

学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

现代科技与人文大观

揭开物质世界的奥秘



1. “坐地日行八万里，巡天遥看一千河” ——运动的绝对性

当我们观察周围的世界，可以看到空中日月的东升西落，飞机掠空而过，鹰击长空，虫鸟飞翔；看地上，河中流水潺潺，鱼翔浅底，江河中百舸争流，马路上车水马龙，人群熙攘，它们都是在运动中，而路旁的树木、房舍则是静止不动的。但是你可知道，“坐地日行八万里”，即使你坐在地上不动，也跟着地球一日走八万里，地球也是在运动的，它一方面以每秒 28.962 公里的惊人速度绕太阳公转，另一方面还要以时速 1609 公里的速度自转，一昼夜转一圈，一年围绕太阳走一圈。另外地球与其他星球以每秒 289.62 公里的速度绕银河系的中心旋转，所以地球根本不是静止的。那么太阳是否静止呢？也不是的，太阳（携带着整个太阳系）以大约每秒 20 公里的速度向着织女（天琴座 α 星）与帝座（武仙座 α 星）之间某个方向（大约赤径 270° 赤纬 $+30^\circ$ ）疾驶，其他恒星也无一不以极为巨大的速度运行。因此宇宙间万物都在运动，运动是绝对的，而静止是相对的，如房子、树木它们是相对地静止。

那么，我们怎样来研究描述各种物体的运动呢？例如站在站台上的人看到火车疾驶而过向前飞奔，而坐在火车上的人看到两边的景物和站在地上的人纷纷向后退走，又如在无风的日子，骑自行车在公路上行驶时，总觉得风是迎面刮来，等到回程时，往往还是感到逆风，这并不是因为风向改变了，而是在骑自行车的人看来，所有物体（路旁房屋、树木、电线杆）都在向后闪过，空气同样也参与这种相对于骑自行车的人向后运动，这就使骑车人常常感受到逆风疾来。又如站在地面上的人在无风的天气里看到雨滴竖直下落，而在行驶着的火车上的人看来，雨滴不是竖直下落，而是斜向后的，雨滴在火车车窗上留下的痕迹也是向后倾斜的。同样的雨滴运动，站在地上和火车上的人看它的运动是不一样的。

因此我们要描述一个物体的运动，必须要先选一个参考物当作是“静止”的，来研究运动物体的运动情况，如参考物为地球，则雨滴的运动是竖直下落，如把行驶的火车作参考物，则看到雨滴不是竖直下落，而是向后倾斜的。从这个意义上来讲运动是绝对的，描述运动是相对的。

2. 描述运动的方法 ——牛顿时空观

要描述一物体的运动情况，必须知道在某一时刻，该物体在某一地方，比如，要描述火车在铁路上的行驶情况，就要知道几点几分火车在某一地方，过一段时间火车到了另一地方。如果在相同的时间间隔内火车走的路程长，或者在相同的路程上，用的时间短，我们说这火车跑得快。火车在某一地方这就是火车的空间位置，什么时刻到那里，这就是描述运动的时间。时间反映着物质及其运动的持续性、顺序性和阶段性，而空间则反映着物质的伸张性和广延性。

时空观是人们对于时间和空间的物质性质的认识，时空观的形成，经历了一段相当长的历史时期。时空问题是一个既抽象又实际的根本问题。自古以来，又是哲学家和科学家十分关心和争论不休的课题。我国古代思想家们

在研究自然、探索宇宙的过程中，对时间、空间的本质及其特性提出了不少卓越的见解，有许多即使在今天也仍然光彩夺目，令人惊叹不止。

在我国古代典籍中，最早明确提出时间、空间概念的是《管子》一书的《审合》篇，它指出，世界万物都包纳在天地之中，而天地又包纳在表示时间、空间的“审合”之中，“宙”即指时间，“合”即指空间。到先秦时期，对时间和空间更有了进一步的认识。其中研究得最深入、最细致的要数后期墨家。他们在《墨经》中对时间、空间给出了更明确的回答，“宇”即空间，包括东、南、西、北四面八方。“久”同“宙”包括现在、过去、早晨、黄昏。又认为事物的运动，必定经历一定的空间和时间，由此时此地，到彼时彼地。这里比较明确地指出了宇宙空间和时间的变动是密切相连的。

在古希腊文化的兴盛时期（公元前7世纪到3世纪），人们不仅对物质运动的观察中提炼出时间和空间的抽象概念，同时还对时间和空间的性质做出多方面阐述，亚里士多德第一个全面而深刻地研究了时间和空间问题。他认为“时间属于运动”，时间是“运动的数目”，而空间像“容纳物体的容器一类的东西”，当它所包容的事物离开或消亡时，空间仍然留下，并不随之消失。

到了十六七世纪，人类对时空的认识进入以哥白尼、伽利略、牛顿为代表的绝对时空时代。在牛顿的《自然哲学的数学原理》一书中，他第一次对时间和空间提出了明确而又抽象的论述。他写道：“绝对的，真正的和数学的时间在自身流逝着”，“绝对的空间，就其本性而言，是与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的”。在牛顿看来，空间像一个大容器，它为物体运动提供了一个场所，物体放进去也好，取出来也好，这个空间本身并不会发生什么变化。例如：空间像放满水的游泳池，供人们游泳，人们来游泳，游完走了，游泳池依旧，而时间像一条川流不息的河流，有事件发生也好，无事件发生亦好，这条河流总是不断地、均匀地、不变地流逝着。总之，按照牛顿的观点，时间和空间是独立于物质运动之外，不受物质运动影响的，而具体物体的机械运动，则是在这种绝对的时空背景上进行的。

在绝对时空观的基础上，在具体描述物体运动的空间位置时，我们必须选择一个参考物或参考系，例如：描述一小球在地面上的运动，可选地面为参考物，如要描述地球对于太阳的运动时，则可选太阳为参考物。为了定量描述物体的空间位置，往往还要选一坐标系，一般选笛卡儿坐标系，即3个互相垂直的坐标系。由于同一物体对于不同坐标系（参照物）的空间坐标是不同的。它们的空间坐标间存在一种变换关系，这关系即为伽利略变换关系。在各坐标系中的时间标准是同一的，因为存在着一个绝对的时标。

在牛顿力学中，惯性参考系占有特殊的地位，因为只有在惯性参考系中牛顿三定律才成立。天体运动的研究结果表明，以太阳中心为原点，以指向任一恒星的直线为坐标轴的参考系，对于研究太阳系内的物体运动来说是一个很好的惯性系。对上述惯性系作匀速直线运动的参考系都是惯性参考系。

当你坐在一辆行驶平稳的作等速直线运动的汽车或轮船上时，如果窗户用窗帘挡着（或者是在夜间）看不到两边的景物，也听不到马达的声音，这时你就很难确定这车或船是在行走还是静止着。如果你丢一球，则用同样的力气朝车（或船）头丢与朝车尾丢一样远；作立定跳远，则朝车头与车尾跳的距离与你在地面上跳是一样远。若使水滴从顶蓬上往下滴，你将看到水滴是垂直下落，决不因为车在行走而落得比车静止时更向车尾一点；如果你在

大海轮上打乒乓球，如果乒乓桌是沿着船头尾方向摆着，你会感到在哪一边打乒乓球都一样，并不因为你从船头一边打向船尾一边会打得远一点。这表示在一个作等速直线运动的车（船）内部，不能借助于任何力学实验来决定该车（或船）的速度，也不能确定这车或船是在作等速运动还是静止。这是一条力学原理。

伽利略于 1632 年在一个关闭的船舱内观察这一现象，他写道：“在这里（只要船的运动是等速的），你在一切现象中观察不出丝毫的改变，你也不能根据任何现象来判断船究竟是在运动还是停止着。当你在地板上跳跃的时候，你所跳过的距离和你一条静止的船上跳跃时所跳过的距离完全相同。也就是说，你向船尾跳时并不比你向船头跳时——由于船的迅速运动——跳得更远些，虽然当你跳在空中时，在你下面的地板是在向着和你跳跃相反的方向奔驰着，从挂在天花板下的装着水的酒杯里滴下的水滴，将垂直地落在地板上，没有任何一滴水落向船尾方向，虽然当水滴还在空中时，船仍在向前走。苍蝇将继续自己的飞行，在各个方向都一样，决不会发生苍蝇（好像它们疲倦地跟在疾驶着的船后）集聚在船尾方向的情形。”

这个原理叫做伽利略相对性原理，也叫力学相对性原理。

伽利略相对性原理，当时也曾回答了哥白尼地动学说反对者对地动说的责难，因为生活在地球上的人无法通过地球上发生的力学现象来判断地球是静止还是在运动的。

爱因斯坦的相对论把这个结果推广，并断言，在一系统（如车或船）内部所作的任何实验（不论是电学的、光学的或其他实验），都不能决定这系统的等速直线运动状况。

3. 描述高速运动的方法 ——相对论时空观

19 世纪中、后期，由于人们对电磁学（包括光学）的研究不断深入，将牛顿的绝对时空观与力学相对性原理推广来说明电磁现象时，出现了种种矛盾与混乱。

由于麦克斯韦建立了电磁场理论，并预言了电磁波的存在。然而，当时的电磁理论是建立在“以太”概念基础上的。所谓“以太”是假想的一种充满整个宇宙空间的特殊介质，电磁场（包括光在内）只不过是这种特殊介质——“以太”的弹性表现，光和各种电磁波都是“以太”中的弹性波，就像声波是空气中的弹性波一样。从空间性质来看，一切物体都在“以太”中运动，而“以太”自己却保持不变，这样一来，“以太”就具有绝对空间的性质。麦克斯韦电磁理论只对“以太”这个参考系成立。“以太”充满宇宙，地球就在“以太”中运动，因此人们就想办法测量地球相对“以太”的运动速度。这项工作从 19 世纪中期开始，不同学者以不同方式来寻找，其中最著名的是 1887 年的迈克尔逊—莫雷实验。但是无论实验在不同的季节和不同的地点进行，还是为相同目的而进行的其他实验，结果都是一样：探测不到地球通过“以太”的运动。

迈克尔逊—莫雷实验的负结果得出两个结论：第一实验表明“以太”没有可观测的性质，使得“以太”的假设站不住脚，一度被人重视的概念落得被遗弃的结局。第二提出了一个新的物理原理，在自由空间中光速处处相同，

与光源及观察者的运动无关。

在分析了不存在普遍适用的参考系所包含的物理后果，1905 年爱因斯坦创建了狭义相对论，处理有关惯性参考系的问题。

狭义相对论是以两个假设为基础的。

第一个假设是：在所有互相以恒定速度作相对运动的参考系中，物理定律可用形式相同的方程式来表示。这一假设表明了普适参考系是不存在的。如果物理定律对于作匀速相对运动的不同的观察者具有不同的形式，那么，就可由这种差别来确定哪一个物体在空间是“静止”的，哪一个是“运动”的。但是，由于没有普适的参考系，这种区别在自然界不存在，所以才有上述假设。

第二个假设是：对所有观察者来说，在自由空间中光速为常数，与观察者的运动状态无关。这个假设是直接来自迈克耳—莫雷实验以及许多其他实验得来的。

初看起来，这些假设并不过分。实际上，它们几乎完全推翻了我们日常经验所形成的直观的时空概念。用一个简单的例子可以说明这一点。

设有两只船 A 和 B，A 船静止在水中，B 船以恒定速度运动，当 B 船掠过 A 船旁的瞬间，两船间发出一闪光。根据狭义相对论的第二个假设，光由闪光点均匀地向各个方向传播，根据狭义相对论的第一个假设，对于位于两船中的两个观察者来说，光的传播速度是相同的，两只船上的观察者一定会看到相同的现象。尽管由于 B 船作等速运动，B 船中的观察者相对于闪光发射点的位置在变化。但二人都看到一个以自身为中心的向外扩展的光球。

让我们作一个熟悉的类比，设在晴朗的天气里，平静的湖面上有两只船，当它们会合时，有人自一船向水中投下一石块。于是有一圆形波纹向四周扩展开来，波纹的形状对每只船上的观察者看来是不同的，只需看一下他是否处在波纹中心，每个观察者就可以断定他是否相对于水运动。水本身是一个参考系，在其中运动的船上的观察者测出相对于自身的波速，在不同方向上有不同的大小，这和静止的船上观察者情况不同，他测出波速各方向是均匀的。在水中的运动与波动，和在空间的运动与波动完全不同，认清这一点是很重要的。水本身就是一个参考系，而空间则不是，水中的波速随观察者的运动而异，空间中的光波速度则不随观察者的运动而变。

要解释两只船上的观察者看到同样的扩展的光球这一事实的唯一办法，是认为，在他人看来，每个观察者的坐标系要受到他们的相对运动的影响。

在狭义相对论的时空观认为：(1)不存在绝对的空间和绝对的时间。(2)空间、时间与在其中运动的物质存在着密不可分的联系。(3)空间和时间是紧密相联系的。

4. 时间的奥秘 ——相对论推论之一

从中世纪以来，人们对时间和空间的认知受着牛顿的绝对时空观影响，认为空间与时间与物质运动无关。时间可以选择任意时刻作为标准计时的起点，可以选择统一的时钟作为空间各点的计时工具。根据直观经验，时间间隔是绝对量，只要所有时钟都对准了，同时亦是绝对的。因此我们从不怀疑，从过去、现在到将来，时间是与外界事件无关地流逝着，时间是绝对的。你

可以说某年某月某日下午 7 时整，你在北京某地，你的朋友在上海家中同时进晚餐，不管是在地面的人看，还是在火箭上的人看，都是同时的。

但是 20 世纪以来，人们发现真空中的光速是一切可能的物理速度的上限这一事实。亦发现了高速（接近光速）运动的物体，在高速运动下，你怎样把钟校准呢？具体的说，在地面上所有的钟（静止在地面上），我们可以用无线电联系把钟校准，在高速运动的火箭中，你怎样把那里的与地面上的钟一齐校准呢？

设想有两艘长形的载人飞船，他们以同一固定的速度朝相反方向飞行，每艘飞船的头尾两端各有一个固定不动的观察者，现在我们来看看这个飞船的时间怎样才能彼此对准。首先每艘飞船上的两个人的钟要彼此对准。我们可以在飞船的正当中（这可以用尺测量好）发出一个光信号，当这光信号从飞船正中传到它的头尾两端时，每一端的观察者就都把自己的表拨到零点。这样这两个观察者就把他们自己参考系中的时间标准确定下来了。当然这是从他们自己的观点出发来说的。

现在他们决定看看他们飞船上的时间记录是不是同另一艘飞船上的记录相符，比如说，当处在不同火箭上的两个观察者彼此擦身而过时，看看他们的表是不是指着同一个时刻？这可以用下面的方法来检验，他们在每一枚火箭的几何中点插上一根各自带异号电的导体，让两艘飞船互相掠过时，在两根带异号电的导体间跳过一个电火花，这样一来，光信号便同时从每一艘飞船的中点向两端传播。由于光信号的传播速度是有限的，所以当光信号传到观察者那里时，这两艘飞船的相对位置已经改变了，结果观察者 A_2 。（飞船 A 尾的观察者）和 B_2 （飞船 B 尾的观察者）要比观察者 A_1 和 B_1 （各自飞船头上的很明显，当光信号传到 A_2 时， B_1 还远远落在 A_2 的后面，因此他需要再过一段时间才能收到这个信号。这样一来，如果即按规定的办法在信号到达时把他的表拨到零点，那么观察者 A_1 必定会说，观察者 B_1 的表慢了。

根据同样的理由，观察者 A_1 一定会得出结论说，比他先收到光信号的 B_2 表走得太快了。既然飞船 A 上的两个观察者，根据他们对同时性的规定，认为他们两人的表是对准了的，所以他们两人就会得出一致的意见说：飞船 B 上的两个观察者的表走得不一樣。同样飞船 B 上的两个人根据完全相同的理由，也一定认为他们两个人的表是对准了的，而认定飞船 A 上的两只表走得不一樣。飞船 A 上 A_1 、 A_2 同时收到光信号，在 B 上观察者认为不同时，飞船 B 上 B_1 、 B_2 同时收到光信号，在 A 上观察不同时。所以绝对同时的概念就不复存在了。在某个参考系中（如飞船 A 中）的同一时间，但在不同地点发生的两件事，在另一个参考系（如飞船 B）看来，将变成被一定时间间隔分开的两件事。

同样，在高速运动时，一个需要花时间间隔的过程，在一个作相对运动的参考系中对它进行观察时，它所花的时间要变长一些，这就是相对论中的“时间延缓”。时间延缓是时空的一个基本属性，与事件发生的过程无关，所有发生在运动物体上的物理过程都有这个延缓。所以，时间不是像牛顿所说那样是绝对的，时空是有联系的，而且与物质运动有关。

因果关系，在相对论中仍然成立，即因发生在前，果发生在后。如果两件事无因果关系，则在不同参考系中看，它们前后次序是可能颠倒的。

那么，是不是说坐在高速运动的飞船上，人的寿命会变长一些呢？回答

是肯定的，我们将在再下一个题目中讨论这个问题。

5. 长度收缩 ——相对论推论之二

在我们的日常生活中，物体的尺寸是一定的，不会因为它运动而改变，比如火车的长度，不论它是停在站上，还是在走着，车身长度是一样的。这就是牛顿的绝对时空观，他在他的《自然哲学的数学原理》一书中写道：“绝对空间，就其本性而言，是与外界任何事物无关，而它永远是相同的和不动的。”但是在 20 世纪开始后，人们开始了解到，许多实验物理的结果与牛顿的时空观有矛盾，其中最重要的实验结果是，人们发现了真空中的光速是一切可能的物理速度的上限这样一个事实。也就是说，光在真空中的速度是永远严格不变的，不管用什么系统来测量它，也不管发光的光源是不是在运动，结果都是如此。在低速时，我们知道船在江河中航行的速度，顺水时是船的速度与水流速度之和，逆水时是船的速度与水流速度之差。但是当物体以接近光速在运动时就不是这样。例如我们设想有一列跑得非常快的火车，它的速度等于光速的 $3/4$ ，再设想有一个人在火车上朝火车头跑去，他的速度也等于光速的 $3/4$ ，按照经典的速度相加定理，这两个速度合成的总速度应该等于光速的 1.5 倍，因此，那个在火车上跑的人应该能够赶上并超过路边信号灯所发出的光速。但是实际情况是：火车上跑的人的合成速度必定小于光速，它不能超过速度的极限值——光速。

爱因斯坦于 1905 年根据两条基本假设：（1）相对性原理，即所有惯性系都是等价的，和（2）光速不变原理，提出了狭义相对论。它使人们对时空的认识发生了重大的变化，它提出了时间、空间与物质运动密切相关，时间和空间不再具有绝对的意义，它们都是和物质密不可分的相对量，对它们的测量不再是纯力学行为，而是与光的传播相关的。根据相对论，运动的尺子要缩短。

设有两个惯性坐标系 S 和 S' ，例如一个固定在地球上，一个固定在高速运动的火箭上，火箭 S' 相对地球 S 在 X 方向以等速 U 飞行，在地面，即 S 坐标系中有一钢尺，它静止时的长度为 l_0 ，在 S 系中它的两端坐标为 X_2 与 X_1 即

$$l_0 = X_2 - X_1$$

现在我们在 S' 系（火箭上）来测量此钢尺的长度，在 S' 坐标系中，在同一时刻，即 $t'_2 = t'_1$ 时，测得钢尺两端在 S' 坐标系中的坐标为 X'_2 与 X'_1 ，所以在 S' 系中测得钢尺的长度 l' 为

$l' = X'_2 - X'_1$ 因为两坐标系间的变换关系，在高速运动时符合洛伦兹变换，按洛伦兹变换关系

因为在 S' 坐标系中测量钢尺两端的空间坐标，必须是同时进行的，即 $t'_1 = t'_2$ ，所以两式相减得

$$X_2 - X_1 = (X'_2 - X'_1) / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

$$\text{故 } l' = X'_2 - X'_1 = (X_2 - X_1) \sqrt{1 - v^2 / c^2} = l_0 \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

由此可见，固定在坐标系 S 上的钢尺，由 S' 系来测量，量得的长度要

缩短 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 倍。

现在我们反过来，如将钢尺固定在火箭上即固定在 S' 系上，钢尺相对火箭静止，量出它的长度，即钢尺两端 X' 坐标为 X'_2 与 X'_1 之差。

$$l' = X'_2 - X'_1$$

在这里 l' 就是钢尺静止时的长度 l_0 。在 S 坐标系中来测，测出钢尺两端的坐标为 X_2 与 X_1 ，所以钢尺的长度为

$$l = X_2 - X_1$$

$$\text{按洛伦兹变换 } X'_1 = (X_1 - Ut_1) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$X'_2 = (X_2 - Ut_2) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

在 S 坐标系中测量钢尺二端的空间坐标，当然也必须是同时进行的，即 $t_1 = t_2$ ，这样一来得到

$$X'_2 - X'_1 = \frac{X_2 - X_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\text{即 } l' \sqrt{1 - v^2/c^2} = l$$

由此可见，反过来设想，钢尺长度还是缩短而不是增长，这就是说，在两个相互作用匀速直线运动的坐标系中，都认为对方钢尺缩短了 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 倍。由此可以得出结论：从与物体有相对速度 U 的坐标上所测得的沿速度方向的物体长度 l ，总是比与物体相对静止坐标系上测得的长度 l_0 （称为固有长度）为短： $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$

从相对性原理来说，谁在运动，是相对而言的，因此，以上结果也可理解为：一个物体当它处于静止状态时，测得的长度为 l_0 ，当它以速度 v 运动时，在原来坐标系测得长度为 $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ ，在这个意义，我们通常说运动物体要缩短。

如果一个运动员以接近光速的速度运动，那么这运动员的身体厚度要缩小，也就变成为一个瘦子了。

当然我们从 $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 中可以看出当速度 v 于光速 C 时，即低速时， $l \approx l_0$ ，长度就不变了。

6. “洞中方几日，世上数千年” ——李生子佯谬

从狭义相对论的观点，同时是相对的，像我们在前面问题中所说，飞船 B 中的 B_1 、 B_2 两观察者的表对准了，即同时了，在飞船 A 中的观察者来看，它们的表没有对准，即两者的表不同时。另外得出运动的钟要变慢。

设有两个双生子甲和乙，甲留在地面上不动，乙乘飞船作宇宙航行，乙以速度 v （设 $v = 0.9995c$ ）历程 l 到达终点后，速度突然反向，返程归来与甲相遇。从甲看来，在这过程中甲所经历的时间为 $2T = 2l/v$ （突然反向，所经时间很短，所以不计在内）。根据狭义相对论，

乙所经历的时间应该是 $2T' = 2T \sqrt{1 - v^2 / c^2}$

如设 $2T=30$ 年

$$\text{则 } 2T' = 30 \sqrt{1 - \left(\frac{0.9995c}{c}\right)^2} = 30 \times 0.03 = 0.9 \text{ 年即10个多月, 即空中10}$$

个月地上已过 30 年, 当乙返回地面与甲相遇时, 乙比甲年青许多。

下面我们仔细来看一下整个过程的时间关系。

设甲所在地面为参考系 S , 在由起点 A 到终点 B 的出航途中, 乙所用的飞船参考系为 S' , S' 相对于 S 以速度 V 沿 AB 的正向运动, 航程 $AB=l$, 在由 B 到 A 的返航途中, 乙所用的飞船参考系 (为区别于出航情况) 称为 S'' , S'' 相对于 S 以速度 V 沿 AB 的负方向运动。

先分析出航过程, 在 S 系中有一系列对准好的钟, 设在 A 处有钟 C_1 , 在 B 点处有钟 C_2 , 在 S' 系有钟 C' 随乙一起运动, 当乙从 A 到 B 时, 从甲看来, 乙的速度为 V , 旅程为 l , 在这段过程中甲所经历的时间 (即钟 C_1 , 或

钟 C_2 所走的时间) 为 $T = \frac{l}{V}$, 而根据运动的钟变慢, 乙所经历的时间 (即钟 C' 所走的时间) $T' = T \sqrt{1 - v^2 / c^2}$, 但从乙看来, 根据狭义相对论, 钟 C_2 。

与钟 C_1 并未对准, 钟 C_2 比钟 C_1 快了一段时间 $T'' = \frac{V}{C^2} l$, 因此当到达 B 时,

虽然钟 C_2 所指示的时间为 $T = \frac{l}{V}$, 而从乙看来, 在此过程中甲所经历的时间

为 $T - T'' = \frac{l}{V} \left(1 - \frac{V^2}{C^2}\right) = T' \sqrt{1 - v^2 / C^2}$, 所以, 在出航过程中, 从乙看来,

甲 比 乙 年 青 , 甲

增长的年龄为 $T' \sqrt{1 - v^2 / C^2}$, 为乙自己所增长的年龄 T' 的 $\sqrt{1 - v^2 / C^2}$ 倍。

而从甲看来, 乙比自己年轻, 乙所增长的年龄 $T' = T \sqrt{1 - v^2 / C^2}$ 为自己所增长年龄 T 的 $\sqrt{1 - v^2 / C^2}$ 倍。这是符合相对论的相对性原理, 甲、乙双方都认为对方在运动, 而运动的钟变慢。

在返航途中, 乙由 S' 系转到 S'' 系, 在 S' 系中, 乙看到钟 C_2 比钟

C_1 快了一段时间 $T'' = \frac{V}{C^2} l$, 但在 S'' 系中, 根据相对论, 乙却看到钟 C_1

比钟 C_2 快了一段时间 $T'' = \frac{V}{C^2} l$ 。因此当飞突然反向, 当乙从 S' 系

转到 S'' 系时, 乙要观察到甲处钟 C_1 突然多走了 $2T'' = \frac{2V}{C^2} l$ 这么多时间,

即观察到甲的年龄突然增长 $2T''$ 。于是乙在刚开始返航时, 即刚由 S' 系转到 S'' 系中时, 就发现甲的年龄, 从乙乘宇宙飞船和甲分手时算起, 又增大了 $(T - T'') + 2T'' = T + T''$, 而乙自己的年龄增大了 $T' = T \sqrt{1 - v^2 / C^2}$ 。

这时, 也就在这时, 乙发现甲比自己老了。在由 B 返回 A 的过程中, 乙仍发现甲的年龄增长比自己小, 甲所增长的为 $T - T''$, 乙所增长的为 T' , 和出航过程完全一样。但在整个宇航过程中, 乙所观察到的甲的年龄增长比他自己的年龄增长大。在整个宇航结束时, 即乙与甲在地面上再度相遇时, 乙所

观察到的甲的年龄总的增长数为

$$T - T'' + 2T'' + (T - T'') - 2T = 2\frac{1}{v}$$

而乙自己年龄总的增长数为 $2T' = 2\frac{1}{v}\sqrt{1 - v^2/C^2}$ ，所以乙比甲年轻了许多。

7. 物体的质量是不变的吗

—动质量问题

我们知道惯性是物体固有的运动属性，那么，任何物体的惯性都一样吗？我们发现不同物体的惯性不同，亦就是说不同物体要改变它的运动状态的难易程度不同，例如火车要它开动与停下来都比汽车要难得多，亦就是说火车与汽车的惯性不一样。我们用质量作为量度物体惯性的物理量。质量大的物体要改变它的运动状态比质量小的物体要难。

那么物体的质量会变吗？根据我们日常生活中的知识，一定会回答物体的质量是不会变的。例如一火车的质量是 30 吨，不管它是静止着还是在运动着，它的质量都是 30 吨，我们日常生活所遇到的运动物体的速度，一般是每秒几百米到每秒几公里，即使是发射的人造卫星，也只有每秒 7.9 公里，在这样低的速度下运动的物体，它的质量改变是微乎其微的。但是近代物理发现，当物体的运动速度接近光速——光的传播速度为每秒 30 万公里，即 3×10^5 公里/秒时，物体的质量要随速度的增加而增加，设物体静止时的质量为 m_0 ，它以速度 v 运动， c 是光速，那么这时的质量 m 为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

因此我们可以说物体的质量是能够变的。但是质量增大只是在速度近于光速时才明显。当速度为光速的 1/10 时，质量增加只有 5%；但是当速度为光速的 9/10 时，质量增加超过 100%，只有量子粒子，诸如电子、质子、介子等等才具有这样高的速度。才能测量到质量的改变。在历史上，首先验证质量改变的是比希雷，在 1908 年发现快速电子的电荷与质量的比值（即 e/m ）比低速电子小，如果把实验结果列表如下，其中电子的静止质量 $m_0 = 9.109 \times 10^{-31}$ 千克， e 是电子电量 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库仑，则

$\frac{v}{c}$	$\frac{e}{m}$ ($\times 10^{11}$ 库仑 / 千克)	$\frac{e}{m_0}$ ($\times 10^{11}$ 库仑 / 千克)
0.3173	1.661	1.752
0.3787	1.630	1.761
0.4281	1.590	1.760
0.5154	1.511	1.763
0.6870	1.283	1.767

从表中可以看出 $\frac{e}{m}$ 随 v 增加而减少，主要是因为 m 随 v 增加而增大，而去 $\frac{e}{m_0}$

确实接近于常数。

质量随速度改变的公式，现在已为很多实验所证明，从而确认该式是物

理学的基本公式之一。

8. 物质存在的最小单位 ——分子的结构

我们眼、耳、鼻、舌、身所感受的千千万万种物质，都是由不到一百种原子组成的。一定种数和数目的原子，按照一定的比例和方式化合成分子，分子再堆集成物质。物质就是通常做成物体的材料。对任何东西你所能得到的最小数量就是一个单位分子，因为如果你把一个分子分成它的组成成分——原子，那就不再具有原来的化学性质了，它可能会变成性质不同的、相当不稳定的物质。例如填充氢气球的氢，是由许多氢分子集合而成的，每个氢分子是由两个氢原子化合而成的。水是由两个氢原子和一个氧原子组成的分子，水分子的 3 个原子结合成等腰三角形，等腰三角形的顶角为 105° ，其结构形式，在室温下，水是一种流体，而氢和氧都是气体，若把像水这样的分子分成它的原子，那可就不一样了。

“ 化学反应就是原子重新结合成新分子的变化，在化学反应中；旧分子已经打碎，但是原子则没有被打碎，整个原子从旧分子转移到新分子中，所以原子是物质在化学反应中不会分割的最大单元，分子则是物质能够独立存在的最小单位。

分子大小的范围是：小到像氢分子和水分子那样，只有很少几个原子；大到像大的有机分子那样，是几万个原子的复杂组织。我们可以把原子看作是分子的基本建筑材料，而分子则是微观世界的楼房和机器。有些分子结构是原子高度重复、循环的组织结果，形成晶体或金属——一种刚性的固定框架。这就是固体，另一些分子摆脱了与它们邻居间化学键的结合，并以随机方式自由运动，从而构成气体。仅部分地摆脱化学键结合的分子可彼此滑过对方，这就形成液体。

也许有人要问：为什么两个氢原子而不是 3 个或 4 个氢原子结合成一个氢分子呢？原来它是与原子中的电子状态有关的，电子不仅绕原子核运动，还会绕通过电子中心的轴线转动——称为电子的自旋，就好比地球除绕太阳公转外，还绕通过地球中心并对着北极星的轴线自转。电子带负电，电子自旋使得电子像个小磁铁，两个电子的小磁铁南北极对着排列时，它们同时出现在氢分子的 2 个核之间的机会就大大增加，把两个氢核牵引在一起构成氢分子。每个氢原子只有一个电子，就好像它只有一只手能够同另一个氢原子的手拉住，没有手再与其他氢原子拉手，所以只能是两个氢原子结合成一个氢分子。

我们吃的食盐分子，叫氯化钠分子，它们是用另一种方式结合的，钠原子丢失一个电子变成带正电荷的钠离子 Na^+ ，氯原子得到钠丢失的电子，变成带负电荷的氯离子 Cl^- ，正负离子靠库仑力吸引在一起，食盐是固体，是由许多氯化钠分子聚集在一起的，仔细观察食盐块是呈立方形的，叫食盐晶体，它是由氯离子和钠离子有规律交替地紧密堆集起来的。

分子还可以用另一种方式聚合在一起，即通过所谓氢键，水就是由水分子通过氢键连成大小不等的分子集团的。氢键普遍地存在于自然界中，我们身体里的蛋白质分子是很大的分子，它主要由碳、氢、氧、氮等原子化合而成的。蛋白质分子像扭着的橡皮梯子，梯子的横杆就表示氢键。

由一个原子构成的分子称为单原子分子，如氦分子；由两个原子构成的分子称为双原子分子，氢分子和氧分子都是双原子分子；由三个或三个以上原子构成的分子称为多原子分子。水分子是三原子分子，做肥料用的氨分子是由三个氢原子和一个氮原子构成的四原子分子；大的有机分子可有几万个原子构成的，这些都是多原子分子。

我们知道，原子中的电子在不停地运动，原子、分子也在不停地运动，分子运动有三种形式：平动、转动和振动。平动就是整个地移动。风就是空气分子平动而形成的。分子中各个原子在其平衡位置上往复作小范围的移动，称为分子振动，所谓原子的平衡位置就是原子在分子中的平均位置。燃烧煤生成的二氧化碳分子，是由一个碳原子和二个氧原子结合成的，三个原子排成一条直线，它们可以作弯曲振动和伸缩振动，二氧化碳激光器就是利用二氧化碳分子的振动运动实现的。分子的转动，就是分子绕通过其自身内某一点的轴线转动，像自行车轮绕通过中心的轴转动一样。目前正在利用分子的转动运动实现远红外激光器，这种激光器对于微波通讯和红外遥感探测等方面都很有用处。

分子的微观世界是一个刚开始揭示的新前沿，目前科学家们已研究出了分子结合的方法，并有了计算机协助处理大批量资料工作，这对确定大分子结构这项工作很有帮助，开发极大分子的世界还刚刚起步，我们相信，用计算机和其他技术武装起来的科学家们在下个世纪将会推动功能和宗旨上都更卓越的、时兴的分子大厦。

9. 在原子的世界里 ——原子的结构

很久以前，人们就开始猜想表面上看来是连续的物质，具有一定的微观结构，及至一个半世纪以前，这种猜想一直没有具体的形式。当 19 世纪的科学家们采纳化学元素是由原子组成这一概念时，他们对原子本身实际上毫无所知。1895 年电子被发现，并认为所有的原子都含有电子，这对原子结构提供了第一个重要的信息，电子带负电荷，而原子本身是中性的；因此每个原子必定含有足够的带正电荷的物质，以与电子的负电荷平衡。此外，电子比原子轻几千倍，这表明原子中带正电荷的成分几乎提供了原子的全部质量。1898 年汤姆逊假设原子是一个内部嵌埋着电子的带正电物质的均匀球体，在当时，他的假设看起来是完全合理的，他的模型被称作汤姆逊葡萄干布丁（类似有葡萄干的面包）的原子模型。

要知道葡萄干布丁内是些什么东西，最直接的方法就是设法插入其中，盖革和马斯登根据卢瑟福的建议于 1909 年进行的实验中，用某种放射性元素自发辐射的快速 α 粒子（即氦的原子核）作为探针，盖革和马斯登把放射粒子材料样品置于铅屏后面，铅屏上有一小孔，以产生一束狭窄的 α 粒子束。将这束 α 粒子垂直地投射到薄的金箔上，金箔的另一侧，放置一个可移动的硫化锌屏，当 α 粒子打到它上面时，便可产生可见的闪光。人们曾预料，如果汤姆逊葡萄干布丁式的原子模型成立的话，大多数 α 粒子会沿直线通过金箔、其余的至多只发生轻微的偏转。

盖革和马斯登实际得到的结果是：大多数出射的 α 粒子的确设有发生偏转，有些则以很大的角度散射，极少数（八千分之一）甚至向后散射。因为

α 粒子相当重（它的质量为电子质量的七千多倍），而实验中所用的 α 粒子是以极高的速度飞行的，显然，只有很强的力作用在 α 粒子上，才能使它产生这样明显的偏转。当卢瑟福知道这个结果时觉得实在难以置信，他经过长时间的思考，进行了严格的数学推导，终于在 1910 年，即在马斯登的实验之后一年多，作出了原子有核的决断，认为原子是由很小的原子核（原子的正电荷和几乎全部的质量都集中在它身上），和与核有一定距离的电子组成的。

利用卢瑟福散射实验，当 α 粒子与原子核对头相碰时的最小距离可以估计出原子核大小的上限、计算结果表明，原子核的半径约为 10^{-14} 米，即一万个原子核排起来约与指甲盖那么宽，而原子的半径约为 10^{-10} 米，所以原子核占整个原子半径的 $\frac{1}{10000}$ 以下。

在卢瑟福原子模型中，核外电子将是怎么样呢？如果电子是静止的，则电子将被原子核所带的正电的静电力吸至原子核中，所以静止是不可能的。如果电子绕核运动，像行星绕太阳运动那样，从动力学的角度看，电力在这里作向心力，这是可能的。但是，电磁理论指出，加速电荷要以电磁波的形式辐射能量，作曲线运动的电子要受到加速，因而要不断地损失能量，将很快地以螺旋形降落到原子核上。无论什么时候作出的实验检验，都已表明电磁理论的预言总是和实验相符的，同时各种原子亦是稳定存在。这一矛盾只能表明：在宏观世界里适用的物理规律——经典物理学，在原子的微观世界里不再成立了。经典物理学失败的原因在于它只是片面地采用“纯”粒子和“纯”波动的抽象概念来研究自然界。如果我们研究的是原子世界，就必须把波的粒子行为和粒子的波动行为都考虑在内，在原子的微观世界里，它们服从量子理论。

原子中最简单的是氢原子，它中间是个只有一个质子的原子核，核外有一个电子，电子并不像行星围绕太阳那样在某一轨道上运动。由于电子既具有粒子性又具有波动性，我们只能求出在某处找到电子的几率，在图中通过一些雾点表示几率分布的大小。在几率密度大的地方，雾点要密；反之雾点就稀，这种雾点的疏密分布俗称电子云。电子云并不表示电子实际上是云状的，电子云是电子几率分布的一个形象化名称。

在自然界中有 92 种元素（如果加上人工方法获得的元素，总数已达 110 多个元素），它们的物理、化学性质千差万别，当然其中也有一些它们具有相似的物理、化学性质。门捷列夫在前人工作的基础上，对各种元素的化学和物理性质，经过长期研究后，于 1869 年发现，如果将元素按原子序数排列起来，则元素的物理、化学性质呈现出周期性的重复，他根据元素的这种周期性，将元素分成 7 个周期，列出一个周期表。

为什么元素的性质会呈现周期性的变化呢？这与原子中的电子的排列与分布有关。

原子中的电子是以一定的壳层与分壳层排列的，它的第一壳层可以排 2 个电子，第二壳层 8 个，第三壳层 18 个，第四壳层 32 个，第五壳层 50 个，第六壳层 72 个电子等等，由于电子的排列需满足一系列规则，所以形成第一周期 2 个元素氢与氦，第二周期 8 个元素，第三周期 8 个元素，第四周期 18 个元素，第五周期 18 个元素，第六周期 32 个元素，第七周期尚未填满。从周期表中我们可以得出以下的结论。

（1）元素的周期性，可以按照原子核电荷增加的次序和电子按一定规律

分布来解释。

(2) 元素的化学性质, 主要是由原子最外壳层中的电子数, 即价电子来决定。8 个价电子的惰性气体原子特别稳定。一个价电子的碱金属原子(如锂、钾、钠等元素), 很容易失掉这个电子而成为正离子, 7 个价电子的卤素族元素(如氟、氯、溴、碘等元素), 很容易从外界掠取一个电子以满足 8 个电子数而成为负离子, 所以碱金属和卤族元素都是最活泼的化学元素。

(3) 化学元素的性质与其原子核的电荷数有周期性的关系。

10. 亚核粒子家族地发现 ——介子的发现与强子

我们知道, 原子核内部, 质子之间有静电斥力, 显然, 这种斥力不能使原子核构成一个稳定系统, 要使原子核成为稳定系统, 在核子之间一定存在着一种更强的相互吸引力, 这种力称为核子力, 简称核力。核力比电磁作用力强得多, 大约为电磁作用的 10^3 倍。那么这样强大的核力是怎样产生的呢?

日本理论物理学家汤川秀树以类比为基础提出: 既然有一种量子粒子(光子或光粒子)是与束缚电子和原子核的电磁力相联系的, 那也应该有一种量子粒子与核力相联系。这种粒子同质子和中子之间的相互作用必定很强, 比光子与电子的相互作用强数百倍, 此外, 与这种新粒子相联系的核力只能在很短距离内有强烈作用。他以这样的推理得出结论, 核力是因一种具有与质子中子有强相互作用的新的重粒子所致, 它称为介子, 后来就用此名称来代表亚核粒子的整个家族。

1946 年, 汤川秀树从理论上预言的粒子, 拉泰斯等人在宇宙射线(高能粒子的天然源泉)中被发现了, 他的理论被证实了, 确实有一种与核力相联系的量子粒子存在, 这种新粒子用希腊字母 π 表示, 俗称 π 介子或简称 π 子, 它的质量和相互作用刚好符合汤川秀树所预言的介子的要求。1948 年, 当有了新的回旋加速器以后, π 子已能在实验室里人工创造出来——真实的 π 子从高能粒子束产生的核子反应中飞了出来。 π 介子有带正电荷的, 有带负电荷的, 还有中性的。

在 π 介子被发现后不久, 罗奇斯特和布特拉于 1947 年用云雾室发现了一个可衰变成两个相反电荷的 π 介子的中性粒子, 开始称为 θ^0 粒子, 后来统一称为 K 介子, 以及 1949, 1953 年相继发现了其他 K 介子, K_1^0 的寿命是 1×10^{-10} 秒, K_2^1 的寿命是 6.1×10^{-12} 秒。

1947 年以后, 在宇宙射线和用高能加速器做的核碰撞实验中陆续发现一些质量超过核子(质子、中子)质量的新粒子, 称为超子, 它们的寿命大约在 10^{-10} 秒 $\sim 10^{-14}$ 秒。

1952 年以后, 在高能加速器实验中还发现某些量子粒子, 除了有基态(最低能量状态), 还有共振态(也称激发态, 即能量较高的状态), 这些共振态的粒子比基态粒子的质量大得多, 寿命、自旋数也不一样。加上共振态粒子到目前为止, 这些粒子已达 300 余种, 比化学元素的种类还要多, 这些介子、核子、超子统称为强子——来源于希腊字“强大”——因为它们都有强的核相互作用。

11. 强子是怎样组成的

——夸克模型

1963 年，摩雷·盖耳曼来到哥伦比亚大学做报告。由于受哥伦比亚的理论物理学家罗伯特·塞伯的提问和建议的启发，盖耳曼提出了关于强子的子结构的想法。盖耳曼把这种子结构称为“夸克”(Quark)，“夸克”是一个德文词，是指制乳酪的凝乳。另一种说法，“夸克”是海鸟的叫声。

我国物理学工作者在 60 年代亦提出了“层子”模型，把这个结构称为“层子”。

强子由夸克组成，这是强子之谜的谜底。但夸克又是什么呢？夸克是类似电子的点量子粒子，也具有同电子样的 $1/2$ 自旋，然而，若是同电子的单位电荷相比，它们的电荷是分数值，另外与电子不一样，到现在为止，还没有人见到过一个自由夸克。

夸克模型的基本思想是，一切强子都是由 3 种夸克和它们的伙伴 3 种反夸克（即夸克的带异号电荷的反物质）所组成。这 3 种夸克称为“上夸克”、“下夸克”和“奇异夸克”。“上”、“下”和“奇异”，是夸克的味道——这是“味道”一词的特殊用法。物理学家们出于一时的古怪念头，曾经用“巧克力”、“香草”和“草莓”来称呼这 3 种夸克，而不是用的“上”、“下”和“奇异”，因而才使用“味道”这个词来表示。但形容冰淇淋的术语未被普遍接受，而“味道”的用法，作为区分这 3 类夸克的类别标签都被采纳了。

物理学家们发现，用字母给粒子命名是方便的，于是他们把上、下和奇异夸克分别用 u 、 d 和 s 表示，而 3 种反夸克则用 $\bar{u}$ 、 $\bar{d}$ 和 $\bar{s}$ 表示。可以设想把夸克当成小的点粒子，以强力束缚在一起而构成强子。它们像是一套组合积木，其零件可按特定的组装规则来组合而构成强子。

由夸克构成强子的规则非常简单。重子是强子的一个大的部分，其自旋为 $1/2$ 、 $3/2$ 等等，这些重子是 3 个夸克的组合体。

qqq

这里 q 代表 u 、 d 或 s 。反重子则由 3 个反夸克组成：

$\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

强子的另一个大的部分即介子是具有 0、1、2 等等自旋的强子。这些介子是一个夸克和一个反夸克的组合体：

$\bar{q}q$

根据这些规则，强子都是具有整数电荷 0、 ± 1 、 ± 2 的夸克组合体，这些电荷刚好是强子所该有的。最后一条规则是：你把夸克组合在一起时，只能是使其总电荷成一个整数，就是这些利用 u 、 d 和 $\bar{u}$ ，以及上述规则，你可以组成一切强子，而且也只能是强子。

虽然夸克模型只用 3 种味道（上、下、奇异）的夸克已能解释当时已观测到的强子，可是一些理论物理学家们不满足，他们早在 60 年代就曾预料还有未被发现的夸克，并坚持探索。

大约在 1974 年 11 月美国东、西海岸的两个实验室同时宣布发现了一种新的 J/ψ 中粒子。在美国东海岸的布鲁克海文实验室发现 J/ψ 粒子的，是华裔美籍物理学家丁肇中为首的马萨诸塞理工学院小组。在美国西海岸加利福尼亚州的斯坦福直线加速器中心发现 J/ψ 粒子的，是美国物理学家伯尔顿·利克特领导的合作组。这两组实验工作者彼此独立地发现了一种新介子，即由一个

新的第 4 种夸克——粲夸克和一个反夸克组成的强子。很快从德国的一个实验室传来了证实这一发现的消息。在这种介于发现后不久，在斯坦福又发现了另一种由粲夸克 C 和反夸克 $\bar{C}$ 组成的介子。

到目前为止已发现有六种夸克，它们是上夸克 (U)、下夸克 (d)、奇异夸克 (S)、粲夸克 (C)、底夸克 (b) 与顶夸克 (t)。

夸克是否就是路途的终点了？抑或夸克本身又由更基本的东西组成？这正是现代物理学家要研究的问题。鉴于夸克显然是永远被禁闭在强子之内，故谈论它们能不能再细分，有各种看法。格拉肖认为“如果夸克禁闭的解释是对的，那就提出了一条捷径来结束这种向物质更细致结构的显然是无限的回归。原子可分解为电子和原子核，原子核可分解为质子和中子，而质子和中子则可分解为夸克，但夸克禁闭理论建议这个系列就到此为止了。如果一种粒子是产生不出来的，那就很难想象这种粒子怎么还会有内部结构。”现有的一切证据都支持夸克是物质“岩基”的观点。但这并非定论，还要进一步探索。

12. 量子世界的另一角落 ——电子、 μ 子、中微子、 τ 子等轻子

我们知道，原子有两个基本组元——原子核和围绕它的电子群。电子是怎么回事？它该归到哪儿？物理学家们今天知道，电子是新的一组粒子的头一个成员，这些粒子都有同样的 $1/2$ 自旋，总名称都称为轻子。别的一些轻子的名称是：难找的中微子、 μ （读谬）子和 τ （读托）子。

为什么物理学家们要费事地把轻子同其他粒子，如强子和组成它们的夸克区别开来单独分类呢？强子之间的相互作用是强烈的，这反映了束缚夸克在其内的力是很强的。相反，轻子的相互作用相对较弱，并且构成了量了世界的一个相当大的角落。

轻子和夸克尽管在许多方面是相似的，但轻子不像夸克，它们能以自由状态存在。例如，电子是由弱电磁力约束在原子中的，易于解放出来。物理学家们已能获得自由电子束，自由中微子束和自由 μ 子束。轻子，比如电子，是真实存在于世界上的。

下面我们分别介绍这些轻子：

(1) 电子

基本量子中最引人注目也最易动的是电子，早在 1897 年它就被确认为一种粒子了。它很容易从原子核的束缚中解放出来，在所有带电量子中，它的质量最轻——它是真正“轻快”的轻子。电子技术是人类掌握电子的成果。

在所有基本量子中，对电子是了解得最透彻的。它似乎是一种绝对稳定的粒子。如果我们承认电荷是绝对守恒的（如今多数物理学家都相信的确是这样的），那么，因为电子是具有最轻电荷的粒子，所以它不再能衰变为更轻的粒子了，没有东西能把它的电荷带走。由量子电动力学的理论指出，电子是真正的点粒子，没有进一步的结构。

(2) μ 子

1937 年尼得梅耶和安德生应用核乳胶，与此同时，斯纯特和斯特威生应用云雾室在研究宇宙射线时发现了这种新型的粒子，称为 μ 介子，或 μ 子。宇宙射线是来自宇宙空间的高能粒子流，它的起源目前还不清楚。在初级宇

宇宙射线中质子约占 85. % , α 粒子约占 12.5 % , 其他的原子核约占 1.5 % , 电子约占 1 % 。当初级宇宙射线到达地球的大气层时, 由于与大气层中的原子相碰撞, 要产生大量的新粒子, 称为次级宇宙射线。这部分次级宇宙射线可分两支, 一支射线用 10 厘米厚的铅板即可挡住, 称为软成分, 它们是由电子和正电子组成; 另一支射线可穿透 1 米厚的铅层, 称为硬成分, 即为 μ 子组成。此时此刻, 正有大量 μ 子在你周围飞过并透过你的身体。如果我们以特殊的眼镜装备起来, 就能看到周围 μ 子的径迹, 只要这径迹能延续一分钟, 就能形成围绕我们和透过我们的近乎垂直的致密线条丛。

μ 子同电子一样, 但有一点不同, 即它的质量比电子约大 207 倍, 所以 μ 子是胖电子。另外, 它是不稳定粒子, 它们的平均寿命是 2.2×10^{-6} 秒, 衰变产物之一是电子, 另有两个中性粒子产生, 它们的质量几乎都等于零, 称为中微子。

μ 子有带正电的 (μ^+), 也有带负电的 (μ^-), 二者互为反粒子, 它们除有相反的电荷外, 质量相同, 自旋都是 $1/2$ 。

(3) 中微子

20 世纪 30 年代, 研究原子核放射性衰变的物理学家们碰到了一件苦恼的事, 他们经过精密的测量发现, 原子核蜕变之前的能量比蜕变之后大。这是对神圣的质量能量守恒定律的冒犯。1931 年理论物理学家沃夫冈·泡利假定这是一种难找的新粒子把检测不到的能量带走了。当泡利提出这种假设之时, 听起来好像是一种骗术。但是后来终于直接找到了这些粒子。这些粒子与电子 μ 子不同, 它们没有电荷。费米给它们起的名字叫“小小的中性粒子”——中微子。

中微子确是难找的轻子。它们在质量上比电子轻 (事实上还不清楚它们究竟有没有质量), 并且它们与其他物质只有极其微弱的相互作用。它们常产生于其它粒子的衰变残余物中。例如 μ 子可衰变为一个电子, 一个中微子和一个反中微子。由于它只有极端微弱的相互作用, 所以中微子一旦产生, 就难于使它停止了。它可以不受任何阻挡地穿过任何物质。由于中微子的穿透性如此之强, 因而可以用它们探测质子和中子的深部结构, 以了解许多有关这些粒子内夸克的情况。

物理学家们惊奇地发现, 共有二种中微子, 一种与电子相联系, 而另一种则与 μ 子相联系。他们的名称是电子中微子 ν_e 和 μ 子中微子 ν_μ (ν 读纽)。

中微子还有一个特点是左手性的, 就是中微子的自旋方向和中微子的运动方向间, 顺着运动方向看, 即如图中从下边向右上方向看, 中微子的自旋是逆时针的, 或者以左手的大拇指表示运动方向, 则弯曲的四指为自旋方向, 所以说它是左手性的。多数基本量子都是右手和左手形式的对等混合物, 而中微子不是。

为什么中微子这么古怪? 只有左手性中微子存在, 这一事实揭示了对宇称守恒的背离。宇称守恒法则说: 如果一种粒子是存在的, 那么, 它的镜像 (左手在镜子中的像, 就是右手, 即镜子中左边变为右边, 右边变为左边) 也能存在。左手性中微子的镜像就是右手性中微子, 可那鬼东西就硬是不存在。两位华裔美国物理学家杨振宁和李政道, 从细节上论证了宇称守恒在这里是行不通的, 并建议做一个实验来检验他们的假说。哥伦比亚大学的华裔物理学家吴健雄和她的同事们的实验证明杨、李是对的。杨和李为他们新奇的工作赢得了 1957 年诺贝尔物理奖。

中微子有无质量的问题一直是物理学家关心的问题。1957 年杨振宁、李政道提出的理论要求中微子质量一定为零。可是现在实验认为中微子质量可能不等于零。就理论物理学家方面的推测而言，认为中微子可能有一小点质量。如果真是这样，对研究整个宇宙的宇宙学来说，意义是深远的。如果中微子具有哪怕只是电子质量的一小部分，它们就提供了宇宙的大部质量，据估计将占整个宇宙质量的 90%，这是一种不可见的质量，因为没有人能真正看到这种中微子“背景辐射”。宇宙质量的另外 10%是星座和星系形式的可见物质。中微子由此可看作是宇宙的“丢失质量”——靠这个总量来制止宇宙的膨胀，并最终导致其收缩。中微子可能成为把宇宙维系在一起的胶。1992 年美国科学家的试验表明，有些中微子可能具有 1.7 万电子伏特的质量（即 $0.00033m_e$ ），如果这一点被证实，将对粒子物理学和宇宙演变理论产生深远影响。究竟中微子是否真正有一小点质量？现在正进行着精密的实验以解决这个重要问题。

（4） τ 子

τ （读托）子发现较晚，在 1976 年，斯坦福附近物理学家们在正负电子对撞环里看到了一种奇特的效应，实验组马丁·柏耳认为，这些效应可能由一种新粒子所引起。1977~1978 年，在德国汉堡，用类似的实验设备获得了肯定的证据，很清楚是一种新的、质量很大的轻子，其质量是电子质量的 3500 倍。同电子和 μ 子一样，很可能也有一个无电荷的左手性中微子与 τ 子相联系，虽然对此还没有直接的证据，因为 τ 子是那么重，所以它能衰变为许多较轻的其他粒子加上伴随它的中微子。如果说 μ 子是个胖电子，那么 τ 子就是个胖 μ 子。

到目前为止轻子有电子、 μ 子、 τ 子及它们相随的中微子，如表所示。一切轻子的特点是：从未揭示出它们有任何内部结构，表现为纯粹的点粒子，是真正的基本粒子，而不是复合粒子。

13. 量子相互作用的联系者 ——胶子

物理学家们像剥洋葱头似的已经剥开了物质的 5 个层次即分子、原子、核子、强子、轻子和夸克。另一方面，他们亦寻找物质同物质的复杂相互作用。当我们观察宏观世界时，不出现相互作用的简单图像。但是物理学家们在微观的量子水平（原子和亚原子水平）来观察物质时，发现只有 4 种基本量子相互作用。按它们强度增大的顺序分别为：引力相互作用，导致放射性的弱相互作用，电磁相互作用，以及束缚夸克的强相互作用。每一种相互作用都有一种胶子与之相联系。而胶子的“粘度”就是相互作用强度的量度。

胶子的量子相互作用的一个显著特点，是它们相互作用的强度，决定于相互作用着的粒子的能量。——这一点在最近 10 年内才发现。对当前实验条件能达到的相对较低的能量来说，夸克和轻子的相互作用分出上述引力相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用 4 种不同情况。但是，令人兴奋的一个发现是：在高得多的能量下，这 4 种相互作用的强度（胶子的粘度）会变得相等，它们之间的差别消失了。这 4 种相互作用实际上可能是同一种普遍适用的相互作用的不同表现而已。这种可能性，正是物理学家们长期梦寐以求的统一场论的基础。

要想象量子相互作用是如何进行的，我们从最简单的氢原子讨论起。在氢原子内只有一个电子，通过电场与一个质子结合在一起，这是一个电磁相互作用的例子。老式的概念认为：氢原子有 2 种粒子，1 个质子和 1 个电子，由电场把它们结合在一起。从量子理论产生了对氢原子的新式概念，即质子和电子两种量子相互交换第三种量子——光子。实际上没有什么粒子和场的区别，只有量子。我们可以把质子和电子想象成是 2 个网球运动员，他们打球（光子）在 2 人之间打来打去。这种球的交换把 2 个运动员结合在一起。光子的表现好比一种胶，是把氢原子的两种组成成分连系在一起的，光子是称为胶子的粒子组中的第一例。

由上述可看出，现代关于相互作用概念的中心思想是：相互作用是由量子本身为媒介的。4 种相互作用各有一种称做胶子的量子与之相联系。与电磁相互作用相联系的胶子，称为光子；与引力相互作用相联系的胶子称为引力子；弱胶子是弱相互作用的媒介；带色胶子则提供束缚夸克的力。粒子，如夸克和轻子，通过交换这些胶子而相互作用着，就像两个网球运动员在打球。胶子也像网球一样，有时也会被打飞了，这时它作为量子粒子可以被直接探测到。

在通常的能量尺度下，这 4 种基本相互作用的强度相差很大，如果把强作用的强度当作 1，则电磁力的强度为亚%，即 10^{-2} ，弱作用力的强度为 10^{-5} ，万有引力的强度为 10^{-39} ，可见其强度相差是多么悬殊。每一种相互作用由一种量子——胶子为媒介。引力的胶子是引力子，目前尚未找到；电磁力的胶子是光子；弱相互作用的胶子是弱胶子；而束缚夸克的强力的胶子则是色胶子。值得注意的是：每一种胶子都有一个相对论性的量子场论作为其数学表述，而这些场论互相都相当近似。

关于这些胶子我们列表如下：

胶子的名称和符号	连结对象	在量子相互作用中扮演的角色
引力子 g	质量	引力：宇宙中，使行星与太阳连结在一起，使恒星与星系连结在一起
光子 ν	电荷	电磁波；使电子和原子核连结在一起
弱胶子 W^+ , W^- , Z^0	弱味荷	强子和轻子的放射性衰变过程
色胶子 (八种)	色荷	强力，使强子内的夸克永远连结在一起

人们不禁要问，为什么自然界存在这么多如此不同的力呢？它们彼此有无联系？它们产生的根源是什么？60 年代后期格拉肖、温伯格和萨拉姆在现代高能物理实验基础上探讨了弱作用和电磁作用的统一理论，取得了巨大成功。于是人们沿着他们的路继续走下去，把弱作用、电磁作用和强作用统一起来，建立大统一理论。大统一理论是目前粒子物理研究的一个新兴的领域，它虽然取得了一系列的成功，但也存在着一系列的问题有待解决，目前有两个方面的发展趋势：一方面把大统一理论扩大到万有引力而建立超统一理论（通常称为超弦理论），目前这方面的尝试正在进行。另一方面把大统

一理论推到更深的亚夸克层次而进一步研究夸克和轻子的结构问题。

14. 质子是稳定的吗 ——质子衰变实验

质子是人类最早认识的几个基本粒子之一。长期以来，由于实验上一直没有观察到质子衰变的现象，所以物理学家们也都认为质子是一种稳定粒子。然而，在本世纪 90 年代，粒子物理学又重新考虑质子是不是会衰变的问题。

我们知道在 60 年代后期，美国科学家格拉肖和温伯格与巴基斯坦科学家萨拉姆分别独立提出了弱作用和电磁作用的统一理论，到了 1978 年被实验证实和确立。在这个统一理论的推动下，70 年代许多粒子物理学家探索建立强作用与弱电作用的大统一理论。其中格欧盖和格拉肖提出的理论得出一系列与实验很好符合的结论，从而受到物理学界的重视。这个理论有一个惊人的预言：质子是不稳定的，可以衰变为正电子（或反中微子）和介子。按照这个理论推算，质子的平均寿命在 10^{11} — 10^{31} 年的范围内。这是一个非常大的数字，要知道我们生活的宇宙的年龄才只有 10^{10} 年呢！

质子衰变的预言引起了各国物理学家的极大兴趣。一旦实验证实，其意义是重大的，而且在实验上也是可以实现的。

质子衰变实验是近年来正在进行的粒子物理最重要的实验之一。全世界有 10 多个实验组同时在作这个实验。在印度南部的柯拉金矿中、在欧洲阿尔卑斯山的隧道中，在美国犹他州的银矿中，在美国俄亥俄州的盐矿中，在日本神冈的铀矿中等等，都在进行着实验。意大利也在建造大规模的地下实验室，进行大型质子衰变实验。

如何观察质子的衰变呢？如果质子的平均寿命是 10^{31} 年，则需要在一年的时间里不断地观察 10^{31} 个质子才有可能看到一个质子衰变的事例。 10^{31} 个质子的重量约 1700 吨（若用水则为 1700 立方米），用各种仪器去监测 1700 立方米的水可不是一件容易的事，况且还有许多干扰，特别是来自宇宙射线的干扰。所以这种实验通常是在很深的地下实验室中用大型探测仪器实现的。实验是通过探测质子衰变的产物，测量的是探测器内部核子的衰变事例。

1982 年 9 月，柯拉金矿的实验组声称找到了质子衰变事例。这个实验用 35 层铁板量能器，探测器是小型的，重量只有 140 吨。在近两年的测量中，总共看到六个可能是质子衰变的事例，其中 3 个被认为是较可靠的。所有这些事例测量到的能量都约为 1Gev（即 10^9 电子伏特），接近于一个质子的质量，他们由此得出质子寿命为 7×10^{31} 年。

许多人认为这个实验还比较粗糙，结果只是初步的。有人指出实验所用的分析方法中，仍有一些不确定的因素，因此质子是否确能衰变，需要等待正在进行实验的许多组得到实验结果后，互相比对才能作出肯定的结论。

由于质子衰变是一个重大的新现象，又对已有的大统一理论是个很强的检验。如果实验上确认了质子衰变事例，并且定出核子衰变的方式，将会使我们对世界的认识发生根本性的改变。因此现在实验和理论粒子物理学家都以极大的兴趣密切注视着这方面实验的进一步发展，以期最终作出明确的判断。

15. 神秘的磁单极 ——磁单极存在吗

电和磁，是人类很早就认识到的两个现象，到 19 世纪，知道它们之间是有联系的，电动能生磁，磁动能生电。但是电与磁之间亦不完全对称，电有正电、负电，且正电和负电能单独地存在；而当说到磁体时，磁南极和磁北极总是存在于同一磁体中，没有只有一个单独的磁南极或单独的磁北极的磁体。对此，人们始终在探索着，研究着。

近代对磁单极的讨论，开始于 1931 年狄拉克的一篇文章。狄拉克指出：如果自然界有磁荷存在，则任何粒子的电荷就必须是量子化的，即必须是电子电荷的整数倍。如果磁极的磁荷为 g ，则电荷 e 是一个最小单位 $\frac{hc}{2g}$ 的整数

倍，（式中 h 为普朗克常数， c 是光速），这就是狄拉克的电荷量子化条件。自从磁单极理论提出来之后，几十过去了，大部分物理学家还是持怀疑的态度，原因是一直没有发现它存在的迹象。当然还是有一部分人在探索着。1974 年苏联物理学家颇拉科夫和芬兰物理学家特·胡夫特指出：磁单极的质量超过质子质量的 5000 倍。在现今的大统一理论中认为磁单极的质量约是质子质量的 10^{16} 倍，达到 20 毫微克（ $2 \times 10^{-8} \text{mg}$ ）。1978 年济耳多维克和克罗波夫（苏联科学家）指出：在宇宙大爆炸的一瞬间，产生了能量极高的磁单极。但是由于大爆炸引起的膨胀，使宇宙物质的温度很快下降，这样，极性相反的磁单极就易于发生湮灭，使得宇宙中幸存的磁单极寥寥无几。在大爆炸后约 10^{-35} 秒，宇宙中磁单极的密度大约是 4×10^{13} 立方米空间中有一个。

在理论上预期磁单极具有如下的性质：

1. 它具有极强的电离能力，在较高速度下，磁单极的电离能力是电子的 18000 倍，在低速下，电离能力更大。这样，磁单极在通过物质时将很快地损失能量。当它通过乳胶时，将会留下一条电离极强的径迹，而且直到径迹終了处电离都没有什么变化。

2. 它在磁场中能被加速。在磁场强度为 1000 奥斯特的磁场中，每走 1 厘米，可得到 41 兆电子伏特的能量。

3. 它被反磁质所排斥，而被顺磁质吸引，把它嵌进反磁物质，例如石墨，所需作的功估计为十分之几电子伏特；而把它从顺磁物质（例如铬的晶体）中拉出所需作的功大约是 10 电子伏特。

4. 它可以和顺磁性的原子或分子结合成束缚系统，结合能的大小和化学结合能相当。

5. 它的质量异乎寻常地大。

根据这些性质，人们设计过这样一些实验：（1）如果从宇宙来的磁单极落在地球上，那么它将很快地由于电离损失能量而停留在地球表面，把地表的岩石粉碎，置于强磁场中，磁单极将被吸出，收集在磁场末端的乳胶中，将乳胶显影，便可看到它留下的径迹。（2）把乳胶叠层带到高空收集磁单极的径迹。（3）利用磁通量的改变能够感应电流的原理，使一可能含有磁单极的岩石样品多次经过一个超导线圈，使感应电流累积到可测量的程度。

1975 年夏，美国加利福尼亚大学和休斯顿大学组成联合科研小组，他们把一个装有聚碳酸酯固体探测器和乳胶的多层片叠在一起，由气球放到 40

公里的高空飘浮 62 小时后收回,在探测器和乳胶中找到一根有着强电离的径迹。而且在整条径迹上,电离没有什么变化。这根径迹,被解释为质量大于质子质量 200 倍以上的磁单极留下的。对他们的结果,许多人持怀疑态度,因为一是这种解释在统计学上不合理,二是它可被解释为一个很重的原子核或者一个很重的反粒子留下的径迹。

1982 年,美国斯坦福大学的卡布里腊做了一个十分精巧的实验,他把一个直径为 5 厘米共 4 匝的铌线圈降温到绝对温度 9K,使之成为超导线圈,将它接在一种极为灵敏的磁通计(超导量子干涉仪)的初级线圈上,当磁单极穿过铌线圈时,在线圈中感应出一个微弱的电流,然后由量子干涉仪记录。为了屏蔽其他杂散磁场的干扰,整个探测装置包在一个直径为 20 厘米,高度为 100 厘米的超导铅箔筒内,由于迈斯纳效应,超导体排斥磁力线,所以,例如地球磁场等杂散的磁力线都不能进入筒内,这就保证只有当磁单极穿过探测线圈时才会感应出电流。1982 年 2 月 14 日下午 1 时 53 分,卡布里腊的仪器测到磁通量突然增高,经过反复分析研究,卡布里腊认为是磁单极进入铌线圈引起的变化,到 1982 年 3 月 11 日为止,这个实验共做了 151 天。

这是一个可能的磁单极事例。但是一个事例并不能作出结论。目前许多组物理学家正在继续进行磁单极的找寻。但迄今尚未有第一二次事例的报导。

为什么对磁单极感到这么大的兴趣呢?因为它涉及最根本的物理问题。果真能找到磁单极的话,电荷的量子化就能得到很好的解释,当今的物理学也会有一个较大的变化,电动力学、量子电动力学需要做必要的修改。对于宇宙起源的认识也会更深入一步。由于一个磁单极的质量相当于 10^{22} 个质子的质量,所以,宇宙中磁单极的数目对宇宙物质总质量的影响是很大的,而宇宙物质的总质量,都决定着宇宙的“命运”——一直膨胀下去呢?还是膨胀速度变慢然后再收缩?

总之,磁单极是目前高能物理学研究的中心课题之一,人们期待着它的性质得到实验上和理论上的澄清。

16. 电荷单位知多少 ——电子的电量

人们很早就发现电现象,西汉末年(约公元 20 年前后)《春秋纬·考异邮》中就记载有“现吸涓(rao)”的话,意思是说,经过摩擦的现能够吸引微小的物体。记述了摩擦起电现象。很长时期以来,人们认为电荷是连续的,可以任意分割的。1895 年发现了电子,测得它带有负电,后来发现了质子,它带有正电。那么它们各自带的电荷有多大呢?每个电子所带的电荷是不是电荷的最小单位?所有带电体所带的电荷是不是电子电荷的整数倍?为了回答上述问题,人们做了不少实验。

最早给人启迪的是 1883 年法拉第的电解定律,他指出电解 1 个“克当量”物质的用电量相当于 96500 库仑。就是说每一个单价离子到达电极还原为原子后,给予电极的电量为 1.60×10^{-19} 库仑。这说明单价离子所带的电量是相同的。直接测出电子电量的实验是 1909 年密立根所做的著名的油滴实验,他的实验装置, A 和 B 是两块平行水平金属板,上板 A 上有一小孔,使 A 板带正电, B 板带负电,油滴由喷雾器喷出,由于摩擦油滴带负电,即油滴带

一个或几个电子。当油滴由 A 板上的小孔掉入两板之间，当 AB 之间不加电场时，由于重力、空气浮力与阻力，使油滴匀速下落；当 AB 间加电场时，且电力大于重力时油滴上升，若电力、重力与空气阻力平衡时，油滴匀速上升，当用开关 S 使 AB 充电、放电时，油滴在 A、B 间上、下运动，由于别的原因（如宇宙线等）在 A、B 间产生离子，这些离子有可能与油滴相碰，使油滴上的电量改变。从而使油滴上升速度发生变化，测出速度的变化，计算出电子电量的最小单位为 $e = 1.60203 \times 10^{-19}$ 库仑 1963 年盖耳曼与茨威格提出强子由夸克组成的理论，预言夸克有多种，它们的电

荷分别有 $\pm \frac{1}{3}e$ ， $\pm \frac{2}{3}e$ 等 4 种。自

1965 年开始，斯坦福大学一直在进行着一项寻找物质上的自由分数电荷的实验。1977 年斯坦福大学费尔班克教授等人用磁漂浮法测分数电荷，他们用直径为 0.36 毫米的铌——25% 钨合金单股线绕成的超导线圈，浸泡在液氮中，用来产生的超导磁场将铌球悬浮在平行板之间，加上变化的电场以观测铌球的运动，其实质是一种大规模的密立根实验。他们用 5 个在铌基片上热处理过的瓷球和 3 个在钨基片上热处理的铌球作漂浮球，质量约 $g \times 10^{-5}$ 克，球的半径为 0.011 ~ 0.014 厘米。测得钨基片上处理的三个铌球的剩余电荷分别为 $(+0.337 \pm 0.009)e$ ； $(-0.001 \pm 0.025)e$ 和 $(-0.331 \pm 0.070)e$ 所有在铌基片上处理的铌球，有接近于零的剩余电荷，因此，他们的结论是：夸克是在热处理过程中从钨基片转移过去的。

并观察到了 $\pm \frac{1}{3}e$ 的证据。后来他们继续研究，并一再发表肯定上述结果的

报告。另一方面别人用其他方法，如用反馈悬浮静电计观测小铁圆柱的实验，和用改进密立根的方法所作的汞滴实验，都没有观察到分数电荷存在的证据。

由此可知，电量不能连续变化，只能取基本电量 e 的整数倍。电荷的这种只能取分立的、不连续的量值的性质，叫做电荷量子化。电荷的量子就是 e ，它等于 1.60203×10^{-19} 库仑。它是电子或质子所带电荷的数值。至于分数电荷，1977 年斯坦福大学实验组得到的结果，可以认为是分数电荷粒子存在的一个证据，但还有很多问题有待解决，只有进行更多的重复实验，才能取得一个正确的结论。

17. 打开微观世界的大门 ——各种加速器

1919 年人们发现用天然放射性元素钋发射的 α 射线（即氦的原子核）打入氮原子核，会使之变成一种新的元素的原子核。这一发现立即引起了许多人的注意，它为研究原子核内部结构，认识原子核和基本粒子的运动规律，开辟了一条新的途径。但是天然放射性物质发射的射线的强度比较弱，产生的粒子能量比较小，且粒子能量的大小不能调节，因此人们希望能用人工的方法产生高能粒了。从 20 世纪 30 年代起建起了各种加速器，从最初的静电加速器、回旋加速器开始，后又出现同步回旋加速器、电子感应加速器、电子同步加速器、质子同步加速器、强聚焦质子同步加速器、直线加速器和对撞机等多种类型。早期的加速器带电粒子的能量只有 1 ~ ZMeV（MeV 为百万电

子伏特，1 电子伏特是一个电子经 1 伏特电势差所获得的能量，所以 1 电子伏特= 1.60×10^{-19} 焦耳)。而现在最大的质子加速器加速质子的能量已达到 400Gev (10 亿电子伏特叫 1Gev)。加速粒子的能量在 100Mev 以下的加速器称为低能加速器，在核物理的研究、工业和医疗中有着广泛的应用；100 ~ 1000Mev 之间的加速器，称为中能加速器，由于它多数用来产生“介子”(一种基本粒子)，所以又称为“介子工厂”1Gev 以上的加速器则称为高能加速器，主要用来研究基本粒子。

18. 更有效地打开微观世界的大门 ——对撞机、北京正负电子对撞机

加速器能提供能量很高的带电粒子(如质子、电子等)，通过这些高能粒子束去轰击实验室里的静止靶，就像炮弹轰击坚固的堡垒一样，使靶中的基本粒子发生变革。显示出它们的内部结构和运动规律。但是高能粒子和靶内粒子之间的有效作用能，只占高能粒子能量的一小部分，大部分能量转化成使靶粒子向前运动的动能，这部分能量不参与高能反应，也就是说这部分能量浪费了，打靶的粒子能量越高，有效作用能所占的比例越小，高能粒子能量的利用率也越低。例如：一个 1000Gev (1Gev= 10^9 ev) 的高能质子同步加速器，它的质子束的有用能量仅为 42Gev。由此科学家们深入研究想法解决这个问题。有人想出让两束能量相等的高能粒子相对碰撞，那么两束粒子的全部能量就都能用于高能反应，例如：当两束被加速的电子相互碰撞时，如果每束电子能量为 2.2Gev 则其有用能量相当于一台 19000Gev 的电子加速器所产生的电子束轰击静止靶中的电子。因此 60 年代后期就出现了对撞机这种加速器。

常见的对撞机有正负电子对撞机，质子—质子对撞机，质子—反质子对撞机等。对撞机是加速器的发展。目前世界上正在进行建造及计划中的对撞机，它们的对撞粒子、能量及地点等。

我国自行设计建造的第一台北京正负电子对撞机，代号 BEPC，已于 1988 年 10 月 16 日对撞成功了，该机于 1984 年 10 月 7 日奠基，邓小平同志亲临奠基破土，经过 4 年的艰苦奋斗，在我国高科技领域中结出了又一重大科技成果。北京正负电子对撞机是一台高能电子和正电子加速器，它是研究高能物理和同步辐射应用的重要工具。

北京正负电子对撞机由 5 个主要部分组成：注入器(电子直线加速器)、储存环、北京谱仪(探测器)，同步辐射实验室和计算中心，其总布局。注入器是一台可将正负电子加速到 1.1 ~ 1.4Gev 的直线加速器，它由 56 根长 3.05 米的波导加速管和一些聚焦节组成，全长 201 米。它也是由 40Mev 的预注入器，150Mev 的电子加速器和 1.1 ~ 1.4Gev 的正负电子加速器组成的。

储存环是由真

空盒，高频加速站，40 块弯转磁铁，68 块聚焦磁铁，扭摆磁铁，校正磁铁等多个元件组成的一个中心轨道周长 240.4 米的椭圆形的环。正、负电子的注入点分别在长轴的两端，短轴的两端是正负电子束的对撞点。储存环的工作包括：正负电子积累，加速和对撞 3 个阶段。为了进行探测，在对撞点处装有探测器——北京谱仪。北京谱仪是一座大型通用探测器，它犹如我们人类的眼睛一样能观察到对撞中微观世界的秘密，正负电子束流从谱仪中

心穿过，该探测器能充分接收到碰撞瞬间产生大量新粒子的各被信息，经电子学系统和计算机处理得到这些粒子的种类、个数、动量、能量、飞行方向等参数。该谱仪长 6 米，高宽各 7 米，总重 480 吨，它由中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器和尸子计数器等组成。

正如人类观察事物一样，光用眼睛还不够，还必须用大脑来分析，正负电子对撞机设有计算中心，这相当于人类的大脑作用，探测获取的信号要利用计算机进行分析处理，才能最后得到物理实验的结果。

为了充分发挥北京正负电子对撞机的作用和经济效益，在该机上建造同步辐射实验区。该区已建成 3 个光束线前端区，5 条光线束和相应的 8 个实验站，可提供频谱从紫外光（波长 $\lambda = 1200 \text{ \AA} - 1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ 米）到硬 X 光（ $\lambda = 0.5 \text{ \AA}$ ）的同步光，光子通量可达 8×10^{10} 光子/秒。

北京正负电子对撞机为我国基础研究、应用研究、发展研究和技术应用提供了一个强有力的实验基地，它必将促进我国多种学科和尖端技术迅速向前发展。该机的主要指标以其高亮度（为美国同类装置的 4—5 倍），低能散射和运行的稳定性可靠性而处于国际领先地位。在 25 届国际高能物理会议上，大会主持人、诺贝尔奖金获得者里克特先生指出“北京正负电子对撞机是当今世界上这一能区中唯一亮度最高的对撞机。”

19. 来自天外的射线 ——宇宙射线

宇宙射线的发现，在自然科学史上是一件重大事件，发现宇宙射线的实验，也和科学上其他实验一样，不是一蹴而成的。人们经过长时间的摸索、思考、实践，才从模糊的意识中逐渐明确方向、改进方法、完善仪器，最终证实了宇宙射线的存在。

早在 1785 年，库仑就指出，放在空气中的带电体会逐渐丢失电荷，这是大气导电性的最早发现。但是，电荷为什么会自动丢失？这是一个谜。在其后的一个多世纪里，空气的导电性被认为是物理学中的一个难题而给搁置起来。直到 1900 年前后，由于物理实验技术的提高，并受到电子、X 射线、放射性物质被发现的启发，人们才又把注意力集中到大气导电性的实验研究上，J.J. 汤姆生、威尔逊、埃尔斯特、盖特耳以及其他科学家们在这方面做了很大的贡献。早在 1901 年威尔逊就曾设想“在干净的空气中不断产生离子是否可以解释为大气之外存在着辐射源。这种辐射源来的辐射可能像伦琴射线或阴极射线，但贯穿本领强得多”。遗憾的是威尔逊在 1906 年改变了想法，放弃了地球外辐射源的设想。

从 1900 年到 1911 年间埃伯特、伯威茨、哥克尔进行过若干次气球飞行，进行漏电率实验，得出“随着高度增加漏电率稍有增加”。1910 年伍尔夫带着改进了的验电器爬上 300 米高的在巴黎的埃菲尔塔顶去测大气电性，得到结论是“若不是在大气的高层存在着另外的 γ 射线源，那就是 γ 射线在空气中的吸收率远比假定的要小得多”。

奥地利物理学家赫斯在 1911—1913 年连续 3 年内进行了 10 次气球飞行实验，得出正确的结论“目前观测的结果，完全可以用这样的假设来解释：高贯穿本领的辐射是从上空进入地球大气层的，直到大气层下层，仍能在密闭的容器中观测到所产生的离子的一部分”。

其后 1922—1925 年间密立根，斯旺和霍夫曼又做了一系列实验，特别是 1925 年在高山上的缪尔湖和箭头湖的雪水湖中的实验，使他们相信赫斯所发现的射线的确来自宇宙空间，于是密立根把这种射线命名为“宇宙射线”。而赫斯由于发现了宇宙射线在 1936 年获得了诺贝尔物理奖。

现在大家知道，宇宙射线就是从宇宙空间飞来的高速原子核，它们的飞行速度接近光速。由于地球表面有大气层阻挡，这些高速原子核不能直接到达地面。当它们进入大气层后，和空气的原子核发生核反应而产生许多次级粒子。其中有一些高能次级粒子会一直到达地球表面，甚至会穿到地球深处。这些每时每刻来到地球的宇宙空间的“来客”，有哪些特征呢？它们来自何方？

现在知道宇宙线中的高速原子核包括轻原子核和重原子核，几乎各种原子核都有，其中大部分是质子，其次是 He 核及 Li、Be、B、C、N、O、F 核等，其能量的数量级可达到 10^{18} 电子伏特以上。

宇宙线是在宇宙空间四面八方飞行的，我们地球接受到其中很少的一部分，对于高能宇宙线来讲，地球上不同地点对准不同方向所测量到的强度是一样的，且强度几乎不随时间发生变化，也可以说在时间上是恒定的。但低能宇宙线的强度则和测量地点、方向有关，而且随时间变化。目前的解释是：大部分高能宇宙线可以起源于超新星爆发，当超新星（超过爆发前亮度一千万倍的新星，叫超新星）爆发时，向宇宙空间抛出大量的高能原子核。这些原子核在宇宙空间飞行时，受空间电磁场的作用，辗转到达地球，在这个过程中它们会和星际空间物质碰撞或发生反应。有人估计过，初级宇宙线被抛出起直到到达地球，其间大约经过 10^8 年的“流浪”时间。因为它们是辗转到达地球的，所以在地球上看来，几乎是各向同性的，而且时间上是恒定的。至于低能宇宙线，则明显地受地磁场的影响，且它们的强度与太阳的活动有关。

在地球表面上接收到的宇宙线，不是初级的高能原子核，而是它们产生的次级粒子。初级宇宙线和大气原子核反应，产生质子、中子、 π 介子（ π^+ 和 π^0 ）等强子，这些次级粒子又会在大气中引起新的核反应，这样重复地进行下去，直到强子能量小于 10^{10} 电子伏特左右才停止。次级粒子有些是不稳定的，它们有一部分在飞行中衰变，例如中子衰变为质子、电子和电子中微子 ν_e ； π^+ 衰变为 μ^+ 子和 μ^+ 子中微子 ν_μ ； π^0 衰变为两个 γ 光子。

宇宙线次级粒子能到达海平面的是 μ 子、电子、中微子，还有少量的质子和 π 介子等。极少数次级粒子如中微子和高能 μ 子，可以一直穿到很深的地下。

我国建国以来，在宇宙线物理研究方面得到了比较稳定的发展，在宇宙线高能物理和高能天体物理方面的研究工作都取得了一批较好的成果。

1953 年中科院物理研究所在云南东川海拔 3180 米的落雪山上建立了宇宙线实验站，1957 年在北京和广州分别建立了宇宙线强度观测站，60 年代中又在落雪山站附近海拔 3200 米的山峰上建立了一个新的高山站。利用云室在高山研究高能宇宙线粒子与物质相互作用，研究了 10^{11} — 10^{12} 电子伏的高能现象。1972 年获得了一个重质量荷电粒子事例。从 1977 年起，中科院高能物理所在西藏海拔 5500 米的甘巴拉山上建设了世界上最高的高山乳胶室。高能所与国内山东大学等和日本东京大学 7 所大学合作，开展了对能区为 10^{15} — 10^{17} 电子伏特超高能核作用的实验研究，找到了至今国际上唯一的

多心结构超低空 γ 族事例。1988 年在怀柔建成塑料闪烁体构成的空气簇射阵列，对宇宙空气簇射进行长期观测，研究能量大于 10^{15} 电子伏特的空气簇射的特性和观测超高能 γ 射线天体，另在云南昌明附近海拔 2720 米的王梁山及西藏海拔 4300 米的羊八井各建一个宇宙线空气簇射观测站。另外还发展高空气球技术，广泛开展初级宇宙射线和空间天文观测等等。利用球载高能 X 射线望远镜系统获得蟹状星云 20—200 千电子伏硬 X 光子时间和能量的近百万组数据，经分析准确地得出了蟹状星云脉冲星硬 X 辐射周期，并在国际上首先成功地得到了天鹅座 X—3 的高能 γ 辐射。并发现了 γ 射线强度同 X 辐射强度的负相关现象，这一发现对于建立天鹅 X—3 的高能辐射区域模型和了解高能粒子加速机制提供了重要依据。总之经四十多年的发展，为我国宇宙线物理研究的进一步发展创造了一些必要的条件。

20. 稀奇的反物质 ——反物质之谜

19 世纪末英国物理学家汤姆逊在对阴极射线进行研究后，肯定阴极射线是一种带有负电的粒子流，测出它的质量为 9.1×10^{-31} 千克，所带电量 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 库仑，根据爱尔兰物理学家斯托尼的假设，称之为电子。1909 年卢瑟福确定了质子的存在。1932 年查德威克在居里夫人等人工作的基础上，确认了中子的存在，以后又相继发现了其他的粒子。

在理论概念上，继卢瑟福、玻尔的原子模型之后，1924 - 1926 年德布罗意、海森堡和薛定谔等建立了量子力学，1925 年泡利发现了不相容原理，这使人们对远比光速为小的微观领域有了理性认识，为了处理高能领域中的问题，1928 年英国青年物理学家狄拉克提出了相对论性电子运动方程，即狄拉克方程。根据这方程可自然得到电子的自旋为 $\frac{h}{2}$ (h 为 2π 分之普朗克常数 h)，并有相应的磁矩，可用它描述质子、中子等，狄拉克方程取得了很大的成功。

然而狄拉克方程也碰到严重的困难，在它的解中存在着无穷多的负能态。而物理上的真实态总是正能量的，人们一时无法理解。为此狄拉克于 1930 年提出了“空穴理论”，他假设负能态为电子海所占满，根据泡利不容原理，正能态的电子不可能跃迁到负能态中，但负能态中的电子吸收了电磁辐射可跃到正能态成为普通电子，负能电子海中同时产生一个“空穴”。当普通电子返回“空穴”时，它们同时湮灭而放出 γ 光子。这个“空穴”相当于一个质量与电子相同而电荷相反的正电粒子，并且因为缺少了负能而具有正能量，这就是狄拉克预言的正电子，它是电子的反粒子。

两年以后即 1932 年 8 月 2 日，美国物理学家安德逊和密立根在研究一种来自遥远太空的宇宙射线时，意外地发现当高能宇宙射线穿过铅板时，会从铅板中轰击出一些新的粒子，其中有一个粒子从其在磁场中偏转的程度来说，可以计算出它具有和电子完全相同的质量和电量，唯一不同的是它在磁场中弯曲的方向与电子相反，也就是它是带有正电的电子。这一发现正好和狄拉克的预言一致，后来安德逊把它称为正电子。

人们不久便知道正电子是不能长久存在的，在它刚出现不久（在百万分之一秒内），就立刻与邻近的电子发生相撞，并互相结合，转化为既不保留

电子也不保留正电子原来性质的一对带有一定能量的光子，这个过程称之为“湮灭”。不久，安德逊又成功地证明存在着相反的过程，那就是在强磁场作用下，狭窄的由光子组成的 γ 射线会分裂成正、负电子，而 γ 射线则自行消失。

接着，查德威克与布莱克特、奥恰里尼合作，发现 α 粒子撞击铍的辐射能够产生正电子，首次提出了除宇宙射线外，还能用一种媒介来产生正电子的结论。

安德逊的发现被誉为 20 世纪以来最主要的发现之一，正电子是最先发现的一种反粒子。它的发现证实了狄拉克的预言，使物理学的一些重要概念发生了根本的变化，在物理学发展史上是一个重要的里程碑。为了表彰安德逊的卓越贡献，1936 年授予他诺贝尔物理奖。

既然电子有反粒子，自然会使人联想到别的粒子是否也会有它的反粒子呢？1933 年 12 月 12 日狄拉克在接受诺贝尔物理奖时，就认为可能存在负质子，果然，在 1947 年第一次在宇宙线中发现反质子。而且在美国的加州大学的塞格莱和张伯伦一起，于 1955 年 5 月在高能加速器中发现了反质子，接着人们又发现了中子、介子、超子等其他粒子的反粒子。反质子具有和质子完全相同的质量和电量，但带的是负电，那么中子不带电，又怎样存在反中子呢？原来各种基本粒子除具有质量、电荷、磁矩等属性之外，还会像地球自转一样，依据各自的转轴自旋，中子和反中子的差异就在于它们自旋时一个是左旋，一个是右旋。同时磁矩亦相反。

各种各样反粒子的发现，促使人们思考这样一个问题，既然各种元素的原子都是由中子、质子和电子这些“正”粒子构成的，那么，是否也可能存在着完全由反粒子组成的反元素呢？为了探索反元素存在的可能性，物理学家们设计了各种各样的设计方案，并终于在 1965 年发现了一种由反质子和反中子结合形成的反元素——“反氢”的同位素“反氕”，接着又找到了“反氦”的同位素“反氦 3”。虽然“反氕”和“反氦 3”也同样不能长期存在，但是它们的发现却打开了人们的眼界。可以肯定，只要继续努力探索，就能在实验室中再制造出其他新的反元素来。

1989 年有一个物理研究小组报告说，他们首次制成了一种由正电子组成的等离子体，塞科（美国加州大学圣迭戈分校）、利文塞和帕斯纳（新泽西州墨累山美国电报电话公司贝尔实验室）设计了一个精巧的陷阱来收集和贮存这种难以捉摸的粒子，在 1989 年 2 月 20 日《物理评论快讯》上，他们预言，这种新的等离子体将被证实是有用的。它可以作为加速器的“子弹”源，作为更好地改进核聚变反应堆的一种工具，以及作其他用途。塞科和利文塞耳还使用这种正电子等离子体去认识关于反物质以及关于物质（或反物质）的奇特状态——等离子态的更多的知识。分离出正电子等离子体也意味着向制造反氢原子迈进了重要的一步。

有了反元素，就有可能制造出由反元素的反原子组成的反物质分子，可是我们却无法获得这些反物质，因为在我们周围的世界里，反物质只要刚一出现，就会立刻与“正”物质结合，并极其迅速地湮灭。

这么说来，反物质在自然界中究竟有没有呢？现在这个问题已从物理学家的手中转到了天文学家那里，人们认为反物质在地球上虽然只能短暂地出现在实验室里，但是在茫茫无际的宇宙中却有可能存在着由反物质组成的星体，在那个星体上反物质的存在是“正常的”，而正物质的存在却极其困难。

据报道,1978年曾观测到银河系中心区域存在着大量的正电子,这就预示着银河系中反物质存在的可能性。

宇宙中果真存在由反物质组成的星体吗?对于这个问题至今还无法获得直接证实。因为正像大家所知道的,由反物质组成的星系是如此相同,以致使我们今天的天文观察手段还无法把它们区别开来。但是根据某些已发现的迹象,人们还是相信它是可能存在的。

1908年6月30日,在西伯利亚中部的通古斯河地区上空,突然飞来一个巨大的物体,在它着陆时引起了一场猛烈的爆炸。几百公里外的西伯利亚居民都能看见巨大的火柱冲天而起,浓黑的烟云就像原子弹爆炸后的蘑菇云,一直上升到19公里的高空。事后调查发现破坏面积达2000平方公里(而广岛原子弹的破坏面积仅46.5平方公里),在那里到处是烧焦的树木,并在树木的年轮上测得了铯137的放射性异常,但是却没有找到降落物实体的任何残骸,仅在土壤中发现数千颗大小为几毫米的硅酸盐和氧化铁小球,据估计,这次爆炸的威力与千万吨级当量的核爆炸相当。是什么原因引起这次无比猛烈的爆炸呢?这是一个使人感兴趣而又难以解决的问题,几十年来众说纷纭,有人认为是天外来客的宇宙飞船发生意外事故,但也有人根据爆炸的猛烈程度、爆炸找不到实体的残骸和存在放射性异常等现象,推测可能是一块由反物质组成的陨石降落地球造成的。人们还列举加蓬铀矿中铀235含量的异常以及美国阿波罗—16登月舱的某些发现来支持这种推测。80年代末美国科学家使用气球在大气高空探测到反质子流,又为这种推测提供了事实依据。于是人们要问这些反物质构成的天体究竟分布在宇宙的什么地方呢?

有人认为鉴于物质与反物质仅是在电磁性质上相反而其他方面是相同的,那么,它们就应该在宇宙的总磁场(人们认为就像地球有自己的磁场一样,宇宙也有自己的磁场)影响下,各自向宇宙的相反方向集中,并分别形成星系和反星系。根据这种观点,宇宙就应该可以一分为二,其一半为正物质构成,另一半由反物质构成。而且可以想象到,由反物质构成的星系应该分布在距离我们极其遥远的地方。

但人们在天文观测中却发现了另外一些迹象,其中之一是60年代以来发现的“类星体”,这是一种奇怪的天体,它在单位时间内释放出来的能量非常之大,几乎是一个普通星系释放能量的1000倍,而其本身的大小却只有普通星系大小的10万分之1。如此惊人的能量是如何产生的呢?天文学家们感到极其为难,因为在已知的物理学领域里,还无法合理地解释这个巨大能量的产生机制,唯一可能的解释就是由正、反物质的湮灭反应。

于是矛盾便又产生了,因为据分析有几个类星体位于距地球不太远期地方。而且70年代通过人造卫星和宇宙飞船测得的数据进行处理,证实地球和月球周围存在反核。

然而事实究竟如何呢?直到今天我们还仅处于一个假设的阶段,没有得到任何肯定的结论。反物质至今未在实验中发现过。但是可以相信,随着科学技术的不断发展,空间技术和探测技术的不断完善,人们终将揭开这一自然之谜。

21. 光是波还是粒子

——光的波粒二象性

人类对光的认识,是从太阳光、火光等可见光开始的,人们从观察日光

照射物体成影的现象中得出：光的一种基本性质是光的直线传播。表明光直线传播的另一个事实是针孔成像，这种像用暗箱来观察，暗箱是四壁封闭的箱子，在某一个壁上穿一个小孔，孔外物体 AB 上一点 A 发出的光线直线传播经孔 a 在暗箱后壁上 A' 点处形成 A 的像，AB 上不同点发出的光线，经过孔 a，形成物体的倒像 A' B'。

关于针孔成像的记载，在我国先秦时代（约公元前 400 至 470 年）的墨经上就有详实的记载，比古希腊的欧几里得（公元前 323 ~ 385 年）的记载既早又好。

光为什么直线传播，光的本性怎样？一直到 17 世纪后半叶，牛顿和惠更斯对光的本性作解释时，发生了原则分歧。

牛顿认为光是一种微粒流，微粒从光源飞出来，均匀介质内按力学定律作等速直线运动，他以这种观点解释了反射定律，并认为光在介质中的传播速度比在真空中快来解释折射定律。微粒说很自然地解释了光的直线传播性。但是这种假说不能说明光线在相交时互不相扰的性质，亦不能说明，由他自己发现的牛顿环现象：把曲率半径大的凸透镜放在平玻璃板上，在透镜与玻璃板接触点处出现明暗相间的同心环，即牛顿环。

惠更斯是光的微粒说的反对者，他创立波动说，于 1690 年在《论光》一书中写道：“光同声一样，是以球形波面传播的，这种波同把石子投在平静的水面上时所看到的波相似。”他从声现象与光现象的许多类似出发，认为必须把光振动看作是在一种特殊的介质——以太中传播的弹性脉动，而这种特殊的介质充满宇宙的全部空间。惠更斯的波动说只是粗略地指出光的波动性，它的光波的概念是很不完全的，他始终没有提到光波在空间上的周期性。

在整个 18 世纪中，光的微粒说在光学中仍占优势，19 世纪上半叶是波动说重新崛起并通过斗争走向胜利的时期。1801—1803 年杨氏做了一个双缝实验，用强光照明狭缝 S，以它作为缝光源送出柱面波，在距 S 一定距离处放置两个窄缝 S₁ 与 S₂，它们把由 S 送出的柱面波，分离出两个很小的部分作为光源，当光照到屏 EE' 上呈现明暗相间的干涉条纹。杨氏用波动说的干涉原理完满地解释了双缝干涉实验，及油膜或肥皂膜在水面的薄膜的彩色条纹。十几年后，菲涅耳原理，成功地解释了衍射现象，即光通过圆孔或窄缝后能产生明暗相间的圆环或条纹。特别值得提出的是“泊松亮点轶事”，当 1818 年菲涅耳向巴黎科学院提出自己关于衍射研究的论文时，泊松提出了这样的反证：若菲涅耳的理论正确，则可推出在一不透光的屏后几何阴影区中心会出现亮点，这一结论从日常经验看来是颇为荒谬的。但是几乎很快由阿拉果从实验上证实了。这种亮点后人称之为“泊松亮点”。它为光的波动说的正确性提供了一个有力的证据。1850 年傅科用旋转镜法测定光速，确定光在水中的速度比空气中小，这是波动说所预言的结果，而牛顿的微粒说认为光在水中的速度比空气中快，从此宣告波动说对微粒说取得了决定性的胜利。

1860 年麦克斯韦在理论研究发现，振动着的电荷或迅速交变的电流都会引起其周围电磁场以波的形式向外传播，而且传播速度与光速相同，从而提出光是电磁波的假说。1888 年德国物理学家赫兹用实验证明了电磁波的存在，从此奠定了光的电磁理论。这理论能够说明光的传播、干涉、衍射、偏振等许多现象。电磁波包括无线电波、微波、红外光、可见光、紫外光、X

光和 γ 光。它们所不同的是波长，或者说是频率各不相同而已。看来波动说已达到尽善尽美的境地。

但是，在上世纪末和本世纪初，当人们研究深入到光与物质的相互作用这一领域时，却发现许多问题是无法用波动说加以解释的，其中最著名的难点是黑体辐射能谱，所谓黑体是：能全部吸收外来电磁辐射而毫无反射的理想物体。如在一空腔表面上开一个小孔（或细缝），则因任何辐射进入小孔后，在腔内进行多次反射和吸收，很难再从小孔透出，犹如被小孔全部吸收，所以这个小孔十分近似于黑体的表面。黑体发出的辐射就叫黑体辐射，一个温度均匀的空腔表面上一小孔（例如炼钢炉上的小孔）发出的辐射，很接近于同温度下的黑体辐射。在黑体辐射中存在各种波长的电磁波，能量按波长的分布仅与黑体的温度有关。

1900 年普朗克大胆提出了一个新的假设：频率为 ν 的谐振子的能量取值 ε ，只能是能量基本单元 $\varepsilon_0 = h\nu$ 的整数倍，即 $\varepsilon = n\varepsilon_0 = nh\nu$ ，（ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ）

这里常数 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒，称为普朗克常数。 ε_0 称为能量量子。因此谐振子发射和吸收光能也只能是一份一份的形式，每份能量为 ε_0 。这个假设也称为普朗克能量量子假设，根据这个假设得到的普朗克公式可包容关于黑体辐射的所有实验规律。能量量子假设的提出，使能量不连续的概念第一次进入了物理学，它标志着近代物理学的开端。

金属在光的照射下释放电子的现象，称为光电效应，放出的电子称光电子。这是 1888 年由赫兹首先发现的。

1905 年爱因斯坦假设：光是由一群光子组成，频率为 ν 的光子，它的能量等于 $h\nu$ ， h 为普朗克常数，当每个光子的能量超过某一数值 $h\nu_0$ 时，就能从被照金属中释放一个电子，所以光子能量越大（即波长越短）电子的速度越大，而光子越多（即光越强），电子数目就越多，光电效应是光子与电子相碰，所以能即时放出电子，所有这些与实验完全相符。另外用光子说可以说明 X 射线的康普顿散射实验。

从上面的介绍可知，光的传播、干涉、衍射、偏振等方面说明光具有波动性，而在光与物质相互作用中，如黑体辐射，光电效应，康普顿散射等现象中，说明光具有粒子性。如果要问光的本性到底是什么？也许只能回答：光既是粒子，也是波。但它既非经典意义的粒子（有静质量和确定的轨道），也非经典意义下的波（能量在空间连续分布），而是一种全新意义的粒子和波。其粒子性表现于它在探测时以整个粒子形式出现，而且这种粒子有确定的能量 $h\nu$ 和动量 $\frac{h\nu}{c}$ （ ν 是光的频率、 c 是光速、 h 为普朗克常数），其波动

性表现于粒子无确定轨道，其行为可用随时间振荡的波函数描述，且波函数遵守迭加原理。可见光的波粒二象性既不同于牛顿—惠更斯时代光的经典微粒说，也不同于经典波动说。它对于二者都是一个本质上的飞跃，已经越出了经典物理的范畴。

对光的本性的认识从经典微粒说——经典波动说——波粒二象性的发展过程，类似于一个否定之否定或“正—反—合”的认识过程，人对光的本性的认识过程，是人的认识的辩证发展规律的一个生动例证，说明对立面表现于每一自然现象之中，同时又存在着对立面的辩证统一。

22. 电子是粒子还是波 ——物质波

电子是最早发现的一种基本粒子,1895年由J.J.汤姆逊在研究阴极射线时发现的,它在电磁场中将发生偏转,电子质量为 9.109×10^{-31} 千克,带负电,电量为 1.602×10^{-19} 库仑,是电量最小单位。电子的定向运动形成电流,如金属导线中的电流就是由于电子的运动形成的,人们可利用适当的电场和磁场,按照需要控制电子的运动,在经典物理中,一向把电子看作是一个质点。

到了20世纪,被看作是波动的光,由于光电效应,使人普遍承认光还具有粒子性,X射线的本性,由于德国物理学家劳厄在1912年发现了它的衍射现象,和英国物理学家布喇格父子成功地用于晶体分析,肯定了它的波动性,而美国物理学家康普顿进一步从X射线与电子的相互作用中确认了它的粒子性。1923年光的波粒二象性已经得到了全面认识。1923年法国物理学家路易斯·德布罗意大胆设想,既然光和X射线等电磁波有粒子性。为什么粒子不可以有波动性?他说:“整个世纪以来,在光学中,比起波的研究方法来,如果说是过于忽视粒子的研究方法的话,那么在实物粒子的理论上,是不是发生了相反的错误,把粒子的图像想得太多,而过分忽视了波的图像呢?”接着他提出了一个大胆的假设,认为不只是辐射具有波粒二象性,一切实物粒子(如电子、原子、分子……等)也具有波粒二象性。

1927年戴维孙和革末用电子证实了德布罗意假说。他们的实验装置如图22·1所示。由热灯丝K发出的电子,被电势差V产生的电场加速后,经小孔射出,形成一束很细的平行电子束,电子束射到晶体上,被晶面反射,反射后的电子束由集电器俘获,并提供了电流I,I可用电流计G测量。电子流强度I表征反射电子束的强度。实验时将集电器对准某一固定方向,改变加速电势差V,测出相应的反射电子流强度I。实验发现,当加速电势差,逐渐增加时,电子流强度并不单调变化,而表现出在某些V值时,I出现极大值,这表明,以一定方向投射到晶面上的电子束,只有具有某些特定速率时,才能准确地按照反射定律在晶面上反射。

上述实验结果与晶体对X射线的衍射情形是极其相似的,电子射线反射与X射线衍射的相似性,有力地说明了电子具有波动性。

G·P汤姆逊,(是J.J.汤姆逊的独生子)几乎同时用另外的方法得到了电子衍射图形,它的实验原理如图22·3所示,电子束经高达上万伏的电压加速,能量相当于10—45千电子伏,电子穿透多晶的金属薄膜(铝、金、铂等薄膜),得到圆环状的衍射花纹。为了说明观察到的正是电子衍射,而不是由于高速电子碰撞产生的X射线衍射,G.P.汤姆逊用磁场将电子束偏向一方,发现整个图像的平移,保留原来的花样。由此肯定是带电粒子衍射而不是X射线。

这些图形与X射线在粉末法中所得图形非常相似,与德布罗意波动力学理论预计的结论在5%的范围内相符。

1937年,G.P.汤姆逊和戴维逊一起,由于电子衍射方面的工作,共同获得诺贝尔物理奖。

电子衍射现象是电子具有波动性的有力证明,电子显微镜使微小物体成

像就是根据这一性质制造的。电子衍射已经发展成一种研究物质结构的有效方法。

1930 年分子束方法的创始人斯特恩和他的合作者用氢分子和氦原子证实普通原子和分子也具有波动性。

自由电子具有波动性可能还比较容易被人们接受，因为电子本身就是一种难以捉摸的微观粒子，波动性也就是它的某种特性。当证明氢分子和氦原子一类的中性物质同样也具有波动性时，就不能不使人们确信波粒二象性是物质的普遍性了。

在经典物理学中，波和粒子，一个是连续的，一个是分立的，二者是完全不能相容的两个截然不同的概念。那么，实物粒子的波粒二象性怎样正确解释呢？对实物粒子的波动性的令人信服的解释是 1926 年由玻恩提出来的，他认为电子流出现峰值处（或衍射图样上出现亮条纹处），电子出现的几率大，而不在峰值处，电子出现的几率小。对其他微观粒子也是一样。对个别粒子在何处出现，有一定的偶然性，对大量粒子在空间不同位置出现的几率就服从一定的规律，并且形成一条连续分布曲线。所以对于微观粒子，其粒子性表现于它在探测时以整个粒子形式出现，而且这种粒子有确定的能量和动量，其波动性表现于粒子无确定轨道，它的空间分布表现为具有连续特征的波动性。这就是微观粒子的波动性的统计解释，这种实物粒子的波动性就是实物粒子的德布罗意波或称物质波。

23. 描述微观世界的力学 ——量子力学简介

19 世纪末 20 世纪初，随着黑体辐射的能量随波长变化的结果被 1900 年普朗克的能量子理论解决后，1905 年爱因斯坦又用光不仅是一种波动而且是一种粒子叫光量子或光子的假设，成功地说明了光电效应；紧接着康普顿效应等，说明光具有波粒二象性。1923 年夏德布罗意想到要把光的波粒二象性推广到实物粒子，认为一切实物粒子（如电子、原子、分子……等）都具有波粒二象性，设质量为 m ，并以速度 v 运动的粒子，就有一定的波长 λ 和频率 ν 的波与之相应，它们间的关系为 $\lambda = \frac{h}{mv}$, $\nu = \frac{E}{h}$ （式中 E 是粒子的能量， h 为普朗克常数），这种波通常称之为物质波或德布罗意波。

从 1921 年开始薛定谔在瑞士苏黎世大学任教授，当时在苏黎世除了苏黎世大学外，还有一所更有名的苏黎世理工学院，德拜在那里任教授，德拜主持一个两校人员都参加的讨论会。一次讨论会后，德拜要薛定谔报告当时深受注意的德布罗意物质波的论文，在薛定谔报告后，德拜评论说，讨论波动而没有一个波动方程，太幼稚了。几个星期以后，薛定谔又作一次报告，他开头说：“我的同事德拜提议要有一个波动方程，好，我找到了一个。”薛定谔这次找到的是非相对论的波动方程，也就是现在的薛定谔方程，在非相对论近似下，由这方程得出的结果与实验符合得很好。他第一次提出“波动力学”这一词。电子是波动这一新奇概念的正确性，被定量地证明了。但那是什么东西的波动呢？如何来解释薛定谔波？这成了新波动力学的核心难

题。

在第一批解释中，包含薛定谔本人提出的一种。他辩解说，电子不是粒子，而是物质波，好比海洋波是一种水波一样。按照这种解释，粒子的概念是错误的，或仅仅是近似的。那么，不仅电子，而且一切量子实体都是微小的波动，而整个自然就该是一个巨大的波动现象了。

以玻恩为首的哥廷根派，反对这种物质波的解释。他们知道，人们可以用盖革计数器来数出粒子的个数，或是在威尔逊云室里看到它们的轨迹。电子的粒子本质不仅仅是个概念。电子的行为像真正的粒子，这是事实。然而波动又是什么呢？

在 1926 年，玻恩自己回答了这个问题，让我们想象一个通过空间的波动：有时波的高度刚刚高过平均水平，有时则低于它。波的高度叫做波的振幅。玻恩的意思是：在空间任何一点上波的振幅的平方给出了在那里找到单个电子的几率。例如，在波的振幅大的空间区域里，找到单个电子的几率也大，或许 2 次中就会有一次发现那儿有一个电子。同理在振幅小的地方，找到电子的几率也小，比方说 10 次中才有一次。电子永远是真正的粒子，而它的薛定谔波函数只是表明在空间某点上找到它的几率。玻恩认为，波不是像薛定谔的错误解释那样是物质的东西，而是几率的波。对于量子粒子运动的这种描述，具有内在的统计性，不可能精确地追踪这些粒子，一般物理学家所能做到的，也只是确定粒子可能的运动。

由于一定时刻在空间给定点粒子出现的几率应该是唯一的，不可能既是这个值，又是那个值，并且应该是有限的，又在空间不同点处，几率的分布应该是连续的，不能逐点跃变或在任何点处发生突变，所以波函数中必须是时空 (x, y, z, t) 的单值、有限、连续的函数。

应该指出，薛定谔方程不可能从经典力学导出，也不能用任何逻辑推理的方法加以证明。它是否正确只能通过实验来检验。

关于原子现象的理论解释，海森堡在 1925 年提出了另一种称为矩阵力学的量子理论，海森堡认为必须丢开原子一切图像，丢开电子以一定半径环绕原子核运转的那种小太阳系图像，他不去考虑原子是什么，而只考虑它们干了什么，即它们的能量变换。他运用数学方法，把原子的能量变换比作数学的阵列，同时发现了这些数学阵列遵循的规则，并运用它去计算原子过程。矩阵力学的主要思想是：物理变量，如粒子的位置和动量，不再是普通数，而是矩阵，矩阵是把一个普通数推广到一个正方或长方形数字阵列。矩阵力学由海森堡首先提出，而由玻恩、海森堡、约当等人完成的。

于是就有了对原子现象的两种解释：海森堡的矩阵力学和薛定谔的波动力学，他们之间有什么关系？狄拉克和薛定谔运用其变换理论阐明了矩阵力学同波动力学是完全等价的。它们只不过是同一理论的不同表述而已。物理学家们把它们称为海森堡（矩阵）表象和薛定谔（波动）表象。

理解狄拉克变换理论重要性的一个好办法，是利用语言和数学间的相似性。比方说某人用英语来描述一棵树，而另一个人则用阿拉伯语来描述它，英语和阿拉伯语的描述，是对同一对象用不同符号的表达方式。如果你想描述这棵树，你至少就得采用一种语言或表达方式（表象）。一旦你有了一种表达方式，就能通过翻译或变换规则来找到另一种表达方式。同理也就明白对电子一类量子对象的数学描述是怎么回事了。某些表象强调了类似波的特征，而另一些则侧重描述类似粒子的特征，但都是表达的同一体。

波动力学和矩阵力学，利用不同的表象来描述同样的行为。这整套理论，包括狄拉克的变换理论，最终被称作量子力学或量子理论，这是一个新的、取代了经典物理的、数学上严谨的动力学。

量子力学的创立，为理解原子现象，探索原子世界的奥秘找到了一把钥匙，在原子结构和光谱方面，几乎没有什么重要问题是量子力学不能解释的。当人把量子力学应用到光的受激辐射情况中去时，一门崭新的现代技术——激光技术诞生了。它还可以解释元素周期律。对氢分子基态能量的计算，揭露了化学键的本质。化合物的结构和特征，化学反应速度等，都可以归结为量子力学问题，于是，出现了一门近代化学的尖端学科——量子化学。当量子力学应用于固体物理时，更是硕果累累。在量子力学基础上发展起来的金属自由电子理论，不但可以完满地解释电子的比热，金属的磁性，而且可以准确地计算金属的电导率和热导率，这一切深刻地影响着现代金属学和冶金理论的发展。利用量子力学计算晶体中原子的能级，导致能带理论的出现，在这理论指导下，人们制成了晶体管，并发展了半导体工业。量子力学的另一重大发展是建立量子场论，物理学家用不同的量子场来描述不同种类的基本粒子，应用量子场论比较成功地解释了电磁相互作用中某些极为精细的效应，和弱相互作用中的 β 衰变现象（放射性原子核放射正或负电子的现象）。

量子论引起了我们对于物质世界观念的一场革命，如今物理、化学、生物、天文等学科的前沿部分，都与“量子”这个名词有关，量子力学正在应用于各个领域并朝气蓬勃地发展着。

24. 掀开原子能发电的一页 ——记秦山核电站

能源是发展国民经济和提高人民物质生活水平的物质基础，是经济建设的首要问题。建国以来，我国能源工业取得了巨大成就，原煤、石油、天然气、水电等分别占世界第3，第6，第12和第7位。但目前我国能源仍以煤炭为主，虽然我国煤炭储量，目前还比较丰富。但是煤是固体燃料，含灰和硫等成分较多，燃烧时产生大量的烟尘和二氧化碳。尼乔斯在《人类对气候的影响》一书中指出，如果下世纪初煤是世界主要能源的话，由于大气中二氧化碳的增加，造成地球温度显著升高，两极冰盖融化，海平面上升，沿海人口密集地区大面积淹没，以及对人类生活的其他方面将造成重大影响。另外，由于煤的大量使用，环境污染已日益严重。据清初孙承泽所著《天府广记》中记载，古代北京空气十分澄澈，60公里以外的百花山可以看到北京城。目前空气十分浑浊。50年代北京每年平均烟雾日45天，70年代约100天，到1981年达200天左右。1983年4月美国宇航员韦策在记者招待会上指出，他当年宇航时看到的地球，比他10年前宇航时看到的污染严重得多，浓密的污染云雾，正使地球变成一颗“灰色的行星”。但是如果下世纪20年代后世界能源以核能为主，就不会出现上述这种后果。

核能就是原子核能，核能的利用有两种途径：一种为核裂变，是较重原子核分裂为两个（或两个以上）裂块的过程称为裂变。各裂块都是质量较小的核，而且彼此质量相差不大，每个核在裂变时，平均还放出2~3个中子，每一重核的裂变可以放出约2万万电子伏特的能量。1千克铀（ U^{235} ）全部裂变所放出的能量，相当于2500吨优质煤全部燃烧时所放出的能量。现已建

成各种类型利用裂变的原子能反应堆和大功率的原子能发电站。

另一种利用核能的途径是聚变，它是轻原子相互碰撞，形成较重原子核并放出巨大能量的过程。聚变是太阳和某些星球的重要能源，由于轻核需在极高温下，具有足够的动能克服核间的斥力，才能发生聚变，所以亦叫热核反应。为了利用聚变中放出的巨大原子能，各国正致力于研究如何实现可控制的热核反应。

我国已建设两个核电站，第一座核电站坐落在浙江省海盐县海边的秦山，另一座大型核电站在广东大亚湾。秦山核电站从 1985 年 3 月 20 日打下第一罐混凝土开始，经 80 多个月的奋战已于 1992 年并网发电，从此结束我国大陆无核电的历史，核电站设计能力为 30 万千瓦，每年将发电 17 亿度，核电站的寿期为 40 年。大亚湾核电站于 1993 年 7 月 20 日反应堆堆芯达到临界状态（即反应堆启动），至 8 月 31 日 21 点 26 分 1 号机组核能发电开始，到 11 月 27 日 22 点 23 分达到满功率 90 万千瓦运行成功。

秦山核电站中有一座圆柱形球状屋顶的建筑物叫安全壳厂房，它有十几层楼高，外壳用预应力钢筋混凝土浇筑而成，厚约 1 米，里面还有一层用钢板拼接而成的内壳。原子核反应堆就安装在它的中央。为了防止反应堆中的放射性物质泄漏出来污染周围环境，厂房将全部密封起来。

核电站的发电原理与火力发电站基本相同，所不同的是它用“烧”铀的反应堆代替烧煤、烧油的锅炉。在反应堆里，核燃料中的铀 235 受中子的轰击发生链式裂变反应，释放大量的热能来。

该电站的反应堆是压水反应堆，堆内的冷却水有很高的压力，即使水的温度达到几百度也不汽化，所以这种反应堆称为压水堆，压水堆由压力容器和堆芯两部分组成。

压力容器是一个密封的空心圆柱体，高达 20 多米，重达几十吨。用来推动汽轮机转动的高温高压蒸气的能量就是这里面产生的，因此压力容器所用的钢材需要耐高温高压，还要耐腐蚀。

堆芯是反应堆的心脏，装在压力容器的中间。堆芯的构造，看上去像是由很多小方盒子排列而成的。这些小方盒子里装的是用浓缩铀氧化物经过烧结制成的燃料芯块。这些燃料芯块呈圆柱形，粗细与铅笔差不多，把它们装入两端密封、长约 4 米的锆合金包壳管中，成为一根根细长的核燃料元件棒，然后再把它们按 15×15 （根）排列成一个正方形，相互间用弹簧将它们固定住，组成像方盒一样的核燃料组件，在堆芯中有 100 多个这种核燃料组件，堆芯中除了核燃料组件外，还有控制棒和含硼的冷却水。控制棒用银镉镅材料制成，外面套上不锈钢包壳，粗细和核燃料棒相差不多，并将多根控制棒集成一束。控制棒用来控制堆内核反应的快慢。如果反应堆发生故障，只要在堆芯中插入足够的控制棒，在 2 秒钟内就会使反应堆停止工作，以确保反应堆的安全可靠。整个堆芯浸在含硼的冷却水中。反应堆产生热能由流入堆内的含硼冷却水带至蒸汽发生器，将蒸汽发生器管外的水加热成高压蒸汽，放热后的含硼冷却水又重新流回到反应堆内，这个循环回路叫一循环回路系统。从蒸汽发生器出来的高温高压蒸汽，推动设在隔壁厂房中的汽轮机，蒸汽先通过汽轮机的高压缸，再进入低压缸，带动一台 30 万千瓦发电机，作功后的废汽在冷凝器中冷凝成水，再由水泵送入加热器重新加热后送回蒸汽发生器中。这一循环回路叫二循环回路系统。

自从美国三里岛和苏联的切尔诺贝利核电站发生事故以来，人们都十分

关心核电站的安全问题。核电站在发电过程中，会产生一些有害于人体的放射性物质，但是在我国核电站的设计中就充分注意到了这一点，考虑到在最严重事故情况下，不致将放射性物质释放到大气中去，在核电站中设置了四道安全屏障，以阻挡和吸收释放出来的放射性物质；用以保护周围的环境和人员的安全。

第一道屏障是核燃料芯块，陶瓷型的核燃料芯块能将 98% 的放射性物质封闭在里面，只有穿透力较强的中子和 γ 射线才能辐射出来。这样就大大减少了放射性物质的泄漏。

第二道屏障是锆合金包壳管，它能挡住从芯块中辐射出来的放射性裂变产物，使它们不向外泄。

第三道屏障是压力容器和密闭的一回路系统，是可挡住放射性物质外泄。即使堆芯中有 1% 的核燃料元件发生破损，放射性物质也不会从它里面泄漏出来。

第四道屏障是安全壳厂房，采用了双层壳体结构，对放射性物质有很强的防护作用。万一反应堆发生严重事故，放射性物质从堆内漏出，由于有厂房屏障，对厂房外的环境和人员的影响也甚微小。

秦山核电站建成发电后，每年对附近居民辐射的量将小于 1~2 毫雷姆（国际标准为 5 毫雷姆），相当于经常看电视所受到的辐照量，平时，我们每人每年从自然界中受到各种放射线的辐照量约为 100 毫雷姆，可见它对附近居民的影响是微不足道的。

核能的利用是当今世界科技的突出成就。核电作为一种安全、经济、清洁的先进能源已逐渐被各界所承认。核电站产生的集体剂量与天然辐射产生的集体剂量相比是微不足道的，而同样发电量的火电站向大气放出的放射性物质比核电站高 3~8 倍。

目前世界上已有 30 多个国家和地区建有核反应堆 500~600 座，总装机容量为 4 万万千瓦以上，全世界核电的总发电量已占全世界总发电量的 17% 以上。由于世界能源需求的增加和常规能源（煤、石油）的限制，核电在今后仍然会成为一种现实可行的新能源而存在。

25. 取之不尽，用之不竭的能源 ——受控核聚变反应

核能目前已成为一种比煤、石油、天然气更加安全、清洁、经济的能源。有的国家（如法国）已经大部分是核电。核能主要是指裂变能和聚变能，目前世界各国使用的是裂变能，它是利用铀 235、钚 239 等重原子核分裂时放出的能量。当轻原子核聚变成较重的原子核时，也会释放能量，这种能量称为聚变能。

在地球上天然存在的物质中，原子核都带正电。当两个带正电的原子核聚变时，首先要克服彼此之间的静电斥力。氢原子核里只有一个质子，所以相互之间的静电斥力最小，因此最容易发生聚变。氢原子核不但最容易聚变，而且聚变时释放能量多。在氢的同位素中，又以氘（D）和氚（T）之间的聚变最容易。当氘和氚聚变时，两个原子核结合成一个氦原子核（ ${}^4_2\text{He}$ ），即 α 粒子，并放出一个中子（ ${}_0^1\text{n}$ ）。聚变产生的 17.6 兆电子伏特能量的 80%，即 14.1 兆电子伏特，被中子所携带，成为中子的动能，其余成为氦核的动

能。氘聚变时，每单位质量放出的能量比铀 235 裂变时放出的能量多 4.14 倍。

由于两个原子核之间有静电斥力，只有在两个核以极高的速度（每秒几百公里至 1000 公里）相碰撞的情况下，才能克服它们之间的排斥力，最容易的方法是将原子加热到很高的温度。要使原子核发生聚变需要温度超过 5000 万度，甚至高达几亿度。“热核反应”这个名称就是由此而来的。

那么，原子核的聚变为什么会释放出这样巨大的能量呢？原来运动是物质存在的形式，物质和运动是不可分割的。质量和能量是反映物质属性的两个物理量，两者有着一定的相互联系。其数量关系可用质能关系式来表示： $E=mc^2$ ， E 是物体的能量， m 是物体的质量， c 是光速（等于 3×10^8 米/秒）。质量和能量既然是物质的两个方面的属性，又是有一定的相互联系，所以当物质释放出一部分蕴藏的能量时，它的质量也会有一定的损失。例如，在烧煤时生成的二氧化碳的质量，比所用的氧和碳的质量有极微小的差异。1 吨煤燃烧后大约轻 0.000028 克。在原子核的聚变中也是这样，一个氘核（由一个质子和一个中子组成）和一个氚核（由一个质子和二个中子组成）聚变成一个氦核和一个中子，氦核和一个中子的质量总和小于一个氘核和一个氚核的质量总和，它们的差额就称为质量亏损，亏损的那一部分质量就转化为氦核和中子的动能（约为 17.6 兆电子伏特）。虽然在热核反应中，亏损的质量极小，但释放出来的原子核能是相当可观的。由氘核和氚核聚变成 1 克氦核，释放出来的能量相当于燃烧 25 吨煤。因此它是一种很有前途的能源。

氘和氚不仅聚变时释放的能量多，而且它的贮量比铀的贮量丰富得多，目前的核电站，虽然已成为工业能源，但主要只能利用铀资源中占 0.725% 的铀 235，所以到下世纪初就会遇到可以经济开采的铀资源日益枯竭所造成的困难。因此目前国外正在发展可以将占铀资源的 99.27% 的铀 238 加以充分利用的快中子反应堆核电站。

而海水中含有 40 万吨的氘，可以满足人类几十亿年的需要。锂吸收中子可以变成氘，地球上的锂，足够用于人类使用氘、氚聚变的年代。氘不仅贮量丰富，而且和开采铀矿相比，从水中提取氘要方便得多。

根据现代科学研究知道，太阳的能量就是聚变产生的。太阳的主要成分是氢的一种同位素。太阳的质量为地球的 33 万倍，这么巨大的质量产生的引力，将氢同位约束在一起，并使中心达到 1500 万摄氏度，3000 多亿个大气压。太阳每秒要“烧”掉 6.57 亿吨氢同位素，它们聚变成 6.53 亿吨氦，亏损 400 万吨质量。亏损的这些质量变成巨大的太阳能射向茫茫宇宙，仅将其其中 22 亿分之一射向地球，即使如此，仍比地球上人类每年消耗的能量大万倍。

聚变发现于 1933 年，它比裂变早 5 年，并在 1952 年实现了聚变爆炸，但这种核聚变是不可控的，因此，它释放出来的巨大能量很难被人们利用，人们希望研制出一种可控的核聚变反应，也称受控热核反应，使它能持续不断地释放出大量的原子核能为人类所利用。要实现受控核聚变，必须具备 3 个必要条件：（1）要把氘和氚加热到几亿摄氏度的超高温，此时燃料以物质第四态——等离子体形态存在；（2）必须使等离子体粒子密度达到每立方厘米 100 万亿个；（3）要使能量约束时间达到 1 秒以上。这就是核聚变自发点火的条件，此后只需补充燃料（每秒补充约 1 克），核聚变反应就能继续下去。但是这样高温的等离子体，任何容器都承受不了，怎样来盛装它呢？在

研究中发现磁场对等离子体有约束作用。因此用很强的磁场来约束高温的等离子体，使等离子体悬挂在容器的当中，而不与容器壁相接触，这样就不致把容器烧毁，同时也可提高等离子体的粒子密度。这种用封闭磁场组成的“容器”叫磁笼。它看不见摸不着，不怕高温烈火烧。这种方法叫磁约束。

1984年9月在四川乐山市郊，我国第一台大型聚变装置——中国环流1号建成并开始工程物理调度，“环流一号”虽不是点火装置，但将使我国获得一个聚变研究的有力工具，从而将大大推动我国受控聚变的研究工作。

在磁约束取得进展的同时，60年代以来，苏联、美国和我国等一些国家，分别开展了激光聚变的研究，从而在受控聚变的领域，出现了一支强大的新的生力军——惯性约束，即用强功率驱动器（激光、电子、离子束）把燃料微粒高度压缩加热，在瞬间实现微型爆炸。

为了加大激光引爆的效率，一般是对称地布置多路激光，同时照射直径一毫米左右的氘、氚小球。在十亿分之几秒的时间里，激光被靶丸吸收，周围形成一圈由高温等离子体组成的冕区，发出比太阳耀眼得多的光芒，根据聚爆理论，为使激光聚变达到点火条件，除了要提高激光的能量外，还要控制激光的照射方式。经过10多年的努力，激光聚变已取得巨大进展。惯性约束，除采用激光外，还研究采用电子束和离子束的聚束作用，来实现芯部点火。

受控核聚变研究是当代世界科学技术领域的主攻课题之一，80年代建造的最新一代功率最大的有托卡马克—JET（欧洲联合环形聚变装置，设在英国的卡勒姆）、TFTR（美国建在普林斯顿）、T—15（苏联建在莫斯科）及JT—60（日本建在那河）。

1991年11月9日，设在英国的欧洲联合环形聚变反应堆JET进行受控聚变试验，第一次产生了大约1.7兆瓦的电力，持续时间为2秒。这是人类向获得安全的、清洁的和取之不尽的能源迈出的重要的、具有里程碑的一步。在欧洲联合环形聚变反应堆工作的14个欧洲国家的科学家小组在1991年11月11日称，他们希望建造一个能产生等于上述能量5倍那么多能量的新反应堆。他们希望这个新反应堆比这次试验用的反应堆大1倍半，希望利用氘和氚的混合物达到在几秒内产生10兆瓦能量的水平。

为了提供关于等离子体和托卡马克技术所需要的完整数据，需要在前面所述的一些装置和未来的核聚变反应堆之间建立下一代中间装置，这就是美国的TIBER，苏联的OTR，日本的FER和西欧的NET。这4个核聚变研究中心已达成协议，开展一个国际合作研究项目ITER。这个合作项目，主要是研究未来核聚变反应堆所必需的氘—氚等离子体，超导线圈和遥控等技术，于1990年底完成研究和设计，1993年开始建造。因此，核科学家认为受控热核聚变的研究，今后几年将进入关键时期。

从目前情况来看，要实现受控热核反应，建立热核反应堆，直接作为社会生产的动力能源，还有许多复杂问题尚待解决，但是由于热核反应释放的能量要比裂变反应释放的能量大三四倍，在反应过程中产生的放射性物质的半衰期要比裂变反应产生的放射性物质短得多，数量也少得多，而且热核反应的材料——重氢（即氘）很容易获得。仅从海水中提取的氘就够全世界用上几十亿年。因此世界各国普遍关心，并积极探索这一尖端课题。由于人类认识自然、征服自然的能力是无限的。随着人类对原子和原子核内部运动规律的认识的不断深入，特别是1991年欧洲联合环形聚变反应堆的核聚变试验

的成功。为聚变能的广泛应用迈开了坚实的第一步，因此我们相信，人类掌握这个取之不尽，用之不竭的核聚变能，为期不远了。

26. 鼓躁一时的常温核聚变 ——冷核聚变现象

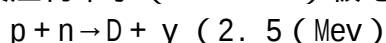
自从 1951 年 2 月 16 日物理学家吕克特在阿根廷的休爱密岛上的实验室内成功地实现了热核聚变反应以来，各国科学家一直在探索可控热聚变反应，以便能有效地解决可靠的能量供应，彻底解决人类面临的能源短缺问题。同时人们亦在探索有没有其他途径实现核聚变。

1989 年 3 月 23 日英国南安普敦大学的弗莱希曼教授和美国犹太大学的庞斯教授宣布常温核聚变实验成功。

弗莱希曼等人使用一个较小的电解槽，槽中装有纯度为 99.5% 的重水（99.5% D_2O + 0.5% H_2O ）和氧化氘锂盐（ $LiOD$ ），阳极是铂丝，阴极为长度 10 厘米的钨棒，极间通以直流电流，电流密度达 500 毫安/平方厘米，他们用了直径不同（1—4mm）的钨棒、肥片与钨块做实验，发现释放出来的热量随钨电极的体积和电流密度的增大而增大，热量释放速度比输入能量（即过热比）高 4 倍，其中有一个实验产生的过热比竟大于 1000%。所释放的热量远大于假定钨中所吸收的全部氢原子与氧结合时所释放的热量。如此大量的释放热，除了归结为核聚变反应所致以外，很难想象出还能是其它什么过程产生的，但是核聚变究竟是否产生要取决于能否观察到核聚变反应的产物，氘（ D ）—氘（ D ）聚变反应

从以上看，核反应产物有氦（ 3He 和 4He ）中子（ n ）、质子（ p ）、氚（ T ）和 γ 射线，弗莱希曼等人发现了发出大量热量的同时伴有中子、 γ 射线、氦和氚产生。

犹太大学的研究组声称测到了氚、中子和 γ 射线，并认为这种 γ 射线是由反应物中子（2.452Mev）被电解池中的质子俘获后产生的。



1989 年 3 月 30 日美国扬伯翰大学的琼斯等人公布了他们在类似的实验中独立地实现了室温核聚变的消息，他们用的电解槽较小，电解液是加了多种盐的重水，阳极是重约 3 克的经过熔融的钛块，其表面积与体积之比较大，他们测到了能量为 2.5Mev 的中子，中子信号比本底信号高五倍，平均每对原子每秒产生 $10 \cdot 24$ 个聚变，但未观察到热效应。

这种在室温条件下产生的核聚变，又称为冷核聚变。

冷核聚变的发现很快就掀起了冷核聚变研究的热潮，到 4 月中旬约有七八个大学的实验小组声称他们在不同程度上重复了弗莱希曼和琼斯的实验结果，但大多数的国家实验室均未能重复。并相继在美国化学学会及物理学会的学术会议上进行了报告与讨论。特别是 5 月 7 日在洛杉矶举行的美国电化学学会会议，在关于冷聚变的专题会上共有 9 个关于冷聚变的报告。虽然其中大多数报告都表示了肯定的结果，但弗莱希曼和庞斯在会上都承认他们在实验中对中子、 γ 射线的测量有错误，并承认 4He 的发现也是不对的，因此大家对他们的结果更加怀疑了，但是庞斯仍坚持他们热量的测量是正确的。5 月 23 日由美国能源部和洛斯阿拉莫斯国家实验室在美国新墨西哥州联

合举行了关于冷核聚变现象专题国际会议，有美国、加拿大、联邦德国、意大利、中国、日本、法国等 10 多个国家和地区参加了会议，提交的报告有 120 多篇，其中有的报告支持和相信弗莱希曼和庞斯的实验结果，有的则反对他们的结果，支持琼斯的实验结果，有的报告则认为不存在冷聚变现象。

在此之后，全世界数百个实验室和上千名科学家投入这场冷核聚变的验证和研究，有些实验室认为证实了冷核聚变反应的存在，有些实验室则发表否定的结果。除了重复进行冷核聚变实验外，还有人从理论上和机制上来考虑这一现象。1954 年诺贝尔化学奖获得者波林认为，宣称测量到冷核聚变产生的热量，可能是化学反应产生的，而不是核聚变产生的。他提出实验用的钷与重水中的氘合成不稳定的氧化钷，在电解作用开始后，这种不稳定的氘化物可能开始缓慢地或者爆发性地分解，结果造成热量的释放，以此解释所观察到的现象，苏联科学家提出，所谓室温条件下的核聚变过程，可能是普通的热核聚变反应而不是冷核聚变反应。打碎含有氘的晶质固体时，在刚形成的表面上出现高密度电荷，高能电子逸出产生高电场，加速氘核达到足够的能量，引起氘的热核反应，并产生中子。另一种可能性是局部形成等离子体导致热核聚变。

冷核聚变现象发现的同时，也招致了反对者，其中物理学家的反对尤为强烈，一开始美国十几位权威物理学家聚会表决，结果压倒多数认为那不是核聚变，只有一二个持保留意见，认为“问题并非就此了结”。且有两位美国理论物理学家则从两个氘核之间库仑势垒的定量计算着手，得出冷核聚变不可能的结论。

因此冷核聚变是真是假问题，仍悬而未决，要作出确切结论，还需做大量的研究工作。那么人们应当如何看待冷核聚变这一现象呢？

1. 冷核聚变反应如果能得到证实，这在科学方面和社会经济方面都具有极为重要的意义，是值得我们关注的，如果能得到可靠的科学数据，不论是最后证实还是否定，冷聚变反应都是很有意义的。

2. 世界科学界核聚变主流派认为，不会那么简单地就产生出高效的能源。即认为即使证实了存在冷核聚变反应现象，也不能认为解决了能源问题。

3. 有人认为弗里希曼和庞斯的发现，其重要性不在于是否叫“核聚变”现象，而在于它是人类在核层次开采方面几十年徘徊不前的一次重大突破。既然在实践过程中有比普通化学反应更多的能量释放，它就必定是一种非常规的化学反应；既然它并不是人们已熟知的核反应，它就必定是一种人类还尚不认识的异常核反应，由此不难看出弗里希曼—庞斯的发现，乃是人类在核层次掘进方向上迈出的又一革命性的一步，继续向着“核换能效应”思路走下去，也许会迎来一个科学的新纪元。

27. 物质有几态

——气、液、固、液晶、等离子态和中子态

世界是物质组成的，综观周围的世界，物质存在的形态各式各样，如岩石、雪花、食盐、水、酒精、石油、空气、氧气等等，通常把这些物质形态，分为固体、液体和气体 3 种状态。

固体是有一定体积和形态的物质，在不太大的外力作用下，其体积和形状的改变很小。当外力撤去后能恢复原状的叫弹性体，不能完全恢复的叫塑

性体。固体又分为在物理性质上完全不同的两类，一类叫晶体，另一类叫非晶体。晶体的基本特征是各向异性，即一均匀物体在不同方向上有不同的性质，例如在不同方向上晶体的膨胀系数不同；在不同方向上晶体的力学的，热学的，光学的和电学的性质不同。晶体最显著的外表特征是它的有规则几何形状。当水在窗玻璃上冻结的时候，水的结晶形成有规则的几何图案，以及单个雪片的规则形状，这是大家都熟悉的。晶体是由几个相交于棱及顶点的平面包围着的。这些平面的相对位置通常是对称的。例如石英所形成的结晶，是一六面棱柱，其两端是六面棱锥；明矾结晶成八面体；岩盐结晶则为立方体等等，在同一晶质的各种不同样品中各晶面间的夹角是严格一定的。例如石英结晶中，棱柱面和棱锥面的角总是等于 $38^{\circ}13'$ 。晶体又分单晶体和多晶体，上图所示是单晶体，一切金属都具有多晶构造，分子力保持着金属的单个小晶体一个挨着一个，所以这种小晶体的整个集团形成一个直接看来是连续的金属块。由于单个小晶体在金属中的方位是不规则的，就总体看金属块不显示出各向异性，虽然每个小晶体是各向异性的。

非晶固体是各向同性的，即它们在一切方向都有相同的物理性质。

如将固体加热，它可从固体状态过渡到液体状态，这称为熔解过程，在这过程中晶体与非晶体的行为不相同。每一种晶体都有完全一定的熔解温度，称为熔点。当温度达到熔点时，物体的温度就停止上升，直到固体完全变成液体时，温度才能上升。如冰熔解过程就是这样，冰熔解时温度保持摄氏零度，直到冰完全变成水为止。非晶体则将连续地由固态过渡到液态，随着温度升高只有软化过程，温度将随时间连续增加，玻璃、松脂、沥青等物体就是非晶体的范例。非晶体接近于粘滞性很大的液体，固体熔为液体的过程称为熔解。其反过程称为凝固，如冰熔解成水，反之水凝固成冰。固体亦可直接变成气体，这过程叫升华，北方冬天洗的衣服，刚一晾出去就结成冰，但它能干，主要是靠升华，冰直接化为水汽离开了衣服，所以衣服照样能晾干。

物质的第二状态是液体，液体是有一定体积而形状随容器改变的物质。如水、酒精、石油等，液体介于固体与气体之间，在外力作用下不易改变其体积（压缩性较小），但容易发生流动。在一般容器中静止时，液体形成与重力方向垂直的水平表面。从微观结构来看，液体分子一方面既在极小范围内有像晶体那样的有规则排列（准晶体结构），另一方面又有像气体分子那样的无规则运动并不固定在一定位置。由于液体分子之间的距离比较小，它们相互间的作用力显著，表面分子受到液面内分子向液内的作用力，使表面产生表面张力。液体在任何温度下都可蒸发，变成气体。如海洋、河、湖中的水不断蒸发而进入空气，是大气中水分循环的重要一环，湿衣服晾干也是蒸发的结果。从物质的分子运动的观点看，蒸发是由于从液体内部逸出液面的分子，比液面附近的蒸汽分子进入液体的数目多所致，将液体加热，当温度达到沸点时，在液体表面和内部同时发生剧烈的气化现象，称为沸腾。在一定的外界压强下沸腾只能在某一特定的温度（沸点）发生。这时液体气化突然加剧，在其内部特别在容器壁处形成大量气泡上升。例如在一个大气压下， 100°C 时水烧开就是这种现象。在沸腾过程中液体不断吸收热量，但温度不变。如果将液体冷却，液体转变为固体的过程称为凝固。晶体物质冷却到一定温度（凝固点）时开始凝固，在凝固过程中放出热量（熔解热），但温度不变，如水当温度降到 0°C 时开始结冰。非晶体物质（如玻璃、火漆、石

蜡等)没有凝固点,它在温度降低时逐渐失去流动性而变为固体。

气体是物质的第三种状态。它是由大量分子组成,能自发充满任何容器的物质,气体分子间的距离较大,相互作用力很小,都在作无规则的热运动;所以气体容易压缩,没有一定的形状。大量的气体分子不断和器壁碰撞而产生压强。温度越高,分子运动就越剧烈,压强就越大。任何气体都可以用降低温度和压缩体积的方法使它变为液体。物质从气态转变为液态的过程,称为凝结。如果已有液体存在,凝结往往在它的表面发生;另一种情况是蒸汽以凝结核为中心凝聚成液滴的过程,如水蒸汽凝结成水,或空中水汽在凝结核上凝成雨滴。气态物质不经过液态阶段而直接凝结为固体的过程,称为凝华。如空气中的水蒸汽直接凝结成霜的过程。

现在我们知道,在固态和液态之间还存在物质的第4种状态,这就是液晶态。

液晶现象是1853年由德国著名病理学家鲁道夫·斐而科首先在显微镜下观察到的,他看到的液晶是神经外鞘髓磷脂,当时他并不知道这是液晶。1888年3月,德国物理学家奥托·李曼与奥地利植物学家弗利德里奇·莱尼泽合作对合成胆甾醇苯甲酸酯这种新物质进行研究。莱尼泽首先发现这种物质与别的物质不同,不是有一个而是有二个熔点,在 145.50°C ,这种白色的晶体变为混浊的液体,在 178.5°C 混浊液体突然变得清澈。李曼后来发现,混浊态具有一种只有固态晶体才有的特性——能使光线发生双折射。1889年8月底,李曼终于确信混浊态的胆甾醇苯甲酸酯是一种“非常软的晶体”,即液晶。液晶是怎样形成的?这个问题直到1924年才由德国科学家丹尼尔·沃伦德做出解释。原来像胆甾醇苯甲酸酯这种具有液晶态的物质,其分子形状与一般分子不同,不是球状而是棒状的。棒状分子除了有“位置有序”性,还多了一个“方向有序”,成百万个分子聚集在一起,顺着同一方向排列。在加热过程中,棒状分子的“位置有序”性首先受到破坏,而“方向有序”性仍保留,这就是液晶态。进一步加热时,“方向有序”性也受到破坏,这时就成液态。现在已经知道,自然界的绝大多数生物,包括人类自身在内,都依赖液晶才得以生存。细胞膜就是一种液晶。生命遗传密码的载体——脱氧核糖核酸,可以形成一种普通的液晶。

对液晶的研究导致一门新兴的技术领域——分子工程的勃然兴起,在60年代,由乔治·格雷领导的研究小组设计并合成了一种性能稳定的液晶分子,用它制成了液晶显示屏,就是现在常见的用于钟表和电动打字机上的那种,这是分子工程获得成功的第一例。1984年又制成了平行层列相的液晶,可以制成更好的液晶显示屏,另外诺尔、克拉克和斯文赖格沃制成铁电液晶器件,可应用于大屏幕液晶电视、光电路和未来的光学计算系统,1978年,印度物理学家S.千德拉锡卡合成了碟形分子液晶。90年代初英国的理·坦普勒和乔·艾达发现改性的碟形分子在冷却过程中会自动绞合成多股,并表现出非线性光学效应。这种分子可用来制造光纤等,新开发的液晶种类层出不穷,液晶领域内的分子工程进展迅速,必将推动高科技迅猛发展。

物质的第五种状态叫等离子体,也叫等离子态或等离子区(一般书上把它与固、液、气并列称为物质第四态)。它是在高温下高度电离化的气体,是带正电和带负电的两种微粒均匀混合,而正负电荷密度几乎相等(从整体上讲呈电中性)的物质系统(其中可以存在极少数未经电离的中性粒子)。例如火焰和电弧中的高温部分、太阳和其他恒星表面气层等都是等离子体。

由于等离子体内部高度电离，存在电磁场和大量运动电荷，不发生一般的化学反应，这就使它的性质不同于一般气态物质。对等离子体的研究可以促进许多科学技术部门的发展。例如氦气在气体放电管中形成的等离子体，在磁场作用下，可脱离管壁，并加热到极高温度，以至产生聚变。这就为实现可控热核反应开辟了一条途径。此外，在天体物理学、气体放电、超声速流体力学、微波器件与技术等方面，等离子物理学也有重要作用。

在地球上比重最大的物质密度约每立方厘米十几克，但是在宇宙间却存在密度高得多的物质，许多恒星晚期将演化成密度极高的星体，称为致密星，致密星大体分为三大类，即白矮星、中子星和黑洞。蟹状星云的中心就是这样一颗中子星，中子星的核心密度高达 10^{15} 克/厘米³。中子星内部存在的物质不是气态、液态、固态或等离子体态，它可以称为物质的第六态——中子态。中子星的半径只有 10 公里左右。中子星的大气层薄而密，其下为固态外壳，其成分为铁原子核和自由电子组成的等离子晶体。在外壳以内，物质密度高达 10^{11} 克/厘米³ 以上，其成分为富中子核（核中的中子数超过正常状况），自由电子和自由中子。再往内部密度达 10^{14} 克/厘米³，这些富中子核挤在一起，界限完全消失，形成“中子海”，还有少量质子、电子和 μ^- 子。在此区域内，中子处于超流状态，质子处于超导状态，而电子则处于正常状态。中子星的核心部分，密度高达 10^{15} 克/厘米³，其成分还不十分清楚。

综上所述，物质存在的形态，除一般书中所说有气、液、固三态外，还有液晶态、等离子态和中子态。

28. 气体分子的运动与气体的宏观性质 ——气体分子运动论

当我们打开一瓶香水，过一会儿，这香味就能充满整个房间。如果将一滴墨水，滴入一杯清水中，你可看到墨水的颜色将逐渐扩散开来，最后使整杯水带有墨水的颜色。这些现象说明什么呢？我们知道香水与墨水都是分子组成的，如果这些分子不运动是静止的，他们怎么能扩散到整个房间与杯子呢？正是由于分子的不断运动，才能使香水和墨水的分子扩散开来。

1826 年英国植物学家布朗发现分子不规则运动存在的实验，布朗将非常小的微粒（如花粉）悬浮于液体中，用显微镜观察这些微粒，发现这些微粒处在连续的不规则的运动状态中，微粒愈小，其运动愈剧烈。这种运动称为布朗运动。这种运动永远不会停止，且不依赖于任何外界的原因，这是物质内在运动的表现，是液体分子不规则运动的结果。运动着的液体分子撞击于任何固体上时，它们就传给这固体一些动量（质量与速度的乘积称为动量），碰撞过程就是物体间的动量传递过程。若液体中的固体颗粒很大，则从各方面撞于其上的分子的数目也非常大，于是在每一瞬间，这些撞击都互相抵消，因而固体实际上保持不动。但是如果物体非常微小，这种抵消就可能是不完全的，偶尔从某一方面较其他方面显著地有较多的分子撞击于微粒上，结果使它发生运动；下一时刻可能另一方面撞来的分子数多于其他方面，微粒被撞向另一方向运动，所以从显微镜中看到微粒作不规则的运动。

必须指出布朗微粒不是分子，它比单个分子要大几十万倍，布朗微粒的运动速度比分子的运动速度要小得多，但是它们的运动可以在显微镜下观察到。

用显微镜观察时，每隔一定时间所记录下来的几个单个布朗微粒的位置。

悬浮在气体中的微粒也作与此相同的布朗运动。

布朗运动说明分子是在作不断的不规则的运动。

现在许多实验证明原子、分子都在不停地作混乱运动。气体、液体、固体的一些物理性质可以用分子运动来加以说明。

盛在容器中的气体，总是要对容器四壁产生一定大小的压强，那么这压强是怎样产生的呢？

我们知道，气体分子是在不停地运动着，这种运动是毫无规则的，它的剧烈程度与温度有关。容器内的气体分子是很多的，在 1 个大气压、摄氏零度时，1 立方米的体积中有 2.68×10^{25} 个气体分子。这些分子都在做着毫无规则的混乱运动，因而它们将不断地撞击在器壁上。就其中一个分子来说，它对器壁的撞击是不连续的，而且它每次给器壁多大的力，碰在什么地方完全是偶然的。但是对大量分子整体来说，在每一时刻都有许许多多气体分子接连不断地和器壁相碰，所以在宏观上就表现出一个恒定的、持续不断的压力。这正如雨点打在雨伞上的情况一样，单个雨点打在雨伞上是断续的，大量密集的雨点打在雨伞上就使撑伞人感到一个均匀持续的压力。单位面积器壁上所受到的气体分子撞击所产生的平均压力，就是气体对器壁的压强。

当两个温度不同的物体放在一起，通过热接触，它们之间就发生了热量的传递，经过一段时间后，这两个物体达到一个新的热平衡状态，使它们都具有相同的温度。

对于气体，我们知道，它的气体分子是在不停地作无规则的热运动（即混乱运动），气体的温度愈高，标志着气体分子的无规则运动愈剧烈。当两种温度不同气体混在一起时，由于分子的热运动，各分子之间发生碰撞，在碰撞过程中分子的运动能量将发生传递，温度高的气体分子，它的平均平动动能要高于温度低的气体分子，碰撞时，动能大的分子将一部分能量传给了动能小的分子，经过一段时间的相互碰撞，使两种气体的平均平动动能趋于一致，宏观上即表现为温度一致。

所以气体的温度是与大量气体分子的平均平动动能相联系的，它是大量分子热运动的集体表现，温度愈高，分子的平均平动动能就愈大。

由此可知，气体的压强与温度这些宏观的物理量，是与气体分子的混乱运动的性质有关，压强是大量分子碰撞器壁形成的，温度则与分子的平均平动动能有关，是分子混乱运动程度的量度。

29. 气体分子运动速度一样吗 ——气体速率分布规律

气体分子是在不停地作混乱运动，它们的速度大小都一样吗？理论与实验都告诉我们气体分子的运动速度不是大家都一样的，有的速度大，有的速度小，分子速度的大小分布可以用实验直接测定。

1920 年斯特恩首先用实验测定了分子速度的分布，1930—1934 年蔡特曼和我国物理学家葛正权对斯特恩的方法作了改进，用铋蒸汽测定了分子的速度分布，是他们的实验装置示意图。金属铋在炉 O 中熔化并蒸发，铋原子束

通过炉上小孔逸出，又通过狭缝 S_1 和 S_2 进入圆筒 C，圆筒可绕中心轴 A 顺时针方向旋转，转速约为每秒 100 转，全部装置都置于真空容器中。

如果 C 不转动，铋分子穿过 S_1 ， S_2 ， S_3 进入圆筒，并沉积在贴在 C 内壁上的弯曲玻璃片 BG 的 B 处，显然 S_1 ， S_2 ， S_3 与 B 在一条直线上。如果 C 以一定的角速度旋转，铋分子在由 S_3 到达玻璃片的这段时间内，由于 C 转过了一个角度而沉积在 BG 中的某处 B' 处。分子速度愈慢 B' 离 B 愈远，速度愈快沉积处离 B 愈近，所以在分子射线束中，不同速度的分子将沉积在 BG 玻璃片的不同位置上。当 C 以恒定的角速度旋转较长的一段时间后，取下玻璃片，并测出各处铋层的厚度就可以得到铋分子数按速度的分布规律。铋层厚的地方这种速率的分子数就多，反之则少。

实验测得，具有很大速率或很小速率的分子数较少，具有中等速率的分子数较多。当温度升高时速率大的气体分子数增多。

所以说气体分子的速率不是大家都一样的，有一定的分布规律。温度愈高、速率大的分子数愈多。

30. 遨游太空 ——宇宙火箭与宇宙速度

我国古典神话小说西游记，封神榜中都有人类幻想进入太空的描述。但那时只能是幻想而已。自从 1957 年 10 月 4 日苏联第一颗人造卫星进入太空，1961 年 4 月 12 日苏联载人宇宙飞船发射成功，使自古至今人类伟大的理想实现了，在人类征服宇宙的历史上翻开了新的篇章。

要使人飞入宇宙，必须使用宇宙火箭，一提起火箭，全世界都公认，这是我国最先发明的。由火药喷射推进的火箭发明年代，大约是唐末宋初。

火箭是怎样飞行的？这可以从燃放“升天”，“二提角”这类爆竹中得到启发。在这类爆竹内部装有火药包，当火药被点燃向下喷气的时候，爆竹就急速上升，这就是一种小型原始火箭，火箭所以会飞，不是利用它里面燃烧的火药产生的气体来推开空气使自己起飞的。火箭起飞的道理，同开炮时炮弹向前飞去而炮身后坐的情形完全一样，你可以想一下步枪和各种火箭在发射时的“后坐力”。假使把大炮悬在空中，不给它支撑点，炮身在射击时就会向后运动，它的速度与炮弹向前的速度比，等于炮弹重量与大炮的重量之比。火箭相当于大炮，不过它射出的不是炮弹，而是火药燃烧后的气体，火药燃烧所生成的气体以很高的速度向后喷射，喷射气体的反冲作用使火箭前进。所以火箭可以在空气很稀薄的高空，甚至在没有空气的宇宙空间照样飞行。

要发射宇宙飞船是不能用普通燃料的，因为火箭必须具有很高的速度，它要求燃料体积小，重量轻，但发出的热量却要很大，这样既能减轻火箭的重量，又能产生很大的推力。同时，它还要求燃料具备容易控制、作用时间较长等条件。采用固体燃料能满足这个要求，如无烟火药等，因为它的燃烧很剧烈，能产生很大的推动力。但固体燃料有不少缺点，主要是作用时间短，推力不易控制等。液体燃料比固体的火药在这方面要优越得多。因为液体燃料燃烧时所放出的能量较大，推动力也就大，它的燃烧时间可长达几分钟或几十分钟，而且比较容易控制。所以，目前发射人造卫星或飞船的火箭大多

数采用高能液体燃料。除了燃料外，火箭还得带助燃物质。因为发射卫星和飞船的火箭，要飞到空气十分稀薄的高空，不可能像在地面上那样有氧气助燃，一般采用低温下的压缩氧气。

要使载人宇宙飞船飞入宇宙，首先必须具有推力强大和构造完善的火箭发动机，就以苏联第一个载人宇宙飞船东方号为例，飞船重 4 725 公斤，即约 5 吨，将这样巨大的有效重量送往卫星轨道的运载火箭有多重呢？为了估算，我们先利用美国卫星运载火箭最优数据：有效重量与火箭起飞重量之比约为 1 200，如果以此估算，东方号的运载火箭起飞重量将达 1000 吨之巨，如果起飞重量与推力比为 1 1.4，对东方号运载火箭的推力就须 1400 吨，如果按有效重量与火箭起飞重量比为 1 100，也还将近 500 吨，推力也将达到 700 吨。如此巨大的推力将要求发动机采用先进燃料，但高能燃料的燃烧必然产生很高的温度，因此先进材料的使用，合理发动机的设计，将成为必须解决的问题，要得到 700 吨推力，如果用几个发动机来完成，则对发动机的控制、可靠性、同步性以及推力偏心的允许值等等都是要求非常严格的。

宇宙飞船的运载火箭一般是多级火箭，对于如此巨大的起飞重量而言，多级火箭的重量分配问题则是一个非常重要的关键，如果这一问题解决得好，火箭重量可大大减轻，否则起飞重量可能比最优值 500 吨重得多，甚至会比

最优值增加 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。必须指出载人宇宙飞船的设计还有它独特之处，那就是必须设计出保护人体不被宇宙射线伤害，并能克服由于压缩及摩擦产生几千度的火箭外表温度，能在返回着陆装置作用下安全返回地面。这就要求火箭工艺具有很高的水平。

为了确保载人飞船飞入宇宙并安全返回，必须具有高度发展的喷气技术、控制技术、无线电遥控、光学、特殊材料的制备与计算技术。

我国已成功地多次发射各种人造卫星，并用长城捆绑式长 火箭成功地发射澳星成功。这说明我国在运载火箭上已达到了先进水平。我们还计划到下世纪发射载人宇宙飞船。中国人遨游太空的日子为期不远了。

卫星或飞船能否上天，关键在于速度。什么样的速度就能使卫星或飞船环绕地球运行而不掉下来呢？我们都有这样的经验，用不同的速度沿水平方向将石头抛射出去，抛射速度越大，着落点离抛出点的距离就越远，石头所以要掉下来，是因为它受到地球吸引力的缘故，如果石头飞行的速度达到这样的大小，使石头所受的地心引力，恰好等于它绕地球作圆周运动时的向心力时，石头就不掉下来，成为一颗绕地球的小卫星了。我们知道石头（质量为 m ）受的地心引力即石头的重量 mg （ g 是重力加速度，它等于 9.8 米/秒^2 ），当它以速度 v_1 在地面附近作绕地球的圆运动，它的向心力为 $m \frac{v_1^2}{R}$ ，

当两者相等时， $mg = m \frac{v_1^2}{R}$ ，算得速度 $v_1 = \sqrt{gR}$ 。地球半径 R 约等于 6.4×10^6 米。代入得 $v_1 = 7.91 \text{ 公里/秒}$ 。这就是卫星环绕地球运行必需的最小速度，人们称它为第一宇宙速度。

如果卫星在地面高 h 的地方飞行，则它的环绕速度为 $v_1 = \sqrt{g(R+h)}$ ，

比 7.91 公里/秒要大一些。

卫星能否发射成功以及运行轨道的形状，取决于人造卫星的环绕速度。这个速度如果恰好等于该高度的环绕速度时，卫星的轨道形状是一个圆，如果大于该高度的环绕速度，卫星轨道是一个椭圆。

当速度大到可以摆脱地球引力而飞离出去时，这时卫星轨道就不再是椭圆而是张开着的抛物线了。卫星飞离地球的最小速度叫做第二宇宙速度。我们可以把卫星飞离地球看作卫星从地面飞向无限远处，在这个过程中（不考虑空气的阻力），卫星必须克服地球的引力做功。卫星从地球表面飞往无限远处所需作的功为 mgR ，这功等于卫星发射时具有的动能。

公里/秒 ≈ 11.2 公里/秒这就是第二宇宙速度。

如果进一步增加卫星的飞行速度，它可以摆脱太阳的引力，飞离太阳系，人们把人造卫星挣脱太阳的引力，飞离太阳系的最小速度称为第三宇宙速度。计算表明，如果让卫星脱离地球轨道的方向与地球绕太阳运动的方向一致，则卫星飞离太阳系的最小速度 $v_3=16.7$ 公里/秒。这就是第三宇宙速度。

由此可知，当卫星发射速度在 v_1 与 v_2 之间时，它成为地球卫星，运动在不同的椭圆或圆形轨道上。卫星运行的轨道越高发射时所需的速度也就越大，如果发射高度为 35840 公里同步轨道上的卫星，它所需的发射速度计算得为 $0.96 v_2$ ，即已经是第二宇宙速度的 96% 了，所以发射这样的同步卫星时，只要稍有误差卫星就将飞离地球。当卫星发射速度大于 v_2 小于 v_3 时，它将成为太阳系中的一颗行星。当卫星发射速度大于 v_3 时，卫星即飞离太阳系成为宇宙中的一员了。

从 1961 年到现在短短 30 多年，人类在航天技术上已有了飞速发展，过去的幻想，今天变成了现实，人类已能巡游九天，漫步月面，我们相信到 21 世纪，航天事业将有更大的发展，航天飞行器的寿命将延长，通讯卫星进一步发展，将对太阳系的其他八颗行星进行进一步的探测研究，探测其他星球上有没有生命。也有人设想将来会出现向地球输送电力的发电卫星，反射太阳光使夜间异常明亮的照明卫星，甚至有人设想建造人造天宫，建设天空城市，使人类能够离开自己的故乡——地球，到天宫中去安家落户。我们希望让航天事业更好地为人类服务吧！

31. 物体的重量会变吗 ——超重与失重

日常生活中常常说某人体重 80 千克，某举重运动员挺举 200 千克，即他的杠铃重 200 千克。这里所说明体重、杠铃重实际上是指的质量。质量是物体的固有属性——惯性的量度，亦是物体所含物质的多少，因此它是不随地点而变的。在低速运动时，物体的质量是不变的。只有在速度接近光速 c ($c=3 \times 10^8$ 米/秒) 时，根据狭义相对论，质量才随物体的速度增加而增加。物体的质量一般要用天平、磅秤来称量。

地面上物体的重量（我们叫它实重）是由地球对物体的吸引力产生的，这个力叫重力，重力的大小叫做重量，它等于物体的质量与重力加速度 g 的乘积。

地球对一个物体的吸引力，是随物体离地心的远近而变化的，在高山上

要比在平地上轻一些。在地球的不同部位同一物体的重量亦不一样。另外重量还随物体在垂直方向上的加速运动情况而改变。物体的重量是用弹簧秤来称量的。

从前曾有人从北纬 50 度附近的一个港口，用船装了重量为 5000 吨的货物，运到靠近赤道的一个地方，用弹簧秤一称，发现货物少了近 19 吨，途中又未卸下任何货物，当时不知怎么少的。原来是地球引力跟这个人开了个玩笑。由于地球稍带呈椭球状，南北两极处地球的半径要比赤道处大约小 20 公里，半径小，地球的引力就大了，赤道附近比北纬 50 度处的引力小，所以货物的重量自然轻了。

用弹簧秤称出来的重量，应该叫视重，当弹簧秤和物体都静止时，称出来的视重正好等于实重。如果我们把弹簧秤放在电梯里，把物体放在秤上。当电梯加速上升时，弹簧秤上的读数要大于物体的实重，这种视重大于实重的现象称为超重；当电梯加速下降时，弹簧秤上的读数小于实重，即视重小于实重，这种现象称为失重。如果让弹簧秤和物体一起自由下落，则弹簧秤上的读数为零，这称为“完全失重”状态。

当电梯突然下降，或汽车快速通过拱形桥面对，人们都会产生一种特殊的感觉，这就是由于失重引起的，在飞机作特技飞行时，在人造卫星与宇宙飞船进入轨道的运行中，都会出现失重现象。人在载人宇宙飞船中呈漂浮状态就是由于完全失重的表现。失重以后，人和动物的动作都有失调的表现，但能忍受与适应。在飞机与宇宙飞船的垂直起飞过程中，将发生超重现象，超重过大会对人体造成危害，故需采取一些措施如使身体与加速方向垂直，以便超重分布在人体较大的面积上等。

由此可见重量是会变的，它随地域和运动情况而变，可以超重亦可以失重，而物体的质量是一定的。

32. 明月天天有，此事今可全 ——太空镜反射阳光成功

苏东坡词云：“明月几时有？把酒问青天，……人有悲欢离合，月有阴晴圆缺，此事古难全”。由于地球、月亮的运动，月圆月缺有其自然规律，我们不能把月亮栓住，使每天像中秋节那样看到皎洁的明月。但是自从人类进入太空时代，要改变这种状况不是不可能的，可以给黑夜以永明的全月。

现代空间科学技术能够帮助我们解决这个“古难全”的问题，不过不是在天然月亮身上打主意，而是向太空发射“人造小月亮”。

早在 80 年代初，美国宇航局就酝酿发射一个“人造小月亮”的计划，按当时的设想，这颗“人造小月亮”是一个照明用的人造地球卫星，不带复杂的仪器设备，它结构是：外形呈板状，由 12 块半径为 150 米的圆形反射镜组成，反射镜用镍钴合金或不锈钢制成，研磨得溜光锃亮。“人造小月亮”的总面积不到 0.85 平方公里，重量只有 45 吨，同泱泱天空中的月亮相比，真是小巫见大巫，微不足道。但是由于它表面光洁度高，反射太阳光的能力要比表面坑坑洼洼的天然月亮高出许多倍，同时它离地球近，不到月地距离的 1/10，因此从地球上看来，估计它的亮度可以达到“十五的月亮”时的 10 倍。

计划中的这个“人造月亮”离地球 358600 公里，自西向东顺着地球自转

的方向同步转动。这样一来，这个“人造月亮”就像一盏高悬于太空固定不动的“天灯”，把太阳光反射到地面上，使一个直径为 360 公里的圆形区域得到照明，通过一个追日镜装置，使反射镜镜面自动调整到使受照射区稳定不变，总是呈“十五的月亮”。

美国的计划虽已提出 10 多年了，但至今未付诸实施。

可是在 1993 年 2 月 4 日莫斯科时间 8 时 28 分，俄罗斯“和平”号空间站上进行的太空镜实验获得成功。这是人类历史上一次前所未有的空间实验，太空镜反射的阳光照向地球背阳的一面达 6 分钟左右。

2 月 4 日的这次代号为“旗帜”的太空试验，是俄罗斯“变黑夜为白昼”计划的第一步，目的是验证一下，用“人造小月亮”（即太空镜或太阳光反射器）反射太阳光，为北极圈内的城镇，边远地区和自然灾害地区提供夜间照明的可能性。

俄罗斯航天专家们设计的这个“太空镜”，比美国计划中的照明用地球同步“人造小月亮”要小且轻得多，它不是用金属板而是用涂铝的塑料膜制成，薄膜比纸还薄，有很强的反光能力，直径 22 米，只有 4 公斤重，加上骨架也不过 40 公斤。

太空镜用“进步”号无人驾驶宇宙飞船载运到驻有两名“宇航员”的“和平”号空间站，飞船在那里完成了运送食物、燃料和机械零件的任务后，即离开空间站徐徐降落。当它降落到离空间站 150 米处，释放出太空镜，被卷成像把伞的太空镜开始转动，转动产生离心力使“伞”慢慢撑开，形成一个直径约为 20 米的圆盘形太空镜。这面太空镜离地面只有 350 公里，迅速地绕着地球旋转，由它反射到地面的阳光，自南向北扫过一条宽约 4 公里的区域，其中包括里昂、日内瓦、伯尔尼、慕尼黑等城市。如果夜空晴朗，这一区域的人们将看到 2—3 倍于满月的“人造月光”，只是随着太空镜的迅速移动，“人造月光”也就很快消逝不见了。

俄罗斯的这次太空实验取得了圆满的成功，反射镜打开的程度比预先计划的要大，而且反射光线的时间和强度都超过了预期的水平。太空镜在完成反射试验之后，已经脱离“进步”号宇宙飞船，大约飞行一二天后就在大气层中自行烧毁。

俄罗斯航天专家们对未来设想更加宏伟，下一步将建造面积更大，效率更高的太空镜，并研制把反射光聚集到固定地点的导向系统。计划在今后若干年内把 100 多面太空镜发射到离地面 1500 到 5530 公里的空间轨道上，使他们形成一个环绕地球的太空镜圈，以便根据需要给“用户”提供合适的“人造月光”。

这次“太空镜”的试验成功，必将使明月天天有，黑夜变白昼，这个自古以来的梦想变为现实，使航天事业造福于人类。

33. 体之秘 ——黑洞

在天体中，我们知道有星团、星云、星系、恒星、行星、卫星、彗星和流星等，除了这些天体外，根据爱因斯坦广义相对论，其引力场方程的一个解即是黑洞，它是一种呈现引力塌缩状态的特殊星体，由于它能产生强大的

吸引力，外界物质纷纷被它引入，并且无一逃遁，即使光线也不例外，因此我们用一般方法是观察不到它的。

那么，黑洞是怎样产生的呢？这与恒星的形成与演化有关。

根据目前多数科学家赞同的大爆炸宇宙论，在大爆炸开始时期，由于辐射与物质强烈相互作用，相互之间耦合很强不能分开，宇宙大爆炸后约经 20 万年，温度降到 4000K，宇宙密度降为 10^{-18} 千克/米³，物质从辐射中解耦出来，此时辐射虽依然存在，但它与物质已没有强烈的相互作用而较易传播出去，在解耦发生以后，在宇宙整体膨胀的同时，那些尺寸大于 30 秒差距（即 97.74 光年的距离）质量大于 $10^6 M_{\odot}$ （ $M_{\odot}$ 为太阳质量，在天文学上成为一种质量单位）的“区域”就可以成为凝聚的中心，从而逐渐形成了星系团、星系。恒星是在星系形成过程中伴随着形成的。在弥散的气体云收缩过程中，有一些质量大于 $10^3 M_{\odot}$ 的星云碎块成为吸引的中心。收缩使这些星云碎块体积缩小，密度增大，聚成球状，温度上升到一定阶段，向外发射不可见的红外线，称之为红外星。这时，开始向原始恒星转化，这过程估计需要数千万年。红外星温度急剧上升，当表面温度达三四千度时，便发出可见光，这时的恒星是红色星。当恒星内部的气体压力和辐射压力同恒星的自身引力相平衡时，恒星进入相对稳定的阶段，这就是主星序阶段，现在我们所见到的恒星，包括太阳在内，大部分处于这一个阶段，在这一个阶段，表面上是稳定的，但内部正发生激烈变化，当内部温度上升到 700 万度左右，开始发生热核反应，这时主要是氢聚变反应，经数百万年以至几百亿年，当恒星中心部分的氢聚变生成的氦核超过 40% 时，恒星内部的稳定被破坏，向外辐射的压力顶不住外层的引力，恒星又开始收缩，引力收缩释放的能量使中心温度可达一二亿度。由于内部温度极高，外部温度相当低，一旦平衡破坏，外壳就急剧膨胀，这时的恒星就会变成体积大、密度小、表面温度低，但光度很强的红巨星。

红巨星体内的高温，使其内部的氦核聚变为碳核，经几百万年，当恒星中心区域的氦核全部变为碳核，相对平衡又遭破坏，引力收缩又成为恒星活动的主导方面，温度又上升，达到 30 亿度，发生碳核聚变。由于能源越来越枯竭，恒星进入晚期，由于它的质量不同，其结局也不一样。质量 $1.3 M_{\odot}$ 以下的恒星，在引力作用下向心收缩，体积缩小，密度增高，变成所谓白矮星。如果质量大于 $3 M_{\odot}$ ，由于引力作用强，一旦核反应结束，向心力失去平衡，发生迅猛异常的塌缩，同时向外发生强烈的冲击波，外层物质猛然向星际空间抛射。这就是超新星爆发。1987 年 2 月 23 日就观测到了近邻星系大麦哲伦云中超新星 SN1987A 的爆发情形。

超新星爆发，可分为三种情况，其一部分在爆发过程中抛射到空间的物质，成为弥漫星云，将开始它的新历史。其核心部分塌缩造成的巨大压力，使原子中的核外电子被挤入原子核和核中的质子结合成中子，从而形成中子星（亦称脉冲星）。如果经超新星爆发后，剩下的质量仍大于 $2 M_{\odot}$ ，则塌缩后将形成比中子星密度更高的天体，即所谓黑洞。当恒星进入黑洞状态时，万有引力大到能吸引所有进入其区域的物质，连光也不能从中逃逸出来，所以，这种天体不易观测到，故称之为黑洞。

70 年代起，天文学家开始对黑洞进行了特别的研究，1977 年 8 月，美国国家航天局发射了一颗人造卫星，用于寻找据信存在于银河系的一千万个黑

洞，不仅如此，该局还建造一座新的天文台，专门研究被认为是黑洞的各个爆炸的星球。

双星系的研究成果为黑洞的存在提供了最能令人信服的证据。双星系，是指在宇宙中一对位置相互影响的星体。天文学家发现，在某些双星系中存在着一颗观察不到的伴星。有一颗编号为 HDE226868 的星球，它的伴星的质量看起来有太阳的 10 到 20 倍，但是我们观察不到它，而 HDE226868 星球上的物质却源源不断地被吸往它的伴星。这种观察不到而又产生巨大引力的星体可能就是黑洞，此外，天文学家还发现到另一些星体，他们的伴星也可能是黑洞。

1992 年美国夏威夷大学和密执安大学的天文学家宣称，他们在距地球 3000 万光年的 NGC3115 星系中心，发现了一个比目前已知同类天体大 100 倍的黑洞，这个黑洞是在天文学家们计算出环绕 NGC3115 星系中运动的普通恒星的质量后，再测量这些恒星的运动速度时发现的。天文学家发现，该星系内恒星的随机运动速度随着与星系中心距离的缩短而激增。这个情况表明：星系中心存在着极强的引力，因为如果没有以黑洞形式存在的引力中心，该星系就会飞散解体。这两位天文学家认为，NGC3115 星系内的黑洞物质大小相当于太阳及其周围所有行星总和的整个太阳系，黑洞的密度比太阳的密度大出 10 亿倍。

据哈勃太空望远镜拍下的比以往任何时候更详细的一星系照片，看到有证据表明，为太阳质量 26 亿倍的一个黑洞把一些恒星吸引到该星系的中心。到目前为止，国际天文界公认的黑洞有下列诸例，属于星系核心的有矮椭圆星系 M32，巨椭圆星系 M87，仙女星系 M31，旋涡星系 NGC3115，4594 和 3377，“草帽”星系 M104，赛弗特星系 NGC6814，赛弗特星系 NGC5548 和蝎虎天体 OJ287。银河系中心是否存在黑洞是一个有争议的问题，哈勃太空望远镜的观测资料说明，猎犬座涡状星系 M51 的中心有黑洞存在的迹象，但不能定其质量。属于双星系统的有天鹅座 X—1，V404，麒麟座 A0620—00，麒麟座变星 V616 等。

黑洞是否存在？或者一个星体的引力塌缩是否可能发生？

首先，黑洞是爱因斯坦场方程的解。爱因斯坦的引力理论已被一些判别性的实验所证实，在描述自然定律上，爱因斯坦的引力理论是正确的。因此也完全可以假定，由引力理论所预言的自然界物质特性也是真实存在的。因此，作为引力理论的一种逻辑推理，黑洞完全有可能存在，当然这还要由观察结果去证实。可以肯定，对黑洞的研究将是引力论、天体物理学甚至宇宙学中的一重要课题。

34. 神秘莫测的星 ——褐矮星

如果你在无云的夜晚，观察一下夜空，你会发现满天星斗，闪耀发光，它们大部分是恒星。这些星星不仅有明有暗，还有不同的颜色，仔细观察，它们有红、白、蓝、黄等不同的颜色差别，为了对星星进行分类，天文工作者用光谱和光度来表示恒星的色与亮度。

什么叫光谱？就是复色光，例如太阳光看起来是白色的，实际是复色光，经过三棱镜后，形成按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫次序连续分布的彩色图

案，这种把光波按波长（或频率）的大小依次排列的图，就称为光谱。天文工作者观测了许许多多的恒星后，发现它们的光谱千差万别，究其原因是因为恒星的温度不同而造成的。温度低的恒星发出的红光强，即光谱中波长较长的部分强，温度高的恒星发出的紫光强，即光谱中波长较短的部分强。只要测得恒星光谱中不同波长部分的强弱程度，就可以知道它的表面温度。根据这个道理，人们将观测到的绝大多数恒星光谱，大致分成 O、B、A、F、G、K、M7 个光谱型。每一光谱又分成若干个“次型”，如 F_0 、 F_1 、 F_2 …… F_9 。O 型星表面温度最高，从 2 万多度到 4 万度以上；B 型星是 1 万度到 2 万多度；A 型星是 7 千多度到 1 万度以下；F 型星是 6 千多度到 7 千多度；G 型星是 5 千多度到 6 千多度；K 型星是 3 千多度到 4 千多度；M 型星是 2 千多度到 3 千多度。太阳属于 G。这个次型。下面我们列一张表，以便大家了解光谱型，恒星表面温度与颜色的关系。

恒星的光度是指恒星在 1 秒钟内向四面八方辐射的总能量，亮度是单位垂直面积上的发光强度，表示发光面沿各方向上发光强弱的物理量。我们知道灯的亮暗与距离有关，同一盏灯离远了看起来就暗，近了就亮，天文学中用“绝对星等”来表示恒星的真实亮度，用“视星等”来表示恒星的亮度，表现在人眼、底片和光度计上的等级。越是亮星，星等级数越小。

70 年代中期正式命名一类新的天体，称为褐矮星，根据目前所得的观测资料，美国亚利桑那大学天文物理学家布鲁斯对褐矮星的特性作了如下的推测，他认为这种星体初生之际，表面气温约为 6000 度，是一团能发深色橙红光线的星云，但在形成后约一亿年，褐矮星表面的气温冷却到 4000 度，在其后百亿年间降至 1000 度而成为一颗冷星。不过在此温度下，大部分的金属元素仍在气态中，然而由于这种天体仍有相当的质量，因而其内部的引力场足以将较轻的元素形成液态金属状，从而构成褐矮星的星核。星核外可能有一层由水气、二氧化碳、甲烷以及其他稀有分子组成的稀薄大气，这层大气的吸光作用，使其星核内所发的光更难外溢。

80 年代后期到 90 年代，美国亚利桑那大学天文学家卡锡及其研究生亨利在距地 26 光年（1 光年约 94605 亿公里）以内的 77 颗红矮星之间，利用光点干涉仪进行了一系列系统的搜索，发现了 3 颗大小均合乎褐矮星类别的天体，此外欧洲多国天文台的天文学家也宣称发现了 6~7 颗可能是褐矮星的天体。

近 10 年来利用红外光点干涉仪对褐矮星的观测，取得了一些重要的成就，对褐矮星的观测研究必将对天体的演化提供必要的论据。

35. 地球的伙伴之一 ——土星上的奇特现象

土星作为地球的伙伴，早在人类文明开发初就为我们所熟识，它是太阳系 9 大行星之一，以距离太阳的次序计，是第 6 颗，列水星、金星、地球、火星、木星之后。与太阳的平均距离为 142800 万公里。赤道直径为地球的 9.5 倍，质量是地球的 95.22 倍，密度只有水的 65%。公转周期为 29.46 年，自转周期 10 时 14 分，形状很扁。因为我国古人认为它 28 年运行 1 周天，正好每年由二十八宿的一宿移至相邻的另一宿，带有巡视镇定的意思，所以又

称为镇星或填星。土星表面大气层很厚，主要成分是沼气和少量的氨，氨大部分凝冻成为固体。表面最高温度 -153°C ，除有二十几颗卫星外，还有特有的光环，它们是沿上星赤道围绕上星运动的环形物质，光环分外环、中环、内环，由三个亮环两个暗环组成，由土星外层向内依次为 E、A、B、C 和 D，A、B、C 为亮环，E、D 为暗环。光环很薄，厚度不到 16 公里。肉眼看不到它。因为环的平面对黄道面（即地球的公转轨道平面）有 28° 的倾斜，当光环平面与我们的视线相合时，在天文望远镜中也看不到它。土星光环为无数平均直径不到 1 米的小物体所组成，它们的总量还不到月球的百分之一。以上数据是多年来从地球上进行天文观测所得到的结果，土星到底是什么样的星，光环是如何形成的，结构如何？有待进一步探索。

自从空间科学的迅猛发展，人类可以借助自己制成的使者——宇宙火箭去拜访我们的伙伴了。

1973 年 4 月 6 日，“阿特拉斯——半人马”火箭载着飞船“先驱者 11 号”在美国卡纳维拉尔角发射升空，作为地球的使者首次去拜会土星。“先驱者 11 号”飞行 6 年多终于在 1979 年 4 月到达了距地球 14 亿公里的土星附近，经过两周时间发回的讯息，使我们对这位伙伴的了解顿时增加一千倍。

“先驱者 11 号”发现了两个光环和一个环缝。测定土星光环的质量约为土星的千万分之一。光环的颜色不一，有几处为红色、棕色和褐色。此外还发现了一个新卫星，被命名为先驱岩或土卫十二。

对土星的辐射带也进行了测定，发现土星的辐射带较木星要弱得多，而土星发射的热量约等于它吸收热量的 2.8 倍。

在距离土星 128 万公里处就发现了土星的磁场，它大约是地球磁场的一千倍，较木星磁场要弱 20 倍。磁场的北—南轴与土星的自转轴基本一致。土星的磁图形状像条大鲸鱼。

为了再度访问土星，1977 年 4 月 5 日，“旅行者 1 号”开始了它访问土星的漫长旅行，经过三年多的长途跋涉，于 1980 年 11 月 13 日距土星 124370 公里处掠过土星，并穿环而过，在土星环的下方、上方、背阳面和向阳面等不同角度探测了土星环，并从“旅行者 1 号”发回 17500 张彩色照片，使我们了解到，来自土星的云顶到距土星中心 32 公里处密布着几千个土星光环，犹如太阳系中一张最巨大的密纹唱片一般。在著名的卡西尼环缝中也发现了四个亮环。此外，又在土星的暗环中发现了许多新的环缝。土星环也不如我们以往想象的那样整齐匀称。而是大小不等，有的对称，有的不对称，有的凹凸不平，有的亮，有的暗，真是千姿百态，各具特色。最奇怪的是发现 F 环中有几个环互相扭结，就好像姑娘们梳的辫子一样。此外还发现有神秘莫测的经向轮辐结构，由土星出发经过 B 环。土星本体上在南纬 55° 处发现了一个桔红色的斑云，类似著名的木星火红斑。土星上赤道的气流刮着每秒 500 米的飓风，比木星强 4 倍，但气流是向东转动的，与木星相反。

这次还发现了三颗新卫星，即土卫十三，土卫十四和土卫十五。且发现土卫十与土卫十一只相距 48 公里，它们犹如连体孪生子，共同在一个轨道上你追我赶。

“旅行者 1 号”测得土卫六的直径为 4828 公里，而木星的木卫三的直径为 5150 公里，所以木卫三是太阳系的长孙（最大一颗卫星），而土卫六只得屈居第二了。土卫六有浓厚的大气层和云层，其中氮占 98%，是太阳系中唯一有大气存在的卫星，土卫一、三、四、五直径较小，它们都有很多陨石坑，

是由大大小小的陨石狂轰滥炸而形成的，这是彗星和更远古时期星子相撞的记录。

继二次访问土星之后，于 1977 年 8 月，“旅行者 2 号”辞别地球，开始对土星进行第三次探测之行。1981 年 8 月 25 日在距土星云尾 101000 公里掠过，考察了土星光环及 4 个卫星，共传回照片 1000 多幅，由于当“旅行者 2 号”逼近土星向土星背面驶去时，电视摄影机扫描平台运转失灵，失去了拍摄土星环“背影”和卫星的时机。

这次发回的土星光环照片远较“旅行者 1 号”发回的清晰，光环千条万缕，五光十色，美不胜收。

“旅行者 1 号”发现的 F 环“发辫”曾轰动一时，而这次却无影无踪。相反见到了 F 环中 14 个独特的小环，一点也看不出 F 环内物质受卫星扰动的现象。

证实光环的组成成分与“旅行者 1 号”探测结果相同，是石块和水，环粒子的体积由小如尘埃到大如高楼大小不等，也许是以前的卫星碎片撞击而成的。小粒子在内环，大碎片在外环，而光环的颜色则是由于粒子的密度变化造成的。

土星的卫星，根据发回的资料分析已确定的有 23 个，此外尚有不少属于可疑的。这样来，土星家族便超过木星家族（共 16 颗卫星），一跃而为太阳系中最大的家族了。

直径 1400 公里的土卫八的面貌十分独特，是个阴阳脸，一面黑如黑炭，一面白如涂粉，两者亮度相差 10 倍，是太阳系中反差最大的天体。至于为何如此，众说不一，尚待研究。而土卫九则类似京剧中的黑脸。土卫七看起来像一个土豆，因此又称它为土豆卫星，上面有一个 90 多公里直径的大陨石坑。而土卫三上的陨石坑直径竟达 400 公里，深 16 公里，土卫四和土卫五的表面有粉末状的白色条纹，像是气体凝成的雪。在探测土卫六的大气时，令人感到意外的是大气上没有电离层。而土卫三、土卫十六和土卫十七则是三胞胎，同占一个轨道。

土星的大气层寒冷多风，还下着氨雨。在北半球高纬区有强大而稳定的风暴区，呈椭圆形长达 2480 公里，而赤道区比较平静。在土星上还记录到数以千次的强大闪电，其威力比地球上的闪电强几万到几十万倍。

土星附近还发现太阳系中最热的区域（等离子云），温度高达 5 亿 5 千万度。等离子云呈包圈状，距土星 25 万～48 万公里。

值得指出的是飞船的天线两次收到土星奏出的音乐声，声音像电子琴声，并伴有笛子等声音，当飞船在土星光环外缘而离开土星时，它又发出像叹息的声音，这声音从何而来，谁发出的，都是个谜。

随着宇宙飞行事业的发展，人类将最终揭开土星等伙伴的神秘的面纱，看清它们的“庐山真面目”已为时不远了。

36.1 分不止 60 秒 ——闰秒之秘

大家熟悉每天 24 小时，每时 60 分，每分 60 秒，可是你是否注意到有些年份的除夕（12 月 31 日）的最后 1 分钟不是 60 秒，而是 61 秒，这增加的 1 秒称为“闰秒”。我们知道农历有闰月，怎么阳历有闰秒呢？

要解释什么是“闰秒”得从计时谈起。古代人们使用的太阳指示器（日规），就是将一天分成若干可测量的次一级单元。随着文化的进展，计时水漏、计时蜡烛和滴漏等代替了日规，但这些计时大多数不精确，长期以来，人们把地球当作一架大“时钟”来计量时间。地球自转1周，就是1天，定为24小时，公转二周，刚好1年为365.25天，并规定以子夜为零点，作为1天的起算时刻。以地球的公转周期为基础的称为历书时，它以1900.0那一回归年的长度作为时间单位的基础，历书时的秒为1900.0回归年长度的 $1/31556925.9747$ 。1956年，国际度量衡委员会采用为时间的基本单位。以1900年初太阳几何平黄经为 $279^{\circ}41'48.04''$ 的瞬刻，为历书时1900年1月0日12时。从1960年起太阳系天体的位置都按历书时推算。以地球自转为基础的计时系统叫世界时，又称“格林威治时”。历书时与世界时之差主要由观测天体（如月球）的位置定出。

如果地球自转速度是均匀而稳定的，那么，这个计量系统是相当可靠的，也不会遇到什么麻烦。可是，人们经过200多年的观测，证实地球自转速度慢了。大约在过去200年里累计起来的误差，已经慢了30秒，另外从珊瑚化石中可以知道地球的演化过程中时间的变化情况。

珊瑚是海洋里的微小的珊瑚虫分泌出来的石灰质，长年累月堆砌而成的，在珊瑚化石上，我们可以清晰地看到一条细线，叫做生长线，这些线有粗有细，这是因为珊瑚虫在白天和夏季分泌出的石灰质要比夜晚和冬季多。于是珊瑚化石就为我们记录和保存下了远古时代的“年轮”和“日轮”。通过仔细研究这些珊瑚石的“年轮”和“日轮”，就能知道在地球漫长岁月中时间的变化情况。在大约57000万年前的古珊瑚化石上，每一个“年轮记有428日轮”，也就是说，那时1年有428个昼夜，而1昼夜的时间只相当于现在20个小时多一点，大约在27000万到35000万年前，一年有385~390个昼夜，一昼夜相当于现在的22小时。

据科学家研究发现，造成地球自转减慢的主要原因，是“月潮”和“日潮”引起的摩擦作用。当海水受到月亮或太阳的引力而涨落时，会消耗一部分地球自转的动能，导致地球自转速度逐渐慢了下来。当然这些变化都是极其缓慢和微小的。但是，在地球演变的历史长河中，这些极细小的变化累计起来，都是相当惊人的。

地球速度的不均匀性，动摇了以地球自转为基础来计量时间的传统观念。而时间基准在近代物理与技术中是非常重要的。于是在1928年由霍顿和摩勒森制造了第一架石英钟，最佳的石英钟具有很高的稳定度，但是它们的重复性与精度仍不够，虽然石英钟比其他时钟具有更准确和稳定的优点。20世纪中叶，由于物理上三方面的研究成果，一是光谱超精细结构的研究；二是分米磁共振实验技术的发展；三是分离振荡场的方法的提出；发明了铯原子钟。铯原子钟是20世纪中叶物理学的一项惊人的成就，其准确度和稳定度之高，使量子频标有可能取代以天体运动为基础的历书时而成为计时的基准。为了表彰拉姆齐在发展原子钟方面的功绩（是他在1949年8月提出分离振荡场的方法），1989年诺贝尔物理奖的一半授给了他。铯原子钟一直比先前的各种时钟都优越。所以在1967年改变秒的国际定义，秒是铯—133原子振荡的9192631770个周期的持续时间。在1958年1月1日零时零分零秒，同世界时完全一致；并从1972年1月1日起，采用了一种新的协调方法，即不调整原子钟的频率，使协调世界时的秒长严格等于原子钟的秒长。当它的

时刻与世界时时相差超过 0.9 秒时，世界时就跳动 1 秒，这跳动的 1 秒被称为“闰秒”。

增加 1 秒为正闰秒，减少一秒为负闰秒。闰秒设置在规定日期的最后一秒之后。一般闰秒的日期规定在 6 月 30 日和 12 月 31 日。自从 1972 年使用协调世界时以来到 1981 年，国际时间局已经 10 次增加闰秒，前 9 次都增加在 12 月 31 日，即除夕之夜，只有 1981 年的一次，增加在 6 月 30 日。1982 年除夕的最后一分钟又增加 1 秒变成了 61 秒。知道这个道理后，以后遇到 6 月 30 日或除夕之夜的最后 1 分钟是 61 秒就不足为怪了。

37. 新技术的开拓者 ——物理学与新技术的关系

作为研究物体运动的最普遍形式、基本规律与物质基本结构的物理学，它的起源是与人类的生产活动紧密相联的，人类的实际需要是物理学发展的推动力，物理学的发展又推动生产技术的发展，促使人类文明进一步发展。

在古埃及，作为古老国家科学文化象征的金字塔，它的建造，需要搬运一二吨重的大石块，并按一定的规则叠砌起来，这就需要许多力学与建筑等方面的知识与技术。古希腊地区巴尔干半岛，特殊的地理条件对于从事航海是得天独厚的，他们吸收了巴比伦、埃及和其他亚洲国家的文明，加以研究和发展，成为欧洲古代科学文化的中心。在力学方面，被公认为古代最伟大的力学家阿基米德发现了浮力定理，即著名的“阿基米德原理”，他确定了杠杆定律和滑轮原理，此外，他还发明了复滑车，水力螺旋，火镜和抛石机等作战机械等。我国是世界上最早进入农业时期的国家之一，随着农田水利的兴建，都邑建筑的兴盛，天文观测的深入，古代力学知识也就开始逐步形成。春秋末年的《考工记》中就记载了不少力学知识，记载了当时手工业的所有主要工种，叙述了车的制造，物体的滚动，箭的制作与飞行。战国时期的《墨经》，其中涉及力学知识的有关时空和物质的运动，力和重，平衡和重心，物体的沉浮、斜面、滑车等简单机械，并有光学与声学方面的知识。春秋时期就有关于磁的记述与应用。

现代科学文化，是从 14～15 世纪文艺复兴时代开始的。到 17～18 世纪使牛顿力学和热力学得到形成和发展，它直接促进了以蒸汽动力技术和机械技术为代表的第一次技术革命的形成和发展。由于当时物理学的许多研究成果促使了蒸汽机的发明和改进。

1643 年托里拆里发现了真空，1648 年德国奥托·冯·格里凯做了有名的马德堡半球实验，使人进一步认识了大气压的性质，并发明了真空泵。英国物理学家波义耳在格里凯实验的影响下，进一步研究了大气压的性质，并在 1664 年发现了气体的波义耳定律。在波义耳的指导下，法国物理学家于 1695 年发明了带活塞的蒸汽机，1705 年经英国工程师塞维利和铁匠纽可门等人的改进形成纽可门机。但纽可门机耗煤量大，效率低。后来经英国著名的发明家瓦特的改进，他应用了关于物体的比热、水转化蒸汽的潜热等物理概念来计算不同大小引擎的蒸汽消耗量，并采取了和汽缸分离的冷凝器这一关键性措施，使蒸汽机的效率得到了提高。新的蒸汽机很快成为适用于各种机器的动力机，从而出现了以蒸汽机的广泛应用为标志的第一次技术革命。

正当资本主义社会被滚滚的蒸汽车轮推向前进的时候，物理学界对于电

磁现象的研究成果，使得电力也悄悄地进入到社会生活中来。1820 年奥斯特发现电流的磁效应，他的发现第一次揭示了电与磁的联系，并开创了电磁学研究的新纪元。在奥斯特发现的启发下，1831 年夏，法拉第发现了电流磁效应的逆效应——电磁感应现象。由于这两项重大发现，直接导致了 1832 年皮克希发明了发电机，和 1837 年雅可比制成早期实用的电动机。从此，欧洲进入了以电机的应用为标志的第二次技术革命时期。

第二次技术革命的步伐大大超过了第一次技术革命。在电动机发明不到 10 年的时间里，1879 年，在柏林博览会上就展出了电机开动的电车；1880 年，用电机带动的各种机床，电梯，起重机和压缩机均已出现了；1882 年德国人德普勒成功地进行了远距离高压直流输电试验。

不仅如此，电力在其他方面也得到了普遍的应用。1800 年伏打发明了第一组电池之后，人们很快就发现电解作用，并在此基础上发展了电解和电镀工艺。1837 年前后，有英国人惠斯通和美国人莫尔斯发明了电磁式电报机和有线电报，

1876 年美国入贝尔发明了电话。1879 年，世界著名的发明家爱迪生发明了白炽灯。这样使电热、电冶、电声、电光源等崭新的技术领域普遍利用了电力。

1865 年麦克斯韦在法拉第有关场的概念和有关电磁现象的实验规律的基础上，建立了电磁理论，并预言电磁波的存在，电磁波在真空中的传播速度等于光速 c ，说明光就是电磁波。并预言光压的存在。1887 年赫芝的电磁波实验证实了麦克斯韦的预言。正是在上述物理研究的基础上，1894—1896 年间意大利物理学家马可尼和俄国的波波夫分别实现了无线电的传播和接收，使有线电报发展成为无线电通讯。

在 19 世纪 80 年代，英、德、俄、意等国的物理学家相继发明了交流发电机，交流电动机和相应的变压器，1888 年建成了一个交流供电系统，使电力的发展和应用有了更加广阔的前景。

由此可见，进入 19 世纪以后，物理学对技术发展的影响更为直接和明显，如果说，蒸汽机和热机的最早出现，在一定程度上是从生产经验或技巧开始的，而物理学只是在其改进提高时才产生影响，而以电气技术，无线电技术为代表的第二次技术革命，则完全是在电磁理论的基础上产生的，从电磁理论到电气技术的转移，只经历几十年甚至只有十几年。

从 19 世纪末就孕育着的物理学革命终于在 20 世纪初以相对论和量子力学的诞生而爆发了。物理学的革命性突破，使自然科学在本世纪得到了飞速的发展，也极大地促进了科学向技术的渗透，出现了一批新兴的科学技术。如原子核物理的研究实现了核爆炸，建成了核反应堆，使原子能的开发利用成为现实；通过对分子、原子和固体中电子运动规律的探索，以及对不同波段的电磁辐射特殊矛盾的研究，发明了使电子元件发生革命性变革的半导体器件和其他固体电子器件，推动了微电子技术的巨大发展；在机械的，电磁的计算工具的技术基础上，吸取了数理逻辑和微电子学的成果，诞生电子计算机，发展了电子计算机技术；空间技术则是差不多集中了现代科学技术的一切重要成果的基础上诞生的。由于这些新兴技术的发展，使得从本世纪 50 年代起发生了以原子能开发和利用为先导，包括原子能技术、电子计算机技术、空间技术、材料技术、生物技术、微电子技术、激光技术和海洋开发技术等许多技术共同组成的，以电子计算机技术为核心的第三次技术革命、这

是一次影响深远的技术革命，已波及社会生产和生活的各个领域，使整个社会的各个方面都出现了全新的发展趋势。

综上所述，我们可以看到，物理学是各个时期新技术的开拓者。我们相信物理学与技术的关系将进一步密切化，物理学中新的研究成果，将推动新技术的诞生和发展，反过来新技术的发展，为物理研究提供更新更好的实验设备和实验手段，两者必将相辅相成，共同发展。

38 · 是导体又非导体

—— 半导体

大家知道，金、银、铜、铝等金属都是很好的导电材料，我们称它们为导体。而陶瓷、橡胶、塑料、云母等物质很难导电，故称它们为绝缘体。在我们周围的世界中，除了导体和绝缘体外，还存在着一类其他的物质，它们既不像导体那样容易导电，也不像绝缘体那样不容易导电，它们的导电性能介于导体和绝缘体之间，我们把这类物质称为半导体。半导体的种类非常多，像锗、硅、硒等与大多数金属氧化物和硫化物（例如氧化亚铜），以及许多金属间的化合物（如二锑化三镁、锑化钢等）都是半导体。

但是，半导体所以引起人们的极大兴趣，原因并不在于它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而在于它具有许多独特的性质。同一块半导体，它的导电能力在不同情况下会有非常大的差别，一会儿它像地地道道的导体，但一会儿又像典型的绝缘体。

当外界温度升高时，半导体的导电能力就增加许多，温度下降一些，它的导电能力又降低许多，也就是说半导体的导电能力与温度有着密切的关系。人们利用这种性质做成了自动化控制用的热敏元件（如热敏电阻等）。

当光线照射在某些半导体上时，它表现为导电能力很强，如导体的性质；但没有光照时，它又像绝缘体一样不导电。于是人们就利用半导体的这种特性，做成各式各样的自动化控制用的光电器件（如光电二极管、光电三极管和光敏电阻等）。

如果在纯净的半导体中适当掺入极微量的外加杂质，那么这半导体的导电能力就会成千上万倍地增加，并且可以根据掺入杂质的多少来控制半导体的导电性能。这是半导体最显著、最突出的特性。正因为半导体具有这样独特的特性，人们才利用掺杂的方法，制造出不同性质、不同用途的半导体材料，使得本来不受人们注意的半导体一跃而成为今天无线电电子技术的主要器件。

半导体的发现和半导体技术的应用为 20 世纪的科学技术发展起到很大的推动作用，并将继续为科技发展做出贡献。

39. 漫游超导世界

—— 超导现象与高温超导

1911 年荷兰物理学家卡末林—翁纳斯首先发现浸在液氦中的固态汞样品，当温度降到 4.2K 时，其电阻突然趋向于零。1913 年他提出超导电性这一名词，并定义这个电阻为零的状态为超导态。处于超导状态的物体称为超导体。

超导电性出现在许多金属元素中，也出现于合金、金属间的化合物和半导体等。从正常态转变到超导态有一个确定的温度，称为转换温度 T_c ，亦

称临界温度，当导体的温度高于它的转换温度时，表现为正常态，低于它的转换温度时表现为超导态。纯元素中转换温度最高的铊（元素符号为 Tc），其转换温度为 11.2K，最低的钛（Ti），它的转换温度 $T_c=0.39K$ ；在化合物中锡化铌（ Nb_3Sn ）的 $T=18K$ 。1974 年曾制成一种铌锗合金（ Nb_2Ge ）薄膜，其转换温度高达 23.2K，但也有许多金属，如锂、钠和钾曾分别降温到 0.08K、0.09K 和 0.08K，仍表现为正常态导体。当铜、银和金的温度分别降到 0.05K、0.35K 和 0.05K，也仍为正常态。转换温度与材料的化学纯度有关，其中磁性杂质的影响特别显著。例如钼中含有百分之几的铁，其超导电性就会被破坏（钼的转换温度为 0.92K）。极微量的钐能使钼的转换温度从 5.6K 降至 0.6K。

在超导态时，物体的电阻实际上为零。有人用超导体制成圆环，在环中感应出一恒定电流，发现电流在环内持续数年，仍未见电流有任何可测量出来的衰减。费尔和密尔曾利用精确的核磁共振方法测量超导电流产生的磁场，以研究螺线管中超导电流的衰减，他们得出的结论是超导电流的衰变时间不短于 10 万年。

由于超导体具有零电阻特性，自然就想到可以利用超导体制成的线圈来产生非常强的磁场。但是在 1914 年翁纳斯发现，太强的磁场会破坏超导性，使导体从超导态回到正常态。实验表明，每一种处在超导态的导体材料，当受到磁感应强度大于某定值 B_c 的磁场作用时，就从超导态转变成正常态，当磁感应强度低于 B_c 时，它又能从正常态转变成超导态。磁感应强度 B_c 称为临界磁场。临界磁场与材料的种类和超导态的温度有关。

1933 年，迈斯纳和奥非尔特用实验研究了超导体的磁学性质，实验结果表明，超导体内部磁场恒等于零，即超导体总是把磁场排除在超导体之外。当然所加的外磁场均应小于临界磁场。超导体的这种特殊的磁效应称为迈斯纳效应。迈斯纳效应表明超导体具有完全抗磁性。它是一种完全的抗磁体。

由于目前人类已经研制出可在液氮温区工作的超导体，因此原来使超导应用受到限制的条件（液氮低温设备价格昂贵）已经解除，超导技术应用的大门已经打开，它将迅速波及国民经济的许多部门，它将首先波及电力工程、电能输送、电动机和发电机的制造，如果用超导线输送电能，线路上的能量损耗很小甚至没有，因此可以将电能输送到极其遥远的用户。用超导体做成超导电机，它们与常规电机相比有很大的优越性，第一单机容量大，常规电机的最大单机容量为 100 万千瓦左右，而超导电机的单机容量可达到 1000 ~ 2000 万千瓦。第二重量轻体积小，超导电机由于输出功率大，它的相对重量要比常规电机轻，同时可省去笨重的铁芯，它的重量和体积可大大减小。第三效率高，损耗小，超导电机的效率可达 95 ~ 98%。第四超导电机的静电稳定性好，即使电网发生波动仍能正常运转。第五减少输送设备，超导电机可提高输出电压，可将电力直接送入电网，可省掉一套升压变电设备，超导电机的应用很广泛，可用于作直流电源外，还可在超负荷情况下拖动像轧钢机、深井采矿通风机、大型卷扬机等，另外可用于原子能发电，航空与航天等方面。有了高温超导即可推广应用超导磁悬浮列车，超导计算机，超导电子学器件，它将促进生物磁学的研究，针灸机理研究，特异功能研究，推动高能加速器的研究，促进可控热核反应研究进程，并可应用于强磁场下物性研究等等，预计由超导技术将引发新的技术革命，它将大大促进世界科技的发展。

——激光原理

激光技术是 60 年代初在无线电电子学、波谱学、光学、原子物理学基础上发展起来的一门新兴技术，它与核能技术、电子技术、超导技术、信息技术构成 20 世纪影响特别巨大、意义深远的科学技术。

在日常生产和生活中，人们经常看到各种不同的光源在发光，有太阳这一类自然光源的发光，也有白炽灯、日光灯、碘钨灯、水银灯、霓虹灯等人造光源的发光。与这些人造光源的光相比，激光有其优异的特性。两暑的发光机理不同。

激光一词的英文是 Laser，它是 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 词组中各词第一个字母的缩写。读作莱塞，现在有读作镭射的（如激光唱片写为镭射唱片），它的意思是受激辐射经光放大而产生的一种光辐射。要弄清楚激光是怎样形成的，得从原子、分子的能量状态及其变化说起。

物质中的原子、分子或离子（统称为微观粒子），一般都处在不同的能量状态中，粒子的能量状态在物理学中称为能级，对于不同能量的能级，人们用一些高低排列的水平线来表示，称为能级图。例如氢原子中的核外电子，根据量子理论，可以处在不连续的、物理上称量子化的能量状态中，即处在不同的能级上。当粒子的能态发生变化时，只能采取跳跃变化的方式，从一个能级“跃迁”到另一个能级，就好像人走楼梯一样，只能一级一级地走，例如氢原子从外界获得能量后，它可以从 $n=1$ 的能级（称为基态）跃迁到 $n=2$ ，或 $n=3$ 的能级上去。 $n=2, 3, \dots$ 的能态叫激发态。通常情况下，组成物质的大多数粒子处于最低能量状态（基态），只有很少的粒子处于较高的能量状态（激发态）。粒子处于高能级的时间（称为能级的寿命）是非常短的，一般为亿分之一（ 10^{-8} ）秒左右。由于粒子内部结构的特殊性，有些能级的寿命较长，达到千分之几秒甚至更长，这种能级称为亚稳态能级。亚稳态能级的存在，提供了形成激光的重要条件。当粒子所处的能量状态发生变化，或者说当粒子从一个能级向另一个能级发生跃迁时，必然伴随着该粒子与其他客体发生能量交换的过程。让我们只考虑粒子与外部辐射场即光子的相互作用与能量交换过程。当粒子在对较低能级和较高能级之间发生跃迁时，只能吸收或发射一个特定的光子。

1916 年爱因斯坦首先提出关于光的吸收和发射的三种过程。

（1）受激吸收：处于较低能级上的粒子吸收一个光子，从而跃迁到较高能级的过程称为受激吸收或简称吸收。

（2）自发辐射：处于较高能级的粒子，不论外部光场是否存在，粒子会自发地跃迁到较低能级上，并辐射出光子。激光出现之前，所有光源的光辐射，基本上都属于这种自发辐射。

（3）受激辐射：处于较高能级的粒子在一定频率的光子的激励下，跃迁到较低能级，并发射一个与入射光子的性质（频率、进行方向等）完全相同的光子。“一模一样”的光子增加了，这意味着入射光被放大了。这样的过程称为受激辐射。

如果借助某种人为的方法，使处在高能级的粒子数多于低能级的，这种状态称为“粒子数反转”。这时如果有外界光辐射通过，其光子能量恰好等于这两个能级的能量差，则处于高能级上多数粒子的受激辐射行为，与处于

低能级上少数粒子的受激吸收行为相比占优势。因此，光通过处于粒子数反转状态的物质后，得到了由受激辐射作用导致的放大。要使物质中的粒子处于粒子数反转分布状态，必须由外界提供能量，通常只有将粒子激发到亚稳态能级上，才能实现粒子数反转分布状态，否则，粒子被激发到寿命很短的能级上，外界入射光子还来不及“激发”，它们就自发跃迁到低能级上去了。激光器只不过是外界提供的各种形式的能量，转换成粒子数反转，最后以光能集中释放出来。

产生激光发射的器件或装置称为激光器，一般激光器是由3部分组成：激光工作物质、激励系统以及光学共振腔。

激励系统的作用是供给激光工作物质能量，使其中处于基态的粒子获得能量后，可以跃迁到较高能量的激发态上去，为实现粒子数反转创造条件。所以它是将各种形式的外界能量转换成激光光能。

激光工作物质是指用来实现粒子数反转并产生光的受激辐射放大作用的物质体系，它是激光器的核心。激光工作物质可以是固体（如晶体、玻璃）、气体（原子气体、离子气体、分子气体）、半导体和液体等介质。对激光工作物质的主要要求是，尽可能在其工作粒子的特定能级间实现较大程度的粒子数反转，并使这种反转在整个激光发射过程中尽可能地保持下去。为此，要求工作物质具有合适的能级结构和跃迁特性。

光学共振腔通常由两块光学反射镜（平面或球面）组成，其中一块为全反射镜，另一块为部分反射镜，共振腔内形成的激光振荡的一小部分，从这块部分反射镜透过，成为输出的激光，共振腔对激光束的方向有选择作用，从而保证激光器输出的激光具有极好的方向性。

由于激光的发光机理与普通光源不同，所以激光有以下的鲜明特点。

（1）高亮度：激光的亮度比太阳表面的亮度要高一百亿（ 10^{10} ）倍，这种高亮度表示能量在时间空间上的高度集中，除核爆炸外至今还找不到其他装置能够像激光器那样高度集中能量。这一特性，使激光在各种技术领域及科学研究的许多方面，获得了广泛的应用。

（2）单色性好：不同颜色的光是不同波长的电磁波。所谓单色光实际上并不是只有单一的波长，而是有一个很小的波长范围，这个波长范围就叫单色光的谱线宽度。谱线宽度愈窄，光的单色性愈好。

（3）高相干性：物理学上所谓两列光是相干光，是指波长相同、振动方向相同有一恒定的位相差的两列光。一般情况下，物质中亿万个原子、分子在发光时彼此互不相关，因此它们发出的光，即使波长相同，它们有不同的振动方向，特别是没有恒定位相差，所以不是相干光，受激辐射时，粒子发的光，“步调一致”，波长单一，所以激光具有极好的相干性。由于这一特性，使全息照相成为现实。

（4）高定向性：由于共振腔对光束方向的选择作用，使得激光器输出的激光束有高度的方向性，光束沿空间极小的立体角范围（一般为 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ 球面度）向前传播。月球距地球平均为38.4万公里，将激光射到月球上，照射的光斑直径不超过两公里，如用探照灯照到月球上，它的光斑直径将达几千公里以上。

由于激光的这些特性，使激光在技术科学及其他学科领域带来了前所未有的应用广度和深度。

41. 神奇的激光之二 ——激光器

随着激光技术的发展，五花八门的激光器不断涌现。因此需要进行分类。激光器的分类有几种，最通常的是按工作物质的物理状态来分，可分为气体激光器、固体激光器、液体激光器和半导体激光器。如果按输出激光的波长来分，可分为 γ （射线）激光器、X（射线）激光器、紫外（线）激光器、可见光激光器和红外（线）激光器等。如果按激光输出时间长短来分，可分为连续激光器、准连续激光器、脉冲激光器、巨脉冲激光器和重复频率激光器（脉冲输出的间断时间很短，如每秒几次到几十次）等。如果按激励方式分类，则有光激发激光器、电激发激光器、热激发激光器、化学激光器等。

气体激光器中最先制成的是原子气体激光器，以惰性气体（氦、氖、氩、氪等）为工作物质的激光器称为惰性气体原子激光器，其中以氦—氖激光器为典型。它是1960—1961年最先制成的一种最常用的气体激光器。它的工作物质是氖，辅助气体是氦。它的单色性好，谱线宽度很窄，可获得极高的频率稳定性。它的方向性也好，它产生的亮度比太阳表面的亮度还高成千上万倍。同时还有构造简单、使用方便、寿命长（可达二三万小时，甚至五万小时），因此获得了广泛应用。它的缺点是增益低、输出功率小（十分之几毫瓦到几十毫瓦），能量转换效率约为万分之一。

原子气体激光器中的另一大类是金属蒸汽激光器。它们是利用蒸汽状态的金属原子发光的，铜蒸汽激光器输出的5105埃绿色激光，在水下传输过程中损失很小，适合于水下通讯。

分子气体激光器是后来居上的一大家族，说它大，第一是能发射激光的成员多，已从上千种气体分子获得了激光，且还在扩充中。第二是它们发射的激光波长范围很广，遍布整个光谱区域。

分子气体激光器中最典型的代表是二氧化碳激光器，它的明显优点是它的能量转换效率高。能量转换效率（简称效率）是评价激光器性能的一个重要指标，它标志着输入激光器的能量转化为激光输出能量的百分比。原子气体激光器的效率一般只有千分之几，而二氧化碳激光器有20~30%，两者差千倍。

固体激光器的工作物质是晶体或玻璃一类固体材料，故又可分为晶体激光器和玻璃激光器。一般都用脉冲氙灯或氪灯一类强光灯（称光泵）来激励，所以它是将普通的光能转换为激光光能的一种装置。固体激光器的优点有器件紧凑和小型，输出功率大。但固体激光器的工作物质制造工艺较复杂，这就限制了它的推广应用。

以半导体为工作物质的激光器称为半导体激光器，这种激光器很小，长宽均为零点几毫米、厚约0.1毫米，它的激光电源也很小，一般只有收音机那么大。由于小，可用于宇宙飞船中作为光雷达来观察星球表面的情况，当然也由于小，它的输出功率只有几十毫瓦，不过，可以把许多半导体激光器组合起来使用，提高输出功率。

半导体激光器的半导体材料，有砷化镓、锑化钢、硫化镉等，其中以砷化镓激光器最为成熟。它的效率可达到60~70%。因此可用于军事上短距离的保密通讯。

随着激光应用的日益发展，在激光分离同位素，激光通讯等场合，很需

要一种波长能连续改变的激光器，液体激光器正是在这种要求下产生的。液体激光器有三大类：有机染料激光器、无机液体激光器和螯合物激光器。

第一类是主力军，已有 350 余种染料获得了激光输出；第二类的工作物质是掺有稀土离子的无机液体；第三类在实际应用上没有多少价值。

当今世界上有千种激光器，它们各有各的特点，各有各的用处，不能一一在此介绍。目前功率最大的是 1990 年 5 月 20 日法国原子能委员会所属的两个科研小组在 1.2 皮秒（即 10^{-12} 秒）的时间内，获得功率为 20 太瓦特（1 太瓦特等于 1 万亿瓦特，即 10^{12} 瓦特）的激光束，刷新了美国创造的 15 太瓦特的世界记录，据研究小组负责人雅克·库唐透露，这项课题的目的是研究出一种功率为 1000 太瓦或 1000 太瓦以上的大功率瞬时激光束。专家们认为，这种高功率脉冲激光器在加速器、材料科学、生物基础研究或其他领域有广阔的应用前景。

42. 神奇的激光之三 ——激光技术的应用

利用激光的高亮度、单色性好、方向性好、相干性好、脉冲时间短、可调谐等特点，可制成各种激光器，目前，全世界激光器有数千种之多，各类激光器输出能量小至毫焦耳以下，大至千焦耳以上，输出功率的范围变化在毫瓦至几亿千瓦之间，甚至达到 20 万亿瓦，发光亮度可在 $10^8 \sim 10^{17}$ 瓦/（厘米²·球面度）的高水平上变动，而太阳的发光亮度也只有 10^8 瓦/（厘米²·球面度）。这千变万化的能力，显示着激光的巨大应用潜力和广阔的应用前景。它在工业、农业、科技、医学临床、环境保护、公安、军事以及社会生活等各个方面都有着极其广泛的应用。

以加工工业来说，由于激光具有能量高度集中的特点，聚焦后可以在焦斑上达到很高的能量密度，因此可用来对材料或工件进行打孔。例如生产化纤用的喷丝头，是用难熔的硬质合金制成的，在直径约 10 厘米的合金材料上，要钻一万多个直径为 60 微米的小孔，若用机械钻头钻孔，需 5 个熟练工人工作一星期。而用激光打孔机只需几小时即可加工一个喷头，而且质量也有保证。除打孔外，还可用激光对各种材料进行焊接、切割、划片、动平衡去重、雕刻等。其优点是：可对高熔点、高硬度和脆性材料加工，热变形、热影响区小，可避免杂质污染，可加工复杂图形等等。激光还可进行金属表面热处理，进行激光表面硬化，激光表面合金化与激光表面覆盖等。

利用激光单色性好，方向性好及相干性好的特点，激光在精密测量方面有突出的贡献。开凿隧道，建筑高楼，铺设管道等都离不开一条基准直线，采用高度准直的激光束作为基准直线，可大大提高准直的距离和精度，例如，在几公里长的距离上，激光的准直精度可在几毫米以内。利用激光测距，具有极高的精度，以激光测月为例，10 万公里距离的测量误差可压缩到 1 米以下。基于高精度的激光测距原理，结合空间卫星技术，可以测量大陆漂移和地壳微小变动，从而可以对地震进行更准确的预报。激光雷达可跟踪和测量卫星及导弹的飞行状态，可以探测和分析大气中的云层湍流和空气中的污染情况，可以测量流体、车辆和飞行器的运动速度等。

利用激光的相干性，引起了照相技术的革命，产生了全息照相技术。全息照相能记录被摄景物在三维空间的全部信息，再现时能“活灵活现”地重

现被摄景物的立体图像。利用全息照相原理，可以记录、贮存和再现大量的图像或数学信息，对计算机技术的发展有重大意义。

根据激光作用在特定的几何形状上会产生特定的散射图形（称为散斑），用它来对产品进行检测，可以发现产品的质量缺陷，例如：条纹、斑点、压痕、气泡、疵点、皱纹、针孔。杂物、擦痕、污斑、裂缝等。激光检测具有速度快，漏检率小，可动态进行，能快速分类、记录、数据贮存等优点。

随着光导纤维、半导体激光器和光耦合器在技术上和制作上的突破，近年来，激光通信得到迅速发展。与常规通信相比，激光通信的特点是容量大，例如，从理论上讲用集成光路和光纤组成的激光通信系统，能同时传播 100 万套电视节目。另外尚有保密性好，抗干扰能力强、安全可靠等优点。

船只、飞机和火箭航行时，都要用陀螺仪（亦称回转仪）来导航，以往陀螺仪是用一只高速（每分钟上万转）旋转的飞轮，它的自转轴能指向空间某一位置，具有一定的稳定性。但机械陀螺由于摩擦的存在其可靠性会逐渐降低，现代用激光陀螺代替。

激光进入医学领域：60 年代初开始于眼科视网膜凝固，经过 20 多年的时间，激光在医学上已涉及从基础到临床的许多方面。激光临床应用则发展到治疗内、外、皮肤、妇、儿、肛、肠、耳、鼻、喉等各科的多种疾病，并且近来的趋势是更加注意发挥激光本身的特色，将其用来解决一些常规医疗手段不易处理的问题。激光在医学临床上的应用主要有两种方式：激光凝固疗法和激光汽化疗法。

激光治疗癌症是最令人感兴趣的一个课题。首先，利用某些癌组织对不同波长激光的选择吸收，来杀死或破坏癌组织；其次利用激光刀进行癌的临床外科手术，诸如宫颈癌、乳腺癌的切除。最新的进展是，用肿瘤亲和性光敏物质进行癌的诊断和治疗，对此最常用的药物是血卟啉，它具有高浓度、长时间存留在癌细胞内的功能。血卟啉的荧光激发光谱峰值在 4000 埃附近，发射光谱则在 6300 埃处有两个峰值。用氦离子激光器进行激发，探测血卟啉的红色荧光，就可以探测到癌细胞的部位，然后再用染料激光器或氦氖激光器照射癌组织，可以杀死癌细胞。此外可利用激光对穴位照射进行“激光针灸”等。

1991 年在检测艾滋病毒的研究中，日本电报电话公司电子实验室和东京国立卫生研究所的科学家发明了激光磁免疫测定方法，这种激光检测艾滋病的方法，其精确度比目前所使用的方法高 100 倍，且简便省时。目前研究人员正在设法缩小设备体积，降低造价，并研究用这种方法检测疱疹、肝炎和流行性感冒等病毒的可行性。

激光在农业上的应用，有对粮豆作物，经经济作物和蔬菜种子进行激光育种，普遍提高了种子发芽率，促进早熟增产。

大家知道，制造原子弹和核反应堆都需要铀 235，铀 235 必须从天然铀中提炼出来。天然铀中含有 3 种铀同位素，它们的含量分别是铀 238 为 99.28%，铀 235 为 0.714%，铀 234 为 0.006%。用于反应堆作燃料时要求铀 235 的浓度为 3%；用于核武器作炸药时，其浓度需达 90% 以上才能爆炸。人们利用激光达到了分离铀同位素的目的。

聚变反应的主要燃料是氘，但要使氘产生聚变反应，必须首先使其加热到 1 亿度以上的高温。利用高亮度的激光会聚照射用氘制成的小靶，可以达到几千万度以上的高温，已观察到标志着初步聚变反应的中子发射。我国一

套高功率激光装置于 80 年代末，进行了惯性约束聚变实验，取得重大成就。这套名为“神光”的装置输出功率高达 20 亿千瓦，将它开展惯性约束聚变综合性物理实验时，成功地完成了双束激光对打空腔靶的试验获得了足够高的腔内辐射温度，超过了国外同类装置同种实验水平。目前世界上很多国家和地区在研究激光核聚变，有望 21 世纪取得成功，那时人类将彻底解决能源问题。

人类已实现了登月飞行，并正在向其他星球挺进，在未来的宇宙航行中，激光可以担任“通讯员”的重要角色，利用 3 个位于大气层外的同步卫星中继站，可使宇宙飞船与地面上任何地点实现通讯联系。激光束在宇宙空间传播时，能量损耗甚小，但进入大气层后，由于大气吸收激光能量损失较大，因此应将其转换成适当波长的电磁波（如微波和红外线），以便易于透过“大气窗口”。

除通讯外，激光还可当作星际航行的动力来使用，有人设想利用强激光的光压或光子反冲，可以推动光子火箭与激光宇宙飞船，它的飞行速度快，可接近光速，以便实现星际旅行。

利用激光的热效应来达到破坏目标，可制成激光武器，目前正在研制的激光火箭，有可成为拦截洲际弹道导弹，或侦察卫星的强有力的武器。由于激光武器要求大功率，高能量的激光器，需要解决许多技术难题，所以要达到实践要求还有相当一段距离，目前超级大国正在加紧研究中。

激光不仅给技术科学带来了前所未有的应用广度和深度，而且还大大推动了物理学、化学、天文学、生物学和医学等基础学科的发展。60 年代以来，激光物理学、激光化学、激光医学等新学科的出现，在人们面前展现了一片广阔的新天地，让我们努力攀登激光技术的新高峰，使激光更好地为人类服务。

43. 于无声处听惊雷 ——次声趣谈

60 多年前，英国科学家罗伯特·伍德为一家剧院设计了一个喇叭，喇叭发出的低音浑厚而富有层次，音质很好，可是当通过喇叭播音时，剧院的门户嘎嘎作响，振动得很厉害。当时不知道是什么原因引起的。另外我们会常常见到：当一架巨型喷气飞机呼啸而过时，家中的窗户会被振得咯吱作响，这又是什么缘故呢？

1948 年，一艘名叫“乌兰格梅达”的轮船在航海途中，全体官兵莫名其妙地死去，奄奄一息的报务员坚持拍发了 SOS 国际呼救信号。等营救人员赶到时，报务员也一命呜呼了，其余全体海员僵死在各自的岗位上，脸上都凝固着恐惧的表情。

其肇事者是谁？成了多年来的难解之谜。多年来科学家经过锲而不舍的追踪研究，终于解开了这一神秘之谜，确认这一海难事件的罪魁祸首是辽阔海面上产生的次声波，上面所说的门窗作响都是次声在作怪。

我们平常听到的声音频率是 20 ~ 20000 赫兹（每秒振动一次称为 1 赫兹）范围内，频率高于 20000 赫兹的叫超声，低于 20 赫兹的叫做次声，次声的特点是频率很低，从 1 秒钟振动 20 次到 2 个多小时振动 1 次，也就是频率从 20 赫兹到 0.0001 赫兹。因此次声的波长很长，在空气中最长的波长有二三

千公里。因为波长长，次声在大气中很少被吸收，所以可传播得很远很远。频率越低的次声传得越远，尤其在海洋，地层等光和无线电波几乎“寸步难行”的领域，次声都能出入自由地广为传播。1960年智利大地震曾使地球以长达1小时的周期（频率的倒数叫周期，即振动一次所需的时间），它发出的次声波传遍了全世界。1883年8月26日爆发的印尼克拉克脱火山产生的次声波，则以0.05—10000秒的周期绕地球转了3圈，持续了108小时之久。1961年苏联1500万吨级的核试验时产生的次声波足足绕了地球5周。

那么，有哪些东西可以发出次声呢？在自然界火山爆发、地震、台风中心、暴风骤雨、电闪雷鸣、晴空湍流、流星坠落、极光辐射、海面波浪以及海洋中很多鱼类都能发出次声。人工次声源也很多，如核弹爆炸、火箭腾空、大炮发射、飞机飞行、急驶的车、航行的船、高楼大厦摇晃、大桥大坝震动、大功率机器运转、剧烈的化学反应等都能发生较强的次声。由此看来，无论从陆地到海洋，从森林到高原，从地面到高空，次声是无所不在的。甚至我们的人体在某种意义上也是次声发射源，人的心脏除平时我们熟悉的脉动以外，还存在着一个频率为1.2赫兹的听不到的次声搏动，而肺在呼吸时发出的次声振动的频率更低，只有0.3~0.25赫兹，这是任何高明的医生也听不到的。但这些次声振动已能用磁带录音机记录下来，成为研究心、肺机能的一种补充手段。

既然我们生活的环境中到处都有次声，那就不得不考虑它对生活和人体的影响了，研究发现，1~3赫兹的次声可使人产生恐惧，使动物烦躁不安。强地震前引起“青蛙跳出井，老鼠逃出洞，牛羊蹿出厩”的现象，就是这个频段的次声引起的；3~8赫兹的次声可引起人的神经混乱，失去意识能力（这可能与脑电的节律相似有关）；8~11赫兹次声可使人思想集中，增强学习能力；13~40赫兹的声音，可以影响人的意志和感情。有人用一密闭的圆柱形大空腔，以一个大功率的马达带动活塞，产生强度和频率可以控制的次声，把狗、猴子、狒狒等动物放在腔体内进行试验。在强度级为172分贝（声学中计量声强等级的一种单位）次声的作用下，发现它呼吸显著困难，狗甚至停止呼吸；猴子和狒狒忍受性较强，但当声强级达185~195分贝以上，频率为7~9赫兹时，它们一会儿就全部死去。剖析表明动物死亡的主要原因是次声与内脏器官发生共振，致使心脏破裂。

研究次声对人体功能的影响，大部分科学工作者所用频率是在几赫兹到十几赫兹，强度级在120~150分贝左右。高强度次声，对人的感觉系统有影响，可引起听觉能力的偏移，有的导致永久性的听觉丧失；有的出现视觉障碍性变化和视觉模糊；有的引起心跳加快和血压升高；有的引起严重的生理和心理变化。感觉轻者会发生昏迷、倾倒、酒醉感，感觉重者会造成耳聋、肌肉痉挛、视力紊乱、语言不清、呼吸困难和精神分裂症等。由于人的脏器共振频率大概在几赫兹到十几赫兹范围内，在更强次声作用下可能也会导致五脏俱裂。上面所说的“乌兰格梅达”号海难事件就是这个原因。

我国东南沿海，每年夏秋季节都要多次遭台风的袭击，沿海渔民，通常把充满氢气的气球（直径约为50厘米）搁在耳朵边听一听，就能知道远处有没有风暴，它是否会袭击本地。这是什么道理呢？原来大风和巨浪的波峰间的冲击，会产生一种频率约为每秒10周（即10赫兹）的次声波。这种次声波比大风和巨浪的传播速度快得多。虽然人耳不能直接听到次声，但是氢气球却能同次声波发生共鸣，产生一种振动。这种振动的振幅和强度，会给予

靠近氢气球的人的耳膜一种压力，使耳膜产生疼痛的感觉。暴风雨愈近，这种感觉愈清晰。根据感觉到的清晰程度的变化，就可以判断暴风雨是迫近还是远离。

人耳虽然听不到次声，但有些动物都能感觉到它。海洋里的水母（又叫海蜇）就具有这样的本领。水母的腹部有一个共振腔，腔内生着一个柄，柄上有个球，球内有小小的“听石”。当风暴激起的8~13赫兹的次声波冲击听石时，就刺激球壁内的神经，水母就“听到”次声了，它就及早游向深水或藏到岩石缝隙里，躲避大风浪的袭击。人们模仿水母的这种机能已制成了一种叫“水母耳”的风暴报警仪，它能提前15小时对风暴作出预报。

利用次声在空气、海洋和地层中能作远距离传播的特性，还可以进行海啸、地震、火山爆发、磁暴（与极光同发生）等自然现象的预报。甚至也可以用高灵敏度的次声探测器来监视火箭发射和核试验。用这种方法可听到1500公里外的宇宙飞船的发射，测知5000公里外地震的发生，人们还可以在地球表面搞些定点爆破，让它发生的次声去巡游地球，将地下矿藏和地球内部构造的丰富资料带给人们。

由于次声能破坏人体的正常生理、心理活动，这就给我们的机器制造和建筑专家们提出了新的课题，在进行设计制造时，应该选用什么材料，什么方案最好，才能使次声振动尽量减少以致完全避免，这样就可以有效地保护工人同志和广大人民群众的健康。假使能使机器运转时发出的声音设计得如音乐一样优美动听，那就太好了。

另外次声能伤害人类。有人幻想制成次声武器，70年代法国报刊曾有过一则骇人听闻的报道，说有位叫加夫洛的科学家发明了一种“次声枪”。在一次试验中使十几公里以外的人被击毙，在场的工作人员也全部遭难，南美一刊物在一篇题为《不产生噪音的杀人武器》的文章中谈到次声武器，“能消灭某一地区或某一城市的人，那些躲在秘密掩蔽所里的人，躲在坦克、潜艇或其他貌似牢不可破的机器里的人都不能幸免。人类正面临着一种十分可怕的武器的发展，它将超越人类想象的边界。”这些报道似乎是超越想象，因为目前想产生那样特大强度而又高度集中传播的次声，还是很难办到的。但这告诉我们应在次声研究领域里迎头赶上，我们相信，随着科学技术的发展，次声的研究一定可以兴利除弊使之更好地造福于人类。

44. 新技术中的多面手 ——超声波及其应用

声波是指在弹性物质中传播的一种机械波。空气、水，各种固体都是弹性物质，所以声波可在一切物质中传播，频率在20—20000赫兹之间的声波能为人耳听得见，称为可听声，高于20000赫兹的声波叫超声波，它虽然不能为人耳所听见，但它以下的特性和作用。

（1）波长短，近似作直线传播；在固体和液体中的衰减比电磁波小；它的传播特性，如声速、吸收等，和传播媒质的微观和宏观性质密切相关。

（2）能量容易集中，因而可以形成很大的声强（指单位时间通过与指定方向垂直的单位面积的声能）。产生剧烈的振动，并引起许多特殊的作用，如骇波、液体中的空化作用等。结果产生机械、热、光、电、化学及生物等各种特殊效应。所以超声波广泛应用于工农业生产及医药卫生等方面，成为

新技术中的多面手。

由于超声波的频率高，传播的能量大。例如在相同振幅情况下，频率为 100 万赫兹的超声波，它的能量要比 1000 赫兹的声波能量大 1000 倍。强大的超声波在液体中传播时，在液体中引起压缩和稀疏的作用，在压缩部位，液体好像受到来自四面八方的压力，在稀疏的部位，液体又像受到向四外的拉力。液体比较经受得住压力，但在拉力作用下，就显得十分脆弱，在拉力集中的地方，液体就会发生断裂现象，产生许多气泡形状的小空腔，这些空腔存在的时间极短，在液体受压的瞬间又闭合起来、空腔闭合时产生非常巨大的瞬间压力，一般可达几千个甚至几万个大气压，这种空腔在液体中产生和消失的现象就叫空化作用。借助于空化作用的巨大压力，就可以将附着在物体上的油脂、污尘清洗干净。超声波清洗机就是根据空化作用原理制成的。这种清洗机效率高、质量好、易于实现自动化，现已广泛应用于清洗精密机械，无线电元件，光学元件、纺织机件及钟表元件等。此外利用超声波的清洗原理，还可以进行乳化、搅拌、粉碎和醇化等加工。例如在医学上可用它来粉碎马立克氏病毒；在机械加工的热处理工艺中，可利用它的搅拌作用来提高热处理后的零部件质量。

利用超声波的高频振动可以用来除尘，在烟囱里装一个超声除尘器，当它产生的超声波作用在烟尘中时，烟尘就随着超声波作激烈的振动，在短时间内，相互间你碰我撞，由于粘合作用，就像滚雪球似的，颗粒越粘越大，当颗粒大到烟囱中的上升气流无法支持它的重量时，就会沉到烟囱底下，起到除尘的作用。

超声波可加工坚硬脆弱的材料，如玻璃、陶瓷、宝石、锗、硅、各种硬质合金等。超声波加工是通过加工工具将超声波的能量传递给磨蚀液中的磨料，使磨料对被加工工件进行不断的磨削来实现的。超声波加工由于振动频率高，能量大，磨粒细，因此加工的精度和光洁度都很高。同时，还可以加工形状复杂的工件，可用于玉石雕刻，对金刚钻模具或硬质合金模具进行研磨。

超声波焊接是焊接技术中的一个新领域。它是通过在两个搭接的焊接件上同时施加一定的压力和超声波振动，使两焊接件焊在一起。超声波焊接是冷焊，在焊接时不需要外加热源和焊剂，可将薄片（或细丝）焊接在厚板上。它不仅焊接金属材料，而且还可以焊接塑料、合成纤维等非金属材料，可用于半导体器件的内引线焊接，电解电容器中的铝箔与引线的焊接及电影胶片的焊接等。

由超声波发生器和带刀片的超声振动刀两部分组成的超声波切刀，由于刀口受纵向的超声振动激励，其刀片的切割能力是普通刀的 10 倍，可用于玻璃、玉石、金属的刻线和研削修整，对于陶瓷底板，印刷线路板图形的修改，焊锡点的修理等最为适用。

利用频率为 2 万赫兹，强度为 120 分贝的超声波可以作超声波驱鼠器，当老鼠等鼠类动物听到这种超声波时，就会感到难以忍受，慌忙逃走，而人类和家畜是听不到的。

以上的应用都是利用超声波的携带能量大，下面是利用它的直线传播性。

超声波的传播特性与光相似是按直线传播的，当它碰到界面时就会产生反射与折射，利用这些特性可以用来检测物体。超声波检测应用的范围很广，

它可用于探测材料的厚度和材料内的缺陷，即用于探伤；可测量海洋或河道的深度，探测海洋鱼群和海底地貌，检测输油管中的油种；用于船舶的定位等。在医疗方面，可用来探测人体内脏、心血管疾病等。

目前医院中使用比较多的是多探头电子扫描超声显像仪，它是由 16 ~ 20 只彼此靠紧、排成一行的探头组成，探头发出的脉冲超声波，在人体内碰到各层组织时，会依次产生各自的回声，这些回声点群相互联系，并用荧光屏显示出来，能使医生清楚地看到心脏、肝、肾、脾等内脏的病变情况，作出准确诊断。由于超声诊断一无痛苦二无损伤，除能定性地用曲线、图像显示外，还能提供确切的定量数据，因此日益得到广泛的应用。

超声波对人体局部血液循环，细胞新陈代谢以及功能状态的改善都会产生有利的影响，因此还可用于治疗。超声所以能治病，是因为超声在人体组织中能产生一系列物理、化学和热效应。超声在组织中引起细胞的波动，相当于一种微细的按摩，能促使局部血流和淋巴循环得到改善，从而对组织营养和物质代谢都能产生良好的影响。超声还可以刺激半透膜的弥散过程，增强其通透性，加强新陈代谢，提高组织的再生能力，另外超声的机械振动，也能引起体内局部温度升高，具有扩张血管的作用可以治疗冠心病。当然超声治疗也有它一定的局限性，如对于出血或出血后尚未稳定的疾病就不应采用，对肝脏、生殖器官也不宜直接使用。尽管如此，超声治疗有操作简便，使用安全，无副作用以及治疗时无痛苦病人乐意接受等优点，所以它是一种有效的治疗方法。

45. 一种看不见的光线 ——红外光及其应用

冬天如果在阳光下，你会感到暖烘烘的，太阳看上去是白色的，如果将一束太阳光照到玻璃或石英棱镜上，折射后，射出的不再是一束白光，而是一条红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等颜色组成，太阳光所包含的七种颜色的光线中，各色光线的热量是一样的吗？1800 年，英国物理学家赫胥耳把头上涂黑的水银温度计依次放在太阳光的各种不同颜色的区域里，发现红光区域的温度最高，而紫光区域的温度最低，当他把温度计移到红光区域的外边时，得到了一个重要发现——这里的温度比红光区域还要高，这个实验告诉人们，在红光之外，尽管人的眼睛看不见什么光线，可是它那里有较强的热效应。当时赫胥耳把它叫做不可见光线，后来人们为它取名为红外线。

红外线简称红外，本质上是一种电磁波，它在电磁波谱中占据了波长从 0.75 ~ 1000 微米这一宽广的波段，它同可见光（波长在 0.4 ~ 0.75 微米）唯一区别是波段差异。红外由于是非可见光，红外技术又多用于军事，故总给人们留下一神秘感。其实红外线并不神秘，因为凡是绝对零度以上的物体都在发射红外线，人体亦是一个红外线源，我们每个人每时每刻都处在红外线的包围之中。各种物体因自身温度不同，表面状态和材料的不同而形成各式各样的红外辐射源。

红外光是如何产生的呢？我们知道，原子中的电子，由于种种原因，使它从低能状态变到较高能量的状态，当它从高能态跃迁到低能态时就发光，对于分子来说，它有振动运动和转动运动。当分子处于较高能态的振动运动

和转动运动跃迁到较低的振动能态和转动能态时，亦要发光，这些原子、分子的不同能态，我们称它为处在不同的能级状态。一般原子中电子能级之间的跃迁对应着发射紫外光和可见光，分子的振动及转动能级之间的跃迁发射红外光。

由于红外线有热效应与生物效应，它可应用于工农业生产和医疗卫生方面。

首先是利用红外的热效应，制成远红外辐射粮食烘干机，它可用于烘干稻谷、麦子、豆类和油菜籽等作物，用红外辐照干燥的粮食有杀死虫卵和病菌的功效，有利于长期保存。经试验对小麦、大麦、油菜籽和棉花种子等用红外辐照后试种，生长状况比没有辐照过的好，因此，它可用于红外辐照育种试验。亦可制成红外测温仪，它的测温范围在 $400 \sim 1000$ ，温度分辨率为 ± 2 ，测量距离为 120 厘米，响应时间为 10 毫秒。测量波段为 $1.2 \sim 2.8$ 微米。利用红外测温原理可以制成红外火源探测仪，在充满浓烟的火场上寻找火源是十分困难的，以往全靠消防人员的实践经验，因而也容易造成差错或贻误战机。红外火源探测仪是连续、快速、非接触测量物体表面温度的新颖探测仪器，在大型现代化城市的建筑设施发生火警时，能通过隔墙、管道等探测火源，并能自动定位报警。除供消防人员救火现场侦察火源外，对于一般储有易燃物的仓库，厂房以及大型船舶都可备用。

利用大气红外辐射异常现象可以预报地震，在卫星拍摄的地球热照片上，某些地方有时会出现红外辐射异常现象。这种现象可保持数日，然后自行消失，当某地区出现这一现象后几天，该地区必然会发生地震。例如，1984 年 3 月 19 日在苏联布哈拉州的加兹利曾发生地震，而在 3 月 11 日此地空间曾出现红外辐射闪光，而辐射光是在整个大片地区上空突然闪现的。类似情况也在其他许多地震事件中观察到。那么，为什么会产生这种大气发光现象呢？原来当地震处于孕育发展过程时，必然会产生地壳向空气释放氢气、一氧化碳气、二氧化碳气、甲烷及其他气体。这些气体在地震形成区的含量迅速提高，导致局部温室效应，使气温骤然升高几度，足以使红外辐射增强，进入空间，当然这种现象在地球上难以观察到，只能从卫星上才能观察到，因此通过卫星遥测红外辐射异常这一信息，可准确地预报即将发生的地震。

利用红外辐射的生物效应，可以进行红外理疗。红外理疗是近 20 年来理疗界崛起的一支新秀。尽管各式各样的红外理疗机相继问世，名目繁多，品种各异，但其本质都是利用红外辐射的生物效应。该效应可分为热效应与非热效应。热效应是生物体中原子分子的偶极子和自由电荷在红外光的电磁场作用下，有按电磁场方向排列的趋势。在此过程中引发分子原子的无规则运动加剧并产生热效应。当红外辐射足够强时，即超过了生物体的散热能力，就会使被照射局部温度升高，引起主观的热感觉。非热效应是在红外光（特别是 $2\text{—}6$ 微米波长的红外光）的光子作用下，生物体中的分子共振吸收了光子的能量，使分子能级被激发，即使分子处于较高的转动与振动能量状态，改善了核酸蛋白质等生物大分子的活性，影响细胞的生理生化功能，从而发挥其调节机体代谢免疫等活动的功能。

80 年代以来，利用红外辐射“热疗法”治疗肿瘤是一项新的研究，特别是对恶性肿瘤的治疗。日本有关资料表明：癌细胞在 32 以下，细胞本身不会变质或坏死，然而在高温 40 以上，癌细胞不仅不繁殖，1 周后还会死去 80%，10 天左右全部毁灭。美国国家防癌中心组织了许多单位，其中以斯坦

福大学为主，对“热疗法”进行临床实验，发现热疗法可以有效地防治皮肤癌，对其他类型的癌症也有一定的疗效。美国有些医院还用红外“热疗法”来治疗晚期癌症，使很多接受治疗的病人出现了良好的转机。我国上海某医疗部门用红外“热疗法”对患晚期子宫卵巢肿瘤的病人使用红外辐射增敏“热疗法”，治疗半月后，患者疼痛明显减轻，且肿瘤萎缩，质地变软。由此可见，红外理疗前景广阔，它已进入攻克疑难病症——癌症的领域，并成为医学界临床上的新课题。

随着红外技术的不断完善，它必将进一步扩大应用范围。

46. 人类的千里眼 ——遥感技术

古代神话中的孙悟空有一双金睛火眼，一个筋头翻上云端，用手往眼上一罩，就能洞察千里之外的妖魔，孙悟空的千里眼是人们的幻想，而今人类确实有了千里眼，这就是遥感技术。遥感就是感知遥远的事物，识破伪装，洞察事物的本来面目。

第二次世界大战中，德国法西斯在法国的阿拉斯市秘密设置了制造 V—1 火箭的基地，由于伪装得巧妙，英美方面虽然多次用可见光空中摄影进行侦察，却始终未能发现。后来改用红外线空中摄影，终于“剥”去了伪装，清楚地摄取了火箭基地的红外照片。

用飞机装载照相设备利用可见光进行空中摄影，这是 20 世纪 30~40 年代的遥感技术。当前遥感技术的含义是：从航天的高度，根据物体的电磁辐射特性，运用传感器进行远距离探测，再通过判读来识别目标的性质。

人是怎样识别物体的呢？太阳或其他光源发出的可见光（其波长为 0.4~0.76 微米），照到物体上就会被反射，不同物体反射可见光的波长和强度各不相同，就形成了物体的颜色，绿叶主要反射绿光，但不同部位，不同性质的绿叶反射绿光的波长和强度也稍有差异，人眼接收到这些可见光的信息，在视网膜上合成了绿叶的图像，人们凭借经验就能判别，这是松叶那是柳叶。

物体不仅反射可见光，而且还反射红外光。不同物体对红外光的反射率是不同的。对可见光反射率相近的物体，对红外光的反射率就可能不同，红外摄影为何能识破伪装道理就在这里。例如涂绿色伪装漆的坦克和绿色植被，对波长为 0.52 微米的绿光的反射率分别为 10.3% 和 10%，因为反射率非常接近，所以就难于识别隐蔽在树丛中的坦克了。但是对 0.8~1.10 微米的红外线，两者的反射率分别为 24~26% 和 56~63%，相差如此之大，要区别它们显然是轻而易举的了。即使用采下的树枝作伪装，由于采摘后趋于枯萎的树叶与活的树叶对 0.7~0.8 微米红外线的反射率分别为 40% 和 20%，这样大的差别，当然亦易于识别了。

一切物体不仅能反射红外线，而且本身还能辐射红外线，辐射的红外线中强度最大的波长，称为峰值波长，峰值波长与物体本身温度 T 成反比，在常温时（ $300K=27^\circ C$ ），物体辐射的峰值波长约为 10 微米，属于红外线区域，所以人眼是看不见的，但是，应用红外探测器就能探测到，探测灵敏度能达到 10^{-12} 瓦的数量级，这相当于在几百公里高的人造卫星上能发现地面上烟头发出的红外线。自然界中的一切物体除辐射红外线外还会辐射其他电磁

波，如微波、紫外线、X 光等。

处于相同温度的物体，其辐射强度又随着物体的性质不同而异，这种辐射特性由物体的比辐射率决定。例如：铸铁、沥青马路与人的皮肤其比辐射率分别为 0.21、0.93 和 0.99。据此，就可以判断目标究竟是飞机还是坦克，是马路还是屋顶。

在高空利用红外或微波遥感仪来接收各种辐射和反射的各种电磁波，就能探测到地面目标，所以遥感器可称得上是科学的“千里眼”。目前用于对地球进行观测的遥感器已有几十种，如高分辨率照相机、多波段照相机、多波段扫描仪、微波辐射计、合成孔径测视雷达、激光高度计等等。它们都包括电磁波接收器（如镜头、反射镜、微波天线等），探测器（如红外探测器、光电倍增管等）和输出器三部分。

卫星把遥感器探测到的电磁波信号，用无线电波发送到地面接收站，有的是数码磁带，有的是传真图像胶卷。但都不是直接易辨的可见景物的再现。这是由于地面物体辐射和反射的电磁波要经过大气层才能传输到遥感器，而大气层对各种电磁波有不同程度的吸收和干扰，同时还有卫星运行姿态变化、太阳高度变化等因素影响，因而从遥感器接收到的是受到各种干扰、发生畸变和失真的信息，必须经过计算机的处理分析来排除各种干扰，使真实的信息得到再现，以获得清晰的图像和确切可靠的数据磁带。

遥感技术的发展起步于 60 年代军事上的需要，它已成为现代战争侦察的重要手段，比如侦察卫星上的红外装置能感测与周围环境有零点几度温差的热目标，据此就能发现敌方导弹基地。监视洲际导弹发射，并能在导弹发射后立即报警。红外装置还能发现飞机、地面军事设施、部队动向和水下 40 米深航行的潜艇。1971 年，美国利用遥感技术发现了苏联新建的 60 个供发射 SS—9 和 SS—11 洲际导弹的地下导弹发射井。利用红外装置甚至能发现部队、车队、飞机离开一定时间培留下的热迹。

在农林水利方面，遥感技术有很多用武之地，分析卫星所拍摄的大面积农作物生长情况的多谱照片，就可以监视作物的生长情况并进行估产。用资源卫星资料和气象卫星资料相结合来预报大面积小麦产量，其结果与实际估产仅差百分之三。这对指导农业生产，进行粮食贸易，具有很大的现实意义。

除农业之外，遥感技术还可用于土地、森林、草原、水力和海洋资源的调查和利用，用于监视森林火灾、河口海岸、沿岸沉积、海水运动、洪水泛滥、火山活动、环境和海洋污染等；还可以用于监视大断裂带的活动及地面的轻微隆起，为地震预报服务。大批鱼群的巡游会使海面色调变化，因而利用遥感技术就能直接指导渔业生产。

在地质勘探中，用电子计算机对卫星资料进行分析，可以很快发现新的地层结构和断裂带，确定大的地质界线，了解深部地质结构，为探矿和预报地震提供了宝贵的数据。许多国家利用遥感资料和实地调查相配合找到了铁、镍、钼、锂等矿藏和石油。用遥感图像绘制地图快速准确，已广泛使用。

遥感已促使气象科学发生了巨大变化，利用几颗气象卫星拍摄的云图资料，每隔几小时就可绘制一幅全球天气图，再利用各种遥感器提供的全球大气温度、湿度垂直分布数据，能准确预报几天以至 10 天以上的大气趋势。特别可连续监视台风等灾害性天气，做到及时预报。

此外，对金星、土星等行星的宇宙飞船探测亦都是用遥感技术，使得人类对这些行星有更清楚的了解。

遥感技术是近 30 年来蓬勃发展起来的一门新技术，它涉及空间技术、红外技术、电子和电子计算机技术的一门综合性探测技术，它把人类的视野扩大到“千里”之外广阔无垠的宇宙空间，以及地球上人类难以到达的任何地方，并且可以昼夜不停地工作，比神话中的“千里眼”还要神通广大，它必将大大深化人类对自然界的认识，也将有力地推动人类改造自然的斗争，它的发展和应用潜力还很大，可以预料，遥感必将为我国实现社会主义现代化发挥越来越大的作用。

47.瞬息传万里，天涯咫尺间 ——卫星通讯

20 世纪以来，在近代物理基础上发展起来的新兴技术中，除核能技术、电子技术、激光技术、超导技术外，就算信息技术了，目前人类已进入信息社会，人类通讯已日益广泛和频繁，传统的通讯方式，以有线通讯为主，大都用架空明线、同轴电缆、波导管来承担。长期以来，人们幻想创造一种新的通讯途径，来取代传统的通讯方式。通讯卫星的出现，使人们的这一幻想变为现实。

卫星通讯就是把人造卫星作为微波中继站，把地面上甲地的微波信号转播到乙地，建立两地的无线电通讯。

由于微波只能直线传播，而地球表面是弧形的，所以微波在地面上的最大传播距离是视线距离（大约 50 公里）。这样地面上远距离通讯时，如途经济南的京沪间的 1800 路微波通讯，就要在沿途建立微波中继站，使微波一站接一站地往下传送。1957 年第一颗人造地球卫星发射升空之后，就有人提出利用人造卫星作为微波中继站，实现在地面上各地间的微波通讯。

1960 年，美国发射了第一颗用于通讯的实验卫星，名为回声 1 号。回声 1 号卫星实际上只是一只大气球，外面贴有金属片，用来反射地面上向它发射的微波无线电信号。由于强度不够，不久就瘪掉了，接着又发射了回声一

型卫星，它是用一定强度的材料做成，在空间工作了五年多的时间，回声一型卫星工作的成功，有力地证明了用卫星反射无线电信号，实现地面上两地间的无线电通讯是可行的。在此基础上，又发射了有源通讯卫星，即在这种卫星上装有接收—发射天线，电源设备与转发器。无线电信号被卫星上的接收设备收集后，进行频率变换、放大，然后发往地面上的地面接收站，由于增加了接收、放大、发送设备，使通讯质量大大提高。现在已发展到发射步同通讯卫星，即将有源通讯卫星送到离地球赤道上空 36000 公里高的同步轨道上，使卫星绕地的转速与地球的自转速度相同，从地面看上去，卫星像是静止不动的。因此可以不用很复杂的跟踪设备，并可以实现全天 24 小时连续通讯，又由于它在 36000 公里的高空，可以覆盖地面上半径为 18000 公里，即地球的三分之一多一些的地区，所以只要发射三颗这样的卫星就可实现全球通讯，现在国际卫星通讯组织在太平洋、印度洋和大西洋上空各放一颗同步通讯卫星，成功地进行国际间的电话通讯和电视传播。

卫星通讯系统由卫星和地面站两个系统组成，由于人造卫星距离地面很远，必须由人造卫星通讯地面站向卫星发射强大的信号，同时把接收到的由卫星转发回来的微弱信号加以放大。随着科学技术的不断进步，使这些系统不断得到完善，这就使卫星寿命增加，通讯线路倍增，费用降低，为卫星通

讯的广泛应用创造了条件。例如，第一代国际通讯卫星寿命仅一年半，可同时通 240 路电话或传送一套黑白电视节目，而第六代国际通讯卫星则可同时通 30000 路电话和传送几种彩色电视节目，寿命为 7 年。加拿大、苏联等国已实现了国内通讯卫星化，即使原来地面通讯系统密集完善的美国、日本，以卫星通讯所占比例也越来越大。

人造卫星通讯是目前实现远距离，以至洲际间全球通讯的主要方式之一。人造卫星通讯的优点是稳定、可靠、通讯容量大。

我国亦已发射多颗通讯卫星，东部发达地区与新疆、西藏等地的通讯已由卫星来承担，最近购制的中星五号卫星已定点，可传送电讯及电视节目。如山东电视台等的节目亦已通过中星五号传送到其他各省，而云南、贵州、西藏、香港等电视台节目，也可通过卫星传到国内其他省份。

据报载，我国长城工业总公司拟用改进型长征二号丙运载火箭为美国摩托罗拉公司发射多颗代号为“铱星”的低轨道卫星。这将对实现跨世纪、跨国界的个人通讯迈出可喜的一步。

“个人通讯”是“全球每个人通讯”的简称，意思是说，你只要有一台通讯机在手，就可以在任何时间与位于地球任何地方的一个人直接沟通联络，事先可不必知道对方位于何处，只要知道他的电话号码就可以了。个人通讯的问世，把通讯由“服务到电话机”推向“服务到人”。普通电话号码实质上是指“电话机的号码”，而个人通讯中，一人只有一个电话号码，无论他在何方都是这个号码。实现个人通讯，除了要拥有一台集计算机、无线电话和图文传真功能于一身的“个人通讯机”外，最重要的条件是建立一个能覆盖全球的低轨道卫星通讯网，每个人头顶上始终都有通讯卫星在运行。因此，不久即将面世的铱星低轨道卫星通讯系统将为实现个人通讯创造条件。

目前，卫星通讯已广泛应用于军事、海洋、海上采油、计算机通讯网、通讯广播等领域，这其中又以通讯、广播最为普遍，卫星每天传送着大量的电话、电报、电传、电视转播、广播、电视会议以及电视教育等微波无线电信号，并以惊人的效率、低廉的费用引起了人们越来越大的兴趣。卫星通讯将引起当代通讯领域的一场革命，改变人类的生活，将人类带入一个“信息社会”。

48. 奇妙的玻璃丝 ——光纤通讯。

一提到通讯，大家就会想到电报、电话等无线电通讯，你可知道，在人类所有通讯活动中，光是最古老的快速通讯工具。几千年前，我们的祖先在高山上构筑的烽火台，事实上就是光通讯站，它在白天利用烟，晚上利用火，把边关的紧急情况火速传递到京城，以便抵抗外来的侵略。至今在某些特殊的地方晚上仍采用信号灯的闪光来代替旗语进行通讯。例如青岛的信号山上，晚上用信号灯的闪光与入港的舰只进行联系。

但是，无论是古代的烽火报信，还是现在的信号灯闪光通讯，都是非常简单的光通讯。激光出现后，由于它具有单色性好，方向性强，几乎能把所有能量向一个方向发射，因此，它是一种十分理想的光通讯光源。但是激光在大气中传播时，由于大气的散射、吸收等影响，将受到衰减，特别是下雨、

下雪和有雾等天气，光通讯受到的影响就更为严重，显著地缩短了光通讯的距离。另外，由于光是直线传播的，为了不使高层建筑等物体挡住光通讯，光通讯设备必须设在高处。这就限制了光通讯的普遍应用，因此考虑能否像电在电线中传播那样，让激光在管道中传播呢？其实人类早已发现光在玻璃纤维中传导的现象。如 50 年代已使用的一种胃镜，就是把光导纤维（简称光纤）插入口中，并穿过弯弯曲曲的食道到达胃内，通过玻璃纤维可以清楚地观察胃内的情况，这种利用光在玻璃纤维中传播来进行通讯的，可说是最早的光纤通讯。

那末，光纤是怎样传播光线的呢？这要从光的传播说起，当光传播到两种介质的分界面时，光在原来介质中将产生反射，在进入另一介质时发生折射。当光线从折射率较大的介质（称光密介质）进入折射率较小的介质（称光疏介质）时，在入射角等于临界角时，折射光线将沿着两介质的界面进行，当入射角大于临界角的情况下就产生全反射现象。此时，不发生光的折射，只有光的反射。

光导纤维是由两层介质组成，用二氧化硅玻璃纤维作芯线，外涂树脂制成，或用特种塑料合成材料作芯线，外层涂料用聚乙烯或聚四氟乙烯，外层涂料的折射率小于光纤芯线的折射率，这样就保证在一定的人射角下的入射光线，始终在芯线和外层之间的界面上产生全反射，不管光纤弯曲成什么形状，使光线来回曲折地在光纤中传播。

另一种光纤是聚焦型光纤，它的特点是光线不是在光纤的芯线与外层之间的界面上反射前进，而是光线在光纤中传播时。它会自动地逐渐向轴线方向折回，形成正弦曲线。

我们知道，无线电通讯的过程是：首先将需要传递的信息（语言、文字、图像、数据等）通过讯号变换器（话筒、摄像机等）转变成低频信号，然后把这种信号加到一种可以远距离传播的高频电磁波上，通过控制它的某个参数（振幅、频率或位相），使它们按信号的规律变化，这样，高频波就“载”着信号由天线发射出去。所以这种供调制用的高频波又叫“载波”。在激光通讯中，信号的发送过程完全类似，只是载波由激光担任，用电、磁或声等信号去调制光线，使之转变成光信号并送入光纤，光信号传到目的地后，由光探测器将光信号转变成与原来一样的电、磁或声的信号。

在长途光纤通讯中，由于光纤和接插头处的损耗。使光信号传播一定距离后变得很弱。因此在长途光纤通讯系统中，每隔一定距离需要设立一个“中继站”或“增音站”。另外，由于光源的频率不够单一，激光虽然单色性好，但也有一定的频率范围，这样一束光在光纤中传播时，它们之间的速度就有些差异（因为介质中的光速与频率有关），再加上光纤的一些缺陷，光信号在光纤中传播一定距离后就会发生畸变，所以中继站的另一个作用是给光信号“整形”。

光纤通讯中的另外两个关键的部件是激光光源和光探测器。

在光纤通讯中最可取的激光光源是微型钕玻璃激光器和镱铝砷激光器，它们具有功率大、体积小和坚固等优点，特别是镱铝砷激光器可做得很小，整个尺寸只有一颗盐粒那么大小，它的发射频谱较窄，且其功率可达几毫瓦到 10 毫瓦以上，适宜作长途大容量光纤通讯的光源。

光探测器是光的接收元件，它的作用是把从光纤中接收到的光信号转变成电信号。在光纤通讯中，光探测器相当小，要求小到足以与头发丝粗细的

光纤相接，并能非常灵敏地检出远距离传来的微弱光信号，而且在高速大容量通讯时，这种光信号脉冲每秒达几亿次以上，这些要求只有精细的固体器件才能满足，一般采用硅 PIN 光敏管和雪崩光敏管作为探测器。

80 年代初，在横贯太平洋海底，铺设了连结日本和美国的海底光纤电缆，它的总长为 1 万公里，相当于地球周长的 $\frac{1}{4}$ ，80 年代末欧美通讯管理部门又铺设一条横越大西洋的光纤电缆。

使用海底电缆通信已有 140 多年的历史了，1850 年，在多佛尔海峡铺设的电缆是最早的，这种电缆采用细钢丝覆盖天然树脂作为绝缘体，使用莫尔斯电报来传递信息。1921 年，出现了传输电话的第二代电缆。海底同轴电缆属于第三代，它具有内外两层导体呈同心圆柱分布，中间夹有高性能绝缘体，还设有海底中继站，沿途不断放大衰减着的信号，它的最大容量为 5200 路电话，用它也可以传输彩色电视，但因彩电信号有较宽的频带，约为电话频带的 1000 倍，所以这种海底电缆的通讯能力就显得不适应了。80 年代铺设的光纤电缆，属于第四代电缆。它可同时传输一万路电话，而且还有很大潜力。

光纤电缆有许多优点，首先，它的信息容量比一般电缆大得多。大家知道，一对电话线上只能通一路电话，如果要在—对电话线上复用更多的电话，则必须用载波的方法，把各路电话搬到每个互相有一定间隔的频段上。由于普通电话的频率范围为 300 ~ 3400 赫，而—对电话线所能传输的最高频率为 150 千赫，这样每对电话线最多只能复用几十路电话，为了使—对线路上能复用更多的电话，相继出现了电缆、同轴电缆、毫米波系统、和微波中继系统等，但它们还是不能适应信息传输量日益猛增的需要。采用光纤通讯后，这个问题就迎刃而解了。因为光是频率极高的电磁波，它可传输信息的频带很宽。例如在频率为 3×10^{14} 赫的可见光中，如果取它频率的 $\frac{1}{10}$ 作为传递信

号用，理论上可传输 10^{10} 路电话。即使考虑到光纤的缺陷只能传输 10^5 或 10^4 路电话也是可观的。要知道这只是一根像头发丝那样粗细的光纤，如果将上百根光纤组成一根光缆，那末这光缆的容量是非常可观的，可见信息容量大是光纤通讯的最大优点。

第二个优点是稳定性好、保密性强。因为光在光纤中传播时不仅不会“漏出”，而且不受电磁场、射频和核爆炸的磁脉冲影响。所以在光纤中传输的音频、视频信号不会受到外界的干扰。第三，光纤的传输损失小。信息容量为 2700 路电话的海底同轴电缆每隔 3.8 公里要装一个中继放大器，而光纤电缆仅需每隔 40 公里加一个中继放大器，这不仅减小建设费用，而且可以大大提高可靠性，这一点在远距离通信上特别重要。如果改用新型材料，中继放大器可以更少甚至可以不用中继放大器。第四，光纤材料主要是二氧化硅，所以价格低廉，重量轻，直径细，对铺设工作很有利，施工费用亦可大幅降低。而且这条光纤可 25 年不用维修。

目前，通讯卫星已可容纳电话 12000 路，还有几路电视信号，如此大容量的卫星通信，足以胜任横跨太平洋的通讯，为什么还要新建海底光纤通讯系统呢？通讯卫星是在赤道上空 36000 公里的同步轨道上，电波往返一次需要 0.3 秒。这个延迟在重要的数据通讯中可能会造成混乱，而用海底光纤电缆就可以避免这个致命的缺点。

光纤通讯是一门崭新的综合性科学，我国已铺设从北到南，从东到西的

光纤电缆，随着信息容量的扩大，光纤通讯将成为现代化通讯的重要工具。

49. 一种新颖的分析技术 ——质子 X 荧光分析技术

一些珍贵的文物，如从古墓中挖出来的越王勾践剑是世界珍宝，千百年来埋在地下，至今仍不锈蚀，保持着原来的锋利，它是如何铸造的？它的成分又如何？我们不能把剑上挖一块下来分析，要在无损伤的情况下分析它的成分，用化学方法是不行的。20 世纪 80 年代人们发现了质子 X 荧光分析技术，使这种无损分析成为可能。

质子 X 荧光分析技术，自 1970 年 A.E. 琼亨生等人在这方面作的开创性研究工作以来，因为它具有独特的优点，越来越受到重视，应用亦日益广泛，如今质子 X 荧光分析已成为一种成熟的多元素微量分析技术。这种分析技术是用加速器产生的高速质子轰击样品，我们知道原子是由原子核和外面若干层电子组成的，使待测物质中的原子受到质子轰击后，它的内层电子被击出，形成内壳层电子空缺（称为空穴），当外层电子去填充空位时，即可发射特征 X 射线，测定 X 射线能谱中各特征 X 射线的能量和面积，就可进行元素的定性和定量分析。

质子 X 荧光分析具有灵敏度高、分析速度快的特点，它对大多数元素（原子序数 $Z > 12$ ）是很灵敏的，可检测的元素含量下限在 10^{-16} 用高分辨的硅（理）能谱仪，可实现多元素（15 ~ 30 个）同时分析，这是其他分析方法无法与之相比拟的，若与计算机配合成自动分析系统，它将成为一种快速灵敏的多元素分析方法。一般情况下，测量一个样品仅需几十秒到几分钟，用计算机程序处理，质子 X 荧光分析能谱也只要几分钟就可送出计算结果。

取样量少是质子 X 荧光分析的又一特点，它的样品仅需微克（ 10^{-6} ）~ 毫克（ 10^{-3} 级的数量，这对分析活体组织是极为理想的，如在分析活体心肌样品时只需约 100 微克，分析单根头发只要几毫米长就够了。

无损分析是这种分析技术的显著特点，它是考古研究中不可多得的分析方法，分析时在很大的文物表面不留一点痕迹，无损分析在医学研究中亦很有价值，如对活人牙齿，进行直接分析就是一个例证。

有关质子 X 荧光分析技术已在很多方面得到应用，首先是它在生命科学中的应用，已公认 14 种元素为人体的基本微量元素，在原子序数上仅氟与硅低于 20，其他为钒、铬、锰、铁、钴、镍、铜、锌、硒、钼、锡及碘。质子 X 荧光分析容许同时测定全部生物的基本微量元素。随着人们对人体中微量元素的进一步了解，可望在不久的将来质子 X 荧光分析技术可供有价值的诊断信息。

由于质子 X 荧光分析具有无损分析的特点，在考古方面有着无限广阔的应用前景，用它可以分析文物的组成成分与制作工艺等。1965 年在湖北江陵望山一号楚墓出土的越王勾践剑的分析是一个很好例证，该剑长 64.1 厘米、宽 5 厘米，表面有黑色花纹，剑格上嵌有琉璃和绿松石等饰物，同时出土的还有一把花纹相似但不带铭文的剑。这两把剑虽在春秋战国时制作，在地下埋藏了 2500 多年，但至今仍很锋利，是我国古剑中最为珍贵的两把，堪称国宝。对这类珍贵文物的研究，首先必须确保无损，用质子 X 荧光分析最为合适，经分析在黑花纹处有硫，据冶金专家认为这是一种硫化技术，在过去尚

未发现过，从琉璃的分析中，发现大量钾、钙，这说明早在 2500 年前，我们已经有钾—钙玻璃了，而过去认为这个时期内中国只有铅—钡玻璃。从剑表面各部位分析表明它主要含铜（40~80%）锡（19~42%），另有铁（0.4~3.7%）和微量硫和砷。

在陕西临潼与秦始皇兵马俑一起出土的文物中有大量的箭镞，其中有些已锈蚀，但有些仍闪烁发光，锋利锐利。经质子 X 荧光无损分析发现，不锈蚀的箭镞表面有大量的铬元素，而在箭镞的断面未发现铬，这说明在我国古代已经知道用表面铬化处理技术来防锈。形成对照的是联邦德国在 1937 年、美国在 1950 年才有这项防锈技术的专利。另外对古尸头发进行分析为古尸研究提供了有用的信息。

质子 X 荧光分析技术在环境科学中的应用有大气气溶胶（即飘尘）的分析。大气气溶胶是一种微量大气成分，在干净的自然大气中气溶胶含量非常低，在污染严重的城市中，气溶胶浓度可达到本底值的 1000 倍。大气中气溶胶颗粒的大量增加，不仅影响大气的能见度，还影响天气，影响辐射平衡，进而可能影响气候；同时它可直接进入人体呼吸道，危害健康；还可能使水源、土壤造成二次污染等。因此大气颗粒物的研究，一直是环境科学研究的重要内容。利用质子 X 荧光分析技术分析大气气溶胶的化学组成元素的浓度及谱分布，找出污染源，为治理环境提供科学的依据。

利用质子 X 荧光分析技术，还可以分析红、绿茶中的微量元素分布及中草药中微量元素成分等；可进行合金成分分析；亦可从犯罪现场采集的样品作分析，为破案提供可靠的根据等。

所以质子 X 荧光分析技术是一项新颖有用的分析技术，它必将为医学卫生、环境保护、工业冶炼，考古分析等方面做出贡献。

50. 一种新颖的分析技术 ——中子活化分析技术

1919 年，卢瑟福用 α 粒子轰击氮核形成一个原子序数等于 9，质量数等于 18 的氟的不稳定同位素，接着产生核反应放出一个质子与氧的同位素，这是人类首次发现的人工核反应。1932 年英国物理学家查德威克用 α 粒子轰击硼或铍时，发现了中子。中子不带电，易于进入原子核内部，因此在原子核物理研究中，常用中子来轰击原子核以引起核反应。在核反应过程中的生成核，有的是稳定的，有的是放射性的，即它可以放射 α 、或 β 、或 γ 射线，产生放射性核的过程就叫激活。

中子活化分析技术就是中子轰击待测样品使其中的核激活，样品中不同元素被激活将产生不同的放射性生成核，对它们的放射性进行测定与分析，可以确定激活前样品中有哪些元素及其含量。

要进行中子活化分析，必须要有中子源，要有足够流量与能量的中子源，中子束的来源大致有三，第一是核反应堆，因为裂变反应堆能提供高通量（单位时间通过单位截面积粒子数多）的慢速中子流（亦称热中子）；第二是加速器中子源；第三是放射性同位素中子源，它是利用放射性同位素放出的 α 射线或 γ 射线作为轰击粒子，去轰击轻原子核，通过轻核的 (α, n) 反应产生中子。

现代的中子活化分析技术具有灵敏度高（在通量约为 10^{12} 中子/厘米²

秒的情况下，用热中子活化可达十亿分之一），准确度高，不破坏样品及多种元素（40 余种元素）可同时测定等优点，因此在地球物理学、宇宙科学、生命科学、环境科学乃至法医学。考古学等领域中都得到重要应用。

最著名的中子活化分析技术应用的事例是解开了拿破仑死因之谜。拿破仑半世戎马生涯，东征西讨，曾经不可一世，滑铁卢一战败北，被俘后被流放到圣黑利厄岛上，最后死于此岛。根据美国的百科全书记载，拿破仑死于胃病。但多年来，法国人却一直坚持认为拿破仑是被英国人毒死的。事实真相一时难于弄清，使拿破仑的死因长期成为一个谜，70 年代科学家将拿破仑的头发切成每段长一毫米左右的发丝，然后分别放入原子核反应堆中接受中子活化，分析结果发现拿破仑头发中竟含有比正常人多 40 倍的砷(As)元素，这就为拿破仑在死前曾遭服食砷剂提供了有力的证据，也就是说拿破仑是砷中毒而死。

中子活化分析技术在工业上，在工业产品，材料检测等方面得到了广泛的应用，它可以精确地分析金属及其化合物的元素成分，也可以推算矿藏的蕴藏量。在环境科学上，利用中子活化分析的高灵敏度和能对多种元素同时测定的能力，不仅可以测得受污染大气的污染程度，同时使得元素关联分析有可能进行，从而确定污染源和污染途径。

微量元素对人体的生命过程起着重要作用，现已查清铁、锌、铜、锰、铬、碘、镍、钴等 14 种微量元素是人体必需的，而铊、镉、铍、镭、汞、铅等元素是有害的。在人体中当缺少“必需”的微量元素或过量有害的微量元素时，会引起相应的病症，中子活化分析可帮助医生确定上述两类元素的上限与下限，可指导临床诊断和治疗与微量元素相关的病症。

中子活化分析还应用在对地球及空间化学的研究上。在 70 年代末，我国专家对吉林陨石进行了广泛的分析研究，测定了其中 14 种稀土元素和 6 种铂族元素，为宇宙演化提供了重要资料。

由化石分析可知古生物恐龙是在 6500 万年以前(对应于白垩纪与第三交接层)灭绝的。人们对恐龙灭绝的原因曾提出各种假说，如火山爆发，气候异常，盐度变化等等地内成因说，近年来用中子活化分析方法发现二叠纪和第三纪界面上铍异常偏高，因此科学家们推测；恐龙灭绝可能是由于地外陨石撞击地球产生的尘埃挡住阳光，以致地球气候引起突变所致。

在国内中子活化分析技术也应用到破案工作方面，通过同源鉴定对一些重要案件的破案做出重要贡献，其中有一案例中，对犯罪现场一根约十几微克的眉毛的四种元素进行分析，把分析结果与同案嫌疑犯的眉毛分析结果进行对照，很快确认了案犯。

中子活化分析技术愈来愈广泛地应用于各个领域，随着这项技术的开展，它将更加受到人们的重视。

51. 材料科学的新工艺 ——离子束技术

利用加速器产生的离子束对半导体材料、金属材料和非金属材料表面处理与改性是本世纪 60 年代开始的。当时将低能离子加速器产生的离子束轰击半导体材料进行掺杂，代替了传统的扩散烧结工艺，在半导体器件，特别是集成电路的研制中起到了重要作用。目前离子注入已成为半导体工业的必不

可少的生产手段，70 年代开始，离子束技术迅速地发展到材料科学的各个领域，成为材料科学的一项新工艺。

离子束最先应用于半导体掺杂，我们知道纯度很高的半导体材料（如硅、锗）中放入一点点一定的杂质，半导体的导电性能就会大大提高，而且放入不同的杂质，就会形成两种导电机构不同的半导体材料。由于离子束注入半导体具有剂量精确，注入深度容易控制，横向扩散很小等优点，因此，在半导体工业中得到广泛的使用。

其次离子束轰击可引起材料表面组分变化，使金属与非金属材料改性，它一方面明显地改善金属表面的机械性能，增强了表面的硬度、表面的耐磨性，与金属的抗疲劳性等；另一方面离子注入也增加了金属表面抗高温腐蚀和溶液腐蚀的能力。例如航空、航天仪器中的高速转动部件表面就用离子束注入来增加其耐磨性。近年来，很多人在研究这种改性问题，并将离子束改性技术发展到其他材料，例如离子注入无机绝缘材料，将离子束注入玻璃、铌酸锂、钽酸锂晶体可以改变它们的折射率和抗辐射性能，离子束注入有机高分子材料可以改善其表面的机械性能和生物相容性，也有人应用离子注入制造和改进高温超导薄膜。

第三是离子束刻蚀和制版，由于离子束轰击材料表面还会引起材料表面原子的溅射，使材料表面原子层剥离。利用离子束刻蚀，可以制造超高频石英谐振器，我们知道在各种频率标准的仪器中需要石英谐振器，如对讲机、石英手表中都是用石英谐振器来做的振荡器，因为它的频率稳定，易于控制，一般石英谐振器是将石英单晶按一定的方向割成薄片，然后研磨成圆型晶体，两面镀上金属电极，制成石英谐振器。利用离子束轰击材料表面可以起到清洁表面的作用，在高精度镀膜过程中，材料表面仅用化学方法清洗是十分不够的，因为材料表面会有残存的化学试剂与残余的气体分子，在镀膜前用离子轰击，可得到十分清洁的表面，从而获得十分纯净的薄膜。离子束剥离技术，在多种表面分析仪器中应用它，它可将表面一层一层地剥离，从而获得随深度变化的信息，达到表面分析的目的。另外离子束刻蚀代替光刻已用于制造大规模集成电路上。

第四方面的应用是将离子束技术与镀膜工艺相结合形成离子束混合新技术。

目前离子束已成为材料科学的一项新工艺、新技术，近年来将离子束，电子束，分子束结合一体的三束机脱颖而出，为离子束的应用开辟了一个新的领域，随着离子束技术的不断完善，以及离子束技术和其他技术的结合，离子束技术将会在材料科学中发挥更大的作用。

52. 探索极微世界的工具 ——电子显微镜、扫描隧道

显微镜和原子力显微镜

要观察微小的物体，一般用显微镜，它用可见光作光源，所以称光学显微镜，最早的光学显微镜是在 1604 年由荷兰米德尔堡的一个眼镜制造工人札卡赖亚斯·詹森创造的。它由一个双凸透镜和一个双凹透镜制成，前者作物镜，后者作目镜，放大倍数约为 10 到 30 倍，可观察小昆虫，当时只被当作

玩具。1610 年伽利略最先将显微镜用于科学研究，研究昆虫，观察到昆虫的复眼。1665 年英国物理学家胡克制造出第一架有科学研究价值的显微镜，他第一次发现植物的细胞，揭开了人类认识微观世界的序幕。1677 年荷兰人列文虎克，改进了显微镜的镜头，使它的放大率达到 150—270 倍，他用自己做的显微镜观察到了污水里和人的唾液中的活细菌，以后经多人改进达到现在的显微镜水平。

显微镜的光学图解，其中 L_1 是短焦距的物镜， L_2 是目镜，现在的物镜与目镜一般由好几片透镜组成。被观察物体 PP_1 放在物镜 L_1 的焦点附近靠外一点。在物镜后产生一放大的倒立实像 $P'P'_1$ 。 $P'P'_1$ 恰好在目镜 L_2 的焦点内，形成一放大的虚像。

现代的显微镜可以分辨 0.2 微米 ($1 \text{ 微米} = 10^{-6} \text{ 米}$) 大小的物体，放大率可达 2000 倍。

用显微镜来看微小物体，它的分辨率是有限度的，所谓分辨率就是用显微镜能观察的最小距离，这与盲人用手指去分辨盲文中二孔之间的距离一样，用手指可分辨的距离在毫米数量级。再靠近就分辨不出了，显微镜用可见光来分辨微小物体间的距离，由于可见光的波长的量级为 0.5 微米，所以光学显微镜的极限分辨率为 0.2 微米。

要提高分辨率，就是要看到更微小的物体，必须用波长更短的波来观察。

1924 年德布罗意提出

微观粒子亦有波动性，认为高速运动的电子也有波动性。它的波长与加速电压的平方根成反比，如果加速电压为 100 千伏，经它加速后的电子的波长为 0.0039 纳米 ($1 \text{ 纳米} = 10^{-9} \text{ 米} = \frac{1}{1000} \text{ 微米}$)，这比可见光波长短 10^5

倍，用电子束代替可见光作照明源，将使显微镜的分辨率提高万倍以上。

1931 年鲁斯卡和克诺尔发明第一台透射电子显微镜。电子显微镜是利用电子在一定形状的电场或磁场中有聚焦的作用制成的。电子显微镜的所有各部分都处在真空容器中。

30 年代的电子显微镜，得到的分辨率为 400 埃 ($1 \text{ 埃} = 10^{-10} \text{ 米}$)。1935 年克诺尔提出扫描电镜的设计思想，于 1955 年变成现实。英国生产的分辨率为 250 埃的第一台商品扫描电镜问世。其后日本、荷兰、西德、美国和中国相继制造各种型号的商品扫描电镜。1969 年，由于扫描电镜上成功地观察到电子通道效应，并成功地结合电子探针微区成分分析技术，使之成为多功能扫描探针。自此以后，扫描电镜的性能得到不断改进，几乎每隔一、二年便出现一次更新换代。在透射电镜和扫描电镜不断发展的同时，1963 年前后，芝加哥大学的克鲁教授分析了扫描技术与透射成像的优点，提出扫描透射型的电子显微镜原理，随后称作扫描透射电镜。经过 6 年多的努力，克鲁用高亮度的场发射枪作电子源，经强物镜聚焦成很细的电子束，并在薄样品上扫描，用弹性散射电子得到高分辨率 (达到 2.4 埃) 高反差的暗场显微像。1972 年首先观察到单个原子及其运动的图像。

70 年代以来，电子显微镜的性能和分辨率都有很大提高。80 年代点分辨率已达 2 埃，并用 3Mev 超高压高分辨率电镜观察到金刚石及硅的晶格原子。分辨率达 1.1 埃。从 80 年代开始生命科学广泛应用电子显微镜，取得了很多研究成果，如电镜观察到危害人类的病毒，为研究细胞超微结构、超微病变

提供最好的线索。电镜的另一大应用领域是固体科学，近年来，利用电子衍射和高分辨电镜发现和证明了固体除晶体和非晶体外，还存在一种具有 20 面体对称性的新状态——准晶态。这个发现对推动以晶体学为基础的固体物理、固体化学、矿物学、材料科学等学科发展具有重大意义。

电子显微镜的诞生和发展，使人们从光学显微镜的分辨极限 0.2 微米，一步一步使观察视野逼近到原子水平，为科学进步做出了贡献。透射电子显微镜在观察物质的整体结构方面是很有用的，但在表面结构的分析上却较困难，这是因为透射电子显微镜是由高能电子透过样品来获得信息的，反映的是样品物质的内部信息，扫描电子显微镜虽然能揭示一定的表面情况，但由于入射电子总具有一定的能量，会穿入样品内部，因此分析的所谓“表面”总在一定的深度上。电子显微镜与光学显微镜一样也有分辨极限，电子显微镜的分辨极限为 1 埃。要观察到原子的细节仍存在着困难。

1982 年 IBM 公司的宾尼格和罗勒尔在凝聚态国际会议上发布，他们研制成功具有原子分辨能力的扫描隧道显微镜。

扫描隧道显微镜的工作原理与电子显微镜完全不同，它不是通过电子束作用于样品（如透射和扫描电子显微镜）来获得关于样品物质的信息，也不是通过高电场使样品中的电子获得大于脱出功的能量而形成发射电流成像（如场发射电子显微镜），并以此来研究样品物质。它是通过探测样品表面的隧道电流来成像，从而对样品表面进行研究。

样品的表面，如金属表面，由于原子的场力对表面电子有束缚作用，它是不允许其中的电子跑出其表面的，这好像一个普通粒子陷于一个土坑中一样，这土坑的壁就是屏障，称作势垒，样品对表面的束缚作用，说明样品表面为不连续的势垒。经典理论认为，动能低于势垒的电子是不能穿过势垒的，犹如一粒小球处于空杯中那样，如果不施力于该小球，使它的动能大于杯子深度的势能，小球是不可能跑出杯子的——它陷在杯中。但是根据量子力学，我们必须用机率波来解释粒子，而这个波的强度就是能找到粒子的机率，假设我们用量子力学来考虑屏障势垒中电子的波形时，其结果则是波的一小部分要泄漏到势垒之外，这意味着电子有一定的机率出现在势垒之外，（就好像穿墙而过似的），这在量子力学中叫势垒隧道贯穿。电子工程师们发现，量子隧道贯穿效应可用来放大电子信号，这个特性已用于许多实际器件中，晶体管、隧道二极管以及许多仪器都利用这个效应，甚至你的数字显示手表也有可能有一些部件是利用这种隧道效应来运转的。

扫描隧道显微镜既可作表面结构分析还可进行表面定域电子态分析，从而可进一步测定定域化学成分。由于它不损伤样品，故可以在真空中，大气中甚至在液体中工作；它结构简单，不需要任何透镜，可以单独使用，也可以与其他表面分析仪器配合使用。目前它正以它独特的优点和广泛应用的潜力迅速渗透到许多研究领域。1989 年中国和美国科学家利用扫描隧道显微镜得到了脱氧核糖核酸（DNA）分子双螺旋结构的清晰图像。

但是尽管扫描隧道显微镜有很多功能，而且还将不断地开发出来，但由于它的原理是量子隧道效应，因而它不能检测非导体样品，这就限制了它的应用范围。

由于扫描隧道显微镜开辟了探索极微世界的新途径，是显微镜发展史上又一丰碑，为此其发明人宾尼格、罗勒尔和电子显微镜的创始人鲁斯卡一并荣获 1986 年的诺贝尔物理奖。

正当扫描隧道显微镜迅速发展时,1985年美国加利福尼亚大学的宾尼格(扫描隧道显微镜发明人之一)和奎特,以及苏黎世研究所的哥伯提出了原子力显微镜,该显微镜是用一根固定在超轻的金箔三角架上的钻石针尖接近样品;当针尖与样品的距离小于10埃时,钻石尖端上的原子和样品表面的原子间的相互作用力即原子力(10^{-6} 克)变得很明显;将样品装在压电陶瓷管上,并相对于针尖在Xy平面内运动,相当于针尖在样品表面上扫描,在扫描过程中原子力随样品表面原子结构形貌不同而变化,钻石尖端就随原子力的变化而上下微微起伏,用一束会聚的激光束照在金箔片上,经金箔片反射的激光束带有样品表面形态的信息,用光电二极管接收该反射激光束,经放大后再去控制压电陶瓷管的伸缩,使样品与针尖之间的原子力保持不变,这样,样品就会在陶瓷管的作用下沿着与其表面形态相仿的轨迹,在Z方向运动,所以,可通过压电陶瓷管的Z方向伸缩信号来构成样品表面的形貌图像。这种光位移原子力显微镜是应用激光反射原理与光杠杆原理,故避开了繁杂的电子线路和干扰,在空气中可无损伤地检测绝缘体和导体样品,其横向分辨率为3埃,纵向分辨率小于1埃。

现在原子力显微镜已用于观察集成电路、晶体、半导体、血液细胞和细菌等。

综上所述,电子显微镜、扫描隧道显微镜和原子力显微镜都实现了人们观察原子的美好愿望,可是原子内部还有许多结构等待人们去探索,随着科学技术的发展,揭开原子与原子内部的形态,就指日可待了。

53. 奇妙的画笔 ——静电复印技术

从前我们要看某一篇文章,必须到图书馆将杂志借出来,坐在那里看或抄录,如遇本地没有这本杂志,则需千里迢迢赴外地(比如北京图书馆)查找与抄录,现在有了静电复印机,各种文献都可复印,外地亦只需通讯联系,复印后即可看到全文,另外一些协议书,证件等都可复印。

下面我们简单介绍静电复印的原理与工作过程。

静电复印实验是1938年首先由美国卡尔逊实现。1959年施乐914型简便复印机正式投产,随着电子计算机技术的迅速发展,人们把计算机技术用于复印机的控制系统,使静电复印机朝多功能、高速度和智能化方向发展,成为目前各种类型的静电复印机。

静电复印是以光敏半导体(简称光导体)的导电特性和静电效应为理论基础,并根据摄影原理发展起来的。光敏半导体具有这样的特性,当它受光照射且光子能量足够大时,它的电导率(即描述导体导电性能的物理量,如银的电导率为 6.7×10^7 /欧·米)要比不受光照时大很多倍。对于静电复印机上的光导体,要求它受光照后的电导率增加100—1000倍,并采取在基底(一般用铝基)上用真空蒸镀方法镀上一厚度约几十微米的薄层硒(或硒合金、硫化锡、氧化锌、有机半导体等)感光膜,制成板式、鼓式或带式光导体,光导体由上、下阻挡层,光导层和基底层构成,没有光照时,充电电荷只能分布在光导体表面,由于阻挡层的作用限制电荷进入光导体内部,故呈绝缘状态,形同绝缘体,在铝基底上感应出等量异号电荷。当光导体受光照射时,使它的电导率急剧增加,电阻下降呈导电性,充电电荷通过光导层放

电而消失。复印机上所用的光导材料要求表面电荷密度高达

4×10^{-7} 库仑 / 厘米²，并能在 $\frac{1}{10}$ 秒内使光照表面迅速放电。

静电复印机的核心部件是圆柱形硒鼓的光导体层，工作时硒鼓不断转动，复印过程大致分为以下几步：

第一步是清除硒鼓上色粉与剩余电荷，由于上次复印后可能残留下来带电色粉，要用导电毛刷清扫硒鼓表面，并用刮板将鼓表面刮干净。为了在下次开印前硒鼓表面不致残留任何电荷，还须开动预曝光灯（荧光灯）照射鼓的表面，使光导体导通而充分放电，使硒鼓处于零电位。

第二步是使硒鼓表面均匀带电的过程，在暗室中将 5800 伏直流高压加到与硒鼓表面平行的、由很细的金属丝做成的电极上，使电极带正电，在强电场的作用下，电极附近的空气（主要是氧气）发生电离，产生紫蓝色辉光放电。在静电力的作用下，正离子飞向鼓表面，由于硒鼓不受到光的照射，光导体呈绝缘介质状态，当鼓转动时，正电荷（离子）便均匀地沉积在光导体的表面上，同时在底基的界面上感应出等量异号的负电荷，这就是光电过程。

第三步是受原稿反射光照射后，在鼓表面形成静电潜象的过程。用较强的光照射须复印的原稿，经原稿反射后射到硒鼓表面的光导体层上时，原稿无图、无字的地方反射光较强，光导体电阻下降，呈导电状态，充电电荷通过光导层与感应电荷中和而消失，在原稿有图、有字的地方，没有反射光，或反射光较弱，光导体呈绝缘状态，充电电荷全部或部分被保留。这样，在光导体表面形成一幅与原稿一致的，由表面电荷形成的图像。由于这种电荷分布是看不见的，所以又称为静电潜象。这就是曝光过程。

第四步是显影，将静电潜像变成可见的色粉图像的过程，让曝光后的硒鼓表面与显影剂接触（显影剂是色粉和一些如玻璃珠或铁粉等固体颗粒载体混合而成），硒鼓表面静电潜像的带正电区便吸引带负电的色粉，色粉被吸附在硒鼓表面形成一幅与原稿相同的可见的图像，这就完成了显影过程。

第五步是转印，即将硒鼓表面的色粉图像转移到复印纸上的过程。将复印纸紧贴在带有色粉图像的硒鼓表面上，使它通过转印电极，该电极平行于硒鼓表面，亦是呈丝状，并加上直流电压约 6000 伏，这丝状电极便对纸的背面进行电晕放电，使纸的背面带正电荷，由于静电力的作用，带负电的色粉便被吸引到复印纸上，这就是电晕转印法。最后借助交流放电，将复印纸上的电荷消去，使它很容易地从硒鼓表面分离下来，这称为分离消电。

最后一步是定影，即将初步粘附在复印纸上的色粉图像固定下来的过程，刚转印在复印纸上的色粉，只是粘附在纸上，并不牢固，必须进行定影。由于色粉是含有热塑树脂的未成型材料，在 190 左右的高温下会成为熔融状态。所以让带有色粉图像的复印纸从热辊和压力辊之间通过，色粉便熔融并渗入纸中，成为不易脱落的、固定的、与原稿一样的复印品。

静电复印有许多方法，目前使用最广泛的就是上面介绍的放电成像法，因为它是卡尔逊发明的，故亦称卡尔逊法，静电复印机现已广泛得到使用，已成为办公室中办公用品之一了。

近年来，国内 CT 机逐渐增多，市级城市医院没有 CT 机的已是罕见的了，一般对于有脑、肝、胰、肾、腹腔内病变的病人，为了及时诊断有无肿瘤等疾病，医生都叫病人做一个 CT。

CT 的全名为电子计算机 x 射线断层术，英文名为 Com-puter assisted tomography，是装有电子计算机和 x 射线断层扫描的装置，这是自 x 射线发现以来，堪称是放射诊断学领域中具有革命意义的一大发明。

CT 首先于 1972 年在英国设计成功并开始应用于临床，其灵敏度比通常的 x 射线检查要高 100 倍以上，是一种对软组织 x 射线检查的最新技术，它最初应用于脑组织的检查，取得很好的效果。后又得到迅速改进发展，并用于检查身体的其他部位，特别是对腹部实质性器官，效果十分良好。在计算机断层术中，用来造像的 x 射线不必进入机体的其他断层，只要进入需要检查的断层，与不需要的平面断层组织完全无关。因此，为了检查软组织的病变，使被检查的组织分成一系列的断层，利用高灵敏度的光子探测器，并借助于电子计算机处理大量的数据，以检查深层的或接触不到的组织，用一定的形式来表达断层中各点对 x 射线的吸收情况，进一步利用电子设备和显像装置将其转换成影像，这就是电子计算机 x 射线断层技术。

为此，第一个设计成功电子计算机 x 射线断层术的英国工程师洪斯菲耳德与创立影像重建基础理论的美国物理学家科马克共同获得了 1979 年度诺贝尔医学、生理学奖。

CT 成像的基本原理是因为不同物质对 x 射线吸收不同，而且同样物质由于分布不均匀各部分对 x 射线的吸收亦不同，吸收的强弱，我们用吸收系数来表示，若物质不均匀，可设想将物质分成许多块小体积元，每个体积元的吸收系数不同，设法计算出各小体积元的吸收系数，就可知道这物质的分布情况。

实际上，首先将 x 射线管和 x 射线探测器对应配置在可移动的机架上，对准患者的需要检查部位，例如头部的某一横断层做同步扫描运动。x 射线被准直器限定在沿扫描方向为 2—3 毫米，沿与扫描成直角方向为 10 毫米的线束，穿透头部横断层后的 x 射线强度用探测器进行测量。选定一个取向，完成待测断层的直线扫描后，再将机架旋转一个角度进行第二次直线扫描，依次类推，直到取得足够数据为止。

将所获数据送入计算机后，由计算机解出各部分的吸收系数，并重建被测断层的密度图像。x 射线束越细，断层越薄，被测部位病理细节越清晰。当然 x 射线束的精细程度是有一定限度的。

利用图像重建原理，将人体该断层的组织显示出来，从而获得一幅清楚的病灶图像，经照相记录在照相底片上。目前已有彩色显示，并用人体组织固有的颜色显示出来，供医生诊断用。

自从 CT 扫描技术问世以来，无论在扫描机械、扫描技术、扫描时间、图像质量和动态扫描等方面都有了迅速的改进和提高，目前已成为放射诊断学领域中一个很重要的组成部分，它与传统 x 线诊断、B 型超声诊断以及核素扫描等互相弥补和互相验证，使病情诊断更加准确，以便于及时治疗和排除可疑病灶。

55. 医疗诊断之二 ——核磁共振成像技术

核磁共振成像是 80 年代发展起来的一项获得空间核磁共振信号的新技术，简称 NMR 是英文名称 Nuclear Magnetic Resonance 的缩写。虽然其成像构思法与电子计算机互射线断层术（即 X—CT 摄像技术）有惊人的相似，但核磁共振成像术却独具其他医疗系统无法比拟的优点。它可为医学提供无损诊断技术，因为系统中的高频电磁波能量仅有 1/10 的电子伏特，丝毫不损于受检机体。而核磁共振系统既可提供解剖学方面的图像，又可提供组织在化学方面和生物学方面的生化图像信息，能十分灵敏地分辨出正常组织与非正常组织，能提供内脏器官有关功能和生理状态的图像信息，它还可显示出透过骨骼屏障的图像。核磁共振成像系统的受检病例的成功率，要比现代 X—CT 提高许多倍，它所显示软组织的对比度比 CT 图像提高了 1—3 个等级度，使各解剖层次和脏器显得更加清晰。

什么是核磁共振呢？

现代科学已发现 105 种稳定核都具有磁性，其中包括组成人体物质的原子核：氢 H、磷 P、碳 C、氧 O 和钠 Na 等元素的原子核。原子核恰似一绕轴作自旋运动的小陀螺，由于自旋而产生自旋磁矩。各种原子核由于结构不同而可能具有不同的磁矩，这种磁矩称为核磁矩。核磁矩在恒定的外磁场中，按照量子论，它的方向相对于外磁场只能采取几个不同的方位，即量子化的方位，因此原子核的能量也只具有几个不同的数值。如果再在垂直于恒定磁场方向上加一个迅速交变的射频磁场，则在适当的交变频率下，原子核剧烈吸收射频磁场的能量而使它的磁矩从一个方位跃迁到另一个方位。这个现象就叫核磁共振。

所谓核磁共振成像就是人为控制垂直方向上交变频率的磁场，使处于稳定磁场中不同空间取向的非零核自旋磁矩相继发生核磁共振，然后切断垂直方向上的磁场，自旋核释放能量，用接收系统检测出核磁共振信号，送入计算机进行数据处理，在屏幕上显示出图像来。

核磁共振现象是 1945 年由两位美国物理学家伯塞尔和布洛赫分别领导的两个科研小组，各自用不同的方法几乎同时独立发现的，他们将含有质子的样品（例如水）放在均匀磁场中，并由射频发生器产生的射频波照射样品，当射频波的频率达到某一值时，样品中的质子吸收了射频波的能量，从一个能级跳到了另一个能量较高的能级，示波器上就出现了样品明显吸收射频波能量的吸收峰，这就是所谓核磁共振吸收。为此他们共同获得了 1952 年诺贝尔物理学奖。

此后，核磁共振作为一项重要的研究物质分子结构的现代分析技术，首先应用于理化领域里而得到迅速发展。1970 年，人们鉴于一些恶性肿瘤组织中氢核的核磁共振谱线与相应的正常组织中氢核的共振谱线明显不同，首次利用核磁共振技术鉴别和诊断出组织中的癌细胞。

1972 年，电子计算机 X 射线断层术（即 X—CT）出现之后，美国化学家劳特伯首先提出核磁共振成像构思法，随后，1978 年英国 EMI 公司成功地获得了第一张人体头部的核磁共振断层图像，并造出第一台 NMR—CT 系统。1980 年美国凡德拜特医学院放射医学博士帕坦，首次向人们展示世界上第一张用核磁共振成像技术显示的人体胸、腹彩色断层图像照片。于是核磁共振技术

便跨出实验室的门槛，开始走向商品市场，成为医学成像的一门新手段。核磁共振成像技术是一种最安全的无痛苦、无损伤的人体检查方法。

核磁共振断层技术与超导技术的进展息息相关，因为核磁共振断层技术医学诊断系统需要配备体积足以包住患者身躯的大磁铁，场强高达数千高斯，从 60 年代起因有性能良好的超导弱磁铁研制成功，人们才研制出实用核磁共振医用诊断系统。今天世界各国科学家竞相研究高温超导，无疑也会给核磁共振系统的研制带来新的生机。

可以确信，不久的将来，核磁共振医用诊断系统一定会获得推广和普及，并为医学诊断展现无限美妙的前景，将给病人特别是癌症和心脏病患者带来福音。

56. 为蜜蜂引路，为信鸽导航 ——生物磁效应

信鸽可以从几千里路之外，将信息带回来，蜜蜂外出采蜜，不论多远都能飞返巢穴，它们是什么道理呢？无数的科学家几乎都用同样的比喻来形容动物的“回归本能”，说“就像头部有一只指南针一样”。据推测，信鸽的飞行导向，蜜蜂的返巢飞行等都可能是体内磁性的表现。这些磁性对生物体的作用是怎样发生的，特别是它的物理机制如何，还有待于进一步研究。根据从简单到复杂，从初级到高级的认识规律，我们从布莱克摩尔对趋磁细菌的观察说起。

1975 年布莱克摩尔研究生活在淤泥中的厌氧细菌时，当他取一点海底淤泥，加些盐水，放一滴在载物玻片上置于显微镜下观察时，发现细菌都游向液滴的一边，他感到奇怪，认为可能是细菌趋光的结果，但是当改变光照方向或将显微镜盖上，细菌的游向不变，总是游向同一地理方向——北方，最后聚积在液滴的北部边缘。于是他猜想细菌是由地磁场导向的，为了证实这一点，他拿一块条形磁铁放在液滴附近，果然细菌离开磁铁的南极向磁铁的北极方向游去。他又把显微镜放到磁场中，发现细菌果真逆磁力线方向游动，当改变磁场方向时，他观察到细菌都拐了一个 U 字形弯而后又逆着倒过来的磁力线方向游去。他把这种细菌叫做趋磁细菌。

这种趋磁性对这些细菌有什么意义呢？布莱克摩尔的观察指出：这种性能对这种细菌来说是性命攸关的，因为这些细菌是厌氧的，它们从淤泥中吸取养分，但是氧气对它们来说都是有害的，在海水或沼泽地里，靠近上面的部分是富氧的。在北半球磁力线是倾斜的，从地下斜向上方，细菌的趋向磁北极就使它们能避开富氧的上层而游向养料丰富的水底淤泥。它们正是靠这种趋磁性才能生存。

趋磁细菌证明，生物对磁场的反应是借助于无机磁铁矿（由其环境中的可溶铁所合成）所造成的生物磁罗盘进行的。如果说，我们的祖先在 2000 多年前发明了用磁铁矿做的磁针并用于导向，这在人类文明史上是首创，那么，在生命的发展史上，这些趋磁细菌走在了前头，在 20 亿年以前，它们就利用了磁铁矿的导向作用。

布莱克摩尔的发现第一次揭示了磁场对生物的影响与生物体内的磁结构，对生物的磁性做了清晰的物理解释。有了这一发现，人们就有可能对更复杂的生物磁性进行研究。现在在甲贝、蜜蜂、蝴蝶、家鸽以及海豚体内发

现了磁铁矿的存在。研究发现在公蜂腹部细胞内有超顺磁铁粒子。对趋磁细菌的研究给探索这些高等生物的定向性能提供了一定的基础，当然要弄明白它们的物理结构与机制，还要作很多的探索。

70 年代初，科学家们就把两门似乎互不相干的学科——磁学和生物学相结合形成一门崭新的边缘学科——磁生物学与生物磁学。研究生物磁信号的学科称为生物磁学，而研究外加磁场对生物体产生什么作用的学科称为磁生物学。

应用磁生物学原理不仅在农业上可以帮助人们促使五谷丰登，在畜牧业和渔业上也能六畜兴旺做贡献，比如在一定磁场环境下养鸡可以加速它们的生长，体重的增长为对比组的一倍；有人在磁场中养蚕，发现蚕的体型增大，成茧率也高，且蚕茧色泽洁白厚实，产量平均提高 9%；用磁化水养鱼有明显的增产效果。在适当的磁场下，不少微生物乃至细菌均会丧失其生命，因此可用来处理工业废水等。

以上都是磁生物学方面的一些研究成果。至于生物磁学，1970 年，首先由科亨、埃代尔塞克和泽默门等应用超导量子干涉仪完善地测出人体中由生物电所产生的磁信号，从而开辟了一个新的研究领域，在人体的肌肉、神经和器官组织的活动中有微弱的生物电现象，根据物理学的规律，运动的电荷、电流会产生磁场，因此凡是能产生生物电现象的部位必定同时产生生物磁信号。

脑电图的研究结果表明，头部存在一种约十几赫的电信号，称之为 α 节律。相应的脑磁 α 节律已被测到。被测者睁开眼时磁场幅度减小。已经证实脑电图与脑磁图之间有密切的对应关系，但不等同。

对头部磁场进行测量的另一类工作是测量脑受激场，它是指人体感觉器官某种刺激（如听觉、视觉内器官受到突发刺激，手指受电刺激）后产生的脑磁信号。实验发现视觉受激场突出反应在头部后侧，此即脑的视觉中心位置，而且视觉受激场存在一个固定的时间延迟。

值得强调的是，如用生物磁技术研究在针灸刺激下所引起的脑磁信号规律性，必将大大有助于揭开针灸之谜。我国作为针灸医学发源国，极待开展针灸脑磁或人体磁信号的研究。当然，在人体特异功能及气功问题上也可开展这方面磁信号研究。

进一步对生物磁信号与磁场对生物体的作用的研究，将促进人们了解生命过程，可以预期，彻底揭开生命奥秘的日子将不是那么遥远了。

57. 物理学与化学 ——量子化学简介

提起化学，大家都会想到从化肥、农药、西药、钢铁、塑料、化纤，到日常生活中吃穿用的许多东西，都是靠化学方法生产出来的。化学是研究物质的组成、结构、性质及变化规律的科学，是研究丰富多采的化学现象的科学。几百年来，人们在科学实验和生产实践中，积累了大量的化学知识，已经发现了 700 多万种化合物，而且对 700 多万种化合物的性质，也有了不同程度的了解。但是在化学知识领域里，有许多道理目前还讲不清楚，真所谓知其然而不知其所以然，正因为这样，以往很多化学方面的发明都是经过曲折的道路的。例如“六〇六”的药，是研究了 606 次才成功的。如今很有用

的不锈钢，当年在实验室里炼出以后，并没有被科研人员“赏识”，而是当废试样扔进了垃圾箱，它在垃圾箱经受长期“考验”而不生锈，才被人偶然发现的。又如糖精，当初并不知道它是甜的，而是人们在试制染料过程中，不小心用沾有染料的手拿面包吃时，才发现它的甜味。显然，这类盲目探索的方法虽也有效，但难免事倍功半。

多少年来，人们都在想，能不能从根本上揭开化学现象的秘密，让我们更能有目的、有预见地改造自然界呢？那么化学的基本过程是什么呢？我们知道：原子和原子结合在一起叫“化合”，原子和原子结合的破裂叫“分解”，各种各样的化学现象都是以此为基础的。所以，分解和化合就是化学的基本过程。为要深刻地理解化学反应中的化合与分解，必须研究反应过程中化学键的断裂和形成。自然要问化学键的本质是什么？如何从微观上理解它。经典物理学不能解决这类问题。从本世纪初发展起来的量子理论，特别是 20 年代建立起来的量子力学，可以给出正确的回答，从而为物理学在化学中的应用开拓了广阔的天地。物理学与化学这两个学科的结合取得了许多丰硕的成果，并逐步形成了一门边缘学科，即量子化学，它已渗透到化学中的各个领域，并成为它们的理论基础。

量子力学是研究微观粒子（电子、原子、分子等）运动规律及其性质的科学，其主要特点就是它不像牛顿力学那样，同时用物体的动量（或速度）和坐标的数值去描写它的运动状态，而是用一种波函数去描写微观粒子的状态，反映微观粒子运动的统计规律，波函数随时间变化的规律可以通过一个数学方程来确定，这个数学方程称为薛定谔方程，其他物理量的值也可以通过波函数作一定的运算而得到。薛定谔方程反映了电子运动“波粒二象性”的特点，因此根据这个方程可以计算化学中许多重要问题。它不但可以算出原子结合的必然性，而且还可以算出它们之间结合的牢固程度。从这个意义上说，薛定谔方程也就是化学中最基本的一个方程式。

物理学在化学中的应用之一是阐明化学键的性质，主要是共价键。因为离子键较易理解，两个对最外层电子吸引能力强弱不同的原子互相接近时，可产生电子转移，变为正负离子，静电引力将它们束缚在一起。而两个同类原子相接近不会有电子转移，其共价键的形成要由量子力学来说明。早在 1927 年海特勒和朗登开创性地研究了氢分子的结构，详细计算了它的共价键的性质。认为两个原子各出一个电子组成电子对，绕两个核运动，同时受到两个核的吸引。考虑到电子的不可分辨性，组建电子对的波函数，代入薛定谔方程计算出电子的本征能量，即可成功地解释共价键的形成。

价键理论在认识分子结构方面起到了非常重要的作用，但由于强调电子定域运动在解释某些共轭分子时遇到了困难，于是关于化学键的另一种理论——分子轨道理论迅速发展起来，并表现出巨大的生命力。“轨道”是个经典物理概念。例如在氢原子中，核外的一个电子绕核运动，按经典力学规律，有个运动轨道。在量子力学中用一个波函数来描述电子的状态，称这个波函数为轨道。在多电子原子中，认为每个电子都在原子核和其他电子产生的有效场中运动。解薛定谔方程可得电子波函数，称这种单电子波函数为原子轨道。用类似的方式可定义分子轨道。分子中的某个电子在组成分子的原子核和其他电子产生的场中运动，描述一个电子状态的单电子波函数，就称为分子轨道。分子轨道理论认为电子可在整个分子范围内运动，它在解决价键理论难解决的问题中取得了显著的成就。分子轨道概念不仅用来研究分子的静

态结构和特性，也已用于有化学反应的动态系统。

化学反应是化学学科中的核心问题，一般说研究化学反应的理论有两类，一是过渡态理论，一是散射理论。所有这些化学的基本问题，都要用量子力学来解决，由于化学上许多问题牵涉许多电子，需要解很多个薛定谔方程，直到 60 年代中期大型电子计算机问世后，才可能对中等程度的化学课题作量子化学计算。近一二十年来量子化学已得到迅速发展。

量子化学实质上属于应用物理，虽然已取得许多重要成就并成为一门边缘学科，仍有很多重要课题没有解决或解决得不能令人满意，这是由于三体问题在经典力学中至今没有解决，所以在量子力学中作为量子多体理论的课题更需要多方面的努力才能取得进展。但是不管怎么说，化学现象的最根本的道理已开始逐步清楚，化学现象将不再是“知其然而不知其所以然”了，如果顺着这条道路走下去，将来总有那么一天，人们在寻找新材料、新药物、新的化工生产方法等方面，可以更有预见性地去设计了。

58. 物理与生物 ——生物物理简介

生物学是研究生命的科学。随着时代科技的进步，近代生命科学的发展已不单是生物学家的事，需要化学、物理学、数学家的通力合作，需要各门学科的相互渗透。物理学是研究自然界的基本规律的学科，当生命科学已从描述阶段发展到研究机理的阶段时，自然离不开物理学，近代生物科学诺贝尔奖获得者名单中有不少物理学家便是一个证明。

物理学与生物学的结合，产生了一门新的学科——生物物理学，它是运用物理学的理论、方法和技术研究生命物质的物理性质和生命现象的物理运动的一门学科。它包括分子生物物理、细胞和膜生物物理、感觉和神经生物物理、理论生物物理、细胞运动和骨架等主要分支。它既从微观角度研究生物大分子的结构和运动以及分子聚集体（膜、细胞、组织等）的结构、运动和功能，也从系统、信息和控制的宏观角度研究生物系统的物质、能量和信息转换关系等。

生物物理学和物理学在推动近代生命科学发展中的贡献主要在两方面，一是为生命科学提供现代化的实验手段，二是为生命科学提供理论概念和方法。

从历史上看，没有显微镜就没有生物学，而近代物理学为生物学提供的实验手段更加广泛而重要得多，高倍光学显微镜的分辨率只有 0.2 微米（1 微米= 10^{-6} 米），放大倍数仅 2000 倍。30 年代制成了电子显微镜，到 80 年代电子显微镜的点分辨率达 1—2（1 埃= 10^{-10} 米），从 80 年代开始生命科学广泛应用电子显微镜，取得了很多研究成果，如用电子显微镜观察到危害人体的病毒，为研究细胞超微结构，超微病变提供最好的线索。1982 年 IBM 公司研制成具有原子分辨能力的扫描隧道显微镜，它的横向分辨率可达 0.2 纳米（1 纳米= 10^{-12} 米），纵向深度分辨率可达 0.001 纳米。这是其他仪器难以达到的。由于独特的优点和广泛应用的潜力，迅速渗透到许多研究领域。1989 年中国与美国科学家利用扫描隧道显微镜得到了脱氧核糖核酸（DNA）分子双螺旋结构的清晰图像。目前已用扫描隧道显微术获得噬菌体表面分辨率 1 埃的三维信息。又如 x 射线衍射，通过原子散射确定原子坐标，从而确

定生物大分子的空间构象，在分子生物学的诞生和发展中立下了汗马功劳。事实上，1953年瓦森和格赖克提出DNA双螺旋模型得力于弗兰克林和威耳凯因斯从x射线衍射分析中获得的大量DNA晶体结构资料。可以毫不夸张地说，没有x射线衍射就不会有DNA双螺旋的认识，也就不会有50年代分子生物学的诞生。1972年由英国工程师洪斯菲耳德设计成功的电子计算机x射线断层扫描技术（简称CT），可以观察生物体内的解剖图像，进一步发挥了x射线衍射方法的威力。继x—CT成像技术之后，80年代发展起来的核磁共振成像技术是一项获得空间核磁共振信号的新技术。所谓核磁共振就是有自旋运动的原子核在外磁场作用下对电磁波的共振吸收现象，吸收灵敏地依赖于周围环境。利用这个性质可在活体条件下测定细胞内部的PH值、细胞膜结构的改变和ATP（一种细胞能源）的生化变化，以及无损伤条件下对人体内部脏器进行观察。它不仅能观察体内的解剖图像，而且能观察活体中的生化图像。

近代物理学为生命科学提供的理论概念和方法，从而形成了一门新兴学科——理论生物物理学。理论生物物理学的开创工作是1943—1944年薛定谔的《生命是什么？——活细胞的物理观》这本小册子。他在这书中讲了三个问题，一是论述生命的热力学基础，提出生命是非平衡开放系。二是论述生命的分子基础，提出大分子的非周期结构包含的大量信息，可作为遗传基因的物质基础。首次提出了遗传密码的概念。三是强调了生物过程和物理规律（包括当时是刚发现的量子规律）相协调的观点。薛定谔提出的第一个观点后来被普赖戈京学派大大发展了。1969年普赖戈京首次提出耗散结构和概念作为描述生命一类自组织系统的物理理论。这个理论在理论生物物理的发展中占有重要地位。薛定谔提出的遗传密码概念在DNA双螺旋模型提出后被加莫夫所发展并具体化，他成为遗传密码理论的创始人。后来分子遗传学的发展证明遗传密码是非重叠的三联体，64个密码子和20种氨基酸相对应。这个对应关系——密码字典——到1966年为尼伦伯格和霍兰纳所完全破译。但是有关遗传密码的问题，有的还有待于进一步研究。薛定谔提出的第三个观点，生物学与量子规律相协调，确定了理论生物物理学的另一个发展方向——量子生物学。50年代中普耳门夫妇建立了量子生物化学。这个理论获得了一系列重要结果。例如解释了芳香烃的致癌活性。众所周知，生物的基本秘密之一，就是许多生物分子能相互“识别”。一个著名的例子，就是“种牛痘”一类“免疫”现象。人体原来是不能抵抗某种病毒的，但是经过“打防疫针”的锻炼，人体内能产生一种抗体的分子，这种分子能“识别”病毒，专门“吃掉”病毒分子。为什么一种分子能识别另一种分子？这当然是量子生物化学与量子生物学的研究课题。但是，分子间的识别能力有时也是有限的。既有“识别”，也就有可能“欺骗”。例如许多病菌都要靠“吃”对胺苯甲酸过日子，于是人们找到了许多磺胺药，它们的分子不仅“外貌”而且内部的电子分布都对胺苯甲酸很相似，细菌“不当心”误吃了它，就中毒身亡，这就是许多磺胺药能杀菌的秘密所在。当细菌们多次“遇难后”，也就会有“抗药性”的菌种产生出来。这种“分子欺骗”和“反欺骗”的斗争就这样反复地进行着。我们怎样才能在这场斗争中争取主动，把许多病毒、病菌彻底打垮呢？一个可能的办法就是用量子生物学弄明白“分子识别”的详细情节，从而发明各种更好的办法把细菌们“骗”入歧途。

“分子识别”在生物中的作用远远不限于免疫和治病。另一个重要作用

就是遗传密码的复制技术。生物要“传种接代”就得有这套复制本领，把父母的特征一代代传下去。这些特征贮存在遗传基因中，一个大肠杆菌基因中的信息内容比一部中篇小说还多，而且每分裂一次（即产生一个新菌）就得把这部“中篇小说”复制一遍。这种“依样画葫芦”的过程也是一种“分子识别”或叫“分子模板作用”。弄清楚“分子识别”的机理是探究生命的重要方面。

在探索复杂的生命时，有两个理论问题特别有兴趣，目前正吸引着许多理论生物物理学家的注意。一是分子序列理论研究，二是神经网络理论研究。前者与生命的起源和早期的演化有关，后者与生命的最高阶段——人的大脑有关。

生命是一个高度组织的系统，是自然界最伟大的创造。生命具有高度有效的物质和能量转换的功能。又具有十分精巧的信息处理功能，这两方面都比现有科学技术创造出来的人工功能要精细和有效得多。因此向生命学习高技术具有特别重要的现实意义。在向生命学习的宏伟任务中，生物物理学占有特别重要的地位。因此生物物理学不仅在自然科学的发展中具有理论意义，而且在探索解决人类科技新模式中有广泛的应用前景。

59. 探寻历史的“脚印” ——物理考古种种

地上地下遗留的无数珍贵文物是我国古代灿烂文明的历史见证，具有重要的历史、艺术、科学研究价值，受到国内外极大的重视。对于文物的探测、鉴别、发掘、保护和修复，有很多地方需要用到物理学的近代技术成果。

对于一件文物首先要确定它是什么年代的，为了鉴别年代最常用的方法有：

（1）放射性碳 14 (^{14}C) 测定法

地球上放射性碳的混合比较均匀，一切活着的动植物都有相同的放射性碳 ^{14}C 与普通碳 ^{12}C 的比值，当该动物或植物死亡后就不再吸收放射性碳了，而放射性碳要不断地衰变为氮，放射性碳的半衰期为 5600 年，即某个动物或植物在死亡 5600 年后含有的放射性碳只有活着时的一半，11200 年后则只有原来的四分之一了。所以用测定植物或动物遗骸中的放射性碳 ^{14}C 的含量与普通碳含量的比值，就能确定它们死亡到现在经过了多少年代。例如 70 年代在浙江余姚发现的河姆渡遗址，经 ^{14}C 测定，该文化层的绝对年代约在距今约 6000—7000 年，河姆渡遗址的发掘，为研究我国南方原始社会面貌提供了重要资料，进而为黄河流域和长江流域同是中华民族古老文化摇篮的说法，增添了新的依据。

（2）铍 10 (^{10}Be) 分析法

地球物理学家、地质学家很关心产生地球以来，地磁场的强度和方向的变化，特别是地磁场有没有发生过逆转变化，需要用 ^{10}Be 分析法来确定。

地磁场方向发生逆转前，磁场强度要急剧减弱，直到消失，其后约需一万年，磁场强度才逐渐恢复，但磁力方向完全相反。地磁场在消失时，地球仿佛失去了保护层，任凭宇宙射线及来自太阳的带电粒子与地球大气发生碰撞，地球上的铍元素，几乎 100% 为稳定的 ^9Be 元素。而大气中的氮、氧等元素，一旦遇到宇宙射线中的高能粒子作用，就会发生核反应，产生 ^7Be 和

^{10}Be , ^7Be 的半衰期很短, ^{10}Be 的半衰期却长达 150 万年, 若地磁场曾发生过逆转的话, 大气中产生的 ^{10}Be 必然残存于地层中, 科学家设法从南纬 $46^\circ 30'$, 东经 $36^\circ 16'$ (非洲南端与南极之间) 的大西洋海底 4731 米深处进行钻探, 将其岩芯切片作 ^{10}Be 浓度分析和磁力测定, 计算有力地证明 70 万年前地磁场确实发生过一次逆转。

(3) 其他方法

1976 年 7 月我国科技工作者采用古地磁方法, 首次测出了云南元谋猿人牙齿化石和元谋地层的年龄。元谋猿人的年龄为距今 170 万年左右, 比北京猿人和蓝田猿人早 100 多万年; 元谋组地层形成于距今 150 ~ 310 万年之间, 在该地层组下面还找到了冰川遗迹, 从而确定了 300 多万年以前我国有过冰川活动, 并定名为“龙 P; 脉期”。这是我国第四纪地质上的新发现, 否定了认为我国第四纪不存在冰川的说法。

为了鉴别文物的真伪, 分析文物的成分, 保护与记录文物等常用的方法有:

(1) 红外线、紫外线鉴别法

一幅有名的古画, 可以价值连城, 但收藏家如何鉴别其真伪呢? 凭什么证实它不是别人用同种纸质和颜料仿造的呢? 这可用红外线或紫外线判定。

红外线、紫外线有显露多层画的能力, 用它们照射后, 可以发现一幅画上面又画上了别的一幅画, 因为画中使用不同颜料和其他材料对这些射线的响应不同。如用红外线可以判别出名古画的草图是用木炭画在白要背景上的, 虽然这张草图最后被所涂的颜料覆盖, 在红外照片上, 木炭画面能显示出来, 因为它能大量吸收红外线而白基则不然。在紫外线的照射下, 不同颜料会产生不同的荧光, 故可检测出原始油画的变更与涂改情况。

若是出土文物受潮发霉, 纸面是一片模糊的棕黑色, 若用红外光照射, 则从纸面上有墨与无墨处反射的红外光强度不同, 经红外成像仪与光电转换, 可在荧光屏上显示出一幅珍贵的名画。

(2) 中子活化技术

原子核是由中子与质子组成, 质子数相同而中子数不同的元素称为同位素。有些稳定的同位素经中子照射后, 俘获了中子, 会变成有放射性的同位素。中子激活了的放射性同位素有一定的半衰期, 它所发出的射线 (如 γ 射线等) 有着特征能量, 因此测定它的半衰期和辐射的能量, 就可以分析出被测对象中包含哪些元素及它们各自的含量。这种分析方法叫中子活化分析法。它十分灵敏, 有时只含有十万亿分之一的极微量 (称为痕量) 元素也可以探测出来。

利用中子活化分析可以对地下发掘出来的陶器或陶器碎片进行分析, 可以分析它们的化学组成, 由于陶器的制作来源于不同的粘土, 可以测出这些出土陶器是否来自同一地方。例如在中美洲墨西哥东南部的尤卡坦半岛所发现的一块陶器碎片和来源于南美洲秘鲁的陶器有同样的中子激活分析图谱, 它为中美洲、南美洲之间的文化接触提供了一个佐证。

世界上有许多名画家的杰作, 有些伪造者能逼真地模仿原作者的艺术风格与绘画技巧, 伪造出一模一样的赝品来。中子活化分析给绘画作品的鉴别又提供了一种有力的手段。中子活化分析可以很容易把一位艺术家使用过的颜料的化学组成展现出来。伪造者虽然能模仿原作者的艺术风格, 却很难找到具有相同化学组成的颜料来使用, 由此可以鉴别真伪。另外, 利用中子活

化技术还可以把摄影技术刚发明时拍摄的珍贵照片复原。

中子活化最著名的应用事例是关于拿破仑头发中砷的分析，发现他头发中的砷含量明显高于正常值，证明拿破仑是死于砷中毒，而不是死于胃病。

（3）激光技术

利用激光的全息照相可对文物进行无损检查，基本的原理是：将激光束分成两支，一支照射在文物样品上，经样品漫反射的光射到全息底板上，称之为物光束；另一支直接照到全息底板，称为参考光束，两束光在底片上发生干涉，形成全息照相。在室温条件下，曝光一次，保持整个系统不动，用红外线辐射源对文物进行局部微热处理，立即再曝光一次，在同一底片上完成两次曝光后，经过暗室处理，将底片放回原位置，取掉待测文物，再用激光照射，就可看到实物像。如果文物完整无损，则两次曝光所形成的干涉条纹是光滑的均匀分布，若条纹呈现错位或断折，就表示文物的损坏程度，条纹的变形位置就是文物的伤残所在。应用激光还可对青铜器及金属制品进行保护，它主要是用于除锈。

用激光全息照相将文物照下来，对于有的稀世珍宝不便于实物陈列的文物，用全息照片放在普通的白炽灯下，即可现出文物的形象，具有与观看实物等同的效果。

（4）质子 x 荧光分析技术

质子 x 荧光分析技术是用加速器产生的高速质子去轰击样品使待测物体中的原子受到轰击后，它的内层电子被击出，形成内壳层电子空缺，当外层电子去填补这空位时，即可发出特征 x 射线，测定 x 射线能谱中各特征 x 射线的能量和面积，就可进行该样品中的所含元素的定性定量分析。由于这种技术有无损的特点，可以用它来分析文物的成分。1965 年在湖北江陵望山一号楚墓中出土的越王勾践剑的分析是一个很好的例证，该剑表面有黑色花纹，剑格上嵌有琉璃和绿松石等饰物，同时出土的还有一把花纹相似，但不带铭文的剑，这两把剑虽在春秋战国时制作，在地下埋藏了 2500 多年，但至今仍很锋利，堪称国宝。经质子 x 荧光分析，在黑花纹处有硫，这是一种硫化技术，在过去未发现过；从琉璃的分析中，发现有大量钾、钙，这说明 2500 年前，我国已有钾—钙玻璃；从剑面各部分分析表明它主要含铜、锡、铁和微量的硫和砷。

当前，除上面所说的近代技术外，还有包括红外，遥测遥感等许多物理技术用于文物保护与探测中，它们与文物考古相互渗透交融，已形成了新的边缘学科“文物工程学”。这将大大促进我国的文物保护工作。

60. 保鲜与育种 ——辐射技术应用

电子、x 射线和放射性现象，被称为世纪之交的物理三大发现，对 20 世纪物理学的发展起到了决定性的作用；导致了现代物理学的诞生；推动了科学技术的革命。其中放射性现象的进一步研究，为人类和平利用原子能开辟了广阔的前景。辐射技术业已成为原子能为人类造福的一个极其重要的方面。

辐射技术所使用的射线主要有两类：放射性钴 60（ ^{60}Co ）和铯 137（ ^{137}Cs ）发出的 γ 射线和电子加速器所产生的电子束，这两类射线的基本性

质不同，故有不同的用途。电子加速器所产生的电子束具有辐射功率大，能量单一、剂量率高等优点，其电子束的能量为 0.15 - 12 百万电子伏特，电子束的穿透能力远不如 γ 射线，决定了它只适宜处理薄层物质。如食品表面处理，涂料固化等，放射性钴 60 和铯 137 在衰变过程中发出波长极短的电磁波—— γ 射线，铯 137 的 γ 射线能量为 0.66 百万电子伏特。钴 60 辐射的 γ 射线能量有 1.17 百万电子伏特和 1.33 百万电子伏特两种。 γ 射线在物质中的穿透力非常强，因此可以对体积较大的物体进行辐照，这对已包装好的物体做辐射加工有特殊的意义。它的主要应用有辐射消毒、灭菌、育种、食品保鲜、三废处理和材料改性等。

辐射灭菌是辐照的直接作用和间接作用的共同结果。细菌受一定剂量的辐照后即可死亡，这是直接作用，间接作用是因细胞中的水吸收辐射能量引起化学变化，这些反应物与蛋白质、酶相互作用，使细胞生存所必须的结构或物质发生变化引起细菌死亡。辐射灭菌已在世界范围内广泛应用于医疗器械、中西成药和药材等。

辐射育种是一种诱变育种，用辐射处理作物的种子、花粉或植株等，诱发遗传物质发生改变，导致有关性状的变异。然后通过选择、培育使有利的变异遗传下去，达到改良品种或创造新品种，我国自 60 年代开展农业育种工作，已育成近 200 多个优质、高产、抗逆性强的农作物。为我国农业发展做出了积极的贡献。世界各国用辐照法培育的花卉新品种有 238 个涉及 32 个科的 69 个属。

除了辐照育种，我国首创离子束诱变育种新技术，经过中国科学院等离子体物理研究所与安徽农科院水稻研究所两年多的通力合作，一种利用离子束诱变育种新技术已于 1990 年取得成功。

他们用的离子束含有碳、氮两种元素，经过高温照射进入种子深部，直接参与遗传密码中核苷酸的重组，将产生一些辐射和激光照射无法获得的变异，大大扩展了种子的变异谱，现已育出三个水稻新品系都具有矮秆、高产、抗多种病虫害的优辐射保鲜，利用钴 60 或铯 137 产生的射线照射食品，其中包括果品、马铃薯、洋葱、大蒜、蘑菇等蔬菜，可以杀掉它们表面的细菌，抑制发芽，以及延长瓜果、蔬菜的成熟期等等。美苏宇航员吃的食品都是经过辐照处理的。

辐射加工事业作为一个新兴的产业正在全世界范围内崛起。我国建成的钴源辐照装置有 31 座，加速器装置 25 台，分布在北京、天津、上海等 20 多个城市，它将使我国的辐照加工业更上一层楼。

61. 地面景物的视运动 ——在奔驰列车上看窗外的景物

观察者从行驶中的火车车窗口向车外观看时，很容易看到最近的物体（如铁路旁的电杆，树木，房屋等）迅速向车后运动，离车稍远些的物体运动较慢，离车更远的物体又会看到它们有向车前进方向的运动，而且越远运动越快。在观察者的整个视野中的大地及地上的树木、房屋等会感觉到它们在旋转。

如何解释这些视运动情况呢？

大家知道，一个物体看上去的大小和其真实大小往往不同，视觉大小由

物体在人的视野中所张开的视角大小决定。因此同一个物体离得越远，看上去就越小，这就是视觉形象中“近大远小”的特点。同样物体运动的视速度与其真实速度也不一样。一只小鸟以每秒 10 米的速度在你眼前掠过，你会觉得它飞得很快，而一架飞机以每秒 700 米的速度在高空飞行。看上去却飞得很慢。因为真实运动的快慢是由物体单位时间里所走过的路程决定的，而视运动的快慢都由物体在单位时间里转过的视角所决定的。

如 OO' 直线表示火车走的轨道， t 时刻车中人在 P 点，其视野张角为 MPN 。设被观察的物体有 A 、 B 、 C ，为便于直观，假定 t 时刻它们同在这个人的一条视线上。经过一段时间间隔 t 后，此人到达 P' 点，视野张角移动到 $M'P'N'$ 位置。在 t 时刻物体 A 、 B 、 C 所在的视线与视线 PN 的夹角都是 CPN ，经过 t 后，观察者在 P' 点至三个物体的视线与 $P'N'$ 的夹角分别是 $CP'N'$ 、 $BP'N'$ 和 $AP'N'$ ，且这三个角均大于 CPN ，可见各物体相对于观察者都产生了角位移。因 $AP'N' > BP'N' > CP'N'$ ，故可知三个物体的角位移是物体 A 大于物体 B ，而物体 B 大于物体 C ，因为单位时间内的角位移就是角速度，那么三个物体相对于观察者的角速度关系是物体 A 的角速度 ω_A 大于物体 B 的角速度 ω_B ，亦大于物体 C 的角速度 ω_C ，即 $\omega_A > \omega_B > \omega_C$ ，所以观察者感到离车最近的物体视运动快，稍远一点的物体视运动慢。

为什么离车侧面更远的物体视运动方向是向车前进的方向，而且随距离增加，视运动越快呢？又为什么在视野中的大地及其上的树木、房屋等感觉在旋转呢？

观察者由近向远处看，视野中的物体相对于观察者都有如前所说的相对运动。由于近处物体视运动较快，眼睛看得不舒服，会不自觉地盯住远近之间的地方，即是取观察者至某物的视线为参照物，来观察其他物体的运动，结果会产生另一种视运动景象。

如 t 时刻观察者在 P 点，被观察的物体取 A 、 B 、 C 、 D 、 E 同在一视线 PE 上，以观察者至物体 C 的视线为参照物，由于观察者的运动，从他到物体 C 的视线相对于地面在运动，而观察者却发现物体 A 、 B 逐渐向左（向车后）偏离参照物（视线 $P'C$ ）及物体 D 、 E 逐渐向右（向车前）偏离参照物。经过 t 时间观察者到达 P' 点时，物体 A 、 B 、 D 、 E 偏离视线 $P'C$ 均有一定的角度，它们分别 $AP'C$ 、 $BP'C$ 、 $DP'C$ 、 $EP'C$ ，这些角度也是物体相对于观察者的角位移。因为 $AP'C > BP'C$ ，所以物体 A 比物体 B 向车后运动快。又因 $EP'C > DP'C$ ，所以物体 E 比物体 D 向车前方向运动快，这样在视野中就出现了运动方向相反的两种运动，所以感觉大地及其上的树木、房屋等在旋转。

如果观察者有意识地把眼睛盯住离车侧最远的某物体 E ，即取 PE 视线作为参考，则会看到视野中的物体都向车后方向运动，而且离车越近的物体，它的视运动越快。

同志们，视运动是一个有趣的现象，如果你以前未注意到，那么在你今后坐车时观察一下，你一定会看到上面所说的几种情况，不妨试一试。

62. 滴水不漏 ——游乐场中“游龙”在竖直

环顶上为何不掉下来不知你有没有看过这样的杂技表演，杂技演员手中拿一根绳子，两端系两只玻璃碗，内盛有红色的水。当他将碗甩着旋转时，两碗在垂直面内来回转动，而碗中的水是滴水不漏，碗到顶端时，碗口朝下，为什么水会不掉下来呢？

这是因为水和碗以同样的速度 v 在空中旋转，当碗在竖直圆的顶点时，碗中水受到重力的作用，重力等于水的质量 m 与重力加速度 g ($g=9.8$ 米/秒²) 的乘积 mg ，这时的重力如果恰好等于使水作圆运动的向心力时（设系统的绳长为 R ，则向心力等于 $m\frac{v^2}{R}$ ），即 $mg = m\frac{v^2}{R}$ 一万，所以当碗在顶端的速度大于或等于 $\sqrt{gR}$ 时，水就不会掉下来。

在游乐场中，我们可以看到一列小车，称它为“游龙”，在一大小的圆形竖直轨道上开动，时而上升，时而下降，最令人惊喜的是这一“游龙”在一大的竖直圆环上运动到达圆环的顶端时，尽管车中的人个个头朝下，还是稳稳当当地通过了圆环到达顶点，没有一个人会从座位上掉下来，这个道理与杂技演员碗中水不掉下来是一样的，只要“游龙”在顶峰的速度 v 大于、等于 $\sqrt{gR}$ ，这里的 R 是竖直圆环的半径。如果竖环的半径 $R=5$ 米，则 $V=7$ 米/秒，只要“游龙”在环顶的速度大于或等于每秒 7 米，则“游龙”上的人一定不会掉下来。

如果物体围绕地球转而不掉下来，所需的速度 V 亦是等于 $\sqrt{gR}$ ，不过这时的半径 R 是地球的半径 6400 公里，得 $V=7.9$ 公里/秒这就是人造卫星的第一宇宙速度。

所以“游龙”不掉与人造地球卫星不掉下来是同一个道理。

63. 秋千荡漾 ——秋千为何越荡越高

一般要使秋千荡起来，开始的时候要靠他人推或拉一下，不再继续推或拉时，秋千就要慢慢停下来。但是我们看到朝鲜族的同胞，他们很会荡秋千，把荡秋千作为一种节日活动，一个人开始荡起来以后，能靠自己的力量使秋千越荡越高。仔细观察一下，他们是在秋千荡到最高点时蹲下，荡到再低点时站立起来，这样反复的蹲下、站立就能使秋千越荡越高。

从物理学的角度分析，人在最高点下蹲是降低重心，人在最低点站起来的过程中，人的重心升高，这样人的下蹲和站立，改变了人和秋千这个系统的重心，对系统作了功，使系统的能量发生变化。同时由于重心的改变，也改变了重力对人和秋千所作的功，重力对人和秋千来说是外力，因此，人下蹲和站立的过程，是将内力做功转换成外力做功的过程，而外力做功的结果，改变系统的运动状态，使系统的能量增加，所以使秋千越荡越高。

所以，在荡秋千的游戏中，含有物理道理，你想过吗？

64. 落体偏东 ——地球自转效应

我们知道空中落下的物体，如冰雹、树上的果实等，由于地心引力它们

必定垂直下落。但是，我们如果仔细观察或测量一下，会发现它的下落位置要略微偏东，这是由于地球自转引起的，叫做科里奥利现象。

下面我们作一定性的分析。

如物体以速度 V 、在纬度为 ψ 、离地面高度为 h 的 A 点，经短时间 t 沿竖直线降到 B 。在这期间 OA 已转过一角度 θ ， AB 到了 A_1B_1 ，在 B_1 点，质点还保持原有的速度方向，对 B_1 点的观察者来说，质点偏离了竖直线产生了东向的速度增量，其次，由于物体跟着地球自转，质点还保持在 A 点的东向速度，这速度比 B 点所在高度的东向速度大，因此相对于 B_1 点，亦产生了东向的速度增量，总起来，在 t 时间间隔里有一东向的速度增量，因为单位时间的速度增量就是加速度。所以产生东向的加速度，叫科里奥利加速度，这就是使物体相对于地球作未受力的加速度，这种现象就叫科里奥利现象。科里奥利现象不仅在物体下落时存在，当物体沿地球表面运动时亦存在。例如，一列火车在北半球沿南北向铁路向北而行，在此情况下，火车施于右轨（即东面轨道）上的压力较施于左轨上的压力大，所以右轨磨损要重一些。在南半球上向南行的火车亦对东面的轨道压力较大。另外，北半球的河流对于右岸的冲刷和南半球的河流对于左岸的冲刷；北半球上的东北方向的贸易风的发生；以及台风的发生，都与科里奥利现象有关。亦就是说是一种地球的自转效应。

65. 潮起潮落为何因

——潮汐的成因

海洋潮汐是大家非常熟悉的一种自然现象。潮是指白天海水上涨，汐是指晚上海水上涨。海水的这种周期性涨落是与邻近天体的作用有关。按牛顿的万有引力定律，潮汐的起因主要是受月球和太阳的引潮力引起的。现在以月球为例加以说明，月球在图中地球的左面，在地球和月球构成的引力系统中，地球上的不同点，月球的引力方向不同，大小也不相等。在离月球最近的 A 点引力最大，在最远的 C 点引力最小。

又由于在地球和月球的引力系统中，月球并不是以地球的球心为圆作圆周运动，而地月均绕它们的共同质心转动。由于地球绕公共质心转动，我们知道在一匀速转动系统内观测一个静止的物体，除受实际上的外力作用外，还受一个方向背离转轴的一个虚拟的力叫惯性离心力。所以在地球上各不同地方的物体，也有一惯性离心力，这惯性离心力的大小相等，方向相同。在地心处，惯性离心力与月球引力的大小相等，方向相反，因而能使月球与地球之间始终保持一定的距离。但在地球上其他地方二者并不相等。月球引力和惯性离心力的合力，就是月球使海水发生潮汐现象的原因。这合力，我们称之为“月球引潮力”。

在离月球最近的 A 点处，物体所受的万有引力大于惯性离心力，合力即是引潮力，它作用的结果是使海水涨潮。

在离月球最远的 C 点，惯性离心力大于万有引力，引潮力的方向背向月球，也造成海水上涨现象。

而在 B 点和 D 点，万有引力和惯性离心力的合力指向地心，其效果造成海水向地心方向运动，结果地球表面水的形状成椭圆状，该椭圆我们称为潮

汐椭圆。

地球在不停地自转，地球对月球自转一周的时间称为太阴日，等于 24 小时 50 分钟。在地球的自转过程中，地球表面（除两极）上任一点都经过图中类似 A、B、C、D 四点位置的机会。因此一般来说，在一个太阴日内常见到的潮汐有两涨两落现象。

除月球外，太阳是对地球潮汐影响最大的天体，太阳质量大，但由于距地球的距离远，所以太阳的引潮力，只有月球的引潮力 0.45 倍。所以地球上的潮汐现象，主要是由于月球的作用。

太阳潮虽然较小且不易单独观察到，但它却影响潮的大小。一个太阳日（24 小时）内同样也有海水的两涨两落现象。当太阳潮 12 小时的周期与太阴潮 12 小时 25 分的周期重合时，就形成大潮，交错时就形成小潮。

从理论上推测，当农历初一（朔）或十五（望）时，地球同月球，太阳的位置几乎在同一直线上，其引潮力叠加的结果将出现大潮。而农历初七、八（上弦）或二十二、三（下弦）时，月球引潮力的方向与太阳引潮力的方向垂直，太阳引潮力削弱了月球引潮力，因而出现小潮。但实际上出现大、小潮的时间，往往比理论推测要迟二、三天，这主要是由于海水在流动时其本身的粘滞作用和地理条件等因素的影响。例如举世闻名的钱塘江大潮就是每年农历八月十八日达到最大的。

地球表面的流体除海水外还有大气，大气如同海洋一样，也存在着潮汐现象。这种潮汐的作用结果使地球外层大气的厚度发生变化，从而影响着地表的气压。观察结果表明大气潮汐引起的气压上升和下降，有着 12 小时的周期，它同太阳潮的周期一致。这主要是太阳辐射的紫外线被地球上层大气所吸收，处于 30—50 公里高空的臭氧层吸收紫外线后膨胀起来，结果产生了类似海潮一样的隆起。

发生在地球固态地壳中的潮汐，表现为地壳中应力的变化，这也是地球上地震发生的原因之一。

由此可知，月亮和太阳对地球上海水、空气与地壳的引力作用，对地球上的潮汐等自然现象有着决定性的作用。

66. 转动惯性的利用 ——冰上芭蕾与运动员的晚旋技术

我们知道物体有惯性，即当物体不受其他物体的作用时，运动的物体有保持匀速直线运动，静止的保持静止的性质，这是讲物体作平动时的情形。物体除了作平动运动（即物体上任一条直线，在运动过程中始终保持同一方向的运动）外，还可以作转动。物体的任一运动都可以看作平动加转动的合成。

平动有惯性，惯性的大小由物体的质量来量度，同样转动亦有惯性，例如，拖拉机的机器上的飞轮，中间薄边缘厚，当它转动起来以后就不易停下。当然转动惯性不仅是与质量有关还与质量的分布有关，它是用转动惯量这个物理量来描述的。人体在伸直与蜷缩时的转动惯量不同，前者要比后者大。

当空翻运动员跳起准备翻滚时，如果始终将身体平直着，则当他还未旋转一圈就要碰到地面，他将重重地摔倒在地上。为了使身体能在空中迅速翻滚一周，使人直立着落地，他必须在空中收缩他的手和脚，使他对他的转轴

的转动惯量变小，以增大他的转动速度。

冰上芭蕾的舞蹈演员，在竖直方向旋转时，利用收回双臂以加速旋转，放开双臂以减小旋转速度。

单杠运动员下杠时的“晚旋”技术，亦是利用了相似的物理原理。运动员在下杠之前，在单杠上作大回环（以单杠为轴线的转动）。撒手后在空中继续作横翻，当横翻将近一周，上体向上立时，右手迅速上举而产生向左的纵转。由于转体开始得较晚，所以我国体育界叫它“晚旋”。晚旋的优点是横翻和纵转的速度快，运动员在空中的方向概念比较清楚，纵转一转到底，干净利落，落地平稳。

利用改变人体手脚的伸卷来改变人的转动惯性，促使人体旋转速度的改变是体育舞蹈常用的一种方法。其实质是一条物理定律的应用，它就是物体在不受外力矩的情况下，物体的转动惯量与旋转角速度的乘积是不变的，转动惯量小了，角速度就增大，反之亦然。

67. 谁能取胜 ——拔河比赛中的力学问题

拔河比赛时，双方同时拉绳子，绳子张力大小相等方向相反，那么怎样才能取胜呢？为此，我们来看看拔河比赛中双方的受力情况。

为简单计，忽略绳子质量，甚至忽略绳子本身，不把它作一个独立存在的物体，仅把它作为甲队人手和乙队人手的一部分。甲、乙两队人相互作用，两队人所受拉力总是大小相等，方向相反，而且作用在同一直线上，而作用点分别在两队人身上，在水平方向上，设 T, T' 为甲乙两方的相互作用力，则 $T=T'$ ， $f_{甲}、f_{乙}$ 分别为两方所受的摩擦力。 $T、f_{甲}、T'、f_{乙}$ 为两队所受反向平行力系，其合力为 $R=f_{甲}-T, R'=T'-f_{乙}$ ，由于这四个力不共线，所以甲乙两队除受合力 R, R' 外，还受一力偶矩 m ，（力偶是大小相等方向相反，但不在同一直线上的两个力，力偶是使物体的转动状态发生变化的物理量。例如汽车驾驶员双手转动方向盘时所施加的常常是一个力偶力偶矩是力偶中的一个力与两力作用线之间的垂直距离的乘积）。要使甲方胜过乙方，则要求 $R>R'$ ，亦就要求摩擦 $f_{甲}$ 大， $f_{乙}$ 小，要增大摩擦力，必须选体重重的队员，加大脚下抵住地面的力量，以增大摩擦力，同时要使自己队员身体的重心下移，即尽量使身体向后倾斜，使自己一方的绳端略低于对方。使对方不但要克服地面的摩擦力，还要克服一部分重力。只有这样才易于取胜。

由此可见，拔河比赛中还有很多物理道理呢！

68. 从“船到桥头自会直”说起 ——伯努利定理的应用实例

如果你稍稍注意一下当船要过桥洞时，船能自动地顺着桥洞的方向顺利通过，因此南方有一句谚语“船到桥头自会直”。为什么船到桥洞能顺桥洞的方向而不横过来呢？这是有一定的道理的，这道理首先由丹尼尔·伯努利（1700—1782）在 1726 年提出的，称为伯努利定理：它表明“理想流体在稳定流动过程中，在同一水平面上，液体流速较大的地方，那里压力较低，流

速较小的地方，压力较大”。因此当船行至桥洞时，设船略有偏斜，这时从桥洞中流来的水在船的左面水面较宽，水的流速慢，在船的右则流速快，于是根据伯努利定理，船头受到左面向右的压力，使船转向顺着桥洞的方向驶过桥洞。

如果你乘轮船就会发现一个很有趣的现象：每当轮船要靠岸的时候，总是把船头顶着流水，慢慢地向码头斜渡，然后船能自动平稳地靠岸，江水越急，这现象越明显，在长江或其他大江大河里顺流而下的船只，当它们到码头时，不立即靠岸而是绕一个大圈子使船逆着水流方向行驶以后才靠岸。

轮船逆水靠近码头，是利用水流对船的阻力起一部分刹车的作用，而自动靠岸是利用了伯努利定理，当船靠近码头时，船与码头之间河道狭窄使水流流速增大，而船的另一侧河面宽广，相对之下流速较慢，因此靠近码头这面的水给船的压力小，另一面给船的压力大，使船向码头靠拢，平稳地靠岸。

这种由于船只两侧水流的流速不同而引起的侧压力常常是船只在航行中发生相撞事故的原因之一。

1912 年秋天，远洋航轮“奥林匹克”号——当时世界上最大轮船之一——在大海上航行着，同时在离它一百米远的地方，有一艘比它小得多的铁甲巡洋舰“豪克”号，几乎跟它平行地疾驶着，当两艘船到了像图所画的位置时，小船竟扭转船头朝着大船冲来，发生了撞船事故。相撞的原因是两船间的水流由于从船头流来的水流到这里流速加大，产生的压力小而两船外侧流速小，压力大，而小船自身重量较小，被这侧压力作用下冲向大船发生相撞。

顺便说一下喷雾器的原理亦是如此：当我们吹一个一头较细的横管，空气在细管里就会减小自己的压力，这样在竖管上面就出现压力比较小的空间，结果大气压力就把容器里的液体沿着竖管压上来，液体到了管口，就落在吹来气流里变成雾状散扩在空中。这亦是伯努利定理的一个实例。

69. 布伞挡雨之秘 ——表面张力

如果在荷叶上撒上一滴水，我们将看到这水滴成球状，在荷叶上滚来滚去，亮晶晶的犹如一粒珍珠。

不知你注意过没有？夏天水面上常有许多小虫能自由自在地在水面上跑来跑去，好像水面上有层膜似的，小虫不会掉到水里去。

另外你玩过肥皂膜吗？用铁丝做一个框框，把它在肥皂水中蘸一下，拿出后可以看到框上有一层很薄而且绷得很紧的肥皂膜，如果在框上系一根一端有一个线环的细线，再蘸上肥皂水，使框上形成肥皂膜。如果将线环中的肥皂膜捅破，则施一适当的与液面相切的力于膜的周界上，这力即表面张力。

表面张力能够说明液体所特有的许多现象，例如一个空气泡浮到液体表面时，这气泡将一圆顶状的薄液层稍微向上顶起，如果气泡充分小，它将不能突破表面层，而停留在液面下，许多这样的气泡的总体就形成泡沫。又如当液体沿一竖直的管子的一端缓慢流出时，表面张力不允许液体一下子由管子里流出。当液体逐渐流出时，液滴的表面薄膜形成一窄缩部分或细的颈部，以后这窄部分断裂下来，液体的下部形成主要的下落的液滴，而由窄缩部分形成一附加的小液滴，若管子内径很小且液体的压力又不够大，这时液滴就

不能断裂下来，而留在管口。

从前的雨伞大部分是用油纸或油布做成，故可以挡雨。可是目前的雨伞大部分是尼龙绸做成折叠式的，这种尼龙绸虽然很密，但总是有布眼为什么亦可以挡雨呢？原来布眼就相当于一个个细的管口，雨水落上后，在上面形成一层液膜，这液膜有一定的表面张力，再有雨滴打上时，由于雨滴的压力不大，不能冲破布眼中的液膜，所以雨滴就穿不过雨伞。但是如果撑伞过屋檐，屋檐处有成串的雨水下落时，或者是瓢泼大雨时，布眼上的液膜挡不住这么大的雨水的冲击力，你就能感到伞内有小雨。

因此布伞所以能挡雨，是因为液体面有一层薄膜，薄膜上有表面张力作用的缘故。

70. 树中汁液是怎样送到树顶的 ——毛细现象、渗透压与负压强

不知你想过没有，一些高大的树木，它树冠处的枝叶所需水分与养料是靠什么机制送上去的呢？

当我们掰开树皮仔细观察，我们会发现树皮及树杆内，有一根根的纤维，这些纤维是送水分与养分的导管，于是我们首先想到输汁液的机理是导管的毛细现象。

当内径很小的毛细管插入液体时，如果液体润湿管壁，管内液面就上升，高于管外的液面，管径愈细上升越高，这种现象称为毛细现象。日常所见的纸张或毛巾吸水，地下水沿土壤细隙上升等都是毛细现象。

根据毛细现象水分能输送到多高呢？一般树中木质中的纤维即毛细管的内径在 2.5×10^{-5} - 2.5×10^{-4} 米，由液体在毛细管中上升的高度 h 与毛细管内径 r 和液体性质的关系，即朱伦公式

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r}$$

式中 θ 是液体与毛细管内壁的接触角，对于水 $\theta = 0$ ， ρ 是液体的密度， α 为液体的表面张力系数， g 是重力加速度。

对于树中的导管，取 $r \approx 10^{-5}$ 米， $g = 9.8$ 米/秒²， $\theta = 0$ ， $\rho = 10^3$ 千克/米³， $\alpha \approx 70 \times 10^{-3}$ 牛顿/米，代入上式得毛细现象只能使水上升 1.4 米左右。这样的高度，对于草本植物（其纤维间隙要比上面所取数据大，水分上升高度当然要更小）和灌木来说，大概可以解决植冠的供水问题，但是对于数米甚至数十米高的大树，则不可能仅仅是依靠毛细现象为植冠提供所需的水分的。

由于植物中输送到植冠的汁液不是纯水，它是各种营养成分的溶液。因此使人们想到渗透压作为植株将汁液送到植冠的一种物理机制。

渗透压是溶液本身的一种特性，是溶液中不易透过半透膜的溶质颗粒（分子或离子）吸收膜外溶剂分子的能力的量度，大小决定于单位体积中溶质颗粒的数目。例如在猪的膀胱中盛以酒精，而后浸于清水中，由于水的渗透，就使膀胱涨大，其他如谷类浸于水中要膨胀，也是由于渗透作用。渗透作用在生物成长过程中十分重要，如植物从其根部吸取养分，动物体内养分的进入血液中，都是养分透过动植物各种细胞壁（半透膜）的结果，渗透压也就是表征这种渗透作用强弱的量。

设取一喇叭口的管子，管口用薄膜（半透膜）封住，管中倒入糖溶液，然后插入纯水中，开始使管内外液面同高，这时将管固定，因为这里所用的薄膜对水分子来说是可以透过的，而糖分子不能透过，故称为半透膜，所以开始水分子进入管中的比从溶液中出来的要多，结果溶液在管中逐渐升高，达到一定高度 h 而后止，这时通过半透膜进出的水分子数相等，高度 h 相当于一定的液体静压强，它增加了从半透膜内出来的水分子数，从而使渗透作用达到平衡，所以与 h 相当的液体静压强可以作为渗透作用强弱的量度，称为渗透压。

早春季节，枫树树根部储存着上年光合作用制造的较高浓度的蔗糖溶液，这时枫树中树汁的上升，是渗透压造成的。设树汁中含有重量为 1% 的蔗糖（ $C_{12}H_{22}O_{11}$ ）溶液，温度为 27℃ 则渗透压能使树汁升高 7.4 米，如蔗糖浓度为 4% 则将升高 29.8 米，即可将树汁输送到 30 米高的树冠上。但是到了夏季，枫树汁中蔗糖浓度将降低渗透压亦要相应减少，树冠要依靠渗透压而获得充足的水分就困难了。

对于很多其他的树种来说，树汁的输送则完全不能用渗透压来解释。例如，高达 60 米以上的冷杉，渗透压无法将水送到这么高的树冠。又例如美洲红树，它是生长在海水中的，其木质纤维中的汁液却是十分纯净的水，渗透压非但不能将汁液送至树冠；反而要迫使树中的水通过根壁的半透膜流入海水中，所以无论毛细作用和渗透作用，都不能解释树汁是如何输送到树冠的问题。长期以来，这一直是个谜。水中的内聚力所引起的负压强似乎能解开它的谜底。

什么是“负压强”？设想我们用的装置测量水的内聚力，当活塞上提时，水略微有点膨胀，但在内聚力的作用下，水柱不会立即断开，但这时它施加在活塞上的一个向下的拉力，而不是向上的压力，或者说，这时水的压强是负的，即负压强。当活塞提升到一定限度时，水柱断裂，与活塞分离。实验上测得，水中负压强的极限值可达 300 个大气压。

树干中水的负压强是怎样形成呢？树干的木质部内有许多半径从 $2.5 \times (10^{-5} - 10^{-4})$ 米的毛细管，管中充满了水，当水从叶面蒸发时，水柱就向上移动以保持不断裂，于是在管道中形成负压强。树干底部的压强仍是大气压强，不断地把树汁压送到顶端，对于高度为 60 米的大树，仅需负压 4.8 个大气压，这是水的内聚力完全能够负担得起的。

由此可知，树通过根茎把土壤中水分、无机盐等，输送到枝叶、树冠等处部分原因是借助了树中毛细管的毛细现象，但主要的则是渗透压和树木中的负压强作用所致。

71. 自来水笔中的物理 ——自来水笔出水的道理

大家都用过自来水笔，当你用它写字时，纸上立刻就出现字迹，不写的时候墨水又不掉下来，这是什么原因呢？

如果你把笔尖轻轻拔下，会看到笔舌上有几条细槽，笔尖上有一条细缝，墨水就是靠它们将墨水送到笔尖的。书写时墨水就附着在纸上，因而纸上就留下了字迹，那么细槽起什么作用呢？

让我们先来做一个实验：将几根内径不同的玻璃管插入盛有水的玻璃杯

中，我们将看到水会从玻璃管中往上升，内径愈细，水面上升愈高，这种现象叫做毛细现象，如果把两片玻璃片靠得很近插入水中，亦可看到水面上升的毛细现象。当毛细管中进去水后即使你将它拿离水杯，水亦不会流下来，能保留在玻璃管中。

自来水笔所以能自动流出墨水，不写时又不流出来的道理，就是用上面所说的毛细原理设计的。

目前生产的自来水笔，笔尖很小，笔舌亦很小，且上面没有细槽，而在它们的外面还有一个笔舌芯，其上开有直的槽，同时有很多横向的圆槽，最外面还有一塑料套。笔舌与吸墨水的胆管有一毛细管相连，这种笔是靠笔舌与笔尖间的缝隙的毛细现象来引导墨水流向笔尖。外面一层笔舌芯，它除了引导墨水到笔尖外，还有蓄水的作用，特别是那些横向槽，是用来蓄墨水的，防止墨水流出过多，沾污纸面。因为在冬天里，若笔胆里的墨水较少时，笔胆中充有空气，人握笔管书写时，人的体温通过手传到笔胆内，笔胆中的空气受热膨胀，会把墨水挤出胆管，有了舌芯中的横槽可以将它们截住，不让它们流到笔尖处。

所以小小自来水笔，其中还有许多物理道理呢！

72. 音调为何能变 ——多普勒效应

声音的形成，首先要有能发声的声源，如小提琴的琴弦、锣鼓、火车上的汽笛、汽车上的喇叭。声源的振动，在四周空气中形成一会疏一会密的声波，这种波以一定的速度（如在空气中，摄氏零度时的声速为每秒为 331 米）传播，当它传到人们的耳朵里，使耳膜随着它同样地振动起来，这样我们就听到了声音，耳膜每秒振动的次数多，人就感到音调高；耳膜每秒振动的次数少，人就感到音调低。那么是不是声源发出什么音调，人们也就听到什么音调了呢？如果声源与收听的人都静止不动，如在剧场中听音乐表演时的情况，拉小提琴的人与听众都坐着不动，这时小提琴拉出什么音调，听到的就是什么音调。但是如果声源或听的人，或者两者都在运动，这时的情况就不同了。

当火车不动时，汽笛发出的声波中的“疏”“密”是按一定距离排列的。相邻两“疏”部（或“密”部）之间的距离叫声波的波长。波长愈长，则声波的频率愈低，频率愈高，即音调愈高，波长愈短。

当火车向你开来时，它把汽笛发出的在空气中传播的声波中“疏”和“密”压得更紧了，使“疏”“密”的间隔更近了，也就是使波长缩短，频率增高，因此耳膜的振动加快了，听到的音调也就高了。当火车离开你开走时，它把空气中的汽笛声的“疏”“密”拉开了，传到耳朵里，引起耳膜的振动减慢了，所以听到的音调也就变低了。火车的速度越大，音调的变化越大。汽车的喇叭声亦随汽车开来而使音调增高，离去时音调降低，所以当火车或汽车从你身旁经过时，你听到的汽笛或喇叭声的声调是不同的，先是增高而后降低。

当声源或观察者相对于介质（如空气）运动时，观察者所感觉到的振动数（即频率）发生变化的现象，称为多普勒效应。

光亦是一种波，当然它不是机械波而是电磁波，当观察者与光源发生相

对运动时，也产生多普勒效应。地球上测得远方星球发来的光的频率均小于实验室测得的静止的同种光源的频率，故认为宇宙间的星星都在离开地球，这是“宇宙膨胀”说的主要根据。

73. 物体“自鸣”的奥秘 ——共振现象

1904年，一队骑兵从埃及式的桥梁上以整齐的步伐通过彼得堡的丰坦卡河时，发生桥梁突然倒塌的事故。之后各国部队过桥时，一般规定便步走而不用正步走。我们要问为什么桥梁在正步走时会倒塌呢？这要从物体的振动说起。

我们知道任何物体，在一定的条件下，都会发生振动。例如当你站在南京长江大桥上，当桥面上有汽车经过，或铁路桥上有火车通过时，你会感觉到桥面在振动，在铁路附近的房屋，当有火车通过时，房屋的窗户会晃动作响，也就是说窗户在振动。每个物体的振动有一定的振动频率，正像琴弦频率的不同发出1、2、3、4、5等不同的音调。这种频率叫物体的固有频率，有的只有一个固有频率，有的有一系列固有频率。当一物体在周期性外力的持续作用下，物体将发生振动。例如：火车车厢在车轮与铁轨接头处隙缝的碰击下，给车厢一周期的外力，迫使车厢振动。如果这周期性外力的频率与物体的固有频率一致，即所谓“合拍”时，振动的幅度将会越来越大。骑兵在丰坦卡河的桥面上整齐地通过时，马蹄给桥一周期的力，这力的频率与桥的固有频率一致，当桥面上下振动，到达开始向下时，马蹄刚好踏下给一向下的力，这力的方向和桥面的振动方向一致，马不断给桥面做功，桥面向上振动时，马蹄亦脱离桥面，每次上下运动与马蹄上下运动一致，使桥面的振动幅度越来越大。超过一定限度时，桥面就要倒塌了。这种在周期力作用下，振动愈来愈厉害的现象，叫做共振。

我国古代已有人懂得共振现象，并且进而掌握了消除共振（共鸣）的方法。

相传晋朝有一殿前大钟无故响起来了，许多人都十分惊异，去问张华（公元232～300年），张华回答说：“这是蜀郡有铜山崩塌，所以钟会响。”不久，蜀郡上报，跟张华说的一样。在刘敬叔著的《异苑》中亦写道、晋朝有人有一铜澡盘，早晚都响，好像有人敲一样，于是去问张华，张华说，“这个盘子的音律（即固有频率）与洛钟相对应，宫中朝暮撞钟，所以盘子也作响。可锉一锉，使它轻一点，则不共鸣了”。照他所说做了以后，真的不再鸣了。

曹绍夔（公元8世纪初），唐朝开元年间曾任管理朝廷音乐的“太乐令”，也善于发现共鸣的来源。当时有这样一个有趣的故事：洛阳某僧房中一磬经常自鸣，僧惧怕得生了病。僧的友人曹绍夔听到此事，特地去问候这和尚，他听见庙中的钟敲响时，磬也作声。于是他要僧次日设宴招待，叮以替他解除掉。次日饭毕，曹取出怀中的锉，将磬锉了几下，磬就不再自鸣了。和尚问曹为什么？曹说这个磬的固有频率与钟一致，所以击钟磬应，随之作响。和尚听了大喜，他的病也就好了。

共振现象有很多应用。许多声学仪表，乐器就是应用共振原理设计制成的，例如小提琴的共鸣盒，钢琴的琴身亦是利用它的共鸣效应。胡琴下段的

蛇皮与圆筒亦是起共鸣作用的。当然共振现象也可引起损害，要避免它。例如桥梁的固有频率一定离开火车轮在铁轨接头处冲击力的频率，避免发生共振而损坏桥梁。工厂的厂房设计时，要使它的固有频率不与机器振动的频率一致。

另外，我们常看到有人买热水瓶时，把瓶口对着耳朵听听。听到有声音就认为是保暖的，其实，热水瓶有声音也是一种共振现象，因为空中有各种声振动，热水瓶相当一个空管，频率合适就能共鸣听到响声（除非瓶胆已破裂），但这不是鉴别保温的条件，只能鉴别瓶胆是否完好。

真所谓共振现象处处有，看你在意不在意。

74. 古建筑中的声学效应之谜 ——记北京天坛回音壁与山西莺莺塔等

我国古代对声学研究方面有许多卓越的发现、发明和经验总结。并在各种用于建筑和生产技术中的声学效应等方面，都有一些处于世界前列的杰出成就。

明代建成的驰名中外的北京天坛，其中具有良好的声学特性的建筑物有回音壁、三音石和圜丘。它们都是根据声波的反射及回声等声学原理建成的。

回音壁是一座圆形的围墙，高约6米，圆的半径约32.5米。在围墙内靠北边距墙2.5米处有一座叫皇穹宇的建筑物，皇穹宇本身亦呈圆形，整个围墙砌得整齐光滑，非常适合于声音的反射。当甲紧贴围墙向北对乙说话，处在围墙内对面的乙听起来十分清楚。乙所听到的声音不是从甲的直线方向传来，而是沿围墙传来，所以乙不必面对着甲，而是靠着墙面对北偏东即可听到甲的声音。这主要由于整个围墙和皇穹宇的大小比例以及所在位置，都是经过精心设计的。只要甲说话，并且对围墙甲点的切线来说，声波射到围墙上的角度小于 22° ，通过皇穹宇与围墙夹道所起的作用，声波就总是经过围墙的连续反射到达乙处，而受皇穹宇及其他建筑的散射很小，由于围墙光滑，声波被吸收亦较少。

三音石是处于回音壁围墙正中央的一块石板，它也是从皇穹宇台阶下来向南面路上第三块石板。传说在这里的一次掌声，可听到三响，所以叫三音石。事实上如果用力鼓掌，听到的回响，可能多达五六响。这是因为当掌声等距离传到东西两配殿的墙壁和回音壁的围墙后，并同时又被反射回中央，形成第二响，第三、第四响。直到声波的能量在传播和反射中逐渐耗尽为止。

圜丘是天坛南面一个由反射性能良好的青石和大理石砌成的圆形平台，图上平台与纸面正交。该平台最高层离地面大约5米，半径约11.5米。除东南西北四个出入口外，四周都围有青石栏杆，台面中心略高，向四周微微倾斜。如果有人站在台中心叫一声，他自己听到的声音比平常听到的声音要响。这是由于声波被青石栏杆反射，射到稍有倾斜的台面后，再反射到台中心，因为时间短促，回声与原来的声音混在一起，耳朵分辨不出，就觉得比平时要响，又使台中心的人似乎觉得声音是从地上传来的。显然，这将加强古代皇帝祈天的效果。

另外在山西永济县普救寺内莺莺塔有几种奇妙的声学效应，在塔内和周围不同位置可以听到塔内传出的蛙声、锣鼓声、狐狸叫声等声音。

莺莺塔，原名舍利塔，最早建于唐朝武则天时期，塔为方形，中空，高

七层。后因元代王实甫在《西厢记》里描写的张生与莺莺爱情故事发生在这里，人们称它为莺莺塔。原塔毁于明嘉靖三十四年（1556 年）运城大地震，八年后又按原来结构修复，但增至 13 层，总高 50 米，莺莺塔有蛙声，初时人们认为是山谷回声，文字记载最早出现在清乾隆年间的《蒲州府志》。莺莺塔的声学效果主要有：人们在离塔 10 米或 20 米处击石、拍手，可以听到由砖塔传来的蛙鸣声；当 2.5 公里外的蒲州镇戏台演戏时，人们在塔底台阶上能听到塔里有锣鼓声；人在塔旁小声说话，距塔 40 米处能清晰地听见；人在塔的第九层上说话，下面听起来像从一层传来；在五层说话则好像一层和九层都有人说话。

莺莺塔所以产生这么多声学效应，其原因主要有三：

一是特殊的地形地貌。莺莺塔所处的地势较高，而四周平缓又无障碍物，因此可接受大范围内传来的声波。蒲州镇的锣鼓声被塔接受，并在其中来回反射，形成从塔中传出的锣鼓声。

二是特殊的建筑构造。每层塔檐挑出成内凹弧形，能把声音反射汇聚，“蛙声”就是这十三个塔檐反射的结果。塔内一层下面有个收缩口，能把塔内发出的声音来回反射，形成共振源。

三是特殊的建筑材料，塔身和塔檐全部都是用青砖叠砌而成。青砖表面光滑，对声波有反射和谐振作用。

再如嘉峪关的雁子石，是在关城的一个角落处有一块大青石，以石击之，即可听到雁叫声，是由于嘉峪关城关高数米，击石发出的声音在城墙上来回反射，听之如雁声，亦是由于特殊的建筑与大青石所在的位置决定的，雁子石已成嘉峪关的一景。

又如位于四川省潼南县境内，有三十六级石梯，似一把巨大的石琴，每个阶梯犹如一支琴键，只要把脚踏上石梯，拾级而上，脚下便会响起美妙悦耳的琴声，称为石磴琴声。另外河南省郾县城内，有一蛤蟆音塔，游人若以掌击塔，塔内会发出“咯咯……”的鸣声，有如千万只蛤蟆在鼓膜低唱，很像贵州赤水市境内的“天锣地鼓”现象。

天坛回音壁、四川石磴琴声、河南蛤蟆音塔、山西莺莺塔合称为我国四大回音建筑。

75. 能量不能无中生有 ——第一类永动机不能实现

要使一个机器能为我们工作，必需使用电力、汽油、柴油、煤或原子能等能源才能使机器开动起来。例如，我们要使水从井中或河中提上来，浇灌农田，那么我们或者要用人力、畜力或者开动柴油机，或者开动马达与水泵。人需要吃饭才能提得动提水工具；畜需要吃饲料才能为人们拉动水车；柴油机和马达需要消耗柴油与电力。因此有人设想能不能不需要消耗任何能源（即不要用煤、石油或电）能使机器开动起来为人类服务，这种机器叫第一类永动机。多少年来，曾有很多人在梦想设计各种各样的第一类永动机，它不耗费任何形式的能量，也不从外界得到热量而能够作功。但是所有的这种设计都失败了，为什么呢？

世界上的一切实际发生的过程，都需服从一条规律——能量守恒与转换定律，在热学中它就是热力学第一定律。它说明任何机器要使它来作功，必

需要消耗一定的能量，因为功是能量传递的一种形式，它可以把燃烧柴油得到的化学能，或其它形式的能量如电能，通过机器做功，把它变成机械能为人们做功。机器只能把一种形式的能量转变成另一种形式的能量，而不能无中生有地创造能量，所以第一类永动机是不能实现的。

76. 热不能完全变成功 ——第二类永动机不能实现

由前一个问题中，我们看到不消耗任何能源，而能为人类做功的机器——第一类永动机——是不能实现的，因为它违背一条自然规律——能量守恒定律。能量守恒定律告诉我们：能量不能消失，也不能创造，只能从一种形式转换为另一种形式。能量的转换传递，可以用作功的形式来完成。例如，人们把一重物举起来对重物做功，使重物具有一定的能量（叫重力势能），当松手让重物自由下落时，可以用它来打夯。也可以用传递热量来完成能量的转换，例如，燃烧煤或油将水烧成蒸汽，这是将煤或油中的化学能以热量的形式传递给水，使水的温度升高变成蒸汽，蒸汽可推动涡轮机，用它来开动机器或发电，把蒸汽的能量转换成机械能或电能。所以功与热量都是传递能量的一种形式。

是不是只要符合能量守恒定律，一切物理过程都可以发生呢？

如果我们让两物体发生摩擦，当搓动这两物体时，我们对它们作了功，摩擦的结果，产生热，测量表明，所作的功可以自发而完全地转变为热。再看各种热机，如蒸汽机，柴油机，汽油机等发动机，它们都是在汽缸内产生高温气体，膨胀推动活塞运动做功，消耗一部分热能，使之成为有用的功，然后排出废气，带走一部分热能。于是有人设想，能不能造一种机器，它从一个方面如高温气体中获得热能，把它全部变成功（机械能）为人类服务，这种机器叫第二类永动机。这类永动机不违背能量守恒定律。如果能制成这类永动机，那么，我们可以用这机器从海水中吸取热量，拿来做功，而海水中的热能是很大的，设想海水温度下降摄氏1度，可放出的热量是相当可观的（1公斤水降1度所放出的热量为1卡，即4.18焦耳）。历史证明，这样的机器是不能实现的，因为它虽不违背能量守恒定律，却违背了热学中的热力学第二定律。

热力学第二定律告诉我们在不违背能量守恒定律的情况下，各种物理过程的发生具有方向性。例如高温物体的热量能自发地传给低温物体，而不能自发地将热量从低温物体传向高温物体，功可以自发而完全地转变成为热，而热不能自发且完全转变为功。气体从较小体积可以自由地膨胀到较大体积，而不能从较大体积中自发地收缩到较小体积中去。甲、乙两种气体能自发地混合成混合气体，而混合气体不能自发分离成甲、乙两种气体等等。

第二类永动机不能实现是因为各种过程具有方向性，可以自发地沿着某方向进行，却不能自发地向相反方向进行。

77. 自动“饮水小鸭”的奥秘 ——乙醚的蒸发与凝结

五六十年代，市场上常见的一种玩具叫“饮水鸭”，把它放在一杯水的

面前，小鸭就会俯下身去把嘴浸到水里，“喝”完一口水，又直立起来，直立一会儿，又会慢慢俯下身去，等到鸭嘴够到了水，“喝”了一口，又会直立起来。饮水鸭的身体是一根玻璃管（或塑料管），管的上端是一个小球，做成鸭头的样子，连着扁而长的鸭嘴，整个头部连同扁嘴上面蒙一层绒布，便于吸水，管的下端连一个较大的玻璃（或塑料）球，整个小球、大球、玻璃管形成一密封系统。球里面装有液体——乙醚。

为什么小鸭会俯身喝水、直立、再俯身喝水，再直立，这样往复运动呢？

原来是鸭肚中的乙醚在起作用，乙醚是易挥发物体，在室温下很容易蒸发，且乙醚的饱和蒸汽压将随温度改变而剧烈地改变，温度降低时，原来的蒸汽将凝结成液体。开始时，乙醚在大球与管中的状态，下端的玻璃球加里面的液体比鸭头重，小鸭呈直立状态，这时，可以看出小鸭有两个独立的乙醚蒸汽区域，一个在头部，一个在大球内。现在如果把鸭头弄湿，或者用手将鸭头压入水中，松手后，鸭仍直立。由于鸭头的表面是用善于吸水又容易让水蒸发的多孔绒布做成的，鸭头弄湿后的水分蒸发，使小鸭头部的温度比周围略低一些，这就使头部小球中部分乙醚的饱和蒸汽因温度下降而凝结成液体，同时头部小球中的压强也随之降低，而下面大球内的蒸汽压还是原来的值，它的压力大于头部，于是就挤压大球中的液体，使它顺着中间的玻璃管上升，重心亦随着上升，当乙醚升到玻璃管的上口时，上部就变得比下部重，于是小鸭就把身子俯到装水的杯子上，鸭嘴浸到水中，当小鸭的身子俯到水平位置时，有两个过程各自独立地进行着，一是小鸭的嘴浸了一下水，把自己头上的绒布浸湿，另一是玻璃管下端的管口就露出液面，使上下两部分的饱和蒸汽混合了，压力也变得一样，玻璃管中的液体就在本身的重量作用下，回流到下端的大玻璃球中，于是小鸭的尾部又变得比头部重，使小鸭恢复直立的位置，过一会儿又重复前面所说的过程，再次俯下身子喝水，再直立起来，如此一直进行下去，直到鸭嘴够不到杯中的水了，小鸭就不能再动了。

这就是饮水小鸭活动的全部过程与原理。有人或许要问，这是不是一种第二类永动机呢？我们的回答是否定的，虽然饮水鸭直立、俯身所需的能量是从它周围空气中吸收热量来的，但是水的蒸发引起了周围环境的变化，所以它不是仅仅从周围吸热来作功，故不违反热力学规律。

78. 冷暖知多少 ——温度的标定

在人类生活中对冷热的感觉是很重要的感觉之一，在所有语言中，像寒冷、温暖一类的词很早就有了，温度是表示物体冷热程度的物理量。早在温度的概念出现以前，我国古代人民已经认识到了较冷的物体和较热的物体之间的区别，开始掌握降温术与高温术，在烧制陶器和冶炼的过程中，有专门的熟练工匠，凭经验掌握“火候”，以定性判断温度的高低。

要定量地度量物体的冷热程度，就必须建立温度的数值表示法——称为温标。为此要解决四个要素；第一，选取某种测温物质。例如气体温度计是选用一种气体作测温物质。水银温度计、酒精温度计是选水银与酒精作为测温物质。第二，选定随冷热程度变化而变化的物性，称为测温属性。例如水银温度计就是利用水银随温度改变热胀冷缩的性质。第三，选取温度的固定

点，例如冰点与沸点。第四，对测温物质的固定点间的测温属性随温度变化的函数关系作出规定，即如何分度。

为测温术奠定科学基础的当首推华伦海脱（1686—1736年），他改良了以水银作测温物质的水银温度计，并确定了华氏温标，对于温度固定点的选取，最初他以氯化铵与冰的混合物的温度定为零度，而以人的体温为100度。以后为了使固定点更准确，改为以冰水混合物的温度（冰点）为32度，而以在标准大气压下水沸腾的温度（沸点）为212度，中间等分180格，每格为华氏温度1度，写为 1°F 。

1742年，瑞典人摄氏选择另一标准，他以冰点为100度，而以沸点为零度。他这样规定是为了避免在冰点以下出现负的温度，但这与习惯不符合。1850年他的同事斯托墨把温标反过来，以冰点为零度，沸点为100度，中间等分100格，每格为摄氏1度，写为 1°C 。这就是今天大家都使用的摄氏温标。

用任意一种测温物质，根据任意一种温度数值的规则所定的温标为经验温标。各种经验温标的温度指示都有赖于测温物质及所选的测温属性，例如水银温度计和酒精温度计除固定点（冰点、沸点）的温度是相同外，中间的温度由于水银与酒精的线膨胀系数不同，他们的指示数值就有差异。因此我们要问：能不能建立一种温标，它的数值与测温物质无关呢？回答是肯定的，这就是按热学规律引入的所谓热力学温标，以 T 表示，也称为热力学温度。它是由开尔文引入的，所以也叫开尔文温标。于1954年温度量度的国际委员会选水的三相点（即汽、水与冰三者共存的温度）的热力学温标（ T_3 ）为

$$T_3=273.16$$

而水的三相点热力学温度的 $\frac{1}{273.16}$ 称为一开尔文，简写为1K，现已公认热力学温标是科学上的标准温标。

采用热力学温度以后，国际计量大会于1960年对历史上沿用最广的摄氏温标重新作了定义，规定摄氏温标 t 要由热力学温标 T 导出， t 与 T 的关系为

$$t=T-273.15$$

即当 $T=273.15\text{K}$ 时， $t=0$ ，并规定温差 $1^{\circ}\text{C}=1\text{K}$ ，当 $T=0\text{K}$ 时称为绝对零度。

79. 让老天爷听人民安排 ——人工降雨与消雨

在旧社会由于人们不了解降雨的科学道理，以为是由老天主宰的，当天旱不下雨时，就求佛拜神，祈天降雨，其实降雨是有它的科学道理的。

当天晴时，地面上的水受热蒸发变成水汽，上升到高空即成为云层，如遇冷空气，就可能凝结成水滴，掉落下来就是雨滴。这是水受热汽化，水汽遇冷凝结成水的过程。但是有时天空乌云密布，就是下不了雨，又是怎么回事呢？原来水汽要凝结成水滴，要有一定的凝结核心，如尘埃等，如果云层中没有凝结核心，那么云层就不能结成雨滴落下来。

懂得了这些科学道理后，我们就可以做人工降雨了，首先天空要有雨云存在，然后，我们用飞机将固体二氧化碳（即干冰）、碘化银、碘化钠等化学药品撒到云层中，这些干冰、碘化银、碘化钠颗粒就成为水汽的凝结中心，

水汽很快在它们上面凝结，并逐渐增大水滴，到一定的大小时，空气已不能支撑它们留在空中，于是就落下来成为雨滴，这就是人工降雨。

为了确保 1993 年 5 月 9 日第一届东亚运动会开幕式能在无雨下进行，我国首次进行了人工消雨。所谓人工消雨，并不是把进行东亚会开幕式的上海虹口体育场空空的雨驱除掉，而是派飞机在大气环流的上海上游地区作人工降雨，使飘向上海方向的降雨云系有所削弱，到上海上空就不再降雨。

5 月 9 日早晨还下着阵雨，空军飞机从 10 时半起飞往太湖一带进行消雨作业。三架银燕在 4—6 千米高度以 5—6 公里的飞机间距喷撒催化物——干冰、碘化银、碘化钠等，使雨降在上海以外地区。下午 5 时以后，江泽民、萨马兰奇等领导人、贵宾、体育健儿们以及数万观众相继来到虹口体育场参加东亚运动会的开幕式，观看精彩的文艺表演，自始至终未下一滴雨。这是我国第一次成功地进行了人工消雨，老天爷终于被人们制伏了。

80. 电冰箱何以制冷 ——制冷技术种种

制冷技术的基本原理是在外界提供能量的条件下，制冷机从低温区吸取热量并向高温区释放热量的过程。

目前使用的电冰箱一般有三大部分组成，压缩机是电冰箱的心脏，其余二部分是冷凝器和蒸发器。制冷的工作物质叫冷却剂，一般采用氟里昂（ CCl_2F_2 ）、氨（ NH_3 ）、二氧化硫（ SO_2 ）或氯化甲醇（ CH_3Cl ）。它们都比较容易液化和凝结。电冰箱的工作原理大致。将汽态的冷却剂由压缩机经阀门 A 压入 B 区，这时汽态冷却剂处在高温高压的情况下，利用散热片使它降温而凝成液体，这时的液体仍处在高压状态下，液体经节流阀 C（或膨胀阀）进入 D 区，这时冷却剂迅速膨胀，从外界吸收热量，同时由液态蒸发成汽态，压缩机活塞上提将蒸汽吸入压缩机的气缸中，再进行下一个循环，在每一循环过程中，在 B 区散热，B 区即冰箱的背面与侧面，以散热片的形式增加散热效果，在 D 区吸热使 D 区的温度下降，D 区即是冰冻室所在的位置，这样使冰冻室的温度急剧下降，达到一定的低温时，由控制电路关闭压缩机，当冰箱四周的热量慢慢传入冰箱内，使它的温度升高到某一温度时，控制电路启动压缩机，使之继续工作，将冰冻室内温度降到规定的温度。

这就是冰箱制冷的原理。

80 年代美国加利福尼亚的一个实验室试验了一种新的制冷方法，它无须使用电力可达 33K 左右的低温。使此制冷装置工作的能量来自太阳能或低温“废”热。这种方法的关键是使用了 LaNi_5 （镍化镧），它在室温下能吸收大量氢气，当把 LaNi_5 的氢化物加热到 377K 时（即 104℃），它就放出氢气而形成二元金属化合物。将氢气压缩通入热交换器而后膨胀，此冷却产生一些温度在 20K 的液氢，它使低温设备冷却，来自冷却循环中的氢气用来冷却热的 LaNi_5 而且在另一室中被 LaNi_5 所吸收，于是用新形成的氢化物再重复此循环，达到制冷的效果。但是用 LaNi_5 制冷目前尚未大量使用。

目前流行的电冰箱大多采用氟里昂作工作物质（制冷剂）。但是用氟致冷剂不仅会造成大气污染，引起温室效应，而且会破坏用以过滤紫外线、保护地面生物的高空臭氧层。出于对环境保护的考虑，联合国环境规划署已组

织 80 个国家签署了一个协议，规定 2000 年为使用氟制冷剂的最终年限。

因此想到用磁制冷技术来获得低温，制成磁冰箱。

早在 1818 年怀斯发现铁磁体绝热磁化时会伴随着可逆的温度改变，称为磁热效应，利用这种效应可以获得低温。1933 年焦克等人，采用磁性材料作工作物质，用等温磁化和绝热退磁方法，在实验室中获得 1K 以下的低温。

磁制冷的基本原理是借助磁性材料的磁热效应，等温磁化时向外界放出热量，绝热退磁时温度降低（冷却），并从外界吸取热量。根据上述原理，人们制造出磁冰箱的原型机，是它的结构示意图：在圆环 A 中充满加工成珠状的磁性材料，当环 A 绕轴旋转时，磁性材料便周期性地从磁极为 N、S 的强磁场、高温区 B 运动到无磁场低温区 D。在高温区 B 时，磁性材料被等温磁化，释放出来的热量由该区的 E 通过管道吸收（通常可用低压蒸发的液氦吸收热量）。当磁化了的磁性材料绝热地离开高温磁场区 B 时，由于绝热退磁，温度下降，并在到达低温无磁场区 D 时，与该区进行热交换，吸收该区 F 中的热量，使低温区 F 温度降低。A 环不断旋转，磁性材料便不断从低温区吸取热量，并向高温处释放热量，使低温区的温度逐渐下降，达到制冷的目的。

用磁制冷其优点首先有效率高，可获得足够的低温，法国制成的原型机，热动力循环效率达 60%，为普通电冰箱的 1.5 倍，估计在特定条件下，可达 2—4 倍。由于磁制冷不受低温时气体蒸发减慢的限制，可获得足够的低温。其次，磁制冷机由于不需要在高温下运行的压缩机，又用固体材料做工作物质，因而具有结构简单、体积小、重量轻、无噪声，便于维修和无污染等优点。

由于磁制冷有许多优点，很快就受到人们的重视，在低温磁制冷研究方面取得较显著的成果。1976 年布朗用钆（Gd）做制冷剂在室温附近做制冷实验，表明制成室温磁制冷机是可能的。据报道，法、美、日等国已设计制造了磁冰箱的原型机。1982 年美国已制成室温附近（-25—55）温差 $T=80$

的磁制冷机。法国格里诺特耳中心，日本东芝和日立公司都制成了磁制冷样机，磁冰箱投放市场将指日可待了。

目前我国已引进新的制冷机，用溴化锂作为制冷物质，不久在空调与冰箱中将有溴化锂的致冷机投放市场。

81. 电是怎样传到你家的 ——输电的真谛

工厂、学校、家庭的用电，你知道是怎样从发电厂输送来的吗？发电是一个复杂的过程，输电也同样是一个复杂的过程。大型的火力发电厂和水力发电场所发出的电力，要供应范围很大的地区，因此往往要把电输送到几十公里、几百公里、甚至上千公里之外的地方。这就需要有一整套的输电设备。我们知道，从电厂到用户之间有电线连接，电线中有电流，电流在电线中流动时，会遇到构成电线的导体（一般用铜或铝线）内部的阻力，称为电阻，就像水在水管中流动时会遇到管壁的摩擦阻力一样。电流为了克服导体的电阻，就要消耗一部分电能，变成热能散于空气中。这一部分电能与导线中的电流大小的平方和导线的电阻成正比。电线中的电阻与电线的长度成正比，所以输电线路越长，电线中的电阻越大，耗能就愈多。例如一台 12 万 5 千瓦的发电机组发出的电，其电压为 15750 伏，它输出的电流就有近 8000 安培，

这样大的电流通过输电线，就会产生高温，把大量电能消耗掉。我们要把电能送出去，又要使输电线路上尽量减小电阻的损耗，于是用了电学上的一条定律：电功率等于电压乘以电流。根据这个定律，如果我们要使输送出去的电功率不变，就可以采用提高电压，减小电流的办法。这就是将发电厂发出来的电，用升压变压器把电压升高几十倍，使电流减小几十倍。目前我国远距离输电线路，用 11 万伏、22 万伏甚至 50 万伏的超高压输电，我们看到的用铁塔式的电杆高架的输电线路即是。一般来说，用户的电不是某一个电厂直接供应的电，而是通过电网，统一规划给用户的，像上海地区就属于华东电网，济南地区属山东电网。什么叫电网呢？就是各发电厂发的电通过远距离输电线，相互联结成一个闭合环形输电线系统，通过一个中心变电所，进行控制调度，根据各地区的实际需要进行分配。每个家庭照明和工厂用电，就很难说这电是从哪一家电厂发的了。

当电输送到某一地区，则要将高压电经变电所变成低压（比如 3300 伏或 1100 伏）送到你的单位，再经降压变压器降至 220 伏或 380 伏送到各家各户。

我们知道，电流是电荷定向运动形成的，输电线中的电流，是电线中的自由电子在电场作用下作定向运动形成的。那么，是不是发电机中的自由电子，经输电线跑到你家的电灯上，你家的电灯才会亮呢？不是的，我们先来看看金属导线中电荷的运动情况。

金属与一般晶体相似，它的离子有一定的规则排列，称为晶格点阵排列，但是金属又与一般晶体不同，它的原子的外层电子受原子的束缚较松，容易脱离原子，形成在金属中自由移动的电子，称为自由电子。这种自由电子的运动，从总体看来，类似气体中的分子运动，即在一定条件下可以把自由电子看作如同电子气，在一定温度下在金属中杂乱地向各个方向运动，当它们与晶格点阵（即离子）相碰时，便折向其他方向。在室温下自由电子的这种混乱运动（称为热运动）速度的大小约为 10^5 米/秒。由于自由电子的热运动是杂乱无章的，它们沿着任何方向运动的机会相同，因此没有电荷沿某一方向迁移，所以也不引起电流。

如果在金属导体中加了电场，则每个自由电子都受到与电场反向的力，使电子产生除了以热运动速度运动外，大家都有一个逆着电场方向的定向运动，这个定向运动就是形成电流的原因。必须指出，电子的平均定向运动速度的大小比起热运动速度要小得多，当电流在每平方厘米 100 安培的情况下，平均定向运动速度也只有 10^{-4} - 10^{-5} 米/秒。当电厂合上电闸，整个城市的灯为什么又能瞬时亮起来呢？这是因为电线中各处都有自由电子，当电闸合上时，电场以每秒 30 万公里的速度传播，电线中各区几乎同时受到电场的作用，使电子作定向运动，形成电流，但每个电子的运动速度都很慢，犹如一队列队的士兵站在跑道上，一声口令“起步走”，第一排的人很快通过起跑线，而后面的人要经过一段时间才越过起跑线。

那么，电能的输送是不是像水在水管中流动那样，靠电子在导线中输送呢？电磁学的理论告诉我们电力的输送实质上是电磁能量的输送，在输电线内流有电流，电流在其周围产生磁场，导线外表面一般有一定的电荷分布，所以在空间亦产生电场，在导线内部有电源产生的电场与电流产生的磁场，电磁能量流动的方向与该处的电场与磁场的方向有关，根据电磁学理论的分析，能量从电源向周围空间发射出来，在电阻很小的导线表面基本上沿切线方向前进，流向用电器（称为负载），在电阻较大的负载表面，能量以较大

的垂直分量输入负载，在导线表面折射入负载中心。所以电磁能不是通过电流沿导线内部从电源传给负载的，而是通过空间的电磁场，从导线的侧面沿着输电线的方向传向负载的。

由此可知，电的传输是需要一套复杂的输电设备的，而电能的传输不是靠导线中的运动电子来输送的，而是由电磁场驱使电能沿着输电线路送到用电单位的。

