

# 走向统一的自然力

## 强力、弱力和电磁力的大统一 ( I )

厉光烈<sup>1</sup> 阮建红<sup>2</sup>

(1 中国科学院高能物理研究所 100049; 2 华东师范大学 200062)

杨-密尔斯规范场、弱电统一理论和粒子物理夸克模型的发现,使人们认识到,不仅电磁力可用  $U(1)$  规范场来描述,而且弱电力和强力也可分别用  $U(1) \otimes SU(2)$  和  $SU(3)$  规范场来描述。于是,用  $U(1) \otimes SU(2) \otimes SU(3)$  规范场来统一描述强力、弱力和电磁力便成为粒子物理的标准模型。本讲第一部分通过引入量子概念、建立量子力学,进而介绍能够完善描述电磁力的量子电动力学;第二部分,首先以量子电动力学为例来介绍什么是阿贝尔规范场,即  $U(1)$  规范场,然后介绍杨-密尔斯规范场,即  $SU(2)$  规范场,以及用来描述弱电统一理论的  $U(1) \otimes SU(2)$  规范场;第三部分通过介绍夸克模型与量子色动力学来说明什么是  $SU(3)$  规范场,以及粒子物理标准模型:  $U(1) \otimes SU(2) \otimes SU(3)$  规范场,进而讨论什么样的规范场可以涵盖  $U(1) \otimes SU(2) \otimes SU(3)$  来给出强力、弱力和电磁力的大统一。



夫琅和费 (J. von Fraunhofer 1787 ~ 1826)

### 1. 量子·量子力学·量子电动力学

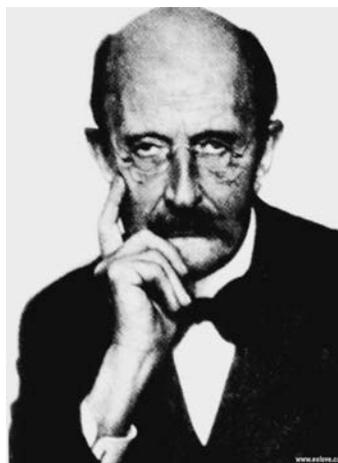
#### (1) 量子

1900年,普朗克为了克服经典电磁理论解释黑体辐射规律的困难,引入了能量子概念,为量子论奠定了基础;1905年,爱因斯坦针对光电效应实验与经典电磁理论的矛盾,提出了光量子假说,并在固体比热问题上成功地运用了能量子概念,为量子论的发展打开了局面;1913年,玻尔在卢瑟福有核模型的基础上运用量子化概念创建了原子模型,满意地解释了氢原子光谱,使量子论取得了初步胜利。

#### 黑体辐射与普朗克能量子假说

在第三讲中,我们曾经提到,著名英国物理学家J. J. 汤姆孙(开尔文勋爵)在19世纪末为展望20世纪物理学而写的一篇文章中说:“在物理学晴朗天空的远处,还有两朵小小的令人不安的乌云。”在那里,我们讨论了其中的一朵:迈克耳孙-莫雷实验,它导致爱因斯坦创建了狭义相对论;现在我们来讨论另一朵:黑体辐射实验,它导致普朗克提出能量子假说,为量子论奠定了基础。

19世纪末,工业发展的需要促进了热辐射的研究,特别是对辐射能量随波长分布的特性进行了研究:继德国人夫琅和费(J. Fraunhofer,



普朗克 (M. Planck, 1858 ~ 1947)



玻尔兹曼

(L. Boltzmann, 1844 ~ 1906)



基尔霍夫

(G. R. Kirchhoff, 1824 ~ 1887)



斯忒藩

(J. Stefan, 1835 ~ 1893)

1787 ~ 1826) 定性观测了太阳光谱的能量分布、英国人丁铎尔 (J. Tyndall, 1820 ~ 1893) 和美国人克罗瓦 (A. P. P. Crova, 1833 ~ 1907) 等测量了热辐射的能量分布曲线之后, 德国物理学家基尔霍夫 (G. R. Kirchhoff, 1824 ~ 1887) 对热辐射进行了理论研究, 并于 1859 年提出热辐射定律: 任何物体发射和吸收辐射的本领之比与物体特性无关, 只是波长和温度的普适函数。1862 年, 他又提出了绝对黑体的概念。所谓“黑体”, 就是一种特殊的高温坩埚, 它在加热后能发出自身辐射但不反射入射辐射, 实验上起先用的是涂黑的铂片, 后来改用加热的空腔, 腔内辐射经过不断反射达到热平衡, 便被称为黑体辐射。1879 年, 奥地利物理学家斯忒藩 (J. Stefan, 1835 ~ 1893) 总结出黑体辐射总能量  $E$  与绝对温度  $T$  的四次方成正比:  $E = \sigma T^4$ , 5 年后, 他的学生、著名物理学家玻尔兹曼 (L. Boltzmann, 1844 ~ 1906) 从电磁理论和热力学出发证明了这一关系。1886 年, 曾经发明灵敏热辐射计

的美国人兰利 (S. P. Langley, 1834 ~ 1906) 测量到了相当精确的热辐射能量分布曲线, 发现辐射能量的最大值随温度增高向短波方向转移。1893 年, 在德国帝国技术物理研究所 (PTR) 从事热辐射实验和理论研究工作的物理学家维恩 (W. Wien, 1864 ~ 1928) 提出了黑体辐射能量分布定律 (即维恩

辐射定律):

$$u(\lambda) = b\lambda^{-5} e^{-a/\lambda T}$$

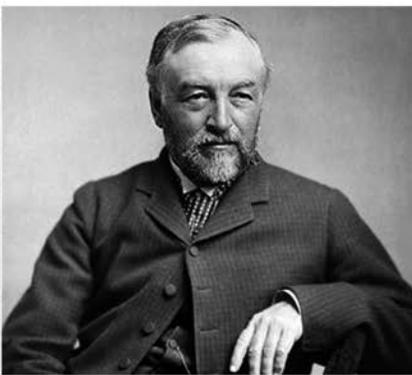
其中  $u(\lambda)$  为能量随波长  $\lambda$  分布的函数, 称作能量密度;  $T$  表示黑体的绝对温度;  $a$ 、 $b$  为两个任意常数, 并由它导出了维恩位移定律: 对应于能量分布函数  $u(\lambda)$  的最大值的波长  $\lambda_{\max}$  与温度  $T$  成反比, 成功地解释了兰利热辐射曲线。

在维恩离开 PTR 后接替他工作的普朗克认为维恩的推导引入太多假设, 不能令人信服。从 1897 年起, 他便试图从基本理论出发, 以尽量少的假设, 用更系统的方法来推导维恩公式。经过二三年的努力, 他将电磁理论用于热辐射和谐振子的相互作用, 通过熵的计算, 终于得到了维恩分布定律。但是, 就在这时, 维恩在 PTR 从事热辐射实验研究的同事卢梅尔 (O. Lummer, 1871 ~ 1937) 和鲁本斯 (H. Rubens, 1865 ~ 1922) 等通过空腔辐射实验测出了更为精确的辐射能量分布曲线, 发现维恩分布定律在长波方向



维恩

(W. Wien, 1864 ~ 1928)



兰利

(S. P. Langley, 1834 ~ 1906)



瑞利

(J. W. S. Rayleigh, 1842 ~ 1919)



金斯

(J. H. Jeans, 1877 ~ 1946)

与他们的实验数据有系统偏差。具体地讲，根据维恩公式， $\ln u \sim \frac{1}{T}$  应为一条直线，然而新实验得到的却是偏离直线的曲线，温度越高，偏离得越厉害。得知这一实验偏离，英国物理学家瑞利（J. W. S. Raylei, 1842 ~ 1919）提醒人们：在高温和长波的情况下，麦克斯韦-玻尔兹曼能量均分原理似乎有效。于是，他假设，在辐射空腔中，电磁谐振的能量按自由度平均分配，由此得出： $u(\lambda) \propto \lambda^{-4}T$  或  $u(\nu) \propto \nu^2T$ ，并于 1905 年计算出比例常数，但计算中有错，英国物理学家金斯（J. H. Jeans, 1877 ~ 1946）随即撰文予以纠正，得  $u(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot kT$ ，这里  $u(\nu)$  为能量随频率  $\nu$  分布的函数， $k$  是玻尔兹曼常数。后来，这个公式便被称为瑞利-金斯定律。

就在普朗克得知新的实验结果后准备重新研究维恩分布定律时，他的好友鲁本斯告诉他，自己新近红外测量的结果确证长波方向能量密度  $u$  与绝对温度  $T$  有正比关系： $u \propto T$ ，说明瑞利定律是正确的。于是，普朗克试图在维恩公式和瑞利公式之间寻求协调统一，他借助于内插法找到了与实验结果符合得很好的黑体辐射公式： $u(\lambda) = b\lambda^{-5} \cdot \frac{1}{e^{a/\lambda T} - 1}$ ，这就是普朗克辐射定律，和维恩辐射定律相比，仅在指数函数后多了一个  $(-1)$ 。鲁本斯得知这一公式后，立即把自己的实验结果与这个公式作了比较，发现完全符合。于是，普朗克和鲁本斯就在 1900 年 10 月 19 日向德国物理学会作了汇报，普朗克以“维恩光谱方程的改进”为题，报告了他得到的经验公式。

作为理论物理学家，普朗克当然并不满足于找到一个经验公式，实验结果越是证明他的公式与实验相符，就越促使他致力于寻求这个公式的理论基础。经过两三个月的紧张工作，他终于在 1900 年底用一个能量不连续的谐振子假设解决了这个问题。借助玻尔兹曼统计方法，他把能量分成一份一份的能量单元，并按不同比例将这些能量单元分给有限个数的谐振子，然后通过熵的运算，推导出了上述的经验公式。关于这个过程，普朗克后来回忆道：“即使这个新的

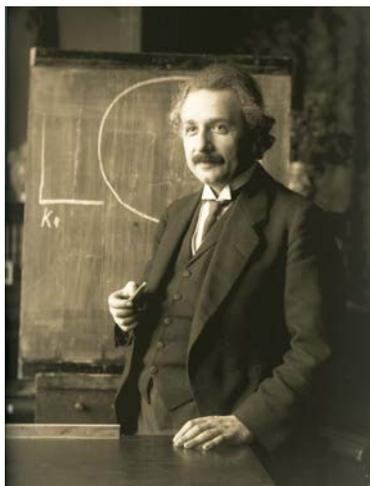
辐射公式证明是绝对精确的，如果仅仅是一个侥幸揣测出来的内插公式，它的价值也只能是有限的。因此，从 10 月 19 日提出这个公式开始，我就致力于找出这个公式的真正物理意义。这个问题使我直接去考虑熵和概率之间的关系，也就是说，把我引到了玻尔兹曼的思想。”普朗克于 1900 年 12 月 14 日在德意志物理学会作了题为“论正常光谱中的能量分布定律”的报告，介绍了这个公式的推导，并指出能量单元  $\epsilon$  和辐射频率  $\nu$  成正比： $\epsilon = h\nu$ ，还根据黑体辐射的测量数据计算出： $h = 6.65 \times 10^{-27} \text{erg}\cdot\text{s}$  或  $h = 6.65 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ 。普朗克将  $h$  称为“作用量子”，现在我们称其为普朗克常数，并将能量单元  $\epsilon$  称为能量子。于是，普朗克提出能量子假设的这一天，即 1900 年 12 月 14 日，就被人们看成是量子物理学的誕生日。因发现能量子，普朗克荣获了 1918 年度诺贝尔物理学奖。

能量子假说的提出，首次揭示了在连续的物理世界中存在着不连续的图景具有划时代的意义。但是，不论是普朗克还是与他同时代的人，当时都没有充分地认识到这一点。在爱因斯坦提出光量子理论之前，普朗克的工作几乎无人问津，他自己也感到不安，总想回到经典理论的体系之中，企图用连续性代替不连续性。为此，他花费了许多年的精力，最后还是证明自己的努力是徒劳的，但这却使他认知了一个事实：“能量元素（就是后来所说的能量子）在物理学中扮演着远比我当初猜测的要重要得多、有意义得多的角色。这一认识使我清楚了，考虑原子问题时，必须引进全新的分析方法和思维逻辑。”

### 光电效应与爱因斯坦光量子假说

光，是波动，还是粒子？在爱因斯坦提出光量子假说弄清这个问题之前，历史上，曾就光的“波动说”和“微粒说”展开过二次论战：

先是胡克在 1665 年出版的《显微术》一书中提出了光的“波动说”，一时甚为风行。接着，1672 年，刚刚当选英国皇家学会会员、年仅 30 岁的牛顿发表了他的第一篇正式论文，把光的分解和复合比喻成不同颜色微粒的分开和混合，提出了光的“微粒说”，但随即遭到了以胡克为首的几位大师的批驳。就在这时，惠更斯参加了进来，他继承和发扬了胡克的思想，



爱因斯坦

提出以太作为光振动的媒介，把媒介的每一个质点都看成一个中心，在每个中心的周围形成一个波。利用这个物理图像，惠更斯导出了光的反射、折射定律，并于1690年出版了《光论》一书，使“波动说”得以完善。但不幸的是，1704年，牛顿

出版了他的辉煌巨著《光学》，详尽地论述了光的色彩叠合与分散，从光的“粒子说”的角度解释了薄膜透光、牛顿环以及衍射实验中发现的种种现象，毫不留情地驳斥了“波动说”。而在这时，“波动说”却因惠更斯于1695年去世而陷入群龙无首的状态，使“微粒说”在第一回合的“波粒”论战中占据了上风，取得了在物理学上被普遍公认的地位。

一百多年后，英国物理学家托马斯·杨（T. Young, 1773～1829）于1801年演示了他的双缝干涉实验，为光的“波动说”提供了新的实验验证，挑起了第二回合的“波粒”论战。接着，年轻的菲涅尔在他的论文《关于偏振光线的相互作用》中，提出光是一种波，但不是胡克所说的纵波，而是横波，并从这个观念出发，以严密的数学推理，圆满地解释了光的衍射和长期困扰“波动说”的偏振问题，为“波动说”建立了完整的体系。托马斯·杨和菲涅尔合力给予了“微粒说”致命的一击，使“波动说”终于取代“微粒说”重新占据了物理学的统治地位。

又过了一百年，德国物理学家勒纳德（P. Lenard, 1862～1947）于20世纪初实验发现光电效应的基本规律：电子的最大速度与光强无关。实际上，早在1887年，赫兹就在研究电磁场的波动性时发现：紫外光照射到负电极上会使其更易于放电；1888年，德国物理学家霍尔瓦克斯（W. Hallwachs）证实“放电间隙”内出现的是荷电体；1899年，J. J. 汤姆孙通过实验进一步证实该荷电体与阴极射线一样是电子

流，并测出了电子的荷质比；1899～1902年间，勒纳德对这种现象进行了系统研究，发现了上述的基本规律，并将其命名为“光电效应”。虽然勒纳德竭力维护经典电磁理论，但是他的这一发现终究不能用光的“波动说”来解释。按照“波动说”，紫外光照射到金属表面就像海浪冲击海滩，金属表面的电子就像海滩上的小石子，紫外光越强，冲击力越大，石子飞出的速度应越快，而不是像勒纳德所发现的那样：“电子的最大速度与光强无关”。顺便指出：科学家的实验研究还发现“光电效应”具有另外一些无法用经典电磁理论来解释的特性，其一是“光的频率低于某一临界值时，不论光有多强，也不会产生光电流”；另一是“光照到金属表面，立即产生光电流，不需要一个能量积累过程。”

1905年，爱因斯坦在著名论文：“关于光的产生和转化的一个试探性的观点”中，借助普朗克的量子概念，提出了他的光量子假说，成功地解释了“光电效应”的那些无法用经典电磁理论解释的物理特性，并因此荣获了1921年度诺贝尔物理学奖。

在上述论文中，爱因斯坦总结了光学发展中“微粒说”和“波动说”长期论争的历史，揭示了经典电磁理论的困难，提出只要把光的能量看成不是连续分布的，而是一份一份地集中在一起，就可以给予“光电效应”一个合理的解释。他写道：“确实，在我看来，关于黑体辐射、光致发光、紫外光产生阴极射线（即光电效应）以及其他一些有关光的产生和转化的现象的观察，如果用光的能量在空间中不是连续分布



勒纳德

路易斯

(P. Lenard, 1862～1947)

(G. N. Lewis, 1875～1946)

的这种假说来解释，似乎就更好理解。按照这里所设想的假设，从点光源发射出来的光束的能量在传播中不是连续分布在越来越大的空间之中，而是由个数有限的、局限在空间各点的能量子所组成，这些能量子能够运动，但不能再分割，而只能整个地被吸收或产生出来。”也就是说，光不仅在发射中，而且在传播过程中，以及在与物质的相互作用中，都可以看成能量子，爱因斯坦称之为“光量子”，现在我们称其为“光子”。应当指出：“光子”一词是由美国物理化学家路易斯（G. N. Lewis, 1875 ~ 1946）于1926年12月18日在给《自然》(Nature)的信中创造出来的：“我冒昧地提议将这个假设性的新原子命名为‘光子（photon）’，它并非是光，但在每一个辐射过程中都扮演着重要的角色。”按照他的原意，“光子”是“辐射能”的一个载体，而不是光粒子本身，与爱因斯坦的光量子（light quantum）并非同一概念，但是，现在大家都用它来称呼爱因斯坦的“光量子”。

爱因斯坦还成功地运用数学公式将表征光的粒子特性的能量  $E$  和动量  $p$  与表征光的波动特性的频率  $\nu$  和波长  $\lambda$  通过普朗克常数  $h$  联系起来，建立了所谓“爱因斯坦关系”：

$$E=h\nu$$

$$p=h/\lambda$$

将光的“波动性”和“粒子性”统一成了“光的波粒二象性”。后来，德布罗意进一步将其推广应用于微观粒子，提出了“微观粒子的波粒二象性”，最终导致了量子力学的建立。因此，爱因斯坦对作为20世纪物理学两大支柱的“相对论”和“量子论”都做出了极其重要的贡献：既是“相对论”的创建人，又与普朗克同为“量子论”的奠基人。顺便指出：今天，我们能够享受电影、电视带来的乐趣，能够用电脑办公、写作和游戏，都应归功于爱因斯坦揭示了光电效应的物理本质，使人们能够借助于光电效应将光讯号变为电讯号以便传输，然后再将接收到的电讯号变为光讯号让人们看到原来的画面。

#### 玻尔定态跃迁原子模型与量子论

19世纪末，X射线、天然放射性和电子的三大实验发现，特别是爱因斯坦于1905年发表的《分子大

小的新测定法》和《热的分子运动所要求的静液体中悬浮粒子的运动》两篇论文以及随后佩兰证实爱因斯坦理论预言的实验都无可置疑地确认了原子的存在，使得物理学家开始了原子结构的研究：1911年，卢瑟福根据盖革和马斯登所做的 $\alpha$ 粒子散射实验发现了原子核并提出了原子的有核模型；1913年，丹麦物理学家尼尔斯·玻尔在卢瑟福有核原子模型的基础上，将量子概念应用于原子结构研究，建立了原子模型的量子理论，即量子论。

尼尔斯·玻尔（N. Bohr, 1885 ~ 1962），1885年10月7日出生于丹麦哥本哈根，1903年进入哥本哈根大学，主修物理学，先后于1909年和1911年分别获得科学硕士和哲学博士学位，论文题目都是金属电子论。随后，赴英国学习和工作，先在剑桥大学J. J. 汤姆孙主持的卡文迪许实验室，后转赴曼彻斯特大学，在卢瑟福的实验室工作了4个月，参加了 $\alpha$ 射线散射的实验工作并开始了对原子结构的探索。1913年，玻尔在英国《哲学杂志》上连续发表了题为“原子构造和分子构造”I、II、III的3篇论文，提出了他的定态跃迁原子模型理论，成功地解释了氢原子光谱。在他的氢原子模型中，电子绕核在特定的分离轨道上旋转，处于稳定状态，或者说，氢原子具有确定的、量子化的能级。他还假设：只有当电子由一个轨道跃迁到另一轨道时，氢原子才以量子化的形式辐射或吸收能量： $\Delta E=h\nu$ （这里 $\Delta E$ 为两个轨道所对应的能级的能量差； $h\nu$ 为普朗克的能量子），并据此导出了氢光谱的巴耳末公式。1915年，索末菲发展了玻尔模型，增加了椭圆轨道，提出了索末菲量子条件：



索末菲与玻尔

$\oint p_k dq_k = nh$ , 这里  $n$  是整数, 表示广义动量  $p_k$  对广义坐标  $q_k$  沿轨道的回路积分是量子化的。索末菲改进后的玻尔原子模型, 曾被用来近似地解释诸如氢原子、氦离子和碱金属光谱的精细结构、拉曼效应、斯塔克效应、旋转-振动分子光谱、拉曼效应和色散等光谱现象, 因此量子论又被称为玻尔-索末菲理论。1916年, 爱因斯坦运用量子跃迁的概念, 导出了普朗克辐射公式, 得到了自发发射、受激发射和吸收等强度之间的关系。

玻尔-索末菲理论在解释原子光谱实验现象方面虽然取得了不少令人惊奇的成果, 但是在理论上仍然存在着不能自圆其说之处。其一, 在这个理论中, 电子在圆形或椭圆形轨道上旋转, 处于稳定状态, 即不辐射能量, 而按照经典电磁理论, 电子在原子核的电磁场中旋转一定会辐射能量, 即不可能处于稳定状态; 还有, 玻尔所说的“电子从一个轨道跃迁到另一轨道”是不需要时间的, 而氢原子所释放或吸收的辐射却是在时空中运动的, 于是便出现了宏观与微观之间无法弥补的裂痕。1916年, 埃伦费斯特借助玻尔兹曼“绝热原理”导出了索末菲量子条件, 为玻尔的“定态”假设提供了理论依据。所谓“绝热”, 指的是几乎与外界没有能量交换的无限缓慢的变化过程。1866年, 玻耳兹曼发现: 如果一个周期性的热力学系统是“绝热”的话, 它的平均动能对频率之比  $E_{\text{动}}/\nu$  等于一个常数。人们后来发现: 普朗克的辐射空腔酷似上述的热力学系统, 因为普朗克关系  $E=h\nu$  符合于玻耳兹曼条件。1913年, 埃伦费斯特把玻耳兹曼的发现命名为“绝热原理”, 并于1916年根据这一原理导出了索末菲量子条件。按照埃伦费斯特的理解, 电子在量子轨道上不辐射能量, 是因为它处于“绝热”的周期性的热力学系统中, 与外界不发生能量交换, 所以它是稳定的, 不会因辐射能量而自堕于氢核之上。为了进一步解决更为棘手的能级跃迁问题, 经过十年酝酿, 玻尔于1923年正式提出了“对应原

理”, 即玻尔量子论在波长很大时将趋近于经典物理学。具体地讲, 量子数  $n$  取得越大, 能级差  $\Delta E$  就越小, 玻尔量子论中的分离能级与经典物理学的连续波动之间的不协调就会自然消失了。1927年, 他又进一步提出了“并协原理”, 即在不同实验条件下获得的有关原子系统的数据, 未必能用单一的模型来解释, 电子的波动模型就是对电子的粒子模型的补充。另外, 他还预言: 在复杂原子中, 电子必须以“壳层”形式出现, 而对一种具体元素来说, 其原子的化学性质取决于最外层电子(即价电子)的数目。他的这一开创性工作, 为揭示元素周期表的奥秘打下了基础, 使得化学从定性科学变为定量科学, 从而让化学家和物理学家可以携手开展原子-分子物理的研究。

但是, 电子壳层的存在同样缺乏理论依据。1924年, 奥地利物理学家泡利(W. Pauli, 1900~1958)通过计算发现: 满壳层的原子实应该具有零角动量, 因此, 反常塞曼效应<sup>①</sup>的谱线分裂只能是由价电子引起的, 从而揭示了价电子的量子性质具有“二重性”。他写道: “在一个原子中, 决不能有两个或两个以上的同种电子, ……”或者说: 在任何原子中, 都不可能有两个或两个以上的电子同时处在量子数  $n$ 、 $l$ 、 $m_l$  和  $m_s$  完全相同的状态上, 这就是著名的不相容原理。实际上, 泡利提出电子的量子性质具有二重性, 就是赋予电子以第四个自由度。来自美国的物理学家克罗尼格(R. L. Kronig, 1904~1995)对泡利的思想非常感兴趣, 他认为可以把电子具有内禀角动量, 即电子自旋, 作为电子的第四个自由度。但是, 他的这个模型遭到了泡利的强烈反对, 原因是: 泡利不希望量子理论中保留任何经典概念, 他早就考虑过绕



托马斯



乌伦贝克(中, G. E. Uhlenbeck, 1900~1974) 高斯密特(右, S. A. Goudsmit, 1902~1979)



塞曼

(P. Zeeman, 1865~1943)

轴自转的电子模型，只是由于电子的表面速度有可能超过光速而不得不放弃。就因泡利反对，克罗尼格未敢把自己的想法写成论文发表。半年后，乌伦贝克（G. E. Uhlenbeck, 1900 ~ 1974）和高斯密特（S. A. Goudsmit, 1902 ~ 1979），在不知道克罗尼格想法的情况下，再次提出电子自旋假设，却得到了他们的老师埃伦费斯特的支持，论文被推荐给《自然》杂志并于1925年发表。玻尔没有想到困扰他多年的光谱精细结构问题竟被乌伦贝克和高斯密特用“自旋”这一简单的力学概念解决了，对他们的工作十分赞赏，但是，使他仍然感到棘手的是：不仅乌伦贝克和高斯密特无法回答双线公式中为何多出一个因子2，而且根据爱因斯坦建议所作的相对论计算也未能完全解释这个因子。1926年，在哥本哈根玻尔研究所工作的英国物理学家托马斯（L. H. Thomas）成功地解决了这个问题。在相对论计算中，他发现：前人的错误在于忽略了坐标系变换引起的相对论效应，只要注意到电子具有加速度并考虑上述相对论效应，便可以自然地得到因子2。这样一来，物理学界才普遍接受电子自旋的概念。

尼尔斯·玻尔，不仅在20世纪10~20年代曾

对原子物理学和化学的发展作出过卓越的贡献，而且，从20世纪30年代开始，他还成为了一位积极的社会活动家：第二次世界大战爆发后，他曾帮助多位欧洲科学家逃避纳粹的迫害，移居美国，他自己也于1944年前往美国参加与原子弹有关的理论研究；二战后，他还曾分别会见罗斯福、丘吉尔和杜鲁门，劝说他们与斯大林分享核技术，避免核对抗，虽未被接受，但却为争取世界和平作出了前瞻性的贡献。

写到这里，本讲的第一部分的“量子”就结束了。我们看到，20世纪物理学的最重要也是最具体的奠基石已被牢牢地植入新建科学大厦的基础之中。随后，我们还会看到，构建新的量子科学大厦，玻尔的“教父”角色将更为突出。

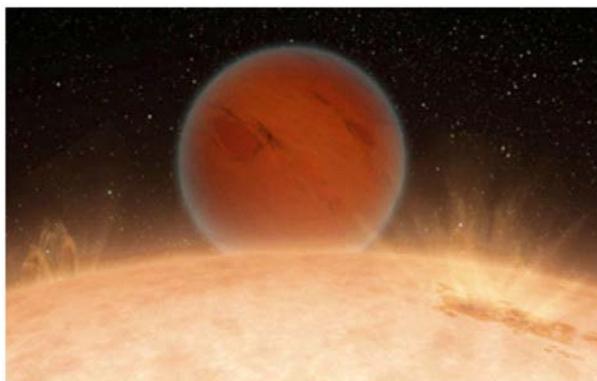
① 1896年，荷兰物理学家塞曼（P. Zeeman, 1865 ~ 1943）研究发现钠原子光谱在外磁场中出现谱线分裂现象，后人称其为塞曼效应。它又分为两种：一是总角动量为零的原子表现出的正常塞曼效应；另一是总角动量不为零的原子表现出的反常塞曼效应。1921年，德国图宾根大学朗德（A. Lande, 1888 ~ 1975）教授分析反常塞曼效应实验结果后指出：描述电子状态的磁量子数应该不是整数，而是半整数。这引起了理论物理学家极大的兴趣，最终导致泡利提出了著名的不相容原理。

## 科苑快讯

### 已知最像地球的外星世界

天文学家最近发现一个外星世界，无论是大小还是位置都更像地球。不过，由于太靠近其恒星，因此酷热如炼狱一般，更像是地球的恶魔表弟而不是孪生兄弟。该天体被命名为 Kepler-78b，是美国宇航局开普勒太空望远镜发现的数百颗日外行星之一，开普勒望远镜监测银河系15万余恒颗恒星的亮度变化，以搜寻围绕其运转的行星。这些日外行星多为气体行星，由气体和尘埃构成，半径比地球大几倍。

但是，Kepler-78b 只比地球大80%，半径比地球大20%。两个研究组在《自然》（*Nature*）网站上发表了其论文。由于密度与地球接近，说明该行星系由岩石和铁构成。但是其距离自己的恒星（比太阳稍小）只是恒星半径的两倍，所以



恒星将像一个巨大的圆盘，在其地平线上若隐若现，覆盖天空的大部分空间。这可不是什么好风景，因为这种环境足以将人烤成肉干。

（高凌云编译自2013年10月30日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)）