

二十世纪的物理学

Physics in the 20th Century

杨振宁

(美国纽约大学石溪分校理论物理研究所所长)

编者按 本文原载香港《二十一世纪》杂志 1990 年创刊号。征得作者同意在本刊转载。作者是本刊美方顾问编委。

本世纪初,经过长期努力准备之后,雄心勃勃的“人文与科学大会”终于在美国圣路易斯召开了,当时是 1904 年 9 月。大会与圣路易斯博览会联合举行,以庆祝美国历史性收购路易斯安那地区百周年纪念,目的在于回顾人类知识在人文和自然科学各个领域的进步,并展望它们在二十世纪的发展。用大会主任暨博览会教育部门主管罗杰斯(Howard J. Rogers)的话来说:“博览会和大会是相关的,前者汇集了人类大脑和手的具体产品,后者则是人类活动见诸文字的表徵”。

大会在一个年轻的国度举行,时间又恰当新纪元之初。当时预期不出数十年,这个国家将成为全球首屈一指的工业大国,而这个世纪,则将以加速前进的步伐,成为人类历史上科学知识累积最丰富、生产力增长最迅速的时代。现在,这个世纪就快要结束了。回顾它过去九十年的进程,探究大会当年种种期望是否兑现,也许正是时候。

然而,我无意包揽这项艰巨的工作。我在本文所要讨论的,只限于一门科学,即物理学。在二十世纪,物理学

——产生了奥妙的观念革命,从而改变了人类对空间、时间、运动和力这几种基本概念的认识;

——深入探索了物质内部结构的奥秘;

——通过技术进步为人类生产力带来了空前增长。

追本溯源

为了明了物理学发展的背景,我们得从早期说起。现代物理学发轫于欧洲文艺复兴时期哥白尼(Copernicus, 1473-1543)、第谷(Tycho

Brahe, 1546-1601)、伽利略(Galileo, 1564-1642)、刻卜勒(Kepler, 1571-1630)和牛顿(Newton, 1642-1727)等先哲的研究。由于他们的努力,力学和天文学这两门定量科学得以建立。这两门学问在十八、十九世纪取得巨大成功。工业革命期间,以力学为基础的许多新技术发挥了惊人效能,从而一种对物质世界的机械观统制了十九世纪的思想。大家相信,一切运动都可以用数学方程式准确和完全地决定,这些方程式就是微观和宏观物质结构的理性基础。

同时,物理学从力学扩展到许多其他新物理现象的领域,最后在十九世纪获得下列三项伟大成就。

1. 热力学的建立

这是由热力学第一和第二定律的发现而来。第一定律说的是,当各种形式的能量都计算在内时,它是守恒的。第二定律所说的是,对孤立系统而言,一个名为熵的物理量永远是增值的。这个奇妙的物理量是克劳修斯(Clausius, 1822-1888)在 1865 年提出来的,他名之曰熵,因为:

我认为应该用古语命名这些重要的科学量,这样它们就可以不经改变,直接应用于所有现代语言。我建议把 S 量称为系统的熵,它源于希腊文 $\etaτροπη$,意思是变换。我作出“熵”这名称,是有意令它和“能”这个词相近,因为二者在物理上的意义既然有密切关系,那么名称相似应该是好的。

2. 法拉第——麦克斯威的电磁场论

这种理论最初由麦克斯威(Maxwell, 1831-1879)在 1855-65 年间以方程式形式表述出来。爱因斯坦曾这样形容它:“法拉第和麦克

斯威的电场理论可能是牛顿以来物理学基础最深远的转变”。

3.由麦克斯威、吉布斯 (Gibbs, 1839-1903) 和波兹曼 (Boltzmann, 1844-1906) 等人的工作而建立的统计力学

由于这些发展,物理学能够精确地解释许多有关机械、热、光和电的现象,而它的巨大成功又倒过头来加强了当时盛行的、涵盖了全部物质结构的机械观。

然而,到了十九世纪末,大家已清楚看到,尽管当时已知的物理原理,即日后统称为“经典物理学”的,地位如丽日中天,但其实有不少令人迷惑的新现象,诸如X射线、放射性等等,是它无法解释的。伟大的数学家庞加莱 (Henri Poincare, 1854-1912) 在1904年的圣路易大会演讲时,首先回顾物理学的基本原理,接着缕述这些原理所遇到的无从解决的新难题,然后认为只有放弃它们:“满目疮痍之中,还有甚么存留的?”

不过,思想坠入绝望深渊,往往就是另一次观念革命的前奏。事实上,在同一个大会上,著名物理学家朗之万 (Paul Langevin, 1872-1946) 是这样结束他的讲演的:“巨大的发展……(将)粉碎旧物理学的框架,……颠覆建立于现有思想和定律之上的秩序,使物理学能在一个简单、和谐、实用的体系中重新发展。”

朗之万再对不过了!事实上,1904年的大会之后不到一年,二十六岁的爱因斯坦 (Einstein, 1879-1955) 就发动了二十世纪物理学上三次大革命的第一次。这些革命,使二十世纪成为概念进步最迅速的世纪。

基本物理学的三次观念大革命 1905-1930

第一次观念大革命是1905年由爱因斯坦提出的狭义相对论,这是有关空间和时间观念的基本革命。爱因斯坦并不是第一个探究这问题的人。事实上,就连在1905年之前已经使用了几年的“相对性原则”这个名词,也不是爱因斯坦创制的。例如,庞加莱在1904年的大会发言中就有这么特别的一段话:

根据相对性原则,无论对静止不动的或者在作匀速平移运动的观测者来说,物理现象的定律都应当是一样的;所以我们没有,也不可能有任何方法来分辨我们自己是否在作这样的运动。

但所有在爱因斯坦之前的学者,包括庞加莱在内,都没有击中问题要害,即时间上的“同时性”这一概念本身也是相对的。在这之前的学者,包括数学界巨人庞加莱和物理学界巨人洛伦兹 (Lorentz, 1853-1928) 在内,的确都提出过不少有见地的想法,甚至曾经写下那极其重要、

现在称为“洛伦兹变换式”的数学变换式,但他们一个个却全都没有能够了解他们自己的讲话和自己的算式的真正物理意义。例如,在我们掌握了爱因斯坦的观点之后,那么无论从哪一个角度来看上面所引庞加莱的一段话,它都是绝对正确的。但在1904年庞加莱还未曾掌握这个新观点。所以,正如他后来在1909年的讲话显示,他并不了解自己1904年那番话的真义。

爱因斯坦所提出的“同时性是相对概念”这个大胆观念,使牛顿力学和麦克斯威电磁理论增加了对称性,因此它们的结构也就变得更为美妙了。这一个重要观念我们下文还要再谈到。

1905年爱因斯坦发表了著名的狭义相对论论文几个月之后,他就同一问题再写了一篇相当短的论文,文中首次出现

$$E=mc^2$$

这条基本方程式。这大概是物理学最著名的一条方程式;就实际影响而言,它的威力肯定是最庞大的。

第二次观念大革命是1908-1915年间出现的广义相对论,创始人仍然是爱因斯坦。这是有关空间和时间观念的另一次重大革命。爱因斯坦证明,时间与空间是扭曲的,或者弯曲的,而时空曲率则决定重力的物理效应。由于爱因斯坦的理论,重力变成了一个可以用极其美妙精简的数学方程来表达的几何概念。若要用日常言语来充分描述爱因斯坦创造广义相对论所反映出的想像力之深广,是极其困难的。我只能说,有幸领略它的奥妙,是毕生难忘的经验。

第三次概念大革命是量子力学,又称为波动力学,它是牛顿力学中运动和空间这两个基本观念的重大修正。先前两次革命基本上都是爱因斯坦一个人发动的,量子力学则不然,它是许多物理学家共同努力的成果。先前两次革命都关系到物理定律的理论结构,量子力学也不然:在1900-1930这三十年困苦的孕育期间,它原本是为解释当时新观测到的原子、分子、辐射等现象的。十九世纪后期的技术进步打开了观测这些现象的大门,但新现象又给物理学家带来了严重和不寻常的挑战。他们的反应是用一连串大胆、精彩但半明不白的观念,从不同角度对这些观测结果的迷阵作战术性进攻。

这一页曲折而不寻常历史的序幕是1900年普朗克 (Planck, 1858-1947) 有关“黑体”辐射的激进构想所揭开的。普朗克是一位稳健而倍受尊敬的理论物理学家,发表了1900年的论文之后,他开始犹疑,并且逐步往后退却。但年轻的爱因斯坦则认为,正确的方向是把普朗克的激进构想再推进一大步,是要比普朗克原先走得更远。1905年3月,在发表狭义相对论论文之前,爱因斯坦写了一篇论文,提出光量子假设,认为物质所释放和吸收的能,并非如过去所坚信的那样是连续量,而是以“互相独立的能量子” $h\nu$ 为单

位的量，其中 h 是普朗克 1900 年提出的常数， ν 是光波的频率。佩斯 (A. Pais) 说，在爱因斯坦所有的伟大贡献当中，只有这个假设连爱因斯坦自己也称为是“革命性”的。

而它的确有革命性。到 1913 年爱因斯坦已经成名的时候，普朗克、能斯特 (Nernst)、鲁宾斯 (Rubens) 和瓦尔堡 (Warburg) 联署提名爱因斯坦为普鲁士皇家学院院士，提名函件的结语是这样的：

总而言之，我们可以说，现代物理学中的许多重大问题没有哪一个是爱因斯坦所未曾作过重大贡献的。即使他的猜测偶有失误，就例如他提出光量子假设那样，我们也不应该因此而对他过分苛求，因为假如要引进真正的新观念，那么即使对精密科学而言，有时不冒些风险也是不成的。

直到 1925 年之后，光量子假设才被物理学家普遍接受。

下一个重要发展是 1913 年的玻尔 (Bohr, 1885–1962) 模型，它把普朗克常数 h 和原子结构结合起来。这一卓越的洞见开启了一个凭借天才各自随机应变的时代，那是物理学史上前所未见的。显然，必须发现一种崭新的，可以用于原子尺度的，而且与牛顿力学关于运动和空间那些牢不可破的观点相矛盾的物理学，才有可能解释大量令人迷惑的原子和分子现象。当时出现的大胆、半明不白的想法，一方面产生与实验相符合的结果，令人欢欣，另一方面又带来逻辑上的矛盾，使人坠入绝望深渊。物理学家奥本海默 (Oppenheimer, 1904–1967) 是在这段思想混乱的时代结束以后，即 1927–1930 年间，才成熟的。他后来这样追述当时的情况：

对参加者来说，那是一个原创性的时代。他们所窥见的新天地既带来兴奋，也带来恐惧。这里面的情节，恐怕是历史无从备载的了。若真要以信史形式使之重现，那么须得有刻划俄狄浦斯王或克伦威尔将军故事那样的妙笔才成。然而，一个距离人类日常经验那么遥远的领域，恐怕并不是诗人史家所能知晓的。

这些发展达到高潮，是在 1925–1927 年间量子力学取代牛顿力学，成为解释空间与运动的物理原理时。对宏观事物来说，牛顿力学还是适用的，它也是量子力学的准确近似理论。但对微观事物如分子、原子、亚原子粒子等来说，牛顿力学便不再适用，必须用量子力学了。量子力学就是分子、原子和亚原子尺度事物的物理学。它的惊人发展主要归功于海森堡 (Heisenberg, 1901–1976)、薛定谔 (Schrodinger, 1887–1961) 和狄拉克 (Dirac, 1902–1984) 三位大师。量子力学的出现，产生了极其深刻的观念变革：它铲除了主宰十九世纪思维的机械决定论世界观，它

又通过奥妙、复杂的思考，并引进似乎与常识抵触的观念，来厘清所谓“观测”的意义。

物理学的进展 1930–1990

在 1930 年之后，借着新的空间、时间和运动观念，以及新技术发展的助力，物理学对物质内部结构的奥秘展开了迅速、深入和广泛的探索。这些发展在二次世界大战期间对军事科技产生了重大和明显的影响，并且因此令世界所有国家都急剧增加拨款支持各门科学研究，尤其是物理学。

这种科学——社会之间的连锁发展，无疑将成为人类历史上极其重要的一章。它一个后果就是令本世纪物理学发展的速率，比前几世纪提高了一个数量级，而物理学研究者的数目，则提高了好几个数量级。同时，物理学研究的对象也发生了显著变化。在上一世纪，物理学主要研究物质的整体，而二十世纪物理学所研究的，却是尺度微小得多的物质。因此，我们一般把前几世纪的物理学称为宏观物理学，把二十世纪的物理学称为微观物理学。

概括来说，当今的物理学可分为四个领域：固体和液体物理学、原子和分子物理学、核物理学和基本粒子物理学（包括基本理论）。按顺序来说，这四种物理学的研究对象是越来越微小的物质单位。除了部分固体和液体物理学之外，这四个领域所探究的问题都是前一世纪闻所未闻的。

1. 固体和液体物理学

以物理学者的数目或刊行的论文数量而言，它肯定是四个领域之首。它研究的对象——固体和液体，自然在前几个世纪已经被广泛研究过，但量子力学完全改变了这个领域，因此我们对许多不同形态的固体和液体的机械、热与电磁性质，以及这些不同形态之间的变换，都得到更深刻的了解。这种了解又转而成为新物质和发展新技术的基础。这些技术中尤其重要的是晶体管，它的诞生令电脑和通讯业得以建立，而后者又反过来有力地推动了科学进步。

“科学—技术—科学—技术”这一循环，是近代科学和技术史中的一个基本模式。但循环之迅速却是二十世纪的特有现象。这一点我们在下文还要谈到。

当代固体物理学的一个特征，是它所研究的物体尺度越来越细小。这个方向的发展十分惊人：本世纪初，原子存在与否还在争论之中，但今天我们已可以拍下（当然，要用特殊的显微镜）清晰可见的个别原子照片。在最近的实验中我们甚至能够把个别原子检起来，将之移动，以形成人工设计的图案。要体会这种技术多么神奇，我们得记住原子是那么微小，在一根头发的

直径上, 就可以排列一百万颗原子。

2. 原子和分子物理学

沿着本世纪初年的传统, 原子、分子和辐射方面的研究, 在 1925 年之后继续取得重大进展, 其中一个深刻发现, 就是根据量子力学创立了化学键的理论。这项成就, 使得化学科学为之全部改观。可以说, 化学的基础已经弄清楚了——那就是量子力学中的薛定谔方程式。原子和分子的研究带来了许多重大技术突破, 微波激射器 (maser) 和激光 (laser) 是特别重要的例子。

上文说过, 现在已经可以在越来越小的尺度作固体和液体研究。我们不妨预言, 在未来数十年间, 固体液体物理学终究会和原子分子物理学合并。这种发展隐含着各种令人目瞪口呆的可能性。就理论而言, 微观和宏观物质的界线将逐渐泯灭, 由是量子 and 经典物理学之间那神秘而又基本的区分将被了解得更透彻。就实用而言, 人类在可控情况下操纵物质的能力将大大提高, 产生有助工业发展和科学实验仪器进步的技术突破。

3. 核物理学

分子和原子尺度大约是一厘米的一亿分之一。在原子的中心是原子核, 它的尺度大约是原子的一万分之一。像原子核这样细微个体的存在, 是 1911 年伟大的实验物理学家路透福特 (Rutherford, 1871-1937) 所作的实验第一次确实显示的。这个重要发现影响深远, 它后来就成为上文已提到过的玻尔原子模型的基础。从 30 年代初开始, 通过原子核互撞或被电子撞击的实验, 就可以研究原子核的内部结构。这样, 核物理学诞生了。当然, 早在十九世纪末, 就已经发现放射性这种核现象, 但只有到 30 年代初期核子加速器建成后, 我们才能系统地研究原子核的性质。在 30 和 40 年代, 核物理学取得惊人进展, 其中一项就是了解到小原子核的聚变 (fusion) 是太阳和恒星能量的来源。

后来在 1938 年发现了重核可以经过裂变 (fission) 而释放出大量能量。这个科学发现对人类影响之重大, 是前所未有的, 而第二次世界大战的爆发, 更提早了它和人类命运的碰头。1945 年第一颗原子弹试爆成功后, “原子弹之父”奥本海默说: “物理学者现在知罪了。”作为物理学者, 我只能祈求这罪不会导致全人类的灭亡。

核物理学虽带来这种戏剧性和沉重的后果, 但至今它还处在定性或半定量的阶段, 离开原来的科学目标仍然遥远, 这是因为核物理学的基础和基本粒子物理学是分不开的。我们现在就要谈谈后者。

4. 基本粒子物理学

基本粒子原则上就是原子核的组成部分。在 30 年代, 大家认为原子核仅由质子和中子组成, 后来才弄明白原子核的结构复杂得多, 它里面还有许多其他类别的基本粒子。从 50 年代初开

始, 大型加速器建成了, 基本粒子物理学也真正变成物理学的一个领域。现在已知道, 基本粒子有好几百种, 各有不同的复杂性质。它们彼此互相施力, 这力称为相互作用。

基本粒子物理学主要目标在于研究物质的各类构成部分, 以及它们彼此之间的作用力。这些关于物质基本结构的探究, 是基本物理定律研究的一部分。

过去五十年来, 基本粒子物理学在理论和实验上有许多重要、美妙和意想不到的发现, 本文限于篇幅无法一一缕述了。但我们要指出, 很概括地说, 有一个对物理学长远发展会产生极其深刻影响的主题已经出现, 那就是自然界的基本力是由对称这一概念来决定的, 这一概念, 上文介绍爱因斯坦的狭义相对论时已经提及。我曾用“对称支配相互作用”的原则表达这主题。我的意思是, 物理世界的基本力是由一种美妙而精确界定的几何性质的对称性决定的。对一个十九世纪的物理学者而言, 这项原则听来未免像是希腊或中古神秘主义旧调重弹。然而, 并不是那么一回事。原来, 希腊哲学家由于直觉而执迷的一个想法, 即对称 (或和谐) 是宇宙结构的基本要素, 其实并没有错, ——只要我们懂得用数学准确地把对称观念表达出来就成了。

总 结

1. 从学术角度看, 二十世纪物理学是极成功、极高妙的。空间、时间、运动和力的革命性观念已把这门学问彻底改观。对物质的深入探究推展到越来越细小的单位, 从而显示出物理定律的普遍性和优美的完备性, 委实令人赞叹不已。

我们渐渐学会鉴别, 大自然的秩序是我们所能寻求了解的。

2. 上文简略介绍了二十世纪物理学的理论进程和实用效果, 但并没有怎样提到那些美妙的实验结果。这并不是说, 本世纪物理学的进展和这些实验发现没有重要关系, 事实上, 实验结果是整个物理体系的基础。但重要的实验突破实在不胜枚举, 所以在这篇短文中无法好好讨论。

3. 空间、时间、运动和力的观念突破, 有赖于抽象程度顺序增加的各种数学, 即黎曼几何、希尔伯特空间、和纤维丛。因此, 未来的进步恐怕更将依靠其他深奥和抽象的数学观念。大自然何以偏爱抽象的数学观念诚然神秘难测, 但数学家和理论物理学家对数学推理在物理学上所发生的强大影响则是同声叹服的。

4. 物理学的进步孕育了许多跨学科的研究, 诸如天体物理学、大气物理学、生物物理学、化学物理学、地质物理学、等离子物理学等等。然而, 值得注意的是, 尽管物理学的影响无远弗届, 它本身却并没有分裂成许多小领域。相对来

讲, 似乎每隔一年便会有一个新的生物学系在每一所研究性质的大学成立, 这些系的名称有时连生物学家都弄不清楚。物理学有这么强的向心力, 理由在于这门学问一方面在扩展研究范围, 另一方面又相应变得更深刻。这种深刻程度的增加造成一种牢固的单元价值判断, 从而使整个系统环绕着几个基本原则团结起来。

5. 在二十世纪中, 物理学研究的规模大幅度扩张了。看来物理学家所研究的物质结构从原子到原子核再到基本粒子, 变得越来越小, 但所用的实验设备反而越来越大。这似乎很奇怪的现象, 是由于量子力学中的测不准原理所致。根据这一原理, 要研究越来越微小的距离, 就必须用越来越大的能量; 要产生更大的能量, 便得使用更大的实验装置。

6. 二十世纪人类生产力的惊人增长, 在很大程度上是基于我们对物理世界知识的增长。1902年美国的人均用电量(这是人均生产力的一个好指标)是76kW·h, 在1987年相应数字则是10 000kW·h, 增加了130倍! 当然, 这激增有许多重要因素, 其中最基本的一项则是由于我们掌握了电磁学原理。

除了上述对人类社会明显的重大影响之外, 物理学的进展在二十世纪中叶还产生了科学与社会之间相互作用的一个新向度。如上文提及, 这是人类历史上极为重要的发展。现在这个世纪快要过去了, 人类面临许多新问题, 例如天然资源的枯竭、环境污染等等。要为之而发展相应的科

技能力, 显然会使未来的物理学家更接近社会问题。

7. 物理学和技术之间的迅速反馈循环, 是二十世纪一个明显的现象。我们只要想到用电量的大幅度增加、通讯工业以至电脑工业的诞生, 便会了解现代社会多么依赖物理学研究的最新进展。而“物理—技术—物理”循环的速度已大大增加了。附表显示, 由发现电动机的原理到第一次使用电动机需时六十五年; 但对激光来说, 所需时间只不过是两年而已。虽然很难设想, 这循环时间可以再大大缩短, 但每年成熟、面世的重要新技术肯定会继续增加。这些我们今日连其名称都还无从想像的未来技术将要下一个世纪人类的命运发生深远影响。

新技术从原理发现到首次实际应用的时间差距

产品	发现原理	产品应用	年份相差
电动机	1821	1886	65
真空管	1882	1915	33
无线电	1887	1922	35
X-光	1895	1913	18
雷达	1935	1940	5
裂变反应堆	1939	1942	3
晶体管	1948	1951	3
激光	1958	1960	2

(严志雄 译)

欢迎订阅《科技导报》

《科技导报》将于1991年下半年改为月刊

为了缩短出版周期,《科技导报》将于今年下半年改为月刊。全年出版9期(上半年3期、下半年6期),请读者于5月份向当地邮局办理订阅手读、直接向我社订阅的订户,请补交3期订款7.00元(含邮费0.40元),读者之友优惠,请补交6.00元(含邮费)。

《科技导报》由邮局公开发行,全国各地邮局均可订阅,请尽快到当地邮局办理订阅本刊手续,邮发代号:2-872。

定 价: 每期每册2.20元

请将书款汇至: 100081 北京8148信箱

《科技导报》读者服务部

亦可将订款由银行汇至:

户 名: 中国科技导报社

账 号: 014-890106-20

开户银行: 工商银行北京西城百万庄分理处

中国科技导报社社址: 100081 北京市海淀区

大慧寺路19号办公楼

电 话: 8313553 8314447-583, 583,
500

传 真: 8328596