

束箔光谱学

〔美〕S.巴什金 主编

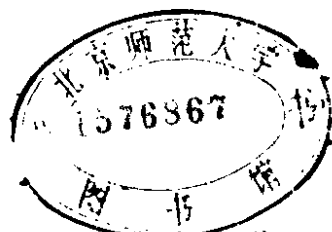
原子能出版社

束箔光谱学

〔美〕S. 巴什金主编

崇光 淑英 维兴 译
孔青 殿彦 次龙
朱启明 张 渊 校

521/68/22



原子能出版社

25

Beam-Foil Spectroscopy
Editor, Stanley Bashkin
Springer-Verlag Berlin Heidelberg
New York, 1976

束箔光谱学

〔美〕S.巴什金主编
崇光 淑英 维兴 译
孔青 殿彦 次龙 校
朱启明 张 渊 校
原子能出版社出版
(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张13.125 ·字数28.5千字
1991年3月北京第一版·1991年3月北京第一次印刷
印数 1—600

ISBN 7-5022-0255-2

TL·101 定价: 12.20元

(限国内发行)

内 容 简 介

束箔光谱学是最近十几年国际上发展起来的一门新兴学科。主要内容是,用被加速的离子撞击不同元素的薄箔的方法研究基础原子物理学、测量电子能级的平均寿命。

目前国际上已有很多人将加速器改装用来研究束箔问题。能量在 10^2-10^3eV 范围的束箔实验可以揭示被加速的元素低电离的电子特性,高达 $8-10\text{MeV}$ /核子的范围可以产生高 Z 的单电子和双电子系统的跃迁,这种跃迁可灵敏地检验量子电动力学。束箔技术应用于天体物理问题上,可以对日冕的性质以及银河系中元素的丰度得到很好的理解。

从事原子物理学、光谱学、天体物理学等研究工作的实验学家和理论学家阅读本书会获得很多原子系统的丰富信息。大学物理系的师生和研究生阅读本书,亦会受益。

本书由陈崇光、刘淑英、马维兴、孔青、许殿彦、张次龙翻译。
由朱启明、张洲审校。

绪 言

S. Bashkin

自从 Kay 的第一次实验^[1]与我的第一次有关箔激发粒子束^[2]固有的可能性正式讨论发表以来,束箔光谱学有了迅速发展。我们发现,束箔源除了能够完成许多重要的任务外,它本身还具有一些我们意想不到的作用。这些意外作用的发现有助于我们了解基础原子物理学。早期的工作,主要是在所选用的波长和粒子能量的范围内发展,而对探索束箔源的潜力来说却仅仅是开始尝试而已。

后来有许多人愿意把他们的加速器装置改用于研究束箔问题或把他们的理论技术应用于与束箔领域有关的计算,借以引起对束箔光谱学现状的讨论。本书的意图是总结已有的知识并略述尚待研究的一些问题。

第一章是有关实验的细节。文献[2]中的内容,一再强调 Doppler 效应引起的谱线加宽给光谱学工作者带来的严重困难。不幸,这项预言已为实验证实。尽管如此,大家还是为减小这种效应做了一些有益的努力,谱线强度数据的归一化工作各人有各人的处理方法。从加速器到分光计的每件设备的优点和局限性在许多实验中都做过探讨。为所有束箔工作者方便起见,第一章把这些情况和有关问题都放在一起。

第二章先介绍了光谱学的有关知识。接着讨论光谱学实验细节,并对系统的数据作了全面处理。以前,此系统的数据是不完全的。同时处理了在束箔源中大量存在的特殊类型的态。本章还详细介绍了能级分类方法,其中特别强调了氢的能级和多激发能级。

在文献[2]中,表示了希望用束箔源来测量激发电子能级的平均寿命。现在已知,这方面的研究已取得许多成果。在本书第三章中首先总结了这些测量的历史,接着详细地分析了如何从数据中推断出平均寿命。在分析过程中非常重视级联效应,并且给出其计算方法。

在实验工作兴起的同时,理论方面,特别在计算振子强度方面有了重要的发展。第四章介绍了从基本观点出发进行这些计算的最新发展,并介绍了以前没有发表过的新的研究工作。本章还提出许多建议以改进为探索原子性质所进行的进一步的实验和计算。

第五章是在多年研究工作的基础上写成的,其中,振子强度随着在等电子数序中的位置而变化的系统特性已表明具有很大价值。特别值得注意的是这些趋势实际上可用于在能级寿命的单个实验中估计误差。由此可知,为消除理论和测量间的差异我们还得做进一步的努力。

束箔技术的几种最使人感兴趣的应用已用到天体物理问题上,特别是用于了解日冕的性质和银河系中元素的丰度方面。第六章和第七章论述束箔数据应用于天体物理学上的成果的不同特点并提出进行一些新的实验来回答尚未解决的问题。

许多束箔实验是在几百keV能量范围内进行的,它们很好地揭示了被加速的元素低电离的电子特性,在能量尺度非常高的一端即每个核子在8或10MeV范围内,就看到了完全新的现象。在这样的能量下,我们可以产生高 Z 的单或双电子系统,这些系统的“光学”电子能够经历的跃迁将成为量子电动力学的灵敏检验。第八章评述了 $Z=14$ 以上的单电子和双电子系统的Lamb移动和各种禁戒衰变的理论和实验工

作。

一种意想不到的束箔源特性，是高度相干和实际上是由每个激发能级表现出的整列以及伴随着特殊的束箔几何的高度定向。第九章给出了这种特性的全面解释，包括理论和实验的比较。这对进一步的实验工作有明确的指导作用。

然而大量的束箔实验必须和光谱学实验一道来做。我们不能忽视当重离子穿过薄箔时大量产生的电子。的确应该注意到激发系统衰变时电子发射本质上是比光发射更为普遍的方式。对这些电子的分立能谱的研究已经提供了关于高自旋亚稳系统的令人信服的资料。第十章描述如何进行实验及有关高度电离原子的电子结构的基本意义。

即使粗略地阅读本书，也能知道束箔源具有单原子系统的丰富信息。实验及理论工作者都有许多机会得到这些信息并对其进行整理。

本书的几位作者与编者共同希望本书将能激发人们去钻研和探讨原子的未知的特性。

本书承蒙C. Davis夫人将原稿全部打印并对编写工作提出许多宝贵意见。编者在此谨表衷心感谢。本书的所有读者都将因此而受惠。

参 考 文 献

- [1] L. Kay, *Phys. Letter* 5, 36 (1963) .
- [2] S. Baskin, *Nucl. Instr. and Meth.* 23, 88 (1964) .

目 录

绪言

第一章 实验方法	1
1.1 加速器	1
1.2 离子源	3
1.3 对束的要求与限制	5
1.4 质谱分析器	7
1.5 靶室	10
1.6 靶	13
1.7 分析装置	17
1.8 探测器	20
1.9 探测的几何安排和线宽	24
1.10 束监测器	27
1.11 外场	31
1.12 结束语	32
参考文献	32
第二章 用束箔方法研究原子光谱	38
2.1 实验方法	39
2.2 光谱研究的结果	44
2.2.1 以前未完整研究的系统	45
2.2.2 类氢能级	52
2.2.3 位移项	58
2.2.4 多激发态	60
参考文献	70
第三章 寿命测量	80
3.1 寿命测量是原子物理学中的一个基本领域	82
3.1.1 寿命测量的需要	82
3.1.2 束箔技术发展前的寿命测量法	83

3.2	基本量的定义	87
3.2.1	瞬时布居数	87
3.2.2	跃迁几率和振子强度	88
3.3	束箔激发衰变曲线的测量	89
3.3.1	束箔技术的能力和限制	89
3.3.2	束箔设备与测量过程的详细介绍	92
3.3.3	级联再布居数——一个容易处理的问题	97
3.4	测量的衰变曲线与时间的关系	101
3.4.1	驱动耦合线性速率方程的解法	101
3.4.2	能级布居数的定量指示器——补充比	106
3.4.3	整列光源的强度关系式	107
3.4.4	仍然保持衰变曲线的平均寿命概念的偏离	109
3.5	对单独的衰变曲线用指数拟合求平均寿命	112
3.5.1	最大似然法	112
3.5.2	非线性最小二乘法	113
3.5.3	衰变曲线的微分和积分	116
3.5.4	间隔很近的平均寿命的展开	118
3.5.5	Fourier 变换法	119
3.5.6	矩量法	120
3.6	通过对与级联有关的衰变曲线作联合分析求出平均寿命	121
3.6.1	确定拟合平均寿命时出现的不确定性	121
3.6.2	勉强拟合	124
3.6.3	与级联相关的衰变曲线的线性拟合的归一化	125
3.7	无级联法	129
3.7.1	束箔符合技术	129
3.7.2	运用整列来识别级联	130
3.7.3	激光激发	132
3.8	结束语	134
	参考文献	135

第四章 中性原子、单次及多次电离原子的理论振

子强度	146
——理论与实验的比较以及评价载有新结果的表	146
4.1 非满壳层多电子理论	150
4.2 电荷波函数的一种光谱学解释	156
4.3 非满壳层多电子理论算法	159
4.3.1 Ψ_0 的 L^2, S^2 对称性	162
4.3.2 偶极子长度与偶极子速度之比较	163
4.3.3 半内部轨道变分 (A型态, 对称性中最 低的态)	164
4.4 对称性的非最低态	167
4.4.1 中性和单次电离原子	167
4.4.2 变分塌缩及其避免	171
4.5 内壳 (KL $\rightarrow$ KL'(M)) 到预Rydberg 能级 ($\bar{V}\rightarrow pR$) 间的跃迁的新振子强度	179
4.6 用非满壳层多电子理论进一步检验影响振子强度 的其它关联效应	182
4.7 结论	190
参考文献	191
第五章 等电子数序中原子振子强度的规律	200
5.1 理论基础	202
5.1.1 定义	202
5.1.2 f 值对核电荷的依赖关系	204
5.1.3 极限 $1/Z\rightarrow 0$ 的探讨	207
5.2 确定倾向的讨论	208
5.2.1 基本倾向	210
5.2.2 具有极大值的曲线	212
5.2.3 具有极小值的曲线	223
5.2.4 反常的曲线	225
5.3 振子强度按等电子数序在光谱系中的分布	226
5.4 相对论性效应及其修正	229
5.5 摘要	235

参考文献	237
第六章 天体物理学中的运用: 吸收光谱	244
6.1 分支比	246
6.1.1 光源	247
6.1.2 光谱仪	248
6.1.3 光谱仪校准	249
6.1.4 对被测分支的选择	251
6.2 增长曲线的分析	253
6.2.1 增长曲线的构成	254
6.2.2 内在一致性检验	255
6.2.3 不同跃迁的跃迁几率的对比	256
6.2.4 太阳丰度的确定	256
6.3 天体物理学应用中所需要的束箔光谱学测量	257
参考文献	259
第七章 束箔光谱学对太阳紫外线发射光谱的应用	263
7.1 色球层和日冕里的电离平衡	266
7.2 色球层和日冕里的激发平衡	267
7.3 电子温度的谱线比率测定法	269
7.4 电子密度的谱线比率测定法	274
7.5 色球层和日冕丰度的确定	276
7.6 诊断法所需要的束箔测量	279
参考文献	280
第八章 高 Z 类氢离子和类氦离子的研究	283
8.1 单电子系统里的 Lamb 移动	284
8.1.1 高 Z 快速离子束的猝灭测量	287
8.1.2 用分离的振荡场在氢中产生的 Lamb 移动	290
8.2 双电子系统中的 Lamb 移动	291
8.3 单电子系统的 $2S_{1/2}$ 亚稳态的辐射衰变	293
8.3.1 理论	293
8.3.2 实验	298
8.4 双电子系统 $n=2$ 态的禁戒辐射衰变	303

8.4.1	源于 2^1S_0 的辐射衰变	303
8.4.2	源于 2^3S_1 的辐射衰变	307
8.4.3	源于 2^3P_2 的辐射衰变	309
8.4.4	源于 2^3P_1 的辐射衰变	311
8.5	双电子系统中双激发组态的研究	312
	参考文献	314
第九章 束箔光源里的相干、整列和取向现象		322
9.1	一般的理论考虑	325
9.1.1	发射过程	325
9.1.2	对称性考虑	330
9.2	整列和线极化	333
9.2.1	零场测量	334
9.2.2	电场	345
9.2.3	磁场	350
9.3	取向和圆极化	353
9.3.1	零场	353
9.3.2	磁场测量法	355
9.3.3	平方 Stark 效应	356
	参考文献	358
第十章 用快速抛射电子光谱学进行自电离离子能级和寿命的测量		362
10.1	快速抛射电子光谱学 (FPES) 方法	368
10.1.1	分析器的选择	368
10.1.2	适用于 FPES 的圆筒形镜式分析器的特性	370
10.1.3	分析器最佳判据的运动学修改	374
10.1.4	分析器性能的相对论性修正	375
10.1.5	横向速度扩展引起的加宽	377
10.1.6	进一步的运动学的考虑, 从抽样中估计在 FPES 里观察到的净线宽	379
10.1.7	FPES 的优点总结	381
10.2	FPES 举例	382

10.2.1	类锂、类铍和类硼离子的长寿命态的光谱	382
10.2.2	类钠氯离子的长寿命壳心激发态的光谱	386
10.2.3	中性的和接近中性的碱金属壳心激发态	387
10.2.4	箔靶在 FPES 中的电子本底	390
10.2.5	气体靶在 FPES 中的电子本底	393
10.3	用FPES测量Auger寿命	396
10.3.1	亚稳类锂离子的 Auger 寿命	396
10.3.2	用Auger 发射能级的光学衰变道测定寿命的 例子	402
参考文献		403

第一章 实验方法

Stanley Bashkin

本章的目的是给出有关用于束箔光谱学实验安排的实际资料，我们先从高能粒子束的产生开始讲起。

1.1 加速器

各种正离子加速器均能用于束箔光谱学的研究。在这类工作中，曾用过的设备有同位素分离器、Cockcroft-Waltons 加速器、单端和串列静电加速器及直线加速器，而静电加速器是最常用的一种类型。同位素分离器一般用较低电压（ $\leq 600\text{kV}$ ），其离子源往往会产生多次电离粒子以致最后粒子能量可达 1.5MeV 。譬如柏林、丹麦和瑞典就使用这种设备。那种本身带有内部正离子源的单端静电加速器广泛用于束箔光谱学实验，其显著的特点是粒子能量容易改变，能量范围合适。

一个 2MeV 静电加速器，在 150kV 的电压下能很容易地运转。然而，通常采用的粒子能量最好是大大低于 150keV 的。为此可以从离子源提取一种适当的分子离子。例如，射频离子源可以大致相同的数目发射 H^+ 、 H_2^+ 和 H_3^+ 。如果这些粒子都能获得 1eV 能量，其中各组分原子的能量分别为 1eV ，

$\frac{1}{2}\text{eV}$ 和 $\frac{1}{3}\text{eV}$ 。如果使用 CH_4^+ ，一个氢原子的能量就会减

少到 $1/16\text{eV}$ ，其余类推。当然，在最后一例中，碳和氢均出现在靶室中。是为了在适当的电压下运转加速器使粒子能量向下延伸，而不得不付出的代价。由于分子在箔里必定会遭到碰撞，不管入射粒子多么复杂，都只能看到单原子发射体。与同样速度的单原子相比，分子的组成部分的散射在某种程度上更严重^[1.1]，不过也有一些相反的结果^[1.2]。

串列静电加速器对于产生许多不同类型的高能离子来讲，是一种非常好的机器^[1.3-5]。端电压高达 20MV 的机器已在运行中，至少有两个 30MV 的机器正在建造中。在 30MV 的电压下，一个两级串列式加速器所产生的离子的最终能量可超过 400MeV ，写本书时报道的束箔光谱工作用串列加速器产生的最高粒子能量是 110MeV ^[1.7,8]。

迄今最高能量是用直线加速器获得的，例如 Orsay 和 Berkeley 的直线加速器。Orsay 的加速器，每个核子 1.15MeV 的能量已使C, N, O和Ne的单电子离子和有几个电子的离子的光谱实验^[1.9-13]得以进行。粒子束的高速度还可用来测定超短平均寿命，而且已经获得像 0.01ns 那样短暂的平均寿命的数据。

在 Berkeley, Marrus 及其合作者们已经在非常高的能量下做了一些最富有想像力的工作（见第八章）。对从硅到氦之间的大量元素，已用高达每核子为 10MeV 的能量，研究了氢离子和类氢离子。这些实验集中于禁戒跃迁，其结果表明，高速度虽然对于测定短暂的平均寿命是有用的，但对于测定长平均寿命却有些不利，因为观测的长度必须相当长。不过在 Berkeley 已经取得了长达两米的束流飞行路程的数据。

从表面上看，重离子回旋加速器似乎是束箔光谱研究中

的很吸引人的机器。由于束流已形成脉冲，而且脉冲宽度只有几百个PS，因此使人们想到对短暂的平均寿命进行延迟符合实验测量。事实上，这种实验可以用气态靶以及箔来完成。然而我们还不了解用一个单独的回旋加速器所进行的这种性质的实验，虽然在低能量的条件下进行的类似实验已由 (Dotchin), (Chupp) 和 (Pegg) 报道过^[1.14]。看来这个研究领域有着广阔的发展前景。

1.2 离子源

对于单端静电加速器来说，射频离子源是最通用的。标准高压工程公司的离子源，是将 BCl_3 ， SF_6 和 UF_6 分别加入放电室里，从而使用像硼、硫和铀等元素的离子。将离子源在高压 $[\approx 6.65\text{Pa} (50\mu\text{Hg})]$ 的条件下运转5分钟或10分钟，然后完全关闭分子气体从而得到最好的性能。再用氩或氪放电，数量级为 $10\mu\text{A}$ 的十分稳定的硼束或硫束便射向靶，但是铀束仅得到 1nA 左右。半天的时间束流就慢慢地降下来，但是可以加进一些混合物使其恢复。采用某些所需的金属材料做成出口通道，就可以加速这些金属，或者简单地在射频室内放进一小块金属并运转氩束也可加速这些金属。铁^[1.15]和铝^[1.16]、铍^[1.16]已用前述方法加速。虽然束流较小并有些难以控制，不过总比没有要好一些。

可能已注意到，Arizona组，其2MV静电加速器里使用过的腐蚀性气体种类很广。除了 BCl_3 ， SF_6 ，和 UF_6 以外，试用过最麻烦的物质或许要算 SiH_4 了。这种气体一旦接触氧马上就自发爆炸燃烧。这些各种不同的气体，对加速器的管道尚无有害的影响，这些管子自1964年夏天开始使用以来一直未发生变化。

产生正离子的另一种重要的离子源是能使所需物质挥发的炉。一电子束使蒸气电离、接着即可提取正离子。Whaling就是用这样的源来做铁的工作的（见第六章）。在某些源中，可以将 CCl_4 注入到热炉中。这样可以促进金属氯化物的形成，而且在相对低的温度下具有很高的蒸气压。但是，这意味着将有許多不必要的粒子进入加速器管道；对于单端加速器来讲，就会导致严重的问题。一个问题是，由于加速器管道里或束流偏转前缝缘上重离子与剩余气体之间的碰撞所放出的电子，都聚积到高压端上，并引起通路上的附加电离。当电子轰击加速器管道末端而停止时，就产生了大通量的高能X射线。这不但有可能造成危险，而且这些X射线还会促使电压不稳。

另一个问题是，通常人们用安装在加速器管道出口处的泵来抽离子源。对于一个2MV的静电加速器来讲，抽速由于管道的限制而每秒不到20升，这是不大的。因此，将 CCl_4 加入炉里就能很容易使管道压力达到电击穿点。

从原则上讲，可以安装一个终端偏转器，这样，从离子源射出的适当成分的离子才能进入加速器管道。离子源设在加速器的外部时，这种预选是非常容易做到的。但是，离子源设在内部时，由于空间与电源的限制，就很难做到了。至少对于原子质量数大约大于20时会是这样的。

另外一种炉源对于碱金属是有用的。但这取决于碱金属的电离能和钨的功函数之间的差。使适当的盐加热，例如硅酸铝锂^[1,7]，就可排出碱金属组分。当碱原子触及钨时，他们就弹回成为正离子，并能导入加速器管道。

Arizona研究小组发现，按照旧式的Wisconsin技术，从加速器装置的外面将气体导入离子源中是很方便的。其方