

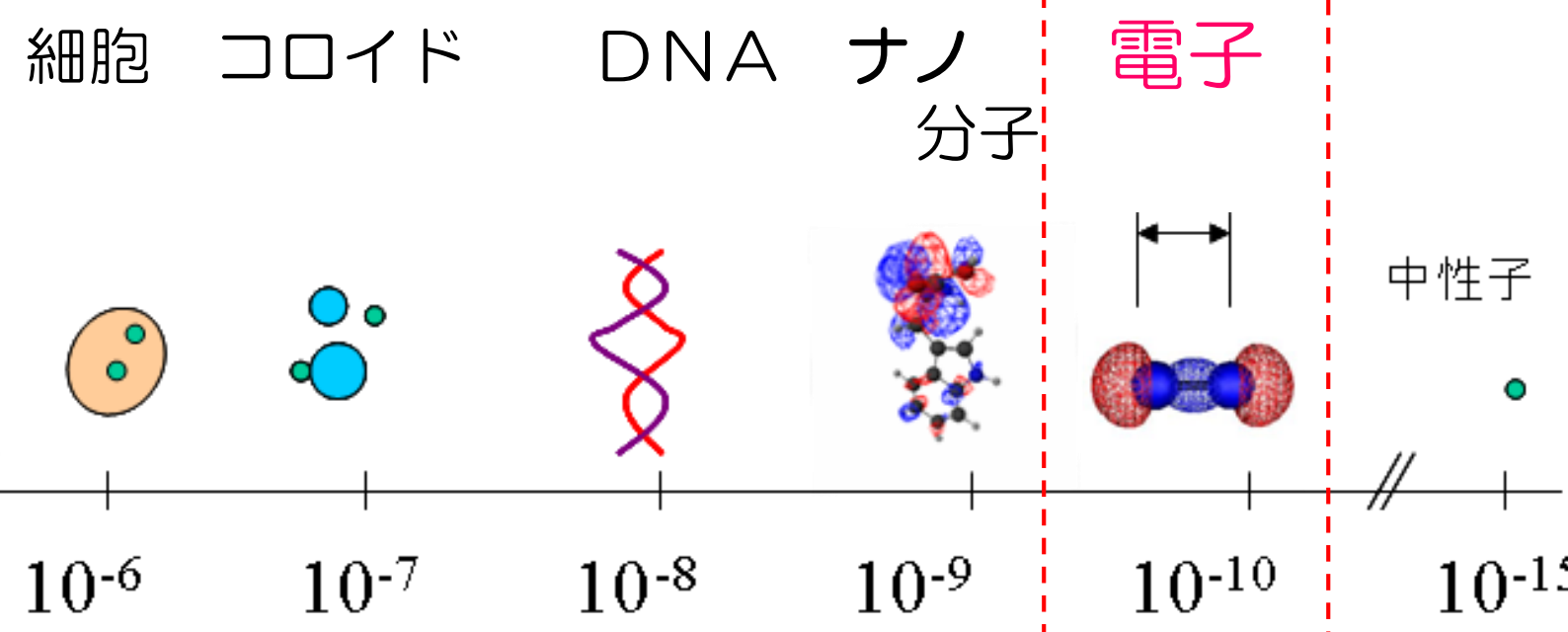
アト秒・超高速分光研究 *Attosecond & Ultra-fast spectroscopy*



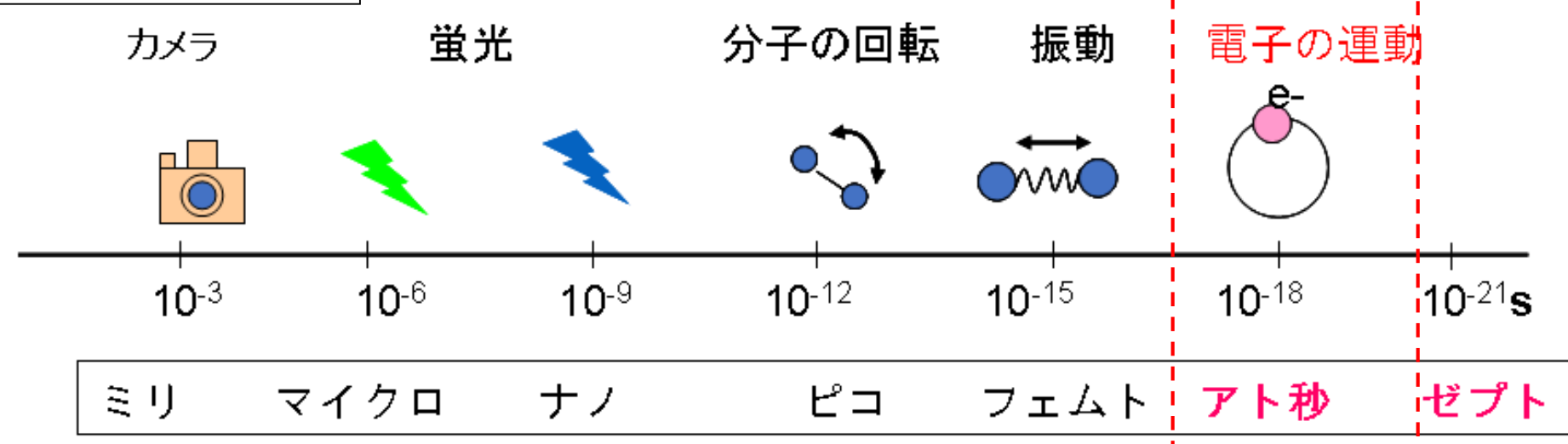
from femto-to-atto clock

大きさのスケール

原子・分子・固体
(物質)の中に電子はある。

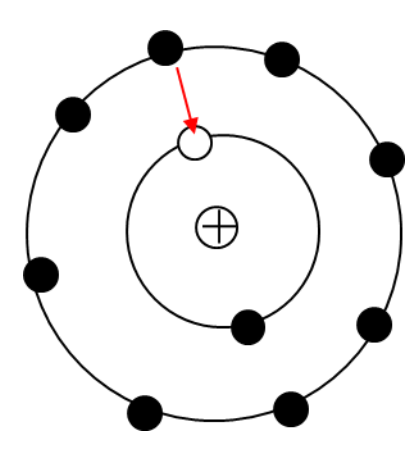


時間のスケール



電子のモデル(原子・分子中)

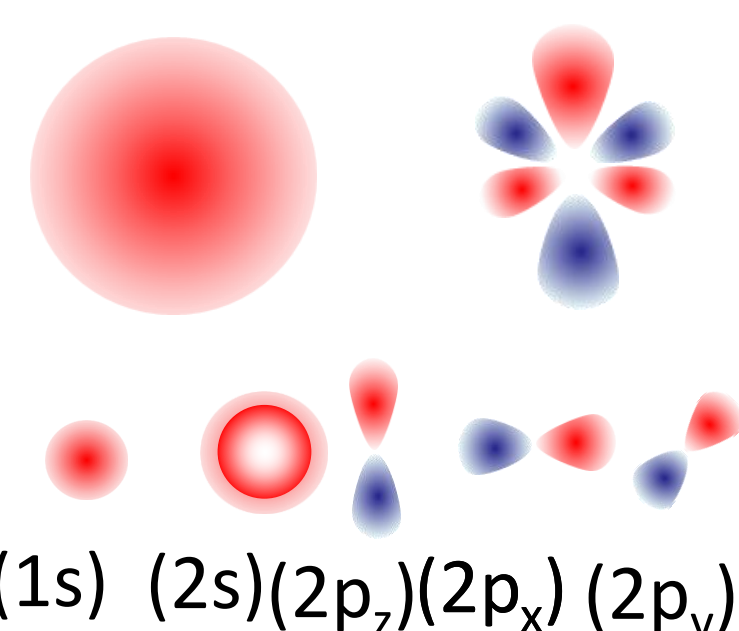
ボーアモデル (1913)



原子核のまわりを
電子がぐるぐる回る

波動関数 Ψ によるモデル

Schrödinger (1925)



(1s) (2s) (2p_x) (2p_y)
“原子軌道”に電子が二つずつ入る。

電子という粒がぐるぐる回るというモデルではなく、電子が分布しているというモデルで表す。どのように分布しているかは、**波動関数 Ψ** で表現される。

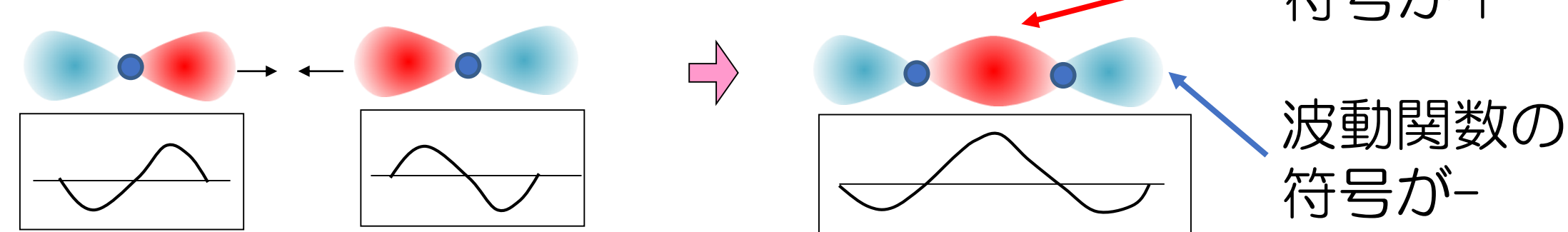
Max Born の確率解釈(1925) :

波動関数の自乗 $|\Psi|^2$ は電子が存在する確率を表す。

電子は”位相”を持つ。

化学反応における電子の位相の重要性

(A) 同じ位相



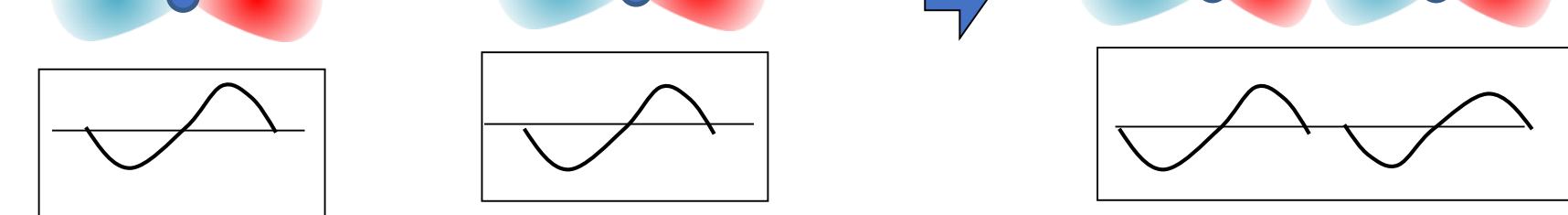
結合する!!

波動関数の
符号が+

波動関数の
符号が-

波の出っ張っている部分同士が**強め合う**

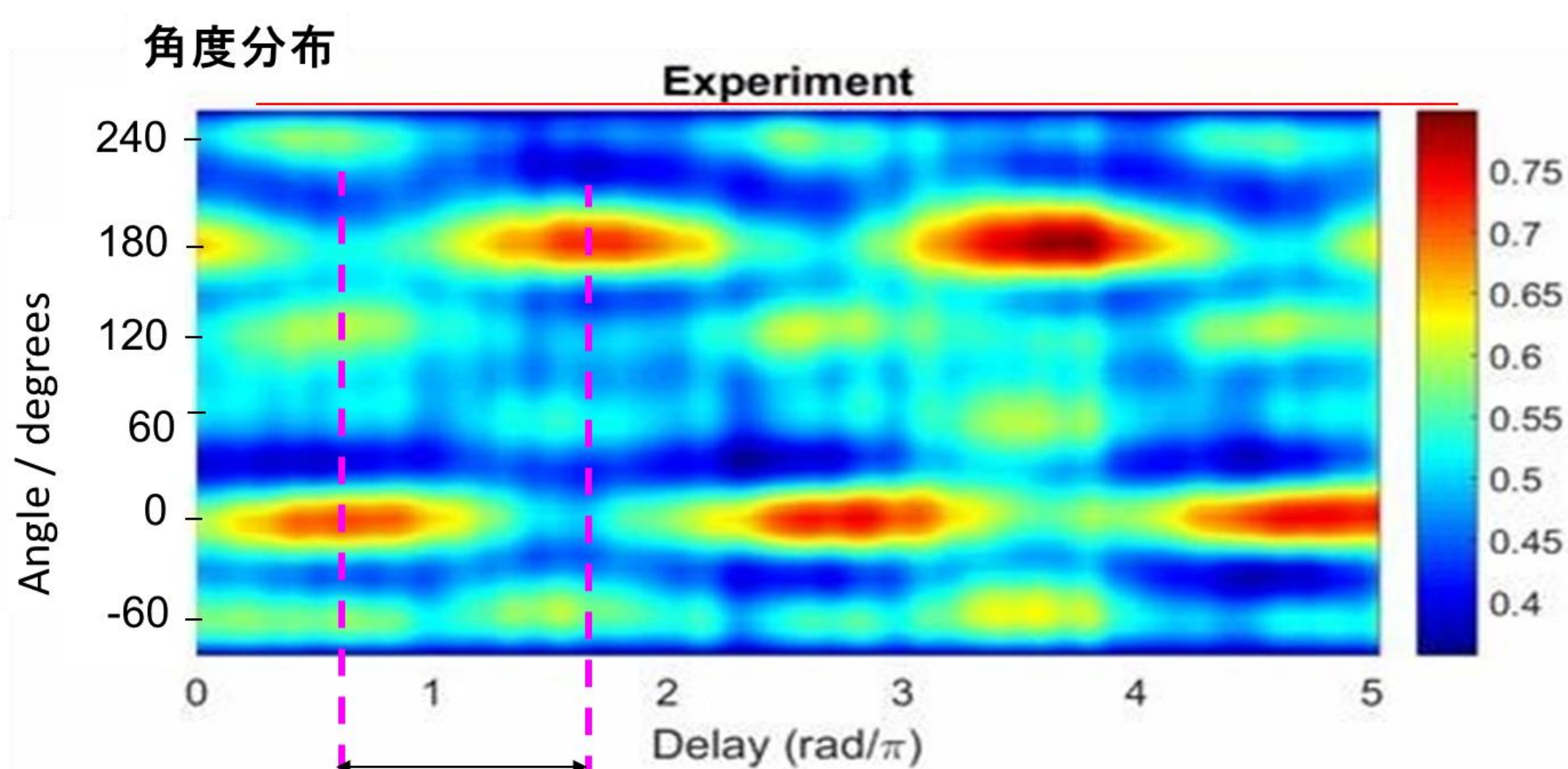
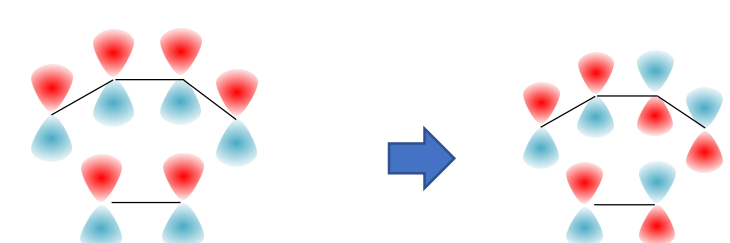
(B) 違う位相



結合しない

波の出っ張っている部分とへこんでいる部分が**打ち消し合う**

ウッドワード・ホフマン則
フロンティア軌道理論
(福井謙一博士: ノーベル化学賞1981)

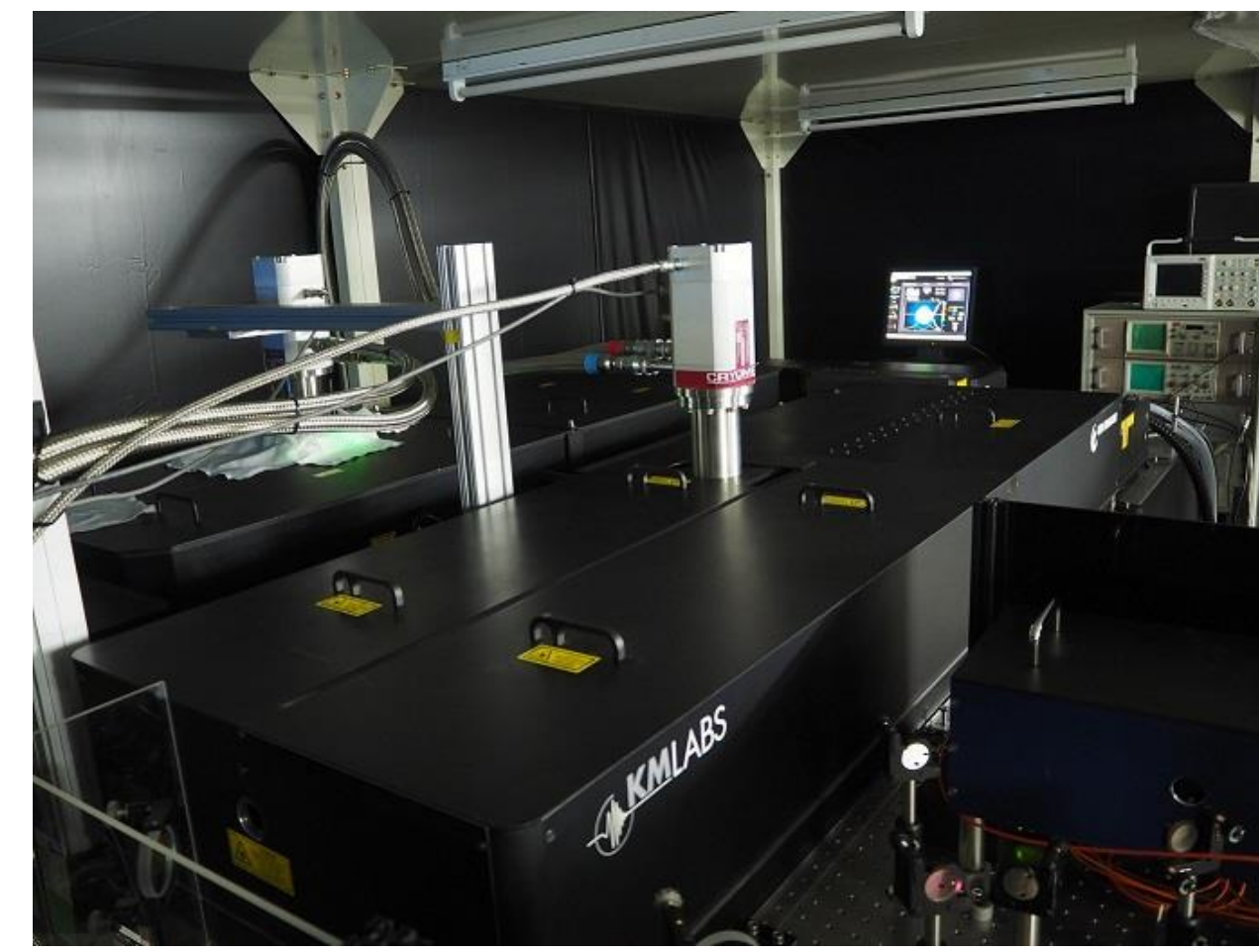


反対方向に放出された電子は、 π だけずれた位相を持つことの実験的証明。

実はほかの角度で放出された電子も、すこし位相がずれている。

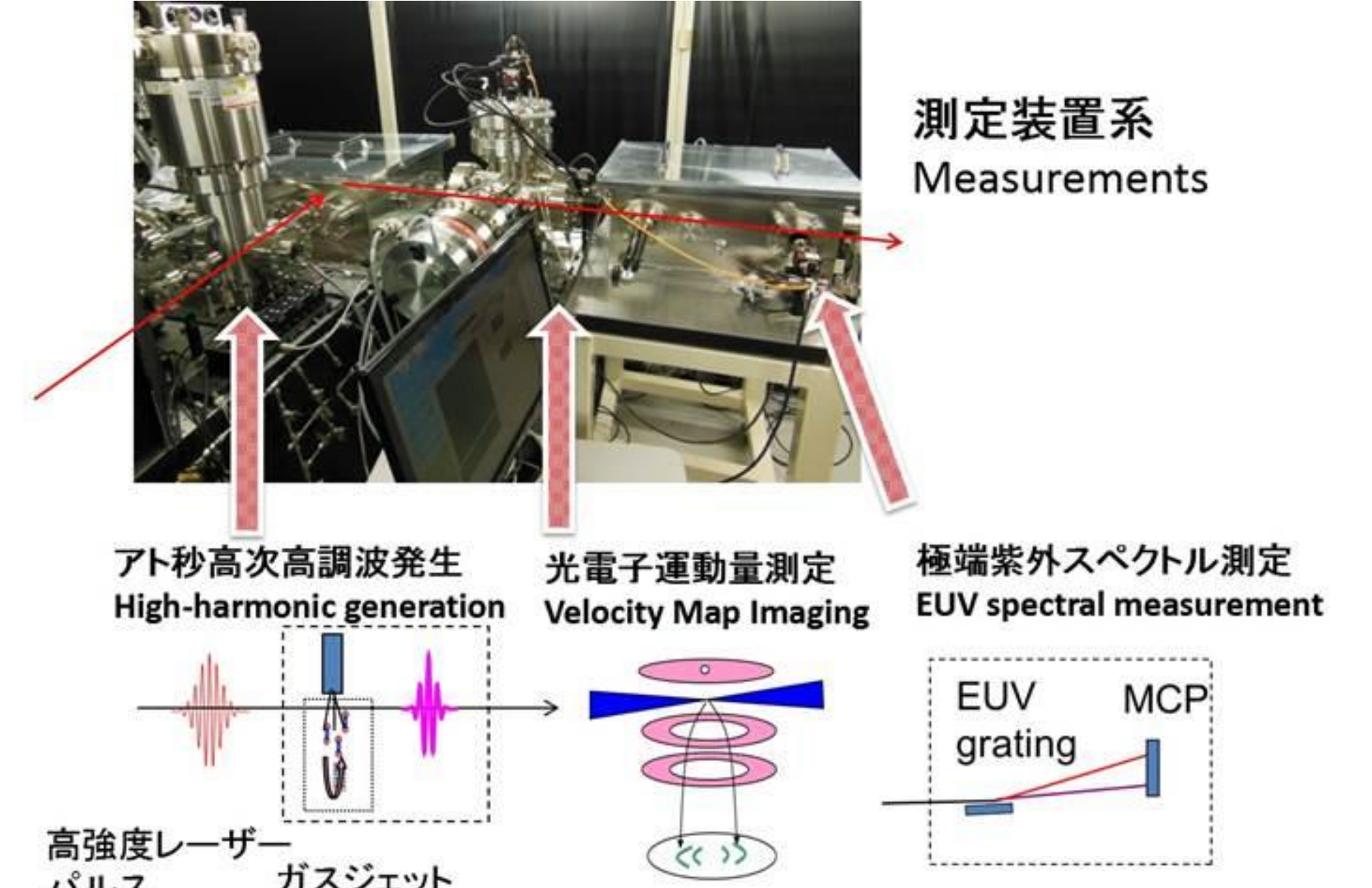
アト秒の科学

- ・アト秒科学・・・電子の姿とその変化を見る。極端紫外～軟X線領域でおこる超高速の現象を測定可能。
- ・2000年ころからアト秒科学が進展。物質科学の基盤。
- ・アト秒レーザーパルス (高次高調波) ・アト秒再衝突電子



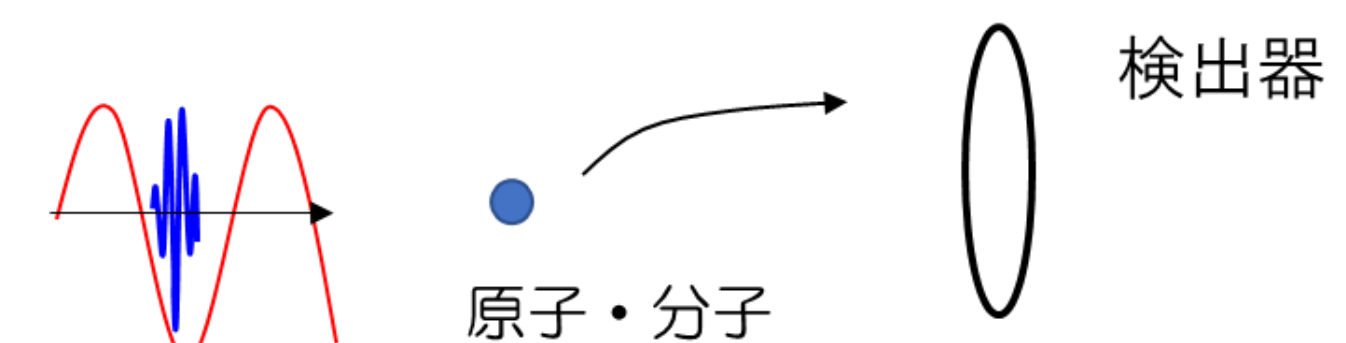
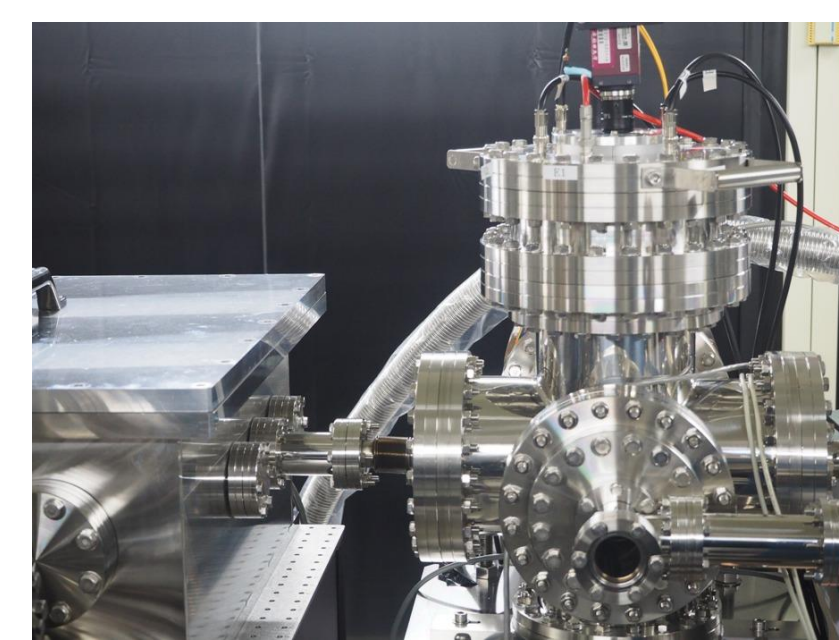
ハイパワーレーザー(7.5~10.5mJ/pulse, 1KHz, 35fs, 790nm)
キャリアエンベロープ位相安定化

51号館B1-19 新倉研究室

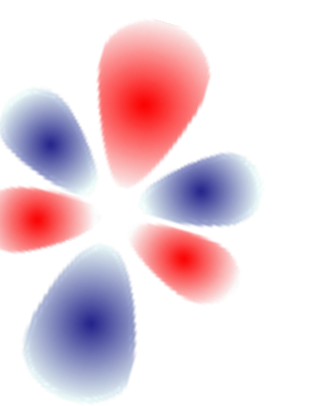


Science 誌掲載の実験はここで開発・測定。

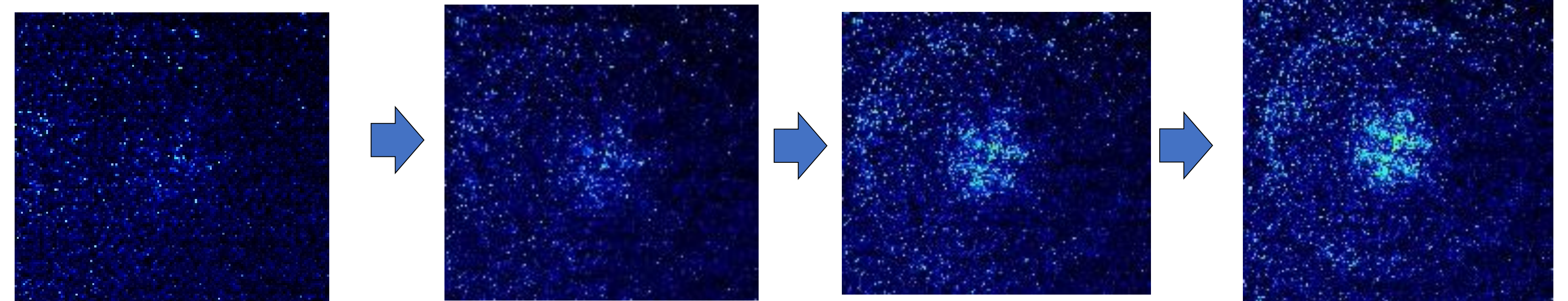
アト秒レーザーで電子(波動関数)を測定する



- (1) アト秒レーザーパルス (極端紫外領域) + 高強度赤外パルスを原子に当てると、電子が飛び出す。(アインシュタインの光電効果)
- (2) 電子の速度と方向 (運動量) を測定する。



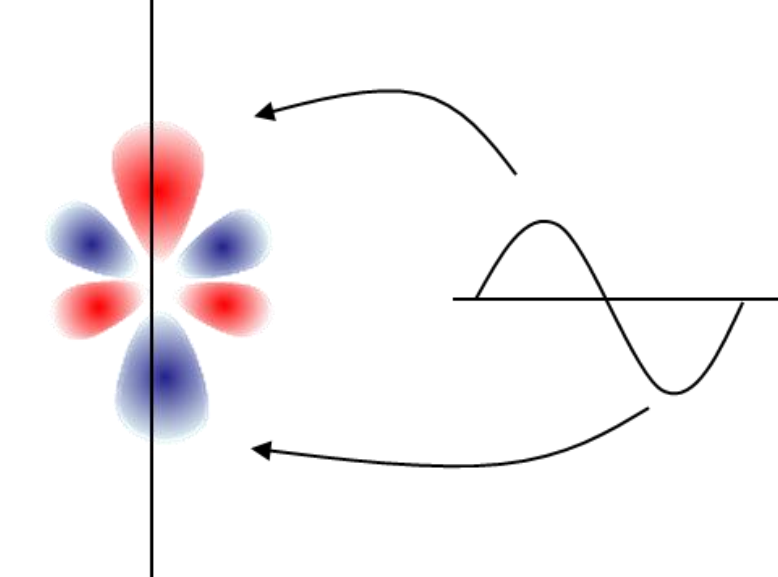
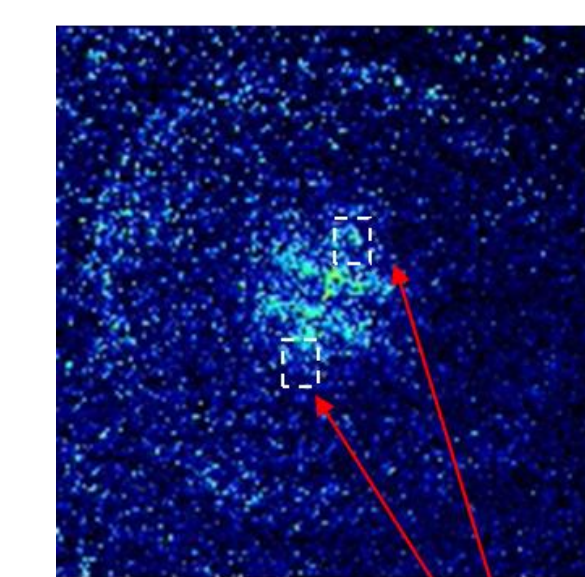
- ・電子は「粒」として観測される。
- ・電子の「粒」をたくさん集めると、「波動関数」の姿になる。



運動量空間での連続状態の電子波動関数(f-wave, m=0)

高強度レーザーパルスとアト秒パルスの組み合わせにより、単一の量子状態 ($l=3, m=0$) のみを選択。レーザーによる新規な量子制御法の開発。

アト秒レーザーで電子の位相を測定する



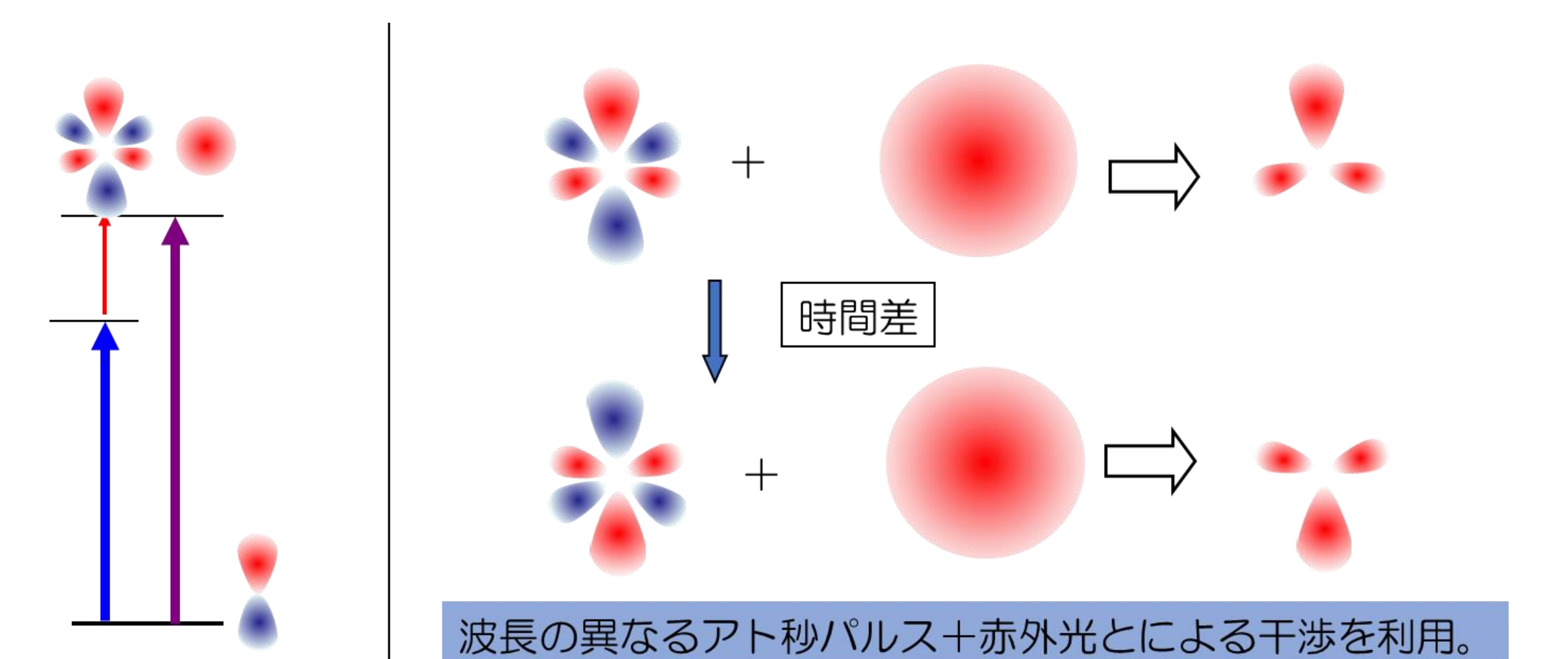
電子の「位相」が違うはすだが「同じ粒として」観測されてしまう。

Science 356, 1150 (2017)

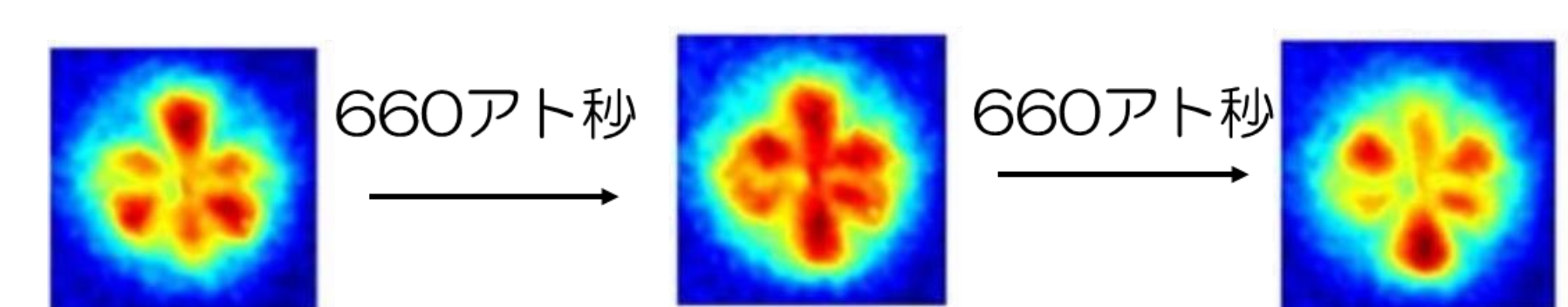
- ・電子は「波」としての性質をもつ。
- ・1つ1つの「電子の粒」は、「位相」を持っている。
- ・「電子の位相」は、検出器に当たると消えてしまう！(いわゆるコペンハーゲン解釈)

波とは干渉すること。

どうやって「電子の粒ひとつひとつの位相」を測定するのか？



実験結果



動画あり

まとめ 電子波動関数の顕微鏡

- ・電子は「分布と位相」を持つものとして表される (数学では波動関数で表現)
- ・アト秒レーザーパルスで、f-軌道電子の波動関数を直接測定。
- ・「アト秒時間分解・位相分解 電子波動関数 顕微鏡」の実現。
- ・電子の「位相と運動量の関係 (位相マッピング)」の測定が可能。

“Sub-laser-cycle electron pulses for probing molecular dynamics” **H. Niikura**, F. Legare, R. Hasbani, M. Ivanov, A. D. Bandrauk, D. M. Villeneuve and P. B. Corkum, **Nature** 417, 917-922(2002).
“Probing molecular dynamics with attosecond resolution using correlated wave packet pairs” **H. Niikura**, F. Legare, R. Hasbani, M. Ivanov, D. M. Villeneuve and P. B. Corkum, **Nature** 421, 826-829 (2003).
“Coherent imaging of an attosecond electron wave packet”, D.M.Villeneuve, P. Hockett, M.J.J.Vrakking and **H. Niikura**, **Science** 356, 1150 (2017)