

ERL光源の短パルス特性を利用した超高速ダイナミクス研究の展望

岩住俊明、間瀬一彦 (KEK・PF)

1. 意義と将来性

相転移や化学反応が進行する時間スケールでの超高速ダイナミクス研究は21世紀の物質科学のフロンティアである。基礎科学としては光物性、量子エレクトロニクス、分子科学、化学、光構造生物学にわたる幅広い分野にブレークスルーをもたらすと予想されており、応用としては光駆動スイッチ、光記憶素子、非線形光学素子、励起状態を制御した新物質開発などに貢献すると期待される。サブピコ秒の短パルスX線を用いた時間分解X線回折法・内殻励起分光法が発展すれば、より直接的な情報が得られるため、超高速ダイナミクス研究は大幅に進展する。

ERLとSASE-FEL、第2・第3世代放射光源を利用する光源を輝度とパルス幅で比較したものを図1に示す。SASE-FELは輝度において他を圧倒しているが、同時供給可能な光源数とエネルギー可変性に限界がある。現在の放射光ユーザー全ての要求を満たし、短波長短パルス光源として第2・第3世代放射光源の拡張型と見なせるのはERLのみである。本ポスターでは超高速ダイナミクス研究者およびPFユーザー、スタッフから提案された研究テーマを紹介する。

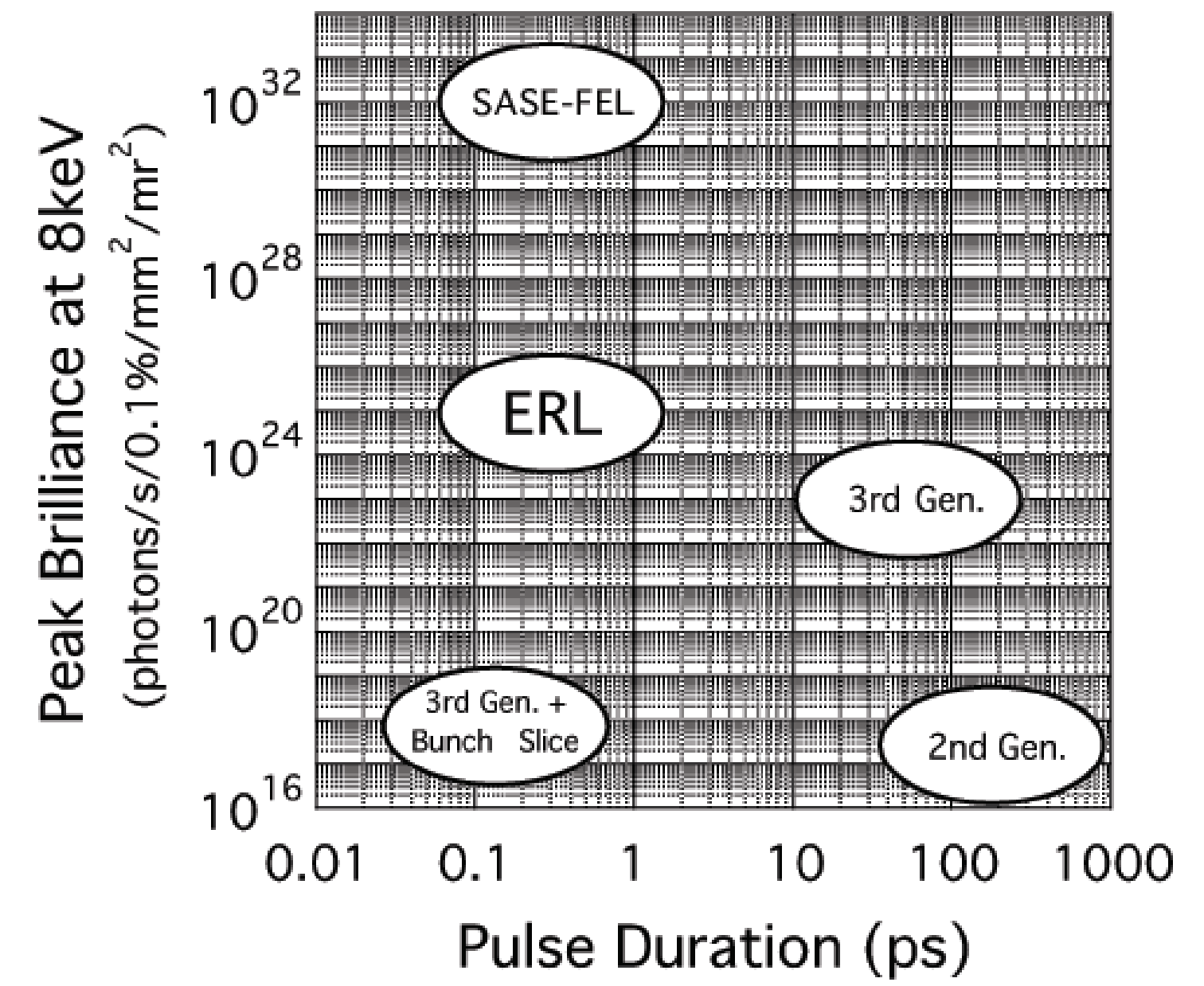


図1. 各世代放射光源のピーク輝度と時間幅。

2. 測定手法

フェムト秒レーザー励起-ERL放射光プローブ法を利用した超高速ダイナミクス測定システムを図2に示す。また、放射光とレーザーの同期システムを図3に示す。フェムト秒レーザーが10kHz、ERLは1.3GHzであるので、99.999%の放射光は時分割測定に利用できない。このため、1nC/10MHzの電子パルスビームで放射光を発生し、短パルス利用実験のビームラインでは10kHzまで機械的なチョッパーで間引くといった運転モードの検討が今後の課題である。

サブピコ秒ダイナミクス計測システム

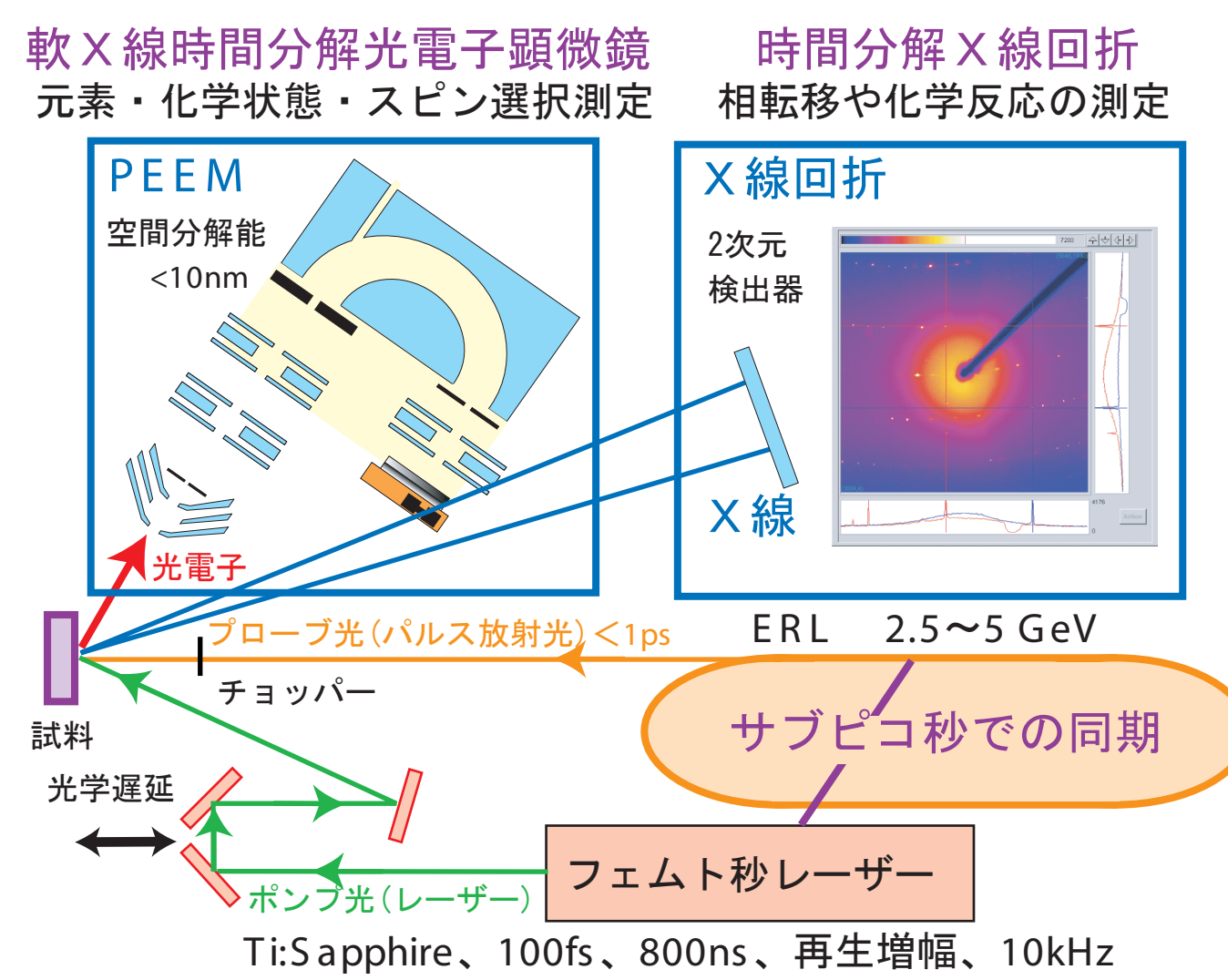


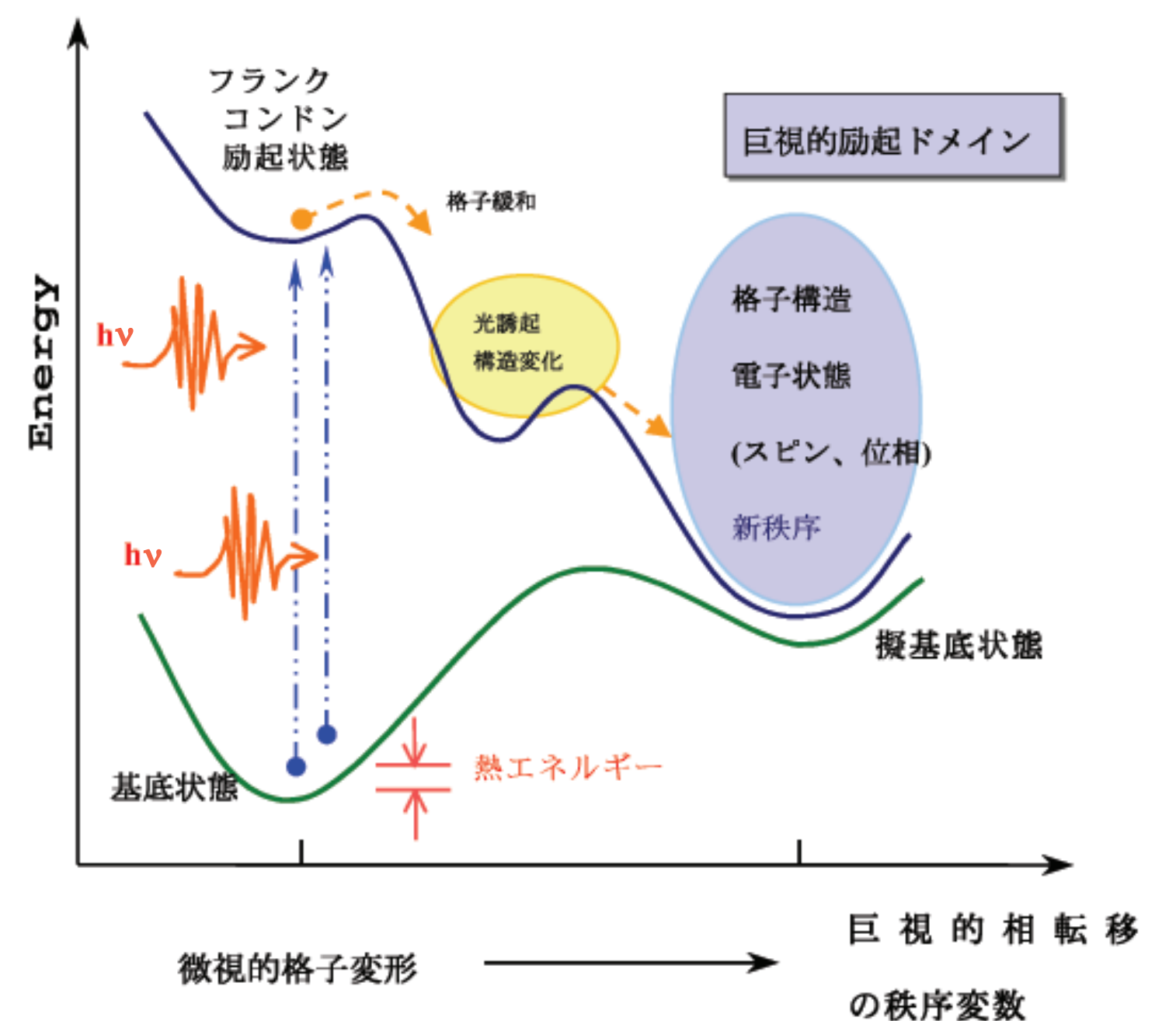
図2. 超高速ダイナミクス測定システム

3. 光誘起構造相転移の超高速ダイナミクス

[腰原伸也 (東工大理工)、那須奎一郎、澤博 (KEK・PF)]

結晶に微弱な可視光を照射するだけで、新しい物性を持った秩序構造が成長し、巨視的規模の励起状態のドメインが出現する現象は光誘起構造相転移と呼ばれ、世界的に注目を集めている(図4)。光誘起構造相転移においては協同的な電子-格子相互作用が重要な役割を果たしていると考えられるので、構造変化の超高速測定がブレークスルーをもたらすと期待される。

図4. 潜在的な多重安定性と光誘起構造相転移の模式図。光誘起によって観測される状態は単なる中間状態ではなく、自己増殖と秩序形成を伴う擬基底状態である。



4. 圧力場中の結晶構造相転移・緩和ダイナミクス

[近藤建一、中村一隆、弘中陽一郎 (東工大・応セラ研)]

高強度のパルスレーザー光の照射により瞬間的に超高压状態を発生させ(図5)、パルスX線でプローブすることにより、高压力場中の結晶構造相転移ダイナミクスを解明することができる。具体的な研究テーマとしては、衝撃圧縮シリコン結晶の時間分解X線回折(図6)、衝撃圧縮下のCdS結晶の構造変化のダイナミクス研究などが挙げられる。

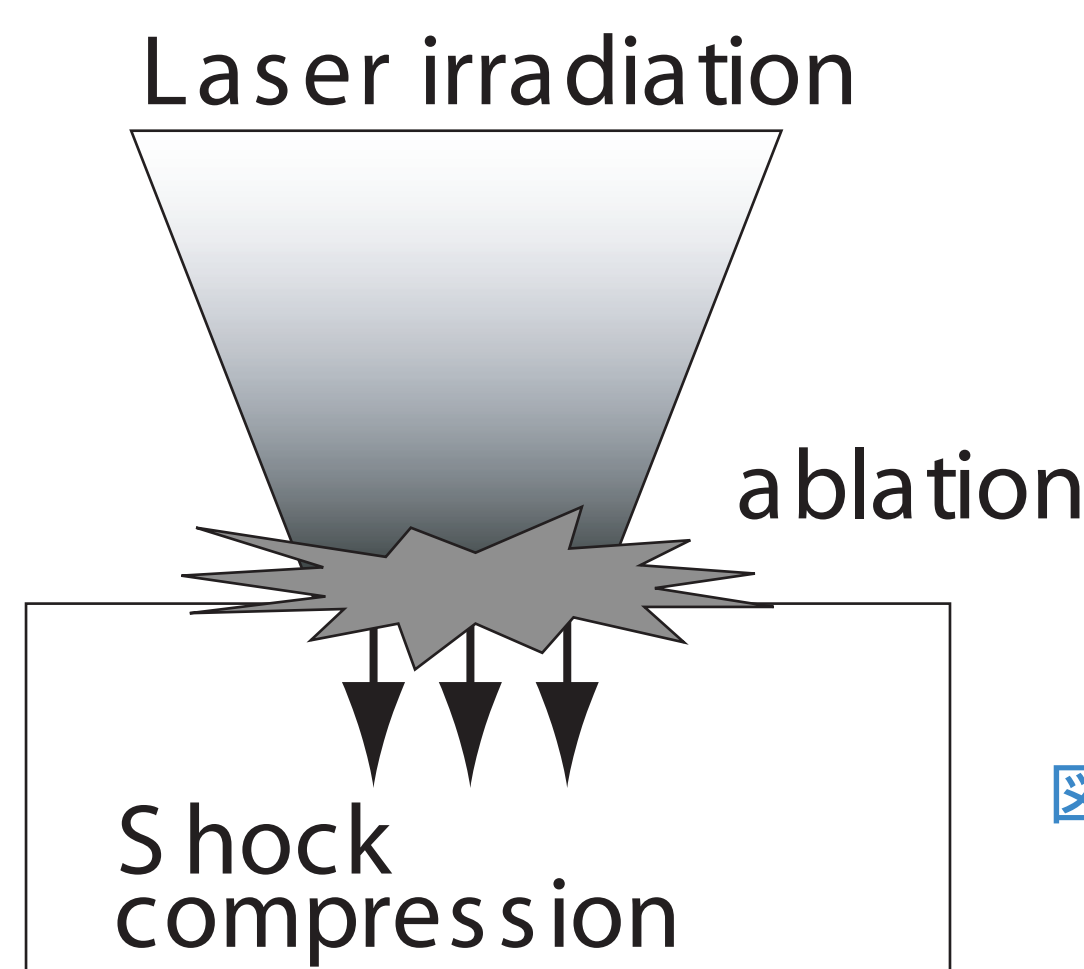


図5. レーザー衝撃圧縮の概念図。

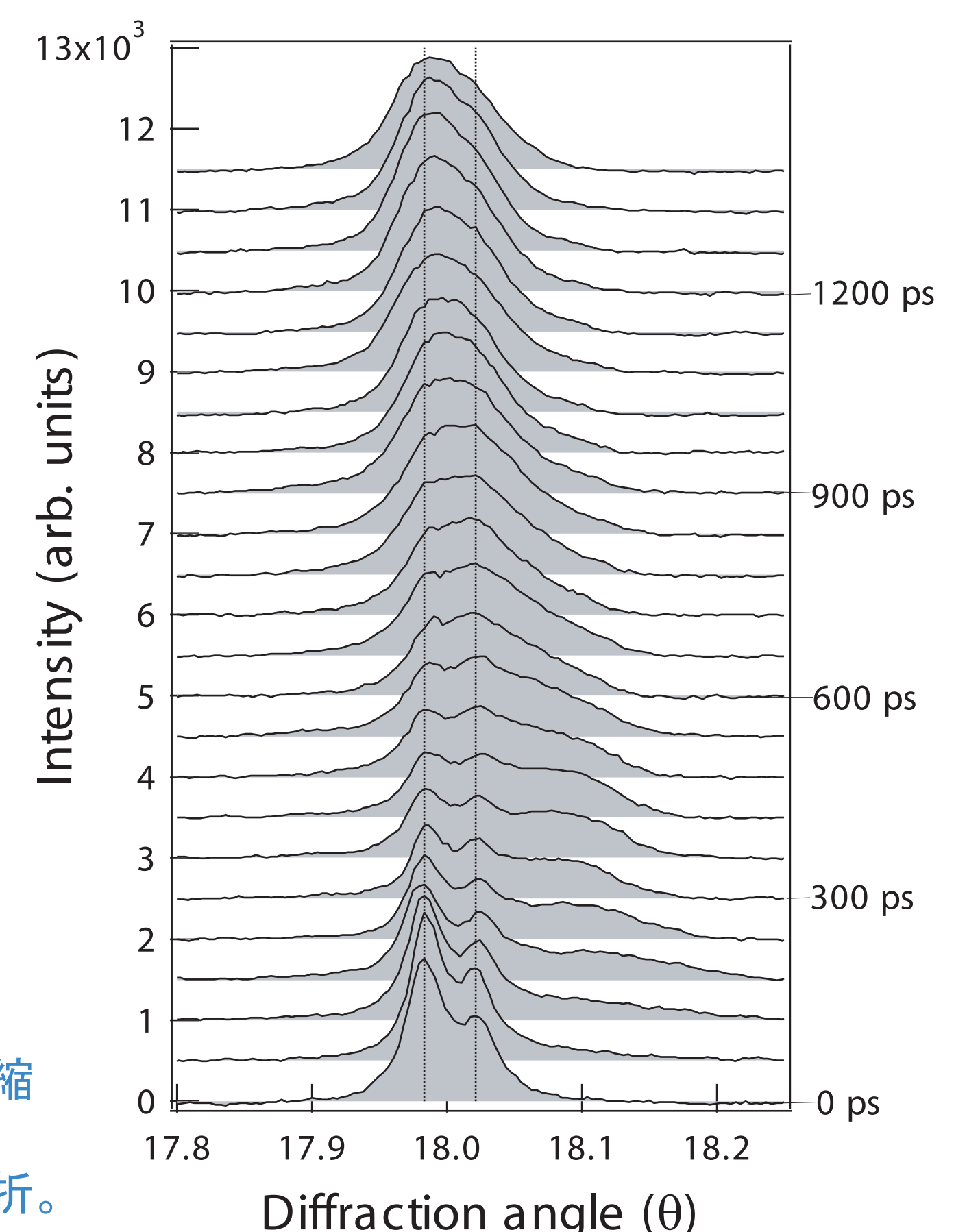


図6. レーザー衝撃圧縮Si結晶のピコ秒時間分解X線回折。

5. 固体表面ナノスケール領域 サブピコ秒ダイナミクス

[横山利彦 (分子研)、
近藤寛、雨宮健太 (東大理)]

情報技術におけるナノ記録素子と超高速情報伝達という要請から、固体表面における微小領域時間分解計測技術の抜本的開発は、単に基礎学問的好奇心を越えた研究課題となっている。また、生体に代表される機能性分子素子におけるエネルギー伝達は、素過程が極めて局所的に超高速に進行するものであるから、究極的な分子素子設計に微小領域時間分解計測技術の開発が不可欠であることはいうまでもない。ERL光源によってサブピコ秒・数nmの時空間分解能を有するポンププローブ超高速化学・磁気顕微鏡が実現し、X線の特長を生かして、元素選択的・化学状態選択的・スピン状態選択的な時空間分解分光という新たな研究分野が創生される。具体的なテーマとして、光合成アンテナモデル化合物の単一分子素子エネルギー伝達機構追跡 (図7、図8) とナノ磁性体の磁化情報伝達機構追跡 (図9) を提案する。

図9. ナノ磁性体の磁化情報伝達機構追跡。

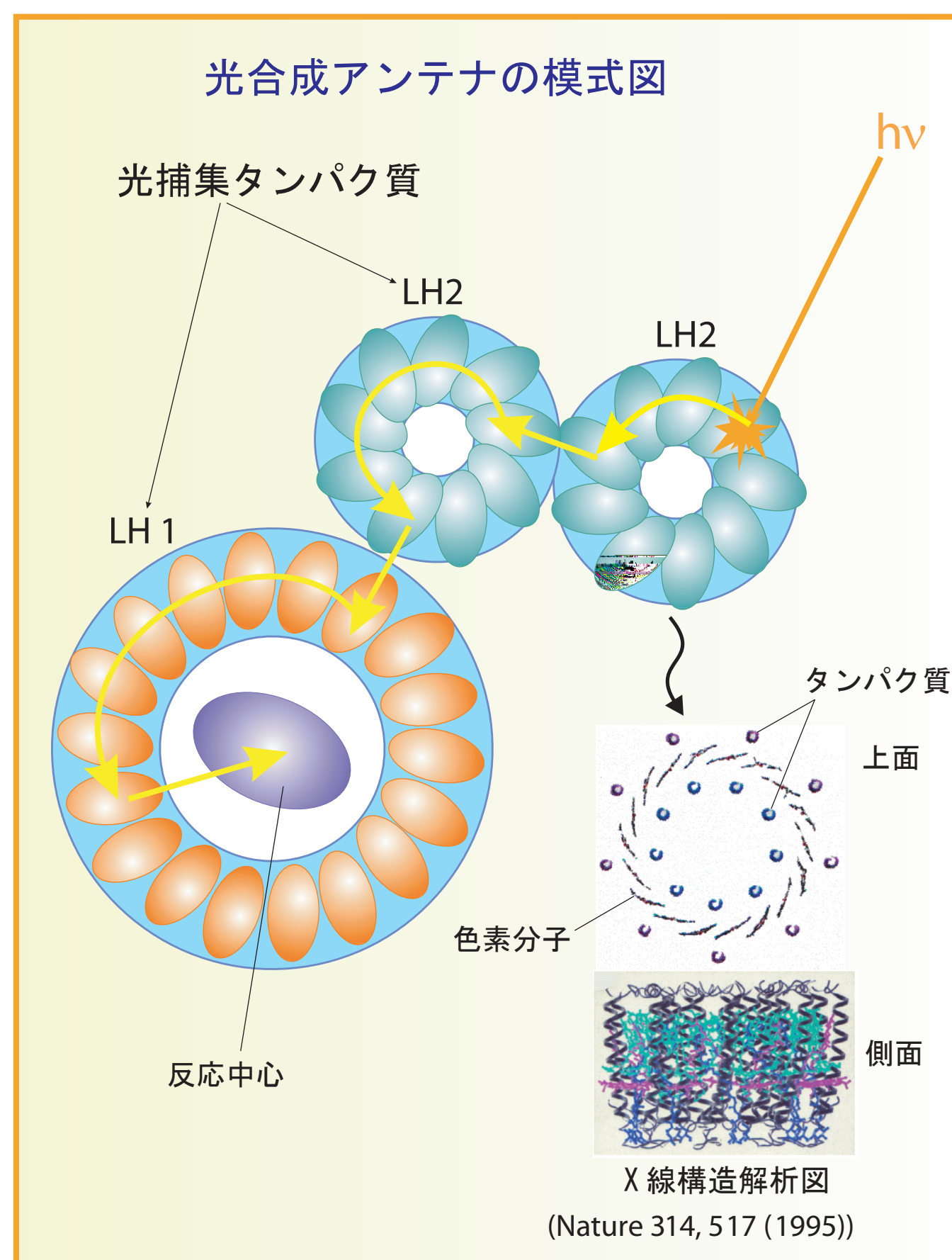


図7. 光捕集タンパク質 (光合成アンテナ) の模式図とX線構造解析図。

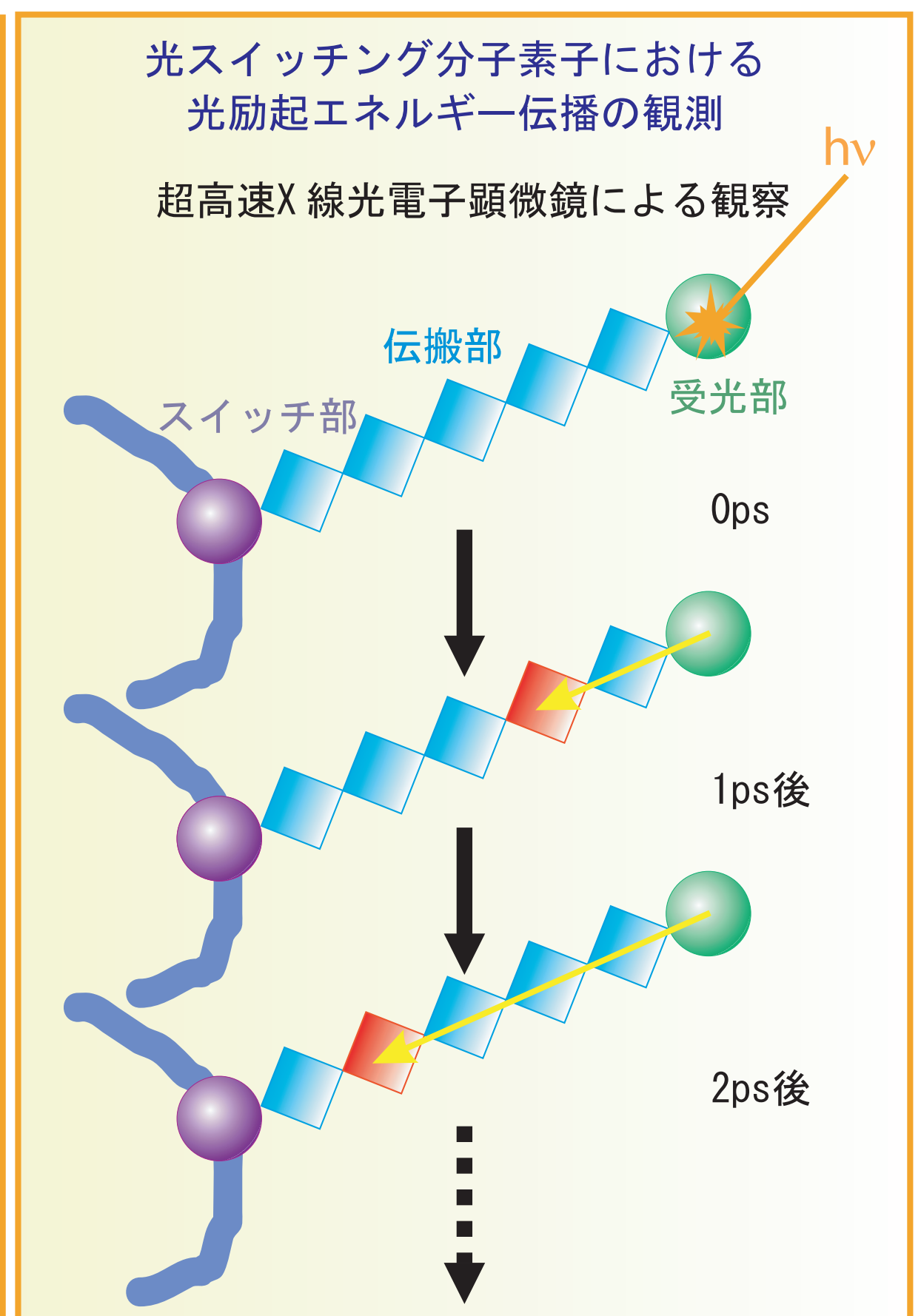
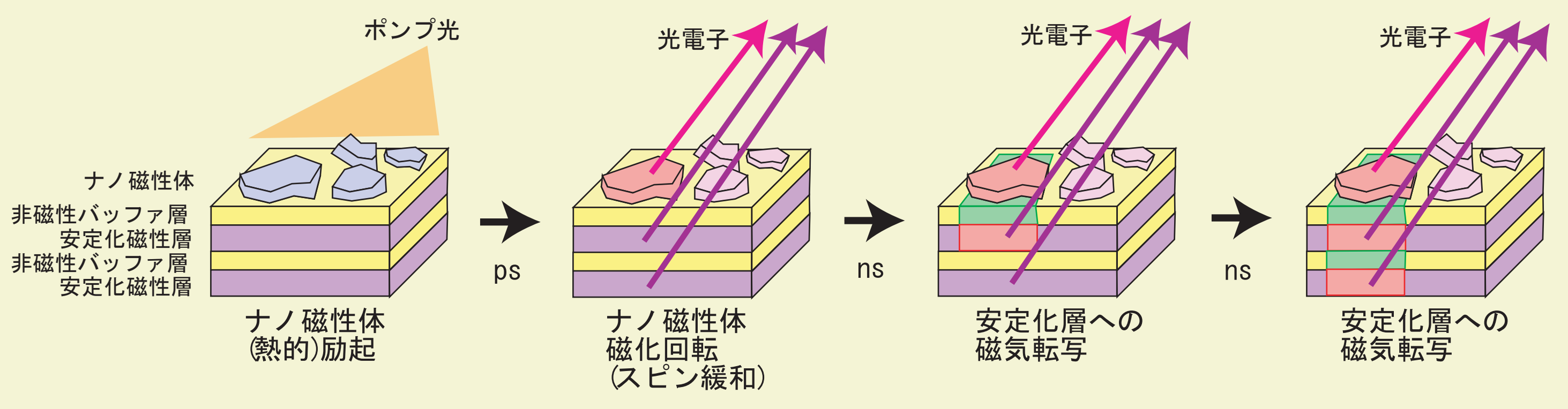
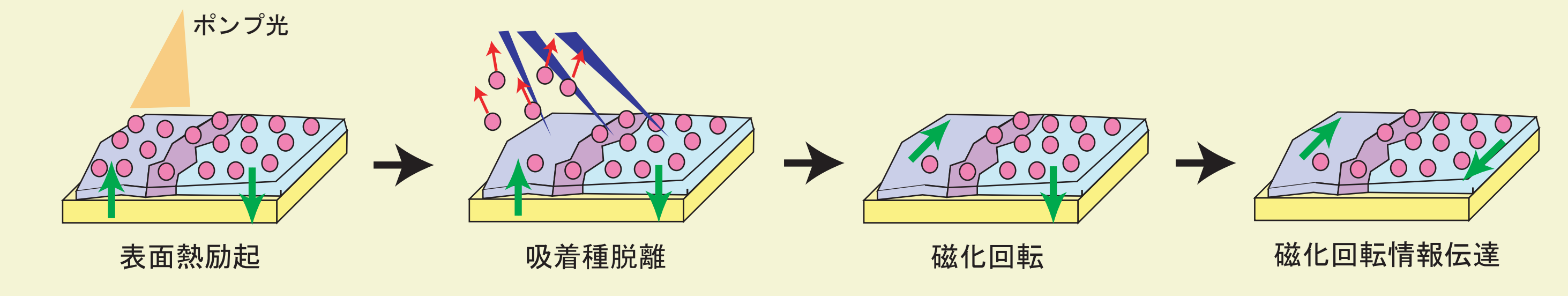


図8. 光合成アンテナを模倣した光スイッチング素子におけるエネルギー伝播の観測。

1) 階層型磁気記録材料の動的磁化過程



2) 吸着・脱離におけるスピン再配列ダイナミクス



6. 強光子場中の分子ダイナミクス

[山内薫 (東大理)]

近年のレーザー技術の進歩によって原子や分子内のクーロン電場に匹敵するほどの電場強度 ($10^{15} \sim 10^{16} \text{ W/cm}^2$) を持つ強光子場を発生させることは、研究室レベルでも容易になった。このような光子場下では分子内の電子が著しく擾乱されるので、強光子場中の原子・分子系を研究することは、「光と物質の相互作用の本質を理解する」という基礎的な問題の理解を深めることになる (図10)。そればかりではなく、分子は「光の衣」を纏い、ドレスト状態を生成し、その実効的なポテンシャル面は光子場によって大きく変形するので、光によって分子の反応を制御するという応用的な観点からも極めて重要でと考えられる。光子場と分子を混合し、「新しい種類の分子」をデザインしながら作ることに伴い、分子の核運動のダイナミクスを制御すること、すなわち、「分子の光マニピュレーション」も可能となると考えられる。内殻光電子分光による強光子場中の分子の電子構造解明、時分割X線回折法による構造変化追跡は本分野に飛躍的發展をもたらすと期待される。

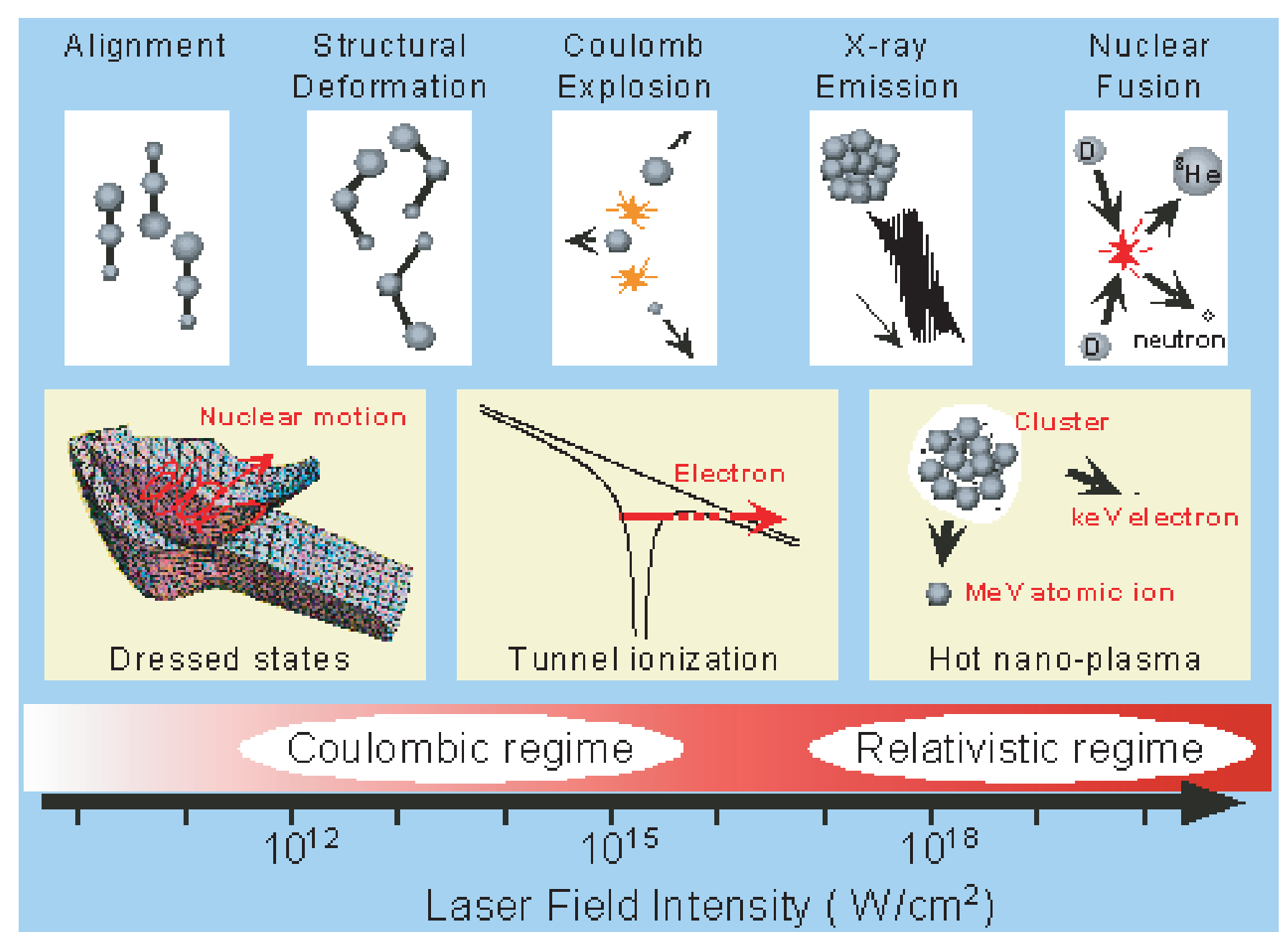


図10. 強いレーザー場と分子・クラスターの相互作用。

7. おわりに

本ポスターではスペースが限られることからいくつかの提案に限り紹介した。これらのテーマに関しては国内に強力なユーザーグループが存在するので、早い段階でオリジナリティの高い成果を挙げられるものと期待される。提案された研究テーマの抜粋を表1に示した。詳しくは「放射光将来計画検討報告」を参照されたい。

表1. 提案された超高速ダイナミクス研究テーマの抜粋

研究分野	研究テーマ	時間分解能	研究手法	提案者
原子核物理	原子核励起現象	~1ps	核共鳴	岸本(PF)、核共鳴散乱UG
プラズマ物理	レーザーアブレーション過程	~1ps	イメージング	上坂(東大原施)
分子科学	強光子場中のダイナミクス	0.1~1ps	X線回折, XPS	山内(東大理)
光物性	光誘起構造相転移	0.1~1ps	X線回折	腰原(東工大)、那須・澤(PF)
高压物性	パルス圧力場中のダイナミクス	~1ps	X線回折	近藤・中村・弘中(応セラ研)
半導体物性	励起キャリアのダイナミクス	0.1~1ps	XPS	鎌田(佐賀大)
表面科学	固体表面ダイナミクス	0.1~1ps	PEEM	横山・近藤・雨宮(分子研・東大)
触媒化学	光触媒の局所構造と反応	0.1~1ps	XAFS	XAFS UG、稲田(名大院理)
構造生物	光受容タンパクの時分割構造解析	1~50ps	X線回折	上坂(東大原施)