



“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术出版基金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉

 **CRC Press**
Taylor & Francis Group

冷 分 子

理论、实验及应用

COLD MOLECULES: THEORY, EXPERIMENT, APPLICATIONS

Roman V. Krems William C. Stwalley
Bretislav Friedrich

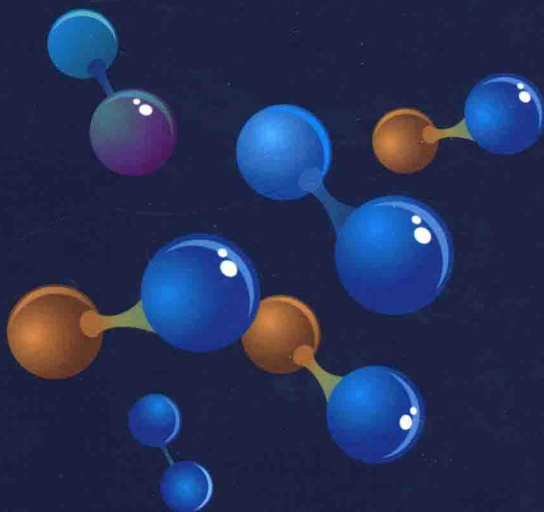
编 著

贾锁堂 马 杰 赵延霆

译

肖连团 秦成兵

审 校



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术出版基金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉

冷 分 子

理论、实验



Roman V. Krems — William C. Stwalley

Bretislav Friedrich

编 著

贾锁堂 马杰 赵延霆

译

肖连团 秦成兵

审 校



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

Cold Molecules: Theory, Experiment, Applications 1st Edition/by Roman V. Krems, William C. Stwalley, Bretislav Friedrich/ISBN:9781420059038
Copyright © 2009 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版。版权所有,侵权必究。

Huazhong University of Science and Technology Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由华中科技大学出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

湖北省版权局著作权合同登记 图字:17-2015-353 号

图书在版编目(CIP)数据

冷分子:理论、实验及应用/(加)克雷姆斯(Krems, R. V.), (美)斯特沃利(Stwalley, W. C.), (德)弗里德里希(Friedrich, B.) 编著;贾锁堂,马杰,赵延霆译. —武汉:华中科技大学出版社, 2015. 12

(世界光电经典译丛)

ISBN 978-7-5680-1478-6

I. ①冷… II. ①克… ②斯… ③弗… ④贾… ⑤马… ⑥赵… III. ①物理光学-研究 IV. ①O436

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 292293 号

冷分子:理论、实验及应用

Lengfenzi: Lilun Shiyan ji Yingyong

Roman V. Krems William C. Stwalley 编著

Bretislav Friedrich

贾锁堂 马杰 赵延霆 译

策划编辑:徐晓琦

责任编辑:余涛

封面设计:原色设计

责任校对:李琴

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录排:武汉楚海文化传播有限公司

印刷:湖北新华印务有限公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:50 插页:2

字数:843 千字

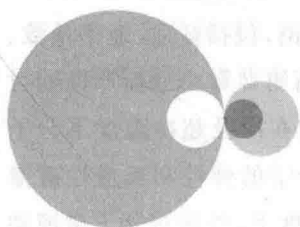
版次:2016年1月第1版第1次印刷

定价:228.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



译者序

20 世纪 90 年代以来,基于激光冷却、俘获和操控中性原子的理论和实验研究得到快速发展,使得冷原子物理、量子光学和精密测量等前沿科学发生了历史性变革,开创了一个全新的研究领域。自 1989 年以来,有五次诺贝尔物理学奖直接授予了从事激光冷却研究或与之相关的科学家,这些研究包括 1989 年原子钟与离子阱俘获技术,1997 年激光冷却和俘获原子,2001 年玻色-爱因斯坦凝聚态的研究,2005 年基于激光的精密光谱学的发展,以及 2012 年发现测量和操控单个量子系统的突破性实验方法。冷原子研究的蓬勃发展极大地激励了人们对冷分子的研究兴趣,与冷原子相比,冷分子的结构更为复杂,但同时也有很多独特的性质,其中最为重要的就是分子具有偶极矩(或者更高的四极矩等)以及磁极矩,这使得人们通过外电场或者外磁场操控其量子态成为可能。基于这些新奇的物理特性,冷分子在量子计算、超冷化学、量子模拟以及高分辨光谱等领域具有巨大的潜在应用前景。

随着国际上冷分子研究领域的快速发展,近年来国内也掀起了冷分子研究的热潮,但是目前在冷分子及相关领域的教材或参考书还十分有限。为推动冷分子研究领域的发展,培养学生们在本领域及其他物理和化学领域的研究兴趣,Roman V. Krems、William C. Stwalley 和 Bretislav Friedrich 等一起组织该领域内的重要研究小组共同参与编著了本书的英文版,介绍了他们对冷分子理论研究、实验方法和应用前景深刻独到的见解。无论是对刚进入该领域的新手,还是在冷分子方面取得一定成就的专家,该书精彩而易懂的内容

都是大有裨益的。本着介绍冷分子研究领域最新研究成果和推动国内冷分子研究发展的目的,由华中科技大学出版社组织,山西大学激光光谱研究所主持翻译了本书的英文版。

本书从理论、实验和应用三个方面,全面系统地介绍了“冷分子”的基本概念、基本原理、实验方法、实验结果及最新进展和对未来的展望。全书共由 18 章组成:第 1 章介绍了低温下原子分子散射的基本理论,包括截面、速率系数、散射长度的概念,并描述了量子碰撞理论的主要部分;第 2 章全面而严谨地讨论了经典和量子力学下的偶极子;第 3 章回顾了目前在冷及超冷温度下分子的振转非弹性和反应性散射的理论工作,包括不同分子的弹性和反应性碰撞零温度速率系数的研究;第 4 章讨论了在冷及超冷温度下,外场对分子碰撞动力学的影响,并展望了低温下分子与场相互作用研究领域中可能的新发现;第 5 章详细介绍了光缔合制备超冷分子的过程,包括同种原子、不同原子在单色光及双色光作用下的缔合以及各种探测方法;第 6 章介绍了长程力主导的近离解区域的分子态;第 7 章介绍了啁啾激光脉冲控制光缔合形成超冷分子的前景,展示了一系列以“超快物理的哪些方法可以应用到超冷物理”为主题的研究;第 8 章提出了一种利用整形激光脉冲的绝热拉曼光缔合的超快/超冷双色光缔合辅助方法;第 9 章介绍了磁场调谐 Feshbach 共振的概念,描述了从制备超冷原子到调谐 Feshbach 共振形成超冷分子的过程;第 10 章介绍了双组分费米气体和费米-费米混合系统中分子形成的物理描述;第 11 章是对 Feshbach 分子微观理论的简要介绍;第 12 章描述了极性冷分子在凝聚态物理中的若干相互作用;第 13 章主要介绍利用低温氦缓冲气体通过弹性碰撞来冷却分子的方法;第 14 章描述了基于非均匀电场的极性分子斯塔克减速、直流和交流俘获以及存储技术;第 15 章介绍了分子的制备和操控在基本物理的检验中的应用,包括寻找电子 EDM 等;第 16 章描述了精密分子光谱在基本物理常数可能变化的研究方面的应用,对比了精细结构常数和电子质子质量比在天体物理观测与实验室观测的若干想法;第 17 章展示了在可扩展的量子计算机中极性冷分子是实现量子比特的极具潜力的候选系统;第 18 章详细介绍了冷分子离子的多种研究技术及其应用。

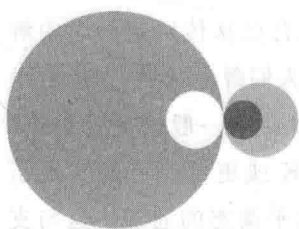
无论是从科研工作或是学生用书的角度来看,这本译作都是值得借鉴的,也衷心希望它的出版能够有助于我国冷分子研究领域的发展。

本书的第 1、2 章由贾锁堂翻译,第 3 章由汪丽蓉与张一弛共同翻译,第 4

至6章由赵延霆与姬中华共同翻译,第7至9章由马杰与武寄洲共同翻译,第10、11章由杨勇刚翻译,第12章由陈刚翻译,第13章由张国峰与肖连团共同翻译,第14章由陈瑞云与肖连团共同翻译,第15、16章由赵建明与张好共同翻译,第17章由秦成兵翻译,第18章由张临杰与汪丽蓉共同翻译。本书的序言及译者序由肖连团完成,导读及英文索引目录由以上译者共同完成。虽然我们为本书的翻译工作投入了大量的时间和精力,但由于能力所限,翻译不当之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

译者

2015年3月8日



前言

本书将给读者们带来一次引人入胜的分子物理前沿之旅。在此,我非常荣幸地为本书作序。这些无畏的前沿探索者同样也善于引导新手和好奇的旅人。本书是对其中的开创性成果、实验和理论方法、展望和机遇所进行的一次生动且易懂的调查总结。我的序言将以更人文化的方式简单地触及该过程中与过去或是未来的一些关联。

我所知道的任何一位物理化学家,都很高兴看到物理学家现在已经开始热情地拥抱分子学。“一个双原子分子要比一个原子复杂太多”这句以前常用的格言也已被否定了。向分子物理方向转变的物理学家们开始效仿 20 世纪早期的前辈们,这些前辈们发现分子对当时羽翼未丰的量子理论提出了挑战性的问题。而今,大量关于“冷”($<1\text{ K}$)和“超冷”($<10^{-3}\text{ K}$)分子的“热门”研究并不是出于令其本身获得低温为目的,主要目标是获得当德布罗意波长变得与分子间距离可比拟,甚至更大时出现的激动人心的量子现象。

80 多年前,在著名的猜测玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)中首次提出了波长与相互作用范围之间的关键性联系,之后又很快在核物理中变得著名起来。对于光子或者动能约 1 MeV (约等价于 10^{10} K)的中子之间的碰撞,德布罗意波长(约 $30\times 10^{-13}\text{ cm}$)比原子力范围大得多。因此,s 波散射、共振和隧穿就成为原子物理研究中的主要特性。这些行为可能很快也会变为分子物理的主要特性,尽管在分子物理中想要达到对应长度的波长范围要困难得多。

一旦进入那个范围,分子物理学家将会拥有很多核物理学前辈们所没有

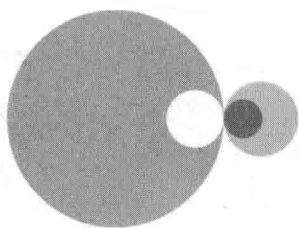
的巨大优势。分子内和分子间相互作用都将很大程度上受外加电场或磁场强烈影响。同时,对于分子来说,由激光诱导产生的相干激发过程将提供一种相当有力的工具。另外,至少对于样品系统来说,分子理论和电子结构计算常常能指导实验的设计和解释。

冷和超冷分子这一领域之所以会引起人们极大的兴趣还有一个基础性的原因。为了获得这样低的温度范围,我们首先需要把自己从传统热力学中解放出来。人们曾长期认为,只有液氦才能实现 BEC。人们曾经预料,在形成量子简并气体所需的温度和密度到达之前,热力学会贯穿于一般的凝聚过程。现在,很多种原子和少量分子蒸气在温度达到 10^{-6} K 或更低时已经实现了 BEC。这就需要寻找一条使动能变得很小而难以到达平衡态的通道。这与支配大多传统化学合成的基本原则是一样的。很多对生物起关键作用的有机分子团簇,在热力学上是不稳定的,但的确是由动力学主导通道生成的。这同样可能是大量有机分子是如何出现在星际介质中的原因,尽管在宇宙中碳的丰度较低。这样来看,冷分子研究甚至可以使实用主义化学家为避开热力学而更大胆地去寻找更多极端的方法。

本书中很多的技术和概念都可以从 Otto Stern 进行的先驱性分子束的工作中找到依据。作为爱因斯坦的第一个博士后,Stern 对 Genken 实验很感兴趣,并在他后来的实验室中将其实现。在他的年代,“束”可能被看作是有误导性的宽泛的叫法。因此,他将其称为“分子射线”。现在看来,这似乎预言了为寻找长德布罗意波长而进行的长达一个世纪的努力。在 1931 年 Fraser 所著的《分子射线学》一书中,Stern 强调这种方法的特点为“它的直接性和(至少在原则上)它的原始性”。对于本书,他的一句赞美词也同样适用:“……(分子束中蕴含的)那份美丽和独特魅力,始终如一地吸引着工作于此领域的物理学家们。”

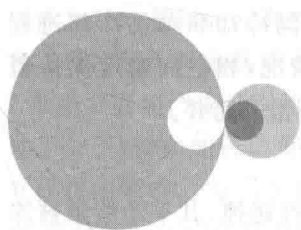
Dudley Herschbach

剑桥,马萨诸塞州



致谢

编者对 John Doyle、Gerard Meijer 和 Francoise Masnou-Seeuws 对本书提供的帮助表示感谢,并且感谢 Harvard-Smithsonian 天体物理中心原子分子和光物理研究所对本书的支持。Francoise Masnou-Seeuws 和 Olivier Dulieu 协调主持的欧盟冷分子研究培训网络对本书报道的研究做出了大量修正。



导读

冷分子研究是一热门领域

本书的编著出版是为了对大量平动(及其他)冷分子研究提供全面而易懂的介绍。起始于 20 世纪 90 年代中期,一批相关领域的积极分子将其作为一个挑战,希望将冷物质研究的范畴扩展至气态分子领域,该挑战以极快的速度发展且经历了极其不平衡的增长。现在,世界范围内有将近四十个研究团体参与了冷分子的研究,且每年有超过 100 篇关于此领域的文章发表。

领域内的领军人物,有着很多共同的交集和研究方向,如今都参与到了本书的编著中,共同探讨领域内的尖端发展。所有参与本书编著的人都希望本书能够作为冷分子及相关研究领域学生的学习教材,并能够让培养的学生们在本领域学术机构内及其他物理和化学领域机构内的认同归属感。

冷分子研究极大地受到其来源冷原子研究的激发,但冷分子研究有其独特的目的。分子不仅仅只是比原子更复杂,从一些方面来说分子还具有很多有趣的性质:除了拥有振动和转动自由度,分子还具有偶(和更高的)极矩和磁极距。这些极距使得分子拥有了新的特性并能够基于新的操作原则(如量子计算)进行研究,同时研究者们还可以对新奇物理(例如,量子简并偶极系统,其范围目前限制于铬原子量子气体的研究)进行研究。本导读简单介绍了本书各章中的内容。

制备平动冷(<1 K)分子的方法可以大致分成两类:直接冷却和非直接冷却。非直接冷却是一种通过磁场调谐 Feshbach 共振或光缔合将超冷(<1 mK)原子连接的方法。连接后形成的分子与其组成原子同样是超冷的。

直接冷却方法减速或选择已经存在的分子。这种方法是通过含时电场、磁场或辐射场产生减速的超声分子束,以及选择分子系综中的慢速部分来进行的。已经存在的分子同时也可以在提前冷却的原子的缓冲气体中进行协同冷却。一旦减速/冷却到低温范围,已经存在的分子可以通过与超冷气体或原子或已俘获在阱中的分子热接触来进行进一步的协同冷却。

需要注意的是,以上所讨论的情况中,只有在协同冷却和蒸发冷却过程中,相空间的密度才是随之增加的。对于其他所有情况,相空间密度保持恒定。相空间密度的降低将导致气态样品更加无法达到量子简并。

冷分子及超冷分子的碰撞

当热原子置于冷原子中时,通过与缓冲气体的弹性碰撞,其平动能量被淬灭。蒸发冷却同样也是基于弹性碰撞,当阱深逐渐减小时,弹性碰撞可以引起能量的转移,同时使平动温度重新平衡。如果分子最初被制备在亚稳态,那么这些分子有可能在发生非弹性碰撞和反应性碰撞的同时也发生弹性碰撞。非弹性和反应性碰撞释放能量并加速碰撞粒子,这导致了俘获样品的损耗。因为在阱中心附近(温度最低)处的分子密度通常是最大的,碰撞俘获损耗会移除一些温度最低的原子和分子并使其加热。理想情况下,一个冷却实验应该以一个制备在绝对基态的分子开始,以避免非弹性碰撞和其他有害影响。然而,这通常是不可行的。静电阱和磁阱被广泛用于将分子气体从热环境中隔离出来,并将其局限于塞曼和斯塔克激发态。通过超冷原子制备的分子通常处于高激发的振动能级。为了冷却特定分子至超冷温度,理解在冷和超冷温度下这些分子发生的弹性散射及非弹性和反应性碰撞的效率是非常重要的。

低温下分子碰撞的理论分析在冷分子研究领域的发展中占据着重要的地位。特别地,在冷分子早期研究中用到的量子力学计算证明,在超冷温度下分子的振转非弹性碰撞和化学反应的发生可能会很快。从理论上来看,被限制在静电阱中碰撞诱导的分子斯塔克弛豫发生得非常快,但是磁阱中的分子对于碰撞俘获损耗相对稳定。量子力学计算方法阐明了静电阱和磁阱中分子的非弹性碰撞机制,同时说明了冷及超冷分子的碰撞特性可以通过外场有效地调谐。该工作表明,有一系列分子可以在磁阱中被碰撞冷却,并促进可以将分子俘获至绝对基态的新俘获阱的发展。这些和其他一些有关冷及超冷温度下分子碰撞的理论工作在本书第1章到第4章中介绍。

为了给下一步的研究工作打下基础,Jeremy Hutson在第1章中介绍了在低温下原子分子散射的基本理论。本章介绍了截面、速率系数、散射长度的概念,并描述了量子碰撞理论的主要组成部分。该章说明了散射波函数和束缚

态波函数可通过基于相同原理和数值方法的计算得到。特别强调了在有外加场的情况下,可将碰撞理论扩展至分子散射,以及对外场可调散射共振的讨论。这些散射共振可用于改变超冷分子相互作用的性质,这对下面章节中所讨论的一系列超冷分子的应用是必要的。

最近实验工作的一个发展方向是制备超冷极性分子,这是因为超冷极性气体为新的基础研究提供了一个激动人心的平台。目前超过十个研究小组具备了利用超冷碱金属原子光缔合制备超冷极性分子的条件。John Bohn 在第 2 章中全面而严谨地讨论了经典和量子力学下的偶极子。作者非常详细地描述了分子结构,如转动角动量、电子自旋,以及 Λ 双线结构对分子偶极子间相互作用的影响。为了方便,该章中的公式通常以球面张量形式表示,这使得偶极-偶极相互作用矩阵元算符变得简洁明了。

Goulven Quémener、Naduvalath Balakrishnan 和 Alexander Dalgarno 所著的第 3 章全面回顾了目前在冷及超冷温度下分子的振转非弹性和反应性散射的理论工作。本章包括不同分子的弹性和反应性碰撞零温率系数的研究工作。作者同时介绍了中性粒子和离子系统,以及包含原子-分子和分子-分子散射的碰撞过程。本章有 25 个图描绘不同的物理现象,如冷碰撞中的近共振能量转移、近阈值虚态(near-threshold virtual states)对冷分子化学反应的影响、阈值碰撞定则、Feshbach 共振和势形共振以及转动自由度对冷及超冷分子振动弛豫过程的影响。作者分析了隧穿主导化学反应及无势垒条件下的插入化学反应,并讨论了超冷化学动力学理论的挑战性工作。

利用电磁场操控化学反应一直以来都是研究者们追寻的目标。外场操控化学反应使化学家不仅能够选择性地制备想要的分子种类,而且也可以揭示化学反应的机制,获得决定化学反应相互作用的信息,并阐明化学动力学中非绝热及相对论效应的作用。然而,双分子反应的外部控制由于分子的热运动而较为复杂,分子的热运动使分子运动变得随机化,削弱了外场对分子碰撞的影响。将分子气体冷却至低温可以降低热运动的影响。只有当分子的平动能小于分子与外场相互作用导致的扰动时,电磁场才可能对分子碰撞产生较大的影响。可在实验室获得的静磁场(高达 5 T)、静电场(高达 200 kV/cm)以及非共振激光场(10^{12} W/cm²)能够使分子能级发生高达几个开尔文量级的移动。因此,在冷及超冷温度(<1 K)下,非常容易实现气相分子动力学的外场操控。在第 4 章中,Timur Tscherbul 和 Roman Krems 讨论了在冷及超冷温度下,外场对分子碰撞动力学的影响,并展望了低温下分子-场相互作用研究领域中的可能的新发现。

第 4 章的第一部分关注于分子冷却实验中碰撞诱导的塞曼弛豫和斯塔克

弛豫,可调谐势阱共振及 Feshbach 共振的讨论,以及电场中分子偶极子的散射。这些结果对第 1 章和第 2 章中概述的内容进行了例证。本章的第二部分描述了组合电场和磁场操控原子-分子相互作用和分子间相互作用的新机制。这里,作者讨论了电场对磁排列分子碰撞的影响,非平行磁场和电场中分子的碰撞,以及电场中冷分子的微分散射。本章的第三部分讨论了被激光场囚禁于准二维空间中超冷分子的非弹性和化学反应性碰撞。在这些系统中开展的实验可能会用于探测外部空间对称性对分子二元相互作用的影响,以及长程分子间相互作用在决定超冷分子化学反应中的作用。第 4 章最后讨论了冷可控化学的前景。

超冷原子的光缔合

使用容易获得的超冷原子产生超冷分子是一个相对简单和吸引人的超冷分子制备方法。其中两种方法在制备超冷分子中广为使用:光缔合(本节讨论)和通过调谐磁场将两个碰撞原子转变为一个弱束缚分子的 Feshbach 共振(下节讨论)。

William Stwalley、Phillip Gould 和 Edward Eyster 撰写了本书第 5 章,对他们的实验结果和理论解释进行了综述。在简短介绍了形成超冷分子的不同方法后,详细介绍了光缔合过程。光缔合过程是原子线展宽的重要组成部分,尤其是原子线的两翼。然而,在室温以及室温以上,由于大范围的碰撞能和碰撞角动量对线型的贡献,展宽的原子线包含相对少的信息。这与超冷原子(典型值为 $100\ \mu\text{K}$)的光缔合产生极大对比,在冷原子中只有很少的几个碰撞角动量可以到达较小的核间距,而在这个位置可以发生大的失谐于原子共振的光缔合。这一超冷光缔合导致了尖锐的线状光谱,其中观察到的每一条线对应于基态碰撞原子对到具有特定量子数的激发振转分子能级的跃迁;也就是说,线状光谱非常接近于一个束缚-束缚分子电子谱。

第 4 章首先介绍了同种原子,尤其是被广泛研究的碱金属原子,形成同核分子的光缔合。详细介绍了简单的单色光缔合实验,涉及各种用于探测分子的技术:俘获损耗(原子荧光的减小)、激发态分子电离的直接探测、共振增强多光子电离的碎片光谱探测、共振增强多光子电离对基态或者亚稳态分子(通过光缔合形成的上能级自发辐射产生)的探测。

同时也讨论了双色光缔合实验,包括制备高激发态的阶梯型机制和制备关联于两个基态原子的束缚分子能级的 Λ 型(拉曼)机制。当然,后一种方法可以用于制备基态和最低亚稳电子态分子(碱金属二聚体的 X 和 a 态)。第 7 章和第 8 章使用了超快激光实现 Λ 型机制,这与第 5 章使用的连续激光形成

了比对。

其次,作者研究了不同原子形成异核分子(具有偶极矩)的光缔合,对广泛研究的 KRb 分子做了重点关注,也对同种原子和不同原子光缔合的区别进行了详细讨论。

接下来,简单提到了可能实现的原子-分子和分子-分子光缔合(实验上还未获得),简单讨论了在量子简并气体、电磁场、光晶格中的快速扩展的光缔合,这可看作是对后续章节的部分介绍。

之后我们将讨论同核和异核碱金属二聚体分子的 a 和 X 态能级的特性,这些分子由光缔合制备的上能级自发辐射形成。共振增强多光子电离,作为一种有效的探测方法,被用于测量近离解限处 a 和 X 态的振动能级布局。离子损耗技术作为一种观测转动结构和超精细结构的新技术,也被用于探测近离解限处的分子能级。为了获得更低的能级,尤其是基 X 态,采用特殊的光缔合方法是必要的,比如具有双势阱结构的激发态势能,两个(或更多)激发态势能共振耦合,从近离解限能级到更低能级(例如,碰撞稳定的 $v=0, J=0$ 能级)的受激拉曼转移。

最后提到了光缔合与超冷分子离子、基本原理的测试、超冷极性分子的量子计算、超冷碰撞、超冷化学以及更加可能领域的联系。

Paul Julienne 在第 6 章全面介绍了长程力主导的近离解区域的分子态。这一章,一方面与第 1~4 章讨论的碰撞动力学相联系,另一方面与第 5~8 章讨论的光缔合以及第 9~11 章讨论的磁缔合(Feshbach 分子)相联系。在单一核间距势能曲线下,作者对超冷能量下的碰撞和离解限下束缚振动能级(长程分子)的长程区域特性格外感兴趣。多重相互作用势的情况和对相应公式的修正也被相继讨论。

Eliane Luc-Koenig 和 Francoise Masnou-Seeuws 在第 7 章展示了一系列以“超快物理的哪些方法可以应用到超冷物理”为主题的研究。通过一系列计算描述了双色 Λ 超快光缔合形成了处于 a 态的铯原子二聚体这一过程,该双色光缔合过程借助了一个具有双势阱结构电子态的外阱来实现。本章以培养超快光缔合的物理思维为重点,提出了一些形象的概念,如共振窗、光缔合窗、动力学孔洞、动量反冲力、压缩效应和积分质量流,来推断并呈现了其结果。

Evgeny Shapiro 和 Moshe Shapiro 在第 8 章提出了一种超快/超冷双色光缔合的辅助方法。作者研究了两个碰撞原子入射波包的拉曼绝热通道,该通道可用来形成平动的超冷双原子分子。这种波包法为上一章所提到的理论提供了另外一个有趣的解释方案。此外,第 8 章的作者对 KRb 和 Rb₂ 做了解析理论研究和数值模拟,展示了如何将光缔合测量方法应用于碰撞原子波函数

的探测。

冷分子少体及多体物理

最近的理论工作表明,俘获在光晶格中的超冷分子可以用来模拟凝聚物质系统,制造带有拓扑序的新相位并能用于研究多体相互作用。极性分子在外场势阱中可能形成分子链,这可用于研究非经典行为的流变学现象。分子玻色-爱因斯坦凝聚的形成使得对于玻色增强的化学性质研究以及在超冷温度下化学相互作用中对称性破坏造成的影响的研究成为可能。这些设想的实现以及大密度超冷分子系综的形成主要取决于通过外加电磁场操控超冷分子散射长度的能力。原子碰撞中磁 Feshbach 共振的预测和观察为很多超冷气体中的开创性实验提供了可能,如 BEC-BCS 渡越的实现、量子相变的观察和利用时变磁场制备超冷分子。将此工作拓展至分子碰撞的研究也会促进新研究领域的发展,如冷控制化学、量子相干控制和利用分子凝聚进行的量子凝聚态物理。

Francesca Ferlaino, Steven Knoop 和 Rudolf Grimm 在第 9 章介绍了磁调谐 Feshbach 共振的概念,描述了制备超冷原子气体的技术,利用可调 Feshbach 共振制备超冷分子的技术,从超冷原子分子混合物中分离原子以制备纯分子气体的技术,以及利用磁偶极-偶极和自旋轨道相互作用诱导的回避交叉以制备特定量子态中的分子样品。作者介绍了在超冷分子气体中引人注目的 Stückelberg 振荡现象,以及如何通过 Feshbach 共振调谐超冷原子的散射长度来研究超冷系统少体及多体物理的问题。特别地,作者描述了 Efimov 三聚体态的实验研究、分子的玻色-爱因斯坦凝聚以及原子费米气体中的多体物理。当前实验研究的一个主要方向是通过在超冷原子中制备处于绝对基态的超冷分子。这曾经是一个令人望而却步的工作。在第 9 章的最后,作者描述了成功制备绝对基态超冷分子的实验结果。

在冷原子物理方面,最重要的进展也许就是弱束缚费米双原子分子的制备和其玻色-爱因斯坦凝聚。通过 Feshbach 共振调节原子间相互作用所制备的分子,是迄今为止所制备的最大的双原子分子,分子大小的数量级达到几千埃。这些分子代表一类新奇的复合玻色子,它们在分子间距很短时表现出费米统计的特性。当处于高激发态时,这些分子有极大的碰撞稳定性,这是由全同费米子原子的泡利不相容原理所造成的。Dmitry Petrov、Christophe Salomon 和 Georgy Shlyapnikov 在第 10 章介绍了双组分费米气体和费米-费米混合系统中分子形式的物理描述理论。他们讨论了这些扩展分子的弹性和非弹性碰撞,展示了玻色-爱因斯坦凝聚中弱束缚分子间相互作用的量子统计

效应。对于异核系统,他们介绍了基于 Born-oppenheimer 近似分离轻原子和重原子运动的模型,应用这个模型很好地描述了 Efimov 态。在结论中,作者把该理论扩展到具有很大质量比率的费米子多体系统,展示了弱束缚分子间的极强远程排斥作用可能导致分子晶体相的自发形成这一现象。

基于第 1 章的讨论并作为第 9、10、11 章的补充,Thomas Hanna、Hugo Martay 和 Thorsten Köhler 在第 11 章对 Feshbach 分子微观理论进行了简洁描述。作者描述了原子的超精细作用和原子间相互作用怎样决定 Feshbach 共振,以及 Feshbach 共振怎样改变超冷原子的相互作用性质。提出了 Feshbach 共振的分类,并区分了开通道主导和闭通道主导的共振。由于不同类型的共振产生不同性质的 Feshbach 分子,本章的讨论对于理解通过磁场调节微观相互作用参数会如何影响超冷量子气体的宏观性质非常重要。

在实验中实现的低维量子气体,为利用超冷原子和分子来研究不同物理领域中的问题提供了一种新的平台。玻色和费米气体展现了不同寻常的特性,而且受限于二维空间的超冷原子具有有趣的量子退相干动力学。低维量子系统还为许多凝聚态物理现象提供了可控的物理模型。例如,受限于二维空间中的极性分子具有长程排斥的性质。基于这种性质,我们不但可以在超低温下建立自组织晶体,而且可以构造各种自旋晶格模型。以上这些内容是第 12 章要讨论的核心问题,该章的作者是 Guido Pupillo、Andrea Micheli、Hans-Peter Büchler 和 Peter Zoller。此章首先综述了这些特殊的多体系统,即外部微波场和直流电场作用下的强相互作用极性分子。该章表明,激光场的偏振、直流场的强度和激光场耦合的数目可以用于调节极性分子间的长程相互作用,并产生纯排斥型、阶跃型或强吸引型势。因此,我们可以在二维分子晶体中设计强关联量子相。这种系统还可以实现由新奇 Hubbard 哈密顿量刻画的有效晶格模型。Hubbard 哈密顿量描述晶格中相互作用费米子和玻色子的低能物理。利用超冷分子的内部自由度和二维极性分子的可控性,作者构建了一个完整的工具箱去模拟具有任意交换对称性的晶格自旋模型。在本章的结论部分,作者构造了一种特殊的分子系统,在该系统中分子间的两体相互作用被消除,但三体效应成为主导。这种新奇的系统可能会在凝聚态物理方面产生有趣的应用。

现有分子的冷却和俘获

虽然激光冷却技术是研究冷原子物理的主力,但是该技术并不适用于大多数分子的冷却。激光冷却技术仅是冷原子物理研究的先驱,大量基于新原理的新型冷却技术已经被发展并可能用于大量现有分子的冷却。这些具有多

样化的直接技术是发明家们丰富想象力的极好证明。

世界范围内大约有 20 个研究小组正在利用这些直接的冷却方法开展原子物理的研究,目前主要集中在如下方法的开发和应用上,如缓冲气体冷却、斯塔克或塞曼减速、基于脉冲光场的减速、通过交叉分子束的碰撞减速、来自反向旋转喷嘴的超声膨胀或在出射束中选择麦克斯韦-玻耳兹曼分布的分子的低速尾翼。所有这些直接的冷却方法可以直接冷却相对热的分子(200~1000 K),通常这些热分子是在超声分子束的源中。间接的冷却方法(如激光冷却)仅限于容易利用光缔合或磁缔合形成的分子(如双原子分子),而直接的冷却方法具有通用性,适合于一大类分子的冷却(如斯塔克减速可以冷却所有的极性分子,缓冲气体冷却与磁俘获相结合可以冷却所有顺磁性分子)或任何分子的冷却(所有其他直接冷却方法)。缓冲气体冷却和斯塔克减速在所有直接冷却方法中是最有效的方法,这些方法将在专门的章节中作细节的描述。

Wes Cambell 和 John Doyle 在第 13 章主要介绍利用低温 He 缓冲气体通过弹性碰撞来冷却分子。

缓冲气体冷却可以获得大约 0.5 K 的温度,这个温度没有达到超冷温度。然而,这个方法的一个显著优势(除了它的通用性)是它能够同时冷却和俘获大量的分子。通过蒸发一小部分俘获的分子,可以进一步将分子系综冷却到超冷温度(<1 mK)。然而,由于俘获分子的初始数量和其他因素(尤其是缓冲气体的消除的影响),迄今为止还未有效地应用这一蒸发冷却方案。

磁俘获分子的数量客观地依赖于装载分子进入缓冲气体的技术。激光烧蚀很难蒸发超过 $10^8 \sim 10^{13}$ 数量的原子或分子(用一个脉冲)。因此,最近大量的努力致力于开发一种装载分子到低温环境的新技术。这项新技术是基于由分子组成的分子束冷却。同时分子束能够向低温池中传输分子。迄今,利用该技术可以通过放电离解 NH_3 分子脉冲束能够获得 10^{12} 个 NH 自由基。

与传统的超声膨胀不同,作者们显示在分子通过一个孔口被释放形成分子束之前,可以预冷却分子,使其温度远低于分子的沸点温度。从本质上说,还是利用高密度的氦气将分子在低温池内冷却到 1 K 的温度,然后从低温池的一个孔口喷射出来形成分子束。通过该方法可以实现分子的转动冷却。如果氦气密度足够高,大多数低温池中的冷分子将从孔口喷射出来形成与冷的氦气一样的向前运动的分子束。这已被证实可以产生高流量的冷分子,如冷分子氧注入一个磁六极场中输出的流量可超过 10^{12} s^{-1} 。

Bas van de Meerakker、Rick Bethlem 和 Gerard Meijer 在第 14 章描述了基于非均匀电场的极性分子斯塔克减速、直流和交流俘获以及存储技术。

作者首先阐述了斯塔克减速(或加速)技术,这种技术不仅可以任意改变