



北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

XANES谱 及分析基础

陈栋梁

北京同步辐射装置

中国科学院高能物理研究所

2014. 11. 19, 武汉



中国科学院高能物理研究所

主要内容



北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据解析讲习班

武汉·2014

- ⊕ XAFS谱、XANES谱
- ⊕ XANES谱基本原理
- ⊕ XANES谱实验技术
- ⊕ XANES谱分析简介
 - 指纹效应
 - 模拟计算
 - PCA分析
- ⊕ XANES谱分析实例

主要内容



北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据解析讲习班

武汉·2014

- ⊕ XAFS谱、XANES谱
- ⊕ XANES谱基本原理
- ⊕ XANES谱实验技术
- ⊕ XANES谱分析简介
 - 指纹效应
 - 模拟计算
 - PCA分析
- ⊕ XANES谱分析实例



XAFS谱、XANES谱

XAFS谱:几个缩写名称

- XAS: X-ray Absorption Spectroscopy
- XAFS : X-ray Absorption Fine Structure
- EXAFS : Extended X-ray Absorption Fine Structure
- XANES: X-ray Absorption Near Edge Structure
- NEXAFS : Near Edge X-ray Absorption Fine Structure





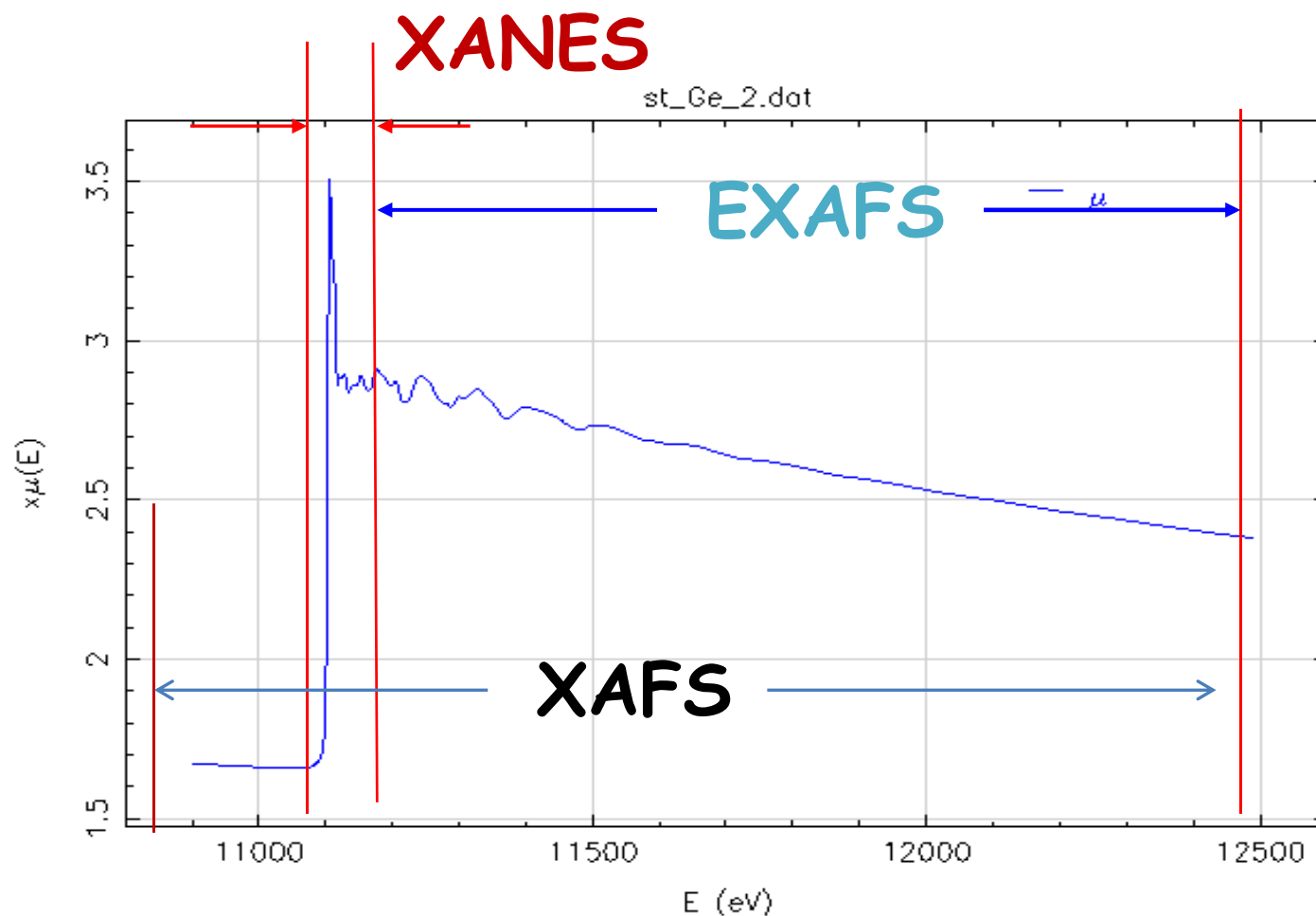
北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据分析讲习班

武汉·2014

XAFS谱、XANES谱

XAFS谱:分类

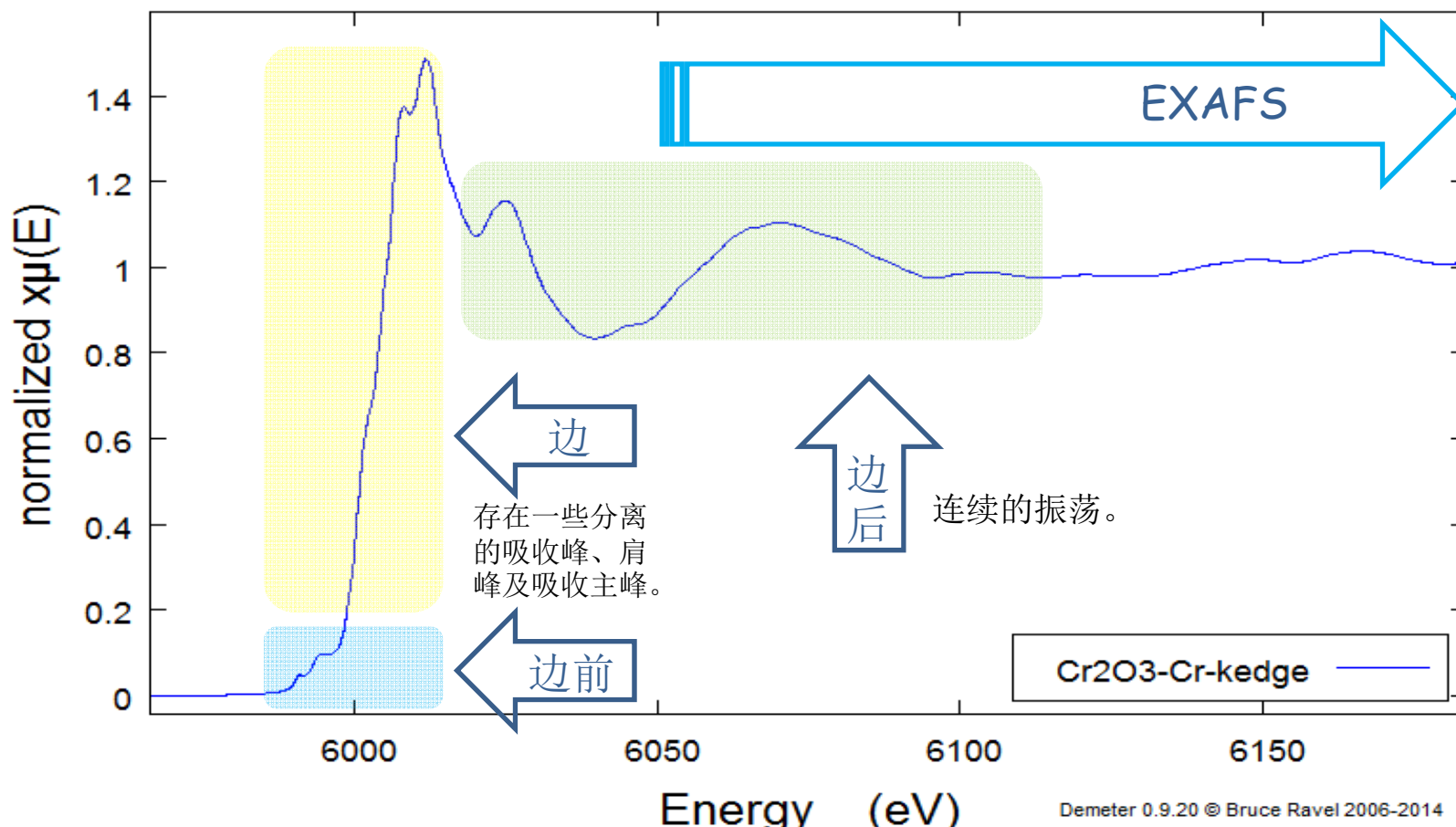




XAFS谱、XANES谱

XANES谱:划分

- ✚ XANES: $-20 \sim +50\text{eV}$ ($-几十\text{eV} \sim +几十\text{eV}$)
- ✚ 区域: 边前 (pre-edge) + 边 (edge) + 边后 (post-edge)

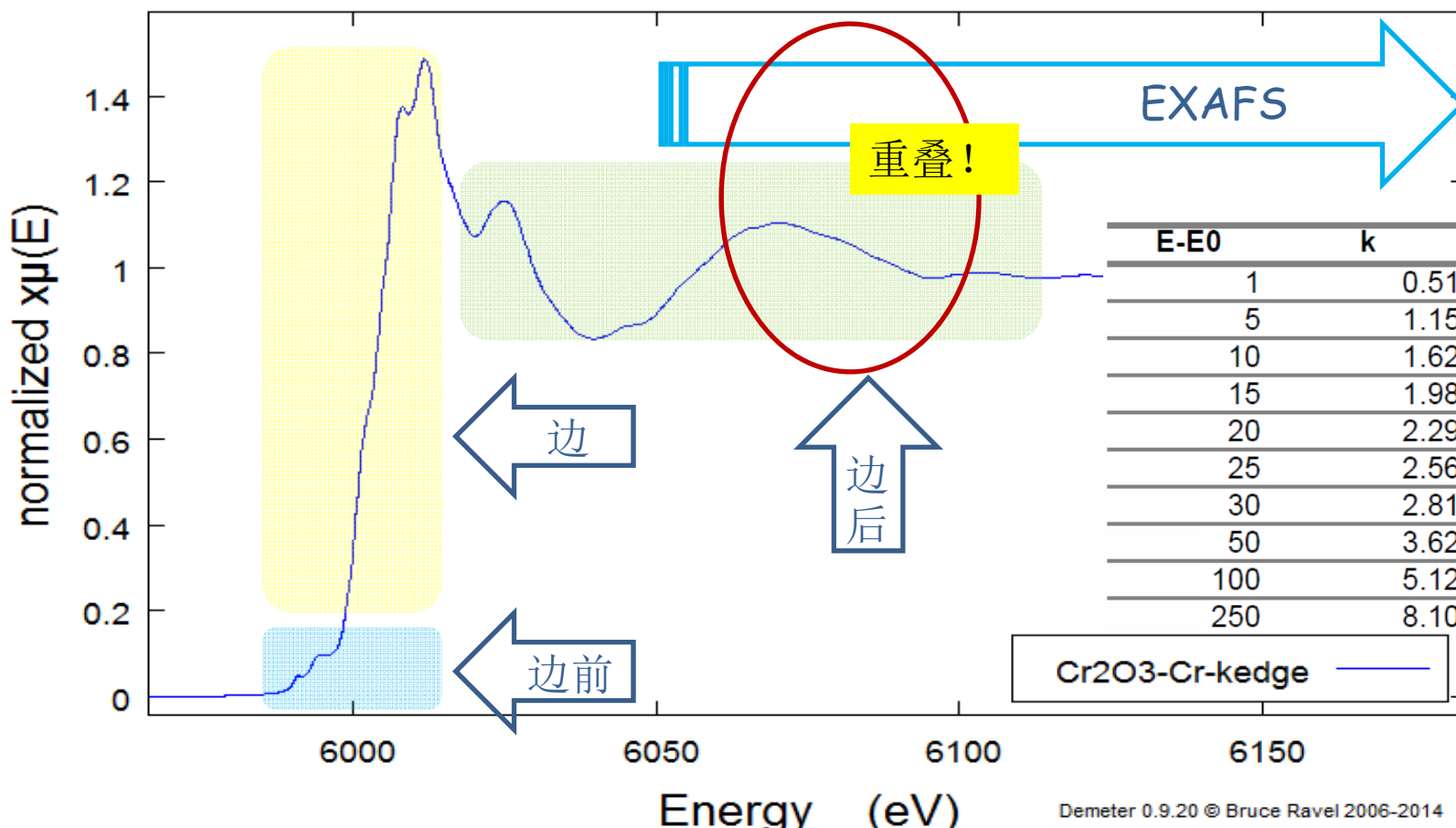




XAFS谱、XANES谱

XANES谱:划分

- XANES: $-20 \sim +50 \text{ eV}$ ($- \text{几十 eV} \sim + \text{几十 eV}$)
- 区域: 边前 (pre-edge) + 边 (edge) + 边后 (post-edge)



主要内容



北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据解析讲习班

武汉·2014

- ⊕ XAFS谱、XANES谱
- ⊕ XANES谱基本原理
- ⊕ XANES谱实验技术
- ⊕ XANES谱分析简介
 - 指纹效应
 - 模拟计算
 - PCA分析
- ⊕ XANES谱分析实例



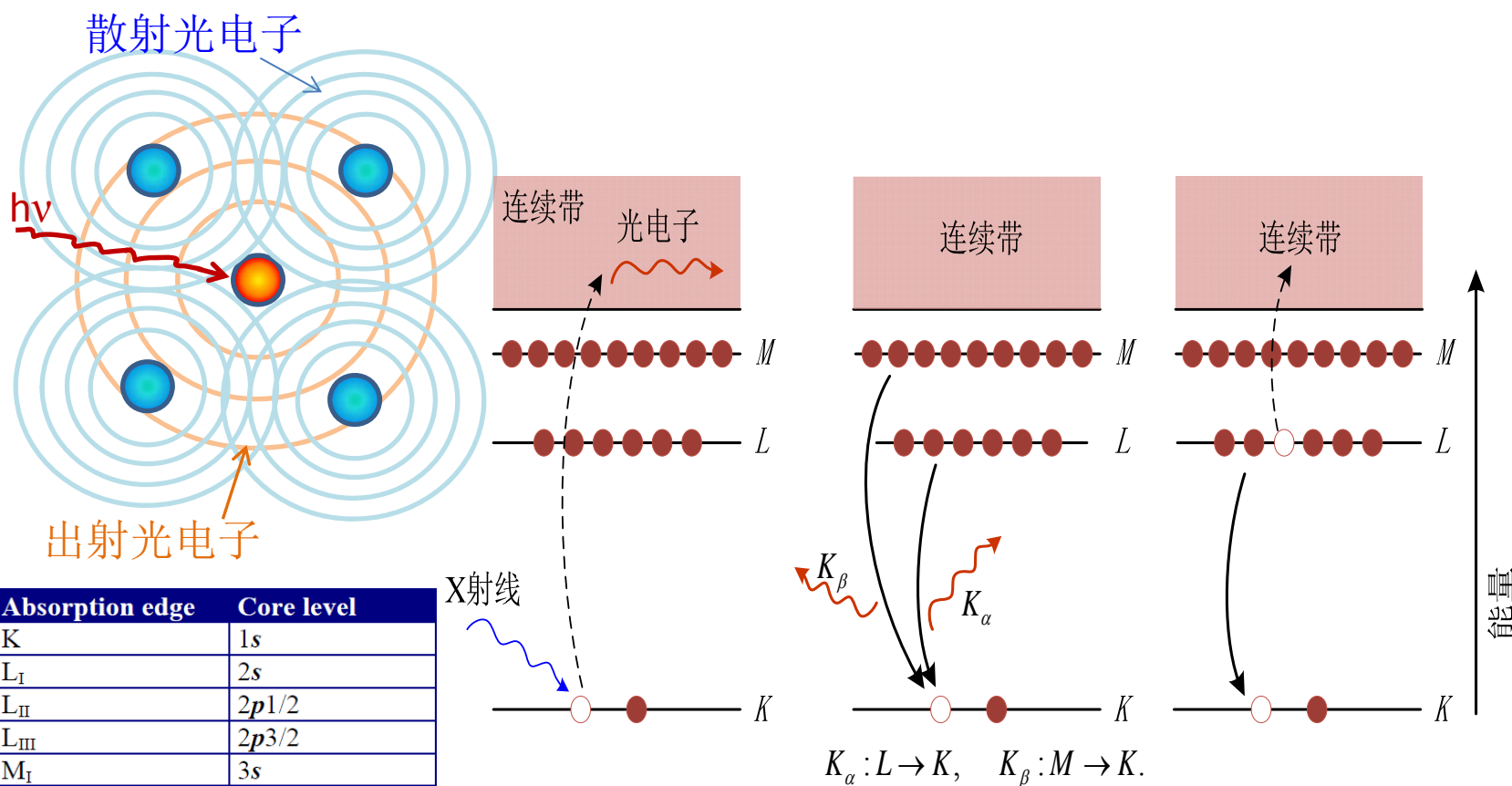
北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据分折讲习班

武汉·2014

XANES谱基本原理

X射线吸收物理过程：出射光电子波与散射波相互作用-对吸收系数调制



Absorption edge	Core level
K	1s
L _I	2s
L _{II}	2p _{1/2}
L _{III}	2p _{3/2}
M _I	3s
M _{II}	3p _{1/2}
M _{III}	3p _{3/2}
M _{IV}	3d _{3/2}
M _V	3d _{5/2}

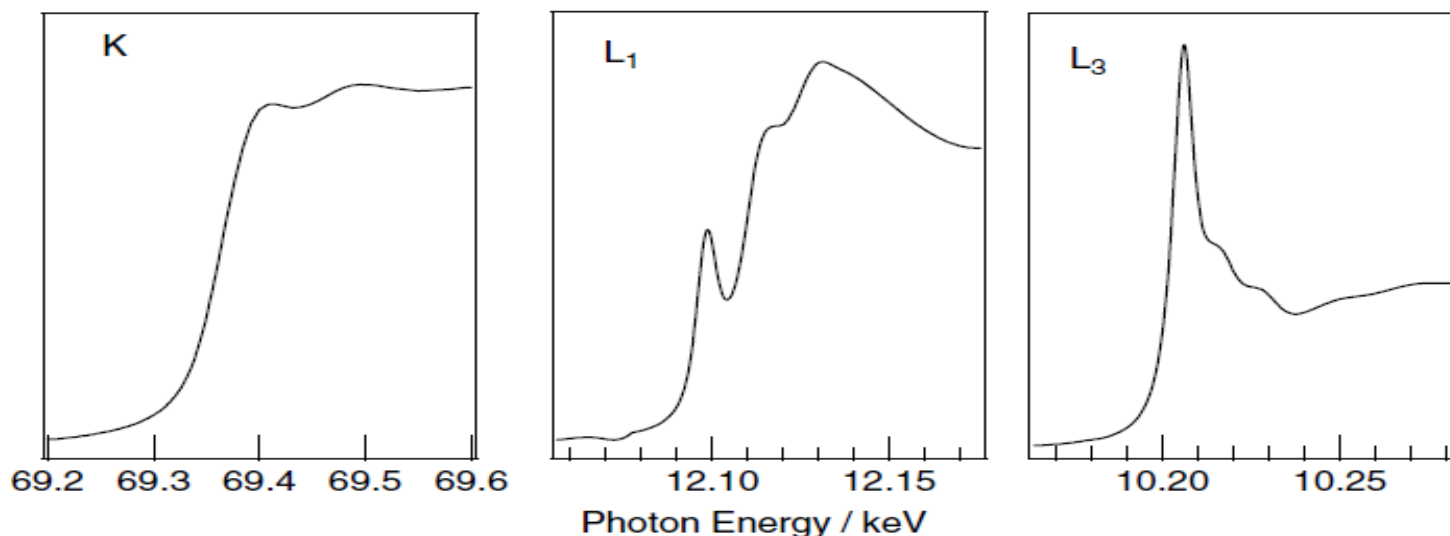


XANES谱基本原理

XANES谱：吸收与跃迁

✓ $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

✓ W的 K -, L_{I} -, L_{III} -边 XANES 谱



当原子吸收X射线光子后，某芯电子被激发，向位于较高能量的被允许未占据轨道跃迁，乃至脱离原子的束缚，向连续空态跃迁。

- ◆ 边前（pre-edge）：有许多分立的峰，源于由芯电子向束缚空态跃迁。
- ◆ 边（edge）：电离，向连续空轨道跃迁。
- ◆ 边后（post-edge）：散射的叠加。





XANES谱基本原理

XAFS谱描述

- ◆ 基于Fermi黄金规则，在外场 \vec{E} 作用下，原子吸收X射线光子，在初态 ψ_i 和终态 ψ_f 的跃迁吸收系数：

$$\mu \propto \left| \int \psi_f^* \hat{\epsilon} \cdot \vec{r} e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} \psi_i d^3 r \right|^2$$

- ◆ 把指数项做多级展开，保留电偶极和四级项：

$$\approx \left| \int \psi_f^* \left(\hat{\epsilon} \cdot \vec{r} + i \left(\hat{\epsilon} \cdot \vec{r} \right) \left(\vec{k} \cdot \vec{r} \right) \right) \psi_i d^3 r \right|^2$$

- ◆ 四级/偶极 $\sim (Z_{\text{eff}}/2 \times 137)$
- ◆ 初态决定吸收边 (K , L_x , M_x 等)，终态是激发态（困难的由来）。





XANES谱基本原理

定性判定：单原子

◆ 原子的选择定则：LS耦合，单电子近似

定则	电偶极跃迁	磁偶极跃迁	电四极跃迁
1	$\Delta J = 0, \pm 1$	$\Delta J = 0, \pm 1$	$\Delta J = 0, \pm 1, \pm 2 (0 \nleftrightarrow 0)$
2	$\Delta M = 0, \pm 1$	$\Delta M = 0, \pm 1$	$\Delta M = 0, \pm 1, \pm 2$
3	宇称改变	宇称不变	宇称不变
4	一个电子跳变	无电子跳变	一个电子跳变或无电子跳变
5	$\Delta l = \pm 1$ $\Delta S = 0$	$\Delta l = 0, \Delta n = 0$ $\Delta S = 0$	$\Delta l = 0, \pm 2$ $\Delta S = 0$
6	$\Delta L = 0, \pm 1 (0 \nleftrightarrow 0)$	$\Delta L = 0$	$\Delta L = 0, \pm 1, \pm 2 (0 \nleftrightarrow 0, 0 \nleftrightarrow 1)$





XANES谱基本原理

定性判定：单原子/连续体

单原子：对于电偶极跃迁

- ◆ K 边：初态为 $1s$ ($n=1, l=0, m=0$)；终态为 p
- ◆ L_I 边：初态为 $2s$ ($n=2, l=0, m=0$)；终态为 p
- ◆ L_{II} 边：初态为 $2p_{1/2}$ ($n=2, l=1, j=1/2$)；终态为 d, s
- ◆ L_{III} 边：初态为 $2p_{3/2}$ ($n=2, l=1, j=3/2$)；终态为 d, s

连续体：多原子分子，液体，固体等凝聚态体系

- 简单的初态： $1s, 2s, 2p_{1/2}, 2p_{3/2}$
- 复杂的终态：原子轨道（态）的相互作用，杂化！（分子轨道和晶体场理论，多重散射理论和能带理论等）；激发态！
- 基本的跃迁：
 - ↖ $s \rightarrow p$, K 边 ($1s$) ; L_I 边 ($2s$)
 - ↖ $p \rightarrow d$, L_{II} 边 ($2p_{1/2}$) , L_{III} 边 ($2p_{3/2}$)



XANES谱分析的关键：终态！ 包括什么态才是可以允许跃迁的（跃迁规则），及能够跃迁多少（态密度）。



北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据分析讲习班

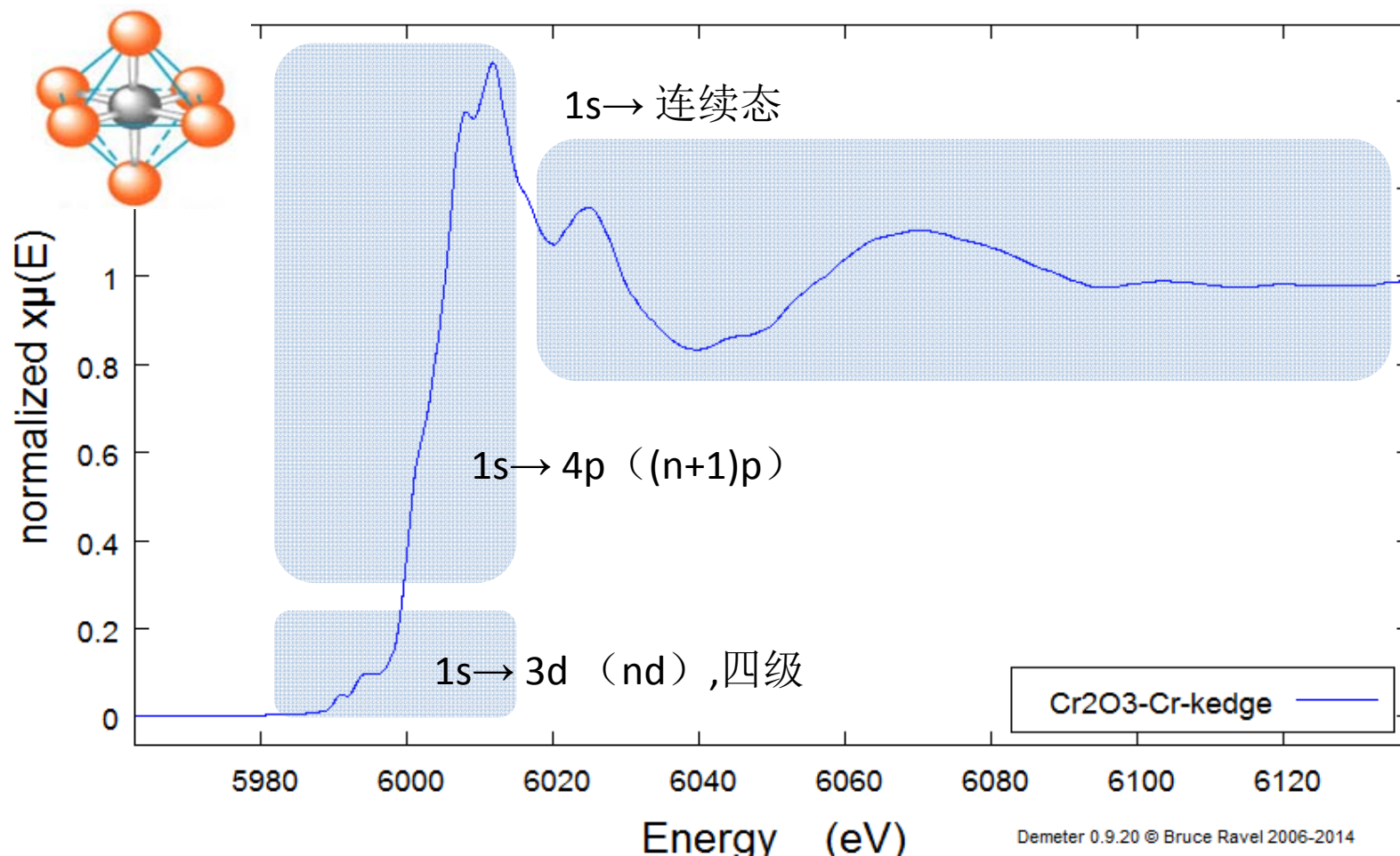
武汉·2014

XANES谱基本原理

定性判定：凝聚态体系

试着： Cr_2O_3 , Cr K-边XANES

$\text{Cr}: 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1 4p^0$



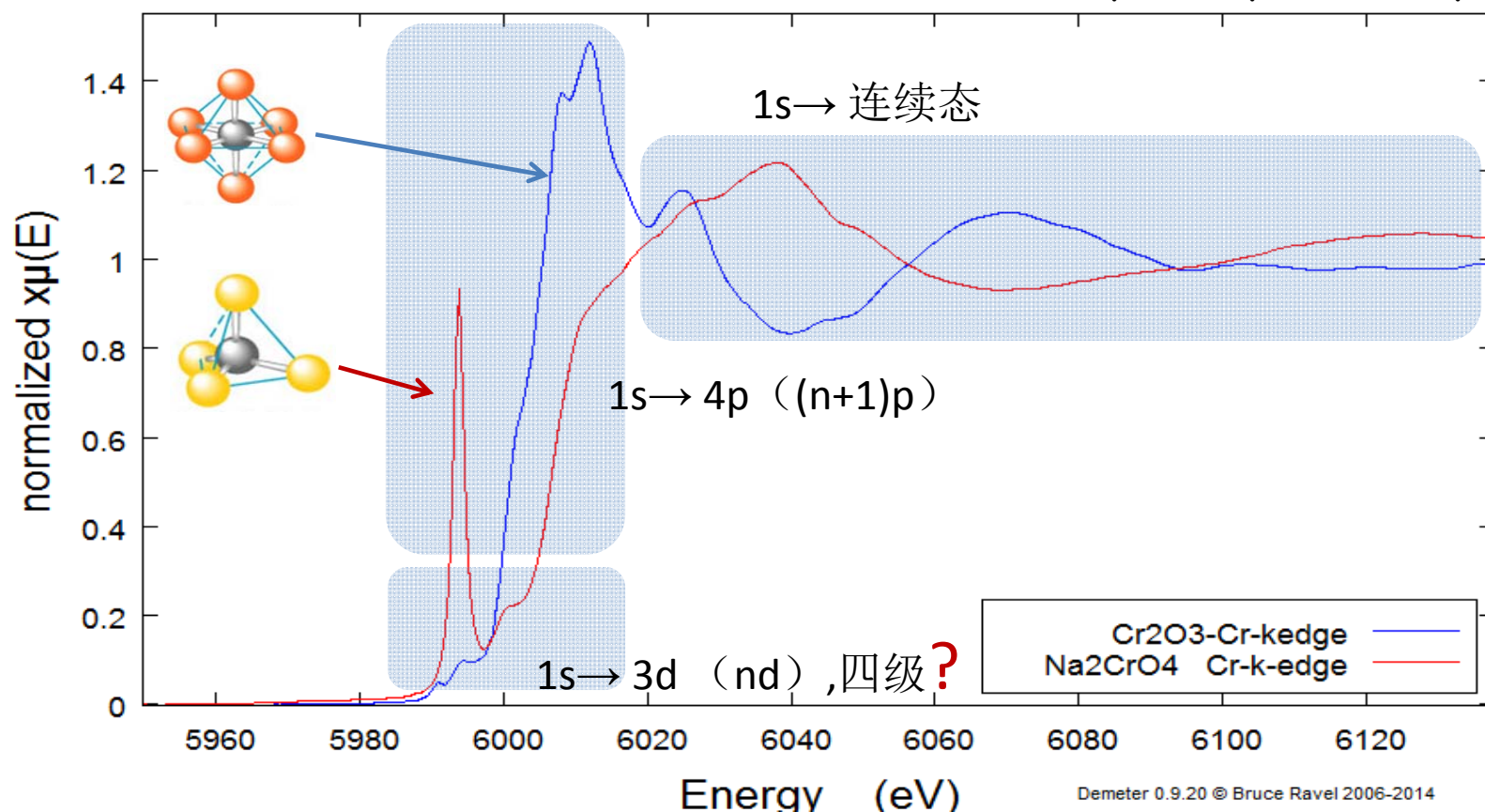


XANES谱基本原理

定性判定：凝聚态体系

试着： Cr_2O_3 和 Na_2CrO_4 ，Cr K-边XANES

$\text{Cr}: 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 4s^1 4p^0$





XANES谱基本原理

XANES谱分析与结果

分析原则:

- 体系: 结构, 吸收原子, 配体等
- 跃迁: 偶极跃迁规则, 四级跃迁规则
- 初态: $1s$, $2s$, $2p_{1/2}$, $2p_{3/2}$
- 终态: 构型, 对称性, 价态, 极化等

分析工具:

- 分子轨道和晶体场理论: 轨道相互作用, 对称性与杂化!
- 多重散射理论和能带理论: 计算XANES谱和LDOS

所获信息:

- ◆ 边前 (pre-edge): 束缚空态, 偶极和四级, 对称性与杂化
- ◆ 边 (edge): 电离阈及边移动, 吸收边结构, 扩展态, 价态
- ◆ 边后 (post-edge): 多重散射共振, 多电子激发, 几何构型



主要内容



北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据解析讲习班

武汉·2014

- ⊕ XAFS谱、XANES谱
- ⊕ XANES谱基本原理
- ⊕ XANES谱实验技术
- ⊕ XANES谱分析简介
 - 指纹效应
 - 模拟计算
 - PCA分析
- ⊕ XANES谱分析实例

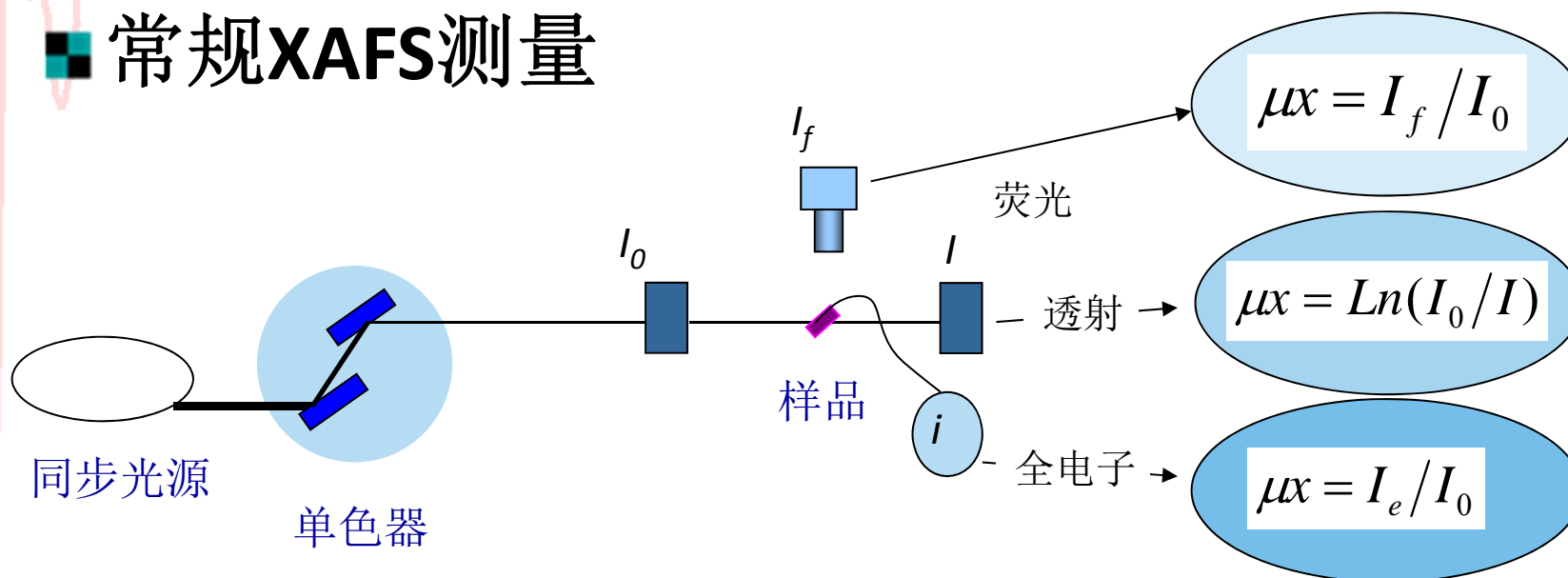


中国科学院高能物理研究所

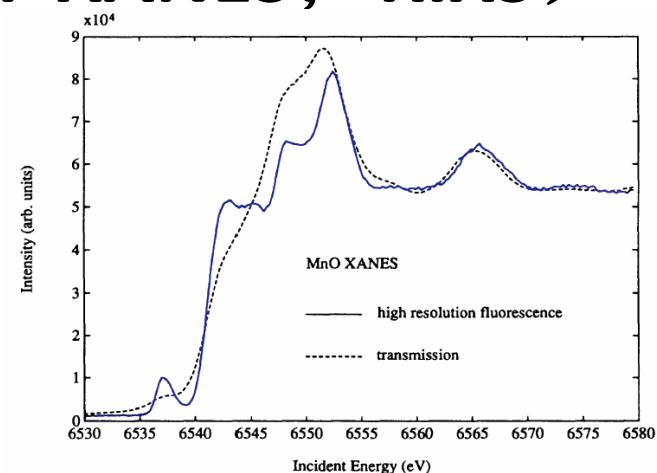
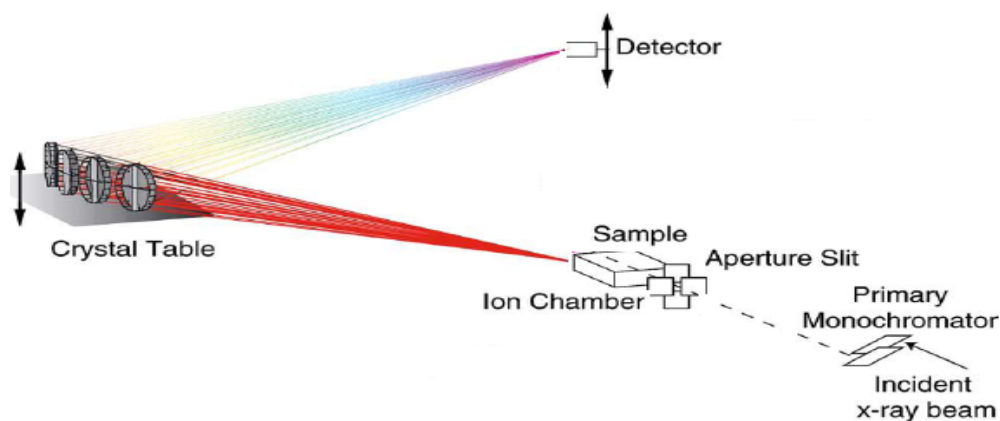


XANES谱实验技术

■ 常规XAFS测量



■ 部分荧光产额XANES (PFY-XANES; RIXS)

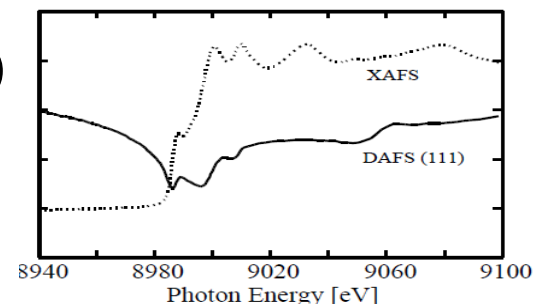




XANES谱实验技术

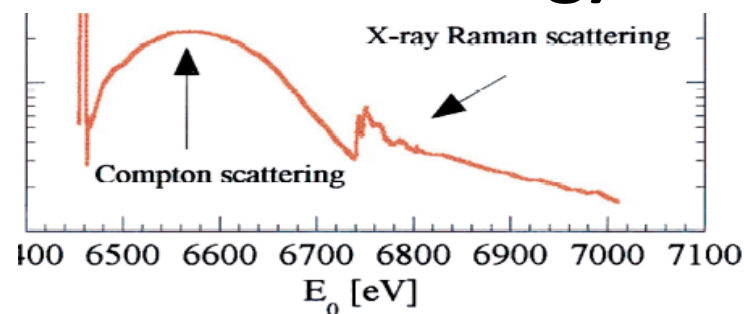
■ X射线反常精细结构 (DAFS)

- ✎ X射线衍射方法
- ✎ 元素选择性(不等价位点)



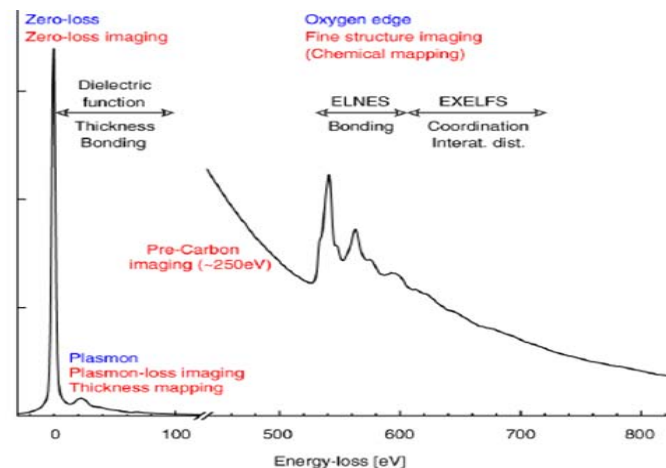
■ X射线拉曼散射(X-ray Raman Scattering)

- ✎ 入射X射线激发芯电子
- ✎ 测量入射X射线的非弹性散射。
- ✎ 测量轻元素谱



■ 电子能量损失谱(EELS)

- ✎ 入射电子激发芯电子
- ✎ 测量入射电子的非弹性散射

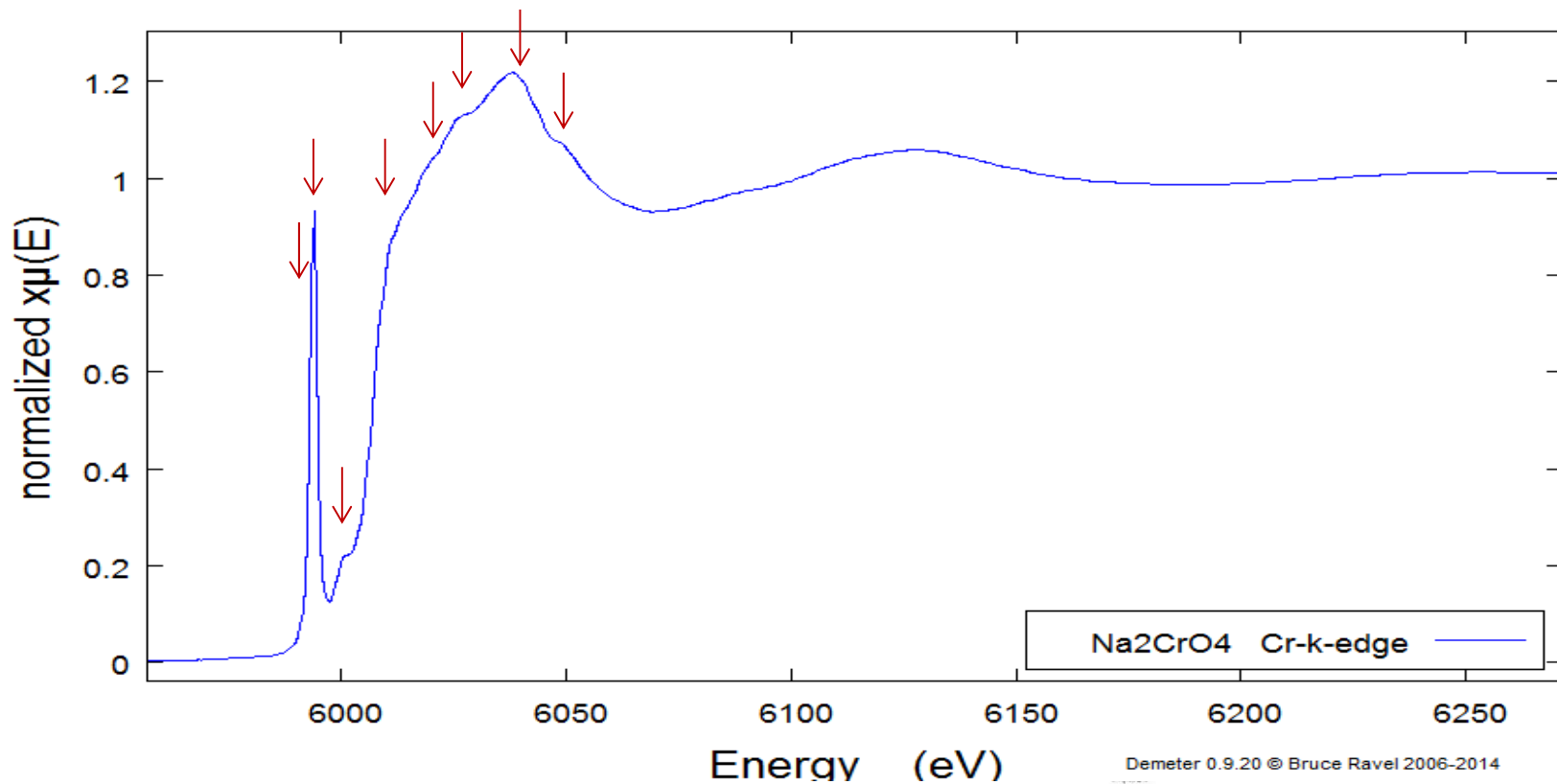




XANES谱实验技术

XANES谱:实验测量

- ✚ XANES: $-100 \sim +200\text{eV}$, 便于归一化
- ✚ 能量步长: 要充分考虑“边前+边”的谱特征
- ✚ 积分时间: 信噪比





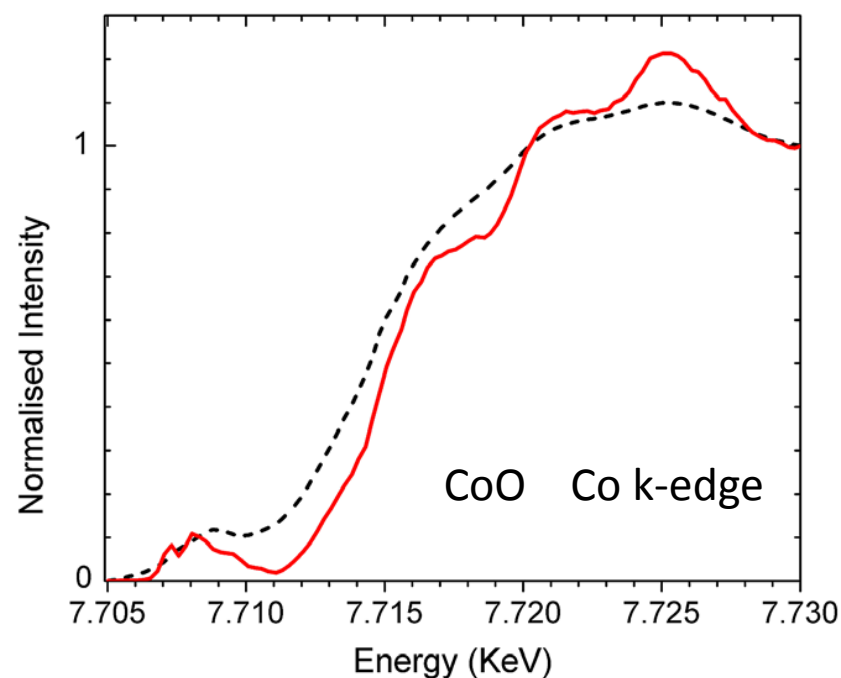
XANES谱实验技术

XANES谱: 芯空穴寿命与展宽

- ✦ $\tau \sim$ 飞秒量级
- ✦ 元素 Z 越高, 寿命越短, 能量展宽越大 (测不准关系)
- ✦ 高 Z 元素的XANES实验谱特征被“抹”了!
- ✦ 低 Z 元素的“NEXAFS”很“sharp”!

HR-XANES谱:

- RIXS, PFY-XANES,
- XRS



主要内容



北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据解析讲习班

武汉·2014

- ⊕ XAFS谱、XANES谱
- ⊕ XANES谱基本原理
- ⊕ XANES谱实验技术
- ⊕ XANES谱分析简介
 - 指纹效应
 - 模拟计算
 - PCA分析
- ⊕ XANES谱分析实例



XANES谱分析简介

XANES谱分析主要方法:

1. 指纹效应

- ↗ 谱的指纹特征
- ↗ 定性分析: 利用边前和边结构的指纹特征作模型比较

2. 模拟计算

- ↗ 多重散射计算
- ↗ 第一性原理计算

3. PCA分析 (略)

- ↗ 主元素分析
- ↗ 混合物谱的拆分



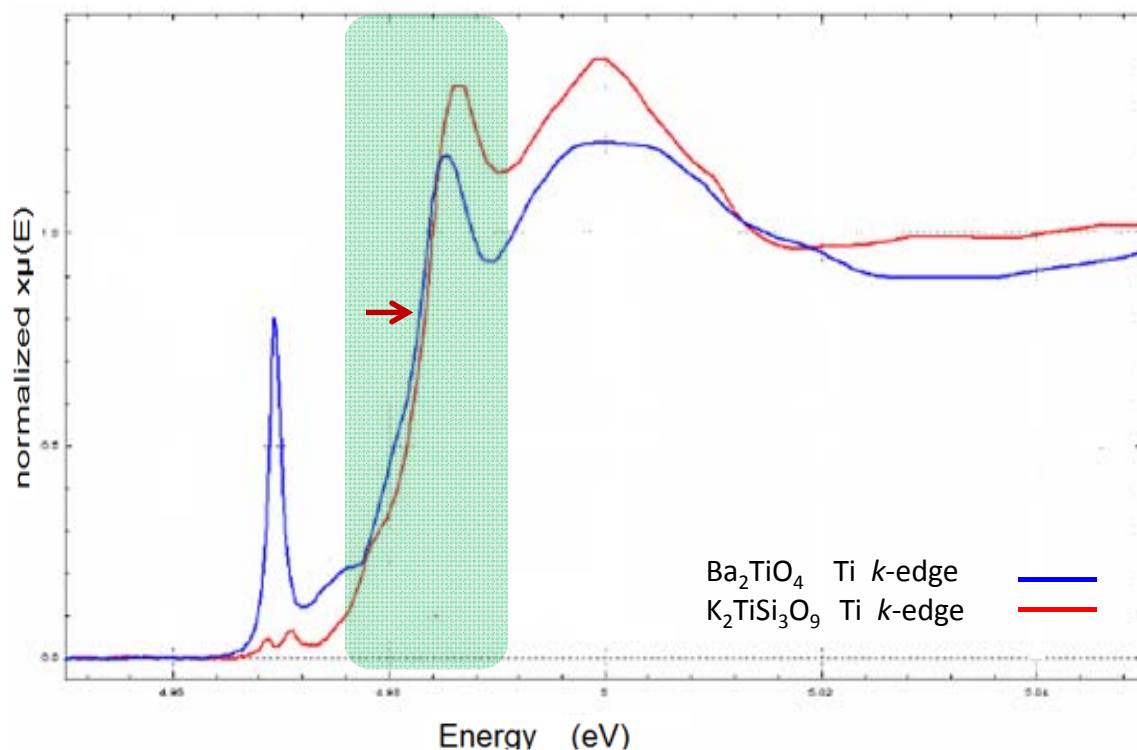


XANES谱分析简介

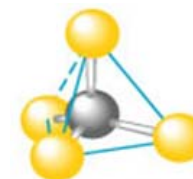
1. 指纹效应-1

谱的指纹特征

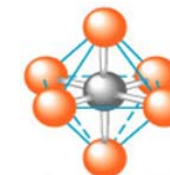
- ✓ 对称性: T_d , O_h
- ✓ 几何结构: 四面体、八面体
- ✓ 氧化态: Ti^{4+}



Ba_2TiO_4 : Ti^{4+}



$K_2TiSi_3O_9$: Ti^{4+}





北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据分析讲习班

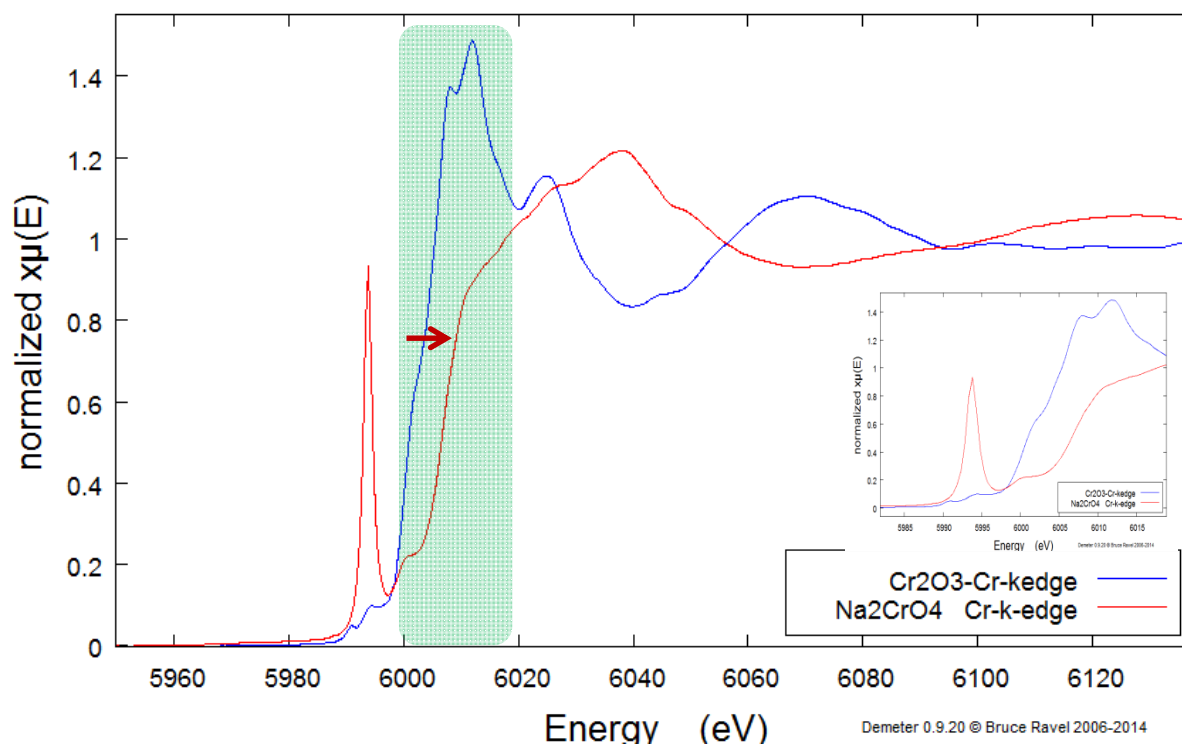
武汉·2014

XANES谱分析简介

1. 指纹效应-1

谱的指纹特征

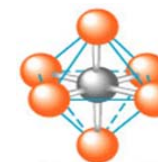
- ✓ 对称性: T_d , O_h
- ✓ 几何结构: 四面体、八面体
- ✓ 氧化态: Cr^{3+} , Cr^{6+}



Na_2CrO_4 : Cr^{6+}



Cr_2O_3 : Cr^{3+}



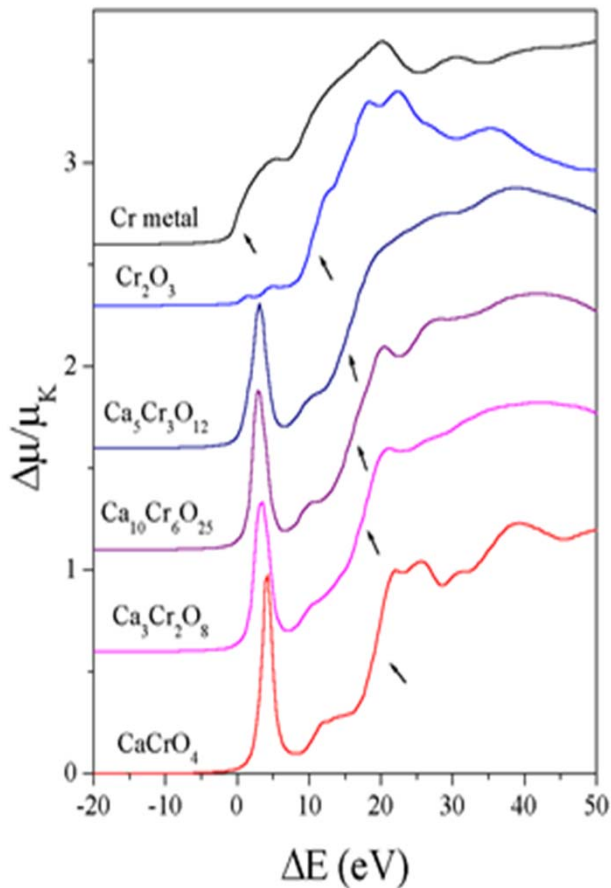
中国科学院高能物理研究所



XANES谱分析简介

1. 指纹效应-1

谱的指纹特征



- ✓ 价态: $\text{Cr}^{0\sim+6}$
- ✓ 对称性
- ✓ 几何结构
- ✓ 吸收边的移动
- ✓ 吸收边结构

- ◆ Cr 箔, Cr_2O_3 , $\text{Ca}_5\text{Cr}_3\text{O}_{12}$, $\text{Ca}_{10}\text{Cr}_6\text{O}_{25}$, $\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{O}_8$, CaCrO_4 的Cr K-边 XANES谱。
- ◆ 能量标定相对于Cr箔 (5989.0 eV)



XANES谱分析简介

1. 指纹效应-1

谱的指纹特征分析: **TM**八面体

➤ 边前:

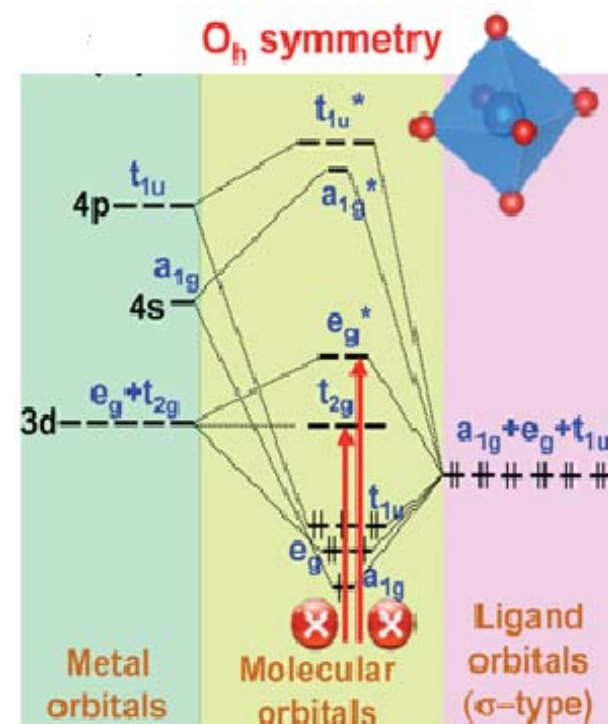
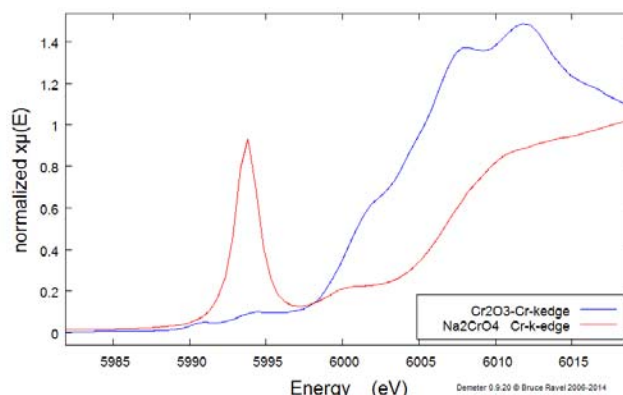
↗ 偶极: $1s \rightarrow (e_g^*$ 和 $t_{2g})$ 跃迁禁闭。但是, 扭曲或振动破坏中心反演对称, 使得 $3d-4p$ 杂化, 发生向 $3d$ (带) 的 $4p$ 部分偶极跃迁。

↗ 四极: $1s \rightarrow 3d$ 跃迁允许, 但是强度 $\sim 1-3\%$ 。

➤ 边:

↗ 偶极: 主峰归结于 $1s \rightarrow t_{1u}^*$ 跃迁。

↗ 对称性: 由于扭曲或振动使对称性降低, 导致 t_{1u}^* 轨道分裂, 出现主峰的劈裂。





XANES谱分析简介

1. 指纹效应-1

谱的指纹特征分析: **TM四面体**

➤ 边前:

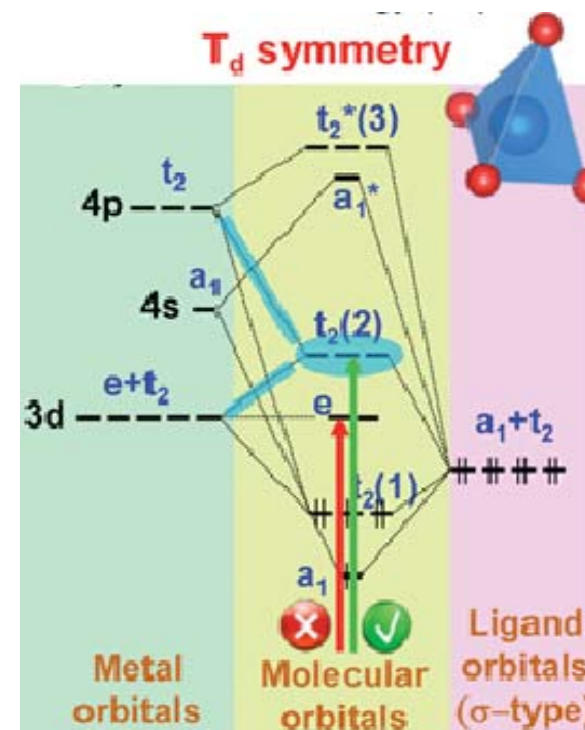
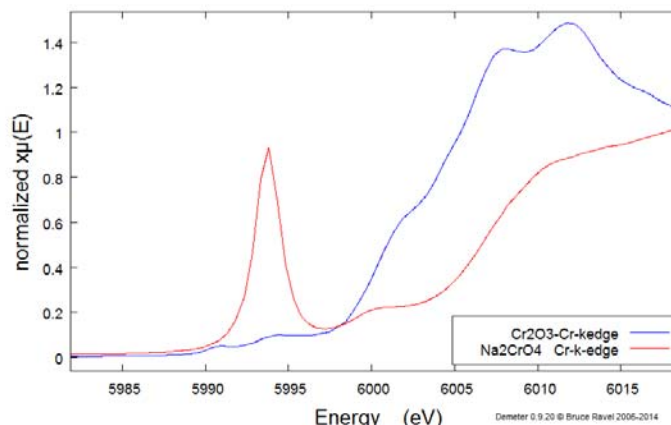
↗ 偶极: $1s \rightarrow t_2(2)$ ($3d+4p$) 跃迁允许。

↗ 四极: $1s \rightarrow 3d$ 跃迁允许。

➤ 边:

↗ 偶极: 主峰归结于 $1s \rightarrow t_2(3)$ 跃迁。

↗ 态密度: 由于 $t_2(3)$ 轨道上空穴态密度的减少, 导致峰强度相对于八面体配位的降低许多。

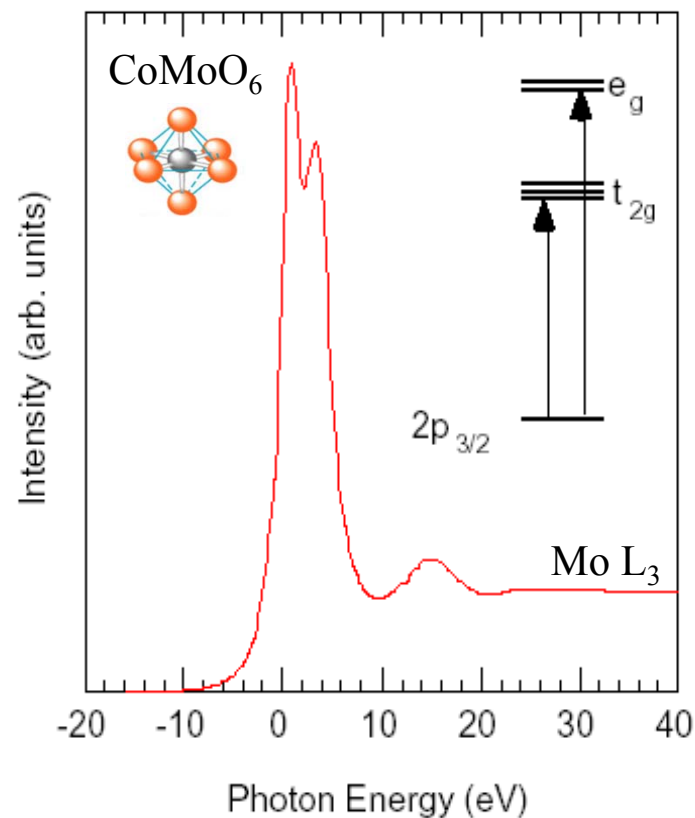
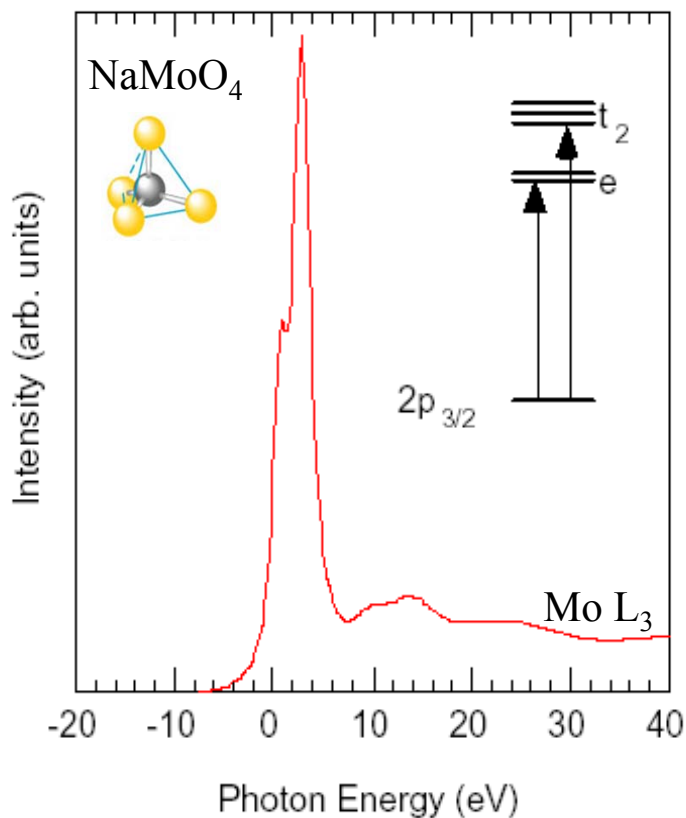




XANES谱分析简介

1. 指纹效应-2

L_{II} 和 L_{III} 边 XANES 是 $2p \rightarrow nd (+ns)$ 跃迁

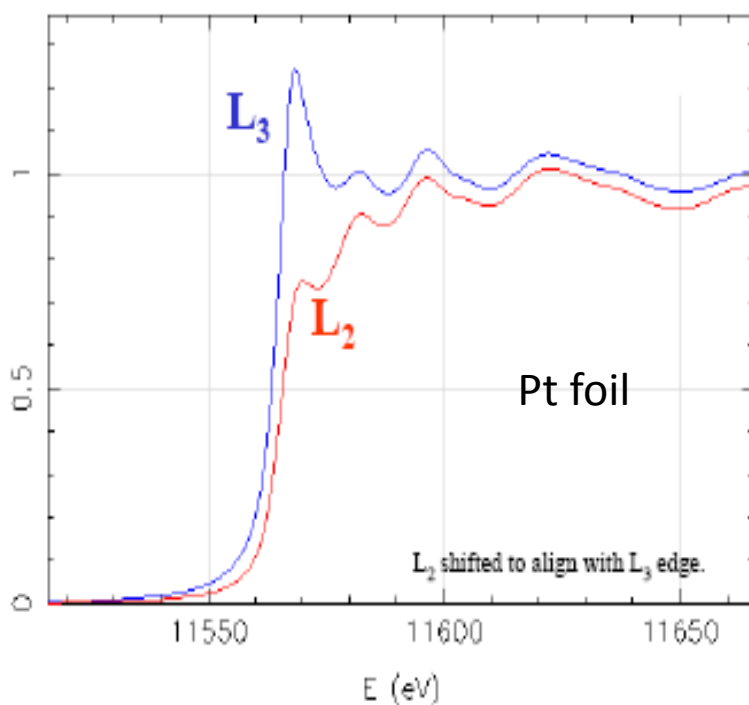




XANES谱分析简介

1. 指纹效应-3

L_{II} 和 L_{III} 边 XANES 是 $2p \rightarrow nd (+ns)$ 跃迁



Pt金属箔的 L_2 和 L_3 边的 XANES谱:

◆ 边前: 无特征

◆ 边:

↗ 主吸收峰很窄, 表明d态的局域性;

↗ 强度明显不同, L_2 比 L_3 的弱很多(?) ;

↗ 边的位置略有不同, 相对论效应(自旋-轨道)

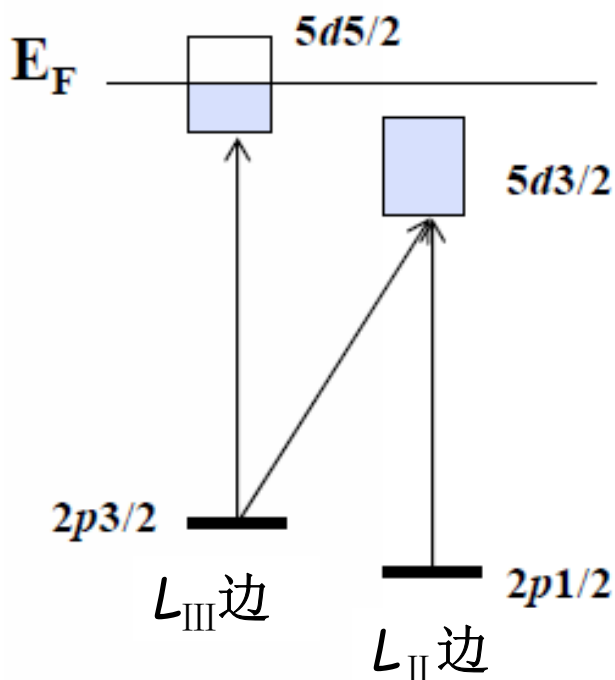
◆ 边后: 一致



XANES谱分析简介

1. 指纹效应-3

L_{II} 和 L_{III} 边 XANES 是 $2p \rightarrow nd (+ns)$ 跃迁



Pt金属箔的 L_{II} 和 L_{III} 边的 XANES 谱分析:

- ◆ 偶极: $\Delta l = \pm 1$, $\Delta j = 0, \pm 1$, $\Delta s = 0$
- ◆ L_{II} 边: $2p_{1/2} \rightarrow 5d_{3/2}$
 $2p_{1/2} \not\rightarrow 5d_{5/2}$
- ◆ L_{III} 边: $2p_{3/2} \rightarrow 5d_{3/2}$
 $2p_{3/2} \rightarrow 5d_{5/2}$





XANES谱分析简介

2. 模拟计算

- 对于**1s XANES**谱，芯电子能够用单电子激发模型描述(可以忽略电荷转移)。
- 而对于**2p XANES**谱，特别是**3dTM**体系，需要考虑空穴-电子的相互作用**TDDFT**，或用考虑了电荷转移和共价效应的多重态分析方法。
- 态密度计算是谱分析的关键。

定量分析：

↙ 黑盒子，数字实验

↙ 分解谱，pDOS

简化模型：

↙ 越清晰，越粗糙





XANES谱分析简介

2. 模拟计算

所用软件:

➤ 实空间多重散射:

↗ FDMNES [1]

↗ FEFF [2]

↗ CONTINUUM [3]

↗ MXAN [4]

[1] Joly Y 2003 *J. Synchrotron Radiat.* **10** 58

[2] Rehr J J and Albers R C 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 621

[3] Wu Z Y, Xian D C, Hu T D, Xie Y N, Tao Y, Natoli C R, Paris E and Marcelli A 2004 *Phys. Rev. B* **70** 33104

[4] Benfatto M, Della Longa S and Natoli C R 2003 *J. Synchrotron. Radiat.* **10** 51



XANES谱分析简介

2. 模拟计算

软件:

➤ 能带结构:

➤ PARATEC [5, 6]

➤ WIEN2K [7]

➤ CASTEP [8]

[5].Cabaret D, Mauri F and Henderson G S 2007 *Phys. Rev. B* **75** 184205

[6] Gaudry E, Cabaret D, Saintavit P, Brouder C, Mauri F, Goulon J and Rogalev A 2005 *J. Phys.: Condens. Matter* **17** 5467

[7] Schwarz K, Blaha P and Madsen G K H 2002 *Comput. Phys. Commun.* **147** 71

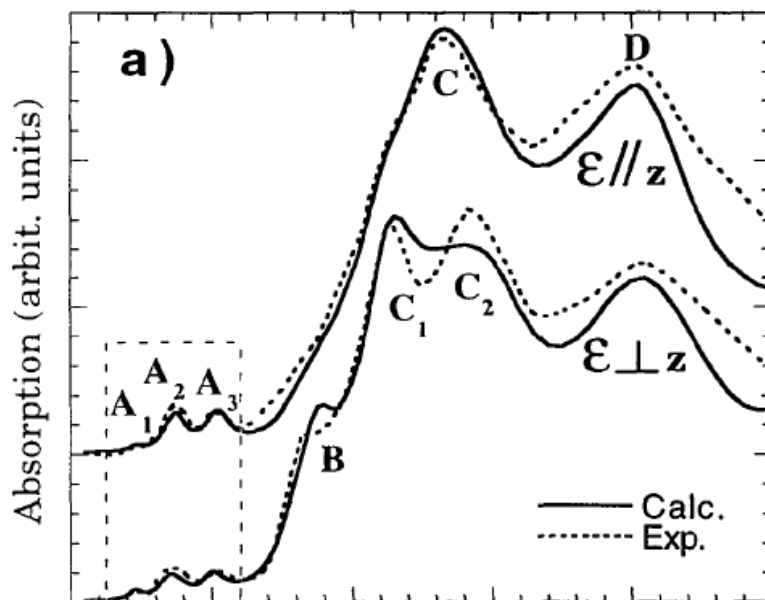
[8] Milman V, Winkler B, White J A, Pickard C J, Payne M C, Akhmatkaya E V and Nobes R H 2000 *Int. J. Quantum Chem.* **77** 895



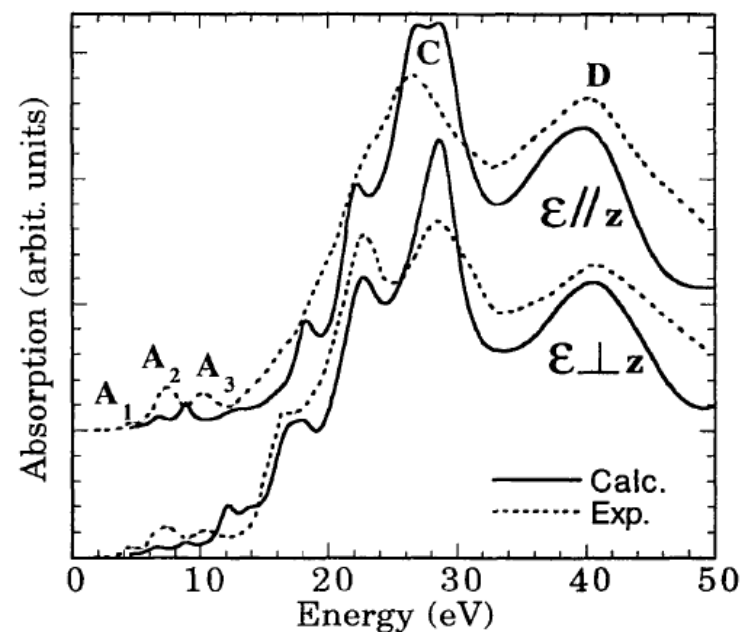
XANES谱分析简介

2. 模拟计算

TM氧化物: Ti K边极化XANES, TiO_2 ,



PARATEC



CONTINUUM

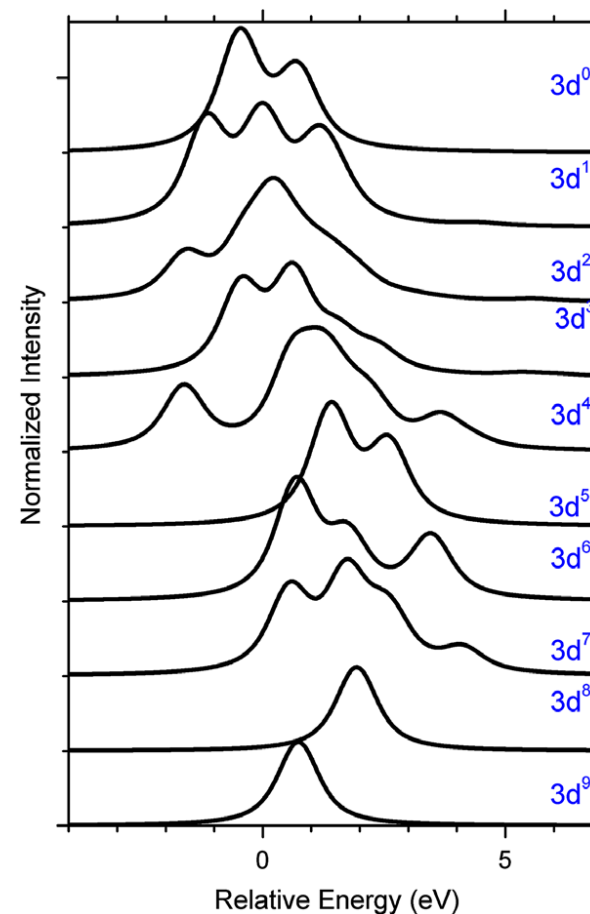


XANES谱分析简介

2. 模拟计算

TM氧化物：四级，八面体

- ◆ 通常八面体只有四级跃迁，可以用 $3d^N \rightarrow 1s^1 3d^{N+1}$ 多重态跃迁模拟。
- ◆ 晶场参数 $10Dq \sim 1.2\text{eV}$
- ◆ 能量零点为 $3d^N$ 初态的平均
- ◆ $1s^1 3d^{N+1}$ 终态为 $N=1\sim 9$



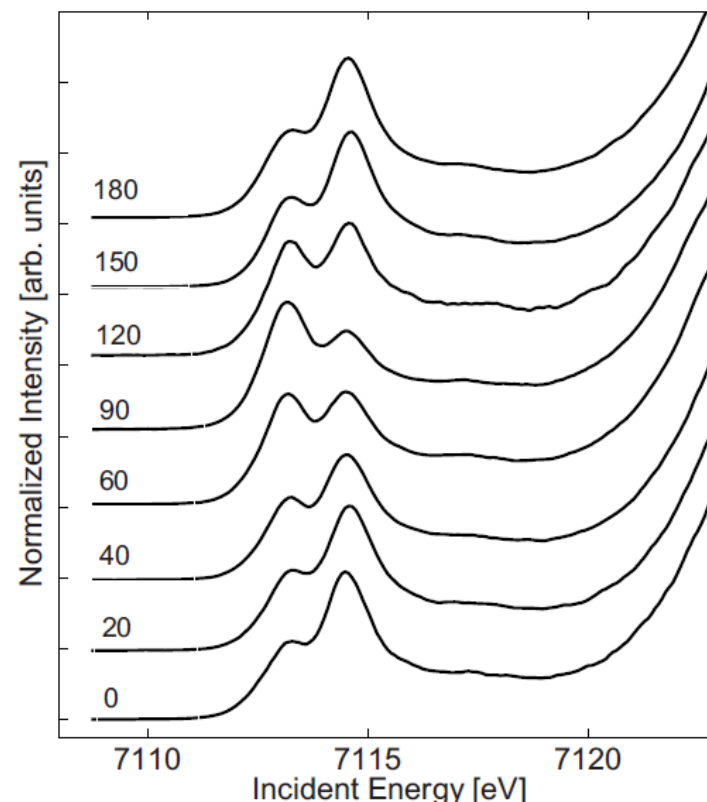


XANES谱分析简介

2. 模拟计算

TM氧化物: 偶极+四级, 扭曲八面体

- 扭曲八面体, 失去了中心反演对称性, 发生3d和4p杂化。
- 不同极化角度的计算表明, α - Fe_2O_3 的Fe的K边XANES谱的边前峰为偶极和四级的和。
- 强度贡献~1:1



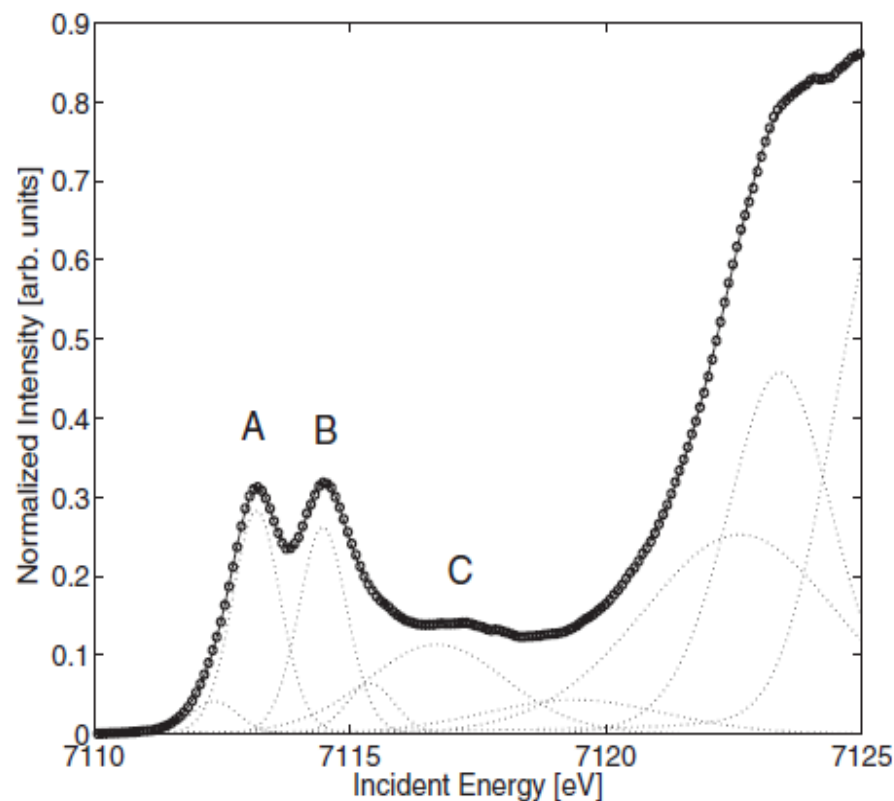


XANES谱分析简介

2. 模拟计算

TM氧化物：局域和非局域偶极，扭曲八面体

- $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的Fe K边XANES谱三个边前峰
- 前两个A and B为向 t_{2g} 和 e_g
- 第三个峰C为向相邻两个Fe-Fe杂化的空轨道的跃迁。

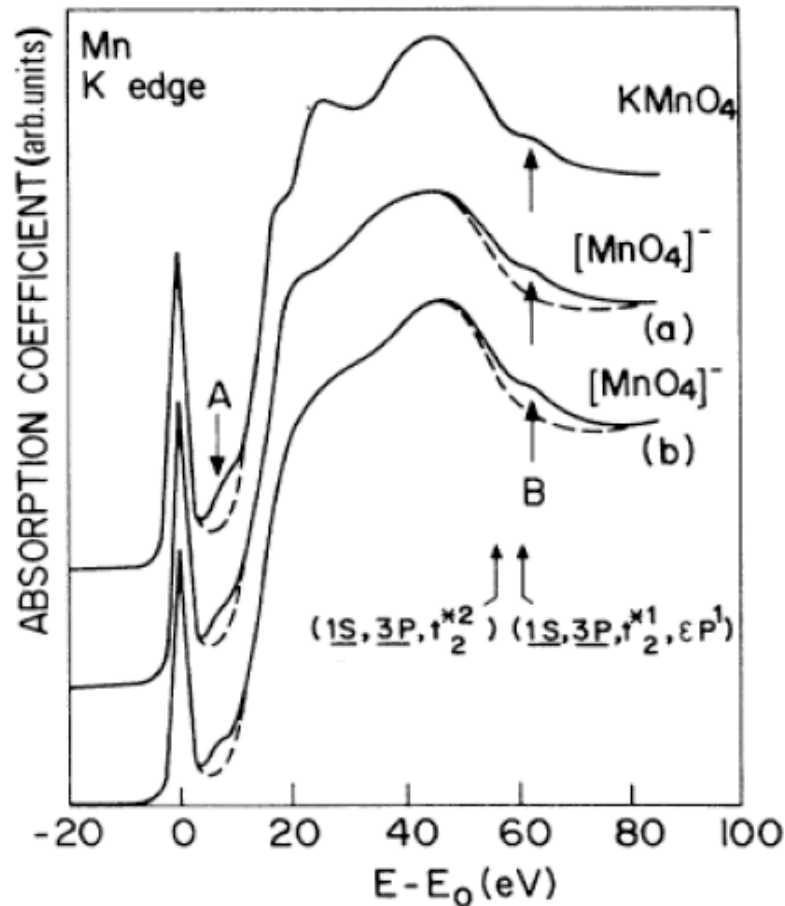




XANES谱分析简介

2. 模拟计算

边后：散射峰与多电子激发



- FMS + 四级
- 双电子激发



北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据分析讲习班

武汉·2014

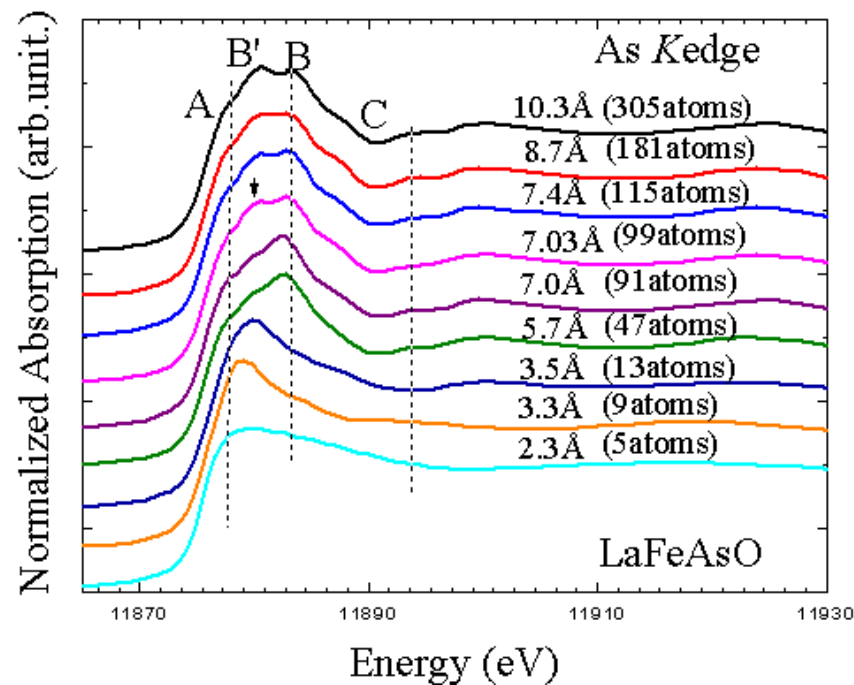
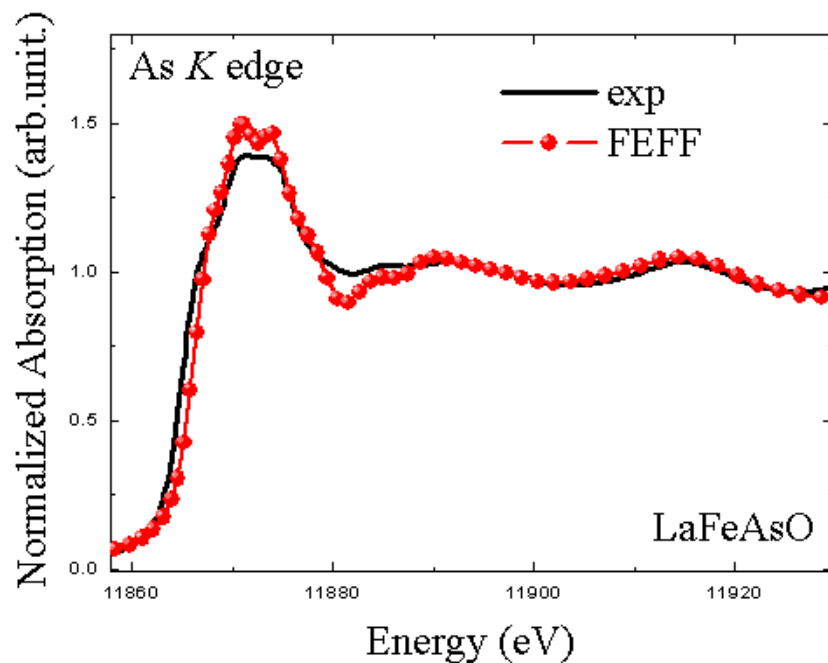
XANES谱分析简介

2. 模拟计算

LaFeAsO的As的K边

FEFF:HL

散射分壳层拆分



中国科学院高能物理研究所



XANES谱分析简介

2. 模拟计算

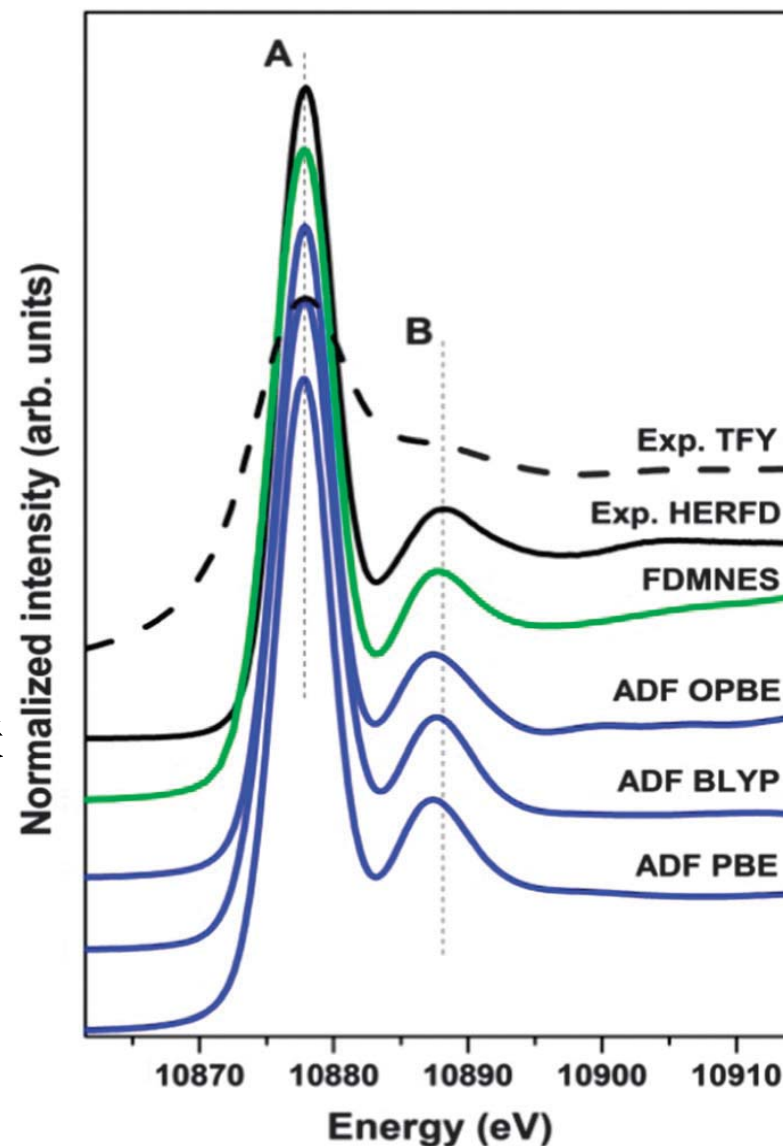
OsCl_3 的Os的 L_{III}

FDMNES

- 有限差分方法(finite difference method) 离散格点解薛定谔方程
- Hedin and Lundqvist 交换关联模型

ADF

- 全电子单点计算.





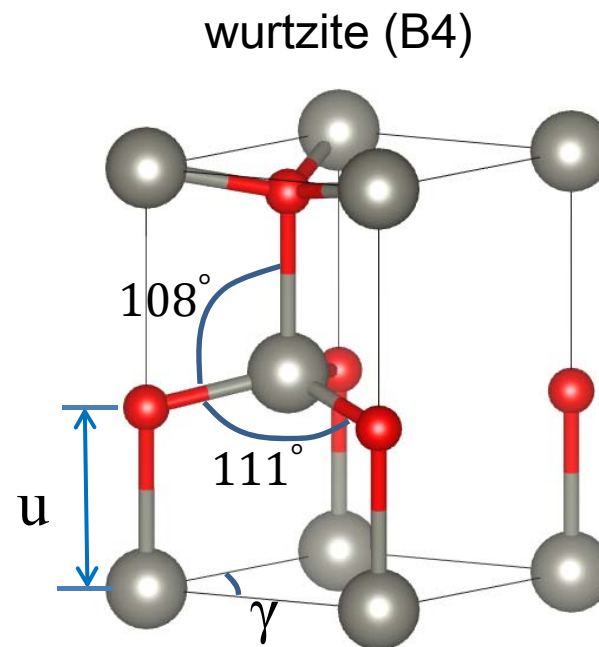
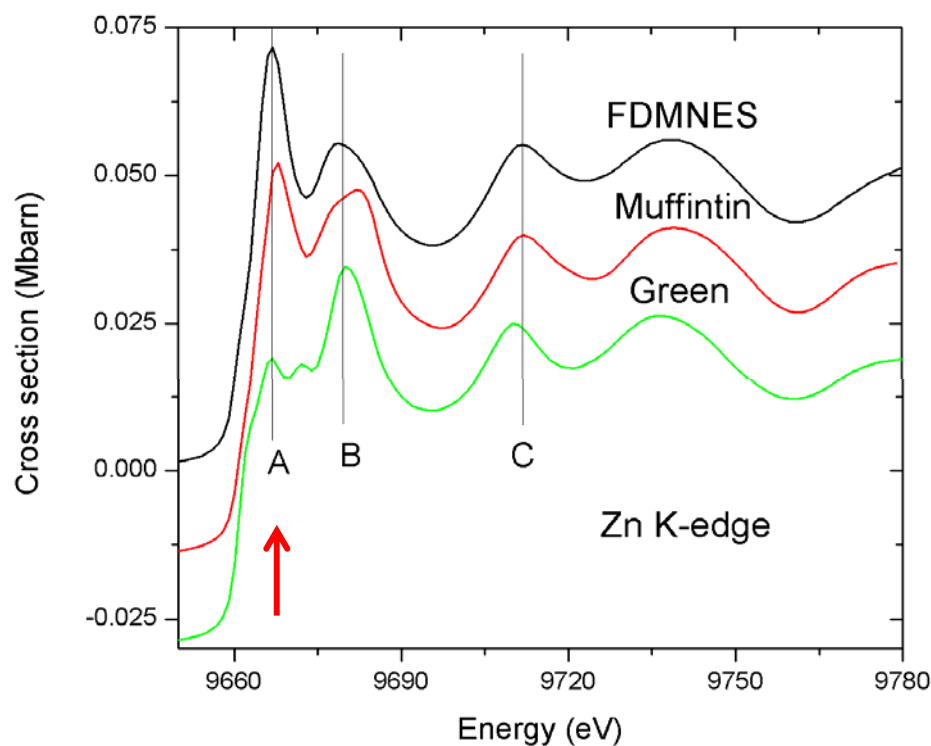
XANES谱分析简介

2. 模拟计算

非Muffin-tin势效应

FDMNES :

可以使用Muffin-tin势或全势





XANES谱分析简介

2. 模拟计算

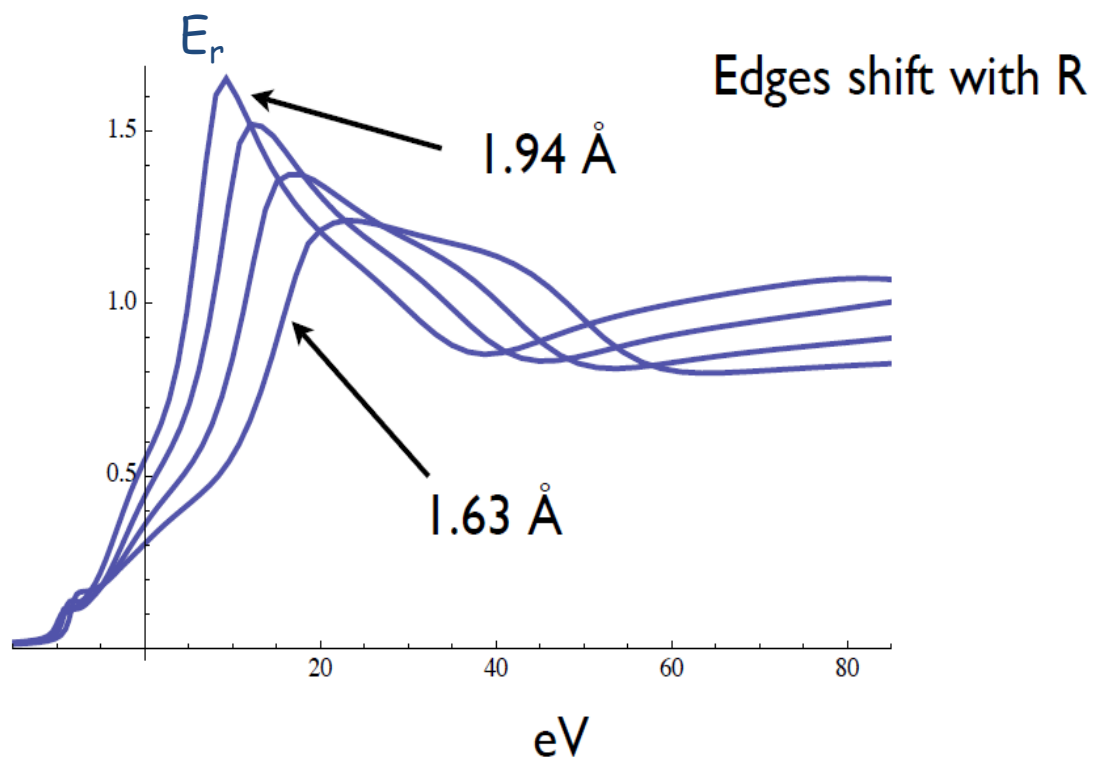
Natoli定理:

$$E_r \cdot R^2 = \text{Const.}$$

- 近似估算。
- 根据峰位，初步判定键长（晶胞）

MnO₄ planar cluster

$r = 1.63, 1.73, 1.84, 1.94 \text{ \AA}$ $f_{\text{eff}} 8.2$ SCF/FMS



主要内容



北京同步辐射装置
Beijing Synchrotron Radiation Facility

×射线吸收谱学实验
和数据解析讲习班

武汉·2014

- ⊕ XAFS谱、XANES谱
- ⊕ XANES谱基本原理
- ⊕ XANES谱实验技术
- ⊕ XANES谱分析简介
 - 指纹效应
 - 模拟计算
 - PCA分析
- ⊕ XANES谱分析实例

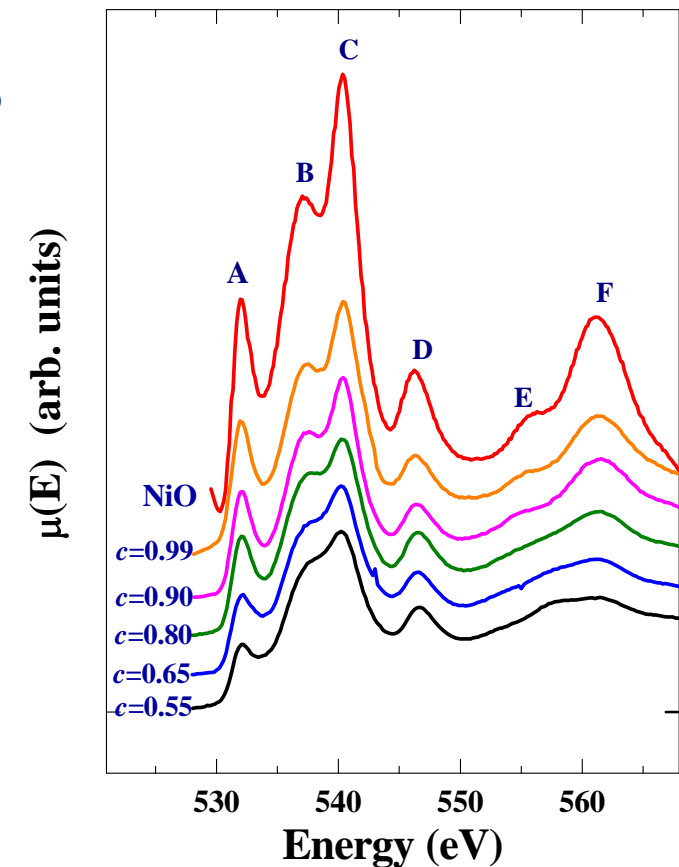


XANES谱分析实例

1. 氧化物O K-边谱计算

固熔体 $\text{Ni}_c\text{Mg}_{1-c}\text{O}$ 中O的K-XANES

- A prototype of a diluted face-centred-cubic(fcc) antiferromagnet.
- Multi-phases:
 - Homogeneous antiferromagnet for $0.63 < c < 1$
 - Cluster antiferromagnet for $0.40 < c < 0.63$
 - A spin-glass state for $0.25 < c < 0.40$
 - Paramagnet for $c < 0.25$
- $3d(\text{Ni}^{2+})$ - $2p(\text{O}^{2-})$ hybridization play a crucial role in magnetic interaction.
- Doping dependence of $3d(\text{Ni}^{2+})$ - $2p(\text{O}^{2-})$ mixing probed by O K-XANES



O K-edge XANES spectra of pure NiO and $\text{Ni}_c\text{Mg}_{1-c}\text{O}$ solid solutions



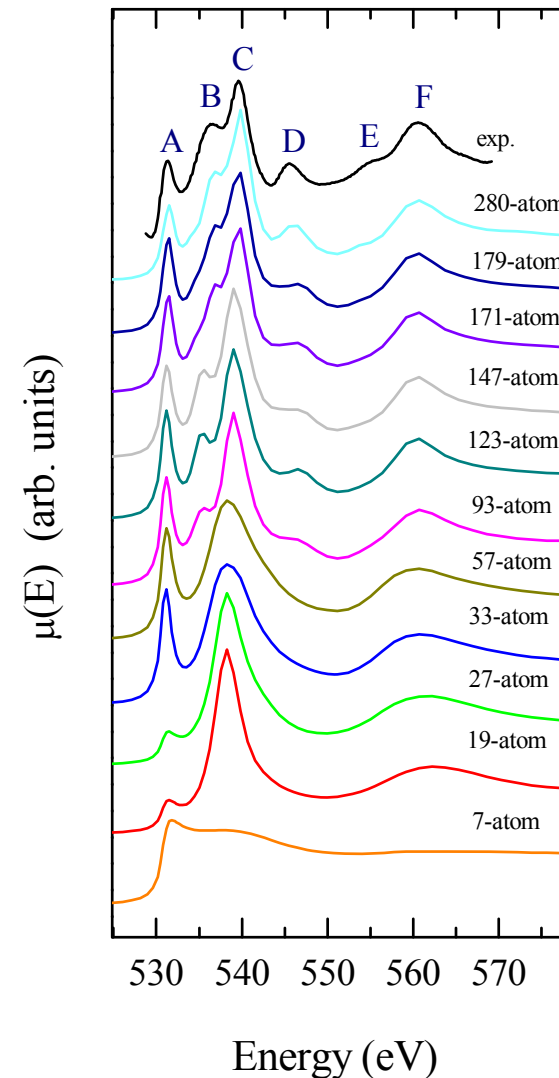
XANES谱分析实例

1. 氧化物O K-边谱计算

- FEFF
- 固熔体 $\text{Ni}_c\text{Mg}_{1-c}\text{O}$ 中O的K-XANES计算

逐层计算NiO的O K-XANES 谱

- Hedin-Lundqvist model
- No shift and additional broadening 0.6 eV
- No thermal disorder

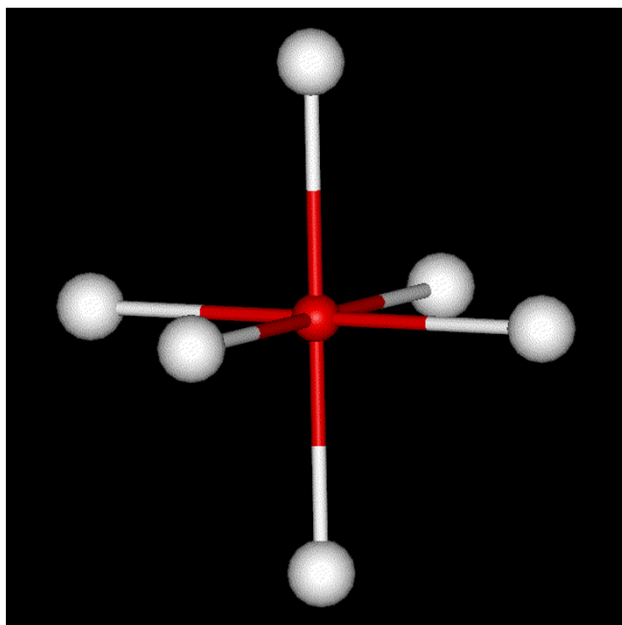




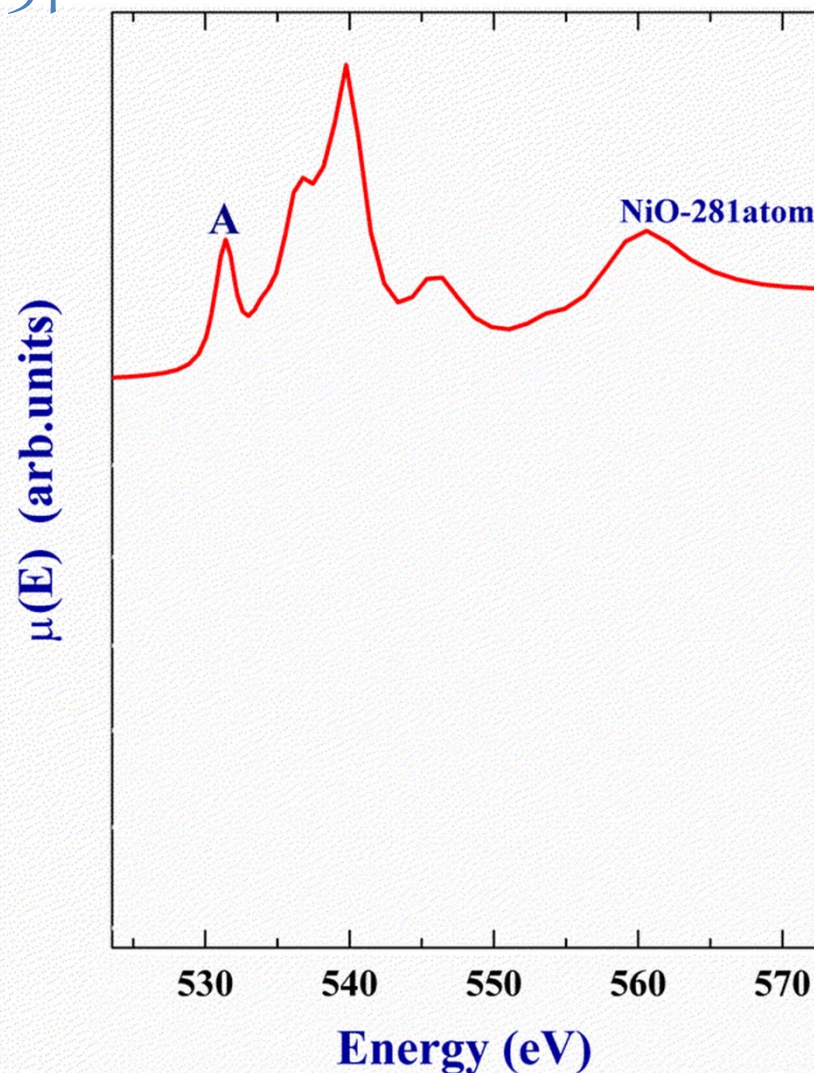
XANES谱分析实例

1. 氧化物O K-边谱计算

用Mg逐一替换O周围的Ni



- ◆ A峰来自 $2p(\text{O})-3d(\text{Ni})$ 混合
- ◆ 强度随Mg的掺杂浓度增加而降低

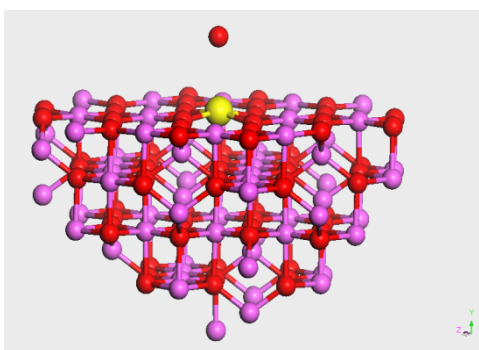
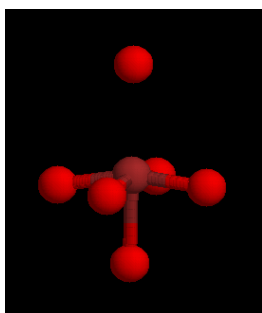




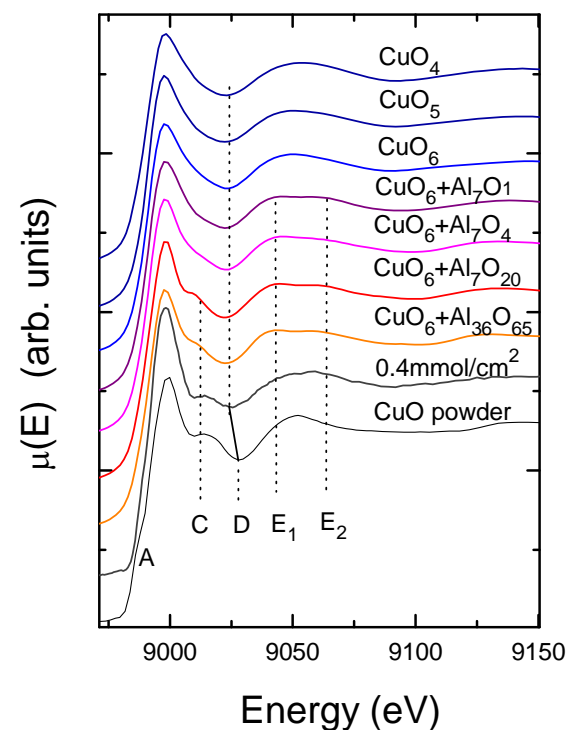
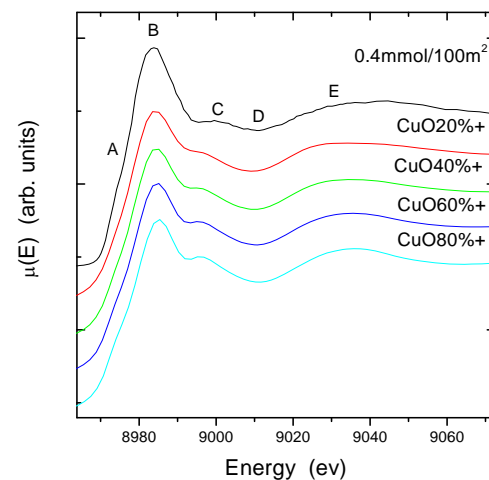
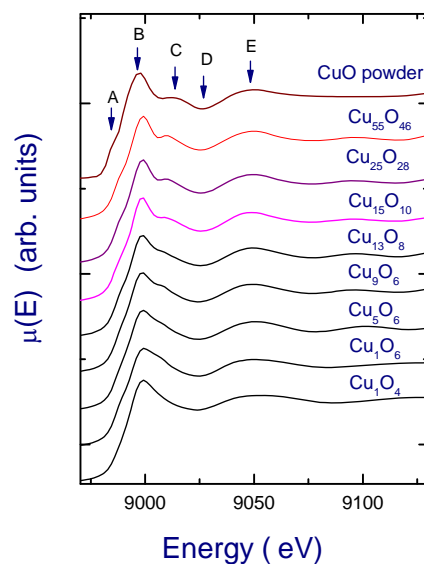
XANES谱分析实例

2. TMO的TM K-边谱计算

- FEFF
- $\text{CuO}@ \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$



CuO分散在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上.



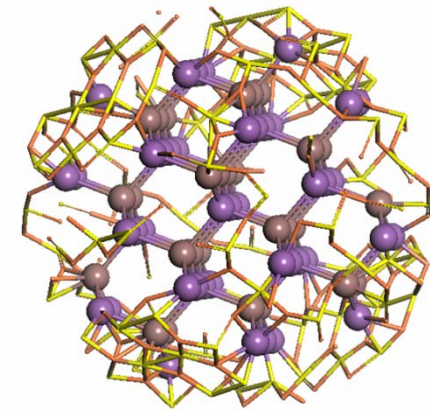
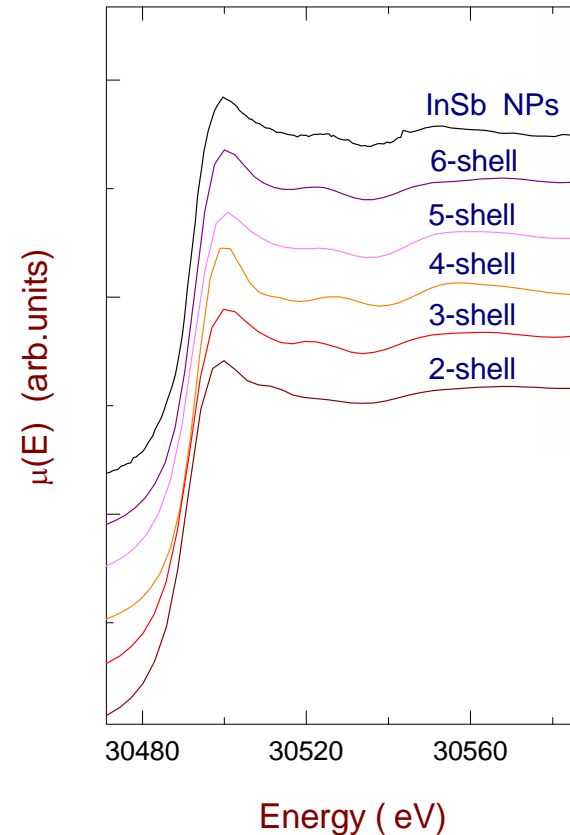
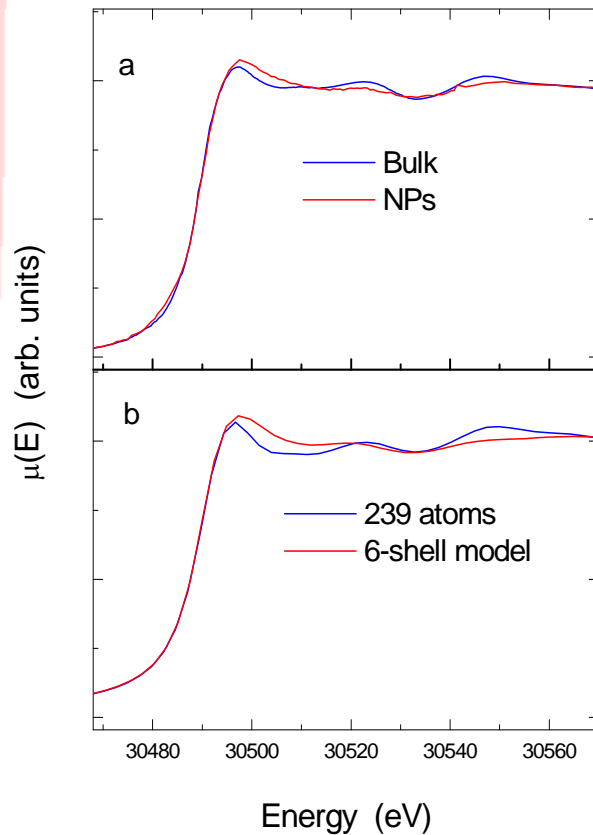
CuO是以团簇的形式分散在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 上，不是单分散。



XANES谱分析实例

3. InSb团簇Sb K-边谱计算

- FEFF
- 嵌在非晶 SiO_2 基质中的InSb量子点



6-shell model:
6 shells InSb cluster
embedded in a- SiO_2
matrix

a. Sb K-XANES;
b. Sb K-XANES simulations for 239 atoms and 6-shell model

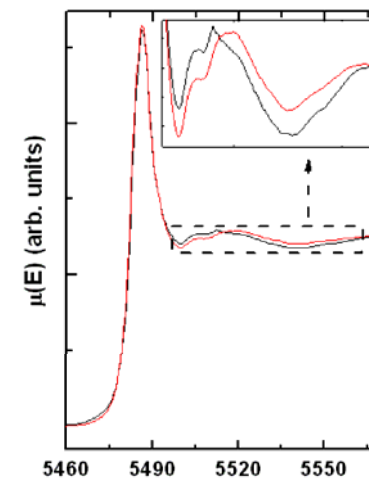
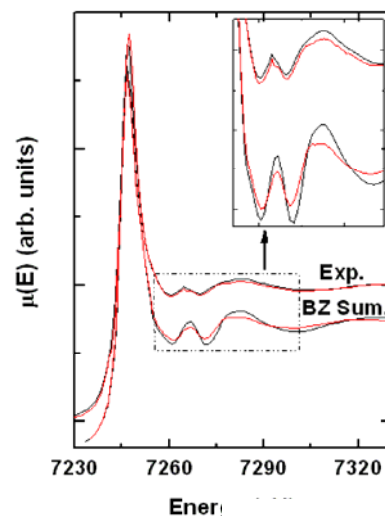
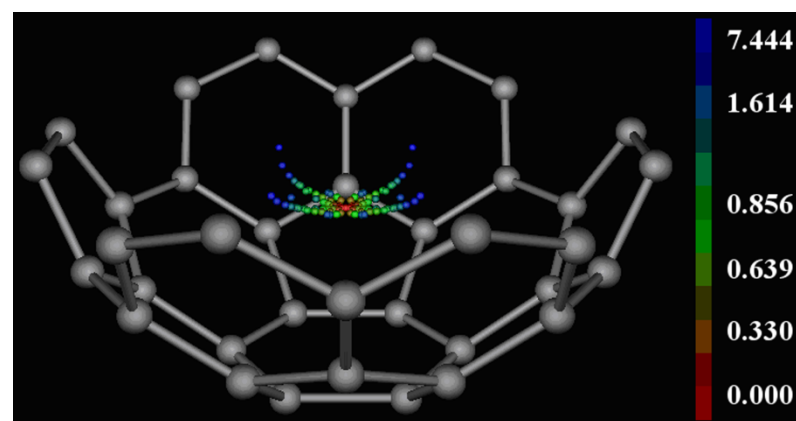
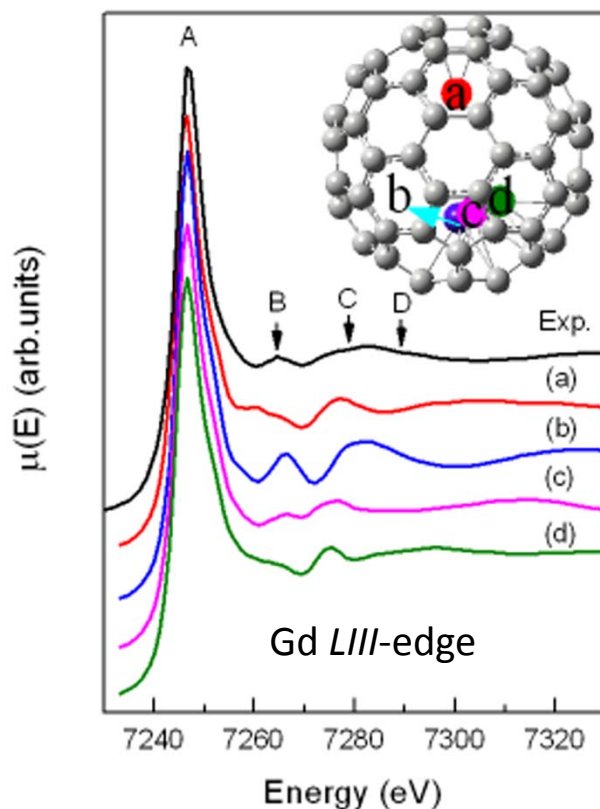


XANES谱分析实例

4. 碳笼 Gd L_{III} 边谱计算

➤ FEFF

➤ Gd@C82



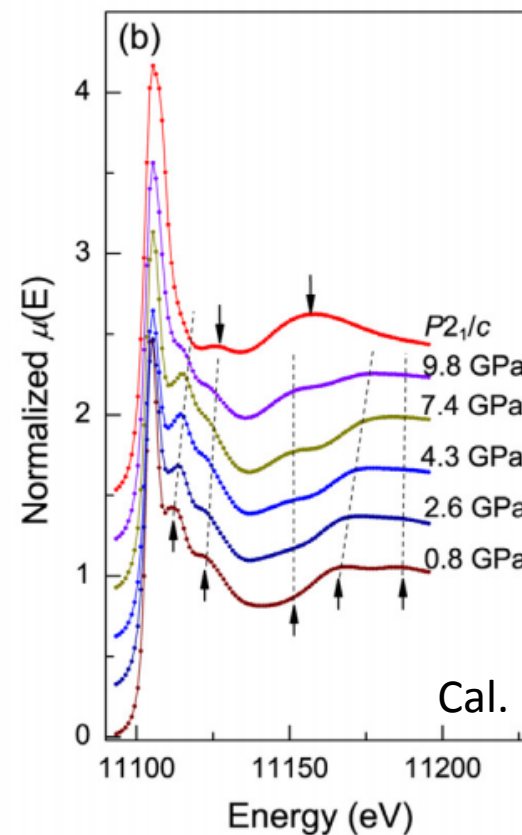
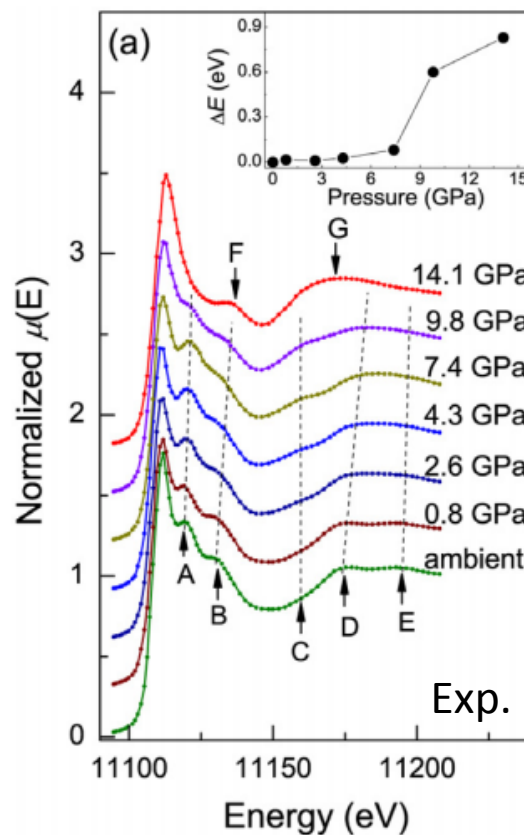
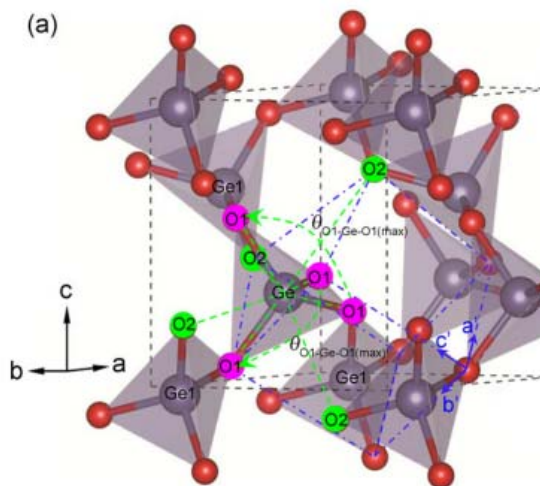
Chem. Commun.2008



XANES谱分析实例

5. GeO_2 的Ge K边谱计算

- FDMNES
- $\alpha\text{-GeO}_2$ 高压相变机制研究



The background features a large, light blue arc sweeping from the top left towards the right. In the bottom left corner, there is a detailed, textured spiral pattern in shades of blue and white, resembling a stylized eye or a vortex.

谢谢