

147546



X射綫與 γ 射綫的防護



人民衛生出版社

2164

147546

464
5/2164

464
5/2164

X射綫與 γ 射綫的防護

A. B. 比貝加 Y. Я. 馬古利斯

E. И. 伏羅比也夫 著

張友尚 王大年 榮德興 王振河 譯

張友尚 王大年 校

人 民 衛 生 出 版 社

一九五八年·北京

內 容 提 要

本書广泛地蒐集了有关放射性輻射的防护資料，書中除簡要地介紹了原子物理学的基本概念之外，对于放射性輻射的剂量測定、X与 γ 射綫的实际防护，都有深入的闡述。

本書在放射性輻射的防护方面，詳細叙述了X与 γ 射綫穿过物质时的特性以及防护計算的原则。此外，还列举了各种防护材料的特性和多种防护的具体办法及各型設備。書中列举了大量的計算例題和防护計算时所应用的計算图，便于讀者参考使用。

本書对于从事于放射性輻射的工作人員、衛生医师、临床医师，甚至剂量測定学專家是一本极有参考价值的書籍。

А. В. БИБЕРГАЛЬ, У. Я. МАРГУЛИС,
Е. И. ВОРОБЬЕВ

ЗАЩИТА ОТ РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-ЛУЧЕЙ

МЕДГИЗ—1955—МОСКВА

X射綫与 γ 射綫的防护

開本：787×1092/16 印張：11 8/9 字數：292千字

張 友 尙 等 譯

人 民 衛 生 出 版 社 出 版

(北京書刊出版業營業許可証出字第〇四六號)

• 北京崇文區錢子胡同三十六號 •

人民衛生出版社印刷 • 新华書店發行

統一書號：14048·1489

定 價：(9) 1.40 元

1958年3月第1版—第1次印刷

(長春版) 印數：1—2,300

審校者的話

放射性同位素的輻射與X射綫在科學、技術與醫學的各個部門中正獲得愈來愈廣泛的應用。這不能不使我們嚴重注意安全技術的問題，以及防護與輻射接觸的人使免受其有害作用而影響到健康的問題。

在比貝加(А. В. Бибергаль)、馬古利斯(У. Я. Маргулис)與伏羅比也夫(Е. И. Воробьев)的專書中，詳細地討論了有關防護學說的重要部分——X射綫與 γ 射綫的有害作用的防護。鑑於本書的對象是針對不具專門物理知識的廣大讀者，所以在敘述防護問題以前，開始的兩章(第一章與第二章)是原子物理學的簡要知識。在本書中，作者也包括了劑量測定學以及防護X射綫與 γ 射綫的劑量管制方面的知識(第四章與第八章)，因為這些知識在研究防護問題時是必不可少的。

在本書討論防護問題本身時(第三、五、六、七章)，詳細地敘述了X射綫與 γ 射綫穿過物質的特性以及防護計算的原則，此外，還列舉了防護材料的特性並敘述了防護設備。在這几章中，包括了大量的計算、例題與防護計算所用的計算圖。本書的最後一章(第九章)概括了有關輻射的生物學作用的一些材料。無疑地，從事輻射的一切工作者將會以很大的興趣來閱讀本章，同時，本章可以使他們對於正常工作條件的保證予以特別的注意。

到目前為止，大量關於防護問題的個別論文散見於為數甚多的、不易為廣大讀者獲得的雜誌上。本書第一次將這類材料收集起來，將其系統化，並以易為廣大讀者接受的形式詳加敘述。可以確信，本書對於劑量測定學的專家也有幫助，因為在本書中可以查到豐富的參考材料。

K. K. 阿格林切夫

(張友尚 譯)

目 錄

引言	1
第一章 物質的构造与放射性	3
§ 1. 原子与分子	3
§ 2. 門捷列夫周期律	4
§ 3. 原子的构造·原子壳層	4
§ 4. 标識輻射	5
§ 5. 原子核的組成·核力	7
§ 6. 放射性蛻变	8
§ 7. 放射性蛻变的規律	10
§ 8. 放射系	13
§ 9. 物質的放射性强度·放射性强度的单位	16
§ 10. 人为放射性	18
§ 11. 核的分裂	19
第二章 X射綫的本質	21
§ 1. 引言	21
§ 2. 轎致輻射	21
§ 3. X射綫管的电压与轎致輻射波长的基本关系	22
§ 4. X射綫管的效率	24
第三章 X射綫和 γ 射綫与物質的相互作用	25
§ 1. 某些概念与定义	25
§ 2. X射綫与 γ 射綫的窄束的一般减弱規律	27
§ 3. 光电吸收	32
§ 4. 相干散射	38
§ 5. 不相干散射	38
§ 6. 偶之产生	44
§ 7. 核的光效应	45
§ 8. 总减弱系数	45
§ 9. 减弱系数的实验測定	57
§ 10. 根据减弱曲綫确定輻射譜成分的图解法	60
§ 11. 寬 γ 輻射束的减弱規律	63
第四章 X射綫与 γ 射綫剂量測定学的物理学基础	81
§ 1. 輻射在穿过物質时所生的效应	81
§ 2. 輻射的剂量	82
§ 3. 剂量的单位——倫	83
§ 4. 在測量剂量时的电子平衡	84
§ 5. 剂量与輻射强度之間的关系	86
§ 6. 放射性制剂的 γ 射綫所致的輻射剂量与制剂放射性的关系	87
§ 7. 深部剂量	91

第五章 防护的计算原理	97
§ 1. 引言	97
§ 2. 最大容许剂量	97
§ 3. 防护措施	98
§ 4. 作为 γ 射线源的人为放射性同位素的应用范围	99
§ 5. 放射性同位素的物理性质	100
§ 6. 对直射射线作用的防护层厚度的计算	105
§ 7. 防护计算图的绘制及应用	116
§ 8. 散射射线的防护	127
§ 9. 用增加距离与缩短照射时间来防御辐射	132
§ 10. 能量等于及低于 200 千电子伏的X辐射的防御	134
第六章 防护材料	136
§ 1. 防护材料的特性	136
§ 2. 防护材料的选择	147
§ 3. 多层防护的计算	149
第七章 防护装置	151
§ 1. 引言	151
§ 2. 移动式防护装置	151
§ 3. 固定式防护装置	165
§ 4. 防护系统	167
第八章 剂量计检查法	181
§ 1. 引言	181
§ 2. 辐射记录的电离法原理	181
§ 3. 测量X射线与 γ 射线的电离室	184
§ 4. 防护检查仪器	185
§ 5. 检查工作人员接受辐射剂量的照相法	188
第九章 X射线与 γ 射线的生物学作用	193
§ 1. 在各种不同照射剂量时发生疾患的特征	193
§ 2. 急性射线病	193
§ 3. 慢性射线病	196
§ 4. 在X射线与 γ 射线下工作的卫生预防措施	197
§ 5. 放射性同位素工作规则及个人预防法	200

附 錄

一、某些常用测量单位及公式	201
二、某些物质的密度	202
三、 e^{-x} 函数表	202
四、自然对数表	203
参考文献	206

引 言

X射綫与 γ 輻射和无綫电波、可見光、紅外綫、紫外綫一样,也是一种电磁振蕩,在真空中以300,000千米/秒(3×10^{10} 厘米/秒)的恒定速度傳播。各种形式的輻射具有相同的本质,然而具有不同的生成条件与性质。例如,X射綫的連續射綫譜是因电子受阻而产生的;当原子核由受激状态轉变成正常状态时則产生 γ 輻射。

当处于受激状态的原子与分子,向正常状态进行各种轉变时,就发出可見光、紅外綫、紫外綫或标識X射綫。

各种形式輻射的性质决定于波长 λ 或頻率 ν ,即单位時間內的振蕩数。

波长与頻率具有下列的关系:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = cT$$

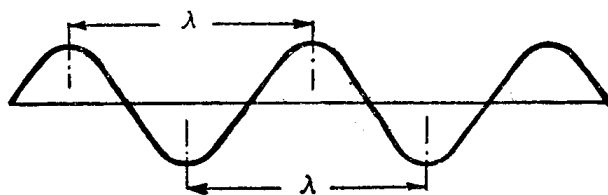


图 1

在此式中: c 为电磁輻射波的傳播速度,其值为 3×10^{10} 厘米/秒; T 为振蕩的周期。波长就是在一个周期以內,即在時間間隔 $T = \frac{1}{\nu}$ 以內,振蕩过程(在此情况下为电磁振蕩)的傳播距离。最简单的情况就是水面上的波,其波长就是波面上相邻二峰或二谷之間的距离(图1);而电磁波的波长則为波的电場具有最大(或最小)值的两点之間的距离。

因此,輻射的波长愈短,則其頻率愈高。

各种形式輻射的波长与頻率的范围見表1。

表 1

輻 射	λ (埃*)	ν (振蕩/秒)
紅外綫.....	$6 \times 10^6 - 7.5 \times 10^3$	$3 \times 10^{11} - 4 \times 10^{14}$
可見光.....	$7.5 \times 10^3 - 4 \times 10^3$	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$
紫外綫.....	$4 \times 10^3 - 100$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}$
X射綫与 γ 射綫.....	$100 - 0.0001$	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{22}$

* 1埃(Å) = 10^{-8} 厘米。

光电效应、不相干散射以及由于X射綫与 γ 射綫穿过物质而产生的其他現象,指出电磁輻射以一定的部分——量子——吸收与放出,同时量子的能量 E 与輻射頻率 ν 的关系为:

$$E = h\nu$$

在此式中: $h = 6.623 \times 10^{27}$ 尔格·秒——作用量子,或普朗克常数。

光子就是一定性质(一定頻率或波长)的最小量光能。

由于发现了象偶的产生与湮没这样一些现象，指出在适宜的条件下物质可以轉变成輻射，反之亦然。輻射具有物质的属性：质量与动量。

根据相对論，物体的质量与能量的相互联系为：

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

在此式中： m 为物体的质量， E 为物体的能量， c 为真空中的光速（ 3×10^{10} 厘米/秒），同时：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

在此式中： m_0 为靜质量； v 为物体的速度。由这些关系，可見运动的物体比靜止时具有較大的质量；这样，物体的动能随其质量而增加。例如，若 $v = 0.9c = 2.7 \times 10^{10}$ 厘米/秒，則物体的质量增加 1.3 倍。

由(1)式可見，动量(质量与速度的乘积)等于：

$$\frac{E}{c} = mc$$

对能量 $E = h\nu$ 的光子而言，其动量应为 $h\nu/c$ ，而质量应为 $m_\bullet = h\nu/c^2$ 。

因此，根据現代的概念，一切电磁輻射(可見光、紫外綫、X射綫与 γ 射綫)除波动性質外，还具有粒子性質。光的粒子，即光子或量子，不帶电，但具有一定的质量与能量，并以 3×10^{10} 厘米/秒的速度沿直綫傳播。

这种双重性，即波动性与粒子性，不仅为輻射所具有，而且物质也有；在一定的条件下，基本粒子(电子、质子、中子)也表現波动性質。因此，根据現代的学說，物质的波动与粒子本性是說明客观现实的不同方面，而不能把这些方面固定在某一簡單公式的范围以內。

“显而易见，既然光流或电子流同时具有粒子无限轉变的性質以及有規則波动的特征，所以实际上光与电子既非粒子亦非波动，而應該是某种辯証的形成物，即‘矛盾的統一体’。但是几乎全部現代物理学所必須应用的概念都是与单独的粒子和波相联系的”^①。

(張友尚 譯)

^① 瓦維洛夫(С. И. Вавилов)，現代物理学的哲学問題以及苏联物理学家为先进科学而斗争的任务，“現代物理学的哲学問題”論文集，苏联科学院，1952。

第一章 物質的構造与放射性

§1. 原子與分子

如果用化学方法可將物質分为单質，則此物質称为化合物。例如水可以分解成氢与氧；食盐可分解成鈉与氯等。单質或元素不能用化学方法分解。現在已知有 101 种元素，其中有 90 种存在于自然界，而 11 种是近年来用人工方法获得的。

原子是单質的最小粒子，在化学反应中不发生变化。各种元素的原子以不同的比例互相結合，形成了自然界存在的如此大量而且种类繁多的化合物。保有原来化学性質的化合物，其最小粒子称为分子。一切物体均由原子与分子組成，它們处于不断运动的状态中。

原子的直徑很是微小 (10^{-8} 厘米)，以致用最高倍的光学或电子显微鏡也无法看見。想要充滿头发这样粗細的空間，就需要五十万个原子。我們在日常生活中接触到的每一小块物質，都是由为数甚巨的分子或原子組成。例如，在一滴水中約含有 10^{21} 个分子。如果將这些分子排成长鏈，則其长度等于地球与太阳的距离，即 150,000,000 千米。

原子与分子的重量也是极端微小的。例如，水分子重 2.99×10^{-23} 克；鉄原子重 9.2×10^{-23} 克；氮原子重 6.64×10^{-24} 克。因此，为比較各种原子与分子的重量，应采用新的质量(重量)单位以及原子量与分子量的概念。

1.66×10^{-24} 克被定为质量(重量)的单位，并称为原子质量(重量)单位——*a. e. m.*。

分子量就是某分子的重量所相当的原子质量单位的倍数。例如，水的分子量为 18；这說明水分子的重量为重量单位 1.66×10^{-24} 克的 18 倍；因此，每一水分子的重量为 $18 \times 1.66 \times 10^{-24} = 2.99 \times 10^{-23}$ 克。

食盐的分子量为 58；因此每一食盐分子的重量为重量单位 1.66×10^{-24} 克的 58 倍，即等于 $58 \times 1.66 \times 10^{-24} = 9.63 \times 10^{-23}$ 克。

原子量就是某原子的重量所相当的原子重量单位—— 1.66×10^{-24} 克的倍数。例如，氧的原子量为 16，鉀——39，鈾——238；这說明氧原子的重量为 1.66×10^{-24} 克的 16 倍，鉀为 39 倍，而鈾为 238 倍。

原子重量单位—— 1.66×10^{-24} 克相当于同位素氧 O^{16} 的原子重量的 $1/16$ 。因此，分子量与原子量的概念也可按另一方式叙述。分子量就是某分子的重量为氧原子重量的 $1/16$ 的若干倍。同样地，原子量也就是某原子的重量为氧原子重量的 $1/16$ 的若干倍。

克分子(克原子)为数值等于分子量(原子量)的物質克数。例如，水 (H_2O) 的分子量为 18，硫酸 (H_2SO_4)——98，鐳的原子量为 226；所以一克分子水重 18 克，一克分子硫酸重 98 克；一克原子鐳重 226 克。

在每一克分子(克原子)的任何物質中，总是含有 6.02×10^{23} 个分子(原子)。此数值称为阿伏伽德罗数。因此，在 1 克物質中所含的分子(原子)数等于阿伏伽德罗

数被該物質的分子量(原子量)除,即:

$$N = \frac{6.02 \times 10^{23}}{A}$$

在此式中: N 为每克的分子(原子)数; A 为分子量(原子量)。

讓我們求出 1 克水与 1 克鐳含有多少个分子与原子。在一克分子水 (18 克) 中, 含有 6.02×10^{23} 个分子; 因此在 1 克水中的含量只有此数的 $\frac{1}{18}$, 即:

$$N_{H_2O} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{18} = 3.34 \times 10^{22} \text{ 个分子}$$

同样地, 对鐳而言:

$$N_{Ra} = \frac{6.02 \times 10^{23}}{226} = 2.66 \times 10^{21} \text{ 个原子}$$

§2. 門捷列夫周期律

研究元素及其化合物的性质指出, 某些元素虽然原子量不同, 但具有相似的化学性质。例如, 氟、氯、溴、碘易与氢化合而成酸; 鈉、鉀、銣、鉍易分解水而放出氢等。曾經不止一次地試圖將元素分类, 但是这些嘗試都不能获得有順序的、在邏輯上有联系的元素系統。

这一任务終於为天才的学者門捷列夫所完成。他指出随着原子量的增加, 某些元素的化学性质周期性地重复着另一些元素的化学性质, 其区别仅在于这种性质的表现程度不同。根据性质变化的这种周期性, 門捷列夫將一切元素納入了严整的系統, 即所謂門捷列夫周期表。

周期律是自然界最重要的規律之一, 利用它不仅可以使現有的元素系統化, 而且也可預示新元素的发现。門捷列夫曾預言銦、镓、鏷、鉍、鐳的存在, 并指出其大概的性质, 因而有助于它們的发现。他还指出鈾的原子量应为 240 左右, 而不是象当时所認为的 120。門捷列夫这一預見也被光輝地証实了。

周期律使人不能不承認原子是一种复杂的构造, 因为如果原子彼此无关而且不具有内部的結構, 則很难設想其相似性。門捷列夫在发现了周期律以后, 立刻就写道, 只有設想原子是由更小的粒子組成的, 才能解釋他所发现的性质的周期性。这只是一种天才的推测, 因为在当时科学尚不能加以証明。周期律是十九世紀末最偉大发现的先声, 这些发现推翻了認为原子是不可分的观点。

§3. 原子的構造 · 電子殼層

卢瑟福及其学生的实验指出: 原子由核与繞核旋轉的电子所組成。

电子是帶負电的粒子, 其电荷为 4.8×10^{-10} 靜电单位。这是現在已知的最小电荷——“电的原子”。电子的质量約为原子质量单位的 $1/1840$ (1.66×10^{-24} 克)^①。

^① 在 20 世紀的 30 年代, 在宇宙綫中发现了“正电的原子”——正电子。就絕對值而言, 正电子的质量与电荷等于电子的质量与电荷。

电子电荷的绝对值称为基本（即最小）电荷。如果说粒子的电荷为5个基本电荷，则表示其电荷的绝对值为电子电荷绝对值的5倍，即 $5 \times 4.8 \times 10^{-10}$ 静电单位。

原子核的直径只有原子直径的 $1/100,000$ 左右（原子直径 $\sim 10^{-8}$ 厘米，而核的直径 $\sim 10^{-13}$ 厘米）。在原子核中几乎集中了原子的全部质量。原子核带正电，同时核的电荷等于 Z 个基本电荷，在此， Z 为门捷列夫周期表中元素的序数。既然在正常状态下原子是电中性的，所以原子中的电子数也等于元素的序数。例如，锂(Li)的 $Z=3$ ，所以核的电荷等于三个正电荷单位，同时原子中含有3个电子。

电子壳层。在带正电的原子核与带负电的电子之间，虽有引力的作用，但是电子由于绕核旋转而不落于核上。同时电子还绕轴自旋。

电子在原子中位于一定的能级，换言之，位于一定的壳层上。壳层或能级以字母表示。离核最近的能级为 K 级，然后是 L 、 M 、 N 、 P 、 Q 级。电子离核愈近，则核与电子之间的引力也愈大^①，即电子在原子中的结合能愈大。因此，由 K 层夺出电子比由 L 层夺出电子需要消耗更多的能量。

根据保里(Паули)的原理，在一个原子中不能有二个电子处于相同的能量状态，此状态决定于四个参数：电子在原子中的结合能；电子绕轴自旋的方向；电子绕核旋转的轨道的形式；以及这一轨道在空间的位置。

在 K 层只能有二个电子（它们彼此间的区别是绕轴自旋的方向不同）；在 L 层有8个电子（它们彼此间的区别不仅是旋转的方向不同，而且各个轨道的形式及其空间位置也不同）；在 M 层有18个电子；在 N 层有32个电子等。

让我们考察一下，电子壳层如何随元素序数的增加而填满。氢原子($Z=1$)有一个电子，位于 K 层；氦($Z=2$)有二个电子，也位于 K 层；锂原子有三个电子，其中二个位于 K 层，一个位于 L 层；铍($Z=4$)有二个电子在 K 层，二个在 L 层。 L 层的建立止于氖($Z=10$)。由钠($Z=11$)即开始 M 层的建立，如此类推。

如果我们考察化学性质相似的元素，则可发现它们的电子壳层具有相似的构造。例如 Li、K、Na、Rb 的外层各有一个电子；卤族元素各有七个电子等。因为外层电子与核的联系最弱，所以它们最易受外来的影响；因此元素的化学性质决定于外层的电子数。原子结合成分子归根结底是外层电子的改组。因此，元素性质的周期性变化是由于电子壳层构造的周期性变化，亦即与原子的构造有联系。

§4. 標 識 輻 射

如上所述，电子在原子中可以处于一定的能量状态（即可处于 K 、 L 、 M 、 N 等壳层之一）。例如，要使电子由 K 层转移至其他任何一层，必须消耗完全一定的能量。同样地，当电子回到 K 层时，就将消耗的能量放出。

假定某一物质的原子遭受了外来的作用，例如被X射线照射，或被快速电子撞击。如果给予原子的能量足以使电子由某一内层(K 、 L 、 M 等)脱出，则发生原子的电离。外层电子之一随即转移至空出的位置上；同时能量的差将以量子或光子的形式放出。

^① 根据库伦定律，电荷之间的作用力与电荷的量成正比，与距离的平方成反比($F=q_1q_2/r^2$)。

如果空出的位置在K层,则电子由L层或M层或更远的层轉移至空出的位置上。M、N-等层的电子則可轉移至L层的空位上。

电子由N层向K层轉移的可能路徑如图2所示。在第一种情况下,放出一个輻射量子,其能量为 $h\nu_1 = E_1 - E_4$; 在第二种情况下,放出能量为 $h\nu_2 = E_3 - E_4$ 与 $h\nu_3 = E_1 - E_3$ 的兩個光子; 在第三种情况下,放出能量为 $h\nu_2 = E_3 - E_4$, $h\nu_4 = E_2 - E_3$, $h\nu_5 = E_1 - E_2$ 的三个光子,同时 $h\nu_1 = h\nu_2 + h\nu_3 = h\nu_2 + h\nu_4 + h\nu_5 = h\nu_6 + h\nu_5$ 。

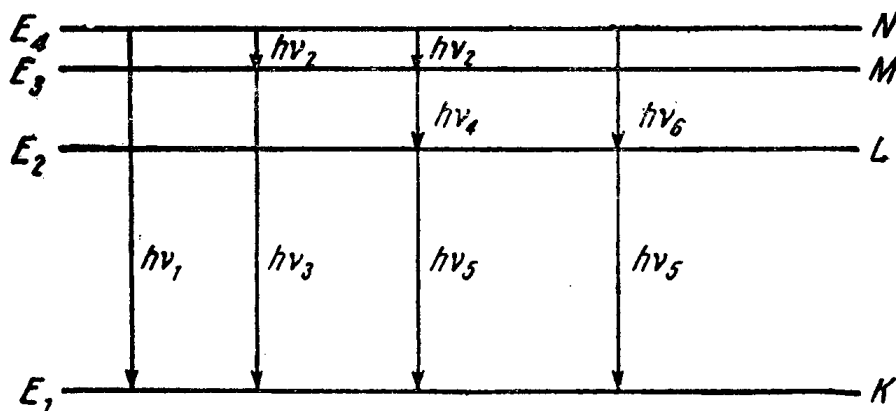


图2 电子由N层轉移至K层的可能路徑

原子由受激状态轉变为正常状态时放出輻射,并称为原子标識輻射。由上例(图2)可見,原子由受激状态轉变成非受激状态时,放出能量完全一定的量子; 因此,原子的标識輻射由能量完全一定(波长一定)的光子(量子)总合所組成,此能量等于原子轉变成非受激状态后电子在壳层上所具的結合能与电子在轉移前的壳层上所具結合能之差。因此,原子的标識輻射具有綫状譜。

表 2

元 素	原 子 序 数 (Z)	E_K (电子伏*)	λ (埃)
氢.....	1	13.5	910
氦.....	2	25.0	504
硼.....	5	190.2	64.3
氧.....	8	533	23.5
铜.....	29	8,960	1.38
銀.....	47	25,450	0.484
铷.....	77	76,100	0.162
鉛.....	82	87,800	0.140
鈾.....	92	115,400	0.107

* 电子伏(eV)为原子物理学中所用的能量單位,它相当于电子通过电位差为1伏的电場时所获得的能量; 1 电子伏 = 1.6×10^{-12} 尔格; 10^6 电子伏 = 1 百万电子伏; 10^3 电子伏 = 1 千电子伏。

电子在原子中的結合能随元素序数Z的加大而增长,因此标識輻射的能量也增加。换言之,在元素的序数与标識輻射的能量(波长)之間具有单值的联系,因此根据輻射譜就能确定元素的序数,反之亦然。某些元素在K层受激时放出的标識輻射的

波长与能量 E_K 列于表 2 中[1]^①。

§5. 原子核的組成 · 核力

原子核也具有复杂的构造,它由质子与中子組成。关于原子核的质子-中子构造的假說,首先是由苏联物理学家伊瓦年科(Д. Д. Иваненко)与加朋(Е. Н. Гапон)于 1932 年提出的。

质子是带有单位正电荷的粒子,其质量約等于一个原子质量单位(更准确些,质子的质量 $m_p = 1.00813$ 原子质量单位);质子就是氢的原子核。

中子是不带电的粒子,其质量約与质子的质量相等(更准确些,中子的质量 $m_n = 1.00898$ 原子质量单位)。

存在于核中的质子与中子有时称为核子。核中质子与中子的总数称为原子核的质量数 A ,它与元素的原子量大約相等,因为质子与中子的原子量約等于 1。

核中的质子数在数值上等于門捷列夫周期表中元素的序数 Z 。中子数等于质量数 A 与元素序数 Z 之差。例如, Co_{59} 的质量数 $A = 59, Z = 27$; 因此鈷的原子核是由 27 个质子与 $59 - 27 = 32$ 个中子所組成的。

同位素。电荷相同而原子量不同的原子核称为同位素。

因此,同位素的核具有相同数目的质子,但是不同数目的中子。因为元素的化学性质决定于原子序数,所以同位素的化学性质相同,它們是同一化学元素原子的不同形式。

例如,鈷的两种同位素 (Co_{59} 与 Co_{60}) 的质量数各为 59 与 60。在两种同位素的核中都各含有 27 个质子; Co_{59} 的中子数为 32,而 Co_{60} 的中子数为 33。

核力。虽然在带有同种电荷的核粒子(质子)之間有相斥的静电庫倫力作用,但是原子核却是很稳定的体系,此体系很难受外来作用的影响。这是因为除静电斥力外,在核粒子之間(质子与质子、中子与中子以及质子与中子之間)有特殊的力量,即所謂核力在作用。核力的性质既不同于电力,也不同于引力。关于核力的假說,首先是由苏联物理学家塔木(И. Е. Тамом)与伊瓦年科(Д. Д. Иваненко)提出的。

核力的特点在于它們只在极短的距离內作用,距离的等級相当于核的直径 (10^{-13} 厘米)。换言之,当核粒子(质子或中子)彼此趋近至距离达到 10^{-13} 厘米左右时,核力即变得非常巨大,并远远超过作用于帶同种电荷的核粒子之間的庫倫斥力。核力的这种特点,也就是质子与中子极为紧密地“斂集”在核內的原因;核物质的密度(即 1 厘米³ 核的质量)高达一亿一千六百万吨。粒子在核中的結合能以若干百万电子伏計(具有中等数值 Z 的核約为 8 百万电子伏),而电子在原子中的結合能則不超过数十仟电子伏(見表 2)。

輕的与中等重量的元素含有为数不多的质子,核的内聚力超过帶同种电荷的核粒子——质子之間的庫倫斥力。这些核是十分稳定的体系。但是,随着元素原子序数的增加,即核中总电荷的增加,质子的分裂作用表現得愈益强烈。因此,在重原子核中中子数大于质子数,只有如此才能增大核中的拉力以平衡增长的、作用于质子之

^① 在此处以及以后各处,方括弧中的数字表示書末文献索引的号数。

間的庫倫斥力。

原子序数 $Z > 82$ 的元素，其核力已不能保證核的完全穩定性，并开始发生內部改組的过程。不穩定核的这种自发蛻变过程是貝克勒耳(Анри Беккерел)于19世紀末发现的，称之为放射性。

随着放射性的发现，物理学中出现了新紀元。

§6. 放射性蛻變

居里夫人与比埃尔·居里的研究指出，某些元素如鈾(U_{92}^{238})、鐳(Ra_{88}^{226})、釷(Th_{90}^{232})等的原子，自行蛻变生成新的元素。放射性蛻变是这些元素的原子本身，更确切地说，是核本身的性质，而与它们的聚集状态以及它们所处的化合物的性质无关。現在已知的天然放射性元素已达40种。

放射性可以分成两种： α 放射性与 β 放射性。在第一种情况下，由放射性元素的每一核中飞出 α 粒子；在第二种情况下，则飞出 β 粒子。在大多数情况下，某放射性元素的一切核只放出一种粒子^①。

α 粒子就是氦(He_2)的核，它是由两个质子与两个中子组成的；因此它具有两个电荷单位的正电荷，而它的原子量为四个单位。

在放射性蛻变时， α 粒子以高达20,000千米/秒的速度飞行，其能量达11百万电子伏。所有的 α 粒子以相同的能量^②由某一放射性元素的核中飞出。例如， Ra_{88}^{226} 的 α 粒子的能量为4.8百万电子伏， Po_{84}^{210} ——5.3百万电子伏， U_{92}^{238} ——4.2百万电子伏。

α 粒子在空气中的射程达11厘米，在组织中达0.1毫米； α 粒子可被一张书写纸或0.006厘米厚的铝箔阻止。

β 粒子就是电子流或正电子流。在第一种情况下我们称之为电子蛻变(β^-)，在第二种情况下称之为正电子蛻变(β^+)；天然放射性元素没有正电子蛻变，它是人为放射性元素所特有的(見§10)。

β 蛻变与 α 蛻变不同。在 β 蛻变时，某一放射性元素的不同原子放出具有一切可能能量的 β 粒子；换言之， β 粒子譜是連續的。但是每一放射性元素有其特有的、完全一定的 β 譜最大能量 $E_{\text{最大}}$ 。典型的 β 譜如图3所示。横軸表示 β 粒子的能量，纵軸为具有各該能量的粒子数 N 。 β 譜的平均能量在0.25—0.45 $E_{\text{最大}}$ 之間变动。 β 譜的連續性是由于在蛻变时不仅放出 β 粒子，而且也放出不帶电以及靜質量为零的所謂中微子 ν ，中微子帶走了核的剩余能量。任何核在 β 蛻变时，

$$E_{\beta} + E_{\nu} = E_{\text{最大}}$$

在此式中： E_{β} 与 E_{ν} 依次为某核所放出的 β 粒子与中微子 ν 的能量， $E_{\text{最大}}$ 为某放射性元素所特有的 β 譜的最大能量。

各种放射性元素(人为的与天然的)的 β 粒子的最大能量在很大的范围内变

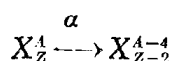
^① 在某些情况下，放射性元素，如RaC，可以具有 α 及 β 放射性；这表示一部分核放出 α 粒子，一部分核放出 β 粒子。

^② 在此未考慮 α 粒子譜的細微構造；在某些情况下由个别的核中可以飞出能量較小的短射程 α 粒子或能量較大的長射程 α 粒子(与該放射性元素原子放出的絕大多數 α 粒子的能量相比)。

动——由数百千电子伏至2—3百万电子伏。具有最高能量的 β 粒子的射程在空气中可达10米，在组织中达10—12毫米。这些 β 粒子可以被5—6毫米厚的铝片或1毫米厚的铅片完全吸收。

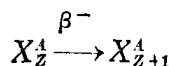
了解了 α -与 β 粒子的性质以后， ν 就可进一步看一看在放射性蜕变时，原子有何变化发生。

设原子序数为 Z ，质量数为 A 的某一元素(以符号 X_Z^A 表示)具有 α 放射性。当放射性核放出 α 粒子以后，核中的质子数减少两个单位，中子数也减少两个单位；因此生成的新核的原子序数应少两个单位，而质量数少四个单位：

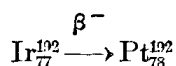


例如，镭 Ra_{88}^{226} 由于 α 蜕变而生成 $Z=86$ 与 $A=222$ 的新元素，即氡 Rn_{86}^{222} 。

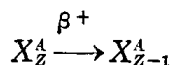
在电子 β^- 蜕变的情况下，有电子与中微子放出。这样就生成了原子序数比原来大一个单位的新元素；原子量仍然不变，因为核中粒子——中子与质子——的总数未变。在 β^- 蜕变时中子在核中转变成质子：



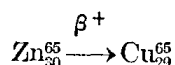
例如，人为放射性同位素 Ir_{77}^{192} ($Z=77, A=192$) 具有 β^- 放射性；由于蜕变，中子转变成质子并放出电子与中微子；因此在新生成的核中质子数已经不像原来的一样是77而是78，即生成了 $Z=78$ 的元素；这一元素就是铂；结果得到了铂的同位素 Pt_{78}^{192} 。



在正电子 β^+ 蜕变时，质子转变成中子，即核中的质子数少了一个单位，结果生成原子序数比原来小一个单位而质量数相同的新元素：



例如，人为放射性同位素锌 Zn_{65}^{65} 具有 β^+ 放射性；由于质子转变成中子，核中的质子数减为29，结果生成 $Z=29$ 的新元素；这一元素就是铜 Cu ：



γ 辐射。在许多情况下，由于放射性蜕变，新生成的核(子核)可以处于受激状态，即具有过量的能。核由受激状态转变成非受激状态时，根据转变的特性可以伴有一个或数个 γ 量子的放出； γ 辐射的能量决定于受激发的程度，同时各种放射性元素

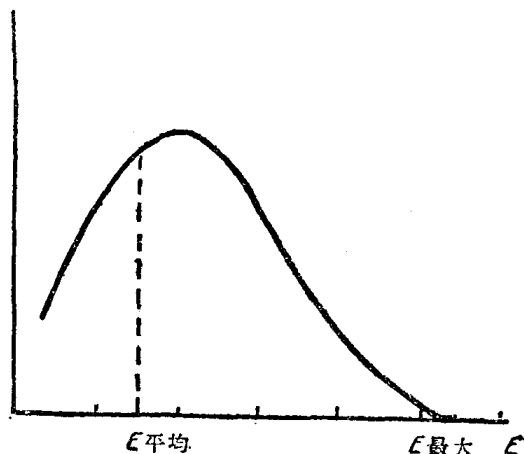


图3 β 谱的典型曲线

的 γ 辐射能量有很大的变动范围：由数千电子伏至2—3百万电子伏^①。

核中的质子与中子，正象原子中的电子一样，也只能处于完全一定的能量状态，因此 γ 辐射谱象标识辐射谱一样是线状的。

具有 γ 辐射的人为放射性同位素 Br_{35}^{83} 与 Hf_{72}^{181} 的蜕变过程如图4、图5所示。由图可见 Br_{35}^{83} 的 γ 射线谱包括能量为0.547、0.787与1.35百万电子伏的三条线。这说明被激发的每一 Kr_{36} 的核，经过三步相继的转变而达到非受激状态；较复杂的 Hf_{72}^{181} 的 γ 辐射谱(由五条线组成)，是由于不同的 Ta_{73}^{181} 核以不同的路径转变成非受激状态而产生。还有些同位素，如 Ta_{73}^{182} 的 γ 辐射谱包括31条线，而另一方面 Cs_{55}^{137} 的 γ 辐射谱一共只有一条能量为663千电子伏的线。

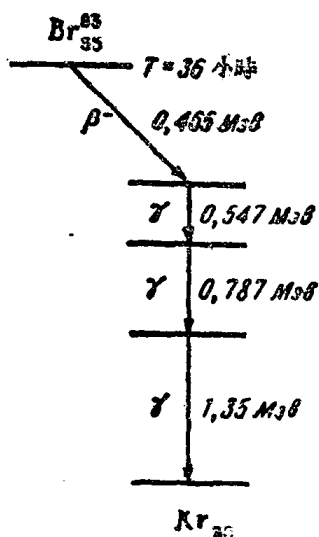


图4 Br_{35}^{83} 的蜕变过程
M.e.v.=百万电子伏

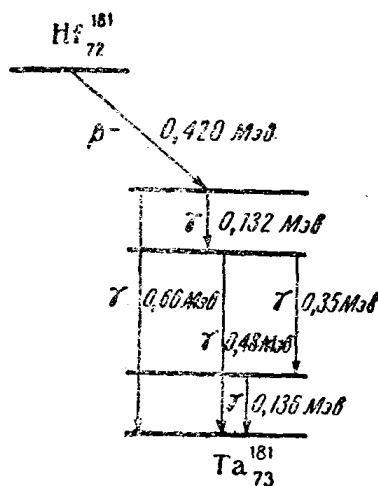


图5 Hf_{72}^{181} 的蜕变过程
M.e.v.=百万电子伏

§7. 放射性蜕变的规律

放射性元素的原子核是不稳定的，它们蜕变而生成新元素的核。但是，并不是放射性元素的一切核同时蜕变；在每一时刻某放射性物质的原子核蜕变的数目仅仅是总数的某一部分。蜕变原子的百分数因放射性元素的种类而异；某元素原子的不稳定程度愈大，则蜕变的百分数也愈大。例如，每秒有 $\frac{1.38}{10^{11}}$ 的镭原子蜕变，约有百万分之二($\frac{2.1}{10^6}$)的氢原子蜕变。这表示在 10^{13} 个镭原子中每秒有138个原子蜕变，在 10^{13} 个氢原子中则每秒有20,000,000个原子蜕变。

因此，根据某放射性物质在单位时间内蜕变的分数可以衡量其原子的不稳定性；此数值称为蜕变常数，并以字母 λ 表示。蜕变常数以秒⁻¹、日⁻¹、年⁻¹为单位。因此，镭的 $\lambda = 1.38 \times 10^{-11}$ 秒⁻¹，氢的 $\lambda = 2.1 \times 10^{-6}$ 秒⁻¹。

研究放射性蜕变的规律时指出，放射性物质的原子数按下列规律随时间而减少：

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

① 应当指出，通常所说的放射性同位素的 γ 辐射，实际上是此同位素蜕变产物的 γ 辐射。

在此式中: N_0 为某一开始时刻的放射性原子数; N_t 为时间经过 t 后剩余的放射性原子数; λ 为蜕变常数; e 为 2.7183……①。

在许多情况下,测定在某一时间间隔 t 内蜕变的原子数很重要;显然,此数为原有的原子数 N_0 与此时间间隔内未蜕变的原子数 N_t 之差,即:

$$N_p = N_0 - N_t$$

将(1.1)式的 N_t 代入,可得:

$$N_p = N_0 - N_0 e^{-\lambda t} = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1.2)$$

图6的曲线,表明(1.1)式所代表的放射性原子数随时间而减少的特性。由图6可见,经过某一时间间隔 T 以后,原有的原子数 N_0 减少一半,即剩余的原子数等于:

$$N_t = \frac{N_0}{2}$$

放射性原子数减少一半的时间称为半衰期 T 。半衰期与蜕变常数具有下列的关系②:

$$\lambda = \frac{0.693}{T} \quad (1.3)$$

同时

$$T = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.4)$$

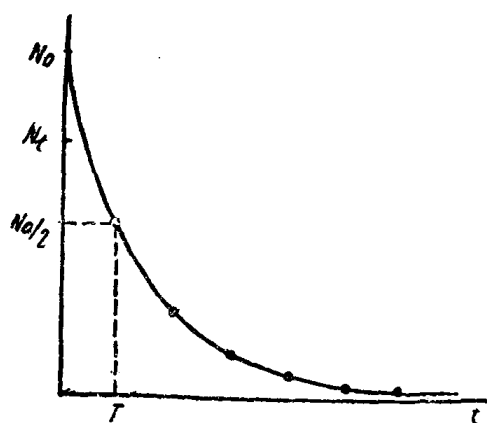


图6 放射性原子数 N_t 随时间 t 而改变的曲线

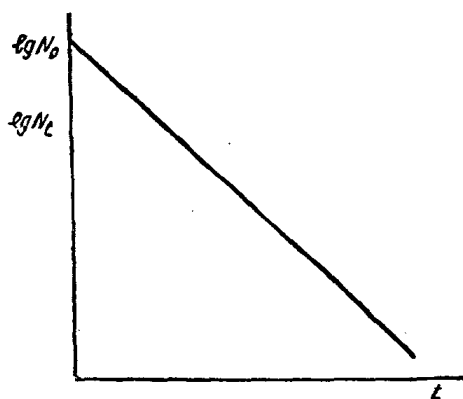


图7 放射性原子数随时间而改变的曲线(用半对数坐标)

① 数值 e 为自然对数的底, 自然对数以符号 $\ln$ 表示, 以区别于常用对数 $\lg$ 。在附录中列有自然对数表以及 e^{-x} 的表。

② λ 与 T 的关系可由(1.1)式导出; 以时间 T 代入 t , 此时 $N_t = N_0/2$,

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}, \text{ 或 } \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}.$$

取对数值可得 $\ln 1 - \ln 2 = -\lambda T$; 因为 $\ln 1 = 0$, 所以:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}; \ln 2 = 0.693.$$