

高等
学校
教材

普通物理学

原子核物理学部分

(1965年修订本)

吴 知 非 编

高 等 教 育 出 版 社

13.3

40

高等学校教材



普通物理学

原子核物理学部分

(1965年修订本)

吴知非编

高等教育出版社

本书是1963年6月出版的“普通物理学(原子物理学部分)”第五版的修订本。修订时根据少而精原则和当前教学改革的要求,对原书进行了较大的修改,力求从实验事实出发,着重揭示物理的一些基本现象和基本规律。修订本由旧版的七章及为四章,增补了插图、附录和习题;采用了以碳原子质量为标准的质量等值数据。全书篇幅减少了三分之一左右,大约可在35学时内讲完。

修订本可以作为综合大学和高等师范院校物理学“普通物理学”课程(原子核物理学部分)的教材,也可供各高等学校其他相近专业参考。

普通物理学

原子核物理学部分(1963年修订本)

吴 一 凡 等 编

北京师范学院物理系(北京100071)

高等教育出版社出版(北京东城区)

人民教育出版部发行

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号:13041·056 定价:0.50元(包括邮费) 印数:15万册
字数:111,000 印张:102/16 06062·01(1983.9) 0.18

1984年6月第1版 1985年11月第2版

1985年11月北京第8次印刷

序

本书是 1961 年 6 月出版的“普通物理学(原子物理学部分)”下册的修订本。根据少而精的原则及当前教学改革的要求,参考各兄弟学校对本书初版的意见,编者自 1962 年起到现在曾作了两次较大的修改。在修订过程中,力图去掉烦琐,突出重点,着重于从“三基”出发讲清本门课程的一些基本现象与基本规律,使篇幅有了较大缩减,体系章节作了较大调整,而科学水平与初版比较则力图有所提高。除小字外,估计本书内容可在 25 学时左右讲完。

在修订本中,增加了一些插图,并附上了每章的讨论题与计算题,以冀对教学有所裨益。但由于时间短促,修订本尚未经过教学实践的考验,因此,在贯彻毛主席教育思想、加强理论联系实际等方面,还是做得很不够的,特别是讨论题与计算题还很不成熟。希读者多多指正,提出宝贵意见,以便以后再版时能修改得更完善些。

在这次修订时,承南开大学刘键、兰州大学周尚文、山东大学张永恩、吉林师范大学刘秉正和吉林大学缪源、梁子松等同志提出了很多宝贵的意见和建议,编者对他们谨致以深切的感谢。

吴知非

1965 年 8 月于吉林大学

目 录

序	v
引言	1
第一章 原子核的某些基本性质	3
§ 1.1. 原子核的电荷与质量	3
§ 1.2. 原子核的大小	6
§ 1.3. 原子核的动量矩与磁矩	7
§ 1.4. 原子核的組成	12
§ 1.5. 原子核的結合能	14
§ 1.6. 核力的基本性质	17
第二章 放射性·原子核的衰变	20
§ 2.1. 放射性过程的一般特性	20
§ 2.2. 放射性衰变規律	22
§ 2.3. 放射性强度	26
§ 2.4. 位移定則·放射系	26
§ 2.5. α 衰变	29
§ 2.6. β 衰变	35
§ 2.7. β^+ 放射性与 K 俘获	43
§ 2.8. γ 衰变与內变換	45
§ 2.9. 射綫的探测方法	51
§ 2.10. 放射性同位素应用的简单介绍	55
第三章 核模型	61
§ 3.1. 原子核的液滴模型和結合能半經驗公式	61
§ 3.2. 其他模型	66
第四章 核反应	70
§ 4.1. 核反应及其遵循的若干守恒定律	70
§ 4.2. 反应能	73
§ 4.3. 原子核的反应截面	76
§ 4.4. 原子核反应的机制	78
§ 4.5. 中子	80

§ 4.6. 高能核反应与基本粒子·····	84
§ 4.7. 裂变反应·····	94
§ 4.8. 原子核的聚变·····	104
讨论题与计算题·····	110
附录·····	115
I. 相对論的几个公式·····	115
II. 四个放射性系表·····	118
III. 一些常用的物理常数·····	120
IV. 同位素的质量、結合能、磁矩、自旋、百分比·····	122
参考书·····	134

引 言

原子核物理学是普通物理学的最后一部分，在这部分内讨论原子核的特性、结构及其变化规律。

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为广泛的联系，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及核力的性质等基本问题，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。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，关于原子核物理的研究，只在 1930 年前后才略有开始。在解放以前从事原子核物理研究的人员为数极少，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、各种计数管、静电加速器及其他从事原子核物理研究的仪器。

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。1964 年 10 月 16 日，我国成功地爆炸了第一颗原子弹。1965 年 5 月 14 日又成功地爆炸了第二颗原子弹。这是党的社会主义建设总路线的伟大胜利。这是毛泽东思想的伟大胜利。

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,在当前反对帝国主义的斗争中和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一定的基本知识。基于普通物理学课程的任务与性质,本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。这里特别着重于阐述学科范围内的基本知识及基本规律。由于原子核物理学正在迅速发展,在学习过程中,读者应特别注意如何从实验事实上升为理论规律的发展过程,及本学科的发展动向。

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,首先来介绍一下原子核的某些基本性质。本章主要将讨论原子核的电荷、质量、大小、动量矩、磁矩、组成、结合能和核力等方面的内容。

§ 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 表示元素的标志伦琴射线的光谱项, Z 表示元素的原子序数, R 表示黎得堡常数。对于 K 项, $n=1, a_1 \doteq 1$; 对于 L 项, $n=2$,

$\alpha_2 \approx 7.4$ 等等。因此，分析元素的标志伦琴射线，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和^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 38.963714，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、16.999134、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，根据目前新的国际标准，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 (${}^{12}\text{C}$) 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：
 $1 \text{ u.}^{③} = 1.66032 \times 10^{-24} \text{ 克}.$

比氧单位要大 1.000317917 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：

$$\begin{aligned} 1 \text{ u.} &= 1.66032 \times 10^{-24} \times c^2 \\ &= 1.49224 \times 10^{-3} \text{ 尔格}. \end{aligned}$$

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，于是：

$$\begin{aligned} 1 \text{ u.} &= 931.441 \times 10^6 \text{ eV} \\ &= 931.441 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

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.，而碳单位为 u.

§ 1.2. 原子核的大小

在原子物理中，根据原子核与 α 粒子间的相互作用是库仑作用，而推得了 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.

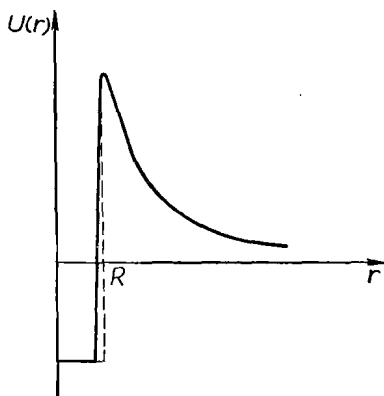


图 1.2.1. 原子核的势能曲线

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。

可见，核力有一个明显的作用区域，这个作用区域的半径，我们称之为“核半径”。因此，“核半径”这个概念只是表示核力作用范围的线度，并不意味着原子核是一个半径为 R 的真正球体，这是应该特别注意的。

核半径的测量，除了利用核对 α 粒子的散射外，还可利用核对质子、电子、中子的散射，或根据 α 粒子衰变理论等来确定。

根据目前的实验资料，核半径 R 与质量数 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 $6\text{\AA}$ 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 $0.023\text{\AA}$ 及 $0.021\text{\AA}$ 的谱线所组成, 这些分裂间隔约为精细结构分裂间隔 $6\text{\AA}$ 的 $\frac{1}{300}$, 故称为光谱线的超精细

① 根据实验, 原子核略呈椭球状.

结构。原子核是一个带电体，且它时刻不停地在运动着，因此，它也应该与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，而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 $\mathbf{P}_I$ 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。 $\mathbf{P}_I$ 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 $\mathbf{P}_F$ ，必须是核外电子总动量矩 $\mathbf{P}_J$ 与核自旋 $\mathbf{P}_I$ 的矢量和，即

$$\mathbf{P}_F = \mathbf{P}_J + \mathbf{P}_I,$$

$\mathbf{P}_F$ 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，原子的能量状态将发生分裂（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 线来加以说明, 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

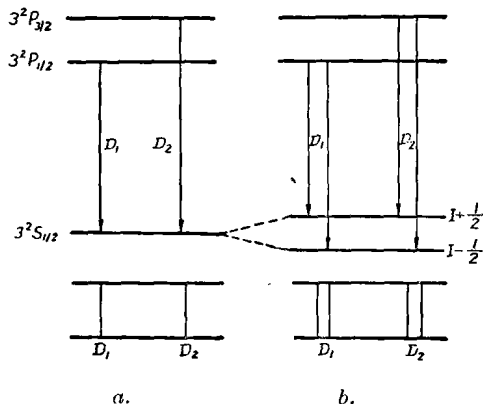
的核自旋 $I = \frac{3}{2}$ 即 $J < I$, 故按前段所述, 原子能级应分裂为 $2I+1=2$ 个子能级。同样, $3^2P_{\frac{1}{2}}$

故按前段所述, 原子能级应分裂为 $2I+1=2$ 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 线何以各分裂为二条谱线(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。



α. 未考虑超精细结构 b. 考虑了超精细结构

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)

(2) 原子核磁矩的大小

大家都已知道, 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 1836.13 倍, 因此, μ_N 为 μ_B 的 1836.13 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 置于电磁铁二极间的磁场 H 中, 由于 μ_I 与 H 的相互作用, 其附加能量

$$\Delta E = -\mu_I H \cos \theta. \quad (1.3.6)$$

根据空间量子化原理, $\cos \theta = \frac{M_I}{\sqrt{I(I+1)}}$, 则上式变为:

$$\Delta E = -g_I M_I \mu_N H. \quad (1.3.6a)$$

M_I 可取 $I, I-1, \dots, -I+1, -I$ 中的任意值, 所以原子核在磁场 H 中将有 $2I+1$ 个可能的附加能级(称为核磁能级). 如果此时在垂直于 H 的方向上再加一个强度较弱的高频交变磁场, 则样品的原子核将在交变磁场中吸收能量而发生能级跃迁. 根据磁量子数 M_I 的选择定则

$$\Delta M_I = 0, \pm 1, \quad (1.3.7)$$

可见, 核的能量改变只能是

$$\delta \Delta E = g_I \mu_N H, \quad (1.3.8)$$

所以, 原子核在交变磁场中, 也只能吸收量子能量

$$\delta \Delta E = g_I \mu_N H. \quad (1.3.9)$$

故当交变磁场的频率 ν 满足关系

$$h\nu = g_I \mu_N H \quad (1.3.9a)$$

时, 交变磁场的能量将被强烈吸收, 称作共振吸收, 此时的 ν 称为共振频率. 式(1.3.9a)可改写成

$$h\nu = g_I \mu_N H = \frac{g_I I \mu_N}{I} H = \frac{\mu'_I}{I} H,$$

即

$$\mu'_I = I \frac{h\nu}{H}. \quad (1.3.10)$$

因此, 测得 ν 及 H , 就可求得 μ'_I 值.

利用预知 g_I 及 I 值的原子核, 还可利用核磁共振实验反过来精确地测定磁场 H . 此外, 核磁共振实验也可用于分子结构和化学方面的研究上^①.

(3) 从实验结果得出的结论

表1.3.1. 给出若干原子核的动量矩与磁矩的实验数值, 由表中的结果, 可以看到下列几点事实:

① 所有奇数 A 的核, 自旋都是半整数; 所有偶数 A 的核, 自旋都是整数. 这一点是核的“质子-中子”组成的论据之一.

① 如要进一步了解核磁共振及其应用, 请参阅“物理通报1962年第1期, 34页”.

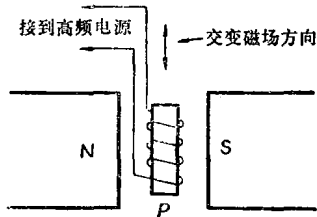


图 1.3.2. 核磁共振法的简单示意图