

2009.3.28
日本物理学会 第64回年次大会

シード光増幅型 自由電子レーザーにおける Superradiant発振の観測

高輝度光科学研究センター(JASRI/SPring-8)

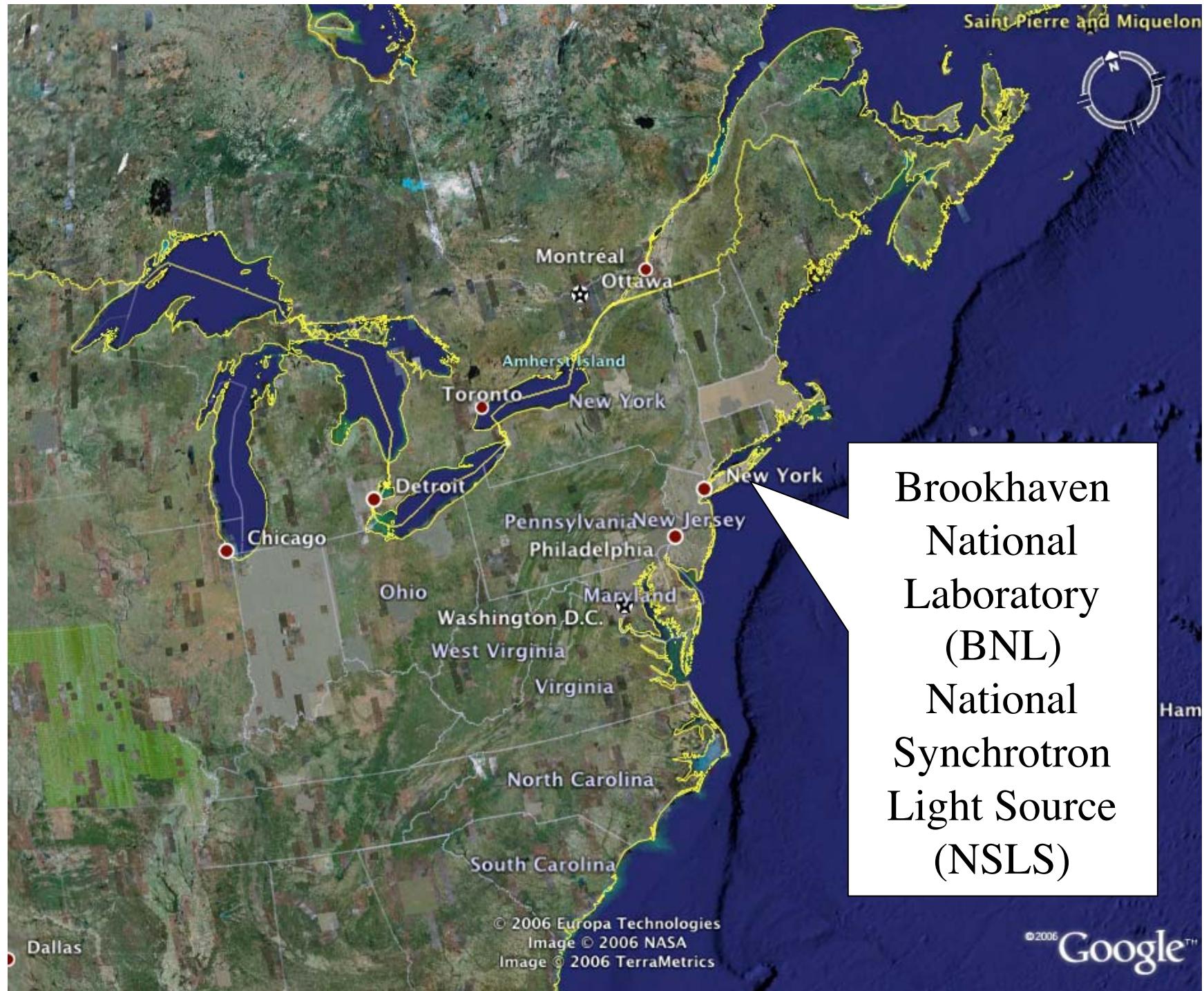
渡部貴宏

T. Watanabe, X.J. Wang, J.B. Murphy, J. Rose, Y. Shen, T. Tsang,
L. Giannessi, P. Musumeci, and S. Reiche,
"Experimental Characterization of Superradiance in a Single-Pass
High-Gain Laser-Seeded Free-Electron Laser Amplifier",
PRL 98, 034802 (2007).

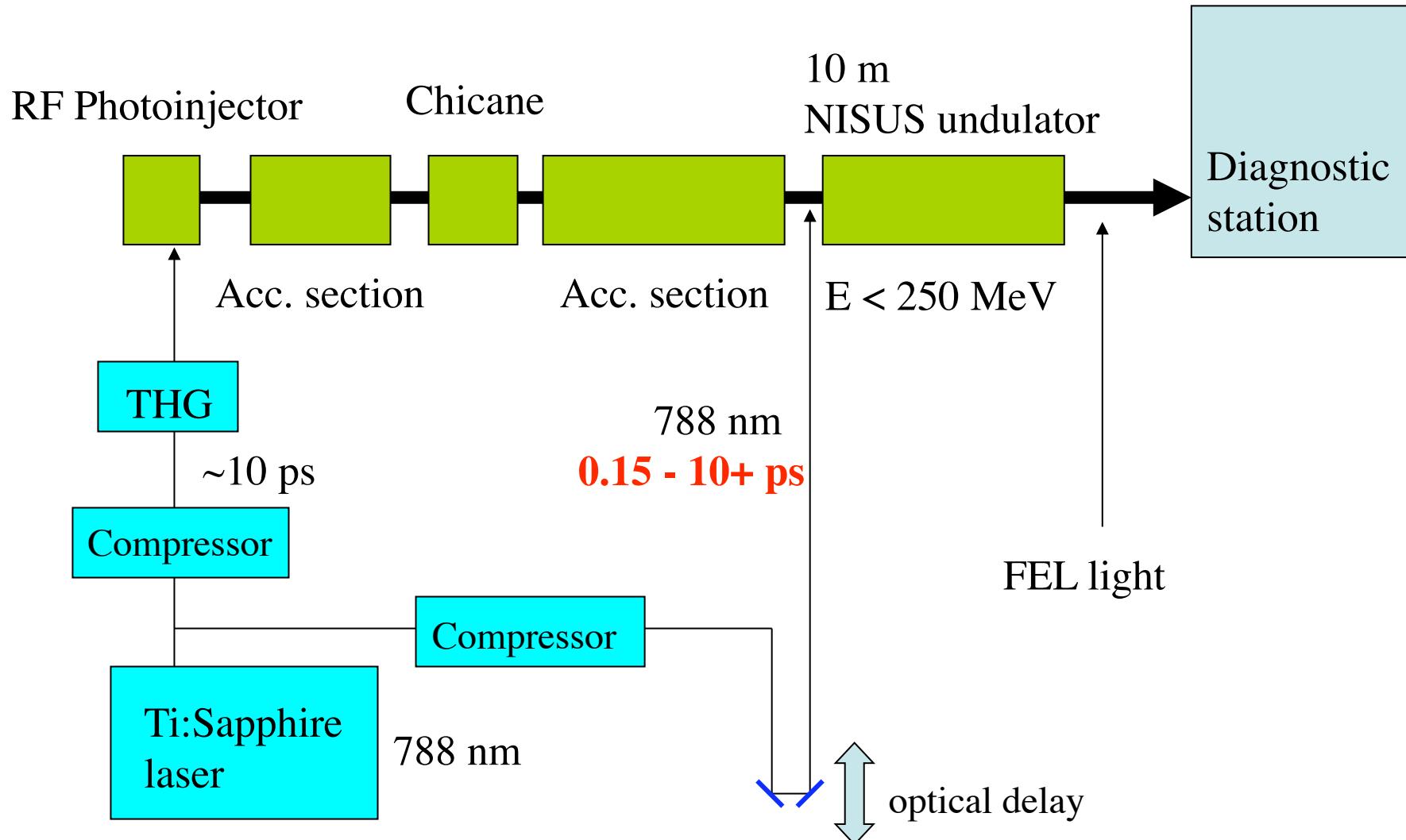
Outline

1. Brookhaven National Laboratory(BNL)の紹介
(2003～2008年まで勤務)
2. 自由電子レーザー(FEL)のイントロ
3. 本研究成果

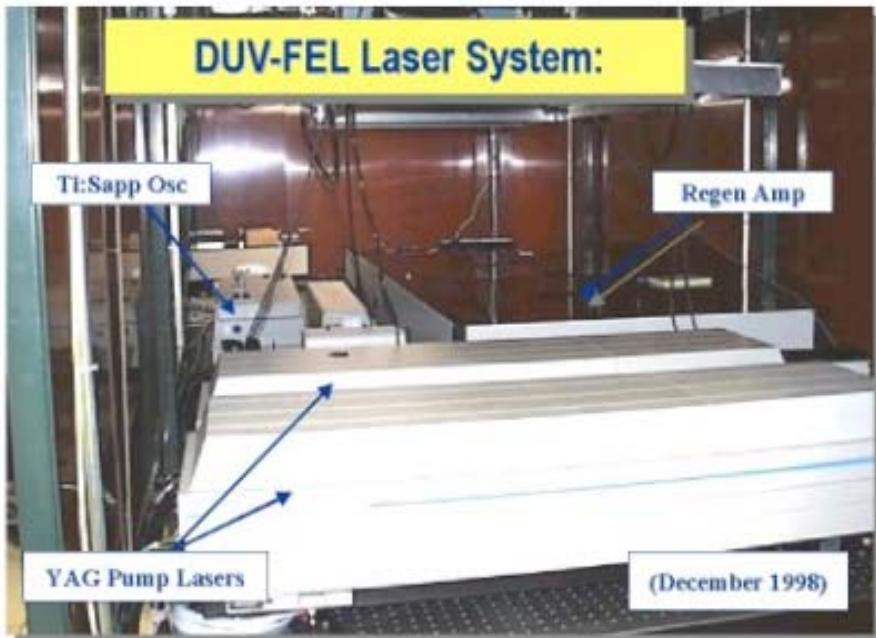
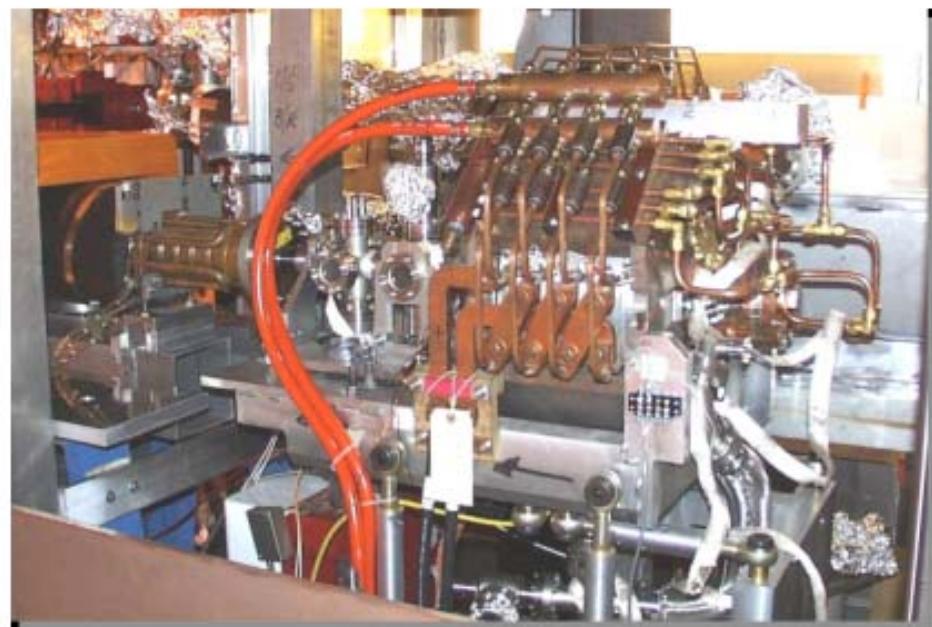
T. Watanabe, X.J. Wang, J.B. Murphy, J. Rose, Y. Shen, T. Tsang,
L. Giannessi, P. Musumeci, and S. Reiche,
["Experimental Characterization of Superradiance in a Single-Pass High-Gain Laser-Seeded Free-Electron Laser Amplifier"](#),
PRL 98, 034802 (2007).



Source Development Lab at BNL-NSLS



RF photoinjector



10m アンジュレータ "NISUS"



Diagnostic station

Undulator period = 3.89 cm
 $K = 1.1$
Undulator length = 10 m
Electron energy = 102 MeV
for Superrad



研究テーマ

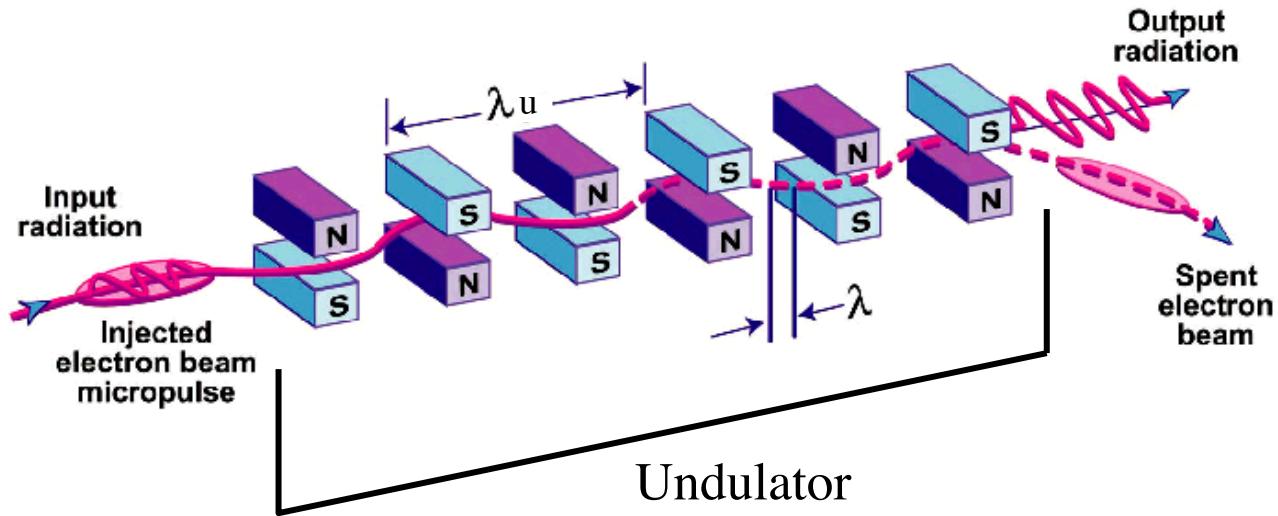
- 「通常の」シード光増幅型自由電子レーザー (Seeded FEL)
 - 平均出力メガワット級FELの数値計算および実験的検証
 - Seeded FELの原理(物理)に関する数値計算および実験的検証
非線形高調波発生
デチューニング etc
- 「通常ではない」 Seeded FEL
 - Superradiance in a single-pass seeded FEL**

その他、

- THz放射／EO
- High Gain Harmonic Generation (HGHG) FEL など

自由電子レーザー(FEL)のイントロ

Free Electron Laser (FEL)とは?



電子ビームがアンジュレータと呼ばれる周期磁場を通過した際に放射される光のコピーメントな部分を取り出すシステム

$$\lambda_r = \lambda_u \frac{(1 + K^2/2)}{2\gamma^2}$$

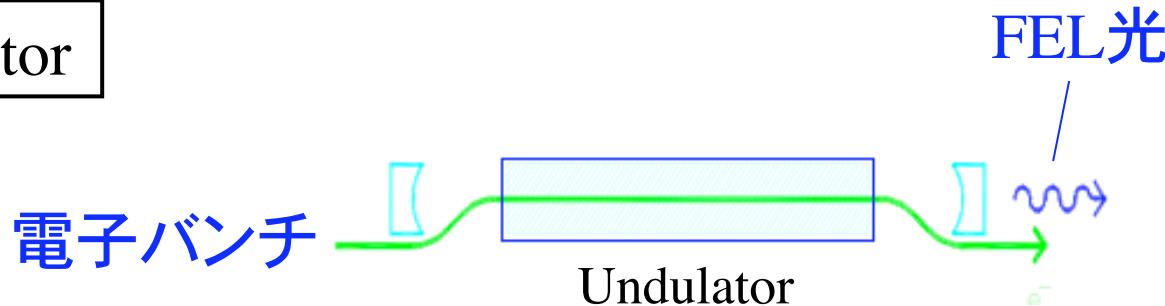
λ_u : undulator period

γ : normalized e-beam energy

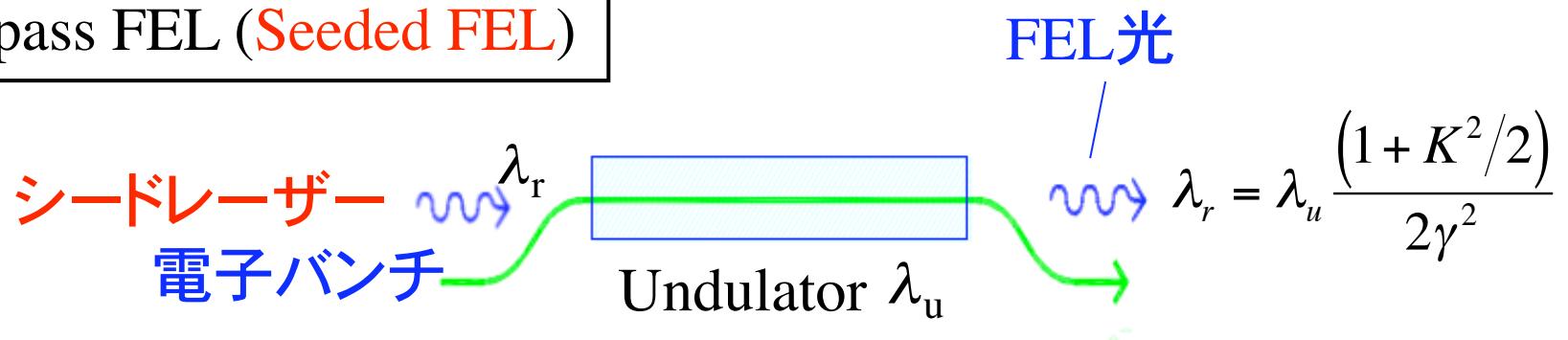
$$K = 0.93 \lambda_u [cm] B [T]$$

FELのいろいろ

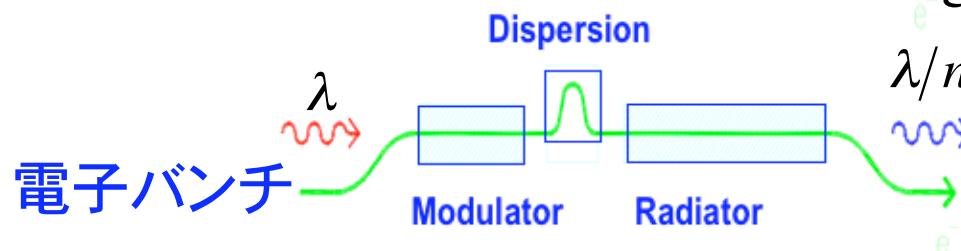
FEL oscillator



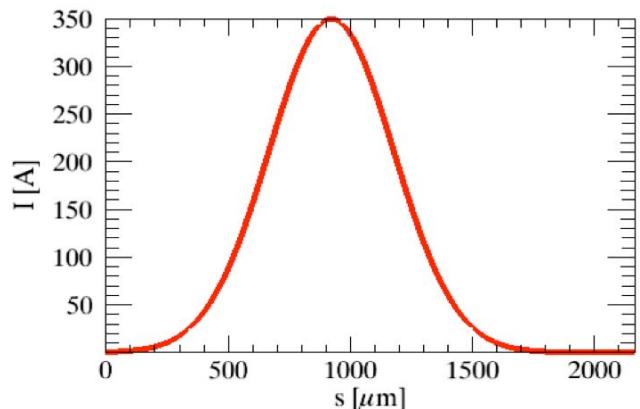
Single-pass FEL (Seeded FEL)



Harmonic Generation - cascading -

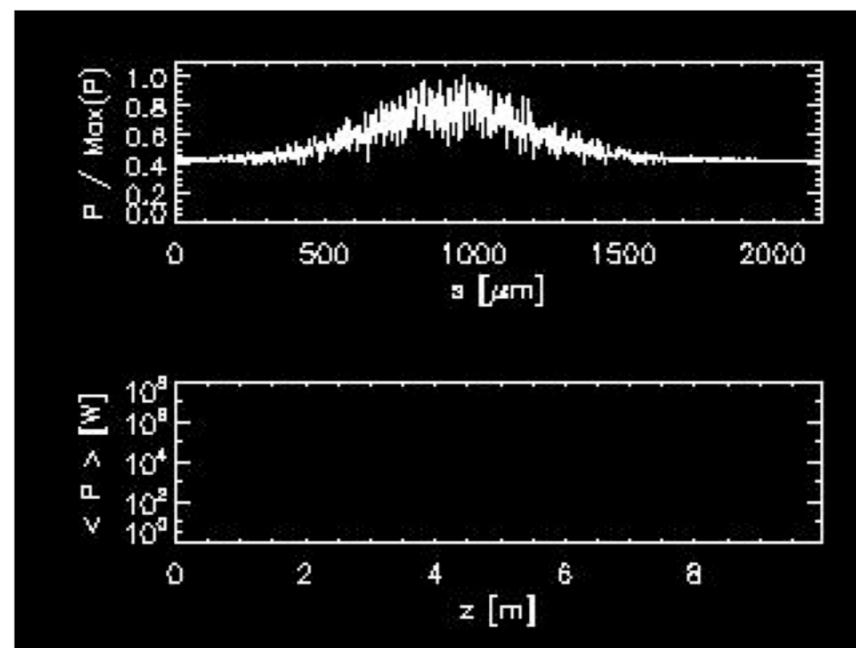


SASE



電子ビームプロファイル

FELプロファイル

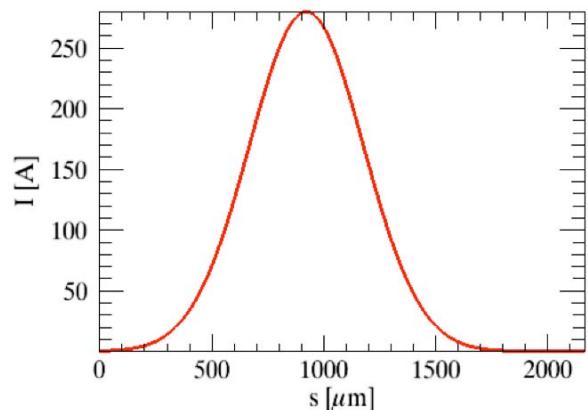


GENESIS1.3

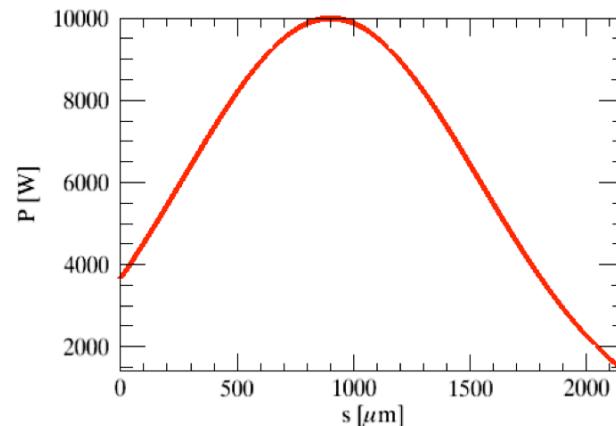
Peak power vs z

Seeded FEL

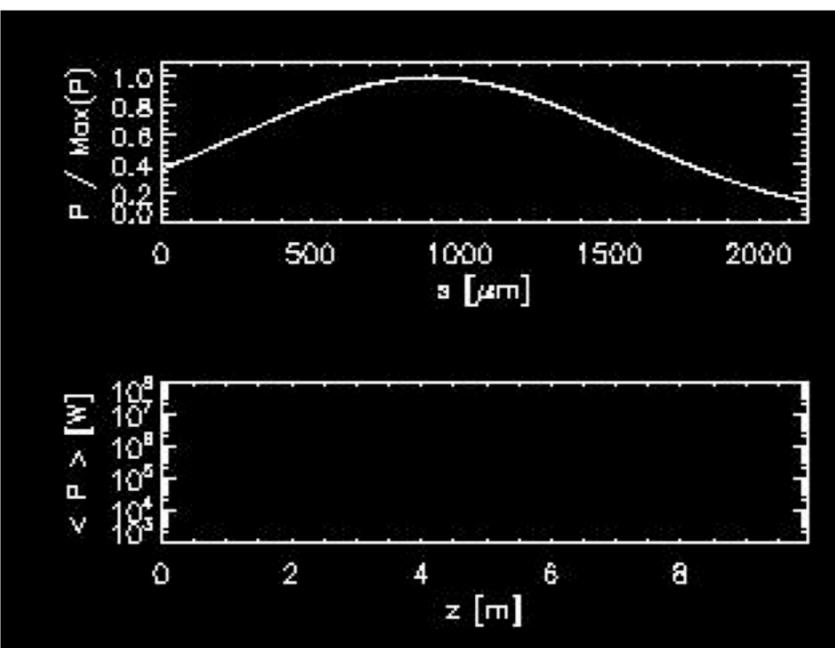
電子ビーム



シードレーザー
(コヒーレントな外部光)



FELプロファイル



GENESIS1.3

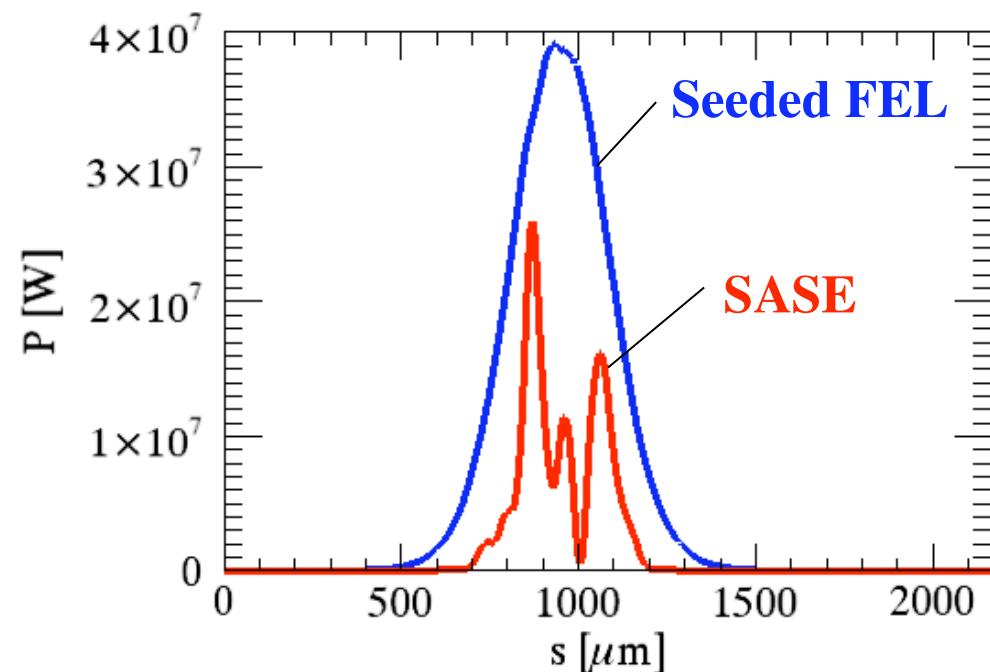
SASE vs Seeded FEL

SASE

- シードレーザー不要

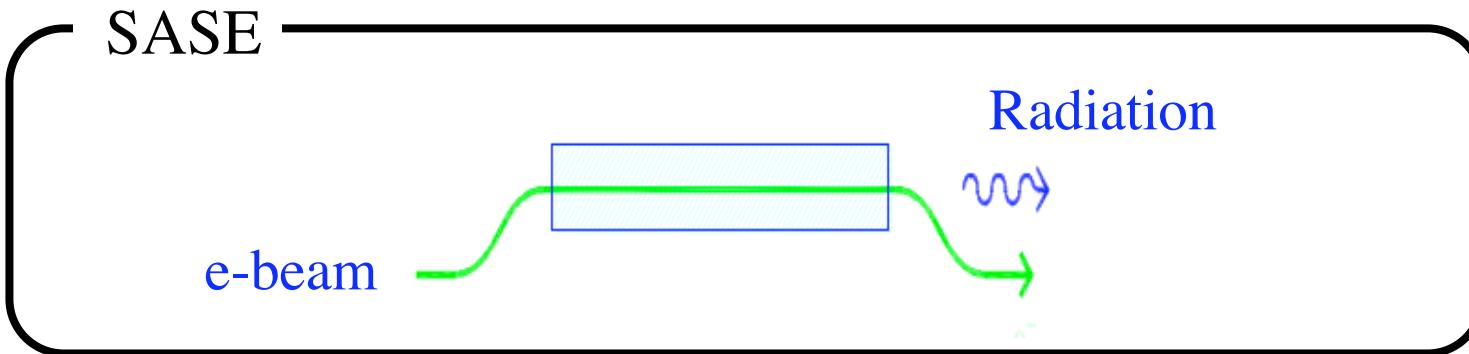
Seeded FEL

- スパイク構造なし



X-FEL: コヒーレントなX線を発生させるFEL

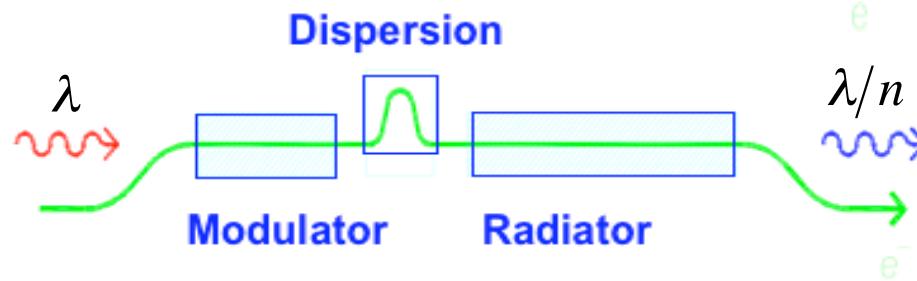
- no cavity, no seed laser for x-ray -



Seeded FEL

Cascading of superaradiance*

4.9 nm 1.4 fs 5 uJ pulse



*L. Giannessi et al., J. Appl. Phys. 98, 043110 (2005).

Superradiance in FEL

- '50年代、Superradianceという言葉が別の分野で命名[1]
- '80～'90年代、R.BonifacioらがFELにおけるSuperradianceを提案し、理論的に議論[2]。

"普通"のFEL
(Steady-state regime)

$$P_{\text{output}} = \rho P_{\text{e-beam}} \propto N_e^{4/3}$$

N_e : # electrons

"特殊な"FEL
(Superradiant regime)

$$P_{\text{output}} \propto N_e^2$$

[1] R.H. Dicke, Phys. Rev. 93, 99 (1954).

[2] R. Bonifacio, J. Opt. Soc. Am. B., 2, 20 (1985).

Superradiance = N² dependence? It's more than that!

"特殊な" FEL
(Superradiance regime)

$$P_{\text{output}} \propto N_e^2$$

&

- Pulse shortening (自らパルス圧縮)
- Nonlinear gain (飽和後のゲイン)

< 27th International Free Electron Laser Conference, 2005 >

L. G. 氏, "残念ながら、Superradianceの定義は複数存在する。"

V. L. 氏, "(FEL賞受賞者の講演に対し)あなたのSuperaradianceの
定義はコヒーレントとどこが違いますか?"

M. Z 氏, "Superradianceという言葉を作ったDickeの主旨は、単なるN²
依存性ではなく「自発的に」位相が揃うということだ"

??. 氏, "私は私のSuperradianceの定義に従う"

しかも、実際の実験・数値計算でパワーを観測しても、
(基本的には) $P_{\text{output}} \propto N_e^2$ にならない。

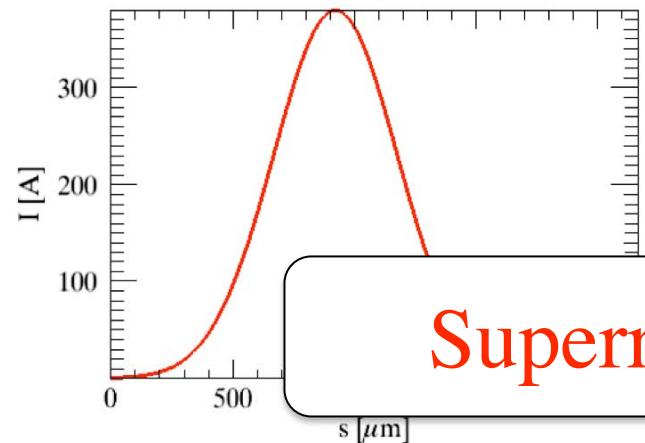
なぜなら、、、

- Superradiance regimeの前にExponential regimeがあり、電荷量を変化させると、ここ(飽和点、飽和パワー)が変わってしまう!
- Superradianceの場合の N^2 は、実は、電子バンチ内の電荷量ではなく、電子がSlippageにより感じた電子の数でしかない!
- 電子数をえると、そもそも電子バンチ圧縮の過程でバンチ形状／バンチ幅が変わってくる!

更に、 N^2 なのか $N^{4/3}$ なのかを厳密に比べるのは実験では困難。

キーワードは「Slippage」

電子ビーム

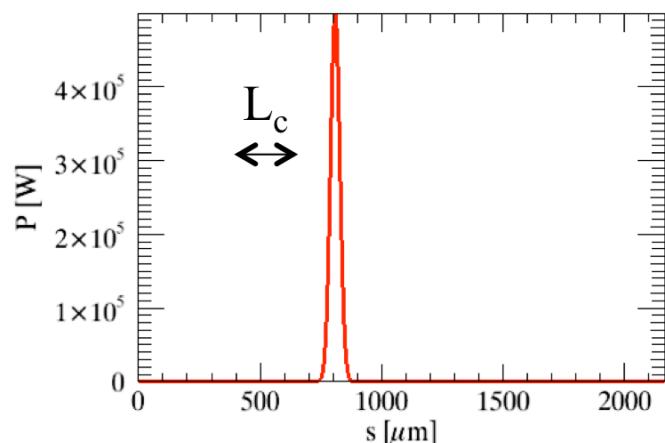


Cooperation length

= Slippage distance in a gain length

Superradiance = パックマン

シードレーザー



Gain length

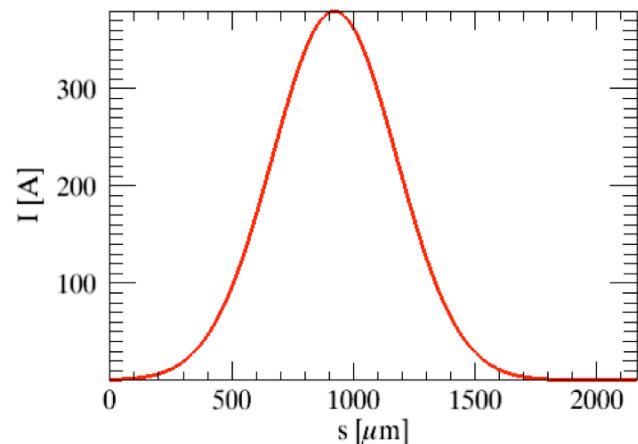
$$L_g = \frac{\lambda_u}{4\pi\rho} \quad \lambda_r = \lambda_u \frac{c - v_z}{v_z}$$

FELパルス幅 < Slippage

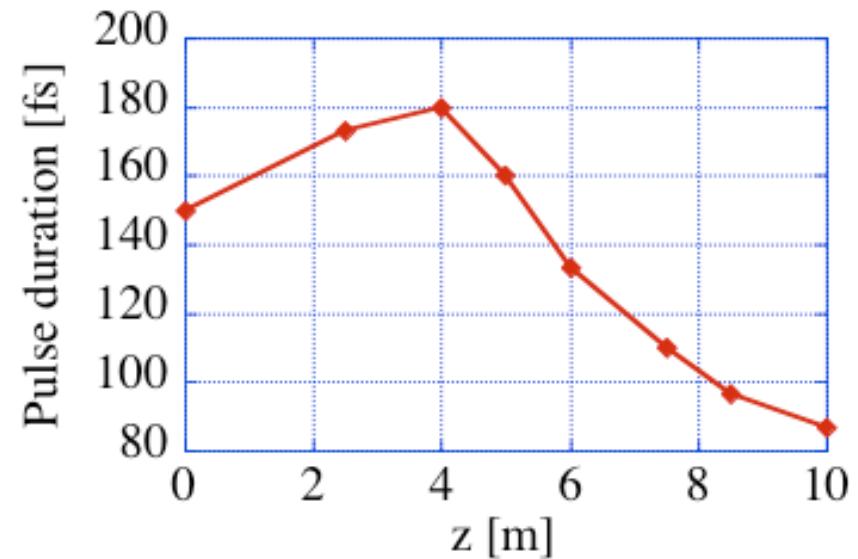
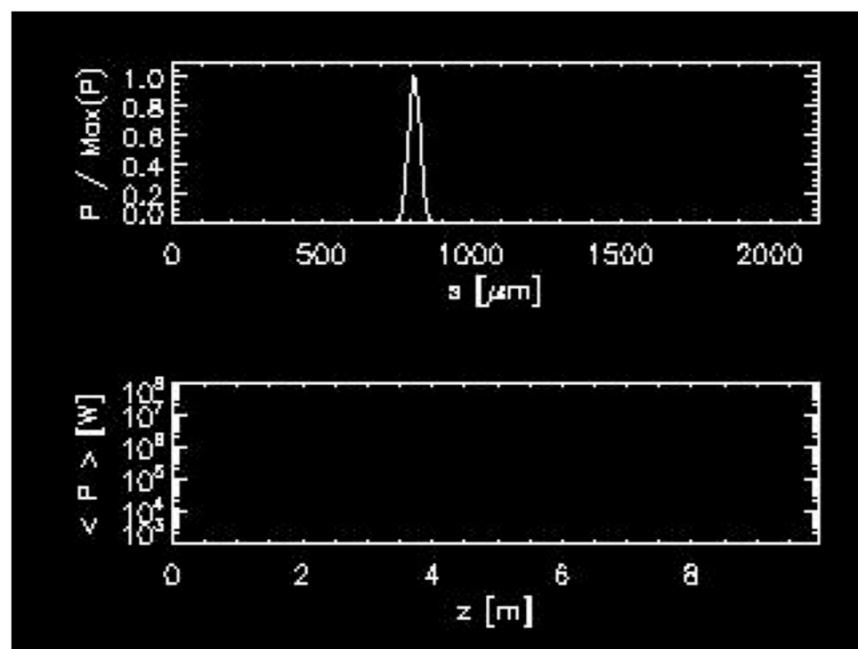
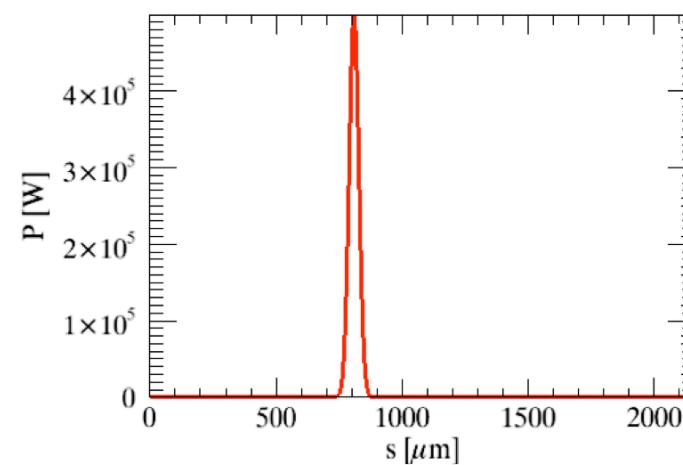
* 通常のExponential gain regimeでは、その分散関係からSlippageがほとんど起きない。

3D simulation

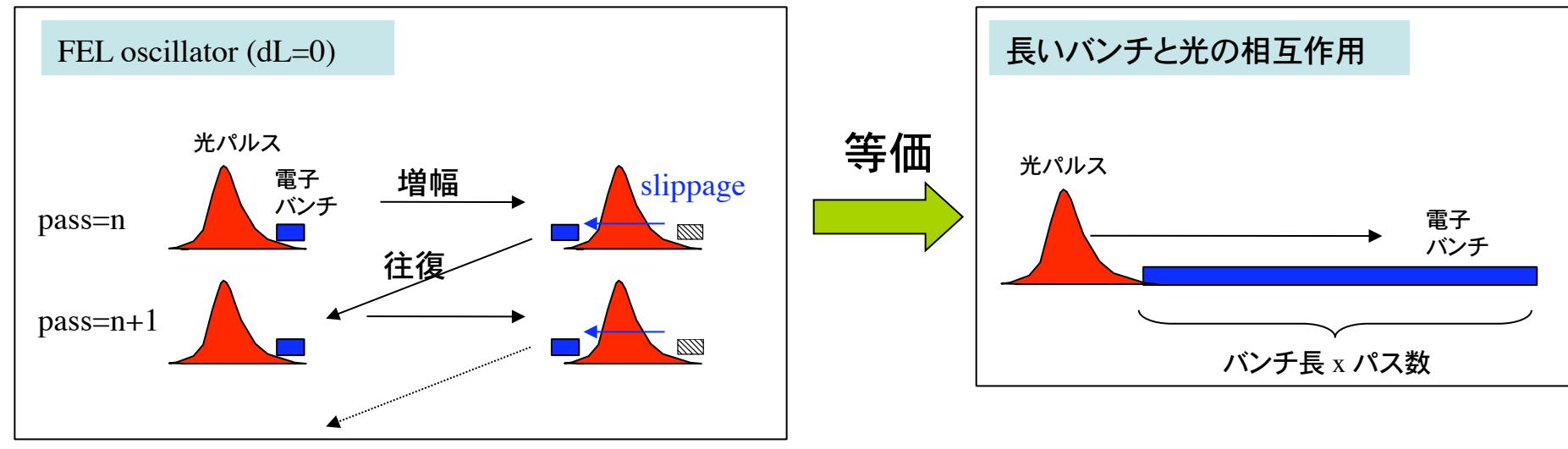
e-beam



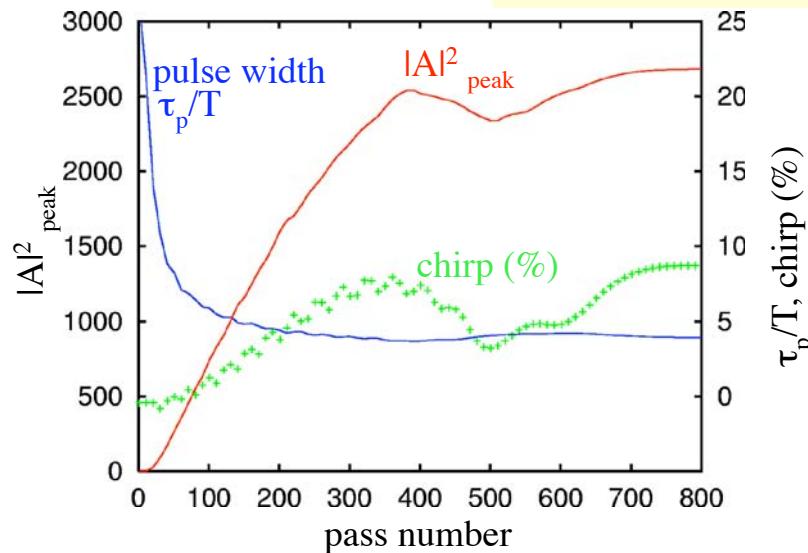
Seed laser



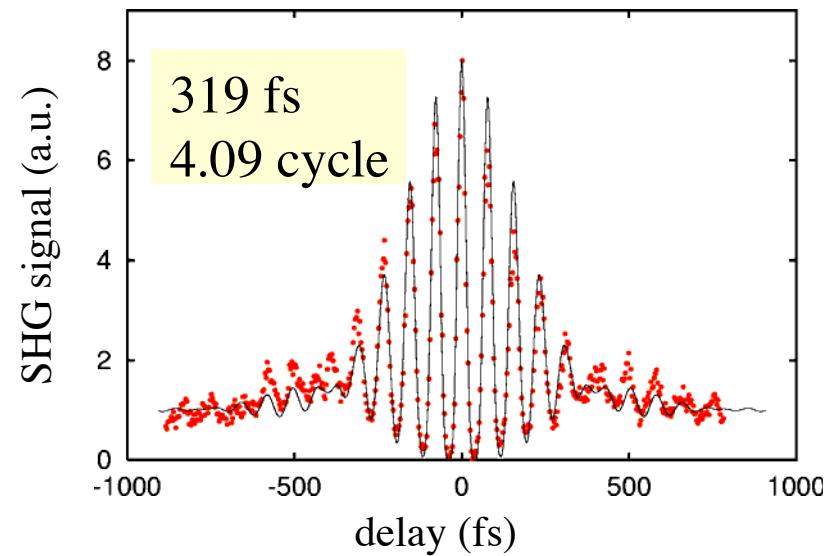
superradiant FEL in a perfect synchronized oscillator



JAERI-FELのシミュレーション → FEL発振と同時に短パルス化が起こる



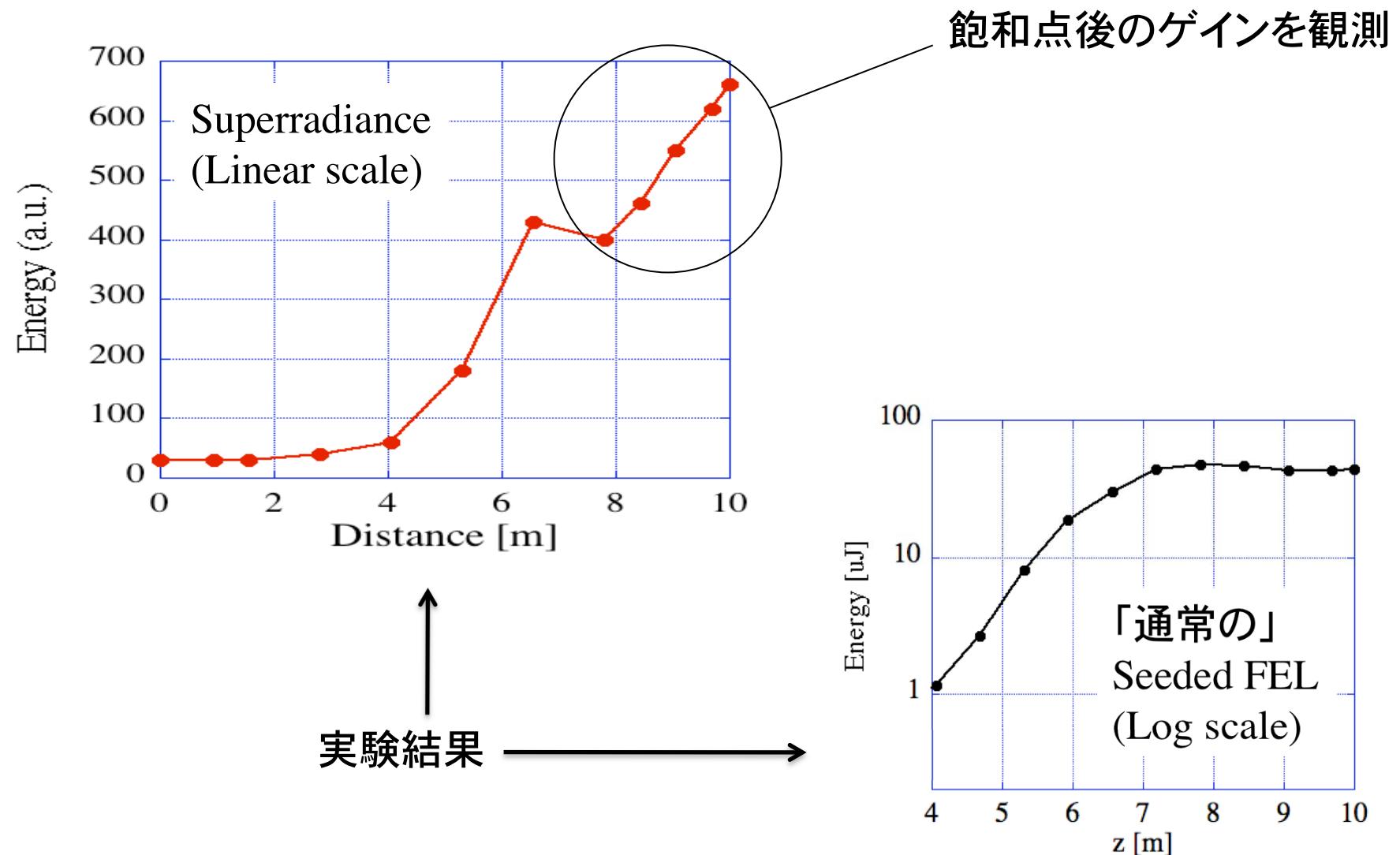
JAERI-FELのパルス計測実験



BNL-NSLSにおける
Superradiance in a seeded FEL
実験結果

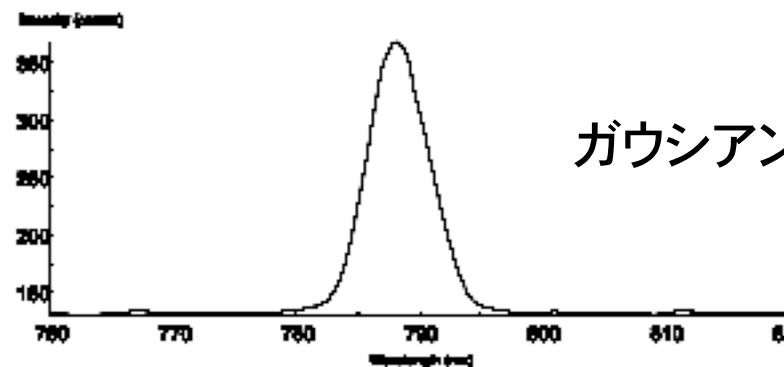
ゲインカーブ = アンジュレータ内のFELエネルギー増加を示すグラフ

～飽和点を7m前後にセットした場合～



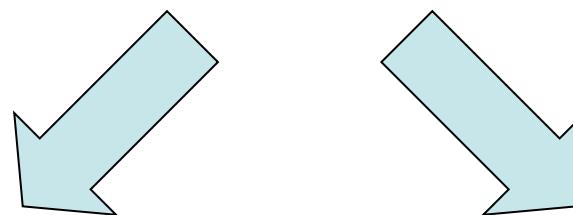
スペクトル

Seed laser

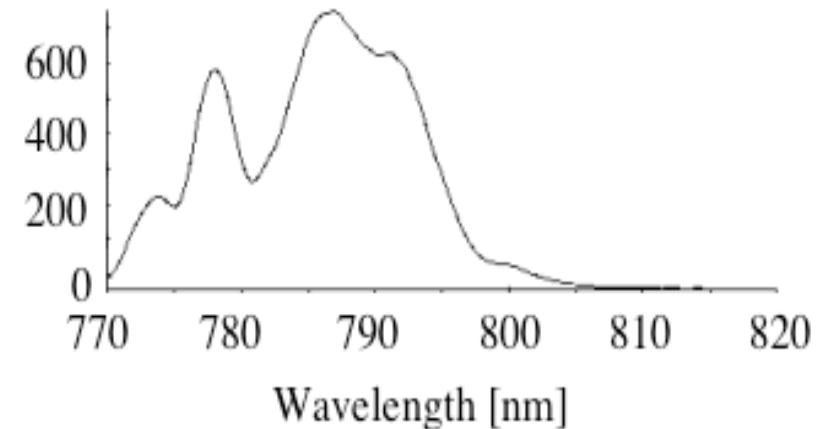
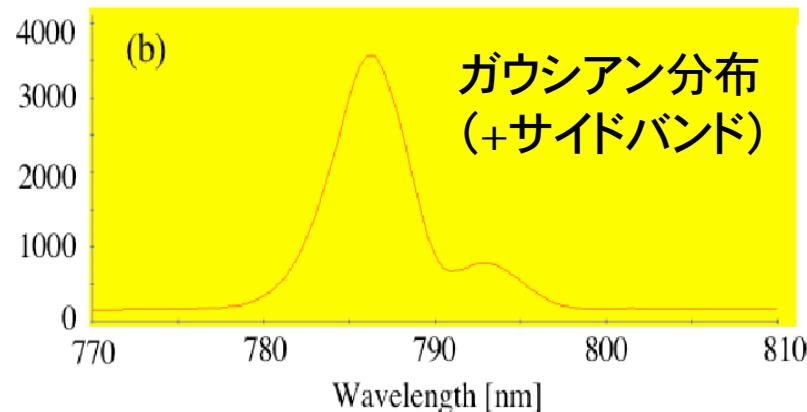


ガウシアン分布

Seed laser ~ 4.5 ps
の時のFEL

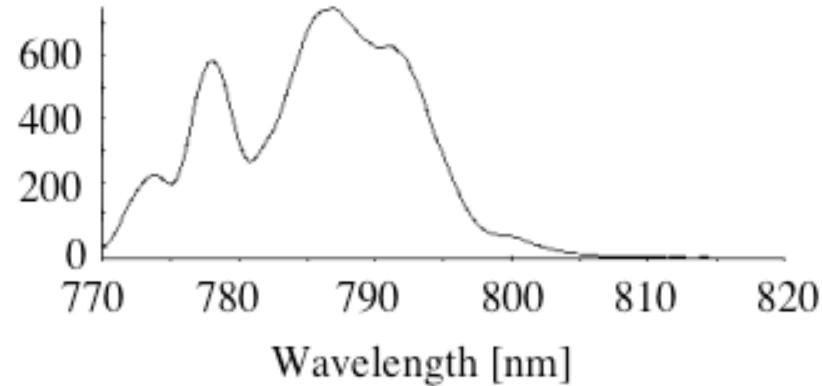


Seed laser ~ 130 fs
の時のFEL

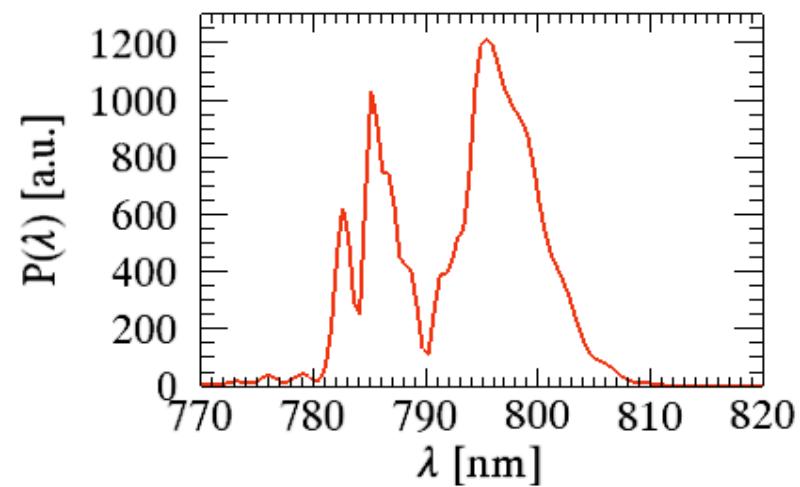


スペクトル: 実験とシミュレーションの比較

実験



GENESIS



定性的には合っている
Superradiance観測のEvidenceとしては弱い

真の狙い



縦方向バンチ分布

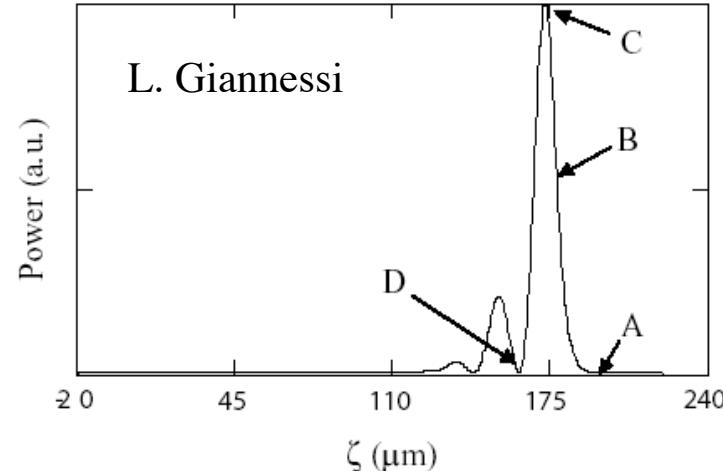


FIG. 2: Longitudinal profile of the radiation pulse in the superradiant regime.

Ultrashort × Asymmetric × Single shot 計測 の難しさ

Ultrashortパルスは周波数領域で観測したい。

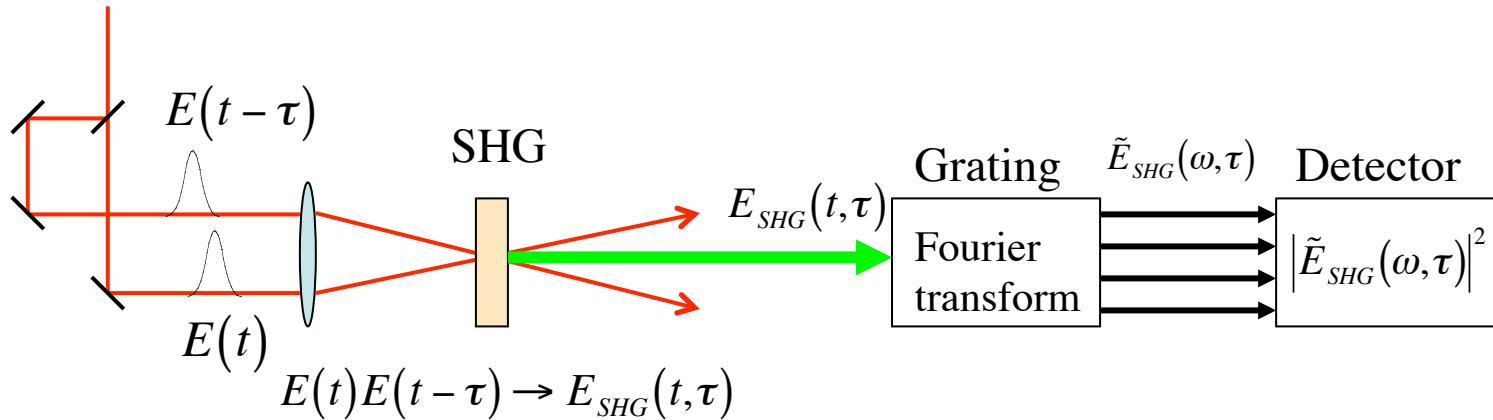
$$E(\omega) = FT^{-1}[E(t)] = A(\omega) \underbrace{\exp(i\phi(\omega))}_{\text{phase} = \text{asymmetry}}$$

実際の実験で計測できるのはスペクトル強度

$$I(\omega) = |E(\omega)|^2 = |A(\omega) \exp(i\phi(\omega))|^2 = |A(\omega)|^2$$

位相(非対称)情報が消えた

FROG (Frequency-Resolved Optical Gating)



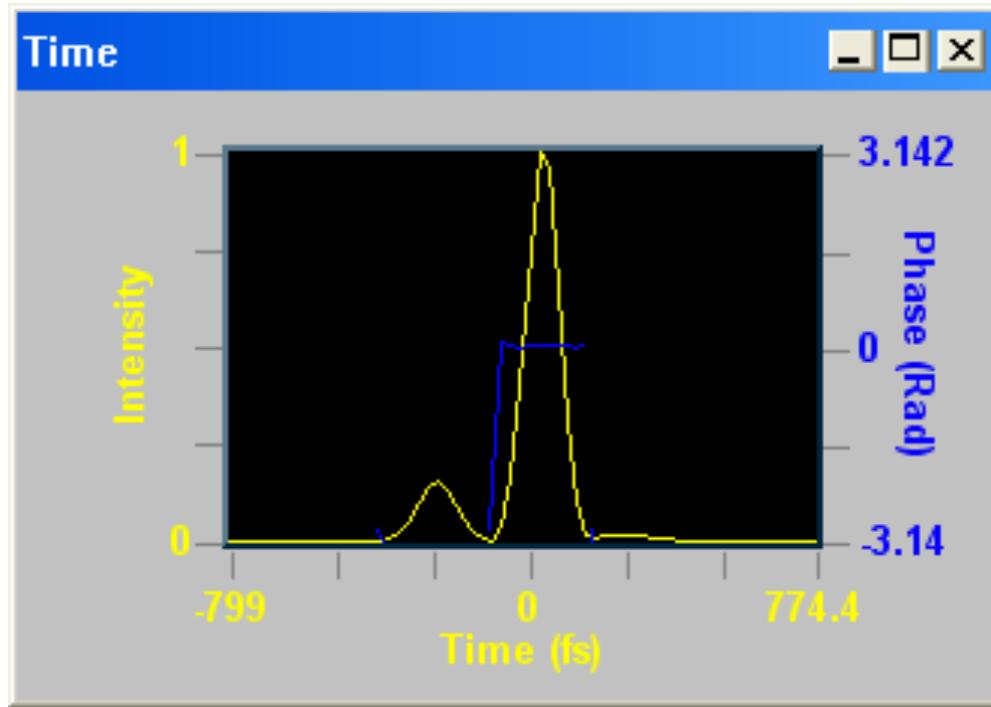
$$I_{\text{FROG}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{SHG}}(t, \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t) E(t - \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2$$

$$I_{\text{FROG}}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_{\text{SHG}}(t, \Omega) \exp(-i\omega t - i\Omega\tau) dt d\Omega \right|^2 : \text{2D Fourier transform}$$

Phase retrieval is a solved problem when **certain additional information**, such as finite support, is available.

In the case, $E(t)E(t - \tau) \rightarrow E_{\text{SHG}}(t, \tau)$

実験結果



Seed laser
150 fs

Results

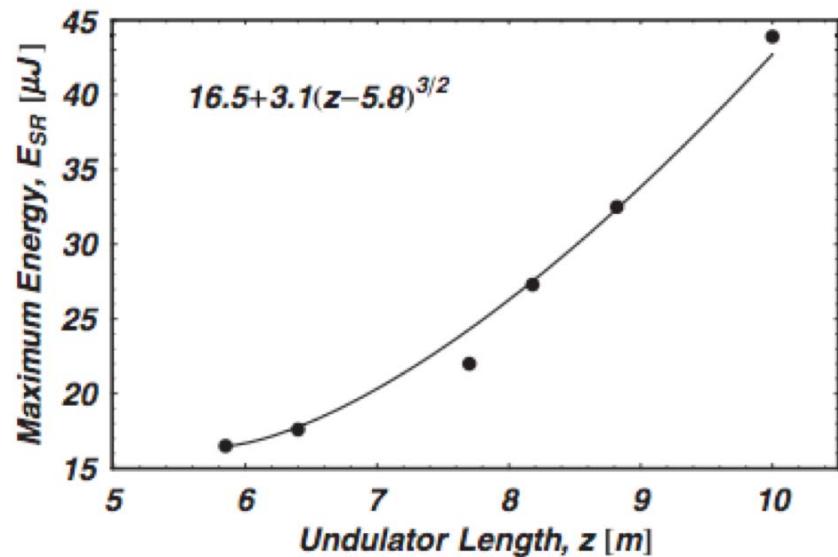
Pulse Width: 103.80 fs
Bandwidth: 1.82 THz
Bandwidth: 3.77 nm
Auto Width: 143.41 fs
TBW Product: 0.19
FROG Trace Error: 0.0228

Calc Rate: 8
Sample Size: 1

FELのバンチ圧縮を実験的に観測
更に、縦方向分布におけるサテライトを実験的に観測
→ FROGの専門家に来てもらい何度か再現実験

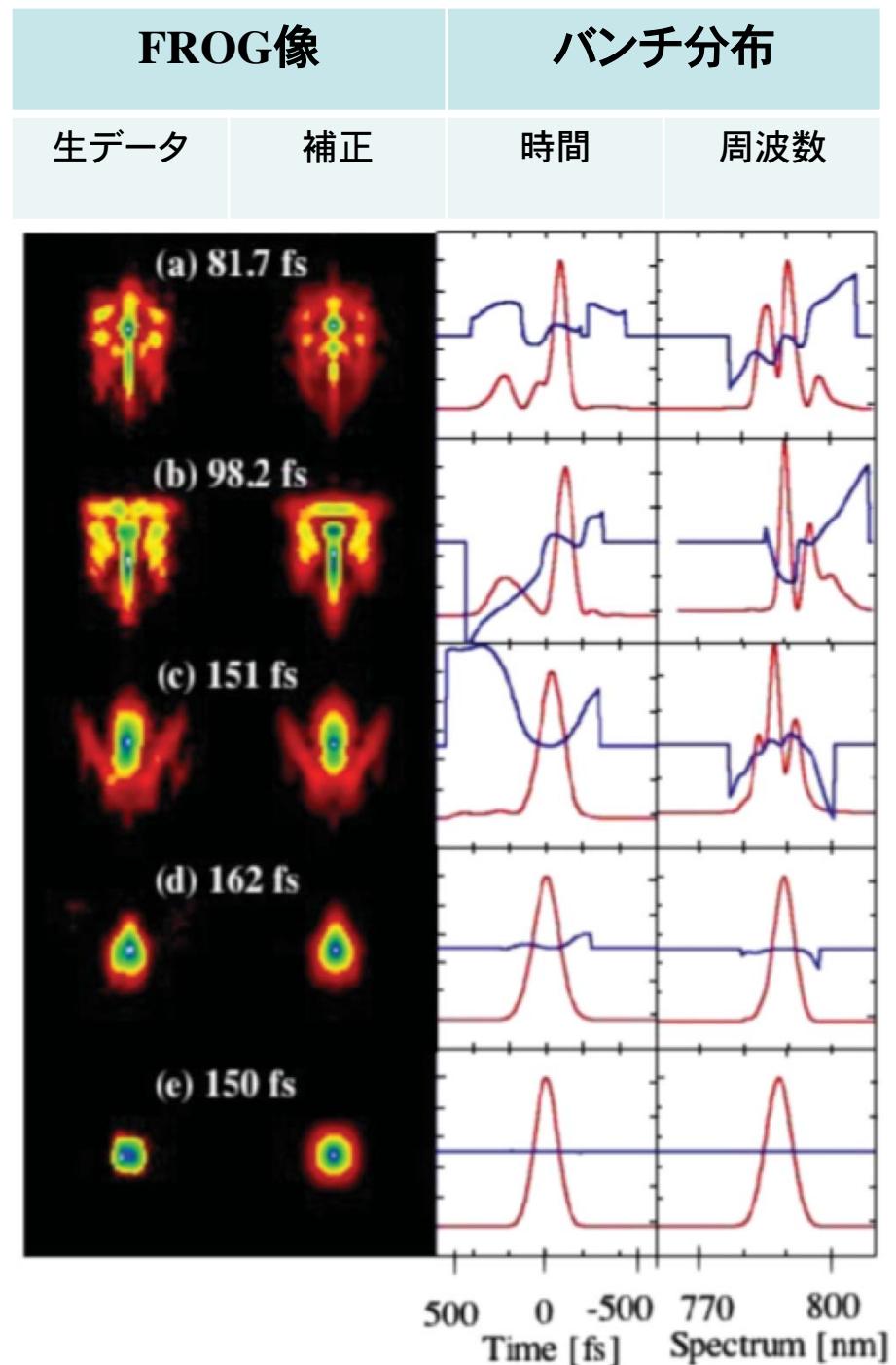
論文になった実験結果

ゲインカーブ



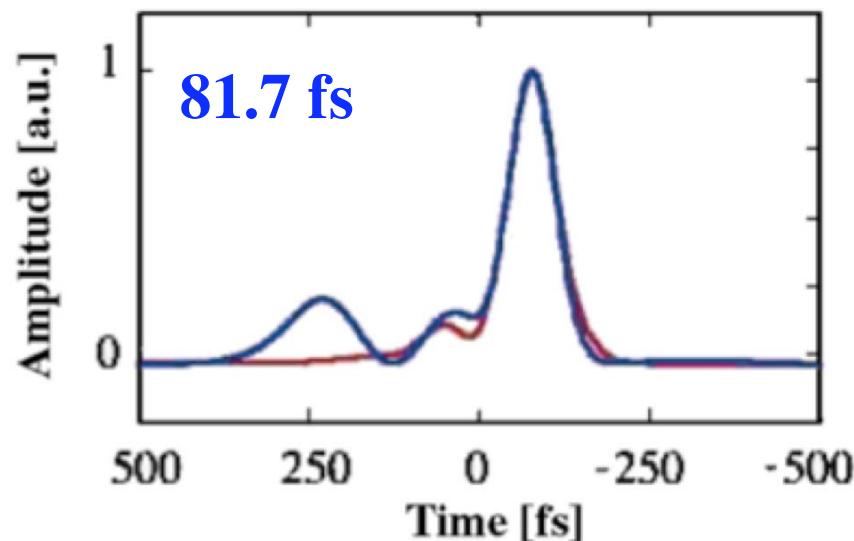
理論的なスケーリングと
概ね合致

T. Watanabe, et al., PRL 98, 034802 (2007).

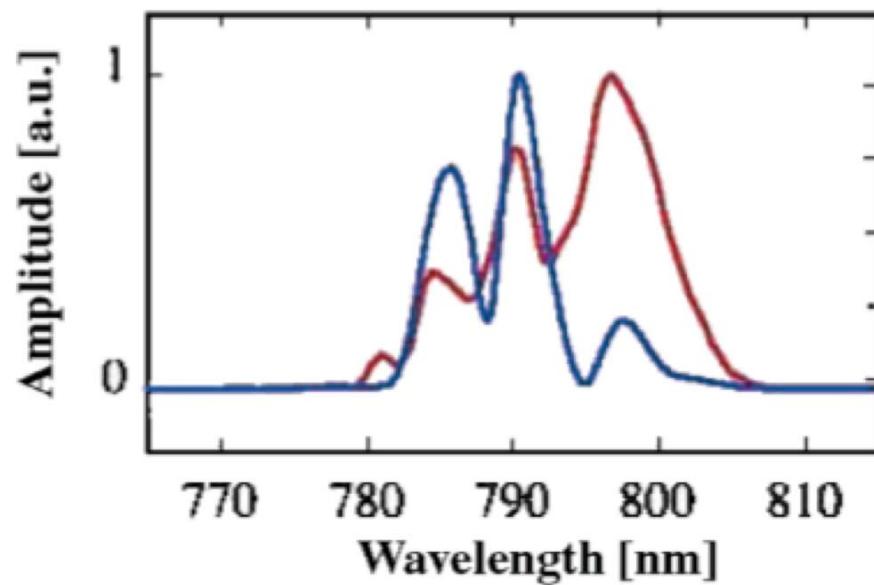


FROGで計測した、FEL光パルスの時間軸分布

時間分布
(青:実験、赤:数値計算)



周波数分布
(青:実験、赤:数値計算)



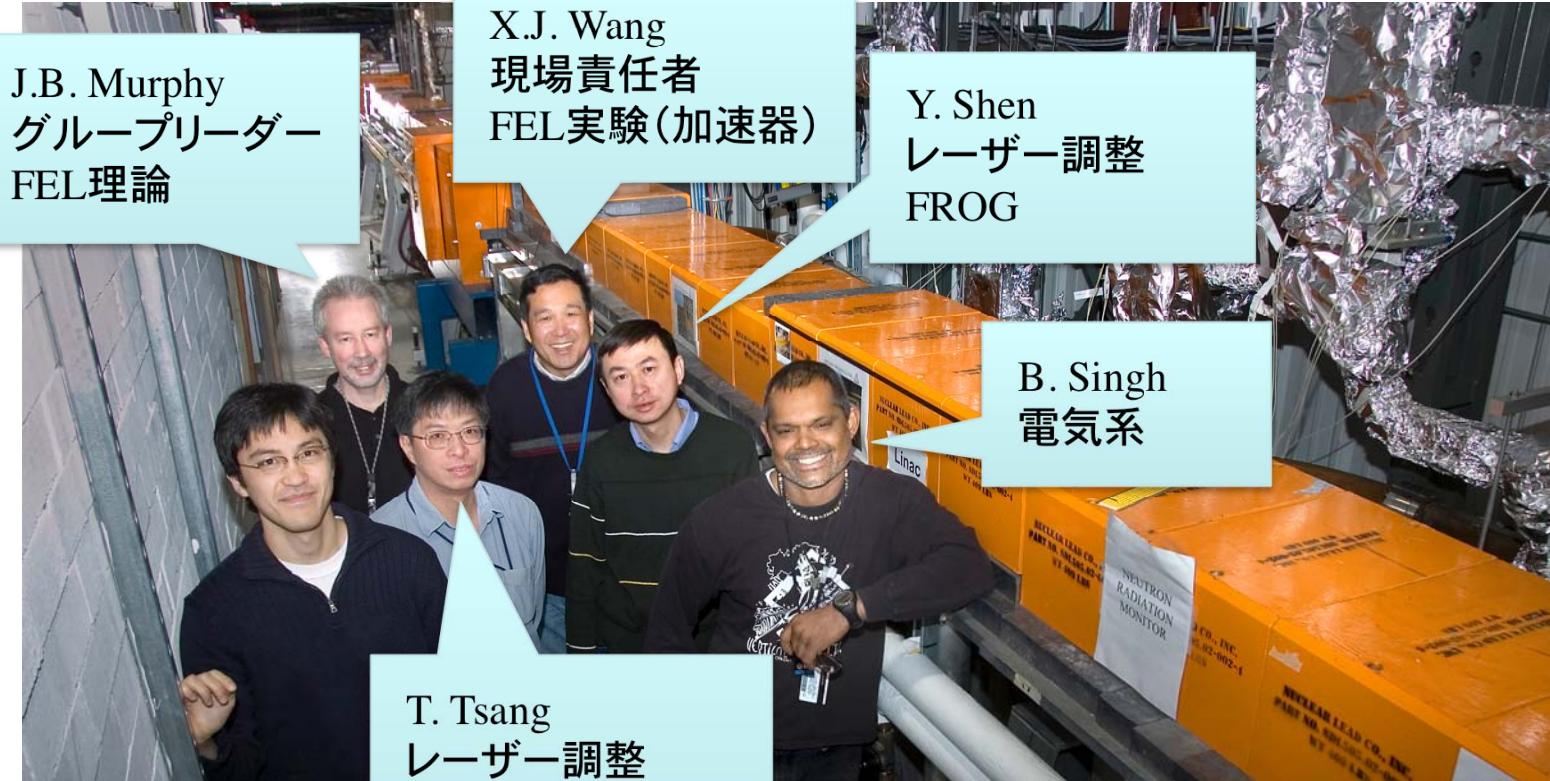
80年代から90年代に言っていたような時間軸分布になっていた
我々が数値解析で得ていたようなスペクトル分布になっていた

Superradianceに関する研究結果のまとめ

Single-pass seeded FELにてSuperradiaceを観測

- 飽和後のゲインを観測
- 高調波Superradiantパルスの横方向分布を観測
- Widebandのスペクトル分布を計測
数値解析と定性的に一致
- パルス圧縮(150fs→82fsなど)を観測
- 縦方向パルス分布が数値計算とよく一致

謝辞



L. Giannessi, ENEA, Italy FEL理論およびシミュレーション

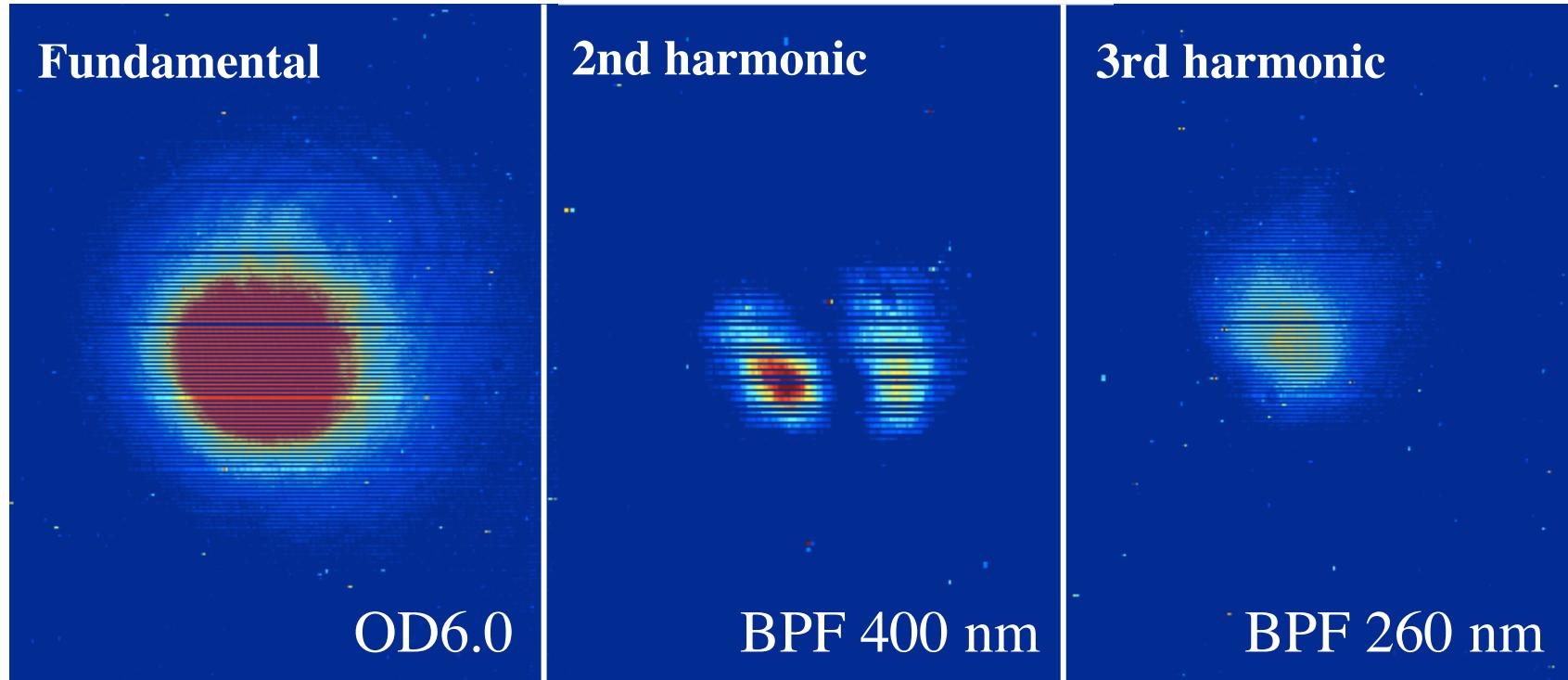
P. Musumeci, ENEA, Italy FELシミュレーション(Double-check)

S. Reiche, UCLA, USA FEL理論、GENESIS1.3制作者

羽島良一氏、JAEA

ありがとうございました

Superradianceパルスの高調波空間分布



「通常の」FELと変わらないことを確認(2次高調波は軸上には放射されない)

Saturation間近あるいは完全なSaturationをしていることを確認

制御エリア

