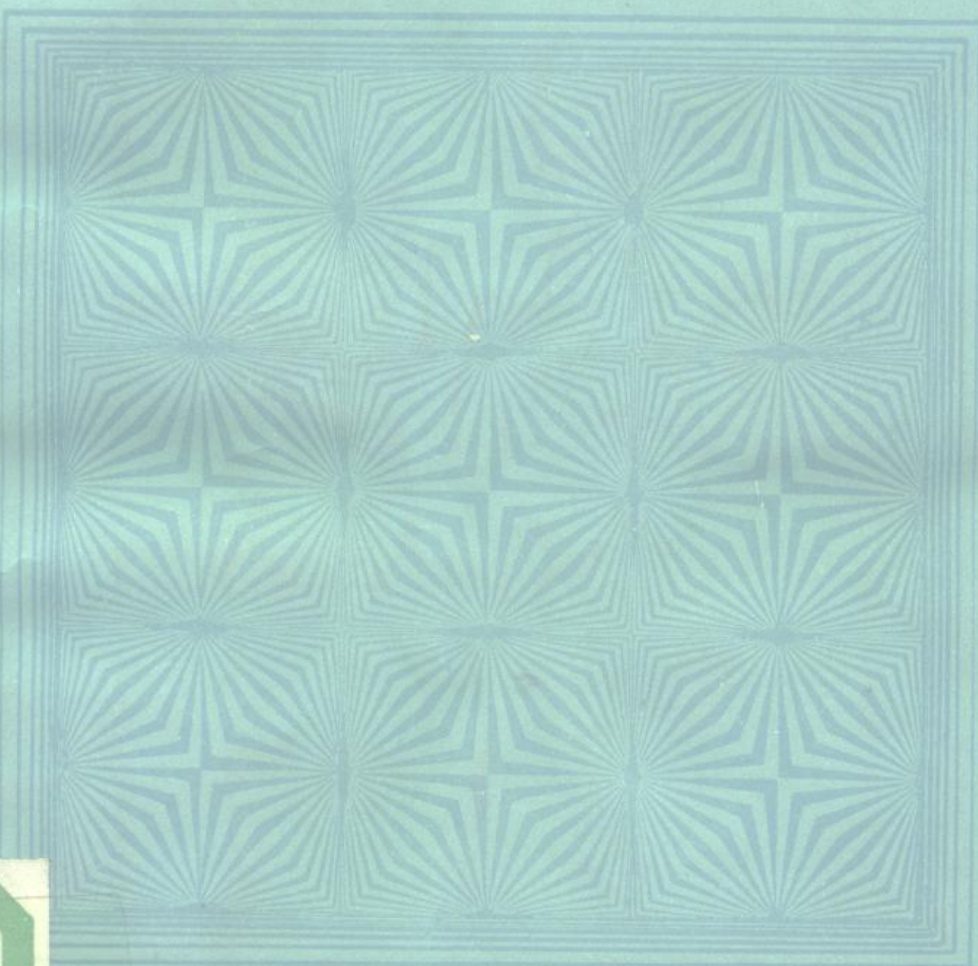


近代物理学 (下册)

• 甄长荫



北京师范大学出版社

本书是作者在原子物理的教学过程中，为使教材现代化和加强培养学生能力而编写的一部教材。全书在普通物理范畴内，以狭义相对论和量子论为基础，较详细、系统地讲述了原子、原子核、粒子物理以及分子、激光和固体等内容。全书共十九章，分上、下两册，下册包括后八章。本书每章都有较多的练习题、典型例题和习题，并附有答案。语言通俗易懂，有启发性，便于自学。

近代物理学

JINDAI WULIXUE

(下册)

甄长荫 编

*

北京师范学院出版社出版

(北京阜外花园村)

新华书店首都发行所发行

机械工业出版社印刷厂印装

*

开本 787×1096 $1/32$ 印张 11.25 字数 250 千字

1987年6月第一版 1988年3月第二次印刷

印数 3201—9200

统一书号 7427·35 定价 2.75 元

目 录

第三篇 原子核物理

第十二章 原子核的基本性质	1
§ 12.1 原子核的电荷和质量	1
§ 12.2 原子核的成分和大小	5
§ 12.3 原子核的自旋和磁矩	8
* § 12.4 原子核的其它性质	12
§ 12.5 原子核的结合能	15
例题	19
习题	23
第十三章 原子核的放射性衰变	25
§ 13.1 放射性的一般特征	25
* § 13.2 放射性的探测简介	27
§ 13.3 放射性衰变规律	29
§ 13.4 位移定则 放射系	35
§ 13.5 α 衰变	37
§ 13.6 β 衰变	47
§ 13.7 γ 衰变和内转换	63
§ 13.8 放射性同位素应用简介	71
例题	73
习题	79
第十四章 原子核反应	86
§ 14.1 引言	86
§ 14.2 核反应中的能量	93

§ 14.3 核反应机制	99
§ 14.4 核反应的作用	108
例题	112
习题	120
第十五章 核力和核结构模型	123
* § 15.1 原子核的质子-中子结构	123
§ 15.2 核力	126
§ 15.3 原子核的液滴模型 结合能半经验公式	133
§ 15.4 原子核的壳层模型	137
* § 15.5 原子核的集体运动(综合)模型的概念	148
例题	150
习题	157
第十六章 原子核的裂变与聚变	159
§ 16.1 原子核的裂变	159
§ 16.2 裂变理论	166
§ 16.3 链式反应	171
§ 16.4 裂变能的应用	173
§ 16.5 原子核的聚变	177
§ 16.6 可控热核反应	181
* § 16.7 元素的起源	183
例题	187
习题	190

第四篇 粒子物理

第十七章 粒子的种类和性质	193
* § 17.1 研究粒子的实验手段	194
§ 17.2 粒子的种类	202
§ 17.3 粒子的性质	220
例题	226

习题	236
第十八章 相互作用、对称性和守恒定律	238
§ 18.1 粒子间的相互作用	238
§ 18.2 动力学方程、对称性和守恒定律	246
§ 18.3 粒子物理中的守恒定律	250
例题	274
习题	279
第十九章 强子结构	282
§ 19.1 强子结构的早期研究	282
§ 19.2 强子结构的夸克(层子)模型	289
§ 19.3 夸克——部分子模型	300
* § 19.4 量子色动力学简介	306
* § 19.5 规范场概念及其应用	312
* § 19.6 粒子物理学展望	320
例题	326
习题	329
下册单数习题答案	330
参考书目	333
附录一 基本物理常数表	334
附录二 能量换算因子表	335
附录三 同位素表	336
附录四 四个放射系表	347
附录五 粒子简表	350

注：标*号章节为机动内容。

第三篇 原子核物理

第十二章 原子核的基本性质

原子核的基本性质通常是指原子核作为整体时所具有的静态性质，即电荷、质量、半径、角动量（核自旋）、磁矩、电四极矩、宇称和统计性等。在本章我们暂不涉及原子核内部结构和变化问题，主要从实验角度出发，有关这些性质的内在联系、理论根据等，则是以后各章要阐明的。

§ 12.1 原子核的电荷和质量

一、原子核的电荷

实验给出，原子核的电荷 $q = +Ze$ ，其中 e 为电子电荷数值， Z 称为电荷数，亦即以前我们所说的原子序数。电荷数 Z 是原子核性质的主要标志之一。

这一结论是同前面对原子的了解一致的。因为原子核外有 Z 个带负电的电子，而整个原子又呈电中性，所以原子核上必然带 Z 倍电子电荷的正电。

核电荷的测定方法很多，象前面讲过的 α 粒子散射实验就可以测量 Z ，有了 Z 核电荷 q 就可得到。此处着重介绍两种方法。

1. 化学方法

主要依据元素的化学性质和按质量的顺序来确定该元素

在周期表上的位置，从而确定 Z ，一般说来，当 $Z \leq 13$ 时，化学方法是准确的。

2. 标识伦琴射线法

在 § 7.5 我们已介绍过， K_{α} 线的波数公式可以近似的表示为

$$\begin{aligned}\bar{\nu}_{K_{\alpha}} &= R(Z-1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) \\ &= \frac{3}{4} R(Z-1)^2\end{aligned}\quad (1)$$

由实验测出 $\bar{\nu}_{K_{\alpha}}$ 之后就可以用上式求出电荷数 Z (原子序数)，这些实验数据还是比较准确的。莫塞莱曾经系统地测定了元素周期表中许多元素的核电荷数。

由于 $Z \leq 13$ 的元素一般不产生伦琴射线，故该法只适用于 $Z \geq 13$ 的情况。

两种方法结合，就可测得所有原子核的电荷。

二、原子核的质量

原子核的质量 M_N 近似地等于该元素的原子质量 M_A 减去该元素所有核外电子的质量 Zm_e ，即

$$M_N = M_A - Zm_e \quad (2)$$

然而一般情况下原子核是处于 Z 个电子的包围中，呈原子状态而存在，很难直接测量核的质量。另一方面电子的质量是已知的。因此，我们今后将用原子核所对应的原子质量代替核质量。这样不仅能直接引用实验数据，计算结果能同实验比较，而且计算也简便很多。

原子质量 M_A 常表示成原子量与原子质量单位 (u) 的乘积，即

$$M_A = \text{原子量} \times \text{原子质量单位} \quad (3)$$

原子质量单位(u)定义为碳-12原子的质量 1.992678×10^{-26} 千克的 $1/12$, 又称为碳单位, 即

$$\begin{aligned} 1 \text{ 原子质量单位} &= 1.992678 \times 10^{-26} \times \frac{1}{12} \\ &= 1.660566 \times 10^{-27} \text{ (千克)} \quad (4) \end{aligned}$$

原子量最接近的整数我们称为质量数以 A 表示, 例如, 氢原子的原子量为 1.007825 , 则它的质量数 $A = 1$. 又钾的原子量为 38.96371 , 则它的质量数 $A = 39$.

质量数 A 同电荷数 Z 一样, 也是原子核特性的标志之一. 以后我们可以看到, 如果已知一个原子核的 A 、 Z 则该核的所有性质基本上了解. 为此一般用符号 ${}_Z^AX$ 表示一个原子核, 其中 X 为该核的元素符号, A 、 Z 分别为质量数和电荷数. 例如上例中氢 $Z = 1$, $A = 1$, 钾 $Z = 19$, $A = 39$, 分别可表示为 ${}_1^1H$, ${}_{19}^{39}K$. 通常把具有相同质子数 Z 和相同中子数 N ($N = A - Z$) (见§12.2) 的一类原子核称为一种核素, 因此符号 ${}_Z^AX$ 也就是核素的符号.

有了核的表示符号, 我们就可以介绍几个原子核中常用的概念.

同位素: Z 相同而 A 不同的核素称为同位素. 例如 ${}^{16}_8O$, ${}^{17}_8O$, ${}^{18}_8O$ 互为同位素. 同位素又分稳定的和放射性的两种, 对氧而言, ${}^{16}_8O$ 和 ${}^{18}_8O$ 为放射性的, 其余为稳定的.

同量异位素: A 相同而 Z 不同的核素称为同量异位素, 例如氩 ${}^{40}_{18}Ar$ 和钙 ${}^{40}_{20}Ca$.

同中子素: 中子数相同, 而质子数不同的核素, 称为同中子素, 例如 ${}^{31}_{15}Si$ 和 ${}^{32}_{16}S$ 就是同中子素.

同质异能素: 如果原子核的 A 、 Z 皆相同而核的内部能量不同则称为同质异能素, 表示同质异能素的方法是在质量

数后加上一个 m ，以表示原子核处在能量比较高的状态。例如 ^{118m}Ar 就表示 ^{118}Ar 的同质异能素。

如前所述，直接测量原子核质量是困难的，故只有利用它的某些性质。

测量原子质量常用的仪器是质谱仪。它的基本原理如下：首先让原子电离，然后在电场中加速以获得一定动能，接着在磁场中偏转，由偏转的曲率半径的大小可求得离子的质量。图12.1是一种质谱

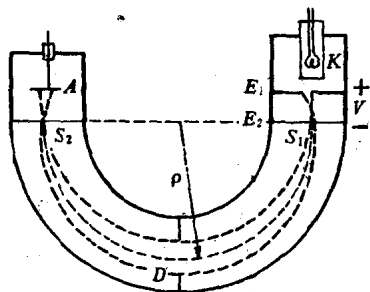


图12.1 质谱仪原理图

仪的原理图。D为一扁平的真空盒，它放在一磁铁间隙内。磁铁产生的均匀磁场，其磁感应强度 B 垂直于真空盒平面。真空盒内主要有离子源 K 、加速电极 E_1 、 E_2 和接收电极 A 。由离子源产生的被测离子，通过加速电极的狭缝 S_1 后，获得动能 qV ， q 是离子的电荷， V 是加速电极 E_1 和 E_2 之间的电势差。于是，质量为 M 的离子通过加速电极后所具有的速度 v 满足下列关系

$$\frac{1}{2} M v^2 = qV \quad (5)$$

因为 $v \perp B$ 故离子受洛伦兹力作半径为 ρ 的圆轨道运动，最后通过狭缝 S_2 到达接收电极，于是有

$$\frac{M v^2}{\rho} = q v B \quad (6)$$

(5)、(6) 式联立得

$$M = \frac{\rho^2 q B^2}{2V} \quad (7)$$

由(7)式当 B 、 V 、 q 已知后,只要测出 ρ 即可得 M 。有了离子质量 M ,就可找出原子核所对应的原子质量。

由(7)式可知,在一定 ρ 、 q 、 B 的条件下, V 和 m 成反比关系,即

$$V_1:V_2 = m_2:m_1 \quad (8)$$

实际测量中一般不是测出(7)式中所有物理量,而是采用与已知质量的原子(如碳-12)作比较的方法,测出待测原子的质量。这种方法是先测出已知质量原子的电流峰值的电压 V_1 ,然后在同样条件下测出待测原子的电流峰值的电压 V_2 ,已知原子的质量为 m_1 ,待测原子的质量即可由(8)式算出。

§ 12.2 原子核的成分和大小

一、原子核的成分

目前已经确认质量数 A ,电荷数为 Z 的原子核是由 Z 个质子和 $A-Z$ 个中子($N = A - Z$)组成。这个结论的得出历史上还有一段复杂的过程,稍后一些我们在§ 15.1中研究原子核的结构时再详细介绍。

中子和质子统称核子,即原子核由 A 个核子组成。质子就是氢原子核 ${}^1_1\text{H}$ ($Z = 1$, $A = 1$,亦可用符号 p 表示),中子是不带电的,质量数 $A = 1$ 的中性粒子 ${}^1_0\text{n}$,它们的质量分别为:

$$M_H = 1.007825 \text{ 原子质量单位}$$

$$M_n = 1.008665 \text{ 原子质量单位}$$

质量数 A 其实反映了原子核内的核子数目,电荷数 Z 则

反映核内的质子数目，故 $A-Z$ 为中子数目，因此前面我们强调的 A 、 Z 可以基本上决定所有原子核的性质，其实是反映了原子核的各种性质都取决于原子核的组成成分。

二、原子核的大小

原子核的大小就目前各种有关问题概括起来是指：核的电荷分布范围；核的质量分布范围；核力的作用范围。通过各方面的实验发现上述三个范围都可以代表原子核的大小，且可用一个公式来表示，即

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (1)$$

其中 R 为核的半径， $r_0 = 1.20 \times 10^{-15}$ 米 = 1.20 费米，为常数。 A 为质量数。

原子核很小，目前还无法直接测量，所以所有表示原子核大小的数据都是通过实验间接测得的。目前应用较多的测量原子核半径的方法有两种。

1. 利用原子核与粒子间的核力作用

所谓核力是一种核子间很强的吸引力，力程很短，详细情况也待核结构一章 § 15.2 再介绍，由这种方法测得

$$\begin{aligned} r_0 &= (1.25 \sim 1.45) \times 10^{-15} \text{ 米} \\ &= (1.25 \sim 1.45) \text{ 费米} \quad 1 \text{ 费米} = 10^{-15} \text{ 米} \end{aligned}$$

2. 利用原子核与粒子间的库仑场作用

由此测得 $r_0 = (1.10 \sim 1.30) \times 10^{-15}$ 米 = (1.10 ~ 1.30) 费米

今后，具体计算我们采用 $r_0 = 1.20 \times 10^{-15}$ 米。由以上不同方法测量之结果可以看出三个范围虽都代表核的大小，但仔细分析起来是有区别的。由此可窥探到一些关于原子核结构的线索。

各种实验结果表明，原子核在一般情况下是接近球形

的，故通常用核半径来描述原子核的大小。由实验得知，在原子核内物质密度不是处处相等的。图12.2是通过测量核内电荷分布得到的核内质量分布的大致情况。在核的中间部分密度基本上是一个常数 ρ_0 ，在核的表层密度由 ρ_0 逐渐下降到零。所谓核半径，就是指由核中心至密度降为 ρ_0 的0.5处的距离。

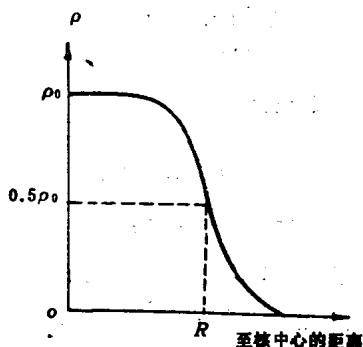


图12.2 原子核的质量密度分布

练习1 半径为

^{189}Os 核的 $\frac{1}{3}$ 的稳定核是什么核？

解 因为 $R \propto A^{1/3}$ ，所以

$$\frac{1}{3} = \frac{R_A}{R_{\text{Os}}} = \left(\frac{A}{A_{\text{Os}}} \right)^{1/3} = \left(\frac{A}{189} \right)^{1/3}$$

故

$$A = \frac{189}{3^3} = \frac{189}{27} = 7$$

由同位素表知该稳定核为 ^7Li 。

由核半径公式可知其体积为

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 A = V_0 A \quad (2)$$

V_0 为一个核子的体积，从而知 r_0 代表一个核子的半径。由体积和质量可求出密度 ρ 为

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 \frac{A}{M}} = \frac{3}{4\pi r_0^3 N}$$

$$\approx 10^{17} \text{ 千克/米}^3 = 10^{14} \text{ 吨/米}^3 \quad (3)$$

式中 N 为阿伏加德罗常数。由 (3) 式可知, ρ 为常数, 且非常之大 (水的密度为 $\rho_{\text{水}} = 1 \text{ 克/厘米}^3 = 1 \text{ 吨/米}^3$, 铁的密度 $\rho_{\text{铁}} = 7.0 \text{ 吨/米}^3$)。宇宙间具有这样大密度的物体是存在的, 例如中子星。

§ 12.3 原子核的自旋和磁矩

一、原子核的自旋

在 § 5.3 我们研究过钠原子的 D 双线 $\tilde{\nu} = 3^2P_{1/2, 3/2} \rightarrow 3^2S_{1/2}$, 稍后于 1928 年又有人用更高分辨本领的摄谱仪和具有特殊构造, 能发出极细谱线的光源研究 D 双线。结果发现 D_1 、 D_2 分别分裂为两条, D_1 分裂的两条 $\Delta\lambda_1 = 0.023$ 埃, D_2 分裂的两条 $\Delta\lambda_2 = 0.021$ 埃, 这两个间距约为 D_1 和 D_2 的间距 $\Delta\lambda = 6$ 埃的 $1/300$, 称为超精细结构。

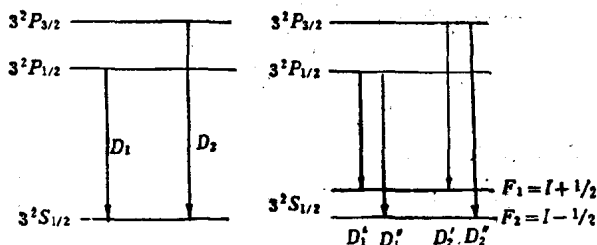


图 12.3 钠光谱的超精细结构

超精细结构的出现说明在原子内部除电子的轨道与自旋磁矩外, 尚有另一个磁矩, 引起精细结构能级再分裂从而形成光谱的超精细结构。1924 年泡利提出原子核也存在自旋。但要注意按照习惯原子核的自旋是指核子的轨道角动量和核

子的自旋角动量的矢量和的总角动量，核自旋的引入可以解释光谱的超精细结构。

超精细结构的形成可以认为是核自旋 I 与核外电子的总磁矩（对应总角动量 J ）在核处产生之磁场间相互作用的结果。

设 L 为电子轨道量子数， S 为电子自旋量子数， I 为核自旋量子数， F 为原子总角动量量子数， J 为电子总角动量量子数，则

$$J = L + S \quad (1)$$

$$F = J + I \quad F = J + I, J + I - 1, \dots$$

$$\dots |J - I| \begin{cases} J > I, \text{ 共 } (2I + 1) \text{ 个} \\ J < I, \text{ 共 } (2J + 1) \text{ 个} \end{cases} \quad (2)$$

对应之原子总角动量值为

$$|F| = \sqrt{F(F + 1)} \hbar \quad (3)$$

例如：Na 的基态 $3^2S_{1/2}$, $L = 0$, $S = \frac{1}{2}$, 故 $J = \frac{1}{2}$,

所以 $F = I \pm 1/2$, 原来能级一分为二。

按照超精细结构理论， $3^2P_{1/2}$ 和 $3^2P_{3/2}$ 亦应分裂，但因它们离原子核较远，受核自旋影响不如 $3^2S_{1/2}$ 大，所以裂距远比基态 $3^2S_{1/2}$ 小，观察不到，故不考虑。因此 D 双线的再分裂可解释为由于原子核的自旋的存在而引起基态 $3^2S_{1/2}$ 分裂所致。（详细分析可知 $3^2P_{1/2,3/2}$ 分裂后，再按选择定则 $\Delta F = 0, \pm 1$, $\Delta J = 0, \pm 1$ 知超精细结构之双线是由几条线合在一起的。）

原子核自旋的测定分两种情况。

1. $I < J$

根据角动量耦合理论知此时 F 取值（即能级分裂个数）

为 $2I + 1$ 个, 因此只要由超精细结构理论求出能级个数即可测出核自旋 I 。这种方法对 I 小的核比较适用, 尤其是当能级不分裂时, 就可以定出 $I = 0$ 。那么如何判断是否 $I < J$ 呢? 这可由原子状态符号中的 J 值和能级分裂个数来判断, 若能级个数不等于 $2J + 1$, 就必然属于 $I < J$ 的情况 (因为在 $I > J$ 时, F 值取 $2J + 1$ 个)。

2. $J < I$

此时 F 取值为 $2J + 1$ 个与 I 无关, 在这种情况下, 可以利用超精细结构各谱线的相对强度测定 I 。

由于超精细结构的谱线的强度正比于 $2F + 1$, 因而从相对强度之比可以定出 I 。事实上, 设 R_1 和 R_2 分别是谱线 $F_1 = I + J$ 和 $F_2 = I + J - 1$ 的相对强度, 则有

$$\begin{aligned}\frac{R_1}{R_2} &= \frac{2F_1 + 1}{2F_2 + 1} = \frac{2(I + J) + 1}{2(I + J - 1) + 1} \\ &= \frac{2(I + J) + 1}{2(I + J) - 1}\end{aligned}\quad (4)$$

练习 2 钠 D 双线的超精细结构对 $3^2S_{1/2}$, 由于 $2J + 1 = 2$ 对应能级分裂数, 故可判定 $I > J$, 不能用第一种方法求 I 。实验上测得 D_1 线 (或 D_2 线) 的两条超精细结构谱线的相对强度之比为 $5:3$, 求钠基态的核自旋 I 。

解 根据 $\frac{2(I + J) + 1}{2(I + J) - 1} = \frac{5}{3}$ 可知 $I + J = 2$ 。已知

$J = \frac{1}{2}$, 所以得 $I = 3/2$, 即钠基态的核自旋 $I = 3/2$ 。

实验给出质量数 A 为偶数的原子核, 当质子数和中子数皆为偶数 (偶—偶核) I 为零; 质子数和中子数皆为奇数 (奇—奇核) I 为整数; 质量数 A 为奇数的原子核 (奇 A 核)

I 为半整数。且 $I_z = I_x = \frac{1}{2}$ 即质子和中子的核自旋皆为 $1/2$ 。

这些实验结果的解释我们也留在以后。

二、原子核的磁矩

原子核中的质子是带电的，它的运动会产生磁场，所以原子核也具有磁矩。以后会了解中子也对原子核的磁矩有贡献。

在 § 5.2 我们学过电子的磁矩是以玻尔磁子 $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ 为单位，式中 m_e 为电子静止质量。由于核子的质量远远大于电子的质量，所以我们以核磁子

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M} = 5.0508 \times 10^{-27} (\text{焦耳} \cdot \text{特斯拉}^{-1})$$

为测量核磁矩的单位，式中 M 为质子质量，比电子质量大 1836 倍，亦即原子核磁矩 μ_I 比原子磁矩 μ_B 要小得多。

磁矩 μ_I 与角动量 I 是相互联系的，同核外电子情况类比可写成

$$\begin{aligned} \mu_I &= g \frac{e}{2M} |I| = g \sqrt{I(I+1)} \hbar \frac{e}{2M} \\ &= g \sqrt{I(I+1)} \frac{e\hbar}{2M} \\ &= g \sqrt{I(I+1)} \mu_N \end{aligned} \quad (5)$$

其中 g 为核的 g 因子，要实验测定，不能通过公式计算，

$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M}$ 为核磁子。

要想由超精细结构求出核磁矩，就需要计算核与电子相互作用的能量，这有很大困难，不可能得到精确的结果。要比较精确的测定核磁矩，一般采用“核磁共振法”，它的基

本原理是在斯特恩-革拉赫实验基础上加以改进即可，因装置本身比较复杂不再介绍。但要指出，实验上给出的原子核的磁矩不是式(5)的值，而是磁矩在外磁场方向投影的最大值，即

$$\mu = g I \mu_N \quad (6)$$

一般数据表给出的磁矩值也是这个值。实验结果给出：

$$\text{质子磁矩 } \mu_p = +2.79278 \mu_N$$

$$\text{中子磁矩 } \mu_n = -1.9131 \mu_N$$

上述结果同我们预计的结果是矛盾的，原来设想磁矩应为一个核磁子，而中子应该没有磁矩（因不带电）。由此可见质子和中子这两种“基本粒子”是有较复杂的结构的。

§ 12.4 原子核的其它性质

以下几种性质今后也要应用，但由于有的计算过繁，有的要应用理论物理的知识，所以我们只做简单介绍。

一、原子核的电四极矩

核电荷 Ze 从整体上描述了原子核的电性质。它确定了原子核的质子数目和元素的化学性质，但不能反映核内电荷分布情况以及与此有关的核性质。为此，有必要对原子核的电四极矩进行讨论。

由电动力学知，当一带电体的电荷是球形对称分布时，在核外离球心 R 处的电势为

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{R} \quad (1)$$

(1) 式中 e 为带电体之电荷，若电荷分布为非球形对称的，它所产生的电势一般可表达为

$$\phi = a_1 R^{-1} + a_2 R^{-2} + a_3 R^{-3} + \dots \quad (2)$$