

电子与氦原子激态碰撞速率的光谱法研究*

黄元网

考尔贝, 伯吉斯

(中国科学院武汉物理研究所)

(英国伦敦帝国理工学院)

提 要

在电子密度 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 电子温度 1.1 eV 的氦等离子体中, 用激光共振荧光, 敏化荧光和激光“烧通”三种光谱技术, 研究了电子与激态氦原子的碰撞速率。并与以文献上沿用的电子碰撞速率为基础的氦原子的多能级碰撞和辐射模型的计算进行了比较, 发现该模型在很大程度上不能预言此类等离子体的特性。实验结果表明, 氦原子激态间的电子碰撞转移速率的实际值远比理论值低。

一、引 言

对于电子密度 n_e 在 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 范围, 电子温度 T_e 在 $0.3 \sim 0.8 \text{ eV}$ 范围的氦等离子体, Burgess 等人^[1]用时间分辨的激光荧光光谱方法研究了电子与氢原子的碰撞速率过程, 发现实验结果与多能级碰撞和辐射模型的理论预言有很大的歧离。对于主量子数 $n=2$ 和 3 的能级, 电子碰撞去激发速率系数比 Johnson^[2]理论预言的值低约一个量级。为了检验理论与实验间的差异是否仅局限于电子与中性氢原子碰撞情形, 我们用几种激光光谱方法, 对 $n_e = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $T_e = 1.1 \text{ eV}$ 的氦等离子体中的电子与中性氦原子的碰撞速率过程, 从不同侧面进行了研究。

本文具体给出了利用激光共振荧光, 敏化荧光和激光“烧通”三种光谱方法所获得的实验结果, 并分别与氦原子的多能级碰撞和辐射模型的计算值进行了比较。

二、理论模型

我们原则上采用 Hess 和 Burrell^[3]的多能级碰撞和辐射模型。该模型包括了氦原子主量子数 $n=15$ 以下的能级, 并把所有 $n=4$ 以下的精细结构子能级分立开来, 总计考虑 30 个能级。并假定: (1) 原子自发辐射和电子碰撞是引起束缚态能级间跃迁的主要因素; (2) 引起原子离化的唯一因素是电子碰撞; (3) 引起电子与离子复合的因素是三体碰撞复合和辐射复合; (4) 电子服从麦克斯韦速度分布; (5) 所有 HeII 离子处于离子基态; (6) 忽略多光子过程, 原子之间的碰撞及等离子体的迁移和扩散。

有关能级的一组速率方程, 可用矩阵简洁地表示如下:

$$\frac{dN}{dt} = XN + H. \quad (1)$$

式中, N 是 (30×1) 矩阵, N_i 表示第 i 个能级的粒子密度。 H 也是 (30×1) 矩阵, H_i 表示

收稿日期: 1984年2月20日; 收到修改稿日期: 1984年3月27日

* 本文曾在 '83 ICL (中国, 广州) 上宣读。

电子与离子复合到氦原子第 i 个能级的速率。 X 是 (30×30) 矩阵, 其矩阵元表示有关能级的离化速率及能级间的耦合速率。按照文献 [3] 所引用的有关公式, 结合 n_e 和 T_e 的具体数值, 即可算出各种速率, 再用电子计算机数值解 (1) 式, 计算出各能级的粒子密度。

当入射激光频率与两特定的上下能级 u 和 l 间的跃迁共振时, 描写激光脉冲照射期间各能级的粒子密度变化的速率方程组成为

$$\frac{dN}{dt} = X^P N + H. \quad (2)$$

矩阵 X^P 除下列四个矩阵元需修改为 $X_{uu}^P = X_{uu} - fB_{lu}$, $X_{lu}^P = X_{lu} + fB_{ul}$, $X_{ul}^P = X_{ul} + fB_{lu}$, $X_{uu}^P = X_{uu} - fB_{ul}$, 其余矩阵元与 X 矩阵的元素全同。上述表式中的 f 是入射辐射的光通量, B_{lu} 和 B_{ul} 分别是爱因斯坦感应吸收和辐射系数。

由 (1) 式, 令 $dN/dt = 0$, 可求得激光照射前, 在特定电子密度和电子温度情况下, 等离子体中氦原子各能级上粒子密度分布的稳态值。这组稳态值用作计算方程组 (2) 的初始条件, 由此可计算出各能级粒子密度随激光入射时间的变化。根据粒子密度数据, 即可预言激光共振荧光, 敏化荧光和激光“烧通”等一系列特性。

三、实验方法和结果

1. 实验装置

等离子体源是处于放电余辉阶段的 70 cm 长的直线箍缩等离子体。此阶段的等离子体均匀、无电流, 并且复合弛豫过程很慢, 在激光脉宽内可把它看成是静态的。

放电室中充以 0.45 Torr 纯氦气。通过测量氦原子波长为 4471 Å 的线光谱和连续光谱强度比的方法^[4], 确定等离子体中的电子温度。用激光干涉法^[5] 诊断电子密度。所有实验测量都选择在电子密度为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和电子温度为 1.1 eV 的时刻。在这样的电子密度和温度下, 电子碰撞速率既高到足以支配整个碰撞速率过程, 又低于激光感应速率。

激光源是同轴氙闪光泵浦的可调脉冲染料激光器。用普克尔盒整形, 使脉冲上升时间小于 2 ns。用法-布标准具调节振荡波长, 所获得的线宽是 0.3 Å, 大致等于所研究的跃迁的线宽。

探测系统包括 Mono Spek 1000 型 1 米光栅单色仪, 快响应的 RCA 4836 光电倍增管及 Tektronix 7904 示波器。整个系统的时间响应为 2 ns。信号用偏振感光片照相记录。

2. 共振荧光测量结果

激光沿轴向通过等离子体柱, 在和光束成 90° 的方向观测等离子体柱中部和激光作用的区域所发出的荧光。由于普克尔盒的整形, 入射激光脉冲上升时间约 1 ns, 宽度为 160 ns。调谐激光波长, 观测了当饱和泵浦 2^3P-3^3D 跃迁(波长 5876 Å) 和 2^3P-4^3D 跃迁(波长 4471 Å) 时, 所对应的时间分辨的共振荧光。图 1 表示由 5876 Å 荧光测量值得到的 3^3D 能级的粒子密度增强随时间(以泵浦光脉冲起始时间为时间零点)变化的关系。图中也示出了多能级碰撞和辐射模型的计算曲线。表 1 列出了有关实验和测量的具体数据。

3. 敏化荧光测量结果

将激光波长调到 5876 Å (对应 2^3P-3^3D 跃迁), 由于碰撞效应, 泵浦跃迁上能级集居

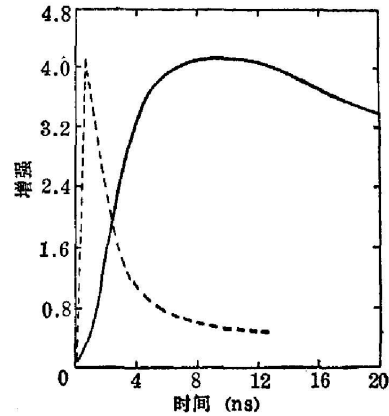
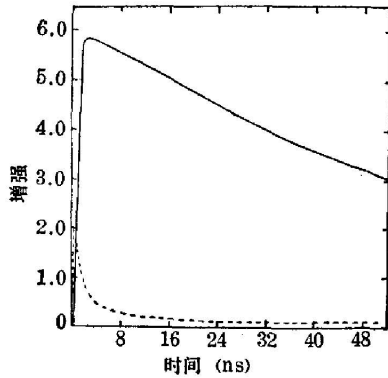


图1 当激光脉冲在 $t=0$ 时刻泵浦跃迁 2^3P-3^3D 时, 3^3D 能级粒子密度增强随时间的变化

Fig. 1 Enhancement of population density of the 3^3D level vs time when pumping from 2^3P to 3^3D level with laser pulse started at $t=0$

图2 当激光脉冲在 $t=0$ 时刻泵浦跃迁 2^3P-3^3D 时, 3^3P 能级的粒子密度增强随时间的变化

Fig. 2 Enhancement of population density of the 3^3P level vs time when pumping from 2^3P with laser pulse started at $t=0$

表1 由激光感应共振荧光确定的两个跃迁上能级粒子密度增强及衰减时间。
等离子体电子密度 $n_e=5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 电子温度 $T_e=1.1 \text{ eV}$

Table 1 Enhancements of upper level population density of two transitions determined by laser induced resonant fluorescence at electron density $n_e=5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, and electron temperature $T_e=1.1 \text{ eV}$

跃 迁	激光峰值功率 $\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{\AA}^{-1}$	最 大 增 强		衰 减 时 间 (ns)	
		实 验	理 论	实 验	理 论
2^3P-3^3D	100	5.9	2.0	37	2.5
2^3P-4^3D	54	3.0	0.2	25	12

表2 当激光泵浦 2^3P-3^3D 跃迁时, 几条敏化荧光强度上升的时间。
等离子体电子密度 $n_e=5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 电子温度 $T_e=1.1 \text{ eV}$

Table 2 Risetimes of various sensitized fluorescences at electron density $n_e=5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ and electron temperature $T_e=1.1 \text{ eV}$ when laser pumping from 2^3P to 3^3D

跃 迁	上 升 时 间 (ns)	
	实 验	理 论
3^3P-2^3S	6	0.6
3^3S-2^3P	6	1.1
4^3D-2^3P	8	0.7
3^1D-2^1P	18	1.5
3^1P-2^1S	12	1.3

的粒子向邻近能级转移, 因此可以观测到许多与泵浦激光波长不同的所谓敏化荧光。表 2 列出了 5 条敏化荧光强度上升时间的测量值和相应的多能级理论模型的计算值。图 2 示出了由相应于 3^3P-2^3S 跃迁的敏化荧光的测量数据而得到的能级 3^3P 粒子密度增强随时间的变化曲线, 以及相应的理论计算的归一化曲线。

4. 激光“烧通”测量结果

饱和和吸收所需要的光强是有关能级碰撞转移速率^[1]的函数。我们将激光波长分别调到 5876 \AA 和 4471 \AA , 用中性滤波器改变光强, 并用已校对的光电二极管鉴别它。将光栅单色仪调到待测的跃迁线中心, 仪器带宽调成 0.2 \AA , 仍用 RCA 4836 光电倍增管和快速示波器探测和显示透射光强。用此方法, 测量了激光穿透等离子柱的透射百分比与入射光强的函数关系。

图 3 表示对 2^3P-3^3D 跃迁的实验测量点和对应的多能级模型的计算曲线。实验表明, 饱和和 2^3P-3^3D 跃迁所需入射光强远比理论预言的低。对于 2^3P-4^3D 跃迁, 实验与理论比较有类似情形。

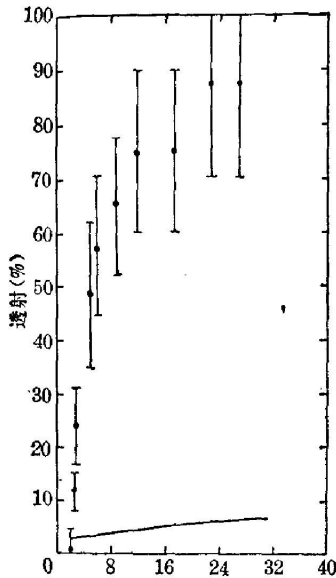


图 3 波长 5876 \AA 的激光束沿轴向穿过 70 cm 长氦等离子体的透射率与入射激光峰值功率的函数关系

Fig. 3 Percentage transmission of laser beam at $\lambda=5876 \text{ \AA}$ along a 70 cm axial path of helium plasma as a function of incident laser power

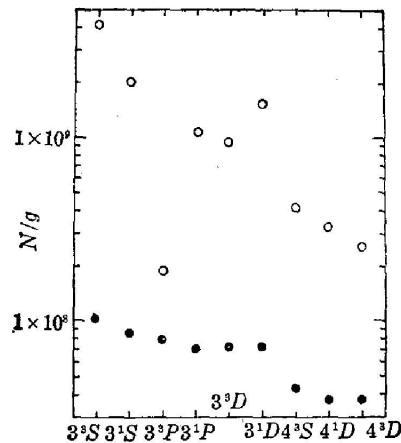


图 4 在电子密度 $n_e=5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 电子温度 $T_e=1.1 \text{ eV}$ 的氦等离子体中, 氦原子激发态能级的粒子密度

Fig. 4 The population densities of excited levels of helium atom for helium plasma at electron density $n_e=5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ and electron temperature $T_e=1.1 \text{ eV}$

5. 激光照射前某些能级粒子密度的测量

用标准钨带灯校对包括光栅单色仪及光电倍增管在内的整个探测系统的光谱响应, 测量氦原子处于可见光谱区的某些发射线的绝对强度, 由此确定了无激光照射下氦原子主量子数 $n=3$ 的精细结构各子能级, 及 4^3S 、 4^1D 和 4^3D 能级的粒子密度。图 4 表示实验测量

值和多能级碰撞辐射模型的计算值。

由图可见: (1) 能级粒子密度的测量值远大于理论计算值; (2) $n=3$ 各子能级的粒子密度的实际值偏离热平衡分布甚远(相对偏离 $>40\%$), 而理论计算值非常接近热平衡分布(相对偏离 $<2\%$)。

在处于放电余辉阶段的等离子体中, 原子各激发态能级的粒子数主要由电子与离子的复合而来。假定多能级模型采用的复合速率数据是正确的, 则各能级粒子密度的测量值远大于计算值的结果表明, 电子与氢原子碰撞去激发速率远低于理论值。上述第(2)个结果也同样说明了这一点。

泵浦跃迁上能级粒子密度(用 N_2 表示)增强(用 E 表示)的定义是: $E(t) = [N_2(t) - N_2(0)]/N_2(0)$ 。设 t_0 时刻, 光脉冲强度升高到足以使对应跃迁的吸收达到深度饱和, 因激光脉冲上升时间很快, 有 $N_2(t_0) = [N_1(0) + N_2(0)]g_2/(g_1 + g_2)$ 。我们可由上面两式得到最大增强的表达式是:

$$E(t_0) = [g_2 N_1(0)/g_1 N_2(0) - 1]g_1/(g_1 + g_2)。 \quad (3)$$

式中 g_2 , $N_2(0)$ 和 g_1 , $N_1(0)$ 分别表示上下能级的统计权重和激光照射前的粒子密度。

对于 5876 \AA 跃迁, $N_2(0)$ 为能级 3^3D 的粒子密度, 其测量值(见图 4) $N_2(0)/g_2$ 是 $8.9 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 。 $N_1(0)$ 即 2^3P 的粒子密度, 通过谱线 4471 \AA (2^3P-4^3D 跃迁)的小信号光学深度的测量, 可确定其值为 $N_1(0)/g_1 = 1.44 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。由(3)式, 3^3D 能级上的粒子密度的最大增强是 5.7。由共振荧光测量所获的最大增强是 5.9(见图 1 或表 1)。考虑到测量误差, 这两个数值彼此符合得很好, 表明了实验测量的可靠性。

四、结论和讨论

通过上节几个测量和计算结果的比较, 发现以目前文献上的电子碰撞速率为基础的氢原子的多能级模型^[3], 不能解释中等电子密度($n_e \approx 10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)和较低温度($T_e \approx 1 \text{ eV}$)的氢等离子体的一些性质。实验与理论之间的歧离程度与类似条件下氢等离子体的情形^[1]相似, 归结如下:

1. 激光共振荧光强度(与共振跃迁上能级粒子密度增强成比例)的衰减速率的观测值远低于理论计算值。
2. 敏化荧光的上升时间的观测值远大于理论计算值。
3. 对应 2^3P-3^3D 和 2^3P-4^3D 两个跃迁的饱和吸收所需实际激光功率远比理论预言的低。
4. 无激光照射情形下, 氢原子 $n=3$ 的各子能级及 4^3S 、 4^1D 和 4^3D 能级的粒子密度的测量值远大于理论计算值。

氢原子的多能级模型不能满意解释上述这些实验事实的可能原因, 是该模型所用的能级间的电子碰撞跃迁速率过高。由于迄今尚无电子与氢原子碰撞截面的精确理论计算公式, 许多碰撞速率系数的计算只能根据碰撞截面的半经验公式, 参数的选择有较大的局限性。文献[1]作了模拟计算, 发现若将按 Johnson 公式计算的氢原子能级间的电子碰撞速率人为的减低 10 倍, 其计算结果比较接近实验事实。

在目前所用电子密度条件下,分子的作用,原子间碰撞等过程的速率远低于电子碰撞速率,多能级模型不考虑这些速率过程的近似是正确的。若考虑这些速率过程,理论与实验的偏离将更大。

我们所用的脉冲光能量一般为数十毫焦,不足以影响等离子体参数。其功率密度也排除了多光子过程发生的可能性。在用激光光谱法研究电子与类氢氦离子碰撞速率的工作中^[6],激光功率比本工作所用的高出1~2个数量级,并未见明显的多光子效应。文献[6]表明,以 Seaton 及 Bates 等人的电子与类氢离子碰撞速率为基础的类氢氦离子的多能级碰撞和辐射模型,较能满意地预言实验结果。所以问题归结为:电子与中性原子(氢、氦)的非弹性碰撞截面及速率的计算,需要进一步深入的研究和探讨。另一方面,电子服从麦克斯韦速度分布律的假定的正确性,也有待深入研究。

作者感谢 R. Hess 博士在有关计算机程序计算方面的协助。

参 考 文 献

- [1] D. D. Burgess, *et al.*; *J. Phys. B: Atom Molec. Phys.*, 1980, **13**, No. 8 (Apr), 1675.
- [2] L. C. Johson; *Astrophys. J.*, 1972, **174**, No. 1 (May), 227.
- [3] R. Hess and F. Burrell; *J. Q. S. R. T.*, 1979, **21**, No. 1 (Jan), 23.
- [4] H. Griem; *«Plasma Spectroscopy»*, (New York, McGraw-Hill, 1964), 279.
- [5] D. E. T. F. Ashby and D. F. Jephcott; *Appl. Phys. Lett.*, 1963, **3**, No. 1 (Jul), 13.
- [6] G. Kolbe, *et al.*; *J. Phys. B: Atom Molec. Phys.*, 1982, **15**, No. 22 (Nov), 4233.

Studies of electron collision rates for excited states of helium atom with laser spectroscopy*

HUANG YUANWANG

(Wuhan Institute of Physics, Academia Sinica)

G. KOLBE AND D. D. BURGESS

(Imperial College of Science and Technology, London, England)

(Received 20 February 1984; revised 27 April 1984)

Abstract

Laser induced resonant fluorescence, sensitized fluorescence and laser "burn through" techniques have been used to study the electron collision rates in a well diagnosed helium plasma, with electron density $n_e = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ and electron temperature $T_e = 1.1 \text{ eV}$, for excited states in neutral helium.

Comparisons are made with theoretical calculations of a multi-level collisional radiative model of helium atom based on widely accepted electron collision rates. The model fails by substantial amounts to predict the plasma behaviour. The experimental results suggest that electron collisional transfer rates between excited states of helium atom are much lower than those predicted by theory.

* This paper was presented at '83 ICL (Guangzhou, China).