

伊·米·弗朗克

徐载通 编译 苏州大学物理系

伊利亚·米哈依洛维奇·弗朗克是著名的前苏联物理学家，1908年10月23日出生于彼得堡；1946年当选为苏联科学院通讯院士；1968年当选为苏联科学院院士。数十年来，弗朗克在物理光学、低能中子物理和核物理的研究中，取得了一系列重大的科研成果。

创立瓦维洛夫-契伦科夫辐射理论

1934年，契伦科夫在导师瓦维洛夫的指导下，发现高速电子在各种高折射率的透明液体和固体会发出一种微弱的淡蓝色光，具有明显的方向性、强偏振以及随介质变化不大的谱分布等特点。他认为这种效应(称为契伦科夫效应)是由高速电子辐射产生的。1937年，弗朗克和塔姆一起对此效应作了系统的理论研究。在他们共同发表的题为《在介质中快速电子的相干辐射》的著名论文中，突破了匀速运动的电子不能辐射的经典观念，提出了在介质中匀速运动的电子当其速度大于光的相速度时可以辐射电磁波的新理论，提出瓦维洛夫-契伦科夫辐射就是由于带电粒子速度超过介质中光速(相速度)时所产生的。这种辐射跟加速带电粒子的辐射不同，它不是单个粒子的辐射效应，而是运动带电粒子与介质内的束缚电流及诱导电流所产生的集体效应。它可以视为一种在介质中的电磁冲击波，类似于超音速子弹或飞机在空气中形成的冲击波。若不考虑介质的色散，设带电粒子的速度为 v ，介质中的光速为 c/n (c 为真空中光速， n 为折射率)，由于 $v > c/n$ ，故粒子在其运动的途径上的各点所激发的介质中的电磁场有一个锥形包络面，粒子就在锥顶上，这就是所谓电磁冲击波。其辐射方向沿圆锥包

络面的法线，辐射方向与粒子轨道间的夹角 θ 满足 $\cos\theta = c/nv$ 。瓦维洛夫-契伦科夫辐射的频率是连续的，在不考虑色散时，强度的谱分布正比于角频率 ω 。但实际上任何介质都是有色散的，即折射率为角频率的函数 $n = n(\omega)$ ，这时显然只有在满足不等式 $n(\omega) > c/v > 1$ 的波段才有这种辐射。在X射线波段 $n(\omega)$ 总是小于1的，故这种辐射的频谱总有一个上限。通常它的能量相应于可见光范围，并侧重于它的蓝紫端。弗朗克和塔姆所推导的公式以及对这种辐射性质的一些预言，与契伦科夫的实验结果完全一致。为此，1946年他荣获苏联国家奖金；1958年弗朗克、契伦科夫和塔姆共同荣获诺贝尔物理学奖金。

根据契伦科夫辐射原理制成的高能粒子探测器，称为“契伦科夫计数器”，具有计数率高，分辨时间短，能避免低速粒子干扰，准确测定粒子运动速度等优点。1955年，发现“反质子”时，就是依靠这种仪器的帮助。根据契伦科夫效应的原理，还可以制成宇宙射线计数器。

预言“穿越辐射”的存在

1945年，弗朗克和金兹堡合作预言了一种新型的辐射即“穿越辐射”的存在，并于第二年共同发表了题为《匀速运动的电子从一种介质穿入另一种介质时所发生的辐射》的论文，认为在不同的介质中带电粒子所建立的电磁场是不同的。当带电粒子快速穿过不同介质的界面时，因来不及调整其所建立的场，部分能量将会以电磁辐射形式发射出来。穿越辐射的形成区厚度很小，一般为几微米量级；它的光子频率从可见光到X射线区连续分布。光

子的运动方向基本上是带电粒子的运动方向。穿越辐射强度很微弱，通常只能用轻物质的多界面交叠结构才能有效地观察到。穿越辐射能谱是连续谱，主要集中在X射线能区。在一个界面上穿越辐射在可见光区的总能量正比于 $\ln 2r$ ，在X射线区的总能量正比于 r (r 为带电粒子的洛仑兹因子)。弗朗克和金兹堡所预言的“穿越辐射”，后来于1953年被丘达科夫发现。根据穿越辐射的原理，弗朗克研究了非均匀介质及其表面的光学性质，测定了相对论粒子的能量。他还研究了在一定条件下光在快速电子上的散射，发现原来的光子不但不会被吸收，而且还会产生感应的光子；除此而外，还能产生散射光的光子。

人们根据穿越辐射的原理，通过增加介质边界的办法来提高辐射强度，研制成一种新型的探测器即穿越辐射探测器。这种探测器在一定条件下可用于探测高能带电粒子的能量。穿越辐射探测器同磁谱仪配合，能够分辨不同种类的高能粒子。对于已知质量的高能粒子，它能定出粒子的能量，并且已被正式用来分辨电子和强子。

研究中子增殖问题

1943年，弗朗克和助手们专门建造了一座铀-石墨反应堆的次临界装置，采用了所谓“棱柱”的方法，精确地测定了铀-石墨系统内的基本中子物理参量，阐明了在该系统内中子输运的规律，并在1955年发表了题为《在铀-石墨系统内中子的增殖》的论文。这些研究有助于对反应堆内中子输运基本规律的理解，并提供了精确测定“临界体积”的方法。所谓“临界体积”，就是裂变反应能自持进行所需的可裂变物质的

最小体积。如果一次裂变反应所释放的平均中子数能引起一次新的裂变，反应就能自持进行下去。裂变反应放出的中子可能被可裂变物质俘获引起新的裂变，也可能被其它原子核俘获而不发生裂变，也可能逸出反应装置。因此，裂变能否自持，不仅取决于每次裂变释放的平均中子数，而且还取决于发生上述各个过程的相对几率。在反应堆中，中子的产生量与反应堆活性区的体积成正比；中子的逃逸量与活性区的表面积成正比。如果活性区的体积太小，其表面积与体积之比很大，中子逃逸量与产生量之比就很大，裂变反应不会自持进行。只有当反应堆活性区达到某一个最低限度的体积，使逃逸量与产生量之比足够小时，反应才能自持进行。这个最低限度的体积便是反应堆活性区的临界体积。可裂变物质，慢化剂，控制棒等在反应堆中的布置情况，以及反射层的几何形状，对临界体积均有影响。在原子弹中，铀块的尺寸也具有一定的最低限度，否则就不会发生爆炸，这个最低限度的尺寸也称为临界体积。根据弗朗克的这些研究，还能够以很高的精确度确定在无限系统内中子的增殖系数，以及研究临界体积、中子的增殖系数和铀-石墨栅格性质的关系。

发现“中子扩散冷却”现象

弗朗克对介质内中子扩散问题曾进行过深入的实验研究，创造性地测定了稳态源发射的中子的空间分布。1952年，弗朗克曾预言：测定脉冲中子源所发射的中子的空间分布，对研究中子的慢化和扩散有着十分明显的优越性；和稳态源相比，脉冲源只需要非常少量的被研究物质。实验证实了他的观点，并发现中子扩散冷却现象。这种现象是由中子气和介质之间达到热平衡的最终速度造成的。他在实验中还发现中子的平均扩散系数与被研究物质的几何尺寸有着一定的关系，即扩散冷却效应。这是由于能量较高的中

子更易泄漏，使得在有限尺寸的装置中扩散的中子平均能量减小。弗朗克提出的研究中子扩散的脉冲方法，不仅能够研究热中子在各种物质中的扩散问题，而且还被推广到地质勘探、仪器制造以及其他科技领域。弗朗克还根据中子在铅中的慢化时间，提出了一种测定中子能谱的新方法。

建造快中子脉冲反应堆

1957年，杜布纳联合核研究所 在弗朗克的领导下开始建造一座快中子脉冲反应堆。30多年来，这座反应堆一直顺利地运行着。它的最大优点在于具有非常大的中子流。弗朗克及其助手们借助这座反应堆进行了有关极化中子、极化核靶、中子共振以及凝聚态物理方面的实验和研究。多年来，他们不断地对它作了改进：先后将电子回旋加速器和直线加速器用作中子注入器，提高了该座反应堆周围的中子谱仪的分辨率。由于这方面卓有成效的工作，弗朗克于1971年荣获前苏联国家奖金。

70年代末，弗朗克领导下联合核子研究所又开始建造一座比ИБР-1型更先进、通量更高的脉冲反应堆（ИБР-2型）。这座反应堆的脉冲中子束流强度很高，是目前世界上利用中子研究凝聚态物质且具多功能的强中子源之一。弗朗克的中子物理实验室已经成为国际上著名的中子物理研究中心之一，也是基本粒子物理学、固体物理学、液体物理学、生物学和放射性医学领域内最重要的研究中心之一。

关于超冷中子的研究

弗朗克最重大的科学成就就是对超冷中子的独特性质进行了深入研究，从而开拓了中子物理学的一个新方向。超冷中子是指速度 ≤ 5 米/秒的中子。这种速度，大致等于气体分子在低于 10^{-4} K温度下的运动速度，其动能小于 10^{-7} 电子伏。它能够沿着任意形状的中子导管传输，

正如稀薄气体一样。可以用弯曲的中子导管把超冷中子从反应堆中引出，或者从热中子束中分离出来。在反应堆中的热中子流中，超冷中子的份额大约只占 10^{-11} ；因此，实际上获得的超冷中子的密度 < 1 中子/ cm^3 。磁场和引力场对超冷中子的运动起着极其重要的作用。超冷中子是检验中子可能有的电荷或者电偶极矩的灵敏工具。对于超冷中子，不管它们对介质的入射角如何，都能发生全反射，因此可以把它们贮存在特制的器皿中。研究超冷中子对于研究中子本身的性质和物理学中某些守恒定律（如电荷共轭、空间反射、时间反演联合变换，即CPT变换）及对称性质（如微观客体的空间反射性质）都很有价值。多年来，弗朗克从理论上研究了超冷中子的光学性质，超冷中子在中子导管中的行为特点，以及超冷中子在孤立容器中短时间存在的可能原因。弗朗克发现中子P-共振的空间宇称不守恒；在中子的P-共振中，对于具有不同螺旋性的中子截面相差达到15%，这对于弱相互作用的核表现来说确是一个很大的数值。这里所说的螺旋性，是基本粒子的一个特征量，即基本粒子的自旋在其运动方向上的投影，用于描述以接近或等于光速运动的基本粒子。若自旋与粒子的运动方向相反，螺旋性为负值（“左螺旋性”）；若自旋与粒子的运动方向一致，螺旋性则为正值（“右螺旋性”）。1972年，弗朗克发表了题为《中子光学的若干新观点》的论文。

在其它方面的研究

研究电子偶现象。1938年，弗朗克和格鲁舍夫合作，利用威耳逊云室，详细地研究了由 γ 量子在氮和氮中所产生的电子-正电子偶的现象，得到了这种现象的量子理论与实验之间最完满、正确的比较。我们知道，当光子的能量超过一个电子和一个正电子的静质量能的总和时，就有可能转化为正负电子对。反



这次火星考察命名为 T-Rex. 它将把装备美国太阳能电池板、摄像机、电脑和电钻的俄国自动考察车于 2001 年送上火星表面. 这辆考察车将在 5 年时间内越过火星表面上的古代湖床, 并探测 30 亿年来存

1. 光电子技术和信息高速公路

在光电子信息处理系统的研究方面, 美国一些著名实验室正在制造包含数以千计的微型激光器的芯片样片. 这些芯片不是依靠电子流过电线, 而是通过使激光在一秒钟里闪烁几百万次来传送和接收信息. 美国政府预见到光电子技术的巨大潜能后, 已决定着建立全国性的光纤信息高速公路. 这项庞大的计划一旦完成, 将使美国社会和美国人的生活发生巨大变化. 日本朝野确认, 信息高速公路是 21 世纪最有希望的重点发展的战略产业, 拟投资几十亿美元用于这项尖端技术的研究和开发, 并计划在 2015 年以前用光纤把每个家庭与商店联成一体. 法国政府于今年 2 月 23 日召开内阁会议, 专门研究信息高速公路问题. 我国有关部门也对此表示关注, 邮电部和“科技日报”先后召开了“信息高速公路”座谈会.

仅在通讯方面, 以光子代替电子可使传输线路的容量扩大一万余倍, 可使目前的计算机处理速度快上许多倍, 并使计算机在存储技术方面出现重大进展. 光电子技术的

影响力还远不止此. 未来 10 年将出现光传感器, 它能监测工厂的生产流程、测定房屋及其它建筑所受到的压力. 对汽车工业, 光传感器可以控制发动机并帮助避免车祸. 光电子技术也正在进入医学领域, 激光已用于疏导动脉堵塞和手术. 激光器还显示了图像采集的良好前景. 人们预计, 在未来 10 至 20 年内, 光电子技术将带来一场与半导体的应用具有同样深远意义的变革. (摘编自“科技日报”)

2. “认知科学”讲座

认知科学是研究人类的认知和本质规律的科学, 其特点是高度跨学科性, 近年来广泛受到物理学家的关注. 应高能物理所所长郑志鹏的邀请, 北京认知科学开放实验室主任陈霖于今年 5 月 27 日在高能物理所作了“认知科学的现状和未来”的专题演讲. 高能物理所学术委员会主任黄涛主持了报告会.

3. 美俄将联合考察火星

据“科技日报”报道, 美国和俄国将于 1999 年 1 月联合向火星发射考察飞船, 以确定火星上是否存在生命形式.

留在火星土壤里的古代有机物的残留物.

火星上是否存在生命一直是个谜. 科学家们认为, 在火星形成后的头 15 亿年里存在过生命. 由美国宇航局艾姆斯实验中心的克里斯托夫·麦克伊博士领导的这个考察小组, 就是想发掘原始火星生命的残留物.

环绕火星的卫星所摄的照片表明, 火星上有流水冲刷成的巨大沟渠和河床. T-Rex 考察车将要在火星表面上的一个古代湖泊盆地上着陆. 麦克伊等人认为, 这里曾经有过类似藻类的生命. 如果他们判断正确的话, 这次火星使命就有可能发掘出这些生命的化石来.

4. 创刊 150 年的《科学美国人》

编辑部设在纽约的《科学美国人》杂志, 创刊于 1845 年. 如今, 发行量达 100 多万份, 除用英文出版外, 还被译成西班牙文、意大利文、法文、德文、波兰文和中文等 10 种文字.

介绍最新最前沿的科学, 其任务可谓艰巨. 《科学美国人》的总编辑乔纳森·皮尔认为, 若想将一门

之, 当一个电子和一个正电子相遇时, 也有可能湮灭为光子. 这种同时产生或湮灭的一个电子和一个正电子总称为电子偶.

研究轻核反应和铀核裂变. 弗朗克对氘核跟氚核的反应进行过详细的研究, 他提出了一些新的实验方法, 研究了快中子跟氘、锂和铀核的相互作用, 及其裂变过程. 这些研究, 为短寿命亚稳态的研究, 以及在介子和高能粒子作用下核裂变的

研究奠定了基础. 他还对低能(几千电子伏)带电粒子核反应的有效截面进行过精确的测量.

1955 年, 弗朗克利用联合核研究所的稳相加速器研究了在大激发能量情况下铀核裂变的可能性(采用快中子进行裂变, 并且考虑慢 π 介子的吸收). 同年, 弗朗克与其助手合作发表了题为“在慢 π^- 介子和高能粒子作用下的铀核裂变”和“在慢 π 介子、快中子和能量为 250 MeV 的 γ 射线作用下的铀核裂变”等论文. 弗朗克在稳相加速器上还对 π

介子的散射问题进行过研究.

弗朗克研究过热中子的利用系数. 为了解决反应堆的冷却问题, 他还研究过气隙、铀块和慢化剂之间的水层作用问题, 以及慢化剂与铀温之间的关系.

弗朗克著有《瓦维洛夫-契伦科夫辐射》(1959 年), 《原子核物理学与原子能》(1968 年)等.

· 弗朗克的中子物理研究形成了一个学派. 1954 年曾荣获苏联国家奖金.