

放射性同位素 实验室技术

R. A. 费尔斯 著
B. H. 帕克斯

科学出版社

放射性同位素 实验室技术

R. A. 费尔斯 著
B. H. 帕克斯

鲁 克 译
向 民 等 校

科 学 出 版 社

1977

内 容 简 介

本书比较全面而扼要地介绍了有关放射性同位素使用方面必需的基本技术知识。内容大体上分四部分：首先介绍基础核物理学知识、同位素制备和放射性辐射防护，以及保健物理学中的一些最新定义和推荐值；其次介绍实验室设计、危险性的控制和废物处理；以后又从实用角度上来论述各种探测和测量方法，其中包括计数统计学和装置的选择两章，最后几章介绍了若干放射性同位素技术和应用，其中一章是关于在一定系统中使用同位素的实际可能性的计算。

本书侧重实际问题，讲求实用，可供从事研制和使用放射性同位素的科技人员和大专院校有关专业的师生参考。

R. A. Faires & B. H. Parks

RADIOISOTOPE LABORATORY TECHNIQUES

Third Edition

Butterworths, London, 1973

放射性同位素实验室技术

R. A. 费尔斯 著

B. H. 帕克斯

鲁 克 译

向 民 等 校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

北京印刷三厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1977 年 10 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1977 年 10 月第一次印刷 印张：10 1/8

印数：0001—4,980 字数：230,000

统一书号：13031·628

本社书号：915·13—8

定 价：1.05 元

译者的话

在毛主席革命路线指引下，我国的工农业生产和科学技术事业不断迅速发展，同位素应用技术已广泛地应用到科学研究和国民经济的各个部门，并取得了许多可喜的成绩。

遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，我们翻译了此书，以供读者更好地了解、掌握和使用放射性同位素技术作参考。

中译本是根据原书第三版译出的。第三版在内容上有较多刷新，增补了“液体闪烁计数技术”一章，并在“保健物理学”一章中介绍了有关国际组织的最新推荐值和定义。鉴于本书的详细内容在“引言”中已有介绍，这里不再赘述。

本书译文经向民、赵允武、谢众蛟等同志校订，特此致谢。

由于译者思想水平和业务水平所限，书中难免存在错误之处，请读者批评指正。

第三版前言

本书在过去十四年间得到一定好评,发行过两版,重印过一次,并被译成德、日、波兰和西班牙文。

因为原书只叙述一些实际工作的一般性指南,理论问题留给参考文献内列出的那些内容更丰富的著作去讨论,这样才有可能不作修订而连续发行若干年。但这种情形不能再继续下去了,所以我们对它作了一次彻底的刷新,删去了一些陈旧的方法,力图介绍一些新的方法。可是我们并未单纯地为改写而改写,无论哪里,根据我们的经验以及别人的意见,只要认为老方法好,我们就把它保留下来。

凡是实际可行的地方,我们均已采用国际单位制,但是由于放射性研究与很多学科有联系,要是处处都套用这些单位,有可能缺乏明确性。我们认为,采用国际辐射防护委员会和国际辐射学单位委员会的最新值和定义是合适的。

在第二版出版时,几乎尚不了解固态探测器和契连科夫计数技术,而液体闪烁计数技术也只是处在初始状态。现在情况大大改观了,因此,在这一版里,增加了“液体闪烁计数技术”一章,它是由我们在哈威尔教育与训练局的同事 R. D. 斯塔布斯承担编写的。我们全面地修订了有关保健物理学和有关分析用放射性技术的章节,引用了新的数据和近代实验。在最后几章里,我们力图增加实际应用细节方面的内容,但并没有打算使它成为一本实验资料手册。(下略)

R. A. 费尔斯

B. H. 帕克斯

目 录

译者的话	iii
第三版前言	iv
引言	1
第一章 原子核物理基础	3
第二章 辐射的性质	22
第三章 放射性同位素的制备	33
第四章 保健物理学初步	47
第五章 实验室	62
第六章 危险性控制	75
第七章 去污和废物处理	90
第八章 实验室器械	97
第九章 电子学技术导引	111
第十章 累计型探测装置	120
第十一章 粒子探测器及其使用	130
第十二章 与探测器配用的测量装置	159
第十三章 误差与修正	170
第十四章 计数统计学	180
第十五章 计数装置的选择	193
第十六章 特殊计数技术	202
第十七章 液体闪烁计数技术	217
第十八章 同位素和射线实际应用的可能性	239
第十九章 分析用放射性技术	250
第二十章 自射线照象术和 γ 射线照象术	270

第二十一章 同位素与辐射的应用.....	290
----------------------	-----

附录

一、物理常数和定义	302
二、简易盖革计数率计	305
三、 β 射线的半值厚度-能量关系.....	307
四、 β 粒子的射程-能量关系.....	308
五、 γ 射线的半值厚度-能量关系.....	309
六、失效时间修正表	310
七、死时间为 100 微秒时的修正计数率	312
八、几种有用的放射性同位素	314

引 言

人造放射性物质大量使用还只有几年的功夫^{*}，可是在这段时间内，在许多研究和工艺领域中，已把它作为工具来使用了。

现在我们来考察一下“放射性同位素”这个术语的含意。

“放射性”是指放出辐射的意思。正如在第一章里就会知道的，这可能是 α 辐射，也可能是 β 或 γ 辐射，这些辐射具有极不相同的性质。它们能直接地或间接地通过次级效应引起电离，而这正是探测它们的基础；放射性也可能对人体造成危害，因此有必要建立内、外照射的最大水平限度，并注意不要超过这些限度。还可以利用 γ 辐射来引起化学效应，例如聚合作用、硫化作用以及其他一些过程。随着核动力规划的实施，作为其副产物，可以获得强的辐射源，使这些效应看来有着非常重要的技术意义。强 γ 源的其他应用有治疗、杀菌、控制虫害和使植物产生某些所希望的突变。射线具有穿透能力，因此可用来进行各种非破坏性检验，如厚度测量和辐射照象等。正因为有这种穿透性，所以必须考虑防护问题，以便控制到达人体的外照射水平。

“同位素”是指在化学元素周期表中处于“相同位置”上。这就是说，一种元素的同位素都具有相同的化学性质。因此，“放射性同位素”与相应的稳定同位素一样，遵循相同的化学过程，不过它具有放射性标记作用，可以示踪反应的历程、元

^{*} 这是从本书初版时间即 1958 年的角度上讲的。——译者注

素的吸收或代谢过程。作为物理标记，可以用来检验炉内或连续工艺流程中的混合率，测量流速，确定渗漏位置以及许多别的事情。考虑到这些实际应用，为此需要放射性物质物理特性及其探测方法方面的知识。由于极微小质量的放射性物质放出的辐射是很容易探到的，所以示踪方法是一种有发展前途的、十分灵敏而又方便的分析工具，其探测限度常常能比一般常用方法高好几个数量级。

本书大体上分四部分。头几章介绍基础核物理学知识，同位素制备和放射性辐射防护。其次几章是实验室设计，危害性的控制和废物处理。第三部分从实用角度上论述各种探测和测量方法，其中包括计数统计学和装置的选择两章。最后几章介绍了若干放射性同位素技术和应用，其中包括一定系统中使用同位素的可能性计算一章。

虽然尽可能地举出了一些进修读物，以便需要的人能够对某些具体问题作进一步了解，但是本书不可能是一个完备的指南。本书目的只是在指出一些应该遵循的原则和给出尽可能多的确实资料。

第一章 原子核物理基础

定 义

在讨论放射性同位素的制备、性质和应用之前,需要简单地考察一下原子的构造。在这段里,先来定义一些核物理中用到的单位和术语,将是有帮助的。

统一原子质量常数(以前称为原子质量单位, a.m.u.)

统一原子质量常数是碳-12 原子质量的十二分之一,即等于

$$1.66043 \pm 0.00008 \times 10^{-27} \text{ 千克.}$$

它又可以表示为阿佛伽德罗常数的倒数,阿氏常数等于 $6.02252 \pm 0.00028 \times 10^{23}$ 个/克分子。

电子伏

电子伏及其倍单位千电子伏和兆电子伏,是表示原子和原子核能量的方便单位。1 电子伏是一个电子沿电场方向通过 1 伏特电位差时所获得的能量。

$$1 \text{ 电子伏} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 焦耳} = 3.82 \times 10^{-20} \text{ 卡.}$$

质能关系

爱因斯坦证明了质量与能量是可以相互转换的,转换方程如下:

$$E = mc^2,$$

其中 E 是能量(焦耳), m 是质量(千克), c 是光速 (2.997925

$\pm 0.000003 \times 10^8$ 米/秒)。

这个方程的结论是：粒子的静止质量有一个等效的能量，运动粒子的质量比它的静止质量要大。由此方程可得到

1 原子质量单位 = 931 兆电子伏。

亚原子粒子

电子 质量为 5.48588×10^{-4} 原子质量单位；带负电荷，等于 1.6×10^{-19} 库仑(安培·秒)。

质子 质量为 1.007276 原子质量单位；带正电荷，在量值上与电子相等。

中子 质量为 1.008665 原子质量单位；不带电。

这三种粒子是组成原子的基本粒子。还有其它一些亚原子粒子，例如介子、中微子和反质子等，不过这里不需要考虑它们，想了解它们特性的读者可查阅原子核物理学方面的著作。

原子的结构

卢瑟福-玻尔原子模型同新的原子结构概念是相当符合的，它能对原子物理学范围内的各种现象、化学的化合和化学价以及原子核的性质给出合理解释。这个模型假设在原子中央，有一个由质子和中子组成的核心(叫做原子核)和沿一定轨道环绕原子核运动的电子云。每一轨道最多只能容纳两个电子，几个轨道组合在一起，又形成壳层结构(图 1.1)。

最外几个壳层中的电子是价电子，参与化学的化合作用。因为电子按周期方式填充壳层构成原子的结构，所以这就表明，门捷列夫的“元素周期表”是十分接近现代原子概念的。

每一轨道代表一个确定的能级，因此电子从一个轨道跃迁到另一个轨道的运动就要涉及到能量的变化，结果便有一

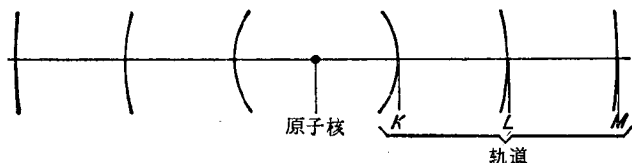


图 1.1 原子核周围的电子轨道

定能量的量子释放出来。最内诸层壳层间的电子跃迁引起产生 X 射线，X 射线的波长表征发射壳层和有关元素的特征。较外壳层间电子跃迁会产生光辐射，放出特征谱线。

凡与放射性相联系的现象，皆与原子核有关，因此在原子核物理学中研究；原子物理学研究的则是各种核外现象。这两门学科所涉及到的能量有很大差别。例如，靠化学键结合在一起的两个原子，其相互作用势能仅为电子伏数量级，X 射线的产生涉及到千电子伏量级；然而原子核内发生的变化，在大多数情况下，有兆电子伏量级的能量被释放出来，或要有兆电子伏量级的能量才能引起变化。

原 子 核

原子的直径约为 10^{-8} 厘米，而原子核的直径约为 10^{-12} 厘米，比原子大约小一万倍。由于原子核是由质子和中子(每个质量约为 1 原子质量单位)组成的，而一个电子的质量却只有 5.48588×10^{-4} 原子质量单位(约为质子质量的 $1/1837$)，所以事实上原子的所有质量是集中在原子核上。由核与原子的相对大小，就可以得到核密度约为 10^{14} 克/厘米³ 量级，这暗示着：把核粒子集合在一起的诸力，与在原子核外面遇到的那些力是极不相同的。至于对这些内容的详细研究以及目前原子核知识发展水平的讨论，读者可以参阅本章末列出的参

考书。在本书里，凡是论及原子核的某些特性时，只是直接引用，不予证明。

原子与核

因为原子是电中性的，原子核所带正电荷总量就必定等于轨道电子所带负电荷总量。在原子核内，只有质子是带电粒子，其电荷在量值上与电子相等。由此可见，原子核内的质子数和所有轨道上的电子数一定是相同的。这个数， Z ，叫做元素的原子序数，它决定着元素在元素周期表上的位置。因此 Z 和元素的化学符号一样，亦能够表征元素。

另一个重要的数是质量数 A 。它是核内质子数与中子数之和，以原子质量为单位时，又是原子质量（原子的精确质量）最相接近的那个整数，原子质量等于原子核及核外电子质量之和。（化学上的原子量是原子的相对重量，取碳原子的重量为12.000作基准。）

现在我们来定义几个在讨论核间相互关系时要用到的术语。

核素 具有特定核特征的某一种原子。例如，质量数32、原子序数15的磷以及质量数60、原子序数27的钴，都是核素。

同位素 Z 值相同但 A 值不同的一组核素称为该元素的同位素。因而质量数32的磷与质量数31的磷皆为磷的同位素。同位素这个术语常常用得不够严谨，在本来应该用“核素”的场合却用了“同位素”。举例来说，我们就常听到“研究中用了‘同位素’钴-60和磷-32”这类话。这种说法固然是不确切的，不过我们不敢对这种现代用法提出批评，因为我们自己就给本书取名为放射性同位素实验室技术，而未采用比较确切但带有学究气的《放射性核素实验室技术》。

表 1.1

	Z	A	N	举 例
同位素	相 同	不 同	不 同	$^{31}_{15}\text{P}$ 和 $^{32}_{15}\text{P}$
同量异位素	不 同	相 同	不 同	$^{32}_{15}\text{P}$ 和 $^{32}_{16}\text{S}$
同中子异荷素	不 同	不 同	相 同	^2_1H 和 ^3_2He

下面两个术语有时也会遇到,但比较次要:

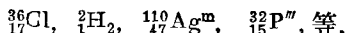
同量异位素 质量数相同,但原子序数不同的核素。

同中子异荷素 中子数相同的核素。

上述诸种关系概括地列在表 1.1 中。

核素符号说明

国际上,表示核素特征所采用的方法,是把质量数(A)放在化学符号的左上角,原子序数(Z)放在左下角,右上角留着标记化学价、电荷或能态,而右下角留着标记分子态(如果涉及到这一点的话),例如:



在早期一些文献里,读者可以遇到一种老式写法,就是把质量数放在化学符号的右上角,如 G^{14} 。但是这种写法会造成混淆,例如在 HG^{14}N 这种情况中,就不知道它指的是碳的特定同位素态呢,还是氮的特定同位素态?

只要不是在核反应方程式里,核素符号的左下标就可省略而不致于引起误解,或者亦可采用另一种写法,即先写出元素名称、紧跟着写出其质量数,如碳-14 或碘-132。在某些目录或一览表里,亦常见 Fe-59 , Mn-54 这类写法,这类写法还常常用来描述标记化合物,就这一点而论,重要的在于指明标记化合物的种类及其位置;如醋酸 2- ^{14}C 表示第二个碳原

子是示踪原子，而丙酮 G-14 表示标记原子的位置没有特别规定，如正癸烷- $^{14}\text{C}(\text{U})$ 和萘-T(G)之类写法则分别表示均相标记化合物和一般标记化合物。

稳定的和不稳定的原子核

试考察表 1.2。在该表中列出了几种有代表性的原子核的 Z 、 N (中子数) 和 A 值。

表 1.2

元 素	Z	N	A	
氢	1	0	1	稳定的
	1	1	2	稳定的(重氢)
	1	2	3	不稳定的(氚)
碳	6	4	10	不稳定的
	6	5	11	不稳定的
	6	6	12	稳定的
	6	7	13	稳定的
	6	8	14	不稳定的

可以看出，表中中子数与质子数之比是变化的，其中有些比值给出了具有稳定性的同位素，即所谓稳定同位素，而另一些比值则给出了具有不稳定性的同位素，即放射性同位素(或核素！)。要考察原子核的稳定性，就要涉及到研究原子核的结合能。原子核的结合能等于核内质子、中子及轨道电子的质量之和减去核素的精确质量所得之差。这在本章之末引证的那些核物理学的标准教科书中皆有详细讨论。

衰 变 方 式

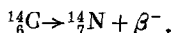
同稳定的原子核相比，凡不稳定原子核总有一些过剩中子或质子。例如在表 1.2 里， ^{14}C 有过剩中子， ^{11}C 则有过剩质子。这两种情形将会引起两种不同类型的衰变。

试考察一个由 Z 个质子和 N 个中子组成的、质量数为 A 的原子核。假若它的质量和能量比另一个质量数为 A 、但质子数为 $Z+1$ 、中子数为 $N-1$ 的核之质量或能量来得大，那么它就极可能通过辐射能量（因而损失质量）而变成后一个核，从而获得更高的稳定性。在这种转化中，核要失去一个负电子电荷，因而新核将会增多一个正电荷。

这些变化是通过辐射一个快速负电子（称为 β 粒子）来实现的，这个过程叫做 β^- 衰变。 β 粒子以接近于光速运动着，并把质量变化中涉及到能量的一部分或全部以动能的形式带走。发现 β 粒子的能谱是零到质量损失所代表的最大能量之间的连续谱。为了解释这种现象，在 1933 年提出一个假设： β 粒子没有带走的那部分能量是由另一种粒子带走了。这种粒子就是反中微子。其质量甚微，可以忽略不计；不带电，速度接近光速。因此在此核转化过程中，涉及到一个中子变成一个质子、一个反中微子及一个 β 粒子，即

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}.$$

对于 ^{14}C 的情形，其始末两个阶段可以表示为：



β 粒子的最大能量由 ^{14}C 与 ^{14}N 的精确质量之差减去一个电子的质量决定，在此情况中，等于 0.155 兆电子伏。

由 β 粒子辐射而形成的核常常是处在激发态上，就是说

它不是处在最低的能级上。(轨道电子的激发态出现在荧光现象、发光现象、照象过程以及半导体器件的工作过程中。)这类核形成之后,在不到一微秒的时间内便发生往基态跃迁的变化,并以电磁辐射的形式把能量辐射出去,称为 γ 辐射。 γ 射线在性质上与X射线相似,不过产生的方法是不同的。它是单能的,而不是连续的。因为它常是跟在粒子辐射之后辐射出来,有点象些分立的能份,故有 γ 光子之称。

假若原子核亏缺中子的话,则可能发生下述两种过程之一。象前面的例子一样,原子核是由 Z 个质子和 N 个中子组成,如果有一个质子变成一个中子、形成 $Z-1$ 个质子和 $N+1$ 个中子的话,该核也许能够达到更高的稳定性。与 β^- 衰变的平衡方程相比较,很清楚,要么发射一个带正电荷的粒子,要么俘获一个电子。究竟发生哪种情形,取决于转化过程的能量改变。假若能量改变大大超过1.02兆电子伏,就会生成两个电子(记住,一个电子的能量当量是0.51兆电子伏)。这两个电子必定是带相反电荷的,射出的正电子(即 β^+ 粒子)具有一定的动能,其能量相当于能量改变减去1.02兆电子伏之后余下的那部分能量; β^- 粒子则与质子结合生成一个中子。在这过程中还产生一个中微子,分去正电子的一部分能量。因此有

$$p^+ \rightarrow n + \beta^+ + \nu^+,$$

例如

$${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + \beta^+.$$

正电子是短寿的,因为它与其它原子碰撞而失去能量时,就会和一个电子发生相互作用。这对电子可能彼此环绕对方作一段短时间的轨道运动(正电子素),但是很快就合併了。这时跟它们生成的方式相反,质量湮没了,转化成两个沿相反方向辐射的、能量各为0.51兆电子伏的电磁能量子。这种湮没辐射是 β^+ 衰变的特征。