

论太阳大气的温度分布

林诗俊

(新疆乌鲁木齐建设路 26 号设计院, 830002)

摘要: 本文详细分析了造成太阳大气的温度分布的物理机制, 认为太阳色球层, 日冕层的高温分布是由于在色球层中上升的高温气体中的分子(离子, 粒子和电子)的平均自由程很长, 在电场力速率分离作用和引力速率分离作用下分子按速率发生了剧烈分离造成的。

关键词: 平均自由程, 引力速率过滤作用, 电场力速率过滤作用, 光球层, 色球层, 日冕, 太阳大气。

我们知道, 太阳大气中温度分布由光球层表面的六千多开直到日冕外层的一百多万开的现象是一个迄今为止还没有得到合理解释的问题。本文将以部分观测数据为准再结合本人近期对分子系统的研究结论对这一问题进行讨论。下列四表是从《物理量与天体物理量》^[1] 择编所得(表中 N/Ne , $\Delta T/\Delta h$ 是新加的):

表一: 太阳中心到光球顶部的部分参数。

r (距离)	T (温度)	ρ (密度)	log P (压强)
10^3 千米	10^6 开	克. 厘米 ⁻³	达因. 厘米 ⁻²
0	15.5	160	17.53
70	13.0	89	17.20
348	3.4	1.00	14.67
689	0.052	0.00005	8.32
692.5	0.031	0.00002	7.68
695.3	0.014	0.0000001	6.15
696.0	0.006	0.0	—

表二: 反变层(从色球大部分延伸到光球)的部分参数。

h(高度)	T	log N	log Ne	log N/Ne	$\Delta T/\Delta h$
千米	开	每立方厘米	每立方厘米		开每千米
2000	9000	11.01	10.51	0.50	3.85
1350	6500	12.25	10.85	1.40	2.94
560	4180	15.20	11.04	4.16	-1.58
320(色球底)	4560	16.13	11.96	4.17	-5.84
0(光球顶)	6430	17.18	13.81	3.37	-25.56
-27	7120	17.19	14.33	2.86	-33.79
-56	8100	17.21	14.94	2.27	-34.38

-72	8650	17.22	15.30	1.92	-34.38
-88	9200	17.22	15.54	1.68	

表中 N 为单位体积内的 (粒子+离子+电子) 数, Ne 为单位体积内的电子数。

表三：色球和过渡层(单位和字母意义同上表)的部分参数。

h (千米)	T (开)	log N	log Ne	log N/Ne	$\Delta T/\Delta h$
0	4560	16.13	11.96	4.17	-5.84
200	4180	15.35	11.18	4.17	-1.9
500	5230	14.08	10.88	3.20	3.5
1000	6420	12.25	10.87	1.38	2.38
1500	8000	11.17	10.54	0.63	3.16
1680	9000	11.01	10.51	0.50	5.56
1900	11000	10.82	10.49	0.33	9.09
1990	28000	10.40	10.10	0.30	188.89
2000	100000	10.11	9.81	0.30	7200
2010	190000	9.77	9.47	0.30	9000
2100	470000	9.32	9.02	0.30	3111

表中高度从表二色球底 320 千米处算起, 1680 米处为色球顶部, 1900 千米附近向上为过渡层。

表四：日冕温度和电子密度的径向变化参数 (近似数据)

r_{\odot}	1.0	1.2	1.5	2	3	5	10	20	215
$T(10^6)$	0.5	1.2	1.7	1.8	1.7	1.4	1.1	0.8	0.2
log Ne	9.0	7.90	7.28	6.52	5.65	4.90	4.1	3.2	0.7
T/ h	3111	5.03	2.39	0.28	-0.14	-0.21	-0.09	-0.04	

表中, r_{\odot} 为太阳半径, 1.0 表示高度为 1 个太阳半径, 以此类推。表中第一行 1.0 是近似值, 一般取 1.003 作为日冕底层, 从表中数据来看大约取在表三的过渡区 2100 千米处。表中的电子密度取的是原表的极大值, 第三列的电子密度为原表上下两项的电子密度的平均值。在日冕层中电子占绝对多数, 离子的密度很小, 每立方厘米大约只有 106 到 109 个离子^[2]。比较表三和表四可以看出, 两表高度衔接的不太好, 不过, 通过以上各表并不影响我们得到如下结论:

第一点; 太阳大气从光球底部 (光球顶部向下 500 千米) 约上万开到光球顶部下降到 6340 开, 到光球上部 320 千米处的色球底部, 温度降到 4560 开, 高度为 560 千米时, 温度降到最低的 4180 开, 随后, 随着高度增加温度不断升高, 到光球上部 1350 千米处, 温度上升到 6500 开, 这已经恢复到光球表面的温度; 到达色球顶部 2000 千米处, 温度增加到 9

千开(对应表三 1680 千米高度处);从色球顶部向上进入过渡层,温度急剧升高,进入日冕层,温度的升高变慢,到达 2 倍太阳半径时,温度达到最高的 180 万开,随后高度升高温度开始降低。

第二点:存在两个特殊温度变化区。第一个变化区在表二所表示的反变层,出现在由光球顶部温度从 6340 开向上逐渐降温最低到 4180 开,然后又升温,到 1350 千米处又升高到 6500 开,形成两个高温层之间夹着一个低温层的三明治式温度分布结构。第二个变化区在表三所示约 1900 千米以上的过渡区,在这个区域,温度随高度增高急剧升高,形成一个急剧变温层结构。

第三点:由于日冕层几乎全部为电子组成,因此,相应的带正电离子都集中在光球层和色球层,这一点从以上各表不难看出,这就是说,在光球层直到日冕高层之间存在一个由光球层指向日冕层远端的电场。下面将看到,这个电场是很强的,对太阳大气的温度分布起着重要的,关键性的作用。

首先我们来分析形成由两个高温层中间夹着一个低温层的三明治式温度结构的原因,由最简单的热学知识不难明白,若没有某种原因能不断地向中间低温层输送低温物质(另一个原因是不断将低温层的热量不断抽走,这一原因在这种情况下是不存在的),两边的高温层就会通过热传递不断加热中间的低温层,经过一段时间后,温度将趋于一致。也就是说,这种温度形式是不存在的。那么,这些持续不断的低温物质是从那里来的呢?我们注意到,在太阳大气层中的光球层和色球层存在剧烈的对流,如米粒组织和超米粒组织,光球层中的米粒组织是光球层大气与色球层之间的循环气流,它不断地将高温气流传到光球之上,同时色球层的低温气流向下游回光球层;而超米粒组织是色球层大气与日冕层之间的循环气流,它不断地将高温气流传到日冕层,同时日冕层的低温气流向下游回色球层。米粒组织和超米粒组织中气流的流动情况如附图一所示。由平均速率公式^[3]:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (1)$$

和方均根速率公式:

$$v_s = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (2)$$

可以求出分子的平均速率和方均根速率。表五是在不同温度下几种元素的原子由(1)(2)式算得的方均根速率和平均速率(表中括号中的数据)的参考值:

表五:几种不同元素的原子在不同温度下的方均根速率和平均速率。

T 开	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	5*10 ⁵	10 ⁶	1.8*10 ⁶
H(1)	4.97	15.72	49.74	111.23	157.30	211.04
	(4.58)	(14.48)	(45.83)	(102.48)	(144.92)	(194.43)

He(4)	2.46 (2.27)	7.86 (7.24)	24.87 (22.91)	55.66 (51.28)	78.65 (72.46)	105.52 (97.21)
O (16)	1.27 (1.17)	3.68 (3.39)	12.44 (11.46)	27.81 (25.62)	39.33 (36.23)	52.76 (48.61)
Mg(24)	1.01 (0.93)	3.21 (2.96)	10.15	22.70 (20.97)	32.11 (29.58)	43.08 (39.69)
Si(28)	0.94 (0.87)	2.97 (2.74)	9.40 (8.66)	21.02 (19.37)	29.73 (27.39)	39.88 (36.74)
Ca(40)	0.79 (0.73)	2.49 (2.74)	7.86 (7.24)	17.59 (16.21)	24.87 (22.91)	33.37 (30.74)
Fe(55.85)	0.67 (0.62)	2.10 (1.93)	6.66 (6.14)	14.88 (13.71)	21.05 (19.39)	28.24 (26.01)
Ni(58.69)	0.66 (0.61)	2.09 (1.93)	6.61 (6.09)	14.77 (13.61)	20.89 (19.25)	28.03 (25.82)
e	212.23 (195.53)	674.28 (621.20)	2123.27 (1956.54)	4767.91 (4392.64)	6742.84 (6212.13)	9046.47 (8334.45)

表中元素符号后的括号内的数为原子量,后面每一格中数据所对应的单位是千米每秒,如氢后第一格 4.97 的意义是在 1 千开温度下氢原子的方均根速率为 4.97 千米每秒,以此类推;表中最下面一行是电子气在不同的温度下对应的方均根速率和平均速率。

从表中可以看出,在各种元素的原子中,氢的平均速率和方均根速率在同一温度下是最高的,其他元素的粒子的速率比这还要低,由麦克斯韦速度分布律知,2 倍平均速率或方均根速率内的分子数几乎已经包括了一个分子系统中的所有分子(参看附图二),大于 2 倍平均速率或方均根速率的分子只占极少数,氢在一百八十万开的日冕层最高温度下,平均速率的 2 倍也没有超过太阳表面的逃逸速度(在日冕上百万开的高温区,已经接近在那里的逃逸速度,不过在那里除了电子几乎没有其他离子),因此,太阳大气中绝大部分元素的原子都不会逃逸太阳,相反,绝大部分太阳大气都会被太阳的引力场束缚住,不会飞向空间。由表可以看出,在 1 万开温度下,除了电子气的平均速率超过了太阳表面的逃逸速度 617.7 千米每秒外,其他所有的粒子的平均速率都比逃逸速度小的多,设到达色球上部的气体温度为 1 万开,我们先考虑除了电子外的粒子(也包括离子)在重力场作用下的行为,由于这些区域的粒子密度很低,粒子的平均自由程很长,粒子之间的相互碰撞占用的时间与粒子的自由运动时间相比可以忽略,在太阳重力的作用下,那些运动方向指向太阳外部或斜向外部的速率大的粒子在完成一次碰撞过程中将比同方向的速率低的粒子上升到更高的高度,多次碰撞的结果是,速率高的粒子与速率低的粒子之间发生明显的分离,速率高的粒子将位于速率低的粒子之上,同时速率低的粒子在重力的作用下起初会以分散的形式下降,在下降过程中,在气体内部的扰动下会逐渐集中起来形低温粒子流流向色球底部。在稀薄的气体中还会形成

大量的随机局部低温冷点^[4]，这些随机局部低温冷点在引力作用下比单个低速率粒子下降的距离更大，这些随机局部低温冷点通过相互间汇合或在气体内部的扰动下会集中起来形成更大的低温粒子流流向色球底部。这些低速率粒子进入光球层的过程中又会重新被加热。另一方面，在一个分子系统中，虽然速率高的分子的数目很少，但是它们之间的速率差别却很大，进入高处的高速率粒子在重力作用下加上高处气体更稀薄，粒子的平均自由程更长，粒子之间由于速率的巨大差别会发生急剧的分离，由于高速率粒子意味着其对应于高温，因此，在这粒子按速率急剧分离的区域温度也相应的发生剧烈的变化，这样以来就形成色球上部的过渡区温度由内向外温度急剧升高的现象（由于电子分离造成过渡区温升加剧的问题将在下面讨论）。这种在引力场作用下的稀薄气体中，由于粒子的平均自由程很长，因而使得粒子的速率发生分离的作用称为引力速率过滤作用。在太阳色球层的稀薄大气中低速率粒子沿重力方向降落的现象可以通过粒子运动时，由粒子辐射的多普勒效应来测定。不过，从色球层产生的抛向日冕层的大量日珥经过抛物线轨迹又返回色球层的现象即可推知，色球层中的低速率粒子会沿重力方向降落到色球层的底部。至于粒子降落的形式，一般先是以分散的形式降落，然后逐渐集中形成粒子流形式降落。米粒组织和超米粒组织本身就是一种高温气体上升，低温气体下降的对流形式。

电子在色球上部不仅受到引力速率过滤作用，而且，更重要的是受到从色球层直到日冕层顶部的大范围的比电子受到的引力速率过滤作用大的多的电场力速率过滤作用。从表五可以看出，在 2 倍太阳半径处，温度已达到 180 万开，电子的平均速率达到 8334.45 千米每秒，这已经大大超过了在这个高度的逃逸速度（比太阳表面的逃逸速度小，约为 436.8 千米每秒），要保证绝大多数电子不会飞散逃逸，作用在电子上的电场力必须达到：

$$\frac{f}{f_0} = \frac{mv^2}{r} \div \frac{mv_0^2}{r} = \left(\frac{2v}{v_0} \right)^2 = \left(\frac{2 \times 8334.45}{436.8} \right)^2 = (38.16)^2 \approx 1456$$

式中 f 为电子受到的电场力， f_0 为作用在电子上的引力， r 为自太阳中心到 2 倍太阳半径处的距离， v 为电子平均速率 2 倍的速率， v_0 为该处的电子的逃逸速度。由结果看出：在 2 倍太阳半径处，电子受到的电场力约为所受到的引力的 1456 倍，这是一个非常大的数值。正是由于该处电子受到的电场力如此之大，才使得绝大多数电子不会逃逸飞散。在色球上部的过渡区，由于其更接近内部，若没有带正电的离子的加入，电场强度会比外部更强，但是，由于过渡层离子的密度较大，相应的电场强度就不一定增大，具体为何，要待实验来确定。过渡区电子在强大电场力作用下，由于该区域的电子密度很小（参看表三），电子的平均自由程也很长，电子会按速率差异发生剧烈分离（如附图三所示），那些速率较低电子在电场力作用下根本不可能达到高处而纷纷下降，在电场力作用下稀薄电子气中低速率电子向色球底部运动的情形与上述稀薄气体中低速率粒子相同，最终都会形成低温电子流流到色球下部。而速率较高的电子会按速率差别发生剧烈分离（由于对电子来说，所受的电场力比起所受的引力大的多，分离程度也比粒子强的多），电子的速率越高，所能达到的高度越高，只

有速率极高的电子才能达到最高高度。同样道理,由于高速率电子对应于高温,这样,在电子速率发生剧烈分离的过渡区,温度分布也发生相应的剧烈变化,这就是造成过渡区温度随高度升高迅速升温的另一个原因。这种在稀薄气体中,由于带电离子的平均自由程很长,在强电场作用下使得离子的速率发生分离的作用称为电场力速率过滤作用。在过渡区,电场力速率过滤作用同样会使过渡区的离子(都是带正电的离子)发生分离,不过分离作用的大小与电子有些差别,其一是方向相反(向上),其二是分离作用还与离子所带电荷的大小有关,这样,在相同速度下那些质量较大的容易电离的元素的原子就有可能比质量较小的难于电离的元素的原子达到更高的高度。在此要说明的是,电子受到的电场力是它受到的引力的1456倍,由于核子的质量约是电子质量的1824倍,因此,并不能使离子受到的电场力大于离子所受到的引力,如在日冕的高温区(按50万开到1百万开计算),氢离子(只能是一次电离),它所受到的电场力小于所受到的引力的五分之四,十三次电离铁所受到的电场力小于所受到的引力的三分之一。除了氢元素外,其他元素的离子,由于核内还有与质子数等量的中子,因此,在日冕层中的原子,即使是完全电离,它所受到的电场力也一定小于它所受到的引力的二分之一。

上面说明了太阳色球层和日冕层的稀薄大气中温度随高度增加而增大的物理机制,现在要接着说明,在这种物理作用机制下的温度分布有着自平衡功能。说明如下:当日冕层中的电子和离子由于相互碰撞,离子会跃迁到更高能级进入激发态,然后离子会重新回到低能态,同时放出一个光子,放出的光子离开日冕层后,会带走相应的能量,大量的光子的逃逸会带走大量的能量使日冕层的温度降低,同时,日冕层中由于电子的相互碰撞和光发射产生的低速率电子在强大的电场力作用下起初会以分散的形式下降,在下降过程中,在电子气内部的扰动下会逐渐集中起来形低温电子流流向色球底部。在稀薄的电子气中还会形成大量的随机局部低温冷点,这些随机局部低温冷点在电场力和引力作用下比单个低速率电子下降的距离更大,通过相互间汇合或在电子气内部的扰动下会集中起来形成更大的低温电子流流向色球底部,一般来说,起初以分散形式降落,待逐渐集中后就变为低温电子流流向色球底部。当这些低速率电子进入光球层上部的过程中又会重新被加热。另一方面,从色球层上升的气流在上升过程中速率高的电子被电场力和引力速率过滤作用分离出来,并进入色球层,补充由于光辐射所损失的能量,当补充的能量与失去的能量相等时,日冕层的厚度和温度分布就达到稳定的状态。位于色球层中的离子中产生的低速率离子(有可能与低速率电子结合变为原子或低电离度离子),在重力作用下也会通过与低速率电子相同的过程形成低温离子流流向色球底部,同时上升的高温气流在过渡层中的引力速率过滤作用和电场力速率过滤作用下,高速率和高电离的离子被分离出来进入日冕层,补充减少的离子。不过离子对日冕层的高温分布的贡献远比电子所作的贡献小。日冕层的这种高速率的电子和离子的流入和低速率的电子和离子流出使得日冕层的厚度与温度分布能够处于相应的平衡态。例如。当太阳活动加剧时,进入日冕层的高速率电子和离子增多,日冕层变厚,同时电子与离子的总数和碰撞数增大,日冕层的能量损失增大,产生的低速率的电子和离子的数目增大,低速率的电子和离子

流向色球底部的回流的数量增多,当单位时间内进入日冕层的高速率电子和离子数与流出日冕层的低速率的电子和离子的数目相等时,日冕层就停止增厚,温度分布相应的达到平衡态分布。同样的分析过程,可以得到太阳活动减弱时的日冕层的厚度与温度分布情形。在此要说明的是,从色球层,日冕层向下运动的低速率粒子,离子和电子,当不是由对流方式降落,而是以分散方式降落时,一般来说,它们是通过相互碰撞,传递式逐渐向低处降落的。由于这个问题分析起来太长,本文不打算叙述,可参阅《碰撞加速原理》^[5],在那里给出了基本分析方法。在日冕层内部还应该存在局部的对流,不过这里基本上都是电子,电子的对流不太好观察。再加上日冕层电子的质量非常小,密度又很低,这样的电子气体极易被太阳黑子,耀斑,谱斑,电磁场和日珥等影响,难以形成象光球层,色球层那样的较为稳定的由电子气组成的米粒组织,这使得我们更难观察到日冕层内部的电子对流。

能够使日冕层达到一定厚度的另一个重要原因是日冕层的电子密度很低和离子密度更低,由于日冕层中的能量损失主要是由电子与离子的碰撞引起的,一个系统的电子和离子的密度越低就意味着相互碰撞频率越低^[6],这样的系统的能量损失就越慢,当单位时间内由光球层,色球层向日冕层输送的高速率电子和离子的数目与通过各种方式降落到光球层,色球层的低速率的电子和离子的数目相等达到平衡时,日冕层的电子密度和离子密度低使得日冕层能将更多的高速率的电子和离子保持更长的时间,日冕层达到平衡态后就可以有更大厚度。

太阳大气中的其他物理过程也可以使日冕层中的电子与离子数增大和能量增高,如日珥,电磁场,黑子,耀斑,谱斑等等,由于它们即不能使日冕层的温度分布达到动态平衡,又不能解释过渡区温度的急剧变化特性,与之相反,由这些因素引起的太阳大气的不平衡分布,需要通过引力速率过滤作用和电场力速率过滤作用来其达到平衡,因此,它们都不能作为引起从色球层到日冕层温度分布形式的真正原因。

综上所述,针对太阳色球层,日冕层的分子密度很低,分子的平均自由程很长的特点,同时引入引力速率过滤作用和电场力速率过滤作用的物理机制分析得出:在引力作用,尤其是电场力作用下,由光球层和色球层底部流向日冕层的速率不同的分子(离子,粒子和电子)会逐渐发生分离,在色球层上部,由于分子的密度很低,分子的平均自由程很长使分子按速率发生了剧烈的分离,这种分离使温度分布随高度增高剧烈升温,形成了过渡区;进入过渡区的高速率分子(主要是电子)被电场力进一步分离,那些更高速率的分子越过过渡区到达更高高度,分子的速率越大,它所能到达的高度越高,这使得温度(确切地说,应该是电子气温度)随高度增高而不断增高,直到色球顶部为止。那些被分离出来的低速率分子以各种形式重新回到色球底部,在那里形成了低温区,随后进入光球层,被重新加热后又重新上升进入色球层,这样就完成了一次循环,紧接着下一个循环就开始了。这样一来,整个太阳大气的温度分布特点都得到了圆满的解释。由于在引力速率过滤作用和电场力速率过滤作用下的太阳色球层和日冕层的温度分布和日冕层厚度(色球层也有厚度变化)有着自平衡功能,

或更确切的说对太阳大气的能量输出与输入过程有着自平衡功能,因此,就目前来说这种物理机制具有不可替代的优越性。在日冕层中稀薄的电子气,由于密度低,温度高,电子的运动非常剧烈,在日冕层中会形成大量的随机局部高温热点和冷点^[7],这些随机局部高温热点和冷点各自之间又可能融合成更大的高温区和低温区,在电磁场等其他因素影响下(日冕层中电子的运动所引起的电磁场变化就非常复杂),可能形成非常复杂的组合形态和运动方式,出现了一些我们一直不能很好的解释的物理现象,本文就是通过将统计物理学知识与本人对随机脉冲涨落的研究相结合并运用到太阳大气中得出的,虽然得出的一些数据可能有些偏差^[8],如在日冕层最高温度处电子受到的电场力是所受到的引力的1456倍,但是在基本原理方面,应该是正确的。本文对太阳大气所做的分析和结论,对其它有稀薄大气的天体,尤其是外层有稀薄电子气的天体同样适用。最后要说明的是,文中对分子在电场力和引力作用下不同速率的分子之间如何分离,分离后又如何运动只是作了描述,并没有做数学分析,这个问题将在适当时候补充,有兴趣的读者也可自行讨论。读者还可以就本文提出的思路,对太阳大气的其他一些还没有得到圆满解释的和没有得到合理解释的物理现象进行研究。

[1] C.W.Allen 编,杨建译,物理量和天体物理量,上海人民出版社,1976年11月第1版,第204-240页。

[2] 神奇的科学奥秘编委会,天文地理的奥秘,中国社会出版社,2006年1月第1版,第39-46页。

[3] 王竹溪,统计物理学导论,高等教育出版社,1965年9月第2版,第46-56页。

[4] 林诗俊,随机脉冲涨落的数学分析,中国科技论文在线,200603-489

[5] 林诗俊,碰撞加速原理,中国科技论文在线,200601-288。

[6] (美)M.L.库特纳著,萧耐园,胡方浩译,天文学—物理新视野,湖南科学技术出版社,2005年11月第1版,第94-112页。

[7] 林诗俊,随机脉冲涨落的物理概念,中国科技论文在线,200603-133。

[8] 林诗俊,关于分子的速度分布,中国科技论文在线,200604-66。

About the Temperature Distribution of the Sun's Atmosphere

Lin Shijun

(Design Institute, No. 26, Construction Road in Urumqi,

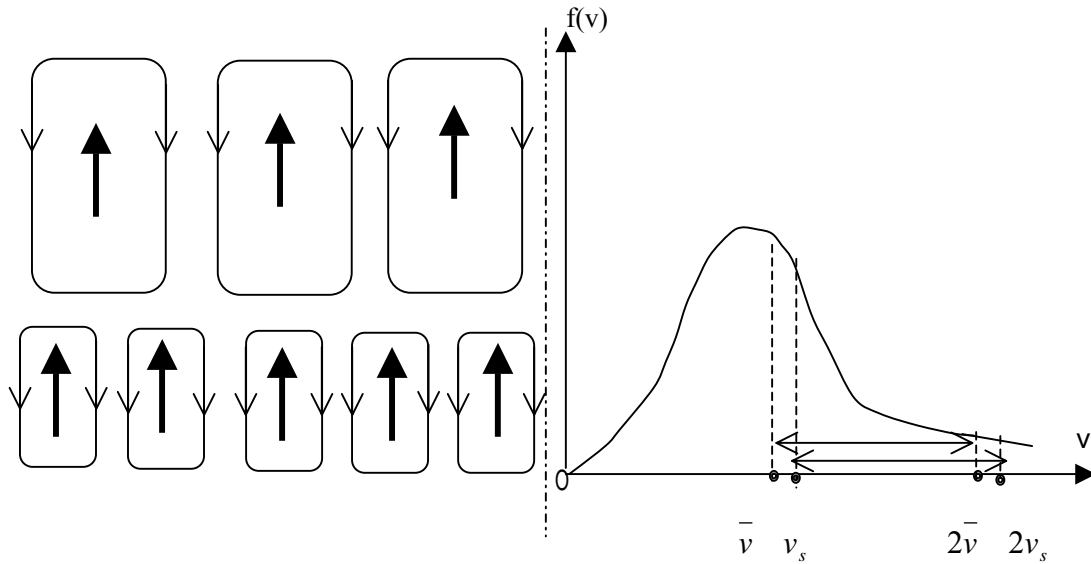
Xinjiang, 830002, E-mail: dadehe-2003@163.com)

abstract

In this paper analyzed the temperature distribution of the sun's atmosphere. Think the high temperature distribution of the chromosphere and the corona is because of the mean free path of the molecules (ions, particles and electronics) of rising high temperature gas in the chromosphere and the

corona very long. Thus, under the speed filtration action of gravitational force and electric field force the violent separation of molecules is to take place as their speed.

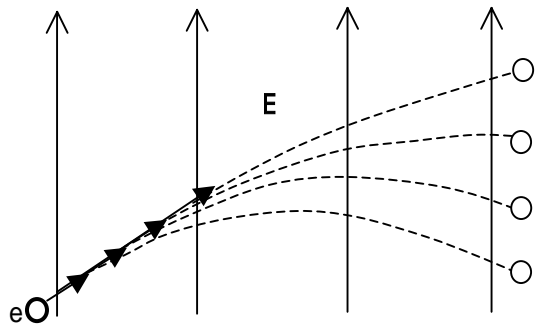
Keywords: The mean free path, The speed filtration action of gravitational force, The speed filtration action of electric field force, Photosphere, Chromosphere, Corona, Atmosphere of the sun.



附图一

附图二

附图一中，每一个矩形框表示一个米粒组织，下部带箭头矩形框表示光球层的米粒组织，上部带箭头矩形框表示色球层的超米粒组织，向上的箭头表示上升气流，向下的箭头表示下降气流。图中只画出了垂直截面的一部分，实际的米粒组织是分布在一个层面上的。



附图三

附图三中圆圈表示电子，E 表示电场，向上的一组箭头表示电场的方向。图中表示一个电子在运动方向相同速度大小不同时，经过一个平均自由程在电场中所能达到的高度，图中由电子到箭头末端的长度表示速度的大小，箭头的方向表示电子的运动方向，虚线表示电子的运动路径。