

陆继根 主编

辐射 环境保护教程

FUSHEHUANJINGBAOHUJIAOCHENG

江苏人民出版社

辐射

环境保护教程

F U S H E H U A N J I N G B A O H U J I A O C H E N G

主 编 陆继根
副主编 赵福祥
编 写 赵福祥 张起虹 王凤英
张伯明 陆继根 侯璧君
刘 明

江苏工业学院图书馆
藏书章

江苏人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

辐射环境保护教程/陆继根等编. —南京:江苏人民出版社, 2006. 4

ISBN 7—214—04318—1

I. 辐... II. 陆... III. 辐射防护—技术培训—综合
IV. TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 025361 号

书 名 辐射环境保护教程
编 著 者 陆继根等
责任编辑 唐爱平 王小文
出版发行 江苏人民出版社(南京中央路 165 号 邮编:210009)
网 址 <http://www.book-wind.com>
集团地址 凤凰出版传媒集团(南京中央路 165 号 邮编:210009)
集团网址 凤凰出版传媒网 <http://www.ppm.cn>
经 销 江苏省新华发行集团有限公司
照 排 江苏奥能制版有限公司
印 刷 者 江苏苏中印刷有限公司
开 本 787×1092 毫米 1/16
印 张 28.25
字 数 470 千字
版 次 2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月第 1 次印刷
标准书号 ISBN 7—214—04318—1/Z·134
定 价 58.00 元
(江苏人民出版社图书凡印装错误可向本社调换)

前 言

随着我国科学技术和社会经济的高速发展,核技术在工业、农业、医疗、科研等领域得到了越来越广泛的利用,核电站为社会经济和人民生活提供了更加经济与清洁的能源,铀(钍)矿和伴生放射性矿得到开发利用,电磁辐射技术也已深入到国民经济的各个部门和人们的日常生活,辐射技术给人们带来了前所未有的方便和快捷。但是,核与辐射技术的应用在带给人类巨大经济效益的同时,也给社会安全带来了潜在的危險,放射性和电磁辐射环境污染亦日显突出,甚至危及人类身体健康和生命。特别是近年来放射源丢失失控和辐照事故时有发生,放射性与电磁辐射污染纠纷频发。

《中华人民共和国放射性污染防治法》和《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》颁布实施后,环境保护部门对放射性污染防治工作实施统一监督管理。核设施、铀(钍)矿和伴生放射性矿开发利用、核技术利用及电磁辐射污染防治都迫切要求我们加强有关辐射方面知识的普及和教育工作。为此,我们组织有关专家编写了《辐射环境保护教程》这本书。

本书共分七章,第一章“电离辐射基础知识”,第二章“电离辐射防护”,第三章“核电站”,第四章“铀(钍)矿与伴生放射性矿”,第五章“核技术利用”,第六章“电离辐射监测”,第七章“电磁辐射污染及防护”。为方便从事核与辐射专业人员使用,附录收列了我国核与辐射方面最新的法律法规及有关名录。本书在保证知识系统完整性的同时,文字

表述力求通俗易懂。此书可供辐射环境保护、辐射安全防护以及相关专业科技和管理人员使用。

本书由江苏省辐射环境监测管理站陆继根主编。第一二章由赵福祥编写,第三章由陆继根、张伯明编写,第四章由王凤英编写,第五章由侯璧君编写,第六章由陆继根、刘明编写,第七章由张起虹编写,全书由赵福祥统稿,陆继根定稿。

在《辐射环境保护教程》编写过程中,自始至终得到了江苏省环保厅领导的关心和支持。南京大学方杰教授、南京邮电大学曹伟教授、中国辐射防护研究院沙连茂研究员及众多专家都给予了热情的指导,提出了宝贵的意见。吴玉丽同志进行了校核等工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于《辐射环境保护教程》编写时间仓促,编者业务水平有限,编写过程中难免有不当之处,恳望大家批评指正。

《辐射环境保护教程》编写组 2006年3月

目 录

第一章 电离辐射基础知识

第一节 原子结构和核衰变	1
一、原子的壳层结构	2
二、原子核的组成及其稳定性	4
三、原子核的大小	7
四、原子核的结合能	8
五、核衰变	11
六、原子核的衰变规律	13
七、核反应	26
第二节 电离辐射源	28
一、天然辐射源	28
二、人工辐射源	29
三、放射性同位素的生产	37
第三节 电离辐射与物质的相互作用	39
一、常用的核辐射类型及其特征	39
二、射线与物质相互作用	41

第二章 电离辐射防护

第一节 常用辐射量与单位	51
一、照射量	51
二、比释动能	53
三、吸收剂量	54
四、当量剂量	56
五、有效剂量	57
六、集体剂量	57
七、集体有效剂量	58
第二节 电离辐射对人体的影响	58
一、辐射对人体健康的影响	58
二、影响辐射生物学作用的因素	60
三、剂量与效应的关系	62
四、短期大剂量外照射引起的辐射损伤	63
五、长期小剂量照射对人体健康的影响	64

第三节 辐射防护	65
一、辐射防护的基本原则	66
二、辐射防护的基本方法	67
三、剂量限值要求	89
第三章 核电站	
第一节 核反应堆	93
一、核反应堆的分类	93
二、压水堆的基本构造	95
第二节 核电站安全	97
一、核电站的安全设计	98
二、核电站的安全运行	100
三、国家核安全法规	103
四、核电站正常运行时对环境的影响	104
第三节 核电站事故应急	106
一、历史上的核事故	106
二、核事件分级和核应急分级	113
三、应急干预的基本原则	115
第四章 铀(钍)矿与伴生放射性矿	
第一节 铀(钍)矿与伴生放射性矿资源及其应用	118
一、铀(钍)矿资源及其应用	118
二、伴生放射性矿资源及其应用	122
第二节 开发利用中的放射性污染	126
一、铀(钍)矿开发利用放射性污染	126
二、伴生放射性矿开发利用放射性污染	130
三、废石场及尾矿的放射性污染	141
第三节 开发利用中的辐射防护	144
一、辐射防护的一般要求	144
二、铀(钍)矿开发利用的辐射防护	147
三、稀土伴生矿物开发利用的辐射防护	151
四、废石场及尾矿库的辐射防护	152
五、事故应急监测和管理	157
第五章 核技术利用	
第一节 工业利用	160

一、工业辐照加工	161
二、工业探伤	181
三、含密封(放射)源仪表的应用	194
第二节 医学利用	214
一、放射治疗	216
二、核医学	230
三、医用 X 射线诊断	243
第三节 辐射事故应急	249
一、放射源和射线装置分类	249
二、辐射事故分级	250
三、辐射事故处理	252
第六章 电离辐射监测	
第一节 辐射探测器原理	260
一、气体电离探测器	260
二、闪烁探测器	261
三、半导体探测器	262
四、热释光探测器	262
第二节 辐射监测仪器	263
一、现场常用的辐射监测仪器	263
二、实验室常用的辐射测量仪器	268
三、选择监测仪器的原则	269
第三节 辐射监测方法	270
一、现场测量	273
二、样品采集与管理	278
三、实验室测量分析	283
四、数据处理与监测结果报告	284
五、辐射监测的质量保证	290
第四节 辐射防护监测	297
一、个人剂量监测	297
二、工作场所监测	299
第五节 辐射环境监测	300
一、辐射环境质量监测	302
二、辐射环境污染源监测	303

第七章 电磁辐射污染及防护

第一节 电磁辐射的基本概念	316
一、名词解释	316
二、电磁波频谱	320
第二节 电磁辐射污染源	321
一、电磁辐射来源	321
二、电磁辐射污染源种类和特点	322
三、我国环境电磁辐射污染现状	333
第三节 电磁辐射污染危害与防护	336
一、电磁辐射污染危害	336
二、电磁辐射安全防护	341
第四节 电磁辐射监测	345
一、电磁辐射测量基础及测量要求	345
二、电磁辐射测量	348
三、常用电磁辐射标准	352
四、电磁辐射监测常用仪器	361

附录:相关法律法规

1. 中华人民共和国放射性污染防治法	365
2. 放射性同位素与射线装置安全和防护条例	375
3. 放射性同位素与射线装置安全许可管理办法	388
4. 关于发布放射源分类办法的公告	399
5. 放射源编码规则	403
6. 城市放射性废物管理办法	411
7. 电磁辐射环境保护管理办法	417
8. 相关法律法规摘要	424
9. 其他文件标准名录	431

第一章 电离辐射基础知识

19 世纪末,在 1895、1896 和 1897 年,相继发现了 X 射线、放射性和电子。这三大发现揭开了近代物理的序幕,物质结构的研究开始进入微观领域。其中,1896 年,法国科学家贝可勒尔(A. H. Becquerel)发现了天然放射性现象,人类第一次观察到核变化的情况,通常人们把这一重大发现看成是核物理的开端,到 20 世纪 50 年代就逐步形成了研究物质结构的三个分支学科,即原子物理、原子核物理和粒子物理。

随着核能和核技术应用的发展,它们在给人类带来巨大收益的同时,也给人类的生存和发展带来一定的负面的影响,放射性物质及由此产生的各种辐射也成为人们日益关注的一个问题。为趋利避害,使核能和核技术更好的为人类服务,熟悉和掌握辐射安全及防护基本知识就显得十分重要。本章主要介绍原子结构和核衰变、电离辐射源、电离辐射与物质的相互作用等基础知识,为开展辐射防护工作奠定必要的基础。

第一节 原子结构和核衰变

世界万物是由原子、分子构成,每一种原子对应一种化学元素。例如,氢原子对应氢元素,氧原子对应氧元素。到目前,包括人工制造的不稳定元素,人们已经知道了一百多种元素了。

1911 年卢瑟福(E. Rutherford)根据 α 粒子的散射实验提出了原子的核式模型的假设,即原子是由原子核和核外电子所组成。从此以后,原子就被分成两部分来处理:核外电子的运动构成了原子物理学的主要内容,而原子核则成了另一门学科——原子核物理学的主要研究对象。原子和原子核是物质结构的两个层次,但也是互相关联又泾渭分明的两个层次。

电子是由英国科学家汤姆逊(J. J. Thomson)于 1897 年发现的,这也是人类发现的第一个微观粒子。电子带负电荷,电子电荷的值为

$$e = 1.602\,177\,33 \times 10^{-19} \text{ C}$$

且电荷是量子化的,即任何电荷只能是 e 的整数倍。电子的质量为

$$m_e = 9.109\,389\,7 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

原子核带正电荷,原子核的电荷集中了原子的全部正电荷。

而原子的大小是由核外运动的电子所占的空间范围来表征的,原子可以设想为电子在以原子核为中心的、距核非常远的若干轨道上运行。原子的大小即半径约为 10^{-8} cm 的量级。以铝原子为例,其半径约为 $1.6 \times 10^{-8} \text{ cm}$,其密度 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 。

原子核的质量远远超过核外电子的总质量,因此,原子的质量中心和原子核的质量中心非常接近。原子核的线度只有几十飞米 ($\text{fm} = 10^{-15} \text{ m} = 10^{-13} \text{ cm}$),而密度高达 $10^8 \text{ t} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。原子核的性质必然对原子的性质产生明显的影响,原子核的许多特性正是通过对原子或分子现象的观察来确定的。但也有许多性质仅仅单独取决于原子或原子核,例如,物质的许多化学及物理性质、光谱特性基本上只与核外电子有关;而放射现象则主要归因于原子核。

对于原子,我们这里仅讨论其原子的壳层结构。对原子核将讨论其一般基本性质,即原子核作为整体所具有的静态性质。本节将讨论原子核的组成、电荷、质量、半径、稳定性以及核衰变基本规律和核反应等,对原子核自旋、磁矩、宇称和统计性质等较深入的问题不在此处展开讨论。如在今后的工作中,遇到这些问题,一般的核物理的书籍中均有描述。

一、原子的壳层结构

根据原子的核式模型,原子由原子核和核外电子组成。对于原子核的组成将在下面讨论。原子核核外电子又常称为轨道电子,把电子看成沿一定的轨道运动,不过是一种近似的模型,但它能很好的解释元素周期及一系列光谱的特性。实际上,电子在核外呈一定的概率分布,在一定的“轨道”上的概率最大而已。

原子的轨道电子离核的距离是不能取任意值的,这也是微观世界的量子特性的一种表现。电子轨道按照一定的规律形成彼此分离的壳层。

最靠近核的一个壳层称为 K 壳层,在它外面依次为 L 壳层, M 壳层, N 壳层, O 壳层等等,依次类推。通常用量子数 $n (n = 1, 2, 3, \dots)$ 代表壳层,并分别对应 K, L, M, ……壳层。每个壳层最多可容纳 $2n^2$ 个电子,以 K 壳层而言,最多可容纳 2 个电子; L 壳层最多可容纳 8 个电子; M 壳层为 18 个电子,……。除了 K 壳层外的其他壳层又可分成若干的支壳层。支壳层的数目等于 $(2l + 1)$ 个,其中 $l = n - 1$, l 也是描述电子轨道的量子数。这样,对 L 壳层, $l = n - 1 = 1$, 就有三个支壳层; M 壳层、N 壳层就分别有 5 和 7 个支壳层等等。通常用壳层符号及其如下标的罗马数字来表示支壳层。例如,

L_I 表示 L 壳层的第一个支壳层, M_{II} 表示 M 壳层的第二个支壳层, 并分别称为 L_I 壳层和 M_{II} 壳层。

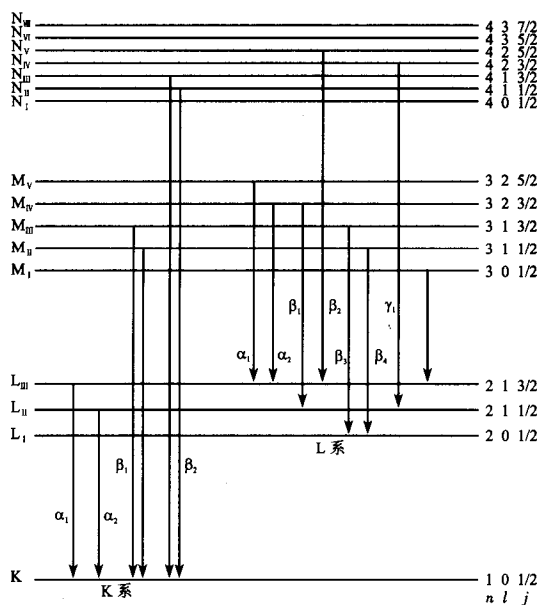


图 1-1 原子能级图和主要的 K 系和 L 系特征 X 射线

处于不同壳层的电子具有不同的位能, 通常用能级图来表示。由于核带正电, 电子带负电, 当电子由无穷远处移动到靠近原子核的位置时是电场力做功, K 壳层的能级最低, 或者说负得最多。在这之上, 依次为 $L_I, L_{II}, L_{III}, M_I, M_{II}, \dots$ 但在外壳层有些的顺序会出现一些例外。

能级的能量大小就等于该壳层电子的结合能, 就是意味假设要使该壳层电子脱离核的束缚成为自由电子所需做的功。结合能是负值, 通常以 keV 为单位, K 壳层电子的结合能的绝对值最大。

图 1-1 是原子能级的一个典型例子, 从图中可以看到相应的 K, L, M, $\dots$ 能级及其支能级。在图的右侧可见用三个量子数 n, l, j 来描述不同的能级。其中 n, l 是与电子轨道运动相关的量子数, $n=1, 2, 3, \dots, l$ 的取值范围为 $l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$ 。而 j 是与电子的自旋运动相关的量子数, j 与 l 的关系是 $j = |l \pm 1/2|$ 。量子数 n, l, j 的不同组合区别不同的支壳层。例如 M 壳层, $n=3, l$ 的取值可以是 0, 1 和 2。在 $l=0$ 时, j 只能为 $1/2$; 在 $l=1$ 时, j 可以是 $1/2$ 和 $3/2$; 在 $l=2$ 时, j 可以是 $3/2$ 和 $5/2$ 。因此, M 壳层共有 5 个支壳层。每个支壳层最多可容纳 $(2j+1)$ 个电子。

在正常状态下, 电子先充满较低的能级, 但当原子受到内在原因或外来因素的作用时, 处在低能级的电子有可能被激发到较高的能级上(称为激发过程); 或电子被电离到原子的壳层之外(称为电离过程)。在这种情况下, 在原来的低能级上会留下一个空位,

此时,更高能级上的电子就跃迁到这个空位,这部分能量主要以电磁辐射的形式释放一个光子。当内壳层电子跃迁(如 K 层出现一个空位。L 层电子跃迁到 K 层),此时光子能量较高,或者说其电磁辐射的频率比较高,而且,不同的元素的原子均有不同、特定的能量,所以,又通常称作特征 X 射线。其特征 X 射线的能量(或相应的波长)满足下面公式

$$E_x = \frac{hc}{\lambda} = E_1 - E_2$$

上式中普朗克常数 $h = 6.626\,075\,5 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; 光速 $c = 2.997\,925 \times 10^{10} \text{ cm/s}$; E_1 , E_2 分别为跃迁前后的两个能级的能量。

特征 X 射线根据其产生的情况可以分为 K 系、L 系、M 系特征 X 射线,每系都含有若干能量不同的 X 射线。K 系特征 X 射线是由 K 壳层之外壳层的电子跃迁到 K 壳层空位时发射的特征 X 射线,主要的射线有 K_{α_1} , K_{α_2} , K_{β_1} , K_{β_2} 等,称为 K 系特征 X 射线。同样还有 L 系、M 系等等。

但需说明,并不是所有较高的能级都可以向较低的能级跃迁,而需满足一定的选择定则,在这里就不展开了。

二、原子核的组成及其稳定性

1896 年贝可勒尔发现了铀的放射现象,这是人类第一次在实验室里观察到原子核现象。他发现用黑纸包得很好的铀盐仍可以使照相底片感光,实验结果说明铀盐可以放射出能透过黑纸的射线。通常人们把这一重大发现看成是核物理学的开端。随后,1898 年居里夫妇(P. & M. Curie)发现放射性元素钋和镭。1903 年,卢瑟福证实了 α 射线是正电荷的氦原子, β 射线是电子。1911 年进而提出原子的核式模型。1932 年查德威克(J. Chadwick)发现中子。

1. 原子核的组成及其表示

在发现中子之前,当时人们知道的“基本”粒子只有两种:电子和质子。因此,把原子核假定是由质子和电子组成的想法就非常自然了,但从其一开始就遇到了不可克服的困难。

在查德威克发现中子之后,海森堡(W. K. Heisenberg)很快就提出原子核由质子和中子所组成的假说。上述困难就不复存在,而且有一系列的实验事实支持了这一假说。

中子和质子的质量相差甚微,它们的质量分别为

$$m_n = 1.008\,664\,92 \text{ u}$$

$$m_p = 1.007\,276\text{u}$$

这里, u 为原子质量单位。1960 年国际上规定把 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 定义为原子质量单位, 用 u 表示

$$\begin{aligned} 1\text{u} &= 1.660\,540\,2 \pm 0.000\,001\,0 \times 10^{-27}\text{ kg} \\ &= 1.660\,540\,2 \pm 0.000\,001\,0 \times 10^{-24}\text{ g} \\ &= 931.494\,013\text{ MeV}/c^2 \end{aligned}$$

中子为中性粒子, 质子为带有单位正电荷的粒子。在提出原子核由中子和质子组成之后, 任何一个原子核都可用符号 ${}_Z^AX_N$ 来表示。右下标 N 表示核内中子数, 左下标 Z 表示质子数或称电荷数, 左上标 A ($A = N + Z$) 为核内的核子数, 又称质量数。核素符号 X 与质子数 Z 具有唯一、确定的关系, 例如, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$ 等等。实际上, 只要简写为 AX , 它已足以代表一个特定的核素, 左下标 Z 往往可以省略。 Z 在原子核中为质子数, 在原子中则为原子序数。只要元素符号 X 相同, 不同质量数的元素在周期表中的位置上相同, 就具有基本相同的化学性质。例如, ${}^{235}\text{U}$ 和 ${}^{238}\text{U}$, 都是铀元素, 两者只相差三个中子, 它们的化学性质及一般物理性质几乎完全相同; 但是, 它们是两个完全不同的核素, 它们的核性质完全不同。

我们先介绍表示原子核的一些常用术语。

(1) 核素(nuclide)

核素是指在其核内具有一定数目的中子和质子以及特定能态的一种原子核或原子。例如 ${}^{208}_{86}\text{Tl}$ 和 ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ 是独立的两种核素, 它们有相同的质量数而原子核内含有不同的质子数; ${}^{90}_{38}\text{Sr}$, ${}^{91}_{39}\text{Y}$ 是原子核内含有不同的质子数和相同的中子数的独立的两种核素; ${}^{60}_{27}\text{Co}$, ${}^{60m}_{27}\text{Co}$ 是独立的两种核素, 它们的原子核内含有相同的质子数和中子数, 而核所处的能态是不同的。

(2) 同位素(isotopes)和同位素丰度

具有相同原子序数但质量数不同的核素称为某元素的同位素。同位是指该同位素的各核素在元素周期表中处于同一个位置, 它们具有基本相同的化学性质。例如, 氢同位素有三种核素: ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$, 分别取名为氢、氘、氚。某些元素, 例如锰、铍、氟、铝等在天然条件下, 只存在一种核素, 称为单一核素而不能说它们只有一种同位素。某元素中各同位素天然含量的原子数百分比称为同位素丰度。例如天然存在的氧的同位素有三种核素: ${}^{16}\text{O}$, ${}^{17}\text{O}$, ${}^{18}\text{O}$ 。它们的同位素丰度分别为 99.756%、0.039% 和 0.205%。

(3) 同质异能素(isomer)

半衰期较长的激发态原子核称为基态原子核的同质异能素或同核异能素。它们的 A 和 Z 均相同, 只是能量状态不同。一般在元素符号的左上角质量数 A 后加上字母 m

核力是短程力,只作用于相邻的核子,正比于 A 。随着 Z 的增加, A 也随之增加,库仑相互作用的影响增长得比核力快,要使原子核保持稳定,必须靠中子数的较大增长来减弱库仑力的排斥作用,因此,随着 $Z(A)$ 的增长,稳定核素的中子数比质子数越来越多,越来越大的偏离 $Z=N$ 直线。不过,当 Z 大到一定程度,稳定核素不复存在,稳定核素区到目前的已知核素区慢慢就终止了。

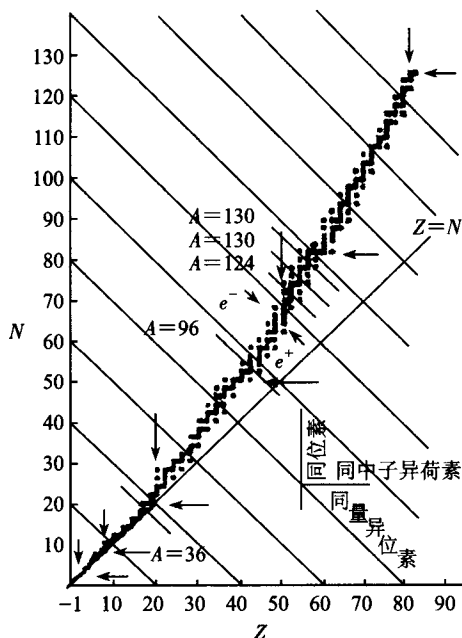


图 1-3 β 稳定核素分布图

在 1966 年左右,理论预告在远离 β 稳定曲线的 $Z=114$ 附近,存在一个超重稳定元素“岛”。近 10 多年来,由于重离子加速器的大量建造,重离子核反应得以广泛实现,为实现和验证这种理论提供了有效的工具。

原子核的稳定性还与核内质子和中子数的奇偶性有关,自然界存在的稳定核素共 270 多种,若包括半衰期 10^9 年以上的核素则为 284 种,其中

偶偶(e-e)核:166 种;偶奇(e-o)核:56 种;

奇偶(o-e)核:53 种;奇奇(o-o)核:9 种。

根据核内原子数和中子数的奇偶性,可以看出:偶偶核是最稳定的,稳定核最多;其次是奇偶核和偶奇核;而奇奇核最不稳定,稳定核素最少。

事实表明,当原子核的中子数或质子数 2, 8, 20, 28, 50, 82 和中子数为 126 时,原子核特别稳定,我们把上述数目称为“幻数”。

三、原子核的大小

一个原子的线度约为 10^{-8} cm,根据卢瑟福用 α 粒子轰击原子的实验得知原子核的

线度远小于原子的线度。若想象原子核近似于球形,则就有原子核半径的概念。由于原子核的半径很小,需要通过各种间接的方法进行测量,由于所用方法的不同,测出的原子核半径的意义也不相同,产生了核力半径和电荷分布半径之分。但无论如何,用各种方法得出的结果是相近的。

在历史上,最早研究原子核的大小是卢瑟福和查德威克。他们用质子或 α 粒子去轰击各种原子核。根据这一方法,发现轻原子核的半径遵从如下的规律

$$R=r_0 A^{1/3}, r_0=1.20 \text{ fm}$$

其后,出现了许多其他更精确的测量方法。如用中子衍射截面测量原子核的大小(核力半径);用高能电子散射测量原子核的大小及电荷形状因子(电荷分布半径)等等。并依据所采用的方法,分别给出电荷半径或核力半径。

总结以上的实验结果,原子核半径 R 与 $A^{1/3}$ 成正比,而其比例常数 r_0 的最近数据为

$$R=(1.20\pm0.30)A^{1/3} \text{ fm} \quad (\text{电荷半径})$$

$$R=(1.40\pm0.10)A^{1/3} \text{ fm} \quad (\text{核力半径})$$

这时,原子核的密度——单位体积内的核子数为

$$\rho_N = \frac{A}{V} = \frac{A}{4/3\pi R^3} = \frac{3}{4\pi r_0^3}$$

ρ_N 等于常数,表明只要核子结合成原子核,其密度都是相同的,这就形成核物质的概念。将 $r_0=1.20 \text{ fm}$ 代入,可得

$$\rho_N = 2.84 \times 10^8 \text{ t/cm}^3$$

即在每立方厘米体积中竟有近3亿吨的物质。

四、原子核的结合能

1. 质能联系定律

质量和能量都是物质同时具有的两个属性,任何具有一定质量的物体必须与一定的能量相联系。质量和能量的相互关系为

$$E=mc^2, \text{或 } m=\frac{E}{c^2}$$

其中,物体的能量 E 以J表示,物体的质量 m 以kg表示,在真空中的光速 $c=2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

根据相对论的观点,物体质量的大小随着物体运动状态的变化而变化。若物体静止时的质量为 m_0 ,称为物体的静止质量,则运动速度为 v 时该物体所具有的质量 m 为

$$m=m_0/\sqrt{1-(v/c)^2}$$