

レーザーで見えるフェムト・ アトの超高速の世界

石川顕一

講義資料ダウンロード <http://ishiken.free.fr/lecture.html>

メール ishiken@q.t.u-tokyo.ac.jp

フェムト秒・アト秒とは？

ミリ	m	10^{-3}
マイクロ	μ	10^{-6}
ナノ	n	10^{-9}
ピコ	p	10^{-12}
フェムト	f	10^{-15}
アト	a	10^{-18}

1フェムト秒の間に光が進む距離は…

$$3 \times 10^8 (\text{m/s}) \times 10^{-15} (\text{s}) = 3 \times 10^{-7} (\text{m}) = 0.3 \mu\text{m}$$

なぜそんな超短いパルスが必要？



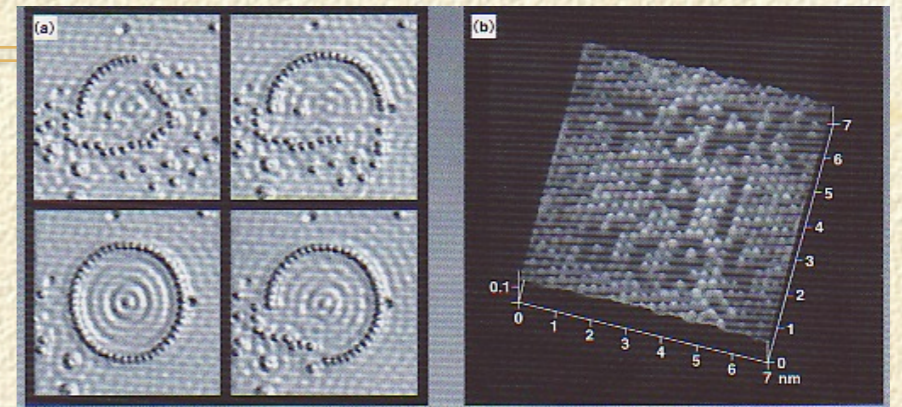
速い動きをとらえるためには、速い(露光時間の短い)シャッターが必要

フェムト秒・アト秒パルスで…

- 化学反応が見える
- 原子の中を電子が動き回るのが見える？
- 光の波が見える！

原子の中を動き回る電子を見る、あやつる

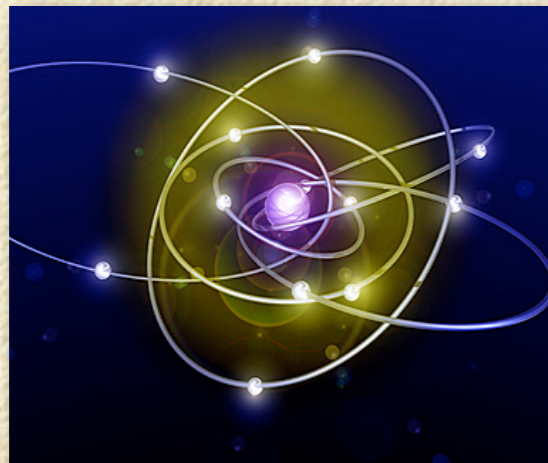
顕微鏡で見える



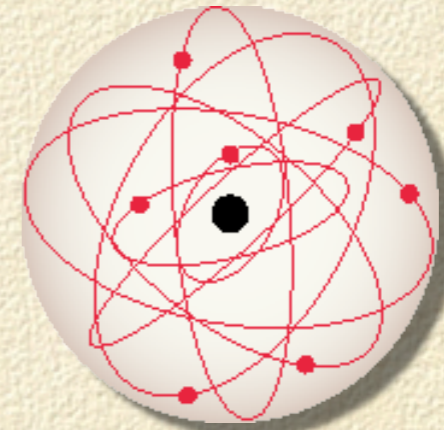
常識?

モノを構成しているのは原子

原子の中では、電子が原子核の回りを回っている



誰も見たことない!



$$T = 152 \times 10^{-18} \text{ 秒}$$
$$= 152 \text{ アト秒}$$

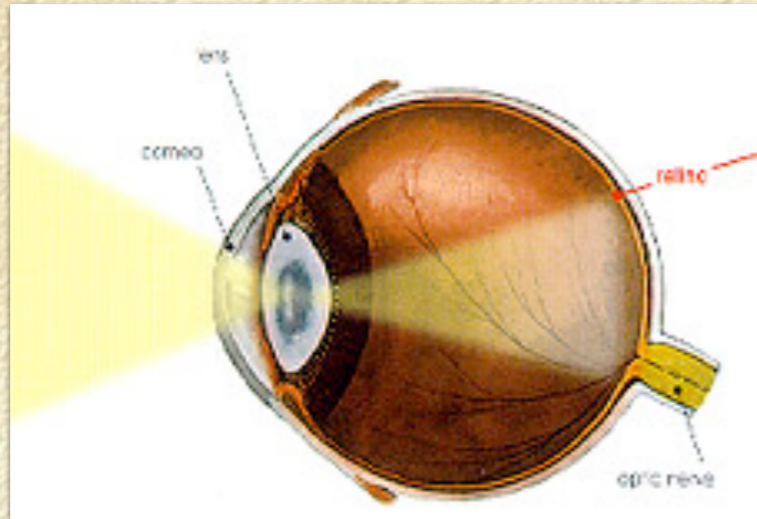
見る
電子の運動を
あやつる

フェムト秒のシャッターが必要な現象とは？

30フェムト秒の間に光が進む距離は9ミクロン

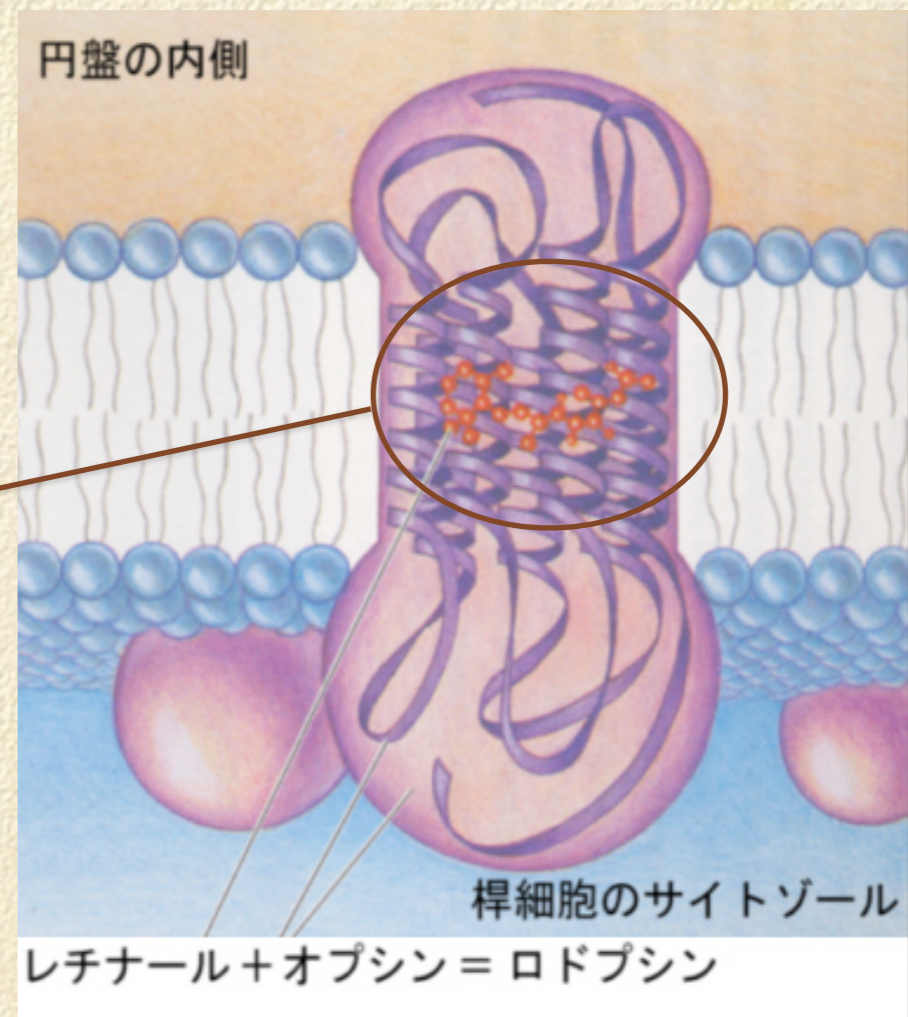
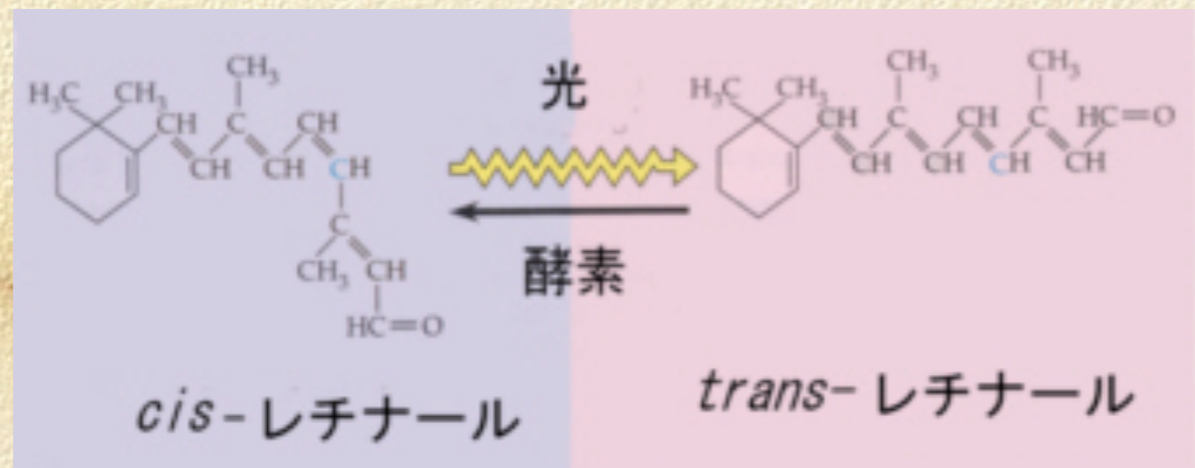
- 化学反応、特に光化学反応
- タンパク質の構造変化
- 化学反応生成物の制御

ヒトの目はどのようにものを見ることができているのか？

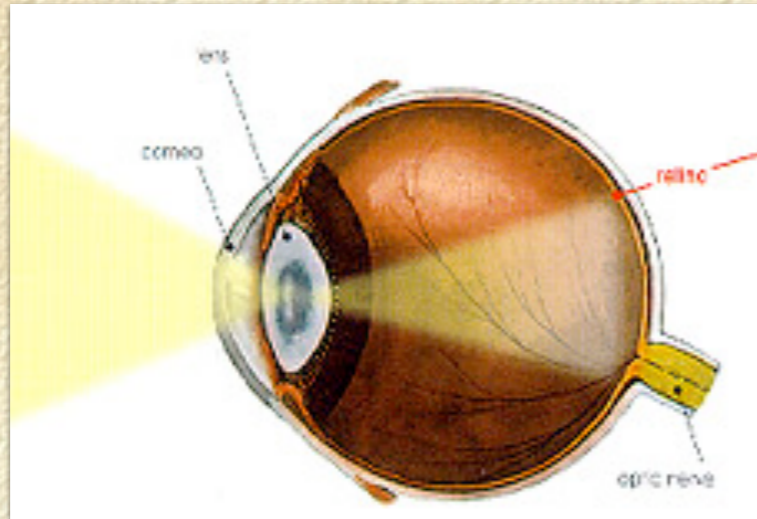


● 網膜の中にある視細胞が光をとらえ

光検出タンパク **ロドプシン**

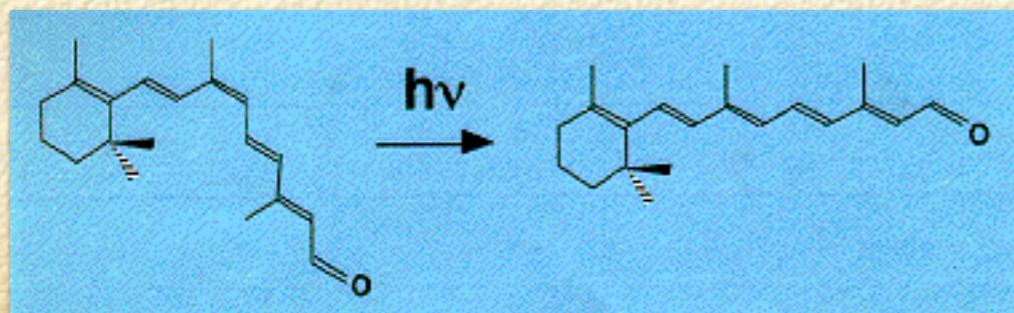


ヒトの目はどのようにものを見る ことができるのか？



- 網膜の中にある視細胞が光をとらえ
- 電気信号に変えて脳に伝える ミリ秒、マイクロ秒

光検出タンパク **ロドプシン**



1ピコ秒以下

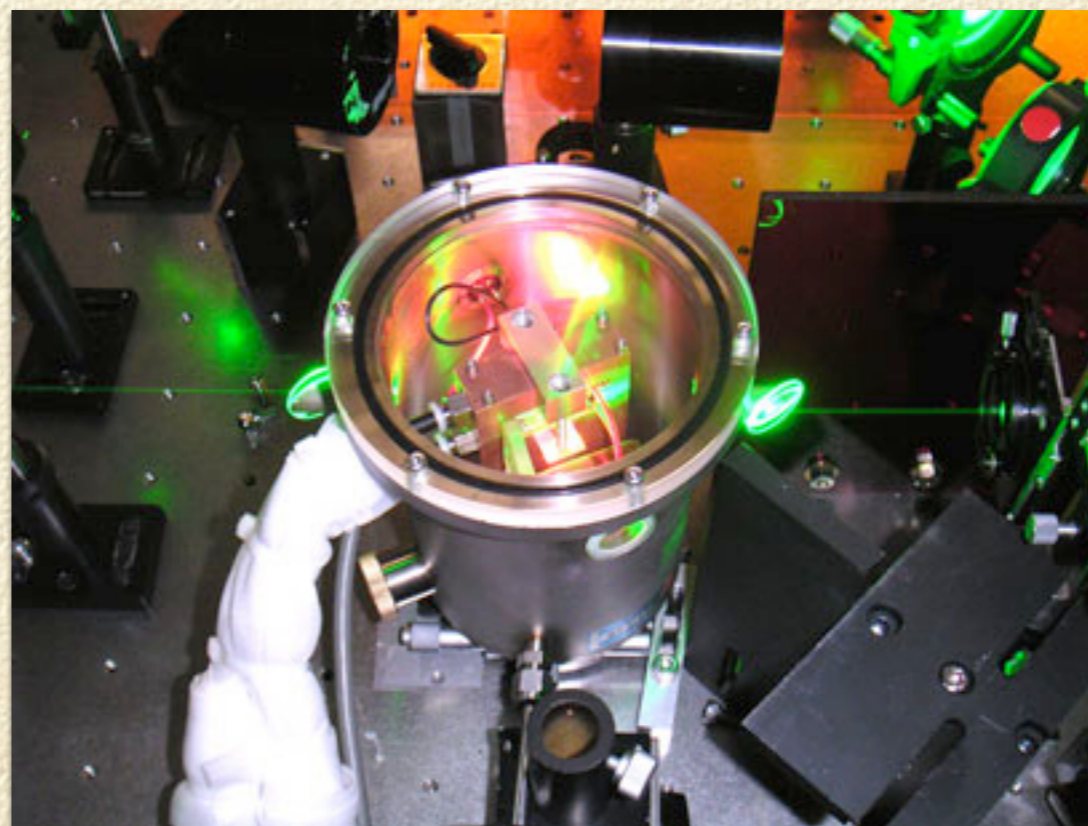
フェムト秒のフラッシュ・シャッターが必要

フェムト秒レーザー

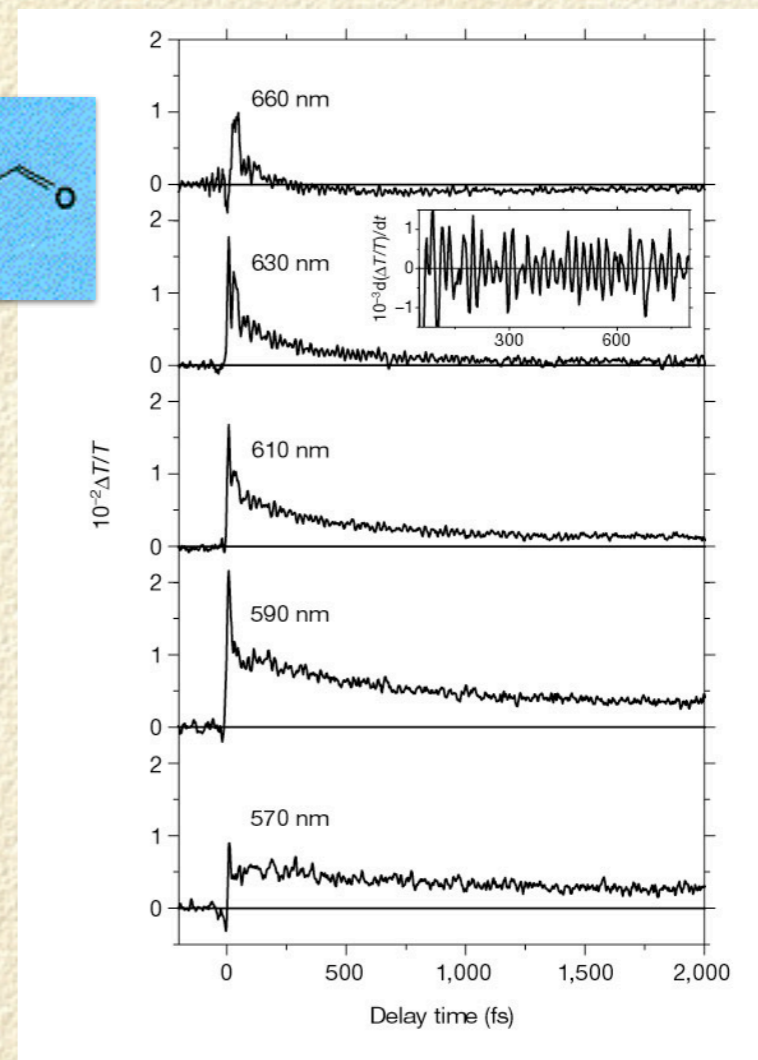
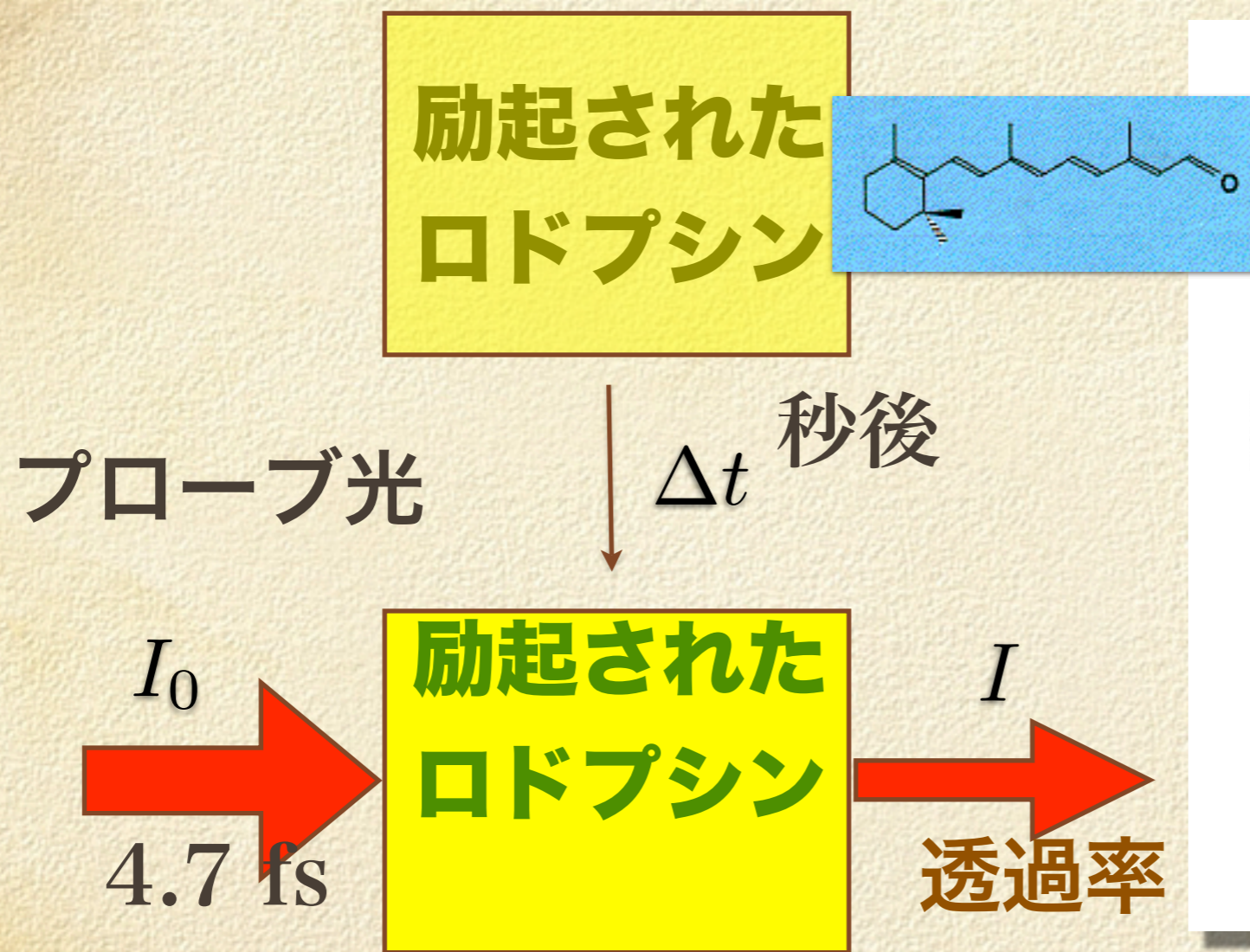
フェムト秒レーザー

チタンサファイアレーザー
(フェムト秒レーザー)

波長800nm前後 (赤外線)

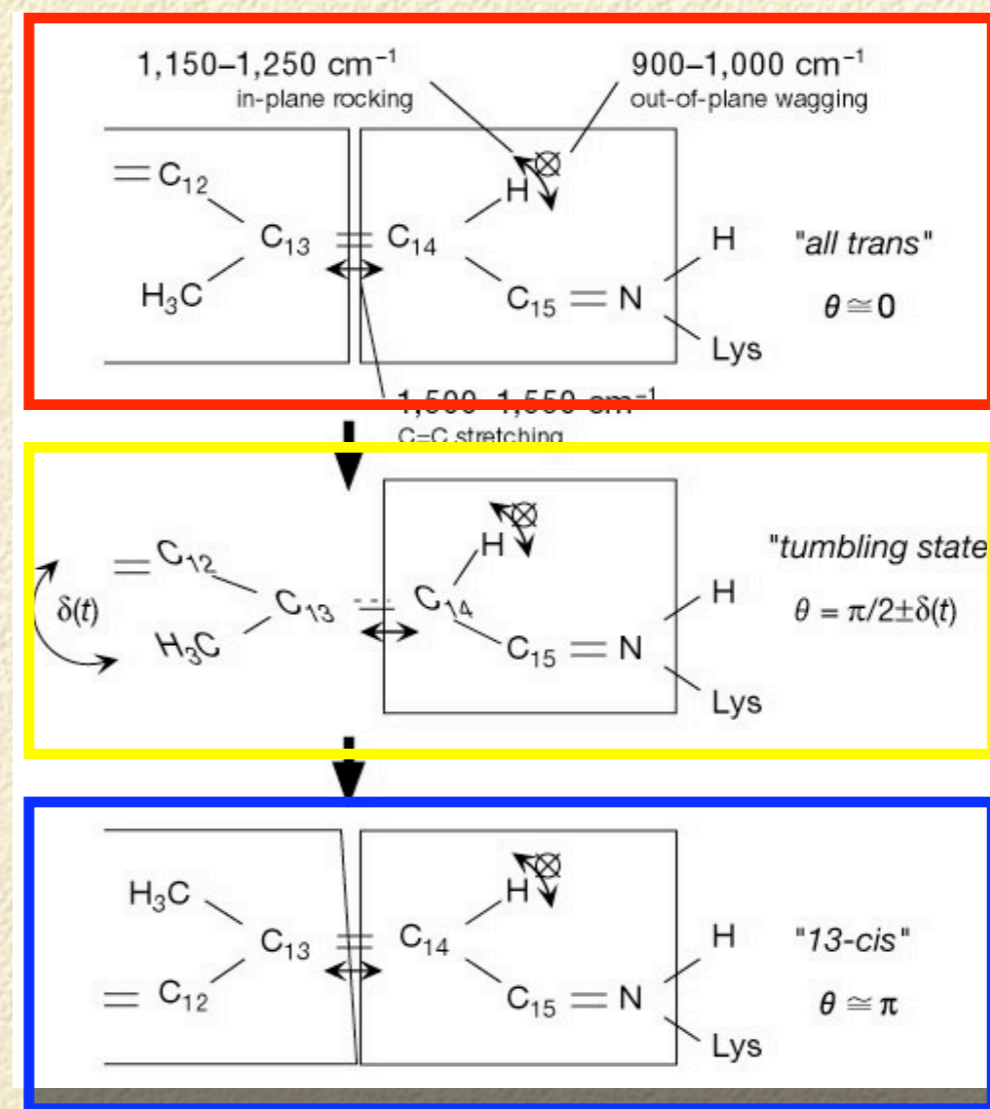
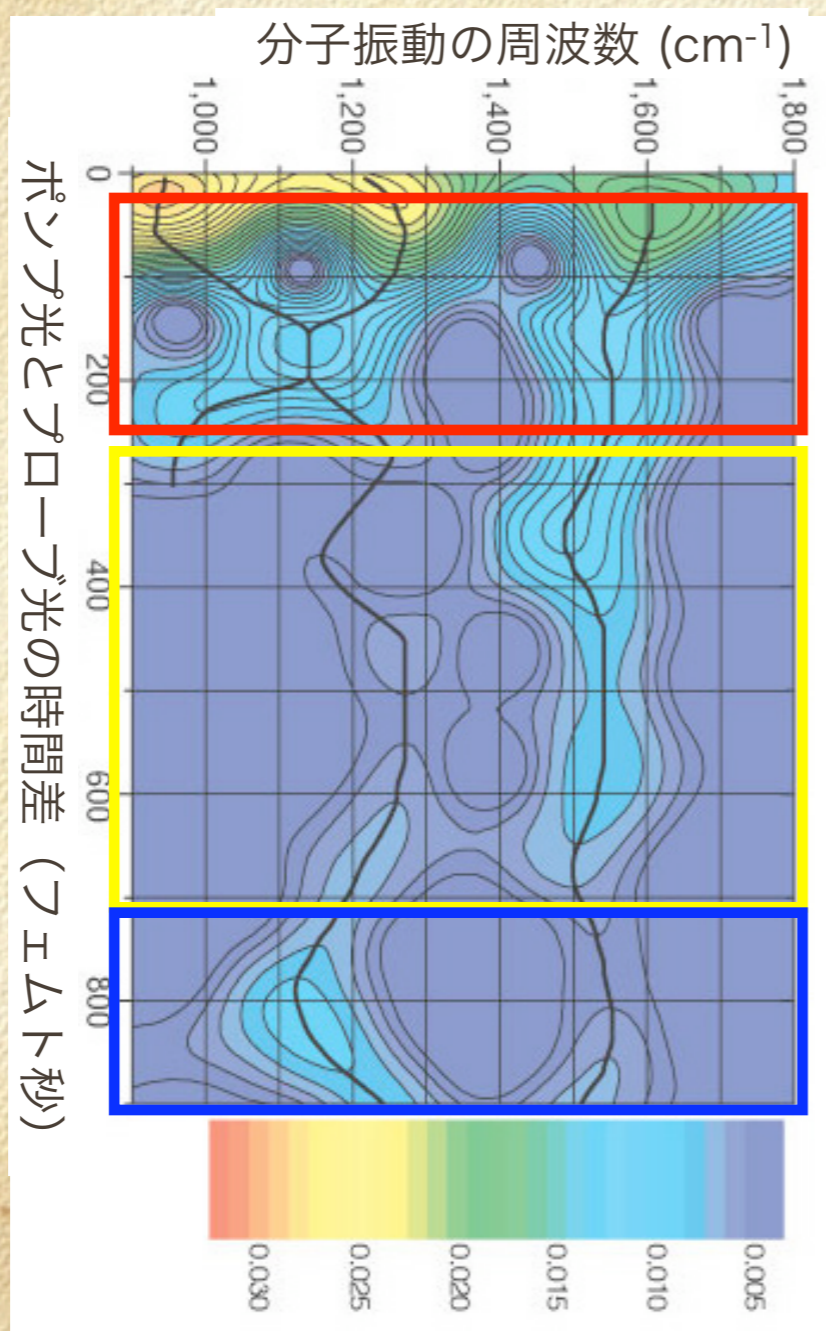


ポンプ・プローブ実験



$$T = \frac{I}{I_0}$$

ロドプシンの構造変化



超高速構造変化が見える！

フェムト化学

フェムト秒レーザーを使えば、超高速の…

● 化学反応が見える

人工網膜

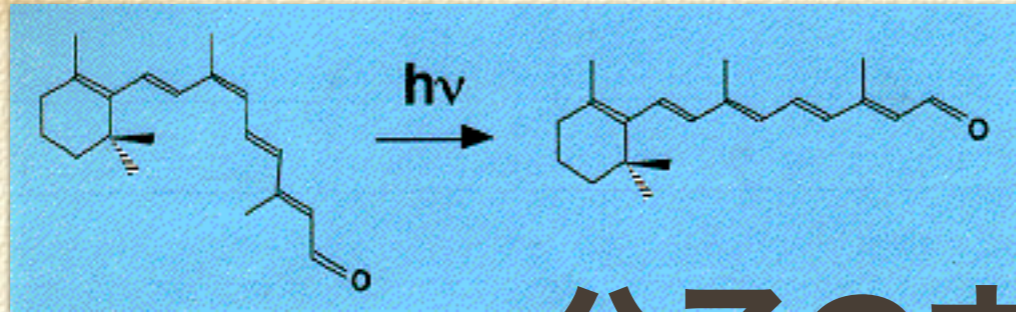
太陽電池

● タンパク質の構造変化が見える

● 化学反応を制御できる

創薬

フェムト化学



約700フェムト秒

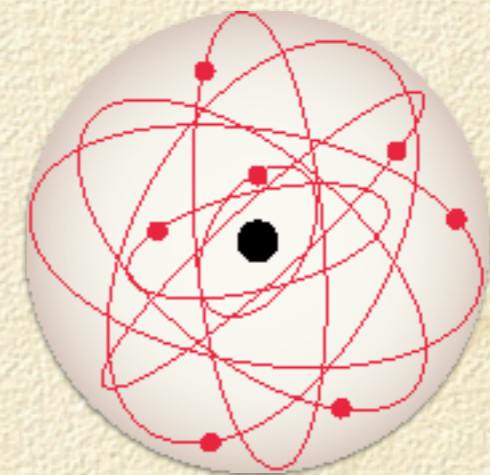
分子の中の原子の運動

原子の中の電子の運動

$$m\omega^2 r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 m r^3}{e^2}} = 152 \times 10^{-18} \text{ s} = 152 \text{ as}$$

アト秒のシャッターが必要

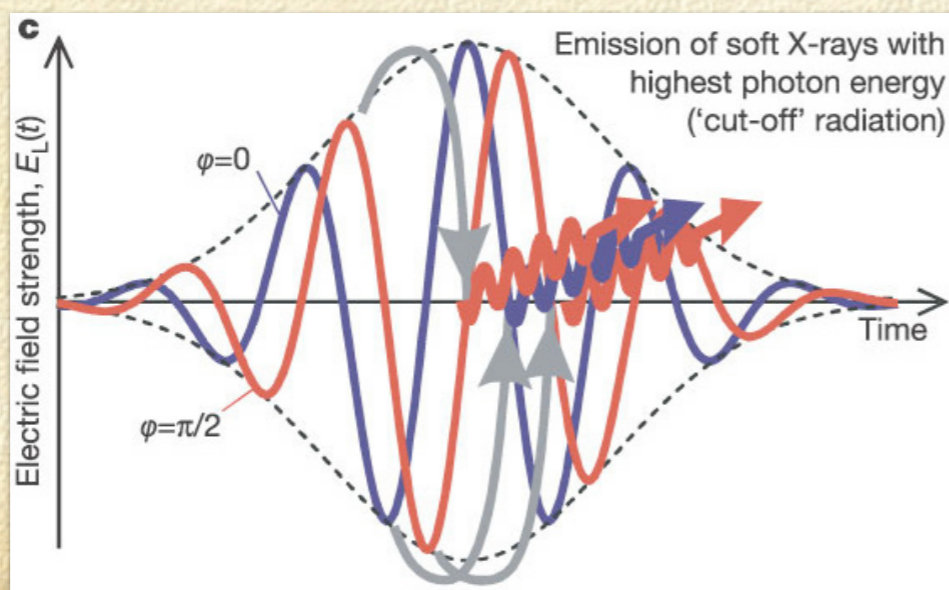


アト秒パルスはどうやって作る？

チタンサファイアレーザーの電場の1周期

(光の波長) \div (光の速度)

$$= (800 \text{ nm}) \div (3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 2.7 \text{ fs}$$



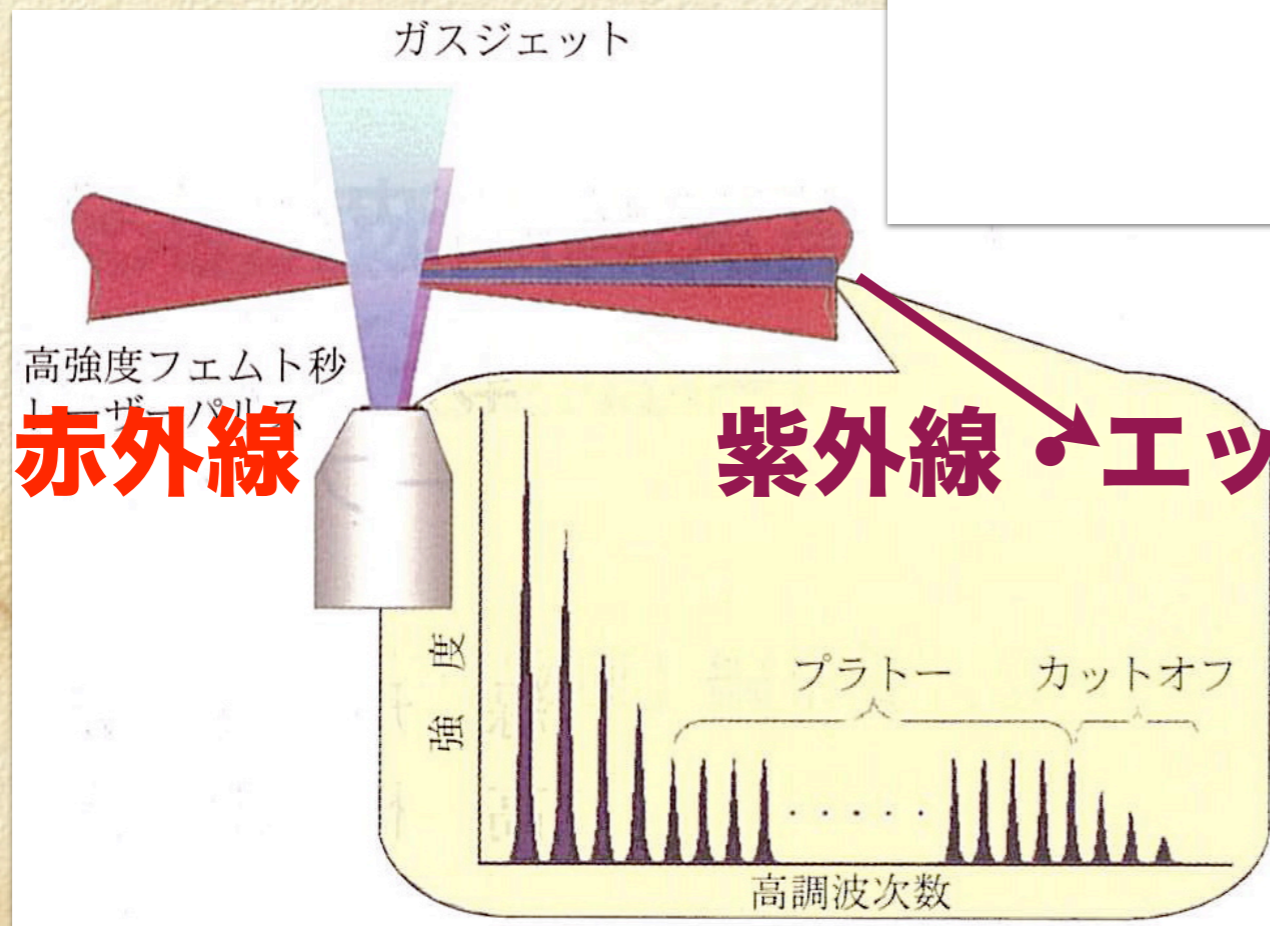
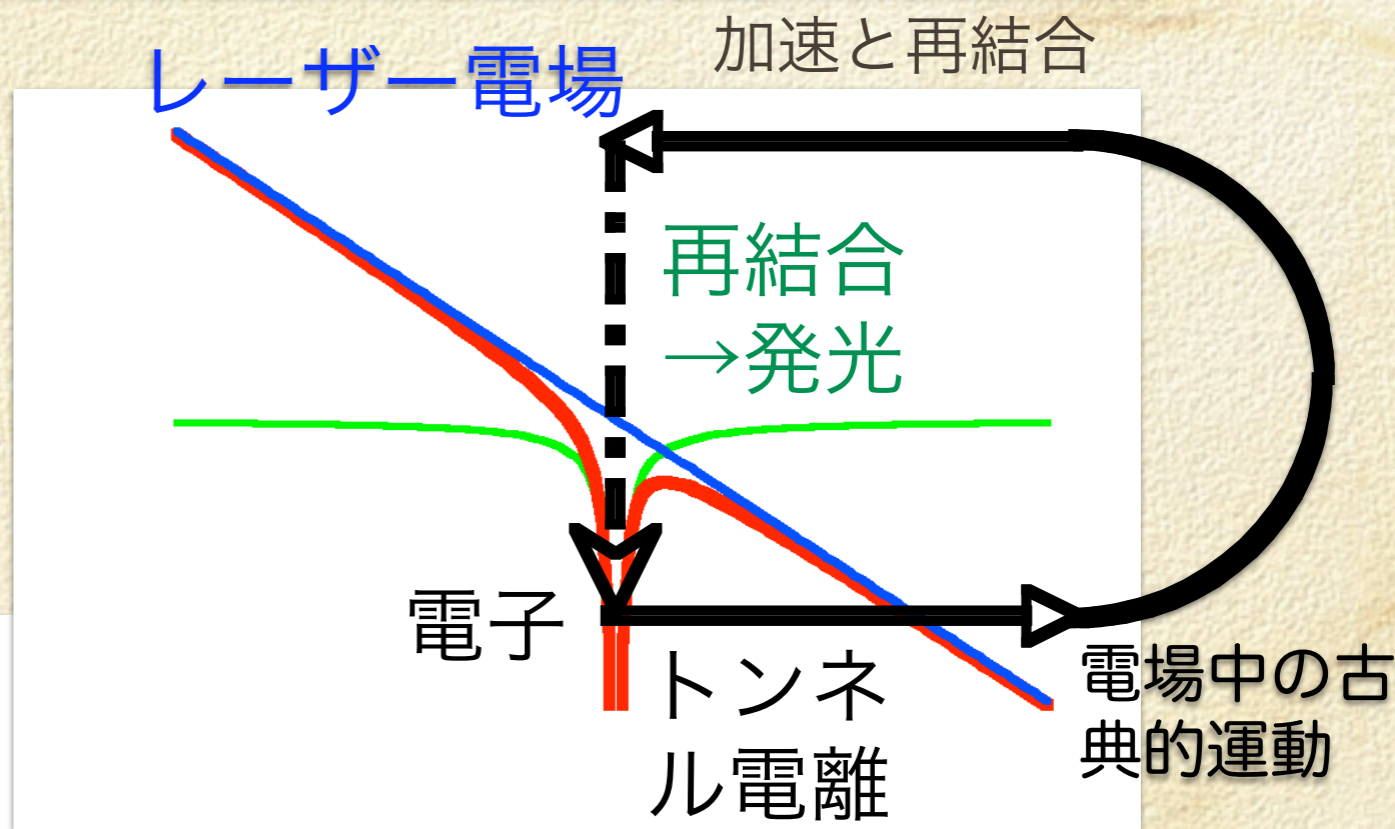
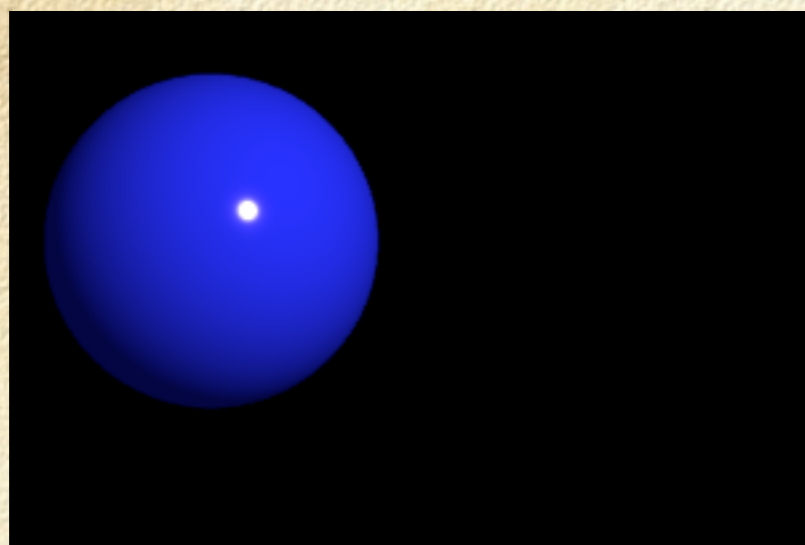
もっと波長の短い光

- 紫外線
- エックス線

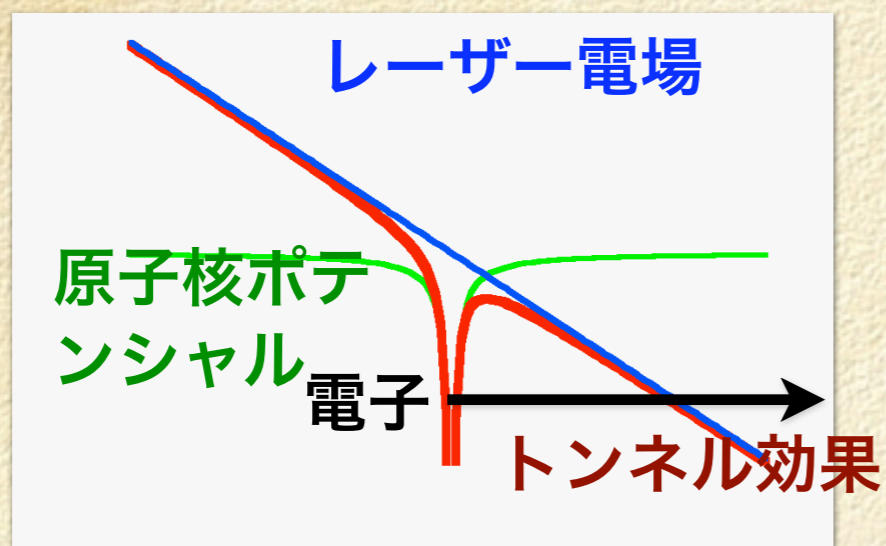
でしか作れない

高次高調波発生

波長変換

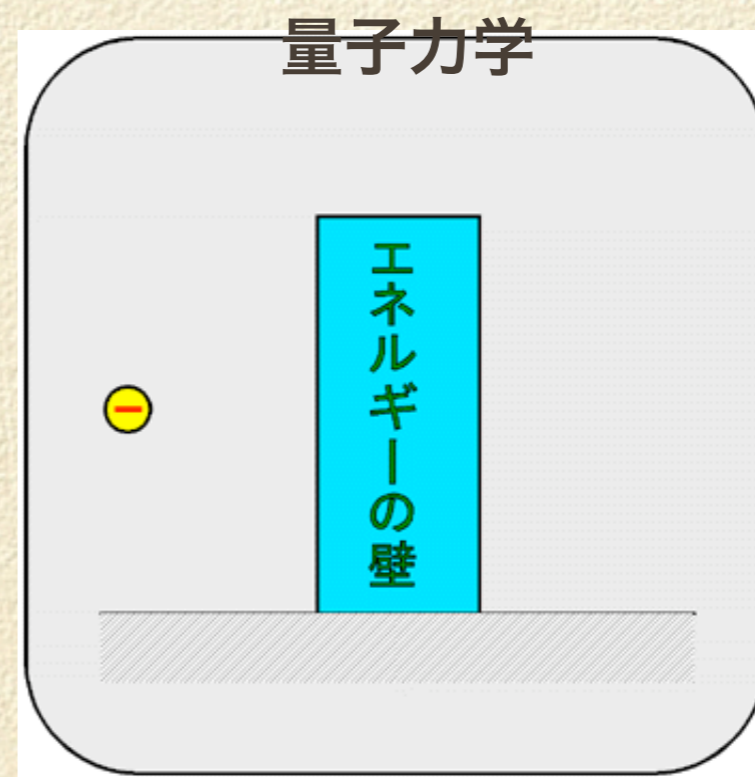
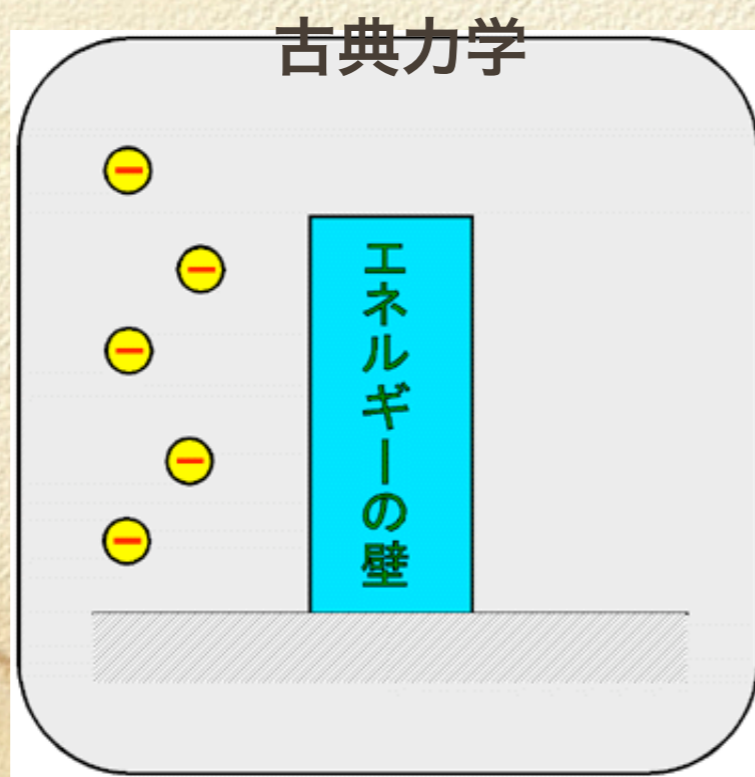


トンネル効果によるイオン化



電子は、**光子**ではなく、**電界**を感じてる！

トンネル効果とは？

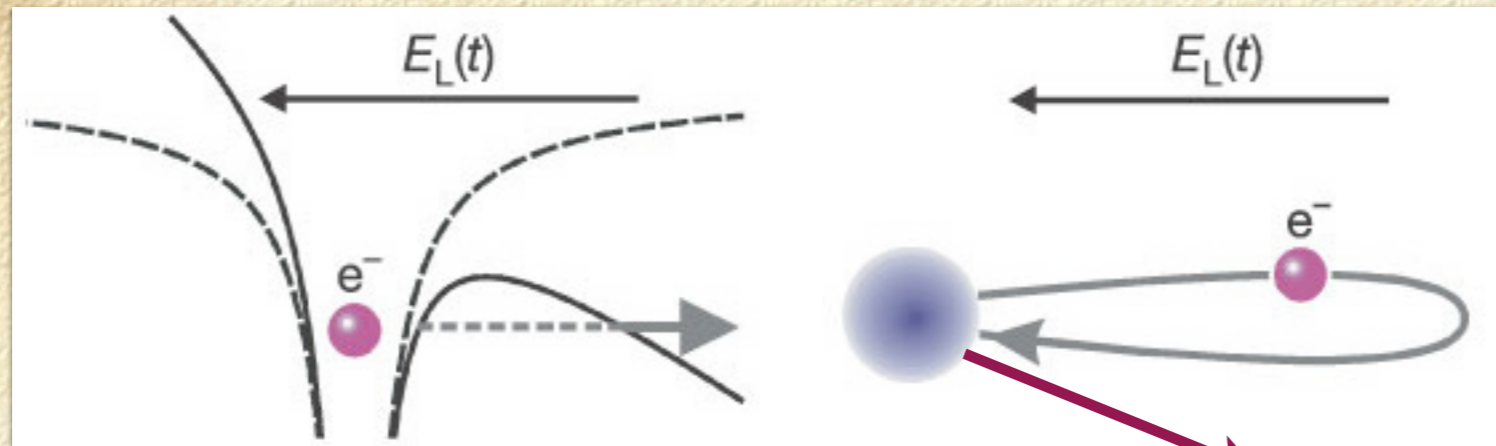


高次高調波発生→アト秒X線パルス

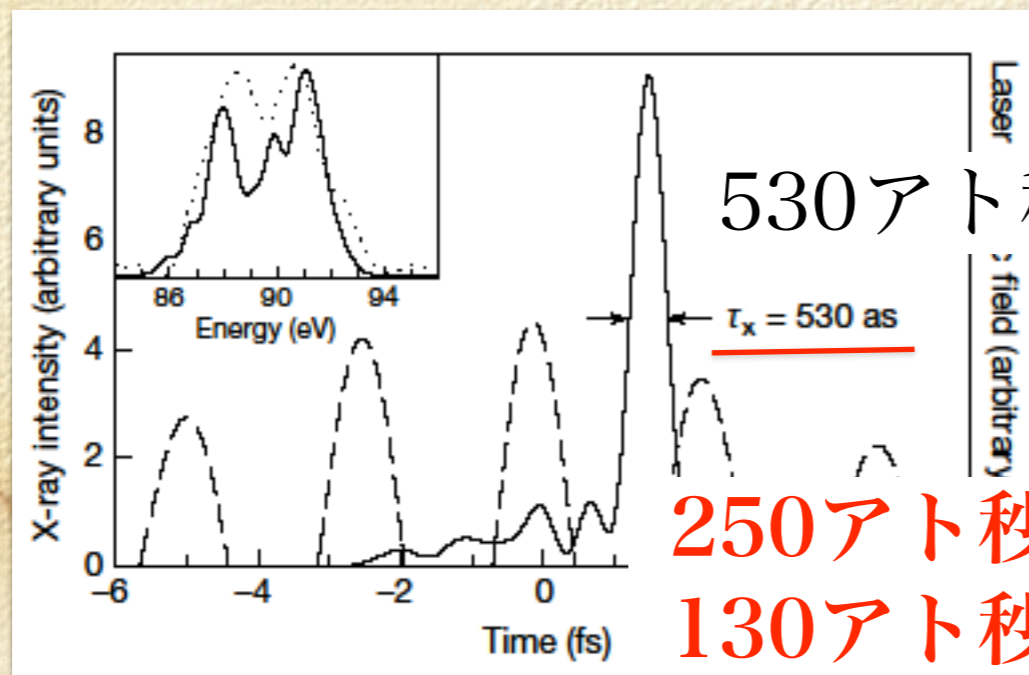
トンネル効果によるイオン化

加速と再結合

クラウド



紫外線・エックス線 (高調波)

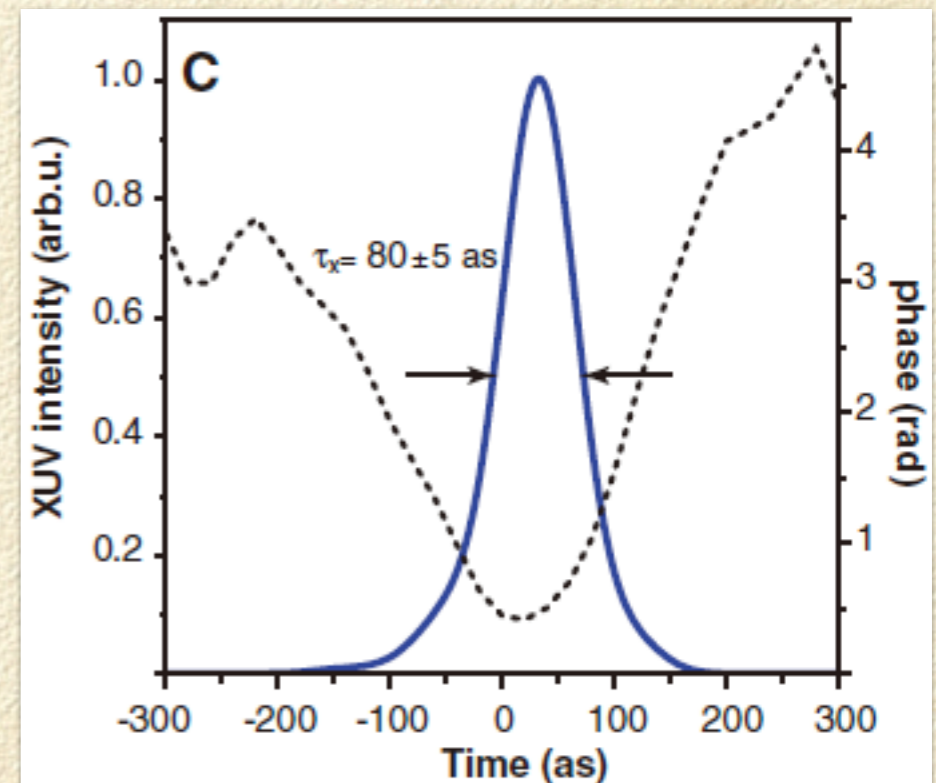


530アト秒(2001年)

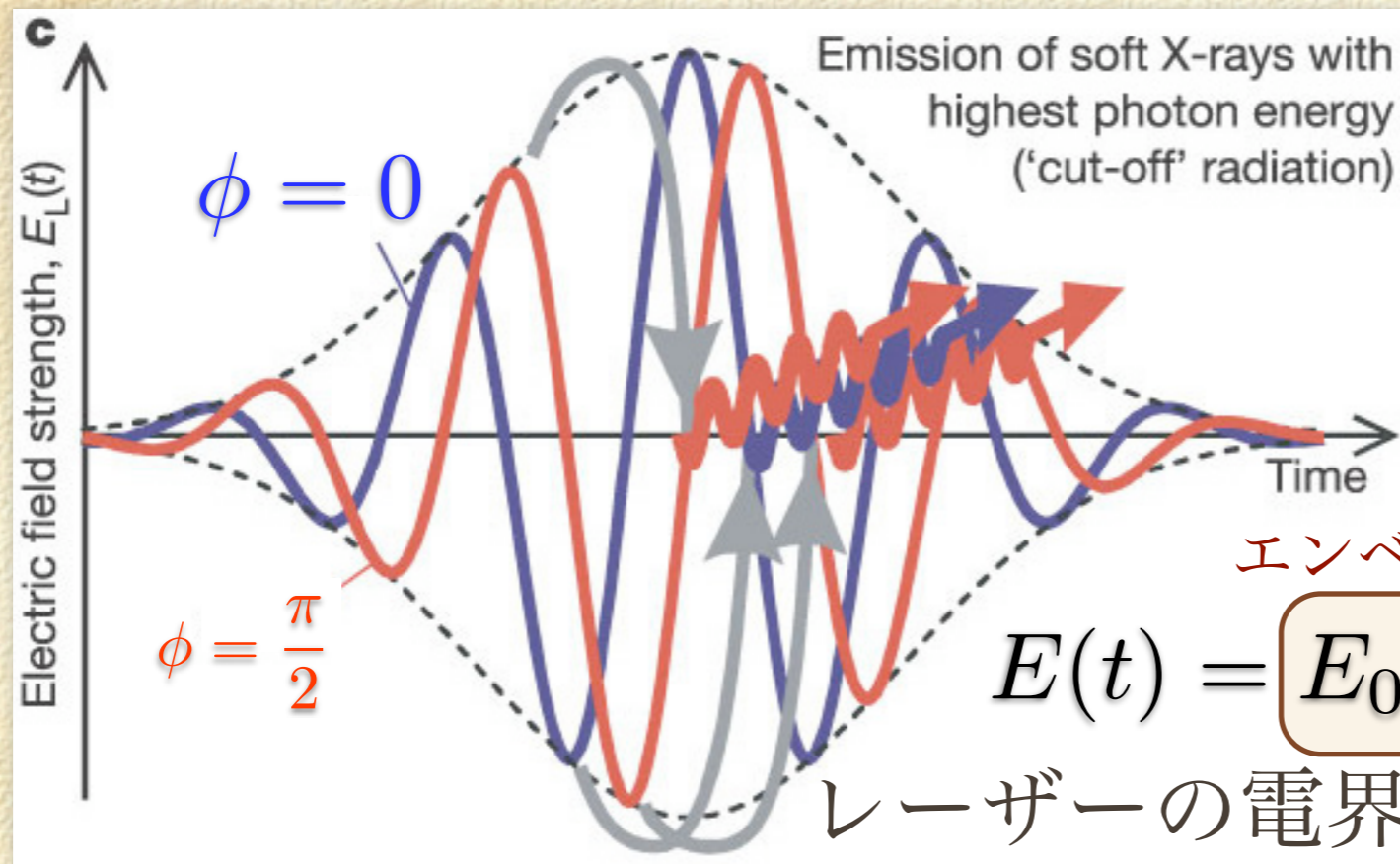
250アト秒(2004年)

130アト秒(2006年)

80アト秒(2008年)



アト秒パルスの発生には



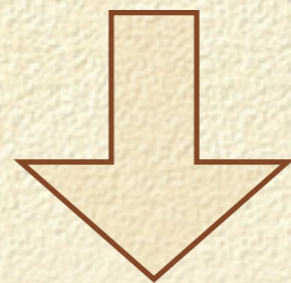
エンベロープ
キャリアエンベロープ位相

$$E(t) = E_0(t) \cos(\omega t + \phi)$$

- 超短パルスレーザー（5フェムト秒以下）が必要
- レーザーの電界のキャリアエンベロープ位相を制御しなければならない。

アト秒パルスの発生には

キャリアエンベロープ位相の制御



高度な光周波数コム技術

テオドール・ヘンシュ
2005年ノーベル物理学賞

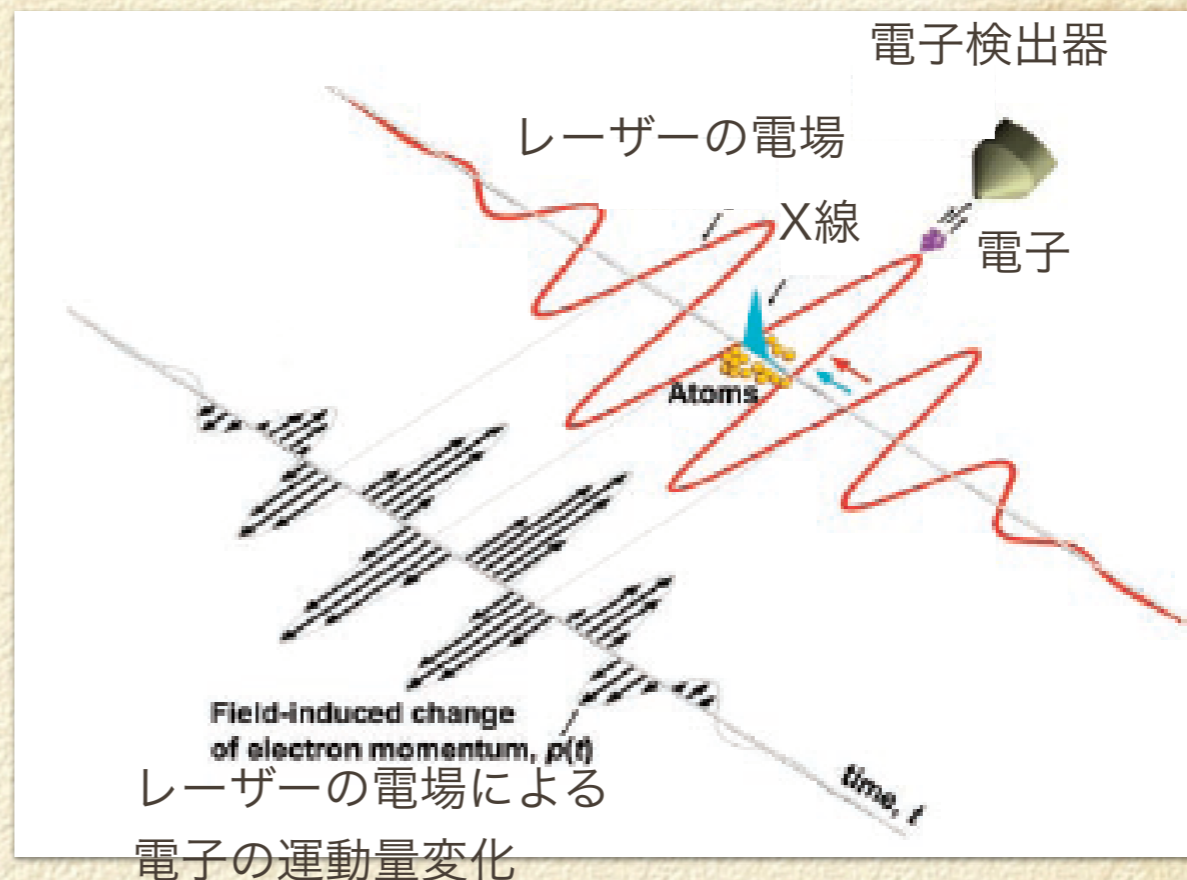
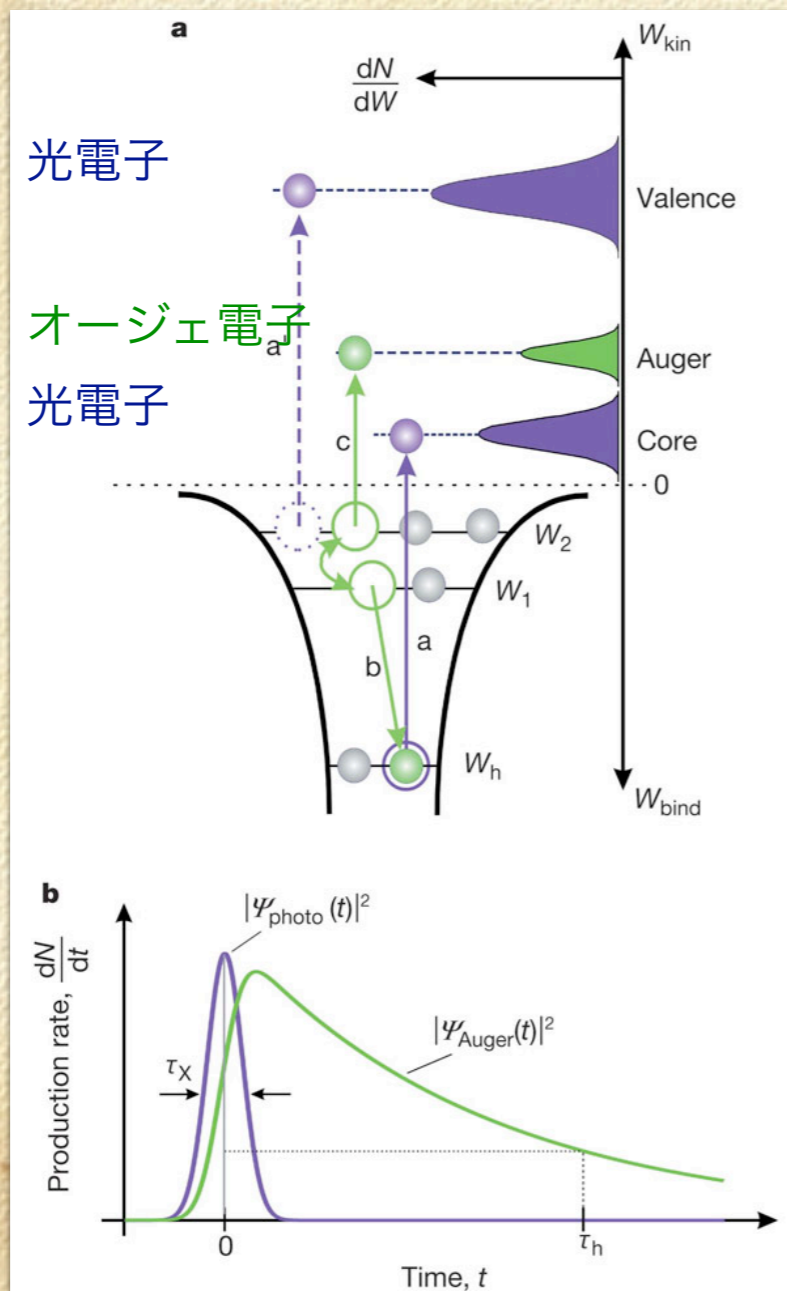


アト秒パルスで…

- 原子の中を電子が動き回るのが見える？
- 光の波が見える！
- トンネル効果によるイオン化が見える！

原子内の電子の運動が見える？

オージェ効果



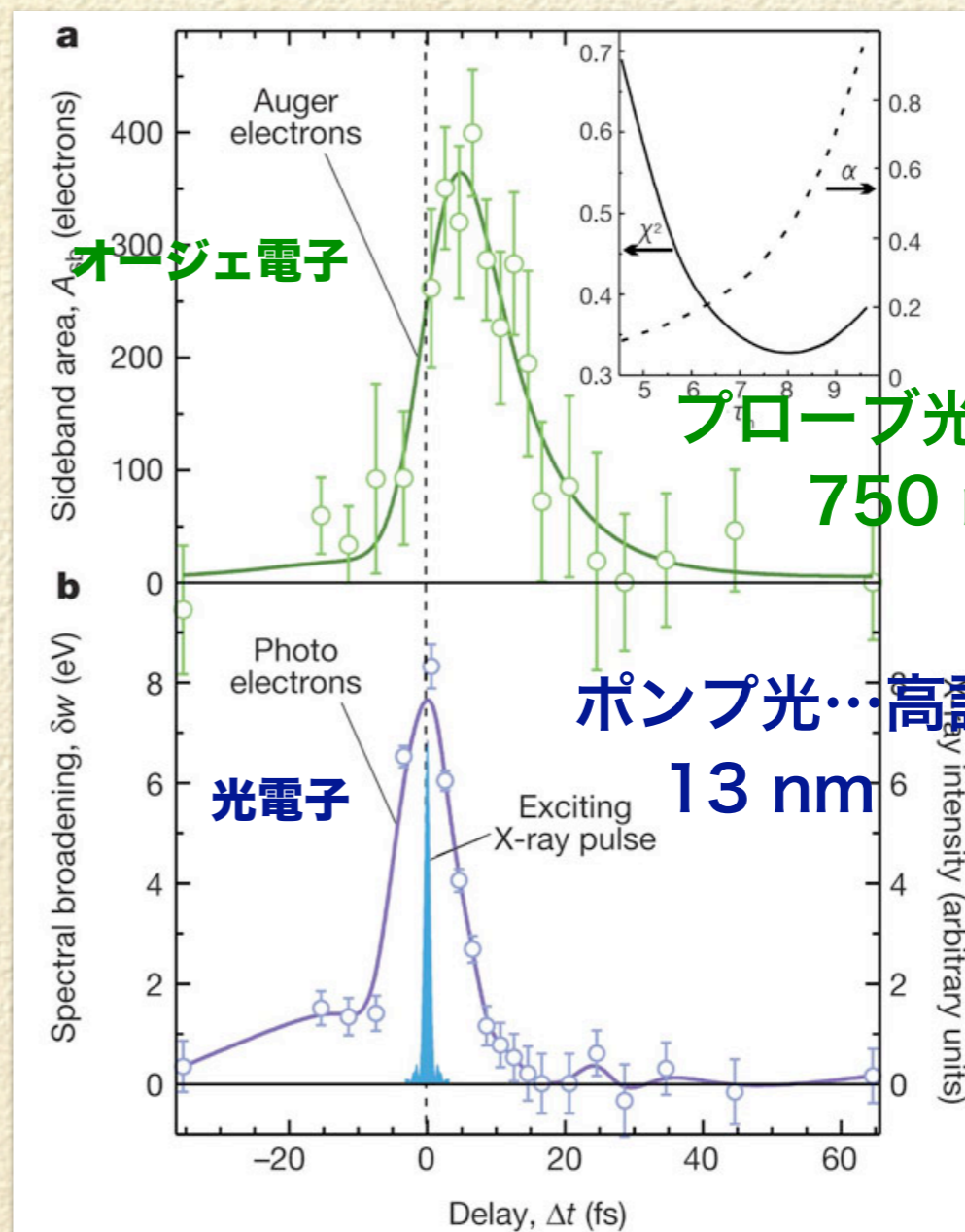
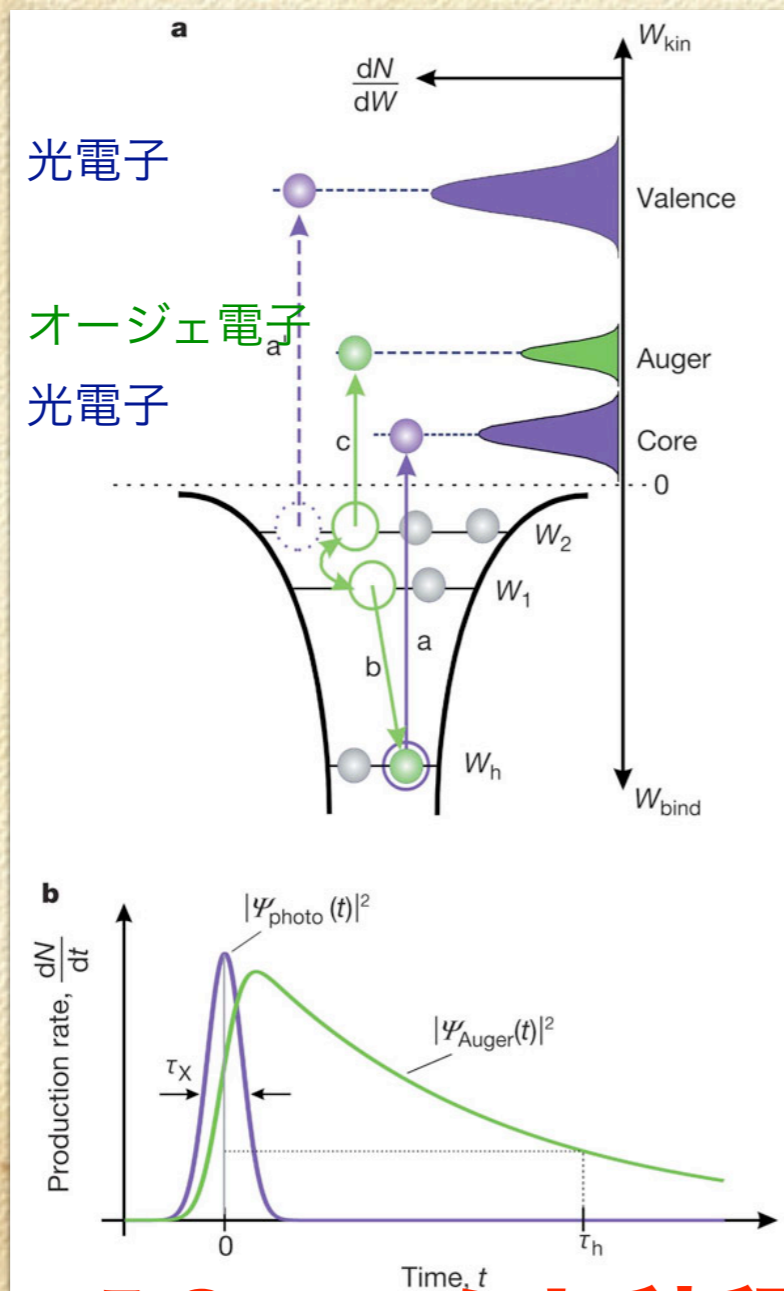
$$\frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} = -e \mathbf{E}_L(t)$$

$$\Rightarrow \Delta p = -e \int_t^{\infty} E_L(t') dt'$$

運動量から、オージェ電子の放出された時刻が分かる。

原子内の電子の運動が見える？

オージェ効果



オージェ電子

プローブ光…レーザー
750 nm

ポンプ光…高調波
13 nm

10フェムト秒程度の超高速過程が見える！

マクスウェル

光は電磁波である



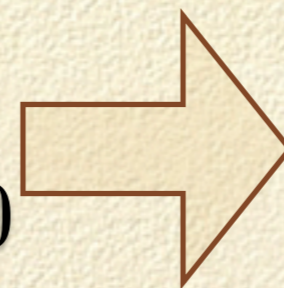
マクスウェル方程式

1864年 $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ 真空中で

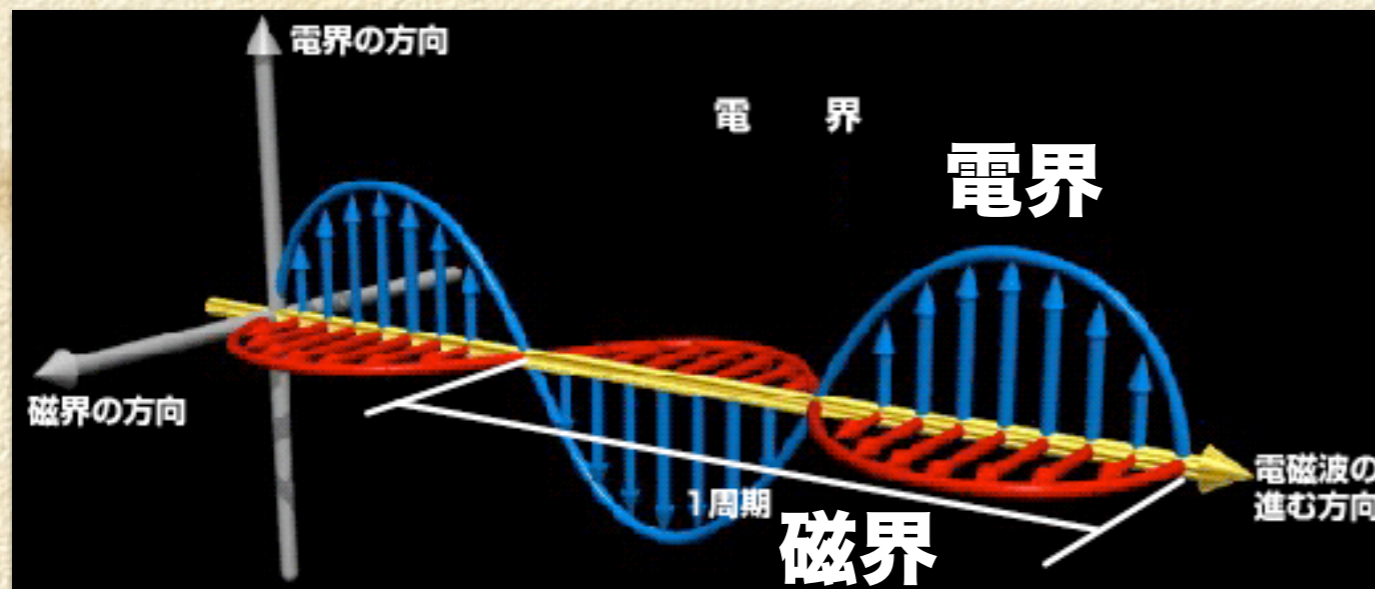
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$



$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{E} = 0$$

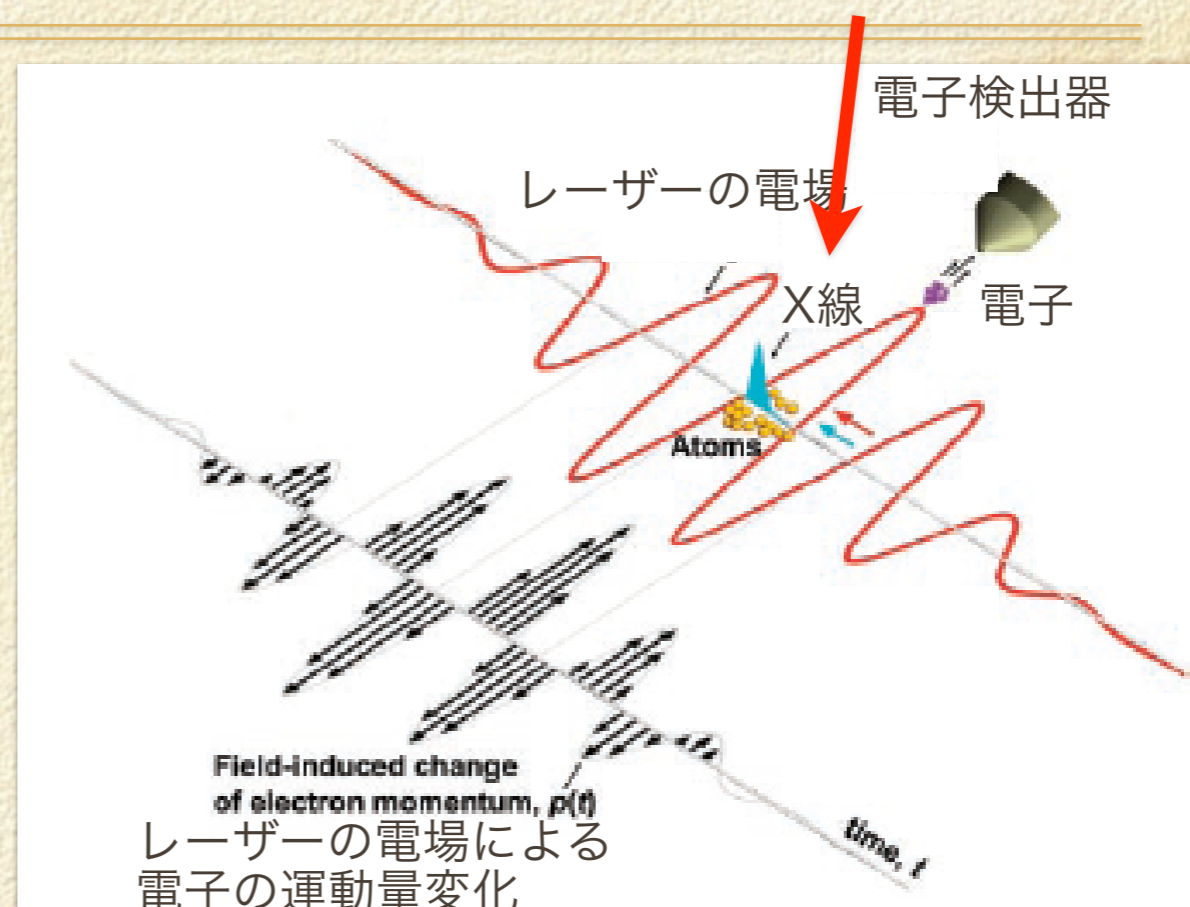
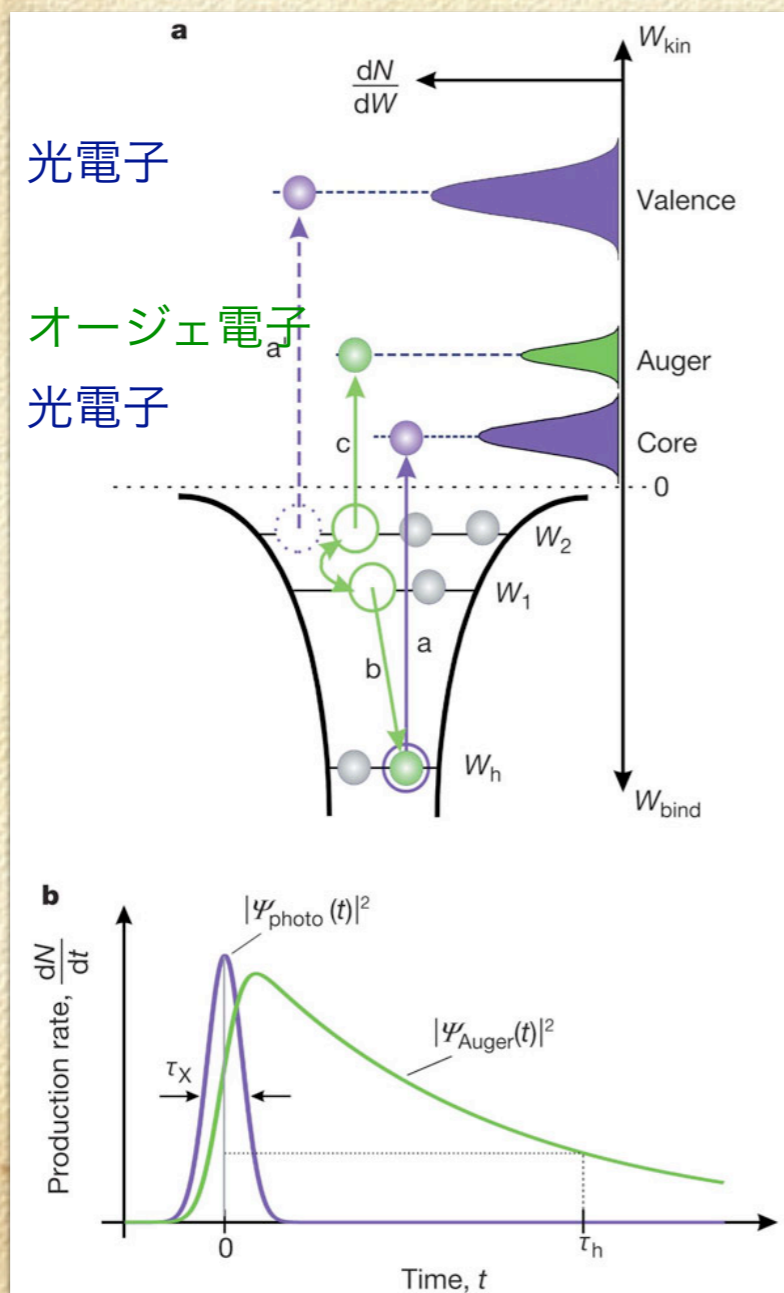


しかし、誰も光の電界
が波打ってるのを見た
ことがなかった…

波打ってこそ波

光の波が直接見える！ アト秒のストロボ

光電効果

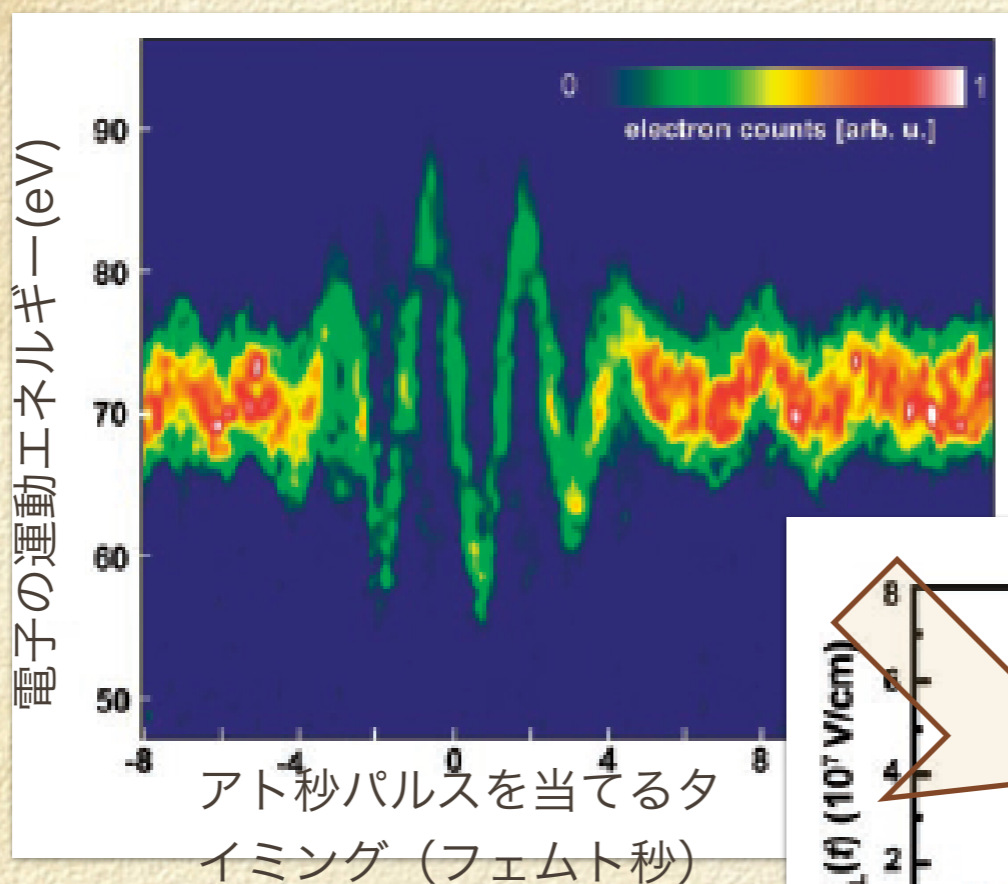


$$\Delta p = -e \int_t^{\infty} E_L(t') dt'$$

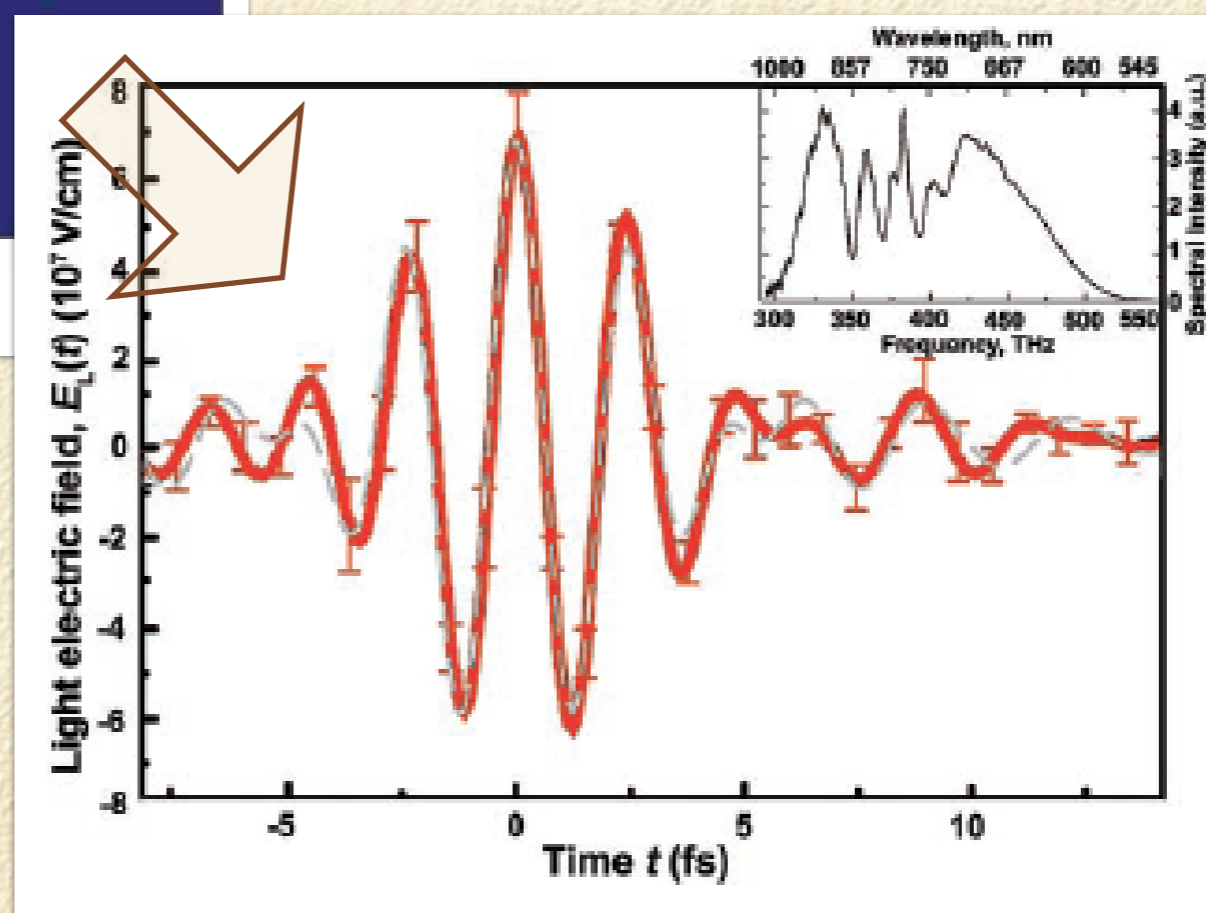
アト秒X線を当てるタイミングを変えながら、光電子の運動量を測定
X線が当たった瞬間のレーザー電場
が分かる

光の波が直接見える！

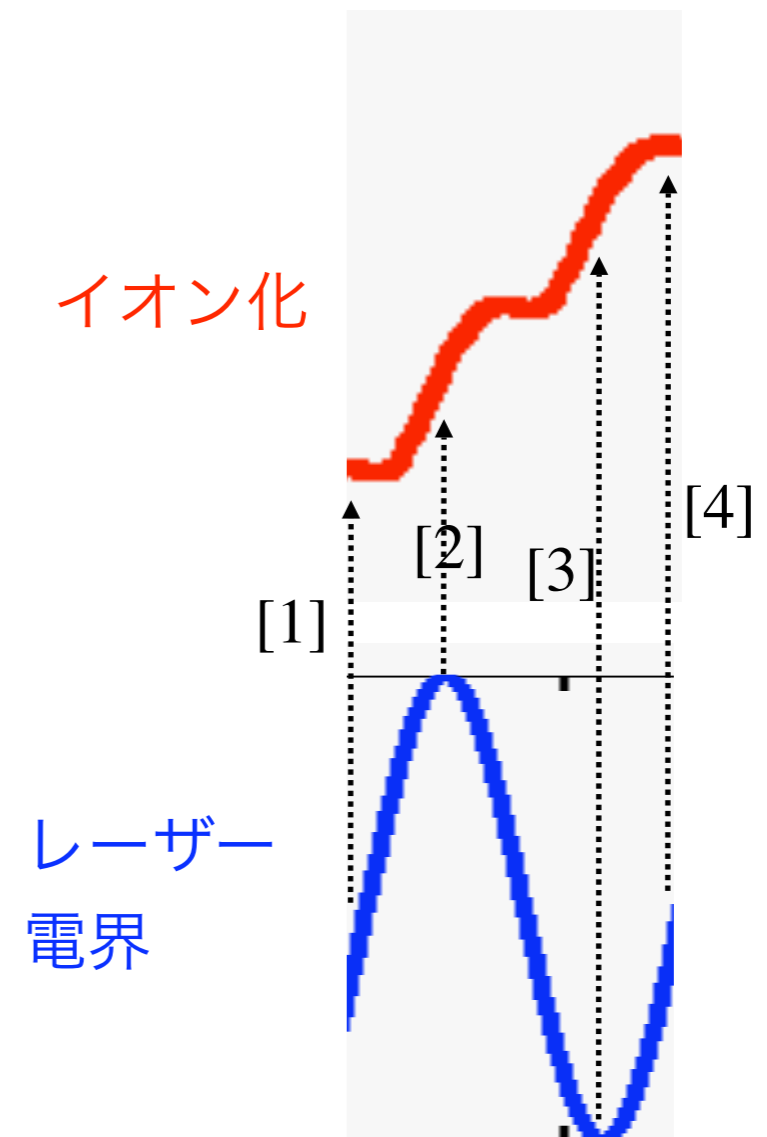
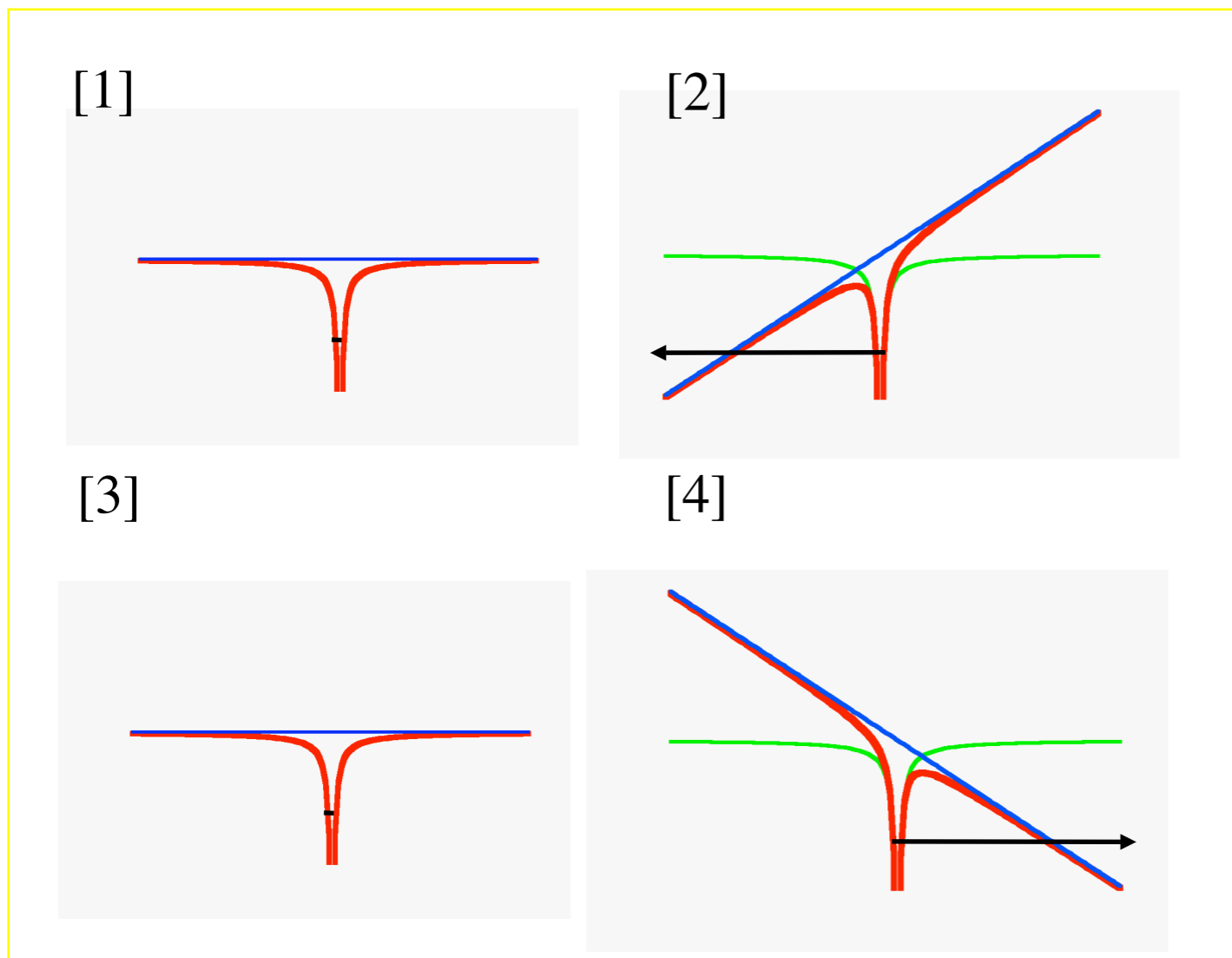
アト秒パルスの波長=13nm



光が波打つ様子を、200
アト秒きざみで観測！



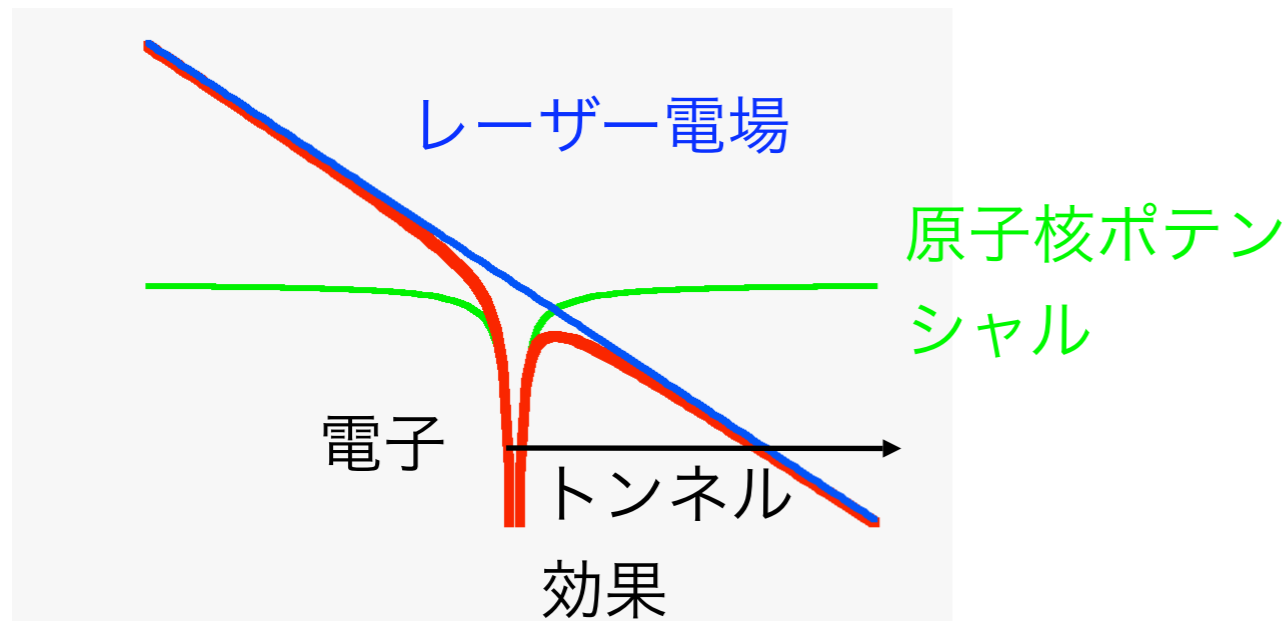
トンネル効果によるイオン化が見える



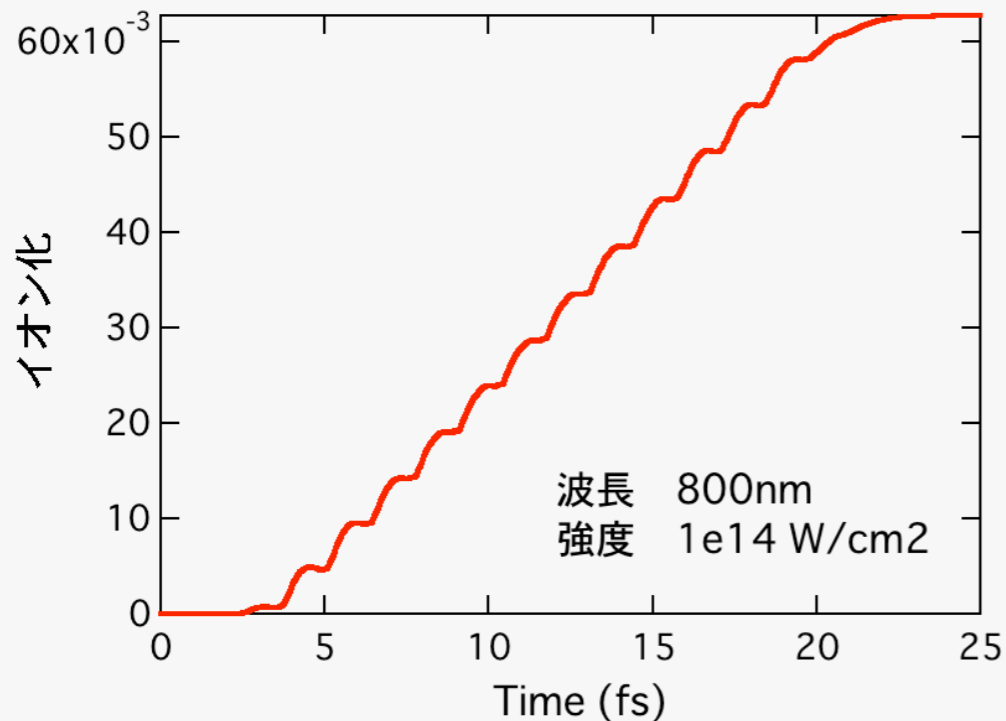
1 サイクル中で電界の値が大きい瞬間にのみイオン化が起こる。

cf. 一光子電離 (連続的にイオン化する)

トンネル効果によるイオン化が見える

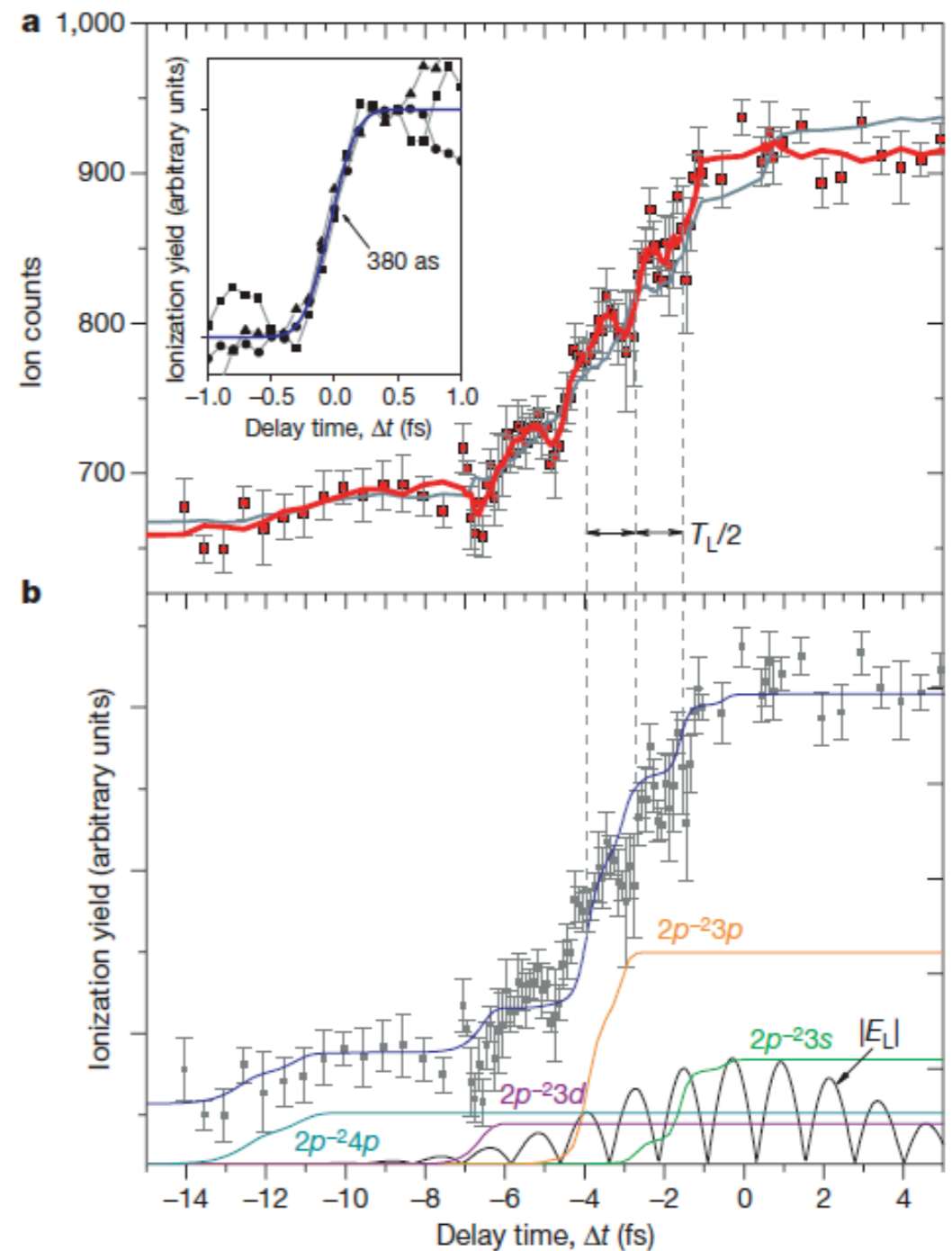


コンピューターシミュレーション



予想：階段状にイオン化が起こる

実験 (2007年)

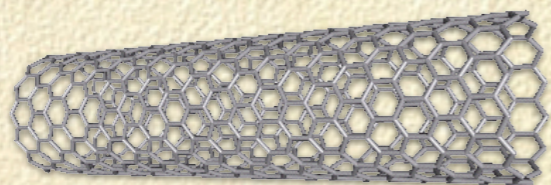


アト秒科学 21世紀生まれの新しい科学

アト秒パルスを使えば、

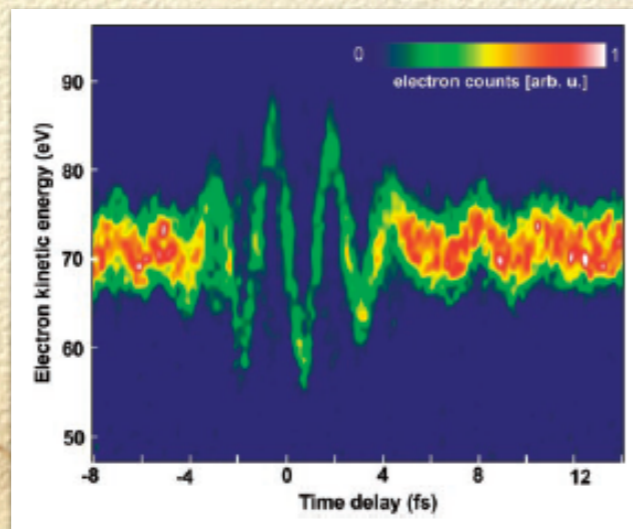
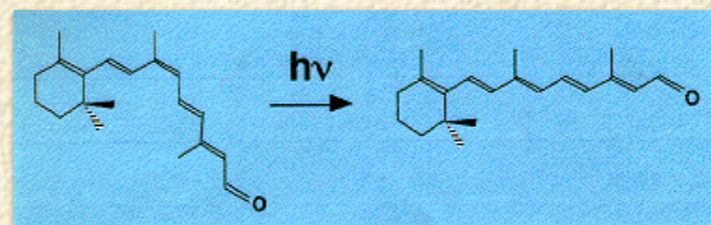
- 原子・分子の中の電子の動きが見える
- 光の電界が波打つ様子が見える
- 原子から電子が飛び出す様子が見える
- 化学反応の瞬間の電子の動きが見える？

アト秒科学の時代へ...



ナノテクノロジー

フェムト化学



アト秒科学

興味・質問のある人は…

石川顕一

ウェブ <http://ishiken.free.fr>

メール ishiken@q.t.u-tokyo.ac.jp