

星际空间研究中的某些原子分子问题

周茂堂

(应用物理系)

摘 要

本文从八个方面介绍并讨论了星际空间中的原子分子问题。它们是：星际分子的观测、星际分子的形成、原子碰撞、高激发态原子、各种电离现象、谱线展宽、振子强度及星际脉泽。

关键词：空间物理，星际分子，星际原子

1 前 言

人们对发生在地球上及地球附近的原子分子问题比较了解，已经作了深入地研究。但对发生在地球以外的其他星体附近及星际空间中的原子分子现象，除了分子天文学家以外，多半知之甚少。研究这个问题的重要性，一方面在于研究宇宙起源这个重大课题，另一方面，随着科学技术的发展，地球人开始访问其他星球，甚至可能在远离地球的地方发生军事冲突。因此，对远离地球的空间中的原子分子问题的研究，不仅有学术价值，而且有重大的经济及军事价值。

星际空间的特殊物理条件，决定了那里的原子分子现象往往有与地面不同的特点。国内外已经作了大量针对性很强的研究工作。八十年代以来，对星际分子谱线的观测已不限于微波范围，而努力进行全波观测。获得大量分子谱线的观测资料，从理论和实验室测量两个方面对星际分子谱线进行分析，最终达到对星际分子的认证，并进一步从理论上推算相应天区的气体种类、密度、温度、磁场、辐射场等状况，这些研究工作构成了新兴的分子天文学。

2 某些原子分子问题

2.1 星际分子的观测研究

迄今为止，对宇宙观测研究投入精力最多的是对银河系。我们知道，星际物质的化学成分的演化同天体的形成史密切相关。如果能知道星际中存在的元素及其同位素含量作为时间的函数，就可以对银河系的演化取得长足的了解。到目前为止，已经观测到并加以认证的星际分子有近60个^{[1], [16]}。从其分子组成看，多半属于多原子分子，当然也有较简单的CO, OH, CH, CH⁺, H₂等双原子分子和离子。所含原子数最多达十几个原子。涉及到的元素是H, O, C, N, Si, S等六种。这些分子主要分布在星际云中，

也有一部分弥散在星际云之外的空间中。

星际云按其内部粒子的稠密程度可以分为两大类^[1]：一是疏散云，粒子数在 $10 \sim 10^3 \text{cm}^{-3}$ ，银河紫外星光可以穿透这种云。在紫外线作用下，出现简单的自由基分子，复杂的大分子均受到破坏。气体大部分以原子形式出现，凡电离能在 13.6eV 以下的原子几乎全部被电离。因而，这个区域有大量自由电子存在，当然，复合现象与电离现象并存。其中的气体动能温度在 $50 \sim 100 \text{K}$ 。另一种是稠密云，粒子数密度在 $10^4 \sim 10^7 \text{cm}^{-3}$ 。由于气体稠密，星际紫外线难以穿入云的内部深处，从而使大量复杂分子得以存在而不被破坏。当然，宇宙线中的高能粒子仍可穿入一部分，引起少量电离，出现极少量自由电子。此种云的动能温度在 $10 \sim 70 \text{K}$ 。稠密星际云的主要成分是 H_2 ，其他还有 CO 、 CS 、 HCN 、 NH_3 和 H_2CO 等。大多数恒星是在稠密云内部逐渐形成的。因此，对这种星际云的研究直接同星体的形成，及星体形成后所含元素的种类等特性密切相关。

也有以氢的电离态作为一个标准来划分星际云的（因为氢占星际气体总重量的 73%，占星际气体原子数的 92%）。冷区称为 H I 区：几乎由中性分子构成；热区是 H II 区，H 原子几乎全部被电离。

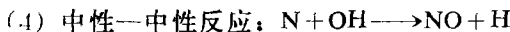
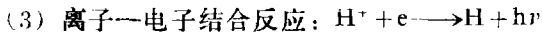
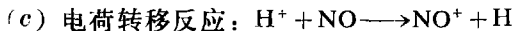
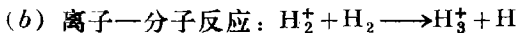
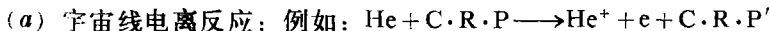
目前观测到的信息很多，而理论上能给予定论解释的不多。

2.2 星际分子的形成问题

这个问题的研究直接同天体的形成与演化、整个宇宙的演化密切相关，同生命起源的研究也有联系。通过对星际分子形成的研究，反过来了解有关星际空间的物理条件，这又与人类未来可能涉足的空间区域的确定有关。研究各种分子的形成时，不可避免地要涉及到那里的条件，如温度、物质环境等等。据此就可以判断那里是否有可能存在生命或是否有可能满足地球人的生存条件。

关于星际分子的形成，研究得较多的是 H_2 的形成。其主要原因是 H_2 本身在星际气体中占有极大的比例。对复杂星际分子的形成，多半从化学的角度加以处理，极少作定量的量子力学计算。关于稠密云中的气相反应^[1]有以下几类：

(1) 离子中性反应，其中包括



这些反应，从物理的角度看，实际上是些碰撞问题。以下将从其他角度详细剖析这些反应。

对 H_2 的形成研究较多。在粒子稀少的那种星际空间中，两个 H 原子直接碰撞形成 H_2 的可能性极小。而且，要想有稳定的 H_2 存在，必须将 H 原子结合过程中的一部分热量放走，从而必须有将热量带走的第三者存在（只有在稠密云中才可能通过直接碰撞转移热量）。因而目前公认的观点是 H_2 在颗粒表面上形成并脱附下来。可是，到底是在尘埃颗粒还是过渡金属颗粒表面上形成呢？对这个问题的裁决要看哪种机制算得的精度

与实际观测接近。Tabak主张后一种机理^[2]。我们就这个争议作了量子力学计算，得到如下结论^[8]：在弥漫星际云中，如果它靠近一个很强的星际辐射场，则介电颗粒的温度将高于靠物理吸附而形成H₂的上限温度，使H₂不可能在这种介电颗粒表面上形成。同H₂在颗粒表面上的形成相比，气相反应是不重要的。因此，在这种星际尘埃云中，H₂几乎多半在铁颗粒上形成。如果星际云不太接近强星际辐射场，或有较高的密度，则颗粒温度将低于H₂在铁颗粒上形成的下限温度（受脱附限制），因而借助于半化学吸附而在镍颗粒表面上形成H₂的机理便起支配作用。在稠密星际云中，在冷颗粒表面上发生的表面反应及气相反应，对于H₂形成变得重要。由此可见，围绕着分子在颗粒表面上的形成，涉及到大量有关原子在固体颗粒表面上的吸附、迁移、碰撞、脱附等问题。

总之，星际分子形成机制的研究同天文观测和星际分子的认证结合起来，是研究天体演化、生命起源、星际空间的物理条件及地球外是否存在生命等重要课题必不可少的途径。原子分子物理学家将在这个领域中找到大量新课题。

2.3 原子碰撞问题

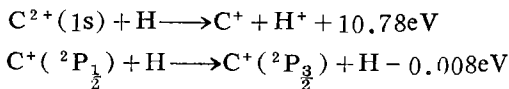
在星际介质中，具有重要意义的原子—原子及离子—原子碰撞现象主要发生在两个能量范围：一是低能区（即热能），大约是10K到几百K；二是高能区，主要表现为宇宙线粒子参入的碰撞过程。我们知道，低能及高能碰撞，比之中等能量（10~100KeV）的碰撞容易作理论处理。

低能碰撞。在电离介质中，电子和离子都近似的以相等的比例存在。一般地说，在激发过程中，电子比离子更有效（电子速度比离子速度大50倍）。也有某种特殊情况，离子碰撞是主要的（对解释复合谱线很重要）。其中一例：



这个过程进行很快^[4]。

一般说来，原子和原子，或离子和原子碰撞仅仅是在中性介质或弱电离的星际介质中才有意义。因为动能温度很小（≈100K），唯一比较活跃的可能反应是放热反应或轻微的吸热反应。典型的例子是电荷交换反应，研究这种反应对确定带电状态的程度很有意义。



后者是稠密星际云致冷的重要机理之一。

高能碰撞（ $E \geq 100\text{KeV}$ ）。这个能量范围内发生的碰撞过程，令人感兴趣的是碰撞电离及碰撞引起的电荷交换。当星际气体受到宇宙线粒子，如质子、 α 粒子等的轰击时，便属于这里所说的高能碰撞。Rudd和Macek^[5]曾经处理过入射到He上的快速质子束问题。

高能碰撞下还可以出现原子内壳层激发，导致许多有趣的复杂离子和原子问题。当原子经受轻离子轰击时，内壳层电子主要通过直接电离的方式跑掉。如果入射离子处于高度剥离的状态，从而带有很大的净电荷 z ，则这时电荷交换就成为主要机理。对于重

离子轰击,甚至在MeV能量范围,相对速度仍可能比K壳层电子的经典速度小,外壳层中的空穴可以转移到内壳层。若K壳层出现空穴,而外壳层若有两个以上的电子存在,则其中一个电子会跃迁到K空穴。同时由于它与外壳层另一个电子的相互作用,将它的一部分能量转移给这个外层电子。获得足够能量的这个外层电子不是辐射光子跳到基态,而是带走它的全部能量电离出去。通过这种自电离过程,原子或离子从高能态衰变下来。上述这类无辐射跃迁叫作俄歇(Auger)跃迁。例如, $\text{Ne}^+(1s^2 2s^2 2p^6)$ 的K壳层空穴,自电离后变为 $\text{Ne}^+(1s^2 2s^2 2p^4)$ 。可参见文献[6]与[7]。

2.4 高激发态原子

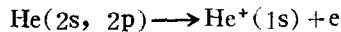
了解高激发态原子的性质,对详细了解恒星大气中的复合及其电离平衡是非常必要的。

在星际空间居然会出现电子处于主量子数 $n=110$ 的状态上的H原子。有人风趣地叫它“胖原子”,这种原子在地面上是找不到的。对于这种高激发态原子,采用原子的经典模型来处理就足够了。在这种“胖原子”中,由于电子处于非常弱的束缚态,以致处于室温下的粒子与之作用一下,就可以使之离开如此的高激发态而回到基态,更何况它处于H II区中(10^4K)的质子和电子的包围之下。它们之所以幸存,仅因为那里气体密度极低,免遭碰撞而已。H II区的电子、质子密度是 10^4cm^{-3} , 温度是 10^4K , 平均动能为 $.29\text{eV}$ 。这种高激发态原子,已经发现的不止是H,还观察到He、C等。

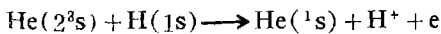
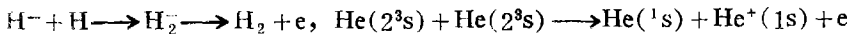
2.5 电离问题

星际空间的电离现象是十分普遍的。前面提到的星际分子的若干种反应中就有电离反应。但远非如此单一,还有各种电离反应发生。

我们知道,原子、分子可以被激发到某一个分立的能态上去,然后通过发射电子,而不是光子,从高能态上衰变下来,这种无辐射过程叫自电离。在自电离过程中,电子要带走一部分能量,留下的是比原来高一价的正离子。例如,某个激发态原子A,自电离后变为 A^+ ; 某个激发态离子 B^{+n} , 自电离后变为 $B^{+(n+1)}$, 电离后处于比原来高一价的带电状态。发生自电离的前提条件是:处于激发态的体系的能量必须至少要高于电离后具有较高带电状态的离子的基态的能量。如果这种能量要求及相应的选择定则得到满足,自电离就会迅速进行。这种状态的典型寿命是 $10^{-14}\sim 10^{-13}$ 秒。假如这种由静电相互作用引起的跃迁选择定则不被满足,自电离过程仍然可以通过其他相互作用(如自旋-轨道相互作用)来实现,不过寿命要长得多。例如^[8]:



同样,分子电子态也会经历自电离而衰变:



此外,还有离解复合情况(实际上是自电离的逆过程): $\text{AB}^+ + e \longrightarrow \text{A} + \text{B}$

在环绕地球的气体中,一个重要的物理过程是原子吸收紫外辐射而造成原子的光电离解。如 H^- 和 He 及各种复杂原子、离子的光电离解。负氢离子 H^- 是引起太阳大气不透明的主要根源,而且它在其他星球的外层大气中也极为丰富。



还有关于 C^- , O^- , Si^- , S^- , Cl^- 的光致离解。

文献[9]指出,即使在H I区, X射线(XR)及宇宙线(CR)也会把C, N, O这些较重的元素电离到一种相当可观的程度。在这种区域的外层,分子遮挡了紫外线(UV)而被离解;当有XR穿过时,便会将原子的K壳层上的电子电离出去。

2.6 光谱线展宽问题

把实验室中及天体物理的等离子体谱线加以详细比较研究,可以得出大量新的信息。谱线展宽理论明显地受到等离子体及天体物理学家的需要的推动,成为迅速发展的领域。由于正在发出辐射的原子与它周围粒子的相互作用,引起谱线的展宽称之为压力展宽;由于正在进行辐射的原子的热运动影响,引起其谱线较原子静止时宽一些,这称为Doppler展宽。还有一种是自然展宽,它是原子同辐射场的相互作用引起的。这三种展宽情况,对整个星际空间乃至拱星空间而言,都很重要。而对空间的某个特定的区域却往往是某一种机制起主导作用。例如,当等离子体的密度足够高,温度较低,同时辐射场很弱时,当然就是压力展宽起支配作用。压力展宽已研究得比较多,可以参见文献[10]、[11]、[12]等。中性He和中性H的谱线展宽问题在太阳大气中是十分重要的,已经作了理论上的论证^[16]。

2.7 振子强度 f

原子和分子的精确振子强度知识对大量天体物理问题是极为重要的。振子强度的数值在确定碰撞截面、强度比和复合速率等方面很有用处。绝对 f 值的可靠测量,以及瞬时跃迁几率,辐射寿命,对天体物理相当重要。J. Burns 和 J. V. Mallow 对C, N, O的中性原子和离子的共振跃迁的辐射寿命作了大量测量,理论计算工作已取得了不少成果。从总的情况看,准确的振子强度计算是不容易的,一般都有较大的偏差。

2.8 星际脉泽(Maser)

脉泽辐射是了解星球形成区内的物理条件的最好的一种“探针”。来自星际空间的脉泽辐射线隐藏着大量宝贵的信息。可是到目前为止,还很少能为众多的观测事实提供结论性的解释,而人们只是从中得出一点关于星体形成的暗示和猜想。现在已经明白:OH, H₂O, SiO都能发出很强的脉泽辐射线^{[13][14]}。天文观测收到的是各种波长的电磁波谱信号,由这些信号推断并认证出相应的星际分子,同时推测那个天区的物理条件,这是一项十分有趣和重要的工作。这是从观测数据中提取有用信息的重要步骤。

3 结 束 语

文中简要地叙述了天体物理中的某些原子分子问题,每个问题都没有展开去谈。因为详细分析问题的各个方面,并将进展情况一一介绍,那不是一篇文章所能完成的。作者希望本文能够帮助感兴趣的同行开扩眼界,并有助于选择课题,从而推动分子天文学的研究。我相信,随着科学技术的进步,人类会与宇宙空间发生更密切的联系,因此,对远离地球的空间中存在的原子分子问题的研究就会显得更实际、更重要。

参 考 文 献

- [1] 曾琴. 成都科技大学学报, 1980; (2): 105
- [2] R.G.Tabak. *Ap. Space Sci.*, 1978, (53): 279
- [3] D.J.YU (于德江), M.T.ZHOU (周茂堂), Q.ZENG (曾琴), Q.Q.GOU (苟清泉),
Ap.Space Sci., 1985, (113): 365~371
- [4] R.M.Pengelly and M.J. Seaton. *M.N.R.A.S.*, 1964; 126: 165
- [5] M.E.Rudd and J.H.Macek. *Case Studies in Atomic Physics*, 1972; 3: 49~136
- [6] Q.C.Kessel and B.Fastrup. *Case Studies in Atomic phys.*, 1973; 3: 137
- [7] J.C.Weisheit. *Ap.J.*, 1974; 190: 735~740
- [8] U.Fano. *Phys. Rev.* 1961; 124: 1866~1878
- [9] J.Silk and R.L. Brown. *Ap.J.*, 1971; 163: 495
- [10] A.Unsöld. *Physik der Sternatmosphären*, (Springer-Verlag, Berlin), 1955
- [11] H.R.Griem. in *Plasma Spectroscopy* (McGraw-Hill), 1964
- [12] H.Van Regemorter. *Annual Review of Astr. and Ap.*, 1965; 3(71)
- [13] A.C.Cheung et al. *Nature*, 1969; 221(626)
- [14] L.E.Snyder and D.Buhl. *Ap.J.Letters*, 1974; 189
- [15] E.Roueff and H.Van Regemorter. *Astr. and Ap.*, 1969; 1(69)
- [16] 曾琴. 原子与分子物理学报. 1985; 2(4)

Rules of Judging Models for Time Series Analysis

Li Rui

Abstract

Judging model's order is an important problem in time series analysis (such as parameter spectral estimation, system identification, regressive analysis). This paper discusses and analyses several ways to judge model's order which have been developed. At the same time it point out their usage, and compares them with each other.

key words: Time series analysis, Spectral estimation, System identification, Modeling, Judging order

Some Atomic and Molecular Problems in Studing of Interstellar Space

Zhou Maotang

Abstract

The eight atomic and molecular problems in studing of interstellar space are recommended:

1. Observation about interstellar molecules
2. Formation about interstellar molecules
3. Atomic collisions
4. Atoms in highly excited states
3. Ionization problems
6. Broadening about spectra
7. Oscillator strength
8. Interstellar Maser

Key words: Space physics, Interstellar molecules, Interstellar atoms