

鐳疗的物理基础与放射性同位素

刘泰福 译

上海衛生出版社

鐳疗的物理基础与放射性同位素

C. W. Wilson 著

刘泰福 译

上海衛生出版社

一九五八年

內 容 提 要

本書以介紹各种放射性物質在放射治疗的应用上所必需的物理学知識为主。由鐳的各种特性为基础,进一步討論到特性相似的放射性同位素,尤其是鈷 60,以及放射綫剂量測定的方法及其理論根据。此外还运用丰富的資料介紹这些放射性物質在临床上应用的方式和方法。在本書最后又着重討論放射工作中的防护問題。在附录中还列出临床应用上必不可少的各种表格。并有图 100 余幅。

本書内容不仅关于放射学的理論方面,而且对实际操作方面亦有細致的介紹。因此本書对一切接触放射性物質的临床医师和放射学的研究工作者都有帮助,亦可供医学院教学及学习人員的参考。

Radium Therapy

*Its physical Aspects and Extensions
with Radioactive Isotopes*

C. W. Wilson

M.Sc., Ph.D., F.Inst.P.

Baillière Tindall and Cox

2 ed 1956 London

鐳疗的物理基础与放射性同位素

刘 泰 福 譯

*

上海衛生出版社出版

(上海南京西路 2004 号)

上海市書刊出版业营业許可証出 080 号

上海新华印刷厂印刷 新华書店上海发行所总經售

*

开本 787×1092 1/27 印張 9 1/3 插頁 10 字数 214,000

1958年1月第1版 1958年1月第1次印刷

印数 1—2,100

統一書号 14120·285

定价(9) 1.40 元

序

当本書第一次出版的时候,发生了許多重要的情况,比如由于原子堆的发展就能便利获得放射性同位素,因而使放射性物質在治疗应用上就有了不少的扩充与改变。同时目前正在对某些同位素的特性进行研究,考虑在治疗上是否能利用它們的 β 或 γ 射綫来代替鐳和氡的作用。

但是这并不是說,鐳本身將全部要被其他新的物質所替代。若以放射性同位素如鈷 60 完全来替代已經熟悉和很有价值的 鐳管和鐳針,大家認為尙无此必要。但是必須說明,目前由于在鐳疗中所获得的物理和临床經驗进一步发展的基础上,亦由于同位素的发展,在临床上应用 β 和 γ 射綫的方法是更加广泛。因此以往所認為許多价格昂貴的、不实际或不安全的、无法实现的治疗計劃,現在可以較為便利地做到。

显然,在第二版中,應該把放射性同位素的扩充范围增添进去,因此必須把材料重新加以整理,使原来仅以研究鐳疗为主的概念能扩展到各种放射性物質的应用上。本書补充名称正符合此内容。

原書所述之各种治疗法中,都具有医师能直接控制病人身上的放射性物質这一特点;然而目前同位素的治疗方法中,常以注射或口服进行,因此,医师常无法控制病人身上之放射性物質。本版对后者之疗法并不加以討論,仅与第一版同样集中于前者治疗方法上。当然,放射源方面,除鐳以外更增加了几种放射性同位素。

現在鐳疗本身亦有了发展,在英国的亞美山姆市的放射化学中心(Radiochemical Centre, Amersham),設立了国立鐳和氡服务所。停止十年之久未举行的国际放射学会第六届已于1950年7月在倫敦召开,第七届于1953年7月在哥本哈根举行,这些會議使放射綫剂量和放射綫防护的觀念有了改变,我們尽量把这

些內容列入新版中。

原子能的发展对鐳疗有着直接帮助, 測量 γ 射綫和 β 射綫剂量仪器制造方面亦有了更进一步的改良, 同时由于鈾的大量供应, 使鐳和其他綫束器可以利用它来作为有效的屏障材料。

此外, 第一版內所叙关于鐳的物理方面, 較为适合放射学研究生的要求, 也可以作为鐳疗医师和医院物理学家的手册和論据。第二版中在放射性同位素的范围方面, 我們繼續保持上述特点, 但是內容的介紹是以对疾病的治疗为主, 可能物理学家們不太感兴趣。但是我希望本書能对使用放射性物質治疗疾病者更为实用。

(下略)

C. W. 威尔遜

1955年11月

目 录

第一章 鐳——性質及在医学上的应用	1
鐳及其輻射	1
天然放射系	4
同位素	5
放射性元素的生成和衰变	6
氡及其測量——居里單位	8
医学上应用的氡的提取法	8
在医学上施用鐳和氡的容器	10
鐳与氡的剂量关系	15
鐳和氡优点的比較	16
鐳的濾屏或濾过	17
鐳和氡的 γ 射綫	18
鐳和氡的測量	19
鐳容器破漏的发现	22
容器內鐳鹽的分布	23
鐳的安全保管	23
第二章 放射治疗上应用的放射性同位素——性質及应用	25
用原子堆制造同位素	25
放射性、放射性比度及 γ 射綫剂量	27
放射性鈷	27
放射性金	30
放射性鉍	32
放射性磷	33
放射性鈉	34
放射性溴	34
放射性鋇	34
放射性鐳	35
放射性鉾	36

第三章 高电压輻射与物質的相互作用	37
吸收	37
高电压輻射的吸收	37
吸收过程, 吸收物質与放射綫波長的关系	40
在空气中及“組織样”物質中 γ 放射綫的吸收	41
基本屏障物質的 γ 射綫吸收	42
γ 射綫的波長	45
屏障本身所发射的次級 β 射綫	47
γ 射綫治疗上的散射效应	51
第四章 γ 射綫剂量測定法 —— 方法与理論	56
“毫克-小时”与“毫居里消失”	56
数学法計算鐳剂量及应用于計算同位素的剂量	57
生物学的剂量測定法	64
化学的剂量測定法	65
照相的剂量測定法	65
利用空气电离的剂量測定法	68
鐳的 γ 射綫在“流动空气”内的电离作用	69
“空气-壁”电离室内的 γ 射綫电离	72
“空气-壁”材料	75
电离室壁的厚度	77
用“空气-壁”电离室以倫琴为單位測量鐳 γ 射綫	80
倫琴單位和能量吸收——rad 單位	82
能通量与倫琴單位	83
放射性同位素的倫琴輸出量	84
其他較老的剂量單位与倫琴的关系	85
β 射綫的剂量——倫琴物理当量	87
总能量吸收或积分剂量	88
影响生物反应的物理剂量因素	90
第五章 γ 射綫剂量測定法 —— 測量仪器	90
“电离室-导綫”型的仪器	91
容电室的方法	100
盖革-穆勒及閃爍計数器	109
測定 β 射綫剂量	110

第六章 表面施用器疗法	111
根据预先决定的剂量率和均匀照射的要求布置放射源	113
派脱逊和派克的表面施用器剂量计算法	114
应用派脱逊-派克计算法的典型例子	118
圆柱形表面施用器	121
表面施用器上用同位素作为“镭同值物”	125
表面施用器的构造	126
表面施用器剂量的测量	128
“余弦”辐射面积	130
积分剂量或能量吸收	131
β 射线表面施用器	134
第七章 腔内疗法	136
引言	136
腔内治疗方法	136
子宫颈癌的治疗	137
膀胱癌的治疗	143
腔内放射的一般问题	145
积分剂量	149
第八章 组织内插植疗法	151
引言	151
组织内剂量的测量和计算	152
派脱逊-派克组织内剂量计算法	155
应用派脱逊-派克方法的典型例子	163
剂量方法的实际应用——实现情况的校对	163
放射性同位素与组织内插植疗法	170
积分剂量	171
第九章 γ 射线束照射疗法	171
远距离疗法或远距居里疗法	171
镭线束器附气压运送镭源装置	177
应用放射性同位素的线束器	179
放射性铀线束器	180
放射性钴线束器	182

放射性鉀綫束器.....	187
确定远距离疗法剂量的因素.....	188
深度剂量的推算.....	191
物理資料在临床工作上的应用.....	192
組織剂量在临床工作中的測定.....	192
計劃性治疗的方法——立体剂量分布.....	193
計劃性治疗的实现.....	197
旋轉照射法.....	201
能量总吸收或积分剂量.....	202
第十章 防护	205
防护的規程.....	205
对 γ 射綫的防护.....	209
物質的防护作用.....	210
距离的防护作用.....	213
审查防护措施的效能.....	215
防护与总能量吸收.....	220
局部和全身曝射.....	221
附 录	225
插 图	245

第一章 鐳——性質及在医学上的应用

鐳 及其 輻射

在自然界里，有一些原子量和原子序数較高的化学元素，它們都能自然地轉变为某些原子序数不相同的化学元素。在轉变的过程中，元素的本身有电磁波輻射和微粒輻射型的能量发射出来。这些元素統称为放射性元素，鐳就是其中的一种。

鐳是一种金屬，在化学性質方面，与某些元素，例如与鋇所起的化学反应相同。医学上都是应用鐳的化合物，例如硫酸鐳、氯化鐳及溴化鐳等。純鐳是不容易得到的。無論是鐳鹽或鐳本身，它們的放射性都是一样的。因为放射性是由鐳产生的，所以在医学上只注意鐳鹽中鐳元素的分量是多少。

极少量的鐳，含于瀝青矿中，这种矿的主要成分是氧化鈾。瀝青矿主要分布于波希米亞、撒克遜尼、东非洲及加拿大。以前所应用的鐳，大多来自剛果的卡坦茄矿。最近发现在加拿大的大熊湖区有大量的貯藏，所以現在加拿大出产的鐳已被广泛采用。

1898年，居里夫人第一次从瀝青矿中把鐳分离出来。提煉鐳須經過多次分次結晶的阶段；需要很高的代价和需要付出极辛勤的劳动，因为即使在一吨含鐳量极丰富的瀝青矿中也不过只能提出不到一克的鐳。

鐳和其他放射性元素的放射性都不受其物理状态和化学性質的影响。因此，天然放射性是重元素所專有的特性。

为了了解放射性变化的原理，必須先簡要地討論一下現代关于原子結構的概念。根据現有資料，大家一致認為每一个原子在其中心都有一个帶有正电荷的核，核的重量就代表原子的重量，在核外有重量极輕的电子，依各种层次及方向不同的軌道，环绕着核旋轉。电子是帶有負电荷的質点，电子在各种不同的原子內被不同的能量束縛于各种相应的原子內。但在某种条件下，如处于阴

极射线管、热离子管或光电管时，电子可由原子中被击出。

由于每个原子电性都是中和的，所以各个原子都有足够数量的电子，以使核外之负电荷相等于核的正电荷数。氢原子的结构最简单，核外只有一个电子，与核的一个正电荷相平衡，所以氢的带有一个正电荷的核可被认为是一个电荷单位。氢的核称为质子，质子的重量，实际上就是整个原子的重量，化学家以氢的核为一个质量单位，以 1 计算（至少相近于 1）。因此，质子就是带有一个正电荷而原子量是 1 的重质点。

其次，结构比较简单的是氦原子，核外有 2 个电子，因此核内有 2 个正电荷的质子，但其原子量却是 4 个原子量单位。在某些条件下，可以看到没有核外电子的氦原子，称之为 α 质点。换句话说， α 质点就是带有 2 个正电荷，而具有 4 个原子量单位的重质点。

有一个时期，认为质子和 α 质点是任何原子核的主要构造单位。1930 年时，发现 α 质点本身是由 2 个质子和另外 2 个质点所组成，这个质点的重量与质子相同，但电性是中和的，即不带电荷的，称之为中子。所以现在认为任何一个原子核都是由一定数目的质子和中子所构成的。

在放射物理学中，元素的原子序数是最常用到的数量。任何元素的原子序数都是表示该元素原子核中带有正电荷单位的数目。如氢的原子序数是 1，氦是 2。同样的，原子序数也表示出核外电子的数目。

一切天然放射性元素，都有较高的原子序数和原子量，如镭的原子序数是 88，原子量是 226，所以这类元素的原子核都是由数目较大的质子和中子所组成的。这种复杂的结构，使元素本身很不稳定，因此自发地发生蜕变，蜕变成比原来元素构造简单的一种元素。在嬗变过程中，尚有以某种形式的能量释放出来。类似的蜕变现象可以继续不断地发生，直到原子核的结构转变为稳定时为止。

在嬗变过程中的能量释放有三种辐射形式： α 射线、 β 射线和 γ 射线。

α 射綫就是从蜕变的原子核内放出的 α 質点，其速度相当于光速的 $1/20$ （光速是 $186,000$ 哩/秒）。实际上 α 質点就是氦的原子核，这一点正由 α 射綫在真空中火花放电时得到的光譜中，发现与氦的光譜相同而証明的。

α 射綫通过空气或其他气体时可产生强力电离，所以其能量消失較为迅速。鐳的最高速的 α 質点可以在空气中运动 7 厘米，但却不能通过数层香烟紙。由于 α 射綫穿透力太低，所以在医疗上没有什么价值。

我們常利用 α 質点在硫化鋅矿物上所产生的螢光效应，来檢查 α 質点的存在。如 α 質点数量不多时，可用低倍显微鏡在螢光物質上观察其断續撞击所产生的閃爍，以計算 α 質点的数目。此外用摄影的效应也可以来檢查 α 質点。

β 射綫是从蜕变的原子核上以各种不同速度射出的电子，其中速度最慢的相当于光速的 $1/6$ （軟性 β 射綫），速度最高的（硬性 β 射綫）近于光速。 β 射綫的性質与 X 綫球管的阴极綫完全相似，二者皆为高速电子。因为 β 質点的質量只相当于 α 質点的 $1/1800$ ，所以 β 射綫的穿透力比 α 射綫大 100 倍，速度最高的可以穿透 1 厘米厚的鋁或更厚的組織层。这种特性常可用于治疗肤淺的病灶。因此鐳管需要减少厚度，才能容許 β 綫的透射。这种射綫的应用范围很有限。

β 射綫与 α 射綫同样可使膠片感光，也能使气体发生电离現象，但 β 射綫电离强度比 α 射綫小。由于 α 射綫和 β 射綫均帶有电荷，当受磁場影响时，可使 α 射綫及 β 射綫发生偏曲，但此二射綫偏曲的方向却相反。

γ 射綫不同于 α 及 β 射綫，磁場不能影响其进行所走的方向，它是与光及 X 綫性質相同的一种电磁波。 γ 射綫的速度与光速相等。鐳及其鹽类所发射的 γ 射綫具有許多不同的穿透能。穿透力最强的（即最硬的射綫）也就是波長最短的 γ 射綫，可以透过 15 厘米的鉛。

現代鐳疗的主要問題就是 γ 射綫，而这一点就是本書主要阐述的重点。 γ 射綫通过物質时，即作用于該物質原子上的电子，使

其产生高速电子，这些电子称为次级微粒辐射。这种次级微粒辐射同样可以使气体产生电离现象，而使组织发生生物效应。因此可认为 γ 射线把能量送到深层组织中，而在组织内，此能量变为能产生生物效应的放射线。

天然放射系

镭是天然放射系的许多元素中之一，它可由其有关的母质连续演变而产生。镭本身也可发生本身的衰变，而产生另外一些放射性的物质。在自然界里有三种天然放射系：铀、钍及釷系。镭属于铀系。在实际应用上，只有铀系可用于放射治疗上。“表一”按照顺序排列铀系的各物质及这些物质在演变时所发射的放射线、衰变率以及与一克镭平衡的量。

表一 铀系的元素

元素	原子量	原子序数	发射质点	γ 射线	衰 变 率	与 1 克镭平衡量
铀 I	238	92	α	—	每年 0.000000015%	2,830 公斤
铀 X	234	90	β	弱	每天 3.3%	0.04 毫克
铀 Y_2	234	91	β	弱	每秒 1.0%	0.0013 微克
铀 II	234	92	α	—	每年 0.0003%	1.18 公斤
钍	230	90	α	—	每年 0.001%	41 克
镭	226	88	α	—	每年 0.044%	1 克
氦	222	86	α	—	每小时 0.75%	0.25 微克
镭 A	218	84	α	—	每秒 0.38%	0.0034 微克
镭 B	214	82	β	弱	每分 2.6%	0.030 微克
镭 C	214	83	β	强	每分 3.5%	0.022 微克
镭 C'	214	84	α	—	极快	极小
镭 D	210	82	β	弱	每年 4.3%	9.8 毫克
镭 E	210	83	β	弱	每小时 0.60%	8.1 微克
钋	210	84	α	—	每天 0.51%	0.22 毫克
铅	206	82	—	—	稳定	

由“表一”可以知道镭放射出一个 α 质点后就变成一种气体性的物质——氦。氦放射出一个 α 质点后就变成固体镭 A，镭 A 放

射出 α 質点后就变成鐳B,鐳B仍然是固体。鐳B在变为固体鐳C时,放射出 β 射綫和弱的 γ 射綫。这些演变是在很短的时间內发生的。此后的演变需要較長的时间,而且 γ 射綫的产生也比較少,因此在 γ 射綫疗法上是毫无价值的。氦衰变以后产生各种固体鐳,这些固体鐳常被称为是氦的放射性沉淀。

我們可以看出在鐳本身衰变时,并无 γ 射綫产生,仅在鐳衰变后所产生的固体鐳B演变到固体鐳C时才产生 γ 射綫。事实上这些固体鐳B和鐳C都是来自鐳衰变后所产生的气体氦。因此假如要使鐳源达到最高度的 γ 射綫放射性,就必须把鐳严密地封閉起来以防止氦气漏逸。如果單从 γ 射綫的发射方面来看可認為氦是鐳的“輻射要素”。这一点在鐳疗上是很有意义的,因此在不适宜用鐳元素作为放射源时可用氦来代替。

当把鐳封閉在一个容器中时,如鐳針,那么鐳衰变后的产物都不会消散,經過相当时间以后鐳的衰变产物的生成率就相等于其衰变率。当各种衰变产物的数量成为固定不变时,此状态称为放射平衡。当鐳針处于放射平衡时即表示 γ 射綫主要来源的鐳C已达到最高量。鐳針內的鐳原子每年約有 $1/2,000$ 演变为多种衰变产物,这就是說鐳針內的能量每年消耗 $1/2,000$,而放射的强度每年也按此微小的比例而减少。

剛被封入針內的鐳,必須經過相当时间以后衰变产物才能累积到一定的数量,而达到放射平衡。所以一根新制成的鐳針最初几天 γ 射綫的强度可能很弱,以后才能逐漸增强,大約在鐳針制成后35天左右其 γ 射綫的强度才接近于平衡状态。

同 位 素

从“表一”,可以看出有一些元素,它們有相同的原子序数,而却有着不同的原子量,如鐳A、鐳C'和钋,它們的原子序数都是84,而原子量却不同,分別为218、214和210。另外如鐳B、鐳D和鉛,它們的原子序数都是82,而原子量却是214、210和206。这种现象也常可在稳定的元素中見到。鐳A、鐳C'和钋称作原子序数为84的同位素。同样,鐳B、鐳D和鉛是原子序数为82的同位素。

有許多穩定的元素，已經證明由數種同位素所組成的。如氯元素的原子序數是 17，它是由二種同位素所組成，它們的原子量是 36 和 37。鉬是金屬元素，其原子序數是 42，它是由 7 種同位素所組成，它們的原子量是 92、94、95、96、97、98 和 100。此外尚有很多例子可以舉出，甚至連氫也有原子量 1 和 2 的同位素，較重者一種為重氫，它在氫元素中只占極少的百分比。由重氫所組成的水稱為重水。

用加速的氫核，重氫的核， α 質點或中子，可射擊穩定的元素，使其改變原子序數和原子量而成為許多種以前所不知道的同位素，其中有很多同位素具有放射性。這就是說，用這種方法可以製造出人為放射能或稱人造放射性同位素。

由於原子能的發展，特別是原子堆的成就，所以現在可以利用強力的中子來射擊穩定的元素，以大量供應各種不同的放射性同位素。

從下面的論述可以看出，有多種具有某些特性的放射性同位素是適合於放射治療上的應用。

為了明確同位素的情況，規定在化學名詞後面或化學符號的右上角加一數字，如磷 32 或 P^{32} ，此即表示磷的放射性同位素的質量是 32。同樣， Na^{24} 或鈉 24 是表示鈉的質量為 24 的放射性同位素等等。

放射性元素的生成和衰變

一般說來任何放射質都有一定的衰變率，此衰變率為該物質所特有的。衰變率是依指數定律而定，即在一定時間內物質的原子有半數將發生蛻變，再經過同樣的時間所殘余下的半數原子的半數將再發生蛻變，如此繼續的依此情況不斷蛻變。圖 1 表示氫的衰變情況，曲線 A 明確的表示出衰變率依指數定律而定。

衰變指數定律可用數學方程式表示之：

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \dots \dots \dots (1)$$

此方程式中 N_0 代表原有的原子數目； N 代表 t 時間後所殘余的原子數目； e 是自然對數的底（等於 2.718）； λ 是代表有關物質的

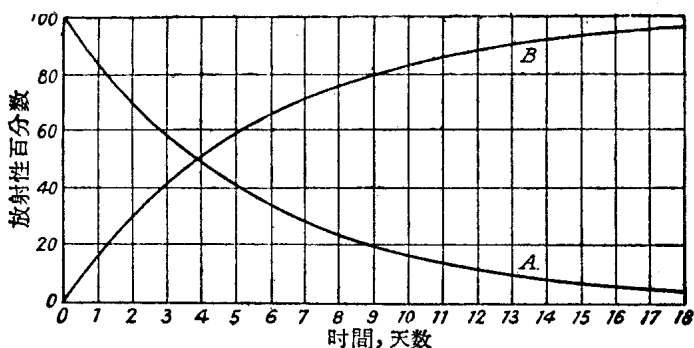


图 1 表示氢的衰变(A)和生成(B)的曲线。

衰变常数。各种物質的衰变常数是不同的，是代表在一个單位時間內的衰变。

母質衰变后，所产生出的新物質的生成，可用下列方程式表示：

$$N = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \dots \dots \dots (2)$$

N_0 代表新物質生成达到最高的原子数目， N 是代表 t 時間后母質殘存的数量。图 1 的曲线 B 是說明氢的生成情况。从曲线上可以看出，約在封入鐳的第 18 天以后，所产生的氘量，接近最高量。氢的衰变常数 λ 是 0.181/天。

放射質經過一定的時間，其原子的半数將蜕变，所經過的時間称为半衰期。半衰期 T 与放射質的衰变常数的关系可以下列方程式表明： $T = \frac{0.693}{\lambda}$ 。氢的半衰期是 3.82 天。通常都以半衰期來說明放射質的衰变率。

放射性元素的个别原子的生存期，可由零至无穷。但在实际上，我們所講到的可称为一大群原子的平均生存期。如某一物質的衰变常数为 λ ，則其原子的平均生存期等于 $\frac{1}{\lambda}$ 。氢原子的平均生存期为 $\frac{1}{0.181} = 5.52$ 天。

金有一种人造的放射性同位素，金 198 (Au^{198})，可以放射 β 和 γ 射线，其半衰期与氢相近，即 2.69 天。 Au^{198} 的衰变常数是 0.258/天，平均生存期为 $1/0.258 = 3.88$ 天。这一种人造放射性

同位素,在第二章时将詳細討論。

氦及其測量——居里單位

由鐳演变而来的氦是質量較重的一种无色而迟鈍的气体,与氦及氡等元素同族。原子量是 222,原子序数为 86。在攝氏 -71° 以下,氦可由气体变为固体,在攝氏 -61.8° 以上为气体。其蒸气压力和其他气体相同。

在治疗上,氦占很重要的地位,因为如我們都知道,氦的固体放射性淀質,鐳 B 和鐳 C,就是 γ 射綫的源泉。从 γ 綫的来源上来看,当氦的全部放射性淀質形成,它与封閉于容器中的鐳有相等的价值。其主要不同点只在于氦的放射性衰变迅速(见图 1)而鐳的衰变則慢得多。

通常用毫居里(mc)作为計算氦的單位,它与处于平衡状态的 1 毫克鐳量相等。也就是說,如果在某一定時間,兩根类似的管子,其中各容納 1 毫居里的氦和 1 毫克的鐳,由于衰变产物的数量相等,所以 γ 射綫的輻射强度也相等。由于氦和鐳的衰变率差別很大,所以除在所选定的時間外,在其他的时间 γ 綫的强度并不相等,这一点特別重要。

最初 1 居里氦是表示与在平衡状态下的 1 克鐳相等的量。每秒鐘 1 居里氦有 3.70×10^{10} 原子蜕变。自从人造放射性元素发现和应用以后,不論是以何种方式的能量輻射,通常都以每秒鐘蜕变的原子数來說明其放射性。目前認為任何一种放射質,其 1 居里單位就是表示在每秒鐘有 3.70×10^{10} 原子蜕变。1 毫居里为其千分之一,而 1 微居里(μc)則为其百万分之一。

也有人提出用一种新的單位——“盧瑟福”(rd),来代表放射源本身的强度。一个 rd 相等于每秒鐘有 10^6 原子蜕变。

医学上应用的氦的提取法

氦不易从固体的鐳鹽中提炼出来,通常都是从溶于稀鹽酸中的氯化鐳或溴化鐳中提取。1 克鐳溶液,每天約产生氦 0.0001 毫升及其他气体 50 毫升,其中有大部分是氦和氧,微量的有机蒸气,