

出来的米当然比用尺子定义准确多了，因为尺子大小会随温度等条件变化而变化。

- 19 2010年2月，美国国家标准局研制的铝离子光钟，精度达到37亿年误差不超过1秒，是世界上最准的原子钟。
- 20 将来，如果条件允许，我们的手机或者其他什么新的可以拿在手里的设备中会出现原子钟。当然，我还没有想出普通人为什么要携带原子钟。

2



时间箭头是怎么回事

第2讲



《哈利·波特》里的魔法棒是一种非常神奇的东西，比如说，有一次邓布利多带着哈利·波特去找一个变成沙发的朋友，看到房间乱糟糟的，用魔法棒一挥，房间登时被整理得干干净净。又有一次，哈利·波特将魔法棒指着一摊水，那摊水很快就结成了冰。

尽管在魔法故事里，我们相信这种神奇的事情，但在现实生活里，这些事会出现吗？回答是，根本不可能。比如说，我们现在都是手机一族了，不论大人还是小孩，没事就捧着手机。和手机配套的是耳机线，它经常给我们带来不愉快的麻烦：我们本来将整理得好好的耳机线放在口袋里，可是，不出意外的是，每次从口袋里掏出它，它又变得乱糟糟的。

你有没有见过这种事情发生：一团乱麻一样的耳机线放进口袋里，掏出来的时候变整齐了？我跟你打一块钱的赌，你肯定从来没有见过这种事情。同样，一个乱糟糟的房间，如果我们不去耐心地慢慢整理，才不可能用魔法棒一挥，就会变得整整齐齐的。那你会问，魔法棒指一下水，它会结成冰吗？回答是，永远不会。原因是什么？因为冰和水比起来，就像整齐的房间和乱糟糟的房间比起来一样。我们慢慢谈这个回答后面的道理。

本来有条理的东西会变得乱糟糟，而乱糟糟的东西不会变得有条理，这是我们这个世界的一个根本规律。再举一个例子，一只杯子掉到地上，水撒出来了，水渗入地板中了，杯子碎了。我们从来没有见过相反的情况，一只杯子的碎片会自动合拢成一个完整的杯子，地板中的水跑回来再跳进杯子，然后杯子从地板上跳到桌子上。这意味着什么？这意味着我们这个世界是一部电影，它从来都是向着一个方向放映，而不能倒着放映，也就是说，时间有一个箭头。

其实，中国人早就注意到这个现象，成语“覆水难收”讲的就是这个现象。这个成语来自汉代的一个故事，汉景帝的时候，有一个穷书生叫朱买臣，娶了个妻子崔氏，他平时除了读书就是砍柴。后来崔氏实在过不



了贫穷的生活，要和朱买臣离婚，朱买臣没有办法，只好离婚了。到了汉景帝的儿子汉武帝即位，没过几年朱买臣得到了汉武帝的赏识，做了会稽太守。崔氏得知这个消息，蓬头垢面跑到朱买臣面前，请求他允许自己回到朱家。朱买臣让人端来一盆清水泼在马前，告诉崔氏，若能将泼在地上的水收回盆中，他就答应她回来。当然，这件事是做不到的。

但是，要很久很久以后，物理学家才找到这个道理背后的根本原因。发现根本原因是一个复杂的过程，有很多故事，我们先讲发现这个根本原因的人。这个人就是奥地利物理学家路德维希·玻耳兹曼。

要理解玻耳兹曼找到的道理并不难。现在，你拿一个盒子，再拿两个玻璃球。将盒子隔成一边一半，你闭起眼睛将玻璃球一个一个扔进盒子里。现在，要求你将两个玻璃球都扔进左边那个盒子，你会发现，尽管这可以做到，但平均下来，每做四次才可能做到一次。原因很简单，两个玻璃球都在左边是一种可能，两个玻璃球都在右边是一种可能，但还有两个可能是两个玻璃球一个在左边一个在右边：1. 第一个玻璃球在左边，第二个玻璃球在右边；2. 第一个玻璃球在右边，第二个玻璃球在左边。

我们继续做这个实验，现在，玻璃球越来越多，要求你闭起眼睛将所



有玻璃球都扔进左边，你会发现越来越难。原因很简单，所有玻璃球都扔进左边只有一种可能，而有很多很多可能是玻璃球乱七八糟地分布在两边。

你看，玻璃球同时在一边相比玻璃球乱七八糟地分布，看上去更整齐，而越整齐的情况越难做到。这个道理说起来非常简单，但是我们可以用这个道理解释前面提到的耳机线的问题：耳机线被整理得有条有理相对耳机



线乱七八糟的样子比较罕见。

那么，玻耳兹曼是怎么解释其他问题，比如说“覆水难收”的呢？玻耳兹曼说啊，任何物体都是由分子构成的，而分子就像我们刚刚做实验的玻璃球。当分子排列得整齐的时候，我们将这种情况叫作有序，而当分子排列得乱七八糟的时候，我们将这种情况叫作无序。相对无序，有序的可能性更小，所以不容易做到。他说，任何物体，一定是从有序变成无序，而不是相反，因为无序总是更有可能发生的。他的这种理论叫统计力学，因为它是建立在大量的原子和分子的统计基础上的。

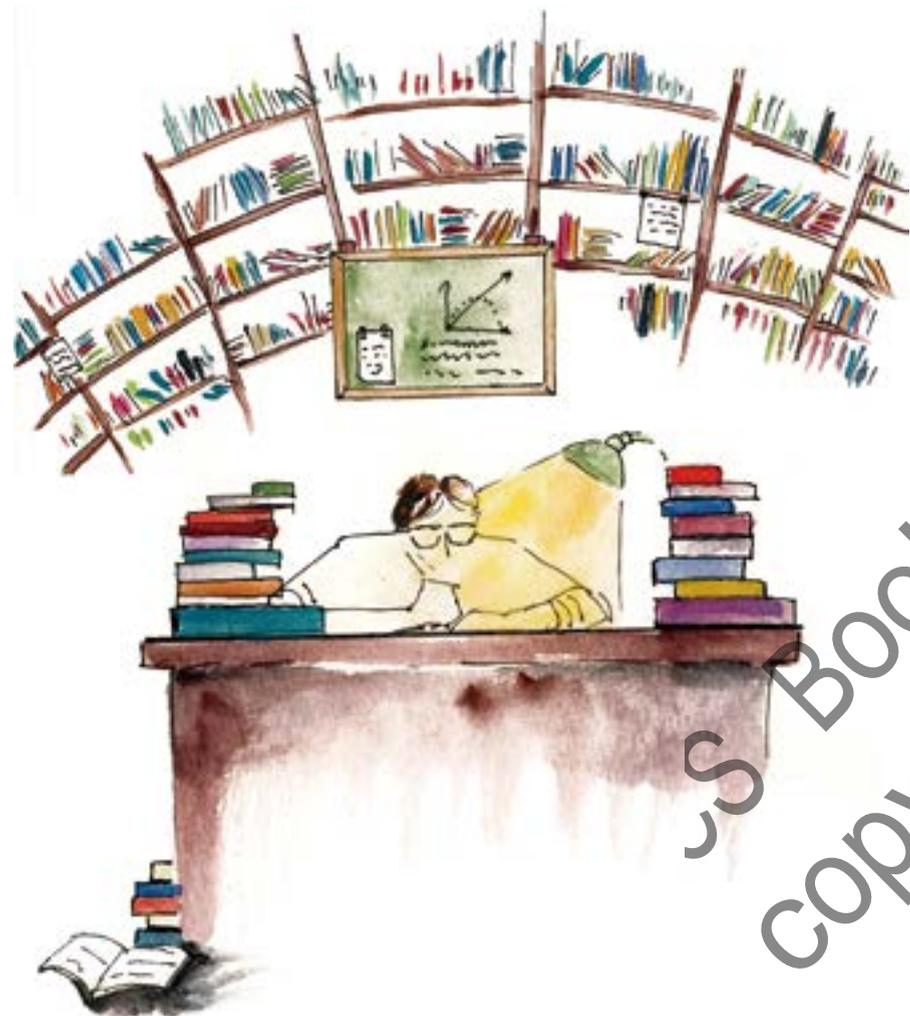
这么简单的道理，我们现在很容易接受。可是，玻耳兹曼却由于当时很多科学家不接受他的理论而自杀了。

今天，我们都觉得物质是由分子和原子构成的，这已经是常识了，但在玻耳兹曼的时代，原子论只是古希腊人的一种哲学，这种哲学根本不被大家接受，因为没有直接证据。科学的好处在于，科学的一切假说都必须有实验来支持。但这个观点有时也有很大的缺陷，就是很多科学家会被当时的实验限制，不敢去大胆地提出假说。原子和分子真实存在的第一个证据和爱因斯坦有关，我们后面会谈一下这个证据。

尽管玻耳兹曼非常成功地用分子和原子假说解释了不少重要的物理现象，同时也得到了大学的教职，却因为别的科学家拒绝接受他的理论，一生都很不快乐。对他打击最大的是，当时最重要的科学家兼哲学家马赫，支持一位比玻耳兹曼年轻的德国物理化学家威廉·奥斯特瓦尔德。奥斯特瓦尔德是一位很有成就的 chemist，后来还在 1909 年获得了诺贝尔化学奖。可见，不论是马赫还是奥斯特瓦尔德，在当时的影响都很大，他们都一致反对玻耳兹曼的原子论。

他们为什么会激烈反对原子论呢？因为在当时，有一种哲学观点特别流行，就是认为所有物质都是由能量构成的，并不存在什么原子和分子，这种观点叫唯能论。我们在上一讲中谈到赫兹发现了电磁波，这个发现让很多科学家认为，物质和电磁波一样，都是连续的能量。而原子和分子一来我们看不见，二来都是一个一个的，不是连续的，所以不可信。

玻耳兹曼 50 岁以后一直和马赫及以奥斯特瓦尔德为代表的唯能论辩论，后者的势力非常强大，而且还以哲学为背景。为了驳倒唯能论，玻耳兹曼甚至自己去研究哲学，也成了哲学家。玻耳兹曼甚至还做了妥协，他说，可以将原子和分子看成一种有用但不真实的模型，这样他对物理现象的统



计力学的解释就成立了。但是，很多人还是反对他。

到了1904年，情况变得对玻耳兹曼更加不利了，那时他已经60岁了。那一年，在美国圣路易斯举办了一个物理学会议，参加这个会议的很多物理学家反对原子论，玻耳兹曼甚至都没有被邀请参加这个会议的物理学部分，他只参加了一个叫“应用数学”的部分。1906年，玻耳兹曼的精神崩溃了，他辞掉了教授职位，在杜伊诺城堡中上吊自杀。

右面这张图是玻耳兹曼的墓地，他的雕像的上方写着玻耳兹曼发现的最重要的公式，公式左面那个S代表一个非常重要的物理量，叫作熵。下面，我们就谈谈关于熵的故事。

首先，什么是熵？这个名词看起来也挺怪的，我先给大家解释一下。我们前面说了，很多有秩序的系统，往往会变成无秩序，比如耳机线。熵这个物理



● 玻耳兹曼之墓 ●

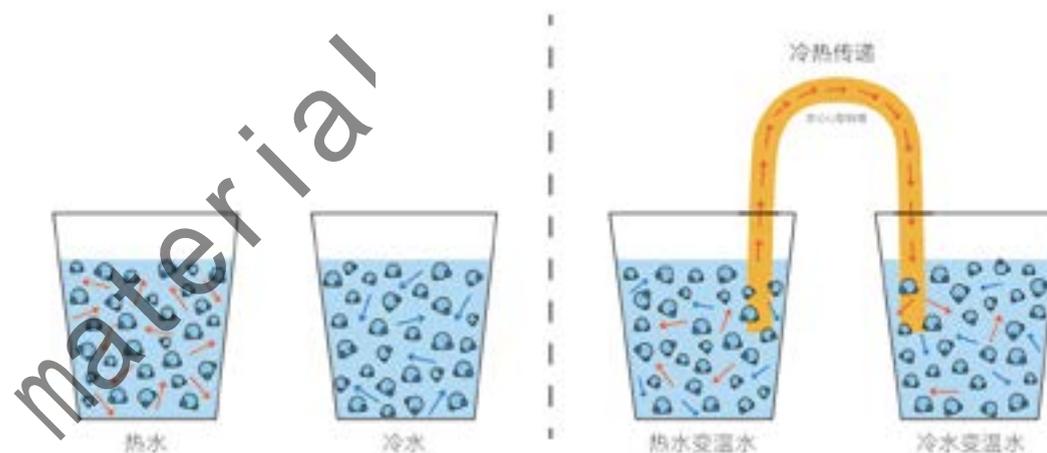


量，就是用来衡量一个系统无秩序的程度。我们前面看到了一些例子，例如在盒子里撒很多玻璃球，玻璃球倾向于越来越均匀地分布在盒子里，而不是只待在盒子的一边，更不会待在盒子的一个很小的角落，因为玻璃球均匀地分布在盒子里表现得最混乱、最无序。我们就说，当玻璃球均匀地分布在盒子里的时候，熵最大。熵总是增大，或至少不会变小，在物理学中被叫作热力学第二定律。

尽管经过我到此为止给大家的解释，我们已经能够接受熵这个概念，以及一个系统总是从熵小的状态变成熵大的状态了，但是，提出熵这个概念，并不是一件简单轻松的过程。熵当然不是玻耳兹曼发现的，他只是发现了关于熵的一个公式。那么，谁是第一个提出熵这个概念的人？

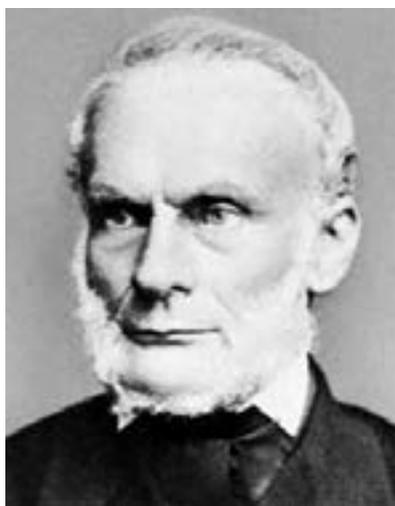
19 世纪上半叶，有一个德国人，名叫克劳修斯，一直在研究当时已经被发明出来的一些蒸汽机的效率，他和比他更早的一些人同样发现，这些蒸汽机不会百分之百地将蒸汽的能量变成推动机器的能量，这是为什么呢？他就从他小时候就熟悉的一个小实验开始思考。那个小实验特别简单，不是别的，就是右图演示的实验。

在这张图中，有两杯水，然后我们用一个可以导热的 U 型铜片将两杯



水连接起来。假如开始的时候，左边那杯水的温度比右边那杯水的温度高。过一段时间，我们再去量水温，就会发现左边高的水温降低了，而右边低的水温变高了。也就是说，热量从温度高的水传到温度低的水了。我们永远不会看到相反的过程，也就是温度高的水温度变得越来越高，而温度低的水温度变得越来越低。

这个简单的实验，是一门叫作热力学的学问的基础。克劳修斯小的时候，就注意到这个司空见惯的现象，而且还深思过，这到底是怎么回事呢？现



• 克劳修斯 •

在，他已经长大了，面临一个更加复杂的问题，蒸汽机为什么不可能达到百分之百的效率？回想起小时候就思考过的问题，他灵机一动，也许，热量从温度高的地方向温度低的地方流动，代表着某种混乱度的提高，那么，干脆将这种混乱度叫作熵。

当然，他必须提出一个严格的公式来计算熵。这个公式其实很简单，在克劳修斯看来，一个系统熵的变化就是它

得到的热量除以温度。这样，我们就可以很简单地解释热量为什么总是从温度高的地方向温度低的地方流动了，因为在这个过程中，温度低的地方熵的增加比温度高的地方熵的减少要大，这样加起来，整个系统的熵就变大了。

于是，克劳修斯就在他的文章中定义了熵，还表述了热力学第二定律：一个系统的熵不会减少，往往是变大。当然，克劳修斯在那个时候还没有

找到热力学第二定律和蒸汽机的关系。但是，他已经觉得他离解释蒸汽机效率问题很近了。

不过，我们需要强调一下，克劳修斯用来定义熵的温度，不是我们常用的摄氏温度，而是一种叫绝对温度的温度，这种温度是英国物理学家开尔文提出来的。

在克劳修斯提出熵和热力学第二定律之前，更年轻的开尔文就发现，任何物体的温度都不可能无限制地降低，存在一个最低温度，他将这个最低温度称为绝对零度。这个温度有多低呢？比水结冰的温度还要低差不多273摄氏度。也就是说，冬天里无论怎么冷，温度也不可能比零下273摄氏度更冷。这是一个了不起的发现。

比这个发现更加了不起的，是在克劳修斯提出热力学第二定律的第二年，开尔文就发现，热力学第二定律可以用来解释为什么蒸汽机不可能将所有的热量都转化成推动机器的能量。他的发现后来被称为热力学第二定律的第二种表述：我们不可能将任何一个带有温度的物体中的热量提出来全部变成推动汽车运动的简单的动能。

看上去，开尔文这个对热力学第二定律的表达与克劳修斯的表达完全



不同。现在，我用伟大的玻耳兹曼的统计力学给小朋友解释一下，你会觉得确实很简单。



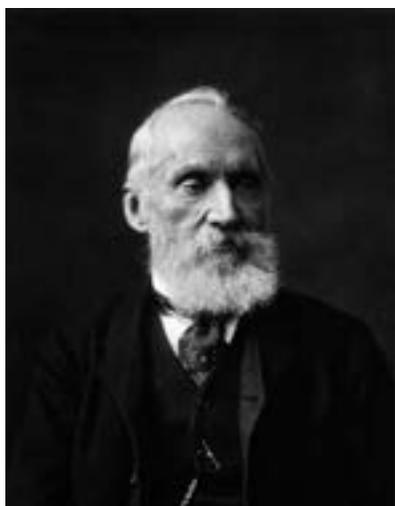
在玻耳兹曼看来，熵不过是一个物体中分子原子运动的混乱度，温度越高的物体，里面的分子原子运动速度越高，混乱度也就越高，这是温

度高的物体熵也高的原因。现在，我们重新看热传导过程。温度高的部分中分子原子会将它们的能量通过碰撞传给温度低的部分中的分子原子，这样，温度高的部分温度会降低，而温度低的部分温度就会升高。就这样，玻耳兹曼的统计力学轻轻松松地解释了克劳修斯的热力学第二定律。

再看统计力学是怎么解释热力学第二定律的开尔文表述的。假如我们可以将一个物体中的热量转化成一部汽车的能量，在玻耳兹曼看来，物体中的分子原子的混乱度降低了，也就是说，熵变小了。但是，一部汽车不论是运动还是不运动，混乱度都是一样的。熵变小，怎么可能呢？

热力学第二定律说起来，就是时间有一个箭头，未来，熵只会越来越大。换句话说，我们只能看到热量从温度高的地方向温度低的地方传导，而不会看到相反的过程。现在，我们完全理解了“覆水难收”，因为，当一盆水渗到地板里的时候，那些水分子变得更加混乱了。

现在回头再说说开尔文。在他指出任何物体的最低温度是绝对零度的时候，他的名字可不叫开尔文，而叫威廉·汤姆孙。威廉·汤姆孙出生于1824年，24岁就提出了绝对零度，27岁的时候仅仅比克劳修斯晚了一年提出热力学第二定律。他还做出了很多其他发现，比如测量地球的年龄。



• 开尔文 •

正由于他的很多科学贡献，他在 42 岁的时候被英国政府封为爵士，在 68 岁的时候又被晋升为开尔文勋爵。现在，已经没有什么人知道威廉·汤姆孙这个名字了，开尔文却大名鼎鼎。另外，绝对温度的单位也叫开尔文。

我在这一讲开头的时候谈到《哈利·波特》中的魔法棒的神奇，它之所以显得神奇，就是因为它做的事情在现实世界中不会发生。魔法棒一指，脏乱

的房间马上变得整整齐齐，这不可能，因为熵不会变小。那么，魔法棒能不能将一摊水变成冰？当然不能，为什么呢？因为水在液态状态下的熵比在结成冰的状态的熵要来得大，热力学第二定律不允许这种事情发生。另外，水变成冰的时候要释放热量，这些热量只能流动到水的外部。但既然本来水并没有结冰，说明外部的温度不比水的温度低，热量怎么会流出去？

同样，我们现在也知道了水结成冰的原因，那就是空气本身的温度降低了，低到比水变成冰的要求要低，这就是我们平时熟悉的零摄氏度。空气温度降到零摄氏度以下，水里面的热量才会释放到空气中去。

虽然我们用玻尔兹曼的观点很容易解释热力学第二定律，也就是说，时间只会向一个方向消逝，未来和过去是不一样的，热量只会从温度高的地方向温度低的地方流动，不存在《哈利·波特》电影中的魔法棒一指水就结成冰。可是，在玻尔兹曼活着的时候，还没有原子分子存在的证据，所以玻尔兹曼活得很辛苦，最后不得不在 1906 年结束自己的生命。

是谁第一个找到原子分子存在证据的呢？又是爱因斯坦。爱因斯坦在他发表狭义相对论的那一年，还发表了三篇关于布朗运动的论文，其中第一篇论文的题目干脆就叫《分子大小的新测定法》。什么叫布朗运动呢，给大家看一张图。

这是一杯水，水里面有一些微小的颗粒，这些颗粒其实肉眼看不见。1827 年，54 岁的苏格兰植物学家布朗午睡后醒来，想起上午做的一个实验还没有做完。上午的时候，他将一些花粉撒到

