

牛津大学研究生教材

分子束

N. F. 拉姆齐



世界图书出版公司
www.wpcbj.com.cn

分子束

N. F. 拉姆齐 著

图书在版编目 (CIP) 数据

分子束 = Molecular Beams; 英文/(美) 拉姆齐 (Ramsey, N. F.) 著.

—影印本. —北京: 世界图书出版公司北京公司, 2012. 9

牛津物理学经典教材

ISBN 978 - 7 - 5100 - 5268 - 2

I. ①分… II. ①拉… III. ①分子束—教材—英文 IV. ①O561

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 217131 号

THIS BOOK IS BASED ON MOLECULAR BEAMS, THIS SPECIAL CHINESE VERSION is published by arrangement with Oxford University Press for sale/distribution in The Mainland (part) of the People's Republic of China (excluding the territories of Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan) only and not for export therefrom.

本书得到牛津大学出版社的授权在中国大陆地区 (不包括香港, 澳门和台湾) 重印发行, 不得出口。

书 名: Molecular Beams

作 者: N. F. Ramsey

中 译 名: 分子束

责任编辑: 高蓉 刘慧

出 版 者: 世界图书出版公司北京公司

印 刷 者: 三河市国英印务有限公司

发 行 者: 世界图书出版公司北京公司 (北京朝内大街 137 号 100010)

联系电话: 010 - 64021602, 010 - 64015659

电子信箱: kjb@wpcbj.com.cn

开 本: 24 开

印 张: 20.5

版 次: 2013 年 1 月

版权登记: 图字: 01 - 2012 - 6229

书 号: 978 - 7 - 5100 - 5268 - 2

定 价: 79.00 元

影印版前言

自从上世纪80年代起，世界图书出版公司北京公司一直致力于与世界各国知名出版商合作，是国内最早开展购权影印图书出版工作的机构。时至今日，已经持续近30年，不仅引进的品种数独占鳌头，而且包括了大量在国际上具有深远影响的经典图书，受到了国内学者和专家的认可和好评。

现在应国内广大读者的要求，在获得牛津大学出版社授权的前提下，世界图书出版公司北京公司将陆续影印出版该社各类丛书中的经典图书。牛津大学出版社是世界著名出版机构之一，每年出版的书籍、刊物超过四千种，其学术著作和教科书的作者均为相关领域的著名学者，其中不乏科学研究前沿的顶尖科学家和领军人物，书籍内容涵盖了最新的科学进展的各个方面，因此一直受到国内外科研人员和高校师生的高度评价，其中已经出版的数学和物理学系列丛书，如*Oxford Graduate Texts in Mathematics*，*Oxford Graduate Texts*，*Oxford Lecture Series in Mathematics and Its Applications*和*Oxford Mathematical Monographs*在国内有着广泛的影响，受到普遍好评。

毫无疑问，考虑到我国的国情以及科学教育发展的迫切需要，这项工作的最大受益者将是那些经济尚不富裕，但却渴望学习知识，想及时了解最新科学技术成果的国内高校和研究机构中的莘莘学子，相对原版，影印版的价格他们更容易接受。在这里，中国的读者和我们出版公司要特别感谢牛津大学出版社以传播科技知识为重，授权世界图书出版公司北京公司影印出版该社系列丛书中的部分图书。我们相信，这些图书的引进，不仅会受到数学物理等相关专业的教师和研究生的欢迎，相关领域的科研人员也将会从中受益。

前 言

多年以来，分子束实验一直是人们获取分子、原子和原子核基础知识的最富成效的来源之一。早期的一些实验为我们提供了空间量子化和电子自旋的直接实验证据。最近的实验导致了这样的一些重要的发现，如质子和中子的反常磁矩、氘核四极矩及其对核子张量相互作用的启示、氢原子精细结构中兰姆位移及其量子电动力学含义、电子的反常磁矩、原子核八极矩的存在以及其他的一些发现。此外，分子束实验还为我们提供了分子、原子和原子核的丰富数据，包括一大批核自旋、磁矩和四极矩的测定，这些结果和其他的一些事实一起为原子核壳模型提供了很多原始证据。

尽管该主题在科学上非常重要，但是介绍分子束的书却很少。就像本书第1章中指出的那样，人们写过相当少量的综述文献和简明专著，而详细的书只出版过一部。该书是由Fraser撰写的（FRA31），完成于25年以前，早于几乎所有上面提到的重要发现。

希望本书能够满足读者对分子束问题的一种详尽、自治以及最新处理方面的需求。尽管本书讨论了分子束的整个论题，但是1930年以前的实验我们只做了简单的叙述，因为这些内容在Fraser的专著中已经论述得非常详细了。

我要感谢使用分子束的许多工作人员，在准备本书时，他们为我提供资料并给予帮助。特别感谢Rabi教授、Kusch教授、Zacharias教授、Kolsky博士和Lew博士。我也要感谢John Wiley & Sons出版公司，允许我使用他们出版的我的《核矩》一书中的部分材料，尤其是第3章。感谢John Simon Guggenheim Memorial Foundation基金会，为我在牛津大学撰写本书期间提供资助。最后，我还要特别感谢我的妻子，Elinor Ramsey，给了我充裕的

时间完成本书。感谢我的秘书Phyllis Brown，在准备书稿中给予的大量出色的帮助。

N. F. R.

哈佛大学

1955年8月

目 录

第1章 分子束和原子束

1. 简介	1
2. 典型分子束实验	2
3. 分子束测量的种类	8

第2章 气体运动学

1. 发自一些源的分子喷流	11
1.1 薄壁孔中的喷流	11
1.2 长通道中的喷流	13
2. 分子束强度和形状	16
2.1 分子束强度	16
2.2 分子束形状	16
3. 分子束中的速度	19
3.1 气体的速度分布	19
3.2 分子束的速度分布	20
3.3 特征速度	20
3.4 分子速度的实验测量	21
4. 气体中的分子散射	25
4.1 测量方法	25
4.2 衰减测量中散射截面计算	28
4.3 截面理论	30

4.4 原子束散射实验结果.....	33
5. 分子束和固体表面的相互作用.....	35
5.1 简介	35
5.2 反射	35
5.3 衍射	38
5.4 非弹性碰撞	44
6. 化学平衡, 电离势, 光谱和微波谱的分子束研究	47
6.1 化学平衡	47
6.2 电离和激发	48
6.3 光和微波的吸收光谱	50

第3章 核与原子的相互作用和分子场

1. 简介	51
2. 静电相互作用	52
2.1 多极展开	52
2.2 电多极子阶数的理论限制	58
2.3 原子核电四极子相互作用	59
2.4 任意阶的多极矩	66
3. 磁相互作用	68
3.1 磁多极子	68
3.2 磁偶极子	72
3.3 磁偶极子与内磁场和外磁场的相互作用	76
3.4 分子中的磁相互作用	80
4. 中等强度的耦合	83
4.1 简介	83
4.2 久期方程的解	84
4.3 微扰论	87

第4章 原子和分子磁矩的非共振测量

1. 偏角和场强的关系	89
-------------------	----

1.1 有效磁矩	89
1.2 磁场导致的分子偏角	90
2. 原子磁矩的偏角测量	100
3. 非顺磁分子中核磁矩与转动磁矩的偏角测量	102
4. 核矩的原子束偏角测量	104
5. 核矩的原子束零力矩方法	107
6. 核矩的原子束再聚焦方法	111
7. 核矩符号的原子束测量	113
8. 核自旋的原子束空间聚焦测量	114

第5章 分子束磁共振方法

1. 简介	115
2. 磁共振方法	116
3. 跃迁几率	118
3.1 孤立分子的跃迁几率	118
3.2 对速度分布求平均的跃迁几率	123
4. 分离振荡场的磁共振方法	124
4.1 简介	124
4.2 具有分离振荡场的孤立分子跃迁几率	127
4.3 对速度分布求平均的分离振荡场跃迁几率	128
4.4 分离振荡场分子束方法中的相移	131
5. 在聚焦束、甚慢分子束和宽束的情况下的磁共振	134
5.1 空间聚焦束	134
5.2 甚慢分子束，宽束	138
6. 分子束共振的畸变	139

第6章 原子核磁矩和转动磁矩

1. 核磁矩的共振测量	145
2. 转动坐标系中的解释	146
2.1 简介	146

2.2 经典理论	147
2.3 量子理论	151
3. 大于 $1/2$ 的自旋	153
4. 核矩的符号	155
5. 核矩的绝对值	158
6. 核磁矩测量	159
7. 磁屏蔽	162
8. 分子转动磁矩	166
8.1 转动磁矩的实验测量	166
8.2 转动磁矩理论	169
9. 核矩测量结果	170
9.1 简介	170
9.2 核矩用表	171
10. 核自旋与核磁矩结果的重要性	171
10.1 简介	171
10.2 原子核统计、自旋和质量数之间的关系	178
10.3 核子磁矩	179
10.4 氘核磁矩	179
10.5 H^3 和 He^3 磁矩	180
10.6 核自旋和磁矩的分类法	181
10.7 核模型	184

第7章 中子束磁共振

1. 简介	189
2. 极化中子束	189
2.1 中子束	189
2.2 中子束的极化	190
3. 中子磁矩	195

第8章 自由分子中的核与分子相互作用

1. 简介	203
2. 核矩与转动磁矩	203
3. 核自旋-自旋的磁相互作用	204
3.1 直接的自旋-自旋磁相互作用	204
3.2 分子中核自旋间的电子耦合相互作用	206
4. 自旋-转动的磁相互作用	208
5. 核的电四极相互作用	213
6. 抗磁相互作用	228
7. 分子振动效应	230
8. 复合哈密顿量	233
9. 矩阵元和中等强度耦合	234
10. 分子氢中的相互作用	238
11. 分子聚合	239

第9章 原子力矩和超精细结构

1. 简介	241
2. 核矩的绝对标度, 基本常数	245
3. 从原子超精细结构求得的核自旋	249
4. $J=1/2$ 时原子超精细结构分离	251
5. 原子磁矩; 电子反常磁矩	256
5.1 原子磁矩	256
5.2 电子反常磁矩	262
6. 氢原子的超精细结构	263
6.1 氢原子实验	263
6.2 氢原子实验的理论解释	267
7. 利用原子的直接核矩测量	270
8. 四极相互作用	271
9. 磁八极相互作用	277

10. 同位素的反常超精细结构和磁矩比率	279
11. 频标和原子钟	283
12. 激发态的原子束共振方法	285

第10章 电偏斜和共振实验

1. 简介	287
2. 电场中的分子相互作用	289
2.1 分子哈密顿量	289
2.2 振动转子的能量	290
2.3 斯塔克效应	292
2.4 超精细结构相互作用	293
3. 电偏斜实验	296
4. 电共振实验	298
4.1 简介	298
4.2 具有可以忽略的超精细结构相互作用分子的 电共振实验	301
4.3 具有超精细结构的电共振实验	303
4.4 具有J改变的电共振实验	307
5. 分子放大器	309

第11章 核的电四极矩

1. 简介	310
2. 核的电四极相互作用	310
2.1 分子中的核四极相互作用	310
2.2 原子中的核四极相互作用	310
3. 电场梯度	313
3.1 原子中的电场梯度	313
3.2 分子中的电场梯度	315
3.3 原子实对核四极相互作用的影响	316
4. 核的电四极矩	319

5. 核四极矩的理论解释.....	319
5.1 氘核四极矩理论.....	319
5.2 复合核的四极矩理论.....	323

第12章 原子精细结构

1. 简介	327
2. 氢原子束方法	329
3. 氢和氘的结果	331
4. 单个已电离的氦的精细结构	336
5. 理论解释	340

第13章 分子束设计原理

1. 简介	346
2. 设计分子束实验的有用公式	347
3. 设计时需要考虑的事情	351
3.1 最佳准直器位置	351
3.2 束的宽度、高度和长度	352
4. 设计举例	354

第14章 分子束技术

1. 简介	361
2. 源	361
2.1 不可凝聚气体源	361
2.2 加热炉	364
2.3 离解原子源	372
3. 探测器	374
3.1 各种各样的探测器	374
3.2 表面电离探测器	379
3.3 静电计, 质谱仪和电子倍增管	381
3.4 电子轰击电离器	387

3.5 Stern-Pirani探测器	389
3.6 放射性探测器	393
4. 偏转场和均匀场	394
4.1 Stern-Gerlach和Hamberg偏转场	394
4.2 Rabi偏转场	395
4.3 两线偏转场	397
4.4 用磁铁构成的两线偏转场	399
4.5 匀强磁场	401
4.6 静电场	402
4.7 聚焦场	404
5. 振荡场	407
5.1 振荡器	407
5.2 振荡场线圈和电极	407
6. 真空系统和机械设计	410
7. 各种各样的组成部分	415
8. 校准	415
8.1 光学校准	415
8.2 用束流校准	416

附录

A. 基本常数	418
B. 矢量和张量的一些关系式	419
C. 四极相互作用	421
D. 速度平均函数用表	425
E. Majorana公式	427
F. 两线场理论	431
G. 校样时增添的注释	433

参考文献

作者索引	455
主题索引	461

I

MOLECULAR AND ATOMIC BEAMS

I. 1. Introduction

THE subject of molecular beams is the study of directed beams of neutral molecules at such low pressures that the effects of molecular collisions are for most purposes negligible. The earliest molecular-beam experiments were those of Dunoyer (DUN 11). He used an apparatus illustrated in Fig. I. 1. A glass tube 20 cm long was divided into three separately evacuated compartments. Some sodium introduced into the first chamber was heated until it vaporized, whereupon a deposit of sodium appeared in the third chamber. The deposit was of the form to be expected on the assumption that the Na atoms travelled in straight lines in the evacuated tube.

Subsequent to Dunoyer's pioneering work, many different experiments based on the molecular-beam methods have been performed. Particularly significant from the point of view of the development of molecular-beam techniques have been the experiments of Stern and his collaborators at Hamburg in the nineteen-twenties and early thirties. The papers of Stern and Knauer in 1926 (STE 26, KNA 26, KNA 29) indeed laid down many of the principles of molecular-beam techniques which have been followed even to the present time.

Precision measurements of nuclear, molecular, and atomic properties began in 1938 with the introduction of the molecular-beam resonance method by Rabi and his associates (RAB 38, KEL 39). At first, the resonance method was applied to the measurement of nuclear magnetic moments only, but it was soon extended as a more general technique of radiofrequency spectroscopy initially by Kellogg, Rabi, Ramsey, and Zacharias (KEL 39a) in applications to molecules and later by Kusch and Millman (KUS 40) in the study of atomic states. Since 1938 the history of molecular beams has dominantly been the history of the resonance method. As discussed in subsequent chapters, important

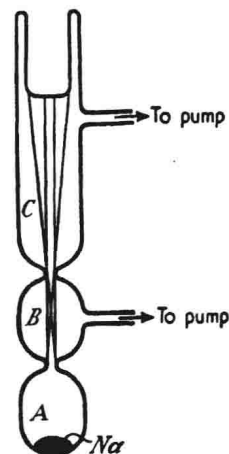


FIG. I. 1. Schematic diagram of Dunoyer's original atomic-beam apparatus. A is the source chamber, B the collimator chamber, and C the observation chamber (DUN 11).

improvements and extensions of the molecular-beam resonance method have been made by Lamb (LAM 50*a*), Ramsey (RAM 50*c*), Kusch (KUS 51), Rabi (RAB 52), Zacharias (ZAC 53), Lew (WES 53), and others. However, since 1938, most molecular-beam researches have been applications of the resonance technique to physical measurements. The molecular-beam laboratories at Columbia University, Massachusetts Institute of Technology, and Harvard University have been particularly effective in measuring with the resonance method many varied properties of nuclei, atoms, and molecules.

The developments in molecular beams prior to 1937 have been described in detail by Fraser in two different books (FRA 31, FRA 37). Since that time no book devoted exclusively to molecular beams has been published. However, considerable discussion of molecular beams is given in the nuclear moment books of Kopfermann (KOP 40) and Ramsey (RAM 53*b*, RAM 53*e*) and in various review articles (HAM 41, BES 42, KEL 46, EST 46, KUS 50, RAM 50, RAM 52, ZZB 1-6). In accordance with existing conventions as to the scope of the subject molecular beams, the present book will be limited to beams of electrically neutral molecules. Ion beam experiments have been discussed extensively by Massey (MAS 50, MAS 52), Burhop (MAS 52), and others.

I. 2. Typical molecular-beam experiment

Although molecular-beam experiments and apparatus vary greatly according to their applications, they also have many features in common. This is especially true of the experiments in recent years, which have almost exclusively been by the molecular-beam resonance method. For this reason a general description of a typical molecular-beam resonance apparatus is given in this section as an introduction to the more detailed considerations which follow in subsequent chapters.

A photograph of a typical apparatus is shown in Fig. I. 2. A schematic diagram of the apparatus is shown in Fig. I. 3. The molecules emerge from a source *S* into an evacuated source chamber. The source may be either a heated oven or a small chamber cooled with liquid nitrogen, depending on the vapour-pressure properties of the substance being investigated. The source shown in Fig. I. 3 is for the study of gaseous hydrogen and is cooled with liquid air. The pressure inside the source is about 6 mm Hg. A typical source slit width is 0.015 mm and height about 0.8 cm. Sometimes the slits are a few millimetres long to assure that a larger fraction of the emerging molecules goes in the direction of the detector. The molecules then pass through a separately

pumped separating chamber and into the main chamber. The purpose of the separating chamber is to aid in the attainment of a better vacuum in the main chamber. Typical pressures are 2×10^{-5} mm in the separating chamber, and 5×10^{-7} mm in the main chamber. These pressures are sufficiently low for most of the molecules to travel the entire length of the apparatus without being subjected to collisions.

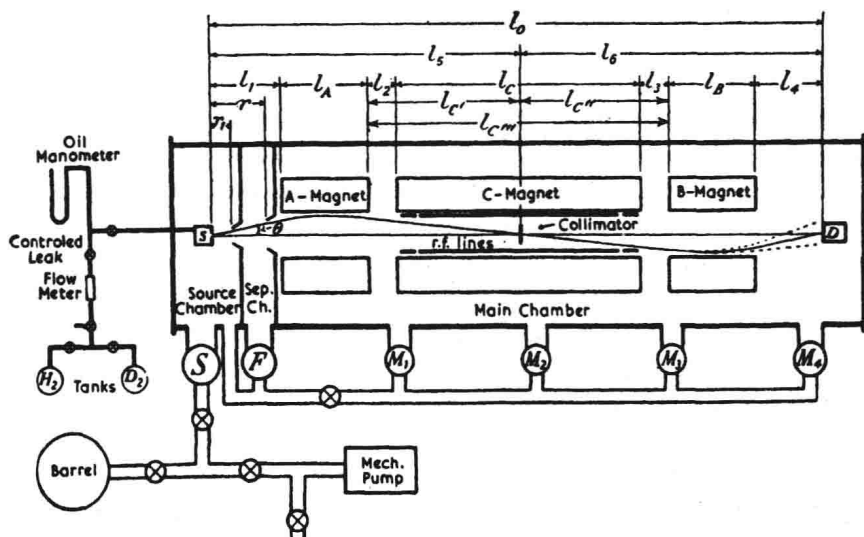


FIG. I. 3. Schematic diagram of a molecular-beam apparatus. The transverse beam displacements are much exaggerated (KOL 50). The *S* and *D* on the beam axis indicate source and detector, respectively. Typical dimensions are given in Table XIII.1 on p. 356.

The molecules are detected in the main chamber by any of several different kinds of detector described in Chapter XIV. Two of the most frequently used detectors are the surface ionization detector and the Pirani detector. The former consists of a heated tungsten (tungsten) wire of about 0.015 mm diameter. If an atom, such as potassium, with a low ionization potential (4.3 eV for K) strikes the heated tungsten wire, whose work function is 4.5 eV, the valence electron goes into the tungsten and the atom evaporates from the wire as a positive ion. The wire is surrounded by a negatively charged cylinder and the positive current to the cylinder is determined, thus providing a measurement of the beam intensity. The Pirani detector, used with non-condensable gases like H_2 , consists of a small volume chamber (7.5 cm $\times$ 0.5 cm $\times$ 0.06 cm in a typical case) along whose length are stretched one or more thin platinum strips (typically 7.5 cm $\times$ 0.05 cm $\times$ 0.0001 cm). The beam is admitted to the Pirani cavity through a long narrow channel (2.5 cm long, 0.8 cm high, and 0.015 cm wide in a typical case).