

# 量子超化学中的类双缝干涉 :玻色 – 爱因斯坦凝聚原子 – 三聚物相干转化

景辉<sup>1</sup> † 程静<sup>2</sup> Pierre Meystre<sup>3</sup>

(1 河南师范大学物理系 新乡 453007)

(2 华南理工大学物理系 广州 510640)

(3 亚利桑那大学 B2 研究所与物理系 图森 85721)

**摘要** 文章作者首次研究了玻色凝聚体中原子与三原子异核分子间的相干转化过程,特别是双通道量子干涉效应的作用,该效应可以看作是量子简并物质波化学中的类双缝干涉.利用相长干涉可以进一步提高分子制备过程的产率,为异核分子的产生和相干调控提供了一个新的技术.此工作发表在 2007 年第 9 卷第 133002 页的 Phys. Rev. Lett 上.

**关键词** 玻色 – 爱因斯坦凝聚体,异核三聚物,量子干涉

## Coherent atom-trimer conversion in a repulsive Bose-Einstein condensate

JING Hui<sup>1</sup> † CHENG Jing<sup>2</sup> P. Meystre<sup>3</sup>

(1 Department of Physics, Henan Normal University, Xinxing 453007, China)

(2 School of Physical Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(3 B2 Institute and Department of Physics, The University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA)

**Abstract** In our recent work (H. Jing, J. Cheng, and P. Meystre, Phys. Rev. Lett. 99, 133002 (2007)), we studied the constructive interference between two chemical reaction channels in the process of coherent atom-trimer conversion in a repulsive atomic Bose condensate. This interference can be viewed as a double-slit-like interference in quantum degenerate matter-wave chemistry (superchemistry). The constructive interference can lead to a significant enhancement of trimer production, leading to a new technique for coherent assembly and control of ultracold heteronuclear molecules.

**Keywords** Bose-Einstein condensate, heteronuclear trimer, quantum interference

1995 年,稀薄碱金属原子蒸气中玻色 – 爱因斯坦凝聚现象的实验实现,代表着原子、分子和光物理学领域的一项重大突破,新的进展和引人瞩目的新结果不断涌现<sup>[1]</sup>.其中,由原子玻色 – 爱因斯坦凝聚体来制造超冷分子甚至分子凝聚体的研究近年来极为活跃.在最近的报道中,通过使用磁费希巴赫共振和相干光缔合技术<sup>[2-5]</sup>,在实验上已经相继产生了同核<sup>[2,5]</sup>和异核者<sup>[6]</sup>超冷双原子分子.超冷异核分子是一个受到普遍关注的体系,特别是永久电偶

极矩的存在使其成为研究各向异性作用量子气体的最佳候选<sup>[6]</sup>.于是,一个自然的问题是,如何从原子凝聚体出发组装和调控更复杂的冷分子?还会出现哪些新的物理现象?这些问题是当前冷分子研究的热点之一<sup>[7]</sup>.

\* 国家自然科学基金(批准号:10874041)和河南省创新人才基金(批准号:2008HASTIT014)资助项目

2008-04-16 收到初稿 2008-08-31 收到修改稿

† 通讯联系人. Email: jinghui73@gmail.com.cn

事实上,最近国外实验小组已经相继观测到了四聚物分子  $Cs_4$ <sup>[5]</sup>和三原子分子  $Cs_3$ (所谓 Efimov 三原子共振,即在两原子束缚态不存在或很弱的情形下形成三体束缚态的奇特量子效应)<sup>[8]</sup>。此外理论上也预言了三原子分子光分解时具有的多通道量子超选择(super-selection)效应等。受这些工作启发,我们研究了三原子分子形成过程,并发现了一个有趣的双通道量子干涉效应,该项工作发表在 2007 年 9 月的美国《物理评论快报》(Phys. Rev. Lett., 2007 99:133002)上。

这篇快报从理论上展示,通过构造两条量子通道及其相长量子干涉,异核三聚物产率可以进一步提高<sup>[9]</sup>。我们随后的工作表明,类似效应在玻色-费米混合原子气体中也可以实现<sup>[10]</sup>。

该方案的一个基本思想是:首先,通过一个标准的磁费希巴赫共振产生高激发态二聚物,然后,通过光缔合作用与束缚三聚物耦合。在转化过程中,通过相干粒子数捕获(CPT)技术,使得中间态(二聚物)粒子数保持为零。此外,三聚物的合成发生在两个相同粒子和一个不同粒子之间<sup>[11,12]</sup>。

在异核三聚物  $A_2B$  的形成中,特别有趣的一点是:类似熟知的双缝干涉过程,我们从同一个原子凝聚体样品出发,可以经过两个不同的反应通道而得到相同的产物。这两个通道包括中介二聚物  $A_2$ (通道 AA)和  $AB$ (通道 AB)。为设置一个反应步骤,我们首先单独考虑两个不同的反应通道。在我们建立的模型中,体系哈密顿量的最简形式可表示为

$$\hat{H} = -\hbar \int dr \{ \sum_{ij} \hat{\psi}_i^*(r) \hat{\psi}_j^*(r) \hat{\psi}_j(r) \hat{\psi}_i(r) + \delta \hat{\psi}_d^*(r) \hat{\psi}_d(r) + \lambda' [ \hat{\psi}_d^*(r) \hat{\psi}_a(r) \hat{\psi}_a(r) + \text{h.c.} ] + (\Delta + \delta) \hat{\psi}_g^*(r) \hat{\psi}_g(r) - \Omega [ \hat{\psi}_g^*(r) \hat{\psi}_d \hat{\psi}_b + \text{h.c.} ] \}$$

假定动力体系的主要特征可采用标准的平均场分析方法(即将算符化为一个复数)来描述<sup>[4]</sup>,我们就可以写出该体系 Gross-Pitaevskii 方程。为减少中间激发态的自发损失,我们利用了一种所谓的 CPT 技术<sup>[3]</sup>,通过一个所谓的“违反直觉的”脉冲序列来实现。若体系最初处在 CPT 态,那么它将一直近似地处在这个态(尽管绝热条件可能随时间推移而很难实现)。相比之下,我们提出三聚物的产生效率可以通过两通道相长干涉得到明显提高。

对三聚物形成的单通道而言,在双光子共振条件下,CPT 态确实存在:

$$N_{g,s} \equiv | \psi_{g,s} |^2 = \frac{1}{3} \left( \frac{\kappa (\lambda_i / \Omega_i)^2}{1 + \kappa (\lambda_i / \Omega_i)^2} \right),$$

其中  $k=4(i=1)$  或  $1(i=2)$   $\lambda$  和  $\Omega$  下标表示两个不同的反应通道。对两条通道 AA 和 AB 来说,在同样外场系数下,有  $N_{g,s}^{AB} < N_{g,s}^{AA}$ 。这意味着两条通道的反应效率不同。此外,通过一个合适的含时激光失谐因子  $\Delta$ ,可以取得近似的 CPT 演化(中间态布居数为零)<sup>[13]</sup>。

由于三聚物相关的碰撞参数在实验上尚未确切知道,于是我们就通过设置大量不同碰撞参数进行多组数值模拟。结果发现,通过控制原子-分子间耦合的失谐因子,总是可以观察到三聚物的稳定生成,其特征大致与二原子分子的生成类似<sup>[4]</sup>。但是在转化过程后期,AB 通道会比 AA 通道留下更多的原子 A(即生成更少分子)。当然,考虑到量子噪声或自发辐射效应后还会导致长时间下的分子衰减<sup>[3]</sup>。

我们的一个主要结果是,两通道的共存为接近三聚物理想 CPT 值提供了额外的灵活性。具体来说,在双通道情况下,三聚物 CPT 稳定态数目是

$$N_{g,s} = \frac{(\lambda_1 / \Omega_1 \chi \lambda_2 / \Omega_2)^2}{\lambda_1 / \Omega_1 + \lambda_2 / \Omega_2 + 3(\lambda_1 / \Omega_1 \chi \lambda_2 / \Omega_2)^2},$$

其中两个通道之间不对称因素是由于 AA 通道的中间态(二聚物)包含两个不可分辨的粒子,而 AB 通道的中间态(二聚物)由两个可分辨的粒子组成。用  $\eta_L = \lambda_L / \Omega_L$  ( $L=1,2$ ) 或系数  $R = \eta_2 / \eta_1$  表示,当加入脉冲  $\Omega_1(t)$  和  $\Omega_2(t)$  后,  $\eta_1$  和  $\eta_2$  逐渐增加,如果系统的振幅频率保持在一个常数,那么系统将沿着常数为  $R$  的曲线演化(参阅文献 [14])。

当只考虑物质波的相干耦合时,对任意的  $R$  值,效率均可达到理想值。但是,在有碰撞存在时,这种情况就变得不明显。事实上,随时间的变化,能够形成三聚物的每条独立通道与 CPT 情况下粒子数差距越来越大<sup>[4]</sup>,这时量子干涉起作用,  $R$  值的任意性为我们试图通过两种通道的干涉并达到理想 CPT 值提供了额外的灵活性,这在二聚物形成中是完全不具备的。

为了确定是否存在上述效应,对于不同的  $R$  值,我们通过使用与单通道情况相同的参数,求解体系运动的平均场方程,发现  $R=2$  时得到的三聚物的产率非常接近理想 CPT 情况,而且比单通道情况要大得多,特别是对于原先产率很低的情形,双通道的最优化干涉大大改善了原子-分子转化率。同时我们还观察到:在双通道情况下,三聚物产值可在某一瞬间比末态值大。这表明在体系变化中,维持一个恒定的比率  $R$  可能不是最佳的,最近我们正在采用新的非同步的含时外场  $R(t)$  来确定三聚物的最大

产率. 我们的最新工作表明, 在多暗态条件下,  $R$  参数的选择依赖于初始粒子数间的非平衡性( population imbalance )<sup>[15]</sup>.

我们要强调的是: 双通道干涉不依赖于三聚物势能函数具体形式. 该工作还可以推广到更优化的多缝干涉情形. 结合我们最近的双分子集体性相干置换反应工作<sup>[14]</sup>, 这些成果有望为物质波光学和量子简并超化学研究开拓一个颇为新颖的方向.

致谢 感谢孙林锋和伏吉庆对本工作的帮助.

参考文献

[ 1 ] P. Meystre , Atom Optics. Berlin :Springer – Verlag , 2001  
 [ 2 ] T. Köhler *et al.* Rev. Mod. Phys. , 2006 , 78 :1311 ; Jones K M *et al.* Rev. Mod. Phys. , 2006 , 78 : 483

[ 3 ] Hope J J , Olsen M K. Phys. Rev. Lett. , 2001 , 86 :3220 ; Ling H Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 93 :250403 ; Winkler K *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2005 , 95 :063302  
 [ 4 ] Pu H *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2007 , 98 :050406  
 [ 5 ] Chin C *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2005 , 94 :123201  
 [ 6 ] Ospelkaus C *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2006 , 97 :120402  
 [ 7 ] Bloch I. Science , 2008 , 319 :1202  
 [ 8 ] Kraemer T *et al.* Nature ( London ) 2006 , 440 :315  
 [ 9 ] Modugno G *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2002 , 89 :190404 ; Wang D *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2004 , 93 :243005  
 [ 10 ] Jing H. Cheng J , Meystre P. Phys. Rev. A , 2008 , 77 :043614  
 [ 11 ] Amado R , Noble J. Phys. Rev. D , 1972 , 5 :1992  
 [ 12 ] Braaten E *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2003 , 90 :170402  
 [ 13 ] Marzlin K P *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1997 , 79 :4728  
 [ 14 ] Jing H , Cheng J , Meystre P. Phys. Rev. Lett. , 2008 , 101 : 073603  
 [ 15 ] Jing H , Jiang Y , Zhang W P *et al.* New J. Phys. ,( to appear )



· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类重点书推荐

书名	作(译)者	书名	作(译)者
半导体自旋电子学	夏建白 等	全息干涉计量 - 原理和方法	熊秉衡
结构相变物理( 第二版 )	Fujimoto. M	超导、超流和凝聚体( 注释版 )	James F. A
实用量子力学	Flügge. S	现代经典光学( 注释版 )	Geoffrey Brooker
经典力学新基础( 第二版 )	Hestenes. D	固体能带理论和电子性质( 注释版 )	Jone Singleton
相变和晶体对称性	Izyumov. Y. A	原子物理学( 注释版 )	Christopher J. Foot
超快和纳米光学	张新平	固体的光学性质( 注释版 )	Mark Fox
现代光学制造工程	杨力	凝聚态物质中的磁性( 注释版 )	Stephen Blundell
量子光学导论	谭维翰	路径积分与量子物理导引	侯伯元 等
狭义相对论( 第二版 )	刘辽 等	技术磁学	钟文定
经典黑洞与量子黑洞	王永久	量子信息物理原理	张永德
普朗特流体力学基础( 翻译 )	H. 欧特尔 等	量子力学	张永德
液晶物理学( 影印 )	P. G. de Gennes	凝聚态物理的格林函数理论	王怀玉
临界现象理论( 影印 )	J. J. Binney	惯性聚变物理	沈百飞
软凝聚态物质( 影印 )	Richard A. L. Jones	量子统计力学( 第二版 )	张先蔚
量子力学原理( 第四版 )( 影印 )	P. A. M. Dirac	输运理论( 第二版 )	黄祖洽
基本粒子物理学的规范理论( 影印 )	T. P. Cheng	拉曼 布里渊散射( 第二版 )	程光煦
介观物理导论( 第二版 )( 影印 )	Y. Imry	现代物理学前沿选讲	黄祖洽
纳米薄膜分析基础( 影印 )	T. L. Alford	半导体的检测与分析( 第二版 )	许振嘉
统计力学( 第二版 )( 影印 )	F. Schwabl	d 波超导体	向涛
磁性量子理论 - 材料的磁学性能( 第三版 )( 影印 )	R. M. White	薄膜材料 - 应力、缺陷的形成和表面演化	卢磊
半导体物理电子学( 第二版 )( 影印 )	Sheng S. Li	激光光散射谱学	张明生
碳纳米管 - 从基础到应用( 影印 )	A. Loiseau	量子力学( 卷 I , 卷 II )( 第四版 )	曾谨言
引力与时空( 翻译 )	向守平、冯珑珑	拉曼光谱学与低维纳米半导体	张树霖
亚稳金属材料	胡壮麒	行星科学	胡中为、徐伟彪

购书与咨询电子信箱 : mlhukai@ yahoo. com. cn dpyan@sina. com