

## 分子组成物质

2000 多年以前，我国古代的学者提出了“一尺之棰，日取其半，万世不竭”的推论。“棰”是一种策马鞭上的短木棍。意思是，一尺长的短木棍，每天分割一半，就是亿万年也分割不完。它朴素地说出了物质无限可分的思想。但是，对于木棍这样的具体物质进行机械分割，是不可能“万世不竭”的。

譬如你“日取其半”地分割一尺长的木棍，分割到第 29 天，剩下的长度大概是五亿分之一尺，它还具有木头的性质。因为木头是由一种纤维素的单元构成的，这是一种很长的链，每个环节差不多是五亿分之一尺，和第 29 天分割之后剩下的长度相当。但是经过第 30 天分割后；剩下的长度仅有十亿分之一尺，变成了比组成木头的纤维素单元更小的东西。在第 30 天以后，虽然物质还能够无止境地分下去，但是分出来的小粒子已经不再具有木头的性质了。可见，具体物质的分割是有限度的。

在物理学中，能够保留某种物质性质的最小粒子，叫做这种物质的分子。自然界里姿态万千的物质，都是由各种各样不同的分子组成的。

分子的尺寸和重量都小得惊人。一滴油滴到水面上，可以扩散很大面积，油层能够薄到只有百万分之一厘米；延展性很好的金子，可以加工成厚度仅有十万分之一厘米的金箔。但是这样薄的油层还有几十个油分子厚，这样薄的金箔竟然有几百

个金分子厚。

精确的实验告诉我们，普通物质分子的直径，大约只有亿分之几厘米。在物理学中，经常把亿分之一厘米叫做 1 埃。像水分子的直径是亿分之四厘米，就是 4 埃。这是一个极小的数字，把 2500 万个水分子一字排开，总长度才是 1 厘米。蛋白质分子的直径也仅有几十埃。

常见物质里含有的分子不计其数。譬如  $1\text{cm}^3$  的水里含有 335 万亿亿个水分子，如果把它们平均分给全世界所有的人，每个可以分到 8 万亿个。假想有一种极小的动物喝水，每 1 秒钟喝进 100 亿个水分子，喝完  $1\text{cm}^3$  的水最小也要用 10 万年以上的时间！

分子的质量也非常微小， $1\text{cm}^3$  水的质量是 1 克，所含有的水分子是 335 万亿亿个，所以一个水分子的质量只有  $2.99 \times 10^{-23}$  分子里最轻的是氢分子，质量小到只有  $3.35 \times 10^{-24}$  克，拿一个氢分子质量和一个中等大小的苹果质量相比较，大约相当于这个苹果质量和地球质量之比。

## 分子的热运动

组成气体的分子都非常活泼。比如你种的茉莉花，一旦开了花，全家甚至邻居都能够闻到扑鼻香气；鱼、肉坏了，会弄得四周臭气熏天。组成液体的分子也很活泼。你在一杯清水里滴入一滴墨水，墨水就会渐渐散开，和水完全混合。这表明一种液体的分子进入到另一种液体里去了。也可以说液体分子在不停地运动。固体分子，也不安分守己。比如把表面非常光滑洁净的铅板紧紧压在金板上面，几个月以后就能发现，铅分子跑到了金板里，金分子也跑到了铅板里，有些地方甚至进入 1 毫米深处。如放 5 年，金和铅就会连在一起，它们的分子互相进入大约 1 厘米。又如长期存放煤的墙角和地面，有相当厚的一层都变成了黑色，就是煤分子进入的结果。

证明液体、气体分子做毫无规则运动的最著名的实验，是英国植物学家布朗发现的布朗运动。

1827 年，布朗把藤黄粉放入水中，然后取出一滴这种悬浮液放在显微镜下观察，他奇怪地发现，藤黄的小颗粒在水中像着了魔似的不停运动，而且每个颗粒的运动方向和速度大小都改变得很快，好像在跳一种杂乱无章的舞蹈。就是把藤黄粉的悬浮液密闭起来，无论是白天黑夜，夏天冬天，随时都可以看到布朗运动，无论观察多长时间，这种运动也不会停止。在空气中同样可以观察到布朗运动，悬浮在空气里的微粒（如尘埃），也在跳着一种乱七八糟的舞蹈。

发生布朗运动的原因是组成液体或者气体的分子本性好动。比如在常温常压下，空气分子的平均速度是 500 米/秒，在 1 秒钟里，每个分子要和其他分子相撞 500 亿次。好动又杂乱无章的分子从四面八方撞击着悬浮的小颗粒，综合起来，有时这个方向大些，有时那个方向大些，结果小颗粒就被迫做起杂乱无章的运动来了。

你倒一杯热水和一杯冷水，然后向每个杯里滴进一滴红墨水，热水杯里的红墨水要比冷水杯里的扩散得快些。这说明温度高，分子运动的速度大，并且随着物体温度的增高而增大，因此分子的运动也做热运动。

## 热与冷的对象与环境

当我们拿着一块冰，说它冰冷彻骨的时候，实际上已经不由自主地把这块冰当作了我们所讨论的对象。对于这块特定的冰，它有一定的外观形状，一定的体积和重量，如果说得更准确一些，它是由大量的水分子微粒组成的，在空间内由若干宏观的几何界面限制在一定的范围之内，像这块冰这样，有了一定的已知的宏观的约束与限制，还是由大量的微观粒子组成，这种形式的我们所描述的对象，热学中便称为体系，或者热力学体系。值得重视的是，组成热力学体系的虽然能是原子、分子、离子乃至电子、光子以及其他粒子等等，但必须是大量的，且在一定的能够描述的宏观界面约束之内。少数几个粒子不能构成一个热力学的体系，几个水分子不能被称之为冰冷的冰块，因为这数量极少的粒子，我们已经无从谈起它的冷与热，无法用热力学性质去描绘它们，因而它们也就超出了热力学的范围，是非热力学体系。只有当一块冰，就算是很小的一块冰，但我们只取那其中的极小的部分，那一小部分仍能表达出冰的热力学性质，我们才能说它达到了热力学极限条件，这块冰才能称为一个热力学体系。在我们宏观的日常生活之中，各种冷与热的对象均具有  $10^{23}$  数量级的粒子数，体积线度也达到了厘米乃至米。比原子分子本身的尺度大得多，都是满足热力学条件的，因而均可称为热力学体系。

冷与热的物体，作为我们所描述的对象，通常是我们所不

会忽视的。不过我们常常容易忽视所描述体系所处的周围环境。正如在力学中施力物对于受力物的研究是非常重要的、必不可少的。热学中的环境对于体系也是特别重要，尤其是“热源”这个特殊环境，体系与环境之间总有特定的相互作用的，譬如环境规定了体系的宏观约束如界面、体积等，环境还可能与体系进行物质和能量的交换，从体系中吸走热量，或者给体系增加能量，从体系中分走一些物质，或者增加体系中的物质等等。按照相互作用的不同，体系可分为三种类型：

1. 开放体系。体系与环境的边界能够进行物质和能量的交换，尤其是物质交换。

2. 封闭体系。体系与环境的边界有效隔离，虽然能够传递能量，但不能交换物质。

3. 孤立体系。体系与环境的边界完全隔离，既不能交换物质，也不能交换能量，即体系与环境之间没有任何相互作用。实际上这仅是一种理想化体系，由于任何体系与环境之间总是有相互作用的，像在地球上，任何一个体系都免不了受地球这个大环境的重力场作用，只是我们在研究体系的某些性质时，把与这种性质相关性不大的与环境相互作用能忽略不计，从而抽象出理想化的孤立体系来。

体系的各部分之间，体系与环境之间不停地存在着复杂的相互作用，每个时刻的体系的相关性质，都能够用某些量参数来表达，这些参数便是这个时刻下特定状态的状态参数。一个体系，当在一定的情况下，它的若干宏观性质都不再随时间的变化而变化时，即它的状态参数不再因时间而不停地变化时，我们说这个体系达到了平衡，处于一种平衡态，平衡态的状态参数是非常有实际意义的，它表现的性质常常是我们研究的对象，如一块冰的体积、热与冷、形状等等。这里之所以要强调

它的若干的宏观性质而不是全部性质，是由于处于平衡态的体系内部仍处在运动变化的过程中，微观性质可能随时间的不同而不同，因而这种宏观上的平衡态，仅是一种动态平衡。

## 热与冷的量度

我们在生活中所说的冷与热，在观念上只是一种人体神经系统的感觉，有一定的相对性。不过在热学理论中，冷与热的程度却是定量的能用数值来量度，人们也都知道那便是温度。

两个具有不同的冷热程度数值的物体，当它们通过一定的壁而相互接触时，都会发生不同程度的相互作用。假如它们之间的壁透热程度好，是透热壁，则它们之间的相互作用比较快，极易达到平衡态——热平衡；就是透热性差的壁，乃至理想化的绝热壁，也是有一定程度的相互作用。人们在研究两个或多个物体通过一定程度的透热壁而相互作用的过程中，结合大量热平衡实验的结果，提出了一个十分重要的定律，这就是热力学第零定律：

“分别与第三个物体达到热平衡的两个物体，它们彼此也一定互呈热平衡”。

热力学第零定律也称为热平衡传递原理。物体  $A$  与物体  $B$  互呈热平衡，物体  $B$  又与物体  $C$  互呈热平衡，那么物体  $A$  就与物体  $C$  互呈热平衡，热平衡这种性质便通过  $B$  而由物体  $A$  传到了物体  $C$ ，就像接力一样。这个定律是来源于实践的，但在某种意义上又高于实践，具有普遍性的品格。它揭示出均相体系存在着一个新的平衡性质，那就是冷热程度的数值的表示——温度。于是第零定律的内容也能够用温度定理来表述：

“任一个热力学的均相体系，在平衡态各自都存在一个状态函

数，称之为温度；它具有这样的特性，对于一切互呈热平衡的均相体系其温度彼此相等。”

温度定理揭露出温度是热力学体系的一个宏观的状态参数，是体系自身热运动性质的反应；这个状态是通过什么途径来达到，例如一瓶水的水温是由冷水加热达到还是由热水降温达到，或是由冷水与热水混合达到，都与它这个状态参数——温度并没有必然的因果关系。另外，一块冰分成不同大小和形态的两块，它们仍然将具有原来的热平衡状态，仍然具有原来的温度，从而也表明了温度是一个具有特殊性质的物理量，它不像重量、体积、微粒数量等物理量那样具有加和的性质。

## 热与冷的尺度

每一个物体，它的长度、重量等都是这个宏观物体的内在属性，它与我们称量它们的方式及我们所使用的长度及重量单位是毫无关系的。但是，假如要得到一块铁条的长度的数值重量的数值，我们就规定长度、重量的单位，才能够表达出这块铁条长度为 10 厘米或 3 寸，重量为 0.5 千克或者 1 市斤。这便是度量单位对于物体的宏观参数的数值表达的重要性。

同样，温度也是一个物体体系的宏观状态参数，它与温标的选择是毫无关联的；但假如我们想以一定的数值表达出来，从而进行相互的比较或者交流，那我们就必须选定一种温标。温标包括指定的单位及所选用的固定点的温度数值，在这里，固定点通常选用各物质纯净态各相间的平衡态，因为那样的状态是可以重现的，而且具有相同的状态值。在人们对温度的标定的漫长历史过程中，陆续选用过多种温标，如摄氏温标、华氏温标、气体温标及热力学温标等，其中可以分为经验温标和热力学温标。

由于水是人们日常生活中间很广泛的很常见的物质，因而人们在很多方面都尽量利用了水的种种性质，温标的确定也同样如此。很久以前，人们发现在一个标准大气压下，只要是纯水与纯冰的混合物，无论是大量的水与少量的冰组成的平衡态，还是少量的水与大量的冰组成的平衡态，它们都具有一样的冷热程度——温度，于是人们便把冰与水在一个标准大气压

下达到平衡时的温度称为冰点，规定为温标中的其中的一个固定点—— $0^{\circ}\text{C}$ ；同样，在一个标准大气压下纯水与纯水蒸汽达到相互平衡时，无论它们互相之间的数量比例怎样变化，均具有一定的温度数值，即为汽点，成为温标中的另一个固定—— $100^{\circ}\text{C}$ ，再把  $0^{\circ}\text{C}$  与  $100^{\circ}\text{C}$  之间均分为 100 个等分，一分就是  $1^{\circ}\text{C}$ 。于是一种经验温标——摄氏温标就建立了。这种和别的种类的经验温标给我们的生活带来了非常大的方便，天气预报中的气温，我们身体的体温等就有了准确的尺度来衡量了，因而被广泛地应用于生活及科研之中。不过，在 1954 年，为了提高温度数值标定的准确性，国际上规定了另一个固定点，即纯冰、水、水蒸汽三相共存平衡时的温度，称为水的三相点，并规定它的温度值为  $273.16$  开尔文，写作  $273.16\text{K}$ 。这个规定，使我们经常用的经验温标如摄氏温标与热力学温标有了一个统一标准。因为热力学温标的一度（ $1\text{K}$ ）是水的三相点温度的  $1/273.16$ ，且摄氏温标的零点又被规定为  $273.15\text{K}$ ，于是，摄氏温标与热学温标之间只是计算温度的起点不同，温度间隔  $1^{\circ}\text{C}$  与  $1\text{K}$  是一样的，以  $T$  代表热力学温度， $t$  代表摄氏温度，则有：

$$t = T - 273.15$$

另外，还有一种华氏温标，以  $T$  表示华氏温度，则它与  $t$  的关系为：

$$T = 32 + \frac{9}{5}t$$

于是，冷与热的衡量尺度便有了相通性，象我们在长度上使用的米与尺寸，在重量上使用的千克与斤的关系一样。

## 热与冷的测量

18 世纪是热力学的真正开端，首先是计温学在这一时期快速地发展起来。虽然伽利略、盖利克、让·莱伊以及西门图学院的院士们已经在 17 世纪发明了首批验温器并不断作了改进，但它们仍然不便于得出定量测定的结果，不同验温器中的不同测温质、不同固定点、以及刻度的随意性等使这些验温器只适合对该处温度涨落作相对的估计。

出生巴黎的阿蒙顿，陆续独立研究过天体力学、物理学、建筑学、数学。他早年就变成了聋子，这给他的生活带来很多不便，也使他找不到工作。但阿蒙顿并没有为这个不幸而感到痛苦万分而从此萎靡不振，他认为能不能听到声音无法阻挡他心爱的研究工作，他甚至乐观地从这不幸中看到了有幸的成分，因为能够不受外界干扰，而一心一意地从事实验研究。

1703 年，阿蒙顿提出了气体测温计的一个有意思的结构，这是一个外形呈 U 字形的固定体积的温度计，主要利用空气的压强来测量温度。

阿蒙顿在 U 形玻璃管的较短的一臂上连接一个空心玻璃球，较长的一臂长 45 英寸。将水银注入 U 形管中并进入玻璃球的下部。测温时用水银始终保持球内空气的体积不变，而用两边水银面的高度差——即球内定容气体的压强与大气压强之差来量度温度。

阿蒙顿将玻璃球首先放入冰中，然后再放入沸水中，记下

了这两种情形下的水银面的差值（以英寸为单位），并假设玻璃球内空气的压强正比于温度而变化，从而使他可以依据长臂中水银面的位置来确定任意温度。

但是，因为阿蒙顿只选择了水的沸点作为一个固定点而并不了解水的沸点受大气压的影响，所以他的温度计并不非常准确；加上这种温度计的结构，用于实际目的也不方便，所以并不是实用的温度计。

在计温学的发展史上，第一只实用的温度计是由德国迁居荷兰的玻璃工匠华伦海特在 1709 年开始制造的。华伦海特迁居荷兰以后，学习和掌握了制作玻璃器皿的技术，成为一个气象仪器制造商。1708 年，他到丹麦首都哥本哈根旅行，看到了罗默制作的温度计。回到荷兰后，他就开始制作罗默温度计。在了解到阿蒙顿利用水银制造的温度计后，华伦海特也改用水银替换酒精，并开始研究温度计的精密结构。

华伦海特制造实用的温度计深受阿蒙顿工作的影响，这从他提交给《哲学学报》的一篇论文中充分地反映出来。华伦海特写道：“我从巴黎皇家学会出版的《科学史》获悉，著名的阿蒙顿曾经用自己发明的温度计发现水可以在某一固定温度下沸腾的原理。我心中立刻产生了一种愿望，很想自己做一个相似的温度计，俾能亲眼看到那瑰丽的自然现象并证实他的实验的正确性。”

然而制造出实用的温度计虽然不是一件易事，却是一件非常必要的事。当时，荷兰的阿姆斯特丹市出现了少有的严寒，差不多每条街的屋面上都是皑皑白雪。

有两位老人来到了华伦海特家里，一进屋就发生了争吵：一位说：“这样的严寒即使年岁再大的老人也不记得了。”另一位则不服气地说，“可是究竟谁知道今年是不是最冷呢？也许，几百年前的冬天要比我们今年的冬天还要冷呢？如果我们不在

人世的话，不知道今后是什么情况呢？”此时，年仅 23 岁的华伦海特也加入到争论中来。他目光炯炯，颇动感情地说：“我找到了一个办法，有了这个办法，在许多年之后，我们的子孙们可以说出究竟是哪个冬天最冷了。”

两位老人都哈哈大笑，异口同声地说：“你有什么好办法呢？”华伦海特很有礼貌地站起身，用手向外一指，“请原谅，到我的小工场去参观一下吧！”两位老人跟随华伦海特向一所房子走去。屋子里的一切东西使他们大为吃惊。一个很大的熔铁炉占去了大半个房间，炉旁是垛成堆的大大小小的管子、一个小熔炉以及许多乱七八糟的玻璃仪器。

华伦海特把老人领到桌前，桌上摆着一些器皿，器皿上安装着一些细高细高的、底部封闭的玻璃管。管子里有的装着带色的酒精，有的则装着水银。

“请看！”华伦海特用手摸着一个小管子说，“我在这根玻璃管里装满了酒精。”他用手指着另一个小管子说，“在这根管子里注入了水银。”华伦海特接着说，“请注意，在这两个管子上都有刻度。当我把这两个管子浸到热水里时，酒精或水银都会升高。而我标定 0° 的地方是我把管子浸在冰、水、氯化铵的混合液体里时，酒精和水银停止的地方，这是我所能得到的最低温度。因此，我认为即使是最寒冷的冬天，也能用这些温度计表示出来。”

“不可思议，”其中一位老人耸了耸肩，“如何能拿玻璃器皿里的冷与上天安排来折磨整个世界的严冬相比较呢？”

“可以比较，可以！”华伦海特丝毫不让步，“温度计中的酒精或水银是活动的，把温度计放在室外可以表示温度的变化。酒精或水银柱的高度在冬天比夏天要低，没有一个冬天能使酒精或水银下降到像在这个混合液里一样低。”……

华伦海特送走了两位老人，继续研究温度计。1724 年，

他在皇家学会的刊物《哲学学报》上发表了制造温度计的方法，随即发表了有关实用温度计的第一篇论文。他当时所设计的温度计选择了两个固定点：结冰的盐水混合物的温度和人体的血液的温度，并把它们之间的间隔分为 96 度。在华伦海特后来发表的论文中，他又采取了不同的刻度法，其中最后一个刻度法后来则以他的名字命名。这个刻度法规定了三个固定点：冰、水和氯化铵的混合温度，用  $0^\circ$  来表示；冰、水混合温度，用 32 标出，水的沸点，为  $212^\circ$ 。

当华伦海特的温度计被荷兰和英国人所采用时，其他国家却一直看不到它的价值。而法国博物学家列奥米尔为了消除刻度不一致的困难，致力于制造一个既方便又能达到精确要求的温度计。他仅取一个定点，即雪的熔点为  $0^\circ$ ，而把酒精体积改变  $1/100$  的温度变化作为  $1^\circ$ ，这样水的沸点就为  $80^\circ$ 。但是，列奥米尔温度计的实用效果并不好，各种难于置信的读数都被显示出来。

1742 年，瑞典天文学家摄尔修斯在《对一个寒暑表上两个固定点的观察》一文中引入了百分刻度法。他用水银作测温质，研究了雪的融化点和水的沸点与大气压力的关系。在进行这个试验时，他将温标上这两个点之间分成一百个格，并把水的沸点定为  $0^\circ$ ，冰的熔点定为  $100^\circ$ 。后来他接受同事斯特雷姆的建议，也许是受到植物学家林耐的提醒，把这两个定点的标度值对调过来。

以上各种温度计中，摄氏温度计比较实用、方便。1948 年第 9 届国际计量大会，把百分刻度法定名为摄氏温标。它有两个定点：纯水在标准大气压下的沸点，冰在标准大气压下与由空气饱和的水相平衡时的熔点。1960 年第 11 届国际计量大会决定，把水的三相点温度作为热力学温标的单一定点，并定为 273.16K。

## 热与冷的感觉

前面说过，人们对冷与热的研究，首先是从感觉开始的，并逐渐发展到它的数值表示的量度、单位、测定的仪器等。这个过程中，感受所涉及的热现象也可以说是功不可没。不过感觉仅仅是感觉，当我们知道了冷与热的实际量度标准——温度时，再来看感觉，便可发现感觉到的与实际上的现象并不那么完全相同。

在严寒的冬天里，冰雪季节里的农家通常都在卧室里烧上了炕灶，从而使卧室里温暖融融，而没有取暖设备的门厅则相对室温较低。当你在卧室里呆了好长时间后出门厅时，感觉到的总是冷，至少也有一丝凉意，不过，你可别怨门厅太缺乏温暖。你若在外面的冰雪世界中玩了很久后进入门厅，便会立刻觉得暖融融的，无比舒服。同样是门厅，按理说温度是相同的，它也不会自己由冷变热，那为何感觉却是冷与热的截然不同呢？

原来，人和动物对热现象的触觉，虽然归根结底是与温度这个物质的内在属性相紧密关联，但并非是直接感觉到温度，而是与物体与人体表皮的热交换直接有关。温度比人体表皮温度高的物体，接触时能量就会从物体传给表皮中的热传感器，传到中枢神经系统，便形成了热的感觉，反之，温度比人体表皮温度低的物体，与表皮接触时能量就会从表皮传向物体，中枢神经系统得到的就是冷的信息，由此可见，冷与热定性地

说，仅仅是所说的物体与人体的比较温度高低，温暖的卧室里的人进入门厅，表皮温度较高，而雪地里的人进入门厅，表皮温度较低，故而会形成冷与热的相反的感觉。

人的感觉所区分的冷、凉、热、温暖，实际上是对环境或物体与表皮温度相差的大小的概分。如果温度大大低于表皮的，表皮传给物体热量的速度就因温差大而快，失去热量速度快在表皮传感器的反映下就是冷了；如果物体温度只是略微低于表皮的温度，那么，因为温差较小，表皮失去能量的速度就相对慢得多，人体所感觉到的冷的程度因而也就轻得多，仅仅是感觉到凉快而已。反之，如果环境或物体温度远高于表皮的温度，它们与表皮接触时，大量的热量就因为温差大而以较快的速度传递给表皮，热或者说烫的感觉便非常显著了，而温度只略微高于表皮温度的物体在与表皮相接触时，温差就比较小，能量传递给表皮的速度就较慢，我们就不会感觉到烫，而只是觉得温暖了。

由此可见，温度的高还是低，温差是大还是小，是我们感觉冷与热的界限以及冷与热的程度的直接原因。不过，我们有时接触到某些物体，譬如是一块铁块与一块木头，有时总觉得铁块比木头凉，或者总是铁块比木头烫，然而测量它们的温度却完全相同，这又是什么原因呢？

原来，虽然铁块与木头与表皮的温差是一样的，但接触后在很短的时间内，表皮与铁块和木头都会发生热交换而影响接触点的瞬时温度。由于铁块是热的良好导体，传热性能好、传热速度快，而木头则传热慢、传热性能差，是热的不良导体，因而表皮传给铁块的热量就比传给木头的热量容易扩散，瞬时升温就会低于木头接触点的瞬时升高，从而就以较大的温差而容易从表皮迅速地获取热量，从而给我们的感觉是相同温度的

低温铁块比木头要凉。同样，较高温度的等温铁块与木块，则由于铁块易于传热，热量就轻易从各处传给接触点再传给表皮，因而表皮吸收热能的速度较快，感觉也就是铁块比木头更烫了。

现实生活中的热现象及人们对热的感觉还举不胜举，有的相对较简单，有的则较为复杂。不过掌握了热力学第零定律及温度定理，我们会把握住热与冷的奥妙，为我们理解这千奇百怪的热学现象打开了方便之门。

## 热的传递

许多现象表明，热可以从一处向另一处传递，这种过程称为热传递。热传递有三种明显不一样的基本方式：热传导、对流和辐射。

人们从生活和生产实践中早就熟悉了热传递现象。在我国古代的《尚书·洪范》篇中有“火曰炎上”的说法，指出火有炎热向上的基本性质。这里所说的“向上”特性，其实就是对于许多存在的自然对流现象的一种概括。东汉的王充在《论衡·寒温》篇中写道：“夫近水则寒，近火则温，远则渐微。何则？气之所加，远近有差也。”他认为热的传递是靠“气”的作用来进行的，这种作用和距离成反比。实际上王充所揭示的这一现象中既包含有热传导、对流，也包括有热辐射。

热传导和对流现象由于比较直观，因此人们早就利用实验方法对它们进行了多方面的研究，掌握了这两种热传递过程的一些具体规律。不过，对于热辐射的了解和研究却开始得比较晚。

早在 1673 年，英国科学家波义耳就发现在真空容器中放入炽热物体时，器壁上依然能够感到热。当然，他不知道这是热辐射的作用。“辐射热”这个术语是瑞典出生的化学家卡尔·威廉·舍勒首先提出来的。他在 1777 年出版的《论空气与火的化学》中，在叙述他所发现的氧（“火空气”）时曾经提及热辐射现象，指出热辐射可以穿过空气，玻璃镜不能反射热辐射，

但金属镜却可以反射热辐射。在舍勒之前，德国的天文学家和光学家兰伯在 1760 年出版的《光度测定法》中，根据冶金工人利用眼镜保护眼睛免遭强光灼伤的经验，曾指出玻璃能够抵挡住热辐射。

法国的皮克泰特对热辐射作了进一步的实验研究。他用金属做了两个凹面镜，彼此相距 25 米远面对面地放置。在一个镜的焦点放一支灵敏的温度计，在另一个镜的焦点轮流地放置被加热的和未被加热的且没有光泽的金属球，两镜之间放一隔板。当拿走隔板后，温度计的读数就随着所放的金属球的温度快速升高或下降。假如将温度计的小球涂成黑色，这个效应将更明显。不过如果将温度计放在焦点之外附近处，它却指示着不变的读数。这个实验使皮克泰特确信存在着和光线相同的“热线”，辐射热就是热线的传播。而且皮克泰特还证明，上述实验中的凹面镜不能用玻璃镜代替，玻璃板还会隔断热线的传播。

1791 年，瑞士的普雷沃斯特在皮克泰特实验的基础上又建立了他的“火的平衡”理论。他认为每个物体都放出热辐射并从周围的物体吸收这种辐射；当物体的温度大于周围环境的温度时，它因辐射而失去的热就多于它从周围介质所吸收的热；相反，较冷的物体从周围介质吸收的热则多于它辐射出去的热，从而实现了热从较热物体向较冷物体的传递。在热平衡时，这种通过辐射而在物体之间进行的热交换仍在进行着，不过每个物体吸收的热刚好等于它所辐射出去的热，因此物体的温度保持不变。普雷沃斯特从火同时产生热和光的事实中，得出了热辐射和光线相类似的思想，指出这种辐射按照普通光线的规律传播。

十年以后，普雷沃斯特的理论得到了英国人威廉·赫舍尔

的实验证明。赫舍尔用灵敏温度计检验了太阳光谱中不同部分的加热能力，结果发现，越向光谱的红端移动，升温效应就越强，在光谱的红端之外，依然发现了温度的升高。赫舍尔因此得出了存在着不可见射线的结论，这种射线按照光线的规律传播，而且产生很强的热效应，红外线就是这样被发现的。接着李特爾和沃拉斯頓又发现了紫外区不可见的射线，即紫外线。

赫舍尔的关于存在着不可见的热射线的结论受到了爱丁堡的约翰·莱斯利等一些人的反对。莱斯利是一个热质说的拥护者，因此他不接受辐射热和光之间类似性的见解。他把红外区的热效应看作是来自可见光光谱部分的空气流。不过戴维却用实验证明，在部分真空中的辐射要比在正常压力下的空气中大两倍，所以这里显然不会存在什么明显的空气流，这就以实验事实有力地反驳了莱斯利的见解。

辐射热的知识通过意大利的梅隆尼的研究而取得了明显的进展。他在 1850 年发表的《热色，或者热质的颜色》这本巨著里，阐述了他对辐射热的研究。他用更为灵敏的温差电堆代替温度计对热辐射进行研究，从而使他明确认识到，热辐射也像光线一样具有多样性。1843 年他就说道：“对视觉器官而言，光仅仅是一系列能被感知的热的征状；反之也一样，不发亮的热辐射可以证明是不可见的光辐射。”由此必然得出结论，光线必然伴有辐射热，所以月光也应当显示出热效应。经历了初期的失败，1846 年他在维苏威山上用一个直径为一米的多区域光带透镜，一个温差电堆和一个电流计，最终从月光中得到了微弱的热征状。

梅隆尼以类比为“透明度”之于可见光，从而创造了“透热性”一词用于热辐射，并且用实验检验了各种物质的透热性能。他的实验表明，岩盐对于热射线具有很大的“透明度”，

而冰和玻璃却强烈地吸收各种辐射热。而且他还测定了不同厚度的各种固体和液体的热透射率。梅隆尼的研究后来又为英国物理学家约翰·丁铎尔所发展。这方面研究的进展，终于导致了“黑体辐射”的研究，并成为“量子”概念产生的前提。当然，现在我们知道，“热辐射”的现象并不属于经常的“热学”研究的范围，因为它和我们通常所理解的热——大量微观粒子的杂乱运动——在本质上是有所区别的。只是在考虑热的传递时，我们才需要考虑热辐射这种方式。

## 混合量热问题

广泛存在的热传递现象，使人们很自然地产生了一种直觉的猜想：在冷热程度不同的物体之间，似乎总有某种“热流”从较热的物体向较冷的物体传递，因而引起物体冷热状态的变化。在蒸汽机的研制中遇到的汽化、凝结现象以及冶金、化学工业中涉及的燃烧、熔解、凝固等过程中引人注目的吸热、放热现象，也关系到“热流”的传递。因为对这种“热流”进行定量的测量和计算，是对热现象进行精确的实验研究所必须解决的问题。所以，从 18 世纪中叶开始，在热学领域内逐步发展起了“量热学”这个新的分支。

在量热学中最早期的工作是研究具有不同温度的液体混合之后的平衡温度问题。这个问题在如今看来自然是十分简单的，不过在 18 世纪前半叶，它却使一些很有才华的科学家陷入困难之中。其困难的根源在于要把描述热现象的两个最基本的概念——温度和热量——准确地区分开来，这并不是很容易做到的。

我们已经谈过，自从伽利略以来，经过大量的研究工作，人们制造出了越来越精确的温度计，并且在医学、热学和气象学的研究方面获得了广泛的应用。温度计的发明使准确地测定物体的冷热程度以冷热变化的幅度成为可能，无疑把人类对热的认识大大推进了一步。不过，温度这个物理量反映着热的什么本质呢？在当时的人们看来，物体的冷热程度理所当然地应

该反映出物体所含有的热的多少；因此，人们确信温度计测量的就是“热量”。在当时的一些科学著作中，很容易找到这类表述“物体‘具有多少度热’”“物体‘失去了多少度热’”；在温度计上显示不同度数的物体“它们原来的热都各不相同”。

荷兰莱登大学的医学和化学教授波尔哈夫就是从这种观点出发来考察混合量热问题的。在他看来，一定量的物体温度每升高一度都应当吸收同样数量的热，这个数值同它每降低一度时放出的热必然相同。波尔哈夫同华伦海特一起试图用实验来证实这个猜想。他们把  $40^{\circ}\text{F}$  的水和等体积的  $80^{\circ}\text{F}$  的水相混合，测出混合后的水的温度恰好是平均值  $60^{\circ}\text{F}$ ，说明冷水所吸收的热和增加的温度，刚好等于热水所放出的热和降低的温度，这同他们预期的结果完全一致。波尔哈夫由此而断言：“物体在混合时，热不能创造，也不能消灭”，这是混合量热中热量守恒的思想。

这个实验结果使波尔哈夫确信，同体积的任何物体，在温度相同的情况下都含有同样数量的热；在相同的温度变化下，它们吸收放出的热也应当一样。不过，当他们用不同温度的水和水银的混合实验来检验这个推断时，却得到了不同的结果。他们将  $100^{\circ}\text{F}$  的水和等体积的  $150^{\circ}\text{F}$  的水银相混合，混合后的温度是  $120^{\circ}\text{F}$ ，而并不是预期的中间值  $125^{\circ}\text{F}$ 。通过这个结果表明，等体积的水和水银温度发生相等的改变时，热的变化是不同的，由于这个事实是波尔哈夫所无法解释的，因此称为“波尔哈夫疑难”。

俄国的物理学家们遇到了相同的困惑。1744年，彼得堡科学院的克拉弗特在一份报告中提出了一个确定混合温度的公式：

$$X = \frac{\gamma a m + \delta b n}{\gamma a + \delta b}$$

式中  $a$ 、 $b$  是混合前两部分水的质量， $m$  和  $n$  分别是它们的温度， $\gamma$  和  $\delta$  是两个系数。本来这个公式已经引进了物质的热容量这一因素，完全可以作为求混合温度的一般公式。但是，克拉弗特从一个实验结果就武断地认为， $\gamma$  和  $\delta$  的数值分别是 11 和 8，因此使他的公式失去了普遍价值。这个严重失误表明，克拉弗特的思想中还没有关于物质热容量的清楚概念。

也是在 1744 年，罗蒙诺索夫的朋友，著名的俄国物理学家黎赫曼向彼得堡科学院作了一份关于混合量热法的报告（1745 年发表于《彼保堡科学院新评论》）从理论上得出了将几部分不同温度的水相混合后计算混合平衡温度的“黎赫曼公式”。用我们现在通常使用的符号可将这个公式表示为

$$t = \frac{m_1 t_1 + m_2 t_2 + \dots + m_n t_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

这里  $m_1$ 、 $m_2$ 、……、 $m_n$  是混合前各部分均匀液体（水）的质量， $t_1$ 、 $t_2$ 、……、 $t_n$  是各部分均匀液体的温度， $t$  为混合后的平衡温度。在推导这个公式时，黎赫曼认为质量为  $m_1$ 、温度为  $t_1$  的一份水其所包含的热为  $m_1 t_1$ ，因此这  $n$  份水混合之前所包含的热总量为  $\sum_n m_i t_i$ ，它应该与混合液体（水）包含的热（ $\sum m_i$ ） $t$  相等，即

$$(m_1 + m_2 + \dots + m_n) t = m_1 t_1 + m_2 t_2 + \dots + m_n t_n,$$

因此就得到了上述公式。

黎赫曼还指出，在运用这个公式求混合温度时，必须注意到容器的质量和温度，周围空气的温度以及实验进行的时间等情况；为了减小误差，必须采取严格的预防措施，以消除外界

因素的影响。不过，人们不久就发现，黎赫曼公式仅适用于不同温度的水的混合（或者其他相同物体的混合）。在把它应用于冰水混合的情况时，得出的混合温度就比实际测定的温度高得多，从而显露出了黎赫曼量热理论的缺陷。

热学研究的伟大先驱约瑟夫以其对量热学基本概念的准确分析，赶走了笼罩在这个领域里的迷雾。

大约在 1757 年前后，布莱克重新审查了波尔哈夫等人的工作，并重复了他们的实验。再次证明相同重量的两份不同温度的水相混合，混合温度正好是它们的中间值；而把相同重量的热水和冷的水银混合起来，混合温度却更接近于水而不是水银的温度。这个事实说明，不同物质的温度变化与热的变化并没有相同的比例关系，一定量的水冷却一度所释放的热要比等量的水银加热一度所吸收的热多些。“波尔哈夫疑难”产生的原因，在于他假定了同体积的两物体在温度相同时也包含了等数量的热。布莱克指出：这是“把问题看得太马虎了。这是把不同物体中热的量和热的强度或集度相混淆了。很显然，这是不同的两件事，在研究热的分布时，我们应当经常加以区分。”他断言，同重量的不同物质在发生相同的温度变化时之所以会有不同的热的吸收或释放，是由于不同的物体对热具有不同的“亲和力”。因此他极力主张将热和温度两个概念区分开，分别称为“热的量（热量）”和“热的强度（温度）”。

应该指出：在布莱克之前，法国物理学家阿蒙顿已经指出，温度计测量的并不是热量，而是物体的受热程度。不过直到布莱克区分了两个概念之后，才澄清了这方面的混乱。说明在人类认识的发展中，要搞清楚某个基本概念并不是很容易的，但一经辨别清楚，就会使科学得到飞速进展。事实上，正是由于正确地区别了热量和温度这两个概念，布莱克自然地引

出了“热容量”的概念。他把各种物体在改变相同温度时的热量变化叫作这些物体“对热的亲和性”，“接受热的能力”或者简称“热容”。实验表明，取同样重量的一份水和一份水银，给它们输入同样的热量，水银的温度变化远比水的温度变化显著得多，这说明水“接受热的能力”远高于水银“接受热的能力”。他的学生伊尔文正式引入“热容量”这一术语，表示物体温度变化一度时的热量变化。“比热”这一术语是伽托林引入的，表示单位重量的某种物质在温度改变一度时而改变的热量。波尔哈夫的实验证明，水银的比热比水为小。

布莱克根据他的发现重新表述了热量在几个物体之间重新分配时总量保持不变的概念。他写道：“当加热后的水银（ $150^{\circ}F$ ）与热水（ $100^{\circ}F$ ）相混合时，混合物的温度降为  $120^{\circ}F$  而不是  $125^{\circ}F$ 。这样，水银冷却了  $30^{\circ}F$  而水的温度升高了  $20^{\circ}F$ 。不过，水所得到的热量却同水银所损失的热量相同。”综合这些成果，假如以  $c$  表示物质的比热，正确的混合量热公式则应表为：

$$t_{\text{mix}} = \frac{m_1 c_1 t_1 + m_2 c_2 t_2 + \dots + m_n c_n t_n}{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_n c_n}$$

差不多在同一时期，瑞典的维耳克也在从事着量热学的研究，他好像是独立地引入了“比热”概念。他指出，假如把水的比热定为 1，就可以通过水和其他受热物体混合时温度的变化计算出该物体的比热。

## 潜热的发现

因为布莱克等人区别了热量和温度两个概念，并引入了热容量和比热概念，正确的混合量热公式和几个物体进行热混合时热量总量保持不变的观念终于建立起来。不过，随着量热学的进一步研究，人们发现前面所述混合量热公式并不经常适用的；在某些热学过程中，部分热量似乎“失掉”了。

我们知道，在通常情况下，物质的存在形式有三种状态，即固态、液态和气态。在一定条件下，物质可以从一种状态转变为另一种状态。此种物态变化在物理学上称为“相变”。在我们居住的地球上，水的三态变化实现很容易，因此物态变化是人们早就熟悉的现象。

人们在研究相变时，发现了一个奇特的现象。

1754年冬天，德留克在巴黎做实验时，把温度计插入装有水的容器中，待水完全凝固成冰后，将容器放到微火上慢慢加热。德留克发现，开始，温度示数缓慢上升；不过当冰开始融化时，虽然继续加热，温度示数却保持不变，直到冰完全溶解后，温度示数才重新缓缓上升。那么，在这段时间内冰所吸收的热量到哪里去了呢？德留克设想，热量必是以某种形式被束缚起来了。他又以适量的水和冰混合起来进行实验，得到了相同的结果，即一部分热量好像“消失”了。

在德留克的发现发表之前，布莱克也独立地作了类似的实验。他把  $32^{\circ}\text{F}$  的冰块与等量的  $172^{\circ}\text{F}$  的水相混合，结果发现，

平均温度不是  $102^{\circ}\text{F}$  ,而是  $32^{\circ}\text{F}$  ,其效果仅是冰块全部融化成水。布莱克因此作出结论：冰在熔解时,需要吸收大量的热量,这些热量使冰变成水,不过并不能引起温度的升高。他还猜想到,冰熔解时吸收的热量是一定的。为了弄明白这个问题,他把实验反过来做,即观测水在凝固时是不是也会放出一定的热量。他把摄氏零下  $4^{\circ}$  的过冷却的水不停地振荡,使一部分过冷却水凝固为冰,结果温度上升了;当过冷却水完全凝固时,温度上升到摄氏零度,表明水在凝固时确实放出了热量。进一步的大量实验使布莱克发现,各种物质在发生物态变化(熔解、凝固、汽化、凝结)时,都有这种效应。他曾经用玻璃罩将装有酒精的器皿罩住,把玻璃罩内的空气抽走,器皿中的酒精就快速蒸发,结果在玻璃罩外壁上凝结了许多小水珠。这说明液体(酒精)蒸发时要吸收许多的热,所以使玻璃罩冷却了,外壁上才凝结了水珠。

布莱克用一个很简单直观的办法来测量水汽化时所需要的热量。他用一个稳定的火来烧一千克零摄氏度的水,使水沸腾,然后继续烧火,直到水完全蒸发掉。他测出使沸腾的水完全蒸发所烧的时间,是使水由  $0^{\circ}\text{C}$  升温到沸腾所烧的时间的 4.5 倍,由此表明所供热量之比为 100:450。这个实验当然是很粗糙的,所测的数值也有很大的误差;现在的测定表明这个比值为 100:539。布莱克还用相似的方法测出,熔解一定量的冰所需要的热量,和把等量的水加热  $140^{\circ}\text{F}$  所需要的热量相等(相当于加热  $77.8^{\circ}\text{C}$  所需要的热量),这个数值也偏小了一点,正确的数值为  $143^{\circ}\text{F}$  (相当于  $80^{\circ}\text{C}$ ),不过在当时,这种测量结果是很难得的。

布莱克由此引入了“潜热”概念。他认为,物体在发生状态变化时,物质的微粒和热流之间会发生某种准化学作用。比

如，一定量的热同冰块内部微粒相结合时，就会使冰微粒的结构松散，使其融化为液体；同样，一定量的热同沸水中的微粒相结合，就能进一步使微粒的结构松散而变成蒸汽。在发生这种变化时，一部分原来是“活动的热”就变成“化合状态的热”而“潜藏起来”，而不再显示引起物体温度升高的热效应；当这个准化学作用沿着相反方向进行（凝结、凝固）时，这些热又会重新分解出来，所谓“潜热”，就是能够“隐藏的热”。

潜热的发现，使“热量守恒”的观念进一步得到证实；但同时也明确了，前述混合量热公式并不适用于冰水混合的情况。或者更一般地说，这个公式只在不发生物态变化的情况下才是适用的；而在包含有相变的过程中，则必须考虑潜热的吸收和释放。当然，如果按照现代的观点，其实并不存在什么“潜热”，而是在相变过程中发生了能量形式的转换，即热这种形式的能转变为物质粒子间的势能，这就是“熔解热”和“汽化热”的实质。

## 拉普拉斯冰量热器

著名的法国化学家拉瓦锡延续了布莱克的工作。1783年，他同法国物理学家拉普拉斯一起，研究了燃烧热和比热问题。他们对比热概念下了十分明确的定义，在论文中写道：“质量相同温度相同的两种物质，要使它们的温度升高同一数值，所需的热量是不一样的。如果把单位质量的水温升高一度所需的热量作为标准，那么具有一定质量的其他任何物质，在升高一定温度时所吸收的热量，也就能够用这一标准的若干倍来表示。”

拉瓦锡和拉普拉斯依据布莱克的潜热理论并模仿布莱克和维耳克用的冰溶解的方法，设计了一个冰量热装置。他们把摄氏零度的冰做成一个中空的冰球，球内放入具有一定温度（高于零度）的物体，而且尽量做到使整个装置与外界绝热。球内物体的温度会渐渐下降，球内壁的冰也慢慢溶解，直到球内物体的温度降到零度，物体的温度就达到稳定，球内的冰也就不再融化。这时只要测出融化的水的质量，便可得出物体从原来的温度降到零度所放出的热量，这个热量等于这些水由冰溶解时所吸收的热量（溶解潜热）。由物体的质量便能非常容易地计算出它的比热。

这个装置经进一步的改进，即现在被称为拉普拉斯冰量热器，它的原理是非常简单的，仅包含冰溶解过程（因而要考虑溶解潜热）的混合量热问题。他们利用这种方法，测定了一些

物质的比热。

在测定气体的比热时，他们让一定量的被测气体流过冰量热器，测出气体进入与流出量热器时的温度以及融化的水，就能够计算出气体的比热。

拉瓦锡与拉普拉斯还利用这套装置，测量了物质化学反应中放出的热量以及物体燃烧和动物呼吸所散发的热量。在测定燃烧热和动物呼吸热时，他们把被燃物或动物放在冰球内。不过，无论是燃烧还是呼吸，都需要外界的空气，也就是冰球必须与外界的空气相通，这就会引起测量误差。为了消除误差，他们把空气预先冷却到冰室的温度，然后再输入冰球。他们用这种方法测得：

- 1 磅磷燃烧所放出的热量能融化 100 磅冰；
- 1 磅木炭燃烧所放出的热量能融化 96 磅冰；
- 1 磅橄榄燃烧所放出的热量能融化 148 磅冰。

这些数据的误差是非常大的；不过，拉瓦锡却用这个方法比较了烛焰和动物呼吸所放出的热量与放出的二氧化碳之比，发现这两个比值近似相等，这对于弄清动物热的来源与呼吸的本质有着重要作用。拉瓦锡的这个研究结果，对于能量转化与守恒定律的建立，也具有重要的启发意义。

## 是谁撑起了世界

世界是有形的，能够触摸能够看见的。放眼从窗户向外望去，近处，未名湖畔初染新绿的杨柳柔若无骨，凭水扶风，却也是柔而坚韧，再狂暴的风也别想切断柳条与生命之根的脉息相通。绿柳之巅，赫然耸起博雅古塔，素灰色的砖和瓦的堆砌，却也在历史与自然的风雨中巍然挺立，千百年来仍惟我自尊。一只只飞鸟在绿树巅凭风峭立，忽然间一声声清脆的鸣叫，振翅飞起，在巍峨的塔影里盘旋，在夕阳的余晖下自由自在地飞翔。

好一幅世中美景，不过，这个奇妙的世界是由什么塑成的呢？柔韧的，坚固的世界，凭风雨肆虐而能身形坚挺，这是什么东西的功劳？对于这个问题，或许大多数人可以都不假思索地回答出正确的答案：固体。不错，是固体，是千姿百态的固体塑成了我们这个有形的世界，是坚固的固体支撑起了这个世界，坚强地，不屈服于压力，不为风雨而折腰，这一切，正是因为构成这个有形世界的物质具有了固体的通性。

固体是坚硬的，或者是柔韧的，虽然用力能使固体发生形变，比如折断、弯曲、拉长或下凹与缩短等等，但是，固体不论在多么大的压力之下，都不会被明显地压缩（除非本就是疏松而不致密的物块）。这所有的一切，根源都来自于固体的微观结构。固体也是由原子、分子、离子等无数微观粒子构成的，按照分子运动论的观点，固体中的微观粒子也在永不停息

地作无规则的热运动，不过，因为固体中微观粒子之间的距离极小，粒子与粒子之间几乎是紧密堆积而少有空隙，就像堆在一块的乒乓球那样，四周没有多少自由运动的空间，因此只能绕着一个固定的平衡位置作不规则、轻微的的振动。正是因为堆积密的微观特点，固体物质通常都具有不流动、不可压缩的一定的体积与形状，具有一定的韧性、硬度、抗拉抗压抗折等各种较强的机械性能。因此，我们踏在地球表面上，能够丝毫不为陷下去而发愁；平常怕掉在河中喝个饱的人，冬天在冰雪季节里也能够放心大胆地在河里的冰面上踏着极薄的冰刀自由自在地滑行了。

那么，固体就完全不可能膨胀或者收缩了么？答案好像是肯定的。摆在我们房间里的家具与物品，一年四季似乎并没有什么明显的不一样。不过，从科学上讲我们的桌椅甚至是我们的钢笔不仅仅是在夏季与冬季里有着体积、长度等方面的不一样，就是一天的早晚之间，它的大小也在随时刻温度的变化而变化，物体的长度、体积等形状因素随温度的升降而缩小或增大的现象，是一个客观存在的普遍的现象，我们称为热胀冷缩。热胀冷缩对于气体是有的，而且表现特别明显；对于液体也是有的，表现就不那么明显，但也容易在定量的实验中观察出来（如温度计水银柱的变化指示刻度）；对于固体，它仍然是有的，只是极不明显，我们也极易受我们自己的眼睛的欺骗而已。温度升高了，固体物质内部微观粒子的振动将加剧，微粒间隙会相对略有增大，宏观上也就会有一个不大明显的膨胀；反之，温度降低，也便会有固体的冷缩过程。因为固体的膨胀会对阻止它膨胀的周围造成非常大的压力，而这个大压力极具有破坏性，所以，铁轨的接头、混凝土板的接缝总会留下空隙，这就是为了防止夏天的烈日曝晒所引起的“轻微”的热

膨胀会破坏铁路、桥梁或者其他建筑物。

在固体中，形形色色的物质构成的固体又按照它的微观结构及宏观表现分为晶体及非晶体。晶体是受热升温到一个特定的温度时能转化为液体的固体，对热传导等表现为各向异性，微观粒子的排列堆积结构则具有微观周期性，譬如食盐晶体、冰晶体等；非晶体则没有特定的转化为液体的温度，对热传导等表现为各向同性，微观粒子的排列不具有周期性或者只具有局部的周期性，全局排列杂乱无章。晶体在受热时转化为液体的特定温度称为固体的熔点，是晶体物质的一个特征数值。在熔点温度以上，晶体物质就再也无法以固态形式存在，而成为流动的液体了。

## 流动的世界

冰是坚固的，其内部的水分子排列致密，只能围绕平衡位置作轻微振动，因此是典型的固体物质。然而，如果我们加热一块冰，温度到达  $0^{\circ}\text{C}$  时，冰便会由固体逐渐转化为液体——水，此时虽然吸收热量，但是温度并不会升高，这是由于什么原因呢？

原来，当冰受热而达到它的熔点时，内部的水分子微粒因为吸收了能量，分子运动更加剧烈，有的分子已经具有足够的能量摆脱平衡振动位点对它们的束缚而慢慢地自由移动；这时吸收的热量越多，就会有越来越多的分子由束缚振动变为自由移动，固态的冰便越来越多地融化为液态的冰。当冰全部化为水时，吸收的热量才会使水温高于  $0$  了。

正是因为分子无规则热运动的加剧，由束缚振动变为自由的渐渐移动，分子间距也略有所增加，从而液体与固体便有了本质的性质差异。水不再具有冰的硬度，强度、韧性、抗拉抗折、不容易形变等机械特性，代之以流动、易形变等特性。正是由于这个奇妙的转变，我们能够看见一个流动的，充满活力与灵动的奇妙的流体世界，也正是由于这个奇妙的转变，我们能够在冬天里滑冰之后，还可以在酷暑里在清凉的水中自由自在地游泳，享受另一种无拘无束的感觉。

水，以及其他液体与固体、气体相同，具有热胀冷缩的性质，而且液体比固体随温度变化而变化的程度更大。所以，当

我们在一个有刻度的烧杯里加热冷水时，以前处于刻度线处的水面就会因受热而迅速高过刻度线，这便是因为水的膨胀比玻璃这种固体的膨胀更显著的缘故，也由于液体受热膨胀的特性以及流动性，使它对于热的传递除了像固体那样的热传导方式之外，更以对流为主要传热方式。加热烧杯里的水，底部的水直接受热后膨胀，密度减少而上浮，原来在上面的冷水则密度较大而下沉，从而受热膨胀，如此循环，热水总是不停地向上离开下面的热源，凉水则不停地向下接近下面的热源受热，于是便形成了环流，一杯水便很快就烧开了。

不过，值得一提的是，水的热胀冷缩现象有它自己的特殊性。普通的物质，温度高的液体密度小，降温则密度增大，体积缩小，再降温甚至凝固成固态时，密度更大，体积更小甚至产生一个大的飞跃。水呢，在  $4^{\circ}\text{C}$  以上，它和普通液体一样遵循热胀冷缩规律，不过在  $4^{\circ}\text{C}$  以下降温时，它的体积非但不缩小，反而膨胀增大，密度减小，直到变为冰亦然。这就是水的反常膨胀现象，由这个现象能够看出，水在  $4^{\circ}\text{C}$  时有密度最大值， $4^{\circ}\text{C}$  以上或  $4^{\circ}\text{C}$  以下密度都小于这个最大值，冰则不像一般物质那样固体比液体密度大，而冰的密度则比水小，由水结冰时体积会增大。你假如不相信，可以作一个小实验来令你信服地证明这一点：冬天的冰雪季节里，装一小瓶水并塞紧，放在室外搁一夜。第二天早上你再去看它时，你会发现由于一夜  $0^{\circ}\text{C}$  以下的冰冻，瓶中的水早已全部冻成冰了，可怜的小瓶被胀得四分五裂残不忍睹，只是冰却奇妙地保持着瓶的原形，不过，在这里你不必为小瓶的惨状而悲伤，只要想想冬天在河面上冰面滑行的趣味，再想一想冰面下水中的游鱼能在温度较高的水层自由自在地嬉戏往来穿梭，你就该高兴起来，设想一下若不是水的反常膨胀，冰将结在水下，河水如果没完全冻成一

个大冰棒便根本没有滑冰的快乐了，而如若河流变成了一个完全的大冰棒，河中的可怜鱼儿们岂不成了冰块中的化石了！

当液态水继续受热而升温时，水分子的能量便越来越高，无规则的热运动也就越来越剧烈。慢慢地，一部分具有足够能量的水分子不再甘于缓慢的自由游动，而是摆脱了周围液相水分子的束缚，飞出水面，在空中无规则地快速地飞行起来（当然也可能由于飞行方向的失控——其实根本是无控而一头扎回水面下重新成为水的俘虏），此时它们的分子间距远大于本身分子的大小，就已经成为水蒸气——水的气态了。当水被加热到  $100^{\circ}\text{C}$  时，大量吸收的热使大量的水分子同时飞出水面成为气体，于是水就沸腾了， $100^{\circ}\text{C}$  这个水由液态剧烈转化为气态的特征温度就被称之为水的沸点。在沸点上，水从液态转化为气体分子这个过程称为沸腾，低于沸点时，少量水分子也可以转化为气体分子，此过程便称之为蒸发。其他液体与水相同，通过蒸发与沸腾的过程，都变成了另外一个物相状态——气态。

## 摸不着的世界

气体分子在空间中快速地进行着无规则的热运动，因为分子之间距远大于分子本身的尺寸大小，分子间的空隙特别大，分子就好似无数漂浮在无穷真空中的乒乓球，快速地无规则地飞行着，突然与某个或某些别的分子碰上了，便改变了方向，向另一个方向快速地掠去。

因为气体分子的间距大，运动速度快，分子非常自由，因此它除了比液体具有更大的流动性之外，它还有着与固体及液体完全不一样的特性——可压缩性。固体及液体的机械特性在气体身上全部失去了，气体变成了摸不着的世界，而且差不多是无孔不入。对某种材料包围着的气体，像一个容器中用自由活塞密封起来的气体，当我们在塞子上方加上一个砝码或别的重物，也就是通过活塞对气体施加压力时，气体体积将会明显地缩小；而当你将活塞上的砝码移去时，它却因压力减少而自动将活塞往上顶一些位置，体积增加。因此，气体具有极为明显的可压缩性。

也正是因为气体模型的相对简单、气体分子间的相互作用相对微弱甚至可以完全忽略，从古到今，科学家们对气体进行了极为全面深入的研究，并取得了一些突破性的进展，揭示了气体世界的奥妙，以及气体在外环境作用下的各种内在规律。在这当中，气体定律应该说是最为主要的成就。

1802年，盖·吕萨克把自己的精力集中到早已着手研究的

问题——气体的热膨胀性质。当时，随着氧、氮等气体发现之后，很多科学家都进行了测定不同气体热膨胀系数的实验，但各种测量却得出了不一致的结果。

原因何在？勤于思考的盖·吕萨克不断进行实验观察，不断提出各种假设，终于给他找到了问题的症结，原来“这些实验测量之所以不够准确，是因为仪器里面有水”。

他指出“设一装满空气的球，其中存有几滴水，若球的温度升到水的沸点的温度，则这几滴水便会化成大于原体积约 1800 倍的气，所以，球中的空气，大部分就会被排出。因此，当球中的气冷凝到小于原体积 1800 倍时，人们必然把这球中仅存空气的膨胀量估计得过高，由于球在沸点时，只有这种空气充塞它的全部体积。若球的温度不到沸点的话，此种不准确的原因也仍然存在，……由于在这种情形之下，水还没有完全汽化，但空气将随着温度的上升而吸收愈来愈多的水汽，从而使该空气的体积，除了因热而增加外，还因吸收这水汽而获得愈来愈大的增加。”

盖·吕萨克努力使各种实验气体充分干燥，从而得出了气体热膨胀系数的一样数值。他写道，这些实验“是我以最大的细心进行的，它们清楚地表明，大气层中的氧气、空气、氢气、蒸气、氦气、氮气……在相同的温度升高下同样均匀地膨胀，……我能够得出这个结论：通常地说，一切的气体都会以同样的比例发生热膨胀。”

因此，他就得到了著名的盖·吕萨克定律：一定质量的气体，在压强不变的条件下，温度每升高（或降低） $1^{\circ}\text{C}$ ，增加（或减小）的体积相当于它在  $0^{\circ}\text{C}$  时体积的  $100/26666$ （现在公认的值是  $1/273$ ）。

换一种方式，盖·吕萨克定律也能够表述为：一定质量气

体，在压强不变的条件，温度每升高（或降低） $1^{\circ}\text{C}$ ，它的体积就增加其原来数值的  $\alpha$  倍，也就是：

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2}$$

式中  $V_1$  和  $V_2$  分别表示在压强不变时，定量气体在温度  $t_1$  与  $t_2$  时的体积， $\alpha$  称为膨胀系数。

盖·吕萨克同时还论述了另一条定律，它确定了在体积不变时定量气体的压强随温度呈线性变化的关系。后来发现，早在 1787 年，法国科学家查理就已经得到了气体的压强和体积随温度的升高而增大的定律，但没有及时发表他的成果。因此后来就把气体的压强随温度膨胀的定律称之为查理定律。

## 蒸汽机的革命

热力学第一定律便是能量守恒与转化定律，它的诞生是以一定的社会物质生产条件为前提的。蒸汽机的改进与广泛应用，对蒸汽机中能量转换问题的研究，是人们通向能量原理的重要桥梁之一。

16、17 世纪以来，伴随着工场手工业的发展，煤渐渐代替了木材而成为主要材料，因此推动了煤矿的开采。为了解决矿井的排水问题，各个矿山都要养好多马，用马轮番施动排水泵。在 17 世纪初，英国一些矿山养马达 500 匹之多，这是既麻烦又费钱的，于是便刺激人们提出利用蒸汽动力的要求。

事实上，古代早就知道了热和蒸汽能产生动力，在我国古代和古希腊都曾经出现过把热能转化为机械能的小型装置。公元前，亚历山大里亚的赫隆便是把蒸汽作为动力制成他的“小涡轮”的。旋转空心球上安装有对称的两个弯管喷口，进入球中的蒸汽从方向相反的两个喷口射出，球便绕轴旋转。当时人们只是用此种装置来作游戏耍乐；教堂则利用它来哄骗信徒——把火放在祭坛上时教堂的门就“自动”打开，让礼拜者感到惊愕。到了 16 世纪以后，人们才因为生产需要而先后设计和研制蒸汽动力装置。

1696 年，英国矿山技师托马斯·萨弗里提出一种被称之为“矿工之友”的蒸汽水泵。它是由汽缸、蒸汽锅炉、冷水箱、抽水管和排水管组成的。抽水时是依靠汽缸内蒸汽冷凝的真空

吸力，排水时依靠锅炉内蒸汽的压力。这个机器的一切阀门都是由人力来控制操作的。它的热损失较大，运行可靠性非常低，工作起来速度特别慢；同时因为需要高压蒸汽，锅炉和管道经常漏气，还容易发生爆炸。整套装置只有安装在深井内才能工作，一旦发生故障，极容易被井水淹没。所以，这种机器没有被广泛采用，不过它的出现已经是了不起的技术发明。

在此之前，曾作过惠更斯的助手的法国人丹尼斯·巴本，受到惠更斯研究的“火药机械”的启发，产生了用蒸汽取代火药作为动力的想法，于 1690 年制成了一台具有汽缸和活塞的实验性蒸汽机。水在汽缸内直接被加热变成蒸汽，推动活塞上升；在活塞到达顶点时，再向汽缸内喷水，蒸汽凝结而降低压强，活塞便下降。

巴本的研究报告使英国的托巴斯·纽可门受到特别大启发，在英国皇家学会的鼓励下，纽可门研究了巴本和萨弗里设计的简单的蒸汽机，1705 年发明了自己的大气压力式蒸汽机，并于 1712 年应用于矿井排水和农田灌溉。纽可门的蒸汽机结构，封闭的圆筒式汽缸里的活塞，系于摇杆的一头，则摇杆的另一头连接着排水泵。蒸汽依靠水泵连杆的重量推动汽缸内活塞上升，切断蒸汽后，朝汽缸内喷入冷水，蒸汽冷凝，活塞下降，于是摇杆带动水泵抽水，因为它能够通过摇杆将蒸汽动力传给其他工作机，并不仅仅局限于抽水，因此它是一个广义上的把热转变为机械力的原动机，是蒸汽机发展史上的一次重大突破。但是，此种机器仍然有动作慢、耗煤量大、较笨重、效率低等缺点，而且只可以作往复直线运动，限制了它的应用。

18 世纪初英国的冶金、纺织、造船、军火等工业迅速发展。以纺织业首先兴起的技术改革大大提高了生产力的水平，动力不足的问题也日渐尖锐地反映出来。真正有巨大工业效用

的蒸汽机，便是在这种社会需要的推动下在英国首先实现的。

蒸汽机的革命是由詹姆斯·瓦特完成的。瓦特自幼便在他父亲的熏陶下培养了器械制造的才能，20岁时到伦敦学会了制造船舶器械的工艺，1760年，他在格拉斯哥大学开设一间修理店，修理各种仪器。他在修理纽可门机的过程中熟悉了它的结构并了解了它的缺点。瓦特把纽可门机的耗煤情况告知了格拉斯哥大学教授布莱克，布莱克就用他发现的量热学原理解释了纽可门机耗煤量过于大的道理。他指出，纽可门机有相当大的时间和热量的浪费，原由是冷凝系统和汽缸合为一体，活塞在完成每一次冲程时，汽缸都必须冷却一次；在作下一个冲程时，又要通入蒸汽重新使汽缸和活塞加热，因此大量的热量（因而燃料）白白地浪费了。在布莱克的启发下，瓦特开始去寻求一个克服此缺陷的办法。

瓦特在汽缸外面单独装上一个用来冷却废汽的冷凝器，从而使汽缸始终保持高温状态。1769年，瓦特终于制成了单向作用的新蒸汽机，它要比功率一样的纽可门机省煤四分之三左右，这当然是特别明显的优点。瓦特的这一成就，是自觉地应用当时的热学理论指导实践的结果，显示了科学理论的作用。

瓦特没有在这个成绩面前止步，他看到因为蒸汽只从一面推动活塞，仍然造成了时间和燃料的浪费。能否让蒸汽从两面交替地推动活塞呢？这个想法在1782年实现了。此种双向作用的蒸汽机的汽缸在活塞的两侧是密闭的，活塞上下的空间运用阀门轮流与蒸汽输入管道以及排气管道连通，使活塞以更大的动力作往复运动。后来瓦特利用一种独特的形式的齿轮传动机构，将活塞的直线运动转变为旋转运动，使此种动力机有了广泛的用途。瓦特还在机器上装上离心式调节器和飞轮，使蒸

汽机在发生颤动和负载变化时仍能保持稳定转动。第一批双向作用的蒸汽机的功率为 20—50 匹马力，燃料消耗只相当于同样功率的纽可门机的七分之一。这马上吸引了顾主的兴趣，很快就在英国的采矿、纺织、冶金和交通诸方面得到广泛应用，而且被输出到欧美其他国家。

19 世纪中叶，蒸汽机得到了进一步的改进，高压蒸汽机也被制造出来，它的功率达到三万马力以上。此时，无数烟囱的黑烟，宣告了蒸汽时代的到来！蒸汽技术的成就，为热转化为机械运动作出了令人信服的证明，从古代发现的摩擦生热开始，到蒸汽机的出现，热与机械运动的转化完成为一个循环。所以，蒸汽机的发明和应用，为能量守恒原理的确立提供了一个重要的前提。

## 永动机的骗局

每个国家都有一部人人必须遵守的宪法，自然界同样也有，这便是焦耳等人发现并且建立的能量守恒和转化定律。

自然界中的所有物质，无一例外地全部具有能量。尽管能量的表现形式五花八门，但归纳起来，不外乎有六类，便是机械能、电能、热能、化学能、光能和原子能。

其中化学能是一种很隐蔽的能量，它不可以直接用来做功，只有在发生化学反应的时候才释放出来，变成热能或者其他形式的能量。比如煤和石油的燃烧，炸药爆炸以及人吃的食物在体内发生化学反应时候所放出的能量，都属于化学能。原子能是原子核所具有的能量。自然界里的物质都是由原子构成的，原子核里又有原子核，因此都含有原子能。原子能做功的本领和储藏的丰富，都在其他能量之上。

各类能量之间可以相互转化。例如，蒸汽机消耗热能，转化成机械能；发电机消耗机械能，转化为电能，而电动机恰好相反，消耗电能，转化为机械能；光照到黑色的物体上，光能被吸收，转化为热能；原子弹爆炸，释放出原子能，转化成热能、光能等。各种形式的能量在转化过程中，总能量始终保持不变。例如电动机在工作的时候，输入的电能不可能都变成有用的机械能，因为摩擦、电阻等的存在，有一些电能还会变成无用的热能，但是不论转化成什么形式的能量，这些能量的总和，必定等于所消耗的电能。这便是说，能量绝不会无缘无故

地消灭，同样，能量也决不会人为地创造出来的。那种希望通过能量的转化愈变愈多的想法，纯粹是幻想。

总之，在自然界中物质的任何一种形式的能量，在一定条件下都可以用直接或间接的方式，转化成其他形式的能量，在转化中，总能量保持不变。这便是能量守恒和转化定律。用恩格斯的话来说，这是一条“绝对的自然规律”。他还把此一定律同细胞学说、进化论一同称为对建立辩证唯物主义自然观“具有决定意义的三大发现”。

大家或许都听说过“永动机”，这是一种不需要任何能量，自己就可以做功干活，并且永远运动的机器。但是，此种“永动机”是不是能制造出来呢？像永远找不到不吃草的好马一样，不需要能量而永远运动并且可以做功的永动机，也是不可能制造出来的。

自从中世纪有人设计出第一架永动机以来，各种各样的迷人的永动机方案，如浮力永动机、弹簧永动机、重力永动机、毛细管永动机等纷纷出现，有千万个之多，但是每个都成了不动机，原由很简单，由于它们都违背了能量守恒和转化定律。

“魔轮”，这是最早的永动机，第一个“魔轮”出现在 700 多年以前的中世纪。在一个轮子的边缘上，装了一些能够活动的短杆，每根杆的末端装了一个铁球。发明家说，不管轮子处在任何位置，右边的铁球总比左边的铁球距离轮轴远一些，根据杠杆原理右边的铁球总是向下压轮子，使它沿着顺时针的方向永远旋转不息。“魔轮”制造出来了，转动了没有呢？没有！问题便在轮子右边的铁球距离轮轴虽然总比较远，但是它们的总数却总比左边的要少，结果左右两边旋转轮子的作用刚好相等，互相平衡。

到了 17 世纪中期，一个叫伍斯特的人改进了设计，制造

了一个庞大的“魔轮”。轮子的直径大约 5 米，里面分成 40 格，每格放一个大约重 25 公斤的铁球。伍斯特说，因为分格板形状的特殊设计，轮子右边的铁球总比左边的离轮轴远，因此在它们的重力作用下。轮子应按顺时针方向不住地转动。其实这个“魔轮”还是转动不了的。

磁力——重力永动机，这是 17 世纪的英国人维尔金斯将重力和磁力作用结合起来设计而成的，立柱上放一个强磁体，斜面和圆弧面倚靠在立柱旁。斜面下端放一个小铁球，上端开有能够通过铁球的圆孔。发明家想：在磁力的吸引下，铁球沿着斜面向上滚，当滚到上端开孔的地方，因为重力作用便掉下来，并且沿着圆弧面加速向下滚，经过弯曲的地方回到斜面下端，之后又被磁体吸上去，这样循环下去，铁球不就永动了吗？但是，这同样是个荒谬的设计，首先，若磁体的磁性非常强，能够把斜面下端的铁球吸上来，那么当吸引到圆孔的时候，距离近了，吸力应该更大，铁球怎么不被吸引到磁体上去呢？其次，就算铁球由圆孔掉了下来，它将受到重力和磁力的共同作用，这两个力的方向是相反的，磁力又特别大，因此铁球根本不可能沿斜面作加速运动；就算已经运动到了下端，也决不可能绕过弯曲的地方滚到斜面上。使人惊讶的是，1878 年，经过改良的这个设计，竟然在德国获得了专利权！这在人们寻求永动机的漫长历史上这是惟一的一次。

从能量守恒的观点来看，上面这些永动机的设计都有一个相同特点，就是想不供给能量，创造出源源不断的能量来，这当然是不可能的；可是，要是先供给机器一定的能量，之后使它不停地运转下来，这该可以吧？不错，历史上的确也出现过很多先提供少量能量，以少易多，换得大量能量的永动机设计。但因为他们同样违反规律，最终仍是一些不动机。

发电机——电动机联合永动机，曾经吸引过不少人。有人设计了永动自行车，在前轮上安装一部发电机，利用其发出的电能来转动安装在后轮上的电动机，再用电动机带动后轮转动。这样，只要先转一下自行车前轮，就是先供给一点能量，让它带动发电机，转化成电能，自行车便成了名副其实的永动自行车，但这一种一本万利的“自行”，好景不长，只要开始的时候提供的能量消耗完，自行车也便自行停车了。

不论是无中生有的永动机，还是一本万利的永动机，都是没有的，不仅过去没有，现在没有，而且将来也永远不会有。若有人硬要说有，那只能是冒牌货，如科学史上多次出现过的欺世盗名骗局！

古往今来，曾经醉心于追求永动机的人不计其数，但是没有一个人成功。愚人进入了永动机的迷宫，认为走进了科学的殿堂，碰壁也不回头，一条道走到黑，最后落了个一无所获。聪明人误入迷宫，一些失败，便能吸取教训，迷途知返，从而真正跨进科学的大厦，做出卓越的贡献，焦耳便是这样的典范。能量守恒定律的创立，宣判永动机的死刑。它好似是一块路标，插在寻求永动机的十字路口，警告科学上的迷路者：此路不通！焦耳还用现身说法，向那些仍迷恋永动机的人发出忠告：“不要永动机，要科学！”

## “活力守恒”原理

机械运动是最简单的运动形式，因此在近代自然科学的发展过程中，以机械运动为研究对象的力学是最先达到体系化的一门学科。而在力学、尤其是作为它的重要组成部分的动力学的发展中，“活力守恒”此原理起到过独特的作用。到了 19 世纪中期，这个原理被发现是能量守恒原理的一个特殊情况，在赫尔姆霍茨等人确立他们的能量守恒观念中，全部直接起到了它的重要作用。

动力学的主要奠基者伽利略经过斜面和摆的研究曾经认识到，物体在下落过程中所得到的速度，可以使它重新回到原来的高度，但不会更高。这已经包含了重力场中机械能守恒的思想。1669 年，惠更斯经过完全弹性碰撞的研究表明：一个静止的物体同另一个与它有同一质量的运动物体碰撞时，后者会立刻静止下来，原来静止的物体却获得了这个速度前进。若两个质量一样的物体以不相同的速度发生正碰撞，则相互交换速度。这两个实例实际上表明了完全弹性碰撞中动能守恒。惠更斯还明确总结出：“当两个物体发生碰撞时，速度和质量平方的乘积之和，在碰撞前后保持不变”，也就是

$$m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2$$

式中  $v_1$ 、 $v_2$  是质量分别为  $m_1$ 、 $m_2$  的两个物体在碰撞之前的速度， $v_1'$ 、 $v_2'$  分别为二物体碰撞后的速度。惠更斯所引入的物理量  $mv^2$ ，在 1686 年被德国数学家、哲学家和物理学家莱

布尼茨称之为“活力”。莱布尼茨依据自由落体定律的计算结果认为，若用活力作为物体运动的量度，就能够得出整个宇宙中力（即“能”）不会增加也不会减小，它的总和保持不变的结论。1695年他又指出，路程和力的乘积与活力的增量成正比。

莱布尼茨的观点遭到牛顿的反对，牛顿认为若以  $mv^2$  作为运动的量度，那么整个宇宙的运动量并不是一个恒量。约翰·伯努利认为牛顿没有真正理解活力守恒法则，他说：“活力是守恒的，也便是说，一个或多个物体在作用前的活力，跟作用后的活力应该相等，因此我把它称之为活力守恒”。约翰·伯努利甚至还指出，在不完全弹性碰撞中，物体不能够完全恢复原状，有一部分活力看来是消失了，但是，在此过程中“碰撞使物体受到了压缩，活力能够看作是保存到压缩体里了，因此活力并没有丧失”。这便是说，活力的表面“丧失”，只是由于它转变为其他形式。到1738年，丹尼尔·伯努利则把活力守恒原理应用于流体的运动，得到了著名的“伯努利方程”：

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + P_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + P_2$$

其中  $\rho$  为液体的密度， $v$  为流速， $g$  为重力加速度， $h$  为液体的高度， $p$  为压强。从方程不难看出，它表示的恰是流体在运动中它的动能、势能和压力能的守恒。他指出，活力守恒便是“实际的下降等于潜在的上升”。到18世纪后半叶，瑞士科学家欧勒得出，在有心力作用下运动的一个质点，在它位于离引力中心有相同距离的任何位置时，其活力都是相同的。总之，到了1800年，物理学界已经普遍认识到：在一个以中心力作用着的物体系统内，活力仅仅取决于系统的位形和依赖于位形的力函数。

此历史表明，能量守恒思想能够追溯到相当早的时候。当然，上述这些论断都还不可以算作是对机械能守恒定律的确切表述，不过却为后人确立能量守恒原理提供了一个方面的基础。

伴随着动力学的进一步发展，渐渐形成了“功”、“能”等重要概念。

伽利略经常把力与路程的乘积称为“矩”，莱布尼茨则是从与“ $ph$ ”（重量与高度的乘积）具有等值的运动的思想出发，提出“活力”是运动的量度。不过，活力这个概念出现之后，除少数人以外，大都不受到重视并把它作为一个基本定量单位。更多的人则运用力与路程的乘积这个更具有力学直观性的量。从 1820 年起，在法国出版的一系列关于机械技术理论的著作和论文中，“功”这个概念渐渐成为一个独立的重要概念。尤其是在分析机器的运转过程中，功的概念是被作为一个基本参数看待的，显示出了其重要性。法国工程师萨迪·卡诺用升高的重物和升高的高度的乘积来评价机器的功效，他把此乘积称之为“作用矩”。法国数学家蒙日把功称为“动力效应”。法国物理学家科里奥利在《对机器效率的计算》一书中，坚决认为活力应表示为  $\frac{1}{2}mv^2$ ，由于这样一来它在数值上就会等于它所做的“功”，这便是如今所说的功能。法国工程师彭塞利大概是受到科里奥利的影 响，在《工程机械学导论》中明确地推荐了“功”这一术语，并明确地形成了用所做的功等于所产生的动能来表示的守恒定律。……总而言之，这一时期好多人都用力 和距离的乘积作为衡量发动机功率大小的标准。这样，“功”这一概念就由 19 世纪初科学家们重视动力机效率的探讨而被引入了物理学。

至于“能量”这个概念，最先出现于英国物理学家托马斯·杨在 1807 年出版的《自然哲学讲义》一书中，他指出：“在应用力学碰到的差不多一切情况中，对于产生运动而必要的功，并非和力矩成正比，而是与这个功所引起的运动的能量成正比”；“应该用能量一词来表示物体的重量或质量与速度的平方的乘积”。不过，他所提出的能量概念，在特别一段时间里很少引起人们的注意。直到 19 世纪 40 年代，人们仍然用“力”的概念来表示能量。

到了 1847 年，赫尔姆霍茨在他的《论力的守恒》中才对功与活力的关系作出了清楚的数学论证。他指出，举高一个重物需要做功  $mgh$ ，而物体在降落下来时又得到速度  $v = \sqrt{2gh}$ 。它以这个速度也可以上升到相同高度  $h$ 。计算可知

$$A = mgh = \frac{1}{2}mw^2 \neq mw^2$$

所，“以  $\frac{mw^2}{2}$  这个量来表示活力的量，这么一来，它就变得和功的大小的量度相同了”。

在动力学中引进的另一个重要概念是“力函数”或“势函数”。

1755 年，欧勒在关于流体力学的研究中，引入一个函数  $S$ ，从而把理想流体的分速度  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别表示为

$$u = \frac{\partial S}{\partial x} \quad v = \frac{\partial S}{\partial y} \quad w = \frac{\partial S}{\partial z}$$

由此得出了方程

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = 0$$

1777 年，法国物理学家和数学家拉格朗日将引力的研究提高至数学分析的高度，指出空间任意一点上，万有引力的分

量能够简单地用某个函数  $v$  的微商的负值表示，也就是

$$f_i = -\frac{\partial v}{\partial x_i}$$

1782 年，他又证明函数  $v$  满足下面方程：

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0$$

后来，法国天文学家和物理学家拉普拉斯修改了拉格朗日的方法，将上式表示为

$$\nabla^2 v = 0$$

1813 年，法国数学家泊松将上述方程推广到静电学中，并给了它一个更普通的形式：

$$\nabla^2 v = -4\pi\rho$$

$\rho$  为“荷”的密度。

1828 年，英国数学家乔治·格林明确提出了“势”的概念，指出泊松所说的  $v$  就是势函数。1834 年，英国物理学家哈密顿也引入了“力函数”用来表示只与相互作用着的粒子的位置有关的力。他还把如今称之为“势能”的东西称之为“张力之和”，而把动能称为“活力之和”。到了 40 年代，由于德国数学家和物理学家高斯的工作，“势”此新函数才得到了普遍的应用。

这样，到了 19 世纪 40 年代，建立能量原理所必需的基本概念，都已经备齐了。

## 热功当量的测定

有关热功当量的测定，是确立能量守恒原理的实验基础。詹姆斯·普雷斯特科·焦耳是曼彻斯特一个酿酒师的儿子和业余科学家，很早便关心各种物理力、尤其是当时刚显示出其发展前景的电力的应用价值的研究。

焦耳最先研究了电流的热效应。电流通过金属导线发热的现象是戴维早已发现的，焦耳则进一步确定了电流生热的定量关系。他在玻璃管中装入水银，通以强弱不一样的电流，测定相应的温度变化，因此发现了导线的发热量与电流强度的平方成正比；后来又通过对不同金属导线的实验，发现电阻与发热量成正比。1840年他写出了论文《论伏打电所产生的热》，断言导体在一定时间内放出的热量同电路的电流和电阻强度平方的乘积成正比。不长时间写了《电解时在金属导体和电池组中放出的热》一文，得出结论：电路所放出的全部热量恰好等于电池中物质化学反应所产生的热量；电流的机械动力和加热能力都和电流强度有相同的比例关系，因此电流的机械动力和加热能力成正比。这里焦耳已接近热、电、化学能相当的概念，但是焦耳认为这个实验还不可以对热的来源作出判断，由于“热质”还可能通过导线从外界输入的。

焦耳想到，用磁电机（即磁电式发电机）的感生电流应该与来自直流电源的电流同样地产生热效应。他使一个线圈在电磁体的两极间转动，线圈放在量热器内。实验表明，产生的热

和用来产生它的机械动力之间存在恒定的比例。因为电路是完全封闭的，水温的升高全部是因为机械能转化为电、电又转化为热的结果，这便排除了热质是从外界输入来的可能。这些实验被总结到 1843 年 8 月 21 日他在一个学术会议上宣读的论文《论磁电的热效应和热的机械值》中，他得到：“使一磅水增加  $1^{\circ}\text{F}$  的热量相当于把 838 磅物体提高一英尺的机械功。”用如今通用的单位，此值约为 460 千克米 / 千卡。在该文的附录中他又补充说：“最近，测定水通过窄管时所产生的热，我得到使 770 磅物体提高一英尺的机械力可以使一磅水增加  $1^{\circ}\text{F}$ 。我将立刻重复并扩展这些实验，用来证实自然界的力根据创世主的意旨是不可以毁灭的，凡是消耗了机械力的地方，总能够得到相当的热”。这样，热便被证实是能量变换的一种形式。但是，焦耳的结论得到的却是一些大物理学家的不信任和怀疑。

焦耳决心以更多的实验证明他的结论。1814 年他又作了测定空气在膨胀和压缩时所产生的热量的实验，用此种新的方法得到了热的机械当量的数值分别是 436 千克米 / 千卡和 438 千克米 / 千卡。他便要求在皇家学会宣读他的论文，遭到拒绝。他把这些结果写入《论由空气的胀缩所产生的温度变化》一文中。

1847 年 6 月，当焦耳要求在牛津举行的英国科学促进协会上宣读自己的论文时，会议主席以内容太多为理由，只准许他简单介绍一下他自己的实验，并且不予讨论。但是在他发言之后，当时已非常有名气的青年物理学家威廉·汤姆逊站起来提出了质询，认为焦耳的结论是同法国工程师们所创立的热机理论相矛盾的，由于后者是以热质说为出发点的。此质询反而引起了人们对焦耳工作的重视。此次会后焦耳和汤姆逊作了进一步的讨论，使汤姆逊得到了“在此之前他从没有过的观念”。

后来，焦耳又进行了摩擦生热的实验。1849年6月，他把论文《论热的机械当量》经法拉第送交皇家学会，被皇家学会刊印。在这篇论文中，焦耳总结了以往的工作，并且介绍了现在一般被写入物理教科书上的那个经典实验：在量热器内装上带有叶片的桨轮，叶片分布在彼此成45°角的竖直面（共八列）；侧壁上呈放射状固结着四列平板，以阻止液体的整体流动。在轮轴外端木圆柱上绕以绳子，绳子绕过定滑轮吊以重物，重物下落做功而带动桨叶搅动液体使它的温度升高，由此可以测出热功当量。他用水做实验所得出的结果是：“要产生一磅水（在真空中称量，温度在55°F到60°F之间）升高1°F的热量，需要花费相当于772磅重物下降1英尺所作的机械功”。这个值便是424.3千克力·米/千卡。此测量结果与30年后，由美国物理学家罗兰所做出的测定在1/400的误差范围内是相同的，由此可见焦耳实验的精确性。从那以后，焦耳还继续进行他的实验测量，直至1878年。他前后用了近40年的时间，做了400多次实验，确定了热功当量的精确数值，为能量守恒原理的建立提供了可靠的实验根据。

1850年，焦耳当选为英国皇家学会会员，他的科研成果终于得到了承认，并标志了他对科学的发展做出了重大贡献。

除迈尔和焦耳之外，这一年代还有很多人得出了同样的结论。

著名的德国物理学家和生理学家赫尔姆霍茨也是从生理现象的研究入手发现了能量守恒原理的。他认为当时流行的施塔尔有关生物机体内存在着一种“生命力”的活力说，事实上是赋予了生物体以永动机的性质。他从永动机不能够实现开始入手论证。在1847年自费出版的《论力的守恒》一书中，赫尔姆霍茨认为，与时间和速度无关的中心力是所有事物运动的最

终原因；他将永动机不可能同中心力的保守性相互联系，从而得出在此种力的作用下“系统中的活力和张力和是始终不变的”。他所说的“张力”便是指势能；“活力”是指动能。赫尔姆霍茨曾经错误地认为，若除中心力之外，还存在着其它的力，永动机就可能实现。后来他认识到了这个错误，对自己的理论作了修正。赫尔姆霍茨将他所得出的能量守恒原理推广到热、光、化学运动、电磁现象以及生物机体内进行的过程上，指出“这一定律与自然科学中任意一个已知现象都不矛盾”。他说：“此定律的完全证实，便是不久的将来物理学家们的基本任务之一”。

法国工程师卡诺早期是信奉热质说的，但在 1830 年他因为受到菲涅耳关于热与光的波动说和伦福德有关热的运动说的影响，而由热质说转向热的运动说，在其笔记中写道：“热并非别的什么东西，而是动力，或者能够说，它是改变了形式的运动”；人们能够由此提出一个普遍的命题“动力是自然界的一个不变量，准确地说，它既不产生，也不能消灭”。卡诺未做推导而给出了热功当量的数值 370 千克力·米 / 千卡 这是特别明确的能量守恒与转化定律的表述。不过，1832 年卡诺因死于霍乱，没有来得及发表他的上述发现。依据当时的习俗，死者的遗物全要被焚烧。直到 1878 年，他的一束未遭火焚的 23 页的手稿被发现，这些见解才公开发表，此时能量守恒原理早已确立了。

李比希的学生、德国化学家莫尔在 1837 年发表的《对热的本性的看法》中，提出了各种不一样形式的能都是机械能的表现的看法。他写道：“力在适当的条件下能够表现为运动、化学亲和凝聚力、力、光、电、磁或热，从这些运动形式中的每一种都能够产生出所有其余的形式”。这个论述表达出了各

种不一样运动形式的相互转化和统一性。

英国律师出身的电学家格罗夫在 1842 年发表了《自然界的各种力之间的相互关系》的讲演，指出各种“物理力”在一定条件下都能够相互转化而不发生任何力的损失，热在本质上是“纯动力的”；他认为应该解决的一个重大问题“便是要确定它们的当量，也就是确定它们与某一标准的度量关系”。这篇报告于 1846 年以《物理力之间的相互关系》为名出版。

丹麦工程师柯尔丁在 1840 年已通过哲学的思考得出力的守恒原理，由此之后又用摩擦实验测定了热功当量的数值。1843 年他向哥本哈根科学院提出了实验报告。

初此之外，蒸汽机工程师，法国的马尔克·塞贯在 1839 年；德国的卡尔·霍尔茨曼在 1845 年；法国的 G·A·赫恩在 1854 年，均提出了能量守恒原理，并都进行了热功当量的计算。赫恩甚至研究过一个纺织厂的热机全部输入的热量与全部输出的功，得出了内能等价地转变为机械功的结论。

这样，从 1832 年至 1854 年间，很多人彼此独立地以不同形式提出了能量守恒的思想，并差不多是同时的、分别的发现了热的运动说，宣布了热的运动说的胜利。

## 热力学第一定律

大量的实验证明，要使一个系统的热运动状态发生变化（如使物体的温度升高或物态变化），既能够通过做功的方式，也能够通过加热的方式。这便是说，自然界存在着两种基本的热力学过程。一种过程与广义力和广义位移互相联系，过程进行中一定有宏观位移发生，或者能够归结为宏观位移的作用。比如，被推动的活塞所发生的是一种宏观位移，而磁场、电场的变化则可以归结为电荷的宏观位移的作用。在这种过程中，系统状态的变化是通过做功实现的。另一种过程则与温度差的存在相互联系，系统状态的变化是通过传递热量实现的。在这种过程中，无宏观的广义位移发生。比如，用酒精灯烘烤一个物体，或者使系统受到电磁辐射的作用等，既没有发生宏观位移，也不能归结为宏观位移的作用。普遍地说，自然界实际发生的热力学过程常常是上述两种基本过程的综合，便是系统既发生宏观位移而做功，又因为存在温度差而与外界交换热量。设以  $A$  表示外界对系统所做的功，以  $Q$  表示系统由外界吸收的热量，系统的能量从  $U_1$  变为  $U_2$ ，则实验表明系统的能量的变化由下式决定：

$$U_2 - U_1 = A + Q$$

对一个热力学系统来说，表明它的热运动状态的能量，便是系统的内能。从微观角度来看，热力学的内能包括物体内部分子无规则运动的动能，分子间的相互作用能，原子与电

子的能量，原子核内的能量，等等。总结地说，内能便是热力学系统由它的内部状态所决定的全部能量的总和，它并非包括系统整体作宏观机械运动的动能以及系统整体在外力场中的势能。不过，在系统经历一个热力学过程而发生了热力学状态的变化时，并不是它的内部的各种能量形式都会发生变化的。像在较小的压缩过程中，原子内能就不发生变化，在一般的燃烧过程中，原子核内的能量也不发生变化。

若  $U$  所表示的是系统的内能，上式便是热力学第一定律的数学表达式。它证明，当热力学系统由某一状态经过任何过程到达另一状态时，系统内能的改变相当于在这过程中所做的功和所传递的热量的总和。

事实上，热力学第一定律的本质含义是很普遍的，并非仅仅适用于热学现象。若不仅仅涉及系统的内能， $U$  所表示的是系统所包含的一切形式的能量，如电磁能、内能、机械能、化学能等； $A$  也表示各种形式的功，比如机械的、电磁的、化学的功，那么便能够把热力学第一定律理解为普遍的能量转化和守恒定律。它表明，自然界的所有物质都具有能量，对应于不同的运动形式，能量也有不同的形式，比如机械运动的动能和势能，热运动的内能，电磁运动的电磁能，化学运动的化学能，原子核运动的核能等，它们分别以各种运动形式特定的状态参量来表示。当运动量发生转移或运动形式发生变化时，能量也由一种形式转化为另一种形式，从一个系统传递给另一个系统；在传递和转化过程中总能量始终不变。

能量守恒和转化定律的确立，首先找到了各种自然现象的公共量度——能量，说明了不同运动形式在相互转化中有量的共同性，因此把各种自然现象用定量的规律联系起来。其次，此定律的确立，打破了人们关于物质运动的机械观念的范

围，从质上表明了各种物质运动形式之间相互转化的无限可能性，说明运动形式相互转化的能力也是不灭的，是物质本身所固有的。这样，转化定律与能量守恒便第一次在极其广泛的领域里把自然界各种物质运动联系起来。

能量守恒和转化定律的确立，具有重大的实践意义和理论意义。在实际中，它对于制造永动机的不可能实现，给予了科学上的最后判决。它指出，若没有外界热源供给热量，则有

$$U_2 - U_1 = A$$

便是说，若系统的内能减少，即  $U_2 < U_1$ ，则  $A < 0$ ，系统对外界做功。因此对外界所做的功是以系统内能的减少为代价的，决不是无中生有创生出来的。但是，如果想使系统源源不断地对外界做功，就必须让系统可以回到初始状态，以便在循环中周而复始地不断进行工作。这样，就会有  $U_2 = U_1$ ，而  $A = 0$ 。这就表明，在没有外界能量供给的情况下要使系统不断对外做功，是不可能的。这个结论彻底粉碎了永动机的幻想。

在理论上，能量守恒与转化定律为物理学的发展提供了一个有力的支点，使经典物理学从经验科学发展成为一系列完整的理论科学。无其他任何一个定律可以如此广泛地把物理学的各个部门乃至自然科学的各个学科联系在一起，自从这个定律建立以来，自然科学、尤其是物理学中的每一个理论，首先都要经受它的检验。每当一个过程中出现了不能用已知的能量形式说明其出现或消失，即能量守恒似乎被破坏的现象时，科学家们总是倾向于假定某种未知类型的能量存在，而不愿考虑能量不守恒的可能性。

当然，应当指出，任何一个重要科学原理的具体形式，都有它的相对性，对于能量守恒与转化定律来说，都有各种具体形式的能量及其转化。事实上，由于人们对自然事物转化过程

的认识，是随着社会实践尤其是科学实验的发展而不断向前发展的，因而对能量形式的认识也在不断丰富。在 18 世纪中叶以前，人们只觉察到了机械的守恒；随着蒸汽机的出现和广泛应用，人们才逐渐认识热运动的能量；电池的出现，电磁现象的研究和电力技术的发展，又引导人们认识了化学能和电磁能。因此，时至 19 世纪 40 年代，又确立了能量守恒与转化原理时，所说的只是机械能、热能、化学能和电磁能的守恒。而到 19 世纪末和 19 世纪初，当人们发现物质的天然放射性现象和镭化合物的永恒发热时，一些物理学家就惊呼能量守恒与转化定律不再成立了。后来的研究说明，这是因为还存有一种新的能量形式，即原子核内的放射性能量，漏掉了这种能量形式，当然谈不到“能量守恒”了。如今，物理学家们正是以核能释放的机制解释了恒星巨大的辐射能的来源。我们毕竟生活在宇宙中一个极小的角落里，与整个宇宙的发展相比，我们不过是在一段极其有限的时间内检验过已确立的物理定律的有效性，而且我们的检测手段也并非绝对精确。因此，我们不能说早已认识了所有的能量形式和转化过程。随着科学实验的进步发展，人们完全可以发现一些新的能量形式，认识一些新的转化机理，甚至探察到一些难以想象的效果。那时，这一重要原理也会以一副崭新的面目展现在我们面前。

## 卡诺第二定理

热力学第二定律的初步思想，最早是从关于热机效率的研究中萌发出来的。从 17 世纪末萨弗里制造出蒸汽水泵以来，在纽可门、瓦特和其他人的再度研究下，蒸汽机不断得到改进。每一个新结构的发明，都会使蒸汽机的效率——从一定燃料的燃烧中所能得到的机械功的数量——得到一些提高。从 19 世纪初，蒸汽机愈来愈被广泛地应用，对交通和工业的发展带来了深远的影响。但是，有关控制蒸汽机把热转变为机械运动的各种因素的理论却未形成，人们只是依靠经验和技巧改进着蒸汽机。热机效率的提高究竟有无限制？提高热机效率的关键途径是什么？这些问题都亟待解决。法国的科学家和工程师们首次在理论上对这些问题进行了研究。其中，卡诺就是一个佼佼者。

卡诺的《关于火的动力的思考》一书于 1842 年出版了，总结了他对热机的早期研究成果。书中谈到了他发明热机的目的是提供动力，来解决人们的各种实际需要。他还指出，热机消耗的燃料太高，效率太低。因此卡诺给自己提出了迫切的实际任务：以普遍理论的形式得出消耗热能得到功的结论，从而阐明热机工作的原理，查明热机不完善的原因，以便提高热机的效率。

当时，热的运动说还不曾被人们普遍接受，大部分科学家还信奉热质说，卡诺在那时也持有热质说的观点，这使他把蒸

汽机和另一种原动机——水车相比。由于水车是靠水从高处降落做功的，蒸汽机是靠热质从高温的锅炉中流向低温物体而做功的，二者都很相似。他说：“我们能够适当地把热的动力和一个瀑布的动力相比，瀑布的动力依赖于它的高度和水量；热的动力依赖于所用热质的量和称之为热质的下落高度，即交换热质的物质之间的温度差”。

这个类比使卡诺得出了一个有益的见解，即为了使蒸汽机能够做功，它至少必须工作在一个高温热源和一个低温热源之间；蒸汽机所产生的机械功，原则上依赖于锅炉和冷凝器之间的温度差与从锅炉传到冷凝器的热质的量。他写道：“蒸汽机产生动力，从本质上说，是由于燃烧等化学作用或其他作用，使热平衡受到破坏，蒸汽机则是使这种被破坏的热平衡得到恢复，……依据这个原理，为了产生动力，不仅需要产生热，而且要具备冷。没有冷，热也就不能利用了。”“由于温度差的存在，使热平衡的恢复才得以表现出来，同时产生了动力。”卡诺还指出：除了加热器（锅炉）和冷凝器外，还必须有工作物质，工作物质在被加热和冷却时会发生状态的改变而做功。在蒸汽机中工作物质便是水蒸汽，它从锅炉中吸取热量而推动活塞做功，然后又向冷凝器放出热量使自身恢复到起始状态。卡诺写道：“水蒸汽只是一种手段，不过不是惟一的手段。任何物质都可用于这一目的，因为一切物质都可以发生冷热交换，都能收缩或膨胀，在发生体积变化的时候都有克服阻抗而做功的能力，因此都能产生动力。”这样，卡诺就得出了一个基本结论：热机必须工作于至少两个热源之间，只有当热质从高温热源流向低温热源的过程中才能做功；热机效率——做出的有用功  $A$  与工作物质从加热器中获得的热量  $Q_1$  之比，经常表为

$\eta = \frac{A}{Q_1}$ ，仅仅决定于两个热源的温度差，而和采用什么工作物质无关。这个结论就是如今被称为卡诺第一定理的基本内容。

将蒸汽机与水车类比，也使卡诺得出了一个错误的结论：正如水通过落差带动水车做功后水的总量并无改变一样，在蒸汽机工作过程中，热质的总量也没有损失，从高温加热器放出的热量都传给了低温热源。他说：“蒸汽机事实上并没有消耗热，只是使热质从高温物体转移到低温物体。”

这样，卡诺热机最简单的结构最少需要一个高温热源与一个低温热源，即一个加热器和一个冷凝器。因此，这个热机必须由两个等温过程（当工作物质与两个热源接触时）和两个绝热过程（当工作物质与两个热源脱离时）所形成的一个循环。当汽缸与加热器连接时，汽缸内的工作物质如水和饱和蒸汽极其缓慢地膨胀着，以使在整个过程中水和蒸汽都处在热平衡状态；然后使汽缸与加热器隔绝，蒸汽绝热地膨胀到与冷凝器的温度相等；再让汽缸与冷凝器相连缓慢地推动活塞等温压缩蒸汽，到一定的状态时让汽缸与冷凝器隔绝，做绝热压缩，直至回到原来的高温状态，从而完成一个循环。在整个循环过程中，工作物质从加热器吸收了一定的热量  $Q_1$ ，向冷凝器放出了热量  $Q_2$ ，卡诺从热质守恒观念认为  $Q_1 = Q_2$ ；但由于压缩时所需的功少于膨胀时做出的功，因此对外做了多余的净功  $A$ ，这是一般热机所完成的任务。假如使这个循环做相反方向运动，即先做绝热膨胀使工作物质降温，然后在低温下做等温膨胀；再通过绝热压缩使工作物质的温度升到原先的高温状态，最后做等温压缩使系统恢复原状。在这个循环中外界对系统做了正功，热量则从低温热源传到高温热源，其效果是为了达到致冷的目的，这就是卡诺致冷机的循环过程。

卡诺知道，相对一个实际的热机来说，它的效率与热机的结构、加热器和冷凝器的温度、工作物质的性质等因素都有关系；但相对一个理想热机，其效率只决定于加热器和冷凝器的温度。这种理想热机不能制造出来，但可以想象有这样的热机。它的理想性在于：这种热机中的一切过程都能做逆方向运行，即能够严格地按相反的顺序实现热机中所进行的各项操作，这样构成的理想循环是可逆的，即可逆的卡诺循环。

卡诺提出了“可逆过程”这一重要概念。如一个系统从状态 A 出发，经历一系列中间状态而到达另一状态 B，我们就说系统经历了过程 AB。假如系统能够严格地按相反方向、以相反的次序由 B 经历原来的各个中间状态返回到状态 A，同时又消除掉了原来的过程 AB 在外界引起的一切变化，即使系统和外界都恢复原状，那么原来的过程 AB 便是一个可逆过程。反之，假如用任何方法都不能使系统和外界完善地恢复到原来状态，即或者系统本身残留下了某些变化，或者在周围物体中产生了某些影响，或者二者都遗留下了变化的残痕，那么原先的过程便不可逆。可见，可逆过程要求系统和外界在经过其逆过程后都必须能够完全复原。

卡诺断言，在相同温度的高温热源与低温热源之间工作的一切可逆的卡诺热机，无论工作物质如何，它们的效率都一样。这便是卡诺第一定理的确切表述。

那么实际热机的效率如何呢？能否会大于可逆卡诺热机的效率呢？卡诺根据热质守恒思想和永动机不可能制成原理，证明了这样一个结论：在相同温度的高温热源和相同温度的低温热源之间工作的一切实际热机，其效率都不会大于可逆卡诺热机的效率。这就是现在所说的卡诺第二定理。

我们可以得用现如今常用的符号和公式将卡诺的这段话解

说如下：设有一部任意的实际热机甲和一部理想的可逆卡诺热机乙，它们在温度为  $T_1$  的高温热源和温度为  $T_2$  的低温热源之间工作。它们从高温热源吸收的热量分别为  $Q_1$  和  $Q'_1$ ，向低温热源释放出的热量分别为  $Q_2$  和  $Q'_2$ ，在一循环中做功分别为  $A$  和  $A'$ ，所以它们的效率分别为

$$\eta_{\text{实际}} = \frac{A}{Q_1},$$

$$\eta_{\text{理想}} = \frac{A'}{Q'_1}.$$

假设这部实际热机的效率比理想的可逆卡诺热机的效率大，即  $\eta_{\text{实际}} > \eta_{\text{理想}}$ ，我们可以调整两部热机的冲程使  $Q_1 = Q'_1$ ，则有

$$A > A'.$$

这样，我们就可以将两部热机联合起来，让实际热机甲做正向循环，而带动理想热机乙做逆向循环，从而将热量  $Q'_1$  放回给高温热源。卡诺根据热质守恒思想断言，在整个循环过程中热质的量并没有改变，只是在两个热源之间转移，所以  $Q_1 = Q_2$ ， $Q'_1 = Q'_2$ 。这样，联合运转的结果是每一次循环后，两个热源和工作物质都恢复原状，只是  $A > A'$ ，或  $A - A' > 0$ ，即对外做出了净功。由此可见，只要是在相同的两个热源之间工作的实际热机的效率大于理想热机的效率，就可以在热源和工作物质的热状态保持不变的情况下，连续不断地对外界提供了多余的净功，这就是永动机。

因为卡诺坚信，永动机是不可能实现的，所以卡诺得出结论，理想的可逆卡诺热机所能得到的最大动力，就是利用任何方法所能得到的最大动力。一切热机的效率都有一个极大值的限制，它仅完全由加热器和冷凝器的温度确定，实际热机的效率都比这个极大值小。

卡诺循环不仅清晰地反映出了热机中热向机械运动转化过程的本质，而且揭示了热机效率主要是由两个热源的温度差决定的。在实践上，卡诺定理的提出，为提高热机效率指明了方向和可能达到的限度。只要设法提高这两个热源的温度差，热机效率便能够提高。在理论上，卡诺所断言的热机必须工作在至少两个热源之间，假如仅有一个热源，热机就不可能工作，这实际上已包含了热力学第二定律的基本内容。因此，卡诺的思想是极深刻的。正如恩格斯所说：“他差不多已经探究到问题的底蕴。阻碍他完全解决这个问题的，并不是事实材料的不足，而只是一个先人为主的错误理论。”由于卡诺的类比和全部论证，都是建立在热质观念的基础上的。更有意思的是，他从错误的观念出发却得出了正确的结论。

但是，从卡诺遗留的笔记本的残页上可以看出：他在 1826 年—1842 年间，已觉察到热质观点并非令人完全满意，还需要认真地研究。上一章中我们早已指出：到了 1830 年，卡诺已经意识到把热机和水车类比是不合适的，在热机的循环中一部分热由于转变成机械功而消耗了，因此他抛弃了热质说而转向了伦福德和戴维所主张的热的运动说，而且得出了能量守恒与转化的结论，进行了热功当量的计算。但是，由于卡诺的早逝，使他的才华没能得到更好的发挥。而且他的大部分遗物（包括遗稿）按照当时法国的风俗又被焚烧了，残存的一些遗稿直到 1878 年才被发表，这时能量守恒定律早已被普遍承认了。

卡诺工作的重要价值，在很长时期内都没有被人们所了解，他的重要著作也逐渐被遗忘了。只是因为法国工程师、巴黎桥梁道路学院教授克拉贝龙的进一步研究和发展，卡诺的理论才引起人们的注意。1834 年，克拉贝龙发表了论文《关于

热的动力》，文中克拉贝龙吸取了英国人瓦特曾经绘制过的用图线的形式表示蒸汽压力如何随汽缸的容积而变动的方法，在  $P-V$  图上描绘了卡诺的理想循环。这是由两个等温曲线  $AB$ 、 $CD$  和两个绝热曲线  $BC$ 、 $DA$  所构成的闭合过程。克拉贝龙证明，卡诺热机在一次循环中所做的功，其数值正好与闭合曲线  $ABCD$  围成的面积相等。这种方法使卡诺的理论变得极直观和易于理解，因此卡诺的理论很快便得到了科学界和工程界的广泛承认，为它的进步发展创造了条件。

## 自然界的不可逆过程

如前所述，卡诺在构造他的理想循环（热机）时，早已提出了“可逆过程”的概念；并且还指出，单纯的、无机械能耗散效应的力学过程都是可逆过程。那么热力学过程是否具有可逆性呢？我们现在结合热力学第二定律的开尔文表述和克劳修斯表述来进行分析。

经大量的事实表明，功能够完全转变为热，或者更确切地说，机械能够完全转化为内能，人们常常遇到的摩擦生热现象便是一个明显的例子。但是，热力学第二定律的开尔文表述却断言，第二类永动机是不会制成的，即不可能在不产生任何其他影响的情况下，把热百分之百地变为功。例如，在焦耳测定热功当量的实验中，重物自动下降做功而使量热器中的水温升高了，说明功完全转化为热了。然而，人们从来未曾见到量热器内的水自动降温，而将放出来的热量变为机械功，克服重力把重物重新提升上去。这表明功变热的过程和热变功的过程是不对称的，后一过程不能完全抵消（补偿）前一过程所产生的一切影响。因此，热力学第二定律的开尔文表述实质上是说，功变热的过程是不能逆的。

大量事实还表明，当不同温度的两个物体相互接触时，热量总会自动地由较热的物体向较冷的物体传递，使热物体的温度降低而冷物体的温度升高，最后达到两个物体的温度相同。然而，热力学第二定律的克劳修斯表述却断言，不可能存在这

种理想的致冷机，其惟一的效果（即在不产生其他任何影响的情况下）是把热量从较冷的物体传到较热的物体，使二者的温差愈来愈大。譬如，把一块冰放入热水中，热量就会从热水中传到冰块中，使冰融化并最终达到均匀温度；但从未发生过热量自动地从冰块流入水中，使这块冰的温度远低于零度，而把水加热到沸腾。因而，热力学第二定律的克劳修斯表述实质上是说，热传导的过程也是不可逆的。

自然界的不可逆过程是复杂多样的，并且各种不可逆过程都是互相关联、完全一致的，因此每一种不可逆过程都可以被选作热力学第二定律的表述。每种表述实际上就是选择一种典型的不可逆过程，指出它所产生的效果不论用什么办法也不会完全消除。不论如何表述，热力学第二定律的实质在于揭示出：一切与热现象有关的实际其宏观过程都是不可逆的。

对于每一种具体的不可逆过程，人们在经验上经常能找出一个特定的物理参量来判断自发过程进行的方向和限度。例如，对于热传导过程，就可用温度作为判断标准，热量总是从高温处向低温处传递，直到温度平衡为止；对气体的扩散过程，便可用密度作为判断标准，气体总是从密度大处向密度小处扩散，直到密度均匀为止；等等。人们自然会提出这样的问题：既然各种不可逆过程是互相关联、彼此一致的，那么能否找出一个普遍的物理量作为共同的标准，来判断任何不可逆过程的方向和限度呢？现在，我们来观察一下这种可能性。

前面早已提出，所有的自发过程都具有一个共同的特点，即当系统在外界影响的情况下，自发地由初态变到终态后，用任何方法都不会使系统重新回到初态而不引起其他任何变化。可见，这种自发过程的不能逆性与过程进行的方式无关，而是决定于过程的初态和终态的性质及其相互关系。由此可以预

期，通过对热力学第二定律的数学分析，也许会找到一个特殊的状态函数，这个态函数在初态和终态的数值差异，可被用来当作自发过程进行方向的数学判据。这个态函数是由克劳修斯发现的。

前面讲到，克劳修斯曾经从对卡诺可逆循环的分析中得到一个等式：

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

或者将  $Q_1$ 、 $Q_2$  取代数值，上式就可表示为

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

克劳修斯将这个结果推广到更复杂的任意可逆循环过程，假如取和用积分代替，于是得出

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0$$

$T$  为热源的绝对温度， $dQ$  表示工作物质在一无穷小过程中从该热源吸收的热量。这个结果是克劳修斯 1854 年在《论热的动力理论的第二原理的另一形式》一文中提出的。

1865 年，克劳修斯在《论热的动力理论的主要方程的各种应用上的方便形式》的演讲中又把上述积分推广到一般的情形，得出

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

式中等号可用于可逆循环过程，不等号可用于不可逆循环过程。关于可逆循环，克劳修斯指出：假如每当物体的变化从任意一个初态开始，陆续地经过任意的其他状态又回到初态时，积分  $\oint \frac{dQ}{T}$  总等于零，则积分号里的表达式  $\frac{dQ}{T}$  肯定是一个

量的全微分，它仅与物体目前所处的状态有关，而与物体到达这个状态的途径无关。假如用  $S$  表示这个量，则我们就能规定：

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

克劳修斯把  $S$  称为物体的熵（*entropie*），外文的意思即是物体的“转变”含量。

在数学上我们知道，如果任意函数  $X$  适合方程  $dX=0$ ，则  $X$  定为一态函数；在任意两个状态  $P_0$  与  $P$  之间，积分  $\int_{P_0}^P dX$  的值只决定这两个状态，而与积分的路径无关。同样，系统的熵也是一个态函数，当系统处于一定的平衡状态时，它的熵就可完全确定了，与通过什么过程实现这一平衡态无关。

为了能找到用态函数熵来判断实际过程进行方向的方法，我们来具体分析一个典型的不可逆过程——热传导中熵的变化情况。

假设把一块冰放进热水中，热水的温度为  $T_1$ ，冰的温度为  $T_2$ ，因此  $T_1 > T_2$ 。这时假如有一定的热量  $Q$  自动地从冰块传递到热水中，则热水的熵就会变化  $\Delta S_1 = +\frac{Q}{T_1}$ ，冰块则由于损失了热量，其熵变化了  $\Delta S_2 = -\frac{Q}{T_2}$ 。因此，热水和冰块所组成的系统总的熵变化则为

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} < 0$$

可见，热量从冰块自动传向热水的过程相当于熵的减少，而这是与热的本性相矛盾的，即热力学第二定律所不许可发生的过程。相反，假如热量是从热水自动流向冰块的，上面的符号都会反过来，于是

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2} > 0$$

这个过程则符合热力学第二定律。这表明，符合热力学第二定律的过程，系统的熵是要增加的。从这个具体问题中，我们实际上是把冰块和热水看作一个孤立系统进行计算的。

上述结果是具有普遍意义的，克劳修斯严格地证明了，任何孤立系统（即与外界不存有任何热交换或机械相互作用的系统），它的熵永远不会减少，这就是“熵增加原理”，它是利用熵的概念所表述的热力学第二定律。

这样，我们就可看到，熵这个态函数，完全可作为判断自发过程进行方向的判据。对于一个孤立系统来说，自发过程仅沿着熵值增加的方向进行；相反，使熵值发生减小的方向上的过程则不能自动实现。因此，熵增加原理统一地用定量的方式明确表述了实际宏观过程的方向性。克劳修斯在 1865 年的这篇论文的后面写道：“我所给出的热力学第二原理的形式断定：自然界中一切沿着我称之为正方向进行的过程，能够自动地、无补偿地发生；而沿着相反的方向、即负方向的过程，则仅能以这样的方式发生：要以同时相伴发生的正方向的过程所补偿。”

那么，什么是熵这个概念的具体的物理意义呢？我们已提到，克劳修斯把熵看成是“物体的转变含量”。他写道：“我特意把字 *Entropie*（熵）造得尽可能与字 *Energie*（能）相像，因为根据这些字所命名的这两个量，依其物理意义来说彼此变得如此接近，以致在名称上有某种相似性，在我看来似乎是恰当的”。因而在克劳修斯看来，在热力学第二定律中所引进的熵这一概念是与热力学第一定律中所引进的“能”这个概念有某种相似性。事实上，“能”这一概念从正面表现着运动转化的

能力，能越大，运动转化的能力也就越大；而熵这一概念却是从反面量度着运动转化的能力，即表现着转化早已完成的程度。在没有外界影响的情况下，一个系统的熵越大，就愈接近平衡状态，就愈不易转化。因此，熵这个概念表示着运动丧失转化能力的程度。虽然机械能等可利用的能量能以百分之百地自动转化为热，然而，热却不能百分之百地自动转化为功；随着热量自发地从高温部分向低温部分的传递，物体间的温度差减小，热向有用功的转化率也愈来愈小。这时总能量虽然仍守恒，但随着熵的增加，系统的能量也有更多的部分不可再供利用了。因而熵这个概念表示着封闭系统内部能量的“退化”和“贬值”，表示着这种内部能量不能转化为其他能量形态的程度；或者说是有用能的“耗散”。汤姆逊在 1852 年就写道：“目前在物质世界中存在着的普遍倾向是机械能的耗散”；“任何机械能的复原，是不可能无生命物质的过程中，而且可能从来没有用有机物质实现的，不论这是具有植物生命的物质还是服从动物意志的物质”。

自牛顿以来，人们普遍认为宇宙就如一架大机器，它的各个部分总是毫无损伤地运转着。反映在物理学理论上，就表现为各个基本运动定律对于时间是对称的；在运动的基本方程中时间符号既可是正的，也可是负的。假如物体发生了运动，则相反的运动同样也会发生，只不过物体所经历的各个状态的顺序彼此相反而已，就像电影胶片反向放映时各个镜头按照倒回的顺序逐个再现出来那样。这助长了一种形而上学的观点：在宇宙中只有那些守恒律才是真实存在的，宇宙能够完全恢复它原有的一切旧貌，它能够以同样的形式永远存下去。但是，熵增加原理（或者说热力学第二定律）却揭示了自发过程的不可逆性，运动的转化相对时间的增加方向与减小方向具有质的不

对称性。按照有些人的说法：“世界正在走坡路，这台机器的各部分正在用旧。”如机械运动能够完全转化为热，但散失了的热却不会完全转化为机械功，这里虽然能量仍是守恒的，但却逐步丧失了它的有用价值；炒鸡蛋时尽管质量仍然守恒，但它的有机结构却无法重新复原。所以，在这些过程中都普遍存在着某种不守恒性，这种不守恒性能够用熵的增长统一地表示出来。可见热力学第二定律所引入的新概念“熵”和物理学上的其他众多概念不同，它描写的不是系统的僵死一成不变的状态，而是揭示出系统的某种发展的倾向。正是由于热力学第二定律揭示了能量转化的另一特点——自然过程的方向性，因而才成为独立于热力学第一定律之外的另一个重要定律。

## 宇宙的“热寂”

热力学第二定律从一个侧面表明了自然界里某些区域过程的不可逆性，这是物理学理论的发展中一个重大的进步。然而汤姆逊、克劳修斯等却把这个定律外推到了整个宇宙，得出了宇宙“热寂”的结论。

汤姆逊于 1852 年发表的论文——《论自然界中机械能散失的一般趋势》中，从他提出的原理导出结论：在自然界中占统治地位的趋向是能量转变为热，从而使温度趋于平衡，最终导致所有物体的工作能力减小到零，达到“热寂”状态。

1865 年，克劳修斯又同样写道：“如果在宇宙发生的全部状态变化中，一定方向的变化在量上总是超过相反方向的变化，那么宇宙的全部状态必定愈来愈多地按第一种方向变化，因而宇宙必然逐渐趋于一个终态。”在这篇论文的结尾，他用能和熵这两个概念，极其精练地把热的动力理论的两条基本原理表述为：“宇宙的能量恒定不变”，“宇宙的熵趋于一个极大值”。1867 年，他在《关于热的动力理论的第二原理》的演讲中，又进一步提出：“我们应当导出这样的结论，即在所有的自然现象中，熵的总值总保持增加，不能减少。因此，对于任何时间、任何地点所进行的变化过程，我们得出如下简单规律：宇宙的熵力图达到某一个最大的值。”他继续说道：“宇宙愈接近其熵的最大值的极限状态，它继续发生变化的可能就愈小；当它最后完全到达这个状态时，也就不再出现进一步的变

化了，于是宇宙就将永远处于一种惰性的死寂状态。”在克劳修斯看来，宇宙如今处于不平衡状态，而任何不平衡状态总是要在有限时间内达到平衡状态的。随着熵的不断增加，一切其他的运动形式如：机械的、光的、电磁的、化学的、生命的，都将最终转化为热运动，热量又不断从高温处传向低温处，最终达到温度平衡，于是宇宙便进入了一切运动过程都终止的“热寂”状态。

克劳修斯这一论断是否正确呢？引起了科学界的众多争论。格林、兰金、台特、普列斯顿等人曾举出了一些好似与克劳修斯原理相矛盾的例子。但是克劳修斯等证明了他们所提出意见的错误性，并进一步断言不可能找到与第二定律相矛盾的过程。尽管如此，但一些物理学家还是认为，把在与宇宙的发展相比是极短暂的时间内，根据地球上的实验建立的原理，推广到整个宇宙，这是不足凭信的。他们还指出，第二定律的绝对适用性意味着从实质上消灭了第一定律，因为不能转化的能量就不是能量。

另外意见认为热力学第二定律本身就蕴含着运动总会逐渐消灭的思想，因为承认自然过程的不可逆性，必然要否认过程向相反方向的转化，这就将会导致运动消灭的结论。因此，要批判“宇宙热寂论”，必须首先否定热力学第二定律，否定自然过程的不可逆性。这种看法是缺乏充分科学依据的，所以是不正确的。“宇宙热寂论”并不是热力学第二定律的必然结论，而是对热力学第二定律的反科学的推论。事实上，热力学第二定律与其他已发现的许多自然科学规律一样，也有其特定条件，因而具有局限性，只有在一定领域里才适用。

第一，通过严格证明的“熵增加原理”是：“一个物体系从一个平衡态出发，经过绝热过程达到另一个平衡态，它的熵

不减小。”这里要求物体系在过程的开始和终了之时都处于平衡态，因为只有这样的熵函数才有确定的意义和数值。但是，平衡态只是一种局部暂时的状态，既不可能扩大到极大的空间，也不可能无限期地保持下去。一个平衡态在一个村庄、一个城市都不能实现，就更谈不上在全宇宙实现平衡态了。

热力学的发展进一步表明，熵增加原理也可以推广到初态和终态不处于完全平衡态的情况，但是必须不能远离平衡态，而宇宙则是一个远离平衡态的无限大系统。

第二，一个孤立系，必然满足绝热的条件，所以也就是说：孤立系中熵不能减少。但是，孤立系是完全脱离了外界环境的系统，而世界上的事物都是相互联系的，根本就没有绝对的孤立系统。热力学的孤立系，只是一种抽象的，不切实际的，在实际上只能在一个小的空间范围和短的时间内近似地得到体现。这时系统所受到的外界的影响还是存在的，只是小得可以忽略或总的的影响近似地被消除而已。例如，在很短的时间内，一只暖水瓶里的系统就能够看作是一个孤立系，但它并非一个真正的孤立系。很显然，这种作为抽象概念的孤立系与整个宇宙在本质上根本不同的东西，不能将由此得出的适用于局部范围现象的结论应用在整个宇宙。

因此，热力学第二定律所揭露的熵增加过程，只是无限多样的运动过程中的一个局部表现，只是在一定条件下、有限范围内与热运动有关的宏观物质运动的一个特殊规律；它不但适用于微观世界，同样也不可外推到宇宙范围。“宇宙热寂论”正是形而上学地把热力学第二定律当成宇宙的普遍规律而走向了谬误。

依据辩证唯物主义的基本原理，宇宙中导致物质和能量逸散的过程必然与导致物质和能量集中的过程密不可分。在一定

条件下熵要增加，能量要发散，而在另一些条件下熵则减小，能量则集结。

近几十年来，人们利用天文观测了解到：各种天体都处在聚集和分散、塌缩和爆发、生成和死亡的不断转化之中；年老的星体逐渐冷下去，年青的星体正在热起来，宇宙空间无丝毫走向热平衡的趋势。这些事实表明，在宇宙中，热并非单一地从高温物体向低温物体发散而使宇宙体系走向热寂状态，而是普通发生着热放散和热重新集结的转化过程。

近些年来，天体物理学中发展起来的“黑洞”理论认为，质量约是三个太阳质量的那些恒星，在其晚年将会因为强大的引力作用而自动地收缩下去，这种无限引力塌缩的结果将会形成“黑洞”。它的强大引力能把一切掉进去的物质和辐射吞下去，即使有巨大速度的光线也只有进无出；因而它就形成了一个封闭的视界，不再有任何光或物质的信息从其表面上发送出来，外界观察者将不会获得有关视界内的任何信息，所以它是黑的，“黑洞”的名称就是这样来的。依据这个理论，大质量的天体系统在其晚期演化中总免不了会成为黑洞。近年来关于中微子也有质量的发现，使我们所观测到的这部分宇宙的平均物质密度大大增加，因而其引力作用远比人们原来估计的要大得多。因此，尽管我们观测范围大约在 150 亿光年以上的宇宙体系目前正在膨胀，但终归有一个时候会在其内部引力的作用下转变为收缩。这种收缩一旦开始，就势必向无限塌缩进行下去。从这个意义上说，我们也正处在一个黑洞之中。

不言而喻，黑洞是作为吸引战胜、排斥因素的产物而引入物理学的，在黑洞区域聚集会超过分散。如此说来，散失的物质和能量只能集结而不能发射，岂不是躲避了热力学第二定律所断言的单向逸散的不可逆性，而又坠入了单向集结的不可逆

性吗？它是如何重新活动起来呢？1974年，英国天体物理学家霍金在研究量子力学对黑洞附近物质的行为的影响时，证实了黑洞也存有由“温度”所标志的辐射。量子力学指出，粒子要以“穿过”核力的势垒跑出来，这就是“隧道效应”。经典物理认为黑洞只能吸收而不能发射；量子力学却允许辐射从黑洞强大的引力势垒中穿出来。并且随着辐射减小黑洞的质量，辐射过程将加快，黑洞的表面温度也将升高，反过来会更促进辐射的增强，因此黑洞会变得愈来愈热，辐射会越来越快，最后黑洞会完全被“蒸发”掉。所以，按照量子力学的观点，黑洞并非一个稳定态，而是一种引力的激发态；黑洞并非物质演化的终点，进入黑洞的物质还会被发射出来，不断转化为其他的物质运动形态，重新展示出绚丽多姿的宇宙物质运动。

当然，这还不过是个粗略的揣摩。随着科学技术的进展，对于放射到太空中的热，如何重新集结和活动起来的问题，肯定会获得解决。那时，包括热力学在内的整个科学理论，也会获得重大的进展。

## 姆潘巴问题

1963年，坦桑尼亚的马干巴中学三年级的学生姆潘巴常常与同学们一起做冰淇淋吃，他们先把生牛奶煮沸，加入糖，待冷却后倒入冰格中放进冰箱的冷冻室内冷冻。由于学校里做的同学多，因此冷冻室放冰格的位置总是比较紧张。有一天，当姆潘巴做冰淇淋时，冰箱冷冻室内放冰格的位置已经所剩无几了，一位同学为了抢先，竟把生牛奶放入糖后立刻放在冰格中送进了冰箱的冷冻室，姆潘巴只得匆匆忙忙地把牛奶煮沸，放入糖，未待冷却，立刻把滚烫的牛奶倒入冰格里，送入冰箱的冷冻室内，过了一个半小时后，姆潘巴发现他的热牛奶早已结成冰而其他同学的冷牛奶还是很稠的液体，尚未冻结，这个现象使姆潘巴惊愕不已！

他去请教物理老师，为什么热牛奶会比冷牛奶先冻结？老师的回答是：“你一定弄错了，这样的事是不可能发生的。”后来姆潘巴进了伊林加的姆克瓦高中，他再次向物理老师请教：“为什么热牛奶和冷牛奶同时放进冰箱，热牛奶先冻结？”老师的回答是：“我所能给你的回答是你肯定错了。”当他不懈地提出问题与老师辩论时，老师讽刺他：“这是姆潘巴的物理问题。”姆潘巴想不透，但又不敢顶撞老师。一个极好的机会终于来到了，达累斯萨拉姆大学物理系主任奥斯玻恩博士访问该校，作完学术报告后回答同学的提问。姆潘巴鼓足勇气向他提出问题：假如你取两个相似的容器，放入等容积的水，一个处于 $35^{\circ}\text{C}$ ，另一个处于 $100^{\circ}\text{C}$ ，将它们同时放进冰箱， $100^{\circ}\text{C}$ 的

水先结冰，为什么？奥斯坡恩博士的回答是：“我不知道，但我保证在我回到达累斯萨拉姆之后亲自做这个实验。”最后他和他的助手亲自做了这个实验，证明姆潘巴说的现象属实！这到底是怎么一回事呢？

发表在 1969 年英国《物理教师》杂志上的由姆潘巴和奥斯坡恩两个撰写的一篇文章中作了首次尝试性的解释：他们做了一系列的实验，实验用的是直径 4.5 厘米容积 100 毫升的硼硅酸玻璃烧杯，放入 70 毫升沸腾过的各种温度不同的水。通过对实验结果的定量分析得出的结论是：冷却主要在于液体表面，冷却的速率决定于液体表面的温度而并非它的整体的平均温度，液体内部的对流使得流面温度维持比体内温度高（假设温度高于  $4^{\circ}\text{C}$ ），即使两杯液体冷却到相同的平均温度，原来热的系统的热量损失仍要比冷的系统来得多，液体在冻结之前必须经过一系列的过渡温度，因而用单一的温度来描述系统显然是不够的，还决定于初始条件的温度梯度。

后来很多人在这方面进行了大量的研究 发现这个看似简单的问题 实际上比我们的设想要复杂得多 它不仅涉及到物理上的原因 而且还涉及到微生物作为结晶中心的生物作用问题。

从物理方面讲，致冷有四种并存的机制：辐射、传导、汽化、对流，通过实验观察及比较，发现引起热水比冷水先结冰的主要原因是传导、汽化、对流三者相互作用的结果，假如把热水和冷水结冰的过程叙述出来并分析其原因就更能说明原因了：盛有 4 冷水的结冰需要很长时间，由于水和玻璃都是热的不良导体，液体内部的热量依靠传导很难有效地传递到表面，杯子里的水由于温度下降，体积膨胀，密度变小，集结在表面，因而最先在水表面处结冰，再次是底部和四周，形成了一个密闭的“冰壳”，此时内层的水与空气隔绝，只能依靠传导和辐射来散热，因此冷却的速率很小，阻拦内层水温继续下

降的正常进行，另外由于水结冰时体积要膨胀，“冰壳”起着一定的抑制作用。盛有 100℃ 热水的那一杯冷冻的时间相对来说要少得多，只看到的表面的冰层一直不能连成冰盖，看不到“冰壳”的现象，沿冰水的界面向液体内生长出针状的冰晶（在初温低于 12℃ 时，看不到此现象）。随着时间的推移，冰晶由细变粗，这是由于初温高的热水，上层水冷却后密度变大而向下流动，形成液体内部的对流，使水分子围绕各自的结晶中心结成冰，初温越高，这种对流越剧烈，能量的损耗也越大。正是由于这种对流，使上层的水不易结成冰盖，由于热传递和相变潜热，在单位时间内的内能损耗颇大，冷却速率较大，当水面温度降至 0℃ 以下并有足够的低温，水面便开始出现冰晶。初温较高的水，生长冰晶的速度比较大，这是因为冰盖未形成和对流剧烈的原因，最后我们观察到冰盖还是形成了，冷却速率变小了一些，但由于水内部冰晶已经生长并且粗大，具有较大的表面能，冰晶的生长速率和单位表面能成正比，因此生长速度依旧要比较初温低的水快得多。

从生物作用方面来看，水要结成冰，水中需要很多结晶的中心，生物实验发现，水中的微生物常常是“结晶中心”。而某些微生物在热水（水温在 100℃ 以下一点）中繁殖比冷水中快，这样一来，热水中的“结晶中心”比冷水中的多得多，加速了热水结冰的协助作用，围绕“结晶中心”生长出子晶，子晶是外延结晶的晶核，对流使各种取向的分子都流过子晶，依靠晶体表面的分子力，抓住合适取向的水分子，外延出分子作有序排列的很多晶粒，悬浮在水中，结晶释放出的能量通过对流放出，而各相邻的冰粒又连结成冰，直到水全部结成冰为止。

以上是对观察到的现象进行分析，得出的一些结论和提出的一些解释。但是要真正解开“姆潘巴问题”的谜底，对其作出全面定量的令人满意的结论，还有待进一步探索研究。

## 超导现象

超导是某些金属或合金在低温条件下出现的一种奇妙的现象。最先发现这种现象的是荷兰物理学家卡麦林·昂纳斯。

1911 年夏，当昂纳斯的两个研究生在做低温实验时，偶然发现某些金属在很低温环境中，金属的电阻忽然消失了。昂纳斯然后用水银做实验，发现水银在 4.2K 时（大概相当于 -269℃），出现了这种超导现象；他又用铅环做实验，900 安培的电流在铅环中流动不止，两年半以后仍然毫无衰减。

昂纳斯的这一发现轰动了全世界的科学家，大家纷纷想要破解超导的奥秘，因为仅有了解了超导现象的微观机理，才能使它为人类做出更重大的贡献。

美国伊利诺斯大学的物理学教授约翰·巴丁也想解开导体的电阻是什么原因在超低温时会消失这个令人费解的斯芬克斯之谜。1955 年金秋季节，巴丁与他的研究生罗伯特·施里弗，以及另一位年轻的博士利昂·库珀组成了一个探索超导现象微观机理的研究小组，开始向这一神秘的领域进发。巴丁原是半导体领域的专家，1956 年因发现晶体管效应而荣获诺贝尔物理学奖；库珀对量子场论、量子统计以及处理数理方法十分熟悉；而施里弗则年轻敏捷、敢想敢闯。他们老、中、青三齐全，为破解超导之谜奠定了坚实可靠的知识基础。

早在 1950 年，英国物理学家弗罗里希就曾经预言：超导体的临界温度与同位素的质量之间存在着一定的关系。所谓

“临界温度”就是导体从正常导电状态变为超导电状态时的转变温度。果然不出所料，弗罗里希的预言得到了实验的证实。那么它的实质是什么呢？他经过仔细分析后认为，同位素之间的电子分布状态是相同的，而原子质量是不同的，那么，超导电性是否会与晶格原子的性质有关系呢？或许，超导的出现（即电阻的消失）是由于电子和晶格原子的相互作用才产生的吧！那么，电子和晶格原子是怎样互相作用的呢？弗罗里希对这一问题无计可施，无能为力；而这正是巴丁希望他研究小组能尽早解决的关键问题所在。

只过了一年，库珀就提出了“库珀对”的崭新概念。“库珀对”是一种电子束缚对，它由两个电子组成，由于晶格的存在，这两个电子之间除了库仑斥力以外，还有一种由晶格引起的引力。正是这种附加的引力作用，才使这两个电子相互接近，组成电子对的。库珀建立了物理模型，接下去的数学计算重任落在了施里弗的肩上。

就在库珀提出“库珀对”概念的第二年——1957年，施里弗在阅读英国物理学家伦敦的一本书的，顿时醒悟，豁然开朗。伦敦这位超导理论的先驱者，他是如何论述的呢？他在书中写道：“超导体是电子在宏观尺度的量子结构，是某种平均动量的凝聚。”正是这句话使施里弗意识到，“库珀对”中的两个电子虽然相距特别微小，但相对于原子核来说却是大不一样。这样，大量的“库珀对”必然要彼此联系，形成凝聚状态，正是微观尺度上的这种凝聚态，在宏观尺度上体现为奇妙的超导电性。这样，当务之急就是用量子力学的方法写出描述这种凝集态的波函数，即超导体的基态波函数。经过不断地奋战，施里弗如愿以偿，写出这个“众里寻它千百度”的波函数。在此基础上，巴丁、施里弗和库珀三位科学家又通力合

作，乘胜追击，一套完好无损的超导微观理论终于呈现在这三位合作者的眼前，超导性的奥秘终于破解了，他们三人荣幸地分享了 1972 年度的诺贝尔物理学奖。这一理论也以他们姓氏的头一个字母命名，称之为“BCS 理论”。

然而，天有不测风云。在很长一段时间内，超导材料的临界温度都在相当低的温度范围内盘旋，但科学家时时刻刻不在绞尽脑汁地企图提高它的温度。他们从纯金属寻找到合金，从无机材料找到有机材料……总想有所收获，有所发展。在昂纳斯发现超导现象后的第 75 个年头，也就是 1986 年，从瑞士苏黎士的 IBM 实验室传来了振奋人心的消息：当科学家在很多很多的导电材料面前无计可施，从而转向绝缘材料时，情况出现了转机，钇钡铜氧化物的临界温度可能会打破铌三锗 ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ ) 一统天下的局面，可达到 30K (约  $-243^\circ\text{C}$ )。经过全世界科学家们的不懈努力，到了 1987 年初，捷报纷纷传来，一度使这个以“冷”著称的领域成了前所未有的“热点”，成了科学界内外各方人士最关注的“焦点”，科学家把超导材料的临界温度一下子提高到了近 1000K (约  $-173^\circ\text{C}$ ) 并大有向室温 (300K) 冲刺的势头。

科学家对此真可谓“望穿秋水”了。然而，它却对解释超导机制的 BCS 理论是一次非常严峻的挑战！由于根据 BCS 理论，超导最高临界温度不会超过 40K，而现在却早已远远地超过了这一极限。很明显，BCS 理论是解释不了新发现的超导现象的，这就相似于 20 世纪初时，牛顿力学所碰到的尴尬局面，人们在努力找寻超导领域中的“爱因斯坦相对论”。新的超导机理在什么地方？很多科学家为此作了种种探索。

日本物理学家田中昭二等人对超导陶瓷的结构进行了深入分析，提出了六个氧原子包围铜原子所组成的八面体分为两

层，当电子在这“夹层”中穿过时，便出现了超导现象。

美国物理学家菲利普·安德森也提出了一个新的超导理论，他一反“库珀对”的常规，认为电子不是互相吸引而是互相排斥，正是这种排斥才使电子与电子靠近了，结合了。

中国复旦大学的陶瑞宝也提出了一个超导的激子渗流理论，这一理论认为，处于超导态下的电子具有不寻常的能带结构，这些电子形成的电子波在晶体中彼此迭加，当在这晶体中通以电流时，电子就会绕过晶体中的点阵，顺着电子波迭加的方向运动，不会产生阻力，所以就产生了超导现象。

当然，一切这些理论还都特别稚嫩，他们能够解释某些现象，却又无法解释另外一些现象。超导现象真正的微观机理还是一个谜，人们期待着它早日“呱呱坠地”，为了寻找更高临界温度的超导材料“出谋划策”。

## 加热器

冬季，倘若你要离开家约一刻钟去买东西，为了节省能源，你最好关闭加热器。

当外界特别冷时，你的房子总是在丢失热量，假如它不损失热量，你仅需加热一次房间就可以永远保持温暖，加热器是用来补偿损失的热量，那么损失的热量是多少呢？这由房子的保温性能和外界的寒冷程度来决定。房子内外温差愈大，降温速度就愈快（这是牛顿的冷却定律：降温速度正比于温差）。你离开家之后，保持房内暖热所失去的热量大于房内温度较低时失去的热量。与外界相比，屋内温度愈高，它损失热量的速度愈快。当然，没有温差就不需要供热。

我们可以形象地将房子想象成有很多小洞的水桶，桶内水面高度代表室温。桶内水面愈高，水在洞口的压力就愈大。水流速度就愈快。保持高水面每分钟所需的水量大于保持低水面所需的水量。很显然，倘若我们要节约水，仅需将水面降低。假如将水龙头关闭，哪怕是很短一段时间，不就能节约更多的水吗？只要略微想一下就会发现，将水龙头完全关闭以后，在需要时再次充满它，所需的水量比保持同一水平面和以相应速度漏出的水量要小得多。当桶内水量为零或接近于零的时候，水面升得特别快，所以此时流入量大于漏出量，直到流入量和漏出量相等时，水面就保持不变了。

所以就像关掉龙头后再次给有洞的水桶充水所需水量小于

保持水面不变所需水量一样，再次加热已冷却的房间所需热量小于保持室内温度高于室外温度所需热量。

为了节省能源，要随手关灯，当你离开家时，勿忘关加热器。

## 压强的起伏

烟是由不计其数地微小灰尘组成的。假如你能测出像烟尘那样小的一个空间的空气压强，你将发现：

在任何时刻，不同位置有不同压强——房间的各处压强不相等；

在房间的任何一处，不同时刻有不同的压强——压强随时间变化而变化；

由于空气分子在空间是无规则分布的，所以，你不能希望在每一小块空间中都有相同数目的空气分子。当分子运动的时候，将不时地在空间中的这里或那里出现一个个小的聚集体。在大的空间里，极难发现这种小聚集体的作用。但在小块空间中，它将表现为压强的起伏——当空气分子在某一小空间中聚集起来，则其中的气压将增大。设想，一个细小烟尘粒子左边的空气压强猛然增大，它就被推向右侧，过一会儿又被推向另一方向，由于空气分子在烟尘的任意一侧都可能聚集起来。

假如你将燃着的香烟放在玻璃窗的小盒子里，接着用显微镜向里观察，你将看到烟尘微粒在空气中浮动所画出的折线，就好像一个醉汉似的。即使最好的显微镜也不能观察到空气分子，但正是这些空气分子在运动过程中不断撞击“大”的烟尘粒子并迫使它“跳起舞来”。这种舞蹈被称之为布朗运动。实际上，单个的撞击无法对烟尘微粒产生影响，然而，在某一方向上多次的撞击，就产生了明显的运动。

## 热望远镜

将温度计的水银球插入衬有铝箔的咖啡纸杯中，这就制成了一架热望远镜。在一个凉爽干燥、晴朗的夜里，先将望远镜朝向天空，读出温度，然后再将望远镜朝向地面，也读出温度。你的结果表明：

天空比地面冷；

夜晚，地面将白天获取的热量辐射回到空间中去。（不然，地面将一天比一天热）。当热望远镜向下指时，一部分由地面回到天空中热辐射（红外线辐射）就射入其中，而当它指向天空时，是收集不到这种热辐射的。

顺便说一下，外层空间的温度只高于绝对零度 4 度，只有温度计和咖啡纸杯是无法测出这种低温辐射的。首先测出此温度的实验工作者，是因为他们的不断努力而获得了诺贝尔奖。

## 圆盘的扩大

张开你想象的翅膀，设想我们称作太阳的圆盘变得很大很大，并假设随着圆盘的扩大，每一小部分的强度减弱，所以我们得到的总能量是不变的。现在假设这个大圆盘充满了整个天空，因而没有了昼夜之区别，不管在什么地方都可在 24 小时内得到均匀的阳光，而不只在白天。我们获得的能量与太阳扩大之前是一样的。假设上述情况真的发生了，那么地球的平均温度将：不变。

在太阳扩大之后，地球获得的能量没有发生改变，地球温度必须保持足够高，以便将从太阳获得的能量辐射回空间中去，所以，即使太阳布满了整个天空，地球温度是不变的。但是，太阳的温度却是要改变的。所以使同样的能量分散，使它从一个大的面积上辐射出来，必然会导致其温度下降。因此，随着圆盘的扩大，它的温度就会降低，太阳也就由黄色变为桔黄再变为红色。

## 热带气候

美国的新奥尔良及海湾地区的夏季气候高温而湿润，在这种气候里，一天中什么时间最舒服？答案是：太阳初升后气温稍有上升时。

热带气候不舒服的主要原因是潮湿。汗从你的皮肤上蒸发掉要带走一些热量，而使你降温，假如空气十分潮湿，其中水汽已经饱和，那么汗就要留在你的皮肤上。一立方米空气所能含有的水的克数由气温决定，高温时空气能含的水分更多些。太阳落山以后，气温渐渐降低，空气所含水的能力减小，这种时候的空气不利于你身上的汗水的蒸发。当气温降得更低，空气中的水汽就会冷凝出来，这便是夜晚的露水。

太阳升起的时候，气温渐高，空气就能容纳更多的水汽，因而水就蒸发进入空气中，此时，露水以及身上的汗水也就蒸发进入空气中，这就使你感到干燥而凉爽——但时间不长，天气将又是高温而闷热了。

是什么原因使蒸发可以降温？由于液体中分子运动速度不同。比如，在 20℃ 水中，水分子并非都是 20℃，有的是 30℃，有的是 20℃，也有的是 10℃，平均温度是 20℃，哪种分子首先蒸发呢？运动速度快、或者说热的分子，例如 30℃ 的，这样就降低了平均温度的等级。留下的是 20℃ 或 10℃ 的分子，平均温度也许就降到 15℃（这由液体中不同温度的分子相对数量决定）。所以，当高速或高温分子离开以后，剩下的液体平均温度就会降低了。

## 压强的升高

在海平面处大气压强下，水在  $100^{\circ}\text{C}$  沸腾， $0^{\circ}\text{C}$  结冰，若压强升高，水的沸点升高，冰的熔点降低。

到海拔高的地方，水将在较低的温度下沸腾，例如在 10000 英尺处水的沸点是  $90^{\circ}\text{C}$ 。则不到  $100^{\circ}\text{C}$  时，水就全部蒸发掉了。那就是为什么在山上鸡蛋煮不熟——水温不够高。只要压强足够低，水在室温就可沸腾。这一点不能证明：将一盘水注入真空容器中，然后抽走该容器中的空气，水就沸腾了。另一方面倘若压强很高，水即使过热了，但也不会沸腾。高压锅里的水，热水喷泉底部的水温都超过  $100^{\circ}\text{C}$ ，而它们都不会沸腾。

当给冰块加压时，即使温度在  $0$  以下，它也会融化。在冰块上放一重物，例如石块，就可证明这一点。

为什么高压使冰易于融化而低压使水易蒸发呢？一种简单的解释方法是：冰融化时体积缩小，高压能够帮助体积收缩；水蒸发成为水汽的时候，体积增大，而高压阻碍这种膨胀。

## 流星的轨迹

流星划过天空产生明亮的轨迹，有时能够保留几秒钟，而闪电在空中形成的闪光在几分之一秒内就消失。产生这种现象的原由是：

流星是在空气稀薄的高空飞过，而闪电发生在气压很低的低空。

流星一般是宇宙空间闯入地球大气层的宇宙砂粒，它在空气中运动特别快而且可以打掉空气原子中的电子，从而形成一个等离子区。丢失电子的空气或气体原子构成了等离子区，它是由裸露的原子和自由电子共同组成的。等离子区过去也称作电离气。在大约一秒钟量级的时间之内，自由电子再次与原子结合并释放出能量，这能量正是迫使它离开起始位置时所需的能量。在结合过程中的能量是流星尾巴发光的能量来源。

闪电也同样形成一个等离子区，它是由形成闪电电流的电子将原子中的电子打掉而形成的。

流星在大气层的高处（也许 20 里）那里气压特别低，即空气中原子相隔很远，所以自由电子找到原子并与它结合而释放能量需要一秒钟左右，而闪电发生在低空，也许只有一两英里高，近地面处气压很高，意味着空气原子相距很近，所以自由电子仅需几分之一秒内就恢复为常规气体。空气变成等离子气要从闪电中吸收能量。当等离子气又恢复成空气时将释放出能量，例如光、热、声。

大部分情况下，闪电中能量大于流星的能量，而且闪电释放能量的速度更快些，所以闪电放出的功率将比流星大。再者，闪电呈现出蓝色，而流星呈黄色——这说明闪电的等离子区温度更高。闪电的等离子气是由电能形成的，流星尾部的等离子气是由流星体的动能形成的。但不管等离子气是怎样形成的，由它恢复成正常空气所需时间是由自由电子找到它所要结合的原子所需的时间决定的。

## 黑白金属

表面一黑一白，大小相同的两块金属都加热到  $500^{\circ}\text{C}$ ，哪个辐射的能量多？是黑色。

设想你有一个密封的盒子加热到  $500^{\circ}\text{C}$ ，盒内  $1/2$  衬有表面是黑色的金属， $1/2$  衬有表面白色的金属，两者不接触，所以它们只有通过辐射交换热量。一部分热量由黑金属块辐射到金属块，一部分由后者辐射到前者。这两部分必定相等，不然散发热量多的一侧将很快变得比另一边冷。净能量自动地由低温处流向高温处是不可能的。表面是黑色的一边，能把所有五切的辐射到它上面的热量都吸收，若物体温度保持恒定，它将辐射出同样多的热量——物体表面吸收的热量与其放出的相同。众所周知一个好的吸收器必是一个极好的辐射器。在白色表面上，对于辐射到其上的热量大部分将被反射，而仅吸收一小部分。所以它辐射的热量也少。一个好的反射体却是一个特别糟的辐射体。黑白表面之间的能量流是相等的，由于白色表面辐射较少是由它反射较多热量来补充的。

所以我们得出在  $500^{\circ}\text{C}$  时，白色金属比黑色金属辐射的热量少。这就是为什么好的散热器表面总要涂成黑色。

另外，假如白色表面被破坏了，它的反射能力便会减弱。相应就会吸收更多的辐射。倘若我们将白色表面破坏得使它的反射能力和黑色表面一样，这样它对热辐射的吸收应该同黑色表面一样。它就和黑色表面起相同的作用，这就意味着它应和

黑色表面一样辐射能量。我们是如何改变白色表面的呢？我们在白色表面上刻下很多划痕，当划痕特别深时，它们就好像小空腔一样起到能隔住进入其中的辐射作用。大多数进入空腔的辐射是不能被反射出来的，它们最终还是被吸收了，空腔起了辐射陷阱的作用。事实上，无论空腔是由金、银、铁、铜，还是碳制成的，它们的效果都犹如黑色的空腔。设想在一个阳光明媚的日子里，有一幢敞开窗户的房子。敞开的窗子就是一个空腔，无论房间里的墙壁涂成什么颜色（金黄、银白等等），从外面看去，房间里是黑色的。

## 无需燃料的船

考虑一下这个问题：一艘船是否可以不需石油或煤，运用下面的方法加热锅炉并带动自身前进。将温暖的海水抽进来，从中汲取热量并集中到锅炉，然后将冷却的海水排入大洋。假如从水中吸收的热量足够多，那么排出的海水很可能结成了冰。第一个问题是：这种设想违反能量守恒定律吗？答案是不是。

上述设想并不违背能量守恒，由于锅炉里的热量是从设想的海水那儿得来的，我们并未创造能量，仅是使能量由一个物体（水）转移到另一物体（锅炉）罢了。

第二个问题：这种设想行得通吗？

答案仍是不是。

假如它可行，我们早就这样做了，但我们发现这种情况在我们的生活中是不可能发生的。物理定律是从人类的总体经验中总结出来的。这类过程不可能发生的结论来自热力学第二定律。热量总是由高温处传送到低温处，它自己无法从温暖的海水里转移到温度高得多的锅炉里，犹如一个球不可能自己向上滚一样。热量可以在外力作用下由低温处转移到高温处——冰箱就是如此。但迫使热量由低温处转移到高温处需要能量，且这个能量必定大于锅炉获得的能量。

船的世界就是海面。倘若整个世界温度相同、那么不管温度多高，不管这个世界上的热能有多少，都无法将其变为功。

## 热能的转化

倘若你用一定燃料（煤油、煤或天然气）烧炉子而获得的热量是  $x$ ；假如同样多的燃料在发电厂燃烧，从而发的电全部通过电炉来加热你的房间。电炉此时：产生的热量远远小于  $x$  由于热量不可能完全转换成电能。

在大部分发电厂附近，你会看到冷却塔将热水放入湖、河或流湾中。原因是热能无法百分之百地转变为电能，必定要浪费掉一部分热能（在水电站这种浪费可以忽略），因为除了极少量的摩擦外可以认为落水的机械能能够全部转换成电能。为什么传到冷却塔、河中的热量不能通过循环再回到动力厂的锅炉里呢？由于热量自己是无法由低温物体转移到高温物体的，而锅炉温度总是远远高于废热的温度。为何不用热泵迫使废热进入锅炉呢？由于热泵工作要消耗能量。要消耗多少能量呢？最少与动力厂在产生这些废热所耗的电相等，因此也就没有什么剩余的电力供输出了。

首先，为何会有废热产生呢？由于在汽轮机或蒸汽机中，汽体必须膨胀以推动汽轮叶片或机械活塞。汽体膨胀时它的温度降低，假如汽体能够膨胀到使其温度降为绝对零度，那么全部热能就都用来做功了。但事实上，它并不能比外界温度低（约为绝对温度 300 度）所以，你无法利用全部的热能。

下面这种方案怎样？你可以使蒸汽膨胀后变成水，再将热水放回锅炉。这样做还会有什么损失呢？你会认为没有损耗

了，因为好像有了一个闭合的循环，但你错了。首先，蒸汽膨胀做功推动活塞时要消耗掉一部分能量，当然这正是你所需要的，所以我们算它是能量损失。浪费在下面：蒸汽膨胀直到温度降为  $100^{\circ}\text{C}$ ，这时机器内部压强与外界大气压相同，它不可能再膨胀了。这时它还不是水，而是  $100^{\circ}\text{C}$  的蒸汽冷凝成  $100^{\circ}\text{C}$  的水必须排除冷凝时释放的潜热。 $100^{\circ}\text{C}$  的蒸汽变成  $100^{\circ}\text{C}$  水时，温度不变，却有极大一部分热量放出，这一部分热量不能回到锅炉，由于它的温度只  $100^{\circ}\text{C}$ ，而锅炉的温度却远远高于它。冷凝的潜热成为废热，太糟糕了，为何锅炉的温度一定要高于  $100^{\circ}\text{C}$  呢？由于  $100^{\circ}\text{C}$  蒸汽的压强未超过大气压强。

当你为电热器付钱时，你不只要为加热你的房间的热量付钱，还要为加热河流、天空和大海付钱。

## 超值热能

倘若你给电热器输入 10 焦耳的电能，你将得到 10 焦耳的热能。在实际中，是否可以给某一设备输入 10 焦耳电能而得到的热能大于 10 焦耳呢？

可以，只要你特别特别聪明，你就可以从 10 焦耳的电能中获得超过 10 焦耳的热能。

想一下窗户上的空调机，夏天室外热，室内凉，电能输入空调以后，它就从室内吸收热量并排放到室外。排放到室外的热量有多少呢？假如空调机吸入 9 焦耳的电能（一个特别差的空调机），那么它一定向外放出 19 焦耳的热能。冬天的时候，外界特别冷，你想升高室内温度，就将空调机调换一个方向，原本在室外的部分朝向室内。开动机器，输入 10 焦耳的电能，同时从外界吸收 9 焦耳热量，这时它必然释放出 19 焦耳的热能。这样倒装的空调机称作热泵。

那么热泵真的能以无换有吗？是，也不是。你能够看到热量可以产生，譬如烤炉就能产生热量；热量还可以转移，如果在空调机里，热泵就能转移热量。热量本身总是由高温处转移到低温处的，但有了热泵（它的运转需要能量），就能够从低温处将热能转移到高温处。

## 吸收体是黑色

眼睛的虹膜有不同颜色，而瞳孔却只有一种颜色——黑色，这是由于：好的吸收体总是黑色的。

可以问一下你的老师，为何黑色物体是极好的吸收体，即黑色物体吸收的能量多于白色物体，它的机制是什么？倘若你的老师并没有发现到这个问题本身是一种误解，而打算找出答案，那将使自己陷入困境。这是由于黑色表面能吸收更多的辐射热量是一个不正确的概念。严格说，应反过来讲，一个强吸收的表面，由于它能吸收大部分能量为黑色。譬如，眼睛的瞳孔能吸收光，所以表现为黑色的。不能说由于瞳孔是黑色的，所以它能吸收光。表现为黑色是瞳孔吸收光能的结果，而不是原因。

这个问题又包含着另一个问题，“为何好的吸收器呈现为黑色？”这是由于吸收与反射是两个相反过程，一个表面不可能同时既是一个极好的吸收体，又是一个极好的反射体。倘若它的吸收能力强，它的反射能力就弱。如果一个表面吸收了所有到达其上的辐射能，而一点也不反射，它看上去就是黑色的。眼睛的瞳孔就是一个空腔，不反射一点光，就像上个问题中说到的窗户一样，呈现为黑色。

## 金属环的膨胀

加热一金属圆环直到金属膨胀了 1%，那么圆环中心的圆孔的直径将：变大。

圆孔只不过是个空缺，而空缺也会膨胀，这是不可避免的。所有圆环的尺寸都要按比例胀大。形象地说，设想有一张圆环的照片，将其放大 1%，照片上的任何部位都将被放大，当然圆也不例外。

也能够这样理解这个问题：将圆环弄直使它形成一个直棒，加热时，它不只变厚而且变长，这样当这根直棒再弯成环形时，内部圆孔的周长就好像它的厚度一样也变大了。

假如我们想象一块方金属板中间有一方孔，那么不难看出方孔将由于金属板的膨胀而变大。把方金属板切成小方块，加热使它们膨胀，再将它们组成原样，方孔就同固体金属一样也就膨胀了。

以前，铁匠给木轮加轮箍是运用这种方法：将稍小于车轮外缘的轮箍加热，因为加热使轮箍膨胀，此时把轮箍正好套在木轮上。等冷却后，不需任何另外的固定就会很牢固地箍在木轮上。

下次，当你打开一个罐子上的金属盖时，在热水里浸一下或放在热炉子上加热一会儿，由于盖子以及它的内周长的膨胀而不难打开了。

## 空气压缩

假如将一定量的空气占有的体积缩小，那么空气的温度将：无法确定。

思考这个问题时，你脑子中出现的图像大概是：将一只气球放进冰箱，在这种情况下，气球体积缩小是由于温度的降低。但另一个人想象的可能是活塞或打气筒中被压缩的空气。在这种情况下，体积缩小伴随着温度的升高。空气温度的变化不仅由它的体积变化而决定，你还必需得知道它的压强变化。空气的温度是它的体积和压强共同作用的结果，只知道其中之一是不行的，假如气体体积减小，压强不变或减小，则空气温度降低。但假如空气体积仅减小一点而压强增大很多，那么空气温度升高。怎样衡量“一点”与“很多”呢？假如气体体积减少到原来的一半，而压强增大到原来的 2 倍，温度则不变；但假如压强增大到大于的 2 倍，温度则升高；假如气压不到原来的 2 倍，温度则降低。我们就说，气体温度与其压强和体积的乘积成正比： $T \sim PV$ 。

## 微型“太阳系”

在汤姆逊发现电子的前一年，物理学上还有一个重大的发现，那就是法国物理学家贝克勒尔与比埃尔·居里、居里夫人发现了元素的天然放射性现象。

最先是伦琴发现了 X 射线，证明阴极射线照射玻璃管壁的时候，不仅产生了绿色的荧光，还会产生一种穿透力很强的 X 射线，X 射线使许多科学家发生兴趣，除汤姆逊之外，贝克勒尔也是其中之一。他很想知道，X 射线与荧光究竟有什么关系。例如，荧光物质在受到太阳光照射发出荧光的同时，是不是也会放出 X 射线呢？

贝克勒尔找来了许多荧光物质，他选择了含铀矿石。试验方法也十分简单：含铀矿石下面放一张用黑纸严密包着的照相底片，含铀矿石通过太阳光照射后发出荧光，如果底片“安然无恙”那就说明没有 X 射线放出；假如底片感光了，那就说明经太阳光照射的含铀矿石也能发出 X 射线。

1896 年春天贝克勒尔开始试验。事情不巧，那几天天气不好，一直阴雨，不见阳光，他只好把预备好的含铀矿石和黑纸包着的底片一起放到抽屉里。

几天之后，雨过天晴，贝克勒尔在正式进行试验之前，决定先把几张底片拿出冲洗，看看是否漏光失效。冲洗的结果使他大吃一惊，底片居然感光了，并且感光部分的形状正好同含铀矿石的形状相同。黑纸没有漏光，含铀矿石也没有受到阳光

照射，那么，是谁使底片感光的呢？

通过多次反复实验，证明使底片感光的是含铀矿石中的铀元素放出来的一种看不见的射线，这种射线的穿透力比 X 射线还强，并且不管外界条件如何改变，它总是不停地放出这种射线。

就这样，贝克勒尔虽然没有完成他预想的实验，然而却意外地取得了一项有助于其他科学家更接近于了解原子到底是什么的发现。人们把物质的这种自发地放出射线的现象称之为放射性现象，而铀就是人类找到的第一种放射性物质。

这项发现引起了另外两位法国青年物理学家比埃尔·居里和居里夫人的关注。他们深入地研究了铀的放射性现象，发现含钍的化合物也有放射性。

在提炼纯铀的过程中，他们又发现作为原料的沥青铀矿的放射性比铀和钍强得多。这表明，铀矿石中除了含有放射性铀之外，一定还含有其他放射性比铀、钍更强的元素。

经过两年的努力，一种放射性比铀强 400 倍的新元素找到了，取名叫做钋。后来又经过 4 年的艰苦劳动，从 30 多吨铀矿石中，提炼到了 0.1 克另一种新元素——镭的化合物，镭的放射性比铀强几百万倍！放射性的发现告诉我们原子是可以分割的，并且有自己的内部结构。

从放射性元素放射出来的射线究竟是什么？它们看不见、摸不着，不断地放射，好像永不停息。

出生在新西兰的英国物理学家卢瑟福解开了这个谜。他让放射性元素发出的射线通过很强的磁场，结果射线分成了三部分，原来它是由三种射线构成的。

第一种射线根本不受磁场的影响，笔直向前，说明它并不是带电的粒子，而是一种像光一样的能量波，卢瑟福把它叫做

$\gamma$  射线， $\gamma$  射线的穿透力十分强。

第二种射线会在磁场中偏转，偏转得比较厉害，偏转的方向与阴极射线相同，说明它是由带负电的粒子构成的。进一步的研究证实，这种射线就是与阴极射线一样的速度很高的电子流，卢瑟福将它叫做  $\beta$  射线。 $\beta$  射线的穿透能力比较强，能穿透约为半毫米厚的铝片。

第三种射线也会在磁场的影响下偏转，不过偏转的程度不如  $\beta$  射线大，偏转的方向与  $\beta$  射线正好相反，这说明它是一种带正电的粒子流，卢瑟福称它为  $\alpha$  射线。 $\alpha$  射线的穿透能力最小。一张纸片就能够把它挡住，1/50 毫米的铝片它也穿不过去。

卢瑟福对  $\alpha$  射线非常感兴趣。经过深入研究，他发现  $\alpha$  射线是带有两个正电荷的粒子流，粒子的质量差不多等于氦原子的质量，也许就是氦原子的正离子，即失去了两个电子的氦原子。

原子不像人们先前所想象的那么简单，它不但是可以分割的，而且内部结构一定挺复杂。

卢瑟福的老师汤姆逊首先发现了电子。原子中含有电子，那么原子的另外部分又是什么呢？

汤姆逊根据自己的实践经验，又借鉴了他人的研究成果，认定一个原子不可能只由电子组成，因为不然的话，这些电子会“同性相斥”而全都散射开来，宇宙间也就除了看不见的电子之外什么也不存在了。

我们平时看到的物质原子全部是中性的，不带电。那么，原子的其他部分必然带有正电，以便与电子所带的负电相平衡。原子中每个电子所带的每个负电荷，必然在原子的其他部分中存在着一个与之相对应的正电荷。

那么这些正电荷又在原子的哪个部分呢？它们在原子中是怎样分布的呢？

1904年，汤姆逊依据元素化学性质的周期性，反复推敲出了一个“葡萄干蛋糕式”的原子模型。他认为，原子中带正电的部分是均匀地分布在原子球体之中的，而带负电的电子则在这个球体之中运动，就像一块蛋糕里夹着一些葡萄干一样。这个设想十分简单，不过设想是不是事实，还需要通过实践来验证。这项使命后来落到了汤姆逊的学生卢瑟福身上。

原子本身已微不可见，它的内部结构当然更加难以把握。卢瑟福与他的助手首先发明了一种“计数管”，其可以数出通过 $\alpha$ 粒子的数目； $\alpha$ 粒子打到硫化锌荧光屏上，还会闪现一下亮光。

根据汤姆逊的原子模型， $\alpha$ 粒子通过“葡萄干蛋糕式”的原子时只能产生十分小的偏转，因为在 $\alpha$ 粒子进入原子之前，中性的原子不会对它起作用；进入原子后，电子的质量仅有 $\alpha$ 粒子的 $1/7000$ ， $\alpha$ 粒子与电子相撞，如同一个大铁球同一个小玻璃球相撞一样，影响甚微。至于正电荷，因为它们均匀分布在整个原子中，力量分散，对 $\alpha$ 粒子的偏转也不会产生多大的影响。

卢瑟福开始是相信汤姆逊模型的，他想用实验来加以证实。实验装置十分简单：用 $\alpha$ 粒子作“炮弹”，一片非常薄的金属箔片作靶子，靶子后面是用来记录打靶结果的荧光屏。假如原子的内部结构真像汤姆逊所说的那样，那么， $\alpha$ 粒子就能几乎不受任何阻碍，很容易地穿透金属箔片打到荧光屏上。

不过实验结果使卢瑟福大吃一惊：极少数的 $\alpha$ 粒子撞击金属箔片后的运动方向竟然发生了很大的偏转，有的甚至干脆被弹射回来。

通过多次的观察，卢瑟福得出结论：平均每发射 8000 个  $\alpha$  粒子，就有一个发生大角度的偏转或弹回。他把这种现象称之为  $\alpha$  粒子的散射现象。

事实终于迫使卢瑟福来反对自己的老师了。事实证明，个别  $\alpha$  粒子的大角度偏转或弹回，用汤姆逊模型是所解释不了的；原子不仅不是十分密实的球体，而且它内部的绝大部分空间是空着的。可以估算出来，原子中带正电的物质只有集中在一个十分小的核心里， $\alpha$  粒子只有同这个距离它  $1/10000$  亿厘米、质量比它大许多倍的正电荷核心相遇时，才会发生那么强大的斥力，把  $\alpha$  粒子弹向一边。

于是，卢瑟福提出了一个原子结构的模型。这个模型就像一个微型的“太阳系”：“太阳”位于原子的中心，被称作原子核；电子就像“行星”一样，绕着原子核急速旋转。不一样的是在这个微型的“太阳系”里，“太阳”和“行星”全是带电的，“行星”都是同样的大小，支配着“微型太阳系”所有的是强大的电磁力而不是万有引力。

卢瑟福的原子有核结构模型得到了一系列实验的证实，最终成为原子结构的基本观点。

## 电子的发现

电子是人们最早发现的带有单位负电荷的一种基本粒子。英国物理学家汤姆逊是首先用实验证明电子存在的人，时间是 1897 年。

汤姆逊是一位十分有成就的物理学家，他 28 岁就成了英国皇家学会会员，并且还担任了有名的卡文迪许实验室主任。

X 射线的发现，特别是它可以穿透生物组织并且显示其骨骼影像的能力，给予英国卡文迪许实验室的研究人员以极大激励。汤姆逊倾向于克鲁克斯的观点，认为它是一种带电的原子。

导致 X 射线产生的阴极射线到底是什么？德国与英国物理学家之间出现了激烈的争论。德国物理学家赫兹于 1892 年宣称阴极射线不会是粒子，而只能是一种以太波。所有德国物理学家也附和这个观点，不过以克鲁克斯为代表的英国物理学家却坚持认为阴极射线是一种带电的粒子流，思路极为敏捷的汤姆逊马上投身到这场事关阴极射线性质的争论之中。

1895 年，法国年轻的物理学家佩兰在他的博士论文中，谈到了测定阴极射线电量的实验。他使阴极射线通过一个小孔进入阴极内的空间，并打到收集电荷的法拉第筒上，静电计显示出带负电；当将阴极射线管放到磁极之间时，阴极射线则发生偏转而不能进入小孔，集电器上的电性马上消失，从而证明电荷正是由阴极射线携带的。佩兰通过他的实验结果明确表示

支持阴极射线是带负电的粒子流这一观点，不过当时他认为这种粒子是气体离子。对此，坚持阴极射线是以太波的德国物理学家马上反驳，认为即使从阴极射线发出了带负电的粒子，但它同阴极射线路径一致的证据并不充分，因此静电计所显示的电荷不一定是阴极射线传入的。

对于佩兰的实验，汤姆逊也认为给以太说留下了空子，为此，他特意设计了一个巧妙的实验装置，重新做佩兰实验。他将两个有缝隙的同轴圆筒放在一个与放电管连接的玻璃泡中；从阴极 A 出来的阴极射线通过管颈金属塞的隙缝进入该泡；金属塞与阴极 B 连接。这样，阴极射线除非被磁体偏转，不会落到圆筒上。外圆筒接地，内圆筒连接验电器。当阴极射线不落在缝隙时，送到验电器的电荷就是很小的；当阴极射线被磁场偏转落在缝隙时，则有许多的电荷送到验电器。电荷的数量令人惊奇：有时在一秒钟内通过缝隙的负电荷，足能将 1.5 微法电容的电势改变 20 伏特。假如阴极射线被磁场偏转很多，以至超出圆筒的隙缝，则进入圆筒的电荷又将它的数值降到仅有射中目标时的很小一部分。因此，这个实验表明，不管怎样用磁场去扭曲和偏转阴极射线，带负电的粒子又是与阴极射线有着密不可分的联系的。这个实验证实了阴极射线和带负电的粒子在磁场作用下遵循同样路径，由此证实了阴极射线是由带负电荷的粒子组成的，从而结束了这场争论，也为电子的发现奠定了基础。

怎样成功地使用阴极射线在电场作用下发生偏转？早在 1893 年，赫兹曾做过这种尝试，不过失败了。汤姆逊认为，赫兹的失败，主要原因在于真空度不够高，从而引起残余气体的电离，静电场建立不起来所致。于是汤姆逊采用阴极射线管装置，通过提高放电管的真空度而获得了成功。通过这个实验

和提高放电管真空度，汤姆逊不仅使阴极射线在磁场中发生了偏转，并且还使它在电场中发生了偏转，由此进一步证实了阴极射线是带负电的粒子流的结论。

这种带负电的粒子到底是原子、分子，还是更小的物质微粒呢？这个问题引起了汤姆逊的深思。为了弄清这一点，他运用实验去测出阴极射线粒子的电荷与质量的比值，也就是荷质比，从而找到了问题的答案。

汤姆逊还发现，不论改变电管中气体的成分，还是改变阴极材料，阴极射线粒子的荷质比都不改变。这表明来自各种不同物质的阴极射线粒子全是一样的，因此这种粒子必定是“建造一切化学元素的物质”，汤姆逊当时把它称作“微粒”，后来改称“电子”。

至此可以说汤姆逊已经发现了一种比原子小的粒子，不过这种粒子的荷质比  $10^7$  约是氢离子荷质比  $10^4$  的 1000 倍。这里有两种可能，或许电荷  $e$  很大，也可能质量  $m$  很小。要想确证这个结论，必须寻找更直接的证据。

1898 年，汤姆逊安排他的研究生汤森德和威尔逊进行测量  $e$  值的实验，随后他自己也亲自参与了这项工作。他们使用云雾法测定阴极射线粒子的电荷同电解中氢离子所带的电荷是同一数量级，从而直接证明了阴极射线粒子的质量只是氢离子的 1%。

## 质子的发现

19 世纪末、20 世纪初，贝克勒尔与居里夫妇发现了放射性现象。卢瑟福认真研究了射线，证明那是由  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  三种射线构成的。 $\beta$  射线是就像阴极射线的高速电子流， $\gamma$  射线是类似 X 射线的电磁辐射，那么  $\alpha$  射线呢？

通过艰难的研究，卢瑟福证明  $\alpha$  射线是由带正电的粒子组成的，每个  $\alpha$  粒子上的电荷是一个电子的两倍，其质量是电子的 7300 倍。接着他又设法让  $\alpha$  粒子吸收电子，抵消正电荷，结果是——他得到了氦。

从放射性元素里居然产生了氦元素，这就证明了他与索迪早在 1902 年就提出的理论：放射性是某些元素的原子自然裂变的表现，裂变的结果是使这种元素变成了另一种元素。

1911 年，卢瑟福通过用  $\alpha$  粒子轰击金箔的实验，证实原子中有带正电的原子核存在， $\alpha$  粒子其实就是氦原子的原子核。原子核实在太小了，直径仅有  $10^{-13} \sim 10^{-12}$  厘米，不到原子直径的 0.1%。

后来，卢瑟福又用  $\alpha$  粒子去轰击氮原子核，结果得到了氧核与氢核。

人们知道最轻的元素为氢元素，最简单的原子为氢原子。氢原子只有一个电子，绕着仅带一个正电荷的原子核旋转。有那么多的原子核，它们带的正电荷全是氢原子核电荷的整数倍，质量也几乎是氢原子核质量的整数倍。这样看来，各种各

样的原子核不都可以看成是由氢原子核组成的吗？

于是，带一个正电荷的氢原子核就被叫做质子，正由于质子很重要，是组成一切原子核的基本材料，因此科学家们用质子——希腊文中“第一”的意思来命名。

质子带正电的电量与电子所带负电的电量相同，都是一个电荷单位，不过它的质量比电子大得多，是电子的 1836 倍。

卢瑟福 1919 年的实验，可以说是人类首次用人工的方法从原子核中击出了质子。

## 中子的发现

1932年，英国物理学家查德威克宣布发现了一个全新的粒子——中子，这个发现标志着探索原子核的实验工作和核结构的理论研究跨入一个新的阶段。

在查德威克发现中子之前，尽管已有迹象表明，存在着一种电子性的粒子，但是当时谁也没有能抛弃常规的旧观念而向前迈进一步。如卢瑟福在用 $\alpha$ 粒子轰击氮的研究过程中，就认为存在着一种电中性粒子，这种粒子不能被束缚在任何容器之中，他想象这种粒子大约是由当时已知的质子和电子结合而成，因为质子带正电荷，电子带负电荷，两者结合就变为电中性。

以后，玻特和贝克发现用 $\alpha$ 粒子轰击铍原子时会产生一种穿透力极强的射线。约里奥·居里夫妇对这种射线进行研究，他们用石蜡把铍板与测量仪器隔开，结果发现当有石蜡插在中间时仪器记录到的效应比中间没有石蜡时要明显得多，也就是观察到石蜡中放射出一种强质子流的放射现象难以解释。

这时查德威克也一直在进行铍辐射的研究，他敏锐地觉察到铍辐射决不是 $\gamma$ 辐射，也许就是卢瑟福早先预言的，也是他多年寻找的中子辐射。于是对这种射线进行更仔细的研究，并使用了各种记录快速粒子的方法，结果在1932年取得令人信服的证据。证实这种中性粒子确实存在，而且其质量与质子的质量相等，这种粒子并不是卢瑟福所设想的那种质子和电子的

复合粒子，而是一种全新的粒子。除了不带电荷外，其基本性质与卢瑟福提出的质子很相似，于是查德威克把这种粒子命名为中子。

中子发现后不久，伊凡宁柯和海森伯都提出了原子核是由质子和中子构成的假说，这个假说成功的解释了核的角动量及统计性质，表明了同位素的存在，而且使人们对原子核的结构有了新的认识。

## 介子理论

介子是在探索核力性质时提出的。

因为原子核通常情况下很稳定，这表明核子，即质子和中子之间结合得非常紧。但中子不带电，而质子又相互排斥，这种结合力到底从何而来？而且，这种力只存在于核内，在核外部没有作用。为了解析核力的这种特殊性质，日本物理学家汤川秀树提出一种大胆的假想：倘若利用各种已知的粒子都不能解释核力的话，那么这里面有可能就隐居着新的粒子。于是他模仿电磁作用力的传递机制，对核力的来源提出一个理论——介子理论。

汤川幼时无任何可能成为物理学家的迹象，他对文学非常感兴趣，是什么原因使汤川弃文转向物理学呢？他在晚年回忆说，当他还在中学时，让他走上研究物理学道路的一个重要因素，是人们在日本人中间找到了一名伟大的物理学家——长冈半太郎。汤川把长冈视为楷模。

长冈在决定从事物理学研究之前也犹豫过，他同样也怀疑过东方人在研究自然科学方面的能力。但当他了解到东方人尤其是中国人在过去对科学的贡献曾远远超过于欧洲之后，便毅然决定做一名职业物理学家。长冈曾说：“我倘若不能进入先进的研究者行列，并对某一个学术领域做出贡献，那么生而为人就毫无意义。”长冈后来成为磁学、光谱学与原子物理学的一位著名科学家。所有这些，都促使汤川下定决心为物理学献

身。

汤川是在日本接受全部教育的，而且大部分是在京都读书。在一定程度上，他又是自学成才的。由于当时在日本没有专门研究量子力学的人，甚至连懂得这个理论而能够开这门课的人也没有。于是他和他的同学朝永振一郎一同学习量子力学，一部分是从原始论文上学，一部分则是从书本上学。互相帮助，共同切磋。

针对核力的解析，汤川探讨了与核力场有关的量子特征。他认为，作为核力及  $\beta$  衰变的媒介存在的新粒子具有有限的静止质量，当他作出这个推理时，所用的理论只不过略超出一点测不准原理和相对论。他推测，该粒子的静止质量大概是电子质量的 200 倍。把这种粒子称为介子正是表示其质量介于质子和电子之间。

介子理论开始并没有引起很大轰动，由于那时还没有人看到与汤川的假设相类似的粒子。然而 1936 年，美国的安德森和尼德迈耶尔在研究宇宙线中发现了一种质量是电子 207 倍的带电粒子，叫作  $\mu$  介子，于是汤川的介子理论开始受到人们的重视。

可是，当初在宇宙线中发现的这种介子平均寿命很长，比汤川理论所预言的要大很多倍。为克服这一困难，日本的谷川、坂田和井上及美国的贝特和马沙克，各自独立地提出了一个假设，即观察到的  $\mu$  介子是汤川介子的衰变产物，而还无任何人观察到汤川介子。直至 1947 年，美国的鲍威尔等人在宇宙线中发现了另一种粒子，相信是汤川所预言的介子，被称之为  $\pi$  介子。

从 40 年代到 50 年代末，人们又依次发现了一些新的基本粒子。这些新粒子均有一种特殊的性质，就是它们都产生得

快，衰变得慢。这证明它们在产生过程中起作用的是类似核力的强相互作用，而在衰变过程中却受支配于  $\beta$  衰变时出现的那种弱相互作用，两者相差  $10^{13}$  倍。这种情况比较令人费解，所以人们把这些新粒子都称为奇异粒子。其中有 1947 年发现的比  $\pi$  介子重的  $K\pi$  子，比质子、中子重的兰姆达超子和西格马超子；1954 年发现了克西超子。

尤其值得一提的是，1959 年我国著名物理学家王淦昌在前苏联杜布纳联合原子核研究所，利用 10GeV 的质子同步稳相加速器和他们自己制做的 24L 丙烷气炮室，在 4 万张照片中发现了反西格马负超子，从而引起了物理学界新的轰动。

## 中微子

$\beta$ 衰变指的是原子核自发地放射出  $\beta$  粒子或俘获一个轨道电子而发生的转变。在研究  $\beta$  衰变的初期，人们在实验上碰到一个难以理解的事实，那就是电子所带走的能量，都比原子核放出的能量要少得多，并且这个能量值每次都不相等。换句话说，原子核所释放的能量有一部分“失窃”了。

围绕着这一桩“窃能”案，物理学家们展开了一场激烈的争论和“破案”工作。

有些胆大的物理学家甚至是物理学权威对  $\beta$  衰变中能量是不是仍然守恒提出了疑问。例如著名的丹麦物理学家玻尔认为，能量守恒定律只是在很多衰变过程中在平均的意义上才有效，而并非在每一次衰变过程中都能成立。又如量子力学创始人之一的奥地利物理学家薛定谔也对这种能量守恒只是一条统计定律的说法，表示非常赞赏。

在此之前，德国物理学家索末菲在他那本著名的《原子结构和光谱线》一书中，也曾想过放弃能量守恒定律的严格确实性。他说：“因此，对于必须应用的波动理论的最温和的修正，是不可以承认能量定理对于单个辐射现象是适用的，而且承认它只能在很多过程取平均时才是适用的。”

物理学权威们对能量守恒定律表示了怀疑。能量守恒定律在  $\beta$  衰变中被破坏和不适用了。这种看法引起了物理学界思想的极大混乱，如果这个定律真的被推翻了，整个物理学的宏伟

大厦和精巧建筑会毁于一旦。

这种怀疑和看法，后来被验证是不正确的。那么，这些物理学权威们为可要去怀疑能量守恒定律，提出能量守恒定律不适用的看法呢？产生这种情况是有原因的。

早在爱因斯坦提出光量子概念，就是把光看作是由一份份独立的能量子——光量子组成的这一崭新概念时，就没有得到关于物理学权威的承认。他们认为光量子说很难被接受，由于它与传统的波动说是那样格格不入，且没法解释光的干涉等波动所特有的效应。

在他们看来，光量子说虽有某些特定的实验根据，事实上不过是早已被推翻了的微粒说在新形式下的复活；而波动说尽管在个别实验的解释上遇到困难，但支持它的实验事实却比支持光量子说的多得多，新观点怎么能和经过千锤百炼、近乎炉火纯青的旧理论相匹敌呢？但是，作为光量子说重要实验根据的光电效应又该怎样用传统的波动说来解释呢？为了“拯救”物理学，这些权威们作了一个异乎大胆的然而又是十分错误的选择，那就是不坚持能量和动量守恒的广泛适用性。由于这样就提供了用传统的波动说“解释光电效应惟一的可能性”，可是他们的这个选择最后还是失败了。

基于不承认光量子说这样一个保守的原因，他们为着保持辐射的经典的波动理论，于是对  $\beta$  衰变中能量守恒问题又一次提出了疑问。有的权威声称：“在原子理论的现阶段，我们可以说，不论是从经验上还是从理论上都没有理由坚持在  $\beta$  衰变中能量一定守恒。原子的稳定性迫使我们放弃的也许正是能量平衡的观念。”其结果是在  $\beta$  衰变能量“失窃”案的侦破中，同样导致了失败。

就在这样一个紧要关头，有一名年轻的物理学家泡利却非

同凡响，提出了自己的崭新见解。他预言：能量守恒定律是有效的；在  $\beta$  衰变过程中放出了一个难以探测到的中性粒子，而这中性粒子在不知不觉中带走了原子核释放出的能量。

1930 年 12 月，泡利向在杜宾根参加放射性工作会议的人们写了一封信，就在这封信中，泡利描述了他所预言的中性粒子，并给此新粒子取名为“中子”。有了这个预言中的新粒子， $\beta$  衰变中能量守恒的困难就可迎刃而解，这个“窃能”案也就可以破了。

泡利的这个预言太新奇了，立刻引起了当时在哥本哈根的意大利物理学家费密的关注和欣赏。他运用泡利的观点，成功地解释了原子核的  $\beta$  衰变，提出了一种新的自然力——弱相互作用理论。费密还给那个“窃能贼”取了一个特别风趣的名字——中微子，意思是“微小的中性小家伙”。

虽然包利的这个预言简单明确，但当时大多数物理学家对此却持怀疑的态度。物理学家们真是感到左右为难，放弃基本的能量守恒定律吧，他们忧心忡忡；承认中微子吧，实验物理学家无论怎样努力寻找，却又始终没能找到这种新粒子。

这一时期物理学家把实验中出现的矛盾，归之于基本物理定律在原子核中不适用，如果对能量守恒定律表示怀疑，而不是去怀疑原子核的内部组成，产生这种不正确的认识也是有一定原因的。

首先，当时人们所认识的“基本粒子”寥寥无几，除去光子，能够组成物质的算来只有质子、电子，不用说  $\alpha$  粒子，连卢瑟福认为的中子也仅是质子、电子的复合体，其实是特殊的原子核，如何设想在认识非常有限的“基本粒子”的基础上能提出新的原子核的组成理论呢？

其次，时代的局限性，限制了人们提出新粒子的可能性。

虽然在理论和实验上都显示出新粒子被发现的曙光，但正如狄拉克所说：“在那些日子里，情况就是这样，人们很不愿意提出一个新粒子。”也就是说，在那时提出一个新粒子的科学预言需要很大的勇气和胆识。正因为有了这种勇气和胆识，才使包利在纠正所谓能量守恒定律不适用的错误中做出了不懈努力和杰出贡献。

中微子的科学预言在理论上是使人满意的，它完全说明了在  $\beta$  衰变过程中“失踪”的能量去向何方，圆满地解决了一些矛盾。然而，在人们还未捕获中微子之前，预言只能作为一种假说。

要证实假说，就得通过实验去捕捉中微子。因为中微子不带电，作用极其微弱，捕捉它就显得非常困难。中微子是以光速运动的，但它并不是光子。光子很容易同物质粒子作用，当它们通过物质时很容易被吸收掉。而通过  $\beta$  衰变放射出来的中微子却不会被物质吸收。它要穿过大概 1000 亿个地球才能与其内的一个原子核碰撞一次。多么神秘的穿透力！即使做成像地球那么大的探测器，当有 1000 亿个中微子通过时，大概只能探测到一个。中微子的主要奥秘就在于此。

尽管捕捉中微子如此之难，很多物理学家依旧千方百计去寻找它。1941 年，我国著名物理学家王淦昌提出通过轻原子核俘获 K 壳层电子释放中微子时所产生的反冲探测中微子。在这类过程中，所产生的原子核的反冲能量和动量将只同发射的中微子有关系。他把自己的假想写成《探测中微子的建议》一文发表于 1942 年 1 月出版的美国《物理评论》杂志上。

王淦昌的论文发表不过几个月，美国物理学家阿伦就据此做了  ${}^7_4\text{Be}$  的 K 电子俘获实验，证实了丢失的能量和动量恰好符合中微子的要求，这是显示中微子存在的头一个实验。王淦昌

的设想和阿伦的实验，被认为是 1942 年世界物理学的主要成就之一。

当然更为直接的实验是对已被放射出来而脱离源的中微子进行探测。这个实验直到 1956 年由美国洛斯阿拉莫斯实验室的柯温与莱茵斯完成。他们用了 200 升水和 370 加仑液体闪烁体做成探测器，埋在美国一个核反应堆附近非常的地下，来探测核反应堆放射出来的特别强的中微子。经过很长的时间，才成功地探测到了为数不多的中微子。

柯温和莱茵斯的实验是这样计划的：当反中微子  $\bar{\nu}_e$  射到水中并与质子碰撞时，便发生下面的反应过程  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$  由此放出的正电子经过减速后与电子湮没，转化为两个  $\gamma$  光子。这些光子同时射入两边的两个液体闪烁体，产生一个符合信号。所谓符合信号是指两个闪烁体同时记录到  $\gamma$  光子而产生的信号。这个信号的出现就表明在水中发生了  $e^+e^-$  的湮没过程。

值得注意的是，上述过程还产生了一个中子 ( $n$ )，它将经过多次碰撞，约数微秒后，被掺在水中的一个镉 ( $Cd$ ) 原子核吸收，同时产生了若干个  $\gamma$  光子  $n + Cd \rightarrow Cd^* \rightarrow Cd + \gamma + \gamma + \dots$  这些  $\gamma$  光子再进入闪烁体，又产生了一个延迟符合信号。这个信号的出现进一步证明在水中确实发生了上述过程。柯温和莱茵斯就是利用这种实验方法证实  $\bar{\nu}_e$  存在的。

这样，20 多年的“窃能”案终于被彻底侦破，中微子也就归了案。后来随着人们对弱相互作用的理解加深，对中微子的认识也就更清楚了。如今已知道，太阳及遥远的星体内部发生核反应时都会产生中微子，中微子一经产生便飞向四面八方，无处不有。尤其在建造了核反应堆这个强大的中微子源后，虽然中微子只有  $1/10^{20}$  的捕获率，但依据现代物理仪器也足以能探测到它的存在，并把它捉拿“归案”。

## 黑体辐射

1859 年 10 月 20 日，35 岁的中年教授基尔霍夫从海德堡提交了他的首篇热辐射论文。全篇论文尽管只有两页，却引起了科学思想的又一场革命。

这年 7 月，是一个阳光明媚，适于做实验的日子。在海德堡大学一间宽敞的实验室里，基尔霍夫正在一心一意地做着物质吸收光的实验。他把一个三棱镜和光屏放在靠窗口的长桌上。窗口用布遮掩起来后，便走到棱镜一侧，把酒精灯点燃，用它去烧灼准备好的食盐。被烧灼的食盐立刻升起黄色的钠光。钠光透过三棱镜，映在了前面的光屏上。光屏马上显现了两条黄色的明线。

然后，他又轻轻地转过身去，撩起布的一角，让窗口的太阳光通过钠光和棱镜照射到光屏上，看看会有什么变化。果然出现了变化：当太阳光较弱时，明线依旧存在；当逐渐增强太阳光，达到某一强度时，明线消失，并在同一位置上显出两条暗线。他把烧灼的食盐拿去一些，暗线又消失了。基尔霍夫观察到此，内心为之一阵激动，由于他发现了一个不同寻常的物理新现象。

作为严谨治学的实验物理学家是绝对不会放过偶然出现的新现象的。他多次重复实验：顺手把拿掉的食盐放回原处，只见光屏上的两条暗线又出现了；当再遮住太阳光时，只见光屏上显出的是两条明线，这到底是什么原因呢？

经过苦苦思索，基尔霍夫对这一现象的研究过程中，突然心领神会，原来是“物体会发什么光，就会吸收什么光”。也就是说，在上述实验中，金属钠原子能够发出两条黄色的明线，所以它能从太阳光中吸收与之相同波长的光，并在被吸收掉光的部分留下黑色的痕迹，即出现两条暗线。于是，基尔霍夫又换用其他物质，以相同的方法，反复进行实验，结果得到了一样的结果。由此，他发现了热辐射的定律，后被称为基尔霍夫定律：任何物体的发射本领和吸收本领的比值与物质特性没关系，是波长和温度的普适函数。

作为善长思考的理论物理学家从热辐射定律又引出一种崭新的想法：假如自然界能找到一个这样的物体，对它加热后，随着温度的不同能发出各种光时，它也一样会吸收掉与之对应的各种光，那么这个物体就可称为一个完全“黑”的物体了。沿着这个思路，基尔霍夫于 1862 年提出了理想黑体的概念。

理想黑体是从观察自然中抽象出来的一种物理模型。理论分析表明，一种理想黑体可以全部地吸收投射到它上面的一切辐射，而在相同温度下，它所发出的热辐射也比任何其他物体为强。对于理想黑体，不管其组成的材料如何，它们具有在相同温度下发出同样形式的辐射能量。所以，研究这样的黑体辐射，具有很大的理论意义和实际意义。

然而实际上黑体是不存在的，但能用某种装置近似地代替黑体。它是一个带有小孔的空腔，而且小孔对于空腔足够小，不会妨碍空腔内的平衡。通过小孔射入空腔的所有辐射经腔内壁多次反射后，差不多全部被吸收，再从小孔射出的辐射极少。

基尔霍夫认为黑体辐射也可称作空腔辐射，他给出了空腔辐射的有效定义：“已知一空间被很多温度一样的物体所闭合，

没有辐射能穿透出去，于是这空间中的每束辐射其组成在性质和强度方面与来自同温度的一个理想黑体的辐射相同。”

于是，基尔霍夫向理论学家和实验学家提出了类似的挑战。基尔霍夫强调实验上存在着很大的困难是有道理的，由于实验学家一定要解决下列三个问题：

- (1) 构造一个具有理想黑体特性而又易于办到的物体；
- (2) 装置具有比较灵敏度的辐射探测器；
- (3) 找到将测量扩展到大的频率范围的方法。

为了回答基尔霍夫提出的挑战，人们整整做了 30 多年的实验才获得较为足够的的数据。1893 年，一位只有 29 岁的德国青年学者维恩从热力学第二定律出发，结合新设计的实验，首先推演出黑体辐射的位移定律。

维恩从 1891 年来到柏林国立物理研究所之后，就悉心从事黑体辐射的研究。面对当时科学界正在找寻理想黑体终无所得而束手无策时，他却充分地显示出了自己的才能。这就是专门特意设制了一只箱子，箱子内壁全涂成黑色，形成一个空腔，上面开有小孔；为了加强吸收效果，又在空腔壁上装了很多带孔的横壁，从而使得辐射很难直接反射出去。

春天临近，经过很多次实验和思考的维恩，终于发现黑体的温度（绝对温度）同所发射能量最大的波长成反比，即维恩位移定律。

1896 年，维恩把热力学考察和多普勒原理结合在一起，应用到空腔辐射的压缩。他指出，在一定温度下的辐射密度能通过反射壁包围辐射区域的绝热收缩或绝热膨胀，转换到另一温度的辐射，从而得出了黑体辐射的能量按波长（或频率）分布的公式，又称为维恩公式。这个公式的短波部分同实验数据正好符合，并足以解释为何光谱的极大强度在黑体的温度升高时越来越向短波方向移动。

那么，维恩公式把空腔辐射的问题解决了吗？没有。1897年，卢默尔和普林斯海姆对空腔的能量分布进行了测量，发现维恩公式只在波长较短、温度颇低时才和实验结果恰好相符，在长波部分却偏离很大、完全不能适用。由此反映出经典物理学在解释黑体辐射规律时碰到了严重困难。

令人注意的黑体辐射，在英国也投入很多研究力量。特别是瑞利，这名出生贵族家庭的物理学家，时至1900年，虽然他已年过半百、颇有声望，可是依旧积极致力于研究工作。

就在这一年，瑞利应用经典统计力学和电磁理论来计算一个封闭腔的热辐射。他指出，随着封闭腔被加热，那么腔中将会建立一个电磁场，这个电磁场能分解成为一个具有不同频率和不同方向的驻波系统，每一个这样的驻波就是电磁场的一个基本状态。于是在一定频率间隔内的场能的计算变为去导出基本驻波的个数，由此得出一个新的热辐射公式。

可是瑞利在推导中错了一个因数8，这个错误为英国当时年仅27岁的金斯所发现。他于1905年给《自然》杂志的一封信中加以改正，即把原来的瑞利公式用8去除，获得了现在称之为瑞利-金斯公式。

这是企图用古典理论来处理黑体辐射的又一重要尝试。这个公式表明，辐射能量密度的频率分布正比于频率的平方。于是在长波部分与实验数据基本符合，但在短波部分却完全不符合，所以此时按公式计算而得到的辐射能量将变成无穷大，很明显这是不可能的。

古典理论和实验事实产生了很大的矛盾，这种情况曾被荷兰物理学家埃伦菲斯特称为“紫外灾难”。实际上，维恩公式与瑞利-金斯公式，各从一个侧面反映出物体辐射中的部分规律，但在解释一切热辐射现象却产生了矛盾和“灾难”，这就充分暴露了经典物理学本身的不足。

## 光电效应

光电效应指的是光从金属表面击出电子的效应。它是最早发现的量子现象，即最早发现的听说是不能作出经典解释的现象，人们把被实验事实所否定的经典机制记述如下：

“当辐射击中在原子内振动着的电子时，就把能量转移给电子。倘若电场的振动频率正好是原子中电子的共振频率，电子就会从光波中吸收能量直至它被释放出来。”

提出这一机制之后，人们就不厌其烦地向读者们证实它怎样地与实验事实不相符，却从来不屑于想一想：这一机制从经典物理学的角度来看是不是合理？其实，只要略微细心一点，就能发现这一机制是经典物理学所不允许的。

首先，实验证明：光只有照射金属才发生光电效应，金属的特点是有大量自由电子，可见光电效应是光和自由电子的相互作用。而自由电子不能有“强迫振动”，由于它没有强迫振动所需要的恢复力（阻止电子逸出金属表面的力是单向的，不是恢复力）。

再次、即使金属中有电子在光作用下强迫振动，其共振频率将是光的频率，所以其振幅将小于光的波长（否则电子的速度将超过光速）。如此频率极大而振幅极小的振动怎么能使电子脱离金属呢？

当然，根据力学原理，就算没有恢复力，电子在光波中也会振动，但这不是本来意义下的“强迫振动”，其振幅也小得

不能被宏观仪器所察觉。从这一点出发，我们可获得光电效应的经典解释：

当电子在光波中达到电动平衡时，它会在光的电场作用下振动，在光的磁场作用下以交变的角速度运动，我们叫这种运动为“光致运动”。这种运动使电子激发一个附加的驻波场，我们称它为“光致波包”。除此之外，我们把电子的光致运动的平衡点的运动称为“整体运动”。通常来说，电子在光波中的这种整体运动是等速直线运动，于是电子在光波中有三种运动形式：内部运动、光致运动与整体运动。电子在真空中则无光致运动，仅有内部运动和整体运动。

当电子从真空进入光波时，把从真空中的电动平衡过渡到光波中的电动平衡，这是一个整体过程，我们叫它为“入光过程”。在入光过程中，电子将产生光致运动，建立光致波包，为此，电子将从光波中吸取能量，即吸收一份光波。此外，电子的整体运动状态也将因此而改变，从一种等速直线运动状态过渡到另一种等速直线运动状态。

电子在入光过程中所吸收的那一份光波，乃是原光波的一部分，从而是一份有限的单色光波波列，因为有限，单色仅是近似的，这份光波就是一个爱因斯坦的“光量子”和“光子”。

这份光波作为从原光波中分离出来的一部分，可以用能量  $\epsilon$  和动量  $p$  来描绘它，即把它看成一个以光速运动的物体。另一方面，作为一个波列，又可用频率  $\nu$  和波数  $\sigma$  来描写它，其中  $p = \frac{\epsilon}{c}$ ， $\sigma = \frac{\nu}{c}$ 。

根据相对论不难证明，当参照系改变时， $\epsilon$ 、 $p$ 、 $\nu$ 、 $\sigma$  都会改变，但比值  $\frac{\epsilon}{\nu} = \frac{p}{\sigma}$  则保持不变。这样，普朗克 - 爱因斯坦关系  $\epsilon = h\nu$ 、 $p = h\sigma$  就不再显得像一个斯芬克司的哑谜了。但

是这一关系式中的常量正好是普朗克常量

$$h = \frac{\alpha\pi m_0 c^2}{\omega_0}$$

则要求从理论上证明（这要求更细致的电子模型）。爱因斯坦和德布洛依心爱的波与粒子的神秘对称性，早已不再是什么“解释”了。

如果光照射金属时，金属中的自由电子经历入光过程，吸进一个光子并从静止变为运动，并因此逸出金属表面，这就是光电效应。

这种经典机制能解释最初发现的实验事实：第一，入光过程极其短促，所以光电效应没有明显的“惯性”；其次，光越强，入光过程越短促，因此就有越多的电子在两次与金属的晶格点阵碰撞的自由程内完成入光过程，成为“光电子”，所以，光电子的数目取决于光的强度；最后，电子进入光波之后的光致运动，决定于光的频率而与光的强度没关系。因此电子在入光过程中所吸取的光波的能量和电子所获得的动能也决定于光的频率而与光的强度无关。

诚然，爱因斯坦的“光子”对光电效应的解释好像更简单而准确，而这一成功却以一系列的挫折为代价。

60年代，曼戴尔（Mandel）等人考察了两个独立激光之间的干涉。因为观测时间特别长，使得“当下一个光子被两个光源中的任一个发射出来之前，上一个光子已被吸收”，却依旧获得干涉条纹影像，如果把其中的一支激光停掉，就什么干涉也没有。这好像表明一个光束中的光子会同另一光束的“虚无”发生干涉。

早在1909年，泰罗（Taylor）就做过“单光子干涉”实验：首先用强光拍下细针的衍射像，然后把光源衰减，相应地

增加曝光时间。最后一次曝光长达 3 个月，相应的光弱到不可能有多于一个光子同时通过仪器。结果发现衍射图像和短时间的强光照一样。令人疑惑的是：“一个光子怎么能同时处在两束分光束中呢？”倘若是双缝衍射，则问题成为：“一个入射光子怎么会同时穿过两个狭缝呢？”

在“光子”学说遇到挫折的地方，我们的经典解释却照样通行无阻。

首先，我们应该考察光电效应的一个重要性质：单个原子辐射出来的光子是有限的单色光波波列，在通常情况下，物质所辐射的光波并不是“光子流”，而是大量光子互相迭回而形成的连续波场。在光电效应中，电子所吸取的光子乃是这个连续波场中的一份，它一般不再是某一原子所辐射出来的一个光子。显然，刚好可以从金属表面击出一个电子的光波，一定多于一个光子。

我们能用一个笨拙的比方来阐明上述结论：把光波比作一桶水，电子比作舀水的杯子，则原子辐射好比用杯子往桶里加水，尽管水是连续的，但在这一加水过程中桶里的水同样是一杯一杯地增加。光电效应好比用同一种杯子从桶里舀水出来，一般地说，舀出的这一杯水不再是原来舀进的某一杯水。除此之外，当桶里正好还能舀出一杯水时，桶里一定不止一杯水。

只有光流的强度很小时，诸光子才成为离散的，不再相互迭加，这样的光波才是名副其实的“光子流”，但这种光子流却已经不可能从金属表面击出光子。

人们经常用光电检测器给光子计数，对于强光，这种仪器是足够准确的；但对于弱光，当它告诉说仅有一个光子（只击出一个电子）时，那就肯定不止一个光子。

最初曼德尔的实验是用光电检测器给光子计数的，所以它

关于“当下一个光子发射之前上一个光子已被吸收”的报告是不可信的。后来换用底片曝光，也有相同的问题。

至于单光子干涉实验，从我们的角度来看，光子原是一个单色光波波列，可以自己和自己相干涉。所以从实验的干涉机制来看无困难，但从探测机制来看却存在同一问题：假如光源真是弱到发射“光子流”的程度，则照相底片将不再感光，所以我们估计，泰罗实验中的光源还是比他认为的要强一些。

这一切都还有待实验进一步检验。

## 普朗克的突破

1900年夏末的一天。在柏林郊外的哥鲁内瓦尔特森林里，德国物理学家普朗克正在和儿子一同散步。就在这长时间的散步过程中，他对儿子热心地谈到了自己在这一年夏天得出的有关热辐射问题的新设想。

据记载，普朗克对儿子说，这个新构想让他作出了第一流的发现，是革命性的发现，恐怕只有牛顿的发现才能与之相比。其实上，普朗克这时对自己工作的认识是无误的，他所作出的量子假说，当之无愧地是第一流的发现，更是革命性的发现。

普朗克早年在慕尼黑和柏林接受大学教育。在柏大林学曾听过亥姆霍兹和基尔霍夫的讲课。他对这两名物理学家的品德和科学研究非常崇敬，然而对他们的讲课却感到没什么帮助。正像普朗克晚年回忆这段经历时说，亥姆霍兹讲课无准备，说起话来结结巴巴，在黑板上经常写错字，“我们总觉得他自己对讲这门课是厌烦的，弄得我们也厌烦了。基尔霍夫的讲课准备得特别仔细，每句话都挑选得非常准，一个字不多，一个字不少，但是既干巴又单调。我们真佩服讲师本身的那股劲儿，可是对他的讲课却不怎么欣赏。”

正是因为这个原因，普朗克经常地是自学，研究他们的原著。亥姆霍兹和基尔霍夫的原著马上就使他感到钦佩，此外是克劳修斯的主要著作《力学的热理论》也对这位年轻的学生产

生了强烈的印象，使他立志去找寻像热力学定律那样具有广泛性的规律。

就是在那些年月里，普朗克形成了自己特有的方法论的基本原则。

听说，当时德国实验物理学家约里曾告诉他：物理学基本上是一门已经完成了的科学，所以，要研究物理学不会有有多大成果。但是普朗克还是下定决心研究物理学，由于物理学可以探索到绝对客体的更多规律。

普朗克早期主要从事热力学研究，他的博士论文就是《论热力学第二定律》。他认为，热力学第二定律不仅是涉及热的现象，还同一切自然过程有关系。热力学第二定律的关系式不仅指出了自然过程的方向，而且因为熵的极大值对应于平衡态，深入地研究熵就可让我们掌握有关物理和化学平衡的全部规律。

简单的热力学关系式可能解释很多现象的这一事实使普朗克深信，在自然界中它们就是真理，是基础，是绝对的，能够描绘自然界中一切最简单的、不可动摇的、永恒的东西。普朗克十分向往完成他自己的这种心愿，于是他多年的科研计划就是为了揭露如何从热力学第二定律中得到尽可能多的结果。

普朗克在散步中谈起，直接导致他作为第一流发现的，是有关黑体辐射的研究。普朗克于 1894 年起，就把注意力转向黑体辐射问题。于是立刻被霍尔基尔函数的普遍适用性迷住了，他说：“这个所谓的正常能量分布代表着某种绝对的东西，既然在我看来，对绝对的东西所作的探求是研究的最高形式，所以我就劲头十足地致力解决这个问题了。”

1896 年，普朗克在热辐射理论研究中，感觉到应用麦克斯韦的电动力学是解决这个问题的一条直接途径。也就是说，

他想象物体的空腔内充满了具有各个不同固有周期的、弱阻尼的线性谐振子或者是共振器；因为热辐射而激起的振子能量交换就会渐渐地达到标准能量发布的、与基尔霍尔定律相吻合的定态。

1899年，普朗克阐述了以下不成熟的想法：“我认为，这必然会使我得出这样的结论，即辐射熵的定义因而还有维恩的能量分布定律，两者必定都是通过将熵增加原理应用于电磁辐射理论而得出的。因此这条定律有效性的限度，倘若它存在着这种限度的话，将和热力学第二定律所受到的完全一样。显然，这使我们对这条定律再做一番实验研究显得更加极其重要了。”

这年年底，普朗克得知鲁本斯等人在9月发表的实验报告中指出了维恩公式在 $\lambda T \rightarrow \infty$ 时出现明显的偏差，所以表明了维恩理论的不足。

第二年，鲁本斯夫妇访问了普朗克，鲁本斯告诉他，在 $\lambda T \rightarrow \infty$ 时，瑞利在当年6月发表的公式却和实验结果很好地符合。

这使普朗克受到很大启迪，立刻尝试用内插法去找寻新的辐射公式，使在长波方面渐近于瑞利公式，在短波方面渐近于维恩公式。普朗克于10月7日当天就获得了一个他所要求的新的辐射公式，并于10月19日的柏林物理学会上以题为《维恩辐射定律的改进》的论文作了报告。

第二天清早，鲁本斯告诉普朗克说，在学会会议结束后的当晚，他把这个新公式跟他自己曾经做过的实验数据作了十分仔细的比较，结果是处处相符，使人满意。鲁本斯深信在这个公式中孕育着极端重要的真理，绝不是一个偶然的巧合。

可是当时也有人认为这个公式只是具有形式上的意义，并

且把它看作是一条靠侥幸猜中的规律而已。这就推动着普朗克去寻找他的公式的理论基础。事后普朗克曾回忆说：“尽管这个新的辐射公式居然能证明是绝对精确的，但是假如可以把它仅仅看做是一个侥幸揣测出来的内插公式，那么它的价值也只是有限的。正是因为这个原因，从它于 10 月 19 日被提出之日起，我即致力于找出这个等式的真正物理意义。这个问题使我直接去考虑熵和几率之间的关系，也就是说，将我引到了玻耳兹曼的思想。”

在这以前，普朗克对玻耳兹曼的统计理论并不欣赏，但他曾负责编辑过他的老师与前任基尔霍夫文集的工作，因此对于玻耳兹曼理论的数学方面是非常熟悉的。他根据玻耳兹曼的统计解释，即状态的熵等于这种状态的几率的对数同  $k$ （玻耳兹曼常数）的乘积，来计算同一定能量的单色振子相对应的几率，那么也就能计算这个体系的熵，从而也可能计算它的温度。至于单色振子相对应的几率，他引用一个新的普适常数  $h$ ，因为  $h$  的因子是能量和时间的乘积，普朗克就称  $h$  为作用量子。这样，该几率量度不但合乎玻耳兹曼的理论，同样也适用于辐射现象。

值得关注的是，普朗克在这一处理方法中，实际上他已经作了一个革命性的假设，已经与经典物理学有所不同了。因为按照经典理论看来，一切的各个微观态的总和应当组成一个连续体。也就是说，把全部可能的微观态编排起来，应当得到一个连续的组合。而按照普朗克的思想线索，其实是认为所有可能的微观态的总组合是宏观的集合；一个系统的每一个宏观态对应于完全确定数目的微观态，这个数目就是所谓状态的几率。再从配容入手，很自然要引进能量不连续的假定，因为只有把能量分成一份份的，才可以计算确定的配容数目，倘若总

能量能够无限连续地划分的话，能量分配的方式就不一定是有限的。

在 1900 年末，普朗克最终确信这个公式所包含的无法避免的似乎振子只能包含分立能量子的结论，有关 1900 年 12 月 14 日，在德国物理学会会上宣读了他的论文《关于正常光谱的能量分布定律的理论》，明确提出了关于物质微观结构的量子假说。

普朗克指出，为了获得和实验完全符合的黑体辐射公式（普朗克公式），必须抛弃经典物理学中有关物体能连续辐射或吸收能量的概念，而代之以新的概念。他认为可以将构成黑体腔壁的物质看成带电的线性谐振子，它们与腔内的电磁场交换能量（辐射或吸取能量）。而这些微观谐振子只能处于某些特定的状态，在这些状态中它们的能量是最小能量  $\epsilon_0$  的整数倍。它辐射或吸收能量时只能由一个可能状态跃迁到另一可能状态，即能量只可一份一份地改变，却不能连续地变化。这最小能量  $\epsilon_0$  称作量子，它和振子振动频率  $\nu$  成正比，比例系数就是  $h$ （又称普朗克常数）， $\epsilon_0 = h\nu$ 。根据这些假设可以成功地导出普朗克黑体辐射公式。

普朗克的量子假说，突破了经典物理学的旧框框，第一次提出了微观系统的量子的特性，从而打开了认识微观世界的大门，是现代物理学史上又一次革命性的发现。

## 德布罗意的联想

1924 年秋天，英国皇家学会权威刊物《哲学杂志》登记一篇无名之辈的文章，却震撼了世界科坛。

这篇文章明确提出一个假设，认为爱因斯坦所讲的波粒二象性不是光子才具有的，它也适用于一般的完全物质，即一切微观粒子。对于这种“二象性”作者名之为“物质波”。其观点的新颖、独创，推理的严密、准确，都是无懈可击的。这种大胆的假设，立刻在科学界激起一个巨大的波澜，但论文的作者只是一个当时在物理学家中几乎不为人知道的法国青年学者路易斯·德布罗意。

路易斯·德布罗意出身于贵族家庭。到了他的祖父这辈，因为承袭了曾祖一辈的爵位，坐享荣华富贵，便无所建树，毕生默默无闻。

早在路易斯少年时期，父母亲就相继逝世了。此后，他就在哥哥莫里斯·德布罗意的抚养与教育下成长。莫里斯是一位卓越的实验物理学家，X 射线方面的初期经典研究的创始人之一，他不但承担了父亲的责任，而且对其弟关怀备至，从而对路易斯走上物理学研究道路产生非常大的影响。

在中学读书时，路易斯的兴趣是文科。18 岁时就取得了历史学学士学位，直到 20 岁那年，在其兄的启发下他的志趣才转向物理学。在此期间，他普遍涉猎了自然科学名著。其中法国物理学家、数学家庞加莱的著作《科学的价值》、《科学与

假设》，对他颇有启发。从庞加莱的著作中，他了解到人应该怎样为科学事业而奋斗，假设在科学领域中不管有着多么重要的意义。莫里斯在巴黎拜伦路上宫殿似的家庭里建有一个私人实验室，路易斯便兼任哥哥当物理实验助手。

路易斯的治学原则是：广见闻，多阅览，勤实验。他认为环境与出身不能决定一个人的志向，重要的是在学术上要善长独立思考，不迷信权威名流。就是对那位比他大 17 岁的哥哥，只要在学术上发生了争论，他也毫不留情面，有时居然弄得哥哥面红耳赤。当时他俩讨论最多的课题之一是关于 X 射线的波动性和粒子性。他在自己的晚年回忆说：“经过长时间的孤寂的思索和遐想之后，在 1923 年我忽然想到：爱因斯坦在 1905 年所作出的发现，应当加以推广，把它扩展到一切物质粒子，尤其是电子。”

这一年，德布罗意着手解决因为光的波粒二象性所造成的困境。根据所有干涉和衍射实验可知，光是由电磁波组组成的；但是，根据光和物质进行的各种能量交换时，它又是粒子性的。两种观点都由大量的实验佐证。一切较早一些的实验结果显示了波动性，而一些最近的实验结果又都表明光具有粒子性。一部分最近的数据就来自他哥哥的实验室；并且，有些实验是在他亲自协同下完成的。怎样去统一看来是如此矛盾的两个方面呢？

德布罗意是从爱因斯坦光的波粒二象性思想中受到非常大的启发。他想，光辐射具有粒子性，而物质粒子为何不可以具有波动性呢？长时间以来，在光学上，与波动的研究方法相比，过去忽视粒子的研究方法了。但在物质粒子的理论上，人们却反其道而行之，太忽视波动的图像了。他认为在研究物质粒子的理论中，必须“同时引进粒子概念和周期性概念”。

大胆设想，不但光有粒子和波动两种性质，而且“一般的”物质同样也具有这两种性质。这就是说，既然粒子概念在波的领域里成功地解释了使人疑惑的康普顿效应，那么，波动概念也应能解释粒子领域里令人困惑的定态概念。

在这些思考的基础上，德布罗意于 1923 年 9 月 10 日，发表了题为《波和粒子》的论文。他指出爱因斯坦的公式  $E = h\nu$  不适用于光子，而该适用于电子。就是说，素来被人看做是粒子的电子，也应该具有波动的性质。他把电子假设为波，用波形轨道代替圆形轨道，让电子从圆周上的某点为起点出发，边振动边绕周。为了绕一周后能回到原来的位置，处于原状，这就得巧妙地调节它的波长，即周长除以它的小长为一整数，也就是玻尔理论中的量子化条件。在该基础上，他把  $E = h\nu$  与爱因斯坦相对论的推论  $E = mc^2$  相结合，创造了物质波的理论。即  $p = h/\lambda$ ，其中  $h$  为普朗克恒量， $p$  为物质的动量， $\lambda$  为其波长。由此可得出物质波的波长，由下式表示：

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

这就是著名的德布罗意公式。他还提出，应该把玻尔理论中的量子化条件解释为有关物质波的陈述：玻尔给出的电子轨道长度应是伴随着电子的物质波波长的整数倍，存在的轨道表示物质波的驻波形式，而在其他禁止的轨道上，物质波因为干涉而消失。这样就阐明了可以用物质波的概念来解释玻尔提出的轨道量子化的条件。

9 月 24 日，德布罗意发表了题为《光量子，衍射和干涉》的论文，引入了相位波概念。在谈到粒子波动现象的实验验证可能性时，他预言：“一束电子穿过非常小的孔也许产生衍射现象，这可能是实验上验证我们想法的方法。”

同年 10 月 8 日，德布罗意具体地给出了关于几何光学和经典力学的类比。他认为传统力学只不过是一种近似，它与几何光学的适用范围一样。他感到有必要建立一种新的动力学——波动力学，并且指出：“关于自由粒子的新的动力学和旧的动力学之间的关系，完全同波动光学和几何光学之间的关系相同。”

1924 年，德布罗意总结了上述三篇短论文，并加以缜密的证明，形成了他的博士论文《关于量子理论的研究》，于 11 月 25 日在索邦学院的审定委员会上答辩了这篇博士论文。

和历史上多次发生过的事情一样，德布罗意有关物质波的极为大胆的假设发表后，起初并没有引起物理学界的重视。索邦学院也是如此，当收到德布罗意的博士论文后，因为不知道怎样进行估价而处境尴尬，导致作出的部分评议是：“我们赞扬他以非凡的能力坚持作出的为克服困扰物理学家的难题所必须作出的努力”，最后在场的评委教授只得以“相信”的结论通过这篇博士论文。

在此之前，德布罗意的老师朗之万将论文的副本寄给了好友爱因斯坦。爱因斯坦收到后，立刻看出了这位青年学者所提出的物质波假设的极其重要性，真有些喜出望外，马上回信表示赞赏。同时写信给玻恩，建议他也读一读这篇别有风趣的，看起来好像是不合理的，然而却是独具一格的论文。由于爱因斯坦的决定性支持与推荐，德布罗意有关物质波的假设受到了国际物理学界的普遍重视。于是，很快全文刊登在皇家学会的《哲学杂志》上。

为何物质波的假设提出竟会使很多有名望的科学家感到难以捉摸呢？这是由于物质波与人们以往所熟悉的水波、声波、光波、电磁波以及其他实实在在的，并能通过感觉器官或者仪

器记录下的各种类型的波，是根本不一样的。

因为德布罗意的物质波大大超出了科学家们当时的思维空间和认识水平，在这些科学家的眼里就认为德布罗意的假设是离经叛道，太神秘了。但是，德布罗意坚信：任何物体包括大至一个行星，一块石头，小至一粒灰尘或一个电子，这些客观存在的物质，能够在真空中传播的现象，决不是机械波，同样也不是电磁波，而是一种崭新的未被认识的波。由于没有物质，就谈不上有什么波，因此德布罗意把这种“不可想象”、“玄而又玄”的“神秘波”叫作“物质波”。

物质波的假设提出使很多科学家处境尴尬的另一原因在于：我们为看不见德布罗意波。但是，一般说来我们如何才能觉察出波来呢？不能只凭借我们的感觉器官，因为人的感觉器官毕竟还有较大的局限性，比如人耳只能听到频率介于 20 至 16000 周/秒的声音，而人眼只能反应波长介于 0.4 至 0.8 微米的可见光波。于是科学家们通过发明各种仪器来不断扩大人的感觉范围。

现在已明白，被假设的德布罗意的波长范围是十分广阔的。既然如此，为什么长时间以来人们却没有发现这种波呢？问题在于：怎样去发现。机械波，波长有几米，便能被人耳察觉。但一台收音机，即使调谐到这声波的波长也不能接收到它，由于收音机只能接收无线电波。从另一角度来看，无线电波不能被人耳或其他机械装置接收到，即使它的波长约几米。

这就是说，任何一种接收器只能对某种特定类型的波作出反应。耳反应声波，眼反应电磁波。由此可见，人们又怎么察觉德布罗意波呢？德布罗意波不但不属于声波这一类，同样也不属于电磁波这一类。

然而，人们还是想方设法要去察觉德布罗意波。这里，先

让我们根据德布罗意公式： $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ ，看一看我们四周的物体运动是和怎样的波长相对应的。

### (1) 地球的波长

地球的质量是  $6.0 \times 10^{24}$  千克，环绕太阳的轨道速度大约为  $3 \times 10^4$  米 / 秒，根据德布罗意公式，普朗克恒量  $h \approx 6.60 \times 10^{-34}$  焦耳·秒，可以求得地球的波长。

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{6.0 \times 10^{24} \times 3 \times 10^4} \text{ 米} = 3.6 \times 10^{-59} \text{ 米}$$

这个数值是现在还没有任何一个能用来作比较的有确定意义的量，它到底会小到什么程度，推测任何现有的以及未来几十年也许拥有的最精密的仪器，也无法记录下这样小的数值，真小得使人奇怪，是不是隐含着深一层次的奥秘？

### (2) 一块石头的波长

一块石头质量为 1 千克，飞行速度为 1 米 / 秒。根据德布罗意公式能够求出，石块运动时的波长。

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-34}}{1 \times 1} \text{ 米} = 6.6 \times 10^{-34} \text{ 米}$$

这个波长的数值比一个原子核的线度还小 1 千亿亿倍。可是原子核本身已经远远超过了显微镜所能观察的范围，所以目前要用仪器观察到这样短的波也是没法做到的。

### (3) 电子的波长

电子的质量为  $m = 0.91 \times 10^{-30}$  千克，带电量为  $1.6 \times 10^{-19}$  库仑，经过 200 伏特的电势差加速该电子，加速后电子得到动能  $E = Ve = 200 \times 1.6 \times 10^{-19}$  焦耳  $= 3.2 \times 10^{-17}$  焦耳。

根据  $\frac{1}{2}mv^2 = E$ ，电子的速度是  $v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$ ，代入数字可得出  $v = 8.4 \times 10^6$  米 / 秒。

按照德布罗意公式求出，这个运动电子的波长为

$$\lambda = \frac{6.60 \times 10^{-34}}{0.91 \times 10^{-30} \times 8.4 \times 10^6} \text{ 米} = 8.7 \times 10^{-11} \text{ 米}$$

这个数字就大不一样了。 $8.7 \times 10^{-11}$  米几乎相当于 X 射线的波长，而后者是可以被测出的。所以，在理论上，我们应该可以测出电子的德布罗意波。

这个理论的推测，于 1925 年被美国物理学家戴维孙的电子衍射实验所证实。戴维孙于 1911 年获得了普林斯顿大学的博士学位，第二年被卡内基理工学院任命为物理学助理教授。1917 年转入西部电气公司的工程部队从事研究工作，成绩卓著。

实际上，电子束在晶体上的衍射早在德布罗意的假设提出之前就已发现。1921 年，戴维孙与助手康斯曼在实验中曾偶然发现，当电子在薄镍片上散射时，能够观察到强度和散射角度有明显的依赖关系，但对于这个奇特的实验结果，他们没有领悟到是一种衍射现象。后来，戴维孙花了大约两年的时间继续这项研究，设计和安装了新的仪器设备，还用不同的金属材料作靶子。工作虽尽管有多大进展，但却为以后的实验研究作了技术准备。

1925 年，戴维孙和助手革末又开始了电子散射实验。一次偶然的事件让他们的工作得到了戏剧性的进展。正如他们的论文指出：

“在进行这项工作时，因为靶子有很高的温度，使盛有液态空气的容器爆炸了。试管被炸碎，进入的空气使镍靶氧化了。后来，氧化物被还原，靶子上面的一层薄膜也用蒸发的办法去掉了，是在氢气中及真空中、在不同的高温下长期的加热后才去掉的。

“当实验继续进行的时候，散射电子按角度的分布全部变了。变化的情况能用曲线示出。……曲线是在事故发生之后得到的，是首次看到的新曲线。这种散射的明显变化曾被认为是因为长时间的加热过程使靶子发生了再结晶而造成的。在事故发生之前，我们轰击过大量的小晶体，事故发生之后，我们只轰击了几个（实验上约 10 个）大晶体。”

也就是说，看到新曲线中发现了好几处尖锐的峰值，他们即采取措施，把管子切开，发现镍靶在修复的过程中发生了改变，原来磨得极光的镍表面，现在看来构成了一排大概 10 块明显的结晶面。他们断定出现新的散射曲线的原因就在于原子重新排列成晶体阵列。

这一极其重要现象的出现，促使戴维孙和革末立刻修改他们的实验计划。特意制作了一块大的单晶镍，并切取一特定方向来做实验。先后花了近一年的时间，制成了新的镍靶和管子。他们为熟悉晶体结构做了许多 X 射线衍射实验，拍摄了很多 X 射线衍射照片，可就是没有把 X 射线衍射和他们正从事的电子衍射联系在一起。这样他们于 1926 年继续做电子散射实验的过程中，并没有立刻重获偶然出事故之后的那种曲线。

1926 年夏天，戴维孙出席了在牛津大学召开的英国科学促进会。在那里，他和玻恩、弗兰克等入讨论了他的电子散射的研究。通过讨论，使戴维孙意识到他实验中出现的新曲线这一重要结果恰恰是因为晶格的电子衍射造成的，这就证明了德布罗意的假设。

于是，戴维孙回到纽约之后，马上和革末一起，更自觉地投入到找寻电子波的实验证据的全面研究中去。从该年 12 月起，经过二三月的紧张工作，便从实验中获取了卓著的成果，

即实验所得的数据表明，德布罗意公式： $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$  在测量准确度范围内是正确的。

1927年3月，他们提出了一个研究结果的初步摘要，全文报告则于12月发表在《物理评论》上。此文系统地记述了电子衍射的实验方法、实验经过和实验结果，首次确定了运动电子的波动性，其波长与德布罗意物质波的假设相同。

电子不但在晶体上散射时表现出波动性，当电子束穿过一薄金属箔后，再照射到一屏上时，在屏上就显现出有规律的条纹，也表现出波动性。这些条纹和 X 射线通过晶体粉末时所发生的衍射条纹是很相似的。这说明电子也和 X 射线一样在通过晶体后有衍射现象，并且从晶格常数、加速电位差和条纹的几何图形等，都证实了电子衍射时的波长和按德布罗意所预言的物质波的波长完全吻合。

电子衍射实验的成功，再次庄严地宣告：德布罗意的假设全部正确！从此，物质波的观念为一切的物理学家全面接受，并成为量子力学的重要基础。

## 爱因斯坦的发展

1905年6月，在伯尔尼专利局工作的一位青年科学家发表了一篇名为《论动体的电动力学》的论文。这篇论文由于逻辑的完美和思想的深邃，尤其是以全新的观点解决了当时物理学进展中的难题，并引起了物理学界的极大重视。这位年仅26岁的青年科学家很快便成为科学革命的一位举世闻名的旗手，物理学界的一颗璀璨夺目的新星，他就是爱因斯坦。

爱因斯坦在专利局干得非常出色。他作为三级技术专家，虽然年薪只有3500瑞士法郎，却已经能维持生活，而且这个工作迫使他作多方面的思考。一旦有了休息的时间，他就用于物理学的研究，并在笔记纸上演算复杂的数学公式。但是他一听见上司的脚步声音，就把纸匆忙地塞进抽屉里。

进行了整整5周的紧张研究，爱因斯坦终于把经过10年酝酿的见解，形成了论文，提出了不同凡响的狭义相对论。正如美国物理学家佩斯指出：“狭义相对论是经历10年的酝酿才诞生的。然而作者（指爱因斯坦）在悟出这个理论最关键、最重要的运动学见解之后，不到五六周的时间便在讨论的过程中实际完成了论文。这件事是从爱因斯坦1922年12月在京都的演说中知道的。”

实际上，爱因斯坦在阿劳的那一年（即从1895年10月到1896年早秋），他已经想到这样一个问题：“如果一个人以光速追随光波运动，他的眼睛看到的会是什么情景呢？”不久，

爱因斯坦进入联邦工业大学学习，他又遇到以太、光和地球运动的问题。这些问题一直萦回在他的脑海之中，他几乎想制造一种仪器，用来精确地测定地球相对以太的运动。

后来，爱因斯坦在谈到他第一次萌发相对论想法时，曾说：“谈论我如何开始产生相对论思想是一件很不难的事。因为激发我思考的事物太多了，在相对论思想发展的不同阶段上，每一种思考所产生的影响又都不相同，……这种想法究竟从哪里开始说不太明确，但是肯定它与运动物体的光学特性有关。光在以太中传播，而地球又在以太中运动，换言之，以太在相对地球运动。”这就是说，对运动相对性的沉思、探索和研究导致了爱因斯坦的“智力革命”。

、美国杰出科学史家科恩认为，科学革命并非一个突发的、短暂的事件，而是有它自己的发展过程的。他根据 4 个世纪以来科学发展的重大事件的历史分析，把这个过程区分为四个阶段：智力革命、书面上许诺的革命、纸面上的革命和科学革命。所谓“智力革命”即“自身革命”。当一位科学家（或一个科学家集团）设计出一种根本解决某个或者某一些主要问题的方案，寻找到一种利用信息的新方法，并且提出一种能以全新的方式包容现存信息的知识框架（由此导致作出没有人曾料到的预言），引入一套改变现有知识特性的概念或提出一种革命的新理论的时候，这种革命就已经出现了。总之，革命的第一步总是由一个或多个科学家在所有科学革命初期建立的。狭义相对论的创立也是如此。

爱因斯坦于 1921 年在伦敦皇家学院的讲话充分表达了这种思想，他说道：“我能够荣幸地在这个曾产生过理论物理学的众多最重要基本观念的国家首都发表讲话，感到特别高兴。我想到的是牛顿所给我们的物体运动的引力理论，以及麦克斯

韦和法拉第借以将物理学放到新基础上的电磁场概念。相对论实在可以说是对洛伦兹和麦克斯韦的伟大构思画了最后的一笔，因为它力图把物理学扩充到包括引力在内的一切现象。”

这就是说，相对论又产生在对麦克斯韦电磁场理论的推广之中。由于麦克斯韦理论和牛顿力学具有明显不同的特点，在物理学的发展进程中，就很自然地提出了这样的问题：运动的相对性对力学规律是适用的，那么对电磁规律是否也适用呢？

爱因斯坦依据对牛顿力学和麦克斯韦理论进行了深刻的分析之后，敏锐地指出：“当麦克斯韦电动力学应用到运动的物体上时，就会引起一些不对称，而这种不对称好像不是现象所特有的。”这里所说的不对称就是统一性遭到破坏。爱因斯坦认为这种不对称不像是自然界所固有的，因为他相信自然界具有统一性，因此问题可能出在我们以往认识自然界的理论和概念上。

牛顿说：“绝对的、真正的和数学的时间自身在流逝着，并由于它的本性而均匀地，同任意一种外界事物无关地流逝着。”“绝对空间由于它的本性，以及它与外界事物无关，它永远是等同的和不动的。”在牛顿看来，空间和时间是独立于人之外的客观存在，这明显是唯物主义的观点；然而牛顿却把空间和时间绝对化，没有看到时间和空间之间的联系，也没有看到它们与物质的联系，而是一种形而上学的看法。

爱因斯坦经过 10 年的沉思、研究发现，只要把作为经典力学基础的绝对空间和绝对时间的概念加以适当修改，上述提到的不对称就能够消除。爱因斯坦正是在一个最简单、最平凡，也似乎是司空见惯、最不成问题的问题上找到了突破口，这也是爱因斯坦“智力革命”的最可贵之处。

实际上，人是居住在地球的表面上的，因此很自然地是以地

球表面为基础来确定物体的空间位置，这是与地球表面联系在一起的空间。物理学家在研究物体运动时，必须依靠参照系的选择，事实上也是用的具体空间，也就是相对于某一物体或物体系的参考空间。所以，并不存在抽象的、绝对的空间，只存在具体的、与物体相联系的空间。显然，与具体的物体相联系的空间，是相对的而并非绝对的。

绝对的时间概念，其特点是统一性与独立性。它的独立性，表现在时间不受任何其他东西的影响；它的统一性，表现在在任何参照系都有统一的时间。但是绝对时间概念的这种性质是不明确的。从麦克斯韦的电磁场理论的观点出发，因为场是以有限的速度传播的，它就不能提供不同参照系之间有同步的时间。例如对于同一个电磁波，不同惯性系测量它的频率是不同的，也就是测量它的振荡周期是不同的。这就是说，对于同一个电磁振荡，在不同的惯性系测得的时间间隔的也是不同。显然，这是对统一的时间标尺的挑战。假如没有统一的时间，承认各个惯性系有各自的时间，那么时间不受外界影响也就无法成立了，因此时间的独立性也不是绝对的了。

爱因斯坦正是在极为周密地考察空间与时间的关系中发现：“两个事件间，既没有空间的绝对关系，也没有时间的绝对关系，但是有时间与空间的绝对关系。”这便是他对时间与空间概念的全新理解。他还发现了“同时相对性”，即两个在空间上分隔开的事件的所谓“同时”，取决于它们之间相隔的空间距离和光信号的传播速度，在静止的观察者看来却是同时的两个事件，在运动的观察者看来就不可能是同时的。这就是说，同时性的概念也变成相对的了，它与物体的运动情况有关。

根据上述的思路，爱因斯坦着手创立更为完善的理论。他

在《论动本的电动力学》一文中写道：“凡是对力学方程适用的所有坐标系，对于上述光学和电动力学的定律也同样适用……我们要把这个猜想提升为公设，并且还要引进另一条在表面上看来同它相反的公设：光在空虚空间里总是以一确定的速度  $c$  传播着，这速度同发射体的运动状态无关。”

爱因斯坦在这里提到的两个公设，现在一般称为狭义相对论的两个基本原理。第一个狭义相对性原理是：在所有的惯性系，物理学规律都是一样的；不存在一个优于其他惯性系的绝对惯性系。第二个原理是光速不变原理：在所有的惯性系中，真空中的光速不变，都是常量  $c$ 。

有了这两个原理，其必然的结果是否定了绝对惯性系的存在，从而也就没有“以太”存在的必要了。以太存在的假说，曾是 19 世纪经典物理学所依赖的基本假说之一。迈克耳逊—莫雷实验的零结果明确地宣告了寻找以太的失败。当时很多物理学家都不愿意看到这个事实，都不愿推翻以太的假说。然而，爱因斯坦却与众不同，他大胆地接受了这个事实，还明确宣布所谓绝对静止的“以太”的存在是“多余”的，并且把所有的“以太漂移”实验中所表现的光在真空中始终是以一确定速度传播的事实提升为一个原理，就是光速不变原理，这又是何等了不起。

爱因斯坦发现，为了证明光速是一个恒量，人们必须接受大量出乎意料的事情：比如随着物体运动速度的增加，物体在运动方向上就会变得越来越短，直至在达到光速时，长度变为零为止；与此同时，物体的质量会越来越大，在达到光速时，质量会变得无穷大。他还发现，当物体的运动速度越来越大时，在运动物体上时间流逝的速率也会逐渐减小，而在达到光速时，时间就会完全停止。所有的这些，在当时人们的脑海

中简直是不可思议的，但是却真正把握了对物理世界崭新的基本认识。

狭义相对论不仅引起了时空观的革命，还带来了整个物理学的革命，在 20 世纪的人类生活中产生了深远的影响。后者最为明显的是关于物体的能量和质量相当性的推论。这是 1905 年 9 月在爱因斯坦写完了狭义相对论论文后 3 个月提出来的。

爱因斯坦发现，物体的质量就是它所含能量的量度，如果能量  $E$  改变了，那么质量  $m$  也就相应地改变  $E/c^2$ ，这里的  $c$  是光速，即

$$E = mc^2$$

这就是闻名的质能关系式，它代表质量与能量的关系。

质能相当性给了我们特别重要的启示，它说明一定的质量就代表一定的能量，质量与能量是相对的，两者之间的关系只是相差一个常数  $c^2$  的因子。依照质能关系式，一个处于静止状态的物体，由于它有静止质量  $m_0$ ，因而也就有能量  $E_0 = m_0 c^2$ ，这在经典物理学又是难以理解的。

尤其令人想不到的是，这样的能量其数值十分巨大。由于光的传播速度是  $3 \times 10^8$  米 / 秒，静止质量为 1 克的物体就含有  $2.5 \times 10^7$  千瓦·小时（度）的能量。由此推算，若一年的发电量为 5500 亿度的话，也不过相当于 22 公斤物质所含的能量。

对此，有人一定觉得十分奇怪，这么巨大的能量，为什么长期没有被人类发现呢？对于这个问题，爱因斯坦有一个特别通俗的回答。他说：“答案是够简单的：只要没有能量向外面放出，就不能观察到它。好像一个非常有钱的人，他从来不花费或者付出一分钱，那就没有谁能够说他到底有多少钱。”

实际情况正是如此。我们对能量的了解，正是在一种形式

的能量通过传热、做功等方式转变成其他形式的能量时。由于能量是客观存在，但是只有由一种形式的能量转变为另一种形式的能量时，这种能量才会被人们发现，也就是说，只有放出其能量时才能被观察到。

质量相当性的发现，预示了物质的质量就是能量的一种储藏，爱因斯坦还指出，从当时已知的放射性衰变去研究这种巨大的能量。由此使得当时根本无法解释的放射性元素，尤其是镭为什么能够不断释放出如此强大能量的现象，以及太阳能的来源问题，都得到完善的解释。随着原子核物理学和原子物理学的进展，人们终于发现了原子核的结合能，即经常所说的原子能。今天，原子能的利用已日渐广泛，尤其是核电站的建立，有效地开辟了人类对能源需求的新途径，这不能不归功于狭义相对论的巨大功绩。

科学思想的革命还促使人们的观念得到进一步解放。这就是任何科学理论都不可能一成不变，随着科学实验的进展，科学发现的出现，导致科学理论必须不断发展，甚至彻底更新。因此，不墨守成规和勇于创新，就成为现代物理学发展中的一个突出特点。

爱因斯坦在创立狭义相对论后不久，就致力于将这理论推向前进，企图将相对性原理从匀速运动（惯性系）推广到加速运动（非惯性系）。狭义相对论只考虑到惯性系之间的变换问题，而非惯性系之间的变换问题，就涉及到引力场。

在实际探索过程中，爱因斯坦认为，引力现象也应当同电磁现象一样，是要建立在场的观念上。但是物体在引力场中运动与电荷在电磁场中运动有一个明显的不同，即所有物体在地球表面都以同一加速度自由下落，这究竟是什么原因呢？原来在于惯性质量与引力质量是相等的。

这一事实，早在 200 多年以前，就被伽利略发现了。匈牙利物理学家厄缶和他的合作伙伴通过著名的扭秤实验，以更高的精确度证实了这一点。一个用弦线悬挂着的质点，在地球表面上要受到三个力的作用而达到平衡。这三个力分别是：地球对它的引力  $F_g$ （指向地心）由地球的自转而产生的惯性离心力  $F_c$ （垂直于地球的自转轴）；沿弦线的张力  $F_t$ 。其中  $F_g$  正比于质点的引力质量  $m_{引}$ ； $F_c$  正比于质点的惯性质量  $m_{惯}$ 。

厄缶在实验中比较了各种不同物质如石棉、铂、木、水等悬挂起来后弦线平衡位置所发生的改变。结果发现根本没有变化，表明  $m_{引} = m_{惯}$ 。这个实验报告最早发表于 1888 年，以后在 1922 年发表的结果中精确度达到  $5 \times 10^{-9}$ 。

惯性质量和引力质量严格相等这一事实，几百年来一直被物理学家们当作一个必然的基本事实，认为里面不存在什么理论问题。但是爱因斯坦却从这个最平常的、司空见惯的事实中，抓住了“一把可以更加深入地理解惯性和引力的钥匙”。他写道：“在引力场中所有物体都具有同一加速度。这条定律也可以表述为惯性质量同引力质量相等的定律。它当时就让我认识到它的全部重要性。我为它的存在感到特别惊奇，并猜想其中必定有一把可以更加深入地理解引力和惯性的钥匙。”从而得出了下列重要的结果。

首先，爱因斯坦注意到把原来奠基于超距作用观念的牛顿引力理论改造为创立在场的观念之上的引力理论，这就很有可能找到惯性质量和引力质量之间联系的线索。他给出了如下的关系式：

$$\text{惯性质量} \times \text{加速度} = \text{引力质量} \times \text{引力场强度}$$

由此可见，引力质量和惯性质量的相等性，是与加速度和引力场强度之间的某种等价性密切联系在一起的。

其次，爱因斯坦将这种等价性加以扩充，使它包括更广泛的物理学领域，并把它提升为理论的前提，即得出了等效原理：引力场同参照系的相当的加速度在物理上完全等价。对于这个等效原理，爱因斯坦还列举了一个升降机的理想实验，作了非常生动形象地说明。设想有一个很大的升降机在摩天大楼的顶上，而这个理想的摩天大楼比任何真实的摩天大楼还要高得多。升降机的钢缆突然断了，于是升降机就会毫无拘束地向地面降落。在降落过程中，里面的观察者正在做实验。一个观察者从袋里拿出一只表和一块手帕，然后让它们从手上掉下来。这时站在升降机外面的观察者看到，这两个物体都是以同样的加速度降落，所以两物体与地板之间的距离不会改变。对于升降机里面的观察者来说，这两个物体就停在他松手让它们掉下来的那个地方。里面的观察者可以不管引力场，因为引力场的源在他的坐标系之外。他发现在升降机里面没有任何力作用于这两个物体，因此它们是静止的，正如它们是在一个惯性坐标系中一样。

再次，从惯引力质量和性质量相等的这一事实出发，爱因斯坦又把狭义相对论所考察到的作匀速运动的参照系之间的相对性，推广到作任意运动的参照系之间的相对性，提出了空间和时间的性质应该由物质运动决定这一革命性的思想。在这方面的探索过程中，爱因斯坦曾经在数学上遇到很大困难，以后在老同学格罗斯曼的援助下，找到了一套合适的数学工具，这就是采用黎曼的曲面几何来描述具有引力场的空间和时间，写出了正确的引力场方程。

爱因斯坦夫人曾讲述了爱因斯坦的这样一个故事：

“博士（指爱因斯坦）像平常一样，穿着睡袍下楼用早餐，但他几乎什么都没有碰。我想，出了什么事，所以我问他，什

么事使他不安，‘亲爱的，’他说，‘我有一种绝妙的想法。’喝完咖啡以后，他走到钢琴前开始弹起来，间或停下来，作点笔记。然后，报告说，‘我得到一个奇妙的想法，一个绝妙的想法。’我说：‘那么，看在上帝的份上，告诉我是什么想法吧，别让我挂虑了。’他说：‘很困难 我得继续把它完成。’

“接着，爱因斯坦继续弹着琴和做着笔记，约持续了半小时。然后，他就上楼到他的研究室里去了，并且告诉我，不要去打扰他。他呆在那里干了整整两周，每天我都给他送饭。黄昏时分，他会踱着步子作点锻炼，再回去工作。

“最后，有一天他从研究室里走下楼来，脸色苍白。‘就是它。’他一边对着我说，一边疲倦地把两张手稿纸往桌上一放。这就是他的相对性理论。”

1915年11月，爱因斯坦在普鲁士科学院的连续三次会议上报告了他的广义相对论。第二年3月，他在《物理年鉴》上发表了长达50页的论文《广义相对论基础》。在这篇极富革命性的论文中，爱因斯坦明确的指出，广义相对论所要论述的内容是狭义相对论所作的可能想象得到的最为广泛的推广。而其理论基准是等效原理、广义协变性原理（物理定律必须在任何坐标系中都具有相同的形式，即它们必须在任意坐标变换下是协变的）、马赫原理（空间和时间的几何不能先验地给定，而应当由物质及其运动所决定）。

在广义相对论中，空间和时间跟引力场有关，并且引力场又是由物质及其运动所产生的。爱因斯坦为了考证这一理论，曾预言会出现如下三个效应：水星近日点的进动；光线为太阳所偏折；光谱线的引力红移。这些预言是相当惊人的，然而被预言的效应不久就为实验观测所证实，于是广义相对论也得到了验证。

其中有一个效应是光线为太阳所偏折。从遥远星体射向地球的光线经过太阳附近，因为受太阳引力场的作用要产生偏折。根据牛顿定律得出的结果为 0.87 弧秒，而爱因斯坦却根据广义相对论计算的结果，预言为 1.75 弧秒，这一预言在 1919 年被证实。

该年的 5 月 29 日，日全食横贯在赤道巴西和非洲之间的大西洋区域上空，为了观测光线的偏折，英国特意派出两支观测队前往非洲几内亚湾的普林西普岛和巴西的索勃拉耳湾旁，他们都拍到了恒星的照片。11 月 6 日，两个皇家学会——伦敦天文学会和不列颠学会举行联席会议。会上宣读了两个观测队所得资料的最后整理结果是：在普林西普岛为 1.61 弧秒，在索勃拉耳湾为 1.98 弧秒，两数字的平均值为 1.79 弧秒，与爱因斯坦的预言 1.75 弧秒是如此的接近，立即轰动了整个世界。

广义相对论已被广大公众所接受，而爱因斯坦则被当做世界伟人来看待了。

第二个效应是水星近日点的进动。就太阳系来说，所有的行星，包括地球在内，根据牛顿定律都是沿着椭圆轨道绕太阳运动的。但是，当时的天文学家已经发现水星的运动轨道并不是完全椭圆形的，而是这个椭圆形本身在“弯曲的”空间中有缓慢的转动，这种现象就被称为水星近日点的进动，其角位移每百年为 43 弧秒。

水星近日点的进动是牛顿引力理论无法解释的，而根据广义相对论就能够很好地解释这一现象。其方法是解在引力场作用下的质点运动方程，在一级近似条件下得出与牛顿引力理论相同的结果，在高一级近似的条件下得到与中顿引力理论的差异，这个高级小量的差异正好导致其角位移每百年为 43 弧秒。

由于水星距离太阳量近，位于引力场最强的区域，广义相对论的这个效应最大，所以这个差值很大；其他行星距离太阳相当远，引力场相对较弱，因此不曾观测到这个效应。

第三个效应是光谱线的引力红移。这个效应所讲座的问题是光在引力场中传播时，频率将会发生什么样的变化。爱因斯坦预言，引力场很强的天体所发出的光向红端，即向波长较长的一端移动。其原因在于，质量越大的天体附近，引力场就越强；引力场越强的区域，时间的标尺也就越长，也就是说那里的时钟会变慢。所以，从这样的天体发出的光，频率较慢而相应的波长较长。

天文学家在天狼星伴星的观测中，首先验证了引力红移现象。天狼星伴星与白矮星类似，是一颗密度非常大的星体，由于它的引力场太强，因而引力红移也较大。实际观测值大多数都与爱因斯坦的预言相接近。

广义相对论虽然在发表几年后就得到了上述实验观测的验证，但是在以后的几十年中，能够验证它的实验观测实际却如此之少，再加上它的数学结构过于深奥，于是有人慨叹：广义相对论是理论物理学家的天堂，是实验物理学家的地狱，以致一直很少有人问津。

但是，到了 50 年代末期以后，由于大口径的射电望远镜和光学望远镜等实验技术的发展，以及宇宙学和天体物理学不断取得重大进展，连续发现了一些新天体，那里存在着很强的引力场，一度受到人们冷落的广义相对论重新形成了研究的热潮。这样在 60 年代，广义相对论又扩大了第四个效应，就是雷达回波的时间延迟。从地球上发向另外行星的雷达讯号，再反射回来为地球接收，如果雷达波经过太阳附近，其往返时间比不经过太阳附近的往返时间要长得多。这也是一个微不足道

的效应，到 70 年代后期，这类测量所得的数据同广义相对论理论值进行比较，相差约 1%。这类实验观测也能在地球引力场中，通过测量人造卫星的雷达回波的时间延迟来进行。

广义相对论还预言过有引力波。引力是从牛顿时代就为人们所熟悉的，而引力波却不同了。这与人们很早就知道带电体之间有作用力，但是不等于已经认识到电波的存在一样。直到 1978 年，由美国的科学家泰勒等人对射电脉冲双星 PSR1913 + 16 进行了几年观测结果的分析中，发现它的公转周期变短而且定量地证实了引力辐射阻尼的存在，被人们认为是引力波存在的第一次间接验证，这样就再一次令人诚服地证明了广义相对论的准确性。

爱因斯坦先后建立的狭义相对论和广义相对论，一方面越来越为科学界和广大公众所重视，另一方面却遭到一些小撮人和排犹分子的歧视。他们搞了一个组织，即所谓的“反相对论公司”，专门反对相对论；他们还举行公开演讲，并印发文集，在报刊上展开全面的攻势，对爱因斯坦进行不能令人容忍的谩骂。1920 年 8 月 24 日，这一伙人在柏林音乐厅举行演讲，又肆意攻击相对论。爱因斯坦闻讯后专门前去参加，作为听众他泰然自若地坐在会场里。

两天之后，8 月 27 日，爱因斯坦即在《柏林日报》发表了题为《我对反相对论公司的答复》的声明。在声明中，爱因斯坦首先指出，就他所知几乎没有一位在理论物理学中做出一点有价值的成绩的科学家，是不会承认整个相对论是合乎逻辑地建立起来的，并且是符合于那些迄今为止已判明是无可争辩的事实。他举出最著名的物理学家诸如索末菲、普朗克、洛仑兹、劳厄、玻恩、拉摩尔、朗之万、德比杰、爱丁顿、勒维—契维塔等都坚定地支持这个理论，而且他们自己也对它做出了

有价值的贡献。

在有国际名望的物理学家中间，直言不讳地反对相对论的，爱因斯坦在声明中说，只能举出勒纳德的名字来。作为一位精通实验物理学的大师来说，爱因斯坦敬佩勒纳德；但是他在理论物理学中从未做过一点事，而且他反对相对论的意见是如此肤浅，以至到现今为止，爱因斯坦认为没有必要给他详细回答。

由于当时从未有过科学家要运用报纸上的篇幅就某个问题作出答复，当爱因斯坦的一些朋友从报上看到这篇声明时都感到震惊，有的人甚至还写信批评他。比如，爱因斯坦的挚友埃伦菲斯特从莱顿写信给他说：“我和我的妻子都绝对无法相信你自已竟会在《我的答复》这篇声明里写下哪怕最少几个字”。“我们一分钟也不能忘怀，你一定是为了一种特别无礼的方式所激怒，我们也忘怀不了，你在那边是生活在一种不正常的道德风气里；尽管如此，但这个答复里还是含有某些完全是非爱因斯坦的反应。我们可以用铅笔将它们一一划出来。假如你真是用你自己的手把它们写下来，那就证明了这些该死的猪猡终于已经成功地损害了你的灵魂，这对我们来说是多么的可怕呀！”

爱因斯坦于 1920 年 9 月 10 日给埃伦菲斯特的回信中作了这样的解释：“只要我还留在柏林，我就不得不这样做，因为在这里每个小孩都能从照相上认得我。如果一个人是民主主义者，他就得承认他有要求公开发表意见的权利。”

魏兰德等人对相对论和爱因斯坦发动的攻击，引起了德国一些优秀物理学家的愤慨。在柏林的音乐厅那个会的第二天，即 1920 年 8 月 25 日，劳斯特、劳厄和鲁本斯就联合给柏林各大报纸发出一个声明。《柏林日报》刊载了这个声明，其内容

如下：“我们并不想在这里来谈论我们对于爱因斯坦产生相对论的那种渊博的，可以引为范例的脑力劳动的意见。惊人的成就已经获得，在将来的研究工作中当然还会进一步被证明。此外，我们必须强调指出，爱因斯坦除了研究相对论外，他的工作已经保证他在科学史中将有一个永久性的地位。在这方面，他不仅对于柏林的科学生活，而且还对于整个德国的科学生活的影响大概都不是估计过高的。任何有幸亲近爱因斯坦的人都明白，在尊重别人的文化价值上，在为人的谦逊上，以及在一切哗众取宠的厌恶上，从未有人能超过他。”

爱因斯坦作为最著名的物理学家，是由于他在广义相对论、狭义相对论、分子运动论、光量子论、宇宙学和统一场论等六大领域都做出了巨大的科学贡献，这是其他物理学家无法比拟的。

**狭义相对论。**1905年6月，爱因斯坦建立的狭义相对论，使物理学爆发了一场革命，它改变了传统的时空、质量、动量、能量等基本概念，不仅深刻地揭示了作为物质存在形式的空间和时间的统一性，而且还深刻揭示了各种物理运动形式的统一性：电磁运动和力学运动的统一性，以及两种运动量度（动量和能量）的统一性，从而极大地推动了物理学的发展。

**广义相对论。**在大部分物理学家还不了解狭义相对论的时候，爱因斯坦则继续努力把他的理论向前推进。1907年提出了均匀加速度与均匀引力场的等效原理。以后经历8年艰苦的探索，中间又得到了他的老同学格罗斯曼的帮助，应用了黎曼的曲面几何，终于在1915年11月创立了广义相对论。广义相对论进一步深刻揭示了作为空间和时间统一体的四维时空同物质的统一关系，并深刻揭示了空间和时间不可能离开物质而独立存在，空间的结构和性质取决于物质的分布，物质之间的引

力不过是空间曲率的一种表现。

光量子论。早在 1905 年 3 月，爱因斯坦就写了《关于光的产生和转化的一个启发性的观点》这篇论文，提出光量子假说，把普朗克的量子概念扩充到辐射在空间的传播上去。爱因斯坦的光量子论揭示了光的量子本性，光不只被看成是一种波动，它同时还是一种粒子，是波和粒子的综合。对于统计的平均现象，光则表现为波动；对于瞬间的涨落现象，光表现为粒子，因此揭示了微观粒子的波粒二象性。

1916 年爱因斯坦发表的论文《关于辐射的量子理论》，是量子论发展第一个阶段的理论总结，它从玻尔的原子构造假说出发，用统计力学的方法推导出普朗克的辐射公式，并提出受激辐射理论。这不仅对 20 年代量子力学的建立有重要作用，也为 60 年代蓬勃发展起来的激光技术准备了理论基础。

1924 年德布罗意的物质波假说提出后不久，就得到爱因斯坦的热情支持，而且爱因斯坦立即用来研究单原子理想气体，同印度的青年物理学家玻色合作，提出玻色，即爱因斯坦统计法。由于受了爱因斯坦这项工作的启发，薛定谔才征图去发展德布罗意理论，并于 1926 年创立了波动力学。

分子运动论。1905 年的 4 月和 5 月，爱因斯坦发表了两篇有关分子运动论的论文，试图通过对悬浮粒子运动（即 1827 年发现的布朗运动）的鉴别来测定分子的实际大小。4 月写的一篇是他向苏黎世大学申请博士学位的论文。他从事这项研究，是为了解决半个多世纪以来哲学界和科学界长期争论不休的分子和原子是否存在的问题。3 年后，法国的物理学家佩兰以精密的实验验证了爱因斯坦的理论预测，这就以无可争辩的事实证明了分子和原子的存在。

现代宇宙学。爱因斯坦在建立广义相对论以后，就开始有

关宇宙学问题的探索。1917 年他发表了题为《根据广义相对论对于宇宙学所作的考查》的论文，提出宇宙空间是有限无界的假说，这是现代宇宙学的开创性文献。后来，因为荷兰天文学家德西特和前苏联大气物理学家弗里德曼的工作，发现宇宙空间可能是在不断地膨胀着，预见到各个星系之间存在着互相分离（远退）的运动。这一预见为美国的天文学家哈勃于 1929 年发现河外星系谱线的红移而得到了有力的支持。

统一场论的研究。从 20 年代开始直到晚年，爱因斯坦把主要的科学创造精力都用于统一场论的研究工作中。企图建立一种包括电磁场和引力场的统一理论，用广义相对论的推广形式来概括一切各种物理运动形式，用场的概念来解释物质结构和量子现象。他认为这是相对论发展的第三个阶段。

虽然这一研究探索当时没有取得具有物理意义的结果，但近年来正以新的形式显示出它有着不可估量的生命力。正如爱因斯坦自己在晚年时所说的：“我完成不了这项工作了；它将被遗忘，但是将来会被重新发现。”

事实就是如此，1967 年，巴基斯坦的物理学家萨拉姆和美国的物理学家温伯格都各自独立地提出了电弱统一理论。电弱统一理论的成功又进一步促进了强、弱和电磁四种相互作用统一的所谓的大统一理论的研究，以及包括引力在内的四种相互作用统一的所谓超统一理论的研究。

## 卢瑟福模型

19 世纪末，经典物理学已经创立了比较完善的理论体系，热力学、电磁理论、力学及统计物理已成为 19 世纪后期科学技术发展的理论支柱，导致有些物理学家认为，物理学的理论大厦已经基本上建成，余下的问题只是把一些常数测得更精确些，把现有的理论应用于各个具体问题上去。1899 年的除夕之夜，著名物理学家开尔文在每年的聚餐会上发表讲演时认为：19 世纪的经典物理学是万里晴空。在人们还陶醉于“尽善尽美”的时候，物理学很多领域里出现了一系列的新发现。这些新发现与经典物理学理论有着尖锐的矛盾，使经典物理学理论体系面临着一场严峻的挑战。19 世纪末，物理学的边缘就出现了两朵小小的、令人不安的“乌云”。第一朵是指 1887 年迈克尔逊同莫雷合作所做的“以太”漂移速度实验得到了否定的结果。这个实验的目的是寻找绝对参照系，结果失败了，这使经典物理的绝对时空观受到了严重打击。第二朵是关于热辐射的“紫外灾难”。

其实，19 世纪末不止有两朵“乌云”，像固体比热、光电效应也是经典理论无法解释的现象。还有 1895 年伦琴发现的 X 射线；1896 年，贝克勒尔发现的铀放射性；1897 年，J·J·汤姆逊发现的电子等都是用过去的概念和知识所无法解释的。这说明在 19 世纪末，经典物理学的天空已不止两朵乌云，而是乌云密布，而是面临着一场疾风暴雨式的物理学革命。事实上

也正是在这场暴风雨过后，才迎来了物理学天空中光彩夺目的彩霞。迈克尔逊 - 莫雷实验导致了相对论的创立；黑体辐射的“光电效应”及“紫外灾难”导致了量子论的出世；X 射线、放射性及电子的发现促使人们去研究原子内部结构，导致建立新的原子模型。

原子是不可分割的最终质点，是 20 世纪之前人们坚信的概念，可是，电子的发现，使原子不可分割的观念被毁灭。那么，电子是怎样被发现的呢？这个问题要从人们研究“阴极射线”谈起。

在 19 世纪的后半叶，真空放电产生辉光现象就成为各国科学家感兴趣的论题，并且都利用真空放电管做了大量实验研究，得到了一些重要研究成果。这里主要介绍一下德国物理学家哥尔施泰因的研究工作。1876 年，他在前人研究的基础上，又做了大量真空放电的实验，发现产生辉光是因为负极上产生的“某种射线”引起的。他把这种射线称之为“阴极射线”。那么，阴极射线的实质又是什么呢？关于这一点相继争论了十几年的时间。1897 年，J·J·汤姆逊做了一次实验，这次著名的、判决性的实验发现，阴极射线不仅能够被磁场偏转，而且还能被电场偏转。进一步实验证明，阴极射线是由带负电的粒子组成的。J·J·汤姆逊根据阴极射线在电场和磁场中的偏转，度量出了这种粒子的荷质比  $\frac{e}{m}$  约为氢离子的 20000 倍。当  $eE = H \cdot Ue$  时，计算出  $U = \frac{E}{H}$ ，只加磁场时射线作圆周运动，磁力即为向心力：

$$H \cdot U \cdot e = m \cdot \frac{U^2}{R}$$

∴  $\frac{e}{m} = \frac{U}{H \cdot R} = \frac{E}{H^2 R}$ , 其中,  $E$ 、 $H$ 、 $R$ 、均可测得, 计算

出  $U = 2.7 \times 10^9$  厘米/秒。  $\frac{e}{m} = 7.7 \times 10^6$  电磁单位/克。

J·J·汤姆逊还通过变换放电管中的气体(空气、氢气、二氧化碳等)和改变电极材料(铝、铁、铂等)推测阴极射线粒子流的荷质比, 结果却发现荷质比不变。经分析断定, 这种粒子应该是电极材料中原子的合成部分。早在 1894 年, 爱尔兰的科学家斯通尼, 在研究电磁理论时就提出, 有基本的单位电荷存在, 斯通尼把它称之为电子, J·J·汤姆逊就采用了“电子”作为这种粒子的名称。不过, J·J·汤姆逊的电子与斯通尼所说的“电子”有区别, 斯通尼的电子是作为电荷的基本单位的, 而 J·J·汤姆逊所说的电子则既包括电荷的基本单位又包括质量的粒子。

电子的发现, 不但解决了“阴极射线”的本质问题, 同时也使以前原子不可分割的概念动摇了。在这一时期, 有许多物理学家纷纷开始研究原子的内部结构。既然原子是中性的, 而电子又是原子的组成部分, 那么, 原子肯定有带正电荷的部分, 而且原子所带负电荷与正电荷在数量上应该相等。人们根据推测提出了多种不同的假说和原子结构模型。

### (1) 勒纳德的中性微粒模型

勒纳德在 1894 年研究阴极射线时, 在放电管的玻璃壁上开了一个小窗口, 用金属箔把它盖住。实验时发现, 阴极射线很容易就穿过金属箔窗口射到空气中去。当发现电子后, 原子结构的探讨就成了中心议题。1903 年, 勒纳德依据阴极射线穿透金属箔的实验, 断定金属中的原子并非实心的弹性球, 必有部分体积是空无所有的空间。他假设原子内部的电子与相应的正电荷组成“中性微粒”。这个中性微粒名为“动力子”, 无

数的动力子在原子内部的空间飘荡。这种原子结构模型没有得到实验证实，因此影响并不大。

### (2) 长岗半太郎的土星原子模型

1904年，长岗半太郎根据土星的卫环理论，提出原子内部，电子组成电子杯，围绕一个核心转动的假设。他在《用粒子系统的运动学阐明线光谱、带光谱和放射性》这篇论文中写道：“我要讨论的系统是由许多质量相同的质点，联接成圆，间隔角度相等，相互之间以与距离成平方反比的力相互排斥。在圆心有一个质量大的质点对其他质点以相同定律的力吸引。如果这些互相排斥的质点以几乎一样的速度绕吸引中心旋转，只要吸引力足够大，即使有小的干扰，这系统通常将保持稳定。”长岗的土星原子模型由于不能够满足经典理论提出的稳定性要求，所以，这个模型提出不久，便有人进行驳斥。虽然长岗的原子模型很不完善，但是，他的提法中已经孕育了原子有核的概念，为后来卢瑟福提出原子有核模型奠定了根基。

### (3) J·J·汤姆逊的原子模型

在1910年以前，寿命较长、影响较大的原子模型是1903年J·J·汤姆逊的原子模型。汤姆逊假设正电荷陆续分布在原子中，而电子埋置在某个固定位置上。因为电子质量很小，他又假设原子的质量存在于分散分布的正电荷中。另外，考虑到电子一方面受到正电荷的吸引，另一方面电子之间又互相排斥，所以电子在原子中的位置要满足一定的条件，这个条件就是使电子处于平衡状态。汤姆逊又由计算证明，三个电子以上时，电子组成环状，而六个以上的电子却不能稳定在一个环上，要组成两个环或者两个以上的环。除此之外，汤姆逊还假设，电子在自己平衡位置附近作自由振动，电子振动就要辐射电磁波，电磁波的频率与电子振动的频率相同。利用这种方法，他

还准确计算出原子的半径约为  $10^{-8}$  厘米。汤姆逊设想的原子模型通常在实验中暴露出与实验之间的严峻矛盾，虽然汤姆逊想方设法改进自己的理论，但最终未能圆满。尽管如此，也好长时间没有人对汤姆逊的观点提出异议，由于汤姆逊当时在物理学界有非常高的声誉。

上述各种原子模型，是依据原子是中性所进行的各种猜测。原子内部到底是什么样的结构，尚需要继续地在实验中进行研究。

在英国的曼彻斯特大学，曾是 J·J·汤姆逊学生的大学教授卢瑟福对他老师提出的原子模型并不感到满意。因为，汤姆逊的原子模型在非常大的程度上带有人为性。卢瑟福决心用他发现的  $\alpha$  粒子作“炮弹”探索原子内部的情况。刚开始，他和他的助手盖革用  $\alpha$  粒子束轰击各种物质制作的靶子，发现大多数  $\alpha$  粒子偏折角不大，其中有少数粒子发生了大角度的散射，甚至有少数  $\alpha$  粒子竟完全被弹回。

卢瑟福又让他的另一位助手马斯登再做实验，以验证是否有  $\alpha$  粒子大角度散射现象发生。两三天之后，马斯登兴冲冲地找到了卢瑟福，报告说，他也发现有些  $\alpha$  粒子被弹回。卢瑟福听到这个消息后，立即再做实验，又证实了这一现象。卢瑟福对别人描述这一现象时说：“这是我一生中遇到的最难以置信的事情，几乎就像 15 英寸的炮弹去轰击一张薄纸一样，而炮弹却掉过头来击中你自己一样难以令人相信。”

是什么将  $\alpha$  粒子弹了回去呢？若按汤姆逊的原子模型， $\alpha$  粒子不可能产生大角度散射，更没有被弹回的可能。他认为， $\alpha$  粒子之所以能被弹回，一定在原子内部受到了特别强电场的作用。这样，就可以设想所有正电荷都集中在一个核心上， $\alpha$  粒子与这个核心接近时，受到极强的作用力，以至于把  $\alpha$  粒子

抛回去。长岗的土星模型也给了卢瑟福很大的启示。1911年5月，卢瑟福提出了“太阳系式”原子模型。他认为，原子中有一个非常小的带正电的中心核，即原子核；电子围绕核心旋转，就像行星绕太阳旋转一样；原子核聚集了原子的大部分质量。这就是卢瑟福的“太阳系式”原子模型。在卢瑟福的原子模型中，电子绕核旋转，就必有加速度，按经典理论原子就必须向外辐射电磁波（即辐射能量），随着能量的逐渐减少，最后电子就会落到原子核上，出现原子坍缩现象。这与事实并不相符合。是不是卢瑟福的原子模型不成立了？卢瑟福在“物质对 $\alpha$ 、 $\beta$ 粒子的散射和原子构造”的论文中指出：“原子的稳定问题先不必考虑，因为这个问题很显然取决于原子的微细结构和带电部分的运动。”这就是说，怎样解释稳定性问题，是以后要解决的事情，它丝毫不影响原子有核模型的建立。

卢瑟福为了进一步检验原子有核模型的正确性，想到必须用力学定律导出一个公式，再由这个公式计算出 $\alpha$ 粒子在离排斥中心不同距离 $b$ （称瞄准距离）处通过时偏转角的大小。据说，卢瑟福在福勒的援助下，才导出了 $\alpha$ 粒子的散射公式。

1913年，在卢瑟福的指导下，马斯登和盖革又仔细进行了 $\alpha$ 粒子散射实验，证明了散射公式的正确性，从而也证实了卢瑟福提出的原子有核模型。至此，卢瑟福的原子有核模型得到了公认并代替了J·J·汤姆逊的原子模型。

## 玻尔模型

虽然新的原子模型已经建立，但如以前所述它同经典理论有尖锐的矛盾。另外，电子围绕核运动发出的电磁波谱按经典理论应该是连续谱，但实际上并非如此。如果原子真的会坍塌，那么，整个生物和宇宙将在很短的时间内进入“死气”状态，即宇宙将是极不稳定的，而实际上宇宙是稳定的。此外，原子发射的光（电磁波）谱也不是连续不断的，而是分立的线状光谱。

氢原子光谱为线状光谱已经早为人知。埃格斯特朗首先从气体放电的光谱中发现了氢的红线，即  $H_{\alpha}$  线，后来又在可见光区发现另外几根光谱线，并精确测出了它们的波长，它们分别是  $H_{\alpha} = 6562.10 \text{ \AA}$ ， $H_{\beta} = 4860.74 \text{ \AA}$ ， $H_{\gamma} = 4340.10 \text{ \AA}$ ， $H_{\delta} = 4101.20 \text{ \AA}$ 。氢的线状光谱被发现后，有许多光谱学家想找出一个能表示氢光谱分布规律的公式，但是大部分没有成功。瑞士的巴耳末当时是一位中学的数学教师，并在巴塞尔大学兼课。巴塞尔大学一位对光谱很有研究的教授曾经鼓励巴耳末试一试。巴耳末仔细研究了氢光谱的分布情况，然后，通过巧妙的数学运算，得出了巴耳末公式

$$\lambda = b \frac{m^2}{m^2 - n^2}$$

$\lambda$  波长， $b = 3645.6 \times 10^{-7} \text{ mm}$ ，这个公式是在 1884 年 6 月 25 日巴耳末向全世界科学协会作研究报告时公布的。这个公式是

怎样得到的呢？在 1885 年巴耳末写的论文中说：“埃格斯特朗对氢谱线的精确测量让我有可能为这些谱线的波长确定一个共同因子（指  $b$ ），以最简单的方法表示出这些波长的数量关系。于是，我逐渐找到了一个公式，至少可以对这四根谱线以惊人的精度算出它们的波长，这一公式是光谱定律的生动表示式。”

“从埃格斯特朗的测定中，导出这个公式的共同因子是  $b = 3645.6 \times 10^{-7} \text{ mm} \cdots \cdots$ ”

“氢的前四根谱线的波长还可以从这一基数相继乘以系数  $\frac{9}{5}$ ,  $\frac{4}{3}$ ,  $\frac{25}{21}$  与  $\frac{9}{8}$  得到。初看起来这个系数并没有构成规则数

但如果第二项与第四项分子分母分别乘 4，则分子  $3^2$ ,  $4^2$ ,  $5^2$ ,  $6^2$ ，而分母相应地差 4。”即是说  $\frac{9}{5} : \frac{4}{3} : \frac{25}{21} : \frac{9}{8} = \frac{3^2}{3^2-4} :$   
 $\frac{4^2}{4^2-4} : \frac{5^2}{5^2-4} : \frac{6^2}{6^2-4}$ 。

巴耳末还说：“因为几种原因，使我坚信，这四个系数属于 2 个数列，第二数列包含有第一个数列。最后，我终于提出一个更普遍的形式  $\frac{m^2}{m^2-n^2}$ ，其中  $m$ 、 $n$  均为整数。”

“如果用这些系数和基数 3645.6 计算波长，以  $10^{-7} \text{ mm}$  作单位，公式与埃格斯特朗观测值的偏差最大不会超过波长的  $1/40000$ ，这个偏差很有可能就在观测的误差范围之内。这真是一个非常好的证据，说明埃格斯特朗是以何等高超的科学技巧和细心从事这项工作的。”至于公式中的因子  $b$  是如何得到的，巴耳末本人并没有提，这只好由后来人根据他的手稿去推测了。1890 年，里德伯将巴耳末公式用波数表示  $\nu = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$   $n = 3, 4, \cdots \cdots$

氢原子的线状光谱事实，就已经暴露出了与经典理论之间的矛盾。但是，因为当时人们还不了解原子内部结构和经典理论根深蒂固的原因，因此这一矛盾的重要性也就没有被提出来。19世纪末至20世纪初，众多的新发现表示了经典理论具有一定的局限性，要解释新发现的问题，就必须放弃经典理论去寻求新途径。实际上，人们正是打破了旧的观念，提出了新的理论观点，才致使问题得以解决，譬如，普朗克在1900年提出能量不连续的概念。他认为，能量有一个最小单元  $\epsilon = h\nu$ ，其他都是这个最小单元的整数倍。普朗克将这个最小单元称做量子。普朗克利用这一观点解决了黑体辐射的“紫外灾难”问题。能量不连续的观点直接与能量连续的经典理论相违背，但它与事实相吻合。1905年，爱因斯坦又提出了光量子的观点，光子具有能量  $h\nu$ 。利用这一观点爱因斯坦解决了“光电效应”问题。光具有粒、波二象性的观点也与经典理论相违背。上述事实足以说明经典理论的局限性。1911年卢瑟福提出原子有核模型，但是，他没有突破经典理论的束缚去解决原子有核模型与经典理论之间的矛盾。

1907年，丹麦的物理学有厄内斯特·玻尔在丹麦的哥本哈根大学学习期间，都读过普朗克提出的能量子观点书籍。1911年，他以《金属电子理论的研究》论文获得博士学位后，于秋天到英国剑桥大学学习，为J·J·汤姆逊的学生。1912年4月初到英国的曼彻斯特大学卢瑟福的身边工作和学习。这时正是卢瑟福的原子有核结构理论进行验证的时候，卢瑟福让玻尔参加了马斯登和盖革主讲的放射性研究的实验方法演讲会，并帮助他们撰写论文和整理数据。玻尔坚信原子的核型结构是符合客观事实。不久，他就向卢瑟福提出 $\beta$ 粒子和 $\alpha$ 粒子可能来自原子核内部的想法。除此之外，他还认为像行星一样在原子核外

旋转的电子，它的排列可能决定了各种元素的物理性质及化学性质。而卢瑟福却持怀疑的态度，说：“不要在微不足道的实验事实上建立太多的理论。”卢瑟福为什么提出了原子有核结构而没有提出解决与经典理论之间的矛盾的方法呢？为什么玻尔提出新设想时，卢瑟福又持怀疑态度？这表明卢瑟福在科学态度上的谨慎。但是过于谨慎往往对人的聪明才干起到束缚作用。时隔不久，英国的化学家鲁塞和索迪尔各自指出：一种元素在放出  $\beta$  粒子后，元素的化学性质就会变成在周期表中与后一位相同的元素；而放也  $\alpha$  粒子后就会变为与前两位相同的元素。几个月以后，索迪就宣布自己发现了所谓的“位移定律”。这一发现使索迪几年之后获得诺贝尔化学奖金，玻尔在这方面则是望尘莫及。他没有抱怨卢瑟福在这一研究问题上曾经给他泼过冷水，而是决心探索出另一条新的途径：绕原子核旋转的电子可能决定元素的化学性质及物理性质。要解决这个问题，玻尔认识到必需首先要解决电子绕核旋转与经典理论之间出现的矛盾，要解决这个矛盾就必须对经典理论进行一番彻底的改造。玻尔的这一想法并不是偶然的，因为前面已有解决黑体辐射的“紫外灾难”、光电效应作为先例，正是在这种基础上玻尔去创立定态跃迁原子模型的。

1912 年 7 月 24 日，玻尔离开了曼彻斯特返回了哥本哈根。回国后，他始终在想原子的核型结构与经典理论之间的矛盾。正在日夜苦思之际，与玻尔一起工作的好朋友光谱学家汉森提示玻尔要注意下巴耳末的发现以及里德伯加以发展的光谱规律，还把巴耳末的发现给玻尔作了详细介绍。后来玻尔回忆说：“我一看到巴耳末公式，整个形式一下子就清楚了。”他分析了原子结构与光谱之间的矛盾，认识到卢瑟福的原子核型结构可以和量子化概念结合起来。之后，他着手写《论原子和分

子结构》的论文，于 1913 年 8 月 27 日全部完稿。这篇论文共分为三部分。第一部分讨论了正电核和电子的结合；第二部分讨论了单原子核系统；第三部分讨论了多原子核系统。这三个部分分别发表于 1913 年的 7 月、9 月、11 月。因为该论文由三部分组成，所以人们把它称之为玻尔的“三部曲”。

在讨论原子结构与光谱线系之间的关系时，玻尔提出了大胆的设想，这个假设包括两点内容：

(1) 稳定状态假设

电子围绕原子核做圆周运动，电子只能稳定地处在角动量满足  $2\pi mvr = nh$  ( $n$  为正整数 1, 2, 3, ……) 的轨道上。

(2) 频率条件假设

当原子由能量为  $W_n$  的定态跃迁到能量为  $W_m$  的定态时，才能辐射能量。所以辐射放出的频率满足  $h\nu = W_n - W_m$ 。

玻尔根据以上的假设，然后运用经典力学规律求出了电子可能存在的轨道半径  $r = \frac{n^2 b^2}{4\pi^2 m e^2 z}$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )。对于氢原子  $z = 1$ ，电子轨道半径为  $r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m e^2}$ 。原子具有能量  $W_n = -\frac{2\pi^2 m e^4 z^2}{n^2 h^2}$ ，即能量是量子化的。如果原子从  $W_n$  态过渡到

$W_m$  态，放出的能量为  $h\nu = W_n - W_m = \frac{2\pi^2 m e^4 z^2}{h^2} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$  其

频率  $\nu = \frac{2\pi^2 m e^4 z^2}{h^3} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ 。  $z = 1$  时， $\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ，由  $\nu = \frac{c}{\lambda} = \bar{\nu}c$ ，得  $\bar{\nu} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ，令  $R = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c}$

有  $\bar{\nu} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ，计算出  $R$  的值与里德伯常数实验值符合得非常好。

玻尔在论文中指出，若上式中取  $m=2$ ，令  $n$  可变，就得巴耳末系。若取  $m=3$ ，就得出里兹预言的、由帕邢 1908 年在红外区观测到的谱线系。玻尔还预言，如果取  $m-1$  和  $m=4$ 、 $m=5$ ，就会有远红外区和紫外区的谱线系。后来，分别由赖曼在 1914 年，布喇开在 1922 年和普芳德在 1924 年都发现了玻尔预言的谱线系。

玻尔理论不仅成功地解释了氢光谱，而且还解释了部分元素的周期性，使化学从定性的科学转变为定量的科学成为可能，并把 20 世纪以前认为不相关的两门学科，化学与物理，统一到同一基础上来。

玻尔理论从建立到被人们承认经历了曲折的道路。1913 年 9 月 7 日，（这时玻尔论文的第三部分还没发表）玻尔应卢瑟福的邀请参加了在英国的伯明翰召开的大不列颠科学促进会会议。会后谈到玻尔的理论时，拉摩尔让瑞利发表对玻尔理论的看法，71 岁的瑞利说道：“我年轻的时候对很多观点是深信不疑的。其中之一就是：人在 60 岁后就不应该在现代观点中插一杠子。尽管我承认自己并不相信这一观点，但还足以使我超然于这场讨论之外。”这位赫赫有名的物理学家是不是“超然于这场讨论之外”呢？不是的。当他的儿子问他是是否看过玻尔关于氢光谱的论文时，他却回答说：“是的，我看过。不过我看出它对我没有用处。我并不以为不按这种方式就做不到发现来，相反倒是很有可能的。但它并不合我的脾胃。”瑞利的话不仅是代表了他自己，而且还代表了相当一部分人的看法。例如，J·J·汤姆逊、洛伦兹也极力反对玻尔的理论，就连当时还很年轻的、已享有名气的物理学家史特恩与劳厄也说：“假如玻尔的理论碰巧是对的话我们将会退出物理学界。”这两个人后来不但没有退出物理学界，而且对玻尔的理论发展也

做出了很多贡献。玻尔理论为什么会引起一些人的反对，其原因有：一、玻尔理论的观点之新颖，导致那些受旧教育出来的物理学家难以接受。二、玻尔当时在物理学界还是一个无名小卒，这样的“小人物”做出这样重大的贡献，使那些“大人物”不可想象。在这个时期，玻尔理论不仅受到舆论上的压抑，而且更严峻的考验是来自匹克林光谱系的理论。

1896年，美国的天文学家匹克林在哈佛天文观测台的第12号通报中宣布：“弗莱明夫人发现船艙座 $\zeta$ 星的光谱十分特殊和别的光谱都不一样”，“这六根线极像氢光谱线那样形成有规律的谱线，显然，这是出自其他星体或者地球上尚未发现的某种元素”。当时，还在通报上宣布了拍得的照片，从照片上可以清楚地看到，有四根谱线与氢的巴耳末系  $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $H\gamma$ 、 $H\delta$ 、 $H\epsilon$  互相间隔，极有规律。

1897年，匹克林将它用巴耳末公式的形式表示出来， $\lambda = 3646.1 \frac{n^2}{n^2 - 16}$ ， $n = 5, 7, 9, \dots$ 。不过，匹克林把巴耳末公式中的  $b = 3645.6$  改为  $3646.1$ ，而  $n$  取奇数。匹克林的经验公式与实际测得的波长符合很好。人们称它为匹克林谱系。后来，里德伯把匹克林公式改为  $\bar{\nu} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ， $n = 2.5, 3, 3.5, 4, \dots$ （ $\bar{\nu}$  波数），由于此公式与巴耳末公式完全一样（只是  $n$  取值不同），里德伯认为它是一种氢光谱。因此，人们始终相信这是星体上一种特殊氢发出的光谱。1912年，英国物理学家福勒宣布：他在实验中通过氦、氢放电管放电，发现了这种特殊的氢。这说明在地球上也存在着这种特殊的氢。但是，在他的实验中，没有根据说明光谱线是由氢发出而并非由氦发出的。福勒并将这种氢光谱总结成下列公式： $\bar{\nu} = K \left( \frac{1}{n_1^2} \right)$

$-\frac{1}{n_2})$ ，不过，他特别申明  $n_1$ 、 $n_2$  都必须包括半整数。福勒的研究工作有一点可以肯定，他打破了人们始终坚信只有天体中存在着这种特殊氢。

1913 年，玻尔发表了《论原子和分子结构》的论文，按照玻尔对氢光谱的解释， $n$  只能取整数，而里德伯和福勒的研究  $n$  可以取半整数，这就使玻尔理论面临着一场严重的挑战。为此，玻尔也花费了很大精力去研究这个问题。玻尔依据卢瑟福的理论，考虑到氢的中性原子由带  $2e$  正电荷的核和两个电子组成，如果考虑氢核只局限住一个电子，令  $Z = 2$ ， $n_1 = 4$  时有  $\bar{\nu} = R \left[ \frac{1}{2^2} - \frac{1}{(\frac{n}{2})^2} \right] = R \left[ \frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right]$ ， $k = 2.5, 3, 3.5,$

4, ..... 这与里德伯的公式完全相同。这种解释开始不被人们所承认，后来，玻尔居然向早已被人们所熟悉的匹克林系提出挑战，声称它不是来源于氢，而是来源于一次电离的氢，这种挑战必然要遭到一部分人的反对。玻尔在卢瑟福身边工作和学习时与卢瑟福结下了深情厚谊，这时玻尔给卢瑟福写信强调了匹克林系起源问题的主要性，并恳求卢瑟福在做实验时为他组织专门的光谱实验。卢瑟福对玻尔的研究工作一方面表示怀疑，一方面又尽力给予支持，他安排了曼彻斯特大学的同事伊万斯做纯氢光谱实验，以证明匹克林谱系的起源问题。1913 年 9 月伊万斯发表了实验结果，证实了玻尔的解释是正确的，匹克林系实属来源于一次电离的氢。以后，伊万斯继续进行这项实验，进一步确认玻尔对氢、氢光谱解释的正确性。通过对匹克林系问题的斗争并围绕这场斗争所做的实验，打破了一直认为匹克林系是来自星体上一种特殊的氢的概念。同时玻尔理论又进一步扩大了战果——对于类氢离子，也可以给予很好的

解释。

1914 年，赫兹和夫兰克用不同能量的电子去碰撞汞的稀薄蒸气，发现处于蒸气状态的原子，吸收电子的能量具有选择性，即只有电子能量为某些值时，才被原子所吸收，这说明原子内部的能量是不连续不断的，这就证实了原子定态跃迁理论的正确性。至此，玻尔理论被人们普遍所承认。赫兹与夫兰克也由于对原子理论的贡献，于 1925 年同获诺贝尔物理学奖。玻尔由于对原子理论的贡献，于 1916 年被哥本哈根大学聘请为理论物理教授，1922 年又获诺贝尔物理学奖。

在玻尔发表氢原子理论的时候，已经有 91 种元素被人们所熟知。但是，玻尔理论仅仅对氢原子及类氢离子产生的光谱现象给予很好的说明，对于具有两个以上电子的原子所产生的复杂光谱，用玻尔理论却无法解释。因此，玻尔理论提出不久，许多人就感觉到了它的不足之处。1915 年，威尔逊和索末菲各自在玻尔量子条件的基础上都作了改进他们认为玻尔的量子条件是不完整的，既然电子绕核的运转像行星绕太阳运转一样，而行星绕太阳运行轨道是椭圆，但是，玻尔在讨论电子绕核运转时只考虑了圆形轨道。于是，他们提出了适宜于一般情况下的量子化通则，认为是作周期运动的系统，若有坐标  $q_1, q_2, \dots$  及共轭动量  $P_1, P_2, \dots$  则其作用积分为  $h$ （普朗克常数）的整数倍，即  $\oint p_k dq_k = n_k h$ 。这个量子化条件对于电子作圆周运动和椭圆运动都是适用的。对于圆周运动，只考虑角变量  $\varphi$  则由  $\oint p_\varphi d\varphi = nh$  ( $p_\varphi =$  常数) 得出  $2\pi mrv = nh$  这就是玻尔的量子条件。对于椭圆运动有：

$$\begin{cases} \oint p_r dr = n_r h & n_r \text{—— 称径向量子数} \\ \oint p_\varphi d\varphi = n_\varphi h & n_\varphi \text{—— 称角量子数} \end{cases}$$

利用电子作椭圆运动计算出原子的能量

$$W = -\frac{2\pi^2 me^4 z^2}{h^2 (n_r + n_\varphi)^2}, \quad \text{若令 } n = n_r + n_\varphi \text{ ( } n \text{ 称主量子数)}$$

则有  $W_n = -\frac{2\pi^2 me^4 z^2}{h^2 n^2}$ ，这与玻尔计算出的原子能量完全一致。

从电子的运行轨道来看，当  $n$  给定时， $n_\varphi$  可取  $n$  个值。当  $n_\varphi = n$  时，为玻尔所说的圆形轨道；当  $n_\varphi \neq n$  时，为不同偏心率的椭圆轨道。因为索末菲的工作，致使玻尔理论得到了改进。不仅如此，更重要的是索末菲经过理论计算指出，对同一个量子数  $n$ ，电子在不同偏心率的轨道时，原子所处状态具有相同的能量，就是原子所处状态是简单的。这一重要结论在以后创立的量子力学中广为应用。

索末菲在发展玻尔理论上成绩卓越。原子光谱的精细结构早被光谱学家们所熟悉，如  $H_\alpha$  线为三重线早为迈克尔逊在 1891 年所发现，可是，用玻尔理论则无法解释。然而，索末菲考虑到电子绕核旋转时，电子的质量就会产生相对论效应。于是索末菲以相对论力学代替了玻尔理论中的牛顿力学，计算出原子所处状态的能量不只与  $n$  有关，而且还与角量子数  $n_\varphi$  有关。即  $w_n = -\frac{Z^2 R}{n^2} \left[ 1 + \frac{\alpha^2 z^2}{n^2} \left( \frac{n}{n_\varphi} - \frac{3}{4} \right) + \dots \right]$  式中  $R$  为里德伯常数， $\alpha \frac{2\pi e^2}{hc} \approx \frac{1}{137}$  称索末菲精细结构常数。由于对给定的  $n$ ， $n_\varphi$  可取  $n$  个不同值，这样就会产生能级分裂，索末菲正是利用这种能级分裂解释了  $H_\alpha$  线的精细结构。在这一期间，索末菲又提出了电子轨道在空间位置的取向也是量子化的假设，这个假设直到 1921—1922 年才由盖拉赫和史特恩利用银原子束在非均匀磁场中的偏转得到证实。电子绕核运动需要第三个量子数——磁量子数来确定。按照理论计算磁量子数  $m$  与角量子数  $n_\varphi$  的关系为  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \dots \pm n_\varphi$ ，而在

史特恩 - 盖拉赫的实验中，银原子束在非均匀磁场中的偏转不是分为三束，实际上只观察到两束，这一原因直到提出电子自旋后才得到完整解决。空间量子化的证实，使 1896 年塞曼所发现的原子光谱在磁场中的分裂现象（寻常塞曼效应）得到解释。但是，对反常塞曼效应则不能给予很好的说明。1923 年，德国杜宾根大学教授朗德对反常塞曼效应作了仔细研究，他根据原子光谱在磁场中的分裂现象指出：能态为  $^{2S+1}L_J$  的原子，在磁场作用下的能级改变可用  $E = E_0 + gM_{\mu_B}H$  表示，式中  $H$  为磁场强度， $M$  为磁量子数， $\mu_B = \frac{he}{4\pi mc}$  为玻尔磁元， $g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$  称朗德因数。当时 包括

朗德本人在内，对  $J$ 、 $S$ 、 $L$  的物理意义，并不清楚。但是，他根据自己提出的公式却很好地解释了反常塞曼效应。

为什么在史特恩 - 盖拉赫的实验中，银原子束在非均匀磁场中的偏转是两束，而不是三束？ $J$ 、 $L$ 、 $S$  又代表什么意义？这两个问题直到 1925 年才弄明白。1925 年，古德斯密特和乌伦贝克为了解释光谱线的精细结构，提出电子有自己的自旋角动量和自旋磁矩的假设。他们分析了一些实验现象，认为电子自旋角动量为  $S \frac{h}{2\pi}$ ，其中  $S$  为自旋量子数，只能取  $\frac{1}{2}$ ，电子自旋磁矩  $\mu_s = \frac{eh}{4\pi mc} = \mu_B$ 。这个假设的提出，不仅解决了光谱线的精细结构问题，还解释了史特恩 - 盖拉赫实验中银原子束是两束而不是三束的实验现象，并明确了  $J$ 、 $L$ 、 $S$  的物理意义。电子自旋概念的提出，证明了电子运动状态的第四个量子数。自旋概念对发展玻尔理论的作用虽然很小，但是，对后来物理学的发展却起了无法估量的作用，自旋概念成了当今物理

学中基本粒子的基本属性之一。

在 1913—1925 年间的 12 年间，在探讨原子内部结构以及利用这种结构解释了原子产生的光谱现象可以说是物理学中的中心议题。对于原子内部的结构，玻尔一开始就利用自己提出的理论作过解释，并证实了部分元素的周期性。但是，他对高原子序数的元素却不能给予解释。所以，玻尔认为自己的理论还不够完善，不能对这类问题给出明确解释。是的，一种理论的发展和完善往往不是一个人的工作而需要很多人的工作，甚至是几代人的工作。从原子概念的提出到原子内部结构的提示就说明了这一点。

关于元素周期表与原子内部结构的解释，泡利作了关键性的工作。1925 年，他提出了闻名的不相容原理，即原子中，任何两个电子都不能具有完全相同的量子数。有了不相容的原理，终于揭示了 20 世纪以前由门捷列夫发现、后来又由莫塞莱改进的元素周期表的物理意义，并解释了元素周期表的周期性。

应该指出，泡利不相容原理，虽然是在玻尔理论发展的后期提出来的，但它与自旋的概念一样，只不过是对于玻尔理论作了最后的补救。但是，泡利不相容原理在现代理论研究中却成为一条最基本的原理。

尽管很多的物理学家在发展玻尔理论上做出了巨大贡献，并且能够解释一些问题。但是，人们越来越清楚地意识到，玻尔理论必须抛弃。这是由于随着实验及理论的发展，发现玻尔理论本身存在着不可克服的困难。比如，玻尔理论不能说明原子定态跃迁时发出光谱的强度；对于双原子分子的振动——转动光谱的解释，应用玻尔理论可得出一个公式，此公式相当于

半奇整数的量子数  $J + \frac{1}{2}$ ，然而，由光谱分析的结果，则应为整数量子数  $J$ ；此外，在简谐振子问题上，玻尔理论所得能量公式为  $E = nh\nu$ ，而实验证明简谐振子具有所谓的“零点能量”  $\frac{1}{2}h\nu$ ，故能量公式应为  $E = (n + \frac{1}{2}) h\nu$ 。这所有的一切说明，玻尔理论本身存在着一定缺陷。其原因是多方面的。从玻尔理论本身来讲，初始他就引用了没有任何实验依据的量子条件；另外，玻尔理论是经典理论加量子观点的混合产物。基于上述原因这就不可避免地使该理论具有一定的局限性；由科学发展的过程来看，玻尔理论具有缺陷也是不足为怪的。因为，人们认识事物的本质及客观规律总是逐渐深化并日趋完善的。

1918—1923 年间，玻尔在量子概念与经典概念之间提出了著名的对应原理。玻尔认为：原子在很高的量子态时，量子理论就必须得出与经典理论相同的结果，即是说经典理论是量子理论的极限情况，这时它们之间必然存在着——对应的关系。尽管玻尔提出了对应原理，也没有能够使自己的理论脱离困境。但是，他提出的对应原理却揭示了经典理论与量子理论之间的联系，也揭示了自然界中一个极为普遍存在的关系。所以，至今玻尔的对应原理在一些问题探讨中起着指导性的重要作用。

虽然玻尔理论带有很大的局限性，可是他对建立原子物理学的功绩，人们永远不会忘怀，由于玻尔是原子物理学的开拓者，他给后来的开垦者提供了一条从经典到量子理论的新途径。1925 年以后，物理学家们放弃了对玻尔理论的发展和补救，从新的观点出发创立了新的理论体系——量子力学，使原子物理学建立在量子力学基础之上，并克服了玻尔理论所克服不了的困难，这就是今天的原子物理学。

## 矩阵力学

量子力学的创立是从两个不同的角度进行的。一是根据原子所体现出来的可观察量（如频率、谱线的强度等）建立起来的理论体系——矩阵力学。二是根据物质波的概念建立起来的理论体系——波动力学。德国年轻的物理学家海森堡就是根据原子体现出来的可观察量于 1925 年首次提出了矩阵力学，而后由玻恩、海森堡、约当等一起完成。

海森堡之所以可以提出矩阵力学与当时物理学的发展背景以及他所处的环境是分不开的。海森堡在大学期间是索末菲的学生，由于索末菲的影响使海森堡对玻尔的原子理论产生了浓厚的兴趣。这是因为海森堡和当时的很多人一样早已感觉到玻尔理论缺乏统一的理论体系。

1922 年 6 月，玻尔受德国哥廷根大学邀请去作有关原子论方面的讲演。索末菲也被邀前往哥廷根，并把海森堡也带到了去。就在哥廷根玻尔认识了海森堡并同他作了一次散步，在散步过程中海森堡同玻尔谈了很多有关原子理论方面的问题。玻尔在谈到自己理论的出发点时说：“这理论的出发点，不是这种想法，认为原子是小型的行星系，人们在这里能够应用天文学中的定律，我从来没有当真地这样认为过。对我来说，出发点是物质的稳定性。而这稳定性到目前为止的物理学看，是一个奇迹。”当海森堡问到：“那么你在前几天演讲里谈到，而且为之提出理由的原子图像，预示着什么？是什么意思？”玻尔

回答说：“这些图像事实上是从经验中推论出来的，或者说猜出来的，不是根据理论计算的结果。我希望，这些图像只是非常好地描写了原子的构造，像用经典物理的直观语言所能做到的，恰如其当地描写它一样。”当海森堡问到：“怎样才能达到科学进步呢？物理毕竟是一门精密科学呀！”玻尔却说：“我们必须等待，等到与物质结构稳定性有关的那些量子论佯谬、不可理解的特征，随着新的经验越来越清晰的时候。假如到了这个时候，那么能够希望，逐步形成一个新的概念，用了这些新概念我们也能解释原子中不能直观的过程。但离那时还远哩。”海森堡认为经过这次散步对他以后在科学上的成长产生了十分大的影响。

1923年，海森堡在慕尼黑大学获得博士学位后到哥廷根大学做了玻恩的助教。1924年7月28日他以《关于量子论的形式规律在反常塞曼效应问题上的更改》一文升为讲师。当年9月他到哥本哈根玻尔研究所工作一个学期。这次去哥本哈根对他以后提出矩阵力学起了决定性作用。经过研究使他认识到：原子理论应建立在可观察量的基础上，而不可以去问人们所看不见的电子在原子中的轨道。假如知道了原子辐射出来的光的频率、强度等这些可观察量，就等于知道了电子在原子中的轨道。海森堡正是以此为依据并借助玻尔提出的对应原理猜测他要建立的新理论的。

海森堡选用了数学上十分简单的线性谐振子作为提出新理论的出发点。按经典力学，任意一个单一的周密性系统，其坐标能用傅里叶级数展开，即  $q(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} A_n e^{in\omega t}$ ，并有  $A_n^* = A_{-n}$ ，其强度为  $|A_n|^2 = |A_{-n}|^2 = A_n A_{-n}$ 。但是，这种用频率、振幅所表示的坐标有一极其重要的性质，就对  $q(t)$  进行相

加、相乘以及微分的运算都不可能产生  $n_{\omega}$  以外的新频率，即总是成  $1\nu, 2\nu, 3\nu, \dots$  的关系。可是，依照原子光谱理论，原子光谱遵守里兹（Ritz）组合原则，即  $\nu_{mn} = T_m - T_n$ ，并由此得  $\nu_{mn} = \nu_{mk} + \nu_{kn}$ 。换言之，假如  $\nu_{mk}$  与  $\nu_{kn}$  是两条光谱线的话，那么， $\nu_{mn}$  也是一条可能的光谱线，就是经典理论不适合原子光谱。海森堡为了找到满足原子光谱组合原则的新的数学表示，提出用一个数集表示坐标，即假定坐标为下列形式： $q_{mk} = A_{mk}e^{i\omega_{mk}t}$ ，并假设  $A_{mk}^* = A_{mk}$ 、且频率为  $\nu_{mk}$  的光谱线强度为  $|A_{mk}|^2 = A_{mk}A_{km}$ 。这样，坐标  $q_{mk} = A_{mk}e^{i\omega_{mk}t}$  与坐标  $q_{kn} = A_{kn}e^{i\omega_{kn}t}$  相乘能用如下列数集表示： $C_{mn}e^{i\omega_{mn}t} = A_{mk}A_{kn}e^{i(\omega_{mk} + \omega_{kn})t}$  或者  $C_{mn} = A_{mk}A_{kn}$ 。显然，海森堡找到了新的数学表示式满足原子光谱的组合原则。当玻恩看到海森堡的文章时指出，海森堡所用的数学正是代数中的矩阵（虽然矩阵数学早就由数学家创立，但对当时的海森堡来说并不十分熟悉，他只是听玻恩提起过）。玻恩感觉到海森堡的文章非常重要，马上推荐给德国《物理学杂志》公布，这就是海森堡创立矩阵力学时的第一篇文章《关于运动学和力学关系的量子论解释》。

在海森堡的思想基础上，不久玻恩与约当合作完成了题为《关于量子力学 I》的长篇论文。在这篇论文中，玻恩和约当不但把坐标用矩阵表示，而且把动量也用矩阵表示，以量子条件  $\oint Pdq = nh$  为出发点，利用玻尔的对易原理，得到了坐标  $q$  和动量  $P$  之间的对易关系，即  $Pq = qp = -ihE$ （其中  $E$  是单位矩阵）。

同年 11 月，海森堡与玻恩、约当合作完成了《关于量子力学 II》的著名文章。在这篇论文中全面阐述了矩阵力学的原理与方法。在此之前，海森堡曾到过英国剑桥，在那里作了关于他工作的报告。因此狄拉克知道了新的量子力学。后来，狄

拉克又研究了海森堡的论文，时间不久就公布了题为《量子力学的基本方程》的论文。在这篇论文中，狄拉克引进了量子力学的泊松括号并获得了量子力学的运动方程，就是  $q = [q, H]$ ,  $P = [P, H]$ ，其中  $H$  为量子体系的哈密顿矩阵。狄拉克的工作，严密了矩阵力学的理论体系。1925 年底，矩阵力学的基本理论结构早已创立，它们是：

任何物理量都用一个厄密矩阵表示。物理系统的哈密顿量也用厄密矩阵表示，并为坐标和动量矩阵的函数。

坐标矩阵  $X$  和动量矩阵  $P_x$  满足下列对易关系。（ $P_x, X$ ） =  $P_x X - X P_x = -i\hbar E$ （ $E$  为单位矩阵）

③系统的正则运动方程是  $X = [X, H]$ ,  $P_x = [P_x, H]$ 。

④物理系统（如原子）的光谱线频率由  $h\nu_{mn} = E_{mn} - E_n$  决定。 $E_{mn}$  为  $H$  的本征值。

## 波动力学

假如说，矩阵力学的创立是将可观察量以及玻尔的量子条件与对应原理作为出发点的话，那么，波动力学创立的出发点却是德布罗意提出来的物质波。

前面提到，德布罗意提出的物质波假说，经过爱因斯坦推荐，才引起物理学界的注意并进行深入地研究。奥地利物理学家薛定谔正是在爱因斯坦的启发下，经过对德布罗意的物质波论文进行研究，才于 1926 年提出波动力学的。

薛定谔在分析了德布罗意的论文之后，认为应该找一个满足物质波的方程，从而创立一种新力学，并使这种新力学在极限情况下接近于经典力学。1925 年末，他提出一个使时间和空间处于同等地位的满足相对论形式的波动方程。但是，当他用这个方程去处理氢原子问题时，发现与实验不符，使他为之失望。所以，他把这一研究工作暂时停止了一段时间。不久，在苏黎世联邦工学院任教的德拜邀请薛定谔介绍德布罗意的论文，这使薛定谔又重新开始了他的研究工作。

1926 年，薛定谔公布了总题为《作为本征值问题的量子化》的四篇论文，完成了波动力学基本理论结构的创立工作。在这次研究中，薛定谔一开始就用非相对论处理电子的行为，获得了描写氢原子的波动方程，利用这个方程获得的氢原子能级公式与玻尔理论中的氢原子能级公式一样，因而氢光谱的巴耳末公式也能够由此导出。这就是薛定谔公布的第一篇论文中的内容。在这篇论文中他还特别指出，在他的理论中量子数是自然产生的。在第二篇论文中，薛定谔提出了波动方程的“推

导”过程。

依照经典力学中的哈密顿-雅可俾方程对于保守系统有：

$$\frac{\partial S}{\partial t} + H(q, \frac{\partial S}{\partial q}) = 0, \quad q \text{—— 广义坐标,}$$

$$S = \int_{t_0}^t L \cdot dt \text{—— 主函数。}$$

因为  $H(q, \frac{\partial S}{\partial q}) = E$  系统总能量 = 常数，所以设  $S = S_0(q, E) - Et$ 。因此  $H = \frac{1}{2m} (\text{grad}S_0)^2 + V \frac{\partial S}{\partial t} = -E$ ，再由哈密顿-雅可俾方程得：

$$|\text{grad}S_0| = \sqrt{2m(E - V)}. \quad \text{另外, 由 } ds = |\text{grad}S_0| + \frac{\partial S}{\partial t} dt = (|\text{grad}S_0| \cdot u - E) dt \quad \text{得波的相速度}$$

$$u = \frac{E}{|\text{grad}S_0|} = \frac{E}{\sqrt{2m(E - V)}}, \quad \text{这一点显然与粒子的速度}$$

$U = \frac{P}{m} = \frac{1}{m} \sqrt{2m(E - V)}$  不同。薛定谔经过分析认识到，在波动光学中，当波长  $\lambda \rightarrow 0$  时能够用几何光学来描述。那么，要使建立的新力学在极限情况下趋于经典力学，必须从几何光学中的费马原理  $\delta \int_A^B n dl = 0$  和经典力学中的莫培丢原理  $\delta \int_A^B P dl = 0$  的相似点入手。于是他假设：主函数  $S$  能够写成如下

形式： $S = \sum_j S_j(q_j, \frac{ds_j}{dq_j})$  及  $S = K L_n \Psi$ 。由此可得

$$H(q_1, \dots, q_n; \frac{K \partial \Psi}{\Psi \partial q_1}, \dots, \frac{K \partial \Psi}{\Psi \partial q_n}) = E$$

$$\text{或 } \frac{1}{2m} K^2 \sum_j (\frac{\partial \Psi}{\partial q_j})^2 + V(q_1, \dots, q_n) \Psi^2 = E \Psi^2$$

形式。再令  $\delta \int_A^B \dots \int \{ -\frac{K^2}{2m} \sum_j (\frac{\partial \Psi}{\partial q_j})^2 + (E - V) \Psi^2 \} dq_1,$

$\dots dq_n = 0$ ，得  $\frac{K^2}{m} \sum_j \frac{\partial^2 \Psi}{\partial q_j^2} + (E - V) \Psi = 0$ ，对于三维空间

有  $\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + (E - V) \Psi = 0$ , 这个方程就是所谓的定态薛定谔方程。

薛定谔为找到含时间的波动方程, 设波函数为  $\Psi(\vec{r}, t) = \Psi(\vec{r}) e^{-\frac{i}{\hbar} Et}$ , 然后, 从常见的波动方程

$$\left(\Delta^2 - \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \Psi(\vec{r}, t) = 0 \quad \left(\text{其中}, u = \frac{E}{\sqrt{2m(E-V)}}\right)$$

为相速度)着手, 得到  $\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + (E - V) \Psi = 0$  若使  $\hbar = \hbar^2$  则上式恰是定态薛定谔方程。另外, 若上式写成  $(H - E) \Psi = 0$  其中  $H = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V$ ,  $P \rightarrow \frac{\hbar}{i}$ 。对于含时间的常见波动方程由  $-\frac{\hbar}{i} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = E \Psi$ ,  $E \rightarrow -\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t}$  得  $(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V) \Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$  或写成  $H \Psi = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}$ 。这个方程描述了波函数  $\Psi(\vec{r}, t)$  随时间变化的规律。

以后的工作, 薛定谔进一步完善自己的理论体系, 成立了波动力学的基本理论结构(波动力学一词是他在 5 月发表的论文中指出来的)。它们是:

任何物理量都用厄密算符表示, 如坐标  $X \rightarrow X$ , 动量  $P_x \rightarrow \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x}$ ; 系统的哈密顿量  $H$  也用厄密算符表示, 并为  $X$ 、 $P_x$  算符的函数。

算符  $X$  和  $P_x$  具有对易关系

$$(P_x, X) = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} X - X \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\hbar}{i}。$$

系统的能态, 为  $H$  的本征值, 即  $H \Psi_h = E_n \Psi$  系统的运动方程是  $i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = (-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V) \Psi$ 。

## 测不准原理

实验表明：假如让一束电子射线通过一个小孔到达屏上，则这些电子在屏上的数密度分布显示出某一未知的波的衍射图形。这个实验叫做电子衍射实验，其中伴随着电子射线的那个未知的波，现在称为德布洛依波。

经过对这一实验的分析，能得出两个结论：“若电子射线的诸电子以同一速度作等速直线运动，从而有一致的动量  $P$ ，则其德布洛依波是单色平面波，其波长为：

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (5.1)$$

这里， $h$  是一常量，叫做普朗克常量。

“在电子射线中，电子的数密度分布与德布洛依的能量密度分布相同。” (5.2)

电子射线是由大量电子组成的群体，我们叫它“电子群”。动量一致的电子群则称为“单色电子群”。

依照定义，单色平面波是一个在时间和空间上都无限的波列。依据波动理论，这种波的能量在全空间均匀分布，而且不随时间改变。因此 (5.1) 和 (5.2) 给出：

“单色电子群的诸电子的位置在全空间均匀分布。”

(5.3)

根据傅里叶分析，任一波动过程能分解为一系列的单色平面波。因此 (5.1) 和 (5.2) 还给出：“电子群的诸电子的动

量分布完全地决定了它们的位置分布。反之，它们的位置分布也完全地决定了它们的动量分布。” (5.4)

既然单色平面波是无限波列，只有无限的电子群的德布洛依波才是单色平面波。但是我们在实验室获得的动量相同的电子射线束只能是有限的。比如，它沿自己运动方向具有有限长度  $\Delta x$ ，根据傅里叶分析，这个电子群的动量不会严格地一致，而必须有一个分布范围  $\Delta p$ 。(5.1) 和 (5.2) 还给出：

电子群的位置分布范围  $\Delta x$  与动量分布范围  $\Delta P$  的乘积约为普朗常量  $h$ ：

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

这一关系是海森堡首先提出的，叫做“海森堡关系”。(5.5)

在海森堡关系中， $\Delta x$  大，表示诸电子的位置分散； $\Delta x$  小，则表示诸电子的位置集中。因此有：

“电子群的动量分布越集中，则其位置分布越分散。反过来电子群的位置分布越集中 则其动量分布越分散。”

(5.6)

电子群的动量一致对应  $\Delta p = 0$ ，这时动量分布绝对地集中。电子群的位置在全空间均匀分布对应  $\Delta x = \infty$ ，这时位置分布绝对地分散。因此 (5.3) 能看成 (5.5) 和 (5.6) 的极端情形。

实验室获得的电子射线束在宽度（指横断面）上也是有限的，依照傅里叶分析，我们还能够从 (5.1) 和 (5.2) 获得结论：这束电子的运动方向也不严格地一致，其宽度越小，则诸电子的运动方向越分散。可见：

“电子群中诸电子的轨道一定是分散的，决不可能所有的电子都在同一轨道上运行。” (5.7)

上述诸命题的中心点是 (5.4)。它能更简单地表述成：

“给定动量分布的电子群,有特定的位置分布。” (5.8)

假如这种位置分布是诸电子在相互作用中形成的,则从经典物理学的角度来看非常容易理解。但是实际上却使人们作出了相反的结论:

“给定动量分布的电子群的位置分布,并不是诸电子在相互作用中形成的。” (5.9)

这一结论的主要实验根据是:

“在宏观电磁场中,电子射线中的每一个电子都像孤立的电子一样运动。” (5.10)

“在电子衍射过程中,即使电子一个一个地通过小孔,也可以形成衍射图形。” (5.11)

能够普遍地证明:

“电子群的位置分布由德布洛依波完全地确定。德布洛依波则由电子所处的宏观条件完全地确定。” (5.12)

根据(5.9)和(5.12),玻恩提出了德布洛依波的“几率解释”:

“若在给定的客观条件下,德布洛依波的波函数为  $\psi$ ,则在该宏观条件下单个电子的位置的几率密度分布函数为  $\psi\psi^*$ 。” (5.13)

依照这种解释,德布洛依波不是一种现实的波,它没有能量和动量,只是一种给出几率分布的“幽灵场”。人们干脆用“波函数”这一纯数学的用语来称呼它。因此玻恩对德布洛依波的几率解释就叫做“波函数的几率解释”。

把波函数的几率解释用于电子衍射过程,会得出如下结论:

如果有  $N$  个 ( $N$  足够大) 完全相同的电子衍射仪器,每一个仪器都进行一次单个电子的衍射过程,从而在  $N$  个屏上

各自留下一个斑点，再将这  $N$  个斑点映在同一屏上，则它们将组成衍射图形。

换言之，假如在某一时间间隔里，有  $N$  个各自经历了一个相同的电子衍射仪器的全程，然后在想象中把这  $N$  个电子衍射仪器重合起来，则这  $N$  个电子的位置分布与  $N$  个电子在相同时间间隔里共同经历同一个电子衍射仪器的位置分布相同。

$N$  个共同经历同一电子衍射仪器的电子的集合就是电子群。 $N$  个各自经历相同的电子衍射仪器的电子的集合则叫做该条件下的“电子统计系综”简称“系综”。系综仅决定于电子所处的宏观条件，而电子数  $N$  则是不重要的，只要它足够大。

这样，我们能够把波函数的几率解释的通常观点表述成：

“在给定的宏观条件下，系综中诸电子的位置分布与处于同一宏观条件下的电子群的位置分布相同。” (5.14)

根据这一观点，(5.3)、(5.5) 和 (5.7) 中的“电子群”能换成“电子系综”。若进一步把这样获得的命题从大数语言换成几率语言，则这三个命题分别表述成：

“假如单个电子出现某一动量的几率为  $1$ ，则它在全空间任一点出现的几率相等。” (5.15)

“单个电子的位置的几率分布范围  $\Delta_x$  与动量的几率分布范围  $\Delta_p$  的乘积约为  $h_0$ 。” (5.16)

“单个电子落于任一轨道的几率都不可能是  $1_0$ 。” (5.17)

像这样把大数语言换成几率语言，波函数对单个电子依然是没有意义的。玻恩对这一点非常明确，他提出波函数的几率解释时，毫不含糊地说：“关于单个电子我们是说不出什么的。”

按照玻恩的这种理解，除了大量电子的位置分布如何形成这一问题令人疑惑以外，对微观世界的描述仍旧是经典的，尤其是单个电子的运动依然是轨道运动。

以玻恩对波函数的几率解释为基础，能够造成量子力学的一种解释：“系综解释”。

电子的系综是由宏观条件决定的，在测量过程中，宏观条件又由测量仪器给出，于是在系综解释的意义下，一个物理量的“几率分布范围”就是其测量误差，于是在(5.16)的意义下，海森堡关系又被叫做“测不准关系”。

玻尔和海森堡也接受波函数的几率解释，但由于它们加进了哥本哈根迷误，获得的对量子力学的解释就不再是系综解释，而是他们自己的解释——哥本哈根解释。下面我们就来考察这一解释。

根据薛定谔方程，我们能够得到测不准关系的常见形式：

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq \frac{\hbar}{4\pi}$$

其中  $A$  和  $B$  是一对共轭的物理量。在本书中，我们把  $\Delta A$  称为  $A$  的“变更”，取  $A = x$ ， $B = p$ ，则有  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{4\pi}$ ，这与本文开头介绍的测不准关系  $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar$  形式略有不同，关于这一点，我们以后再考察。

在系综解释中，测不准关系只有认识论的意义，它被理解为一种表现宏观仪器对微观粒子的测量的精确度的界限，通过哥本哈根迷误，它又被赋予了本体论的涵义，表现单个波包在相空间的分布范围，当这两种涵义在幻想中相互混淆之后，这一关系就荣获了“原理”的尊称，成为“测不准原理”或“海森堡原理”了。

依照这一原理，测不准关系成了一个分界线。线的一边是

经典的宏观世界，另一边则是非经典的微观世界。微观世界之所以是“非经典”的，就是由于它在幻想中混淆了两类经典的物理概念：粒子概念与波动概念。在这里，经典的物理概念由于这一混淆而在幻想中被抛弃了，海森堡十分好地表述了这一幻想中的扬弃过程：

“量子理论的这种新解释的要点是，经典概念的应用是有局限的。这个局限性实际上是广泛存在而且完全确切的，它能够应用于粒子图形的概念，比如位置、速度和能量；也能够应用于波的图景的概念，比如振幅、波长和密度。”

“量子力学的数学方案的灵活性表明了玻尔的互补性概念。关于‘互补性’一词，玻尔企图用它来描述下列事实，即同一现象有时能够用完全不同的甚至矛盾的图景来描绘。说这些图景互补的涵义是：假如要使这些现象的‘量子’特性表现出来，则两种图景均属必要。当这些概念的局限性被恰如其分地考察后，它们之间的矛盾就消失了。这样，我们能够说波动图景与粒子图景互补……”

说得很好：经典的概念体系在幻想中的互补图景中被幻想地扬弃了，而幻想中的互补图景中的矛盾又因为这一幻想中的扬弃而在幻想中消失了。只有一点海森堡说得不对：“说明”互补性概念的并不是量子力学的数学方案的“灵活性”，而是“不确定性”这一用语的“双关性”。

那么，用什么概念取代在幻想中被扬弃了的经典概念呢？海森堡的回答说：“没有！”

“也曾有过另外的尝试，想在量子理论的数学方案中采用一种新的语言来取代传统的经典概念来描述现象，但是，……更准确的语言并没有提出来过……”

这样，经典的概念体系早已在幻想中被扬弃，而新的概念

体系又并未“提出”，在这种无政府状态下，海森堡就变成了战无不胜的拿破仑。

既然没有非经典的、与量子理论的数学方案相适应的新概念体系，谁要是不同意海森堡的建议，就只能使用经典的语言与他争论，而海森堡有言在先，经典的语言中的每一个概念在微观世界都无意义，因此原则上都被禁止使用。作为这一禁令的颁布者，海森堡能够随心所欲地一会儿用波的概念一会儿用粒子的概念，但他能巧妙地在关键时刻禁止对方使用某一经典概念。比如，禁止对原子中的电子使用轨道的概念。

下面的例子有助于我们体验海森堡这一禁令的威力：

依照哥本哈根解释的用语，在电子衍射过程中，通过小孔的单个电子的轨道是不确定的，它在屏上的落点也是不确定的。既然由于“电子的轨道不确定”就必须禁用“轨道”的概念，那么，由于“电子在屏上的落点不确定”也就必须禁用“落点”这一概念了。这么说，“电子衍射图形”也应该被禁用了，因为它是由被禁用的“落点”构成的。更进一步，电子衍射实验也该被禁止，因为它将获得被禁有的电子衍射图形。

可见，一旦迈进量子力学的大门，人们就有了偷食禁果的原罪：他们的每一句话都是违背禁令的。假如说他们毕竟还是说了点什么，那也只能是某种特许。比如，在原子中，禁用轨道概念，但对于电子衍射，能够通融，或者，即使对于电子衍射，仍然禁用轨道概念，但“落点”的概念能够通融，等等。至于什么情况下禁用，什么情况下通融，就取决于裁决者海森堡的喜好了。在这种形势下，哥本哈根解释又怎么能不战无不胜呢？

然而，哥本哈根解释对测不准关系更根本的误解还在另一方面，这一点我们以后再进行考察。

## 玻尔与爱因斯坦之争

在 20 世纪物理学的发展中，爱因斯坦和玻尔是两位最伟大的科学巨匠，他们都创造了当今物理学的辉煌，然而他们对当代物理学的基本问题却有着自己独特的见解，由此引起了长期的争论，成为两个最伟大的心灵之间的冲突。

两位科学巨匠争论的问题，主要不在于量子理论本身的内容与形式，而在于量子理论的解释方面，也就是关于作为量子理论基本特征的不连续性与统计性的说明方面。因此，争论主要发生在 1927 年哥本哈根学派系统地提出量子力学解释以后，但随着量子理论的逐渐成熟，两位科学巨匠思想上的差别也逐渐明显。下面我们将依照争论的不同阶段和特点，谈一谈有关的故事。

第一阶段（1927 年以前）。量子力学逐步建立，量子力学的哥本哈根解释还没有提出，相对于量子理论中出现的、引人注目的不连续性与因果性问题，也就涉及到是坚持还是放弃经典物理学的信条，爱因斯坦与玻尔的态度却有非常大的不同，因而开始个别地、直接或间接地进行了辩论。

爱因斯坦虽然提出了光的波粒二象性，但从实质上他不准备放弃连续性和严格因果性，因为这些都是相对论的基本特征。他还坚持相信对于原子过程可以给出连续的机制和直接的原因，而这种原因一旦被得到、被重复，现象就会无一例外地以决定论方式精确地显现出来。

而玻尔则认为，这一理想并不总被满足，由于观察操作引起的扰动不可以任意小，我们只可以谈论一种“单元事件体”。比如电子从激发态到基态的某一次跃迁，比这更细微的过程我们将无法认识到。所以，对于经典物理学的连续性和严格因果性必须放弃。

这场争论的开始能够追溯到 1920 年春天，那时玻尔和爱因斯坦这两位科学巨匠在柏林会晤。虽然玻尔非常赞赏爱因斯坦对相对论的贡献以及对普朗克定律的巧妙的推导，但是他很难接受爱因斯坦的光量子概念。所以在 1920 年 4 月他对柏林物理学会所作的关于《光谱理论的理状及其在不久的将来的发展的各种可能性》的讲演中，虽然这个题目同光子理论有十分密切的关系，他却只在一个地方提到“辐射量子”的观念，而且这或许只是出于对也参加了这个报告会的爱因斯坦的尊重；玻尔立刻补充道：“我将不在这里讨论‘光量子假设’在干涉现象上所带来的众所周知的困难了，而辐射的经典理论对于说明干涉现象却是这样适合。”

在玻尔看来，经典物理学和量子理论是不能调和的，虽然它们经过对应原理以渐近的方式联系着。而爱因斯坦则是一切物理现象应当有一个统一的因果理论的坚定信仰者。从他在 1919 年 6 月写给玻恩的一封信中，我们能够看出他心目中对玻尔的二分法是颇为反感的：“量子论给我的感觉同你的感觉十分相似。人们实在应该对它的成功感到羞愧，因为它是依据教会的信条‘不可让你的左手知道右手所做的事’而得到的。”

在没有会晤玻尔以前写给玻恩的另一封信中，爱因斯坦写道：“关于因果性的问题也使我很伤脑筋。光的量子吸收和发射是否有朝一日总能够在完全的因果性的意义下去理解呢，还是一定要留下一个统计性的尾巴？我必须承认，在这里我缺少

判决的勇气。无论如何，要放弃完全的因果性，我会是非常、非常难受的……”

1920年3月，爱因斯坦在给玻恩的信中又写道：“我在闲暇时总是从相对论的观点来沉思量子论的问题。我认为理论并不见得非得要放弃连续性不可。但是，到现在为止我未能把我的宝贝想法想得再具体些，这个想法就是用过分确定条件下的微分方程来理解量子的结构。”鉴于这一段话，我们就会很容易理解，为什么爱因斯坦后来对薛定谔的波动力学是那样“热情”。

1923年，康普顿效应被发现后，玻尔同爱因斯坦的争论达到了头一次高潮。看来康普顿效应是绝对支持光的粒子说的，所以便求玻尔一方相应采取断然的步骤。

为了回答这个挑战，玻尔在1924年同克拉默斯和斯莱脱合作写了著名的论文《辐射的量子理论》。这篇文章完全摒弃了爱因斯坦关于辐射的量子结构的观念，而是假设用抽象的几率波来表明实在的电磁波，从而进一步突出了不连续性与统计性的实质性质。

该年4月，爱因斯坦在致玻恩的信中这样写道：“玻尔关于辐射的意见令我十分感兴趣。但是，在有比迄今为止更为有力得多的反对严格的因果性的证据之前，我不想轻易放弃严格的因果性。我不能容忍这样的想法：受到一束光照射的一个电子，会由它自己的自由意志来选择它想要跳开的时刻和方向。假如是那样，我宁愿做个补鞋匠或者甚至赌馆里的一名佣人，都比当个物理学家强。不错，我要给量子以明确形式的尝试，一而再、再而三地失败了，但是，我还是不想长远地放弃希望。”

第二阶段（1927—1930年）。在玻尔提出对应原理和哥本

哈根学派提出波函数的几率解释的基础上，1927 年海森伯提出“测不准关系”。同年 9 月，玻尔在意大利科摩市召开的纪念伏打逝世 100 周年的国际物理会议上公布了题为《量子公设和原子理论的量近发展》的讲演，提出著名的“互补原理”，进一步引起了学术界的巨大震动。

互补原理认为“微粒和波的概念是相互补充的，同时又是相互矛盾的，它们是运动过程中互补图像。”玻尔尤其指出，观察微观现象的特殊性，因为微观客体中最小作用量子  $h$  要起重要作用，所以微观客体和测量仪器之间的相互作用是不能忽视的。这种相互作用在原则上是不能控制的，是量子现象不可分割的组成部分。这种不可控制的相互作用的数学表示就是测不准关系。因此决定了量子力学的规律只能是几率性的；为了描述微观客体，必须丢弃决定性的因果原理；而量子力学精确地描述了单个粒子体系状态，它是完备的。

一个月以后，在布鲁塞尔举行了第五届索尔维物理学会议。10 月 24 日早晨，在一种满怀期望的心情中，全世界的物理学权威们相聚一堂，来对新量子论的意义彼此交换意见。科摩会议的大部分参加者出席了这次会议，此外参加者中引人注目地增加了爱因斯坦、埃伦费斯特和薛定谔等著名的物理学家。

玻尔在会上又一次阐述了他的互补原理，量子力学的哥本哈根解释为那时很多参加者所接受。但是它也受到来自各方面的批评，尤其是爱因斯坦公开的批评。他在会上发言说：“我必须请大家原谅，因为我对量子力学并没有深入的研究。虽然这样我还是愿意谈一些通常性的看法。”

爱因斯坦认为，波函数不是代表单个电子，而是代表分布在空间中的电子云。 $|\psi|^2$  表示在被观察的那一部分空间有电

子云的一个粒子存在的几率，而不是表示在所考虑时刻的那一刹那一个特定的粒子存在于所给地方的几率。因此，量子力学只能给出相对来说是无限多个基元过程的集合的知识，而不能完备地描述某些单个过程。

会上进行的争论，在会后的交谈继续进行。会议参加者一般是在早餐以后就在旅馆中见面了，爱因斯坦就开始描述一个理想实验，那是他认为能够经过分析坐标和力量的测量来驳倒测不准关系。于是玻尔、海森堡等就分析这个理想实验，并在晚饭桌上由玻尔把分析的结果告诉爱因斯坦。这样，爱因斯坦又提出了另一个理想实验，但是在玻尔、海森伯这两位善于分析理想实验的专家面前，爱因斯坦非但没有驳倒测不准关系，反而被哥本哈根学派抓到了把柄。但是，爱因斯坦的挑战最终还是促使哥本哈根学派去深入地研究量子力学的测量问题。

1930年，第六届索尔维物理学会议又在布鲁塞尔举行。会议原定的主题是讨论“物质的磁性”。可是，会上围绕量子力学基础的讨论却变成了主要内容。

在这次会议上，爱因斯坦提出了一个“光子箱”的理想实验，试图通过能量和时间能够同时精确测量，以此来驳倒能量与时间的测不准关系。

设有一个用弹簧秤挂在固定底座上的不透明的箱子，箱子的一个壁上开了一个小孔，小孔上装着一个用计时装置来控制它启闭的快门。通过挂在箱子下面的砝码和装在箱子侧面的指针，能够测定整个箱子的总重量。爱因斯坦设想，快门从时刻  $t_1$  打开到时刻  $t_2$  关闭，中间经历的时间  $\Delta t = t_2 - t_1$  非常短，以至只有单独一个光子从箱子中放出。在  $t_1$  之前和  $t_2$  之后，都能够要多准确就多准确地测定箱子的重量，并从而根据质量和能量的关系式  $E = mc^2$  来推出箱子的发射光子以前和以后的能

量之差。另一方面，按照计时装置的读数也能够要多准确就多准确地确定光子的发射时刻及其到达远处屏幕上的时刻。这样，按照爱因斯坦的想法，关于能量和时间的测不准关系好像是不可能成立了。

爱因斯坦的这种争论方式出乎玻尔的意外，以致使他大吃一惊据目击者回顾，那时玻尔面色苍白，呆若木鸡。但是，在经过一个不眠之夜的紧张思索之后，他终于找出了问题的症结所在。他发现爱因斯坦在上述论证中，竟然忘记他自己发明的效应：在引力场中，时钟能延缓。结果使爱因斯坦否定测不准关系的光子箱实验，反倒成了论证测不准关系的理想仪器。从此以后，爱因斯坦承认量子力学的内在体系是自给的，但他仍然坚持认为量子力学不是微观体系的、完备的、最终的描述。

第三阶段（1930年以后）。量子力学理论体系获得了更加完美的形式，但有关量子理论的完备性的争论仍然继续进行着。1935年5月，爱因斯坦和两位年轻的美国物理学家波多耳斯基和罗森在美国《物理评论》47期公布了题为《能认为量子力学对物理实在的描述是完备的吗？》的论文，在物理学界、哲学界引起了巨大的反响，玻尔则以相同的题目撰文回答。

爱因斯坦等在论文中提出了物理理论体系完备性的判据与著名的以三位作者姓的头一个字母简称的EPR悖论（这一悖论涉及到怎样理解微观世界实在的问题），仔细地论证了量子力学对物理实在叙述的不完备性。

EPR在论文中，首先给物理实在与物理理论的完备性下了定义。假如一个物理理论对物理实在的描述是完备的，那么物理实在的每个要素都必须在其中有它的对应量，也就是完备性

判据。当我们不对体系进行任何干扰，却能确定地预言某个物理量的值时，必定存在着一个物理实在的要素对应于这个物理量，就是实在性判据。

EPR 在推理过程中还默认了以下两个假设：(1) 定域性假设：假如测量时两个体系不再相互作用，那么对第一个体系所能做的无论什么事，都不可能使第二个体系发生任何实在的变化；(2) 有效性假设：量子力学的统计预示（至少本论证有关的范围内）已经为经验所证实。接着，EPR 介绍了物理实在的量子力学描述的常见特征后，认为量子力学不满足上述这些判据，因此是不完备的。

在论文的第二部分，EPR 设计了一个理想实验来进行论证：假设有两个子系统 I 和 II 构成的复合系统，当  $t < 0$  时，它们是相互分离的，状态为已知；在  $0 < t < T$  时，它们接近而发生相互作用；在  $t > T$  以后，它们又彼此分离并且停止相互作用。一方面由量子力学能够知道，当子系统 I 和 II 分离后，据对子系统 II 的动量（或位置）所作的测量，人们就能够在不对子系统 I 进行干扰的情况下确定地预示子系统 I 的动量（或位置）。所以，根据 EPR 的实在性判据和定域性假设，子系统 I 的动量与位置均对应于物理实在的要素。另一方面，由于动量与位置是一对不对应的共轭变量，人们不会对子系统 II 的动量与位置同时进行测量，从而不可能对子系统 I 的动量与位置同时作出预测。如此，我们就否定了上面二中择一的两个命题中的第二个命题，从而证明了其中第一个命题，就证明了量子力学并不为物理实在提供一个完备的描述。

玻尔以为，EPR 所说“不对体系进行任何干扰”是不确切的。因为在测量过程中虽然没有对子系统 I 施加力学干扰，但因为作用量子的不可分性，微观体系和测量仪器组成了一个不

可分割的整体。测量安排是确定一个物理量的必要条件，而对微观体系未来行为所预测的可能类型正是由这些条件所决定的。

这样，玻尔提出的量子现象的整体性特征，引起了人们对 EPR 所默认的定域实在论的怀疑，预示着把世界看做在空间上分离的、独立存在的各部分组成的看法不一定广泛成立，从而促使量子力学的完备性问题获得了系统的研究。

1949 年，为纪念爱因斯坦 70 大寿，玻尔写了题为《就原子物理学中的认识论问题和爱因斯坦进行的商榷》的论文，爱因斯坦则主要针对论文集《爱因斯坦：哲学家—科学家》中哥本哈根学派各篇论文的意见，写了《对批评的回答》一文作为反批评。这两篇论文，都带有某种归纳性质，不过他们各自坚持自己的基本观点不会变。

1955 年 4 月 18 日爱因斯坦死了以后，玻尔心里也没有忘记和爱因斯坦的论战。根据记载，玻尔在逝世（1962 年 11 月 18 日）前一天的傍晚，在他的工作室的黑板上所画的最后一个图，就是爱因斯坦的光子箱的草图。

对于这场持续了近 40 年的争论，尤其是 EPR 悖论的争论，从基本观点来说，谁也没有说服谁。后来，有人想把上述 EPR 理想实验推进到真实实验，以此来证明谁是谁非。50 年代，英国物理学家玻姆在 EPR 悖论启迪下提出了隐参量的量子理论。60 年代，又一位英国物理学家约翰·贝尔依据隐参量的量子理论从数学上推导出了一个关于远隔粒子量子有关联的定量不等式——贝尔不等式。由于贝尔的工作，人们才有可能设计真实实验来检验 EPR 悖论的争论的孰是孰非。

从 1972 年至 1982 年间，物理学家共完成了 12 个实验，其中 10 个实验的结果违反贝尔不等式而与量子力学的预言相同。

但是，人们假如引入非决定论的随机性，就能够导出贝尔不等式。所以，上述实验仅仅说明了量子理论是超距关联、非定域的，而没有确定量子理论是决定论的还是非决定论的，换言之微观世界因果律是否成立还没有盖棺论定，EPR 悖论的争论还有待于人们进行更深入的研究。

## 天圆地方

公元前 600 年，亚述帝国刚刚衰亡。在它的繁荣时期，版图曾经从埃及延伸到巴比伦，两端相距 2200 公里。紧接着代之而起的是波斯帝国，它的版图西起今日的利比亚东部，东到克什米尔，横跨 4800 公里。

毫无疑问，这些帝国的普通老百姓对于整个国家的范围只有十分模糊的观念，他们只满足于在自己那一小片乡土上生老病死，再大不了就是无意的到邻近的村子去旅行一趟。不过，那时的经商者和士兵们对于帝国疆土的辽阔，以及疆域之外还有那更加遥远的地方，一定是会有所认识的。

在这些古代王国里，想必有一些人曾经思考过：大地有尽头吗？这能够说是学者们面临的第一个宇宙学问题了。

当然，没有一个古代人到过大地真正的尽头，无论他曾经旅行得多么远，但他充其量只是到达了某一处的海岸上，而天涯海角好像还在那地平线以外呢。就算他登上一条船，向外驶去，也是永远到不了尽头的。

这么说，大地是不是就没有尽头了呢？这个问题的答案怎样，要看你认为大地的整个形状是怎样的。

在古希腊时代之前，所有的人都认为大地是平的。真的，它看起来的确就是那样，只不过有一些山丘、河谷的小起伏罢了。可是，假如大地确实是平的，几乎立刻能够断定，它非得有个什么样的尽头才行。要不然，它就是个没完没了地向外延

伸的平面——换言之，它的范围是无限大的，这是个叫人最不能理解的概念。在历史上，不论对空间或者时间，人们总是力求避免“无限”这个概念，由于这样的东西好像既不能认识，又无法理解，因此也就无从进行研究和推理了。

另一方面，假如大地确实有个边缘，就是它是有限的，这又会导致另一些困难的发生。人们要是走得太靠边了，不是要掉下去吗？

当然，也许干的陆地周围都有海洋环绕，因此人们是靠近不了那个边的，除非有谁故意乘船向外航行，远远地离开陆地，一直到看不见的地方。实际上，直到哥伦布那个时代，还有很多水手真的害怕发生这样的事情呢。

不过，要是认为人类由一圈水保护着，这又导致了另一个问题，是什么东西挡住了海水，使它不致于从大地的边缘流出去呢？

要解决这个问题，一个办法是假设我们头顶的天空是一个坚固的盖子，从四面八方往下罩住了大地。这就是所说的“天圆地方”。真的，天空看起来不就如此吗？这样一来，能够把整个宇宙想象成一个盒子，天空组成了弯曲的盒盖和盒边，而海水和干的陆地则是平坦的盒底，人和万物都在这个盒底上面生长、活动。

在这么一个“盒子宇宙”里，大地的形状和大小又是如何的呢？

很多人曾觉得大地宛如一块长方形的板。说来也很有趣，由于历史上和地理上的巧合，尼罗河、底格里斯河和幼发拉底河、印度河这一系列最早的人类文明发祥地是从西到东，而不是由北向南分布。还有，地中海也是东西走向的，因此古代文明人的那一点模模糊糊的地理知识，好像在东西方向上来得丰

富一些，因而他们也就理所当然地把“盒子宇宙”想象成东西方向东，南北方向短了。

希腊人好像具有比较强烈的几何学的均衡与对称的观念，他们倾向于把大地想象成一块圆板。不消说，希腊正位于这圆板的中心。这块平板上大部分是陆地，周围环绕着一圈水，地中海就是从那儿一直向内延伸到陆地中央。

到了公元前 500 年，希腊第一位科学的地理学家喜卡塔乌斯认为，这块圆板的直径最多是 8000 公里左右。也就是说，平坦的大地面积大概为 5000 万平方公里。在他那个时代的人看来，这个数字已经足够大，大得都有点吓人了。其实它只有陆地实际面积的 1/10。

我们暂且不谈这个“盒子宇宙”的大小和形状，先来问一问是什么东西使它维持自己的位置的？在上面所说的这种扁平的大地看来，有一个特殊的方向叫做“下”，一切重的、实的东西全要“往下掉”，那么，大地本身为什么不会“掉下去”呢？

当然，能够假定构成大地的材料，是一直往下延伸的。但这样一来，又得面临“无限”这个概念。为了避免这一点，我们能够说大地本身立在其他东西上面。比如，古印度人就认为，大地是由四根柱子支撑住的。

可是这只不过把困境推迟了一点而已，这四根柱子又是立在哪儿呢？立在四头大象背上！大象呢？站在一只巨大的乌龟背上！乌龟呢？浮在大海上！那么大海呢？……

总而言之，只要假定大地是扁平的，不管这样的假定好像是多么“符合常识”，都不能避免地会引起最严重的哲学上的困难。

其实，要是人们可以恰当地使用自己的眼睛，那么，这种

“扁平的大地”是连常识也不符合的。假如大地真是平的，那么在地面上所有的地方应该可以看到同样的星星。但是所有的旅行者都知道，如果朝北走去，一些星星会消失在南方的地平线下，另一些星星却出现在北方的地平线上；要是向南走，情况就正好相反。而只要认为大地是南北弯曲的，就能毫不费力地解释这种现象。

因此希腊学者阿纳克西曼德就提出，人类生活在一个南北方向弯曲的圆柱面上。就我们今天所知，是他头一个提出了地面的形状不是平面，时间大概在公元前 550 年左右。

但是圆柱形的大地还是解决不了问题。住在海边，常常注意观察海船的人都有这样的经验，向大海驶去的船只并不是变得越来越小，一直小到只剩下一点，然后才消失的。假如大地是平的，情况本来应该是这样。但实际上，船到消失的时候看上去还相当大，它们像是翻越到了山背后一样，船身首先隐没，然后才是船帆。假如大地是弯曲的，情况就肯定是这样。而且，不管船是向着罗盘上的哪个方向驶去，消失时的情形全是一样的。所以，大地并不只是在南北方向弯曲，而是朝所有方向都同样的弯曲。而在一切方向上弯曲程度相同的表面只有一种，这就是球面。

古希腊的天文学家还发现，对于月食的成因，最好的解释就是：因为月亮和太阳正处于大地两侧相对之处，大地的阴影（由太阳所投下的）落到月亮上，从而造成月食。无论月亮和太阳相对地面的位置怎样，月食时能够看到这种阴影的断面总是圆形的。只有一种物体能朝所有的方向都投下断面为圆形的影子，这就是球。

总之，认真地观察便能发现，大地并不是平的，而是球形的。但你平时看来，它非常像个平面，因为整个大地是那么一

个巨大的球体，在它的表面上，用眼睛所能看到的只是一小部分，它的弯曲程度是小得难以觉察的。

球形大地的概念立刻清除了关于大地“尽头”的问题，而又不必引进“无限”这个概念。球的表面有确定的面积，但却没有尽头；它是有限的，但却没有边。

到了公元前 350 年，地球的观念就早已牢固地确立了。从那以后，西方世界受过教育的人全部都承认了这种观念。

这种观念显得如此理想而又完美，虽然没有直接的证明，但是人们还是承认它。直到公元 1522 年，由葡萄牙航海家麦哲伦率领的一支探险船队里幸存的一条船驶回了港口，人类这才第一次成功地环绕地球航行一周，因而直接地证实了大地不是扁平的。

如今，我们对于大地这个圆球的认识真正达到了“眼见为实”的程度。发射到高空的火箭和卫星拍下来的图像都向我们展示了地球的真实面貌，证实了它的形状。

## 宇宙的中心是地球吗

自古以来，人们都亲眼目睹日月星辰是围绕着人类所居住的大地在运动，而大地又是如此的平静和安稳，所以在人们的头脑中就自然而然地产生所谓大地处于宇宙中心的概念。在这个基础上就产生了古代希腊的地心说，以及与地心说有相类之处的中国的浑天说。

我国古代，曾提出过与地心说相似的浑天说，浑天说源于战国时代，而我国东汉初期的天文学家张衡是浑天说的代表人物。他将天和地比做蛋壳和蛋黄的关系。这就揭露了大地是悬浮于宇宙空间的一个圆球，而且宇宙是以地球为中心。可见，我国古代浑天说的宇宙体系，和古代希腊的地心体系是非常相似的。

古希腊的毕达哥拉斯学派认为，所有立体图形中最美好的是球形，一切平面图形中最美好的是圆形，而宇宙是一种和谐的代表物，因此一切天体的形状都应该是球形，一切天体的运动都应是匀速圆周运动。但实际观察的结果并非如此，行星的运动速度很不均匀。在柏拉图看来，这仅是一种表面现象，可以用匀速圆周运动的组合来解释。于是他就提出了一种以地球为核心的同心球壳结构模型。各个天体都处在各自的球壳上，各同心球之间是由正多面体联接着。

柏拉图的学生欧多克斯发表了他的观点，按照欧多克斯的假设，地球是万物的中心，日、月、行星都是在同心的透明球

体上绕地球转动的。他认为一切恒星都在同一个球面上，而这个球的半径最大，它环绕着通过地心的轴线每天旋转一周。其他天体则由几个同心球结合成一组以及另一组等等。

亚里士多德在欧多克斯同心球理论的基础上，将这些转动的同心球，不仅看成是实际存在的物质的实体，而且还把它们看作是一个透明的“水晶球”，每个组都成了一个连续的相互接触的系统。在亚里士多德的体系中，各个天体离地球由近到远的依次为：月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星和恒星天，在恒星天之外还有一层“宗教天”。亚里士多德认为，一个物体由于另一个物体的推动而运动，这个“宗教天”的运动，是由不动的神来推动的。当神一旦推动了“宗教天”的运动，“宗教天”就把运动依次传递到恒星、太阳、月亮和行星上去。亚里士多德就如此把神是第一推动力的唯心思想，首次塞进了宇宙论中来。这就成为亚里士多德体系中致命的弱点。

以地球为中心的宇宙理论由喜帕恰斯给出了几何模型。从地球上观测到的行星运动非常复杂，它们有时由西向东行，有时逆行，有时又好像在群星中不动。为了解释这种杂乱无章的运动，喜帕恰斯提出了本轮均轮的思想。他认为行星在本轮上围绕着一个假设的中心运动，而这个假设中心又绕地球在均轮上运行。

在喜帕恰斯之后 3 个世纪内，希腊天文学没什么新的进展。到了公元 2 世纪，古希腊著名天文学家托勒密继承了亚里士多德的地球位于宇宙中心静止不动的思想，全面总结了希腊罗马时期的天文学，创立了托勒密的地心体系，也叫托勒密的地球中心说。他提出：以地球为中心，外边环绕着月亮、水星、金星、太阳、火星、木星、土星，然后是恒星天和最高天，共有九重天。全部的行星和太阳、月亮都有本轮和均轮，

并且均轮都是偏心圆。这样他就能够让实测的天体运动分解成许多简单的圆运动来满足宇宙的和谐。

公元 5 世纪至 10 世纪，是欧洲历史上的黑暗时期，基督教神学占统治地位，按照基督教的教义。上帝是世界的最高主宰者，宇宙间的万物是上帝为满足人的需要而创造出来的。基督教还把宇宙的样子也纳于宗教的教义。亚里士多德 - 托勒密的地球是宇宙的中心见解，以及神是第一推动力的思想也被教会利用了。在黑暗的中世纪，地心说的宇宙体系统治了西方约 1000 多年。

那么，地球真的是宇宙的中心吗？

随着观测仪器的改进和观测水平的不断提高，用托勒密体系计算出来的行星位置，和实际观测的偏差越来越大。虽然托勒密的继承者已经把本轮的总数增加到 80 个，但所得的结果仍然与实际的星位不相符。在这种情况下，科学家们对托勒密的宇宙体系越来越产生怀疑。到后来，由于自然科学的快速发展，自然科学与神学之间的矛盾越来越尖锐，甚至发展到科学起来反叛教会了。于是，科学和神学的这场斗争，首先从对宗教神学宇宙观的基础——地球中心说的批判开始。

## 从哥白尼到牛顿

哥白尼出生于波兰维斯杜拉河畔的托伦城。他所处的时代，正是欧洲黑暗的中世纪的末期，亚里士多德 - 托勒密的地心说早已经被基督教篡改为基督教义的支柱。但因为天文观测技术的提高，就算在托勒密的地心体系中已经增加到 80 个左右的本轮和均轮，也难以获得与观测相符的结果，而且这类本轮的数目还在不断增加。这就使当时某些具有进步思想的哲学家、天文学家们，对托勒密的复杂的地心体系产生了怀疑，甚至感到不满。而哥白尼接受了这种进步的思想，因为受到古希腊阿里斯塔克的地球围绕太阳转动的学说的影响和启发，哥白尼分析了托勒密体系中的行星运动，发现各个行星都有一日一周、一年一周和相当于岁差的三种共同的周期运动，但又不能对此作出合理的解释。他认为，假设把这三种运动都归到被托勒密视为静止不动的地球上，就可消除他的体系里不必要的复杂性。因此，哥白尼认为地球并不是宇宙的中心，而是一颗一般的行星，建立了一个以太阳为核心的日心体系。

哥白尼认为，月亮是地球的卫星，它在以地球为中心的圆形轨道上每月绕地球公转一周。与此同时，月亮也随着地球一起绕太阳公转。地球每天自转一周，天穹实际并不转动，是由于地球自转才出现日月星辰每天的东升西落现象。恒星和太阳的距离非常遥远，它们在离太阳很远的一个天体上。行星和地球一样，都在圆形的轨道上匀速绕太阳公转。就这样，哥白尼

把统率宇宙的力量都归功于太阳。

哥白尼花费了 40 年的心血，以严格的科学态度进行反复的观测、研究和计算，完善了他的学说，最终写成了阐述日心说的不朽巨著《天体运行论》。他在这本书里全面讨论了当时天文学的全部问题，使过去很多莫名其妙的问题都得到了合理的解释。

哥白尼的日心体系从根本上动摇了中世纪宗教神学的基础，认为宇宙是能够认识的，有一定的规律可供人类研究探寻。从此自然科学便开始从神学中解放出来，大踏步前进了。

但是哥白尼的革命并不够彻底。他还保留了行星作匀速圆周运动的概念，因此对一些天体的不均匀运动还要保持一些本轮。除此之外，他还保留着固定不动的恒星天球的概念，让太阳成为宇宙中心。这些都要等到天文学进一步发展才陆续得到解决。

在哥白尼之后，意大利的修道士布鲁诺因为善于接受新事物，在学习了哥白尼《天体运行论》之后，他认识到宗教神学宇宙观是虚假的，是毫无科学根据的，而科学才是真理，并决心为探求科学真理奋斗终生。由于布鲁诺的“离经叛道”，他迫不得已离开他的祖国，过着长期流亡的生活。在流亡的过程中，他大力宣传科学真理，还写了许多文章，热烈宣传和赞扬哥白尼的学说，猛烈地抨击了官方经院哲学的教条。

布鲁诺不仅捍卫了哥白尼的学说，还充实、发展了这一学说。他认为：宇宙是统一的、物质的、无限的和永恒的；在太阳系以外，还有不计其数的世界，我们所熟知的世界，是无限宇宙中十分渺小的一部分，而地球又是无限宇宙中一粒微小的尘埃；无数颗恒星，都像太阳一样巨大、炽热，并以很大的速度向各个方向疾驰着……

布鲁诺的宇宙永无止境的思想，使几千年来在人们头脑里难以突破的天球硬壳，一下被布鲁诺砸碎了。美丽的天空豁然开朗，伸向无边无际的地方。由于布鲁诺广泛宣传和捍卫了哥白尼的学说，以及他对哥白尼学说的发展，震惊了整个欧洲，气极败坏的罗马教廷用阴谋将他骗回意大利并逮捕了他。他们用尽了所有威胁、利诱和恐怖的手段，但丝毫没有动摇布鲁诺对真理的信仰和捍卫。到 1600 年 2 月 17 日，布鲁诺在罗马的百花广场上被烧死了。

真理是不能用火烧掉的。布鲁诺虽然被罗马教廷烧死了，但唯物主义的宇宙观已渐渐深入人心。

继布鲁诺之后，意大利的天文学家和近代实验科学的创始人伽利略由于受到当时的一种玩具“光管”的启发，制造了望远镜并用它来观察天空，从此获得了一系列新的科学发现，在天文学方面做出了巨大贡献，也进一步证实和发展了哥白尼学说。

伽利略发现在望远镜的视野里，行星不再是一个光点，而是像月亮一般的圆面。他惊奇地发现金星甚至露出月亮一样的圆缺变化，他还清楚地看到有四颗卫星围绕木星运行。他看到了月亮表面的凹凸不平，发现了大量环形山。土星的光环他也观测到了，但当时没有确认。在欧洲，他是首个借助望远镜看到太阳黑子，并发现太阳的黑子在日面上移动，从而得出太阳有自转的结论。他发现随着望远镜口径的增加，可见到的恒星数目也大大增加。可是，即使在望远镜里，恒星仍旧只是一个光点。因此他断定它们肯定无比遥远。他还发现银河实际上是由无数颗恒星组成的。

全部这些发现都是前所未闻，轰动了欧洲的学术界，这些发现都有十分利于哥白尼的日心学说。他的观测结果，强有力

地论证了哥白尼的学说，使罗马教廷非常震惊。最后教廷把他拘禁起来。他在完成了最后一本论述力学与运动的书并偷运出意大利之后，孤单地死去。

与伽利略同时代的丹麦天文学家第谷创造了许多大型精密的天文仪器，并坚持进行 20 多年的仔细观测。根据他对 1572 年在仙后座发现的超新星距离的测定以及对 1577 年一颗明亮彗星运动情况的测算，他也开始怀疑托勒密体系，但是他并没有接受哥白尼的体系，他认为其他行星都是围绕太阳运动的，可是地球仍旧是宇宙的中心，月亮和太阳及其率领的行星队伍则是围绕地球运转的，第谷的功绩主要在于他创制了很多的仪器并且详细地记录了他多年精密观测行星运动的资料。除此以外，他还非常幸运地在临终前一年接受了一位很不错的助手和接班人，德国的天文学家开普勒。

开普勒用了相当长的时间，对第谷遗留下来的观测资料进行综合分析和研究。后来，开普勒发现“行星是沿椭圆轨道绕太阳运行的，太阳在这个椭圆的两个焦点之一的位置上”的定律。这就是开普勒的行星运动第一定律，也叫做轨道定律。这个发现，把哥白尼学说向前推进了一大步。

接着，开普勒又发现，尽管火星不是匀速运行，但是无论从任何一点开始，在单位时间向径（行星和太阳的连线）所扫过的面积却永远不变。这样开普勒又推出了“火星的向径，在相等时间内扫过相等的面积”的行星运动第二定律，又称为面积定律。

到 1609 年，开普勒出版了《新天文学》一书，在这本书里他发表了轨道定律和面积定律。并且在书中指出：“这两条定律也同样适用于其他行星和月亮的运动”。

后来，开普勒经过长时间繁杂重复的计算和不计其数的失

败，又发现了“所有行星公转周期的平方与椭圆轨道半长轴的立方的比值都相等”的行星运动第三定律。这是一个非常重要的自然定律。因为不但行星遵循着它，而且围绕行星运动的卫星，以及太阳周围的其他天体也同样遵循它。这就能够确定，太阳和它周围的所有天体，构成了一个有秩序的行星系统，这个系统就是太阳系。

行星运动三定律的发现，具有划时代的意义，它不仅为经典天文学奠定了基础，而且还导致了数十年后牛顿的万有引力定律的发现。

就是在伽利略不幸逝世的 1642 年，在英国诞生了伟大的科学家牛顿，牛顿对自然科学的贡献是多方面的，不光是在天文学方面，更主要的还是在力学、数学和物理学，而这些又直接影响到天文学的发展。狭义地说，他在天文学方面的直接贡献之一是发现万有引力定律，并由此建立起天体力学。另一项贡献则是发明反射式望远镜和棱镜分光的天文光学。

在开普勒的三大定律发表之后半个多世纪，牛顿总结了前人尤其是伽利略所发展起来的力学理论，提出了三大运动定律，具备了归纳提高开普勒三大定律的条件。牛顿与此同时总结和发展的前人的数学成就，创立了微积分方法。在这两方面的理论基础上，牛顿首先用数学方法根据力学原理从开普勒三大定律推导出太阳对行星的引力定律，其要点就是太阳对行星的引力与行星的质量成正比，而与行星对太阳距离的平方成反比。他并且证明只要有这种距离平方反比的引力，开普勒三大定律就是必然的推论，而且是在行星质量远比太阳质量为小的条件下大概相似。著名的苹果落地故事里说：他由此悟出重力是地球对它表面物体的引力，并且把地球半径、地月间距离、地面物体重量和下落加速度以及月亮绕地球的运行周期相结

合，得出任意两个物体之间都存有相互引力，这种引力和两物体质量成正比，与两者距离的平方成反比，而且比例常数无论天上地下都完全相同。这就是著名的万有引力定律。这条定律的重要意义不仅因为它至今还广泛应用于众多方面，更值得强调的是它首次证明宇宙间的自然规律能够认识，地面和天空是统一的。后者实际上是人类认识宇宙、研究天文学的基本出发点。由于万有引力定律的广泛应用和重要性，下面把它的数学形式写出来：

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

其中  $F$  为两物体之间相互的引力， $M_1$  和  $M_2$  分别为它们的质量， $R$  为两者质心的距离， $G$  为比例常数，称为万有引力常数，数值为  $6.67 \times 10^{-11}$  米<sup>3</sup>/（秒<sup>2</sup>·千克）

牛顿以他的三大运动定律和万有引力定律为基础建立起一个机械力学体系。他于 1687 年发表的不朽杰作《自然哲学的数学原理》一书，全方面叙述了他的发现和理论。300 年来经过众多的后继者的发展和补充，牛顿的体系已经非常完整，现在通称为牛顿力学。牛顿力学开始形成植根于天文学，又反过来为天文学开辟崭新的领域，建立起天体力学这个天文学的分支。天体力学的建立标志着历来单纯观测统计的天文学走上了引用物理方法进行研究的新道路。

牛顿在天文光学方面还有两种创造，一种是反射式望远镜，另一种是棱镜分光，对天文学的深刻影响是不可忽视的。反射式望远镜的口径比用透镜构成的折射望远镜更容易做得大些，能够收集到更多的星光，方便观测更暗弱的天体，使人类探测宇宙的深度大大增加。此外，星光不经过透镜的折射就不会产生不同颜色成分发散开的问题，出来的图像更加清晰。因

此，现代的大型望远镜无一例外都是反射式，差不多全部遥远的河外天体都是由反射式望远镜发现并观测研究的。至于棱镜分光术对于天文学的影响更是格外深远，甚至可以说它为建立天文学里最活跃、发展最快、成果最大的分支——天体物理学打下了重要基础。

牛顿用万有引力定律解说了一系列宇宙间的重大问题，从而奠定了天体力学这一门新科学的基础，从此天体力学便从它的幼年时期进入到成年时期。到此时，哥白尼的日心说经过布鲁诺、伽利略、开普勒和牛顿等人的宣传、捍卫和发展，已被公认为阐明太阳系实际结构的学说，很少再有人否认了。

又由于天王星、海王星的发现，证实了牛顿万有引力定律能非常准确的推算出行星的位置，也因新的发现而充实了哥白尼学说。

从哥白尼的《天体运行论》于 1543 年公开发表起，直到 1846 年加勒观测到海王星，经历了 300 余年的时间，经过无数次曲折和斗争，冲破了宗教和传统观念、习惯势力的重重阻力，克服了哥白尼学说本身存在的缺点，哥白尼的日心说终于由海王星的发现而取得了最终的胜利。

到 1930 年 1 月 21 日，美国天文学家汤博发现了冥王星。冥王星的发现，又一次扩大了太阳系的范围。

# 地 球

地球是一个略微扁平，半径大约为 6370 千米，质量为  $6 \times 10^{24}$  千克，平均密度为 5.5 克/厘米<sup>3</sup> 的椭圆球体。它的南北向的半径并不相等，因此称它为椭圆球体。但它和一个理想的圆球体差别非常小。

地球表面十分不规则，在陆地有崇山峻岭，在海底有深沟大壑，为了方便实际测量应用，常常把海水的平均表面作为地球表面，在陆地上则以海面的延伸部分为基础。

地球内部的基本结构分为地核、地幔和地壳。地核和地幔还各自能够分为两部分。在地球最核心的部位，半径为 1255 千米的区域是内地核，呈固态，它的外面是熔融状态的外地核。地核为铁镍物质所构成，认为地球的磁场和这种铁镍物质在外地核里流动有关联。而地幔全部是石质的，密度比地表岩石大，但因温度高刚度却不远如地表的岩石，只有与地壳相连并包括地壳在内厚度不超过 80 千米的表层比较坚硬，叫做岩石圈。在它下面距地面总计不超过 200 至 400 千米的上地幔，岩石所受的压力和温度相比并不高，使其处于接近熔融状态，被称为软流圈。在岩石圈有裂缝或缺陷处，软流圈里的物质失去了压力就会成为流动性较好的岩浆或熔岩，甚至也许流到地表面来。

地幔以上是地壳，构成地壳的原始岩石和地幔物质完全是硅酸盐矿物质。硅酸盐的主要成分是硅和氧两种元素，它们都

是恒星演化过程中核反应合成的重要产物。地壳的厚度很不均匀，海洋下面地壳厚度仅有 5 至 8 千米，大陆地壳的厚度是 16 到 60 千米不等。

地球表面以上是大气层，大气层没有显著的边界，只是愈向上愈稀薄。流星的光迹从 160 千米高处就会出现，太阳的高能粒子在稀薄空气中所产生的极光则能够在高达 1000 千米的地方辉耀，不过平常所说的大气层则指的是 50 多千米以内空气比较浓密的范围。在这范围以上的高层大气只占总质量的 2%。这部分较浓密的大气层还能够细分为对流层和平流层。平流层往上为中间层。自 80 千米以上称为热成层。在高层大气里从大约 100 千米到 350 千米的高度范围里有一系列电离层，含有比较多的电离气体。电离层可以反射无线电波，有助于越洋的短波无线电通信，并受太阳活动性的影响。

地球随处普遍存在的磁场称为地磁场，通常磁感应强度为  $5 \times 10^{-5}$  特。在中低纬度区地磁场的方向基本是南北向。地球磁场的真实起源当前还不太清楚，通常认为是地核里液态铁质流动所引起的，但还没有令人信服的证据。

## 月 球

洁白无瑕的月亮是天空中除太阳以外最惹人注目的天体，又是除流星以外距我们最近的天体，也是人类首次登临的地外天体。月亮诞生的过程大致和地球相差不太多，只不过因为它比较小，内部热量和重力都比地球小得多，才使月亮内部和表面的情况和地球截然不同。

月亮与地球的距离根据雷达探测资料，平均为  $38401 \pm 1000$  米。1969 年 7 月 20 日美国宇航员登上月球后在月面上放置了激光反射器，如今用激光测距精度可以达 7 米。月亮的半径为地球半径的 0.27 倍，即约为 1740 千米。月亮的质量为地球质量的  $1/81$ ，即约为  $7.35 \times 10^{25}$  千克。由月亮的半径和它的质量计算得的平均密度为 3.3 克/厘米<sup>3</sup>。在太阳系全部的行星卫星组合中，它是与所归属的行星大小最接近的卫星，因此很多人认为它原来也是一颗行星，后来被地球引力所俘获才形成共同围绕它们的质量中心转动并围绕太阳公转的姐妹行星。月亮总是用同一个面对着地球。这种情况称为同步自转。

月亮表面最明显的特点就是凹凸不平，布落各种山脉、裂谷和大小不一的月坑，另外也有几大块平原称为月海。月坑又称为环形山，小的仅有几十厘米或更小，大的直径有 200 千米以上。大月坑底部很平坦，中央有一些尖锥状的小山。大多数月坑是陨星撞击而形成的，裂谷和断崖则是月面坍塌的结果。月亮上没有水，所谓月海实际是由熔岩流布而成的平原，有的月海周围有一圈山脉，好像以前也是大月坑，但后来被熔岩淹

没掉。空间探测器飞越月亮时发现好几个月海下面有大块密度较高的物质，这些物质被认为是巨大高密度陨星撞进月面，撞击所产生的大量热能融化了四周的岩石，可能再加上由月亮内部深处冲破薄弱月面流出来的熔岩，淹没掉原来的洞穴，最终形成了月海。虽然月亮内部可能不像地球那样全部被熔化过，也没有形成铁质的月核，但从登月过程中做的月震波实验来看，月亮内部也分为核、幔和壳三部分。月核半径约为 700 千米，是软流状固态硅酸盐矿物质构成的，温度仅有 1000 开左右，远比地核低。月幔和月亮组成刚性的岩石层。月幔厚 1000 千米，月亮的厚度在正面大约为 65 千米，而在它的背面也许要厚上一倍。

1969 年宇航员登月后不但进行了月震波试验，还作了一系列的“月质”考察。月面的岩石主要是玄武岩，是由熔岩凝固而成的，因此至少月亮表面曾经处于熔融状态。月亮上最古老的岩石已经有 44 亿年以上的历史，但月面上普遍覆盖的粉尘的年龄却达 46 亿年，这些粉尘估计都是从月亮凝固出的首批岩石剥落下来的。在月亮上没有明显的磁场，这也许与月亮内部不存在可流动的铁质核有关。

由于内部热量不足，坚硬的岩石圈厚达上千米，所以月亮上不存在板块运动，也没有板块撞击的造山运动。然而使历史陈迹原封不动保留到现在的主要原因是没有大气和水流，不存在风化和水蚀作用。不过月面仍受到另外一些因素的剥蚀，一是昼夜温差使岩石表面剧烈热胀冷缩而破裂和剥落；二是大量陨星的撞击，每次陨星撞击都会有崩裂的碎屑，在高温下熔成玻璃珠状的细微颗粒；三是太阳风粒子和其他高能辐射以及宇宙线对岩石分子组的破坏。而最主要的是在行星际空间到处存在的细微尘埃颗粒的冲刷，这些颗粒未受大气阻拦以高速直冲月面，严重磨蚀月面岩石，结果使月面普遍散布着一层粉尘。

## 地球和月亮的运动

由于地球绕日公转，太阳看起来似乎是在天穹的繁星之间由西向东运行，它所走的路线夏天在赤道以北，冬天在赤道以南，这种表面的太阳轨道就是黄道。因为太阳和地球都永远在地球轨道面上，所以地球轨道面和黄道面是同一个平面，两种叫法可以互换使用。黄道在天穹上和天赤道有两个交点：一点是视太阳由南向北穿过赤道的春分点；另一点是秋分点。太阳在一年里陆续穿行于黄道十二个星座，它们仿佛是太阳的行宫，所以又称黄道十二宫。

地球轨道的偏心率虽然仅有 0.017，地球在轨道上运行的速度仍旧有明显变化，反映出来是太阳在黄道上走得速度不同。每年春分到秋分地球在远日点一侧，运行比较慢，共约需 185 天；而由秋分到第二年春分则在近日点一侧，运行比较快，只需要大约 180 天。这正是开普勒第二定律的反映。

月亮绕地球运行的公转是产生月相变化和形成日月食的原因。月亮与地球的平均距离是 38.4 万千米，绕地一周需要用 27.3 天。这个周期并不是两次满月的间隔，而是以天空的恒星作为背景所观测到的周期，所以叫恒星月。在这期间地球在自己的公转轨道上向前运行了一段，月亮、地球和太阳的相对位置有了变化。例如原来月亮在太阳和地球当中，经过一个恒星月之后，以遥远的恒星为准，月地的相对位置已经和上次相同，但是月亮却还未来得及第二次走到太阳和地球中间，大约

还差  $27^\circ$ ，需要再过一段时间才能到达。月亮先后两次到达太阳和地球当中所间隔的时间叫做朔望月，长度是 29.5 天。

月相变化是由于太阳、地球和月亮相互位置的变化，使我们看到被太阳照亮的月亮部位的不同而形成的。当月亮在日地之间时，面对地球的是阴暗面，称为朔，即农历初一；月亮转到日地连线对面时是满月，称为望，即农历十五。中间还有娥眉月和上弦、下弦。两次朔日或两次望日之间所经历的时间就是朔望月。

在朔日假如月亮正好穿过地球的轨道面或在附近，它就会把影子投到地球上形成日食，月影经过的地带就是日食带。由于太阳整个圆面都发光，因此月亮投射出的影子分本影和半影两部分。在本影区内月亮把太阳全部遮挡住，而半影区只部分遮挡住太阳。月亮的本影投射到地球上就会产生日全食。在锥形本影经过的地带能够看到日全食，在锥形半影扫过的区域，太阳不会被月亮完全遮挡，只能够看到日偏食。在一次日全食中可以看到偏食的地带远比能够看到全食的地带为大。月亮在椭圆轨道运行，距地忽近忽远，所以有时月亮即使正好处在太阳和地球当中，本影的锥尖却不够长无法投射到地球上，这时月亮距地较远，它的盘面比太阳圆面小，就会形成日环食。本影的锥尖未达到地面，在锥尖的延长线所指位置附近能够看到日环食，半影区内其他地方只能看到偏食，如果在望的时候月亮刚好穿过地球轨道面，月亮就会走到地球的本影里面而接受不到阳光，这样就会形成月食。

很明显，并不是每个月的朔望日都会产生日月食，只有在朔望时月亮刚好十分靠近或穿过地球轨道面时才可以发生日月食。月亮绕地运行的轨道面即一般称为白道面的平面，既不和黄道面重合又不和地球的赤道面重合，所以月亮的运动看起来

显得杂乱无章。

发生日食的机会远比发生月食的机会多。每年都至少会发生两次日食，两次之间大约相隔半年。最多一年之内能够发生五次日食，它们分为三组，其中两组连续两个月都发生日食，另外相隔大约半年还有一次单独日食。日食的发生次数虽然多，但月影尤其是月亮本影锥尖在地球上扫过的面积每次都非常有限，所以对任何一个具体地点平均经过二三百年才能遇到一次日食。月食每年最多只有三次，有些年份甚至一次月食也不发生。但是每次发生月食在夜间的半个地球上都能见到，所以看到月食的机会反而较多。每年日月食总数不会超过七次。

月亮绕地运行还影响海水和潮汐。月亮对地球上各点的距离不同，对地球各部分的引力也不尽相同。面对月亮的部分距离最近引力最强，地心处次之，背着月亮的一面距离最远引力最小。如果地球全部是刚性固体不会变形，每个部分受到的引力差别从整体上起不了任何作用，合起来相当于加在地心处的总引力。但是地球并非是理想的刚体，更何况表面还有一望无垠的海洋，能流动的海水是能够随受力情况而变形的。其结果是受引力最强处向月亮移动的加速度最大，地心次之，背着月亮的一面引力最弱加速度也最小。这些力总合的作用是维持地球和月亮相互绕行，但是从地球本身来看，面向月亮的部分向月亮靠拢的趋势强，而背着月亮的部分却跟不上整体的行动。结果无论面对或背向月亮的部分匀有离开地心的趋势，或者说它们都受到向外拉的力，海水受这种力的作用在两个方向上都会凸起来形成海潮。这种引起海水潮汐的力就叫做潮汐力或引潮力。一个天体的质量越大或者和周围物体距离越近，它所施加给周围物体的潮汐力就越大。在中子星或黑洞附近潮汐力也许会大到任何物体都要被四分五裂的地步。潮汐力虽然是万有

引力的一种表现，但它是不同距离上引力的差值，因此不再与距离的平方成反比而是与距离的三次方成反比。太阳对地球的潮汐力就由于它的距离比月亮远得多，不像月亮对地球的潮汐力那么强。

所谓潮汐原是指在朝朝夕夕的昼夜周期里，日月潮汐力使海水涨落的变化。太阳和月亮的引潮力还是以朔望月为周期。在朔日或望日，太阳、地球和月亮在同一条线上，日月潮汐力方向相同，形成大潮。中秋钱塘江大潮就如万马奔腾颇为壮观。

地球反过来自然会向月亮施加更加强大的潮汐力。月亮早期表面由熔岩覆盖的时候，潮汐力会使熔岩发生涨落的流动。由于熔岩粘滞性很大，流动起来摩擦阻力很大，就使月亮转慢起来，最终达到自转周期和公转周期相等为止。这时月亮固定用一个略微向外突起的面对着地球，不再有熔岩的流动和涨落，这就是月亮以及已测得自转周期的卫星完全是同步自转的原因。再反过来看地球，地球上海水的潮汐也同样有摩擦力。虽然比熔岩流动给月亮的阻力小，却同样可能使地球自转减慢。现在已经测出，地球的自转周期每 100 年大约延长 1 毫秒的样子。有许多证据证明在远古时代地球每年自转 400 多次，而不是像现在这样 365 次多一点。

## 光辉的太阳

太阳是太阳系中惟一独自发光的天体，是一颗稳定的恒星。它光焰夺目，光芒四射，以巨大的光与热哺育着大地，给人间带来了温暖。对于人类来说，地球上万物的成长，气候的变化，江河湖海的出现，各类矿产的形成，直到人们的日常生活，都离不开太阳，因此在宇宙的众星球中，没有一个能比得上太阳更为重要。可以说，如果没有太阳就没有人类居住的地球，也就没有人类。从这个意义上说，太阳好比是“大地的母亲”。

在我国广阔的土地上，从很早的古代起，就居住着很多部族，各个部族都有自己奉祀的上帝、鬼神和有关太阳的神话传说。传说中，我国东方殷商人信奉的上帝是帝俊（又称帝喾），而西方的周人所奉祀的上帝是黄帝，并且这往往又与太阳的神话传说有关。

传说帝俊长着鸟的头，头上有两只角，猕猴的身子，仅有一只脚，手里经常拿着一根拐杖，弓着背，一拐一拐地走路。说帝俊有三个妻子，一个叫做娥皇，另外两个一个叫羲和，另一个叫常羲。羲和是太阳的女神，生了十个太阳。常羲是月亮的女神，生了十二个月亮。

传说，在东海外的汤谷，有一棵大树生长在海水中，这棵大树名叫“扶桑”，扶桑有几千丈高，一千多围粗，这十个太阳就居住在这扶桑树上，通常有一个太阳住在上面的树枝上，

另外九个全住在下面的树枝上。他们轮流出现在天空中，一个太阳回来了，另一个太阳才出去值班，因为虽然有十个太阳，但经常与人们会面的却只有一个。

据说到帝尧当政的时候，十个太阳不再认真地轮流出来值班，而一齐跑出来玩耍。一经养成习惯，就天天都结伴出来，这便给大地上的人们带来了沉重的灾难。十个太阳发出的光和热，把禾苗晒得枯干了，把土地烤焦了，铜铁沙石也快要晒熔化了，血液差不多快要沸腾，怪禽猛兽纷纷从火焰似的森林、沸汤般的江湖里跑出来残害人们，人们处在垂死挣扎的边缘，就连帝尧也没法活下去了。

在天庭的帝俊看到这般光景，觉得再也不能让孩子们胡闹下去了，于是就决定派擅长射箭的名叫后羿的天神到人间去严厉地教训他们一番。据说后羿的箭法十分高明，即使一只小雀从他面前飞过，定会把它射下来。在后羿离开天庭的那天，帝俊赐给了他一张红色的弓和一口袋白色的箭，这箭不仅华美而且坚固锋利。帝俊对后羿还叮嘱一番。后羿领了帝俊的使命后，就带着妻子天神嫦娥降到了人间。

后羿在茅草屋里见到了愁苦的帝尧，又亲眼看到了人们受难的情景，引起了他可怜人们、痛恨太阳的怒火，这时已顾不上帝俊的嘱咐了，便弯弓对准太阳射出一箭，嗖的一声上去，隔了一会儿，只见天空中一团火球无声地爆裂，流火乱飞，黑色的羽毛纷纷四散，坠落到地面上一团黑色的东西。人们跑去一看，原来是一只带着箭的硕大无比的三脚乌鸦，它就是太阳精魂的化身。天上果然少了一个太阳。后羿见大祸既然已闯下来了，干脆一不做二不休，用箭一支接一支地射向太阳，三脚乌鸦一只接一只地落下来。站在旁边看射箭的帝尧，想到一个太阳出来的时候，太阳对人们有很大的好处，因此不能全射下

来，便赶忙命人暗中从后羿装满十支箭的箭袋里抽出一支，因此最后天空中只剩下了一个太阳。

后羿虽然为人们除了害，但因为射下了九个太阳而闯下大祸，就再没回到天庭，嫦娥也因此受到了连累。后羿为了长久生活在人间，就引出了后羿向西王母讨药，以及嫦娥奔月的故事。

我国是最早观测与研究太阳的国家之一，早就注意对太阳黑子和日食现象进行观测，还留下了大量的资料。根据《汉书·五行志》记载，在西汉成帝河平元年（公元前 28 年）三月乙未，日出黄，有黑气大如钱，居日中央”，这是世界有名的公元前 28 年 5 月 10 日的太阳黑子记录（据考证，“乙未”应为“己未”），以后在我国的史籍上不断出现相似的记载，对科学家们研究黑子周期有很大的参考价值。

不过首先用仪器观测太阳的要算是伽利略了。在 1609 年，伽利略首次用望远镜观测太阳黑子。1826—1843 年，法国有位药剂师，名叫施瓦布，是个天文爱好者。他对太阳黑子持续观测 17 年后，发现黑子有 10 或 11 年的周期变化。1848 年，瑞士的 R·沃尔夫提出黑子相对数的概念，并且利用历史上望远镜观测积累下来的黑子资料，测算出上溯到 1700 年的黑子相对数的年平均值，从而进一步证明太阳黑子活动确实存在着明显的周期性变化，其周期平均长为 11.1 年，这就是大家所了解的太阳黑子 11 年周期。

到了 19 世纪最后 10 年，美国的海耳与法国的德朗达尔分别发明太阳单色光照相机和太阳谱线速度仪，从此开创了现代的太阳研究的新时期。他们通过单色光观察太阳光球与色球，发现了钙云（谱斑），20 世纪初，在威尔逊山天文台安装了太阳塔与分光设备，广泛地观察太阳，发现了黑子的磁性和 22

年的磁周期。1931年，李奥制成了日冕仪，为人们平时观查日冕提供了条件。到20世纪50年代初，太阳光磁象仪研制成功，从而进一步推动了对太阳活动规律和活动区物理的研究。

此外，在20世纪30年代，詹斯基等人发现了来自地球以外的无线电波。射电天文学的诞生，使人们可以用无线电方法接收并研究太阳的射电波，并且取得越来越多的成果。

随着空间科学技术的发展，空间天文学也发展起来。在卫星上天以前，已经开始利用飞机、气球、火箭进行探测。近年来，又发展到利用地球轨道太阳观测卫星、一些深空探测器和天空实验室上的阿波罗望远镜装置，从空间观测太阳，此外，许多地球物理探测卫星，也进行太阳观测。

美国在1960年6月—1976年3月，发射了太阳辐射监测卫星（英文缩写为SOLRAD）系列。这个系列共发射13颗，当中有三次发射失败，后发射的几颗成果较大。它们的任务是对太阳X射线进行持续监测。从1961年1月以来，利用这些卫星监测太阳X射线辐射，测定了这个黑子周期内的极小与极大的辐射流量，以及辐射流量随太阳活动的变化情况。

此外，美国从1962年3月—1975年6月，还发射了轨道太阳观测台（英文缩写为OSO）系列。它也是观测太阳的卫星系列。这个系列共发射8颗，主要任务是通过观测太阳的紫外线、X射线和 $\gamma$ 射线，从而连续而全面地研究太阳的结构、动力学过程、化学成分以及太阳活动的长期、快速的变化。

除了美国以外，苏联、欧洲空间局、日本等国也先后发射了太阳观测卫星，进行对太阳的观测与研究。

1973年，美国的“天空实验室”成功发射，使空间太阳观测发展到了空前的程度。天空实验室是美国实验性的大型载人轨道空间站。最上面的阿波罗望远镜是一组观测太阳的天文

仪器，在远紫外线或 X 射线等不同波段，对太阳色球与日冕进行了电视或照相观测，拍摄了太阳活动景象的大量照片。并且，通过天空实验室的高分辨率成像观测表明，日冕不是宁静的均匀结构特征。科学家们还注意到，当太阳赤道有大冕洞时，地球附近就会观测到高速太阳风。因此，人们认为冕洞可能是高速太阳风的源泉。

可见，人类在漫长的岁月里，通过不同手段对太阳的观测，使人们知道了太阳上有着壮丽的景色，变幻的风云，甚至强烈的爆发，太阳上是那样充满生机，丰富多彩。这里，我们对太阳的知识仅做简单的介绍。

太阳是太阳系的中心天体，它以巨大的引力控制着太阳系中的天体。地球自形成以来，已绕太阳运行过 46 亿年了。太阳是离我们最近的一颗恒星，它的直径为 139 万公里，比地球大 109 倍，体积是地球的 130 倍，质量是地球的 33 万倍。

太阳是一个炽热而发光的气体球，严格地说，它是一个高温的等离子体天体。太阳是由一系列类似于同心圆的气层构成的。

我们肉眼看到的光芒夺目的太阳表面，经常称为“光球”。厚度大概有 500 公里，表面温度达 6000℃。我们接受到的太阳能量基本上是从光球发出的。在光球上没有受到干扰的地方，布满了米粒组织，估计米粒组织的总量达 400 万颗。在光球活动区有太阳黑子、光斑，偶尔还有白光耀斑。

“米粒组织”是光球下面气体对流所引起的一种日面结构。它在高分辨率的光球照片上，呈现出米粒状的亮斑，它们的直径常常达 700—1400 公里。

在光球上出现的大小不等、形状不一的黑点，就是我们熟悉的太阳“黑子”。在太阳表面，黑子像一个不规则的洞，充

分发展的黑子是由中心较暗的本影与周围较亮的半影组成的，它比光球低约 500 公里。温度比光球低，仅有 4500℃。黑子常常成对成群出现，黑子群几乎全部呈椭圆形。有的年份黑子出现得多，有的年份出现得少，经过长期观测和对观测资料的分析，发现黑子数的变化平均有 11 年左右的周期，因此人们把 11 年周期称为“太阳活动周”或“黑子周”。在一个太阳活动周里，黑子数量升到最高的年份叫做“太阳活动峰年”（极大年）黑子数量降到最低的年份称之为“太阳宁静年”（极小年）。至于太阳黑子的成因，现在还不能确知，但是不过黑子与强大的磁场有关系，磁力现象必定与黑子的来源有密切关系，这是没有疑义的。

在太阳东西边缘部分的黑子四周，常常可以看到亮的条纹或小块，这就是“光斑”。光斑一般环绕着黑子，与黑子有着密切的关系。与黑子有关的光斑由明亮的纤维组成；与黑子无关的光斑出现在 70 度的高纬地区，面积小，略呈圆形。

光球上面的气层是“色球”。在日全食时，当月亮挡住了太阳的光球，就可以看到太阳边缘出现一圈明亮而狭窄的玫瑰色圆环，这就是色球。色球层的厚度各处不同，平均厚度大概有 2500 公里。

用色球望远镜观测太阳圆面时，可以看到太阳单色像上有一些比较明亮的区域，称作“谱斑”。谱斑是在色球层中出现的类似光斑的亮区。

最好看的要数从色球层喷出的“日珥”了。假如把太阳比做一团熊熊燃烧的火球，那么日珥就是从火球上冒出来的火焰。日珥的形状各种各样，有的像火焰，有的像半圆环，也有的像喷泉，有时一个巨大的“气柱”升腾而起，达到几万公里甚至一百多万公里的高度，然后再落回日面，有的便脱离太阳

而去。日珥要比日面的亮度小得多，因此它在日面上的投影是暗黑色的。在太阳单色光照片上，像是一条蜿蜒曲折的长蛇，称作“暗条”。

有时，一个亮斑点在黑子群的上空忽然出现，在几分钟甚至几秒钟内，它的面积和亮度增到极大，以后又慢慢减弱直到消失，这种变化快并且比谱斑更明亮的亮斑，称作“耀斑”，它也许是色球和日冕过渡层中的一种大气不稳定过程。耀斑的出现与黑子有密切关系，因为 95% 以上的耀斑都产生在黑子群范围内。一个耀斑发出的总能量等于 100 亿个百万吨级的氢弹爆炸所产生的威力。当耀斑出现时，除了发出十分强的无线电波外，还发射大量的紫外辐射、X 射线、 $\gamma$  射线，抛出高能带电粒子。当它们到达地球时，有时会使短波无线电通讯受到干扰，产生磁暴和极光，有时也会间接地影响到地球物理现象。

色球层向上是“日冕”，日冕为太阳最外层的大气，从色球层顶部一直向上延伸到几个太阳半径。日冕的光度比较暗弱，因此平时看不到，日全食时可以看到在圆轮周围有个银白色的圈，就是“日冕”。

日冕是由十分稀薄的、完全电离的等离子体所构成，其中主要是质子、高速电离的离子与高速的自由电子。温度十分高，可达 100 多万度。

日冕的结构精细，有冕流和极羽、冕洞、日冕凝聚区等。日冕的形状与太阳活动有关，在太阳活动极大年，日冕接近圆形，而在太阳宁静年则比较扁。

太阳发出的能量，99% 是由其内部产生的。关于太阳产能的秘密，直到 20 世纪 30 年代以后，才渐渐被人们所认识。在半径大概为太阳 1/4 的日核部分集中了 1/2 的太阳质量，温

度高达 1500 万度，压力为  $25 \times 10^{10}$  大气压。在那里进行着大规模的四个氢原子核（质子）聚变成一个氦原子核的热核反应。当四个氢原子核聚合成一个氦原子核的时候，我们会发现有质量的亏损，即一个氦原子核的质量比四个氢原子核的质量要少一些。这些亏损的物质则变成了光和热。产生的能量，主要以辐射形式稳定地向空间发射。

太阳是一颗平凡的恒星，它居于无数颗恒星之中，正因为这颗恒星离我们最近，所以人们就可以通过对太阳的细致研究，为对遥远的恒星世界的研究提供了条件。

## 大行星和它们的卫星

早在几千年前人们已经把太阳、月亮与水、金、火、木、土五颗行星从大量恒星中区分出来了，因为它们都穿越恒星组成的星空背景运行。太阳和月亮又以它特殊外貌与另外五颗行星相区别。今天我们已经知道，它们全部属于远离星空背景诸星的太阳系。太阳系里还包含地球本身和后来陆续发现的三颗大行星、众多卫星、无数小行星，还有彗星、陨星以及大量尘埃物质与稀薄的气态物质等等。

现在一般把水星、金星、地球与火星归为一类，称其为类地行星。它们的共同特点是其主要由石质和铁质构成，半径和质量较小不过密度较高。把木星、土星、天王星和海王星归为一类，称其为类木行星。它们的共同特点是其主要由氢、氦、冰、甲烷、氨等构成，石质和铁质仅占极小的比例。它们的质量和半径都远大于地球，但密度却较低。冥王星是特殊的一个，虽然成分与天王星、海王星相似，不过它比月亮还要小。另外还有一种分法是把木星和土星归为一类，称其为巨行星或类木行星；而把另外三颗归为一类，称其为远日行星。其理由是木星与土星的成分与其余三颗不相同，特别是大气的成分有显著差别。前者含有较丰富的氢和氦，而后者则包含较多的冰、甲烷和氨。

大行星的公转轨道大部分是近乎正圆的椭圆形，仅有水星和冥王星的偏心率比较大。

大多数卫星的公转轨道与大行星的轨道类似，也是类似正圆形的椭圆形，行星围绕太阳和大部分卫星围绕行星都和地球的绕行方向相同。行星运行轨道所组成的平面都很接近，差别最大的冥王星轨道面和地球轨道面之间的夹角也只有  $17^\circ$  多。大部分卫星的轨道面和行星轨道面之间的夹角也不大，最多  $30^\circ$  左右，只有天王星的几颗卫星例外，它们的轨道面差不多和天王星的轨道面垂直。以上是行星与卫星运行的主要情况，总体来说，它们的轨道运行有近圆性、同向性和共面性。

有四颗行星的自转轴与它们的公转轴有  $20$  多度的夹角。水星、金星和木星的两轴夹角只有几度。金星的夹角虽小，自转的方向却与公转方向相反。天王星和冥王星差不多是躺在轨道面上自转的，它们的自转轴接近与公转轴垂直。在卫星中仅有少数几颗的自转周期已知，全部与它们围绕行星运行的公转周期相同，被称为同步自转。

轨道在地球以外的行星可以运行到与太阳完全相反的方向，地球正处于太阳与行星之间时称为冲，此时地球与该行星相距最近。太阳正处于地球与行星之间时叫做合，此时地球与行星距离最远。行星的方向与太阳方向成  $90^\circ$  时叫做方照，按两者的关系分别为东方照和西方照。外行星在星空背景的视运动路径也有顺行、留以及逆行的变化。

在人类进入空间时代之前已经知道地球有  $1$  颗卫星，火星有  $2$  颗，木星有  $12$  颗，土星有  $10$  颗，天王星有  $5$  颗，海王星有  $2$  颗卫星。近  $30$  年来随着空间技术的进一步发展，特别是两个旅行者号空间探测器于  $1979$  年  $3$  月和  $7$  月飞临木星，接着又于  $1980$  年  $11$  月和  $1981$  年  $8$  月飞临土星，旅行者  $2$  号于  $1980$  年  $1$  月底飞越天王星，又于  $1989$  年  $8$  月飞越海王星，发现了很多过去不知道的卫星。

大行星的卫星大小差异很大，运动特性也很不相同。一般依据它们的轨道运动是不是具有共面性、同向性和近圆性把它们分为规则卫星和不规则卫星。有许多卫星是逆行的，但只要整组卫星都同向逆行，仍然算有同向性。

## 类地行星

类地行星距离太阳比较近，物理特性和化学成分也都很接近，全都是石铁为主的固态球体，球体表面上即使有液态海洋和气态大气层，但在总质量和总体积上所占的比例也十分微小。四颗类地行星中以地球为最大，金星次之，火星又次之，水星最小。月亮只比水星稍微小一点，且其他特点都十分相似，因此有人把它也算作类地行星之一，和地球组成姐妹行星对。类地行星内部都有核、幔和壳之分，壳所占的厚度很小，主要是核和幔。

水星是最靠近太阳的行星，半径 2400 千米，自转周期 58.65 天。它的质量仅为地球的 5.5%，即约为  $3.33 \times 10^{23}$  千克，密度与地球差不多，为 5.4 克/厘米<sup>3</sup>。因为它距太阳很近，在天空中和太阳之间的夹角永远不会超过 28°，所以它经常受阳光影响很难见到。哥白尼临死前惟一深感遗憾的事，就是没亲眼看到过水星。1974 年—1975 年水手 10 号空间探测器三次飞越水星，最靠近时曾达到距表面仅几百千米。现已知道水星表面十分像月亮，有大量陨星坑，也有类似月海的大平原，形成的年代大概也在 30 亿至 40 亿年以前。

水星表面和月面一样覆盖着一层尘埃，很难传热，加上无大气环流，因此水星昼夜温差很大，正午时赤道温度可达 700 开，夜间则为 100 开。水星表面几乎没有大气。通过紫外摄谱仪发现水星表面有极微量的氦，可以算做逃逸之后剩余的一点

大气成分。水星表面没有水。水星有磁场并且磁场结构和地球的磁层相似，迎太阳的一面有磁层顶，背向太阳的一面拖着长尾巴。但水星的磁场很弱，约有  $5 \times 10^{-7}$  特，仅为地球磁场的 1%。

1965 年发现水星的自转周期与公转周期准确之比等于 2:3。这种数学上的巧合当然并非偶然，是太阳潮汐力对它作用的结果。假如水星轨道接近于正圆，潮汐力作用的结果便会形成同步自转。然而水星轨道的偏心率达到 0.2，近日点和远日点与太阳距离之比为 0.8:1.2，所受潮汐力与距离之比的三次方成反比，达到 3.375 倍。近日点的潮汐力比远日点强很多，水星自转周期主要受近日点控制。依据开普勒定律，近日点附近水星的运动速度比平均值要高，所以水星的自转周期最终会比同步的公转周期短一些。然而除非两个周期成简单整数比关系，否则潮汐力对自转的制动作用不能达到一个稳定状态。对于水星来说，比值关系只能是 2:3。

金星是天空中除日月之外最亮的天体，也是离地球最近的行星。它与太阳的夹角永远不会超过  $48^\circ$ ，不是为朝日东升开道就是随夕阳西落。我国古代曾把它误认为两颗星，曾分别称为启明和长庚。用望远镜很容易看到金星有类似月亮的相位变化，同时还有大小的变化。金星与太阳相距 1.08 亿千米，公转周期为 224.7 天。它的半径大概是地球的 95%，即约为 6050 千米，质量约为地球的 82%，即约为  $4.87 \times 10^{24}$  千克，密度为 5.3 克/厘米<sup>3</sup>。这些数据都与地球相近，好像金星应该是地球最亲密的姐妹。从内部结构来看，金星的确和地球相当类似，不过它的大气组成和气象条件却和地球迥然不同。在空间拍摄的金星照片上，其表面云雾弥漫无法看到大气层以下。

金星内部至今依然有慢的对流引起造山运动和产生着新的

岩石，新生的岩石年龄不过几百万年。金星岩石的薄弱处或许还有火山活动。由雷达和金星探测器探知金星表面有大到几百千米的环形山和深达 7 千米的裂谷以及平缓的坡地。因为金星有浓密的大气，环形山不可能由陨星冲击而成，只能是火山喷发的结果。从金星的大气组成来看，火山活动在发展金星大气里起了主要作用。金星大气的总量超过地球大气 90 倍，其成分主要是火山喷出的二氧化碳，其次是氮和一氧化碳，水蒸气的比例很小，只约占 0.2%。另外还有 0.03% 的二氧化硫以及极微量的盐酸、氟氢酸。金星大气中氧的含量极低，不到 0.003%。而在地球的大气中，除占 78% 的氮之外，其余大部分全是氧，二氧化碳则仅占 0.03%。金星上空永远浓云密布，不像地球上空云量平均只有 56%，而且比金星的云薄得多。金星的云层几乎全部是硫酸小滴，落到金星表面的雨也是硫酸雨，以致金星表面湿度只有 0.1% 到 0.2%。金星的黄色云层分布在 35 至 65 千米的高度范围里。金星云层的顶部能把入射的太阳光反射回宇宙空间 75%，尽管这样，因为金星距太阳比地球近许多，入射阳光的强度将近高出一倍，所以金星表面得到的太阳辐射并不比地球表面少。金星云层之下还相当亮，在穿透云层的阳光照射下，物体还会投下模糊的影子。金星大气里有显著的天气变化，大气也有对流和环流，在云层里，上升气流常常有大规模的雷电。金星上空 10 千米左右高度上雷电十分频繁，闪电甚至使金星天空呈现接连不断的辉光。金星探测器就曾记录到一次长达 15 分钟的持续闪电。

金星表面的温度很高，达 730 开（约为 450℃）能使铅熔化，而且基本上不受纬度、日照和昼夜的影响。金星的自转很慢，周期为 243 天。由于自转方向与公转方向相反，金星上面一昼夜的长度是地球上的 117 天。浓密大气的环流把热量均匀

输送到表面各处，使整个金星表面的温度变化和温差都很小。金星表面的气压达到地球表面大气压的 90 倍。大气环流的水平风速并不高，记录到的风速只有每秒 2 米左右，对岩石的风蚀作用很小，遍布金星表面的岩石边缘都很锐利。不过在大气高层，纬向风的速度却达每秒 100 米，与自转方向相同，四天就能够绕金星上空一周。

既然金星和地球内部成分和结构都很近似，那么起源和历史也应该很相似，为什么它们的大气条件、表面温度等却相差那么大呢？现在多数研究者认为这种差异的原由是金星上发生了失控的温室效应。

二氧化碳能让可见光和紫外线顺利通过，但对红外辐射相当不透明，有些像温室的窗玻璃。金星表面在二氧化碳的覆盖下，所吸收的太阳可见光与紫外线能量使它升温，但不能以红外线的形式重新辐射到宇宙空间，能量在表面积累起来，温度就会逐渐升高，这就是温室效应。最终达到的平稳温度比地球上相对透明大气所确定的温度高出很多。金星表面的温室效应和二氧化碳及水的其他物理化学特性相结合，致使金星损失掉大量的水并保留下全部游离的二氧化碳，而地球则相反。

金星比地球接受的太阳辐射多，温度比地球一直高。据计算，在金星与地球的外壳冷却形成时，金星约为 55 而地球则约为 0℃。那时还没有大气层，其后由火山喷发出来的二氧化碳和水蒸气等才开始形成大气。地球表面的水蒸气大部分冷凝成液态水，而在金星表面大量以水蒸气的形式存在无法溶解二氧化碳。因此金星上就有了愈来愈强的温室作用，最终使大气发展的方向与地球背道而驰。到后期地球上有了生命，二氧化碳被绿色植物吸收进行光合作用，被海生动物吸引作为介壳石灰质的原材料。光合作用的副产品氧不但供养了动物，而且

在高层大气中吸收了大量紫外线，使水蒸气免遭破坏。最后，地球上原来只占很少量的氮变成大气的主要成分，氧也占了十分重要的地位，二氧化碳却成为很次要的成分。大气中失去了原先最主要的二氧化碳，只剩下 1% 左右，而保存下来的水却构成大片海洋。由此可见大气中二氧化碳的温室作用不容忽视。

金星基本上没有磁场，自然也就没有磁层和辐射带。估计这可能是因为自转太慢的缘故。因为没有磁层和辐射带的保护，太阳风和其他高能宇宙线粒子可以直接进入金星大气层，在大气层内部离金星表面很近处形成一个不太厚的电离层。

火星从来就是天文学家很感兴趣的行星，因为早年在望远镜里看到它表面有明显的地形标志，并据此测算了它的自转周期。它的两极都有白色的极冠，大片浅橙色和暗灰色覆盖的面积随季节变化。有人甚至说看到过很规矩的运河网也随季节变化。乐观的天文学家过去曾经猜测火星上可能有好客的植物供养着高等生物。

火星的半径是 3400 千米，质量为地球的 10.7%，即约为  $6.4 \times 10^{23}$  千克，密度为 3.9 克/厘米<sup>3</sup>，自转周期为 24 小时 37 分。它和太阳的平均距离约为 2.3 亿千米，公转周期 687 天。因为它的自转轴和公转轴之间有  $23^{\circ}59'$  的交角，因此它有非常类似地球的四季变化。尽管火星的昼夜长短与地球大致相等，不过季节变化却要慢一倍。火星内部的结构有核、幔和壳，不过含铁较少而且几乎全部是硫化铁。火星比地球小很多，内部压力低许多，所以平均密度比地球低很多。所以从总体来说火星并不像过去有些人设想的那样与地球相似。

火星表面一片荒凉，地貌有点类似地球上的沙漠。从在火星上拍摄的照片，可以看到由风力造成的典型沙丘，还可以看

到大裂谷和滑坡。即使现在没有发现火星板块活动的迹象，但过去火星壳也发生过很大的变动。火星上发现了十几个火山，当中最大的是奥林匹斯火山。火星上的火山曾经巨烈地活动过，强度可能超过地球上的火山。奥林匹斯火山的锥顶高度达到 26 千米，比地球上最高的山峰还要高出几倍。但火星的火山可能停止活动很久了。

火星的大气十分稀薄，表面气压仅有地面气压的 0.6%，在一些火山的顶峰上只剩下 0.1%。因为空气稀薄，对流交换的热量小，所以昼夜温差极大，可以由 240 开变到 190 开，平均温度为 210 开。赤道处的极端最高温度可以达到 300 开，大概相当于平常的室温。火星大气里由温差引起的气流速度非常快，达到每秒 30 到 60 米，常常刮起表面的尘土形成强烈的尘暴。火星大气也是靠火山活动喷发而成的，主要成分是二氧化碳以及少量氮、氩、氧、水蒸气和一氧化碳等。水蒸气与氧的含量随地区和季节不同有很大变化。火星两极即使在夏季也保留一片极冠，北极冠是水结成的冰，南极主要是干冰（固体二氧化碳）。火星上的水蒸气经太阳紫外线的光化学作用产生臭氧、单原子氧、过氧化氢、羟基等强氧化剂，对岩石表面氧化腐蚀并破坏有机分子。火星大气里云十分少，但是确有冰晶形成的云，在极区还有干冰形成的云，甚至有干冰构成的雪。

对火星的探测有一个重要目标是寻找地球以外也许存在的生命形式。从长期的观测和研究来看，在整个太阳系里，除地球之外火星存在生命的可能性最大，但是直到今天为止有关火星生命的问题还没有肯定的结论。

火星探测中发现了一个引起人们极大兴趣的问题，就是在火星的赤道地区不少处存在着明显的河流遗迹。这些河道目前尽管是干涸的，但过去一定是由流动的液态物质冲刷而成。除

少数粗短的可能是熔岩形成的以外，其余大部分是由流动性很好的液体冲出来的，所以很可能火星存在过湍急而汹涌的水流，但目前火星大气和表面完全不存在保留流水的条件。

火星有两颗十分小的卫星。说来有趣，18世纪20年代英国讽刺作家的讽刺幻想小说《格列弗游记》里，除描写格列弗到大人国和小人国的经历外，还记载了格列弗到过一个叫拉普他的地方，那里的人都有很多奇思怪想。据拉普他的天文学家说，他们发现火星有两颗卫星，它们与火星的距离分别是火星半径的3倍和5倍，而围绕火星的公转周期则分别是10小时和21.5小时。实际上火星的两颗小卫星一直到19世纪70年代才真正被观测到，已经是在小说发表后150年。最有趣的是它们和火星的距离分别等于火星半径的2.8和6.9倍，公转周期是7.65小时和30.3小时。这些数字与拉普他天文学家的“发现”实在相近得令人惊奇。

火星的两颗小卫星围绕火星转得非常快，在火星上看起来它们不像地球上看见月亮。快的一颗会从火星地平线的西方升起，约5.5小时就从东方地平线落下，然后再经5.5小时又从西方升起。火星上每夜可以看到它升落两次，它的“月相变化”十分快而明显，因为它的“一个月”还不到8小时。比较慢的一颗东升西落，每次升起来要在天空呆66小时才落下去，差不多接近火星的三个昼夜。

## 巨行星

巨行星处于九大行星中部，与类地行星之间隔着一片小行星的轨道。从多次空间探测器的临近探测和理论分析了解，巨行星是以氢、氦为主的庞然大物，由铁石质固态核、金属氢液态内幔和分子氢液态海洋组成。外面的大气层也以氢为主，除氢外还含有氦、甲烷、硫化氢以及多种有机分子与含磷化合物。

木星是太阳系里最大的行星，半径 7.1 万千米，质量是地球的 320 倍，密度为 1.3 克/厘米<sup>3</sup>。它与太阳相距 7.8 亿千米，公转周期近 12 年，自转周期约 10 小时，因为自转很快所以相当扁。木星各部分自转速度不一样，赤道部分比较快，两极转速稍慢。木星的可见外表是大气的上层，有许多明暗交替的带状条纹，色彩和形状都不断发生变化，里面还可以看到无数斑点。据认为带状条纹是木星快速自转形成的，而那些斑点则有许多是差速自转所引起的气旋和风暴。木星大气上层的纬向气流速度最高能达每秒 150 米，局部风暴中心还可以另加上每秒几十米的旋转风速。空间探测器发现，木星辐射的能量约相当于它接受太阳能量的 2 倍；所以木星本身还有某种能源。这些能源除形成一般行星大气上空都有的纬向气流之外，也许在能量分布不均匀的地方还形成局部风暴中心。在木星南半球有一个突出的大红斑，它与一些较小的红斑和白斑都是局部的风暴或气旋。旅行者号空间探测器发回了大量大红斑细致结构的照

片，很明显可以看出它是一个很强大的旋涡，逆时针方向转动，很可能像地球上的台风。因为木星大气稠密，下面又没有固态表面的摩擦阻尼，气旋能量损耗十分小，这种局部气流和气旋可以存留很长时间。大红斑最少已经存在 300 年以上，至今仍然有 2.1 万千米长、1.1 万千米宽，足可以容下两个地球。木星大气主要由氢和氦构成，比例和太阳大气相似。另外含有氨、甲烷、水蒸气、乙烷、乙炔、磷化氢、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢铵等。据信正是由于这些化合物受太阳紫外线辐射和频繁雷电的作用，在复杂的大气化学过程中对木星多变的色彩起主要作用。

从空间探测器先驱者 10 号和 11 号分别在 1973 年末和 1974 年末飞过木星的运行轨道分析中得知，木星大气以下的表面是液态而不是固态。再依据木星的总质量和密度，以及它的大气组成来推算，它的主要成分应该与太阳相似，内部也许是处于高温高压下的氢和氦，状态应该是液态，在最深的地方甚至是金属性的液态。

木星的磁场较强，为地球的 10 多倍，在其外部构成一个庞大的磁层机构，最远伸展到七八百万千米，俘获很多高能粒子，发出射电辐射。假如木星的磁层能够直接看到的话，从地面上看起来视角约和太阳相当。

已发现木星有 16 颗卫星，当中最亮的四颗，即木卫一至木卫四，有两颗与月亮大小相似，另两颗更大一些。它们称做伽利略卫星，一般认为是伽利略靠望远镜首先发现的。

两次旅行者探测器就近观测，发现这四颗卫星表面各不相同。木卫一至今仍有火山活动，表面覆盖着易蒸发的钠盐。木卫三和木卫四都有许多环形山，只有木卫二既无火山也无环形山却有很多裂纹，纹里由内部流出的熔岩填充。木卫二、三、

四表面除覆盖砂砾土壤和冰霜之外也有钠盐。在木卫一四周及它的轨道上存在钠云和氢云，来源是木卫一表面的蒸发。现已判定木卫三是太阳系里最大的卫星，半径为 2638 千米，比水星还大，不过质量仅有  $1.49 \times 10^{23}$  千克，不到水星的一半，密度只有 1.93 克/厘米<sup>3</sup>。

旅行者探测器发现木星有一个光环。木星环为太阳系内发现的第三个行星环。木星环大概有 6500 千米宽，30 千米厚，在云端以上约 6 万千米。与木星半径相比环较窄距表面也较远。木星环是由黑色块状物构成的，每块尺度由几十米至几百米。这些物体围绕木星公转的周期约为 7 小时。后来发现在木星环的下面还有一个内环，亮度比较低，高度差不多接近木星大气层上部。

土星与太阳的距离比木星几乎远一倍，有 14.3 亿千米，公转周期为 29.5 年，自转比 11 小时稍长。因自转快，所以它也相当扁。它的差速自转比木星还要明显。土星半径比木星稍小，为 6 万千米，不过质量只有地球的 95 倍，密度只有 0.68 克/厘米<sup>3</sup>，比水还要低。这说明它内部主要不是密度较大的金属氢，而是液态的普通分子氢。土星大气的主要成分仍然是氢和氦，另外还有甲烷和氨，高层有结晶态的氨云，云顶温度 160 开。土星外表也有黄色的带状条纹，但是界线不像木星那么分明，色彩也不像木星那么鲜艳，排列得却比木星规则得多，也没有木星那么多斑点。这说明大气里的气流不像木星那么紊乱，其主要原因可能是土星接受到的太阳能量比木星要少。从探测知道土星内部也有能源，辐射出来的能量是吸收能量的 2.5 倍，但要总量比木星小得多。

土星也有磁场并且在空间形成磁层，里面也俘获高能粒子构成辐射带。虽然土星的磁层很大，但因距太阳远，高能粒子

数量少，辐射的强度却比地球磁层差多了。土星磁层的形状有点像一头鲸鱼，有 100 多万千米长的尾巴。

自古以来土星就以它美丽的环系十分引人注目。土星的光环在它的赤道上空，最少由五道同心环组成，比较明显的部分总宽度有 6 万千米，厚度不超过几千米。组成光环的物质是小冰块和包着冰的尘埃和小石块，大小在 4 厘米至 30 厘米之间，旅行者探测器发现光环不均匀，而是像唱片纹路那样形成螺旋线。为什么会这样还有待研究。

土星是目前已知卫星最多的大行星。两次旅行者空间探测器飞过它近旁之后，把先前所知的卫星数翻了一倍还多，总数为 23 颗，已知详细数据的达 17 颗。有些新发现的卫星轨道很有趣，最少有三组是两三颗共用一条轨道。现已知土卫四和土卫十二在同一条轨道上，土卫十和土卫十一的轨道相同，而土卫三、土卫十六和土卫十七则共有一条轨道。已确知新发现的土卫十六和土卫十七分别在土卫三前后，由土星上看它们和土卫三的夹角都是  $60^\circ$ 。土卫六是土星最大的卫星，半径为 2560 千米，比水星稍微大一些，有较浓密的大气层。它的大气成分主要是氮（约占 82%），氫（12%）和甲烷（6%），另外还有氨和多种烃类。这些都是旅行者号空间探测器依据它的红外和紫外光谱分析的结果。空间探测器还探测出它表面的气压约为地球表面大气压的 1.5 倍，然而它表面的重力仅有地面的 15%，因此它的大气总量至少超过地球大气总量的 10 倍。土卫六和木卫三的密度相近，为  $1.92 \text{ 克/厘米}^3$ ，显然也不可能主要由铁石类物质组成。

## 远日行星

远日行星处于大行星家族的外侧，因为远离太阳受太阳引力较小，氢、氦等气体逃逸很多。据计算它们应该各有一个铁石质的核，外边是由水、氨和甲烷等物质冻结成的冰幔，再外边是液态分子氢海洋，它们的大气虽主要是氢，但是还有甲烷等成分。

天王星的半径为 26150 千米，质量为地球的 14.54 倍，密度为 1.19 克/厘米<sup>3</sup>。它与太阳的距离比土星又远一倍多，有 29 亿千米，公转周期是 84 年。它的自转周期很难测准，因为它的自转轴差不多与轨道面平行，是躺在轨道上转的。直到 1986 年 1 月 24 日旅行者 2 号飞临它的时候才准确测算出它上层大气的自转周期是  $17.24 \pm 0.01$  小时。

根据旅行者 2 号发回的资料，天王星大气中除 10% 到 15% 的氨之外，主要是氢，另外还有甲烷。据推测它应该还有水和氨。天王星接受的太阳辐射十分少，又没有内部能源，因此大气层里十分平静。现已探明天王星和海王星的化学成分中甲烷、氨和水等容易冷凝的所谓冰物质占总量的 60% 至 70%，它们都具有液态分子氢的海洋，都有浓密而深厚以氢为主的大气，体积、质量都很大，密度在 1 左右。

旅行者 2 号飞临天王星之前已经知道它有 5 颗卫星在其赤道上空。因为天王星躺在轨道面上自转，所以它的卫星都垂直于它的轨道面绕其公转。旅行者 2 号一举发现了它的另 10 颗

卫星，使它的卫星总量接近木星。天王星的环系也在它的赤道上空。

天王星有较强磁场并且在外部空间组成磁层。这意味着它内部或许有铁质核，不过旅行者 2 号发现它的磁场不同于其他行星的简单双极型，而是歪斜扭曲的。

为什么天王星会带着它的卫星和环系躺在绕日轨道上公转？有人认为它形成的初期受其他天体碰撞，不但转动方向发生了变化，而且撞下来的很多碎块也都在赤道面上空散布开，然后才渐渐形成了它的卫星和环系。

海王星的半径为 24700 千米，质量是地球的 17.2 倍，密度为 1.6 克/厘米<sup>3</sup>。它与太阳的距离约为 45 亿千米，公转周期 164.8 年，自转周期 17.8 小时。海王星也有浓密大气，主要由氢、氦构成，另外还有甲烷和氨。海王星表面的温度为 56 开，甲烷和氨大部分结成冰晶。从海王星所接受到的太阳能来计算，它的温度只应有 46 开，这与实际相差 10 开。据分析这并不是由于它有特殊的内部能源，而是自诞生以来约 45 亿年自然冷却的结果，它的温度尚未达到平衡，还在继续冷却过程中。

海王星有两颗卫星，其中较大的海卫一以 5 天为周期反向绕海王星转，轨道面与海王星赤道面成 20.角，是一颗最大的不规则卫星。它肯定比月亮大，半径在 1800 千米至 2600 千米之间。红外观测发现它也有大气层，已探测到有甲烷成分。旅行者 2 号还发现海王星有 6 颗卫星，但还未获得详细的数据。

海王星是否有环的问题曾几经周折。最终才肯定它有 5 道环。既然海王星也有环，那么木、土、天、海四星的形成和演化肯定有内在的共同点。研究环系的成因对了解太阳系的形成和演化定会有重要价值。

冥王星与太阳的平均距离为 95 亿千米，为已知最远的行星。它的公转周期大概为 248 年，自转周期到 1973 年才测出来，约为 6.4 天，自转轴与公转轴的交角大于  $60^\circ$ ，有点像天王星那样侧躺在轨道上自转。它的质量直到 1978 年发现了它的那颗卫星之后才测定出来，只有地球质量的  $1/400$ ，远小于月亮。它的半径至今仍未准确测出，过去根据距离与亮度在 1977 年推算为 1350 千米，但在 1980 年利用光斑干涉法测量得到半径为 1500 至 1700 千米。据此计算它的密度为 0.8 至 1.5 克/厘米<sup>3</sup>。无论采用哪个半径值它都比月亮小。冥王星光谱中有甲烷吸收线，说明它的化学成分和天王星、海王星类似，但是它的温度更低，除氢、氦还可以是气态之外，其它全部冷凝为液态或固态。它的质量过小，即使因温度低还可以保留一些大气，也肯定会相当稀薄。

冥王星轨道的偏心率在大行星中是最高的，它走到近日点附近时距太阳比海王星还近。事实上冥王星自 1979 年 1 月 21 日就进入海王星轨道的距离以内，要到 1999 年 3 月才超出去。冥王星轨道面倾斜比较大，与海王星不在一个平面内，所以它们不会相撞。

## 波得法则、小行星和彗星

18 世纪德国的波得较详细地研究了太阳系里大行星的排列，提出了一个彼得法则。事实上他利用了与他同时代的提丢斯的发现，因此这个法则也称为提丢斯 - 波得法则。此法则认为行星轨道大小若用天文单位来计算，就可以用下列经验公式表达：

$$\alpha_n = 0.4 + 0.3 \times 2^{n-2} \quad (\text{天文单位})$$

其中  $n$  为行星的序号，但水星应取  $n = -8$ 。按这个式子在  $n = 5$  的距离上少一颗行星，木星和土星的  $n$  应分别是 6 和 7，在  $n = 8$  的距离上发现了天王星，在大概相当于  $n = 9$  的距离上发现了海王星。20 世纪 30 年代发现的冥王星按说应该是  $n = 10$ ，但事实上仍接近于  $n = 9$ ，很可能和它形成的情况有关。冥王星之外是不是还有真正相当于  $n = 10$  的大行星。虽然一直引起人们的兴趣，但至今还未能定论。

提丢斯与波得都认为木星和火星的轨道差别太大，中间似乎还应该有一颗行星。一直到 1801 年元旦之夜才发现了名为谷神星的行星，并且由著名数学家高斯计算出它的轨道半长径为 2.77 天文单位，正好符合波得法则的预言。但是随后又陆续发现了另外三颗半长径与谷神星接近的行星，到 19 世纪末已经发现了 500 多颗。因为所有这些新发现的行星都很小，当中最大的谷神星半径只有 380 千米，因此它们统统被称为小行星，现在经编号的已有 2000 多，假如把照片上的暗弱小行星都算上，其总数要多达 50 万颗。

小行星的成分可以从它们表面的反射能力来判断。大部分小行星除硅酸盐岩石成分外还含有较多的碳和硫化物，被称为 C 类小行星。另有一些主要为岩石构成，称其为 S 类小行星。还有少数由铁、镍之类的金属为主构成，称为 M 类小行星。

波得法则不但对行星有效，在木星、土星、天王星等卫星较多的卫星系统中也可以找到相似的经验公式。一般规则卫星都满足经验公式，不满足的不是规则卫星。由此看来，波得法则应该有它内在的必然性，也许和太阳系的诞生和演化过程有关，但是至今未得到合理的理论解释。

彗星是太阳系里较特殊的天体，它们的轨道大多是抛物线，少数是极为窄长的椭圆或双曲线。具有椭圆轨道的彗星周期性地在太阳附近出现。彗星的轨道可以与黄道面成任意夹角。

彗星要到离太阳非常近才会被发现，出现肉眼能够看到的大而亮的彗星的机会非常少。这些大而亮的彗星都有长长的尾巴，被称为扫帚星，不论中外过去都被当做不祥之物，认为它预示着国家衰亡或其他天灾人祸。20 世纪初，对彗星的本质和运行规律有了很多了解之后，还有人担心哈雷彗星的尾巴扫过地球会形成灾难。事实上当它于 1910 年果真扫过地球时，什么特殊现象也没有发生，证明那都是杞人忧天。

我国古代很早就对彗星的本质有较正确的认识。《晋书·天文志》里说“彗本无光，傅日而为光，故夕见则东指，晨见则西指。在日南北，皆随日光而指，顿挫其芒，或长或短”。彗星距太阳较远时是由尘埃、石块、冰块以及凝成固态的氨、甲烷等化合物组合而成的固体，称作彗核，半径大概为百米到几十千米。当它运行到太阳附近时，受到太阳光和热的照射，冷凝物质和固体里吸附的气体挥发出来在核外形成发光的气团，

叫做彗发，连同彗核合称为彗头，这时它的大小大概可达 10 万千米。当它更进一步接近太阳时，彗发物质受太阳辐射以及太阳风的推力，迫使其一部分向背离太阳的方向流动，成为彗尾。在太阳附近彗尾的长度可以有一两百万千米，大彗星的彗尾甚至长达上亿千米。彗尾里的物质比实验室的真空还要稀薄很多，根本不可能对地球有什么影响。当然，假如一颗大彗星与地球当面对撞倒是会造成一些灾害。

彗尾其实并不一定尾随彗头，它只是永远背向太阳，彗星绕过太阳向远方离去时彗尾实际指前方。彗尾的形状随时都有变化。彗尾一般可以分为两部分：由等离子体气态物质组成的离子彗尾和由尘埃物质构成的尘埃彗尾。前者的质点较小受太阳辐射压和太阳风的作用较大，常常形成细长彗尾直接背向太阳；而后的颗粒较大受太阳风的推力较小，往往散布较宽并且呈弯曲形。

一颗大而明亮的彗星出现时是很壮观的景象，有时甚至可以和日月争辉。但是彗星发光的能量全都来自太阳。彗核靠反射太阳光，是连续光谱，而彗发彗尾则是受太阳辐射和太阳风激发之后的跃迁辐射，光谱里有原子的发射谱线也有分子的发射谱线。彗星物质结合得不紧密，穿越大行星轨道区运行中受到太阳和大行星引力的作用，常常会发生分裂，甚至瓦解成碎片。大彗星发生分裂的机会更多。

彗星的质量至今没有精确测定过，仅做过一些估计。过去曾对一颗大彗星进行详细观测，发现它经过木星的卫星附近对卫星几乎没有影响。后来它与地球的距离曾近到 240 万千米，经测定它对地球绕日周期的影响还不到 1 秒。据此推算它的质量不可能超过地球质量的  $1/5000$ 。现在估计大彗星质量在  $10^{17}$  到  $10^{22}$  克，小彗星的质量则仅有  $10^{10}$  克。

## 太阳系里的其他物质

晴朗夜空常常忽然出现一条光迹，这就是流星。极少数的情况下光迹一直延伸到地面，接着砰然坠地成为陨星。以上两者都是绕日运行的流星体进入地球大气层之后所形成的。流星体进入大气层的速度为每秒十几千米到几十千米，在大气里受阻将动能转化为热能从而使星体熔化并燃烧起来。大部分流星体原来的体积只有豆粒大小，在大气层中存在不过几分之一秒，从离地 100 千米以上开始发光到 70 千米左右的高度上就全化为气体和尘埃。这短暂而光辉的一刹那为它赢得了流星这个名称，当十分明亮像个火球的被称为火流星。流星数量很多，晴朗夜晚在任何地方每小时都能看到四五颗。不过要在十分稀罕的情况下才会有特别大的流星体进入大气层，而且没有被全部烧毁直至到达地面成为陨星。陨星落地时都会在地面上留一个陨星坑，但是因地球大气层的缓冲作用再加上风侵水蚀，地面上保留下来的陨星坑并不多。

密集的流星体被称做流星群，它们和地球相遇时会形成流星雨。我国《左传》上有世界上最早的流星雨记载：“鲁庄公七年四月辛卯（公元前 687 年 3 月 16 日）夜中星陨如雨”。特别大的流星体进入大气层之后，在受阻发热过程中常常会爆炸而分裂成很多碎块，也会形成类似流星雨的陨星雨。1976 年 3 月 8 日就有一颗特大陨星进入大气层，随后崩裂成无数碎块，形成有历史记载以来最大的一场流星雨，降落在我国的吉林省。

陨星的组成主要分铁质、石质和铁石质三类，都含有多种矿物和有机物。放射性同位素测算陨星的年龄为 40 多亿年，有的甚至达到 46 亿年，保存着太阳系起源的秘密。从 1969 年坠落在澳大利亚的一颗陨星中发现了氨基酸。氨基酸是地球上一切蛋白质的基础，而蛋白质又是地球上一切生命的物质基础之一。所以研究陨星的起源和构成具有十分重要的意义。从如今已经找到的陨星来看，铁质陨星以 1920 年在非洲西南部找到的一块重 60 吨的陨铁为最大。1976 年落在我国吉林省的特大石质陨星残块中，最大的一块有 1770 千克，是世界上现存最大的石质陨星。分析这块陨星时也发现了它所携带的氨基酸。

在太阳系的辽阔空间里，除了存在以上由物质凝聚在一起的天体之外，还存在着弥漫物质，称作行星际物质。它的成分包括等离子体和固态的尘埃。人造地球卫星和火箭探测的结果表明，地球周围物质的平均密度大概为  $10^{-23}$  至  $10^{-21}$  克/厘米<sup>3</sup>，大都与流星体一样绕太阳公转，方向与行星相同。这种特征表明它们是太阳系的组成部分并和太阳系的起源相同。行星际物质的空间分布并不均匀，在行星轨道面四周比较浓密，离太阳近处比较多，因此整体上大约形成以太阳为中心的铁饼形。

在太阳系的辽阔空间里还普遍存在磁场，称作行星际磁场。除在各行星附近有行星磁场的局部影响之外，行星际磁场的主要来源是太阳表面磁力线的伸延。太阳表面附近的磁力线有一部分会被太阳风带到遥远的行星际空间。太阳自转时，这些远伸的磁力线拖着等离子体会微微落后一些，形成螺旋形结构，行星在这种磁场中穿行时自身的磁场也要受到它的影响。

## 银河与银河系

在天高气爽的秋夕抬头仰望，会看见一条白茫茫的银带高悬在头顶的天空。这就是银河。以前人们曾经为这条奇异的银带编造了很多动人的神话故事。中国古代的牛郎织女被这条天河所隔，使诗人为之惋惜：“河汉清且浅，相去复几许？盈盈一水间，脉脉不得语。”事实上天空当然没有大河，银河只是密集群星给人的表面印象。

直至伽利略把他的望远镜指向天空之后，银河才开始露出一些真面目。原来它是由许多密集的星辰组成的，而在其他方向上星辰的数量比较少，因此看起来才像一条带子或银白色的大河。银河里的星辰有很多都距离太阳系成千上万光年，这在20世纪初已经显得是相当遥远了。当时很多天文学家都认为人类所能了解的宇宙范围大概就局限在银河的密集群星之中。为了对银河群星所形成的宇宙范围有个整体的概念，天文学家在18世纪中叶就对各个方向上的恒星计数，了解到银河所代表的宇宙范围是扁平的，像一块运动场上的铁饼，而太阳系也在这块饼里面。人们从饼内向外看，垂直于圆盘方向上穿过的距离短，碰到的星数少，而平行于圆盘方向穿过的距离长，看到的星多，因此才会看到一条星辰密集的银河。表面的银色带状群星密集区和由这些星所组成的扁平天体系统是两种不同的概念，如今分别用“银河”与“银河系”两个术语来表述，有时候也把后者称为“银河星系”。

略看起来一整圈银河亮度几乎相差不太多，因此起初天文学家认为太阳位于银河系的中心。这真是“不识庐山真面目，只缘身在此山中”。事实上由于星际空间有气体和尘埃吸收了许多星光，使距太阳稍远的地方被遮挡，才使那时的天文学家受了骗。直到 1918 年测定了很多球状星团的位置和距离之后，才知道银河系的中心并不是太阳，而是在远离太阳的人马座方向 距离太阳 2 万多光年。那时假设球状星团对银河系中心成球对称分布，没有原因全都偏在银河系的一侧，后来知道这个假设十分正确。

银河系之外还有些什么？这是一个长期为天文学家感兴趣而又争论不止的问题，直至 1924 年以后才真正有些眉目。实际上 18 世纪中叶德国哲学家康德就有过宇宙里存在着很多类似于银河系这样的天体系统的看法，他认为在仙女座里人眼都能模糊看到的那个“星云”并不是一般的星云，而是和银河系相似的天体系统，他甚至认为银河系和仙女座星云是孪生姐妹。约 100 年以后德国博物学家洪保德甚至还为这类天体系统命了一个“宇宙岛”的名称。但是康德的这些看法在很长时期并没有被大多数天文学家所接受。对于天空中陆续发现的所谓“旋涡星云”包括仙女座星云在内，多数天文学家依然认为是银河系内的一类普通天体。少数同意康德和洪保德主张的人又苦于无法从观测上找出准确无疑的证据。为解决两派争议，1920 年 4 月美国科学院甚至特意出面主持召开了一次会议，由两派代表人沙普利和柯蒂斯进行辩论，前者认为旋涡星云都是近处天体，在银河系之内；而后者则认为它们在银河系之外，是与银河系本身可以比较的天体系统，尽管双方争辩十分激烈，但谁的论据也不充足，谁也说服不了对方，最后还是以无结论告终，但总体来看仍以反对康德意见的沙普利一派继续

占优势。一直到 1924 年美国青年天文学家哈勃在仙女座“星云”里发现了造父变星之后，情况才发生了根本性转变。根据当时对造父变星的了解，哈勃断定仙女座星云在 80 万光年之外，大大超出银河系的范围。从此以后对那些远离银河系的恒星系统才开始使用“星系”这个术语，意思等同于洪保德的宇宙岛，有些人还乐意在星系之前加上“河外”这个形容词把它们和银河系以内由气体和尘埃组成的星云划分出来。后来发现当时认定的造父变星其实分属不同类型，按照更精细测出的周光关系推算出仙女座星系的实际距离是 225 万光年。现在已经在天空中发现了上亿个星系。这样一来不但太阳系不再是银河系这个小宇宙的中心，而且银河系也成为不足为奇的普通星系。宇宙展示出更大范围、更高层次，人类的眼界也大为开阔了，对物质世界不可穷尽性的认识也大大提高了。

现在对于银河系的真实形状已经有了较为正确的了解。它的主要发光部分有点像个摊鸡蛋，中间有个球形，旁边摊成薄片。银河系的扁平圆盘称为银盘，中间的球形隆起叫做核球。在主要发光部分之外，银河系还包括一个球形的区域，里面有球状星团、天琴 RR 型变星等天体，但分布得很疏松，被称为银晕。近年来还发现在银晕外还有一个更大的球形区域，里面的可见天体更少，但有明显迹象表明其中依然包含相当多物质，有人把这个区域称为大晕，有人把它叫做银冕。

银河系的恒星总数大概有 3000 亿颗。虽然在恒星之外银河系还包含着大量的气体和尘埃，但可以直接探测到的物质中 90% 以上是恒星。在 1980 年以前，人们普遍认为通过各种方式探测到的银河系物质总质量大概是太阳质量的  $2 \times 10^{11}$  倍。然而 80 年代以来，由银河系对它外围天体和周围小星系的引力作用判断，银河系的质量要比原来的设想高出一个数量级，

达到  $2.1 \times 10^{12}$  倍太阳质量，说明在主要发光物质之外有大量不可见的物质散布在广阔的区域里。银河系全部发光物质的总光度差不多是太阳光度的  $2.5 \times 10^{10}$  倍，这相当于每秒钟发出  $10^{37}$  焦的能量，从这些数字能够看出银河系里大多数恒星比太阳暗。

与银河系的总质量测定值相反，其发光部分的尺度最近的测定值反而比 80 年代以前预计的要小。以前公认银盘直径约为 10 万光年，太阳约离银河系中心 3 万光年。1986 年宣布的新测定值是：银盘直径约为 7 万光年，太阳到银河系中心只有 2.3 万光年。除此以外，银盘平均厚度约为 5000 光年，中心核球直径约 1 万光年。在核球中间还有一个银核，直径只有约 30 光年。在主要发光部分以外，银晕的直径约为 10 万光年，而新发现的银冕则一直伸展到距中心 30 万光年的范围。

旋臂基本上在银盘的对称平面上，这个把银盘横向一分为二的对称面叫做银道面，太阳系几乎都在这个面上，只向北偏离约 25 光年，因此在地球上看起来银河似乎正好把天空分为两半。在地球上以银道面为基准来研究银河系内各天体的分布较为方便。

## 星际物质和旋臂

在银盘里，恒星之间的广阔空间还普遍存在着极其稀薄的星际物质。这些物质的密度通常都比地球上实验室能取得的高度真空的物质密度还要稀薄 100 万倍，可是银河系里所有的恒星、行星和其他天体正好是由这种稀薄物质聚集起来而构成的。这些物质中假如以原子的个数来算，氢要占到 90% 以上，氦占近 10%，其余所有元素的原子总数合计还不足 1%，如果按质量来算，氢约占 3/4，氦约占 1/4，其余元素共占 2% 左右。氢存在的形态分为三种：电离氢、原子态氢和分子态氢。气态物质除氢、氦之外，还有少数氮和氩、氖等惰性气体，以及许多气态化合物分子。混合在这些气态物质中的还有固态颗粒的尘埃，颗粒的大小差不多在微米量级，总质量约占星际物质的 1%，成分是各种金属及它们的氧化物和硫化物，以及凝结成冰晶的水、氨、甲烷等等。尘埃颗粒的表面常常还会吸附一些气态物质。这些星际物质在银盘里分布得并不均匀，从大的范围来说，在螺旋形的旋臂里面比较浓密，从局部来说往往聚集成团，形成一片一片的星云。人们常常把星云以外更为稀薄的星际物质称为星际介质，密度在  $10^{-24}$  克/厘米<sup>3</sup> 之下，即每立方厘米之内少于 1 个氢原子。

银河系的星云主要分为亮星云和暗星云两类。亮星云只能在明亮恒星周围才会发现，它们全是受到恒星光线照射之后才发亮的。有一些亮星云的光谱和它们附近恒星的光谱基本一

致，表明它们完全靠反射及散射恒星的光来发亮。

其实，星云里的氢氦混合气本身并不会反射光线，因此反射星云里必然含有不少尘埃物质，由尘埃反射和散射恒星投射到它们上面的光线才使星云发光。散射光的强弱与入射光的波长以及尘埃颗粒的大小有关，波长愈短受到的散射愈强，因此反射星云颜色常常比恒星原来发的光偏蓝一些。

除了反射星云之外，还有一些亮星云的光谱和周围的恒星不同，它们的光谱是在暗弱的连续光谱上有明显的发射线，称为发射星云，这种星云通常都是由电离氢构成的，它们所伴随的恒星都是光度和温度颇高的 O 型或 B 型恒星。这些恒星辐射最强的部分处于紫外线区，高能的紫外线光子和氢原子碰撞时，往往把原子核外的电子激发到极高的能级上，形成高激发态或者成为电离态，受激发的电子向下跃迁时就会发出明线光谱。向下的跃迁常常分几步进行，辐射的能量每次都比激发能量小，所以辐射的波长比激发波长要长一些，落在了可见光波段，这是一种荧光现象。

暗星云周围既无明亮星光可资反射，也没有受到高能光子的激励，因此无法发光。它们只有在明亮的星云背景前面靠遮蔽背景的亮光才能被人发现。很明显，仅仅由混合气构成的星云消光能力很弱，很难达到那么强的遮挡作用，在暗星云中起遮挡作用的主要也还是尘埃。暗星云在银道上分布得很多，尤其在牵牛星附近的一段，银河明显的分为两叉，正中被大片暗星云遮挡。因为暗星云的存在，用光学手段几乎无法观测银河的中心区。

星云的体积都很大。不管那一类星云，小的也有几光年直径，大的到上百光年。星云里的物质密度差别很大，从每立方厘米里面只几个氢原子到多达几千个氢原子，相当于  $10^{-23}$  克/

厘米<sup>3</sup>到  $10^{-20}$  克/厘米<sup>3</sup>。虽然密度如此低，一块大星云的总质量却差不多有几千倍太阳质量，由它可以凝聚出成百上千颗恒星。

由于银盘内星际物质尤其是星云的严重消光作用，在银盘内离太阳稍远一点的地方就很难用光学方法加以研究，而且充满着银盘的星际物质和暗星云本身又因温度低而几乎不存在光学辐射，所以在 20 世纪 40 年代以前对银盘内物质组成和结构形式可以说是一无所知。银河系是否真的像仙女座星系（M31）那样是一个旋涡星系，在当时也是猜测的成分多于观测。只有到射电技术发展以后，尤其是 60 年代以后，才真正对银盘里物质的空间分布和化学成分有了一些比较准确的了解。

氢原子的特征谱线除在紫外区、可见光和红外区都有之外，在射电波段的 21.1061 厘米上还有一条谱线，简称 21 厘米谱线。这条谱线的产生，不像其他的谱线那样来自电子在不同轨道之间跃迁，而是因为电子自旋方向的变化。氢原子有一个电子，它和氢原子核都绕各自的轴旋转，称为自旋。电子和原子核的自旋方向相同和相反的两种情况，在能量上有稍微的差距。这两种状态之间发生跃迁所涉及的能量很小，辐射的波长在射电波段，而且在很低温度时也可以发生这种跃迁。21 厘米射电波有一个最显著的优点就是波长远远大于尘埃颗粒的尺度，使它不受尘埃的吸收和散射，成为探测银河系内外氢原子密集区的有力工具。

对银道面内各个方向进行 21 厘米射电波探测之后发现，差不多任何方向上都有 21 厘米射电辐射，并且在一个方向上往往发现几条很接近并顺次减弱的谱线。一条 21 厘米射电波谱线变成很接近的几条谱线，只有用多普勒效应来说明比较合

理，几条谱线就代表氢原子的几个集中区域各以不同速度在运动。通过 21 厘米中性氢谱线的测定，再结合别的方面的测定得知银河系内星际空间的物质和恒星大气相似，最丰富的物质仍然是氢，对别的星系测定的结果也莫不如此现在通常认为在人类探测所及的宇宙这一隅，所有区域物质丰度都差不太多，丰度最大的是氢和氦。

通过 21 厘米中性氢谱线的测定，还知道星际空间普遍存在着磁场。虽然这一点在别的观测里也同样发现过，但测定得十分不准确。银河系内普遍存在着平均磁感应强度约为  $10^{-10}$  至  $10^{-9}$  特的磁场，局部区域可能还要高一些。银盘内磁场的方向几乎平行于旋臂，在银晕里以及一些局部区域的磁场方向就很紊乱。

21 厘米射电波对探测普通的原子态中性氢密集区很有用，但它对氢非常密集的区域反而无能为力。这些区域里氢已结合成分子状态，氢分子由两个氢原子组成，其中一个的电子和原子核自旋相同，另一个自旋相反，不存在两种自旋状态之间的跃迁，也就不会发出 21 厘米谱线的辐射。但是在氢密集形成分子的区域或称分子云里，其他化合物分子的总数也十分可观，这些分子各具自己的特征谱线，其中不少也在射电波段，可以间接用来指示氢分子的密集区。最常选用的是一氧化碳在 2.6 毫米的谱线。2.6 毫米射电波观测的结果更进一步证实了银盘物质的旋臂结构。

化合物分子内部有许多运动状态，相应于多种能级，在运动状态发生跃变时也会吸收或发射一定波长的光子。分子的运动状态除电子运动外，还有各原子在平衡位置上振动和分子的转动。振动能级之间的跃迁对应谱线的波长在红外区，需要的激发能量还相当大，只有在离炽热星体不太远的区域才会遇

到，通常的星际空间条件下较少见。60年代以来利用空间技术在一些正在形成恒星的星云附近发现一些红外源，里面有分子谱线的红外辐射。分子跃迁能级差最小的是转动，尽管其中也有部分落在红外波段，但这类跃迁的谱线绝大多数在射电波段，主要是毫米波与厘米波。即使在星际空间的低温条件下也很容易发生这类跃迁，因此射电观测的谱线分析技术是从事星际分子观测十分有力的手段。

分子云里的化合物分子和普通星际空间的分子是60年代用射电技术发现的，是那时一项巨大发现，被称为60年代四大发现之一。到1986年为止已发现了近100种星际分子。

## 银盘和星族 I

在银盘里除以上的星际物质和星云之外，还有许多恒星和银河星团。20 世纪 40 年代发现，银河系里的恒星能根据它们的化学成分、相对于太阳的速度以及分布区域的不同划分为两个星族。银盘里的恒星都是属于星族 I 的，其中包括主序星、蓝超巨星、造父变星、金牛 T 型变星和银河星团等。这些类型的恒星除分布区域的共同性之外，在化学成分上都包含相当多的重元素，含量可达 1% 至 4%。此外，在太阳周围的这一族成员与太阳之间的相对运动速度比较低，大多是年龄比较小的恒星。星族 I 还可以再分为三个星族：极端星族 I，包括 O 型星、B 型星、蓝超巨星、造父变星、金牛 T 型变星和银河星团等年龄最小的星体；中介星族 I，包括 A 型星和有较强金属谱线的 M 型星等年龄略老一些的星体；盘星族，包括 G、K、M 型主序星、行星状星云、新星及部分位于银河系核球部位的星体。整个星族 I 的星体都分布在银盘里面，以大致为圆形的轨道绕银心旋转。极端星族 I 的恒星分布十分不均匀，大都形成集团，通常年龄不到  $10^8$  年，有的甚至仅有三五千万年或更短，重元素含量差不多要占到 4%。所有这些情况都表明极端星族 I 是问世得最晚，由受污染最严重的星际物质凝聚而成的。中介星族 I 的年龄在  $10^8$  至  $1.5 \times 10^9$  年，重元素含量的占 2%，垂直于银道面的无规运动速度较极端星族 I 高。这表明它们已问世比较久，大都已经分离开，但仍能看出一定的成

团情况。盘星族在银盘内分布得较为均匀，没有成团倾向，年龄为  $1.5 \times 10^9$  至  $5 \times 10^9$  年，重元素含量只有 1% 左右，表明它们是问世较久的星体。它们垂直于银道面的运动速度更高一些，已经分遍到银盘内各处。

从上述星族 I 再分的情况可以明确地看出，星际物质里的重元素是逐步加多的，恒星形成得愈晚，构成它的原材料污染得愈严重。最年轻的极端星族 I 的星都在旋臂里；旋臂同时又是星际物质的密集区，有很多星云。新问世的星大都成团并与星云有密切联系，经过一段时间后，各星无规运动的结果让它们互相分离，分散到比较大的范围里。所有这些情况都与恒星由星际物质凝聚而成的演化理论相吻合。

银盘里有旋臂存在这件事，用光学方法测定最年轻光度最高的 O 型星和 B 型星的分布也能发现。这样做要充分考虑到星际物质对星光的消光作用，否则，计算出来的距离就会比实际距离远。从星光红化的程度能够估计受到的散射，而吸收又和散射的大小成比例，所以吸收程度也是可以估算出来的。用光学方法在银盘里观测只限与地球相距 1.5 万光年的范围以内才十分有把握。现在已经用光学方法定出太阳周围的几段旋臂，最靠外的一条主要在英仙座，叫英仙臂，其次是猎户臂，再往里是人马臂。太阳在猎户臂的内边缘里面，不在旋臂上。光学方法测定出来的其实只是三条旋臂在太阳周围的片段，其基本位置与射电方法测出来的相符。猎户臂里恒星形成的活动特别明显，至今还在不断降生出新的 O 型或 B 型星，使猎户星座区域里散布着许多新诞生的亮星和伴随这些亮星的星云。

在银盘里除了单个恒星、双星、聚星之外还有很多银河星团，大都聚集在旋臂里面。各个星团都是由一团弥漫星云分裂成的，因此它的成员应当有相同的年龄，然而在分裂中形成的

碎块却大小不同，形成的恒星质量也不相同，演化的快慢就能出现差异。大质量的十分短的时间就离开主星序成为红巨星，或者已发生超新星爆发而成为高密度低光度的天体。

星团的赫罗图不但可以用来确定星团的年龄，而且还能用来确定该星团与地球的距离。小质量恒星演化得较慢使星团赫罗图主星序下端保留许多星，带状主星序的位置由下端的恒星分布描绘得很准确。由于星团内各星处在同一地区，与地球的距离几乎相等，它们的光度就和它们的视亮度成正比，用视亮度所作的赫罗图和用光度所作的赫罗图形状完全一样，仅差一个比例常数，表现为纵坐标的数值不同。所以若把按视亮度所作的赫罗图重迭在标准赫罗图上，再顺纵坐标上下移动两幅图的位置让主星序带状分布重合，就能够找出视亮度和光度之间的比例关系。这时根据视亮度、光度和距离的关系就可以求出星团与地的距离。当然利用星团里的造父变星也能够确定星团的距离，两种办法可以互相印证。

现在已经用上述方法确定了 200 多个银河星团的距离，按它们的方位和距离也可以获得太阳周围有三段旋臂。因此，人类虽然处在银河系之内，但从氢的 21 厘米谱线观测，分子云的观测，高光度 O、B 型星团的观测以及银河星的观测都证实了银河系有一个旋涡状的银盘。

## 银晕、银冕和星族 II

以银河系核心为中心在大致呈球形或椭球形，半径将近 5 万光年的空间里，还分布着一些恒星和球状星团以及少量极为稀薄的星际介质。这个空间称为银晕，它的外沿并没有显著的界限，只是渐渐过渡到物质密度更小的银冕里去。银河系内球状星团的总数将近 500，但已被确定的只有 132 个。银晕里的恒星之间和星团之间的距离相当大，比起银盘里的恒星和星团来，它们要疏松得多。它们围绕银河系中心运行的轨道大多数是很狭长的椭圆，轨道面的取向很分散。太阳和它周围的恒星都在银盘里围绕银心旋转，相互之间的相对运动十分慢，球状星团等则是与太阳相对运动较快的天体，叫做快速恒星和快速星团。银晕的星际介质比起银盘里旋臂之外的区域还要稀薄很多，只是根据银晕发出一种均匀分布的射电辐射才判定它里面还存在着少量的星际介质，但不像银盘里尤其是旋臂里那样充满星际物质。这就足以说明银晕里的气体 and 尘埃已经全都凝成恒星了。

银晕里恒星的分布是愈靠中心愈密，所以银河系的核球实际上相当于银晕中部的恒星密集区，里面的恒星绝大多数属于银晕的成分。银晕的恒星全都属于星族 II，它们的特点是年龄十分老，重元素含量较少，大约只占 0.1%。很明显它们是在银河系本身还很年轻的时候诞生出来的。星族 II 也能再细分为两个：极端星族 II，也称晕星族，包括天琴 RR 型变星和球状

星团等；中介星族 II，包括苍藁型变星等。极端星族 II 的成员年龄都大于  $6 \times 10^9$  年，有的甚至超过  $10^{10}$  年以上，所以大质量的恒星较少，许多都是和太阳质量差不多甚至比太阳还小的恒星。这些星的重元素含量只占 0.1% 以下，垂直于银道面的速度分量则较大，很多都达到 75 千米 / 秒。中介星族 II 的成员年龄约在  $5 \times 10^9$  至  $6 \times 10^9$  年之间，重元素含量可以达到 0.4%，垂直于银道面的速度分量通常都超过 30 千米 / 秒。正是因为星族 II 的成员发布在大致呈球形或椭球形的银晕里，并且诞生的时代已很久远，才使人们推测银河系早期的范围大致是相当于银晕区域的球体，后来才渐渐演变到现在这种样子。

从恒星演化理论能够推算出来，M3 由形成到现在已经有大概 140 亿年的历史。大有可能这不仅代表球状星团的年龄，也非常接近银河系本身的年龄。用视亮度赫罗图与标准赫罗图重迭的办法，也能和银河星团一样确定球状星团的距离。同时也可以利用球状星团里的天琴 RR 型变星确定距离加以比较验证，银河系中心所处的位置最早正是靠测定球状星团的空间分布才确定出来的。

以前认为离银河系核球较远的部分应该按开普勒定律运行，即距银河系中心愈远转得愈慢，并且按这种看法估算了银河系的总质量。可是在 1976 年以后发现远离银河系中心的部分绕心旋转的线速度几乎不随距离变化，一直保持到很远都这样。1979 年研究银河系外环的一些球状星团的绕行速度之后，肯定了 1976 年的结论，后来根据射电观测资料更加证明这个结论，并且得到了较为准确的数据，绘出距银心不同远近各点的旋转速度曲线。根据天体力学的理论，这种现象表明有相当一部分物质并不集中在核球周围而是分布在很辽阔的区域，由此才提出了在银晕之外还有一个更大的银冕区的说法。

由于银河系总质量比过去估计高很多，它的逃逸速度也比过去的估计提高很多倍，银河系的物质更难扩散到银河系以外的空间，银河系比过去设想的要稳定得多。假如以目前比较粗略的数据来估计，银盘（包括核球）、银晕和银冕大致比例如下：以银盘的体积和质量为 1，则银晕体积约为 10，质量约为  $1/10$ ，而银冕体积约为 2000，质量约为 10。由此可知银冕的密度比银晕还低。

## 核球与银核

银河系中心的位置最早主要靠分析球状星团和天琴 RR 型变星的分布找出来。在已知的 132 个球状星团中大约有 1/4 在人马座，别的分布在以人马座为中心的半边天空中。天琴 RR 型变星的分布有点儿类似，也以人马座为中心在半个天空中散布，只是区域略带扁平。伴随射电技术的发展，银河系中心的正确位置已经找到了。从全天射电连续谱辐射强度的探测中发现，除了很多分立的射电源之外，以来自带状银河的强度最大，其中又以人马座与天蝎座交界处周围为最强，这就是银核所在。银核还同时发出强烈的红外线和 X 射线辐射。

银河系中间部分的核球里面有少量 K 型和 M 型的星族 I 恒星，可主要的却是星族 II 恒星，可以认为核球的外层是银盘物质和银晕物质的混合区，以银晕物质为主。核球内部深处的信息主要由射电和红外辐射提供。从 2 微米的红外波段到 73 厘米的射电波段观测的结果知道，银核的直径大约是 30 光年左右，里面还有一个仅有几光年的内核，而其中发出强烈同步加速辐射的最核心处甚至不大于木星绕太阳的轨道范围。以前许多人认为银核和核球与外层部分一样是恒星密集之处，只不过银核处密集程度更高而已。现在看来银核的构成不是那么简单，还需要经过大量的努力才能弄清楚。恒星的能源主要来自聚变核反应，辐射形式主要是热辐射。强烈的同步加速辐射是非热辐射，显然不能简单地来自密集的恒星。此外，由 21

厘米射电谱线观测可知，在离银核 1.3 万光年处有一团质量为 1000 倍太阳质量的氢云，以 53 千米 / 秒的速度向太阳奔来。在银核的另一侧有大致相同的一团氢云以 135 千米 / 秒的速度离银核远去。在离银道面较远处也观测到一些氢云以 100 千米 / 秒左右的速度在运动。从这些氢云的运动状况来推测，在大约 1300 万年以前银核应该发生过一次类似爆炸的事件，抛射出大量物质。射电观测还发现离银核约 1000 光年处有一个绕银核快速旋转的氢气盘，以每秒上百千米的速度往外膨胀。气盘里还有一部分直径约为 100 光年的氢分子云。再向里到离银核 200 光年处还有扰动很激烈的电离氢区，也以高速往外膨胀。由红外观测还得知，银核在 3 光年直径范围内就有几百万个太阳质量的物质。一方面有各种强烈的辐射，另一方面又大量抛射物质，说明银核处于非常不稳定的状态，因此银核的情况特别复杂，很难说它是单纯由恒星和星际物质构成的。现在仅能推断在 3 光年直径范围内大约只有 100 万个太阳质量的物质是以恒星的形式存在，剩余部分究竟以什么形式存在还不明白。有人认为中心的致密核有可能是一个旋转的大黑洞，在它周围还有电离物质运动并产生极强的磁场。在黑洞吸积周围很多物质时巨额引力势能转化为热能，使物质高度电离并在磁场中加速到很高速度，最后产生强烈同步加速辐射，同时大量热能还会使部分物质发生剧烈对流、喷发等活动。事实上银核的活动性迄今并没有真正明确的理论解释，黑洞说只是一种猜测并据此作了些推测，但没有详细的活动经过和具体机制。今后还要经长期努力才能得到比较准确的了解。

## 星 系

如此已经知道人类探测能力所达的范围里有数以亿计的星系，它们全属于与银河系相同等级的物质结构。星系之间虽然相距特别遥远。平均达到约 1000 万光年，但与星系本身的尺度几万至几十万光年相比，也不过百倍上下。可是太阳系与恒星的距离和大行星区尺度相比将近 1 万倍，与恒星半径相比，要高达 1 亿倍。所以可以说星系之间的相对密度要比太阳系附近恒星之间的相对密度高许多。为什么到晚上仰望天空时只觉繁星密布，而不见众多星系互相拥挤呢？其原因主要是因为它们都非常遥远，除仙女座星系和大小麦哲伦云之外人眼都无法看见。

星系发现的历史要上溯到 18 世纪。当时限于物理学的发展水平，对恒星的观察研究很长时间没有多大进展，不少天文学家就对发现新彗星非常感兴趣。可是要在彗星远离太阳的时候把它们找出来却非常不容易。那时它们运行得较慢，又没有长长的彗尾，往往只是一些暗弱而模糊的光斑。许多人遍寻天空，找出一切模糊的光斑，然后长期观测来确定它们的轨道。这种努力获得了一项副产品，当时任何人都预想不到这项副产品的的重要性远远超过彗星本身。他们在天空中除了发现很多缓缓移动的彗星之外，还发现大量位置固定的模糊光斑。随后把这些资料汇总起来列为星表。最常用的有三种，一种叫《梅西耶星表》其中列举了 103 个天体；另一种叫《星云星团新总

表》上面列了 7840 个天体，包括《梅西耶星表》的全体成员在内。两表里所列的成员在序号前分别加 M 或 NGC 以资区别。以后还有一个补充的《星云星团新总表补编》，列出另外 5386 年天体，序号前冠以 IC。今天知道这三个表里所列的成员包括星团、真正的星云和以前被称为星云实际上是星系的三类完全不同的天体。前两类都在银河系以内，而后一类却是跟银河系属于同等物质层次的天体。

星系的分类法是以形态为基础的。星系在望远镜的视野里与恒星不同。即使距离最近的恒星看起来也只是一个光点，看不出任何构造，但星系却能显出一定形态。如果拍成照片，会因曝光时间不同而显出不同层次。另一方面，恒星的光谱相互间有很多差别，并且可以依此对它们分类。可是星系的不同部位就有不同的光谱，总和效果随形态的变化而变化。所以至今还是按形态来分类比较能反映星系之间的差别。形态相同的星系有类似的物理特性和演化规律。如今通行的分类法主要是美国天文学家哈勃 1926 年提出来的。后来观测资料增加，有人提出了一些新的分类法，其中有些是在哈勃分类基础上作些修订补充，另一些则着眼于光度和光谱结构或别的特点。不过哈勃分类法简洁明了，仍然较为常用。

哈勃把当时观测到的星系分为三大类。一类是椭圆星系，用字母 E 代表；一类是旋涡星系，用字母 S 代表；另一类是不规则星系，用 Ir 代表。后来发现旋涡星系还可以再分为两类：一类是标准旋涡星系，沿用字母 S 代表；另一类是棒旋星系，用 SB 代表。另外还有少数像旋涡星系那样扁平，但看不见旋涡结构的，叫做透镜形星系，用 SO 代表。

椭圆星系的外形看起来是椭圆形（包括正圆形）。即使看起来接近正圆形的椭圆星系，因为人们只能从一个方面观测，

也很难断定它们是真正的球形。有些或许实际上像糕饼一样扁平，只是由于视线正对着圆面，才被看成圆形。看起来细长的椭圆星系，按引力和旋转的动力学要求估计，它们的真实形状不会是雪茄形，也应该是扁平的圆饼形，只不过视线从侧面看而已。为了更精密地把椭圆星系加以区分，通常按它们的扁平程度定为 0 至 7 共八个等级。当然由于倾斜角度不同，一个星系的实际扁平程度一定等于或大于它的等级分类。椭圆星系扁平程度的差距原因在于旋转，旋转快的就会扁一些，不过总体来说，椭圆星系比起旋涡星系来，旋转则要慢得多。在暗弱的星系中有特别多的椭圆星系，被称为矮椭星系。现在的统计是椭圆星系占总数的 60%，其中非常明亮而巨大的巨椭星系是少数。

宇宙间最大的星系和最小的星系均是椭圆星系，它们的大小差别极为明显。最庞大的巨椭星系有几千亿甚至几万亿 ( $10^{11}$  至  $10^{12}$  量级) 颗恒星，发光部分总质量最高达到太阳质量的  $10^{13}$  倍。最小的矮椭星系仅有几百万颗恒星，特别像银河系里的球状星团。有些离银河系较近的矮椭星系看起来几乎透明，可以穿过它们群星之间看到更远的亮星系。椭圆星系构成的特点是它们只含少量气体，里面的恒星几乎全部是低质量的星族 II 恒星。直到 1981 年才发现约有 1/4 的椭圆星系里有少量的中性氢、电离氢和发出 X 射线的炽热气体，而且也观测到极少数正在形成中的恒星。椭圆星系中极少有年轻的恒星，而大质量恒星又早就完成了生命的历程，成为光度极低的小天体：白矮星、中子星或黑洞。椭圆星系里的恒星数量尽管很多，但大都是余下来的小质量的老恒星。所以相对整个星系的质量和恒星总数来说，椭圆星系的光度是相当低的。基于同样的理由，椭圆星系的总和光谱特性和比较暗弱的 K 型恒星相

似，反映出来整体的颜色比较发红。

标准旋涡星系的外形从正面看有非常美观的旋臂由中心核球伸出来，绕核球呈旋涡状。假如由侧面看则是中央有核球突起的盘状，而且在对称面附近常常还有被尘埃遮挡的带状暗黑区。对旋涡星系通常按中心核球的突起程度和旋臂缠绕的紧松分为三种类型，分别用  $S_a$ 、 $S_b$  和  $S_c$  代表。 $S_a$  星系的中心核球最大，旋臂收得最紧； $S_b$  星系次之； $S_c$  星系的核球最小，旋臂散得最开。

几种旋涡星系的内部发光物质的分布各不相同。在  $S_c$  星系的星系盘里物质最多，而在  $S_a$  星系里则以核球包含的物质最多， $S_b$  星系居中。除了盘与核球之外，还有一小部分物质以球状星团和零散恒星的形式处在晕里。旋涡星系的盘里，尤其是在旋臂里有比较多的气体和尘埃，还有星族 I 恒星。一些新诞生的恒星正在那里成长，有很多高光度的蓝巨星和蓝白色的巨星。在核球里则主要是一些年老的星族 II 恒星。所以旋涡星系的盘与核球具有不同的光谱和颜色。所有的旋涡星系的核球的颜色和光谱都和椭圆星系相近似，但三种类型旋涡星系的盘却具有不一样的颜色和光谱型。其中以  $S_c$  的色调最蓝，光谱型相当于 A 型或 F 型恒星， $S_b$ 、 $S_a$  则比较发白、发黄，光谱型相当于 F 型或 G 型。与椭圆星系相比，在质量一样的条件下，旋涡星系要亮得多。这是哈勃早期统计时，认为旋涡星系所占比重较大的原因之一。旋涡星系里发光物质的质量范围是太阳质量的百亿（ $10^{10}$ ）到几千亿（ $10^{11}$ ）倍，银河系和仙女座星系（M31）都是比较的  $S_b$  星系，两者各种性质都十分相似。仙女座星系质量和体积都比银河系略大一些。它是用肉眼能够看到的最远的天体。

从正面看，有些旋涡星系的旋臂并不从中心圆形核球伸出

来，而是由通过中心核球的一根棒形结构的两端伸出来，再形成旋涡状。这就是棒旋星系。通常也按核球大小和旋臂松紧，照标准旋涡星系那样分为三种类型，分别用 SBa, SBb, SBc 来表示。有的棒旋星系还有一个圆环结构，通过核球的棒形结构是圆环的直径，它们大多属于 SBa 星系。棒旋星系的一般性质都和标准旋涡星系相似，包括光谱和颜色在内。它最特殊的地方就是棒形结构。棒旋星系在旋转的时候，棒形结构就像由固体材料制成的那样，整体以同一角速度旋转。但是事实上棒形结构依然是恒星和星际物质的集合体，并不是一整块固体。

不规则星系从外形上看既看不到中心核球和旋臂，又没有对称平面，只是一团无定形的亮斑，它们通常都是含气体和尘埃最多，年轻而明亮的恒星也最多，年老恒星最少的星系。因此不规则星系的颜色最蓝，而光谱型则较多地接近 A 型恒星。不规则星系的一个显著例子，称为大麦哲伦云。它和小麦哲伦云都是离银河系最近的不规则星系，它们两个全在南天，我国要在南沙群岛才能看到。它们是麦哲伦作环球航行之后才被世人所知的，所以用了麦哲伦的名字。大麦哲伦云距银河系约 15 万光年，小麦哲伦云大约为 20 万光年。从最近的资料来看，它们很可能通过银冕和银河系联系在一起。在一般不规则星系之外还有少量外形也不规则，但明显看出好像在发生喷发或爆炸的星系。过去也有人把它们归于不规则星系，但现在多数人的意见是把它们叫做特殊星系为好，因为它们反映出一些活动性的特点，许多方面和一般所称的不规则星系不同。在哈勃分类时，不规则星系只占 3%，而事实上，现在统计要占 10% 左右。它们的质量都不太大，比较大的约相当于最小的旋涡星系，也就是不超过  $10^{10}$  倍太阳质量。曾经有人认为不规则星系是诞生较迟的星系，但是在不规则星系里，年龄很老的恒

星虽然非常少，但却并不是没有。因此只能认为在不规则星系里恒星的诞生率比较低，大量恒星的诞生被推迟了，所以今天还有许多气体能够制造新的恒星，而不是整个星系比较年轻。

以上列举的几种类型星系的形态和分类，完全是依据可见光辐射的观测结果，在射电、红外和 X 射线探测技术发展之后，对河外天体的观测发现了许多情况。有些河外天体，包括一些星系在内，它们的主要辐射能量并不在可见光波段，有些还表现出一系列十分特殊的其他性质。在光学观测里，它们至少属于星系这个等级的物质结构，也应当称为星系。因此后来就把主要辐射能量集中在可见光波段的星系称为正常星系，而把其他的称为特殊星系。正常星系的辐射基本上能够看成恒星和星际物质辐射的总和，它的基本特点是热辐射。但是特殊星系的辐射明显的不符合热辐射定律，肯定有十分大的非热成分，而恒星的能源机制又不可能产生这么强的非热辐射。因此把它们单纯当做普通恒星和星际物质的集合体就不符合事实了。

星系绝大多数不是单独存在的，常常构成大大小小的集团。有的成双成对，有的三五成堆，还有十几个、几十个成群，更有成百上千，甚至几万个组成的大团。每个集团内部凭借引力联系在一起。在同一个集团里的星系并不都属于同一种类型，常常各类星系相互混杂，但集团成员愈多椭圆星系的比例就愈大。零散的星系中旋涡星系和不规则星系占大多数。

银河系就至少带领着三个小星系。它们是大小麦哲伦云和一个叫做比邻星系的矮椭星系，后者距银河系只有 5.5 万光年。另外还有几个矮椭星系也靠得相当近，很可能也在与银河系的相互引力约束之内。仙女座星系近旁也有四个矮椭星系。银河系、仙女座星系（M31）和一个较小的旋涡星系（M33）

加上附近的小星系又构成一个比较大的群，称为本星系群。目前认为成员总数约有 40 个。本星系群内部结构十分松散，没有向中心密集的现象。本星系群的尺度，由于几十年来不断发现新成员，所以范围在不断扩大，目前认为它的直径为大约有 300 万光年。

许多星系团远远大于本星系群。离本星系群最近的星系团是室女座星系团。银河系到室女座星系团中心的距离大约为 7000 万光年。室女座星系团包含着 2500 个星系，它的中心有一个巨椭圆星系 M87，是一个相当特殊的星系。有证据说明，事实上本星系群只不过是室女座星系团为中心的更大集团的一个成员，这个大集团称为本超星系团。本星系群的位置靠近超团的边缘。本超星系团总的外形是一个扁平的旋转球形天体系统，直径约为 2.5 亿光年，很可能还在膨胀。目前银河系绕本超星系团中心的公转周期约为 1 千亿年。本超星系团是很多星系群和星系团的集合体，成员总数约有 50 个群和团，总质量也许达到太阳质量的 1000 万亿（ $10^{15}$ ）倍，离银河系 2.2 亿光年还有一个叫做后发座星系团，约有 9000 个成员星系，它们都不同于恒星那样仅仅为单纯的圆点。在武仙座方向还有一个巨大的星系团，包含着上万个星系。总之星系的成团现象是非常普遍的。

一般成员较多的所谓富集星系团里，越靠中心星系密度越大，中心大多是巨椭圆星系，近旁是椭圆星系和透镜形星系，只是在边缘区域才有旋涡星系和不规则星系。在富集星系团中心区，星系的密度远远大于人类探测范围内星系的平均密度。在那里星系之间的距离和它们本身的尺度几乎是同一个数量级，以至星系之间的互相靠拢，不断发生碰撞。富集星系团中心的巨椭圆星系常常会吞食游荡到它周围的矮星系。很可能正因为这

样它才成长为巨椭星系的。有些发生碰撞的星系相互之间的作用十分强烈，潮汐力使两个星系内部结构均发生变化。相互发生强作用或碰撞的星系在距离还相当远时往往就出现“桥形”物质流互相连接，在潮汐力更强的时候，背向另一星系的方向上也会长出延伸物和彼此连接的桥对应。有些巨大星系的边缘区域存在着一个或几个突起的亮斑或亮团，看起来十分可能是被它吞食掉的矮椭星系残骸，还没有来得及完全“消化”。

在富集星系团内的星系际空间，近年来还探测到弥漫的 X 射线源。从 X 射线的谱形来分析，属于热辐射，是温度高达  $10^8$  开的气体发出来的。近日直接探测的铁原子电离 25 次（即失去 25 个电子）的谱线，只有温度达到  $10^8$  开才能达到这样高度的电离状态。从而证明富集星系团里的星系际空间确实存在着很高温度的电离气体。除此之外也发现星际空间还有 21 厘米氢谱线的射电辐射，表示那里也有中性氢原子。现在判断在富集星系团中心区物质密度或许达到  $5 \times 10^{-30}$  克/厘米<sup>3</sup>，而在普通星际空间则约为  $2 \times 10^{-34}$  克/厘米<sup>3</sup>。通常认为这些气体除了空间原有的弥漫物质之外，还有受到星系团中心区巨大引力从成员星系里拉出去的气体，由于探测表明星系团内的星系本身大多数只保留少量气体，甚至一些旋涡星系也被剥离得只剩下少量气体，不大容易观测到盘结构而变为类似透镜形星系。

星系在星系团内部是靠引力联结在一起的，它们本身则在不停的运动之中，不然就会落到一起去了。星系在团内的运动速度能够高达 1000 千米/秒。在这样高的速度下，星系团的总质量必须特别大，使整个星系团具有极高的逃逸速度，这样才能约束住星系，使团不致分崩离析。可是由星系的光度和它们的自转推算出来的质量总和，却比维持星系团存在所需要的总

质量小得多。现在虽然从银河系的观测情况推测也许存在星系冕，而且发现星系团内空间普遍存在星系际物质，其中包括温度高达  $10^8$  开的高温电离气体，但其数量仍不能弥补短缺质量。此短缺质量问题，对于更大范围的宇宙结构和演化有巨大的影响。

在庞大的超星系团之上是否存在更大范围的集结现象，现在还不能绝对肯定或否定。但是从统计天空各个方向星系数目的情况来看，在人类目前探测能力所及的范围里，星系的分布较为均匀，肯定不存在类似银河系里恒星分布之类的不均匀现象。在银河系里，核球和银盘是恒星密集区。在星系空间里，即使把大量非常暗弱的矮星系全部计算在内，也显然不存在类似的集结现象。所以从大范围来看，星系在空间的分布可能是非常均匀的。

对于我们现在能探测到的全部空间，有人称为“总星系”，有人直接称为宇宙。从哲学上的意义来讲，宇宙应该是包罗万象、无边无际、无始无终、没有穷尽的，然而在任何一个时期，人类对宇宙所能认识到的部分又必然有具体内容，有一定范围。从古到今，在讨论当时所知最辽阔广延的时间空间实体时，又常常把这个实体称为宇宙。远古时代，人类把自己居住的局部地面及上面像帐篷一样罩着自己的空间称为宇宙，恰如后来民歌里所唱的“敕勒川，阴山下。天似穹庐，笼盖四野。天苍苍，野茫茫。风吹草低见牛羊”。后来又认为地球和围绕它转的九重天就是宇宙，以后则以为太阳系和外面的天球就是宇宙。直到 20 世纪初发展到银河系是整个宇宙。现在人类把能探测到的 100 多亿光年的空间和 100 多亿年的时间实体称为宇宙当然更是可以的。这是一种狭隘的宇宙概念。

“总星系”这个名词是 20 世纪 30 年代提出来的，虽然至

今还有很多人在使用，但概念上每人理解并不相同。有人认为总星系是超星系团以上的一层物质结构体系，它的范围可能会大于、等于或略小于今天我们人类的探测能力所及。既然人类无法观测到这个体系以外，因此它究竟能否算作一级天体系统那只有理论上的意义，或者说根本没有多大意义。多数人认为它和狭义的宇宙概念是同义词，所以在习惯上比较倾向于直接用“宇宙”一词。星系团或超星系团就是这个宇宙空间里的组成部分。虽然星系团内和星系团之外星系的密度具有很大差别，但总星系团的空间分布却比较均匀。在研究宇宙的结构时，宇宙间物质分布的基本状况可以认为是均匀而且各向同性的。这种情况可以和一团云雾相对比，云雾所含的小水滴内部水分子密集，小水滴之外的密度就很小，但是从云雾的整体来看，可以说物质的分布是均匀且也是各向同性的。

# 射电天文学

## 太阳射线

虽然从外层空间来到地球的宇宙线、 $X$ 射线和 $\gamma$ 射线使天文学家产生过强烈的兴趣，但在 20 世纪中期天文学方面的真正突破却是电磁波谱的另一端——长波一端，也就是光子能量较小的无线电波部分。

关于这一点主要的原因有两个。首先，地球的大气对可见光是透明的，但对电磁波谱的其他部分却是不透明的，不过，恰好是在非常短的无线电波或微波部分又有一个透明的宽带。这样，在天文学家面前就出现了观测天空的第二个“窗口”。所以，从天体射来的任何微波辐射都可以在地球表面上从容不迫地进行研究，这就没有必要在利用气球或火箭把仪器送上高空。

其次，无线电波在通信方面的应用，使得对这类微弱辐射的接收和放大的精巧技术有了空前的发展。

事实上，科学家很早就考虑过探测来自天空的无线电波的可能性。仅在发现无线电波后几年，就有人设想探测来自太阳的无线电辐射的可能性。这其中有英国物理学家洛奇，他是一位无线电通信的先驱，他在 1890 年前后就试图探测来自太阳的无线电波，但没有成功。这方面的努力从此销声匿迹一代人

之久，最后的成功是在一次偶然的机会有获得的。

太阳的无线电波是美国无线电工程师詹斯基首先发现的。1931年，他正在研究与天文学根本无关的问题，即无线电通信天电干扰的防御问题。有一个天电干扰源他开始无法弄清楚是来自什么地方，最后他终于确定，那是来自外层空间非常短的无线电波。他于1932—1933年发表了发现，但他的文章却没有引起天文界多少兴趣。

事实上，惟一热心的是另一位美国无线电工程师雷伯。他于1937年在他的后花园建造一个“无线电（射电）望远镜”，这是个直径为9.4m的抛物面装置，用来收集一定面积上的、来自空间微弱的微波辐射，并把它们集中到位于抛物面焦点的一个接收装置上。在多年里，雷伯小心地定出天空中各射电源的位置。他是第一位，并且在相当长的时间里他是惟一的一位“射电天文学家”他于1940年发表了他关于这方面的第一篇文章。

天文学家们仅是缓慢地产生了一点兴趣。一个不利因素是从太空来的波长非常短的射电波比通常用于无线电通讯的射电波要短许多，所以这些射电波通常不干扰无线电接收也引不起人们的注意。此外，当时技术上还没有发现有效的方法来掌握这样短的无线电波。

然而，在30年代末期，几个关键性的进展最后才打开了缺口。英国和美国都在发展“雷达”——这是一种装备，它发出一束微波，期望它射在一个不透明的物体上反射回来，并能够探测到反射的回波，从回波射来的方位来确定这个不透明物体所在的方向；从发射微波束至接收到回波之间的时间延迟，可以确定这不透明物体的距离（因为微波以光的速度传播）。雷达是人们准确快速探测远距离目标最理想的手段，特别是在

一般光学方法用不上的条件下更是如此。它在夜间和白天一样工作，云和雾对于可见光是不透明的，但对于微波事实上却是透明的。

雷达被英国用于早期预报，以发现德国飞机的到来，并且是英国用以赢得战争的关键性辅助手段。所以，任何对雷达工作的干扰理所当然地都会引起英国及盟国的严重关注，而且就在 1942 年，这样的干扰发生了。整个雷达系统受到了强大的外部微波辐射的严重干扰。英国警报系统一时间毫无用处。如果这是由于德国方面的有意干扰，那后果是不堪设想的。然而，经研究表明，那是由于太阳耀斑而引起的（耀斑就是偶然地发现来自太阳的宇宙线的最早征兆）。很明显，耀斑送出的强大微波流射向地球时，很轻易地就淹没了人工供给雷达系统的辐射。就这样，人们才发现了太阳在电磁波谱无线电波区的辐射。二战结束后，天文学家们就认认真真转向了“射电天文学”。

因为和雷达有关而高度改进了的技术，用于研究太阳的微波谱，人们很快就查明，太阳辐射的微波远比据太阳表面温度所应辐射的还要多。有些波长的辐射强度，只有温度达到  $1000000^{\circ}\text{C}$  才有可能。当然，这些都是由日冕发射的，日冕的高温足以发射  $x$  射线。

太阳也发射突变性高强度的微波辐射，这些辐射和黑子、耀斑及其他扰动都有关联。

## 行星射线

在太阳系中的微波源不光是太阳（真是够令人惊奇的）。行星只靠反射光线而发光，但其中有些自也会发射微波，这些

微波的强度足够让人们探测到。

例如，1955 年人们认识到，木星是某些微波的爆发源，这些微波的爆发曾使观测者们困惑了 5 年之久。一般微波辐射起源于热，这仅仅是由于木星的一部分表现处于某一温度下，从而辐射出电磁波。这部分辐射覆盖了电磁波谱中很宽的一段波长范围，其中包括微波区域。然而，在某些波长，无线电波的辐射比纯粹由热源所引发的辐射要强得多。

同样值得注意的是，从金星也接收到了微波。这种微波第一次是于 1956 年探测到的，并立刻给天文学家端出了一个很有趣的且相互矛盾的事实。在对金星的普通红外辐射的测量表明，它的“表面温度”大约为  $-43^{\circ}\text{C}$ 。可是，微波辐射温度明显表示要比这高数百度，实际上，比水的沸点还要高得多。

但这是真的矛盾吗？从金星来的红外辐射，必定是来自这个行星的最高层大气。要是它来自固体表面或靠近金星固体表面的地方，红外辐射就会被金星的大气所吸收。而金星的大气与地球的大气一样对于微波都是透明的。尽管金星不透光并永远被云层覆盖着，它的固体表面还未曾被人类的眼睛看过，但对于微波来说却是透明的。所以，很有可能红外线所指示的温度，是人们对其高层大气所自然应该期待的低温，而由微波辐射所揭示的温度才是金星固体表面的真实温度。

对于金星来说，表面温度比水的沸点要高得多，是相当值得惊奇的。是否微波辐射不是由于热的原因，而是至少有一部分是来自磁场，就如同木星那样，后面的这种可能性是很小的。天文学家普遍相信，金星绕它的轴自转速度非常缓慢。天文学家还强烈地意识到，一个行星要想具有磁场，就得要有足够的自转速度，能够在它的熔融核心建立起涡流。因此，缓慢旋转的金星似乎不像会有可观的磁场。

这个问题让金星探测器“水手2号”解决了。“水手2号”是一个仪器装置精良的火箭，它于1962年12月在离金星34800公里内经过，并没有探测到明显的磁场。如果金星有磁场的话，它不会超过地球磁场强度的1/100。“水手2号”的数据还指出，微波辐射根本不是来自金星的电离层，而是来自它的表面，所以微波辐射必定是来源于热，因此金星表面必定是很热的。从“水手2号”所探测的微波强度表明，金星的表面温度约为400℃。

利用反射的微波辐射也能得到太阳系的信息。例如1945年由流星雨反射回来的微波。即使在白天通常看不到流星雨时，也可利用它们的反射波来探测和研究它们。如果要利用更远的障碍物作为微波的反射体来研究它们，只要改进技术，即能送出非常强的微波脉冲，并能在同样性质的本底辐射（“噪声”）中检测并放大非常弱的回波也就行了。

在发射与回波到来之间的时间延迟可以确定行星的距离，事实上，利用金星对无线电波的反射就是新的、空前准确的测定太阳系大小的方法。这种方法比这一代人之前利用小行星爱神星的视差所进行的测量有着明显的改进。

此外，从微波辐射还可以获得有关反射面的信息。如果反射面是光滑的理想球体，就只有面对着地球的部分会送回来反射回波。反之，表面是粗糙的、不平的、倾斜的，就会在那些作为球面本来不该有回波的地方发送回波。以月球为例，由于月球的曲率，有回波返回的倾斜的地方距离地球会稍远些，因此回波就会变得不太尖锐，要比原先发出去的脉冲拉得长些。如果反射面是在自转，那么，由于多普勒效应，微波的回波也就会有某些失真。

自然，从雷达所获得的月球情况，有许多能从月球表面所

反射的太阳光来核实。在金星上的情况就做不到这一点。金星上的固体表面对于可见光而言是被覆盖的，但是利用可以透过云层的微波就能触摸到它。从 1965 年的微波反射来看，似乎揭示出金星表面至少有两座大山脉，其中的一座走向是自北向南，而另一座则是自东到西。

金星的自转问题就更有意思的一些。由于在这个行星上面除了覆盖的云层之外，什么也看不到，因此没有办法准确测定它的自转周期。一直到 1962 年，关于遥远的冥王星的自转，所知道的要比金星多得多，而金星却是我们最邻近的行星。根据不充分的数据，对金星的自转有许多猜测和估计，多数人的看法是，这个行星的自转周期等于它绕日公转的周期——225 天。

要是真的这样，这个行星的一侧就要总是面对太阳，而另一侧则永远背着太阳（就如同月球的一侧永远向着地球，而另一侧永远背着地球一样）。这样，人们就可以期望金星的“永昼侧”必然非常热，而“永夜侧”必然非常冷。

可奇怪的是，微波辐射似乎表明，金星表面温度变化没有像存在永昼侧与永夜侧所应有的那么多。人们就设想有很强的风把永昼侧的热传给永夜侧。或者还有可能的是金星自转周期并不完全等于公转周期，所以没有永昼侧和永夜侧，而是（像地球这样）行星上任何一点都会周期性地见到太阳，又见不到太阳。

后面这种看法被微波的反射所证实，使天文学家感到惊奇的是，1962 年测得的金星自转是倒转，周期为 247 天，这就是说，如果从它的北极上空高处观看，它的表面是顺时针方向旋转，而不是像地球和几乎所有的行星那样逆时针旋转。换句话说，金星是自东向西转，而不像我们地球是自西向东转。把自

转周期与行星绕日运动结合起来，就意味着从这个行星的表面上任意一点看起来，在每个行星年中，太阳（要是云不存在的话）从西方升起再从东方落下大约各两次。

为什么金星会逆向自转以及为什么会那么热，目前真让天文学家们大伤脑筋。不过，出现了未解答的问题总比没有问题要好的多。

新的微波技术更正了人们对金星自转所产生的见解，但这不是惟一的成就。1965年，微波反射表明，水星的自转周期并不等于它绕日公转的周期 88 天。这比金星还要更值得惊奇，因为水星没有云层覆盖，它的表面可以看得一清二楚（虽然它与太阳那么接近，观测很困难），所以它的自转周期可以直接从它表面的细节变动观测出来。

当有了微波的观测数据后，对水星表面进行了更加小心严格的观测，结果证明，水星的自转周期为  $58\frac{1}{2}$  天，刚好为大约它一年的  $\frac{2}{3}$ 。某次近日点太阳所照到的特定区域在往下数第二次、第四次、第六次近日点时又再次出现。任何人相隔两次公转周期或其倍数所进行的观测，都将看到同一些表面细节出现在同一位置，因而假设行星每公转一周就自转一次是情有可原的，因为在那种情况下，人们的确会观测到完全相同的现象。

## 恒星辐射

太阳系中的物体所辐射的微波虽然是值得重视的，但这决不会是它全部射电天文学的内容。事实上，在这个领域里从最初进行的观测，就与太阳系以外的微波源打上了交道。

詹斯基的第一次观测就是在太阳相对来说比较宁静的那个时期，它发射的微波相对来说还比较少。所以太阳不是他所探测到的微波源。詹斯基一开始也认为太阳是他探测到的微波源，因为那个微波源随着太阳在天空中移动。可是，一天又一天过去了，他注意到这个源每天要比太阳提前四分钟出现，这就意味着这个源相对于恒星而言，位置是固定的，而当后来确定出它的位置是在人马座方向时，它就被称做“人马座 A”。无疑地，这个源就是银河系的核心，这个核心从微波所得的数据来判断，直径为 10 秒差距，包含有 1 亿颗恒星。

这是最重要的一次发现。永远妨碍我们对银河系核心进行可见光观测的尘埃云，对于微波来说是非常透明的。如果说不能以平常的方式看到银河系的核心，我们却能够用微波“看到”它。

雷伯在独自对天空发射微波进行的研究中，绘制了一幅图称做——“射电波天空”。这是天空中各个区域微波辐射的本底强度。其主要特征是：射电波天空是沿银河延伸的高辐射带，它在银河系核心方向最强，而沿两侧减弱，在与银河系核心正好相反方向上减到最弱。

然而银河平面并不是囊括了射电天空的所有。即使是远离银河的天区，也会在这里或那里出现高强度的射电辐射源的小斑。开始，这些射电源无法和看得见的东西对应起来，不过我们很清楚，它们不可能是像我们太阳一样的普通恒星。要是恒星一般来说只像太阳那样辐射微波，那么，银河系的核心就不可能辐射足够多的微波，以至它在到达我们地球时还那么强。

当这些射电源之一很快被确定为蟹状星云时，它们不平常的性质就完全清楚了。我们已把这个天体作为 X 射线源和宇

宙射线源讨论过了。它被证明也是一个微波源，是个太阳系之外第三强的微波源。

当初人们可能设想，蟹状星云的微波辐射远远要比太阳强得多，这只是由于它具有产生 X 射线和宇宙线的高温。然而，情况并不是这样。要是温度高到足以产生如所观测到的微波强度，那么蟹状星云在可见光范围里应当还要亮得多。再者，由高温产生的微波强度应当随着波长的增加而减小，但蟹状星云并不是这样。

1953 年，苏联天文学家什克洛夫斯基提出，蟹状星云可能有一个很强大的磁场，而且磁力线很可能迫使电子作螺旋运动，因而电子就如它们所表现的那样发出同步加速器辐射。这种辐射很可能同时包含微波和可见光。

如果真是这样，其所发出波的形式就受到磁力线的控制，而这些磁力线在空间有着固定的取向。这样波的振动方式必然固定在一个平面里，因而从蟹状星云来的光必然具有“偏振”的性质。天文学家可以检验这些光是否偏振，而苏联物理学家多姆布洛夫斯基首先证明，事实的确是这样，这一现象立刻就得到天文学界的公认。通过取某些给定方向的偏振滤光器观测蟹状星云，都会呈现与偏振器取向垂直的直线结构。这也正是偏振光所应有的现象。

由于，有关蟹状星云的这种见解获得了成功，人们就提出这样一种看法：木星的非热辐射可能有一部分也是来自同步加速器辐射。这就意味着木星的磁场要比地球强几十倍，考虑到木星的自转速度（尽管木星直径为地球的 11 倍，它自转一周却仅为 10 小时，而地球为 24 小时），这种看法很有可能是对的。到 1960 年，木星的微波辐射被发现是偏振的，偏振的情况就像它的磁极与地理极接近时（地球就是这样）所应出现的

那样。

当我们认识到磁力线能有效地捕捉带电粒子，从而就发现了地球的磁层。因此，人们必然也就会推断出木星有一个更强的磁层。不仅如此，当 1962 年一颗核弹在大气层以外的空间爆炸时，就有大量的带电粒子冲进地球的磁力线区并被捕获，并且在它们来回绕磁力线作螺旋运动时，的确发出了可检测到的同步加速器辐射。这就使得上述见解得到了充实。

当然，蟹状星云几乎可以肯定是个超新星遗迹，而其他一些射电源也可以认证是处在我们银河系已经爆发的超新星的位置上。第谷与开普勒所观察到的超新星就是这方面的一个实例。然而，最强的射电源却和已知的超新星没有任何关系。这个射电源叫做“仙后座 A”，因为它的位置处在仙后座中。没有什么光学上能引人注意的东西和仙后座 A 相对应，有的只是距离我们大约 10000 光年的一些气体云或成为小束的气体丝状物。对这些气体进行认真研究表明，它非常热，并在剧烈运动着。它非常可能是近在 1700 年爆发的一颗超新星遗迹，但由于它的距离较远显得并不特别亮，因而根本没有引起人们注意，那时对“新星”的兴趣并不大，只有特别亮的才会引起观察者的注意。另外一个有趣的射电源 IC443 也是云状的，可能也是个超新星遗迹，或许已有 50000 年的历史了。与这个云状物相联系的白矮星没有观察到，这也是由于它的距离比较远。

这样设想是有道理的：银河带发射的微波一般可能是由于其中出现过的超新星所引起的，但这不可能是惟一的微波源。有一种类型的红矮星有时会不规则地闪亮起来。人们推测，这些星是由于类似太阳的耀斑而闪亮起来的。只不过耀斑的规模非常强大，这些耀斑像太阳的耀斑一样都能辐射出微波。美国天文学家惠普尔与英国天文学家洛弗尔合作，证实了微波辐射

的强度的确与闪亮是并行的，因而这些“耀斑星”就是最早被确认为射电源的普通个体恒星。

## 银河系辐射

银河系的微波辐射不全是恒星或者来自超新星遗迹的。就连恒星之间的物质，即恒星际主要是由氢组成的稀薄气体，也会发射微波。要是这些氢正好受到附近某些恒星的加热，氢原子就很可能被泵足能量而电离。以后，这些能量可能又辐射出来，因此天文学家就会观察到发光的云和探测到与氢相联系的光谱线。

有这种现象会比没有要好些，但好不了多少，因为银河系中只有很少一部分星际氢被加热到能产生这些光谱线的能量。至少 95% 的星际氢相对来说是比较冷的，用辐射的语言来说，是宁静的。此外，炽热的氢所发射的谱线，只有当中途没有暗星云插入时，我们才能观测到，这就是说，能够进行这类观测的，仅限于银河系中我们自己所在的这一地段。

然而，1944 年，一位荷兰天文学家范德赫斯特以纸笔计算与冷氢有关的行为来消磨时间。他指出，氢原子中与质子和电子相关连的磁场彼此有特定的取向关系，它们可以同向或反向。这两种状态的能量有些许差异，而且每当氢原子处于能量较低的状态时，经过一段时间就会吸收一个能量恰好合适的光子，使它本身过渡到能量更高的状态。每当氢原子处于更高的能量状态后，再过一段时间，就会发射一个光子，并使自己降低到能量较低的状态。氢原子收进或支出的这份能量非常小，也只有能量很小的光子才能被吸收或被发射。这种光子的波长为  $21\text{cm}$ ，处在微波范围内。

每个氢原子发射和吸收  $21\text{cm}$  波长的微波注定是很稀罕的，平均来说每 1100 万年才发生一次，但整个空间的氢原子又是如此众多，因此这样的事件也就像下毛毛雨那样，存在着那些虽然微弱但能够探测到的光子流。

二战结束后，天文学家们开始搜寻这方面的证据，并于 1951 年，由瑞士出生的美国物理学家布拉克与美国物理学家蒲塞尔分别探测到  $21\text{cm}$  的辐射。而氢原子在  $21\text{cm}$  波长处的标志性吸收，在后来也被探测到了。

这就提供了一种探测星际氢的手段，可以根据它来得知氢在什么位置相对来说比较丰富，又在哪些地方比较稀少。不仅如此，由于这种光子是落在微波而不是在可见光区域，它们很容易穿过尘埃，因此天文学家就可以借助它们“看”到银河系中很多利用可见光无法看到的地方的氢。

由于人们曾设想银河系的尘埃和气体集中于旋臂，因此， $21\text{cm}$  射电源的分布图就应当给出关于我们银河系旋臂结构的概貌。

其实早在探测到  $21\text{cm}$  的辐射之前，人们已经试图利用炽热发光的氢云来描绘银河系的旋臂了。这些亮氢云围绕着特别炽热的第 I 族恒星，它们是在充满尘埃的旋臂上而形成的恒星。这些能够照亮数光年范围里的氢的蓝白色巨星的分布情况，勾画出了旋臂的来龙去脉。利用这种技术，美国的天文学家摩根及其合作者于 1951 年绘制出了银河系的旋臂图。

这张图描绘出了三支旋臂，其中之一包含着猎户座中那些亮星云和热巨星，所以称做“猎户臂”。

进一步的类似研究弄得这样的图就更加错综复杂，但是接下来这种技术就过时了，因为有了  $21\text{cm}$  辐射可资利用。利用这种手段，立即就可以探测到银河系中更远的地方，并且也探

测得更加详细。银河系的旋臂图现在已经绘制出来，人们可以形象化地把它想象为相当对称的双螺旋。

银河系中冷的中性气体氢并不是静止不动的。乌尔特与范德赫斯特的研究似乎是表明，氢从银河系的中心向边缘以令人惊异的速率流出。乌尔特估计每年从银河系中心向外迁移出来的氢等于一个太阳的质量。根据某些揣测，这些沿旋臂向外流的气体使得旋臂保持着丰富的气体，并且在那里形成恒星。另一方面，很难弄清楚在银河系中心这些氢的来源是如何维持的。除非是有某种整体的循环使得银河系中心的氢能得到补充，否则，氢必然早就用完了。但迄今为止还不清楚是什么原因维持着这样的氢循环。

当然，其他星系也有它们自己的氢储备，其数量随星系的类型不同而不同。旋涡星系似乎比椭圆星系的氢较多。21cm 辐射的研究表明，比较开放的旋涡星系，星际氢比收紧的星系要多，而不规则星系的星际氢为最多。这一点要是与星系演化有关的话，关系密切到什么程度，至今也不清楚。

天文学家们很自然地渴望找到另一种类型的微波辐射，以便用来进一步研究星际气体，因此就想到了氘（氢 2）。氘 2 与普通氢 1 的不同是它的原子核中多了一个中子。由质子和中子所组成的核磁场也与单一质子的核一样，必然与电子的磁场相互作用，根据理论预言，这种作用必然会发射 91cm 波长的微波。像仙后座 A 这样的强射电源就是被用来搜寻这个能揭露秘密的波长。1966 年，芝加哥大学的天文学家们已探测到了它。目前看来，氘在宇宙中的数量大约为普通氢的 5%。

宇宙中除了氢以外，最常见的就是氦了。苏联文学家卡尔达雪夫从理论上计算出了氦应发射的微波波长，这也于 1966 年被探测到了。

在氢与氦之后，星际气体最常见的成分就是氧。一个氧原子很容易和一个氢原子结合成为“羟基”。这样的结合在地球上是很不稳定的，因为羟基非常活泼，会与它遇到的几乎所有的其他原子或分子结合，特别是会与另一个氢原子结合形成水分子。然而，正如什克洛夫斯基于 1953 年所指出的，在星际空间原子的分布是十分稀，原子之间的距离非常远，碰撞是极罕有的，因此，羟基一旦形成，可以维持相当长一段时间不受扰动。

在氢、氦和氧之后，星际物质最常见的成分就是氮和碳。人们继续寻找包含这两种元素的化合物。1968 年在星际气体和尘埃中探测到了和氨分子（是由一个氮原子和三个氢原子构成的  $\text{NH}_3$ ）相联系的谱线，并于 1969 年探测到与甲醛分子（是由一个碳原子、两个氢原子和一个氧原子构成的  $\text{CH}_2\text{O}$ ）相联系的谱线。这些化合物使人们特别感兴趣。因为任何有关行星上产生生命的描述，都把诸如氨和甲醛这类分子当做原始材料。要是在恒星际的空间物质中也有这些分子，那么，在许多行星上生命的形成应该是宇宙间的普遍现象这种猜测就又得到了一些加强。

到了 60 年代，天文学家对那些特殊的微波源的强度会发生变化这一点增加了兴趣。这种强度变化要不是发生得极快，是不值得惊奇的。但是，在 1964 年左右，人们注意到有些微波源所发射的微波强度变化得是惊人的迅速，简直就是一个连续不断闪烁的微波源。

这就推动了天文学家去建造能够探测超短微波爆发的射电望远镜。他们认为，这样就能够详细地研究这种迅速的微波强度变化。使用这种射电望远镜的天文学家之一是剑桥大学天文台的休依斯。

几乎是当休依斯刚开动这台望远镜时，就探测到了来自织女星和牵牛星的中间地带的微波爆发。虽然他事先设想过很迅速的微波爆发，可是他没想到爆发会是如此之短促，每次爆发只能持续  $1/30$  秒，这使他感到非常之惊奇。不仅如此，更使人惊奇的还在于这些爆发是一个接着一个，极其有规则地间隔  $1\frac{1}{3}$  秒。

光说是  $1\frac{1}{3}$  秒那简直是不公正的。这个时间间隔是如此准确，一样，使得其数值可以精确到一亿分之一秒。这个属于某种新现象的首例，其周期为  $1.33730109$  秒。

这台新设备这样快就“捕获”到这个射电源，似乎是有些奇怪。为什么通常的射电望远镜都未能“抓”到它呢？

应当明确的是，一次这样的射电爆发，能量是非常巨大的，足够使它在一瞬间显得特别明亮，并且容易探测到——但仅仅是在一瞬间而已。一台射电望远镜如果不是专门设计用于探测极超短的爆发的话，它仅能探测到从那个地方来的平均辐射，而这平均辐射只有爆发时最大亮度的  $3\%$  或更少些，这就不容易引起注意了。

休依斯根本就没想到会出现这个奇怪的微波现象。由于这种微波似乎是来自天空的某一点，他就把它当做了某种类型的恒星。由于微波是以短脉冲的形式出现的，他设想它应该是一种“脉动着的星”。这个名称几乎立刻就被简化为“脉冲星”，这个新天体就以这个命名而为人们所知晓。

不过，我们应当说“一些天体”而不是说“这个天体”，因为休依斯发现了第一个之后，他就继续搜寻其他的，到了 1968 年就已找到了 4 个。其他天文学家也开始热烈地寻找，并很快就发现了更多的类天体，两年以后，又找到了近 40 个

脉冲星。

这些脉冲星中的  $2/3$ ，位置都十分接近银河系的赤道面，这很好地说明了脉冲星几乎都是银河系的成员。有些脉冲星可能近到约 100 光年左右。

所有脉冲星的特点都是极端有规则脉冲，当然，各种脉冲星的准确的脉冲周期是各异的。有一个脉冲星周期长达 3.7 秒，而西弗吉尼亚州格林班克的天文学家们于 1968 年 11 月在蟹状星云中观测到的一个脉冲星，周期仅有 0.033089 秒。它每秒能发出 30 个脉冲。

当然，是什么东西会产生这样短的“闪光”，并且闪光具有如此令人难于置信的规律性。休依斯及其同事们对于第一个脉冲星是如此奇怪，他们甚至想到是否是外层空间某种有文明的生命所发出的信号。然而这种想法很快就被抛弃了。

但总得有东西产生这样的脉冲；某些天体肯定经历着某种按时发生的、快得足以产生这些脉冲的变化。

理论工作者们立即忙碌起来，但是，使尽他们的本事，无非是设想一颗白矮星绕另一颗转，或者绕轴自转，或者自身脉动着，但都无法要求其周期小到足以成为脉冲星的周期。白矮星的个子还是太大了，引力还是太小了。

后来人们又把目光移向中子星并针对此做了一系列的观察、计算、推测和试验，然而即使是中子星，也似乎还是不太足够产生这样的引力波。

那么，是否还有某种尚未认识的东西，有更加极端的力，更加想象不到的规模巨大的物质聚集，我们拭目以待。

## 演化着的宇宙

关于宇宙作为一个整体的结构及它的诞生、形成、演化，自始就非常引人入胜。人类一直用自己最高的智慧和想象力，尽自己所有知识去解答这个问题。宇宙论也许是整个天文学同时诞生的最古老分支之一。世界上任何一个民族都在远古时代就有宇宙诞生的神话和传说。无论是在中国开天辟地的盘古，还是在西方开创世界的上帝，都是由混沌中创造出宇宙万物，也创造了宇宙本身。起初是清者为天浊者为地，然后是日月星辰，最后才有各种动物和人类。然而盘古和上帝在一次创造出宇宙之后，好像大功告成，从宇宙的和谐运转中抽身隐形，让宇宙永存不朽地运行。除非重现共工那样的捣蛋鬼破坏宇宙美妙的韵律，需要女娲来加以补修，或者一旦上帝发现世上罪恶滔天，要来加以毁灭。这种神造永存的宇宙论尽管完全来自古代人类的浅薄无知，但其影响力实际上延续到牛顿之后近代科学已有了相当发展的时代。由牛顿力学原理引申出来的宇宙论仍旧是没有演化发展的、机械的静态宇宙。直至 20 世纪初宇宙论的基本内容仍然是：宇宙在原始外力的作用下按一成不变的方式运行下去。

到爱因斯坦在广义相对论里将时间、空间、物质、引力和运动都联系成统一的整体之后，现代宇宙论才开始建立。广义相对论的哲学基础是不承认宇宙间有处于特殊地位的观测者。广义相对论认定宇宙间一切观测者其地位都是等价的，他们所

测定的全部自然法则都应当相一致。依此得出的结论是：物质及其运动与时间空间所组成的统一体——时空是密不可分的宇宙结构要素，物质与时空之间通过引力相互渗透及影响。既然宇宙本身就是物质及其运动与时空的组合体，用数学形式描述它们之间渗透及影响关系的爱因斯坦引力场方程自然就变成研究宇宙结构和演化的有力工具。所以从广义相对论引力场方程诞生日起，就把宇宙论研究推进一个新阶段。这个阶段的最显著特点是：宇宙不再被认为是受原始外力推动而机械运行的一部机器，而是由内在因素促成其诞生、演化、发展的完整体系。然而爱因斯坦本人却仍然受着静态宇宙论思想的影响，起初在他的场方程里人为地增添了一个称为宇宙因子的项，使他的场方程得到静态的解。假如去掉这个人造的因子，场方程就不会有静态解，得到的宇宙模型不是在膨胀就是在收缩。总之，依据广义相对论引力场方程的推论，宇宙必定不会是一成不变的，而是有着自身的演化。既然宇宙肯定有演化，自然就应该有它的诞生和终结，即亦是有演化的起点和终点，在这段演化史之外是其他的存在形式。

虽然在远古时代，人类曾经认为地球、太阳系或银河系就是宇宙，而这些也的确就是当时了解到的宇宙范围，当然也完全可以研究它们的形态、演化和发展，可是这种过于狭窄的含义又和现在谈论的宇宙迥然不同。因为当时是对客观上确实已经观测到的遥远天体作了错误的估计，将之硬塞在狭小的范围里，例如仙女座星系 M31 早被人们发现，但被主观认为在银河系之内。而现在所谈论的宇宙在主观上没有任何阻碍，只要是能及的范围都包括在宇宙整体内。假如要问还有无限制，那只能来自客观。客观限制有可能两个来源：一是光速限制，二是演化效应。被观测的天体愈远，它的退行速度就愈高，极其

遥远的天体就会接近光速退行，红移值会趋于无穷大，它的辐射将无法在地球观测到，这就是光速限制。另一方面，观测宇宙的深度愈大，看到的就愈是它远古的历史景象，假如它的历史本身就有限度，回顾自然无法超越，能够观测的宇宙深度也就有个尽头。这便是演化效应的限制。不过目前人类的观测离这两个限制的边界还很远。

## 热大爆炸宇宙模型

关于宇宙的形成和演化，尽管现在有很多模型，但都不能认为主要方面已经有比较坚实可靠的基础。但目前被多数天文学家所接受的热大爆炸宇宙模型，比其他模型能解释的事实更多一些，因而也更优越一些。

不妨先用设想来回溯一下过去宇宙可能的状况。既然宇宙目前在膨胀，倒推回去很自然得出：在久远的过去宇宙的尺度远小于现在，宇宙间的物质密度比目前高得多，在宇宙形成的早期物质应该非常密集。由于物质与时空无法分离，根本不存在没有物质的时空，也不存在脱离时空的物质，因而在宇宙物质极端密集的时代，时空也缩到极小的范围，整个宇宙也便高度浓缩到一个特别狭窄的区域。另一方面，在宇宙早期，现在分散于宇宙空间成为微波背景辐射的能量也会非常集中，使那时的温度远远高于现在的 2.7 开。如今已知，物质在异常高温和高密的条件下，不仅通常的天体不会存在，甚至分子、原子的结构也要受到破坏，在极端条件下连原子核也要被压碎成基本粒子。由上述的回溯可以大概描绘一个宇宙的简略的演化过程：宇宙形成的早期温度和密度都高得令人无法想象，当时的物质形态至多只能包含基本粒子，或者甚至到现在还不能了解的物质形态。随着宇宙的膨胀，温度密度都相应地下降，到一定程度基本粒子开始结合，先后形成氢、氦等轻元素的原子核。温度密度的进一步降低导致其组成原子，然后陆续发生宇

宙物质分裂成团块的现象，逐次形成超星系团、星系团、星系，以及恒星、行星等等。

20 世纪 40 年代末提出来的热大爆炸宇宙模型，就是顺着上述的基本思路形成并发展的。但是当时尚未发现微波背景辐射，宇宙早期处于高温状态是这种模型的假定，并且据此预言应当观测到今天尚剩余的温度。热大爆炸宇宙模型认为，宇宙起始起高温高密的“原始火球”，最开始甚至也许只是一个点。在原始火球里，温度与密度都高到令人无法想象的程度，甚至连基本粒子也很难存在，物质处于当前还不了解的状态。这种状态可能特别不稳定，终于使原始火球发生爆炸，爆炸的范围涉及整个宇宙的全部时空和全部物质。爆炸使宇宙的空间尺度各部分同时膨胀，能量和物质的空间密度都逐渐降低，相应的温度也会下降，与温度相应的热辐射光子的能量也随之降低，辐射的波长拉长。在温度下降、体积膨胀的过程中，大多数高能基本粒子湮灭转化为光子，剩下的很少部分在能量降低以后结合成轻元素的原子核，再进而结合成原子。温度大大降低之后，物质才分裂成团块，进而逐步形成现在的宇宙状况。

热大爆炸宇宙模型从提出到现在已有近 40 余年的历史。起初时只有一个轮廓，后来结合高温高密物质状态研究以及基本粒子理论的研究，现在已经有比较完好的理论体系，对宇宙各个阶段的状况有了一些定量的叙述，有些定量的结论适合观测得到的数据。在这个模型里，宇宙从诞生到今大致可以分为三个阶段，下面就简单地把整个过程讲一下。

初始阶段：

大约在一百几十亿年前，原始火球开始爆炸，那时的温度和密度都很高，在爆炸发生初期，物质所处的状态现在尚不清楚，由于目前的物理学内容里尚未有那么高温高密条件下的实

际知识。爆炸发生之后  $10^{-4}$  秒，温度和密度早已下降了，物质便能以基本粒子动态平衡的形式存在，就是处于光子、中微子、介子、电子、极少量的质子和中子以及所有这些粒子的反粒子相互作用和转化的动态平衡状态。此情况总共维持了 1 秒钟。爆炸发生 1 秒钟后温度已经降到  $10^{10}$  开。此时正反粒子大都湮灭了，只剩有光子、中微子以及极少量的电子、中子和质子。这里所谓极少量是与爆炸初期的各种粒子总数相比。实际上今天宇宙里存留下来的便是这个极少量。在第 1 秒末的时候，宇宙的尺度还很小，大约 5 光年左右，但是物质和能量的密度却极大，尤其是光子和中微子的能量按照当时的温度来算则很高。假如把全部能量都按相对论的质能转化公式折合为质量，则光子和中微子的能量折合的质量密度约为  $10^5$  克/厘米<sup>3</sup>，而电子、中子和质子等实物粒子的平均密度则约为 1 克/厘米<sup>3</sup>。在宇宙膨胀的过程中全部尺度都按照同一比例增长，光子的波长也包括在内。热辐射特性是辐射的波长愈长相应的温度就愈低因而可以得出一条很重要的结论：宇宙的温度和它的尺度成反比，宇宙膨胀得愈大它的温度就愈低。这一点不仅在初始阶段如此，在其他阶段也莫不如此。

辐射为主要阶段：

温度由  $10^{10}$  开降至  $10^5$  开的阶段，宇宙的尺度相应地膨胀了  $10^5$  倍，最后约达到 50 万光年左右的阶段称为辐射为主阶段，因为在这个阶段里辐射能量折合的质量密度总是高于实物粒子的平均密度。在宇宙膨胀的过程中，辐射能量的密度和物质粒子的密度虽然都在降低，但变化的规律各不相同，能量密度降低得会快一些。热辐射规律是辐射强度和温度的四次方成正比，而辐射强度的大小就代表着辐射能量密度的高低。既然宇宙的温度和它的尺度成反比，辐射能量的密度也就与宇宙尺

度的四次方成反比。但是实物粒子的质量并不会随宇宙的大小改变，在宇宙膨胀过程中它们只是分散到愈来愈大的体积里去，而宇宙的体积当然与它的尺度三次方成比例。由此可知实物粒子的密度是和宇宙尺度三次方成反比。很明显在辐射为主阶段的末了，由于宇宙膨胀了  $10^5$  倍，辐射的密度也应该降低  $10^{20}$  倍，而实物的密度应该降低  $10^{15}$  倍，两者由原来相差  $10^5$  倍变成相等，数值都约为  $10^{-15}$  克/厘米<sup>3</sup>。

这个阶段约延续了 2000 年左右。大爆炸之后各阶段演化的时标与宇宙的物质密度直接相关，但总的来说膨胀的速度是愈来愈慢。辐射为主的阶段还能够细分为前后两期。前期大约共历时 30 分钟，宇宙里主要的原始元素都在这一阶段里合成。在这个阶段的开始 100 秒内，温度下降到约  $10^9$  开，这种条件下几种最轻的原子核能够稳定地存在。于是质子和中子开始结合成氘，然后在氘的参与下，合成大量的氦<sub>4</sub>，即普通的氦原子核。元素的核合成到 30 分钟末尾后就基本停止了，因为那时温度已降到  $3 \times 10^8$  开，绝大部分质子和中子的动能已不能够令它们相碰撞而结合。用早知的基本粒子理论进行计算，在元素合成的这几十分钟内，大约有 25% 的质子转变为氦原子核，及少量氘以及极微量的氦 3、铍 7、锂 6 和锂 7，其他的仍然是质子（氢原子核），由于质量数为 5 和 8 的原子核级不稳定，因此元素合成跳不过这两道障碍，使得当时没能合成更重的元素。氢和氦都是极稳定的元素，一直遗留到现在。热大爆炸宇宙模型对宇宙间氢氦含量的比例作出如此完善的解释，是现在其他任何模型不能与之相匹敌的，也是它受到广泛接受的重要理由之一。辐射为主阶段的后期只是一般的膨胀过程，无什么特殊的事件发生。

实物为主阶段：

宇宙温度降到  $10^5$  开以下，实物的密度便超过了辐射的密度，宇宙的演化于是以实物的密度变化为主，整个宇宙的平均密度就大致与宇宙尺度的三次方成反比。这个阶段一直延续到现在，同样能够分为前后两段。在宇宙年龄小于 70 万年、温度高于 3000 开的前段，尽管辐射的密度早已比物质的密度低，但整个宇宙的温度仍旧很高，实物粒子都在高速地运动着，具有极高的能量，电子、质子及其他原子核无法结合成原子。直到这时宇宙间一直充满着快速运动的自由电子，它们和光子之间碰撞得极频繁，它们和别的物质粒子的碰撞也常常发生。这时候辐射和实物粒子之间、实物粒子相互之间仍然不断地相互交换能量，使每种粒子分配到的平均能量相等，并且相互混杂为均匀的混合状态。整个宇宙间处在所谓热动平衡的条件下，温度完全相同，因而直到现在宇宙仍然处于严格均匀各向同性状态。同时由于光子和电子常常发生碰撞，根本无法顺利穿透宇宙空间，因此从大爆炸以来至此宇宙都是不透明的。假如当时有个观测者对宇宙进行研究，他大约仅能看出 1000 光年的距离，因为那时光子平均走这样一段距离就要和自由电子发生一次碰撞。可是那时宇宙的尺度早已超过 1500 万光年，而宇宙的年龄已经近 70 万年。

实物为主阶段的后段自宇宙温度降到 3000 开以下开始。随着温度的下降，物质粒子的能量也愈来愈小，电子从质子或其他原子核附近跑过，或与它们相碰撞时，再也没有足够的动能去摆脱正电荷的羁绊，于是便开始与它们结合成中性原子。至此宇宙间忽然失去了大量自由电子，光子不再受到自由电子的强烈散射，于是宇宙便开始透明了。自此以后实物和辐射之间基本上就各行其是互不干扰了。实物不再受到布满宇宙的辐射影响，就可能发生非均匀性扰动或涨落而分裂成团块，然后

发生引力集聚逐渐形成各种层次的天体。与此同时，光子的波长仍然随宇宙尺度的膨胀而继续加大，辐射的有效温度随之而降低，直到现在剩下的 2.7 开背景辐射温度。这就是原始火球的余温，完全均匀各向同性，充满整个空间无处不在。

严格讲，人们今天观测到的微波背景辐射并非直接来自热大爆炸的原始火球，因为当宇宙温度低于 3000 开以前宇宙并不透明。人们所能观测的只是接近透明处的辐射，也就是 3000 开地发出的辐射。这就如根本无法直接观测太阳或恒星的不透明内部所发生的高能辐射，而仅能看到它们表面的辐射一样。但是发出 3000 开辐射的宇宙早期景象早已与现代相隔了一百几十亿年，这种辐射传到人类眼睛的时候，宇宙早已大为膨胀了。人们接受到的辐射是由远在一百多亿光年之外的地方发来的，因此有很大的红移，令人们看到的不再是 3000 开的高温而是 2.7 开的低温。从人类现在所处地位附近发出的 3000 开辐射早已传出去很远了，当然人类不可能再看到了。

前面曾经讲到过：人类可以探测的宇宙可能在客观上有一定限度。从上面的热大爆炸模型就能够理解何以会有这个限度，且不讲原始火球以前是什么状况人类无法观测，就以宇宙年龄 70 万年以前来说，视线早已无法透过了。人们现在极目远眺，最远只能达到宇宙在 3000 开时的景象，那就是如今已经被人们接收到的微波背景辐射。比微波背景辐射的来源近一些的大概是众多的类星体，再近一些是星系。这个顺序也是宇宙演化的历史顺序。

以上就是热大爆炸宇宙模型所提供的宇宙演化历史的大概图景。这个模型孕育在哈勃关系的回溯和反演中，后来结合了基本粒子理论等物理学理论，经过长期改进才逐渐完善的。在上面几段里列举的宇宙温度、时代、物质构成和密度以及宇宙

尺度等等，都是依据现有物理学知识推算出来的。它满足了宇宙均匀各向同性和星系退行的要求，分析了宇宙间氢氦含量的比例关系，并且在发现微波背景辐射之前，就预言应当有宇宙早期高温的余热，并估计约为 5 开的低温。正由于它能说明的观测事实最多，而且准确预言了当时尚未观测到的现象，因此它才获得了多数天文学家的承认。但是它也有些问题没有解决。例如，根据这个模型计算，宇宙间氦的含量应该受元素合成时代物质密度的影响特别大。假如当时密度高。氦转化为氢的机会就少，剩下的氦颇少，反之氦颇多。从现在实测的氦含量和按实测宇宙物质密度倒推回去计算的结果有较大的出入，原因在哪里现在尚未弄清楚，此外，这个模型只描述了宇宙的去，尚未对将来的发展趋势进行预测。

即使只考虑宇宙演化的历史过程，热大爆炸宇宙模型也并非没有问题。最大的问题便是原始火球的起点。这个模型的起点是全部物质和空间缩在一点，一个几何学上的点，一个密度、温度都无穷大的奇点。宇宙就要从这样一个奇点爆发产生。奇点在数学上司空见惯，但在物理上却很难接受。很可能物质密集到一定程度以后，会形成比基本粒子更原始的物质状态，会出现新的力使收缩不能持续到底。不过从现在的物理学知识来看，尚未发现这一类情况。

## 开宇宙和闭宇宙

热大爆炸宇宙模型与其他一些爆炸模型都仅描绘了宇宙的过去。稳恒态宇宙模型假设宇宙的样子任何时候看起来都与现在相同。真正可能描述宇宙今后发展趋向的还需看物质与时空的进一步互相作用，也就是爱因斯坦引力场方程的进一步解。物质之间的引力是最终决定宇宙演化去向的惟一作用力。膨胀着的宇宙受引力的制动作用，膨胀速度一定会愈来愈小。速度变化的情况就能够以爱因斯坦场方程中求得解答。按照这个理论的分析计算，宇宙演化的去向有三种可能。第一种可能是：宇宙间的物质极多，减速效果非常明显，经过一段时间之后膨胀速度就会减至零，然后变为收缩，最后又缩成一个点。这种宇宙叫作闭宇宙。第二种可能是：假如宇宙间的物质过分少，减速作用永远不能制止膨胀，就会永远膨胀下去没有尽头。这种宇宙称为开宇宙。当然还应该介于两者之间的第三种可能，处于临界状态，膨胀速度渐渐趋向于零。这种宇宙叫做临界宇宙。以上这三种宇宙都能采用热大爆炸模型作为它们的过去。从目前观测到的膨胀速度推算，它们开始的时间应该不一样。假如是开宇宙，起点应该最早，临界宇宙次之，闭宇宙的起点最晚。这三种情况又都比按哈勃时间所定的起点要晚。

三种宇宙今后的发展趋势之间的差别远比过去演化历史的差别大得多。开宇宙会永远膨胀下去，永无止境。将来星系之间的距离愈来愈大终至于稀疏到所有星系全部成为真正的孤

岛，也许最多只有邻近几个星系在相互强引力作用下尚未分离。临界宇宙里星系之间的距离最终会稳固下来。然而从爱因斯坦场方程来看这种状态本身是不稳固的，只要略有误差或扰动就会变为另两种之一。闭宇宙在达到最大宇宙尺度之后就会由膨胀变为收缩，并且收缩的速度越来越大，最后会从相反方向回溯演化的历史进程而变成高温高密的火球，或奇点。

对于闭宇宙还存在另一种可能性，在收缩到火球或奇点之后或许又开始一轮新的大爆炸。甚至在现在这次大爆炸以前已经经历过多次，今后还要重复多次。这种宇宙称为振荡宇宙。当然每次收缩到特别小时，过去的全部痕迹都会消失。宇宙对它的上一次轮回没有丝毫记忆。虽然这里说收缩到最后成为奇点，很可能实际上并未形成奇点而是收缩到一定程度后巨大的引力转变为巨大的斥力，又形成了新的大爆炸。不过这在现在还仅是猜想。

虽然上面说了几种宇宙，但客观存在的宇宙只可能是其中的一种。从实际观测中判断宇宙类型的努力，到目前尚未得到非常明确的结论。理论计算说明，要使宇宙闭合，现在宇宙的物质密度应当大于  $5 \times 10^{-30}$  克/厘米<sup>3</sup>。然而目前有把握的物质密度，只不过约是此值的 1/10。另外从目前测定氦含量推算出来的结果也倾向于开宇宙。然而从遥远星系和类星体所统计的减速情况来看，又好像是闭宇宙。到 1980 年这个问题的解答里忽然又异峰突起地冒出一个中微子的质量之谜。前面谈到宇宙的物质成分时，都是将光子和中微子看作一类，全部按辐射来算，由于按一般理解两者都以光速运动并且都没有静止质量，它们之间的重要差别之一在于和实物粒子的相互作用：光子较容易受到吸收和散射，而中微子则不太容易与实物粒子相互作用。在宇宙演变历史中，宇宙在相当早期就对中微子透明

了,直到 3000 开低温以后才对光子透明。假如中微子没有静止质量,这点差别对宇宙演化的影响微乎其微。按计算,到大爆炸初始阶段结束的时候,中微子的总数约为质子、中子和电子总数的  $10^9$  倍,到目前每立方厘米里面平均还有几百个,与充满宇宙空间的微波背景辐射光子的数量相类似。1980 年有两组实验显示出中微子也许存在静止质量的迹象,有人估计约为电子质量的十万分之一,有人则估计也许能达到电子质量的 2%。不论哪一种估计更正确,只要中微子存在静止质量就是地覆天翻的大事。即使中微子的静止质量仅是电子的十万分之一 ( $10^{-5}$ ),宇宙间中微子的质量总和就要高出其他全部物质粒子总和的 5 至 10 倍,因为质子和中子的质量不及电子质量的 2000 倍,而中微子的数量要高出它们  $10^9$  倍。这样一来宇宙间的主要物质密度就会由中微子来控制,因而今后宇宙演化的过程就仅受中微子左右,实际上过去的历史也应受到中微子的极大影响。