

13.58
185

放射治疗学基础

A. B. 柯兹洛瓦教授 著

繆 其 宏 譯

張 建 國 校

人 民 衛 生 出 版 社

內 容 提 要

本书全面地介绍了有关放射性物质的基础知识及其在临床上的应用。首先讨论了放射性物质及其物理性质、放射性制剂、放射治疗的方法、剂量测定、电离辐射的生物学作用及组织在这种作用下的变化、全身反应等。其次又分别讨论了各器官恶性新生物的放射治疗，对皮肤、消化道、呼吸器官、生殖器官、神经系统等的肿瘤，均说明其放射治疗的方法、剂量、适应证、副作用等等。最后叙述了放射性同位素在治疗肿瘤及其他疾病上的应用，对放射性磷、放射性碘等的用法及适应证等有较详细的说明。

本书适于放射科工作者及各科临床医师参考使用。

A. B. КОЗЛОВА

ОСНОВЫ
РАДИЕВОЙ ТЕРАПИИ

РУКОВОДСТВО ДЛЯ ВРАЧЕЙ

МЕДИЗ • 1956

放射治疗学基础

開本: 787X1092/18 印張: 12 2/3 插頁: 4 字數: 312 千字

繆 其 宏 譯

人 民 衛 生 出 版 社 出 版

(北京書刊出版業營業許可證出字第〇四六號)

• 北京崇文區綏子胡同三十六號 •

人 民 衛 生 出 版 社 印 刷 廠 印 刷

新华书店科技发行所发行 • 各地新华书店经售

統一書號: 14048 • 2100

定 價: 1.90 元

1959年12月第1版 - 第1次印刷

(北京版) 印數: 1 - 2,000

目 錄

前言	1
医学放射学发展史概述	2
放射性物质在自然界中的分布	6
放射性物质及其物理性质	8
基本粒子	8
原子的电子壳层	8
原子核	9
原子核衰变	9
天然放射性	10
放射性物质的性质	13
放射性物质的射线	13
人为放射性	14
放射性制剂	17
放射性辐射源的性质和成分	17
射线的滤过	20
放射性制剂	22
放射治疗的方法	25
γ 射线治疗法	26
敷贴法	26
远距离 γ 射线治疗	29
组织内放射疗法	32
腔内放射疗法	35
β 射线治疗法	36
α 粒子辐射在治疗上的应用	37
放射治疗的剂量测定	38
敷贴法放射治疗的剂量计算	44
组织内放射疗法的剂量计算	48
腔内放射疗法的剂量计算	50
人为放射性同位素的剂量测定	53
体内放射性同位素的剂量测定	58
电离辐射的生物学作用	62
对电离辐射作用反应的可恢复性	70
射线的刺激作用	70
放射敏感性	71
在电离辐射作用下正常组织和肿瘤	
组织的变化	76
在放射治疗中影响皮肤和粘膜	
反应过程的因素	76

放射治疗的皮肤和粘膜反应	79
放射治疗时皮肤和粘膜的形态学变化	85
放射治疗时受照射组织和器官的形态学和机能的变化	87
放射治疗时照射剂量和照射条件的选择	94
放射治疗时肿瘤组织的形态学变化	95
放射治疗的全身反应	100
放射治疗恶性肿瘤病人时新陈代谢的失调	101
放射治疗时血液有形成分的变化	103
放射治疗时局部和全身反应的意义及其防治对策	106
恶性肿瘤病人放射治疗时的并发症	110
恶性肿瘤病人放射治疗的适应证和禁忌证	112
恶性新生物的放射治疗	114
皮肤恶性新生物的放射治疗	114
皮肤癌(114)	
皮肤黑色素瘤(125)	
皮肤癌前状态的放射治疗	126
唇癌	126
舌癌	133
口腔底癌、颊部和硬腭粘膜癌	137
咽环恶性肿瘤	138
唾液腺的恶性和良性肿瘤	140
上颌恶性肿瘤	141
下颌恶性肿瘤	144
食道癌	145
直肠癌	151
喉癌	153
肺恶性新生物	158
乳腺癌	162
女性生殖器官恶性肿瘤	169
卵巢恶性肿瘤(170)	

子宮頸癌(171)	
子宮體癌(177)	
阴道癌(178)	
女性外生殖器官恶性肿瘤.....	179
女性尿道癌.....	180
阴道肿瘤.....	181
膀胱恶性肿瘤.....	183
神经系统恶性肿瘤.....	185
大脑肿瘤(185)	
脊髓肿瘤(187)	
甲状腺恶性肿瘤.....	188
软组织恶性肿瘤.....	190
骨恶性新生物.....	192
骨髓发性恶性肿瘤(198)	
血管瘤.....	199
放射性同位素在治疗恶性和良性新	
生物和其他疾病上的应用.....	202
放射性磷(P^{32})	202

毛细血管瘤(202)	
放射性磷在治疗慢性皮肤	
疾病上的应用(204)	
眼结膜和角膜疾病(204)	
放射性磷(P^{32})的分布和排出 ..	205
肿瘤内引入放射性磷.....	206
放射性磷在造血器官疾病中的	
应用.....	208
放射性磷在诊断和治疗上的应	
用.....	209
放射性钠在临床上的应用.....	213
电离辐射所致的职业性疾病.....	215
急性皮炎.....	215
慢性皮炎.....	216
慢性放射钱病.....	217
电离辐射有害作用的防护措施..	221
在医疗机构中放射治疗的组织工作..	225

前 言

放射性物质在现代医学中日益广泛地应用于治疗。它们被用来治疗内脏器官、女性生殖器官、神经系统的疾病以及各种皮肤病和新陈代谢失调。它们在肿瘤学上的意义尤其重大。在恶性和良性新生物的治疗中,使用放射性物质是一种基本的、而且是最有效的方法。

在已知的许多天然的和人为的放射性元素中,镭最先用于治疗,故有“Радиевая терапия”(原意为镭疗——译者)之称。这个名称沿用至今,但已不仅理解为使用镭,而且还包括使用其他许多放射性物质。

由于人为放射性的发现,使得放射治疗在近年来用得更加普遍。放射性物质已经不像前数年只集中在大的肿瘤治疗机关中,它还供给各个州的肿瘤防治所。由于广泛地应用放射性物质,就要求培养新的放射学的干部。但是在我国文献中尚缺少一本可以满足现今要求的参考书。Ф. С. Гроссман 著的外科疾病放射治疗(1937)和 Б. А. Архангельский 著“伦琴射线和镭在妇产科”(1928)二书已属陈旧。

在苏联医学文献中,尚缺乏一部作医师参考用的介绍放射性物质射线生物学作用的现代资料及其治疗应用经验的书。这种情形促使我们编写这本书,希望本书将有助于苏联放射学工作者掌握放射治疗的基础。

医学放射学发展史概述

1896年 Анри Беккерель 在研究荧光物质时,发现了从铀盐中发射出的射线。该射线的性质与伦琴射线的性质相近。它们亦能穿透可见光所不能透过的物质,使照相底片感光,并使荷电体放电。Беккерель 于1896年2月24日在巴黎科学院会议上第一次宣布了自己的发现。之后这种射线遂称为 Беккерель 氏射线。在以后数年,人们又接连地发现了具有类似性质的若干物质。如1898年 Г. Г. Шмидт 和 М. Кюри 发现了钍射线。同年,居里夫妇在沥青铀矿中发现了新的放射性物质,命名为钋和镭。1899年,Дебери и Гизель 发现了镭。1900年 Рутерфорд 分离出钍射气,Дорн 分离出镭射气。Ган 于1905年发现了射钍,又于1907年发现了新钍。1907年,Болвуд 分离出了钷。这些物质均称为放射性物质。

纯粹的镭元素在1910年才分离出来。后来数年又发现了若干其他有名的放射性物质,它们是铀、钍、镭的或其同位素的衰变产物。

1900年,第一次出版了关于放射性物质理化性质的俄译论著。俄国学者的研究工作从1901年开始出现(Б. Пильщиков, А. П. Грузинцев, В. К. Лебединский 和 И. А. Леонтьева 等)的论文陆续发表。

1903年,发表了第一批关于放射生物学的文章,其中 Е. С. Лондон 所写“关于镭的生理学和病理学意义”一篇,至今尚未失去其价值。Е. С. Лондон 曾进行了一系列的实验工作,查明了机体在全身照射时的变化。他首先断定,全身的和局部的大剂量照射会引起血液和造血器官有形成分的变化、卵巢滤泡的变性,甚至动物的死亡。

Е. С. Лондон 提出的各种组织和器官具有放射敏感性这个概念,在放射治疗的发展上有特别重大的意义。Л. М. Горовиц-Власова(1906)详细地研究了动物各个正常组织的放射敏感性。她首先以组织学检查法证明神经组织具有高度的放射敏感性;在所有的组织之中神经组织的放射敏感性占第一位。

Е. С. Лондон 证明了细菌对射线的敏感性,1904年首先应用了自动放射照相法,以便确定各组织和整个机体内放射性物质的存在与否。这个方法最近已被广泛采用。他把研究成果一并归纳在1923年出版的“镭在生物学和医学中”这一专著内;该书在国内外均享有盛名。

С. В. Гольдберг 通过临床检查和系统的病理形态学检查研究了射线对正常皮肤的作用。他曾在自己身上作了实验;照射的结果形成烧伤,经过数年该处发生了皮肤癌,他且因此而致死。С. В. Гольдберг 研究了皮肤对于镭作用的反应,并竭力查明了生物学效应与使用剂量大小的关系。他曾在细菌实验中证实了这种关系。

И. Р. Тарханов(1896), М. Н. Жуковский(1904) 等工作,对研究中枢神经系统在射线影响下的机能变化是有很大的价值和意义的。И. Р. Тарханов 第一个断定了中枢神经系统的活动在放射能作用后受到损害。

С. Л. Арнштам 和 Я. В. Зеленковский 研究了射线对正常眼各部分的作用,

认为射线可用于治疗眼疾,尤其是沙眼。

Данло 在巴黎首先用镭治疗皮肤的上皮瘤。随之,在1903年 E. C. Лондон, C. B. Гольдберг, C. Л. Багров 等用镭治疗皮肤癌, Л. М. Горовиц-Власова 用来治疗东方疳(皮肤莱什曼病)。在以后数年,对各种疾病都开始应用放射治疗,但是主要还是用于恶性肿瘤的治疗(E. C. Лондон, C. B. Гольдберг, A. П. Крымов, C. Л. Багров, 1903; B. H. Гейнац, 1905; Д. Ф. Решетилло, 1910; П. Г. Мезерницкий, 1914 以及其他等人等)。

B. H. Гейнац 于1914年在第一届全俄防治痼病会议上,报告了他应用镭治疗700例患有皮肤、唇、舌和咽喉恶性肿瘤病人的疗效。他对治愈的病人跟踪观察7年。

1906年,Уден 和 Фершер 在法国,1910年 Д. Ф. Решетилло 在俄国,都成功地用镭治疗子宫纤维肌瘤。自1913年起镭和镭-新钍开始用于治疗女性生殖器官的癌(Дебберт, Ф. Н. Ильин)。Ф. Н. Ильин 并提出同等量曲线的方法,用以确定骨盆各部位的剂量。1915年,В. А. Полубинский 以题为“应用镭和新钍治疗子宫癌”一文通过了医学博士的论文答辩。但是,那时的治愈疗效,要付出使周围正常组织严重受害的代价才能得到,因为那时使用的射线是未经滤过的。Вирхман 和 Доминичи 建议应用滤过方法(1910),可说是治疗上的一大发展,因为从此可以使用比较均匀的射线,扩大放射治疗的适应证,并照射深部的肿瘤。此外,它还可以减少各种并发症。

在最初几年,放射治疗的方法只是把放射性制剂直接敷贴于病灶上。1908年 Дюан 提出往肿瘤组织内送入制剂的方法(组织内法)。

1914年,Дебриш 和 Pero 应用氢代替镭盐。他们把氢充于玻璃毛细管内;这样不但可用 γ 射线,还能用其对组织有强烈刺激作用的 β 射线。1920年, Pero 提议应用铂针-滤器,以便得到较均匀的射线。同年,Фейлла 建议用金属毛细管作针。

放射性物质在世界各国的积累非常缓慢。在放射性物质发现后25年,仅在个别国家内才拥有1~5克镭,这样就有可能建造远距离 γ 射线机;这种机械为了保证足够的射线强度,需要不少于2~5克的放射性物质。

1920年 Лам 第一个设计了远距离 γ 射线机,Фейлла(1921), Лисгольм(1922)等亦追随其后。以后,各国已经拥有足够量的镭和镭-新钍,能够设计威力更大的、含有2~10克镭或镭-新钍的治疗机。

从1904~1905年开始,为了发现适用于治疗的放射源,人们开始研究水、土壤、污泥、空气的放射性。与此同时,医学上开始使用天然的和人工制备的含有放射性元素可溶性盐类的弱放射性水、污泥、压布、药物(И. М. Боргман, Я. Н. Соколов, E. C. Лондон, П. Г. Мезерницкий 等)。使用的方法是经口、经直肠、经阴道、皮下注入、经呼吸道吸入,用于各种内脏器官疾病、新陈代谢病、结核病、神经系统疾病、炎症和传染病。

随着经验的积累,放射性水的应用有了固定的适应证(慢性炎症、周围神经系统慢性疾病、某些心血管系统疾病、痛风、风湿病和若干皮肤病),从而改善了治疗的

效果。

在恶性疾病和其他疾病放射治疗的发展过程中，最大的阻碍是缺少正确的剂量测定法。这方面的情况坏到如此程度，甚至制剂内的放射性物质含量只能测到近似值。因此，常常发生了并发症(在局部照射时，形成不可愈合的溃疡，或在使用高浓度放射性水时，造血器官和周围血液有形成分产生严重变化)。内服或注射含有镭盐的溶液是极其不恰当的，因为病人可因此在多年中成为镭衰变产物的携带者，对病人产生极为恶劣的作用，病人常常因此而死亡。

1910年，在布鲁塞尔放射学会会议上，提出了把与1克镭处于平衡状态的氢及其衰变产物的数量作为氢的测量单位。这个单位就叫作“居里”。1911年，作成了标准镭，保存在法国度量衡局内。从此，在治疗上氢的测量单位以1毫居里(mC)计算，而镭和镭-新钍的测量单位是1毫克镭。1910年提出了剂量的离子测定法(Ионметрический метод)，在放射生物学上应用得很有效，可是由于当时的技术缺陷，还不能用于放射治疗。

在俄国放射学发展的最初20年中，主要困难是国内镭的不足。镭和所有的仪器均从国外进口，而且价格昂贵。在1913年以前，俄国的镭量不足100毫克，以后才增加到1克。

直到1916年，才第一次在国内勘探和开采了放射性矿藏。1921年，В. Г. Хлопин 第一次从钒酸钙铀矿(туя-муянская руда)中提炼到新钍和镭。1920年，在列宁格勒成立镭铀研究所，它在组织勘探镭的矿藏和取得其他放射性物质的新矿源方面开展了广泛的工作。从此，放射性物质的供应开始有了计划性，而放射治疗在恶性新生物治疗方法中占着首席位置。

文献中反映出当时在放射学方面已积累了经验和知识。除了单篇文章，并出版了若干放射学教科书(Д. Ф. Решетилло, 1910; П. Г. Мезерницкий, 1914; В. А. Полубинский, 1915)。1916年，成立了第一个伦琴射线学和放射学协会，同年末召开了第一届全俄伦琴射线学和放射学会会议。有关放射治疗的文章刊载在各种医学杂志上，尤其常刊登在“俄国妇科学通报”和1920年起出版的“伦琴射线学和放射学通报”上，又在1928~1940年间的“肿瘤学问题”上刊载。此外，放射学的论文还刊载于莫斯科、列宁格勒、喀山、哈尔科夫、沃隆尼日、斯维尔德洛夫斯克、塔什干等医学院的论文集中。

1918年，在彼得格勒成立了伦琴射线学和放射学研究所，该所从事放射生物学理论和实践问题的研究。

1925年，根据功勋科学家 Н. Н. Петров 的倡议，在列宁格勒建立了肿瘤研究所，广泛开展了治疗恶性肿瘤病人的研究和实践活动。放射治疗在各种疗法中占有重要地位。研究所所出版的 Н. Н. Петров, А. И. Серебров, А. П. Шанин, А. А. Эпштейн, С. А. Холдин, А. О. Верещинский, В. Е. Цимбал 等的著作，都是每个肿瘤学家的案头参考书籍，放射学被介绍得很完善。此外，Ф. С. Гроссман 编写了外科疾病放射治疗的专著。

1924年，成立了莫斯科伦琴射线学和放射学研究所；该所从1928年开始应用放射治疗。

在研究所的鑷實驗室內，曾組織了鑷射氣的提煉工作，以供該所和其他地方醫療機構之用。

由於放射學被廣泛地用於醫學的結果，莫斯科、烏克蘭和蘇聯其他加盟共和國的倫琴射線學和放射學研究所出版了一些極有價值的有關本專業的匯編和著作。

蘇聯保健部的一些指令在國內大力發展放射學和放射治療上有重要意義。例如，1925年防治癌病會議的決議中指出，在各個州中心必須成立倫琴射線學和放射學協會的分會。

1937年，為了改善對居民的放射學救護，改進放射性物質治療的組織工作，蘇聯保健部內成立了放射學委員會，委員會的任務為：解決對居民的放射學救護的組織問題，科學方法指導工作，勞動保健和分配放射性制劑。

1950年，蘇聯保健部發布了關於治療惡性腫瘤病人的基本方針和放射治療方法的命令。

近幾年來，由於發現了取得人為放射性的方法，放射學的發展，以及接踵而來的放射治療的發展，均有了長足進步。大多數腫瘤醫療機構都能配備到足夠量的、分裝合適的放射性制劑，而在許多規模大的研究所和醫院內還裝備着叫作 γ 射線機的強大的放射線裝置，以及其他裝置。

放射性同位素的半衰期各有不同，它在衰變時產生出不同貫穿能力的射線，應用這些放射性同位素，可以大大擴充用放射性元素治療和診斷的適應證。在心脏血管系統疾病、內分泌器官疾病和新陳代謝疾病的診斷上應用放射性同位素，可以解決許多與上述疾病的機制有關的問題，更能確定診斷，從而有助於改善這些疾病的治療方法。

放射性物質在自然界中的分布

天然放射性物質——鐳、氡、鈾和釷——是自然界中分布最廣的一類放射性元素。它們經常以極微小的濃度存在於土壤、水和空氣中。

大氣空氣含有的氡量，僅是最稀薄的放射性礦泉氣體的 1,500~2,000 分之一。而土壤空氣所含的氡量要比大氣空氣多若干倍(表 1)。

表 1 在通常自然條件下常見放射性元素的含量

(據 А. А. Дробков)

	放 射 性 元 素 的 含 量		
	鐳	鈾	釷
土壤.....	$2 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$
海水和河水.....	$2 \cdot 10^{-15}$	—	$10^{-8} - 10^{-7}$
土壤空氣.....	$2 \cdot 10^{-13}$	—	—
地面的大氣空氣.....	$100 \cdot 10^{-13}$	—	—
海洋面的大氣空氣.....	$2 \cdot 10^{-13}$	—	—

放射性元素在土壤中的含量以 1 克土壤含克量計算，在水中用 1 毫升含克量表示，在空氣中以 1 立方厘米中氡居里量計算。

為了測定大氣空氣中放射性物質的含量，Дэyson 建議在 20 分鐘內使空氣以恆速 30~35 升/分通過瓦特曼紙^①。氣流的速度按連接在儀器上的 V 型測壓計的指標以螺旋鉗來調節。沉澱在紙上的放射性物質的數量靠計數器來測定。實驗證明，瓦特曼紙能滯留 99% 的放射性物質。實驗中發現，在一天中以及在不同的季節，放射性元素在紙上的含量都有極大的變動。空氣中放射性元素量同氣壓和絕對濕度成正比，同風力和氣溫成反比。這位學者的研究證明，在通風的城鄉建築物內外，放射性物質的平均濃度約為 $60 \cdot 10^{-12} \sim 100 \cdot 10^{-12}$ 居里/立方米。

水的放射性與放射性氣體的吸收、放射性礦層和礦物的溶解度有關。水的天然放射性的射源是鈾、釷和錒族的元素。但是在天然水中可以測出的元素只有 U^{238} 和 Ra^{226} 。釷在自然界中的量要比鈾多得多，但是在測定這個元素的微小量時尚有困難，因此我們對它在天然水中的含量所掌握的資料是不足的。在 1 升海水中(據 Лове 氏資料)，隨其地理位置和採樣的深度不同，約含有 $1.1 \sim 1.7 \cdot 10^{-6}$ 克鈾， $0.08 \cdot 10^{-12}$ 克鐳和 $0.5 \cdot 10^{-6}$ 克釷。鐳的濃度在海洋底的沉積物中要比陸地火山層多。礦泉水的放射性，根據就近礦藏的放射性而有很大的波動範圍。地表水和地下水通常只含少量的放射性元素；但是由於近年來開採放射性礦藏的增多，它們很可能為放射性物質所污染。據 Лове 的資料，未經污染的水的放射性不超過 $10 \cdot 10^{-12}$ 克/升。流動的水在污染後，很快就能使用而毫無危險。地下水一旦污染放射性物質，可以保留很長時間，數以年計而無改變，因為它們流動速度慢。

天然放射性物質見於一切動植物體內。植物在發育和生長過程中含有的放射性

① 一種用手工製成的高級繪圖紙——譯者注。

元素量,要比它們的周圍环境的含量多若干倍。

經驗証明(苏联科学院生物化学实验室),如果从土壤中完全除去鐳、鈾、釷和放射性鉀,植物生长就緩慢,不再开花。这就是說,放射性元素就象其他营养物质一样,为植物所必需,尽管兩者之間是絲毫不能相互替代的。放射性物质在新陳代謝上的意义很大。土壤中放射性元素含量增多会增加收成,增加植物的果实,加速它們的成熟,能使根莖內糖含量增多。植物中碳水化合物数量的增多,同参与植物細胞內碳水化合物合成的轉化酶活性增强紧密关联。

缺乏放射性元素使得植物的新陳代謝失調,表现为摄取分子氮的中止。根据 A. A. Дробков 的資料,对植物生长最合适的是在营养介質中含有下列濃度的放射性元素:

鐳—— $10^{-12}\%$;

鈾和釷—— $10^{-6}\sim 10^{-7}\%$ 。

植物可耐受大于此量的 10~100 倍而毫不受害。

放射性元素在植物內部集中在生长点、上部幼叶、結果实的器官中,即集中在新陳代謝最旺盛的地方。在下部老叶內,放射性元素含量大为减少,根內所含的鐳量比植物的地面器官多 30~40 倍。

在动物体内,放射性元素含量极微小。动物体亦同植物一样,具有集中放射性元素的能力,其含量較外界环境要多数百倍。

对动、植物体意义特別大的,是半衰期为 1.42×10^9 年的放射性鉀($^{40}_{19}\text{K}$)。放射性鉀在植物內大部分集中在生长点上,在动物是在生理上活动性最强的器官(肝、脾)內。神經活动,即兴奋沿神經的傳导,是靠鉀来实现的。人体內存有的全部放射性鉀量,在 1 分鐘內可发射出 50 万 β 粒子。

用于工业和医疗上的放射性物质取自鈾矿——瀝青鈾矿和鈾酸鉀鈾矿,在一吨鈾矿中放射性物质的含量不超过 0.2 克。

在发现放射性物质以后的最初数年,鐳主要是在捷克斯洛伐克开采的。自 1912 年起,开始在比属剛果的矿山中大量开采。接着很快地开发了其他鐳矿藏所在地——如在 Корнваллис,南澳大利亚、印度、加拿大、苏联。

1934 年在加拿大、在大熊湖畔、在北极圈內发现了比其他地方分布較淺在的富裕的放射性矿藏。

釷取自磷鈾礦石(Монацит),后者含有 4~5% 氧化釷(磷鈾礦砂)。含釷的放射性矿藏在巴西、北美、印度和苏联均有开采。

放射性物質及其物理性質

对放射性元素物理性質有了清楚的概念，才可能正确理解电离輻射的生物学作用，以及由此而产生的放射治疗的原理。放射性物質的物理性質与原子結構有着不可分割的联系。

基本粒子

物質的原子由輕的和重的基本粒子組成。基本粒子的主要特征是它們的质量和电荷。由于粒子的质量同它的能量有关，并随速度的改变而变化，所以通常只指明粒子在游离态(而非結合态)的靜止质量。

电子和正电子是輕基本粒子。这些粒子的靜止质量仅是最輕的原子——氢原子——质量的 $1/1,840$ ，即为 $0.91 \cdot 10^{-27}$ 克。电子带基本的阴电荷，正电子带相同的阳电荷。这种电荷相当于 $4.8 \cdot 10^{-10}$ 绝对静电单位。电子是稳定且較易察觉的粒子。在各种电真空器材中可見其游离态。电子的結合态見于每个原子。它們圍繞带阳电的原子核运动，每个电子有其自己的軌道，軌道的綜合形成原子的电子壳层。原子組成中的电子数等于門捷列夫周期系統的原子的序数 (Z)。其数值以核相对电荷表示之(表 2)。

表 2 基本粒子的数据

粒子符号	名 称	相 对 靜 止 质 量	相对电荷
e^-	电 子	$0.91 \cdot 10^{-27}$ 克	-1
e^+	正 电 子	$0.91 \cdot 10^{-27}$ 克	+1
ν	中 微 子	小于电子质量	0
n	中 子	1.0089	0
p	质 子	1.0081	+1
μ	介 子	比电子质量大 200 倍	0 ± 1

原子的电子壳層

圍繞原子核运动的电子形成原子壳层。离原子核最近的一层叫作 K 层。每个在自己軌道上旋轉的电子都具有一定的能量，电子愈远离原子核，其能量愈大。粒子的能量以电子伏特(eV)表示。1 eV 是指一个电子通过 1V 电势差所具有的能量 [$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-18}$ 尔格(erg)]。

氢原子有一个电子。在未激发原子內，这个电子位于 K 层。在外界作用刺激时，电子由 K 层跳入离核較远的某一层。所产生的过程叫作原子的激发。原子处于这样的激发态的时间往往不超过 10^{-8} 秒。

原子由激发态恢复到常态，并以电磁輻射的形式发射出能量子。如果原子受外力作用，电子完全脱离軌道，則产生电离。

电子和原子核以静电引力相互联系。元素的原子序数愈大，原子核电荷愈大，核

電場愈強。元素的原子序數愈大，耗損于激發原子或從不同原子的同一亮層射出電子的能量愈多（能量的變化同 Z^2 幾成正比）。

原 子 核

各種原子核的半徑介於 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 厘米之間。由於在很小的原子核體積中幾乎集中了原子的全部質量，因此核質的密度就顯得異常之大。

在自然界還未見到任何其他的構成物，其物質密度可同核質的巨大密度相比擬。

在這樣的密度的情況下，組成原子核的粒子非常接近，以致在擊脫原子核的質子或中子時，必須消耗一定的功。這個功叫做結合能，按原子核中每個粒子計算。中等原子核的結合能幾乎相同，為 8MeV ；但輕原子核和重原子核的這個數值比較小。原子核由質子和中子組成。核內的質子數等於元素的原子序數，並決定核電荷。核內的中子數等於元素原子量（質量數）和原子序數的差數，對核電荷無影響。質子數相等的原子核內，其中子數可以不等。

原子量不同（原子核內中子數不同），但原子序數相同（質子數相同）的物質，叫做同位素，均屬於同一種元素（ $Z_1 = Z_2$ ）。

舉例說，硫是四個同位素的混合物，它們的質量數（原子量）是 32, 33, 34 和 36，其原子序數為 16（ S^{32} , S^{33} , S^{34} , S^{36} ）。原子中的中子數是 $A - Z$ 的差數，即分別為 16, 17, 18 和 20。每個元素的同位素數目的比值是異常恒定的。同位素成分的恒定性甚至可從宇宙性元素，如隕石中得到証實。

質子數不同，但核粒子總數相同的原子核，叫做同量異位素原子核（ $A_1 = A_2$ ）。

現已闡明，每個在化學上純粹的天然元素都是幾種同位素的混合物，它們用元素的化學符號來表示，下界表明原子序數，上界用質量數（ x ）表示。舉例說，氫的最輕同位素原子核（p-質子）的符號是 ${}_1\text{H}^1$ ，重氫同位素原子核（d-氘核）的符號是 ${}_1\text{H}^2$ ，超重氫同位素原子核——氚核—— ${}_1\text{H}^3$ 。同理， α 粒子或氦同位素原子核的符號用 ${}_2\text{He}^4$ 表示。

目前在我們已知的 100 種元素中，已發現約 1,000 種同位素。同位素的原子核並不全是穩定的。如果核內的變化（如放出 γ 量子）或質子-中子的互變（如俘獲粒子或射出粒子）所致的原子核態帶有勢能的低落，則原子核象任何其他過程一樣就成為不穩定的了。反之，如果原子核各態和反應符合於勢能的上升，原子核將是穩定的。 $Z=21$ 以前的輕元素的同位素原子核帶有的質子，和中子數幾乎相等（ $N/Z=1$ ），因此核表現穩定；但重元素的同位素原子核帶有的中子數多於質子數（ $N/Z=1.7$ ）。如果質子數是中子數的一半，液滴原子核的表面張力就不能同質子的靜電斥力維持均衡，原子核就成為不穩定。

不穩定態或借粒子的再結合而變為穩定態，或導致核的衰變。

原子核衰變

核粒子雖然結合很密，但仍處在不斷運動中。如所周知，在輕元素同位素中，凡質量數能被 4 除盡的元素，其結合能達到最大值（ ${}_2\text{He}^4$, ${}_4\text{Be}^8$, ${}_6\text{C}^{12}$, ${}_8\text{O}^{16}$ ）。這說明在原

子核中由二个质子和二个中子构成暂时性的极稳定的形成物。这种形成物(α 粒子)具有足够的动能时,能从原子核中分离出来(α 衰变)。在含有许多粒子的、重而较不稳定的原子核中尤易见到。 α 衰变时,核原子序数减少二个单位,质量数减少四个单位。原子核除上述的 α 衰变外,尚可以出现 β 衰变。它见于核子互变时(质子变中子或相反)。 β 衰变时,核原子序数变动一个单位(根据飞出 β 粒子的电荷符号减少或增加一个单位),但核的质量几乎没有变化。

最后可能有第三种衰变,它是重原子核自发地分裂成二块碎片和数个中子。原子核的衰变现象统称放射性。

在 α 和 β 衰变时形成的原子核往往处在激发态中。这些核在转变成常态时能放出电磁辐射的量子(γ 量子)。由此可见,当从核中飞出带阳电的 α 粒子,即 α 衰变时,以及当飞出 β 粒子($\pm e$),即 β 衰变时,可以伴随放出 γ 射线;它是电磁辐射的量子,性质与波长较短的伦琴射线相同。

原子核衰变受统计学规律性的支配;因此在单位时间内某些部分从全部原子中衰变,是着有完全一定的几率(Вероятность)的。放射性原子核数目在时间上的变化规律可表述为:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

在此式中, N_t 为在一定的 t 时间内所保存的原子核数, N_0 为在最初时间 t_0 内的原子核数, λ 为衰变常数。

如以 T 表示在该段时间内全部存有的原子中有一半原子发生衰变(半衰期),即如果取 $t=T$, $N_t = \frac{1}{2} N_0$, 则由前式可得:

$$\ln 2 = \lambda T \text{ 或 } \lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0.69}{T}$$

这样,代入 λ 即可以算出(事实也就是这样变成)放射性元素的半衰期。

天然放射性

重元素的不稳定核在衰变时产生的新核往往也是不稳定的,同时也能进行 α 或 β 衰变。全部转变以形成稳定核而告终。相继产生的原子核的总计叫做放射族。因为核的质量仅在 α 衰变时才有改变,而且又是改变四个单位,因此属于同一族的全部元素的质量数应当符合以下四个公式中的一个:

$$A=4n, A=4n+1, A=4n+2, A=4n+3.$$

实际上存在着四个天然放射族(图1和图2)。

放射族的起始元素往往是半衰期最长的元素。 $4n$ 族始于第90号钍元素的同位素 Th^{232} ($T=2 \cdot 10^{10}$ 年)。在经过10次连续的核衰变后获得稳定核,其中有6次是 α 衰变。显然稳定核的原子序数要比起始元素小8个单位($6 \cdot 2 - 4 = 8$),而质量数要小 $4 \cdot 6 = 24$ 个单位。因此,该族的稳定核(钍D)是铅的同位素核 ($Z=82, A=232-24=208$) $_{82}\text{Pb}^{208}$ 。 $A=4n+1$ 族的起始元素是第93号镎元素的同位素 $_{93}\text{Np}^{237}$, 半衰期 $T=2.25 \cdot 10^6$ 年(它在经 β 衰变后: $_{94}\text{Pu}^{241} \rightarrow _{95}\text{Am}^{241} + e^-$ 及经 α 衰变后: $_{95}\text{Am}^{241} \rightarrow _{93}\text{Np}^{237}$ 产生)。该族经十次衰变后产生铅的同位素核 $_{82}\text{Pb}^{209}$, 其中有7次为 α 衰变,但是 $_{82}\text{Pb}^{209}$ 本身仍不稳定,能够产生 β 衰变: $_{82}\text{Pb}^{209} \rightarrow _{83}\text{Bi}^{209} + e^-$ 。

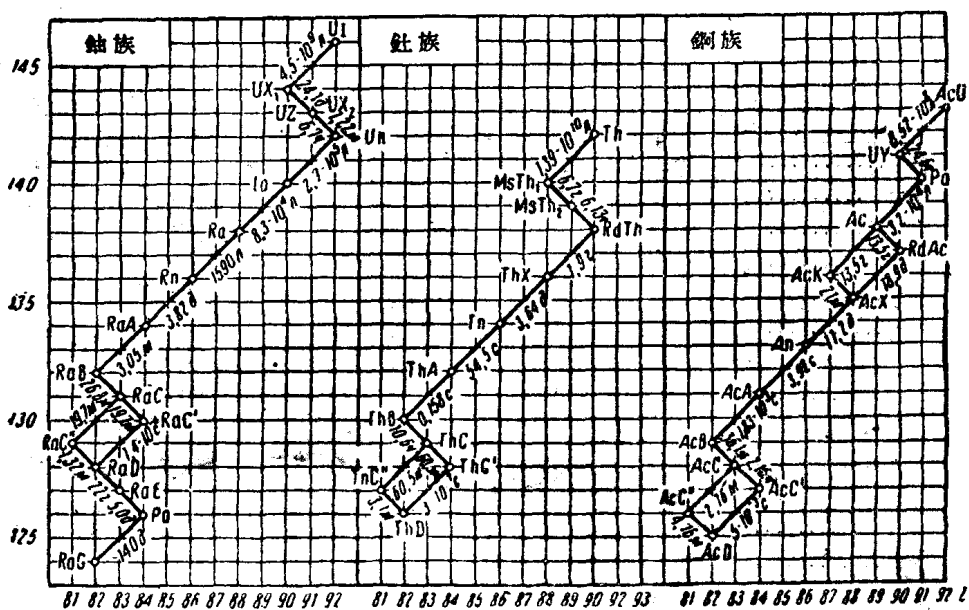


图 1 用质子-中子简图表示的放射族
 圖內 Π 或 Γ =年, Δ =天, M =分, C =秒。

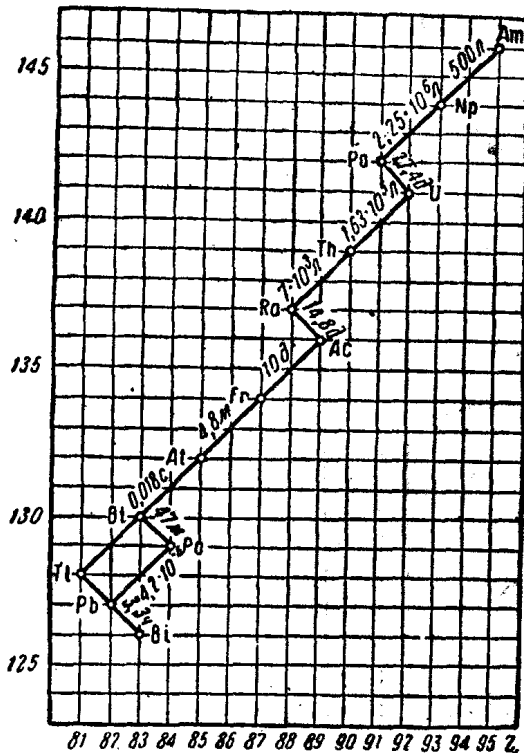


图 2 第四放射族的质子-中子简图
 圖內 Π =年, Δ =天, M =分, C =秒。

$4n+2$ 族始于第 92 号铀元素的同位素 ${}_{92}\text{U}^{238}$ ，半衰期为 $T=4.5\cdot 10^9$ 年。该族经 14 次连续衰变后，以形成铅的稳定同位素 ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ 告终，其中有 8 次是 α 衰变^①。

表 3 放射族的各项数据

名	称	原子序数	原子量	半衰期	射线	α 粒子在空气中的射程
铀族	铀 I	92	238	$4.5\cdot 10^9$ 年	α	2.53
	铀 X_1	90	234	4.5 天	β, γ	—
	铀 X_2	91	234	1.15 分	β, γ	—
	铀 II	92	234	$2.5\cdot 10^5$ 年	α	2.91
	铀 Y	90	231	24.6 小时	β, γ	—
	铀 Z	91	234	6.7 小时	β, γ	—
	钍	90	230	$9\cdot 10^4$ 年	α, γ	3.03
	镭	88	226	1,580 年	α, β, γ	3.21
	镭射气 (氡)	86	222	3.825 天	α, β	3.91
	镭 A	84	218	3.05 分	α	4.48
	镭 B	82	214	26.8 分	β	—
	镭 C	83	214	19.5 分	α, β, γ	3.6
	镭 C'	84	214	约 10^{-6} 秒	α	6.6
	镭 C''	81	210	1.32 分	β	—
钍族	镭 D	82	210	22 年	β, γ	—
	镭 E	83	210	4.85 天	β, γ	—
	钋 Po	84	210	136.5 天	α, γ	3.72
	镭 G (钍铅)	82	206	∞	—	—
	钍 Th	90	232	约 $2\cdot 10^{10}$ 年	α, γ	2.75
	新钍 I	88	228	6.7 年	β	—
	新钍 II	89	228	6.2 小时	β, γ	—
	射钍	90	228	1.9 年	α, γ	3.81
	钍 X	88	224	3.64 天	α, γ	4.13
	钍射气	86	220	54.5 秒	α	4.8
	钍 A	84	216	0.14 秒	α	5.39
	钍 B	82	212	10.6 小时	β, γ	—
	钍 C	83	212	60.8 分	α, β, γ	4.53
	钍 C'	84	212	约 10^{-11} 秒	α	8.17
镭族	钍 C''	81	208	3.2 分	β, γ	—
	钍 D (钍铅)	82	208	∞	—	—
	镭铀	92	235	$7\cdot 10^8$ 年	α, γ	—
	铀 Y	90	231	24.6 小时	β, γ	—
	镭	91	231	$1.2\cdot 10^4$ 年	α	3.48
	镭	89	227	20 年	β	—
	射镭	90	227	18.9 天	α, β, γ	4.43
	镭 X	88	222~224	11.2 天	α, γ	4.14
	镭射气	86	218~220	3.92 秒	α, γ	5.49
	镭 A	84	214~216	$2\cdot 10^{-8}$ 秒	α	6.24
	镭 B	82	210~212	36.1 分	β, γ	—
	镭 C	83	210~212	2.16 分	α, β, γ	5.22
	镭 C'	84	210~212	约 $5\cdot 10^{-9}$ 秒	α	6.1
	镭 C''	81	206~208	4.76 分	β, γ	—
	镭 D (镭铅)	82	206~208	∞	—	—

① 原文誤为 β 衰变——譯者注。

(續前)

名 称	原子序数	原 子 量	半 衰 期	射 綫	α 粒子在空气中 的射程
钷Pu	94	241	10年	α, β	—
镅Am	95	241	500年	α	—
镎Np	93	237	$2.25 \cdot 10^6$ 年	α	—
钷Pd	91	233	27.4天	β	—
铀U	92	233	$1.63 \cdot 10^5$ 年	α	—
钍Th	90	229	$7 \cdot 10^3$ 年	α	—
镭Ra	88	225	14.8天	β	—
锕Ac	89	225	10天	α	—
釷Fr	87	221	4.8分	α	—
砒At	85	217	0.018秒	α	—
铋Bi	83	213	47分	β	—
钋Po	84	213	$4.2 \cdot 10^{-8}$ 秒	α	—
鉛Pb	82	209	3.3小时	β	—
铋Bi	83	209	∞		

第四族—— $4n+3$ 族的起始元素也是第 92 号铀元素的同位素 ${}_{92}\text{U}^{235}$ (鋼鈾), 半衰期 $T=8 \cdot 10^8$ 年。在十一次核转变后形成鉛的稳定核 ${}_{82}\text{Pb}^{207}$, 其中有 7 次是 α 衰变(图 1 和图 2)。

放射性物質的性質

放射性物質与非放射性物質的区别在于: 它們的原子核在衰变时具有不断发射出射綫的本領。如果把被放出的射綫全部吸收, 則可以确信原子核衰变时伴有大量能量的放出。举例說, 1 克同其衰变产物处于平衡的鐳, 在 1 小时内放出的能量相当 137 小卡, 而且在全部能量中 90% 的能量是动能。1 克鐳全部衰变时放出 $3.7 \cdot 10^9$ 小卡, 即相当 500 公斤煤全部燃燒时所放出的能量。

放射性物質的射綫具有使各种物质发生荧光——发光的本領。

发射出的射綫的最重要的性質是它們在貫穿各种介質时具有产生电离的本領。电离空气的本領被用作測量放射性輻射。

射綫同物质相互作用的结果产生化学反应。例如, 使照相乳胶上的銀还原, 氧气变成臭氧, 水分解成 H 和 OH 等。

放射性物質的射綫

放射性衰变中可以产生三种射綫 α 粒子, β 粒子和 γ 量子。

α 粒子是由放射性元素原子核放出的氦核流。每个粒子由結合相当牢固的二个質子和二个中子組成。从原子核飞出的 α 粒子速度各有不同: 根据物质的性質, 其速度介于 0.047 到 0.068 光速之間。 α 粒子在空气中的射程不超过 7~12 厘米。

α 粒子的动能很大, 但速度較小, 沿其行程引起介質的高度电离。 α 射綫的特点是貫穿本領小。它可被数厘米的空气层、薄玻璃层, 或数百分之几毫米厚的鋁或鉛板所吸收。自核飞出的 α 粒子在电场和磁场中偏轉較小。 α 粒子通过某介質时不断受到阻止, 結合二个电子而变成氦原子。 α 射綫的能量构成了鐳发射出的全部能量的主要部分(90%)。利用 α 粒子落在硫化鋅屏上所产生的閃爍(光閃耀), 可以观察 α