

# ERLにおける超高速レーザー技術の可能性

板谷 治郎

(独)科学技術振興機構  
ERATO腰原非平衡ダイナミクスプロジェクト 研究員

Material Sciences Division  
Lawrence Berkeley National Laboratory

# 背景

2007.2～ レーザーの仕様検討、インフォーマルな議論→この中間報告

## ERL推進室

河田洋 (KEK)  
栗木雅夫 (KEK)  
羽島良一 (原研)

ERLの電子銃、加速器開発

## 産総研 光技術部

小林洋平  
吉富大

極限的なタイミング同期技術

## ERATO腰原プロジェクト

腰原伸也 (東工大)  
大門正博 (JST)

## PF-AR時分割ビームライン

足立伸一 (KEK)

## Lawrence Berkeley Nat'l Lab

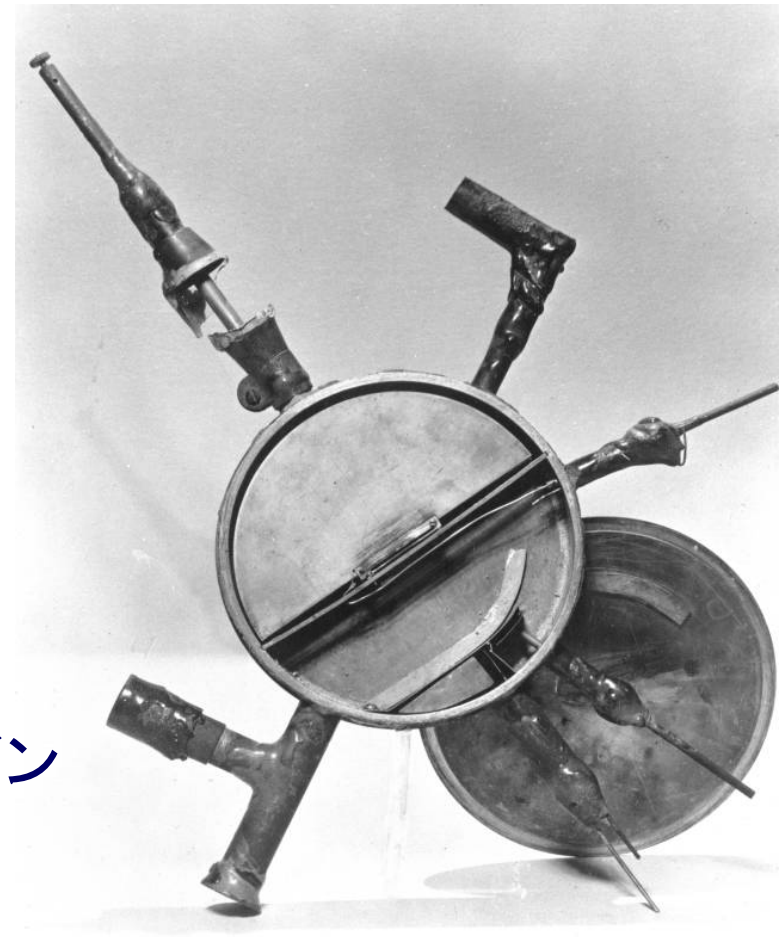
Bob Schoenlein (LBL)

第三世代放射光でのピコ秒～フェムト秒時分割測定

(敬称略)

# アウトライン

- ERLへの期待
- 超短パルスレーザー技術
- フォトカソード励起用レーザー
- タイミング同期技術
- ALSフェムト秒スライシングビームライン



# 放射光とレーザー

## ミクロの世界を探る汎用ツール

X線の発見(1895)

相対性理論

サイクロトロン<sup>の発明</sup>

DNAの構造解析

放射光技術

第一世代  
第二世代  
第三世代

$$|\Psi(x)|^2$$

XFEL

ERL

$$|\Psi(x,t)|^2$$

分子動画

Molecular Dynamic Imaging

## 量子の世界を探るツール

Einsteinの光量子仮説(1905)

量子力学

レーザーの発明

分光学  
非線形光学  
超短パルスレーザー  
量子光学  
原子光学

$$|\Psi(k)|^2$$

$$|\Psi(k,t)|^2$$

高出力・高強度レーザー

$$\Psi(k,t) [\equiv \Psi(x,t)]$$

[J. Itatani, "Molecular Orbital Tomography"]

# エネルギー回収型ライナック(ERL)

March 2003, KEK

放射光将来計画検討報告  
— ERL 光源と利用研究 —

Study Report on the Future Light Source  
at the Photon Factory  
— Energy Recovery Linac and Science Case —

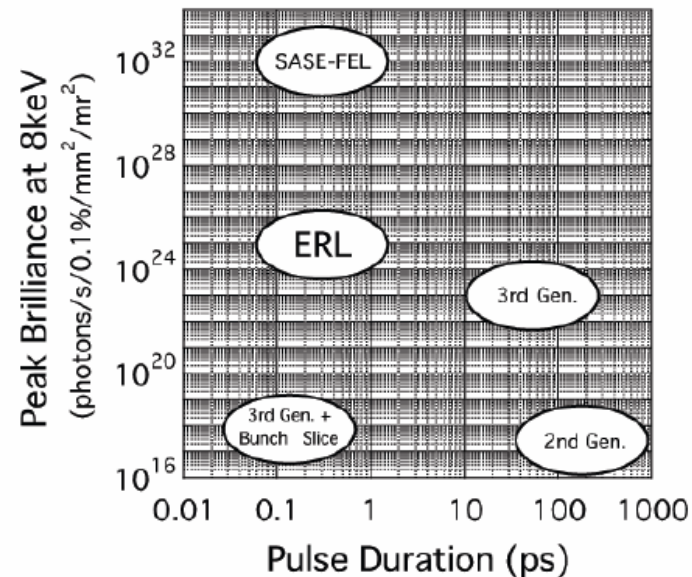
高エネルギー加速器研究機構  
物質構造科学研究所 放射光研究施設  
加速器研究施設

©High Energy Accelerator Research Organization

コスト試算 700~800億円(2003)

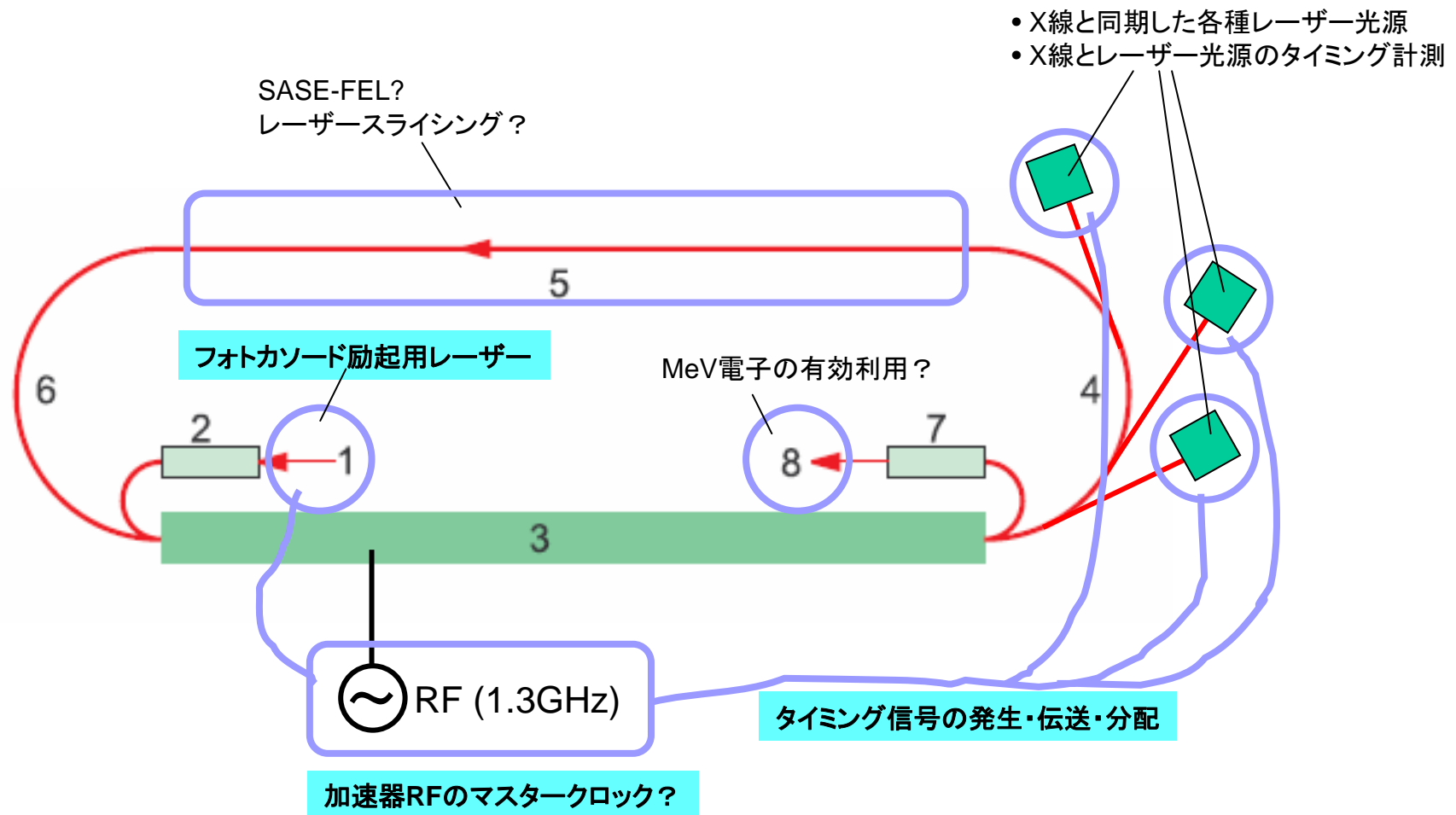
表 1.1: ERL の主要パラメータ

ビーム・エネルギー	2.5~5.0	GeV
入射エネルギー	10	MeV
周長	1253	m
最大電流	100	mA
規格化エミッタンス	0.1	$\mu\text{m}\cdot\text{rad}$
エネルギー幅 (rms)	$5 \times 10^{-5}$	
バンチ長 (rms)	1 ~ 0.1	ps
加速周波数	1.3	GHz
加速勾配	10 ~ 20	MV/m



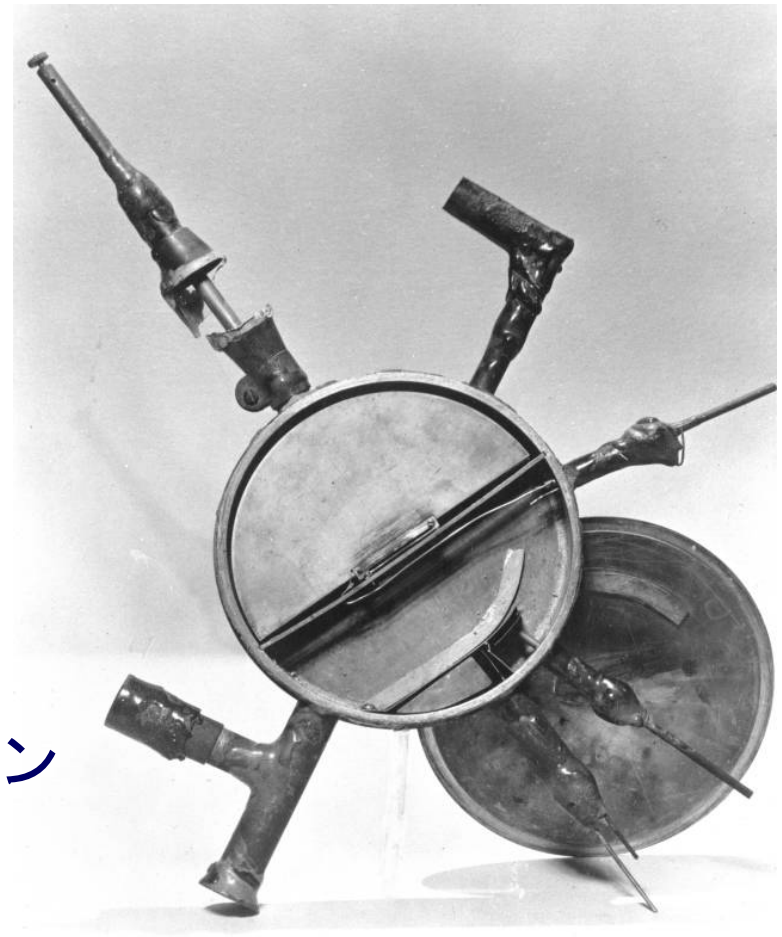
# レーザー屋から見たERL

超高速レーザー技術が必須のものとして、放射光に融合できるか？



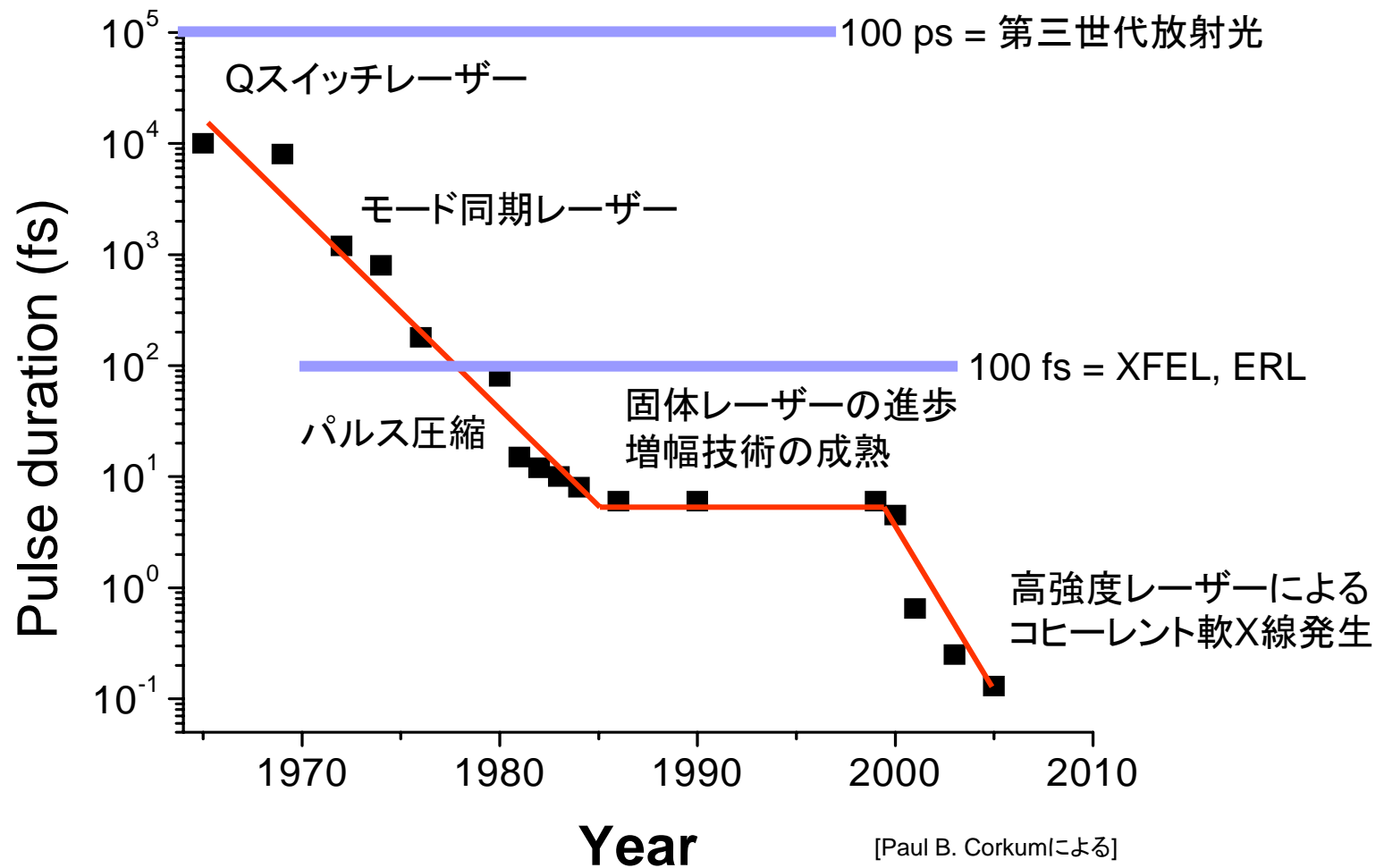
# アウトライン

- ERLへの期待
- 超短パルスレーザー技術
- フォトカソード励起用レーザー
- タイミング同期技術
- ALSフェムト秒スライシングビームライン



# 超短パルスレーザー

## 1. 最短パルス幅の変遷





# 超短パルスレーザー

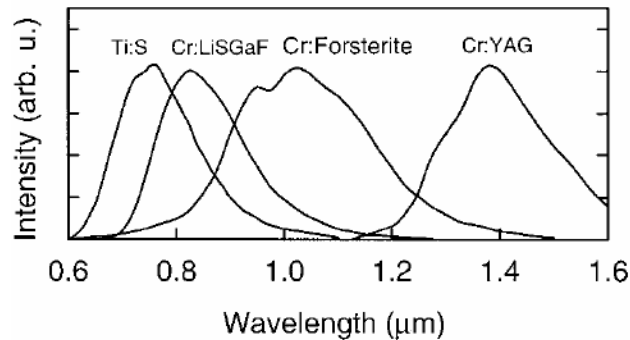
## 2. 超短パルスの発生と増幅

- チタンサファイア
- カーレンズモード同期
- チャープパルス増幅(CPA)

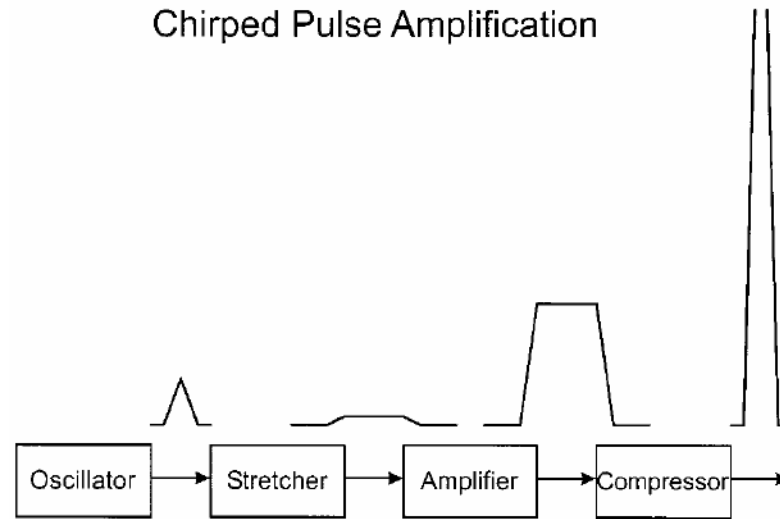
超短パルス(<10 fs)の発生

テラワットレベルへの増幅

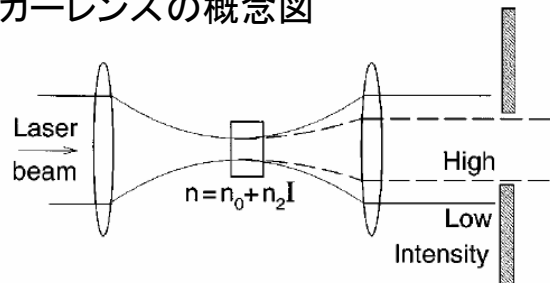
広帯域固体レーザーの比較



チャープパルス増幅法  
Chirped Pulse Amplification

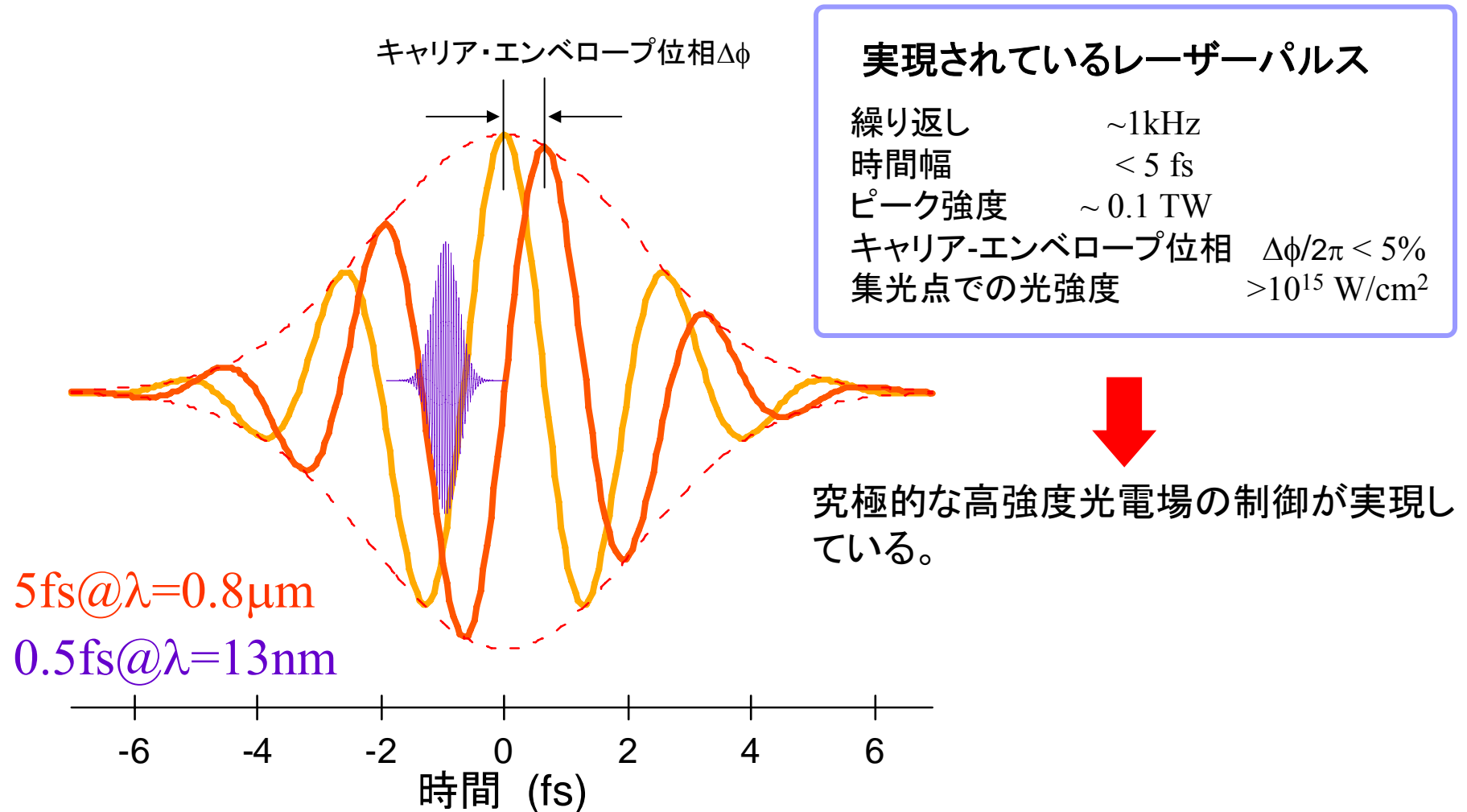


カーレンズの概念図



# 超短パルスレーザー

## 3. 光電場波形の制御



# 超短パルスレーザー

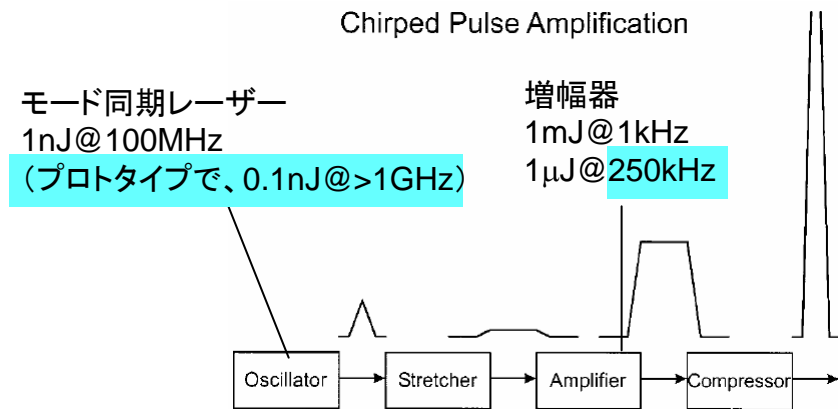
## 4. 高出力チタンサファイアレーザー

フェムト秒レーザーのデファクトスタンダード —— しかし、繰り返しは1MHz以下

### 典型的なスペック

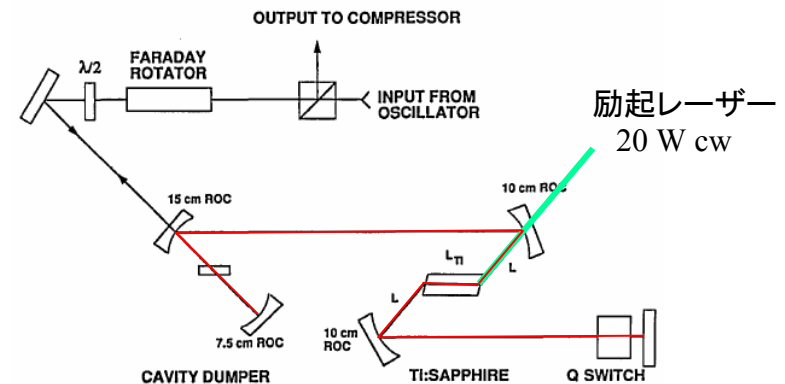
- テーブルトップ規模の装置
- パルス幅 30 fs
- パルスエネルギー 1 mJ
- ピークパワー 30 GW
- 繰り返し 1 kHz
- 平均出力 1W

市販品の例（独フェムトレザー社）



### 連続波励起250kHz再生増幅器

[T. B. Norris, Opt. Lett. 17, 1009 (1992)]



# 超短パルスレーザー

## 5. ファイバーレーザー

ファイバーレーザー発振器

ファイバーレーザー増幅器

典型的なスペック

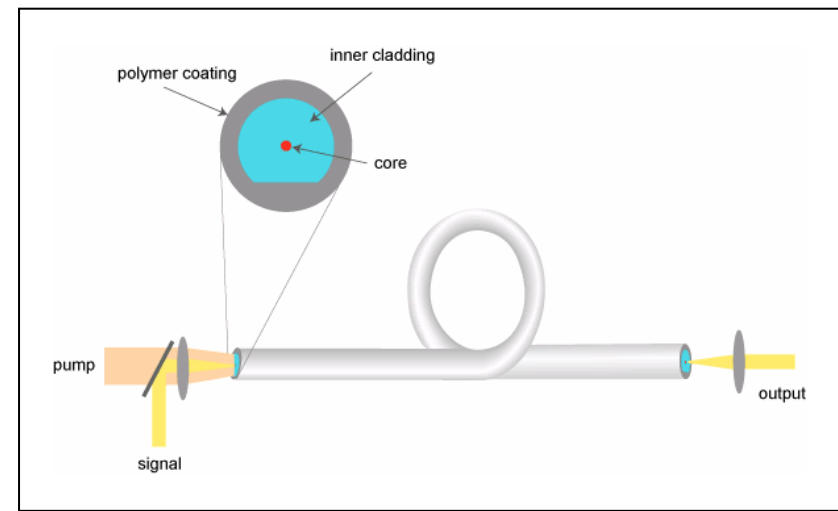
パルス幅	100 fs	300 fs
パルスエネルギー	0.1 nJ	10 $\mu$ J
繰り返し	50 MHz	100 kHz (1GHz以上も可能)
平均出力	50 mW	1 W (プロトタイプでは、10-100 W)

ERLでの用途

周波数のトランシーバー

繰り返し1.3GHzの光パルス増幅器

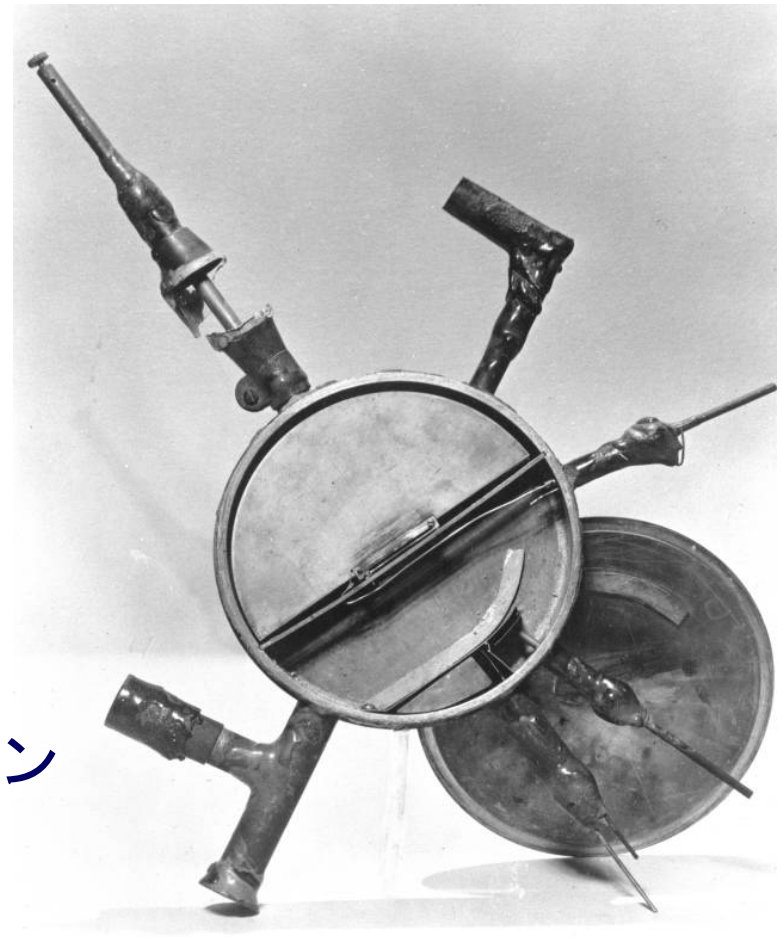
市販品の例(IMRA America, Inc.)



[Encyclopedia of laser physics and technology, [www.rp-photonics.com](http://www.rp-photonics.com)]

# アウトライン

- ERLへの期待
- 超短パルスレーザー技術
- フォトカソード励起用レーザー
- タイミング同期技術
- ALSフェムト秒スライシングビームライン



# 電子銃のスペック

ERL への入射用として実現すべきビームは以下のようなものである。

- $\varepsilon_x = 0.1 \pi \text{mm.mrad}$
- 100 mA、連続ビーム
- $\sigma_z \sim 2\text{ps}$

現在このようなビームを生成できる電子銃はこの世に存在しない。

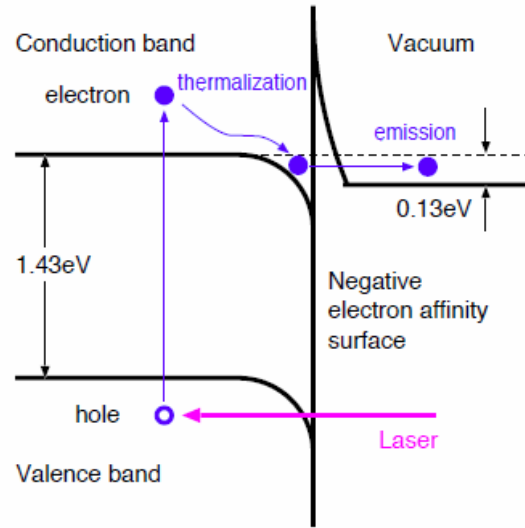
[KEK ERL Report (2003)]

レーザーだけの問題ではない

# フォトカソード材料

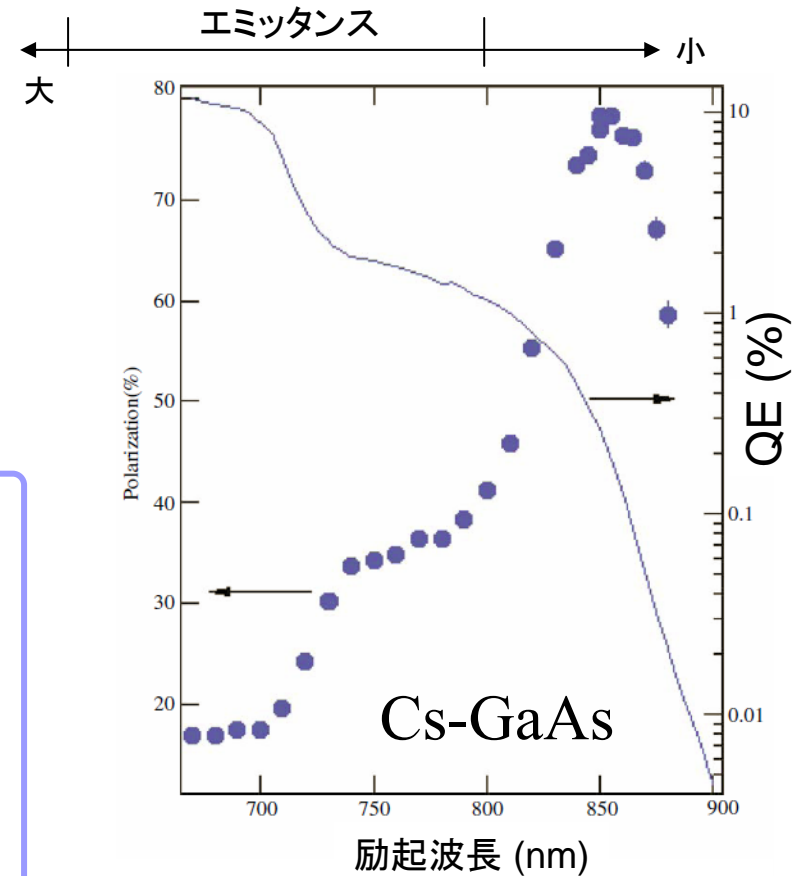
## NEA-GaAs

[KEK ERL Report (2003)]



報告値  
500 nm  
1 mm.mrad

期待する値  
800 nm  
0.1 mm.mrad ?



[T. Rao et al., NIMA 557, 124 (2006)]

### 原研・羽島氏からのまとめ(2007.3)

- 低エミッタンス(0.3 mm.mrad)のためには、NEA-GaAsが唯一の選択肢
- NEA-GaAsのエミッタンスは、励起波長依存性が大
- エミッタンスと量子効率はトレードオフとなる
- 量子効率は、超格子構造等によって改善の余地がある。
- 段階的な開発もありうる  
0.1mm.mrad @ 10 mA → 1mm.mrad @ 100mA  
(ERLプロトタイプ機?) (ERL?)

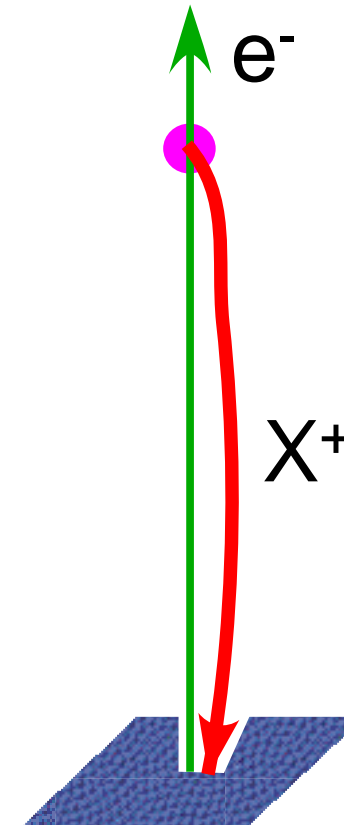
# フォトカソード材料(続)

KEK, ERL Report (2003)

- GaAsにCsと酸素を吸着させ、表面準位を反転させる。
- その構造上、イオンの衝突によって壊れやすい。
- 高真空が必要  $10^{-10}$  Pa
- 暗電流を $1\text{nA/m}^2$ 以下にする必要がある。
- そのときの表面電場は $33\text{MV/m}$
- CEBAF入射器(Jefferson Lab)  
直径 $1\text{mm}$ で $100\text{mA}$ の運転だと、寿命は5時間(予測)。

C. K. Sinclair, NIMA 557, 69 (2006)

- 実績値  $9\text{ mA @ } 75\text{ MHz}$  (Jefferson Lab, [in operation](#))
- ERL ( $100\text{mA}$ )を実現するためには、寿命が最大の問題
- 寿命は、イオンの衝突によって制限されている。





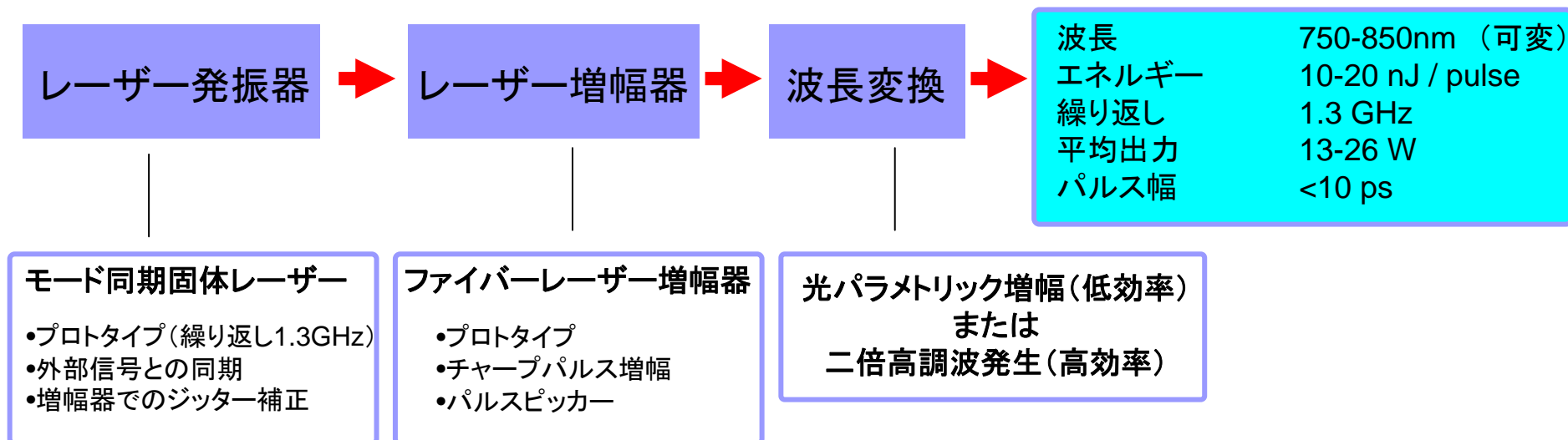
# 早急なR&Dの必要性

## 【現状】

- 電子銃の開発が、ERL開発におけるネックとなる可能性がある。
- 現時点では、フォトカソード励起用レーザーの仕様は明確ではない。
- 材料の開発が必要(寿命、量子効率の改善)
- 電子銃の開発が必要(超高真空化、フォトカソードの交換・冷却)
- しかし、レーザー自体が市販品では実現困難なため、先行開発したい。  
(スケーリングのきく方式が望ましい)
- 早急に、材料の開発・評価体制を整えて、開発を推進する必要がある。  
(電子銃の評価用レーザーも必要?)

# フォトカソード励起用レーザーの構成

現時点でのレーザー仕様



## 【特徴】

- 市販されているレーザーとは非常に異なる仕様
- すべての要素が、2007年時点でのプロトタイプ技術に基づく
- したがって、ERLを目標にしたレーザー開発体制が必要

# ファイバーレーザー媒質の比較

	Ybガラス	Er-Ybガラス
波長	1030 nm (Nd:YAGとほぼ一致)	1560 nm (光通信と一致)
超短パルス化	100-200 fs (どちらも、ファイバー中の非線形伝播によって制限される)	>200 fs
増幅	<b>高効率</b> - 高い量子効率(~90%) - ESAがないので強励起可。	<b>低効率</b> - 低い量子効率(60%) - YbからErへのエネルギー移行 - ESAがあるので強励起が不可。
連続波出力	~200 W (commercial) >1 kW (R&D)	<10 W (commercial) ~100 W (R&D)
波長変換 (=> 800 nm)	<b>低効率(&lt;20%)</b> - 第一段階:PPLNによる二倍波発生 - 第二段階:二倍波を励起源とした 光パラメトリック増幅 - 波長は750-850nm付近で可変。	<b>高効率(&gt;80%)</b> - 疑似位相整合素子(PPLN)の利用 - 波長は775nmで固定される。
R&Dでの注意点	産業用に高出力化が進んでいる。 通信・アイセーフ用のため、高出力化の需要が少ない。 励起波長(~930 nm)が共通しているため、同時に開発を進められる可能性がある。	

# フォトカソード励起用レーザーの構成例

## 1. Ybファイバー増幅器

### 超広帯域モード同期チタンサファイアレーザー

- 波長 650-1100 nm
- 繰り返し 1.3 GHz
- パルス幅 <10 fs
- パルスエネルギー 0.5 nJ
- 平均出力 0.6 W

レーザー  
発振器

パルス  
ストレッチャー

### Ybファイバー増幅器 (単一モードファイバー)

- 平均出力 10 W

波長1.0  $\mu\text{m}$

パルス  
ピッカー

### Ybファイバー増幅器 (マルチモードファイバー)

- 平均出力 100 W

パルス  
コンプレッサー

### 二倍波発生

- 変換効率 80%

### パラメトリック増幅

- 変換効率 10%

波長  
1.5  $\mu\text{m}$

0.5  $\mu\text{m}$

0.8  $\mu\text{m}$

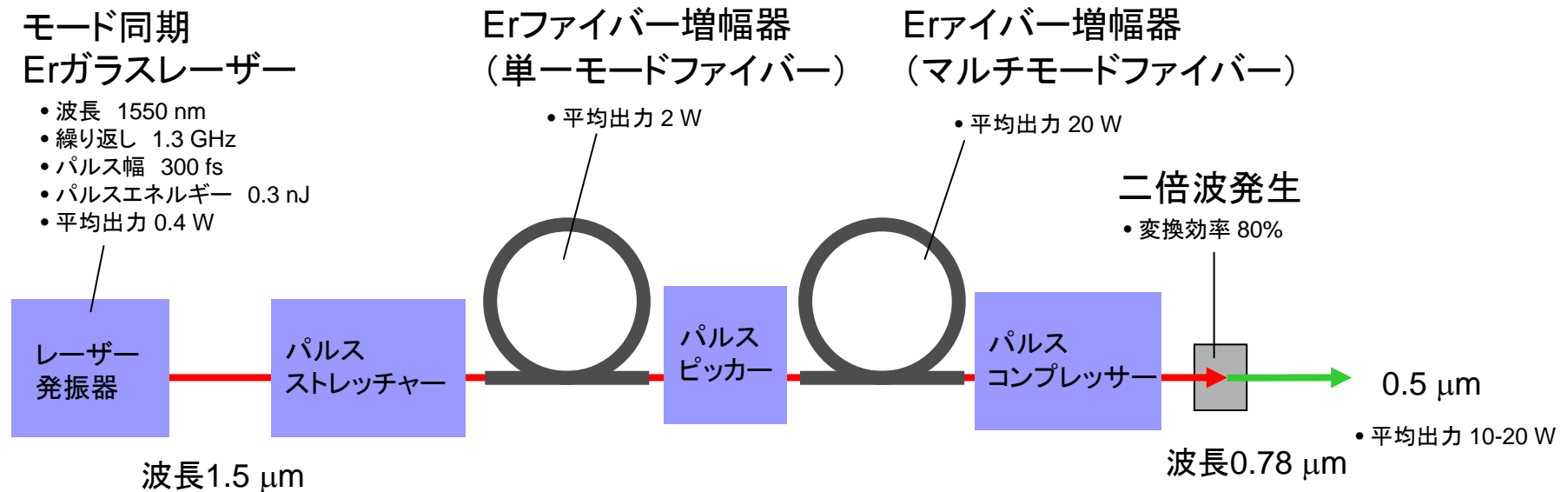
- 平均出力 10-20 W

波長0.8  $\mu\text{m}$

- 波長可変
- 出力のスケールアップが可能
- 波長変換が二段階で、効率が低い

# フォトカソード励起用レーザーの構成例

## 2. Er-Ybファイバー増幅器



- 波長は固定される。
- 出力のスケールリングが不明(材料固有の問題?コスト?)
- 波長変換が一段階で、簡便かつ、高効率。

# パルスピッカーについて

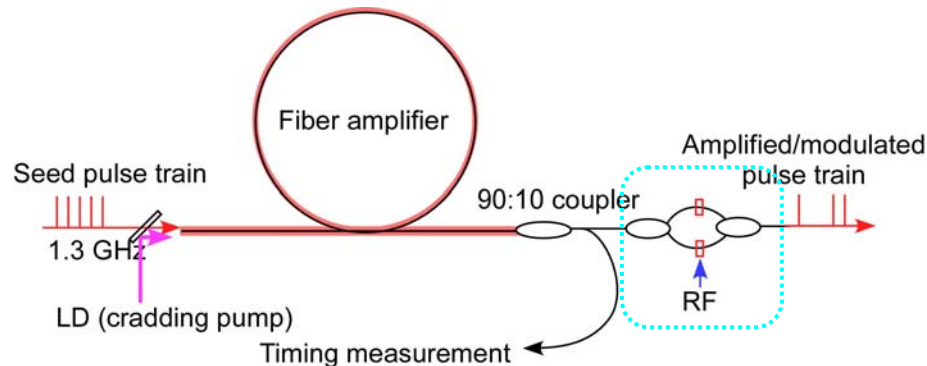
- 1.5 GHzのパルス列を、必要に応じて間引けることが望ましい。  
 (例) レーザーと同期した時分割実験では、レーザーと同期したX線パルス「だけ」が欲しい。

- Mach-Zender干渉計による10GHzのパルスピックアップは通信用に(=低いパワーで)実現している。

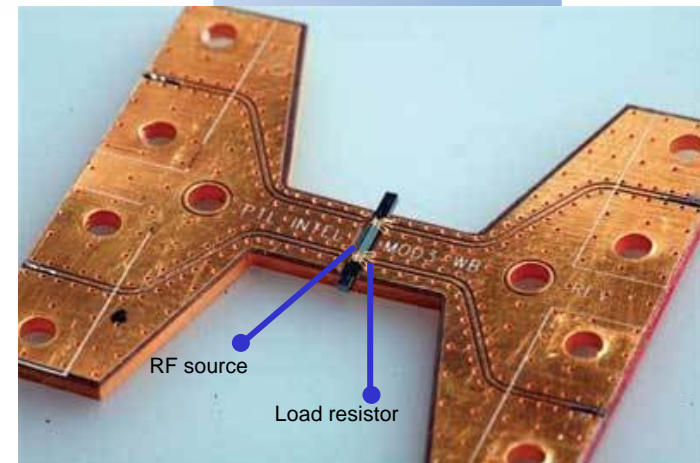
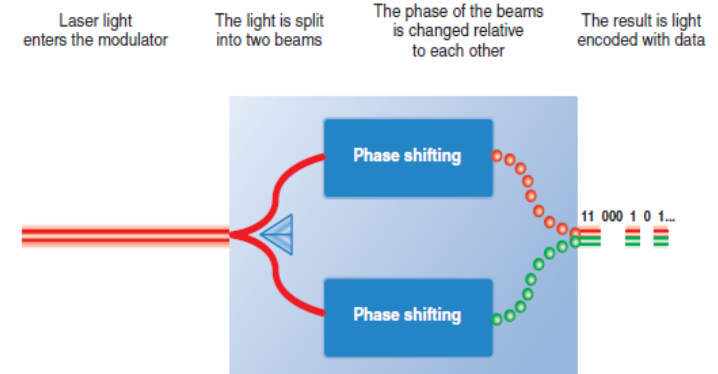
通常の非線形結晶 (LN)	10 Gb/s (commercial) 40 Gb/s (R&D)
Si	30Gb/s (R&D)

- また、ファイバー増幅器へのインテグレーションが可能。

初段ファイバー増幅器へのインテグレーション



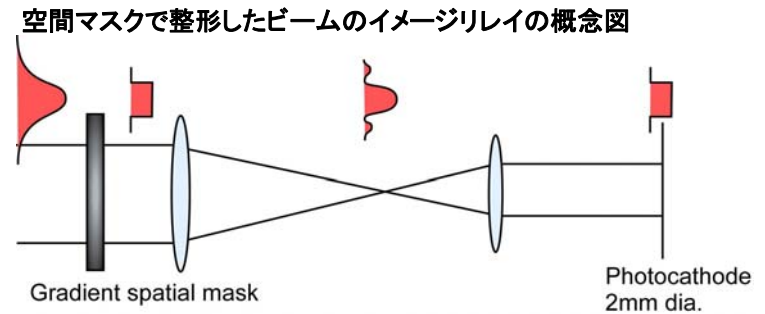
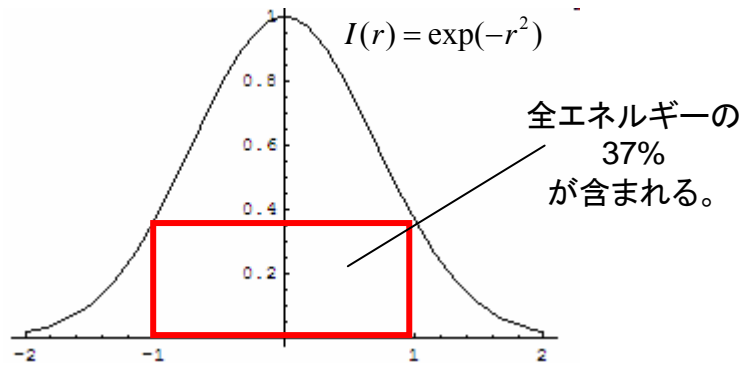
通信用のGHz強度変調子(概念図、実物写真)



[Silicon photonic modulator, Intel, Laser Focus World, April 2007]

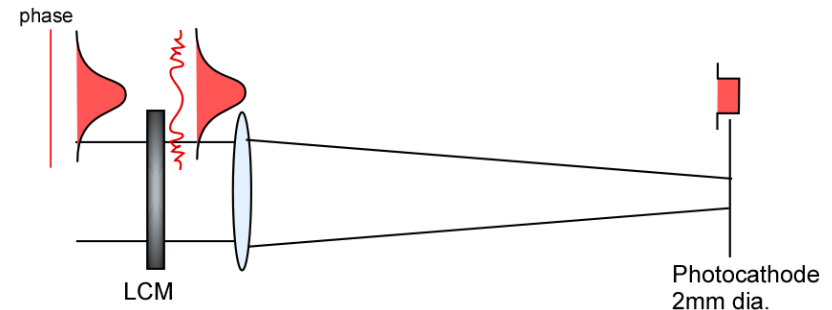
# レーザーパルスの空間整形について

- フォトカソードは、一様な強度分布での光照射が望ましい。
- ガウシアンビームを整形するような反射率分布をもつミラーのスループットは最大40%



- 液晶などによる波面整形は可能。  
位相マスクによってスループットを>80%に高めることは、原理的には可能。

空間位相変調子の例 [Meadowlark Optics]



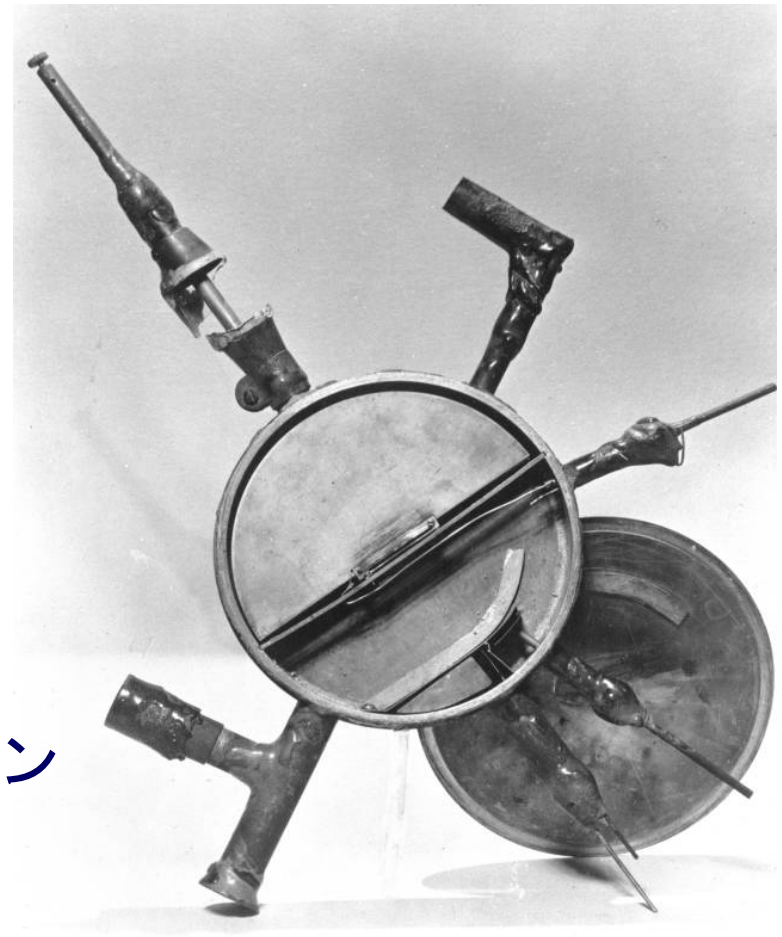
# フォトカソード励起用レーザーに関するまとめ

- ファイバー増幅器のレーザー媒質の候補として、ErファイバーとYbファイバーがある。
- 現時点では優劣はつけがたい。  
両方式で初段の低出力増幅器を開発し、全体のパフォーマンスを検証することが望ましい。
- フォトカソード材料や電子銃の設計とレーザー開発とは車の両輪であり、連携した開発体制が望ましい。



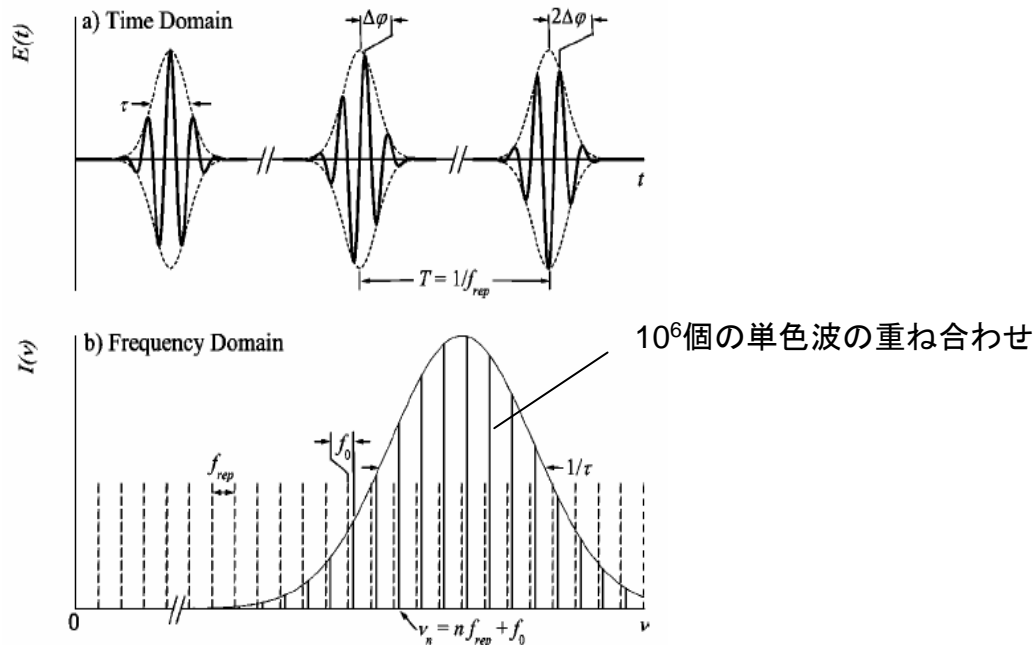
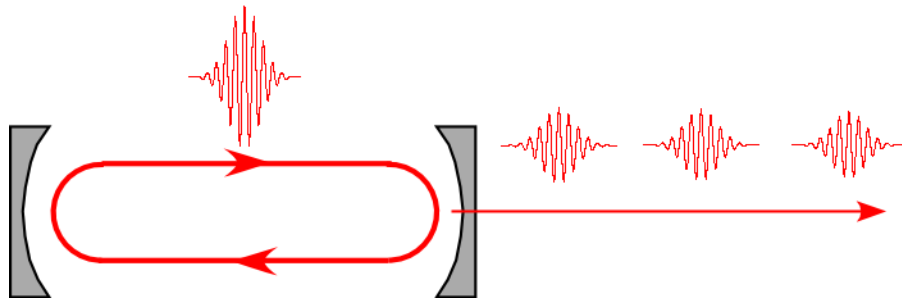
# アウトライン

- ERLへの期待
- 超短パルスレーザー技術
- フォトカソード励起用レーザー
- タイミング同期技術
- ALSフェムト秒スライシングビームライン



# 光信号の伝送・分配

## 1. 周波数コム



- モード同期レーザーを周波数のクロックとして使う。
- パルス列の繰り返し周波数(RF) = 周波数コムの間隔
- 光ファイバーによる長距離伝送、分配が容易。
- RFのビートを検出することにより、二つのモード同期レーザーのタイミングを高精度に同期できる。
- 光検出器を介して、RF信号を発生できる。

# 光信号の伝送・分配

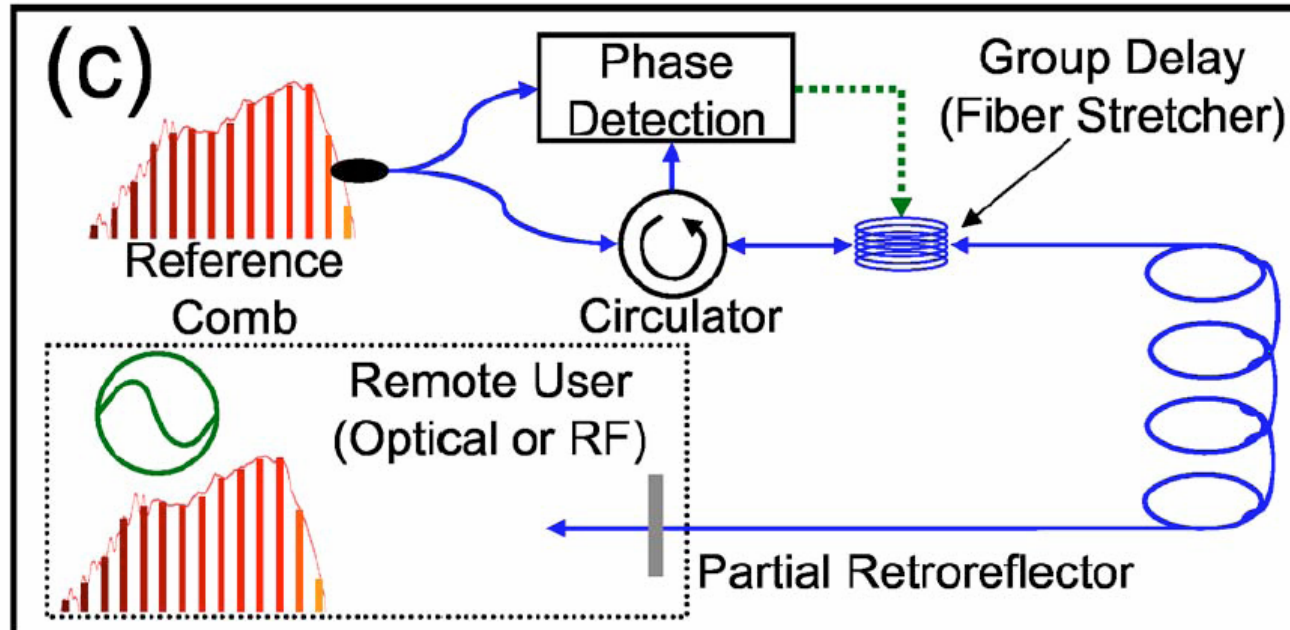
## 2. 周波数コムの実用例

### 【基本的な考え方】

- モード同期レーザーを、周波数の「トランシーバー」として使う。
- ファイバーで送った光を逆に戻して、マスタークロックとのタイミングのずれを測定、補正する。

### 【特徴】

- 同軸ケーブルでRF信号を送るよりも高精度な同期が得られる。
- 光ファイバーは、加速器からの電氣的擾乱を受けにくい。



# 光信号の伝送・分配

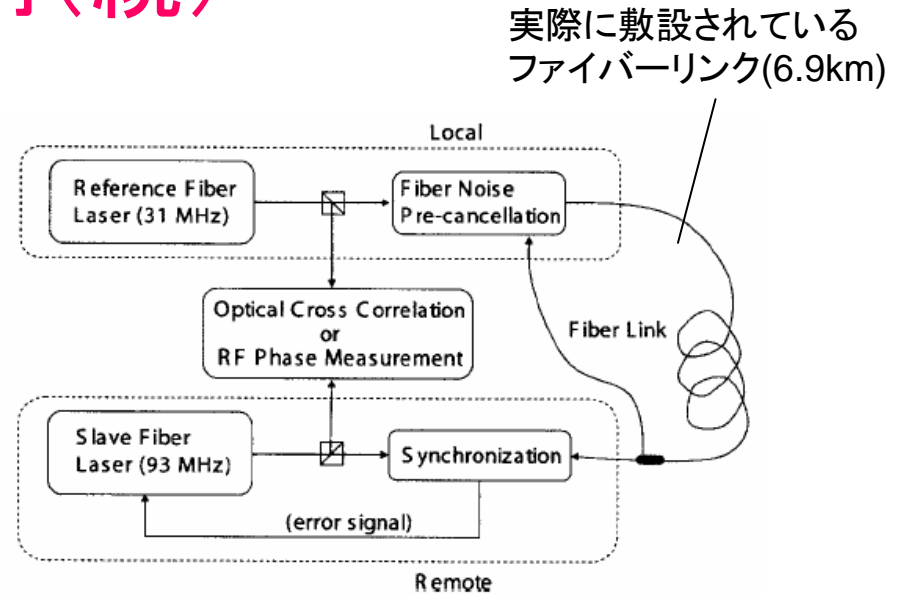
## 2. 周波数コムの実用例(続)

### Synchronization of mode-locked femtosecond lasers through a fiber link

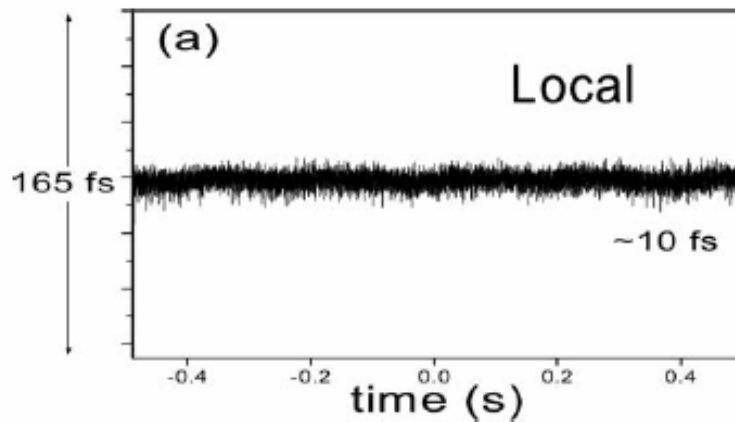
Darren D. Hudson, Seth M. Foreman, Steven T. Cundiff, and Jun Ye

JILA, National Institute of Standards and Technology and University of Colorado, Boulder, Colorado 80309-0440  
and Department of Physics, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309-0390

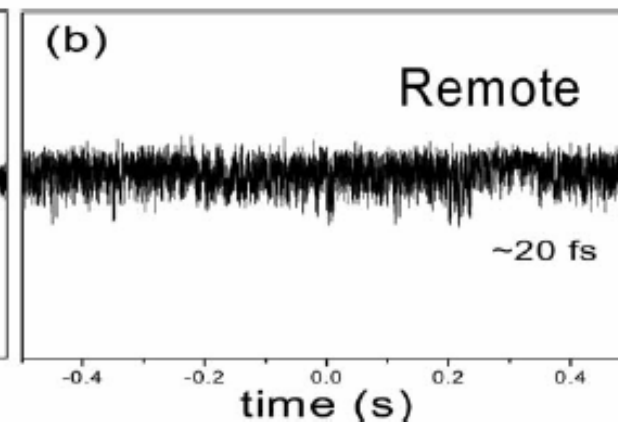
[JILA group, Opt. Lett. 31, 1951 (2006).]



光ファイバーを経由しないで同期



光ファイバーを経由して同期



# ERLでの同期精度の目標

## 【妥当な目標】

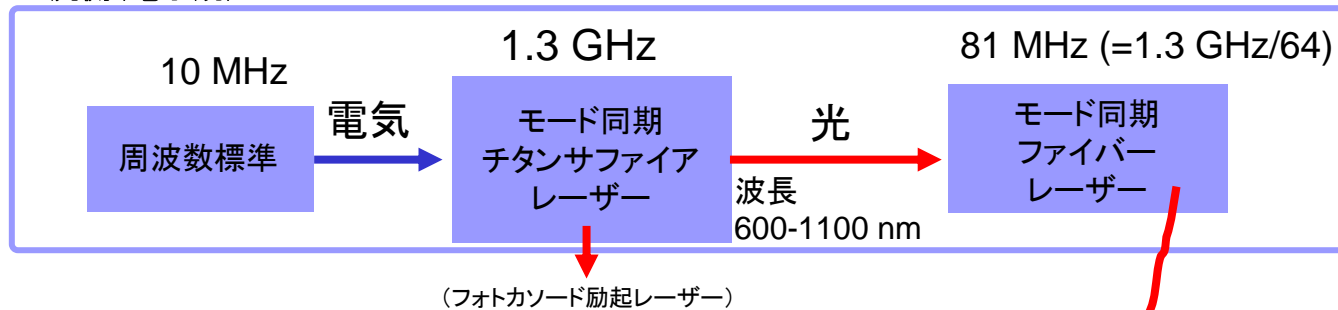
タイミング信号(光-光実験)の精度 = 10-20 fs

### 関係する時間スケール

ERLから得られるX線のパルス幅	100 fs <50 fs? (レーザースライシング等)
加速器のRFの位相ジッター	20 fs (~0.01度)
光ファイバー(>1km)でのジッター	10 fs (現在のstate-of-art)

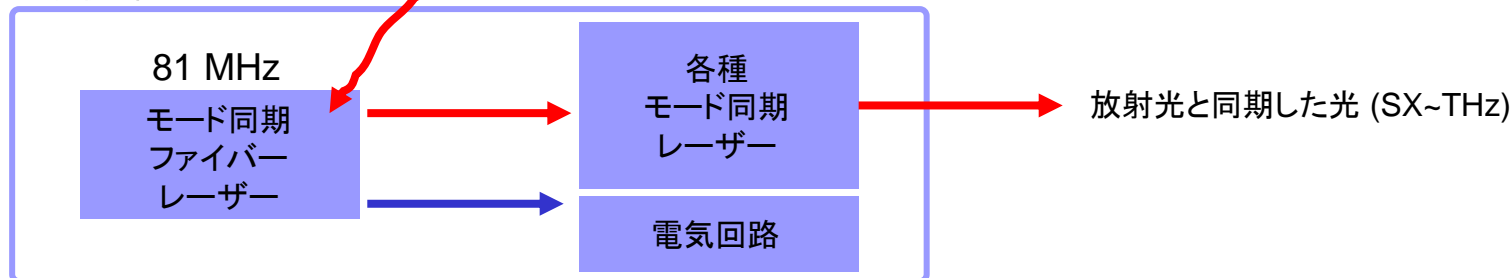
# ERLのタイミング同期システム

上流側(電子銃)

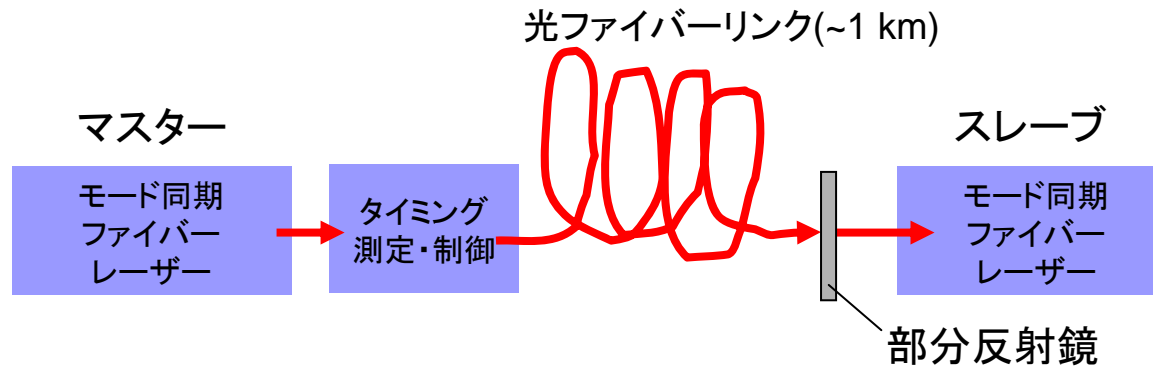


光ファイバーによる中距離伝送(~1 km)と分配

下流側(各ビームライン)



# マスタークロックの正確さ



1kmのファイバー往復に要する時間は、 $10\mu\text{s}$ である。  
その間に、マスタークロックのタイミングのゆらぎを $10\text{-}20\text{fs}$ 以下に抑える必要がある。

$$\frac{10\text{ fs}}{10\mu\text{ s}} = 10^{-9} \quad (\text{積算時間 } 10\mu\text{ s})$$

長時間のジッター(ドリフト)は問題ではなく、むしろ短時間( $<100\mu\text{s}$ )でのタイミング揺らぎが問題。  
=> 原子時計の利用は長時間のジッターを補正するだけであり、必ずしも必要ではない。

# 周波数基準の選択

$$(\text{精度}) \propto (\text{積算時間})^{-1/2}$$

積算時間 $10\mu\text{s}$ では $10^{-9}$   
=> 積算時間1秒では $3 \times 10^{-12}$

市販の周波数標準 (積算時間1秒)

---

安定化した水晶発振子	$10^{-10} \sim 10^{-12}$	} RF出力
水素メーザー	$2 \times 10^{-13}$	
安定化したモード同期発振器 (水素メーザーに同期)	$5 \times 10^{-13}$	光コム出力

---



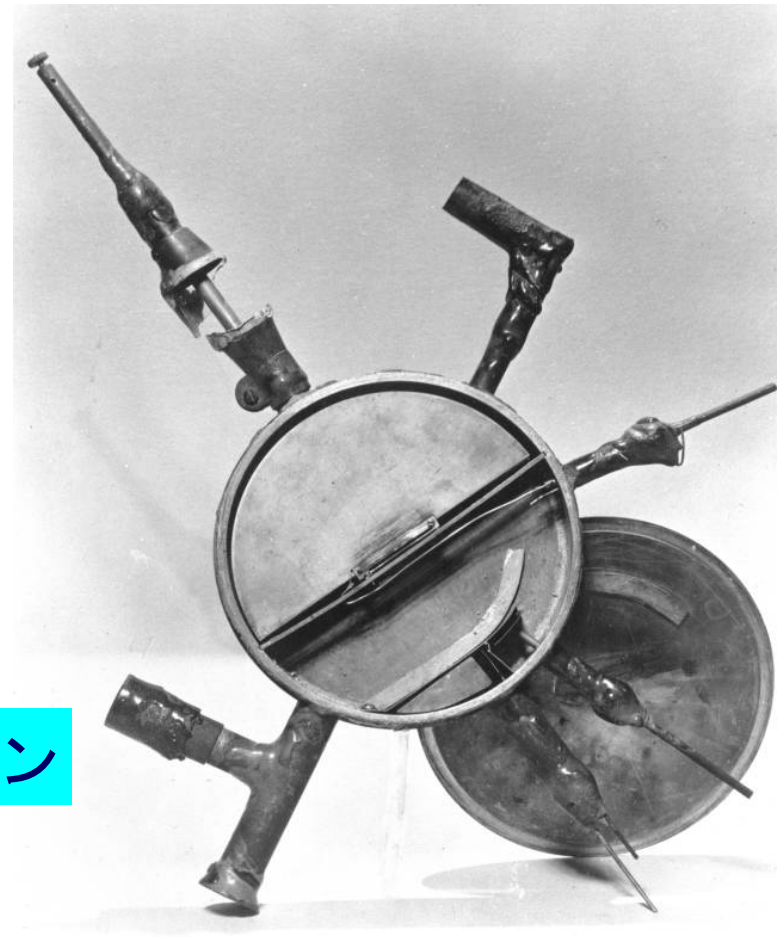
# タイミング同期システムのまとめ

- ERLでは、10-20フェムト秒のタイミング同期が実現可能である。それを視野に入れたタイミング同期システムの開発が望ましい。
- 最有力は、フェムト秒レーザーの周波数コムをタイミングの「トランシーバー」として使う方式である。その開発も、フォトカソード励起レーザーと平行して行うことが望ましい。

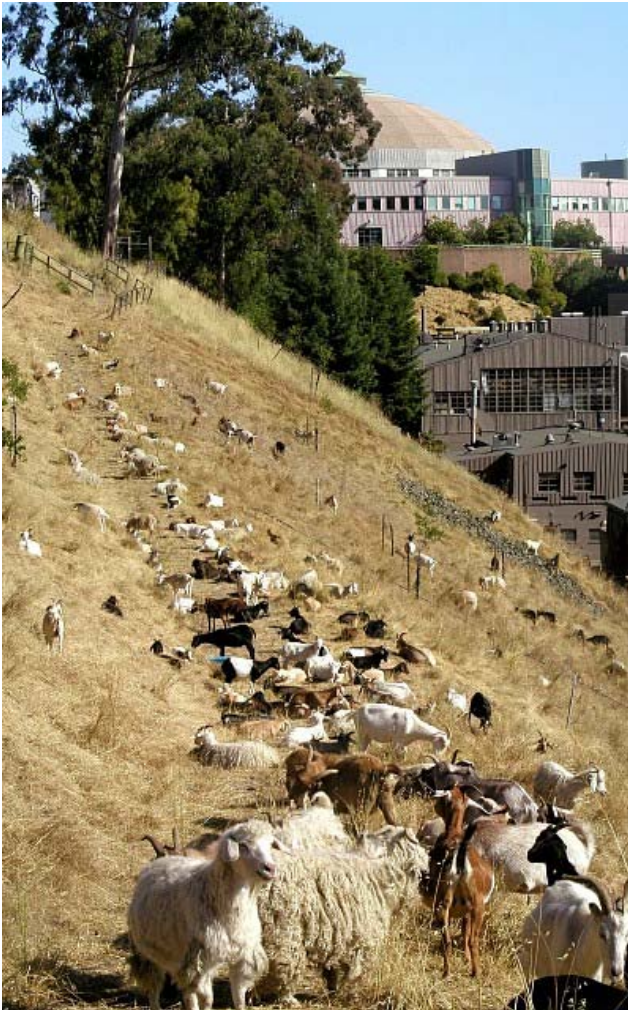
# アウトライン

- ERLへの期待
- 超短パルスレーザー技術
- フォトカソード励起用レーザー
- タイミング同期技術

• ALSフェムト秒スライシングビームライン



# Advanced Light Source (ALS)



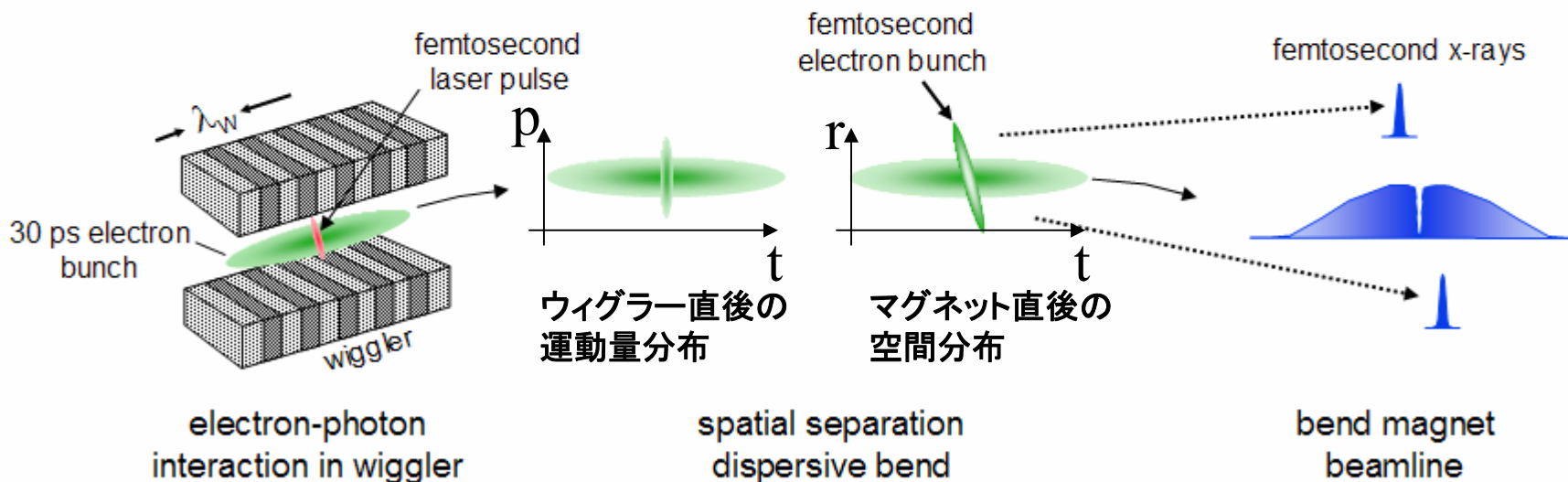
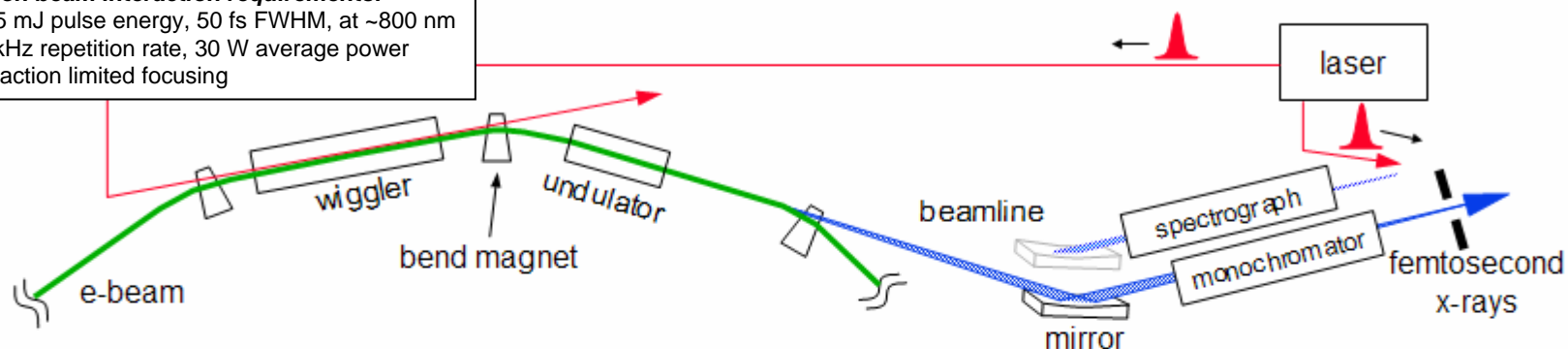
- 米国エネルギー省の第三世代放射光(1.9 GeV)
- 35のBLが稼働中
- トップオフモードを準備中

- フェムト秒X線発生(BL5.0.1)
  - トムソン散乱 [Science 274, 236 (1996)]
  - レーザースライシング [Science 287, 2237(2000)]
- 現在アップグレードしたBLを立ち上げ中
- アンジュレーター追加による円偏光化も計画中

- 隣接機関との有機的な連携
  - UC Berkeley
  - Lawrence Berkeley National Lab

# Generation of Femtosecond X-rays from the ALS

**Electron beam interaction requirements:**  
 ~1.5 mJ pulse energy, 50 fs FWHM, at ~800 nm  
 20 kHz repetition rate, 30 W average power  
 diffraction limited focusing



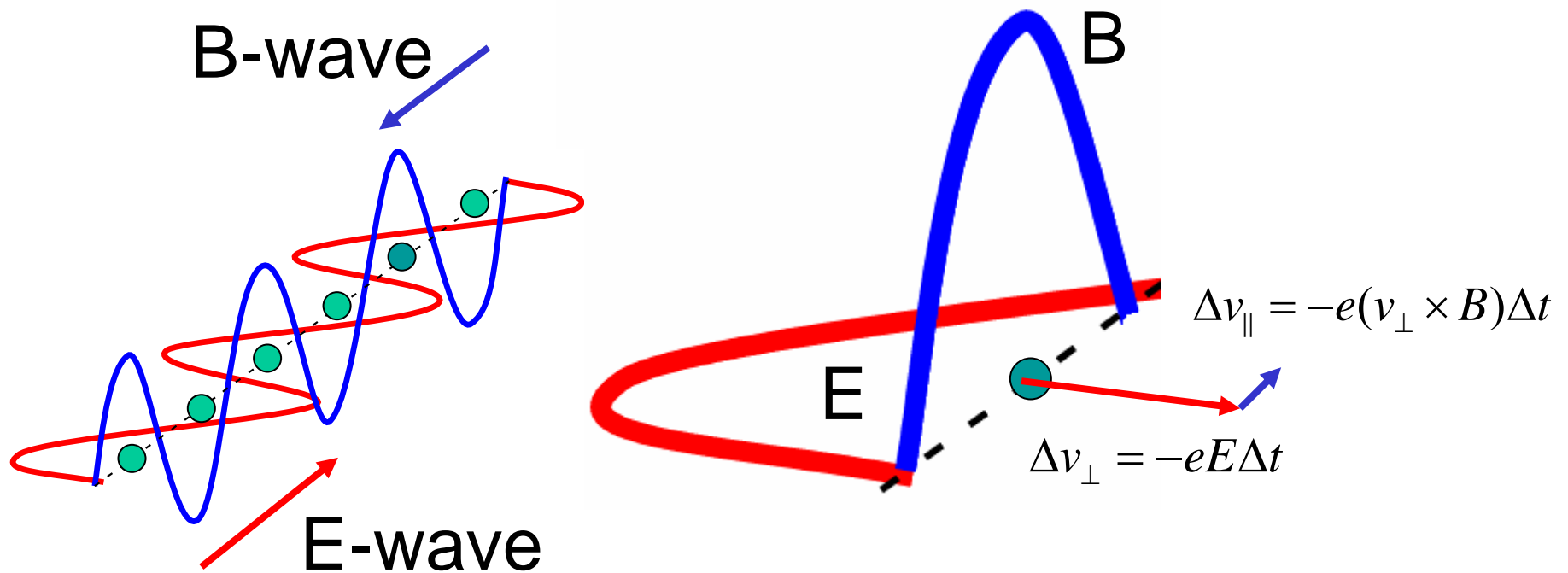
Zholents and Zolotarev, *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 916, (1996).

Schoenlein et al., *Science*, **287**, 2237 (2000).

# レーザースライシングの原理

運動している電子は、

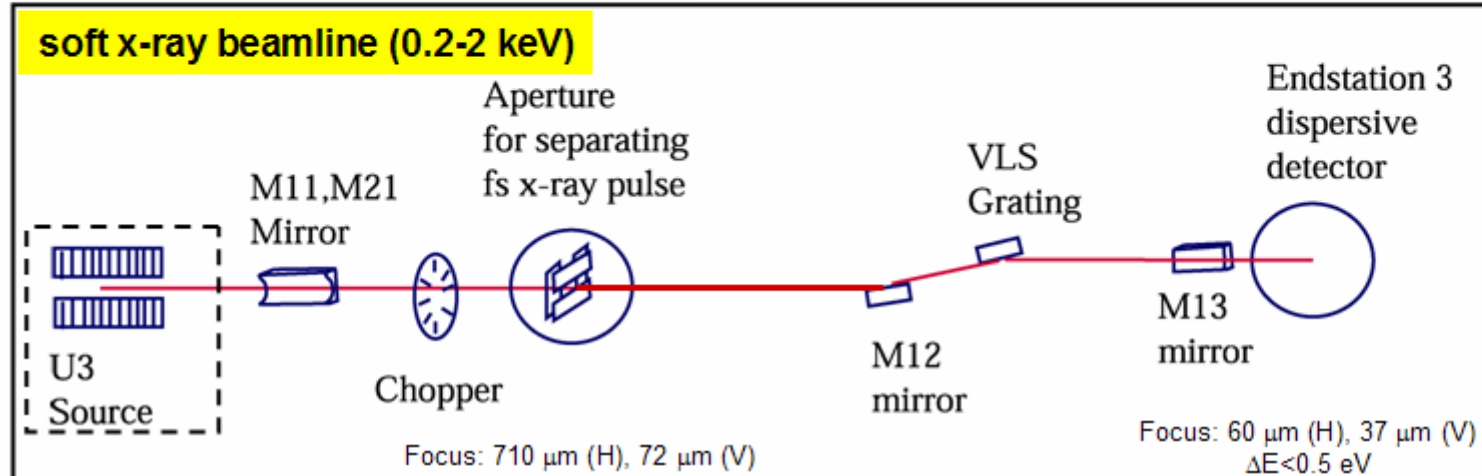
- 前方からはローレンツ収縮した磁場の波を、
- 後方からはドップラーシフトした電場の波を見る。





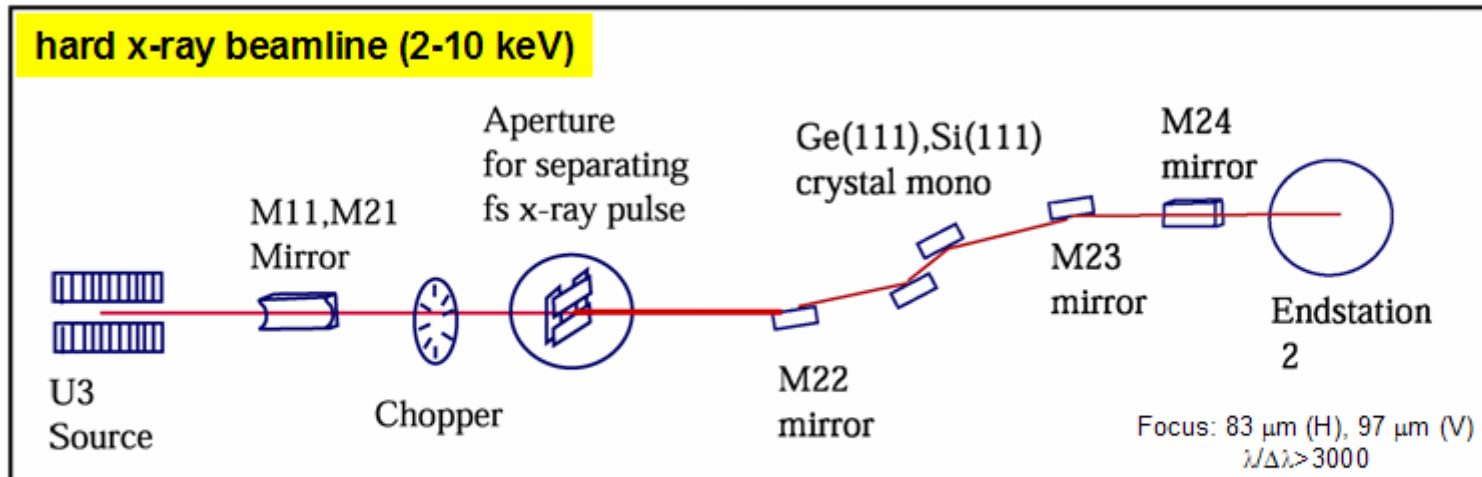
# アップグレード中のフェムト秒X線ビームライン ALS Femtosecond Undulator Beamlines

P. Heimann, H. Padmore, R. Duarte, D. Cambie et al.



**Oct 2006  
Commissioning**

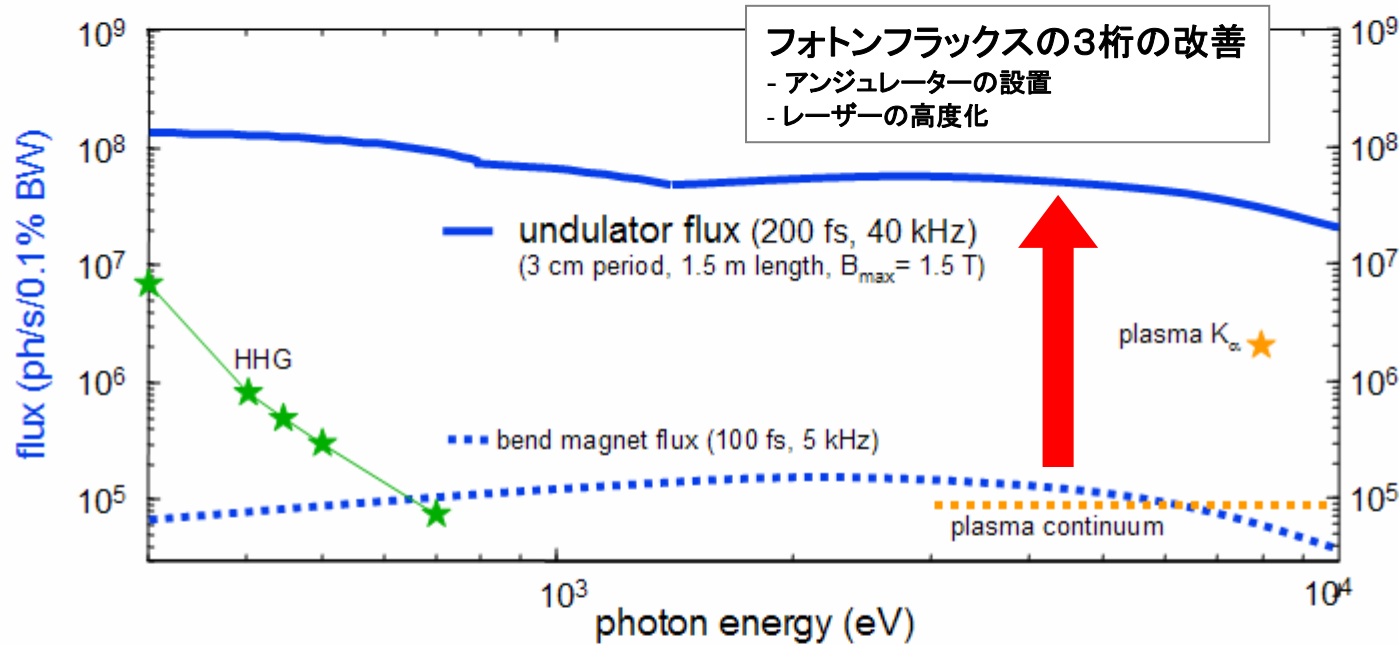
**Jan 2007  
First user exp.**



**Jan 2007  
Commissioning**



# Femtosecond X-ray Flux



★ HHG flux from F. Krausz, laser: 10 fs, 3 mJ/pulse, 60 W

★ Plasma source flux in mrad<sup>2</sup> from Rose-Petrucci, laser: 40 fs, 1 mJ/pulse, 60 W (continuum includes projected 10<sup>5</sup> improvement)

Cu  $K_{\alpha}$  - 10<sup>10</sup> ph/s/4 $\pi$  (proj. 10<sup>12</sup> with Hg target)  
 cont. 6x10<sup>7</sup> ph/s/4 $\pi$  (integ. from 7-8 keV)

**ALS typical average x-ray flux**  
 undulator ~10<sup>15</sup> ph/s/0.1% BW  
 bend-magnet ~10<sup>13</sup> ph/s/0.1% BW

**RF Bunch Deflection Scheme**  
 x10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup> enhancement in flux/pulse  
 200 fs pulse duration

# ERLにおける レーザースライシングの可能性

- レーザースライシングにより  
X線の短パルス化  
レーザーとの完全なタイミング同期  
が実現できる。
- ERLでは、電子バンチの時間幅が短いため、バックグラウンドの少ないスライシングが実現できる。