

157-45

电离辐射对 天然及合成高聚物 的效应

F. A. 博維 著

科学出版社

Polymer Reviews, Vol. 1.

FRANK A. BOVEY

THE EFFECTS OF IONIZING RADIATION
ON NATURAL AND SYNTHETIC
HIGH POLYMERS

Interscience Publishers, 1958

内 容 简 介

本书为 H. F. Mark 主编的高分子进展 (Polymer Reviews) 的第一卷, 对于电离辐射 (高能辐射) 对高聚物的效应进行了总结。首先概述了辐射化学的基础, 特别综述了高分子辐射化学的理论与实际。论述了辐射交联与断键的统计理论。然后分章总结了碳氢高聚物、丙烯酸酯及甲基丙烯酸酯类高聚物、含氮及氟的高聚物、二烯类高聚物、缩聚高聚物以及天然高聚物的辐射效应。书末附有高能辐射对高聚物的效应的数据。

本书适用于在 高分子化学、辐射化学、特别是高分子辐射化学领域中从事研究、教育与学习的科学家、工程师与研究生等的阅读与参考。

电离辐射对天然及合成高聚物的效应

F. A. 博維 著

錢保功等譯

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业许可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1962 年 5 月第一版

书号: 2523 字数: 217,000

1962 年 5 月第一次印刷

开本: 850 × 1168 1/32

(京) 0001—6,550

印张: 8 1/2

定价: 1.30 元

“高分子進展”導言

在最近几年中,在分子科学的某些学科如离子引发、鑲嵌及接枝共聚、高分子結晶机理、高分子輻射化学、聚电解质及两性电解质的性质等方面,都有較快的和惊人的进展。所有这些学科几乎都仍在繼續生长阶段,距离其終点还远得很。然而其中的大多数学科已累积了許多有意义的結果,并且在許多場合中还有着将来发展的新前景。

因此,我們同意許多作者的意見,即适当篇幅的总結性論著对于这些領域中的工作者将有所帮助,同时对于从事相邻与有关問題的研究工作者亦将引起其兴趣。“高分子进展”的重点将放在这些原則上,即促使新的学科生长,并将我們所知的真实情况合理地充分表达出来,以及将那些估計能在最近控制其发展的概念和方法提出綱要。

作者和出版者希望这些丛书宁可让它放在实验桌上被藥品染污,而不让它留在书架上保持整洁。同时,不論对本丛书的形式与內容,都欢迎提出意見和批評。

H. Mark

1953年1月

原 序

在 1942 年，当第一个原子核鏈式反应在芝加哥大学实现时，人类进入了一个新时代。这一事实，对于每一知道此事的人都是明显的，不必要在这里論述。我們仅想指出：輻射时代的重要方面是核反应器的強力电离輻射对周围材料的影响問題，即普通的結構材料，如普通的陶瓷、玻璃、金属、塑料、橡胶等能否在实际工作所需的期間內耐得住強力的輻射？

核反应器的設計者，至少在早年是这样，主要仅考虑了上述五类材料中的前三类所发生的变化。这些变化常常是深刻的而且往往是有害的；对于这些变化的理解，是原子核反应器設計与运轉成功的首要条件。对于这些无机物质的輻射效应的实际观察与理論解释已經有了显著的进展时，大約仅在六年以前，开始发现在有机高聚物（塑料和橡胶）中也发生深刻和奥妙的变化，而这些变化有着本質的不同，并且不是常常有害的。某些塑料，特别象聚乙烯，当用中等剂量的輻射处理后即变得坚韧且不熔融；而另一些則强度变弱甚至脆裂。但是，如果剂量极大时，則几乎所有的塑料和橡胶都被毁坏或变得无用。在多年前早已知道，小的有机分子在电离輻射的作用下能够分解或聚合，但对于大型的高分子則这些反应变得更加显著，在这本书中我們試将其理由加以闡明。

随着这一发现之后的深刻研究系由下述两方面所推动：首先，研究如何促进有利的反应而避免有害的反应，即将高分子鏈的交联作用加速而将断鏈作用阻滯，如此可发展硫化橡胶与韧化塑料的实际方法。其次，为了設計耐輻射的高聚物并适用于核设备，需研究如何不促进所有的反应。讀者将会知道，这两条途径的任何一条仅有有限的进展。我們仍不真正理解反应是如何进行的，因而也就不知道如何去加速或阻滯特殊的效应。而关于对电离輻射

特別穩定或敏感的高聚物的設計,則尙无显著的进展。

在研究輻射与合成高聚物的相互作用更早之前,曾研究輻射与活細胞的相互作用。从人类安全与基本科学的观点看来,后一領域也是极重要的。但是,这两个領域包括着相同的基本原理,并且几乎涉及相同的基本反应,因此实际上是一个領域。在两个領域中的任务,是在于发现高分子鏈在輻射的作用下交联、断鏈及其他反应是如何进行的。在細胞中,我們所涉及的是蛋白質和核酸分子。我們一般地知道这些高聚物的組成与結構,但所有的重要問題則仍不清楚。除掉胰島素这一簡單的情况外,我們还不知道結構单位——氨基酸与核貳——是如何排列的。关于輻射对它們起什么作用,以及这些作用如何被有机体轉为輻射病、促使組織的破坏与組織的生长(两者都可发生)以及基因突变等等,我們也知道得极少。最难理解的是:那种对体外絕大多数高聚物不足以发生任何可觉察变化的小量輻射,如何会使細胞或整个有机体发生巨大的变化而致死亡。自从1895年 Röntgen 发现X射綫以及1896年 Becquerel 发现放射性以来,这些問題就极为重要,而且随着能源強度的不断增強而进行着研究。先驅工作者对于高能輻射的致死效应几乎毫无所知,因而其中許多人曾遭遇到悲慘的死亡。而到現時,我們已为輻射的直接效应以及更潛在的遗传效应的危险所喚醒。但是,虽然进行了許多研究工作,迄今我們还很难說已站在理解的門口。在末一章中,我們將論及这些研究的更基本的化学方面。

本书是批判性的总结,而不是詳尽的专著。其目的是把最有意义的基本研究——其中大部分是最近的研究——表达出来。可是,实用的或技术性的研究并没有忽略,因为关于某几类高聚物这是仅有的报导。专利文献則很少引用,因为在考虑到基本数据时这种文献有其明显的局限性,所以仅偶而引用了一些。

作者希望这一对我们近代知識的簡短总结可以促进进一步的研究。为此,曾特別努力指出这一知識中較显著的缺陷,这些缺陷既多且大。

作者愿对 A. R. Shultz 博士表示感謝，因他曾进行了促进性的討論，且曾在編写第四章时給了极大的帮助。Shultz 博士本人的研究工作对这一領域极有意义，且不断作出貢獻。他曾对本书全部手稿进行了詳尽的校閱，但留下的任何錯誤应仅归于作者本人。

F. A. Bovey

St. Paul, Minnesota

1958 年 1 月

俄譯本序言

关于輻射对于高聚物的作用，不仅对于从事在技术上利用高聚物材料的工程师和学者具有很大的兴趣，而且对于研究輻射对生命过程的作用的生物学家也是很重要的。最近几年来，虽然在这方面已經出現了相当多的文献，但 F. Bovey 的这本书还是在輻射化学这一重要领域中第一本系統的总结。

这本书有不少缺点，它还只是一些片断的不完整的叙述。一方面这是由于可靠的实验資料还不够，同时也是由于高聚物的輻射化学和物理化学发展得太快的緣故。在这方面所积累起来的資料还缺乏一致的解释；建立关于高聚物輻射化学变化的可靠理論还是今后的任务。在一切可能的地方，作者都指出了还在爭論和尚未解决的問題，这种問題在这样一个年輕的科学领域中是很多的。

翻譯这本书的时候，对原书沒有作任何修改，只是改正了一些錯誤和錯字。在这本书里几乎完全沒有注意到苏联学者在这方面的工作；这些工作的主要部分是在最近二、三年內发表的。因此在本书的后面附有补充文献表，其中包括了研究輻射对高聚物作用的大部分俄文文献，同时也列出了一些翻譯成俄文的外国文献。

F. A. Bovey 的这本书，虽然有某些不足之处，但仍不失为很难得的一本参考材料。向那些从事在強烈輻照下利用着高聚物的研究工作者和工艺师、研究高聚物改性的化学家以及放射生物学家介紹这本书是有益的。这本书对高等学校高年級同学也是有用的。

Ю. С. Лазуркин

譯 者 的 話

高分子輻射化學是隨着原子能和平利用事業的發展以及高分子科學與工業的進展而發展起來的一門新興學科。在最近十年來，這門學科在整個輻射化學與高分子化學領域中進展得特別迅速，在原子能-高分子時代中開創了其自身發展的途徑並取得了顯著的成就，並提出了在理論上與實際上重大的與基本的問題。同時還對其他鄰近學科與領域起了推動與促進作用，例如促使停滯已久的光化學得到新生、推動固體（特別是催化劑與半導體）輻射化學和輻射電化學進一步開展、以及促進輻射生物學更進一步發展，等等。

高分子輻射化學的基本科學任務是：(1)提高現有高分子材料的輻射穩定性，創制耐高能輻射的並具有綜合物理-機械性能的新型高分子材料；(2)在高分子材料的製備與改性過程中充分利用高能輻射的特點，使得輻射聚合與輻射改性方法能在高分子工業生產中成為特種生產技術與方法。這些科學任務，對於我國社會主義建設與國防事業無疑是必要的，而對於在我國如何在原子能事業中利用高分子材料以及在高分子事業中如何利用原子能更具有技術革新的意義。

本書的俄譯者對原書的優缺點曾有概括的說明，中譯者完全同意。同時需強調指出的是：原書是一總結性的著作，並未論及高分子輻射化學的全貌，例如輻射聚合這一部分即不在本書範圍之內。再者，原書系在1958年出版，近年來的成就當然不能包括在內；因之，若欲全面了解高分子輻射化學的近代成就，尚需進一步閱讀有關的專著、總結與論文。

最後需要指出的是，在原書第四章中關於高分子輻射交聯的統計理論，錯誤在其出發點，因而在結論上有着嚴重錯誤之處，這

已根据唐敖庆教授的有关理论加以适当注明,但未作修改。

书末除附有俄译本中所附列的俄文文献外,并加列了有关的中文文献。

本书的翻译得到了唐敖庆教授的鼓励与指导;本书的出版得到了科学出版社的支持与安排,特此一并致谢。若有翻译不当之处,尚望提出批评。

参加本书的翻译工作者有:第一、二章为钱保功,第三、四章为江元生,第五、六章为梁映秋,第七、八、九章为王霞瑜,第十章为陶慰蓀、梁杉桓,校阅者第一至九章为钱保功,第十章为陶慰蓀。

钱保功

长春, 1960年8月

第一章

电离辐射的性质

在本书中,将叙述X辐射、 γ 辐射、电子、质子、氘子、 α 粒子及中子等电离辐射对高聚物(高分子化合物)的作用。为便利起见,我们将这些辐射统称为“电离辐射”或“高能辐射”,虽然这些名词并不能精确地描述中子辐射。这些辐射的吸收与紫外光及可见光等长波辐射的吸收完全不同。除掉极软的X射线外,这种吸收是很少选择性的,而几乎不依赖于化学结构。但是,电离辐射对高聚物的总效应则十分依赖于化学结构。在高聚物的辐射效应中,断键与交联两者皆可发生,并伴有脱氢(常导致双键的形成)以及一氧化碳、二氧化碳、甲烷以及其他小分子等碎片的产生。根据高聚物的结构,这些反应以极不相同的速率并按极不相同的比例发生。

在详细讨论高能辐射对高聚物的作用之前,首先概述电离辐射的本质与性质,其产生与测量以及其对物质的作用。

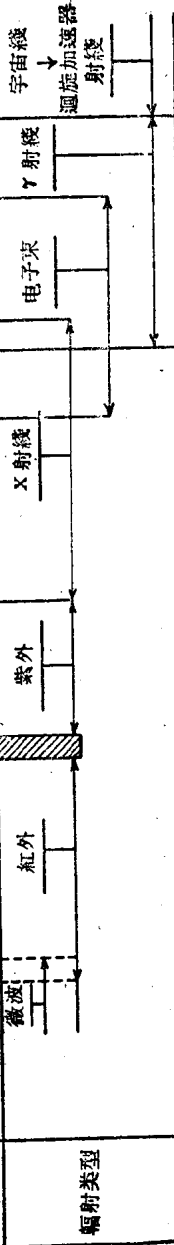
1. 高能辐射的能源及性质

a. 电磁辐射

电磁谱的X射线区域,常指从软X射线的 10^{-6} 厘米(100埃)至稍短于 10^{-8} 厘米(1埃)的区域,后者是液体及固体中的原子间距离(见表1.1)。

X射线的发生,系借加热阴极所发射出的电子流,在阳极或靶具有高正电势的影响下,使之击至高原子量的金属阳极或靶。X射线的产生,主要是由于电子在靶物质中的减速,即与光电效应相反,而式1.1可用以描述这两种现象:

表 1.1

	热能		化学能 (外层电子)	X 射线能 (内层电子)	核能	介子能
	平动能	分子及原子的振动				
波长	厘米	10^{-2} 10^{-3} 10^{-4}	10^{-5} 10^{-6} 10^{-7}	10^{-8} 10^{-9} 10^{-10}	10^{-11} 10^{-12}	
	埃	10^6 10^5 10^4	10^3 10^2 10^1	10^0 10^{-1} 10^{-2}	10^{-3} 10^{-4}	
波数	厘米 ⁻¹	10^6 10^5 10^4	10^3 10^2 10^1	10^0 10^{-1} 10^{-2}	10^3 10^4	
频率	周/秒	10^{12} 10^{13} 10^{14}	10^{15} 10^{16} 10^{17}	10^{18} 10^{19} 10^{20}	10^{21} 10^{22} 10^{23}	
能量	电子伏	0.1 1 10	10 ³ 10 ⁴ 10 ⁵	10 ⁶ 10 ⁷ 10 ⁸	10 ⁹ 10 ¹⁰ 10 ¹¹	10 ¹² 10 ¹³
	卡	10^2 10^3 10^4	10^5 10^6 10^7	10^8 10^9 10^{10}	10^{11} 10^{12} 10^{13}	
辐射类型						

$$\frac{1}{2} m v^2 = h(\nu' - \nu_0) \quad (1.1)$$

式中: m 是电子的质量, v 是电子的速率. $h\nu'$ 及 $h\nu_0$ 分别表示出射光子的能量及閾能, 后者是在光电效应中自金属中移去电子的能量. X射綫的最短波长(以埃为单位) λ 与施加于X射綫管的电压(V)之間的关系, 可近似表示为:

$$\lambda_{\text{最小}} = \frac{C}{\nu_{\text{最大}}} = \frac{1.24 \times 10^4}{V} \quad (1.2)$$

式中: C 为光速.

靶中电子的減速, 实际上使得发射出的光子具有某一范围的能量. X射綫譜是連續譜, 由式 1.2 所决定的高頻率极限开始, 延伸至較低的頻率, 其強度逐漸減低. 所有这些輻射的平均能量, 与相当于 $\nu_{\text{最大}}$ (由式 1.2 所求得者) 的半数的能量相近. 在这一連續譜上, 可找到若干具有較高強度的峯. 这些高峯, 仅能在較高电压时观察到, 相当于电子在靶原子中最內层之間的跃迁. X射綫譜常借使輻射撞击晶体(例如氯化鈉)而測定, 晶体的功用恰如分光光度計在紫外光或可見光范围内工作时的光柵. 根据 Bragg 公式, 当掠射角 θ 愈大时, 自晶体反射出的波长将愈长.

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

式中: d 为在散射晶面之間的距离, n 为譜的級序, 如第一級光譜、第二級光譜等等. 图 1.1 为从鉑靶所放出的X射綫譜, 系用氯化

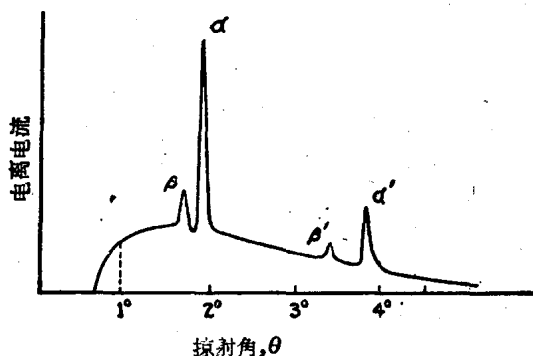


图 1.1 由鉑靶发射的X射綫譜

鈉晶体分析而得者。所显示的峯,相当于鉑的K系发射綫,在最小角度的一組是第一級光譜,第二組是第二級光譜。根据 Moseley 定律,这些峯的頻率的平方根系与靶元素的原子序数成比例。其他的峯系也可得到, L, M 及 N 相当于在外层中低能电子的跃迁。如需选择相当于某一特定綫的单色 X 輻射, 则可使散射角 θ 固定而获得。“白色”輻射当能借不用散射晶体而用一自靶直接发出的适当平行的光束而获得。

γ 輻射通常是在放射性原子核衰变时发射出, 同时伴有 α 或 β 粒子射出。当这些粒子发射出后, 原子核即处于激发态; 而当回至基态时即发射出 γ 輻射。自多种普通天然放射性元素发射出的 γ 光子, 具有几万电子伏*(ev), 相当于 0.05—0.1 埃数量級的波长(見下文及表 1.1)。鈾 C'' 具有 2.6 兆电子伏(Mev)的 γ 輻射, 有些強的能源具有与原子反应堆所产生的 γ 輻射相同的数量級(見表 1.2)。当起核蜕变反应时能产生極強的 γ 輻射, 例如, 当鋰核俘获一个質子时能得 17 兆电子伏的 γ 射綫。

放射性元素能显现十分复杂的、由明显的綫所組成的 γ 輻射譜。如輻射的波长不太短的話, 这种譜可用适用于 X 射綫的晶体衍射法稍加改进而測定。十分強的 γ 光子的能量, 可由从行星式电子层所击出的次級“內轉变”电子(見 8—9 頁)的能量来推算。

由上述可知, 在 X 射綫与 γ 射綫之間并无真正的区别。表 1.1 所表示的是这些光譜区域之間的通常界限。这种界限相当于下述事实, 即近年来最強的 X 射綫管均在約 400 千伏的电压操作, 而大多数 γ 輻射具有更高的能量。在过去 10—15 年中, 由于 Van de Graaff 静电加速器、直綫加速器、电子迴旋加速器、同步迴旋加速器等高能設備的发展, 能产生几兆伏的 X 射綫, 这包括或甚至超过 γ 輻射的能量范围, 使得这种界限完全消失。但 X 射綫与 γ 射綫这二名詞仍然有用, 我們仅用以区别自原子核外抑自原子核内发生的輻射; 必需指出, 在能量的基础上我們并无区别。

* 电子伏是一种能量单位, 相当于 1.60×10^{-12} 尔格; 1 兆电子伏 = 10^6 电子伏。

长波电磁辐射的吸收的初级过程即光子的吸收,其发生是单动的(即一次动作).继起的过程是激发与电离(后者在能量足够高时才发生),而当波长愈短时则这些过程变得愈为重要.就是这些继起的过程能产生化学效应,这将在第二章中加以论述.不管这些过程的本质与程度如何,由于这是一种单动的吸收过程,下述的定律仍是正确的:即当通过厚度为 dx 的物质时所吸收光子数 dn , 系与 dx 及准备被吸收的光子数 n 成比例. 因此, $-dn = \mu n dx$, 而 n 则与光强 I 成比例,故可得:

$$-dI/dx = \mu I \quad (1.3)$$

式中: μ 定义为吸收系数. 如在吸收物质的正面(即 $x = 0$ 时)的光强为 I_0 , 则将式 1.3 积分可得:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1.3a)$$

或

$$\ln(I_0/I) = 2.303 \log(I_0/I) = \mu x \quad (1.3b)$$

这与 Lambert 定律的表示式相同,对于所有的单色电磁辐射都精确地服从该定律. 上述关系式对于非单色辐射并非总是精确符合的,因为 μ 依赖于波长. 对于短波的 X 射线和 γ 射线,光子的吸收并非单动的,而仅在经过几次碰撞之后始能散射或吸收. 但是,散射光子在其通过吸收体时,一般并不再发生散射. 由于吸收仅是一次动作,吸收过程能精确地服从 Lambert 定律.

在式 1.3 中,由于 μx 的乘积是无因次的,故吸收系数的单位是所选取的 x 的单位的倒数. 通常采用四种吸收系数: (1) μ , 单位为厘米⁻¹; (2) μ/ρ , 单位为厘米²/克, 其时 ρ 是吸收体的密度, 其单位为克/厘米³, 而 x 的则为克/厘米²; (3) μ_e , 单位为厘米²/电子, 称为电子吸收系数, 其时 x 的单位为电子/厘米²; (4) μ_a , 单位为厘米²/原子, 称为原子吸收系数, 其时 x 的单位为原子/厘米². 如果所吸收的原子的原子量 A 及原子序数 Z 是已知的, 则这些系数可互相换算, 例如 $\mu_a = Z \mu_e$; $\mu/\rho = N(Z/A) \mu_e$ 等等, N 为 Avogadro 常数.

表 1.2 放射性同位素代表物
(按原子序数排列)

元素	原子量	原子序数 Z	半衰期	辐射能量 (兆电子伏)		形成方式
				β	γ	
H	3	1	11.8 年	0.018	—	$H^3(n, \gamma)H^2$
Be	10	4	2.5×10^6 年	0.555	—	$Be^9(n, \gamma)Be^{10}$
C	14	6	5.57×10^5 年	0.155	—	$C^{13}(n, \gamma)C^{14}$
P	32	15	14.3 日	1.701	—	$P^{31}(n, \gamma)P^{32}$
S	35	16	88 日	0.167	—	$S^{34}(n, \gamma)S^{35}$
K	40	19	1.3×10^9 年	1.33	1.46	天然存在
Sc	46	21	85 日	0.36, 1.2	0.89, 1.12	$Sc^4(n, \gamma)Sc^{46}$
Fe	59	26	47 日	0.271, 0.462, 1.56	0.191, 1.098, 1.289	$Fe^{56}(n, \gamma)Fe^{59}$
Co*	60	27	5.27 日	0.306	1.17, 1.33	$Co^{59}(n, \gamma)Co^{60}$
Zn	65	30	250 日	0.325	1.12	$Zn^{64}(n, \gamma)Zn^{65}$
Sr	90	38	2.8 年	正子	—	裂变 $Sr^{90} \xrightarrow{\beta} Y^{90}$ (23.6%)
Y	90	39	2.54 年	0.61	—	裂变
Zr	95	40	65 日	2.18	0.722, 0.754	$Zr^{92} \xrightarrow{\beta} Nb^{92}$ (65.1%)
Nb	95	41	35 日	0.364, 0.396, 0.883	0.745	裂变
Pd	109	46	14 小时	0.160	—	$Pd^{108}(n, \gamma)Pd^{109}$
Ru*	103	44	39.8 日	0.95	0.498	裂变
				0.217, 0.698		

Ru*	106	44	1.0 年	0.04	—	裂变
Rh*	106	45	30 秒	2.0, 2.44, 3.1, 3.53	0.513, 0.624, 0.87, 1.045, 1.55, 2.41	$Ru^{106} \xrightarrow{\beta} Rh^{106}$
Sb	124	51	60 日	0.50, 0.68, 0.95, 1.69, 2.29	0.121, 0.607, 0.653, 0.730, 1.708, 2.04	$Sb^{123} \xrightarrow{(n, \gamma)} Sb^{124}$ $Tc^{130} \xrightarrow{\beta} I^{131}$
I	131	53	8 日	0.605	0.364	裂变
Cs*	137	55	26.6 年	0.51, 0.117	—	裂变
Ba*	137	56	2.6 分	—	0.662	$Ca^{137} \xrightarrow{\beta} Ba^{137}$ (26.6分)
Ce*	144	58	282 日	0.17, 0.3	0.134	裂变
Pr*	144	59	17.5 分	2.97	极弱	$Ce^{144} \xrightarrow{\beta} Pr^{144}$ (23.4日)
Pm*	147	61	2.6 年	0.223	—	裂变
Au	198	79	2.69 日	0.97	0.441	$Au^{197} \xrightarrow{(n, \gamma)} Au^{198}$
Hg	203	80	45 日	0.208	0.279	$Hg^{202} \xrightarrow{(n, \gamma)} Hg^{203}$
Tl	204	81	4.0 年	0.765	—	$Tl^{203} \xrightarrow{(n, \gamma)} Tl^{204}$
RaE(Bi)	210	83	5.02 日	1.17 + α : 4.77	—	天然存在
Po	210	84	140 日	α : 5.3	0.773	天然存在
Rn	222	86	3.83 日	α : 5.49	—	天然存在
Ra	226	88	1590 年	α : 4.79	0.19	天然存在
Ac	227	89	13.5 年	β : 0.01 α : 4.95	0.37	天然存在
Th	232	90	1.39×10^{10} 年	α : 3.98, 4.2	—	天然存在
Pa	231	91	3.43×10^4 年	α : 5.01, 4.74	0.095, 0.294, 0.323	天然存在
U	235	92	8.9×10^8 年	α : 4.56, 4.40	0.162, 0.187	天然存在
U	238	92	4.51×10^9 年	α : 4.18, 4.23	—	天然存在

b. 粒子輻射

电子可在放射性物质衰变时产生,而称为 β 辐射。有许多放射性元素能产生 β 辐射(见表 1.2)。每发射出一个电子,原子核的原子序数即同时增加一个单位。从前曾设想过电子就这样在原子核中存在,但现在则明了电子的产生是在中子转变为质子与电子

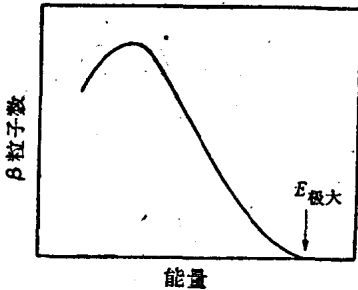


图 1.2 β 辐射的能量分布

时发射出来的。同时还知道,原子核系以量子化的能态存在着,这与外层电子相似,因此可以预期 β 粒子会以能量十分确定的谱带发射而出。但事实上并非如此。如图 1.2 所示,这种 β 辐射的连续分布曲线是 β 发射体的典型曲线(在 γ 辐射发射的场合下,可观察到粒子能的分立谱带,但这

是由于出射的 γ 光子所导致的行星状电子的光电发射;这是一种“内转变”过程,与原子核的 β 发射完全不同)。为了说明这种连续分布,曾假定“失踪的”能量(即在光谱上任何一点所观察到的能量与最大能量间之差额)是为一种称作中微子(neutrino)的极微中性粒子所带走。如假定电子及其结合能与原子核跃迁的能量相等,中微子即同时发射。自纯粹出于假设的中微子首次假定(1931)之后25年,其存在才在最近获得实验证实。

表 1.2 说明: β 粒子的最大能量可以有几万电子伏到3兆电子伏的范围。极强的辐射也可使从加热金属阴极所发射出的电子流经高压电场而产生。为此目的而产生1兆电子伏以上的首次设计是 Van de Graaff 静电加速器^[1]。在这一设备中,系将电子喷射至一转动的橡皮带或丝带上,使电子带至球罩形的电极中,电子在该电极中用一组接触点连续地移去。当球罩形电极用惰性气体围住时,即可产生几兆伏的电势。在球罩形电极与地面之间连有真空放电管。放电管主要就是X射线管,但在其底端不用靶而用一