

未来百年的物理学

(中国科学院国家天文台 邹振隆 编译自 Frank Wilczek. *Physics Today*, 2016, (4): 32)

未来百年物理学前景如何?当然我不会知道,但这是一个发人深思的问题。限于个人的兴趣和学识,本文中的猜测难免偏颇。不过,这些猜测若能引起读者思考,即便回答完全不同,也算达到我的目的了。

为了探讨这个问题,让我们先回顾一下过去。100年前,物理学正处于动荡时期。爱因斯坦刚发表了革命性的引力理论。卢瑟福发现了物质原子的有核结构。以玻尔原子模型为特征的量子论还是一组假设。超导现象之谜在理论上还未得到破解。化学键的本质和恒星的能源这些自然界的重要问题,仍令当时的物理学感到困扰。

50年前的情景已经变得完全不同。广义相对论在理论和实验方面日渐成熟。同哈勃发现宇宙膨胀一起,它开启了科学宇宙论的新时代。微波背景辐射的发现,加上轻核宇宙学起源的证实,成为大爆炸学说最有力的证据。量子力学作为一个数学精密、逻辑自洽和非常成功的理论,尽管让很多人感到困惑,但已成为我们与自然界对话的语言。

原子物理学、化学和材料科学有了坚实的基础。超导现象借助BCS理论得到了全面解释。激光、晶体管和核磁共振等新技术,令人印象深刻地展示了新物理学的深度和可靠性。物理学家理解了恒星何以发光,学会了如何制作核弹和使用核能。另一方面,弱力特别是强力的描述仍然是零碎和唯象的,宇宙线和加速器中高能事件的研究产生了许多意外的惊喜。

25年前,物理学得到进一步发展。两个标准模型已经建立,一个用于基本相互作用,一个用于宇宙学。面对严格的定量检验,这些模

型至今表现优异。归因于对物质,特别是半导体的量子理论的深刻了解,计算机革命方兴未艾。这对物理学来说意义深远。

经历百年之后,物理学基础变化的步伐放慢,而它所支持的创新步伐加快。这些变化反映了可靠而全面的标准模型的成就。

扩展对称

物理学家早已熟知相对论性量子场论的原理,和嵌入我们的核心理论(广义相对论和强力、弱力和电磁力规范理论)中的局域对称性。我们现在有表述精确、久经考验的方程,为化学、工程学、天体物理和宇宙学众多现象的描述提供了可靠的基础。然而,还有不少可以改进的空间。

引力子、胶子、W和Z玻色子及光子都是局域对称性的化身。它们的耦合,乃至其存在都是那个深刻原理的反映。在基于对称性的标准模型中,基础物理学看起来最接近实现毕达哥拉斯和柏拉图的愿景:真实和数学理想之间存在着完美的对应。

在粒子物理学标准模型中,强、弱和电磁相互作用都有自己的对称性,并且都有各自相关的荷。这种切分的结果使组织基本粒子的方式稍显复杂。从一个较大的对称群来看,这种组织方式会变得更为优美。它提示我们也应该将引力与其他力平等看待,鼓励我们进一步引进新型对称性。

为了把所有的粒子拢到一起,

我们需要关联不同自旋粒子的对称变换。将狭义相对论的洛伦兹对称性扩展到更大的超对称性就可能跨越这个鸿沟。该扩展的对称性要求我们熟悉的粒子有其伙伴粒子,它们有不同的自旋,但有等值的电荷、强色荷和弱色荷。

完整的超对称性要求伙伴粒子也有相等的质量。没有观察到这种简并的原因可能是:超对称性存在于基本方程中,而不是在方程的解中。换句话说,超对称性自发破缺了。值得注意的是,如果超对称破缺不是太大,即已知粒子的伙伴粒子质量不太大,耦合的定量统一就可以完成。

借助超对称来实现统一的原则性思考内涵非常深刻。20世纪物理学的伟大成就,是超越了物质表面上不同的两种性状:波动性和粒子性。在个别量子的水平上,光子和电子都是波—粒子。然而,在系综水平上,它们的描述仍然非常不同,分别涉及玻色统计和费米统计。

超对称性向我们展示,这种差别也可能被超越。其主要的成功,除了整合核心理论的量子数和耦合强度以外,还预言了(现已观察到的)非零但很小的中微子质量。重子数破坏过程,包括质子衰变和超伴子的存在,也是上述想法激动人心的判决性预言。按我的最佳估计,它们应该在百年之内被发现。

探测轴子

粒子的质量和混合角问题提供

了更加鼓舞人心的前景。我们核心理论的一般原则允许参数 θ 的存在,它将导致强相互作用中空间反射和时间反演变换对称性的破坏。实验有力地约束了这类破坏,得出的结论是: $|\theta| < 10^{-10}$;而我们先验地预期 θ 接近1。人择论证无力解决这个疑难,因为难以置信 θ 近于1带来的任何影响会阻止智能观察者的出现。

对 θ 极严的限定表明,必须有个新的原则来解释该参数何以如此之小。最佳选项是一种新型的对称性,它预言存在一种质量超轻、相互作用极弱的新粒子——轴子。如果它们存在,就可以在早期宇宙中大量产生。这为暗物质(其效应已被天文学家观察到但其本质尚未确定)提供了一个优秀候选者。若干检测轴子的巧妙而困难的实验正在进行,应在百年之内甚至更早取得成功。

统一引力

作为引力理论的爱因斯坦广义相对论在概念上非常严谨,只允许牛顿引力常数和宇宙学常数这两个自由参数。它通过了物理学家和天文学家设计的所有检验,然而还是不能完全令人满意。

首先,引力与其他力在强度上相差非常悬殊。如果我们相信自然界有统一的运作方式,那情况怎么可能如此?其次,真空质量密度(即宇宙项,通常被称为暗能量)的测量值同合理预期极不相称。为什么它远小于理论预期,却不为零?第三,将广义相对论直接量子化得到的方程在极端条件下失效,其后果是什么?这些都是未来百年物理学的重要课题。

理论家估计宇宙项来自几个量的贡献(有正有负),其中单个量的绝对值远远超过总额。因此,这个项的观测值极小,表明存在精妙的

相消,而这是我们的核心理论所不能解释的。或许正如温伯格建议的那样,需要诉诸人择论证:宇宙项太大会使宇宙膨胀过快,从而抑制宇宙中的结构形成。不能形成星系、恒星和行星,那观察者也就不可能出现了。人择论证是物理学能做的最佳选择吗?还是有某种更深层次的原理在起作用呢?

广义相对论同量子力学的原理尽管从概念上难以调和,在实践层面并没有什么问题:天体物理学家和宇宙学家在两者同时有效的物理条件下进行的计算通常都很成功,并没有明显的模棱两可或奇性出现。

问题出现在我们试图将方程应用于宇宙大爆炸最早时刻或黑洞内部等极端条件的时候。在有关小黑洞行为的思想实验中也会出现概念上的疑难。除了常用的半经典近似之外,识别真正量子引力产生的可观察现象,将是令人振奋的重大进展。

弦理论是将广义相对论和量子理论紧密联系起来的一个宏伟框架。它支持一个丰富的对称性结构,不仅容纳规范对称性,还有超对称和轴子。目前,弦理论对构建宇宙模型的应用尚未定形。如果可以将它打造成更确定的形式,可能极大地澄清我讨论的许多问题。一百年时间应当足够了。

提升视角

物理宇宙学在过去几十年日益成熟。我们积累的大量精确证据表明,宇宙开始于一个非常特殊的、概念上简单的初始状态。引力之外的各种力在极高温度下处于热平衡中,空间遵循广义相对论方程迅速膨胀。随后,微弱不匀的物质分布通过引力不稳定性增长,形成了星系团、星系、恒星、行星这些我们生活于其中的宇宙结构。

这幅宏观图景毋庸置疑,但许多细节还有待推敲。有证据表明,宇宙在其早年历史中曾经历一个暴胀时期,空间在几分之一秒内增长数十个量级。这种非凡的可能性得到源于基础物理学一些考虑的支持。尽管其物理起源目前尚无定论,但有望在未来百年内观测到暴胀期间量子涨落产生的引力波,从而将暴胀从一种方案变为一个理论。

自然哲学中一个永恒的主题是所谓“蚂蚁视角”与“上帝视角”的对立。蚂蚁像人类那样通过事件的时间序列感知世界,而上帝则将现实看作一个整体。自牛顿时代以来,蚂蚁视角一直主导着基础物理学。矛盾的是,我们将自己对世界的描述划分为与时间无关的动力学定律和让这些定律陆续起作用的初始条件。这种划分一直非常有用和成功,但它远未提供已知世界的完整科学说明。它给出的说明是:事情现在是这样,因为它们曾经是那样。问题在于,为什么事情曾经是那样而不是其他样式呢?

鉴于相对论,上帝的视角看来更为自然。相对论教我们把时空看作一个整体,其不同方面由对称性联系起来,如果我们坚持将经验切为时间片段,这些对称性是难于表示的。外尔在他1949年的著作《数学和自然科学之哲学》(普林斯顿大学出版社,116页)中深刻地表述了这个根本观点:

“客观世界原本就存在着,而不是偶然出现的。只不过是跟着我的感觉沿自己躯体的生命线向上爬,这个世界的一部分才作为随时间不断变化、在空间转瞬即逝的图像变得活动起来。”

我认为,将观察物理现实的蚂蚁视角提升到上帝视角,是对未来百年

基础物理学最深刻的挑战。

革新算法

运行速度和集成密度25次翻倍的摩尔周期律，是人类通过深刻理解物质而获得的创造性成果，它给一般人，尤其是物理学家带来了能力非凡的计算工具。虽然这种指数增长的步伐也许会放慢，但可以预计，未来几十年至少还将有若干翻倍周期。可用的量子计算机也将上线。日益增长的计算能力将改变我们所从事研究问题的实质，甚至将改变研究者自身的本性：“我们物理学家”究竟是什么？

正如电脑对核物理学、恒星物理学、材料科学、化学和飞机设计已经做过的那样，仿真计算将补充、并最终取代实验室实验(图1)。

发展算法将愈益成为理论物理学的焦点。计算机可以处理的概念和方程将备受关注；不能化为算法的概念和方程则不被看好。这并不意味着盲目的数字运算将取代创造性的洞察。恰恰相反，人们对物理学中普遍性、对称性和拓扑性等创造性理解的成功，预先为电脑编程思想提供了合适的范例。

设计算法可以被认为是一种特殊形式的教学，对象是极其快捷但仍缺想象力和经验的学生——不善于处理模糊事物的计算机。目前这些学生主动性不够，好奇心不强，但这些缺点是可以克服的。百年之内，他们将具备与其才华相称的独特思想，而成为人类教师的同事和最终的继任者。

宏伟项目

埃及的金字塔、雅典的帕台农神庙、西班牙的阿尔罕布拉宫、中世纪欧洲的教堂和埃菲尔铁塔，这些都是人类文明借以表达其愿望和身份的宏伟项目。类似的非凡机会

今天摆在我们面前，但是做起来需要大量的投资。

引力波天文学已经打开洞察宇宙中隐蔽区域和猛烈事件的新窗口。今年2月，激光干涉引力波天文台(LIGO)宣布首次直接观测到引力波。为了利用引力波天文学的全部潜能，我们应在太空部署跨越数百万公里的精密仪器，例如太空激光干涉仪(LISA)，如图2所示。

系外行星天文学将系统地调查银河系，收集数以百万计行星的质量、轨道、地质学和大气层信息。作为副产品，我们将了解生命的稀有性以及所需的条件，以此检验和改进人择原理。

触感天文学将更多依靠机器人探测器、虚拟网真和适当物种(而不是难以适应外太空环境的人体)。人类文明将超越太阳系，但殖民规模不会太大。

逆向天文学将在大型加速器项目中回溯距离更短和能量更高的早期宇宙。

量子计算将为日益精致的量子装置提供可行算法。百年之内，它将成为化学和材料科学的核心工具。

现在的主流计算机本质上是二维的。其基础芯片必须在极清洁的环境下生产，任何误操作都可能导致不可恢复的损坏。与此相反，人类的大脑是三维的，它诞生于散乱的环境，有病受伤仍能工作。实现这些功能，打造具有容错和自我修复能力的三维电脑，同时保留半导体技术的密度、速度和灵活性，并没有什么明显的障碍。具有类似人的大脑和躯体、可自组装、自繁殖和自创新的机器人将会出现。

我们看不到可见光范围之外的频率(包括紫外线和红外线)，而它们蕴含着周围环境有价值的信息。



图1 太空电梯靠离心力克服重力得到支撑，可以建立联接地球表面和外层空间的便捷通道。为实现这一概念所需的新型坚固材质，几乎肯定可以借助电脑设计出来

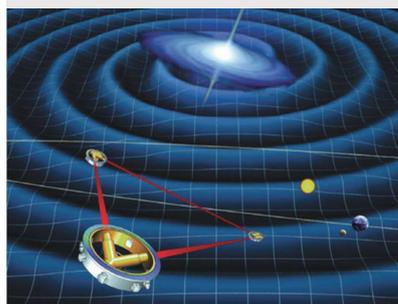


图2 太空激光干涉仪(LISA)可以探测频率范围0.1—100 mHz的引力波，由3艘彼此相距数百万公里的飞船组成一个等边三角形围绕太阳运行，它将是自古以来最大的人造结构，是人类好奇心、进取心和创造性的永恒纪念碑

现代微电子学和计算机提供了获取这类信息的可能性。通过适当的编码变换，我们可以借助已有信道大大扩展自己的感官，从而认知一个更为真实的世界。

结语

从本文挂一漏万的简述中不难看出，宣称物理学的终结肯定为时过早。光明就在前头。我们能够而且将在众多前沿领域取得进展，更加深入地洞察和掌控现实世界的物理现象。