

高等医药院校讲义

供医疗、卫生、兒科、
口腔及中医专业用

放射医学

(内部材料 注意保存 只限学校内部使用)

上海第一医学院

張建国 張鴻寿 叢树樾 赵惠揚 等 編

人民卫生出版社

放 射 医 学

开本: $787 \times 1092/16$ 印张: $18\frac{4}{8}$ 插页: 4 字数: 428 千字

张 建 国 等 编

人 民 卫 生 出 版 社 出 版

(北京书刊出版业营业许可证出字第〇四六号)

·北京崇文区钱子胡同三十六号·

北 京 市 印 刷 一 厂 印 刷

新华书店北京发行所内部系统发行

统一书号: 14048·2605

1961年9月第1版—第1次印刷

定 价: 1.80元

1962年7月第1版—第3次印刷

印 数: 14,201—21,857

前 言

在原子能被广泛应用的今天，每个医务工作者都应该懂得有关放射生物学和放射医学领域中的一些最新成就和基本知识。

我国年轻的放射医学，在党的正确领导和亲切关怀下，正以飞躍的速度向前迈进；全国各医学院校，也都开设了“放射医学”课程。因此，讲授这一門新兴学科，也就迫切需要一本教材。当今年高等医药院校教材座谈会將我院原有的很不成熟的“放射医学讲义”选作教材使用时，我們既感到光荣，又十分惶恐。为了使本書达到教材水平并符合排印要求，我們在付印前，在院党委的领导下，將原有讲义重新修改了一遍。但是由于我們水平有限和時間倉促，再加上編者們是分篇分章編写的，因而在全書內容連貫、笔調一致方面，可能存在一些缺点，也可能有一些不必要的重复和重要的遺漏，甚至某些內容还会有一些錯誤。因此，我們殷切地希望各校师生对本書提出批評和建議，俾本書需要再版时据以修訂。

本書的主要目的是想把放射医学的一些基本知识和最新成就簡略地介紹給讀者，使讀者能在短期內了解放射医学這門課程的一般內容。本書共分四篇：放射物理学及剂量学基础、放射性同位素在临床医学上的应用、放射損伤和放射病以及放射卫生防护等。这些內容既能适合医疗系又能滿足卫生系的教学需要。因此，希望各校教师在講授时根据具体情况有所側重。

最后，我們在这里对于焉文社、庄夢舟、周蓮芳、方瑞英等同志，在本書編写过程中，在准备材料、繪圖、抄写、核对等方面所給予的帮助，表示衷心的感謝。

目 录

緒 論

第一篇 放射物理学及剂量学基础

(邱德抗、赵惠揚)

第 一 章	放射物理学基础	邱德抗 (5)
第一节	原子結構 同位素	(5)
第二节	放射性 放射性衰变的規律 放射性的單位	(8)
第三节	电离輻射与物質的相互作用	(16)
第四节	粒子加速器 原子反应堆	(25)
第 二 章	放射性探測及測量	邱德抗、赵惠揚 (30)
第一节	放射性探測的方法和种类	(30)
第二节	几种常用的放射性探測儀器的介紹	(46)
第三节	放射性測量时的統計学因素及数据处理	(55)
第四节	放射性的絕對測量	(58)
第 三 章	剂量学基础	邱德抗、赵惠揚 (62)
第一节	剂量的單位	(62)
第二节	放射性同位素体外照射的剂量測定	(64)
第三节	放射性同位素体内照射的剂量測定	(67)

第二篇 放射性同位素在临床医学上的应用

(赵惠揚、林克健、張建国)

第 四 章	概況	赵惠揚 (72)
第一节	放射性同位素在临床医学上应用的历史和原理	(72)
第二节	医学上常用的同位素介紹	(75)
第三节	临床上常用的特殊放射性葯物	(79)
第 五 章	放射性同位素在診斷学上的应用	赵惠揚、林克健 (81)
第一节	放射性碘 ¹³¹ 測定甲状腺机能状态	赵惠揚 (81)
第二节	放射性同位素在腫瘤診斷上的应用	赵惠揚 (89)
第三节	放射性同位素在循环系統疾病診斷上的应用	赵惠揚、林克健 (96)
第四节	放射性同位素在血液疾病診斷上的应用	赵惠揚、林克健 (108)
第五节	放射性同位素測定臟器的功能	赵惠揚、林克健 (112)
第 六 章	放射性同位素在治疗学上的应用	赵惠揚、張建国 (116)
第一节	放射性碘 ¹³¹	赵惠揚 (116)
第二节	放射性磷 ³²	赵惠揚 (125)
第三节	β 射綫敷貼治疗	赵惠揚 (130)
第四节	膠体金 ¹⁹⁸ 与膠体磷 ³² 酸鉍在治疗上的应用	張建国 (134)
第五节	远距离 γ 射綫治疗	張建国 (140)

第三篇 放射损伤及放射病

(何介薇、罗梅初、張鴻寿、張建国)

第七章	放射病的基础医学	何介薇 (146)
第一节	放射病的病因和分类	(146)
第二节	放射病的發病原理	(149)
第三节	放射病时物質代謝的变化	(152)
第四节	急性放射病时机体主要系統机能的变化	(154)
第五节	放射病的病理解剖	(156)
第八章	放射性物質的毒理学	罗梅初 (159)
第一节	某些放射性物質毒性的一般作用特点	(159)
第二节	放射性物質侵入机体的途徑及其吸收	(160)
第三节	放射性物質在机体中的分佈	(162)
第四节	放射性物質的体内代謝	(166)
第五节	机体内放射性物質的排出問題	(167)
第九章	急性放射病	張鴻寿 (169)
第一节	急性放射病的病程經過	(169)
第二节	急性放射病的出血綜合症	(173)
第三节	急性放射病的感染併發症	(175)
第四节	急性放射病的治疗	(176)
第十章	慢性放射病	張鴻寿 (179)
第一节	慢性放射病的临床經過	(179)
第二节	慢性放射病的診斷	(181)
第三节	慢性放射病的治疗	(184)
第四节	內照射放射病	(185)
第十一章	放射性复合伤	張建国 (187)
第一节	放射性复合伤的临床特点	(187)
第二节	放射性复合伤的診斷与治疗	(190)
第十二章	皮膚放射损伤的临床与治疗	張建国 (193)
第一节	皮膚放射损伤的临床特点	(193)
第二节	皮膚放射损伤的治疗	(199)
第十三章	电离輻射对机体作用的远期后果	張建国 (202)
第一节	射綫对受害机体本身的远期损伤	(202)
第二节	电离輻射对后裔的影响	(208)

第四篇 放射衛生防护

(叢树樾、許 荣、金錫鵬)

第十四章	天然放射性物質及电离輻射的最大容許标准	叢树樾 (209)
第一节	天然放射性物質及其含量	(209)
第二节	放射性物質在外界环境中的动态	(210)
第三节	放射性物質的最大容許剂量和濃度	(212)
第十五章	放射性同位素實驗室設計的卫生要求	叢树樾 (215)

第一节	放射性工作场所的分类	(215)
第二节	实验室的形式和地址选择	(216)
第三节	实验室房间的组成和分区	(216)
第四节	实验室围护结构及设备的卫生要求	(218)
第五节	放射性废弃物的处理	(220)
第十六章	X 射线及 γ 射线的卫生防护	許 荣 (223)
第一节	X 射线和 γ 射线的应用	(223)
第二节	X 射线和 γ 射线的防护计算原则	(224)
第三节	X 射线的卫生防护	(238)
第四节	钴 ⁶⁰ γ 射线源的卫生防护	(240)
第五节	镭疗的卫生防护	(243)
第十七章	放射性厂矿卫生防护	金錫鵬 (245)
第一节	放射性厂矿的卫生问题	(245)
第二节	放射性厂矿的防护原则	(247)
第三节	铀矿开采及加工冶炼过程中的卫生防护	(248)
第四节	放射性发光涂料工作的卫生防护	(251)
第十八章	放射性工作的卫生保健	周益勤 (252)
第一节	放射性工作的个人防护用具	(252)
第二节	不同放射性水平的操作技术	(254)
第三节	放射性工作的个人卫生及表面去污染	(256)
第四节	放射性工作机构的保健组织及其工作任务	(258)
第五节	放射性工作者的健康检查	(260)
第十九章	核武器的防御	周益勤 (263)
第一节	核武器的种类	(264)
第二节	核武器爆炸方式和景象	(265)
第三节	核武器爆炸时的杀伤破坏因素	(266)
第四节	核武器的防护措施	(268)

附 表

附表一	同位素衰变表	(271)
	氚(271) 钠 ²⁴ (272) 磷 ³² (273) 硫 ³⁵ (274) 钾 ⁴² (275) 钙 ⁴⁵ (276) 铬 ⁵¹ (277)	
	铁 ⁵⁹ (278) 钴 ⁶⁰ (279) 铜 ⁶⁴ (280) 铷 ⁹⁰ (281) 钇 ⁹⁰ (282) 铈 ¹²⁵ (283)	
	碘 ¹³¹ (284) 金 ¹⁹⁸ (285)	
附表二	死时间校正表	(286)
附表三	64进位乘积表	(288)
附表四	电离辐射的最大容许标准	(289)
表1.	几种基本射线的最大容许剂量表	(289)
表2.	不同能量 β 粒子最大容许通量 β 粒子/平方厘米/秒表	(289)
表3.	不同能量的 γ 量子最大容许通量 γ 量子/平方厘米/秒表	(290)
表4.	复杂能谱的射线, 最大容许剂量和最大容许通量表	(290)
表5.	放射性物质工作者手、工作服等污染最大容许程度表	(290)
表6.	水和空气中最大容许浓度表	(291)
附表五	门捷列夫元素週期系	

緒 論

原子能的發現和利用，是廿世紀自然科學領域中最偉大的成就之一；是几千年来人類智慧的結晶；也是全世界科學家們艱苦勞動的成果，這個成果已廣泛地應用於國民經濟的各个方面。尤其是在人為放射性同位素能大量生產以後，短短的幾年內，和平利用原子能事業得到了迅速的發展。現在差不多在每一種科學領域中，例如工業、農業、生物學、醫藥衛生等部門都廣泛地應用原子能和放射性同位素，作為一種新的方法和工具來研究和解決工作中存在的困難課題（這些課題用其他方法難以獲得解決）。例如工業上的測井探礦、高爐檢修、鑄件探傷；農業及生物學上的選種施肥、促進經濟植物的生長發育；醫學上在生理、生物化學、藥理、衛生學等專業的研究以及用於疾病的臨床診斷和治療等等，都已取得了非常顯著的成效。

原子能和放射性同位素的廣泛應用，對於促進科學文化事業的發展，增加人民物質財富，為人類改造自然進而征服自然，已經作出而且將繼續作出巨大的貢獻。但是，以美國為首的帝國主義集團，卻把這一科學成果用於製造大規模的殺傷武器，進行原子訛詐，妄圖達到獨霸世界的目的。大家都記得，美帝國主義者於1945年8月在日本長崎、廣島這二個不設防的城市擲下了兩顆原子彈，造成了數十萬日本人民的傷亡。但他們不顧全世界愛好和平人民的堅決反對和嚴厲譴責，仍熱衷於擴軍備戰，以及製造和試驗新型大規模殺傷武器。與此相反，以蘇聯為首的社會主義陣營，始終不渝地將原子能和現代科學技術用於和平建設，反對試驗、生產和使用核武器以及其他大規模殺傷武器。但是，只要帝國主義還存在，就有侵略戰爭的土壤。因此，我們必須保持特別高的警惕，隨時粉碎帝國主義的侵略計劃，使其戰爭陰謀不能得逞。

放射醫學（或稱原子醫學）是隨著原子能科學的發展而形成的一門新興科學。它的主要內容是研究電離輻射對生物機體的作用原理和發病機制、診斷、治療以及預防放射損傷和放射病，同時還要研究放射性同位素在醫學上的應用等。放射醫學這門課程建立在一般醫學基礎之上，而與各種醫學課程有著密切的聯繫。為了學好這門課程，在放射物理學、放射化學、放射生物學以及放射毒理學等方面，必須有鞏固的基礎。

放射醫學的任務主要是：及時診斷和治療放射損傷和放射病；預防電離輻射對工作人員或周圍居民的有害影響；擴大放射性同位素在醫學上的應用，以保證我國和平利用原子能事業得到迅速發展和提高醫學水平。

放射醫學的發展，與原子能科學——核子物理學、放射化學、電子管學以及有關的工程技術和生物學的發展是分不開的。過去在醫學上只有低強度的X射綫機，只能應用少量的天然放射性同位素鐳等。現在不僅有了不同強度不同類型的X射綫機，同時還應用了荷電粒子加速器——電子加速器、同步穩相加速器， γ 射綫鈷⁶⁰裝置以及多種放射性同位素。中子輻射也在進行實驗研究，也準備應用到醫學上來。

同位素示踪方法是實驗醫學強有力的新工具，它日益廣泛地被應用到研究複雜的生物學、生理過程和生物化學、物質代謝方面來了。例如，利用放射性鈉（ Na^{24} ）等同位素確定血流速度，利用放射性磷（ P^{32} ）研究核酸代謝等都取得了顯著的成績。

放射自显影术,在組織学中尤其是对骨組織的研究中,它是一种極有意义和極有前途的檢查方法。用这种方法可以帮助我們了解磷和鈣鹽在骨組織內如何沉积,研究骨組織的發生和生長,研究各种代謝病、維生素缺乏病和骨折后骨組織的增長愈合以及測定放射性元素进入体内后的微量分布等問題。在放射性元素毒理学方面的研究也有重大意义。

放射性同位素在临床診斷与治疗的应用方面也取得了很大的成效。例如,应用放射性同位素碘 ^{131}I 測定甲状腺机能,可以正确地診斷甲状腺疾患。腦腫瘤手术前的定位,临床上感到極大的困难,甚至有时施行了不必要的手术,自从用碘 ^{131}I 作定位診斷后,其准确性达96—98%。用碘 ^{131}I 确定腦瘤位置的方法比造影檢查还要优越。利用碘 ^{131}I 、磷 ^{32}P 等早期診斷恶性肿瘤,其准确性也很高。

放射性同位素在治疗学中的应用,有四种基本方式,即:外照射治疗、内服治疗、腔内治疗和組織内治疗。可根据疾病的發展特点和治疗上的要求采取不同的治疗方法。

外照射治疗有远距离疗法、近焦距疗法和敷貼疗法等。放射性鈷(Co^{60})完全可以代替价格高昂的鐳制剂,鈷 60 远距离治疗已被广泛地采用。鈷 60 合金可以做成各种形式的制剂,进行腔内治疗和組織治疗,因而易于达到治疗上的要求。用鈷(Co^{60})、磷(P^{32})、銻(Sr^{90})、鈾(Ge^{144})、鈳(Ru^{106})等敷貼物治疗皮膚癌、毛細血管瘤、皮膚癬症等疾患也有良好的疗效。目前采用寿命較長的放射性同位素銫(Cs^{137})作为 γ 射綫源,进一步發展了远距离治疗技术。放射性銥 ^{192}Ir 和鎔(Eu^{152} , Eu^{154})同样可以作为远距离治疗放射源。

放射性同位素内服治疗,应用最普遍的是放射性碘、磷等。碘 ^{131}I 治疗甲状腺机能亢进症具有良好的效果。磷 ^{32}P 治疗白血組織增生病和紅血球增多症亦甚有效。

利用放射性膠体金和膠体磷治疗胸、腹腔晚期腫瘤以及进行腫瘤組織內注射治疗有良好的效果。許多学者認為膠体治疗有广闊的發展前途。

大家知道, X 綫攝片需要很笨重和价格高昂的 X 射綫机。現在还可利用放射性同位素銩(Tl^{201})、氙(Xe^{133})来代替 X 綫攝影。因为銩和氙可放射 γ 射綫,能量与診斷用的 X 綫相同。这种同位素攝影术尤其适用于野战的条件。

原子能和放射性同位素的和平利用,显然給予医学及其他科学增添了丰富的內容,提高了医学科学水平。但是,放射能对人体是有害的,控制不严或使用不注意防护,会使人体遭到不必要的損害。这在广泛开展和平利用原子能的同时給医学提出了另一方面的極其复杂的任务——預防、診斷和治疗放射損伤和放射病。为了有效地預防和治疗放射損伤、放射病,必須在这方面进行广泛而深入的研究。

虽然,放射損伤在放射能發現的早期即已發生,但是对放射損害作用进行比較全面系統的观察和对其預防与診斷作深入的研究,还是在美帝国主义在日本投擲原子彈以后开始的。自从日本受到原子彈的攻击,發生大批急性放射病病人以来,世界各国相繼地开展了放射医学的研究工作。关于这方面的文献报告,也相当多。

射綫的防护,直接关系到从事原子能事業人員的健康。在放射性實驗室、原子工業和临床放射工作中,电离輻射和放射性同位素的防护方法,已得到了广泛的研究,初步建立了适合于各种情况的防护規程和卫生监督制度。

关于电离輻射的最高容許剂量問題,国际上規定为每周不得超过0.3倫。随着射綫对生物机体損害的深入研究和認識的提高,最高容許剂量有逐漸減低的趋势。

放射性厂矿的卫生防护工作、放射性廢物处理問題、防护材料的研究和制备等,也得

到了广泛的开展,同时亦取得了很好的效果。

我国在党的正确领导下,和平利用原子能事业,正在一日千里地发展。1956年我国国务院在拟订的科学發展十二年远景规划中,将同位素在医学科学上的应用列为国家的一项重点任务。我国和平利用原子能事业的发展,也是与苏联的无私帮助分不开的。1955年苏联政府宣布了苏联在促进原子能和平利用的研究方面给予其他国家以科学、技术和工业上的帮助。1958年在苏联政府的帮助下,我国建成了第一座原子能反应堆和回旋加速器,开展了放射性探测剂量仪器的试验和生产工作,创办了各种同位素应用训练班,培养了大批这方面的专业干部。这样就给予开展原子能和平利用的工作,打下了有利的基础,尤其是最近三年来,在社会主义建设总路线的照耀下,在大跃进的形势下,放射医学如同其他事业一样,在党的“中央和地方并举”、“大中小相结合”“土洋并举”等一系列两条腿走路和大搞群众运动的方针指导下,原子能事业正在以飞跃的速度向前发展。

为了适应这一发展形势的要求,为了保证从事放射性工作人员和居民的健康与安全,防护和探测仪器必须先行。我国政府十分重视并建立了防护工作制度,国务院正式批准了“放射性工作卫生防护暂行规定”。这是我国原子能事业发展过程中的一件大事。这充分地说明了党对人民健康无限的关怀以及社会主义制度的优越性。

我国的放射医学正在这种大好形势下,从没有到有,从小到大,茁壮地成长起来。

同位素在实验研究应用方面:用碘¹³¹、磷³²、硫³⁵等示踪化合物研究X线全身照射后对大白鼠血管通透性的影响,以探讨放射病的出血机制。用磷³²、铁⁵⁹研究电离辐射对造血机能的作用,用放射自显影术研究胚胎学中的“活质”问题,以及利用氢、硫³⁵、锌⁶⁵等进行不同目的的研究工作,都取得了很好的成绩。

同位素在临床医学应用方面:目前国内已广泛地采用碘¹³¹测定甲状腺功能以诊断甲状腺疾患,并用以治疗甲状腺机能亢进症。同位素扫描术也在各大城市安装和使用。在甲状腺的体积大小,早期诊断恶性肿瘤方面取得了一定的成果。应用磷³²鉴别诊断各种癌症,并已成功地运用了微型计数管进行食道内测定来早期诊断食道癌。磷³²测定组织血流及循环血量已广泛开展。应用磷³²内服治疗真性红血球增多症及慢性白血病。磷³²敷贴剂治疗毛细血管瘤、慢性湿疹以及神经性皮炎等,均已取得了显著的效果。钴⁶⁰远距离治疗机,也已在全国各地安装和使用。

在射线损伤方面:从临床医疗到实验研究也已广泛地开展。值得提出的是,祖国医学在急性放射病的医疗和研究中的应用。电离辐射生物学作用原理和射线对机体的远期后果方面,也已开展了研究。生物化学和生物物理工作者特别注意电离辐射的原发机制和病理形态学等方面的研究,对放射损伤、放射病时造血机能、凝血机制的破坏,胃肠道机能的障碍以及感染免疫等问题,也进行了若干研究。

在放射卫生防护以及放射毒理学方面,如上所述,由于党和政府对人民健康的关怀和重视,首先对于放射性厂矿和放射性同位素的应用机构,进行了监督。为了保护工作人员的健康,以及防止外环境的污染,对防尘、通风、废水、废物的处理,表面污染的洗消,个人防护用品的制造,以及定期健康检查和卫生保健制度等,都进行了不少现场调查和实验研究工作。

放射毒理学方面,对于某些放射性物质在体内的吸收、分布、排泄以及从体内加速排除等放射毒理的问题,也开始进行研究。

至于放射物理、放射剂量学方面，我們已拥有了各种探测和测量仪器。鈷⁶⁰放射源不仅在临床医院中已經推广使用，同时也为实验研究安装了不同要求的外照射放射源。

放射医学比起其他学科来講，是一門非常年輕的学科，随着我国原子能事業的不断發展，其前途也是非常廣闊的。关于放射医学今后的研究方向，我們認為有以下几方面：

放射性同位素在医学上的应用方面，必須巩固同位素在診斷和治疗中的应用成果。在提高同位素診斷的技术水平方面，合成各种示踪化合物，有效地应用于診斷上。在治疗方面，正确地掌握治疗剂量，研究 γ 射綫的剂量学标准，正确地掌握同位素治疗的指征。扩大同位素在診斷治疗方面的应用范围，为提高确诊率和治疗效果而努力。放射性同位素示踪等方法在基础医学上的应用必須大力开展，这是一項極有前途的研究方向。

在放射损伤、放射病的研究方面，必須深入地研究急性和慢性放射病的早期診斷、發病机制以及有效治疗問題。不仅要以临床观点和病理生理学观点进行研究，同时还应从生物物理、生物化学等方面进行深入的研究。利用新的技术方法和精密仪器，研究电离輻射对生物体的原發作用；从原發机制的設想，筛选并寻找防护放射损伤的有效藥物和方法；对电离輻射所引起的远期后果和后裔的研究等，都应引起足够的重視。在急性放射病的研究方面，为了要达到有效的实验治疗，应抓住出血、造血、感染、免疫、代謝障碍以及胃腸道机能紊乱等主要环节进行有效的研究。此外，对放射性复合伤的研究也应大力开展。对在放射病情况下的軟組織损伤的愈合規律也必須加以研究。

在放射毒理学方面，必須进一步研究对人类危害較大的一些放射性同位素对机体损伤的規律及其加速排除等問題。

在放射卫生防护方面，从保証原子能事業發展的要求出發，必須从事原子能工業中的防塵、通風、洗消、污水处理和个人防护装备等各方面的研究工作，以保証工作人員和居民的安全。放射性同位素实验室的卫生設計与卫生要求， γ 射綫的外防护，都是放射卫生防护中的重要研究課題。原子武器的防御問題的研究在国防医学方面也是極其重要的。

放射医学的研究工作，必須从实际出發，必須采取現場調查与实验室研究相結合的方式，来研究和解决生产与工作中的实际問題，解决应用医学方面的問題。理論研究工作，也必須相应地开展，因为，沒有理論研究，应用技术就很难得到根本的变革与提高。因此，理論研究工作不是可早可晚，更不是可有可無，而是当前急待發展的一个重大方面，我們必須予以重視。

我国的放射医学事業还很年輕，科学队伍正在成長壯大，摆在我們面前的任务是光荣而艰巨的。我們坚信，只要听党的話，坚持政治挂帅，按照总路綫的精神办事，敢于攻克尖端科学堡垒，我国放射医学事業一定能够得到飞速的發展。

第一篇 放射物理学及剂量学基础

第一章 放射物理学基础

第一节 原子結構 同位素

一、分子、原子結構 自然界存在的一切物質都是由極小的粒子——分子——所組成的。在一定的外界条件下,分子可以單獨存在,而保持着物質的基本化学性質。一切物質的分子又是由原子組成的,原子是元素的最小粒子,具有元素的一切性質。單質的分子由同一种原子組成,复杂物質的分子則由不同原子組成。只有惰性气体在自然界中,是以各个單獨原子聚集的形式存在,因此就惰性气体而言,分子与原子的概念是一致的。

原子是很小的粒子,它的直徑只有 10^{-8} 厘米左右,原子的質量也是十分微小的,一个氫原子的質量只有 1.6733×10^{-24} 克,就是最重的鈾原子的質量也不过是 3.951×10^{-22} 克。不同元素的原子具有不同的性質,但是它們的構造是十分相似的。在原子的中心是一个原子核,簡称为核。离原子中心很远的地方有电子繞着原子核按照一定的軌道而运行。原子核帶正电荷,电子帶負电荷,一个电子所帶的电荷为 4.8028×10^{-10} 靜电單位(e. s. u.) (当兩個等量的电荷,在真空中相距一厘米,二者之間的作用力为一达因时,每个电荷的电量叫做一靜电單位,用符号 e. s. u. 表示之),通常用字母 e 来表示它。电子的質量非常輕,等于 0.91×10^{-27} 克,也就是說电子的質量只有世界上最輕的原子——氫原子質量的 $\frac{1}{1840}$ 。

原子核是帶正电的,某一种元素的原子核所帶的电量^①,剛好就等于該元素在門捷列夫周期表上的原子序数,通常用字母 Z 来表示不同元素的原子序数。所以原子核所帶正电荷的数量,是由繞行电子的数目来决定的。例如氫原子只有一个繞行电子,它的核帶有 1 e 正电荷;鉄原子有 26 个繞行电子,它的核帶有 26 e 正电荷。換句話說,原子核所帶的正电荷恰巧和各电子所帶負电荷的总和相等。这样就構成中性的原子。当原子失去一个或数个(或增加一个或数个)繞行电子时,它就帶有电荷,此时我們就把它称为离子。

繞行电子和原子核構成一个原子,可是它們的質量相差很远,原子核差不多具有原子的全部質量,电子的質量比起核来要輕很多。例如,最輕的氫原子核的質量是 1.67243×10^{-24} 克,而它的一个繞行电子的質量却只有 9.1085×10^{-28} 克,二者的比是:

$$\frac{\text{电子質量}}{\text{氫核質量}} = \frac{9.1085 \times 10^{-28}}{1.67243 \times 10^{-24}} = \frac{1}{1836}$$

原子序数大的元素,这个比数还要小,例如,鈾原子的 92 个繞行电子的总質量和核的总質量的比只有 $\frac{1}{4714}$ 。

核的質量虽然几乎等于原子的質量,可是核只占着整个原子的極小的一部分空間。

^① 这里所用的單位是电子單位,一个电子單位的电量等于一个电子的电量。

上面已經提到,原子的直徑約為 10^{-8} 厘米左右,而核的直徑僅在 10^{-13} — 10^{-12} 厘米之間,所以在原子核和繞行電子之間,大部分的空間是空虛無物的。

原子模型及波爾(N. Bohr)理論 原子既然是由帶有正電的原子核及帶有負電的電子組成,那麼二者之間是如何排列呢?

Rutherford 根據他試驗的結果,提出了原子的模型:原子的結構與太陽系的結構相似,原子中心有一個小而重的帶正電的原子核,周圍有若干個小而輕的帶負電的電子圍繞着這個核旋轉。電子的數目是和元素在門捷列夫周期表上的原子序數相等,同樣,原子核的電量數值也等於原子序數。核的大小和整個原子相比較是很小的。這種模型叫做原子的核模型^①。

但是核外電子究竟在什麼樣的軌道上旋轉呢?有的原子有很多個電子,它們又是怎樣排列的呢?它們和元素化學性質的周期性有什麼關係呢?

丹麥的物理學家 N. Bohr 在 1912 年提出了原子結構的量子理論,他的結論:

1. 原子核周圍的每一個繞行電子都有它固定的軌道(圓形的或橢圓形的)。這些軌道分成好幾個殼層,每一個殼層有一定數目的幾個軌道,每個軌道最多只能有一個電子(圖1-1)。最靠近核的是 *K* 殼層,它有兩個軌道,所以最多只能有兩個繞行電子。其次是 *L* 殼層,它有兩個支殼層,第一個支殼層有兩個軌道,第二個支殼層有六個軌道,所以 *L* 殼層最多只能有 8 個繞行電子。接着是 *M* 殼層,它有三個支殼層,共有 18 個軌道,所以最多只能有 18 個繞行電子。一般說來,殼層里可以有的最大電子數目可以用 $2n^2$ 來表示, n 是層次,愈到外面可以容納的電子就愈多。但原子的最外一層則除外,它有嚴格的限制,允有繞行電子的軌道不能超過八個。

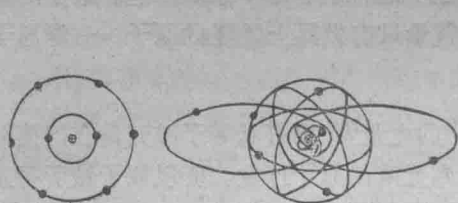


圖 1-1 氧原子 O^{16}

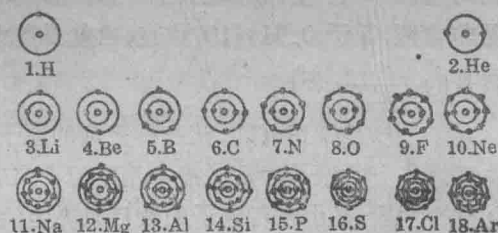


圖 1-2 1—Ⅲ週期的元素的原子結構示意圖

因之可以解釋周期律:

化學變化和原子結構深處的電子沒有多大關係,只有最外層電子的位置和運動才發生變化,因此,原子最外層電子的多少就基本上決定了原子的化學性質。元素的原子量越大,原子核就越重,帶的電荷就越多,核外電子也越多,但每一層所能容納的電子又有一定的限制,所以增加到一定程度,就只好排列到更外面的新的一層去了,於是最外層的電子數目就又是一個、二個的逐漸增加上去,也就出現了化學性質相似的元素。元素化學性質的周期性的本質也就被揭露了(圖1-2)。因此,周期律如下敘述:

元素的化學性質隨着原子核電量(原子序數)的增加而有周期性的變化。

2. 電子在一定的軌道上運動具有一定的能量,既不吸收能量,亦不輻射能量。各層

^① 這個原子模型習慣上稱為盧瑟福-波爾模型。

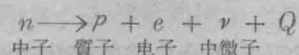
軌道都有一定的能量, K 壳層軌道的電子能量最低, 越往外的軌道, 電子的能量越高。

3. 電子由一層軌道過渡(躍遷)到另一層軌道時, 將放出或吸收能量。當電子由外層軌道跳到內層軌道時, 即是由高能級過渡到低能級時, 原子放出能量。在這樣躍遷的過程中, 電子多餘的能量一般變成電磁輻射(光子)放射出來。反之電子由低能級跳到高能級(由內層跳向外層)將吸收外加能, 這種現象叫做原子的激發。假如激發的能量很大, 使得軌道上的電子能夠脫離原子核的吸引力而自由運動, 則稱為電離或游離。

二、原子核的構造 原子核也具有複雜的構造, 在 1930 年 Bothe 和 Becker 二氏用 α 粒子去轟擊鈹(Be)與硼(B)等元素時發現能放出中子以後, 蘇聯物理學家 Д. Д. Иваненко 立刻提出原子核是由質子和中子所組成的假設, 這個假設不久就獲得了普遍的承認。質子和中子又統稱為核子。

質子是帶有單位正電荷的粒子, 其質量約等於一個原子質量單位(更正確些 $m_p = 1.00813$ 原子質量單位), 質子就是氫的原子核。用符號 p 表示。

中子是不帶電的粒子, 其質量約與質子相等(更正確些 $m_n = 1.00898$ 原子質量單位)或 1.6747×10^{-24} 克, 在自然界中它並不單獨存在, 它是在原子核受了外來粒子的轟擊而起變化時, 才從核里釋放出來的。中子在處於自由狀態時是不穩定的, 它會衰變成爲一個氫核(質子)、一個電子和一個中微子, 衰變的半衰期為 12.8 分鐘。若用公式表示, 則爲



這裡 ν 代表中微子, 它是一種質量十分微小的中性粒子, 它的質量比電子質量的 $\frac{5}{10000}$ 還小; Q 代表在這衰變過程中所釋放出來的能量。

任何一原子核, 都是由 Z 個質子和 $A-Z$ 個中子所組成的。質子和中子數目的總和就等於原子的質量數(A)。質子的數目就等於核所帶的正電荷數。例如氦⁻⁴ (${}_2\text{He}^4$) 是由二個質子和二個中子組成的, 鈾⁻²³⁸ (${}_{92}\text{U}^{238}$) 和鈾⁻²³⁵ (${}_{92}\text{U}^{235}$) 是分別由 92 個質子和 146 個中子、92 個質子和 143 個中子所組成的。

雖然在帶有同種電荷的核粒子(質子)之間有相斥的靜電庫倫力的作用, 但是原子核却是很穩定的體系, 此體系很難受外來作用的影響, 是什麼原因使核子結合成牢固堅實的原子核呢? 這是在於核子之間除了質子與質子之間存在靜電斥力以外, 在核子之間(質子與質子、中子與中子以及中子與質子之間)尚存在著一種很强的具有引力性質的力, 叫做核力。核力的性質既不同於電力, 也不同於引力, 它能夠克服質子與質子之間的靜電斥力而把核子凝集成原子核。關於核力的詳細情形還有很多地方沒有弄清楚, 但是有些特性是已經確定了的(Д. Д. Иваненко),

1. 力程短。電磁作用力隨著兩個帶電粒子間的距離的增大而減弱, 核力也是如此, 不過減弱的比較快。當兩個核子間的距離小於 3×10^{-13} 厘米時, 它們之間有很強的作用力, 而且比電磁力要強的多。但當距離大於 3×10^{-13} 厘米時, 作用力就很快的減小到接近於零。所以說核力是一種短程力。

2. 中子與中子之間、中子與質子之間以及質子與質子之間的核力大致是一致的。

3. 核力具有飽和性。差不多所有的原子核的密度都相同, 只有最輕和最重的原子核例外, 有關這一點的解釋是這樣的: 核內每一核子僅與鄰接核子相作用, 而和其它相距很遠的核子則沒有相互作用。若是核力作用於遠距離, 那麼每一核內核子就要和所有其

余的核子相互作用，而原子核的密度則將隨核內核子數的加多而增大。由於原子核具有近乎相同的密度，所以核的體積與核內的核子數，亦即與質量數 A 成正比。這種核子只能和相鄰核子作用，而不能和遠鄰核子作用的性質，就叫做核力的飽和性。

三、同位素 在研究放射性元素的性質及其在門捷列夫周期表中的位置之後，發現了同位素。有些新分離出的元素與過去已知的元素它們之間除了原子量不同之外，其它化學性質都是一樣的，以致不能不把它們放在周期表的同一格內。例如由瀝青礦中分離的元素鐳，在化學性質上與元素釷毫無區別，而它們僅僅在放射性上有區別，鐳原子衰變比釷原子衰變要快得多。這些具有相同化學性質的不同原子就稱為同位素。

同位素就是質子數目相同而中子數目不同的原子；也就是原子序數相同，化學性質也相同，在周期表上的位置也相同，而質量數不相同的原子，就叫做某元素的同位素。在歷史上，人們利用了質譜儀首先發現元素氖原來是三種氖原子的混合物，它們的原子量是19.998860, 21.998270和21.000589，上面所說的這三種氖原子，氖²⁰($_{10}\text{Ne}^{20}$)、氖²¹($_{10}\text{Ne}^{21}$)、氖²²($_{10}\text{Ne}^{22}$)就都是氖的同位素。這三種氖的同位素，在自然界中是以某一定的比例混合起來的。氖²⁰的數目占氖原子總數的90.92%，氖²²占8.82%，而氖²¹占0.26%，不管我們在什麼地方得到的自然界的氖，它們的比例總是不變的。進一步的研究證明，大多數元素都是由若干種天然同位素以一定比例混合而成的。同位素的原子質量通常稱為同位素質量。

穩定的和不穩定的同位素：

穩定的同位素是指原子核的結構不會自發的發生改變的同位素，而不穩定的同位素亦稱為放射性同位素，它與此相反，即使不受任何外在原因的作用，原子核的結構會自發的產生變化，在這變化過程中，核將放射出 α 射綫（即氦核）、 β 射綫（即電子）、 γ 射綫（一種高能量的電磁波）或 β^+ 射綫（即正電子），或者在核外俘獲一個繞行電子。這些現象統稱為核衰變，將在第二章第二節里詳細討論。

在自然界中原來就存在的不穩定的同位素，稱為天然放射性同位素，而用核反應的方法產生的不穩定同位素，稱為人工放射性同位素。隨著原子核物理學的發展，已經可以用人工的方法來製造各種元素的同位素。到目前為止，同位素的總數已超過一千種，同位素的研究，一方面推動了原子核物理學的發展，另一方面它又被廣泛地應用於生產和其它各門科學中。特別是放射性同位素的應用，更有極重要的意義，現在醫學和生物學上常用的放射性同位素有：碘¹³¹、磷³²、錒⁹⁰、碳¹⁴、鈉²⁴、鐵⁵⁹、鈷⁶⁰、鉀⁴²、鈣⁴⁵、碲⁷⁶、硫³²、銻¹³⁷、金¹⁹⁸、鐳²²⁶……等，這些將在第二篇中進行討論。

第二節 放射性 放射性衰變的規律 放射性的單位

一、放射現象的發現 1896年法國物理學家H. Becquerel在研究鈾鹽時，發現鈾的化合物能使附近的包在黑紙裏面的照相底片感光，他由此斷定鈾能不斷地自動放射出某種看不見的、穿透力相當強的射綫。

兩年後(1898年)居里夫人(M. Sklodowska Curie)發現大多數含鈾的礦石的放射性強度和礦石內鈾的含量成正比，但是有一種瀝青鈾礦的放射性強度卻比按照其含鈾量計算的放射性強度要大四倍。她認為這種瀝青鈾礦中有一種放射性比鈾大得多的未知物質存在。從這個推論出發，她和她的丈夫居里(P. Curie)經過艱苦的工作，最後從30噸瀝青鈾礦中提取出2毫克放射性非常強的氯化物。這個化合物的性質很象氯化鋇，因此，按照

門捷列夫週期表，这个和氯化合的新元素應該和鋇同一族，就應該填在这一族的一个空格——第88号元素的位置上，他們把这新元素叫做鐳。后来从原子量証明它的原子序数的确是88。

此后，居里夫妇同时还發現另一种放射性很强的新元素釷（原子序数是84）及釷（原子序数是90）。其后科学家們又陸續發現了89号元素錒及91号元素鐳等。

进一步的实验証明，这种不可見的射綫，是来自鈾、釷、釷、鐳等原子核的本身，与其化合物的性質無關，并不需要外界的任何作用，它們的原子核能自行放出不可見的、具有穿透能力的射綫，此种性質称作“放射性”。

現在知道，原子序数从84起的所有元素都有天然放射性，原子序数小于84的某些元素（如鉀）也具有天然放射性。放射現象的發現是人类历史上的一件大事，它使人类的知識深入到原子的深处——原子核中去。

二、各种放射綫的本質 放射性物質放射出来的究竟是什么东西呢？经过研究証明，放射性物質放射出来的輻射并非是單一的。如果在鉛盒子里面放一点含有鐳的放射性制剂（圖1-3），鉛盒子上开一小孔，再把这个裝置放在强的磁場中，这放射性制剂所放射出来的射綫，在磁場中就可以分解成为三种独立的射綫；一种向左，一种向右，一种沒有偏轉，仍旧按直綫方向射出来。这样就知道第一种向陰極偏轉的射綫帶正电，第二种向陽極偏轉的射綫帶負电，而第三种不偏轉的射綫不帶电，这三种射綫依次叫做 α 、 β 和 γ 射綫。

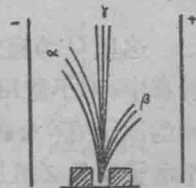


圖 1-3 从鐳源中放出的三种射綫

1. α 射綫 它是帶正电的高速粒子流，这种粒子叫做 α 粒子，它是氦原子核（帶两个正电荷，質量差不多是4个氧單位，写作 He^{+4} 或 ${}^4_2\text{He}^{+4}$ ），而且也由2个質子和2个中子所組成。它从放射性元素的原子核中以高达每秒2万千米（公里）的速率放射出来（用这样的速率，只要兩秒鐘就可繞地球一周）。但是它很容易被物質吸收，一張紙就可以阻挡 α 射綫的透过。

2. β 射綫 经过实验証明，它就是电子流或正电子流，在第一种情况下我們称之为电子衰变（ β 衰变）；在第二种情况下我們称之为正电子衰变（ β^+ 衰变），天然放射性同位素沒有正电子衰变，它是人为放射性元素所特有的。它們的速率更高，每秒約二十多万千米。它們所具有的穿透力較 α 射綫要大得多，可以透过鋁箔。

3. γ 射綫 它是一种光子流，是电磁輻射，它的性質和X射綫十分相似，各种形式的电磁輻射（如可見光、紫外綫、紅外綫、X射綫和 γ 射綫等）的区别是在于其光子能量的不同，可見光是低能光子流， γ 射綫是高能量的光子流。光子是輻射的單位，它不帶电，具有一定的質量与能量，它以光速（在真空中是每秒三十万千米）运动的粒子，它的穿透能力極强。

虽然各种射綫它們的本質是不同的，但是它們有許多特性是相同的。

（一）都能使物質电离，其中以 α 粒子最强， γ 光子最弱， β 粒子介于二者之間。

（二）它們都能引起生物学的和化学的作用，特别是都能使照相乳膠感光。

（三）都具有一定的貫穿能力，其中以 γ 射綫最强， α 射綫最弱， β 射綫居中。

（四）在放射过程中都不断放出能量，使周圍物質吸收后溫度升高。

（五）都能产生螢光。

三、原子核衰变 放射性同位素的原子核自發的發生变化而放射出某一种粒子(如 α 、 β 、 β^+ 等)或者 γ 射綫,或者核外俘获一个繞行电子,这种現象称为核衰变(或核蜕变)。核衰变进行的速度完全不能以外加因素(如温度压力的改变、电場或磁場、或讓他們参加各种化学变化等)加以改变。有的同位素衰变得很快,有的則很慢,每个同位素具有各自的特性,衰变后的核有的是稳定的,有的是不稳定的而会繼續衰变。通常把衰变前的核称为母体(核),衰变后的核称为子体(核),当然如果子体(核)会繼續衰变的話,則有第一代、第二代……子体(核)之分。

1. α 衰变 由放射性同位素的核放射出 α 粒子的衰变,称为 α 衰变。一个原子核經 α 衰变以后,核的电荷数就少2,即原子序数少2(在週期表內向左移动兩格),質量数少4个單位。用 X 代表母体(核), Y 代表子体(核),并以下指标表示原子核的电荷数,以上指标表示其質量数,則 α 衰变可用下式表示

$${}_Z X^A \longrightarrow {}_{Z-2} Y^{A-4} + \alpha + Q \quad (1-1)$$

这里 Q 为衰变能,其值应为母体核的質量和子体核及 α 粒子的总質量之差,但在实际計算中,都不能用原子核的質量,而用連同繞行电子質量計算在內的同位素質量,这样,母体的原子有 Z 个繞行电子,但子体的原子則只有 $Z-2$ 个繞行电子,比原来少了两个,这两个电子質量必須加进去才行,因此

$$Q = m_Z - (m_{Z-2} + 2m_e + m_{\alpha e})$$

此处 m_Z 和 m_{Z-2} 分别为母体和子体同位素質量, m_e 和 $m_{\alpha e}$ 分别为电子和 α 粒子的質量,但 $2m_e + m_{\alpha e} = m_{He}$ 为氦的同位素質量,所以

$$Q = m_Z - (m_{Z-2} + m_{He})$$

式(1-1)若采用同位素質量,則应改为

$${}_Z X^A \longrightarrow {}_{Z-2} Y^{A-4} + {}_2 He^4 + Q \quad (1-2)$$

如果要自發的發生 α 衰变,則 Q 值必須为正,也即母体的質量必須大于子体与氦原子的总質量,否則 Q 值必为負,也即表示不是自發的發生衰变,而必須吸收能量才能發生 α 衰变。所以要自發的發生衰变,必須

$$m_Z > m_{Z-2} + m_{He}$$

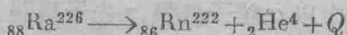
例 1. 我們已知鉀 $^{87}({}_{37}Rb^{87})$ 是放射性的,現在要知道它是否可以放射 α 粒子?

我們先假定它是可能的,則根据(1-1)式有



由同位素圖查出 ${}_{37}Rb^{87}$ 的同位素質量 $m_{Rb} = 86.93709$ 原子質量單位, ${}_{35}Br^{83}$ 和 ${}_2He^4$ 的同位素質量分別为 $m_{Br} = 82.94159$ 原子質量單位和 $m_{He} = 4.003873$ 原子質量單位, $m_{Br} + m_{He} = 86.94546$ 原子質量單位,显然 $m_{Rb} > m_{Br} + m_{He}$ 的条件不能成立,所 ${}_{37}Rb^{87}$ 不能作放射 α 粒子的衰变。

例 2. 鐳 226 的衰变,可用下列反应式来表示



${}_{88}Ra^{226}$ 的同位素質量 $m_{Ra} = 226.09574$ 原子質量單位,

${}_{86}Rn^{222}$ 的同位素質量 $m_{Rn} = 222.08663$ 原子質量單位,

${}_2He^4$ 的同位素質量 $m_{He} = 4.00387$ 原子質量單位,

由此計算得 $Q = m_{Ra} - (m_{Rn} + m_{He}) = 0.00524$ 原子質量單位,得 Q 为正值,表示鐳 226 可自

發地进行 α 衰变, 根据質能联系定律, 与此值相应的能量应为 $0.00524 \times 931.2 = 4.88$ 百万电子伏特(Mev)(1 百万电子伏特 $= 1.6 \times 10^{-6}$ 尔格), 此能的絕大部分(4.79 百万电子伏特)为 α 粒子的动能, 一小部分变为反冲核 Rn^{222} 的能量。

作 α 衰变的天然放射性絕大部分是属于原子序数大于 82 的同位素, 低于 82 者只有四个元素, 人造的放射性同位素大部分均不作 α 衰变, 即使作 α 衰变者, 其原子序数亦大多数大于 82。

由一种同位素放射出来的 α 粒子的能量是單一的, 但是伴有 γ 射綫的 α 衰变的同位素常常放射出来不只一种能量的 α 粒子, 例如 $_{88}\text{Ra}^{226}$ 衰变就有二种方式(圖 1-4); 其中一种伴有 γ 射綫。它的 α 粒子的能量就有两种, 一种为 4.777 百万电子伏特占总强度的 94.3%, 另一种为 4.589 百万电子伏特占总强度的 5.7%, 它的發生可以这样来理解, 当鐳放射出能量为 4.589 百万电子伏特的 α 粒子而变成处于激發状态的氡²²², 然后很快的躍迁到氡²²² 的基級而放射出能量为 0.188 百万电子伏特的 γ 射綫。

2. β 衰变 由放射性同位素的核放射出 β 粒子的衰变, 称为 β 衰变。由于 β 粒子就是电子, 它的質量要比原子質量單位小 1840 倍, 所以它的質量近于零, 而所帶的电荷是一个基本負电荷的电量。因此一个原子核經 β 衰变时, 核的电荷数增加一單位, 即原子序数增加 1 (在週期表內向右移动一格), 而質量数保持不变。原子核內本身沒有 β 粒子存在, 它是由中子轉变成質子而放出的負电子, 中子本身是中性的, 若其本身減掉一个負电子, 則在其本身上即存留同样电量的正电荷, 即可以看作核內多了一个質子, 但总的質量数不变。 β 衰变可用下式表示

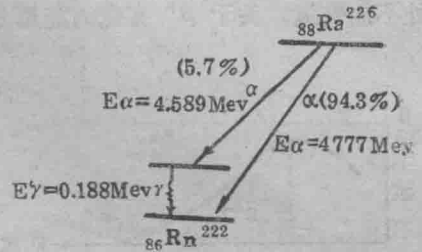


圖 1-4 $_{88}\text{Ra}^{226}$ 的衰变圖

$${}_Z\text{X}^A \longrightarrow {}_{Z+1}\text{Y}^A + \beta + \nu + Q \quad (1-3)$$

式中 ν 为中微子, 是种不帶电的微小粒子, Q 也是表示衰变能, 其值可以从母体的質量和孩子体、 β 粒子和中微子的总質量差来求得。但在实际应用中用同位素質量来計算, 原来母体的同位素質量包含 Z 个电子的質量, 而子体的同位素質量則包含 $Z + 1$ 个电子的質量, 無形中多計算了一个电子的質量, 所以在計算中必須減去, 因此

$$Q = m_Z - [(m_{Z+1} - m_e) + m_\beta + m_\nu]$$

而中微子的質量十分微小($m_\nu \approx 0$)可以略去不計, 同时 $m_\beta = m_e$, 所以上式可写成:

$$Q = m_Z - m_{Z+1}$$

同样如果要自發的發生 β 衰变, Q 值必須为正值, 因此要自發的發生 β 衰变, 母体的同位素質量必須大于子体的同位素質量, 故有

$$m_Z > m_{Z+1}$$

核衰变时放射出来的 β 粒子, 在被物質阻止之后, 就成为自由电子, 和一般的电子没有什么不同, 但为了区别起見, 通常称从核里出来的电子为 β 粒子或 β 射綫。

从(1-3)式可以看出, β 衰变有三个生成物, 即 ${}_{Z+1}\text{Y}^A$ 、 β 和 ν , 而衰变时所放出的衰变能为这三者所共有, 各种粒子所帶的能量又不是固定的, 同时由于子体的質量要比 β 粒子的質量大几千倍乃至几十万倍, 故子体所帶走的能量是微不足道的, 因此

$$Q = E_Y + E_\beta + E_\nu \approx E_\beta + E_\nu$$