

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

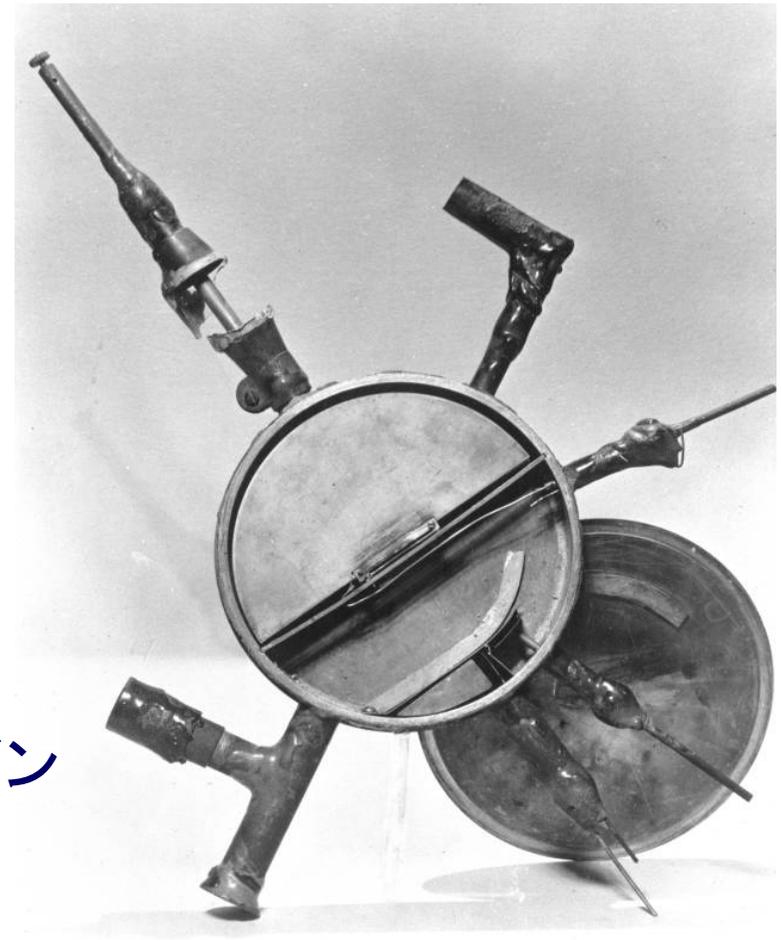
Bob Schoenlein (LBL)

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^{の発明}

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 —

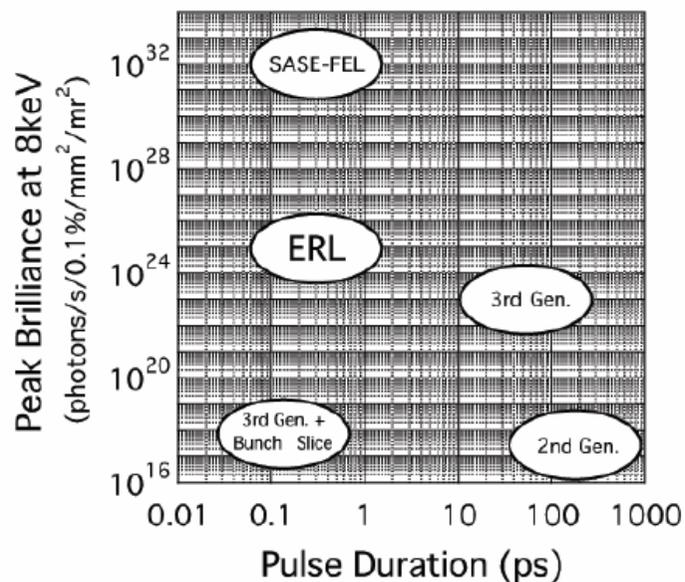
高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所 放射光研究施設
加速器研究施設

©High Energy Accelerator Research Organization

コスト試算 700~800億円(2003)

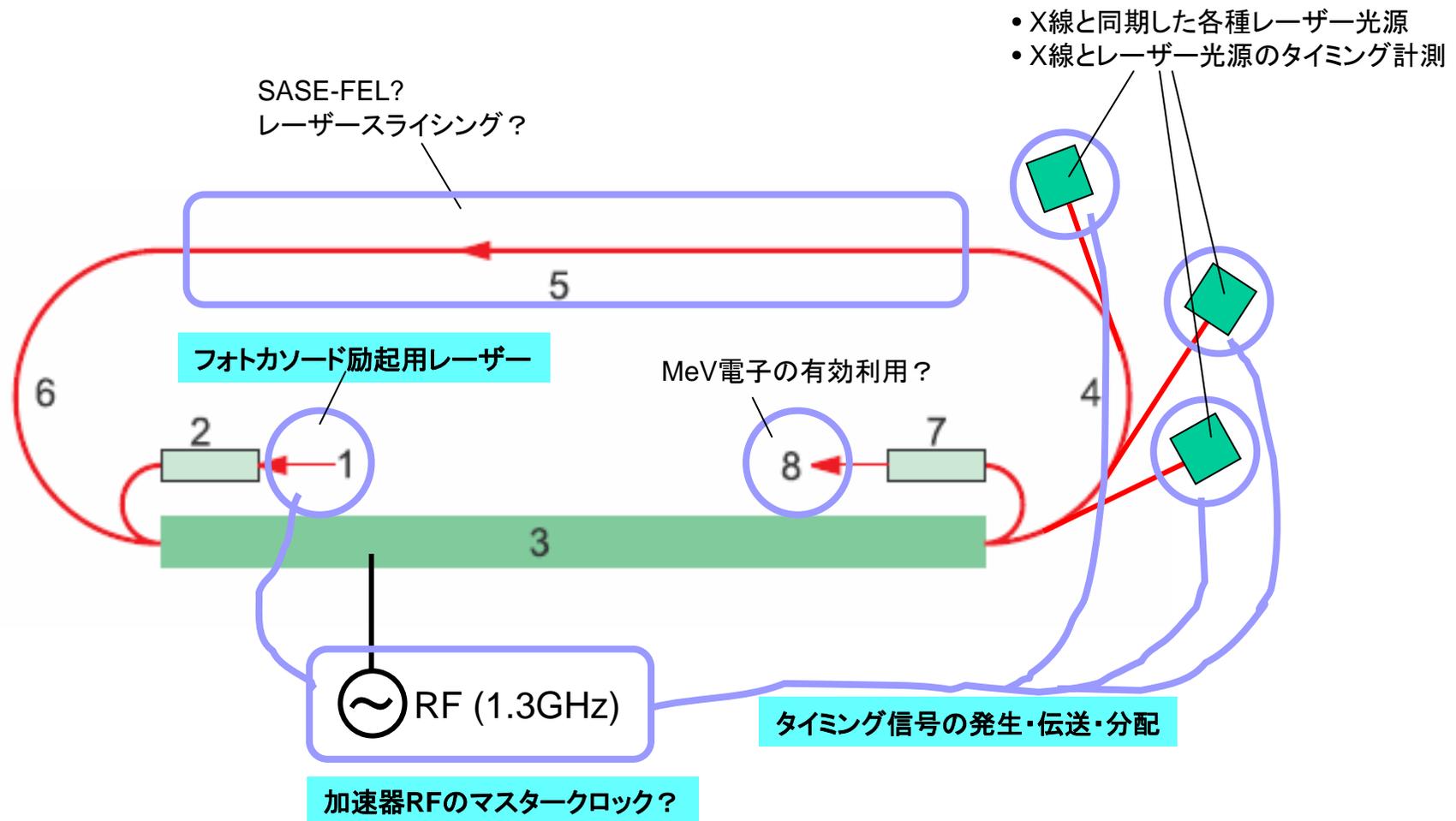
表 1.1: ERL の主要パラメータ

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)	5×10^{-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



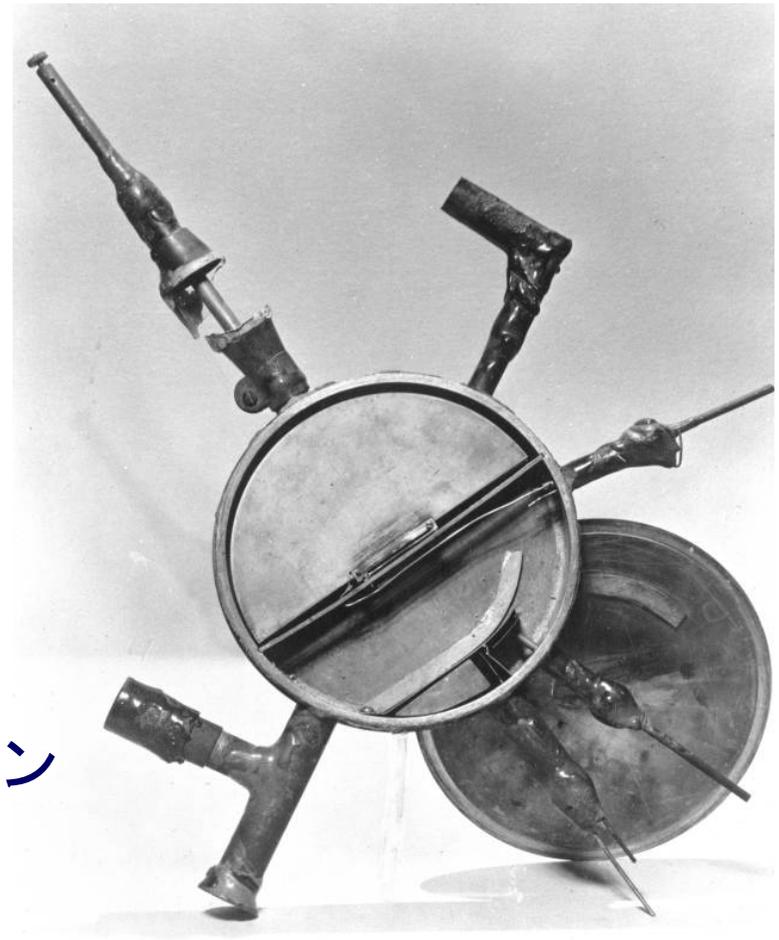
レーザー屋から見たERL

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？



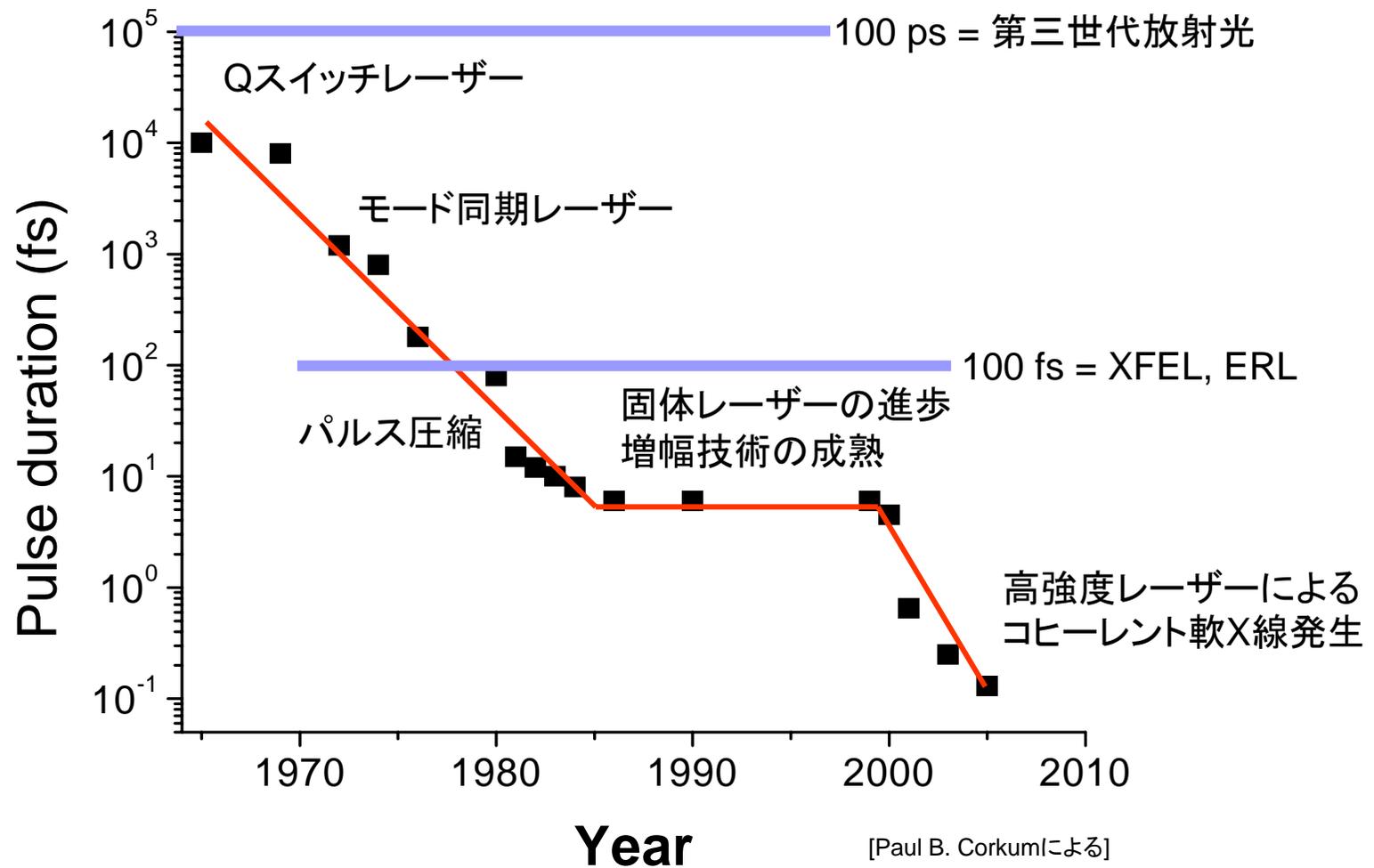
アウトライン

- 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

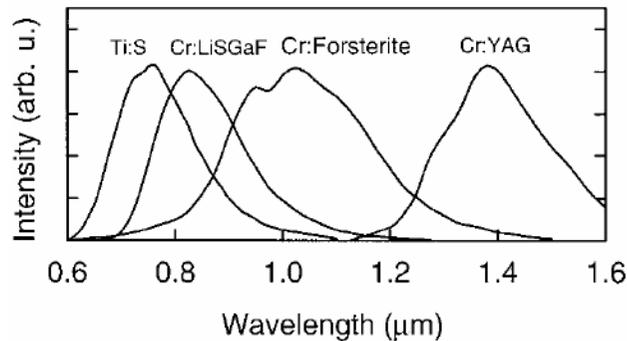
2. 超短パルスの発生と増幅

- 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)

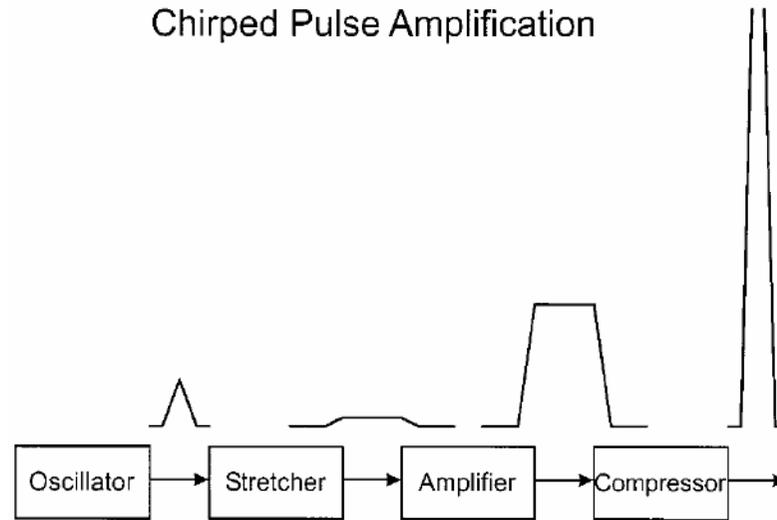
超短パルス(<10 fs)の発生

テラワットレベルへの増幅

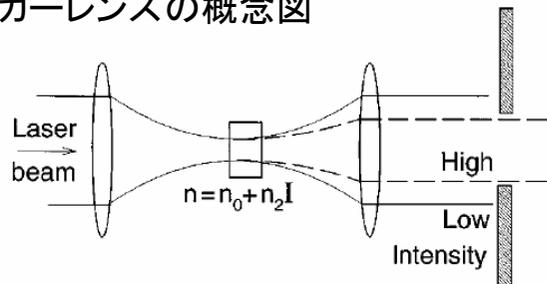
広帯域固体レーザーの比較



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

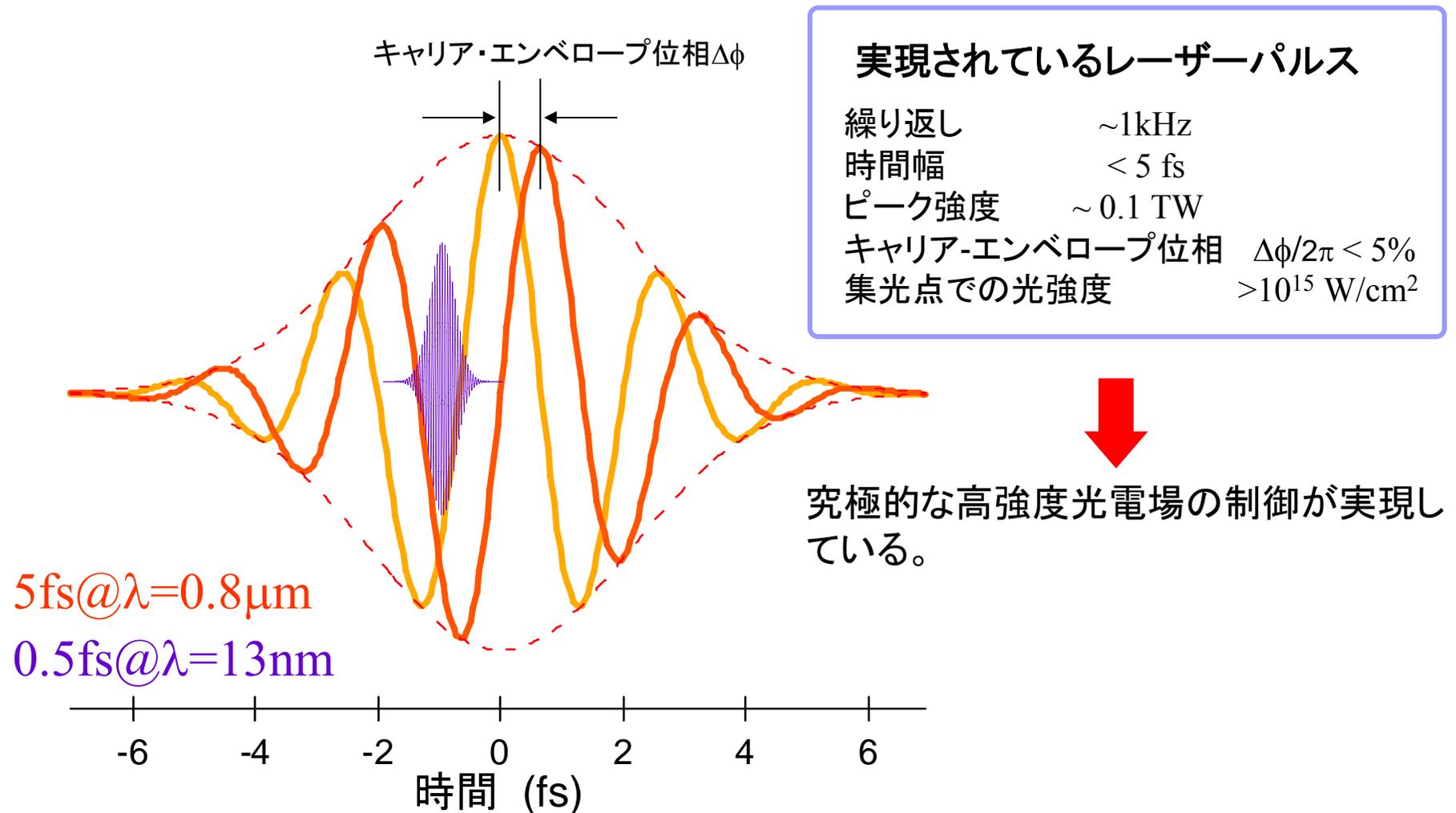


カーレンズの概念図



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

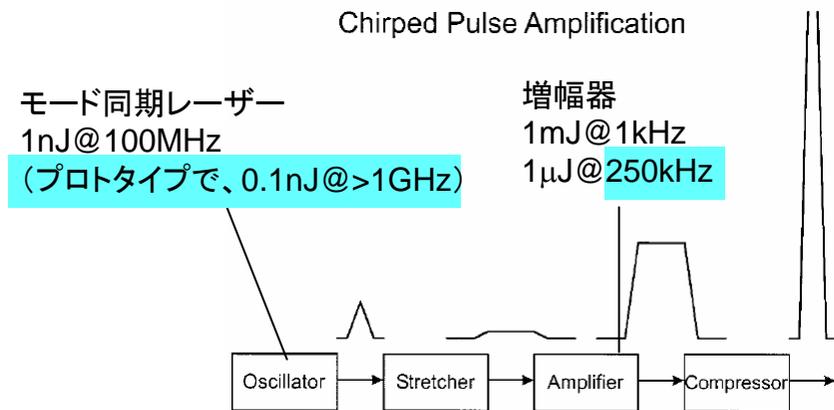
4. 高出力チタンサファイアレーザー

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

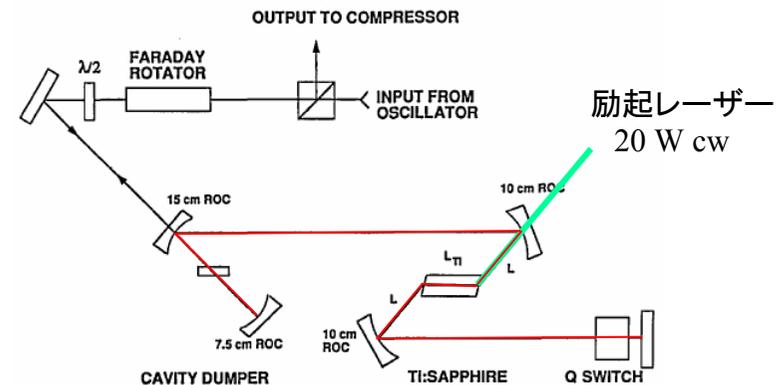
- テーブルトップ規模の装置
- パルス幅 30 fs
- パルスエネルギー 1 mJ
- ピークパワー 30 GW
- 繰り返し 1 kHz
- 平均出力 1W

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

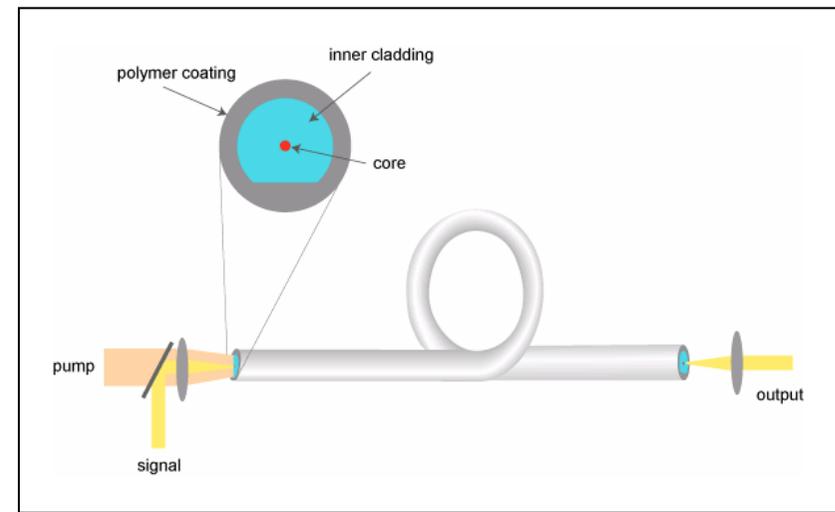
パルス幅	100 fs	300 fs
パルスエネルギー	0.1 nJ	10 μ J
繰り返し	50 MHz	100 kHz (1GHz以上も可能)
平均出力	50 mW	1 W (プロトタイプでは、10-100 W)

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

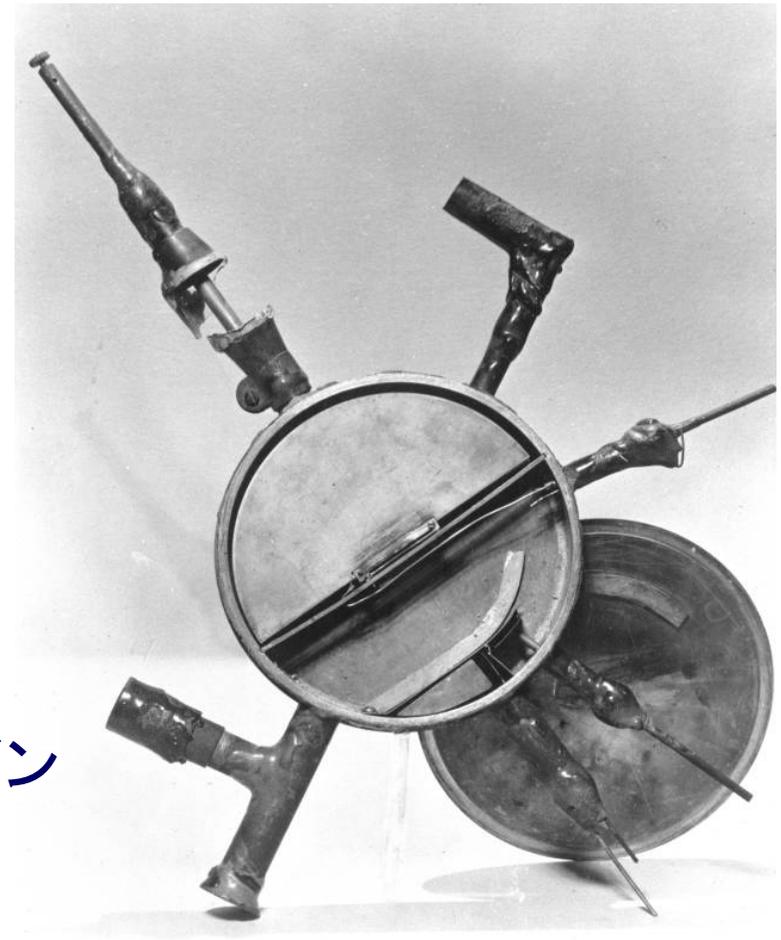
市販品の例(IMRA America, Inc.)



[Encyclopedia of laser physics and technology, www.rp-photonics.com]

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。

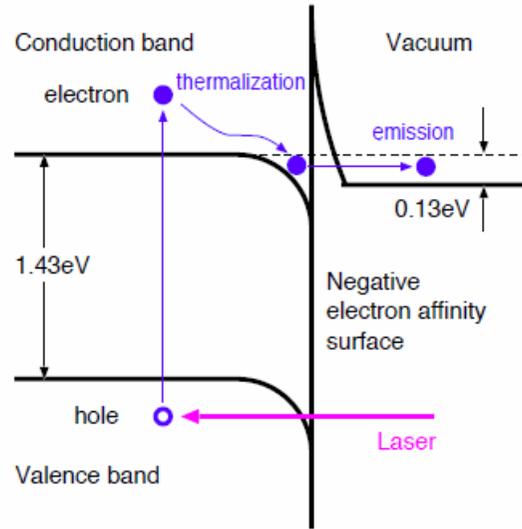
[KEK ERL Report (2003)]

レーザーだけの問題ではない

フォトカソード材料

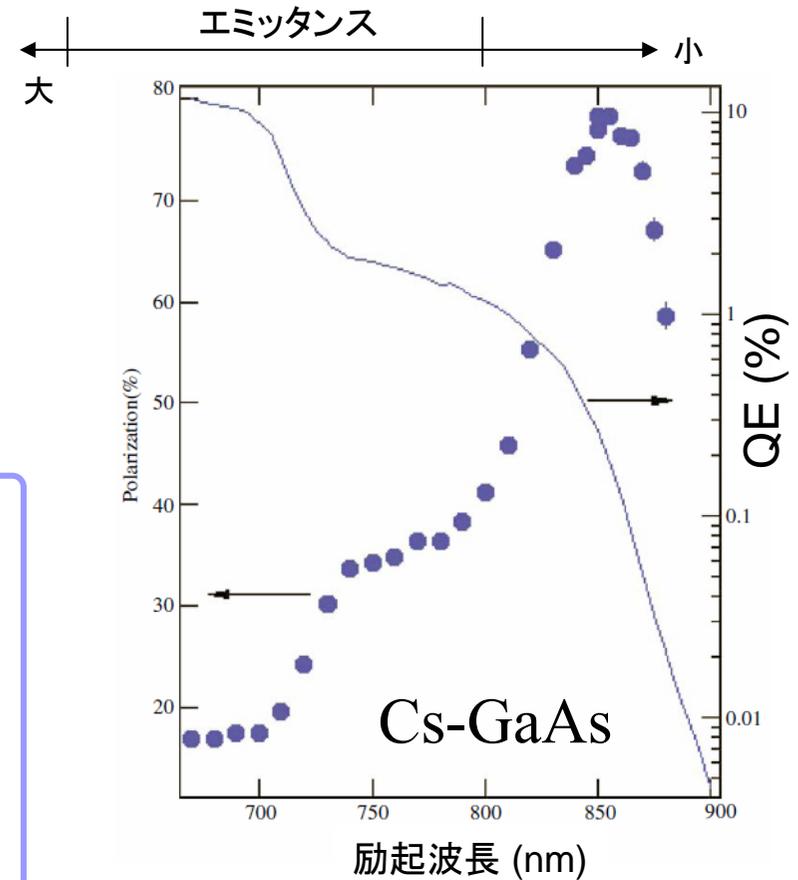
NEA-GaAs

[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?)

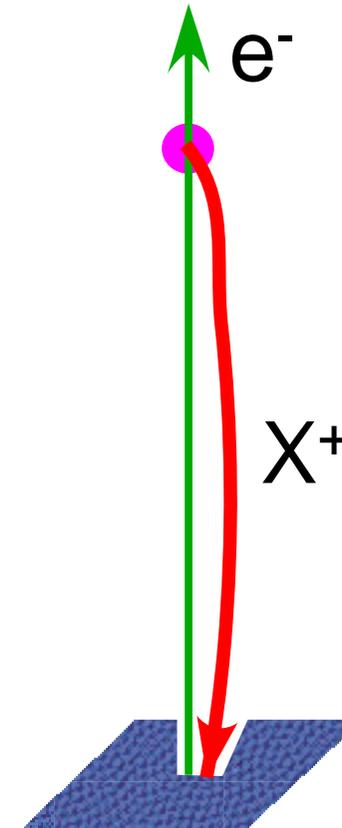
フォトカソード材料(続)

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 $1\text{nA}/\text{m}^2$ 以下にする必要がある。
- そのときの表面電場は $33\text{MV}/\text{m}$
- CEBAF入射器(Jefferson Lab)
直径 1mm で 100mA 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 (100mA)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。



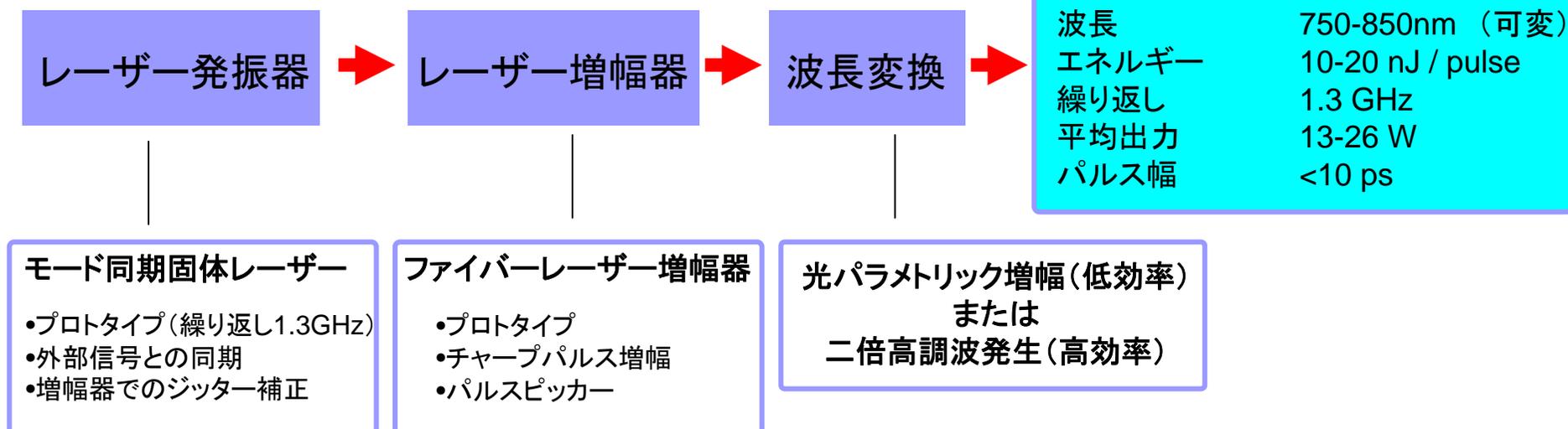
早急なR&Dの必要性

【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	高効率 - 高い量子効率(~90%) - ESAがないので強励起可。	低効率 - 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)	低効率(<20%) - 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。	高効率(>80%) - 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 μm

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 μm

0.5 μm

0.8 μm

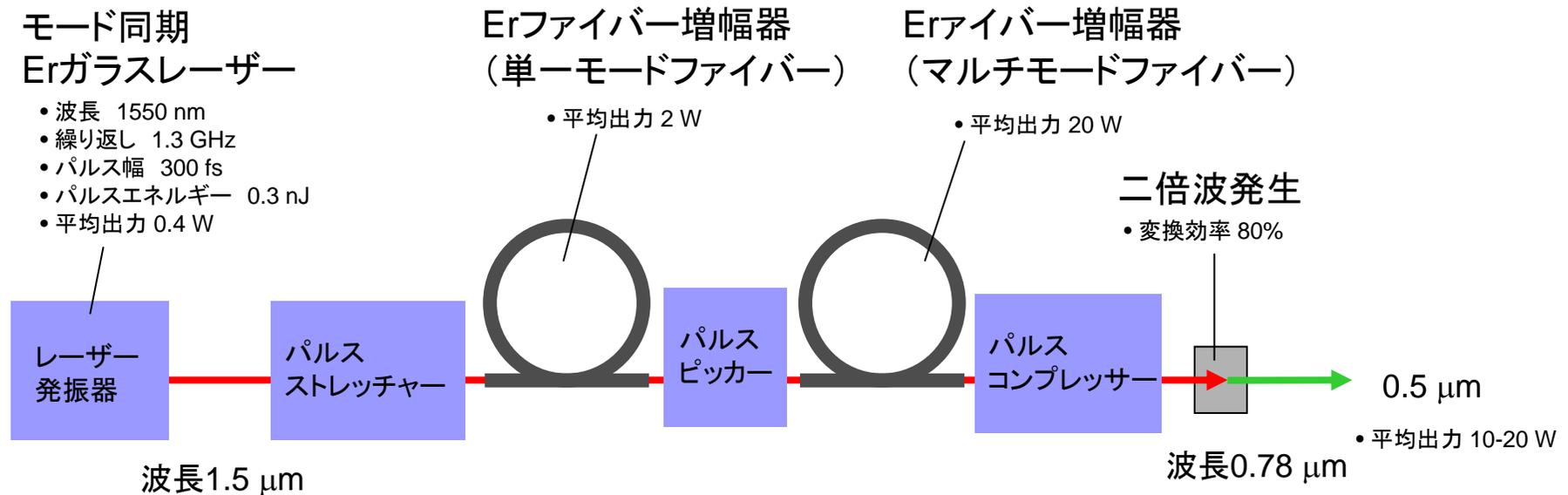
- 平均出力 10-20 W

波長0.8 μm

- 波長可変
- 出力のスケールリングが可能
- 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

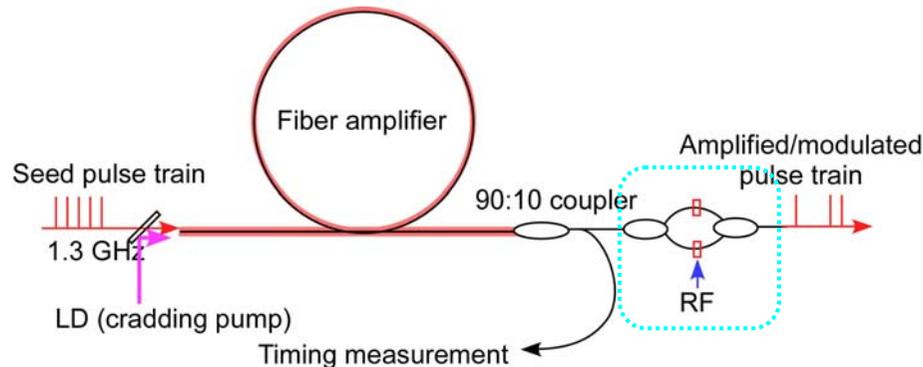
- 1.5 GHzのパルス列を、必要に応じて間引けることが望ましい。
 (例) レーザーと同期した時分割実験では、レーザーと同期したX線パルス「だけ」が欲しい。

- 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。

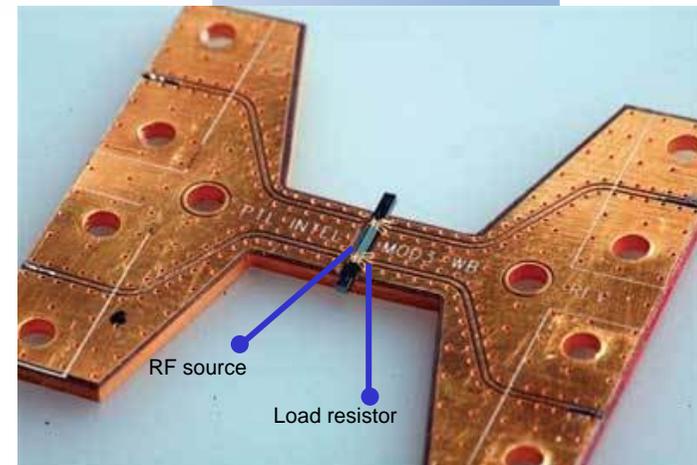
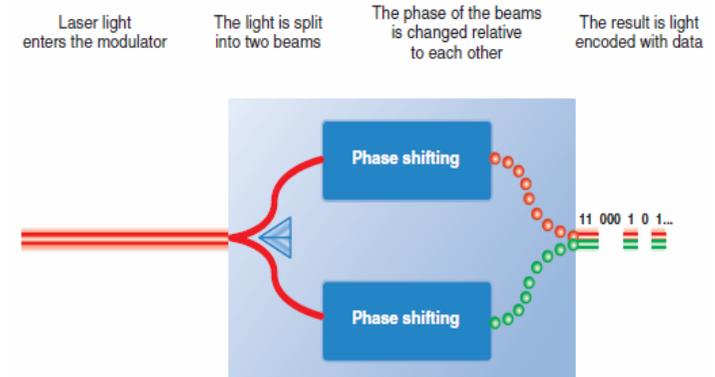
通常の非線形結晶 (LN)	10 Gb/s (commercial) 40 Gb/s (R&D)
Si	30Gb/s (R&D)

- 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



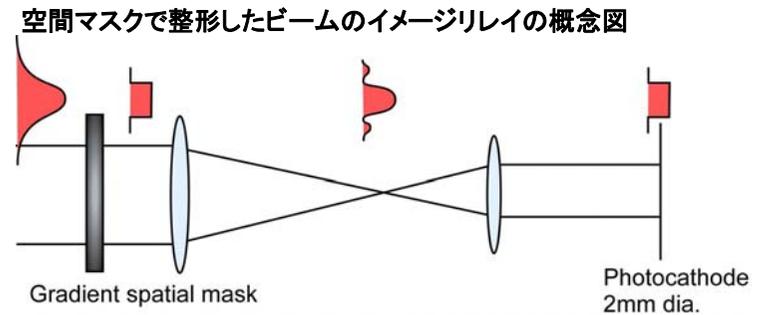
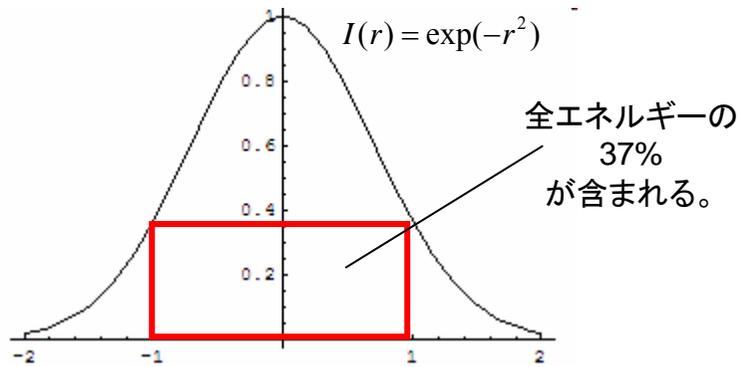
通信用のGHz強度変調子(概念図、実物写真)



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

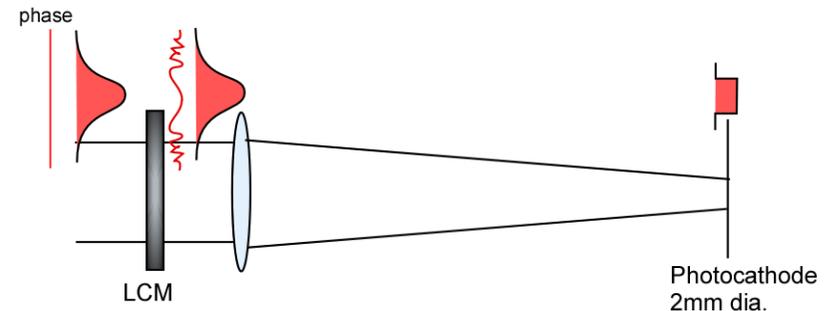
レーザーパルスの空間整形について

- 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]

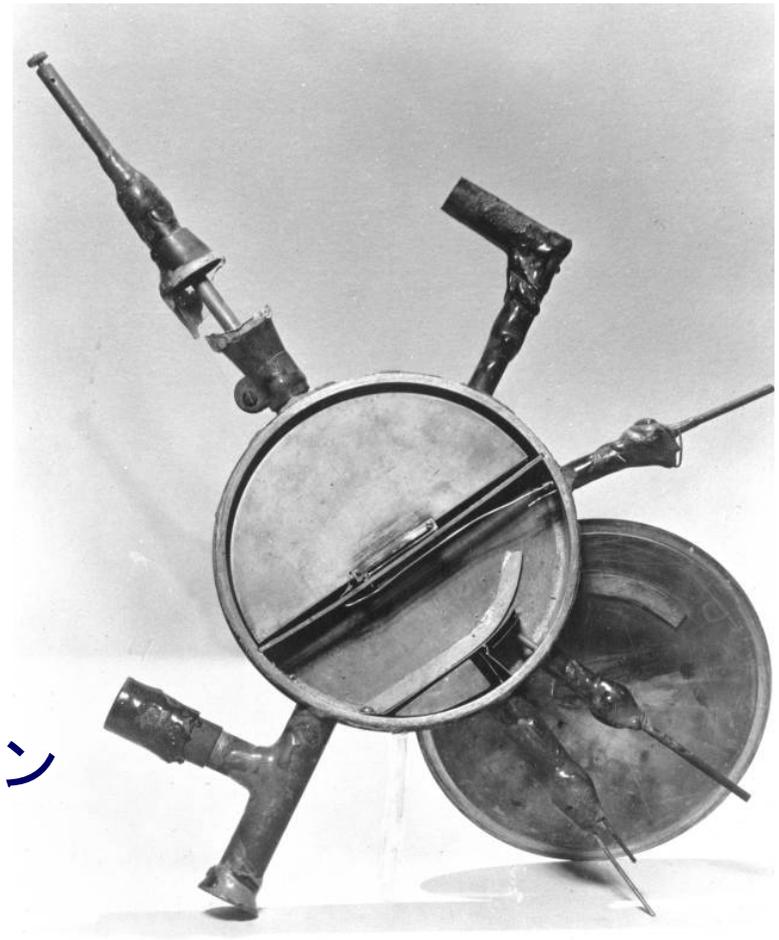


フォトカソード励起用レーザーに関するまとめ

- 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。

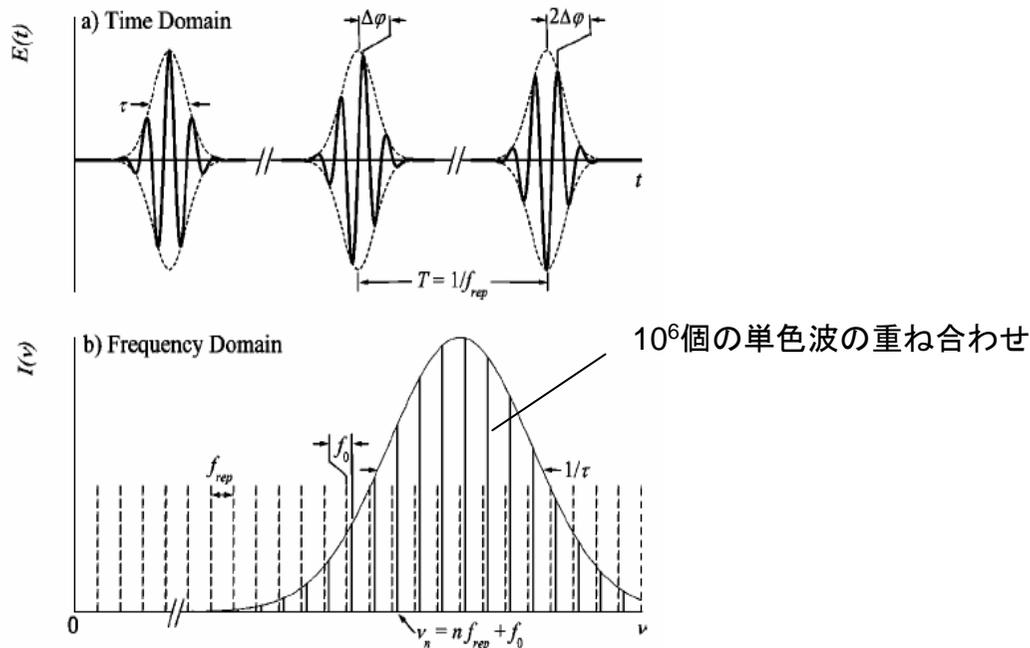
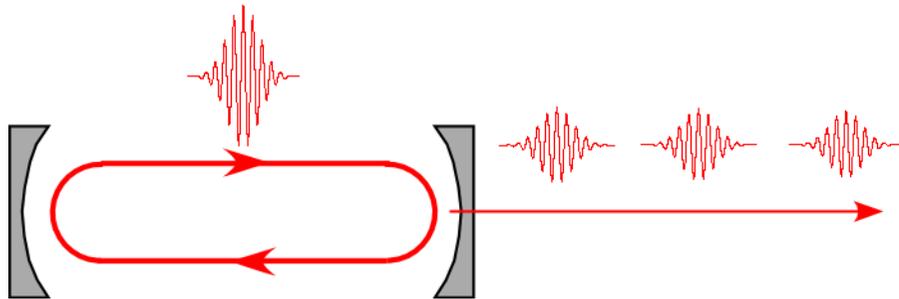
アウトライン

- 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

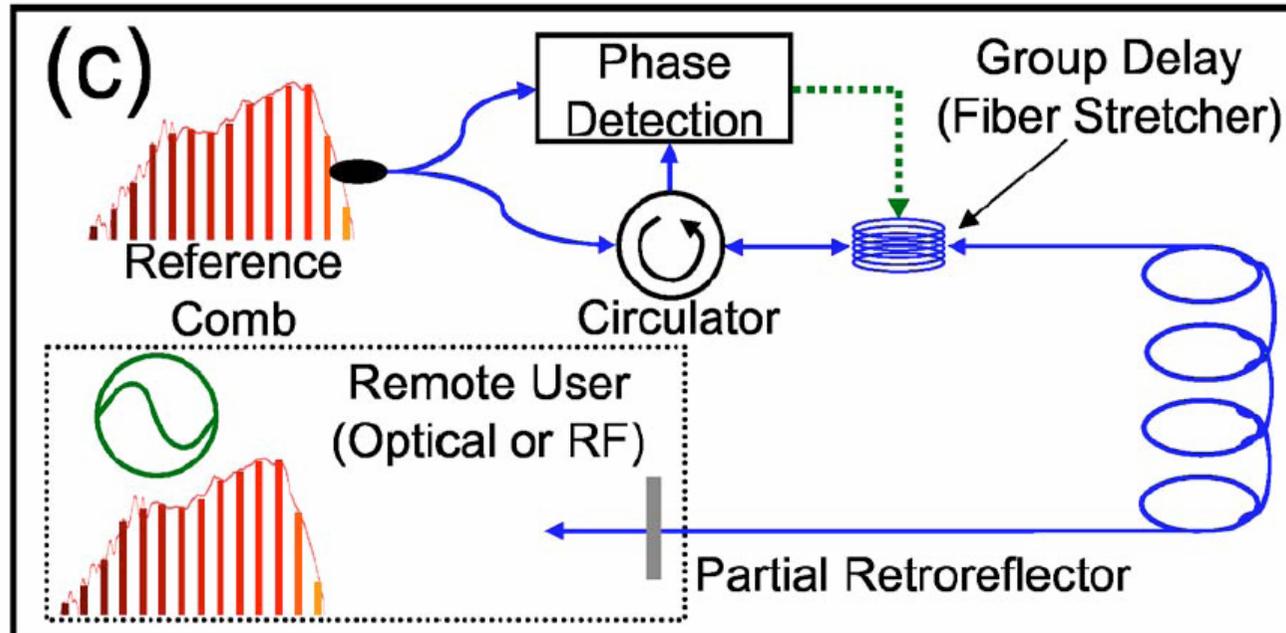
2. 周波数コムの実用例

【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

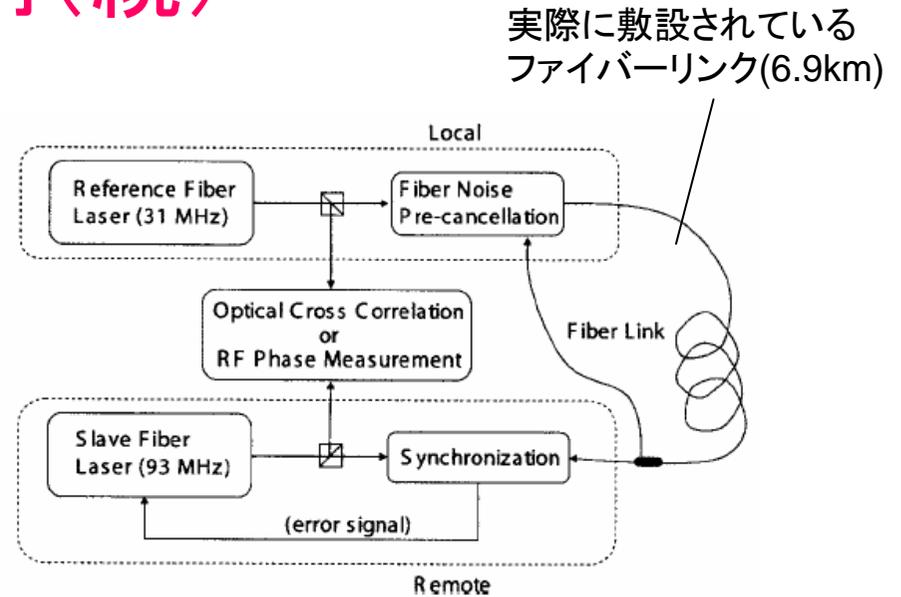
2. 周波数コムの実用例(続)

Synchronization of mode-locked femtosecond lasers through a fiber link

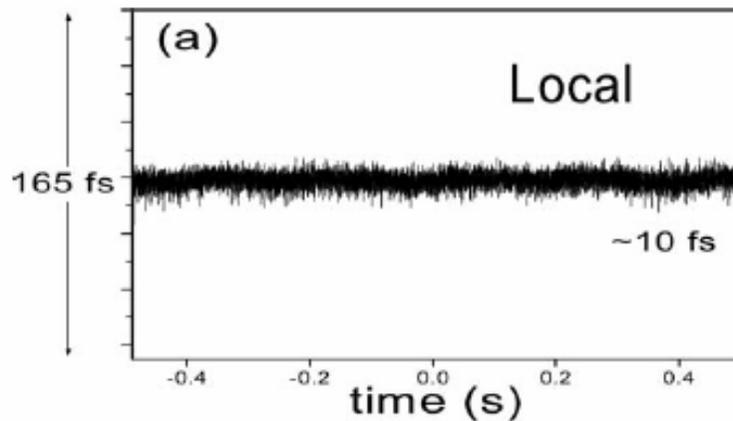
Darren D. Hudson, Seth M. Foreman, Steven T. Cundiff, and Jun Ye

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

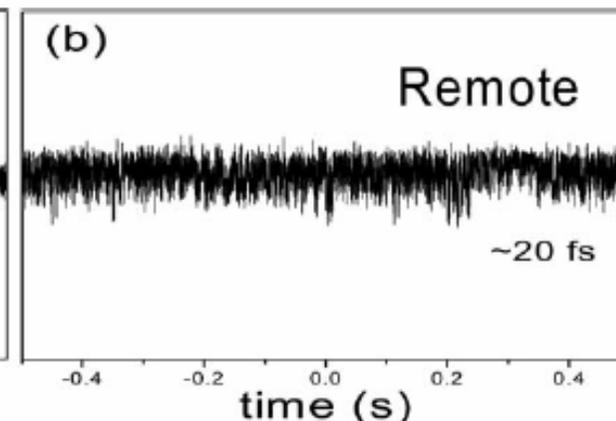
[JILA group, Opt. Lett. 31, 1951 (2006).]



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)

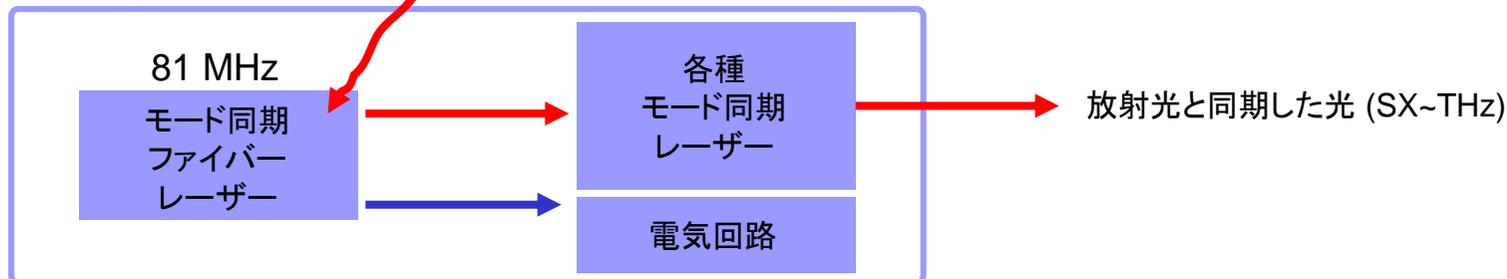
ERLのタイミング同期システム

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 3×10^{-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	2×10^{-13}	
安定化したモード同期発振器 (水素メーザーに同期)	5×10^{-13}	光コム出力

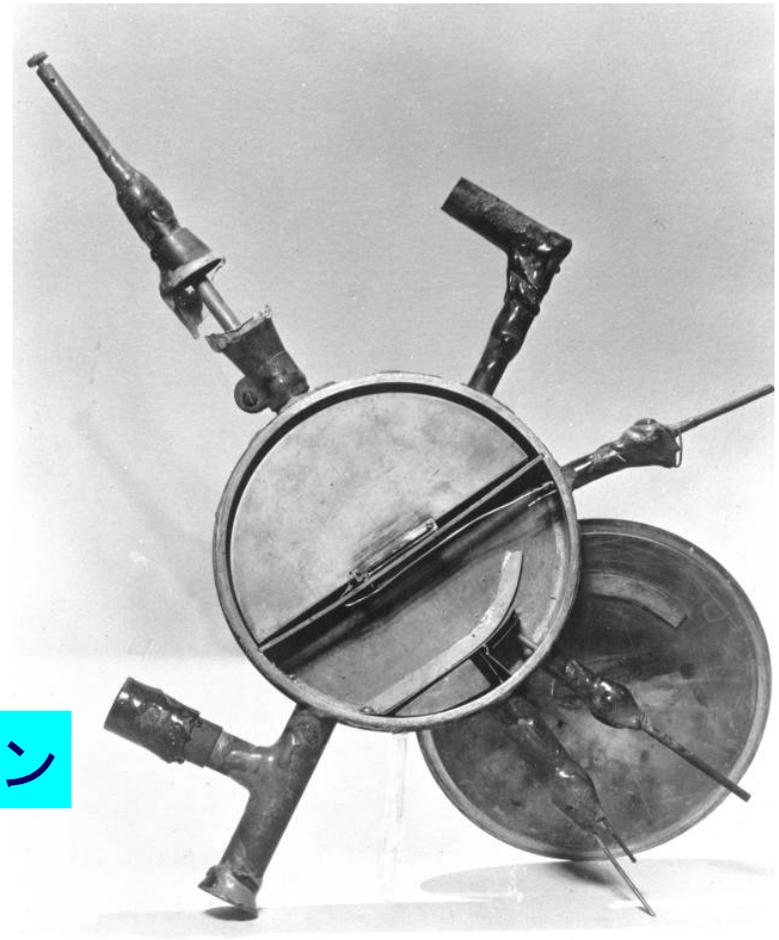
タイミング同期システムのまとめ

- 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)



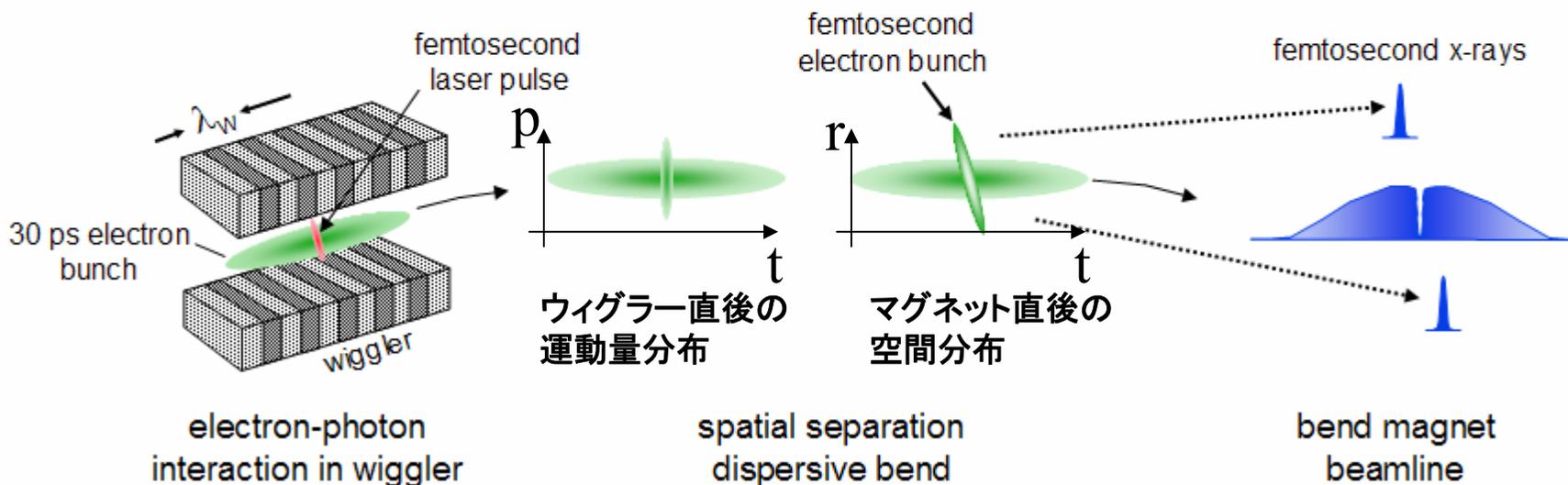
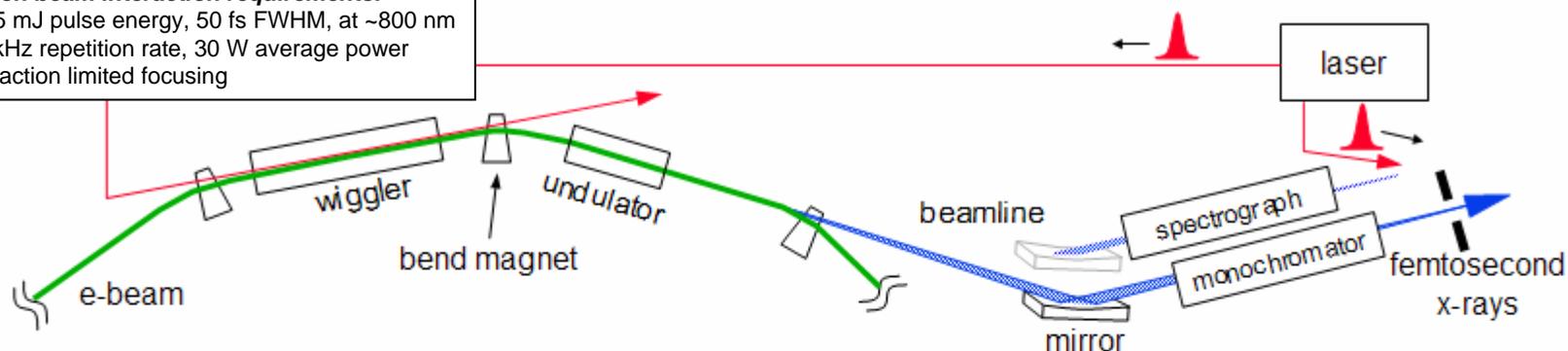
- 米国エネルギー省の第三世代放射光(1.9 GeV)
- 35のBLが稼働中
- トップオフモードを準備中

- 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



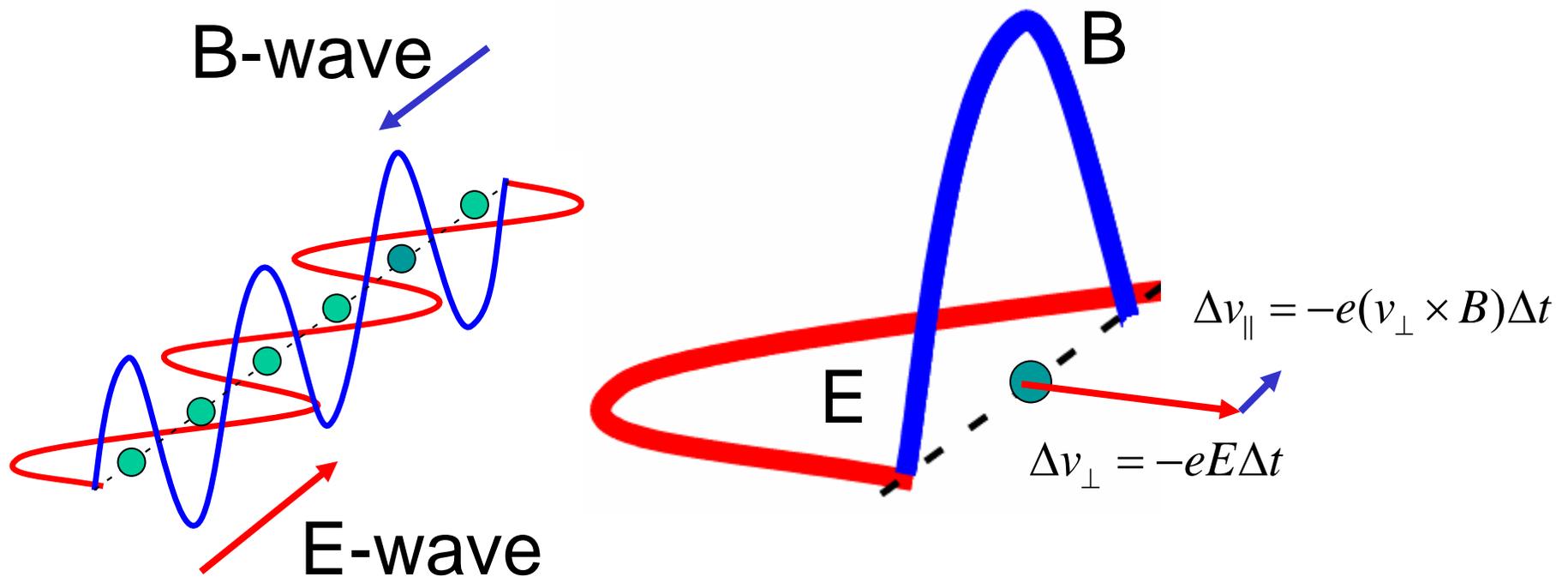
Zholents and Zolotarev, *Phys. Rev. Lett.*, **76**, 916, (1996).

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、

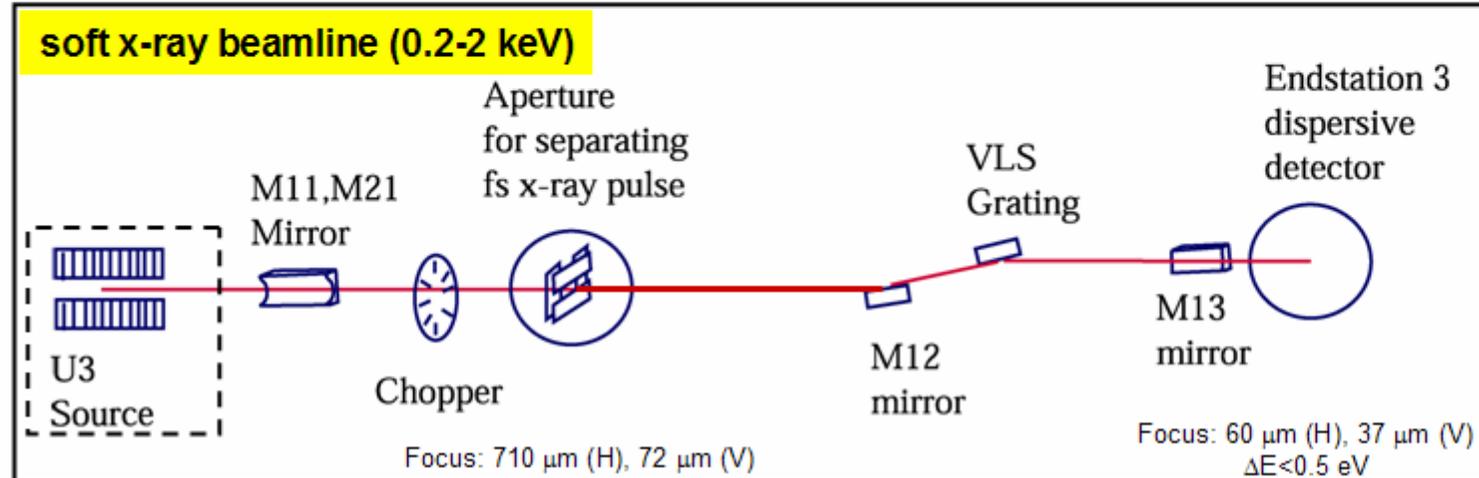
- 前方からはローレンツ収縮した磁場の波を、
- 後方からはドップラーシフトした電場の波を見る。





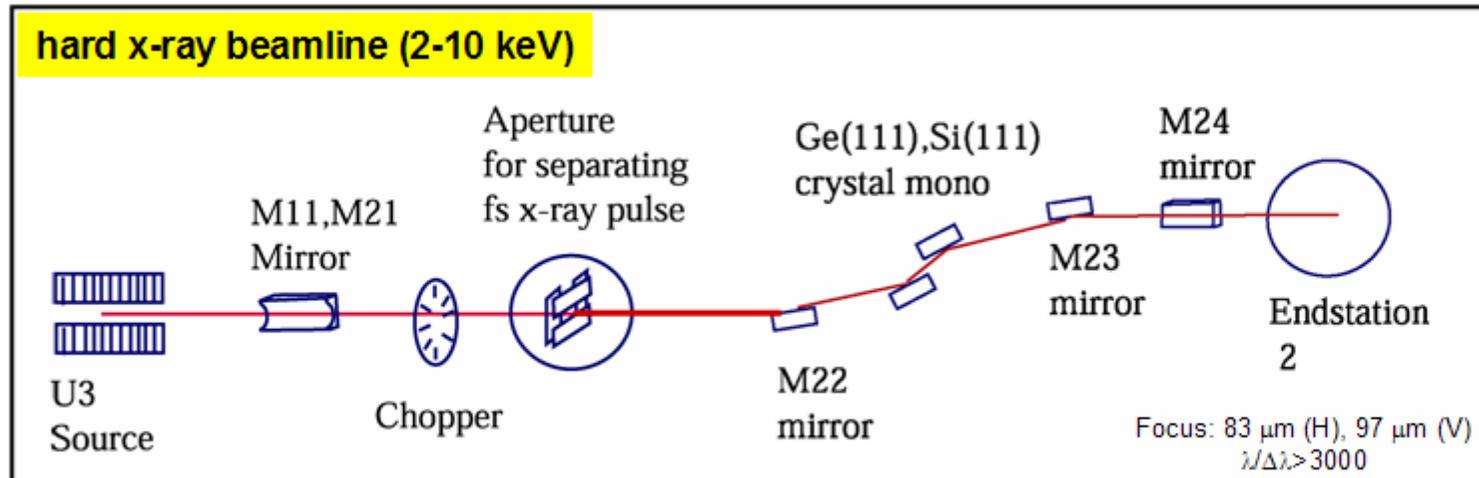
アップグレード中のフェムト秒X線ビームライン ALS Femtosecond Undulator Beamlines

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



**Oct 2006
Commissioning**

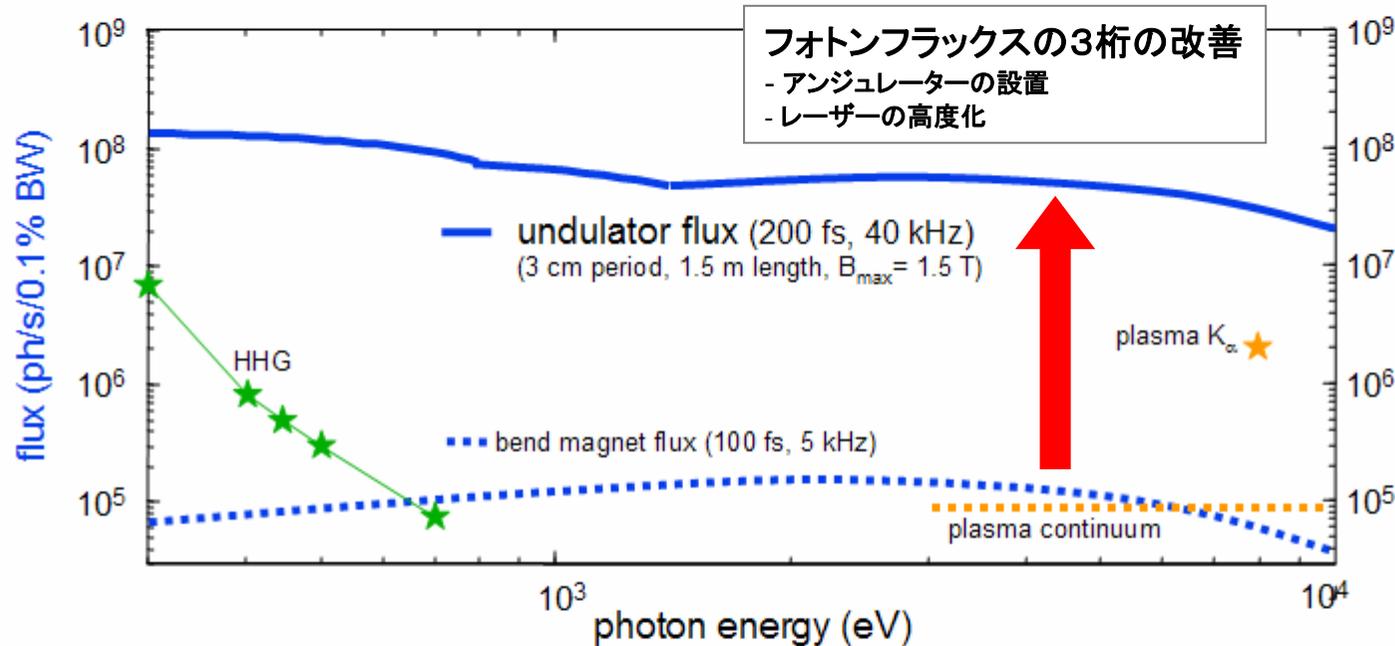
**Jan 2007
First user exp.**



**Jan 2007
Commissioning**



Femtosecond X-ray Flux



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

★ Plasma source flux in mrad² from Rose-Petrucci, laser: 40 fs, 1 mJ/pulse, 60 W (continuum includes projected 10⁵ improvement)

Cu K_α - 10¹⁰ ph/s/4π (proj. 10¹² with Hg target)
cont. 6x10⁷ ph/s/4π (integ. from 7-8 keV)

ALS typical average x-ray flux
undulator ~10¹⁵ ph/s/0.1% BW
bend-magnet ~10¹³ ph/s/0.1% BW

RF Bunch Deflection Scheme
x10³-10⁴ 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。