

高层大气热状态

К. Я. 康德拉捷夫等著

科学出版社

高层大气热状态

К. Я. 康德拉捷夫 著
О. П. 费里波维奇

赵明哲 译

陈耀武 马彦华 校

科学出版社

1964

К. Я. КОНДРАТЬЕВ и О. П. ФИЛИПОВИЧ

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ВЕРХНИХ
СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ

Гидрометеониздат

1960

內 容 簡 介

本书系統地闡述了有关高层大气热状态的規律性問題。首先探討了有关溫度的概念和大气平衡状态的形式等一般性問題，接着闡述了目前确定高空溫度的間接方法(包括声学、光学、无綫电方法和流星的观测等)和直接利用火箭与卫星的測量方法。然后，比較全面地論述了有关高层大气热状态的規律性、热状态中的輻射因素和平流层、中层大气的动力学特性以及有关外层大气热状态因素的理論問題。此外，还詳細地介紹了近年来有关高层大气結構和高层大气成分方面的研究成果。

本书可供从事高层大气气象学和大气物理学方面的研究工作者和业务工作者参考，同时亦可供高等院校有关专业师生参考。

高 层 大 气 热 状 态

К. Я. 康德拉捷夫 等著

赵 明 哲 譯

陈 耀 武 等 校

*

科学出版社出版

北京朝阳門大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1964年7月第一版 开本：850×1168 1/32

1964年7月第一次印刷 印张：11 3/16

印数：0001—2,600 字数：294,000

統一书号：13031·1945

本社书号：2998·13—7

定价：[科七] 1.90 元

序

实际需要促使高层大气的研究工作迅速地发展着，这特别表现在人们对高层大气热状态问题十分注意。正因为如此，在利用火箭和卫星进行研究的最初计划中，就规定了要广泛地研究高空大气热状态的规律性。近来，出现了很多研究高层大气热状态的理论工作。可是至今不论在苏联或在其它各国，对高层大气热状态的完整概念还没有过综合论述。

本书的目的是试图对高层大气热状态研究的现状给以简短的论述。由于本书篇幅有限，所以不可能讨论所有这方面的问题和详细地引用全部有关的成果。在很多情况下，作者只限于引证一些文献。但所引证的文献也不是详尽无遗的；文献目录中尽先列举了近年来最重要的著作。高层大气热状态问题是如此广泛，以致稍许全面的文献目录就需要占用过多的篇幅。

研究高层大气热状态的规律，首先必须研究一些关于温度的概念、大气中平衡状态的形式等一般性问题。

正因为如此，本书前两章就探讨了这些一般性问题。在第一章中，当温度概念确定以后，就简短地综述了热力学平衡定律。在第二章中讨论了大气中平衡状态的主要类型，同时阐述了热力学平衡不存在的情况下，温度概念的运用问题。

在第三章和第四章中评论了目前用于确定高层气温度的主要方法。

在第五章中阐述了高层大气热状态规律的研究结果。

在第六章中分析了高层大气热状态中的辐射因素。在第七章中介绍了一些有关平流层和中间动力学的知识，举例说明了作为热状态因素的动力过程的重要性。在第八、九、十章中，探讨了有关外部大气(热层和外层)热状态因素的理论概念。

高层大气热状态問題与微观性质因素的研究(光化学、光致电离、光致分解、复合、碰撞、吸收和辐射过程等方面的問題)有着密切的联系。現在不論在苏联[例如 В. И. 克拉索夫斯基 (Красовский), И. С. 史可洛夫斯基 (Шкловский), С. Ф. 罗基奧諾夫 (Родионов), Б. А. 巴加良茨基 (Багаряцкий) 和其他人的工作]还是在国外[象 D. R. 貝特斯 (Bates), Н. 麦西 (Massey), М. 尼古萊 (Nicolet) 的工作]在这方面都进行了广泛的研究工作。詳細研究微观过程的困难性是明显的。这也就說明了为什么尽管对上述問題作了大量的工作,可是对它暂时还没有足够清楚了解的原因。为了闡明高层大气热状态的主要問題,在很多情况下,宏观地研究能量的传递和交换过程就已經足够了。由于这两个理由,我們也就不再討論微观过程(討論微观过程同样也会使本书的篇幅大量增加),而尽可能局限在宏观現象的研究上。

因为本书是給出有关高层大气热状态問題完整概念的初次尝试,自然,它的很多部分不仅在实质上,而且在形式上都还远不够完善和成功。請讀者們把意見和希望通知我們,作者将表示感謝。

作者力图把这些材料闡述得既适合于对高层大气物理有兴趣的广大讀者,又可以提供給相应专业的高年級大学生閱讀。

本书第三到第七章是 К. Я. 康德拉捷夫 (Кондратьев) 写的,第一、二章和第八章到第十章是 О. П. 費里波維奇 (Филипович) 写的。К. Я. 康德拉捷夫对本书进行了全面的校訂。

作者对 В. П. 古洛夫 (Гуров)、С. Ф. 罗基奧諾夫、С. И. 基托夫 (Титов)、Е. Г. 史維德科夫斯基 (Швидковский) 等同志表示謝意,他們閱讀了原稿,并且提出了許多宝贵的意見。

11/30/02

目 录

序	vii
緒論	1
第一章 气体統計理論中的一些知識	7
§ 1. 溫度的概念	7
§ 2. 統計平衡定律	9
第二章 大气不是处在統計平衡条件下的气体	17
§ 1. 存在于地球大气中的一些平衡状态	17
1. 局部的热力学平衡	17
2. 基尔霍夫定律在地球大气中成立的問題，部分 J. T. 平衡的概念	25
3. 单色輻射平衡	47
4. 輻射平衡	49
5. 平衡状态的混合型	50
6. 质点按状态的定常分布	52
§ 2. 不存在热力学平衡条件下的溫度概念	53
§ 3. 关于地球大气中統計平衡定律成立的一些意見	61
第三章 确定高空溫度的間接方法	67
§ 1. 声学方法	67
§ 2. 流星的觀測	75
§ 3. 光学方法	82
1. 曙暮光方法	82
2. 探照灯的探測	94
3. 夜天光和极光的光譜研究	98
4. 臭氧的光譜	104
§ 4. 无綫电方法	107
1. 均匀大气高度	107
2. 有效复合系数	108
3. 电子的碰撞頻率	110
4. 大气的热无綫电輻射	112

§ 5. 大气潮汐的观测和其他的方法	114
1. 大气潮汐	114
2. 大气的逸散	115
第四章 利用火箭和卫星测量温度	117
§ 1. 在火箭上的温度测量	117
1. 电阻温度计	118
2. 压力计的测量	121
3. 声速的测量	127
4. 落球法	131
5. 光学方法	134
§ 2. 根据卫星观测确定温度	134
1. 根据卫星制动观测来确定大气密度	134
2. 压力计的测量	142
3. 大气的热力探测	144
§ 3. 卫星的温度和热量平衡	147
第五章 观测到的高层大气热状态的规律性	157
§ 1. 不同高度上的温度垂直分布	157
§ 2. 温度的年变化	165
§ 3. 温度的日变化	170
第六章 决定平流层和中层热状态的辐射因素	174
§ 1. 高层大气的吸收辐射	174
§ 2. 平流层热状态的辐射因素	178
§ 3. 中层热状态的辐射因素	186
§ 4. 平流层和中层的辐射平衡理论	190
第七章 高层大气动力学的一些知识	193
§ 1. 高层大气中的乱流	193
§ 2. 大型环流运动	199
第八章 热层和外层热状态的理论概念	202
§ 1. 辐射平衡理论在热层大气中的应用	203
§ 2. 考虑导热的热状态理论模式	206
§ 3. 由行星际气体引起的高层大气的加热	221
第九章 能量守恒方程及其在高层大气温度分布问题 上的应用	233

§ 1. 能量守恒方程的推导	233
§ 2. 导热方程的讨论	237
§ 3. 关于热状态理论的一些意见	241
第十章 各种因素对高层大气加热的作用问题	255
§ 1. 太阳的紫外辐射和伦琴射线辐射	256
1. 太阳紫外和远紫外光谱区的火箭研究	258
2. 伦琴射线谱区的火箭研究	264
3. 紫外和伦琴射线谱区内太阳辐射能分布的理论计算结果	265
4. 关于由太阳紫外辐射和伦琴辐射带入地球高层大气的能量情况的讨论	267
§ 2. 行星际气体	269
§ 3. 太阳吸积的星际介质和从太阳大气中逸散的质点	272
§ 4. 微粒流	274
§ 5. 电流	282
§ 6. 磁流体动力波	291
§ 7. 地球大气和行星际气体的摩擦	302
§ 8. 微流星	302
§ 9. 低声波	304
§ 10. 地“冕”	306
結語	314
参考文献	317
附录	336
名詞索引	349

緒 論

研究高层大气中所发生的各种现象,特别是极光、曙暮光、夜天光以及其它现象已有很长时期的历史了。可是,仅在本世纪内,首先由于实际需要的促进,高层大气物理学的各个分支才开始迅速发展。由于无线电联系及无线电广播的需要,致使电离层物理学的研究蓬勃的发展起来,并且在此领域中已取得了相当大的成就。由于火箭技术的惊人成就,人们能够发射卫星和宇宙火箭,这就使研究高空大气成分和结构的任务提到了首要地位。利用火箭和卫星作为科学试验工具,给研究高层大气物理学的许多迫切问题展示了广阔的远景。

大气最有代表性的特点之一就是它的很多性质(如成分、结构、电的性质)在铅直方向上的不均匀性。这种不均匀性的存在说明大气在垂直方向上有一定的成带性,也可以说把大气分成一系列各有特性的层。由于划分层次时鉴别特性的方法不同,层次的划法自然不同。

在温度随高度的分布上最明显地表现了各层特性的差别。在表1中援引了国际上通用分类中大气主要各层和各过渡层的名称。

表1 大气层的名称

层 名	上界和下界的平均高度(公里)	过 渡 层
对 流 层	0—11	对流层顶
平 流 层	11—35	平流层顶
中 层	35—80	中层顶
热 层	80—800	热层顶
外 层	800 以上	

我們在这里不介绍那些以其它性质分布为基础的专门术语,

因为在研究大气热状态时无需使用它們（众所周知的有关电离层的术语除外）。

近来也通用把大气划分成“高层”和“低层”。低层就是对流层，高层包括所有高于对流层的各层。太阳对这些层影响结果的特征差异是这样划分的基础。太阳辐射对低层大气的直接影响很小，而主要是間接的影响；地表面由于吸收太阳辐射而变热了，以后借助乱流热交换和水分从地面上蒸发在大气中凝結的途径，把热量由地面传递給大气。

談到高层大气，几乎所有发生在这层的、并为这层所特有的現象，就是由太阳作用所形成的。光致电离、光致离解、电流系統的构成、夜天光、极光等等都属于这种現象。

在介紹了下面将要用到的有关术语以后，我們极简单地談談关于高层大气成分和結構的基本知識。

在发射第一批研究火箭以前，人們主要由間接的實驗方法和理論計算来取得有关大气密度、压力、温度和成分的知識。用火箭只可以得到低于110—130公里处的足够可靠的資料。在发射人造地球卫星和宇宙火箭以前，用各种方法得到的更高处大气密度的資料是极端矛盾的。由最初的火箭探測資料构成的标准大气模式与更早期由电离层和光譜学研究所給出的模式比較起来，前者得出大气的概念要冷得多，而且密度也要小得很多。較近期发射火箭得到的資料重新給出的概念是：这里的大气很热而且不那么稀薄；这和从人造卫星观測得到的情报是一致的。

很可能将来火箭和卫星結構的改进以及測量方法的完善，会从根本上糾正我們現有的知識。

很多作者对高空大气的密度、压力和温度的分布进行了定量計算。但是由于高空大气物理性質的情况不明，使得各个作者所用的、在同类計算中所必須的初始假設可以彼此不同。这就使得不同作者的大气模式并不一样。这种或哪种模式正确性的唯一标准就是：它和理論及观測資料是否很好的一致。因为高层大气的这种資料还不多，它們的可靠性經常受到怀疑，所以利用已有模式

的“平滑过”的资料(认为这个资料是最适当的)比在这些模式中选择某一个更要合理些。在表 2 中是 N. 格尔逊 (Gerson) 著作中的标准大气模式。

表 2 N. 格尔逊的大气模式

高度 (公里)	温度 (°K)	压力 (毫巴)	质点数目 (厘米 ⁻³ , $n = \frac{p}{kT}$)	密度 (克/厘米 ³ , $\rho = \frac{p\mu}{\mu_0 RT}$)
0	288	$1.01325 \cdot 10^0$	$2.549 \cdot 10^{19}$	$1.226 \cdot 10^{-3}$
10.8	218	$2.349 \cdot 10^0$	$7.805 \cdot 10^{18}$	$3.756 \cdot 10^{-4}$
32	218	$8.608 \cdot 10^0$	$2.860 \cdot 10^{17}$	$1.376 \cdot 10^{-5}$
62	330	$2.041 \cdot 10^{-1}$	$4.480 \cdot 10^{15}$	$2.156 \cdot 10^{-7}$
84	200	$1.204 \cdot 10^{-2}$	$4.361 \cdot 10^{14}$	$2.098 \cdot 10^{-8}$
94	262.5	$2.834 \cdot 10^{-3}$	$7.821 \cdot 10^{13}$	$3.763 \cdot 10^{-9}$
100	300	$1.488 \cdot 10^{-3}$	$3.593 \cdot 10^{13}$	$1.429 \cdot 10^{-9}$
300				
8月	2700	$1.142 \cdot 10^{-5}$	$3.064 \cdot 10^{10}$	$1.727 \cdot 10^{-12}$
1月	2000	$3.983 \cdot 10^{-5}$	$1.443 \cdot 10^{10}$	$5.307 \cdot 10^{-13}$
400				
8月	3900	$5.692 \cdot 10^{-6}$	$1.057 \cdot 10^{10}$	$3.619 \cdot 10^{-13}$
1月	2850	$1.546 \cdot 10^{-6}$	$3.929 \cdot 10^9$	$1.345 \cdot 10^{-13}$

此模式是在分析许多 1951 年以前的电离层和光谱学观察资料的基础上构成的。虽然其中没有利用火箭资料(从这个观点上讲,可以认为这个模式是陈旧的),可是为了和更新的模式比较起见,介绍它们还是有意义的。有关的现代的成果将在第五章和附录表中加以介绍。

大气热力层结在定性上的主要特点是:在对流层和平流层之间有一个窄狭的过渡带——对流层顶。在对流层顶以上,温度开始是缓慢的而后是比较快的随高度而增加。在 50 公里高空附近,温度达到极大;再向上大约到 80 公里,温度随高度的增加而减少。在这里观测到稳定的最低温度。更高的地方,温度增长到很高的数值——1000°K 左右甚至更高。至于密度和压力,它们单调地随高度增加而减少,在第一近似下,可以认为这种减少是成指数

关系。

以下簡短地談談有关大气成分的知識。

在解决一系列的課題中(例如計算高空大气的温度、电离层的产生和維持、寻求重力場中的扩散分离面、研究气体从地球大气中逸散等),高层大气成分問題起着首要作用。

最初研究大气成分的目的是要檢驗道尔頓(Dalton)气体分压定律,从这个定律得出結論;在地球重力場內,大气中較輕气体的相对含量应当随高度增加。研究空气成分的方法,是用各种提升装备把一个抽取空气样品用的特殊瓶子带到高层大气中去。以后就来分析这些样品。

直到1949年才有了用火箭研究大气的可能性,在这以前,測定大气成分所用仪器上升的最大高度不超过30公里。

利用火箭可以測定80到100公里高空的大气成分。按照理論推算,扩散分离面就应当位于这个区域内。

測定大气成分的主要困难是在火箭四周存有寄生气体,这会造出实验結果的失真。但是苏联研究人員在很大程度上克服了这个困难,他們用的方法(在利用容器取样时)保証取样瓶从圍繞着火箭的气体“云”中摆脱出来。

在最初利用火箭的研究中,同样也是借助于取样方法来解决高空大气成分問題的。当时,是对那些化学活动性低的气体(如分子态的氮、惰性气体)进行样品分析的,測量輕的和重的空气成分的相对浓度。

現在为了測定高空大气的成分,除了“古典的”取样方法以外,还采用了在飞行中直接分析空气的方法。为此利用了射頻質譜仪。用这种方法可以发现那些化学性活跃的、不太稳定的高层大气成分(例如O, OH, NO, N等等);这些成分用取样瓶方法是不可能发现的,因为化学活动性,在封閉容器中它們很快就不存在了。因为从很高高空取得的气体混合物的样品含量都很小(这里指出:在 10^{-3} 毫米汞柱压力下,充滿500厘米³体积的气体,在大气压力下只占有0.5毫米³的体积)。所以为了分析它們,就需要用特

殊的方法和技术了。

在苏联，由 С. Э. 福里斯(Фриш)拟定了定量分析混合气体的光谱方法，现在可以分析十分之一甚至百分之一立方毫米体积的混合气体。

在表 3 中给出了苏联在 1951—1956 年期间所进行的火箭研究结果。

表 3 高空大气成分的綜合資料

[按 Б. А. 米尔托夫 (Миртов)]

高度 H (公里)	集气瓶内的压力 (毫米汞柱)	体 积(%)		
		O ₂	N ₂	Ar
65	$1.7 \cdot 10^{-1}$	19.0	80	0.91
75—80	$2.0 \cdot 10^{-2}$	21.0	78	0.93
75—80	$2.5 \cdot 10^{-2}$	21.0	78	0.93
80	$1.1 \cdot 10^{-2}$	21.5	78	微量
80	$1.0 \cdot 10^{-2}$	19.0	80	0.86
80	$1.5 \cdot 10^{-2}$	22.0	77	0.87
80	$8.0 \cdot 10^{-3}$	23.0	76	0.90
82—85	$4 \cdot 10^{-3}$	24.5	74	0.77
82—85	$3.7 \cdot 10^{-3}$	20.5	78	0.79
82—85	$4.4 \cdot 10^{-3}$	19.0	80	0.91
85	$3.7 \cdot 10^{-3}$	21.0	78	0.86
85	$3.2 \cdot 10^{-3}$	21.0	78	0.90
85	$3.4 \cdot 10^{-3}$	21.0	78	0.88
95*	$1.2 \cdot 10^{-3}$	21.5	77	0.76

利用光谱方法分析空气，可以把得到的样品分析成三种气体：氧气、氮气和氩气。在氮气和氩气間表现出了最明显的区分效应。这是因为它們之間分子量的差别最大。

可是，得到的資料并没有提供出可靠地解决开始气体扩散分离那个面的高度问题的可能性。

由装置在苏联第三顆人造卫星上的质谱仪研究中，得到了表

* 原书为 85，此处根据 Б. А. 米尔托夫的原資料 (Усп. Физ. Наук. т. 63, в. 1b, 1957) 改为 95——譯者注。

征 230—100 公里高空电离层化学成分的正离子的質譜知識。这些研究証实了在电离层中主要的气体成分是原子态氧的概念。

除了原子态氧的离子以外,还記錄下了氮原子的离子,另外也发现了原子量是 28 和 32 原子单位的重質点,已經把質量是 30 的离子当作一氧化氮的离子了。发现原子态氮对于原子态氧的相对含量随着高度和地理緯度的变化是从 1% 到 10%, 另外发现这个量也随時間变化。重的一氧化氮离子和分子态氮的相对含量随着高度的增加而显著減少,在 230 公里高空,一氧化氮的离子数是氧原子数的 25%—40%。

在附录表 5—8 中,引用了不同高度上空气成分的更詳細的“模型”資料。

很多在地面上对电离层的研究,发现在大气中存有几个被电离的层。但是根据火箭和卫星上的測量,从根本上改变了以前所采納的大气电結構。从这些資料中可以得出結論:在电离层中,仅在 F 层区域内存在着一个表現清楚的电离最大值。电离层的所有其余的层,只是电子浓度在垂直分布上細薄結構的表現。

在緒言的最后,我們談談目前采用的有关卫星的術語,人們用发射的年代来标記卫星,并且用希腊字母来表示它在該年中出現的次序,例如象第一个和第二个卫星的記号是 1957 α 和 1958 β 。假如卫星的运載火箭和其他物体(例如保护用的圓錐体)与卫星同时处在軌道上,那么它們中的每一个都得到一个附加的号碼 1, 2, 3; 而且第一个号碼属于那个最亮的物体,例如象第一个人造卫星的运載火箭和卫星本身被标記为 1957 α 1, 1957 α 2。

第一章

气体統計理論中的一些知識

§ 1. 溫度的概念

大家知道,任何一个具有給定內能的絕热的孤立系統,在規定不变的外界条件下(外界的場、容积、压力),当系統中的任何宏观过程和变化停止时,就逐渐地达到某个定态。这个状态被称为热力学平衡¹⁾,系統可无限长久地停留在此状态中。

仅在外界条件改变或向系統輸入热量时(破坏系統的絕热隔离,改变系統的能量),才可以改变热力学平衡状态。这样一来,在热力学平衡时,这个系統的状态仅是决定外界条件的那些参量和系統能量的函数。在热力学平衡状态中可以认为:由所研究系統質点的位置和速度决定的系統內部宏观参量,是外界参量和能量的函数。

同时,依赖于內部参量的系統的个别宏观特性(系統的輻射强度,它的电、磁性質等),最終也是外界参量和能量的函数。

在热力学平衡情况下,在整个系統和它的宏观部分[子系(подсистема)]中,存有一个对整个子系取同一数值的系統状态函数。此函数被称为温度。

象其他状态函数一样,温度也仅仅依赖于外界参量和系統能量。利用这种关系,可以把能量表示成温度和外界参量的函数。于是,換句話說,在热力学平衡状态中,所有依赖于系統內部参量

1) 以后除了術語“热力学平衡”外还要应用和它等价的術語“統計平衡”,在把統計物理的定律应用到在大气中發生的現象时,自然就用到“統計平衡”这个術語。

的状态函数是外界参量和温度的函数。

这样一来,在外界参量給定时,温度就成为唯一集中定量描述热力学平衡状态的系統内部参量。可以从統計力学着手来解释这种意見。由統計力学的观点,对某个閉合系統的子系讲,任一能量 ϵ_i 的状态实现的几率 w_i 是由下式确定的:

$$w_i = \frac{e^{-\frac{\epsilon_i}{kT}} \Omega(\epsilon_i)}{\sum e^{-\frac{\epsilon_i}{kT}} \Omega(\epsilon_i)}, \quad \sum w_i = 1,$$

式中 $\Omega(\epsilon_i)$ 是能量为 ϵ_i 的状态数, T 是温度, k 是玻尔兹曼 (Boltzmann) 常数。

从以上引用的公式看出:系統的特性取决于它的能譜 ϵ_i 和能量 ϵ_i 状态的統計重量 $\Omega(\epsilon_i)$ 。按这种状态的分布也仅取决于温度。

对每种具体物体讲, w_i 的公式或多或少地都有自己独特的复杂形式。这个公式对气体系統看来是最简单的。对气体系統,存在有 w_i 表达式的許多特殊形式:质点按速度分布的麦克斯韦 (Maxwell) 定律,对原子和分子按内部自由度分布的玻尔兹曼定律。描述电离平衡的薩哈 (Saha) 定律等等(見 § 2)。

物体的各种宏观特性(例如:压力、浓度、輻射光譜的強度分布等等)和温度关系的形式是一定的,而且可以根据已知的几率 w_i 由理論上計算出这些关系。从实验中测定了适当的宏观量(如压力 $p = nkT$),就可以推定物体的温度。下面我們将要仔細討論这个问题。这里还要注意到下述情况。

因为在高空的大气很稀薄,所以作为在一般意义上物体加热程度的温度概念就不大适用了。

已知在 300 到 500 公里高空的气温(温度和气体质点平均动能 $\bar{\epsilon}$ 是由关系 $\bar{\epsilon} = \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT$ 联系的, k 是玻尔兹曼常数)可以达到几千度。同时,假如把某个宏观物体放置于这样熾热的大气内,那末物体的温度要比介质的温度低很多。其原因如下:由于介质很稀薄,气体的质点很少和物体的表面相撞,所以物体的温度

將完全取決於它的輻射平衡(見第四章 § 3)。

最後還有一個意見。溫度是個宏觀概念。僅在下述情況中，論及某體積氣體的溫度才有意義：就是在这个體積內，要有足夠多的質點，由於它們在容積內的碰撞，確立了上述狀態幾率 w_i 的平衡分布。所研究體積的綫尺度 L 顯然要比自由路程 l 大很多， $L \gg l$ 。

如果注意到，在量級上 $l \sim \frac{1}{n\sigma}$ (這裡的 n 是質點的濃度， $\sigma \sim 10^{-16} - 10^{-15}$ 厘米² 是質點的碰撞橫截面)，那麼甚至到高度 ~ 300 公里處(在此高處的 $n \sim 10^{10}$ 厘米⁻³)， $l \sim 10^6 - 10^5$ 厘米 = 10—1 公里，即 L 應當大於 10 公里。

由此可見，有意義討論的溫度的體積是多麼巨大。顯然 $L \sim 10$ 公里體積的溫度是不能用一般的溫度計來測量的。這就必須採用特殊的方法，例如測量壓力和氣體的濃度(雖然在後一種情況也可能有很大的誤差)。其中最簡單的方法是將溫度理解成質點平均動能的尺度， $\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT$ ，實際上在測量壓力時也就確定了 $\bar{\epsilon}$ ($p = nkT = \frac{2}{3} n\bar{\epsilon}$)。

談了這些主要是涉及十分複雜的溫度概念的初步意見之後，下面將要敘述處於統計平衡狀態中的系統輻射特性方面的結論。

§ 2. 統計平衡定律

在本節中我們的興趣主要在於：在統計平衡情況下，輻射的普遍定律和氣體按狀態平衡分布的定律。首先研究基爾霍夫(Kirchhoff)把現象學的热力學應用到熱力學平衡系統中所得到的某些結論^[1](同時僅限於討論均勻介質情況)。

1. 由於介質的均勻性和各向同性，在熱力學平衡狀態下，輻射在各處和各方向上的光譜成分是相同的。也就是說輻射強度 I ，與方向無關，並且對所有介質點具有同一數值(注意：輻射強度是在單位頻率間隔內，在單位立體角內包含的能量，它是在單位時間內