

高等学校试用教材

原子核物理导论

蒋明 编 卢希庭 审

原子能出版社

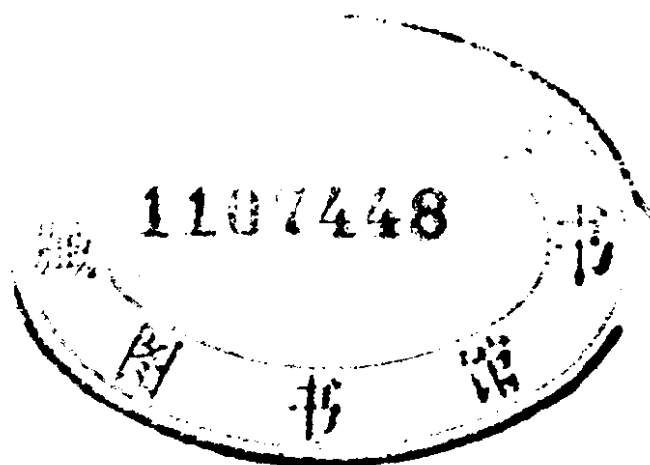
JY1157/13

高等学校试用教材

原子核物理导论

蒋明 编

卢希庭 审



原子能出版社

内 容 简 介

本书比较广泛地介绍了原子核物理的初步知识。全书共十章。书中对原子核的基本性质、原子核的衰变、射线与物质的相互作用、原子核反应作了比较系统的叙述；对中子、宇宙射线和基本粒子作了一般介绍。各章附有习题，书末附有习题答案。

本书可作为高等院校原子能类各专业（不包括核物理专业）的试用教材，也可供其他有关专业师生和从事放射性工作的科技人员参考。

高等学校试用教材

原子核物理导论

蒋 明 编

卢希庭 审

原子能出版社出版

（北京 2108 信箱）

重庆印制一厂印刷

（重庆市枇杷山后街）

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 $11 \frac{1}{4}$ · 字数 300 千字

1983 年 5 月第一版 · 1983 年 5 月第一次印刷

印数 001—5,500 · 统一书号：15175·481

定价：1.20 元

前 言

本书是在北京大学技术物理系用的《原子核物理导论》讲义的基础上编写而成的，可作为高等院校原子能类各专业（不包括核物理专业）的试用教材。

全书共十章。书中对原子核的基本性质、原子核的衰变、射线与物质的相互作用、原子核反应作了比较系统的叙述；对中子、宇宙射线和基本粒子作了一般介绍。标有•符号的部分，是为学生较深入地学习原子核物理知识而编入的，可不作为讲课学时数内的必学内容。

本书由蒋明同志编写，其中第七章是在施鼎同志的讲义基础上经补充修改而编成的。

卢希庭同志认真审阅和修改了本书全部书稿。本书经审稿会审阅，参加审稿会的有清华大学、北京大学、复旦大学、四川大学、兰州大学、天津大学、吉林大学和中国科学院原子能研究所等单位的有关同志，他们对书稿提出了宝贵意见。在本书的编写过程中，郑春开同志对第一、二、三、四、五、八章提出了一些修改意见；吴名枋同志对第六章，刘元方、王祥云同志对书中部分章节分别提出了意见。在此，编者谨向他们一并致谢。

由于编者水平有限，书中有不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者

1982年9月

目 录

前 言

第一章 原子核的基本性质和结构	1
§ 1.1 原子核的电荷、质量和半径	1
1.1.1 原子核的电荷	1
1.1.2 原子核的质量	2
1.1.3 原子核的半径	5
§ 1.2 原子核的组成	7
1.2.1 原子核的组成	7
1.2.2 核素和核素图	8
§ 1.3 质量亏损和结合能	11
1.3.1 核物理中的能量单位	11
1.3.2 质量和能量的相互关系	11
1.3.3 质量亏损	13
1.3.4 结合能	15
1.3.5 平均结合能和原子核的稳定性	16
§ 1.4 原子核的角动量和磁矩	18
1.4.1 原子核的角动量	18
1.4.2 原子核的磁矩	20
* 1.4.3 原子核的角动量与光谱的超精细结构	22
* § 1.5 原子核的电四极矩	25
§ 1.6 原子核的字称和统计性	28
1.6.1 原子核的字称	28
1.6.2 原子核的统计性	29
§ 1.7 核力	30
1.7.1 短程强作用力	30
1.7.2 与电荷无关性	31
1.7.3 核力的饱和性	32
1.7.4 核力的交换性	33
§ 1.8 原子核的液滴模型和结合能半经验公式	34

1.8.1 原子核的液滴模型	34
1.8.2 体积能 E_V	34
1.8.3 表面能 E_s	35
1.8.4 库仑能 E_C	35
1.8.5 非对称能 E_a	35
1.8.6 奇偶能 E_p	35
1.8.7 结合能半经验公式	36
§ 1.9 原子核的壳层模型	38
1.9.1 壳层模型的实验基础——幻数的存在	38
1.9.2 建立壳层模型的条件	39
1.9.3 单粒子能级	40
1.9.4 自旋和轨道耦合与能级次序	42
1.9.5 壳层模型对核基态自旋和宇称的预言	44
习题	46
第二章 原子核的衰变规律	48
§ 2.1 放射性的发现和核衰变类型	48
2.1.1 放射性的发现	48
2.1.2 核衰变类型	49
§ 2.2 原子核衰变的基本规律和放射性活度	51
2.2.1 原子核衰变的基本规律	51
2.2.2 放射性活度	53
2.2.3 衰变常数、半衰期和平均寿命	54
2.2.4 放射性活度的单位	56
§ 2.3 核衰变规律的统计性	58
§ 2.4 两次连续衰变规律	61
2.4.1 两次连续衰变	61
2.4.2 暂时平衡	63
2.4.3 长期平衡	65
2.4.4 不成平衡	68
2.4.5 三种平衡情况的比较	70
2.4.6 短寿命核素发生器	71
§ 2.5 混合物的放射性	73
§ 2.6 多次连续衰变规律	75

2.6.1 多次连续衰变	75
2.6.2 分支衰变	80
2.6.3 四个放射系	81
习题	91
第三章 α 衰变	96
§ 3.1 α 衰变中的能量及其分配	96
§ 3.2 α 能谱的精细结构与核能级	98
3.2.1 α 能谱的精细结构	98
3.2.2 α 能谱的精细结构与核能级的关系	98
§ 3.3 α 衰变的实验规律	103
3.3.1 α 衰变能与 Z, A 的关系	103
3.3.2 α 衰变能与同位素的关系	105
3.3.3 α 粒子的能量与衰变常数的关系(盖革-努塔尔定律)	106
* § 3.4 α 衰变机制	108
3.4.1 α 粒子与原子核的相互作用	109
3.4.2 α 衰变的量子理论	111
习题	114
第四章 β 衰变	116
§ 4.1 β 衰变的三种形式	116
4.1.1 β^- 衰变	116
4.1.2 β^+ 衰变	117
4.1.3 电子俘获和俄歇效应	118
4.1.4 β 衰变纲图和 β 衰变三种形式的比较	120
§ 4.2 β 能谱的连续性与中微子	122
§ 4.3 同量异位素的 β 稳定性	127
* § 4.4 β 衰变理论	132
4.4.1 β 衰变的几率公式	132
4.4.2 选择定则	135
4.4.3 β 谱的形状和居里描绘	136
4.4.4 衰变常数和比较半衰期	139
习题	142
第五章 γ 跃迁	143
§ 5.1 γ 跃迁中的能量	143

§ 5.2 内转换	145
5.2.1 内转换现象	145
5.2.2 内转换电子的能量	146
5.2.3 内转换系数	148
§ 5.3 同质异能素	149
* § 5.4 γ 跃迁的多极性	152
5.4.1 多极辐射	152
5.4.2 跃迁几率	154
5.4.3 选择定则	155
§ 5.5 穆斯鲍尔效应	156
5.5.1 共振荧光	156
5.5.2 穆斯鲍尔效应	160
习题	163
第六章 射线与物质的相互作用	165
§ 6.1 重荷电粒子与物质的相互作用	165
6.1.1 电离和激发	165
6.1.2 电离损失	168
6.1.3 阻止本领	171
6.1.4 射程	174
§ 6.2 电子与物质的相互作用	179
6.2.1 电离损失	179
6.2.2 韧致辐射	181
6.2.3 散射和反散射	185
6.2.4 切伦科夫辐射	187
6.2.5 正负电子的湮灭	190
6.2.6 β 射线的吸收和射程	191
§ 6.3 γ 射线与物质的相互作用	196
6.3.1 光电效应	197
6.3.2 康普顿效应	201
6.3.3 电子对效应	205
6.3.4 γ 射线在物质中的吸收	208
习题	214
第七章 原子核反应	218

§ 7.1 核反应及其分类	218
7.1.1 概述	218
7.1.2 核反应的分类	221
§ 7.2 核反应中的能量	223
7.2.1 反应能 Q	223
7.2.2 动量守恒和 Q 方程	225
7.2.3 核反应的阈能	226
7.2.4 离心位垒和库仑位垒	229
§ 7.3 核反应截面	230
7.3.1 反应截面	230
7.3.2 总截面、分截面和微分截面	232
7.3.3 激发函数	233
7.3.4 核反应产额	233
§ 7.4 放射性核素的产额计算	236
7.4.1 简单情况	236
* 7.4.2 混合链的产额计算与 Bateman 方程	237
§ 7.5 核反应的光学模型	241
7.5.1 核反应的三阶段描述	241
* 7.5.2 光学模型	243
§ 7.6 核反应的复合核模型	244
7.6.1 复合核模型的基本假设	244
7.6.2 复合核的能级和能级宽度	245
7.6.3 核反应中的共振现象和单能级共振公式	246
§ 7.7 连续区理论	249
§ 7.8 直接反应	252
§ 7.9 几种核反应介绍	253
7.9.1 10MeV 至 50MeV 能区的荷电粒子核反应	254
7.9.2 重离子核反应	254
7.9.3 光核反应	256
习题	257
第八章 中子	260
§ 8.1 中子的分类和性质	260
8.1.1 中子的分类	260

8.1.2 中子的性质	261
§ 8.2 中子源	264
8.2.1 同位素中子源	264
8.2.2 加速器中子源	267
8.2.3 反应堆中子源	271
§ 8.3 中子的核散射	271
§ 8.4 中子的减速	274
8.4.1 中子与核连续碰撞的能量损失	274
8.4.2 减速能力与减速吸收比	277
§ 8.5 中子在物质中的分布	278
8.5.1 慢化距离与慢化长度	279
8.5.2 热中子的扩散距离和扩散长度	280
8.5.3 点源周围中子的空间分布	282
习题	283
第九章 核裂变和核聚变及核能的利用	285
§ 9.1 自发裂变	286
9.1.1 自发裂变在能量上的可能性	286
9.1.2 原子核的稳定性与裂变位垒	288
9.1.3 自发裂变的几率及其与 Z , A 的关系	291
9.1.4 裂变同质异能素	294
§ 9.2 诱发裂变	295
9.2.1 裂变激活能与诱发裂变	295
9.2.2 裂变截面与激发函数	297
§ 9.3 裂变后现象	300
9.3.1 裂片的质量分布	300
9.3.2 裂片的电荷分布	303
9.3.3 裂变能及其分布	305
9.3.4 瞬发中子和瞬发 γ 光子	307
9.3.5 次级裂片的 β 衰变	309
9.3.6 缓发中子	310
§ 9.4 链式反应	310
§ 9.5 核反应堆和裂变能的利用	314
9.5.1 核反应堆的结构和应用	314

9.5.2 原子武器	317
§ 9.6 核聚变与受控热核反应	317
9.6.1 实现自持聚变的条件	318
9.6.2 受控热核反应	320
习题	324
第十章 宇宙射线和基本粒子	326
§ 10.1 宇宙射线	326
10.1.1 初级宇宙射线的成分	327
10.1.2 宇宙射线的硬性部分和软性部分	328
§ 10.2 初级宇宙射线在大气中的演变	329
10.2.1 μ 子	329
10.2.2 π 介子和 K 介子	330
10.2.3 超子	331
10.2.4 宇宙射线在大气中的演变过程	332
§ 10.3 基本粒子	334
10.3.1 基本粒子的分类	334
10.3.2 粒子和反粒子	335
10.3.3 共振态	335
10.3.4 粒子之间的相互作用	338
10.3.5 强子之间相互作用的规律	338
§ 10.4 基本粒子的结构	340
习题	343
参考书籍	344
附录	345
习题答案	345
常用物理常数	350

第一章 原子核的基本性质和结构

十九世纪末，发现了X射线和放射现象，人类的认识开始深入到原子的内部。1911年，卢瑟福（E. Rutherford）通过 α 粒子的散射实验，证明了原子内部有一个体积很小、几乎集中了原子全部质量的荷正电中心体。这个中心体就称为原子核。

在本章中首先讨论原子核的基本性质，然后介绍关于核结构的两个模型：液滴模型和壳层模型。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，即原子核的电荷、质量、半径、角动量（核自旋）、磁矩、电四极矩、宇称和统计性等。这些性质与原子核的结构及其变化有关。学习上述内容，不仅能对原子核的性质和结构有一个梗概的了解，而且是为以后各章的学习准备必要的知识。

§ 1.1 原子核的电荷、质量和半径

1.1.1 原子核的电荷

原子核带的正电荷量恰为 e 的整数倍，习惯上用符号 Ze 表示， Z 称为核电荷数， e 为基本电荷 $[e=1.602\times 10^{-19}\text{C}(\text{库仑})]$ 。

（核电荷数相同的原子具有相同的化学性质，通常就把核电荷数相同的一类原子称为一种元素。）元素的原子序数等于核电荷数。截至1981年，已发现的元素共107种，其中17种是用人工方法合成的，它们是锝($_{43}\text{Tc}$)、钷($_{61}\text{Pm}$)、镎($_{93}\text{Np}$)和钚($_{94}\text{Pu}$)至107号元素。虽然在自然界发现了极微量的钷、镎和钚，但其可称的量是由人工方法合成的。

核电荷数可以用特征X射线、卢瑟福散射等方法测定。

特征X射线法是一种间接测定核电荷数的方法，实验数据比

较准确。

莫塞莱(H. G. J. Moseley)于1913和1914年,对各种原子发出的特征 X射线的频率 ν 与它们的原子序数 Z 之间的关系进行了定量研究,得到如下关系:

$$\sqrt{\nu} = aZ - b \quad (1-1)$$

这个关系式称为莫塞莱定律。式中 a , b 均为常数,在一定范围内与 Z 的变化无关。对于不同系列的特征 X射线,它们的 a , b 值是不同的。因此,只要测得元素的特征 X射线的频率,即可定出原子序数、核电荷数。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,指出从氢到铀共有92个元素,并确定了43, 61, 85和87号元素在周期表中的位置(当时这四个元素还未发现),纠正了几对元素 (Co-Ni, Ar-K, Te-I)在周期表中曾经被颠倒了顺序。

查德威克(J. Chadwick)从1920年起,曾采用卢瑟福散射法对一些元素的核电荷数进行了直接测定。实验表明,在允许误差范围之内,测得的一种原子的核电荷数等于这种原子所属的元素在元素周期表中的原子序数。表1-1列出了几个元素的测定结果。

表1-1 卢瑟福散射法测定的核电荷数

元 素	原 子 序 数	实验测得的 Z 值
铜	29	29.30
银	47	46.30
铂	78	77.40

1.1.2 原子核的质量

原子或原子核的质量是非常小的,一个 碳-12 原子的质量为 $1.992678 \times 10^{-26} \text{kg}$ (千克),较重的铀-238 原子的质量为 $3.9521 \times 10^{-25} \text{kg}$ 。为方便起见,通常用一个特殊的单位来量度原子和原子核的质量。

1960 年的国际物理学会议和 1961 年的化学会议分别通过决议,确定以一个碳-12 原子质量的 $1/12$ 作为原子质量单位,记为

u(u是unit的缩写)。这个原子质量单位又称碳单位。

$$1u = 1.992678 \times 10^{-26} \times \frac{1}{12} = 1.660566 \times 10^{-27} \text{kg}$$

与碳单位相应的阿伏加德罗常数 $N_A = 6.022045 \times 10^{23}$ 。

1961年以前,国际上通用的原子质量单位是以一个氧-16原子质量的1/16作为原子质量单位的氧单位,记为amu。和amu相应的阿伏加德罗常数 $N_A = 6.0236 \times 10^{23}$ 。氧单位比碳单位略小一些,两者之比为1:1.000318。

电子的质量很小,为 $5.4858 \times 10^{-4}u$ 。铀-238的原子质量为238.050786u,它的92个电子的质量为 $5.0469 \times 10^{-2}u$,约占铀-238原子质量的 2.12×10^{-4} 。

在一般的核数据表中只标明原子质量。原子质量等于原子核的质量加上核外全部电子的质量,再减去与电子在原子中的结合能^①相当的质量。所以,原子核的质量可以表示为

$$m_N = m - Zm_e + \sum_{n=1}^Z \frac{\epsilon_n}{c^2} \quad (1-2)$$

式中 m , m_N 和 m_e 分别表示原子、原子核和电子的质量; c 为光速 [$c = 2.9979 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (米·秒⁻¹)]; ϵ_n 为第 n 个电子的结合能。如果忽略电子的结合能,核质量近似为

$$m_N \approx m - Zm_e \quad (1-3)$$

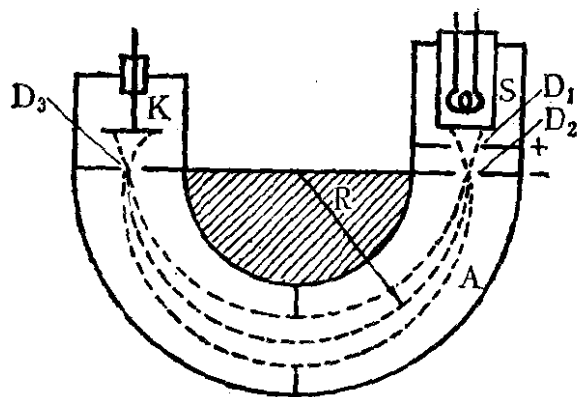


图1.1 质谱仪示意图

原子质量常用质谱仪来测量。图1.1是质谱仪示意图。图中A为真空室,它被放在一个磁铁间隙内。磁铁产生的均匀磁场,其磁感应强度 B 垂直于图面。S是离子源。 D_1 , D_2 是有狭缝的加速电极,其间加一可以调

① 关于结合能的概念参见 §1.3。

节的电压 V ，使离子源产生的被测离子通过它时获得动能而被加速。被加速到具有速度 v 的离子，受到磁场的作用（洛仑兹力），而在垂直于磁感应强度的平面内作匀速圆周运动，其轨道半径为 R 。最后，受到磁场偏转的离子通过狭缝 D_3 ，到达收集电极 K 。通过静电计测量电极 K 接收的离子电流。

质量为 m ，电荷为 q 的离子通过电场加速后获得的动能为

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV \quad (1-4)$$

以速度 v 运动着的离子受到磁场的洛仑兹力为

$$f = qvB \quad (1-5)$$

在此力的作用下，离子以 r 为半径作圆周运动，其向心加速度为 v^2/r ，因此，有以下关系：

$$f = qvB = \frac{mv^2}{r} \quad (1-6)$$

由 (1-4) 和 (1-6) 式消去 v 即得

$$m = \frac{r^2 B^2 q}{2V} \quad (1-7)$$

在质谱仪中只有以 $r=R$ 运动着的离子，才能到达收集电极 K 。因为磁感应强度 B 已固定，轨道半径 r 只与加速电压 V 有关，只要调节 V ，使得 $r=R$ ，静电计上就可以测到一个电流峰值。利用此时的 V ， B ， R ， q 值，由 (1-7) 式即可算出质量 m 。

图 1.2 是实验测得的接收电极离子电流随加速电压变化的关系曲线。图中峰值对应的电压和被测原子的质量一一对应。由 (1-7) 式可知， V 和 m 成反比关系，即

$$V_1 : V_2 = m_2 : m_1 \quad (1-8)$$

实际测量中，一般不是测出 (1-7) 式中的所有物理量，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 (1-8) 式算出。表 1-2 为实

验测得的一些原子的质量。

由表 1-2 可以看出，以 u 为单位表示原子质量时，原子的质量都接近于整数。通常就把这个整数称为核质量数，并用符号 A 表示。前文所述的碳-12、铀-238 中的 12、238 分别是这两种原子的核质量数。

1.1.3 原子核的半径

关于原子核的大小有两种理解：一种是核物质或核电荷的分布范围，另一种是核力^①的作用范围。不过两者之间的差别不是很大。原子核很小，目前还无法直接观察。目前所有表示原子核大小的数据都是通过实验间接测得的。测量原子核大小的方法

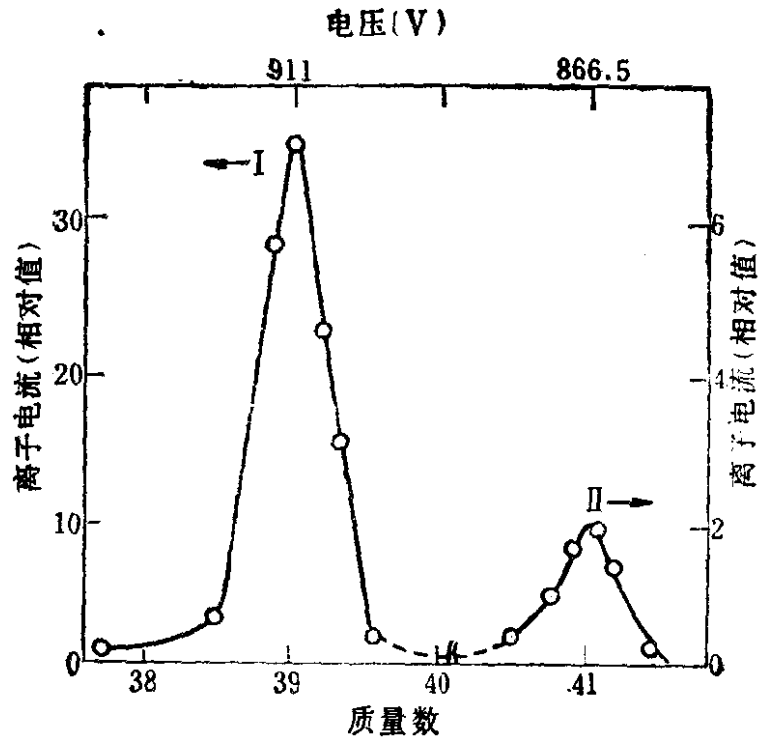


图1.2 质谱仪测定的钾-39和钾-40的电流分布曲线

表1-2 一些原子的质量

原 子	质 量(u)	原 子	质 量 (u)
氢-1	1.007825	钴-60	59.933820
氦-4	4.002603	铜-64	63.929766
锂-6	6.015123	钼-99	98.906252
铍-9	9.012183	钋-210	209.982363
氮-14	14.003074	氡-222	222.017574
氟-19	18.998404	镭-226	226.024894
镁-24	23.985045	铀-238	238.050786

① 核力是核子之间特有的作用力，参看 § 1.7.

有： α 粒子的核散射；电子的核散射；快中子的核散射； μ 子原子的特征X射线研究等。

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

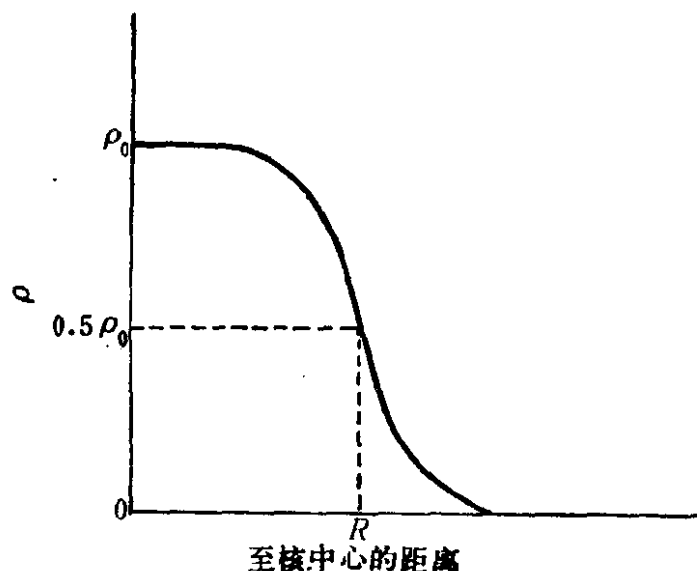


图1.3 原子核的质量密度分布

质密度不是处处相等的。图1.3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 逐步下降到零。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。

实验证明，各种不同的原子核中间部分的密度几乎相同，表层厚度也几乎相等。这就是说，核物质的密度 ρ_0 和它减小至零的快慢与原子核的质量数 A 无关（图1.4）。

各种实验方法的测量结果表明，原子核的半径 R 约为 10^{-15} — 10^{-14} m(米)，并与质量数 A 有以下近似关系

$$R \approx r_0 A^{1/3} \quad (1-9)$$

r_0 是常数。用不同的方法测量核半径时，所得到的 r_0 值略有差异。测量核力作用范围得到的 $r_0 \approx (1.3-1.5) \times 10^{-15}$ m；测量电荷密度分布范围得到的 $r_0 \approx (1.1-1.3) \times 10^{-15}$ m。所以，通常取 $r_0 = (1.1-1.5) \times 10^{-15}$ m。

设原子核的体积为 V ，质量为 m_N ，则原子核内核物质的平均密度为

$$\rho = \frac{m_N}{V} = \frac{m_N}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{3}{4} \frac{m_N}{\pi r_0^3 A} \quad (1-10)$$