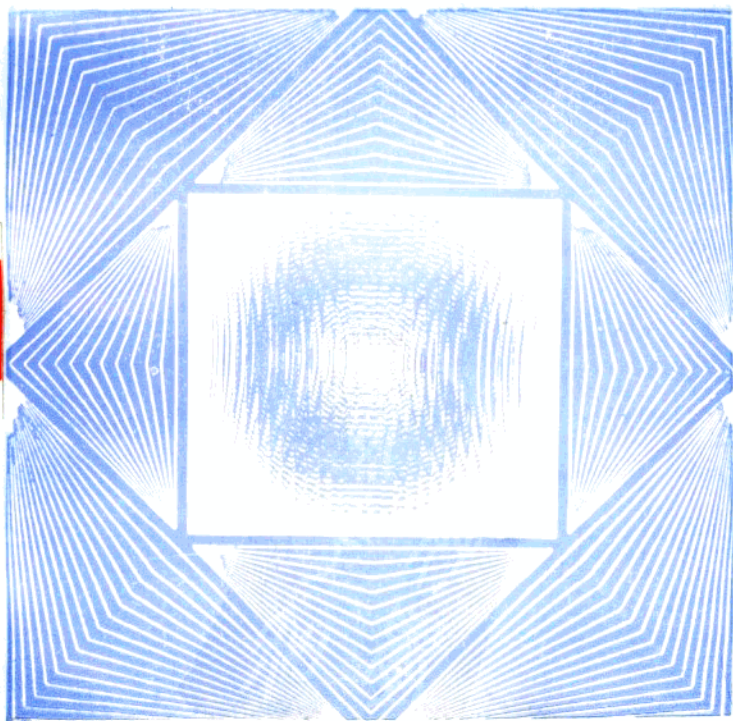


辐射防护基础知识

田德祥 编著



原子能出版社

前 言

国家《辐射防护规定》(GB8703-88)指出:从事辐射工作的人员,必须具备辐射防护基本知识,理解辐射防护最优化的基本原则,熟悉辐射防护方面的规章制度,并经过培训考核取得辐射工作人员合格证后方可参加工作。国务院第 44 号令也特别强调:“对已从事和准备从事放射工作的人员,必须接受体格检查,并接受放射防护知识培训和法规教育,合格者方可从事放射工作”。

为此,北京大学曾于 1991 年至 1993 年先后对已从事放射工作的人员(包括副教授、教授)和准备从事放射工作的人员进行过八次辐射安全培训,作者在培训中讲述了辐射防护基础知识,北京大学辐射防护室曾把讲稿印成小册子内部发行。这次正式出版前,作者对有些章节进行了补充和修改,并将 ICRP 第 60 号出版物的重要内容也收到有关章节之中。作者力求文字简练,避免繁琐的数学推导和理论计算,目的是帮助读者对有关辐射类型、防护标准、辐射危险性、防护方法、放射性废物管理、辐射事故处理及辐射防护法规等方面的知识和概念有个基本的了解,使之更自觉地执行国家的辐射防护规定,以达到保障放射工作人员和广大公众的安全与健康、保护环境、促进核科学技术、核能和其他辐射应用事业的发展。

本书在编写过程中曾得到北京大学辐射防护室严瑞芳副研究员、赵忠祥工程师、唐适宜助理研究员的大力协助,北京大学

吴季兰教授对本书的正式出版给予了热情鼓励和推荐,作者在此一并表示感谢!

由于作者水平所限,错误和疏漏在所难免,敬请读者和辐射防护界同行批评指正。

作者

1994年9月 于北京大学

目 录

第1章 放射性	(1)
1.1 原子和原子核	(1)
1.2 同位素	(2)
1.3 放射性核素	(2)
1.4 放射性活度	(3)
1.5 放射性比活度和放射性浓度	(5)
1.6 天然放射性	(5)
1.7 人工辐射源	(6)
思考题	(9)
第2章 辐射类型及其与物质相互作用	(10)
2.1 辐射类型	(10)
2.1.1 α 粒子	(10)
2.1.2 β^- 粒子	(10)
2.1.3 β^+ 衰变与电子俘获	(11)
2.1.4 γ 辐射与同质异能跃迁	(13)
2.1.5 X 射线	(14)
2.1.6 中子	(15)
2.2 辐射与物质的相互作用	(16)
2.2.1 带电粒子的能量损失	(16)
2.2.2 γ 辐射与物质的相互作用	(18)
2.2.3 中子与物质的相互作用	(19)
思考题	(19)
第3章 辐射的生物效应	(21)
3.1 辐射与细胞的作用	(21)
3.2 辐射的躯体效应	(23)
3.3 辐射的遗传效应	(25)

3.4 影响辐射效应的因素	(26)
思考题	(28)
第4章 常用辐射量和单位	(29)
4.1 授予能 ϵ	(29)
4.2 吸收剂量 D 及其单位	(29)
4.3 照射量 X 及其单位	(30)
4.4 剂量当量 H 及其单位	(31)
4.5 有效剂量当量和有效剂量	(33)
思考题	(35)
第5章 辐射防护标准	(36)
5.1 辐射防护的目的	(36)
5.2 辐射防护三原则	(37)
5.3 个人剂量限值	(38)
5.4 对公众照射的限制	(40)
5.5 国际放射防护委员会(ICRP)的新建议	(40)
思考题	(41)
第6章 辐射的危险性控制	(42)
6.1 辐射的危险性	(42)
6.2 外照射的防护	(42)
6.2.1 控制受照时间	(42)
6.2.2 增大与辐射源间的距离	(43)
6.2.3 屏蔽	(43)
6.2.4 屏蔽厚度估算	(43)
6.3 内照射危险的控制	(46)
6.3.1 年摄入量限值和导出空气浓度	(47)
6.3.2 日等效操作量和工作场所分级	(48)
6.3.3 放射性污染的控制水平	(49)
6.3.4 放射性污染的去除方法	(51)
思考题	(55)

第7章 剂量监测与剂量仪	(56)
7.1 剂量监测原理和方法	(56)
7.2 剂量仪的选择	(57)
7.3 辐射测量仪的校准	(58)
7.4 常用剂量监测仪介绍	(59)
思考题	(60)
第8章 放射性废物的管理	(61)
8.1 放射性废物的含义	(61)
8.2 放射性废物的管理原则	(61)
8.3 放射性废物的分类	(62)
8.4 放射性废物的收集、包装和送贮	(64)
思考题	(64)
第9章 辐射事故和辐射防护法规	(66)
9.1 辐射事故管理	(66)
9.1.1 辐射事故的含义	(66)
9.1.2 辐射事故的分类和分级	(66)
9.1.3 辐射事故的处理原则	(68)
9.2 辐射防护法规	(69)
9.2.1 制定法规的目的	(69)
9.2.2 有关辐射防护法规、标准及其内容介绍	(69)
思考题	(76)
主要参考文献	(77)
附录 I 常用放射性核素表	(79)
附录 II 常用放射性核素的年摄入量限值和导出空气浓度	(84)
附录 III 常用放射性核素的毒性分组	(87)
附录 IV 电离辐射标志	(88)

第 1 章 放射性

1.1 原子和原子核

自然界中,一切物质都是由分子组成的,分子则是由原子组成的,原子是很微小的粒子,它的半径为 10^{-8}cm 左右,质量也很轻,一个氢原子质量只有 $1.6773 \times 10^{-24}\text{g}$,一个铀原子质量也不过是 $3.915 \times 10^{-22}\text{g}$ 。近代物理研究表明,原子是由更小的粒子组成的,这些粒子称为基本粒子,它们是质子、中子和电子,所有原子都是由这些基本粒子组成的。

质子、中子、电子的质量分别为 $1.6725 \times 10^{-24}\text{g}$ 、 $1.6747 \times 10^{-24}\text{g}$ 及 $9.1089 \times 10^{-28}\text{g}$,在核技术应用中用克作单位实在太,因此,国际上统一规定以 ^{12}C 原子量的 $1/12$ 为质量单位,称为原子质量单位(u),一个 ^{12}C 原子的静止质量为 12.000000u ,其它原子或粒子的质量可以与 ^{12}C 作出比较定出。 $1\text{u} = (1.66043 \pm 0.00008) \times 10^{-24}\text{g}$,因此,质子、中子和电子的静止质量分别为:

质子: 1.007276u

中子: 1.008665u

电子: $5.48588 \times 10^{-4}\text{u}$

原子核是原子中带正电的核心,它是由质子和中子组成的,而电子在不同轨道上围绕原子核不停地运动。通常用下列符号表示不同元素的原子核:



Z 是原子序数,等于核内质子数, A 为原子质量数,是核内质子和中子数之和, X 则是元素的符号。因为每种元素都有确定

的质子数,所以 Z 有时可不标出,简写成 ${}^A\text{X}$ 。如: ${}^1\text{H}$ 、 ${}^{32}\text{P}$ 、 ${}^{125}\text{I}$ 等。

1.2 同位素

虽然一种元素的所有原子,它们都包含有相同的质子数,但他们可能包含不同的中子数,这就意味着一种元素可能有一系列的原子。例如,元素磷(P)的原子序数为 15(也就是每个原子含有 15 个质子),但是它可以具有不同中子数,如:

${}^{28}_{15}\text{P}$ 15 个质子 13 个中子 ($Z=15, A=28$)

${}^{29}_{15}\text{P}$ 15 个质子 14 个中子 ($Z=15, A=29$)

${}^{30}_{15}\text{P}$ 15 个质子 15 个中子 ($Z=15, A=30$)

${}^{31}_{15}\text{P}$ 15 个质子 16 个中子 ($Z=15, A=31$)

${}^{32}_{15}\text{P}$ 15 个质子 17 个中子 ($Z=15, A=32$)

${}^{33}_{15}\text{P}$ 15 个质子 18 个中子 ($Z=15, A=33$)

${}^{34}_{15}\text{P}$ 15 个质子 19 个中子 ($Z=15, A=34$)

这些不同类型的原子称为该元素的同位素,或彼此是同位素,如 ${}^{32}\text{P}$ 和 ${}^{34}\text{P}$ 互为同位素。同位素还有一种特殊类型,是同质异能素:核内中子数和质子数都相同,但所处的能态不同,如 ${}^{99m}\text{Tc}$ 和 ${}^{99}\text{Tc}$, ${}^{99m}\text{Tc}$ 是 ${}^{99}\text{Tc}$ 的激发态,两者是同位素,又是同质异能素。同位素由于原子序数相同,它们在元素周期表中处于同一个位置,所以它们是有相同的化学性质。

1.3 放射性核素

核素是指具有特定的质量数、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,如 ${}^{32}\text{P}$ 或 ${}^{33}\text{P}$ 都称为核素(nuclide)。核素分稳定的和不稳定的,不稳定的核素称为放射性核素。

放射性核素具有三个主要特性：

(1)放射性核素能自发地放出射线,并与此同时变成另一种核素。例如 ${}_{84}^{218}\text{Po} \xrightarrow{\alpha} {}_{82}^{214}\text{Pb} \xrightarrow{\beta} {}_{83}^{214}\text{Bi}$ 。放出的射线常见的有 α 、 β 、 γ 射线等。

(2)放射性核素具有一定的半衰期($T_{1/2}$)。所谓半衰期是指一定数量的某种放射性核素的原子核数目衰减到它初始值的一半所需要的时间。常用 $T_{1/2}$ 来表示。半衰期是放射性核素的一个特征常数。它不随外界条件和元素的物理、化学状态的变化而改变。不同的放射性核素具有不同的半衰期(见附录1),而且差别很大,有的放射性核素的半衰期相当长:如 ${}^{226}\text{Ra}$, $T_{1/2} = 1600\text{a}$ 。有的则几天、几年;如 ${}^{32}\text{P}$ 的半衰期为14.28d, ${}^{60}\text{Co}$ 的半衰期5.27a,当然也有相当短的,如几小时,甚至更短。

(3)放射性核素的第三个特性是放射性原子核数目的衰减是服从指数衰减规律的。一般用 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ 表示。 N_0 为初始的放射性原子核数, N 为经过时间 t 衰变后所剩下的放射性原子核数, λ 是与该种放射性核素性质有关的常数,称为衰变常数。衰变常数 λ 与半衰期 $T_{1/2}$ 的关系为 $T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$ 。

1.4 放射性活度

放射性核素在单位时间内发生核衰变的数目,即衰变率,称为放射性活度,用符号 A 表示。

放射性活度的大小决定于放射性核素的性质(即衰变常数 λ 或半衰期 $T_{1/2}$)和存在的放射性原子核的数目(N)。可用 $A = \lambda N$ 表示。

活度的单位叫做贝可(Becquerel),用符号Bq表示,1Bq = 1衰变/s。

旧的专用单位是居里(Ci)。

新旧单位的换算关系如下：

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq} = 37\text{GBq}$$

$$1\text{mCi} = 1 \times 10^{-3}\text{Ci} = 3.7 \times 10^7\text{Bq} = 37\text{MBq}$$

$$1\mu\text{Ci} = 1 \times 10^{-6}\text{Ci} = 3.7 \times 10^4\text{Bq} = 37\text{kBq}$$

$$1\text{kBq} = 1 \times 10^3\text{Bq} = 0.02703\mu\text{Ci}$$

$$1\text{MBq} = 1 \times 10^6\text{Bq} = 27.03\mu\text{Ci}$$

$$1\text{GBq} = 1 \times 10^9\text{Bq} = 27.03\text{mCi}$$

$$1\text{TBq} = 1 \times 10^{12}\text{Bq} = 27.03\text{Ci}$$

因为放射性样品的活度(或称衰变率)是与不稳定原子核数目成比例的,所以不稳定原子核数也是与时间成指数关系而变化,我们可以把样品的放射性活度 A 写成 $A = A_0 e^{-\lambda t}$, A_0 为 $t=0$ 时刻的样品活度。放射性活度随时间衰变的曲线如图 1.1 所示。

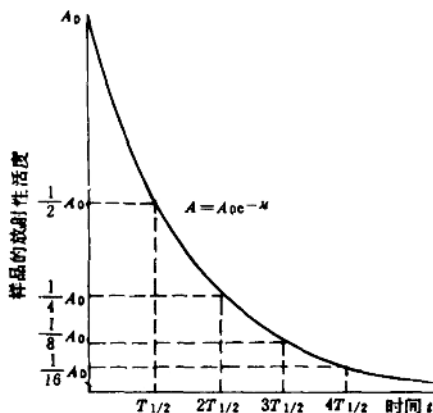


图 1.1 放射性活度随时间的变化

它表明了样品的放射性活度随时间的变化关系。经过一个半衰期时,放射性活度衰减到 $1/2A_0$, 经过二个半衰期时,放射性活度衰减到 $1/4A_0$ 。放射性核素的半衰期是个常数,对于多种混合的放射性核素的样品,测量半衰期可将它的未知成分识别出来。

1.5 放射性比活度和放射性浓度

放射性比活度(specific activity)是指某一纯的元素或化合物样品中,单位质量所含的放射性活度。单位是以 MBq/g 或 kBq/mmol 等表示。放射性比活度通常简称为比活度。实际上,比活度是表示样品内放射性核素在其所属的元素的全部原子中所占比例的一种参数。例如 NaCl 中的 Na 全部是放射性核素 ^{22}Na 时,比活度应为 5.1TBq/mmol ,若样品中稳定核素 ^{23}Na 占一半, ^{22}Na 占一半,则其比活度为 2.55TBq/mmol 。

放射性浓度是指单位体积溶液中所含的放射性活度,单位常用 MBq/mL 等表示。有时还用单位质量物体(如组织)中所含的放射性活度来表示放射性含量,如: kBq/mg 等。放射性浓度和放射性含量不仅取决于所含放射性样品的比活度,还取决于样品的化学量。

1.6 天然放射性

人类的历史,可以说是处在辐射照射下生存和发展的,当然这种称为天然本底辐照的照射水平都比较低。天然辐射源主要有三种来源:宇宙辐射、陆地上的辐射源和体内放射性物质。

宇宙射线来自星际空间和太阳,宇宙射线有较强的贯穿能力,它们在大气中与元素碰撞,经受许多类型的反应,使之损失能量,大气层成为一个天然的屏障,使宇宙射线到达地球表面以前已经减弱了许多,人们所受的宇宙射线的剂量当量率,在海平

面处要比高山地区低得多。例如在赤道海平面处测得的性腺平均剂量率为 0.23mSv/a,而在海拔 3050m 处的剂量率则为 0.56mSv/a。

宇宙射线中的中子与大气层中的氮发生相互作用时,产生一种非常重要的放射性核素 ^{14}C ,其反应为 $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 。 ^{14}C 的半衰期为 5692a,它将扩散到低层大气中,并在那里被生物吸收。

陆地上的辐射源,主要是来自土壤和岩石中的少量放射性元素铀和钍以及它们的子体产物,这些放射性元素的浓度与地理位置和地质构造有很大关系,在世界上有些地区,如印度和巴西的独居石地质构造地区,都属高本底地区,那里的剂量率高达 0.12 Sv/a。当然,大部分地区都属低本底地区。

体内放射性源主要是人体内含有微量放射性元素,如 ^{14}C 和 ^{40}K ,除此之外,铀和钍系的放射性气体衰变产物,即氡和钍射气,对人体内放射性有显著的贡献。这些气体从岩石和土壤中扩散出来被植物和动物所吸入,致使大多数食品中会有可测量的天然放射性物质,最后进入人体内,产生对人体的照射。

从某些建筑材料中释放出来的氡气使有些地区室内氡气含量过高,已引起人们的关注。

表 1.1 天然辐射源产生的平均年剂量

辐射源	剂量($\mu\text{Sv/a}$)
局部地区的 γ 辐射	400
^{14}C	10
氡和钍射气及其衰变产物	800
人体中的 ^{40}K	200
宇宙射线	300
人体中的铀和钍核素	170
	总计 1880

据英国 Isles 地区调查由于天然辐射造成的平均年剂量值如表 1.1。

1.7 人工辐射源

人工辐射源包括放射诊断和放射治疗辐射源、放射性药物、放射性废物、核武器爆炸的落下灰以及核反应堆和加速器产生的照射等。

放射诊断：如牙科、胸部透视、骨科等都用 X 射线进行照射（见表 1.2）。X 射线诊断对公众的照射在医用辐射总照射量中占 75%~90%。对孕妇的照射应加以严格控制，因为这种照射有可能导致儿童身体和智力的损伤。

放射治疗：对群体产生的平均剂量远远低于放射诊断，虽然在某些治疗（如癌症）中可用到大剂量的照射，但只有少数（病）人受到这种照射。

放射性药物：有的用于局部治疗（如甲状腺），有的用于追踪人体内特殊化学物质的途径和部位，据美国统计表明，放射性药物用量正以每年 25% 的速率增加，到 2000 年从这些辐射源获得的剂量可能达到所有人工辐射源产生剂量的 15%。

放射性废物：由于放射性同位素的应用，尤其是核能工业的发展，导致了放射性废物的不断增加。连续地将低水平的放射性废物排放到环境中，就意味着对公众照射水平的提高，所以要严格加以控制。

核爆炸的落下灰：核武器试验中释放出来大量的⁹⁰Sr 和¹³⁷Cs 释放出来并随落下灰到达地面，最终通过食物链进入人体。美国原子能委员会保健和安全实验室，给出了 1964 年美国公众日常饮食中，从各种食物中摄入⁹⁰Sr 的量，如表 1.3 所示。

表 1.2 X 线诊断(透视)器官和组织剂量

诊断部位	每一次透视各器官或组织的平均剂量当量 H_r (mSv)						
	性腺	乳腺	红骨髓	肺	甲状腺	骨表面	其余五个组织平均
臀部和股骨上部	0.4	0.0001	0.11	0.0004	0.0006	0.015	
骨盆	0.04	0.0001	0.06	0.0005	0.0005	0.17	0.17
腰椎	0.004	0.0004	0.04	0.06	0.006	0.7	0.14
尿道	0.07	0.002	0.30	0.04	0.003	0.6	1.0
尿道及膀胱	0.10	0.0004	0.12	0.0004	0.0008	0.4	0.3
胃和上部胃肠道	0.05	0.3	5.3	4.8	0.08	22	7.4
小肠	4.7	0.004	12.2	0.17	0.01	28.6	14.3
腹部	0.06	0.0008	0.11	0.0018	0.001	0.3	0.4
胆囊	0.015	0.014	0.4	0.07	0.01	1.2	1.7
胸(肺、心)	0.0001	0.08	0.02	0.08	0.03	0.05	0.03
头	0.0000	0.0002	0.002	0.0008	0.0011	0.007	0.0015

表 1.3 从食物中摄入⁹⁰Sr 的量

食物种类	⁹⁰ Sr 的日摄入量	
	Bq	%
牛奶	574	47.7
面粉和谷物	270	22.4
根菜类	59	4.9
叶菜类	122	10.1
水果	85	7.1
肉、鱼和蛋	37	3.1
水	56	4.7
总计	1203	100

职业照射:由研究工作和生产活动接受的全部职业性照射剂量,要在整个群体中求平均时是很小的,在英国,这种剂量约为 $8\mu\text{Sv/a}$,其中核能工作者的贡献大约为 40%,其余是由核工

业和医学中应用辐射而造成的。

总之,人工辐射源将随着核工业的发展以及核科学技术的应用不断增加。当然,各国利用原子能情况不同,因而产生的人工辐射源照射的剂量也会有差异,据英国的统计,人工辐射源对公众产生的平均年剂量如表 1.4 所示。

表 1.4 人工辐射源产生的平均年剂量

辐射源	剂量($\mu\text{Sv/a}$)
放射诊断	220
放射治疗	30
医用同位素	2
放射性废物	2
核爆炸落下灰	10
职业照射	9
其他辐射源	12
总计	285

思考题:

1. 放射性核素的主要特征是什么?
2. 放射性活度及其单位是如何表达的?
3. 试述天然放射性和人工辐射源对公众剂量的贡献。

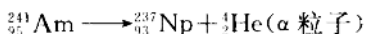
第 2 章 辐射类型及其与物质相互作用

2.1 辐射类型

我们所指的辐射是以辐射与物质相互作用为基础的,这种辐射可以使物质引起电离和激发,称为电离辐射,又分直接致电离辐射和间接致电离辐射。直接电离粒子包括有 α 粒子(α 射线)、 β^- 粒子、 β^+ 粒子、质子等带电粒子,它们具有足够的能量,可与物质中的原子(主要是核外电子)碰撞引起电离。间接电离粒子主要包括光子(γ 射线和 X 射线)、中子等不带电粒子。

2.1.1 α 粒子

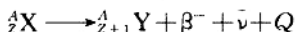
α 粒子的结构与氦核相同,是由两个质子和两个中子组成的,带有两个单位的正电荷。它是由某些不稳定的核自发地从核内放射出来的。原子质量数大于 140 的许多核素会发生这种 α 衰变,例如 ^{241}Am 即通过 α 衰变而变成 ^{237}Np (子体):



α 粒子以一定的动能发射出来,能量的单位常用兆电子伏特(MeV)表示。

2.1.2 β^- 粒子

β^- 粒子是由原子核里发射出来的高速电子。它是由于原子核内中子相对过多,导致核内一个中子转变为质子,同时释放出一个电子,此过程称 β^- 衰变。 β^- 衰变的子体与母体相比,其质量数 A 不变而 Z 增加 1,可用下式表示:



$\bar{\nu}$ 是一种质量极小的中性基本粒子,叫反中微子。它的穿透性极强,可以带走 β^- 衰变过程中的部分能量,子核 $^A_{Z+1}\text{Y}$ 的质量

远大于 β^- 和 $\bar{\nu}$, 故带走的能量相对很小, 所以衰变能 Q 主要分配给 β^- 和 $\bar{\nu}$, 形成它们的动能, 这种分配是随机的, 因此 β^- 粒子的动能可从 $0 (E_{\beta} \approx 0, E_{\bar{\nu}} \approx E_{\max})$ 到最大值 $E_{\max} (E_{\beta} \approx E_{\max}, E_{\bar{\nu}} \approx 0)$, 形成一个连续的能量分布。如图 2.1。

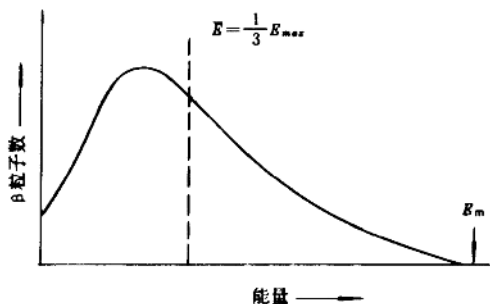
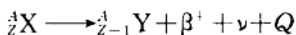


图 2.1 β^- 能谱示意图

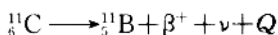
2.1.3 β^+ 衰变与电子俘获

β^+ 粒子是在核内中子相对缺少时, 一个质子转变为一个中子, 同时从核内释放出的正电子, 这个过程称为 β^+ 衰变。正电子亦即 β^+ 粒子或 β^+ 射线, 它的质量与负电子完全相等, 但带一个正电荷, β^+ 衰变时, 也同时发射一个穿透性极强、质量极小的中性基本粒子, 称为中微子。

β^+ 衰变的子核与母体核相比, A 不变而 Z 减少 1, 可用下式表示:



例如 ${}^{11}_6\text{C}$ 就是属这种衰变:



它的衰变图如图 2.2。