

---

# K中間子へリウム 4 原子 X線の精密測定 (V)

---

理研 岡田 信二

for KEK-PS E570 collaboration

# KEK-PS E570 Collaboration List

G. Beer<sup>1</sup>, H. Bhang<sup>2</sup>, M. Cargnelli<sup>3</sup>, J. Chiba<sup>4</sup>, S. Choi<sup>2</sup>,  
C. Curceanu<sup>5</sup>, Y. Fukuda<sup>6</sup>, T. Hanaki<sup>4</sup>, R. S. Hayano<sup>7</sup>, M. Iio<sup>8</sup>,  
T. Ishikawa<sup>7</sup>, S. Ishimoto<sup>9</sup>, T. Ishiwatari<sup>3</sup>, K. Itahashi<sup>8</sup>, M. Iwai<sup>9</sup>,  
M. Iwasaki<sup>8</sup>, B. Juhasz<sup>3</sup>, P. Kienle<sup>3</sup>, J. Marton<sup>3</sup>, Y. Matsuda<sup>8</sup>,  
H. Ohnishi<sup>8</sup>, S. Okada<sup>8</sup>, H. Outa<sup>8</sup>, M. Sato<sup>6</sup>, P. Schmid<sup>3</sup>,  
S. Suzuki<sup>9</sup>, T. Suzuki<sup>8</sup>, H. Tatsuno<sup>7</sup>, D. Tomono<sup>8</sup>,  
E. Widmann<sup>3</sup>, T. Yamazaki<sup>8</sup>, H. Yim<sup>2</sup>, J. Zmeskal<sup>3</sup>

Univ. of Victoria<sup>1</sup>, SNU<sup>2</sup>, SMI<sup>3</sup>, TUS<sup>4</sup>, INFN(LNF)<sup>5</sup>,  
Tokyo Tech<sup>6</sup>, Univ. of Tokyo<sup>7</sup>, RIKEN<sup>8</sup>, KEK<sup>9</sup>



# Contents

- \* 導入 --- K中間子ヘリウムパズル, 動機 ---
- \* 実験 --- KEK-PS E570 ---
- \* 解析 前半：前講演(竜野)

---

- \* スペクトルフィット 後半：本講演
- \* 系統誤差
- \* 最終結果と考察

---

---

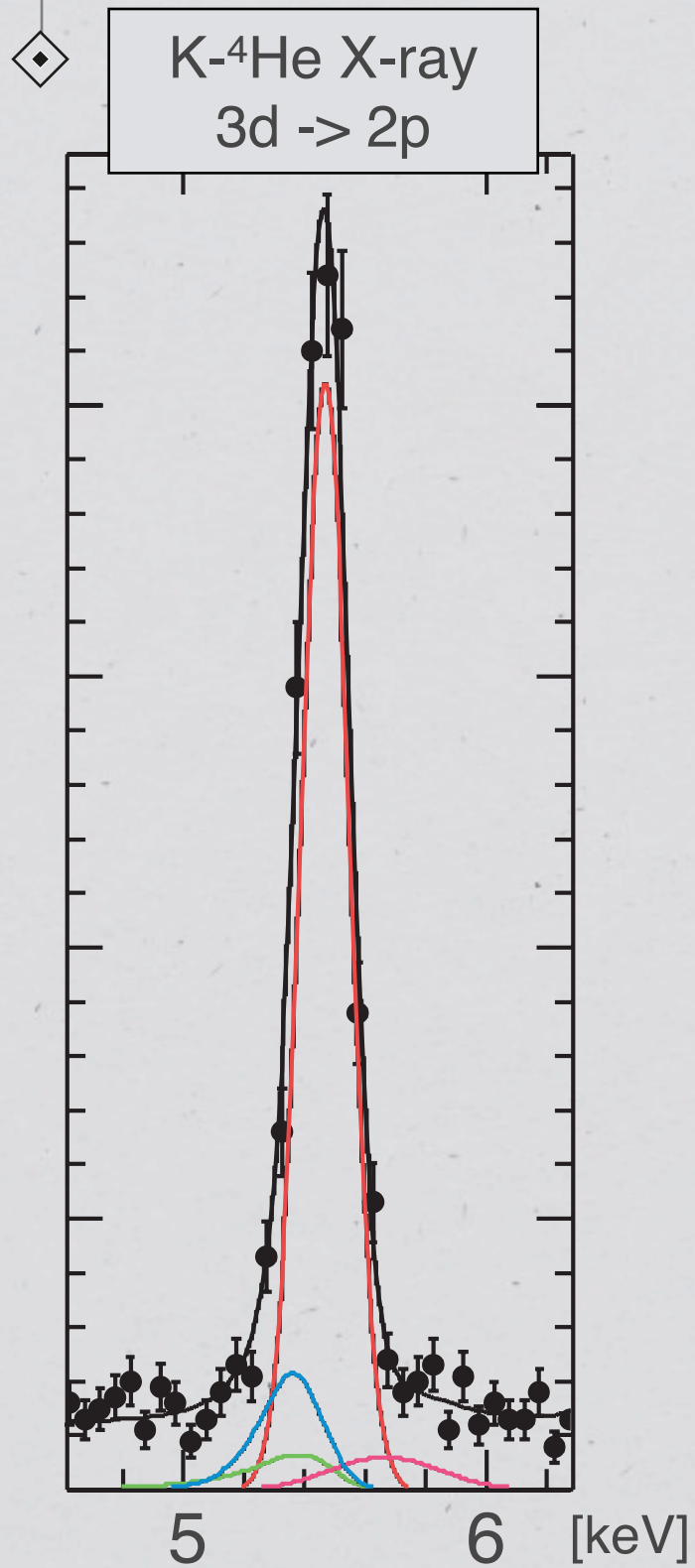
# スペクトルフィット

---

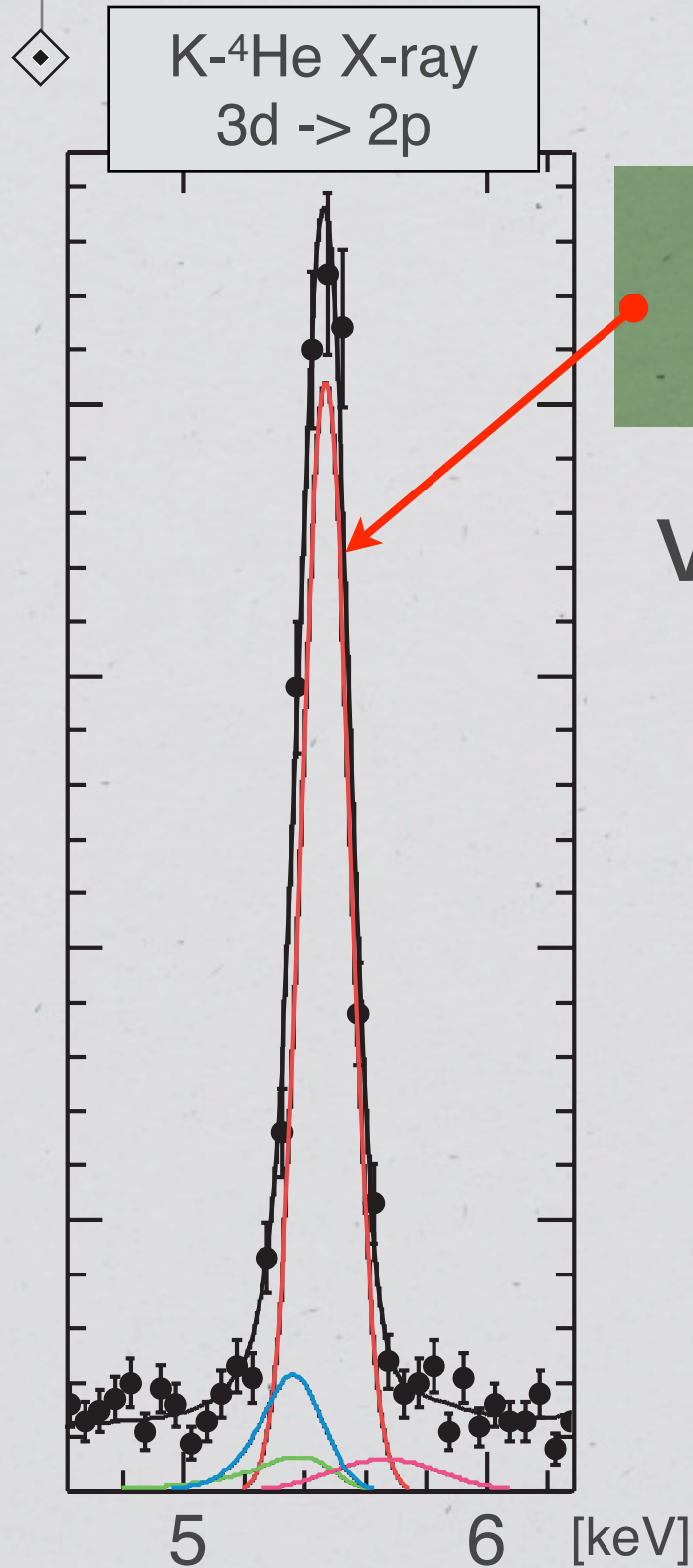
---



# フィット関数



# フィット関数



メインピーク

Voigt 関数

Voigt 関数 : ガウス関数とローレンツ関数の畳み込み



# フィット関数



メインピーク

検出器応答

Voigt 関数

Shelf 関数 + Tail 関数

**Shelf 関数** : ステップ関数とガウス関数の畳み込み

$$S(i, E_{jk}) = \frac{Gain}{2E_{jk}} \operatorname{erfc} \left( \frac{E_i - E_{jk}}{\sqrt{2}\sigma_{jk}} \right)$$

**Tail 関数** : ガウス関数と指数関数の畳み込み

$$T(i, E_{jk}) = \frac{Gain}{2\beta\sigma_{jk}} e^{\frac{E_i - E_{jk}}{\beta\sigma_{jk}} + \frac{1}{2\beta^2}} \operatorname{erfc} \left( \frac{E_i - E_{jk}}{\sqrt{2}\sigma_{jk}} + \frac{1}{\sqrt{2}\beta} \right)$$

# フィット関数



メインピーク

Voigt 関数

検出器応答

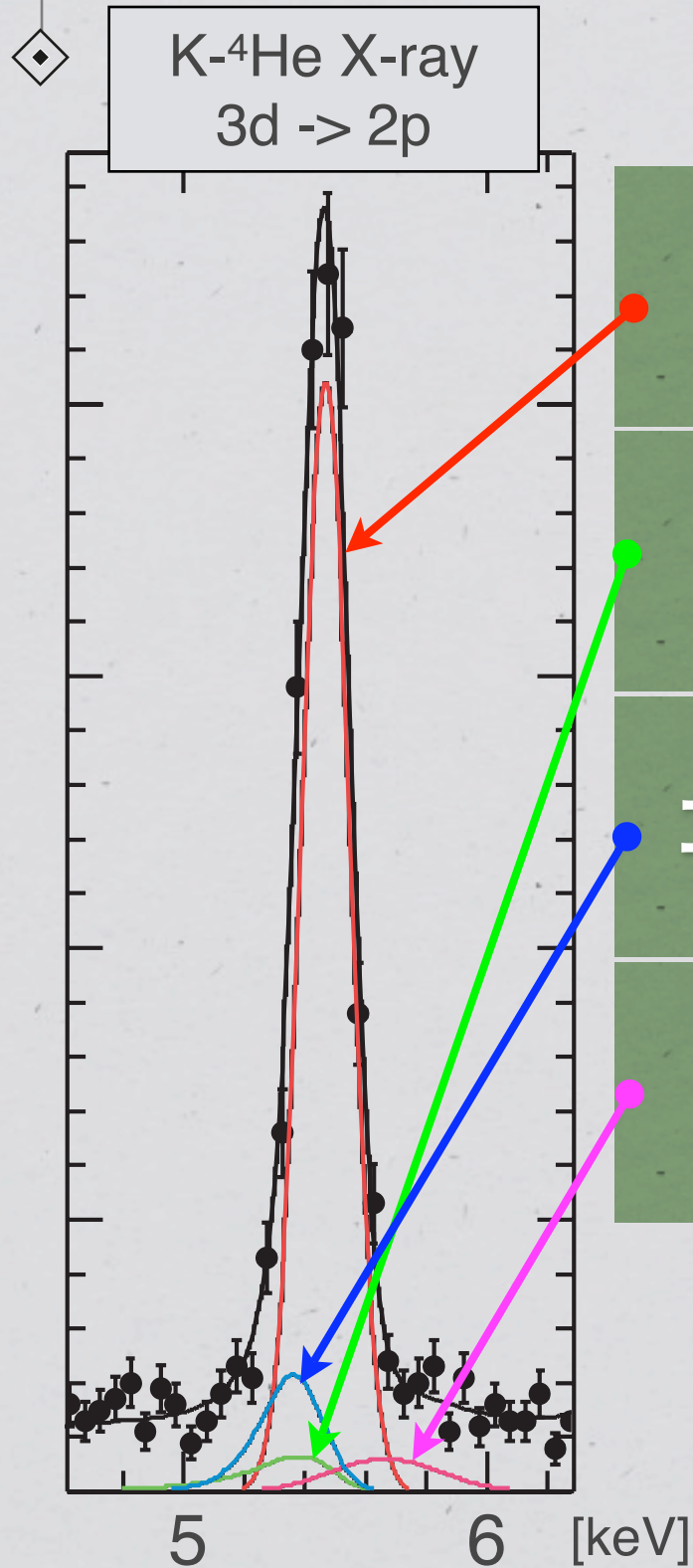
Shelf 関数 + Tail 関数

コンプトン散乱効果

Tail 関数



# フィット関数



メインピーク

Voigt 関数

検出器応答

Shelf 関数 + Tail 関数

コンプトン散乱効果

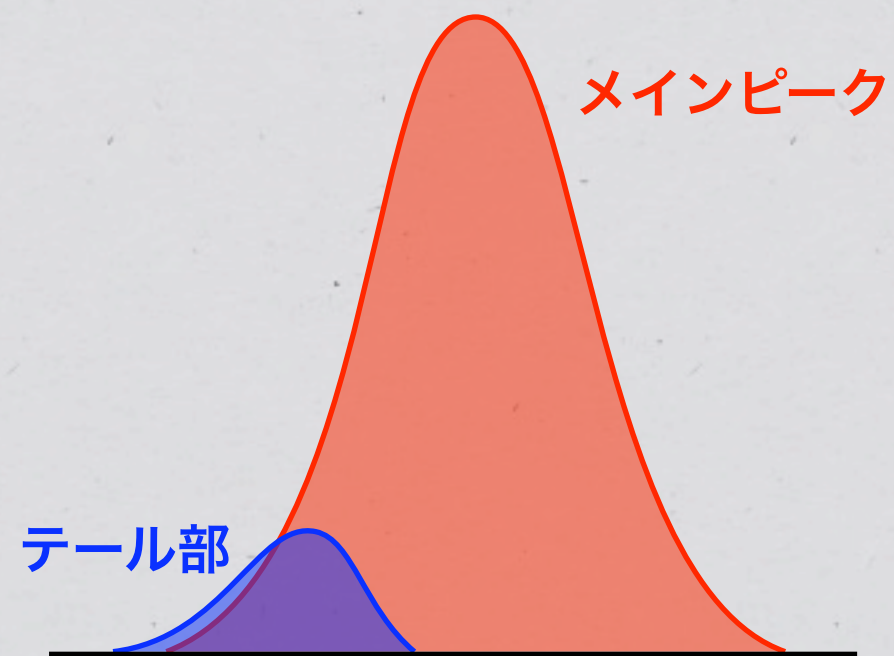
Tail 関数

パイルアップ効果

Gauss 関数

# フィットパラメータ

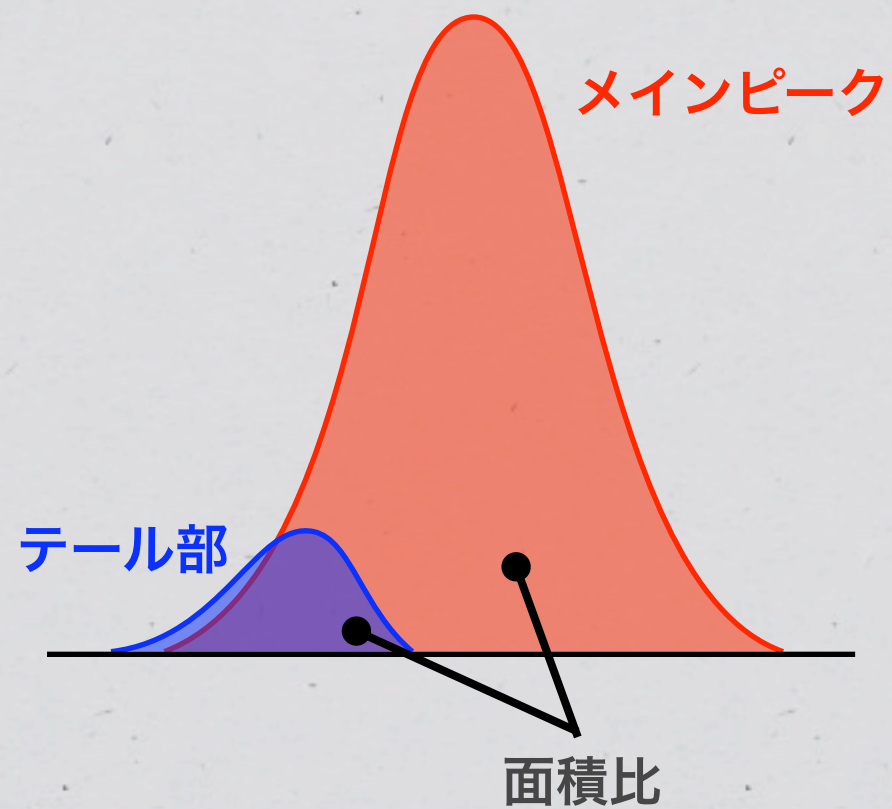
メインピーク以外の  
フィットパラメータの定義





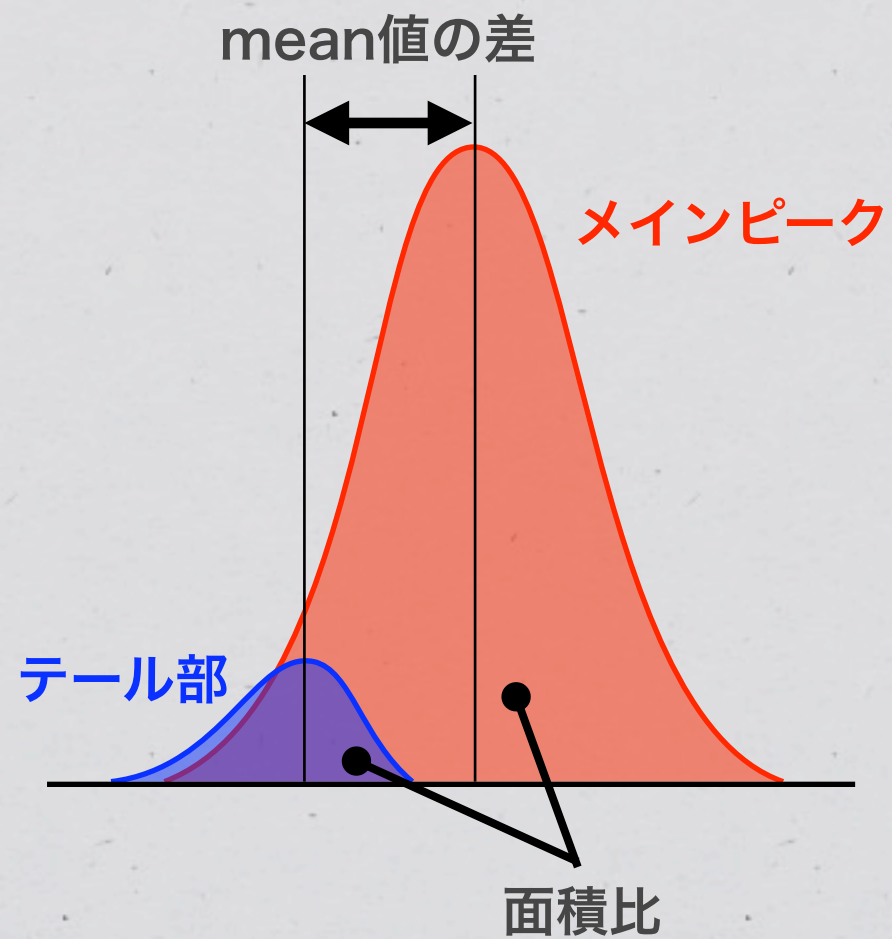
# フィットパラメータ

メインピーク以外の  
フィットパラメータの定義



# フィットパラメータ

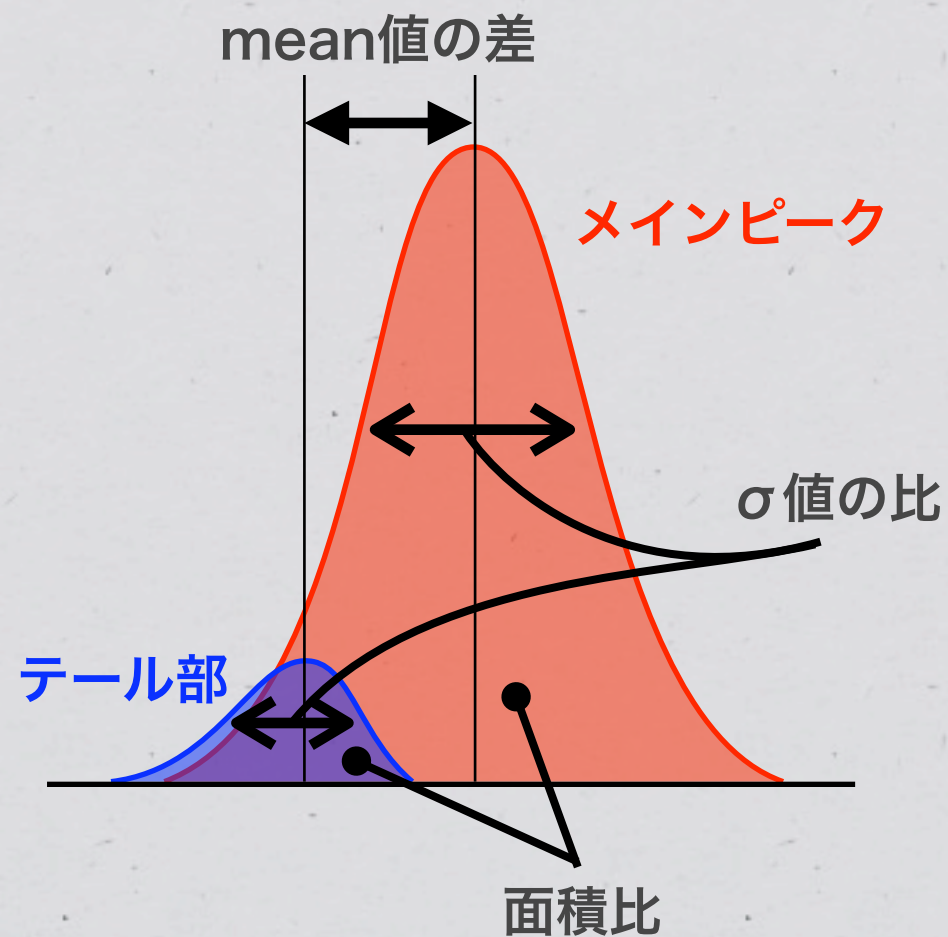
メインピーク以外の  
フィットパラメータの定義





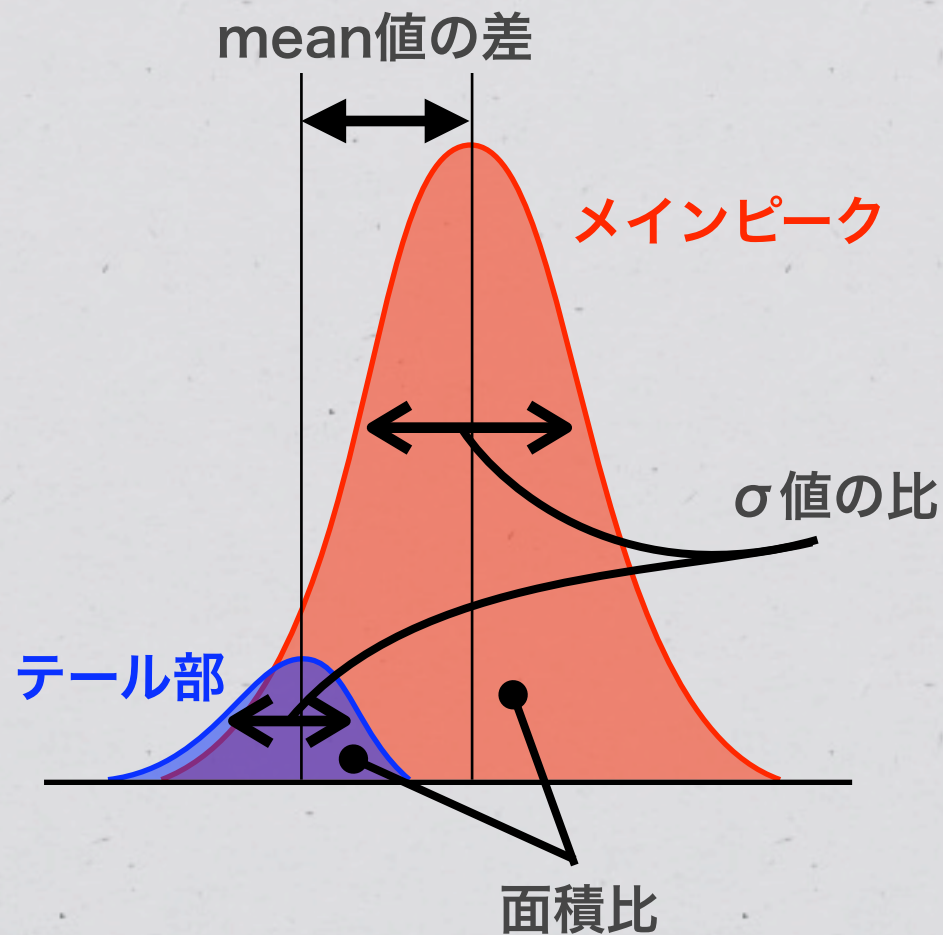
# フィットパラメータ

メインピーク以外の  
フィットパラメータの定義



# フィットパラメータ

メインピーク以外の  
フィットパラメータの定義



1つのピークに対して、

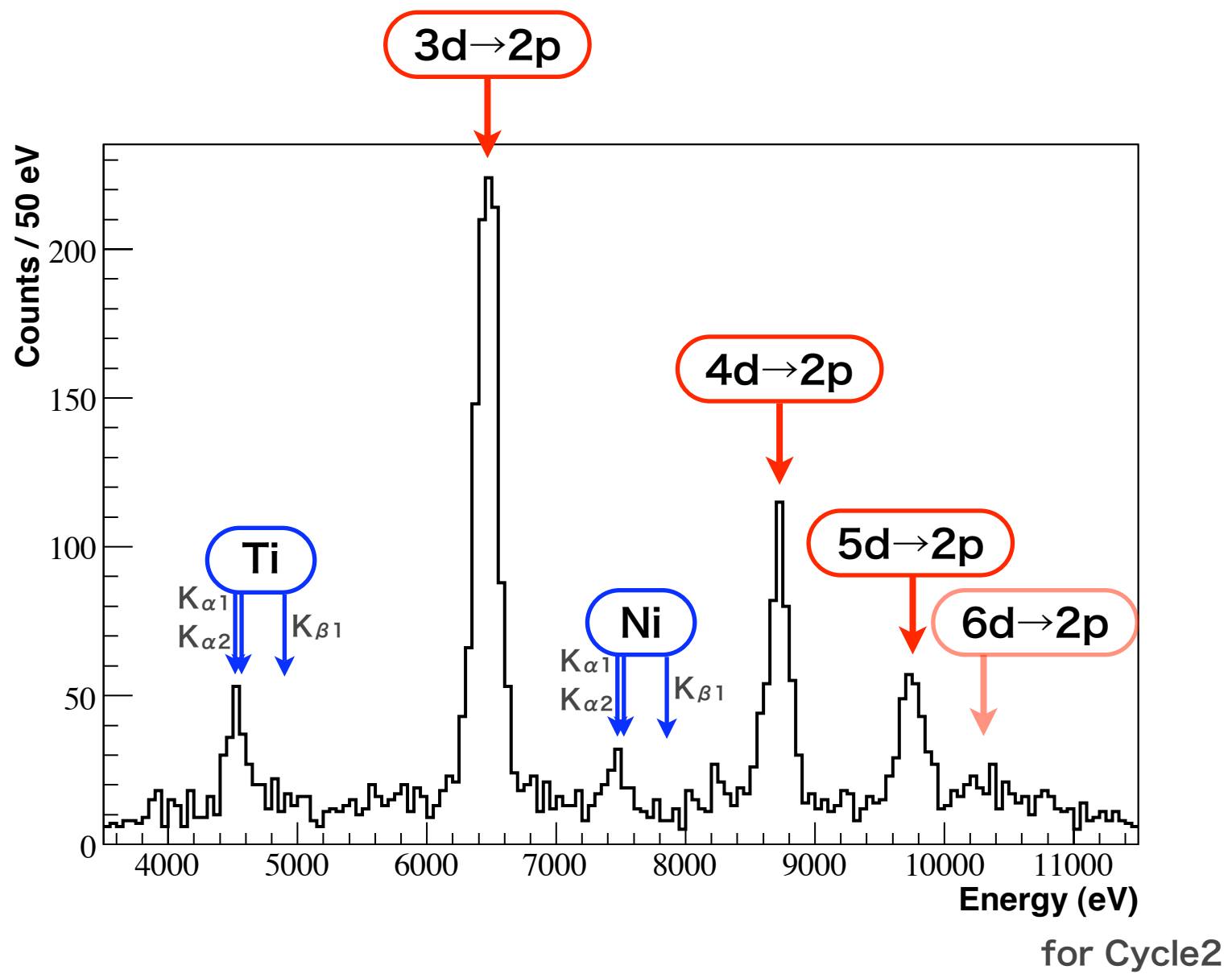
	パラメータ数
メインピーク	4
検出器応答	3
コンプトン散乱効果	4
パイルアップ効果	3

14 パラメータ



# フィットパラメータ

K中間子ヘリウム



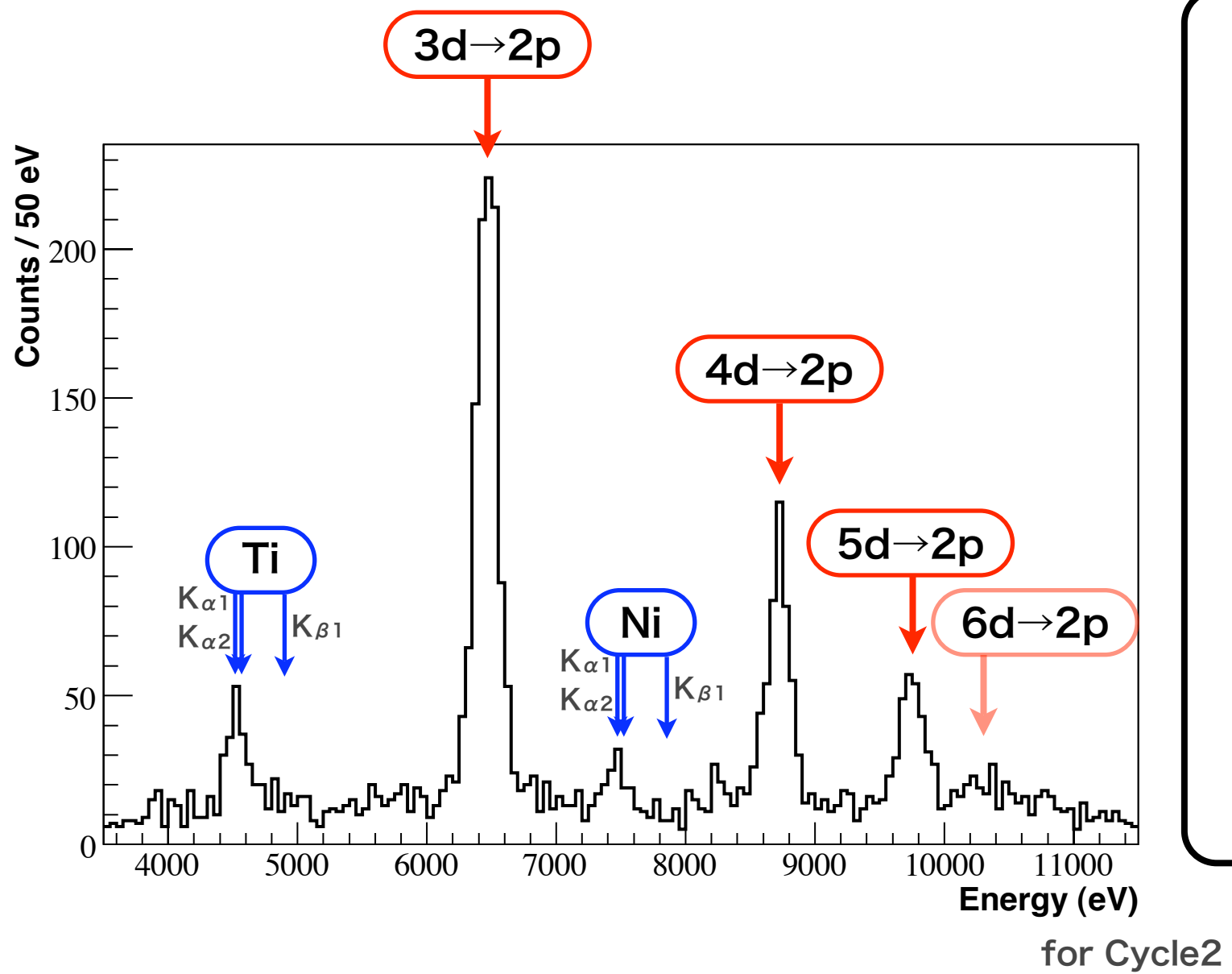
ピークに対して、

	パラメータ数
ピーク	4
器応答	3
散乱効果	4
アップ効果	3

パラメータ

# フィットパラメータ

K中間子ヘリウム



**6 ピーク**  
K-4HeX線ピーク：4本  
(特性X線ピーク：2本)  
を**同時フィット**



**40パラメータ**

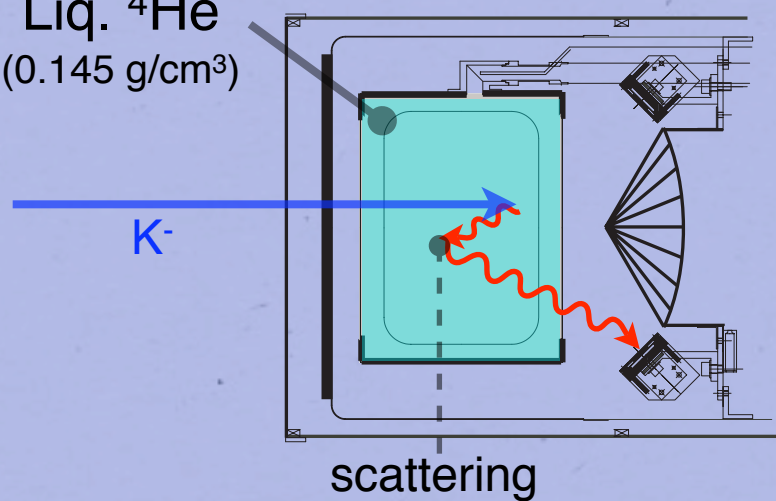




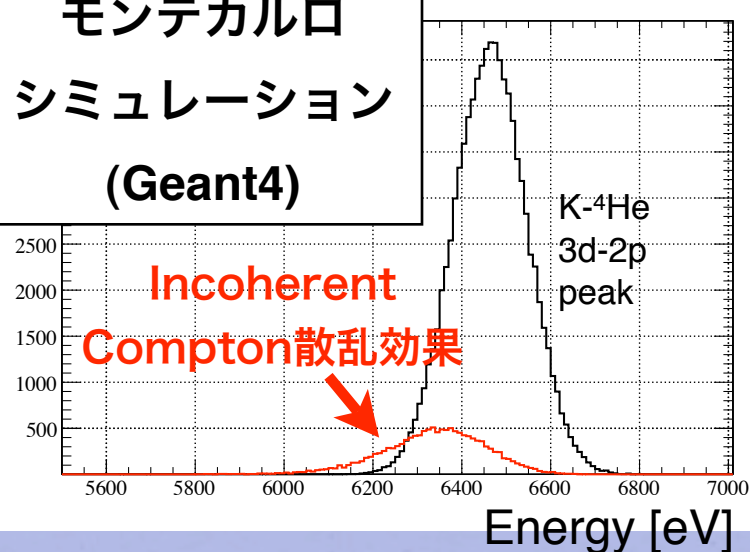
# フィットパラメータ

		メインピーク				検出器応答			パイルアップ効果			コンプトン散乱効果				BG
		Voigt				Tail+Shelf			Gauss			Tail				2次関数
		area	mean	$\sigma$	$\Gamma$	area (tail)	area (shelf)	$\beta$	area	mean	$\sigma$	area	mean	$\sigma$	$\beta$	関数
K- <sup>4</sup> He X線	3d-2p	1	1									1	1	1	1	3
	4d-2p	1	1									1	1	1	1	
	5d-2p	1	1		1							1	1	1	1	
	6d-2p	1	15			1	3	1	1	3	1	1	16	1		
特性 X線	Ti	K $\alpha$	1	-												
		K $\beta$	1	-												
	Ni	K $\alpha$	1	-												
		K $\beta$	1	-												

Liq. <sup>4</sup>He  
(0.145 g/cm<sup>3</sup>)



モンテカルロ  
シミュレーション  
(Geant4)



シミュレーションにより  
全16パラメータを決定





# フィットパラメータ

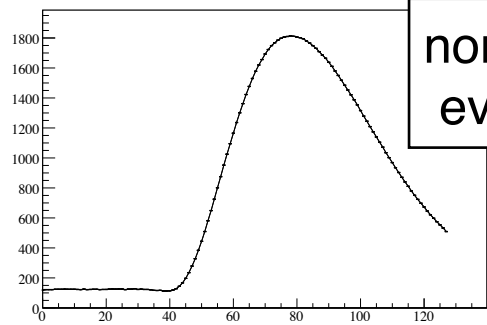
	メインピーク				検出器応答			パイルアップ効果			コンプトン散乱効果				BG
	Voigt				Tail+Shelf			Gauss			Tail				2次関数
	area	mean	$\sigma$	$\Gamma$	area (tail)	area (shelf)	$\beta$	area	mean	$\sigma$	area	mean	$\sigma$	$\beta$	
K- <sup>4</sup> He X線	3d-2p	1	1								1	1	1	1	
	4d-2p	1	1								1	1	1	1	
	5d-2p	1	1		1						1	1	1	1	
	6d-2p	1	15			1	3	1	1	3	1	0	1	1	3
Ti K $\alpha$	1														

特性  
X線

FADCのWaveformデータ

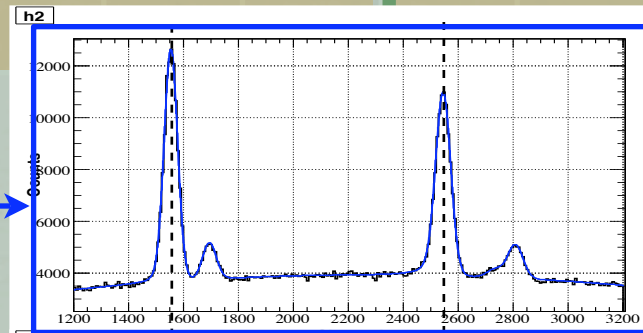
典型的なシグナル

Pulse height

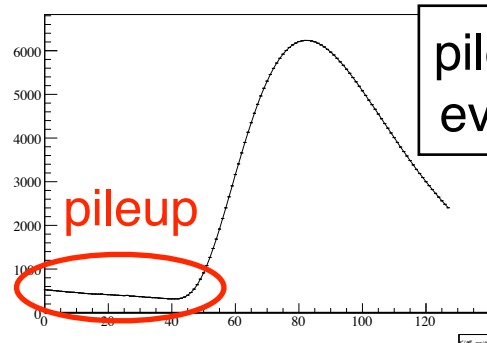


normal event

spectrum



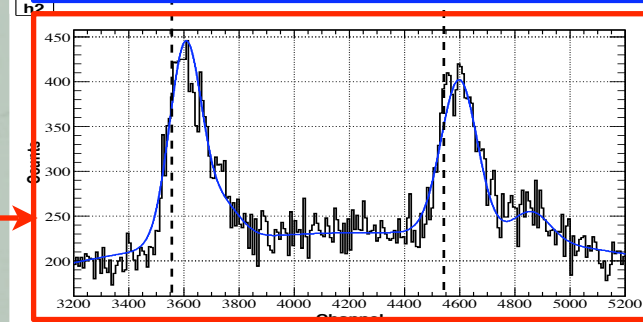
Pulse height



pileup event

pileup

spectrum



Channel

FADCデータを用いたパイルアップイベントの選別

パイルアップイベントの  
スペクトルフィットにより  
2パラメータ決定

mean値の差  
 $\sigma$ 値の比





# フィットパラメータ

		メインピーク				検出器応答			パイルアップ効果			コンプトン散乱効果				BG
		Voigt				Tail+Shelf			Gauss			Tail				2次関数
		area	mean	$\sigma$	$\Gamma$	area (tail)	area (shelf)	$\beta$	area	mean	$\sigma$	area	mean	$\sigma$	$\beta$	
K- <sup>4</sup> He X線	3d-2p	1	1									1	1	1	1	3
	4d-2p	1	1									1	1	1	1	
	5d-2p	1	1		1							1	1	1	1	
	6d-2p	1	15			1	3	1	1	1	1	1	0	1	1	
特性 X線	Ti	K $\alpha$	1													
		K $\beta$	1	-												
	Ni	K $\alpha$	1	-												
		K $\beta$	1	-												

## セルフトリガーイベントのスペクトルフィット

- ▶ 検出器の応答関数
- ▶ エネルギー依存の検出器分解能 等



8パラメータ決定

$$\Delta E(\text{FWHM}) = 2.35\omega \sqrt{W_N^2 + \frac{FE}{\omega}}$$





# フィットパラメータ

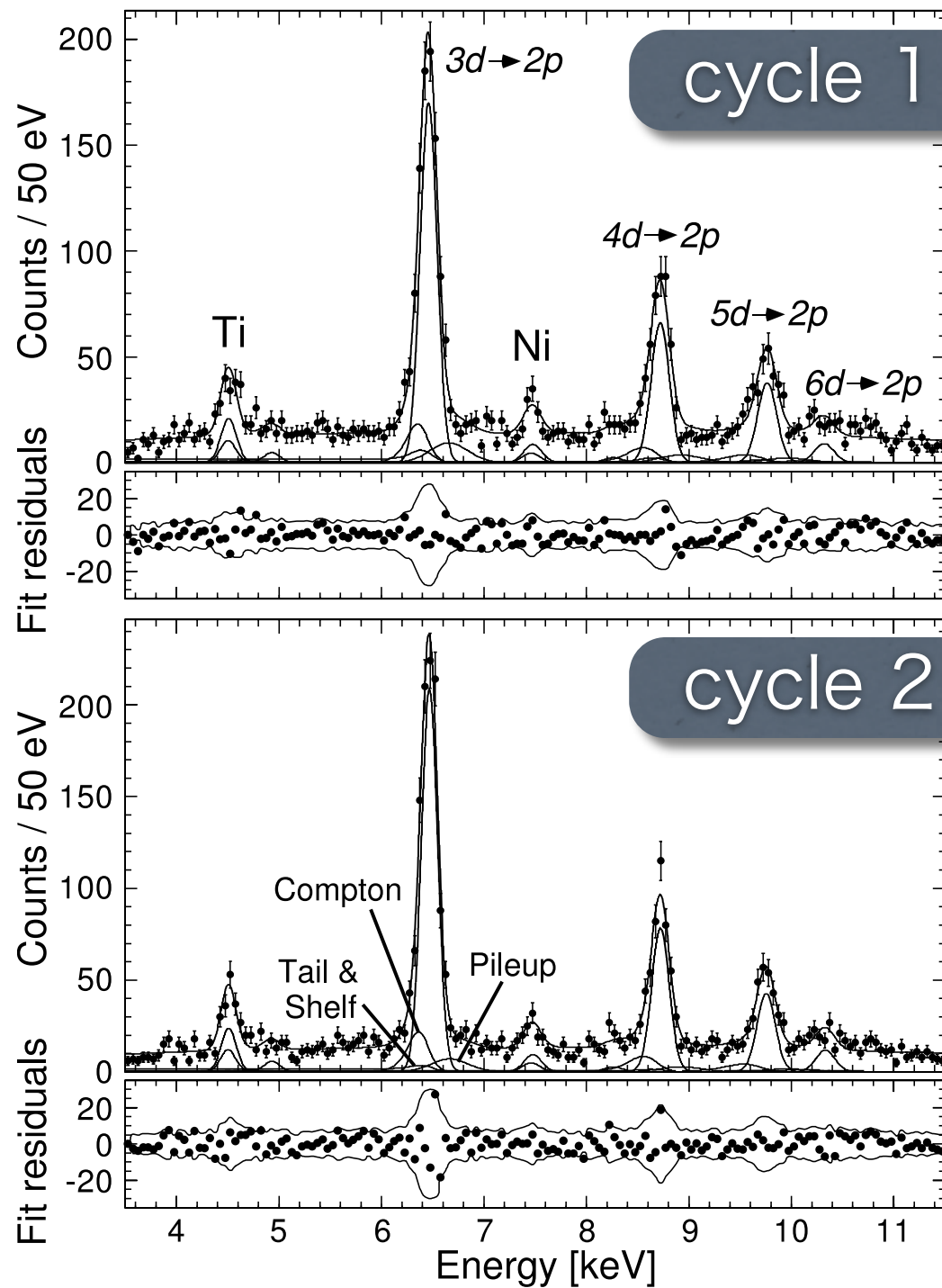
		メインピーク				BG
		Voigt				2次関数
		area	mean	$\sigma$	$\Gamma$	
K- <sup>4</sup> He X線	3d-2p	1	1		1	3
	4d-2p	1	1			
	5d-2p	1	1			
	6d-2p	1	1			
特性 X線	Ti	K $\alpha$	1	-	-	
		K $\beta$	-	-		
	Ni	K $\alpha$	1	-		
		K $\beta$	-	-		

- **K-<sup>4</sup>He X線 4つの遷移エネルギーと収量**
- **自然幅**
- バックグラウンド
- 特性X線の収量

**14フリーパラメータ**



# Fit 結果



- データの $\pm 2\sigma$ ライン  
( $\sigma$ : 計数統計)
- フィットのresiduals

Cycle 1 : 2005年10月 (520時間)

Cycle 2 : 2005年12月 (260時間)

# 遷移エネルギー

	測定値 [eV] (統計誤差のみ)	EM計算値 [eV]
3d→2p	6467.0 ± 2.5	6463.5
4d→2p	8723.5 ± 4.6	8721.7
5d→2p	9761.4 ± 7.6	9766.8

EM計算 : **T. Koike, Private communication**

- Vacuum polarization
- Nuclear finite size effect
- Relativistic recoil effect
- Electron screening effect
- **Totally corrected energy levels を考慮。**

cf. J.P. Santos et al. Phys. Rev. A71, 032501 (2005)

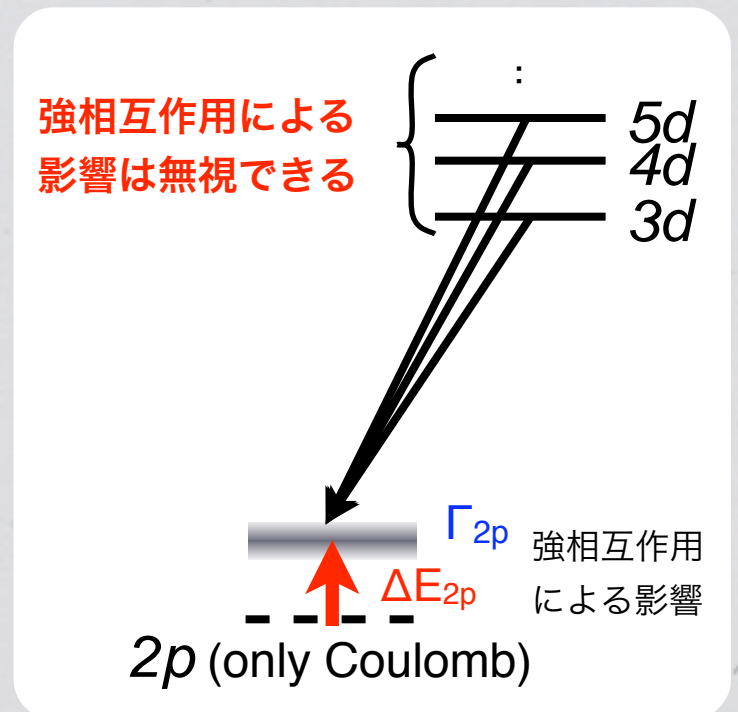
これまで印刷公表された  
K-He原子レベルのEM計算値は、  
0.1eVの桁まで記されていない



# 2p レベルシフトの導出

主量子数  $n > 2$  のエネルギー準位の  
強相互作用シフトが無視できると仮定：

$$\Delta E_{2p} = (E_{n,d} - E_{(2,p)}) - (E_{n,d}^{EM} - E_{(2,p)}^{EM})$$



# 2p レベルシフトの導出

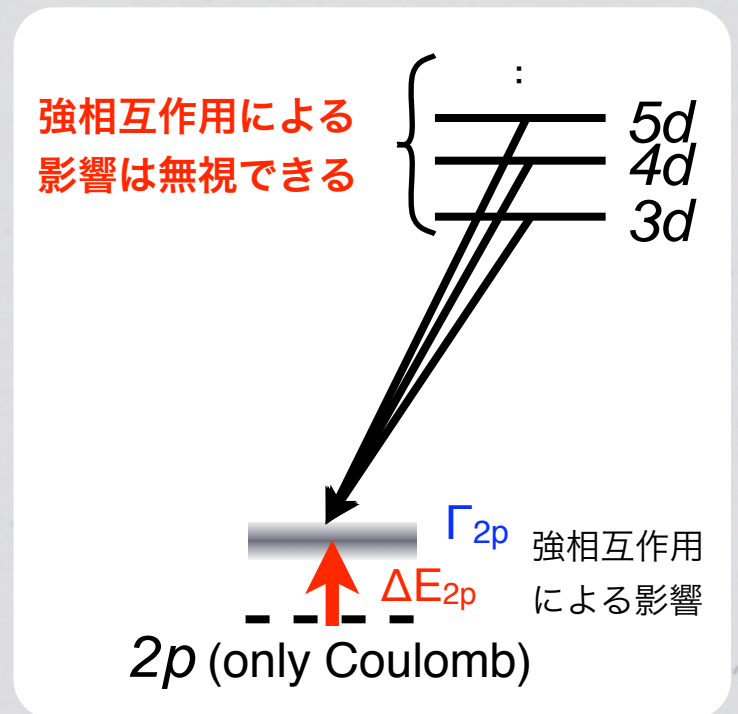
主量子数  $n > 2$  のエネルギー準位の  
強相互作用シフトが無視できると仮定：

$$\Delta E_{2p} = (E_{(n,d)} - E_{(2,p)}) - (E_{(n,d)}^{EM} - E_{(2,p)}^{EM})$$

全遷移エネルギーを用い 2pレベルシフトを導出：

	測定値 [eV]	EM計算値 [eV]
3d→2p	6467.0 ± 2.5	6463.5
4d→2p	8723.5 ± 4.6	8721.7
5d→2p	9761.4 ± 7.6	9766.8

➡  $\Delta E_{2p} = 2 \pm 2 \text{ (stat) eV}$



注) **K中間子質量の誤差起因**のEM計算値の誤差は、非常に小さい

現在のPDG値 493.677(16) MeV/c<sup>2</sup> の**1σ**のずれは、 $\Delta E_{2p}$ の**約0.2eV**ずれに相当



---

---

# 系統誤差

---

---

# 系統誤差

・**コンプトン散乱効果**

・**検出器応答関数 (tail・shelf関数)**

・**パイルアップの効果**



# 系統誤差

## ・☞ コンプトン散乱効果

LECS(Low Energy Compton Scattering)パッケージ：

▶(束縛)コンプトン・レイリー散乱の $^4\text{He}$ に対する断面積の誤差は数%

$\pm 5\%$ の収量変化 =  $\sim \pm 0.4\text{ eV}$ の変化

## ・☞ 検出器応答関数 (tail・shelf関数)

## ・☞ パイルアップの効果

# 系統誤差

## ・**コンプトン散乱効果**

LECS(Low Energy Compton Scattering)パッケージ：

▶(束縛)コンプトン・レイリー散乱の $^4\text{He}$ に対する断面積の誤差は数%

**$\pm 5\%$ の収量変化 =  $\sim \pm 0.4\text{ eV}$ の変化**

## ・**検出器応答関数 (tail・shelf関数)**

メインピークに対する収量(Gain)比：

- ▶ セルフトリガーのフィットから導出
- ▶ 中心値はTi・Niの特性X線ピークに対して共通として求める
- ▶ エネルギー依存性や、tail関数のみを導入した場合等を考慮

**$\sim \pm 1\text{ eV}$ の変化**

## ・**パイルアップの効果**



# 系統誤差

## ・コンプトン散乱効果

LECS(Low Energy Compton Scattering)パッケージ：

▶(束縛)コンプトン・レイリー散乱の $^4\text{He}$ に対する断面積の誤差は数%

**$\pm 5\%$ の収量変化 =  $\sim \pm 0.4\text{ eV}$ の変化**

## ・検出器応答関数 (tail・shelf関数)

メインピークに対する収量(Gain)比：

- ▶ セルフトリガーのフィットから導出
- ▶ 中心値はTi・Niの特性X線ピークに対して共通として求める
- ▶ エネルギー依存性や、tail関数のみを導入した場合等を考慮

**$\sim \pm 1\text{ eV}$ の変化**

## ・パイルアップの効果

パイルアップ収量比の誤差：

▶FADC解析におけるパイルアップイベント選別の誤差から $\pm 10\%$

**$\pm 10\%$ の収量変化 =  $\sim \pm 0.4\text{ eV}$ の変化**

# 最終結果

**3d->2p 遷移エネルギー :  $6467 \pm 3 \text{ (stat)} \pm 2 \text{ (syst)} \text{ eV}$**

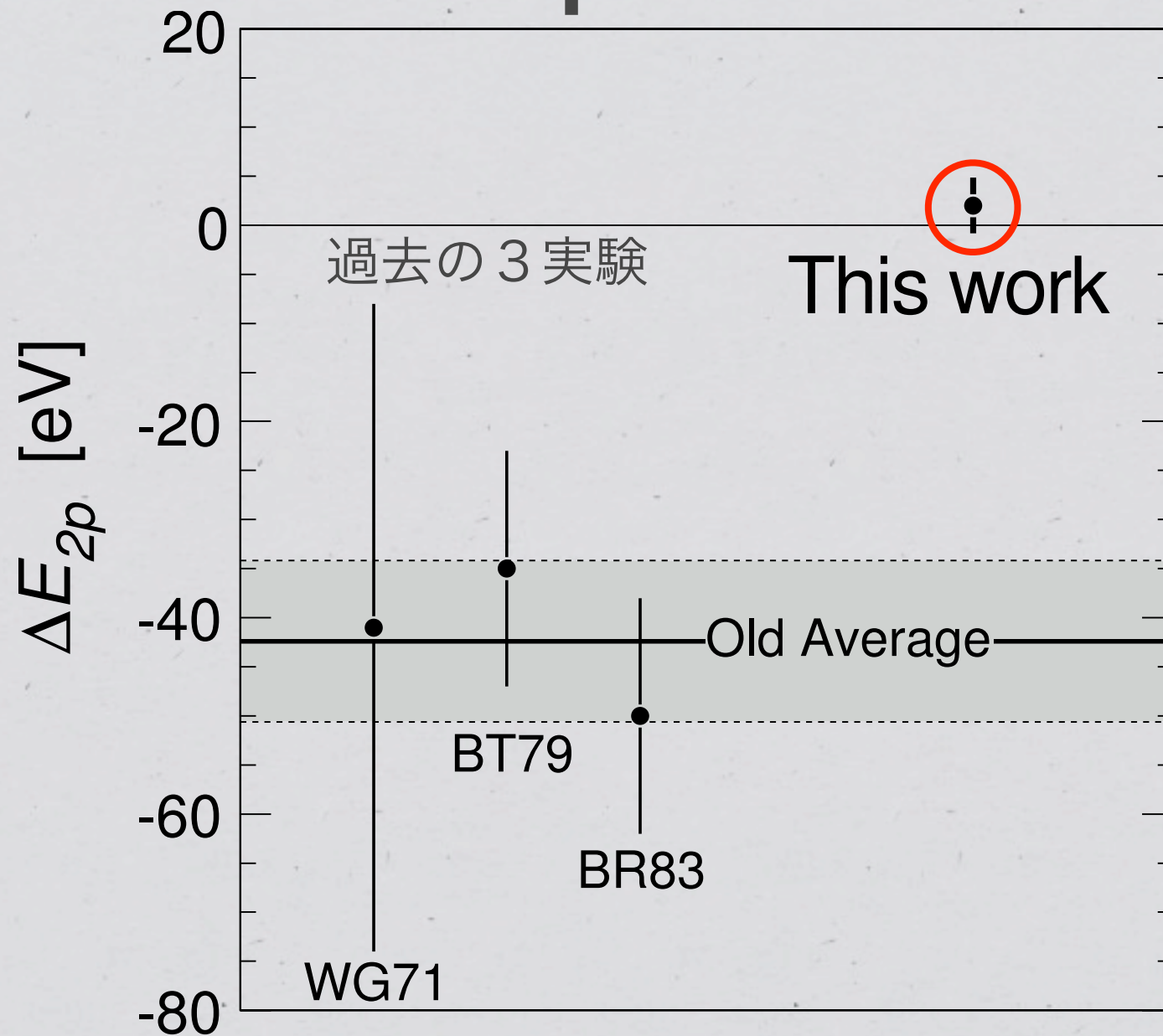
全遷移エネルギーを用い、

**2pレベルシフト  $\Delta E_{2p}$  :  $2 \pm 2 \text{ (stat)} \pm 2 \text{ (syst)} \text{ eV}$**



# 過去の実験値・理論値との比較

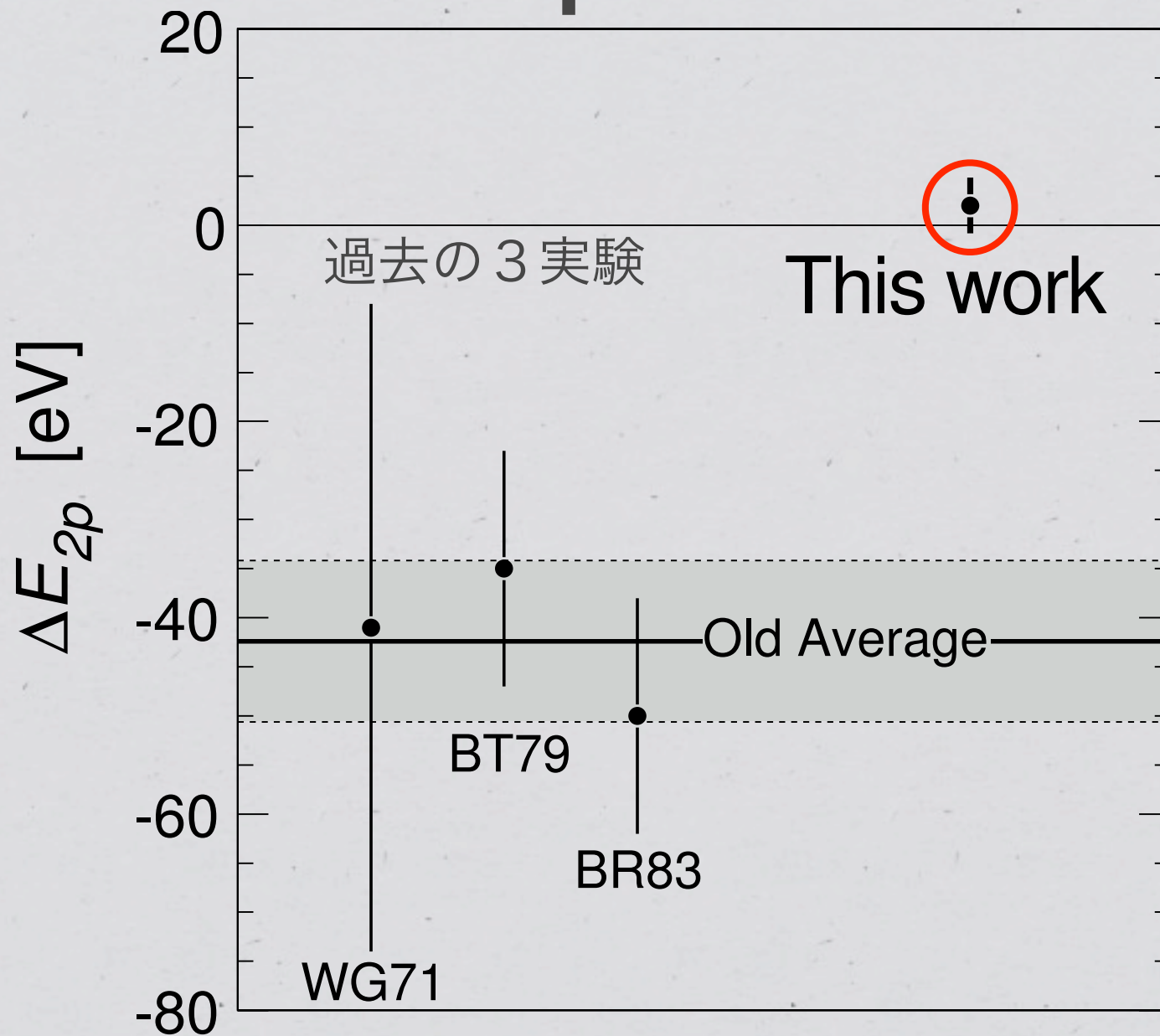
## Experiment



注) 誤差棒は、統計/系統誤差は自乗和としている

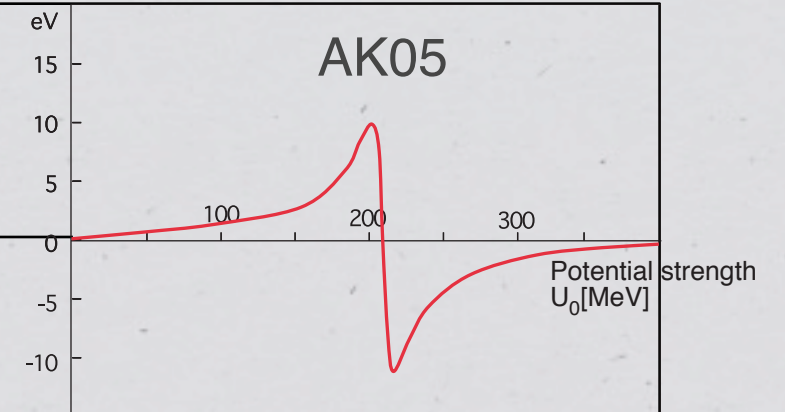
# 過去の実験値・理論値との比較

## Experiment



## Theory

BT90  
HZ00  
FR06



( $U_{\text{coupl}} = 120$  [MeV])

- ✓ BT90 : グローバルフィット
- ✓ HZ00 : SU(3) カイラルユニタリーモデル
- ✓ FR06 : 非線形密度依存を考慮 (-0.4eV as the lowest)
- ✓ AK05 : Coupled-channel モデル

WG71 : C.E. Wiegand and R. Pehl, PRL27,1410 (1971).  
 BT79 : C.J. Batty et al., NPA326, 455 (1979).  
 BR83 : S. Baird et al., NPA392, 297 (1983).  
 BT90 : C.J. Batty, NPA 508, 89c (1990).  
 HZ00 : S. Hirenzaki et al., PRC 61, 055205 (2000).  
 FR06 : E. Friedman, private communication (2006).  
 AK05 : Y.Akaishi, EXA05 proceedings (2005).

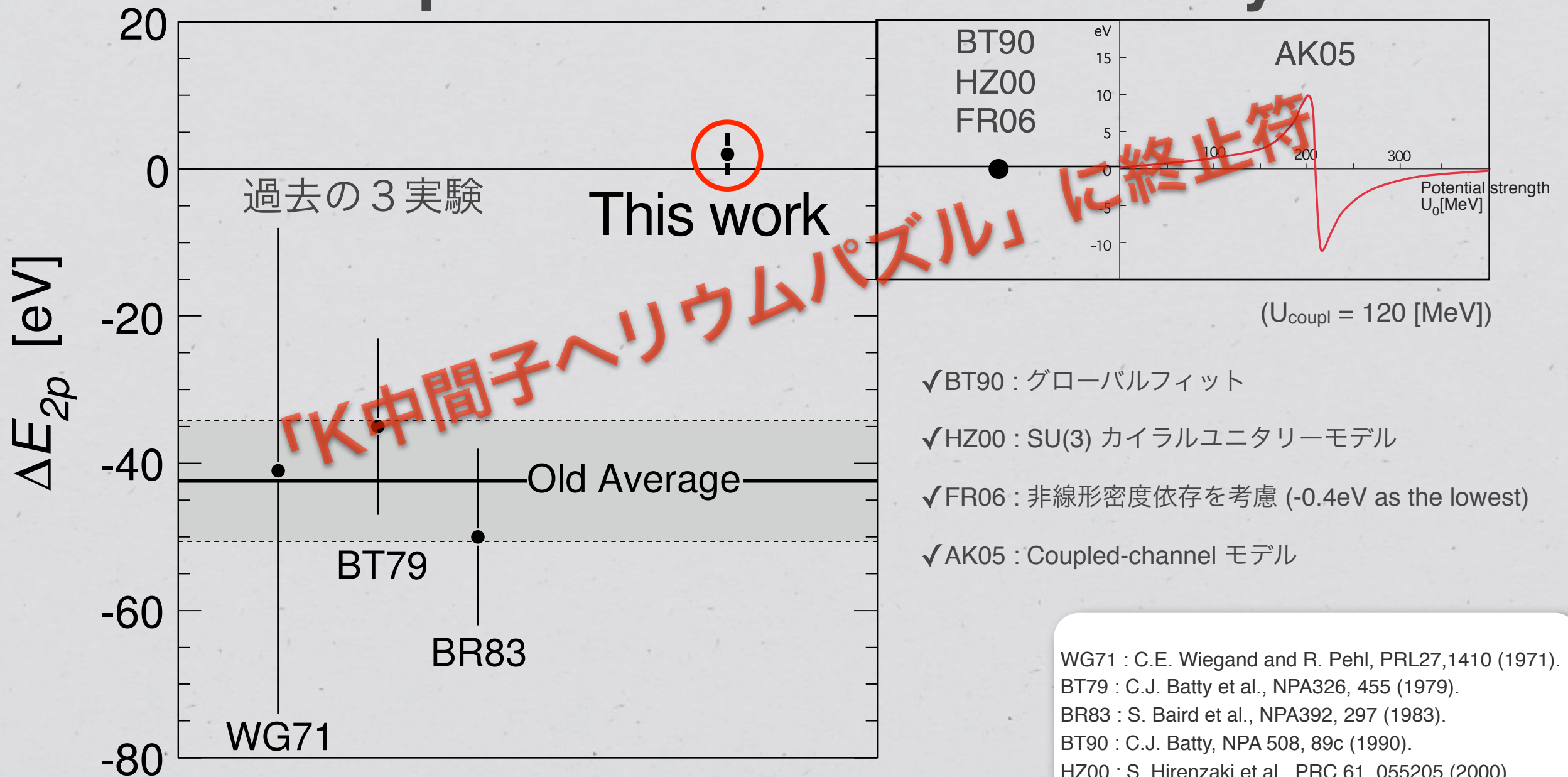
注) 誤差棒は、統計/系統誤差は自乗和としている



# 過去の実験値・理論値との比較

## Experiment

## Theory



- ✓ BT90 : グローバルフィット
- ✓ HZ00 : SU(3) カイラルユニタリーモデル
- ✓ FR06 : 非線形密度依存を考慮 (-0.4eV as the lowest)
- ✓ AK05 : Coupled-channel モデル

WG71 : C.E. Wiegand and R. Pehl, PRL27,1410 (1971).  
 BT79 : C.J. Batty et al., NPA326, 455 (1979).  
 BR83 : S. Baird et al., NPA392, 297 (1983).  
 BT90 : C.J. Batty, NPA 508, 89c (1990).  
 HZ00 : S. Hirenzaki et al., PRC 61, 055205 (2000).  
 FR06 : E. Friedman, private communication (2006).  
 AK05 : Y.Akaishi, EXA05 proceedings (2005).

注) 誤差棒は、統計/系統誤差は自乗和としている

# Phys. Lett. B 653 (2007) 387



ELSEVIER

Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

 ScienceDirect

Physics Letters B 653 (2007) 387–391

PHYSICS LETTERS B

[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)

## Precision measurement of the $3d \rightarrow 2p$ x-ray energy in kaonic $^4\text{He}$

S. Okada<sup>a,\*</sup>, G. Beer<sup>b</sup>, H. Bhang<sup>c</sup>, M. Cargnelli<sup>d</sup>, J. Chiba<sup>e</sup>, Seonho Choi<sup>c</sup>, C. Curceanu<sup>f</sup>,  
Y. Fukuda<sup>g</sup>, T. Hanaki<sup>e</sup>, R.S. Hayano<sup>h</sup>, M. Iio<sup>a</sup>, T. Ishikawa<sup>h</sup>, S. Ishimoto<sup>i</sup>, T. Ishiwatari<sup>d</sup>,  
K. Itahashi<sup>a</sup>, M. Iwai<sup>i</sup>, M. Iwasaki<sup>a,g</sup>, B. Juhász<sup>d</sup>, P. Kienle<sup>d,j</sup>, J. Marton<sup>d</sup>, Y. Matsuda<sup>a</sup>,  
H. Ohnishi<sup>a</sup>, H. Outa<sup>a</sup>, M. Sato<sup>g,1</sup>, P. Schmid<sup>d</sup>, S. Suzuki<sup>i</sup>, T. Suzuki<sup>a</sup>, H. Tatsuno<sup>h</sup>, D. Tomono<sup>a</sup>,  
E. Widmann<sup>d</sup>, T. Yamazaki<sup>a,h</sup>, H. Yim<sup>c</sup>, J. Zmeskal<sup>d</sup>

<sup>a</sup> RIKEN Nishina Center, RIKEN, Saitama 351-0198, Japan

<sup>b</sup> Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, British Columbia V8W 3P6, Canada

<sup>c</sup> Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-742, South Korea

<sup>d</sup> Stefan Meyer Institut für subatomare Physik, Austrian Academy of Sciences, A-1090 Vienna, Austria

<sup>e</sup> Department of Physics, Tokyo University of Science, Chiba 278-8510, Japan

<sup>f</sup> Laboratori Nazionali di Frascati, INFN, I-00044 Frascati, Italy

<sup>g</sup> Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8551, Japan

<sup>h</sup> Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>i</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Ibaraki 305-0801, Japan

<sup>j</sup> Physik Department, Technische Universität München, D-85748 Garching, Germany

Received 30 June 2007; accepted 13 August 2007

Available online 17 August 2007

Editor: V. Metag

2007年8月受理



# まとめ

- \* K中間子ヘリウム4原子X線を測定
  - \* 高分解能 : 190 eV @ 6.5keV (SDD使用)
  - \* 高S/N比 : 静止K-イベント選定
  - \* 高精度エネルギー較正 : 特性X線(Ti, Ni)を用いた in-situ エネルギー較正
- \* 3d→2p遷移エネルギー : **6467 ± 3(stat) ± 2(syst) eV**
- \* 2pエネルギーシフト : **2 ± 2 (stat) ± 2 (syst) eV**
- \* 「K中間子ヘリウムパズル」に終止符

---

---

# BACKUP SLIDES

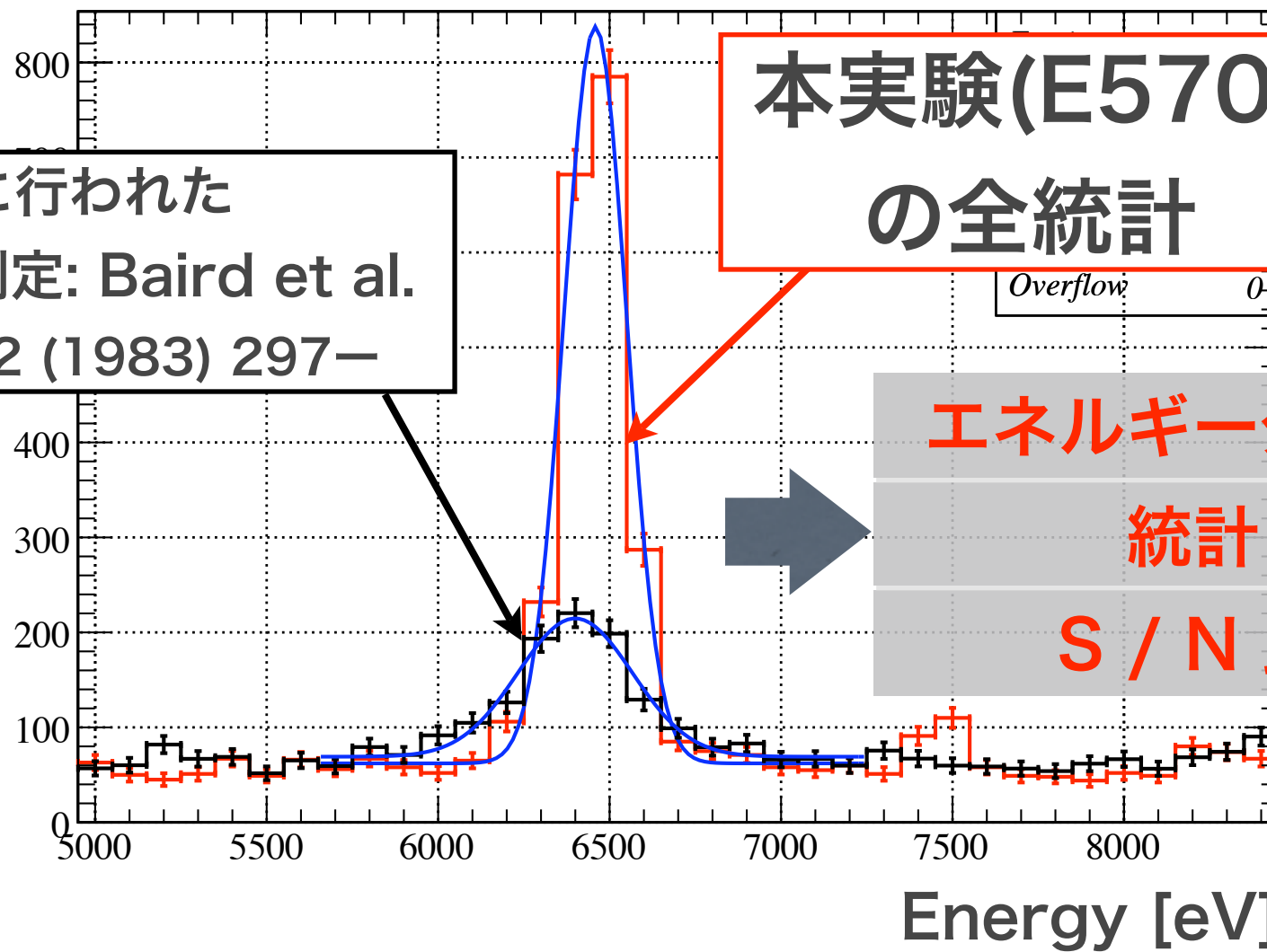
---

---



# 過去の実験との比較

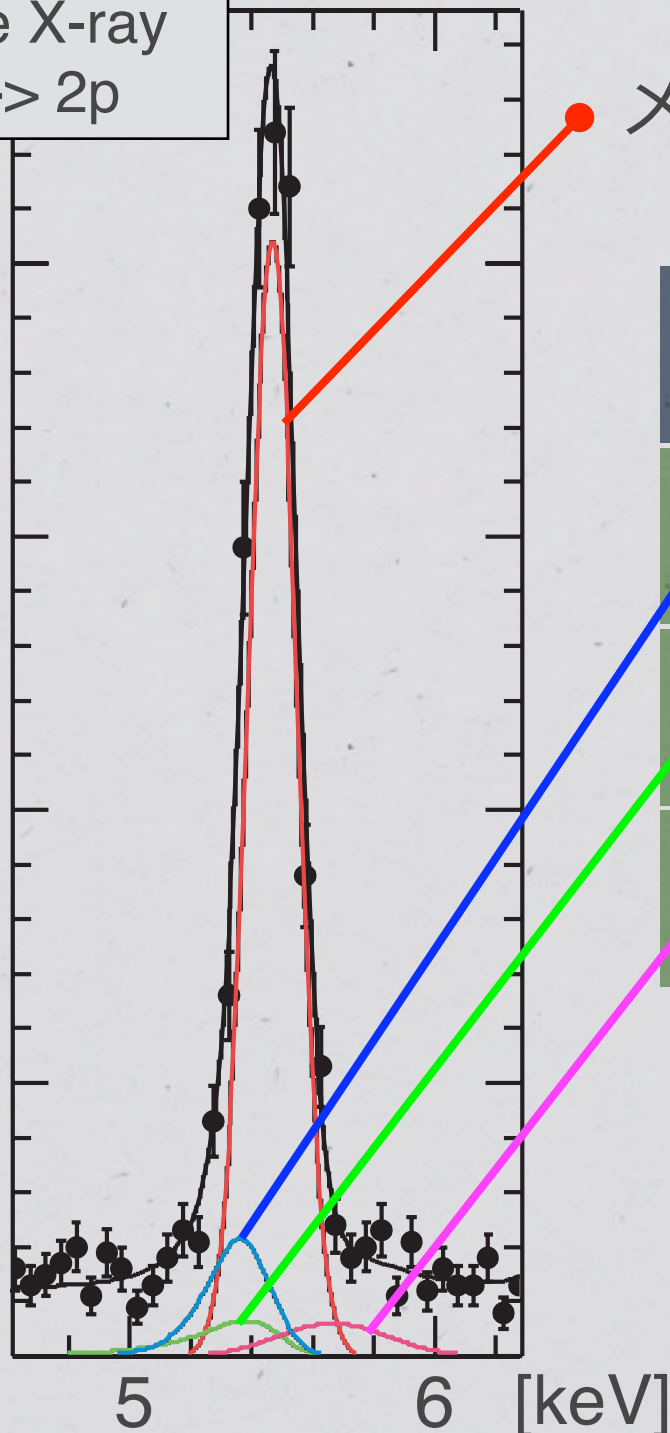
3d→2p



本実験以前に行われた  
最新のK-<sup>4</sup>He X線測定: Baird et al.  
—Nucl. Phys. A392 (1983) 297—

# メインピーク以外からの寄与

K-<sup>4</sup>He X-ray  
3d → 2p



● メインピーク

	Main peak Other effect	
	cycle 1	cycle 2
● コンプトン散乱効果	14 %	
● 検出器応答関数 (tail&shelf)	4 %	3 %
● パイルアップの効果	11 %	6 %

メインピークに対する収量比

cycle 2のスペクトル