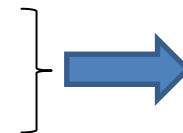


# 光量子ビーム施設の推進方策について - ユーザーの立場からの提案 -

光量子ビーム科学の発展  
施設利用の推進  
人材育成

## 東京大学・物性研究所

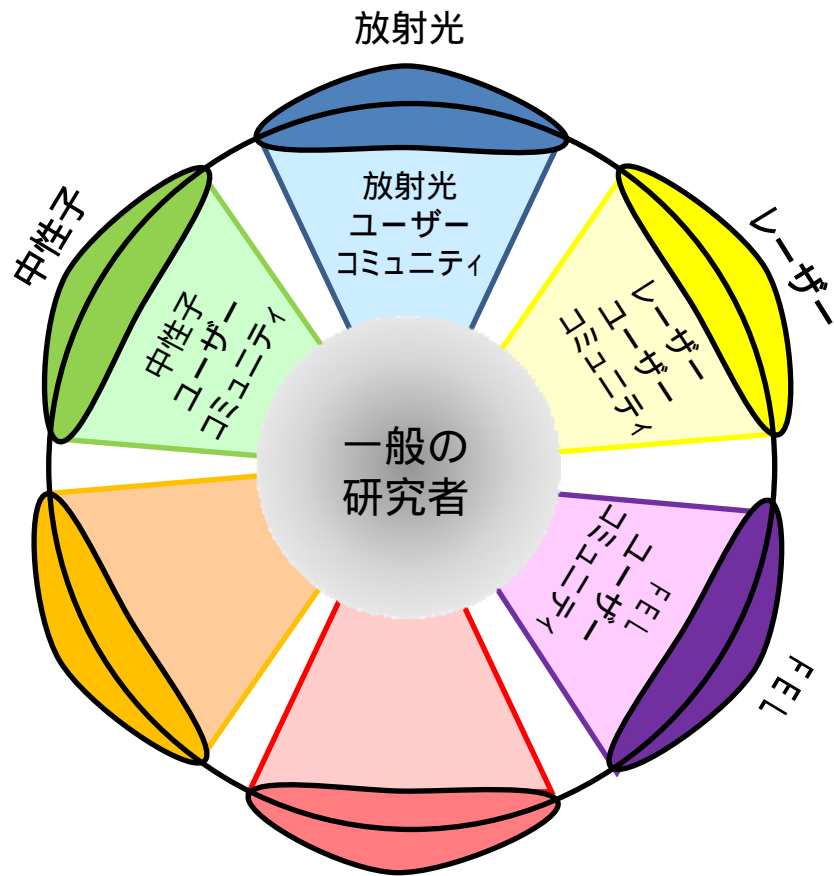
先端分光研究部門  
軌道放射物性研究施設  
辛埴



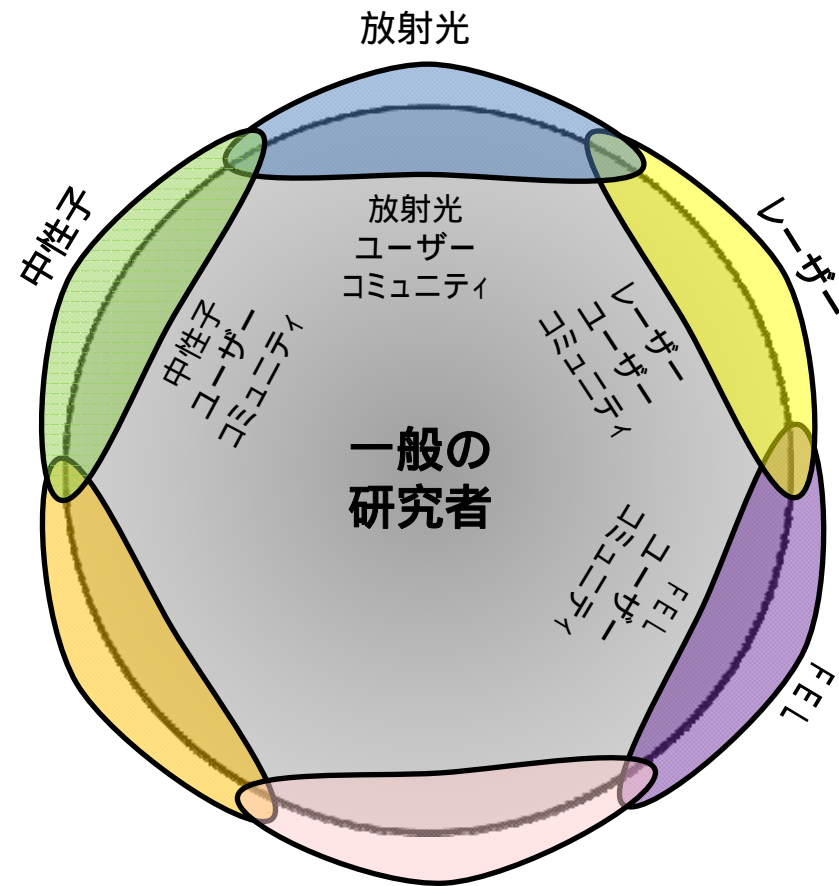
今秋に、極限コヒーレント光  
科学センター(仮称)に改組

# 光・量子ビーム技術の革新が、プラットフォーム化をもたらす

これまで

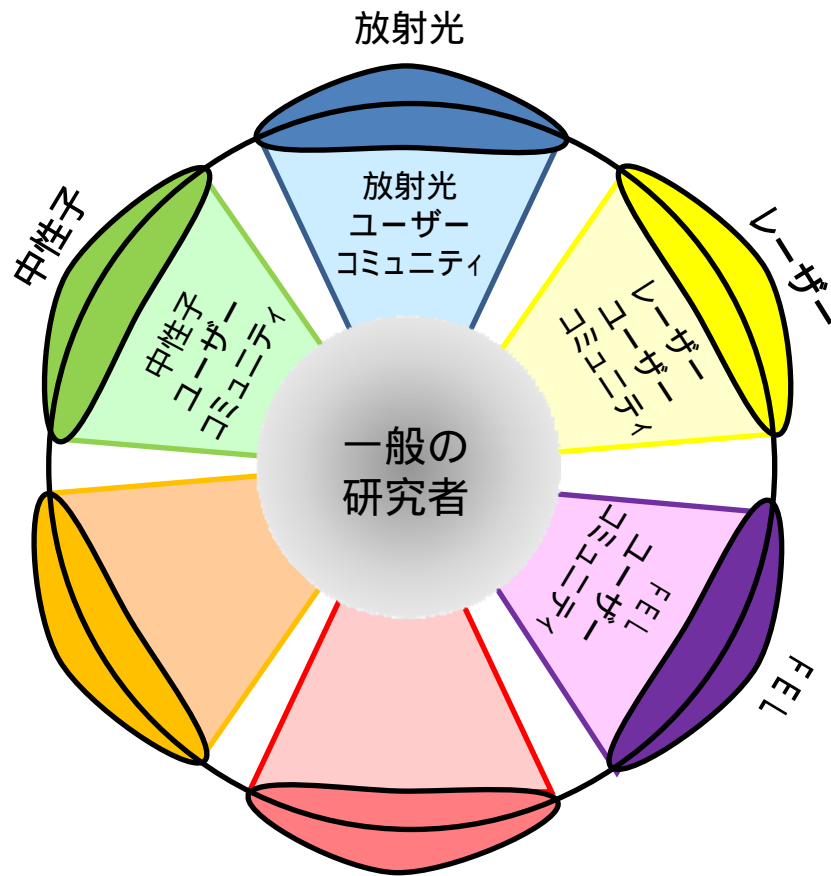


現状とこれから

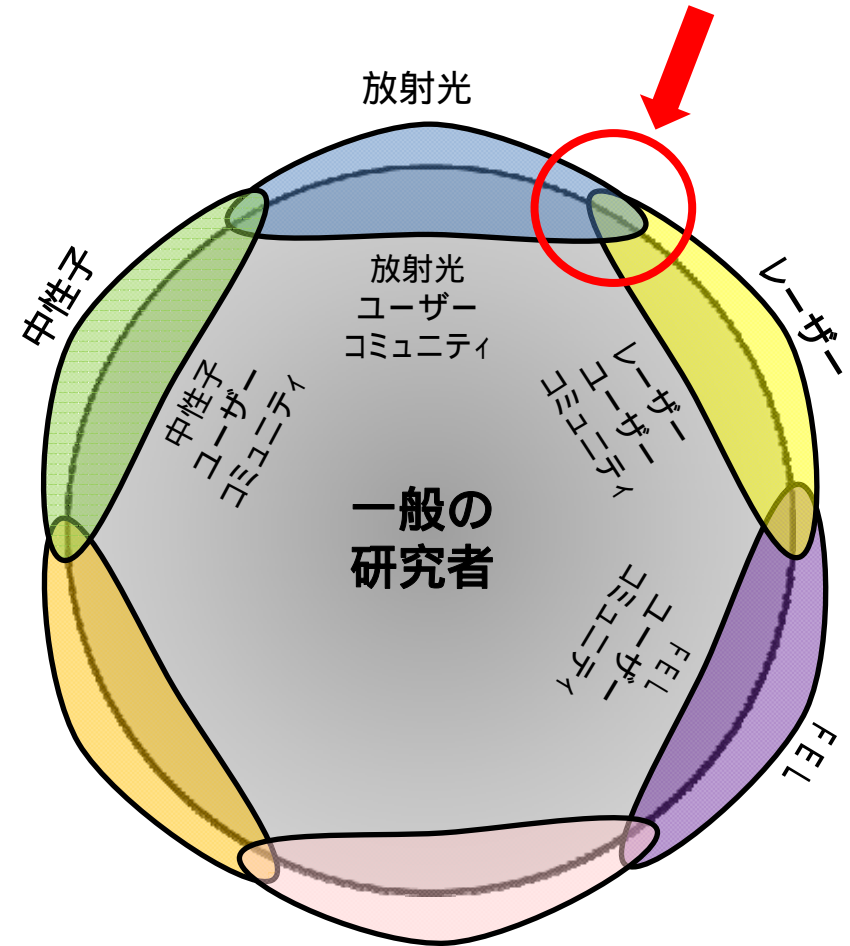


# 光・量子ビーム技術の革新が、プラットフォーム化をもたらす

これまで

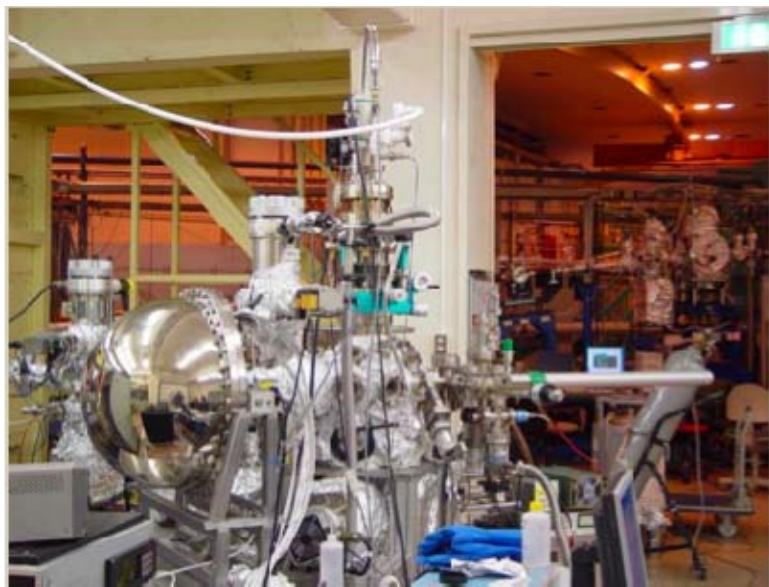


現状とこれから



# 超高分解能光電子分光;放射光とレーザーの比較

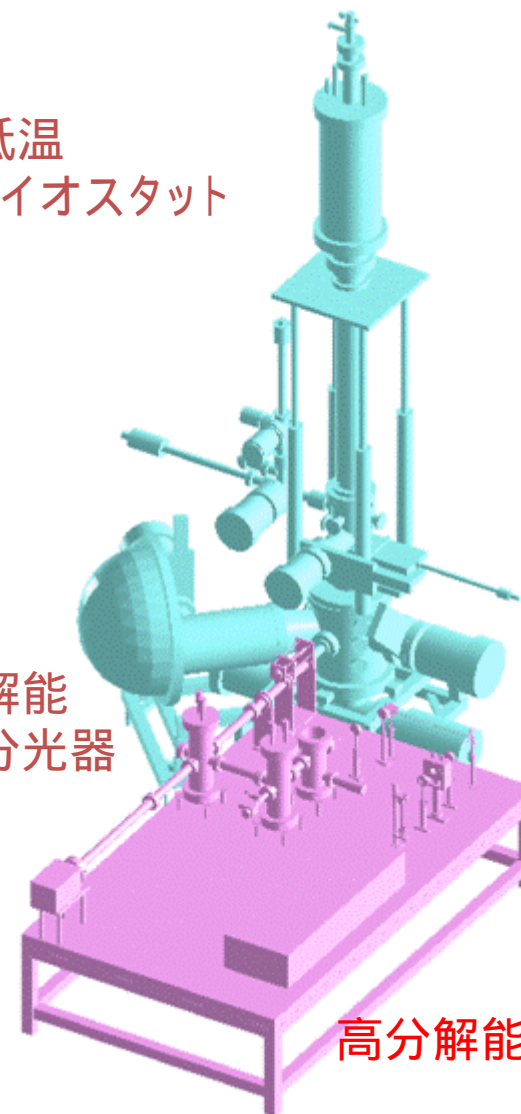
放射光光電子分光@KEK PF BL28



レーザー光電子分光@物性研

極低温  
クライオスタット

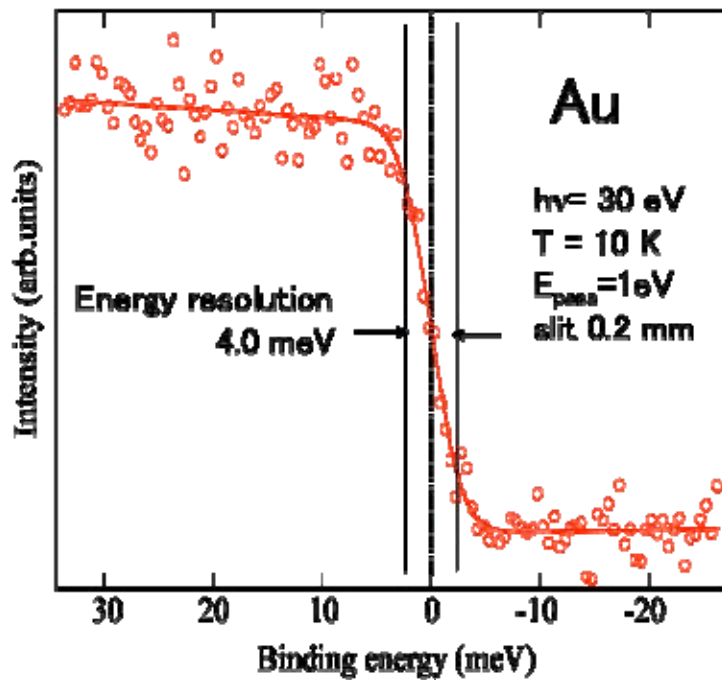
超高分解能  
光電子分光器



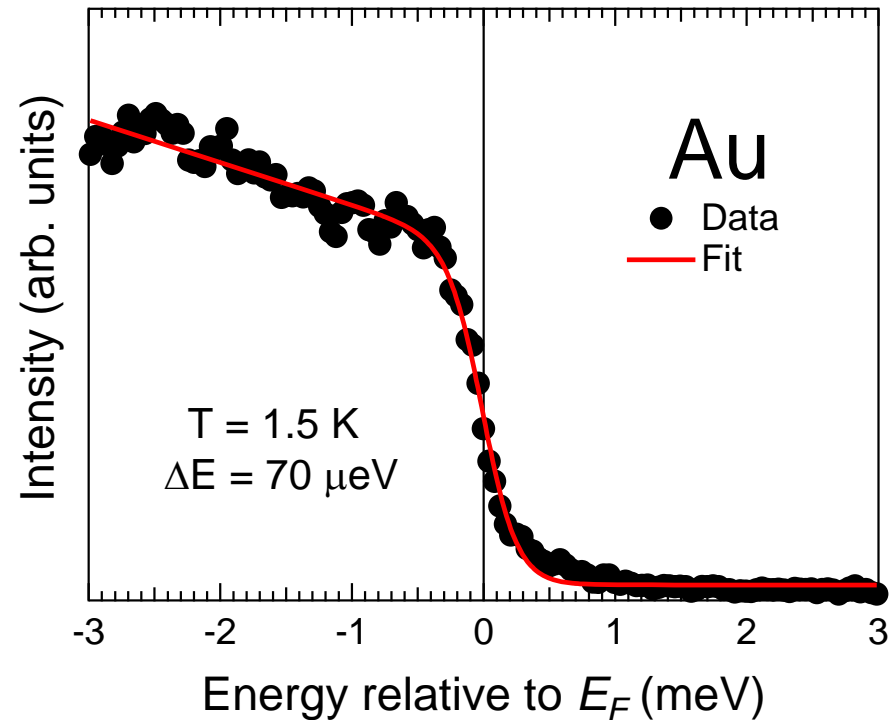
高分解能レーザー

# 超高分解能光電子分光装置

放射光光電子分光@KEK PF BL28



レーザー光電子分光@物性研



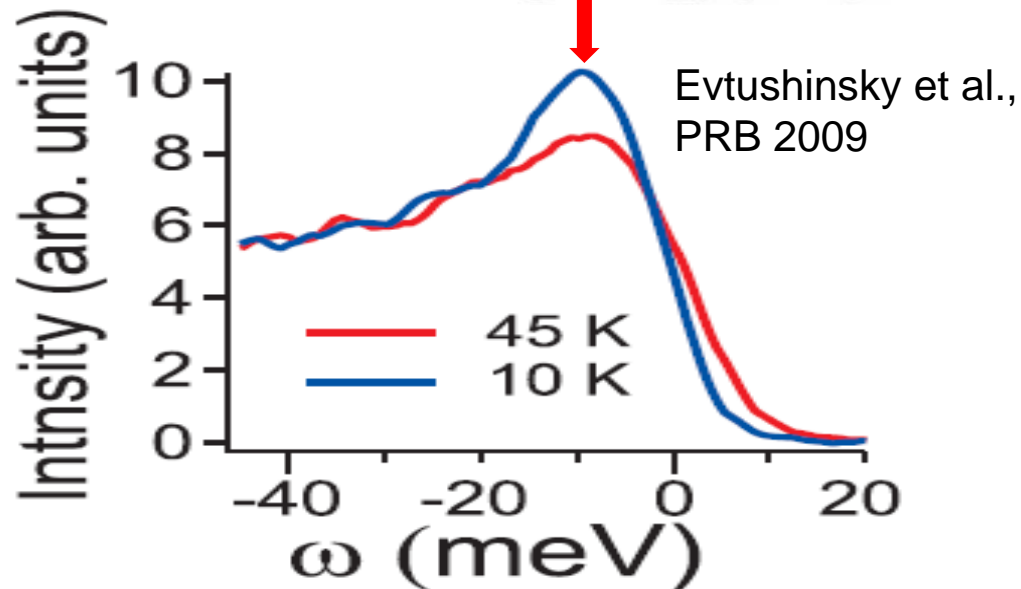
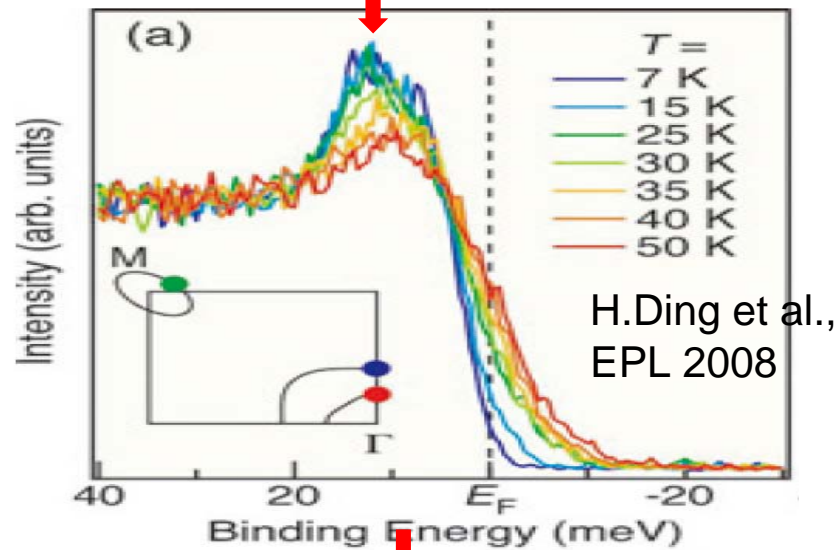
Total Resolution

$$70 = \sqrt{62^2 + 25^2} \text{ } \mu\text{eV}$$

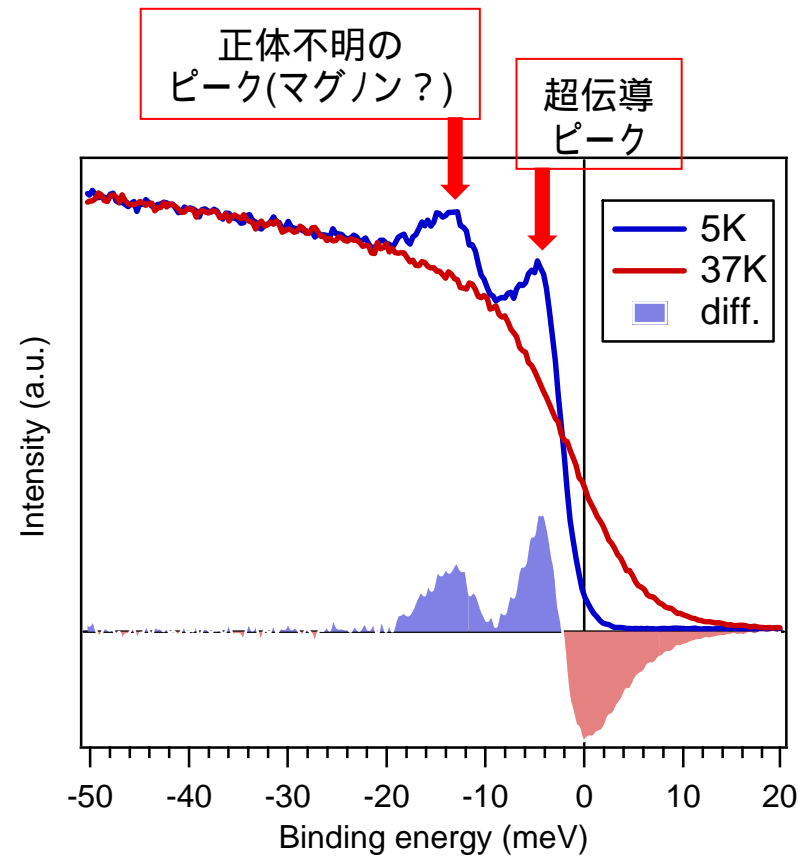
analyzer resolution    laser line width

# (Ba<sub>0.6</sub>K<sub>0.4</sub>)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 超伝導体の超高分解能光電子分光

放射光を用いた光電子分光による  
超伝導ギャップ



レーザーを用いた光電子分光による  
超伝導ギャップ(同じ物質、同じ横軸)

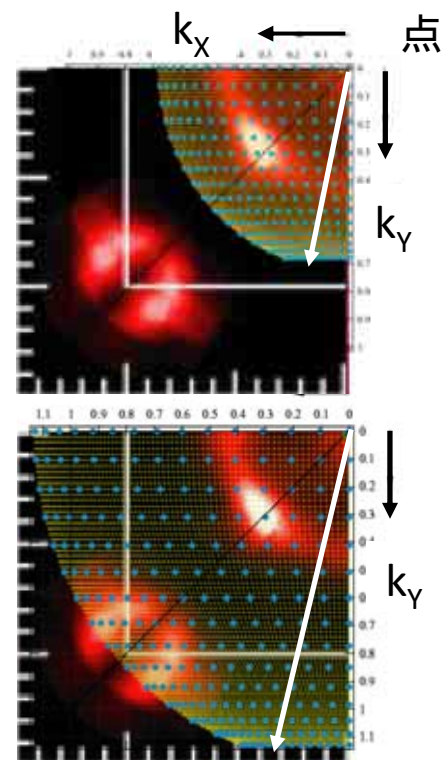


Shimojima, Shin et al.,  
Science 332(2011)564

# 8eVレーザー開発のモチベーション

レーザーより放射光の方が圧倒的に有利

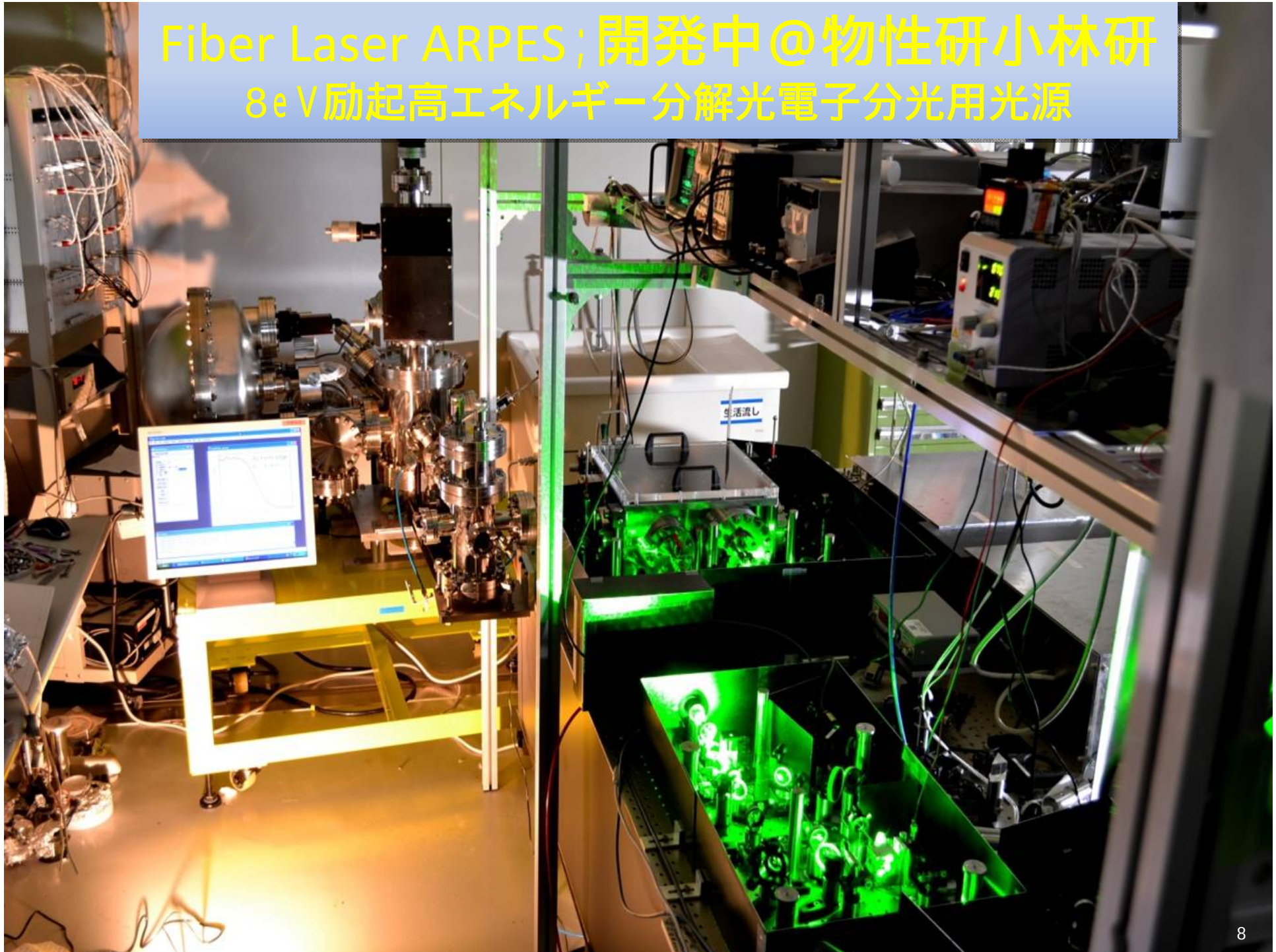
1. 現状(7eV)では測定できる波数・エネルギー空間が小さい  $k \sim (E)^{1/2}$   
より短波長の光源が必要
2.  $k_z$ 位置やmatrix element 効果などは入射光のエネルギーに強く依存する  
同等の分解能を持つ異なる波長の光源



NdFeAs(O,F)のフェルミ面

# Fiber Laser ARPES ; 開発中@物性研小林研

8eV励起高エネルギー分解光電子分光用光源

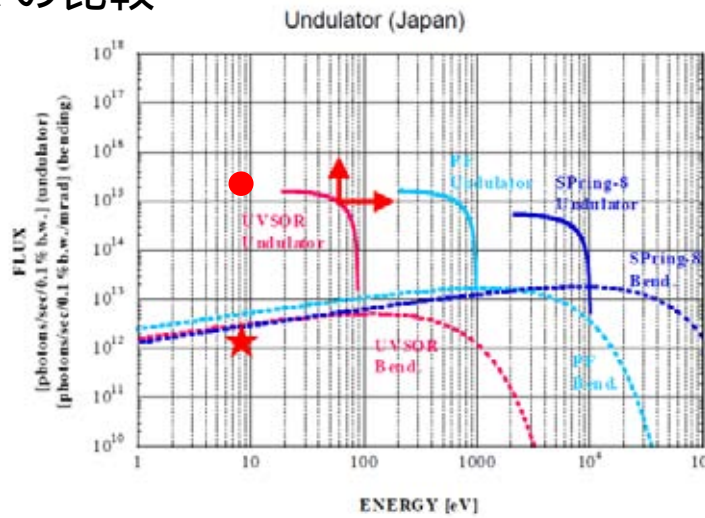




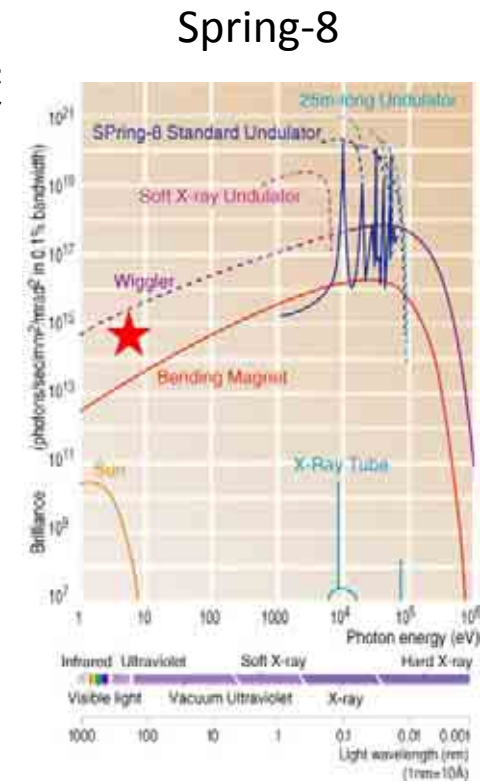
# シンクロトロン放射光とレーザーの比較

SPring8の偏向磁石以上の(分光器前の)輝度を持つことが分かる。  
 輝度のグラフは分解能1000に相当。  
 レーザーは分光器が入らず、分解能2万に相当。

## Flux の比較



## Brillianceの比較

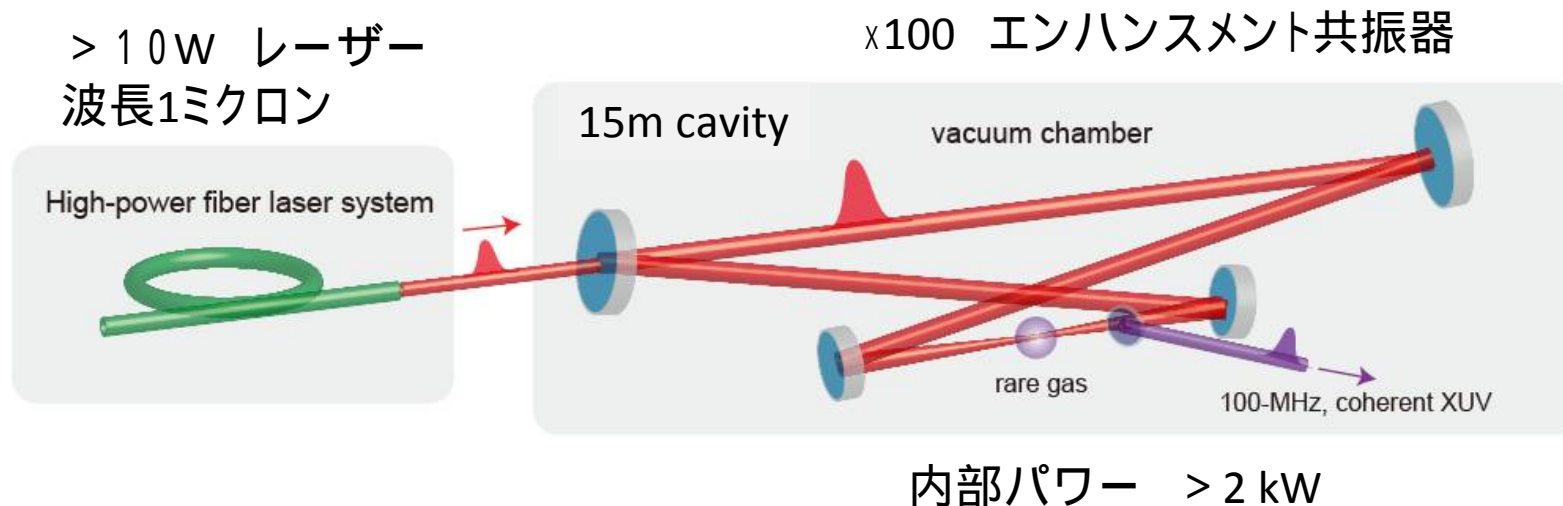


# XUV光源 - 建設中@物性研小林研 -

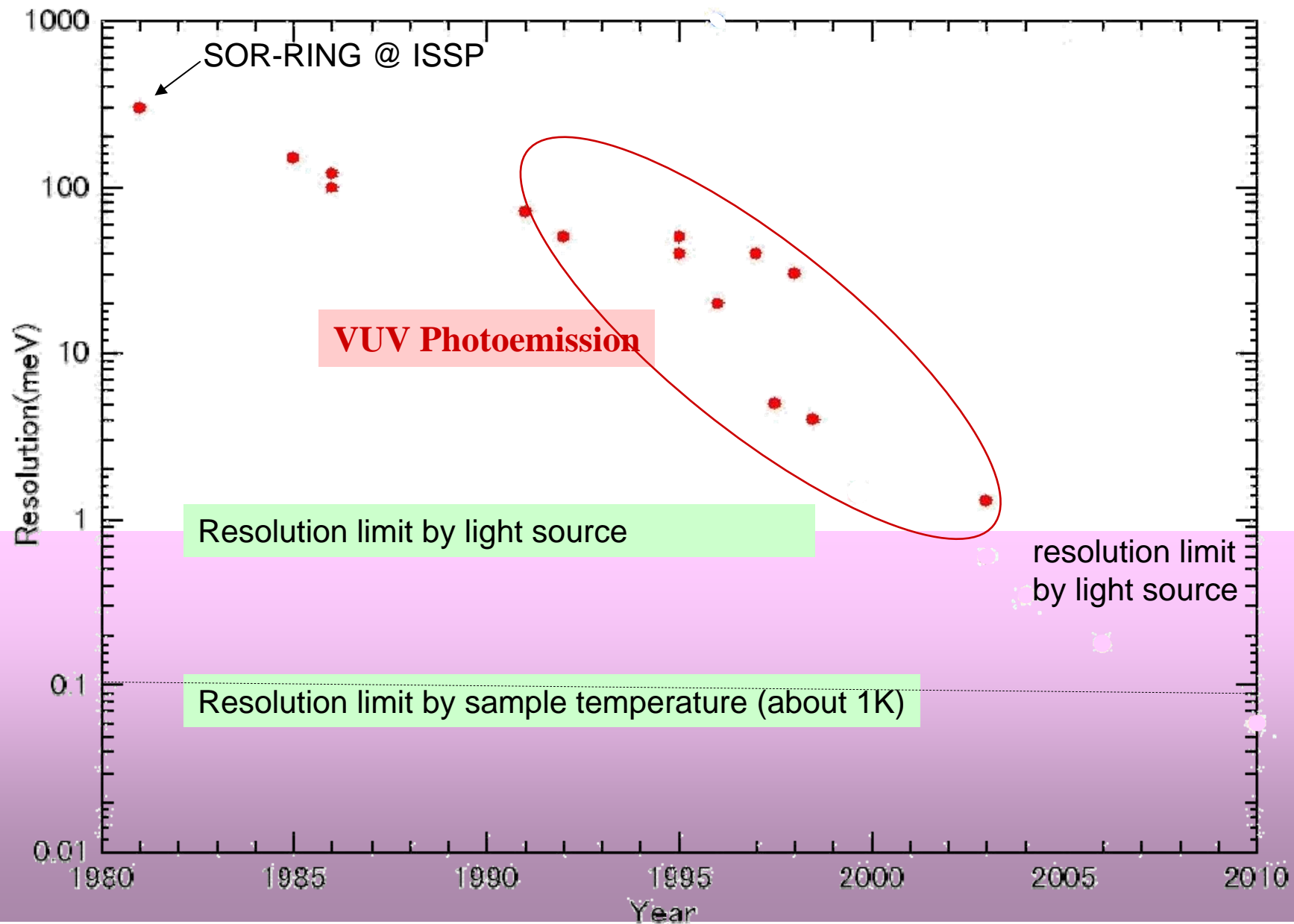
•光子エネルギー :	8 eV - 20 eV (波長150nm – 60 nm)
•繰り返し :	80 MHz
•平均パワー :	サブ $\mu$ W
•パルス幅 :	~100 fs
•エネルギー幅 :	$\Delta E \sim 17$ meV

高繰り返しの高次高調波

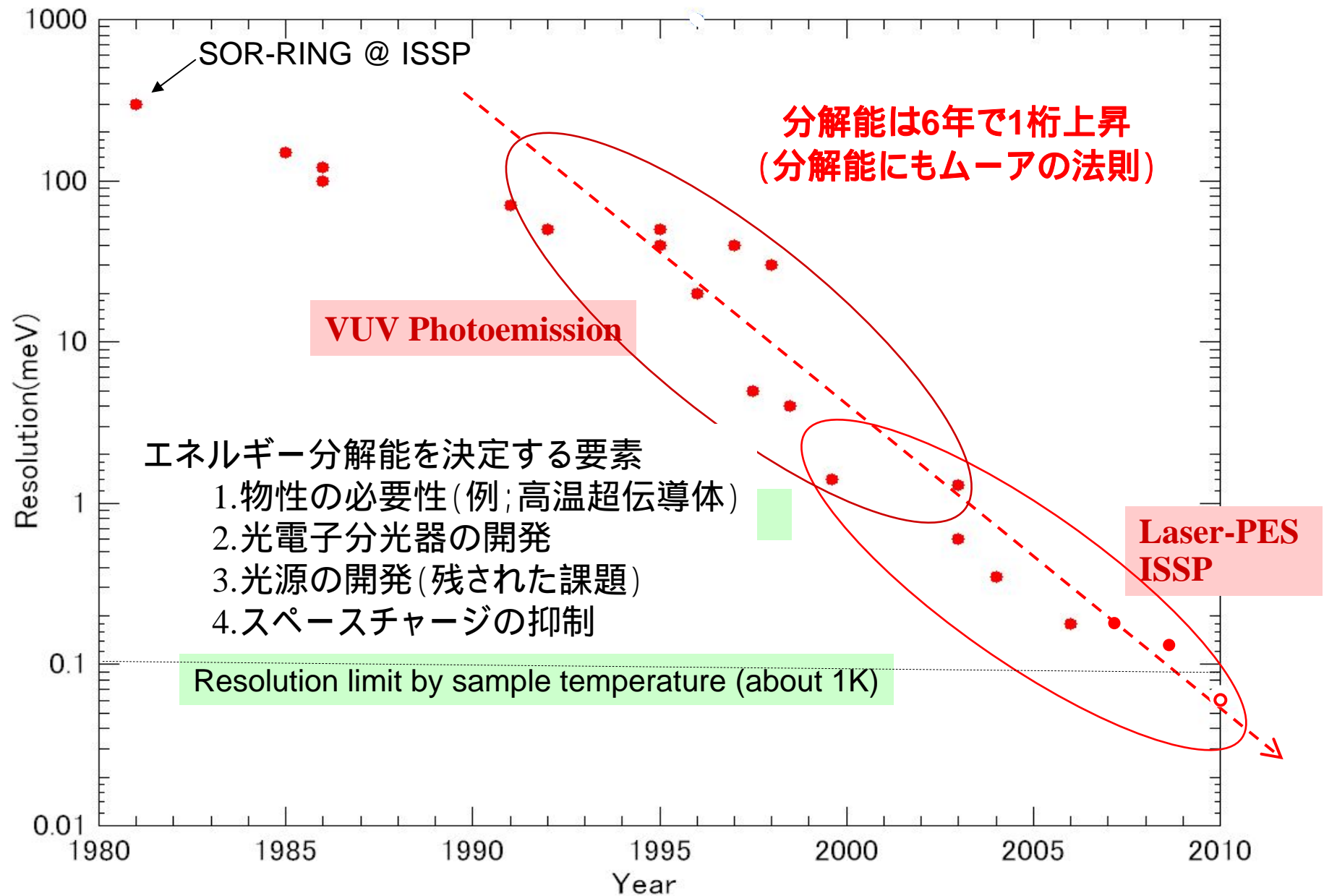
Ybファイバーレーザーシステム + 外部共振器



# 量子ビーム技術開発の例; 超高分解能光電子分光

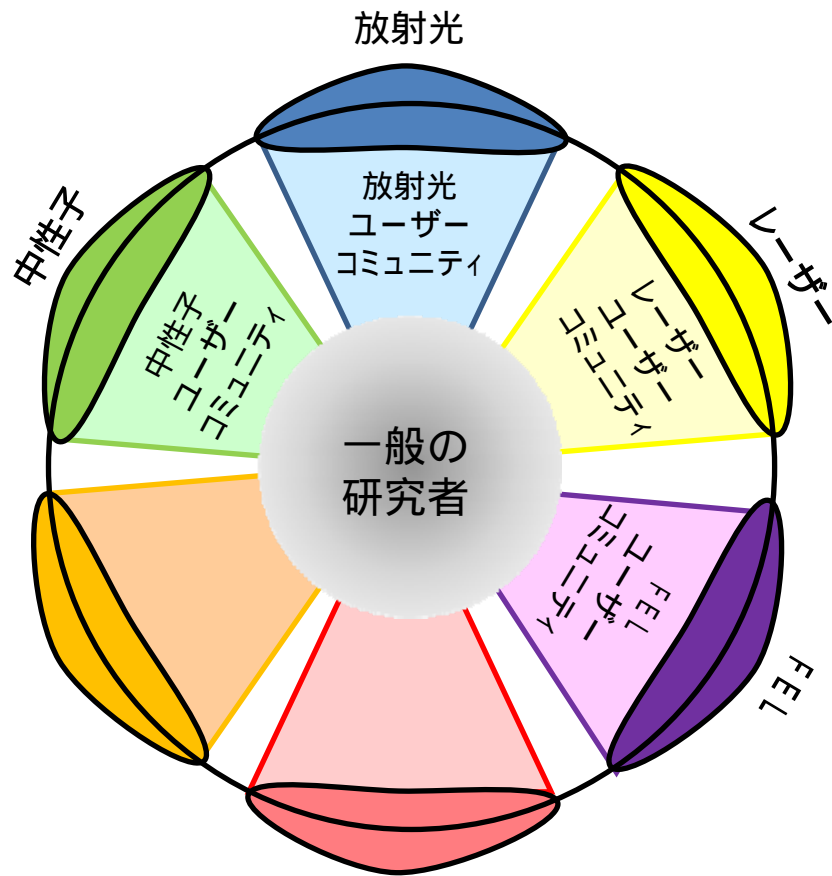


# 量子ビーム技術開発の例; 超高分解能光電子分光

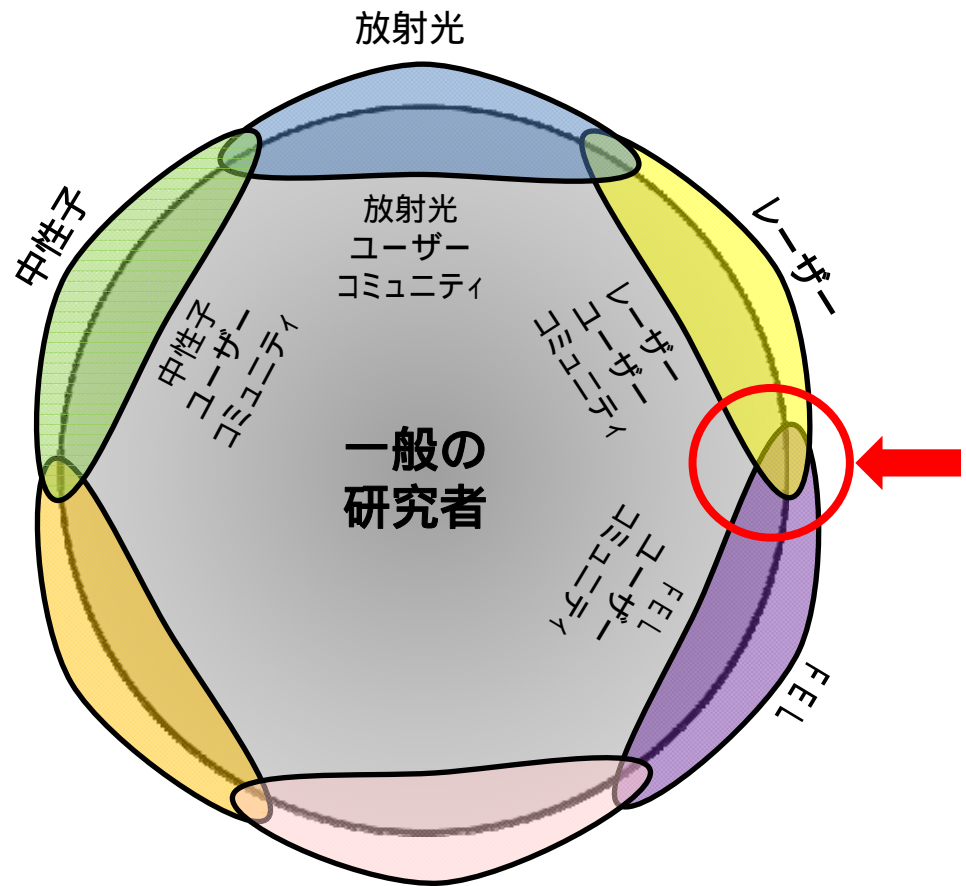


# 光・量子ビーム技術の革新が、プラットフォーム化をもたらす

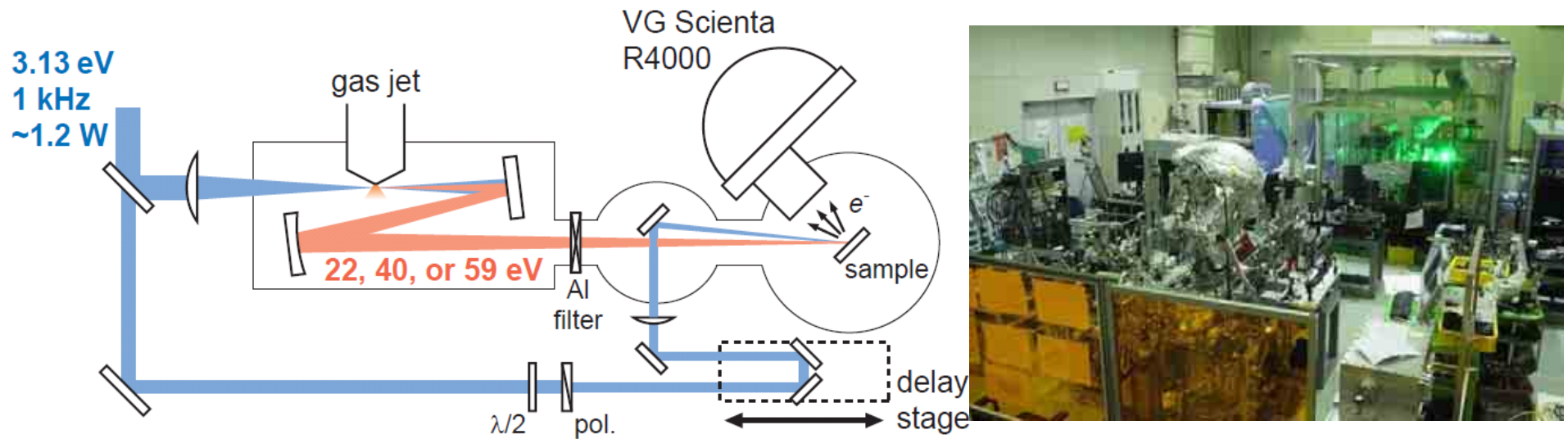
これまで



現状とこれから

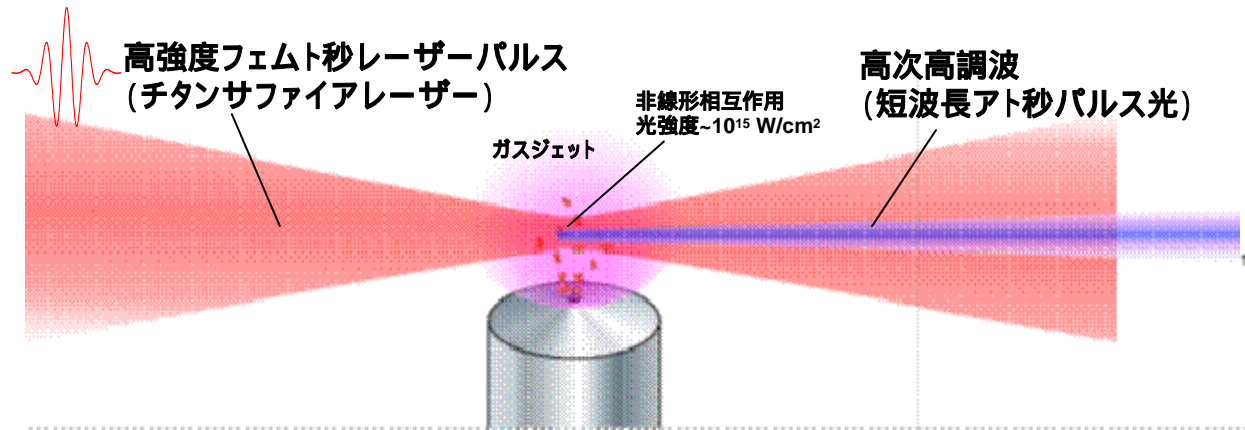


# 軟X線レーザーを用いたポンプ・プローブ型光電子分光

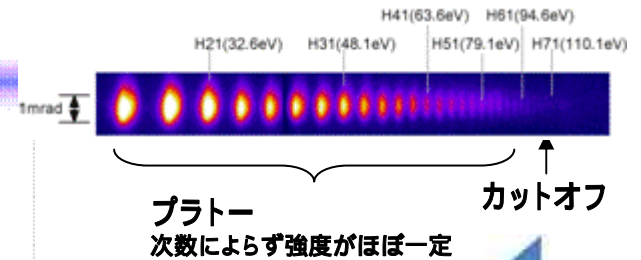


- 内殻時間分解PES(最低でも60eVが必要、できれば120eV)  
→ **元素選択的**な電子状態のダイナミクス
- 軟X線時間分解ARPES  
→ **Brillouin zone全域**の電子状態ダイナミクス
- 大強度軟X線領域での**新しい多光子光電子現象**の探索

# レーザー高次高調波とは？



空間分解されたスペクトル  
レーザー:Ti:sapphire(波長800nm)

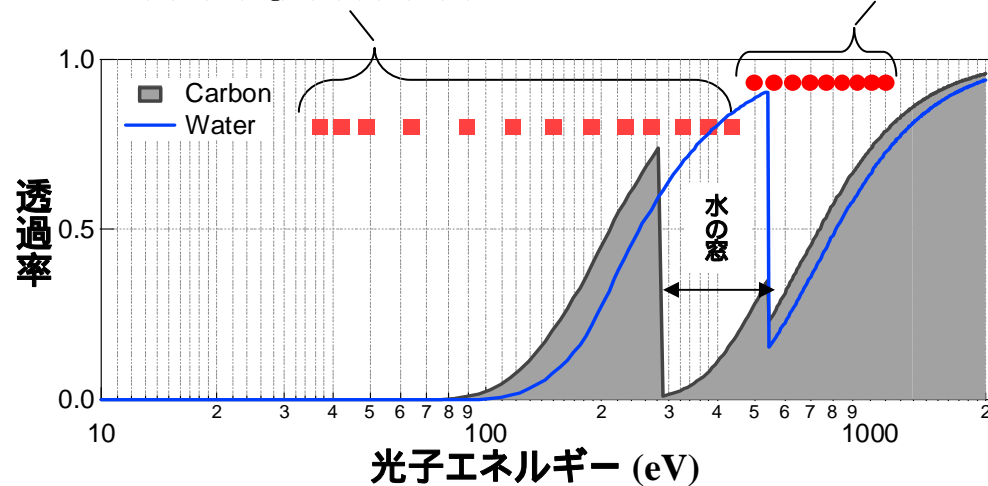


## 化学・生物での重要元素

軽元素のL吸収端  
(N,O,Ne,Na,Mg,Al,Si,P,S,Cl,Ar,K,Ca)

## 固体物理での重要元素

3d遷移金属のL吸収端, 4f電子系  
(Sc,Ti,V,Cr,Mn,Fe,Co,Ni,Cu)

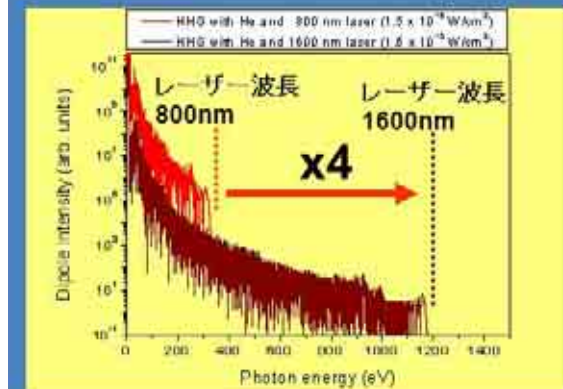


## カットオフ則

$$\hbar\omega_{\max} = 3.2U_p + I_p$$

ポントロモーティポポテンシャル

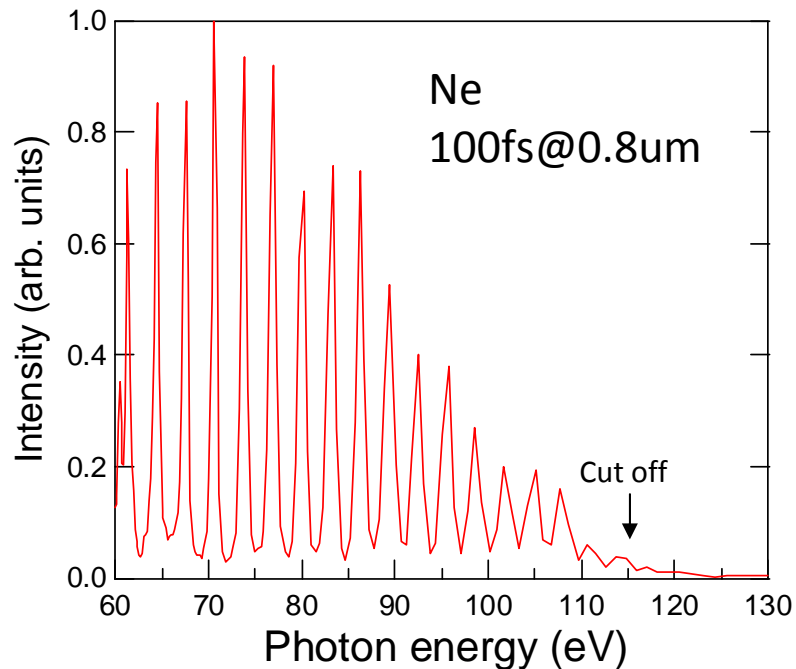
$$U_p \propto \lambda^2$$



# 高次高調波発生 の 現状

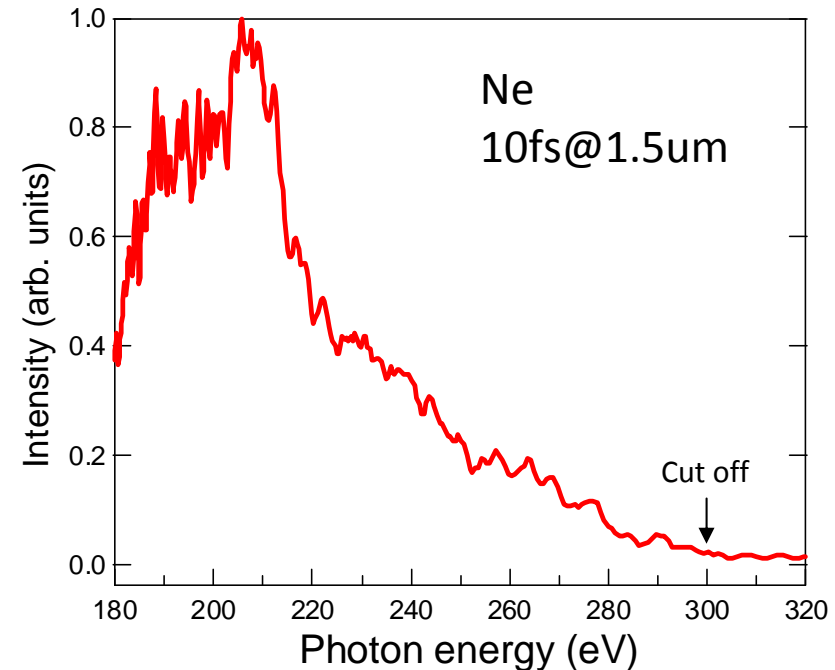
## チタンサファイアレーザー (波長800nm)

60eVレーザーより小型の光源装置で  
110eVまでをカバーできた。



## 赤外OPCPAレーザー (波長1500nm)

赤外レーザーにより、カットオフは300eV  
まで拡大した。



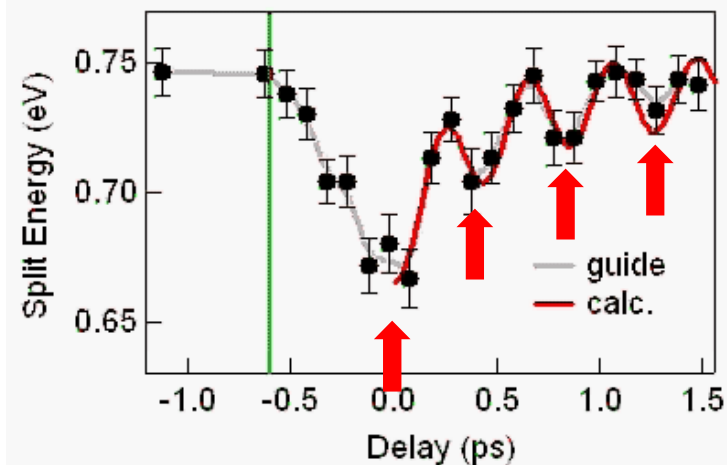
実際に、物性研究に使える光！



# シンクロトロン放射光とレーザーの比較

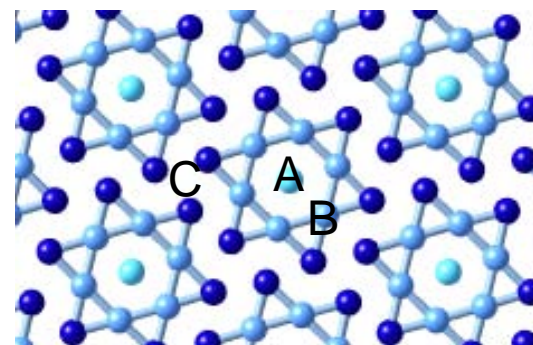
石坂 Phys. Rev B (2011) Rapid Commun.

## 内殻電子によるサイト選択的な時間分解光電子分光

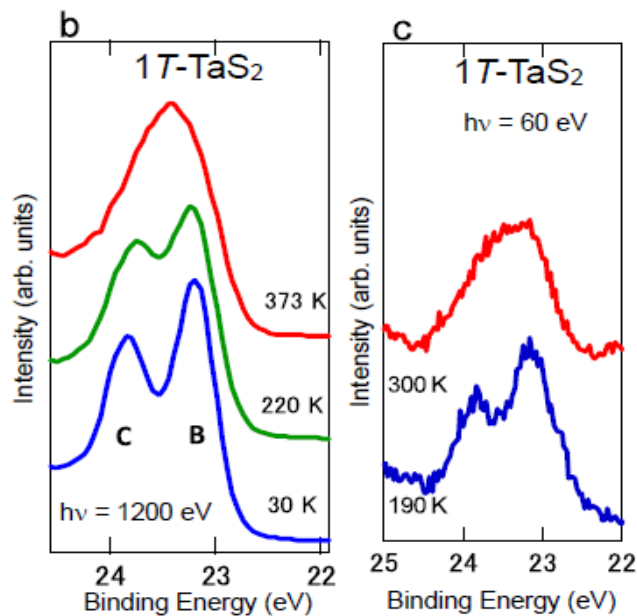
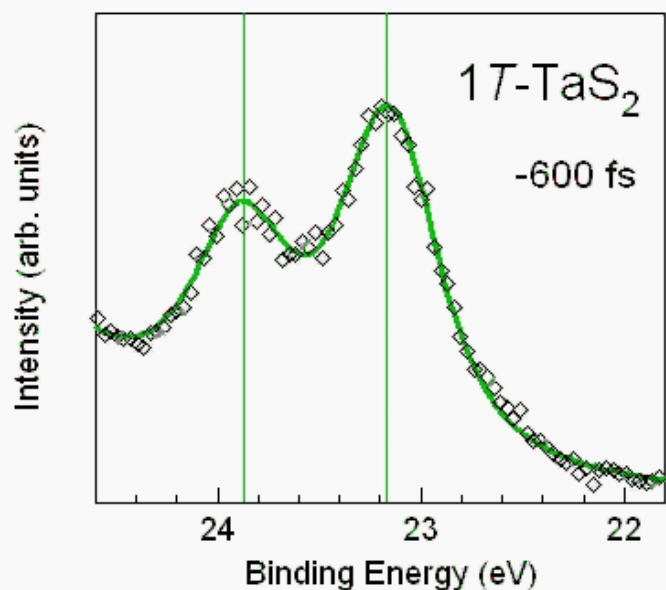


実は、ドイツで、FELを使って、同じ実験をしたが、...

時間分解光電子分光はレーザーの方が有利

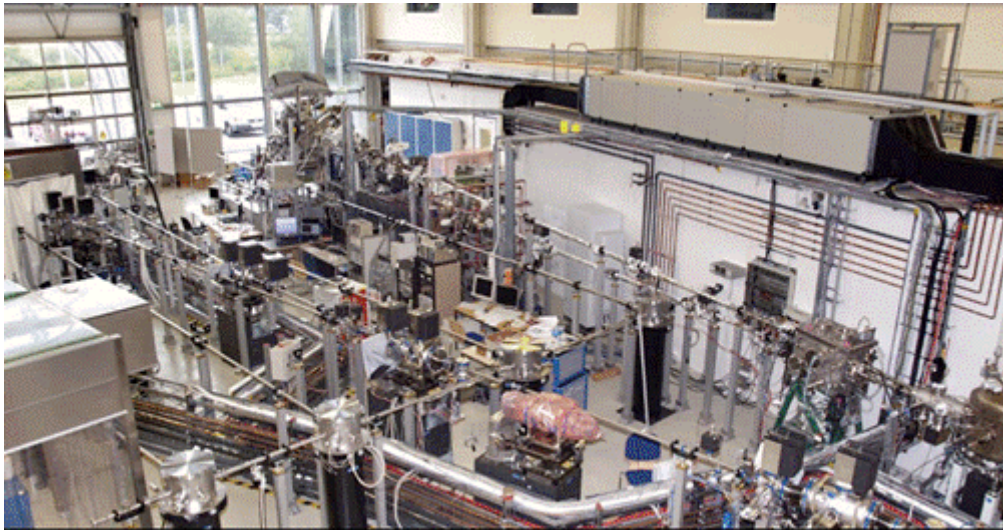


● 電子密度: 小    ● 電子密度: 大



放射光とレーザーを使った実験の比較

# FLASH; 初めてできたFEL



30-200eV  
<100fs

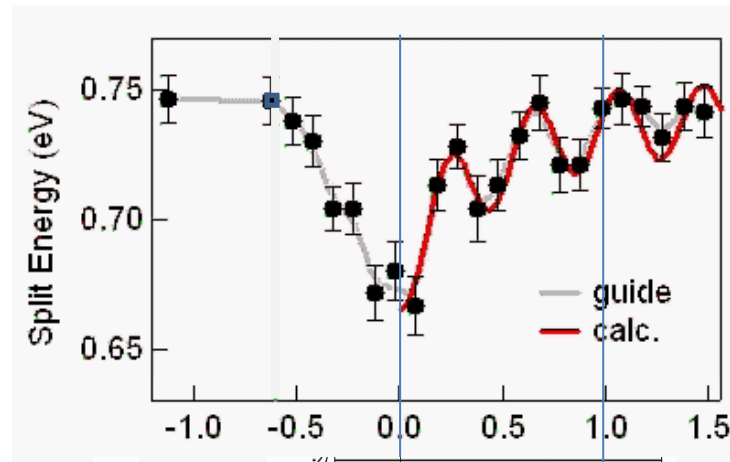
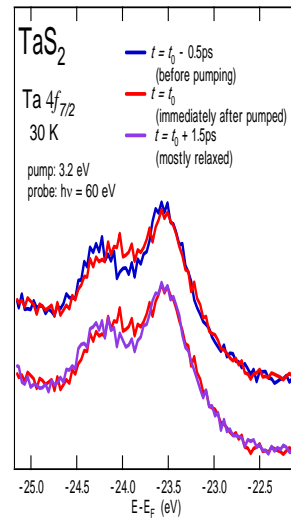


European XFEL

# FELとレーザーの時間分解光電子分光の比較 (TaS<sub>2</sub>の場合)

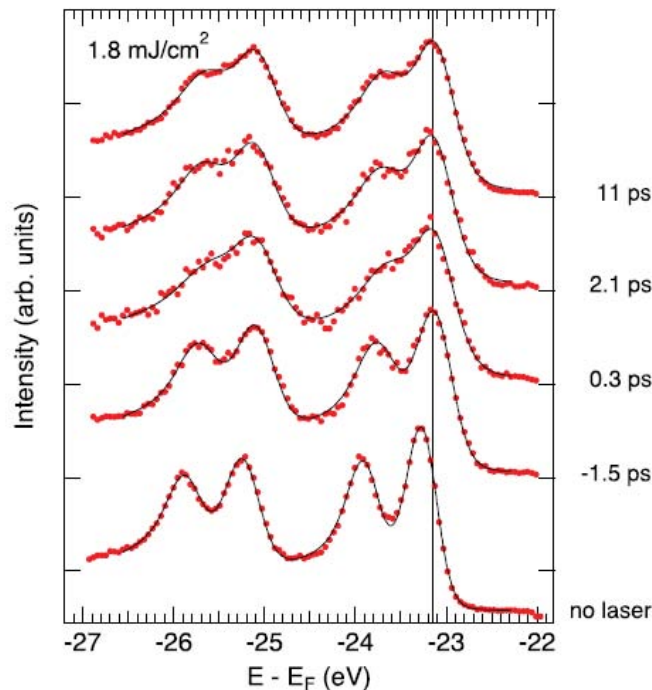
レーザーを用いた  
TaS<sub>2</sub>の時間分解  
光電子分光

石坂、辛 et al.,  
PRB(2011)

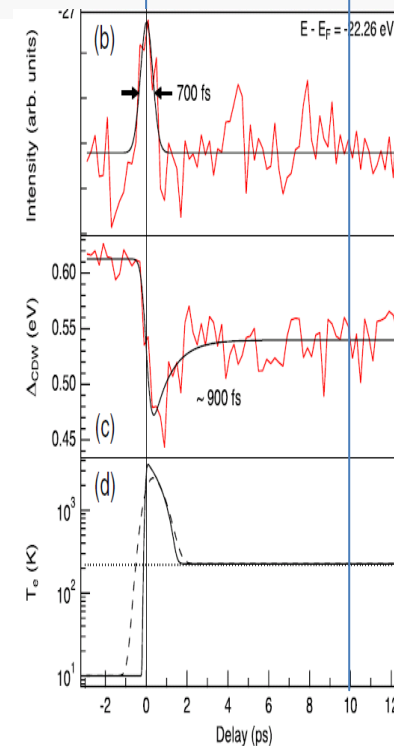


FELを用いた  
TaS<sub>2</sub>の時間分  
解光電子分光

Hellmann et al.,  
PRL(2010)



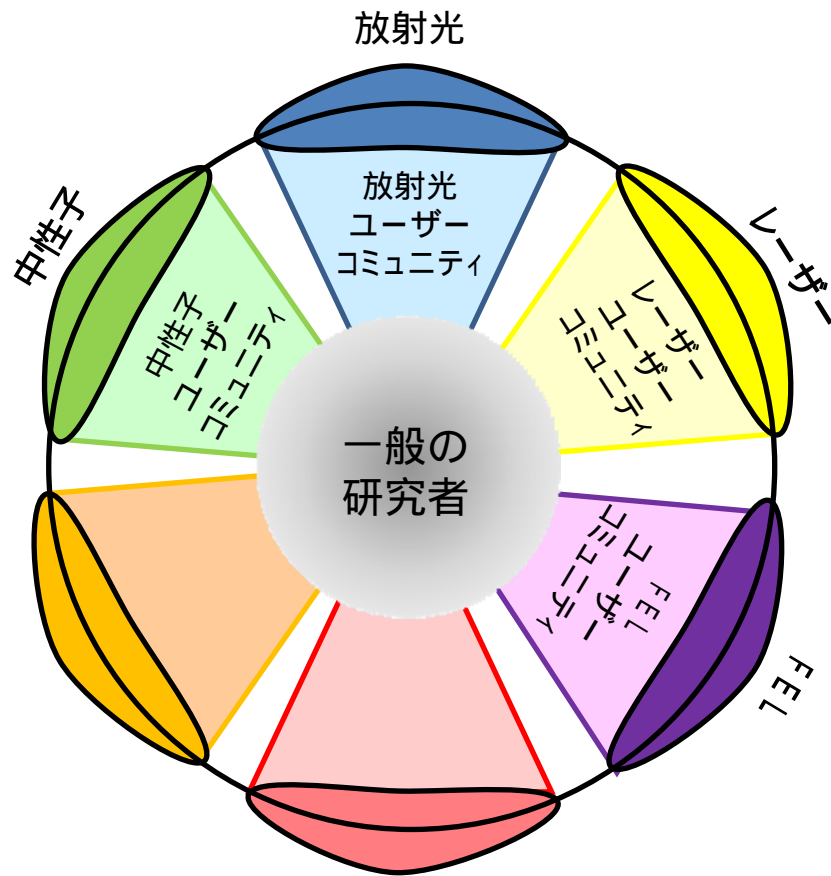
横軸のスケールは同じにしてあります



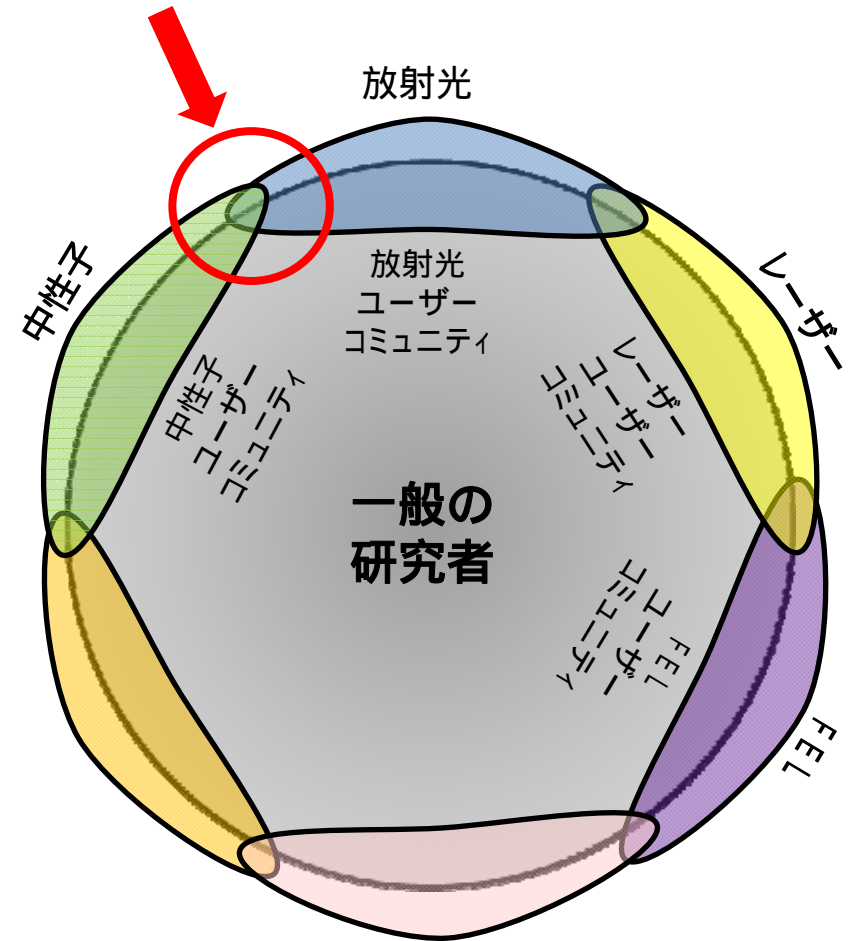
横軸のスケールは同じにしてあります

# 光・量子ビーム技術の革新が、プラットフォーム化をもたらす

これまで



現状とこれから



# 東京大学アウトステーション

## SPring-8 BL07LSU

### 高分解能軟X線ビームライン



Energy range: 250 eV – 2000 eV

Energy resolution:  $E/\Delta E: >10,000$

Spot size:  $x < 0.5-10 \mu\text{m}$ ,  $y < 10 \mu\text{m}$

Photon flux:  $> 10^{12}$  photons/s



Beamline

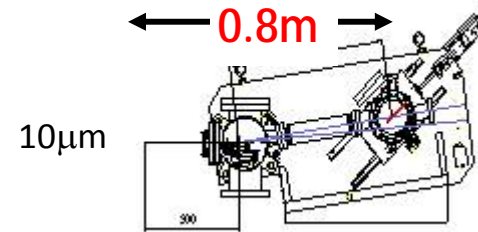


Ultra-high resolution soft X-ray emission HORNET

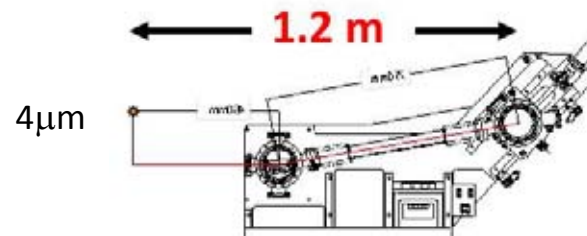


# SPring-8における発光分光器の進歩

分解能; 1300



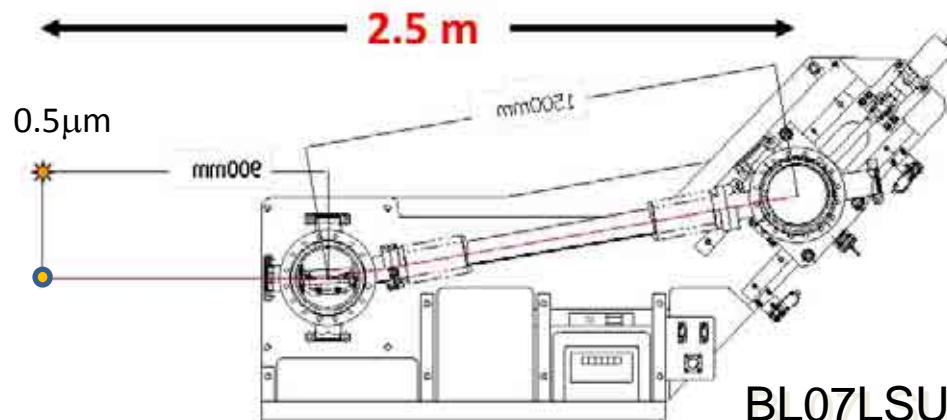
BL27SU  
(2001-)



BL17SU  
(2004-)



分解能;  
2100



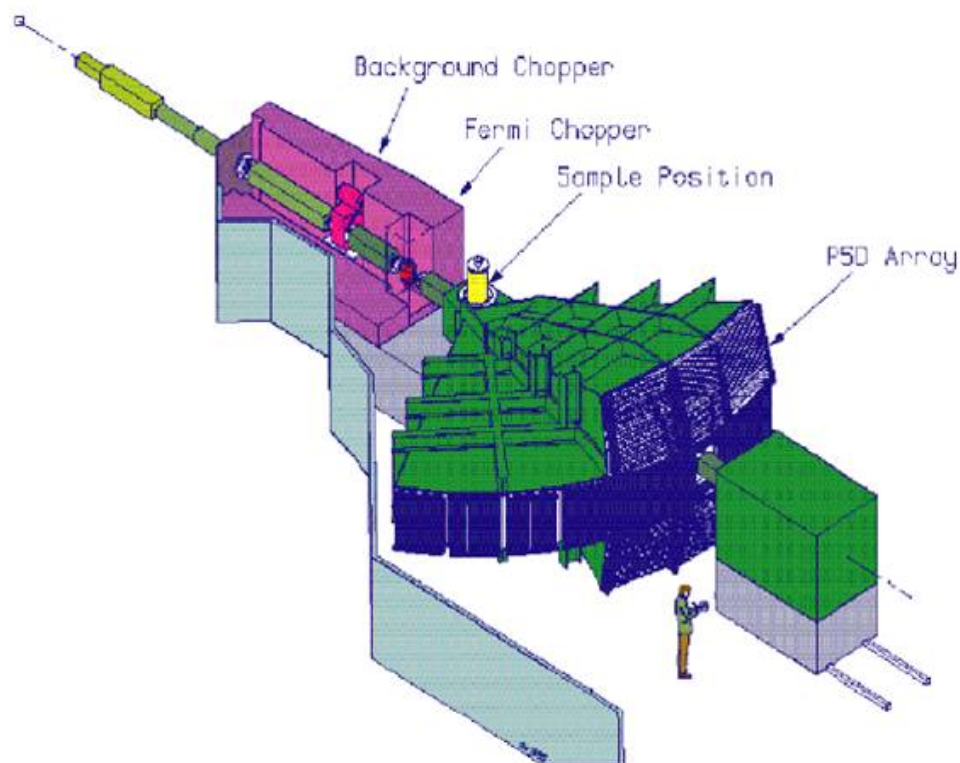
BL07LSU  
(2009-)



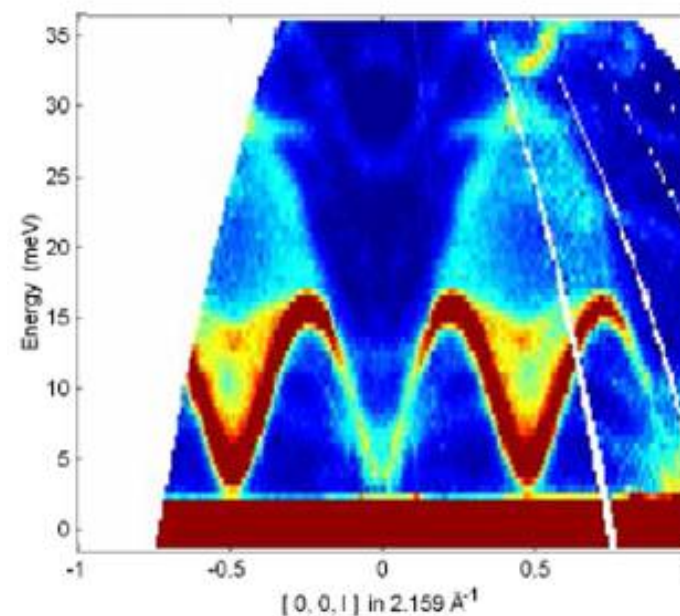
分解能; 10000

# 中性子を用いたマグノンの観測は通常行われている

試料の大きさが大きければ、そして、元素が中性子を吸収しなければ  
→ 中性子にとって最も得意な分野



非弾性散乱測定用パルス中性子分光器を用いて測定された



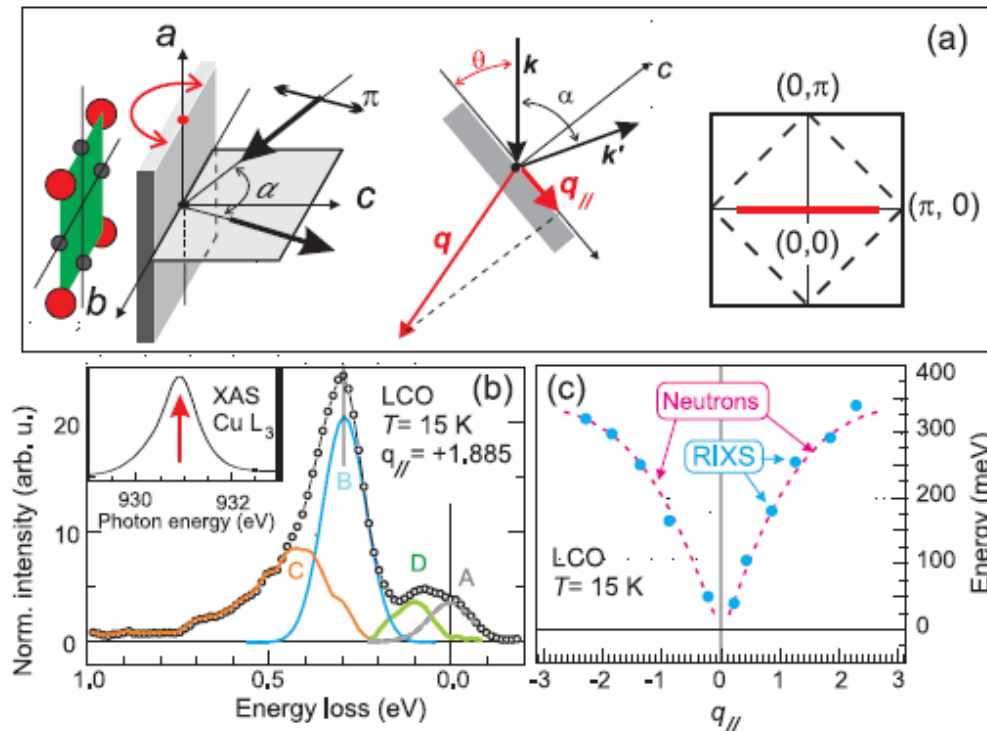
CuGeO<sub>3</sub> ; 1次元スピンパイエルス系の連続励起とスピンパイエルスギャップの測定

# 放射光を用いた高分解能RIXS(発光)と中性子との比較

- 1mm以下の試料でも測定可
- どんな元素でも測定可

Magnetic Excitations and Phase Separation in the Underdoped  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  Superconductor Measured by Resonant Inelastic X-Ray Scattering

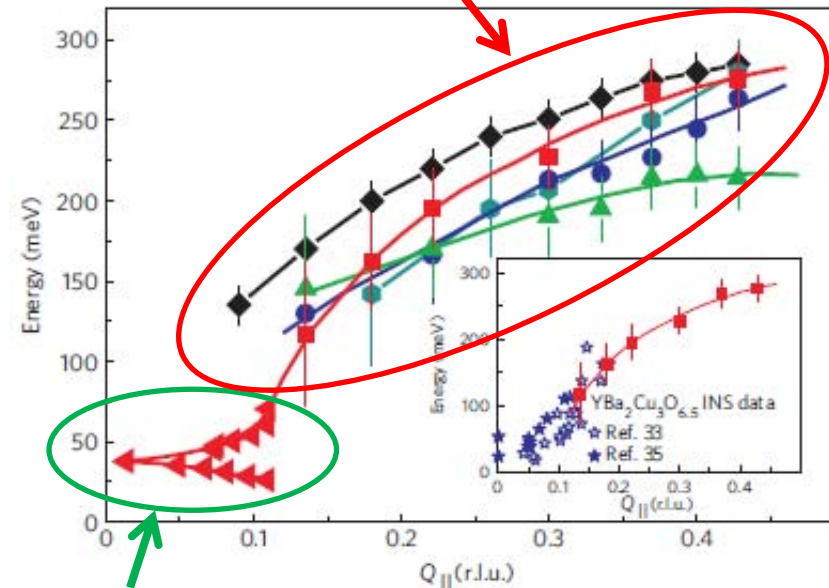
Braicovich, et al., PRL(2010)



Intense paramagnon excitations in a large family of high-temperature superconductors

Tacon, et al., Nature Physics(2011)

放射光 高分解能RIXS  
低エネルギー領域



中性子  
低エネルギー領域

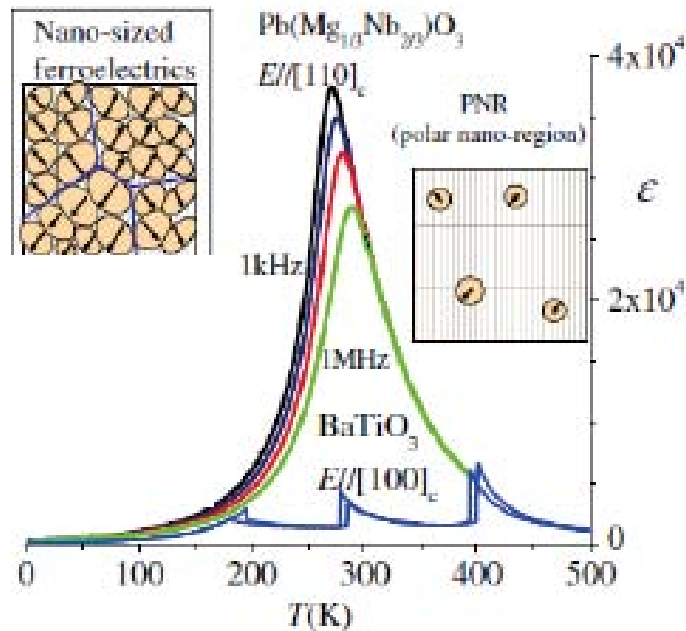


# 山田和芳物構研所長のPPTから

若い研究者達がタッグを組み始めている！

巨大誘電応答に潜むマルチスケール現象

リラクサー誘電体



Desheng Fu et al. (2009)

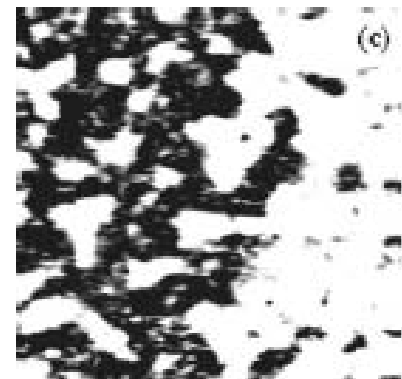
大和田 (X線、光子相関法)



巨大誘電応答



階層的なドメイン構造



125  $\mu\text{m}$

V. V. Shvartsman et al. (2004)

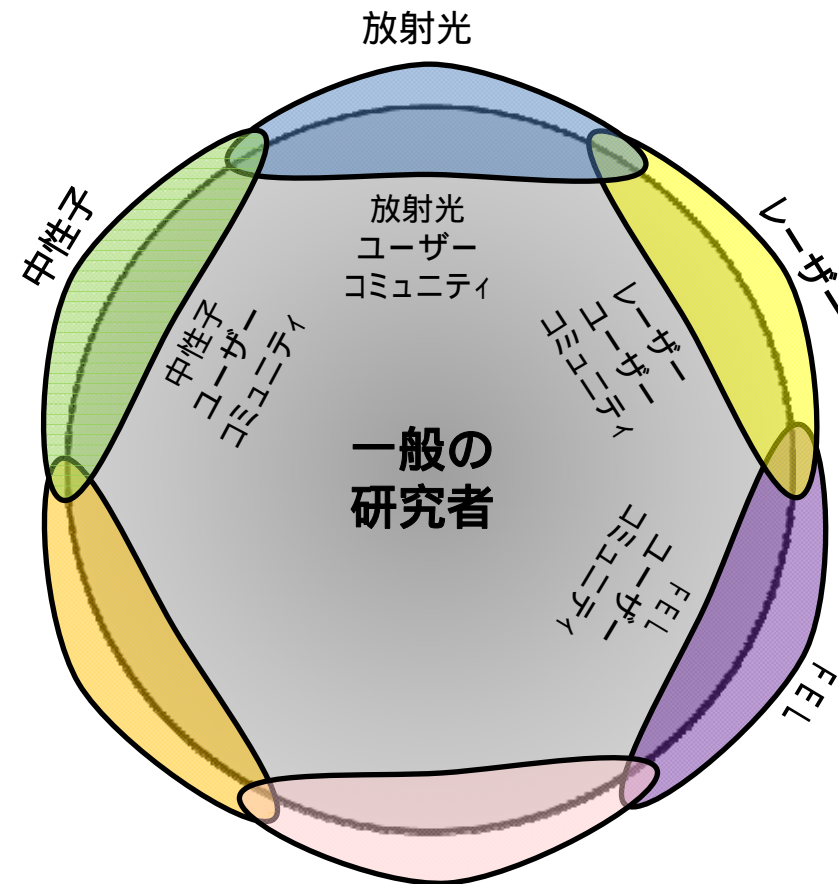
松浦 (中性子、スピネコー)

# まとめ

1. 分光光度計のように、量子ビームの巨大施設を使うようになり、大学の有力研究室が先細り、人材供給源が減少
2. 研究者は、測定対象に応じて、様々な量子ビームを組み合わせるようになる
3. 技術革新は量子ビーム間のプラットフォーム化を更に推進

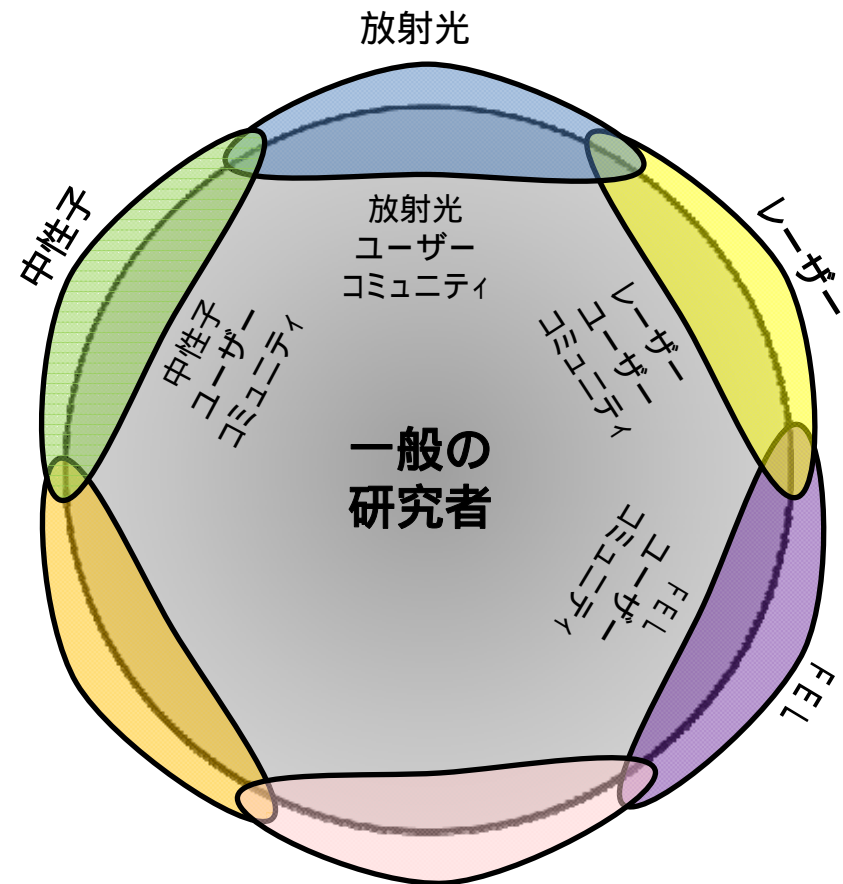
➡ 量子ビームにおける富裕層（施設側）と貧困層（一般のユーザー）に解離

➡ 継続可能な量子ビームの発展を行うためには？

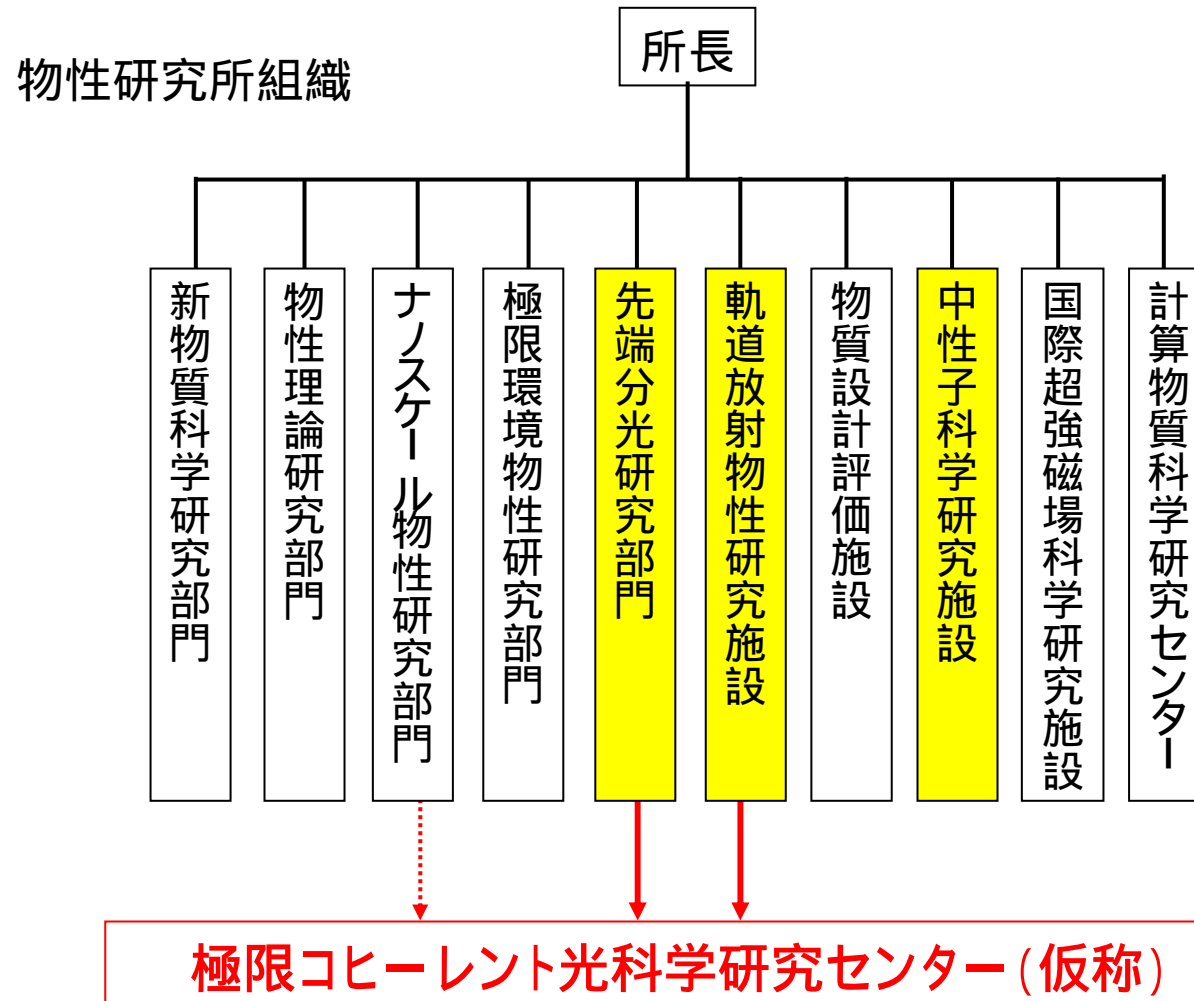


# 今後の方針

- 1.ユーザーコミュニティ(中間層)を強化し、ユーザー主導の量子ビーム開発が必要
- 2.量子ビーム間の垣根を越えるパワーユーザーの育成
- 3.ユーザーコミュニティとパワーユーザーの育成が最も有効な人材育成(学生を直接支援するよりも有効)
- 4.技術革新による光量子のプラットフォーム化は産業界にとっても有効



# 付録; 物性研の光科学



物性研究所における光関連研究活動(極限レーザー, 軌道放射)を  
統合再編して, 次世代の光科学にチャレンジ