

宇宙线是否带电

李 骋 高 卫

(中国科学院高能物理研究所 100049)



1. 宇宙线的发现与新问题

19世纪初,物理学家们发现了空气电离的现象,并开展了一系列实验测量,探究空气电离之谜^[1]。物理学家通过测量电离率与海拔的关系,从而确定了这些神秘射线来自于外太空^[2],继而有了“宇宙射线”的概念。宇宙射线的发现吸引了众多物理学家的兴趣,人们对于这一神秘射线的发现充满了好奇和怀疑。虽然奥地利物理学家维克多·赫斯的实验结果清晰表明电离率会随着海拔升高而增加,但是依然有很多物理学家对这一发现提出了质疑,其中就包括美国著名实验物理学家罗伯特·安德鲁·密立根。密立根于1909年设计了著名的“油滴实验”,首次测量了电子电荷,从而证明了电荷的不连续性。密立根也因其测量电子电荷以及验证爱因斯坦光电方程方面的工作获得了1923年的诺贝尔物理学奖。密立根对研究宇宙射线产生了浓厚的兴趣,他首先对赫斯的结果产生了怀疑。他在1926年的美国物理年会上宣传“the whole of the penetrating radiation is of local origin”^[3]。作为一名杰出的实验物理学家,密立根很快提出了自己的实验方案。他选择在两个不同海拔高度的湖泊对空气电离率进行测量。一方面,湖泊放射性弱,本底背景比较干净;另外一方面还可以测量不同水深的电离率。密立根发现不同海拔高度湖面的电离率不一样,高海拔湖面的电离率比低海拔湖面要高,而且发现两米深湖水的吸收长度大致与2千米空气的相当,因此证明了宇宙射线确实来自于外太空^[4]。既然知道了这些神秘射线来自外太空,那么另外一个问题也随之而来,即这些神秘射线究竟是什么?

在那个年代,人们对于微观世界的了解才刚刚开始。彼时人们还没有发明大型对撞机,还没有办法打开微观世界大门,也不知道微观世界的家族有如此多的“成员”,只能通过放射性物质来研究微观世界。英国物理学家欧内斯特·卢瑟福在1898年发现了 α 射线和 β 射线。其中 α 射线穿透能力很弱,甚至一张纸就能阻挡;而 β 射线的穿透能力要更强一些,往往需要几毫米厚的铝箔才能阻挡。后来人们认识到 α 射线其实是氦原子核,而 β 射线是电子。1900年法国科学家维拉德发现一种贯穿力非常强的辐射,是继 α 、 β 射线后发现的第三种原子核射线。1913年,该射线被证实是电磁波,和X射线性质极为相似,但是具有比X射线还要强的穿透能力,即 γ 射线。图1为几种射线的穿透力示意图。

宇宙射线要穿过厚厚的大气来到地面,其穿透能力比 γ 射线还要强。如果它是带电粒子,那么其能量将会超出想象,所以人们普遍相信这种神秘射线应该是中性粒子。另外一方面,爱因斯坦在1905年提出了狭义相对论,揭示了物质与能量的关系,人们已经知道物质会转换为能量(图2)。当两个较

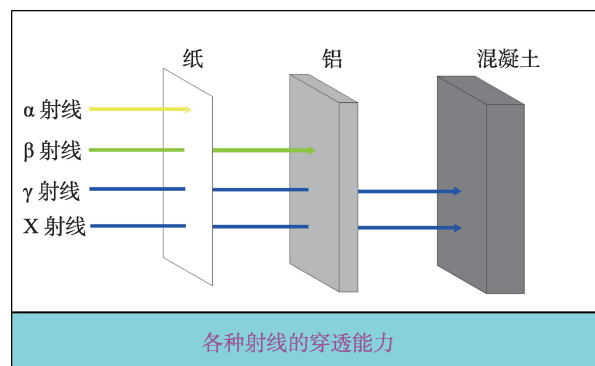


图1 各种射线穿透能力(图片来自网络)

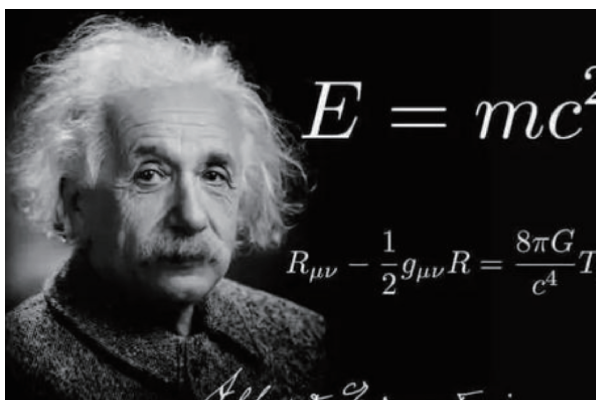


图2 爱因斯坦及相对论(图片来自网络)

轻原子的质量小于其合成的较重原子的质量时,则说明在聚变过程中有质量亏损,从而以能量的形式辐射出来。根据质能关系式 $E=mc^2$ 和普朗克公式 $E=h\nu$,可推算出辐射光子的频率。密立根假定,这些辐射光子就是宇宙线的最初来源。1923年美国物理学家康普顿发现当一个高能光子与电子散射时会将部分能量传递给电子,从而得到一个能量较高的电子和能量较低的光子,这与经典物理学是相悖的——在经典物理学框架里,电磁波经过物质散射以后波长并不会改变,因此能量不会改变,这一实验结果证明了犹太裔物理学家爱因斯坦的光子理论,康普顿也因此获得了1927年的诺贝尔物理学奖。当高能光子穿过大气层到达地面附近进而与物质发生康普顿散射,产生高能电子,继而可以解释空气电离效应。这在当时看起来是很“合理”的解释,而且是“唯一”的解释。但是科学是需要实验支撑的,即使听上去再合理的理论都需要通过实验去证实。

想要证明粒子是否带电可以将运动粒子放在磁场中检验。如果是带电粒子,则运动轨迹会发生偏转,如图3所示;如果是中性粒子,则运动轨迹不会受到磁场影响。虽然实验原理很简单,但是由于宇宙射线的能量极高,在实验室中真正实现起来很困难。根据粒子在磁场中的运动规律,粒子的回旋半径与粒子速度成正比而与磁场强度成反比。为了看到这个偏转效应,要么我们在很大的尺度范围内进行测量,要么需要提供超强的磁场。在当时的

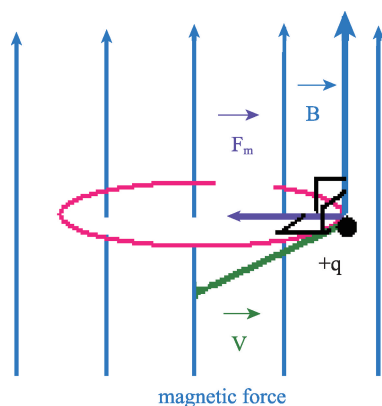


图3 带电粒子在磁场中运动规律(图片来自网络)

情况下,人类自然选择了前者。地磁场近似于一个偶极磁场,磁力线从地理南极延伸到地理北极。假设带电粒子从各个方向均匀入射,在地球两极沿着磁力线运动,更容易到达地球;而在赤道附近会因切割磁力线被偏转而更难到达。因此地球两极的宇宙线流量应该更高,低纬度的流量相对更低,我们称之为“纬度效应”。

在确定了通过测量“纬度效应”来确定宇宙线是否带电的实验方案之后,实验物理学家们就开始付诸实施,其中以康普顿和密立根的贡献最为突出。1932年,密立根在许多人的帮助下进行了范围较广泛的观测。一位加利福尼亚理工学院的年轻物理学家内赫发明了一种高灵敏度的自动记录验电器,密立根非常高兴,相信新仪器“可以避免各种人为因素的影响和观察者的偏见”。还有美国空军的负责人同意密立根使用轰炸机将测量仪器带到8000多米高空。遗憾的是,密立根实验并未观测到明显的纬度效应,密立根因此坚信宇宙射线是中性粒子。同时期,康普顿的实验也在紧锣密鼓地进行着。1932年3月18日,康普顿离开芝加哥,开始了他本人行程5万余英里、遍历五大洲、跨越赤道5次的远征,当时的航行图如图4所示。康普顿非常自豪地将自己这次南到新西兰的杜恩廷、北到北极圈,上至6000多米的高山、下至海平面的远征测量比作“马可·波罗的东方旅行”。他曾对俄克拉荷马大学的听众说:“正如马可·波罗打开新世界一样,现在科学也在打开新的世界”。康普顿在横跨全球

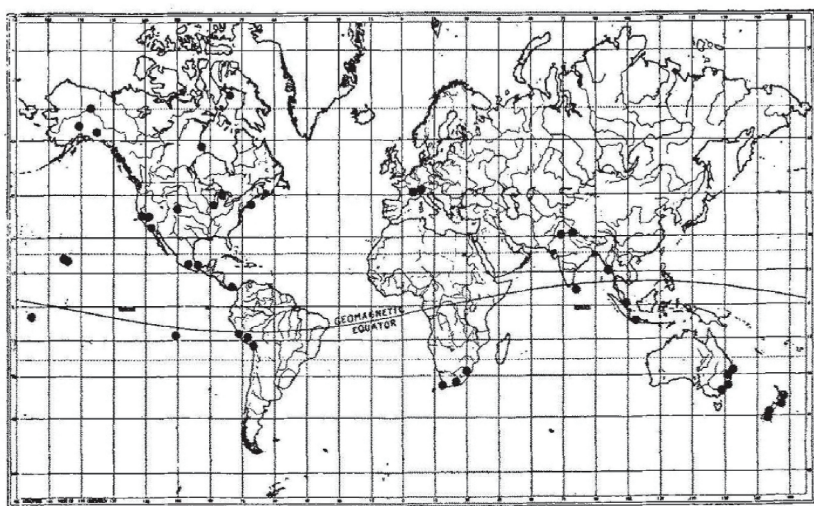


图4 1932年康普顿测量宇宙射线“纬度效应”航行图^[5]

几大洲,包括从南极到北极荒漠,几次穿越赤道线的更大地理范围的观测认为存在明显的纬度效应。在1932年9月《纽约时报》刊出大幅标题“识破密立根的谬误”,指出宇宙线是带电粒子,而非光波。康普顿和密立根两位学界大佬约定在当年12月大西洋城举行的美国物理学会上进行一场“决定胜负”的论战。由于学界早有预知,加上媒体的渲染,这场论战闹得沸沸扬扬,争论的最后结果是“密立根输,康普顿赢”。这是科学家前辈们对宇宙线是否带电的验证历程,现在我们能否重走验证之路,判断宇宙线的电性呢?

2. 在校园检验宇宙线电性

磁场是检验粒子电性的“照妖镜”,运动的带电粒子在磁场中受到洛伦兹力的作用,运动轨迹被偏转,如果宇宙线是像X射线或伽马射线这样的中性粒子,那么宇宙射线在传播到地球的过程中,其飞行路线则不会受到磁场(星际空间磁场、地磁场等)的偏转,借助天然磁场的作用设想一些实验去检验宇宙线的电性。

(1)通过“纬度效应”观测判断宇宙线是否带电

从前文已知,如果宇宙线是带电粒子,会存在

“纬度效应”,因此,我们可以通过对不同纬度宇宙线强度的测量,重走前辈的探索路程,判断宇宙线是否带电。

我国幅员辽阔,最南端纬度不足4度,最北端纬度高达50多度,跨越将近50度的纬度范围。目前校园宇宙线联盟已有多个站点,纬度分布在30~40度。随着更多的学校建立校园宇宙线观测阵列,所覆盖的纬度范围将进一步扩大,在各个站点测量当地的宇宙线的流强,通过共享数据,联盟成员可以获得不同地理纬度的宇宙线流强数据,检验其是否呈现“纬度效应”,从而判断宇宙线是否带电。该方案可能面临如下困难,地磁场导致的不同地理纬度的宇宙线流强差异比较小,需要很高的测量精度才能观测到“纬度效应”,而观测地点的海拔高度和环境气压等都会影响测量结果。

(2)找源知电性

如果我们将视线从地球放到更远,发现其实银河系中也弥散着磁场,整个银河系也可以成为我们的探测“介质”。可以提出以下假设,如果宇宙线是中性粒子,则宇宙线的方向即为宇宙线源的方向,宇宙线会有明显的“成团”效应,就像夜空中看到的一个个星星;相反,如果宇宙线是带电粒子,则宇宙线在银河系传播过程中会被磁场偏转(如图5所示),从而失去原初方向信息,呈现几乎均匀的分布。我们的

校园宇宙线阵列就可以测量宇宙线的原初方向,如果其分布没有明显的“成团”现象,便可以排除宇宙线是电中性的这一假说,进而得到宇宙线是带电粒子的结论。如图6所示,为校园宇宙线项目中一个由5台探测器组成的小型阵列一天的观测数据获得的宇宙线分布天图,由于事例有限,还不能支持我们下结论。后期随着数据积累,增大统计量,会获取更准确的结果来帮助我们验证这一方案是否可行。

(3)望月识电性

月球是离我们最近的天体,忽略空气的折射等现象,夜晚看到的月球位置就是它的真实位置。与

光学成像类似,是否可以把光替换成宇宙线为月球拍照呢?事实上宇宙线来自各个方向,月球遮挡了部分宇宙线,使得月球方向测到的宇宙线更少,与周围背景相比,宇宙线流强在月球方向“缺失”,这就是宇宙线为月球成的“像”,我们称之为“月影”。

如图7(a)所示,假设宇宙线同可见光一样是电中性的,我们看到的“月影”应该和月球在同一个方向。如图7(b)所示,如果宇宙线是带电粒子,地磁场会偏转其方向,就好比光的折射,我们看到的“像”会偏离实物的方向。因此可以通过比较“月影”相对月球的视位置是否发生偏移来判断宇宙线是否带电。如图8所示为我国的高海拔宇宙线观测站实

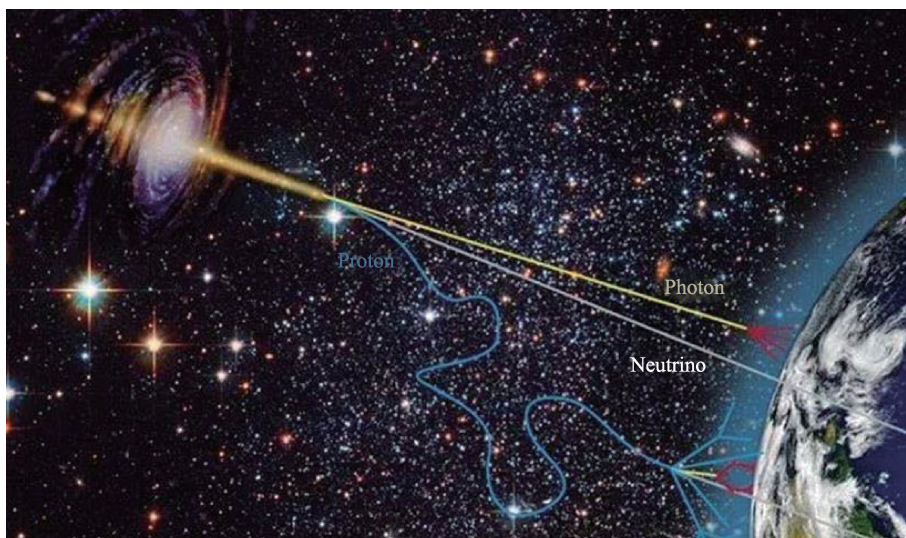


图5 带电粒子和中性粒子在银河系中传播示意图(图片来自网络)

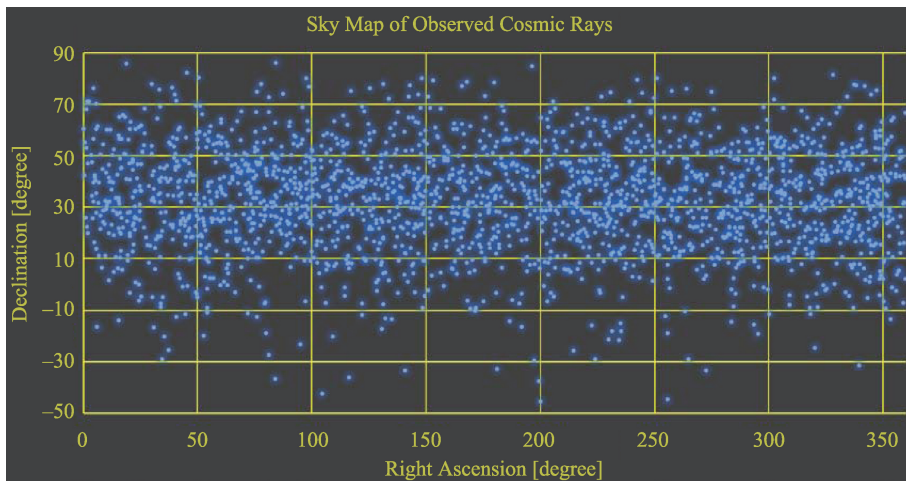


图6 天球坐标系下宇宙线方向分布

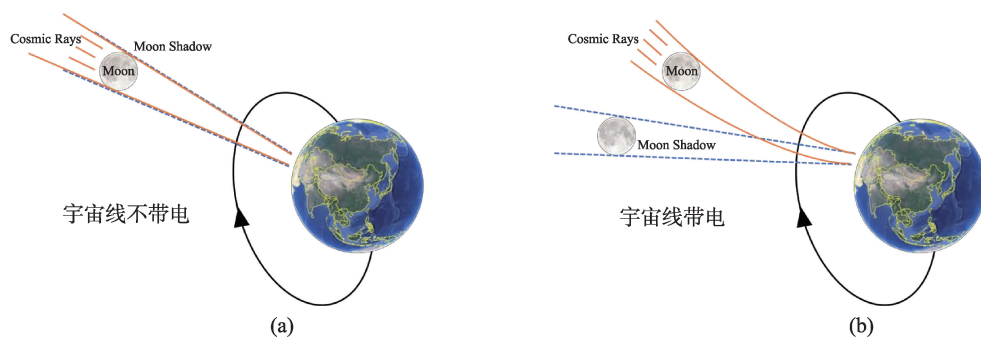


图7 宇宙线不带电(a)和带电(b)时月影视位置受地磁场的影响偏离月亮实际方向示意图。

只作定性示意,放大了月影偏移度,不代表实际偏移量

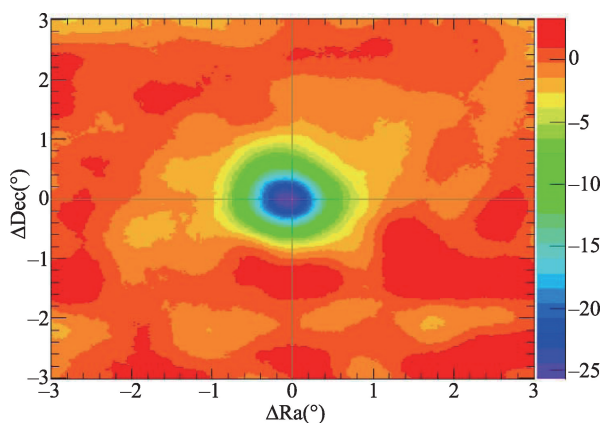


图8 实验观测到的宇宙线月亮阴影^[6],坐标原点为月亮的中心位置,东西方向(赤经Ra)为地磁场导致的月影偏移,南北方向(赤纬Dec)的偏移量代表了实验的指向精度

验观测到的月影,能够看到在东西方向上,“月影”偏离了月球的位置,支持宇宙线带电的结论。

3. 空间直接测量

上述的方案都是利用自然界磁场为工具,通过地面宇宙线实验的间接测量来判断宇宙线是否带电的本质。除此之外,还可以把探测装置搭载到高空气球、卫星以及空间站上对大气层外的原初宇宙线进行直接测量。一个典型的代表是位于国际空间站的阿尔法磁谱仪(AMS-02)^[7],能够在太电子伏特(Teraelectron volt, 10^{12} eV)能区精确测量宇宙线。图9为AMS-02探测器图片,它可以通过测量粒子的电荷(Z)、能量(E)和动量(P)等鉴别粒子的种类。通过空间直接测量,人们已经知道该能量范围的宇宙线中约90%是质子,其余9%是氦原子核,其

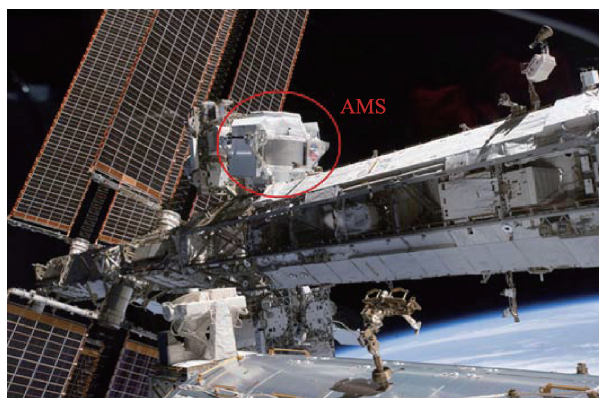


图9 位于国际空间站的AMS

余1%包含了其余更重的原子核和光子、电子等等。如果我们了解得更多,就会清楚各种成分的含量是随着能量变化的。

与密立根的时代相比,得益于科技的发展,宇宙线探测器技术发展迅速,如今有多种探测手段对宇宙线开展精确测量。低能的宇宙线流强较高,可以用气球、卫星等这种空间载荷实验探测器直接观测,确定宇宙线粒子种类;对于流强很低的高能宇宙线,由于空间载荷实验的探测器不能做得太大,因此采用地面的大型阵列进行间接测量。

回顾最初宇宙线的发现,前辈们实际上测量的是宇宙线的大气簇射产生的次级粒子,校园宇宙线联盟研发的校园宇宙线阵列可以实现对原初宇宙线的测量,测量数据向联盟成员开放共享。这是一个很好的机会,利用我们掌握的磁场对带电粒子影响的知识,自己动手设计实验去了解宇宙线是否带电的本质,发散思维,利用所知探索未知。

参考文献

[1] C.A. de Coulomb, "Troisième mémoire sur l'électricité et le magnétisme," Histoire de l'Académie Royale des Sciences, pages 612-638.
[2] V.F.Hess. *phys. Z.*13,1084(1912).
[3] Carlson, Per. "A century of cosmic rays." *Physics Today* 65 (2012): 30-36.

[4] A.Millikan and G.H.Cameron: "New results on cosmic rays." *Nature*, 121(1928), 19.
[5] Prof. ARTHUR et al. "Nature of cosmic rays". *NATURE*. 1933.
[6] Xin-Hua Ma et al., Chapter 1 LHAASO Instruments and Detector technology, *Chinese Phys. C*, 46 030001(2022). https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/alpha-magnetic-spectrometer.html



新书推荐

新书介绍——《前进中的物理学与人类文明》

物理学是自然科学中重要的基础学科之一。它以实验为基础,借助物质、能量、空间、时间等基本要素,研究物质的基本结构、物质之间普遍的相互作用、一般的运动规律以及所使用的实验手段和思维方法。物理学从17世纪作为一门科学诞生之日起,迄今经过300多年的发展所取得的辉煌成就引发了一次又一次的产业革命,从而极大地丰富了人们对物质世界的认识,引领无数科学技术领域的开拓和创新,有力地促进了人类文明的进步。正如国际纯粹物理和应用物理联合会第23届代表大会的决议《物理学对社会的重要性》指出的,物理学是一项国际事业,它对人类未来的进步起着关键性的作用,包括探索自然,驱动技术,改善生活以及培养人才。

《前进中的物理学与人类文明》一书,作者从牛顿力学讲起,然后简明介绍了经典电磁学与统计物理学、狭义和广义相对论、量子物理、量子场论、粒子物理学以及高能天体物理学的相关知识和重要的进展。剖析了物理学与数学的关系,以及物理学与科学技术各领域的发展和人类文明的发展的密切联系。给读者绘制了物理文化与人类文明的绚烂多彩的图景。作者李学潜为南开大学著名理论物理学教授,他潜心研究粒子物理和宇宙学五十多年,出色完成了近二百篇在国内外有影响的学术论文,培养了几十名博士和硕士研究生。

李学潜教授多年来以极大的热情积极投入物理学的科普工作,除了翻译了一些诺贝尔奖获得者的科普名著外,还撰写了多部科普作品,并以视频形式给公众解读难度比较大的一些高级科普著作,深受读者欢迎。多年来一直担任现代物理知识杂志的编委,对

于推进我国物理学的科普工作,做出了突出的贡献。如今虽已耄耋之年,但仍精神抖擞、孜孜不倦、耕耘不止。

本书的读者对象是爱好物理学的中学生和低年级的大学生或非物理专业的大学生。其显著的特点是涵盖的内容非常广泛,而且涉及很多现代物理的抽象的概念,虽然这些内容听起来很难,但是通过作者通俗易懂、深入浅出的讲解,相信能让本书的读者有不小的收获。作全书叙述风格平易近人,犹如家常聊天,娓娓道来,其中还穿插一些趣闻,不会让读者觉得枯燥乏味。此外,为了保证内容的科学性和严谨性,作者没有刻意丢弃公式。尽管从数学角度会带来一定困难,但由于经过了精挑细选,把公式数量压到了最小,因此不会对阅读造成太多的障碍。最后值得指出的是作者尝试用现代物理讨论新冠病毒传播的基本特点,尽管没有给出明确的结论,但也让人耳目一新,受益匪浅。



《前进中的物理学与人类文明》,2023年人民邮电出版社出版, 定价69.8元

(丁亦兵,中国科学院大学物理学院)