

高里德伯态氢原子与氢分子的全量子态分辨的 散射动力学研究 : 费米模型的精确性 *

戴东旭 吴国荣 杨学明[†]

(中国科学院大连化学物理研究所 分子反应动力学国家重点实验室 大连 116023)

摘要 文章描述了高里德伯态氢原子与氘分子(D_2)散射的近期研究结果. 实验研究表明, 在高里德伯态氢原子与 D_2 的散射中, 非弹性散射和化学反应散射都是重要的. 在非弹性散射过程中, 氘分子的核自旋是守恒的. 反应散射结果说明, 高里德伯态氢原子与氘分子的散射动力学和质子与氘分子的散射动力学是非常类似的. 这一结果表明, 费米的独立碰撞模型在态-态散射动力学的层次上也是正确的.

关键词 里德伯态氢原子, 反应散射, 费米模型

Full quantum state resolved scattering dynamics of high Rydberg H atom with hydrogen molecule : the validity of Fermi model

DAI Dong-Xu WU Guo-Rong YANG Xue-Ming[†]

(State Key Laboratory of Molecular Reaction Dynamics , Dalian Institute of Chemical Physics , Dalian 116023 , China)

Abstract Recent developments in the study of Rydberg H - atom scattering from D_2 molecules is reviewed. Experimental results show that both inelastic and reactive scattering are significant , and that nuclear spin is conserved in the former process. It is also found that the reactive scattering with D_2 is remarkably similar to the proton reactive scattering with D_2 . These results show that the Fermi independent collider model is valid at the full quantum state - to - state scattering level.

Keywords Rydberg H atom , reactive scattering , Fermi model

高里德伯原子分子是非常特殊的一类激发态物种, 介于一般的中性分子与离子之间. 通俗地说, 当原子分子激发态的能量可以用里德伯态公式来描述时, 我们称这些态为原子里德伯态. 一般原子或分子的里德伯量子态可由其主量子数 n 来描述. 里德伯态原子或分子的大部分物理性质是随主量子数非常快速地变化的. 通常, 这些物理性质是随 n^α 变化的 ($\alpha = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \dots$). 例如, 里德伯态原子分子的寿命是随 n^3 变化的, 极化率是随 n^7 变化的, 结合能是随 n^{-2} 变化. 2 个里德伯态原子间的范德瓦尔斯相互作用是随 n^{11} 变化的, 等等. 这些随 n 变化的物理规律可以从氢原子的本征函数推导而来. 由于里德伯态原子分子的物理特性随 n 的快速变化, 处于很高 n 值的里德伯态原子分子有非常奇特的物

理及化学特性. 例如, 高里德伯态原子分子的寿命要比一般原子分子激发态的寿命要长许多. 里德伯态原子分子的这些奇特的性质, 被广泛应用于物理及化学研究之中(见图 1). 例如, 在分子动力学研究中, 被广泛应用的氢原子里德伯态时间飞渡方法就是利用氢原子处于高里德伯态的长寿命的特性. 我们实验室就是利用这种非常独到的实验方法来研究分子碰撞动力学的.

高里德伯态原子分子的碰撞过程的动力学是一个相当有趣的研究课题. 里德伯态原子的碰撞动力

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 :G1999075300)、国家自然科学基金(批准号 20373070)、中国科学院资助项目
2005 - 08 - 02 收到初稿 2006 - 03 - 01 修回

[†] 通讯联系人. Email xmyang@dicp.ac.cn

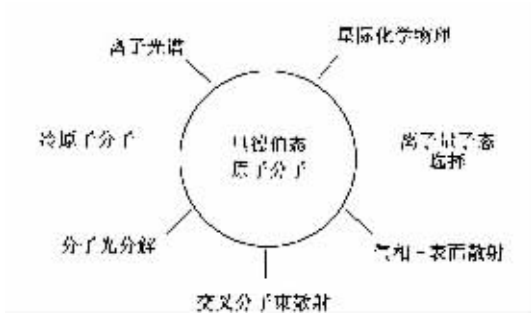
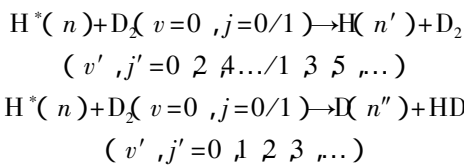


图1 里德伯态原子分子在科学研究中的应用

学研究是由当时的意大利科学家 Amaldi 和 Segre 研究高里德伯态钾原子与惰性气体原子碰撞时高里德伯态光谱线位移开始的^[1]。为了解释他们观测到的谱线位移实验结果,著名科学家费米^[2]提出了一个所谓的“独立碰撞体”模型^[3-7]。这一模型的主要特点是将里德伯态原子的碰撞近似为 2 个碰撞过程:里德伯电子与另一原子的碰撞,以及离子核与另一原子的碰撞。这一模型从物理的观点来看是相当合理的。当氢原子处于 $n = 45$ 时,玻尔半径是 1075 \AA ,也就是说里德伯态电子与离子核的间距要比一般化学物理相互作用间距($\sim 10 \text{ \AA}$)要大许多。而且,在高里德伯态电子与离子核之间的相互作用能非常弱,一般只有几十波数。因此,人们认为里德伯态原子的碰撞是电子与离子核两个单独的碰撞,是一个相当合理的近似。这一模型最为成功的例子是,解释了在高平动能碰撞时高里德伯态原子被破坏的总截面是电子散射截面与离子核散射截面之和这一结果^[8,9]。最近, Davis 等人研究了高里德伯态氢原子与 N_2 和 O_2 的振动态分辨的非弹性散射过程,发现非弹性散射过程中里德伯态电子只是一个旁观者。

量子态分辨的散射研究是研究原子分子碰撞动力学最好的实验方法。最近,我们实验室利用氢原子里德伯态的方法,对高里德伯态氢原子与氢分子的碰撞动力学进行高分辨的散射研究^[10]。实验的装置如图2所示。实验结果表明,在高里德伯态氢原子 $H(n)$ 与 D_2 分子的散射过程中,至少同时存在非弹性散射的能量传递过程以及化学反应过程:



在非弹性散射的能量传递过程中, D_2 的核自旋对称性是守恒的。也就是说,里德伯态原子与分子的碰撞无法改变核自旋对称性。更有趣的是,在散射实验中,

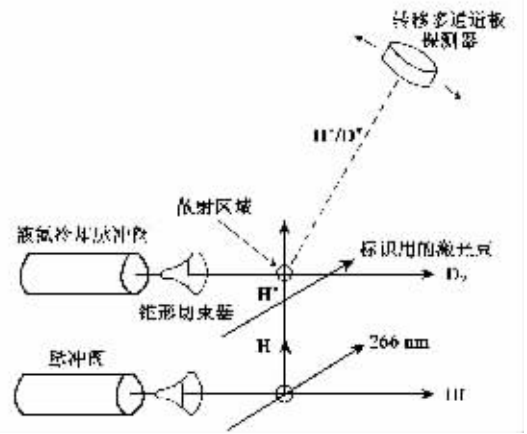


图2 研究高里德伯态氢原子与 D_2 的散射装置

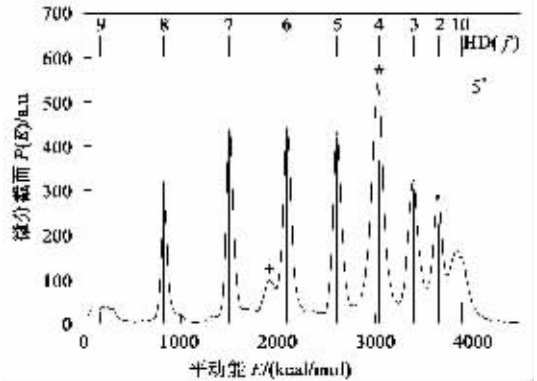


图3 高里德伯态氢原子与 D_2 分子散射和氢离子与 D_2 散射微分截面结果的比较

我们还观测到了 $H(n)$ 与 D_2 的反应过程。而反应产物的 D 原子也是处在高里德伯态上。这一实验结果说明,在里德伯态反应过程中,里德伯态电子基本上没有参与反应过程,而是作为一个旁观者的角色。因此,里德伯态原子 $H^*(n)$ 与氢分子的反应实际上与质子 (H^+) 与氢的反应非常类似。我们将里德伯态氢原子与 D_2 的高分辨散射结果和质子与 D_2 的较低分辨的散射结果作了比较,比较的结果说明,在类似的实验条件下,两种散射产物在某一特定角度下的微分截面是非常相似的(见图3)。这一结果说明,费米“独立碰撞体”模型在里德伯态原子量子态分辨的反应散射过程中也是正确的。这一结果给了我们一个相当重要的启示:里德伯态氢原子可以被用来研究质子的态-态传能及化学反应动力学,为离子反应及传能的态-态动力学研究开辟了一条新的研究思路。里德伯原子量子态分辨的散射实验研究也为这一课题的理论量子动力学研究提出了挑战。

致 谢 非常感谢参与本项研究工作的研究人员.

参 考 文 献

- [1] Amaldi E, Segrè E. *Nuovo Cimento*, 1934, 11 :145
 [2] Fermi E. *Nuovo Cimento*, 1934, 11 :157
 [3] Renwick S P, Deng F, Martinez H *et al.* *Phys. Rev. A*, 1993, 47 :1907
 [4] Matsuzawa M. In: *Rydberg State of Atoms and Molecules*. Ed. Stebbings R F, Dunning F B. New York : Cambridge University Press, 1983
 [5] Dunning F B, Stebbings R F. In: *Rydberg States of Atoms and*

Molecules. Ed. Stebbings R F, Dunning F B. New York : Cambridge University Press, 1983

- [6] Dunning F B, Stebbings R F. *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 1982, 33 :173
 [7] Gallagher T F. *Rydberg Atoms*. Cambridge : Cambridge University Press, 1994
 [8] Koch P M. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, 43 :432
 [9] Wang L J, King M, Morgan T J. *J. Phys. B*, 1986, 119 :L623
 [10] Dai D, Wang C C, Wu G *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 95 :013201

· 物理新闻和动态 ·

原子线

适用于电子装置上的世界上非常细小的金丝已能成批地生产,这个工作是由荷兰 Delft 大学 Kavli 纳米实验室的 P. Snijders 和 S. Rogge 两位教授与美国田纳西大学的 H. Weitering 教授合作完成的.他们首先在温度为 1200 K 下对硅基底进行烘烤,从而可以对硅基内的杂质进行清洗,再将这种硅基表面切割成阶梯形状,第二步是把金原子蒸发并喷溅于硅基底上,最后对金原子不加干涉,让金原子不受干扰地沿着阶梯的起伏形状自组装成为一条具有 150 个金原子长度的金细丝.他们制作的金细丝具有不同的宽度,通常为 50 nm,其中最细的只有一个原子的宽度.这种最细的金细丝现在并没有使用在任何电子装置上,而只是作为科学研究之用.

科学家们利用隧道扫描显微镜 (STM) 的探针沿着金原子铺成的细丝进行测试,主要是观察电子在细链上运动时的纳米电性. STM 探针不仅可以给出原子的图像,还可以测量出原子最外层电子的能态.通过测试,他们看到了电荷密度波的初始阶段,但在某些情况下,由于细线长度的缩短,电荷密度波形成驻波.

利用 STM 探针沿着细丝也可以测到冻结在各个位置上的电子密度.测试后奇异地发现,沿着细线可以共存着两个或更多的密度波,同时电荷密度同样也具有类粒子性,即它们具有分数电荷或它的倍数的激发态.

(云中客 摘自 *Physical Review Letters*, 24 February 2006)

宇宙中最古老的爆炸

γ 射线爆是一种发射强 γ 射线的激烈爆炸,可持续几毫秒到约一百秒的时间.继初始的爆炸后,会有波长较长的辐射的“余辉”,持续几周甚至几年.许多天文学家认为,当一个大质量的恒星在其“寿命”尽头经历超新星爆炸并崩塌成黑洞时发生 γ 射线爆.

名为 GRB 050904 的只持续了 80 秒的 γ 射线爆是于 2005 年 9 月 4 日由美国国家航空和宇宙航行局的 Swift 人造卫星探测到的.意大利国立天体物理研究所的科学家描述了在几秒钟内卫星如何转向,使其内置的 X 射线望远镜指向天空中发生 γ 射线爆的区域 (*Nature* 2006, 440 :164).这使得在世界上其他光学和红外线望远镜上工作的天文学家能够寻找和测量 γ 射线爆的余辉.

日本东京技术研究所的科学家报道了他们测量的光学波段的余辉 (*Nature* 2006, 440 :184).美国 North Carolina 大学的研究组测量了较长的近红外波段的余辉 (*Nature* 2006, 440 :181).

光线传播的速度是有限的,因此需要经过一定的时间才能到达我们这里.宇宙学家通常使用“红移”来定义距离,或定义一个物体实际上存在于距今多遥远的过去. γ 射线爆 GRB 050904 的红移约为 6.3,是至今观测到的最远的恒星爆炸,发生在宇宙的年龄只有约 9 亿年的时候.当前的宇宙年龄为 137 亿年.研究人员认为现在可以探测其他遥远的 γ 射线爆.这些 γ 射线爆可用于研究早期宇宙中第一代恒星是如何形成的.

(树华 编译自 *Physics Web News*, 8 March 2006)