

高等学校试用教材

原子核物理学

吴知非 编

高等教育出版社



高等学校试用教材

原子核物理学

吴知非 编

高等教育出版社

本书是编者在1965年出版的《普通物理学(原子核物理学部分)》一书的基础上,根据现行教学大纲修改补充而成的。这次修订时,对基本粒子、受控热核反应、探测器和加速器等方面做了较多的补充和修改,其他部分也有一些改动。

本书可作为高等学校物理专业的试用教材,也可供其他有关专业参考。

高等学校试用教材

原子核物理学

吴知非 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

青浦任屯印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 7.25 字数 174,000

1983年5月第1版 1983年11月第1次印刷

印数 00,001—12,500

书号 13010·0871 定价 0.84 元

序

本书是在 1965 年 11 月出版的《普通物理学(原子核物理学部分)》一书的基础上,根据教育部 1980 年 8 月颁布的综合大学物理专业普通物理学(原子物理学)教学大纲的要求以及本门学科近年来的进展加以修订补充而成。在修订过程中,力求突出重点,着重讲清本门课程的一些基本现象与基本规律。而在课程内容及科学水平上,力求更新与提高。全书内容估计可在 28 学时左右讲完。

原子核物理是一门较新的学科,发展很快,尤其基本粒子的研究,近来更有不少新的进展。所以这次修订中,将“基本粒子”单列一章,收集了新近资料,简要地介绍了有关内容。现在受控热核聚变反应,已成为世界各国探索与解决能源的一个重要方面,并且已接近“热核点火”,因此这次修订中,也充实了这方面的内容,并将裂变与聚变另立了一章。另外,对探测器与加速器也作了适当的补充。

书中除另有说明者外,凡带有 * 号的章节及每节小字排印的部分,可根据情况不讲或从简。

为了便于读者进一步深入学习,书后列出了一些参考书目,这些书藉,也是作者在修订过程中用到的部分参考资料。

由于本人水平有限,书中一定有很多缺点甚至错误,恳请读者提出宝贵意见。

在本书出版工作中,出版社的同志给予了很大帮助,谨表谢意。

吴知非

1982年 10 月于华东纺织工学院

引 言

原子核物理是物理学的一门重要分支学科，它研究物质的基本结构，在生产和国防上有着极其重大的应用，与其他各门科学又有极其广泛的联系，目前发展十分迅速，形成物理学当前主流之一。原子核物理的研究，正在三个主要方面进行着。第一是研究原子核的结构、核力的性质，以及核反应等基本问题，为更进一步利用自然规律开辟道路。第二是研究有关原子能产生与应用的理论与技术问题，为解决能源问题开辟广泛的途径。第三是基本粒子的研究，这是物质结构与运动的最基本问题。

在我国，有关原子核物理的研究，只在1930年前后才略有开展。解放前，从事原子核物理研究的人员极少，实验设备几乎没有，连观测放射性射线用的最简单的计数管都不能生产。解放后，在党的英明领导下，我国原子核物理学的研究得到了蓬勃的发展。现在我们能自己设计并制造加速器与各种性能良好的能谱仪，已能生产原子核乳胶、各种计数器及其他原子核物理研究用的仪器。

放射性同位素，在我国正日益广泛地被应用于工业、农业、医学及其他各部门的生产技术与科学研究中。

在原子能应用方面，我国7000—10000千瓦的重水型研究性反应堆于1958年投入运行以来，最近又建成了大型高通量原子反应堆，并已投入运行。现在又在浙江省海盐县秦山着手建造核电厂，它是我国自己研究设计的，该核电厂装机容量为电功率三十万千瓦，采用压水型反应堆。该电厂的科研试验和设备设计，以及厂房的建设等工作正在加紧进行。1964年10月16日，我国成功地

爆炸了第一颗原子弹，以后又相继进行了氢弹等其他一连串的原
子爆炸试验。七十年代以来，对可控热核反应，也已着手进行研
究，并已取得一定的成果。

由于原子核物理是物理学发展主流之一，在生产、国防及科学
研究中又有着极其广泛的应用，在当前社会主义建设事业中具有
重大的意义，因此每个物理专业的学生必须具备这方面的一定的
基本知识。本课程作为一门基础课程，在内容的叙述上，注意了从
核物理的实验事实出发，建立概念，总结规律，建立初步理论，特别
着重于阐述基本知识及基本规律。

目 录

序

引言.....(i)

第一章 原子核的某些基本性质.....1

§ 1.1. 原子核的电荷与质量.....1

§ 1.2. 原子核的大小.....4

§ 1.3. 原子核的动量矩与磁矩.....5

* § 1.4. 原子核的电四极矩.....11

§ 1.5. 原子核的组成.....12

* § 1.6. 原子核的宇称.....14

* § 1.7. 原子核的统计性.....14

§ 1.8. 原子核的结合能.....15

§ 1.9. 核力的基本性质.....18

第二章 放射性·原子核的衰变.....22

§ 2.1. 放射性过程的一般特性.....22

§ 2.2. 放射性衰变规律.....24

§ 2.3. 放射性强度.....28

§ 2.4. 位移定则·放射系.....28

§ 2.5. α 衰变.....32

§ 2.6. β 衰变.....40

§ 2.7. β^+ 放射性与K俘获.....47

§ 2.8. γ 衰变与内变换.....50

§ 2.9. 穆斯堡尔效应.....56

§ 2.10. 射线的探测方法.....60

§ 2.11. 放射性同位素应用的简单介绍.....69

第三章 核模型.....76

§ 3.1. 原子核的液滴模型和结合能半经验公式.....76

§ 3.2. 壳层模型.....81

* § 3.3. 原子核的集体模型·····	86
第四章 核反应 ·····	90
§ 4.1. 核反应及其遵循的几条守恒定律·····	90
§ 4.2. 反应能·····	92
§ 4.3. 原子核的反应截面·····	96
§ 4.4. 原子核反应的机制·····	98
§ 4.5. 中子·····	101
§ 4.6. 正电子的发现·正负电子对的形成·····	106
§ 4.7. 核反应的类型·····	108
§ 4.8. 高能粒子所引起的核反应·····	110
§ 4.9. 超铀元素·····	113
第五章 原子核的裂变与聚变 ·····	115
§ 5.1. 重核的裂变·····	115
* § 5.2. 裂变理论·····	118
§ 5.3. 链式反应·····	121
§ 5.4. 裂变能的利用·····	123
§ 5.5. 轻核的聚变·····	128
* § 5.6. 太阳能的来源·····	130
* § 5.7. 氢弹·····	131
§ 5.8. 可控热核反应的途径·····	132
第六章 基本粒子 ·····	139
§ 6.1. 宇宙线及其某些特性·····	139
§ 6.2. 簇射·····	144
§ 6.3. 介子·····	145
§ 6.4. 奇异粒子·····	148
§ 6.5. 共振态·····	154
§ 6.6. 粒子间的相互作用·····	157
§ 6.7. 守恒定律与对称性·····	161
§ 6.8. 基本粒子的内部结构——夸克(层子)与层子模型·····	167
第七章 粒子加速器 ·····	177
§ 7.1. 静电加速器·····	177

* § 7.2. 直线加速器	180
§ 7.3. 回旋加速器	184
§ 7.4. 同步回旋加速器	187
* § 7.5. 同步加速器	188
* § 7.6. 对撞机	191
讨论题与计算题	195
附录	201
I. 相对论的几个公式	201
II. 四个放射性系表	204
III. 一些常用的物理常数及换算因子	206
IV. 同位素的质量、结合能、磁矩、自旋、百分比	208
参考书	219

第一章 原子核的某些基本性质

核物理的各种现象,如核衰变、核反应等等,是与原子核的基本性质有着密切关系的。因此在我们正式讨论这些核物理现象之前,首先介绍一下原子核的某些基本性质。本章主要讨论原子核的电荷、质量、大小、动量矩、磁矩、电四极矩、组成、结合能、核力、宇称和统计性质等方面的内容。

§1.1. 原子核的电荷与质量

(1) 原子核的电荷与电荷数

在原子物理学中,我们已经知道原子核所带的电荷 q 等于

$$q = +Ze, \quad (1.1.1)$$

式中 Z 为电荷数(也就是原子序数)。

Z 可用各种方法例如 α 粒子散射实验等来测定。根据 α 粒子散射公式,被散射到某一散射角 θ 方向、打到萤光屏单位面积上的 α 粒子数,是与散射元素的 Z^2 成正比的。因此,当我们测得了被散射到该方向的 α 粒子数后,就可求得 Z 的数值。

但是,用 α 粒子散射实验测到的 Z 值往往是不够精确的。而且在这个实验中还必须把物质做成极薄的靶子,因而也限制了被测元素的种类。在实验上,比较精确而又广泛应用的方法,是利用莫塞莱定律:

$$\sqrt{\frac{T}{R}} = \frac{1}{n}(Z - a_n), \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (1.1.2)$$

式中 T 表示元素的标识伦琴光谱的光谱项, Z 表示元素的原子序数, R 表示里德伯常数。对于 K 项, $n=1, a_1 \approx 1$; 对于 L 项, $n=2$,

$a_2 \approx 7.4$ 等等。因此，分析元素的标识伦琴光谱，求得了光谱项 T 后，就可算出该元素的 Z 值。

(2) 原子核的质量与质量数

原子核的质量 M_N 近似地等于该元素的原子质量 M_A 减去该元素所有的核外轨道电子的质量^①，即

$$M_N = M_A - Zm_0, \quad (1.1.3)$$

式中 m_0 为电子的静止质量。

原子的质量 M_A 常表示成原子量与“原子质量单位”的乘积，即

$$\text{原子质量} = \text{原子量} \times \text{原子质量单位}. \quad (1.1.4)$$

原子量最接近的整数部分，称为质量数 A 。例如氢的原子量为 1.007825，则它的质量数 $A=1$ ；又如钾的原子量为 38.963710，则它的质量数 $A=39$ 。以后我们要讲到，质量数 A 其实也就是核内所含中子与质子数之和。

在自然界中，同一种元素 (Z 相同) 存在着不同原子量的所谓同位素。例如对于氧元素，它的电荷数 $Z=8$ ，但有原子量分别为 15.994915、16.999133、17.999160 的三个稳定同位素。

因此，用化学符号表示同位素原子核时，必须同时表出它的电荷数与质量数。设某同位素原子核的化学符号为 X ，电荷数为 Z ，质量数为 A ，则按照新的国际符号标准，应表为 ${}_Z^AX$ (按旧符号为 ${}_Z X^A$)。例如，锂 (Li) 的 $Z=3$ ， $A=7$ 的同位素核可表为 ${}_3^7\text{Li}$ ，它的 $A=6$ 的同位素核可表为 ${}_3^6\text{Li}$ 。

在物理学中，根据新的国际标准，一元素某一同位素的原子量，定义为该同位素的质量与 $A=12$ 的碳同位素 (${}_{12}^{12}\text{C}$) 质量^②的

① 未考虑核外电子的结合能。

② 碳的这种同位素在自然界中含量的百分比最大，且其原子量定为 12.000000。

$\frac{1}{12}$ 之比值。这样与碳原子质量比较而定出的原子量，称为碳单位原子量^①。而在1961年以前国际上通用的是原子量的氧单位，它是以 ^{16}O 作为比较标准的，即将各元素的同位素质量与 ^{16}O 质量的 $\frac{1}{16}$ 之比值，定义为该同位素的原子量，同时认为 ^{16}O 的原子量为16.000000。对于原子量的物理碳单位^②，一个原子质量单位等于

$$1\text{u}^{\text{③}} = 1.660566 \times 10^{-24} \text{克},$$

是氧单位的1.0003179倍。

根据相对论的质能联系定律(见附录 I)，对于任何物质，当它的质量为 m 时，则必具有

$$\mathcal{E} = mc^2 \quad (1.1.5)$$

的能量，式中 c 为光速。事实上，质量与能量是物质的两种不同的基本属性，对于同一物质，它的质量与能量是应该有着内在联系的。因此，如果某一物质的质量有了 Δm 的变更，那末，与此联系着的就一定有

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta mc^2 \quad (1.1.6)$$

的能量变化。由此可见，一个原子质量单位在能量的尺度上为

$$\begin{aligned} 1\text{u} &= 1.660566 \times 10^{-24} \times c^2 \\ &= 1.49244 \times 10^{-3} \text{尔格}. \end{aligned}$$

在原子核物理学中，能量单位常以电子伏特(eV)或兆电子伏特(MeV)来表示，1电子伏特 $= 1.602189 \times 10^{-12}$ 尔格，于是

$$\begin{aligned} 1\text{u} &= 931.502 \times 10^6 \text{eV} \\ &= 931.502 \text{MeV}. \end{aligned}$$

① 本书中所用的原子质量数据，都是碳单位。

② 在化学中是以自然元素作比较标准的，所以，化学上确定的原子量实际上只是某元素各同位素的平均值。

③ 氧单位的原子质量单位符号表为 a. m. u.，碳单位为 u。

§ 1.2. 原子核的大小

在原子物理学中，曾根据原子核与 α 粒子间的相互作用是库仑作用而推得 α 粒子散射公式。实验表明，这个公式只在重核对慢速 α 粒子的散射中才是正确的，对于轻核和快速的 α 粒子来说，则与实验结果有很大差异。这个事实说明了，当 α 粒子足够接近原子核时，除了库仑斥力外，还有其他一种力存在。根据对实验结果的仔细分析，这是一个吸引力，它随距离的变化要比库仑力随距离的变化快得多，我们称这个力为核力。

因此，核对 α 粒子（及其他带电粒子）的势垒曲线可用图 1.2.1. 表示，图中纵坐标表示势能 $U(r)$ ，横坐标表示离核心的距离 r 。由图可见，在 r 大于 R (R 的数量级为 10^{-13} 厘米) 的地方，可认为核力为零，只有库仑斥力，这时势能曲线具有双曲线形状，而在 r 略小于 R 时，随着 r 的减小核力迅速增大，此时库仑力与它相比，已无足轻重，势能变号，曲线迅速下降，形成势阱。

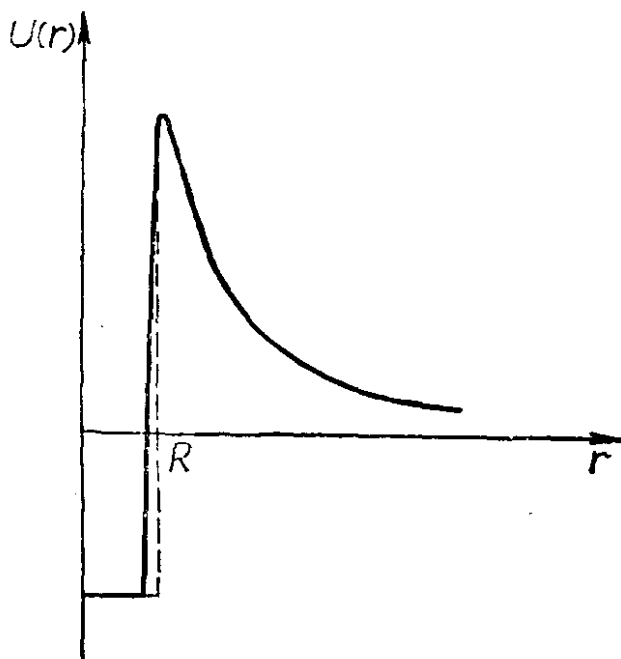


图 1.2.1. 原子核的势能曲线

可见，核力有一个明显的作用区域。在这个作用区域以内，原子核物质(核子)存在的几率很高，而离开这个区域，机率就很快降到零。所以原子核的边界面比较确定，可以用核半径 R 来表征。根据实验资料，核半径 R 与原子核质量数 A 的 $\frac{1}{3}$ 次方成正比，即

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}}, \quad (1.2.1)$$

式中 r_0 为比例常数, 用不同实验测得的 r_0 稍有差异, 但其数量级都是 10^{-13} 厘米, 现代的数据给出 r_0 大约在 $1.1-1.3 \times 10^{-13}$ 厘米范围内.

如果认为原子核是球状的^①, 则它的体积为 $V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$, 这表示核体积 V 与 A 的一次方成正比. 因为 A 是核中所包含的核子数, 因此 $V \propto A$ 说明了核中每个核子所占的体积为一常数, 这也就是说各种原子核的密度是相同的. 原子核的密度

$$\rho = \frac{M_N}{V} = \frac{M_N}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{M_N}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 A} = \frac{3}{4\pi r_0^3} \frac{M_N}{A}, \quad (1.2.2)$$

式中 M_N 为原子核的质量. 我们以任一原子核的 M_N 和 A 代入式 (1.2.2) 中, 所得到的 ρ 都近似相等, 其值约为 $\rho \approx 10^{14}$ 克/厘米³. 可见原子核是物质密集之处, 且其密度是大得多么惊人!

§ 1.3. 原子核的动量矩与磁矩

(1) 原子核的动量矩(通常称为核自旋)和磁矩

在原子物理学中已经讲到, 由于电子的自旋, 使原子发射的光谱线产生精细结构, 但对原子光谱作进一步研究时, 还发现具有所谓超精细结构. 例如钠的 D 线, 由于电子自旋而分裂为两条间隔 6 \AA 的 D_1 与 D_2 线, 形成谱线的精细结构. 但如果进一步利用高分辨本领的光谱仪与特殊构造的光源去进行观察, 则发现 D_1 与 D_2 线又是分别由两条间隔为 0.023 \AA 及 0.021 \AA 的谱线所组成, 这些分裂间隔约为精细结构分裂间隔 6 \AA 的 $\frac{1}{300}$, 故称为光谱线的超精细结构. 原子核是一个带电体而且不停地运动, 因此, 它也应该与

^① 根据实验, 除少数例外, 原子核是近似球形的.

原子一样具有动量矩与磁矩。可以证明，由于核磁矩与原子轨道磁矩的相互作用，使原子能级产生分裂，从而引起光谱的超精细结构。

原子核的动量矩 P_I 的数值 P_I 是量子化的，根据量子力学，其值为

$$P_I = \sqrt{I(I+1)}\hbar, \quad (1.3.1)$$

I 称为自旋量子数。 P_I 也是空间量子化的，它在空间某特殊方向的投影为

$$P_{Iz} = M_I\hbar, \quad M_I = I, I-1, \dots, -I+1, -I, \quad (1.3.2)$$

M_I 称为磁量子数。通常还用动量矩在某特殊方向投影的最大值

$$P'_I = I\hbar \quad (1.3.2a)$$

来表示动量矩的大小。故若以 \hbar 为单位，则动量矩的大小就可以用 I 来表示。

由于核自旋的存在，原子的总动量矩 P_F 是核外电子总动量矩 P_J 与核自旋 P_I 的矢量和，即

$$P_F = P_J + P_I,$$

P_F 的数值也是量子化的，根据量子力学

$$P_F = \sqrt{F(F+1)}\hbar, \quad (1.3.3)$$

式中量子数 F 的值为 $J+I, J+I-1, \dots, |J-I|+1, |J-I|$ 。可见，当 $J > I$ 时， P_F 有 $2I+1$ 个可能值，当 $J < I$ 时，则有 $2J+1$ 个可能值。不同的总动量矩 P_F 表示核动量矩 P_I 相对于核外电子总动量矩 P_J 的取向不同。一般说来，由于动量矩与磁矩是平行或反平行的，从而不同的 P_F 就表示核磁矩与原子的核外电子的总磁矩的取向不同，因而其磁相互作用能也有微小的差异。因此，对于给定的 J 值，当 F 值不同时，原子的能量状态也不同，即原子能级发生分裂（由于核磁矩比电子磁矩小三个数量级，所以这种分裂间隔是很小的）。于是这些能级间的跃迁所发射的光谱线也将发生分

裂,而形成光谱线的超精细结构.

现在我们仍以钠的 D 线来说明, 钠的 D_1 与 D_2 线是分别由能级 $3^2P_{\frac{1}{2}}$ 与 $3^2P_{\frac{3}{2}}$ 跃迁到能级 $3^2S_{\frac{1}{2}}$ 而发射的谱线(图 1. 3. 1a). 由于核

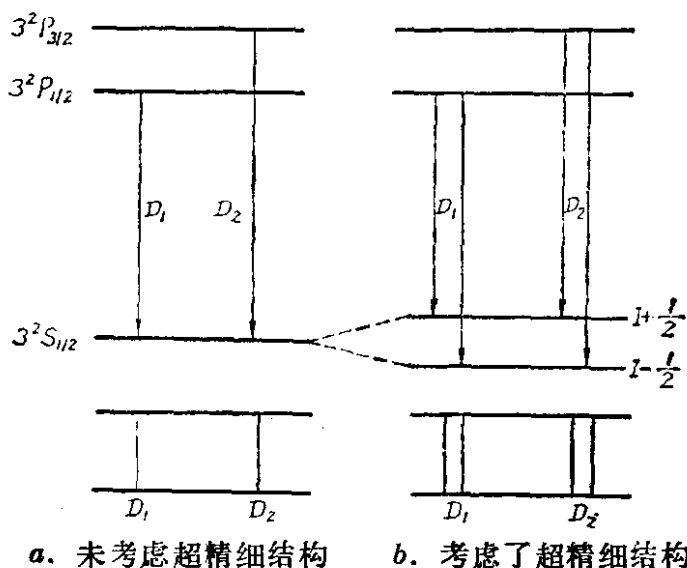


图 1. 3. 1. 钠原子 D 线

(图中能级与谱线的分裂间隔是夸大的了)

磁矩与核外电子总磁矩的相互作用, 原子各能级又进一步发生分裂. 对于 $3^2S_{\frac{1}{2}}$ 能级而言, $J = \frac{1}{2}$, 而根据实验结果(见表 1. 3. 1), 钠的核自旋 $I = \frac{3}{2}$ 即 $J < I$, 故按前段所述, 原子能级应分裂为 $2J + 1 = 2$ 个子能级. 同样, $3^2P_{\frac{1}{2}}$ 和 $3^2P_{\frac{3}{2}}$ 能级也要发生分裂, 但其间隔更小(约为 $3^2S_{\frac{1}{2}}$ 的 $\frac{1}{10}$), 故在图中没有画出. 这样, 由于核自旋与核磁矩的存在, 就引起了 $3^2S_{\frac{1}{2}}$ 能级的分裂, 从而解释了 D_1 和 D_2 线何以各分裂为两条谱线(图 1. 3. 1b).

根据以上讨论, 当核的自旋量子数 I 小于核外电子总量子数 J 时, 能级分裂为 $2I + 1$ 个子能级. 因此, 我们可以从光谱线的超精细结构中, 定出超精细子能级的数目以求出量子数 I 的数值. 但是, 如果 $J < I$, 分裂的子能级为 $2J + 1$ 个, 用这种方法就只能求出

J 而不能求 I 了。在这种情况下, I 的数值要用其他办法才能确定。

(2) 原子核磁矩的大小

大家都知道, 电子的磁矩以玻尔磁子

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_0 c}$$

为单位, 式中 m_0 为电子的静止质量。由于原子核的质量远大于电子的质量, 所以我们以核磁子

$$\mu_N = \frac{eh}{4\pi m_p c} \quad (1.3.4)$$

作为量度核磁矩的单位, 式中 m_p 为质子的质量, 为电子质量 m_0 的 1836.15 倍, 因此, μ_N 为 μ_B 的 1836.15 分之一。

磁矩 μ_I 与动量矩 P_I 是相互联系的, 且在数值上成正比关系, 一般 μ_I 可写成

$$\mu_I = g_I \frac{e}{2m_p c} P_I = g_I \sqrt{I(I+1)} \mu_N, \quad (1.3.5)$$

这里的 g_I 称为原子核的“ g 因子”。 μ_I 在某一特殊方向的投影等于

$$\mu_{Iz} = g_I M_I \mu_N. \quad (1.3.5a)$$

通常测量的是核磁矩 μ_I 在某一特殊方向的投影的最大值

$$\mu'_I = g_I I \mu_N, \quad (1.3.5b)$$

并以此来衡量核磁矩的大小。可见, 如果知道了 I , 并测得 g_I 值后, 我们就可求得核的磁矩了。

要想由超精细结构来求出核磁矩, 就需要计算核与电子壳层相互作用的能量, 这是有很大困难的, 不可能得到精确的结果。要比较精确地测定核磁矩, 一般采用的是“分子束法”或“核磁共振法”。

现在我们来简单地介绍一下“核磁共振法”的基本原理。此法的简单示意图如图 1.3.2, 待测样品 P 置于电磁铁两极间的磁场 H 中, 由于 μ_I 与 H 的