斯坦-希尔伯特引力作用量密度)。其他包含曲率高次项的较为复杂但含有很多对称性特点的理论是提出于1971年的 Lovelock 引力, 该理论是用广义的克罗内克(Kronecker)全反对称 delta 张量 $\delta_{\alpha_1\beta_1\cdots\alpha_n\beta_n}^{\mu_1\nu_1\cdots\mu_n\nu_n}$ 与黎曼曲率张量 $R^{\alpha_r\beta_r}_{\mu_r\nu_r}$ 两者一起构造出来的。它的引力场的作用量密度是 $\ell = \alpha_0\mathfrak{R}^0 + \alpha_1\mathfrak{R}^1 + \alpha_2\mathfrak{R}^2 + \cdots$, 其中 $\mathfrak{R}^n = (1/2^n)\delta_{\alpha_1\beta_1\cdots\alpha_n\beta_n}^{\mu_1\nu_1\cdots\mu_n\nu_n}$ $\prod_{r=1}^n R^{\alpha_r\beta_r}_{\mu_r\nu_r}$ 。在作用量密度第二项中, 全反对称张

量 $\delta_{\alpha\beta}^{\mu\nu} \propto g_{\alpha_1}^{\mu_1} g_{\beta_1}^{\nu_1} - g_{\beta_1}^{\mu_1} g_{\alpha_1}^{\nu_1}$ 就是普通的克罗内克符号。由于存在无穷多个广义的克罗内克张量 $\delta_{\alpha_1\beta_1\cdots\alpha_n\beta_n}^{\mu_1\nu_1\cdots\mu_n\nu_n}$, 因此该理论的引力作用量密度可以是无穷多项, 其第一项显然是常数(即宇宙学常数项), 第二项是爱因斯坦-希尔伯特引力作用量密度(即标准的爱因斯坦引力), 第三项恰好是上面所说的 Gauss-Bonnet 项。所以, Lovelock 引力相当于把上面的几个高阶导数引力理论“统一”起来了, 颇吸引了一批追随者。

上面所介绍的几个高阶导数引力其作用量密度仅仅是由黎曼和里契曲率张量等构造, 并不直接添加协变导数, 虽也复杂, 但也可以被人掌握。文献中还有其他高阶导数甚至无限多阶导数的引力理论, 其引力作用量密度中直接将一些导数算符插入进去(如包含了 $R_{\mu\nu}F(\square)R^{\mu\nu}$ 和 $RF(\square)R$ 项, 此处空框 \square 表示达兰伯符号, $F(\square)$ 可以是弯曲时空内的达兰伯符号的任意函数, 达兰伯符号定义为 $\square = g^{\mu\nu}\nabla_\mu\nabla_\nu$)。这样复杂的理论起源于弦论的启发, 其目的之一是为了消去广义相对论中的奇点问题。这样的理论是相当令人恐怖的, 一方面其含有太多的导数项导致理论极为复杂繁琐, 另一方面一些函数诸如 $F(\square)$ 本身可能也是无法自定的, 导致理论预言结果不再确定。如果这些高阶导数项比较弱(耦合系数很小), 那么它们不受中子星合并“双信使”事件影响。但如果这些理论也想要来解释暗物质之谜, 把星系“失踪质量”看作是这些高阶导数项的产物, 那么这些理论也会受到“双信使”事件清洗, 毕竟中子星合并事件中的引力波与电磁波要穿越长达 1.3 亿光年无比广袤的宇宙学距离到达地球, 在这段距离中, 分布有星系、星系群、星系团、超团、星系长城、宇宙空洞等结构, 这些高阶导数项对引力波和电磁波的贡献是不一样的, 从而从同一波源出发的引力波与电磁波“双信使”信号不可能同时到达地球。

在标量-张量型引力理论中, 近年来文献中比较常见的可能要数莫法特(Moffat)的理论。加拿大

的莫法特曾提出过三种修改的引力理论(modified gravity), 即 1995 年的不对称非度规引力理论及 2005 年的标量-张量-矢量引力(scalar-tensor-vector gravity)理论和度规-不对称张量引力(metric-skew-tensor gravity)理论。他的 1995 年理论已经被人指出有不可接受的理论问题, 所以我们在这里不讲述。莫法特称呼他的两种 2005 年理论为“修改的引力理论”。在这种理论中, 不需要暗物质假设, 所谓星系“暗物质”效应乃由其引力理论中的新的修改项所致。这两个理论在星系引力物理学中取得了不少成果。这两个理论的共同点是在爱因斯坦-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新的标量场、矢量场和张量场作为新的“引力场”(可以称为所谓“第五种力”的场), 让普通物质产生新的引力场的同时也受到额外的引力。在标量-张量-矢量引力理论中, 矢量场类似 Proca 重光子场, 矢量场的作用量密度是 $\ell_\phi = -(\omega/(4\pi))[B^{\mu\nu}B_{\mu\nu}/4 - \mu^2\phi_\nu\phi^\nu/2 + V(\phi)]$, 其中反对称张量场 $B_{\mu\nu}$ 定义为 $B_{\mu\nu} = \partial_\mu\phi_\nu - \partial_\nu\phi_\mu$ (与电磁场强定义一样), μ 是莫法特的矢量场的静止质量, ω 是某参量。不过在莫法特的标量-张量-矢量引力理论中, 引力常数 G 、 μ 和 ω 都不再被看作为常数, 而是看作为各种动态标量场(注意: 在前面已经叙述的布兰斯-迪克理论和压力子(pressuron)引力理论中, 引力常数 G 也被当作是标量场。这是所有这类所谓标量-张量引力理论的普遍特色)。莫法特的这三个新标量场 G 、 μ 与 ω 的作用量密度(动能项)是 $\ell_s = -(1/(2G))(\partial_\nu G\partial^\nu G/G^2 + \partial_\nu\mu\partial^\nu\mu/\mu^2 - \partial_\nu\omega\partial^\nu\omega)$ 。此外, 作用量密度中还有 G 、 μ 与 ω 的未知的自相互作用势能项。莫法特理论中的爱因斯坦-希尔伯特引力作用量密度是 $\ell_g = R/(16\pi G)$, 由于引力常数 G 是一个动态标量场, 是可变参量, 因此在星系尺度上可以让引力效应放大, 用于解释星系“暗物质”效应。莫法特自 2005 年以来发表了 20 余篇论文, 研究他的新引力理论在天体物理学问题(星系、球状星团、星系团中的转动动力学和“等效暗物质”分

布)和宇宙学问题(诸如宇宙加速膨胀和“暗能量”效应以及对微波背景辐射的影响)中的应用。星系暗物质动力学之谜包括星系平坦转动曲线之谜与星系重子 Tully-Fisher 关系之谜等。莫法特和合作者布朗斯坦(Brownstein)认为,过去的 Milgrom 的 MOND(修改的牛顿动力学)理论只能解释星系的转动曲线之谜,但在更大的天体如星系团中,MOND 理论就无法解释星系团内的物质和引力场分布。观察表明,这样的星系团除了有上亿开尔文温度的炽热气体 X 射线源外,还隐藏了更多的“暗物质”引力源。布朗斯坦认为,为了解释星系团内的“暗物质”之谜, Milgrom 的 MOND 理论需要把该理论中的特征加速度(量级为 10^{-10} m/s^2)放大四倍以上;对于有的星系团,特征加速度需要被放大十倍,否则也照样需要额外的暗物质来补充不足的引力。这意味着 Milgrom 的特征加速度不是一个常数,晦暗气氛笼罩在 MOND 理论上面。莫法特和合作者布朗斯坦认为他们的理论具有更棒的优势。

莫法特的另一个有名的理论即度规-不对称张量引力(metric-skew-tensor gravity)理论包含了一个不对称场 $A_{\alpha\beta}$ 和一个耦合源 J_ν , 它们之间的相互作用拉格朗日量密度是 $\ell_{AJ} = \varepsilon^{\alpha\beta\mu\nu} A_{\alpha\beta} \partial_\mu J_\nu$, 其中 $\varepsilon^{\alpha\beta\mu\nu}$ 是全反对称列维-奇维塔(Levi-Civita)张量。不对称场 $A_{\alpha\beta}$ 的拉格朗日动能项与质量项之和是 $\ell_A = F_{\mu\nu\rho} F^{\mu\nu\rho} / 12 - \mu^2 A_{\alpha\beta} A^{\alpha\beta} / 4$, 其中三阶张量是 $F_{\mu\nu\rho} = \partial_\mu A_{\nu\rho} + \partial_\rho A_{\mu\nu}$ 。虽然莫法特这两种理论所添加的额外“引力场”大不相同,如度规-不对称张量引力理论包含了一种属于二阶张量场的斜场 $A_{\alpha\beta}$ (skew field 即不对称场)且带有静质量,而他的标量-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 ϕ_μ 和三种其他标量场(G 、 μ 与 ω),但这两种引力理论都具有类似的引力场行为。例如,对于普通重子物质位于中心的情形,莫法特的这两种修正的引力理论有类似的引力场强公式,如 $g = -(G_N M/r^2)[1 + \alpha - \alpha(1 + \mu r)\exp(-\mu r)]$ (其中 G_N 是牛顿引力常数, M 为位于星系中心的普通重子质量)。

因此莫法特合并研究他的这两种理论。在该引力场公式中,当天体尺度 r 比较小的时候(如太阳系内),它退化为牛顿引力场公式;但是当天体尺度 r 比较大的时候(如星系内),牛顿引力常数就被放大到原先的 $1 + \alpha$ 倍,这样星系内具有更强的引力,从而束缚星系,使得不至于瓦解。莫法特和布朗斯坦认为, Milgrom 的 MOND 理论在球状星团中也无法成立。但是他们说他们自己的理论(度规-不对称张量引力理论)则不存在这样的问题。他们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。所有新引力理论的企图都是希望在各种宇宙学问题中一显身手。这些问题包括宇宙的早期暴涨、晚期加速膨胀以及中晚期宇宙暗物质问题、星系暗物质动力学之谜。莫法特当然也要这么去做。我们知道目前为了解释宇宙加速膨胀要引入暗能量(能演化到物态系数为-1的动态标量场)。由于莫法特理论含有太多的动态标量场,因此他们相信他们的理论也可以用于解释宇宙加速膨胀。但是莫法特的这两个理论看起来也并不完美,主要有如下几个瑕疵:所引入的标量、矢量和不对称张量场的拉格朗日密度过于随意。例如,这些额外场如斜场(不对称场)、矢量场、三个标量场的作用量密度的写法似乎不具有唯一性,有人为拼凑痕迹;莫法特认为他的引力理论可以解释星系转动动力学中的难题即 Tully-Fisher 关系。该关系最重要的特质是涡旋星系绕自身中心的转动速度之平方正比于星系内普通重子物质质量 M 的平方根 ($v^2 = \sqrt{GMa_0}$)。但是我分析表明,实际上他并未能推出星系中的 Tully-Fisher 关系,只是因为他的理论中有无法自定的参量可以去迎合星系重子的 Tully-Fisher 关系。从本质上讲,该关系在他的多篇论文中其实是假定的,只是他的理论留有允许做这种假定的空间,他的理论与 Tully-Fisher 关系并不矛盾,但是 Tully-Fisher 关系并非是他的理论中唯一的这类关系。

莫法特的理论不借助暗物质粒子去解释星系尺度上的“暗物质”效应,依靠的是他的斜场、矢量场

以及几个标量场,在星系尺度上放大了引力常数,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(可以称为“第五种力”)。但是这样也带来了一个后果,导致引力波与电磁波方程在弱场近似下不再具有相同结构,于是引力波与电磁波从上亿光年外的双中子星合并源出发,虽然两者的初始位置和传播方向均一致,但是它们毕竟不会沿着相同的轨迹同时传播到地球。这很容易说明:对爱因斯坦-希尔伯特引力作用量密度关于度规 $g^{\mu\nu}$ 求泛函变分,得到 $\delta(\sqrt{-g} R/G) = \sqrt{-g}(R_{,\nu} - g_{,\nu} R/2)\delta g^{\mu\nu}/G + \sqrt{-g} g^{\mu\nu}(\delta R_{,\nu})/G$ 。如果引力常数 G 是一个常数,我们已经熟知 $\sqrt{-g} g^{\mu\nu}(\delta R_{,\nu})/G$ 可以化为一个全散度项,它对引力场方程不起作用,但是现在 G 不再是一个常数,故而 $\sqrt{-g} g^{\mu\nu}(\delta R_{,\nu})/G$ 不再能化为一个全散度项。这样一来,引力场(与引力波方程)就会多出一项,从而引力波传播路径就要偏离电磁波轨迹。2017年8月17日来自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(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)几乎同时到达地球(两者仅仅相隔1.7秒先后到达),这一事实说明引力常数 G 即使可变,其可变程度也是微乎其微的。但是莫法特要求他的额外引力在星系和星系团中对普通物质的影响将远远大于广义相对论引力,或者从另一角度讲,不但让引力常数 G 随着空间坐标可变,而且在数值上放大很多倍(由于莫法特理论中不需要非重子暗物质假设,实际上他的这种被放大的引力取代了广义相对论的引力)。可以说,双中子星合并所产生的电磁波与引力波“双信使”信号同时到达地球这一观察事实可能对莫法特理论并不吉祥。一件比较有趣的事情是,莫法特的合作者布朗斯坦在2006年对《新科学家》(*New Scientist*)杂志记者声称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10号、11号和其他几个无人探测器在太阳系边缘受到的反常加速度(10^{-9} m/s^2)之谜。因为先驱者号反常加速度(10^{-9} m/s^2)比起Milgrom特征加速度来大了一个数量级,莫法特和布朗斯坦认为Milgrom的

MOND理论就无法解释先驱者号反常加速之谜,而他们能解释,因此自己胜出。这个在1998年首次被公布的先驱者号航天器的反常加速之谜,在之后十多年来在引力物理学界引起广泛兴趣,甚至有人说这暗示物理学新的革命即将到来,将促使暗物质、第五种力、新引力理论研究等领域获得质的飞跃。但是在2012年物理学界已经公认:先驱者号反常加速是一出“乌龙”事件,该所谓“反常”加速度其实是来自航天器自身的各向异性热辐射效应,这属于应用物理学效应,不是物理学基本原理意义上的效应,当然也更不必谈其“新物理学革命”意义了。那么莫法特理论是否“空对空”地打了一个根本不存在的靶子?

谈到莫法特理论,也有必要谈一下另一个在过去十多年亦引起较大兴趣的理论即贝肯斯坦的张量-矢量-标量理论。上面提及的在1983年由Milgrom提出的MOND理论比较“鄙陋”,如它没有拉格朗日密度,也违反一些基本原理如动量守恒定律等。尽管理论不正则(canonical),但是其以很简明的方式一举解决了星系平坦转动曲线之谜和星系重子Tully-Fisher关系之谜,使得人们真的不得不认真对待它。作为相对论引力的研究者,贝肯斯坦多年来一直在为Milgrom的MOND理论建立含有拉格朗日密度的正则形式,最终在2004年将其发展为相对论版本(即所谓张量-矢量-标量理论)。贝肯斯坦的主要思想如下:Milgrom的MOND理论方程是 $GM/r^2 = f(a)$,要求在受力物体加速度 a 比较小的时候,函数 $f(a) \rightarrow a^2/a_0$ 。显然Milgrom保留了牛顿引力,但是修改了牛顿力学第二定律 $F = ma$,即要求 $F \rightarrow ma^2/a_0$ 。但是要把这样的牛顿运动定律相对论化,十分难。于是可以反其道而行之,只修改牛顿引力定律,但保留牛顿力学第二定律。这只要对 $GM/r^2 = f(a)$ 求反函数,得到 $f^{-1}(GM/r^2) = a$ 即可,即此时新的引力场强是 $f^{-1}(GM/r^2)$ 。这样一来只要在广义相对论的修改版本中将新引力场 $f^{-1}(GM/r^2)$ 推导出来即可。因此,贝肯斯坦理论最终也可以被划归到包含莫法特理论的一大类理论(修正的引力理

论)之中。贝肯斯坦仍旧采用爱因斯坦-希尔伯特标准引力作用量密度 ($\ell_g = R/(2\kappa)$, $\kappa = 8\pi G$), 引力常数 G 仍为常数。在这个张量-矢量-标量理论中, 有两个标量场 ϕ 和 σ 以及一个单位矢量场 u_μ , 标量场 ϕ 是动态的(有拉格朗日动能项), 标量场 σ 是“死”的(无拉格朗日动能项)。两个标量场 ϕ 和 σ 的拉格朗日量密度是 $\ell_s = (1/2)[\sigma h^{ab} \partial_a \phi \partial_b \phi - (G/2l^2) \sigma^4 F(kG\sigma^2)]$ (我这里采用的度规符号与贝肯斯坦所用的相差一个负号), 其中等效度规 $h^{ab} = g^{ab} + u^a u^b$, l 是一个具有长度量纲的常数, k 是一个无量纲参数, F 是一个无量纲的未明函数。贝肯斯坦的单位矢量场 u_μ 的拉格朗日量密度为 $\ell_v = (-K/(32\pi G)) [B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - (2\lambda/K)(g^{\mu\nu} u_\mu u_\nu - 1)]$, 其中 $B_{\mu\nu} = \partial_\mu u_\nu - \partial_\nu u_\mu$ (类似麦克斯韦电磁场强), K 是无量纲参数。显然, $-(2\lambda/K)g^{\mu\nu} u_\mu u_\nu$ 可以看作是它的质量项, 因此该理论中的矢量场与上面提到的莫法特2005年的标量-张量-矢量理论相似, 都具有带上了非零静止质量的类似电磁场的矢量场, 矢量场具有 Proca 电磁场特色。在该理论中, 贝肯斯坦还定义了一个有效度规 $\hat{g}^{\mu\nu} = \exp(2\phi)g^{\mu\nu} + 2u^\mu u^\nu \sinh(2\phi)$ 。凡是在普通物质场(如电磁场、普通旋量物质)的拉格朗日量密度中出现的度规以及协变导数中出现的度规均使用有效度规 $\hat{g}^{\mu\nu}$ 。这样一来, 两个标量场 ϕ 和 σ 以及单位矢量场 u_μ 都可以与普通物质场耦合起来。因此, 在该理论中普通物质场(如电磁波)与引力波将受到不同的引力, 沿着不同的轨迹传播。

贝肯斯坦理论与莫法特理论有相同点, 如都包含了多种标量场与矢量场。但也有不同点, 如莫法特理论包含了标量场与引力度规张量场的耦合(在引力拉格朗日量密度中, 标量场直接与曲率标量相乘在一起), 从而可以放大引力系数, 而贝肯斯坦理论让普通物质场(包括电磁场)与标量场、单位矢量场发生耦合。在这些理论中, 在星系尺度上广义相对论引力不再起主导(也即让牛顿引力失效), 物质场可以受到更强的引力, 呈现出星系“暗物质”效应。但这也会使得引力波与电磁波方程得到不同

程度的修正, 从而它们不能再以相同传播速度、相同轨迹运行, 因此与莫法特理论有类似境遇, 贝肯斯坦理论在这次双中子星合并中所发生的“双信使”信号同时到达地球的事件中受到了检验, 可以被认为处于遭到了淘汰的境地。该类“修正的引力理论”, 以贝肯斯坦和莫法特理论为代表, 其理论形式很复杂, 似乎拼凑痕迹也很明显, 看上去有点不太自然。理论研究者只要自己愿意就可以在拉格朗日量密度中免费添加他们需要的标量场与矢量场, 在拉格朗日量密度之中设计各种“莫名”的耦合, 为的是迎合天体物理和宇宙学观察结果。基本物理学定律的统一、优美、简洁性在这里并没有被彰显出来。太多的标量场与矢量场在宇宙早期就会对应很强的辐射能量密度, 我们担心它们会影响宇宙原初核丰度, 使得原本与实验观察一致的理论上的轻核丰度不再与观察一致, 除非这些标量场、矢量场像引力子一样过早与物质脱耦从而使自己独立演化、降温更快, 不影响后来的宇宙原初核合成(发生于宇宙时三分钟前)。如果这些标量场与矢量场静质量较大, 那么也可以作为天然的暗物质粒子。但是它们与引力场和电磁场的耦合有很大不同, 故而也会使得引力波与电磁波轨迹发生偏离。贝肯斯坦、莫法特等的“修改的引力理论”尽管已经结出了丰硕的果实, 但面对新的实验现象, 也仍旧需要对其进一步仔细考量。他们的理论结构可能对于确立最终的新引力理论也具有参考意义。

无论是 Milgrom 的“修改的牛顿动力学”还是贝肯斯坦、莫法特等的“修改的引力理论”, Milgrom 将它们合称为 modified dynamics (MD), 而另一派持暗物质观点的理论被称为 dark matter (DM) 假说。这样, 对星系转动动力学之谜的解释就有了 MD(修派)与 DM(暗派)之争。在“修派”理论中, 被引入的标量场、矢量场要么与引力场有额外耦合(即与曲率标量直接相乘, 修正引力常数), 要么与普通物质有耦合。无论是哪一种情形, 都可以说在此次引力波与电磁波“双信使”事件中遭到了将被淘汰的命运。如果被引入的标量场、矢量场既不与引力场有额外耦合, 也不与普通物质有耦合, 那么这样的理

论其实就是“暗派”理论了(后者引入的超对称粒子、惰性中微子就是这样不与引力场、普通物质有其他额外耦合的粒子)。这就是“修派”与“暗派”之间的主要不同点。现在看起来,“修派”稍在下风。形势是否能扭转?

六、尾声

真正的引力理论可能只有一个或一种,浩如烟海的文献内的引力理论和各种星系暗物质假说大多必将随着天体物理和宇宙学观察事实的增多而被逐步淘汰。中子星合并中的“双信使”事件已经牵连到了上述不少理论。这些理论由于使得电磁波与引力波并不能沿着相同的轨迹传播而遭到淘汰。物质与引力的耦合应该是满足规范相互作用的最小耦合,不能再随意引入额外的相互作用,即无自旋(或自旋可以不计)的粒子应该沿着短程线运

动,因此那些不需要暗物质、依靠额外的标量场、矢量场来修正引力常数、增强引力效应从而解释星系和星系团中的“额外引力”来代替“暗物质”引力效应的理论,极有可能将被淘汰。被淘汰的理论的特征,看起来正好就是具有MOND理论之相对论版本贝肯斯坦理论和莫法特理论等的特征;其他如轴子暗物质理论、卡鲁扎-克莱因理论、布兰斯-迪克理论、部分高阶导数引力理论因为对电磁波与引力波有不同的耦合,也会让“双信使”偏离彼此轨迹,因此也可能被淘汰。即使不淘汰,“双信使”事件至少对这类理论中的一些耦合参数作了限制。过去半个世纪,新引力理论层出不穷,你方未唱罢,我方已登场,让人消化不良、颇感焦虑甚至无所适从、惶恐失措。对于这种喧闹场景,我们要抚平心情,以平常心待之,同时大力挖掘观察事实,等待更多的实验事实来确证或辨伪这些新理论、新方案。这正如诗云:白发渔樵江渚上,惯看秋月春风。



欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的Word文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn, 并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技

经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2019年《现代物理知识》每期定价10元,全年6期60元,欢迎新老读者订阅。

邮局订阅邮发代号:2-824。

编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)

银行账号信息

名称:中国科学院高能物理研究所

开户行:工商银行北京永定路支行

账号:0200004909014451557

需要过去杂志的读者,请按下列价格转账。

2010~2018年单行本每期10元;2010~2017年合订本每本60元。