同步辐射在凝聚态物理中应用的进展

麦 振 洪

(中国科学院物理研究所,北京)

同步辐射是电子同步加速器中产生的电磁辐射 (Synchrotron Radiation 简称 SR). 早在 1898 年 Liénard[1]就指出,一个带电粒子作加速运动(不论是正或负的加速度)时,会发射出电磁波或者至少一个电磁脉冲,并给出了其发射能量的表达式. 1947 年偶然地在电子同步加速器上首先观察到可见光的电磁辐射. 1956 年 Hartman[2] 报道了在 320MeV 电子同步加速器发射的 80—300 Å 同步辐射光谱和角分布, 并拍摄了 Be 和 Al 薄膜的K和L吸收边的光谱图,揭开了 SR 应用的帷幕. 七十年代初,由于高能量电子加速器的出现, 获得从紫外到硬X射线波段宽广的连续电磁波谱,从而使 SR 的应用进入了一个新的时期. 由于同步辐射具有许多优越的特性,在物理学、生物学、化学、地学、微电子学、计量学、材料科学及其交叉学科得到广泛的应用,受到各国科技界的极大重视. 不少先进的工业国家已先后建立了 SR 源及相应实验装置. 目前, 全世界已有三十多个 SR 装置在运行. 另外, 计划中或建设中的装置还有十多个. 我国北京正负电子对撞机已于 1988 年 10 月 16 日正负电子对撞成功,标志着我国 SR 装置将进入实用阶段. 我国合肥的 HESYRL 和新竹的 TAISY 两个装置正在建设中.

SR 具有许多普通光源不具备的特点,如高强度,高亮度;频谱宽, 连续可调; 光束准直性好;偏振性好;有特定的时间结构等. 利用这些特性, 已经建立和不断发展起来的各种实验技

表 1 SR 实验技术及所应用的学科

	原子物理	分子物理	光化学	固体电子性质	表面、界面电子性质	有序、无序固液相和相体的变	凝聚相区部有序	固体缺陷	核物理	化学	分子生物学	细胞生物学	地质
吸收/反射谱	×	×	×	×	×				×		×		×
发射谱(能量和时间分辨)	×	×	×	×	×				×		×		×
EXAFS,XANES	×	×	×	×	×	×	×	×		×	×	×	×
光电子谱	×	×	×	×	×				×	×			×
光电离谱	×	×	×		×				×				×
光电导			×	×	×					×			
X射线荧光谱	×	×	×	×	×		×	×		×	×	×	×
Mössbauer 谱	×	×				×	×	×	×		×		×
光子非弹性散射	×	×		×						×			
X射线衍射			×	×	×	×				×	×		×
X射线漫散射			×		×	×	×	×		×	×		×
X射线小角散射			×			×		×		×	×		×
X射线形貌术								×					×
X射线干涉术	×	×		×	×						×		
X射线照相术								×				×	×
X射线显微术								×			×	×	×
X射线层析术							×	×			×		×

本文 1988 年 12 月 18 日收到.

术已广泛应用到各科学技术领域(表1).有关 SR 的实验方法、原理及应用已有不少介绍[3,4],因篇幅所限,本文着重介绍在凝聚态物理某些领域中的新结果.

一、SR 在凝聚态物理中的应用

凝聚态物理研究固体、液体、液晶和无序物质的结构及其物理性质和规律. 是物理学中内容最丰富、应用最广泛的一门分支学科. SR 的出现也是首先应用到凝聚态物理范畴[2].凝聚态物理涉及的范围十分广泛,本文只介绍 SR 在凝聚态物理若干领域的应用.

1. 高临界温度超导体的研究

1986年 Müller 和 Bednorz[5] 发现了 30K超导的 La-Ba-Cu-O 体系,使高临界温度超导体研究取得突破性进展, 获得了液氮温区的超导材料. 很快 SR 就被用来研究氧化物超导体. Moss 等[6]应用高分辨X射线粉末和单晶衍射技术发现, $La_{1.8}Ba_{0.2}CuO_{4-Y}$ 超导体存在两个 K_2NiF_4 型的四方相 ($\Delta a/a \approx \Delta c/c \approx 10^{-4}$). 对 70$\mu$m 尺度的单晶进行分析,仍发现两相共存. 许多科学家应用扩展X射线吸收精细结构 (EXAFS) 和X射线吸收谱 (XAS) 方法研究了其他超导材料,如 La_2CuO_4, La-Ba-Cu-O, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, Bi-Sr-Ca-Cu-O 和以它们为基的十多种掺杂氧化物超导材料的原子结构,发现 Cu 与Y或 La 原子位置发生部分错位[7],而且在压力大于 20kPd 时 Cu-O-Cu 链发生歪扭[8].

超导体的电子结构对探讨超导机制提供重要信息. 科学家应用共振光发射谱、X射线吸收谱等方法对 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 做了大量研究,结果表明, $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 中 Cu为2价,且电子间存在强的库仑相互作用,强的耦合作用,这对超导性能起着重要作用.

当然,限于目前超导材料的单相性,完美性都较差,以致一些实验结果和结论不一致,但可以肯定,随着实验和理论研究的深入,氧化物超导体的机制是完全可以被认识的.

2. 表面、界面的研究

表面、界面物理是一门新兴的学科,由于它与许多重要学科和应用领域有着密切的联系而受到很大重视. 自 1977年 Easfman[9]运用 SR 作光电子谱以来,实现了用常规光源无法进行的许多实验. 近年来,发展了表面扩展X射线吸收精细结构 (SEXAFS)、X 射线吸收边近边精细结构 (XANES), 角分辨光电子精细结构 (ARPEFS) 及光电子衍射 (PED) 等技术,使这一研究领域取得十分突出的进展.

Citrin 等人[10]利用 SR 的偏振性研究了 Cu(100)C(2 × 2)-Cl 系统,从垂直和平行表面的近邻(不超过五个壳层)的散射,获得随偏振和温度变化的 SEXAFS 谱,发现 Cl 和表面 Cu 的独自平均位移平方 $\Delta\sigma^2$ 约比表面内沿法线的大两倍,不符合普遍使用的模型.这是 SEXAFS 技术首次用于研究各向异性表面动力学问题.

Stöhr 等人[11]应用 XANES 技术,观察到当光子能量变化通过化学吸附 C, N, O 等原子 1s 电子的激发阈值时,会引起分子内共振现象,从而确定表面吸附分子的取向、成键状况和键长. Norman 等人[10]研究 Ni(100) 上O和 Co 的 XANES 谱, 精确测定了化学吸附内部分子距离的变化,其精度可达 0.01Å.

Binns 等人[13]应用 ARPEFS 研究了 Cr/Ag(100), Fe/Cu(100) 和Fe/Ag(100)P(1 × 1) 单原子超薄层的磁结构, 对 Cr/Ag(100) 系统观察到磁矩随覆盖厚度变化: 0.1 单原子层时其磁矩为 4.0 μ_B, 0.6 单原子层时磁矩为 1.5 μ_B, 随着覆盖进一步增加, 磁矩接近体效应值. Terminello 等人[14]测定了 C(2 × 2)S/Cr(001) 表面和近表面结构, ARPEFS 得到 10Å 深

度的几何结构信息.

Hughes 等人[15]测量了 Fe/Cu(100) 系统 PED 谱自旋相关的差别，获得局域磁环境的信息,表明即使长程磁有序被抑制,但局域磁矩仍保存.

利用 SR 高亮度的特性进行实时观察是十分吸引人的. Samant 等人[16]结合掠入射和荧光测量,首次获得电化学沉积过程 Pb/Ag(111) 的X射线散射谱,表明 Pb 单原子层是有序、六角密堆积排列，Pb 的晶格相对 Ag 的晶格转了4.4°，比块状铅晶格压缩了1.2%.单原子层的形成在块状沉积之间,近邻距离随所施加的电压而减少. Huggins 等人[17] 对 Ca 和K对褐煤催化行为和转变进行实时 EXAFS 观察,表明它们对碳是活性的，从惰性气氛中高温分解到氧气氛中气化,活性的 Ca 没有变化,而活性的K在氧中气化，迅速转变为块状碳酸钾.

3. 准晶体的研究

1984年 Shechtman 等人[18]在快速凝固的 Al-Mn 合金中发现一种具有五次对称的二十面体相. 它是具有取向有序,平移无序,但有准平移周期的一类新的有序结构，称为准晶. 到目前为止,已相继发现了八次、十次、十二次对称的准晶,但对准晶体结构的描述以及结构测定仍是探讨中的问题. Budai 等人[19]应用高分辨X射线衍射技术,研究了 Mn 离子注入 Al 单晶形成的准晶. 结果表明，准晶的衍射峰不在严格的二十面体对应的位置，峰的位移可用线性 Phason 应变描述,而 Phason 应变与准晶颗粒生长条件有关. 除位移外，还发现峰宽随 Phason 动量增加而变宽,这可能是 Phason 应变的非线性分量或是来自具有 Phason 应变稍有差别的不同颗粒散射的叠加.Marcus 等人[20]应用 EXAFS 方法研究了 Al-Li-Cu 和 Al_6V 准晶结构,发现 Al-Li-Cu 中 T_2 相和R相的 EXAFS 谱没有区别,表明其结构接近. i-Al_6V 的 EXAFS 谱类似 Al_3V 的谱，即为面心立方上的简单四方超结构，与二十面体没有明显的联系. 这表明 Al_6V 与 Al-Mn(Si) 具有不同结构类型. Egami 等人[21] 应用择尤异常X射线散射技术测量了 $Al_{5.5}Li_{3.3}Cu$，$Pd_{58.8}U_{20.6}Si_{20.6}$ 和 Al_{78} Ru_5Mn_{17} 等准晶的散射强度,并尝试推算其原子排列. 结果表明,一些准晶可用三维 Penrose tiling 模型来描述. Stern 等人[22]研究了二十面体 Al-($Mn_{98}Fe_2Si$) 和三十面体 Al-($Mn_{98}Fe_2$) 中 Fe 和 Mn 的位置,发现在 i 相中 Fe 和 Mn 的位置相同，而在三十面体却不一样. 二十面体 T_2-AlCuLi 和体心立方 R-AlCuLi 的 EXAFS 谱表明，Cu 的环境完全一样，因此建议截短约100个原子的二十面体作为 T_2 相的结构单元. Fibonacci 超晶格是一维准晶,其相邻两层厚度比满足黄金分割 τ. Kamigaki 等人[23]制备了相邻两层厚度比不是 τ 的"外形 Fibonacci 超晶格",X射线衍射谱表明,其峰的位置能用 τ 表征,具有"自相似"性.

4. 材料结构与性能的研究

材料科学是当代科学技术的基础,一直受到人们的高度重视. 研究材料的原子、电子结构、缺陷及其对性能的影响是 SR 应用的一个重要方面，每年占用各 SR 设备相当大比例的工作量. 本文只介绍某些方面的实验新结果.

由于 SR 亮度高,波长可调，可对生物大分子和小至几微米的小样品进行结构分析. 大分子结构分析的分辨率可达 1.5Å. Satow 等人[24] 利用聚焦 SR 光和成象系统劳厄衍射方法,对溶菌酶晶体进行快速时间分辨的研究,发现曝光时间为 7ms 即可拍摄质量好的照片.如果曝光间隔为 50—700ms,样品总曝光量为 10s，也不产生辐射损伤. 提供了研究活生物晶体动态变化的可能性.

通常的X射线粉末衍射难以应用于从头开始的微晶结构测定工作，但 SR 使研究成为可

能. Newsam 等人[25]研究了沸石，衍射峰虽然可用大的正交单胞指标化，但高分辨数据还揭示:它是由宽的和很窄的峰组成,有助于揭开这类材料的络合物相图.Tsuji等人[26]研究了 Si 和 Ge 在高压下从半导体性到金属性的相变. 确定了 a-Si 的转变压力为 10 GPa，a-Ge 为 6GPa，而且转变伴随着结构变化。同时还发现，相变对液体或固体传导介质的静水压敏感. Iwamoto 等人[27]应用时间分辨X射线衍射技术研究了蛙类半腱状肌肉纤维在脉冲刺激下产生的强直性痉挛,观察了肌浆球蛋白最强反射峰在 14.3 和 21.5ms 内的变化过程.

SR 实验可同时加入各种环境条件如电场、磁场、热场和应力场等,同时,利用 SR 的偏振性研究极性晶体和非线性光学材料是十分有利的. Eddy 等人[28] 研究 KTP 晶体在外电场作用下,电场频率和电压引起 KTP 晶体内阳离子的位移,其测量精度 $\Delta d/d < 10^{-5}$. Ming 等人[29]模拟地层环境，应用能量色散X射线衍射 (EDXRD) 研究 $(Mg, Fe)_2SiO_4$ 橄榄石到尖晶石的相变与压力和温度的关系. 为地球科学提供了有力的研究手段. Stern 等人[30] 应用 EXAFS 研究纯 Pb 和 Hg-5at% Pb 样品,发现 Hg 等杂质在 Pb 母体中局部熔化始于 400 K,低于体材料的熔点. 可以肯定，晶体中的缺陷也会引起类似的局部熔化现象，这对解释体材料的熔化机制很有帮助.

X射线小角散射是研究材料结构的重要工具之一. 利用 SR 可实现动态过程的实时观察. Galambos 等[31]研究了含离子键的聚合物热处理中离子团的形成过程. Sato 等[32]对 Al-Li 合金的结构和分解过程进行动态测定,表明 Al-Cu 和 Al-Li 的合金形成动力学有差异.

很多材料的物理性能与材料表面或界面的粗糙度有关. 某些材料存在粗糙温度，当温度低于或高于此温度,材料表面分别为理想表面或粗糙表面. 但粗糙温度的测定是十分困难的. Mochrie[33] 应用 SR X 射线衍射技术，研究不同温度 Cu 衍射峰强度的变化. 首次确定了 Cu(110) 的粗糙温度为 600℃. Woronick 等人[34]应用掠入射X射线反射方法,确定了用分子束外延方法制备的 InAs/GaAs 薄膜的膜厚为 248 ± 6Å，InAs-GaAs 界面粗糙度为 18 ± 5 Å,上表面粗糙度小于 1Å. 说明 InAs 在 GaAs 上生长,先是从粗糙面开始,最后达到平滑.

5. 晶体缺陷的研究

SR 白光和单色光形貌术,X射线小角散射、X射线散射等技术都是研究晶体缺陷的有力工具,已有大量报道,这里着重介绍X射线形貌术某些新结果.

自从 Bordas 等人[35]首先利用 SR 形貌术观察钛酸钡晶体铁电相到顺电相的相变以来,人们已成功地进行了磁性材料中畴界和畴运动,水晶 α 相到 β 相的相变、铝单晶和 Si-Fe 再结晶过程,镉单晶位错运动等动态过程的实时观察. Tanner[36]利用 SR 脉冲光源,采用高时间分辨电视接收系统,观察了在磁场作用下，α-Fe_2O_3 磁畴壁的运动、加速和消失过程，其时间分辨为 200ms. 麦振洪[37]研究了硅单晶热处理氢致缺陷形成过程.

对变化很快的动态过程需要采用频闪技术. Miltat 等[38] 采用频闪技术，研究 Fe-3.5% Si 单晶中缺陷与磁畴壁的相互作用，在一个正弦波的不同相位拍摄了一系列形貌图，观察到 90° 畴壁与沉淀物和位错相互作用而变宽. Greeff 等[39]应用频闪截面形貌技术观察水晶振荡器,随频率升高,直接象变弱而中间象强烈变化. 频闪技术具有高时间分辨，应用越来越广.

平面波X射线适用于测量点阵参数和取向的微小变化. 当入射X射线的波长和角的发散度都足够小,便可使外延层和基质分别成象. 这种分别成象技术对研究半导体异质外延层以及固体薄膜器件十分重要. 如 (Ga, Al)(As, P)/GaAs 四元薄膜衬底和外延层失配引起反射峰间距为 40″，Petroff 等人应用角发散度为 0.3″ 的X射线入射,成功地分别拍摄了衬底和

外延膜的形貌图.

晶体生长过程中成份不均匀或杂质不均匀富集会造成晶体点阵参数的微小变化，通常还伴随着点阵面的微小扭转. 这种点阵的微小变化可用平面波形貌技术来检测. Usuda 等人[40]对不同组分磁场下生长的 $\phi 3''$ GaAs 单晶由于成份不均匀引起的点阵参数变化进行精确测量，测量精度 $\frac{\Delta d}{d} \sim 2.6 \times 10^{-6}$，发现非化学配比和位错会使 GaAs 晶体点阵参数发生 $\frac{\Delta d}{d} \sim 10^{-5}$ 量级的变化.

二、几种值得重视的技术发展

SR 应用历史并不长，但由于应用的广泛性，各个学科各个领域发展不断提出新的要求，促进了 SR 实验技术的不断发展. 这里提到的若干实验技术是目前比较重视的一部分，但不一定是发展动向.

1. 微束X射线荧光分析 (X-ray Fluorescence Microprobe)

微束X射线荧光分析技术是微电子学、生物学和地学等领域的重要分析手段. 如超大规模集成电路元素微区分析，微量元素的亚细胞分布，痕迹元素的分析，矿物和外星来物超微量元素的检测等都要求极高的分辨率. 目前，美国 NSLS 的 X26c 线微束光斑为 25μm，对地质和生物医学样品元素探测极限为 1ppm；二维痕迹元素成象元素分辨率 10ppm；空间分辨率 30μm. 日本光子工厂 BL-4A 线微束光斑为 10 × 30μm，对 Mn 探测极限相对浓度为 6ppm，应用选择X射线发射谱，可检测小于 10^{-10}g 的痕迹元素.

2. X射线层析技术 (X-ray Tomography)

近年，SR X 射线层析技术应用于材料科学、地球科学等领域，它可提供密度和化学组分不均匀的材料中化学和结构及具体元素的分布. 目前，可观察 0.5—1mm 的小样品，从二维成象发展到三维成象. D'Amico[41]声称，采用二极管阵列，重建象分辨率达 1μm. 成功地在化学不均匀的样品中确定了过渡金属.

3. X射线驻波分析 (X-ray Standing Wave Analysis)

X射线驻波是X射线入射束与衍射束在晶体内一种干涉现象. 可用来高精度、高灵敏度测定原子结构，越来越受到人们的关注. Zegenhagen 等人[42] 研究在 Si(111) 衬底上外延 CoSi, 薄膜，膜厚为 6nm 和 16nm 时，垂直晶格相对 Si 衬底的失配分别为 -0.0153 ± 0.0003 和 -0.016 ± 0.001. Si(111) 与第一层 Co 的距离为 0.288 ± 0.005nm；Co 原子与 Si(111) 悬挂键连接；在界面上符合五次对称配位金属原子. 最近，Ohta 等人[43]提出背反射X射线驻波技术，可放宽对样品完美性的要求.

4. X射线 Raman 散射

EXAFS 是研究中心原子局域结构的有力工具，但对于低序数原子，实验需在真空中进行. 采用硬X射线非弹性散射可获得同样的信息. 1967 年 Miznno[44] 发现了X射线 Raman 散射和X射线吸收的这种关系，由于散射强度极弱，无法获得足够高的分辨率和信噪比的谱线. Tohji 等人[45]首次获得石墨的X射线 Raman 散射谱，并计算出 c—c 距离为 1.43 和 2.48 Å. 此技术可望用于测定低序数中心原子的局域结构.

交叉效应在 SR 中的应用，如核布喇格散射、X射线光声发射、激光与 SR 光发射等等，都显示出各自的特点，引起人们的兴趣.

SR 光源的应用是一个范围非常广、发展非常快的领域，即使我们把论述对象局限于凝聚态物理领域，由于人们所感兴趣的信息种类不同，还涉及多种多样的方法和技术，限于篇幅，不能述及。庆幸的是，BEPC、HESYRL 和 TAISY 三个装置的建设，为我国开展同步辐射实验创造了条件，在中国的同步辐射实验站开展研究的日子已为期不远了。

参 考 文 献

[1] Lienard, A., Eclairage, L., *Electr.*, **16**(1898), 5.
[2] Tomboulin, D. H. and Hartman, P. L., *Phys. Rev.*, **102**(1956), 1423.
[3] Emst-Eckhard Koch (ed.), *Handbook on Synchrotron Radiation*, North-Holland Publishing Company, 1983.
[4] Herman Winick and Doniach, S. (ed.), *Synchrotron Raadiation Research*, Plenum Press, 1980.
[5] Bednorz, J. G. and Müler, K. A., *Z. Phys.*, **B64**(1986), 189.
[6] Moss, S. C., Forster, K. et al., *NSLS Annual Report*, 1987, 3—141.
[7] Lytle, F., Greegor, R. and Panson, A., *Phys. Rev.*, **B37**(1988), 1 Feb; *Novel Mechanisms of Superconductivity*, Plenum, 1987, 1049.
[8] Crozier, E. D., Alberding, N. et al., *SSRL Activity Report*, 1987, 44, 103.
[9] Eastman, D. E., *Phys. Rev. Lett.*, **28**(1972), 1327.
[10] Citrin, P. H. et al., *SSRL Activity Report*, 1987, 190.
[11] Stöhr, J. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 2414.
[12] Norman, D. and Durham, P. J., Daresbury preprint, DL/SCI/p. 406T, 1983.
[13] Binns, C., Newstead, D. A. and Norris, C., Synchrotron Radiation Appendix to the Daresbury Annual Report, 1985/86, 116, 112.
[14] Terminello, L. J. et al., *SSRL Activity Report*, 1987, 188.
[15] Hughes, H. P. et al., Synchrotron Radiation Appendix to the Daresbury Annual Report, 1985/86, 105.
[16] Samant, M. G., et al., *J. Am. Chem. Soc.*, **109**(1987), 5970; *Surface Science*, **193**(1988), L29; *J. Phys. Chem.*, **92**(1988), 220.
[17] Huggins, F. E. et al., *Intern. Conf. Coal Science*, Maastricht, The Netherlands, 1987, 563.
[18] Shechtman, D. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984), 1951.
[19] Budai, J. D. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 2304.
[20] Marcus, M. et al., *NSLS Anual Report*, 1987, 3—106.
[21] Shen, Y. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1440; *Phys. Rev.*, **B35**(1987), 4489.
[22] Ma, Y. and Stern, E. A., *Phys. Rev.*, **B35**(1987), 2678; *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1956.
[23] Kamigaki, K. et al., Photon Factory Activity Report, 1987, 145.
[24] Satow, Y., et al., *Photon Factory Activity Report*, 1987, 158.
[25] Newsam, J. M. et al., *SSRL Activity Report*, 1987, 754.
[26] Tsuji, K., et al., *Photon Factory Activity Report*, 1987, 163.
[27] Iwawoto, H., Kobayashi, T. et al., *Photon Factory Activity Report*, 1987, 333.
[28] Eddy, M. M. et al., *NSLS Annual Report*, 1987, 3—44.
[29] Ming, L. C .et al., *SSRL Activity Report*, 1987, 89.
[30] Stern, E. A. and Zhang, K., *NSLS Annual Report*, 1987, 3—91.
[31] Galambos, A. F., *SSRL Activity Report*, 1987, 124.
[32] Sato, J. et al., *Photon Factory Activity Report*, 1987, 344.
[33] Mochrie, S. G. J., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 304.
[34] Woronick, S. C. et al., *Proc. of 3rd Intern conf. on Mondulated Semiconductor Structure.*
[35] Bordas, J. et al., *Phil. Mag.*, **32**(1975), 471.
[36] Tanner, B. K., *Proc. Daresbury Study*, 1982, 66.
[37] 麦振洪, *Chinese Phys. Lett.*, **2**(1985), 493.
[38] Miltal, J. and Kleman, M., *J. Appl. Phys.*, 1980.
[39] Graeff, W. and Henning, A., *Proc. 13th Intern. Cong. of Crystallography*, Hambury, 1984, c-325.
[40] Vsuda, K. et al., *Photon Factory Activity Report*, 1987, 166.
[41] D'Amico, K. L. et al., *NSLS Annual Report*, 1987, 3—66.
[42] Zegenhagen, J. et al., *NSLS, Annual Report*, 1987, 3-109; 3-110.
[43] Ohta, et al., *Nucl. Instrum. and Meth.*, **A246**(1986), 760.
[44] Mizuno, Y. and Ohmura, Y., *J. Phys. Soc. Jpn.*, **22**(1967), 445.
[45] Tohji, K. and Vdagawa, Y., *Photon Factory Activity Report*, 1987, 266.