

ERL研究会
2007年7月9日 KEK

京大炉ライナック及びJAEA-ERLにおける
テラヘルツ・コヒーレント放射光の研究

京都大学原子炉実験所

高橋俊晴

講演の概要

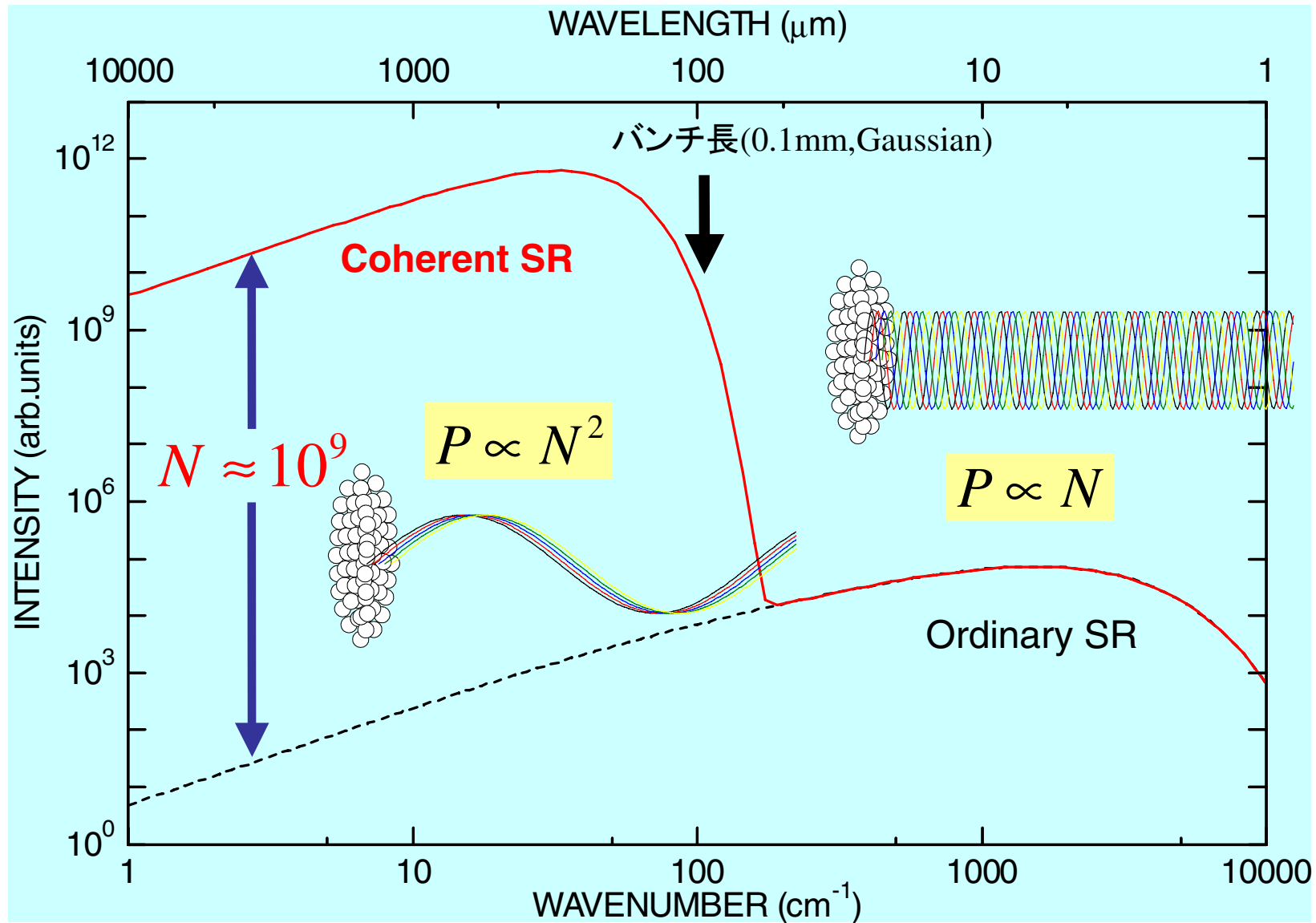
コヒーレント放射光の初観測から18年。
現在どのような状況にあるのか。

- コヒーレント放射光の概略
- 線型加速器(京大炉ライナック)
分光装置、光の性質、利用実験
- ERL(原子力機構ERL)
スペクトル、放射強度

コヒーレント放射光の概略

コヒーレント放射光とは

- ・短バンチ
- ・バンチ内密度変調



コヒーレント放射光で何ができるか？

加速器屋から見れば・・・ **高分解能のビーム診断ツール**

放射スペクトルがバンチ形状に敏感 ・・・・高分解能バンチ形状モニター

バンチ間の可干渉性 ・・・・高精度バンチ間隔モニター

利点

ストリークカメラでは追いつかない短バンチに有効

バンチ内の微細構造

コヒーレント放射光で何ができるか？

分光屋から見れば・・・ **強力なテラヘルツ光源**

光と電波の境界 = 未開拓の領域

テラヘルツTDSシステムの出現で活発化

利点

ビームとの相互作用を利用できる

線型加速器でのCSR

高強度のためダイナミックレンジが4～5桁とれる

吸収の大きな物質も測定可能

近接場分光が可能（波長サイズ以下の局所構造観察）

励起光として利用できる

微小エネルギーギャップを多重励起することによる物性変化

（FELでは単一モードの励起）

線型加速器(京大炉ライナック)における研究

昭和39年(1964年)設置

全国共同利用装置 年間運転時間:約2,500時間

最大エネルギー:46MeV

最高出力:6kW 200 μ A@30MeV (公称10kW)

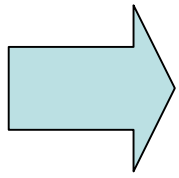
小型ライナックとしては最大級

Lバンド(1.3GHz)のマイクロ波で加速

国内では2台のみ(阪大産研ライナック)

線型加速器でのコヒーレント放射光

CSRの初観測が線型加速器だった理由



放射光リングよりバンチが短かった(元々短バンチ)

つまり

ビームダクトによるSRの抑止効果が現れない

通常の遠赤外分光器で測定可能な波長領域

難しい技術は不要

特長は？

シンクロトロン「放射光」だけではない (遷移放射、チェレンコフ放射……)

打ちっぱなしなので 電子線と物質との相互作用を利用

様々なタイプのコヒーレントな放射の基礎的性質を
実験的に解明

コヒーレントな諸放射

シンクロトロン放射(放射光)

Y.Shibata, et al., NIM A **301** (1991) 161-166

K.Ishi, et al., Phys. Rev. A **43** (1991) 5597-5604

U.Happek, et al., Phys. Rev. Lett. **67** (1991) 2962

R.Kato, et al., Phys. Rev. E **57** (1998) 3454-3460

遷移放射

Y.Shibata, et al., Phys. Rev. A **44** (1991) R3449-R3451

E.B.Blum, et al., NIM A **307** (1991) 568

T.Takahashi, et al., Phys. Rev. E **48** (1993) 4674-4677

Y.Shibata, et al., Phys. Rev. E **49** (1994) 785-793

回折放射

Y.Shibata, et al., Phys. Rev. E **52** (1995) 6787-6794

スミス・パーセル放射

K.Ishi, et al., Phys. Rev. E **51** (1995) R5212-R5215

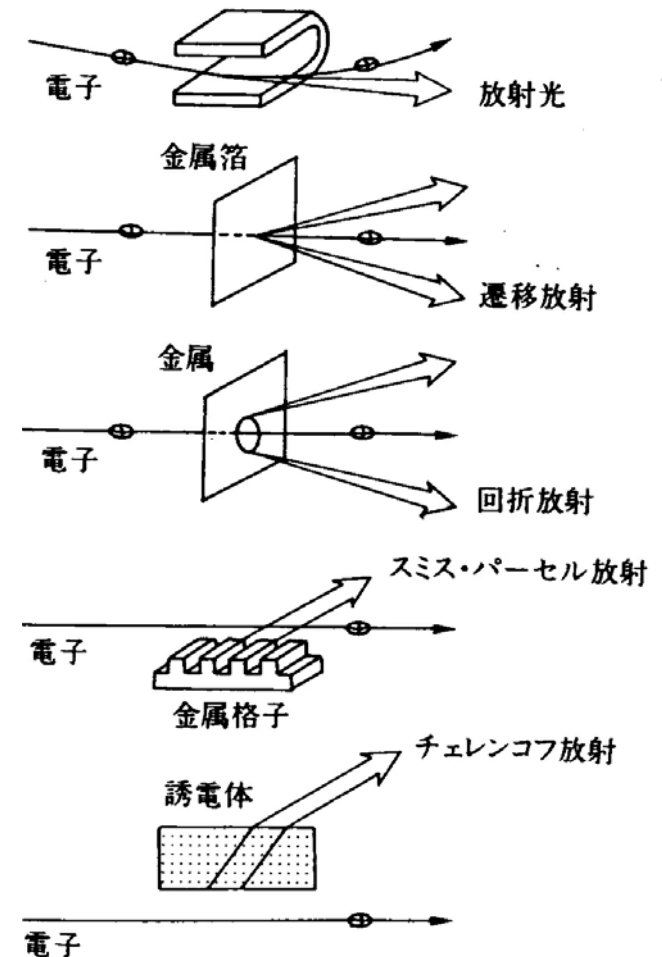
Y.Shibata, et al., Phys. Rev. E **57** (1998) 1061-1074

チェレンコフ放射

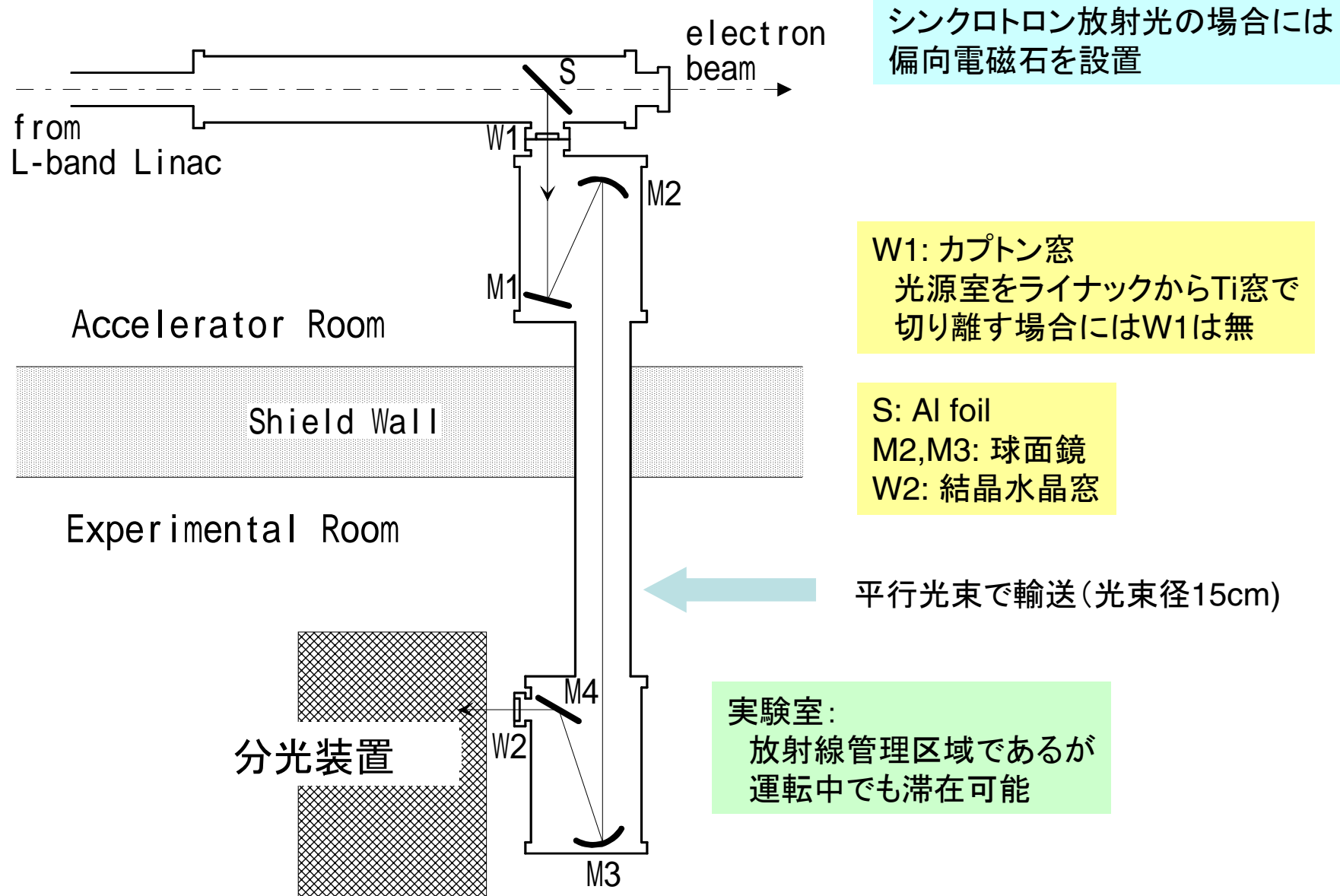
J.Ohkuma, et al., Phys. Rev. Lett (1991) 1967

T.Takahashi, et al., Phys. Rev. E **50** (1994) 4041-4050

T.Takahashi, et al., Phys. Rev. E **62** (2000) 8606-8611



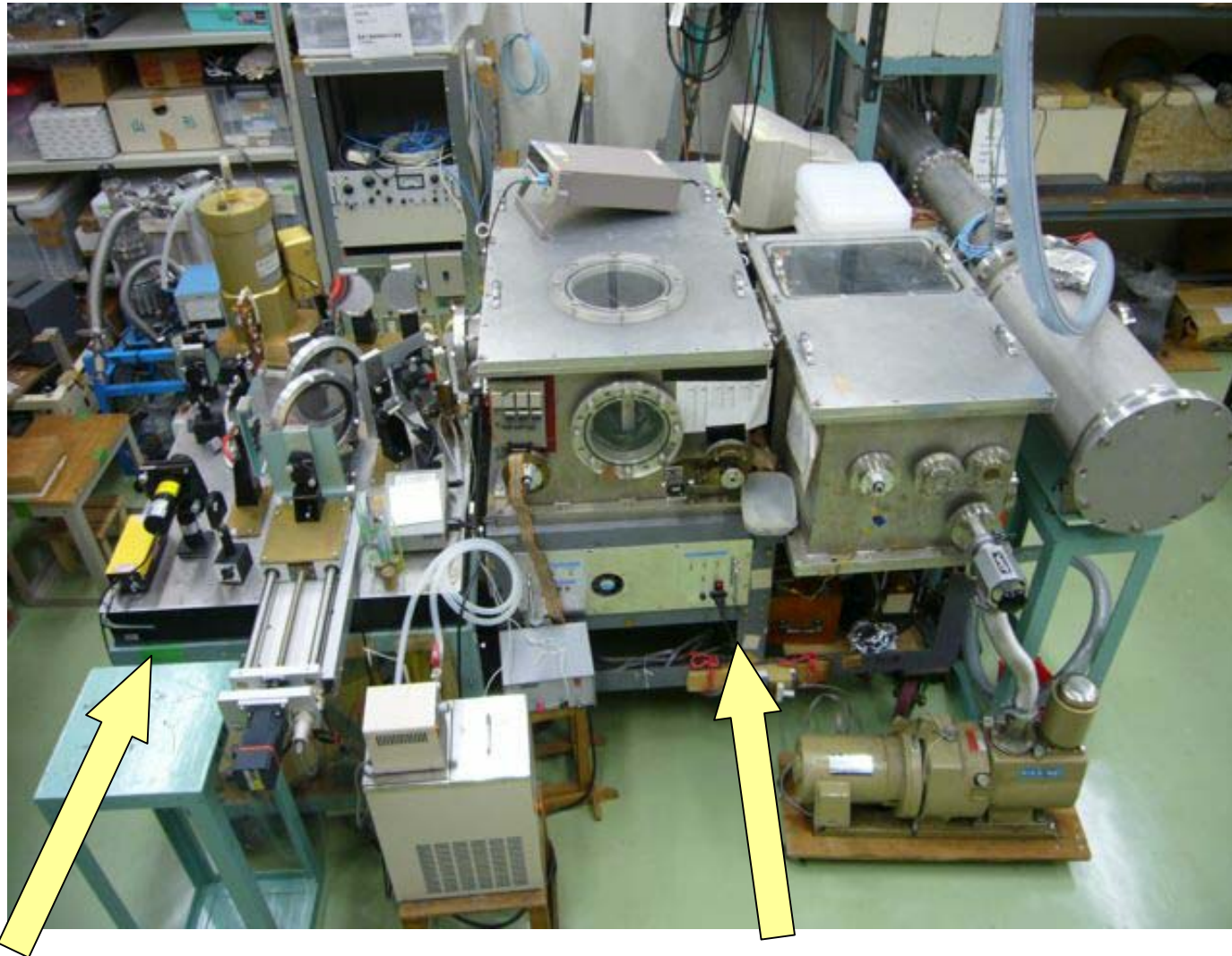
京大炉ライナックのビームライン (遷移放射CTRを光源とする場合)



分光・検出装置 光学的な装置～遠赤外分光の延長

分光器	Martin-Puplett型 フーリエ変換干渉分光計	・一度に広帯域のスペクトルが欲しい場合
	回折格子型分光器	・単色光を取り出す場合 ・ダイナミックレンジが大きく縦軸の精度を求める場合
検出器	液体ヘリウム冷却Siボロメータ (付属のプリアンプは通常バイパス)	高感度・低ノイズ・VBW1kHz
	液体ヘリウム冷却InSbボロメータ	高感度・低ノイズ・VBW1MHz
	ミリ波ダイオード検波器	狭帯域だが高速VBW1GHz
信号増幅	ロックインアンプ ボックスカー積分器	パルス繰返し数が少なくduty比が小さい場合(特にInSb使用時)
真空窓	結晶水晶、ポリエチレン、カプトン (ウェッジ加工)	平行平板:窓材の厚さに注意 波長と同程度だと干渉が乗る

分光装置の写真

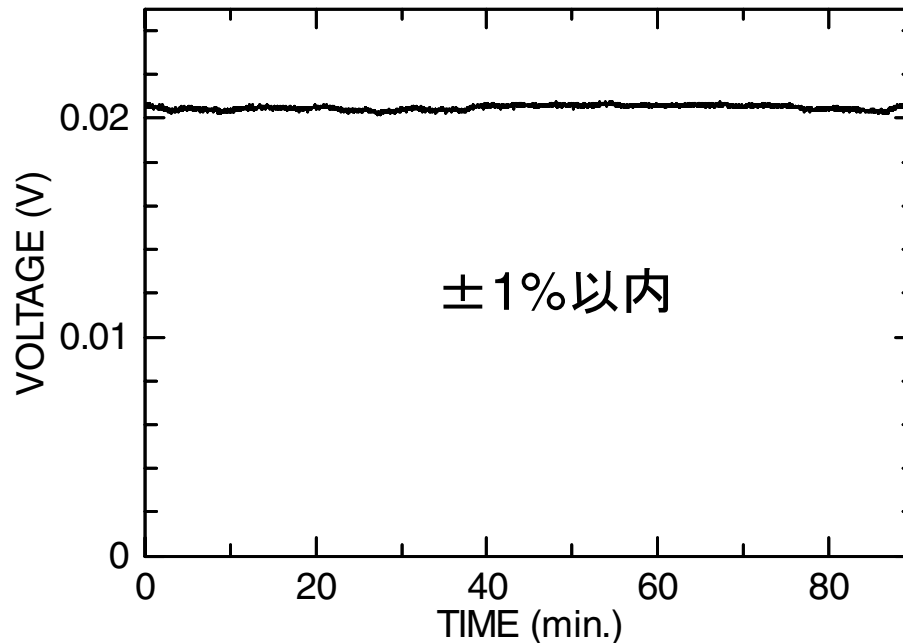


フーリエ干渉計

回折格子型分光器
(干渉計使用時は回折格子を鏡に置き換え)

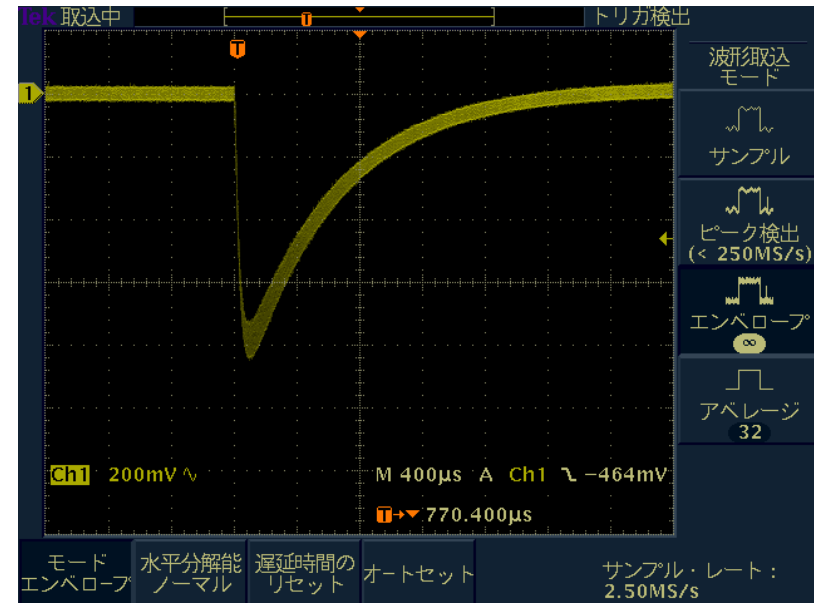
安定性

長時間安定性



Siボロメータ@干渉計
ロックインアンプ(TC:0.3s)

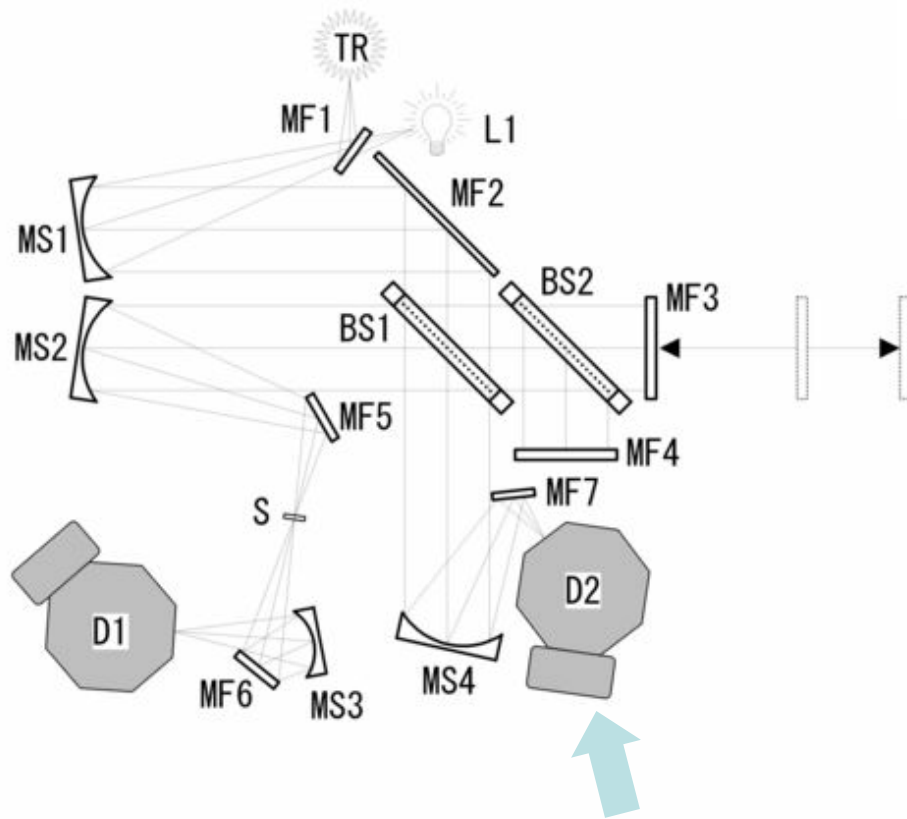
パルス安定性



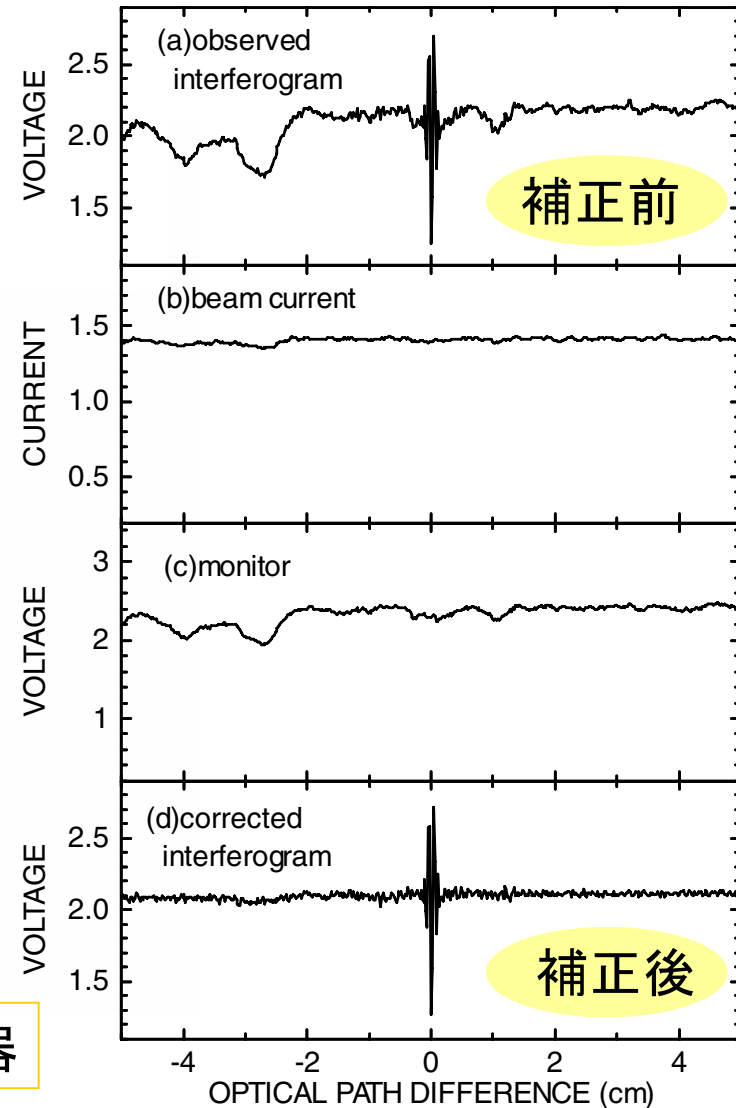
Siボロメータ@干渉計
パルス繰返し46Hz
オシロスコープ:
エンベロープモード

放射強度変動モニターの有効性

もし放射強度が不安定でも...

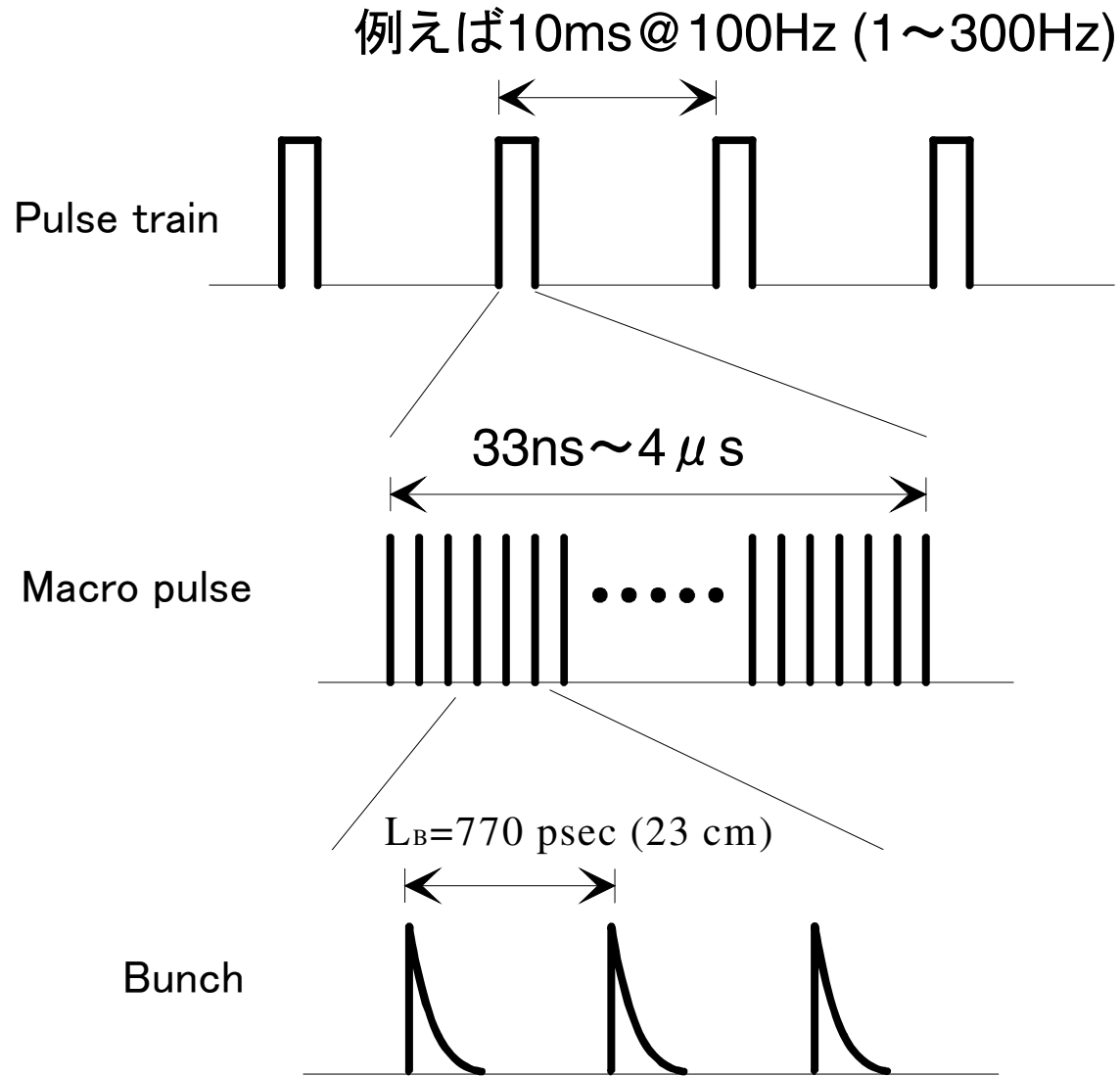


変動補正用モニター検出器



電子ビームの時間構造

すなわち コヒーレント放射の時間構造

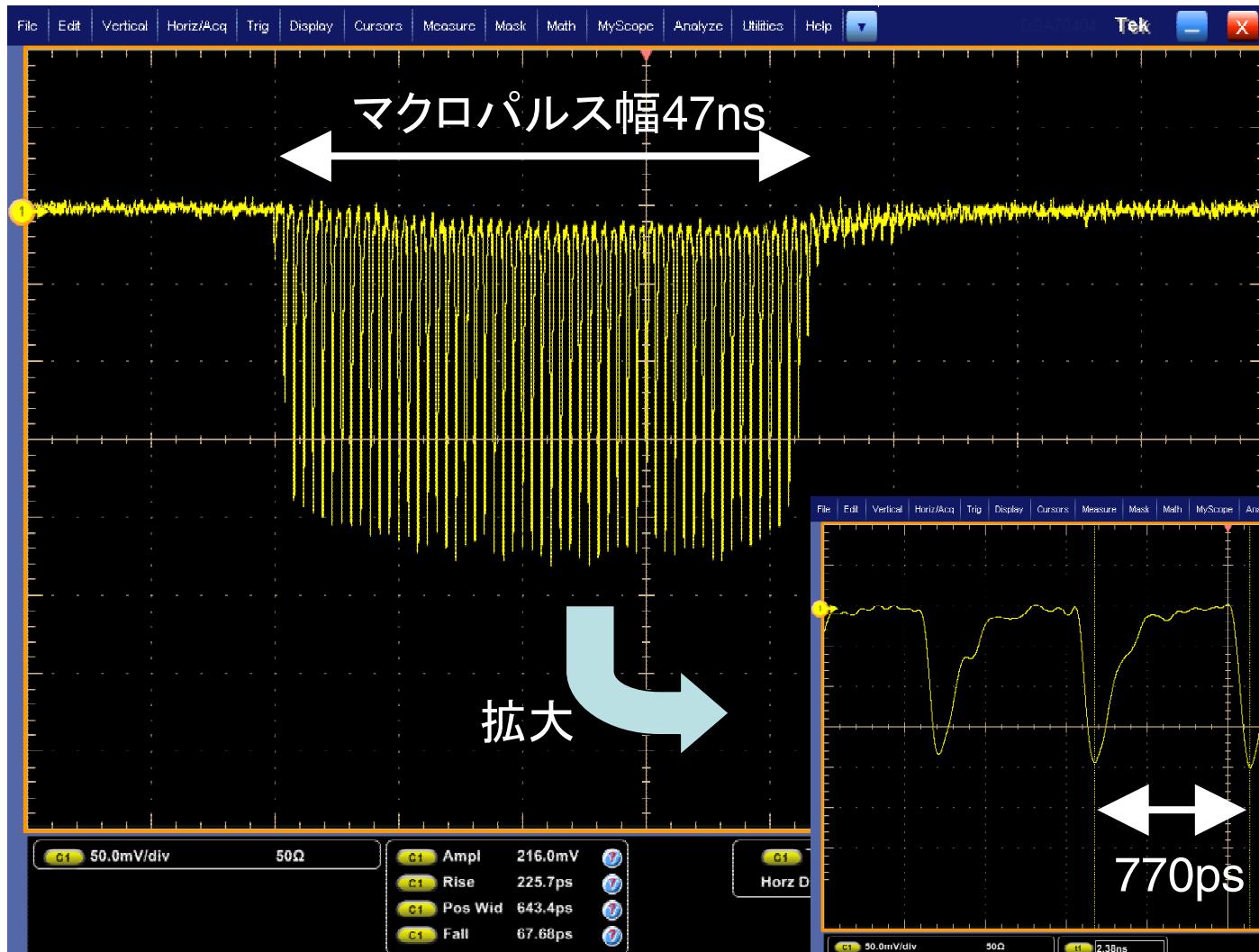


コヒーレント放射の時間構造

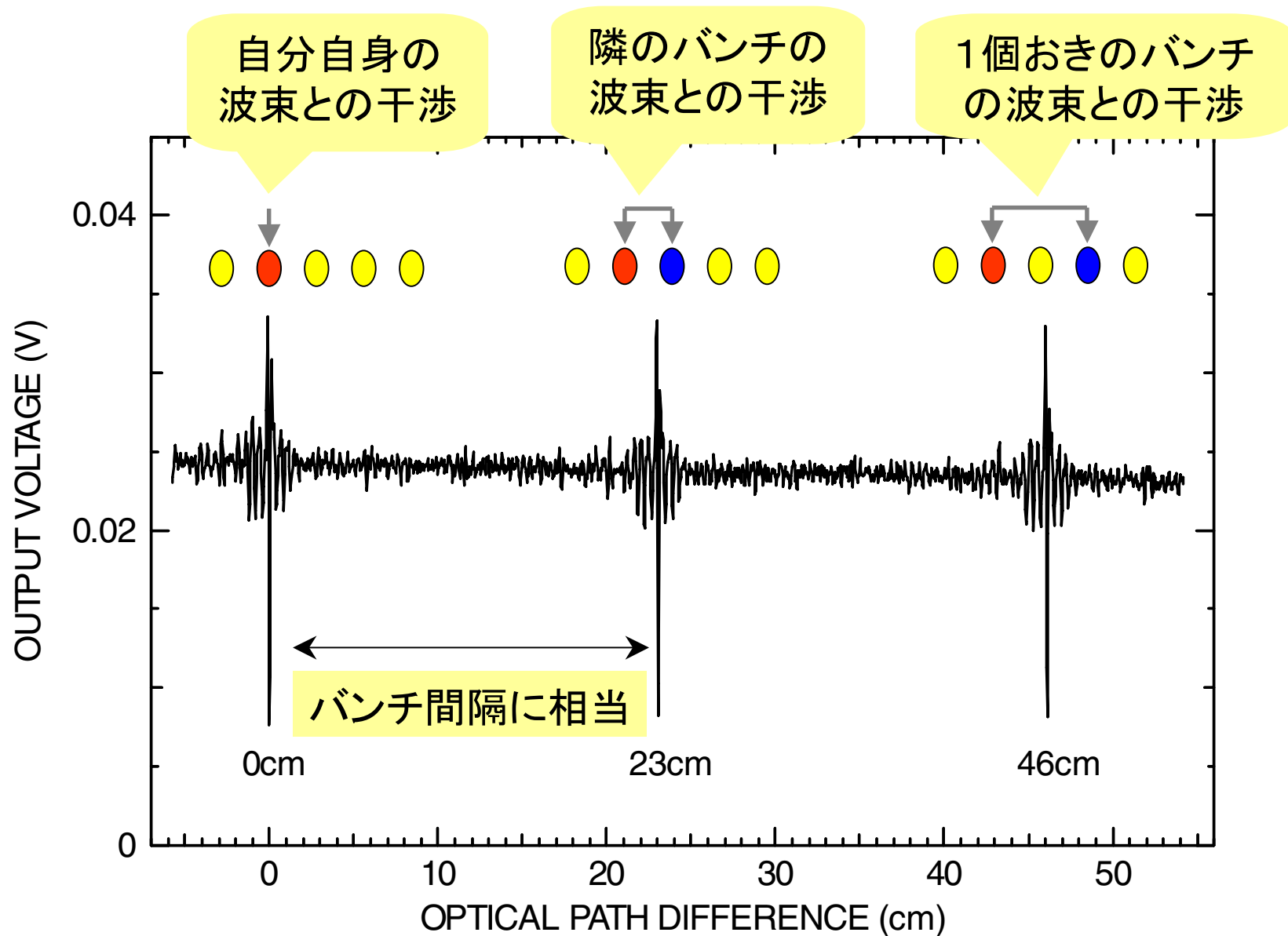
(ミリ波ダイオード検波器)

W-band

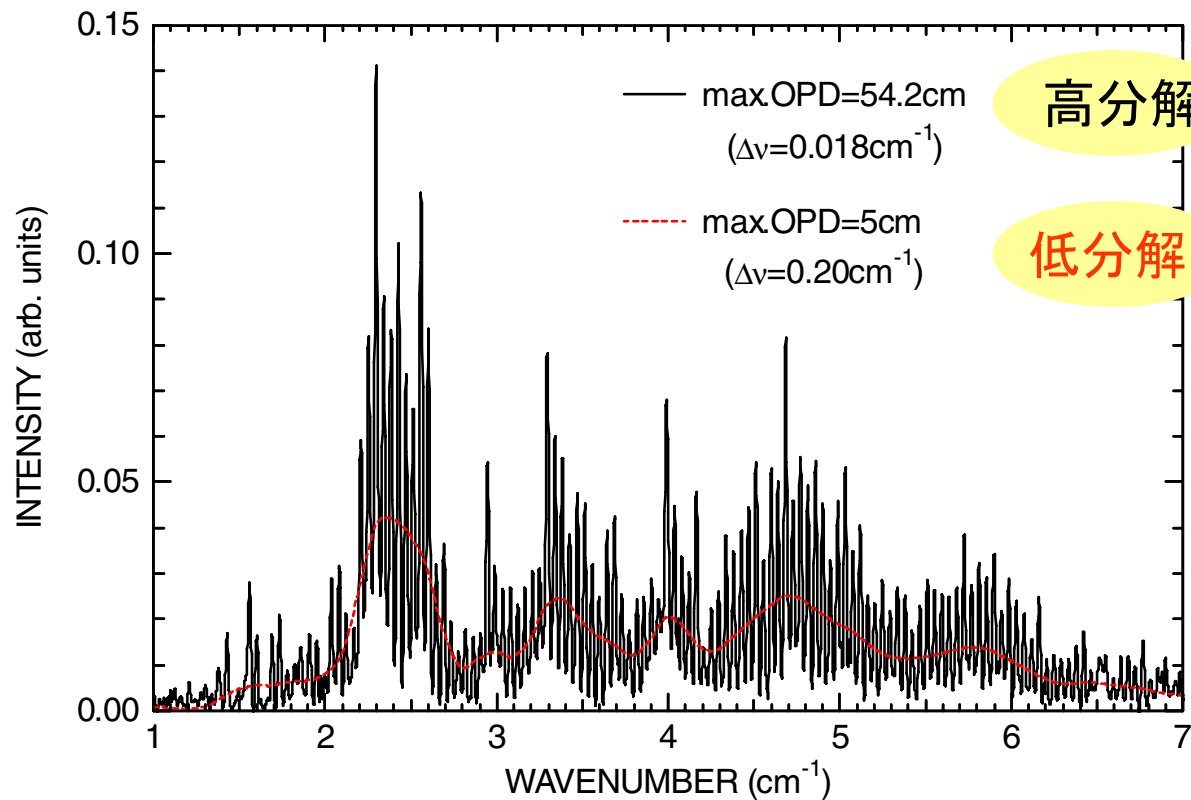
75-110GHz



干渉計による大きな光路差のインターフェログラム



バンチ列からの放射



連続スペクトルとして見なせる波数分解: $\Delta \nu > f_{RF} / c (\text{cm}^{-1})$

1.3GHzでは0.043cm⁻¹

マルチバンチの
デメリット

- ・スペクトル→低分解能に制限
- ・時間分解分光での遅延時間の制限



シングルバンチ
運転の必要性

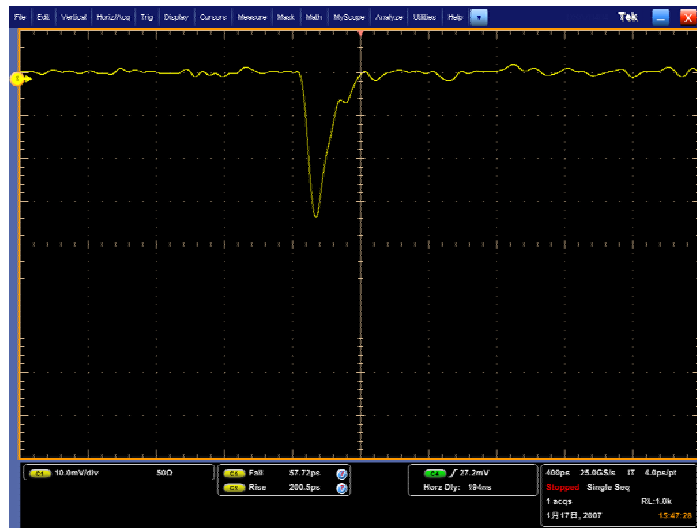
シングルバンチの生成

通常は加速管の前に
サブハーモニック
プリバンチャー
(SHPB)を設置

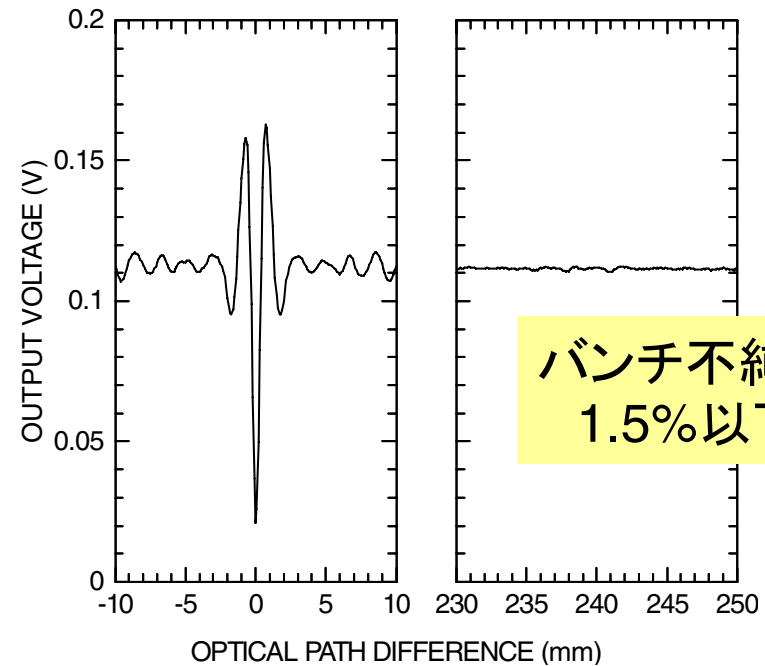
- ・予算
- ・スペース

京大炉ライナックでは...

入射器に
高速パルサーを開発・導入
(アバランシェ・トランジスタ)

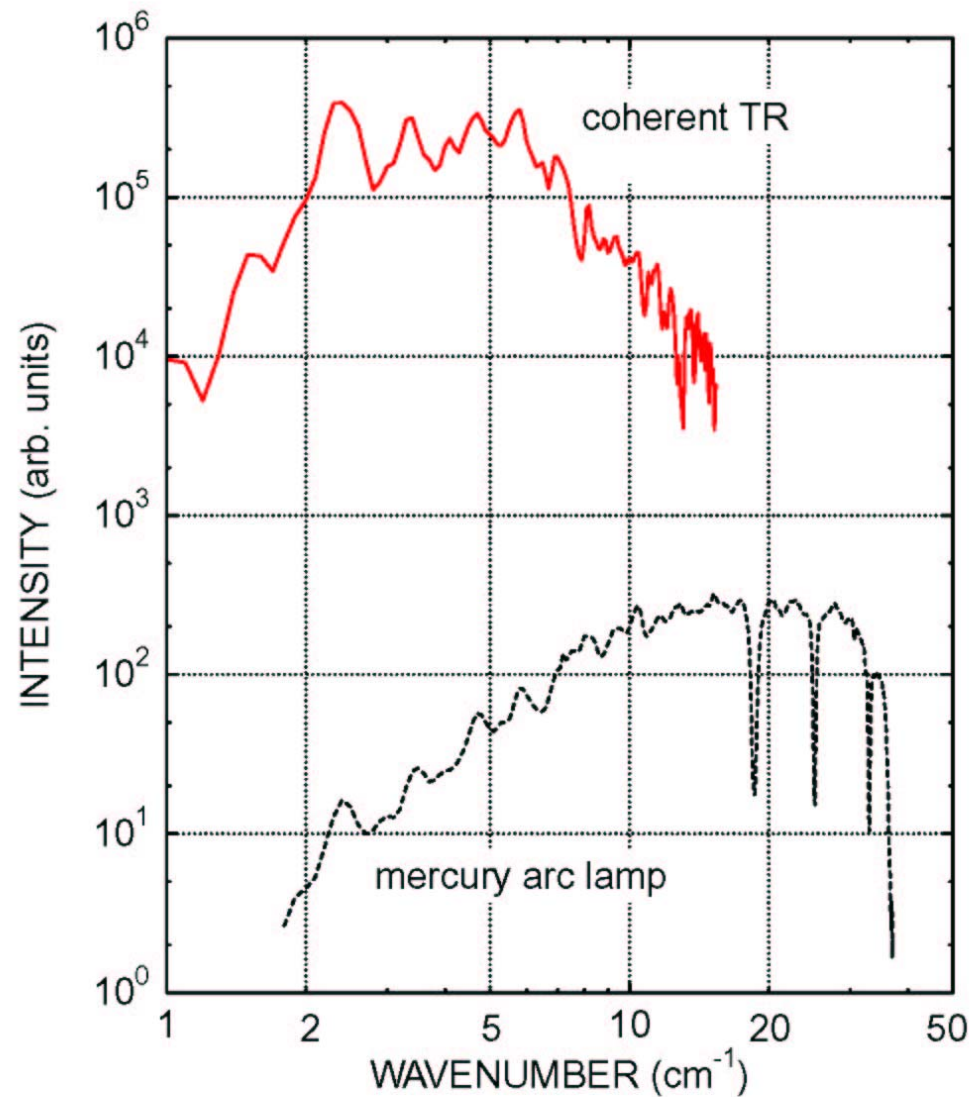


シングルバンチでの
コヒーレント遷移放射の波形
(ミリ波ダイオード検波器)



干渉計インターフェログラム

京大炉ライナックにおける CTRスペクトル

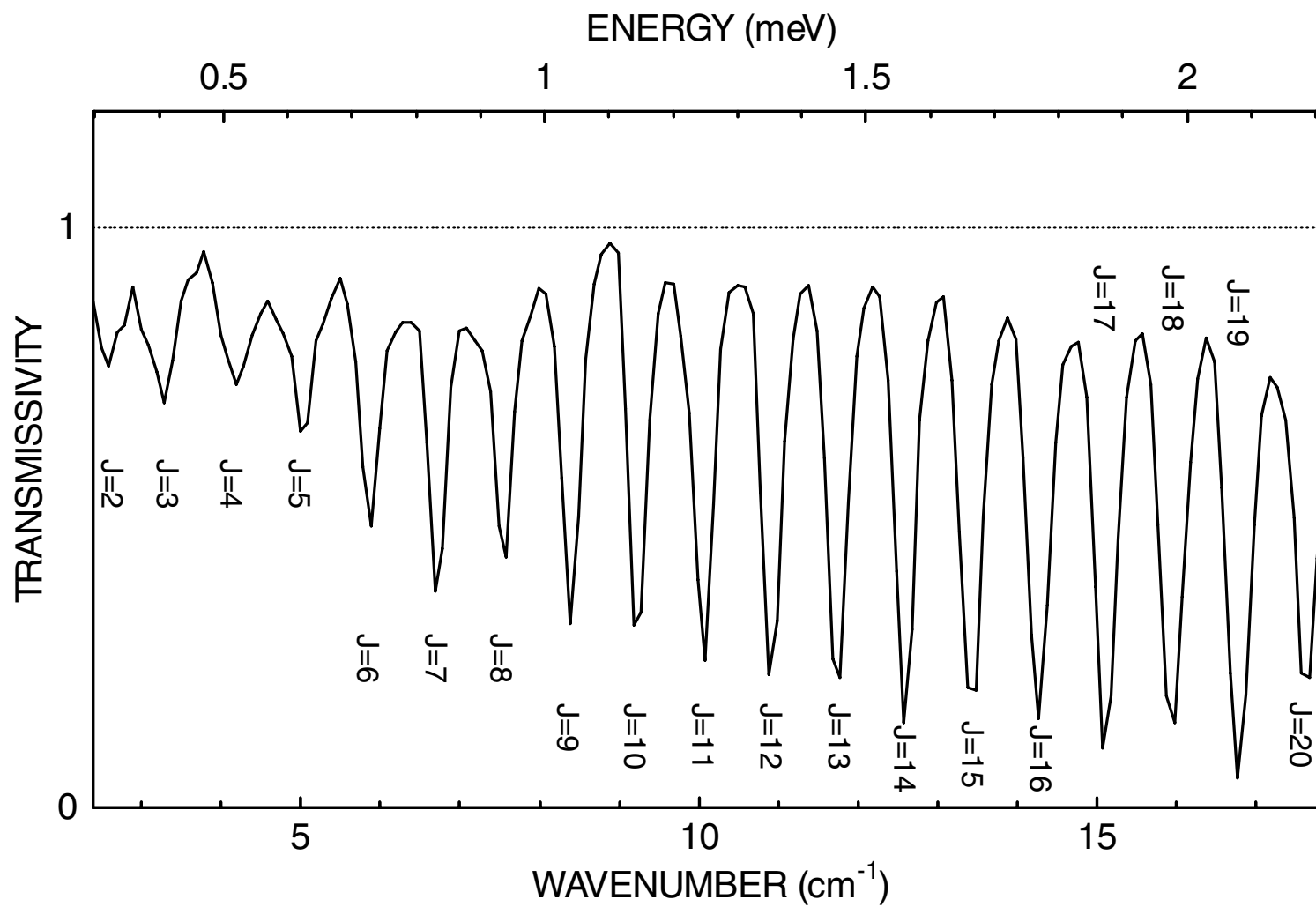


干渉分光計

Siボロメータ

受光角70mrad

N₂Oガスの吸収スペクトル(回転準位)



京大炉で実施済・進行中の分光研究（全国共同利用）

・大強度を利用したもの

- ・NaCl中不純物トンネル励起の直接観測
- ・超イオン導電体のミリ波吸収・反射スペクトル
- ・水-アルコール混合系の吸収スペクトル
- ・高分子材料への放射線照射による吸収スペクトル

・高いピーク強度、パルス性を利用したもの

小型パルス強磁場発生装置を用いた強磁場光スペクトル

・電子線と物質の相互作用を利用したもの

- ・フォトリソグラフィ結晶からのSmith-Purcell放射
- ・ミリ波パルスラジオリシス

・より高輝度の光源開発

Pre-bunched FEL

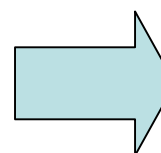
- ・コヒーレント放射光を種とする
- ・広帯域で増幅

ERLにおけるコヒーレント放射光

赤外放射光源の特長の比較

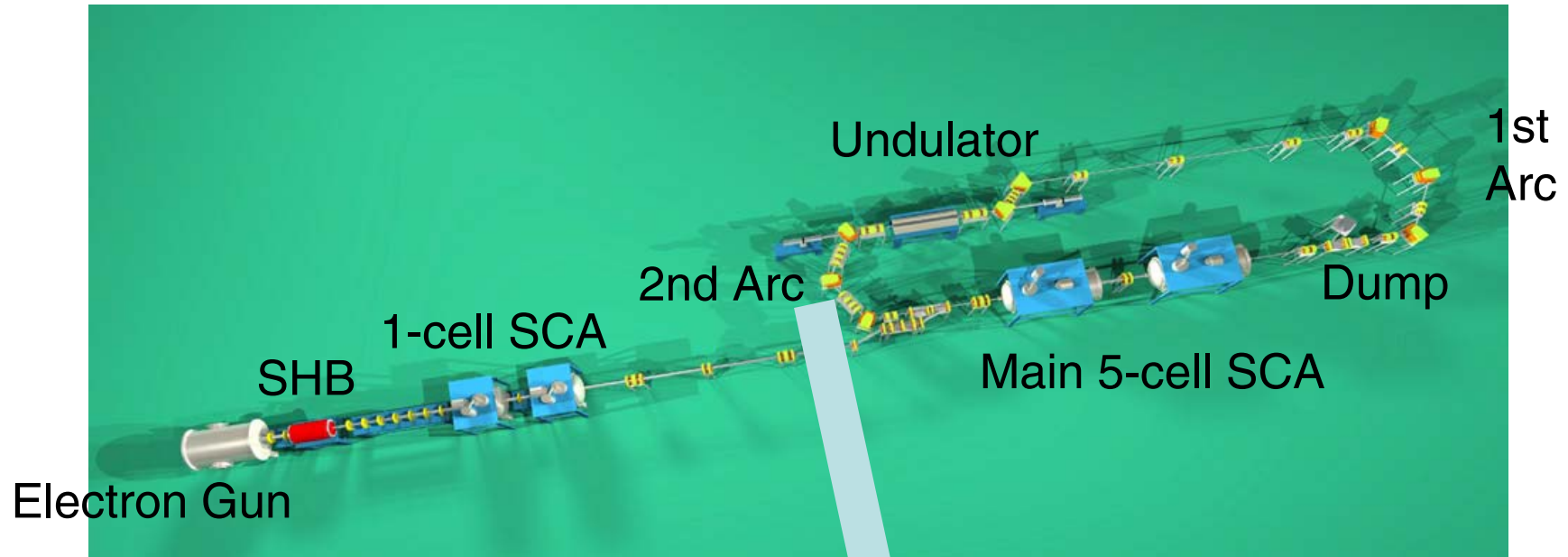
	蓄積リング	ライナック	ERL
バンチ長	長 100ps	短 1ps	極短 0.4ps
繰り返し 周波数	大 500MHz	小 10Hz	大 37MHz
平均電流	大 100mA	小 10 μ A	大 5mA
利用できる 波長領域	IRSR (近赤外 ~遠赤外)	CSR (サブミリ波・ ミリ波)	IRSR+CSR (近 赤外~ミリ波)

赤外放射光ユーザーから見たERLのメリット



広帯域で高輝度
短いパルス
高いピーク強度

JAEA-ERLでの実験配置



運転パラメータ

エネルギー: 17 MeV

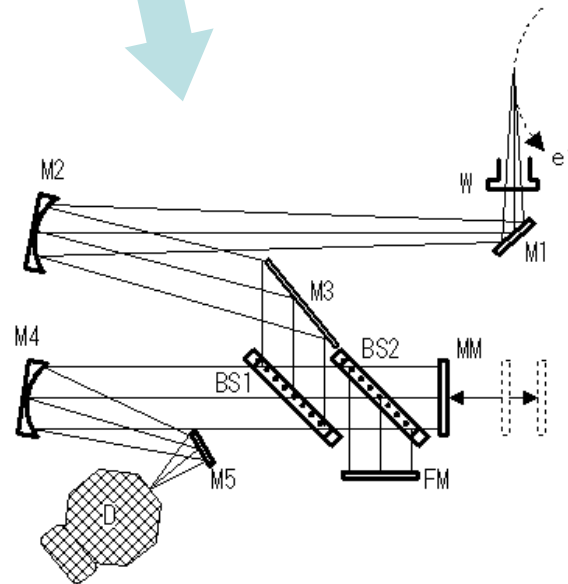
バンチ繰返し: 20.8 MHz

マクロパルス幅: 230 μ s

マクロパルス繰返し: 10 Hz

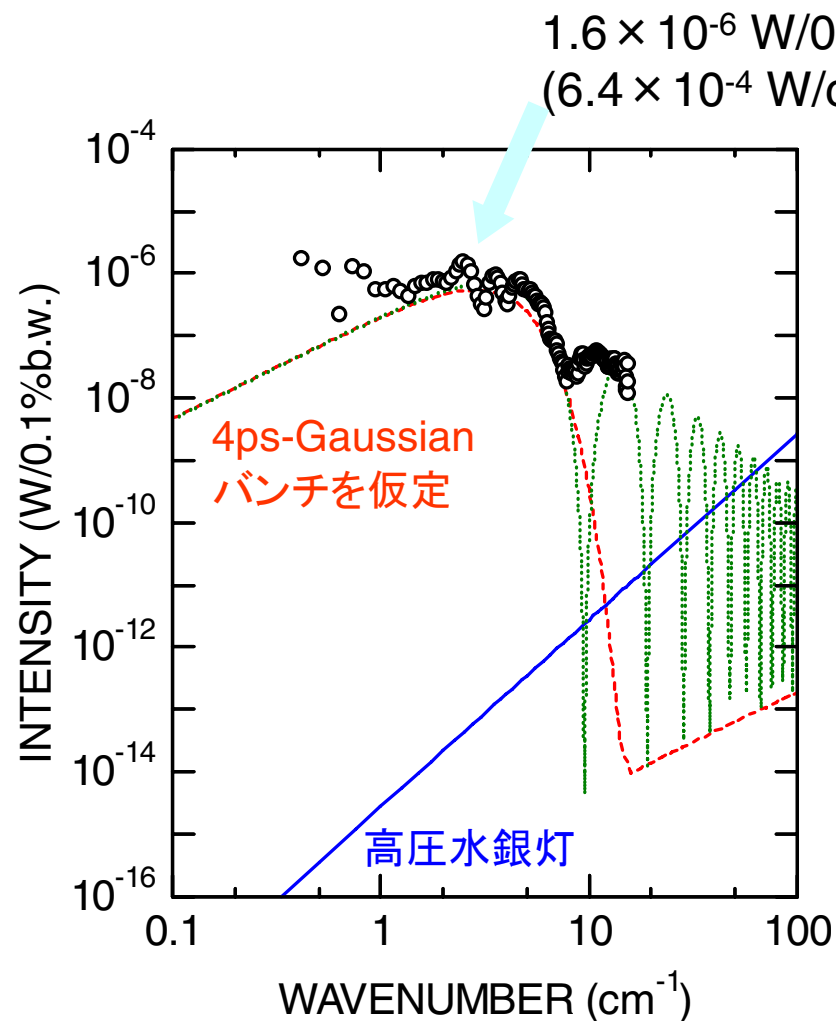
平均電流: 17.7 μ A

軌道半径: 20cm



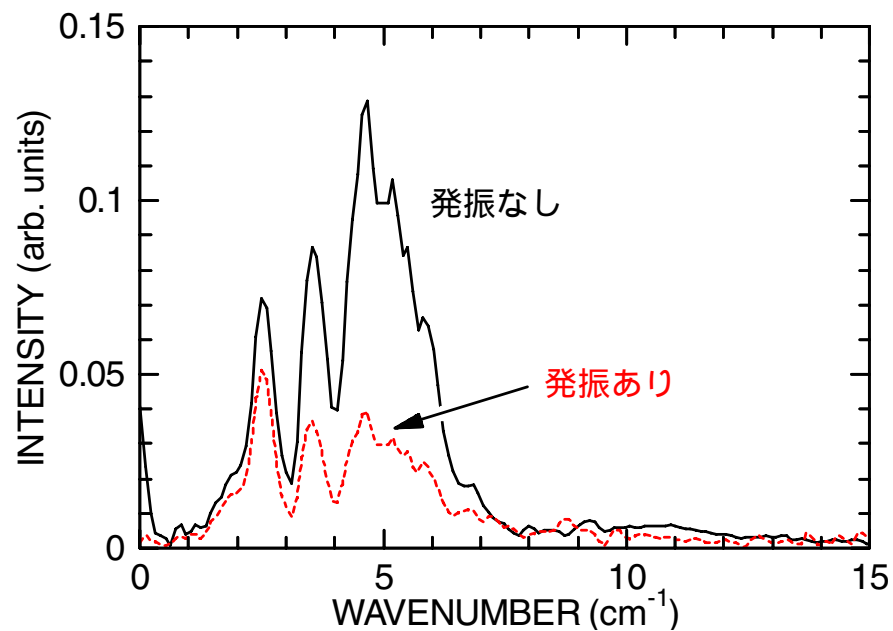
80mradの受光角で設計したが
検出器が飽和したため
37mradに。

JAEA-ERLで観測された CSRスペクトル



受光角37mrad

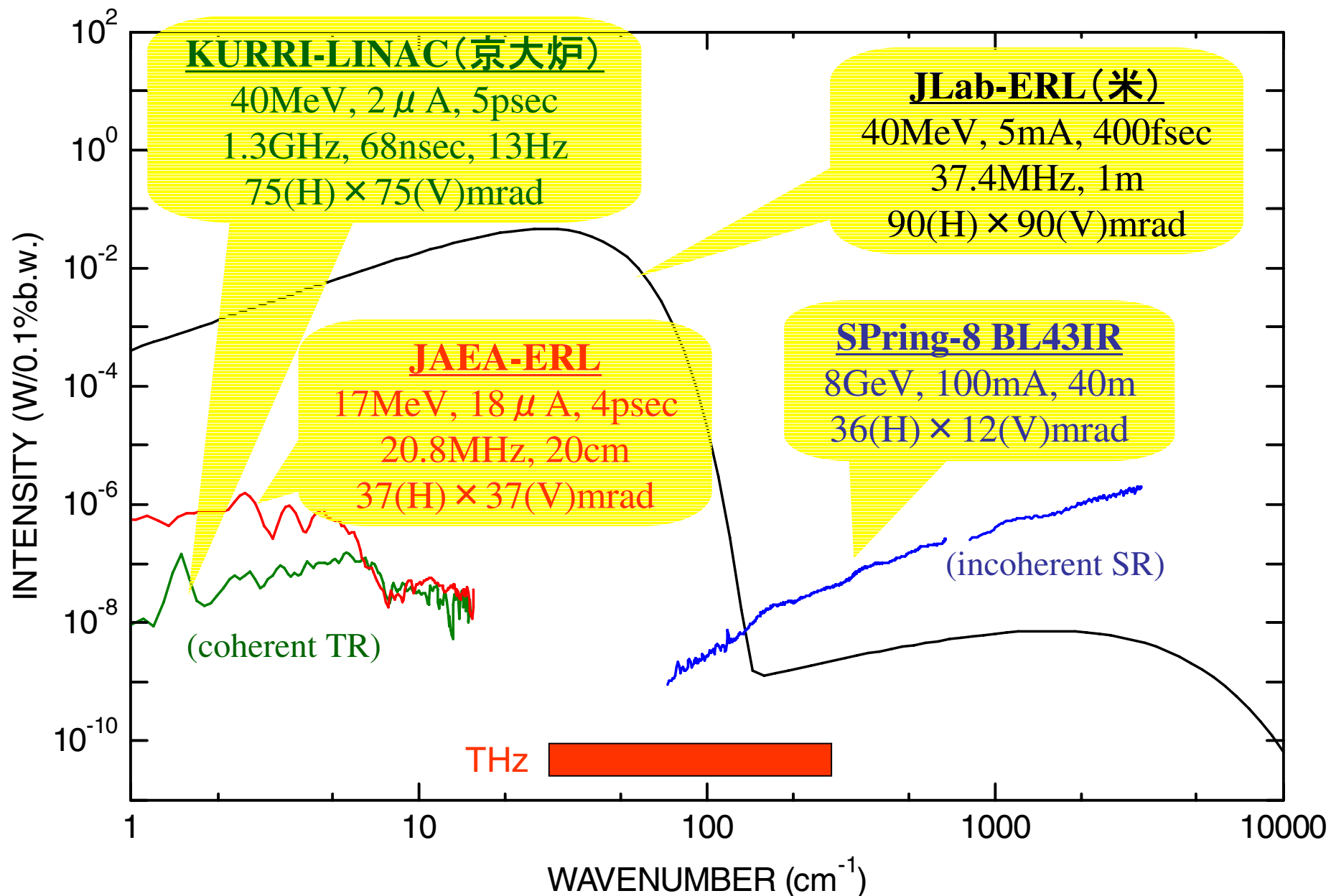
上流の22 μ mFELの 発振による変化



マイクロバンチングが発光点まで
保存されないオプティクス

エネルギー広がりによりバンチが伸びた

THz付近の放射光源の比較



まとめ

京大炉ライナック

繰返しが少ないがバンチあたりの電荷大

コヒーレント放射の強度 \propto (バンチ内電子数)²

ピークパワー大

パルス利用に利点

JAEA-ERL

繰返しが多くできる

マクロパルス運転ではなくCWにできる？

(現在のところは冷凍機負荷の制限でCWは無理)

平均パワー大

CWにできれば今より2~3桁増強

バンチ長を1桁短く: THzを網羅



- ・物性改変
- ・物質創製