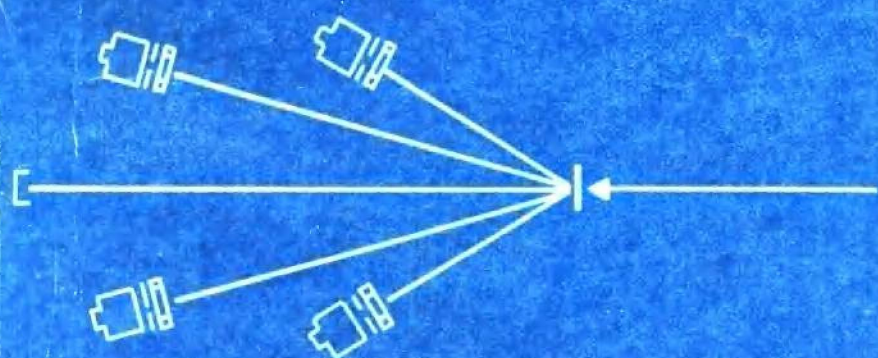


# 重离子物理实验方法

〔西德〕R. 奥特格



原子能出版社

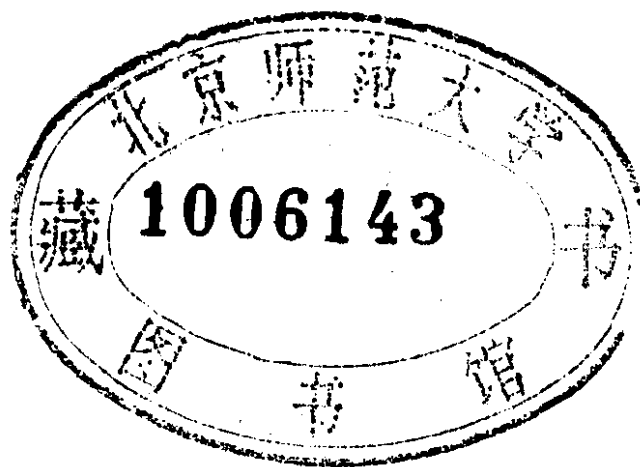
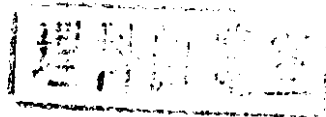
# 重离子物理实验方法

〔西德〕K. 贝特格 编

江栋兴 刘洪涛 译

胡济民 校

刊1182/02



原子能出版社

## 内 容 简 介

本书较为全面、系统地评述了重离子物理实验技术的新近发展。作为全书重点的前三章分别讨论多电荷态重离子的产生、重离子与物质相互作用以及重离子探测器。后面两章则对重离子束靶和研究重离子反应的磁谱仪作了简要的介绍。

本书着重叙述实验技术的物理过程，图象清楚，富于启发。它不仅对直接从事重离子物理研究和重离子束应用的科学工作者有所裨益，而且对有关核物理专业的大学教师、研究生以及从事核技术应用的科技人员也有一定的参考价值。

### 重离子物理实验方法

〔西德〕K.贝特格 编

江栋兴 刘洪涛 译

胡济民 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张  $10 \frac{1}{8}$  · 字数 229 千字

1982年5月第一版·1982年5月第一次印刷

印数001—2,600 · 统一书号: 15175·397

定价: 1.30元

## 中译本校者序

重离子核物理是在原子核物理学中受到广泛重视的前沿领域之一，而重离子束的应用则是核技术应用方面一个具有广阔前景的新方向。所有这些都是在重离子束实验技术的发展密切相关的。正如大多数迅速发展的学科一样，有关资料分散在大量的文献资料中，而且其中存在着不少相互矛盾的看法。所以查阅和评价这些资料是相当困难的。本书的编著者均为从事重离子物理研究的科学家，他们有条件对这方面的进展加以介绍和评述，加之每章后面汇集了较为完整的参考文献，因此，本书对从事重离子核物理研究和重离子束应用的科学工作者会有参考价值。

本书特别强调了重离子的特点及实验技术的物理过程，较为全面地评述了重离子实验技术各个方面的较新发展。由于重离子实验技术本身是从一般核实验技术发展起来的，所以它的发展必然反过来促进轻离子实验技术的发展，从而有助于全面提高核实验技术。书中有些部分，如探测器、重离子与物质的相互作用以及磁谱仪，对有关专业的大学教师、研究生以及其他从事与一般核实验技术有关的科技人员都有参考价值。

胡 济 民

1980.10.1

## 前 言

对于原子、离子和复杂原子核这些重的粒子所发生的物理现象的研究，即对于有关它们之间相互作用的物理量的测量，已经摆脱了单凭经验进行探索的初始状态。回顾实验方法的现状可以看到，在利用重的粒子所做的实验中，人们最初试图推广使用在研究轻的粒子相互作用时发展起来的技术和方法。然而，人们很快发现以前那些方法的局限性。因此，需要人们提出许多新的设想，并且必须在这些设想能够成功地应用之前，对它们进行检验。正是因为普遍地感到需要发展新的实验技术，我们选择了本书的课题。由于目前世界上从事重离子研究的单位不断增多，它们也都在致力于发展实验技术，所以本书不打算对整个领域进行全面的评述，而宁可对其中某些课题的现状作一介绍。诚然，文章重点的确定以及内容的取舍完全取决于作者，但如果这本取材于1978年初以前资料的书，对已经在这领域内从事工作的人能够提供有价值的参考资料，而对这个领域的新手以及希望从事发展测量实验装置的人能够作为一个指南，作者和编者将为此感到高兴。毫无疑问，在对重离子物理实验方法进行详尽而广泛的评述中，能够包括更多的课题。本书涉及到的仅仅是其中对实验技术发展有大的影响的一些。

遗憾地是书中的文章不可能是同时完成的，因此，总会在某些方面有新的进展，对于这些进展进行交流，编者和作

者将非常感谢。

虽然，不少有关评述文章已经发表在各种杂志和评述丛中，但这里把它们之中的一些收集在一起，可能对致力于此领域研究的人员是有帮助的。

编 者

1978年4月于美因河畔法兰克福

# 目 录

|                                               |         |
|-----------------------------------------------|---------|
| 第一章 多电荷态重离子的产生 (H.温特尔).....                   | ( 1 )   |
| 1.1 引言 .....                                  | ( 1 )   |
| 1.11 重离子束的产生和应用 .....                         | ( 1 )   |
| 1.12 多电荷态重离子源研制方面的进展 .....                    | ( 3 )   |
| 1.13 多电荷态重离子源结构的一般特性 .....                    | ( 5 )   |
| 1.2 多电荷态离子源的基本工作过程 .....                      | ( 7 )   |
| 1.21 离子的产生 .....                              | ( 7 )   |
| 1.22 离子的损失 .....                              | ( 13 )  |
| 1.23 在产生多电荷态离子的结构中的平衡, 多电<br>荷态离子源的主要参数 ..... | ( 18 )  |
| 1.24 离子束动力学 .....                             | ( 34 )  |
| 1.25 多电荷态离子源的诊断 .....                         | ( 38 )  |
| 1.26 多电荷态离子源的工艺 .....                         | ( 41 )  |
| 1.3 关于各种多电荷态离子源结构的讨论 .....                    | ( 44 )  |
| 1.31 等离子体多电荷态离子源 .....                        | ( 44 )  |
| 1.32 具有强的离子约束的多电荷态离子源 .....                   | ( 96 )  |
| 1.33 其他多电荷态离子源的设计 .....                       | ( 108 ) |
| 1.34 加速器-积成多电荷态离子源 .....                      | ( 109 ) |
| 1.4 结论 .....                                  | ( 110 ) |
| 参考文献 .....                                    | ( 112 ) |
| 第二章 重离子穿过物质 (H.施米特-博金) .....                  | ( 121 ) |
| 2.1 引言 .....                                  | ( 121 ) |

|                                                               |       |
|---------------------------------------------------------------|-------|
| 2.2 荷电粒子能量转移的机制 .....                                         | (126) |
| 2.3 荷电粒子在物质中的平均能量损失 .....                                     | (139) |
| 2.31 快入射粒子的电子阻止( $V_p \gg V_0$ ) .....                        | (140) |
| 2.32 低速度离子 ( $V_p \lesssim V_0 \cdot Z_p^{2/3}$ ) 的电子阻止 ..... | (153) |
| 2.33 核阻止 .....                                                | (155) |
| 2.34 在重离子的平均能量损失中的高阶效应 .....                                  | (157) |
| 2.4 阻止本领的测量方法 .....                                           | (162) |
| 2.41 微分方法 .....                                               | (163) |
| 2.42 积分方法 .....                                               | (167) |
| 2.43 间接方法 .....                                               | (172) |
| 2.5 能量离散 .....                                                | (173) |
| 2.51 快速粒子 ( $V_p \gg V_0$ ) 的能量离散 .....                       | (174) |
| 2.52 低速粒子 ( $V_p \lesssim V_0 \cdot Z_p^{2/3}$ ) 的能量离散 .....  | (186) |
| 2.53 射程离散 .....                                               | (189) |
| 2.6 多次散射 .....                                                | (190) |
| 2.7 结论 .....                                                  | (193) |
| 参考文献 .....                                                    | (195) |
| 第三章 重离子探测器 (B.马丁, H.斯特尔泽) .....                               | (204) |
| 3.1 硅探测器 .....                                                | (204) |
| 3.11 硅探测器的能量分辨率 .....                                         | (205) |
| 3.12 硅半导体探测器的脉冲高度亏损 .....                                     | (210) |
| 3.13 在硅探测器中的等离子体时间 .....                                      | (212) |
| 3.14 硅探测器的辐射损伤 .....                                          | (214) |
| 3.2 充气型探测器 .....                                              | (215) |
| 3.21 单丝正比计数器 .....                                            | (217) |
| 3.22 多丝正比室 .....                                              | (223) |
| 3.23 电离室 .....                                                | (238) |
| 3.24 平行板雪崩计数器 .....                                           | (250) |

|      |                             |       |
|------|-----------------------------|-------|
| 3    |                             |       |
| 3.3  | 薄膜探测器 .....                 | (254) |
| 3.4  | 次级电子发射 (SEM) 探测器 .....      | (258) |
|      | 参考文献 .....                  | (264) |
| 第四章  | 重离子束靶(J.L.英特马, F.尼克尔) ..... | (274) |
| 4.1  | 引言 .....                    | (274) |
| 4.2  | 碳剥离膜 .....                  | (276) |
| 4.3  | 靶的损伤和靶的寿命 .....             | (283) |
| 4.31 | 辐射损伤 .....                  | (283) |
| 4.32 | 溅射 .....                    | (285) |
| 4.33 | 蒸发 .....                    | (288) |
| 4.4  | 靶温度 .....                   | (289) |
| 4.41 | 温度的计算 .....                 | (289) |
| 4.42 | 测量 .....                    | (293) |
| 4.43 | 用于高离子流密度的靶系统 .....          | (296) |
| 4.5  | 靶的均匀性 .....                 | (297) |
|      | 参考文献 .....                  | (300) |
| 第五章  | 研究重离子反应的磁谱仪 (T.沃尔彻) .....   | (301) |
| 5.1  | 引言 .....                    | (301) |
| 5.2  | 一般考虑 .....                  | (302) |
| 5.21 | 测量原理 .....                  | (302) |
| 5.22 | 探测器的一些情况 .....              | (304) |
| 5.23 | 束流和靶的效应所引起的限制 .....         | (306) |
| 5.24 | 运动学展宽 .....                 | (308) |
| 5.3  | 离子光学的一些关系式 .....            | (310) |
| 5.31 | 运动学修正 .....                 | (310) |
| 5.32 | 动量分辨本领和质量分辨本领 .....         | (311) |
| 5.33 | 高阶的情况 .....                 | (313) |

|                     |         |
|---------------------|---------|
| 5.4 重离子磁谱仪的例子 ..... | ( 314 ) |
| 5.41 Q3D磁谱仪 .....   | ( 315 ) |
| 5.42 伯克利磁谱仪 .....   | ( 316 ) |
| 5.43 GSI磁谱仪 .....   | ( 318 ) |
| 参考文献 .....          | ( 320 ) |

# 第一章 多电荷态重离子的产生

H.温特尔 (H. Winter)

普通物理研究所, 维也纳技术大学, 奥地利

## 1.1 引言

### 1.11 重离子束的产生和应用

关于像原子、分子、离子和裸核等重的粒子间的相互作用的实验研究已经发展成为今天的一个最活跃的物理学研究领域——重离子物理。用于研究这些反应的实验方法主要依赖于相应粒子的相互作用能量, 它可以从几百eV一直扩展到相对论能区。所以, 为了所希望的反应能够发生, 在靶粒子和入射粒子中至少必须有一个要被电离成离子, 并被加速到那样大小的能量。

对于轻的原子粒子间的碰撞, 相互作用能量必须达到约1MeV/amu 方能发生核作用过程。对于更重的弹-靶反应体系, 这个能量则须大于6MeV/amu。对于那些能够更好地了解核物质性质的新的作用过程, 甚至需要更高的相互作用能量, 例如直到几GeV/amu。而且这个能量范围似乎也非常适合于生物物理和医疗方面的有意义的研究。

为了把重离子加速到上述能量范围, 使用加速轻离子的传统的直线或圆形加速器是不行的。其原因如下(SCHME-

LZER1970);

由于加速器每单位长度所能承受的电压是有限的(对于传统的直线加速器大约为  $1\text{MeV}/\text{米}$ , 其峰值可达  $20\text{MeV}/\text{米}$ ), 所以加速离子的路程就会变得非常长。于是, 为了避免太多的离子损失, 就必须对真空提出十分苛刻的要求。

同样, 由于粒子的电荷剥离, 圆形加速器也不能用来加速单电荷态重离子。这是因为随着粒子能量增加, 这种电荷剥离亦随之增加, 而圆形加速器只加速具有确定荷质比的粒子, 所以粒子损失变得非常大。

为了解决这些问题, 能够使用三种不同的方法:

#### 1) 多电荷态离子的加速

必须借助于一个多电荷态离子源 (MCIS) 来产生具有更大荷质比的离子。在形成离子束以后, 用第一加速级使离子达到适当的能量, 以使用剥离片使离子的电荷态大大增加。最后, 用第二加速级使离子达到足够高的能量。对于离子的初始电荷态的选择必须权衡多电荷态离子源、第一加速级和后加速级的费用。因而必须仔细地考虑许多技术细节。关于多电荷态离子源, 必须强调: 在低的粒子速度下, 由于电荷转移造成的离子损失随离子电荷态的增高而大大增加。

#### 2) 用串列静电加速器加速负离子

在第一加速级中, 负离子被加速, 并到达置于串列静电加速器终端电位处的剥离片。在这里, 负离子转换成多电荷态的正离子, 并加速回到地电位。如果对于更重的离子需要更高的能量, 可以对离子进行第二次剥离, 然后再加速。

虽然在1)和2)中都可以用直线或圆形加速器作为第二加速级, 但它们之间的不同之处在于:

对于1), 第一级的造价与多电荷态离子源的性能密切相关;

对于2), 由于需要产生负离子以及两次剥离过程, 最终可得到的粒子流强受到很大的限制。然而, 它们都得到了人们的支持, 并在通常的加速器技术范围内得到应用。随着超导加速结构的即将出现, 在不久的将来, 它们很可能还会得到更进一步发展。

### 3) 集体粒子加速

一个和上述两种途径完全不同的方法是离子连同相对论电子云(或束)被集体加速。在设想的电子环加速器(ERA)中, 将产生一个稳定的环状快速电子云, 将其压缩并让其承载待加速的离子, 在发散的磁场作用下, 原则上可以把离子加速到高的能量。另外, 还可以使用强的二极管放电, 在这里, 离子的加速是借助于相对论电子束来实现的。这两种方法都不需要单独的多电荷态离子源, 因为通过相对论电子与中性粒子的相互作用就可以产生离子。根据已有的知识, 用这种技术, 离子只须通过相当短的路程就可以得到非常高的能量。然而, 即使将来这种加速器能够成功地运转, 它也只能提供非常窄的离子脉冲, 而且束流品质也很差。

## 1.12 多电荷态重离子源研制方面的进展

如果按照方法1)来加速重离子, 多电荷态离子源的应用就非常重要。而且, 多电荷态离子源也应用于其他的许多研究和技术领域。所以有必要对与多电荷态离子源运转有关的物理和技术方面的问题进行广泛的研究。若干年前, 由于在大多数情况下, 单凭经验的方法就可以产生所需要的离子流,

人们还普遍认为对离子源进行专门的研究是多余的。然而，现在由于电磁质量分离、空间引擎、为聚变实验提供所需的强中性粒子束以及重离子加速器等方面对离子源的要求日益迫切，暴露了单凭经验的方法的局限性。所以，最近十年来，人们较多地致力于有关离子束的产生的研究，使多电荷态离子源有了巨大的进展。同时也增进了对它们的工作原理的了解。有关重离子源研究的会议和专题讨论会的数目的增多就充分反映了在这方面所取得的成果和进展（参看文章 A—F）。

冯·阿登纳(VON ARDENNE 1956)和坎克(KAMKE 1956)给出了关于离子源的早期研究工作的评述。格思里和韦克林 (GUTHRIE AND WAKERLING 1949)的报告，对于等离子体离子源的发展具有特别的重要性。近来，加鲍维什 (GABOVICH 1972)对同一课题进行了广泛的讨论。另外，还应该提到包含重离子源的关于离子掺杂技术的报告(FREEMAN 1973)和关于强离子束的报告(GREEN 1974)。

为了更好地了解已知的多电荷态离子源构造的主要特点，在本章中介绍了一个物理模型。在简短地讨论了与多电荷态离子的产生和损失有关的主要过程之后，我们将解释这个模型和它的主要参数。然后，研究这些主要参数和多电荷态离子源的工作参数间的关系。

沿着这条线索，我们将讨论一些最重要的多电荷态离子源类型(包括已经建成的和新的有希望的设想)。其中，包括我们自己的和别人的研究成果。因为考虑到多电荷态离子源的实际应用，所以在整个讨论中，我们都用了合适的物理单位。

当然，所得结论明显地反映了作者本人的看法。由于多

电荷态离子源已经进入一个迅速发展的阶段，所以我们未提到的某些工作原理却很有可能在不久的将来被利用来建造强有力的多电荷态离子源。

### 1.13 多电荷态重离子源结构的一般特性

一般讲来，必须把每种多电荷态离子源和其后相连的加速结构连系起来讨论。我们可以沿如下线索来展示多电荷态离子源的特征：

#### 1.131 基本特性

为了全面地描述多电荷态离子源的特性，必须指出如下性质：

- 1) 发射粒子的种类，待加速的发射粒子的种类。 $M$ 为粒子的质量数， $M_n$ 为标称粒子的质量数。
- 2) 离子的电荷态 (CS)  $Z$ ，待加速离子的电荷态  $Z_n$ ，其荷质比分别为  $Z/M$  和  $Z_n/M_n$ 。

另外，定义发射离子的电荷态分布 (CSD) 为

$$\text{CSD}(Z)(\%) = \frac{I_z}{\sum_z I_z} \times 100$$

$I_z$  代表具有电荷态  $Z$  的某种粒子的发射离子电流。

显然，多电荷态离子源在遵从可接受的工作条件下运转时，标称离子电荷态的 CSD 必须尽可能的高。发射的电荷态的整个电荷态分布反映了各种离子的产生和损失过程的相对重要性 (参看 1.23 节)。

- 3) 发射的粒子流  $N_z$  及  $N_{z/n}$ 。这个数值限制了能被加速的粒子流的大小，而且在加速器运转过程中，粒子发射必须尽可能的稳定。

4) 注入粒子的发射度 $E(Z_n)$ (参看1.24节)。

5) 离子发射的时间结构。虽然连续工作状态是通常所希望的, 但是对绝大多数在加速器上的应用而言, 脉冲工作状态的多电荷态离子源已经足够。一般, 时间结构用负载因子和脉冲宽度(或重复频率)来标志。

### 1.132 技术特性

技术特性指明为使某种多电荷态离子源正常运转所需的设备和装置。

1) 多电荷态离子源的大小、重量、功率和冷却要求。这些数值表征了一个加速器的头部的容量。

2) 总的发射效率/标称粒子效率。第一个量代表标称离子的粒子流强与所有发射离子和中性粒子的总粒子流强的比值。所以它给出真空系统容量的量度。第二个量给出标称离子的粒子流强与所有标称粒子流强之和的关系。因此它是关于填装物质的使用效率的量度(这个量对于稀少的填装物质, 如同位素浓缩物质将显得特别重要)。

3) 源寿命。它限制了多电荷态离子源在加速器上能够连续运转的时间间隔。通常, 多电荷态离子源在可靠工作之前必须在连接真空系统之后进行调整, 所以源寿命必须显著地超过调整它所需的时间。为了避免在换源过程中加速器停止运转时间过长, 通常采用多源装置或多源头结构。

4) 可靠性和运转费用。虽然, 这些特性通常被忽略, 但它们极大地影响到加速器的总的运转性能。所以, 它们应受到特别重视。

最后, 必须提到的是, 目前还没有同时适合各种应用的多电荷态离子源。而且, 某个多电荷态离子源的品质只有通

过加速器的实际运转来评定。所以对于所有有关的工作，都必须根据经验来评定。

## 1.2 多电荷态离子源的基本工作过程

### 1.21 离子的产生

多电荷态离子可以通过原子、分子或它们的离子与光子、电子或重的粒子间的非弹性碰撞来产生。作为一个例子，在图1.1中给出了分别利用光子、电子和质子作为入射粒子所得电离截面的典型曲线。

原则上讲，由于光子只传递很小一部分动量给重粒子，光电离是最合适的过程。然而它并不是产生多电荷态离子的一个有效途径，因为除对于共振能量外，光电离截面都相当小，而且还因为至今仍无可用的、能量高于5eV的强光子源。

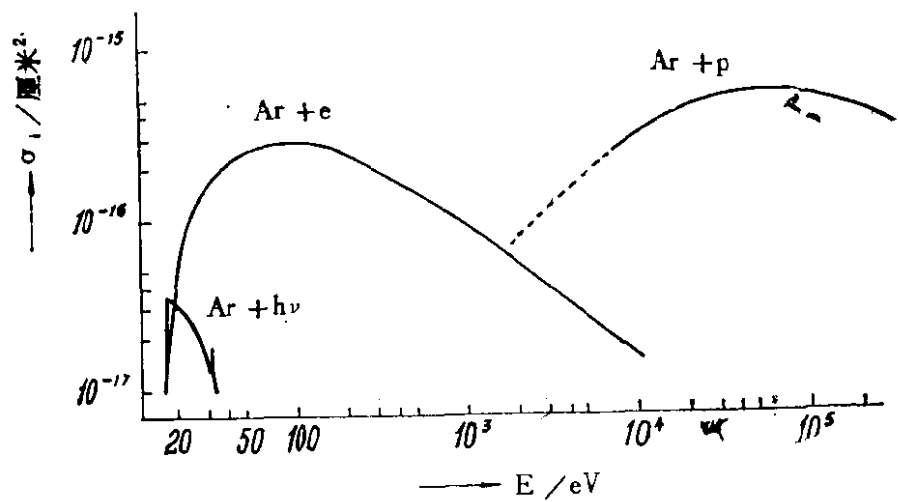


图1.1 Ar分别与光子、电子和质子碰撞的电离截面之比较