

21世纪高等学校规划教材

湖南省物理学会推荐教材

主编 匡乐满

大学物理

(第三册)

DAXUE WULI



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

21 世纪高等学校规划教材
湖南省物理学会推荐教材

大学物理

(第三册)

主 编 匡乐满

副主编 施毅敏 蔡新华 曾爱华



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内容简介

本书是为适应当前教学改革的需要,根据教育部高等学校非物理专业物理基础课程教学指导分委员会在 2004 年 12 月审定的“非物理类理工学科学物理课程教学基本要求”,结合编者多年的教学实践和教改经验编写而成的教材。

全书分三册,共 20 章,其中经典物理内容占 15 章.教材编写力求简明凝练,内容的深度、难度适中,理论讲解追求够用、实用.同时本教材针对各学校及不同专业对物理知识要求的差异作了适当的安排,以适合他们不同的要求。

本书可作为高等学校非物理专业大学物理课程的教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.第三册/匡乐满主编.—北京:北京邮电大学出版社,2007
ISBN 978-7-5635-1582-0

I. 大… II. 匡… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 177381 号

书 名 大学物理(第三册)
主 编 匡乐满
责任编辑 沙一飞
出版发行 北京邮电大学出版社
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真 010-62282185(发行部) 010-62283578(传真)
电话信箱 ctrd@buptpress.com
经 销 各地新华书店
印 刷 北京忠信诚胶印厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 14.75
字 数 320 千字
版 次 2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1582-0

定 价(一、二、三册):74.00 元
(本册):22.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前 言

本书是为适应当前教学改革的需要,根据教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会在 2004 年 12 月审订的“非物理类理工科大学物理课程教学基本要求”,结合编者多年的教学实践和教学改革经验编写而成的.具有如下四个特点:

1. 简明 本教材力求文字简明凝练,内容精细紧凑.对某些专业需要可单独自行增补,而大多数学校又没有时间讲授的内容,如非线性物理,电、磁场的边界条件,电、磁场的相对性,色散、波包等,没有编入教材.这样处理,并不影响普通物理知识内容和体系的完整性.

2. 适中 本教材与其他同类教材相比,在内容的深度、难度上也作了适当地调整.主要表现为:一、在对矢量性和相对性的要求上作了适中的选择.例如在力学中,我们仍然引入“相对运动”以描述运动的相对性,但并不在动力学中的相关部分深化该问题的讨论;对“矢量性”只是作为物理概念讲述清楚,而不是刻意用矢量的方法去解算一些偏难的习题.二、对于数学工具的运用,在保证基本要求的前提下,尽量避免繁杂的数学推演.如在量子物理部分,教材不要求解算二元偏微分方程,而重在讨论方程解算的思路和理解解算结果的物理意义;对于例题和习题则尽量少编入偏难、偏深和思路奇特的内容.

3. 实用 本教材的编写原则是:精讲经典,加强近代,选讲现代.经典物理是工科各专业后续课程的必备基础知识,必须讲透,讲够.以篇幅而言,教材编有 20 章,其中经典内容占有 15 章.以训练而言,例题和习题也集中在经典部分.对于近代物理部分,主要是突出相对论的时空观和量子思想.除了讲清这些物理理论知识,注重启迪思维外,还引导学生学习前辈科学家勇于创新的进取精神.对于现代物理部分采取专题选讲的形式,重点在为高新科技的生长点打基础,突出物理理论与高新技术的结合.总之,教材编写的目标是:围绕基础,加粗主干,重在实用,重在基本训练,重在为后续课程打基础.因此在每章均列有内容提要 and 典型例题汇编为第三册.

4. 兼容 本教材的编写中,既考虑到物理体系的完整性和系统性,又要尽量考虑到各类学校及不同专业对物理知识要求的差异.因此在某些章节的内容前面加了“*”号,教师可以根据学校课程设置、教学专业特点和教学时数来取舍,也可以跳过这些带*号的内容,而不会影响

整个体系的完整性和系统性,教材即“一剧之本”满足教师在授课“舞台”有据可依的需要,又为教师提供了个性发挥的空间.

本教材由匡乐满教授主编,参加编写与讨论的人员有罗维治、黎培德、杨友田、龚志强、罗益民、赵近芳、王振华、付茂林、吴烨、孙越胜、吴松安、方家元、黄小益、蔡新华、曾爱华、唐英、卢卯旺、卢德华、游开明、章湘平、刘朝辉、李玉珍、邓曙光、施毅敏、陈昌永、唐世洪、黄祖洪、王瑜、蒋练军、荆继良、李科敏、孔永红、陈雪娟、刘琼等.全书编写过程中,得到了北京邮电大学出版社的大力支持,他们组织各高校教师和湖南省物理学会的专家、同行与参编人员进行了多次讨论,提出了许多宝贵的意见和建议;更得到了中南大学、湖南大学、湖南师范大学、湘潭大学、长沙理工大学、南华大学、湖南科技大学、中南林业科技大学、湖南工业大学等高校物理老师的帮助和指导,编者在此一并表示衷心的感谢.

由于我们水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正.

编 者

2007 年 11 月

目 录

第六篇 原子核物理与粒子物理

第 18 章 原子核物理与粒子物理简介	(1)
§ 18.1 原子核的一般性质	(1)
§ 18.2 原子核的放射性衰变	(6)
§ 18.3 核衰变规律	(10)
§ 18.4 原子核的裂变与聚变	(14)
§ 18.5 粒子物理简介	(17)
习题	(20)

第七篇 天体物理与宇宙学

第 19 章 天体物理与宇宙学简介	(21)
§ 19.1 广义相对论	(22)
§ 19.2 致密星	(28)
§ 19.3 宇宙学简介	(31)

第八篇 几何光学

第 20 章 几何光学	(33)
§ 20.1 几何光学的基本定律	(33)
§ 20.2 球面折射	(35)
§ 20.3 透镜	(38)
§ 20.4 共轴球面系统的基点和成像公式	(41)
§ 20.5 眼睛	(44)
§ 20.6 放大镜 显微镜	(46)
习题	(51)

第九篇 内容提要及典型题解

1	运动的描述·····	(53)
2	运动定律和力学中的守恒定律·····	(63)
3	狭义相对论力学基础·····	(80)
4	机械振动·····	(87)
5	机械波·····	(100)
6	气体动理论基础·····	(118)
7	热力学基础·····	(127)
8	真空中的静电场·····	(133)
9	静电场中的导体和电介质·····	(145)
10	稳定电流的磁场·····	(155)
11	磁场中的磁介质·····	(167)
12	电磁感应、电磁场·····	(172)
13	光的干涉·····	(193)
14	光的衍射·····	(202)
15	光的偏振·····	(212)
16	量子物理基础·····	(218)

第六篇 原子核物理与粒子物理

第 18 章 原子核物理与粒子物理简介

原子核物理学是研究原子核特性、结构和变化等问题的一门科学. 自 1911 年卢瑟福通过 α 粒子散射实验发现原子的核式结构以来, 已获得了很多关于核的知识, 包括核的结构、放射性、能量以及核的转化等. 随着核理论和核工业技术的发展, 核能、放射性同位素等已得到广泛的应用. 本章重点讨论原子核的基本性质, 核衰变的种类和规律, 原子核的裂变与聚变、射线的性质及其粒子物理的基本概念和基本规律.

§ 18.1 原子核的一般性质

一、原子核的组成

自从 1932 年发现中子(neutron)后, 理论和实验都证实了原子核是由质子(proton)和中子组成的. 质子的质量和中子的质量几乎相等. 在原子核中有一种强大的核力(nuclear force)把核紧密地束缚在一起.

原子的质量包括原子核的质量和核外各电子的质量, 质子的质量为 $1.672\ 6231 \times 10^{-27}$ kg, 中子的质量为 $1.674\ 9286 \times 10^{-27}$ kg, 电子的质量比质子、中子小得多, 为 $9.109\ 3897 \times 10^{-31}$ kg. 因此, 国际上规定一种专用的质量单位——原子质量单位(用符号 u 来表示)来度量它们, 1 个原子质量单位等于 1 个碳原子(自然界中含量最丰富的 $^{12}_6\text{C}$)质量的 1/12, 即

$$1\text{u} = 1.660\ 5402 \times 10^{-27} \text{kg}$$

由表 18-1 可知,原子的质量以“原子质量单位”量度时,都接近于某一整数,这个整数称为此元素原子核的质量数(mass number),用 A 表示,质量数实际上就是原子核内质子和中子的总数.

表 18-1 一些基础粒子和原子的质量

名称	粒子所属原子核符号	粒子原子质量/u
电子	e	0.000 549
质子	p	1.007 276
中子	n	1.008 665
α 粒子	α	4.001 506
氢原子	${}^1_1\text{H}$	1.007 825
氘	${}^2_1\text{H}$	2.014 102
氚	${}^3_1\text{H}$	3.016 049
碳原子	${}^{12}_6\text{C}$	12.000 000
氦原子	${}^4_2\text{He}$	4.002 603
氧原子	${}^{16}_8\text{O}$	15.994 915

原子核带正电荷,它的电量 q 等于电子电量的绝对值 e 的整数倍,即 $q=Ze$, Z 为整数,称为此元素原子核的电荷数(charge number),也就是该元素的原子序数(atomic number). 于是原子核内中子数 $N=A-Z$,如果用 X 表示某种元素的化学符号,则可以用 ${}_Z^AX$ 表示该原子核的符号.

如果把原子核看作球体,核的半径可由核对 α 粒子、质子、电子等的散射实验测定,根据实验资料,可得原子核半径 R 的经验公式

$$R = r_0 A^{\frac{1}{3}} \quad (18-1)$$

式中 A 是原子核的质量数; r_0 是比例常数,其值约等于 $1.20 \times 10^{-15} \text{ m}$. 由于原子核的体积 $V = \frac{4}{3}\pi R^3$,所以原子核的平均密度为

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

设每个核子的质量近似为 1u ,则 $M=A\text{u}$,所以

$$\rho = \frac{3\text{u}}{4\pi r_0^3} \quad (18-2)$$

由(18-2)式可知,各种原子核的密度是相同的,用上式计算原子核的密度大约为 $2 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,铁的密度为 $9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,原子核的密度是铁的 10^{13} 倍,可见原子核是物质紧密集中之处.

二、放射性同位素和核素

早在 1896 年,贝克勒尔(H. Becquerel)在研究荧光矿物质时,发现有些原子能够自发地放出某种射线.所有原子序数大于 83 的天然存在的元素都具有放射性,少数天然放射性同位素的原子序数小于 83,后来又发现可以用人工的方法产生自然界原本不存在的放射性同位素.

原子序数 Z 、中子数 N 、质量数 A 都相同的一类原子称为某种核素(nuclide).利用质谱仪对各种元素进行分析,发现同一种元素的原子核内含有的核子不尽相同,更确切地说,它们的质子数相同,但中子数不同.例如氢就有 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ 三种,它们的核中均有一个质子,但中子数却分别为 0、1 和 2,因此它们的质量数不同,分别叫做氢(氕)、重氢(氘)和超重氢(氚).然而,它们在化学周期表中占据着同一位置,具有相同的化学性质,因而称它们为氢的同位素.事实上各种元素都有各自的同位素,如氦的同位素有 ${}^3_2\text{He}$ 、 ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^5_2\text{He}$,碳的同位素有 ${}^{10}_6\text{C}$ 、 ${}^{11}_6\text{C}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 $\cdots$ 、 ${}^{15}_6\text{C}$.因而通常把一些电荷数 Z 相同而质量数 A 不同的元素的原子称为该元素的同位素(isotopes).其中核结构不稳定的,能自发地放出射线的同位素,称为放射性同位素(radioactive isotopes).

在天然的或人工制造的同一元素中,用下列 3 个数来区分原子核:①原子序数 Z ;②核内的中子数 N ;③质量数 A .如上所述,把原子序数 Z 相同而质量数 A 不同的一类核素称为同位素.然而,原子序数 Z 和质量数 A 都相同的原子核也可能处于不同的能量状态,习惯上把那些处于激发态、寿命又较长的核素称之为同质异能素(isomer),如 ${}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ 和 ${}^{99}_{43}\text{Tc}$, ${}^{210\text{m}}_{83}\text{Bi}$ 和 ${}^{210}_{83}\text{Bi}$,左上角带 m 的表示处于激发态的原子核,原子序数 Z 不同但质量数 A 相同的核素,称为同量异位数(isobar),如 ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ 和 ${}^{40}_{20}\text{Ca}$.

统计分析表明,中子数和质子数基本相同的原子核都是稳定核素.中子数过多或过少的原子核都不是稳定的.当核子数大于 209 时,就不能组成稳定的核,这种原子核称为放射性核素,能放射出特定的射线,衰变为质量数较低的稳定核.

三、原子核的结合能

原子核是由核子紧密结合在一起组成的, ${}^2_1\text{H}$ 核由 1 个中子和 1 个质子组成,由表 18.1 可知它们的质量和为 $1.008665\text{u}+1.007276\text{u}=2.015941\text{u}$.但实际测量表明,1 个 ${}^2_1\text{H}$ 核(不是 ${}^2_1\text{H}$ 原子)质量为 2.013553u ,两者相差为

$$\Delta m = 2.015941\text{u} - 2.013553\text{u} = 0.002388\text{u}$$

根据爱因斯坦的质能关系式 $E=mc^2$,结合上式就有

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

上式的意义:质量减少等效于原子核结合时有能量放出.按照功能原理,若要将原子核拆成单个的核子,就要对它做功,就要从外界提供能量;反之如果将这些核子组成原子核,则一定要放出能量.处于自由状态的单个核子结合成原子核时放出的能量称为原子核的结合能(binding energy),原子核的质量与组成它的所有核子的质量之差 Δm 称为质量亏损(mass defect).

实验给出,1 个中子和 1 个质子结合成 ${}^2_1\text{H}$ 核时,将释放能量 $\Delta E=2.225\text{MeV}$ 的光子,由

质能关系可得与此能量相联系的质量为

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{2.225 \times 10^6 \times 1.602 \times 10^{-19}}{(2.9979 \times 10^8)^2} = 3.9665 \times 10^{-30} \text{ kg} = 0.002389 \text{ u}$$

恰好等于质量亏损。也就是说,形成 ${}^2_1\text{H}$ 核时释放出的能量 ΔE 恰好等于 ${}^2_1\text{H}$ 核分解成自由质子和中子所需要的能量 ΔE 。

原子核由核子组成,不仅是1个质子与1个中子结合成氘核时释放能量,质子和中子结合成其他原子核时也要释放能量,任一个原子核 ${}_Z^AX$ 的结合能 ΔE 定义为

$$\Delta E = (Zm_p + Nm_n - m_A)c^2$$

式中 Z 、 N 分别表示质子数和中子数, m_p 、 m_n 、 m_A 分别表示质子、中子和原子核的质量,等式右端括号内的量就是 Z 个质子和 N 个中子结合成的 ${}_Z^AX$ 核的质量亏损 Δm ;此质量亏损以光子的形式释放而离开原子核。

如果把原子核的结合能除此核内的总核子数 A ,就得到每个核子在核中的平均结合能,以 $\bar{E}$ 表示,即

$$\bar{E} = \frac{\Delta E}{A} = \frac{\Delta mc^2}{A}$$

$\bar{E}$ 越大,核子间结合的越紧密, $\bar{E}$ 的大小可以看作是对某个核稳定性的度量。图18-1是平均结合能曲线,由图可见,较轻的核与较重的核平均结合能还出现周期性起伏,其最大值的地方相应为 ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^9_4\text{Be}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{16}_8\text{O}$ 等核,中等质量的核(A 在40~120之间), $\bar{E}$ 较大,显示了核力具有饱和性。表18-2给出了一些核素的原子质量及平均结合能。

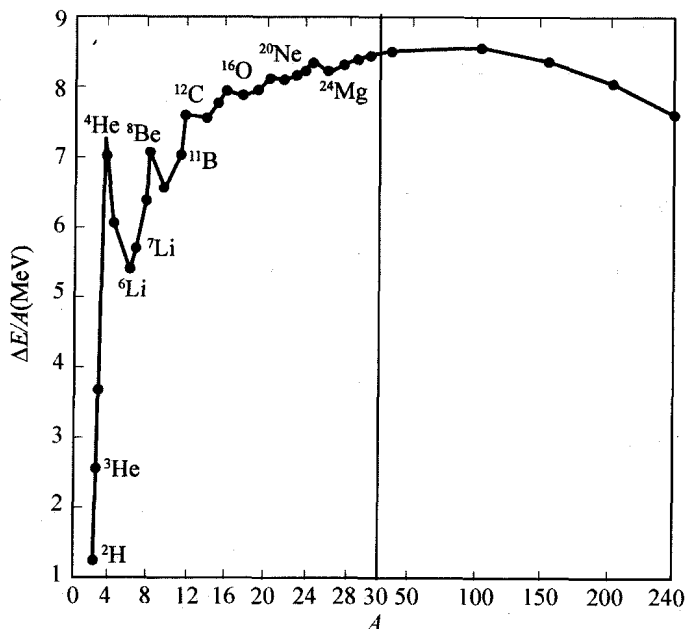


图 18-1 原子核平均结合能曲线

表 18-2 一些核素的原子质量及平均结合能

核素	含量/%	原子质量/u	平均结合能/MeV	核素	含量/%	原子质量/u	平均结合能/MeV
^1H	99.985	1.007 82503	—	^{84}Sr	0.56	83.913 429	8.677 5
^2H	0.009~0.023	2.014 102	1.112 3	^{86}Sr	9.8	85.909 273	8.08 4
^3H	1.38×10^{-4} (大气)	3.016 029	2.572 7	^{87}Sr	7.0	86.908 890	8.705 2
^4He	99.99986	4.002 603	7.072 9	^{88}Sr	82.6	87.905 625	8.732 6
^6Li	7.5	6.015 123	5.332 3	^{89}Y	100	88.905 856	8.713 9
^7Li	92.5	7.016 004	5.606 4	^{90}Zr	51.5	89.904 708	8.710 0
^9Be	100	9.012 182	6.462 8	^{91}Zr	17.1	90.005 644	8.693 4
^{10}B	19.3	10.012 938	6.475 1	^{92}Zr	17.1	91.905 039	8.692 7
^{11}B	80.2	11.009 305	6.344 0	^{94}Zr	17.4	93.906 319	8.666 8
^{12}C	98.89	12.000 000	7.680 2	^{96}Zr	2.8	95.908 272	8.635 5
^{13}C	1.11	13.003 355	7.469 9	^{93}Nb	100	92.906 378	8.664 2
^{14}N	99.63	14.003 074	7.475 7	^{92}Mo	14.8	91.906 818	8.657 8
^{15}N	0.366	15.000 109	7.699 5	^{94}Mo	9.3	93.905 086	8.662 4
^{16}O	99.76	15.994 915	7.976 3	^{96}Mo	15.9	94.905 838	8.648 8
^{17}O	0.038	16.999 131	7.750 5	^{96}Mo	16.7	95.904 676	8.654 1
^{18}O	0.189~0.209	17.999 159	7.767 2	^{97}Mo	9.6	96.906 018	8.635 2
^{19}F	100	18.998 403	7.778 8	^{98}Mo	24.1	97.905 405	8.635 3
^{20}Ne	90.51	19.992 449	8.032 4	^{100}Mo	9.6	99.907 473	8.604 7
^{21}Ne	0.27	20.993 845	7.971 7	^{203}Te	29.5	202.972 336	7.886 2
^{22}Ne	9.22	21.991 384	8.080 6	^{205}Tl	70.5	204.974 410	7.878 6
^{23}Ne	100	22.989 770	8.111 6	^{204}Pb	1.42	203.973 036	7.880 1
^{24}Mg	78.99	23.985 045	8.260 7	^{206}Pb	24.1	205.974 455	7.875 5
^{25}Mg	10.00	24.985 839	7.806 1	^{207}Pb	22.1	206.975 885	7.870 0
^{26}Mg	11.01	25.982 595	7.942 7	^{208}Pb	52.3	207.976 641	7.867 6
^{40}Ar	99.6	39.962 395	8.595 2	^{209}Bi	100	208.980 389	7.838 6

例 18-1 试计算氦原子核的质量亏损、结合能和平均结合能。

解 氦核的 $A=4, Z=2, m_A=4.002603\text{u}$, 则 $\Delta E=[Zm_p+(A-Z)m_n-m_A]c^2$, 因为 1 个原子质量单位的能量为

$$1\text{u}\cdot c^2=1.660566\times 10^{-27}\text{kg}\times (2.99792\times 10^8\text{m/s})^2=1.49224\times 10^{-10}\text{J}=931.441\text{MeV}$$

所以 $\Delta m=(2\times 1.007825+2\times 1.008665-4.002603)\text{u}=0.030377\text{u}$

$$\Delta E=(2\times 1.007825+2\times 1.008665-4.002603)\times 931\text{MeV}=28.28\text{MeV}$$

$$\bar{E}=\frac{\Delta E}{A}=\frac{28.28}{4}=7.07\text{MeV}$$

四、核力

从结合能计算可知,由质子和中子组成的原子核的能量比它们各自独立时的总能量要低,这就从能量的观点上说明原子核是一个较稳定的系统.既然原子核具有稳定性,核子之间应该存在引力的作用.但原子核内部质子之间存有静电斥力,中子又不带电,显然使质子、中子聚合成原子核并维护原子核的稳定性的力不可能是电磁力,核子之间的聚合力也不是万有引力,因为核子间万有引力非常小(比电磁力小 10^{39} 倍),不足以克服静电斥力.显然要使原子核成为稳定系统,必须在核子之间存在着一种更强的相互吸引力,这种力称为核力(nuclear force).

理论和实验证明,核力有如下主要性质:

(1)核力是短程力,即核子之间的距离很短时,才有核力的作用,核力的作用距离为 10^{-15} m 的数量级,当距离增加,核力就急剧减小为零.

(2)核力是目前已知的最强的力.

(3)核力与核电荷数及核子的电性无关.实验表明,不管核子带电与否,在原子核中质子与质子之间,中子与中子之间,质子和中子之间都具有大致相同的核力.

(4)核力只有饱和的性质.每个核子只有它最邻近的几个核子有核力的作用,而不是与核内所有的核子都有此种作用.

§ 18.2 原子核的放射性衰变

核素按照原子核的稳定程度分为稳定性核素(stable nuclide)和放射性核素(radioactive nuclide).稳定性核素在没有外来因素(如高能粒子的轰击)时,不发生核内结构或能级的变化,或者说虽有可能发生变化,但概率极小,半衰期可达 10 亿年.放射性核素也称放射性同位素(radioisotope),其原子核是不稳定的核素,容易发生结构或能级的变化,能自发地放出某种射线而转变为别的核素.放射性核素又分为天然放射性核素和人工放射性核素(简称人造核素),人造核素主要由反应堆和加速器制备.放射性核素发出某种射线而转变为另一种核素的现象称为原子核的衰变(nuclear decay).

根据放射性核素放出射线的种类,核衰变可分为 α 衰变、 β 衰变(包括 β^- 衰变、 β^+ 衰变、电子俘获)和 γ 衰变.在所有的衰变过程中都严格遵守质量守恒、能量守恒、动量守恒、核子数守恒和电荷守恒等基本定律.

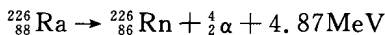
一、 α 衰变

放射性核素的原子核放射出 α 射线而变为另一种核素的现象称为 α 衰变(alpha decay). α

粒子就是高速运动的氦原子核(${}^4_2\text{He}$),它是由 2 个质子和 2 个中子组成. α 衰变过程可用下式表示

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\alpha + Q \quad (18-5)$$

式中 X 表示衰变前的核(母核), Y 表示衰变后的核(子核), Q 表示衰变能(母核衰变成子核时放出的能量),衰变能被子核和 α 粒子共同分得. 例如:



此 α 衰变过程中衰变能主要反映在 α 粒子的动能,子核的动能很小,子核的原子序数比母核少 2,相当于在元素周期表上向前移动两位,这条规律称为衰变的位移定则. α 粒子以很高的速度从核中飞出,受物质所阻而失去动能,然后捕捉 2 个电子变成一个中性氦原子. 实验表明,在发生 α 衰变的核素中,只有少数几种核素放射出单能的 α 粒子. 而大多数核放出几种中不同能量的 α 粒子,使子核处于激发态或基态,因此 α 粒子的能谱是不连续的线状谱,而且常伴有 γ 射线.

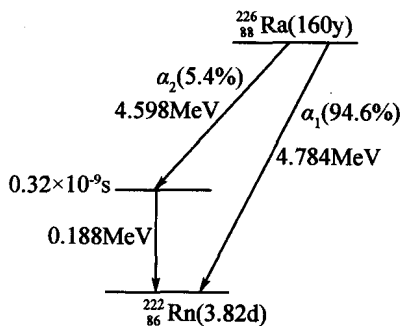


图 18-2 ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 的衰变图

核衰变过程常用衰变能级图表示. 图 18-2 表示镭核(${}_{88}^{226}\text{Ra}$) α 衰变的 2 种方式.

二、 β 衰变和电子俘获

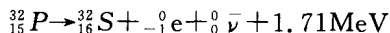
β 衰变(β decay)包括 β^+ 衰变、 β^- 衰变和电子俘获 3 种类型.

1. β^- 衰变

放射性核素的原子核放射出 β^- 射线变为另一种核素的现象称为 β^- 衰变,形成 β^- 射线的粒子是高速电子流, β^- 粒子被物质阻止后就成为自由电子. β^- 衰变可用下式表示为

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + \beta^- + {}^0_0\bar{\nu} + Q$$

例如:

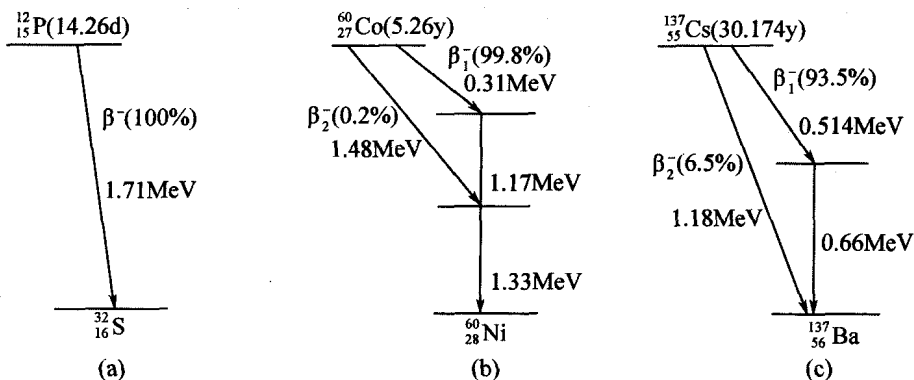


β^- 射线可以看成是母核中的一个中子(${}_0^1\text{n}$) 转变为一个质子(${}_1^1\text{p}$) 并发射出的一个电子(${}_{-1}^0\text{e}$) 和反中微子(${}^0_0\bar{\nu}$) 来完成,可用下式表示为

$${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p} + {}_{-1}^0\text{e} + {}^0_0\bar{\nu}$$

反中微子是不带电的中性微粒,它的静止质量可视为零($<$ 电子质量的 0.05%),是中微子(${}^0_0\nu$)的反粒子.

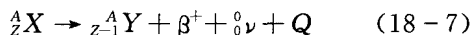
发生 β^- 衰变后,子核与母核质量相同,子核的原子序数增加 1,在周期表后移 1 位,这就是 β^- 衰变的位移定则,图 18-3 为 3 种放射性核素的 β^- 衰变,可见发生 β^- 衰变的核素,有的只放射 β^- 粒子,有的放射 β^- 粒子的同时,还伴随有 γ 粒子,有的要放射 2 种或多种能量的 β^- 粒子.

图 18-3 β^- 衰变图

2. β^+ 衰变

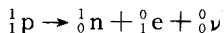
放射性核素的原子核放射出 β^+ (正电子) 射线而变成原子序数减少 1 的核素的过程称 β^+ 衰变。 β^+ 粒子是带 1 个单位正电荷且静止质量与电子相等的粒子, 通常用 β^+ 或 0_1e 来表示。这种衰变只有人工放射性核素才能发生, 产生 β^+ 衰变通常是因为核内质子数偏多, 中子数偏少的原因。

β^+ 衰变可用下式表示为



例如: ${}^{13}_7N \rightarrow {}^{13}_6C + \beta^+ + {}^0_0\nu + 1.24\text{MeV}$

β^+ 射线可以看成是母核中的一个质子 (${}_1^1p$) 转变为一个中子 (${}_0^1n$), 同时放射出一个正电子 (${}_1^0e$) 和中微子 (${}_0^0\nu$) 的过程, 即



β^+ 衰变如图 18-4 所示。

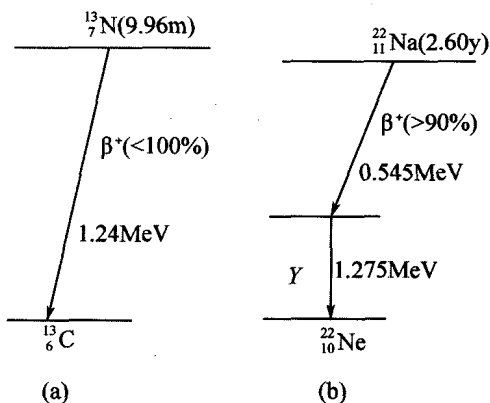
(18-7) 式中衰变能 Q 按照母核与子核的质能关系换算, 可得

$$Q = [M_Z - (M_{Z-1} + m_e + m_p)]c^2 = (M_Z - M_{Z-1} - 2m)c^2$$

式中 m 是电子的静止质量。由于是自发表变, 所以 $Q > 0$, 因此

$$M_Z - M_{Z-1} > 2m$$

由此式可知, 发生 β^+ 衰变的条件是母核与子核的原子质量差必须大于 2 个电子的静止质量。 β^+ 粒子是不稳定的, 只能存在短暂时间, 当它被物质阻止后而失去动能, 并与物质中的电子相结合而转化成电磁辐射, 产生一对沿相反方向飞行的 γ 光子, 这一过程称正负电子对湮没。每个光子的能量为 0.511MeV , 正好与电子的静止质量相对应。实验中通过探测这种能量的 γ 光子来判断 β^+ 衰变的发生和 β^+ 粒子的存在。

图 18-4 β^+ 衰变图

发生 β^+ 衰变时均有 3 种生成物,即子核、 β^+ 粒子和正反中微子,所以衰变能 Q 必然转换为 3 个生成物的动能.由于核的质量远大于 β^+ 粒子以及正反中微子,所以子核带走的能量很少,故衰变能 Q 被 β^+ 粒子和正反中微子任意分配,正是由于 β^+ 衰变时伴有正反中微子的产生.所以从某一种核素发出 β^+ 粒子,其能量不像 α 衰变或 γ 衰变那样具有一种或几种特定数值的能量,而是具有连续分布的能量,且有一个最大值 E_m ,如图 18-5 所示.

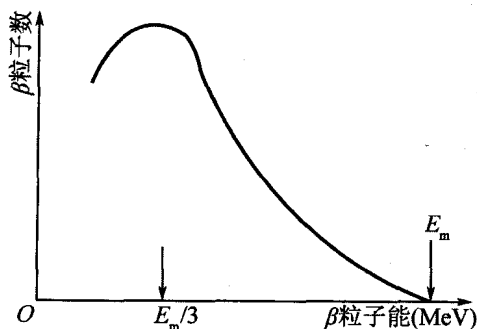
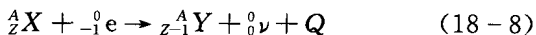


图 18-5 β^+ 射线的能谱

当中微子获得的能量(E_ν)较小,则 β^+ 粒子的能量 E_β 就大,当 $E_\nu=0$ 时,则 E_β 就大于 Q (即图中 E_m).可见 β^+ 粒子的能量可以取 $0 \sim E_m$ 间的任一数值.必须指出,一般手册中标示的 β^+ 粒子的能量都是 E_m ,但在实际的剂量计算中,均采用发射粒子中占比例最大的那个能量值,即多粒子的平均能量 $\bar{E}$,经计算 $\bar{E} \approx \frac{1}{3} E_m$.

3. 电子俘获

某些放射性核素,可以俘获它的一个核外电子,使核内一个质子转变为一个中子,同时又放出一个中微子而变为原子序数减 1 的核素,这一过程称为电子俘获(electron capture),常用符号 EC 表示.如果母核俘获一个 K 层电子称 K 俘获,同理有 L 俘获和 M 俘获.因 K 层最靠近原子核,故 K 俘获的概率最大, $^{55}_{26}\text{Fe}$ 的电子俘获衰变图如图 18-6 所示,电子俘获过程可表示为



例如: ${}^{55}_{26}\text{Fe} + {}_{-1}^0e \rightarrow {}^{55}_{25}\text{Mn} + {}_0^0\nu + 0.231\text{MeV}$

在电子俘获过程中,可能出现外层轨道电子填补内层轨道空位而产生标识 X 射线或俄歇电子(Auger electron).当高能级的电子跃迁至低能级,其多余的能量直接转移给同一能级的另一个电子,而不辐射 X 射线,接受这份能量的电子脱离其轨道成为自由电子,这种电子称为俄歇电子.在实际工作中,常通过观测 X 射线或俄歇电子来确定电子俘获是否发生.顺便指出,放射性核素发生 β 衰变或电子俘获后,母核和子核的质量数未发生变化,只是电荷数改

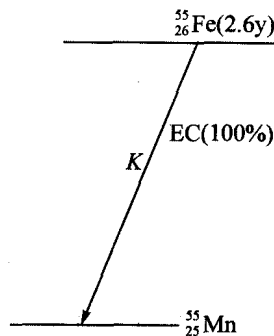


图 18-6 $^{55}_{26}\text{Fe}$ 的电子俘获衰变图

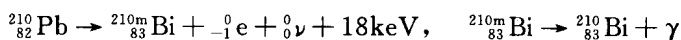
变了,因此,母核与子核属于同量异位素.

三、 γ 衰变和内转换

原子核的能量也是量子化的,常用能级来表示,原子核处于能量最低的状态,称为基态.核衰变所产生的子核可能处于较高的激发态,处于激发态的原子核向较低能态或基态跃迁时,把多余的能量以 γ 光子的形式辐射出来,这种过程称为 γ 跃迁,也称 γ 衰变.因此, γ 衰变往往是伴随着 α 衰变和 β 衰变而出现的,原子核经 γ 跃迁后,子核的质量数和原子序数不变,只是能级发生了改变,故 γ 跃迁又称同质异能跃迁. γ 衰变可用下式表示为



图 18-7 为 ${}^{210m}_{83}\text{Bi}$ 的衰变图,其衰变式为



在一次 γ 衰变中, γ 射线的能量是单一的,其大小等于两衰变的能级之差,多数 α 、 β 衰变产生激发态子核,随后就有 γ 衰变.有的 β 衰变伴有 2 次 γ 跃迁,如图 18-3(b) 所示,放出 γ 射线的能量也有 2 种.

处于激发态的原子核向低能态跃迁时,还可以把能量直接传递给电子,使它脱离原子核的束缚而成为自由电子,这种现象称为内转换(internal conversion),放出的电子称为内转换电子,参与内转换的主要是 K 层电子,偶然也有 L 层或其他层电子,内转换发生后,在原子的 K 层或 L 层会留下空位,因此还会有标识 X 射线或俄歇电子出现,这与电子俘获情况相同.

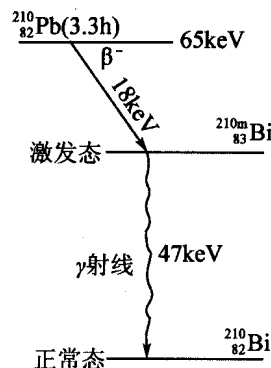


图 18-7 ${}^{210m}_{83}\text{Bi}$ 的衰变图

§ 18.3 核衰变规律

原子核的衰变过程是原子核由不稳定状态趋于稳定状态的过程,任何一种放射性同位素中所有的原子核都能够发生衰变,且衰变是自发进行的,但它们有先有后,相互独立,且与外界温度、压力、电磁场等条件无关,对于一个给定的核,无法预知它在何时发生衰变,但是对于大量原子核组成的放射源来说,衰变是具有统计性规律的,下面我们来讨论这种规律.

一、放射性衰变规律

设某种放射性核素在 t 至 $t+dt$ 的时间内衰变的原子核数为 dN ,虽然我们不知道在该种核素中是哪一部分衰变,但很显然 dN 是与时间间隔 dt 及 t 时刻原子核数成正比的,即

$$dN = -\lambda N dt \quad (18-10)$$

式中负号表示原子核数随时间减少,比例系数 λ 又称为衰变常数(decay constant),其数值与