

2011年4月27,28日
ERLサイエンスワークショップⅡ

ERL/XFEL-Oの光の性質と サイエンス・ケース

KEK物構研・放射光

足立伸一

アウトライン

- 次世代放射光が目指す光源特性
 - 輝度の向上～空間コヒーレンスの向上
 - 短パルス性能の向上～時間コヒーレンスの実現
- ERLが実現する放射光サイエンス
- ERL/XFEL-Oが実現する光源性能
 - 高輝度性
 - 空間コヒーレンス
 - 短パルス性
 - 時間コヒーレンス
- まとめ

放射光源の進化と利用研究

第1世代

高エネルギー加速器を間借り利用

第2世代

占有利用
偏向電磁石中心

第3世代

挿入光源中心

第4世代

線形加速器
自己増幅

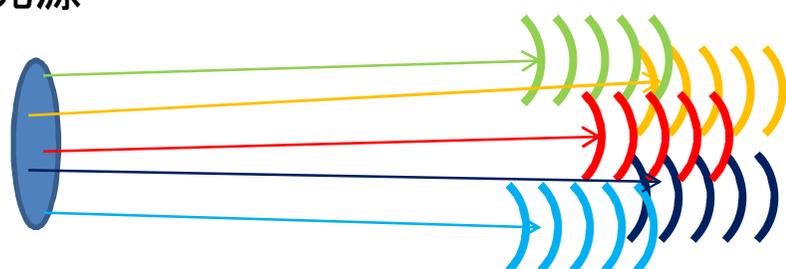


次世代放射光が目指す光源特性(1)

- 輝度の向上
 - 望みのサイズ、エネルギー幅のビームを光学素子に余分な負荷をかけることなく供給する
- 空間コヒーレンスの向上
 - 物性変数の空間分布を、光の位相情報を用いて検出する
- 短パルス性能の向上
 - 物性変数の時間断面(スナップショット)を、光の短パルス性能を用いて検出する
- 時間コヒーレンスの実現
 - 物性変数の時間発展を、光の位相情報を用いて検出する

次世代放射光が目指す光源特性(2)

光源



Case1: 現在(第3世代まで)の放射光源(インコヒーレント光源)

- ・高輝度
- ・波長可変性
- ・可変偏光



Case2: ERLとSASE-XFEL光源
空間コヒーレント光源

- ・回折限界光源



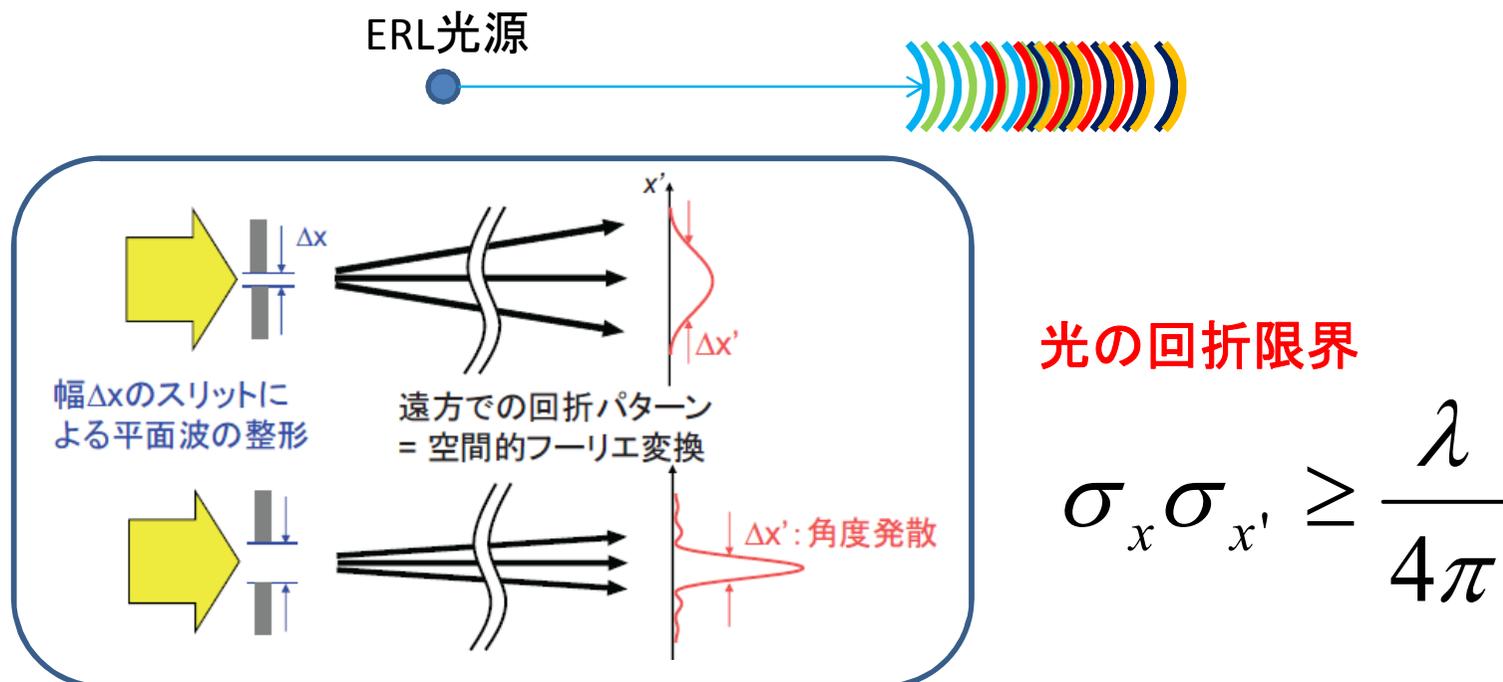
Case3: Seeded XFEL, ERL + XFEL-O
空間および時間コヒーレント光源

- ・回折限界 & フーリエ限界光源

ERLが実現する放射光サイエンス(1)

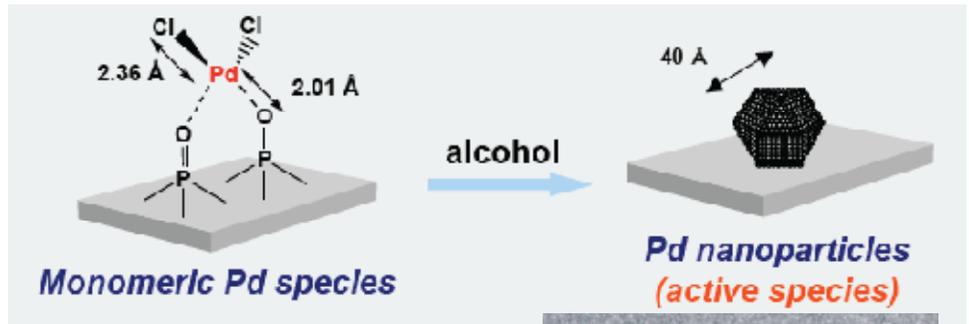
輝度の向上

- X線領域で回折限界を達成
- 波長オーダーの集光が可能に

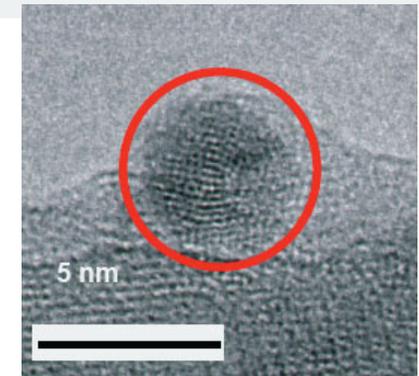


放射光基礎講習会資料(抜粋)

輝度を活かした放射光研究 高機能な不均一固体触媒の開発



不均一固体触媒反応
全体からピンポイントへ
XAFS研究



高機能な不均一固体触媒の開発と評価
(燃料電池、排ガス除去、光触媒など)

グリーンイノベーション分野

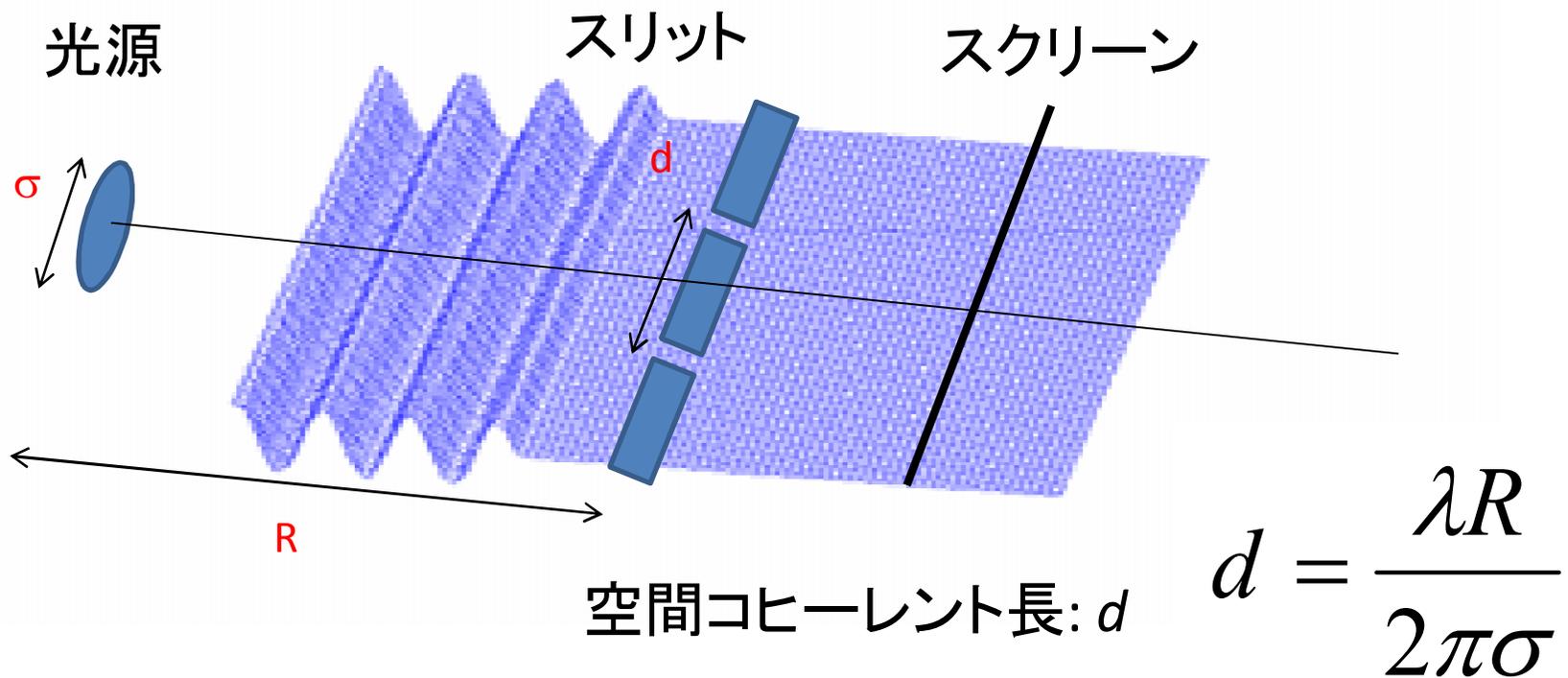
ナビーム

分光

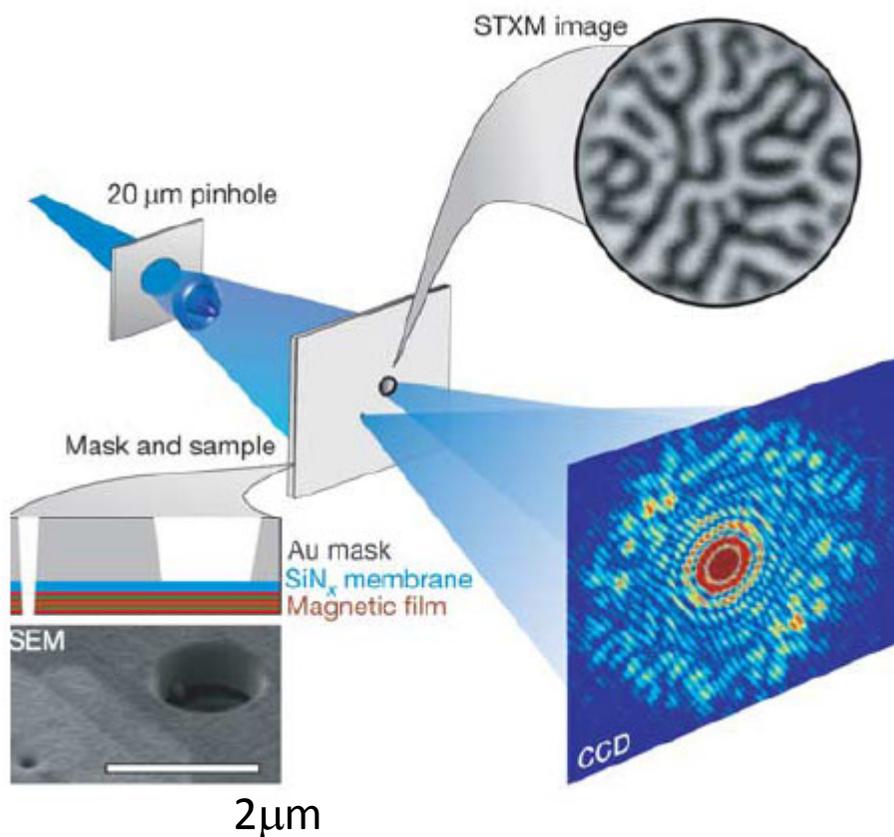
ERLが実現する放射光サイエンス(2)

空間コヒーレンスの向上

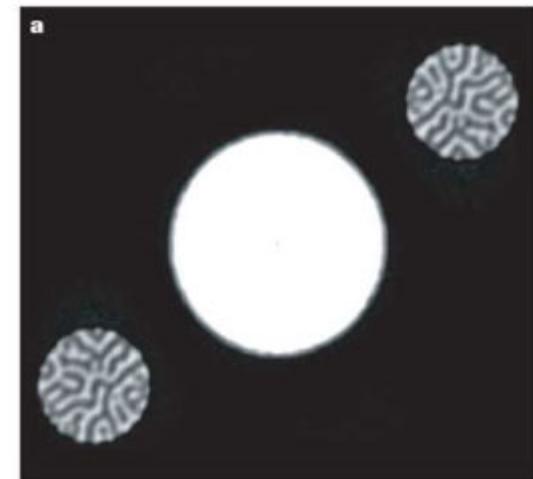
- 光の位相情報から構造情報を得る
- 非周期性(非結晶性)試料が対象に



空間コヒーレンスを活かした放射光研究例 非結晶試料の構造を原子レベルで解析する



磁気ドメインのホログラフィー観察
非結晶性の試料(例: Co/Pt多層膜)について
光の干渉像から磁気構造の情報が得られる
⇒不均一系の物理: 複数の秩序相の競合、
高温超伝導相とストライプ構造など



**Lensless imaging of magnetic nanostructures by
X-ray spectro-holography**

Eisebitt et al. Nature (2004) 432, 885-888.

グリーンイノベーション分野

空間コヒー
レンス

イメージング

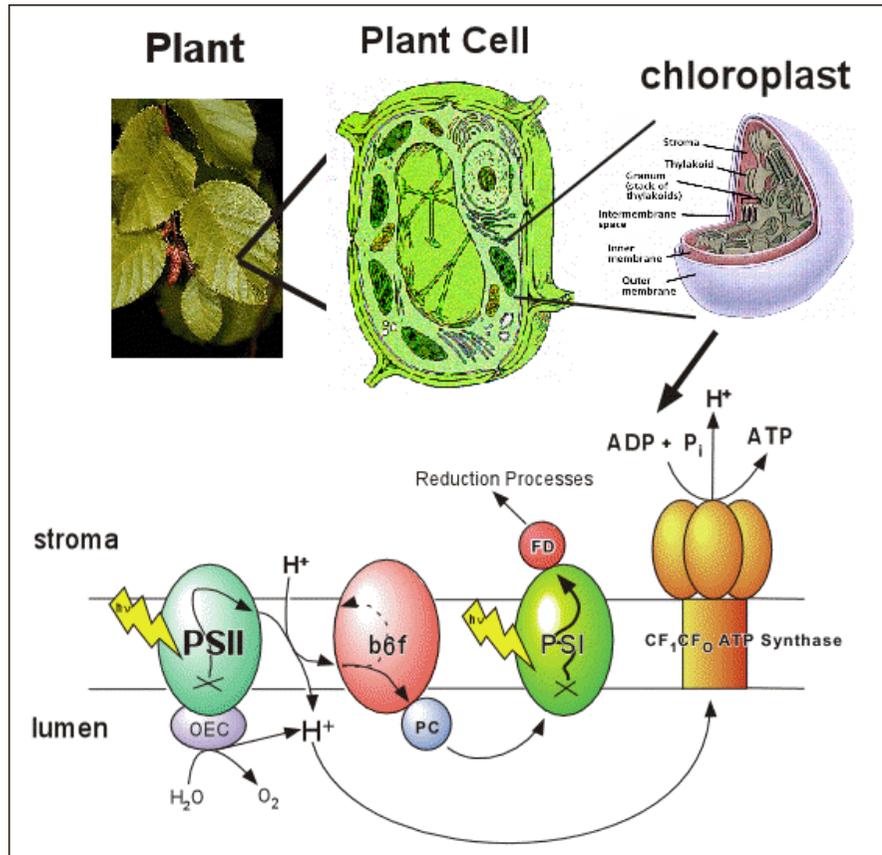
ERLが実現する放射光サイエンス(3)

短パルス性能の向上

- 物性変数の時間断面(スナップショット)を、光の短パルス性能を用いて検出する
- ピコ秒からフェムト秒オーダーへ

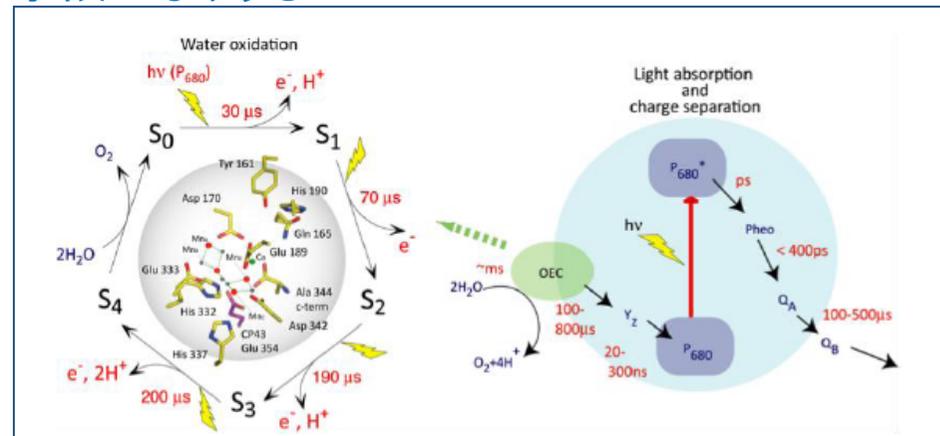
短パルス性能を活かした放射光研究例

高速現象をスナップショットで捉える



太陽光エネルギーを化学エネルギーに変換する光合成反応の理解は、エネルギー問題を解決する上で、基礎・応用面から極めて重要

しかし、最も重要な水を酸化して水素と酸素に変える反応機構がいまだに理解されていない
⇒放射光時間分解測定は極めて有力な測定手段になりうる



グリーンイノベーション分野

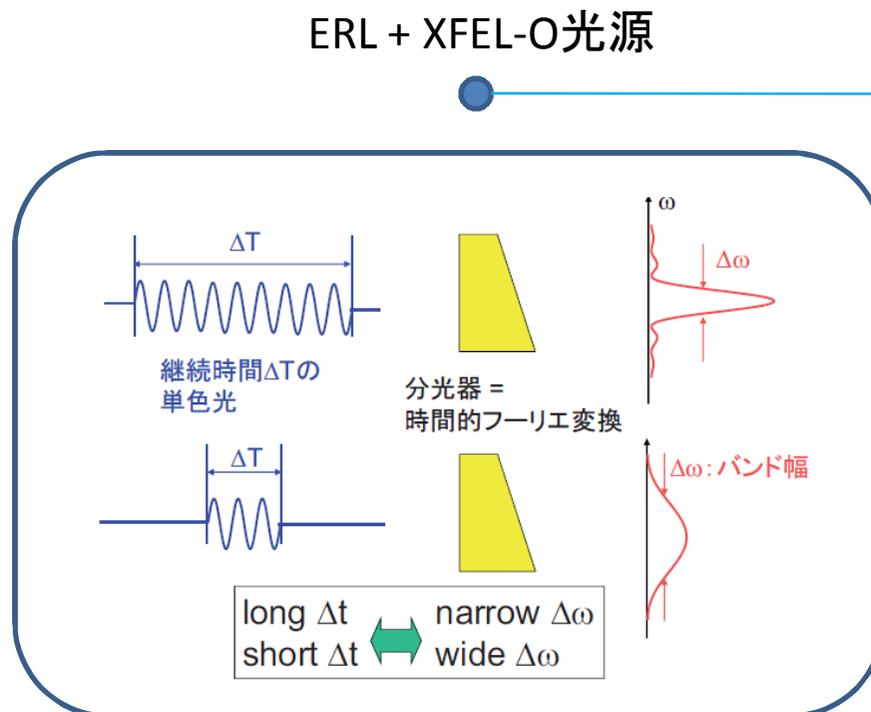
短パルス

XAFS、回折

ERLが実現する放射光サイエンス(4)

時間コヒーレンスの実現

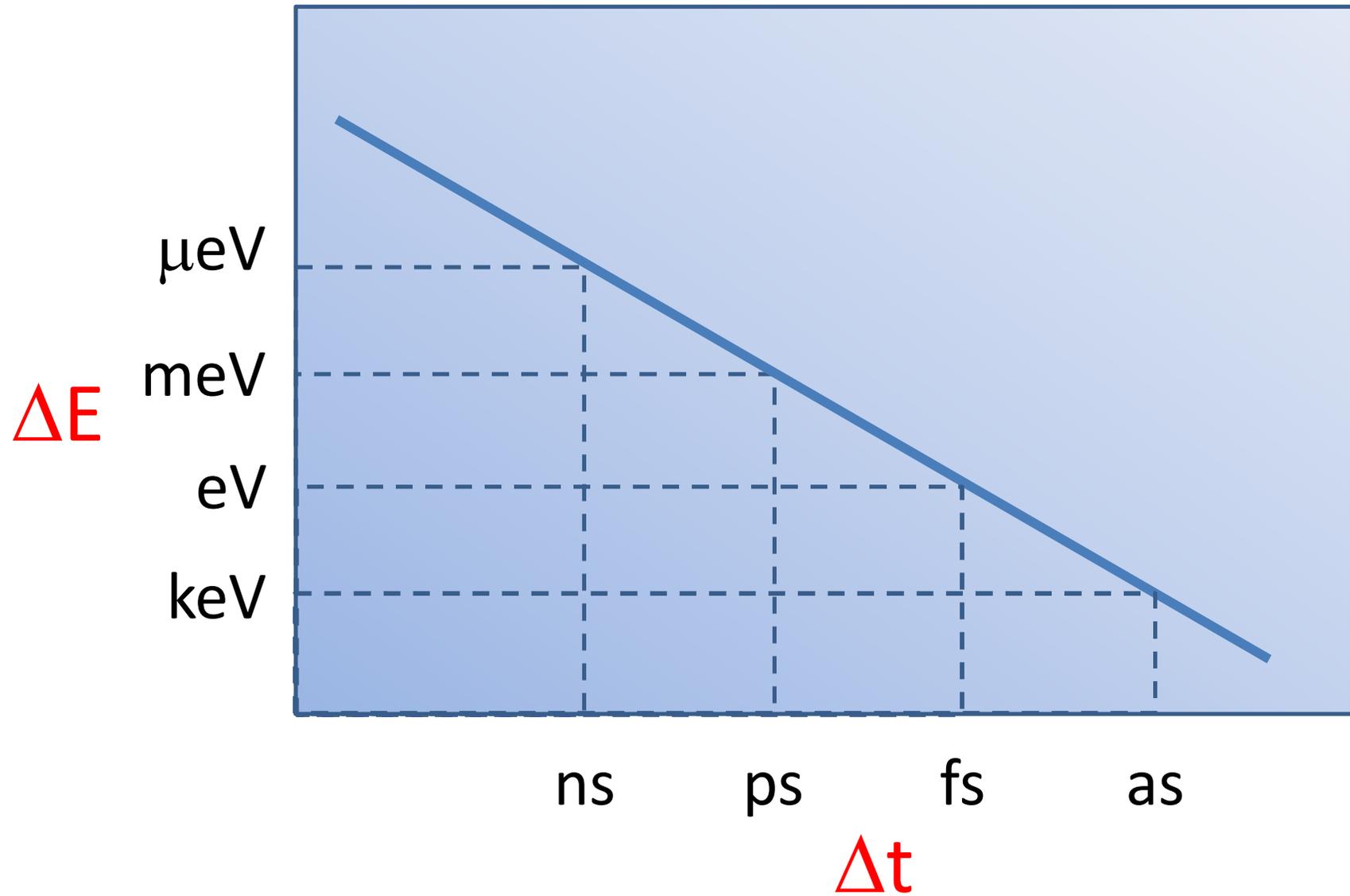
- 物性変数の時間発展を、光の位相情報を用いて検出する



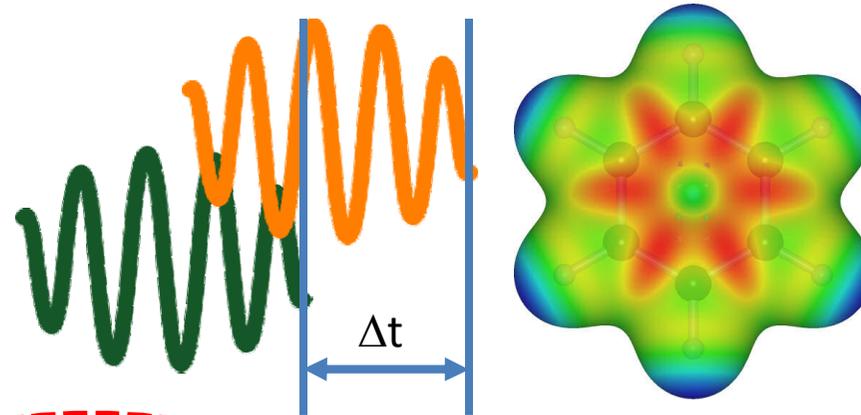
光のフーリエ限界

$$\Delta\omega\Delta t \geq \text{const.}$$

光のフーリエ限界



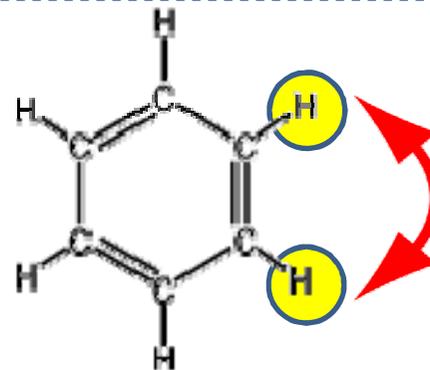
光の時間コヒーレンスと物質(1)



| 光の周波数 | MHz (10^6Hz) | GHz (10^9Hz) | THz (10^{12}Hz) | PHz (10^{15}Hz) | EHz (10^{18}Hz) |
|-------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|
| 光の波長 | 0.3km (10^3m) | 0.3m (10^0m) | 0.3mm (10^{-3}m) | 0.3 μm (10^{-6}m) | 0.3nm (10^{-9}m) |

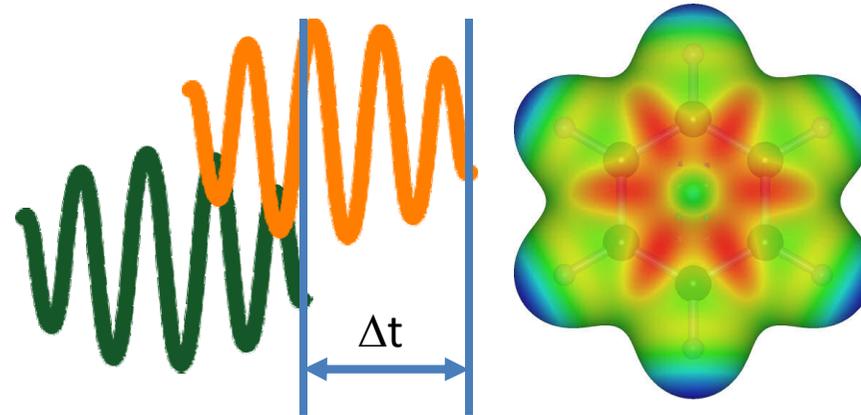
電波領域

多次元核磁気共鳴(NMR)
物質の核スピン間に内在する
コヒーレンスの情報を引き出す



核スピン結合

光の時間コヒーレンスと物質(2)

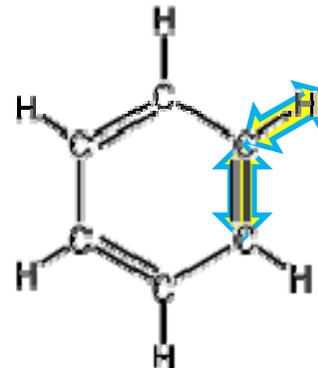


| 光の周波数 | MHz (10^6Hz) | GHz (10^9Hz) | THz (10^{12}Hz) | PHz (10^{15}Hz) | EHz (10^{18}Hz) |
|-------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|
| 光の波長 | 0.3km (10^3m) | 0.3m (10^0m) | 0.3mm (10^{-3}m) | 0.3 μm (10^{-6}m) | 0.3nm (10^{-9}m) |

赤外領域

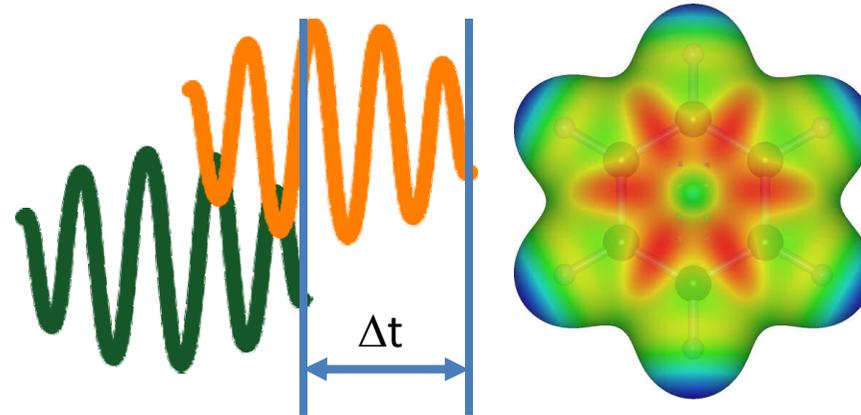
多次元振動分光

物質の**振動順位間**に内在する
コヒーレンスの情報を引き出す



フォトンエコー

光の時間コヒーレンスと物質 (3)

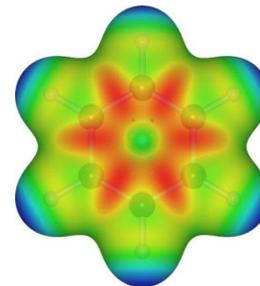


| 光の周波数 | MHz (10^6Hz) | GHz (10^9Hz) | THz (10^{12}Hz) | PHz (10^{15}Hz) | EHz (10^{18}Hz) |
|-------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------|
| 光の波長 | 0.3km (10^3m) | 0.3m (10^0m) | 0.3mm (10^{-3}m) | 0.3 μm (10^{-6}m) | 0.3nm (10^{-9}m) |

X線領域

多次元X線分光

物質の電子状態間に内在するコヒーレンスの情報を引き出す



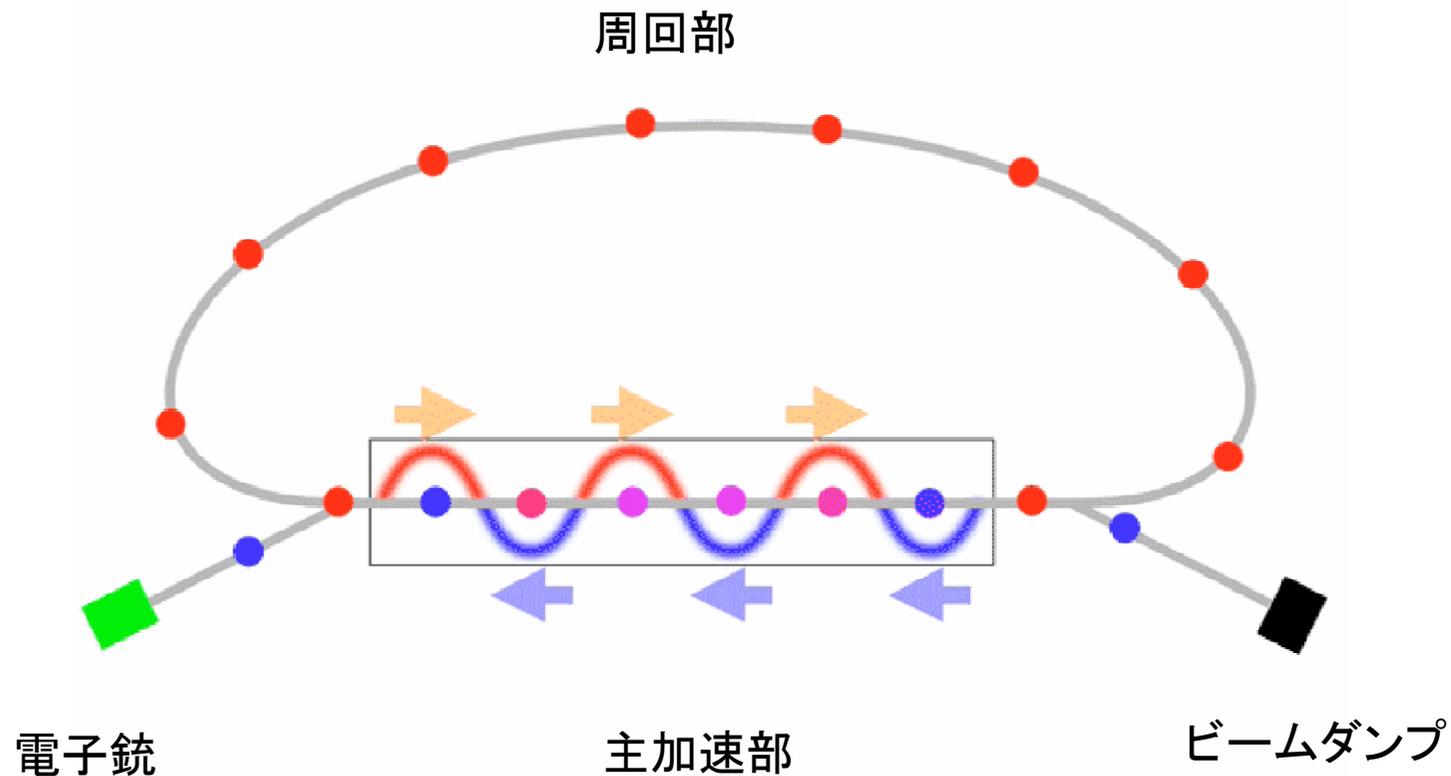
電子状態間の
時空間相関の解明
⇒ 電子密度から
波動関数へ

ERL/XFEL-Oから得られる光の性質

<http://pfwww.kek.jp/adachis/erl/index.html>

エネルギー回収型ライナック (Energy Recovery Linac, ERL)とは？

<http://pfwww.kek.jp/adachis/erl/index.html>



よくある質問

- なぜ、蓄積リングではなく、直線加速器？
 - ライナックを基盤とすることで、蓄積リングの電子ビーム特性の限界をはるかに超える性能を実現できる
- 直線加速器なのに、なぜビームが周回？
 - 蓄積リングのように電子が周回することで、周回部に蓄積リングと同様にビームラインを多数設置することができ、しかも、それらすべてのビームラインでライナックの良質な電子ビーム性能が利用できる
- なぜエネルギーを回収する？
 - $5\text{GeV} \times 100\text{mA} = 500\text{MW}$ の電子ビームをもし減速せずにそのまま捨ててしまうと、止めたところで大量の熱と放射線が発生するので、加速エネルギーを回収し、減速してから捨てる。
- 超伝導加速空洞は、なぜ必要？
 - 高周波損失の小さい超伝導体製の加速空洞をライナックに使用することにより、1.3GHzという高い繰り返し周波数で電子ビームを加速することが可能になり、100mAという高い電流を加速することができる

光源エミッタンスと光源サイズ

| 自然エミッタンス nmrad | σ_x μm | σ_y μm | $\sigma_{x'}$ μrad | $\sigma_{y'}$ μrad |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 293 (AR) | 1350 (NW14) | 140 | 338 | 36 |
| 36 (PF) | 600 (BL3) | 12 | 88 | 29 |
| 3 (SP8) | 286 (ID) | 6 | 11 | 1 |
| 1 | 50 ($\beta_x=\beta_y=5\text{m}$) | 50 | 10 | 10 |
| 0.1 | 16 | 16 | 3 | 3 |
| 0.01 (ERL) | 5 | 5 | 1 | 1 |

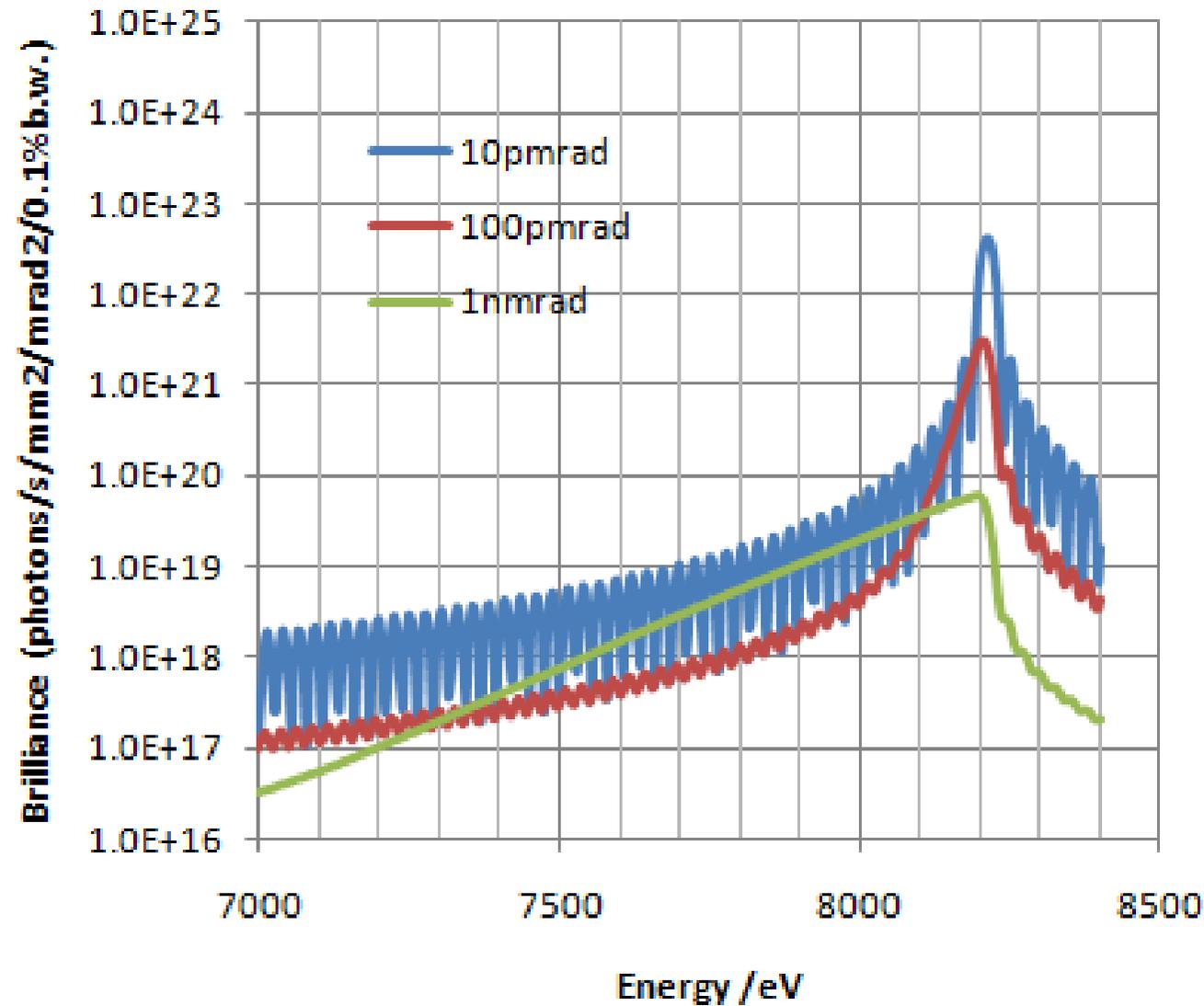
ERLとアンジュレータ放射

- アンジュレータ放射は光源エミッタンス無限小のとき、周期数 N で決まる単色光。周期数 N に対して、光のエネルギーバンド幅は $\Delta\omega/\omega=1/N$ 。

$$I(\Delta\omega) \propto \left(\frac{\sin\left(\pi N \frac{\Delta\omega}{\omega}\right)}{\pi N \frac{\Delta\omega}{\omega}} \right)^2$$

- 現実には、電子ビームの有限のエミッタンスと電子ビームのエネルギー拡がりにより、光のエネルギーバンド幅が広がる。

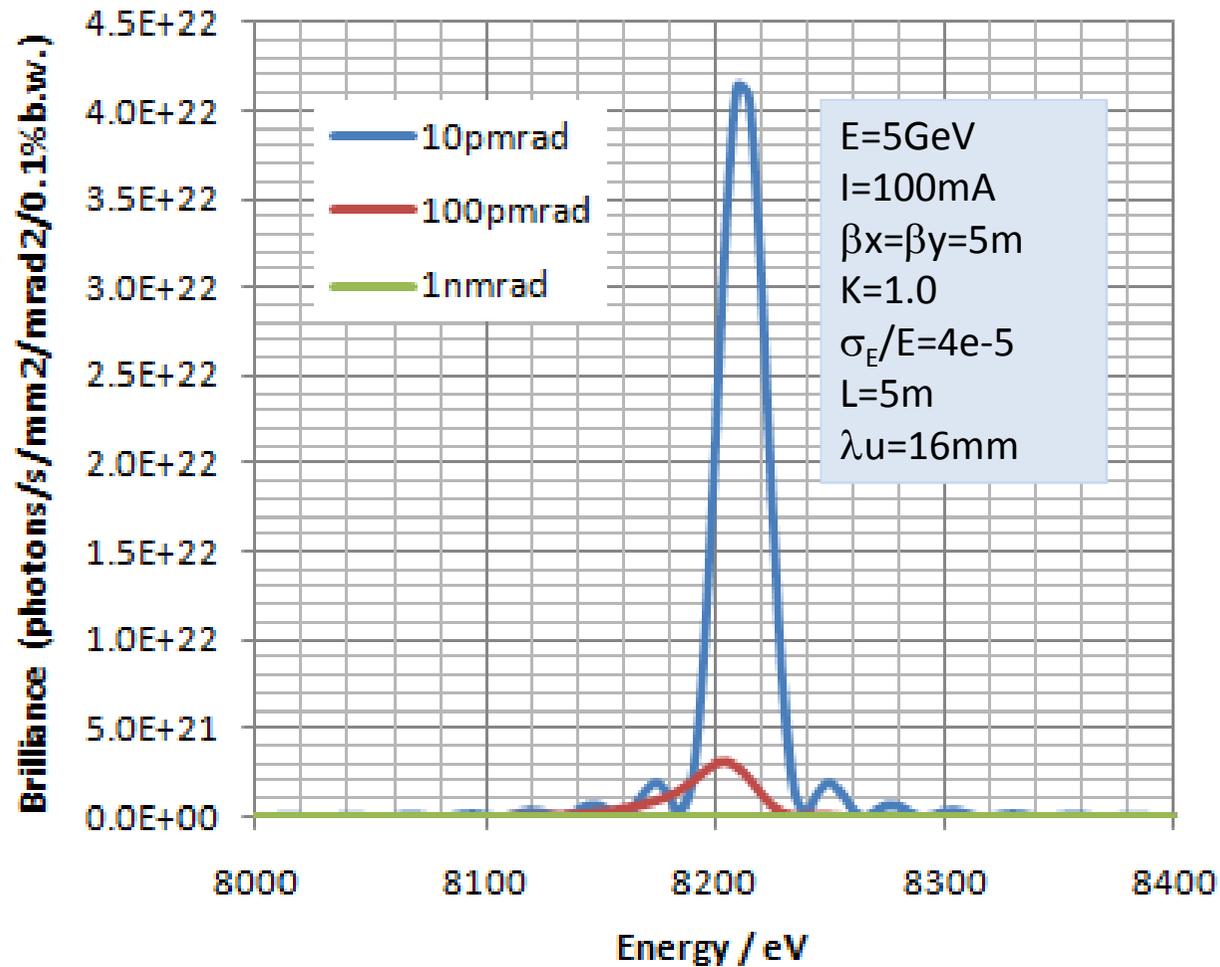
エミッタンスによる アンジュレータスペクトルの違い



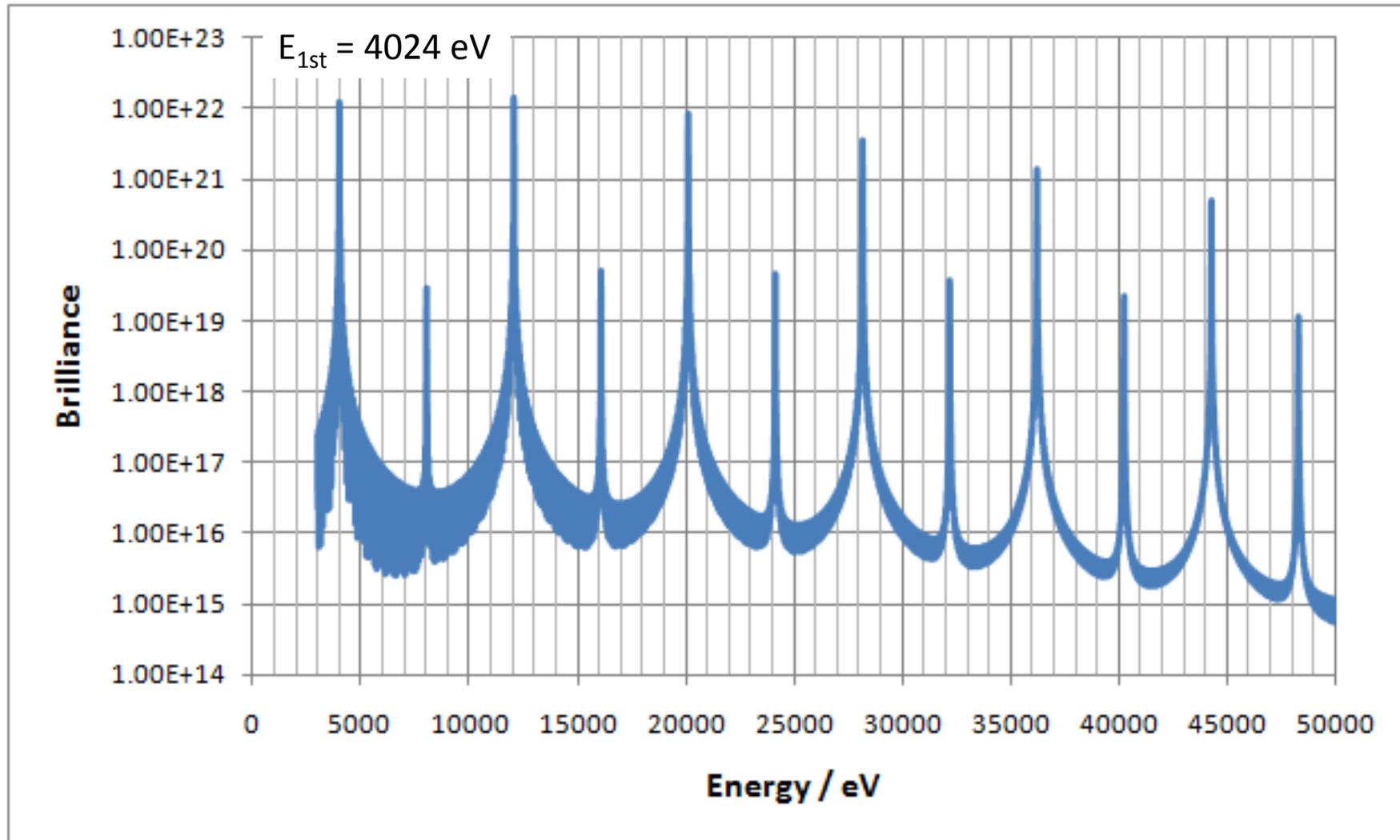
E=5GeV
I=100mA
 $\beta_x=\beta_y=5\text{m}$
K=1.0
 $\sigma_E/E=4e-5$
L=5m
 $\lambda_u=16\text{mm}$

ERLのアンジュレータ1次光

$$\Delta E/E = 25\text{eV} / 8200\text{eV} = 0.003$$



3.5GeV ERLの場合



ERLを使った共振器型FEL(XFEL-O)で フーリエ限界X線を実現する

K.-J. Kim et al. PRL (2008) 100, 244802

シングルモード

エネルギー分解能: 10^{-7}

エネルギー幅: $\sim \text{meV}$

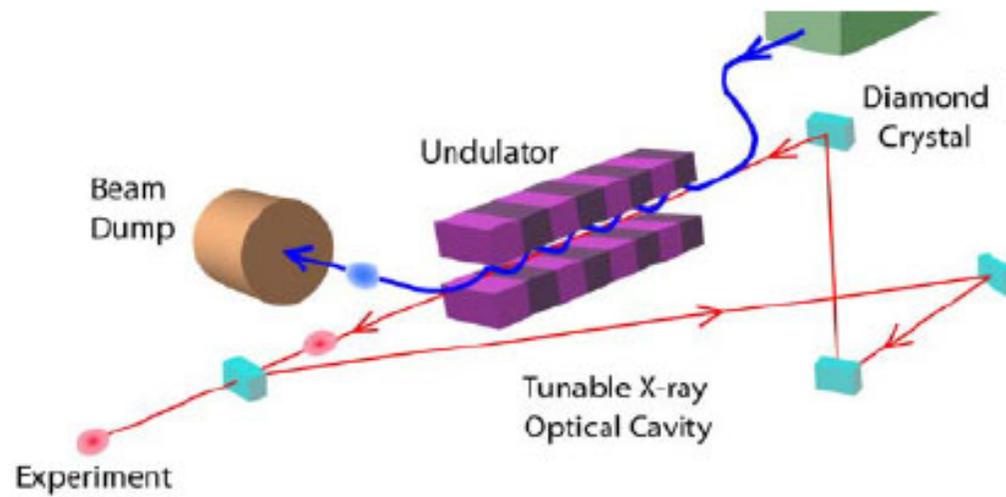
パルス幅: $\sim 1 \text{ps}$

フラックス $10^9 \text{ photons/pulse}$

平均輝度 $10^{26} \sim 10^{28}$

繰り返し1MHz

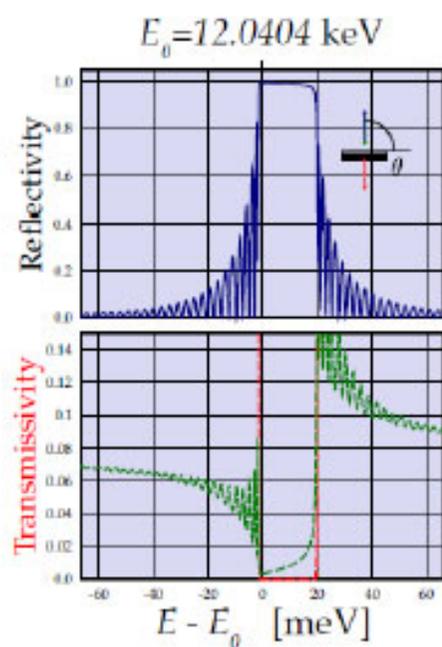
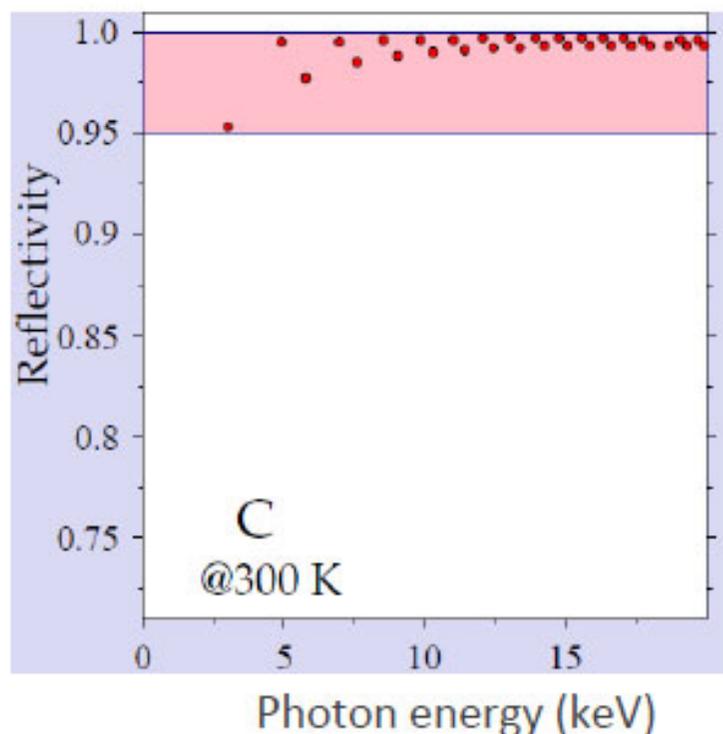
Hard X-Ray FEL Oscillator



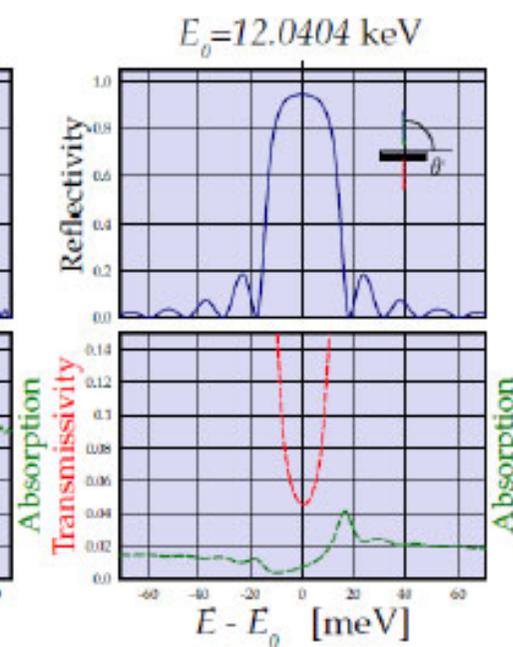
- **Store an X-ray pulse in a Bragg cavity** → multi-pass gain & spectral cleaning
- **Provide meV bandwidth** ($\Delta\omega/\omega \sim 10^{-7}$)
- **MHz pulse repetition rate** → high average brightness

Originally proposed in 1984 by Collela and Luccio and resurrected in 2008 (KJK, S. Reiche, Y. Shvyd'ko, PRL 100, 244802 (2008))

Diamond backscattering : High reflectivity and narrow bandwidth



C(4 4 4); L = 0.2 mm; T = 300 K



C(4 4 4); L = 0.042 mm; T = 300 K

Courtesy of Yuri Shvyd'ko

ERL光源の短パルス特性

- 通常運転モード
 - 77pC, 1.3GHz, 1ps-100fs, 100mA
- ERLは高繰り返し・高輝度に特徴がある。
 - ビームサイズが小さくなることにより、高繰り返しレーザーを有効に利用できる。(MHzオーダー)
 - 現象の回復時間に依存
 - レーザーサイズはどこまで絞ればよいか. $\sim 1\mu\text{m}$ (NA=1) は可能だが、実用的には作動距離に問題あり？
 - 共振器型FELにより、1パルスあたりのフォトン数を稼ぐ

ERL利用研究に向けたキーワード

高輝度性
ナノビーム
顕微分光
顕微回折

空間コヒーレンス
コヒーレント長
回折イメージング
スペックル

時間コヒーレンス
非線形光学
共振器型FEL(XFEL-O)
meV分解能

短パルス性
フェムト秒パルス
1GHz高繰り返し
ナノ秒コマ撮り

基盤技術

集光・空間コヒーレンスの保持・振動対策・ビーム位置安定性

Energy
ERL
Recovery
Linac

持続可能な社会を 実現する放射光

プログラム

13:00 基調講演

講演トピックス

- ・ERL計画の概要と進捗状況
- ・人工光合成・光エネルギー変換に
おける課題
- ・触媒科学における課題
- ・超高速光デバイスにおける課題
- ・強相関電子系材料開発における課題
- ・生命科学における課題
- ・デバイス開発研究の課題

18:30 懇親会

シンポジウム
7/11 月 2011

会場：つくば国際会議場 エポカルつくば

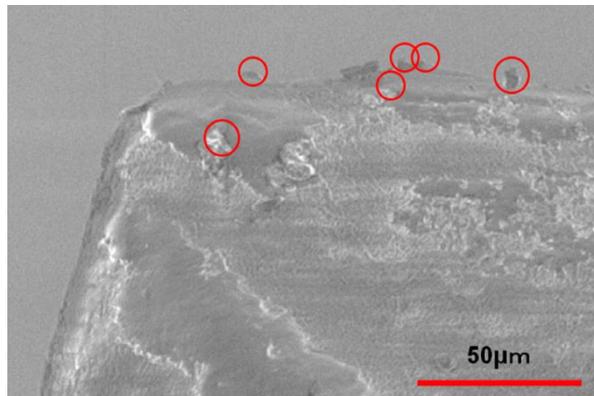
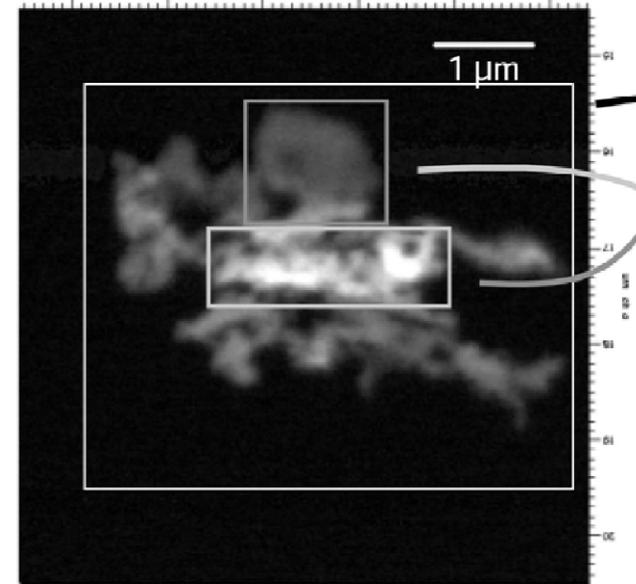
主催：ERL計画推進室・KEK物質構造科学研究所

http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/erl_sympo/

參考資料

輝度を活かした放射光研究②

宇宙塵から地球の起源を探る



スターダスト計画、はやブサなどにより採取された宇宙塵微粒子の分析
ミクロン以下の微粒子の化学状態分析を行うためには、ナノメートルオーダーのX線ビームが不可欠

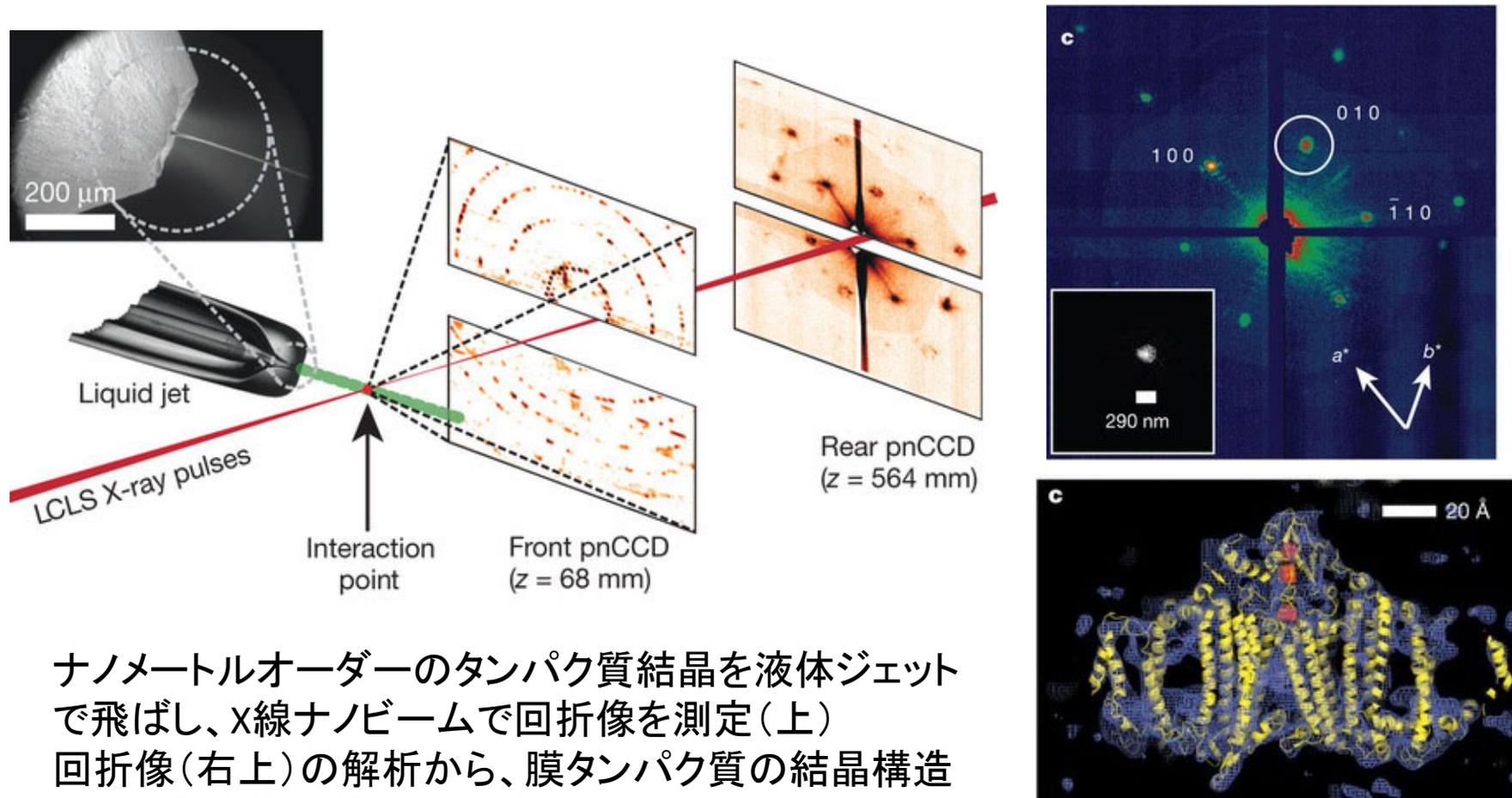
宇宙・地球科学分野

ナノビーム

分光

輝度を活かした放射光研究③

タンパク質ナノ結晶構造解析



ナノメートルオーダーのタンパク質結晶を液体ジェットで飛ばし、X線ナノビームで回折像を測定(上)
回折像(右上)の解析から、膜タンパク質の結晶構造(光合成系I複合体)が得られた(右下)

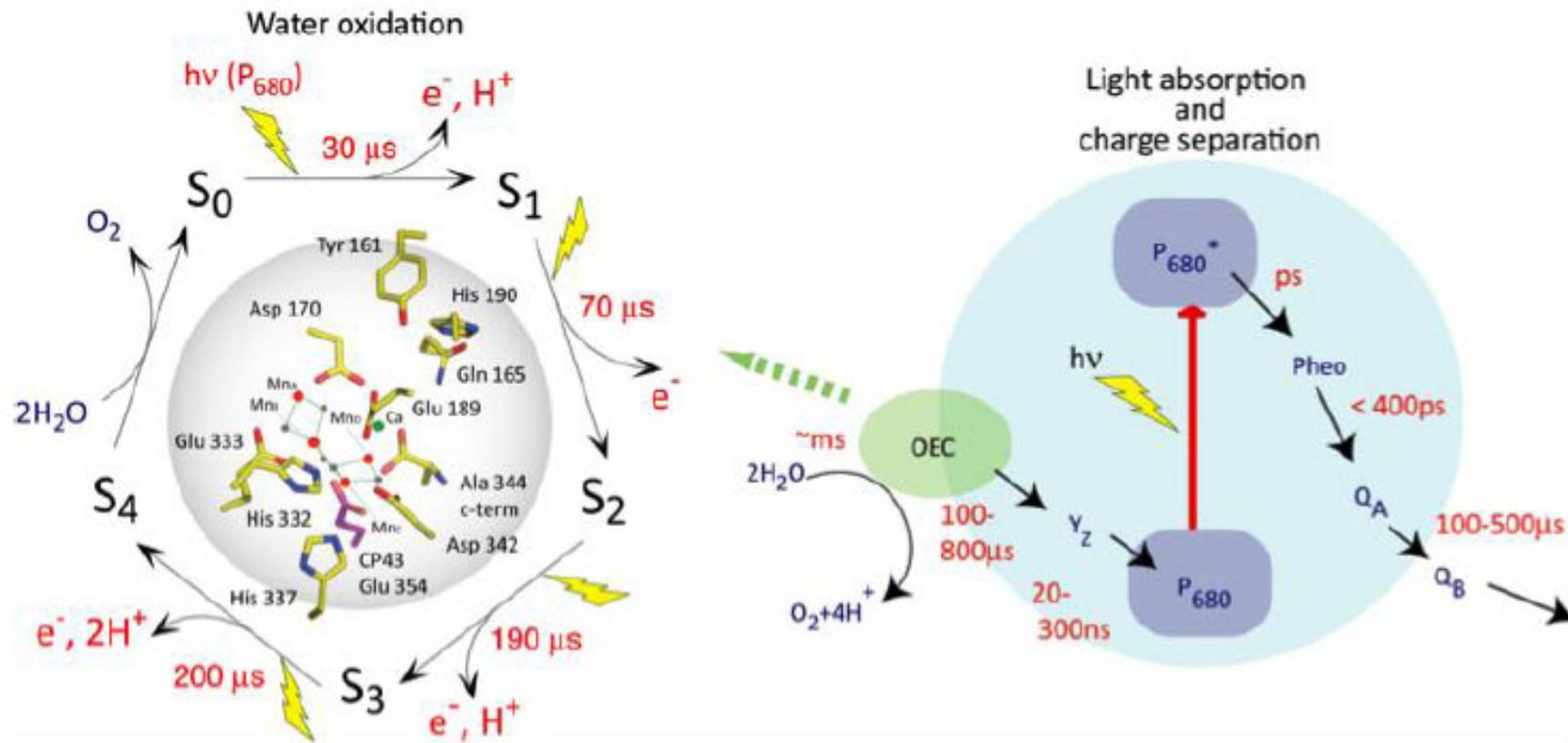
Femtosecond X-ray protein nanocrystallography
Chapman et al. Nature (2011) 470, 73-77.

ライフイノベーション分野

ナノビーム

回折

短パルス性能を活かした放射光研究 高速現象をスナップショットで捉える



グリーンイノベーション分野

短パルス

XAFS、回折

光の固有エミッタンスと回折限界

光の固有エミッタンス: $\varepsilon_p = \lambda / 4\pi$

回折限界: 電子ビームのエミッタンス～光のエミッタンス

| 自然エミッタンス nmrad | σ_x μm | σ_y μm | $\sigma_{x'}$ μrad | $\sigma_{y'}$ μrad | 回折限界 nm, eV |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 293 (AR) | 1350 (NW14) | 140 | 338 | 36 | 3682 nm 0.33 eV |
| 36 (PF) | 600 (BL3) | 12 | 88 | 29 | 452 nm 2.7 eV |
| 3 (SP8) | 286 (ID) | 6 | 11 | 1 | 37.7 nm 33 eV |
| 1 | 50 ($\beta_x=\beta_y=5\text{m}$) | 50 | 10 | 10 | 12.6 nm 98 eV |
| 0.1 | 16 | 16 | 3 | 3 | 1.26 nm 984 eV |
| 0.01 (ERL) | 5 | 5 | 1 | 1 | 0.126 nm 9.8 keV |

ERLの空間コヒーレンス

(伝播のコヒーレンス:小さい光源を遠くで見る)

- コヒーレント長 d
- X線の波長 λ
- 光源と観測点の距離 L
- 光源の空間サイズ σ

$$d = \frac{\lambda L}{2\pi\sigma}$$

光源から40m地点で、サイズ5 μm の光源から出た0.1nmのX線のコヒーレント長は、

$$d = (0.1\text{e-}9) \times 40 / (2\pi \times 5\text{e-}6) = 120 \mu\text{m}$$