

天文教育I: 万有引力与天体物理*

徐仁新^{1,2†}

(1 北京大学物理学院天文学系 北京 100871)

(2 北京大学核物理与核技术国家重点实验室 北京 100871)

摘要 分别从物理学和天文学角度引申出天体物理学, 特别关注万有引力在其中扮演的关键角色. 无论在综合性大学亦或理工院校, 天文教育均有益于提高学生的科学和人文素养, 而天体物理则是天文学的主要内涵. 介绍了作者讲授“天体物理”课程的相关信息以及个人认识. 最后, 以大气簇射 μ 子产生、啾质量、宇宙加速膨胀等教学案例结束, 侧面诠释了作者的“天体物理”教育理念.

关键词 天文教育, 天体物理, 万有引力

中图分类号: P1-4; **文献标识码:** A

1 从物理到天体物理

透过缤纷现象认识繁杂事物之本质推动了人类文明和进步; 从远古的金木水火土到如今的夸克与轻子, 概莫能外. 无疑, 物理学在这方面发挥了关键作用. 物理学科关注构成不同层次物质的基本单元及其间的相互作用. 诚然, 万有引力¹为最早认识的一种基本相互作用, 不过在人们探究较小尺度物理时(无论是传统的电磁力还是后来的强力、弱力等过程), 它往往可被忽略. 目前, 粒子物理标准模型囊括了除引力之外的所有物理, 但是引力却至今未能成功地纳入量子论框架.

在探究较大尺度物理时, 引力效应则不可忽略; 这正是天文学家²面对宇观现象时的处境. 可见, 从基本物理规律出发研究宇观客体时就不得不重视万有引力作用的存在, 相关的学科以天体物理学为主体. 简言之, 天体物理本质上具有物理学灵魂, 只不过在这类物理中引力构成核心要素罢了.

引力所扮演的角色可以归纳为如下两个方面:

(1) 引力主导的物质运动. 在物质的状态已知或可被近似为质点系的情况下, 可以依据万有引力定律演绎若干宇观现象. 这方面的例子包括: 太阳系动力学及其稳定性、双星系统及演化、双致密星旋进与并合、星系碰撞与并合、暗物质存在的动力学效应等. 目前描述引力的基本理论是爱因斯坦广义相对论(GR), 但在弱场、低速时可以很好

2020-08-24收到原稿, 2020-09-04收到修改稿

*国家重点研发项目(2017YFA0402602), 国家自然科学基金项目(11673002、U1531243)资助

†r.x.xu@pku.edu.cn

¹“Gravity”一词亦被译为“重力”. 本文中“引力”均指“万有引力”.

²当然, 引力在包括地球在内的行星物理学中的地位也不能忽略.

地用牛顿的平方反比律近似。鉴于GR是非量子的,它显然存在改进的余地,因此在更高精度上检验包括GR在内的各种引力理论是一个有趣而必要的话题。丰富的天文现象提供了各类检验引力理论的平台,然而不幸的是:至今所有的观测或实验均未发现偏离GR的可靠结果;

(2)引力场造就特殊的“天体实验室”。原则上这类极端物理条件下物质的属性由基本相互作用决定,但往往很难甚至不能在地面实验室制造出这类特殊物质。无疑,对这些极端物态的研究将拓展人类认识自然的视野。先举一个矿物物理方面通俗的例子。对于近似处于零压(实则一个大气压)下地球表面物质(矿物和岩石)而言,我们能够较方便地研究它的物性(晶体结构、状态方程、弹性和蠕性等)。然而,为了深入了解地球的演化(如地球的成因及热平衡过程等)及其动力学行为(板块运动的物理机制、地磁的起源与反转等),人们不得不掌握高温高压下矿物和岩石属性方面的知识(研究其他行星也类似,如木星深部的金属氢相)。怎么去研究?好在构成矿物的基本单元为原子(或离子),原则上可以通过第一性原理计算给出物性,并且理论结果的可靠性还能通过高温高压实验检验。这正是矿物物理的职责,其对地球内部结构的描述受到地震学等地球物理测量的支持。可见,地球引力造就的这个高温高压“实验室”为人们提供了一种“闭环的”³智力游戏来深化对于“原子物质”(即以原子/离子为基本单元而构成的物质)的理解。

类似于在地球物理学/行星物理学中的角色,引力在天体物理中亦表现得尤为突出。虽然不少“天体实验室”也是闭环式的,但是有些天体物理过程所探讨的问题却是“开环的”。这看似不幸,但却是值得欣慰的,因为人们原则上有机会通过这类极端“天体实验室”探究之前未曾很好把握的物理规律。这里涉及引力和物性两个方面。引力跟不确定的极端物态耦合在一起,问题的解决变得扑朔迷离。若两者均涉及未知的本质,则往往很难依据观测现象有效地约束对基本规律的认识;但若其中之一较为确定,即能探究较不确定的另一方面了。

鉴于GR的成功,一般来说人们往往以GR为可信的基础来探究极端物理环境下的物质状态,从而深化对自然规律的理解。这里举两个“开环的”例子。

一个是关于中子星的内部结构。众所周知,原子核因库仑排斥而很难大规模地聚合起来。然而天体极端环境出人意料:大质量恒星演化至晚期时,其核心引力如此之强以至于能将那里大量的原子核挤压成一片,最终形成中子星并伴随超新星爆发。构成中子星的物质平均密度略高于原子核,其物态决定于低能强作用(即非微扰量子色动力学, NQCD)行为。尽管研究历史悠久,但因NQCD之困至今未能澄清这一致密物质状态。此物态之谜或许是人类进入引力波天文学时代拟解决的第1个重大科学问题^[2]。将构成中子星物质当作理想流体,考虑静态球对称时空,GR场方程则被简化为TOV (Tolman-Oppenheimer-Volkoff)方程;结合反映物性的状态方程原则上可给出星体的内部结构(例如图1左图所示),进而通过观测来检验。

另一个是有关极早期宇宙的推论。类似于中子星,宇宙也是物质在引力主导下存在的客体,只不过时空的对称性有异:前者为静态球对称,而后者为含时演化的3维常曲率

³矿物物理涉及已知的(即确定且可计算)基本物理规律;它通过理论计算对比实验数据的多次迭代解决问题。鉴于不触及未知的物理,可称这类研究为“闭环的”。反之,若所研究的物理问题涉及未知的物理过程,则称为“开环的”。前者的理论结果往往基于较可靠的第一性原理(风险低),而后者不得不依靠科学猜想(风险大且涉及物理本质)。当然科学问题是分不同层级的(请参见文献[1]),这里“开闭”之分只是为了方便说明问题罢了。

空间. 宇宙学Friedmann方程则是GR场方程在后一时空对称下的产物. 可见, 描述宇宙演化的Friedmann方程跟刻画中子星结构的TOV方程地位相当, 乃不同时空对称性情形下有源爱因斯坦场方程解的两种特例罢了.

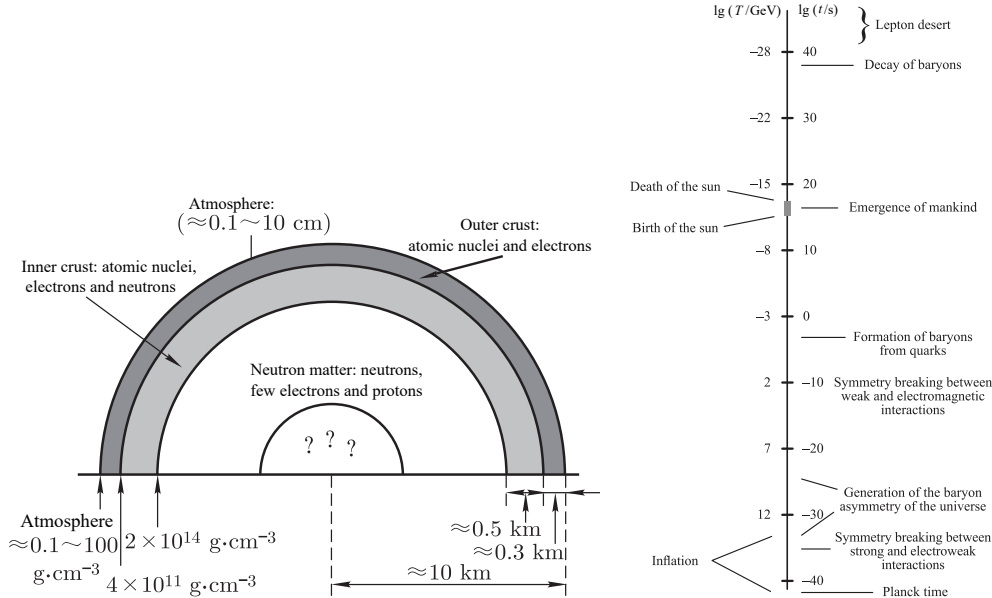


图 1 展现极端引力场下特殊物质状态两例. 左图: 静态中子星结构; 右图: 动态宇宙演化(宇宙年龄 t 、温度 T 分别以s和GeV为单位^[3]).

Fig. 1 Two cases of extreme state of matter as solutions of Einstein’s general relativity. Left: a static solution of neutron star’s structure. Right: a dynamic solution of cosmological evolution (cosmic age t and temperature T are in units of s and GeV, respectively^[3]).

不同于中子星内部低温高密的环境, 宇宙早期处于极高温状态, 牵扯到真空对称性的自发破缺(即真空相变)、基本相互作用的分化、重子的起源、强子的形成以及早期核合成等若干物理过程(见图1右图). 宇宙年龄在0.1 ns(弱电相互作用分化)之前, 理论上的不确定性还是比较大的, 但在此之后原则上可用标准模型描述. 例如, 在宇宙年龄50 μ s左右, 此前的自由夸克就开始被囚禁起来形成强子, 在约3 min后合成原子核. 地面的相对论重离子碰撞实验也试图模拟早期宇宙的物质状态.

总之, 天体物理本质上即为物理学, 只不过万有引力在其中扮演关键的角色罢了. 极端引力造就的特殊物质环境让我们能够探究自然深层次的本质: 基本粒子及其间相互作用. 鉴于此, 引力在认识宇宙方面的角色也被烙上“时代记忆”. 牛顿在学术上是多产的, 但以万有引力定律的发现最具代表性. 17世纪以来相当长的时间内, 学术界对牛顿的崇拜近乎神化, 直到20世纪出现更新牛顿引力的爱因斯坦广义相对论. 同样, 爱因斯坦在物理学领域贡献颇丰(从固体热容到光电效应), 而“相对论”是他历史地位的象征. 从牛顿到爱因斯坦, 学术话语权的主导也相继从英国转向德国、美国. 不少人有“诺贝尔奖情结”, 但我们这个民族更应该思考的是: 谁将会是这颗蓝色行星上替代爱因斯坦的人物? 这个人的出现才标志着大国崛起后走向真正的辉煌.

2 从天文到天体物理

古老的天文学是略带神秘主义色彩的⁴。直到1609年伽利略将自制的望远镜指向静谧的夜空,人类从此用地球上已发现的物理规律去理解宇宙,开始揭开“天文学”神秘的面纱,使得地球在宇宙中的地位逐渐下降、震人心魄的星云美图也不再莫测。从字面上讲,天体物理是研究“天体”的物理,而“天体”即地外物体。不过作为当今天文学主体的天体物理学,其研究非常广泛,就连地球及太阳系的形成和演化也成为其热点话题。

作为自然科学6大基础学科(数理化天地生)之一,天文学紧随人类文明之启而诞生。相信早期智人抬头凝视繁星点点的夜空时,神秘而不解的疑问就会萦绕其脑海:那是什么?离我多远?还有比它们更远的吗?它们一直就在那吗?是不是那里也有一个像我一样遥望星空的她/他?在思辨这些基本问题的过程中,人类充分进化并终于迎来现代文明。虽然现代科学已经高度分化导致不同学科沟通的语言越来越有限,但是天文学企图回答的问题还是那么单纯而直白。

相对于其他基础科学而言,天文学具有“小学科、大科学”特点。一方面,天文学所研究的科学问题丰富、终极而基本,往往需要倾一国或多国之财力和人力方能成功建设和运行某个大型天文观测设备以试图解决这些问题(此为“大科学”)。另一方面,天文学从业人员数目相对于其他学科而言偏少,甚至于明显低于某些2级学科(此为“小学科”)。近廿年来我国高等天文学教研规模有所上升,但相对于欧美等发达国家而言尚有距离。鉴于经济实力的提升,未来一段时间将是我国天文学蓬勃发展的黄金时代。

天文学要回答的问题是基本的、终极的,这奠定了她的社会地位。

首先,天文学能够塑造人们正确的世界观和宇宙观、提升整个民族的人文和科学底蕴。人类对认识自己所处的宇宙环境具有本能的渴望,而错误且极端的宇宙观易于导致某些灾难性的后果。“不知天有多高地有多厚”的人对自然从来没有敬畏感、对同类也缺乏包容心,在法律和道德面前很可能就失去了心理底线。尽管渺小,但人类用科学手段探究自身在宇宙中的存在,这有助于革除教条思维、破除封建迷信。对于成功的国家而言,正确的世界观无疑是建设文明、和谐社会的必要元素;

值得一提的是,基于所掌握的物理规律来理解天象是现代天文学的标志。人们曾经一度认为绝不可能知道遥远天体的化学组成。19世纪上叶,原子光谱观测技术的引入就使得天文学发生了翻天覆地的变化。结合原子物理和量子力学的研究进展,依据天体光谱的研究可以合理地推断遥远恒星和星系的丰富属性,包括系统温度、元素丰度、运动学特征等。此外,以极端天体环境为平台,人们还可以检验已知物理定律的正确性,甚至不排除某些规律需要修正。完善和发展物理定律也体现了天文学的魅力;

其次,以探测微弱天体信号为目的而发展起来的若干先进天文观测技术,促进了现代技术的发展。这些科技的转化和应用推动着社会现代化。贯穿人类文明史的重大疑难问题的解决离不开愈来愈尖端的技术革新,只有这样才能探测愈来愈准、愈来愈远的宇宙信息(包括望远镜在内的大型实验设备没有最先进,只有更先进)。可见,尝试解决终极问题的努力促使对尖端技术永无止境的追求、带动整个社会产业的升级并提升竞争力;

再者,参与多国加盟的大型天文望远镜的建设和运行是分享优秀管理经验的机会。

⁴这有点类似于古代文明长河中发展起来的各国传统医学。类似于对生命产生的神秘感,浩瀚无垠的宇宙在物理学不够发达的时代让人措手不及、充满迷信。“地心”与“日心”之争乃典型一例。

尽管各国文化、制度等存在差异,但高度国际化的天文设备的建设和运行却普遍以“高效率、低成本”为宗旨。所以,国际大型天文设备不仅是科技交流的平台,也为高效而科学的管理模式提供范例;

总而言之,天体物理传承了古老天文学的衣钵,继续肩负着其科技革新、文明进步等方面的使命。

3 我的“天体物理”课

教育,无外乎明事理、长技能,即提升人文修养和知识水平。天文教育在这两方面均扮演重要的角色。高校天文课程往往有所侧重:如“宇宙概论”、“现代天文学”等课程适合于非物理类同学了解宇宙的基本形态,而“天体物理”、“普通天体物理”、“天体物理导论”等课程基于物理学知识透视宇宙以造就专业天文后备队伍。我的课程属于后者。当然极端的天文现象充满新奇,也生动地诠释了各种物理规律,因而学习本课程还有助于深化对若干物理概念的理解、裨益基础物理课程的学习。

我的天体物理课定位于以“普物”风格介绍发生在宇观层次的若干物理过程,将天体看作探索自然基本物理规律的“极端实验室”。所谓的普物风格是指在定性和半定量的层次上认识、理解各类自然现象;这类似于“数量级物理”(Order-of-Magnitude Physics),以区别于传统的理论物理教学。诚然,大学教育形式多样,包括校园文化、同学思辨、师生互动、课堂教学等,课堂授课却始终是不可忽略或替代的重要形式。如下教学体会供讲授相关课程教师参考或评议,以便更好地服务于未来课程的建设及完善。

课程教学包含22次课堂讲授,配以约50道课后作业题。自2001年春季开设以来,基本框架不变:在介绍了辐射和等离子体等准备知识后,分别在“恒星”和“星系与宇宙”两个层次阐述若干天体及相关物理过程^[4]。当然,讲课内容随着时代变迁而有所调整。如下简介3个课堂教学案例,从中可以品觉本人关于“天体物理”课程教学的理念。

(1)大气簇射 μ 子产生。极端天体物理过程所泄漏的电磁波、中微子、引力波及宇宙线是人类认识宇宙的信使。天文学家通过捕获的宇宙信使来分析、研究发生在遥远宇宙中的事件。大气簇射是研究高能宇宙线的有效途径;它将地球大气作为探测介质,通过测量相互作用产生的次级粒子来反演原初入射宇宙线的能量甚至成分。

原初宇宙线跟大气原子核强相互作用时往往产生 π 介子,进而发生下述 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ (寿命 8.4×10^{-17} s)、 $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ 和 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (寿命都是 2.6×10^{-8} s)等衰变反应。当然,高能光子在碰撞过程中往往会转变为电子对; μ 子也会最终衰变($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ 、 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$)。是故,大气簇射的产物包含光子、正反电子、正反 μ 子、正反 e 中微子和 μ 中微子等(可见 μ 子是强子级联的探针)。 π^\pm 衰变因涉及弱作用而比 π^0 慢了许多是可以理解的,但还有一个疑问:为何 π^\pm 不直接衰变为电子及中微子(即: $\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ 、 $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$)?事实上, π^\pm 衰变为电子的概率仅为万分之一。为何这两种通道的衰变概率差异如此巨大?

这牵涉到弱作用宇称破缺的“螺旋度抑制”(Helicity Suppression)。若粒子自旋跟运动方向一致,则定义螺旋度 $H = 1$;反之 $H = -1$ 。对于静止费米子而言, $H = \pm 1$ 几率相同。对于光速运动的中微子则不然:Dirac中微子只能是左手的、反中微子是右手的;即 $H(\nu_l) = -1$ 、 $H(\bar{\nu}_l) = +1$ (其中 $l = \{e, \mu\}$)。以静止 $\pi^- \rightarrow l^- + \bar{\nu}_l$ 为例:因 π^- 自旋为

零,角动量守恒要求 l^- 和 \bar{l}_i 的螺度相同.是故,衰变过程能否顺利进行就跟 $H(l)$ 有关了:如果产物 l^- 静质量趋于无穷而静止,则 $H = \pm 1$ 几率各半;但若 l^- 静质量为零则 $H = 1$ 的几率为零,则此衰变模式被严重抑制!鉴于 μ 子静质量远大于电子,故 π^\pm 衰变产物以正反 μ 子为主.

真的是Dirac中微子吗?这是个值得深究的话题.原子核“双 β 衰变”实验正试图回答这个有趣的问题^[5].

(2)质量函数与啾质量.恒星质量的测量具有重要意义(例如脉冲星极限质量跟致密物质的状态方程紧密关联),它可以通过测量质量函数等来实现.在牛顿引力框架下,原则上可以证明(易于得到圆轨道情形的结论)

$$\frac{M_2^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{a_1^3}{G} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2, \quad (1)$$

其中 M_1 、 M_2 分别为双星质量, T 为轨道周期, a_1 为主星轨道半长轴, G 为引力常数.观测上可以得到 $a_1 \sin i$ 和 T ,故 $f(M_1, M_2, i) \equiv (M_2 \sin i)^3 / (M_1 + M_2)^2$ 为可观测量,其中 i 为轨道法向与视线之间的夹角.因其量纲为质量,故称 f 为主星质量函数.若通过其他方式测得 i 及伴星的质量函数,即能测定 M_1 和 M_2 了.

不过,在爱因斯坦引力框架下,双星系统由于引力波辐射,轨道周期 T 并非常数而是逐渐减小的, $dT/dt < 0$,即轨道绕转频率越来越快.据GR得到双星旋进引力波辐射功率,能够定量给出 $dT/dt \neq 0$,进而可以证明(课后习题)

$$\mathcal{M}(M_1, M_2) \equiv \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}} = \left(-\frac{5}{192\pi} \frac{dT}{dt} \right)^{3/5} \frac{c^3 T}{2\pi G}, \quad (2)$$

称 \mathcal{M} 为啾质量(chirp mass).引力波观测能够给出 T 和 dT/dt ,故 \mathcal{M} 亦为可观测量.在考虑双致密星并合事件(如双中子星并合引力波事件GW 170817,见参考文献[6])时,这一点是非常重要的;在设定质量比 $q \equiv M_1/M_2$ 后即可确定双星质量.当然,通过引力波信号测定 \mathcal{M} 和 q 等值时,都是通过匹配滤波的方式来实现的.

(3)暗能量、宇宙学常数与真空能.1998年Ia超新星观测给出宇宙正在加速膨胀的确切证据.万有引力束缚的动力学过程理应是减速的,为何加速膨胀?什么神秘的能量会驱动宇宙加速膨胀但我们却不能直观地感受到这种能量的存在?这一特殊物质形态被冠以“暗能量”之称号.

事实上,1917年爱因斯坦引入的宇宙学常数 Λ 就能起到“暗能量”的效用^[7].那时的爱因斯坦先验地认为宇宙是静态的;不过,他起初建立的场方程因只考虑万有引力效应故不能得到静态宇宙解.因此,他在场方程中添加了一项 Λ ,其动力学效果是“斥力”,这样引力和斥力平衡就能够建立一个静态宇宙模型了.然而,这一模型因如下两点很快被放弃了:动力学不稳定,且天文观测逐渐显示宇宙在膨胀.据说爱因斯坦曾懊悔,认为引入 Λ 是一生中最大的失误.

然而,事态的发展并非就此作罢.20世纪30年代,随着量子场论的发展,真空被看作是量子场的基态、具有非零的能量(类似于熟知的谐振子零点能).可以证明,这种真空能的动力学效果跟 Λ 相似,也能导致宇宙加速膨胀.但是,为解释观测的宇宙加速膨胀,所需要的真空能密度要比量子场论的估算值低一百多个数量级!

如前所述, 假设膨胀宇宙“3+1”时空的3维空间是常曲率的, 并且其中存在理想流体, 则爱因斯坦场方程简化为Friedmann方程. 该方程描述了宇宙膨胀的速度和加速度; 其中加速度正比于 $-(\rho + 3P)$, 这里 ρ 为宇宙物质密度、 P 为压强. 形式上, 一般将宇宙物质状态方程参数化成 $P = \omega\rho$; 对于零静止质量粒子系(如光子辐射场) $\omega = 1/3$, 而动能可忽略的粒子系 $\omega = 0$. 注意到对于普通物质而言 $\omega > 0$, 故由这类物质构成宇宙膨胀的加速度一定是负的(即减速膨胀). 但是, 如果宇宙中存在某种特殊的物质, 如若 $\omega < -1/3$, 则宇宙膨胀加速度可以是正值. 能够证明, 宇宙学常数和真空能的动力学效果等效于 $\omega = -1$. 对于真实宇宙而言, ω 到底是多少? 为常数吗? 会不会随时间演化? 这些都是有趣的话题, 但目前尚无 ω 明显偏离 -1 的观测证据.

可见, 定性而言, $\omega = -1$ 、宇宙学常数 Λ 以及真空能 Λ 三者的动力学效应是类似的, 可以看作“三位一体”.

当然, 在具体教学实践过程中, 应重视国内外重大科学工程的介绍. 兴趣驱动学习和科研是受到欢迎的, 而将教研跟大科学与工程结合起来则更值得提倡. 紧密围绕国内(如HXMT、FAST、JUNO、LHAASO、CSST、DAMPE等)、国际(如SKA、NICER、LIGO、LHC等)⁵大设备展开科研及人才培养有助于优化学科建设、推动教改.

2020年春季, 受新冠病毒疫情的影响, 我线上授课. 尽管缺少了线下请同学在黑板上推演或计算等环节, 但5G时代的远程教育或有助于打破教育壁垒^[8]. 从私塾教育到学堂教育, 再到视频教育, 受教育权逐渐平等. 这一历史性趋势将深远地影响整个教育体系. 为了更好地教学研讨, 作者公布2020年春季天体物理课程的授课视频:

“<http://psr.pku.edu.cn/rxx/ap.rar>”.

欢迎读者斧正!

参 考 文 献

- [1] Anderson P W. Science, 1972, 177: 393
- [2] Xu R X. SCPMA, 2018, 61: 109531
- [3] Linde A. ConCP, 2005, 5: 1
- [4] 徐仁新. 天体物理导论. 北京: 北京大学出版社, 2006
- [5] 唐纳德·帕金斯. 粒子天体物理. 来小禹, 陈国英, 徐仁新. 译. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2015
- [6] Abbott B P, et al. PhRvL, 2017, 119: 161101
- [7] 俞允强. 科学, 1993, 15: 6
- [8] OECD. Equity in Education: Breaking Down Barriers to Social Mobility, Published on October 23, 2018 (<http://www.oecd.org/education/equity-in-education-9789264073234-en.htm>)

⁵HXMT: Hard X-ray Modulation Telescope, FAST: Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, JUNO: Jiangmen Underground Neutrino Observatory, LHAASO: Large High Altitude Air Shower Observatory, CSST: Chinese Space Station Optical Survey Telescope, DAMPE: Dark Matter Particle Explorer, SKA: Square Kilometer Array, NICER: Neutron Star Interior Composition Explorer, LIGO: Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LHC: Large Hadron Collider.

Astronomy Education I: Gravity and Astrophysics

XU Ren-xin^{1,2}

(1 Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

(2 State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871)

ABSTRACT The author explains astrophysics from the perspective of physics as well as of astronomy, with special attention to the important role of gravity in astrophysics. Either in a general university or a particular college of science and technology, astronomy education should be necessary for both sciences and humanities, and astrophysics is a vital ingredient in teaching astronomy. The course of astrophysics at Peking University is introduced. Finally, this article concludes with teaching cases such as the muon-generation in air shower, the chirp mass and the accelerating universe.

Key words astronomy education, astrophysics, gravity