

バンチ内6D位相空間電荷密度分布の実時間計測可能な 非破壊モニターの開発

Development of non-invasive monitoring system to measure
bunch-by-bunch charge density distribution in 6D phase space

富澤 宏光, 富樫 格, 松原 伸一

(公財)高輝度光科学研究センター XFEL利用研究推進室

伊達 伸, 出羽 英紀, 谷内 努, 鈴木 伸介, 岡安 雄一,

下崎 義人, 柳田 謙一, 深見 健司

(公財) 高輝度光科学研究センター 加速器部門

増田 剛正, 清道 明男

(公財) 高輝度光科学研究センター 制御・情報部門

黒田 隆之助, 平 義隆

(独)産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門

南出 泰亜, 野竹 孝志

(独)理化学研究所 テラヘルツ光源研究チーム

小川 奏, 大和田 成起

(独) 理化学研究所 放射光科学総合研究センター

JA全農あおもり

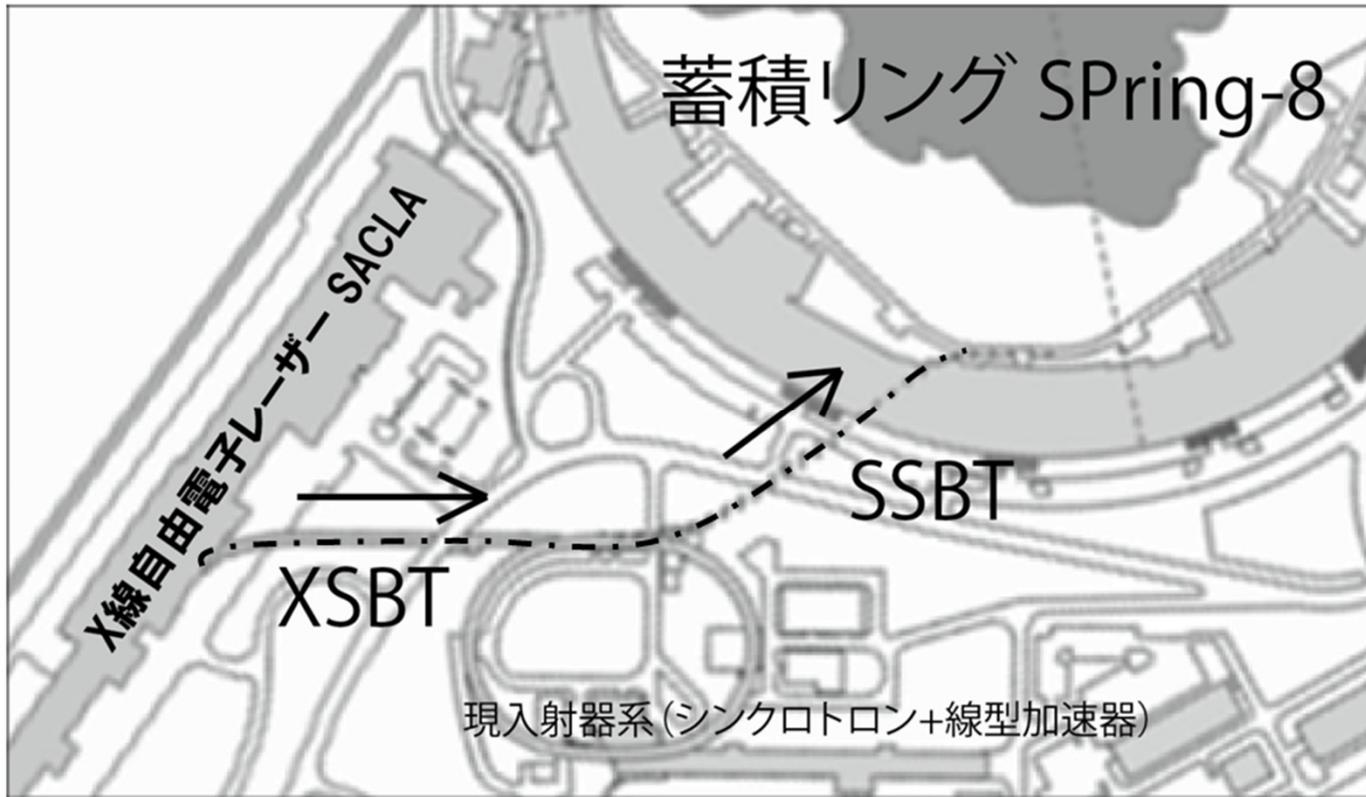
JAPAN
AIRLINES

行こ
東北
JAL東北応援プロ

研究背景

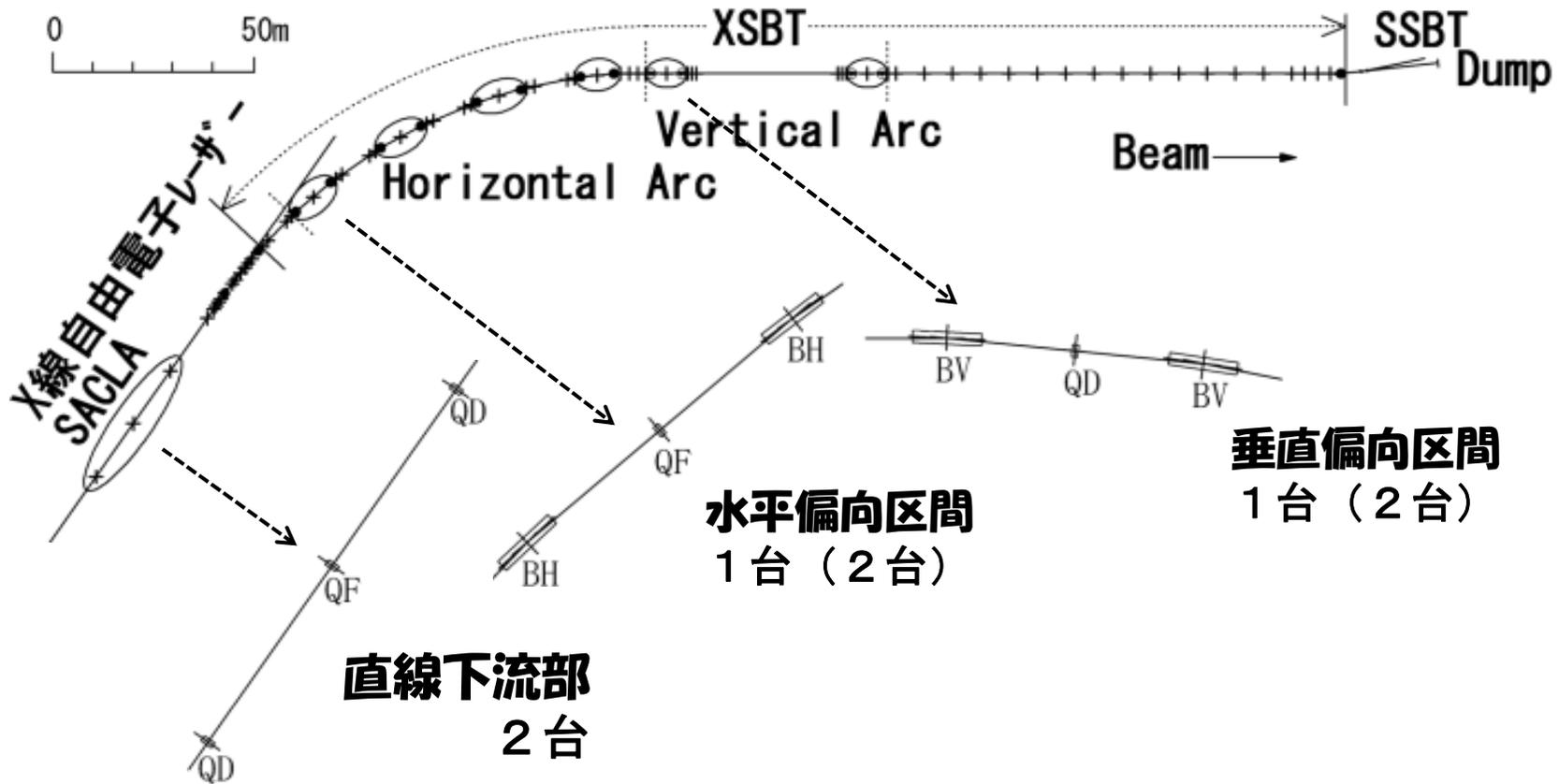
X線自由電子レーザー (SACLA) を入射器として、XSBTを通じて、アップグレードしたSPring-8蓄積リングに入射するという次期計画を検討中。

電子バンチの6次元位相空間での電荷分布の挙動を bunch-by-bunch で計測する非破壊モニター の提案。

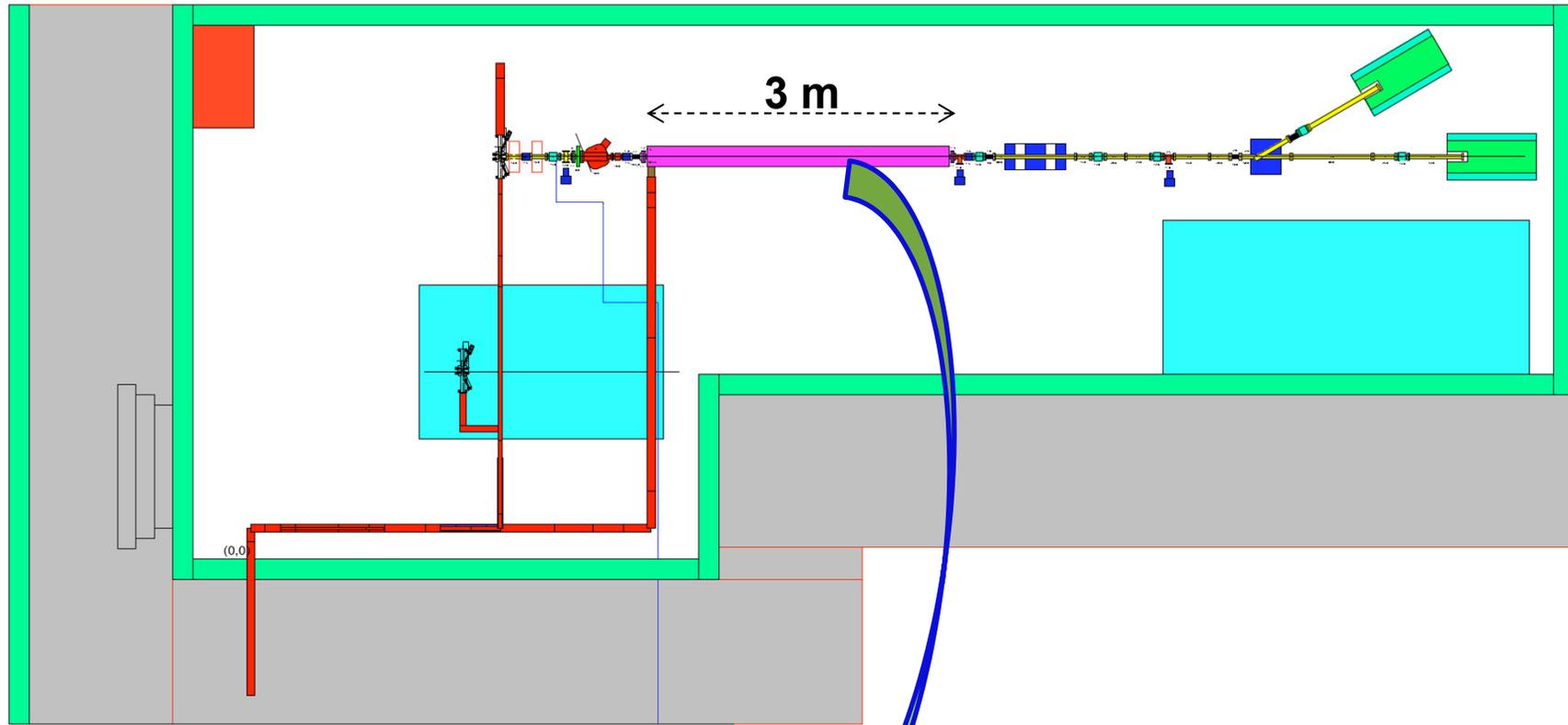


研究背景

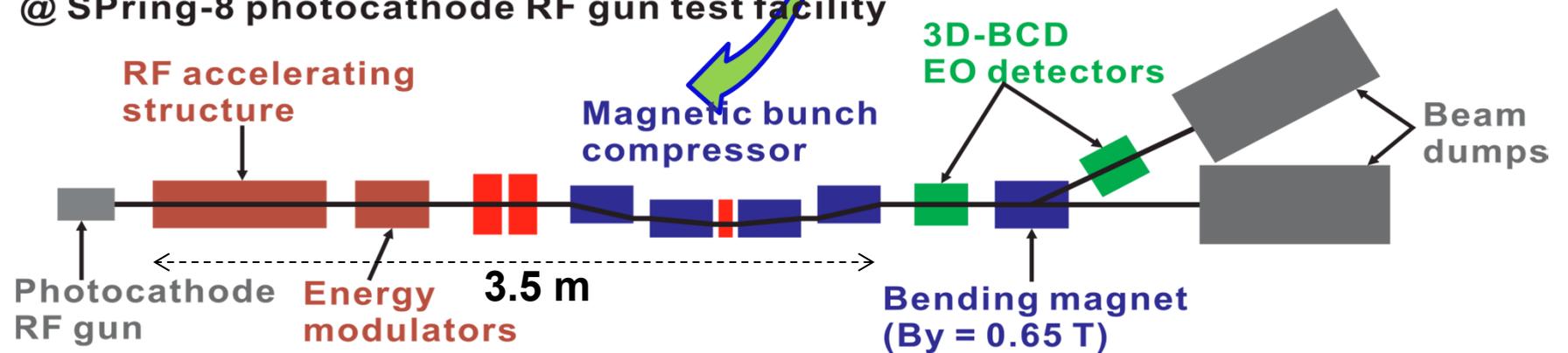
XSBTは、現状のシンクロトロンがSPring-8蓄積リングよりも**9m低く位置**するため、水平のみならず、垂直偏向部が存在するので、ここをビーム診断ラインとして利用する。



RF電子銃試験施設(モニターテストベンチとしてアップグレード)

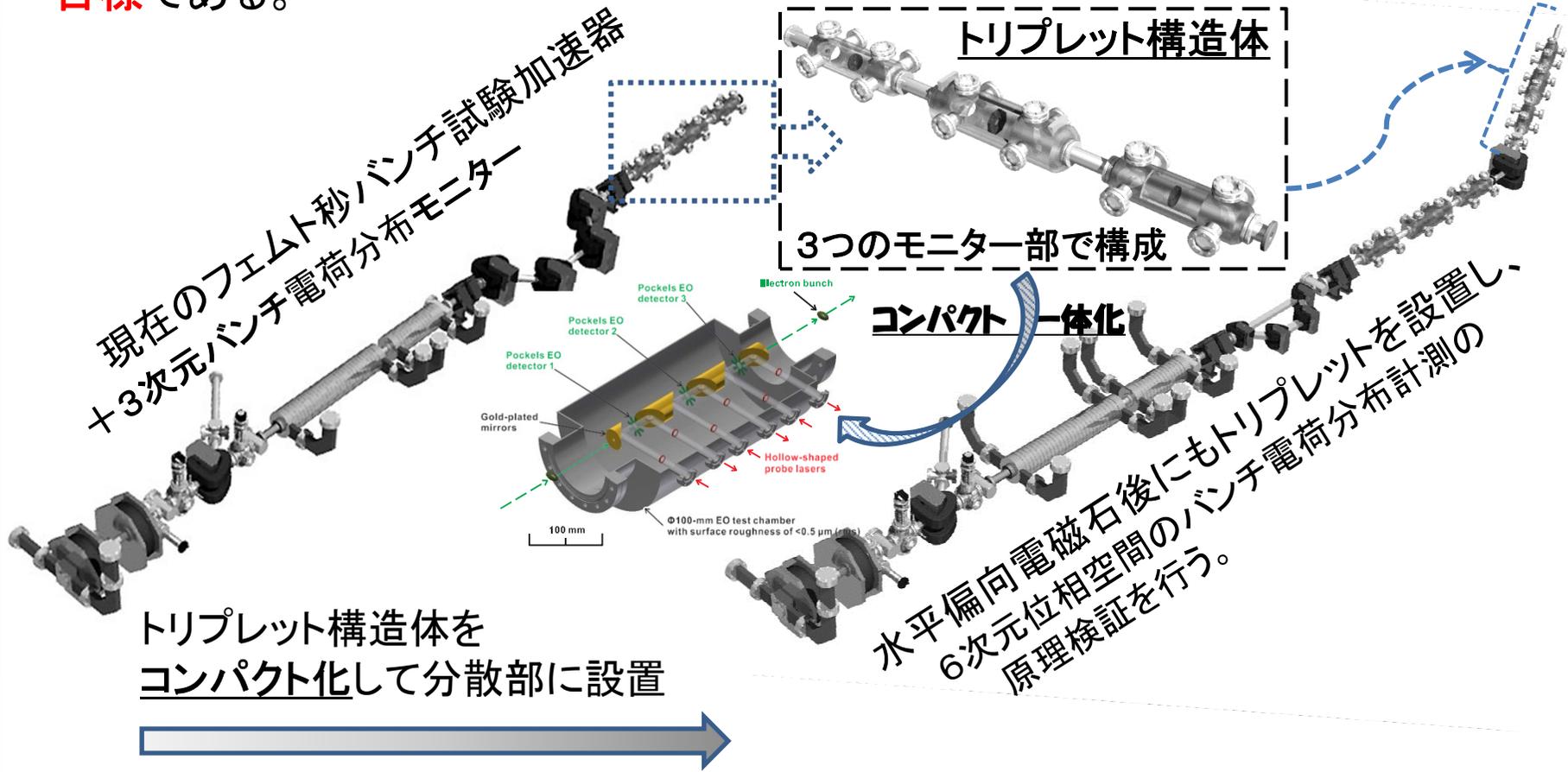


Designed accelerator complex
@ SPring-8 photocathode RF gun test facility



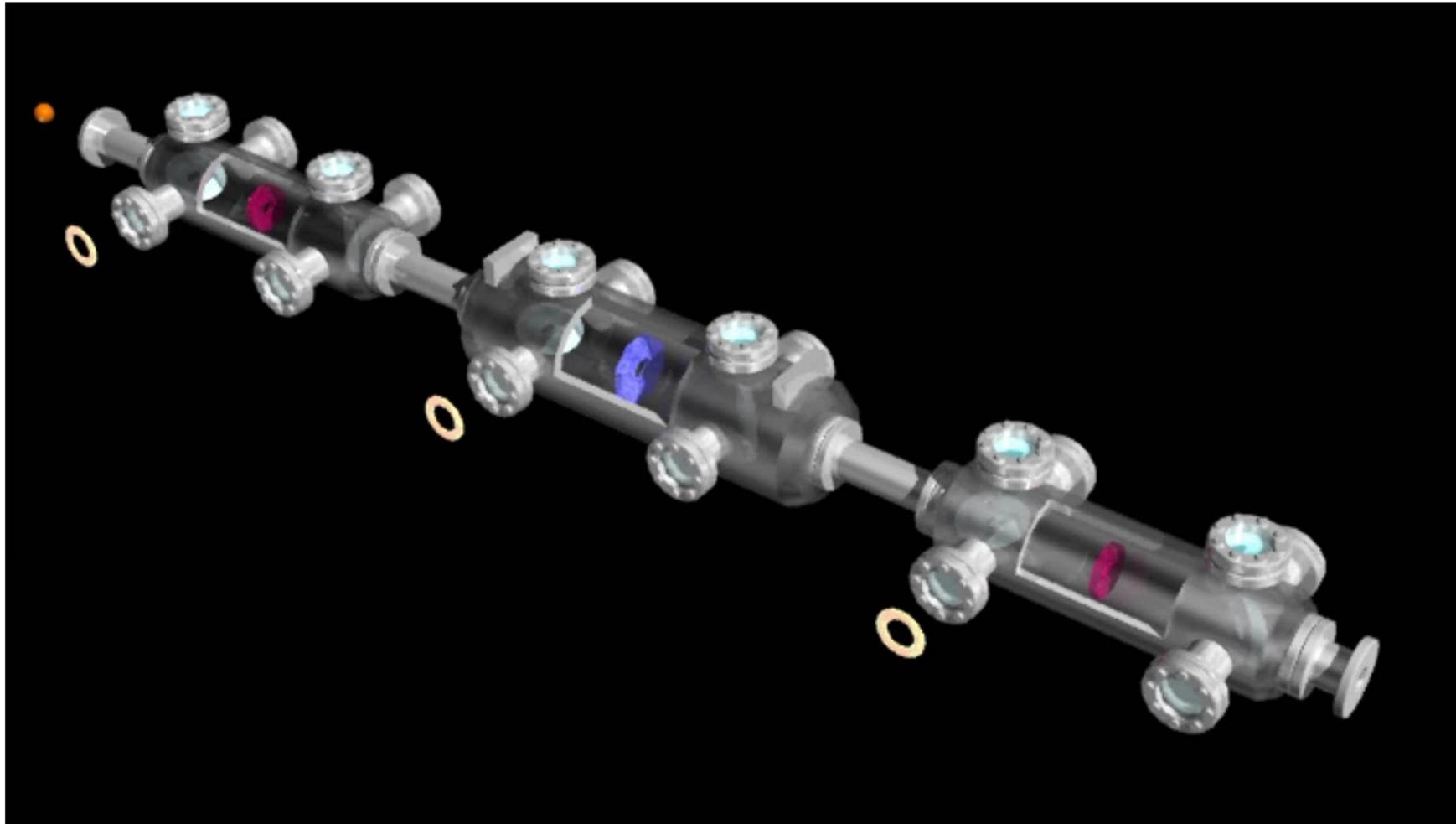
研究背景

XSBTに設置するモニターは、コンパクト化した**3D-BCDのトリプレット構造体**を用い、リアルタイム計測が可能な高密度多重化計測とそれと技術的に融合したデータ収集系の設計を行っている。これにより、**ライブビューの実現が戦略目標**である。



3D bunch shape monitor (One element of 3D-BCDM) [1]

Three sets of 3D-BCD elements: **de/en-coding** to **de/o-** multiplexing



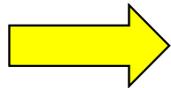
- [1] H. Tomizawa, H. Hanaki, and T. Ishikawa,
“Non-destructive single-shot **3-D electron bunch monitor** with femtosecond-timing **all-optical system**
for pump & probe experiments,” Proc. FEL2007, Novosibirsk, Russia, 2007 pp. 472-475.

研究開発の大項目は2つ:

非破壊・リアルタイムでの3次元バンチ内電荷分布(3D-BCD)計測

電気光学(Electro-Optic)効果による電子バンチ形状計測

- 非破壊・シングルショット・リアルタイム計測
- フェムト秒時間分解能での計測の実現

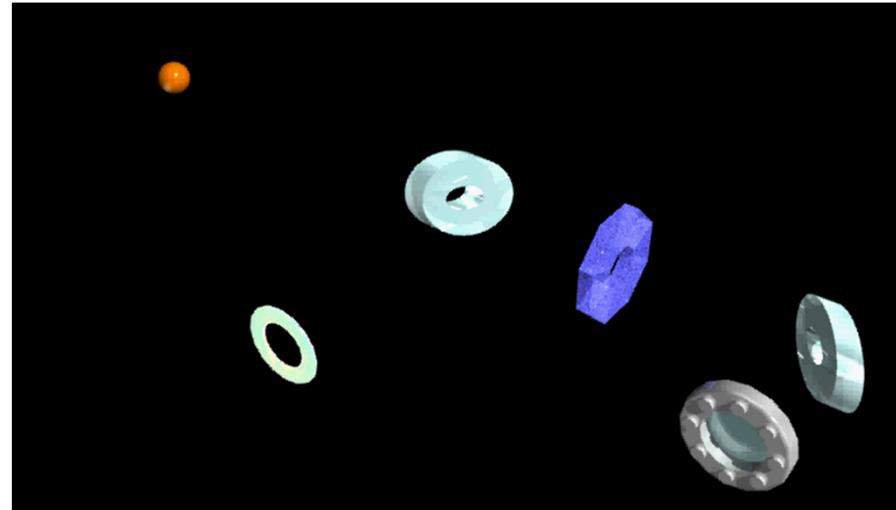
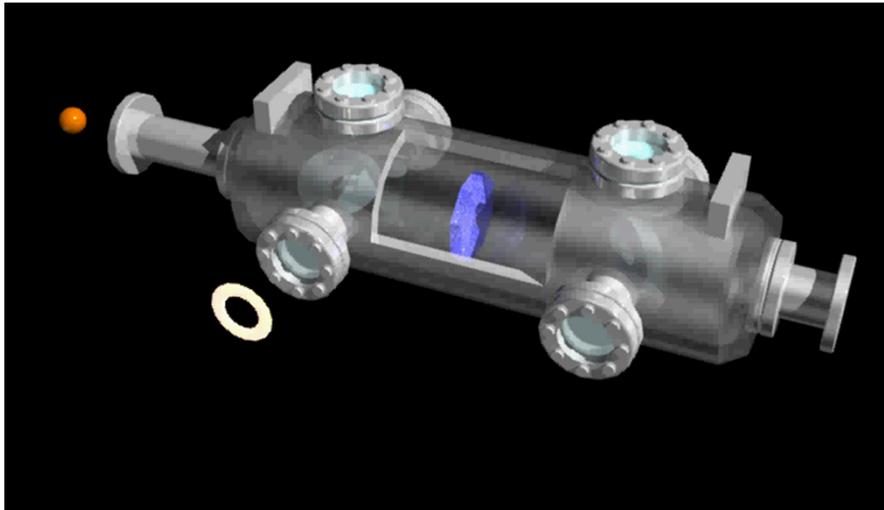


①3次元電子バンチ形状計測体系の構築

縦方向+横方向電荷密度分布のシングルショット計測。

②高時間分解能化のための光源、EO結晶、光学系の開発

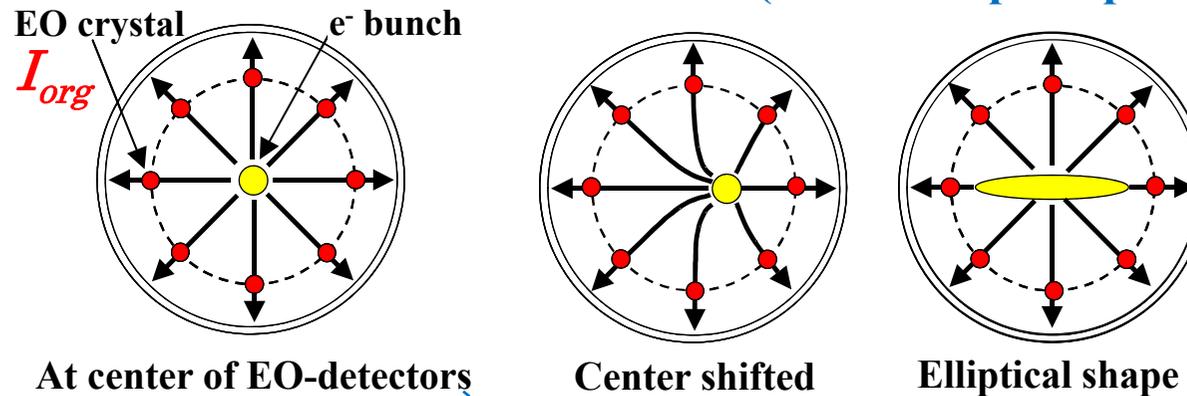
30fs (FWHM)の極短電子バンチ計測を可能とする体系の構築



(1) 3次元計測のための空間電荷分布計測: EOSの多重化

2D moment of bunch slice as transverse detection

A) Boundary condition of metal vacuum chamber (like Multi-pickup BPM)



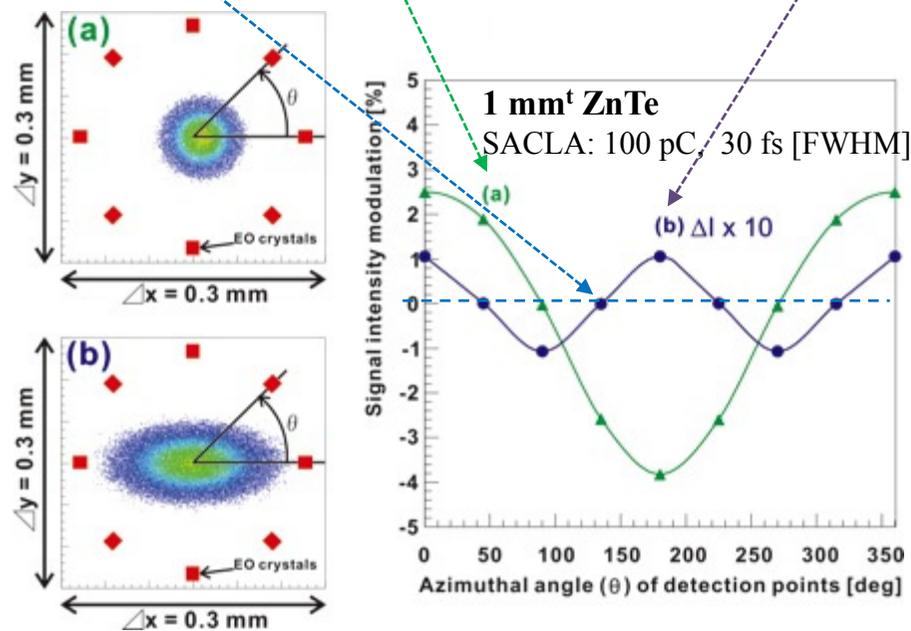
B) Situated in free space (3D-BCD EOS)

Probe points on EO-crystal edges located 2-mm from center of bunch slices.

- (a) 10- μ m transverse shift e^- beam (40 μ m [rms])
- (b) ellipse-shaped slice (150 μ m [rms] in major axis)

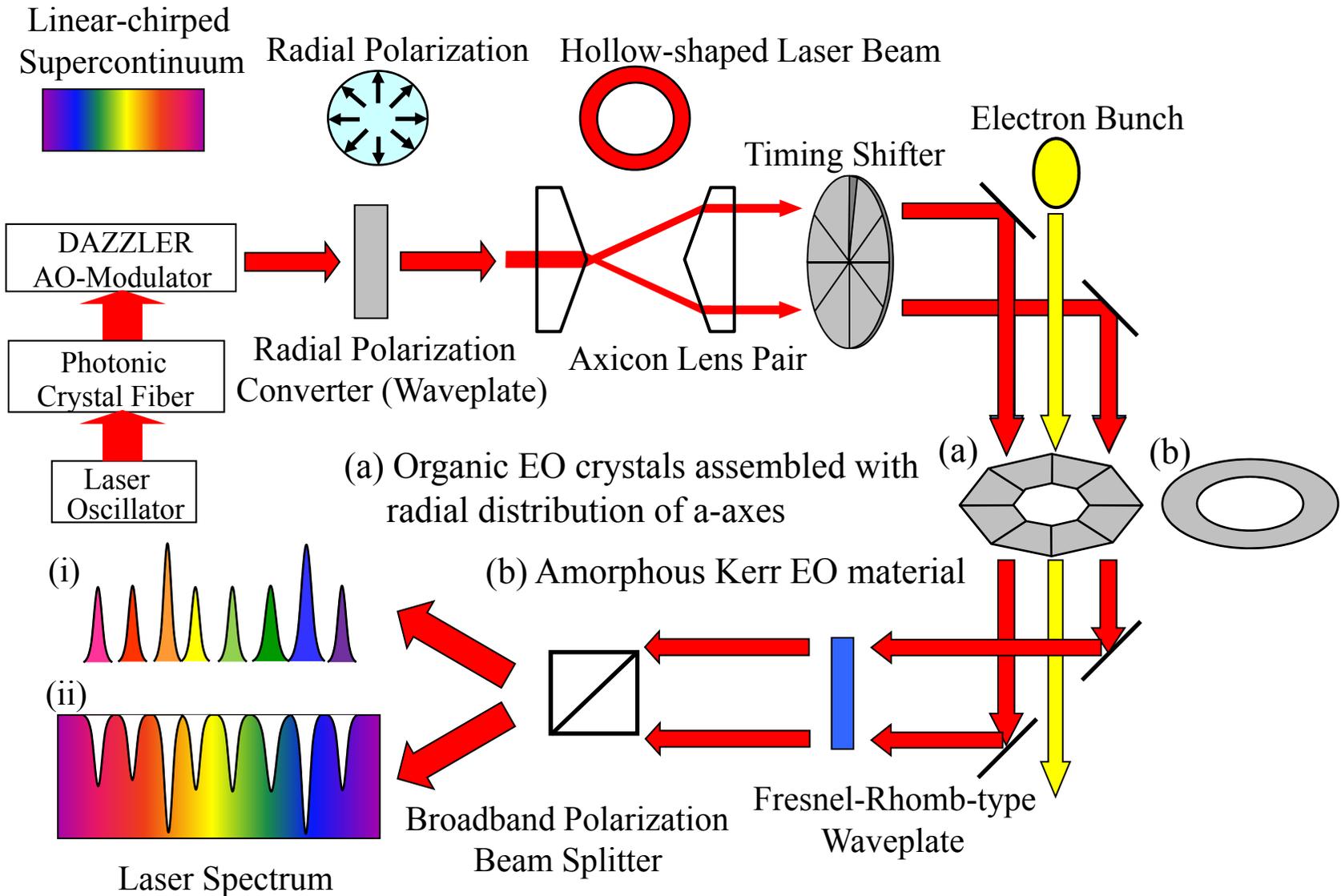
$$\Delta I = \frac{I_{sig} - I_{org}}{I_{org}},$$

$$I_{sig} = I_0 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2\lambda} \Delta n L \right).$$



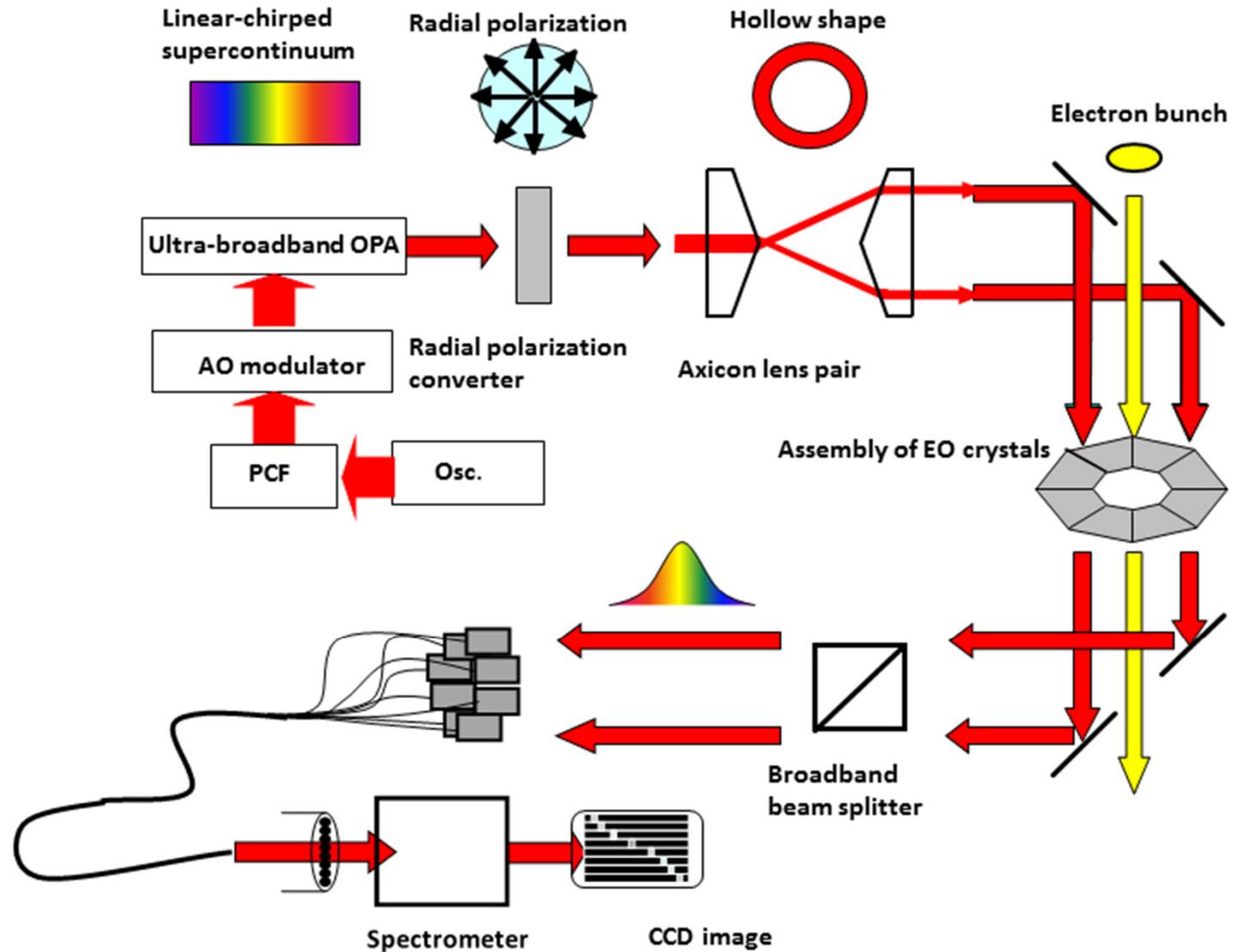
① 波長多重化方式(旧式)

3次元フェムト秒バンチ形状計測要素の全体像

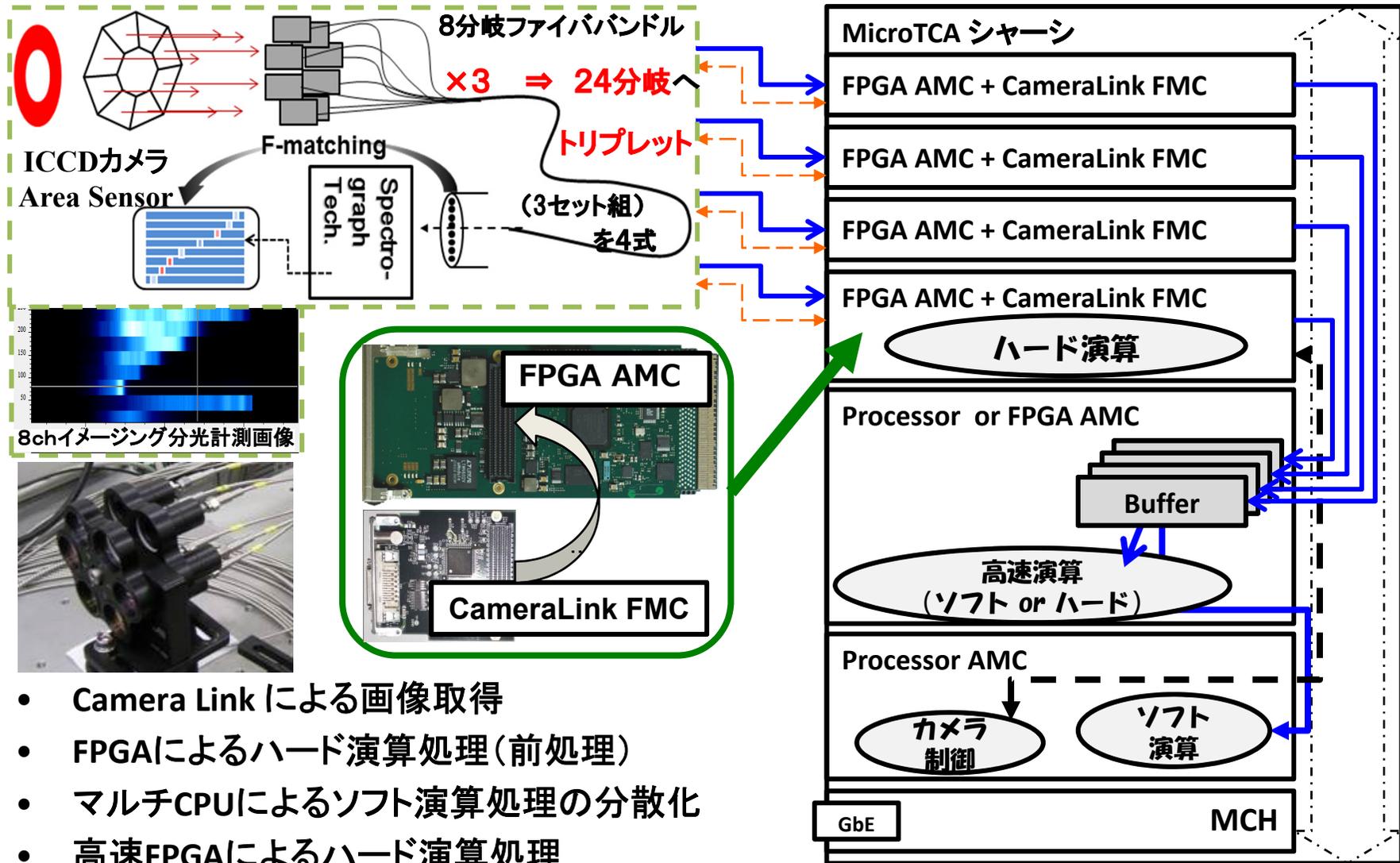


② 空間多重化方式(新式:エリアセンサー検出方式)

3次元フェムト秒バンチ形状計測要素の全体像



データ収集系の基本戦略は、3D/6D電子バンチ計測のリアルタイム再構築系の基本コンポーネントである、空間多重化と融合した技術で構成する(多重化密度の極大化)。



- Camera Link による画像取得
- FPGAによるハード演算処理(前処理)
- マルチCPUによるソフト演算処理の分散化
- 高速FPGAによるハード演算処理

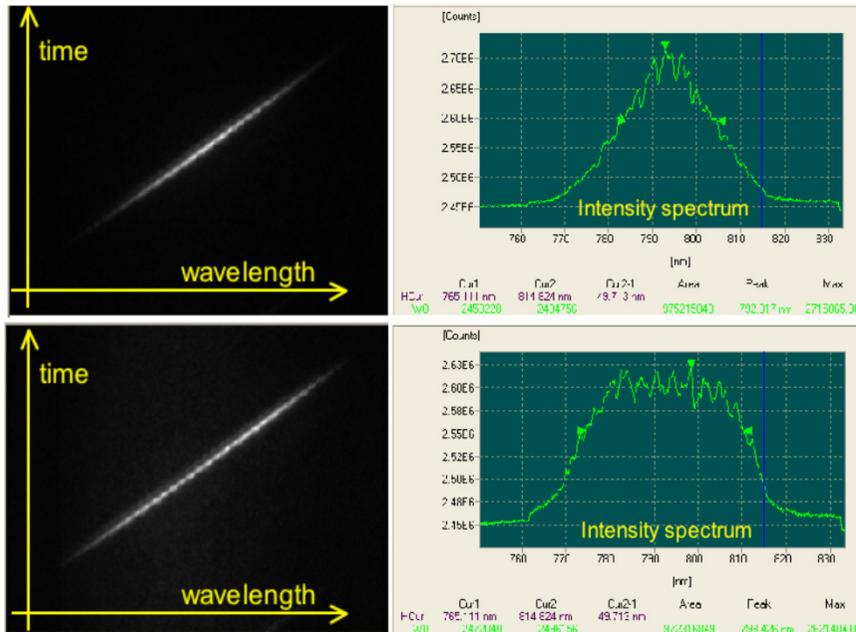
(2) 時間方向 (バンチ長) 計測:

Measurement (Decoding) methods of EO Sampling :

(a) Temporal Decoding

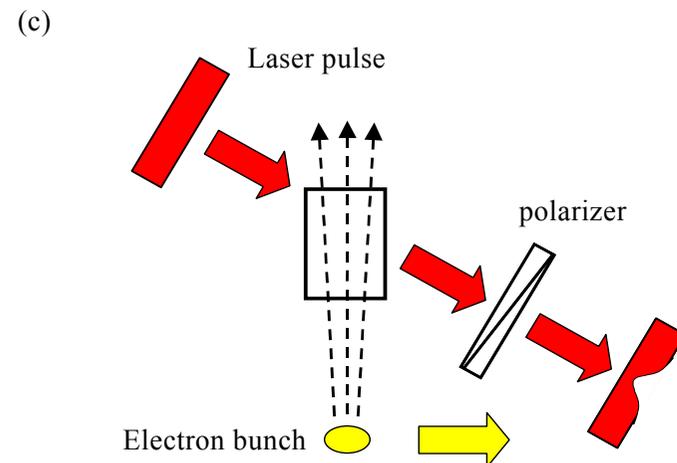
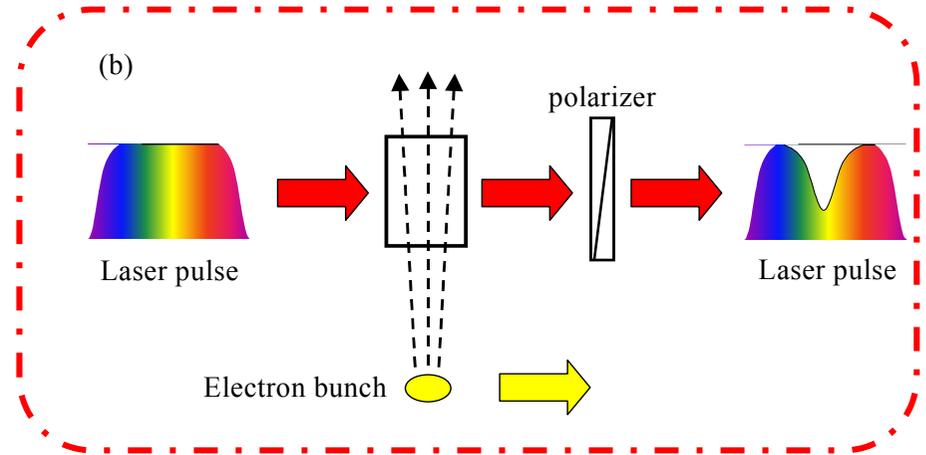
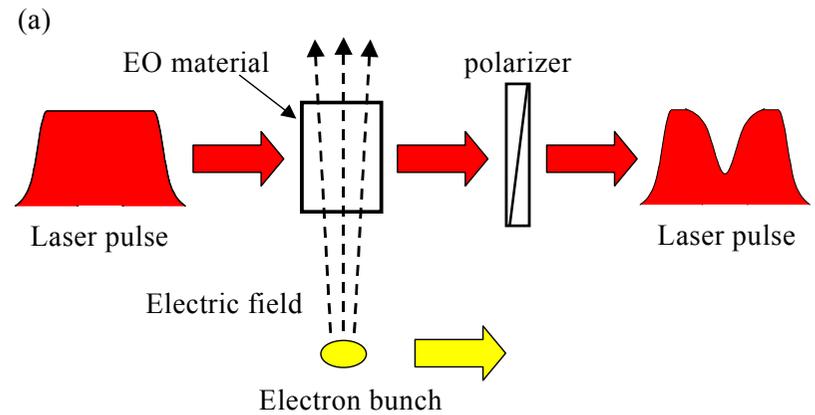
(b) Spectral Decoding

(c) Spatial Decoding



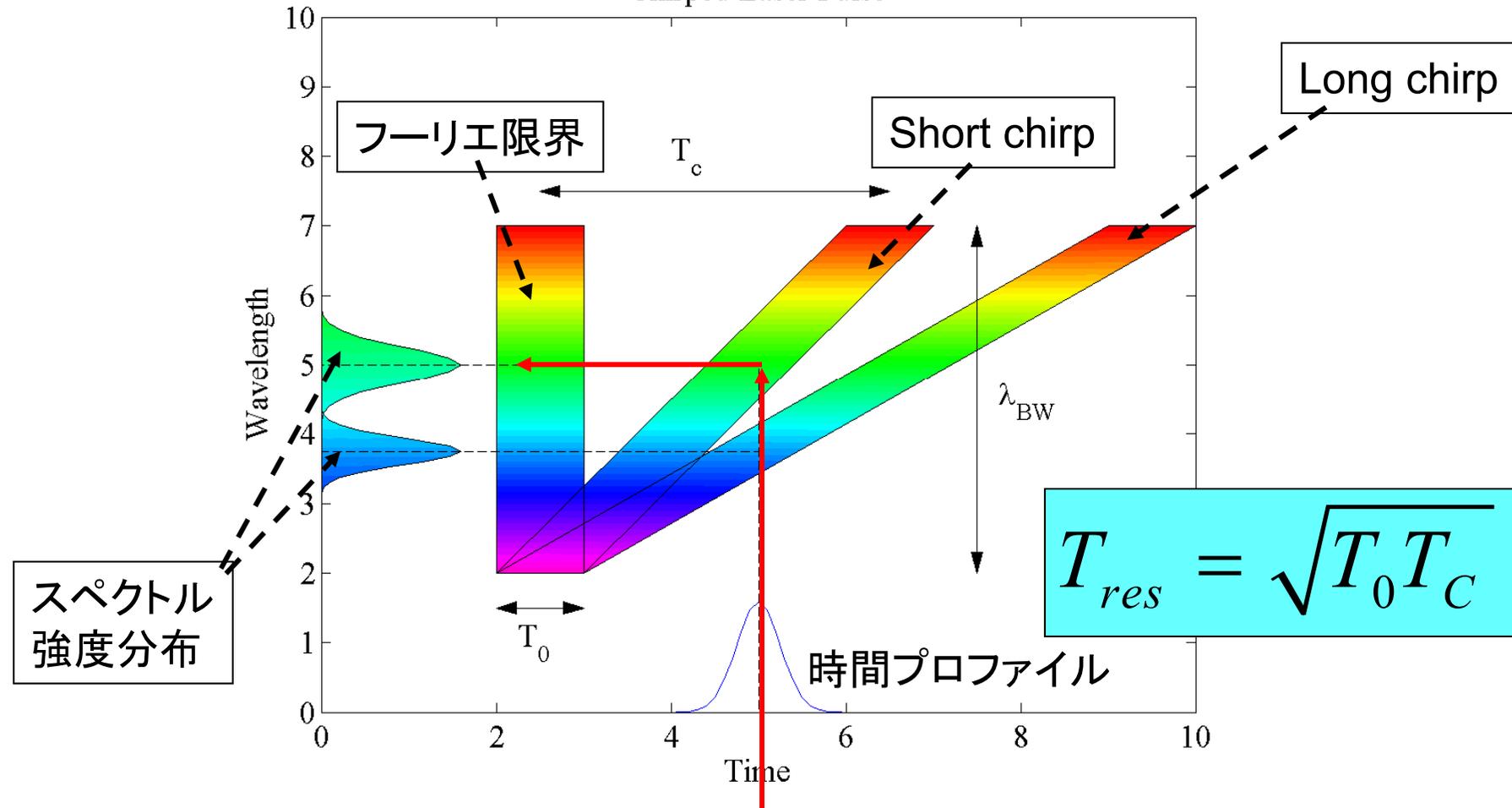
Measurements of linear-chirped laser probe pulse with Spectrograph Streak camera:

The upper is an original laser probe pulse (constant chirp rate).
The lower is squarely shaped spectral intensity distribution by DAZZLER AO-modulator.



EOサンプリングとプローブレーザのチャープニング

Chirped Laser Pulse



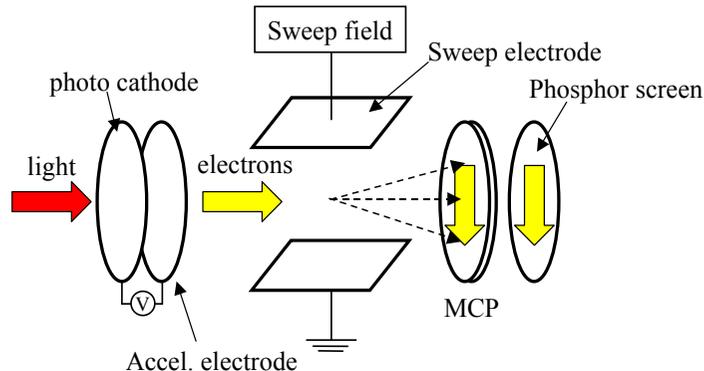
Timing jitter はスペクトル中心波長がずれるのみ

チャープされることで、フーリエ限界パルス(T_0)が数フェムト秒のパルスも、100psのチャープパルス幅(T_c)にいと簡単に伸ばすことが可能となる。

その他のフェムト秒電子バンチのバンチ長計測手法との比較

i) Streak Camera [1-3]

The best temporal resolution is **300 fs (FWHM)**
when we use “> 700 nm light for injection” + “Fastest sweep field”



Cherenkov radiation enters photocathode.

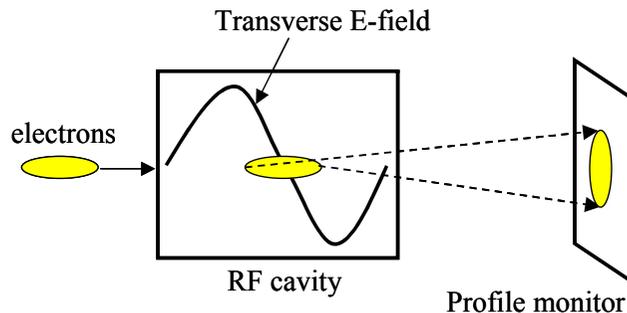
$\lambda \sim < 500\text{nm}$: resolution of Streak Camera is $\sim > 500\text{fs}$ (FWHM)

Photoelectrons are swept by E-field to obtain the temporal distribution.

Space charge effect and initial velocity distribution of photoelectrons limits resolution.

ii) RF deflector Cavity

High precise with high resolution, but **destructive**.
It will be installed to XFEL [4] (The total length became large $\sim 15\text{ m}$).

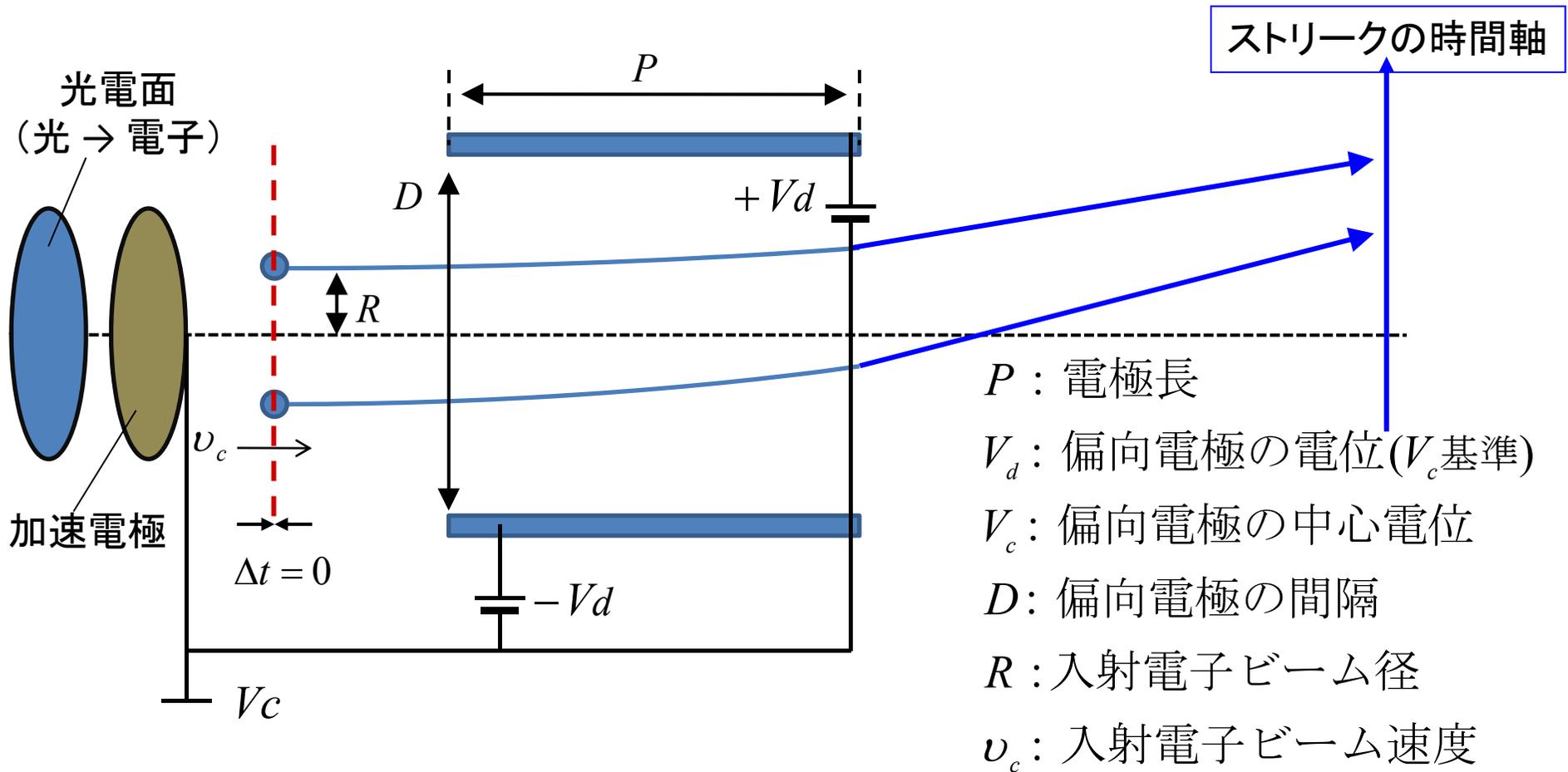


Electron bunches enters RF cavity.

Electrons are swept by RF field to obtain the temporal distribution

- [1] H. Tomizawa, Proc. of 5th PASJ, 2008, 129, [2] M. Uesaka, Femtosecond beam science, Imperial College Press (2005)
[3] M. Uesaka et al., IEEE Trans. Plasma Sci. 28 (2000) 1084
[4] H. Ego et al., in Proceedings of EPAC 08, Genova, Italy (2008) 1098

偏向電界に起因する走行拡がり 波長依存性



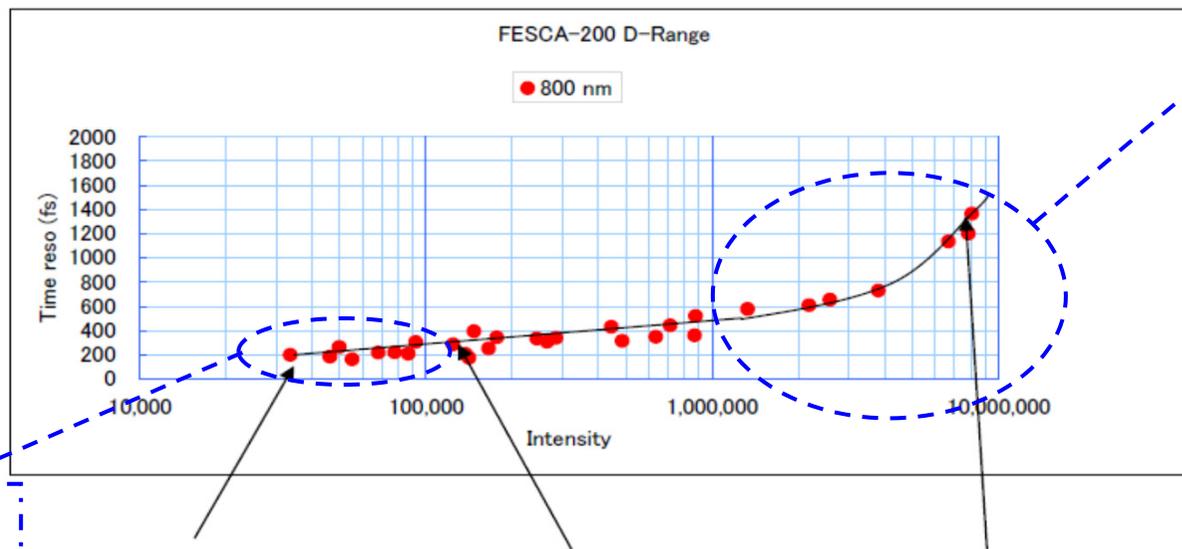
偏向電界による電子の走行拡がりが、エネルギー分散によってさらに大きくなる



時間分解能に波長依存性があり、赤外域より短波長になると悪化する要因

800nm (皆様のお手元にある一般的なTi:Sa Laser); 100fs laser FESCA200でのパルス幅(FWHM)の波長依存性

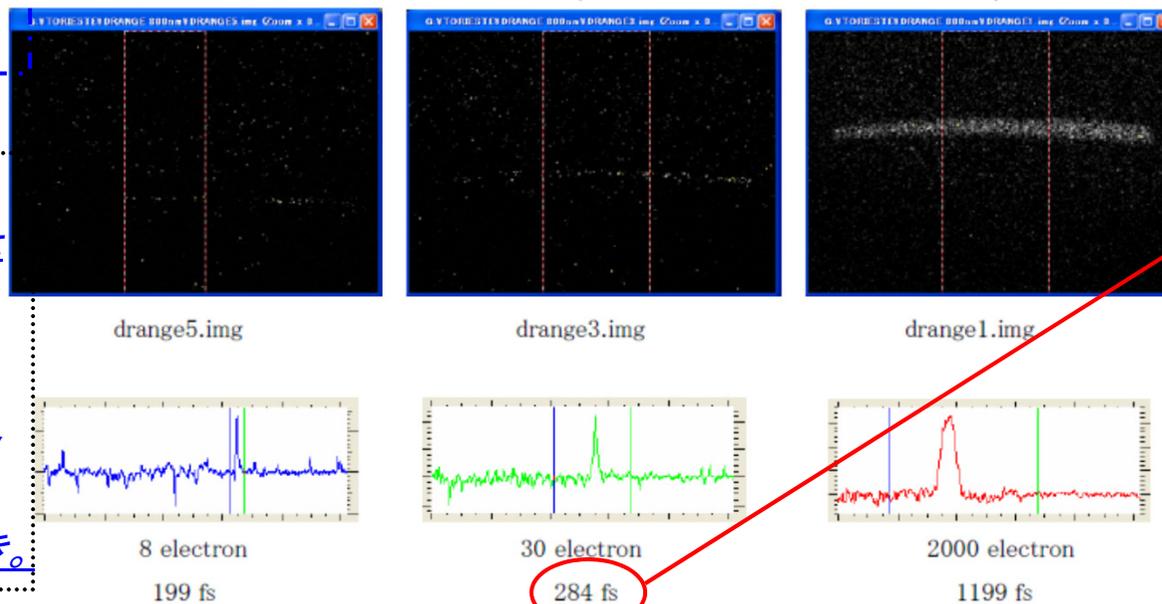
参考データ2 C6138 における波長 800nm のダイナミックレンジ C6138のカタログ掲載データ例
<http://jp.hamamatsu.com/resources/products/sys/pdf/jpn/c6138.pdf>



空間電荷効果による
pulse broadening
領域

Quantum
noise 領域

※この領域
で計測された
パルス幅は
一つの目安
に過ぎなく、
大きなバラツ
キがあること
を熟知すべき。

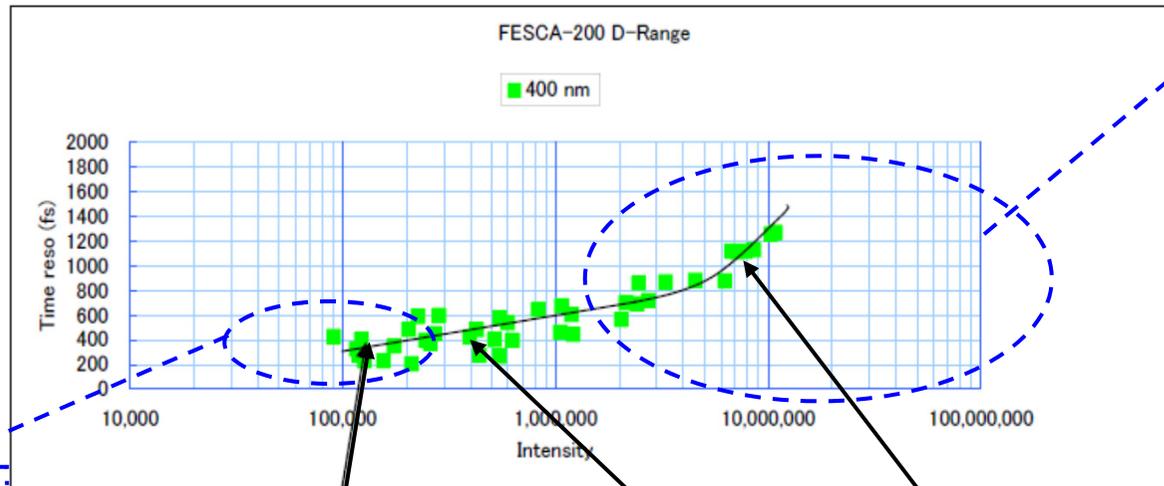


>800nm:
Res. ~<300fs

400~500nm (チェレンコフ光の波長); 100fs laser

FESCA200でのパルス幅(FWHM)の波長依存性

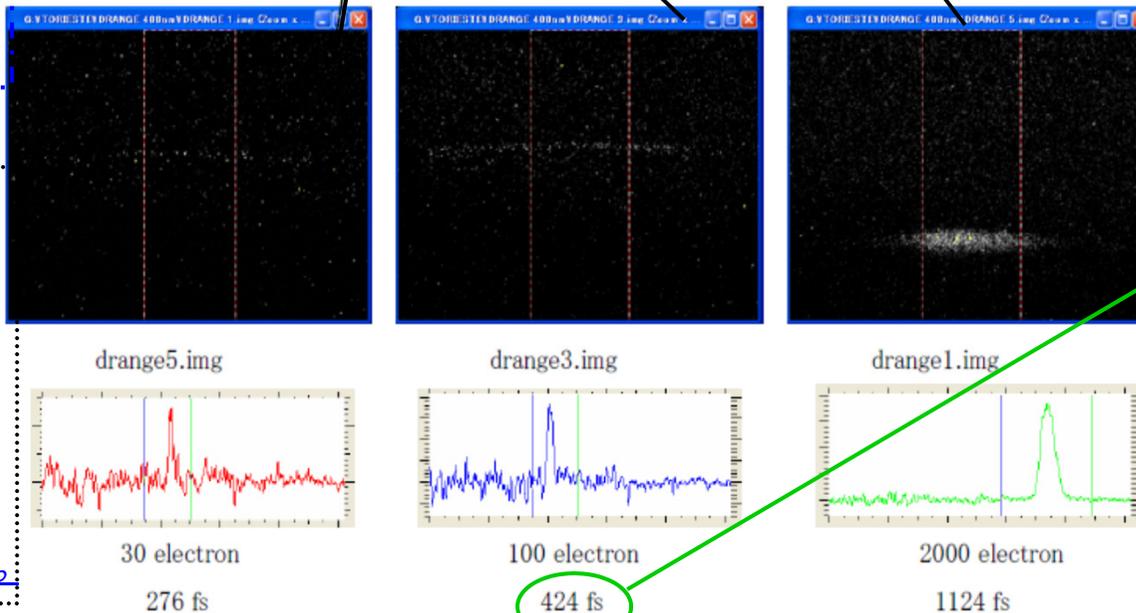
参考データ1 C6138 における波長 400nm のダイナミックレンジ C6138のカタログ掲載データ例
<http://jp.hamamatsu.com/resources/products/sys/pdf/jpn/c6138.pdf>



空間電荷効果による
pulse broadening
領域

Quantum
noise 領域

※この領域
で計測された
パルス幅は
一つの目安
に過ぎなく、
大きなバラツ
キがあること
を熟知すべき。



400~500nm:
Res. ~500fs

フェムト秒電子ビームバンチ計測の比較

1. フェムト秒ストリークカメラの限界: (Single-shot計測が必要)

- ・100fsのレーザパルスはストリークカメラFESCA200で計測しても
800nm: 時間分解能 ~ 300 fs (FWHM) [カタログ保証値]
400nm: 時間分解能 ~ 500 fs (FWHM) [浜ホトの参考値]
量子ゆらぎ領域では、パルス幅は誤差が大きく、値が定まらない(ポアソン分布)
- ・ストリークカメラでのSingle-shot計測ではFWHMでパルス幅を評価する程度(時間分解能領域では)
十分な統計性を上げると正確なサブピコ秒パルス形状は鈍ってしまう

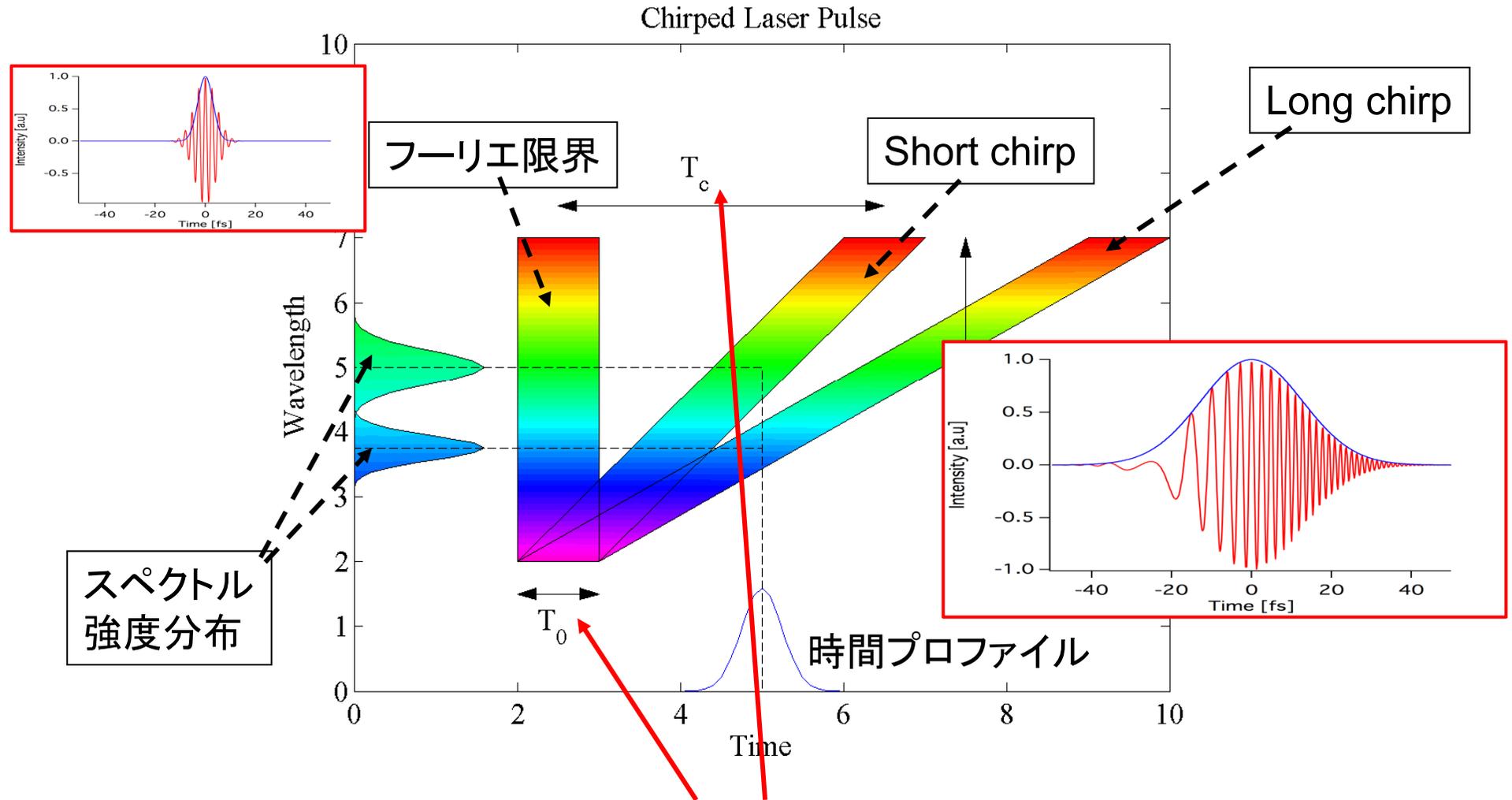
2. マイケルソン干渉計を用いた電子ビーム幅測定

- ・コヒーレント長の計測しかできない: フーリエ限界パルスを仮定
- ・バンチ長計測というには電荷密度分布を計測: 強度相関計測
- ・フェムト秒バンチ計測には紫外までの計測必要: 300nm \sim 1 fs

3. EOサンプリングでどこまで時間分解能を上げられるか?

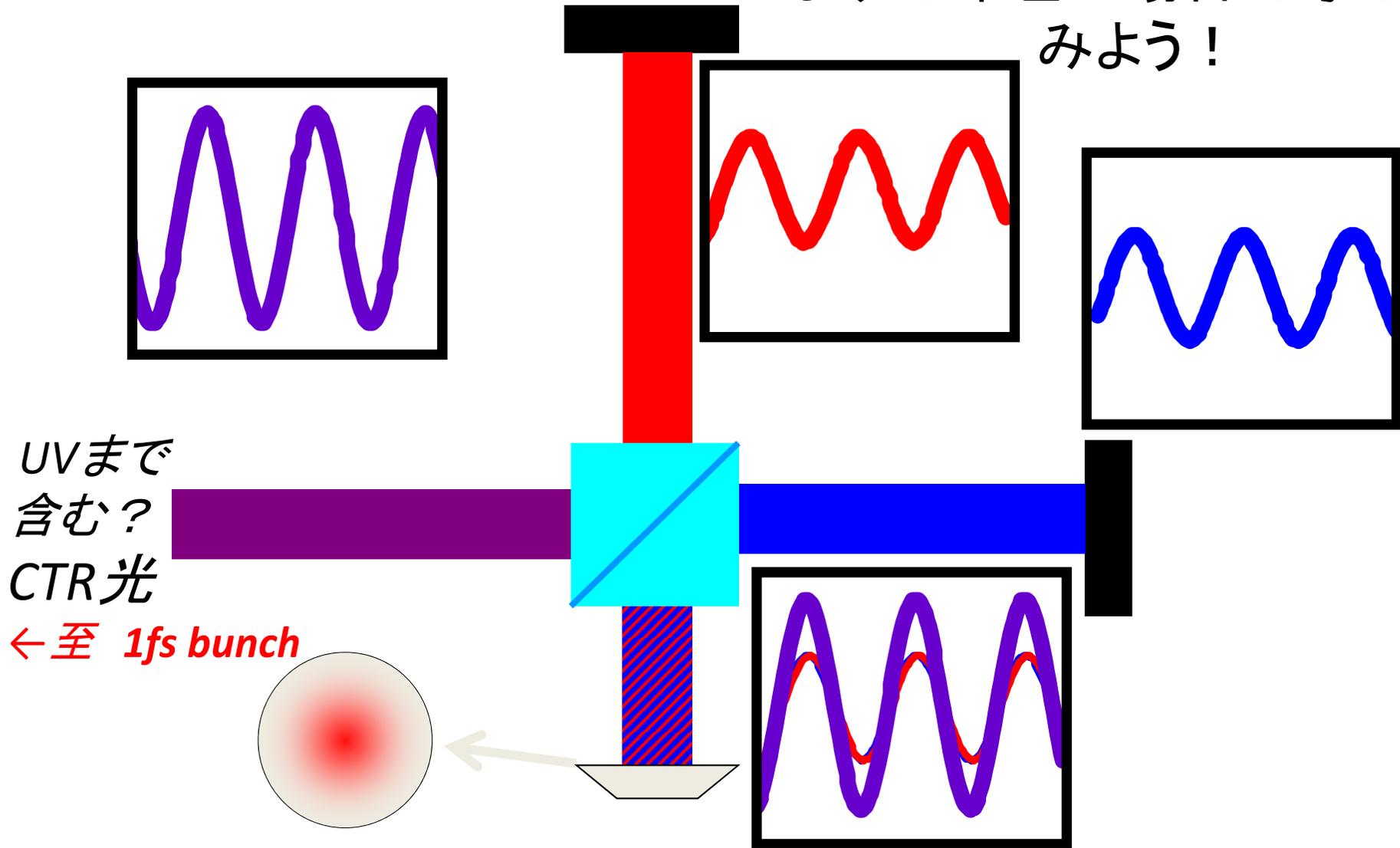
- ・線形チャープ矩形白色パルス光源開発: 30fsまで分解能向上
- ・有機EO結晶フィルムの開発: 30fsまで分解能向上

同じスペクトル帯域をもつパルスでもパルス長は可変。
計測バンチ長は不定(スペクトル位相分布計測が必要)。



フーリエ限界パルス(T_0)で数フェムト秒のパルスでも、100psのチャープパルス幅(T_c)でもコヒーレント長は同じ！！

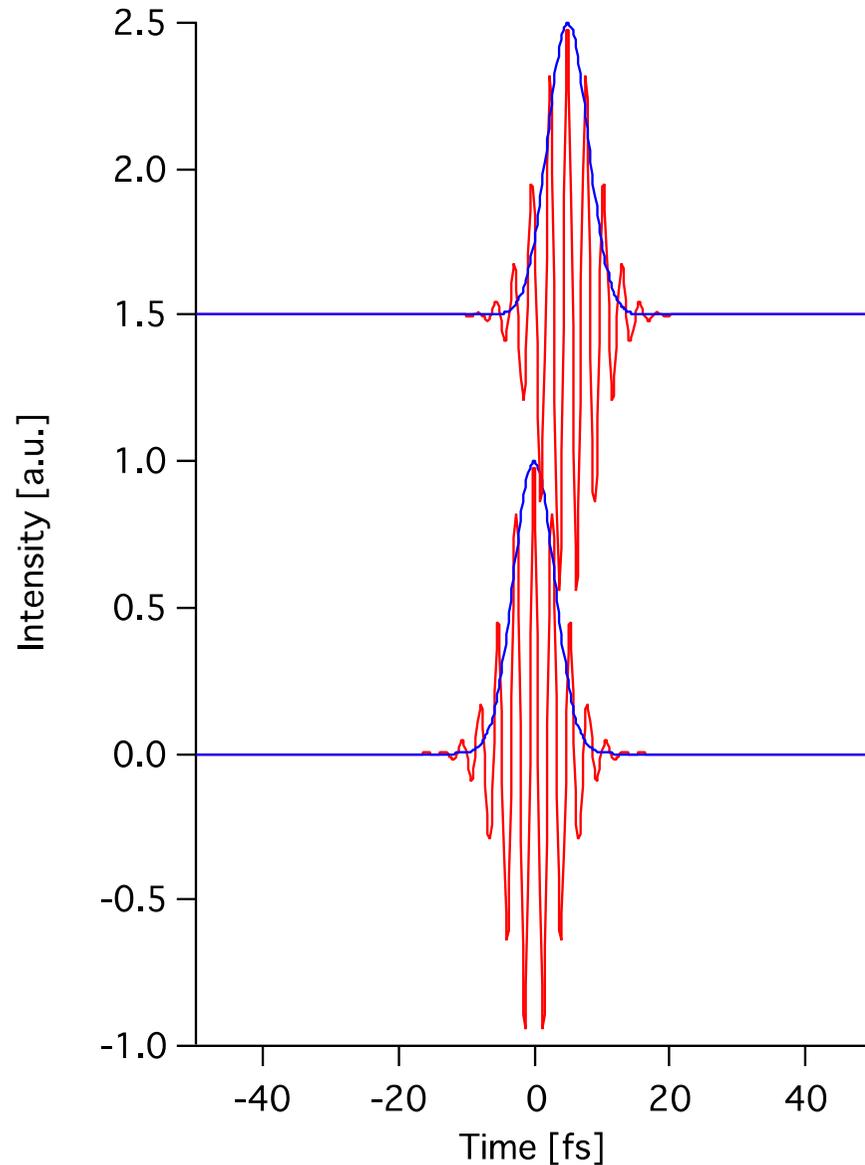
まずは単色の場合で考えて
みよう！



マイケルソン干渉計は2つの腕の一方をスキャン
して時間コヒーレント(コヒーレンス長)を計測

電場相関と強度相関の違い

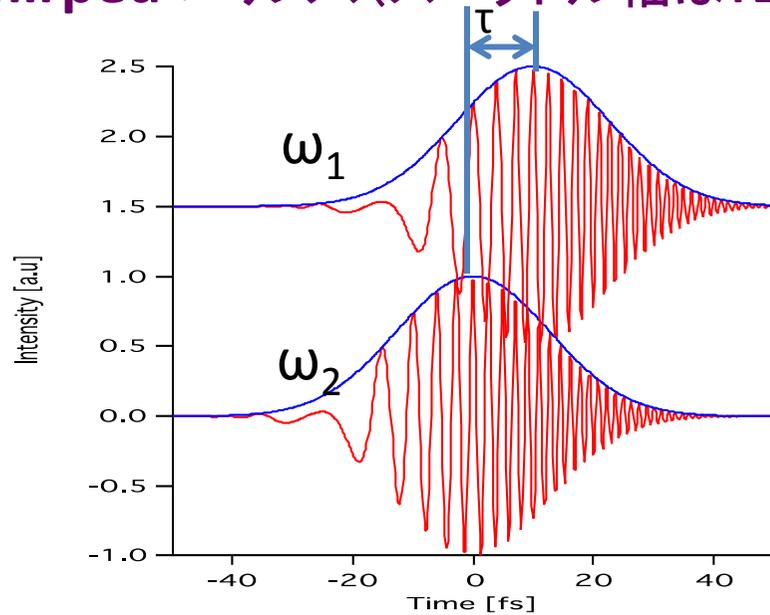
Transform limit パルス



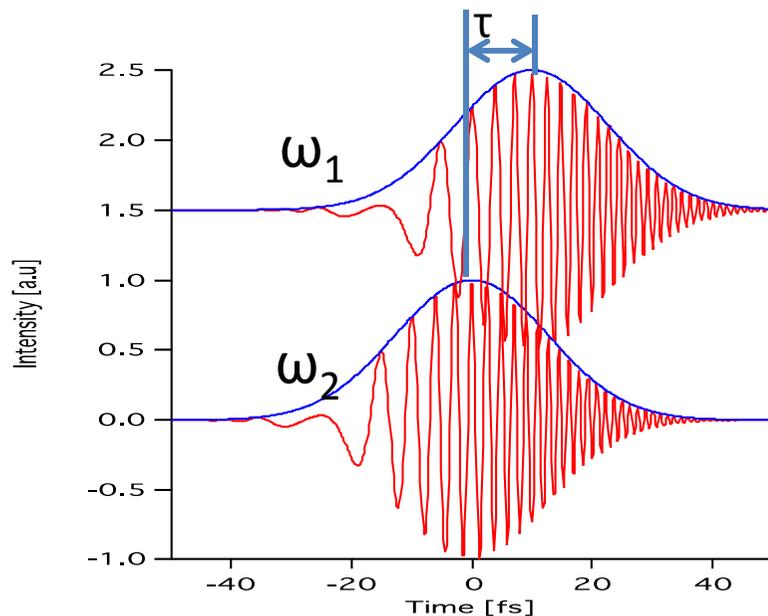
Transform limit パルスでは、電場相関でも強度相関でも同じ時間幅の信号が得られる。(コヒーレント時間)

電場相関と強度相関の違い

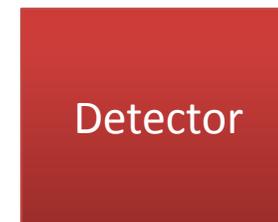
Chirped パルス (スペクトル幅はTLパルスと同じ)



$\tau \neq 0$ では、 $\omega_1 \neq \omega_2$ となり、信号強度平均化される。
 $\tau = 0$ 付近でのみ相関強度が大きくなり、
その幅は、TLパルスと同じ。



非線形結晶



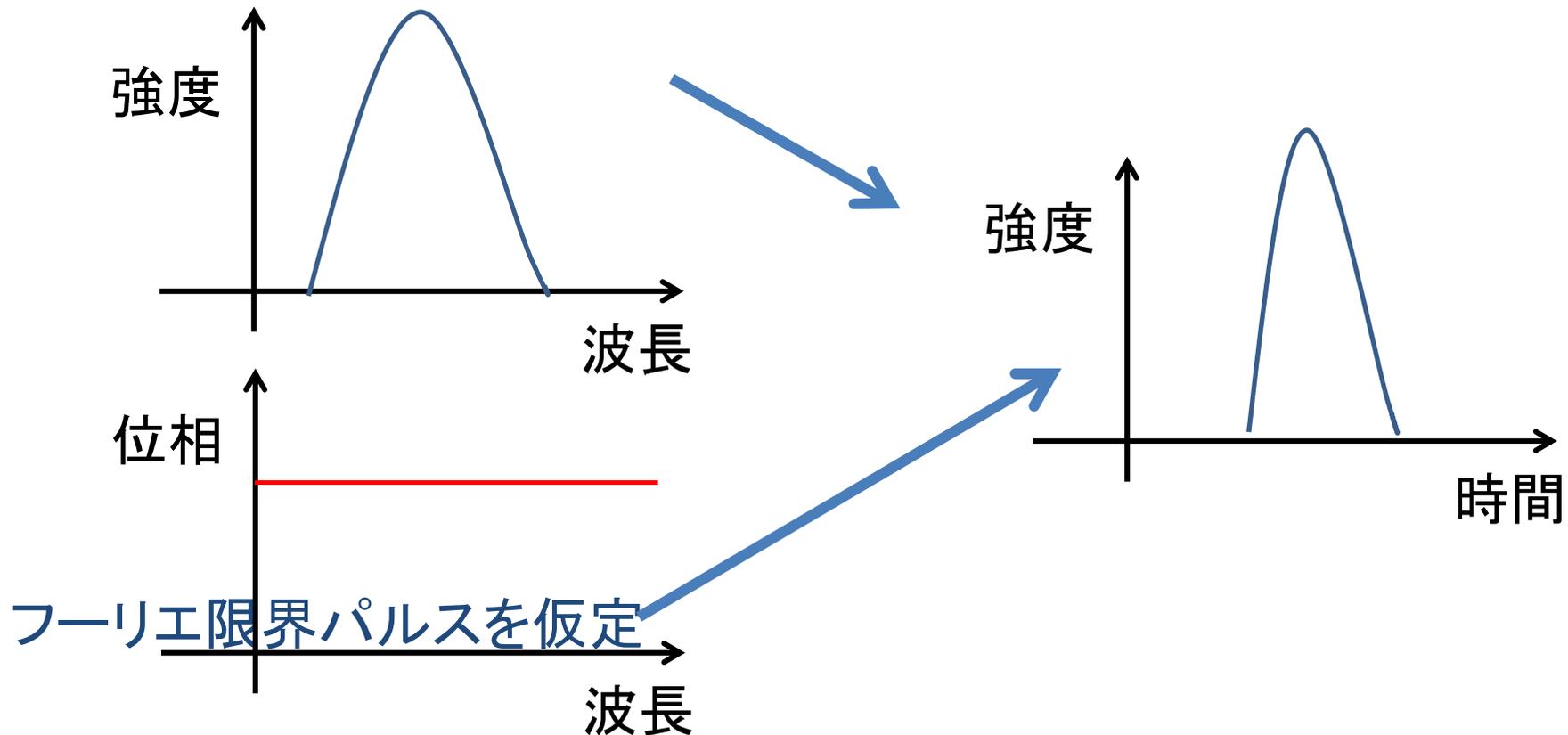
$\tau \neq 0$ でも、 $\omega_1 + \omega_2$ の和周波信号が発生する。
その幅は、パルスのEnvelopeを反映したもの
になる。

干渉計でバンチ長計測するには

マイケルソン干渉計を用いた電子ビーム幅測定

- ・コヒーレント長の計測しかできない

(単にスペクトル帯域を計測しているのと同様)



- ・実際のLINACのバンチ構造は複雑で、その構造で最も高い周波数成分をみているだけ(電子がその成分に大多数いるのが重要)

干渉計でバンチ長計測するには マイケルソン干渉計を用いた電子ビーム幅測定

- ・強度相関を計測する必要がある。(電荷密度を計測する必要性)

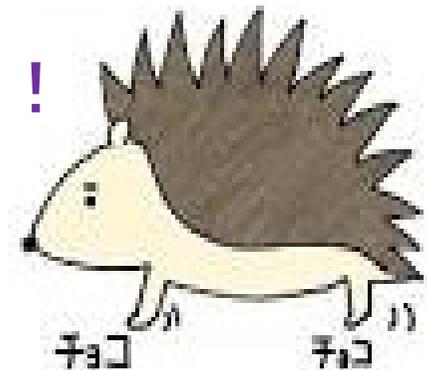
強度相関計測

光強度が強い場合 ⇒ 非線形効果を利用

光強度が弱い場合 ⇒ 2次相関(Hanbury-Brown Twiss)

ハリネズミの体に針がたくさんあることを知りたいのか、
体長を計測したいのかの違い！

⇒ 何を測っているのか分からなくなります。



フェムト秒電子ビームバンチ計測の比較のまとめ

1. フェムト秒ストリークカメラの限界:

- ・100fsのレーザパルスはストリークカメラFESCA200で計測しても
800nm: 時間分解能 ~ 300 fs (FWHM) [カタログ保証値]
400nm: 時間分解能 ~ 500 fs (FWHM) [浜ホトの参考値]
量子ゆらぎ領域では、パルス幅は誤差が大きく、値が定まらない(ポアソン分布)
- ・ストリークカメラでのSingle-shot計測ではFWHMでパルス幅を評価する程度(時間分解能領域では)
十分な統計性を上げると正確なサブピコ秒パルス形状は鈍ってしまう

2. マイケルソン干渉計を用いた電子ビーム幅測定

- ・コヒーレント長の計測しかできない: フーリエ限界パルスを仮定
- ・バンチ長計測というには電荷密度分布を計測: 強度相関計測
- ・フェムト秒バンチ計測には紫外までの計測必要: 300nm \sim 1 fs

3. EOサンプリングでどこまで時間分解能を上げられるか?

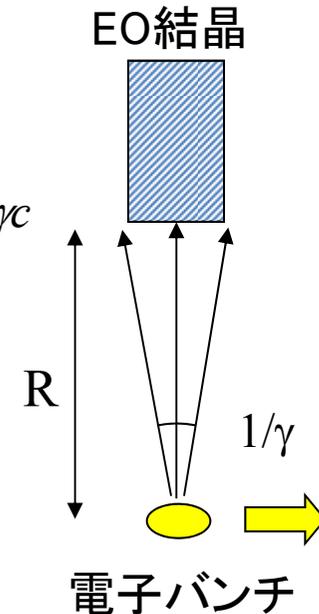
- ・線形チャープ矩形白色パルス光源開発: 30fsまで分解能向上
- ・有機EO結晶フィルムの開発: 30fsまで分解能向上

Spectral decodingの時間分解能の制約①

①電場の空間的広がり

相対論的電子バンチのつくるクーロン電場の広がり $T_{geo} = 2R/\gamma c$

8GeV+ビーム軸から10mm以内の条件⇒ 4 fs

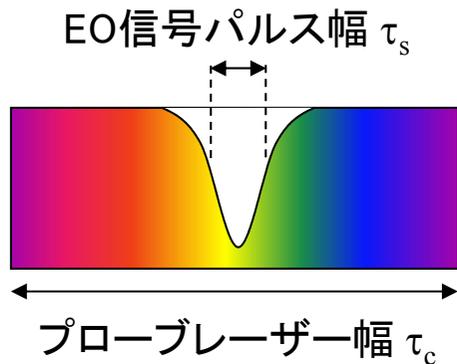


②プローブレーザーのバンド幅

フーリエの不確定性の関係 $T_{ft} \approx \sqrt{\tau_0 \tau_c}$
 (τ_0 : フーリエ限界パルス幅、 τ_c : チャープパルス幅)

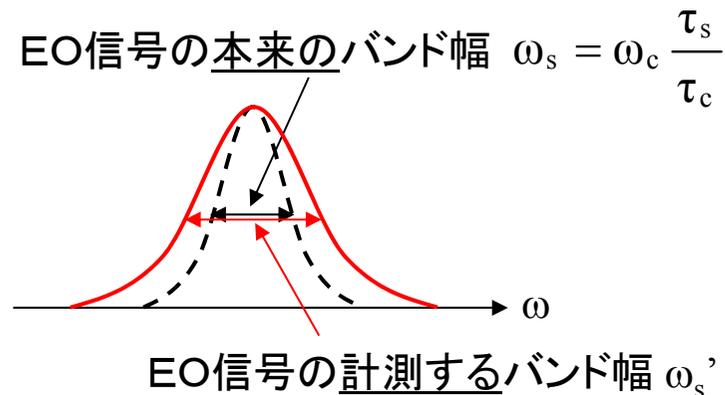
$t_c=300\text{fs}$, $T_{ft}=30\text{fs}$ の条件⇒ **バンド幅 >300nmの白色レーザーパルス**
 (チャープパルス幅 > 電子ビームの時間ジッターの必要)

時間領域



スペクトル領域

バンド幅が狭い場合
 $\tau_s \omega_s < 0.441$
 (gauss)

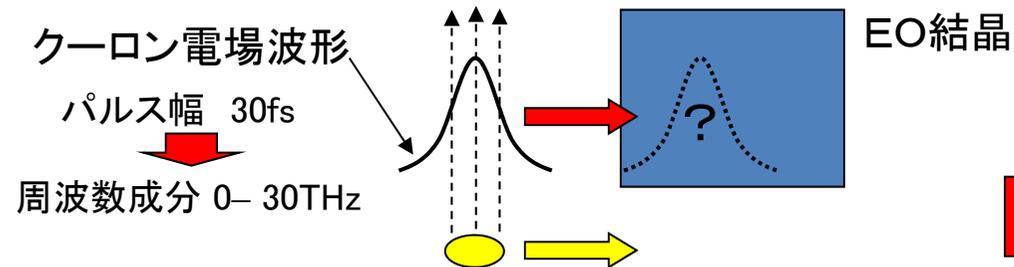


Spectral decodingの時間分解能の制約②

③EO結晶の屈折率分散

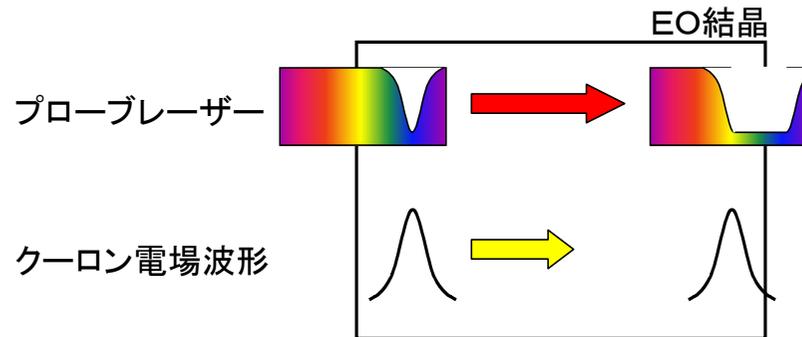
a) THz領域での屈折率分散

結晶伝播中にクーロン電場のパルス波形が崩れる。

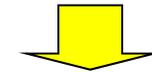


b) 可視領域とTHz領域の屈折率の差による速度不整合

レーザーとクーロン電場の結晶中の伝播速度の差



時間分解能の悪化

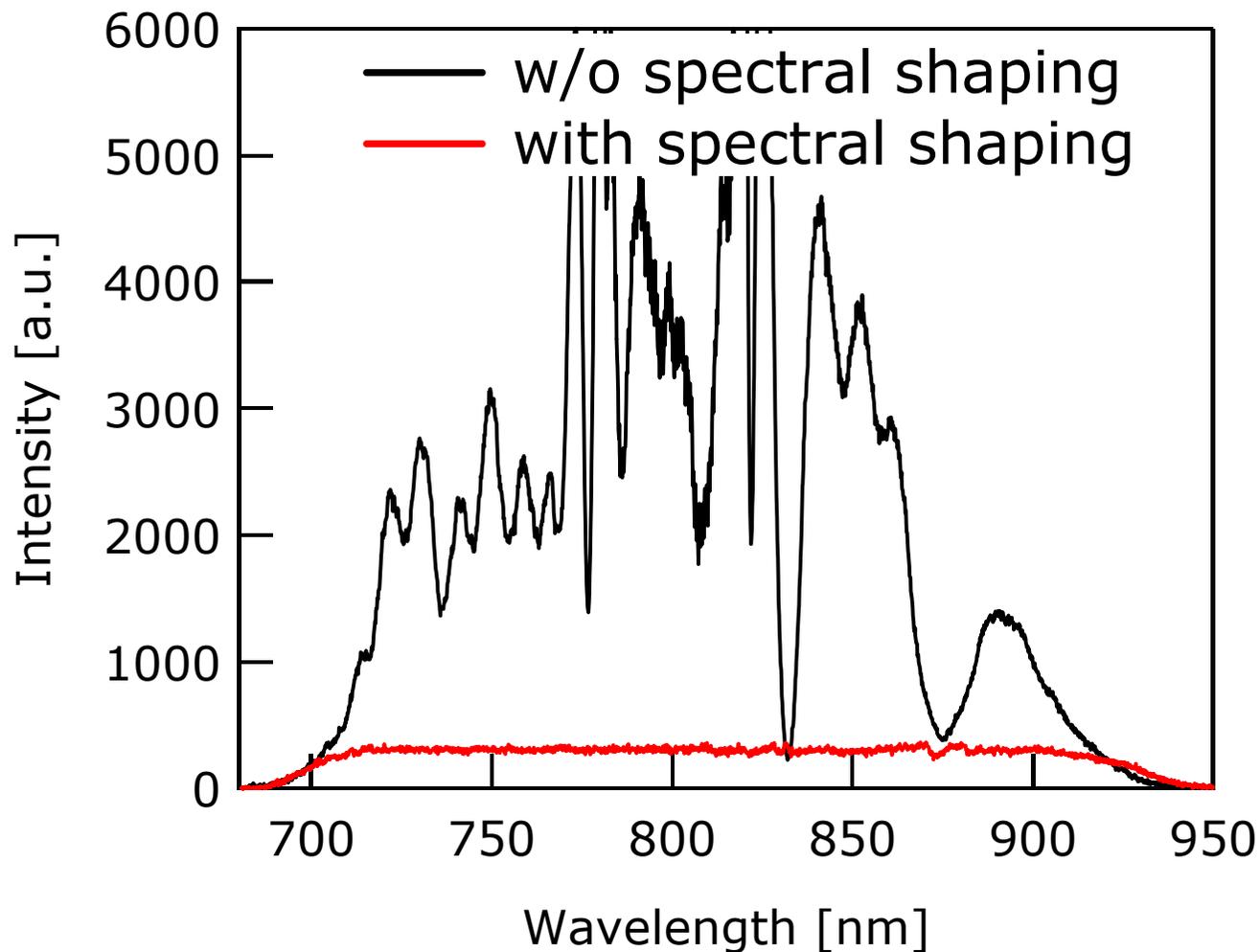


有機EO結晶の活用

フェムト秒時間分解能のためには、
白色レーザーパルス(バンド幅 > 300nm)と有機結晶が必要。

広帯域化の矩形スペクトル ($T_0=7$ fs) を生成

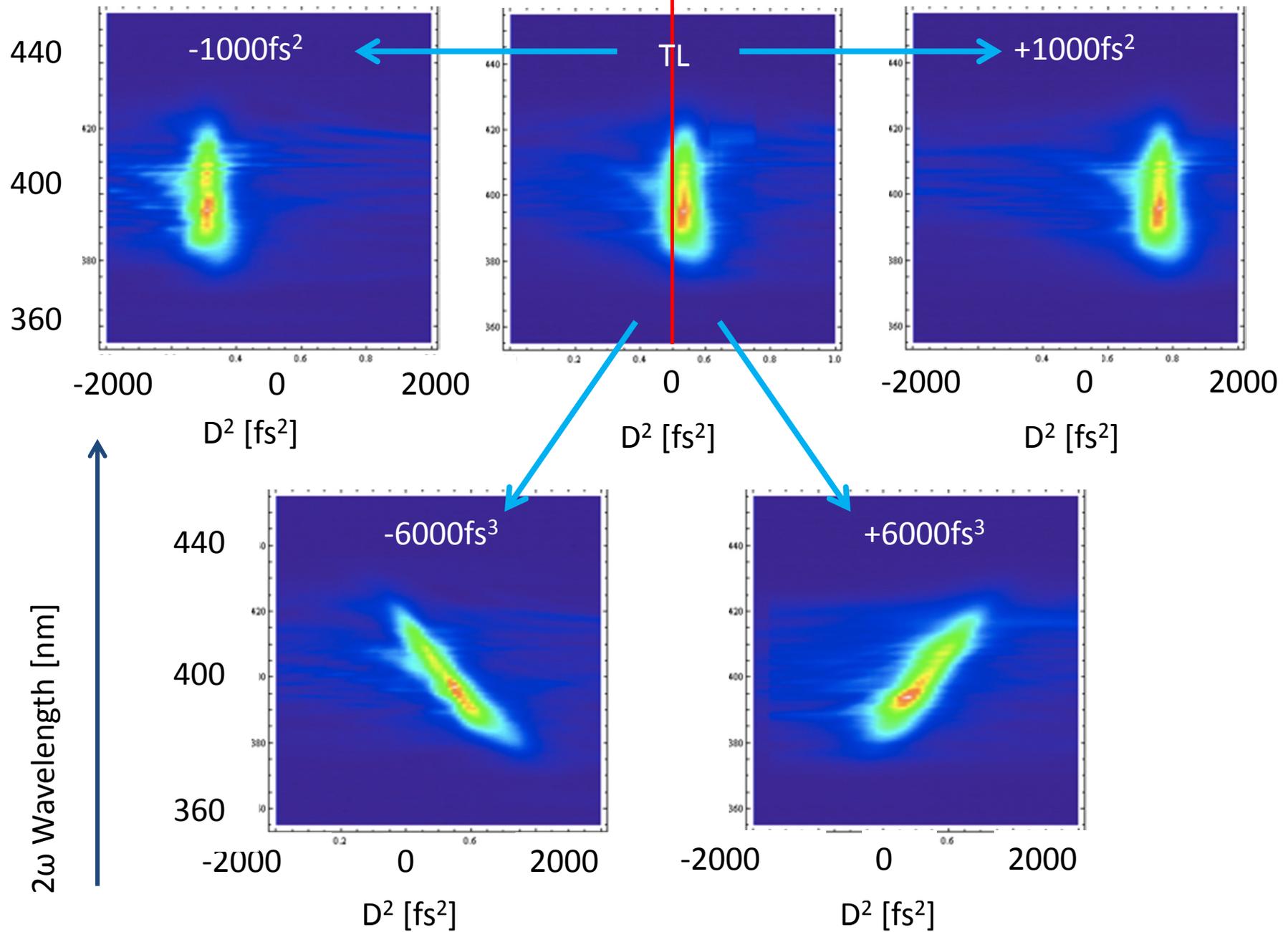
※300~500fsの線形チャープパルスにして用いる(タイミング・ジッターをカバーするため)



Clipping efficiency: 12%

Diffraction efficiency: 20% ==> 50% (w/ 50W RF amplifier)

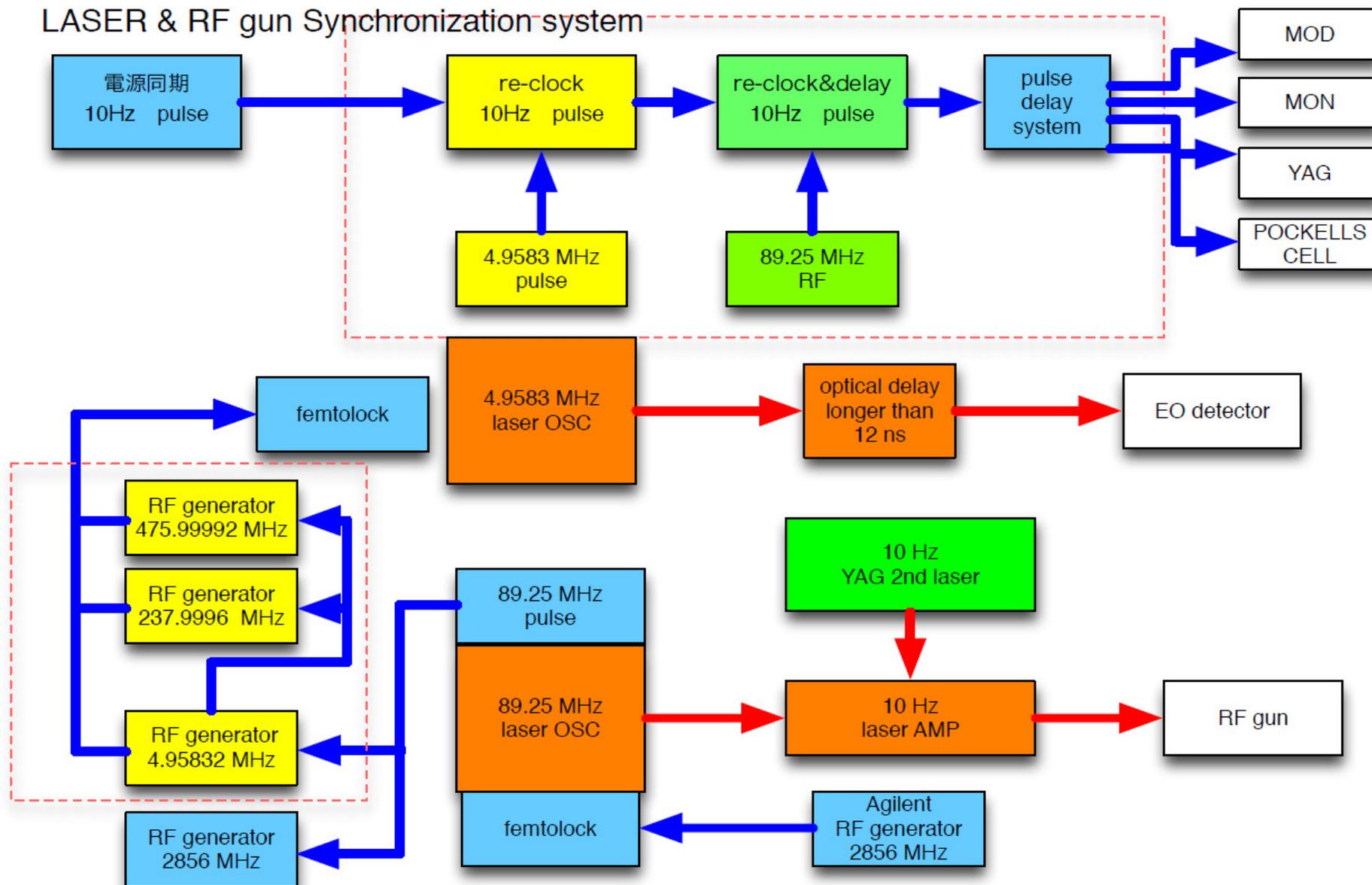
Chirp scanning to add pure GDD Chirp Rate: 40fs/nm



プローブレーザーのパルス幅は、タイミングジッターをカバーする必要があることに注意！

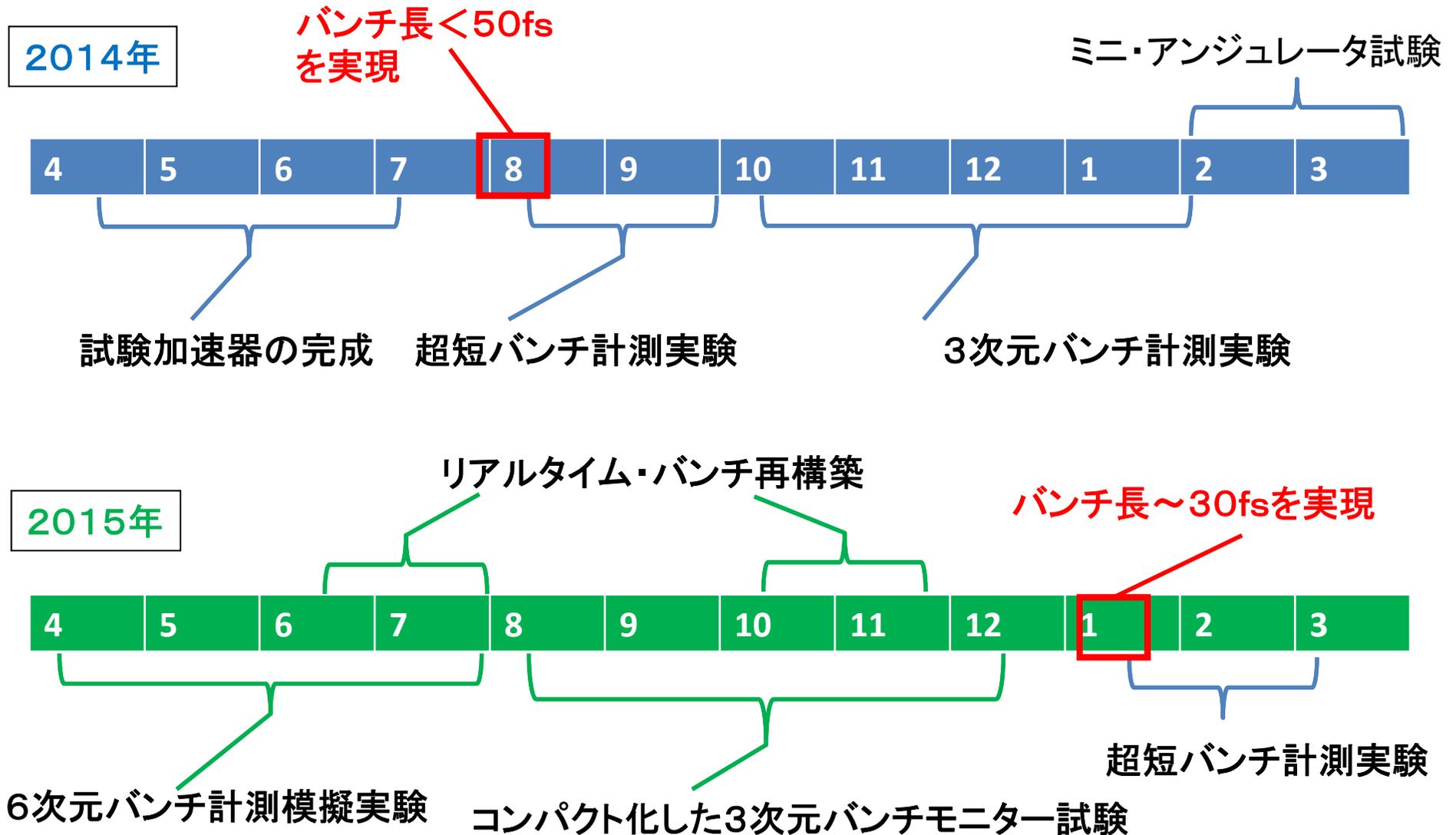
$$T_{ft} \approx \sqrt{\tau_0 \tau_c}$$

LASER & RF gun Synchronization system



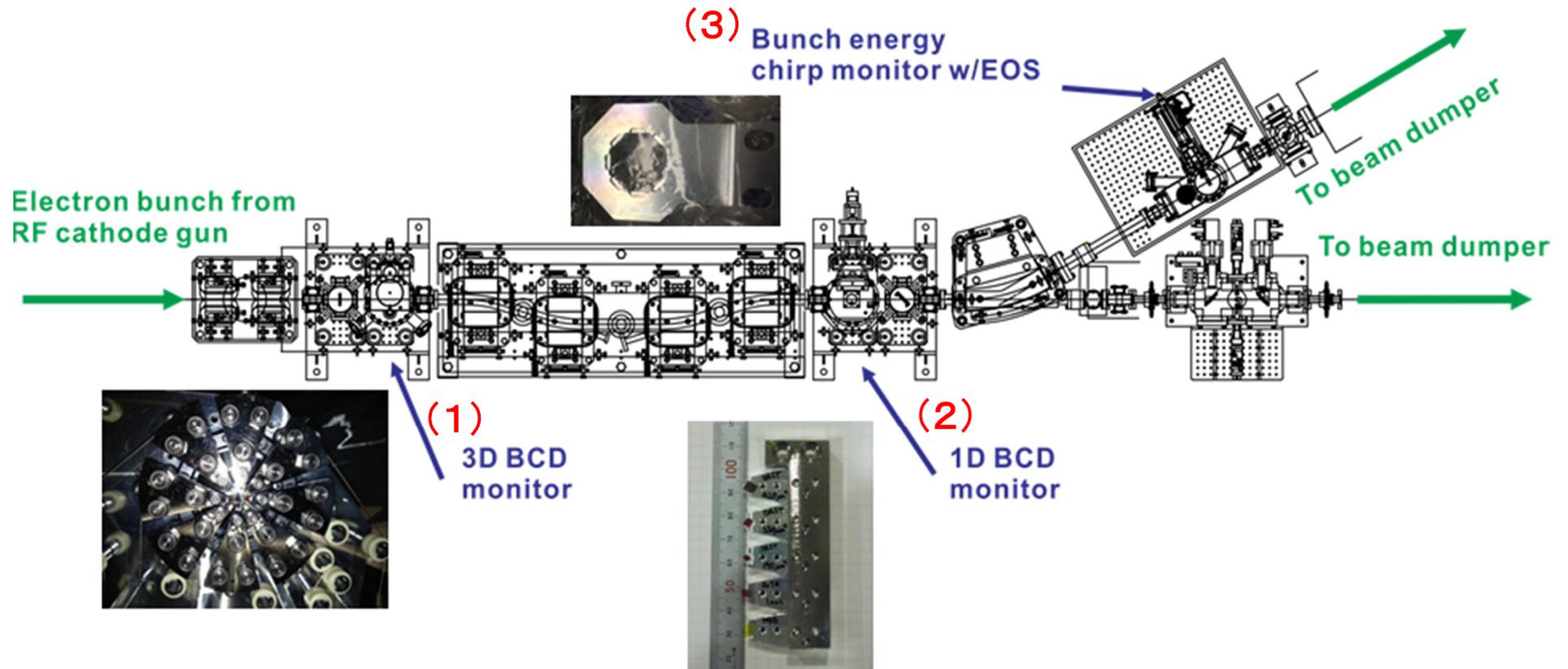
モニターテストベンチ開発スケジュール

2014年～2015年の計画



テストベンチの準備状況

- (1) 3次元電荷分布計測：シケイン前のピコ秒電子バンチで試験
- (2) 超高速EO結晶応答性試験：極短バンチで試験
- (3) エネルギーチャープモニター：分散部で広がり計測試験



まとめ：達成目標と留意点



本年度の達成目標:

- (1) マシン実験棟のアップグレード試験加速器を有効活用し、超高速バンチモニターの開発テストベンチをXSBTに設置するモニター開発用に整備する。
- (2) 有機EO結晶の耐放射線性も実現し、電子バンチ長を $< 50 \text{ fs [FWHM]}$ の時間分解能で非破壊・リアルタイム計測を実現する(EO結晶開発を含む)。
- (3) 他の方法も併用し、**物理的に変な計測にならない** ように注意し、比較して確かな計測を行うことが重要。
特に、阪大産研の吉田研がやっているような計測は、バンチの何らかの周波数成分を測ってるだけで、バンチ計測になっていない。付加的な計測としてしか使えない。今後、精査して比較計測を選択していく。

バンチ長が $1\text{ fs} \Rightarrow 10\text{ fs} \Rightarrow 20(5)\text{ fs}??$

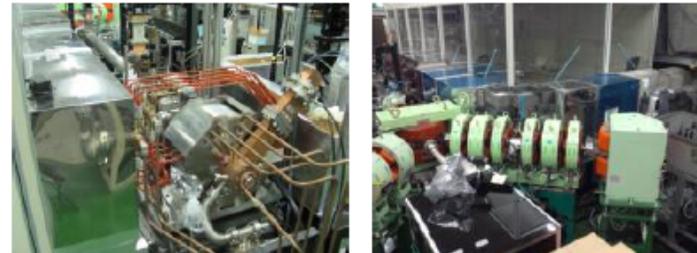
プレス発表の記事では

【発表2】 1000兆分の1秒の電子ビームの発生に成功

ナノ極限ファブリケーション研究分野は、**1フェムト秒** (1000兆分の1秒) の電子ビーム発生に成功しました。これは従来の電子ビームの100分の1の時間に相当し、最先端の加速器と技術を駆使した成果です。非常に短い電子ビームを物質に当てて、その時の物質の変化をパルスラジオリシスと呼ばれる方法を用いることで、物質の中で起こる超高速現象を探索することができるようになります。今回発生に成功した電子ビームを使うことにより、**世界最高時間分解能のパルスラジオリシスが実現可能**となりました。

これらの超高速現象は、放射線の人体への影響や放射線によるがん治療などの基礎過程の解明に重要な役割を果たします。また、次世代の半導体微細加工プロセスにとっても重要なパターン形成の基礎過程の解明が可能となり、さらに高性能なCPUやメモリーの開発に貢献します。

今回の成功により、さらに短いアト秒オーダー (10000兆分の1秒程度) の電子パルスの発生も実現にも目途が立ち、近い将来、ますます短い時間の世界を覗くことが可能となり、電子ビームによる“アト秒サイエンス”の解明が近づいてきました。



1フェムト秒の電子ビーム発生に成功した最先端の加速器

PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS

出版された論文の一つでは。。。

Measurement of $< 20\text{ fs}$ bunch length using coherent transition radiation

I. Nozawa, K. Kan,[†] J. Yang, A. Ogata, T. Kondoh, M. Gohdo, K. Norizawa, H. Kobayashi, H. Shibata, S. Gonda, and Y. Yoshida[†]

*The Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University,
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan
(Received 3 March 2014; published 9 July 2014)*

インターフェログラムが不可解 (I_{max}/I_0 ?)

まとめ：達成目標と留意点



この手法の問題点：

(1) 遷移放射のプロセスで、CTRのスペクトルが変化すれば、その干渉波形(時間波形)に影響するので、干渉波形から求めることが可能。しかし、電子ビームの時間波形が変化(logitudonalの分布が変化)しただけでは、CTRのスペクトルは変化しないので、干渉波形(時間波形)は変化するはずはない。

<300nm ~祝 1fs電子バンチ

(2) 超短パルス光では、パルスの中に1波長以上存在するべきである。10THzは波長30umで、100fsより短いパルスは存在しないはず。20fsのパルスでは、波長6umより短い中赤外~可視・紫外域の光が関与する。よって、20fsのパルスを測定しているとすれば、CTRスペクトルの掲載図は、パルスとして関与していない部分のスペクトルを見ていることになり、解析や測定方法そのものが間違っている。