

第二讲 信息的产生与获得(下)*

张 开 逊

(北京机械工业自动化研究所 北京 100011)

新的科学信息、发现自然规律,是科学研究永恒的主题。近代科学诞生之后的200年间,物理学已经形成了自身的传统,任何理论都必须接受实验的检验,理论导出的结果必须与以科学手段获得的自然信息一致,准确的自然信息在科学发展中起着决定性作用。

人类活动每迈出新的一步,都会面临获取自然信息的新问题。在科学和技术领域前沿工作的科技工作者,随时关注着新的科学发现和技术发明,以创造性的智慧努力使它们用于获取更多的信息。

1 新的科学信息动摇了经典物理学的基础

1800年,天文学家赫歇尔(1738—1822)观察到太阳可见光谱红光区之外有一种明显的热辐射,发现了红外线。1801年,里特(1776—1810)发现了紫外辐射。此后,通过分光镜和探测器研究物体热辐射从红外到紫外能量和波长之间的关系。当1821年德国物理学家塞贝克(1770—1831)发现热电效应之后,采用金属热电偶与灵敏电流计组合,可以精确测量不同波段热辐射的能量分布。这项实验先后做了半个多世纪,在紫外波段实验结果与经典理论完全不符。为了调合这种矛盾,普朗克(1858—1947)提出了量子理论。

迈克耳孙(1852—1931)和莫雷(1838—1923)利用干涉仪设计了一套极精密的测量装置,使一束光通过半反射镜分为相背而行的两支,通过等距离光程之后经反射再次回到半反射镜,重新会合。按照经典理论,考虑到地球在太空中相对于绝对坐标系(以太)的运动,这两束光相聚时由于光程差将发生干涉。根据经典理论计算,预计将出现0.4个条纹的移动。它们的干涉仪可以观察到1/100以下的条纹

移动,结果没有发现任何干涉条纹变化。迈克耳孙和莫雷提供的科学信息,使人们发现了光速不变性原理,为爱因斯坦(1879—1955)提出的狭义相对论奠定了重要的实验基础。

2 在自然界不曾有过的实验条件下获取科学信息

步入20世纪之后,获取自然信息的方式发生了微妙的变化。科学家不再满足于被动地观察分析自然界已有的信息,更喜欢创造自然界不曾有过的环境和条件,使大自然泄露自己的秘密。这种“强迫”大自然产生信息的做法,常常能够获得意外的收获,甚至成为推动学科前进的主要方法。

早在1897年,英国物理学家J. J. 汤姆孙(1856—1940)发现电子的时候,已经测量出了它的荷质比(e/m),但是不知道单个电子电荷与质量分别是多少。电子电荷与电子质量,是研究电子行为和探究与电子相关的物理过程必需知道的两个独立参数。从1906年到1917年,美国物理学家密立根(1868—1953)等人前后12年进行了近千次实验,测量出单个电子的电荷,从而也知道了电子的质量。

密立根在两个金属平行板电极产生的均匀静电场中,以喷雾的方式产生带负电的细小油滴,油滴在静电场作用下受到向上的力。调节极板之间的电压,以改变电场强度,使一部分油滴受到的静电力与重力平衡,通过显微镜可以清晰地观察到它们飘浮在空间静止不动。逐渐改变电压,不断有新的油滴成为“飘浮者”。记录下每次新的“飘浮者”出现时对应的电压值,从这些离散的不连续数值中找出最小差值,根据油滴的尺寸和比重算出对应的电荷改变量,这

* 2004-10-21收到初稿,2004-11-29修回

就是单个电子的电荷. 由于油滴上的电荷量是不连续变化的, 它们只能是单电子电荷量的整数倍, 电压的最小差值对应着 1 个电子电量的变化.

1909 年, 英国物理学家卢瑟福(1871—1937)等人采用 α 射线轰击极薄的金箔(采用金箔的原因是由于金具有良好的延展性, 可以锤打成非常薄的箔, 减少对 α 射线的吸收, 金的化学稳定性使其表面不产生氧化层) , 发现大部分 α 粒子可以穿过金箔, 小部分改变方向, 甚至观察到反弹回来的 α 粒子. 使人们知道原子的绝大部分质量都集中很小的空间区域之中, 好像 1 个核. 这个核带正电, 电子则远远地围绕着它, 从而建立了原子结构的行星模型. 自从公元前 5 世纪古希腊自然哲学家德谟克里特(公元前 460—370) 提出原子论以来, 直到 2400 年之后人们得到新的科学信息, 才弄清了原子的结构.

1930 年, 德国物理学家泡利(1900—1958) 提出了中微子的概念, 可以满意地解释 β 衰变时 β 电子能量连续分布的难题. 他提出: “ 原子核中可能存在一种自旋为 $1/2$, 服从不相容原理的电中性粒子 ”. 他推断 β 衰变中失踪的能量有可能是这种察觉不到的电中性粒子带走的. 1934 年, 科学家曾经计算过, 要把放射性核在 β 衰变中产生的中微子阻留在液氢中, 需要厚度为 1000 光年的液氢.

面对这种无法研究的问题, 1953 年, 在美国洛斯阿拉莫斯实验室的莱因斯提出, 利用核反应堆大通量辐射产生强中微子流, 使单粒子长程小概率事件转换为粒子群短程高概率事件, 亿万个中微子通过 1m 厚的物质有可能被截留. 他们用含氯化镅的 400 升水作靶, 通过闪烁计数器观察到相距 $1\mu\text{s}$ 先后出现的两个光子. 第一个光子是中微子在水中与质子碰撞产生的正电子与电子相遇湮灭产生的, 第二个光子是中微子与质子碰撞产生的中子被镅吸收后产生的. 它们出现的时序关系与理论计算符合, 人们第一次通过实验证实电子中微子的存在.

3 物理学的新发现带来新的科学信息

3.1 粒子的波动性突破了微观世界的观测极限

1924 年, 物理学家德布罗意(1892—1987) 提出了微观粒子具有波粒二象性的假说. 1927 年, 戴维森(1881—1958) 和盖末(1896—1971) 采用低速电子轰击镍靶, 发现了低速电子的衍射现象. 同年, G. P. 汤姆孙(1892—1975) 又用在静电场中被加速的高速电子束穿过金属薄片, 在电子束前进方向观

察到了电子产生的衍射花纹, 这种花纹和光的衍射图案十分相似. 获取新科学信息的兴奋之情迅速感染了更多的学者, 使他们产生了更加富于想象力的构思. 1930 年, 斯特恩在速度随机分布的氢分子和氦原子中, 选择分离出具有确定速度范围的中性粒子, 采用极其灵敏的气压计在真空环境中测量它们的空间分布, 发现这些中性分子和原子同样具有波动性, 使人们确信波粒两象性是微观粒子共同的属性. 微观粒子波动性的发现, 使人们有可能以新的方式突破光学显微镜分辨率极限, 获取更加精确的微观世界空间信息.

17 世纪光学显微镜诞生之后, 人们不断制造光学玻璃的方法和改进磨制玻璃透镜的技术, 显微镜很快达到了分辨率的极限. 当被观测对象线度接近可见光波长的时候, 几何光学成像原理不再成立, 光线因被观测对象发生显著的衍射和干涉, 像和物之间不存在几何形状对应关系. 光学显微镜的极限放大率只有 2000 倍, 即使采用紫外光, 性能改善也十分有限. 1931 年, 德国物理学家卢斯卡利用电场和磁场控制电子运动轨迹, 使高速电子束穿透样品薄层, 产生了样品结构被放大的空间信息, 发明了电子显微镜. 后来又利用强电场作用下的隧道效应做成了扫描电子显微镜, 进一步提高了分辨率. 在加速电场作用下, 具有波动性的电子波长远远小于可见光, 它获得的图像分辨率远远高于光学显微镜, 放大率可以达到几十万倍, 甚至可能看到单个原子.

3.2 核科学改变了获取自然信息的时间尺度和鉴别信息的能力

在宇宙演化的历次巨变中, 许多物质改变了性状, 大量的信息已经丢失, 唯有原子核的衰变不受影响. 根据某些放射性物质含量的比例变化, 可以测出宇宙演化过程以及地球地质演变中所发生事件的时间. 通过样品中放射性铷 87(年衰变率为 1.6×10^{-11})、放射性铀 235(年衰变率为 2×10^{-10}) 和放射性钾 40(年衰变率为 0.7×10^{-9}) 的测定, 可以测量太阳系形成的时间, 判断地球上各种岩石的年龄, 为宇宙学与地质学研究提供最重要的时间坐标.

1957 年, 德国物理学家穆斯堡尔(1927—) 发现了 γ 射线无反冲共振吸收现象, 称为穆斯堡尔效应. 利用这种效应, 可以精确测定核能级, 研究核外电子和晶格在原子核所在处的电磁场对核能级的影响, 可以由核能级的细微变化了解物质的微观结构, 在固体物理、化学、地质学、材料科学中获得广泛的应用.

爱因斯坦在 1915 年提出广义相对论之后, 很多人希望在地球上验证它的正确性. 如果广义相对论是正确的, 在地球重力场作用下, γ 射线的频率将会发生变化. 1959 年, 美国科学家庞德和雷布卡设计了在地球表面上观测引力红移的实验. 他们应用穆斯堡尔效应以极高的精度测出钴 57γ 放射源在 22.6m 高塔上产生的频率偏移为 2.57×10^{-15} , 与广义相对论预言的引力红移理论值仅相差 5%, 1965 年改进实验方法后, 差值减小到 1% 以下, 人们在地球上通过实验验证了广义相对论.

3.3 同步辐射开辟了获取信息的广阔前景

1947 年, 科学家在电子同步加速器中第一次发现了接近光速的带电粒子改变运动方向的时候以光辐射的方式丢失能量. 光子能量与带电粒子能量的 3 次方成正比, 与曲率半径成反比. 这种辐射是一种高偏振度、高亮度、有特定时间结构、波长可以连续变化的洁净光源, 它的频率范围可以从远红外到 X 射线.

光信息的获取, 经历了自然光 - 电光源 - X 射线 - 激光四个阶段, 同步辐射与之相比具有一系列新的特点: 极高的光子通量, 可以在 10^{-12} s 内取得丰富的物质结构信息; 可以随意连续改变频谱, 使光子能量与不同研究对象的能谱匹配, 产生所需要的共振吸收和激发态; 没有灯丝和吸收材料产生的光污染.

可以用同步辐射模拟地球内部下地幔处的温度与压力环境获得地球深处的信息; 它既可以作为光源也可以作为能源, 在改变实验对象物性的过程中实时获取物质结构信息, 通过“可视”过程制造极端条件下出现的新材料(例如在爆炸过程中合成具有预定晶型的金刚石); 还可以对各类有机物大分子、蛋白质进行高效快速分析. 利用目前运行的同步辐射光源对胰岛素蛋白质作晶体结构分析只需要几秒钟, 而中国科学家在数十年前刚刚合成牛胰岛素时, 进行蛋白质晶体结构分析需要用几个月. 同步辐射已经成为当代获取物质结构信息最重要的手段之一, 在同步加速器中产生的自由电子激光将进一步拓展这种新光源的应用领域, 使人们取得更多的科学信息.

4 没有无用的信息

一位幽默的经济学家说过: “世上没有垃圾, 只有放错地方的财富”. 宇宙间没有无用的信息, 信息

的价值取决于选择和理解信息的能力. 人们不仅通过精心设计的实验产生自然界中难得一见的科学信息, 也关注那些似乎没有意义的信息, 发掘它们的价值.

任何电阻都存在着由于热运动引起的固有噪声, 噪声是电子器件不希望的干扰, 但噪声电压与信号带宽、电阻值和温度之间有确定的关系, 利用噪声电平可以对温度进行绝对测量. 通过光纤传输信号的时候, 环境温度的变化、轻微的振动或应力应变, 都会损害通信质量, 可利用光纤本身作为信息的手段, 设计出对外界因素十分敏感的光纤, 通过光纤折射率、传播模式或传输系数的变化获得信息. 这种信号源与传输系统合一的检测方式, 在强电磁干扰环境中具有突出的优点.

大约 20 年前, 几位中国科学家使咽口水的声音成为科学信息, 发明了一种早期诊断食道癌的方法. 他们注意到, 每个人在吞咽一口水的时候, 都会先后发出两次轻微的声音. 第一次是水通过咽喉进入食道的时候, 第二次是水流经过贲门进入胃的时候. 这是由于水和空气混合进入截面积变化的管道时发生的两相流共振现象. 记录和分析这两次发出的声音, 可以产生重要的生理、病理信息. 例如食道中段有占位性病变, 食管变窄, 水流速度减慢, 两次声音之间的间隔加长. 如果占位性病变出现在食道上段或下段, 两次发声的特征会产生特异的变化. 通过健康人群的背景信息研究和典型病例声音信号特征分析, 可以迅速得到初步诊断结果, 使食道癌的普查成为可能.

制造石英晶体谐振器的时候, 要剔除那些晶片或电极镀层过厚的产品, 因为它们会降低谐振频率, 使产品偏离技术标准. 有时却有意利用石英晶体谐振频率的变化获取信息. 例如 20 世纪 90 年代, 我国台湾科学家发现牛蛙对某种有害气体(高分子有机物)异常敏感, 他们分离出牛蛙嗅觉神经细胞的纯净蛋白质, 发现它会强烈地吸附这种有害气体. 把这种蛋白质做成浆料分别涂敷在两个谐振频率相同的石英晶体表面上, 其中 1 个晶体密封在纯净的空气中, 另 1 个与监测环境大气相通. 当被检测的有害气体出现在环境大气中时, 由于牛蛙神经蛋白质膜吸附这种气体, 使其质量增加, 晶体谐振频率改变. 采用高精度频差检测电路, 标定石英晶体谐振频率变化量与待测气体浓度的对应关系, 以此获得待测气体的相关信息.

5 在广阔的科学技术背景中获取信息

根据自然界物质形态的微小差异,人们发明了确定古代生命活动时间坐标的方法. 20 世纪中期,美国化学家利比教授发现,地球大气圈 CO_2 中存在着一定比例碳的同位素 C^{14} , 它的原子核由 6 个质子和 8 个中子构成, 这种同位素半衰期为 5700 年. 大气圈中的氮原子在宇宙辐射的作用下, 部分原子核中一个中子发生正 β 衰变, 由 N^{14} 变成 C^{14} , 它的化学性质与 C^{12} 相同. 当宇宙辐射产生的 C^{14} 和自身的衰变达到平衡时, C^{12} 与 C^{14} 保持恒定的比例. 大气圈中 CO_2 是构成食物链最基础的成分, 通过光合作用, 植物使 CO_2 和 H_2O 变成有机质, 成为植物自身的组分和食草动物的食料, 食草动物又是食肉动物的食料. 一切活着的生物体内 C^{14} 和 C^{12} 比例与大气圈 CO_2 中的比例相同. 当生物死亡之后, 大气圈中 CO_2 中的 C 不再进入机体, 这种平衡被打破, 只存在单纯的 C^{14} 衰变过程, C^{14} 含量按指数规律递减, 每过 5700 年, C^{14} 含量减少一半, 利用质谱仪或加速器很容易测出 C^{14} 和 C^{12} 的比例, 可以直接判定样品生物死亡的时间. 这项发明已经成为考古学(特别是史前考古)广泛采用的断代方法, 有助于了解人类祖先真实的历史和文化轨迹.

通过不同学科成果的非线性组合, 从而超越传统技术的极限获取新的信息. 在 20 世纪中期, 医学中传统的平面 X 射线透视技术遇到了不可逾越的障碍. 软组织密度变化引起的 X 射线吸收系数差异非常小, 这种差异信息常常淹没在包围病灶的正常组织的吸收信息之中. 例如探测患者消化系统中某处占位性病变时, X 射线必须通过腹部厚厚的肌肉和脂肪层, 它们对 X 射线的吸收远远超过病灶. 特别是探测颅脑病变时, X 射线必须两次通过颅骨, 骨骼对 X 射线的吸收系数比软组织大 1000 倍, 照片上的影像将一团漆黑. 几位科学家提出了 X 射线断层扫描的方案, 这是一种新概念, 把分辨 X 射线吸收强度的技术问题变换为求解多元联立方程式的数学问题. 综合采用计算机技术、传感器技术和电视技术, 获得医学信息, 简称 X-CT. 他们利用线状 X 射线源不断改变方位穿过被观测截面, 利用光敏传感器探测 X 射线束前后强度变化, 获得数量足够的独立方程组, 从而解出截面内被观测对象的二维密度分布, 在运算过程中作为参变量消去非病灶部位产生的背景吸收信息, 使信噪比显著提高, 获得满意的

灰度等级和分辨率, 通过电视图像处理技术得到清晰直观的截面组织结构影像. 连续变化被扫描截面的纵向位置, 可以在无创条件下获得人体内部结构的三维信息, 成为世界范围内医疗机构不可或缺的诊断设备. 它的应用领域已经扩展到考古(例如研究古埃及木乃伊的身体构造)、古生物学(通过恐龙蛋化石的 X-CT 图像研究 1 亿年前恐龙胚胎发育情况)和工业设备无损缺陷探索.

空间技术、高精度时间测量技术、高速信息处理技术相互融合, 使人们能够通过动态天基坐标获得高精度三维空间信息. 最成功的实例是全球卫星定位系统, 简称 GPS. 它是美军 20 世纪 70 年代初研制的新一代卫星导航系统, 1986 年开始正式运行. 这种系统采用 24 颗极轨卫星以确定的空间关系绕地球旋转, 其中有 18 颗工作卫星, 均分布在 6 个不同的轨道平面上, 轨道平均高度 20200km, 12 小时绕地球一周. 每一颗卫星都是具有确定频率和相位关系的无线电信号源, 它们的空间分布使地球上任何地方都能够同时接收到至少四颗卫星发出的无线电信号, 通过精确的时间测量和相位识别, 根据卫星信号到达接收器所需的时间可以精确测量接收器到卫星的距离. 根据 1 颗星的信号可以定出 1 个球面, 2 颗星的信号可以定出 2 个球面相交的圆弧, 3 颗星的信号可以定出圆弧与球面的 2 个交点, 利用第 4 颗星的信号可以选定其中 1 个点. 在真空中电磁波传播速度为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, 当时间测量精度达到 10^{-11} s 时, 空间距离的测量精度可以达到 $3 \times 10^{-3} \text{ m}$, 即测量误差只有 3mm. 利用这种获取空间几何量信息的技术, 可以获得精确的全球地理信息, 利用它研究大陆漂移, 观测喜马拉雅山顶峰高程的变化, 还可以藉此实现全球全天候车辆、船舶和飞行器精确定位与导航.

6 无尽的前沿

探索者获取自然信息的努力已经取得了丰硕的成果, 仍然不能满足人类渴望了解世界的需求. 人们每次获得新的科学信息, 都会发现自己面对着更广阔的未知世界.

到目前为止, 人们还没有获得关于构成宇宙中 90% 以上质量的暗物质的任何信息; 虽然进行过无数次实验, 但至今没有获得关于引力波的满意信息; 宇宙大爆炸产生的反物质至今下落不明.

在许多医院里, 人们主要使用 1903 年荷兰人埃

因霍温(1860—1927)发明的心电图机通过心电信号了解人体心脏的功能,可是许多患者因心脏病离开人世之前,心电信号仍然一直显示“正常”;大多数医院一直使用伦琴(1845—1923)在1895年发现的X射线透视检查诊断肿瘤,往往在发现的时候已经到中晚期。因为许多恶性肿瘤早期不会引起器官组织形态或密度变化,对X射线的吸收特性不会产生异常影响,没有任何影像学诊断的特征,脑科学探索长期停留在心理学研究水平上,很难发现与思维过程直接相关的物质运动信息。

人们对地球的直接观察了解,也仅仅限于地壳表面不足10km的薄层,不及地球半径1/500。目前

获得的关于地球信息只能勉强应付开采浅层矿藏和土建活动的需要,对地壳更深的地方,对地幔和地核都知之甚少;人们不清楚产生地震的机制,更不清楚地球演变历程中地球磁极多次倒转的原因;生命的起源至今仍然是一个谜,它的谜底需要充足的科学信息才能揭开。

人类自身是宇宙的一部分,是生命演进历程中出现的一个新物种。向往探索宇宙与生命的奥秘,本身就是诗意的壮举。人类诞生以来,探寻的目光从来没有离开过浩瀚的未知世界,从来不曾停下迈向未来的脚步。蓦然回首,每次都会发现,走过的地方世界变得清晰了许多。



· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

书 名	作(译)者	定价	出版日期	发行号
计算声学——声场的方程和波	李太宝	¥38.00	2005年1月	0-2016
半导体量子器件物理	傅英 陆卫	¥50.00	2005年1月	0-2004
磁层粒子动力学	徐荣兰	¥35.00	2005年1月	0-1961
现代声学理论基础	马大猷	¥48.00	2005年1月	0-1830
现代声学理论基础	马大猷	¥48.00	2005年1月	0-1830
物理学家用微分几何	侯伯元 侯伯宇	¥98.00	2004年8月	0-1976
数学物理方程及其近似方法	程建春	¥58.00	2004年8月	0-1952
量子力学朝花夕拾——教与学篇	王文正等	¥36.00	2004年11月	0-2095
随机振动的虚拟激励法	林家浩 张亚辉	¥45.00	2004年9月	0-1889
准晶物理学	王仁卉	¥45.00	2004年8月	0-1802
非平衡凝固新型金属材料	陈光 傅恒志	¥42.00	2004年8月	0-2027
金属陶瓷薄膜及其在光电子技术中的应用	孙大明 孙兆奇	¥56.00	2004年7月	0-1942
岩石力学	谢和平 陈忠辉	¥54.00	2004年5月	0-1944
软X射线与极紫外辐射的原理和应用	张 杰	¥59.00	2003年9月	0-1682
现代压电学(上中下)	张福学	¥99.00	2003年5月	
拉曼布里渊散射——原理及应用	程光煦	¥48.00	2003年5月	0-1301
应用力学对偶体系	钟万勰	¥42.00	2003年3月	0-1542
广义相对论和引力场理论	胡 宁	¥15.00	2003年3月	0-1157
激光的衍射及热作用计算	李俊昌	¥34.00	2003年3月	0-1553
粉末衍射法测定晶体结构	梁敬魁	¥68.00	2003年4月	0-1697

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书。如果您有出版意向,请和我们联系。凡购书者均免邮费,请按以下方式和我们联系:

电 话:010-64017957 64033515 电子邮件:mlhukai@yahoo.com.cn 或 dpyan@cspg.net

通讯地址:北京东黄城根北街16号 科学出版社 邮政编码:100717 联系人:胡凯 鄢德平

欢迎访问科学出版社网址 <http://www.sciencep.com>