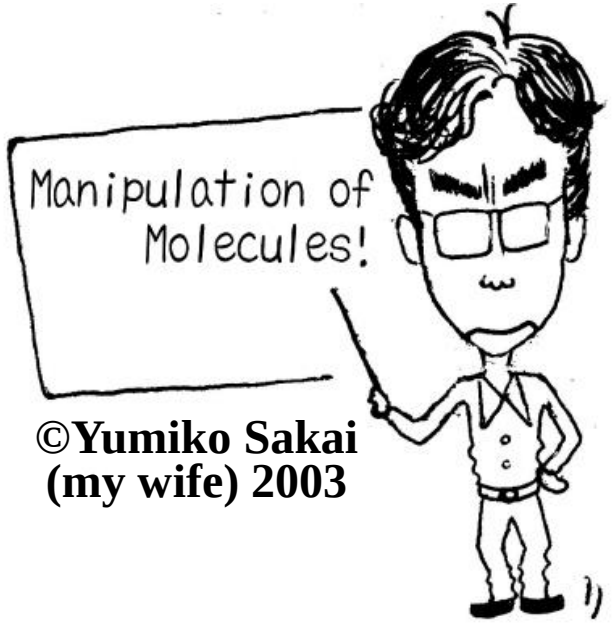
酒井広文研究室



1．研究分野

最先端レーザー技術を駆使した原子分子物理学実験

レーザー物理

（AMO: Atomic, Molecular, and Optical Physics）

量子力学的現象・効果が顕著に現れ、直接的に観測できるのが魅力

酒井グループは、高強度レーザー電場を用いた気体分子の配列・配向制御という新しい研究分野を開拓し、一貫して世界をリードする研究を進めています！

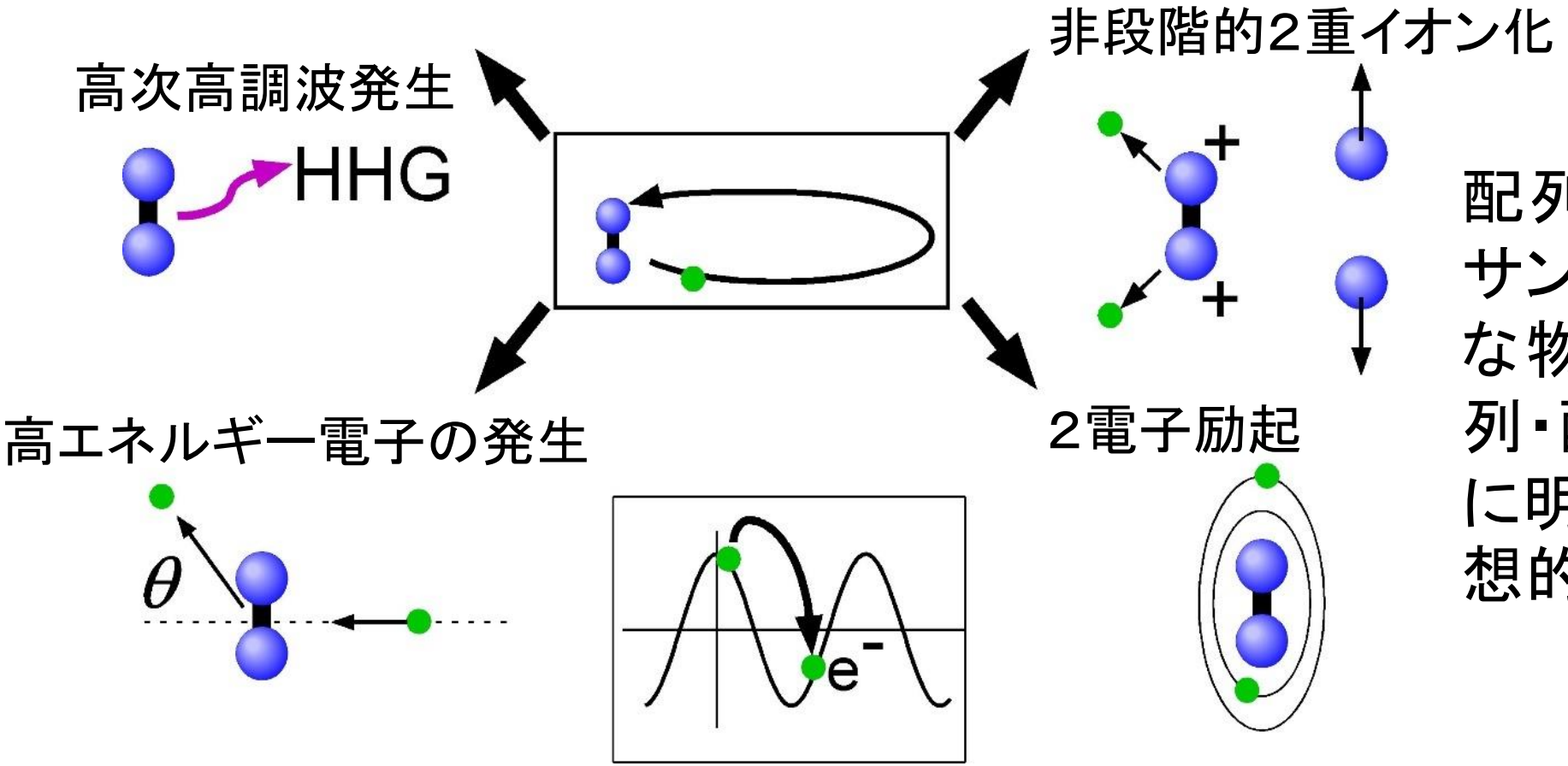
2．研究場所

実験室：理学部1号館西棟地下1階B102号室、B104号室

居室：理学部1号館中央棟4階442号室、440号室

「分子内電子の立体ダイナミクス」研究の展開

高強度フェムト秒レーザーパルスでトンネルイオン化した電子が再衝突する際に、下記の興味深い現象が発現する。

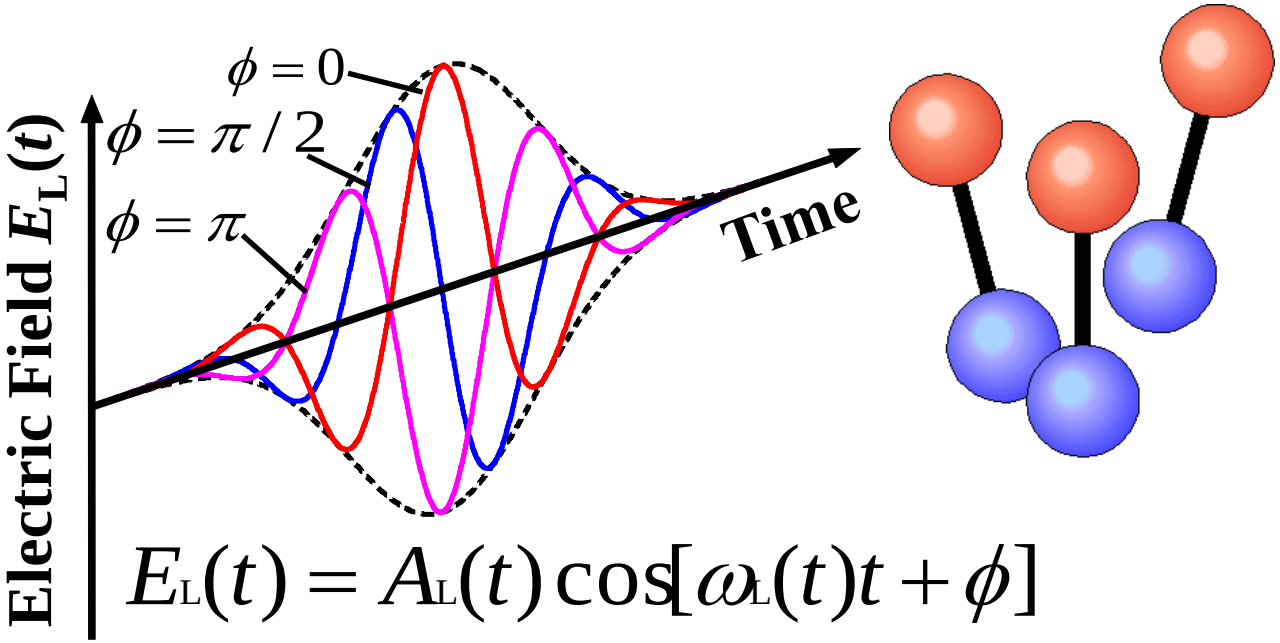


配列・配向した分子アンサンブルは、左記の様々な物理現象における配列・配向依存性を実験的に明らかにするための理想的な試料となる！

「分子内電子の立体ダイナムクス」←これらの現象の配列・配向依存性を明らかにする

CEP制御された数サイクルパルス→光の1周期以内の現象のCEP依存性も明らかにできる

超高速分子イメージングの高度化へ
（最も高度で洗練された分子イメージングの確立）



$$E_L(t) = A_L(t)\cos[\omega_L(t)t + \phi]$$

・配向した分子を試料とする

・CEP制御された数サイクルパルスを照射

→分子の配向依存性を明らかにしつつ、

　光の１周期以内の現象を直接的に解明！

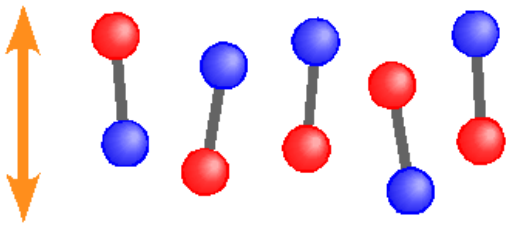
気体分子の配列・配向制御（断熱領域）

レーザー電場の存在下で
配列や配向が実現

Linear Molecules (1D)

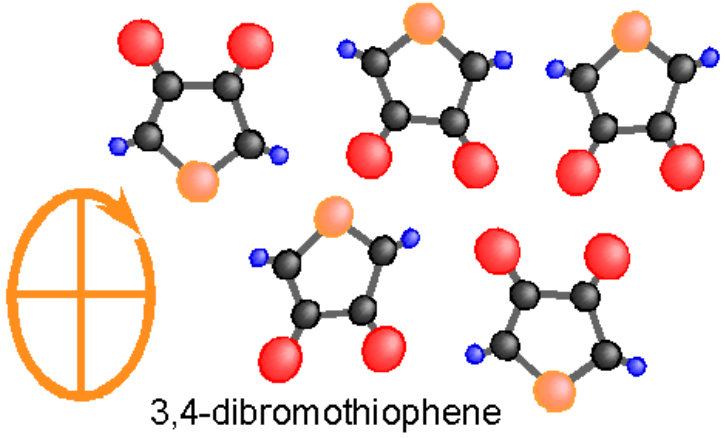
Planar Molecules (3D)

Alignment
（配列）



Ex. I_2, ICl, CS_2

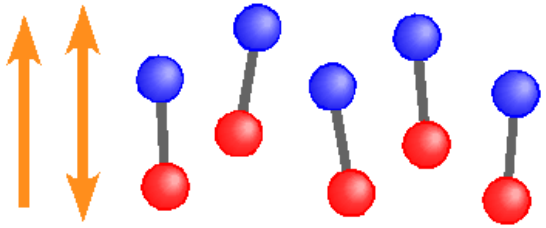
H. Sakai *et al.*, J. Chem. Phys. **110**, 10235 (1999).



3,4-dibromothiophene

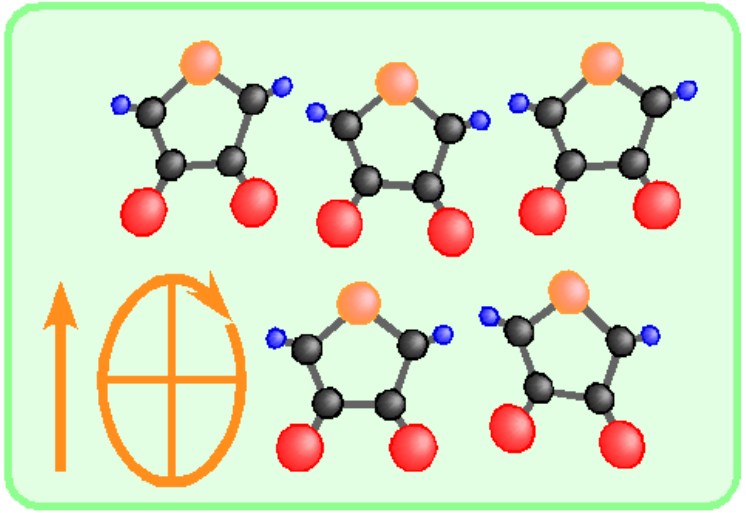
J. J. Larsen *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 2470 (2000).

Orientation
（配向）



Ex. OCS, HCl

H. Sakai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 083001 (2003).
S. Minemoto *et al.*, J. Chem. Phys. **118**, 4052 (2003).



H. Tanji, *et al.*, Phys. Rev. A **72**, 063401 (2005).

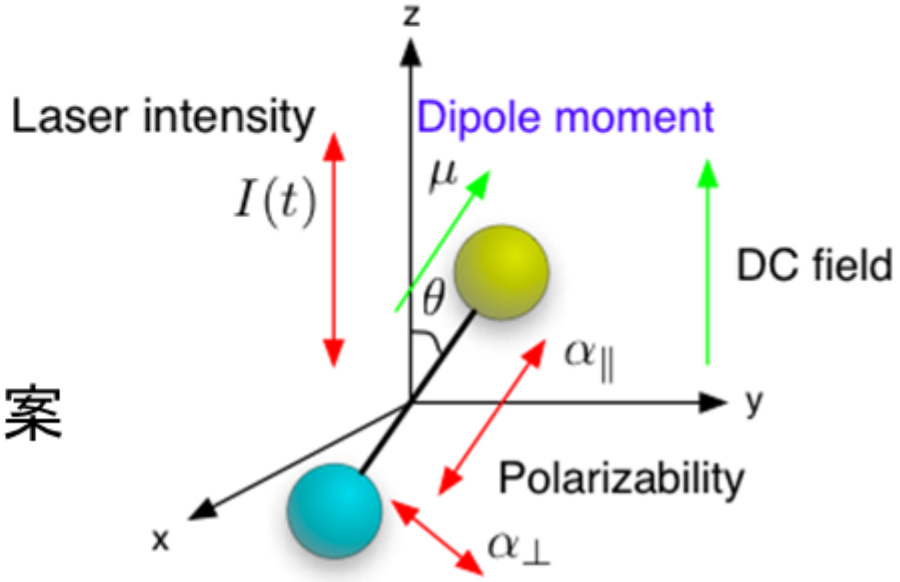
静電場とレーザー電場を併用する分子配向技術の発展

・1次元的配向制御
H. Sakai *et.al.*, Phys. Rev. Lett. **90**, 083001 (2003)
S. Minemoto *et al.*, J. Chem. Phys. **118**, 4052 (2003)

・3次元的配向制御
H. Tanji *et al.* Phys. Rev. A **72**, 063401 (2005)

・レーザー電場のない条件下での分子配向制御の提案
Y. Sugawara *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 031403(R) (2008)

・レーザー電場のない条件下での分子配向制御
A. Goban *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 013001 (2008)



ほぼすべてのマイルストーン技術を東大酒井グループが単独で開発！

・状態選別した分子のレーザー電場のない条件下での1次元的配向制御
J. H. Mun et al., Phys. Rev. A **89**, 051402(R) (2014)

・状態選別した分子のレーザー電場のない条件下での3次元的配向制御
D. Takei et al., Phys. Rev. A **94**, 013401 (2016)

（↑高い配向度、レーザー電場のない条件下、3次元的配向制御の3条件を満たす配向制御の「完成形」を実現）

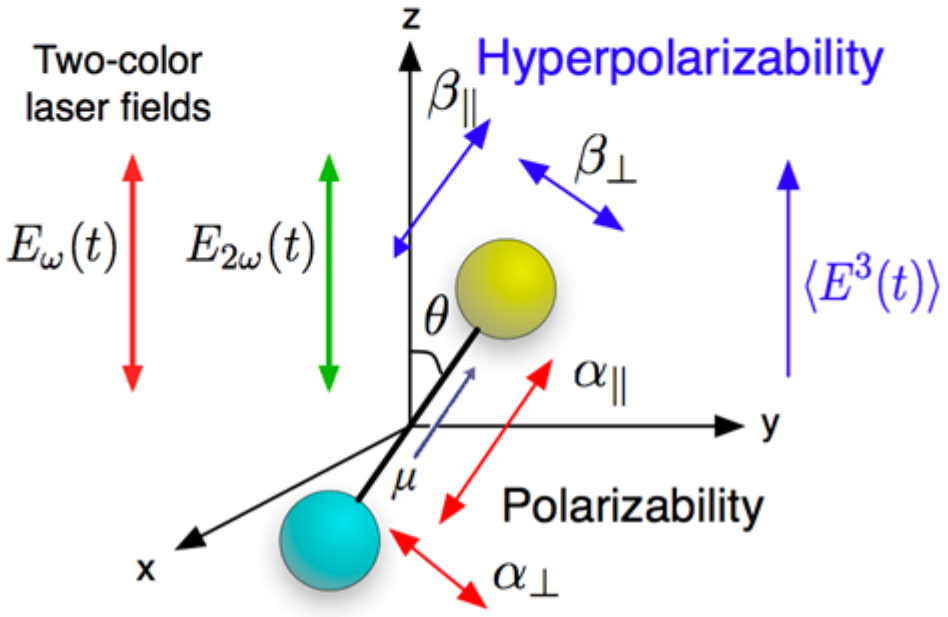
全光学的分子配向制御技術の発展

- 非共鳴2波長レーザー電場のみを用いる全光学的配向制御

手法の提案：T. Kanai and H. Sakai, J. Chem. Phys. **115**, 5492 (2001)

原理実証：K. Oda, M. Hita, S. Minemoto, and H. Sakai, PRL **104**, 213901 (2010)

（東大酒井グループの独創です！）



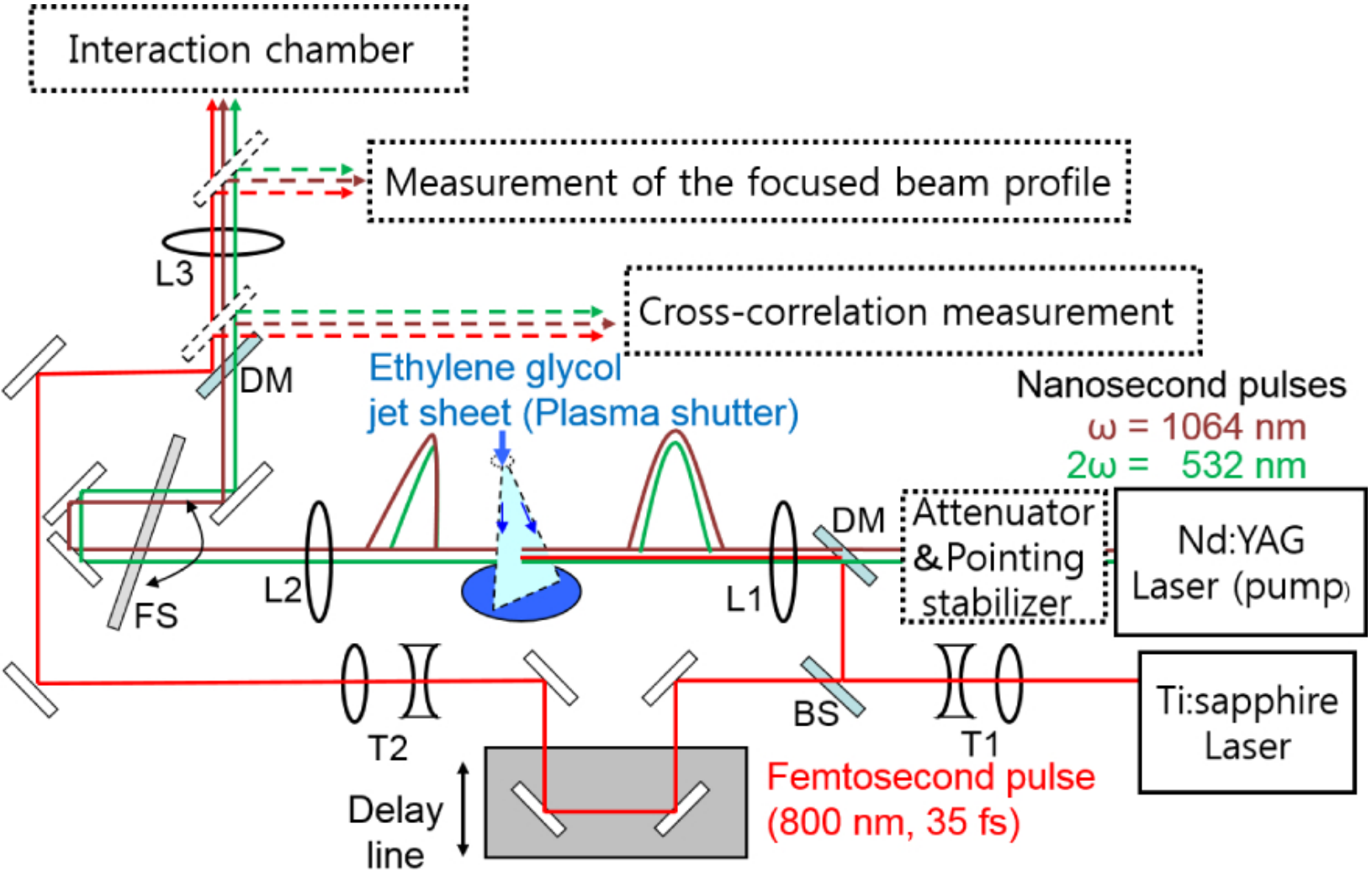
目標：全光学的配向制御手法の「完成形」の実現（特別実験の課題の一つです）

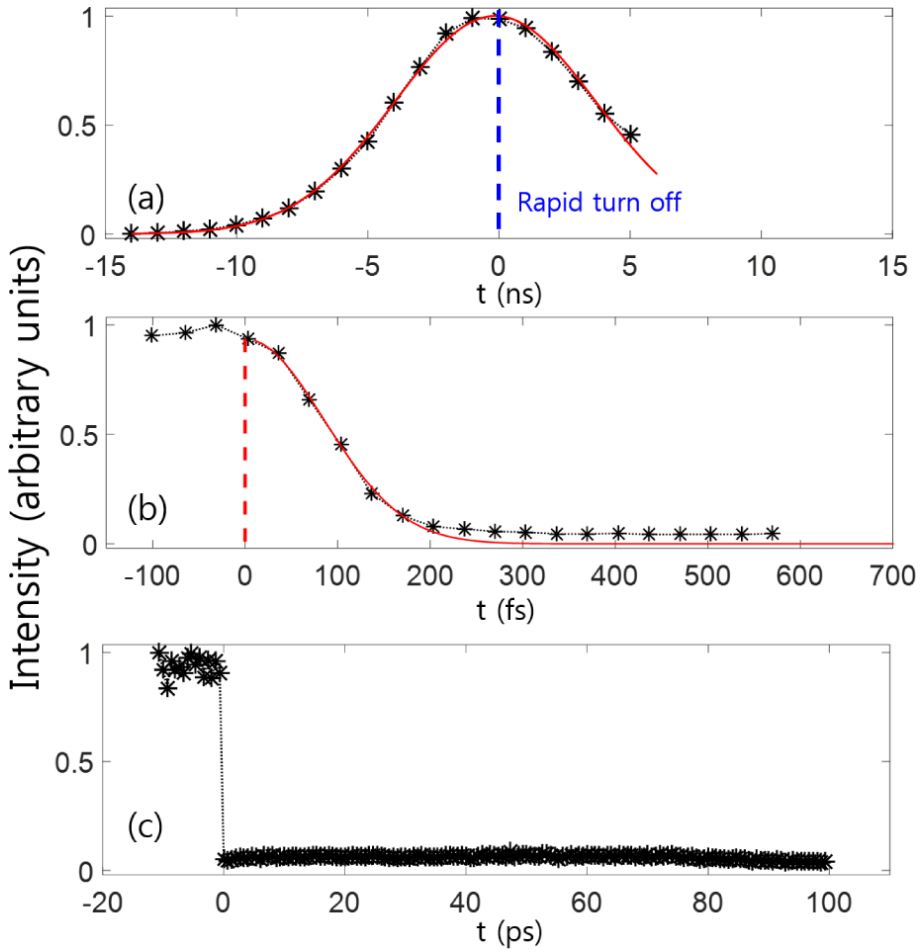
下記の3条件を満たす

1. 高い配向度の実現←分子偏向器（開発済み）で初期回転量子状態を選択
2. 分子の向きの完全な制御である3次元的配向制御←直線偏光＋楕円偏光
3. 完全にフィールドフリーな条件下での配向制御←プラズマシャッター技術

２波長用プラズマシャッターの概略図

Mun *et al*., Optics Express **27**, 19130 (2019)より



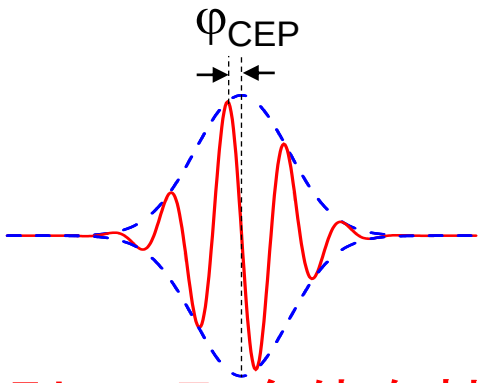


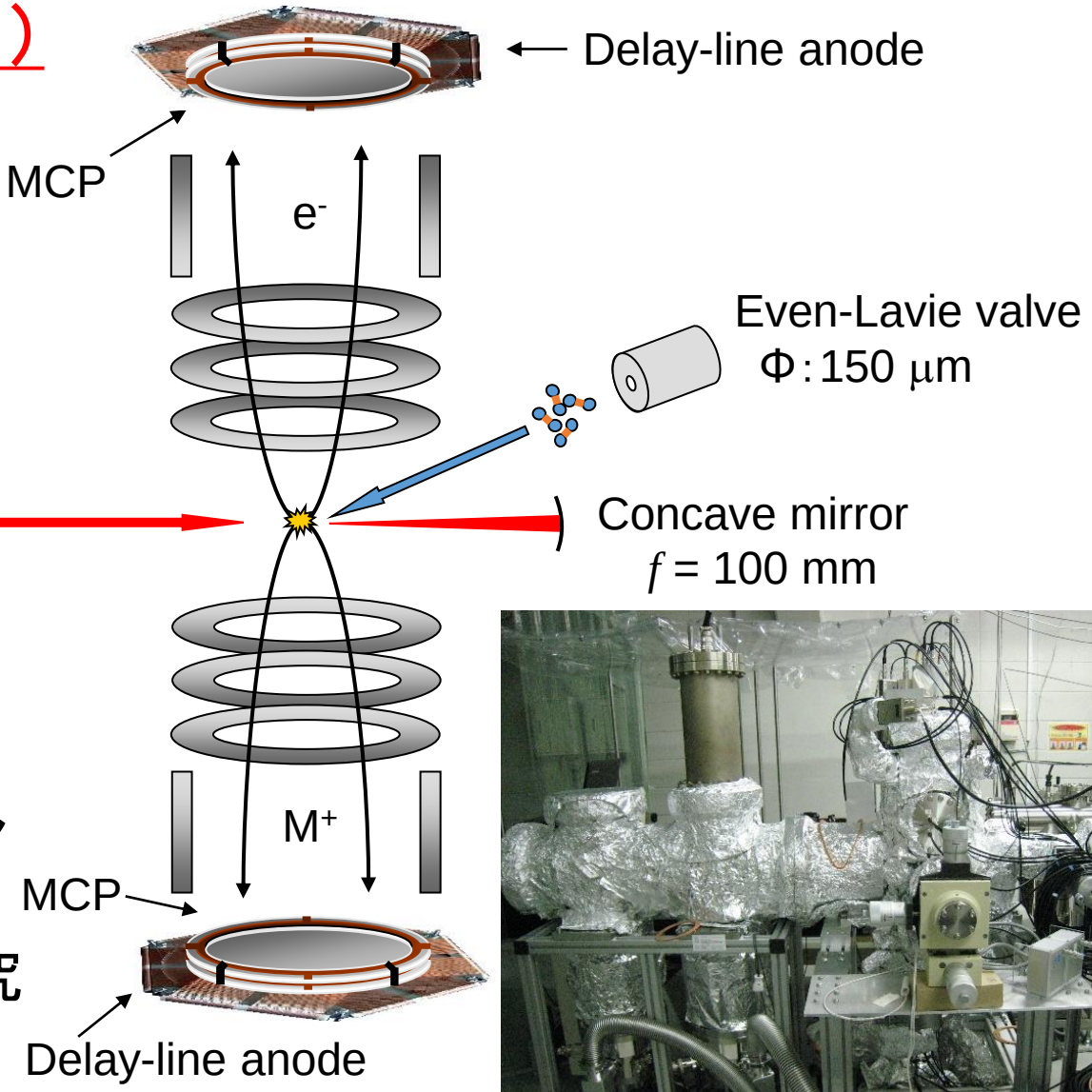
立下り~150 fs程度で急峻に遮断できる！

分子のトンネルイオン化とそれに続く非段階的2重イオン化の配向依存性
電子・イオン多重同時計測運動量画像分光装置（CO−VIS）の活用

（特別実験のもう一つの課題です。）

・レーザー電場に直接応答する電子を観測できる。





解離するチャネルを区別して配向依存性を明らかにできる！

（1）イオン化用レーザーの波長スケーリングの探究

（2）搬送波包絡位相（CEP）依存性の探究

開発したCO−VIS→

数値計算の課題を提供することもできます

1. Md Maruf Hossain and Hirofumi Sakai, “All-optical orientation of linear molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields,” J. Chem. Phys. **153**, 104102 (2020)の発展
上記の論文では、直線偏光の基本波と楕円偏光の第2高調波の組合せで1次元的な分子配向制御（直線分子の配向制御）を行うことを提案した。

その後、数値計算コードを3次元的な分子配向制御に拡張し、非対称コマ分子の3次元的配向制御のダイナミクスを追究した。下記の論文を近日中に投稿予定。江崎蘭世君が貢献。

2. Md. Maruf Hossain, Nanse Esaki（江崎蘭世）, and Hirofumi Sakai, “All-optical three-dimensional orientation of asymmetric top molecules with combined linearly and elliptically polarized two-color laser fields,” to be submitted to J. Chem. Phys.

これらの成果を基礎として、さらに光学異性体（キラルな分子）を配向制御するための数値計算プログラムを開発し（特別実験の課題の例）、配向のダイナミクスと時間依存偏光パルスとの相互作用の研究に発展させたい。

特別実験の成果を学会や論文で発表

1. 洪木子、酒井広文
「フィールドフリーな条件下でのマクロな3回対称性をもつ分子アンサンブル生成のダイナミクス」
レーザー学会学術講演会第41回年次大会（2021年1月）
洪木子さんが令和2年度理学部学修奨励賞を受賞
2. 仲林宏斗、小松原航、酒井広文
「2色レーザー電場を用いたマクロな3回対称性をもつ分子アンサンブルの生成法の提案」
2018年（平成30年）第65回応用物理学会春季学術講演会
「3回対称性をもつ気体結晶の生成法」
レーザー学会学術講演会第39回年次大会
Physical Review A 99, 043420 (2019)
3. 羅恒宇、小森健太郎、峰本紳一郎、酒井広文
「配列したCO_2分子中から発生する高次高調波の楕円率依存性」
2014年（平成26年）第61回応用物理学会春季学術講演会
小森健太郎君が平成25年度理学部学修奨励賞を受賞
4. 樋口嵩、中前秀一、渡部源太郎、峰本紳一郎、酒井広文
「配列分子から発生する第三高調波の楕円率依存性」
2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会　　ほか多数

レーザーを用いた原子分子物理学実験の特長（魅力）

0. 極限環境下の有限量子系

   →量子力学理論の直接的検証が可能

1. 物理・化学・レーザー工学の学際的領域

2. 自分のアイデアを自分で検証できる

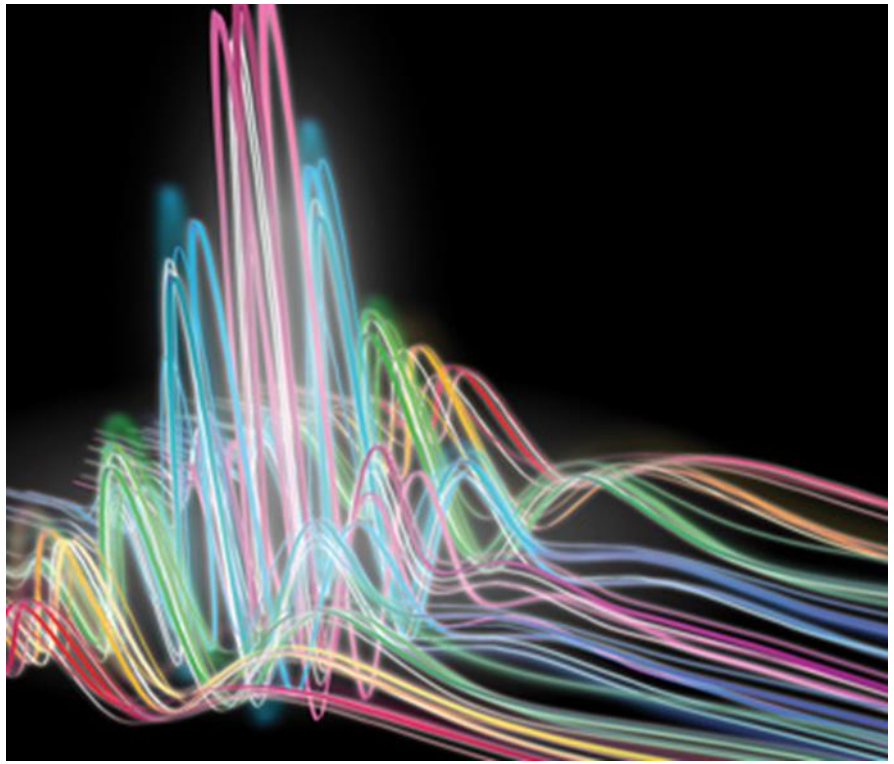
3. 新現象の発見があるなど実験が理論より先行する場合が少なくない

4. 実験の準備期間が比較的短く装置開発まで自分でできる

5. 一人ないし少人数の実験が主体で自分が主役になれる（プロジェクトの歯車にならない）

アト秒物理に関する実験研究にも取り組んでいます

単一アト秒パルス（< 200 as）の発生と配列分子を用いた偏光制御、
及び原子分子中の電子の超高速ダイナミクスの制御への応用



原子分子中の電子が運動する時間スケールがアト秒（10^{-18} sec)領域

時間の1原子単位＝24 as（水素原子の基底状態にある電子が軌道上を1 rad走るに要する時間）

↑Artistic representation of a coherent (laser-like) X-ray pulse.
[Tenio Popmintchev, JILA, University of Colorado at Boulder]
Optics & Photonics News, May 2015より

「分子ムービー」技術の開発にも取り組んでいます

SACLA（理研・播磨キャンパス）HPより

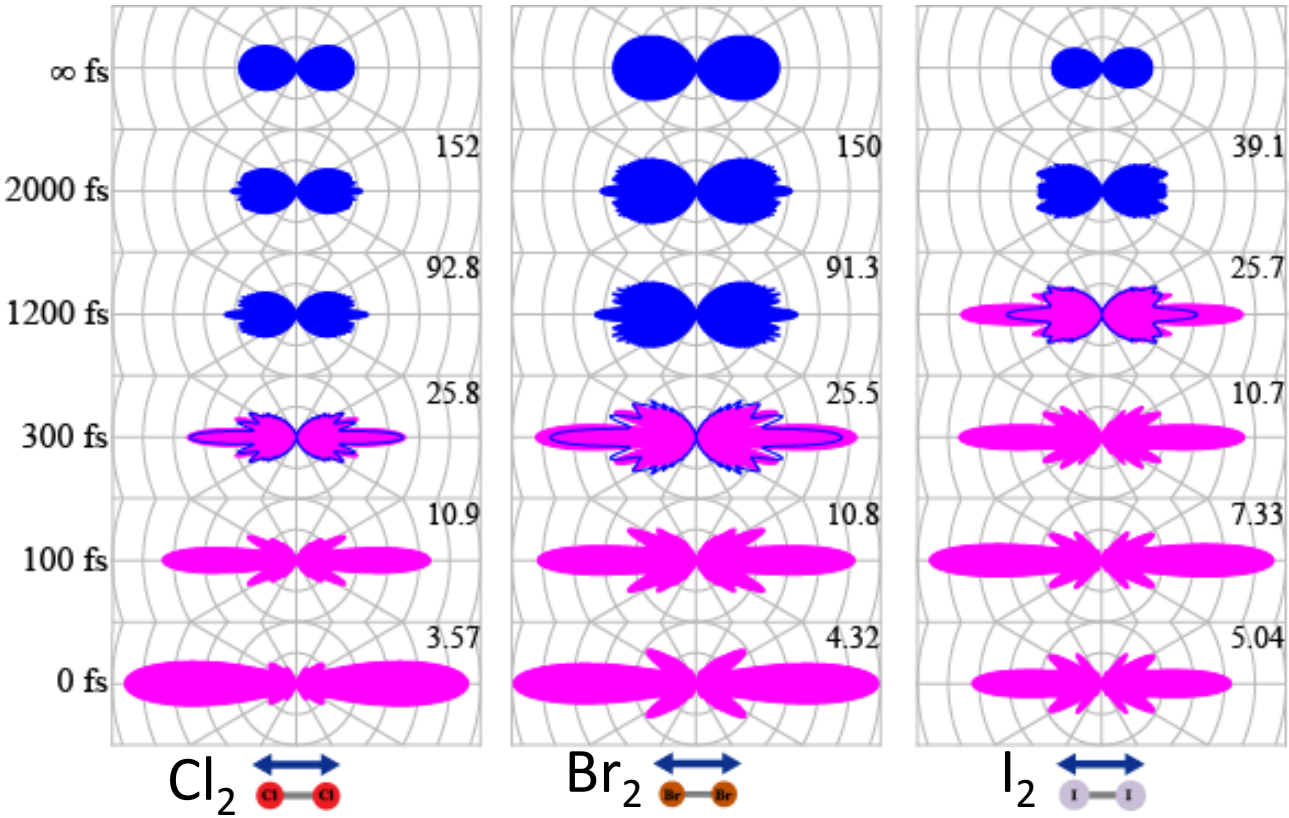
1. 「X線光電子回折法」の原理実証：Nakajima *et al.*, Sci. Rep. **5**, 14065 (2015)
2. 配列レーザー電場中の核間距離の伸長の発見：Minemoto *et al.*, Sci. Rep. **6**, 38654 (2016)
3. Ar 3*p*光電子のATI信号の観測とジッター評価：Minemoto *et al.*, J. Phys. B **51**, 075601 (2018)

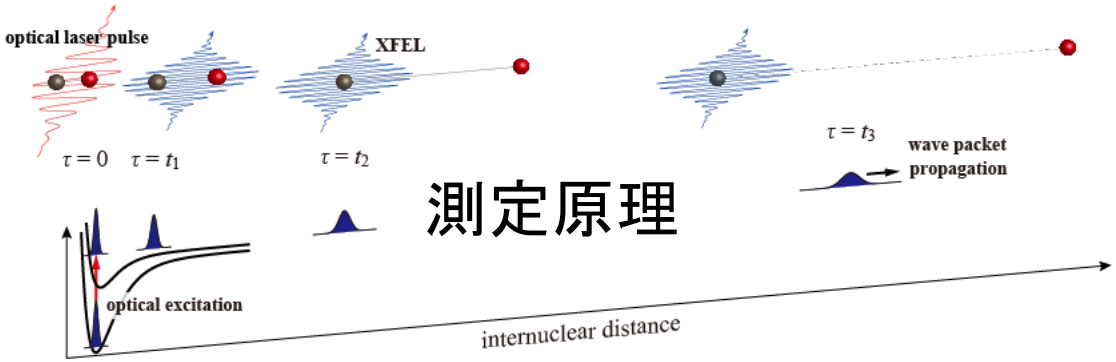
着々と成果を積み上げています！

「分子ムービー」の実験（今後の展開）

韓国（PAL：Pohang Accelerator Lab.)HPより

X線光電子回折実験に最適な光子エネルギー
300 eV～1 keVが供給される





測定原理

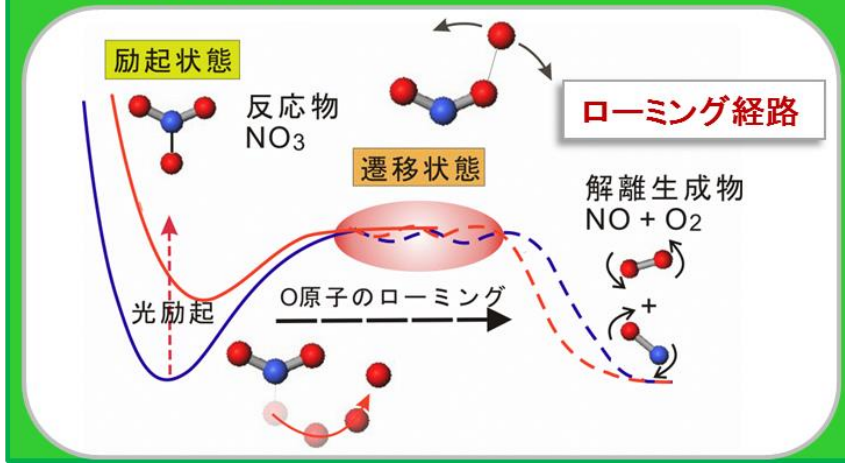
S. Tsuru *et al.*, J. Chem Phys. **148**, 124101 (2018)

まずは、2原子分子の解離ダイナミクスの観測から

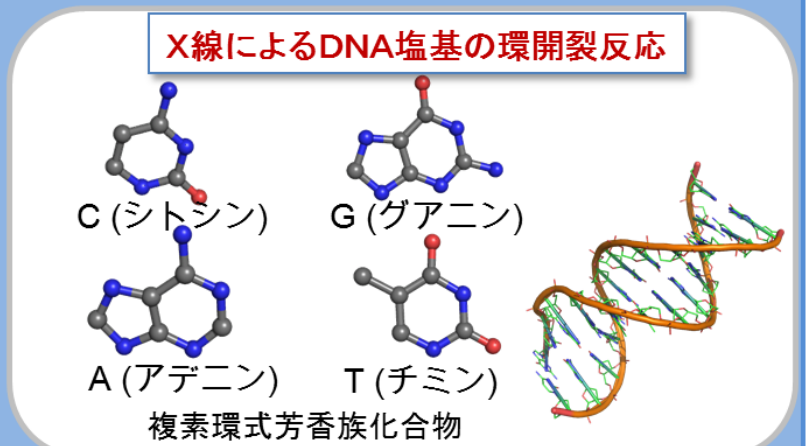
気体分子を試料とする場合、配列・配向した分子アンサンブルの利用が不可欠

本研究で解明する分子光化学反応の例

環境科学

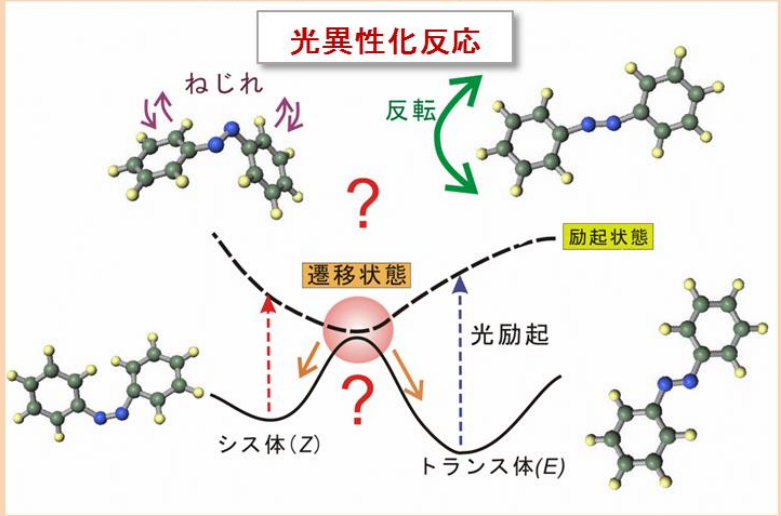


生命科学



N 窒素原子　O 酸素原子

光化学反応



【期待される成果と意義】

- 新たな分子構造決定法の創設
- 超BO化学創設への貢献
- 偏光利用による反応制御