

コヒーレント放射光の現状と ERLへの期待

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歴史・原理
- 京大原子炉ライナックの放射光ビームライン
- 進行中の研究
- ERL(エネルギー回収型ライナック)でのコヒーレント放射光

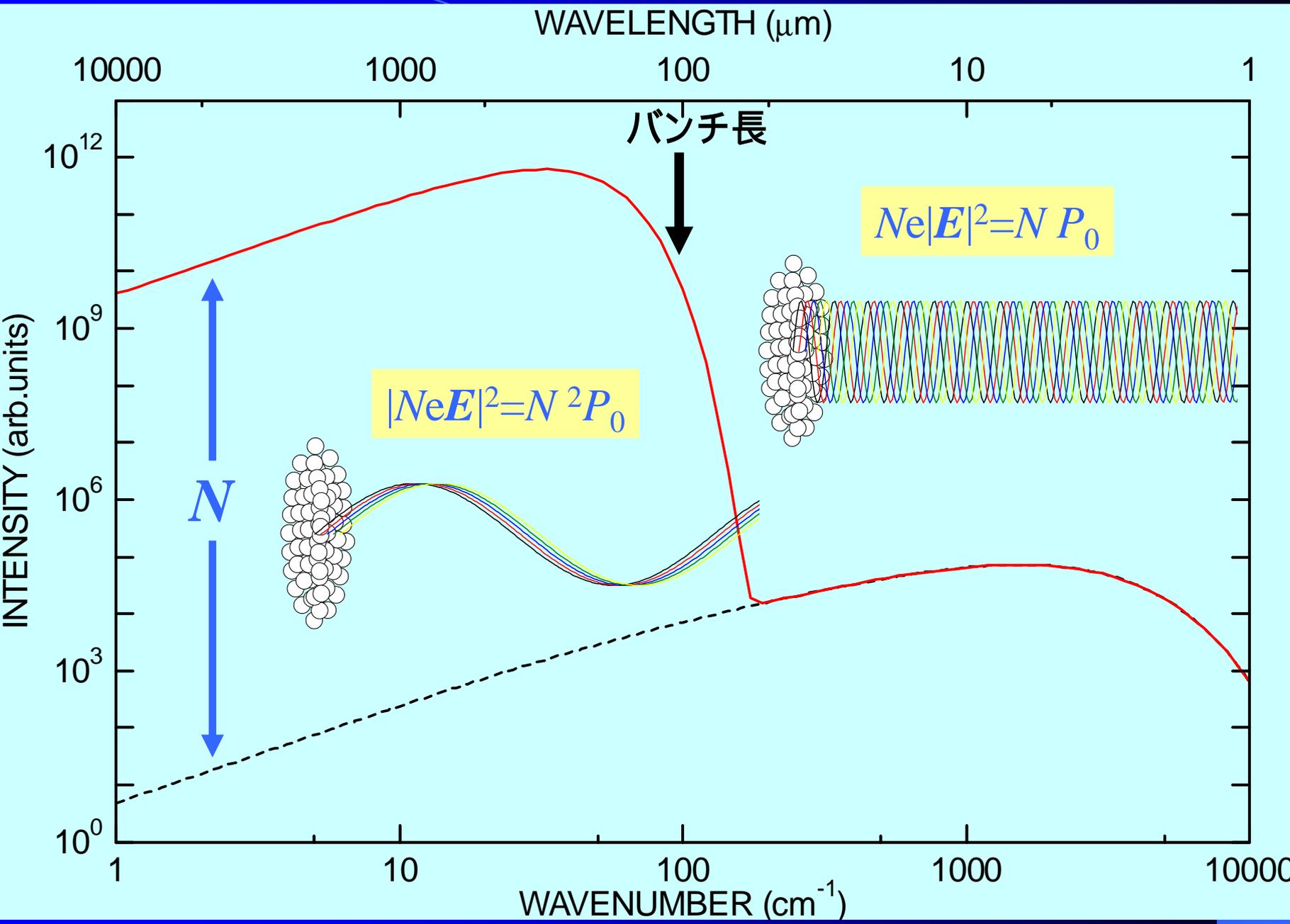
コヒーレント放射光の解説記事

池澤幹彦, 日本物理学会誌, 49 (1994) 208

同 53 (1998) 842

固体物理, 31 (1996) 245

コヒーレント放射光とは



コヒーレント放射光の歴史

1940年代

加速器におけるエネルギー損失の問題としての理論研究

蓄積リング建設期

分光研究者には忘れ去られた存在

1982年

蓄積リングにおいて長波長の強力なコヒーレント放射光が発生している可能性を指摘 (天文学者F.C.Michel)

F.C.Michel, Phys. Rev. Lett. **48** (1982) 580.

コヒーレント放射光の観測

1984年

Daresbury SRSで観測の試み 確認できず
J.Yarwood, et al., Nature **312** (1984) 742.

1989年

東北大核理研で観測成功
(電子ライナックの短バンチ電子ビーム)
T.Nakazato, et al., Phys. Rev. Lett. **63** (1989) 1245.

以降

京大原子炉、阪大産研、Cornell Univ.、Stanford Univ.、などで
基礎的性質の研究

最近

蓄積リングで観測
MAX-I A.Andersson, et al., Opt. Eng. **39** (2000) 3099.
NSLS G.L.Carr, et al., N.I.M. A **463** (2001) 387

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

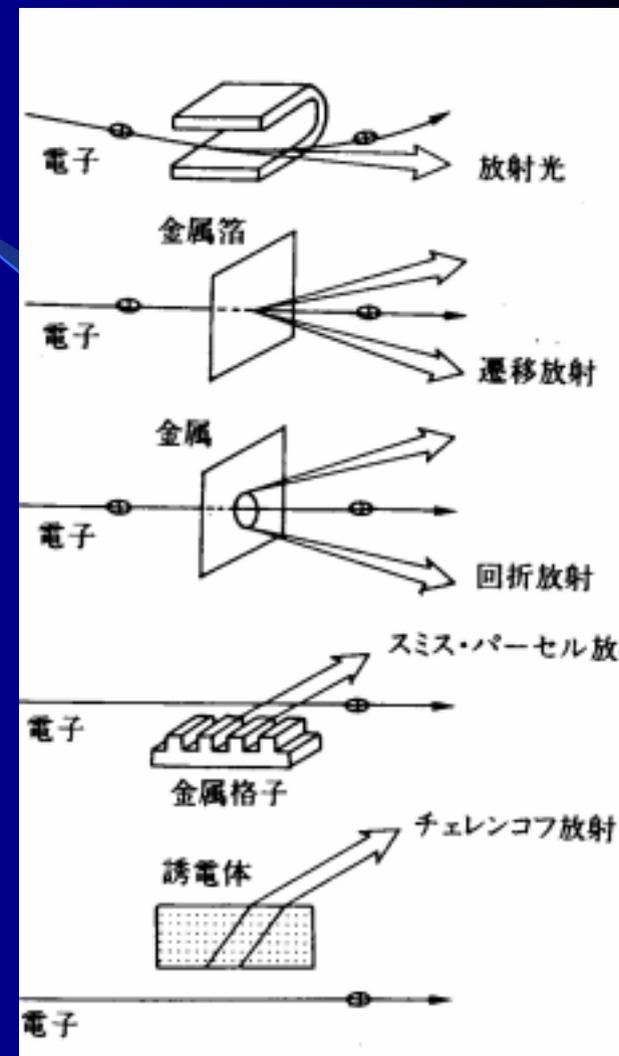
- Y. Shibata, et al., Phys. Rev. E **52** (1995) 6787-6794

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



コヒーレント放射光の理論

電場の重ね合わせ

$$P(\nu) = \left| \sum_{j=1}^N E_0 \exp(i2\pi\nu x_j) \right|^2$$

N : バンチ内電子数
 ν : 波数
 $P_0(\nu)$: 一個の電子からの強度

放射強度スペクトル

$$P(\nu) = NP_0(\nu) + N^2 f(\nu) P_0(\nu)$$

バンチ形状因子 $f(\nu) = \left| \int S(x) \exp(i2\pi\nu x) \right|^2$

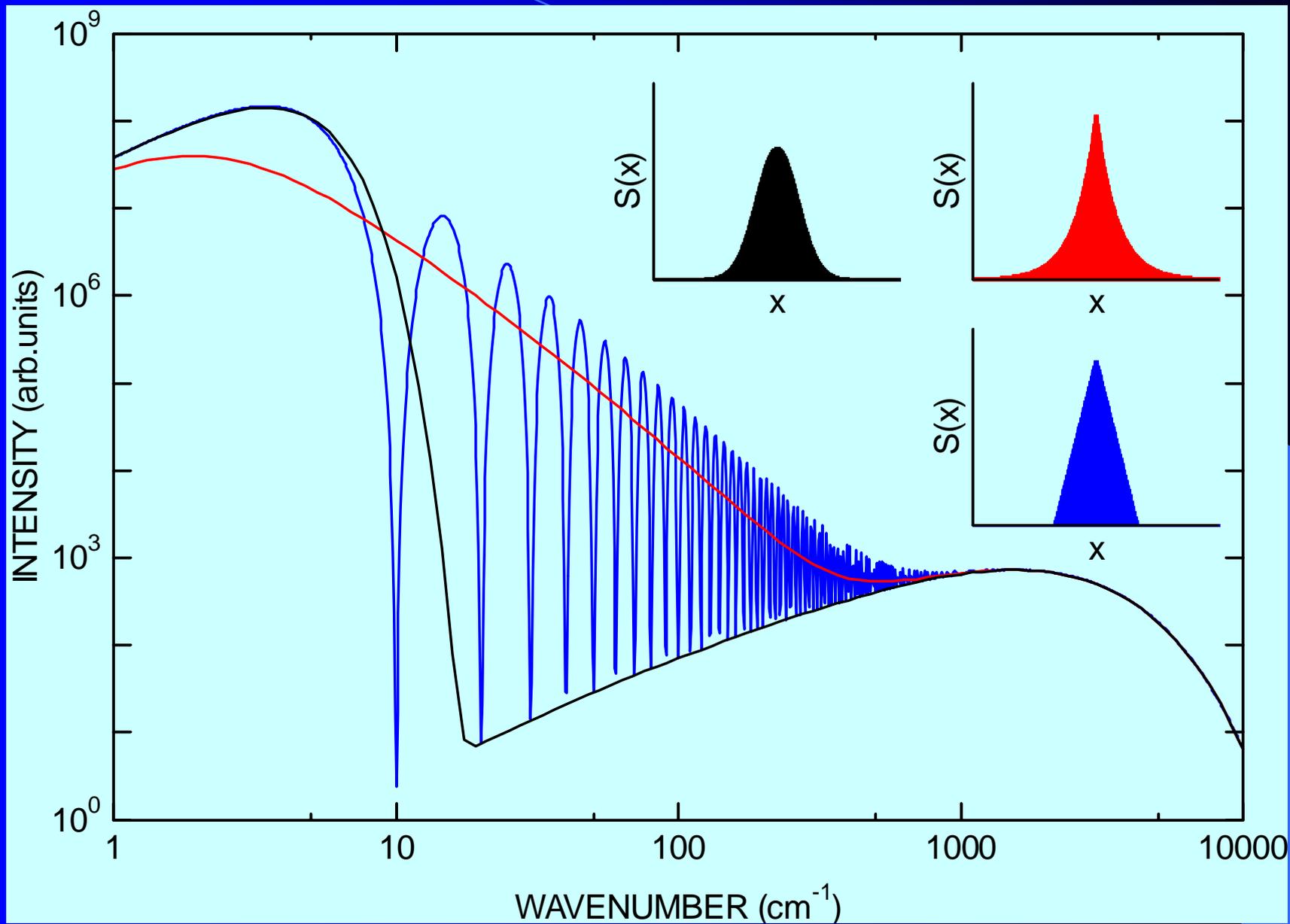
バンチ内電子分布 $S(x)$ のフーリエ変換

スペクトル



電子分布 (バンチ形状)

ハンチ形状によるスペクトルの変化



バンチ形状計測

コヒーレントな放射を用いる手法の基本的な文献

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

Y.Shibata, et al., Phys. Rev. E **50** (1994) 1479-1484

R.Lai, et al., Phys. Rev. E **50** (1994) R3342

R.Lai, et al., Phys. Rev. E **50** (1994) R4294

R.Lai, et al., Phys. Rev. E **52** (1995) 4576

H.Lihn, et al., Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 4163

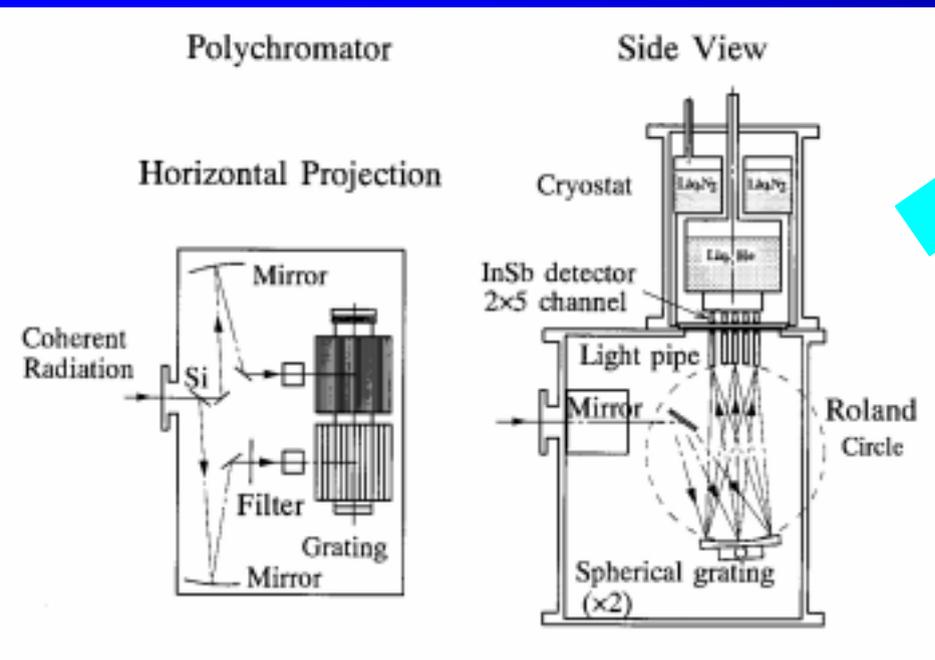
H.Lihn, et al., Phys. Rev. E **53** (1996) 6413

R.Rai, et al., NIM A **397** (1997) 221

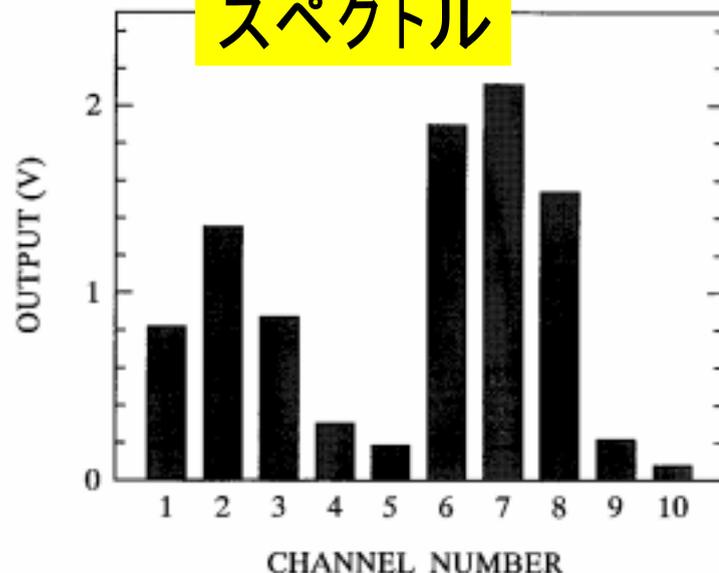
M.Uesaka, et al., NIM A **406** (1998) 371

コヒーレントな放射による バンチ形状計測

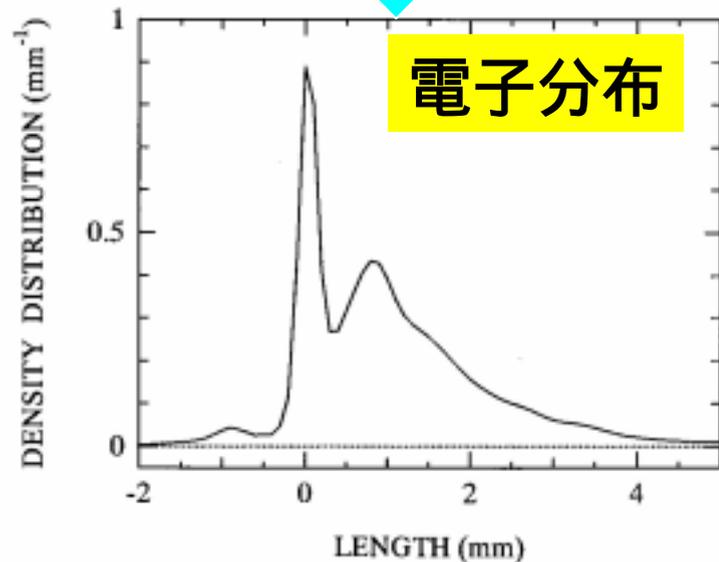
ポリクロメータ (InSb, 10Ch.)



スペクトル



電子分布

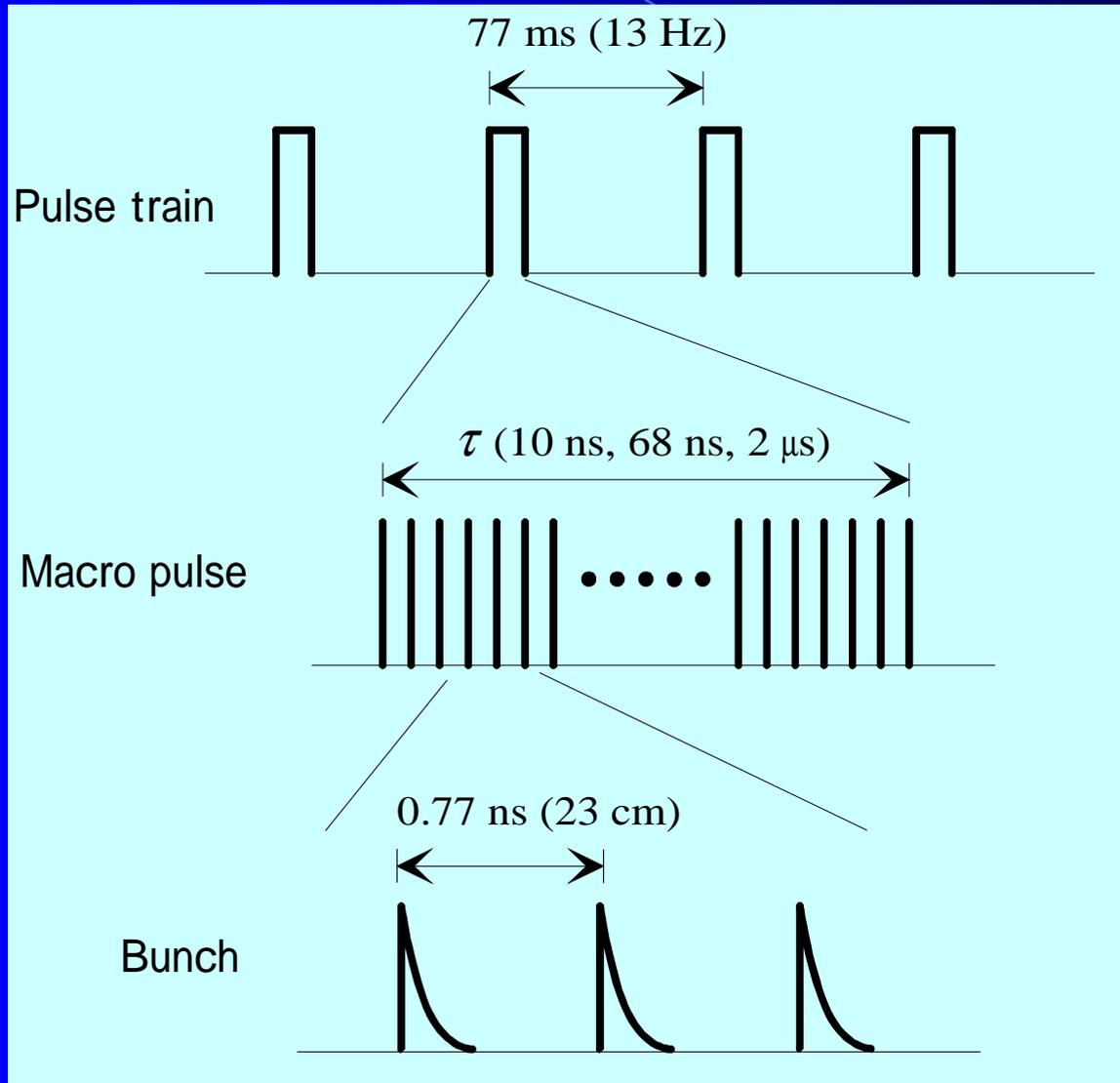


リアルタイム
計測が可能

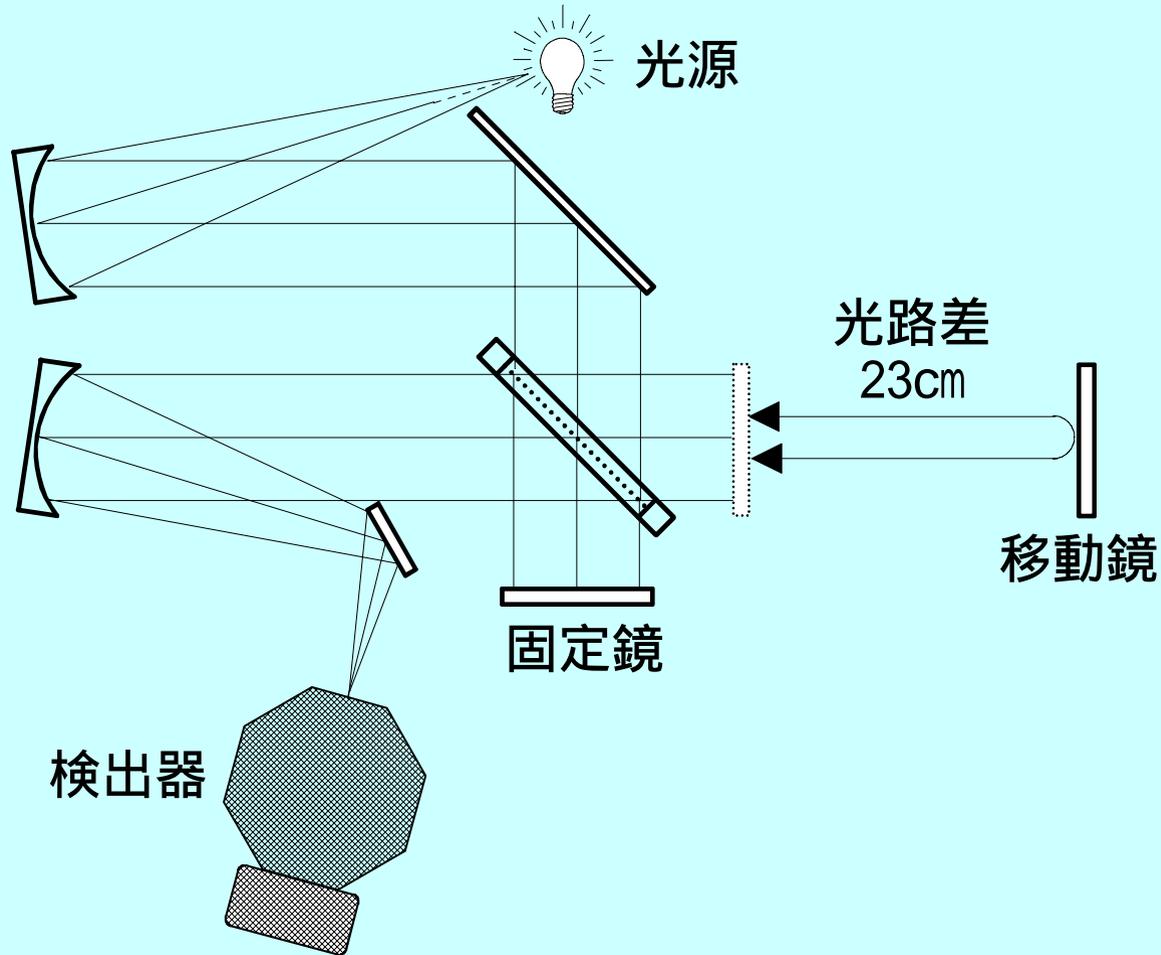
バンチ間の可干渉性: 電子ビームの時間構造

Y. Shibata, et al., Phys. Rev. A **44** (1991) R3445-R3448

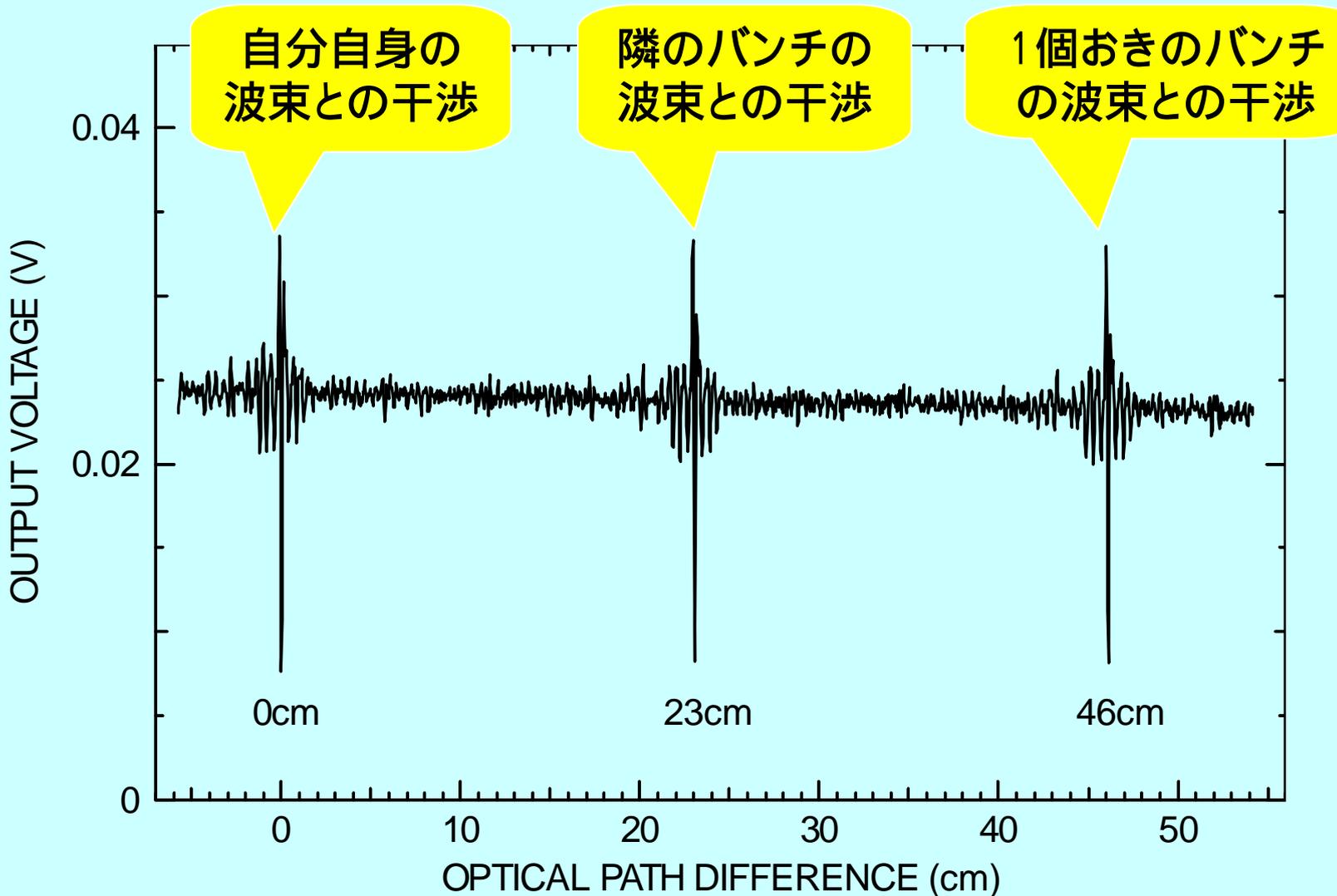
T. Takahashi, et al., Rev. Sci. Inst. **69** (1998) 3770-3775



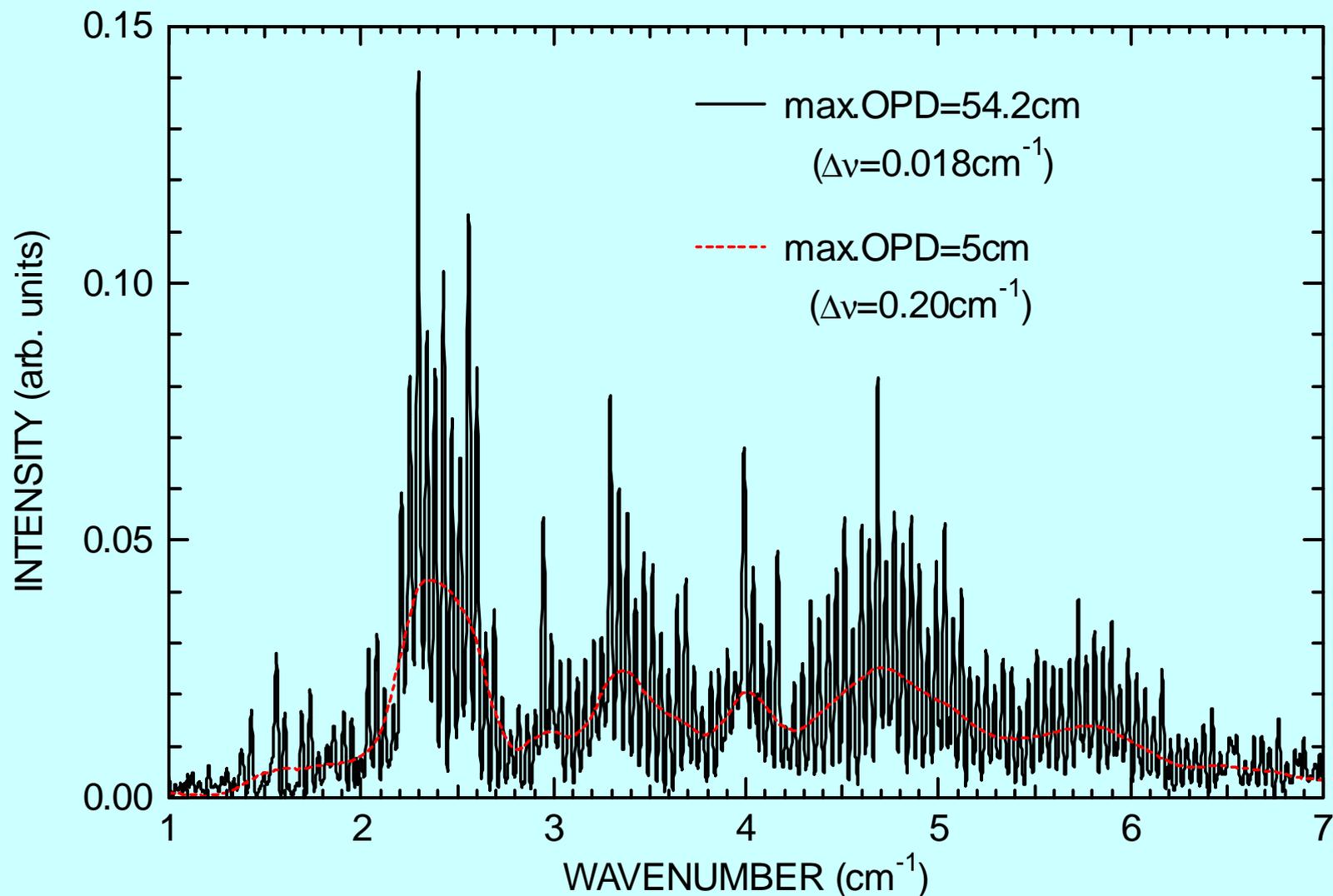
バンチ間の可干渉性：干渉分光計



大きい光路差のインターフェログラム



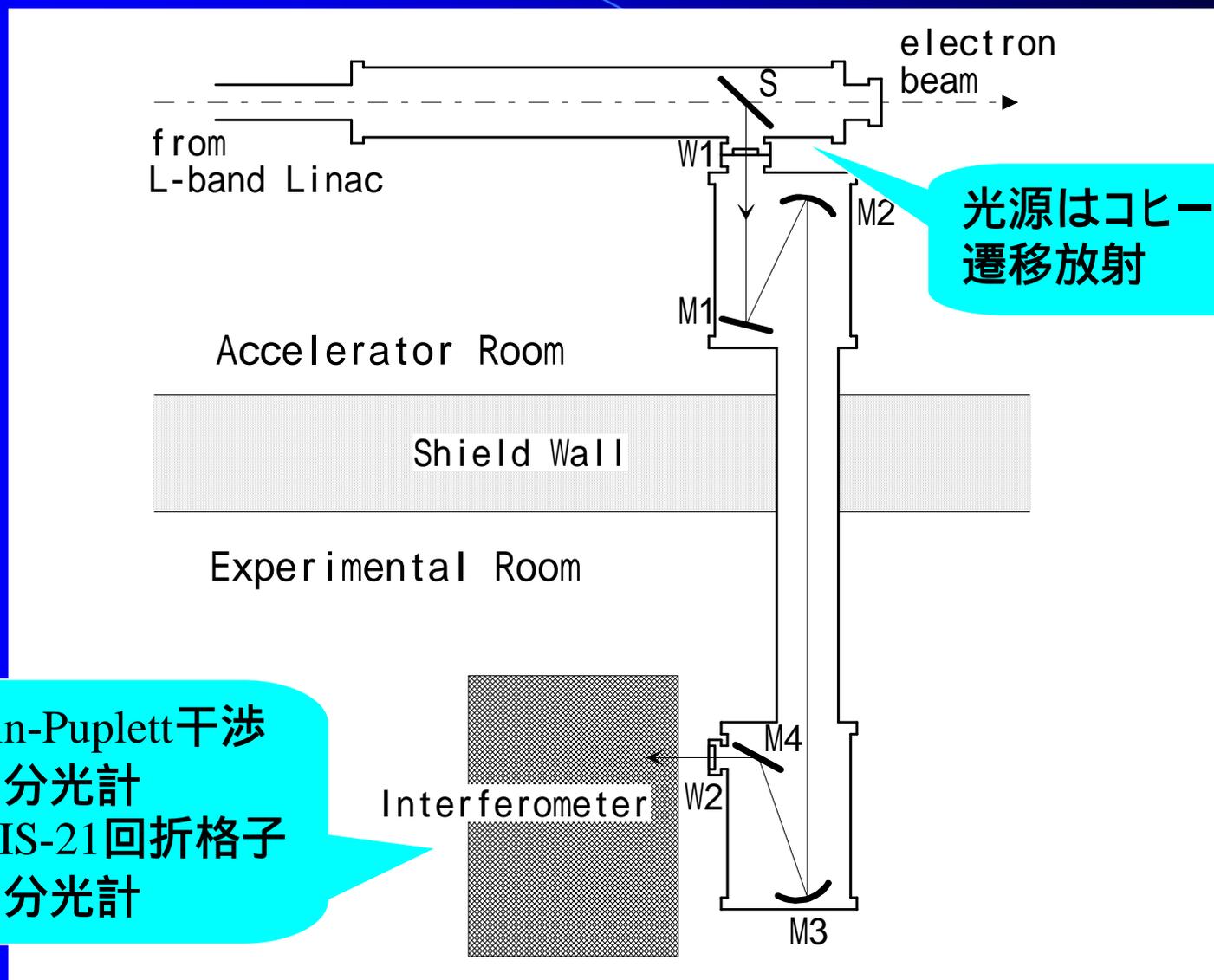
高分解能のスペクトル



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

コヒーレント放射光ビームライン

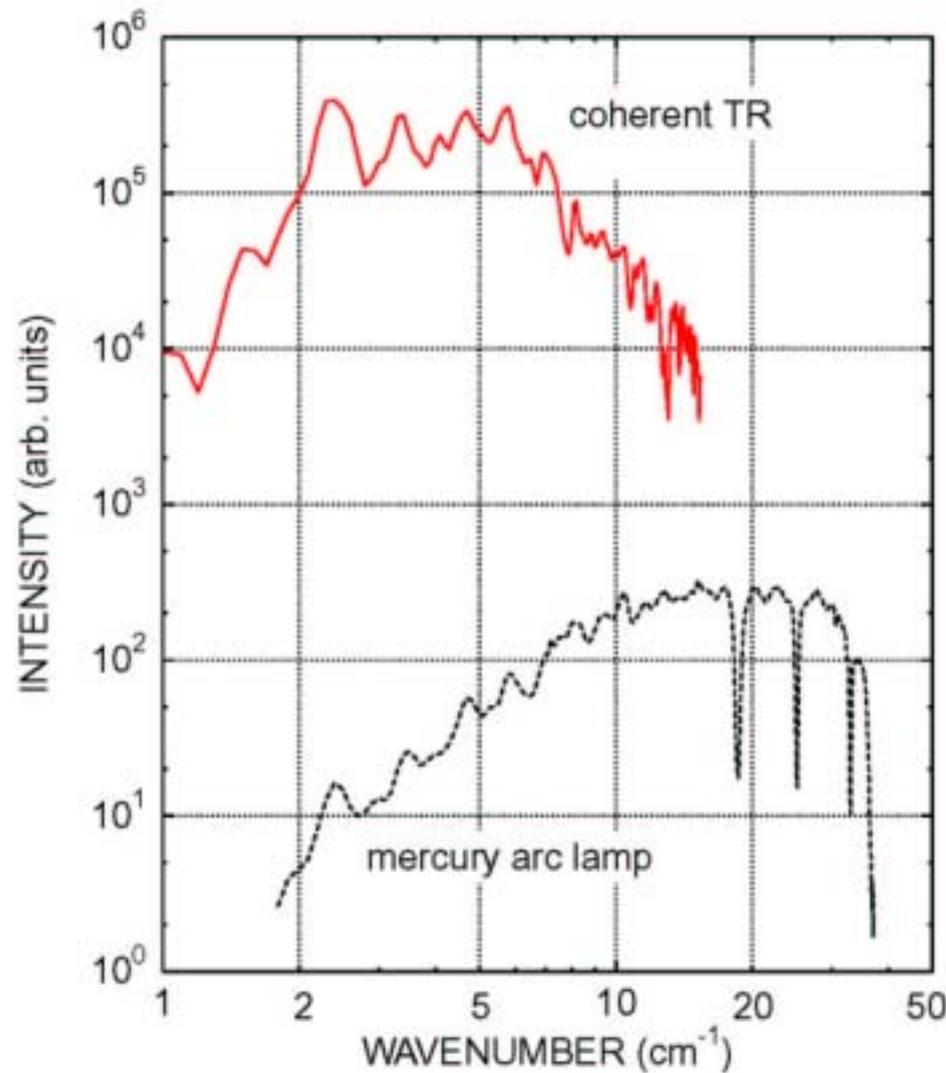
京大原子炉Lバンド電子ライナック (40MeV, Max.10kW)



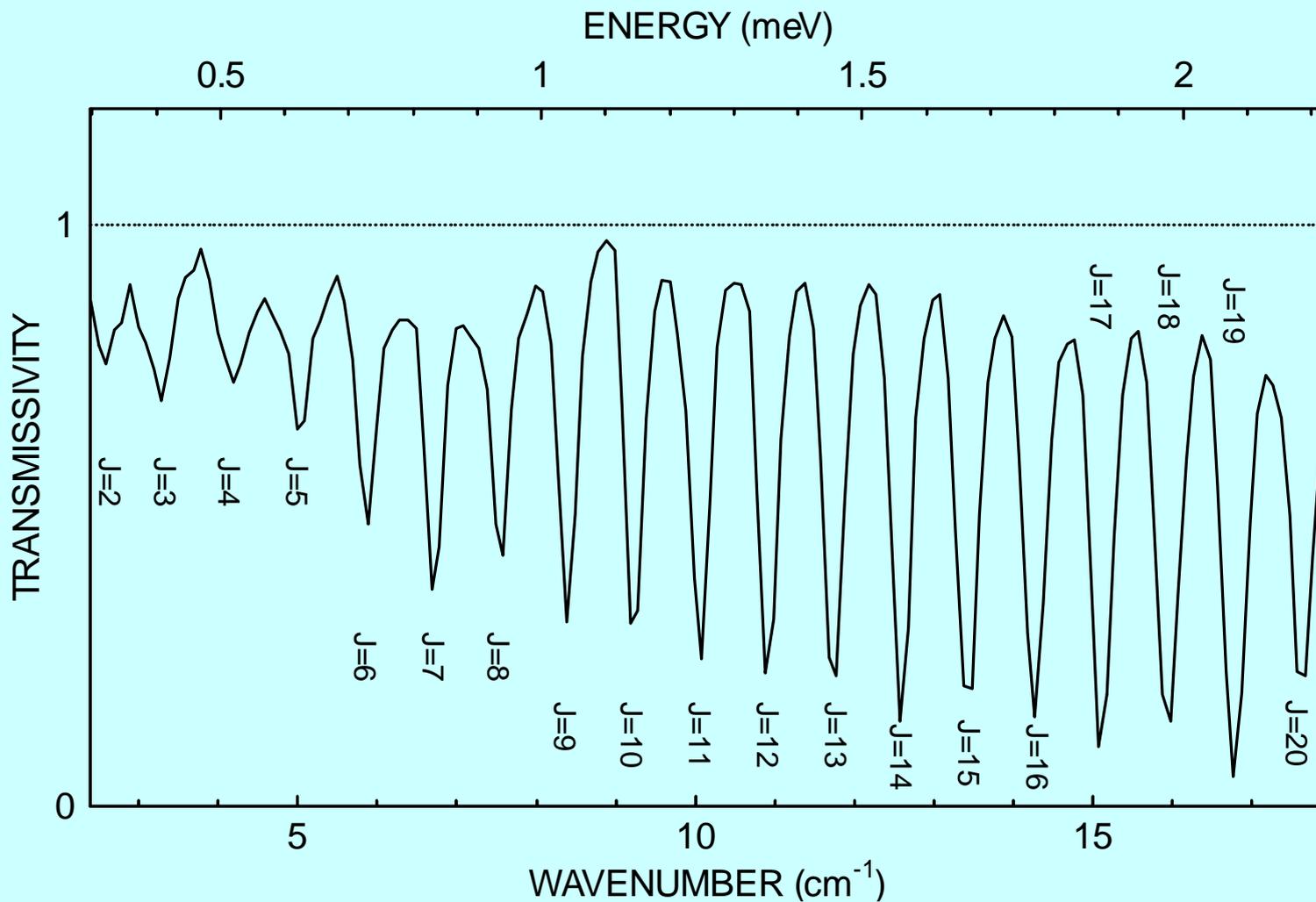
光源はコヒーレント遷移放射

・Martin-Puplett干涉分光計
・日立FIS-21回折格子分光計

ビームラインでのスペクトル



N₂Oガスの吸収スペクトル(回転準位)



京大炉で進行中の研究(光源)

Prebunched FEL

東北大多元研・柴田先生、伊師先生

- ・既にコヒーレントになっている光を共振器で重ね合わせ増幅
- ・アンジュレーターを用いるFELと異なり、バンチング過程を無視したFELの増幅過程の研究が可能

Y.Shibata, et al., Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 2740-2743

Y.Shibata, et al., NIM B **145** (1998) 49-53

ミリ波領域での円偏光放射光の発生

東北大多元研・柴田先生、伊師先生

- ・縦横一組の偏向電磁石(1/4周期の円偏光ウィグラー)を用いる方法
- ・前方遷移放射と後方遷移放射の重ね合わせ方を工夫する方法(Y.Shibata, et al., Rev. Sci. Inst. **72** (2001) 3221-3224)

京大炉で進行中の研究(分光)

アルカリハライド結晶中不純物の低エネルギー励起

T=1.4K ~ 4.2K

ライトパイプ型クライオスタットによる透過測定

リチウムイオン二次電池材料のミリ波反射分光

神戸大分子フォトセ・太田先生

T=77K ~ 400K、試料サイズ ~ 20mm

ミリ波パルスラジオリシス

東北大工・近藤先生、東北大多元研・柴田先生、伊師先生

電子線励起・コヒーレント放射光プローブ

遅延時間0 ~ 770psec

パルス強磁場と波長可変パルス光源による強磁場光スペクトル

岡山大理・松田先生、野尻先生

B=0 ~ 40T、4.2K ~ 77K

量子ドットや多重量子井戸のサイクロトロン共鳴

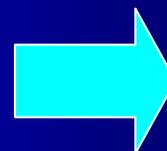
磁性クラスターの電子スピン共鳴

ERLの特徴

(ERL:エネルギー回収型ライナック)

	蓄積リング	ライナック	ERL
バンチ長	長 100ps	短 1ps	短 100fs
繰り返し 周波数	大 500MHz	小 10Hz	大 1.3GHz
平均電流	大 100mA	小 10 μ A	大 100mA
利用できる 波長領域	近赤外 ~ 遠赤外	サブミリ波・ ミリ波	近赤外 ~ ミリ波

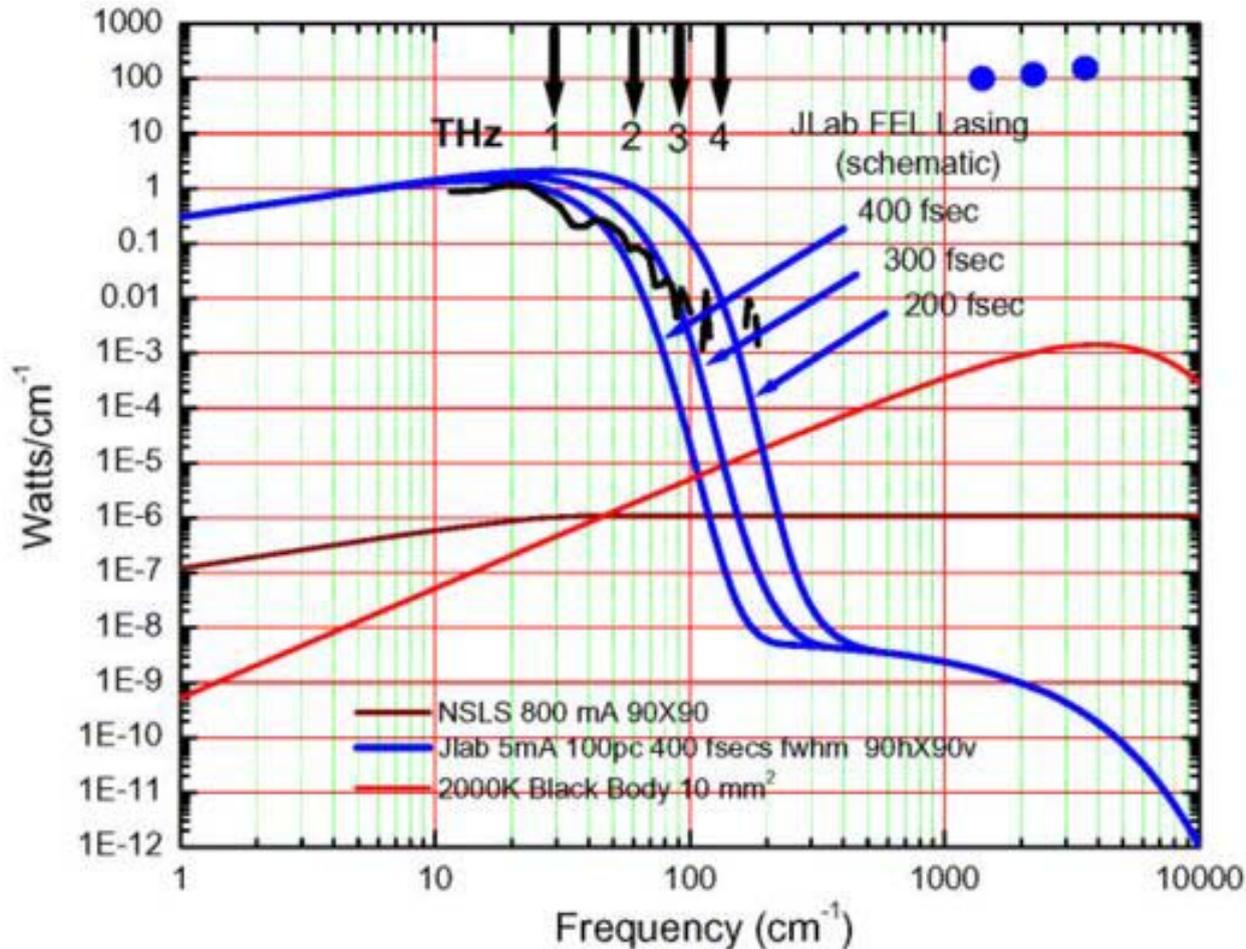
赤外放射光ユーザーから見たERLのメリット



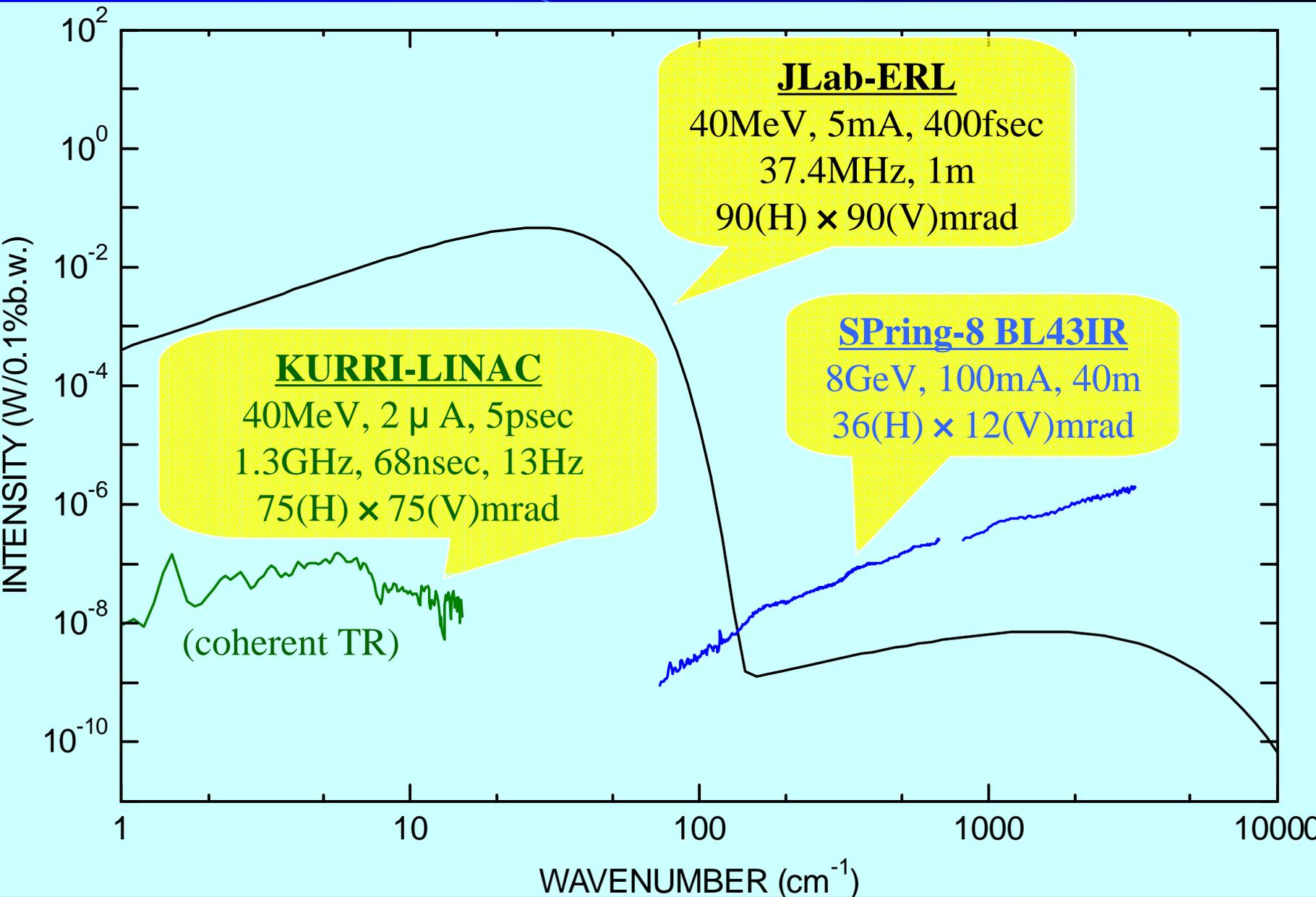
広帯域
短いパルス

JLab-ERLのデータ

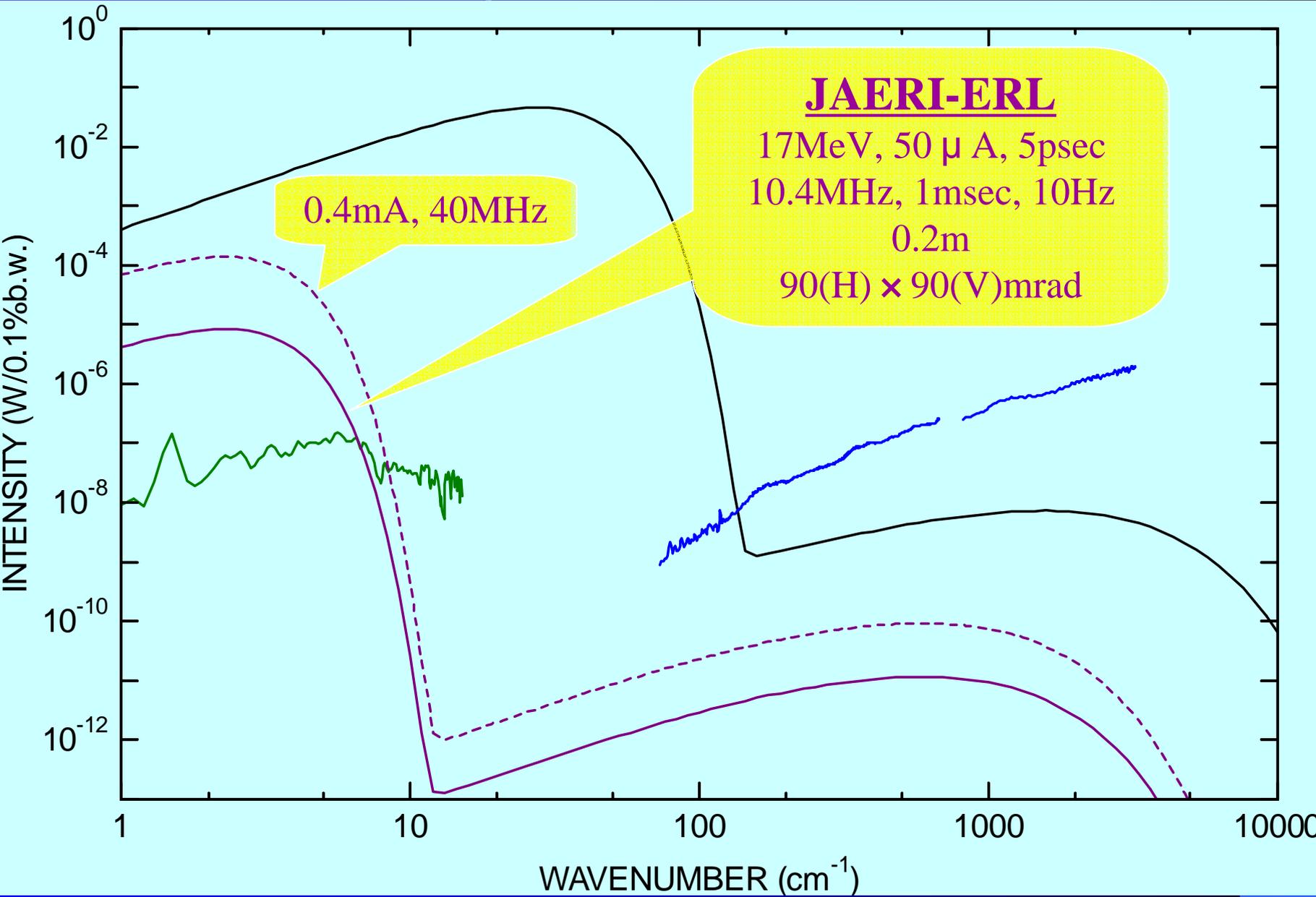
G.P.Williams, Rev. Sci. Inst. 73 (2002) 1461



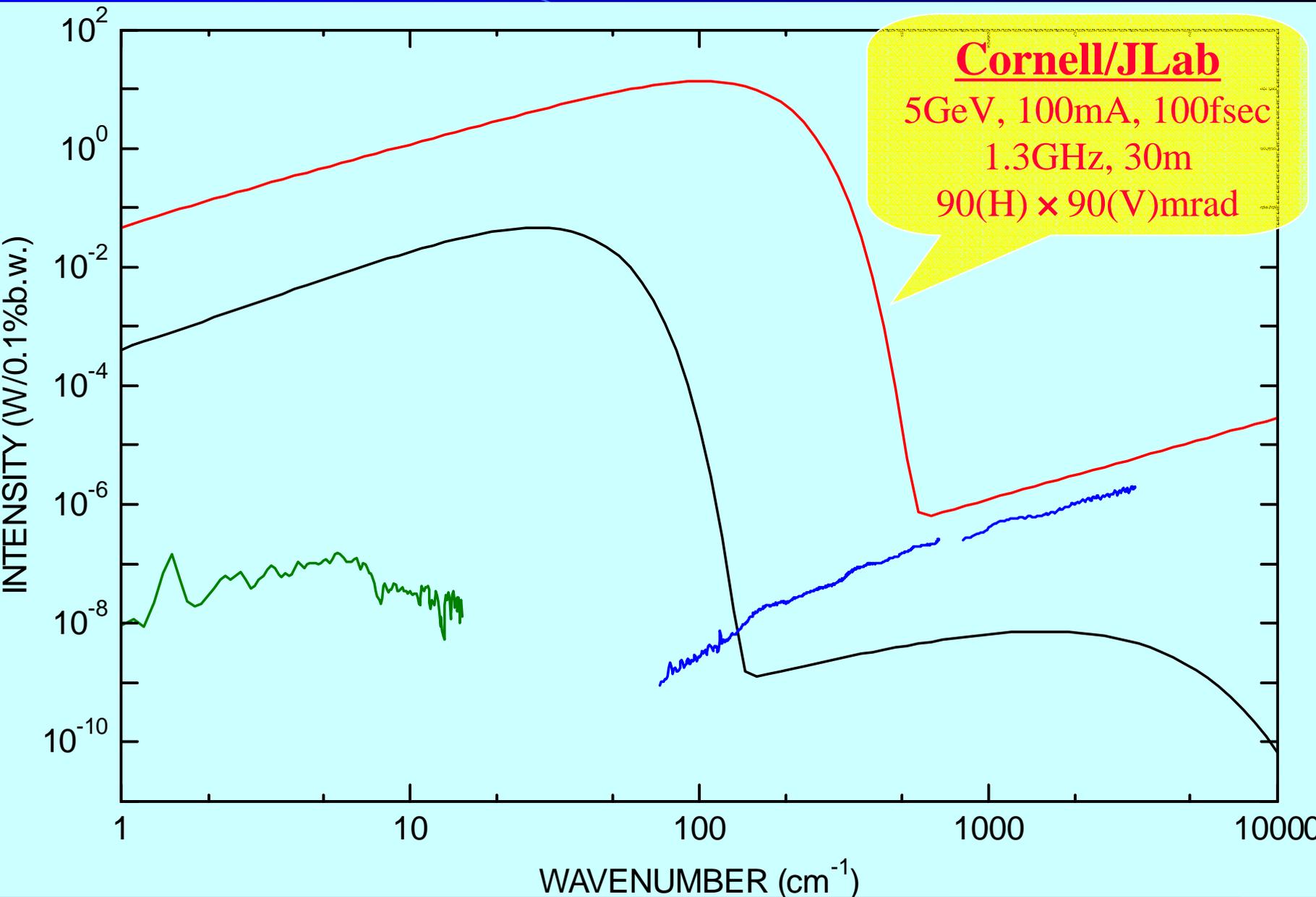
JLab-ERLと他の放射光源の比較



京研ERLのスペクトル



ERL放射光源計画のスペクトル



ERLコヒーレント放射光の注意点

光強度の安定性が不明

蓄積リングの場合と比較してどうか？

ビーム電流の安定性 光強度は電流値の2乗に比例して変化

バンチ形状の安定性 バンチ形状が変わればスペクトルが変化

現在の加速器技術をもってすれば問題なし(?)

バンチ間干渉による波数分解能の制限

高分解能の測定では繰り返し周波数を大きくできない

1.3GHzのマルチバンチ運転の場合: $> 0.04\text{cm}^{-1}$

繰り返しを小さくしてバンチ電荷量を大きくできれば問題なし

まとめ

- コヒーレント放射光(およびコヒーレントな遷移放射、回折放射、スミス・パーセル放射、チェレンコフ放射)の基礎的性質は現在までに実験的な解明が終了
- 京大原子炉ライナックのビームラインでは分光測定がスタート
- ERLでは遠赤外からミリ波にかけて強力なコヒーレント放射光



低エネルギーでコンパクトな赤外専用ERL放射光源が可能
例えば100MeV, 100mA, 100fsec, $\lambda = 10\mu\text{m}$
(X線による光学素子のダメージがない)