

等离子体物理学

J. G. 林哈脱著 陆全康 徐学基译

上海科学技术出版社

53.83

335

等离子体物理学

J. G. 林 哈 脫 著

陆全康 徐学基 译 許国保 校

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书分理論及应用两部分。理論方面共分六章：第一章描述等离子体中电子和离子的微觀运动；第二章应用玻耳茲曼方程从微觀过渡到等离子体的宏观性质；第三、四、五章从宏观角度描述等离子体的平衡位形，稳定性問題以及波动現象；第六章綜合了等离子体的微觀和宏观观点討論等离子体中的碰撞和弛豫过程。应用方面分为两章：第七章專門討論受控热核反应方面的研究；第八章則涉及等离子体的其他有应用希望的各个方面。

本书可供学过流体力学、电动力学及气体分子运动論的高年級大学生閱讀，也可作为有关专业的研究人員参考之用。

等 离 子 体 物 理 学

PLASMA PHYSICS

原 著 者 J. G. Linhart

譯 者 陆全康 徐学基

校 者 許 国 保

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

上海洪兴印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印張 8 16/32 字数 206,000

1962年12月第1版 1962年12月第1次印刷

印数 1—2,500

統一书号：13119 · 489

定 价：(十四) 1.45 元

校 者 序

等离子体即高度电离的气体，也就是离子与电子的混合体。这种物质状态(現称物质第四态)在上世紀末期已經发现。但是等离子体运动性质的研究，直到本世紀四十年代才开始；当时認識到宇宙空間及恒星体中存在着这种物质状态，因而为了研究天体及星际現象必須研究等离子体的物理性质。一九五六年后发现氦、氘的等离子体在磁力的高度压縮下，温度可以增高到有实现热核反应的希望，于是等离子体运动性质的研究蓬勃展开，实验和理論方面的論文风起云涌，日新月异。一九五八年日内瓦和平利用原子能會議以后，发展更速。近二三年来，关于这方面研究成果的綜合性书籍亦漸有出版，但国内譯本尚少。本书作者林哈脫为等离子体物理学方面的专家。书的内容包括理論描述及应用概况两部分，涉及的面頗为广泛而篇幅并不太大，叙述明晰易懂，各章各节都举出中心内容，数学公式亦詳細列出，使讀者能够对每一課題作出具体計算；只因限于本书深度及篇幅，对数学公式的推导不作詳細介紹，然而书末附有各章的有关文献，有志深入钻研的讀者亦能作进一步的参考。

总的說来，本书可作为大学教材或供研究人員参考之用，因此选择本书由陆全康、徐学基两同志譯出。譯文完全以原文为依据，仅有少数觉察到的印刷上錯誤加以修正。因本书内容系物理学的新兴部門，譯名未有統一标准，文字亦稍嫌晦涩，所以譯文难免有不妥之处，希望讀者随时指正。

許 国 保 1962 年 8 月

作 者 序

近年来,研究等离子体物理的物理学家急骤增加,这方面出版的科学刊物数量也显现了同样的趋势。但与此对照,关于等离子体物理的书籍却还很少出版;在一門迅速发展的学科中,这种情况是很自然的。然而并非所有书本都是历史学家写成的,作者觉得即使一本簡略地叙述最新成就的书也未始无用,特别是对于等离子体物理方面的研究生和近年来进入这一领域的老物理学家。编写这本书是一件兴奋的工作,只要这种兴奋的心情有一小部分能感染給讀者,作者的愿望就算达到了。

作者敬向西欧原子核研究协会(CERN)的同事們对这一工作的鼓励和帮助致謝,并向 Dr. D. Finkelstein, Mr. E. R. Harrison, Dr. J. D. Lawson, Dr. L. Ornstein, Mr. C. Maissonier, Dr. A. Robson, Dr. A. Schlütter 和 Dr. P. Sturrock 等感謝他們对本书的討論和有益的批評。

J. G. 林 哈 脫 1959 夏于日内瓦

目 录

校者序

作者序

引 言1

第一章 电子与离子在电磁场中的运动7

引言7

1.1. 在静电场中的运动7

1.2. 在静磁场中的运动8

1.2.1. 带电粒子在环形磁场中的运动13

1.2.2. 带电粒子在磁透镜场中的运动15

1.2.3. 带电粒子在螺旋形磁场中的运动21

1.3. 带电粒子在交叉电磁场中的运动22

1.3.1. 环形磁场与电子回旋加速器型磁场的迭合场25

1.3.2. 电涡旋场与磁透镜场31

1.4. 带电粒子在电磁波的场中的运动33

1.5. 粒子在两相交叉的射频电场和静磁场内的运动35

1.6. 从加速电荷发出的辐射39

1.6.1. 韧致辐射41

1.6.2. 回旋(电子加速器,同步加速器)辐射44

1.6.3. 余楞可夫辐射47

参考文献53

符号表54

第二章 等离子体的流体描述55

引言55

2.1. 稳定分布59

2.2. 玻尔兹曼方程60

2.2.1. 非相对论性系综62

2.2.2. 相对论性系综66

2.3. 玻尔兹曼方程对速度空间的积分67

2.3.1. 非相对論性情况	67
2.3.2. 相对論性情况	72
2.4. 流体方程	74
参考文献	78
符号表	78
第三章 平衡位形	79
引言	79
3.1. 起因于等离子体中电流产生的磁場的約束	81
3.1.1. 非相对論性川流	81
3.1.2. 相对論性川流	85
3.2. 在外磁場中的等离子体	89
3.3. 等离子体在外場与自生場中的平衡	96
3.4. 沒有力的磁場	98
参考文献	100
符号表	100
第四章 等离子体波与不稳定性	101
引言	101
4.1. 等离子体中的电子振荡	102
4.1.1. 纵振荡	105
4.1.2. 横振荡	106
4.1.3. 横波与纵波的混合波	109
4.1.4. 无規速度对色散关系的影响(朗道阻尼)	111
4.1.5. 电磁波在等离子体中的反射	112
4.1.6. 等离子体圆柱中的电子波	114
4.2. 正离子振荡	118
4.2.1. 静电离子振荡	119
4.2.2. 稳定等离子体中的磁流体振荡——无界等离子体——等离子体 圆柱中的波	122
4.2.3. 等离子体川流中的磁流体振荡	127
4.3. 增长波与不稳定性	131
4.3.1. 粒子川流的动能轉化成等离子体纵振荡的能量	133
4.3.2. 势能轉化成等离子体的动能——磁流体不穩定性的能量原理	136
4.3.3. 流体动力学不稳定性	141
参考文献	146
符号表	146

第五章 等离子体中的激震波(駭波)	147
引言	147
5.1. 无磁場等离子体中的激震波	149
5.2. 回旋等离子体中的激震波	152
5.3. 真空中的激震波	153
5.4. 等离子凝聚体	157
参考文献	159
符号表	160
第六章 碰撞与弛豫过程	161
引言	161
6.1. 二个带电粒子碰撞的动力学	161
6.2. 福克-普朗克方程	166
6.2.1. 等离子体的电导——回旋等离子体的电导	170
6.3. 位形空間中的扩散	177
6.3.1. 粒子通量	179
6.3.2. 热导与电导	181
6.3.3. 动量扩散 粘滯性	183
参考文献	185
符号表	186
等离子体物理的应用	187
第七章 受控聚变研究	189
引言	189
7.1. 原子核能源	189
7.1.1. 原子核的基本概念	189
7.1.2. 結合能	192
7.1.3. 原子核聚变	195
7.1.4. 作为能源的裂变反应和聚变反应	200
7.1.5. 不受控聚变反应	201
7.1.6. 受控聚变反应	203
7.2. 約束	210
7.2.1. 外界磁場——环状磁場約束——磁鏡約束——射頻場約束	211
7.2.2. 电流本身磁場的約束	219
7.2.3. 相对論性电子流磁場的約束	224
7.3. 加热和能量損益	226

7.3.1. 动力箍縮	227
7.3.2. 焦耳加热	227
7.3.3. 损失	229
7.4. 受控聚变問題的探索途徑	232
参考文献	234
符号表	235
第八章 其他方面的应用	237
8.1. 电磁波的产生	237
8.2. 化学能直接轉換成电能	241
8.3. 在粒子加速器上的应用	247
8.3.1. 注入	247
8.3.2. 引导磁場	249
8.3.3. 加速	254
8.4. 火箭推进	258
8.5. 能量的貯藏	260
参考文献	263
符号表	263

引 言

等离子体物理系研究自由电子与电离原子所組成体系的行为,这里庫侖相互作用不能被忽視。狹义地說,此粒子体系所含有的正負电荷数是近乎相等的。这类体系是介质的一种,称为等离子体,其性质在很多方面与固态,液态和气态的物质不同。

物质的所有状态表示各种不同的有序程度,而有序度与結合能的一定数值相对应。因此,在固态中重要的物理量是分子在晶体中的結合能;事实上,晶体可以看成是宏观分子或巨分子。若每个分子的平均动能 W 超过結合能 U (小于 1 电子伏特),晶体結構破坏而轉化成液体或直接轉化成气体。在液体情况有类似的規律起作用,为了使液体轉化成气体,每一分子必需具有一定的最小动能以破坏范德瓦尔斯力的鍵。当每一粒子的动能 W 超过原子的电离势能时(这通常是几个电子伏特)物质可以等离子体形态,即以其第四态的形式存在。由此可見,每一粒子的平均动能确定物质存在的状态。这一定理的确切的数学表述是沙哈型的方程。然而,简单的判据可以写成

$$U_n < W_{n+1} < U_{n+1} \quad (1)$$

式中 U_n, U_{n+1} 表示相应于物质处于第 $(n+1)$ 級状态的結合能限值。

将此原理外推到目前尚未探索到的物质的更高级状态,我們可以依

$$2 < W_5 < 200 \text{ (兆电子伏特)}$$

来确定物质的第五态。这将是自由核子与电子所組成的气体——“核子气”(nugas),而物质的第六态可以由

$$0.2 < W_e < 4(\text{Gev}^*)$$

来确定,此状态将包含自由介子,残余核子(mutilated nucleons)和电子。可以预期,物质的第五态与第六态具有远较等离子体更多样化的行为,因为除了长程库仑力以外还有短程的核力作用。

另一方面,根据 W 的方程(1),等离子体比物质的其余状态所占的能量范围大;在动能尺度上,它占据约 20 个能阶。等离子体状态占有动能谱的广阔性是等离子体物理与物理学的其余领域,如与个别带电粒子动力学(其中不考虑粒子间的相互作用)或气体放电物理(其中带电粒子与中性原子和分子间的相互作用极为重要),有很多共同性的原因;而等离子体物理所采用的某些描述和分析方法则属于流体动力学,特别是磁流体动力学的主要课题。等离子体理论所必需的另一物理学科是统计力学,等离子体物理还要引用其他物理领域中的术语和数学公式。

虽然宇宙中可能有 99.9% 以上的物质是电离化的,就是处于等离子体状态的,但在我们的行星(地球)上,等离子体必须在特殊条件下通过特殊物理过程来产生。这些过程是气体放电物理学的课题,而这就是气体放电物理与等离子体物理有密切关系的原因。

如果把等离子体比拟为有生命的东西,我们可以说气体放电物理比较着重于研究等离子体的诞生和新陈代谢,而等离子体物理则大部集中在研究等离子体的解剖和活动方面。

在地球上通常类似于理想等离子体的介质是部分电离的气体。这种介质以三种形式进入有史以前的人类的经历中,即火、闪电与北极光。在这一方面,令人惊奇的是许多希腊哲学家,从阿格里琴托(Agrigentum)的恩培多克勒(Empedocles)(约公元前 490—430 年)开始,认为宇宙物质是由四种“基元”(土,水,空气和火)所组成。以现代的名词来说,这些可与物质的四态(固体、液体、气体与等离子体)相比拟。把在气体放电中产生的介质辨别为物质

* 译注: $1\text{Gev} = 10^{12}$ 电子伏特。

第四态的光荣属于格鲁克斯(Grookes),他写道(1879年):“这些真空管中的现象在物理学中呈现了一种新的领域,在此领域,物质可以第四态的形式存在…”約在同一时候,也了解到这种新发现的物质状态在稠密和寒冷的地球上不很稳定,因而为了在实验室中产生“类等离子体介质”,必须具备特殊的条件。对这些条件的研究是气体放电物理学的课题。只当电工和真空技术发展使长寿命的和相当稳定的气体放电可被利用的程度时,等离子体物理学才成为独立的研究领域。

在1923年左右,朗缪尔(I. Langmuir)发展了电离气体的恰当基本理论,并将此类介质取名为“等离子体”^①。在1923~1938年间,由于汤克斯(L. Tonks),西里杰尔(R. Seeliger),克拉费尔脱(B. Klarfeld),斯蒂恩培克(M. Steenbeck),恩格尔(A. V. Engel),劳勃(B. Loeb),本涅特(W. Bennett),丕宁(F. M. Penning),汤生(J. Townsend),洛考夫斯基(W. Rogowski)等等的努力,这一学科得到进一步的发展。

在本世纪初期,天体物理学家开始注意到电离物质在宇宙空间过程中所起的重要作用,因而后来他们对等离子体物理作出了某些杰出的贡献。这里我们特别提及沙哈(M. N. Saha),蔡普曼(S. Chapman),柯林(T. G. Cowling),法拉罗(V. O. Ferraro),昌德拉塞克哈(S. Chandrasekhar),斯毕泽(L. Spitzer),阿尔芬(H. Alfvén)以及德国马克思-普朗克学院天文物理学组的工作。

在1929年胡脱曼(F. Houtermanns)和阿金森(R. Atkinson)提出了星体主要能源是轻元素原子核间的聚变反应的假设。1945年后在氢弹的制造中探索了类似的机构,而在同一时候某些物理学家开始对受控聚变能量的释放进行研究。然而,值得注意的是

①. “等离子体”(Plasma)一字首先在名词“原生质”(protoplasma)中出现。捷克生物学家浦基尼(Purkynie)在1839年最先将“原生质”的名称引入科学词汇,它是一种在其内部散布着许多粒子的胶状介质,它组成细胞体的一部分。

由聚变反应产生的能量輸出密切依赖于碰撞原子核的动能，而获得实际有用的聚变功率輸出将有赖于人们是否能够得到至少几百万度(凱氏)的高温。若要避免爆炸，物质在此高温下的压强必须被外力所平衡。这个条件限于目前工程师的能力，只有当核燃料密度比大气密度稀时才有可能。

因而，对受控聚变能量释放机构的研究与高温低密度等离子体的研究具有同等意义。这是等离子体物理学的一个转折点。在此以前，等离子体物理已变成不很时新的学科。正如我的一个朋友所指出的，不属于天文范围的多数物理学家认为它只是一个有趣的课题，充满了微小而多彩的实验，尚待发现的问题已经不多，它的唯一实际意义只是供那些不惜为它浪费时间的人们作消遣而已。

由于制造聚变反应堆这一目标的刺激，等离子体物理已成为很多物理学家和工程师感兴趣的学科。然而应当注意的是尽管近来有了进展，但对等离子体物理中极大多数问题的了解仅是定性的，而只是在某些理想情况中才应用定量的解法。看来在这类问题中有许多将在一二十年內得到解决，在这样情况下，这一学科的书本不能指望它成为一本经典著作而只能力图将这方面的丰富而颇为混乱的文献收集起来并加以系统化使其成为一本记叙性著作。本书就是这样一种著作。这里我们将简要地介绍本书对课题的讨论次序。

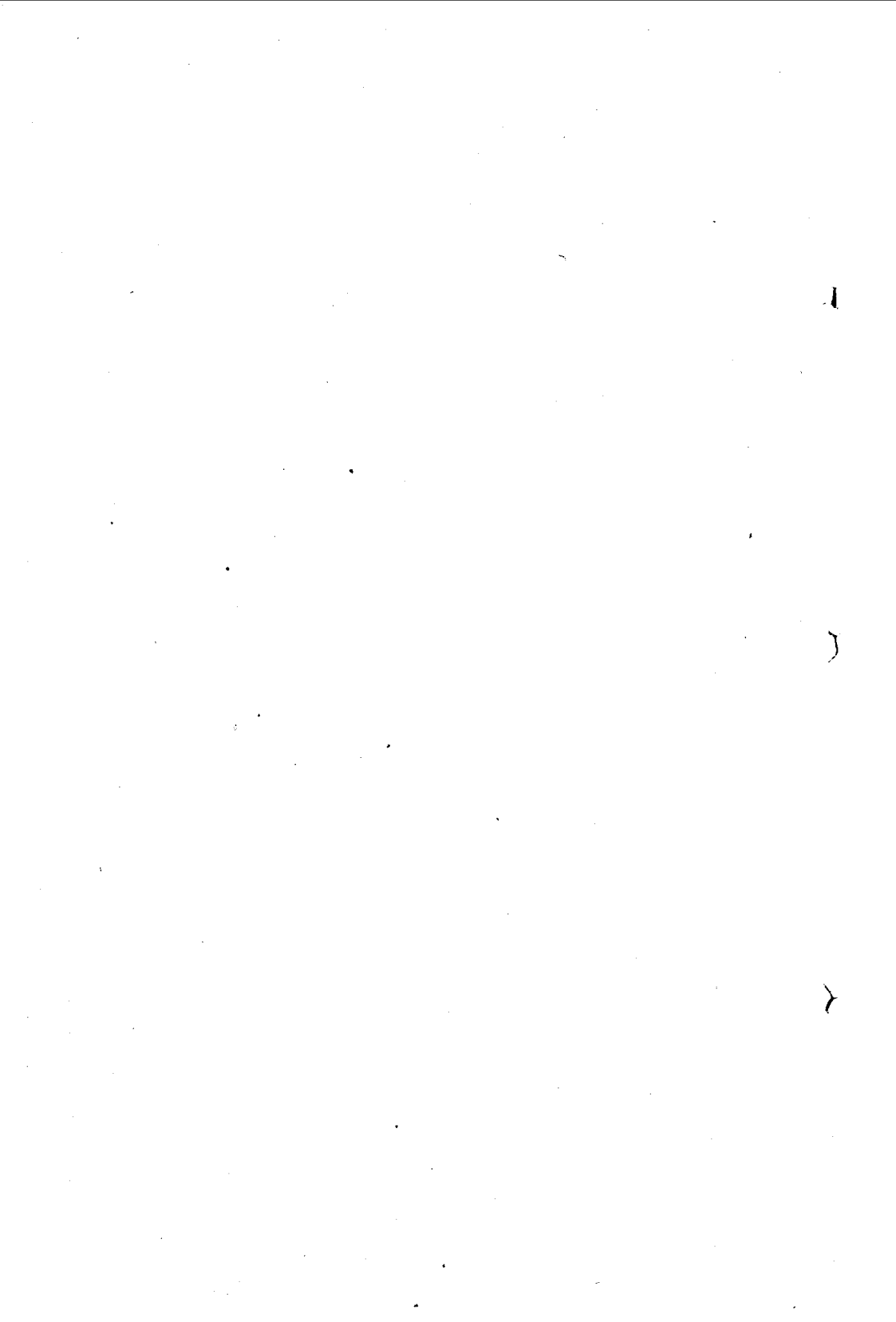
等离子体物理和任何处理大量粒子系综的课题一样，采用二种互相补充的描述方式：单粒子运动的分析和流体模型。这二种处理方法是第一章与第二章的课题。

其后，将这些描述方法应用于平衡位形(第三章)，应用于等离子体中的波动与不稳定性(第四章)，最后应用于等离子体激震波和等离子体束的运动(第五章)。

为了完成对等离子体的描述，了解平衡位形如何达成是重要

的。然而只当我们能找到对有效地达成平衡的各类碰撞,扩散和辐射过程的适当描述方法以后,这一问题才得到解决,这是第六章的目标。

前六章所提供的等离子体过程的模型将在第七章和第八章内用于描述等离子体物理对受控热核聚变,电子学,以及应用物理和工程上的其余问题的一些应用。



第一章

电子与离子在电磁场中的运动

引言

本章系研究带电粒子在与等离子体研究中有关的各种力场内的运动以及在这些场所组成的组合场内的运动^①。这些运动中最重要的的是带电粒子与各种磁场的相互作用。本章的最后一节将研究单电荷所发出的辐射。

1.1. 在静电场中的运动

若场是无旋的，它可以用位势 V 来描述，而粒子的轨迹在一般情形中是从曲率半径 R 的方程作出的。此方程为(参见图1)。

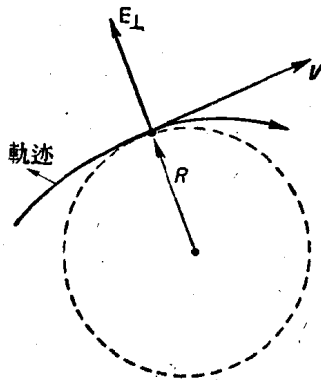


图1 静电场中带电粒子的轨迹在其振荡平面上的投影

① 符号表附于每章之末。

$$\frac{mv^2}{R} = eE_{\perp}, \quad (1-1)$$

若当 $V=0$ 时, $v=0$, 可以将上式化成(对于非相对论性能量)

$$\frac{2eV}{R} = e \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{\perp}.$$

因此

$$R = \frac{2V}{\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{\perp}} \text{ (厘米)}. \quad (1-2)$$

用逐步作图法描画粒子轨迹时可以很简便地采用此公式。在电解槽中自动描画轨迹时也用到它^[1]。

这种运动在电子光学中是极关重要的;然而在等离子体物理中,只在库仑散射的微观描述中遇到。

1.2. 在静磁场中的运动

在均匀静磁场 B 中,带电粒子以角频率

$$\omega_c = \frac{e}{mc} B \quad (1-3)$$

沿螺旋形轨迹运动(图2)。

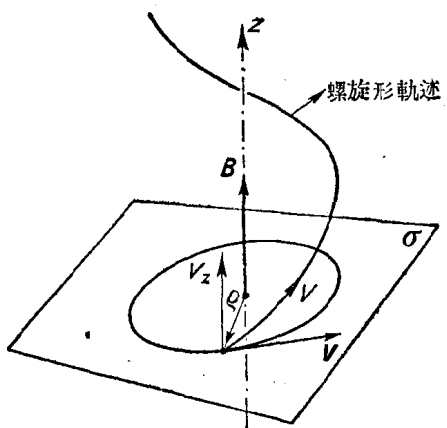


图2 均匀静磁场中的带电粒子轨迹