



**Waseda University**

Research Institute for Science and Engineering

**コンパクトX線源実現のための  
パルスレーザー光共振器開発の現状と  
X線生成試験**

**Major in Pure and Applied Physics,**

**Faculty of Science and Engineering, Waseda University**

**Kazuyuki Sakaue**

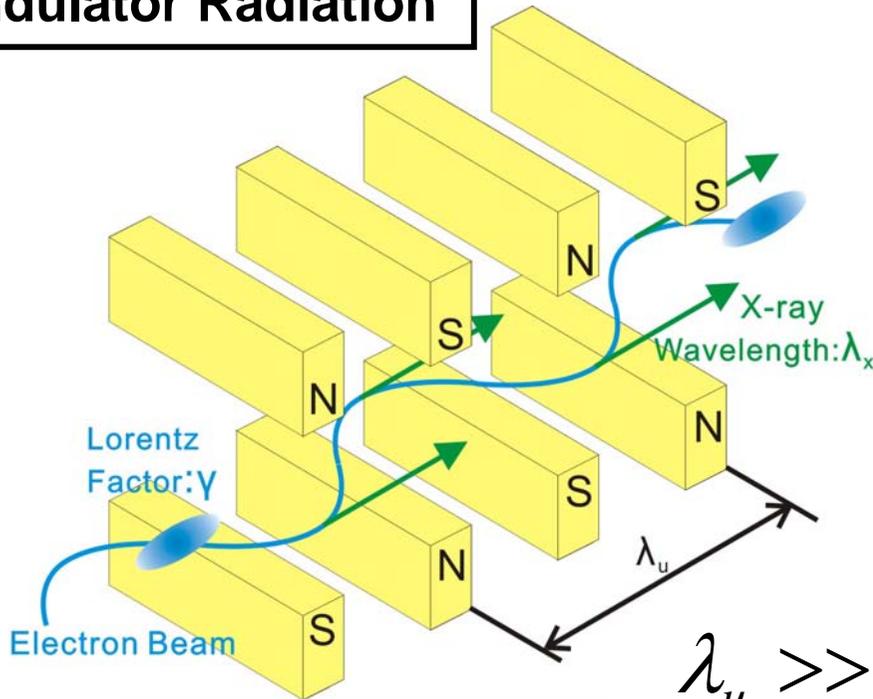


# Laser-Compton Scattering

## Comparison of Produced X-ray Energy

by Laser-Compton Scattering and Undulator

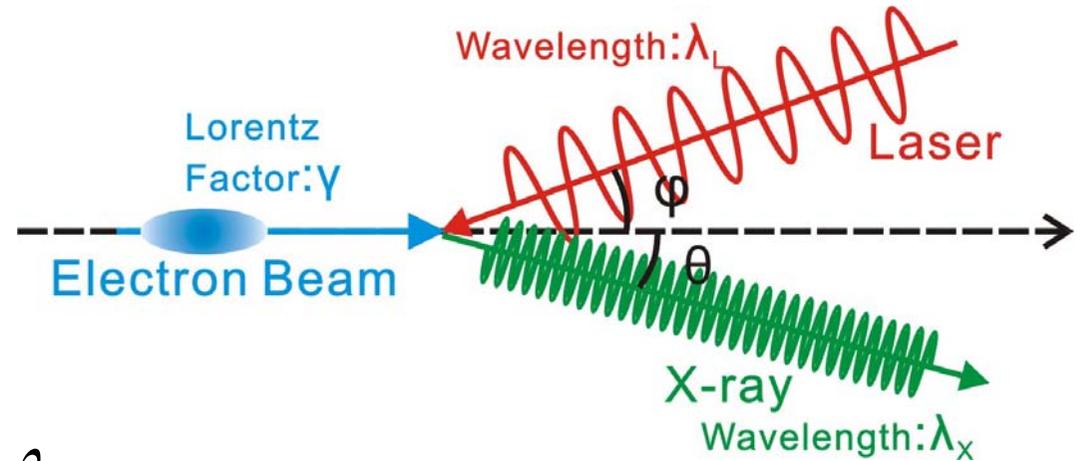
Undulator Radiation



$$E_X = 2\gamma^2 \cdot hc / \lambda_u$$

$$\lambda_u \gg \lambda_L$$

Laser-Compton Scattering



$$E_X = 2\gamma^2 \cdot hc / \lambda_L / (\cos \phi + 1 / \beta)$$

Laserの電磁場があたかもUndulatorのように振舞う  
 ⇒ 周期長をレーザー波長程度まで小さく出来る  
 低エネルギー電子で高エネルギー光子が生成可能

コンパクトな線源  
 高エネルギー光子の生成  
 が実現可能

# Motivation of This Research

レーザーコンプトン散乱法による  
第2世代放射光源と同等のX線源の開発

現在までの実験状況  
パルスレーザー光共振器を用いた  
Laser-Compton散乱X線生成の実証

パルスレーザー光共振器の開発  
高増大率共振器の実現  
光共振器の安定運転



高品質マルチバンチ電子ビーム生成

X線生成システムの開発  
X線検出器の開発  
特に本システムの適したもの

# Contents of This Talk

パルスレーザー光共振器を用いた  
第2世代放射光源と同等のX線源の開発

現在までの実験状況  
パルスレーザー光共振器を用いた  
Laser-Compton散乱X線生成の実証

パルスレーザー光共振器の開発  
高増大率共振器の実現  
光共振器の安定運転

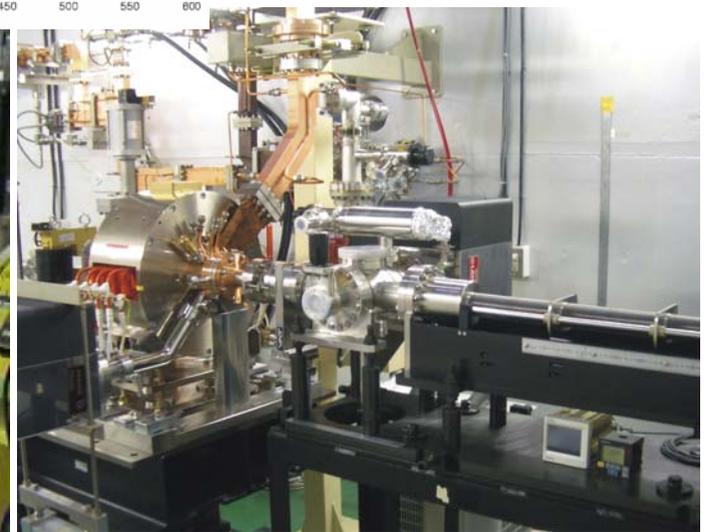
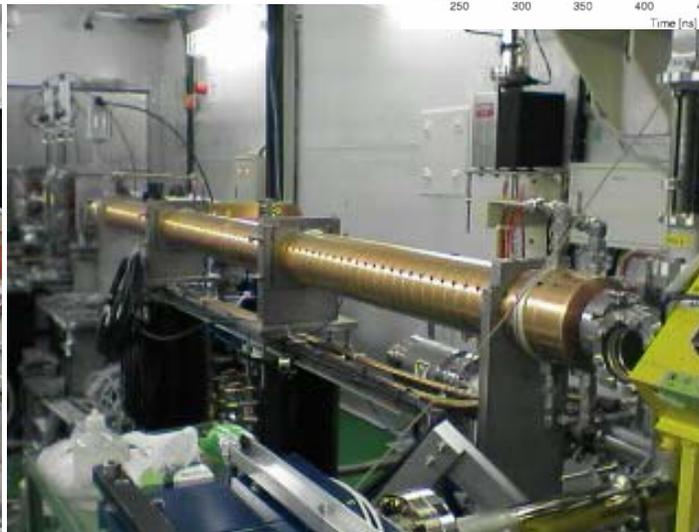
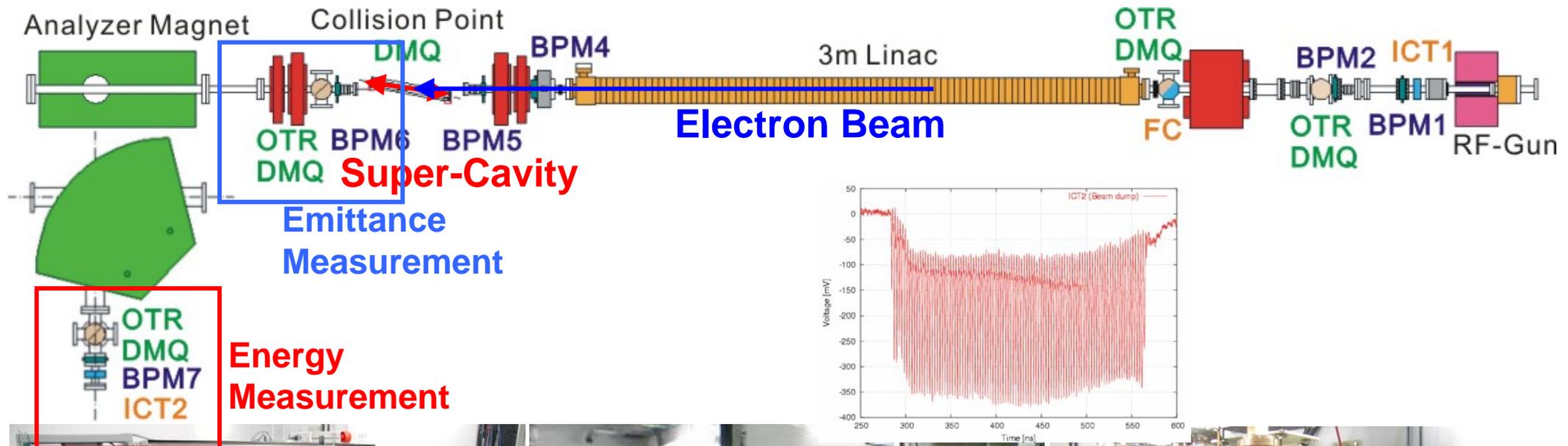
X線生成システムの開発  
X線検出器の開発  
特に本システムの適したもの



高品質マルチバンチ電子ビーム生成

# Multi-Bunch Electron Linac

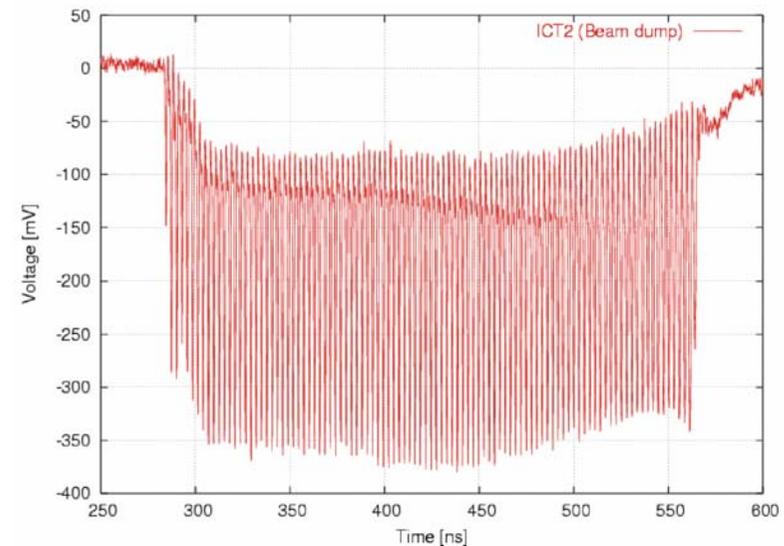
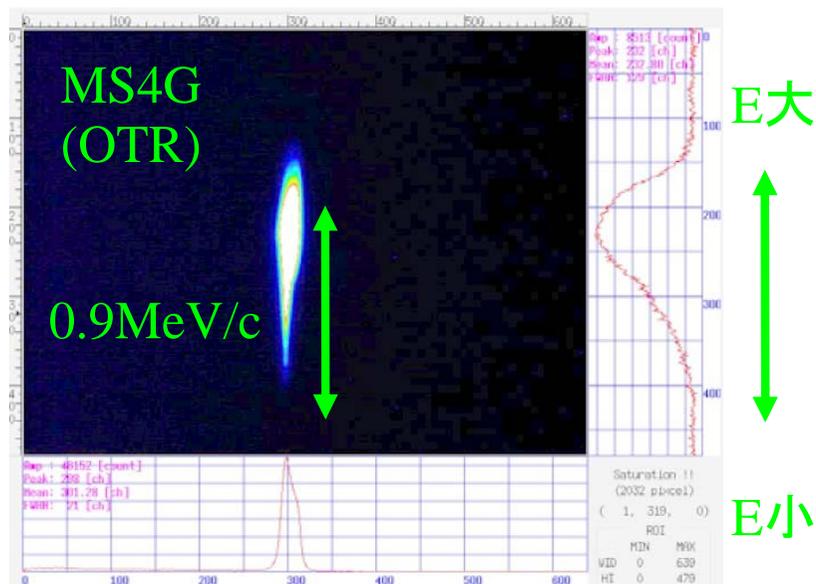
## LUCX Multi-Bunch Electron Linac



# Status of LUCX LINAC

## Beam Parameter at LUCX Accelerator

|                                    |                                   |                   |                   |               |
|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Energy                             | Energy Spread                     | Energy Difference | Bunch Charge      | Bunch Length  |
| 32-44MeV                           | 0.13% (rms)                       | 0.5% (rms)        | 0.5nC/Bunch       | 5psec (rms)   |
| Horizontal Emittance               | Vertical Emittance                | Bunch Spacing     | Num. Bunch /Train | RF Repetition |
| $15 \cdot 10^{-6} \pi \text{mrad}$ | $7 \cdot 10^{-6} \pi \text{mrad}$ | 2.8nsec (357MHz)  | 5-100             | 3.13-12.5Hz   |



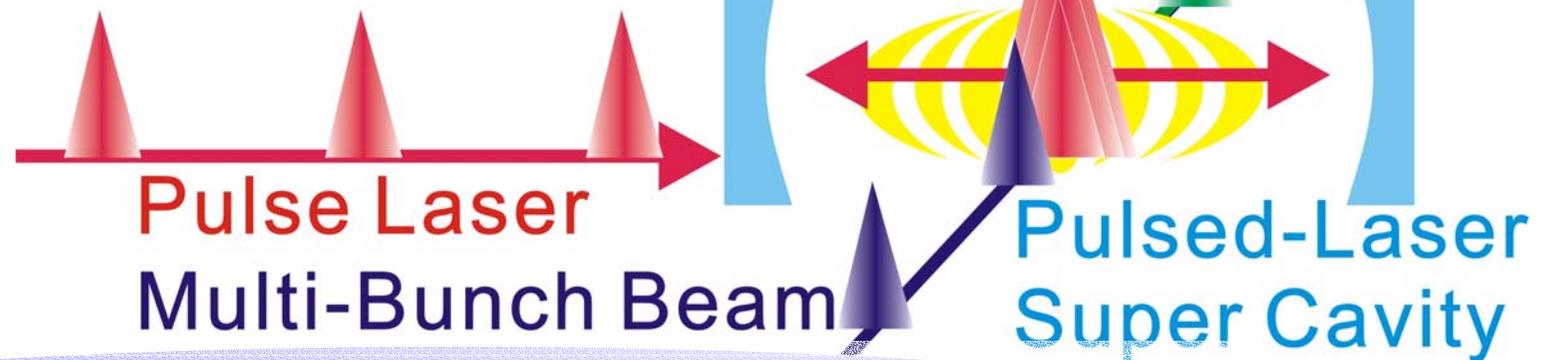
# Contents of This Talk

パルスレーザー光共振器を用いた  
第2世代放射光源と同等のX線源の開発

現在までの実験状況  
パルスレーザー光共振器を用いた  
Laser-Compton散乱X線生成の実証

パルスレーザー光共振器の開発  
高増大率共振器の実現  
光共振器の安定運転

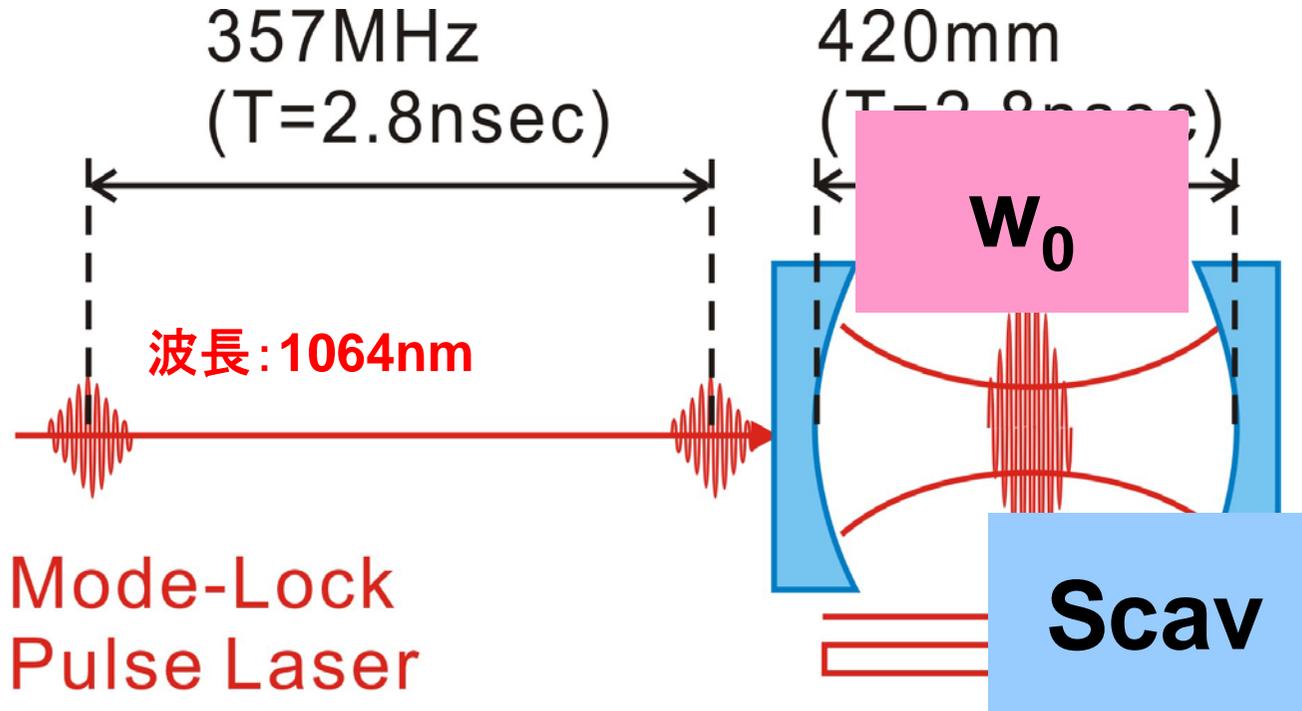
X線生成システムの開発  
X線検出器の開発  
特に本システムの適したもの



高品質マルチバンチ電子ビーム生成

# Pulsed-Laser Super-Cavity

## Pulsed-Laser Super-Cavity



Mode-Lock  
Pulse Laser

パルスレーザー光共振器の特徴

- 共振器内のレーザー蓄積 (蓄積率Scav)
- 安定かつ小さなウェスト ( $w_0$ )
- パルス化によってピーク強度大
- 加速器との組み合わせで取り出す必要なし

## 共振器の共鳴条件

$$L_{cav} = n\lambda / 2$$

パルスレーザー  
共振器の共振器長が  
レーザー半波長の  
整数倍となること

$$L_{cav} / c = mT_{laser}$$

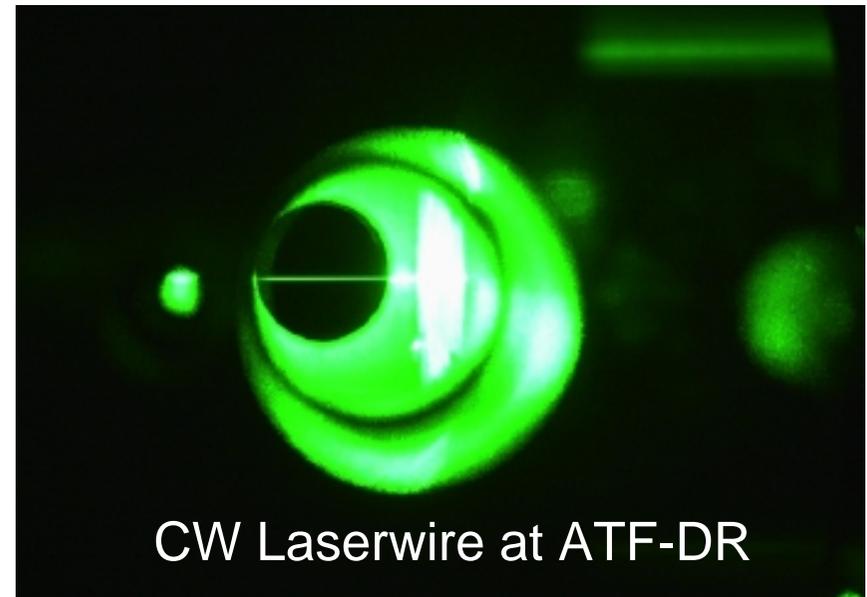
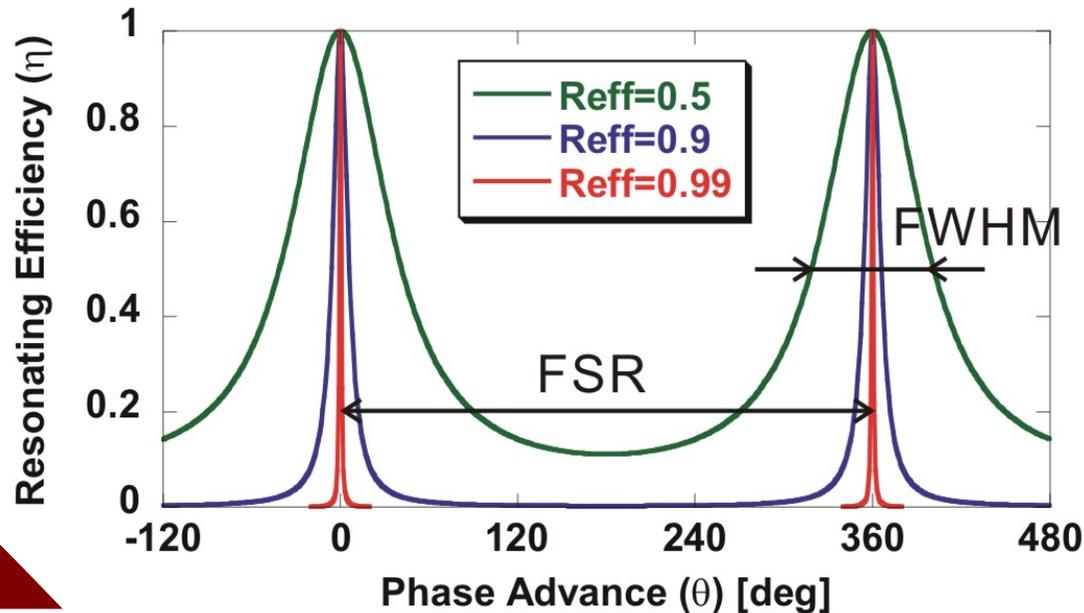
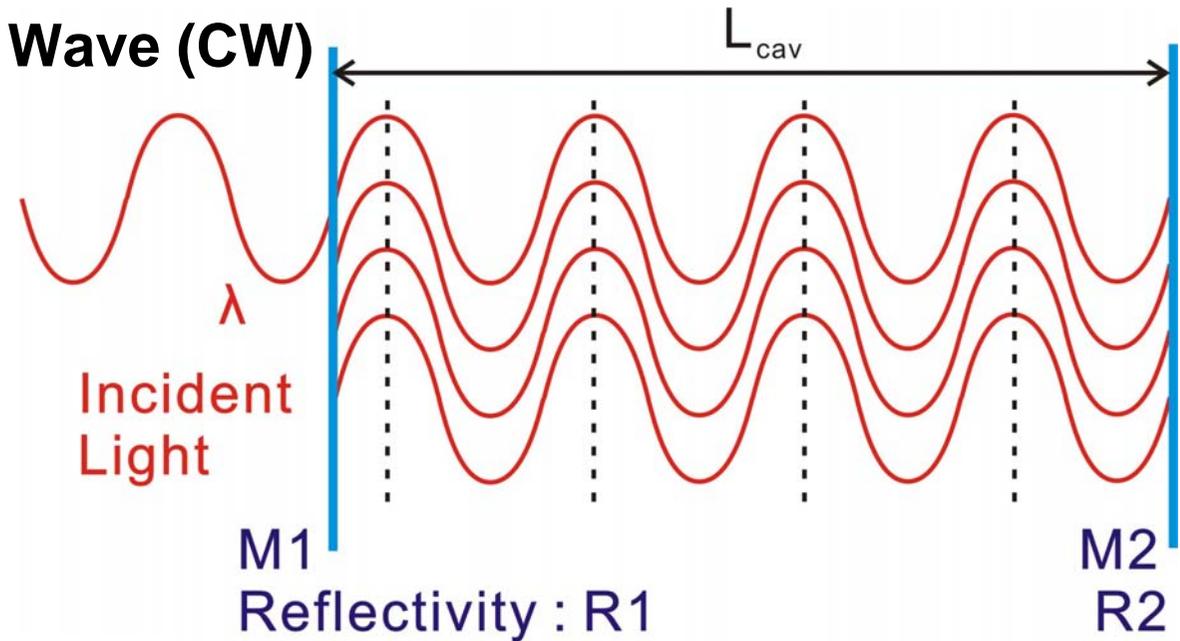
パルスレーザー  
共振器の周期が  
パルス繰り返しの  
整数倍になること

# Cavity Resonance Condition

## Resonance of Single Frequency Wave (CW)

$$L_{cav} = n\lambda / 2$$

パルスレーザー  
共振器の共振器長が  
レーザー半波長の  
整数倍となること

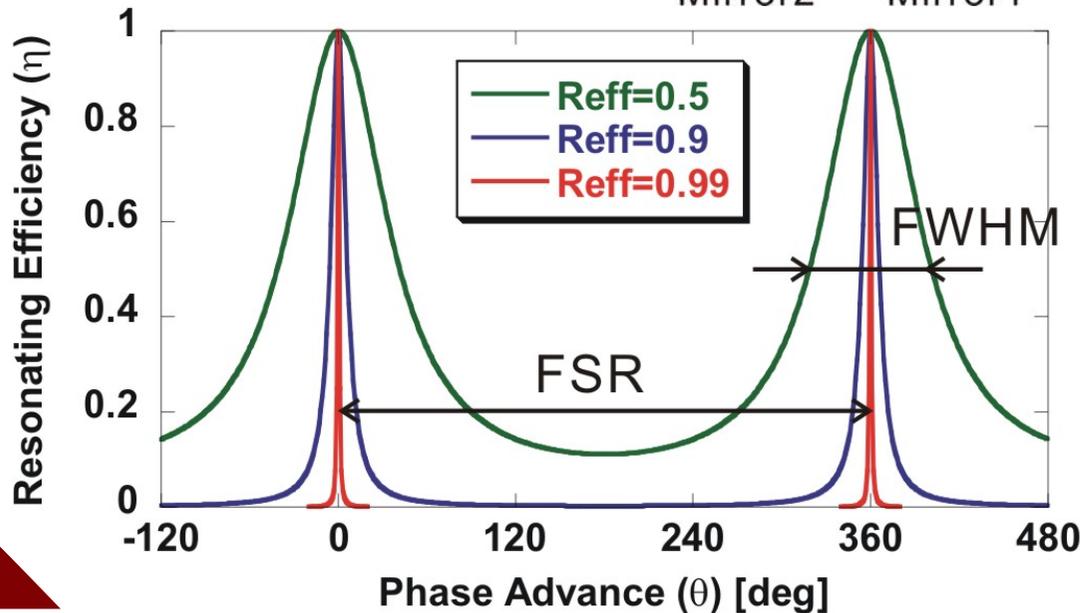
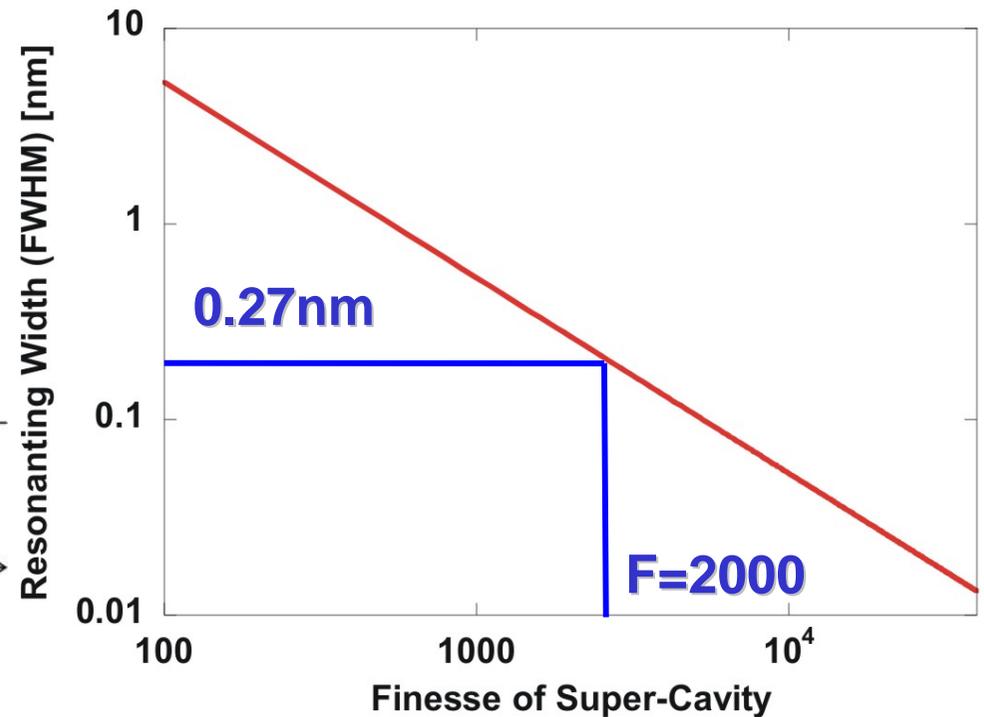
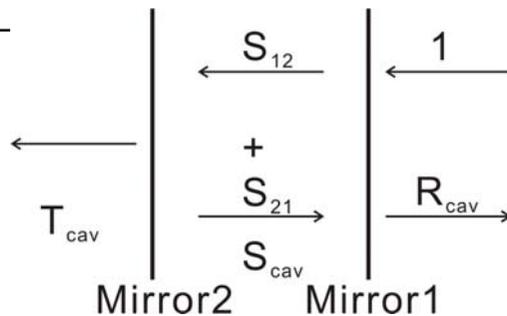


# Cavity Resonance Condition

## Cavity Finesse and Storage Power

$$S_{cav} = \frac{F}{\pi} T_{cav} \quad R_{eff} = \sqrt{R_1 R_2}$$

$$F \equiv \frac{FSR}{FWHM} = \frac{\pi \sqrt{R_{eff}}}{1 - R_{eff}}$$



**Finesse=2000で0.27nm (FWHM)**  
以下の精度での共振器長の制御  
が要求される。

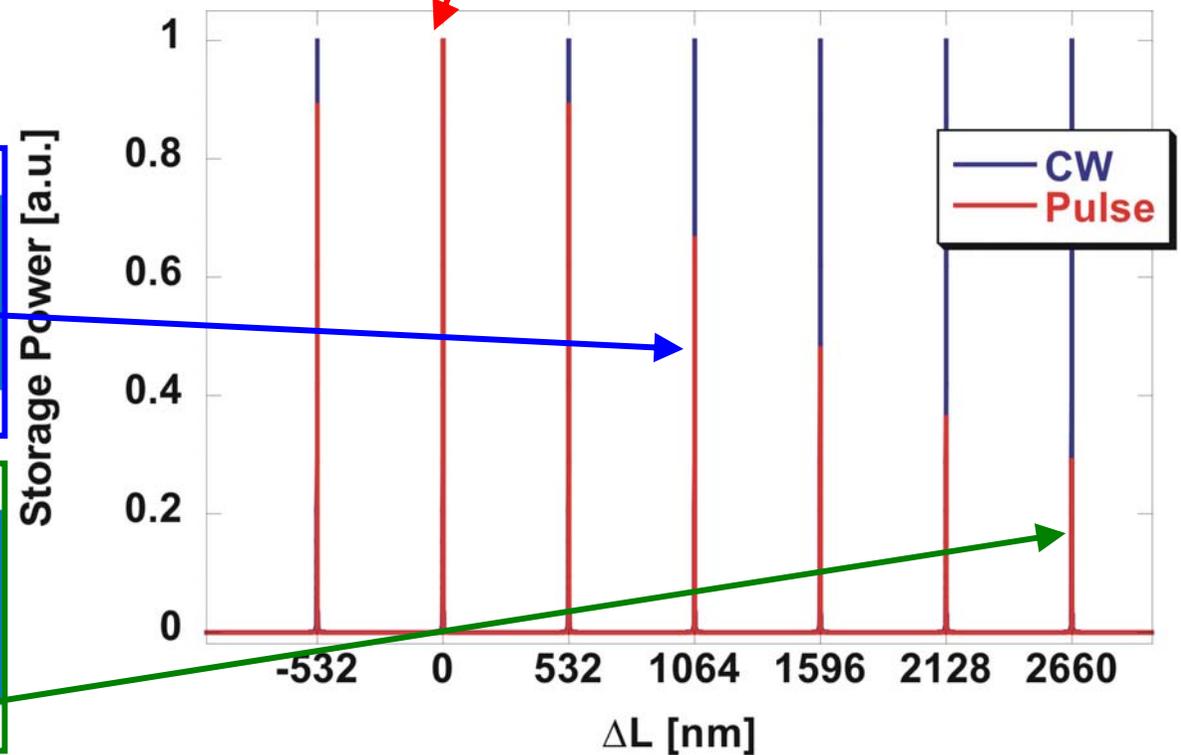
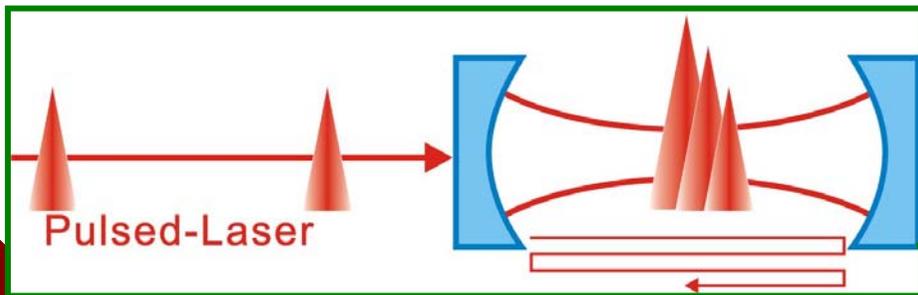
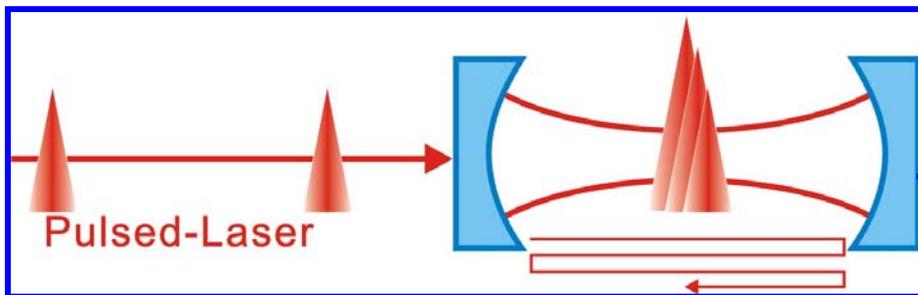
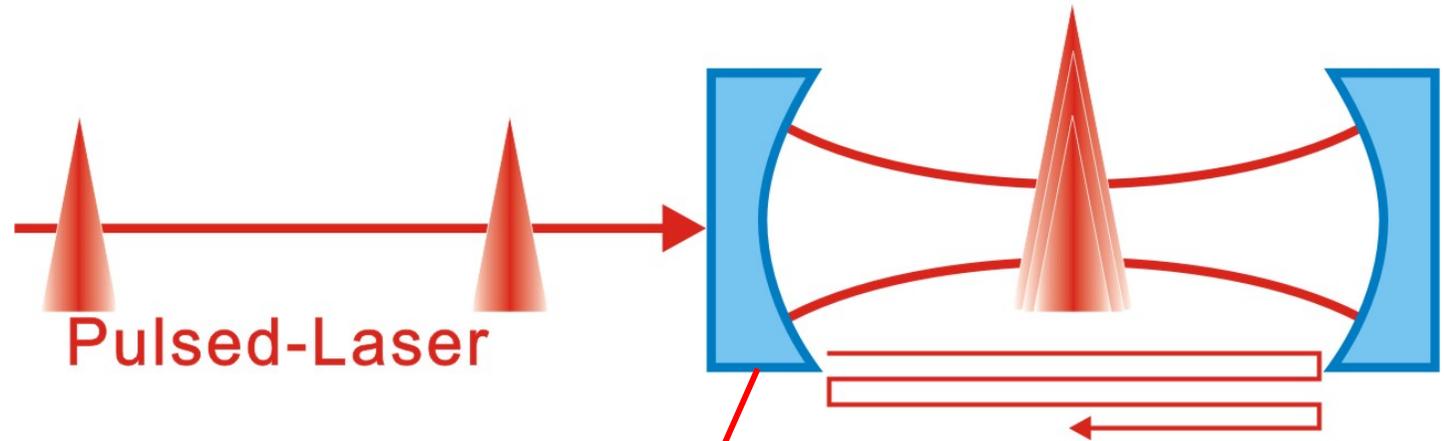


# Cavity Resonance Condition

## Pulsed-Laser Stacking

$$L_{cav} / c = mT_{laser}$$

パルスレーザー  
共振器の周期が  
パルス繰り返しの  
整数倍になること



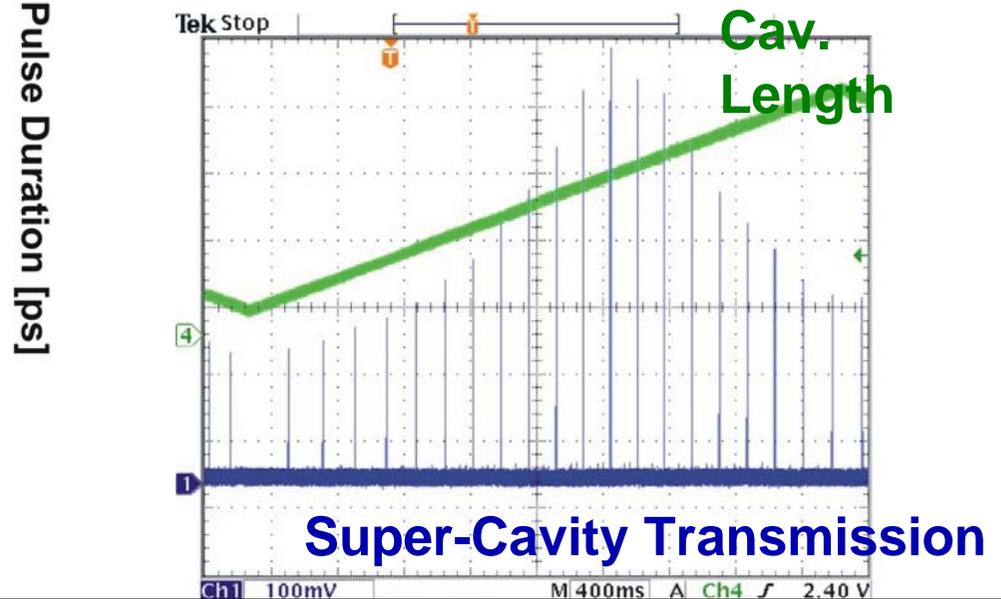
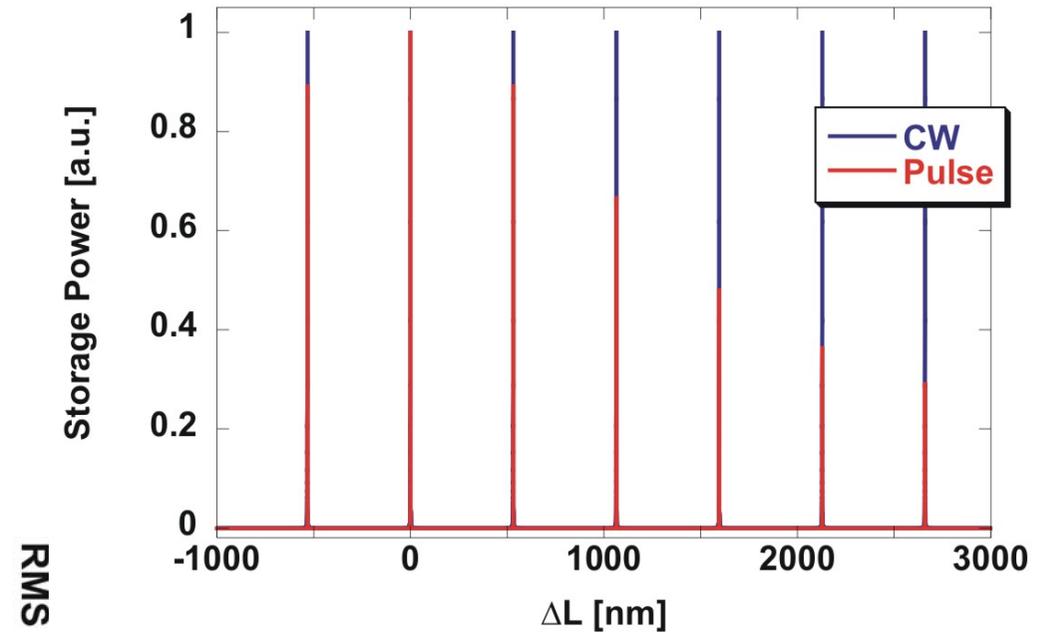
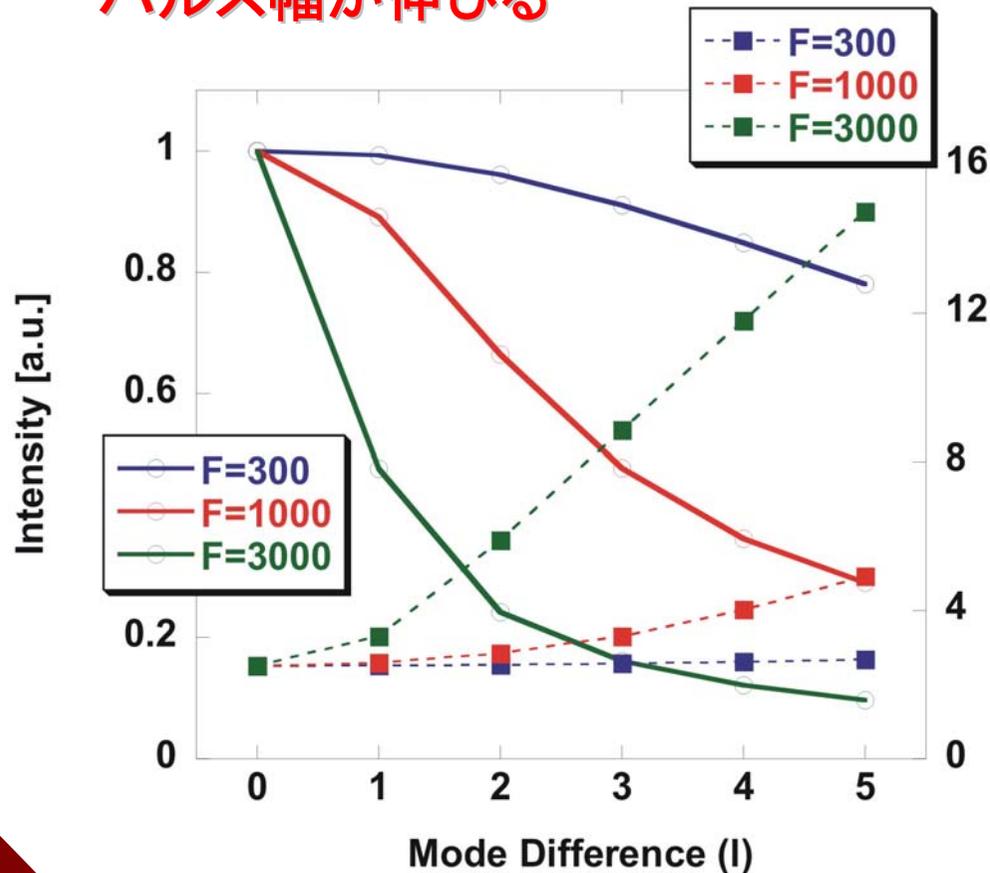
# Pulsed-Laser Stacking

## Principle of Pulsed Laser Stacking

パルスの重なりがずれる

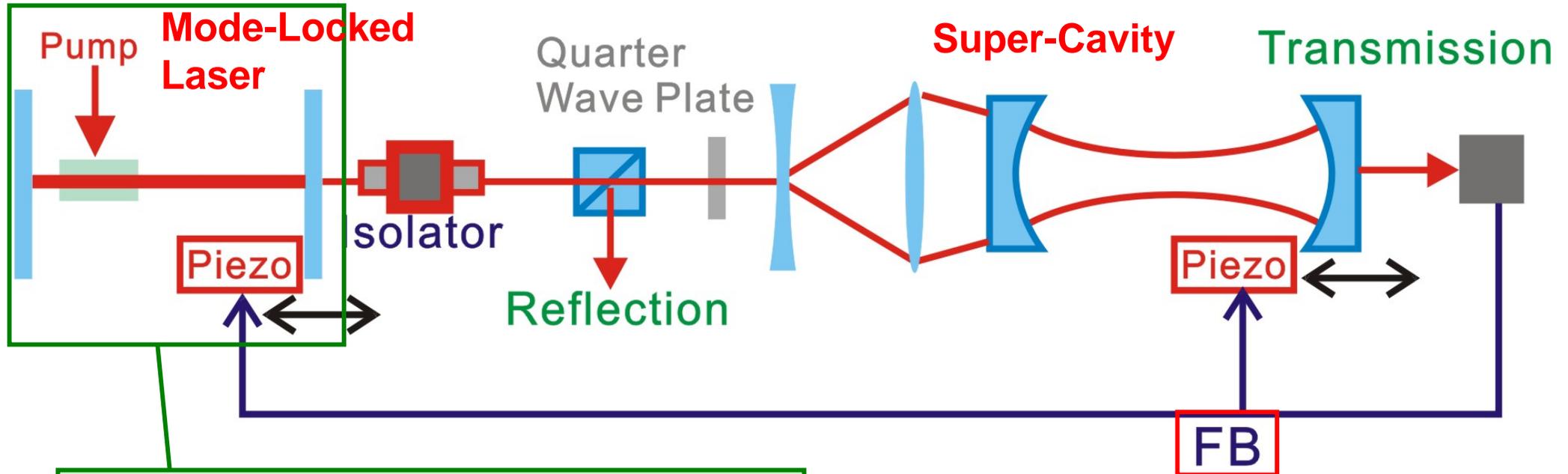
⇒蓄積強度が減少する

パルス幅が伸びる



# Super-Cavity System

## Difficulty of Pulsed Laser Stacking



得られる共振器の増大率

- 共振器システムにおける雑音
- それを制御するPiezoの特性

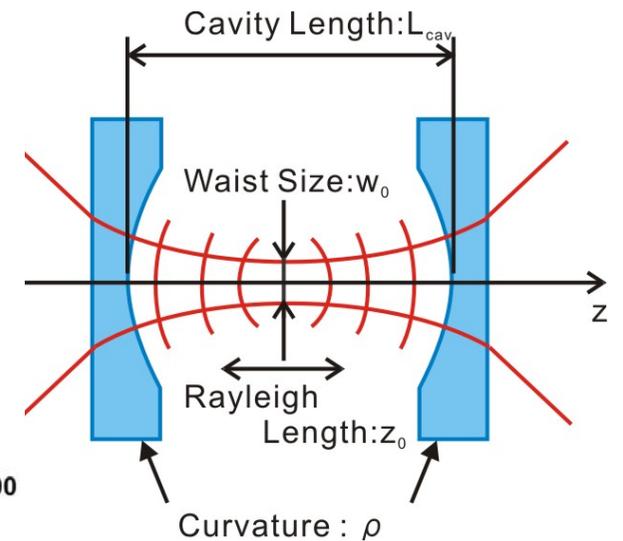
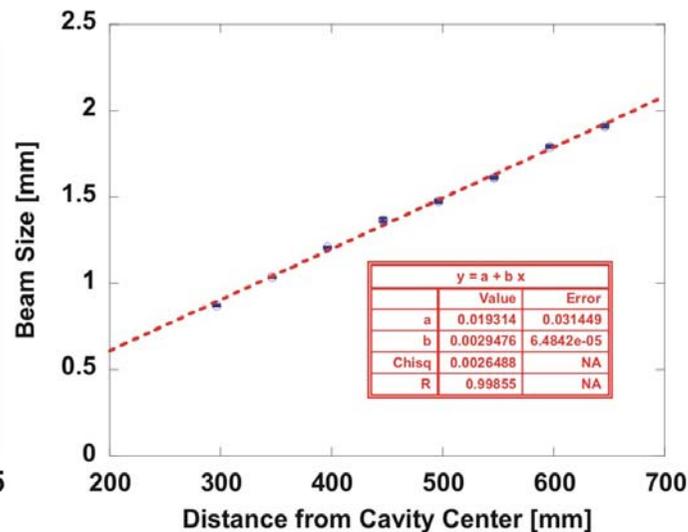
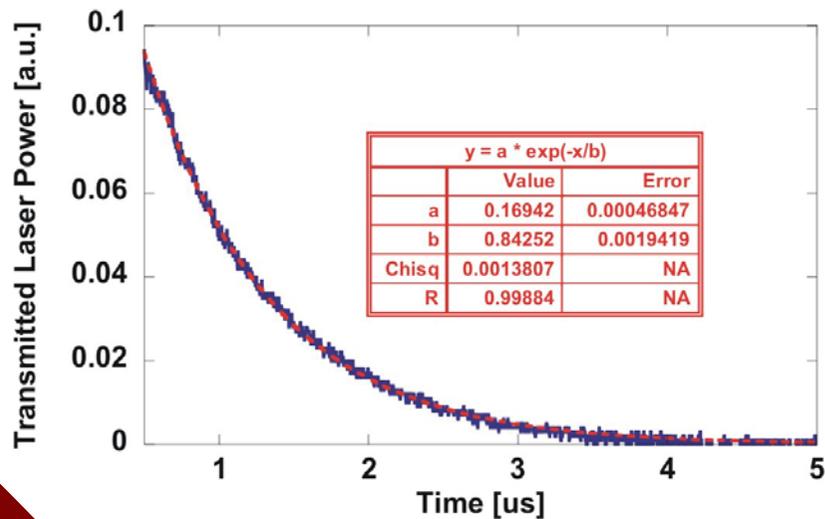
によって制限される

共振器の共鳴を維持するために  
透過光などから得た情報でFB

# Present Status

## Present Status of Super-Cavity

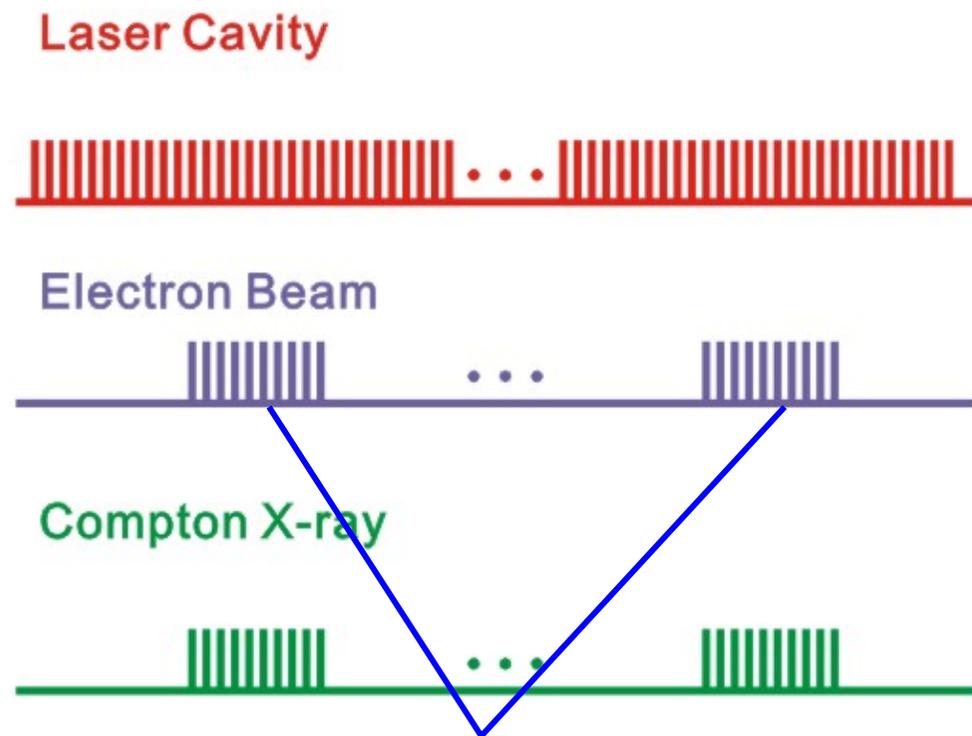
|               |             |                |                            |                |
|---------------|-------------|----------------|----------------------------|----------------|
| Wavelength    | Pulse Rep.  | Incident Power | Finesse                    |                |
| 1064nm        | 357MHz      | 4.05W          | 1889.9                     |                |
| Storage Power | Enhancement | Pulse Energy   | Waist Size                 | Pulse Duration |
| 2.45kW        | 605         | 6.9 $\mu$ J    | 89.2 $\mu$ m (1 $\sigma$ ) | 7psec (FWHM)   |



# Introduction of “Burst Mode”

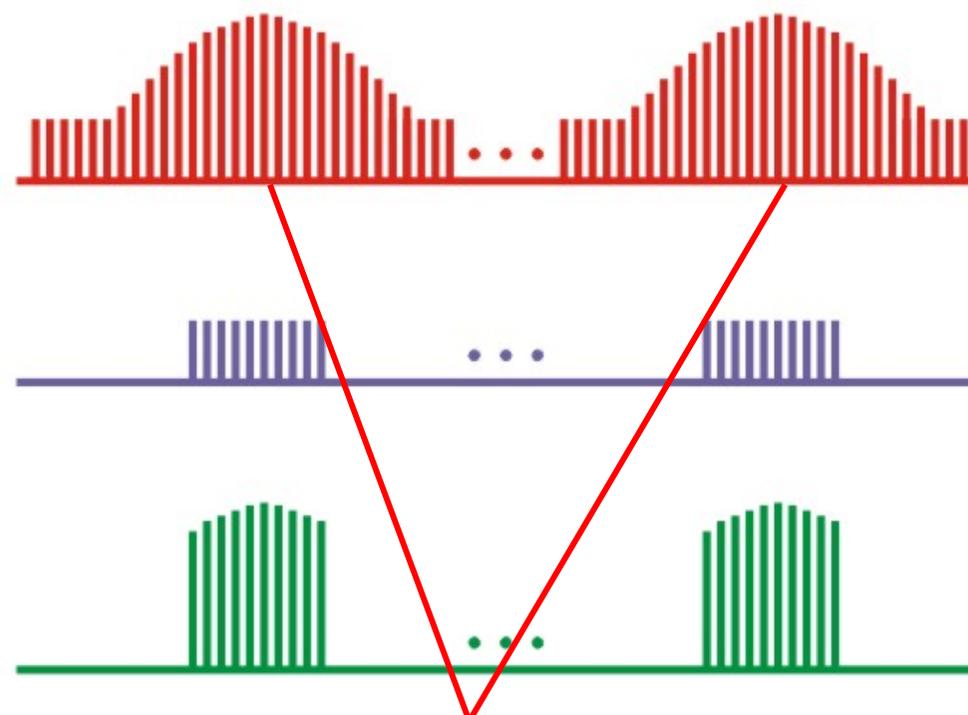
## “Burst Mode” Super-Cavity for Multi-Bunch Electron Beam

### Normal Mode Operation



線形加速器 (LUCX)では  
電子ビームの時間分布は  
**280nsecの時間幅を**  
持つマクロパルス構造

### Burst Mode Operation

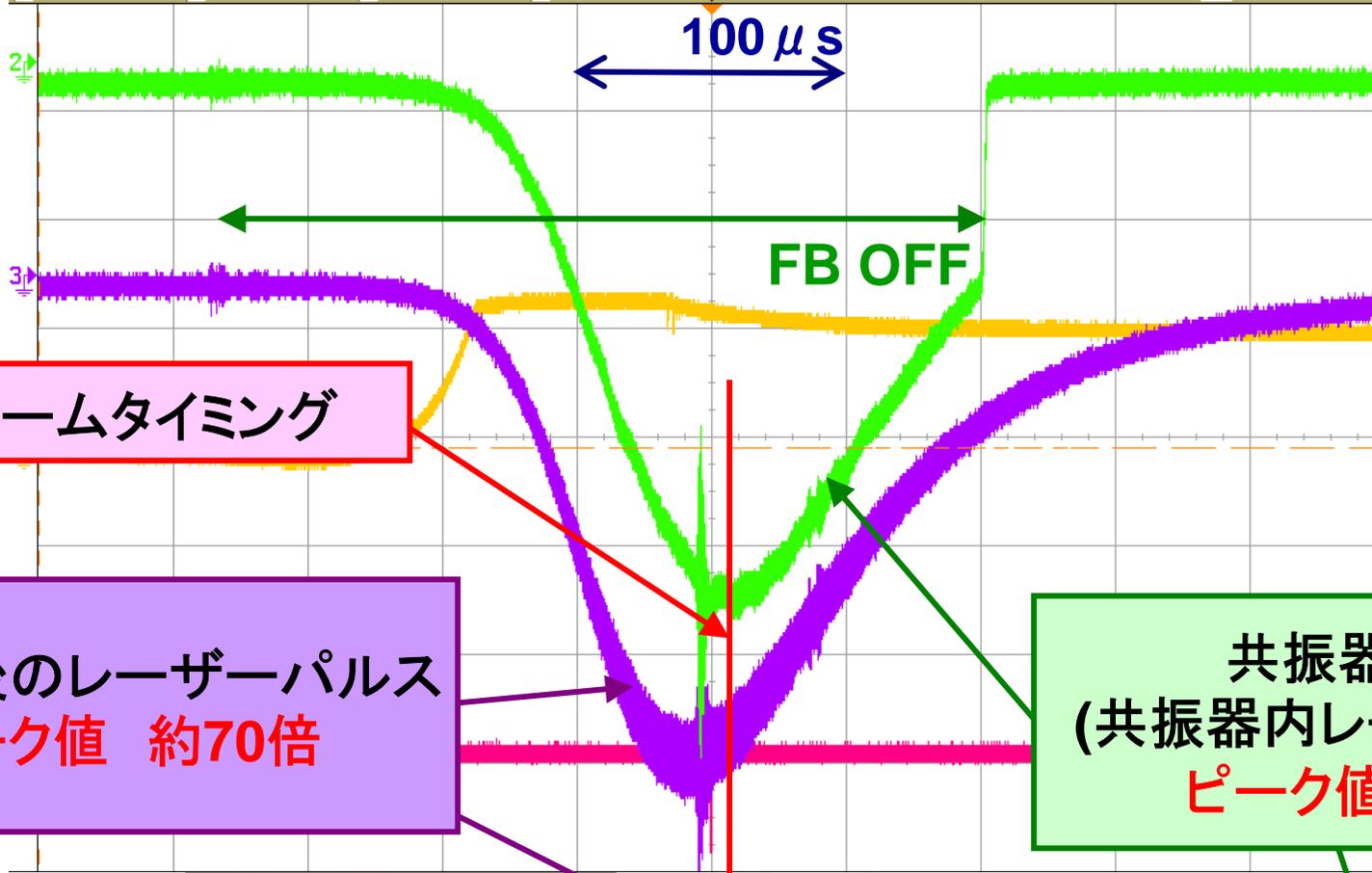


電子ビームタイミングのみをパルス的に  
増幅することによって一時的に  
衝突光子数を増大させることができる  
⇒ **Burst Mode**

# Burst Mode Experiment

## “Burst Mode” Super-Cavity for Multi-Bunch Electron Beam

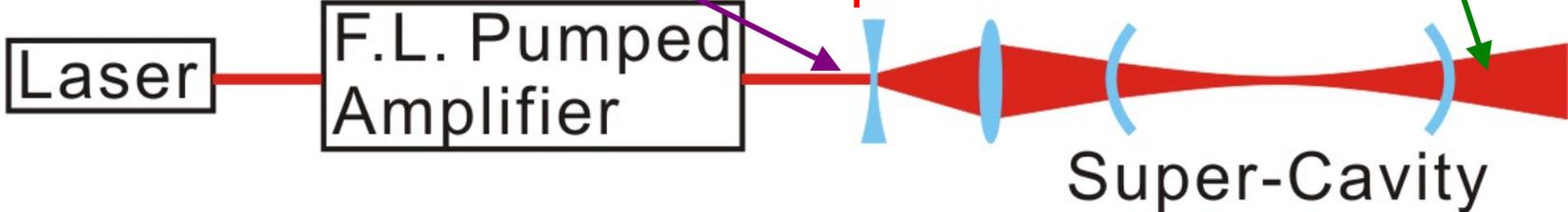
1 1.00V/ 2 10V/ 3 10V/ 4 1.00V/ 0.0s 50.00%/ Stop f 4 -438V



電子ビームタイミング

増幅器後のレーザーパルス  
ピーク値 約70倍

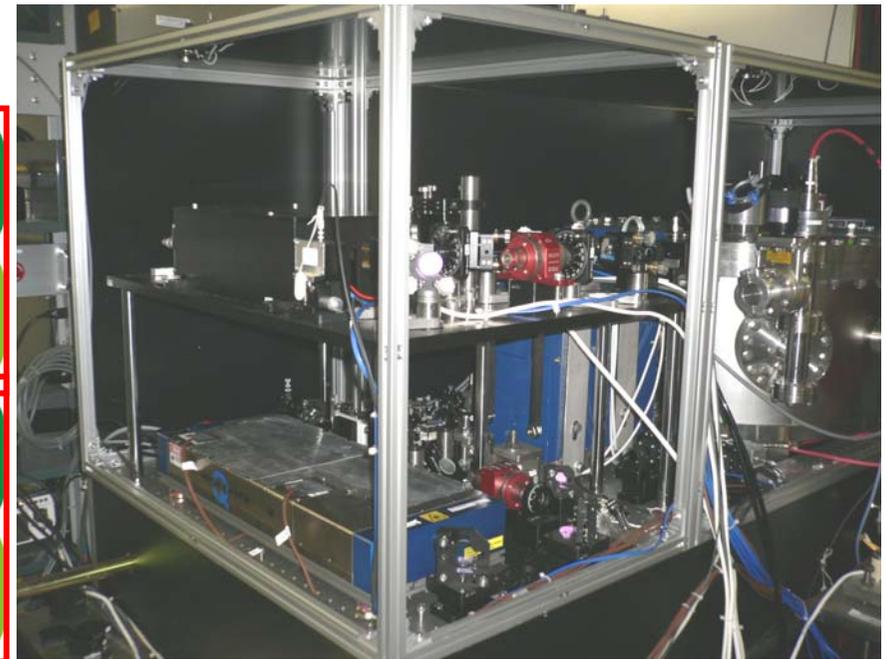
共振器透過光  
(共振器内レーザーパルス)  
ピーク値 約40倍



# Status of Burst Mode Cavity

## Super-Cavity Laser Specification

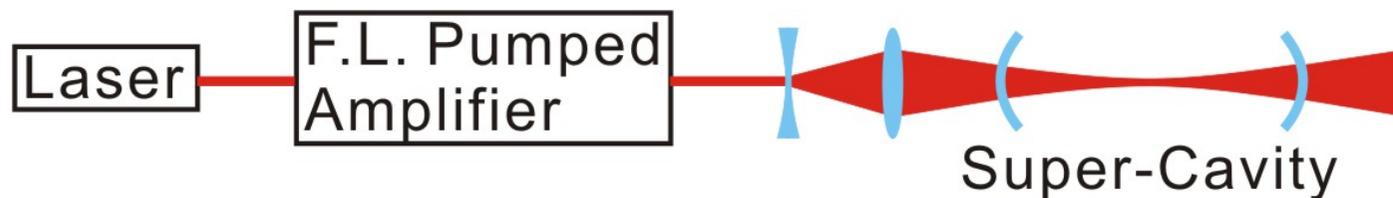
|             |                            |                |
|-------------|----------------------------|----------------|
| Wavelength  | Pulse Rep.                 | Amp. Gain      |
| 1064nm      | 357MHz                     | 70             |
| Finesse     | Peak Power                 | Pulse Energy   |
| 878.5       | 40kW                       | 112 $\mu$ J    |
| Enhancement | Waist Size                 | Pulse Duration |
| 13000       | 30.3 $\mu$ m (1 $\sigma$ ) | 7psec (FWHM)   |



レーザーセットアップ



レーザー増幅器



Burst Mode Cavity概念図

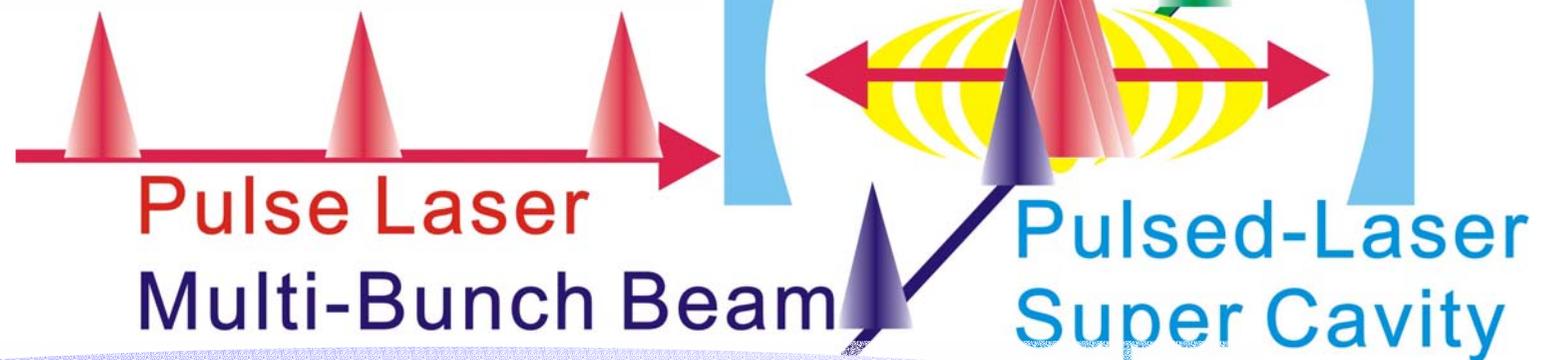
# Contents of This Talk

パルスレーザー光共振器を用いた  
第2世代放射光源と同等のX線源の開発

現在までの実験状況

パルスレーザー光共振器を用いた  
Laser-Compton散乱X線生成の実証

パルスレーザー光共振器の開発  
高増大率共振器の実現  
光共振器の安定運転

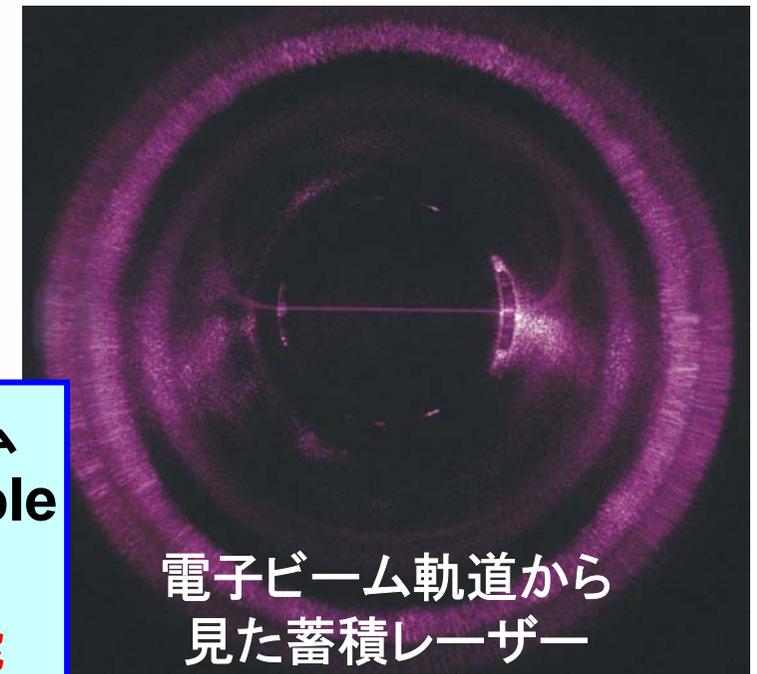
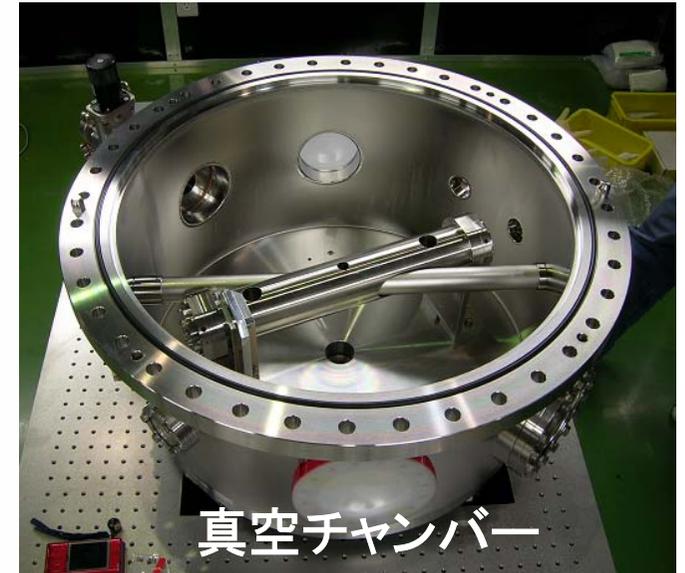
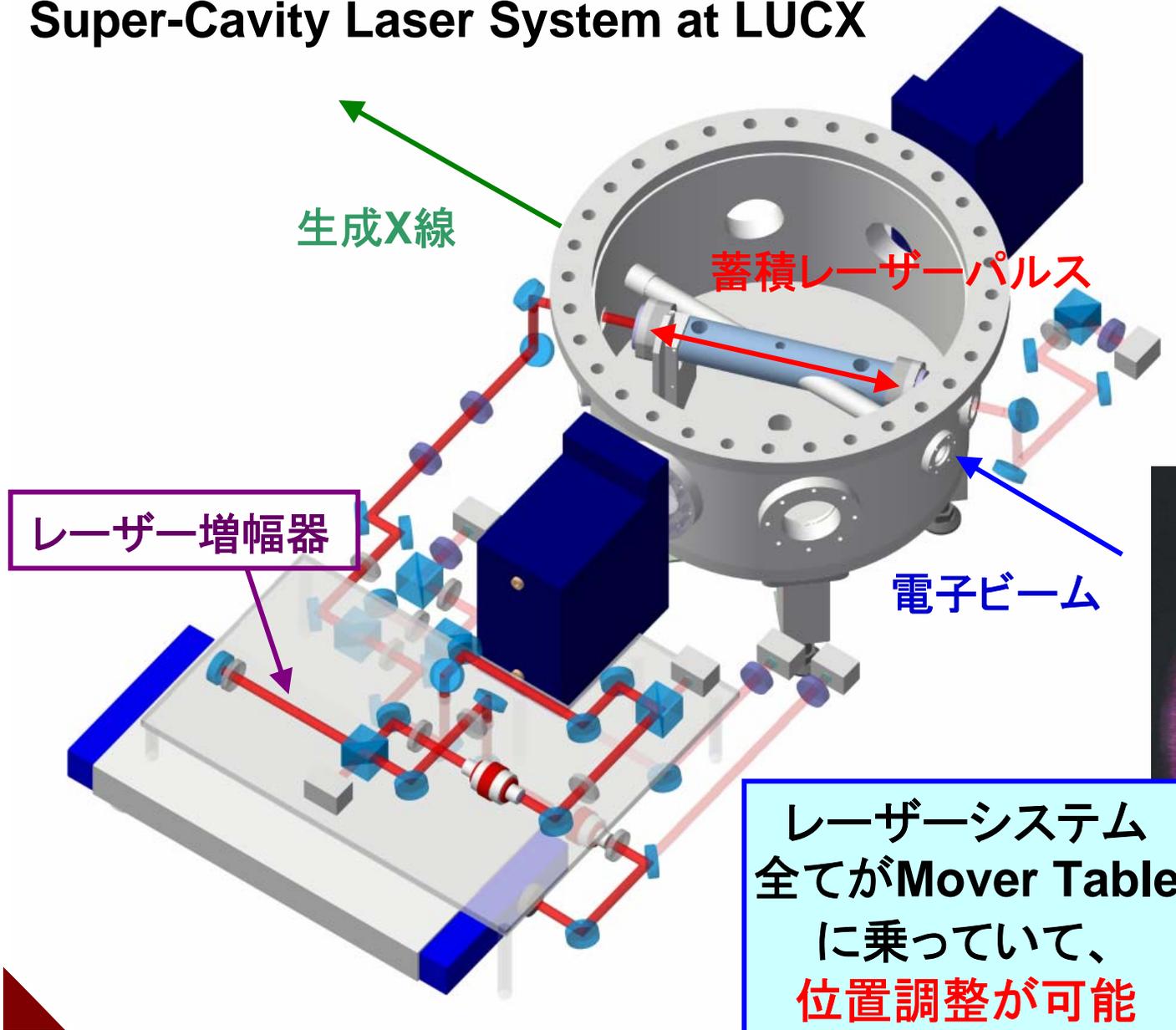


高品質マルチバンチ電子ビーム生成

X線生成システムの開発  
X線検出器の開発  
特に本システムの適したもの

# Super-Cavity System at LUCX

## Super-Cavity Laser System at LUCX



# Particle Specification at Collision Point

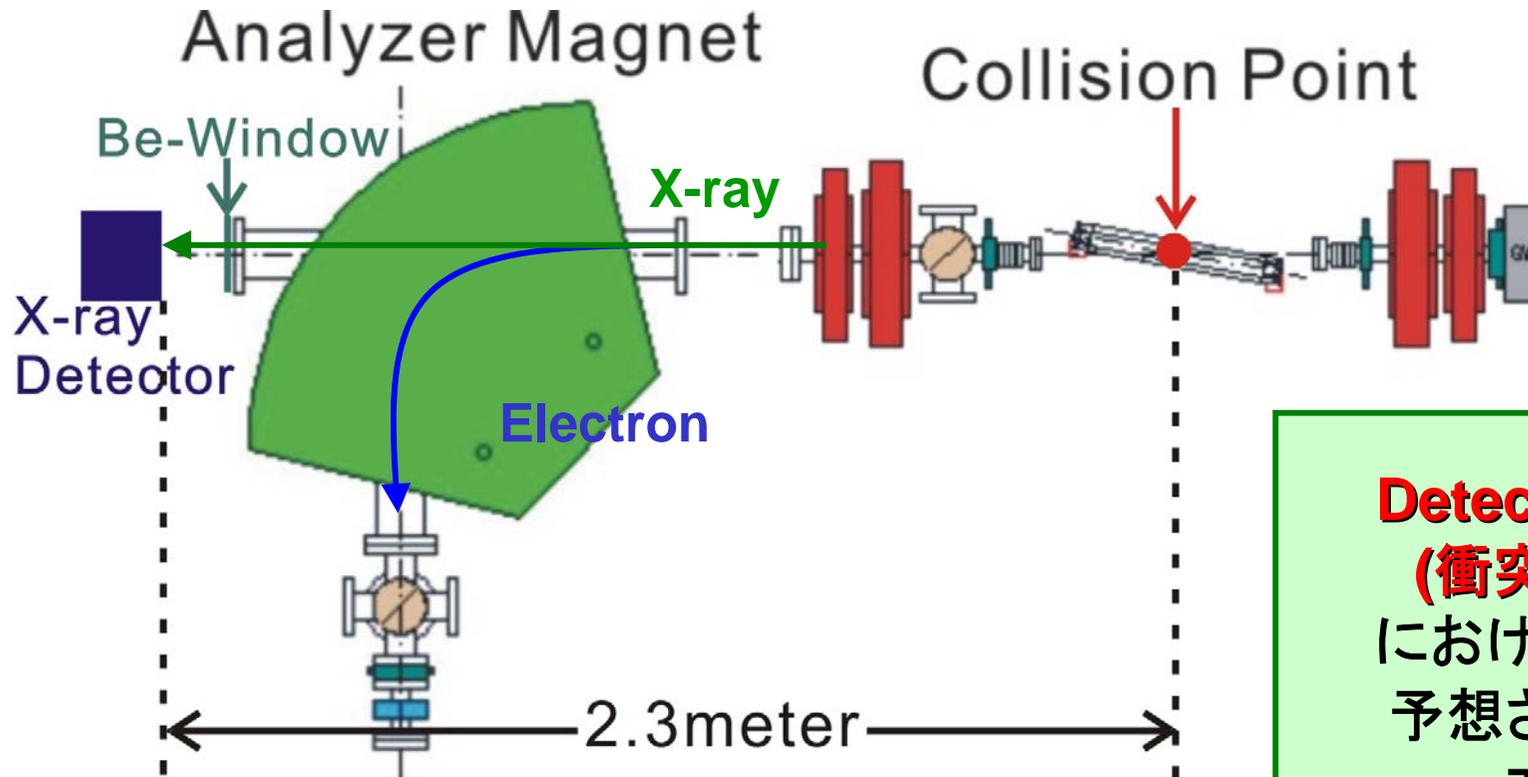
## Laser and Electron Beam Specification at the Collision Point

| Electron Beam    |                   | Colliding Angle        | 20deg       | Laser Pulse                |                |
|------------------|-------------------|------------------------|-------------|----------------------------|----------------|
| Energy           | Energy Spread     | Energy Difference      | Wavelength  | Pulse Rep.                 | Amp. Gain      |
| 32-44MeV         | 0.13% (rms)       | 0.5% (rms)             | 1064nm      | 357MHz                     | 70             |
| Bunch Charge     | Bunch Length      | Beam Size (Hol./Ver.)  | Finesse     | Peak Power                 | Pulse Energy   |
| 0.5nC/Bunch      | 5psec (rms)       | 200 $\mu$ m/60 $\mu$ m | 878.5       | 40kW                       | 112 $\mu$ J    |
| Bunch Spacing    | Num. Bunch /Train | RF Repetition          | Enhancement | Waist Size                 | Pulse Duration |
| 2.8nsec (357MHz) | 5-100             | 3.13-12.5Hz            | 13000       | 30.3 $\mu$ m (1 $\sigma$ ) | 7psec (FWHM)   |



# X-ray Detector Location

## Location of X-ray Detector at LUCX



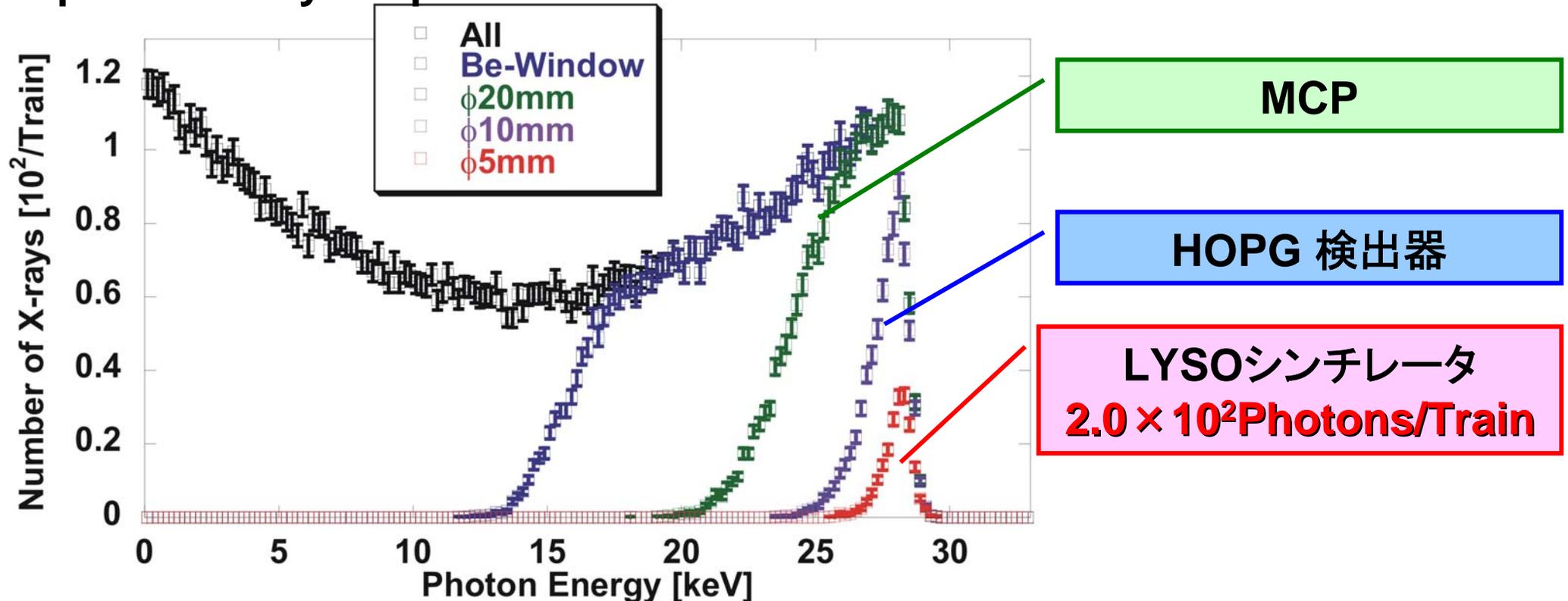
衝突点から約2mの位置に設置された  
**Be窓 (35mm × 45mm)**によって  
X線は**大気中に取り出される**  
⇒その後Collimatorなどで切られる

**Detectorの設置位置**  
**(衝突点から2.3m)**  
におけるX線について  
予想される光子数や  
エネルギー

LCSのシミュレータ  
CAINを用いて計算し、  
測定と比較する

# Expected X-ray at Detector Position

## Expected X-ray Properties at LUCX



目的別に**3種類**のX線検出器を用意している

1. LYSO シンチレータ  $\Rightarrow$  生成X線数の測定
2. MCP (Micro-Channel Plate)  $\Rightarrow$  Pulse-by-Pulseの測定
3. HOPGを用いた検出器  $\Rightarrow$  X線エネルギーの測定

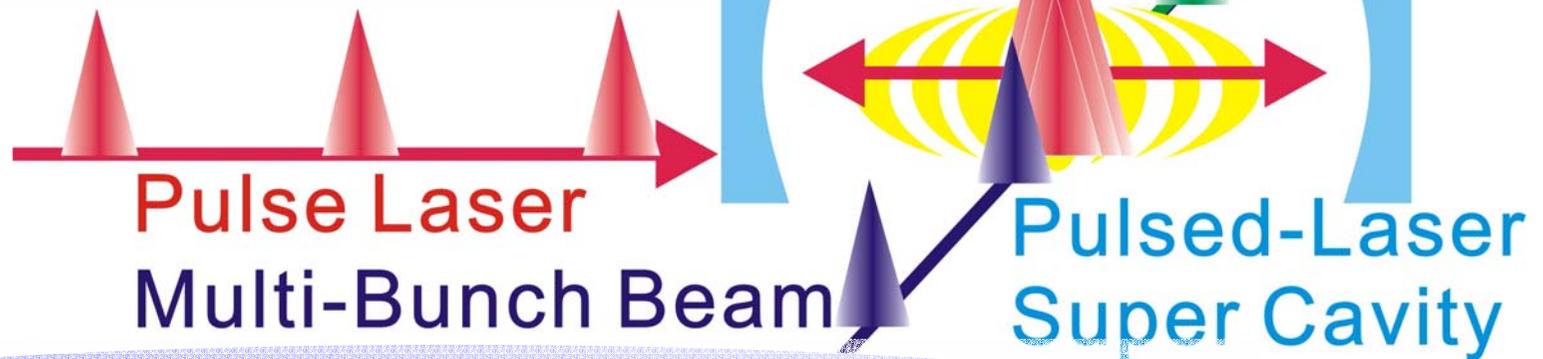
# Contents of This Talk

パルスレーザー光共振器を用いた  
第2世代放射光源と同等のX線源の開発

現在までの実験状況  
パルスレーザー光共振器を用いた  
Laser-Compton散乱X線生成の実証

パルスレーザー光共振器の開発  
高増大率共振器の実現  
光共振器の安定運転

X線生成システムの開発  
X線検出器の開発  
特に本システムの適したもの



高品質マルチバンチ電子ビーム生成

# Multi-Pulse X-ray Generation

## X-ray Detection

**by LYSO Scintillation Detector**

>Number of X-rays Measurement

known detection efficiency

**by Micro-Channel Plate**

>Pulse-by-Pulse Measurement

unknown efficiency but enough temporal resolution

**by HOPG (Bragg Reflector) Based Spectrometer**

>X-ray Energy Measurement

Bragg reflection provides X-ray energy

# Multi-Pulse X-ray Generation

## X-ray Detection

**by LYSO Scintillation Detector**

**>Number of X-rays Measurement**

**known detection efficiency**

**by Micro-Channel Plate**

**>Pulse-by-Pulse Measurement**

**unknown efficiency but enough temporal resolution**

**by HOPG (Bragg Reflector) Based Spectrometer**

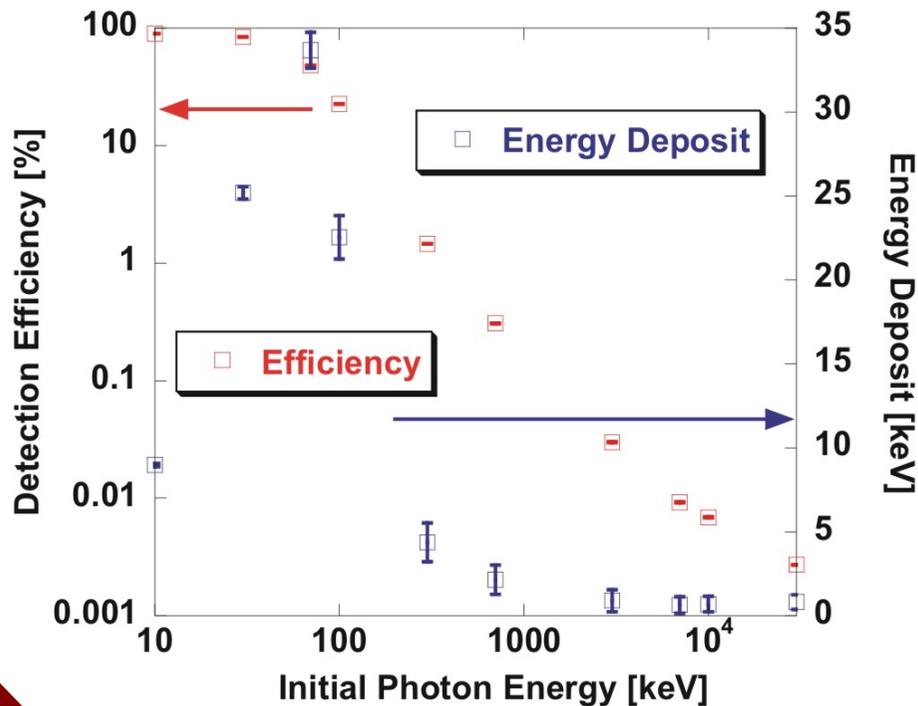
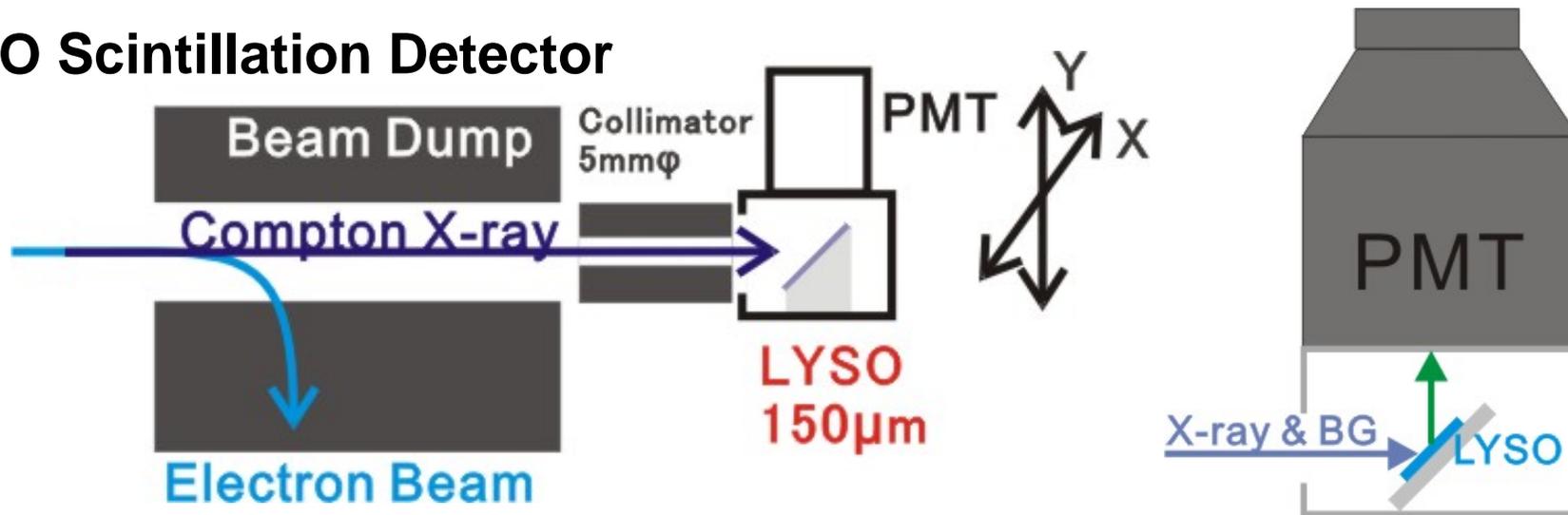
**>X-ray Energy Measurement**

**Bragg reflection provides X-ray energy**



# LYSO Scintillation Detector

## LYSO Scintillation Detector



**Calibration (線源Am-241 (59.5keV))**  
**信号とLEDによるPMT Gain Calibration)**

$$E.D.[keV] = \frac{Count}{A} V_{PMT}[kV]^{-\alpha}$$

$$A = 4.022 \times 10^{-2} \pm 4.55 \times 10^{-4} [Count / keV]$$

$$\alpha = 7.5221 \pm 0.0202$$



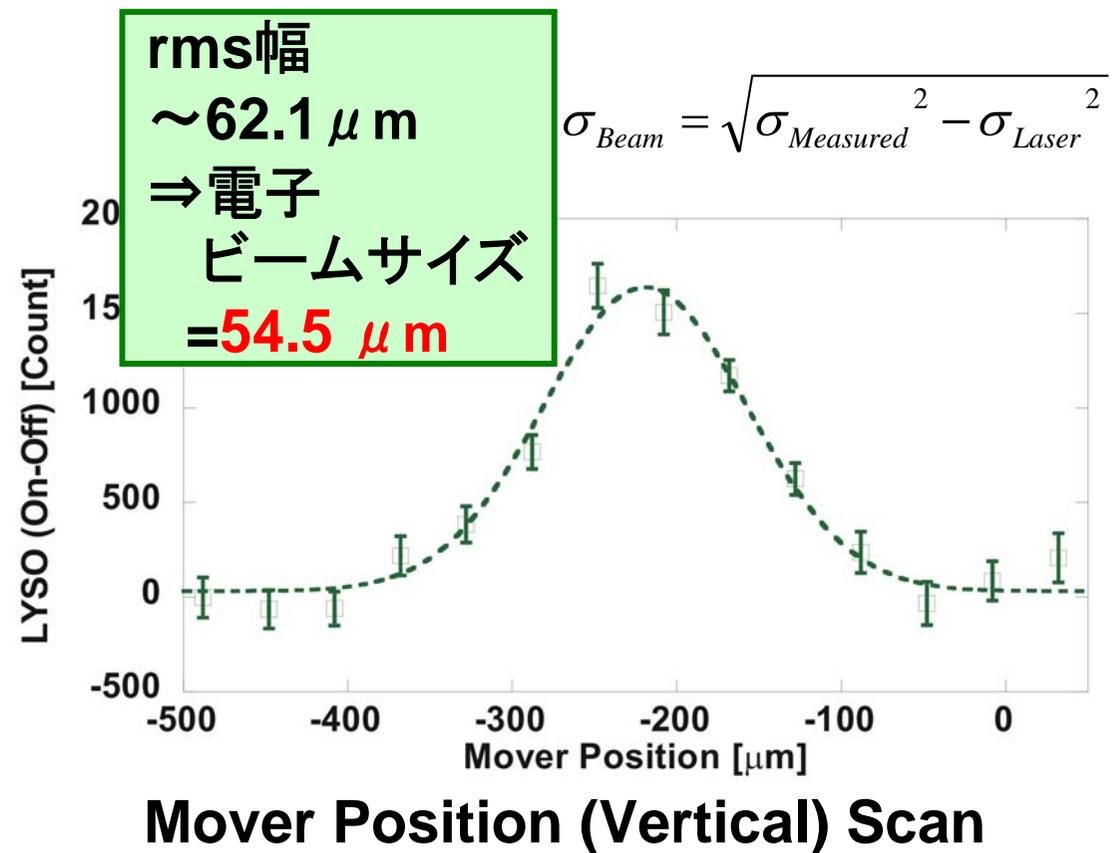
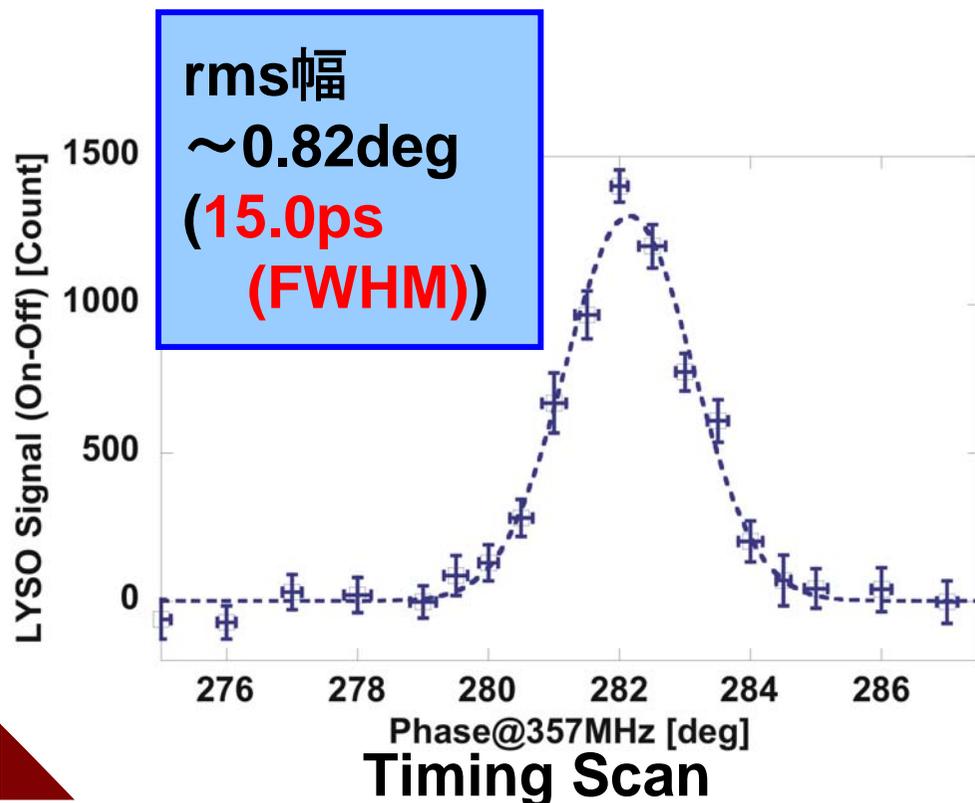
# First X-ray Detection

## X-ray Detection by LYSO Scintillation Detector

Timing Scan : LaserのReferenceの位相をずらして衝突タイミングをScan

Mover Position (Vertical) Scan : Laserの乗っているTableの位置Scan

⇒衝突位置はScreenで合わせているため、まずは衝突タイミングを捜す



# Number of X-rays

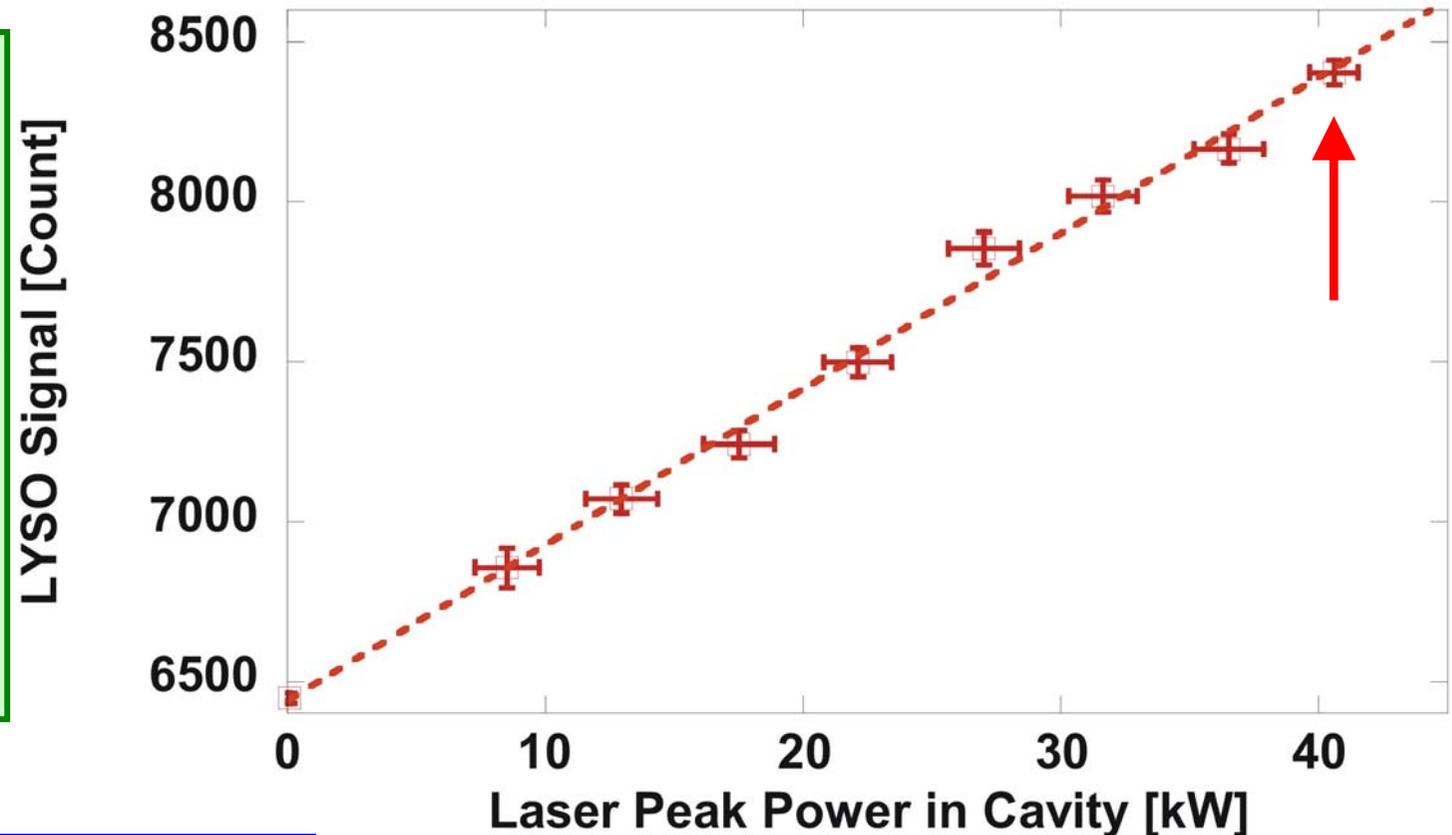
## Number of Produced X-ray Photons Measurement

Laser Powerに対する  
X線数の相関を測定

⇒線形に変化

…Laser-Compton散乱  
の予想する挙動と同じ

LYSO Detector  
S/N ~ 1/4



1957Count@40kW  
⇒164Photons/Train  
/1.25mrad

… $0.93 \times 10^4$ Photons/Train

CAIN及びGEANTを用いた  
予想値は201Photons/Train

⇒ほぼ一致する

# Multi-Pulse X-ray Generation

## X-ray Detection

by LYSO Scintillation Detector

>Number of X-rays Measurement

known detection efficiency

by **Micro-Channel Plate**

>**Pulse-by-Pulse Measurement**

**unknown efficiency but enough temporal resolution**

by HOPG (Bragg Reflector) Based Spectrometer

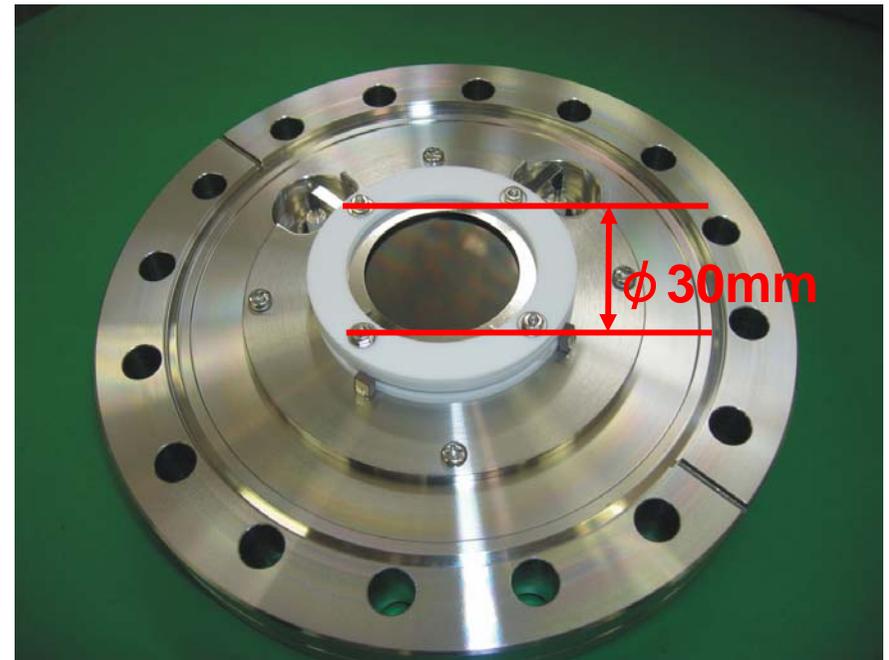
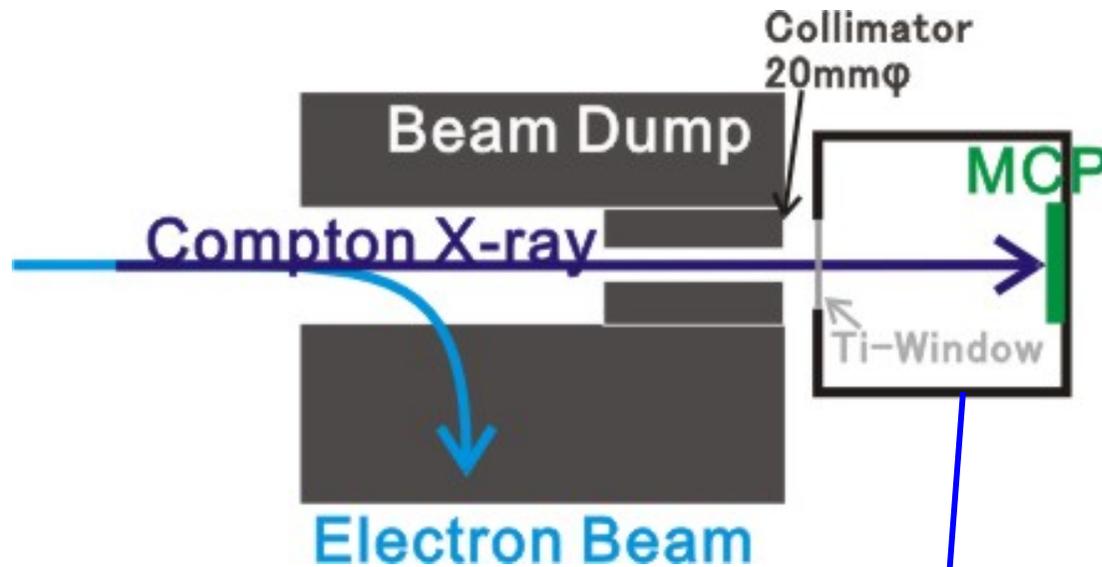
>X-ray Energy Measurement

Bragg reflection provides X-ray energy

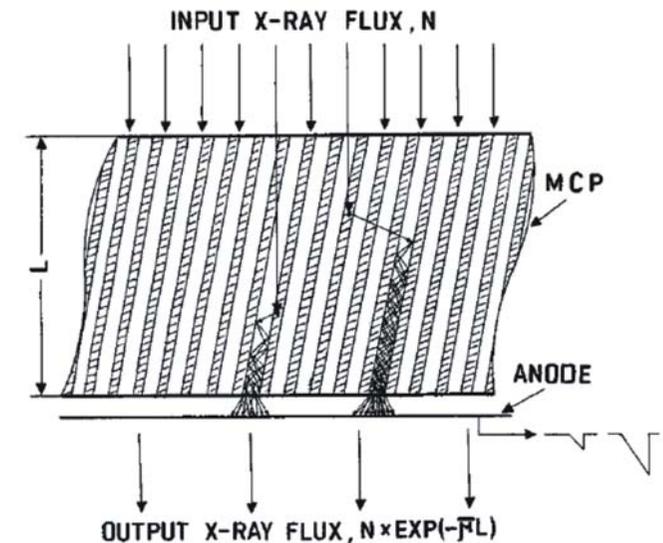


# MCP X-ray Detector

## Micro-Channel Plate Detector

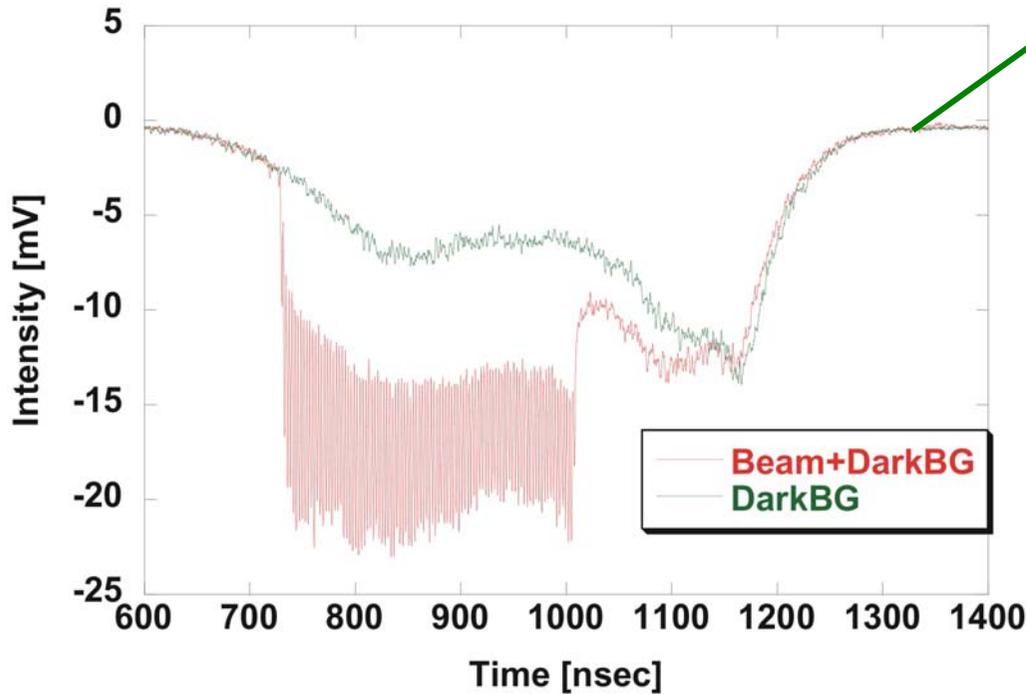


MCPは動作環境として高真空が求められるため、**薄いチタン窓を付属したMCP用真空容器を用意した**  
⇒他の検出器との併用のため



# MCP Waveforms

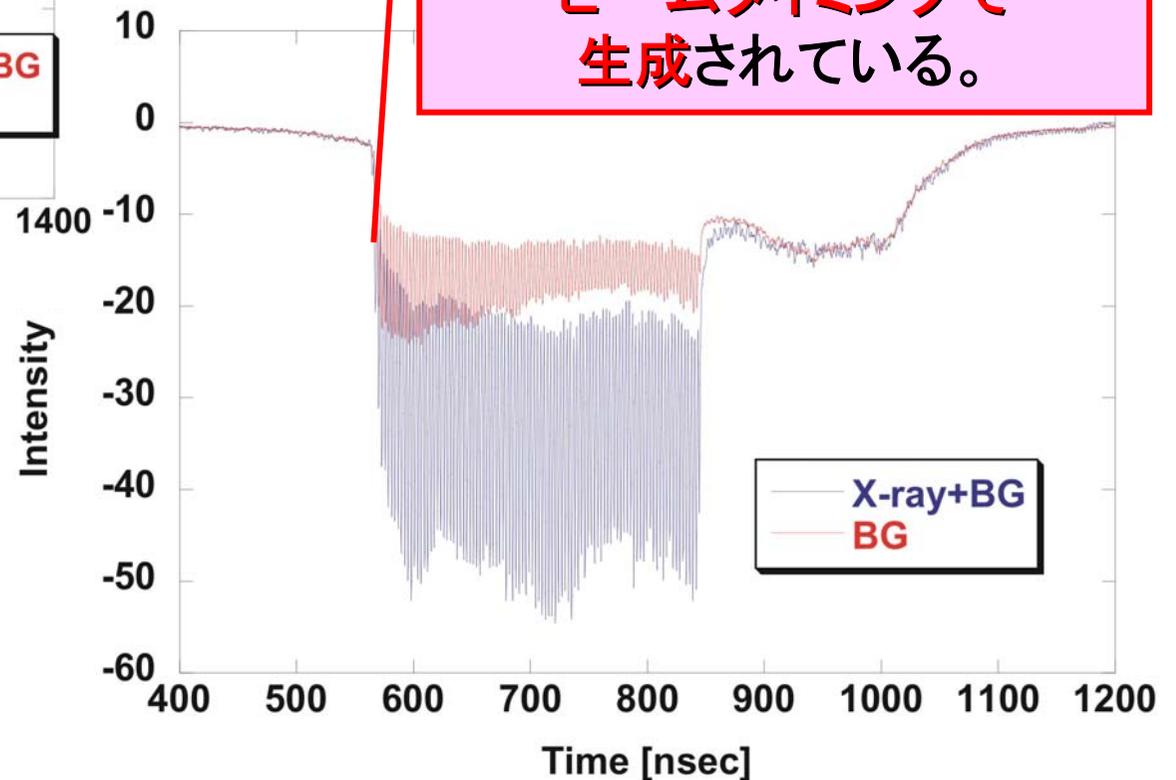
## Waveform from Micro-Channel Plate



Dark起因のBGの上に  
Beam起因の短い時間での  
BGが乗っている

生波形で確認しても  
明らかに大きな信号が  
ビームタイミングで  
生成されている。

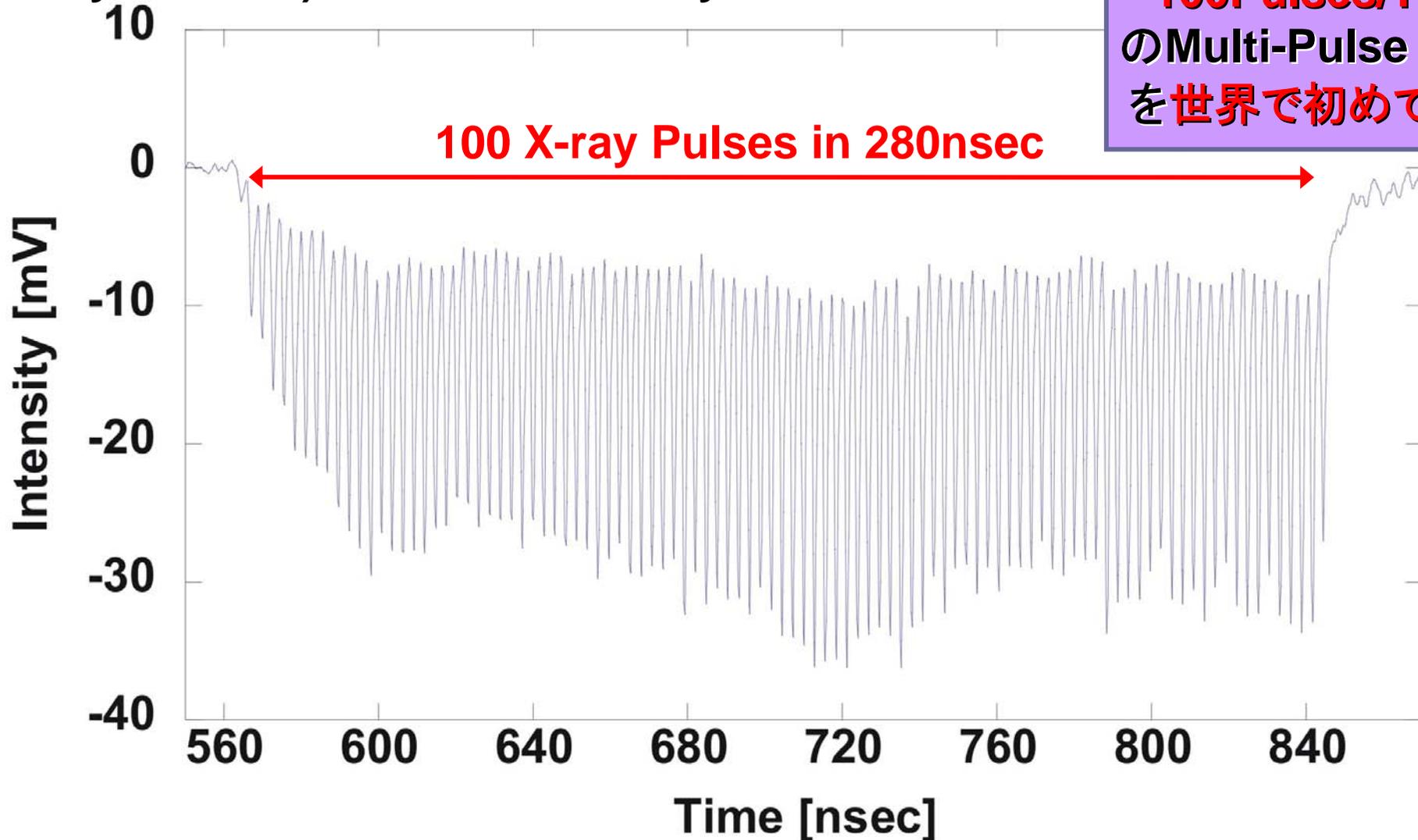
MCPからの信号を  
オシロスコープで測定  
↑ Back Ground  
BG and X-ray Signal→



# Multi-Pulse X-ray Detection

## X-ray Waveform Detected by Micro-Channel Plate

(X-ray+BG波形)-BG波形によりX-ray波形を出力



**100Pulses/Train**  
のMulti-Pulse X-ray  
を世界で初めて確認

# Multi-Pulse X-ray Generation

## X-ray Detection

**by LYSO Scintillation Detector**

>Number of X-rays Measurement

known detection efficiency

**by Micro-Channel Plate**

>Pulse-by-Pulse Measurement

unknown efficiency but enough temporal resolution

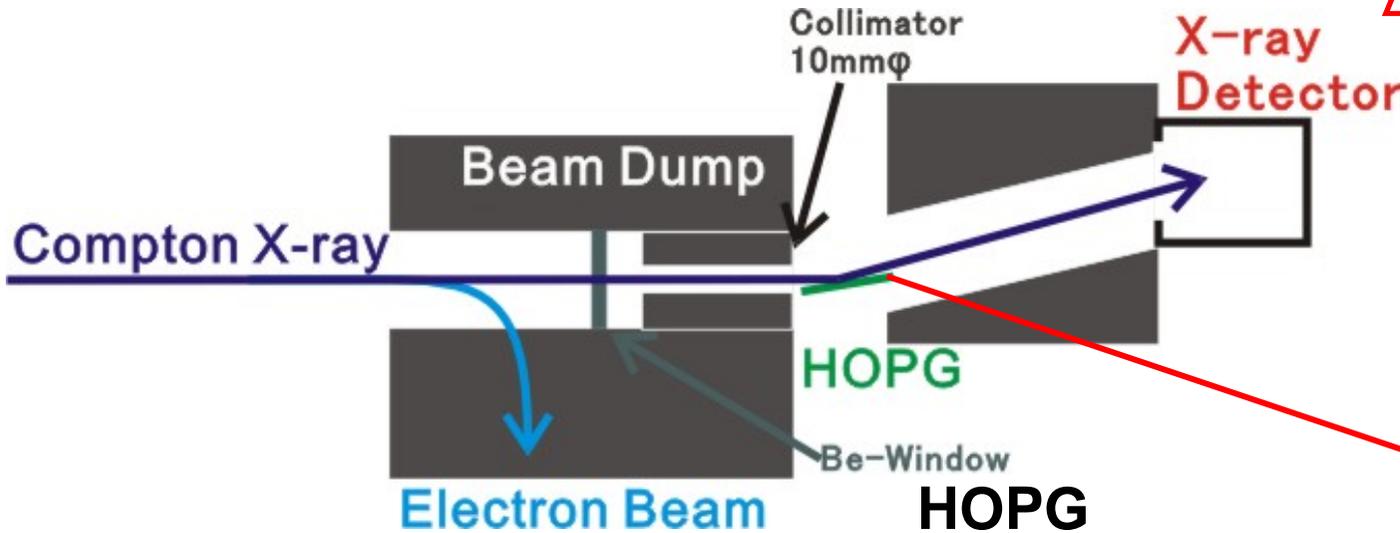
**by HOPG (Bragg Reflector) Based Spectrometer**

>X-ray Energy Measurement

**Bragg reflection provides X-ray energy**

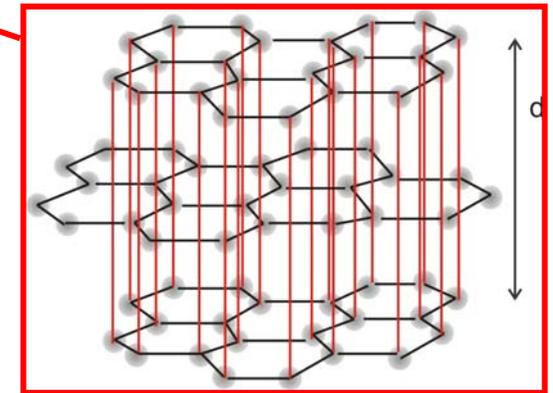
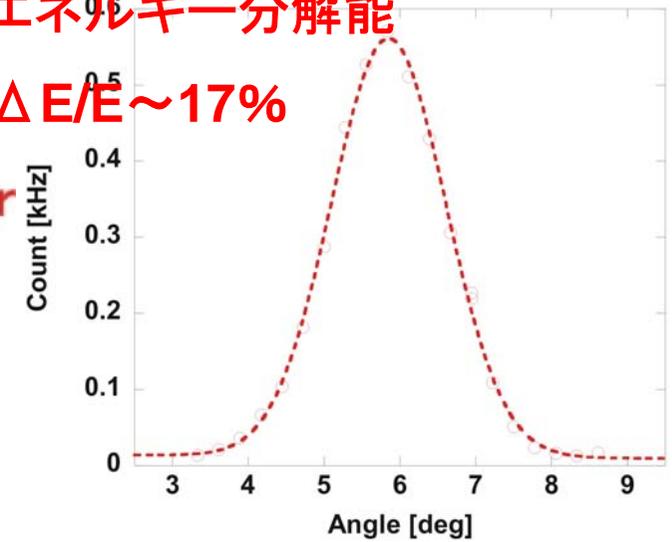
# HOPG Based X-ray Spectrometer

## HOPG Bragg Reflector Based Detector



エネルギー分解能

$\Delta E/E \sim 17\%$



**HOPG**  
(Highly Oriented  
Pyrolytic Graphite)

Bragg's Law

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

|                        | HOPG                      | Si(111)                                 |
|------------------------|---------------------------|---|
| Interlayer Distance    | 3.354-3.358 $\text{\AA}$  | 3.135 $\text{\AA}$                      |
| Density                | 2.24-2.25 $\text{g/cm}^3$ | 2.33 $\text{g/cm}^3$                    |
| Reflection Coefficient | 15-50 %                   | 90 %                                    |
| Mosaic Spread          | 0.1-3 deg                 | 7.395 sec (= $2.05 \times 10^{-3}$ deg) |

加速器バックグラウンド  
 ・高エネルギー  
 ・エネルギー広がり大  
 ⇒ Bragg結晶を用いて  
**信号とバックグラウンドを分離**

さらに、Bragg Angleより  
 エネルギーの測定が可能

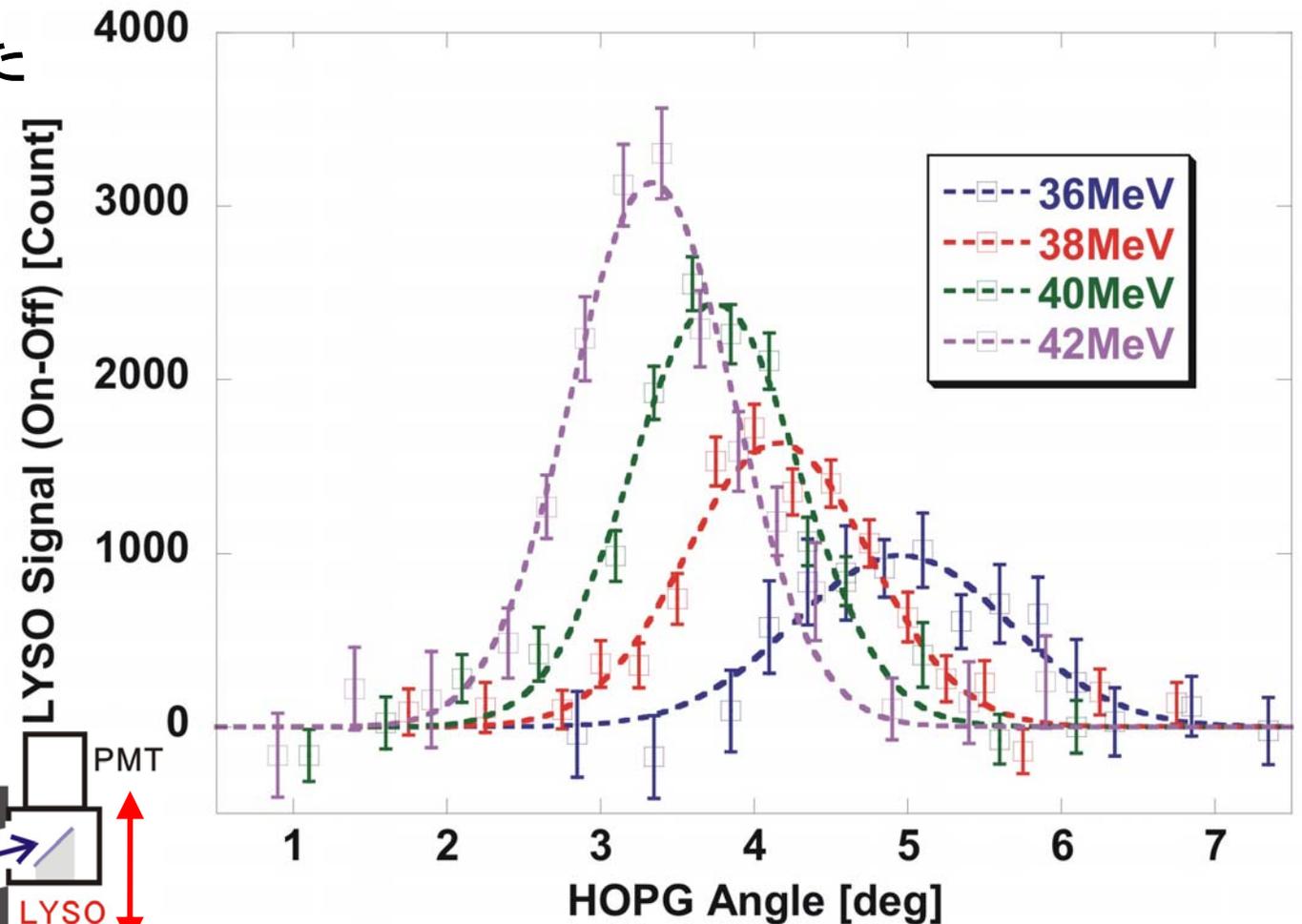
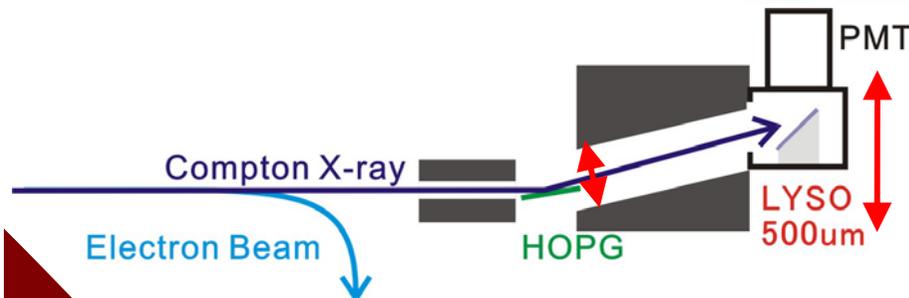
# Rocking Curve Measurement

## Rocking Curve Measurement at Beam Energy 36/38/40/42 MeV

ビームエネルギーを36・38・40・42MeVと変えて、**HOPG反射板の反射角度からX線のエネルギーを測定した**

### Rocking Curve

⇒ **Beam Energyが**  
**大きいほど**  
**Bragg角が**  
**小さくなっている**



# X-ray Energy Measurement

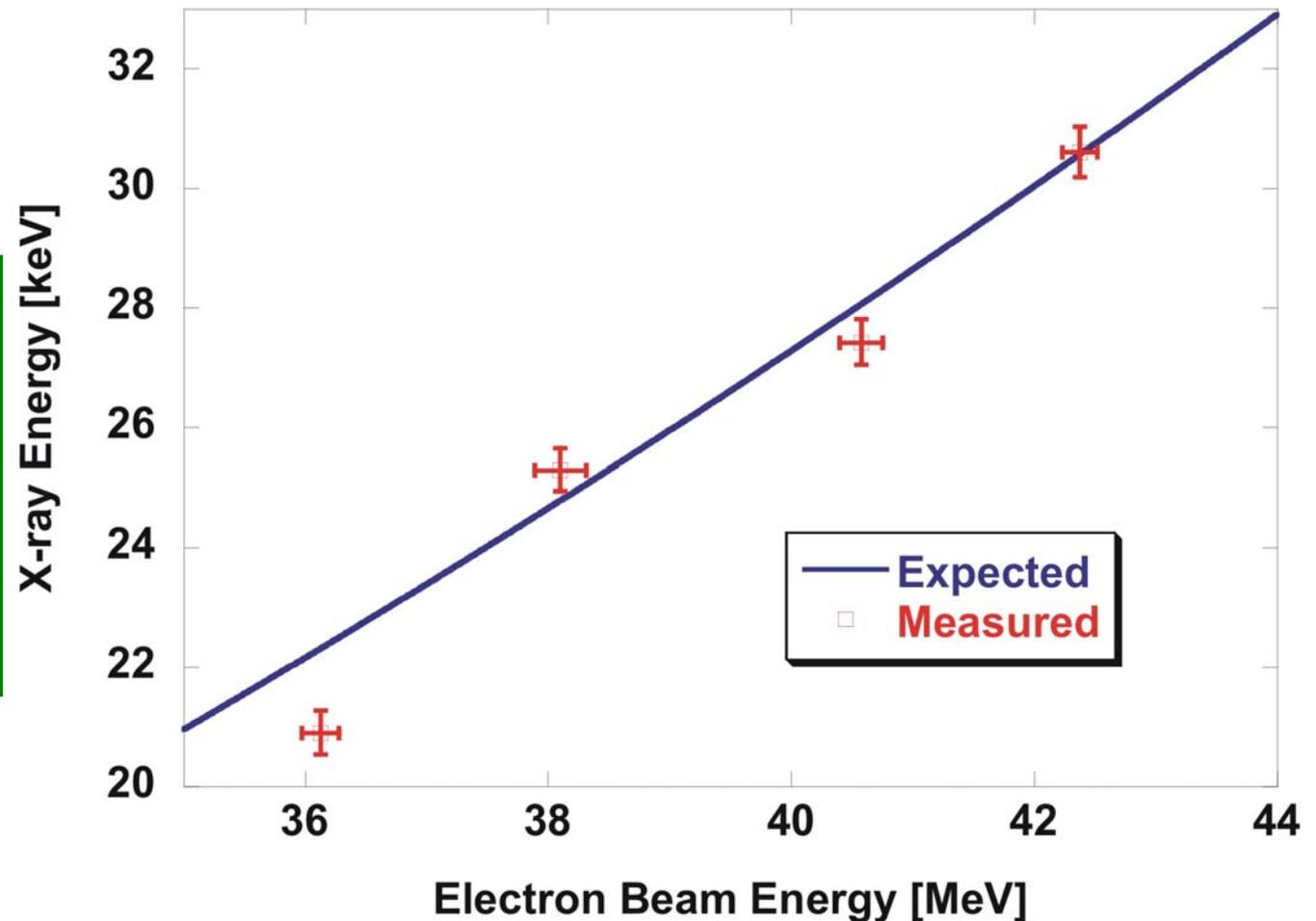
## X-ray Energy Measurement by Bragg Angle

HOPG反射板の反射角度によるX線エネルギー測定結果

反射率最大の角度 (Bragg Angle) からX線の波長を算出

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

ビームエネルギーとともに  
生成X線のエネルギー  
がほぼ計算どおり  
変化している

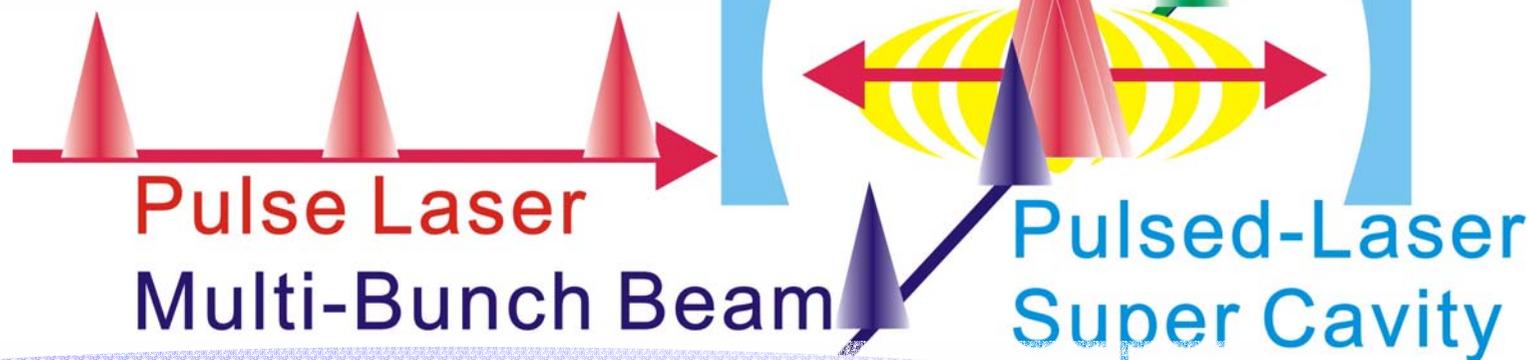


# Contents of This Talk

パルスレーザー光共振器を用いた  
第2世代放射光源と同等のX線源の開発

現在までの実験状況  
パルスレーザー光共振器を用いた  
Laser-Compton散乱X線生成の実証

パルスレーザー光共振器の開発  
高増大率共振器の実現  
光共振器の安定運転



高品質マルチバンチ電子ビーム生成

X線生成システムの開発  
X線検出器の開発  
特に本システムの適したもの

# Feasibility of LCS X-ray Source

## LINAC Base Laser-Compton X-ray Source

本実験で得られたX線の輝度  
(Photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%b.w.)  
 **$2.75 \times 10^5$  (相互作用回数1.25kHz)**

電子ビームの増強  
⇒ 相互作用回数**300倍** (Burst全てが相互作用)

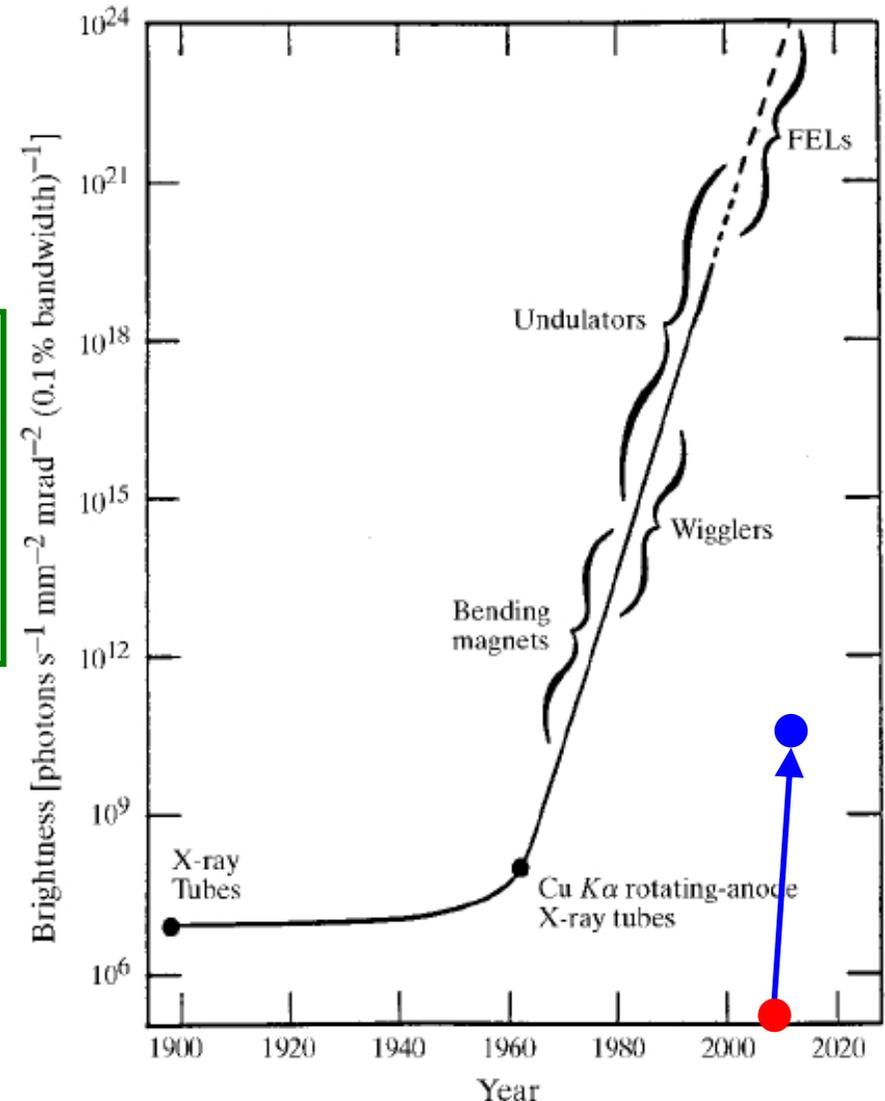
レーザー増強**10倍**+サイズの収束**1/3**  
X線輝度 **$10^{10}$ Photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%b.w.**

電子ビーム

**超伝導LINAC**  
によってバンチトレイン  
を**長パルス化**可能

パルスレーザー  
光共振器の開発

**Burst Mode  
Cavityの増強**



# Feasibility of LCS X-ray Source

## ERL Base Laser-Compton X-ray Source

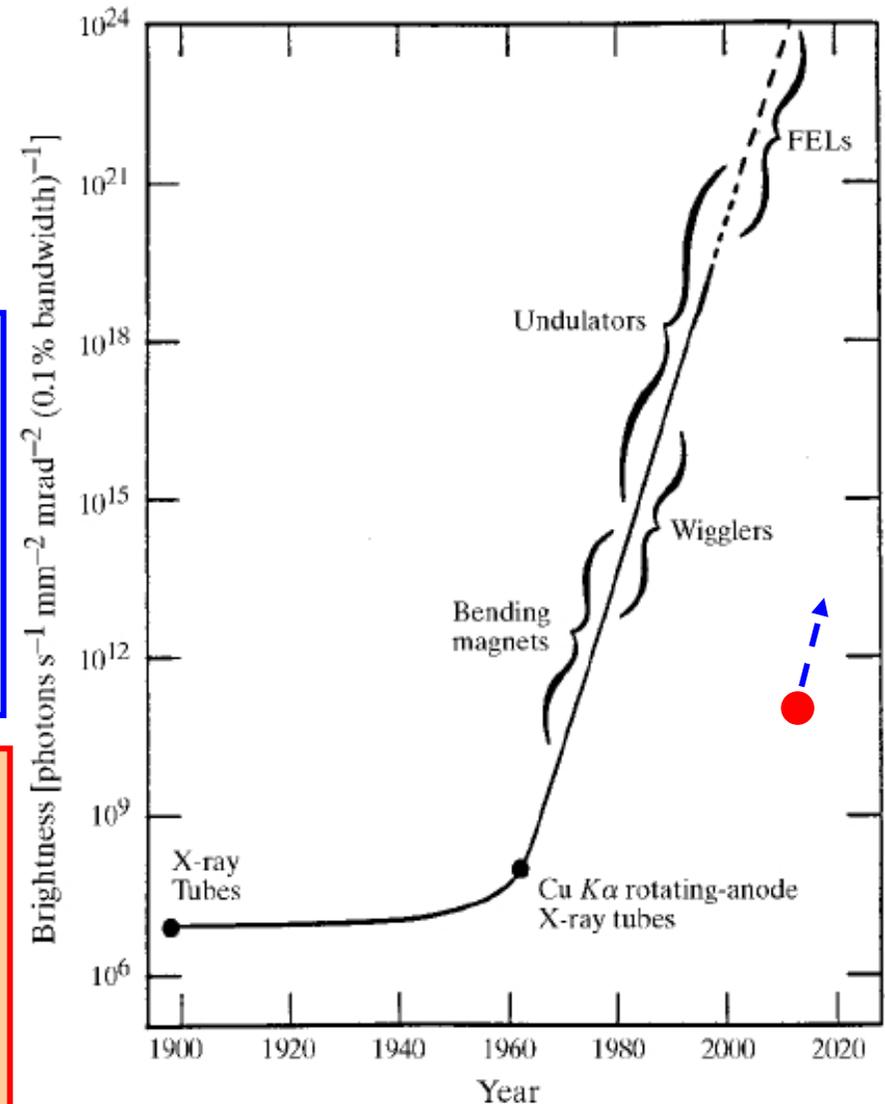
本実験で得られたNormal-Mode  
Cavityの蓄積レーザーパワー: **2.5kW**

ERLの電子ビーム  
⇒ **1.3GHz · 77pC/Bunch · 40MeV**を仮定  
(相互作用回数1.3GHz)

X線輝度 (Emittanceの効果含まず)  
 **$3.5 \times 10^{11}$  Photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%b.w.**

極低Emittanceを  
仮定するとさらに輝度の  
向上が期待できる。  
**γ線領域ではさらに  
輝度大**

パルスレーザー  
光共振器の開発  
・レーザーの低雑音化  
・FBの高速化  
さらに**高度な共振器へ**  
(次ページ参照)



# Conclusions

## Num. X-ray/X-ray Energy/Widths of All Scans

- ⇒ 全ての結果がLaser-Compton散乱の予見する結果と一致している
- ⇒ **確実にLaser-Compton散乱を実現**しており、正しい信号を得ていることを示している
- ⇒ **Super-Cavityを用いたX線生成の実証**

## Num. X-rayがほぼ計算と一致 ⇒ 100Bunch+Super-Cavityでも計算に乗ることを実証

今後…さらにビームカレントを上げることでさらなる線量増大が期待される

現在  $3 \times 10^4/5\text{mm}/2.3\text{m/sec}$  ( $\Delta E/E \sim 10\%$ )

- ⇒ **超伝導LINAC**や**蓄積リング・ERL**などと組み合わせることによって
- 第2世代放射光施設と同等程度の輝度のX線源を構築することが可能**

## Super-Cavity Development

- 現状、機械的制御 (Piezo) のみ ⇒ **電氣的光學的制御を含める**
- …より帯域の広い制御が可能となり、FB後の残りNoiseを減らせる
- ⇒ **1~2桁の増大を目標**

Burst mode ⇒ **ダメージ閾値近い**

- …共振器設計から見直す必要あり (すでに**4枚鏡構成の共振器設計が始められている**)
- 今後、Laser-Comptonに限らず他の応用へも視野を広げて行きたい



*Fin.*