“外星人”学物理

——匈牙利普通高中物理教材

4

〔匈〕Tóth Eszter 著　　秦克诚 刘培森 译

人民教育出版社

“外星人”学物理

——匈牙利普通高中物理教材

4

[匈] Esther Tóth 著
秦克诚 刘培森 译

人民教育出版社

图书在版编目（CIP）数据

“外星人”学物理：匈牙利普通高中物理教材（4）/（匈）Toth，E. 著；秦克诚，刘培森译．－北京：人民教育出版社，1999

ISBN 7－107－13232－6

Ⅰ．外…

Ⅱ．①T…②秦…③刘…

Ⅲ．物理课－高中－教学参考资料

Ⅳ．G634.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字（1999）第 32978 号

人民教育出版社 出版发行

（北京沙滩后街 55 号　邮编：100009）

北京市联华印刷厂印刷　全国新华书店经销

1999 年 12 月第 1 版　1999 年 12 月第 1 次印刷

开本：880 毫米×1230 毫米　1/32　印张：9.5

字数：230 千字　印数：1—2 000 册

定价：19.70 元

目　录

统计物理学

如果我们将许多樱桃椒*穿在一根线上，它就成了一个樱桃椒的环。反之，如果我们不把它们穿起来，它们就不构成一个环。

尽管还是有那么多樱桃椒，这些樱桃椒还是那么红、那么辣，但它们仍然不是一个环。

这只是由于那根线吗？——不，并不是由于那根线。那根线只是区区小物，只有第三等重要性。那么，是由于什么呢？

如果有人开始想这个问题，并且小心别让他的思想走火入魔，而是沿着正确的方向想下去，那么，他有可能跟上伟大真理的步伐。

——厄肯尼·伊斯特万：《生命的意义》

* 一种小而红的辣椒——译注

1. 正过程和逆过程

"于是他开始倒过来放映我的生活电影……我开始消化,很快午餐得了,我的仆人托着脏盘子倒退着走进房间,我坐在靠背椅上,用刀叉把拌有农家奶酪的美味面条从胃里抠到盘子上。我把切开的很好吃的肉片又粘在一起。在用勺把汤从嘴里盛出来之后,我站了起来并且看了一下我的表。正是 12 点半,我必须在中午之前赶到我的办公室里,因此我匆忙地倒退着走出房间。我叼在嘴里的烟蒂变得越来越长,最后我点着了它并且把它搁到兜里。"

——卡仑提·弗里格斯:《道德》

图 1

倒过来演的电影的大多数镜头是滑稽可笑的,因为它们是反常的。倒退着走出房间是很罕见的。但是它并不是不可能:一个守护睡着的孩子或者刚受过惊吓的母亲,在离开时边走边看着孩子,便是这么做的。但是,当我们看到在消化过程中破碎的食物小块又拼成整块,或者从冒起的烟圈和散开的烟灰又重新组合成一支香烟,我们就会感到这不仅反常,而且是不可能的。

一块小石子吊在一根长线上摆动。在石头每次摆动的末了它都回到原来的位置:它在同一地点有同一速度。(如果把它的运动拍成电影并且把它倒过来演,一点也不会觉得它反常。)但是在多次摆动之后我们注意到摆幅减小。(这时看倒过来演的电影我们会感到惊奇。)摆为什么会停下来?因为它把自己的能量分散给它周围空气的许多许多的分子以及线和天花板的粒子去了。只要能够不断地从外界补充这个能量,摆就会永远不变地摆动。(受迫振动。)

如果一个物体回到其初始状态,并且它所在的环境也回到原来的状态,我们就说这样的过程是可逆过程。

如果摆在真空中摆动并且在悬点没有摩擦,因而不可能把能量耗散到环境里的许许多多个自由度上,那么摆的运动将是可逆的。在现实中,每个物体,每块宏观大小的物质,都是由大量粒子(原子,分子)组成的。**由大量粒子组成的物质系统中的过程永远是不可逆的。**我们把其中某些过程看成可逆的,这只是一个近似。

想像在一张理想的、无摩擦的台球桌上以 100 个不同的速度打出 100 个球。每个球在两次碰撞之间自由运动。每次碰撞会改变它们的路径。可以找出隐藏在每次路径改变后面的严格动力学规律。但是如果有大量的球在台球桌上运动,我们就认为球的运动是无序的。球越多,试图追踪每个球的轨迹就越没有希望。

在描述大量粒子的系统时,我们索性放弃追踪每个原子的运动的做法,而代之以认为原子的行为完全无序。这种描述自然的新方法是奥地利物理学家玻耳兹曼在十九世纪下半叶提出的。用这种与严格决定论的力学完全不同的新方法,可以理解由大量原子或分子组成的大块物质的行为。

追踪系统中的每个分子不仅不可能,而且也不必要。(只要我们有足够的氧,那么,一个到达我们肺叶的 O_2 分子是来自房间的哪个角落以及速度是多大对我们完全无所谓。)有实际意义的是知道物质


图 2

系统整体的行为,如气体的密度、压强或一个物体的温度如何变化,等等。

每个物质系统的行为由宏观参量描写,宏观参量是作为整个系统特征的可测量的量。例如,密度、体积、压强、温度、质量……就是这样的参量。

世界是由很多的基元成分如原子组成的。因此对过程应当用这种方式描述,即认为这大量成分的行为是无序的。这种工作方法叫做统计物理学。

在统计物理学中,我们通过想像大量分子的无序运动来预告宏观参量的变化。在由许多基元组成的系统中发生的是不可逆的"单向"过程。因此,人们期望从统计物理学能够对不可逆性、对事物的先后顺序(即过程的方向)有所了解并作出预言。

问题

1. 人类为什么首先从天上的现象(天文学中的力学)而不是从房屋里的现象学习物理学?

2. 科隆博上尉走进一座似乎没人住的公寓。他的视线停在一串钥匙上,它挂在钉子上并且还在摆动。他发现厨房桌子上的水壶中有热水。再举出一些别的可能的迹象,从这些迹象上尉可以认定有人刚刚离开这个公寓。一两小时后就不可能从这些痕迹发现这里是否有过人了。为什么?

3. 电力 $F = qE$ 会加速金属导体中的电子。但是,将一个恒定电压接到一根导线上,得到的是一个恒定的电流。这是为什么?有什么观察证据支持你的答案?

2. 密度分布

图 3

灰姑娘需要一个奇迹:她需要鸽子帮助她把小米从炉灰中拣出来。继母给她的小米和炉灰的混合物不过是全部可能的排列中的一种,正像二者完全分开是排列的另一种一样。但是,继母把二者混合起来要比灰姑娘把二者分开容易得多。为什么?

对大自然来说,每个分子都是同等重要的。各个分子并不争着去做这件事或那件事,并不抢着去这儿或那儿。**一种给定的分子排列和另一种排列完全是等概率的。**

人体是由许多许多个分子组成的。为了生存,我们并不需要分辨环境里的分子,倒是需要能够辨别一头狮子和一丛百合,一只活老虎和一只死老虎。有许许多多种排列可以认为是实际上等价的。(继母的小米加炉灰系统有亿万种可能的排列,它们都可以简单地叫做“混合物”。继母生成的可以是这些可能的排列中的任何一种,它们在灰姑娘眼中都是一样的,而灰姑娘要完成的小米和炉灰相互分离的分布却只能用较少的排列方式实现。)

样本的一个状态若能用其分子的更多种排列方式生成,则它有更大的发生概率。

气体分子在盒子里四下飞行。我们想像把盒子分成左右相等的两部分。任何一个四下里无序飞行的分子,以相同的概率处于盒子的左半边或右半边。如果我们想要追踪每个分子的飞行,需要考虑对分子进行命名或编号。用这个方法可以表明每个分子是在盒子的哪一部分。由于分子的行为不是系统性的,每种特定的分子排列是等概率的。

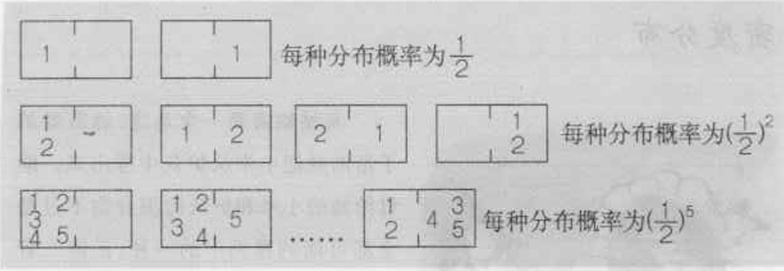

图 4

得到细致描述并且具有相等的发生概率的分子系统的特定状态，叫做微观状态。

但是我们人类并不对每个分子的位置感兴趣，只对气体的密度感兴趣。我们提出的问题是："盒子的左半边有多少个分子，右半边有多少个分子？"，但是我们不问是哪个特定的分子在那里。让我们擦掉微观状态图中分子身上的编号。我们看到：好些图是重复的。

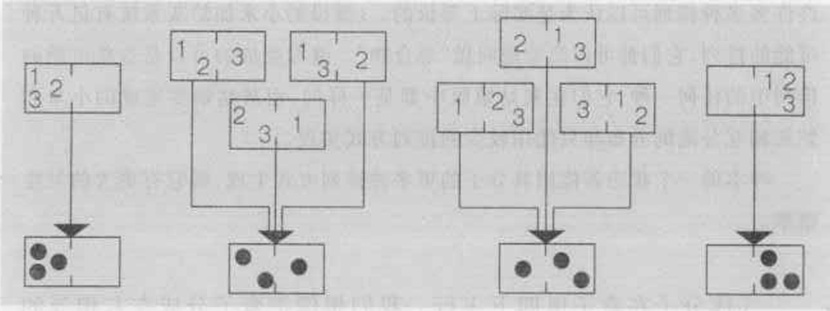

图 5

不同的密度分布通过不同数目的微观状态实现。有的分布的微观状态个数少一些，别的分布的微观状态个数多一些。**用 Y 表示实现同一分布的可能的微观状态的个数。**所有的微观状态都是等概率的，因此一个特定的分布的发生概率正比于 Y。

开始时含有 N 个分子的气体处于体积 V 中。打开通向另一体积为 V 的空盒子的阀门。我们有多少种方法可以把 N 个(编号的)分子放到两个对称的盒子里？第一个分子可以放在左边,也可以放在右边:这就有两种情况。第二个分子(独立于第一个)可以用同样的办法放置,因此第一个分子和第二个分子可以有 $2\cdot2=2^2$ 种方式放置。N 个分子可以用 2^N 种方式放置。在这些放置方式中,所有的分子都在左边的原来的盒子中的微观状态只有一个。对于 1 mol 的气体,2^N 之值为 $2^{6\cdot10^{23}}\approx10^{1.8\cdot10^{23}}$,这个数字的位数多于 10^{23} 位！因此,气体膨胀到另一个盒子中去要比留在原来盒子中的可能性更大。(见本课末例题 2。)

在上例中介绍了统计物理学所用的基本工作方法:用发生概率相等的微观状态来描述大量分子的无序行为。对属于每一分布(现在实质上是密度分布)的微观状态的数目进行计数,我们就得到关于样本的宏观参量的信息。我们从上例学到的一般结论是:

不加干扰时,后来的分布的微观状态的个数大于先前的分布的微观状态的个数。如果系统进入了微观状态数目最多的分布,那么这一分布实际上不会再有任何进一步的变化。具有最多的微观状态并且实际上不随时间再作任何变化的分布叫做平衡分布。

例题 1

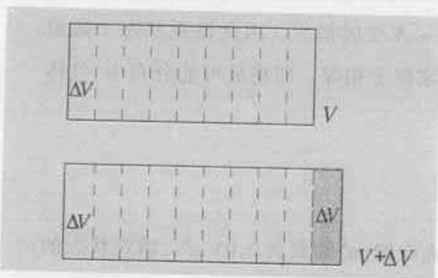

图 6

含有 N 个分子、体积为 V 的气体膨胀到体积 $V+\Delta V$ 中。微观状态的个数增大到几倍？

[解] 我们想像把体积 V 分成大小为 ΔV 的微元。N 个分子放到 $(V/\Delta V)$ 个微元中的方式有 $(V/\Delta V)^N$ 种。膨胀后体积所含的微元数增加到 $V/\Delta V+1$, N 个分子排列在 $V/\Delta V+1$ 个微元

中的方式有$(V/\Delta V+1)^N=[(V+\Delta V)/\Delta V]^N$种。因此末了的微观状态的个数正比于$[(V+\Delta V)/\Delta V]^N$。后来的微观状态的个数同早先的微观状态的个数之比为

$$\frac{Y_{后}}{Y_{先}}=\frac{\left(\frac{V+\Delta V}{\Delta V}\right)^N}{\left(\frac{V}{\Delta V}\right)^N}=\left(\frac{V+\Delta V}{\Delta V}\cdot\frac{\Delta V}{V}\right)^N=\left(\frac{V+\Delta V}{V}\right)^N=\left(1+\frac{\Delta V}{V}\right)^N。$$

体积由 V 膨胀到 $V+\Delta V$ 时，微观状态个数增加到原来的$(1+\Delta V/V)^N$倍。（又见问题 2。）

例题 2

两个相等的体积相互连通，其中的气体含有 N 个分子。可以有多少种不同的密度分布？每种密度分布对应于多少个微观状态？哪一种密度分布的概率最大？

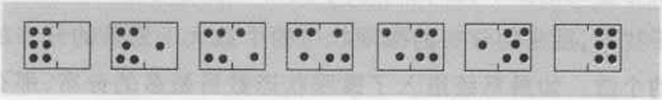

图 7

［解］可以有 $N+1$ 种不同的密度分布：右边的体积或者没有分子，或者有一个、或两个……或 N 个分子。

右边体积中有 k 个分子的分布对应的微观状态的个数，等于从 N 个物体中取出 k 个的不同取法：$Y=\binom{N}{k}$。最可能的密度分布就是对应的微观状态个数最多的那种分布。二项式系数在 $k\approx N/2$ 时最大。因此微观状态个数最多的分布对应于两边体积中的气体密度实际上相等。即在最可能分布中，气体均匀地充满可占据的空间。

问题

1. 1 mol ($N=6\times10^{23}$)气体的体积从 0.02 m^3 膨胀到 0.03 m^3。微观状态的数目增加多少？

2. 在例题 1 中，如果我们不选微元的大小为 ΔV，而选为 $\Delta V/2$，结果如何？

3. 气体的体积从 V_1 膨胀到 V_2，微观状态的个数增加多少倍？

4. 气体自发地膨胀而不会自发压缩。为什么？

5. 一个烧瓶中装有氮气，另一个等体积的烧瓶中装有氧气。两种气体的宏观参量相同。烧瓶的出口用橡皮管连接。打开阀门。若每个烧瓶中有 1 mol 气体，在达到平衡的过程中，微观状态个数增加多少？

3. 能量分布

课间休息时，学生在教室里到处溜达。他们的空间分布有许多许多种形式。上课铃响了，孩子们都坐到自己的坐位上，但是仍然可以淘气。练习本、教科书、橡皮等等可以到处乱扔，可以在孩子们之间以多种不同的形式摆放。

下面我们不讨论分子的空间分布，而讨论能量在物质内的分布。为此，我们采用一种模型晶体，其中各个原子的位置基本上是固定的，因此只需考虑它们的能量。

一块模型晶体由 N 个原子构成。晶体含有 r 个能量量子的能量，这些能量量子分配给各个原子。对所有各种分布和原子状态，能量量子的总数相同。大自然并不偏爱哪一个原子。任何一个有 r 个能量量子的原子状态是等概率的。

如果我们标明每个原子的能量量子数，我们就确定了模型晶体的一个微观状态。

晶体的单个原子的个别行为对我们无关紧要，不过通过计算微观状态的个数，可以找到晶体的平衡分布。因此我们的第一个任务就是计算由 N 个原子构成并且具有 r 个能量量子的晶体的微观状态数目。

如果 N 个原子构成的晶体没有任何能量，那么它只可能有一个微观状态。（“无物”只能用一种方式排列。）如果总能量是一个能量量子，那么微观状态的数目为 N。（这个能量量子可以属于 N 个原

子中的任意一个。)如果我们能够计算取越来越多的能量量子时微观状态的个数如何增加,那么就可以从无能量的晶体的情况推导出具有任意个能量量子的晶体的微观状态数。*

N 个牧鹅人从村里将 r 只鹅赶到草地上。他们排成单行,每个牧鹅人领着交给他管的鹅。可以想像出许多种(Y 种)不同的排队方式。现在有一只鹅要

图9

加入队列。它可以排在任何一个牧鹅人或任何一只鹅的后面。这样,可能的排队方式将增加到$(N+r)$倍。从远处我们分辨不出哪只鹅是新来的鹅。队伍里的 $r+1$ 只鹅中,任何一只都可能是新的。从远处看,可能的不同排队方式不是 $(N+r)Y$ 种而是 $(N+r)Y/(r+1)$ 种。$r+1$ 只鹅在 N 个牧鹅人之间的分布方式,是 r 只鹅的分布方式的 $(N+r)/(r+1)$ 倍。

我们用 N 个牧鹅人模拟编号的原子,而分辨不清的鹅的只数则模拟原子的能量量子数。可能的单行排法代表可能的微观状态。

---

* 原书用两个装饰性的图案图 8 和图 10 作为下面这段插话的边界,中译本改用细线,因此缺图 8 和图 10。——译注

一块晶体有 N 个原子并且具有 r 个能量量子，若晶体得到一个新的能量量子，其微观状态的个数增加为原来的 $(N+r)/(r+1)$ 倍。

例题 1

我们来计算一块由 N 个原子组成并且具有 r 个能量量子的晶体有多少个可能的微观状态。

[解法 1] 这个问题可以由一块无能量的晶体得到一个一个的能量量子，直到得到 r 个量子而解出。无能量的晶体的微观状态数为

$$Y(0)=1。$$

收到一个能量量子，其微观状态数将增加到 $(N+r)/(r+1)=(N+0)/(0+1)=N$ 倍：

$$Y(1)=N\cdot Y(0)=N。$$

得到第二个量子后，$(N+r)/(r+1)=(N+1)/(1+1)=(N+1)/2$，因而

$$Y(2)=\frac{N+1}{2}\cdot Y(1)=\frac{(N+1)\cdot N}{2},$$

再加上第三个量子：$(N+r)/(r+1)=(N+2)/3$，

$$Y(3)=\frac{N+2}{3}\cdot Y(2)=\frac{(N+2)\cdot(N+1)N}{3\cdot 2}。$$

再得到第 r 个量子后，

$$Y(r)=\frac{N+r-1}{r}\cdot Y(r-1)=\frac{(N+r-1)\cdots\cdots(N+2)(N+1)N}{r\cdots\cdots 3\cdot 2\cdot 1},$$

它可以写成更简短的形式：

$$Y(r)=\frac{(N+r-1)!}{r!\cdot(N-1)!}。$$

[解法 2] 这个问题可以重新表述为一个组合问题。让我们画 $N+r$ 个圆圈排成一行。原子用白圈表示，它们后面的黑圈代表原子的能量量子。这样，一系列白圈和黑圈就代表一个特定的微观状态。

第一个圈无论如何是白的，因为它是一个“原子”。剩下的 $N+r-1$ 个圆圈中有 r 个必须涂黑。这样的涂法与 $N+r-1$ 个圆圈中选 r 个的选法相同：