(参考資料)

発振波長0.06nmの決定要因

短波長レーザーのメリット

- 空間分解能限界~波長 原子分解能構造解析には波長 < 0.15 nm 波長が短いほど原理的には高分解能化が可能

パラメータ決定の外部要因

SPring-8への電子ビーム入射 電子ビームエネルギー8 GeV



短波長レーザーの困難さ

- レーザー発振の容易さ ³波長が短いほど干渉効率が悪くレーザー発振が困難
- 現有技術で製作可能なアンジュレータの最小周期長~15 mm 波長が短いほどより小さくて強力な磁石が必要

X線自由電子レーザー光の強度調整

非常に強いX線自由電子レーザー光は試料を破壊する?

試料を破壊せずに計測

強度調整可能な光源 (シーディング技術)

開発検討課題(||期計画)

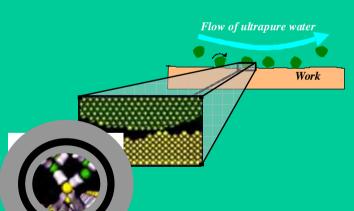
試料を破壊しつつ計測

超高速計測 (壊れる前に測り終える)

XFELのパルス幅を、試料破壊に至る時間より短くすることにより、試料が壊れる前にデータを取得することが可能!

光学系による強度調整

- 欧米計画では光源からの距離 が異なる、複数の実験室を用意 して、単位面積あたりの光子数 を変える。
- 理研計画では、理研 大阪大 学共同研究により、硬X線のコ ヒーレンスを劣化させない超平 坦X線反射鏡が開発済み。
- 形状誤差 1nm p-v以下の非球面ミラーを開発済みであり、一次元拡大率 0.0001~10000倍が既に達成されている。
- これを用いると、X線コヒーレンスを保ったまま、二次元光子密度を10⁻⁸~10⁸倍の範囲で調整可能

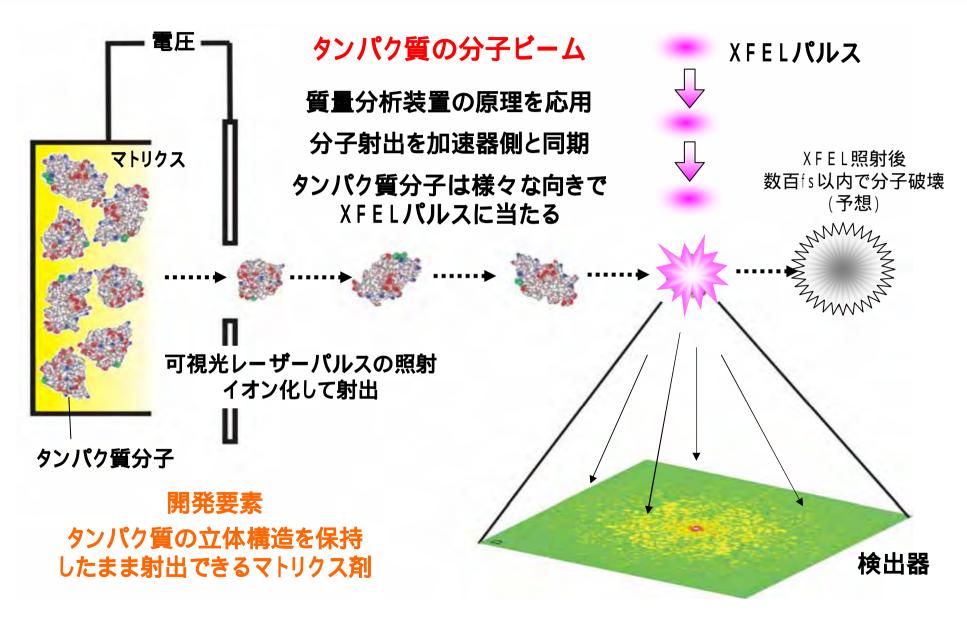


大阪大学で開発された Elastic Emission Machining 法による超平 坦ミラー研磨



超平坦ミラーを利用したKB ミラー装置。 0.1mm×0.1mmのビーム を10nm×10nmに縮小

分子ビーム発生装置によるタンパク質一分子からの散乱パターン記録



短パルス超強度XFELの照射によって分子は破壊されるが、散乱パターンは破壊前に取得できる

X線レーザーを得るために

X線領域でレーザーを得るためには

・レーザーを短波長化 X線を放出するレーザー素子が存在しない

結晶で波長を短くする方法もあるが、非常に弱くなる。

·放射光を高干渉性化 現在の放射光施設では十分な干渉性が得られない。

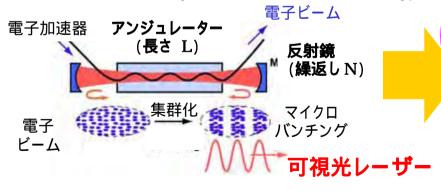
X線放射光を繰り返し干渉させれば、 X線レーザーが得られるはず。

放射光を鏡で反射させると

従来型の自由電子レーザー

(原理提唱1971年、

実証試験1977年[赤外線;米スタンフォード大])

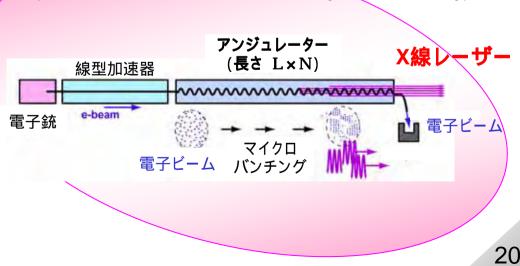


× X線を反射する鏡が存在しない 赤外線・可視光が限界

反射させる分を真直ぐ縦に伸ばしていくと

自己増幅型自由電子レーザー

(原理提唱1986年、実証試験2000年[紫外線;DESY])



日本におけるX線自由電子レーザー開発の経緯(1)

1999年 4月 学術審議会特定領域研究推進分科会加速器科学部会報告にて、 「また、近年、X線自由電子レーザーが将来の第四世代光源として注目を集めている。こ の開発のため、高エネルギー加速器研究機構を中心とした関係研究機関、大学の 連携・協力により基礎研究を推進する必要がある。」 1998年~2000年 第三世代大型放射光施設SPring-8にて、理化学研究所による27m真空封止アンジュ レータ建設、1000mビームライン建設により、精密アライメント技術、アンジュレータ磁場 調整技術を確立、真空封止アンジュレータによるX-FEL小型化の可能性を検討。 2000年 4月 理化学研究所において、X-FELの開発コンセプト(SCSSコンセプト:コンパクト、低コス ト)を創案。 2000年 8月 Berlin SRI2000会議にて、SCSSコンセプトの概念を提示し、大きな反響を呼ぶ。 2001年 4月 理化学研究所において、要素技術の開発研究開始。 2001年12月 超精密X線ミラー完成。世界最高のミラー表面平坦度を達成。 ICFA Workshop on Future Light Source にて、SCSSコンセプトを発表。 2002年 5月 2002年 8月 硬X線回折像からの3次元実空間再構成に世界で初めて成功。 (X-FEL利用を想定した回折顕微鏡試行実験) 真空封止型短周期磁場アンジュレータの位相誤差 2.7度 / 360度以内 を達成。 2002年10月

日本におけるX線自由電子レーザー開発の経緯(2)

2003年12月 電子銃のエミッタンス値の世界最高記録を樹立。

(500kV×1A、電圧及び電流安定度0.2%)

2004年 2月 Institute Laboratory Advisory Council (ILAC)開催。SCSS計画の推進を提言。

2004年11月 理化学研究所において、線型放射光研究開発グループ発足。

2005年 2月 理化学研究所において、国際レビュー(事前評価)を実施。

2005年 4月 理化学研究所において、250MeVプロトタイプ機の製作を開始。

2005年 5月 日本放射光学会 次世代光源検討特別委員会 中間報告書にて、

「X線自由電子レーザーは、レーザー光科学分野と放射光分野の両面からみて、究極的性能を達成する光源として位置づけられ、それらを渇望してきた研究分野に対して大きな飛躍を与えることが期待できる。我が国独自技術による光源のコンパクト化というブレークスルーにより国際的にも先導的な計画であり、X線自由電子レーザーの実現を目指すことはきわめて重要である。」

施設計画·開発·運営·利用計画等を一体的に検討するための利用研究促進懇談会を設置。

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 研究評価部会に次世代放射光源計画評価作業部会を設置。

2005年 8月 次世代放射光源評価作業部会にて、X線自由電子レーザー計画評価について中間とり

まとめ

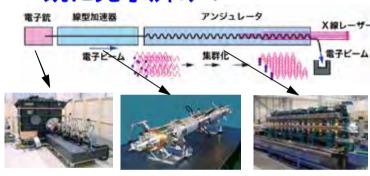
2005年11月 理化学研究所にて、250MeVプロトタイプ機による発振実証試験を実施予定。

プロトタイプ機の位置づけ

- (1) 実機完成後、速やかに利用研究を展開するための基盤技術開発用ツール
- (2) 紫外線~軟X線領域における強力コヒーレント光源

実機整備のための要素技術開発

既に完了済み!



熱電子銃を用いた 高密度低エミッタン ス電子ビーム発生

従来の2倍の加速 効率をもつ加速器

真空封止型アン ジュレーターにより 効率良〈X線を発振

超精密組立 · 据付技術

SPring-8(周長 1.4km)、1km長尺 ビームラインにて 既に実証済み!



"プロトタイプ機"が担う2つの役割

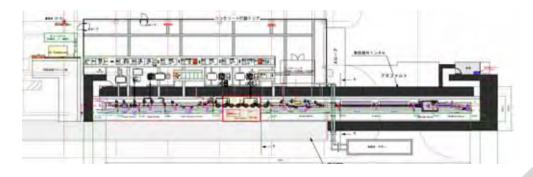
(1) 強力レーザー光ハンドリング技術開発

"実機"完成後、速やかに利用研究を展開 するための基盤技術開発用ツールとして活用。

(2) 紫外線~軟X線レーザー光源"実用機"

例えば、<u>非平衡状態を利用するソフトマテリアルの創製</u>などに威力を発揮。

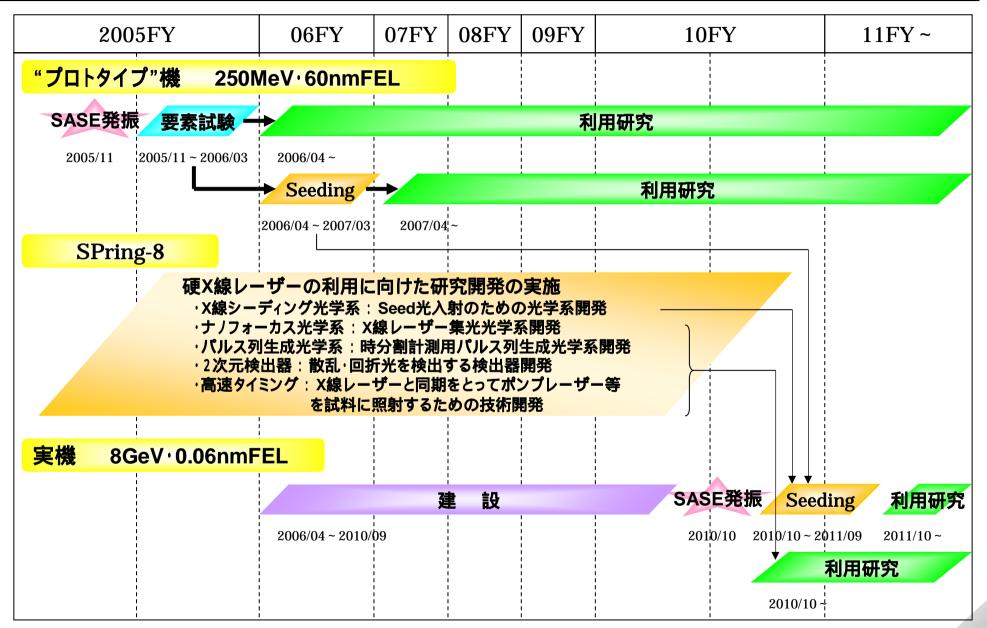
温度によりオンオフする液晶 光形状記憶素子



"プロトタイプ機" = 軟X線自由電子レーザ 23

実機整備に残された技術要素は無い!

マイルストーン



シーディング技術による光源特性の向上

アンジュレータ内での電子ビームサイズ: 50 µm (ラウンドビーム)

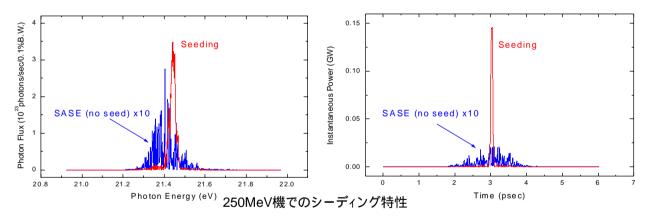
電子ビームサイズで決まる回折限界光子ビームを生成

波長によって、試料位置でのビームサイズは変わる

波長0.1ナノメートルでの回折限界発散角~2マイクロラジアン

波長0.1ナノメートル、アンジュレータ 試料距離250メートルとすると、0.5mm X線ビーム

シーディング: シード光を飽和させることにより、変動の少ない光強度が得られる 250MeV機では、レーザー高調波がシード光として利用可能 8GeV機では、自由電子レーザー本体でシード光を作成。R&Dが必要



パルス列の生成: 基本繰り返し周波数は60Hz

Seeded FELを結晶オプティカルキャビティを利用して、パルス列に分割 500nmの中に、マイクロバンチ生成が可能

エネルギー分解能: No Seedでは、アンジュレータ周期数で決まる分解能(~10-4)、

Seeded FELではシード光の分解能(<10⁻⁴)

パルス幅: No Seedでは、250MeV機で~1ps、8GeV機で~80fs。

Seeded FELではシード光のパルス幅(~1fs)