

强流离子光学原理

郁庆长 著

原子能出版社

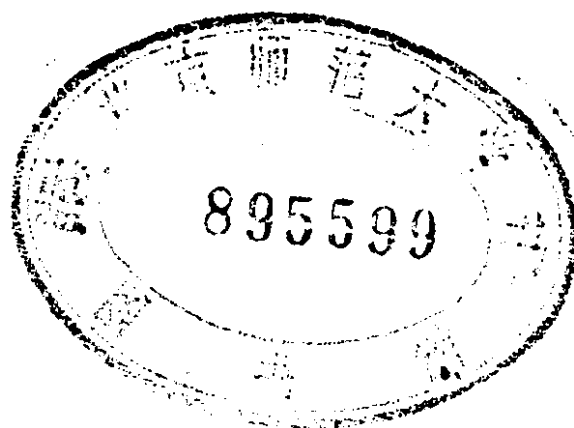
强流离子光学原理

郁庆长 著

赵忠尧 审校

陈佳洱

341115/21



原子能出版社

强流离子光学原理

郁庆长 著

赵忠尧 审校
陈佳洱

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 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $11 \frac{3}{4}$ · 字数 310 千字

1982 年 6 月 第一版 · 1982 年 6 月 第一次印刷

印数 001—2600 · 统一书号: 15175 · 390

定价: 1.65 元

内 容 简 介

强流离子光学研究强流离子束在电磁场中的运动规律。本书系统阐述强流离子光学的基本原理、计算方法及其最近的发展。主要内容有：离子在电磁场中的运动，强流离子束的线性和非线性空间电荷效应，强流离子光学中的数值计算方法，离子束运动的相空间理论，强流离子源的引出系统，空间电荷中和的强流离子束。

本书可供从事加速器、受控热核反应装置、空间离子推进器及其它离子束装置研究与设计工作的人员和大学有关专业师生参考。

序

强流离子光学研究强流离子束在电磁场中的运动规律。近年来，强流离子束在现代科学技术中获得了日益广泛的应用。各种强流离子加速器、受控热核反应装置、空间离子推进器和电磁同位素分离器等都需要强流离子束。它不仅用于科学研究领域，也越来越多地用于工业、农业、医疗和国防技术等方面。因此，人们要求更深入地掌握强流离子束在其形成、加速和传输的过程中的运动规律。这就促使强流离子光学迅速地发展。

但是，到现在为止，还很少见到论述强流离子光学的专著。在带电粒子光学一类的书籍中，多数是电子离子兼叙而偏于电子，或者弱流强流并论而重于弱流。对于强流离子束特殊的运动规律，则往往略而不语，或语而不详。这就给从事这方面工作的研究和设计人员带来了不小的困难。作者有鉴于此，遂决意写这样一本书。

强流离子光学的内容是比较丰富的，它和电动力学、统计物理学、电子光学、等离子体物理学、流体力学、计算方法和电工技术等学科都有密切的关系。为了在不太长的篇幅中既系统阐述它的基本原理，又反映出它最近的发展，我们对材料的选择和内容的安排都作了反复的斟酌。当然，无可讳言，作者的观点和兴趣对此也有一定的影响。书的前四章是它的基础部分，后三章则是一些专题性的研究，一些备查的材料放在附录中，每章之后附有参考文献目录。书中某些内容已经越出了传统的离子光学的范围，这是各学科相互接近和渗透的结果，在科学技术迅速发展的今天这是很自然的现象。

为使读者较好地掌握强流离子光学的基础理论知识，我们在必要的地方都采用了比较详细的推导和叙述。本书对数值方法给予了应有的重视，讲述了强流离子光学中常用的一些数值计算方法。我们认为对于研究现代科学技术的人来说，熟练地掌握解析方法和数值方法都是必要的。

本书初稿完成于1978年，最近又作了较大的修改。在写作过程中作者得到了许多同志的关怀。赵忠尧先生对本书的写作给予了极大的支持。赵先生和陈佳洱先生细心地审阅了本书初稿，提出了许多宝贵的意见和建议，并经常给作者以热情的鼓励。谢家荣先生也很关心作者的研究工作。严声清、陈鉴璞和于金祥同志校阅了部分书稿，提出了不少有益的建议。景毓辉同志为本书绘制了插图。此外，作者还得到了中国科学院高能物理研究所、原子能研究所、北京大学技术物理系等单位一些同志的帮助。作者在此向他们表示衷心的感谢。

作者学识有限，水平不高，书中错误和不当之处在所难免，望读者给予批评指正。

作 者

1980年5月于中国科学院
高能物理研究所

常用符号表

A	磁场的矢量位
A	离子质量数
a	电极孔半径, 传输管道半径
B	磁感应强度
B	离子束亮度
b	带形离子束 (x 方向) 的宽度
c	真空中光速
$d\mathbf{l}$	线元矢量
$d\mathbf{S}$	面元矢量
dV	体元
E	电场强度
e	离子电荷
e_0	质子电荷
F	力
F	传射率
f	相空间密度
f	空间电荷中和率
f	焦距
G	磁四极透镜的磁场梯度
H	磁场强度
h	轨道曲率
h	网格尺寸
I	束流强度
i	束流密度
k	Boltzmann 常数
L, l	纵向长度

m	离子质量
m_e	电子质量
m_p	质子质量
n	离子密度
n_e	电子密度
n_g	气体原子（分子）密度
n_i	自中和离子束中慢离子密度
P	导流系数
p	离子动量
p	压强
P_0	广义导流系数 $\Pi=1$ 的质子束的导流系数
Q, q	电量
R	一阶传输矩阵
R	轴对称离子束半径
r	位置矢量
r	径向坐标
T	二阶传输矩阵
T	离子能量（动能）
T	离子温度
t	时间
T_e	电子温度
U	电位
u	离子热运动速度
U_0	加速电压、引出电压
v	离子速度
$\bar{v}$	空间一点附近的离子平均速度
w	振幅函数
X	椭圆截面离子束 x 方向的半径
x	横向（ x 方向）坐标

Y	椭圆截面离子束 y 方向的半径
y	横向 (y 方向) 坐标
Z	离子电荷数
z	纵向 (z 方向) 坐标
α	球面二极管公式中的 α 函数
α	亚松弛因子
α	离子光学系统的接受度
β	$\beta = \frac{v}{c}$
β	超松弛因子
γ	$\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$
δ	离子动量的相对偏差
ΔQ	三阶差分传输矩阵
ΔR	一阶差分传输矩阵
e	离子束的发射度
$\tilde{e}$	离子束的方均根发射度
ϵ_0	真空介电常数
ϵ_e	离子束的有效发射度
ξ	无量纲的纵向坐标
η	离子荷质比
η_e	电子荷质比 (绝对值)
η_p	质子荷质比
Θ	离子束在某一 z 处离子 $ x' $ 或 $ y' $ 的最大值
θ	角度
κ	线性力的比例系数, 线性外场力的比例系数
λ	离子束束腰的特征长度
λ_D	Debye 长度
μ	导磁率

μ	相移
μ_0	真空导磁率
μ_0	不考虑空间电荷效应时的相移
ν	输出输入电位比的平方根
Π	广义导流系数
ρ	空间电荷密度
ρ	轨道曲率半径
ρ	无量纲的径向坐标
σ	离子束的 σ 矩阵
σ_i	气体电离截面
σ_s	几种反应截面之和
Φ	磁通函数
φ	角向坐标
φ	无量纲的电位
Ψ	磁场的标量位
ψ	角度
ω	角速度
ω	由离子源引出系统引出的离子束的半会聚角
$\tilde{\omega}$	离子束的方均根半散角
ω_c	离子回旋 (角) 频率
ω_L	离子 Larmor (角) 频率
ω_p	等离子体 (角) 频率

任一矢量 $\mathbf{A}$ 的绝对值以 A 表示, 在 x, y, z 方向的分量以 A_x, A_y, A_z 表示, 余类推.

任一物理量 x 对时间 t 的导数用 $\dot{x}$ 表示, 对纵向坐标 z 的导数用 x' 表示, 平均值用 $\bar{x}$ 表示, 方均根值用 $\tilde{x}$ 表示.

目 录

序

常用符号表

引 言	(1)
-----------	-------

第一章 离子在电磁场中的运动	(5)
----------------------	-------

§1.1 恒定电磁场	(5)
------------------	-------

§1.2 离子的运动方程和轨迹方程	(10)
-------------------------	--------

§1.3 离子束和它的空间电荷场	(17)
------------------------	--------

1.3.1 离子之间的电磁相互作用 空间电荷场	(18)
-------------------------------	--------

1.3.2 轴对称离子束、带形离子束和椭圆截面离子束	(21)
----------------------------------	--------

§1.4 轴对称场	(23)
-----------------	--------

1.4.1 轴对称电场	(23)
-------------------	--------

1.4.2 轴对称磁场	(26)
-------------------	--------

§1.5 平面分布场	(33)
------------------	--------

1.5.1 一般的平面分布场	(33)
----------------------	--------

1.5.2 对称的平面分布场	(34)
----------------------	--------

§1.6 多极场	(36)
----------------	--------

1.6.1 具有中央对称平面的磁场分解为多极场	(37)
-------------------------------	--------

1.6.2 磁四极透镜的多极场	(41)
-----------------------	--------

1.6.3 偏转磁铁的多极场	(44)
----------------------	--------

参考文献	(49)
------------	--------

第二章 空间电荷效应	(50)
------------------	--------

§2.1 描述离子束的参量	(50)
---------------------	--------

§2.2 比例关系	(54)
-----------------	--------

§2.3 横向空间电荷效应 强流离子束的发散	(57)
------------------------------	--------

2.3.1 轴对称离子束的发散	(57)
-----------------------	--------

2.3.2 带形离子束的发散	(62)
----------------------	--------

§2.4 纵向空间电荷效应	(66)
---------------------	--------

§2.5 离子发射的 $3/2$ 次方定律	(69)
2.5.1 平面二极管公式	(70)
2.5.2 球面二极管公式	(72)
2.5.3 讨论	(73)
§2.6 Pierce 加速电极系统	(75)
2.6.1 带形离子束的 Pierce 加速电极系统	(75)
2.6.2 圆柱形离子束的 Pierce 加速电极系统	(80)
2.6.3 圆锥形离子束的 Pierce 加速电极系统	(86)
§2.7 强流离子束通过电极孔	(88)
§2.8 离子源的引出系统	(90)
2.8.1 单隙引出系统	(91)
2.8.2 双隙引出系统	(97)
§2.9 轴向均匀磁场中的强流离子束	(99)
§2.10 离子的热运动	(107)
2.10.1 离子的热运动速度分布	(107)
2.10.2 离子热运动对离子发射的影响	(109)
2.10.3 离子热运动对离子束聚焦的影响	(114)
2.10.4 平衡的圆柱形离子束中的离子密度分布	(115)
§2.11 强流离子束的空间电荷中和	(117)
参考文献	(123)
第三章 电磁场和离子轨迹的计算	(128)
§3.1 电场的计算(1)	(128)
3.1.1 轴对称电场的差分公式	(129)
3.1.2 平面分布电场的差分公式	(133)
3.1.3 边界条件的处理	(135)
3.1.4 超松弛迭代法	(136)
3.1.5 直接法	(138)
3.1.6 电位和电场强度的插值	(140)
§3.2 离子轨迹的计算(1)	(141)
3.2.1 离子运动方程的解法	(142)
3.2.2 空间电荷密度的计算	(145)
3.2.3 发射面形状与位置的确定	(148)

3.2.4	考虑离子热运动时离子轨迹的计算	(149)
3.2.5	离子束的包络线及其它	(151)
§3.3	电场的计算(2)	(153)
3.3.1	根据离子束横截面上束流密度分布计算横向空间 电荷场	(153)
3.3.2	根据近似的空间电荷密度分布进行电场计算	(157)
§3.4	离子轨迹的计算(2)	(160)
§3.5	磁场的计算	(164)
3.5.1	计算磁场的微分方程法	(164)
3.5.2	计算磁场的积分方程法	(168)
参考文献		(169)
第四章	离子束运动的相空间理论	(172)
§4.1	Liouville 定理	(172)
§4.2	离子束的发射度和离子光学系统的接受度	(176)
§4.3	离子在相空间的分布	(180)
4.3.1	椭圆的解析几何学	(180)
4.3.2	Капчинский-Владимирский 分布、超椭球内 均匀分布和 Gauss 分布	(183)
4.3.3	离子温度与发射度的关系	(187)
§4.4	强流离子束的包络方程	(189)
4.4.1	线性力与非线性力	(189)
4.4.2	Капчинский-Владимирский 方程	(194)
4.4.3	轴对称情况下的傍轴包络方程	(196)
4.4.4	方均根形式的包络方程	(197)
4.4.5	包络方程的解法 Капчинский-Владимирский 方程的幂级数解	(200)
§4.5	矩阵理论	(202)
4.5.1	离子运动方程的矩阵形式	(202)
4.5.2	常用的离子光学元素的一阶传输矩阵	(205)
4.5.3	矩阵理论在强流离子光学中的应用	(211)
§4.6	离子束发射度图形在运动过程中的变化 腰-腰传输 公式	(213)

4.6.1	发射度图形的矩阵表示	(213)
4.6.2	几个例子	(216)
4.6.3	腰-腰传输公式	(219)
§4.7	周期场聚焦	(221)
4.7.1	周期场聚焦的矩阵理论	(221)
4.7.2	几种周期场聚焦系统的一阶传输矩阵	(224)
4.7.3	空间电荷效应对周期场聚焦的影响	(227)
§4.8	传输系统的极限束流	(230)
	参考文献	(235)
第五章	非线性问题	(238)
§5.1	带形离子束的非线性空间电荷效应	(239)
§5.2	轴对称离子束的非线性空间电荷效应	(245)
§5.3	椭圆截面离子束的非线性空间电荷效应	(249)
§5.4	非线性空间电荷效应的矩阵理论	(251)
§5.5	离子束的散射	(256)
	参考文献	(257)
第六章	强流离子源引出系统的进一步研究	(258)
§6.1	一维等离子体-离子鞘方程	(258)
§6.2	离子源的引出系统中离子轨迹的计算	(266)
§6.3	单隙和双隙引出系统的进一步研究	(271)
§6.4	强流离子源引出系统设计中的一些问题	(275)
	参考文献	(282)
第七章	空间电荷中和的强流离子束	(286)
§7.1	自中和离子束	(286)
§7.2	自中和离子束中的电位分布	(287)
§7.3	自中和正离子束的发散	(294)
§7.4	空间电荷透镜	(297)
§7.5	由正离子和负离子或电子组成的合成束	(302)
	参考文献	(308)
附录 A	椭圆截面离子束的空间电荷场	(310)
附录 B	离子在具有中央对称平面的磁场中的运动	(315)

附录C	几种离子组成的离子束的折合束流	(319)
附录D	两个无限长的同轴圆柱面之间的离子发射	(320)
附录E	包含函数 $g(x) = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \exp(-\lambda x^2)$ 的积分	(322)
附录F	计算电磁场时采用的网格	(323)
附录G	二阶常微分方程的数值解法	(328)
附录H	利用随机选取方法确定离子轨迹计算的初始条件	(331)
附录I	离子束的方均根发射度	(333)
附录J	流体力学方法	(335)
附录K	优选法在强流离子光学系统设计中的应用	(345)
附录L	等离子体模拟	(348)
附录M	脉冲强流离子束	(351)
附录N	数表	(354)
1.	常用物理常数	
2.	质子的能量、 β 与 γ 值和磁刚度	
3.	函数 $f(x) = \int_0^x \exp(w^2) dw$	
4.	球面二极管公式中的函数 $a(r)$	
5.	误差函数 $\text{erf}(x)$	
6.	一维等离子体-离子鞘方程的解 $\xi(\varphi)$	

引 言

人类研究离子束的历史已经不算短了。如果从 1886 年发现极隧射线（后来证实这种射线就是一种离子束）算起，到现在已将近百年。但是那时人们所得到的离子束是很微弱的。直到第二次世界大战期间，人们才在电磁同位素分离器中获得了 100 mA 左右的铀离子束。这是人类研究和利用强流离子束的开端。

六十年代，特别是七十年代以来，强流离子束在科学技术中获得了日益广泛的应用。

为了寻找新的极其丰富的能源，人们进行着受控热核反应的研究。很强的质子束或氦离子束被注入到磁约束系统中加热等离子体以产生聚变，利用更高功率的短脉冲离子束引发惯性约束的热核聚变的试验也在进行中。

为了探索微观世界的奥秘，认识原子核和基本粒子运动的规律，人们建造了各种类型的离子加速器，它们可以产生不同种类、不同能量和不同束流强度的离子束。强流加速器是加速器发展的一个重要方向。现在，加速器除了用于基础科学和应用科学的研究外，还广泛地用于工业、农业、医疗和国防技术等方面。为此人们还制造了各种专用的加速器，如中子发生器、离子注入机和医用加速器等。

在空间技术中，人们利用高速喷射的强流重离子束作为空间推进的动力，这就是空间离子推进器（离子火箭）。近年来，一些国家还在积极进行离子束武器的研究。

随着强流离子束的应用日益广泛，人们对它的束流强度和性能都提出了更高的要求。

产生离子束的装置称为离子源。从离子源中引出离子束并把它加速到一定能量，再把它输送到需要的地方，这样的一些装置统称为离子光学系统。它由一系列的离子光学元素组成。各种离

子光学元素的作用是不同的。例如，各种加速系统可用于加速离子；各种磁透镜（如磁四极透镜、螺线管等）和电透镜可用于使离子束聚焦；偏转磁铁除了能偏转和分析离子束外，也可以有一定的聚焦作用。还有其它种类的离子光学元素。不同的离子光学元素产生不同形式的电磁场，人们就是利用这些电磁场来控制离子束的运动。不存在外电磁场的空间称为漂移空间，我们也把它看作一种特殊的离子光学元素。

为了得到性能满足需要的强流离子束，不仅要研制适用的离子源，还要设计出性能良好的离子光学系统。这就要求我们掌握强流离子束在其形成、加速和传输过程中的运动规律。

强流离子光学研究强流离子束在电磁场中的运动规律，它是在强流情况下离子光学系统设计的理论基础。

在强流情况下，由于离子束的空间电荷显著地改变了它周围的电磁场，根据离子在电磁场中的运动和光线在介质中的传播之间的相似性建立的几何离子光学已不能适用。因此我们必须另辟新径。最基本的研究方法是从电动力学中描述带电粒子和电磁场相互作用的基本原理出发，来研究在此相互作用下电磁场的变化和离子束的运动。

强流离子光学和强流电子光学是一对姐妹学科。强流电子光学的发展比强流离子光学早得多，它被广泛地运用在各种电真空器件的研究和设计上。离子和电子都是带电粒子，它们的运动规律有着很多共同性，因此人们很自然地把强流电子光学的规律用于研究强流离子束，这在一定范围内也是适用的。然而，正如世界上一切事物都有其共性和个性一样，强流离子束毕竟不同于强流电子束。由于离子和电子本身特性的不同，由于离子束和电子束产生和应用的情况不同，由于人们对离子束和电子束束流性能的要求不同，强流离子光学在其内容和方法上都有它自己的特点，它比强流电子光学更为复杂。这也就促使人们对强流离子光学进行更深入的研究。