

P. Genaud 著

放射性元素的防御



科学出版社

放射性元素的防御

P. Genaud 著

陶 坤 盧 侃 譯

科 學 出 版 社

內 容 提 要

主要内容是叙述操作放射性元素时可能發生的危險和操作时应当採取的防禦方法，記述了射線对生物的危害作用和人体全身遭受照射时的容許剂量。書中对檢查和測量射線的仪器、实验室的設計、实验室的規則、放射性廢物的排除等都有清楚的說明。

本書原著人为法国 P. Genaud，中文譯本系根据 1954 年苏联外文出版社出版的 H. A. Ра́йская 之俄譯本譯成。

放 射 性 元 素 的 防 御

P. Genaud 著

陶 坤 盧 侃 譯

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市書刊出版業營業許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华書店总經售

*

1957 年 8 月第 一 版

書号：J854 字数：71,000

1959 年 2 月第二次印刷

开本：850×1168 1/32

(京 2,170—4,175

印张：8 插页：1

定价：(10) 0.60 元

俄文本編者按語

本書簡明地敘述了在操作放射性元素時發生的主要危險和防禦這些元素有害作用的方法。

事情敘述得確切而清楚；引用的表、圖解和算法都很簡單，便於實際使用。

本書主要的缺點是沒有引証文獻。

本書供給用放射性元素和電離射線工作的各科專家（生物學家、化學家、醫師等）閱讀。

法文本原序

對於放射性射線应当給予應有的注意，但是不要怕它。

K. 摩 根

通常認為应用科学的發展虽然改进我們的生活条件，但是也有造成不幸事故的新的可能性。放射性同位素的应用並不是此項通則的例外。

X 射線和鐳应用得愈广，新的粒子加速器造得愈是威力强大，放射性同位素的应用范围就与日俱增地扩大。在不久的將來，我們还要有取之不竭的能量泉源——热核反应器。不过这一切都伴随着有放射作用，而放射作用對於人体具有严重的危害性。

1895 年，X 射線發現了几个月后，就出現了操作此項射線的实验者受到伤害的第一个报导。兩年后，在 1897 年，文献中計載有 23 个 X 射線引起的皮膚病例。1898 年，發現了鐳，鐳也能引起不幸的事故。其中一个事故就發生在 A. 貝克勒耳身上：他把裝有鐳的試管放在背心的口袋中，几个小时后竟發現皮膚上起了紅色斑点。居理夫人由於鐳長期的作用，在 1934 年死去了。

后来，X 射線和鐳的受害者数目繼續增加，最近达到了可观的数字。

原子能应用的領域愈广，人类遭到的危險就愈大。新的危險已經出現，这是不得不加以注意的。因此，应当研究这种危險的性質，並且找出防禦它的各种的方法。

目 录

俄文本編者按語

法文本原序

第一章	射線和物質的相互作用	1
	α 和 β 射線	1
	γ 射線	2
	中子	5
第二章	电离射線的生物作用	7
	生物作用的机制	7
	射線对染色体的作用	10
	射線的病理作用	12
	放射性同位素	13
	生物体外的照射	13
	体内照射	14
	照射的晚期后遺症	18
	惡性腫瘤的生長	18
	不育症和遺傳性變異	20
	寿命	21
第三章	許可的剂量	22
	單位	22
	全身照射的許可剂量	23
	表面被放射性同位素沾染的許可程度	26
	空气和水中放射性同位素的許可濃度	27
	国际放射学会議(倫敦, 1950 年 7 月)对防御放射性射 線的建議	27
第四章	对不同强度的射線的防御	30
	多居里射域	30

	毫居里射域	33
	貫穿射線的防御	34
	沾染的防御	44
	微居里射域	51
第五章	實驗室	52
	設計概要	52
	工作人員	54
	放射性同位素實驗室的規則	55
第六章	衛生保健所的檢查儀器	58
	測定射線強度效率的儀器	58
	总量計數器	61
	射線檢查接收机的应用	67
第七章	實驗室中放射性廢物的排除	72
	一些放射性廢物的排除規則	74
	放射性碘 I^{131}	74
	放射性磷 P^{32}	75
	放射性碳 C^{14}	76
	若干一般性的意見	76
第八章	放射性沾染的清除	79
	實驗室設備的清洗	79
	衣服	81
	手套、鞋子、面罩	82
	皮膚表面	83
	傷口	84
	吸入	85
	食入	85
第九章	医学檢查	86
	預先檢查	86
	定期檢查	86
結語		90

第一章 射線和物質的相互作用

对生物体产生有害作用的物理現象应当分成兩类。第一类是粒子射線： α 和 β 粒子以及中子。第二类是呈为 X 和 γ 射線的电磁射線。不同类型的射線，在貫穿物質时，在不同的程度上被物質吸收。不同类型的射線，其吸收历程也是不相同的。

α 和 β 射線

α 和 β 粒子主要是由於被碰原子的直接离化作用而喪失其能量的。

β 粒子运动的速度很大。其所造成的电磁場將原子外層的电子帶走(初級电离)。这些电子离开原子时速度頗大，它們也能造成离子(次級电离)。 β 粒子在失去速度之后乃附着在原子上面形成陰离子。

原子外層上失去的电子，其空位就由其他电子取代。这个取代过程同时發生有光子發射作用。如果是原子內層电子取代了电子空位，則会产生吸收元素所特有的 X 射線，此項射線也能引起次級电离(見下)。

介質在吸收了其他荷电粒子： α 粒子，質子，氘核等的能量后，也就以类似的方式發生了电离作用。

β 粒子在空气中的貫穿本領为数米，重粒子(α 粒子，質子，氘核等)的貫穿本領則仅为数厘米。

这样一来， β 粒子喪失能量的行程就要比 α 粒子長得多。由此可見， α 粒子比同等能量的 β 粒子所造成的电离密度要大(电离密度指的是單位行程上的离子数目)。

第一表列出了具有相等能量(2Mev)的 α 、 β 和 γ 射線在空气

中的行程長度和电离密度，同等能量 (2 Mev) 的射線在其行程上造成的离子偶数目相等 (即 60,000 离子偶；形成一对离子偶所費的能量等於 32.5 ev)。

表 1 具有 2Mev 能量的各种类型射線底貫穿本領和电离密度

射 線 类 型	在空气中行程的長度, M	电 离 密 度, 1 mm 中的离子数目
α 粒 子	0.01	6000
β 粒 子	10	6
γ 量 子	~600	0.1

註: ev 电子伏 (特), Mev 百万电子伏 (特)。

γ 射 線

γ 射線和物質有五种不同的作用机制。

1. 散射 γ 射線的入射束向各个方向散射。这是各种波長的电磁輻射所共有的現象，並不伴有吸收作用和波長的改变。自防禦 γ 射線有害作用的观点看来，入射束向各个方向散射具有極其重要的意义。

2. 光电效应 有一部分 γ 量子將其所有的能量遞交給电子，將电子自原子中逐出並賦予一定的速度。此項遞交能量的历程在重元素軟性 γ 射線的吸收作用上具有重要的意义。光电子在其行程上使被碰原子电离。逐出的光电子，其空位立刻由其他电子代替。这个現象伴随着有吸收元素特有的 X 射線的放射作用 (螢光 X 射線)。

3. 康普頓效应 是由於光子在自由电子上彈性散射而产生的。在此时有一部分光子的能量遞交給电子，电子乃改变了其原有速度和运动方向。光子运动的方向也發生了改变，其能量也減小了，也就是說，其波長加大了。

参加康普頓效应的电子由於电离被碰的原子而消耗掉其所获

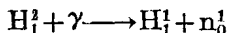
得的能量。由於多次康普頓效应的結果，光子能量乃減小到一定数值，此时乃有产生光电效应的可能。

康普頓效应通常在中等能量光子的作用下發生，与介質的原子序数实际上沒有关系。康普頓效应在空气中和活生物体的組織中也能見到。

4. 电子正电子偶的生成 当光子和原子核相互作用时，可以看到能量量子的消失，同时自核中發出电子-正电子偶；其中每个粒子的能量等於 0.51 Mev。因此，只有在射入光子的能量很大时（不小於 1.02 Mev 时）才能生成电子-正电子偶。在重元素中，此項現象可以在比輕元素中光子能量較小的情況下看到；例如，在鉛中，能量大於 5 Mev 时就可以看到此項現象，而在鋁中則要大於 10 Mev 才可看到；在能量低时，則康普頓效应起主要的作用。

电子-正电子偶形成时产生的电子將其所有的能量都消耗在介質原子的电离作用上；正子則在其行程上碰到某一电子，便与之結合，这二个电子-正电子偶的能量乃变成具有 0.51 Mev 能量的两个光子。此項現象叫做偶的湮沒。光子为介質所吸收而引起光电效应。

5. 光致蛻变 这种类型的核反应最著名的乃是氘核变成質子和中子的光致蛻变：



这种反应主要在輕元素的核上發生；而它們的产量不多，因而对 γ 射線的全部吸收作用影响很小。

通过了 (x) 厚度的物質后， γ 射線的强度 (I) 与射入射線原有强度的关系如下：

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

式中 μ 是物質的吸收系数。

系数 μ 也可以表現成下面的样子

$$\mu = \tau + \sigma_k + \sigma_\phi,$$

在此 τ , σ_K 和 σ_ϕ 分別代表光电效应, 康普頓效应, 及偶生成現象相當的吸收系数。

表 2 γ 射線和物質的相互作用

相互作用的类型	作用的粒子	最常發生作用的元素	單位能量, Mev	結 果
散射	原子	—	0	沒有吸收作用
光电效应	原子上的电子	重元素	< 1	光电子; 螢光 X 射線
康普頓效应	自由电子	—	< 5	反冲电子; 光电子
电子-正电子偶的生成	核	重元素	> 5	电子, 正电子; 湮沒放射,
		輕元素	> 10	光电子
光致蜕变	核	輕元素	> 10	中子, 質子, α 粒子

γ 光子的能量增大时, 由於光电效应和康普頓效应的吸收作用随之減少, 而由於偶形成的吸收作用却随之增加。因此, 总吸收系数 μ 在光子能量的某一中間範圍內, 有一个最低值 (圖 1)。例

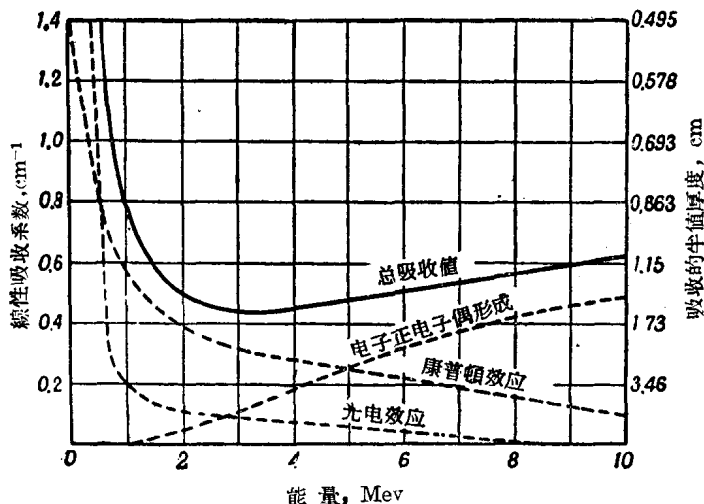


圖 1 鉛对 γ 射線的吸收

如鉛，當光子能量近於 3.5 Mev 時，其總吸收係數為最小。

圖 1 中的曲線指明，特別是在光子能量不足 1 Mev 時，主要的作用乃是康普頓效應。注意！大多數 γ 放射性同位素放出的光子能量是近乎 1 Mev 的。

半吸收厚度 放射性制品只有經過無限長的時期才會完全喪失其放射性，以此類似， γ 射線也只有通過無限厚的物質才會完全被吸收掉。

也像放射性物質借助所謂的半衰期來描述其分解過程一樣， γ 射線要用射入射線強度減少了一半時的物質厚度 L 來表示其在物質中的吸收作用。 L 的數值乃叫做半吸收厚度。

如果在 (1) 式中

$$I = \frac{I_0}{2},$$

則

$$\frac{1}{2} = e^{-\mu L},$$

由此

$$\mu L = -\ln \frac{1}{2} = 0.693,$$

或

$$L = \frac{0.693}{\mu}.$$

中 子

當中子和電子以及中子和原子核碰撞時，只有在後一情況才產生能量的傳遞作用。

中子和核的相互作用有數種不同的類型（表 3）。

1. 彈性碰撞 在彈性碰撞時，有一部分中子的能量傳遞給被擊中的原子核。帶陽電荷的核由此獲得了很大的速度，並在其行程上將它所碰到的原子電離。中子和核的彈性碰撞遵從彈性體碰撞的古典定律。依照此項定律，原子愈輕則其所獲的能量愈大。

這樣，中子和質子碰撞時喪失的能量最多。例如，用 1 cm 厚

表 3 中子和物質的相互作用

作用的类型	作用的粒子	最常發生相互作用的元素	中 子	結 果
彈 性 碰 撞	核	輕 元 素	任何中子	被击中的核 γ
非彈性碰撞	"	重 元 素	快 中 子	中子
放 射 俘 获	"	任何一种	热 中 子	γ 射線
核 反 应	"	輕 元 素	快 中 子	質子, α 粒子, 中子等等

的水或石蜡来減低中子束的强度就比用同样厚的鉛效用更大些。

由於一系列的碰撞,中子的能量乃減小,最后达到与气体分子能量相等的数值。这种能量的中子叫做热中子。

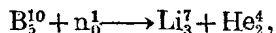
2. 非彈性碰撞 在非彈性碰撞时,中子貫入原子核中並將其一部分动能賦予原子核。这样激發了的核將其所获得的能量作为一个或数个 γ 量子而放出。此后射入核中的(或任何其他)的中子又自核中帶着較小的能量飞出。此項过程是一个 (n,n) 反应;它通常是当快中子射到重元素上时發生的。

3. 輻射俘获 $[(n,\gamma)$ 反应] 在碰撞时,中子乃被原子核所吸收;受激的核將其能量作为 γ 射線形式放出;例如



此項过程在热中子射到任何重量的元素上均会發生。

4. 核反应 中子可以引起整系列不同的反应: (n,p) , (n,α) , $(n,2n)$ 等等反应。这些反应主要是在高能中子射到輕元素上时發生的。下列反应



乃是例外,是由於慢中子¹⁾的作用而發生的。

- 1) 因为活的生物体含有大量的氢,所以快中子在其中很容易由於彈性碰撞的結果而喪失其能量。此外在快中子和氫作用时,乃形成氘;这个反应伴有 γ 射線的放射作用,同样, Na^{23} 也会变成放射 β 粒子的 Na^{24} ; N^{14} 也能变成 C^{14} 和質子等等。

第二章 电离射线的生物作用

生物作用的机制

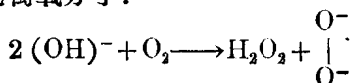
如前章所述,各种类型射线的吸收作用归根到底都导致同一的现象——导致电离。荷电粒子(α, β, p 等等)直接电离介质的原子;电中性的射线(X 和 γ 射线,中子)由于次级过程的结果而使介质的原子电离。所有的这些类型的射线都有一个共通的总名——电离射线。

近来,认为射线的生物作用是活体中原子电离作用的结果。活体中的原子,由于电离作用的结果获得极其可观的化学活性,并在活体中发生变化,这些变化在大多数情况下对于细胞都是致死的变化。虽则对细胞中全部原子数目说来相对的电离原子数目是微不足道的,可是其绝对数目却是极为重要的。例如 X 射线对人的致死剂量(500 r)会在(体积为 $10^3 \mu^3$ 的)细胞中造成 10^6 左右的电离原子,其通常的原子总数为 10^{14} ,那就是说,大约每100,000,000 未电离的原子中就有一个电离了的原子。

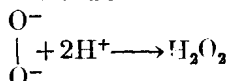
离子的平均寿命约为 1μ 秒;因而,所有的初级化学反应都应该发生了;有些在离子形成后立刻在形成离子的地点发生。

臆测起来,可能的化学反应数字是非常大的。可是如果细胞中所有的分子都可以电离的话,那么在细胞中占多数的分子,也正是水分子,其电离的可能性将最大。

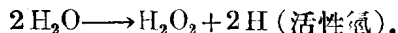
有些作者(Lauzeler, Latapie)认为电离作用所引起的最初的作用是从每个氢氧离子中取出一个电子交给氧分子,而产生出带有两个负电荷的电离氧分子:



同时形成过氧化氢,这样又复降低了 pH。电离了的氧分子,就其本身而论,将或者和被氧化的物质或者和氢离子起作用。后一作用的结果也会形成过氧化氢:



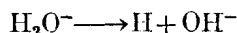
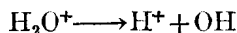
另外的一些作者 (Pifo, Giemin) 则提出下述反应:



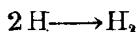
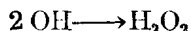
活性氢原子能够和介质中所含的氧结合,再生成水分子,不过任何其他氢的受体也都可以起和氧相同的作用。

应当认为英国学者 (Вейс, Ли) 所倡议的学说是最值得相信的,按照此项学说,起主要作用的是游离基 H 和 OH。

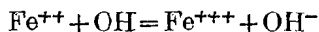
射线从水分子中击出一个电子。自由电子又附着到其他水分子上;如此乃形成电离了的水分子 H_2O^+ 和 H_2O^- , 后两者乃分解:



不稳定的 H 和 OH 基会自相结合起来,形成 H_2O_2 和 H_2 :



不稳定的 H 和 OH 基,以及 H_2O_2 其本身也可以和溶解了的物质结合。例如 OH 可以氧化二价铁离子成三价铁离子,而本身变成 OH^- :



过氧化氢和水的分解产物,即使为量很少,也会影响到细胞内的系统,胞内系统的完整性对细胞正常机能是非常重要的,因为只有有在极严格的理化条件下才有生命的可能。在胞内系统中酶具有很大的意义。所有的生活现象结局都是某一化学作用的结果,而化学作用的过程又都是被酶所调节着的;由于酶是一种催化剂,即使为量很小,也能够影响这些反应。酶的活性的抑制破坏细胞

内通常已然是很不稳定的化学平衡,导致细胞的死亡。

業已証实,过氧化氢能氧化酶的氢硫基 SH^- , 而抑制其活性。用谷胱甘胜作用可以恢复酶的活性 (Barron, Dickman, Zinger)。

电离射线的作用是直接的呢还是間接的呢?

一直到現在,我們都只研究了射線的間接作用,也就是說,只研究了水分解产物的作用。可是射线作用直接使一些化合物电离的可能性並非沒有,按照下述理由推断,似乎可能性很小:

1) 細胞中水的含量非常大,在电离射性和細胞起作用时,水电离的可能性是最大的;

2) Berkeley 做的工作指出,电离射线能阻碍在机体远端遭受放射作用区域的部位核酸的形成;

3) 射线能使水溶液中的去氧核糖核酸發生解聚作用,而不会引起干燥的和在乙二醇溶液中的去氧核糖核酸發生解聚作用。

由此看来,电离射线引起的現象十分可能是其繼發性过程所引起的。射线电离水分子,水分子的分解产物再作用於細胞的化学成份,特别是对酶的作用。

多年来,都認為在射线生物作用的机制中,酶活性的阻抑不当起多大的作用,因为使酶溶液失去活性的必要剂量显著地高於引起活細胞改变的剂量。可是后来 Mitchell 的工作表明, X 射线的治疗性剂量在活体中可以阻抑核中胸腺核甙酸的合成,也能使細胞質內的核糖核酸聚集起来。

此項現象乃是由於核中能將核糖核甙酸还原成去氧核糖核甙酸的酶的活性被阻抑而引起的。

核失去了合成染色質的本領,乃导致核本身的死亡,此后又复导致整个細胞的死亡。同时,可以看到核中开始起組織上的变化——核內的物質凝結起来了(固縮),核膜破坏(核破裂),此后細胞質乃开始变淡。

由此可見,對於射线最敏感的細胞內成分,乃是細胞核 (Кле-

точный организм)。核是細胞的敏感部分，或者說是細胞的生命中心。細胞中核質愈多，則其對射線的作用就愈為敏感；在分裂狀態下的細胞可以用來作為例子。

核質在核中形成 1μ 左右長的結構，叫做染色體。在每一種細胞中，染色體的數目是恆定的；例如，在人的細胞中，染色體數目是 48。

在細胞的分裂過程中（圖 2, A），每一個染色體沿縱的方向分裂成兩個完全相等的部分，此兩部分，分向細胞相對的兩極。細胞質在中部橫隔開來。這樣，母細胞就分裂成兩個子細胞，每個子細胞都具有核，其核也具有該種細胞所應有的一定數目的染色體。

射線對染色體的作用

染色體分子的電離作用，導致被損傷的染色體的破裂。染色體的碎片，消散在細胞質中，在子細胞中就再也看不見了（圖 2, B）。

射線的劑量愈大則電離密度愈高，被射染色體的數目也就愈多，因而，射線的致死作用也就愈強。此項相關僅僅在對同一類型射線的不同劑量而言時才是對的（例如對 γ 射線而言）。在比較不同類型的射線時就會發現，同一的劑量（即造成同等電離的劑量）產生不同的效果。此項射線作用的差別與其電離密度有關。例如在比較 α 和 β 射線的效力時，就會發現，在劑量相等時（也就是說：造成同等離子偶的劑量）， α 粒子對細胞的作用顯著地大於 β 粒子。這說明，在單位行程上 α 粒子所造成的電離作用顯著地多於 β 射線所造成的電離作用。例如，在威爾遜室中觀察粒子徑跡時，我們可以看到 β 粒子痕跡的密度顯著地低於 α 粒子痕跡的密度。染色體的破裂可能是電離達到一定強度的結果。如果染色體的厚度等於 0.1μ 左右，而 α 和 β 粒子（在透過 0.1μ 厚的組織層時）所造成的電離密度相當於 1,000 和 1，則自然，同等劑量的 α 粒子，其作用將顯著地大於 β 粒子的作用了。各種類型射線