

物理百年：1950~2050

迈克尔·S. 特纳 著 谌俊谋 译 李学潜 校



物理学刚刚经历了一个伟大的世纪：量子力学、核能与核武器、大型粒子加速器、晶体管和随之而来的各种量子器件，以及从夸克到暗能量的各种重大发现。物理学统治了整个 20 世纪。在《时代》杂志将爱因斯坦评为世纪人物后，对这一事实的最后一丝疑虑也被消除了。而在 1950~2000 年间，美国拥有了大部分的诺贝尔奖获得者，最大的粒子加速器和最一流的学术期刊，是无可争议的物理学的圣地。

过去 10 年世界发生了深刻的变化。生物学成为 21 世纪最受瞩目的学科。从基因组测序到功能性核磁共振成像、生物和生命科学的突破（有许多借助了物理工具）非常了不起，走在了时代的前面。而同时，美国将不可能再像过去 50 年那样主导物理学或世界经济了。所有这些不能不让美国和世界各地的物理学家们思考：21 世纪，物理将向何处去？

我认为科学本身不是，或者不应该是让我们烦恼的东西。前人给我们的遗产为未来提供了坚实的基础，摆在面前的机会激动人心。而我们表现得这么大惊小怪，不过是因为现状的改变和未来的不确定：坐在王座的感觉当然好，但被赶下去的滋味就不那么容易接受了。

受到这种焦虑的驱使，我将以当代为基点，盘点前后一个世纪的物理学。选当代为时间参照点可以让我既回顾过去的成就又展望未来的机会，从而完成我对物理学正如何变化和将向何处去的思考。

伟大的成就：1950~2000

过去 50 年产生了这么多重要的进步，要选择这个让人激动的时代的主题实在是很难。我将重点论述那些改变了物理学和开拓了研究新方向的成就。尽管我认识到，这个清单展示出的物理学的变迁（一个粒子物理学家可能变成天文学家和宇宙学家）可能和物理学本身一样多。

夸克 核子和其他强相互作用有关的粒子由六种带分数电子电荷的夸克构成。这一发现对物理学产生了深刻影响：导致了粒子物理标准模型的诞生，改变了核物质内在运作模式的图像，为重离子碰撞中夸克—强子转变的研究打开了大门，并为关

于宇宙大爆炸后一微秒以内物理图像富有成果的研究提供了基础。

中微子 在泡利 1930 年为挽救能量守恒提出中微子理论的 26 年后，其微弱的相互作用才被探测到。中微子是电子、 μ 、 τ 轻子的中性伴随子，此 6 个粒子统称为轻子。轻子和夸克是物质组成的基本成分。尽管中微子是基本粒子中最轻和最惰性的（在四种基本相互作用中，中微子只参加弱相互作用）粒子，但它们是产生重元素的大型恒星爆炸的关键因素，它们贡献给宇宙的质量就相当于恒星的贡献；此外，中微子也很可能对建立夸克和反夸克的不对称性上是决定性的，从而成为原子能够存在的关键。

场论的成功 曾几何时场论的课题被一些人认为是数学而非物理，现在却在物理学里取得了伟大的成就。它不仅提供了粒子物理标准模型的 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 规范场理论和统一所有基本力的框架，还为超导的标准理论，重整化群和描述凝聚物质系统的共型场理论提供了基础。让我们把广义相对论也算进来吧，在场论框架下，它从原本深奥的数学变成了理解宇宙演化和宇宙中各种事物的基础。

极端的宇宙 1966 年，神秘的类星体被发现，轰动一时。现在我们知道它们有由银河星系中央的超大黑洞供给的能量。各种发现接踵而至，恒星大小的黑洞，中子以及能量高达 10^{20}eV 的宇宙射线，这些发现揭示出：宇宙并不像我们想象的那样平静，它要有趣得多，是一个有着极强能量、密度和重力场的地方。这些发现不但使更多的物理学家进入天文学领域，而且把天空变成了一个物理实验室。

宇宙学及宇宙的汇合 宇宙微波背景的发现，随后出现的大量数据，以及由此产生的惊人的想法：非常巨大的宇宙要与粒子理论描述的非常小的实体汇合，使宇宙学这个让物理学家皱眉的死水成为所有科学中最热门的学科之一（参见 *Physics Today*, December 2008, page 8）。宇宙的外部空间与基本粒子和核子的内部空间之间的深层联系被揭示了出来，它们存在于暗能量和暗物质、膨胀子、中子星

和中微子之中。

量子力学在主导我们的世界 物理学家们驯服了量子力学原理制约下的原子世界，制造实用的设备：包括晶体管、集成电路、激光和超导导线等。这些发明改变了我们的生活方式，使信息时代成为了可能，无疑这是由好奇心推动的基础研究产生巨大回报令人惊奇的范例。

计算物理 摩尔定律在过去 50 年间跨越了 12 个数量级，计算机存储量从千字节 (killo-bytes) 发展到 10 亿兆字节 (petabytes, 10^{15})，运算速度从每秒千次浮点数 (kiloflops) 到每秒亿兆次 (petaflops)，催生了一门新的学科——数值模拟和实验。复杂如量子色动力学 (QCD) 和广义相对论的理论现在能够精确得到数值了；基本粒子的性质也可以从第一原理出发进行计算了；黑洞撞击的后果变得可以预见，甚至宇宙本身都能模拟了。

新的观测手段和新工具 物理学家制造出来的工具冲击了科学的每个方面。加速器不止使我们能够观察夸克和轻子的世界，还提供了用来观测和研究生物和材料样品的强 X 射线束。探测微波，红外线，紫外线，X 射线和 γ 射线光子，也许很快还要加上探测引力波的探测器，这些都为天文学家观察宇宙提供了新的手段。人们能够很容易地把单个原子限制在特定的位置，并进行操作和研究，这使得我们可以采用各种技术手段来观察原子世界。

机遇：2000~2005

过去 50 年我们研究方式的改进，为很多问题的答案提供了线索，解答它们的时机已经成熟；也指出了极有前途的物理领域供人们开拓。过去的辉煌很难复制，但我认为下一个 50 年也许能创造出更伟大的成就和发现。下面是我的预测。

开发原子世界 我们已经能够观察原子的形象并开始操纵它们。下一个挑战将是在原子水平做真正的工作：制造新材料和新机器，制作物理—生物杂交型材料，以及更广泛地认识纳米世界的潜力。这一工作对社会的冲击将可与量子力学比肩。

量子理论与引力的统一 这两大 20 世纪的物理学支柱是不相容的。弦理论试图统一它们，现在还难言成败，但统一的时机已经成熟。当它成功时，我们对物质、能量、空间、时间以及宇宙的起源和演化的认识都会深化。而且谁知道它会最终带给我们什么现实的收获呢，就像量子力学曾经做到的那样。

关于宇宙完整图景 宇宙学家正努力把宇宙演化的时间顺序全都弄清楚，从大爆炸发生之前，经过星系、恒星、行星和生命的产生，直至时间的终点。有了这些雄心勃勃的想法，再加上以后几十年里的功能强大的地球和太空电子望远镜，我们似乎正沉浸在宇宙学的黄金时期。

可持续能源 这个世界在接下来 40 来年中需从 10 万亿瓦的能量消耗增加到 40 万亿瓦，这个增加应该是以可持续的方式实现并对地球产生尽可能小的影响。尽管备选方案似乎很多：从太阳能到核能，从生物能源到碳封存矿物燃料，最佳解决方案却还没有出现。在为解决这一人类大难题而进行的基础研究中，物理学家将是关键参与者。如果我们成功，其成果应该比核武器更令人难忘。

生命物理 我们已经具有物理测量和操作原子、分子和细胞的能力，也许我们离回答一些重大问题的时候已经不远了：大脑是如何运行的？基因组的信息是什么？生命体是怎样运作的？它们能被模拟甚至重新编排吗？新的工具是关键，但伟大的创意以及理解和描述生命复杂系统的组织原则也同样重要。

有外星生命吗 现在已知有超过 350 个轨道接近其恒星的行星，还有我们自己太阳系的几个可能存在生命的地方，发现地球外的生命应该不是问题。而它们一旦真被发现，将对生物学、天文学和人类对自身的看法产生深远的影响。现在想象一下我们找到了智慧生物吧！

复杂性和突变 我一直很喜欢用小孩观察象棋比赛来比喻物理学的任务，意思是我们通过仔细观察自然以发现它潜在的规则。当然，学会了规则并不意味着我们就学会了下棋。在像湍流和生命组织这样的复杂系统里更是如此。理解复杂系统和大尺度行为的突变一直是巨大的挑战。

为 21 世纪准备的工具和手段 没有人在创新仪器工具和改进方法上比物理学家做得更好，这样所有科学领域的前途当然就掌握在我们手里。

物理学向何处去

有人也许会想，有着一系列前所未有的成就和未来巨大的机遇，物理学家们应该是一贯地自信满满。相反，他们身上闪现的却是对自身的怀疑。生命科学和生物学的崛起让赛场中游戏各方扯平了：物理学家不再占据科学和学术上头号的领军人的位

置；不再是所有最好和最聪明的学生都渴望成为物理学家了。科学内部有着对资源、下一代的科学家以及荣誉的激烈竞争。此外，在更大的背景上看，科学正经历着剧烈的转变：它更强调合作和跨学科研究，更国际化和数字化，更强调经验，节奏更加快速。

为了继续繁荣，物理学家必须有信心重新改造物理学，就像我们曾经做到的那样。很多最令人激动的机会都存在于和其他学科的交界处。物理学必须能巧妙地容纳下更加多种多样的研究方向。很容易想象分割成小块的物理学，有宇宙物理学、生物物理学、计算物理学、应用物理学等等，但就是没有物理学本身。这是生物学甚至化学所经历过的，但我认为这种学科分化并不能最好地发展物理学。

物理学家研究问题有一个重要的统一的原则。物理学家使用严格和定量的方法；寻找内在的规律和基本法则；他们从简单的模型开始，增加复杂性；他们依赖还原论，并且不断进行仪器工具和方法的创新。虽然物理学的名字一直不变，它的内容却一直在变，改变得太多了，以至于唯一不变的定义是：物理学就是物理学家所做的工作。物理学从 400 年前的力学和天体力学到 18 和 19 世纪的电学、磁学和统计物理，到了今天它包含了材料、原子、原子

核、基本粒子、宇宙和生物学里越来越多的领域。而从事研究的物理学家们为了应对他们所处时代最紧迫的问题，创造了数学上、概念上和仪器上的新工具。从最乐观的角度看，物理学家曾经是，并且将继续是科学上机会的敏锐发现者。在我任教的芝加哥大学曾经有一个叫做阿尔伯特·迈克尔逊的物理学家，因为在一个世纪以前宣布物理学的死亡而声名狼藉。我不会重复他的失误，我真的看好物理学的将来，除非你疯了，否则你绝不敢小看物理学的。

（湛俊谋、李学潜，南开大学物理学院 300071）



作者简介

迈克尔·S. 特纳（Michael S. Turner）是芝加哥大学布鲁斯和戴安娜·劳耐尔讲座杰出贡献教授，芝加哥大学卡弗里宇宙物理研究所创始会员。

原文刊登在 *Physics Today*, 2009 年第 9 期。由杨炳麟教授推荐给本刊，并承蒙特纳教授允许译成中文并寄来照片。

科苑快讯

IBM 展示运行速度最快的石墨烯晶体管

在刚刚出版的《科学》杂志上，IBM 的研究人员展示了一种由石墨烯材料制作而成的场效应晶体管（FET），其截止频率可达 100 吉赫兹（GHz），这是迄今为止运行速度最快的射频石墨烯晶体管。这一成就是美国国防部高级研究计划局“碳电子射频应用项目”取得的重大进展，为研发下一代通信设备铺平了道路。

研究人员通过使用与现行的先进硅器件制造技术相兼容的加工技术制成了圆晶规模、外延生长的石墨烯，从而达成了此一高频纪录。

IBM 公司负责科研的副总裁陈自强博士表示，石墨烯的一大优势在于其中电子可实现极高速的传输，这对于下一代高速、高性能晶体管的研发来说是至关重要的。此一突破清楚地表明了石墨烯可用

以制造高性能器件和集成电路。

对碳化硅衬底进行热分解可合成统一的高品质石墨烯。该石墨烯晶体管使用了一种金属顶栅结构，及一种含有聚合物和高介电常数氧化物的新型栅极绝缘体堆栈。栅极长度适中，为 240 纳米，为将来通过缩减栅极长度以进一步优化性能留下了足够的空间。

值得注意的是，该石墨烯晶体管的频率性能已超过了相同栅极长度的最先进硅晶体管的截止频率（40GHz）。研究表明，从天然石墨获取的石墨烯材料也可表现出相似的性能，这证明了这种高性能也可获自不同来源的石墨烯。此前，研究人员已利用从天然石墨中提取的石墨烯片制成了截止频率为 26GHz 的石墨烯晶体管。

（摘自 2010 年 2 月 8 日《科技日报》，作者：冯卫东）