

遗憾的是目前还没有相应的正常细胞的数据。

5. 大鼠肝细胞 1978 年贝尔实验室还用 ^{31}P NMR 谱^[10]研究了生理条件下大鼠肝细胞线粒体内和胞液之间的 pH 值差(ΔpH)。

他们获得一组曲线,曲线中 P_i 不是一个简单的单峰。在高场边有一小突起,说明线粒体和胞液之间可能存在 ΔpH , 因为已知缬氨霉素能使分离的线粒体内膜两边的 ΔpH 增加^[12], 因此他们在分离的完整大鼠肝细胞中加入缬氨霉素,然后在不同的时间,观察到这个小突起分裂出另外一个 P_i 峰,而且两个 P_i 峰拉得愈来愈开,说明线粒体膜内外的 ΔpH 增加了,这主要是因为胞液的 pH 从 7.1 下降到 6.91,而线粒体内的 pH 值保持不变所引起的。

相反,加解偶联剂 FCCP 以后,或停止供氧、或用氮代替氧以后,已分开了的 P_i 峰会逐渐合并成一个峰。说明线粒体膜内外的 ΔpH 减小了。

上述对肝细胞线粒体的研究证明, ^{31}P NMR 第一次为生理条件下,直接观察线粒体膜内外的 ΔpH 提供一个重要方法,这组实验结果是重要的,对于氧化磷酸化的化学渗透学说认为线粒体膜内外存在 H^+ 梯度,提供了有力的实验支持,对研究生物能问题极有帮助。而生物细胞的能量究竟是怎样获得的,在生物分子的运动、传输和光合作用过程中,都牵涉到这个问题。

结 语

近十多年来 NMR 技术的发展是很快的,磁场强度提高了约 4 倍,灵敏度提高了至少 20 倍,因此,70 年代后 NMR 就大踏步地进入到分子生理学的领域,上述二篇连载的综述,主要报道了 ^{31}P NMR 在活组织、活细胞及活器官研究方面的进展。

参 考 文 献

- [1] Hollis, et al.: *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **75**(4), 1086, 1977.
- [2] Damadian, R.: *Physiol. Chem. and Phys.*, **9**, 97, 1977.
- [3] Schr, P. A. et al.: *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **77**(1), 195, 1977.
- [4] Daniels, A. et al.: *Proc. Roy. Soc. London. B*, **187**, 353, 1974.
- [5] Dwek, R. A. (ed): *NMR in Biology*, p. 277, 1977.
- [6] Moon, R. B. et al.: *J. Biol. Chem.*, **248**, 7276, 1973. Henderson, T. O. et al.: *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **71**, 2487, 1974.
- [7] Gupta, R. K. *J. Biol. Chem.*, **253**, 6172, 1978.
- [8] Colman, A. et al.: *Europ. J. Biochem.*, **61**, 387, 1976.
- [9] Ugurbil, K. et al.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **75**(5), 2244; **75**(8), 3742, 1978.
- [10] Navon, G. et al.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **75**(2), 891, 1978.
- [11] Cohen, S. M. et al.: *Nature*, **273**, 554, 1978.
- [12] Pudem, E. et al.: *Europ. J. Biochem.*, **40**, 431, 1973.

[本文于 1979 年 5 月 29 日收到]

X 光电子能谱及其在生物学中的应用

田 佩 珠

(中国科学院生物物理研究所)

X 光电子能谱(简称 XPS)或化学分析电子能谱(简称 ESCA)是以测定物质电子结构为基础的urface谱学方法^[1-3]。自 1967 年问世以来,发展迅速。目前已是谱学领域中最活跃的分枝之一。它已广泛地用于物理、化学、微电子学和材料科学研究等方面,但在生物科学中的

应用还不普遍。众所周知,许多生物或生命过程是在液—固或气—固界面上进行的,因此在原子或分子水平上了解生物体系表面与界面的化学组成和结构对分子生物学研究来说是至关重要的,而 XPS 在这方面将有其独特的用处。

本文目的是通过对 XPS 基本原理的介绍和

对国外工作的评述,概要地说明 XPS 作为一种新的生物科学研究工具的潜力,以期引起生物物理和生物化学研究者重视。

一、基本原理

1. 光电过程 是物质受光激发后释放电子的现象。1905 年 Einstein 建立了这一过程的定量描述

$$Ek = h\nu - Eb - \Phi$$

Ek 是光电过程放出电子的动能, Eb 是电子的轨道结合能, $h\nu$ 是进行激发的光子能量, Φ 是电子逸出功(在实验中,相当于谱仪的功函)。光电过程中低能光子(如紫外光)只能激发原子的价电子或分子的外层轨道电子,而高能光子(如 X 射线)则有可能激发核心和外层电子;前一类是紫外光电子能谱(UPS)涉及的范围,而后一类是 XPS 的研究内容。

光电过程是光子与轨道电子相互作用的一步过程,始态是基态原子或分子,终态是离子。依据 Heisenberg 测不准原理:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

式中 ΔE 是谱峰宽度(电子伏特), Δt 是寿命(秒), h 是普朗克常数。由上式可知,内壳光电离是一个很快的过程(约 10^{-16} 秒),因此可以近似地认为被光子打出的电子的动能(Ek),按 Einstein 公式换算成结合能(Eb)后可以代表基态时原子中某一对应轨道的能量,这就是所谓的“冻结轨道近似”。但对于严格的轨道能量测定还必须加入弛豫能(因轨道收缩而附加的能量)校正项。此外,由于光电子发射时与原子或分子中外层电子相互作用造成伴随激发,另外轨道间不成对电子的耦合作用也可能产生多种伴峰——即所谓的“多体效应”。因此,严格地说 XPS 的终态而不是始态谱。对于元素鉴定和化学位移测定一般可以不考虑弛豫能贡献,而多体效应产生的伴峰常使谱的解释复杂化,但如加以利用也能获得极有价值的结构信息。例如从多重分裂可提供关于顺磁标本的自旋态和不成对电子的分布信息,而振起峰时常与大 π

结构相关等^[2]。

2. 化学位移 不同元素和不同电子能级的核心电子峰有特征的能量,光电过程中的 Eb 值是元素的标识性参数,这是元素定性分析的基础。但 XPS 用作化学研究工具,化学位移(ΔEb)这个参数更重要。图 1 是化学位移的一例,可以看出处于不同化学状态的同一元素有明显不同的峰位置。这种现象是化学结构鉴定的基础。XPS 是一种低分辨谱:位移/峰宽 $\approx 1-10$,这不利于结构分析。造成这种现象的主要原因是:能级本身以及 X 射线源的宽度。为了提高分辨可选较窄宽度的能级和单色化的 X 射线源。利用计算技术(逆褶积和拟合)也能有效地克服上述困难。

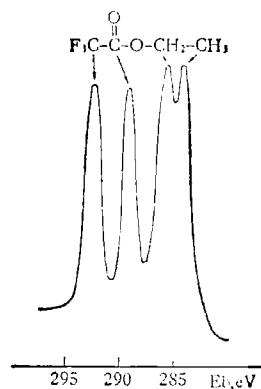


图 1 化学位移的例

结构鉴定可以用量子化学或其它理论方法算出预定结构的原子电荷,再与实验值相比较;也可以用经验的方法^[2,3]。目前看来后者比较实用。

3. 定量分析 XPS 不仅可以做元素定性鉴定和结构分析,也可能进行定量测量。按基本物理过程的定量模型描述还不成熟,但标准样品法和相对灵敏度因子法已被广泛采用。制备模拟生物体系的标准样品比较困难,因此相对灵敏度因子法对生物研究更有用。这种方法忽略了样品的母体效应,以 $F1s$ 或 $C1s$ 能级的强度为 1,列出各元素不同能级的相对强度比,并按下式求出样品中的组份含量

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_1 S_1}{I_2 S_2}$$

S 即为相对灵敏度因子, N_1/N_2 是两种元素的相对原子比, I_1 和 I_2 分别为测量的强度值。这种方法很简便, 但误差较大 (小于 50%), 只能作半定量分析。

4. 表面灵敏度 XPS 是一种表面谱学方法, 因为被测量的信号仅起源于表面以下十个分子层左右的厚度 (10—50 埃)。如果能量和角度选择适当, 则可将取样深度降低到一个或两三个单分子层厚度 (5—10 埃)。这种高表面灵敏度十分利于对生物膜与生化材料表面组份和结构以及生化表面过程的研究。

5. 剖面信息 (1) 改变电子能量和出射电子角度改变取样深度, 可以不破坏样品, 而获得超薄层 (5—50 埃) 的元素或化合物的剖面分布信息。(2) 离子刻蚀法。可用于对更深的剖面 and 界面研究, 用荷能 (1—10 千电子伏特) 的惰气离子束轰击样品, 逐层将表面物质剥离, 因此是一种破坏性方法 (举例见后)。应用时要特别注意优先溅射、离子注入和破坏样品等问题, 否则将会导致实验结果的错误解释。

6. 微区分析 常规的 XPS 技术不能进行微米量级的微区分析, 但生物样品常是不均匀体系, 因此了解不同物质或组份的空间分布是很重要的。1977 年 Hovland^[4] 首先实现扫描 XPS, 并成功地获得了百合花粉微粒的空间分布相 (图 2)。这可能是 XPS 发展的一个新的里程碑, 并为生物应用提供了新的可能性。但这种方法还有一些技术困难, 有待克服。

二、实验技术

1. X-光电子能谱仪^[2,3] 由下列几部分组成: 进样系统、制备/反应室、分析室、激发源、电子能量分析器、电子探测器、信号测量数据系统和真空系统。现代商品仪器常将几种激发源和分析器组合于同一超高真空系统内, 以实现同一样品的多种测量。

2. 样品制备 固体: 粉末固体样品可以压成薄片, 也可以撒布在导电胶带上或擦涂在软性金属基片上。坚硬的颗粒可压入铝箔中。大细胞或组织 (如皮肤、骨骼、头发等) 可以直接

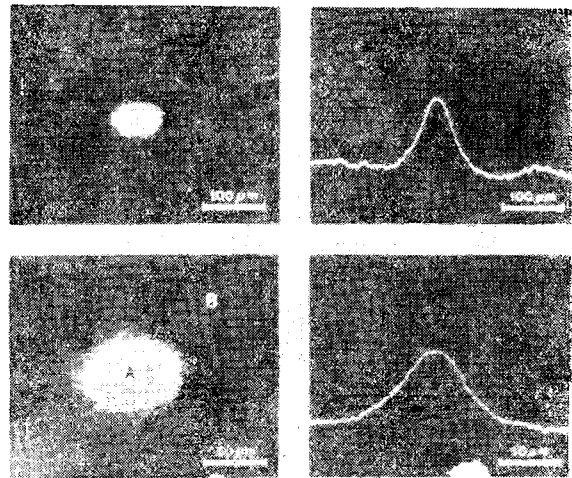
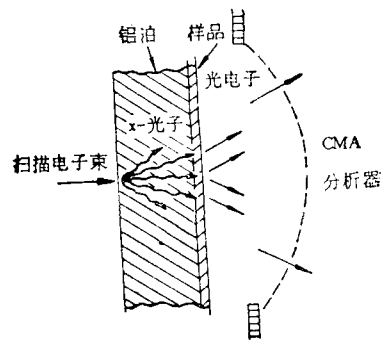


图 2 扫描 XPS 实验原理 (左) 和不同分辨时的氯元素像和线扫描图 (右)

进样。一般生物样品是非导体, 要注意在 X 射线照射期引起的表面电荷问题。充电效应可以用低能的泛射电子束来消除, 或用标准光电子线加以校正。

液体: XPS 的液体技术还不成熟, 但生物样品又常常是液体, 这是 XPS 生物学应用中需解决的问题。挥发性不高的液体可以低温冷冻成固体后进行分析, 较高挥发性和稳定的液体可以升温使成气相后在专门的气体池内测量。

辐射损伤问题: 生物样品长期暴露于 X 射线辐射下, 可能观察到 XPS 谱线发生变化, 但一般辐射变质的速率较慢, 因此通常辐射效应的影响可以忽略。对较易变质的样品可采用在某一能区内快速扫描, 或将样品冷却到液氮温度进行测定。

三、应用举例

1. 蛋白质和多肽 XPS 已用于蛋白质、

氨基酸等的结构判定和反应跟踪。图 3 是跟踪生化反应一例。(a) 中的 S 2p 窄峰是胰岛素氧化前三个二硫键的特征。(b) 中的两个峰表明与碘酸钾作用后反应产物中含有两种不同化学状态的硫, 与已知物对照证实处于较高结合能处的峰是磺酸根中的硫原子的特征。右侧峰位置与未氧化前的硫位置一致, 两峰面积比为 2.1/1, 从而证实了碘酸钾与胰岛素反应时, 仅 A、B 链间的两个二硫键被选择氧化, 而 A 链中的硫保持不变^[1]。

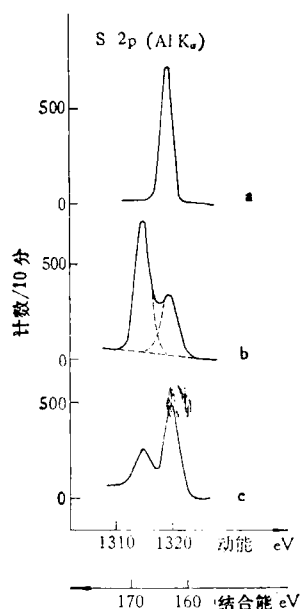


图 3 胰岛素的选择氧化裂解
a. 未氧化, b. 氧化, c. 部分氧化

近年来也发展了一些定量分析技术。Millard 等^[5]利用化学修饰法将高检测灵敏度的氟元素引入蛋白质中, 使牛血清清蛋白三氟乙酰化。XPS 谱中的 F 1s 谱线强度代表被修饰的赖氨酸的量, 测定结果与一般化学分析值一致, 误差小于 5%。Jones 等^[6]则采用内标法定量测定了肽分子中氨基酸侧链 γ -或 δ -位上的各种亚砷基团。

2. 酶 酶是 XPS 用于生物研究中较活跃的一个方面, 尤其对起运载电子作用的蛋白辅酶和一些带有辅助因子酶的研究较为广泛。

Kramer^[7]通过化学位移的测定, 确定了几种非正铁血红素铁蛋白中所含硫原子的性质,

并证实红色氧(化)还(原)蛋白中没有酸不稳定的硫, 只有四个半胱氨酸的硫。经过与 X 射线晶体衍射结果比较, 认为红色氧还蛋白中半胱氨酸的硫较弱地键合于铁, 两个原子之间很少或几乎没有有效的电荷转移。

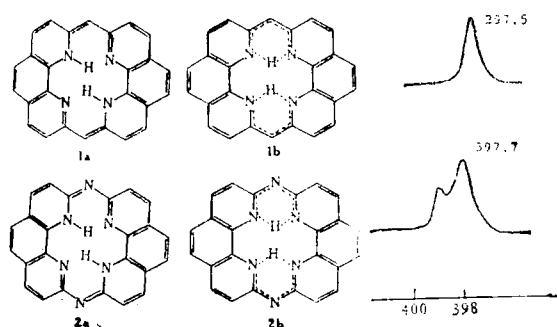
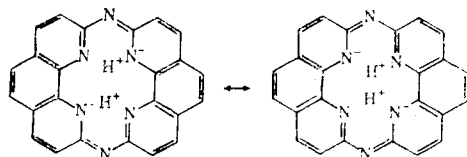


图 4 四偶氮大环(1)和六偶氮大环(2)
可能的结构式及其 N 1s 谱

结构 1a 应有两个不同的 N 1s 峰, 1b 则只应有一个; 2a 应有三个, 而 2b 应出现两个峰。

细胞色素是一类含血红素辅基的酶, Senō 等^[8]用 XPS 研究四偶氮大环、六偶氮大环及其金属络合物的电子和立体化学结构。从图 4 的峰位和峰形可以推论四偶氮大环内氢的不定域结构, 而六偶氮大环也有类似的内氢不定域性, 即谱图反映了 (1b) 和 (2b) 结构, 因为如果是 (1a) 或 (2a) 则分别应有两个和三个 N 1s 峰位。通过与模型化合物胺化酰亚胺及其溴化物比较 (图 5), 进一步表明六偶氮大环的中心氮原子上有负电荷 (其结合能高于 $\ddot{N}$ 、低于 $\dot{N}$) 而两个桥接的氮电荷接近于中性 (结合能近于 NH)。据此, 研究者对六偶氮大环提出了下述的共振式 (得到红外和核磁共振谱的证实)。



Winograd 等^[9]用 XPS 研究叶绿素 a 的水合作用, 利用原位升温监测结合水的脱水过程。通过 C 1s 和 O 1s 电子谱测量和计算机数据处理证实叶绿素 a 以单分子水合态存在, 当温度

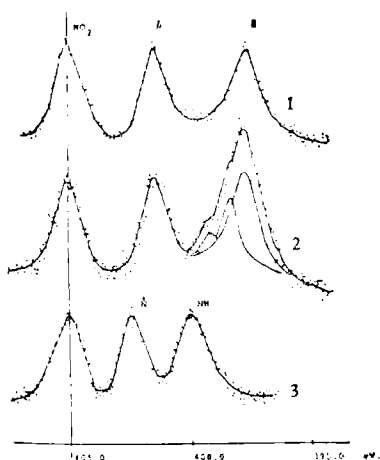


图 5

(1) 胺化酰亚胺、(2) 胺化酰亚胺与六偶氮大环化合物混合物和 (3) 胺化酰亚胺的溴化物 (3) 的 N 1s 谱。指定 (3) 中的 NH 为 N₁、(2) 谱中的三个组分分别对应于 N₂ 和六偶氮大环中内环的四个氮和桥接的两个氮。

高于 120°C 时, O 1s 谱的肩膀减小, 在 250°C 完全消失。

Weser 等对重要的微量元素与各种氨基酸、巯基化合物之间的相互作用以及谷胱甘肽过氧化物酶的催化部位等进行了系统的研究^[10]。他们测定了这些化合物中硒的氧化态以及因配位体不同所引起的 XPS 谱的变化, 以确定酶活性部位的化学结构和揭示活性基团的键合部位。Jung 等^[11]用 XPS 研究赤铜酶中的活性中心分布。这种过氧化物歧化酶由二个亚单位组成, 每 32600 克酶含有 2 克分子的 Cu⁺⁺ 和 Zn⁺⁺。原子吸收光谱分析(总体信息)证明 Zn⁺⁺ 与 Cu⁺⁺ 的克分子量相同, 但 XPS 谱(表面信息)发现锌与铜的信号强度比为 1:2.8, 据此可推论铜在酶的表面被键合, 而锌却较深地键合于蛋白质的内部, 可见表面与本征组成不相同。这种能获得深度分布的信息是 XPS 独有的能力。

XPS 是研究电子转移的有效手段, 对于用电子自旋共振、穆斯堡尔谱、紫外与可见光谱不能检测的体系更显示出它的优越性。因为 XPS 不仅能用于顺磁标本而且可测定抗磁性分子; 不仅可测铁等穆斯堡尔谱敏感的元素, 而且能

研究除氢和氦以外的周期表所有元素。例如, Yatzimirshij 等^[12]用 XPS 测定了 CO⁺⁺-氨基酸-咪唑复合物的电子结构。Rupp 等^[13]则用 XPS 研究不能用电子自旋共振测量的抗磁性酶标本。

3. 核酸 Hulett 等^[14]研究了 t-RNA 及其组份的 XPS 谱, 并发现在化学诱变物 7-甲基次黄嘌呤核苷中, 由于它的碱基第七位被甲基取代, 使 N 1s 谱发生明显变化, 因此推论这个甲基对改变该分子的电荷分布有重要的影响。

XPS 是确定生物大分子与金属离子键合位置的有效手段, 主要是依据测量生物分子中给体原子的化学位移。Millard 等^[15]用 XPS 研究了金属铂化合物与 DNA 的相互作用机理, 以探讨其抗癌活性的原因。实验表明, 顺式铂化合物不仅与氮原子反应还与 O⁶(Gua) 位键合, 形成一种特殊的螯合物。由此推论: 抗癌活性不受 N₇(Gua) 配位的影响(图 6 中, (A)、(B) 两条 N 1s 线很接近)而起决定性作用的是 O⁶(Gua) 位络合 ((A) 的 O 1s 线与 DNA 接近, 而 (B) 有 1.0 电子伏特的明显位移)。正常情况下, 鸟嘌呤与胞嘧啶之间形成三对氢键, 但当顺式的氯化铂氨与 O⁶(Gua) 位发生强烈键合作用时, 破坏了于该位形成氢键的可能性, 使胞嘧啶不能识别鸟嘌呤, 从而中止了 DNA 正常复制过程。

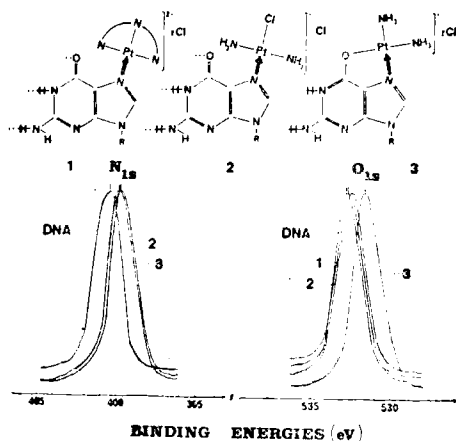


图 6 DNA 与 DNA · pt 复合物中 N 1s 和 O 1s 谱

(A) 反-[pt(NH₃)₂N₇(Gua)₂Cl]Cl (无抗癌作用)
(B) 顺-[pt(NH₃)₂N₇(Gua) · O⁶(Gua)]Cl₂ (有抗癌作用)

4. 生物膜 用 XPS 结合离子刻蚀技术能测定各种细胞的表面和次表面组成。例如, Meisenheimer 等^[16] 利用这种方法研究了人体红细胞膜的剖面组成和膜厚度。他们发现在细胞表面以下大约 100—500 埃的深度范围内存在 Ti^+ (图 7), 而这个部位与细胞壁内的磷脂双层区大体一致。在刻蚀了 300 分钟以后, 出现了

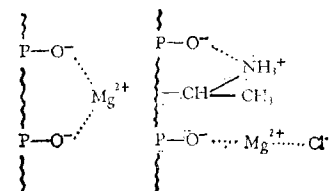
$\text{Fe } 2p$ 峰, (708 和 721 电子伏特双线), 因刻蚀率约 100 埃/30 分钟, 故可推论真空干燥后的红细胞膜的厚度约为 1000 埃。表 1 是用相对灵敏度因子法由各电子线峰强度求出的各组份在不同深度上的含量。从硫和氮的数据可以看出整个膜上都有蛋白质分子存在。

Baddiley 等^[17] 用 XPS 研究氨基酸对 Mg^{2+}

表 1 不同深度上各组份的含量

刻蚀时间(分)	近似的膜厚度(Å)	元 素							
		C	N	O	P	S	Cl	K	Ti
0	20	0.84	0.11	0.039	0.006	0.002	0.0006	0.001	—
30	100	0.92	0.036	0.035	0.001	0.003	0.0008	0.003	0.0006
150	500	0.92	0.036	0.041	—	0.002	0.001	0.002	0.0001
300	1300	0.91	0.034	0.048	—	0.002	0.001	0.001	—

与细胞壁键合作用的影响, 并提出了如下的键合模型



认为在细胞壁上由于丙氨酸的存在使 Mg^{2+} 的键合作用减弱。电镜技术通常用四氧化锇作为固定剂, 但它与各种细胞相互作用的机理以及对显微图片产生的影响却很少为人所知。White^[18] 用 XPS 检查了红血球空胞及用四氧化锇处理过的有关体系的氧化态, 说明处理过的细胞膜中不饱和类脂优先被氧化, 在固定过程中产生不同比例的 Os(III) 、 Os(IV) 、 Os(VI) 化合物, 没有 Os(V) 及低于 Os(III) 的化合物存在。同时还证实固定后用乙醇脱水也增加了 Os(III) 的比例。

最近 Pickart, L 等 (1978) 报告用离子刻蚀-XPS 技术研究钙促进 DNA 合成与复制的机理, 发现钙浓集于 HTC₄ 细胞膜表面约 450 埃以下的部位, 因而认为细胞内部是钙影响 DNA 复制的主要部位。

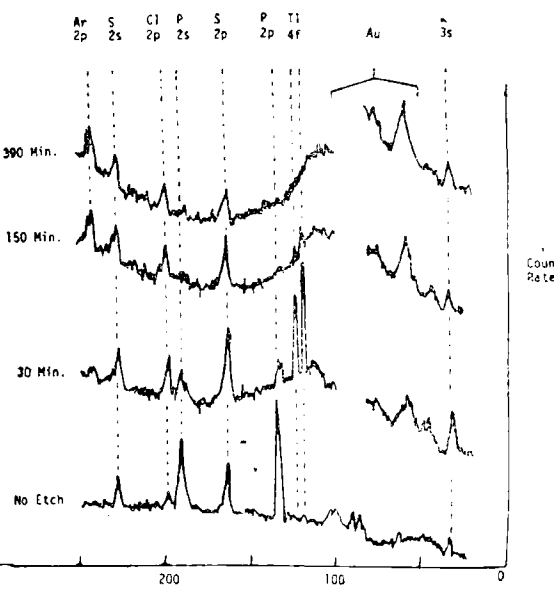


图 7 以刻蚀时间为函数的红细胞膜的 XPS 谱

5. 其它 XPS 已广泛地用于不溶性医用聚合物材料表面的研究^[19]。也有人将 XPS 用于临床和保健医学研究, 瑞典一家医院于七十年代初就设置了一台电子能谱仪用于临床医学^[2]。H. Rupp, 等 (1976) 则试图用 XPS 研究青霉素治疗因铜中毒引起的人体疾病的机理。应当指出 XPS 是目前可以测定生物体系中痕量金属氧化态的唯一方法。

D. M. Hercules, (1977) 指出 XPS 结合氦离子刻蚀是研究牙齿、骨骼表面与剖面定量组成的有效手段。

参 考 文 献

- [1] Siegbahn, K. et al.: *Nova Acta Regiae Sci. Ups.*, Ser. IV, 20, 1967.
- [2] Carlson, T. A.: *Photoelectron and Auger Spectroscopy*, 1975.
- [3] 包国荣:《分析化学》, 1973 年, 第 3 期, 第 99 页。
- [4] Hoyland, C. T.: *Appl. Phys. Lett.*, 30, 274, 1977; 13th Ann. Proc. Microbeam Anal. Soc., 75, 1978.
- [5] Millard, M. M. et al.: *Anal. Chem.*, 46, 1820, 1974.
- [6] Jones, D. et al.: *Biopolymer*, 17, 2703, 1978.
- [7] Hramner, L. N. et al.: *Electron Spectroscopy*, p. 733, 1971.
- [8] Senó, M. et al.: *J. Am. Chem. Soc.*, 99, 3014, 1977.
- [9] Winograd, N. et al.: *J. Am. Chem. Soc.*, 98,

2369, 1976.

- [10] Weser, U. et al.: *J. Electron Spectr.*, 10, 429, 1977. *Bioinorg. Chem.*, 5, 21, 1975; *Biochem. Biophys. Acta.*, 377, 211, 1975.
- [11] Jung, G. et al.: *Biochim. Biophys. Acta.*, 295, 77, 1973.
- [12] Yatzimirshii, K. B. et al.: *Chem. Phys. Lett.*, 52, 481, 1977.
- [13] Rupp, H. et al.: *Biochim. Biophys. Acta*, 446, 151, 1976.
- [14] Hulett, L. D. et al.: *Clin. Chem.*, 16, 677, 1970.
- [15] Millard, M. M. et al.: *Biochim. Biophys. Acta*, 402, 166, 1975.
- [16] Mesenheimer, R. G. et al.: *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 68, 994, 1976.
- [17] Baddiley, J. et al.: *Nature*, 243, 43, 1973.
- [18] White, D. L. et al.: *Biochim. Biophys. Acta*, 436, 577, 1976.
- [19] Yamamoto, F. et al.: *J. Polym. Sci.*, 17, 1581, 1979.

[本文于 1979 年 11 月 2 日收到]

π^- 介子的辐射生物物理特性

孟 香 琴 张 仲 纶

(中国科学院生物物理研究所)

放射疗法是一种有效的治癌手段,其所用辐射源除了 X 光、钴-60 γ 源、镭针等,近年来又广泛应用加速器产生的高能 X 射线、电子束、中子、 π^- 介子束等。而从生物物理角度来看 π^- 介子更具特色,并有可能成为辐射治疗的一种新射源,其原因是由于: 既对周围正常组织损伤较小,又能够使肿瘤区获得较大剂量照射;可以使肿瘤区内形成高 LET 次级粒子,而在周围正常组织内次级粒子以低 LET 的为多,从而使肿瘤区内辐射作用的 RBE 大于四周组织,而 OER 低于周围组织。

这几方面的特点,其他射线束,如 X 射线、 γ 射线、中子、质子等都不能兼而有之。

一、 π^- 介子的基本性质

1948 年,科学工作者用高能 α 粒子或质子轰击高密度物质,人工地得到 $\pi^\pm$ 介子。1950 年又找到了 π^0 介子。

π^- 介子质量是电子的 273 倍,约为质子质量的 15%,这表明它具有重带电粒子的特性。同时,当 π^- 介子通过介质材料慢化后,停止时会被介质中的原子俘获。这会使俘获它的核发生“星裂”,放出一些带电粒子和碎片^[1]。

对于生物组织的几种主要化学元素来说,73% 的 π^- 介子被氧俘获,20% 被碳俘获,3% 由氮俘获,4% 被更重原子俘获。Fowler 和 Mayes^[2] 研究了 π^- 介子同氧的交互作用。平均起来讲,每个被俘获的 π^- 介子生成一个单一电荷粒子(质子、氘和氚),一个 α 粒子,一个重粒子 ($Z \geq 3$) 和三个中子。与“星”中其他成份相比,中子对局部剂量贡献是小的,产生生物效应的主要是 α 粒子及重反冲核。

二、 π^- 介子的深部剂量 ——生物物理特性之一

了解 π^- 介子束在机体或是类组织的模型