

原子物理学领域的瑰宝

——Cohen-Tannoudji 新著《原子物理学进展通览》

王义道

(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

今年(2011年)初,新加坡世界科技出版社(World Scientific)主编潘国驹教授跟我说,1997年诺贝尔物理奖得主Cohen-Tannoudji教授在他们出版社要出版一本关于原子物理进展的英文新书,问我能否把它翻译成中文,争取早点出版。Cohen-Tannoudji教授是我所尊敬的学者,他在原子物理学上开创性的工作全球闻名。他也是我的老朋友了,在该社出版的两本《电磁场中的原子》(1994和2004年版)都送给了我。因此,尽管我并不知道新书的具体内容,我肯定这是一本好书。当时我刚把他的老同学和老朋友、法国物理学家B. Cagnac的法文版《原子物理学(上册)——原子与辐射场的电磁相互作用》译成中文(本书弥补我国一般原子物理学教材之不足,是读懂Cohen-Tannoudji新著的基础,即将由科学出版社出版),准备翻译下册。下册的主题是原子结构,是我国一般原子物理学教材所共有的(尽管那本书的材料要丰富和深入得多),比较不急;而翻译英文书还可以求助于我的同事和学生,因此我就痛快答应了。不久(1月18日)就接到了Cohen-Tannoudji教授的热情来信,他非常高兴我能接受这个任务,并说书稿要等五六月份出来,先寄一份目录来,以便我了解内容。我一看,这目录足有17页,把20世纪50年代以来原子物理学60多年的重要进展都囊括进去了,简直是这个领域的百科全书。而且不止如此,通过物理思想与方法的演进,把绚丽多彩的原子物理世界逻辑地深入串接起来,成为一个有机的体系。于是,我决心漂亮地完成这个翻译任务,以信达雅的译文奉献给中国读者,也不辜负作者——Cohen-Tannoudji教授和他的年轻同事D. Guéry-Odelin的厚望。

和Claude Cohen-Tannoudji教授交往,说来有缘。20世纪60年代初,我开始从磁共振研究转向光磁双共振(opto-magnetic double resonance),把它用于原子频标的研究与开发,碰到了一些现象,像共振

频率的光位移,当时百思不得其解。后来发现Cohen-Tannoudji的文章用虚跃迁(virtual transition)做了解释。该文章登载在1962年的法国*Annales de Physique*上,是他的博士论文,很详细也很长;这期刊物就登了这一篇文章。我下决心要细读这篇文章,就开始学习法语。由此我也特别关注Kastler和Brossel所开创的法兰西原子物理学派。我注意到,他们把射频波谱学(法国人叫做赫兹波谱学)中辐射场与原子相干相互作用的丰富内涵与光作用下的能级跃迁结合起来,使我曾认为是十分单调的跃迁过程变得非常丰富,很有意思,大大提高了我对这个领域研究的兴趣。1964年中法建交,当年10月Kastler访问中国,在新建的科学会堂做了一个关于光抽运和光磁双共振的报告,我仔细聆听了,这更加激发了我对巴黎原子物理学派的向往。按现在的话说,成为他们的“粉丝”了。1966年,Kastler因上述成果得了诺贝尔物理奖,而中国却陷入了“文化大革命”。1978年,“文革”刚结束,Claude就和Brossel一起访问了中国,考察和指导了刚恢复的中国高等教育。他们参观了北京大学基础物理实验室,Claude在北京师范大学做了一个报告,主要讲量子电动力学和奇异原子,我虽听不大懂,但这是当时的一个热门,也饶有兴趣。1981年,国际频率标准和计量会议在法国Aussois召开,我有幸参加,Claude也与会,我们得以近距离交谈,后来在巴黎他亲自开车把我们中国代表接到Lhomond街24号巴黎高师物理实验室(现在叫Kastler-Brossel实验室)参观,并进行了座谈交流。对于我,这次参观就像朝圣一样,那红墙、那铁栅栏大门、那古老的电梯,至今印象犹深。1983年,我有机会作为访问学者出国进修,我毫不犹豫地首选法国。恶补了一通法语,于当年10月到也属于Kastler-Brossel实验室的巴黎第六大学部分B. Cagnac教授组里工作。我得以每周一次到法兰西学院聆听Cohen-Tannoudji关于激光冷却和陷俘原子的系列

课程. 虽不全懂(一是法语, 一是我中间插进去的, 不了解前面内容), 但由于有很详细的讲义, 特别是给了我以前的课程讲义, 使我对这个领域有了系统的理解. Claude 还在一些问题上给了我具体指点. 4 个多月的巴黎访问, 给了我从事激光冷却原子领域研究的扎实基础, 还使我结识了许多法国学者, 受益匪浅. 此后, 我又多次访问过巴黎, Claude 也几次访问过中国, 并且受聘为北京大学的名誉教授, 对我们做了热情指导. 可是直到 1994 年, 我们才在国家自然科学基金委支持下开始实验研究, 在冷原子和玻色-爱因斯坦凝聚、原子激光器方面做了一些在中国还算是打头阵的工作, 写了一本《原子的激光冷却与陷阱》的书(北京大学出版社, 2007). 这里我应该感谢 Cohen-Tannoudji 教授多年的指教和帮助.

Cohen-Tannoudji 无疑是法兰西原子物理学派的现代掌门人. 这本新著既总结了他们 60 多年的研究成果, 也凝结了全世界原子、分子与光物理 (AMO) 领域学者的智慧和成就. 本书通览该领域研究进展全貌, 也给出了进一步发展的线索. 书的特点是要让读者整体地、全面地理解这门学科的内容. 正像第 1 章《引言》中指出的: “本书目的在于通过把 AMO 领域不同时期的研究成果贯穿起来, 通过指出从各种观点来看都是很重要的、值得反复回顾的基本概念, 使读者对 AMO 的演进有一个更好的理解. 我们期望能给他们以探索新课题的更大信心”. 本书就是从物理图像清晰的基本概念出发, 用严格的数学形式对各种相互作用做明确的描述, 然后结合具体情况求解, 再把理论结果与实验现象联系起来做精细的物理解释. 第 2 章是全书的共同基础, 从引入原子的内、外部变量和场变量着手, 通过对原子与场的相互作用的经典和量子描述, 以分析相互作用中的能量与角动量守恒定律为主线, 对二能级原子与单色相干辐射场的相互作用(磁共振、Rabi 振荡)和宽带光相互作用(导致吸收与发射)做了物理解释, 并使它们成为操控原子的重要手段. 这里, 他们把射频相干波谱学的处理方法推广到光谱, 首次用密度矩阵非对角元描述“相干性”概念, 注重各种相互作用的“速率”, 区分过程中各种时间的数量级不同, 这是巴黎原子物理学派的特色.

接下来的 25 个章分为 8 大部分: 它们分别是:

(1) 作为原子信息源的光(4 章), 叙述光抽运给 Zeeman 能级带来的布居数差使磁共振的灵敏度大为提高. 激光器的发明则使光谱学发生了革命性的飞跃, 开发了多种高分辨率光谱学方法, 具有重要应

用价值. 这里还引入了几种很有用的理论方法, 如光学 Bloch 方程、饰缀原子、量子跳变等.

(2) 作为一种有用微扰源的原子-光子相互作用(2 章), 叙述相互作用过程中两种紧密相关的效应——原子能级的位移与增宽. 这无疑是干扰, 然而却也有用处, 例如能陷阱原子. 这种效应还解释了像 Lamb 位移和电子反常自旋等重要物理现象.

(3) 多光子过程(2 章), 叙述原子-光子相互作用过程的高阶效应, 它们分别发生于射频与微波波谱和光谱中, 这里特别强调了双光子受激 Raman 过程. 多光子电离是这种过程的一个特例, 在强激光下可以产生远紫外和 X 光的超短(阿秒)脉冲.

(4) 激光冷却与陷阱原子(4 章), 叙述利用原子-光子相互作用来操控原子运动. 这里引入了两种辐射力——耗散力和反动力, 前者使原子减速, 实现 Doppler 冷却; 后者可用于陷阱原子. 这里叙述了 Doppler 冷却极限和反冲极限, 以及打破这两种冷却极限的亚 Doppler 冷却与亚反冲冷却方法. 最后还讨论了各种陷阱原子或离子的阱.

(5) 超冷原子相互作用及其操控(2 章), 从微观和宏观视角讨论了这个问题, 首先引入重要参量——散射长度, 然后介绍几个重要的势以便简化计算, 而研究超冷原子背景气体中原子传播的变化还可导出平均场概念. 最后叙述冷原子相互作用可用 Feshbach 共振来操控, 并产生冷分子.

(6) 原子干涉和纠缠态(3 章). 用冷原子波长很长的德布罗意波可以观察到原子外部参量的量子干涉现象, 如杨氏双缝干涉、衍射、Bloch 振荡等; 在这种干涉现象中也可引起原子内态变化, 从而产生 Ramsey 花样, 可应用于研发冷原子钟, 在精密测量中发挥着重要作用. 最后讨论了量子关联和纠缠态.

(7) 简并量子气体(5 章). 从叙述这个领域的发展史开始, 分析了量子气体的三个特征长度: 热德布罗意波波长 λ_T , 原子间平均距离 d 和相互作用范围 r_0 , 给出了几种不同的量子构制. 其次是对玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)的探索进行了详细的历史评述, 用平均场方法导出 Gross-Pitaevskii 方程, 对极低温度下弱相互作用 BEC 的静态和动态特性做了描述. 然后引入量子气体中原子场算符的关联函数, 由此得到了 BEC 的相干性质. 最后从实验观点分析了 BEC 中的元激发和超流性, 这是量子流体的另一个耀眼的宏观量子特性, 并以量子化涡旋的实验呈现作为结尾.

(8) 原子物理的几个前沿方向(3 章). 它们是: 基

本理论的检验,如原子宇称破坏;量子气体中多体系统的强相互作用引发的一些效应,类似于 Josephson 效应、超流-Mott 绝缘态相变、BEC-BCS 交叉等;与强激光相关的实验成就,如超短(阿秒)光脉冲、超强激光脉冲等。

在第 28 章结论中,作者指出了本学科领域进一步发展的若干方向,如:推进原子系统的操控,提高光谱频率分辨率,打破极限的先进方案,更加严格的检验基本规律,微观到宏观的量子体系,开发提取信号的新技术,与其他学科的富有成果的合作对话等。全书引用了 1100 多篇文献,这对领进这个研究领域也是非常有帮助的。

从这里我们看到,这本书是理论与实验密切结合的,甚至关心 AMO 的研究成果转化为应用技术。这也是巴黎原子物理学派的一个鲜明特色。事实上,不仅光抽运、双共振实验最早出于这个实验室,就是

像用速度选择相干布局陷阱法(VSCPT)实现亚反冲冷却、早期的原子宇称破坏和 BEC 探索、原子喷泉的实现等光辉实验都出自这个实验室。正是通过这样的努力,我们现在可以对原子实现全面操控:吸收与发射改变能级,光抽运改变能级布居数与自旋极化,激光冷却改变速度,激光陷阱改变位置,Feshbach 共振改变原子间相互作用。

近十年来,中国在 AMO 领域学习和研究的青年人越来越多了。对于他们,这本书是一个瑰宝。所以我们相信,本书中文版的出版发行一定能引起中国读者的广泛兴趣和喜悦,从中得到极大的教益;并将促使中国 AMO 学科的繁荣。这次,Cohen-Tannoudji 教授亲自到中国来介绍这本书,并推荐我们来翻译,我们要深深感谢本书两位作者的辛勤努力和友好情意!