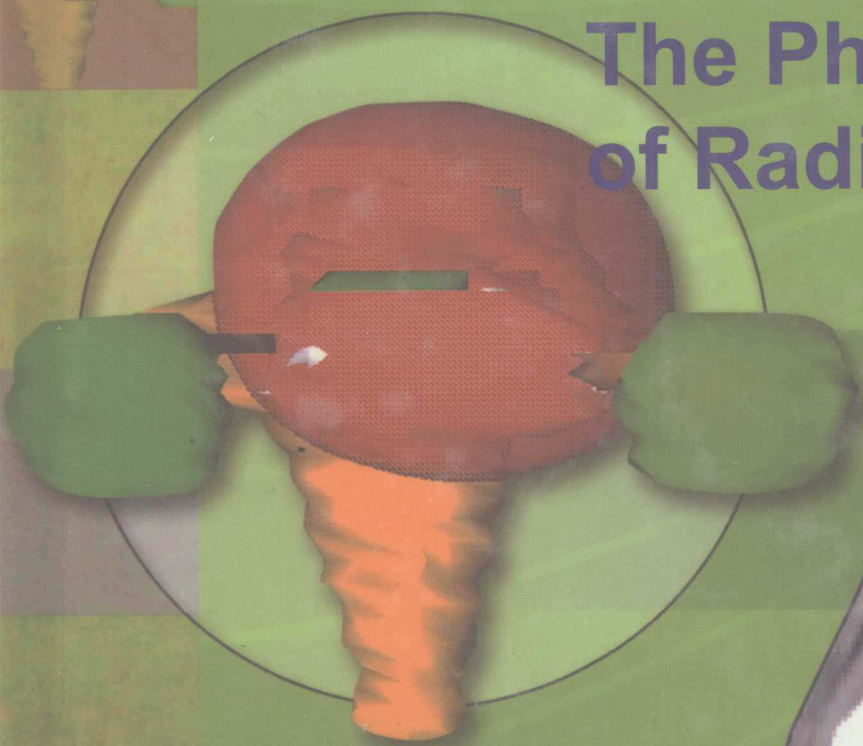


第4版

# 放疗物理学

The Physics  
of Radiation Therapy



原著 Faiz M. Khan  
主译 刘宜敏 石俊田

第④版

# 放疗物理学

## The Physics of Radiation Therapy

原 著 Faiz M. Khan

主 译 刘宜敏 石俊田

副主译 王学涛

译 者 (以汉语拼音为序)

陈 利 (中山大学附属肿瘤医院)

何 艳 (中山大学孙逸仙纪念医院)

黄晓延 (中山大学附属肿瘤医院)

廖 恺 (中山大学孙逸仙纪念医院)

刘宜敏 (中山大学孙逸仙纪念医院)

祁振宇 (中山大学附属肿瘤医院)

石俊田 (中山大学孙逸仙纪念医院)

王学涛 (广东省中医院)

吴少焜 (中山大学孙逸仙纪念医院)

张书旭 (广州医学院附属肿瘤医院)

The Physics of Radiation Therapy, 4e  
by Faiz M. Khan

©2010 by LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS

All rights reserved. This book is protected by copyright. No part of this book may be reproduced in any form or by any means, including photocopying, or utilized by any information storage and retrieval system without written permission from the copyright owner, except for brief quotations embodied in critical articles and reviews. Materials appearing in this book prepared by individuals as part of their official duties as U.S. government employees are not covered by the above-mentioned copyright.

放疗物理学 第4版

中文版权归人民卫生出版社所有。本书受版权保护。除可在评论性文章或综述中简短引用外，未经版权所有者书面同意，不得以任何形式或方法，包括电子制作、机械制作、影印、录音及其他方式对本书的任何部分内容进行复制、转载或传送。

Lippincott Williams & Wilkins/Wolters Kluwer Health did not participate in the translation of this title.

Not for resale outside the People's Republic of China.

不得在中华人民共和国境外零售。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

放疗物理学 / (美) 费兹著; 刘宜敏等译. —北京: 人民卫生出版社, 2011. 5

ISBN 978-7-117-14019-5

I. ①放… II. ①费… ②刘… III. ①肿瘤—放射疗法—物理学 IV. ①R730.55

中国版本图书馆CIP数据核字 (2011) 第019500号

门户网: <a href="http://www.pmph.com">www.pmph.com</a> 出版物查询、网上书店
卫人网: <a href="http://www.ipmph.com">www.ipmph.com</a> 护士、医师、药师、中医师、卫生资格考试培训

版权所有，侵权必究！

图字: 01-2010-4684

## 放疗物理学

主 译: 刘宜敏 石俊田

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里19号

邮 编: 100021

E - mail: [pmph@pmph.com](mailto:pmph@pmph.com)

购书热线: 010-67605754 010-65264830

010-59787586 010-59787592

印 刷: 北京人卫印刷厂 (宏达)

经 销: 新华书店

开 本: 889×1194 1/16 印张: 27 插页: 4

字 数: 856千字

版 次: 2011年5月第1版 2011年5月第1版第1次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-14019-5/R·14020

定 价: 93.00元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: [WQ@pmph.com](mailto:WQ@pmph.com)

(凡属印装质量问题请与本社销售中心联系退换)

## 第4版前言

---

自2003年本书第3版发行以来，鉴于放射治疗领域的新发展，第4版在第3版的基础上对每一章节逐一做了修订。其中增加了第23章和24章两个新的章节以涵盖图像引导放射治疗及质子束放射治疗的最新发展。而且在每一章的最后增加“关键点”部分以强调该章的重点。

同之前的版本一样，第4版同样由放射治疗团队完成，他们是：放射肿瘤学家、医学物理学家、放射剂量测定学家以及临床医学家。我意识到一个人无法在一本教材中完全满足各式读者的需求，而只有教材的临床相关性才能引起所有内行人的共同兴趣。我希望，这本书无论是对学生还是从事放射肿瘤学的工作人员都是有益的。文中提供了充足的文献资料以便为需更深一步研究的人员提供帮助。

感谢学校院系各级教师的支持：Bruce Gerbi、Patrick Higgins、Parham Alaei、Susanta Hui、Yoichi Watanabe 和 Kathryn Dusenbery。自2001年退休后，我继续参与住院医师及研究生的教学工作，这使我能够紧跟放疗学科领域的最新发展。

感谢执行总编 Jonathan Pine 以及 Lippincott Williams 和 Wilkins 的其他编辑人员对这次出版所作出的重要贡献。同时也感谢 Sign Age 公司 La Carte 设计所的 Justin 和 Aimée 对书中图表着色的帮助。

最后，我要非常感谢我的妻子，对我无休止的阅读和写作工作的容忍以及对共同快乐生活的耐心等待。

Faiz M. Khan  
刘宜敏 何艳 译

# 第 1 版前言

---

大多数关于放射物理学的教材所涉及的内容都比较广泛，包括放射治疗物理学、诊断学及核医学等。这些教材的重点在于介绍基本的物理原理，它们构成了放疗领域最基本的原则。然而实际应用则讨论的较少甚至完全没有提及。因此，我们需要一本能够致力于重点强调实际应用细节的放射治疗物理学。

这本书主要是为了满足住院医师及临床物理学家的需求。因此，我们将重点更多地放在了物理学在临床中的实际应用。对于住院医师，本书不仅涉及了基础放射物理学知识，而且还包括治疗计划制订、光子束、电子束以及近距离治疗放射源使用过程中所涉及的物理方面知识。另外，我们还为临床物理师提供了有关放射剂量测量方面的最新信息。

书中除了一些章节涉及吸收剂量测量的理论外，同样也适用于放射治疗技术人员，尤其在治疗技术、患者摆位及剂量计算方面。

由于本书面向不同层次的读者，因此我们必须使理论与实际操作细节得到平衡。为此我们做了很多工作，在不减少本书对物理师的价值的同时使本书适用于那些没有正式受过物理培训的人员（例如住院医师或技师）。通过细致的课题选择、简化数学公式及参考大量相关文献，本书很有希望实现这个目标。在本书的创作过程中，我得到了物理学院同事们的大量帮助，他们是 Jeff Williamson、Chris Deibel、Barry Werner、Ed Cytacki、Bruce Gerbi 以及 Subhash Sharma。我要谢谢他们在本书评审中所做的各种努力。此外，非常感谢 Sandi Kuitunen 先生，他为手稿打字并排版。同样要感谢 Kathy Mitchell 和 Lynne Olson，他们为此书提供了大部分插图。

最后，我要感谢我的合作者，物理学院的主席 Seymour Levitt 先生，从他身上我学到了很多作为物理学家所需的临床哲学知识。

刘宜敏 何 艳 译

## 第一部分 基础物理

第1章 物质结构 .....	1
第2章 核转换 .....	8
第3章 X线的产生 .....	19
第4章 临床射线发生器 .....	27
第5章 电离辐射的相互作用 .....	42
第6章 电离辐射的测量 .....	53
第7章 X线质 .....	66
第8章 吸收剂量的测量 .....	72

## 第二部分 经典放射治疗

第9章 剂量分布与散射分析 .....	111
第10章 剂量计算系统 .....	125
第11章 治疗计划 I：等剂量分布 .....	141
第12章 治疗计划 II：患者数据，校准和设置 .....	161
第13章 治疗计划 III：射野修饰、皮肤剂量和相邻野设计 .....	193
第14章 电子束治疗 .....	209
第15章 近距离治疗 .....	248
第16章 辐射防护 .....	278
第17章 质量保证 .....	295
第18章 全身照射 .....	320

## 第三部分 现代放射治疗

第19章 三维适形放射治疗 .....	327
---------------------	-----

第20章 调强放射治疗 .....	338
第21章 立体定向放射外科 .....	354
第22章 高剂量率近距离治疗 .....	364
第23章 图像引导放射治疗 .....	377
第24章 质子束治疗 .....	389
Appendix .....	403
索引 .....	425

# 第一部分 基础物理

## 第 1 章 物质结构

### 1.1 原子

所有的物质都由称之为元素的个体构成。每种元素通过它的基础构成部分——原子的物理和化学性质区别于其他元素。最初认为原子是物质中“最小的”和“不可再分割”的粒子，当时不知道原子还具有亚结构并且可以再“分割”成更小的组成成分。每个原子包含一个小核心，即原子核，集中了几乎全部的原子质量，周围的电子云就围绕着原子核在轨道中运动。尽管原子的半径（电子轨道的半径）近乎于 $10^{-10}\text{m}$ ，但原子核的半径却小得多，仅仅 $10^{-15}\text{m}$ 。所以，大小与原子核相似的粒子，在碰撞发生前可能穿过物质的若干原子。如同本章开始所说的，保持这些未与原子（初始射线）发生作用的粒子及那些已经经历碰撞的粒子（散射线）的轨道非常重要。

### 1.2 原子核

原子的性质取决于各自原子核的构成、原子序数及轨道电子的排列。

原子核含两种基本粒子：质子和中子。质子带有正电荷，而中子不带电荷。因为电子带有一定单位的负电荷（ $1.60 \times 10^{-19}$ 库仑），质子带有一定的正电荷，而在原子核中质子数和原子核外电子数相同，因此，使得原子呈电中性。

原子可用公式 ${}_Z^AX$ 表示，其中 $X$ 是元素的化学符号， $A$ 是质量数，被定义为核子（原子核中的中子和质子）的数量，而 $Z$ 则是指原子序数，表示原子核中质子的数量（或原子核外电子的数量）。以上述形式表示的原子也称为核素。例如， ${}_1^1\text{H}$ 和 ${}_2^4\text{He}$ 各自表示氢和氦的原子、原子核或核素。

基于原子核中中子和质子的不同比例，原子被划分为以下几种类型：同位素，即各原子的原子核中质子数相同而中子数不同；同中子异位素，即有

相同的中子数而质子数不同；同量异位素，它们的核子数相同但是质子数不同；异构体，它们含有相同的质子数和中子数。最后一种类型，也就是异构体，它们具有相同的质子和中子数，即代表相同的原子，只是拥有不同的原子能量而已。例如， ${}_{54}^{131\mu}\text{Xe}$ （ $\mu$ 代表亚稳态）就是 ${}_{54}^{131}\text{Xe}$ 的异构体。中子和质子以某些方式的结合可得到比起其他原子更加稳定（无放射性的）的原子核。例如，在低原子序数范围内，稳定的元素通常具有相同的中子数 $N$ 和质子数 $Z$ 。然而，当 $Z$ 增加超过了20，稳定原子核的中子质子比变成大于1，并随 $Z$ 的增加而增加。如图1.1所示，该表显示了在稳定的原子核中质子与中子的比率。

原子核稳定性亦可根据中子数及质子数的奇偶性来分析。在大约300种不同的稳定同位素中，其中超过一半拥有偶数质子数和偶数中子数的被认为是偶数-偶数原子核。这些研究表明当质子和中子互相成对时，原子核可以获得稳定性。另一方面，仅有四种既有奇数个的 $Z$ 又有奇数个的 $N$ 的稳定原子核存在，它们是 ${}_1^2\text{H}$ 、 ${}_3^6\text{Li}$ 、 ${}_5^{10}\text{B}$ 和 ${}_7^{14}\text{N}$ 。大约有20%的稳定原子核有偶数个 $Z$ 和奇数个 $N$ ，且差不多相同比例的原子核有奇数个 $Z$ 和偶数个 $N$ 。

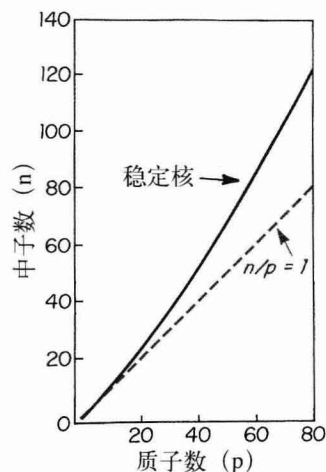


图 1.1 在稳定的原子核中中子与质子的比率



### 1.3 原子质量及能量单位

大多数原子及粒子都被赋予了原子质量单位 (amu)。Amu 被定义为碳同位素  $^{12}_6\text{C}$  原子重量的  $1/12$ 。因此,  $^{12}_6\text{C}$  原子被人为地划定为 12 amu。它的基本换算为:

$$1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

以 amu 方式表示的原子质量称为原子质量或原子量。另外一种术语是克原子量, 它被定义为数字上等于原子重量的以克计的重量。根据阿伏伽德罗法则, 每种物质的克原子量含有相同数量的原子。阿伏伽德罗常数 ( $N_A$ ) 已通过大量研究测得, 目前普遍接受的值是每克原子含有  $6.0228 \times 10^{23}$  个原子。

通过之前的定义, 可以计算其他感兴趣的量, 例如每克有多少原子、每个原子多少克以及每克有多少电子。以氢为例, 它的原子量 ( $A_w$ ) 相当于 4.0026, 因此:

$$\text{每克原子数} = \frac{N_A}{A_w} = 1.505 \times 10^{23}$$

$$\text{每个原子质量} = \frac{A_w}{N_A} = 6.646 \times 10^{-24}$$

$$\text{每克电子数} = \frac{N_A \cdot Z}{A_w} = 3.009 \times 10^{23}$$

根据原子质量单位, 原子中各粒子的质量是: 电子 = 0.000548amu, 质子 = 1.00727amu, 中子 = 1.00866amu。

因为电子的质量远小于质子或是中子, 而质子和中子质量几乎相同, 都近似于 1amu, 所以, 以 amu 单位表示的所有原子质量均非常接近于质量数。然而, 有必要指出原子的质量并非恰好等于组成粒子的质量总和。之所以这样是因为, 当原子核形成时, 某些物质被破坏并转变成了能量, 这些能量以类似“胶水”的作用使得核子聚集在一起。这种质量差别被称之为质量亏损。从另一角度看, 为了使原子核分离成各个核子, 必须供给与能量亏损相同的能量。因此, 这种能量亦被称为原子核的结合能。

能量的基本单位是焦耳 (J), 它相当于 1 牛顿的力通过 1m 的距离所做的功。牛顿作为力的单位, 是质量 (1kg) 和加速度 ( $1\text{m}/\text{sec}^2$ ) 的乘积。然而, 在原子及原子核物理学中更方便的能量单位是电子伏特 (eV), 定义为 1 个电子在通过 1V 电位差的过程中获取的动能, 而此过程所做的功等于电位差和

电子所带电荷的乘积。因此有:

$$1 \text{ eV} = 1 \text{ V} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

单位换算:

$$1 \text{ keV} = 1,000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ million eV (MeV)} = 10^6 \text{ eV}$$

根据爱因斯坦的质能等效原理, 质量  $\mu$  等效于能量  $E$ 。它们的关系如下:

$$E = mc^2 \quad (1.1)$$

其中  $c$  是光速 ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )。例如, 1kg 质量, 如果转化成能量, 相当于:

$$\begin{aligned} E &= 1 \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/sec})^2 \\ &= 9 \times 10^{16} \text{ J} = 5.62 \times 10^{29} \text{ MeV} \end{aligned}$$

静止状态电子的质量有时以能量当量的方式描述 ( $E_0$ )。因为它的重量仅仅是  $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ , 我们由等式 1.1 得出:

$$E_0 = 0.511 \text{ MeV}$$

另外一个有用的转换是将原子质量单位 amu 换算成能量, 如下所示:

$$1 \text{ amu} = 931 \text{ MeV}$$

从等式 1.1, 我们得出总能量  $E$  的任何粒子的等效质量 (动能加上静止质量能量) 可以通过  $E/c^2$  计算。相应的, 粒子的质量亦可以用式  $\text{GeV}/c^2$  表达, 可以得到:

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 1.0723 \text{ amu}$$

### 1.4 轨道电子的分布

根据 1913 年由 Niels Bohr 提出的模型, 电子在特殊的轨道上围绕着原子核旋转, 并且因原子核所带的正电荷与电子所带的负电荷相互吸引产生的向心力而不脱离原子。

基于经典物理学, 加速的或旋转的电子必定辐射能量。这将导致随着电子最终盘旋地接近原子核, 电子的轨道半径不断缩小。然而, 元素释放或吸收放射线的数据显示能量的改变不是连续的, 而是不连续的。为了解释观察到的氢的线状光谱, 波尔推测, 氢的光谱中尖锐谱线表示电子跃迁, 即电子从一个轨道跳到另一个轨道, 并同时释放出特殊频率的光子或一定的能量。他提出两条基本假设: (a) 电子仅能存在于下述轨道上, 这种轨道中电子的角动量是  $h/2\pi$  的整数倍, 其中  $h$  是普朗克常数 ( $6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}$ ); (b) 当电子仍处于允许的任一轨道上运行时, 并没有能量的获得或丢失。

原子核外电子的排列由量子力学的原则或泡

利不相等原则（在此不予讨论）决定。尽管电子的实际排列相当复杂和多变，还是可以通过分配电子到特殊的轨道来简化概念。最内层轨道或壳被称为K轨道，由内向外依次是L、M、N和O轨道。一个轨道上所能容纳的最大电子数是 $2n^2$ ，其中 $n$ 表示轨道的层数。例如，在第一层轨道最多只能容纳2个电子，第二层可以容纳8个，第三层则可以容纳18个。图1.2中显示了氢原子、氦原子、氧原子的电子轨道。

电子轨道也可以看做能级。在这种情况下，能量就是电子的电势能，从另一角度，也可以称之为电子的结合能。

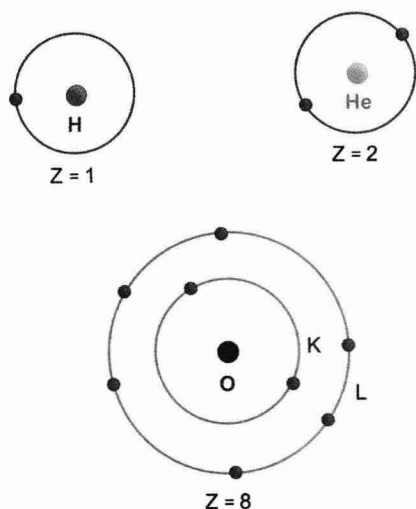


图1.2 氢原子、氦原子及氧原子的电子轨道

## 1.5 原子能级

常通过已知的能级图表示轨道电子的能级（图1.3）。不同轨道的电子的结合能取决于原子核与轨道电子相互吸引的库仑力的大小。因此，原子序数 $Z$ 越大的原子的结合能越大，因为原子核所带电量更多。在钨原子中（ $Z=74$ ），位于K、L及M层的电子各自拥有约69 500、11 000及2500eV的结合能。所谓的价电子，即负责化学反应和原子间的结合以及光辐射的电子，通常占据外层。如果能量传递给某个价电子，使其升至更高能量（更高电势能但是更低结合能）的轨道，这将导致原子的不稳定性。随着电子以光辐射的形式释放能量，电子又退回到它正常的位置。释放的光辐射的能量将与跃迁发生的两轨道间的能量差相等。

如果跃迁涉及内层轨道，例如电子被更紧地束

缚（因为更大的库仑力）的K、L和M层，能量的吸收或释放将涉及更高能的辐射。同样，如果足够的能量传递到内层轨道电子，以使它完全释放电子，在此层上产生的空位或空穴将几乎瞬间就被来自较高能级轨道的电子填充，从而导致光辐射。这就是特征X射线的产生原理。

## 1.6 核力

如之前讨论的，原子核包括不带电荷的中子和带有正电荷的质子。但是，静电排斥力存在于有相似电荷的粒子间，那么这些粒子是怎么聚集在一起的呢？早在1.3节中就已提及质量亏损与原子核的结合能。在当时认为，保持核子结合所需的能量由质量亏损提供。然而，保持原子核完整性的自然力十分复杂，在此仅简要提及。

自然界存在四种不同的力量。按强度顺序排列，它们分别是：(a) 强核力、(b) 电磁力、(c) 弱核力和 (d) 万有引力。其中，原子核中含有的万有引力非常微弱可以忽略。带电荷核子间的电磁力非常强，但它是相互排斥的，其倾向于分裂原子核。比电磁力更加大的力是强核力，它是使得原子核中核子结合在一起的力量。弱核力微弱得多并仅出现在一定类型的放射性衰变中（如 $\beta$ 衰减）。

强核力是一种短程力，当核子间的距离变得比原子核直径更小（约 $10^{-15}\text{m}$ ）时它才发挥作用。如果我们假定当核子离原子核的距离无限远时，其具有零势能，当其足够接近原子核以致在核力的范围内时，它将经历强吸引力且“跌落”至势阱（图1.4A）。势阱是质量亏损和提供原子核结合能的结果。它作为势垒阻止任何核子从原子核中溢出。

当带正电荷粒子接近原子核时，相互排斥的库仑力所致的势垒将阻止粒子接近原子核。但是如果粒子能足够接近原子核而在强核力的范围内，排斥力将可以被克服且粒子也能进入原子核。图1.4B说明了势垒阻止带电粒子如 $\alpha$ 粒子（经过 ${}^4_2\text{He}$ 的原子核）接近 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 的原子核。相反，势垒可阻止 $\alpha$ 粒子溢出原子核。尽管根据经典理论，即一个 $\alpha$ 粒子可能需要与势垒高度（30MeV）相同的最低能量以穿透 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 原子核或从中溢出，但数据显示低得多的能量就可以穿过势垒。这已可以通过一个复杂的数学理论即波动力学解释，在该理论中粒子被认为与德布罗意波有一定联系。

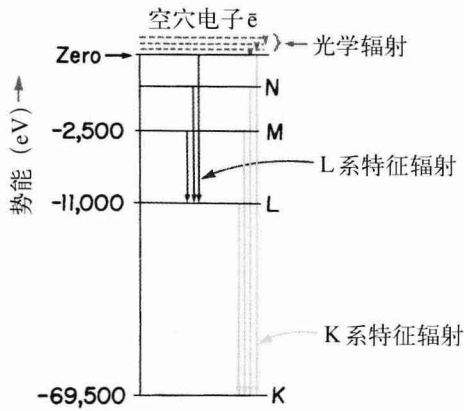


图 1.3 钨原子的简化能级图。图中仅描述了少数可能的跃迁。当原子处于非活跃状态时，在价电子的位置上零能量被任意设定

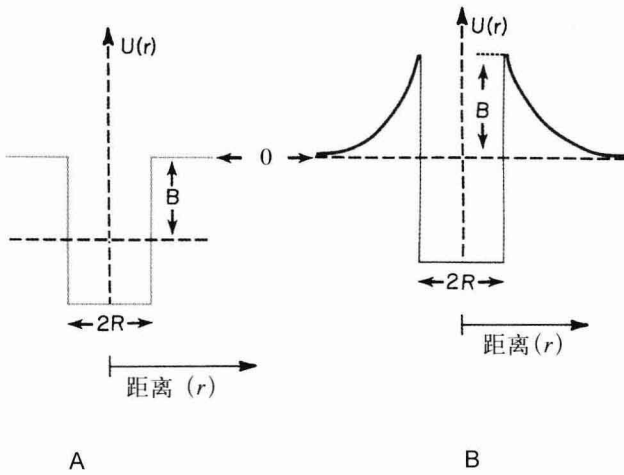


图 1.4 原子核中粒子的能级图。A. 不带电荷的粒子；B. 带正电荷的粒子。 $U(r)$  是到原子核中心距离为  $r$  的电位差， $B$  是屏障高度， $R$  代表原子核半径

### 1.7 原子核能级

原子核轨道模型假定核子按照轨道排列，原子核表现出不连续的能量状态，这与原子能级相似。如果能量传递给原子核，它将上升至一个活跃状态，而当它回到较低能状态时，它将释放出与两状态能量差相等的能量。有时，在原子核回到稳定状态或基态前，能量是步调一致地释放的，这与中间能量状态相符。

图 1.5 显示了钴-60 ( $^{60}_{27}\text{Co}$ ) 原子核（在反应堆中用中子轰击稳定的  $^{59}_{27}\text{Co}$  原子而形成放射性原子核）衰变的能级图。活跃的  $^{60}_{27}\text{Co}$  原子核首先发射一个粒子，即我们所知的  $\beta^-$  粒子，然后经过两次连续

的跃迁，放射出一系列能量，就是光子。 $\beta^-$  粒子的发射是原子核转化的结果，其中原子核中的一个中子分裂成一个质子、一个电子及一个中微子。电子和中微子是瞬间被释放的且与反冲核共享释出的能量。这个  $\beta$  衰减的过程将在下一章讨论。

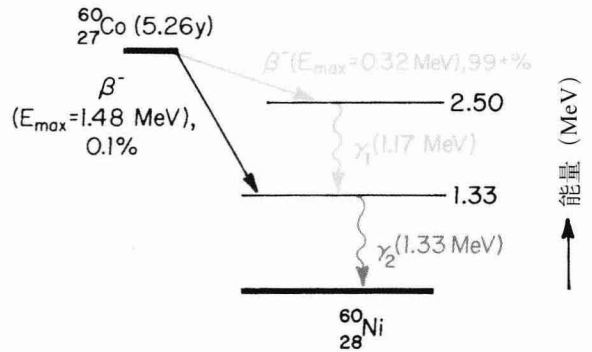


图 1.5  $^{60}_{27}\text{Co}$  原子核衰变的能级图

### 1.8 粒子辐射

辐射指能量通过空间或者物质媒介的发射和传播。而粒子辐射指通过具有明确静止质量且在任意时刻具有明确的动量和位置的微粒的传播所产生的能量传播。然而，1925年在德布罗意提出关于物质双重性的假说后，均表示能量传播模式的粒子辐射与电磁波之间的差别变得没有那么明显了。德布罗意推理认为不仅光子（电磁波）有时可表现得像粒子（表现为动量），其他的物质粒子比如电子、质子和原子也有一些与光子类似的波动性（表现为折射和其他波状性质）。

除了之前提到的质子、中子及电子，许多其他原子及亚原子粒子亦已被发现。这些粒子依靠它们的动能可高速传播，但是永远达不到真空中的光速。它们亦会与物质相互作用，并产生不同大小的能量而转移至介质。

### 1.9 基本粒子

基本粒子就是没有已知亚结构的粒子。在过去，质子、中子和电子被认为就是基本粒子。随着质子和中子亚结构（夸克）的发现，它们不再被认为是基本粒子。本章节中下述的基本粒子摘录自参考文献 (1)。现有两组粒子：费米子和波色子。费米子是角动量自旋为奇数半整数 ( $1/2, 3/2, 5/2 \dots$ )

的物质或反物质粒子的统称。波色子是自旋为整数(0, 1, 2...)的任意粒子的统称。

物质基本粒子(费米子)有两种:夸克和轻粒子。它们各自又有六种类型,如下所示:

夸克:上(u)、下(d)、核(c)、壳(s)、顶(t)和底(b)。

轻粒子:电子(e)、电子中微子( $\nu_e$ )、 $\mu$ 介子( $\mu$ )、 $\mu$ 介子中微子( $\nu_\mu$ )、tau( $\tau$ )和tau中微子( $\nu_\tau$ )。

除上述十二种物质基本粒子外,还有十二种对应的反物质粒子。这遵循Paul Dirac 1928年提出的原则,该原则指出对于所有物质粒子,必然存在与其质量相同但带相反电荷的反物质粒子。所以,就存在六种反夸克和六种反轻粒子。

夸克是称之为强子(中子、质子、介子等)的较重粒子的构成单位。例如,质子由三个夸克(u, u, d)组成而中子也由三个夸克(u, d, d)组成。这些夸克通过称为胶子的场粒子结合在一起,其中胶子是强核力的信使粒子。

根据量子电动力学(QED)理论,这组被称之为信使粒子的粒子在力场中是力的携带者。这些粒子不是物质粒子而是力场中的量子。因此,任意两个相互影响的物质粒子间的力会被以光速运行的信使粒子传递。

介导4种自然力的共有13种信使粒子或波色子,它们如下:

- 电磁力 —— 光子( $\gamma$ )
- 强核力 —— 八种胶子
- 弱核力 ——  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$
- 重力 —— 万有引力(还未被检测到)

虽然物质粒子(费米子)可以达到高能或高速,但它们不能完全达到光速。当它们的速度接近光速时,进一步的加速通过使它们的质量增加而非速度增加而使它们的能量增加。所以,加速器(例如,位于日内瓦的费米实验室和欧洲粒子物理研究所的粒子加速器)中产生的超高能粒子有更大的质量但是速度仍不及光速。另一方面,信使粒子(波色子)拥有高量子能量但它们均以光速运行。它们还能自行转变成物质粒子,借此它们的高能被转化成高能物质粒子,例如, $W^+$ 转变成电子( $e^-$ )和中微子( $\nu$ ), $W^-$ 转变成电子( $e^-$ )和反中微子( $\bar{\nu}$ ),而 $Z^0$ 转化成 $e^+$ 和 $e^-$ 或者一对介子( $\mu^+ + \mu^-$ )。 $W^+$ 或 $W^-$ 具有大约79GeV的量子能量, $Z^0$ 大约具有91GeV。

其他一些神秘粒子(目前尚未发现的)已经添加到上述表格中。在1964年由Peter Higgs假

定它们的存在后,就被称之为Higgs波色子。粒子物理学家相信我们的宇宙弥漫着Higgs波色子。Higgs场被认为遍及所有的空间而且任何空间都是一样的。所有物质的静止质量都是由Higgs场产生的。换言之,粒子是与Higgs场相互作用而获得质量。Higgs波色子还对粒子产生一个拖曳效应,因此,粒子表现出惯性。对运动的抵抗力定义成它们的质量。

有必要提一下,理论物理学家Steven Weinberg和Abdus Salam利用Higgs的观点,通过信使粒子——光子、 $W^+$ 、 $W^-$ 和 $Z^0$ 将电磁力和弱核力统一为弱核力。

回到Higgs场,这个术语场在物理学上被定义为力线。例如,一块磁铁被其磁场所包围。置于该场中的铁粒子将沿着磁力线被吸引到磁极。力通过力载体例如光子、W或Z波色子和胶子的交换在场中传递。对于Higgs场,力载体就是Higgs粒子(一种波色子)。

我们没有实验数据证实Higgs场或它的波色子即信使粒子的存在。但是,最近利用欧洲粒子物理研究所(CERN)的大型电子正电子对撞机所做的实验产生了与Higgs波色子衰变的那些假设中特征相似的粒子。

图1.6(见文末彩插)是基本粒子的图表。它只是当前有关粒子物理知识的冰山一角。

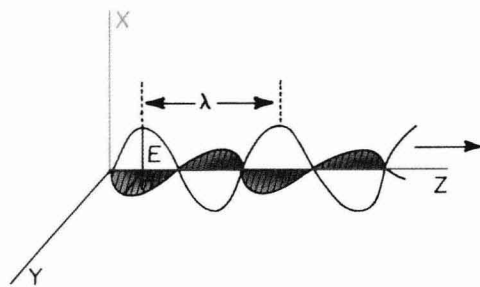


图1.7 图示在特定时刻的电磁波, E和H各自代表电场和磁场的峰值。这两个场相互垂直

## 1.10 电磁辐射

### A. 波模型

电磁辐射是能量传播形式之一,如光波、热波、无线电波、微波、紫外线, X射线和 $\gamma$ 射线。这些辐射被称为电磁辐射,因为它们首先被Maxwell以振荡的电场和磁场形式描述。如图1.7中所示,电

磁波可通过电场 ( $E$ ) 和磁场 ( $H$ ) 强度的空间变化来表示, 这两个场在任意时刻均互成直角。能量在  $Z$  方向上以光速 (真空中  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ) 传播。波长 ( $\lambda$ )、频率 ( $\nu$ ) 和传播速度 ( $c$ ) 的关系如下:

$$c = \nu\lambda \quad (1.2)$$

在上述公式中,  $c$  的单位是  $\text{m/s}$ ,  $\lambda$  的单位是  $\text{m}$ ,  $\nu$  的单位则是周/秒或赫兹。

图 1.8 (见文末彩插) 示波长范围从  $10^7 \text{m}$  (无线电波) 到  $10^{-13} \text{m}$  (超高能 X 射线) 的电磁辐射谱。因为波长与频率成反比关系, 与上述范围相对应的频率的范围将在  $3 \times 10^1 \sim 3 \times 10^{21}$  周/秒内。只有很小一部分电磁波范围构成可见光带。人肉眼能感应的波的波长从  $4 \times 10^{-7} \text{m}$  (蓝光) 到  $7 \times 10^{-7} \text{m}$  (红光)。

电磁辐射的波动性可以通过如涉及光的干涉和衍射现象的实验证明。使用具有与 X 线波长相当的原子间距的晶体可以观察到 X 线的类似效应。然而, 当波长变得非常小或频率变得非常大, 电磁辐射所表现出来的主要属性仅能通过考虑它们的粒子性及量子性来解释。

## B. 量子模型

为了解释涉及辐射与物质相互作用的某些实验 (例如光电效应和康普顿散射) 的结果, 不得不把电磁辐射当成粒子而不是波。如此一个能量包即光子携带的能量大小如下:

$$E = h\nu \quad (1.3)$$

其中  $E$  是指光子携带的能量 ( $\text{J}$ ),  $h$  是普朗克常数 ( $6.62 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{sec}$ ),  $\nu$  是指频率 (周/秒)。结合公式 1.2 和公式 1.3, 我们可得到:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.4)$$

如果  $E$  以电子伏特 ( $\text{eV}$ ) 表示,  $\lambda$  以米 ( $\text{m}$ ) 表示, 因为  $1 \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$ , 所以:

$$E = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{\lambda} \quad (1.5)$$

上述等式表明当波长变小或频率增加, 光子的能量就会增加。这在图 1.8 中也可获悉。

### 关键点

- 原子结构
  - 一个原子包括带正电的原子核和围绕在其周边的带负电的电子云。
  - 原子大小: 原子的半径约是  $10^{-10} \text{m}$ , 原子核的半径约是  $10^{-15} \text{m}$ 。
- 原子可以用公式  ${}_Z^A X$  表示, 其中  $X$  是元素符号,  $A$  是质量数 (质子数加中子数),  $Z$  是原子序数 (质子数)。
- 原子分类
  - 同位素—— $Z$  相同, 但中子数不同的原子。
  - 同中子异位素——有相同数目的中子但  $Z$  不同的原子。
  - 同量异位素—— $A$  相同、 $Z$  不同的原子。
  - 异构体——原子的  $A$  和  $Z$  都相同但原子核能级不同。
- 原子核稳定性
  - 原子核中中子数 ( $n$ ) 和质子数 ( $p$ ) 的某些结合比其他更为稳定。
  - 最稳定的原子核包括偶数个的  $n$  和偶数个的  $p$ 。
  - 稳定性最小的原子包括奇数个的  $n$  和奇数个的  $p$ 。
  - 高  $n/p$  比引起  $\beta^-$  衰变, 低  $n/p$  比引起电子捕获和  $\beta^+$  衰变 (将在第 2 章讨论)。
- 原子质量
  - 原子质量单位 ( $\text{amu}$ ) =  ${}^{12}_6\text{C}$  原子质量的  $1/12$ 。
  - 原子质量或原子量可以通过  $\text{amu}$  表示。
  - 每克电子数 =  $N_A \cdot Z/A_W$ , 其中  $N_A$  是阿伏伽德罗常数,  $Z$  是原子序数,  $A_W$  是原子量。
- 质能等效性  $E = mc^2$ 
  - 静止电子的能量当量 ( $E_0$ ) =  $0.511 \text{MeV}$ 。

- $1\text{amu}$ 的能量当量 =  $931\text{MeV}$ 。
- 粒子的等效质量同样可以用单位  $\text{GeV}/c^2$  来表示 (见图 1.6)。
- 原子能级
  - 原子中最内层的电子轨道是 K 轨道。由内到外依次是 L, M, N 和 O 轨道。任何轨道所能容纳的最多电子数是  $2n^2$ , 其中  $n$  是轨道层数。
  - 不同轨道电子的结合能主要取决于原子核正电荷与电子负电荷相互吸引的库仑力的大小。轨道越靠近原子核, 结合能越大。
  - 电势能就是结合能的负值。
- 原子核能级
  - 核子按照原子核的不连续能级排列。
  - $^{60}\text{Co}$  原子核衰变的能级图表明  $\beta$  粒子发射后, 紧跟两次  $\gamma$  光子线发射, 每次分裂能量分别是  $1.17\text{MeV}$  和  $1.33\text{MeV}$ 。
- 基本粒子
  - 一共有 12 种基本物质粒子: 6 种夸克和 6 种轻粒子。相应的, 就有 6 种反物质夸克和 6 种反物质轻粒子。所有这些粒子都称之为费米子。另外, 还存在有 13 种叫波色子的信使粒子, 它们介导了四种自然力。
  - 费米子具有非整数自旋, 而波色子具有整数自旋。
  - Higgs 场弥漫于所有的空间, 负责产生物质的质量。Higgs 场中信使粒子就是 Higgs 波色子 (尚未发现)。
- 自然力
  - 存在 4 种自然力。根据强度排列, 它们分别是强核力、电磁力、弱核力及重力。
  - 所有的自然力都被特殊的信使粒子介导, 如波色子。
- 电磁辐射
  - 电磁辐射以振荡的电场和磁场为特征, 总是彼此垂直且与它们能量传播的方向垂直。
  - 电磁波的波长 ( $\lambda$ )、频率 ( $\nu$ ) 和速度 ( $c$ ) 的关系为:  $c = \nu\lambda$ 。
  - 量子模型通过  $E = h\nu$  联系光子能量与其振荡频率, 其中  $h$  是普朗克常数。
  - 如果  $\lambda$  以 m 为单位, 那么光子以电子伏特 (eV) 为单位表示的能量  $E = (1.24 \times 10^{-6}) / \lambda$ 。

(何 艳 刘宜敏 译)

## 参考文献

1. Khan FM. *Our Universe: A Scientific and Religious View of Creation*. New York: iUniverse, Inc.; 2007.

## 第2章 核转换

### 2.1 放射性

亨利·贝克勒尔(1852-1908)首先在1896年发现了放射性,即元素的原子核辐射放射线的一种现象。放射线以粒子辐射、电磁辐射或同时具有两者的形式表现出来。

图2.1描述了一个方法,其中镭所释放出的放射线在磁场中可以被分离出来。因为 $\alpha$ 粒子(氦核)带正电且 $\beta^-$ 粒子(电子)带负电,它们向相反的方向偏斜。曲率半径的差别表明 $\alpha$ 粒子比 $\beta$ 粒子重得多。另一方面,除了其原子核起源外其他方面都与X线相似的 $\gamma$ 线,没有带电荷,因此就不会受到磁场的影响。

在第1章就已提到(1.6节),存在势垒防止粒子进入或溢出原子核。尽管位于原子核内的粒子拥有动能,但在稳定的原子核中的这种动能并不足以让任何粒子穿过原子核势垒。然而,放射性原子核却有过剩的能量在原子核中通过相互碰撞被不断地重新分配。作为一种可能性,其中一个粒子可能获得足够的能量从而脱离原子核,因此使原子核达到较低能状态。同样,粒子的发射可能仍然使原子核位于激发态。如果这样的话,原子核将通过继续发射粒子或 $\gamma$ 线以下降到较低能状态,直到达到稳态或者基态。

### 2.2 衰变常数

放射性衰变或分裂的过程是个统计学现象。尽管不可能知道某个特定原子何时将分裂,但可以准确地预测:在既定的时间内的大量原子中会有多少比例的原子分裂。放射性衰变的计算建立在简单的事实上,即每单位时间分裂的原子数( $\Delta N/\Delta t$ )与当前的放射性原子数( $N$ )成比例。用符号表示:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N \quad \text{或} \quad \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \quad (2.1)$$

其中 $\lambda$ 是称之为衰变常数的一个比例常数。负号表示放射性原子的数目随时间减少。

如果 $\Delta N$ 和 $\Delta t$ 足够小以致可以用其相应的微分 $dN$ 和 $dt$ 代替,那么等式2.1就会变成一个微分方程,即:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

其中 $N_0$ 是放射性原子的初始数目, $e$ 表示自然对数( $e = 2.718$ )。等式2.2是一个著名的放射性衰变的指数等式。

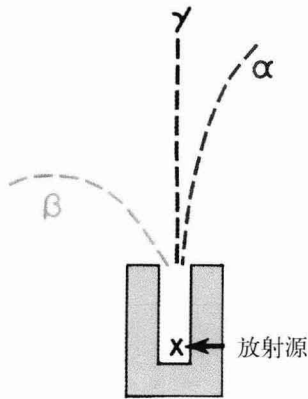


图2.1 在磁场的影响下,镭所发射的三种类型射线的分离图示(磁场垂直于纸平面)

### 2.3 活度

衰变率指的是放射性物质的活度。如果在等式2.1中 $\Delta N/\Delta t$ 被活度符号 $A$ 替代,那么:

$$A = -\lambda N \quad (2.3)$$

同样地,等式2.2也可以用活度表达:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

其中, $A$ 是在 $t$ 时间的剩余活度, $A_0$ 是相当于 $\lambda N_0$ 的初始活度。

活度单位是居里(Ci),定义为:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 衰变/秒 (dps)}^1$$

单位换算:

$$1 \text{ mCi} = 10^{-3} \text{ Ci} = 3.7 \times 10^7 \text{ dps}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Ci} = 10^{-6} \text{ Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ dps}$$

$$1 \text{ nCi} = 10^{-9} \text{ Ci} = 3.7 \times 10^1 \text{ dps}$$

$$1 \text{ pCi} = 10^{-12} \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{-2} \text{ dps}$$

活度的国际单位 (SI单位) 是贝克 (Bq)。比起居里, 单位贝克是更小但更基础的单位, 它定义为:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps} = 2.70 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

## 2.4 半衰期和平均寿命

放射性物质半衰期 ( $T_{1/2}$ ) 的定义是, 活度或放射性原子数衰减至初始值一半所需的时间。把  $N/N_0 = 1/2$  代入等式 2.2 或者  $A/A_0 = 1/2$  代入等式 2.4, 当

$t = T_{1/2}$ , 可得到:

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \text{or} \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

其中  $\ln 2$  是 2 的自然对数, 值为 0.693。因此:

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.5)$$

图 2.2A 以半衰期为单位说明了放射性样品随时间呈指数衰减。一个半衰期后, 物质的活度是最初的一半; 两个半衰期后, 仅是原来的 1/4, 以此类推。因此, 在  $n$  个半衰期后, 物质的活度将下降至最初值的  $1/2^n$ 。

尽管指数函数可以绘制成线性图形 (图 2.2A), 但是最好还是绘制在半对数坐标纸上, 因为这样能形成一条直线, 如同图 2.2B 所示。这条曲线适用于任何放射性物质, 而且如果实耗时间可以用半衰期的分数来表达的话, 它还可以用来确定剩余的分活度。

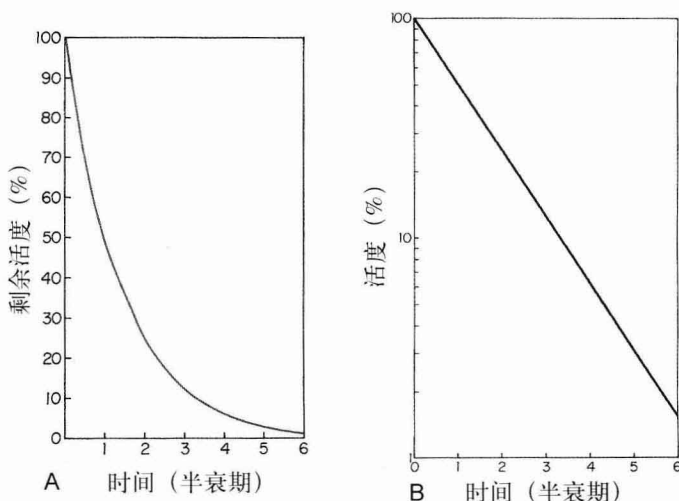


图 2.2 一般衰减曲线。纵轴为初始活度的百分数, 横轴为时间, 以半衰期为单位。A. 绘制成线性图; B. 绘制成半对数图

平均寿命是放射性原子衰变所需的平均时间。在理论上, 尽管让所有原子衰变需要无尽的时间, 但平均寿命 ( $T_a$ ) 的概念可根据假想放射源的观点理解, 该假想放射源以与初始活度相同的恒定速率衰变, 而且与从时间  $t = 0$  到  $t = \infty$  成指数衰变的特定放射源产生相同的衰变总数。因为初始活度 =  $\lambda N_0$  (源自等式 2.3), 且衰变总数必须等于  $N_0$ , 我们得到:

$$T_a \lambda N_0 = N_0 \quad \text{or} \quad T_a = \frac{1}{\lambda} \quad (2.6)$$

比较等式 2.5 和 2.6, 我们得到半衰期和平均寿命间的如下关系:

$$T_a = 1.44 T_{1/2} \quad (2.7)$$

### 例 1

1. 计算  $1\text{g}^{226}\text{Ra}$  所含的原子数。
2.  $1\text{g}^{226}\text{Ra}$  的活度是多少 (半衰期 = 1622 年)?

(1) 在 1.3 节中, 我们知道:

$$\text{克原子数} = \frac{N_A}{A_w}$$

<sup>1</sup>这个定义基于 1g 镭的衰变率, 最初测得为  $3.7 \times 10^{10}$  dps/g。尽管现代测量已确定镭的衰变率实为  $3.61 \times 10^{10}$  dps/g, 但活度单位居里的初始定义保持不变。



其中  $N_A =$  阿伏伽德罗常数  $= 6.02 \times 10^{23}$  原子/克  
原子量,  $A_w$  是原子量。我们在同一节亦已说明,  
 $A_w$  非常接近于质量数。因此, 对于  $^{226}\text{Ra}$ :

$$\text{克原子数} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{226} = 2.66 \times 10^{21}$$

(2) 活度  $= \lambda N$  (等式 2.3, 忽略负号), 因为  $N = 2.66 \times 10^{21}$  原子/克 (如上所述), 而且:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{0.693}{T_{1/2}} \\ &= \frac{0.693}{(1622 \text{ 年}) \times (3.15 \times 10^7 \text{ 秒/年})} \\ &= 1.356 \times 10^{-11} / \text{秒} \end{aligned}$$

因此:

$$\begin{aligned} \text{活度} &= 2.66 \times 10^{21} \times 1.356 \times 10^{-11} \text{ dps/g} \\ &= 3.61 \times 10^{10} \text{ dps/g} \\ &= 0.975 \text{ Ci/g} \end{aligned}$$

放射性核素每单位质量的活度称为比活度。如前例子所示, 镭的比活度略微小于  $1 \text{ Ci/g}$ , 尽管居里最初被定义为  $1 \text{ g}$  镭的衰变率。正如前面提到过, 之所以存在差异是因为当前修正镭的实际衰变率时没有修正最初关于居里的定义。

某些放射性核素的高比活度对很多应用都是有利的。例如, 在研究生物化学过程中, 元素作为示踪剂的应用, 要求组成整体的元素质量必须足够小以致不会影响正常代谢并且该元素应能够呈现可测量的活度。另外一个例子是放射性同位素作为远距离放射治疗的放射源。尽管钴-60的半衰期比铯-137短 (相比于  $^{137}\text{Cs}$  30 年的半衰期,  $^{60}\text{Co}$  仅有 5.26 年), 但钴-60 仍然比铯-137 更合适的原因之一就是它具有高得多的比活度。感兴趣的读者可以通过实际计算核实这个事实。

## 例 2

1. 以月的倒数为单位计算钴-60 的衰变常数 ( $T_{1/2} = 5.26$  年)。
2.  $5,000\text{-Ci } ^{60}\text{Co}$  放射源 4 年后的活度是多少?

$$\begin{aligned} \ln 5 - 8.609 \times 10^{-2} \times t &= \ln 2 - 4.846 \times 10^{-2} \times t \\ \text{或 } 1.609 - 8.609 \times 10^{-2} \times t &= 0.693 - 4.846 \times 10^{-2} \times t \\ \text{或 } t &= 24.34 \text{ 天} \end{aligned}$$

最后, 可以绘制各个样本的活度作为时间的函数图。两个样本的活度将在两曲线相交处对应的时间点相等。

(1) 从等式 2.5 中我们知道:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

因为  $T_{1/2} = 5.26$  年  $= 63.12$  个月, 所以:

$$\lambda = \frac{0.693}{63.12} = 1.0979 \times 10^{-2} \text{ 月}^{-1}$$

(2)  $t = 4$  年  $= 48$  个月, 根据等式 2.4, 我们得到:

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ &= 5,000 \times e^{-1.0979 \times 10^{-2} \times 48} \\ &= 2,952 \text{ Ci} \end{aligned}$$

另外:

$$t = 4 \text{ years} = \frac{4}{5.26} T_{1/2} = 0.760 T_{1/2}$$

所以:

$$A = 5,000 \times \frac{1}{2^{0.760}} = 2,952 \text{ Ci}$$

从图 2.2 的一般衰变曲线中读出  $t = 0.76 T_{1/2}$  时的分活度, 然后将其与初始活度相乘, 就得出了想要的答案。

## 例 3

多少时间  $5 \text{ mCi}$  的  $^{131}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 8.05$  天) 和  $2 \text{ mCi}$  的  $^{32}\text{P}$  ( $T_{1/2} = 14.3$  天) 会有相同的活度?

对  $^{131}\text{I}$  而言:

$$A_0 = 5 \text{ mCi}$$

且:

$$\lambda = \frac{0.693}{8.05} = 8.609 \times 10^{-2} \text{ 天}^{-1}$$

对  $^{32}\text{P}$  而言:

$$A_0 = 2 \text{ mCi}$$

且:

$$\lambda = \frac{0.693}{14.3} = 4.846 \times 10^{-2} \text{ 天}^{-1}$$

假设两种核素的活度在  $t$  天后将相同, 那么, 从等式 2.4:

$$5 \times e^{-8.609 \times 10^{-2} \times t} = 2 \times e^{-4.846 \times 10^{-2} \times t}$$

等式两边取自然对数:

## 2.5 放射系

现今已知总共有 117 种元素。其中前 92 种 (从  $Z = 1$  到  $Z = 92$ ) 系自然存在的。其余的都是人造的。