

916600

高等学校试用教材

核化学及核技术应用

郑成法
毛家骏 主编
秦启宗
江林根 主审

原子能出版社

高等学校试用教材

核化学及核技术应用

(初 版)

郑成法

江林根 主审

毛家骏 主编

秦启宗

柴之芳 审校

原子能出版社

高等学校试用教材
核化学及核技术应用
(初 版)

郑成法

毛家骏 主编 江林根 主审

秦启宗

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

重庆印制一厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16 印张26.75 字数 664 千字
1990年6月北京第一版·1990年6月北京第一次印刷

印数 1—1000

ISBN 7-5022-0246-3

TL·94(课) 定价: 5.20元

前言

本书是根据原核工业部教育司于1985年10月召开的放射化学教材会议审定的编写提纲编写的。

核化学是以分子中原子核的运动与核外电子运动之间的相互联系作为主要研究对象的。这门学科曾对天然和人工放射性、原子核裂变现象的发现以及超铀元素的人工合成发挥了很大的作用。同时,核化学也已成为核技术应用的重要基础。目前核技术的应用更趋广泛,而且还在不断地发展。它不仅包括在化学、材料科学、生物学、医学、地学、宇宙学、考古学以及环境科学等重要基础学科中的应用,而且还涉及在国民经济一些重要部门中的应用,并已获得了显著的经济效益。本书的编写宗旨是为我国读者提供一本核化学基础和核技术应用相结合的教材,着重提供必要的核化学基础知识以及核技术应用及其在一些重要领域的研究现状及动向。

本书作为一本放射化学专业的教材,力图能适应当前教学工作的需要,将核物理导论,核辐射测量和防护以及放射化学这三部分内容作了很多精简,加强和扩充了核技术应用方面的知识,以适应学生今后工作需要。在编写过程中,力求阐明物理基本概念和核技术应用中的基本原理,减少各种公式的推导,以适应从事核技术应用方面的广大读者需要。

本书内容主要包括两大部分:一是核化学基础,二是核技术和核辐射的应用。第一章扼要介绍了原子核性质、核衰变规律和射线与物质相互作用,它与第二、三章中的核辐射测量和防护互相配合,为以后讨论核技术应用提供必要的基础知识。第四至第八章属于基础放射化学内容。第九至第十三章分别介绍了核技术在化学、医学、生物学、材料科学、考古学以及辐射加工技术等方面的应用。本书最后附录部分列入了一些重要物理常数以及常用核素性质,并采用了近年来修正的新数据。此外,在各章结尾还列出了一些重要参考资料,以供读者进一步学习时参考。

本书是由多位作者合作编写而成的,主要是为了发挥各人的特长,使各章各具特色,但难免在文体上不够一致。本书由复旦大学物理二系郑成法、毛家骏和秦启宗主编。参加撰写的有:郑成法(第一、四、十章)、赵魁东(第二、三章)、秦启宗(第五、六章)、叶明吕(第七、十一章)、毛家骏(第六、七章)、唐静娟(第八、十二章)、柴之芳(第九章)和朱锦心(第十三章)。全书由北京大学江林根和中国科学院高能物理研究所柴之芳审校。在本书编写过程中及审稿会上,北京大学刘元方、北京师范大学刘伯里、四川大学祝霖、兰州大学陶祖貽、天津大学王榕树、中国原子能科学研究院化学所郭景儒和林漳基等同志,曾对本书初稿提出很多宝贵意见,我们在此表示由衷的感谢。由于作者水平有限,书中难免会有错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编者

1989年2月

目 录

前言

第一章 原子核与放射性	1
第一节 原子核	1
一、原子核的组成	1
二、原子核的性质	5
三、原子核结构	11
第二节 核衰变类型	14
一、 α 衰变	15
二、 β 衰变	17
三、 γ 衰变	20
四、其他衰变方式	22
第三节 核衰变规律	23
一、核衰变的基本规律	23
二、放射性活度及其单位	25
三、两次连续衰变规律	26
四、多次连续衰变规律和放射系	30
第四节 射线与物质的相互作用	34
一、 α 射线与物质的相互作用	34
二、 β 射线与物质的相互作用	38
三、 γ 射线与物质的相互作用	41
四、中子与物质的相互作用	45
第二章 核辐射测量	49
第一节 核辐射探测器	49
一、气体电离探测器	50
二、闪烁探测器	57
三、半导体探测器	66
第二节 放射性活度的测量	72
一、影响放射性活度测量的因素	72
二、放射性活度的相对测量方法	74
三、放射性活度的绝对测量方法	75
第三节 γ 射线能谱的测量	79
一、 γ 能谱的基本形式	79
二、 γ 能谱的测量方法	85
三、 γ 谱仪的能量刻度及效率刻度	86
第四节 专用测量方法	88
一、液体闪烁测量法	88
二、低水平放射性测量	93
第五节 放射性测量中的统计误差	97
一、核衰变的统计性	97

二、统计误差的表示及运算	100
三、测量数据的检验	104
第三章 核辐射的防护	107
第一节 核辐射防护中的基本概念及单位	107
一、照射量	108
二、吸收剂量	109
三、剂量当量	110
四、照射量与吸收剂量的关系	110
第二节 核辐射的生物效应及防护标准	112
一、核辐射对人体的危害	113
二、辐射防护标准	117
第三节 核辐射剂量计算及防护方法	121
一、外照射	121
二、内照射	127
第四章 核反应及其化学效应	131
第一节 原子核反应	131
一、核反应能量	131
二、反应截面	134
三、核反应的机制和模型	134
四、一些重要核反应介绍	137
第二节 热原子化学	140
一、热原子的形成	141
二、次级反应	144
三、反冲原子化学	145
四、核衰变的化学效应	148
第三节 核裂变	149
一、诱发裂变	150
二、自发裂变	152
三、裂片的质量分布	153
第四节 核聚变	155
一、轻核聚变反应	155
二、可控热核反应	157
第五章 放射性元素化学	160
第一节 天然放射性元素和天然放射系	160
一、经典的放射化学研究方法和钋、镭的发现	161
二、放射性衰变规律	162
三、同位素概念和位移规律	162
四、天然放射系	163
第二节 人工放射性元素	164
一、锝(Tc)、钷(Pm)和砹(At)	164
二、超铀元素的发现	165
第三节 锕系元素化学	169

一、铜系理论和铜系元素的电子组态	169
二、铜系元素水溶液化学	170
三、铜系元素的固态化学	173
四、铜系元素的应用	174
第四节 超铜系元素的发现和超重元素的探索	176
一、超铜系元素的发现	176
二、超重元素的探索	178
第六章 放射化学分离技术	181
第一节 放射化学分离的重要性和一般特点	181
一、放射化学分离的重要性	181
二、放射化学分离的特点	181
三、放射化学分离中几种效率指标	184
第二节 沉淀和共沉淀分离法	185
一、沉淀分离法	185
二、共沉淀分离法	186
第三节 溶剂萃取分离法	189
一、溶剂萃取中的特征参数	189
二、萃取机理	191
三、溶剂萃取分离技术	195
第四节 离子交换分离法	199
一、离子交换树脂及其基本性能	199
二、离子交换平衡及交换动力学	202
三、离子交换色层的基本原理	205
四、影响离子交换色层分离的一些因素	206
五、高压离子交换色层	208
第五节 萃取色层分离法	209
一、一般介绍	209
二、萃取色层原理	210
第六节 其他分离技术	211
一、电化学分离法	211
二、核反冲法	212
三、挥发法	212
第七节 快速分离技术	213
一、高速离心萃取器	213
二、热色层	213
第七章 核能利用中的化学问题	215
第一节 核反应堆与核电站	215
一、核反应堆	215
二、核电站	220
三、压水堆的一些化学问题	222
四、核能在其他方面的应用	227
第二节 核燃料循环化学	228

一、核燃料循环概述	228
二、核资源的有效利用	229
三、铀的生产工艺化学	229
四、钍的生产工艺化学	238
五、核燃料后处理过程化学	240
第三节 放射性废物的处理和最终处置	245
一、放射性废物的来源和分类	246
二、放射性废液的处理	246
三、放射性废气处理	247
四、放射性废液的固化处理	248
五、放射性核素在地质介质中的迁移	250
第八章 放射性核素的生产与标记化合物的合成	253
第一节 从天然产物和裂变产物中提取放射性核素	253
一、天然放射性核素	253
二、从裂变产物中提取放射性核素	254
第二节 反应堆生产放射性核素	256
一、核反应的选择	256
二、靶子物的选择和制备	257
三、产额的估算与照射时间的确定	258
第三节 加速器生产放射性核素	263
一、核反应的选择	263
二、加速器靶的特点及其制备	265
三、产额的估算	266
第四节 放射性核素发生器	267
一、放射性核素发生器的特点和要求	267
二、放射性核素发生器的基本原理	268
三、放射性核素发生器的类型与制备方法	271
第五节 标记化合物的制备	273
一、化学合成法	274
二、同位素交换法	278
三、生物合成法	279
四、双标记化合物的制备	280
第九章 核辐射分析技术	282
第一节 基于探测缓发辐射的核分析方法	282
一、基本原理	282
二、中子活化分析	284
三、带电粒子活化分析	286
四、 γ 光子活化分析	291
第二节 基于探测瞬发辐射的核分析方法	293
一、瞬发 γ 辐射法	293
二、瞬发X荧光法	295
三、瞬发带电粒子谱	300

第十章 放射性核素在化学中的应用	305
第一节 放射性示踪技术	305
一、基本原理	305
二、放射性示踪剂在测定物理化学性质上的应用	307
三、示踪技术在分子结构和化学动力学中的应用	310
第二节 同位素稀释法	312
一、测定比活度的放射性同位素稀释法	312
二、亚化学计量同位素稀释法	314
三、亚-超当量同位素稀释法	316
第三节 穆斯堡尔谱	318
一、 γ 光子共振吸收	318
二、穆斯堡尔参数	320
三、穆斯堡尔谱仪	323
四、穆斯堡尔谱在化学中的应用	324
第四节 正电子湮没技术	327
一、基本原理	328
二、实验方法	330
三、正电子湮没技术的应用	332
第五节 扰动角关联技术	334
一、基本原理	334
二、实验方法	337
三、扰动角关联在化学中的应用	338
第十一章 核技术在医学和生物学中的应用	341
第一节 竞争放射分析	341
一、竞争放射分析的基本原理	342
二、测定方法	343
三、临床常用的几种竞争放射分析法	345
第二节 放射性药物概论	346
一、放射性药物诊断原理	346
二、放射性药物在临床治疗上的应用	348
三、对放射性药物的要求	349
四、放射性药物的鉴定	351
五、放射性药物及其发展趋势	352
第三节 放射性核素脏器显像技术	355
一、核医学显像技术	355
二、某些脏器显像的原理和常用的放射性显像剂	358
第四节 放射性核素在生物学中的某些应用	362
一、用放射性 ^{14}C 示踪法研究植物的光合作用	362
二、人体内物质吸收、分布、排泄的示踪技术	365
三、动物体内各种物质动态平衡的示踪研究	366
四、核糖核酸(RNA)一级结构的测定	366

第十二章 核技术在地质学和考古学中的应用.....	370
第一节 放射性 ^{14}C 纪年.....	370
一、 ^{14}C 纪年法的基本原理.....	371
二、测量技术.....	371
三、 ^{14}C 纪年法的误差和校正.....	372
四、加速器 ^{14}C 纪年法.....	373
第二节 放射性衰变平衡纪年法.....	374
一、钾-氩法纪年.....	374
二、铀系法纪年.....	376
三、宇宙成因核素纪年.....	376
第三节 热释光纪年法.....	377
一、热释光机理.....	377
二、热释光纪年的基本原理.....	378
三、热释光纪年的实验方法.....	379
第四节 电子自旋共振纪年法.....	380
一、基本原理.....	380
二、测定方法.....	382
三、电子自旋共振纪年法的适用性.....	383
第五节 裂变径迹纪年.....	383
一、铀及其裂变径迹.....	383
二、裂变径迹法的年龄计算.....	384
三、裂变径迹纪年法的应用.....	385
第六节 核技术在地质勘探中的应用.....	385
一、 γ 射线测井.....	386
二、中子测井.....	386
三、利用地表的放射性寻找地下水源.....	387
四、同位素X荧光法探矿.....	388
第十三章 射线辐照技术及其应用.....	390
第一节 高能射线的化学效应.....	390
第二节 辐射加工中的化学剂量法.....	393
一、照射量、吸收剂量、剂量率、G值.....	393
二、辐射加工中的剂量计算.....	393
三、辐射加工中的剂量测定.....	394
第三节 辐射源.....	397
一、常用辐射源特性.....	397
二、 γ 辐照器及有关设施.....	398
第四节 辐射加工技术的应用.....	400
一、辐射加工的特点.....	400
二、辐射加工剂量范围及加工产量估算.....	401
三、辐射加工的几个主要领域.....	402
附录.....	408

第一章 原子核与放射性

长期以来,人们认为原子是物质的最基本单元,是不能分割的。直至19世纪末,相继发现了X射线、放射线和电子,对原子的内部结构才有比较深入的认识。1911年,卢瑟福通过 α 粒子散射实验建立了原子的核式模型,即原子的中心有一个体积很小、质量却占99.9%以上的荷正电的核心,称为原子核,核外有绕核运动的电子,占有的空间约为核的 $10^4 \sim 10^5$ 倍。

研究原子核和核外电子运动规律所得结果表明,物质的物理、化学性质基本上取决于核外电子,而放射性、核转变和核反应等现象,是由原子核的特性所决定的。因此,有关原子核的基础知识,是核化学及其应用的基础。

本章首先介绍原子核的性质和结构;其次讨论核衰变及其规律;最后简述核辐射与物质的相互作用,这是射线的测量及应用的重要基础。

第一节 原子核

一、原子核的组成

1. 质子-中子模型

1886年E. Goldstein在放电管中发现了失去一个电子的氢原子核。直至1914年卢瑟福才将它命名为质子,用符号p表示。1919年卢瑟福用 α 粒子轰击氮-14核获得氧-17和质子,证明核内存在质子。

当初,人们发现各种原子核的质量几乎是质子质量的整数倍,认为原子核是由质子组成的。1920年J. Chadwick用卢瑟福散射公式第一次通过实验测出了原子核的电荷数Z,证明核电荷数Z等于其元素的原子序数。假如原子核只含质子,则核电荷数Z应等于质量数,而实际上正电荷数约为质量数的一半。因此,核内除存在质子外,还必须有足够的负电荷来中和一部分正电荷。从而提出了原子核是由A个质子和(A-Z)个电子组成的,即质子-电子模型。这一模型似乎被原子核能发射 β 粒子所证实。然而,在核内存在电子的假设,一开始就遇到很多不能克服的困难。例如,自由电子在核内的de Broglie波长($\lambda=h/mu$)不能大于核的直径($\approx 10^{-12}\text{cm}$),但按此波长估算的电子动能比核发射的 β 粒子能量要大一个数量级,显然是不能成立的!

为了克服这些困难,卢瑟福早在1920年就提出核内可能存在一种质子和电子结合的“中子”。直至1932年Chadwick以 α 粒子轰击铍时发现一种穿透力很强的射线,它可从石蜡等含氢化合物中打出质子,证明这种粒子是不带电荷的中性粒子,其质量几乎与质子质量相等。这时才正式把它命名为中子,符号为n。发现中子后不久,海森堡立即提出了原子核是质子和中子组成的假说。质子-中子模型认为,核内质子和中子的总数等于其质量数A,质子数等于原子序数Z,因此中子数N等于A-Z。构成原子核的质子和中子统称为核子。核的质量数A为核内的核子数,核的正电荷数即为核内质子的总电荷数。几十年来,大量实验事实证

明了原子核的质子-中子模型是正确的。

原子的化学性质由其核外电子数 Z 和电子的轨道分布所决定,因此具有相同原子序数 Z 的化学元素,其化学性质基本相同。但在核化学中,原子的核性质除与其核电荷数(质子数) Z 有关外,还要考虑中子数 N 的影响。例如,质量数为235的铀和238的铀都是铀元素,只相差三个中子,其物理、化学性质虽基本相同,但核性质相差很大,前者是核武器的燃料,后者甚至是分离铀同位素工厂的废料。因此常将具有相同的质子数 Z 、中子数 N 的一类原子称为核素。考虑到具有相同的 Z 和 N 的原子如处于不同的能态也具有差别很大的核性质,因此,核素的严格定义应为:具有特定质量数、原子序数和核能态,而且其平均寿命长得足以被观察的一类原子。核素的常用符号为 ${}_Z^AX$,其中 X 为化学元素符号,其左上角 A 表示核质量数,左下角 Z 为原子序数。例如质量数为14的氮、质量数为18的氧可分别写为 ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{18}_8\text{O}$ 。一般若不是表示核反应方程式内的核素,其左下标可以省略,如 ${}^{14}\text{N}$, ${}^{18}\text{O}$,也可简写为氮-14、氧-18。为了表示处于不同能态的核素,可在右上标加 m ,如 ${}_Z^AX^m$,表示处于 m 高能态的 ${}_Z^AX$ 核素。有时为了表示中子数 N ,也可将 N 写在右下角,如 ${}_Z^AX_N$ 。

2: 核素的分类

核素按其质子数 Z 和中子数 N 可以分为如下几类:

(1) 同位素 具有相同原子序数但质量数不同的核素统称为同位素。因其原子序数相同,在元素周期表中占据同一位置而得名。例如,氢有三种同位素 ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$ 。但对每一种核或原子,如 ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$ 或 ${}^3\text{H}$ 只能称核素,不能称同位素。然而由于过去没有引入核素这一概念,至今仍有混用的。同位素的核外电子数相同,其物理、化学性质极相近,但同位素之间核性质的差别可能很大。如 ${}^3\text{H}$ 能发射 β 射线,而 ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$ 则是稳定的。

(2) 同中子异位素 具有相同中子数、不同质子数的一类核素称为同中子异位素。例如 ${}^3_1\text{H}_2$, ${}^4_2\text{He}_2$, ${}^{30}_{14}\text{Si}_{16}$, ${}^{31}_{15}\text{P}_{16}$, ${}^{32}_{16}\text{S}_{16}$ 各为同中子异位素。

(3) 同质异位素 具有相同质量数、不同原子序数的一类核素称为同质异位素。例如, $A=14$ 的 ${}^{14}_6\text{C}_8$, ${}^{14}_7\text{N}_7$; $A=131$ 的 ${}^{131}_{53}\text{I}_{78}$, ${}^{131}_{54}\text{Xe}_{77}$ 。一对 Z 和 N 相差1,并相互交换的同质异位素称为镜像核。如 ${}^{13}_6\text{C}_7$ - ${}^{13}_7\text{N}_6$, ${}^{23}_{11}\text{Na}_{12}$ - ${}^{23}_{12}\text{Mg}_{11}$,研究镜像核的性质,可对核结构提供有用的信息。

(4) 同质异能素 指具有相同质量数和原子序数,处于不同核能态的一类核素。同质异能素所处的高激发能态是亚稳态(一般指半衰期 $T_{1/2}>10^{-6}\text{s}$)。其表示方法是在核素右上角加一个 m ,有多个同质异能素时可用 $m_1, m_2, \dots$ 区分。例如, ${}^{99}\text{Mo}^m$, ${}^{99}\text{Mo}$ 及 ${}^{124}\text{Sb}^{m1}$, ${}^{124}\text{Sb}^{m2}$, ${}^{124}\text{Sb}$ 各为同质异能素。

按核素的稳定性,也可以分为稳定核素和不稳定核素(即放射性核素)两大类。

(1) 稳定核素 指质子和中子数一直保持不变的核素*。至今发现的天然稳定核素约有280种,例如, ${}^2\text{H}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{17}\text{O}$, ${}^{18}\text{O}$, ${}^{19}\text{F}$, ${}^{63}\text{Cu}$, ${}^{208}\text{Pb}$ 等。

(2) 放射性核素 指自发地放出粒子或 γ 射线,或在轨道电子俘获后放出 X 射线,或发生自发裂变的核素。天然存在的放射性核素约有30余个,例如 ${}^{238}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{226}\text{Ra}$, ${}^{210}\text{Po}$ 等。而人工制造的放射性核素已达1600多个,例如 ${}^{60}\text{Co}$, ${}^{137}\text{Cs}$, ${}^{252}\text{Cf}$ 等。

* 一般认为核素在 $\approx 10^{21}\text{a}$ 内不变可视为稳定。但此年限随探测技术的发展而变。如,长期认为 ${}^{130}\text{Te}$ 是稳定的,但现已测出其半衰期 $\approx 10^{21}\text{a}$ 。

因此，在已发现的2000多种核素中只有少数是稳定核素。很自然会产生这样一个问题：为什么有的核素是稳定的而有的是放射性的，什么因素能使核稳定？

3. 核的稳定性和核素图

在完全了解核结构之前是很难解决核稳定因素问题的。但对大量稳定核和放射性核进行研究后，已概括了很多有关核稳定性的事实。这些也是了解核结构的实验基础。

(1) 质子数和中子数的奇偶性 将所有的稳定核素按其质子数和中子数的奇偶性进行分类，则可以发现其分布与奇偶性的关系（见表1-1）。

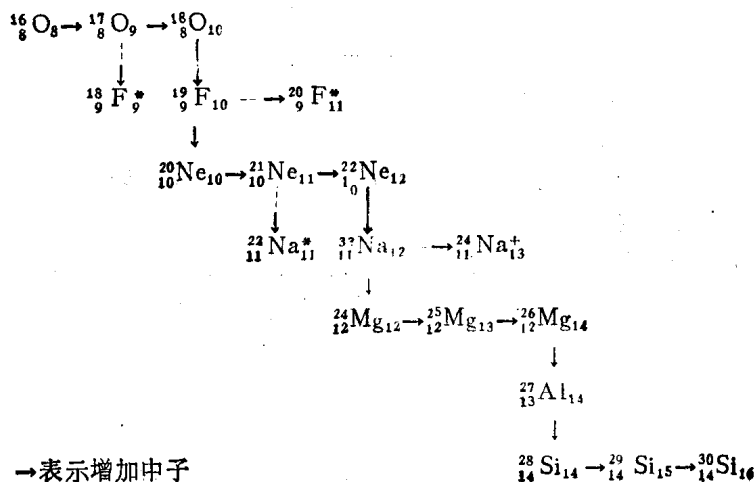
表 1-1 稳定核素按质子、中子数奇偶性的分布

Z	N	A	稳定核素	例
偶	偶	偶	165	${}^4_2\text{He}$, ${}^{24}_{12}\text{Mg}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ 等
偶	奇	奇	55	${}^{17}_8\text{O}$, ${}^{25}_{12}\text{Mg}$, ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ 等
奇	偶	奇	50	${}^7_3\text{Li}$, ${}^{19}_9\text{F}$, ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ 等
奇	奇	偶	6	${}^2_1\text{H}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{50}_{23}\text{V}$, ${}^{180}_{73}\text{Ta}$

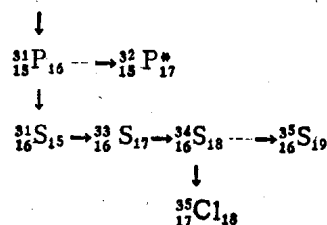
由表可知，Z和N均为偶数的稳定核数最多。在地壳中约有85%的核素是属于偶-偶核，如 ${}^{16}_8\text{O}$ （丰度为48%）， ${}^{28}_{14}\text{Si}$ （28%）， ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ （5%）， ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ （3.5%）， ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ （2%）；只有13%的核素是奇Z或奇N核，如 ${}^{27}_{13}\text{Al}$ （8.5%）， ${}^{23}_{11}\text{Na}$ （2.8%）， ${}^{39}_{19}\text{K}$ （2.5%）。比较在分子形成稳定化合物时电子配对的情况，可以得出核内如形成P-P和n-n对，则核趋向稳定。

奇Z或奇N的核素的数量约为偶-偶核的1/2。不论是奇Z还是奇N，奇A核的数量是相同的，这说明中子和质子具有相似的性质，核子的稳定性与核电荷是无关的，且也说明质子和中子是各自配对的，而它们是不能相互成对的。

质子与质子和中子与中子有成对的倾向，这在轻元素由氧至氯的稳定核素分布中很容易看出。在此区内是连续形成稳定核素的，严格地说是一次加一个中子，在加了两个中子后，随后一次加一个质子，增加两个质子后，再如此重复增加。这样，偶Z元素有三个同位素，其质量为A，A+1，A+2，而奇Z元素只有一个同位素。如果增加一个中子后加质子或增加一个质子后加中子，则形成放射性核素。例如超过 ${}^{35}\text{Cl}$ 后增加的规律更复杂，常常是在奇



↓表示增加质子
•代表放射性核素



Z核素上增加两个中子形成质量数为A和A+2的一对稳定同位素。例如， ${}_{17}^{35}\text{Cl}$ — ${}_{17}^{37}\text{Cl}$ ， ${}^{39}\text{K}$ — ${}^{41}\text{K}$ ， ${}^{63}\text{Cu}$ — ${}^{65}\text{Cu}$ ， ${}^{79}\text{Br}$ — ${}^{81}\text{Br}$ ， ${}^{85}\text{Rb}$ — ${}^{87}\text{Rb}$ ， ${}^{107}\text{Ag}$ — ${}^{109}\text{Ag}$ 。

在天然发现的只有单一同位素的20个稳定元素中，有19个是奇Z核素，只有一个例外， ${}^4\text{Be}$ 。没有稳定同位素的元素也是奇Z核素，如 ${}^{93}\text{Tc}$ ， ${}^{147}\text{Pm}$ ……。

(2) 中子与质子比(N/Z) 除 ${}^1\text{H}$ 以外，所有核素均含有中子和质子。一般在稳定核素中 $N/Z \geq 1$ ，在Z由2至 ${}_{20}^{40}\text{Ca}$ 的轻核中， $N/Z \approx 1$ ，在重核中 $N/Z > 1$ 。

可将核素按Z或N绘成核素图，如图1-1和图1-2所示。

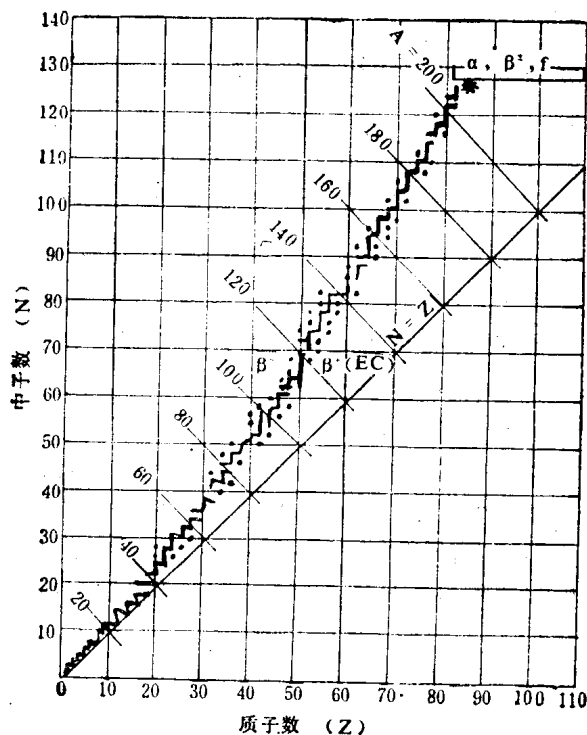


图1-1 β稳定核素分布图

大多数元素具有几种稳定同位素，所以核素图上的曲线由一些狭条或区组成，Z越高，此区也越宽。所有稳定核素位于这些区内，而区外的核素属放射性核素。在区上部的核素所含中子数比稳定核素区内的要多，由于中子可转变成质子，因此，这些核素能发射 β^- 粒子而趋于稳定。相反，在区下部的核素是缺中子的，此时质子转变成中子而发射 β^+ 粒子或进行电子俘获（见图1-1）。核素图1-1中，通过稳定区中心的曲线称为β稳定线。由图可知，随Z的增加，核素的N与Z之比也增加。核素的N与Z之比，在Z小于20时约为1，Z值为中等数值时约为1.4，Z在90左右时约为1.6。

完整的核素图是以中子数N为横坐标、质子数Z为纵坐标作成的（见图1-2）。它不仅包

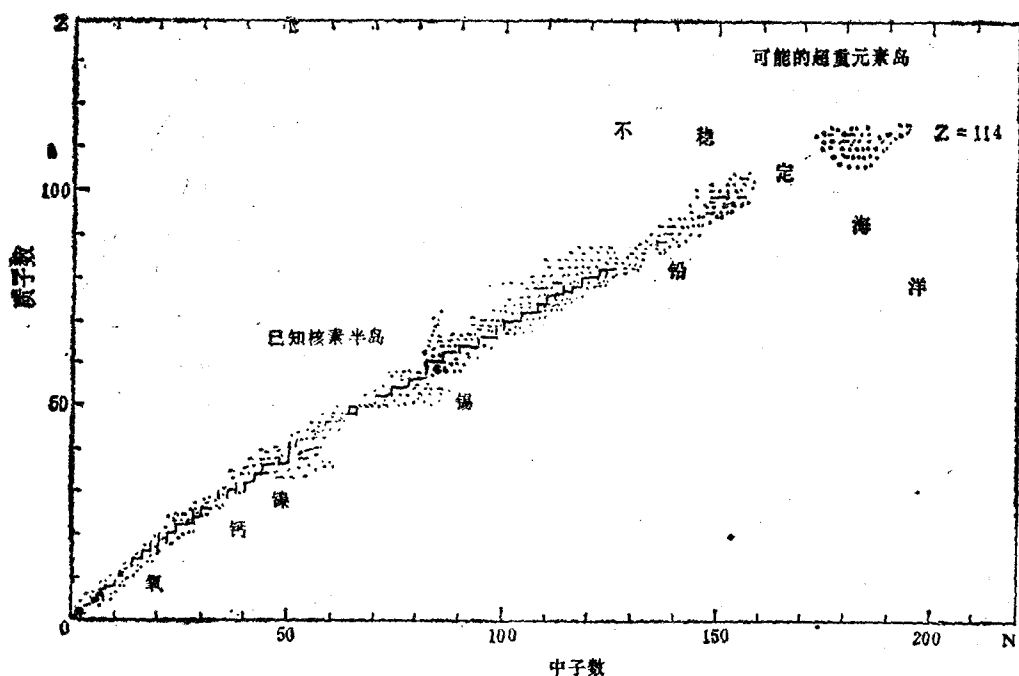


图1-2 核素图

含稳定核素和1600多个放射性核素，还包括理论上预言的在 $Z=114$ 附近存在的超重元素。若把不存在核素的区域比作不稳定海洋，则已知核素存在的区域（包括稳定核和放射性核）像一个狭长的半岛。在1966年左右，理论上预言在不稳定海洋中离开半岛不远处，在 Z 为114附近尚存在一个超重元素稳定岛（参见第五章第四节）。按现在的理论预计，在现有的核素半岛上，允许存在的核素还不止2000种，至少应有5000种。不断地研制出新核素的事实正在逐步证实这种预言。

二、原子核的性质

1. 原子核的半径

极大多数基态原子核的形状接近球形，其大小可由球半径表示。核半径的数量级在 10^{-15}m 左右，常用费米（fm）作为核半径单位， 1fm 等于 10^{-15}m 。目前还不能直接测量核半径，需要通过原子核与其他粒子相互作用间接测量。如利用高能电子对原子核的散射作用（即电子与核内电荷——质子的作用），或高能 α 粒子、质子、中子与原子核的核力作用。因此，原子核的半径不是其几何半径，而是由核电荷分布范围得到的核电荷分布半径或由核力作用范围得到的核力作用半径。这两者相差并不大，在10~20%以内。电荷分布半径比核力作用半径要小一些，可能是由于核表层分布的中子数比质子多。

高能电子在核上散射的结果表明，原子核内的电荷或质量不是均匀分布的，其电荷密度或质量密度在边界区逐渐下降。图1-3示出核质量密度（ ρ ）在核内的分布。核内中间部分的质量密度（ ρ_0 ）为一常数，离核心一定距离后 ρ 值开始降低。核半径 R 定为核心至 $\rho=0.5\rho_0$ 处的距离。 $0.9\rho_0$ 至 $0.1\rho_0$ 间的距离称为表层厚度 t_s 。由图1-4可知，轻核与重核的中间部分密度几乎相等，其表层厚度 t_s 也相近， t_s 为 $(2.4\pm 0.3)\text{fm}$ 。

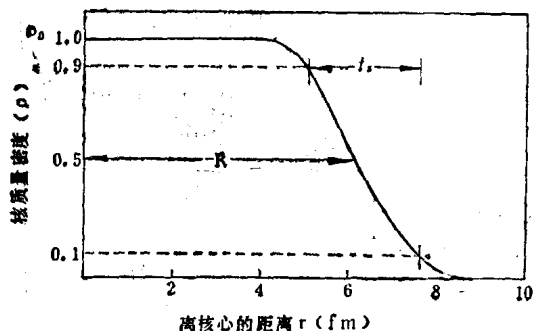


图1-3 核质量密度分布

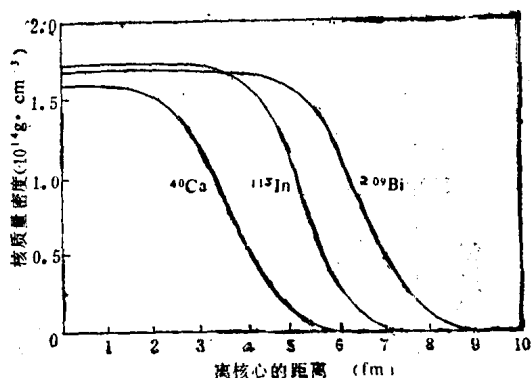


图1-4 ^{40}Ca , ^{115}In 和 ^{209}Bi 的核质量密度分布

$$\text{由于 } \rho \propto \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} \approx \text{常数} \quad (1-1)$$

$$\text{因此 } R \approx r_0 A^{1/3} \quad (1-2)$$

式中, R 为核半径, A 为质量数, r_0 为常数, 核电荷分布半径的 r_0 约 $1.1 \sim 1.3 \text{ fm}$, 核力作用半径的 r_0 约 $1.3 \sim 1.5 \text{ fm}$ 。

由(1-2)式可知, 原子核的体积 v 与质量数 A 成正比, 即每个核子所占的体积近似为一常数, 而核子的质量相近。即核子密度也大致相等。设原子核的质量为 m_n , 则原子核的平均密度为

$$\rho = \frac{m_n}{v} \approx \frac{m_n}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} \quad (1-3)$$

由 $A/m_n = N_A$ (阿佛加德罗常数), 即得

$$\rho \approx 10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

由此可见, 核物质密度是惊人的巨大, 每立方厘米竟达几亿吨重!

2. 原子核的质量

原子核的质量很小, 以普通质量单位表示要小于 10^{-21} g , 因此采用 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 作为原子质量单位, 符号为 u^* 。 $1u = 1.9926482(52) \times 10^{-23} \times 1/12 = 1.6605402(10) \times 10^{-24} \text{ g}$ 。

应该注意, 元素质量表上的数据是原子质量, 因此核质量应扣除电子的质量和与其结合能相当的质量。一般因结合能很小, 此项可略去。氢原子的质量为 $1.007825050(02)u$, 电子质量为 $0.000548579903(13)u$, 质子质量为 $1.007276470(12)u$, 中子质量为 $1.008664904(12)u$ 。

原子核质量方面的一个重要性质是原子核虽由中子和质子组成, 但其质量不等于所有核子的质量之总和。例如, 氘核(^2H)由一个中子和一个质子组成, 但氘核的质量为 $2.013552u$, 而质子和中子的质量之和为 $1.007276 + 1.008665 = 2.015941u$, 二者相差 $0.002389u$ 。这

* 在 ^{12}C 单位之前, 物理原子量单位采用 ^{16}O 原子质量的 $1/16$ 作为原子质量单位; 化学原子量单位采用氧元素(含 ^{16}O , ^{17}O 和 ^{18}O)质量的 $1/16$ 作为单位。 ^{12}C 单位与化学氧单位之差为 0.005% , 而物理氧单位比 ^{12}C 单位要大 0.0318% 。

种原子核质量与其组成核子质量总和之间的质量差称为原子核的质量亏损。每个原子核都有质量亏损。如 ${}^4\text{He}$ 核的质量亏损为 Δm ,

$$\Delta m = 2m_p + 2m_n - m_{{}^4\text{He}} = 2 \times 1.007276 + 2 \times 1.008665 - 4.001506 = 0.030377\text{u} \quad (1-4)$$

由于质量表上给出的是原子质量, 因此质量亏损计算时一般可直接采用原子质量。如,

$$\Delta m_{Z,A} = Zm_{{}^1\text{H}} + (A-Z)m_n - m_{Z,A} \quad (1-5)$$

式中 $m_{{}^1\text{H}}$ 为氢原子质量, $m_{Z,A}$ 为 ${}_Z^AX$ 的质量。这是由于 Z 个氢原子中的电子质量与 ${}_Z^AX$ 原子中的 Z 个电子质量正好相抵。严格地说, 这是近似的, 因没有考虑电子结合能因素, 但其影响极小。

质量亏损 $\Delta m_{Z,A}$ 对所有原子核均为正值, 即 $\Delta m_{Z,A} > 0$ 。因为能量(E)与质量(m)都是物质的属性, 其相互关系为

$$E = mc^2 \quad (1-6)$$

其中 c 为真空中的光速。此式表明, 具有一定质量的物质也具有由(1-6)式确定的能量。

按上式, 对应于1g质量的能量为

$$\begin{aligned} E = mc^2 &= 10^{-3}\text{kg} \times (2.9979246 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \\ &= 8.9875518 \times 10^{13}\text{J} \end{aligned}$$

一个原子质量单位 u 所对应的能量为

$$\begin{aligned} E = mc^2 &= 1.6605402 \times 10^{-27}\text{kg} \times (2.9979246 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \\ &= 1.4924191 \times 10^{-10}\text{J} \end{aligned}$$

在核物理中, 焦耳(J)单位显得太大, 常用电子伏特(eV)作能量单位。1eV是一个电子在真空中通过电位差为1V时所获得的动能。

$$\begin{aligned} 1\text{eV} &= 1.6021773 \times 10^{-12}\text{erg} \\ &= 1.6021773 \times 10^{-19}\text{J} \end{aligned}$$

因此, $1u = 931.4943\text{MeV}$

对运动粒子的质量, 相对论还指出 m 与其运动速度有关,

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (1-7)$$

式中 v 为粒子运动速度, m_0 是粒子的静止质量($v=0$)。此式表明, 粒子的质量随其运动速度增加而增大, 相应地其能量也增大。

按质能联系公式, 原子核的质量亏损 Δm 必有相应的能量变化, 即

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (1-8)$$

此式说明自由核子结合形成原子核时会释放能量, 这种能量称为原子核的结合能。核素 ${}_Z^AX$ 的结合能通常用 $B(Z, A)$ 表示。即

$$B(Z, A) = \Delta m(Z, A)c^2 \quad (1-9)$$

对于 ${}^2\text{H}$ 核, 其结合能 $B({}^2\text{H}) = 0.002390 \times 931.5 = 2.225\text{MeV}$, 而 ${}^4\text{He}$ 核的结合能为 $0.030377u \times 931.5 = 28.30\text{MeV}$ 。

原子核中每个核子对结合能的贡献, 通常用平均结合能 B/A 表示, 又称比结合能。例如, 氘核的平均结合能为 $2.225/2 = 1.113\text{MeV}$, 而 ${}^4\text{He}$ 核的平均结合能为 $28.30/4 = 7.075\text{MeV}$ 。显然平均结合能大的原子核结合紧密, 因此, 平均结合能反映原子核的稳定性。原子