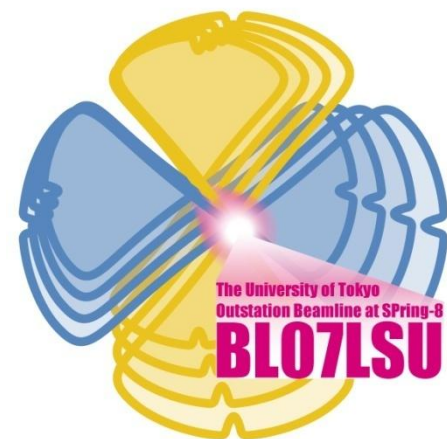


# BL07LSU時間分解軟X線分光ステーションの整備状況と 最近の研究成果

松田巖

東大物性研

東大放射光連携研究機構



# 謝辞

近藤寛先生（慶応大学）

田中義人先生（理研）

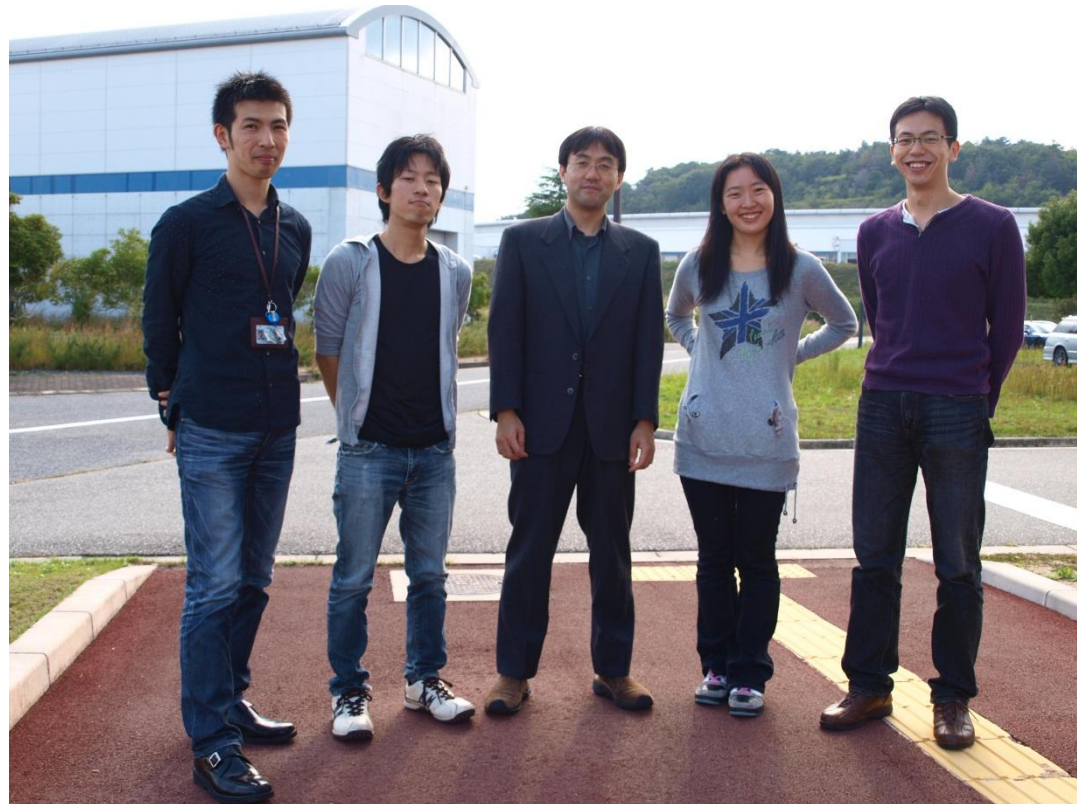
山本達

小河愛実

小宇佐友香

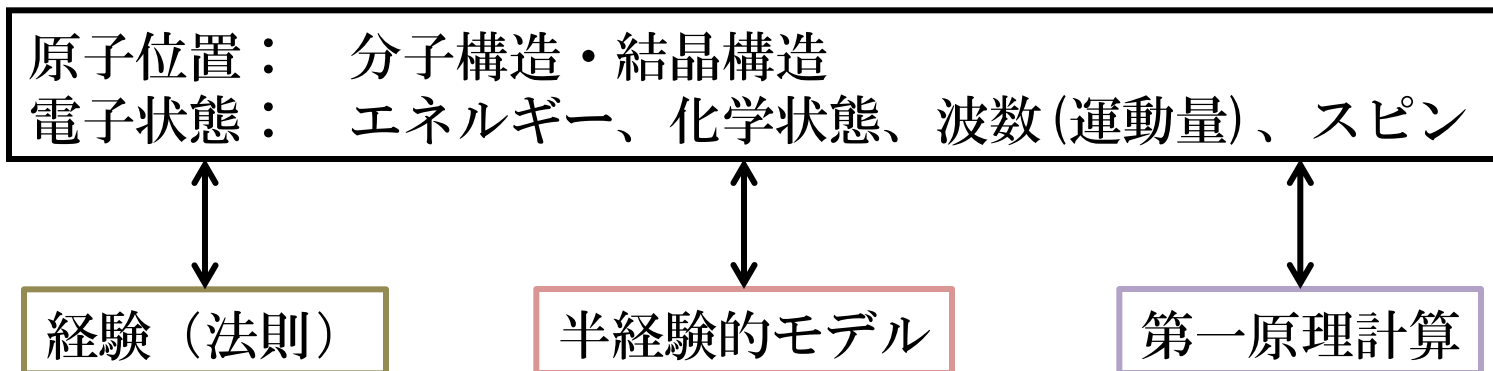
中村史一

湯川龍



# はじめに

## 物性を知る。



光電子分光法 → **時分割測定：相転移や反応など動的現象の解明**

- エネルギー： HOMO、価電子
- 波数： 価電子帯
- スピン： 交換相互作用、スピン-軌道相互作用
- 内殻準位： 元素の定量分析
- 化学シフト： 化学状態の定量分析
- 回折： 分子構造、結晶構造

バンド分散

# Photoemission Spectroscopy

$$E_k = h\nu - \Phi - E_B$$

work function
binding energy

$$k_{\parallel} (\text{\AA}^{-1}) = 0.512 \{(h\nu - \Phi - E_B)\}^{1/2} \cdot \sin \theta_e$$

→ **Band dispersion (E,k)**  
**Fermi surface (E<sub>F</sub>,k<sub>F</sub>)**

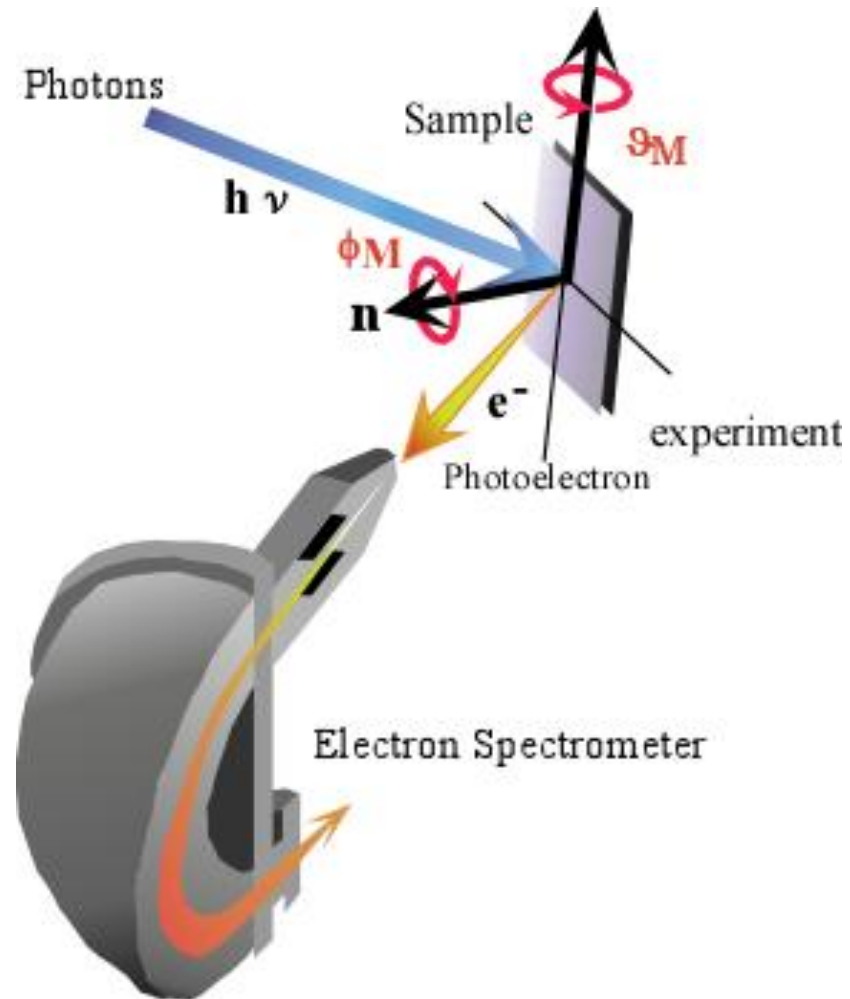
↕ **Fermiology**

**Solid state properties**

- Electron transport
- Phase transition
- Magnetism
- Formation energy

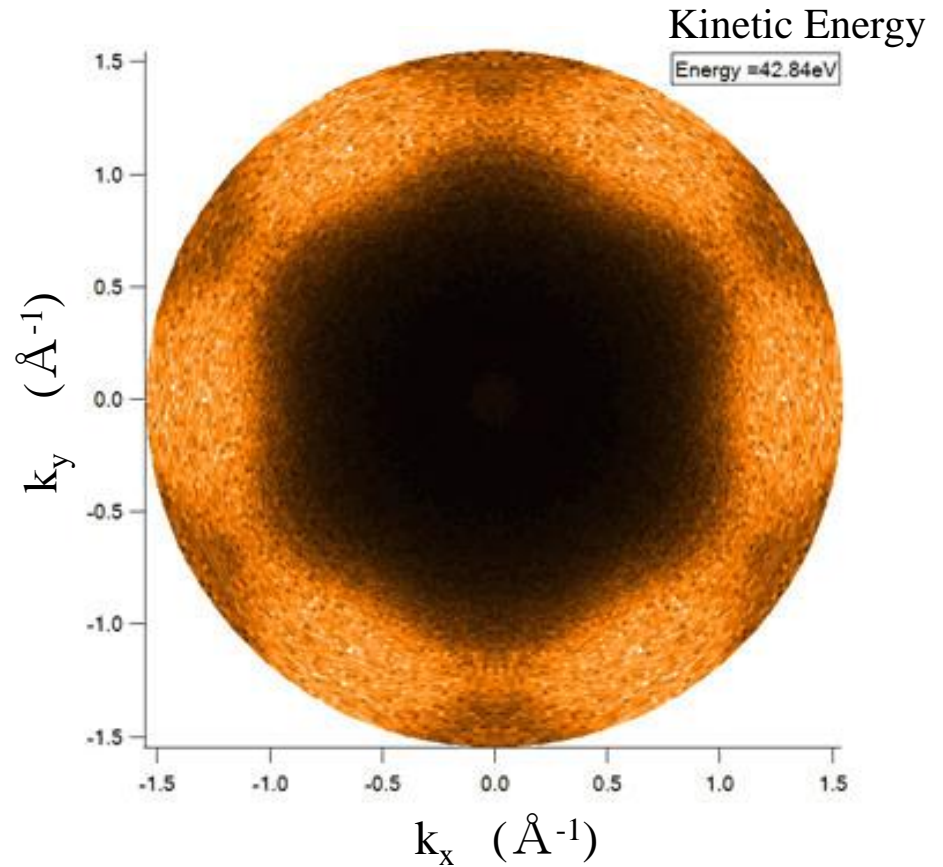
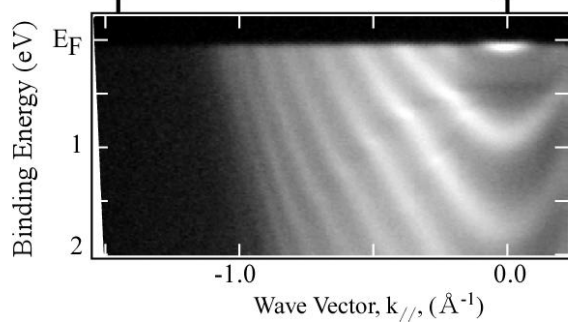
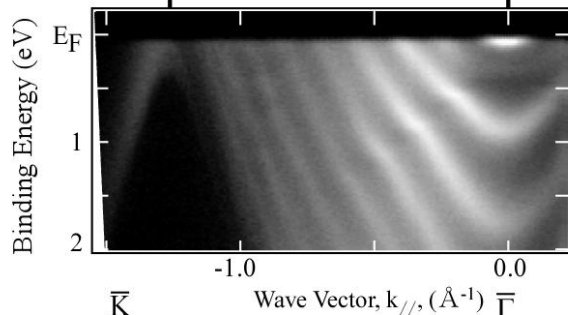
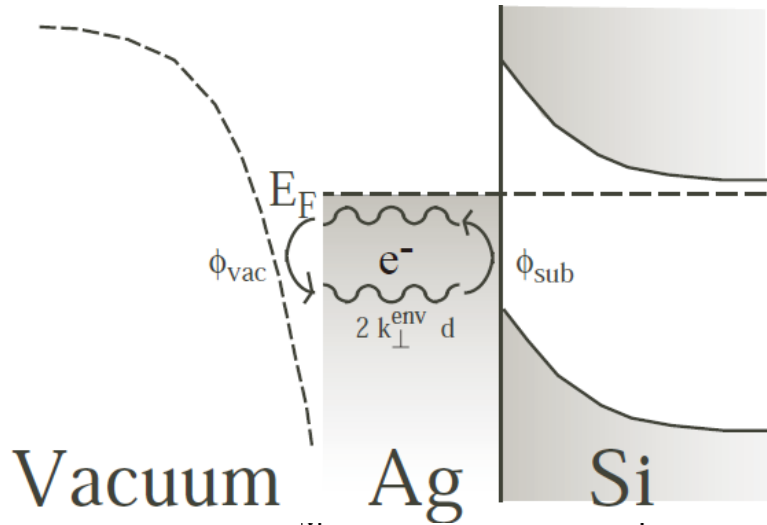
.....

**Angle-resolved photoemission spectroscopy (ARPES)**



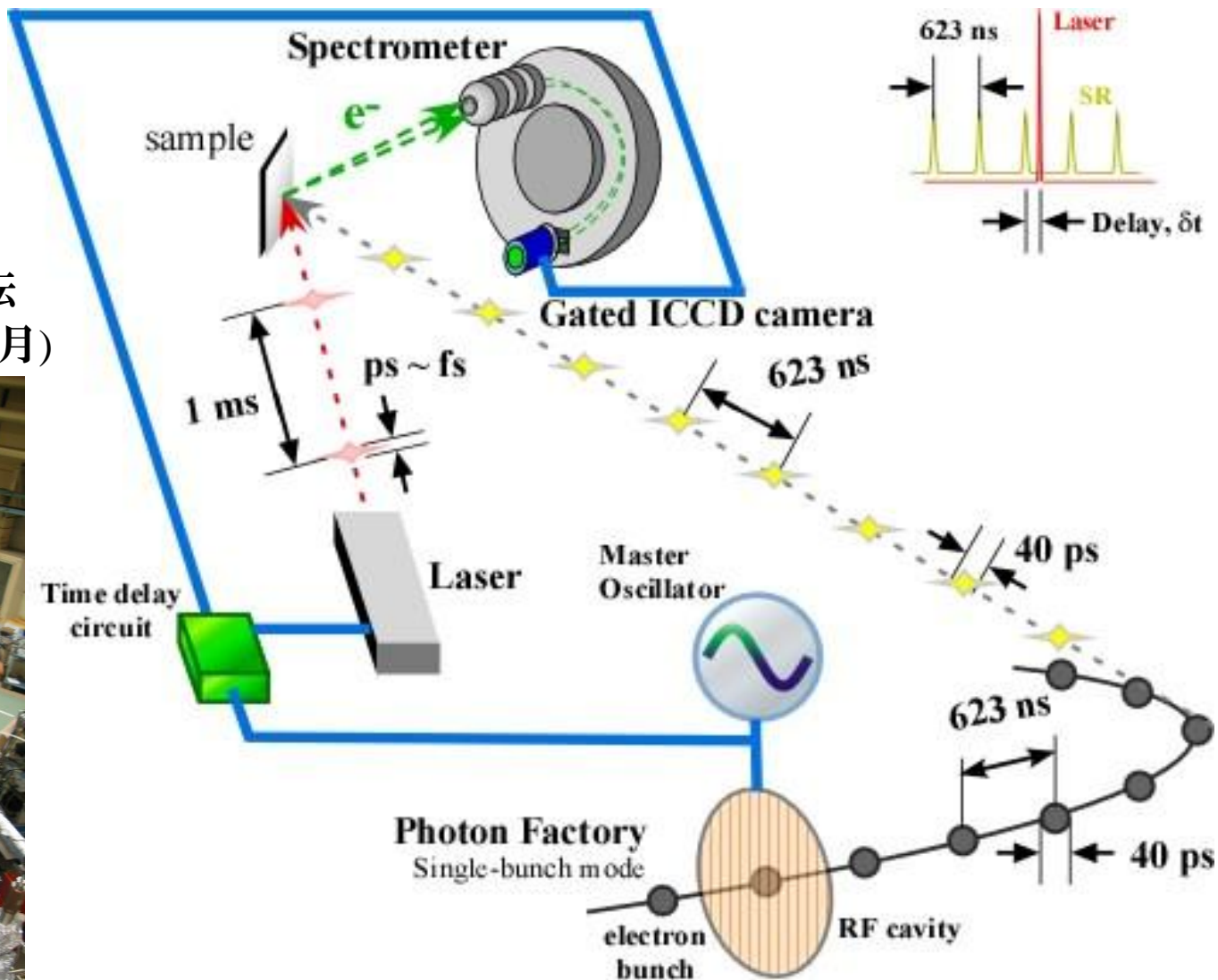
# Example: Quantum size effect

## 15ML-Ag(111) metal film on Si(111)

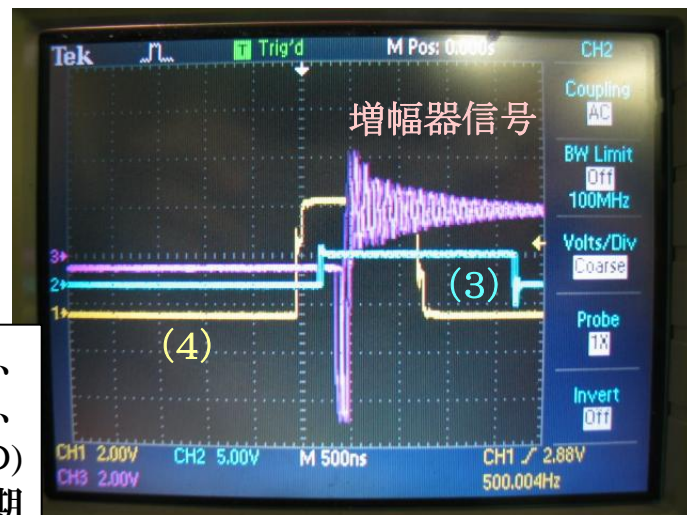
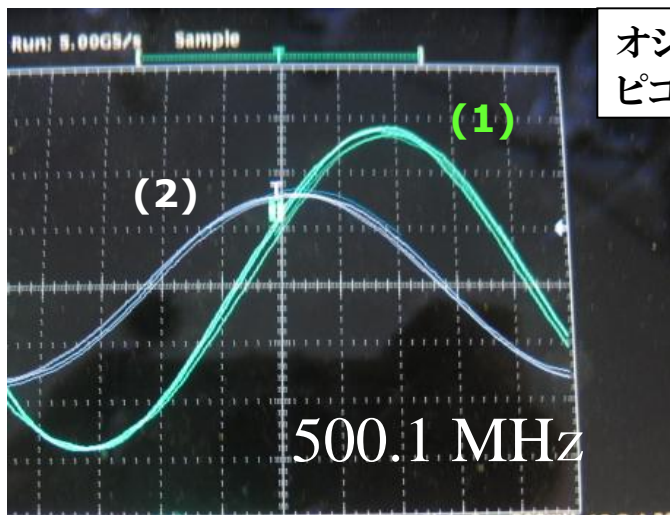
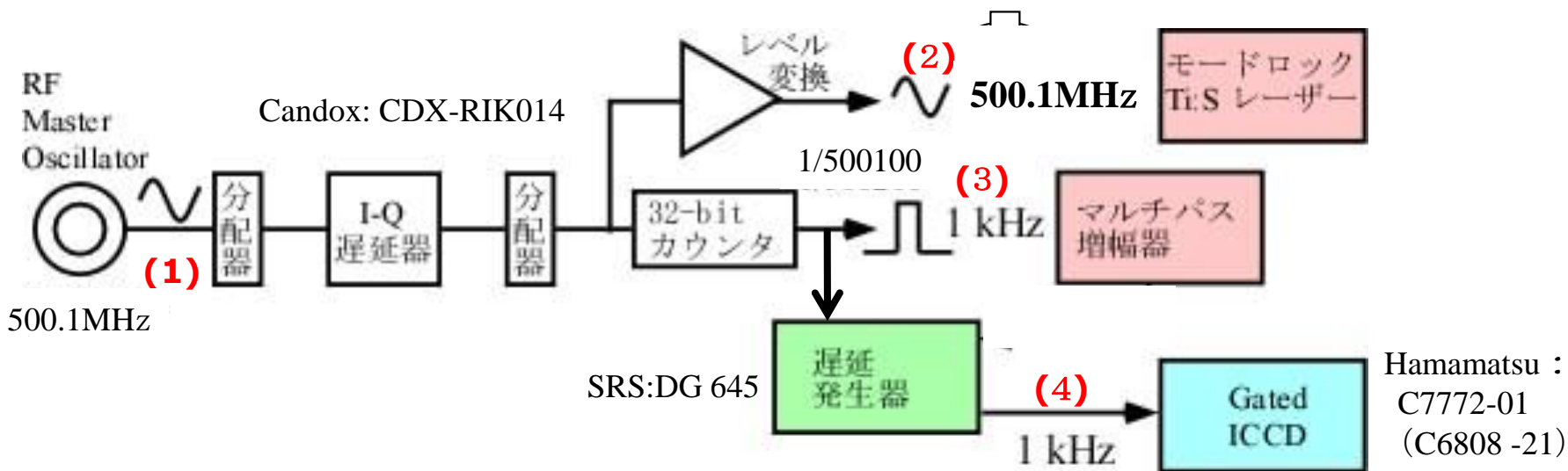


# 既存の半球型電子分析器を用いた 放射光時分割光電子分光実験

KEK-PF BL-11A SB運転  
ビームタイム (2008年10月)



# ■ タイミング調整



# 既存の半球型電子分析器を用いた 放射光時分割光電子分光実験

## システムの時間構造

### ●光源

SX放射光パルス：パルス幅 40ps、パルス間隔 623ns  
800nm レーザーパルス：パルス幅 < 40 fs、パルス間隔 1ms

### ●遅延システム

高周波遅延回路 (Candox CDX-RIK014) : total jitter 1ps  
デジタル遅延パルス発生器 (SRS:DG 645): 立ち上がり 1ns, jitter < 25ps

### ●電子分析器(VG Scienta SES-2002)

電子分析器： 電子分光器 + 電子検出器

半円球型 MCP+蛍光スクリーン+CCD

MCP: 500 ps (大浦氏(SPring-8), private communication)

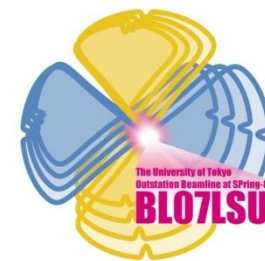
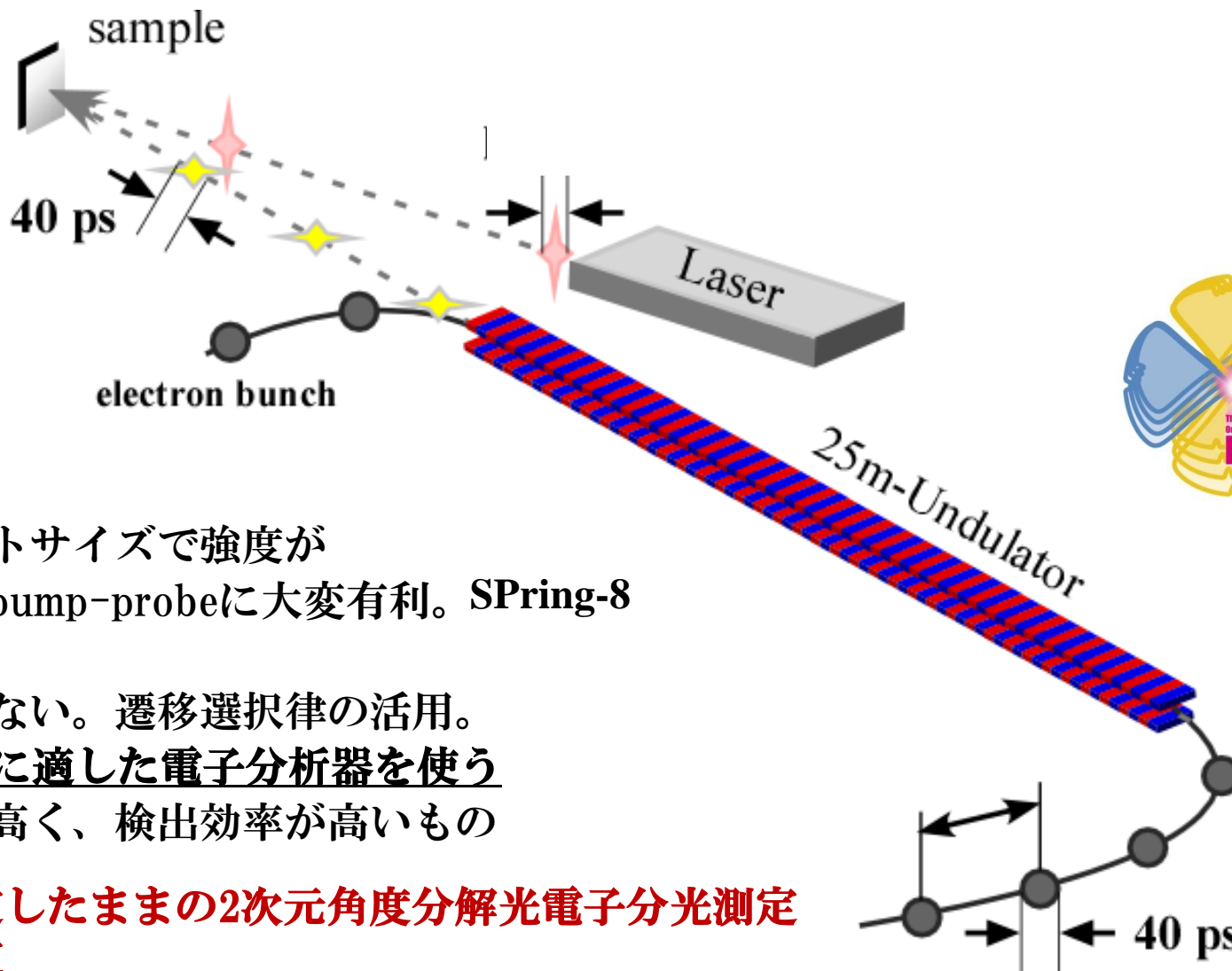
Gated ICCD (Hamamatsu C7772-01, C6808-21) : 1  $\mu$ s  
cf. CCD (VG Scienta) : 15-80 frames/s [66.7-12.5 ms]

蛍光スクリーン: 1 ms (Hamamatsu, 10% afterglow time)



# SPring-8 東京大学ビームラインBL07LSU

## 目的



## 高輝度を活かす

小さいスポットサイズで強度が大きいことはpump-probeに大変有利。SPring-8

## 偏光度を活かす

入射角を変えない。遷移選択律の活用。

## もっと時間分解に適した電子分析器を使う

時間分解能が高く、検出効率が高いもの

**サンプルを固定したままの2次元角度分解光電子分光測定と時間分解測定**

# BL07LSUにおける 時間分解光電子分光システム

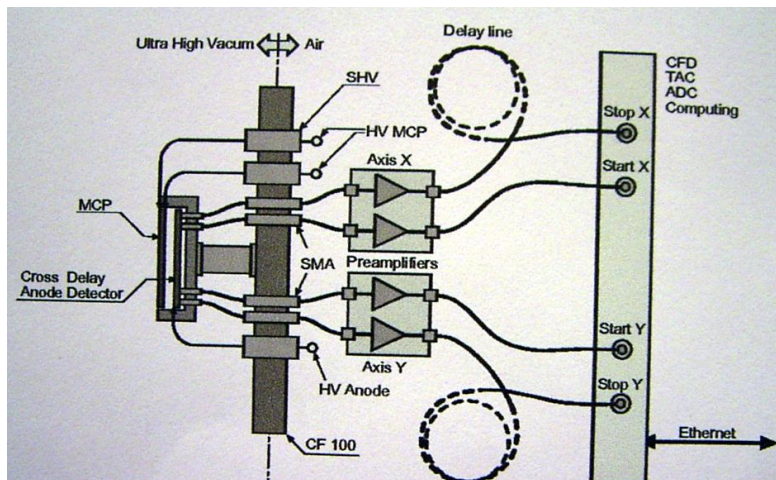
○ 時間分解用電子分析器

## 飛行時間型角度分解電子分析器 VG-Scienta ARTOF 10k

2次元光電子を一気に検出

VUV～軟X線光電子分光測定に容易に対応

Delay-Line-Detector



Measuring frequency: 80 ~ 100 MHz  
Time resolution: 10 ~ 12.5 ns

ELECTRON SPECTROMETER  
ARTOF 10k



### Property

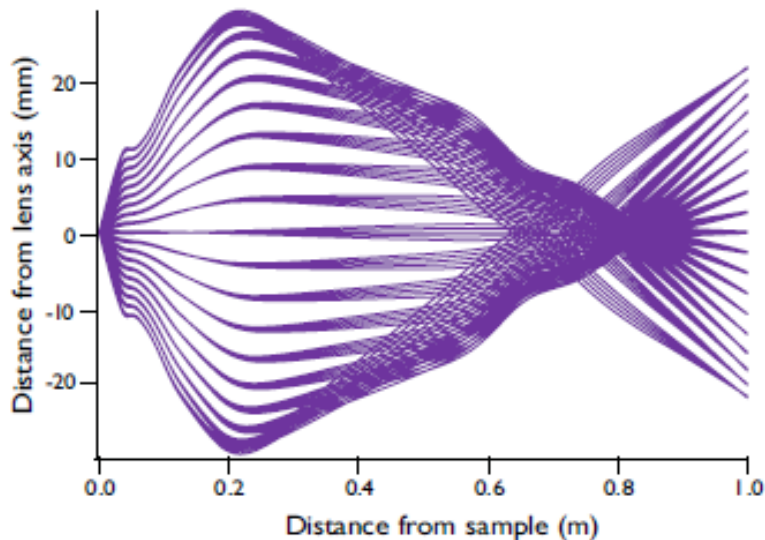
Energy Resolving Power  
Energy Resolution  
Kinetic Energy Range  
Maximum Angular Acceptance  
Angular Modes  
Transmission/Imaging Mode  
Angular Resolution

### Specification

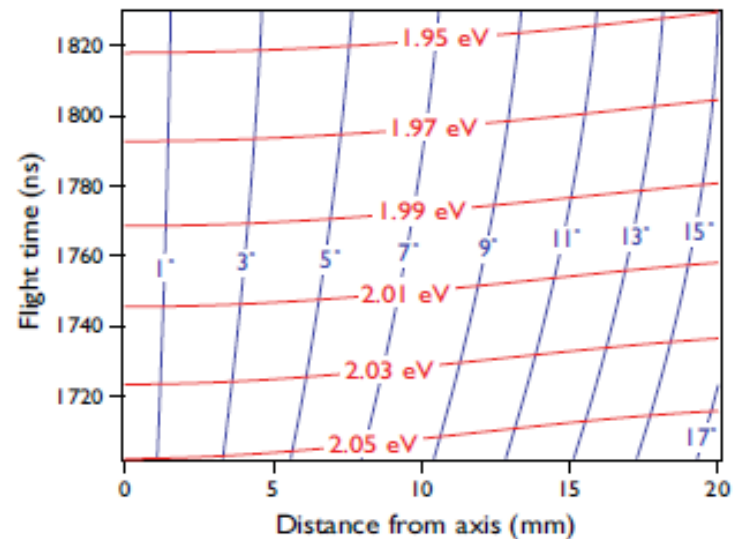
> 10,000 (theoretical 16,000)  
150  $\mu\text{eV}$  \*  
0.2 - 1000 eV  
 $\pm 18^\circ$   
 $\pm 7^\circ, \pm 15^\circ$   
Yes  
0.08  $^\circ$  \*

# BL07LSUにおける 時間分解光電子分光システム

## 飛行時間型角度分解電子分析器 VG-Scienta ARTOF 10k



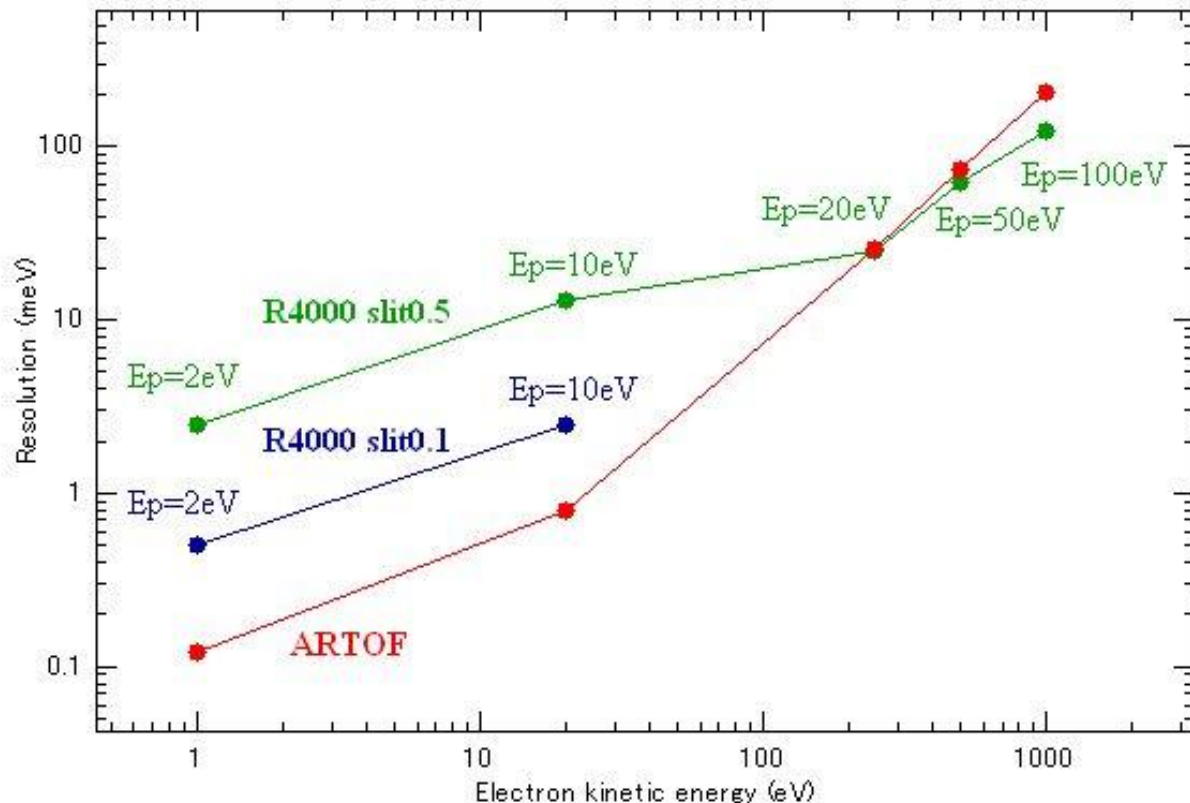
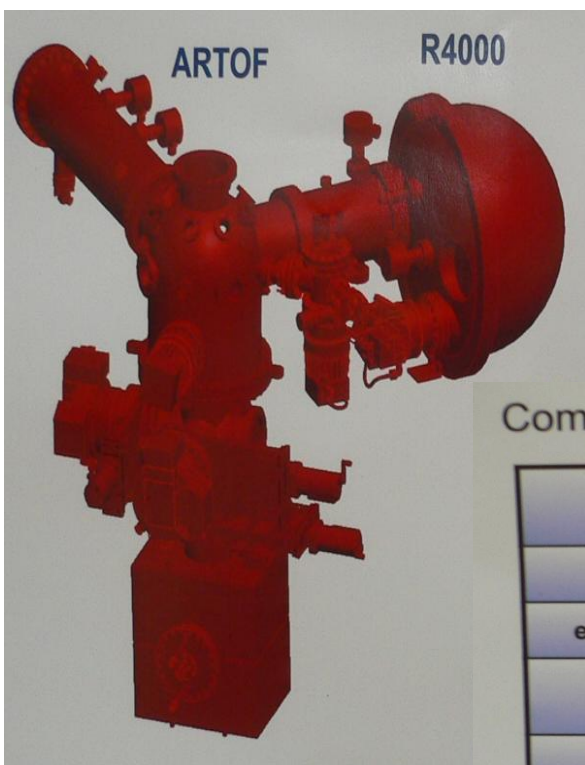
The graph shows calculated trajectories for 2 eV electrons with lens voltages optimized for a 0.1 eV energy window around 2 eV, and with angular window  $\pm 15^\circ$ . The separation between trajectory pencils is  $2^\circ$  and the source diameter was 0.4 mm.



This plot shows how the measured time of flight and electron position on the detector is converted to energy and angular information. The energy contours are marked in red while the polar angle contours are in blue.

# 半球型電子分析器 との比較

IDEESS, BESSY  
Cosmin Lupulescu (BESSY)



Comparison between the ARTOF and the hemispherical analyzer

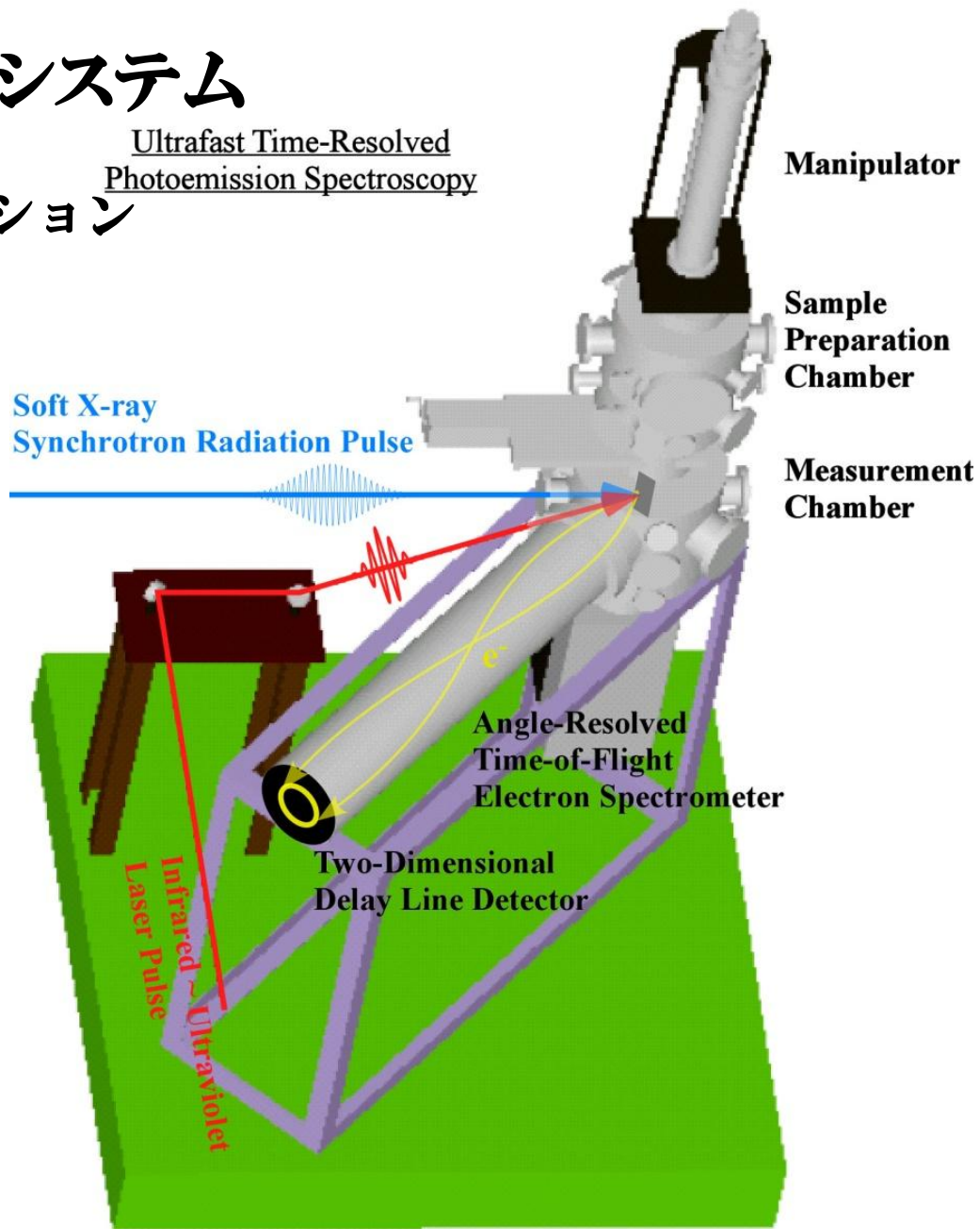
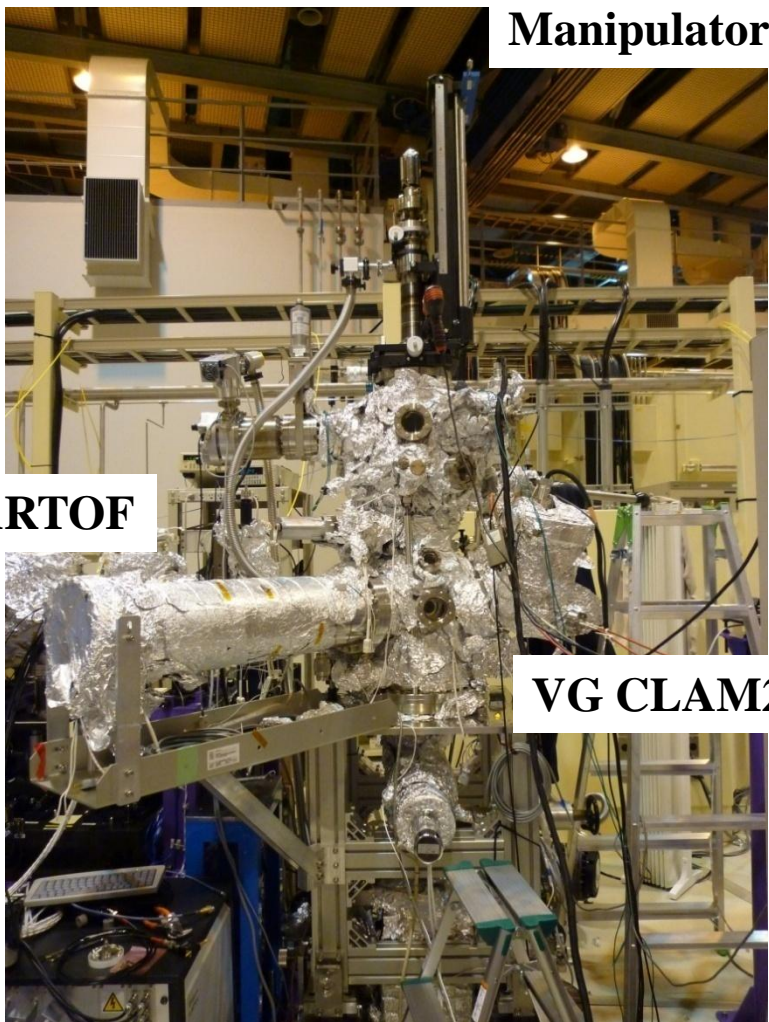
	time-of-flight analyzer (Scienta ARTOF 10k)	hemispherical analyzer (Scienta R4000)
energy resolution	150 $\mu$ eV	1.8 meV
energy resolving power	10000	1750 (for 0.2 mm slit)
angular resolution	0.08° (0.4mm sample diameter)	0.4° (1mm sample diameter)
slits	0 (total cone detection)	9
detector	MCP/delay-line	MCP/CCD
repetition rate	max. 3 MHz	-
transmission	250 x R4000 analyzer	1

スリット幅によって  
最大625倍

# BL07LSUにおける 時間分解光電子分光システム

Ultrafast Time-Resolved  
Photoemission Spectroscopy

○時間分解軟X線分光実験ステーション



# BL07LSUにおける 時間分解光電子分光システム

○ 超短パルスレーザーシステム  
(安全対策)

## BL07LASER

レーザー (Ti-Sapphire Laser, 800 nm)

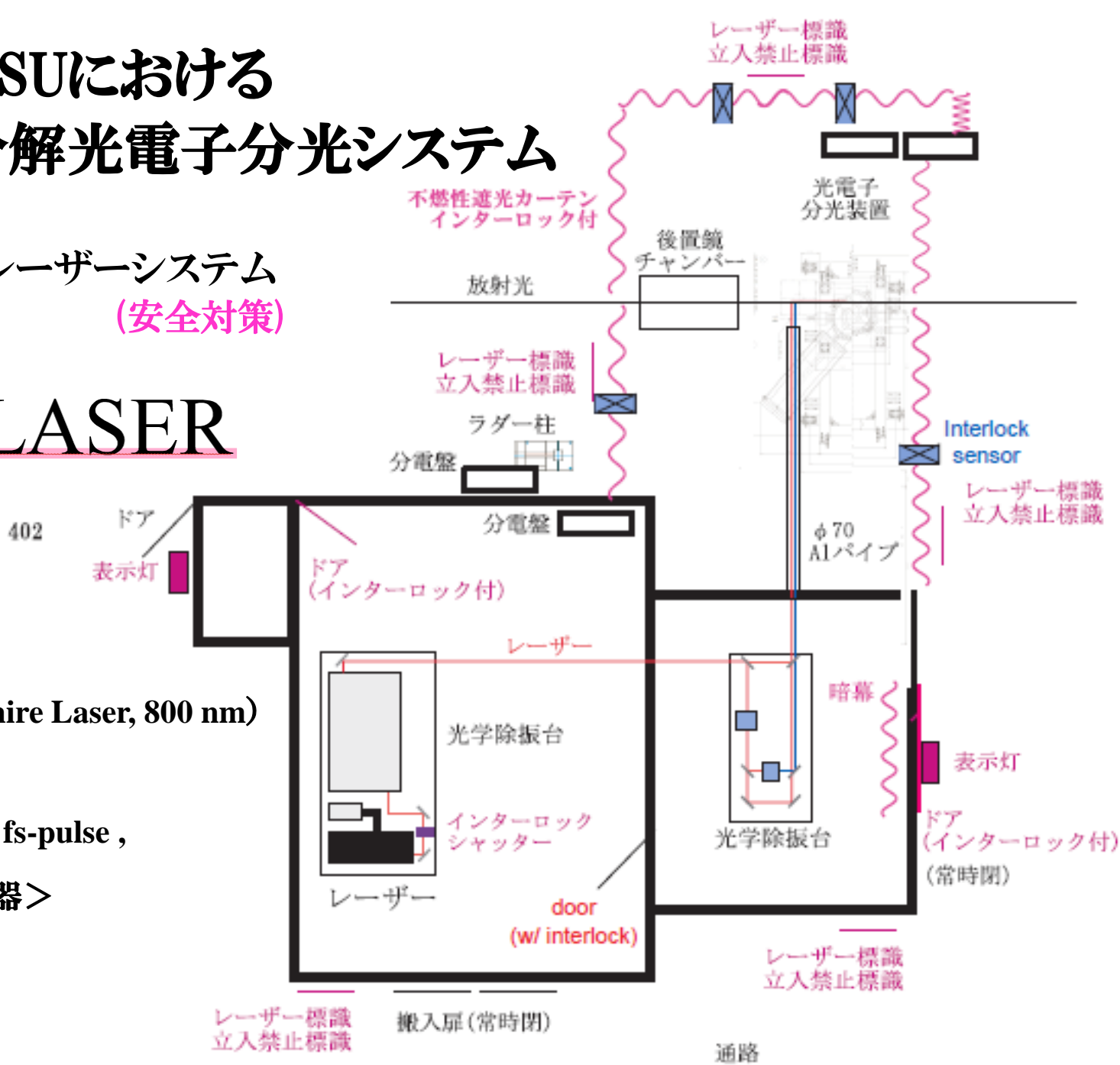
<オシレーター>

nJ, ~ 80 MHz, <20 fs-pulse ,

<マルチパス増幅器>

> 2.5mJ, 1~2 kHz,

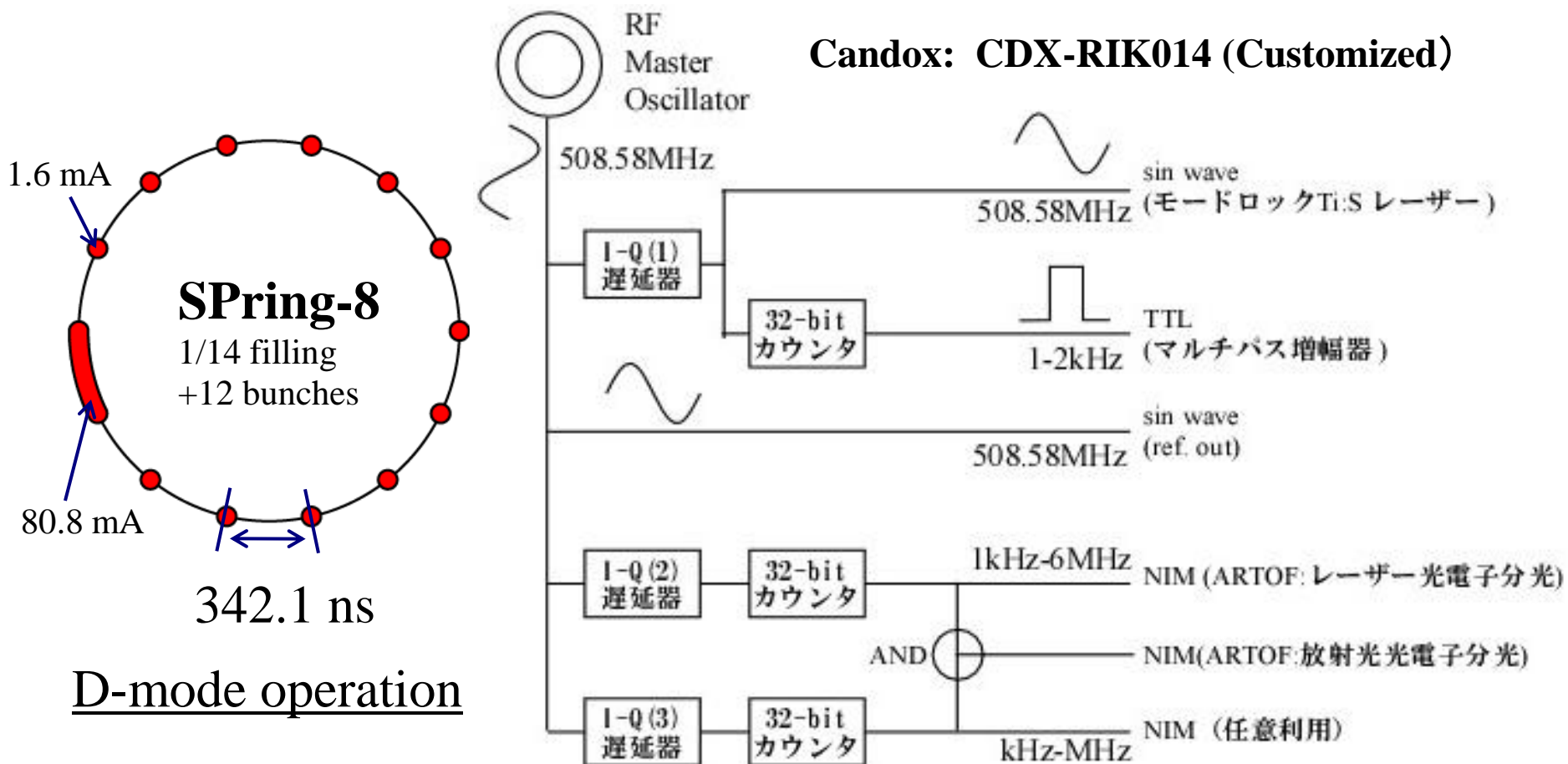
< 40 fs pulse



通路

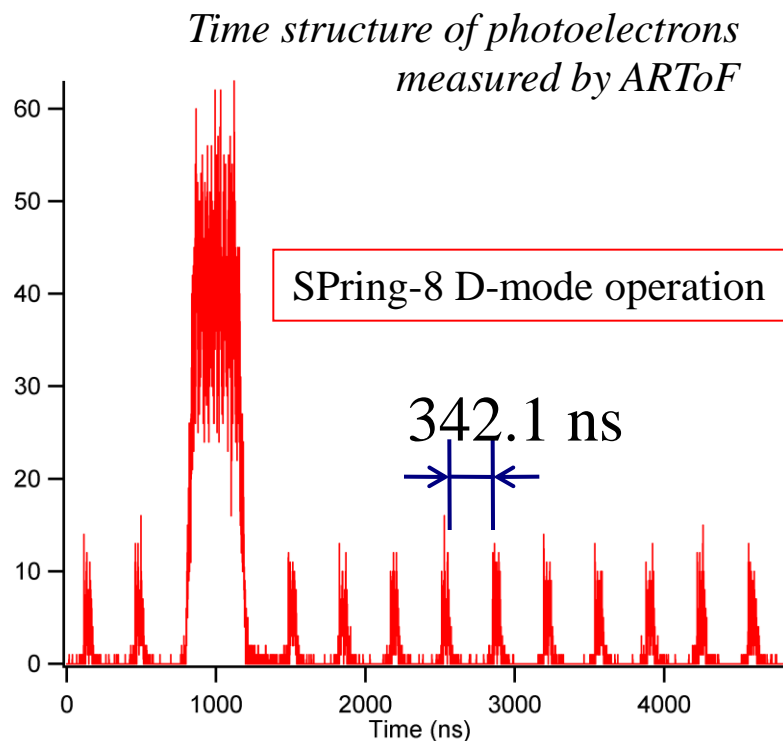
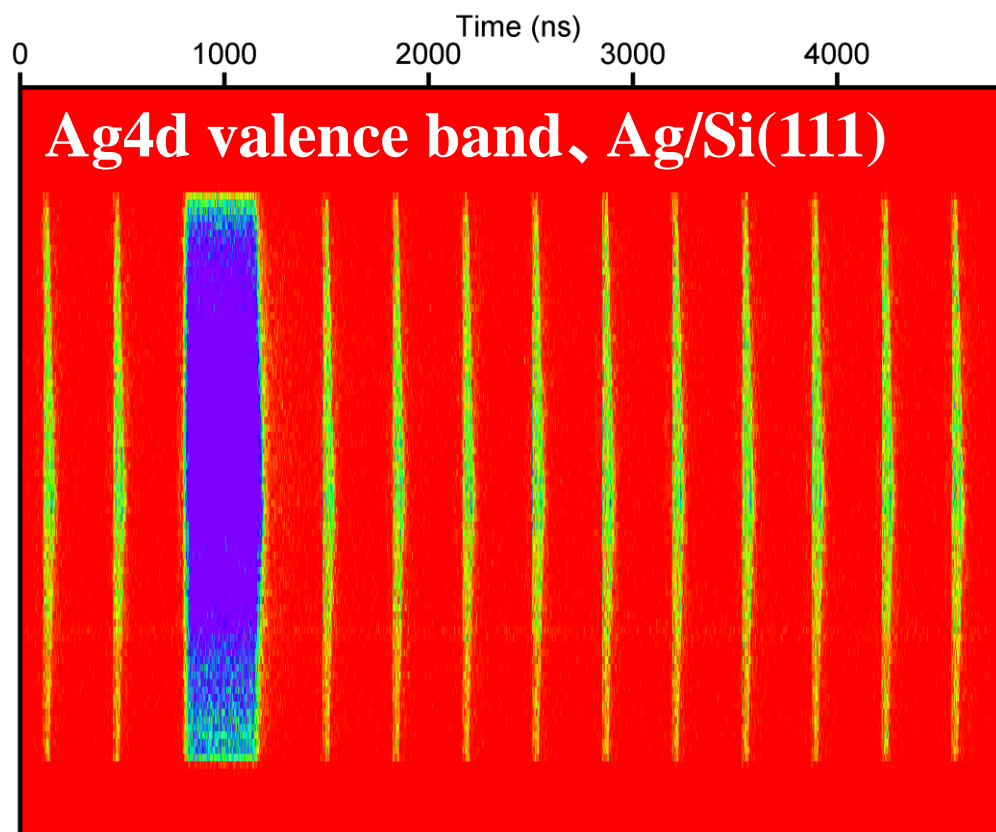
# BL07LSUにおける 時間分解光電子分光システム

○ SPring-8運転モードに合わせた同期・遅延制御システム



# BL07LSUにおける 時間分解光電子分光システム

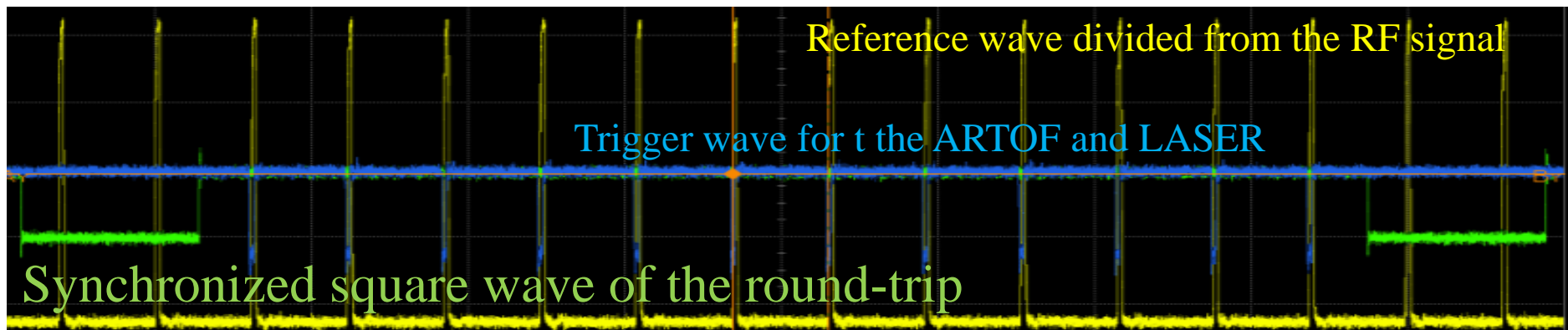
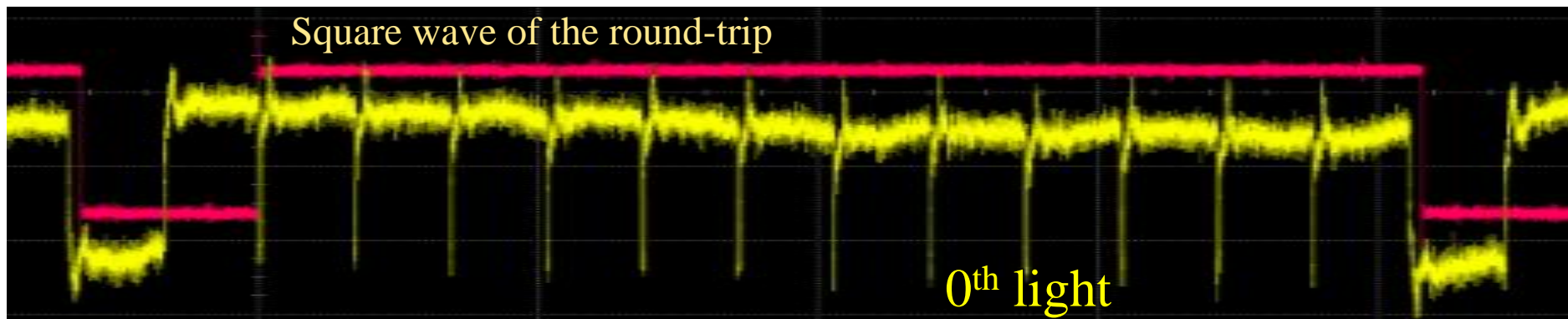
## ○ 光電子評価測定





# BL07LSUにおける 時間分解光電子分光システム

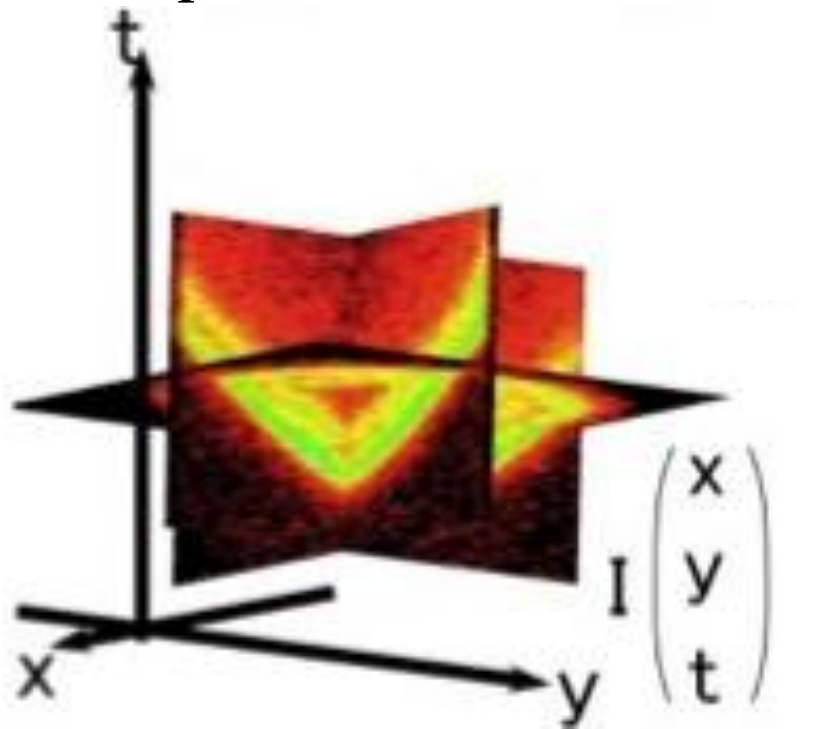
○ SPring-8運転モードに合わせた高精度同期システム



No photoemission measurements at the bunch train

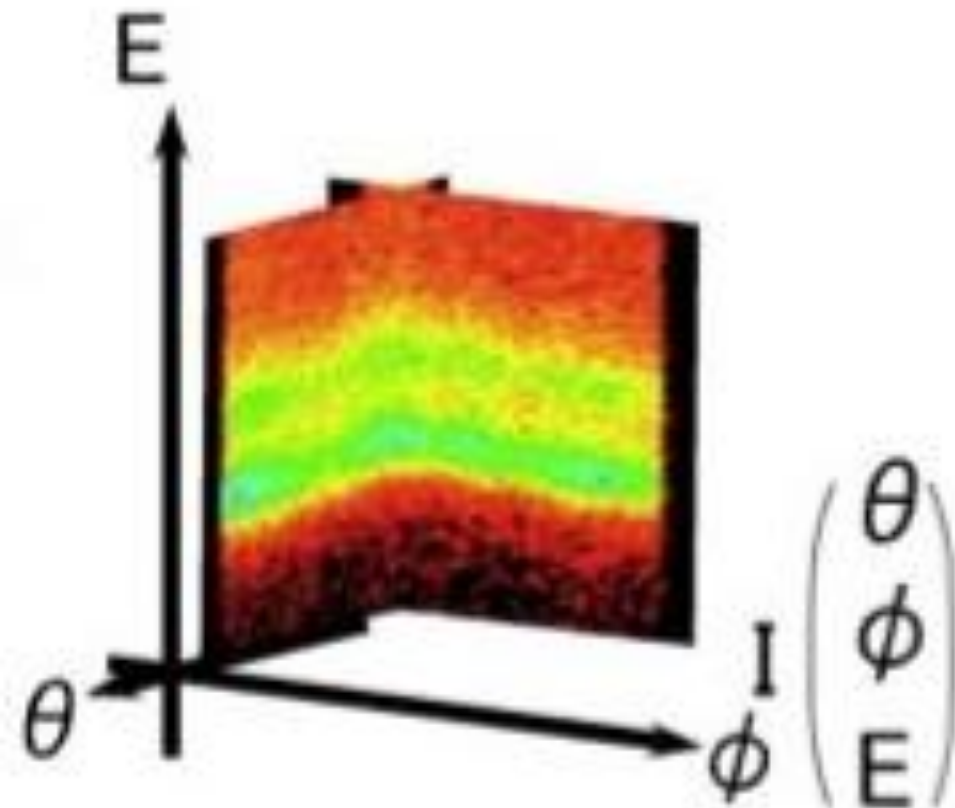
# SPring-8 BL07LSU

○ Si 2p core-level



conversion

Si 2p CLS  
 $h\nu \sim 260$  eV



# BL07LSUにおける 時間分解光電子分光システム

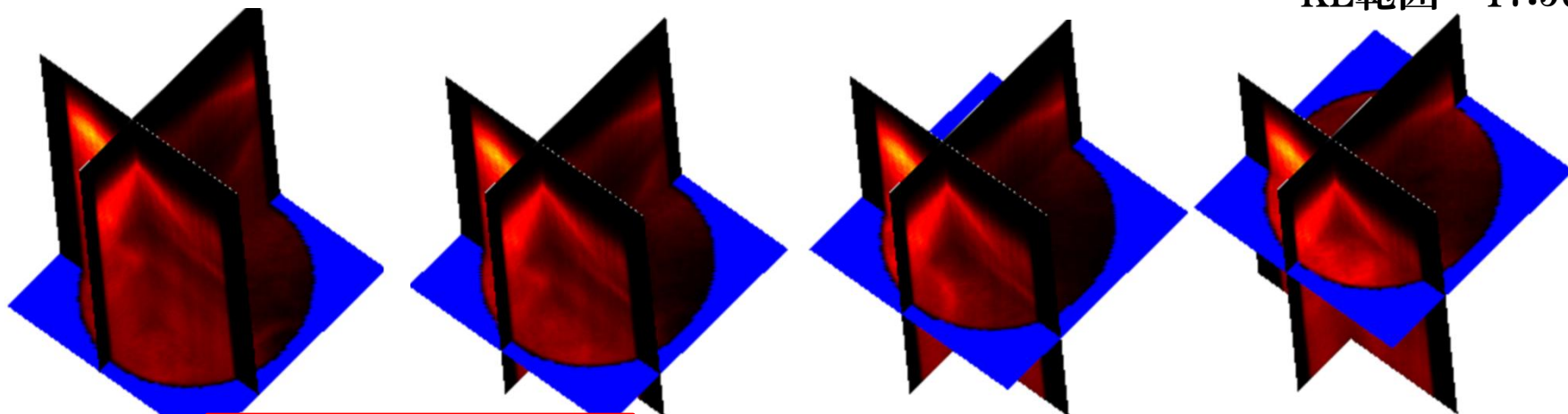
Si(111): bulk valence band

$h\nu=250$  eV

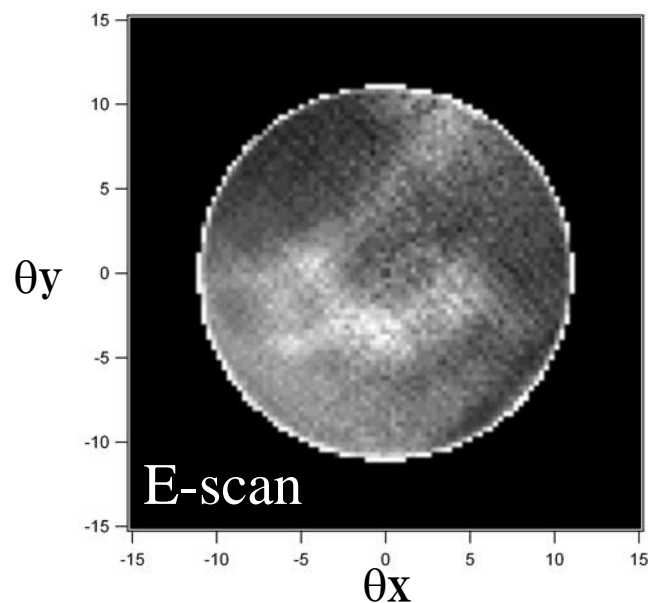
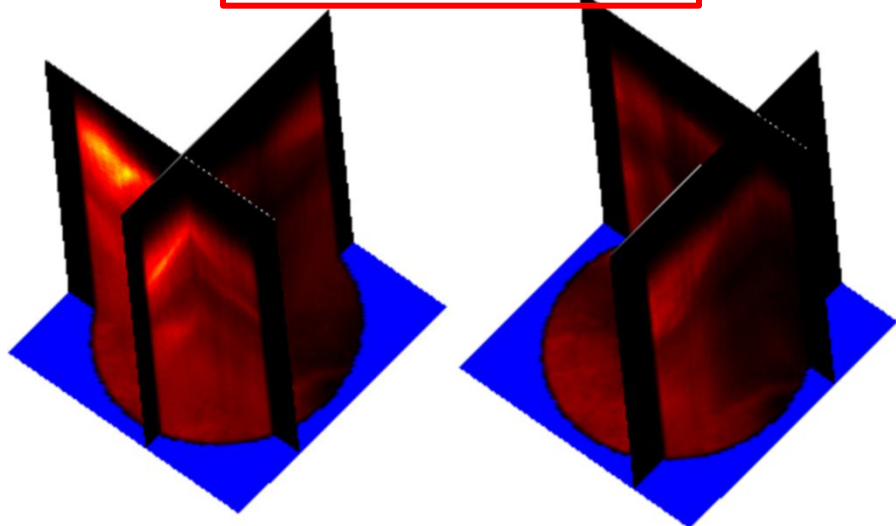
$\theta_x$ 、 $\theta_y$ 範囲= $\pm 12.5$ 度 (最大15度)

KE範囲= $17.5$ eV

○ 2次元角度分解測定



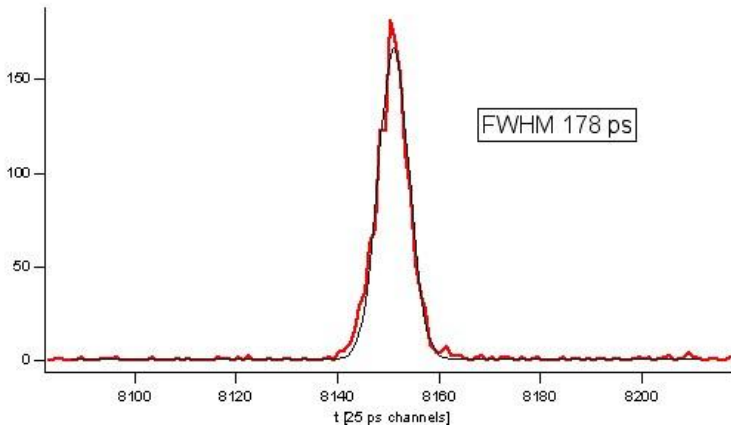
\*サンプル位置固定



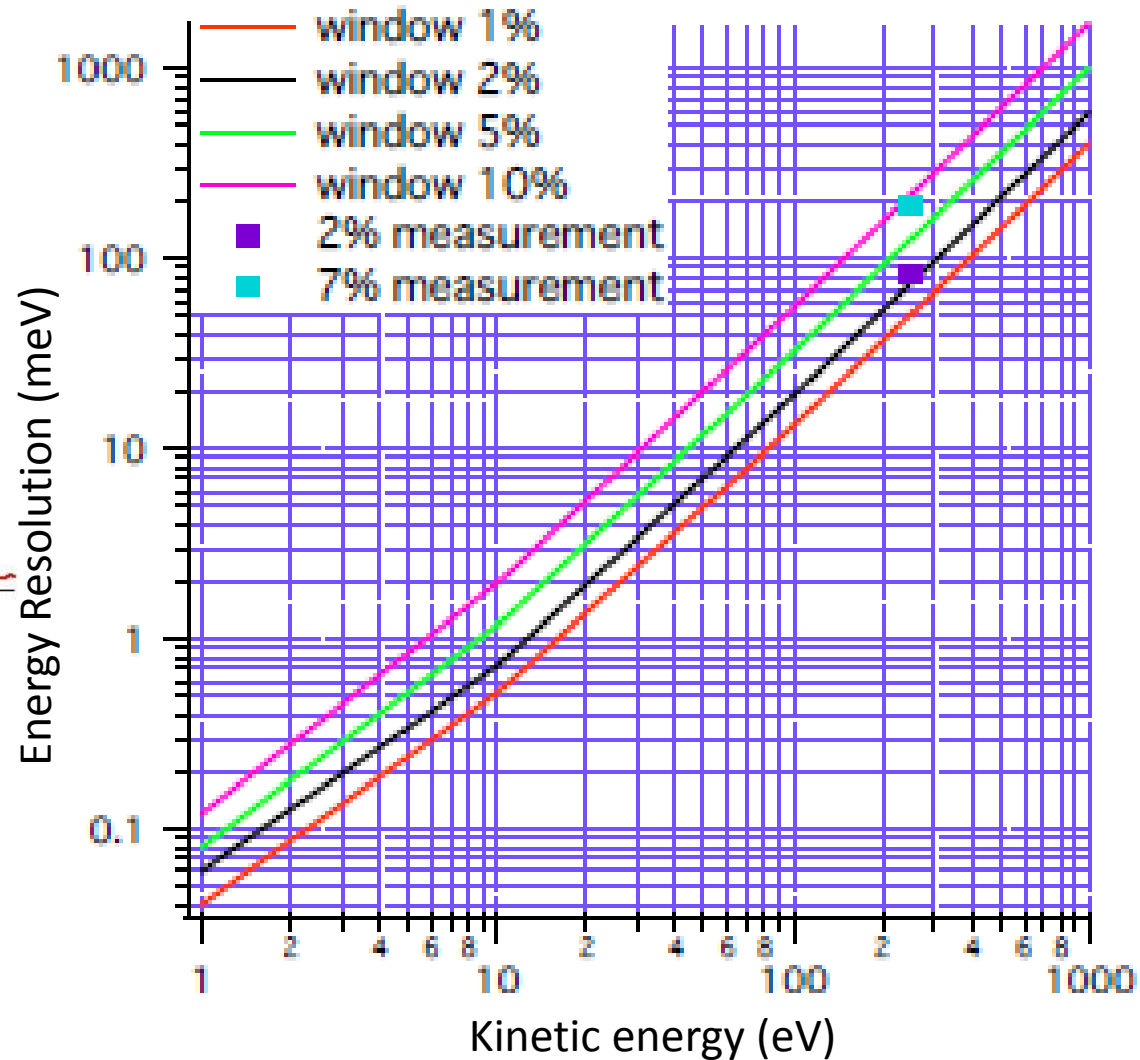
# 分解能評価 (SPring-8 BL07LSU)

仕様通りの性能

Direct photon beam into the analyzer



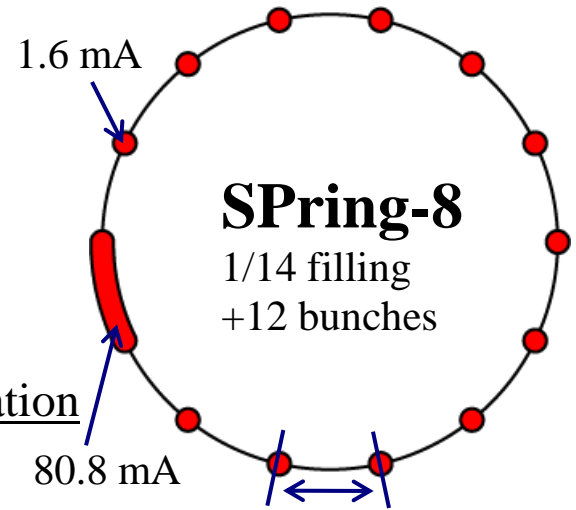
Total time resolution  
of the measurement system  
 $\Delta T = 178 \text{ ps}$  (0.178 ns)



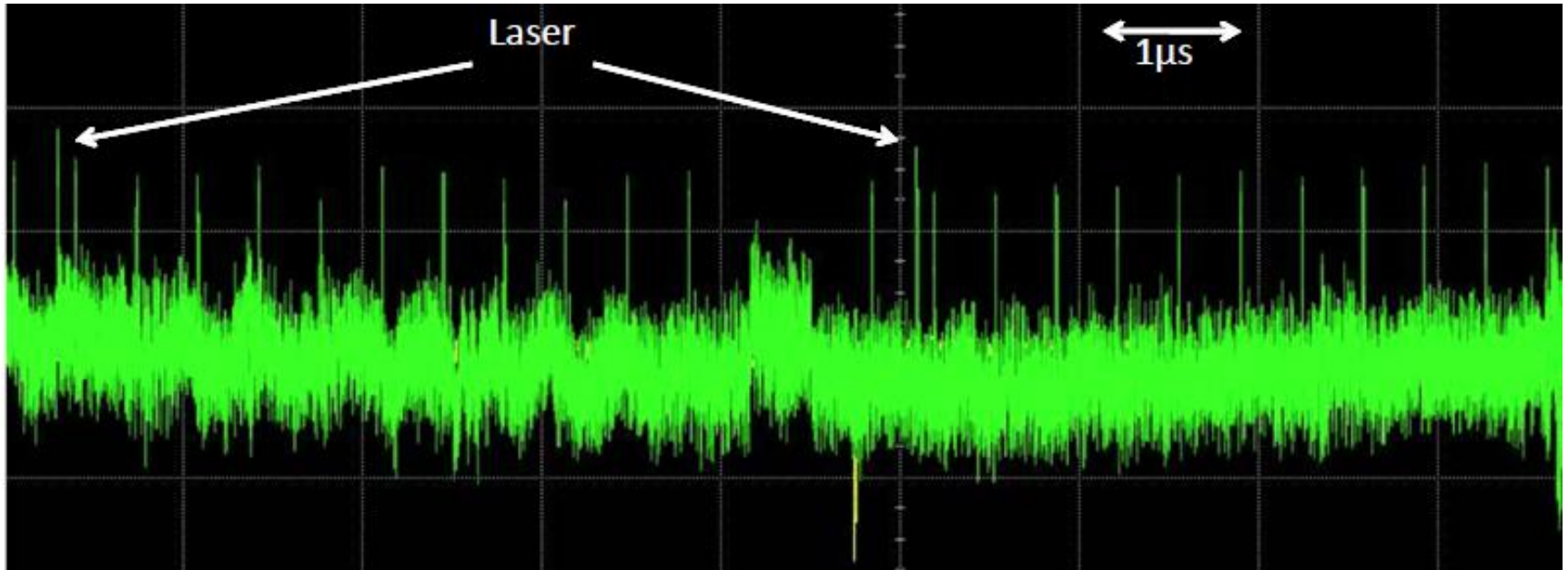
# BL07LSUにおける 時間分解光電子分光システム

○超短パルスレーザーと放射光の  
同期・遅延制御

D-mode operation





Timing control of laser and SR pulses: 50~100 ps





# 現状

-  高輝度軟X線ビームラインSPring-8BL07LSUにおいて、時間分解光電子分光用実験ステーションが完成した。
-  時間分解光電子分光測定を有利に行うために、飛行時間型角度分解電子分析器及び高精度遅延時間回路を立ち上げた。

SPring-8放射光軟X線パルスを用いて、

-  サンプル回転なしで2次元広波数領域バンドマッピングが実現した。

ARTOF型電子分析器での2次元角度分解測定 (2010)

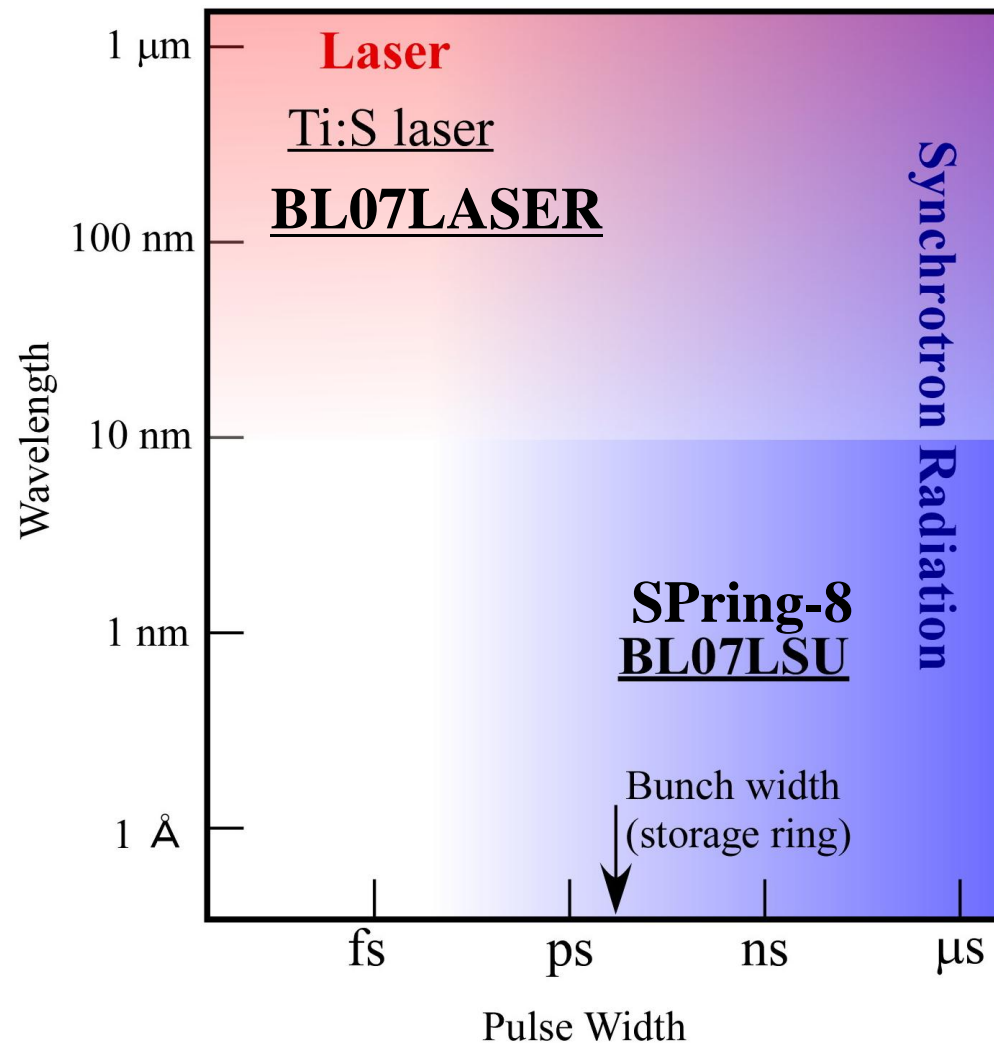
6eV Laser (MIT, 米)

16 eV SR (BESSY, 独)

**250 eV SR (SPring-8, 日本)**

-  フェムト秒パルスレーザーと組み合わせてピコ時間分解内殻光電子分光測定が実現した。

# 現状



## 時間分解放射光光電子分光

$h\nu > 250$  eV: 単光子光電子分光  
( $\Delta t \sim 50$  ps,  $\Delta E = 10$  meV-range)

## 時間分解レーザー光電子分光

$h\nu = 1.5 - 3$  eV: 多光子光電子分光  
 $h\nu = 6$  eV: 単光子光電子分光  
( $\Delta t \sim 50$  fs,  $\Delta E = 10$  meV-range)

不確定性原理:

$$\Delta t \text{ (fs)} \Delta E \text{ (meV)} > 1000$$

# 今後の展開：共同利用研究

- 波数分解キャリアダイナミクス研究
- Quasi-Fermi surface mapping

## ○ トポロジカル絶縁体のエッジ状態

「トポロジカル絶縁体の物理」  
村上修一、平原徹、松田巖、  
日本物理学会誌 65, 849 (2010).

「トポロジカル絶縁体の電子構造」  
松田巖、表面科学誌 (2011年4月号掲載予定)

## ○ (ワイドギャップ) 半導体表面の 低次元電子状態

Topical Review Article  
in the Fermi Surfaces Special Issue  
of J. Phys. Cond. Mat. **19**, 355007 (2007).



Phys. Rev. Lett. **104**, 156805(2010).  
Phys. Rev. B **82**, 165330 (2010).

