

# プラズマ・複相間輸送: PWI, 弱電離プラズマ・光・物質相互作用

## 所員

中村 浩章	(NIFS・名大)
Wang Chenxu	(NIFS)
小林 政弘	(NIFS・東大)
後藤 勇樹	(NIFS)
宇佐見 俊介	(NIFS・東大)
吉村 信次	(NIFS・名大)
森高 外征雄	(NIFSプラズマ量子プロセス)

## 戦略メンバー

小林 憲正	(横国大)
久保 伸	(中部大)
加藤 政博	(広大・IMS)
川口 秀樹	(室蘭工大・NIFS)
齋藤 誠紀	(山形大)
田中 宏彦	(名大)
井戸 毅	(九大)

## 所外

Tomio PETROSKY	(テキサス大オーチン校)
澤田 圭司	(信州大)
星野 一生	(慶応大)
大野 哲靖	(名大)

## PWIユニットの研究目標

### 目標①:

- ・ プラズマと固体・液体・気体が接する系の熱・粒子・運動量の輸送現象を理解し、予測して、制御する。
  - 磁場閉じ込め核融合炉の開いた磁力線領域から壁
  - 壁を冷却する冷媒、あるいは排気装置を経て燃料循環系に至る系

### 目標②:

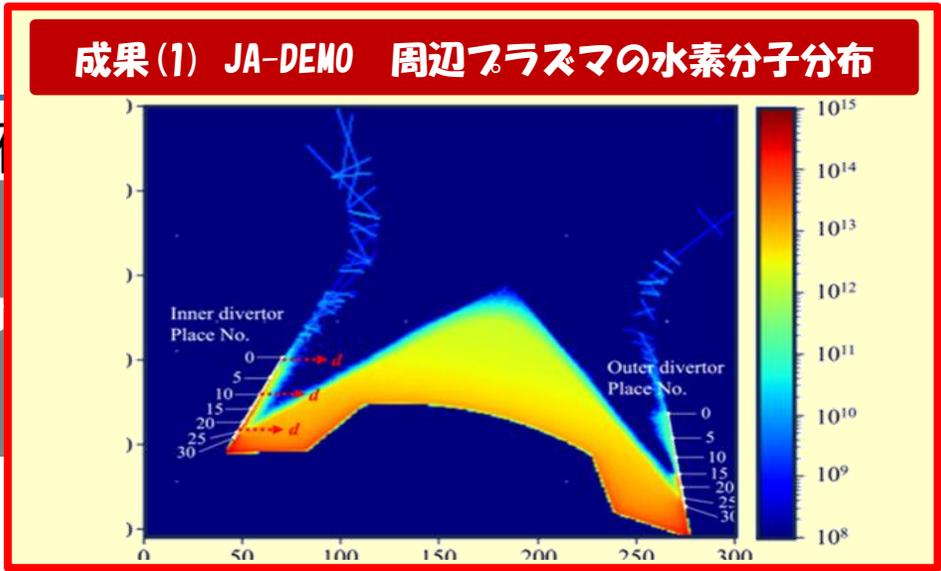
- ・ このような研究から得られる知見や技術を、核融合分野以外の様々な分野に展開し、それらの分野の進展に寄与することを目指す。

# プラズマ・光・物質相互作用の成果概要

PWIおよび炉工学 ←



弱電離プラズマ・光・物質相互作用



成果(2) プラズマと光渦

光渦(電磁波)

プラズマ

成果(3) 生体分子形成の分子動力学

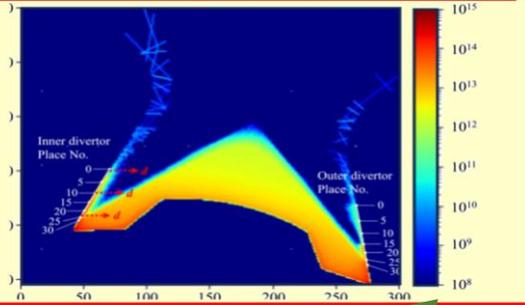
宇宙線 (ex.陽子)

気体

成果(4) 非エルミートマイクロ波光学  
導波管中のサイクロトロン運動からの電磁波伝播

# プラズマ・光・物質相互作用Gの連携体制

成果(1) JA-DEMO 周辺プラズマの水素分子分布



## 所員

- 中村 浩章 (NIFS・名大)
- Wang Chenxu (NIFS)
- 小林 政弘 (NIFS・東大)
- 後藤 勇樹 (NIFS)
- 宇佐見 俊介 (NIFS・東大)
- 吉村 信次 (NIFS・名大)
- 森高 外征雄 (NIFSプラズマ量子プロセス)

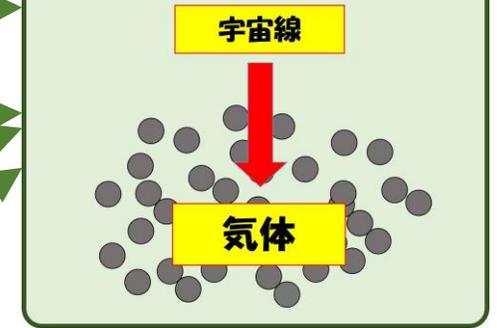
## 戦略メンバー

- 小林 憲正 (横国大)
- 久保 伸 (中部大)
- 加藤 政博 (広大・IMS)
- 川口 秀樹 (室蘭工大・NIFS)
- 齋藤 誠紀 (山形大)
- 田中 宏彦 (名大)
- 井戸 毅 (九大)

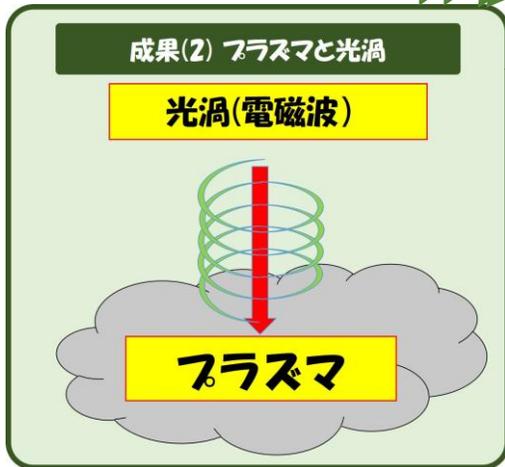
## 所外

- Tomio PETROSKY (テキサス大オーチン校)
- 澤田 圭司 (信州大)
- 星野 一生 (慶応大)
- 大野 哲靖 (名大)

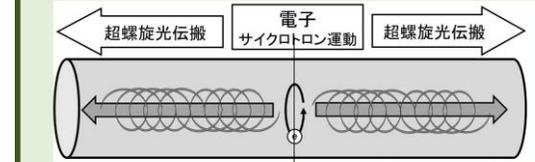
成果(3) 生体分子形成の分子動力学



成果(2) プラズマと光渦

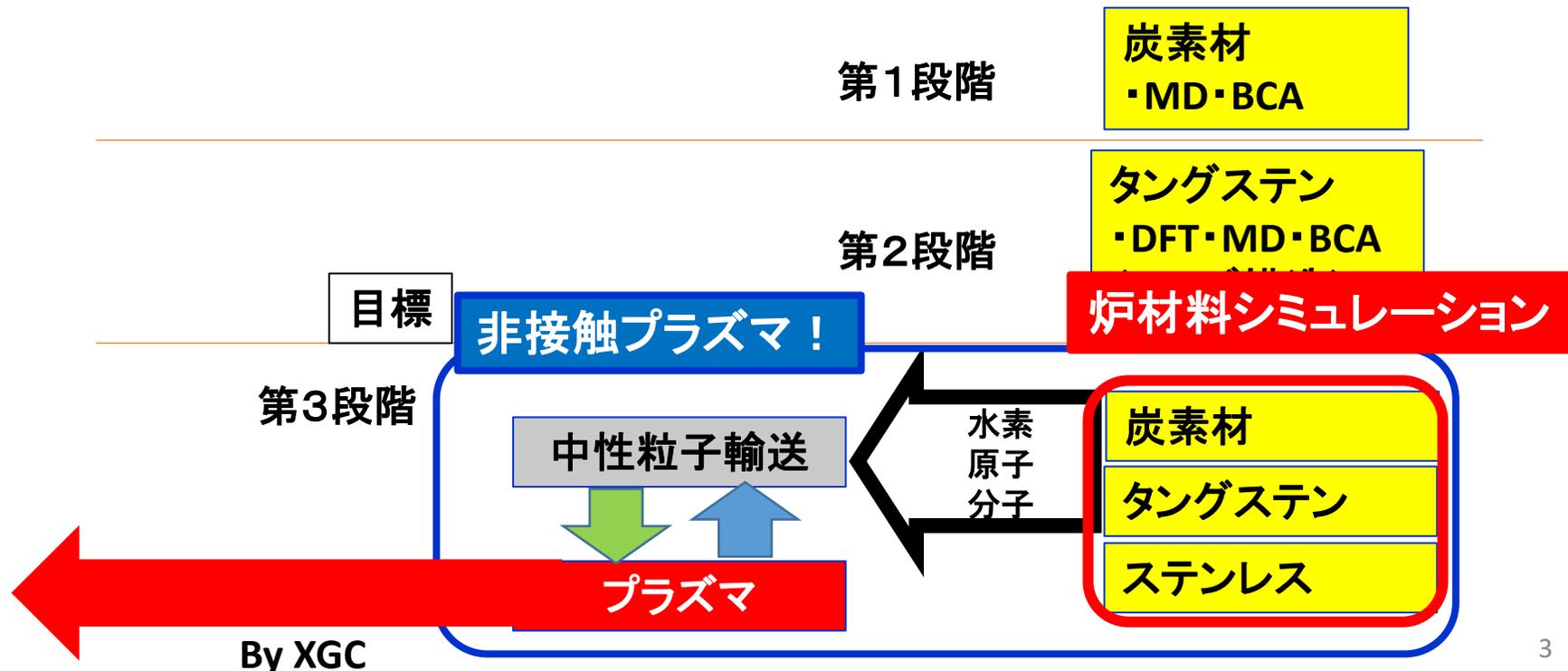
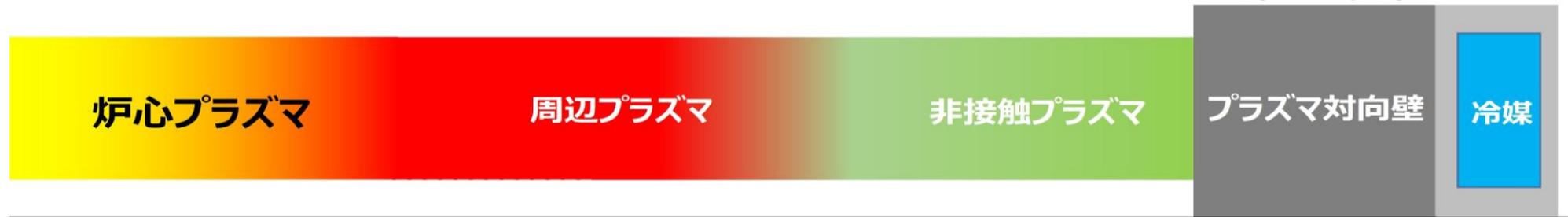


成果(4) 非エルミートマイクロ波光学  
導波管中のサイクロトロン運動からの電磁波伝播



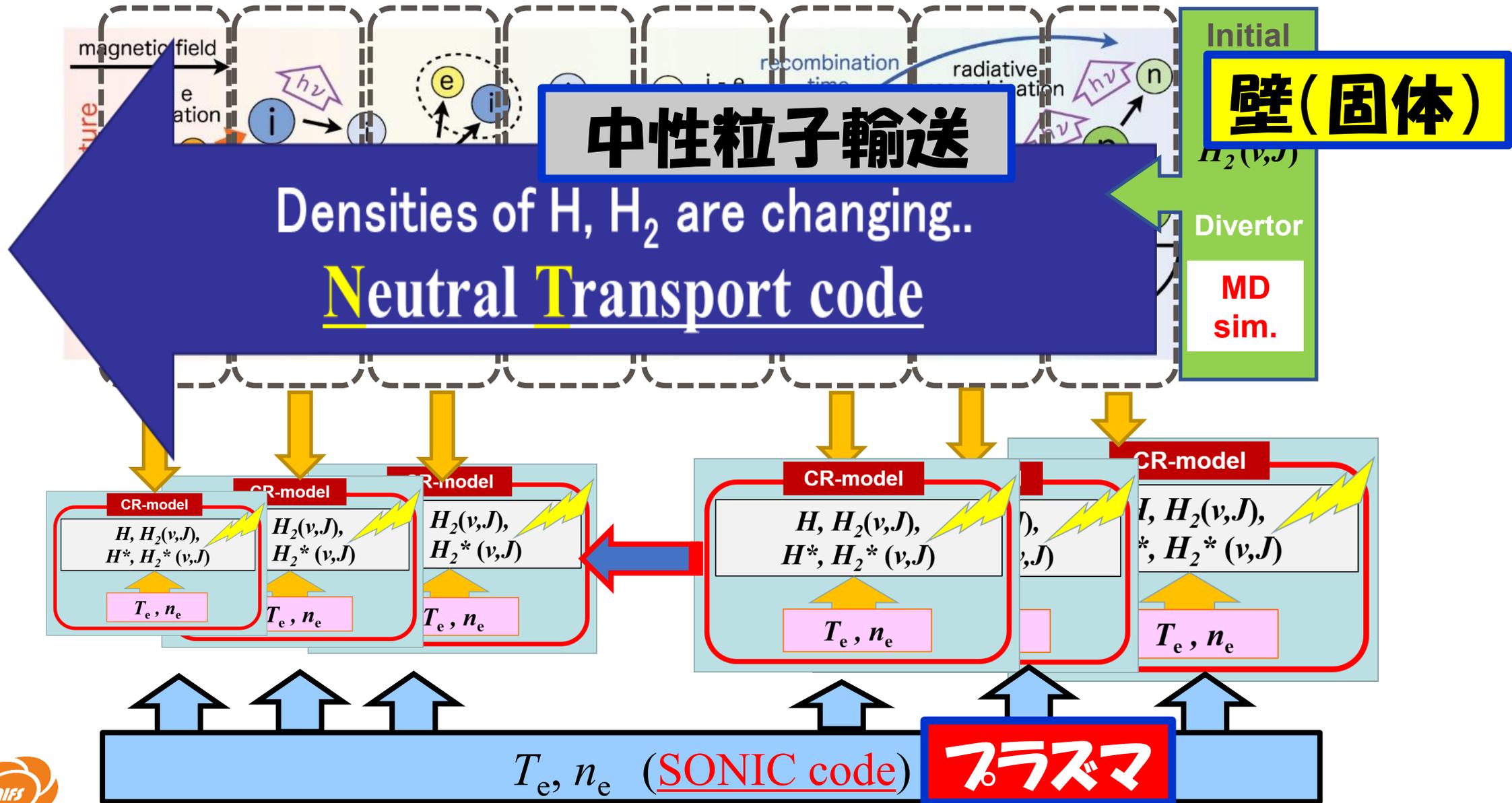
# 成果(1) JA-DEMO炉周辺プラズマの水素分子分布：目指すところ

目標：非接触プラズマの生成条件を調べるためのコード群の開発→設計・運転の制御に役立てる！  
コアプラズマから周辺プラズマ・プラズマ対向壁までを含むシミュレーションコード群や使用する物理モデル群の整備・拡張



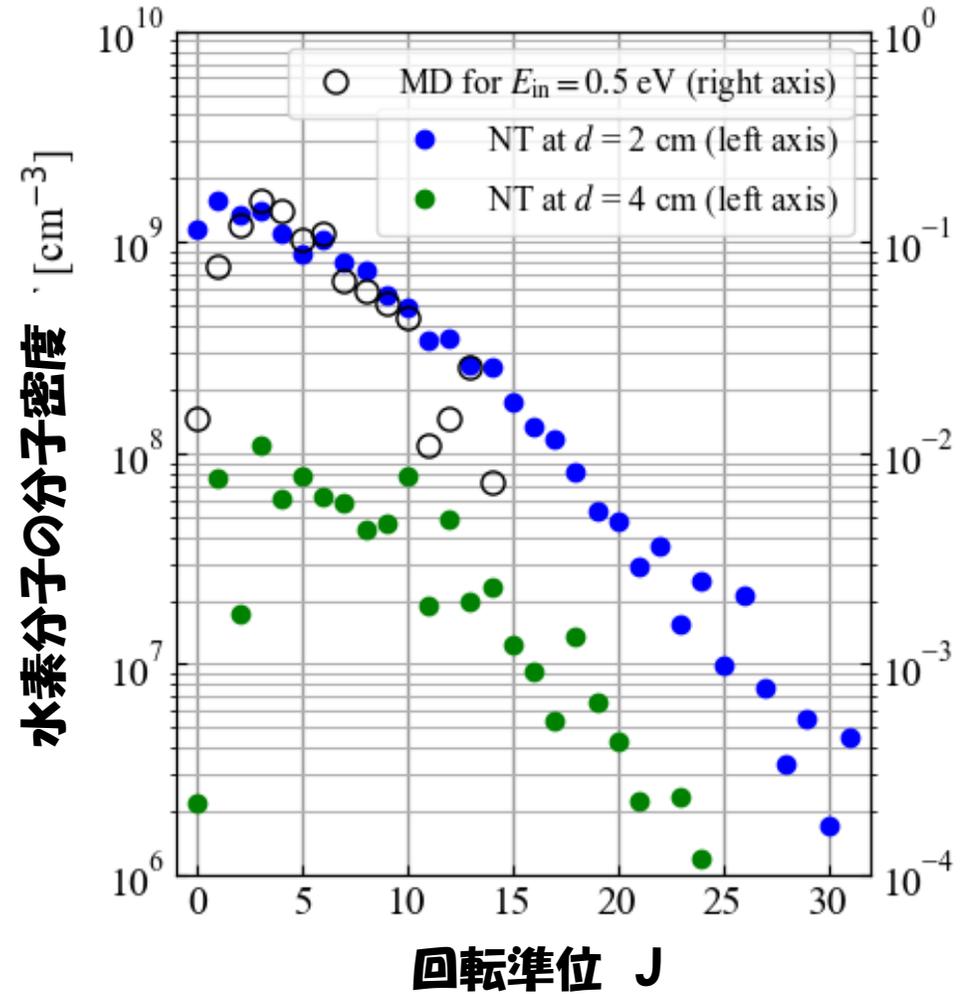
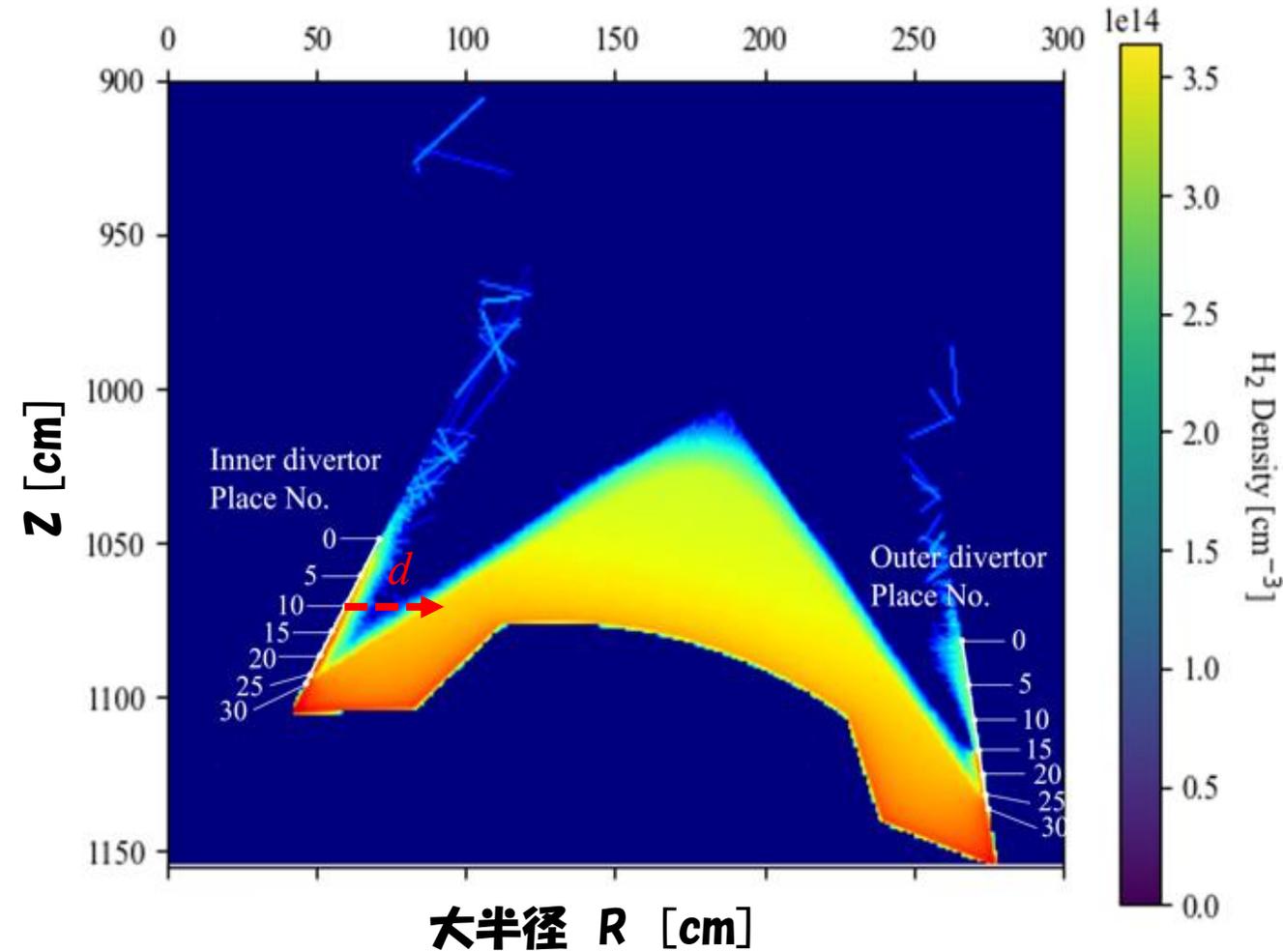
# Combining NT-CR code, MD, and SONIC code

Figure 13 from Y. Hayashi, *et. al.* 2016 Nucl. Fusion 56 126006 doi:10.1088/0029-5515/56/12/126006



# 水素分子の空間分布: JA-DEMO を想定

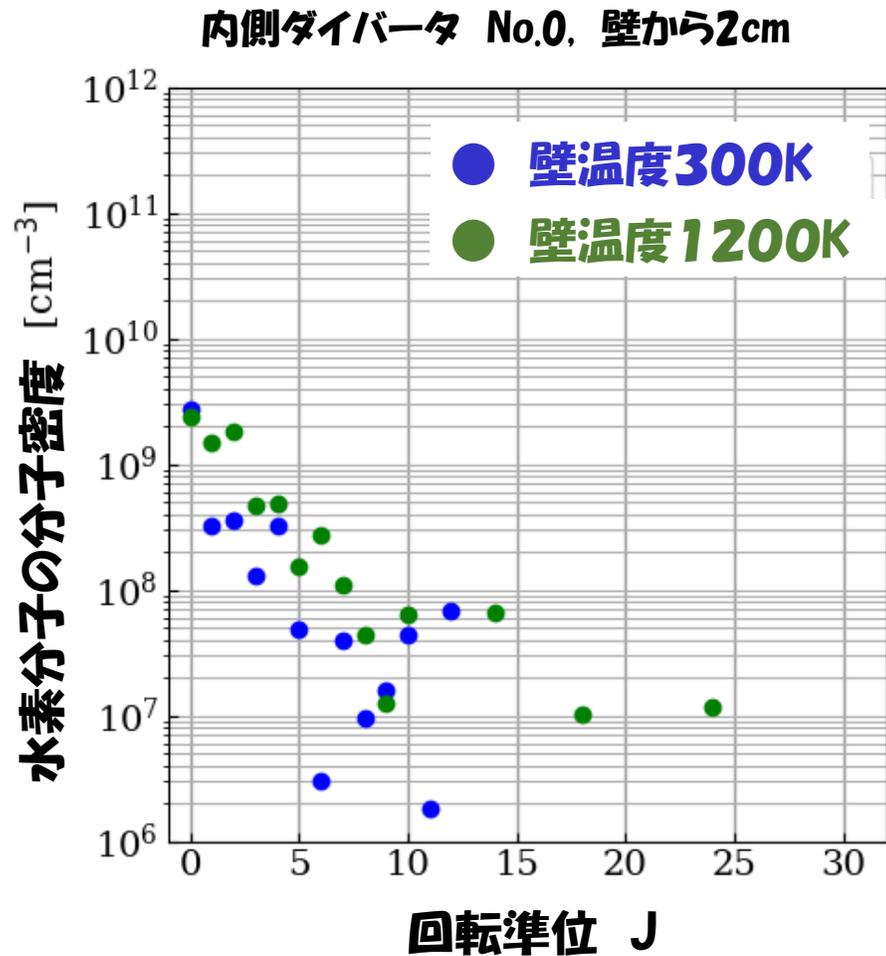
S. Saito, H. Nakamura et al., Nucl. Fusion 64 (2024) 126067



ダイバータ近傍の電子、H<sup>+</sup>イオン、あるいは中性H原子との衝突によって、J = 15より高い回転状態を持つ分子が生成されることを示唆している。

# 壁周辺プラズマの回転温度の壁温依存性

## JA-DEMO における 壁モデル+中性粒子輸送による計算結果



将来計画

GAMMA10/PDXにおける  
分光計測による実測値との比較

回転温度 [K]

300 400 500 600  
ターゲットの温度 [K]

A. Terakado, et al., Plasma Fusion Res. **13**, 3402096 (2018).

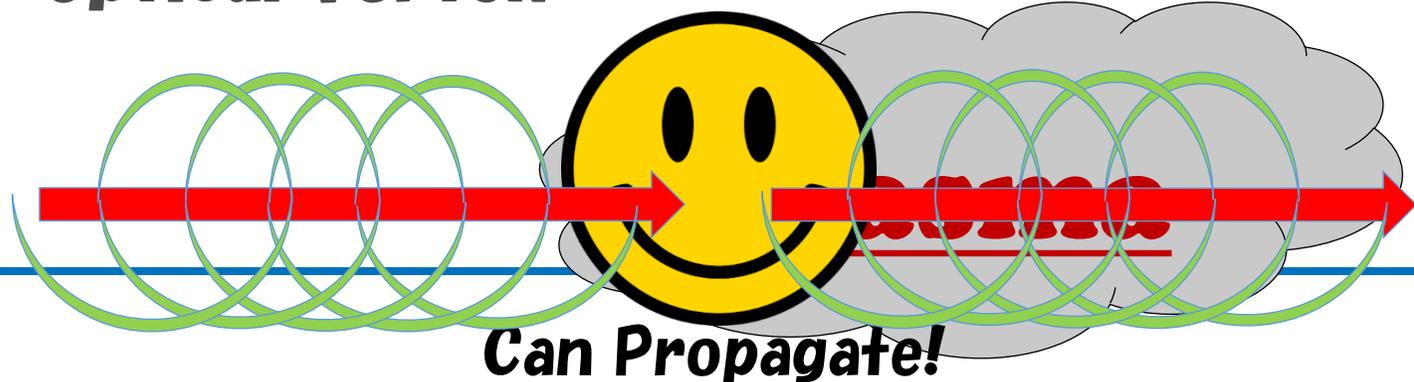
## 成果(2) フラズマと光渦

D  
of

We try to confirm Optical vortex propagation into plasma by FDTD-simulation!

\*FDTD=Finite-Distance Time-Domain.  
「時間領域差分法」

$\omega$   
 $\omega_p$   
0



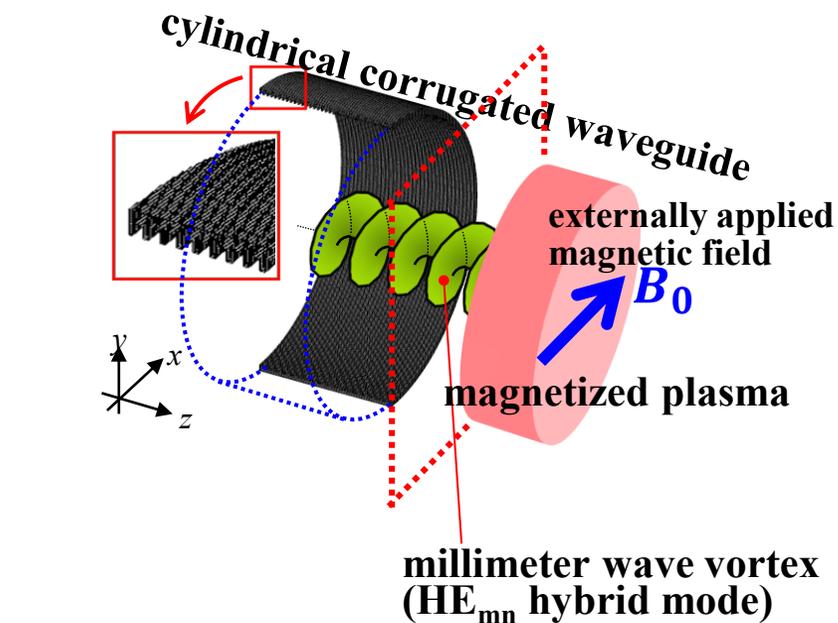
Tsujimura and Kubo:

Phys. Plasmas **28**, 012502 (2021)

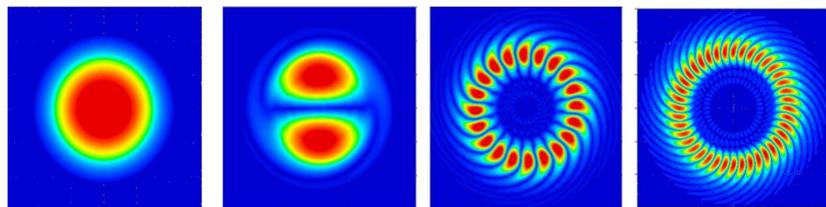
DOI: [10.1063/5.0015109](https://doi.org/10.1063/5.0015109)

## (2) プラズマと光渦: FDTD simulation with Lorentz model

C. Wang, H. Kawaguchi, H. Nakamura and S. Kubo, Jpn. J. Appl. Phys. 63 (2024) 09SP08.



x-y vertical cross-section



$l = 0$

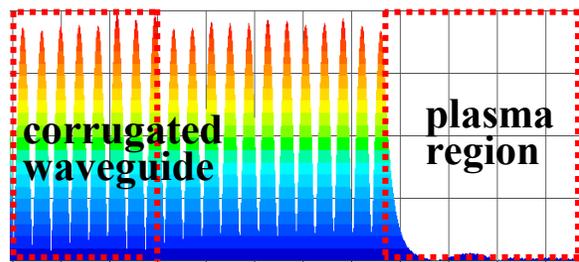
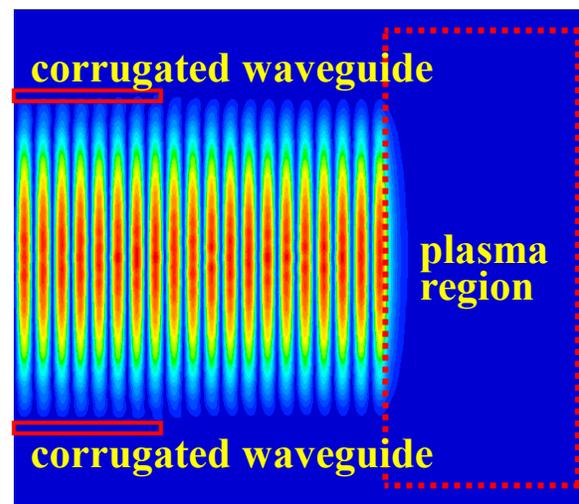
$l = 1$

$l = 10$

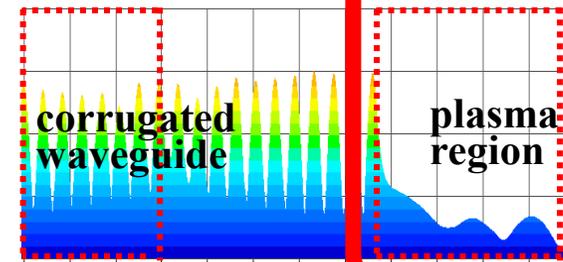
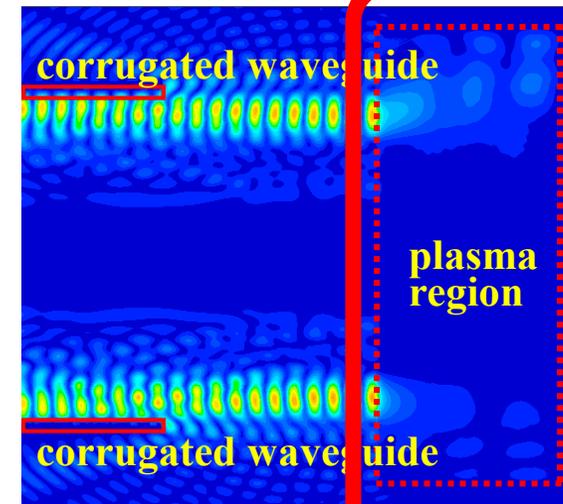
$l = 20$

distribution of electric field intensity

ねじれ無し ( $l = 0$ )



光渦 ( $l = 20$ )

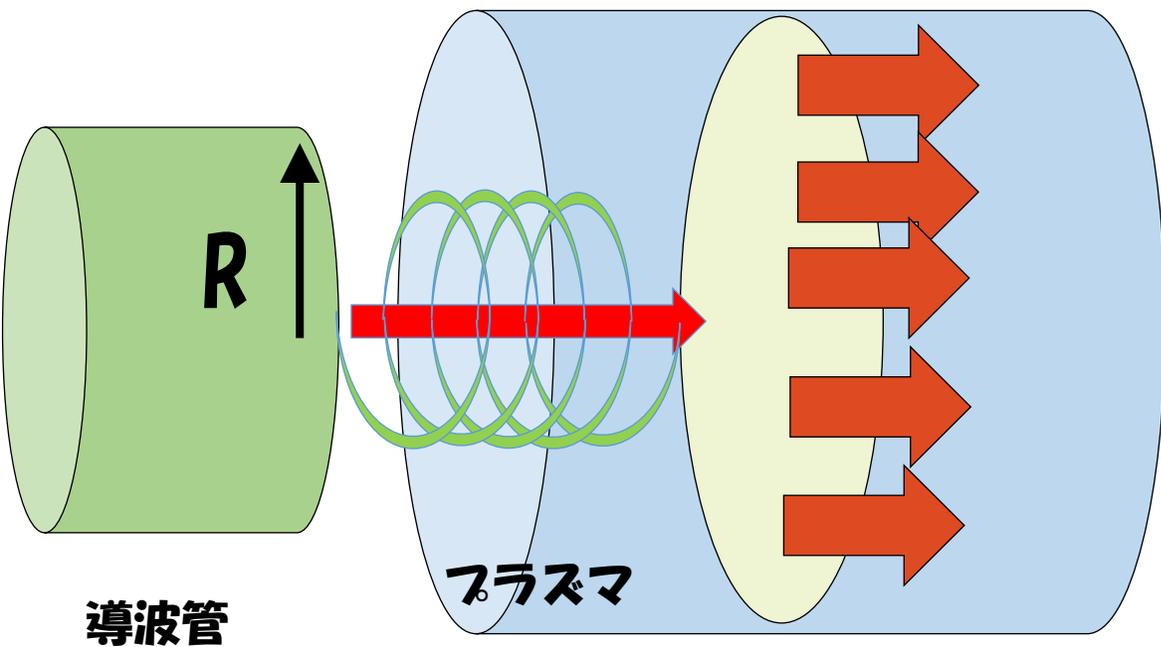


電磁波がプラズマ中に侵入

## (2) プラズマと光渦: プラズマ中のエネルギー流のトポロジカルチャージ依存性

C. Wang, H. Kawaguchi, H. Nakamura and S. Kubo, Jpn. J. Appl. Phys. **63** (2024) 09SP08.

$P$ : 断面のエネルギー流の積分

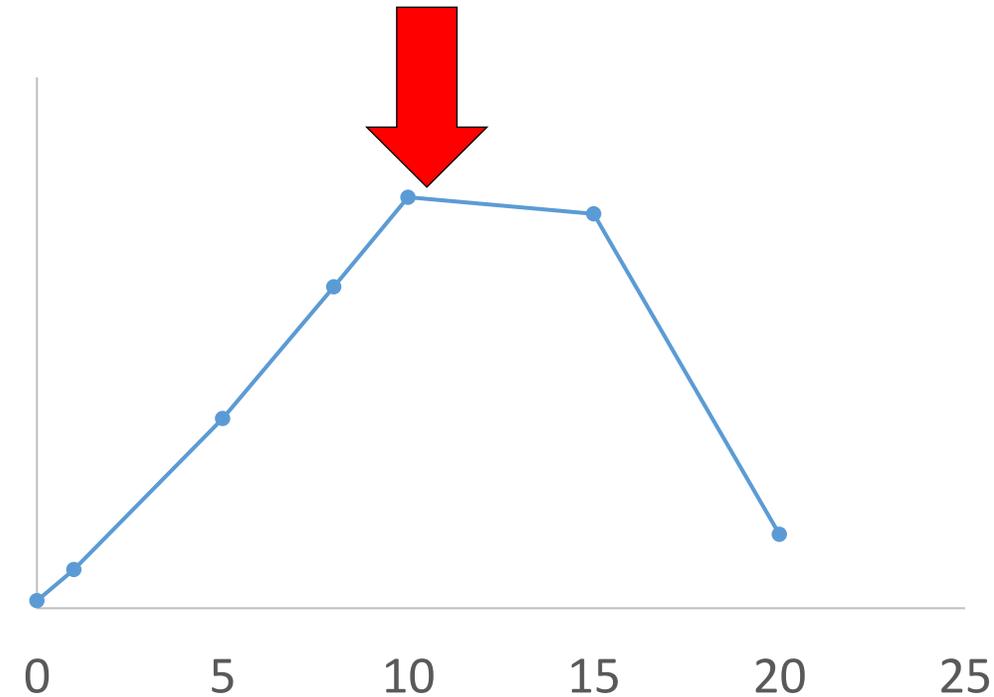
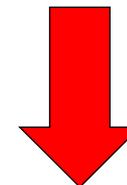


$P$  [W]

3.50E+04  
3.00E+04  
2.50E+04  
2.00E+04  
1.50E+04  
1.00E+04  
5.00E+03  
0.00E+00

0 5 10 15 20 25  
topological charge  $l$  ( $R = 30\text{mm}$ )

$l_{\max} = 10$



## (2) フラズマと光渦:まとめ

- **FDTD法を用いて、磁化フラズマ中の円筒形の波状導波管ハイブリッドモードのミリ波渦の伝播特性をシミュレート成功!**
  - **平面波の伝播できない周波数帯でも、光渦にすることで伝播可能!**
  - **トポロジカルチャージに伴い、フラズマ中で伝播しやすくなる!**
  - **ただし、 $l$ が大きくなると導波管の大きさと干渉するため、上限  $l_{\max}$  がある。**

**Chenxu WANG (核融合科学研究所 COE研究員)**

**Outstanding Presentation Award at “The 43rd JSST Annual International Conference on Simulation (JSST2024)”, Kobe in Sept. 2024.**

**Title: Numerical investigation of millimeter-wave vortex propagation in magnetized plasma**

**IAEA-FEC(FEC2025) at 成都 10月で発表!**

- C. Wang, H. Kawaguchi, H. Nakamura and S. Kubo, Jpn. J. Appl. Phys. **63** (2024) 09SP08.
- C. Wang, H. Kawaguchi, H. Nakamura and S. Kubo, J. Adv. Simulat. Sci. Eng. **12** (2025) 145.

# 成果(3) 化学進化論: 生体分子形成の分子動力学: Birthplace of Origin Material of Life

マーチソン隕石(1969年飛来)から, 90種類以上のアミノ酸を検出  
→ 宇宙空間で生命の起源物質が合成された可能性

→ ✓ 分子雲環境下での生成シナリオに着目



小林憲正先生



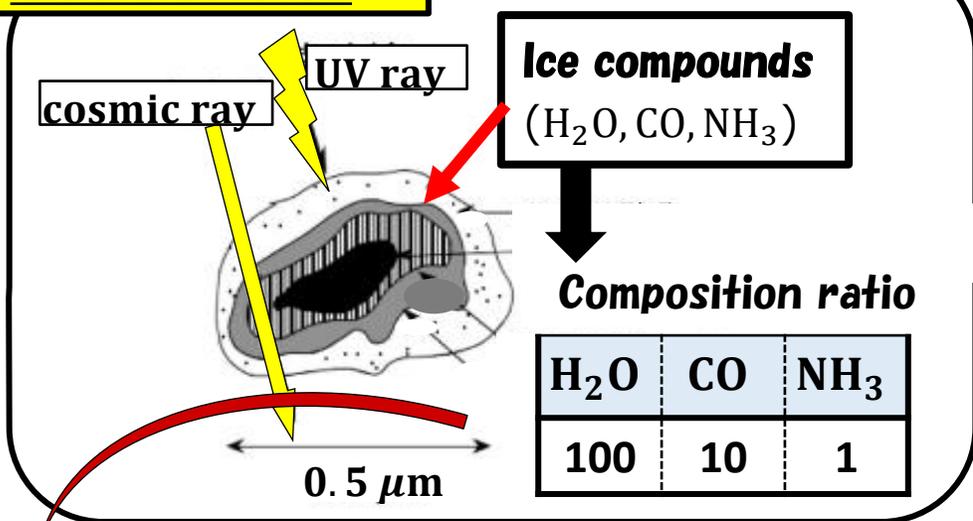
## 【研究対象】

ボトムアップシナリオに基づき、  
分子動力学シミュレーションを用いて、  
アミノ酸が合成される条件を調べる！

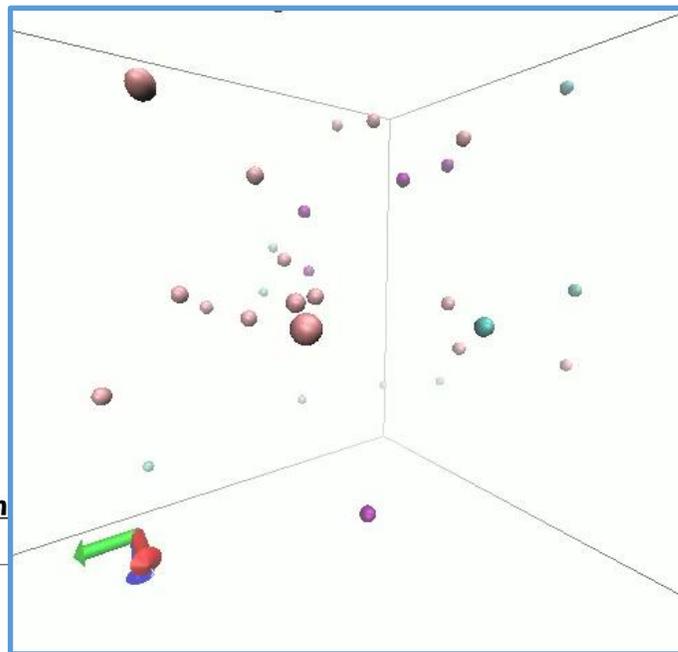
【左近樹, <https://www.s.u-Tokyo.ac.jp/ja/press/2021/7522/>】

# 生体分子形成：MD simulation result

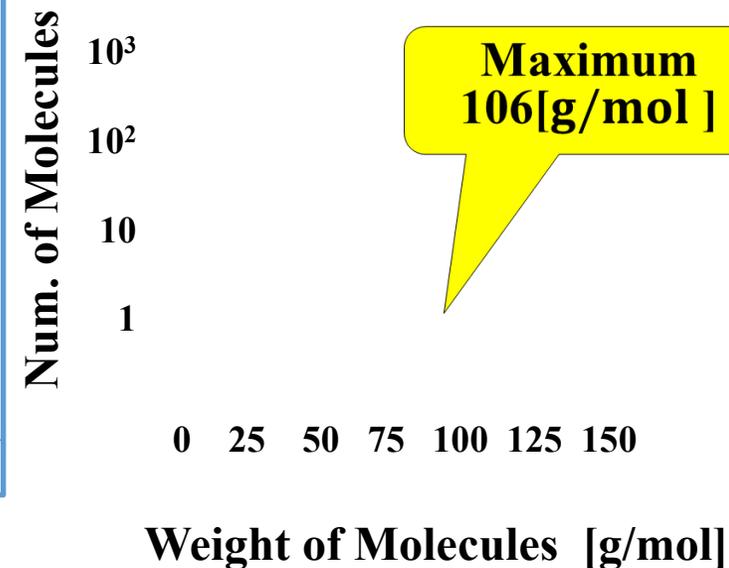
## Ice mantle dust



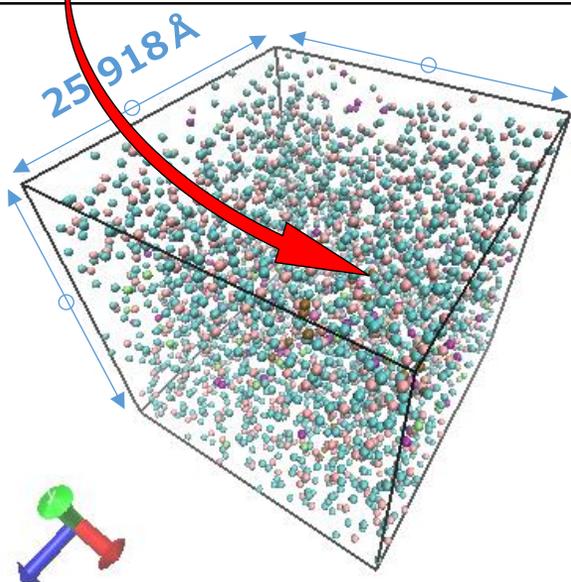
## Time evolution of molecular formation



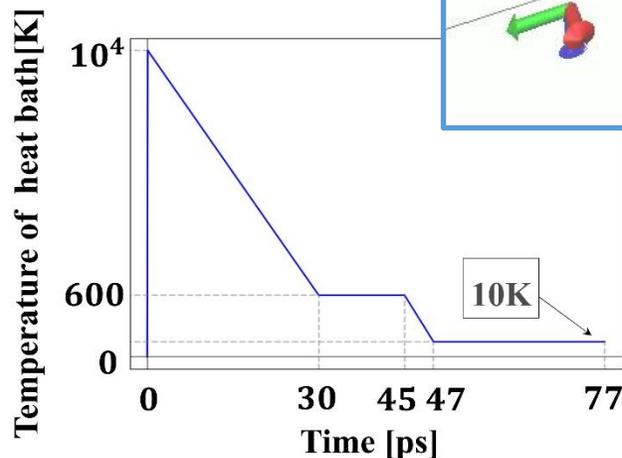
## Molecular Weight Distribution



## Simulation model in the initial state



## Temperature Control by Langevin



# 派生研究：DL-alanineの選択的分解の解明 using UVSOR, HiSOR

## DL-alanineの円二色性実験測定

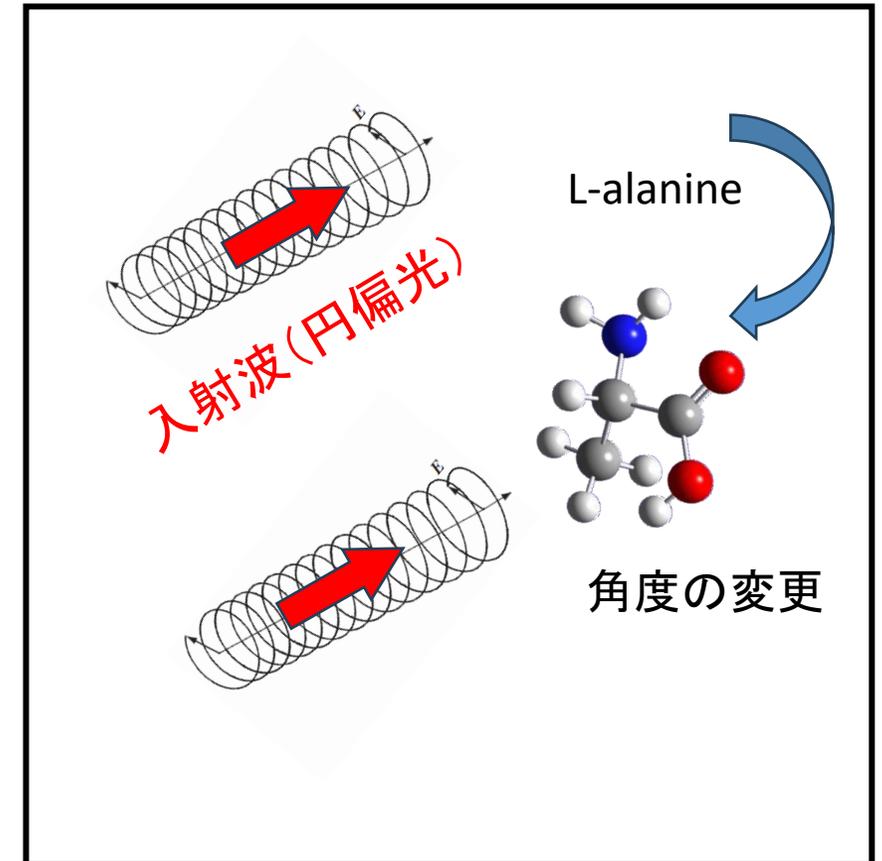
放射光施設： UVSOR, HiSOR

M. Kobayashi et al.,

Chirality, 36 (2024) e70004-1~8.

山形大齋藤誠紀G: 共同研究

1. D-alanineに右円偏光と左円偏光を照射する時間発展シミュレーションを行いCD値のスペクトルの**角度依存性**を確認する。
2. 右円偏光、左円偏光をL-alanineに照射する剛体分子動力学シミュレーションを行い、選択的分解の温度上昇の**角度依存性**を評価する。



# 成果(3) 化学進化論:生体分子形成の分子動力学 まとめ

## まとめ

宇宙空間におけるアミノ酸合成のボトムアップ過程を検証するために、**reactive 分子動力学(RMD)**シミュレーションを行った。

- **大きな有機分子を作成成功!**

# 成果(4) 非エルミートのマイクロ光学:

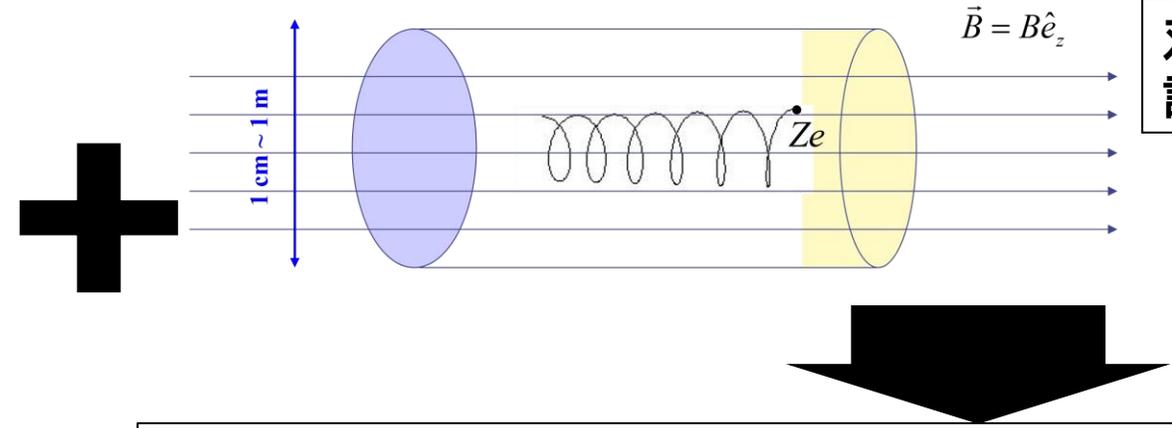
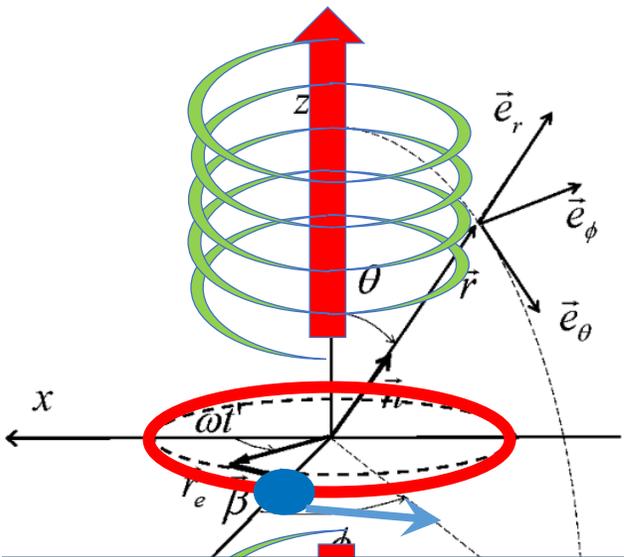
## 円柱導波管中での古典的 Van Hove 特異点近傍の電子サイクロトロン運動の光渦放射

電子サイクロトロン運動の光渦放射  
M.Katoh等,PRL.118(2017) 094801

導波管中のサイクロトロン運動の緩和  
T.Petrosky等, PRL.94(2005) 2043601

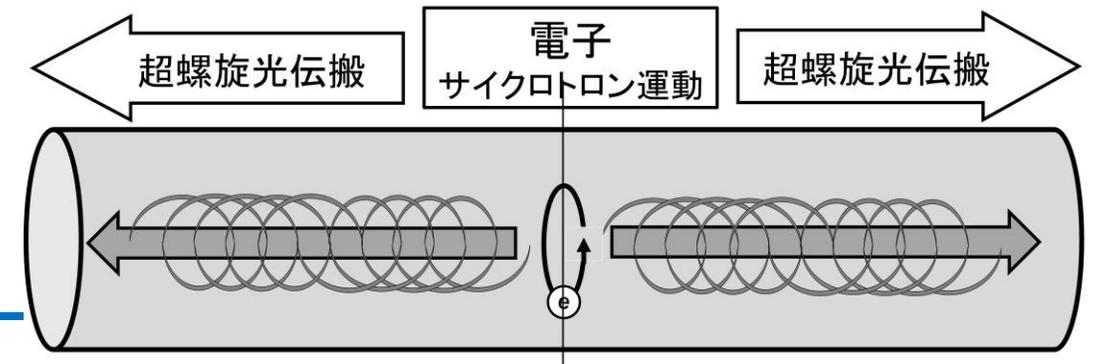
→ Friedrichs Hamiltonian  
で記述できる。

双極子近似で緩和時間が、解析  
計算で求まる。



導波管中のサイクロトロン運動からの電磁場伝播  
Y. Goto, S. Garmon, T.Petrosky等PTEP, DOI: 10.1093/ptep/ptae021

**量子ラダー と adatom**  
H. Nakamura等, PRL 99(2007) 210404



# (4) 非エルミートのマイクロ波光学：Classicalization of Quantum Mechanics:

## Classical Radiation Damping Without the Runaway Solution

*T. Petrosky et al., Physics* **2024**, 6, 1191–1203. <https://doi.org/10.3390/physics6040073>

### 主題

Abraham-Lorentz(AL)方程式に内在する古典放射減衰の矛盾はどこから生じるのか？

### AL方程式

$$m_e \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}_{\text{ex}}(t) + m_e \tau \frac{d^3 \mathbf{r}}{dt^3}$$

→古典的減衰過程を取り扱うために提案された

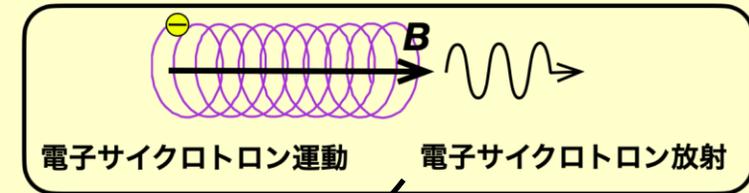
### 問題点

- ▶ 位置の3回微分項の影響により非物理的な解となる
  - 時間的に発散する暴走解
  - 因果律に反す!

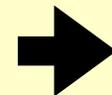
### 古典的Friedrichsモデル

古典的減衰過程を含む現象を厳密に解析

$$H = \omega_1 q_1^* q_1 + \int_{-\infty}^{\infty} dk \omega_k q_k^* q_k - \lambda \int_{-\infty}^{\infty} dk (V_k^* q_1 q_k^* - V_k q_1^* q_k)$$



- 対角化可能な双線形型のハミルトニアン

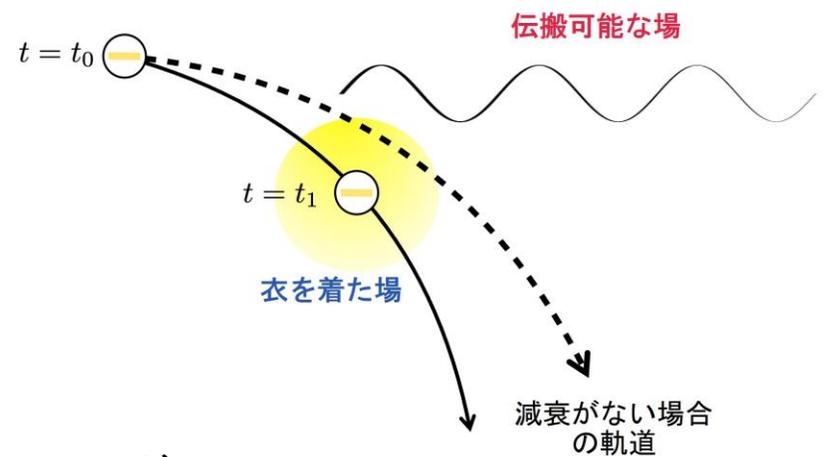


この厳密解を参考に、AL方程式の導出過程を再考

# (4) 非エルミートのマイクロ波光学：AL方程式の導出における問題点

運動する点電荷の作る電磁場:  
Lienard-Wiechert ポテンシャル

## 古典的Friedrichsモデルから得られる厳密解



場のモード

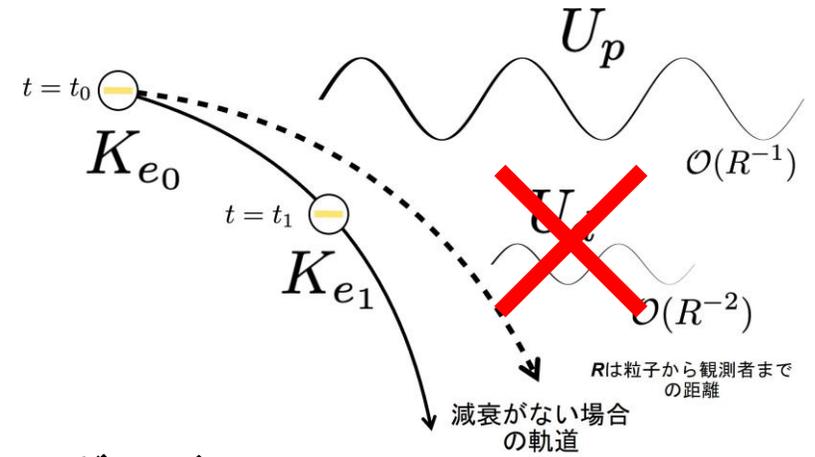
$$\bar{q}_\kappa = \bar{Q}_\kappa + \lambda^2 \bar{V}_\kappa^* \int_{-\infty}^{\infty} d\kappa' \frac{\bar{V}_{\kappa'}}{\xi^-(w_{\kappa'}) (w_{\kappa'} - w_\kappa - i\varepsilon)} \bar{Q}_{\kappa'}$$

伝搬可能な場

衣を着た場

時間減衰した場は無限遠へ伝搬

## AL方程式の導出法



### エネルギーバランス

$$K_{e0} - K_{e1} = U_p + \cancel{U_d}$$

無視  
(衣を着た場に相当)

### AL方程式の導出における問題点

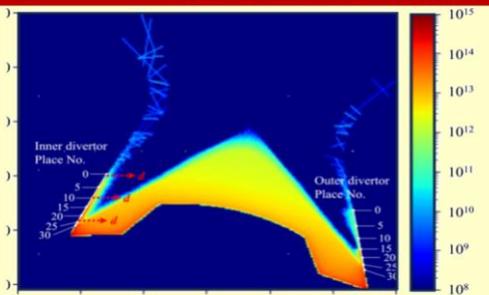
Udは伝搬できないとし、エネルギーバランスから除外

**AL方程式の矛盾は、場と粒子を一緒に解かなかったため！**

Cf:MMIアルゴリズム (Macro-Micro Interlocked Algorithm法)

# 他分野との研究核融合科学へのimport

成果(1) JA-DEMO 周辺プラズマの水素分子分布



核融合：非接触プラズマ

## 所員

- 中村 浩章 (NIFS・名大)
- Wang Chenxu (NIFS)
- 小林 政弘 (NIFS・東大)
- 後藤 勇樹 (NIFS)
- 宇佐見 俊介 (NIFS・東大)
- 吉村 信次 (NIFS・名大)
- 森高 外征雄 (NIFSプラズマ量子プロセス)

## 戦略メンバー

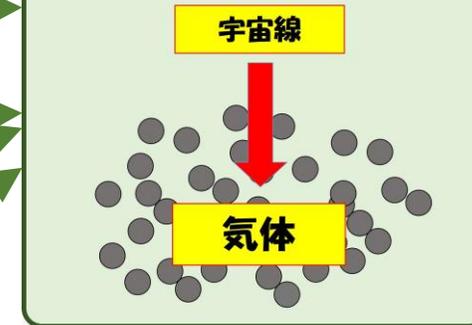
- 小林 憲正 (横国大)
- 久保 伸 (中部大)
- 加藤 政博 (広大・IMS)
- 川口 秀樹 (室蘭工大・NIFS)
- 齋藤 誠紀 (山形大)
- 田中 宏彦 (名大)
- 井戸 毅 (九大)

## 所外

- Tomio PETROSKY (テキサス大オーチン校)
- 澤田 圭司 (信州大)
- 星野 一生 (慶応大)
- 大野 哲靖 (名大)

核融合：機能的なECH加熱法

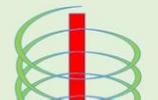
成果(3) 生体分子形成の分子動力学



加速器の多角的利用

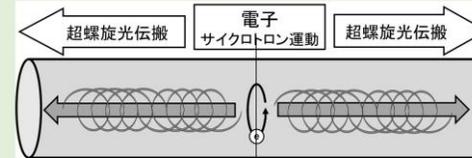
成果(2) プラズマと光渦

光渦(電磁波)



プラズマ

成果(4) 非エルミートマイクロ波光学  
導波管中のサイクロトロン運動からの電磁波伝播



MMIへの  
理論研究からの事例

了