

電子衝突によるヘリウム自動電離スペクトル の衝突エネルギー、放出角依存性

原子物理研究室
若林潤

< 本研究の目的 >

Heの二電子励起状態からの放出電子スペクトルの衝突エネルギー、角度依存性を系統的に調べ、二電子励起状態の生成、崩壊の過程を明らかにする。

< 過去の本研究室における研究成果 >

1 .高エネルギー電子衝突によるHeの
2121' 系列からの放出電子スペクトル
の形状因子の決定した

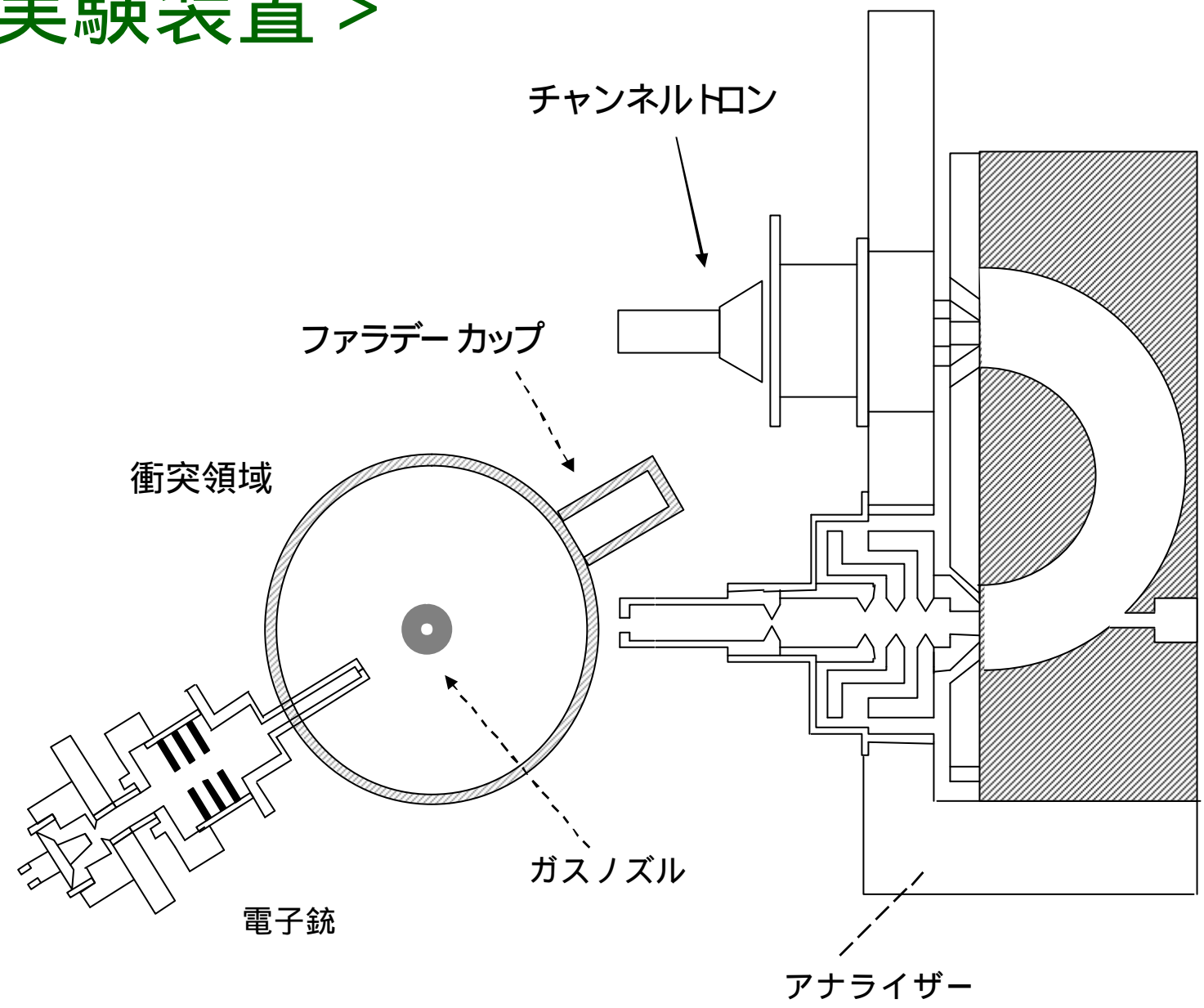
2 .一次のボルン近似による計算結果
との比較をした結果、1keVにおいて
も大きく異なるということがわかった

< 研究内容 >

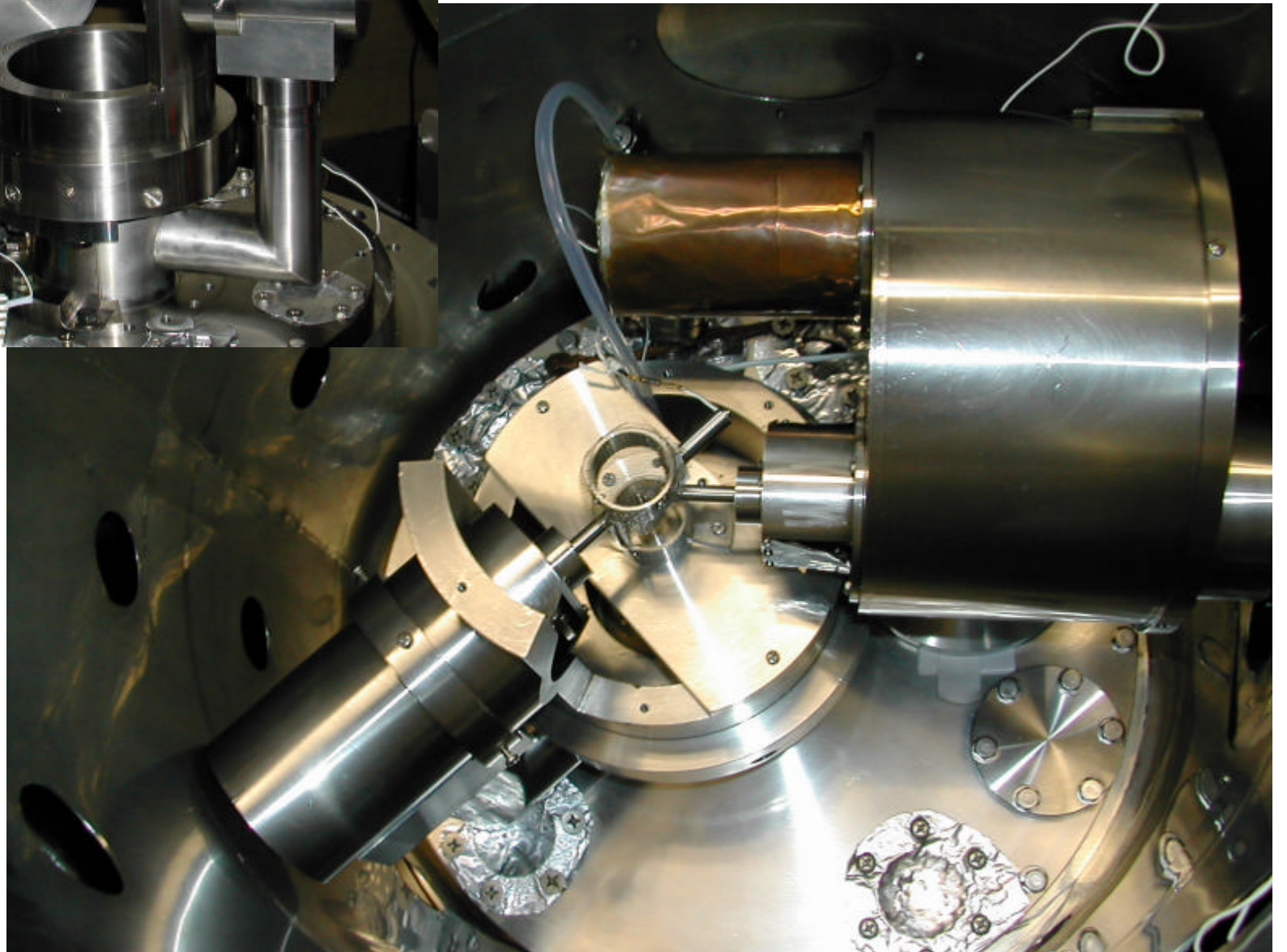
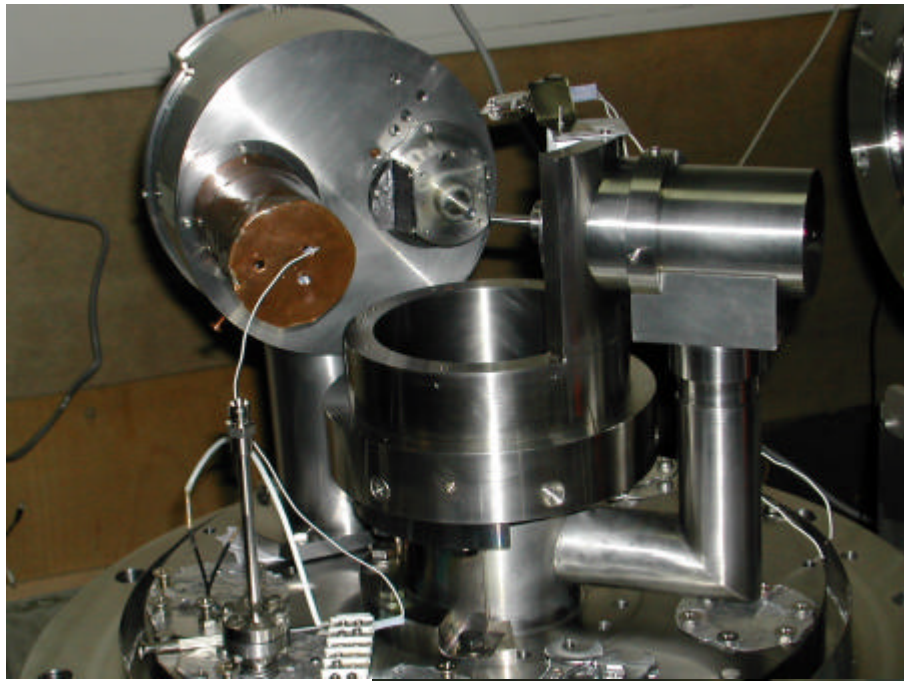
200eV以下の低エネルギー電子衝突

1. $2121'$ 状態からの放出電子スペクトルの形状因子の決定
2. $2131'$ 状態及び $(2p^2)^1S$ からの放出電子スペクトルの測定
3. 二電子励起閾値付近でのPCI効果の観測

< 実験装置 >

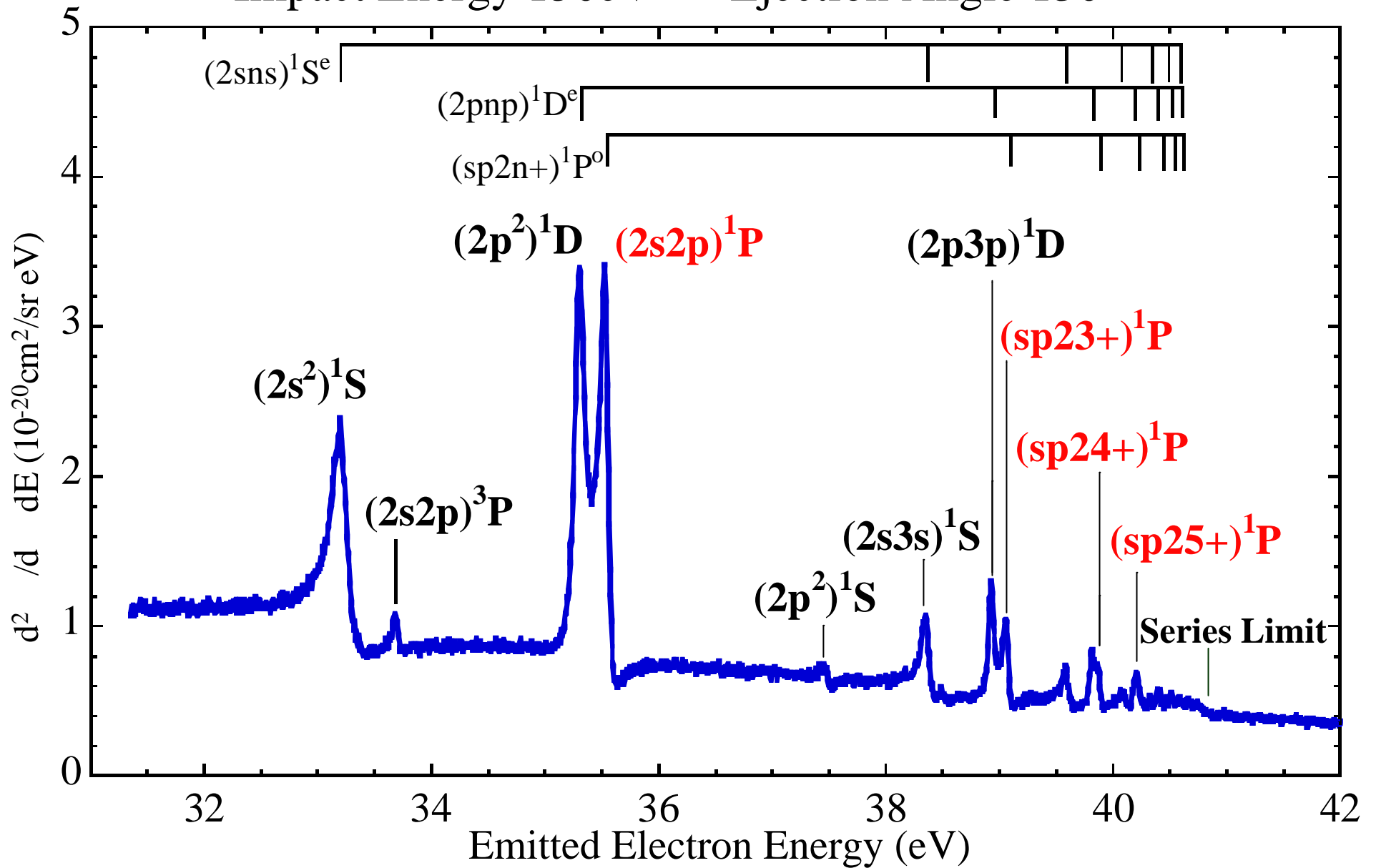


平均軌道半径50mm

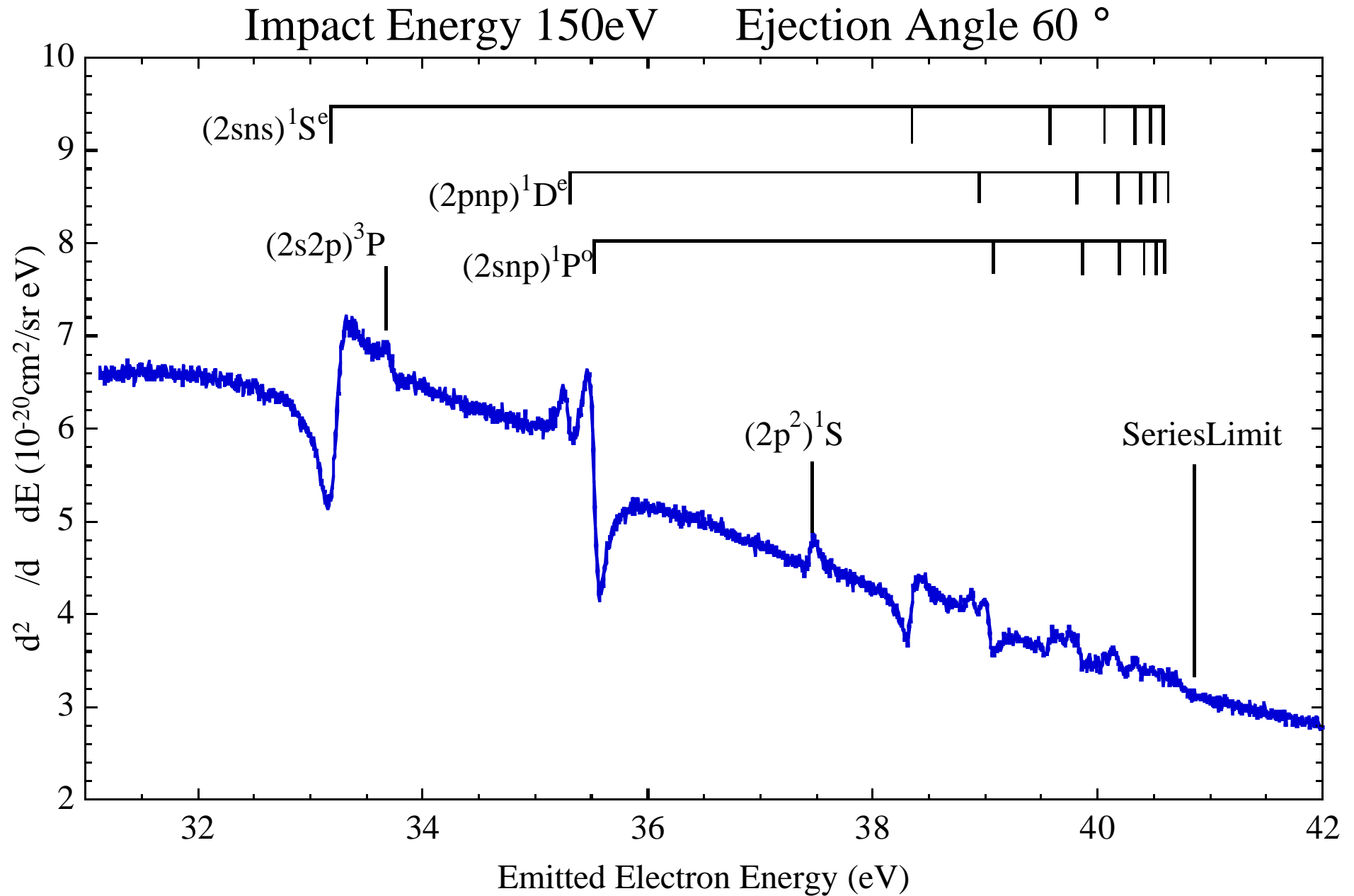


< 放出電子スペクトル >

Impact Energy 150eV Ejection Angle 130 °



< 放出電子スペクトル >



1. $2121'$ 状態からの放出電子スペクトルの
形状因子の決定

2. $2131'$ 状態及び $(2p^2)^1S$ からの放出電子スペ
クトルの測定

3. 二電子励起閾値付近でのPCI効果の観測

< 放出電子スペクトルにおけるShoreの式 >

三重微分断面積の式を散乱電子の方向について積分

$$\frac{d^2 S}{d\Omega_e dE} = \underbrace{f(E, \mathbf{q}; E')} + \underbrace{\frac{a(E', \mathbf{q})e + b(E', \mathbf{q})}{e^2 + 1}}$$

直接電離過程の干渉しない部分
による放出電子スペクトル

直接電離過程と自動電離過程
による干渉

a, bがピークの形状を特徴付ける形状因子

$$\varepsilon = \frac{E - E_r}{\Gamma / 2}$$

E : 放出電子のエネルギー
E' : 入射電子衝突エネルギー
θ : 観測角
E_r : 共鳴エネルギー
Γ : 自然幅

< Shoreの式のa ,bパラメータ >

$$a = \frac{8k_s}{k_0} \int \frac{d\Omega_s}{k^4} \left\{ \text{Re} \left[\sum_{m'=0}^{\infty} I_{m'} I_m (q(K) - i) \right] \right\}$$

$$b = \frac{8k_s}{k_0} \int \frac{d\Omega_s}{k^4} \left\{ \text{Im} \left[\sum_{m'=0}^{\infty} I_{m'} I_m (q(K) - i) \right] + \frac{1}{2} |q(K)^2 + 1| \right\}$$

共鳴に關与する部分波と他の部分波の干渉がa, bに反映される

散乱電子に対するFanoのqパラメータ

$$q(K) = (\pi v_{\mu})^{-1} \frac{J_{\mu}(\vec{k}_0, \vec{k}_s)}{I_{\mu}(\vec{k}_0, \vec{k}_s, \vec{k}_e)} \quad p v_m^2 = \frac{1}{2} \Gamma_m$$

k_s : 散乱電子運動量 J_{μ} : 二電子励起への散乱振幅

k_0 : 衝突電子の運動量 I_{μ} : J_{μ} と同じ角運動量を持つ電離の散乱振幅

$d\Omega_s$: 散乱電子の立体角 $I_{\mu'}$: J_{μ} と別の角運動量を持つ電離の散乱振幅

< スペクトルのフィッティング >

衝突エネルギー200eV測定角度35° ~ 130° の測定結果においてshoreの式でフィッティングを行った。

< 分析器の分解能を考慮したShoreの式 >

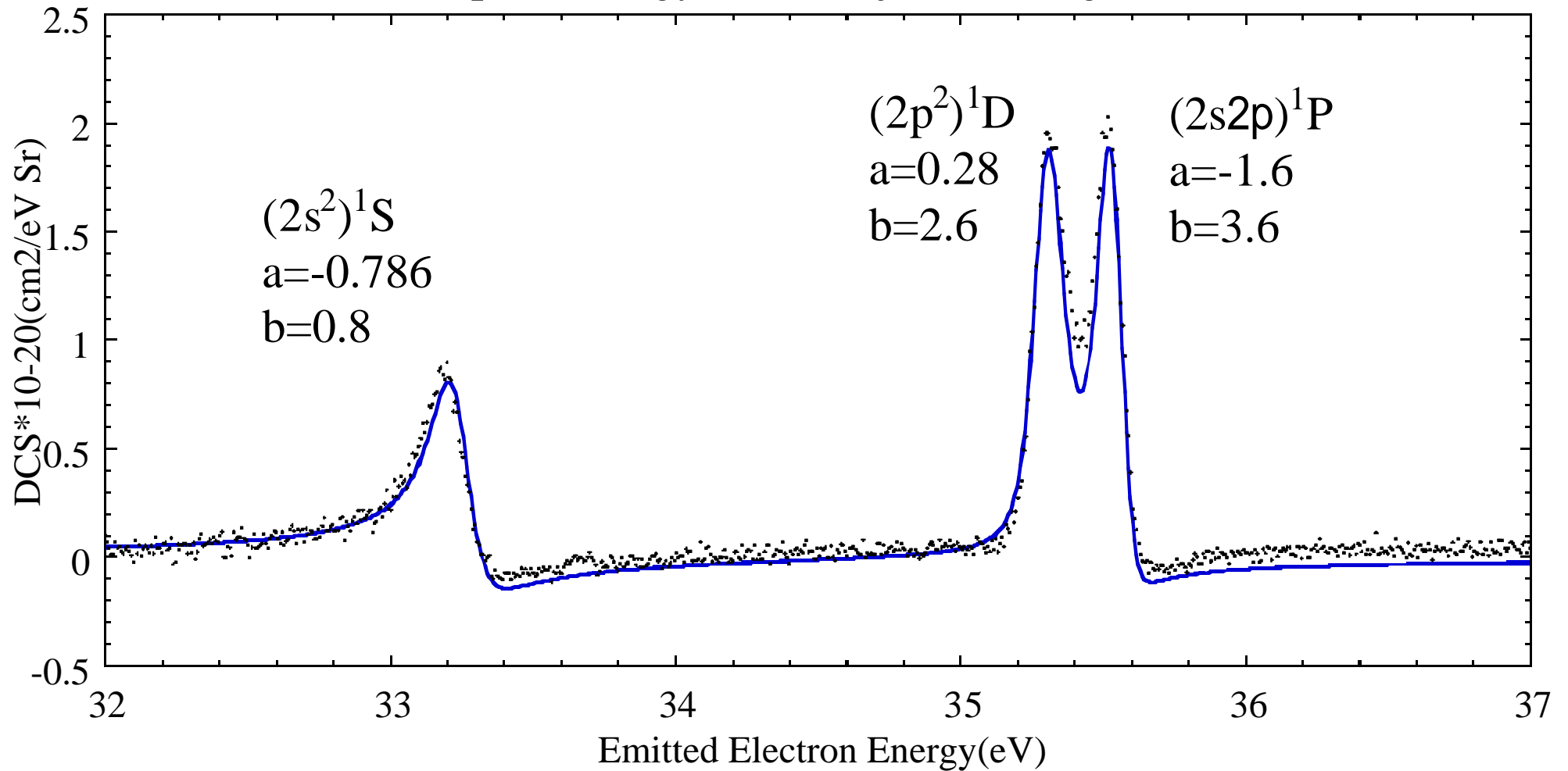
$$Y_{fit}(E_i) = \frac{1}{\sqrt{p} \Delta E} \int_{-\infty}^{+\infty} F(E) \exp \left\{ - \left(\frac{E - E_i}{\Delta E} \right)^2 \right\} dE \quad \text{但し } \Delta E = \frac{\Delta E_{FWHM}}{2\sqrt{\ln 2}}$$

Single particle notation	$N (K, T)_n^A$	$2s+1 L$	放出電子エネルギー	自然幅
$^1S^e$	$^+_2(1,0)_2$	$(2s^2)$	33.255eV	0.12 eV ^A
$^1D^e$	$^+_2(1,0)_2$	$(2p^2)$	35.322eV	0.072eV ^B
$^1P^o$	$^+_2(0,1)_2$	$(2s2p)$	35.56 eV	0.038eV ^B

< 参考文献 > A:増田 明 修士論文(2004) B:J.P.van den Brink et al *J.phys.***B22**:3501(1989)

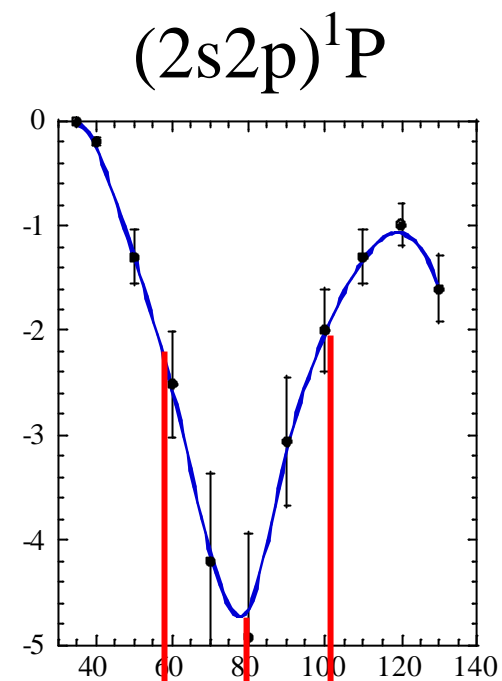
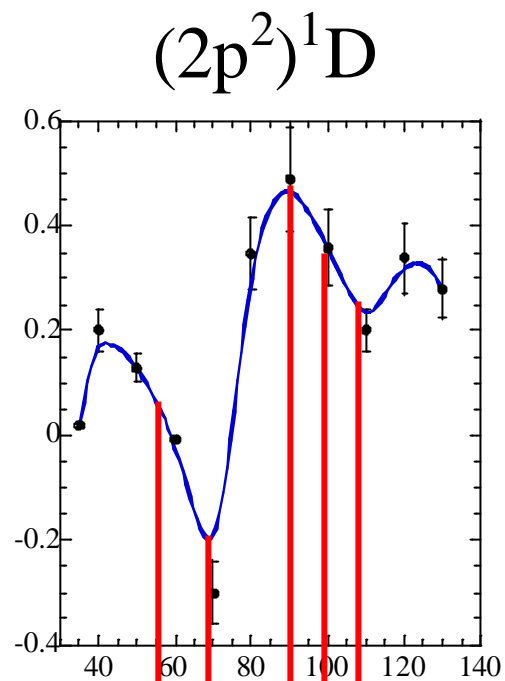
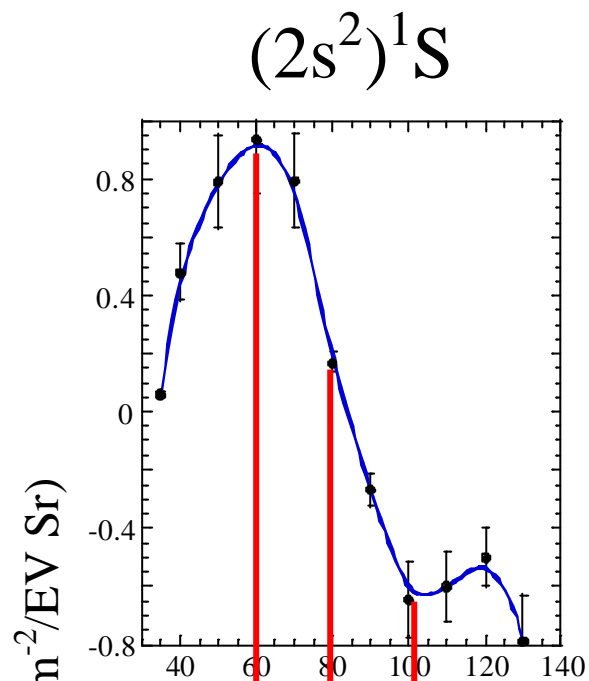
< スペクトルのfitting例 >

Impact Energy 200eV Ejection Angle 130°

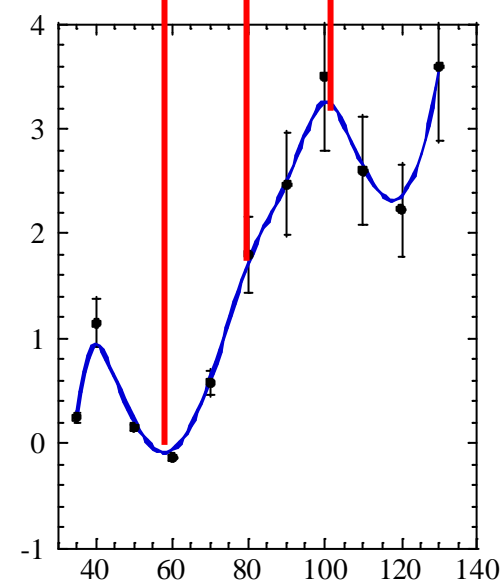
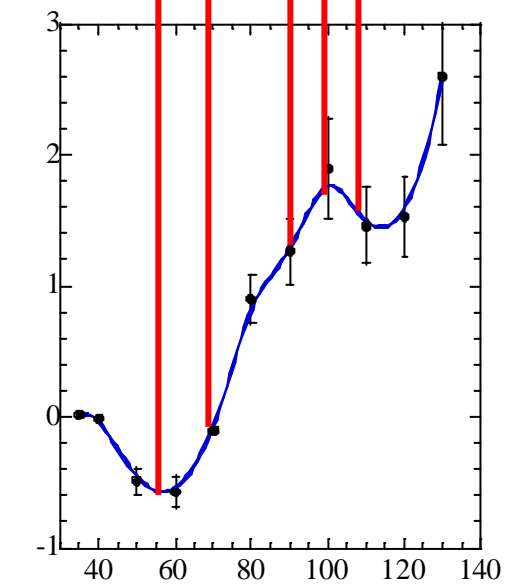
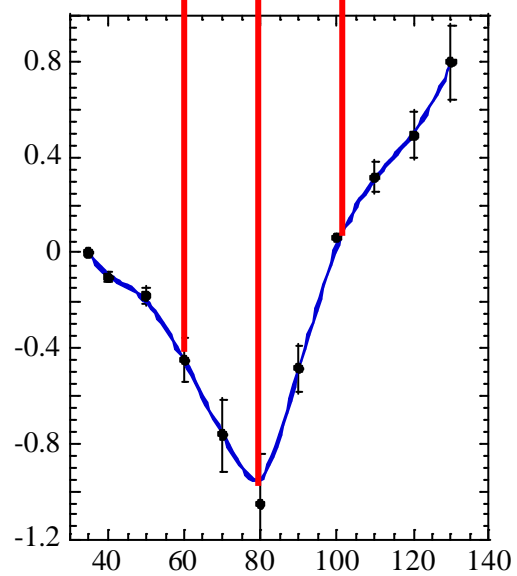


200eV
形状因子

a



b

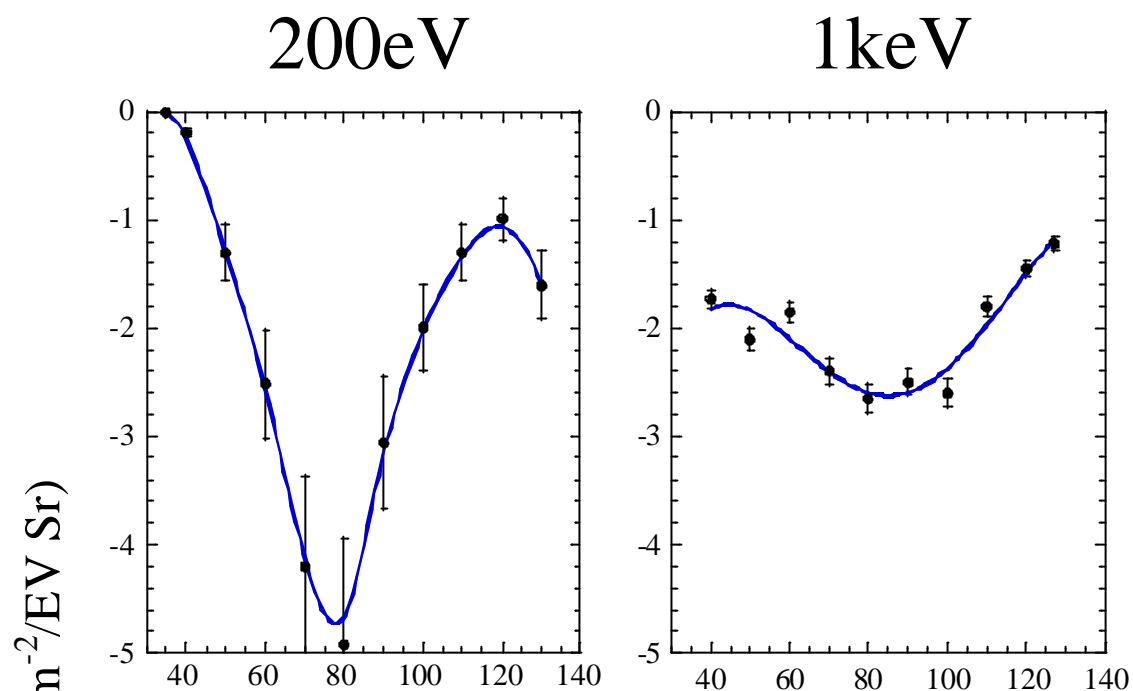


Ejection Angle (deg)

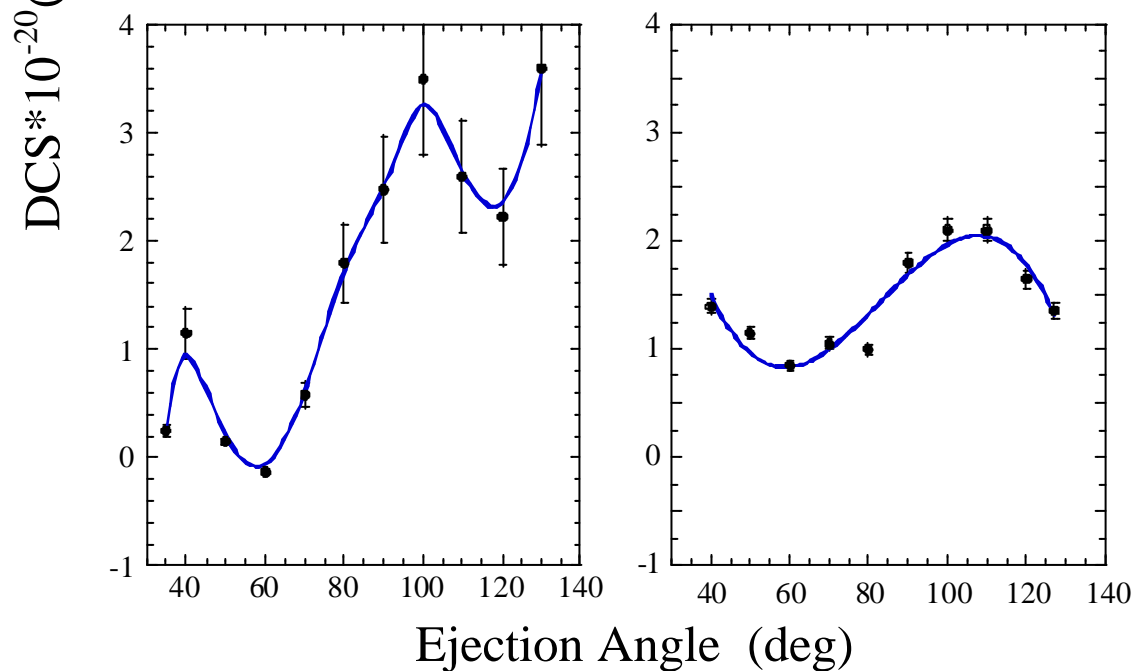
200eV, 1keVの
 1P の形状因子
の比較

200eVのほうが1keV
よりも大きく振動して
いることがわかる

a



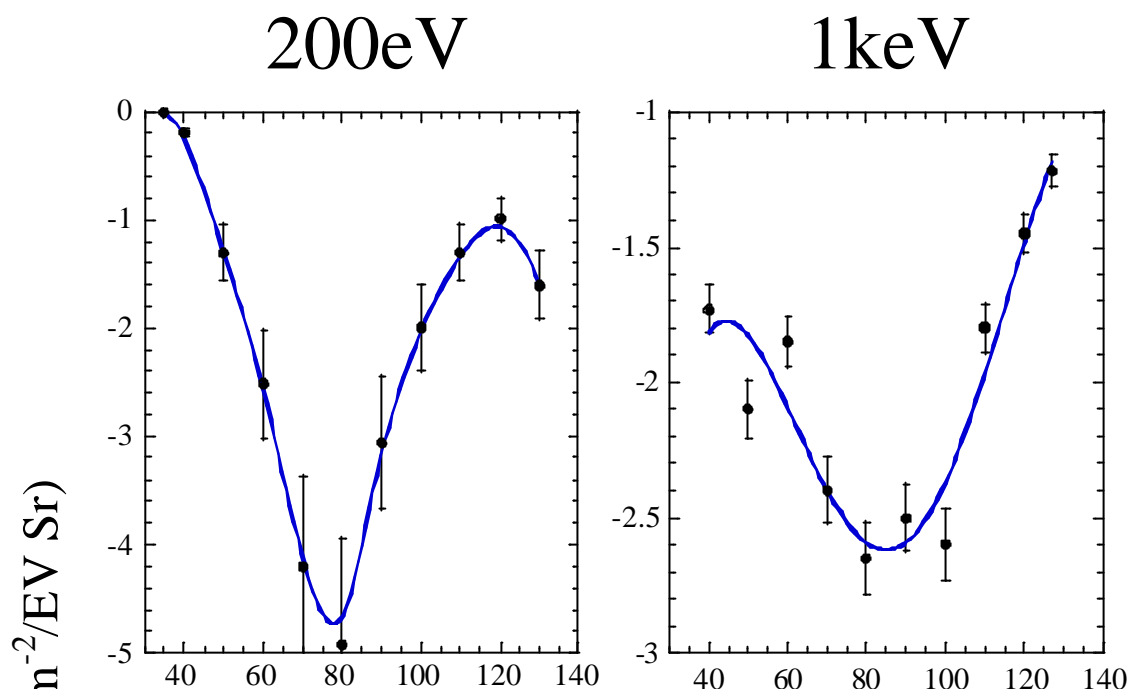
b



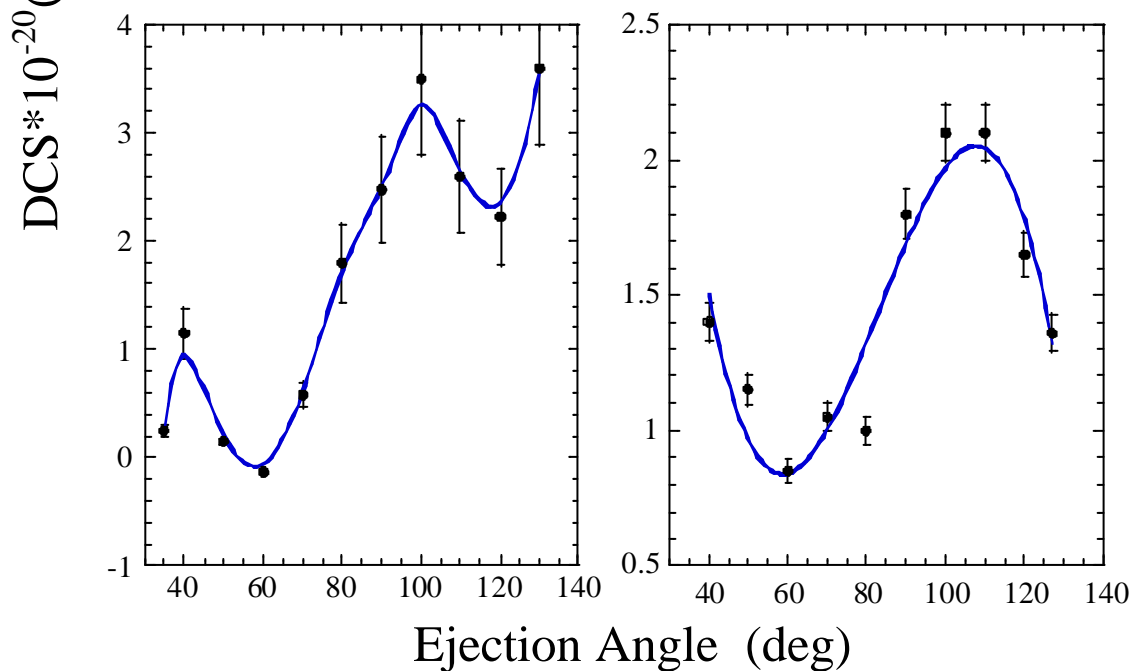
200eV, 1keVの $1P$ の形状因子 の比較

$1P$ ではa,bともに
200eVのほうが1keV
よりも振動の間隔が
狭くなっていることが
わかる

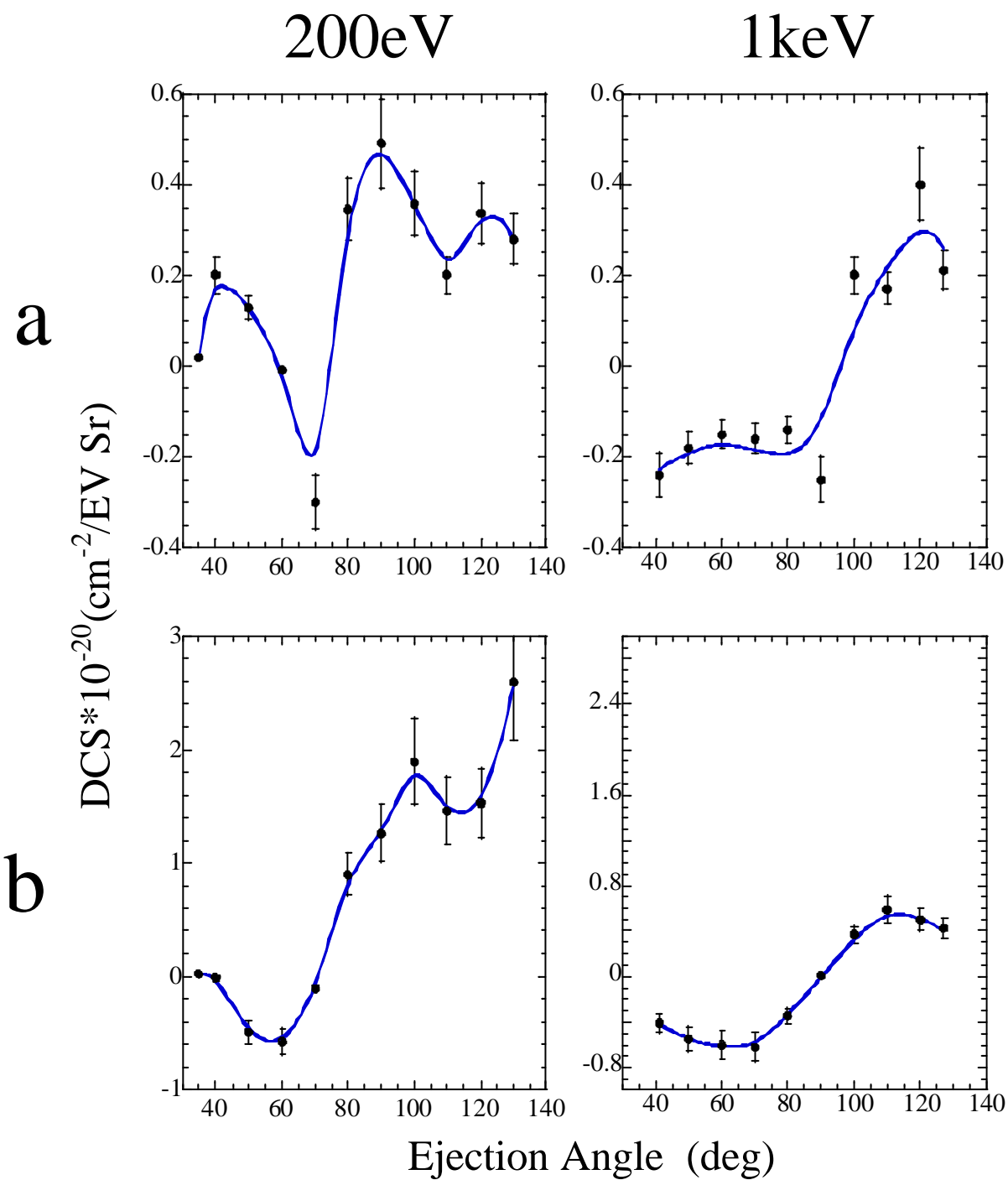
a



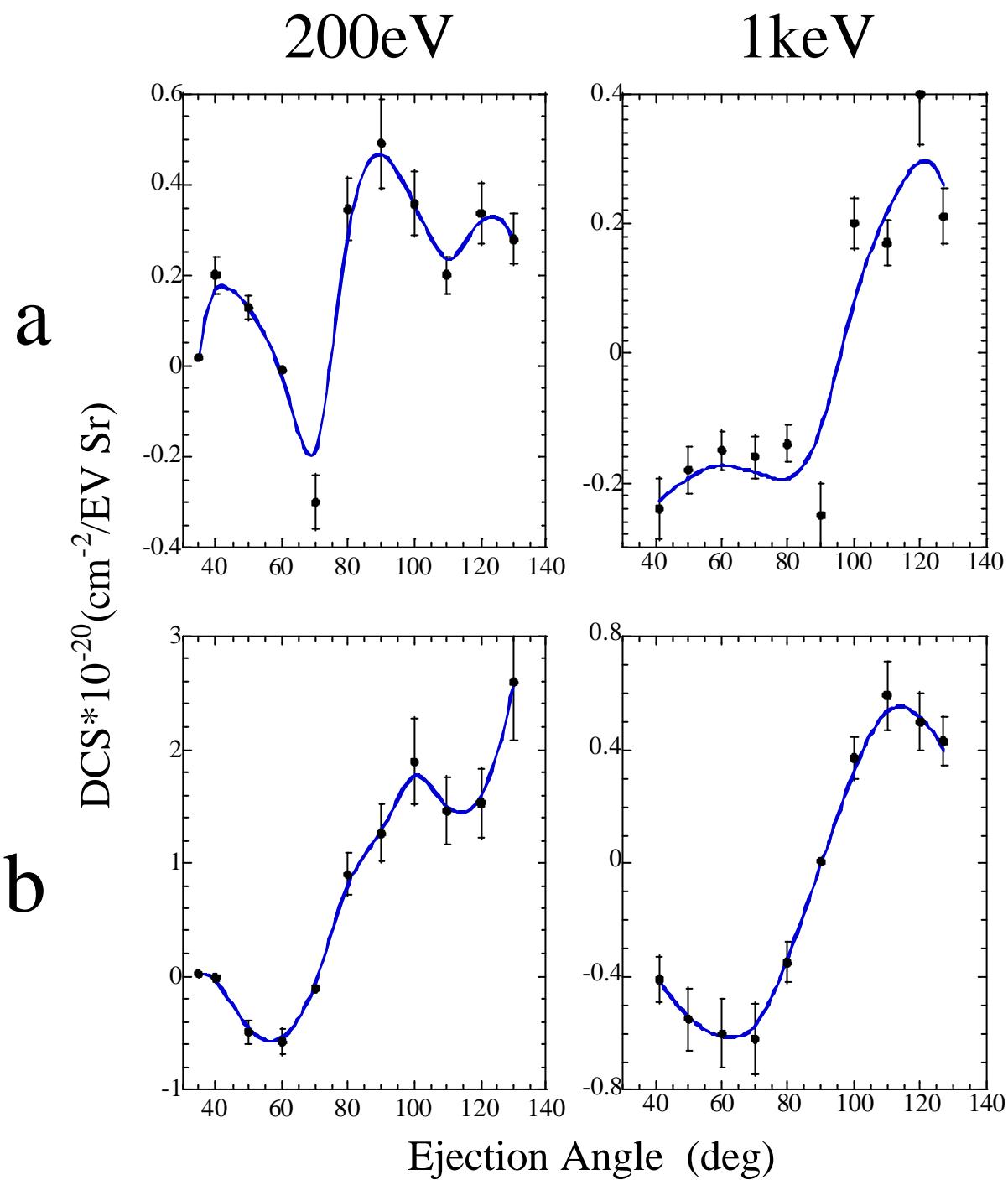
b



200eV, 1keVの
 1D の形状因子
の比較



200eV, 1keVの
 1D の形状因子
の比較



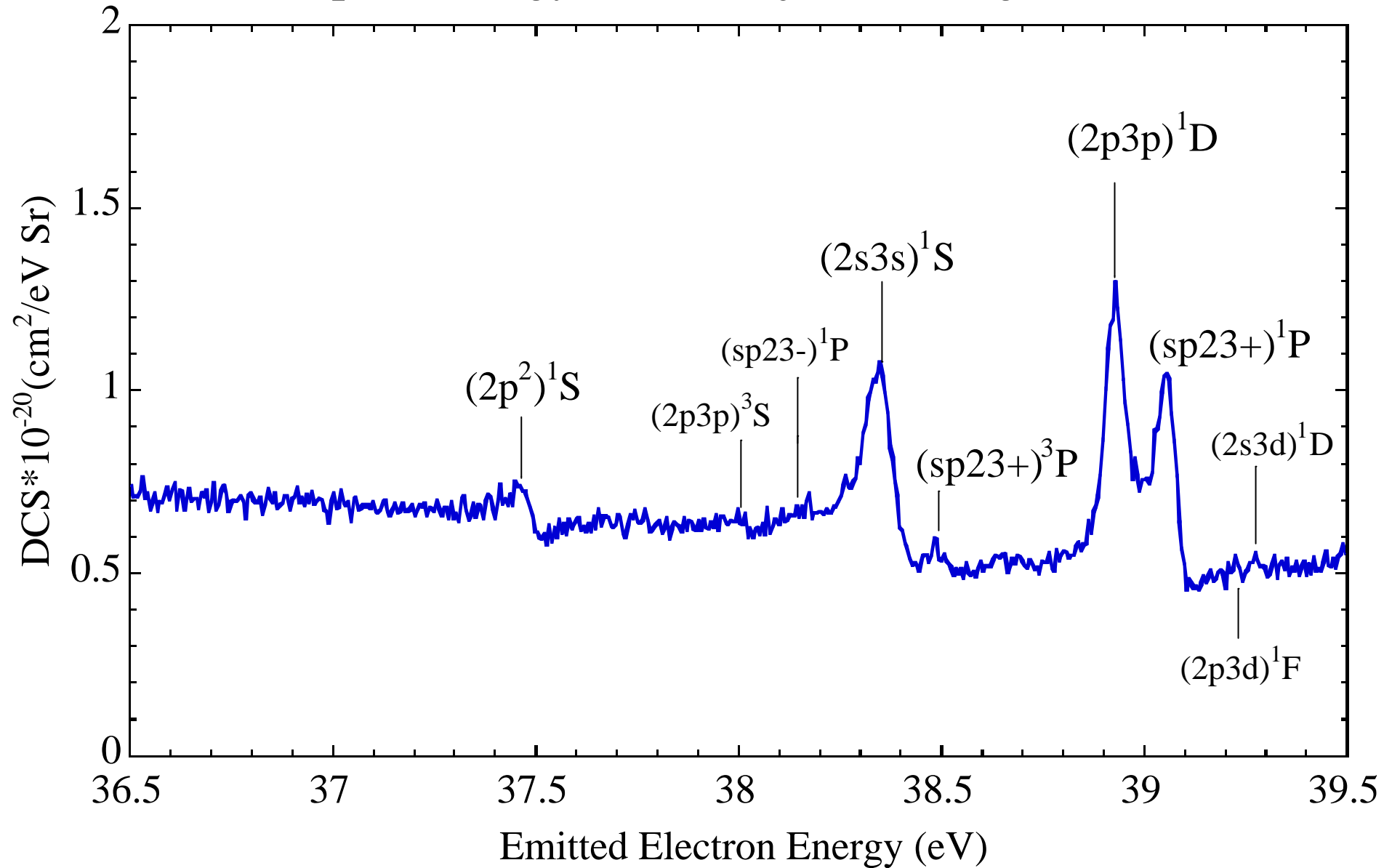
1. $2121'$ 状態からの放出電子スペクトルの
形状因子の決定

2. $2131'$ 状態及び $(2p^2)^1S$ からの放出電子スペ
クトルの測定

3. 二電子励起閾値付近でのPCI効果の観測

< 放出電子スペクトル >

Impact Energy 150eV Ejection Angle 130°



< スペクトルのフィッティング >

衝突エネルギー150eV、測定角度35° ~ 130° の測定結果においてshoreの式でフィッティングを行い、形状因子を決定した

Single particle notation	${}_N (K, T)_n^A$	$2s+1 L$	放出電子エネルギー	自然幅
${}^1S^e$	${}_2 (-1, 0)_2^+$	$(2p^2)$	37.498eV	0.0058 eV (a)
${}^1S^e$	${}_2 (1, 0)_3^+$	$(2s3s)$	38.37 eV	0.037 eV (a)
${}^1D^e$	${}_2 (1, 0)_3^+$	$(2p2p)$	38.93 eV	0.0153 eV (b)
${}^1P^o$	${}_2 (0, 1)_3^+$	$(sp23+)$	39.07 eV	0.00819eV (c)

(a)E.Lindroth,Phys.Rev.A **49**,4473(1994) (b)J.Z .Tang et al,Phys.Rev.A **46**,2437(1992)
(c)Y.K.Ho,Phys.Rev.A **23**,2137(1981)

< $(2p^2)^1S$ および $213I'$ 系列のFitting >

Impact Energy 150eV

130

○

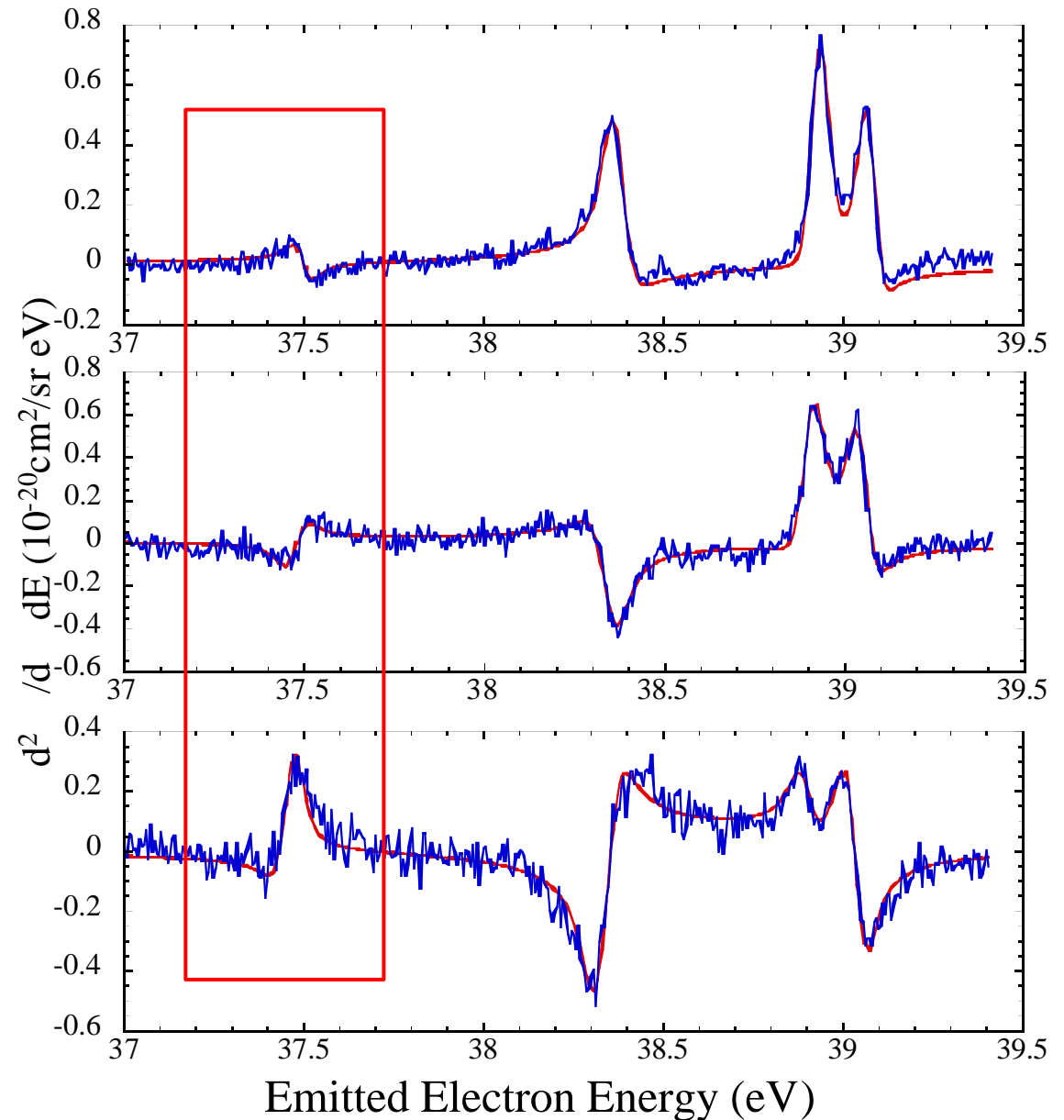
$(2p^2)^1S$ の角度
変化を観測で
きた

90

○

60

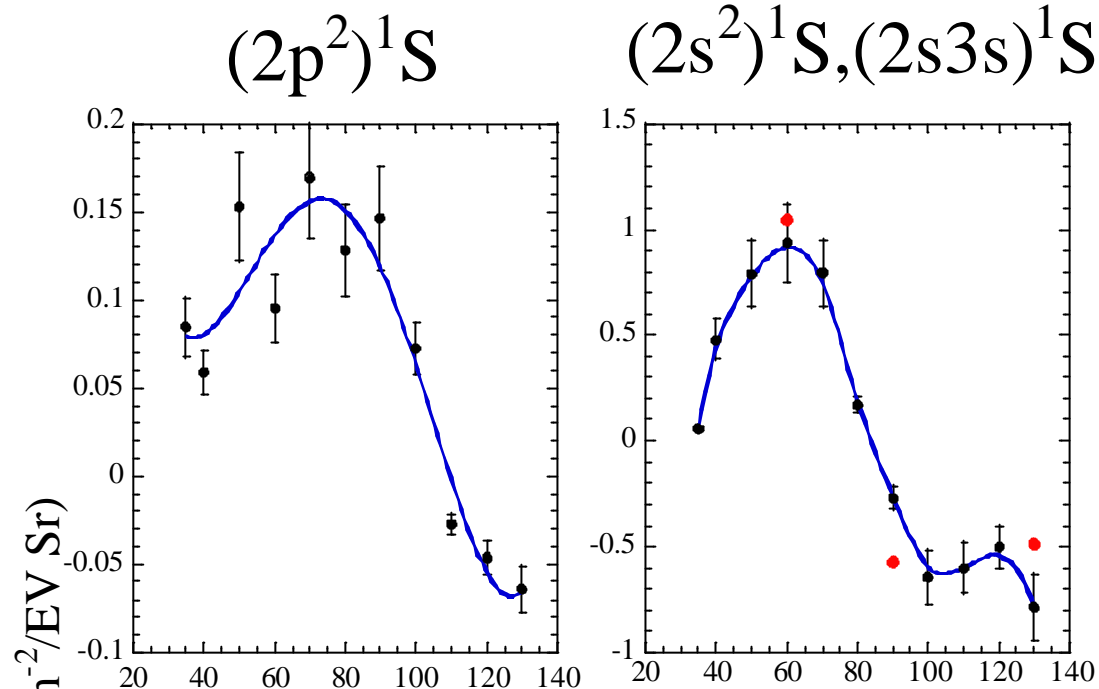
○



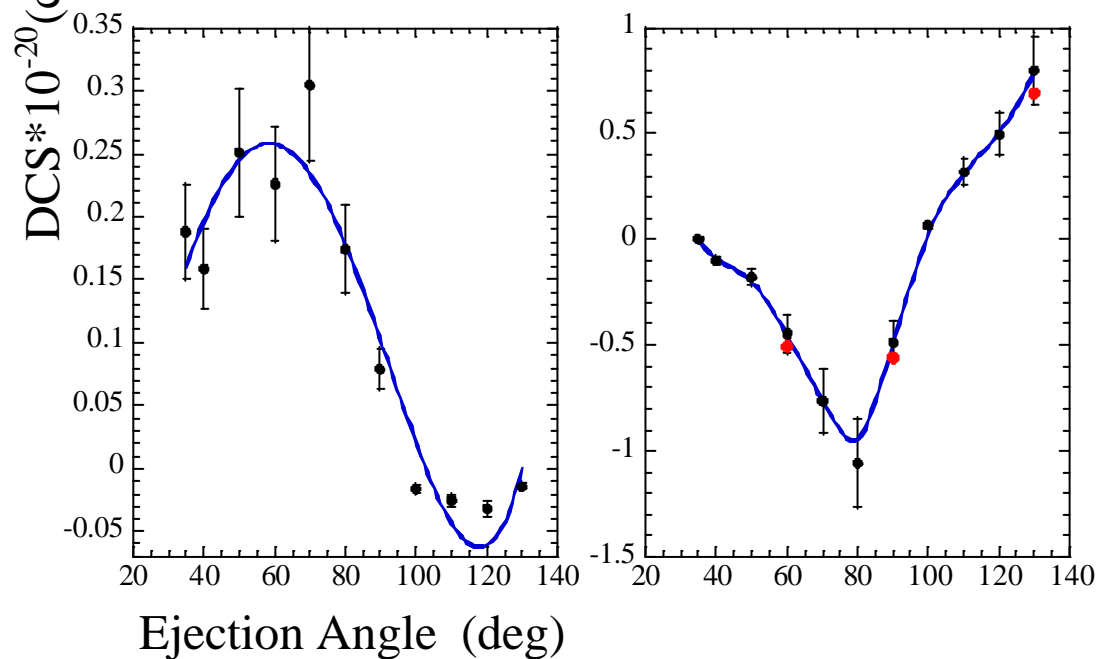
$(2p^2)^1S, (2s^2)^1S$ の
 1P の形状因子の
比較

aパラメータでは
同じような振る
舞いをするが、b
パラメータでは
大きく異なること
がわかった

a

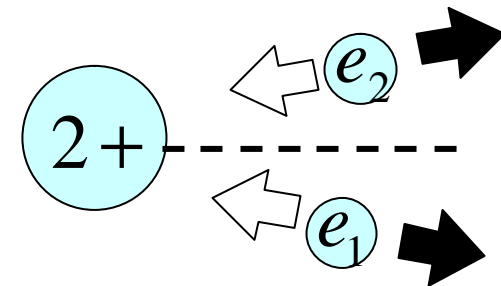
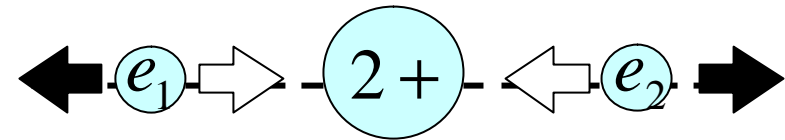


b



< 分子模型による2121'系列の分類 >

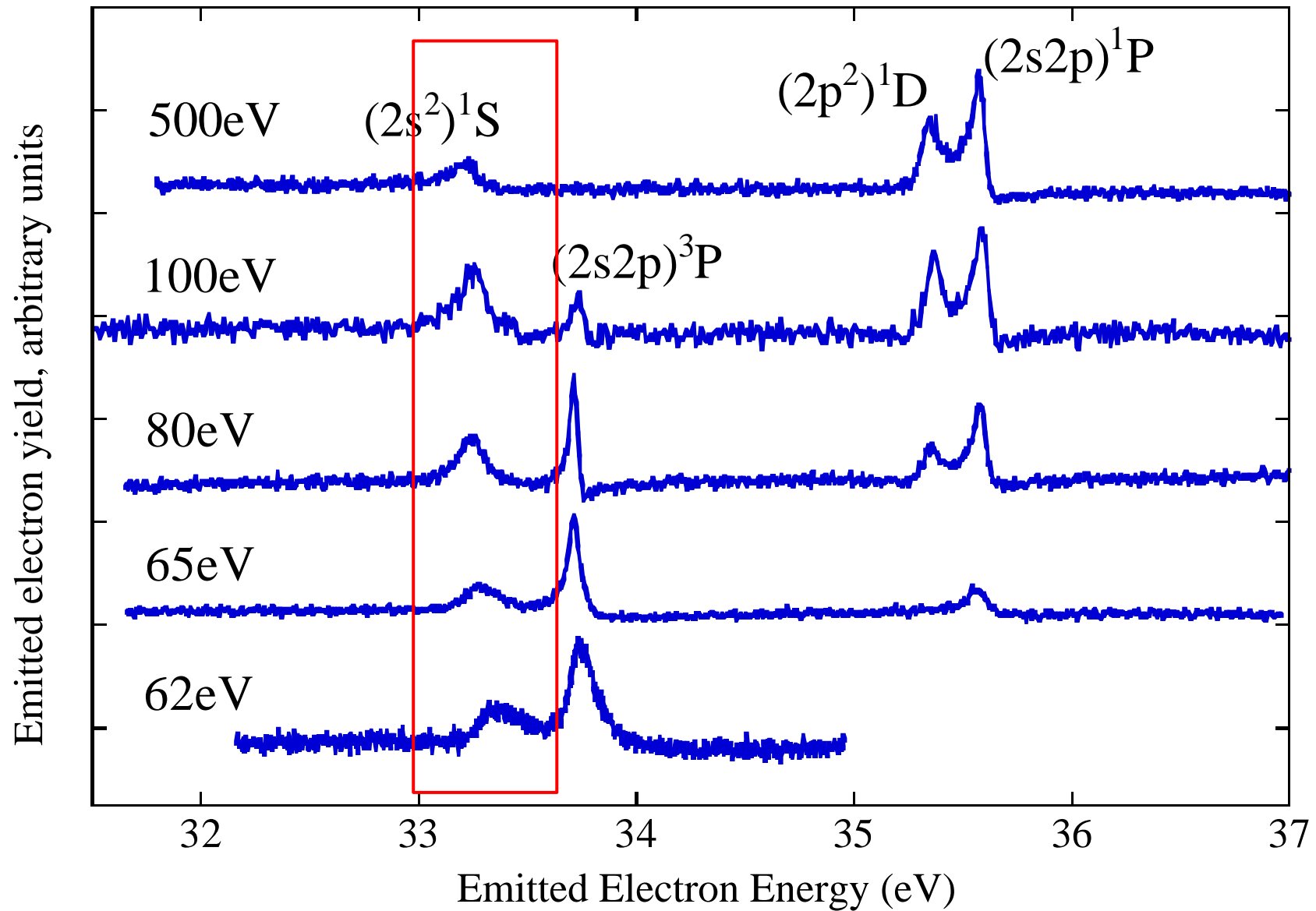
${}^A_n (K, T)_n$	Single particle notation	$2s+1 L$
${}_2(1,0)_2^+$	$(2s^2)$	${}^1S^e$
${}_2(1,0)_2^+$	$(2s3s)$	${}^1S^e$
${}_2(-1,0)_2^+$	$(2p^2)$	${}^1S^e$



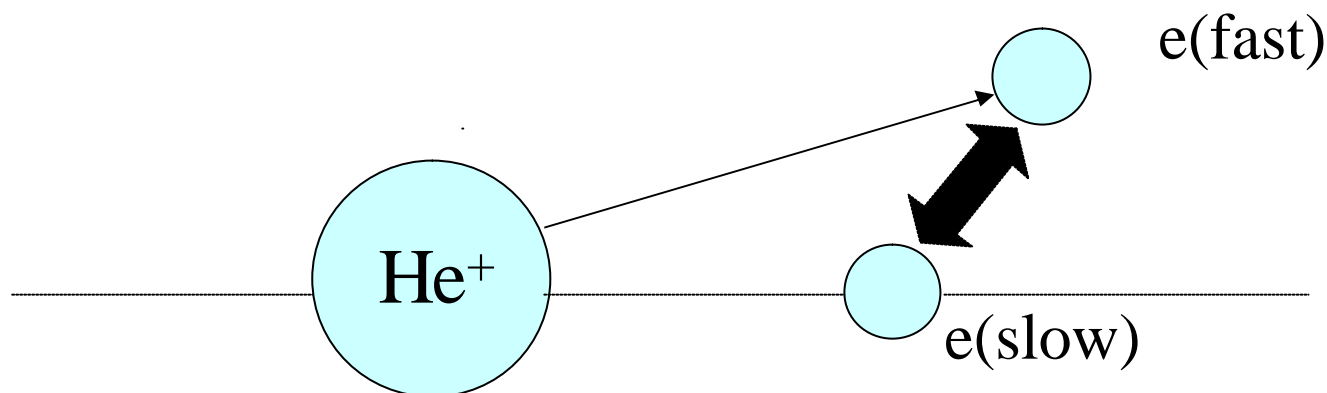
1. $2I2I'$ 状態からの放出電子スペクトルの形状因子の決定
2. $2I3I'$ 状態及び $(2p^2)^1S$ からの放出電子スペクトルの測定
3. 二電子励起閾値付近でのPCI効果の観測

< 放出電子スペクトル >

Ejection angle 130 °



< PCI効果 > (post-collision interaction)



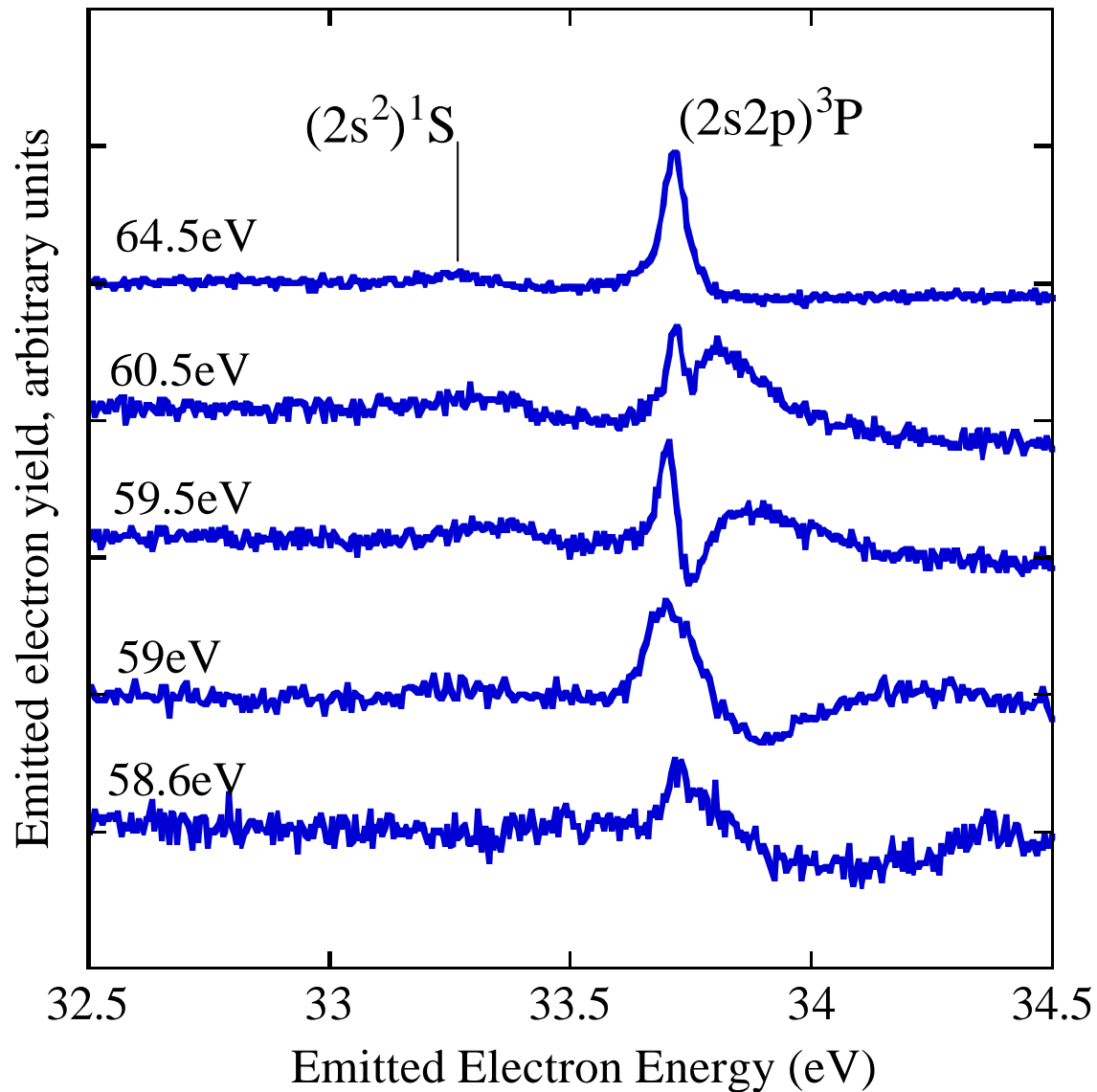
遅い散乱電子がHe原子の近くにいるため放出電子が散乱電子による反発を受けて加速される。



寿命の短いピークのシフト、ブロードニングが観測される

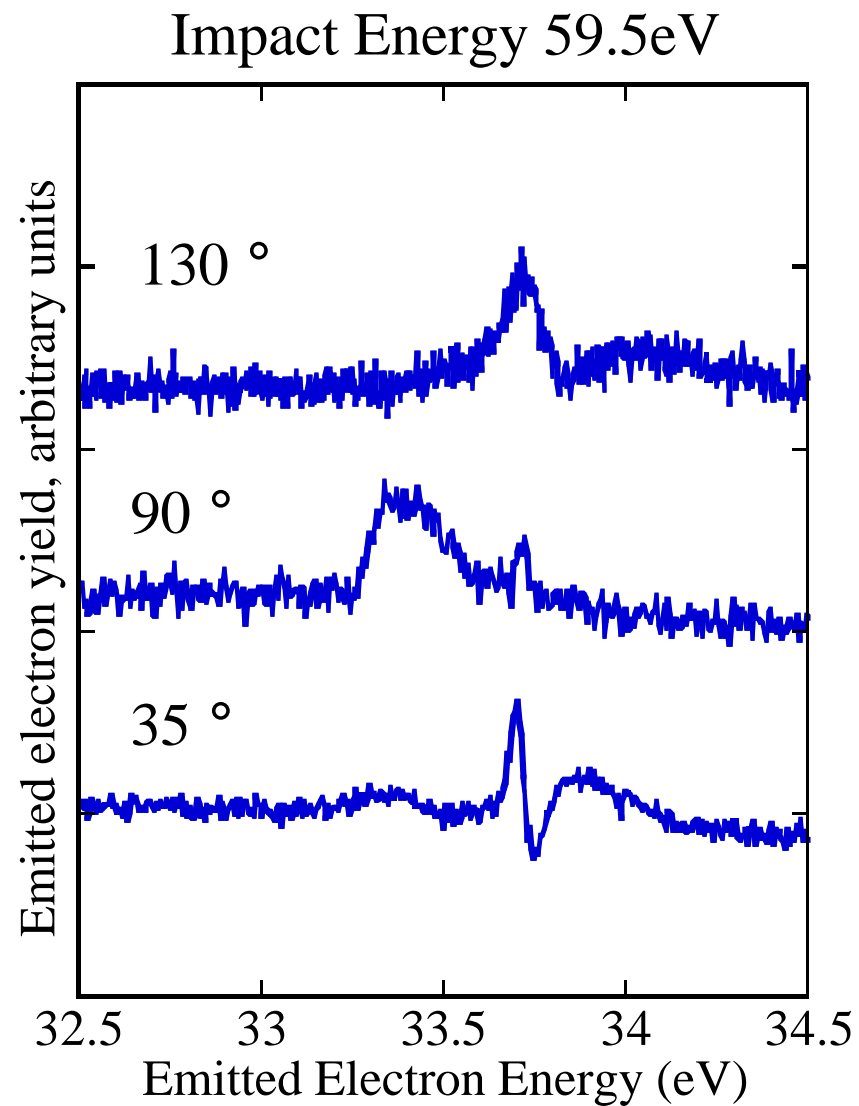
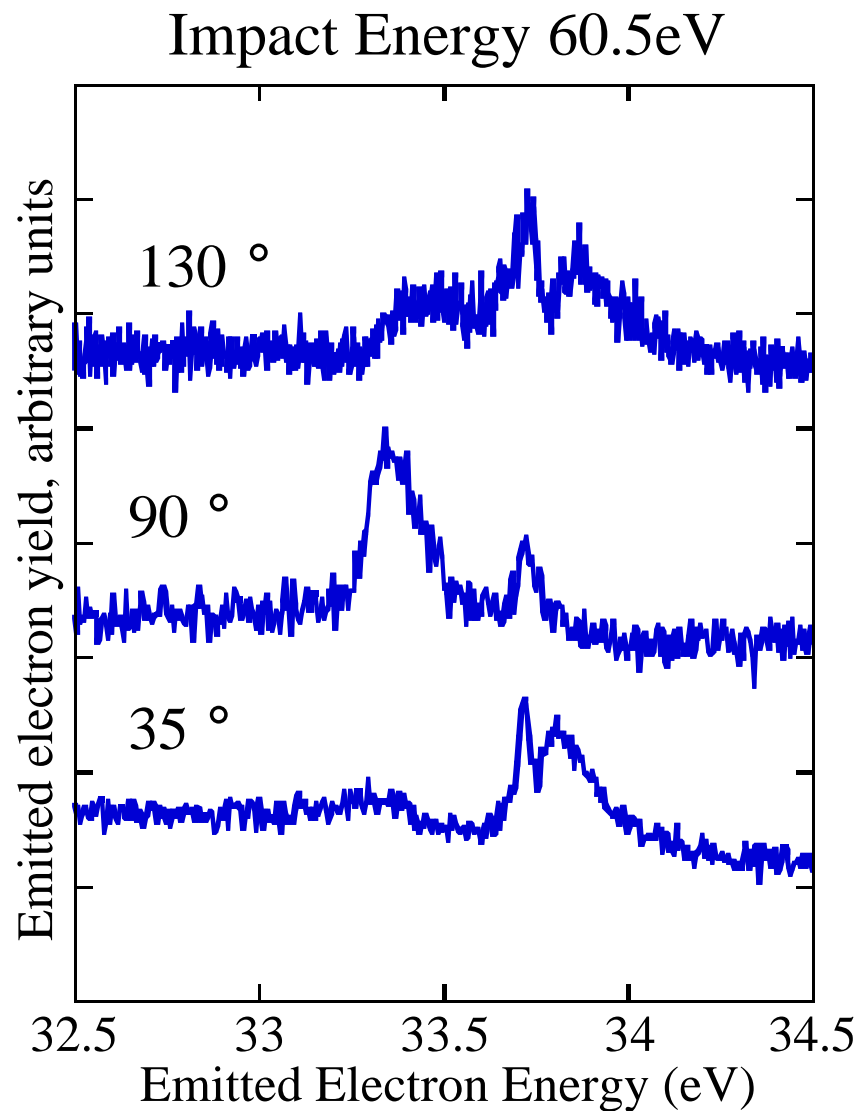
< PCI効果のエネルギー依存性 >

Ejection Angle 35 °



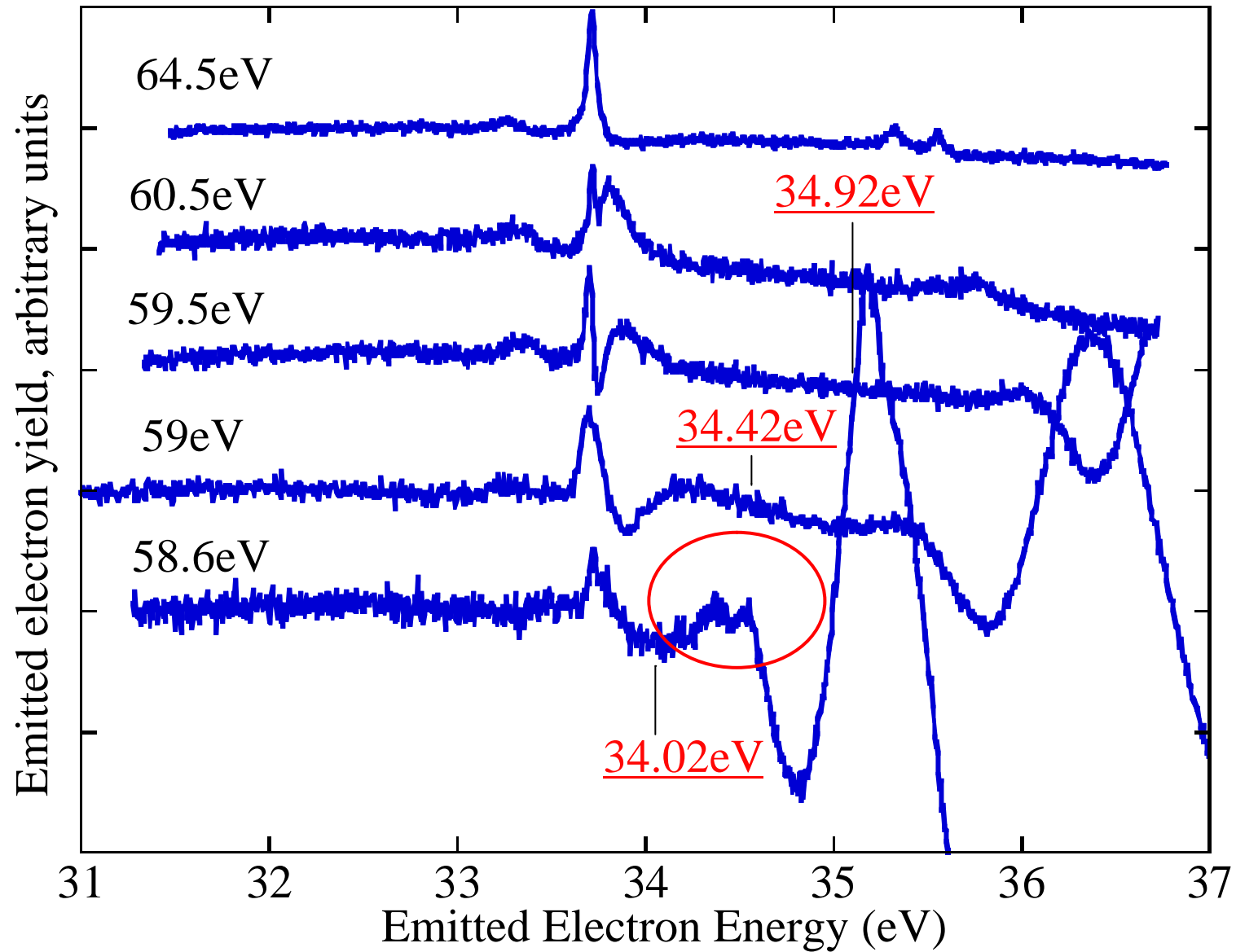
古典論的なPCI効果では説明できない2電子励起状態同士の干渉を観測することができた

< PCI効果の角度依存性 >



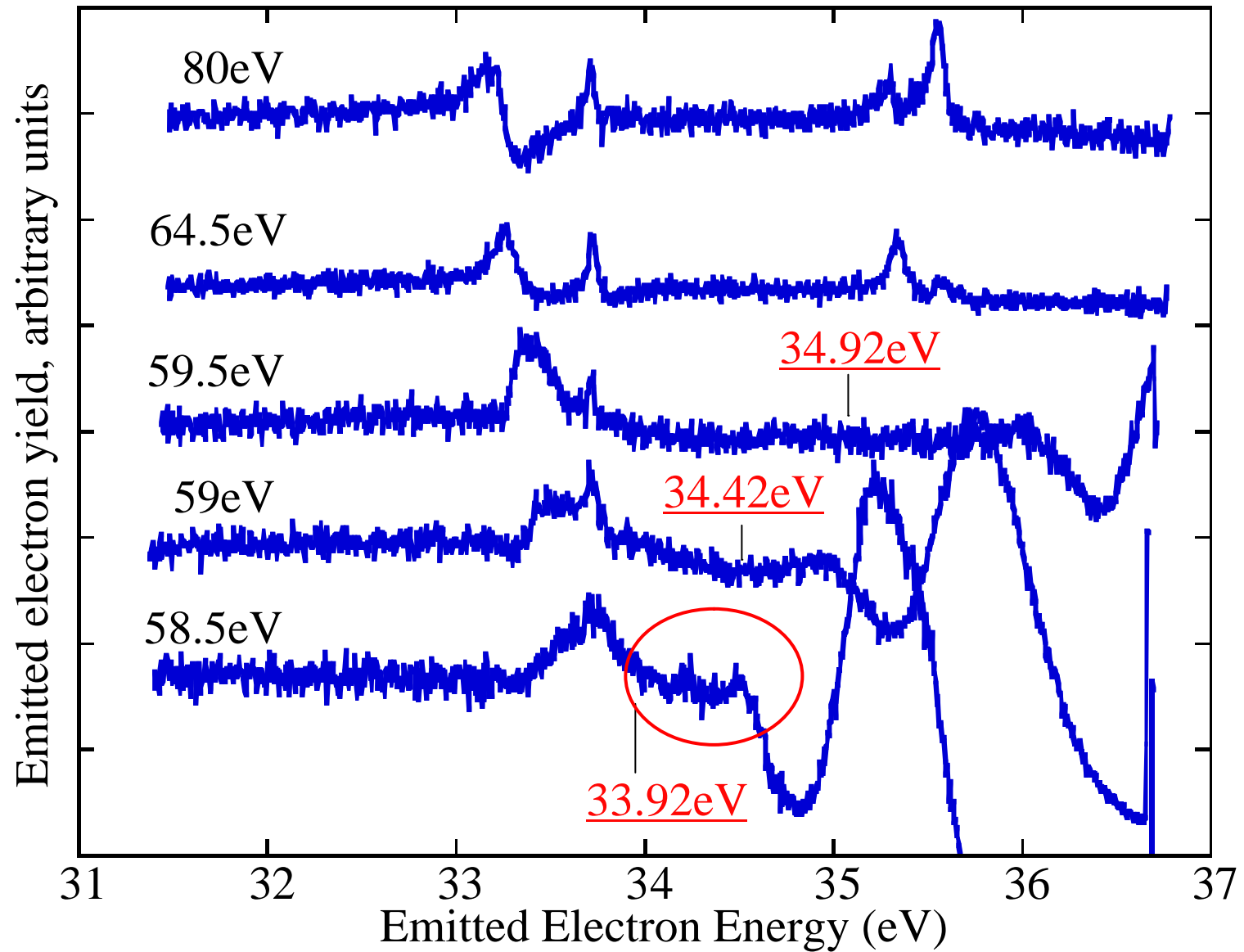
< 放出電子スペクトル >

Ejection Angle 35 °



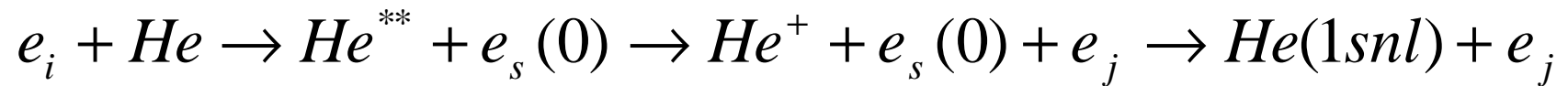
< 放出電子スペクトル >

Ejection Angle 90 °



< 放出電子と散乱電子の共鳴 >

< 衝突過程 >



二電子励起状態からの放出電子が、一電子励起を起こした散乱電子として観測されている

< まとめ >

1 .2121' 系列の測定

形状因子は極大・極小を持つ振動的な振る舞いをする事がわかった。
低いエネルギーの方が極大と極小の間隔が狭くなり、a,bで極大・極小の位置が等間隔にずれている。

2 .2131' 系列および $(2p^2)^1S$

・ $(2p^2)^1S^e$ のbパラメータは $(2s^2)^1S^e$ と著しい違いがみられた。このことは分子模型による電子配置の違いを反映しているものと考えられる。

3 .二電子励起閾値付近におけるPCI効果の観測

PCI効果に角度依存性があることがわかった

・ $(2s2p)^3P$ のピークも励起閾値付近ではブロードになることがわかった。

励起閾値付近ではPCI効果によって放出電子と散乱電子との共鳴が起こっていることがわかった。

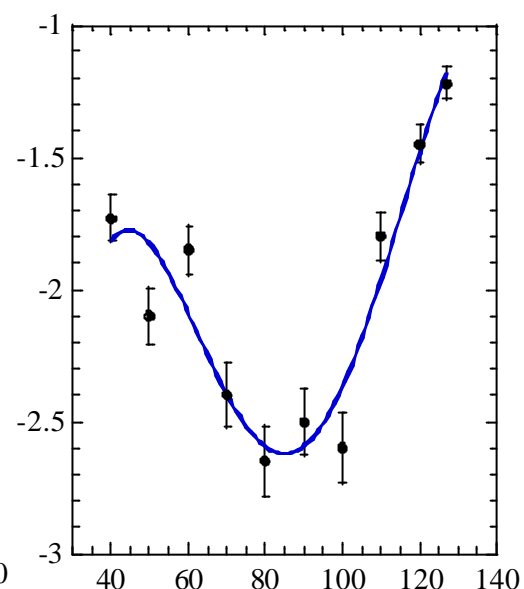
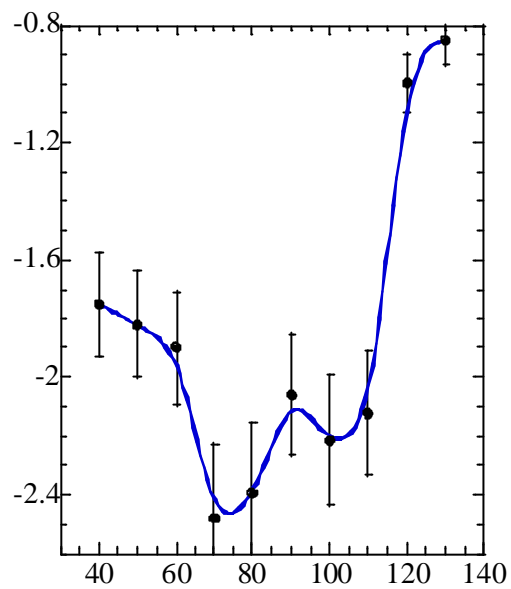
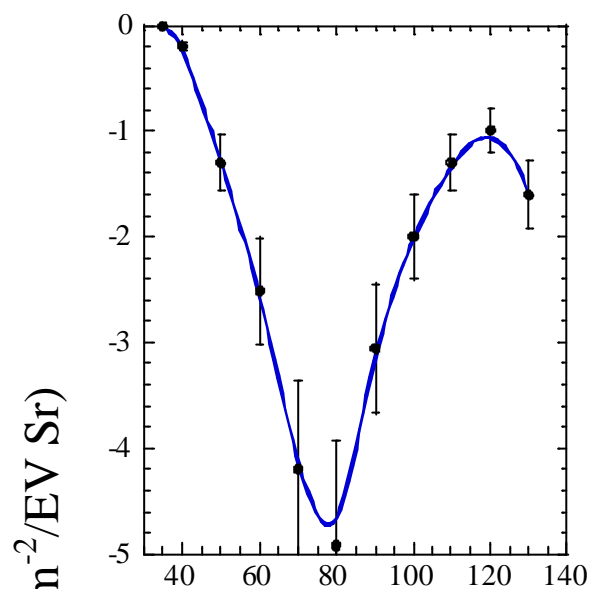
$(2s2p)^1P$

200eV

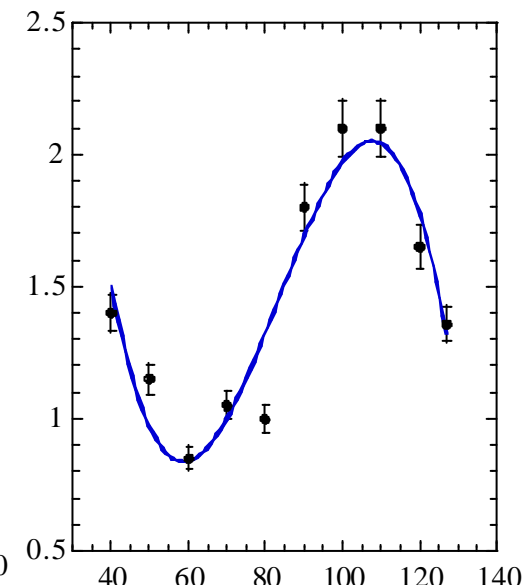
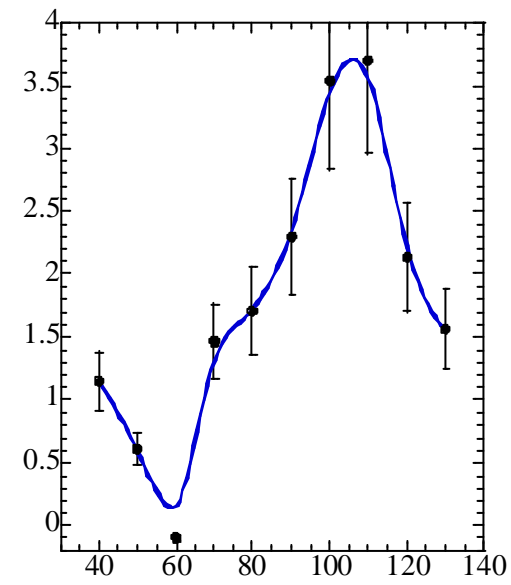
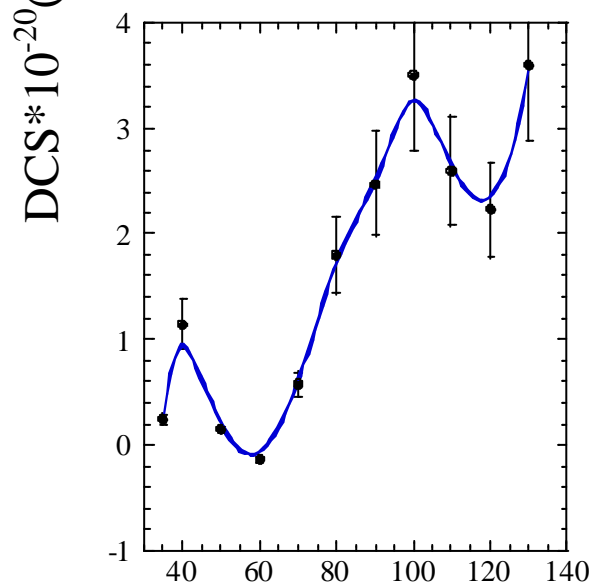
500eV

1keV

a

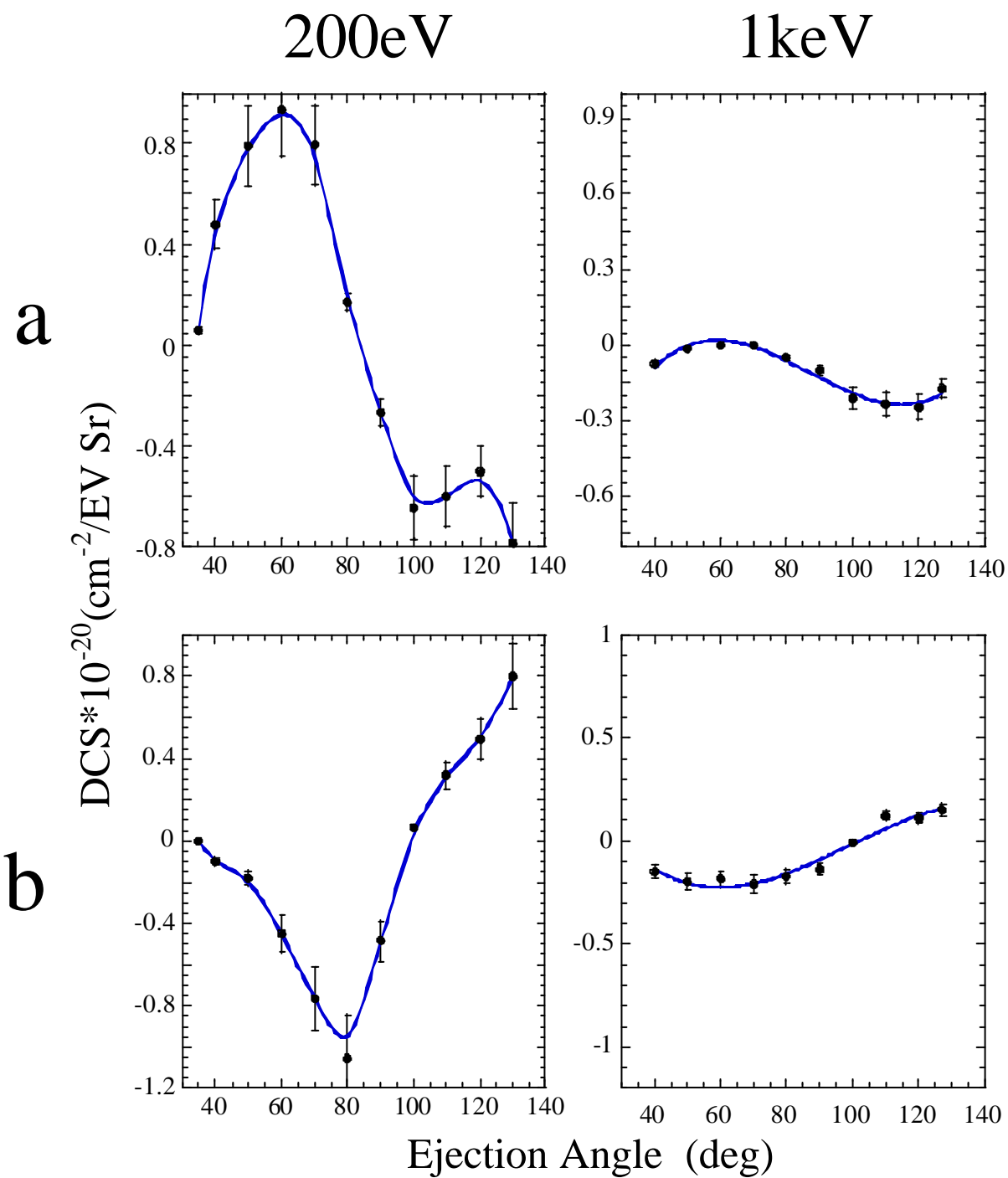


b

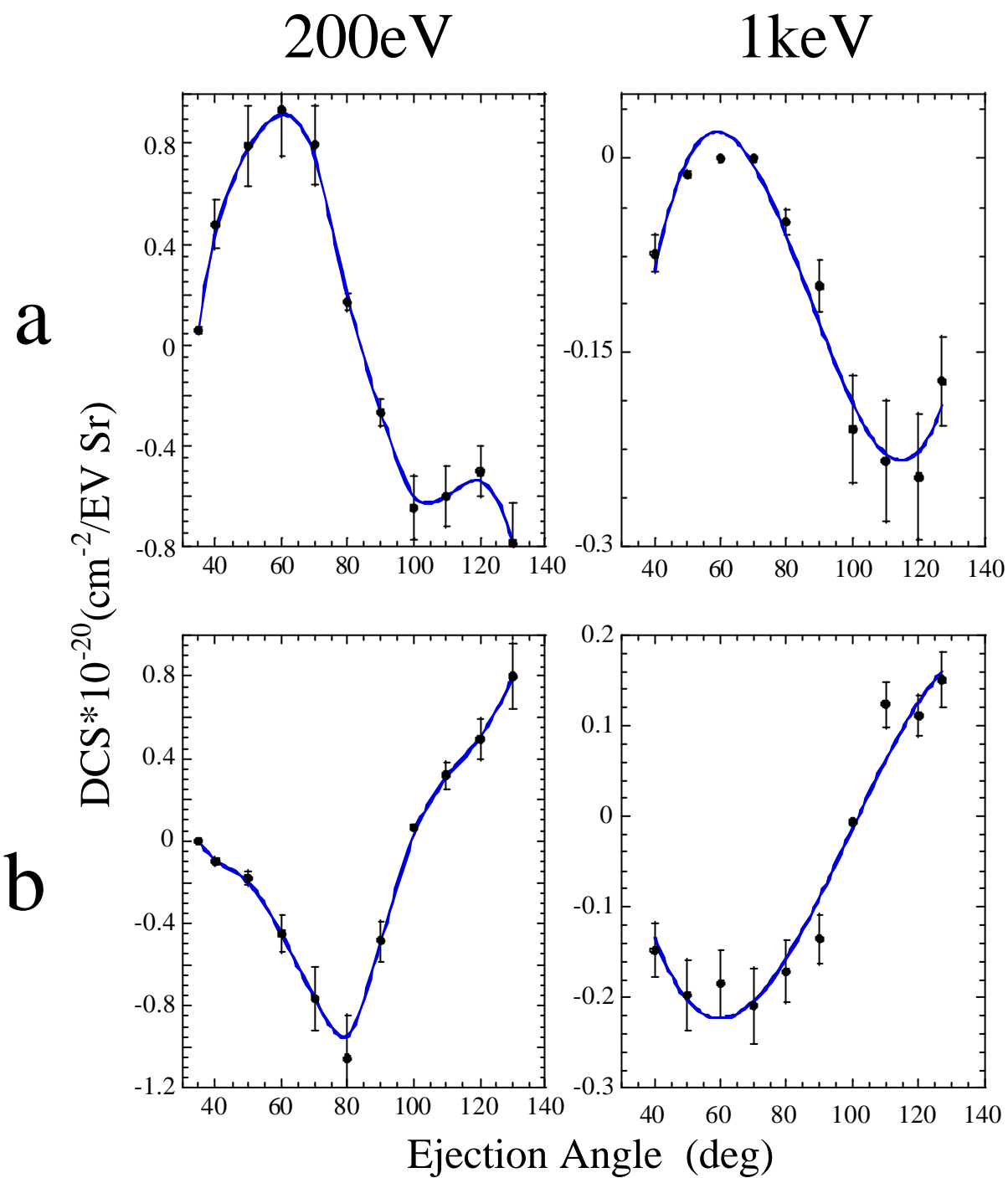


Ejection Angle (deg)

200eV, 1keVの
 $1S$ の形状因子
の比較



200eV, 1keVの
 $1S$ の形状因子
の比較



$$\langle {}_n (K, T)_N^{A \ 2S+1} L^p \rangle$$

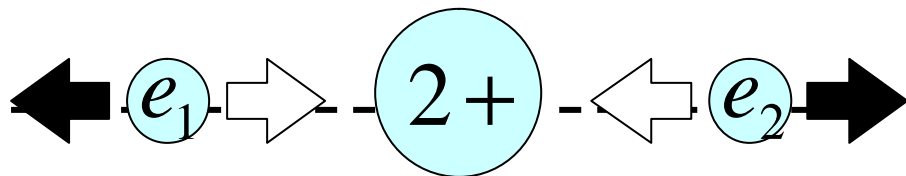
相関量子数

$$T = 0, 1, 2, \dots, \min(L, N - 1)$$

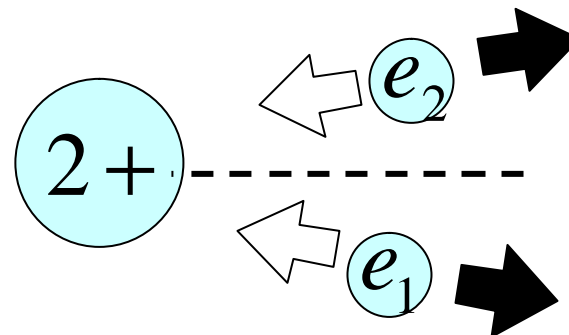
$$K = N - 1 - T, N - 3 - T, \dots, -(N - 1 - T)$$

$$\begin{cases} A = \mathbf{p} (-1)^{S+T} & (K > L - N) \\ A = 0 & (K \leq L - N) \end{cases}$$

$${}_2 (1, 0)_2^{+1} S^e$$



$${}_2 (-1, 0)_2^{+1} S^e$$

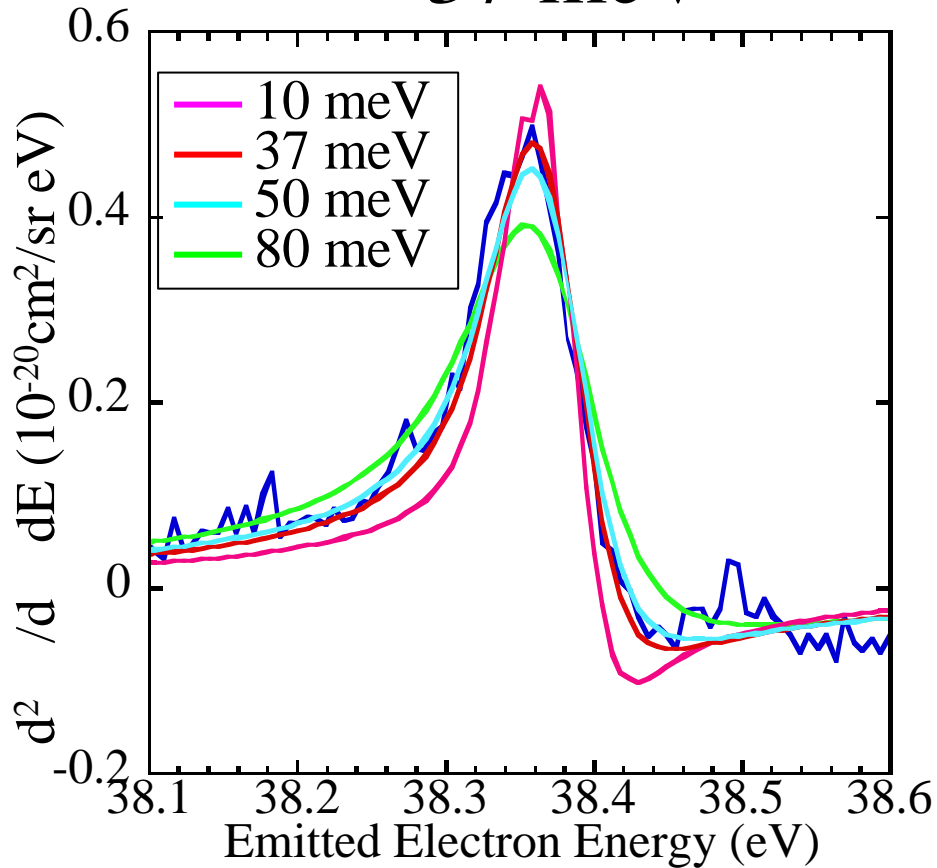


< (2s3s)¹S の Fitting >

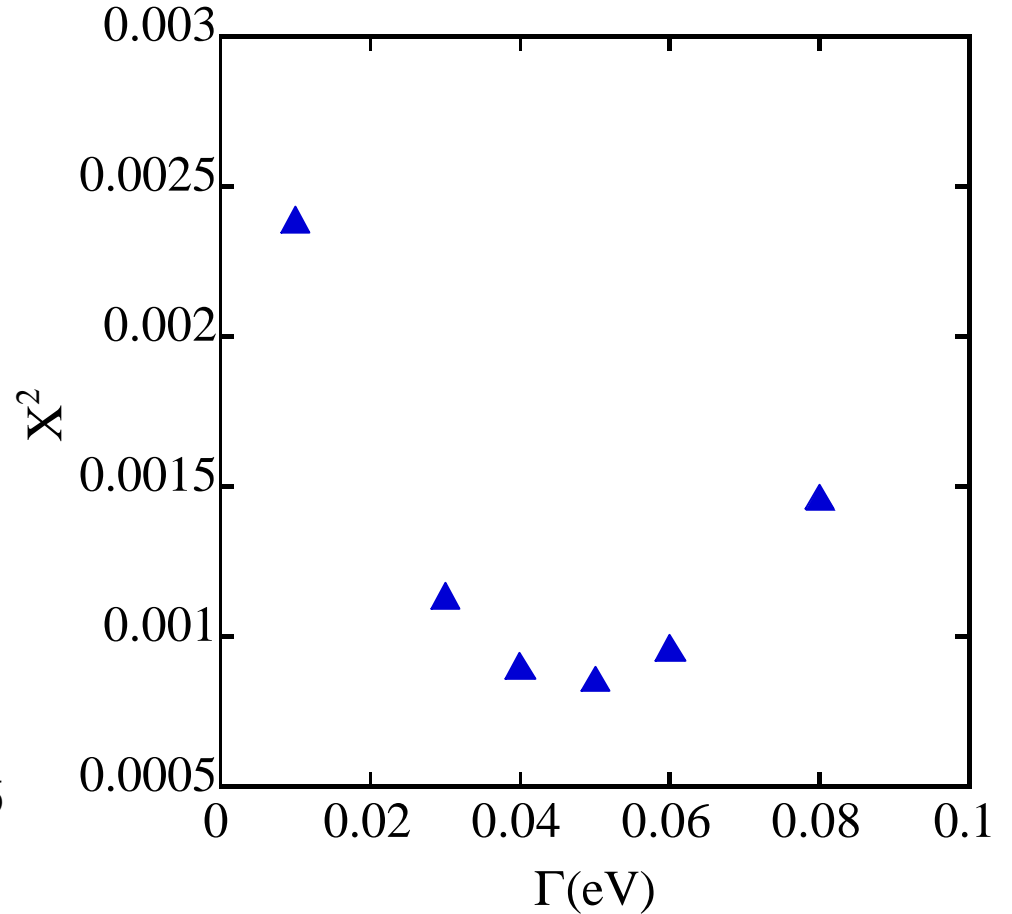
Impact Energy 150eV

Ejection Angle 130 °

= 37 meV



χ^2



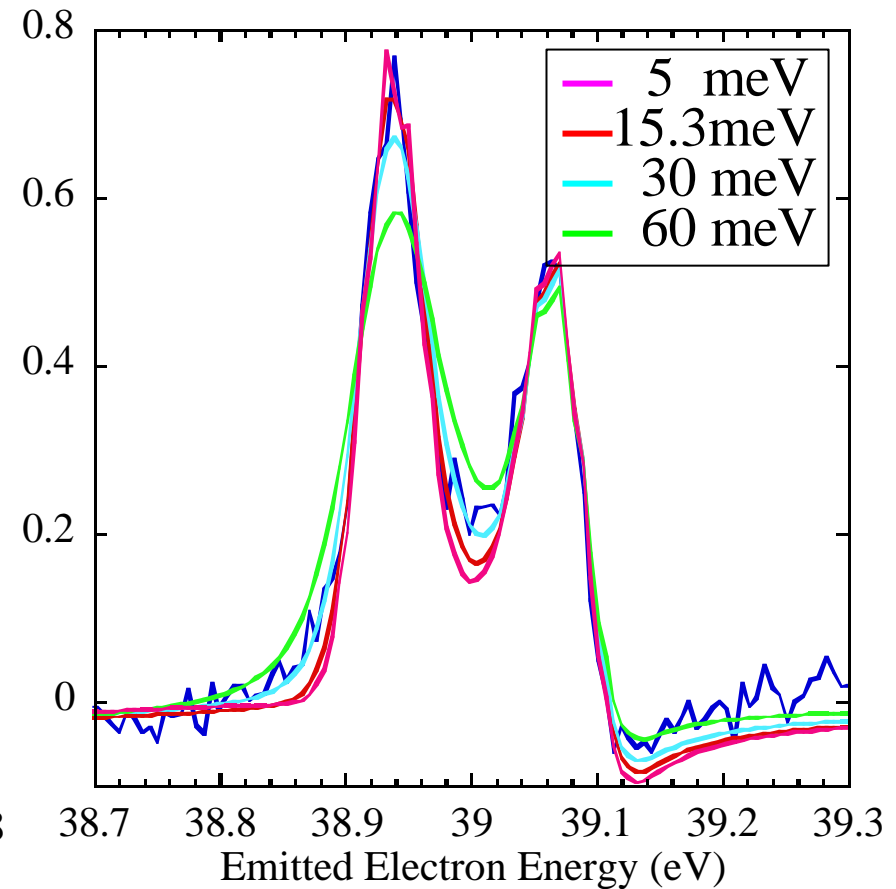
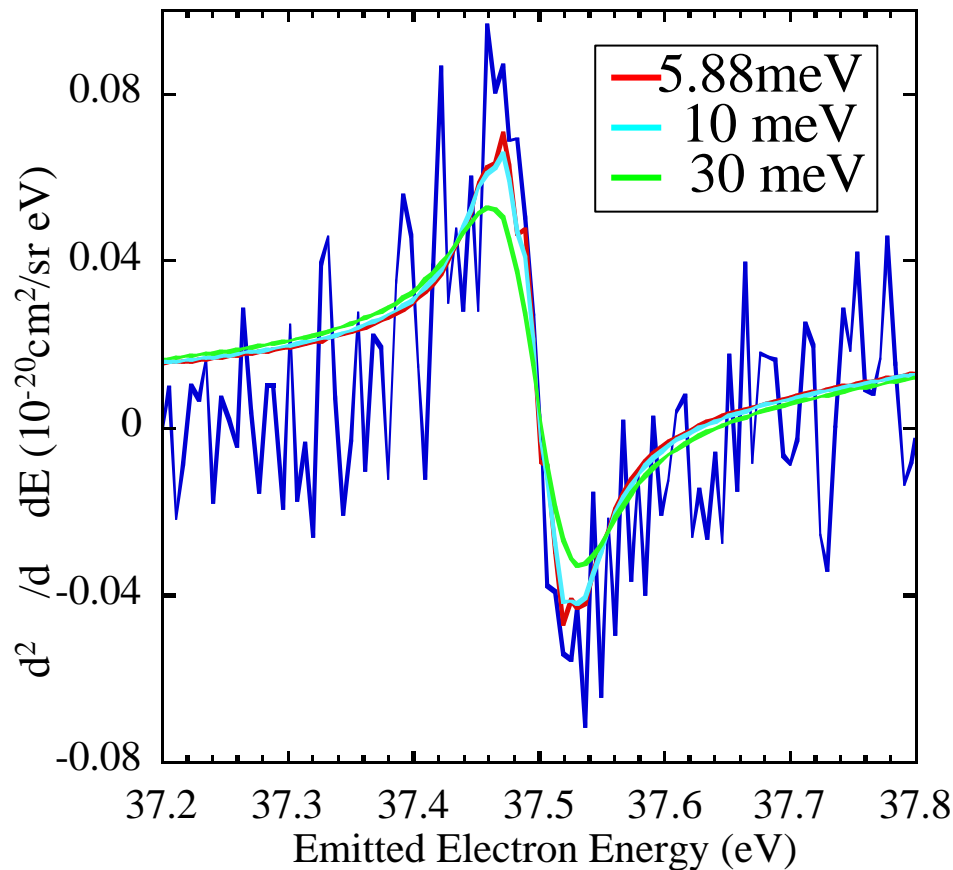
< $(2p2)^1S$ および $(2p3p)^1D$ のFitting >

Impact Energy 150eV

Ejection Angle 130°

= 5.88 meV

= 15.3 meV



E.Lindroth, Phys.Rev.A **49**,4473(1994)

J.Z .Tang et al, Phys.Rev.A **46**,2437(1992)

< $(2p2)^1S$ の角度依存性 >

