

◆ 高等学校教学参考书 ◆

统计物理学导论

王竹溪 著

人民教育出版社

高等学校教学参考书



统计物理学导论

王竹溪著

人民教育出版社

本书系统地讲解经典统计物理学，内容包括平衡态的系综理论，非平衡态的输运过程理论及涨落理论；对量子统计物理学也有简单的介绍，但没有作系统的阐述。

本书第二版曾由著者作了全面的修订。现予重印可作为综合大学及高等师范学校物理各专业“热力学及统计物理学”课程中统计物理学部分的教学参考书，也可供高等工业学校的相近专业选用。

2R13/B1

简装本说明

目前 850×1168 毫米规格纸张较少，本书暂以 787×1092 毫米规格纸张印刷，定价相应减少 20%。希鉴谅。

统计物理学导论

王竹溪 著

人民教育出版社出版（北京沙滩后街）

国营五二三厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 13012·0131 开本 787×1092 1/32 印张 11 4/16

字数 288,000 印数 55,801—100,800 定价(5) 0.88 元

1956 年 2 月第 1 版 1955 年 8 月第 2 版

1978 年 5 月第 10 次印刷

第二版序

第一版发行已经有九年了,在使用中感到較深的内容多了一些,沒有与基本内容区别开来。第二版的主要改变是对較深的各节都加了星号(*),以示区别。这些带星号的各节可以供在時間許可的情况下选用一部分,可以作为学生課外自由閱讀参考之用。

本书的系統和主要内容仍然与第一版一样。在系統上先讲平衡态的統計理論,然后讲非平衡态的統計理論。非平衡态的統計理論的主要内容是經典的气体分子运动論,它在历史上是先于平衡态的統計理論而发展的。在今天科学发展的情形下,平衡态的統計理論远比經典气体分子論重要,而且非平衡态的統計理論的进一步发展依赖于平衡态的統計理論,所以現在沒有必要按照历史发展的次序讲。而且从人的認識程序來說,直接理解平衡态的統計理論是很自然的,并不需要借用气体分子运动論的知識。这許多年来使用这本书的經驗也证明这个系統是适合于教学的。

世界各国的統計物理学的书有各种不同的系統,各种不同的讲法,很难說哪一种最好。但是不管系統和讲法怎样不同,基本理論核心总是一样的。

第二版与第一版在次序上主要有两处不同。一处是把非平衡态的統計理論一章与漲落理論一章次序顛倒了,这是因为漲落理論中的布朗运动理論需要一些分子碰撞的知識,移到非平衡态的理論之后更好些。至于漲落的基本概念和公式,早在平衡态的統計理論一章中讲了,漲落理論这一章的内容具有特殊性,在内容上是相当独立的一章。

另一处的次序改变是在非平衡态的統計理論一章中把玻氏积分微分方程和 H 定理提到輸运过程理論之前讲。这本来是应当采用的次序,

是原来第一版安排得不好。

第二版增加了一些内容，主要在第二章和第六章，这些是 26, 27, 28 及 67, 68, 69, 70 各节，这些节都加了星号。26 节的内容是新的，文献上还没有过。也删去了少量不重要的内容，总页数比第一版略有增加。

第二版虽然作了全面的修订，但是在内容和讲法上仍然基本上与第一版一样。现在把第一版序言中的最后三段转录于下：

“本书的主要内容是经典统计物理学，对于量子统计物理学只在最后一章作了一点简单的介绍。这样做是为了使得本书可以作为一本教科书，在书中不宜于加入过多的高深材料。同时也由于量子统计物理学的内容是很多的，而它又应当在量子力学的基础上重新建立起一个系统，所以它更适宜于以独立的一本专书的形式出现。”

“本书的末尾附有习题，并且还有常数表和几种数学表，以供实际问题的计算之用。”

“本书难免有错误和不妥当之处，希望使用本书的教师和读者多提意见，以便有再版机会时改正。”

1964年5月 王竹溪

目 录

第二版序	vii
第一章 统计物理学的基本概念	1
1. 统计物理学的对象、目的和方法	1
2. 统计物理学的发展简史	4
3. 物质的微观模型	6
4. 宏观量的统计性质	9
5. 理想气体的压强	11
6. 相宇	14
7. 统计系综	17
*8. 几率的概念	21
9. 刘维定理	22
*10. 相体积不变定理	25
11. 统计规律与力学规律	28
第二章 平衡态的统计理论	31
12. 微正则系综	31
13. 各态历经假说	34
14. 近独立子系的最可几的分布	37
15. 麦克斯韦速度分布律	46
16. 在重力场中的密度分布	50
17. 吉布斯正则系综	52
18. 热力学公式	56
19. 玻氏关系	63
*20. 普朗克关于熵与热力学几率的理论	65
21. 正则系综平均值的偏差	67
22. 能量均分定理	69
23. 气体的比热	72
24. 固体的比热	77
*25. 巨正则系综	79
*26. 化学平衡条件	87
*27. 三种系综之间的关系	90
*28. 熵的增加	94

第三章 气体的平衡性质	96
*29. 化学纯的理想气体的平衡性质	96
*30. 混合理想气体的平衡性质	100
31. 非理想气体的物态方程	102
*32. 第二維里系数与分子間力	107
*33. 用維里法推导物态方程	109
*34. 迈尔的理论	115
第四章 非平衡态的統計理論	123
35. 总論	123
36. 气体分子的碰撞頻率	125
37. 碰撞后速度的改变	132
*38. 碰撞的力心点模型	133
39. 自由程	136
40. 气体分子碰壁数、蒸发与凝結	141
41. 玻氏积分微分方程	143
42. H 定理	149
43. 关于 H 定理的討論	153
*44. 有外力場下的 H 定理	156
*45. 系綜理論中的 H 定理	160
46. 輸运过程的初級理論	163
(甲) 粘滯性	163
(乙) 热傳导	170
(丙) 扩散	172
*47. 用弛豫時間法求金屬的电导率	177
*48. 輸运过程的数学理論	179
*49. 洛倫茲气体的輸运过程	193
第五章 漲落理論	203
50. 用准热力学方法处理圍繞平均值的漲落	203
*51. 光的散射	209
52. 布朗运动理論	215
53. 仪器的灵敏度和振蕩电路中的电漲落	224
*54. 郎之万方程的几率形式解	229
*55. 福克-普朗克方程	234
第六章 量子統計学大意	245
56. 热輻射的經典統計理論	245
57. 普朗克的輻射公式及量子論	252
58. 量子統計物理学的一般理論的要点	258

59. 气体比热的量子理論.....	261
60. 固体比热的量子理論.....	265
61. 量子統計法.....	275
*62. 用巨正则系綜法推导玻色和費密分布.....	281
63. 光子气体.....	285
*64. 玻色气体的性质.....	289
65. 費密气体的性质.....	294
*66. 金属中自由电子的热发射和輸运过程.....	299
*67. 热力学第三定律.....	309
*68. 蒸气压常数.....	311
*69. 关于負的绝对温度.....	314
*70. 达尔文-否勒法.....	318
习题.....	324
附录一 常用常数表.....	337
附录二 积分表.....	338
附录三 誤差函数表.....	338
附录四 函数 $\psi(x)$ 表.....	343
附录五 爱因斯坦比热公式数值表.....	344
附录六 德拜比热公式数值表.....	345
索引.....	346
外国人名索引.....	349

第一章 統計物理学的基本概念

1. 統計物理学的对象、目的和方法

热現象的理論有两方面：一是宏观理論，即热力学；一是微观理論，即統計物理学。热力学理論是根据三个基本法則而作演繹的推論，解釋各种物质热的性质。所根据的三个基本法則就是热力学的三个定律，这是由直接观测的現象而总结归纳得到的三个自然界的关于热現象的基本法則。热力学理論有高度的可靠性与普遍性，但对特殊物质的特性不能給出具体的知識，而在这方面需要从实验观测中得到必要的數據。例如气体的性质在热力学理論中必須根据特殊的关于气体的实验定律来討論，这些定律是玻意耳定律，焦耳定律，阿伏伽德罗定律等。热力学在处理物质的性质时，把物质作为連續体看待，把物质的性质用确定的連續函数表达。实际上，由于物质是由有限多个原子所构成的，宏观性质是微观性质的統計平均值，所以宏观性质会表現有統計平均所必然具有的漲落現象。这种漲落現象在布朗运动中表現得很明显，这是热力学理論所不能解釋的。

統計物理学从物质是由大量的分子和原子組成的这一事实出发，把宏观性质作为微观量的統計平均結果，因而成功地解釋了漲落現象。不但如此，統計物理学还可在对某种特殊物质作一些簡化的物质的微观模型假設之后，利用求微观量的統計平均法，推論得到这种物质的特性。最重要的特殊物质的例子是理想气体和理想固体。此外，对于物质不处在平衡态时的一些性质，特别是关于气体的輸运过程，統計物理学也能給以理論的解釋。統計物理学在討論物质由非平衡态过渡到平衡态时，对过程的不可逆性有更深刻的解釋，指出宏观的不可逆性是統計的效果，而微观运动則是可逆的。

由上面所說的總結起來是：統計物理學所研究的對象是大量分子（包括原子，電子，輻射場等）所組成的體系，它的目的是根據分子的運動來解釋所觀測到的物質的宏觀熱性質，它的方法是對分子的微觀量求統計平均值。關於具體的求統計平均的方法將在後面各章節中詳細討論。關於科學的目的性，應當指出，解釋自然現象只是初步目的，科學的最終目的在應用客觀規律能動地改造世界。

由上面所說的統計物理學所能解決的問題來看，可以把統計物理學的理論分為三方面。第一方面是關於平衡性質的理論，這是統計物理學在今天已經發展得比較完善的一方面。這一方面需要應用普遍的力學運動定律，而在原理上所得到的結果可以適用於任何力學體系，包括輻射場在內，因而這一方面的理論是極其普遍的。這一方面的理論恰好與熱力學相當，兩者都能適用於各種物質。由於應用了普遍的力學運動定律，由於理論結果的普遍適用性，這一方面的理論通常名為統計力學。又由於它與熱力學相當，它又名為統計熱力學。統計力學根據力學運動定律和統計原理，可以闡明熱力學的三个基本定律的微觀意義。從這裡可以看出，統計物理學比熱力學在理論上更進一步，更深入到物質的內在性質，能夠把熱力學的三个互相獨立的基本規律在微觀上歸結於一个基本統計原理。在這裡需要補充說明一下，熱力學第三定律是在量子統計力學建立以後才得到統計解釋的。

統計物理學的第二方面是關於非平衡態的理論，關於輸運過程的理論。在這方面的理論中需要考慮分子之間的相互作用對於運動情況的影響，特別是關於分子相互散射或碰撞的情形。這種分子間交換能量的具體過程可以名為**碰撞機構**，這種具體的碰撞機構在統計物理學的第一方面理論中是不需要的，統計力學關於平衡性質的結論是對任何碰撞機構都適合的。惟有在非平衡態的問題中，碰撞機構的具體性質才起決定性的影響。由於在理論上只能討論最簡單的碰撞機構，例如彈性剛球的碰撞，所以輸運過程的理論還只能應用於氣體，或是應用

于金屬中的电子气体。这第二方面理論在历史上比第一方面理論(統計力学)发展得早些。这一方面理論构成經典的气体分子运动論,它是統計力学的前身。

統計物理学的第三方面是关于漲落現象的理論。漲落現象有两类,一是圍繞平均值的漲落,这已經包含在第一方面理論中了。第二类漲落現象是布朗运动,这一类的普遍問題是**机遇問題**,有普遍的数学理論,这第二类的漲落現象理論与力学运动定律的关系很少。

我們看到,热力学所不能解決的問題——特殊物质的具体性质和漲落現象,統計物理学解决了,而且統計物理学使我們对自然界的認識更进了一步。但是統計物理学也有它的局限性。由于在統計物理学中对物质的分子結構模型所作的簡化假設只是实际的近似代表,所以理論的結果与实际不能完全符合,而只是或多或少的近似于实际。

当統計物理学的理論应用到輻射和固体比热的問題上与实际不合时,使我們对微观世界的运动規律,即原子和分子所遵循的运动規律,有了新的看法,这些看法逐漸发展而构成一个新的力学——量子力学。在量子力学建立以后,統計物理学的基础应当建筑在量子力学之上,而不是建筑在經典力学之上。根据經典力学而建立的統計物理学叫做經典統計物理学,根据量子力学而建立的叫做量子統計物理学。虽然能正确地解釋自然現象的是量子統計物理学,而不是經典統計物理学,但是我們还是首先讲經典統計物理学,而且把主要的內容放在經典的理論上,只在最后給量子統計物理学一些初步的簡短的介绍。我們这样做有两个理由。第一个理由是:根据我們对自然界的認識过程是由宏观到微观,由經典到量子的这一发展的次序,我們必須先讲經典統計物理学。第二个理由是:統計原理在經典的和量子的理論中基本上是一样的,在基本概念上完全一样,只是数学方法上有些小的不同;而且經典統計物理学的理論結果在很多情形下是与实际符合的,因而經典統計物理学是不可缺少的理論知識。与第一个理由有关的是我們必須先学

經典統計物理学而引到量子論，才能学习量子力学，而量子統計物理学則必須在量子力学学习以后才能学。

2. 統計物理学的发展簡史

統計物理学是作为基本科学理論发展起来的，它服务于科学实验，但与工业生产沒有直接的关系。在关于热現象的实验資料积累得相当多之后，要进一步掌握热現象的規律，必須从物质的結構来研究热現象的本质。这样就产生了热現象的微观理論——統計物理学。这是在十九世紀的后半，在热力学定律建立之后，发展起来的。統計物理学的发展在开始时虽然与工业沒有直接的关系，但它所賴以发展的实验資料則同工业的关系比較密切。沒有工业的发展，实验資料的取得就不会有足够的丰富，科学理論就不能巩固地建立起来。因此，統計物理学的发展与工业生产的发展还是有关系的，可以說是一种間接的关系。这是早期的情况。現代工业技术水平大大提高，直接牵涉到物质的各种微观过程，統計物理学与工业的关系比过去密切得多。例如，在原子能工业和电子器件工业中，必須考虑原子和电子的統計分布才能作好設計工作。这說明科学理論的发展又反过来促进工业的发展。

虽然統計物理学的发展是在十九世紀的后半期，在工业有了高度发展之后，但是它的基本思想萌芽还可追溯到古代。統計物理学的基本概念是：热現象不是一个独立的現象，而是由于物质的大量分子的运动所产生的，这些分子的运动是人的感官直接觉察不到的。

物质的原子学說导源于古希腊的哲学家。大約在紀元前 640—547 年間，泰勒斯(Thales of Miletus)假想自然界的物质全是由水和由水变化来的物质組成的：他认为土是水凝固成的，空气是水稀釋成的，火是由空气受热而产生的。大約在紀元前 500 年，赫拉克利特(Heraclitus)认为土、气、火、水是四种独立的元素，不能互相轉变，而自然界所有各种物质則是这四种所組成的。比这个时代稍晚一点，留基伯(Leucippus)

及德謨克里特(Democritus)认为物质是由极小的硬粒子所組成的,各种不同的物质有各种不同的粒子。到大約紀元前 341—276 年时,伊壁鳩魯(Epicurus)有同样的主張,为亚里士多德(Aristotle)所駁斥。在紀元前 55 年,卢克萊修(Lucretius)把伊氏的主張重新提出,而且加以发展。

以后,物质的原子学說中斷了很久,直到資本主义萌芽时代才被重新提出来。在 1658 年伽森狄(Gassendi)提出物质是由分子构成的假說,假想分子是硬粒子,能向各方运动,并且进一步解釋物质的固液气三种聚集态。在 1678 年胡克(Hooke)提出同样的主張,他認識到气体的压力是由于气体分子与器壁相碰的結果。到 1738 年伯努利(Daniel Bernoulli)发展了这个学說,并且从气体分子与壁碰的概念导出玻意耳定律。在 1744—1748 年罗蒙諾索夫(Ломоносов)繼續发展了伯努利的理論,他提出了分子与原子的不同,一个分子可以含有数个原子;他明确地提出热是分子运动的表现;他是化学反应中物质守恒原理的創始者;他肯定了笛卡儿的运动守恒原理在分子运动中的正确性。

在一世紀之后,分子运动論得到飞跃的发展。有赫喇帕司(Herapath, 1821), 瓦特斯頓(Waterston, 1845), 焦耳(Joule, 1848), 克倫尼希(Krönig, 1856), 克勞修斯(Clausius, 1857), 麦克斯韦(Maxwell, 1860), 玻耳茲曼(Boltzmann, 1868)这些人的工作。克勞修斯、麦克斯韦和玻耳茲曼这三个人是分子运动論的主要奠基者。克勞修斯是正确地证明玻意耳定律的第一个人,并且是第一个人引进自由程的概念的。麦克斯韦是第一个人認識到分子的速度各不相同而得到速度分布律的,以后他又建立了輸运过程的数学理論。玻耳茲曼最初在速度分布律中引进重力場,用 H 定理证明速度分布律,給与熵以統計意义,并且完成了輸运过程的数学理論。洛倫茲(Lorentz)把輸运过程的数学理論用到金屬中的电子,得到重要的結果。1902 年吉布斯(Gibbs)出版了他的統計力学书,把玻耳茲曼和麦克斯韦所創立的統計理論推广而发展成为系統的理论,并創立了統計系綜理論。

分子运动論从一些定性的論断进到关于气体分子运动的一个系統的定量的理論，随后又进到一个普遍的，对于固体、液体、气体都适用的統計力学。統計力学应用到固体和輻射时，得到与实验不合的結果。1900年普朗克(Planck)为了解决实验与理論在輻射問題上的矛盾而創立量子論。以后一系列的現象证明量子学說是微观世界的根本法則，到了1926年就建立了量子力学。1924年玻色(Bose)和爱因斯坦(Einstein)发现第一种量子統計法，1926年費密(Fermi)和狄喇克(Dirac)发现第二种量子統計法。量子統計法只有这两种，一切物质不屬於这一种，就必屬於那一种。

在二十世紀五十年代以后，統計物理学又有很大的发展，这主要是在分子間有較强的相互作用下的平衡态和非平衡态的問題。

分子运动学說在发展中受过唯心的和保守的思想的阻碍。在十九世紀末叶奥斯瓦耳德(Ostwald)提倡“唯能論”，认为只要用能量的概念与热力学的理論，就可說明自然界的一切現象。他反对分子运动論，认为分子是空想。他的思想是唯心的，在实质上是脱离物质的运动来看能量，就把能量当作了一种与物质无关的抽象的概念。列宁^①在“唯物主义和經驗批判主义”一书中严厉地批判了这种唯心論。列宁說：“唯能論物理学是那些想像沒有物质的运动的新的唯心主义嘗試的泉源。”

自从1897年电子被發現以后，人們开始从实验的观测方面認識了原子和分子的真实性的。特别是1908年皮兰(Perrin)研究布朗运动得到关于分子运动的实验結果，才把唯能論者彻底打倒。从此以后，原子和分子的真实性的已經有了坚强的实验证明，而被公认为科学真理。

3. 物质的微观模型

根据无数的近代原子物理学的研究結果，我們已經对于物质的原

^① 列宁全集14卷, 286—289頁(人民出版社1957年)。

子结构有了相当完全的認識。通常我們认为分子是一个化学純的物质的最小单位，而原子是在化学反应中不改变的最小单位。一个分子可以就是一个原子，也可以是几个原子組合成的。例如氮气的分子就是一个氮原子(N_2)，氧气的分子是两个氧原子构成的(O_2)，水分子 H_2O 是两个氢原子和一个氧原子所組成的。当一个分子就是一个原子时，这个分子叫做单原子分子；当它是由两个原子組成时，它叫做二原子分子；当它是二个以上的原子組成时，它叫做多原子分子。

原子也有它的內部结构：它是一个原子核和一个或許多个电子所組成的，原子核帶有阳电荷。原子的原子序数由原子核所帶阳电荷的数值而决定，它等于核电荷含电子电荷的倍数；原子序数决定原子在元素周期表中的地位。原子的质量集中在原子核上面，原子核的质量是原子中所有的电子总质量的約一千八百多倍到四千多倍，原子核的质量佔据全部原子质量的 99.95% 以上。假如一个原子中所含电子数等于原子序数，这个原子的电荷是中和的，这就是正常的原子。假如不然，这个原子就叫做离子：帶阳电的名阳离子，帶阴电的名阴离子。分子缺少电子或有多余电子因而带电的也名为离子。原子中最外层的电子离原子核約 10^{-8} 厘米，这可以认为是原子的半徑。原子核本身的半徑則只有 10^{-13} 到 10^{-12} 厘米的大小，約为原子的半徑的十万分之一到万分之一。

原子核也有它的內部结构：它是质子和中子所組成的，所含质子的数目等于原子序数。质子帶正电，每个质子所带的电等于电子所带的电，但正負号相反。中子是不带电的。质子的质量与中子的质量差不多相等，质子的质量等于电子质量的一千八百多倍。

統計物理学所討論的对象是一大群分子和其他粒子等微观客体的集团。为簡單起見，我們把这些微观客体的一个单元就叫做分子，这是广义的分子，它包括上面說的分子，原子，离子，电子，等等，并且还包括光子。当这大群的分子集团的运动有不同的剧烈程度时就表现为物质

的三种聚集态: 固态, 液态, 气态。分子运动論对热現象的看法是: 分子的运动越剧烈, 溫度就越高。当分子在相互作用的影响之下, 只能在不远离它們各自的平衡位置作微小的振动时, 就表现为固体的状态。一个理想的固体模型是: 分子的平衡位置排列成为一个有規則的晶体点陣, 而每个分子的运动是微小的簡諧振动。

在溫度升高时, 分子的运动变为更加剧烈。当运动的剧烈程度达到某一定的限度时, 分子之間的相互作用已經不能維持分子在固定的平衡位置附近作微小的运动, 但还能使分子不分散远离, 这样就表现为液体的状态。在液态时, 分子沒有固定的平衡位置, 因而整个物体的形状不能維持不变, 但仍然有一定的体积。

当溫度再升高时, 分子的运动又增加了剧烈的程度, 不但分子的平衡位置沒有了, 而分子之間也不能維持一定的距离。这时候分子相互分散远离, 分子的运动可以說近似的自由运动, 这样物体就表现为气体的状态。一个理想的气体模型是: 每个分子能自由运动, 分子間的相互作用除了在分子相互碰撞的一瞬間需要考虑外, 一般可以认为沒有作用。气体的分子既然能自由运动, 整个气体就不可能保持固定的形状和大小; 不論多大的器皿, 气体都能完全充塞。不同种类的气体放在同一器皿内能够很均匀地混合在一起。

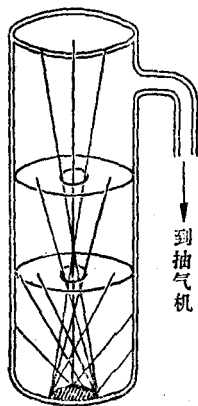


图 1. 气体分子的直綫运动。

杜諾叶(Dunoyer)在1911年的实验可以說明气体分子作自由的直綫运动的情形。他把一个圓筒用两块板隔为三节, 每个板上钻一小孔(見图 1)。在筒底放一小块鈉, 热之使蒸发。筒中空气用抽气机抽去。鈉分子蒸发后向各方运动, 其中一小部分相继穿过两块板中的小孔而到达筒頂, 凝聚在筒頂上。鈉凝聚在筒頂的地位正好相当于直綫运动所达到的地位。假如把

上面的那块板子取消，而悬挂一小物体在原来那块板子的中心小孔处，则在筒頂可发现凝聚的鈉被这个小物阻隔而构成像光綫的阴影情形。

上面所說，由于溫度不同，使得分子运动的剧烈程度不同因而表现为不同的聚集态，这是对一种物质說的。不同的物质，由于分子相互作用的差别，在同一溫度可表现为不同的聚集态。

在經典統計物理学中假設分子遵守經典力学的运动定律，而且假設分子的相互作用的性质是：分子集团构成一个保守的力学体系。根据这个假設所作的推論关于气体在通常的溫度和压强下的性质与实验相合。但是关于分子的内部运动，經典理論与实验不合。只有在用了量子理論到分子的内部运动之后，才得到与实际符合的结果。例如，在經典理論中必須把一个单原子分子当作一个质点看待才能得到与实际符合的结果，因此不能认为原子再有内部运动。原子内部的电子运动所以不表现出来的原因直到有了量子理論后才得到解釋。

4. 宏观量的統計性质

統計物理学的主要任务是从物质的微观結構和微观运动來說明物质的宏观性质。什么是宏观性质呢？这就是一些可以观测的物理量，也就是热力学里的变数和函数，如密度，压强，內能等。怎样从微观量来得到这些宏观量呢？这有两种情形。一种情形是有明显的微观量与宏观量相对应，例如密度，內能，等。这些是在力学中已有的一些物理量，內能就作为分子运动的机械能。另外一种情形是没有明显的微观量与宏观量相对应，例如溫度，热量等。这是热現象中出現的新的物理量。对于第一种情形說，由微观量求宏观量是比較简单的，那就是对微观量求統計平均。所以統計物理学的一个基本原理是：**宏观量是相应的微观量的統計平均值**。下面对統計平均作进一步的解釋。

举气体的密度为例來說明宏观量的統計性质。設 ρ 为气体的密度， m 为每个分子的质量， n 为分子的数密度，則 $\rho = mn$ 。說 n 是分子