

注册核安全工程师岗位培训丛书

核安全综合知识

《注册核安全工程师岗位培训丛书》编委会 编著

中国环境科学出版社·北京

《注册核安全工程师岗位培训丛书》编委会

主任委员：陈金元

副主任委员：汤搏

委员：（以姓氏笔画为序）

马校正	卞洪兴	王秀清	王青松	王瑞平	池雪丰	宋福祥
陈伯显	杨孟琢	张健	罗上庚	郁祖盛	郑继师	洪润生
俞尔俊	赵亚民	顾洪坤	桂立明	贾宝山	常向东	商照荣
蒋云清	熊本和	嵇凤官	潘英杰			

前 言

我国对核能与核技术的开发利用始于 20 世纪 50 年代。经过多年的不懈努力，核能与核技术已在我国国防、医疗、能源、工业、农业、科研等领域得到广泛利用，这对维护我国国防安全，促进国民经济和社会发展，增强我国的综合国力，起到了十分积极的作用。但是，核能与核技术开发利用过程中的安全问题和放射性污染防治问题，也越来越突出。主要表现：一是，我国已有多座核设施，有些核设施已经进入退役阶段，如果监管不严或者处置不当，其遗留的放射性物质将对环境和公众健康构成威胁；现正在运行的核设施，也存在着潜在危险，一旦发生泄漏或者因发生安全事故产生放射性污染，将危及周边广大范围内的生态环境安全和公众健康。二是，我国现有放射源五万多枚，由于用户多而分散，有的单位管理不善等原因，近年来因放射源使用不当或者丢失导致的放射性污染事故不断发生，造成严重后果。三是，在铀(钍)矿和伴生放射性矿开发利用过程中，由于对放射性污染防治重视不够，缺乏对放射性污染防治的专项管理制度，乱堆、乱放放射性废矿渣的情况时有发生，由此造成的放射性污染事故威胁着环境安全和公众健康。四是，我国已产生了不少放射性废物，虽然国家有放射性废物处置政策，但是，由于缺乏强制性的法律制度和措施，致使对放射性废物的处置监管不力，在一定程度上对环境和公众健康构成了威胁。为了解决上述问题，进一步做好放射性污染防治工作，在总结我国放射性污染防治的实践经验、借鉴一些有核国家防治放射性污染的成功经验的基础上，全国人大于 2003 年 6 月 28 日通过了《中华人民共和国放射性污染防治法》，对我国核安全的统一监管必将起到巨大的作用。

为了提高核安全专业技术人员素质，确保核与辐射环境安全，维护国家、社会和公众利益，根据《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例》的有关规定，人事部、国家环境保护总局于 2002 年 11 月 19 日颁布了关于印发《注册核安全工程师执业资格制度暂行规定》的通知人发〔2002〕106 号，决定在核安全及相关领域中建立注册核安全工程师执业资格制度。

根据《注册核安全工程师执业资格制度暂行规定》，注册核安全工程师执业资格考试科目为：《核安全相关法律法规》《核安全综合知识》《核安全专业实务》和《核安全案例分析》。为了方便考生复习和准备考试，本丛书编写委员会依据国家环境保护总局组织编写、人事部审定的《全国注册核安全工程师执业资格考试大纲》的具体要求编写了此书，供广大专业人员培训或自学使用。

本套丛书共有四册，包括《核安全相关法律法规》、《核安全综合知识》、《核安全专业实务》和《核安全案例分析》。

《核安全综合知识》第一章由陈伯显编写；第二章由顾洪坤、蒋云清、潘英杰、池雪丰、罗上庚、贾宝山、熊本和编写；第三章由桂立明编写；第四章由赵亚民编写；第

五章由熊本和编写；第六章由杨孟琢、商照荣编写。

本书编写后，由《注册核安全工程师岗位培训丛书》编写委员会组织了多位专家、学者对全书进行了统稿，在此表示谢意。

在本书编写过程中，虽然经过反复斟酌和努力，但由于时间紧迫，难免存在不足之处，诚望广大读者提出宝贵意见，以便再版时修改完善。

目 录

181	.....	.....	第四章
171	.....	.....	第第五章
181	.....	.....	第第六章
181	.....	.....	第第七章
181	.....	.....	第第八章
190	.....	.....	第第九章
191	.....	.....	第第十章
第一章 原子核物理基础	.....	.....	1
205	考试要求	.....	1
203	引言	.....	1
205	第一节 原子和原子核的基本性质	.....	1
	第二节 原子核的放射性	.....	10
205	第三节 射线及其与物质相互作用	.....	17
205	第四节 原子核反应	.....	30
205	第五节 核裂变及核能的利用	.....	36
206	本章小结	.....	42
207	思考题	.....	43
210	.....	.....	第三章
第二章 核能和核技术应用	.....	.....	44
233	考试要求	.....	44
231	引言	.....	44
234	第一节 辐射源种类	.....	45
240	第二节 反应堆和加速器生产放射性同位素基本知识	.....	54
240	第三节 放射性同位素在医学、工业、农业、食品加工等行业的应用	.....	57
	第四节 放射性同位素应用中的辐射安全问题	.....	67
245	第五节 射线装置在医学、工业、农业等行业的应用	.....	71
245	第六节 射线装置应用中的辐射安全问题	.....	77
245	第七节 核燃料循环设施	.....	84
245	第八节 核动力厂和其他反应堆	.....	113
244	第九节 核动力厂和其他反应堆的安全问题	.....	139
245	本章小结	.....	154
251	思考题	.....	155
252	.....	.....	第第五章
第三章 辐射防护	.....	.....	157
260	考试要求	.....	157
264	引言	.....	157
265	第一节 辐射防护的概念、目的与任务	.....	158
	第二节 电离辐射对人类和环境的影响	.....	159
	第三节 辐射照射的类别	.....	165

第四节	电离辐射对人体的作用	167
第五节	辐射剂量与辐射防护中常用量及其单位	174
第六节	实践与干预	180
第七节	辐射防护的基本原则	184
第八节	辐射防护标准及其安全评价	185
第九节	外照射防护与内照射防护的基本方法	190
第十节	辐射防护监测	195
第十一节	辐射防护大纲	200
第十二节	辐射应急准备的基本要求	202
本章小结	.....	203
思考题	.....	204
第四章	流出物和环境放射性监测	205
04.01	考试要求	205
04.02	引言	205
04.03	第一节 环境放射性本底调查	206
04.04	第二节 天然放射性的来源与水平	207
04.05	第三节 人工放射性核素的来源及水平	210
04.06	第四节 控制流出物排放的原则	219
04.07	第五节 环境放射性监测	223
04.08	第六节 放射性核素在环境中迁移和蓄积	231
04.09	第七节 人为活动对环境辐射水平的影响	234
04.10	本章小结	240
04.11	思考题	240
第五章	核与辐射安全的概念	242
05.01	考试要求	242
05.02	引言	242
05.03	第一节 核安全的历史发展	243
05.04	第二节 核与辐射安全的基本原则	244
05.05	第三节 纵深防御	247
05.06	第四节 核安全的基本技术原则	251
05.07	第五节 质量保证	256
05.08	第六节 安全目标	259
05.09	第七节 风险分析	260
05.10	本章小结	264
05.11	思考题	265
05.12	.....	.....
05.13	.....	.....

第六章 安全文化.....	266
考试要求.....	266
引言.....	266
第一节 安全文化概述.....	266
第二节 安全文化的组成部分.....	269
第三节 核安全文化的发展阶段及弱化识别.....	273
第四节 安全文化的评价方法.....	276
第五节 培育安全文化的良好实践.....	281
本章小结.....	283
思考题.....	284
参考文献.....	286

第一章 原子核物理基础

考试要求

1. 熟悉原子结构的知识（原子，原子核，同位素）。
2. 熟悉放射性的概念、衰变及其规律（核素图，半衰期，放射性活度的单位计算和测量）。
3. 熟悉射线及其与物质的相互作用（ α 射线， β 射线， γ 射线，X射线，中子等）。
4. 掌握核反应的类型。
5. 了解核裂变及其裂变反应的知识。

引言

19世纪末，在1895年、1896年和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，法国科学家贝克勒尔（A.H.Becquerel）发现天然放射性现象，成为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原子核物理的开端，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。三者有独立的各自研究的领域和对象，但又紧密的关联。对我们的研究对象而言，我们将重点论述原子核物理这一领域。

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，放射性及由此产生的各种辐射也成为人们关注的一个问题。为趋利避害，使核能和核技术更好地为人类服务，核安全就成为一个独立的学科存在。核安全涉及的知识领域十分广泛，其中对原子、原子核的基本性质的了解，对核衰变、核反应和核裂变的了解，是其重要的一个方面。因此，在《核安全综合知识》中，我们首先介绍有关原子核物理的基础知识。

第一节 原子和原子核的基本性质

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(R.C.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，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

$$e = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$$

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

$$m_e = 9.1093897 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

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性质，即原子核作为整体所具有的静态性质，本章将着重讨论原子核的组成、电荷、质量、半径、稳定性等性质，对原子核自旋、磁矩、宇称和统计性质等较深入的问题不在这里展开讨论。如在今后的工作中，遇到这些问题，一般的核物理的书籍均有论述。

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，但它能很好地解释元素周期表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层，在它外面依次为L壳层，M壳层，N壳层，O壳层等，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右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。

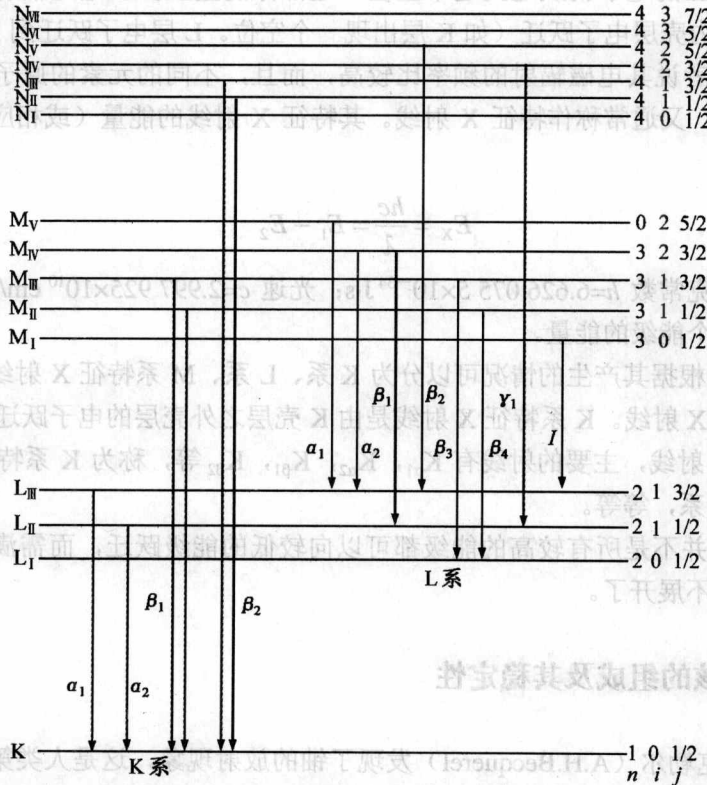


图 1-1 原子能级图和主要的 K 系和 L 系特征 X 射线

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其大小。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 K 层以上，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，就是意味假如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, ... 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。当发生内壳层电子跃迁（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 $h=6.626\ 075\ 5 \times 10^{-34}$ J·s；光速 $c=2.997\ 925 \times 10^{10}$ 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 $K_{\alpha 1}$ ， $K_{\alpha 2}$ ， $K_{\beta 1}$ ， $K_{\beta 2}$ 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 年贝克勒尔 (A.H.Becquerel) 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，1897 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核， 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。海森堡立刻提出原子核由质子和中子组成的假设。

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的组成的想法就非常自然的，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.Heisenberg) 很快就提出原子核由质子和中子所组成的假说。上述困难就不再存在，而且有一系列的实验事实支持这一假说。

中子和质子的质量相差甚微，它们的质量分别为

$$m_n = 1.008\ 664\ 92u$$

$$m_p = 1.007\ 276\ 46u$$

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

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

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由符号 ${}^A_Z\text{X}_N$ 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 ${}^A\text{X}$, 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 ${}^{208}_{86}\text{Tl}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ 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 (isomers)

寿命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 表示, 这种核素的原子核一般处于较高能态, 例如 ${}^{87m}_{38}\text{Sr}$ 称为 ${}^{87}_{38}\text{Sr}$ 的同质异能素, 其半衰期为 2.81 小时。同质异能素所处的能态, 又称同质异能态。它与一般的激发态在本质上并无区别, 只是半衰期即寿命较长而已。

2. 原子核的稳定性及核素图

根据原子核的稳定性, 可以把核素分为稳定的核素和不稳定的放射性核素。原子核的稳定性与核内质子数和中子数之间的比例存在着密切的关系。

正如在化学和原子物理学中把元素按原子序数 Z 排成元素周期表一样, 我们可以把核素排在一张所谓核素图上。核素图与元素周期表不同之处在于, 除了电荷数 (即核内

质子数) Z 外, 还必须考虑中子数 N 。这样, 核素图就必须是含有 $N-Z$ 的两维图。图 1-2 是核素图 (部分), 以 N 为横坐标、 Z 为纵坐标 (也可以反过来表示), 然后让每一核素对号入座。图 1-2 中, 每一格代表一个特定的核素。深色并带有斜线条的核素为稳定核素, 格中百分数为该核素的丰度。白底的核素为不稳定的放射性核素, 格中 α, β^-, β^+ 表示该核素的衰变方式, 箭头指向为衰变后的子核, 时间表示半衰期的长短。

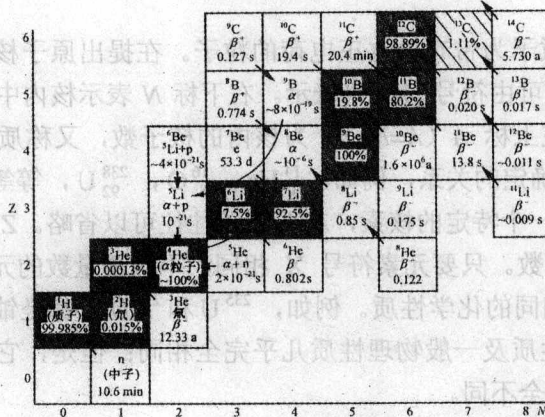


图 1-2 核素图 (部分)

在现代的核素图上, 既包括了天然存在的 332 个核素 (其中 280 多个是稳定核素), 也包括了自 1934 年以来人工制造的 1 600 多个放射性核素, 一共约 2 000 个核素。

为了从核素图中得到更多的有关核稳定性的认识, 有人绘制了 β 稳定核素分布图, 如图 1-3 所示, 图中横坐标为质子数 Z , 纵坐标为中子数 N 。在图 1-3 中, 在同一垂直线上 (即 Z 相同) 的所有核素是同位素; 在同一水平线上 (即 N 相同) 的所有核素是同中子异荷素; 在 N 和 Z 轴上截距相等的直线上 (即 A 相等) 的所有核素是同量异位素。

由图 1-3 可以发现, 稳定核素几乎全落在一条光滑曲线上或紧靠曲线的两侧, 我们把这条曲线称为 β 稳定曲线。由图 1-3 可见, 对于轻核, 稳定曲线与直线 $N=Z$ 相重合; 当 N 、 Z 增大到一定数值之后, 稳定线逐渐向 $N>Z$ 的方向偏离。在 Z 小于 20 时核素的 N 与 Z 之比约为 1, Z 为中等数值时约为 1.4, Z 等于 90 左右时约为 1.6。相对于稳定曲线而言, 中子数过多或偏少的核素都是不稳定的。位于稳定曲线上的核素为

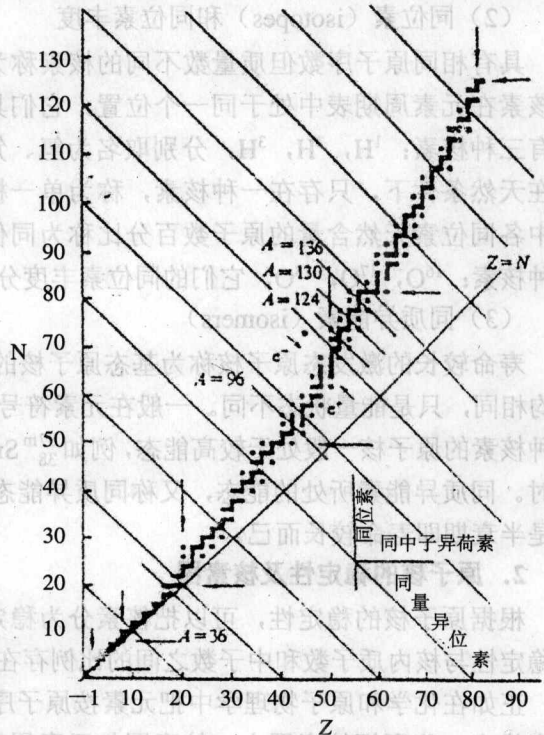


图 1-3 β 稳定核素分布图

丰中子核素，易发生 β^- 衰变。位于稳定曲线下方的核素为缺中子核素，易发生 β^+ 衰变。

由于库仑力是长程相互作用力，它能作用于核内的所有质子，正比于 $A(A-1)$ ；而核力是短程力，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 $Z=A$ 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。

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。

根据核内质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为 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。若想像原子核近似于球形，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

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

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

$$R = (1.20 \pm 0.30)A^{1/3}\text{fm} \quad (\text{电荷半径})$$

$$R = (1.40 \pm 0.10)A^{1/3}\text{fm} \quad (\text{核力半径})$$

这时，原子核的密度——单位体积内的核子数为

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

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 t 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

$$E = mc^2, \quad \text{或} \quad m = \frac{E}{c^2}$$

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

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

当 $v \ll c$ 时, $m \approx m_0$ 。
 $E = mc^2$ 称为质能关系式, 也就是质能联系定律。它表示任何具有 m 千克质量的物体, 一定具有 mc^2 焦耳的能量; 如果在运动过程中, 能量发生变化, 质量一定随着发生相应的变化。如果一个体系从外界吸收 ΔE 的能量, 则这个体系质量就增加 $\Delta m = \Delta E/c^2$ 。反之, 如果一个体系向外界辐射 ΔE 的能量, 则这个体系的质量就减少 $\Delta m = \Delta E/c^2$ 。

$E = mc^2$ 中的能量包括两部分: 一部分为物体的静止质量 $E_0 = m_0c^2$; 另一部分为物体的动能 T

$$T = E - E_0 = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right]$$

在通常情况下, $v \ll c$, 则 $\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ 可以级数展开

$$T \approx m_0c^2 \left[\left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 + \frac{3}{8} \left(\frac{v}{c} \right)^4 + \dots \right) - 1 \right] \approx \frac{1}{2} m_0 v^2$$

这与经典力学所推出的结果是一致的。

与一个原子质量单位相联系的静止质量相应的能量为

$$E = \frac{1.660\ 538\ 73 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (2.997\ 924\ 58 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{1.602\ 176\ 462 \times 10^{-13} \text{ J}} \\ = 931.494\ 013 \text{ MeV}$$

2. 原子核的质量亏损

原子核既然是由中子和质子所组成，那么，原子核的质量似乎应该等于核内中子和质子的质量之和。实际情况却并非如此。举一个最简单的例子—氘核，氘是氢的同位素，氘(${}^2\text{H}$)由一个中子和一个质子所组成。

中子的质量： $m_n = 1.008\ 665\text{u}$ ；质子的质量： $m_p = 1.007\ 276\text{u}$ ；

$$m_n + m_p = 2.015\ 941\text{u}$$

而氘核的质量： $m(Z=1, A=2) = 2.014\ 102\text{u}$

可见，氘核的质量小于组成它的质子和中子质量之和，两者之差为

$$\Delta m(1, 2) = m_p + m_n - m(1, 2) = 0.001\ 839\text{u}$$

推而广之，定义原子核的质量亏损为组成原子核的 Z 个质子和 $A-Z$ 个中子的质量与该原子核的质量之差，记作 $\Delta m(Z, A)$

$$\Delta m(Z, A) = Zm_p + (A-Z)m_n - m(Z, A)$$

式中 $m(Z, A)$ 为电荷数为 Z 、质量数为 A 的原子核的核质量。可是，在实际计算中，采用的是原子质量 $M({}^1\text{H})$ 和 $M(Z, A)$ ，当用原子质量代替核质量时，由于 Z 个 ${}^1\text{H}$ 原子中的电子质量正好被 ${}_Z^A\text{X}$ 原子中 Z 个电子质量所抵消，上式表示为

$$\Delta m(Z, A) = ZM({}^1\text{H}) + (A-Z)m_n - M(Z, A)$$

这样做是一种近似，忽略了电子在原子中的结合能的差别，这种近似是可以接受的。从原子核的质量亏损的定义可以明确的看出，所有的核都存在质量亏损，即 $\Delta m(Z, A) > 0$ 。

3. 原子核的结合能

既然原子核的质量亏损 $\Delta m > 0$ ，由质能关系式，那么相应能量的减少就是 $\Delta E = \Delta mc^2$ 。这表明核子结合成原子核时，会释放出能量。这个能量称之为结合能。由此， Z 个质子和 $(A-Z)$ 个中子结合成原子核时的结合能 $B(Z, A)$ 为

$$B(Z, A) \equiv \Delta m(Z, A)c^2$$

将上式代入此式，得到

$$B(Z, A) = [ZM({}^1\text{H}) + (A-Z)m_n - M(Z, A)]c^2$$

一个中子和一个质子组成氘核时，会释放一部分能量 2.225MeV ，这就是氘的结合能。它已为精确的实验测量所证明。实验还证实了它的逆过程：当有能量为 2.225MeV 的光子照射氘核时，氘核将一分为二，飞出质子和中子。

其实，一个体系的质量小于组成体系的个别质量之和这一现象，在化学和原子物理学中同样也存在。分子的质量并不等于原子质量之和，原子的质量也不等于原子核的质量

与电子质量之和；任何两个物体结合在一起，都会释放一部分能量。不过，结合能的概念在原子核物理中要比原子、分子物理中重要得多，而在高能物体中更有其特别的意义。

4. 比结合能曲线

原子核的结合能 $B(Z, A)$ 除以质量数 A 所得的商，称为平均结合能或比结合能 ϵ ，即

$$\epsilon(Z, A) = B(Z, A)/A$$

比结合能 ϵ 的单位是 MeV/Nu，Nu 代表核子。比结合能的物理意义为原子核拆散成自由核子时，外界对每个核子所做的最小的平均功。或者说，它表示核子结合成原子核时，平均一个核子所释放的能量。因此， ϵ 表征了原子核结合的松紧程度。 ϵ 大，核结合紧，稳定性高； ϵ 小，结合松，稳定性差。

图 1-4 是核素的比结合能对质量数作图，可得到比结合能曲线。它与核素图一起，是原子核物理学中最重要的两张图。

从图 1-4 可见，比结合能曲线两头低、中间高，换句话说，中等质量的核素的 B/A 比轻核、重核都大。比结合能曲线在开始时有些起伏，逐渐光滑地达到极大值（约 8MeV），然后又缓慢地变小。

当结合能小的核变成结合能大的核，即当结合得比较松的核变到结合得紧的核，就会释放能量。从图 1-4 可以看出，有两个途径可以获得能量：一是重核裂变，即一个重核分裂成两个中等质量的核；一是轻核聚变。人们依靠重核裂变的原理制造出原子反应堆与原子弹，依靠轻核聚变的原理制造出氢弹和人们正在探索的可控聚变反应。由此可见，所谓原子能，主要是指原子核结合能发生变化时释放的能量。

从图 1-4 还可见，当 $A < 30$ 时，曲线在趋势是上升的同时，有明显的起伏。为此，在 $A \leq 25$ 的范围加大了坐标的单位。在图中，峰的位置都位于 A 为 4 的整数倍的地方，如 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{20}\text{Ne}$ 和 ${}^{24}\text{Mg}$ 等偶偶核，并且有 $N = Z$ 。这表明对于轻核可能存在 α 粒子的集团结构。

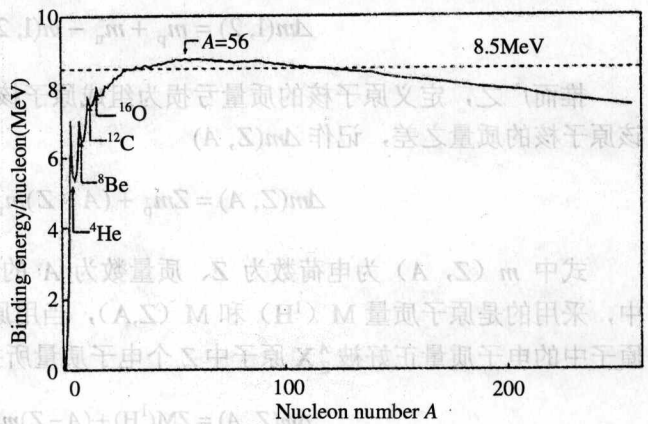


图 1-4 比结合能曲线

第二节 原子核的放射性

如前所述，已经发现的天然存在的和人工生产的核素约有 2 000 多个，其中天然存在的核素约有 332 个，其余皆为人工制造的。天然存在的核素可分为两大类：一类是稳定