

宇宙真空学的发展

达道安^{1*} 杨亚天²

(1. 兰州空间技术物理研究所 兰州 730000; 2. 福建师范大学物理系 福州 350007)

Advance of Emerging Space Vacuum Science

Da Daoan^{1*}, Yang Yatian²

(1. Lanzhou Institute of Space Technology and Physics, Lanzhou 730000, China;

2. Fujian Normal University, Fuzhou 350000, China)

Abstract An emerging space vacuum science, initiated by the author, was tentatively discussed in a thought provoking way, based on the history of research, development and applications of vacuum science and technology. Space Vacuum Science studies a variety of important issues, including but not limited to the atmosphere distributions on the planet, escape of planetary atmosphere, vacuum characteristics of the spacecraft ambient, space-vacuum measurement techniques, and the physical nature of space vacuum. The discussions focused on: (i) The concepts of the physical models and mathematical derivations; (ii) Theories governing density distribution of planet's atmosphere, mechanisms accounting for escape of the planet's atmosphere, operation principles responsible for cosmic vacuum measurement techniques, and in-depth understanding of the Space Vacuum; and (iii) The calculated results of the atmospheric density distributions of nine solar planets, total atmospheric mass of the Earth, Venus, Mars, and the moon, the life-time of their atmospheres, and possibility of water existence on the moon and Mars. The calculated and observed results were found to be in good agreement.

Keywords Space vacuum, Planetary atmospheric, Atmospheric escape equation, Martian water, Moon water

摘要 研究了真空科学技术发展及应用的历史过程,建立了宇宙真空学。宇宙真空学是研究行星表面以上空间大气分布规律、行星大气逃逸理论、航天器周围的真空环境特性及宇宙真空测量理论与技术、宇宙真空的物理本质等的学科。本文系统地叙述了作者创立《宇宙真空学》的逻辑思维、建立模型的物理概念以及理论推导的数学技巧。给出了行星大气密度分布理论、行星大气逃逸理论、宇宙真空测量理论及宇宙真空的物理本质等方面的研究结果。作为理论应用的实例,计算了太阳系行星的大气密度分布,地球、金星、火星、月球大气的总质量及大气逃逸寿命,月球、火星表面水存在可能性的理论分析,与实际观测结果符合。宇宙真空学对空间应用及行星探测工作有重要的理论和实际指导作用。

关键词 宇宙真空 行星大气 大气逃逸方程 火星水 月球水

中图分类号:TB7;TB79 文献标识码:A doi:10.13922/j.cnki.cjovst.2015.05.01

人类在地球表面大气环境中生存了数百万年,人类对真空的认知经历了几千年历史时期。公元前六世纪,中国人在冶铁时采用风箱(古称鞴)鼓风技术提高炉温。战国时期的《老子道德经》书中说鞴“虚而不屈,动而愈出”,说明风箱鼓风的过程是利用了低真空和环境大气之间的压力差产生吸气的原

理。到了16世纪欧洲人才发明了风箱。公元五世纪晋朝医生葛洪在《肘后备急方》书中介绍了“拔火罐”治病的方法。使用燃烧的火焰把罐中的气体加热膨胀赶出,火焰熄灭后再冷却形成真空,利用大气压力使火罐被吸附在皮肤上,这些技术至今仍在使用。但那时没有说明发生以上现象的物理原因,也

收稿日期:2014-06-23

* 联系人: E-mail: dadaoan@sohu.com

没有实验测量和数学表达。

欧洲人遇到同样的问题时,形成了以古希腊哲学家亚里斯多德(Aristoteles,公元前 384—322)为代表的观点:大自然界不存在真空,其格言是“大自然厌恶真空”。16 世纪罗马人用水压机抽汲矿井中的水,当水压机的活塞被提上来时,在水管的下部留下一段真空空间,周围的水就会打开水管底部的单向阀门涌入其中填补真空空间,说明大自然不允许存在真空,该观点统治了 1800 多年。当人们重复水压机汲水动作时,管内水位不断提高,直到水从出口溢出。直到 17 世纪发现提升水位的高度有限制,于是请科学家伽里略(Galileo)到现场指导,伽里略亲自测量其限制值为 10 m;伽里略分析后认为:由于汲水管插入水池和大气连通,汲水高度和大气重量产生的压力有关。於是,让他的学生托里切利(Torricelli)用实验验证。托里切利想到了用比重为 13.6 g/cm^3 的水银替代水,10 m 水柱的高度可降为 760 mm。1643 年,他的同学瓦里安(Viviani)把水银灌满在长度约 1 m、一段封口的玻璃管中,倒置在水银池中,测得大气压力等于垂直高度为 760 mm 水银柱的重量产生的静压力。这个实验得到了三个非常重要的科学结论,提高了人们对真空的认识:①大气压力是由大气重量产生的;②地球表面的大气压力值等于 760 mm 高汞柱的静压力;③在玻璃管封闭端水银面的上面形成了约 240 mm 长的人造真空空间。图 1 给出了实验示意图。此后,人们开始接受在把环境大气隔离的条件下可以人工获得真空的事实^[1-3]。

伽利略、托里拆利、瓦里安的实验测量了大气压力并证明用人工技术可实现真空。此前,阿里斯多德、笛卡尔都认为自然界不可能存在真空,任何真空

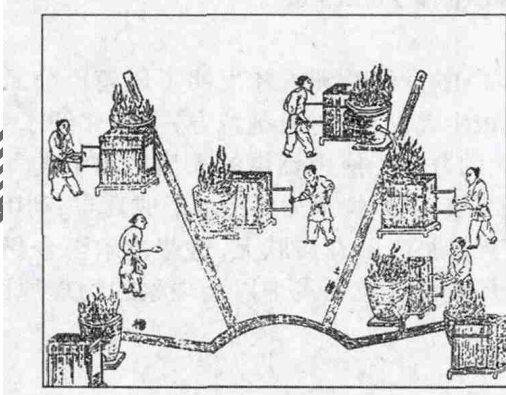


图 1 用风箱鼓风炼铁(采自《天工开物》)

. 1 Application of low vacuum bellows blast in ancient China

一经获得,附近的大气就会将它填满,坚持大自然界不存在真空的论点。上述实验证实:自然界阻碍在地面形成长久真空的本领是有限的,从此打开了人工真空科学技术的大门。1650 年德国人葛利克(Otto Von Guericke)和英国人玻义耳(R Boyle)先后发明抽气机以后,使真空的产生变得更加具有实际意义。近四百年来,科学家充分发展了真空获得、测量、检漏、工程及应用技术,研究不同稀薄程度的大气如何影响热学、光学、声学、电磁学、化学、生命科学特性等,使真空科学技术的进步达到近于完美的地步,地面真空科学技术从获得、测量、应用等方面形成了完整系统的真空科学技术体系,广泛应用到人类社会生产、科研、生活的诸多领域。人类发现了人工真空环境,发展了人工地面真空科学技术,真空科学技术回报了人类,人类生存离不开真空科学技术,真空科学技术极大地推进了人类社会的进步。

如果从真空的形成过程和真空科学技术的应用范围出发,到目前为止人们主要研究了在行星表面大气环境下,用技术手段在密封容器内获得及应用真空的科学技术。密封容器内气体的压力主要由气体分子动量变化产生,大气重量产生的压力可以忽略。气体分子密度和温度在空间和时间上是均匀分布的,容器内的稀薄气体处于平衡态,遵守理想气体状态方程,可总称为人工真空科学技术,该部分主要技术内容已被归纳、整理、汇编在由作者主编的《真空设计手册(第 3 版)》里。

宇宙真空学研究的是行星表面以上的宇宙真空环境,在行星重力场作用下大气分子随高度的分布

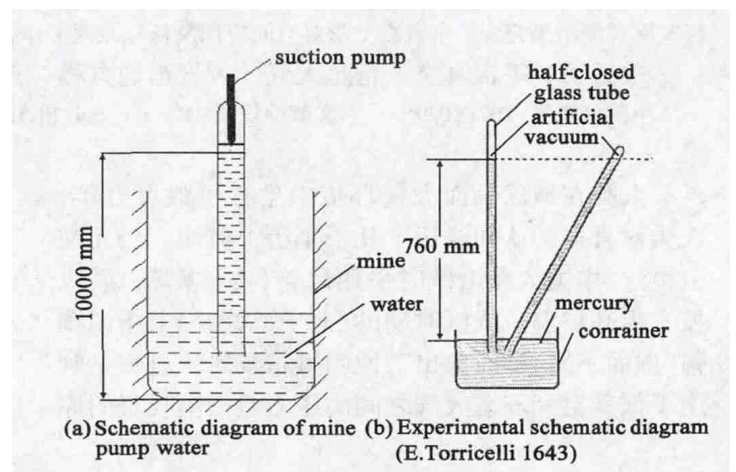


图 2 测量大气压力并发现人工真空的实验示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of atmospheric pressure measurement and obtained low vacuum obtained

律。宇宙真空是开放的、无容器、无边界的,具有无限容量和无限抽速的天然真空,大气分子处于非平衡态,完全不同于地面真空科学技术体系的研究对象。追溯历史,最早发现这一现象的是受托里切利实验的启发,法国科学家帕斯卡(Pascal)在 1647 年 9 月 16 日和皮埃尔(Perier,帕斯卡的姻兄)在克莱蒙佛朗(Clermont-Farrand)附近的多姆山进行了一项著名的实验。他们在山顶和山脚分别测量大气压力,发现大气压力仅随离地面高度的增加而减小,并发现大气压力表现为各向同性。如果把帕斯卡的实验结论外推到宇宙空间,就可得出宇宙空间处于天然的真空状态。这一结果预示了随着人类能力的增长,有朝一日总会到达高远的宇宙空间,那里是广袤无限的真空世界。

时钟走过了约三个世纪,20 世纪中期人们发明了火箭技术,1957 年苏联用多级火箭把第一颗人造地球卫星送入地球轨道,1959 年加加林驾驶宇宙飞船进入宇宙空间。1969 年美国用阿波罗飞船把宇航员送上月球。2003 年中国把宇航员送到地球轨道并安全返回,人类具有进入宇宙太空的能力。近年来世界各国相继开展探测月球、火星、金星、小行星的活动。所有的空间探测器、卫星、飞船不仅飞行而且生存在宇宙真空环境中,长时期与宇宙真空环境发生相互作用,影响航天器的工作性能、可靠性及寿命。当火箭上升时与大气层摩擦发热,需加防护罩。航天器绕地球轨道飞行时遇到大气阻力,使轨道不断降低,影响航天器寿命。航天器返回地面再入大气层产生的热量,使航天器温度升高,并使航天器周围大气分子电离为等离子体,出现黑障现象等。迫切需要弄清从行星表面向上一直到行星际、星系间大气密度空间分布以及随时间的演变规律、在轨飞行航天器周围气体分子分布状态以及与此相关的真空测量、校准技术。并期望借此理论给行星探测活动一些理论指导或者给探测结果作出合理的解释和预测。例如,月球表面为何处于极高真空状态?火星表面为何没有液态水存在?如果航天器在行星表面降落、着陆、巡航、勘测、取样及返回,特别是航天员的出舱活动,必须了解宇宙及行星表面以上的真空或大气特性。这些问题的回答已经超出了地面人工真空科学技术的领域,必须建立新的《宇宙真空学》理论。在自然界中,人们不仅可以制造出人工真空环境,而且可以利用天然真空环境。两种不同类型的真空环境,影响气体分子运动的作用机理不同,

描述它们运动规律的数学方程也不一样,自然应该有两个不同的真空学理论。

前日本真空株式会社理事长林主税在 2002 年中国真空学术年会所作的“21 世纪真空科学技术展望”中提出了“21 世纪的真空科学技术是宇宙真空时代”的预言^[4]。前中国工程院院长宋健在 2004 年 7 月给《真空设计手册(第 3 版)》写的序言中指出^[5]，“20 世纪下半叶,人类航天事业的出现,卫星、飞船、登月、深空探测都迫切需求关于宇宙真空的科学知识和开发利用以及对付真空的技术。”因此,深入地研究宇宙真空特性的任务摆在了真空科学技术工作者的面前。

长期以来,科学家通过天文观测和航天器探测得到了大量的行星大气特性的数据,拍摄了大量的照片,经过分析整理得到了许多观测结论。迫切需建立完整的理论体系解释这些观测结论,指导今后宇宙真空的探测工作。该理论体系必须满足四个条件:理论本身的自洽性,与实际观测结果的符合性,和前人理论的一致性以及对新现象的预见性。

基于上述的思路,作者经过十多年的思考、研究,建立了宇宙真空学的理论体系,内容包括:行星际大气密度分布律,行星大气组分分布律,行星大气压力分布公式,行星大气逃逸方程,行星大气寿命、行星表面水汽存在的寿命、行星表面冰存在的寿命等数学表达式,在轨航天器周围真空环境以及宇宙真空测量的理论与技术,宇宙真空的物理本质等,形成了较完整的宇宙真空学的理论体系。

1 宇宙真空学的概念和内涵

真空的本意是虚空,即没有任何实物粒子的空间。但在实际使用中,有两个完全不同的概念;一是低于周围环境大气压力的空间。由于在地面上不能自然生成真空,但可以利用人工技术获得人造真空环境,使密封容器中的大气压力低于周围环境大气压力,称为工程技术真空。二是物理真空或者宇宙真空,按照现代物理学的认识,物理真空是量子系统能量最低的能态(基态)。两种不同的真空概念在工程技术的实现上没有严格的差异,只是实现的程度和难易不同。到目前为止,人们用人工技术获得了 10^{-11} Pa 的极高真空度^[6],大气分子密度约 10^4 cm^{-3} 。人类进入宇宙空间后发现远离地球的空间,大气密度更低,存在着没有实物粒子的局域物理真空环境。

宇宙空间大气密度分布如何用数学表达呢? 1859年麦克斯韦研究了气体分子按动量和坐标在相空间的分布后,推导出了麦克斯韦速度分布公式。玻耳兹曼研究了处于外场中气体按总能量的分布,并认为外场中分子的势能只是它的质心坐标的函数 $U=U(x,y,z)$,像引力场一样沿 Z 轴是均匀的,得到了外场中的玻耳兹曼大气分子密度分布公式。用该公式计算近地表面大气密度随高度分布时,符合性较好。但当计算宇宙中行星大气总分子数时给出了发散的结果^[7],这一问题早被前苏联理论物理学家、诺贝尔奖获得者 Landau 指出过^[7]。

可否利用地面真空科学技术理论的拓展延伸来解决这个问题呢?众所周知,地面真空科学技术的研究对象是针对一个有限容积的真空容器中,气体分子经过相互碰撞或和容器碰撞达到平衡态时,采用有限抽速和抽气量的真空机组产生人造真空环境的理论,忽略了重力场的作用,气体分子不能逃出容器,用气体分子处于平衡态时状态方程 $p=nKT$ 表达气体压力是足够精确的。而宇宙真空环境是开放的、气体分子在行星引力场的约束下处于缓慢变化的非平衡态或准静态。显然,在宇宙真空中,由于容积无限且不能忽略行星引力和气体的逃逸,用流体静力学方程计算大气压强或总分子数时出现了发散,与状态方程是不相容的,要解决这一难题必须另辟蹊径。

2 问题的发现与解答

欲求出行星大气分子分布律,必先知道行星大气的总分子数。然而,当用玻耳兹曼公式计算行星大气总分子数 N 时,得到的结果是发散的。

$$N = \int_{r_0}^{\infty} n(r) 4\pi r^2 dr = n_{\infty} \int_{r_0}^{\infty} e^{\frac{GmM}{kTr}} 4\pi r^2 dr = \infty \quad (1)$$

式中, G 为引力常数; M 为行星的质量; r_0 为行星的半径; m 为气体分子质量; k 为玻耳兹曼常数; T_r 为 r 处气体分子的温度; n 为分子的密度; r 为距行星质心的距离。

L. D Landau 和 E. M Lifshitz^[7] 发现这一问题,指出:根据公式(1)计算的行星大气密度在无穷远处具有不等于零的有限值。但是有限数量的大气质量不可能以到处都不等于零的密度分布在无限大的宇宙空间。Landau 等暗示了三个问题:①有限的行星大气分子总数不能以气体分子密度不为零的有限值分布在全宇宙空间。②表征行星大气密度分布的玻

耳兹曼公式(BF)不能在全宇宙空间范围适用。③要正确表征宇宙空间行星大气密度分布,需找出新的行星大气密度分布律。

最早讨论这一问题的是英国天体物理学家金斯(Jeans)的经典著作《气体动力论》The dynamical theory of gases^[8-11]。他仍然承认玻耳兹曼分布的正确性,并且默认行星大气分子的总数为有限值,把BF公式的适用范围限制在人为规定的高度 H_{eff} 以内, H_{eff} 是气体分子平均自由程等于“标准高度 H ”的空间, $H=kT/mg$ 。假定全部分子在 H_{eff} 以内,而在 H_{eff} 以外没有气体分子存在,於是得到了部分可满足实际需要的结果。这是非常粗略的近似,没有从理论上根本解决发散的问题。

3 宇宙真空学理论的建立

要找出玻耳兹曼分布律出现发散问题的原因,必须回顾它的推导过程。

行星大气系统的分布函数原则上可由 Gibbs 分布函数 $f \propto A \exp[-E(p,q)/kT]$ 表示,能量 $E(p,q)$ 为动能和势能之和,动能与分子的动量相关,势能与分子的位置相关。由于动量(或速度)的几率和位置(坐标)的几率是彼此独立的,分布几率可以分为两个因子的乘积。把动能和势能表示为 $K(p)$ 和 $U(q)$,则 $f \propto A \exp\{-[K(p)/kT + U(q)/kT]\}$ 。麦克斯韦利用动能的分布函数,得到了气体分子速度的麦克斯韦分布律。当考虑处于外场中的气体分布并且认为势能只是它的质心坐标的函数时,例如中心力场包括引力场,势能就是分子能量中一个独立的可加量。此时分子速度的麦克斯韦分布律不变,而按质心坐标的分布由

$$dN_r = n_0 e^{-\frac{u(x,y,z)}{kT}} dV \quad (2)$$

决定,公式给出了 $dV=dx dy dz$ 中的分子数,而

$$n_r = n_0 e^{-\frac{u(x,y,z)}{kT}} \quad (3)$$

是 $u=r$ 处的分子密度, n_0 是 $u=0$ 处的分子密度。式(3)称为玻耳兹曼分布律。

例如在沿 z 轴方向的均匀的行星引力场中, $U=mgz$, 气体分子密度分布由

$$n(z) = n_0 e^{-\frac{mgz}{kT}} \quad (4)$$

决定。在距离行星很远的位置,引力场用牛顿公式描述,此处势能变为零。式(3)仍给出气体密度不为零的有限值。这说明仅考虑行星引力作用的行星大气密度分布律是不会收敛的。分析指出在宇宙空间

约束大气分子的力,除引力外还应考虑其它力的存在,例如计算了大气分子的自引力,仍然不能使行星大气密度分布收敛,于是提出物质分子是由基本粒子和真空构成的猜想,把真空作为物质的组成要素之一,认为真空是连续、均匀分布在宇宙空间的能量场,作为一种力的传介质,它可以传递物质间的四种作用力,引力、电磁力、强作用力、弱作用力。真空充满在物质内部的微观空间和物体间的宏观空间以及宇宙宏观空间,所有的物体内部都包含有真空并在外部真空场中运动。当物体作加速运动时物体内部的真空场会和外部的真空场发生能量交换作用,通过物质内部的真空场能流密度增大,或者密度被压缩,从而产生真空对物质的作用力,使行星大气总质量收敛。

考虑了宇宙空间其它的作用力后,作者在玻耳兹曼公式中引入新的归一化因子 $g(r)$,得到修正后的玻耳兹曼公式为

$$n(r) = g(r) \cdot n_B(r) \quad (5)$$

式中 $n_B(r)$ 为遵从玻耳兹曼分布的大气密度,由式(6)给出。

$$n_B(r) = n_0 \exp\left\{\frac{GMm}{kT}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right)\right\} \quad (6)$$

在式(6)中,取星球表面即 r_0 处的势能为零。

采用这种方法,不引入新参数,即可进行解析计算,既克服了用式(6)计算行星大气总分子数出现的发散困难,又可得到合理的结果。

从(6)式看出,由玻耳兹曼分布得到的大气总分子数为

$$N_B = \int_0^{\infty} n_B(r) 4\pi r^2 dr = n_0 \int_0^{\infty} \exp\left\{\frac{GMm}{kT}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right)\right\} 4\pi r^2 dr \quad (7)$$

由此可见

$$n_0 \exp\left\{-\frac{GMm}{kT}\frac{1}{r_0}\right\} \int_0^{\infty} dr \cdot 4\pi r^2 \leq N_B \leq n_0 \int_0^{\infty} dr \cdot 4\pi r^2 \quad (8)$$

即总分子数 N_B 是以 r^3 发散的。若取 $g(r) = (r_0/r)^s$, $s > 3$ 时积分收敛。 s 越大,行星总分子数收敛得越快。考虑到:①收敛速度合理,以使计算结果与近地表面的玻耳兹曼公式及常用的大气模式符合;②该公式可以进行数学解析运算,选取 $s = 4$;③ $g(r)$ 是无量纲的, $g(r)$ 的表达式取

$$g(r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^4 \quad (9)$$

这时式(5)改为

$$n(r) = n_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^4 \exp\left\{\frac{GMm}{kT}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right)\right\} \quad (10)$$

式(10)称为修正的玻耳兹曼分布公式(RBF),消除了玻耳兹曼分布律公式的发散问题。

4 RBF 公式合理性验证

4.1 行星大气的总质量表达式

由式(10)可导出大气分子总数公式

$$\begin{aligned} N &= \int_{r_0}^{\infty} n(r) 4\pi r^2 dr = n_0 \int_{r_0}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r}\right)^4 \exp\left\{\frac{GMm}{kT}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right)\right\} 4\pi r^2 dr \\ &= \frac{4\pi n_0 r_0^4}{r_{DY}} \{1 - \exp(-\frac{r_{DY}}{r_0})\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{其中: } \frac{r_{DY}}{r_0} = \frac{GmM}{kT} \quad (12)$$

当 $r_{DY}/r_0 = r_0/H \gg 1$ 时,

$$N = \frac{4\pi n_0 r_0^4}{r_{DY}} = \frac{4\pi r_0^2 kT}{mg} n_0 \quad (13)$$

$$M = Nm = \frac{4\pi r_0^2 kT n_0}{g} = \frac{4\pi r_0^2 p_0}{g}, p_0 = n_0 kT \quad (14)$$

这就是常用估算行星大气总质量的式(14)。对地球上的大气而言,取 $r_0 = 6356.776$ km, $g = 9.81$ m/s², $p_0 = 1.013 \times 10^5$ Pa, $Nm = 5.26 \times 10^{18}$ kg 和实测结果 5.3×10^{18} 符合得很好。

选取月球的相关参数,由式(14)算出月球大气总质量为 9600 kg,与文献[13]给出的估计值 10^4 kg 非常符合。代入火星的相关参数,首次计算出火星大气总质量为 2.9×10^{16} kg,比地球大气总质量约小 180 倍,尚待实验验证。

4.2 行星大气总质量随高度分布公式

计算 $r_0 \rightarrow r_1$ 的球壳内的分子数 N

$$\begin{aligned} N(r_1) &= \int_{r_0}^{r_1} n(r) 4\pi r^2 dr = n_0 \int_{r_0}^{r_1} \left(\frac{r_0}{r}\right)^4 \cdot \\ &\quad \exp\left\{\frac{GMm}{kT}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right)\right\} 4\pi r^2 dr \\ &= \frac{4\pi r_0^2 n_0 kT}{mg} \{1 - \exp\left[-\frac{GMm}{kT}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}\right)\right]\} \\ &= N \{1 - \exp\left[-\frac{GMm}{kT}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}\right)\right]\} \end{aligned} \quad (15)$$

其中最后一步用了式(13)。

令 $h \equiv r_1 - r_0$, 若 $h \ll r_0$, 保留至 h/r_0 的一次项,则

$$N(h) = N\{1 - \exp(-\frac{mgh}{kT})\} \quad (16)$$

$$\frac{N(h)}{N} = 1 - \exp(-\frac{mgh}{kT}) \quad (17)$$

定义 h_q 满足

$$\frac{N(h_q)}{N} = \frac{N(R=r_0+h_q)}{N} = 1 - 10^{-q} \quad (18)$$

根据式(18)计算的数据和美国 NASA 大气模式 MSISE-1990 实测值一致。

4.3 与玻耳兹曼大气分子分布公式的一致性

式(10)也可化为

$$n(h) = n_0(1 - \frac{4h}{r_0})(1 + \frac{h^2}{Hr_0})\exp(-\frac{mgh}{kT}) = n_0[1 - (4 - \frac{h}{H})\frac{h}{r_0}]\exp(-\frac{mgh}{kT}) \quad (19)$$

当 $h = r - r_0$, 若 $h \ll r_0$ 时, $n(h) = n_0 \exp(-\frac{mgh}{kT})$,

又回到了式(6), 说明 RBF 公式在地球表面附近与玻耳兹曼公式是一致的。

4.4 气压计公式

根据式(10), 可推导出

$$\log \frac{p(r)}{p_0} = 4 \log \left(\frac{r_0}{r_0+h} \right) - \frac{r_{DY}}{r_0} \frac{h}{r_0+h} \log e \quad (20)$$

当 $h \ll r_0$ 时, 取 h/r_0 的一次项, 可得

$$\log \frac{p(h)}{p_0} = - \left(\frac{r_{DY}}{r_0} \log e \right) \frac{h}{r_0} \quad (21)$$

这就是常用的行星大气压强随高度呈指数变化的气压计公式。

5 行星大气分布计算结果

运用以上推导的理论式(18), 代入不同行星的相关参数, 可以计算出各个行星大气总质量随高度的分布及大气组分随高度的分布。例如地球和金星大气总质量随高度分布的计算结果示于表 1, 计算数据和实测值一致。

同理运用式(19), 代入地球的相关参数, 可以计算出大气压力随高度的分布值, 结果示于表 2。

实测值是指采用美国大气模式的数值, 由以上计算结果看出: 在地球表面 0~135 km 区域内, 由玻耳兹曼 BF, 和扩展后的公式(RBF)计算的结果是相同的, 而 RBF 公式中的拟合温度 238.8 K, 更接近实测的平均温度 244.43 K。

以上的计算验证了 RBF 理论公式的正确性。于是计算了太阳系八大行星大气密度随行星表面高度的分布, 用图和表分别给出^[14-16], 此处仅给出地

球、火星及金星的计算图。从图 3 可以看出: 用 RBF 公式计算的结果介于 BF 与 Jeans 理论中间, 缓慢的、连续的收敛, 是一种比较好的解决行星大气总气体分子数发散问题的理论公式。

表 1 地球和金星大气质量的分布

Tab. 1 Radial distributions of atmospheric mass on the earth and Venus

星表高度/km	组分			1g 以内 大气组分 /%
	地球 T=273 K		金星 T=240 K	
	O ₂	N ₂	CO ₂	
h_1	17	19	12	90
$h_2=2h_1$	34	38	24	99
$h_3=3h_1$	51	57	36	99.9

表 2 地球表面上 0~135 km 区域由 BF 和 RBF 计算的
压力分布

Tab. 2 Radial pressure distributions above the Earth, calculated by BF and RBF

log $\frac{p(h)}{p_0}$	h/km		
	实测 ($T_{\text{实测}}=244.43 \text{ K}$)	BF ($T_{\text{拟合}}=237.77 \text{ K}$)	RBF ($T_{\text{拟合}}=238.81 \text{ K}$)
-1	16	16.14	16.14
-2	31	32.36	32.36
-3	48	48.66	48.66
-4	65	65.05	65.05
-5	80	81.52	81.52
-6	92	98.08	98.08
-7	108	114.71	114.71
-8	135	131.44	131.43

由于行星大气是由行星引力约束的, 大气沿行星径向呈等密度球状分布, 如金星大气的分布示于图 4。依此类推分别代入太阳系其它行星的相关参数, 同理可计算相关行星的大气密度分布数值^[14-15]。

6 行星大气逃逸理论

当行星表面大气分子运动速度等于或大于逃逸速度且方向竖直向上时, 气体分子可以逃逸出大气层围绕行星、恒星或星系不再返回行星大气层, 和人造卫星一样作二次曲线轨道运动。麦克斯韦气体分子速度分布律指出: 若气体分子平均温度大于绝对零度, 总会有一些气体分子具有大于逃逸速度的几率。不同的是气体分子质量很小, 当它和其它的气

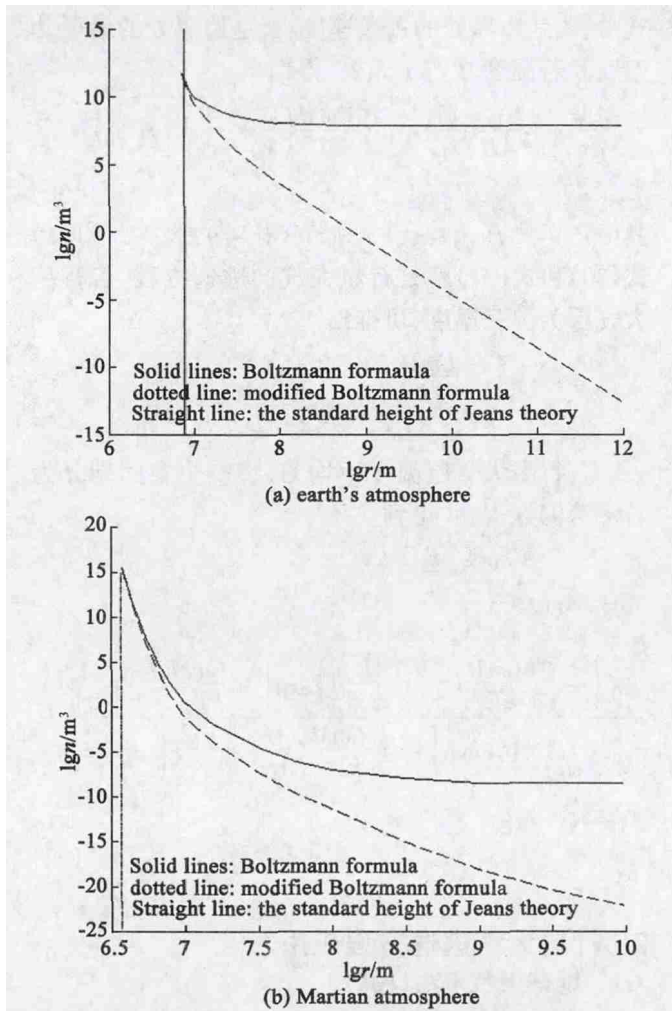
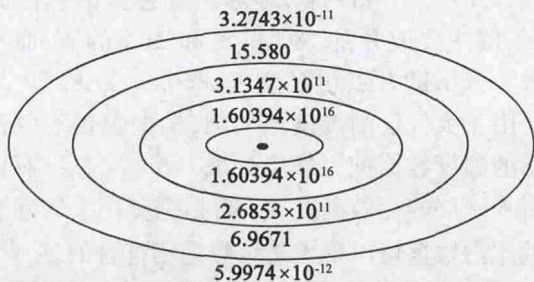


图 3 地球大气和火星大气密度双对数分布图

Fig.3 Log-log curve of the earth's atmosphere and the Martian atmosphere density distribution



central Black spots for Venus
From the inside to the outside, the radius of the Venus are:
6.5×10⁶ m 6.8×10⁶ m 8.0×10⁶ m 1.0×10⁷ m
The above digital on Fig is atmospheric density value from BF (m⁻³)
The below digital on Fig is atmospheric density value from RBF (m⁻³)

图 4 金星大气密度分布示意图

Fig.4 The atmospheric density distribution of Venus

体发生碰撞时会交换能量、动量,使其速度的方向和速率发生变化。所以只有位于大气层最顶部的逃逸

界面处的气体分子,在它们达到了逃逸速度时并不和其它气体分子发生碰撞的情况下,才有可能逃出行星大气层。

行星表面大气的分布现状和行星质量、行星直径、原始大气压力、大气组分、大气温度、行星大气演化过程、行星年龄等有关,建立行星大气逃逸理论就是要把上述参数用数学方程表示出来。为导出行星大气逃逸方程,就要计算行星大气的总分子数 N ,推出 N 随时间的变化方程。为此,首先建立行星大气逃逸理论模型,定义行星大气逃逸率、行星大气半寿命、行星大气分子的逃逸界面,推导出行星大气半寿命的数学表达式,选择实例运用表达式进行计算,比较理论计算数值和实测值的符合性。

Jeans 最早用流体静力学方程推导出行星大气寿命公式,承认玻耳兹曼分布律的合理性,得到了逃逸一层厚度为单位长度的行星大气所需的时间为

$$t_0 = \left(\frac{2\pi m}{kT}\right)^{1/2} \exp\left\{\frac{r_0}{H}\right\} \frac{1}{1 + \frac{r_0^2}{HR}} \quad (22)$$

式中单位长度行星大气层的逃逸寿命 t_0 和行星表面大气分子密度或行星大气总质量无关,结果是令人怀疑的。

Lyman Spitzer^[12] 引入行星大气总质量以后对式(22)作了修正,给出了新的行星大气逃逸寿命表达式, t_e 表示行星大气组分减小 e 倍的时间

$$t_e = \left(\frac{2\pi}{3}\right)^{1/2} \frac{\beta}{\alpha} (\exp\alpha) \frac{C}{g} \quad (23)$$

式中, $\alpha = 3v_e^2/2C^2$; v_e 为逃逸速度; β 为行星大气总质量对大气外层分子总质量的比值; C 为气体分子的均方根速度。式(23)基本上是 Jeans 公式的变型,式中出现 $\beta \equiv N_{total}/N_{out} = n_0/n_a$ 并未严格地推导。如果认为 $\beta \equiv N_{total}/N_{out} = n_0 V_{total}/n_a V_{out} = n_0/n_a$, 则做了非常粗略的近似;式中 total 和 out 分别表示该参数的全部和高度大于 H 的外层空间部分。Lyman Spitzer 根据式(23)计算了地球大气中 N_2 在 1000 K 时的逃逸寿命为 10^{107} y。火星大气在 1000 K 时,氧原子(O)的逃逸寿命为 1.6×10^{10} y, N_2 的逃逸寿命为 10^{35} y。同理可得到火星水汽的逃逸寿命为 10^{12} y,该结论表明火星表面应该有大量的液态水,明显地不符合火星表面不存在液态水的观测结果。原因在于 Jeans 或者 Lyman Spitzer 均没有给出合理的行星大气分布公式,仍然运用玻耳兹曼分布律,而大气分子随行星表面高度收敛速度很慢,为此作了某些假定和近似造成的,只有解决玻耳兹曼分布律的发散问

题,才能建立起合理的行星大气逃逸理论。

6.1 行星大气逃逸方程

为导出行星大气逃逸方程,需用修正 RBF 算出行星大气的总气体分子数 N , 写出 N 随时间变化方程, 求出逃逸界面的气体分子数流强度 J_b , 即单位时间逃出逃逸界面并带有逃逸速度的气体分子数, 逃逸方程为 $\frac{dN}{dt} = -J_b = -\lambda N$, λ 为大气分子逃逸率, 令 $\tau = \frac{1}{\lambda}$, τ 为行星大气的半寿命, 简称为寿命。

6.2 行星大气分子逃逸界面 r_b 的确定

由于气体分子平均自由程 \bar{l} 和气体分子密度成反比

$$\log \frac{\bar{l}(r+h)}{\bar{l}(r)} = \log \frac{n(r+h)}{n(r)} \quad (24)$$

定义一个 $\bar{h}(r)$, 令其满足

$$\frac{n[r+\bar{h}(r)]}{n(r)} = \frac{1}{10} \text{ 或 } \log \frac{n[r+\bar{h}(r)]}{n(r)} = -1 \quad (25)$$

$$\text{若 } r \geq r_b, \text{ 必有 } \bar{l}(r) \geq \bar{h}(r) \quad (26)$$

把满足式(26)的最小的 r 值定义为逃逸边界 r_b 。式(26)表示, 当气体分子离开逃逸边界后, 在尚未发生碰撞前, 就可逃出逃逸界面不再返回。式(26)定义的逃逸界面 r_b 比 Jeans 定义的 H_{eff} 要大些, 因而更合理。

6.3 J_b 的计算

以逃逸界面法线方向为 z 轴, 凡 $v_z \geq 0$, 且 $v \geq v_e$ 且位于逃逸界面外的的气体分子均能逃逸出行星大气层, 故

$$J_b \equiv J(r_b) = 4\pi r_b^2 n(r_b) \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_{v_z \geq 0} \int_{v \geq v_e(R)} \exp\left\{-\frac{mv^2}{2kT}\right\} v_z dv_x dv_y dv_z \quad (27)$$

式中, $n(r_b)$ 是逃逸边界处的大气分子数密度。在速度空间用球坐标进行积分

$$J(r_b) = 4\pi r_b^2 n(r_b) \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_{v_z \geq 0} \int_{v \geq v_e(R)} \exp\left\{-\frac{mv^2}{2kT}\right\} v \cos\theta v^2 \sin\theta d\theta dv d\varphi \quad (28)$$

$$= 4\pi r_b^2 n(r_b) \frac{\bar{v}}{4} (1 + \eta^2) \exp(-\eta^2)$$

其中 $\eta \equiv v_e(r_b)/v_p(r_b)$, $v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r_b}}$, $v_p \equiv \sqrt{\frac{2kT(r_b)}{m}}$ (29)

式中, v_e 是边界处的逃逸速度; v_p 是边界处的最可几速度。若温度 T 与 r 无关, 得到

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\bar{v}}{4H} \left(\frac{r_0}{r_b} \right)^2 \exp\left\{\frac{GmM}{kT} \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_0} \right)\right\} f(\eta_b) N \quad (30)$$

其中: $f(\eta_b) \equiv (1 + \eta_b^2) \exp\{-\eta_b^2\}$ (31)

式(30)和式(31)就是行星大气的逃逸方程, 若行星大气层为单一温度, 可推出

$$\lambda = f(\eta_b) \frac{GmM}{r_b^2} \frac{\bar{v}}{4} \exp\left\{\frac{GmM}{kT} \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_0} \right)\right\} \quad (32)$$

若行星大气层温度不均匀, 将整个空间划分为若干等温区^[1], 并得到

$$\lambda = f(\eta_b) \frac{GmM}{r_b^2} \frac{\bar{v}}{4} \cdot \frac{\exp\left\{-\sum_{i=0}^{q-1} \frac{GmM}{kT_{e_i}} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right)\right\} \exp\left\{-\frac{GmM}{kT_{e_q}} \left(\frac{1}{r_q} - \frac{1}{r_b} \right)\right\}}{\Gamma \exp\left\{-\sum_{i=0}^l \frac{GmM}{kT_{e_i}} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right)\right\}} \quad (33)$$

$r_q \leq r_b < r_{q+1}$

7 行星大气逃逸方程应用

7.1 地球大气寿命计算

运用式(30)式(33), 代入地球的相关参数为^[18]: 地球的有效半径 $r_0 = 6\,356.776$ km, 地球质量 $M = 5.976 \times 10^{24}$ kg, 地球表面大气压力 $p_0 = 101,325$ kPa, 地表平均温度 $T = 288.15$ K, 万有引力常数 $G = 6.672 \times 10^{-11}$ N·m²/kg², 地球大气包含的气体成分很多, 但主要成分是 78% 的氮和 21% 的氧, 而把它等效为分子量为 28.8 的空气, 取 $m = 28.8$ 。

由于大气层的温度不均匀, 根据美国大气标准给出的温度数据把大气层分成八个等温层, 对每一层引入该层的等效温度 T_{e_i} , 再根据美国大气标准给出的压力数据可以得出与该数据相符合的 T_{e_i} ^[18]。

经过计算, 在太阳平静年, 地球大气寿命为 5.4×10^{95} 年。结果表明, 地球的大气非常稳定, 其寿命远远大于宇宙年龄 ($\sim 10^{10}$ y 量级)。

7.2 金星大气寿命计算

同理, 选取金星的相关参数, 计算金星大气逃逸常数 λ 时, 缺少像地球那样温度随距离变化的详细的实测数据, 参照地球的温度分布, 分三种情况计算:

(1) $T=240\text{ K}$, 单一温度(金星云层温度), 金星大气半寿命: $\tau=1.8 \times 10^{508}\text{ y}$;

(2) $T=753\text{ K}$, 单一温度(金星表面温度), 金星大气半寿命: $\tau=.5 \times 10^{157}\text{ y}$;

(3) $T_e \leq 240\text{ K}, h \equiv r - r_0 < 90\text{ km}; T=800\text{ K}, h=90\text{ km}; T_e \leq 1\ 600\text{ K}, h > 90\text{ km}$; 金星大气半寿命: $\tau=8.7 \times 10^{78}\text{ y}$ 。

上述计算指出, 金星大气层的寿命最短为 $8.7 \times 10^{78}\text{ y}$, 比地球大气层还稳定。金星引力小于地球, 大气寿命又大于地球大气寿命, 说明金星具有 90 个大气压 ($1\text{ atm}=1.013 \times 10^5\text{ Pa}$) 的大气是金星形成过程中产生的。

7.3 火星大气寿命计算

代入火星相关参数, 首先计算火星大气中氮的逃逸寿命, 这是为了解释现在火星表面压力为 700 Pa 的大气, 是否是火星大气逃逸后的剩余气体。假定在火星形成时, 火星表面存在一个大气压的空气, 由于氧气的分子量比氮气的分子量大, 氧气比氮气更难以逃逸。为简化起见, 计算火星表面压力为 1 atm 的由氮气组成的大气的逃逸寿命。大气的逃逸寿命依赖于大气层的温度分布, 在缺少这方面实测数据的情况下, 对照地球, 假定三种温度分布进行了计算:

(1) 火星的大气层具有单一温度 $T=258\text{ K}$, $\tau=1.4 \times 10^{52}\text{ y}$;

(2) 实际上大气温度随 r 升高而增加, 设 $h_T \equiv 200\text{ km}, T_{e1}=258\text{ K}, 0 \leq h \leq h_T, T=700\text{ K}, h=h_T, T_{e2}=1\ 000\text{ K}, h > h_T, \tau=3.0 \times 10^{11}\text{ y}$;

(3) 假定火星大气层具有更高的温度: $T_{e1}=290\text{ K}, 0 \leq h \leq h_T, h_T \equiv 200\text{ km}, T=900\text{ K}, h=h_T, T_{e2}=1\ 200\text{ K}, h > h_T, \tau \geq 2 \times 10^{13}\text{ y}$ 。

分别对三种温度分布计算结果表明, 最短的火

星氮气逃逸的半寿命为 $\tau \geq 2 \times 10^{13}\text{ y}$, 远大于火星的年龄(约 $4.5 \times 10^9\text{ y}$), 说明火星大气压小, 不是由于逃逸的结果, 而是火星形成时原始大气压力就比地球小。

2014 年 4 月 14 日发表在《自然-地球科学》的论文指出^[8]; 证明火星不具有浓厚大气层的证据在于火星上存在尺寸较大的陨石坑。分析火星勘测轨道拍摄的图像, 发现在火星赤道附近 84000 km^2 的有 300 多个陨石坑, 其中 10% 的直径约 50 m , 10% 的直径等于或小于 21 m 。分析指出; 如果火星曾有密集的大气, 小型天体在穿越大气层时必定会被热解, 不会被大部分完整无损的保留下来并形成较大的陨石坑。火星上众多的陨石坑和较大的直径表明火星没有存在过浓厚的大气层。和作者的计算结果相符合。

7.4 月球大气寿命计算

假设月球在形成时也存在 1 atm 的空气, 假定了四种温度分布进行计算^[19]:

(1) $T=240\text{ K}$, 单一温度(地球大气层的平均温度);

(2) $T=400\text{ K}$, 单一温度(月球表面白天的平均温度);

(3) $T_d=400\text{ K}, T_n=90\text{ K}$ (月球表面白天、夜间的平均温度);

(4) $T_e \leq 240\text{ K} (r < 3/2r_0\text{ 时}); T=800\text{ K} (r < 3/2r_0\text{ 时}); T_e \geq 1\ 600\text{ K} (r > 3/2r_0\text{ 时})$ 。

在计算分子自由程时, 仍取分子半径为 $d=2 \times 10^{-10}\text{ m}$, 计算结果如表 3 所列。

计算指出月球的引力太小, 约束不住大气, 大气逃逸寿命 $\tau=2.0 \times 10^7\text{ y}$, 月球表面应该没有大气, 为什么还保存有 10^{-10} Pa 的稀薄大气且主要成分为

表 3 月球假想大气层的逃逸率 λ 和寿命 τ

Tab. 3 Assumed atmospheric escape rate λ and its life on the moon

月球大气的温度	r_h	$\bar{l}(r_h)$	$\bar{h}(r_h)$	$T(r_h)/\text{K}$	$\frac{\bar{v}}{4}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	η	$f(\eta)$	λ/s^{-1}	τ/y
(1)	$2.6r_0$	820 km	$< 820\text{ km}$	240	102.5	3.95	2.72×10^{-6}	1.28×10^{-20}	2.47×10^{12}
(2)	$9.6r_0$	$4.58r_0$	$< 4.58r_0$	400	135.6	1.59	0.279	1.89×10^{-1}	1.68×10^7
(3)	$9.6r_0$	$4.58r_0$	$< 4.58r_0$	$d: 400$ $n: 90$	135.6	1.59	0.1659	0.94×10^{-1}	3.36×10^7
(4)	$20r_0$	$10.2r_0$		1600	271.1	0.552	0.9620	1.62×10^{-1}	1.95×10^7

氢和氦呢?分析认为月球大气中的氢和90%的氦来自太阳风,因而假定月球大气的形成是由于月球表面不断放出气体和大气逃逸达到的一种稳态平衡,从而算出月球表面的He放气率为 $1.61 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$,相当于每秒放出1g的He,从而给出了月球表面保持稀薄大气的一种解释。

8 火星水汽逃逸寿命计算

火星上的大气的相关参数为: $p_0 = 700 \text{ Pa}$, $n_0 = \frac{p_0}{kT}$, 取 $T = 258 \text{ K}$, $n_0 = 2.10 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $\bar{l}(r_0) = 2.7 \times 10^{-5} \text{ m} = 2.7 \times 10^{-8} \text{ km}$ 。

假定火星大气温度分布为: $T = T_{e1} = 258 \text{ K}$, $r_0 \leq r < r_T$, $r_T = r_0 + h_T$, $h_T = 200 \text{ km}$; $T = 700 \text{ K}$, $r = r_T$; $T = T_{e2} = 1000 \text{ K}$, $r > r_T$ 。

火星大气的平均气体分子量为: $\bar{m} = 43.44$, $r_{\text{DY1}} = \frac{GmM}{kT_{e1}} = 8.79 \times 10^5 \text{ km}$, $r_{\text{DY1}}/r_0 = 259$; $r_{\text{DY2}} = \frac{GmM}{kT_{e2}} = 2.27 \times 10^5 \text{ km}$, $r_{\text{DY2}}/r_T = 63.07$; 取 $r_b = 4045 \text{ km}$ 为逃逸边界,计算水汽的逃逸率和逃逸半寿命 τ 。

$$r_{\text{DY2}}(\text{H}_2\text{O}) = \frac{Gm(\text{H}_2\text{O})}{kT_{e2}} M = 0.9395 \times 10^5 \text{ km},$$

$$\eta_b = \sqrt{r_{\text{DY2}}(\text{H}_2\text{O})/r_b} = 4.819,$$

$$f(\eta_b) = 2.242 \times 10^{-9} \lambda = 4.87 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1},$$

$$\tau = 2.05 \times 10^{15} \text{ s} = 6.5 \times 10^7 \text{ y}$$

火星水汽逃逸的半寿命小于火星的年龄(约 $4.5 \times 10^9 \text{ y}$),现存的火星水汽只有最初的 $\exp(-4.5 \times 10^9 / 6.5 \times 10^7) \approx 1.2 \times 10^{-30}$ 倍,计算结果表明即使火星表面以前有丰富的水,现在已逃逸无几了(图5)。

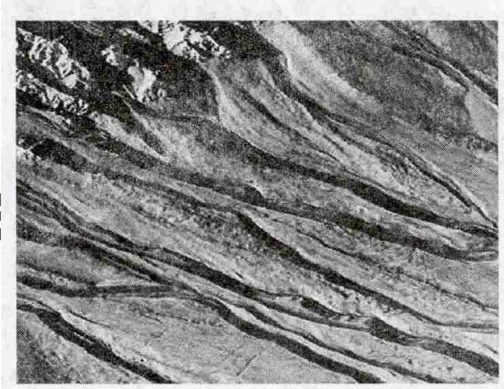


图5 火星水流过的地貌照片

Fig. 5 A photo of flood invaded landscape on Mars

9 火星上固态冰的寿命

行星上固态冰的逃逸需要经历先升华为水汽,再行逃逸。Murphy和Koop在2005年给出了冰在真空中饱和蒸汽压的最终函数

$$p_{\text{sat},i} = 0.01 \exp(9.550426 - \frac{5723.265}{T} + 3.53068 \ln T - 0.00728332 T) \text{ hPa} \quad (34)$$

这时温度 T 的范围 $110 \text{ K} \leq T \leq 273.15 \text{ K}$ 。

设火星有液体水或冰的总表面积为 $S(t)$,它随时间而减少,则逃逸方程需改为

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N + e_s S(t) \quad (35)$$

式中, e_s 为单位时间单位面积水冰的升华率,其解为

$$N = [N_0 + \int dt e_s S(t)] e^{-\lambda t} \quad (36)$$

由于火星水汽的逃逸寿命很小,所以水或冰存在的寿命主要由单位时间表面积为 S 的冰蒸发掉的气体分子数决定,于是有

$$\frac{dN}{dt} = e_s S(t) \quad (37)$$

用此公式先估算一块面积为 S 高为 H 的冰柱的蒸发时间 τ ,此冰柱的总气体分子数为

$$N = \frac{\rho S H}{m} \quad (38)$$

式中, ρ 是冰的密度,由此得到

$$\tau_e = \frac{N}{e_s S} = \frac{\rho H}{e_s m} = \frac{\rho H \sqrt{2\pi k T}}{p_s \sqrt{m}} = 53.73 \frac{\rho H \sqrt{T}}{p_s} \quad (39)$$

Pruppacher and Klett's 得出纯冰的密度和温度的关系是

$$\rho_i = 916.7 - 0.175(T - 273.15) - 5.0 \times 10^{-4} (T - 273.15)^2 \quad (40)$$

但若在低洼处,冰的温度降至 $T = 193.15 \text{ K}$,则由式(34), $p_s = 8.952 \times 10^{-5} \text{ hPa}$, $\rho = 927.5 \text{ kg/m}^3$, $\tau_e = 7.737 \times 10^7 H(\text{s})$,若冰的温度再降至 110 K , $p_s = 2.857 \times 10^{-14} \text{ hPa}$, $\rho = 931.9 \text{ kg/m}^3$, $\tau_e = 2.030 \times 10^{14} H(\text{s})$ 。计算指出,1m厚的冰需 10^{11} y 才能蒸发完。远远超过了火星的年龄。

上面的计算,假定了冰是处在真空中。实际上,火星冰是处在约700Pa的压力下,在冰点以下的温度,其升华速率还会小一些,这一条件在低洼处和两极是容易满足的,火星冰的分布图(图6)验证了计算值的符合性。

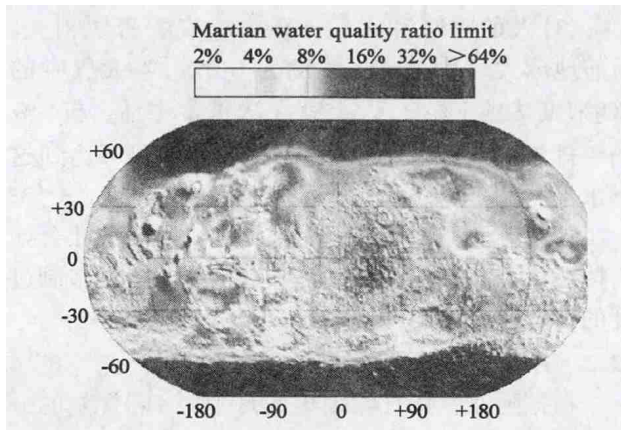


图 6 火星南北极水冰分布图

ig. 6 Ice distribution on the north and south poles of Mars

10 月球水汽及冰寿命的计算

10.1 理论计算

按照行星大气逃逸理论,水汽分子的逃逸界面就是月球表面。计算指出月球大气中水汽在 240 K 下,逃逸半寿命为 2.6×10^6 y,远小于月球的年龄 (4.5×10^9 y),月球表面不具备液态水存在的条件,于是固体冰的升华速率成为决定月球水长期存在寿命的主要因素。计算了厚度为 1 cm 的月球冰在不同温度下的升华寿命,表 4 给出了计算结果。

表 4 厚度为 1 cm 的月球冰在不同温度下的升华寿命
Tab. 4 Calculated life-time of 1 cm thick ice on the mood sublimated at different temperatures

温度/K	90	100	110
寿命/y	3.4×10^{11}	3.4×10^9	3.4×10^7

表 4 说明只有温度处于 100 K 以下的月球冰可以保存到现在。按照 W 型辐射制冷器设计原理,这种温度环境存在于三不见的地方,看不见太阳辐射、月面反射阳光及月球辐射、地球反射阳光及地球辐射。

解释了美国 NASA 半人马座火箭选择在月球南极附近环形山下深寒的凯布斯深坑是符合上述理论分析的。月球两极是月球全年平均温度最低的地方,环形山可以挡住周围太阳照射、月面反射阳光及辐射、地球反射阳光、地球辐射的热流,深坑中的冰面只能把内部的热量散发到宇宙 3 K 的背景去,同时使坑底冰的温度可能降低到 90~100 K 或者以下,形成了深度冷冻的辐射阱,延长了月球冰的寿命,可能会有大量的月球冰长期储存下来。印度月船一号携带的美国宇航局的 Mini-SAR 雷达在月球

北极发现 40 多个含有水冰的陨石坑,直径从 2 km 到 15 km 不等(图 7),据估计月球北极至少储存有 6 亿吨水冰。

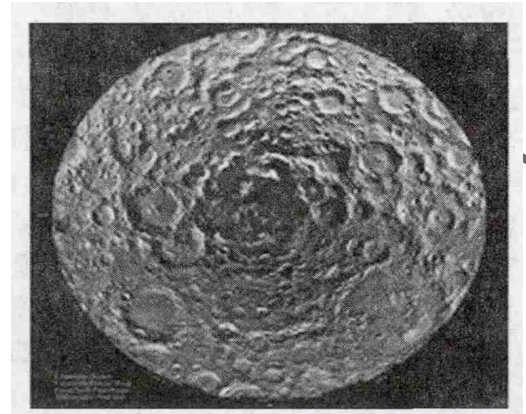


图 7 月球南极存在多处深坑的照片

. 7 Photos showing deep pits on the south pole of the moon

11 宇宙真空测量理论

宇宙空间真空与地面容器中真空度测量的差别在于^[20-21]:

(1) 航天器上的压力传感器以宇宙速度相对于行星大气系统运动,只能测量到分子流密度 J_{-n}^v 。需把分子流密度转换为动压力 p ,再把动压力转换成相对于行星大气静止的静压力 p_0 ,它与航天器运动速度及压力传感器和航天器飞行方向的夹角有关。经过推导作者给出了他们的理论转换公式,分子流密度 J_{-n}^v 的表达式;设航天器的轨道速度 \vec{u} 和 \vec{n} 之间的夹角为 β ,则

$$s_z = u \cos \beta / v_m, u = |\vec{u}|$$

$$\text{或 } s_z = s_m \cos \beta, s_m = u / v_m$$

令 $J_0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} n(r) v_m$, 是 $u=0$ 时的入射分子流密度,

则上式化转为

$$J_{-n}^v = J_0 \{ \exp[-(s_m \cos \beta)^2] + \sqrt{\pi} s_m \cos \beta [1 + \operatorname{erf}(s_m \cos \beta)] \} \quad (41)$$

测量出 J_{-n}^v 后,即可求出 J_0 。

(2) 行星大气动压强

$$p = p_0 \{ (1 + 2s_m^2 \cos^2 \beta) [1 + \operatorname{erf}(s_m \cos \beta)] + \frac{2}{\sqrt{\pi}} s_m \cos \beta \exp(-s_m^2 \cos^2 \beta) \} \quad (42)$$

$\beta=0$ 时,即航天器前壁所受的压强为

$$p = p_0 \{ 2s_m^2 [1 + \operatorname{erf}(s_m \cos \beta)] \} = 4s_m^2 p_0 = \frac{1}{2} n(r) m v_m^2 4 \left(\frac{u}{v_m} \right)^2 = 2n(r) m u^2 \quad (43)$$

测量出 p 后,即可求出 p_0 。

p_0 和 J_0 的关系式

$$\frac{p_0}{J_0} = \frac{\frac{1}{2}n(r)mv_m^2}{\frac{1}{2\sqrt{\pi}}n(r)v_m} = \sqrt{\pi}mv_m = \sqrt{2\pi mkT} \quad (44)$$

有了以上公式,就可以将从航天器坐标系测量到的分子流密度 J_{-n} 或压强 p ,转换为从地惯系坐标系测量的分子流密度值 J_0 或压强值 p_0 ,进而与地面实测值比较。

(3)航天器周围的真空度测量。航天器周围的气体压力由宇宙本底真空叠加航天器自身放气产生的派生真空构成。需要注意的是当测量宇宙真空时,航天器放气分子带有航天器的漂移速度。而测量航天器周围的真空度时,放气分子的漂移速度和航天器相同,不必另外考虑,此时航天器放出的气体处于非平衡态,气体的密度、温度及方向均保持初始状态。

(4)测量分压强时,由于航天器的运动会发生质量选择效应,连接规管时会产生规管效应^[6],恢复数据时需加以修正。

(5)正确运用上述公式,可以通过合理设计的地面真空校准装置对测量传感器进行地面校准。

12 几个相关问题的研究

从宇宙真空学理论出发,研究了几个人们颇为关心的问题,得到了很有意义的结果。

12.1 地球大气 CO₂ 浓度的持续增长与人类生存的相关性

随着科学技术的进步,人类有了足以改变地球大气环境的能力,例如工业生产规模的过度扩张,使地球大气中的 CO₂ 浓度由 1958 年的 313×10^{-6} 增加到 2014 年 4 月的 401.33×10^{-6} ,连续 56 年平均以每年 4% 的速率递增,如果人类不去有效地控制 CO₂ 的过度排放,预计会带来三种不希望的恶果。

(1)按 4% 的年排放 CO₂ 的速率计算,再过 1628 年,地球大气中的氧气就会由于碳的燃烧而耗尽。

(2)实际上,人类在地球生存环境不超过海拔 5000 m 这一生命线,在此高度以上无生命存在。海拔 5 000 m 的大气压为 540 kPa,氧分压为 11.29 kPa,氧含量下降到海平面的 65.4%。按 4% 的年排放 CO₂ 的速率计算,再过 1443 年,地球海平面的氧含量即可达到现在海拔 5000 m 的水平,人类无法生存了。

(3)人的呼吸和大气中的 CO₂ 浓度密切相关。目前地球大气中的 CO₂ 浓度为 0.3%,当大气中的 CO₂ 浓度达到 1% 时,人类就无法正常生活。按 4% 的年排放 CO₂ 的速率计算,再过 876 年即可达到这一水平。

无论上面那种算法,留给人类解决自身社会如何持续、稳定发展问题的时间非常有限,必须节制过度的消费,减小 CO₂ 的排放率。

12.2 月球 He³ 储量的估算

根据阿波罗登月舱采集的月尘中 He³ 含量的分析及对不同区域月尘厚度的测量,月球表面尘埃中约储存有 $(100 \sim 500) \times 10^4$ t He³,它是清洁、安全的核聚变原料。一台发电量 50×10^3 kW 的发电机,年消耗的 He³ 原料约 50 kg,估计百吨量级的 He³ 可供地球人类一年用电,足见价值的可贵。分析指出月尘中的 He³ 来自太阳风,由于月球表面大气非常稀薄,太阳风直接照射到月尘表面,扩散到月尘体内,目前已经达到饱和状态。根据太阳风中 He³ 的流量,结合月球大气模式,He⁴ 在太阳风中占 0.04~0.07,在月尘中占 0.025,而 He³ 仅为 He⁴ 的 1/2500,从而算出月尘中 He³ 的储量约为 $(90 \sim 320) \times 10^4$ t。同时得出月球的 He³ 处于动平衡状态,如果人们提取了月尘中部分 He³,月尘可以继续吸收太阳风中的 He³,使自己达到饱和,因而是取之不尽的能源。但目前人类尚没有完全掌握收集、储存、输送月球 He³ 的技术。

12.3 行星大气与生命的相关性

行星表面是行星生命发生、生长及繁衍的地方,行星生命和行星大气的特性密切相关。行星生命需要合适的大气压力、大气厚度、大气组分及浓度,特别是生命体主要元素,例如,大气中的水汽、氧气、氮气及 CO₂ 的含量,行星大气逃逸寿命等。大气压的大小对于大气中水分的保存,温度的调节及宇宙射线辐照、太阳紫外防护有重要作用。分析指出由于火星大气压力比地球小 100 多倍,不具有生命发生、生长及繁衍的环境条件,从而推出火星没有生命存在的结论。

13 宇宙真空的物理本质

宇宙真空不是空虚的几何真空,它充满了物质或能量(未被激发的场),宇宙真空是物质真空。真空有其物理特征,例如真空有不为零的介电常数和磁导率,真空有抗性性等。真空能传递物质相互作用。

用的四种力,引力、电磁力、强作用力、弱作用力。真空是物质形成时力的传媒,没有真空传递物质的相互作用力,不会形成大千物质世界,因而真空是物质生成的必要且充分条件。换句话说,粒子、原子、分子、晶体、非晶体等实物物质应该是由真空加上实物粒子组成的,例如,原子是由原子核(质子+中子)、核外电子加真空组成的,依此类推,分子是由原子加真空组成的,晶体是由原子(分子)加真空组成的,总之只有物质加真空才能构成了完整的、封闭的系统,真空是组成物质的基本要素。

宇宙也是由物质加真空构成的。由于真空中的物质是有限的,所以,宇宙也是有限的,但宇宙可以不止一个。正如《宇宙大设计》一书中霍金方程给出的方程解数一样,宇宙之间的几何空间是连续的,而真空空间是断开的。

物体静止或作匀速直线运动时不改变运动途径的真空状态,但作加速运动时使物体内部的真空场能量密度流不断增大,在时间维度上压缩物体内部能量密度,从而形成压缩能。当物体离开时,压缩能被释放,因而产生反作用力,该力就是被加速系里的物体感受到的惯性力,惯性力也可能是真空场产生的反作用力。该现象类似于闭合回路中由于磁通量的变化而产生感应电动势的法拉第楞次定律。正像法拉第定律说明电和磁的联系一样,在真空场中做加速运动的物体产生惯性力,也表明真空场和力之间有普遍联系。

14 结束语

本文综述了作者创立宇宙真空学的哲学思考和物理概念,建立的理论和方程的逻辑思维,推导公式的数学技巧。讨论了理论的正确性和自洽性,进行了一些实例的计算,得到了与观测结果符合的数据,给出了一些新的结论。新学科领域的建立需要一个成长过程。撰写本文希望引起读者的兴趣,开展交流,得到读者的批评指正以便完善。

参 考 文 献

- [1] 雷 雯. 从亚里斯多德到朗缪尔[J]. 真空与低温, 1985, 1(4): 63
- [2] 同 春. 真空泵发展史话[J]. 真空与低温, 1985, 1(4): 53
- [3] 郭晓玲. 真空测量史话[J]. 真空与低温, 1985, 1(4): 58
- [4] 林主税. 21 世纪真空科学技术的展望[J]. 真空科学与技术学报, 2003, 23(1): 96
- [5] 达道安. 真空设计手册(3 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- [6] 达道安, 杨亚天. 宇宙真空学[M]. 北京: 化学出版社, 2012
- [7] 朗 道, 栗弗席兹. 统计物理学[M]. 杨训恺等译. 北京: 人民教育出版社, 1964: 140-142
- [8] Jeans J H. The Dynamical Theory of Gases[M]. Dover Publications Inc, 1954: 65
- [9] Jeans J. Phil Trans[M]. Roy Soc, 199, A49 and "Astronomy and Cosmogony"(2nd ed), 1902: 345-350
- [10] Stands U S. Atmosphere Supplements Washington, 1966 re-cited from: Jia Nai-hua, Astronautical Physics 1990 (in Chinese) Atmospheric Mode MSISE-1990, Announced by NASA, 1990
- [11] Gao Chong-Yi. Derivation of Jeans Empirical Rule and Its Applicability[J]. Commun Theor Phys, 1995, 23: 355-362
- [12] Lyman Spitzer Jr. The Terrestrial Atmosphere above 300 km in the Atmosphere of Earth and Planets [M]. University of Chicago Press, 1952: 211-247
- [13] Lucy Ann McFadden Paul R. Weissman Encyclopedia of the Solar System[M]. Beijing: Science Press, 2007: 126
- [14] 达道安, 杨亚天, 涂建辉. 太阳系类地行星际真空环境特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2005, 25(增刊): 1
- [15] 达道安, 杨亚天, 涂建辉. 太阳系行星及行星际大气环境特性研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1306
- [16] Da Daoan, Yang Yatian, Tu Jianhui. Research on the Environment Characters of Atmosphere of Planetary and Interplanetary Space in the Solar System[J]. The Proceedings of the China Association for Science and Technology, 2008, 3(1): 232-240
- [17] 达道安, 杨亚天. CO₂ 排放量对地球大气中氧含量影响的分析[J]. 现代学术研究, 2007, 10: 19-22
- [18] Sheng Pei-xuan, Mao Jie-tai, Li Jian-guo. Atmospheric Physics[M]. Beijing University Press, 2003: 80
- [19] Da Dao-an, Yang Ya-tian. Escape of Atmospheric Gases from the Moon[J]. Journal Earth System Science, 2005, 114(6): 637-644
- [20] 卢耀文, 陈 旭, 李得天, 等. 方向规用于空间站检漏的探讨[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(12): 1174
- [21] 达道安, 杨亚天. 宇宙真空测量的理论与技术[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(4): 355-368