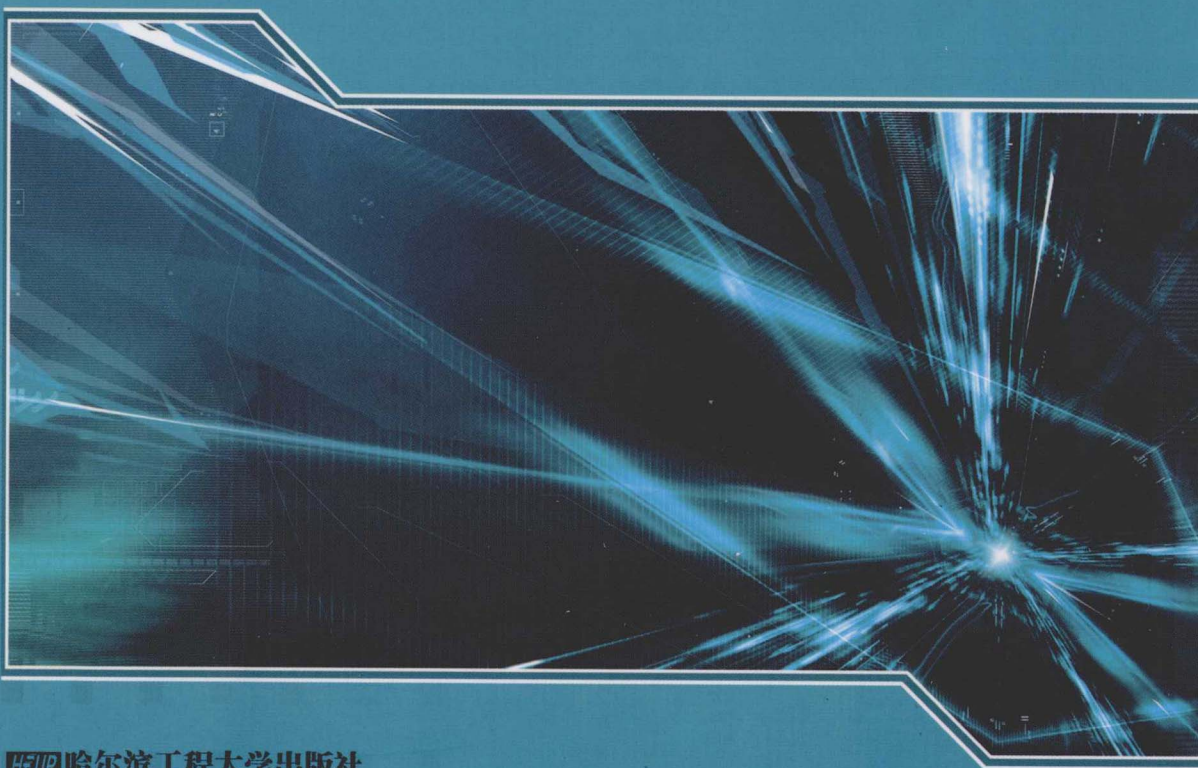




国防特色教材·核科学与技术

核辐射测量原理

——汤彬 葛良全 方方 刘义保 赖万昌 周四春 编著



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社
西北工业大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

核辐射测量原理

汤 彬 葛良全 方 方 编著
刘义保 赖万昌 周四春

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
西北工业大学出版社 哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本教材着重阐述核辐射测量的基本原理和方法、数据处理和典型应用等基本内容,以及相关进展情况与最新成果,同时介绍辐射防护和辐射剂量学的基础知识。本教材分为九章,主要包括:原子与原子核、放射性衰变规律、核反应概论、核辐射测量常见物理量及单位等基础知识;重带电粒子和快电子、 γ 光子和X光子、中子等与物质相互作用的基础知识;核事件的统计分布,统计误差与数据检验,测量不确定度等数据处理的基础知识;气体、闪烁体、半导体等核辐射探测器的工作原理与射线探测过程,核电子学的基础知识; α 和 β 等带电粒子的活度测量方法, α 能谱与 β 最大能量的测定方法, α 和 β 测量技术的典型应用;不同形体辐射源的 γ 辐射场计算, γ 照射量率与 γ 能谱的测量方法,能量刻度和效率刻度及 γ 能谱数据处理方法, γ 测量技术的典型应用;X荧光的定性定量分析及其干扰因素校正,X荧光测量技术的典型应用;中子源和中子探测的基础知识,中子通量和中子能谱的测量方法,中子测量技术的典型应用;辐射效应和辐射防护的基础知识,环境辐射水平和辐射防护标准,外照射和内照射剂量的估算与测量等基础知识。

本教材的建议课堂教学课时以45~60学时为宜,其中带“*”为可选课堂教学内容,另需要安排20~30学时的实验教学内容。

本教材可作为高等学校核工程与核技术、核技术、辐射防护与环境工程等本科专业的试用教材和硕士研究生的教学参考书,也可供相关科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

核辐射测量原理/汤彬等编著. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社,2011.8

ISBN 978-7-5661-0203-4

I. ①核… II. ①汤… III. ①辐射度测量-高等学校
-教材 IV. ①TL81

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第164553号

核辐射测量原理

汤彬等 编著

责任编辑 刘凯元

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

http://press.hrbeu.edu.cn E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省教育厅印刷厂印刷 各地新华书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:28 字数:595千字

2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-5661-0203-4 定价:57.00元

前 言

近十余年来,核辐射测量原理及应用方面的教材一直处于短缺状态,为适应新世纪培养核科学技术类本科专业人才的需要,经原国家国防科技工业委员会(现国家国防科技工业局)立项资助了一批国防规划教材,本教材属其中之一。

本教材适应于核工程与核技术、核技术、辐射防护与环境工程等本科专业的教学,也可作为相关专业硕士研究生的教学参考书。全书分为九章,其中第1章、第3章、第8章、第9章由汤彬负责编著,第2章由刘义保负责编著,第4章由赖万昌负责编著,第5章由方方负责编著,第6章由葛良全负责编著,第7章由周四春负责编著。参与本教材部分章节编著和书稿整理工作的还有杨磊、覃国秀、吴和喜、刘玉娟等同志。本教材由汤彬、葛良全按章节分别进行统稿和定稿。本教材由程业勋教授、刘庆成教授负责审稿。

在国家国防科技工业局、东华理工大学、成都理工大学、哈尔滨工程大学出版社的大力支持下,编著者经过两年多断断续续的编著工作,终于完稿并出版,在此对本教材付出辛勤劳动的各位同仁和相关单位表示衷心的感谢!同时对被本教材所引用和参阅的论著作者表示衷心的感谢!

本教材的课堂教学以45~60学时为宜(其中带“*”为可选课堂教学内容,另需要安排20~30学时的实验教学内容)。由于编著者水平有限,加之时间仓促,书中难免有不当与错误之处,恳请读者批评指正!

联系方式:TangBin@ECIT.EDU.CN

编著者

2010年6月于江西抚州

目 录

第1章 核辐射基础知识	1
1.1 原子与原子核	1
1.2 放射性衰变和衰变规律	9
1.3 原子核反应*	35
1.4 人工放射性核素与人工辐射源	45
1.5 核辐射测量中的常见物理量和常用单位	47
思考题和练习题	56
第2章 射线与物质的相互作用	58
2.1 重带电粒子与物质的相互作用	59
2.2 快电子与物质的相互作用	69
2.3 γ 或 X 射线与物质的相互作用	75
2.4 中子与物质的相互作用	87
思考题与练习题	92
第3章 核辐射测量的统计误差和数据处理	93
3.1 基本概念	93
3.2 核衰变和核辐射测量的统计分布	96
3.3 核辐射测量中的统计误差与数据检验	100
3.4 测量不确定度理论及其应用实例*	105
思考题和练习题	113
第4章 核辐射探测器	115
4.1 概述	115
4.2 气体探测器	116
4.3 闪烁探测器	125
4.4 半导体探测器	138
4.5 其他探测器	151
思考题和练习题	161

第5章 带电粒子测量方法	163
5.1 α, β 射线样品的活度测量概述	163
5.2 α, β 射线样品的活度测量方法	170
5.3 α 能谱与 β 最大能量的确定	195
5.4 带电粒子测量的应用*	199
思考题和练习题	214
第6章 γ 射线测量方法	216
6.1 概述	216
6.2 不同形状辐射体的 γ 辐射场计算	217
6.3 γ 射线的照射量率与能量测量方法	225
6.4 γ 射线能量刻度与探测效率刻度	238
6.5 低水平 γ 射线的测量条件与测量装置	252
6.6 谱数据的处理	257
6.7 γ 射线测量方法的应用*	267
思考题和练习题	298
第7章 X 射线荧光测量方法	300
7.1 X 射线荧光法定性与定量分析原理	300
7.2 X 射线荧光分析干扰因素及其校正	311
7.3 X 荧光测量的应用*	324
思考题和练习题	332
第8章 中子测量方法	334
8.1 中子源	334
8.2 中子探测基本原理与方法	339
8.3 中子能谱测量方法	346
8.4 中子通量密度测量方法	353
8.5 中子测量的应用*	356
思考题和练习题	368
第9章 辐射效应与辐射防护概论	370
9.1 辐射防护中的常用物理量	370

9.2 辐射对人体的生物效应及其危险度分析	374
9.3 环境辐射水平及辐射防护基本原则与标准	380
9.4 外照射剂量计算与防护*	391
9.5 内照射剂量估算与防护*	407
9.6 辐射剂量测量原则	415
思考题与练习题	420
附录 I 天然放射性系列的衰变图	421
附录 II 天然放射性核素的射线谱	425
附录 III 核辐射测量中的常用物理量及单位	434
参考文献	436

第1章 核辐射基础知识

1.1 原子与原子核

1.1.1 原子与原子核模型

自然界由各种各样的物质组成,尽管物质种类繁多、形态各异,但所有这些物质都是由存在于自然界中的 90 多种元素的原子所组成。例如,水(H_2O)是由二个氢原子和一个氧原子组成;乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)由六个氢原子、二个碳原子和一个氧原子组成。各种元素的原子具有不同的质量和性质,但它们的原子结构却又十分相似。

1. 原子模型和原子结构

1911 年卢瑟福在观察天然放射性物质放出的 α 射线穿透铝箔时,发现大部分 α 粒子能够径直穿透铝箔,但也有个别 α 粒子以很大的角度被散射,极个别的 α 粒子像碰到了东西似的,按原路弹回,如图 1.1 所示。

卢瑟福认为被散射或被弹回的 α 粒子,在前进的路线上碰到了一个带正电、很重而且很小的东西,即存在原子的核心,这就是著名的卢瑟福 α 粒子散射实验。在解释实验现象的基础上,他提出了原子结构模型,即原子中带正电的部分是原子的核心部分(即原子核),电子绕着核心运动。原子核集中了原子的全部正电荷和 99.95% 以上的质量。原子核的直径大约为 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ m}$,约为原子线度的 $1/10\,000$ 。1913 年玻尔进一步提出了带正电的原子核和带负电的轨道电子的玻尔原子结构模型,其中带负电的轨道电子围绕着带正电的原子核在不同的轨道上高速运行,分别对应于太阳系中的太阳和行星,如图 1.2 所示。

对某种原子而言,其电子从一个轨道跃迁到另一个轨道,所放射出的电磁波的波长 λ 具有固定值,即

$$\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} = \frac{(6.6 \times 10^{-34} \cdot \text{s}) \cdot (3 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})}{(E_2 - E_1) \cdot (1.6 \times 10^{-19} \text{ J})} \approx \frac{12\,345}{E_2 - E_1} \times 10^{-8} \text{ cm} \quad (1.1)$$

式中, $E_2 - E_1$ 表示两个轨道之间的能量差,单位为 J,通常还采用 eV 为单位,表示电子通过电位差为 1 V 的电场时所获得的能量; h 为普朗克(Planck)常数,其值为 $6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 为光速,其值为 $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; λ 为光的波长(波长 λ 与振动频率 ν 的关系为 $\nu = c/\lambda$)。

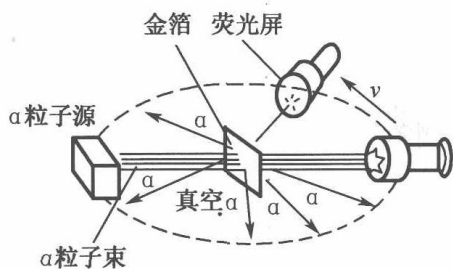


图 1.1 卢瑟福散射实验示意图

(包括径直穿过、小角度散射、大角度散射、正面碰撞)

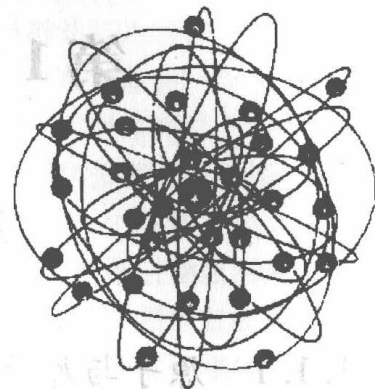
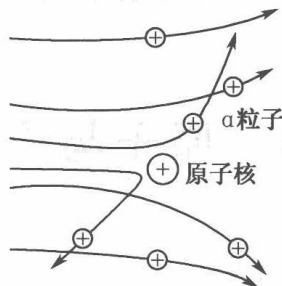


图 1.2 玻尔原子结构模型示意图

(其中原子核带正电、轨道电子带负电)

为便于记忆,可将式(1.1)中的 12 422 采用 12 345 代替。因电子带一个单位的负电荷(记为电子电量 e , 且 $1 e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$), 按 $1 e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $1 \text{ V} = 1 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1}$ 进行单位换算, 求得 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。玻尔采用该模型很好地解释了当时所测得的氢原子光谱, 他的观点包括以下内容:

(1) 原子内的电子与原子核保持一定的距离, 并在某些特定的轨道上运动。各轨道上运动的电子具有一定的能量(动能和势能), 离核越远其能量越大, 离核越近则能量越小。

(2) 在轨道上运动的电子不发射电磁波(光), 仅当外层电子跃迁到内层空位时才发射电磁波(光), 其能量为两个轨道的能量差, 即 $E_2 - E_1$ 。内层电子也可吸引外来能量并跃迁到外层轨道(称为激发), 当激发能很大时, 可使轨道电子脱离原子核吸引而自由运动(称为电离)。

(3) 由于光辐射是以光量子形式进行的, 其能量为

$$E = E_2 - E_1 = hc/\lambda \quad \text{或} \quad E = E_2 - E_1 = h\nu \quad (1.2)$$

以上就是玻尔根据电磁理论和量子论, 提出的原子结构模型以及理论解释。玻尔理论尽管有不完善的地方, 但仍被广大科学家所认同, 因此吸引了不少人去探求原子核的组成。1932 年查德威克发现了中子, 推动了人们对原子核结构的认识, 并发现原子核是由带正电的质子和不带电的中子组成。原子核内的质子和中子统称为核子。在原子核内, 一定条件下的中子可以转变成质子, 质子也可以转变成中子, 它们之间的相互转变可用下式表示, 即

$$n \rightarrow p + e^- \quad \text{或} \quad p \rightarrow n + e^+ \quad (1.3)$$

式中, n 表示中子, p 表示质子, e^- 表示负电子, e^+ 表示正电子。

2. 原子核结构和原子核基本特性

原子很小, 经测定其直径为 10^{-8} cm ; 原子核更小, 直径仅为 $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{ cm}$ 。原子的质量

也很小,在 $10^{-22} \sim 10^{-24}$ g 的范围内。例如,氢为最轻的元素,其原子质量只有 $1.673\,6 \times 10^{-24}$ g,铀为自然界中最重的元素,其原子质量也只有 $3.951\,0 \times 10^{-24}$ g。通常,原子质量采用 $^{12}_6\text{C}$ 原子质量的 $1/12$ 来表示,称为原子质量单位(记为 u)。经科学家测定: $1\,\text{u} = 1.660\,57 \times 10^{-24}$ g,则质子、中子和电子的质量分别为: $m_p = 1.007\,276\,\text{u}$, $m_n = 1.008\,665\,\text{u}$, $m_e = 0.000\,549\,\text{u}$ 。

如果原子核由 Z 个质子(即原子序数为 Z)和 N 个中子组成,则该原子核的质量为全部核子(质子、中子)的质量之和,即 $m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n$ 。因 m_p 和 m_n 接近于 $1\,\text{u}$,当用 u 作单位时,该核的质量非常接近于一个整数。如果采用 A 表示原子核质量最接近的那个整数,并称之为质量数(即 $A = Z + N$)。常见的各种表示方式列于表 1.1 中。

表 1.1 元素及其原子核的各种参见表示方式

元素名称			氢	氘	氚	氦	元素 X
元素符号			H	D 或 d	T 或 t	He	X
原子核名称	中子	质子	氢核	氘核	氚核	氦核	X 核
原子核符号	n	p	H	D 或 d	T 或 t	α 或 He	X
质子数 Z	0	1	1	1	1	2	Z
中子数 N	1	0	0	1	2	2	N
质量数 A	1	1	1	2	3	4	A
核素符号	^1_0n	^1_1p	^1_1H	^2_1H	^3_1H	^4_2He	^A_ZX

1.1.2 核力、原子核的结合能和放射性核素

1. 核力和原子核的稳定性

原子核由中子和质子组成,它们靠什么力将这些核子约束在原子核内呢?目前公认的说法是原子核内核子间存在核力,它是中子与中子、中子与质子以及质子与质子的相互吸引力,正是核力的存在使核子紧密地聚集在一起(各核子间具有相同的核力)。核内的质子与质子之间还存在服从库仑定律的静电斥力,使核倾向于分裂。此外,核内核子间还存在万有引力以及对 β 衰变一类变化起作用的弱力。

在核物理中,常常用“相互作用”这个术语代替力,核子的结合被归于强相互作用。原子核中呈现的力,无论是强相互作用还是弱相互作用,都随距离的增加而迅速减小。表 1.2 列出了上述四类相互作用的相对强度和力程。由表可知,原子核内核子间的核力很强,所以原子核是一个结合得很紧密的实体。但是,由于核力的力程(相互作用的距离)很短,在 10^{-13} cm 以内,核子只能与相邻的核子相互吸引;而静电斥力是长程力,核内所有的质子之间都有静电斥

力。所以,随着原子序数的增加,静电斥力的增加要快于核力增加,斥力与质子对之间键的数目成正比,而质子间键的数目等于 $Z(Z-1)/2$,这意味着质子间静电斥力近似正比于质子数目的平方。

表 1.2 相互作用的力程和相对强度

相互作用类型	强	电磁	弱	万有引力
在其中起重要作用的过程或体系	核子结合成原子核	γ 衰变、电子与的原子核结合	β 衰变	太阳系
相对强度	1	10^{-2}	10^{-13}	10^{-38}
力程/cm	10^{-13}	无限	$<10^{-13}$	无限

然而,核子间的强相互作用只涉及相邻的核子,例如在一个中等大小的原子核内增加一个中子,该核中的大多数核子将不受它的影响,也不因它的加入而结合得更紧密。尽管如此,由于轻的和中等大小的原子核相互作用比电磁相互作用(静电斥力属于这一类)强 100 倍,故轻的和中等的原子核是非常稳定的。对于较重的原子核,由于质子数的增加,核内静电斥力迅速增加,这时要使核保持稳定就要求核内有更多的中子,即通过增加核内的中子数来增加核力,以维持核的稳定。所以,当原子核的 Z 增大时,核内中子数与质子数的比值也增大。对于轻核存在 $N:Z \approx 1$;当 $Z > 20$ 存在, $N:Z > 1$ 。不过,对于铅以后的原子核,虽然 $N:Z \geq 1.5$,但由于核内静电斥力迅速增加,原子核仍不稳定,形成了许多天然放射性核素。

放射性核素总是能自发地从核内释放出来某种粒子(如 α, β, γ 等),并使核结构和能量发生变化而趋向稳定,这种现象称为核衰变,也称为放射性衰变。

2. 原子核的结合能

任一原子核 ${}_Z^AX$ 是由 Z 个质子与 $A-Z$ 个中子组成,该原子核质量应等于 Z 个质子与 $A-Z$ 个中子的质量之和,但实际并非如此。例如:氦原子的质量 $m_{\text{He}} = 4.002\ 603\ \text{u}$,如果忽略电子的结合能,则氦原子核的质量 $m_{\text{He}} - 2 \times m_e = 4.002\ 603\ \text{u} - 2 \times 0.000\ 549\ \text{u} = 4.001\ 505\ \text{u}$;而两个质子与两中子质量之和为 $2 \times 1.007\ 277\ \text{u} + 2 \times 1.008\ 665\ \text{u} = 4.031\ 884\ \text{u}$ 。它比氦原子核的质量要大,其差额为 $\Delta m = 4.031\ 884\ \text{u} - 4.001\ 505\ \text{u} = 0.030\ 379\ \text{u}$,即由两个质子和两个中子结合成氦原子核时,质量少了 Δm ,该减少的质量称为质量亏损。

科学家在研究原子核的质量时,发现由单个质子和中子结合成任何原子核时,都有质量亏损,这种现象可以用爱因斯坦的质能关系定律 $E = mc^2$ (式中, E 是原子核的总能量, m 是原子核的总质量, c 是光速)来解释。显然,如果某原子核的质量为 m ,则它具有的能量为 $E = mc^2$,当它的质量改变了 Δm 时,则它具有的能量也将有相应的改变,即

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (1.4)$$

反之,如果能量有 ΔE 的改变,也必然伴随着一定的质量改变,即

$$\Delta m = \Delta E/c^2 \quad (1.5)$$

当单个质子和中子相距很近时,由于核子间强烈吸引作用,会使一定数量的质子和中子结合成一个紧密的原子核,并向外释放能量。由于核子总能量的减少,按照质能关系定律,核子的总质量也将相应减少,这样,原子核的质量就比结合前的单个核子质量的总和小,这就产生了质量亏损。

如果将核子结合成原子核时所释放的能量称为结合能,并把原子核分成单个核子所要消耗的能量称为分离能,则结合能和分离能在数值上是相等的。原子核的结合能是和它的质量亏损相对应的,根据质能关系定律,从质量亏损可求出结合能。

通常,原子的质量能够在实验中测定,而原子核的质量却难以测定。为了计算的方便,往往采用原子的质量代替原子核的质量,用氢原子的质量代替质子质量,则质量亏损为

$$\Delta m = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_x] \quad (1.6)$$

相应的结合能 E_B 为

$$E_B = \Delta mc^2 = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_x]c^2 \quad (1.7)$$

在核物理中,能量单位常用 eV、质量单位常用 u 来表示,根据 $1 \text{ u} = 1.66057 \times 10^{-24} \text{ g}$ 的关系,可按上式进行换算,得出 1 u 质量所具有的能量为 931 MeV (请读者自己换算),即

$$E_B = 931\Delta m (\text{MeV}) \quad (1.8)$$

例如,当两个质子和两个中子结合成一个氦核时,其质量亏损为 $\Delta m = 0.030379 \text{ u}$,按上式求得的其结合能为 $E_B = 28.28 \text{ MeV}$ 。结合能 E_B 是 Z 个质子和 $A - Z$ 个中子结合成原子核时所释放的总能量,如果将结合能平均到原子核内的每个核子,并称其为比结合能 E_b ,则有

$$E_b = E_B/A \quad (1.9)$$

比结合能是描述原子核性质的一个重要物理量,比结合能大的原子核结合得更紧密,则该原子核就更稳定。由上式得到氦核的比结合能为 $E_b = 28.28/4 = 7.07 \text{ MeV}$,铀核的比结合能为 1.11 MeV ,这表明氦核比铀核结合要紧得多,氦核更稳定。表 1.3 计算了部分核素的比结合能,可将该计算结果与质量数的关系绘制于图 1.3 中。

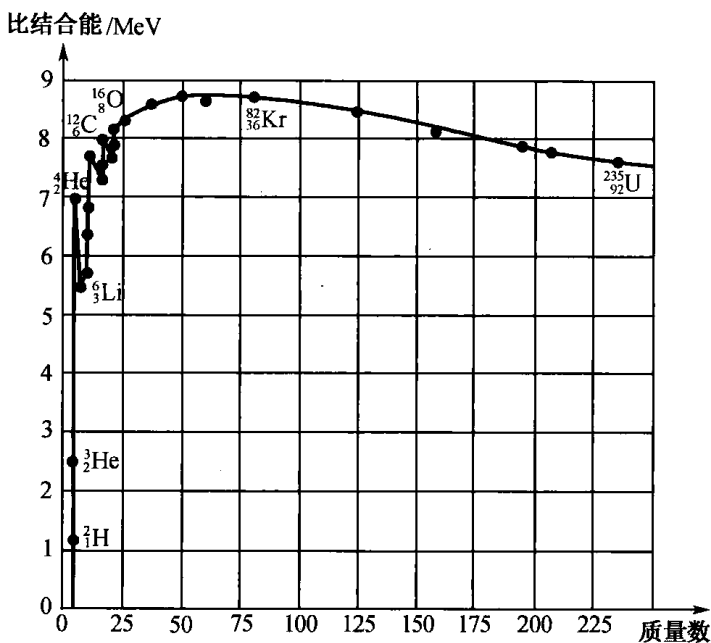


图 1.3 核素的比结合能和质量数之间的关系

表 1.3 核素质量和结合能之间的关系

核素	原子质量 /u	结合能 /MeV	比结合能 /MeV	核素	原子质量 /u	结合能 /MeV	比结合能 /MeV
e	0.000 549			^{85}Kr	84.912 523	739.387	8.69
p	0.007 277			^{90}Sr	89.907 747	782.628	8.69
n	1.008 665			^{95}Zr	94.908 035	821.152	8.64
^1_1H	1.007 825			^{130}I	129.920 915	1 094.747	8.42
^2_1H	2.014 102	2.225	1.11	$^{232}_{90}\text{Th}$	232.038 097 9	1 766.683	7.61
^3_2He	3.016 050	8.482	2.83	$^{233}_{92}\text{U}$	233.039 654	1 771.723	7.60
^4_2He	4.002 603	28.288	7.07	$^{235}_{92}\text{U}$	235.043 943	1 783.871	7.59
^6_3Li	6.015 124	31.993	5.33	$^{238}_{92}\text{U}$	238.050 819	1 801.680	7.57
^7_3Li	7.016 004	39.245	5.61	$^{239}_{94}\text{Pu}$	239.052 175	1 806.924	7.56

比结合能以质量数最小的原子核为最低,并随原子核的质量数的增加而迅速增大。但原子核的质量数增至 40 ~ 120 之间时,比结合能接近于最大值 8.5 MeV,然后随着质量数的增加而缓慢下降,铀核的比结合能已下降为 7.5 MeV。

若将 $^{235}_{92}\text{U}$ 吸收 1 个中子变成复合核 $^{236}_{92}\text{U}$,再按质量数为 236 的重原子核分裂成质量数为 118 的两个中等原子核时,则它们的比结合能之差为 1 MeV(即比结合能从 7.5 MeV 增至 8.5 MeV)。亦即具有 236 个核子的重核分裂成两个具有 118 个核子的中等核时,分裂过程所要释放的能量为 236 MeV,这就是制造裂变反应堆以及原子弹的理论根据。

同理,如果将两个质量数低的轻原子核结合为一个较重的原子核时,它们的比结合能也要增加,如两个氘核(^2_1H)结合成一个氦核(^4_2He)时,平均每个核子将增加 6 MeV 的能量。相比重核分裂,平均每个核子增加的能量更高,这就是制造热核反应堆以及氢弹的理论根据。

3. 放射性核素、同位素和同质异能素

两个原子核的质量数 A 和原子序数 Z 都相同,并且它们处于相同的核能态时,称它们为同一种核素,例如核素 $^{235}_{92}\text{U}$ 就是所有 $^{235}_{92}\text{U}$ 原子核的总称。

原子序数相同,而质量数不同的核素互为同位素,如氕(^1_1H)、氘(^2_1H)和氚(^3_1H)的原子序数 Z 都为 1,但质量数 A 分别为 1,2,3,则 ^1_1H , ^2_1H 和 ^3_1H 三种核素都为氢的同位素。

原子序数和质量数都相同的原子核,原子核处于不同核能态的一类核素称为同质异能素,如 $^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ 和 $^{99}_{43}\text{Tc}$ 为锝元素的同质异能素。

现在,世界上已发现的元素有 111 种,核素有 2 000 多种,其中的稳定核素有 300 种左右(如 ^{31}P , ^{32}S 等),其余的核素都是放射性核素(如 ^{131}I , ^{32}P 等)。

由于中子和质子的质量近似为 1 u , 故任何原子的质量也应该接近为 1 u 的整数倍。但是, 一种元素的相对原子质量(又称平均质量数)却与整数有较大偏离, 如氯的相对原子质量为 35.45 , 铜的相对原子质量为 63.54 , ……当然, 原子内存在的质子或中子不会为半个, 出现该现象的原因是自然界中的氯有两种稳定同位素 $^{35}_{17}\text{Cl}$ 和 $^{37}_{17}\text{Cl}$, 前者 and 后者所占比例分别为 75.4% 和 24.6% , 故自然界中氯的相对原子质量为 $A = 35 \times 75.4\% + 37 \times 24.6\% \approx 35.49$ 。

现已证实: 自然界的元素, 实际上是它的全部同位素按一定比例组成的混合体, 例如氖是三种同位素(^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{22}Ne)按 90.92% , 0.26% 和 8.82% 的比例混合组成, 而且不管在什么地方, 用什么方法得到的自然界中的氖, 这三种氖的同位素的百分比是不变的, 故称某种同位素所占的百分比为该同位素的丰度。

1.1.3 核外电子与元素周期表、能级与能谱

1. 核外电子与元素周期表

原子核带正电, 核外电子(又称轨道电子)带负电, 它们之间存在着静电吸引力, 通过这种引力使电子束缚于原子内, 并绕原子核运动。绕核运行的轨道电子严格遵循一定的规律, 每一个电子除绕自身的轴旋转外, 还按一定的轨道绕原子核旋转, 这些轨道按能量的高低, 分别属于不同的壳层。每个电子壳层用主量子数 n 表示($n=1, 2, 3, 4, \dots$), 如图 1.4 所示, n 越大, 表示电子壳层离核越远, 电子与原子核结合得越弱(即核对轨道电子的束缚力越弱)。最靠近核的电子壳层叫 K 层($n=1$), 可容纳的电子数为 2 个(即 $2n^2$ 个电子); 从该核往外计算的第二层叫 L 层($n=2$), 可容纳电子数 $2 \times 2^2 = 8$ 个电子; 第三层叫 M 层($n=3$), 可容纳 $2 \times 3^2 = 18$ 个电子; 再外是 N 层, 可容纳 32 个电子……

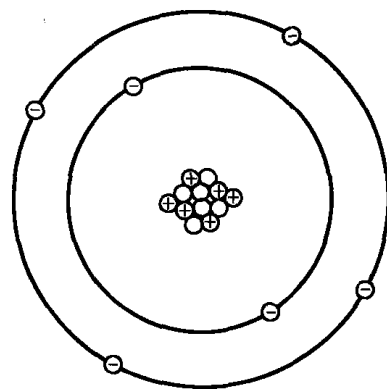


图 1.4 电子壳层模型与核外电子分布

人们还发现, 电子壳层与元素所在的周期有内在联系, 即各电子壳层所容纳的电子数与周期系的周期长度相一致。第 1 周期有 2 个元素; 第 2, 第 3 周期各有 8 个元素; 第 4、第 5 周期各有 18 个元素; 第 6、第 7 周期各有 32 个元素, 元素周期表如图 1.5 所示。由于核内的质子数等于绕核运行的轨道电子数, 故整个原子呈电中性, 故元素的化学性质与原子核的质子数有关, 而元素的化学变化只和最外层的电子数有关。

另外, 核外电子的结合能大致是: 外层电子为几个 eV, 内层电子为 100 eV 左右, 有机化合物的原子间的结合能约为几个 eV。

I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	IX	X	IB	II B	III A	IV A	V A	VI A	VII A	0																
1 H 1.0079	现代的化学元素周期律 (Periodic table) 是19世纪俄国门捷列夫发现的。他将当时已知的 63 种元素以表的形式排列, 把有相似化学性质的元素放在同一横行, 这就是元素周期表的雏形。这个表经过多年修订后才成为当代的周期表。在周期表中, 元素是以元素的原子序数排列, 最小的排行最先。表中一横行称为一个周期, 一列称为一个族。																2 He 4.0026																
3 Li 6.941	4 Be 9.012	<table><tr><td>碱金属</td><td>碱土金属</td><td>铜系元素</td><td>铜系元素</td><td>过渡金属</td></tr><tr><td>主族金属</td><td>类金属</td><td>非金属</td><td>卤素</td><td>惰性气体</td></tr><tr><td colspan="5">●气体 ●液体 ●固体 ●人工合成元素 ●尚未发现的元素</td></tr></table>										碱金属	碱土金属	铜系元素	铜系元素	过渡金属	主族金属	类金属	非金属	卤素	惰性气体	●气体 ●液体 ●固体 ●人工合成元素 ●尚未发现的元素					5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.17	
碱金属	碱土金属	铜系元素	铜系元素	过渡金属																													
主族金属	类金属	非金属	卤素	惰性气体																													
●气体 ●液体 ●固体 ●人工合成元素 ●尚未发现的元素																																	
11 Na 22.989	12 Mg 24.305											13 Al 26.982	14 Si 28.085	15 P 30.974	16 S 32.06	17 Cl 35.453	18 Ar 39.94																
19 K 39.098	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.9	23 V 50.9415	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.84	27 Co 58.9332	28 Ni 58.69	29 Cu 63.54	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.5	33 As 74.922	34 Se 78.9	35 Br 79.904	36 Kr 83.8																
37 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.22	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.94	43 Tc 99	44 Ru 101.07	45 Rh 102.906	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.6	51 Sb 121.7	52 Te 127.6	53 I 126.905	54 Xe 131.3																
55 Cs 132.905	56 Ba 137.33	57 La 174.96	58 Ce 178.4	59 Pr 180.947	60 Nd 183.8	61 Pm 186.207	62 Sm 190.2	63 Eu 192.2	64 Gd 195.08	65 Tb 196.967	66 Dy 200.5	67 Ho 204.3	68 Er 207.2	69 Tm 208.98	70 Yb (209)	71 Lu (209)	72 Hf (209)	73 Ta (209)	74 W (209)	75 Re (209)	76 Os (209)	77 Ir (209)	78 Pt (209)	79 Au (209)	80 Hg (209)	81 Tl (209)	82 Pb (209)	83 Bi (209)	84 Po (209)	85 At (209)	86 Rn (209)		
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (263)	107 Bh (263)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	110 Ds (268)	111 Rg (272)	112 Uub (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus (294)	118 Uuo (294)		
铜系 57 La 138.905	58 Ce 140.12	59 Pr 140.91	60 Nd 144.2	61 Pm 147	62 Sm 150.4	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.5	67 Ho 164.93	68 Er 167.2	69 Tm 168.934	70 Yb 173.0																				
铜系 89 Ac 227.03	90 Th 232.04	91 Pa 231.04	92 U 238.03	93 Np 237.05	94 Pu 244	95 Am 243	96 Cm 247	97 Bk 247	98 Cf 251	99 Es 254	100 Fm 257	101 Md 258	102 No 259																				

图 1.5 元素周期表示意图

(图中每个元素包括其原子序数、元素符号、中文名称、平均质量数)

2. 原子的能级

原子中束缚电子绕核运动有一定的轨道, 相应原子处于一定的能量状态。每种原子的束缚电子数目和可能的运动轨道都是一定的, 因此每一原子只能够在一定的、不连续的一系列稳定状态中, 这一系列稳定状态, 可用相应的一组能量 E_i 来表征, 称为原子的能级。

处于稳定状态的原子不放出能量。当原子由较高的能级 E_L 过渡到较低的能级 E_K 时, 相应的能量变化为 $\Delta E = E_L - E_K$, 并以发射光子的形式释放出来。即该光子满足

$$h\nu = E_L - E_K \quad \text{或} \quad \nu = (E_L - E_K)/h \quad (1.10)$$

式中, h 为普朗克常数 ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), ν 为光子的频率, $h\nu$ 为光子的能量。

可见, 光子的频率完全由能级之差决定。将某种原子发射的各种频率的光子按波长进行排列 (也就是按能量排列), 便构成了该种原子的发射光谱, 可见, 原子的光谱也就是原子的能谱。在原子光谱学中, 可以将其分为两个类型。

第一, 轨道电子在外部壳层各轨道之间跳跃时所产生的光谱称为光学光谱。例如, 若轨道电子原来位于 N 层, 当它在 N, O, P, Q 等外部壳层之间跳跃时, 就发生光学光谱。这种外部跳

跃时的原子能量变化较小,发出的光频率较低,一般在可见光区或其附近。地质工作中用来分析岩矿元素的光谱分析,就是利用这一部分特性。

第二,轨道电子在 K, L, M 等壳层中间跳跃时,所产生的光谱称为线状伦琴光谱,这时的原子能量变化大,发射的光子频率高。线状伦琴光谱由内壳层电子的跳跃所引起,而内壳层电子离核很近,所以这种光谱与原子核电荷之间有密切关系,称为标识伦琴射线(又称特征 X 射线)。近年来,分析和鉴定中迅速发展起来的 X 射线荧光法,便利用了该特性。

3. 原子核的能级

组成原子核的中子和质子,也是在运动变化之中的。核子的运动状态不同,相应的能量状态也不同。目前对于原子核的结构,虽然还不像原子的结构那样了解得很清楚,但是原子核如同原子一样有不同的能级,核子在能级之间也发生跃迁,因能级跃迁而辐射 γ 光子的现象早已被实验所证实,并且许多原子核的能级已经被实验所确定。类似于原子能级,原子核的能级也可形象地用图示来表示,例如 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 经 β 衰变,可成为 $^{137}_{56}\text{Ba}$, 其核能级变化可采用衰变纲图来描述,如图 1.6 所示。

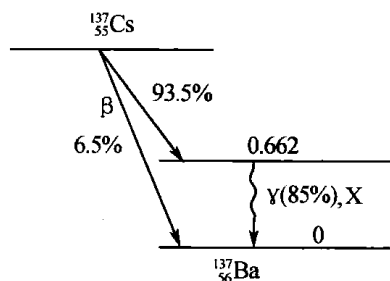


图 1.6 衰变纲图表示的核能级示意图

一个原子核最低的那种能量状态叫“基态”,比基态高的能量状态称为“激发态”。激发态的能级又分为第一能级,第二能级,等。如果原子核的运动状态处在激发态的某个能级上,这种状态是不稳定的,它往往通过放出光子从高能级的激发态回到基态(或低能级的激发态)。核能级变化放出的光子波长很短、能量很大,我们把这种光子称为 γ 光子(即 γ 射线)。原子核发射的各种能量的 γ 光子集合,称为该原子核的 γ 射线谱(即原始 γ 能谱)。

1.2 放射性衰变和衰变规律

1.2.1 放射性和放射性衰变

人们发现,由不稳定的原子核组成的天然物质能自发地转变成稳定的原子核。在这种转变过程中,常伴随着发射带电粒子(α 粒子、 β 粒子等)和 γ 射线,其本身变成另一种核素,该过程称为放射性衰变,这种现象称为放射性现象,这类物质称为放射性物质。

法国科学家贝可勒尔(Becquerel)于 1896 年最早发现放射性和放射性现象,在此后的十余年内,卢瑟福(Rutherford)、索迪(Soddy)、居里夫人(Marie Curie)等科学家在大量实验中证

实了某些原子核的不稳定性,这些不稳定的原子核主要发射几种类型的辐射,即 α 、 β 和 γ 等辐射,或轨道电子被俘获之后辐射X射线。具有放射性现象的核素称为放射性核素。1900年,经卢瑟福和索迪进一步研究指出:放射性现象与原子核从一种结构或能量状态自发地转变为另外一种结构或能量状态相联系。微观粒子系统从某一状态到另一状态的过程称为跃迁,放射性核素放射出来的粒子(或辐射)是原子核发生自发跃迁的结果。

1.2.2 核辐射的主要类型

辐射是以波(又称光子)和粒子束的形式进行能量传播的一种形式。核辐射涉及由原子核产生的各类辐射,包括由核辐射出 α 粒子、 β 粒子(正负电子)、 γ 粒子(γ 光子)和中子等,分别称为 α 辐射、 β 辐射、 γ 辐射和中子辐射等,下面介绍常见的主要核辐射类型。

1. α 辐射

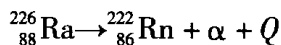
α 辐射是由氦原子核组成的以粒子流形式传播的能量流。 α 粒子由2个质子和2个中子组成,这4个粒子紧密结合就像一个基本粒子,其质量为4u,带2个正电荷(电子电量为 $2e$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。因它较重,因此在磁场中有微弱偏转。高速运动的 α 粒子能量流也称 α 射线。

在大多数天然 α 辐射中,核素的原子序数 $Z \geq 82$,仅少数 $Z \leq 82$ 。如 $^{147}_{62}\text{Sm}$ (钐,半衰期 $T_{1/2} = 6.7 \times 10^{11} \text{ a}$)的原子序数就小于82。原子核进行 α 衰变的一般反应式记为



式中,X为母体核素(简称母核素或母核),Y为子体核素(简称子核素或子核),Q为衰变能。

例如: $^{226}_{88}\text{Ra}$ (镭核, $T_{1/2} = 1\,600 \text{ a}$)放出 α 粒子变成了 $^{222}_{86}\text{Rn}$,其 α 衰变的反应式为



在 α 衰变过程中,由核内释放出的能量为 α 粒子具有的动能与子核的反冲能之和。其中, α 粒子所具有的动能称为 α 辐射能。

2. β 辐射

β 辐射是由核电荷数改变而核子数不变的核衰变所产生,主要包括 β^+ 衰变、 β^- 衰变、EC(电子俘获)三种核衰变所产生的辐射。

(1) β^- 辐射

β^- 辐射是由原子核发射出来的高速运动的电子(称“核电子”)所组成,它以粒子流的形式传播能量流。核电子与原子电子具有相同的特性,带一个负电荷,质量数为 $1/1\,840 \text{ u}$ 。因为它很轻,所以在磁场中有较大偏转。原子核进行 β^- 衰变的一般反应式为

