

高等学校教学用书

放射性概论

FANGSHEXING GAILUN

A. H. 穆林 著
沈志洪 译

人民教育出版社

高等学校教学用书



放射性概論

FANGSHEXING GAILUN

A. H. 穆林 著
沈志洪 譯

人民教育出版社

本书是根据苏联列宁格勒大学出版社 (Издательство Л. Г. У) 1955 年出版的阿·恩·穆林 (А. Н. Мулин) 著“放射性概论”(Введение в радиоактивность) 一书译出的。

全书共十三章, 内容包括: 原子核的一般性质; 同位素现象; 辐射的探测; α 、 β 、 γ 射线的性质和它们穿过物质及与其作用; 荷电粒子的加速; 核反应; 裂变散变反应; 中子的波性; 超高速粒子与原子核的作用以及新放射性元素等。

本书可作综合大学及高等师范院校化学系学习放射化学课程的教学用书, 也可供地质、生物等专业参考。

放 射 性 概 論

A. H. 穆 林 著

沈 志 洪 譯

北京市书刊出版业营业许可登记证字第 2 号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

人 民 教 育 印 刷 厂 印 装

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 經 售

统一书号 K13010·1055 开本 850×1168 $1/32$ 印张 9 $2/16$ 插页 1

字数 190,000 印数 0,001—5,000 定价 (6) 0.90

1962 年 8 月第 1 版 1962 年 8 月北京第 1 次印刷

序 言

本书是供非物理专业而专门从事放射性方法的应用方面的读者之用的简明教材。本教材首先适用于化学系学生，但我期望它对地球化学工作者，地质学工作者或生物学工作者也会是有益的。因此，作者是对读过大学化学系教学计划中所规定的正规物理学教程的读者而写的。

本书仅包括放射性和原子核物理学方面的基本知识。

应用问题，特别是，放射性指示剂的方法几乎没有涉及；在物理化学中与放射性现象的应用有联系的某些问题，读者可参阅其他作者的书籍。

放射性测量法的原则对为了进行有效的实际工作来说，叙述得还嫌不够详细，这里介绍读者几本关于测量法方面的参考书，首先是 В.И. 维克斯列尔、Л.В. 格罗色夫和 В.М. 伊沙也夫著《研究射线的电离法》（《Ионизационные методы исследования излучений》，Гостехиздат, 1951）专论和 В.包奇卡略夫、И.凯利姆-马尔库斯、М.利沃夫和 Я.普卢斯林著《 β -和 γ -射线源的放射性的测量》（《Измерение активности источников бета-и гамма-излучений》，Изд. АН СССР, 1953）一书。本书没有编入宇宙射线的一章。但在本书很多地方，都涉及到了关于这种射线的部分知识。

在每章末所列出的参考书刊还不够完全，仅收集了主要的，并且几乎只有苏联的或俄译本的参考书刊；但读者可以根据在本书中所提到的每一本书或一篇文章中找到你们所感兴趣问题的原始文献。

原子核物理学的发展现今以非常快的速度前进。不断出现着

新的研究方法,也完善着旧有的,不断在发现愈来愈新的“基本”粒子;我們很快就能听到关于“反质子”(具有质子质量而带负电荷的粒子)的发现。原子核光谱学的新工作校正而且有时更改了放射性核的“蜕变图式”。发现了许多新的放射性(和稳定的)同位素;加速重粒子的技术的发展在最近的将来肯定会引致获得新的超铀元素。

本教材不能满足讀者不断充实自己学識的需要。这一事实,除了叙述簡要和不完备外,并受本书名称的限制,因为本书不能超越放射性概論研究的范围。

本书稿曾經苏联科学院通訊院士И. Е. 斯大利科教授、А. И. 拉特涅尔和 Г. В. 郭尔史關夫作了校閱,并提出了許多宝贵意見,作者深表謝意。

在本书整理出版中,化学候补博士 Н. И. 泡列娃姪和 В. И. 巴拉曼諾夫給予了很多具体帮助,借此也表示感謝。

А. 穆林

目 录

序言	vii
第一章 原子核的一般性質	1
第一节 原子核的电荷	1
第二节 原子核的质量	3
第三节 带质子-中子的核模型	6
第四节 核内核子間的結合能	7
第五节 核的自旋、核的磁矩和四极矩	11
参考书刊	15
第二章 同位素現象	17
第一节 物质的同位素組成	17
第二节 同位素系	19
第三节 同位素的分离	23
参考书刊	30
第三章 天然放射性	32
第一节 放射性的发现和 α -、 β -以及 γ -射綫的发现	32
第二节 放射系	34
第三节 放射性蜕变定理	40
第四节 放射性漲落	53
第五节 放射性单位	55
第六节 放射性实验样品內的 γ -放射性的比較	56
第七节 另一些天然放射性元素·軌道电子的俘获	57
第八节 用放射性的方法測定地質年令	59
参考书刊	62
第四章 放射性輻射强度的探測和測量方法	63
第一节 电离法	63
第二节 螢光計数管	71
第三节 威尔逊室	72
第四节 照象法	75
第五节 契倫科夫效应的应用	76
第六节 量热法	77

参考书刊	78
第五章 α-粒子和其穿透物质	79
第一节 α -粒子的能谱	79
第二节 长射程的 α -粒子·盖革-努塔尔法则	80
第三节 当 α -粒子穿透物质时引起其能量损失的过程	83
第四节 α -粒子的射程	86
第五节 原子核对 α -粒子的散射	90
第六节 α -蜕变过程的机构	95
第七节 反冲原子	97
参考书刊	100
第六章 β-射线和其穿透物质	102
第一节 β -谱	102
第二节 中微子	104
第三节 正电子	108
第四节 核对 β -蜕变和 K -俘获的稳定性	109
第五节 当电子穿过物质时其能量的消耗	113
第六节 弹性散射 电子在物质中的射程	115
参考书刊	120
第七章 γ-辐射和它与物质的相互作用	121
第一节 γ -量子在电子上的散射·光电吸收	121
第二节 电子偶的形成·各种效应的比较作用	124
第三节 测定 γ -射线能量的基本方法	127
第四节 根据放射性同位素所放出的射线鉴定放射性同位素	132
第五节 内转化现象	133
第六节 核的同质异能	135
参考书刊	138
第八章 荷电粒子的加速法	139
第一节 概论	139
第二节 离子静电加速器(静电加速器)	140
第三节 回旋加速器和稳相加速器	141
第四节 电子回旋加速器	147
参考书刊	150
第九章 核反应	151
第一节 中子的发现·它的质量	151
第二节 中子的放射性	154

第三节	人工放射性的发现	155
第四节	核反应的能效应	156
第五节	库伦势垒在核反应中的作用	159
第六节	核反应的机构·核过程的竞争	160
第七节	核反应产率·有效截面	161
第八节	借助于荷电粒子获得中子	164
第九节	中子的减速	167
第十节	中子与核的反应· (n, γ) 反应	170
第十一节	反照率	174
第十二节	(n, p) 和 (n, α) 反应	174
第十三节	关于中子与物质相互作用的几点补充说明	177
第十四节	核的光电效应	179
第十五节	在质子作用下进行的反应	182
第十六节	在氘核作用下进行的反应	183
	参考书刊	185
第十章	裂变反应	186
第一节	一般说明	186
第二节	核裂变现象的发现	189
第三节	核在中子作用下的裂变	192
第四节	裂变时产生的中子	194
第五节	裂变产物·裂变过程的能量平衡	196
第六节	自发裂变	199
第七节	核的链式反应·铀反应堆	200
	参考书刊	204
第十一章	中子的波性	206
第一节	晶态物质上的中子衍射	206
第二节	单色中子的获得	208
第三节	干涉散射时相的改变	212
第四节	中子的磁相互作用和偏振化作用	214
	参考书刊	215
第十二章	超高速粒子与原子核的作用	216
第一节	在极大能量粒子作用下的核反应	216
第二节	π -和 μ -介子	219
第三节	超子和重介子	223
	参考书刊	224
第十三章	新放射性元素	226

第一节 超铀元素.....	226
第二节 周期系繼續的可能性.....	230
第三节 鐳放射系和天然放射系的付鏈.....	232
第四节 填入到 I, II. 門捷列夫周期系中空位处的元素.....	233
参考书刊.....	234
附录.....	236

第一章 原子核的一般性質

关于放射性、原子核的結構、原子核轉变以及原子核間和核射綫与物質間互相作用的学說，是科学中最重要部分之一。

关于物質的原子結構的知識是現今大家所熟知的。原子系由按其几何体积來說是很小的、荷正电荷的核(实际上原子的全部質量都集中在核里)与环绕核回轉的荷負电荷的电子所組成的体系。

核电荷数等于(以 $e=4.803 \times 10^{-10}$ 靜电单位来表示)門捷列夫周期系內的原子序数，它决定了原子壳层上电子的数目以及該层的性質。由此而知，尽管原子核本身并不直接参加一般的化学反应，在化学反应过程中它是不变的，但核电荷却决定着原子的全部化学性質。

核的电荷和質量是原子核的两个最重要的性質，这两个性質决定了原子核的特性。所有的原子核(現在已知的各种不同的原子核近一千个)都可以用二度体系图来表示，其一坐标(位置)是質量，而另一坐标是电荷量。这种图的例子将在以后叙述。

第一节 原子核的电荷

中性原子的电子层上的电子数是由原子在周期系內的序数— Z 所决定的。因此門捷列夫周期系中第 11 号元素——鈉原子的电子层是由 11 个电子組成的，而鐳($Z=100$)的电子层是由 100 个电子組成的。

很明显，鈉核的电荷等于 $+11e=11 \times 4.803 \times 10^{-10}$ 靜电单位。在这里提起一句，一庫倫等于 3×10^{10} 絕对(靜电)电量单位。

原子內的電子按一定的電子層而分布，例如，離核最近的電子層稱為 K -層， K -層上有（在所有情況下都如此除了氫原子序數 $Z=1$ 外）兩個電子（ K -電子），其次的一層稱 L -層，它有 8 個電子，以此類推。如果附加能量給原子殼層（用高速電子襲擊物質，以光或熱激發原子），則原子殼層的能量呈不連續的增加，原子由一種量子狀態轉變到另一種狀態——“高量子狀態”。反之，則轉入“低”量子狀態，即低能狀態，原子能放出光量子（一部射線能），而射線頻率 ν 可由眾所共知的關係式 $h\nu = \Delta E$ 求出，式中， ΔE —原子殼層的二個能量狀態之差，而 h —普朗克常數（ $h = 6.625 \times 10^{-27}$ 爾格·秒）。電子由 L -層（或更高電子層）轉到 K -層的空位置上時（雖然用電子襲擊），所放出的樂琴射線的頻率可由 K -層和 L -層（或更高层）的電子結合能之差來決定。而原子內電子結合能是由電子與荷正電的核以及與原子內的其他一些電子的庫倫作用，即靜電作用所決定的。為了簡便起見，可認為核對輻射電子的作用，在某種程度上被存在於核與輻射電子之間的屏蔽核電荷的電子的作用所抵消。正象摩斯萊（1913）實驗所證明的一樣，他的實驗結果是：全部元素的樂琴射線的特性綫條的頻率都滿足了關係式 $\nu = b(Z-a)^2$ ，式中， a 和 b —常數，這兩個常數僅由綫條的系列而定（即隨電子躍遷類型而定，例如從 L -層到 K -層），而與元素無關。由此可知，原子殼層上的電子數目以及原子核的電荷都可用研究該元素的特性樂琴譜方法來確定。

核電荷的測定可歸結於測定該元素的原子序數，實際上一般都用化學分析法來解決。

必須指出，在沒有任何附加假設時，核電荷可根據 α -粒子（某些放射性元素的核所輻射出的高速氦核）在由相應的物質作成的薄片中的散射的實驗結果來確定。這樣實驗的敘述及理論將在描述 α -粒子性質的一章中講到。

第二节 原子核的质量

化学上所规定的元素的原子量是该元素的原子质量与氧原子质量 $1/16$ 之比。为了把化学原子量(即相对的数值)换算成绝对的数值,还需要知道,在该物质的一定称量里含有多少原子。

大家知道在一克分子的单质里含有 6.025×10^{23} 个分子。那末一个氧原子就重为 $16.00000 : 6.025 \times 10^{23} = 2.657 \times 10^{-23}$ 克。但必须指出,这个质量的精确度只取次于亚佛加德罗常数的精确度,即精确到 0.1% 。

除此而外,这样测得的氧和其他元素的原子质量是与该单质所有的原子质量相同。

但也有用物理法测定原子质量的方法,它们与化学分析法无关;物理方法中的一些主要方法是质谱仪法,这些方法是基于测定该物质正离子(即失去一个或几个电子的原子)的电荷与质量之比值。

当电子轰击在气体放电中的气体,对某些元素的盐类进行加热或被电子轰击时,则生成正离子(例如加热 RbNO_3 生成 Rb^+ 离子),或用其他相似办法得到正离子。最简单的质谱仪的示意图如图 1 所示。

在离子源处所生成的正离子,被作用在 P 和 S_1 光栏间的电位差所加速。由 P 向 S_1 流动的离子所具有的动能— $E_{\text{动能}}$,由下式来决定:

$$E_{\text{动能}} = \frac{mv^2}{2} = eV, \quad (1)$$

式中, e 是离子电荷, m 是离子的质量。

离子通过 S_1 而进入到强度为 H 的均匀磁场中,此磁场的磁力线垂直于图面,很明显两磁极(在图上没有画出)是与示意图平行

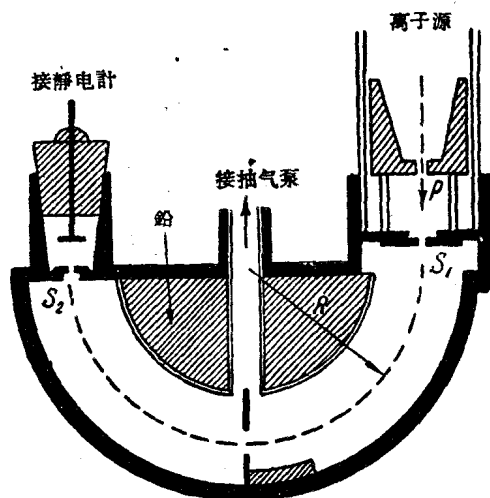


图1. 最简单的质谱仪示意图。

的。

上述的离子由 S_1 孔隙到 S_2 孔隙(见图)所走过的半圆路程的半径可由下式求得,

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{evH}{c}, \quad (2)$$

式中, c 是光速, e 与 H 是用绝对单位来表示, 即以静电单位来表示电荷, 而用奥斯特来表示 H 。由(1)与(2)式可求得通过 S_2 孔隙的离子的电荷与质量之比:

$$\frac{e}{m} = \frac{2Vc^2}{H^2 R^2}. \quad (3)$$

通过 S_2 孔隙的离子是根据离子传给与静电计联结在一起的集聚器的金属板的电荷来探索与测定的。如果保持恒定的磁场强度 H , 而改变 P 与 S_1 间的电位差 V , 则测得仪器“出口上”的电流后, 即可得到如图2的曲线。

如 H 与 R 值为已知, 而离子的电荷量(它是个有限值 e 的整数

倍)亦为已知,我們利用式(3)即可确定与电位差 V 相对应的离子质量是多少。于是,我們所利用的这个仪器便可测定单个离子的质量,也就是把被电离后的原子(或分子)进行特殊的电磁称量。

快速带电粒子对照象底板起作用,若把质谱仪相应地改变,便可用照象方法来代替电量测定法。这样的质谱仪图形如图3所示。我們可以看出,当 V 与 H 保持一定的值时,用照象法同时可测定不同质量的几种离子。这时所得到的照片如图4所示。

对周期系内各元素用质谱仪法研究,証明了只有相对的不多的几种元素是由一种类型原子所組成(例如氟、钠、铝、铍)。大多数元素是由不同原子量的几种类型原子所組成。具有相同的原子序数 Z (即属于同一元素),而有不同原子量的原子称为同位素。

好在各种同位素的原子的质量都趋近于整数,如果认为氧原

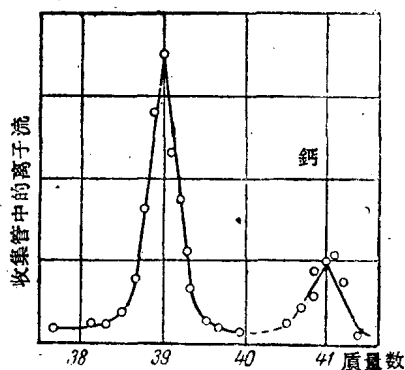


图2. 质量为39和41的钙的两种同位素的质谱曲线。

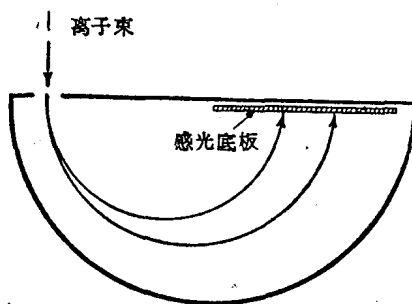


图3. 照象方法的质谱仪图。

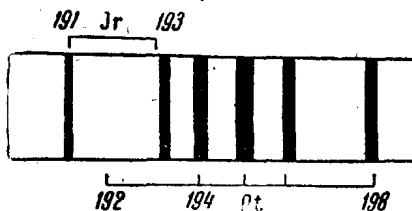


图4. 铀和铂的质谱图。

子質量為 16.00000 時，則只有在特別精密的測定下，才觀察到同位素的原子量不是整數，與整數相差 0.01。最接近該同位素原子量的整數稱為質量數 A 。

把化學元素符號的右上方標上質量數，即可用來表示各個同位素。例如，氯的兩個同位素可表示為 Cl^{35} 和 Cl^{37} 。

氧不是屬於只有一種同位素的元素，除基本的，分布最廣的同位素 O^{16} (99.76%) 外，它還含有兩個更稀有的同位素 O^{17} 和 O^{18} (0.04% 和 0.20%)。

在原子量的化學量度里，把天然混合的氧同位素 (O^{16} 、 O^{17} 和 O^{18}) 的原子量確定為 16.00000。在原子核物理學里經常應用原子量的物理量度。在這個量度里把氧的同位素 O^{16} 作為標準，把它的原子量認為是 16.00000。由此可見化學量度的質量單位比物理量度里的質量單位要大些，而與此相應，用“化學”單位來表示某一同位素的原子量的數值就小於物理單位量的數值。它們之間的換算，可借增補乘數 1.00072 ± 0.00005 來進行，這一數值可由自然氧的同位素組成來決定。

根據物理量度的單位，氫原子 (H^1) 的質量等於 1.008142，電子的質量等於 0.000548；於是，氫原子核——質子的質量等於 1.007594 質量單位，一個質量單位等於 1.661×10^{-24} 克。

第三節 帶質子-中子的核模型

根據各個同位素的原子量接近於整數的性質，便作出一個完全肯定的設想：所有的原子都是由許多單個（基本）粒子——原子量接近於 1 單位的核子——所組成的。試圖建立帶質子-電子的原子核模型是不現實的。根據這個構型，帶有質量數 A 和原子序數為 Z 的核應由 A 個質子（總荷電量為 $+Ae$ ）及 $(A-Z)$ 個電子 [總荷電量為 $(A-Z)e$] 所構成。這樣的模型誠然滿足了核的應有的 A 個質量

数和 Ze 电荷,但我們可以看出这样的核模型是有很大缺点的。

当发现中性的不带电的“基本的”粒子—中子 (它的质量很接近质子的质量,但它稍稍比质子的质量大些)后不久,关于正确的符合于客观真实的原子核模型,首先被苏联的物理学家 Д. Д. 伊万年科所提出。根据这样的模型,具有质量数为 A 和电荷为 Ze 的原子核是由 Z 个质子和 $(A-Z)$ 个中子所构成。因此,例如:具有质量数为 238 的铀同位素(U^{238})的原子核是由 92 个质子和 $(238-92)=146$ 个中子所组成的。保持质子和中子于核内的作用力的本质到现在还不十分清楚。可以说,在物理学家面前还有着“创立原子核的真实理论来代替现在还存在的经验论的任务,当我们在研究原子核物理领域内事实上能做的要比知道的还多的时候”(费尔米)。核内核子(质子和中子)间的作用力看来是属于所谓“交换”力之列,在已知的程度内,这个力好象由二个共有电子相联系着的氢分子内两个原子的结合力一样。

我们对原子核内作用力的本质以及组成原子核的核子体系结构的特性的知识的不足,并不能影响我们对类似的体系的稳定性以及其他性质作出一系列的重要结论。这些结论都是以很熟悉的守恒定律作为基础的,这些定律断定了某些一定的物理量,首先是它的能量,而后动量、动力矩、电荷等等是“守恒的”,也就是它们都不会由无而生,并且也永不会消灭。我们在本书中将碰到这种结论的许多例子。

第四节 核内核子间的结合能

借某些力的作用,我们能够从核中夺掉一个粒子(质子或中子)。由于我們用的是稳定核,即核子的稳定体系,则为了夺掉一个粒子,我们必须对它作一定的功,换言之,即附加给该体系一定的能量。根据能量守恒定律,所附加的能量值与方法完全无关。至

于粒子如何被夺掉仅与核的本性有关，也就是与核内的质子及中子数和核的结构有关。

核内粒子的结合能是负值，它的绝对数值等于夺掉该粒子所需的功。一般所说的结合能的绝对值，在这个意义上，通常举例表示如下：“ Bo^9 核内呈最弱联系的中子，其结合能等于 2.6×10^{-8} 尔格”。

整个核的结合能 E 是以全部的功来表示，即把核内所有的中子和质子彼此分开，也就是说把核完全“分成”组成部分时所必须作之功。

测定核的结合能是一个非常重要的问题，以实验方法来解决这个问题时是比测定原子的电子层上全部电子结合能要简单得多。在测定电子结合能时，要测出电离的全部依次电位，其实就是要测知夺掉第一个第二个第三个……一直到电子层上最后一个电子所作的功。

如果把组成该核的粒子的质量总合与该核的真实质量 m_i 作比较后，则亦能计算出核的结合能。事实上，如果设想具有质量数为 A 、电荷为 Ze 的核是由 $(A-Z)$ 个中子和 Z 个质子所合成，则在合成时放出的能量等于核结合能的绝对值 E 。但若体系能量减少 E ，则根据相对论中的一个最重要结论：体系质量减少 Δm ，而 Δm 与 E 有以下的关系式

$$\Delta m \cdot c^2 = E. \quad (1)$$

这样就可借关系式：

$$E = \{ [Z \cdot m_p + (A-Z)m_n] - m_i \} \cdot c^2, \quad (2)$$

计算出核的结合能。式中， m_p —质子的质量， m_n —中子的质量。

由于氢原子的质量 M_H 等于质子的质量与电子的质量 m_e 之总和，而具有质量数为 A 和原子序数为 Z 的原子质量 M_A 应等于核质量 m_i 与 Z -电子质量之总和 ($M_A = m_i + Z \cdot m_e$)，可把关系式(2)