

# フラーレンを用いたペアイオンプラズマ 生成と応用に関する研究

大原 渡, 畠山 力三

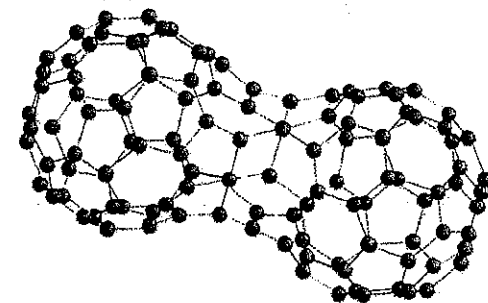
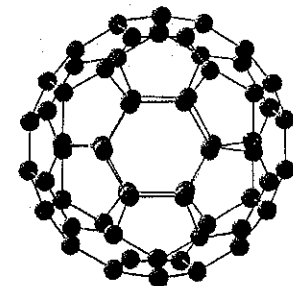
東北大学大学院工学研究科・電子工学専攻



TOHOKU  
UNIVERSITY

ECEI

- 研究背景・目的
- ペアイオンプラズマ生成（物理研究）
- フラーレンベース材料合成（材料応用）



E-mail: [oohara@ecei.tohoku.ac.jp](mailto:oohara@ecei.tohoku.ac.jp)  
<http://www.plasma.ecei.tohoku.ac.jp>

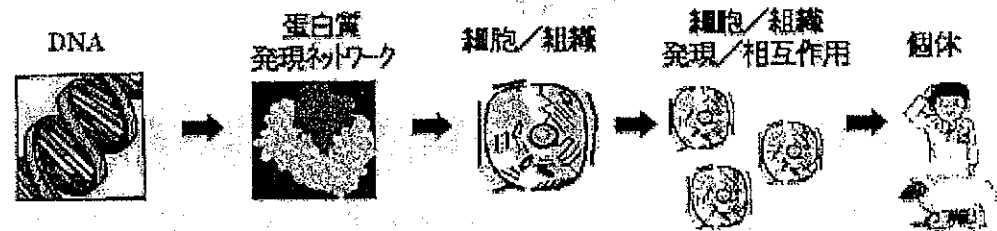
# 階層構造

## 生命科学分野

分子動力学スケール(蛋白質折りたたみ機構, 生体膜)

細胞スケール(生体維持)

個体スケール



## プラズマ科学分野

電場構造・磁場構造の中で、プラズマ構成粒子の運動などに関連したミクروسケールの物理から、流体運動や熱輸送などマクروسケールの物理まで、様々な時空間スケールの物理が存在しており、それらが複雑に絡み合っている。

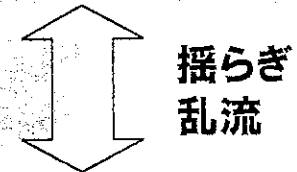
### 1) 異なる階層間の相互作用

- ・異なる基礎方程式で記述される対象
- ・複数の階層間の情報交換を含む

### 2) 同一階層で、異なる波長領域の波の相互作用

- ・同じ基礎方程式で記述される対象(同一階層)
- ・広い空間・時間ダイナミックレンジを有する

流体運動や熱輸送など  
(マクروسケール)



荷電粒子運動に関する現象  
(ミクروسケール)

イオン系(セミミクروسケール)

電子系(ミクروسケール)

# 通常プラズマとペアプラズマ

## 通常プラズマ

電子と正イオンから構成されている。

(正イオン/電子) 質量比 は高い。

$$(m_+/m_e = 10^3 \sim 10^5)$$

荷電粒子間の大きな質量差が、プラズマ集団現象に対して顕著な時空間非対称性をもたらし、これがミクロスケールにおける時空間階層構造を生み出す。

## ペアプラズマ

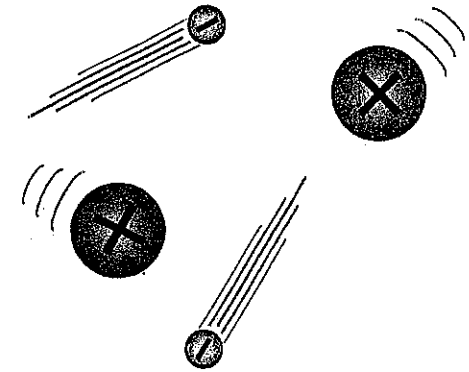
等質量正負荷電粒子から構成されている。

(正電荷粒子/負電荷粒子) 質量比 が等しい。

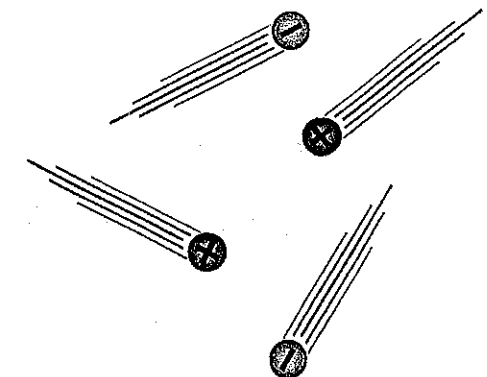
$$(m_+/m_- = 1)$$

正負荷電粒子集団現象に対して時空間対称性をもたらし、これが時空間階層構造の縮退をもたらす。

## 通常プラズマ



## ペアプラズマ

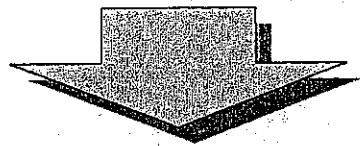


# ペアプラズマの研究

高エネルギー・宇宙天文分野において、反物質物性研究の中でCPT対称性(物質・反物質の完璧な対称性)の真偽に関連して陽電子(positron)が注目された。電子と混合した電子-陽電子ペアプラズマが生成された。ペアプラズマ物性の実験・理論研究が行われた(1980年代後半~1990年代)。

## 電子-陽電子ペアプラズマ実験の問題点

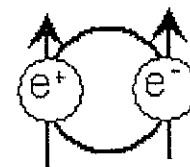
- ・再結合による短いプラズマライフタイム
- ・プラズマ計測の困難さ



理論的研究が先行しており、実験的検証が進まない。

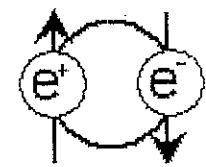
### Positronium (Ps)

ortho-Ps



Lifetime: 140 ns

para-Ps



Lifetime: 0.13 ns

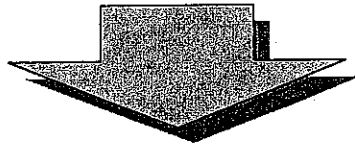
荷電粒子集団現象:

線形/非線形 波動伝搬特性

(荷電粒子自己無撞着電磁場を介する)

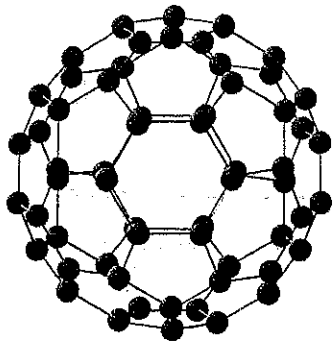
# ペアイオンプラズマ

陽電子の取り扱いが実験研究を困難にしている。



取り扱い易いイオンのみから成るペアプラズマで実験研究を行う

正負イオン( $C_{60}^+$ ,  $C_{60}^-$ )に成り易い  
フラレン  $C_{60}$  に注目して、  
これをイオン種としたペアイオンプラズマ  
の生成を目指した。



質量数 : 720 amu  
質量誤差 :  $10^{-6}$ - $10^{-4}$

完全等質量ではない

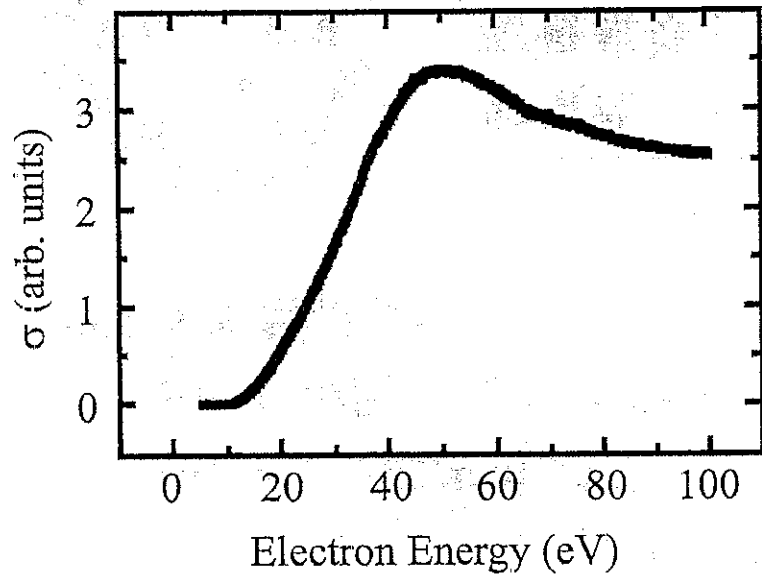
$C_{60}$  をプラズマに適用した研究

- ・負イオンプラズマ研究で利用 ( $SF_6$  より高質量数)  
(東北大: 平田, 畠山, 佐藤(徳))
- ・正イオンとして利用 (応用指向)  
(茨城大: 佐藤(直), 真瀬)

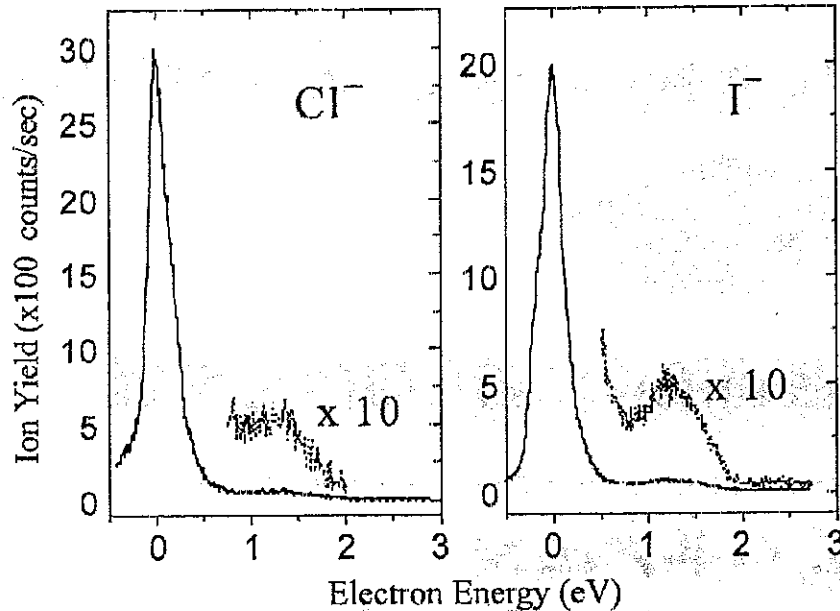
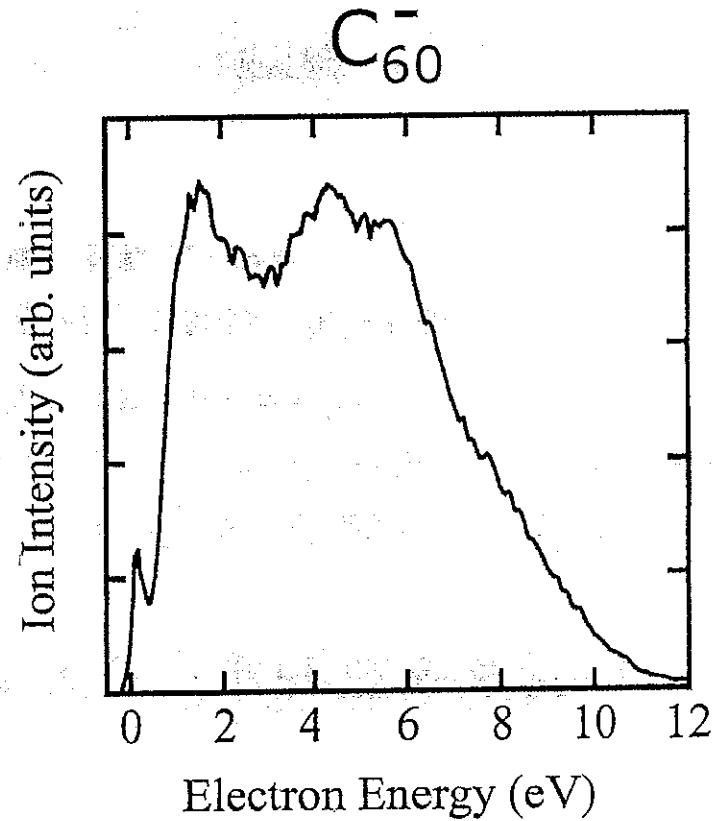


- ・電子2個分の質量誤差
- ・同位体の存在 ( $C^{12}$ ,  $C^{13}$ )

# 電子衝突・付着断面積



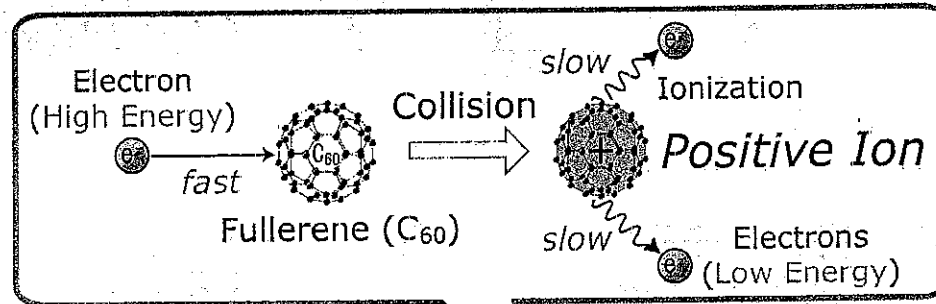
$C_{60}^+$



$C_{60}$ の最大のメリットは  
正負イオン共に成り易いこと

# ペアイオンプラズマの生成方法

“Pair-Ion Plasma Generation using Fullerenes”, W. Oohara and R. Hatakeyama, Physical Review Letters, 91 (2003) 205005.

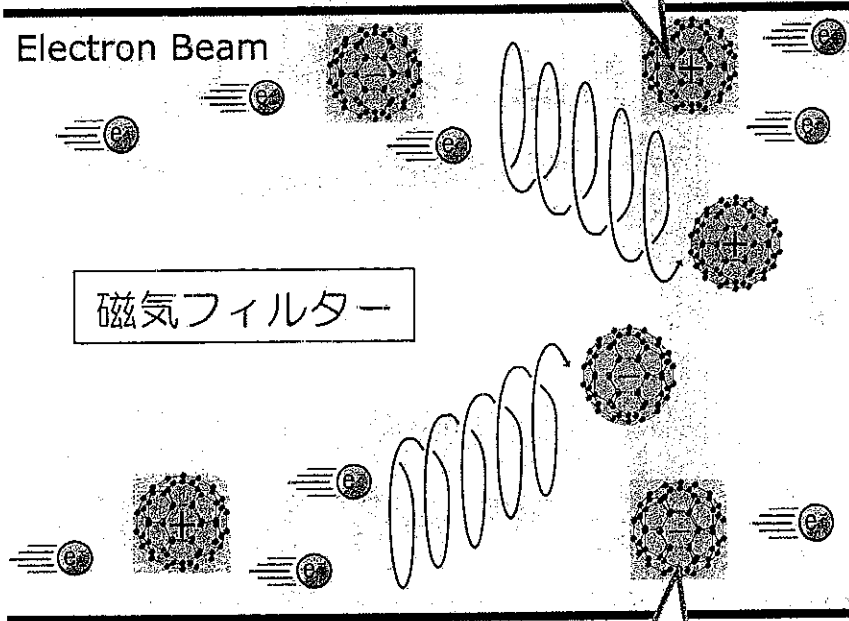


電子衝突電離

環状電子ビーム



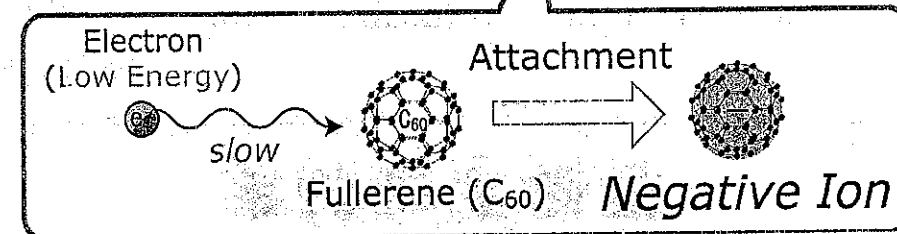
**B**



ペアイオンプラズマ

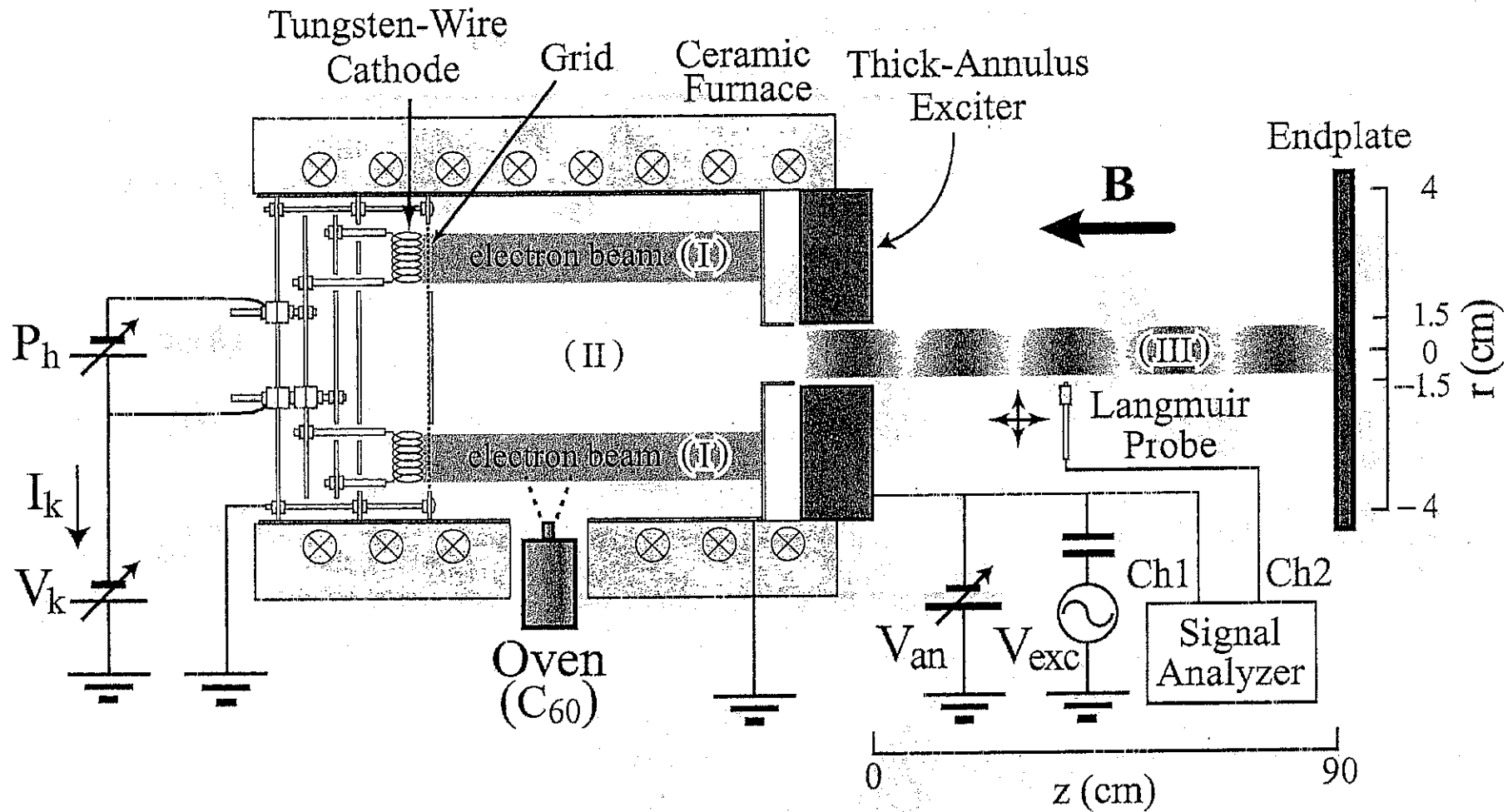
$C_{60}^{\pm}$  Larmor Radius : 0.9 cm  
 $e^-$  Larmor Radius : 0.0008 cm

環状電子ビーム



電子付着

# 実験装置概要



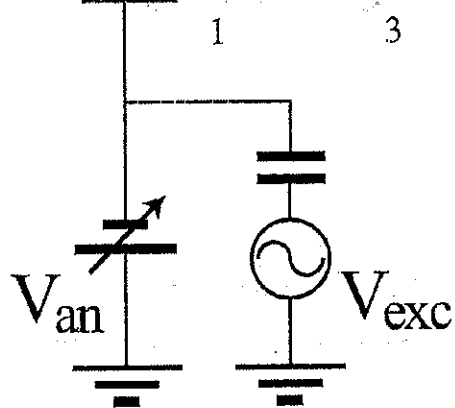
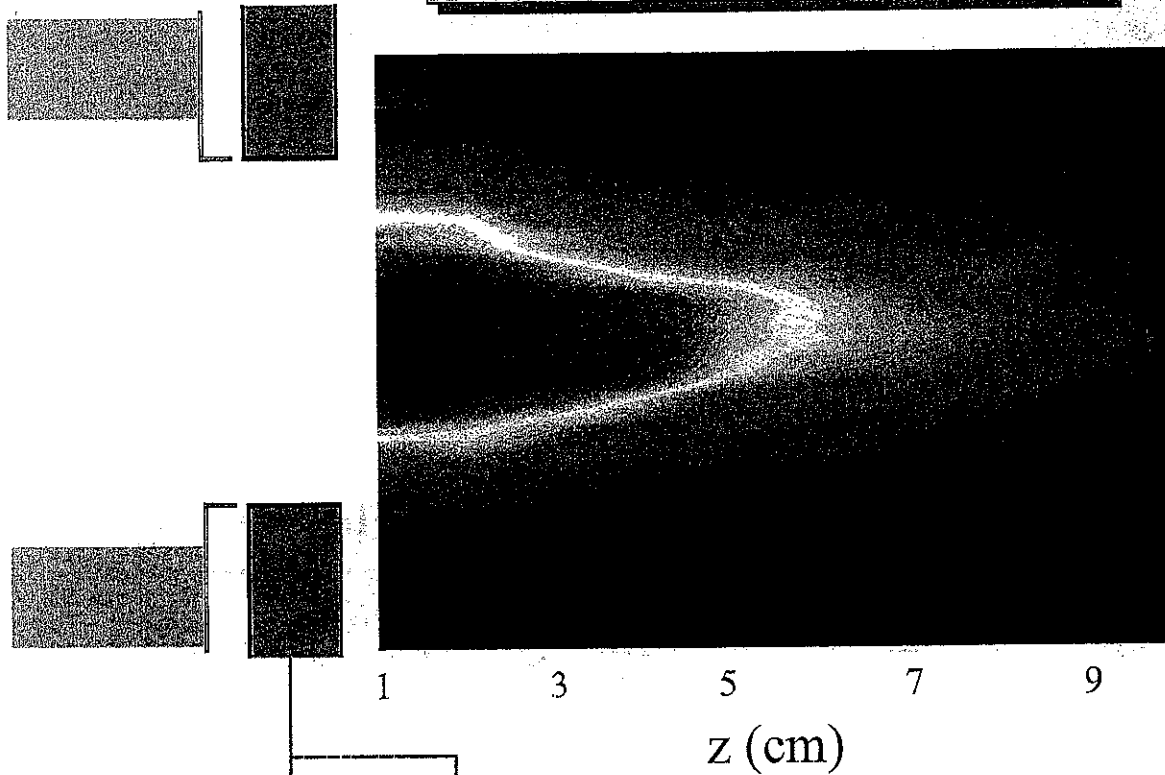
## 典型的な実験パラメータ

$P = 5 \times 10^{-4}$  Pa,  $B = 0.3$  T (uniform),  $C_{60}$  (Purified > 99.5%)  
 $n = 10^7 - 10^8$  cm $^{-3}$ ,  $T = 0.5$  eV

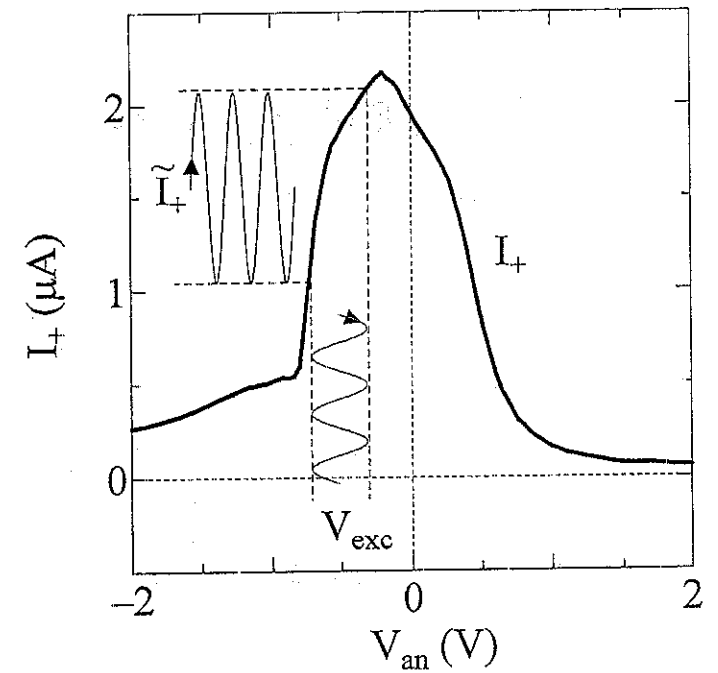
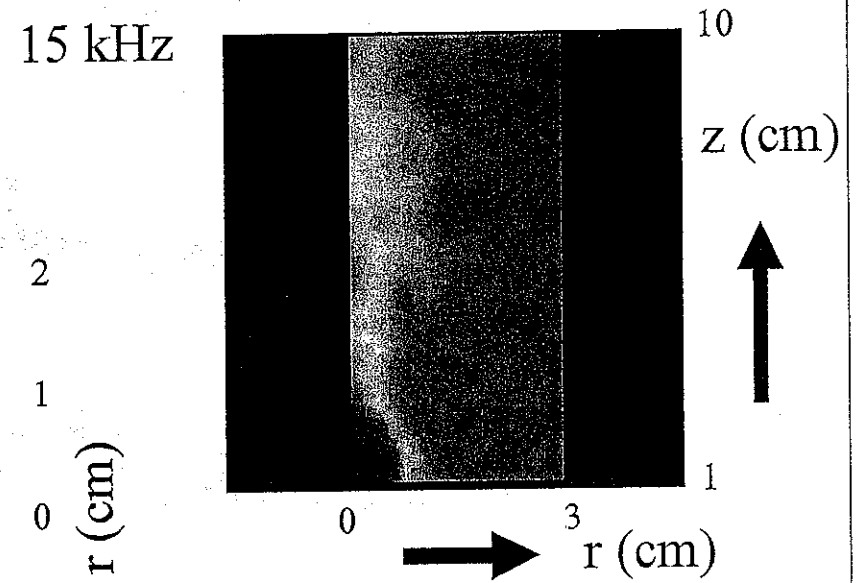


# 静電波動の励起

2D Static Plasma Profile



15 kHz



# 静電波動の種類

“Properties of Pair-Ion Plasmas using Fullerenes”, R. Hatakeyama and W. Oohara, Physica Scripta, T116 (2005) 101.

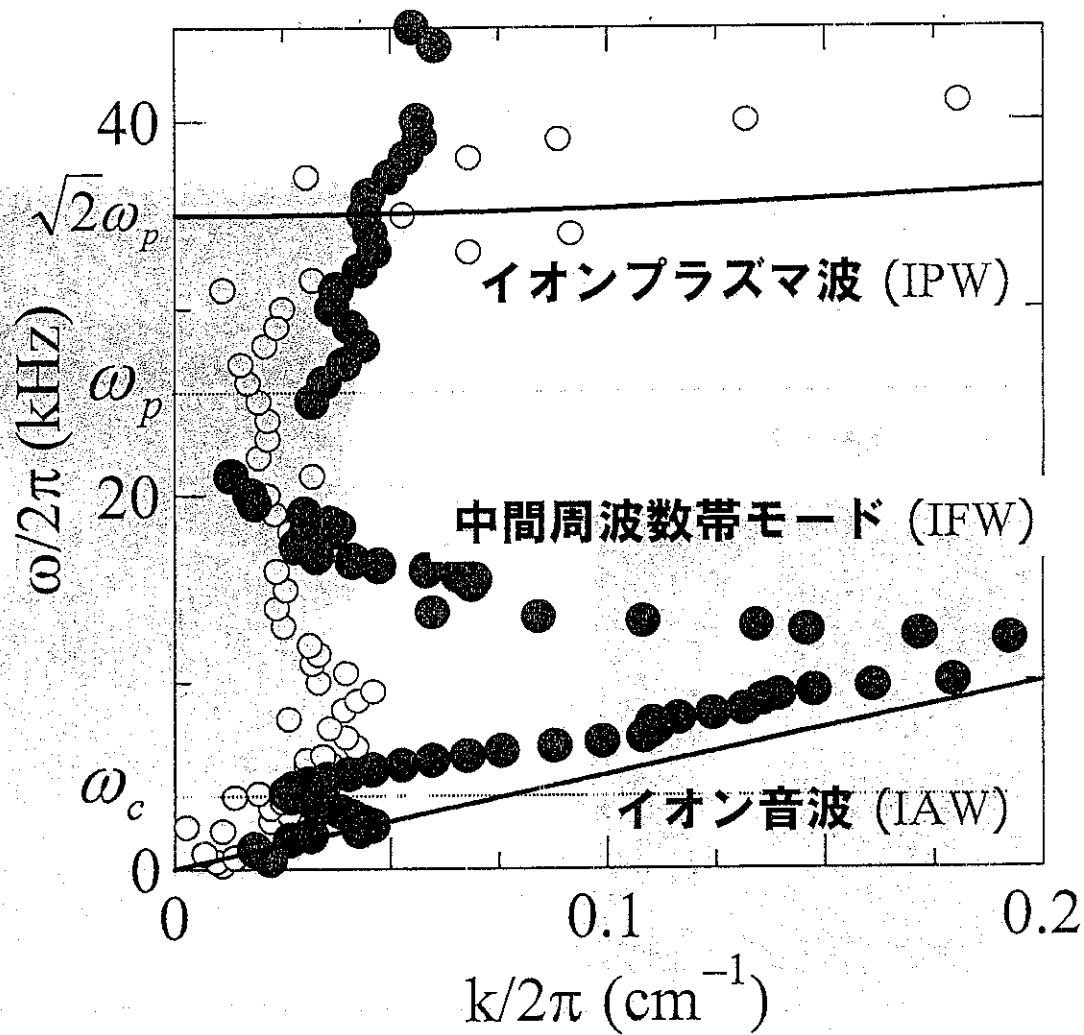
“Electrostatic Waves in a Paired Fullerene-Ion Plasma”, W. Oohara, D. Date, and R. Hatakeyama, Physical Review Letters, in press.

$$\omega^2 = C_s^2 k^2 + 2\omega_p^2$$

Ion Plasma Wave

$$\omega^2 = C_s^2 k^2$$

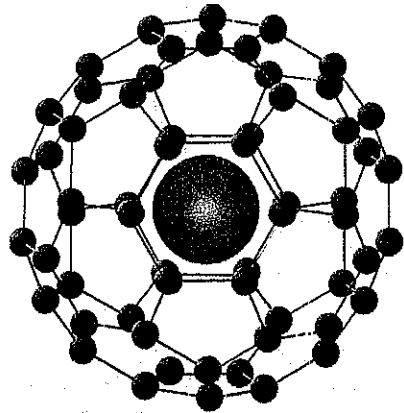
Ion Acoustic Wave  
(Thermal mode)



# フラーレンベースの材料合成

イオン化された(活性状態の)フラーレンを活用して、  
大量合成を念頭においたフラーレンベースの材料開発を行った。

異原子・分子をフラーレンに衝突させて  
内包フラーレンの合成



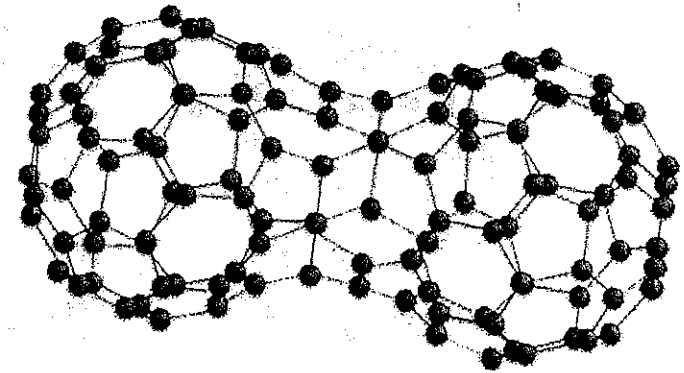
窒素原子内包の場合

擬似原子構造, 長寿命不対電子スピン

スピントロニクス素子

量子コンピュータ

フラーレン同士の衝突による  
融合体(ダイマー)の合成



ナノサイズ磁性体となる可能性

# フラーレンジダイマーの合成

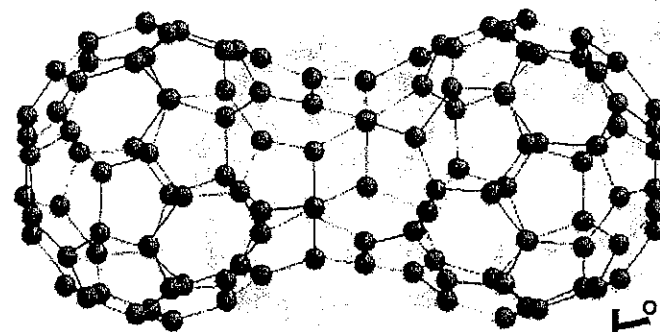
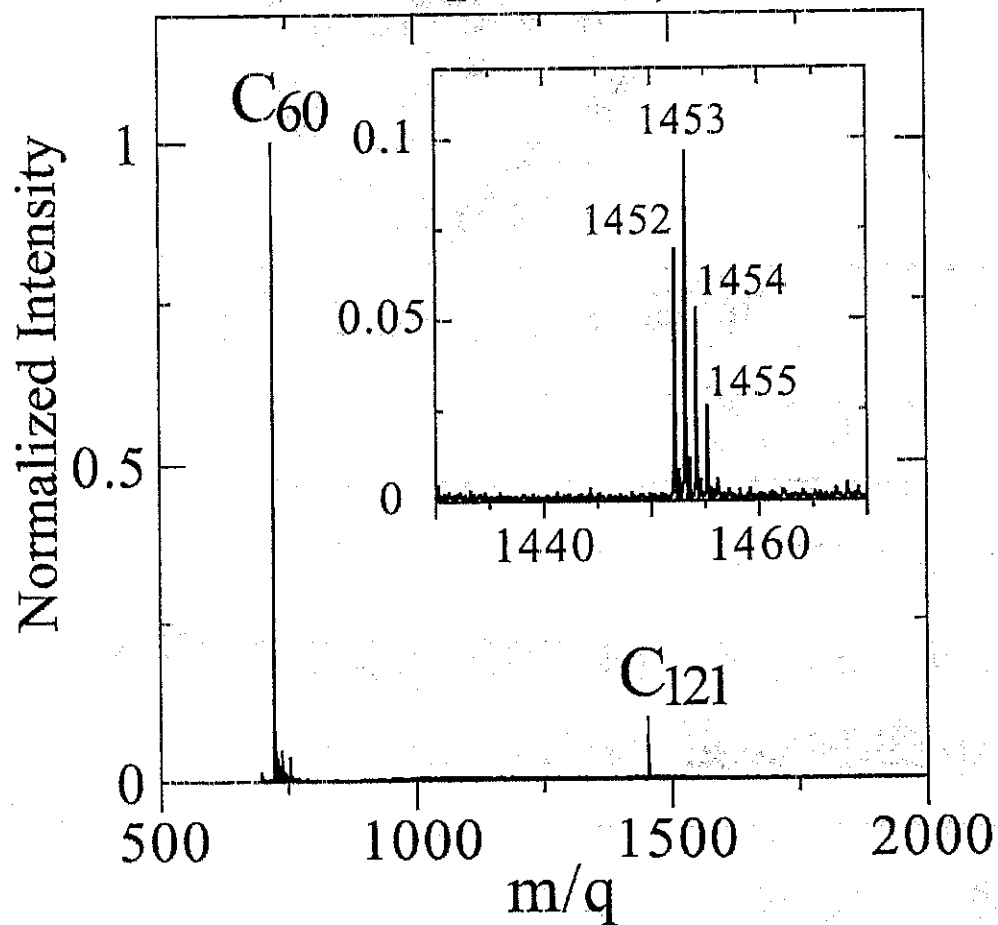
"Formation of Fullerene Dimers in Pair-Ion Plasma", W. Oohara, H. Iwata, D. Date, and R. Hatakeyama, Thin Solid Films, 475 (2005) 49-53.  
"Pair-Ion Plasma Generation and Fullerene-Dimer Formation", W. Oohara and R. Hatakeyama, Thin Solid Films, 435 (2003) 280-284, 2003.

マトリックス支援

レーザー脱離飛行時間型質量分析

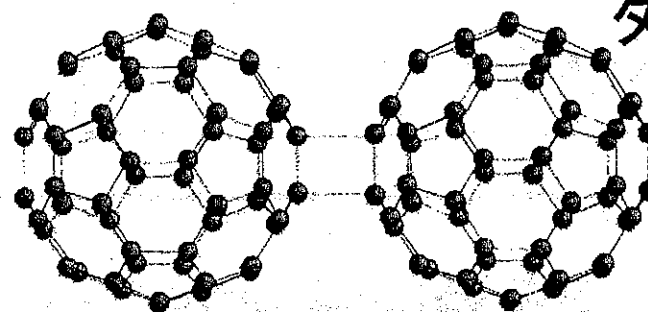
(MALDI-TOF MS)

$V_k = -120 \text{ V}$ ,  $V_a = -90 \text{ V}$



ピーナッツ型

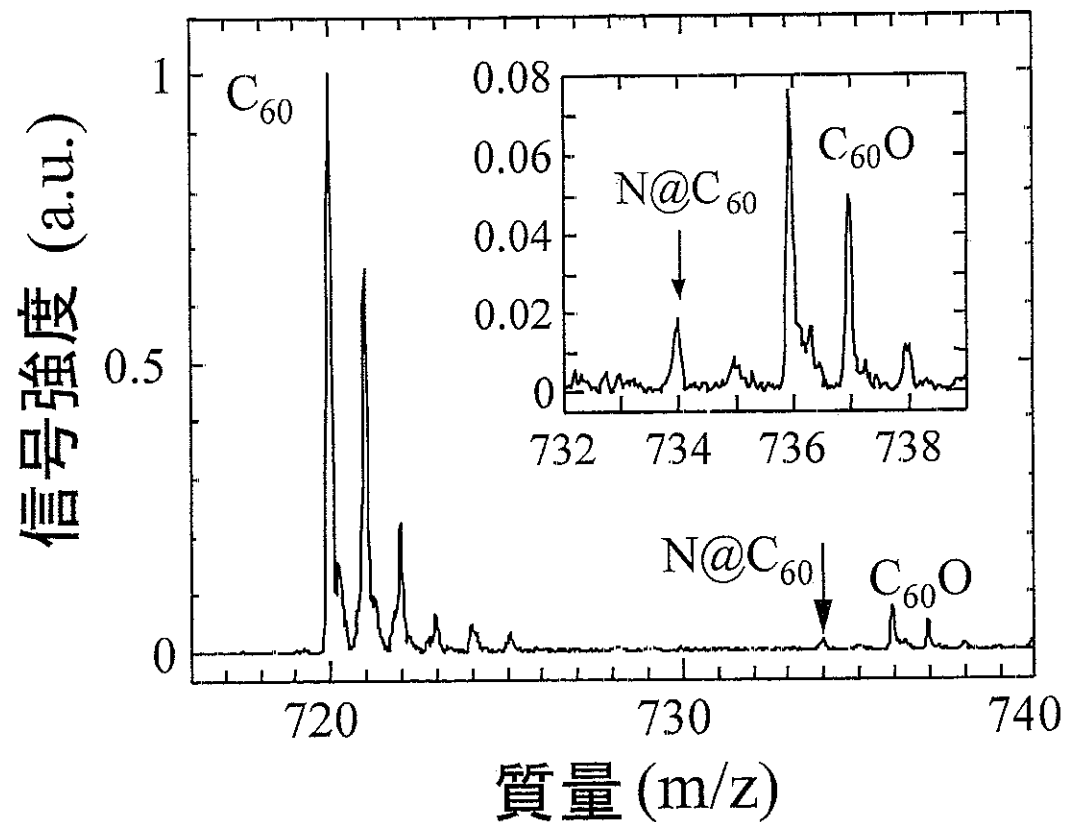
ダイマー(イメージ図)



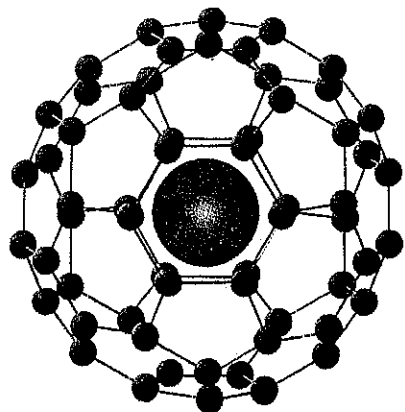
ダンベル型

Matrix: 9-nitroanthracene (223 amu)  
Solvent: Toluene (92 amu)  
TOF Mode: Negative-Ion Mode

# 窒素内包フラーレンの合成



MALDI-TOF MS



更なる内包効率の  
増加が今後の課題

電子スピン共鳴分析 (ESR)

