

# ペアイオンプラズマの物性

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

「プラズマと物質科学」の研究討論会 於 核融合科学研究所 (2002.11.19)

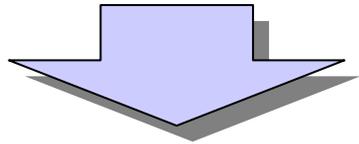
## 内容

- ペアイオンプラズマの生成方法
- ペアイオンプラズマ中の静電波動伝搬
- ペアイオンプラズマを用いたフラーレンダイマー形成

# Research Background

A plasma usually consists of electrons and positive ions.

The mass ratio of positive ions to electrons is very high. ( $m_+/m_e = 10^4 \sim 10^5$ )



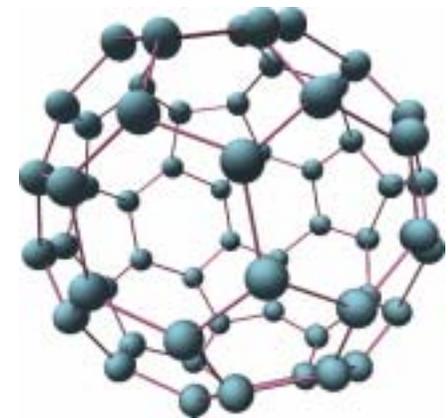
On the other hand . . .

**Pair Plasmas** consisting of positive and negative charged particles with **equal mass** ( $m_+/m_- = 1$ ) have been investigated.

However, it is not easy to generate, maintain and measure the electron-positron plasma.

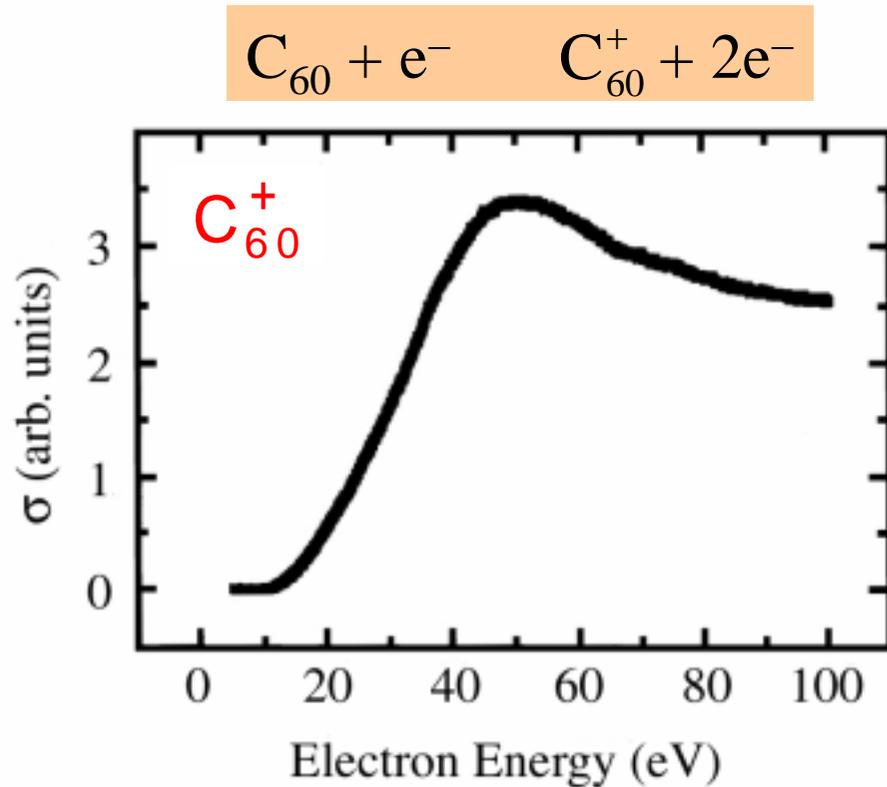
**Fullerene C<sub>60</sub>** has a stable structure and it is a promising material for application.

e.g. Dust Plasma among Planets  
Electron-Positron Plasma

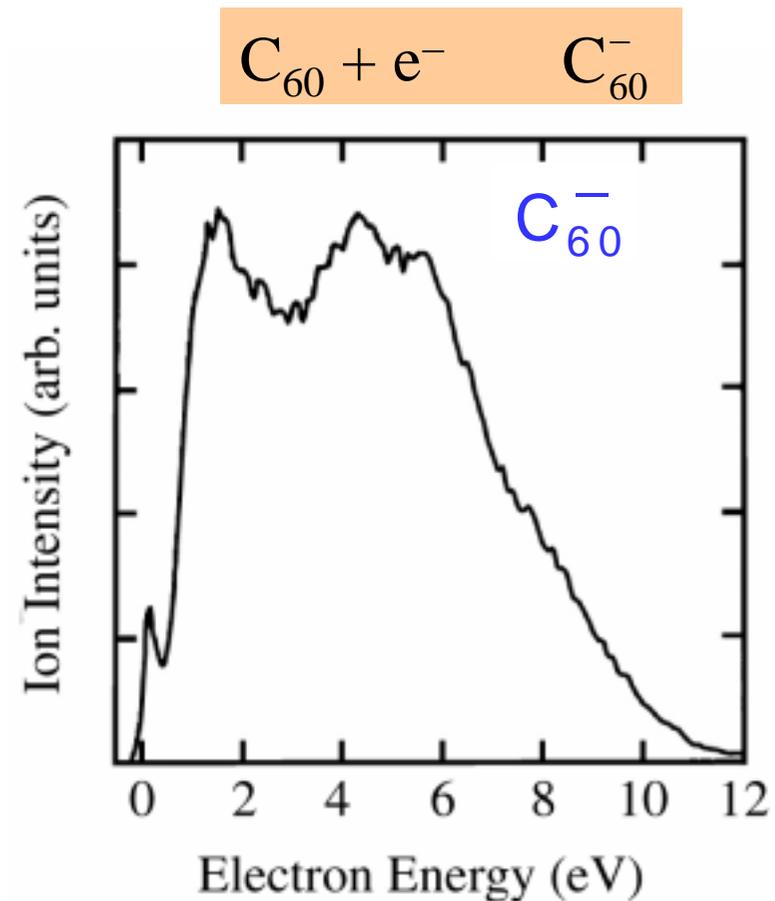


We tried to generate **Pair-Ion Plasma** ( $C_{60}^+ - C_{60}^-$ ) consisting of same mass ions using **Fullerene**.

# Cross Section for $C_{60}$

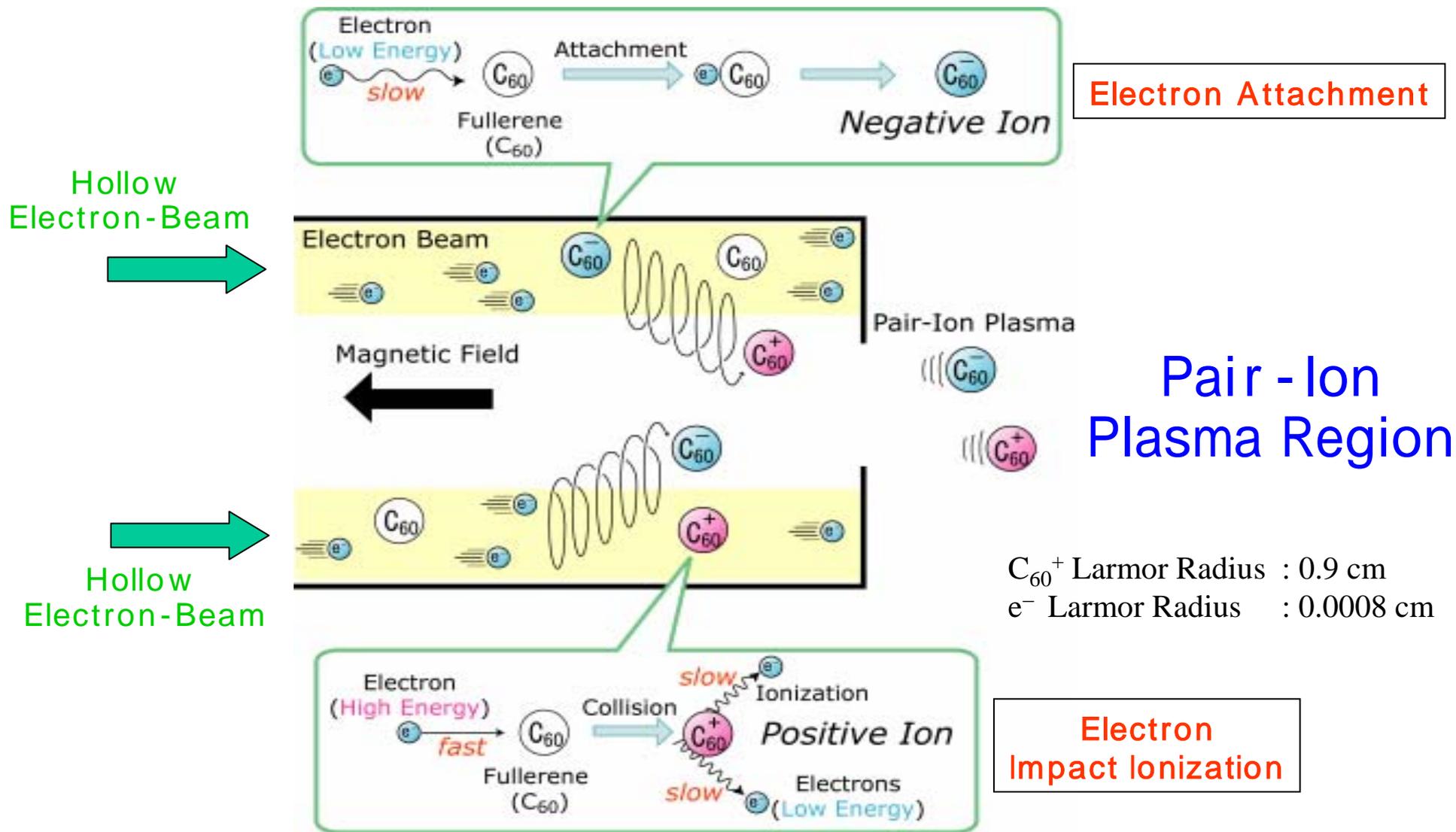


Electron Impact Ionization  
Cross-Section for  $C_{60}$ .  
[ S. Matt et al. : J. Chem. Phys.  
105 (1996) 1880 ]

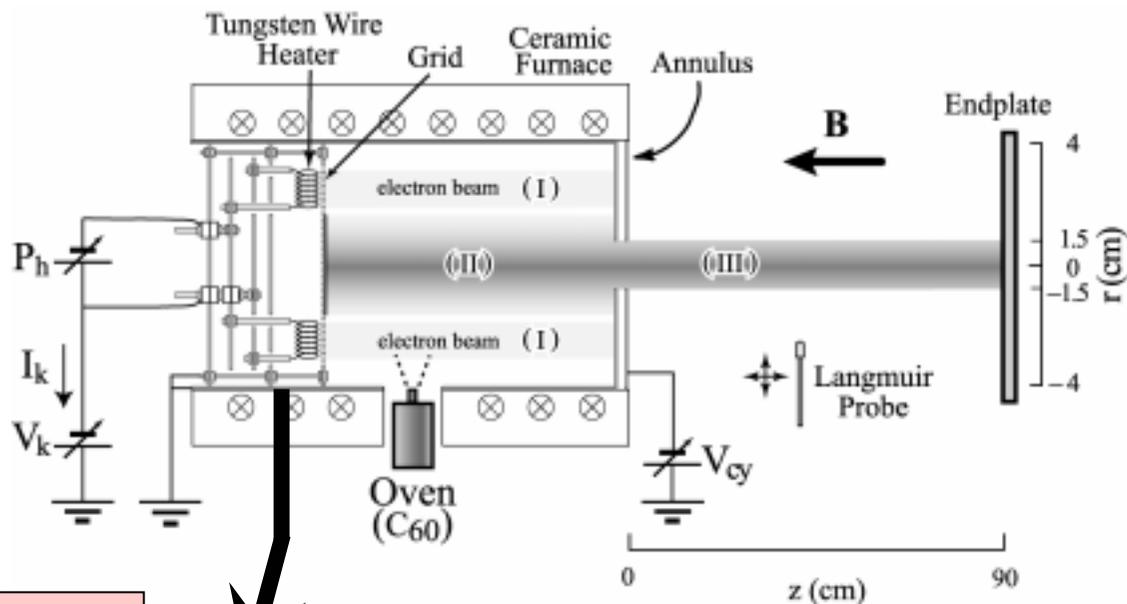


Electron Attachment  
Cross-Section for  $C_{60}$ .  
[ J. Huang et al. : J. Phys. Chem.  
99 (1995) 1719 ]

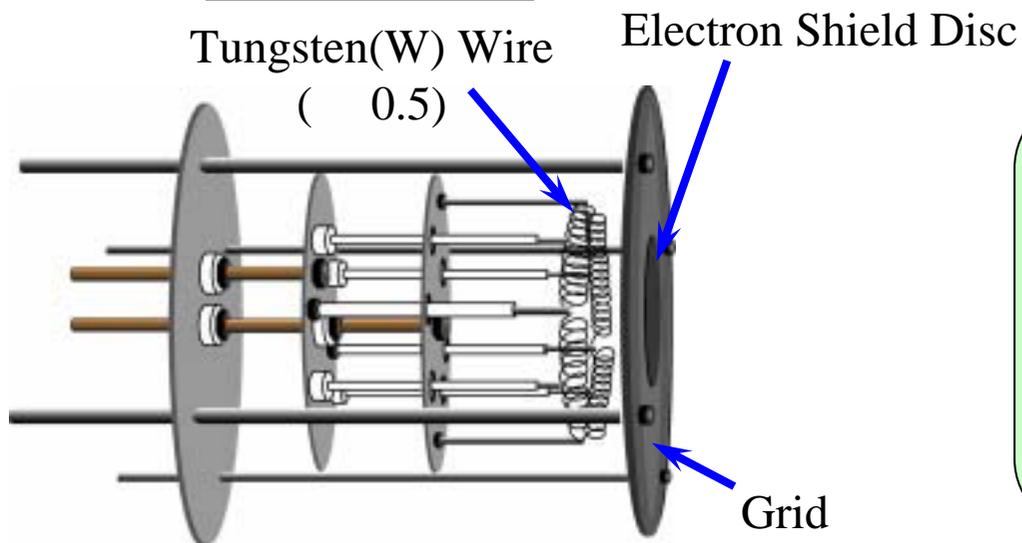
# ペアプラズマの生成原理



# 実験装置



## 電子ビーム源

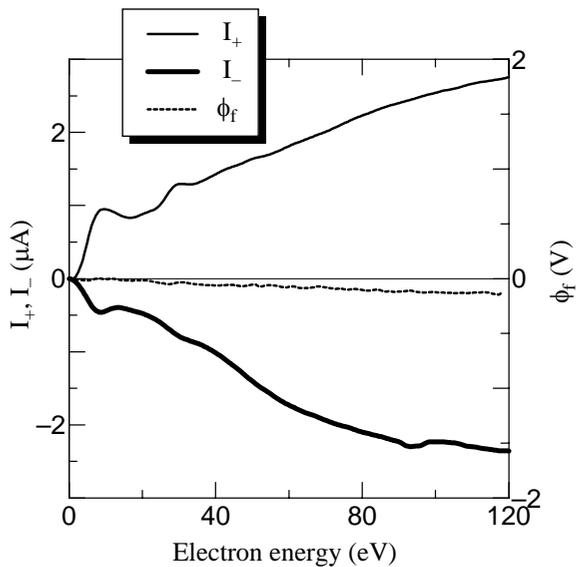


## 実験パラメータ

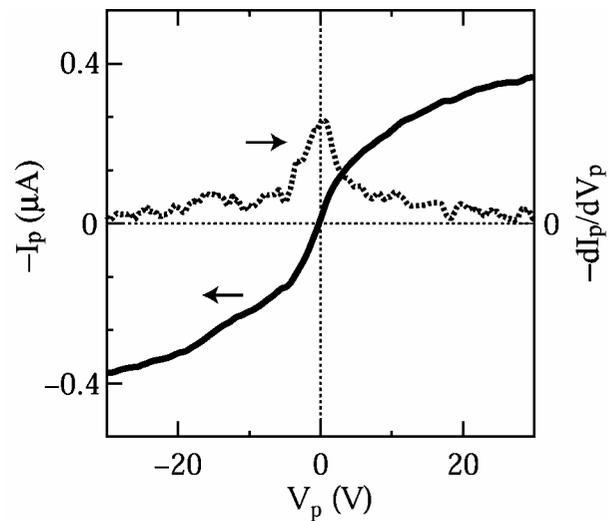
Pressure	: $5 \times 10^{-4}$ Pa
Magnetic Field	: 0.3 T (uniform)
Fullerene Sample	: $C_{60}$ (Purified > 99.5%)
Plasma Density	: $2 \times 10^7$ cm <sup>-3</sup>
Ion Temperature	: 1 eV

# パイオンプラズマの生成

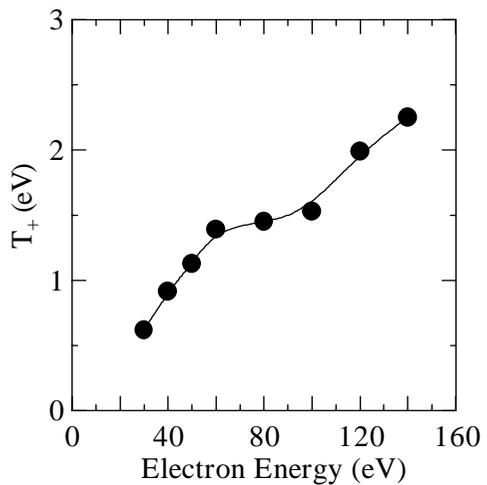
## 放電特性



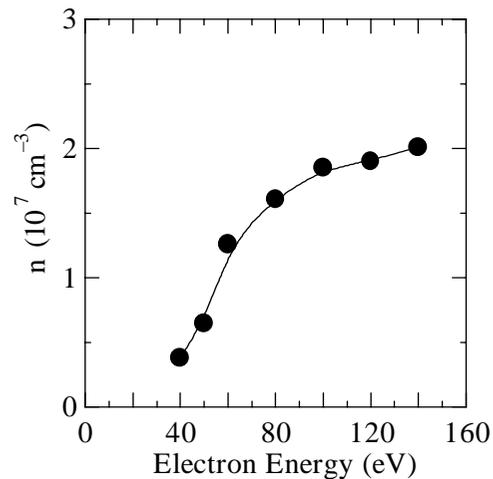
## ラングミュアプローブ特性



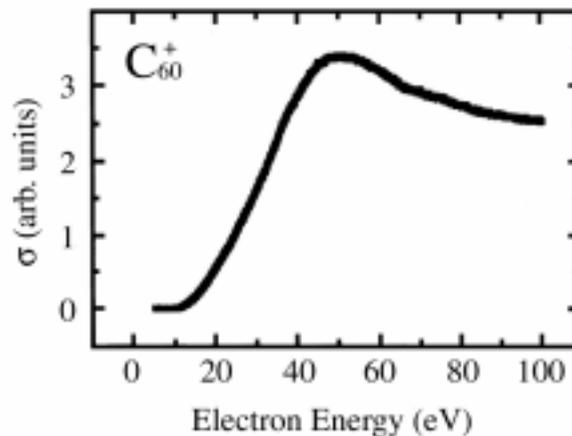
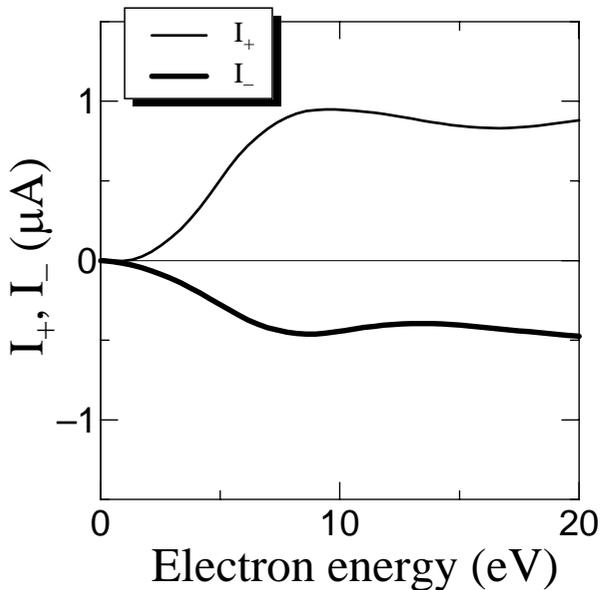
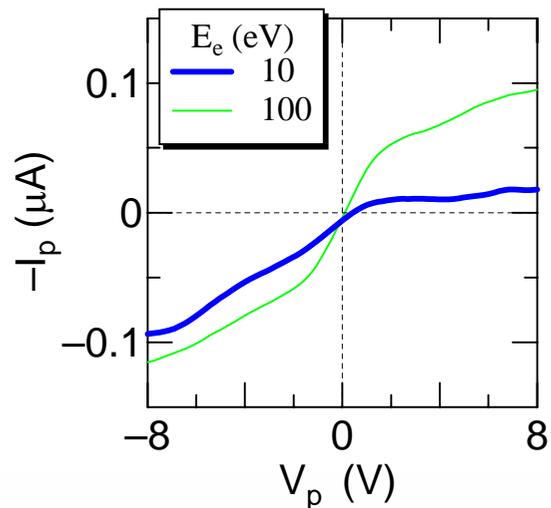
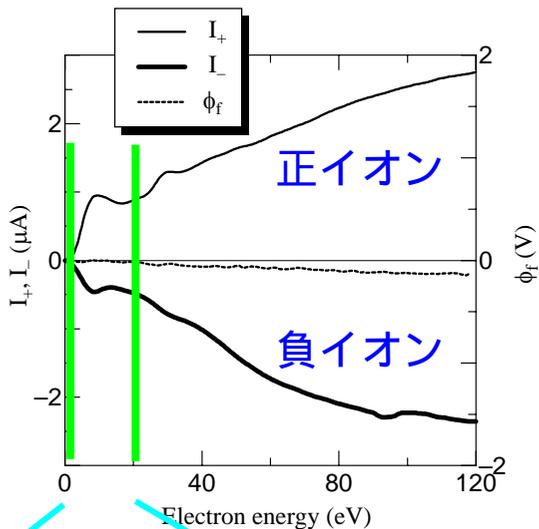
## イオン温度



## プラズマ密度



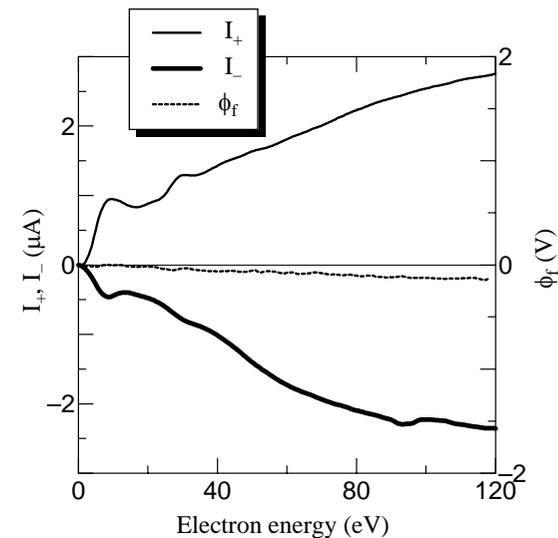
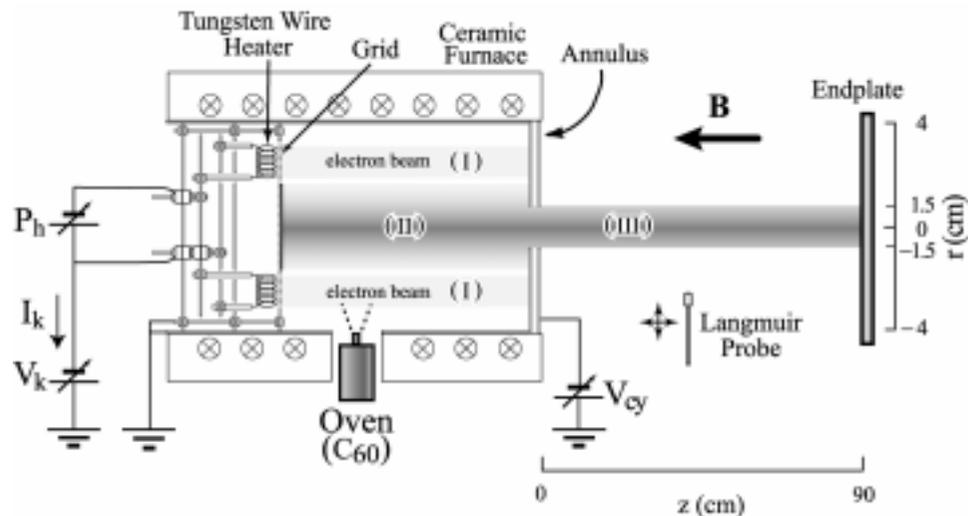
# 低電子エネルギー領域でのプラズマ生成



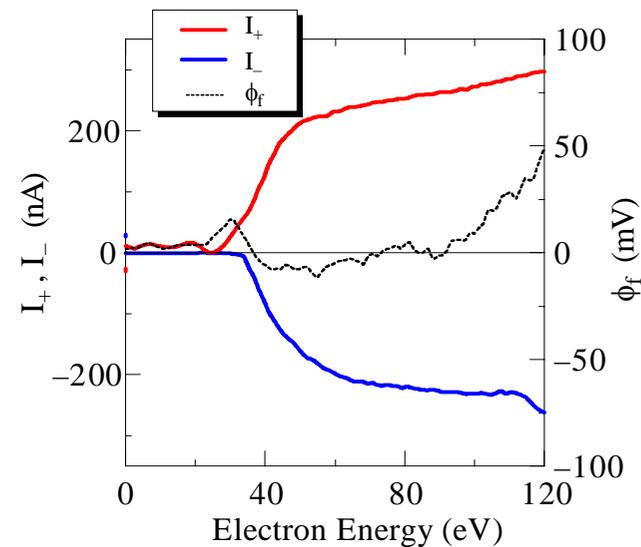
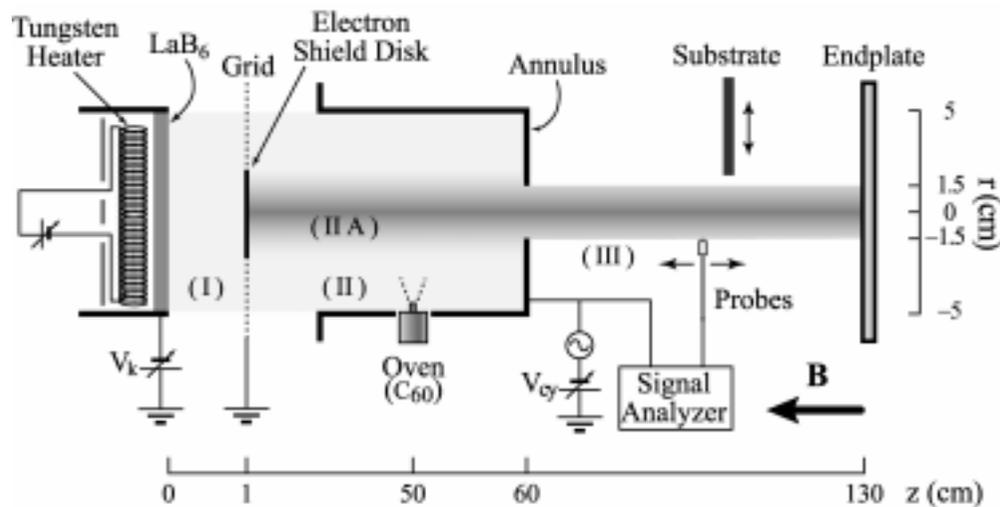
電子衝突電離によって正イオンが生成されている訳ではない

# 電子ビーム源変更に伴う放電特性の変化

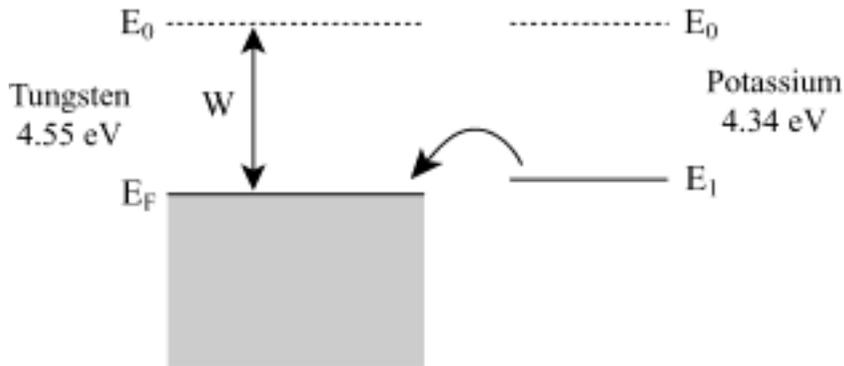
## W-Wire Electron Gun



## LaB<sub>6</sub> Electron Gun



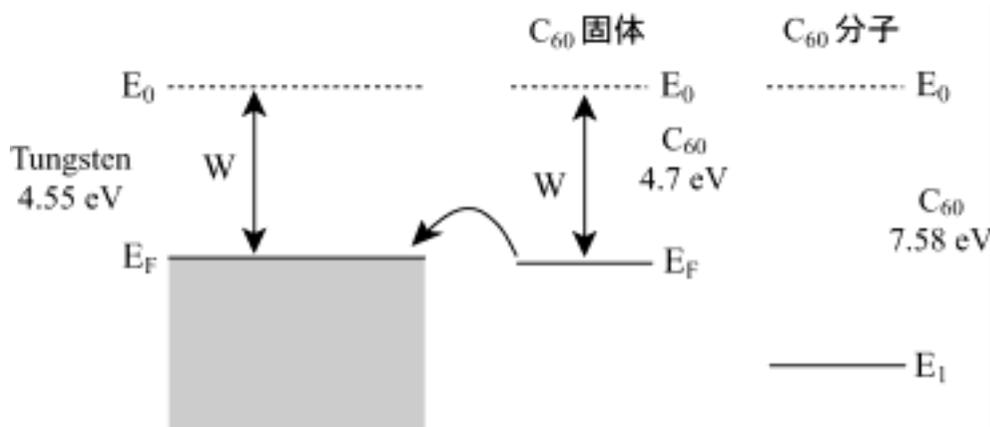
# 接触熱電離による $C_{60}^+$ の生成



接触電離(Qマシン)プラズマ

カリウムKの性質

第一イオン化ポテンシャル：4.3 eV



$C_{60}$ の性質

第一イオン化ポテンシャル：7.6 eV

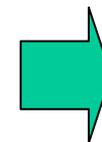
仕事関数：4.7 eV

$C_{60}$ が固体を形成すると、 $C_{60}$ 分子間での相互作用が現れ、 $C_{60}$ 固体としてのエネルギーバンドを形成する。

昇華した固体（クラスター）状の $C_{60}$ が高温のタングステンと接触する



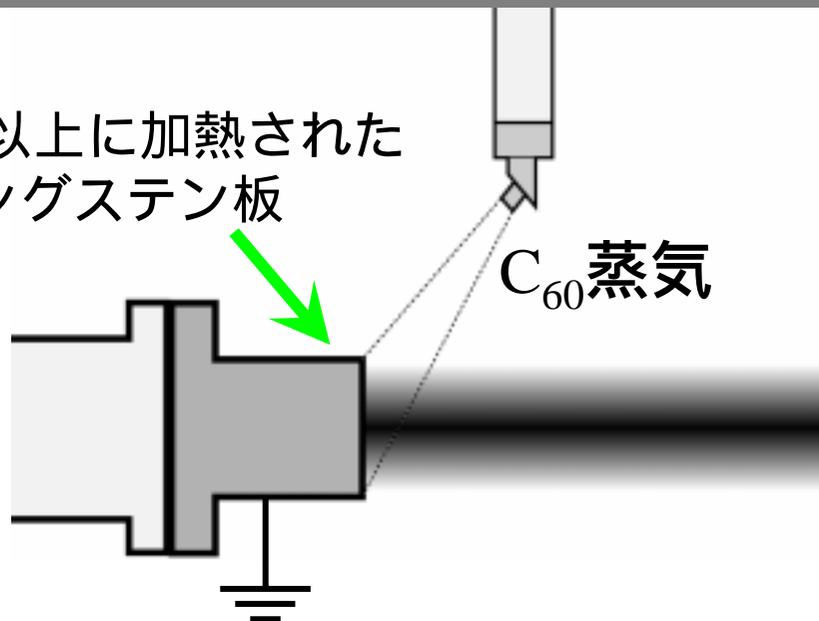
電子がタングステンに奪われると同時に、高温ゆえに分子構造に解離する



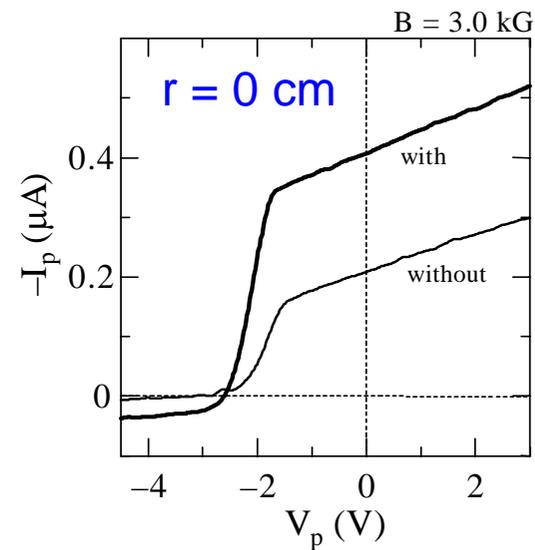
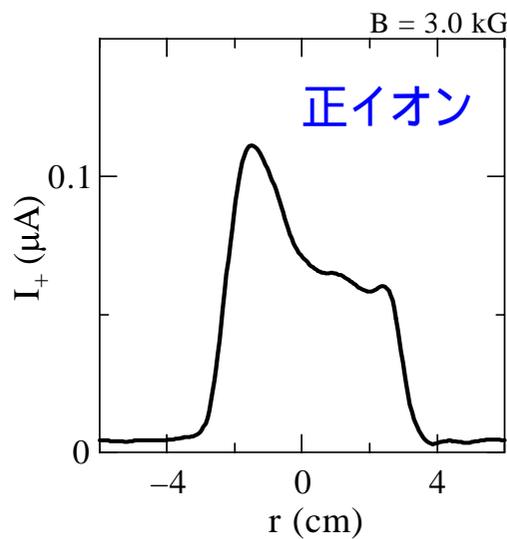
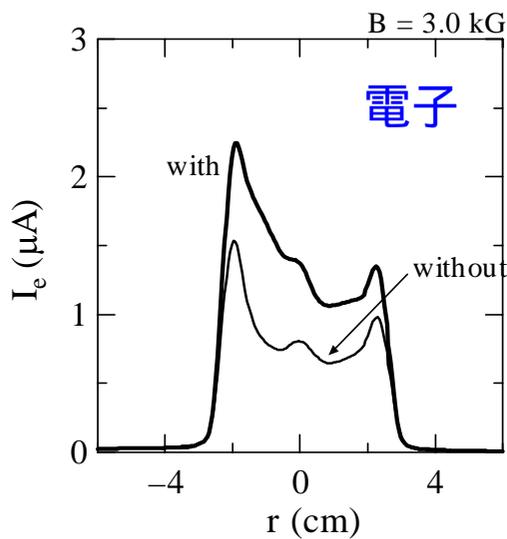
$C_{60}^+$ イオンが生成

# 接触熱電離フラールンプラズマの生成

2000 以上に加熱された  
タングステン板



$C_{60}^+$   
 $e^-$   
( $C_{60}^-$ )



## ペアプラズマ中の波動

ペアプラズマ（電子-陽電子プラズマ）は、正負荷電粒子の質量が等しい。質量が等しいことに起因して、このプラズマが時空間的な対称性を有する独特の媒体であると予測されるため、宇宙プラズマや高エネルギー物理分野において広く興味を持たれてきた。また、実験室においてペアプラズマが実現できるようになったことも、多くの興味を集める一因となった。

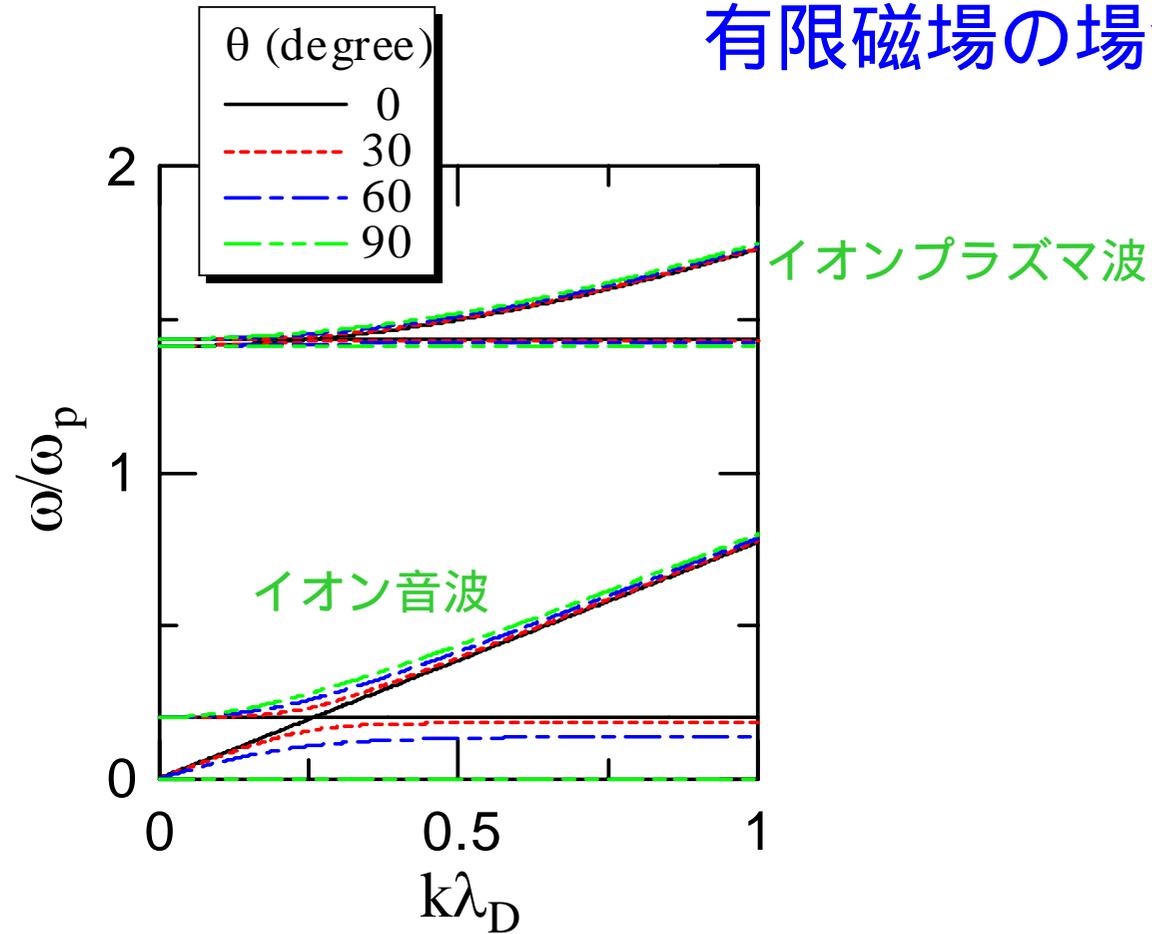
プラズマの特徴の一つとして、多様な波動が存在することが挙げられる。多くの研究がなされた通常の異質量から成るプラズマと、どのように波動特性が異なるのかが理論的に調べられた。電子-陽電子プラズマの波動特性を測定するのに十分な密度と粒子ライフタイムを実現するのは容易ではない。波動特性の実験的検証が遅れている。

我々のイオンから成るペアプラズマは生成・維持・測定が容易である。そこでペアプラズマ中の波動特性を実験的検証をおこなった。

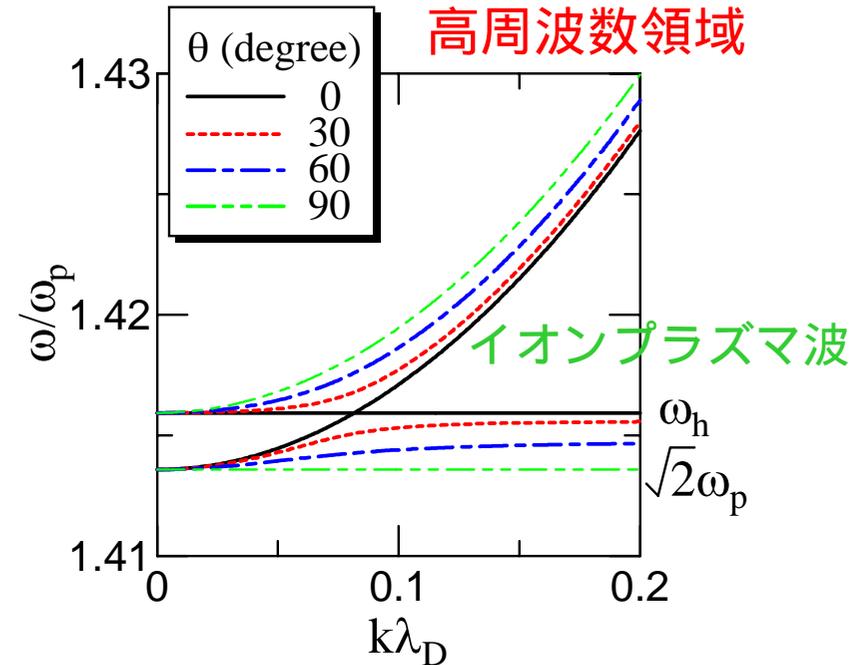
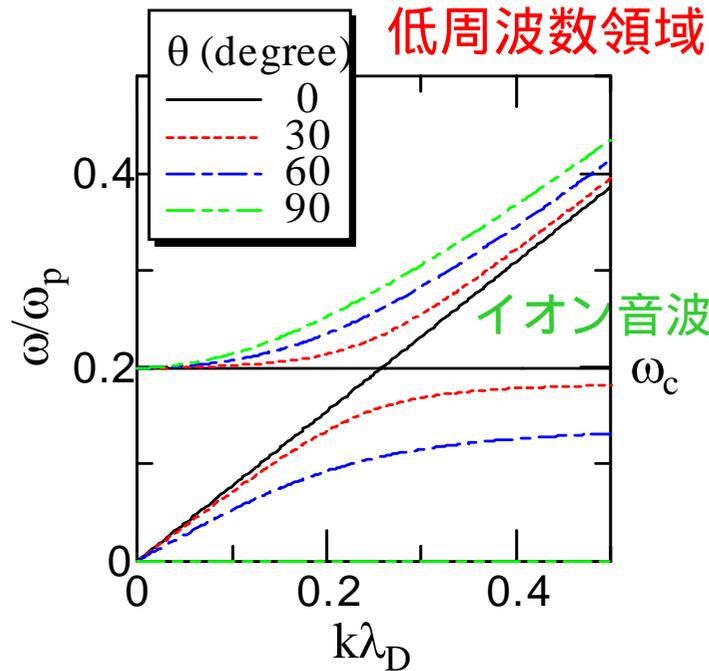
# ペアプラズマ中の静電波動（流体論）

G. P. Zank and R. G. Greaves: Phys. Rev. E, **51** (1995) 6079

有限磁場の場合



# ペアプラズマ中の静電波動（流体論）



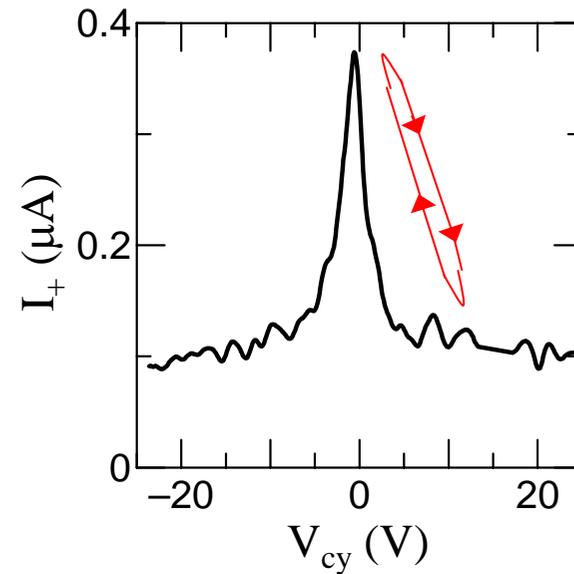
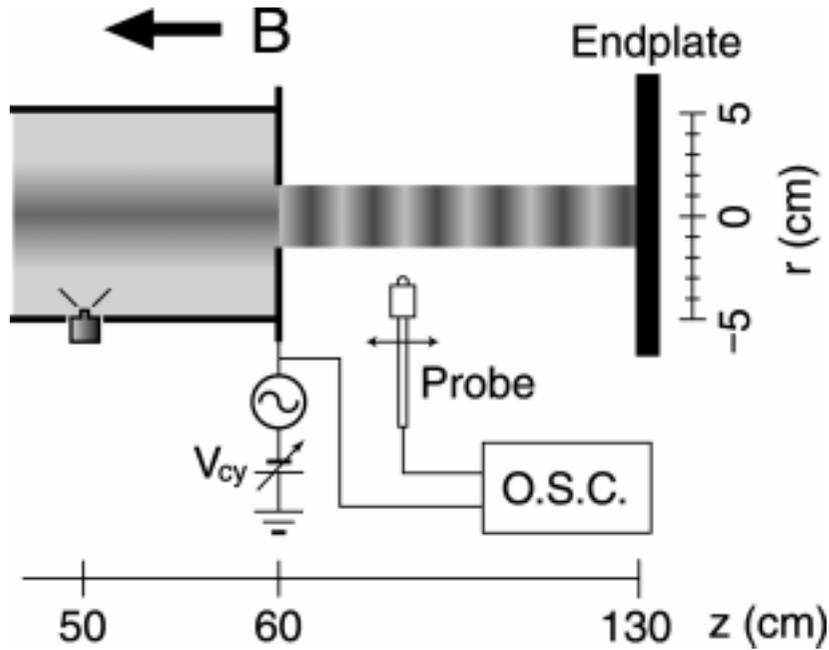
$$\theta = 0 \begin{cases} \omega^2 = C_s^2 k^2 \\ \omega^2 = \omega_c^2 \end{cases}$$

$$\theta = 90 \begin{cases} \omega^2 = 0 \\ \omega^2 = C_s^2 k^2 + \omega_c^2 \end{cases}$$

$$\theta = 0 \begin{cases} \omega^2 = 2\omega_p^2 + \omega_c^2 = \omega_h^2 \\ \omega^2 = C_s^2 k^2 + 2\omega_p^2 \end{cases}$$

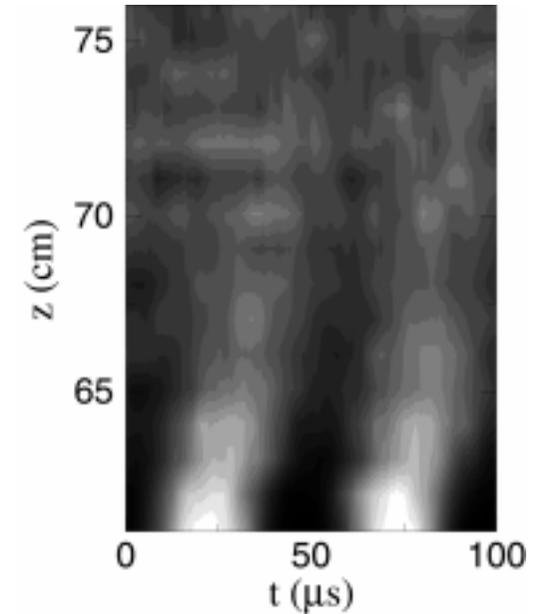
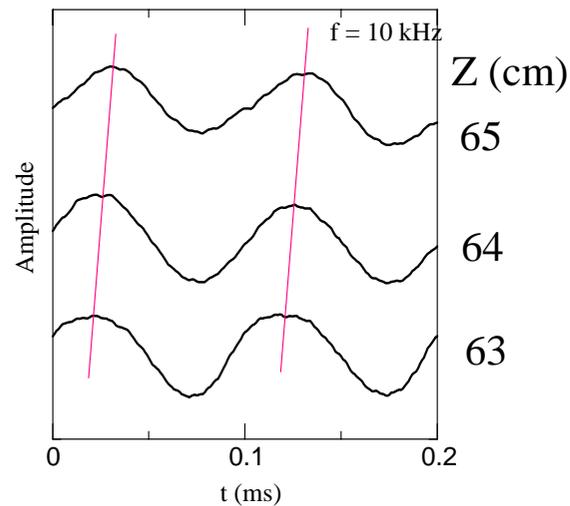
$$\theta = 90 \begin{cases} \omega^2 = C_s^2 k^2 + 2\omega_p^2 + \omega_c^2 \\ \omega^2 = 2\omega_p^2 \end{cases}$$

# 静電波動の励起方法

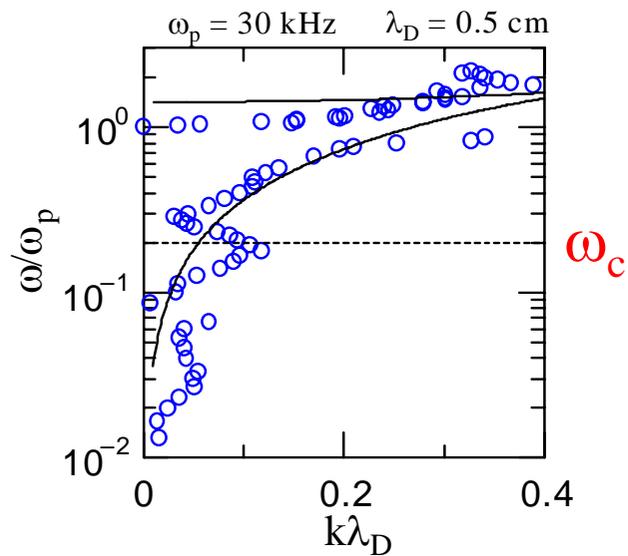
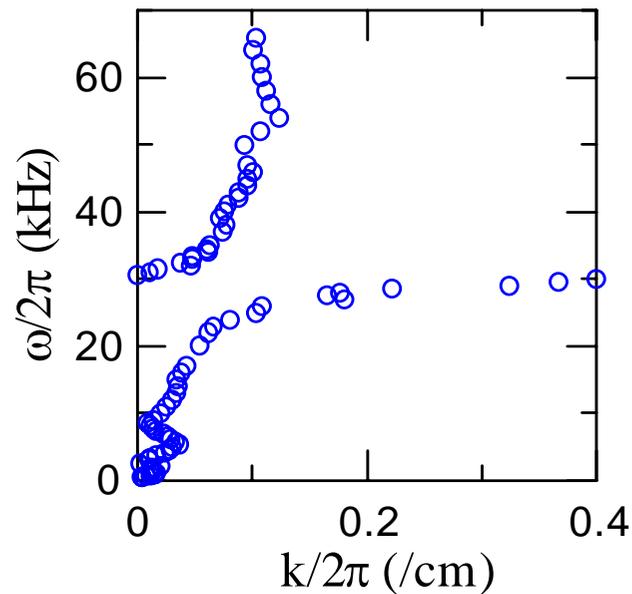
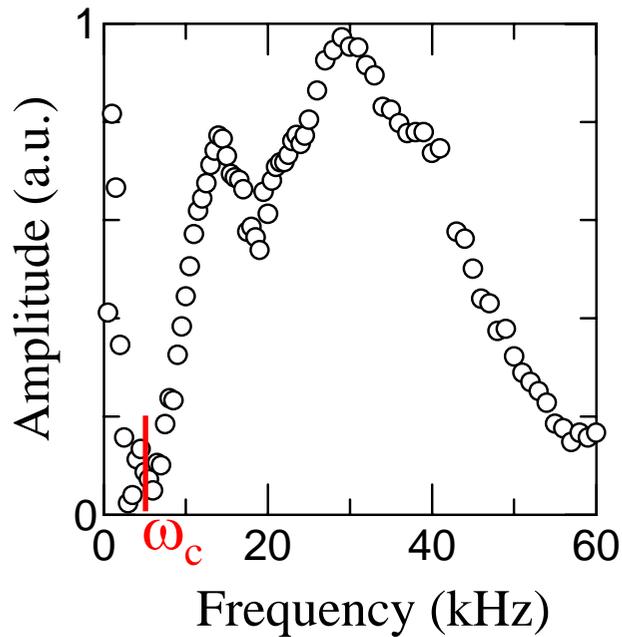


20 kHz

密度・温度が比較的低いため  
 ( $10^7 \text{ cm}^{-3}$ , 1 eV)、静電波は  
 励起しやすいが、電磁波を励起  
 しにくい。



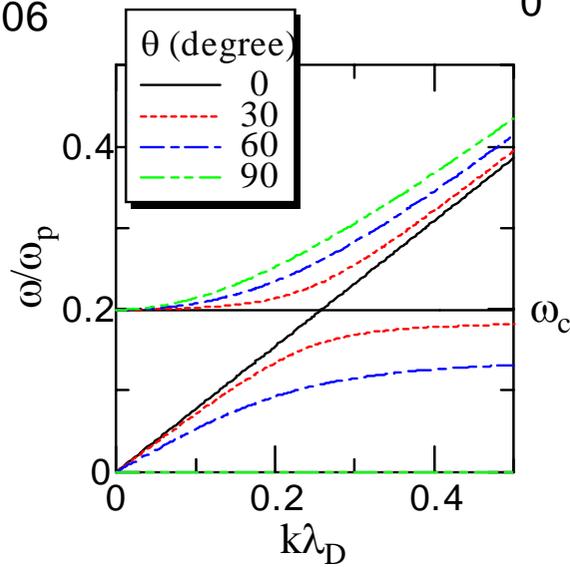
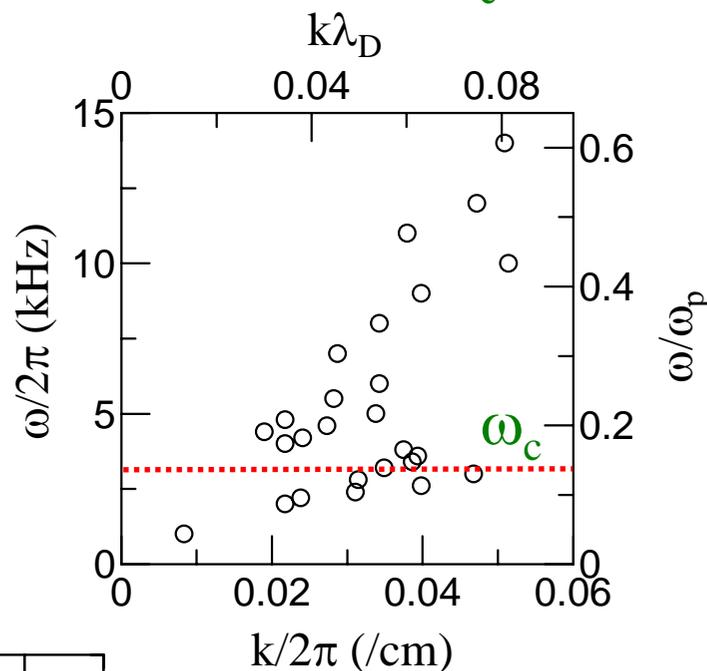
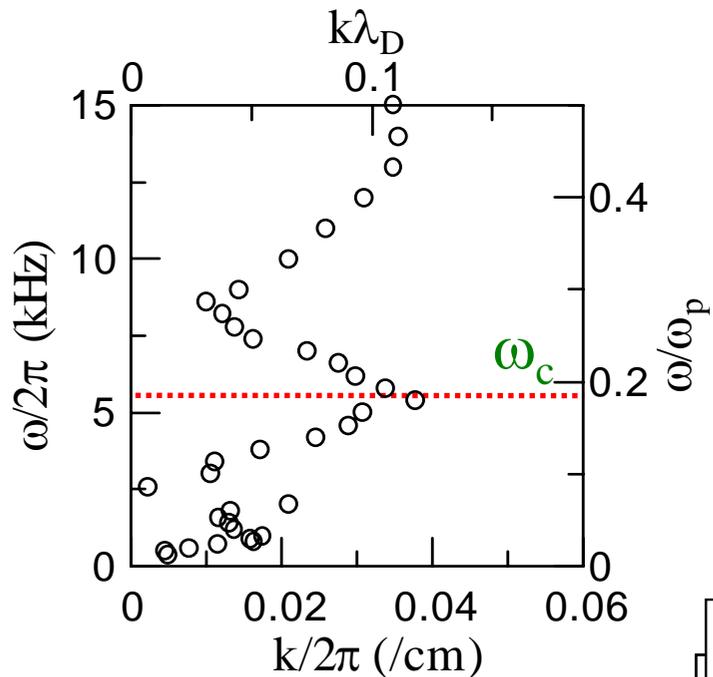
# ペアプラズマ中の静電波動



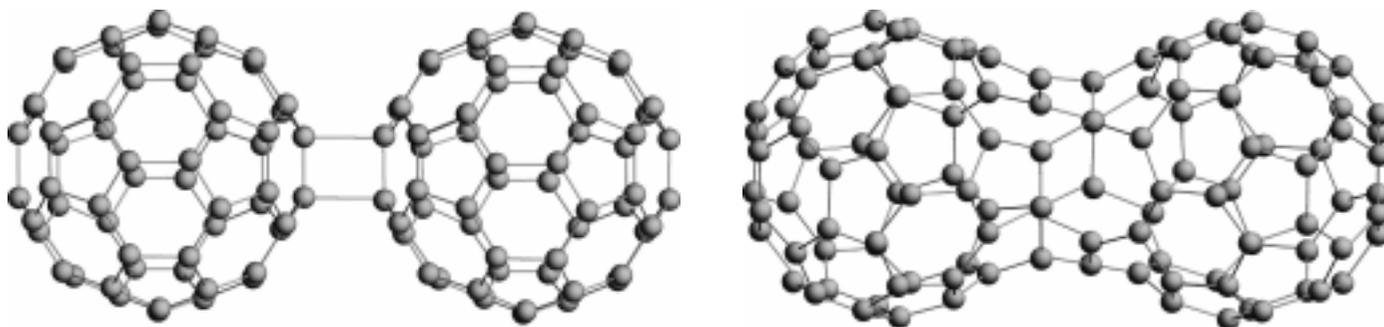
# ペアプラズマ中の静電波動（低周波数領域）

$B = 0.3 \text{ T}$  ( $\omega_c/2\pi = 6 \text{ kHz}$ )

$B = 0.15 \text{ T}$  ( $\omega_c/2\pi = 3 \text{ kHz}$ )



# フラーレンダイマー形成



Connection Type

$C_{120}$

Fusion Type

Dumb-bell-shaped fullerene dimer  $C_{120}$

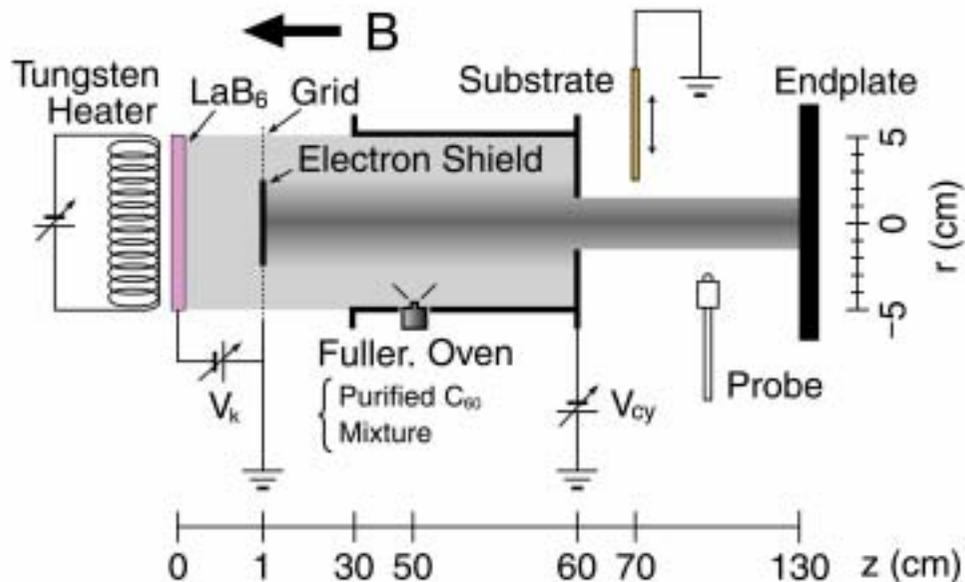
$C_{120}$  ( $C_{60} + C_{60}$ ),  $C_{130}$  ( $C_{70} + C_{60}$ ),  $C_{140}$  ( $C_{70} + C_{70}$ ) etc.

Current methods of dimer formation are accompanied with **stepwise procedures** in solid- or solution-phase reactions using catalysts or nonallotropic fullerene derivatives.



We try to **form directly** fullerene dimers from fullerene molecules.

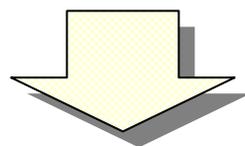
# 実験装置



## フラレンサンプル

Purified	$C_{60} > 99.5\%$
Mixture	$C_{60} : C_{70} : C_{78} : C_{84}$ 69% : 24% : 3% : 4%

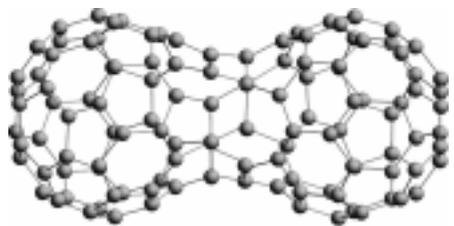
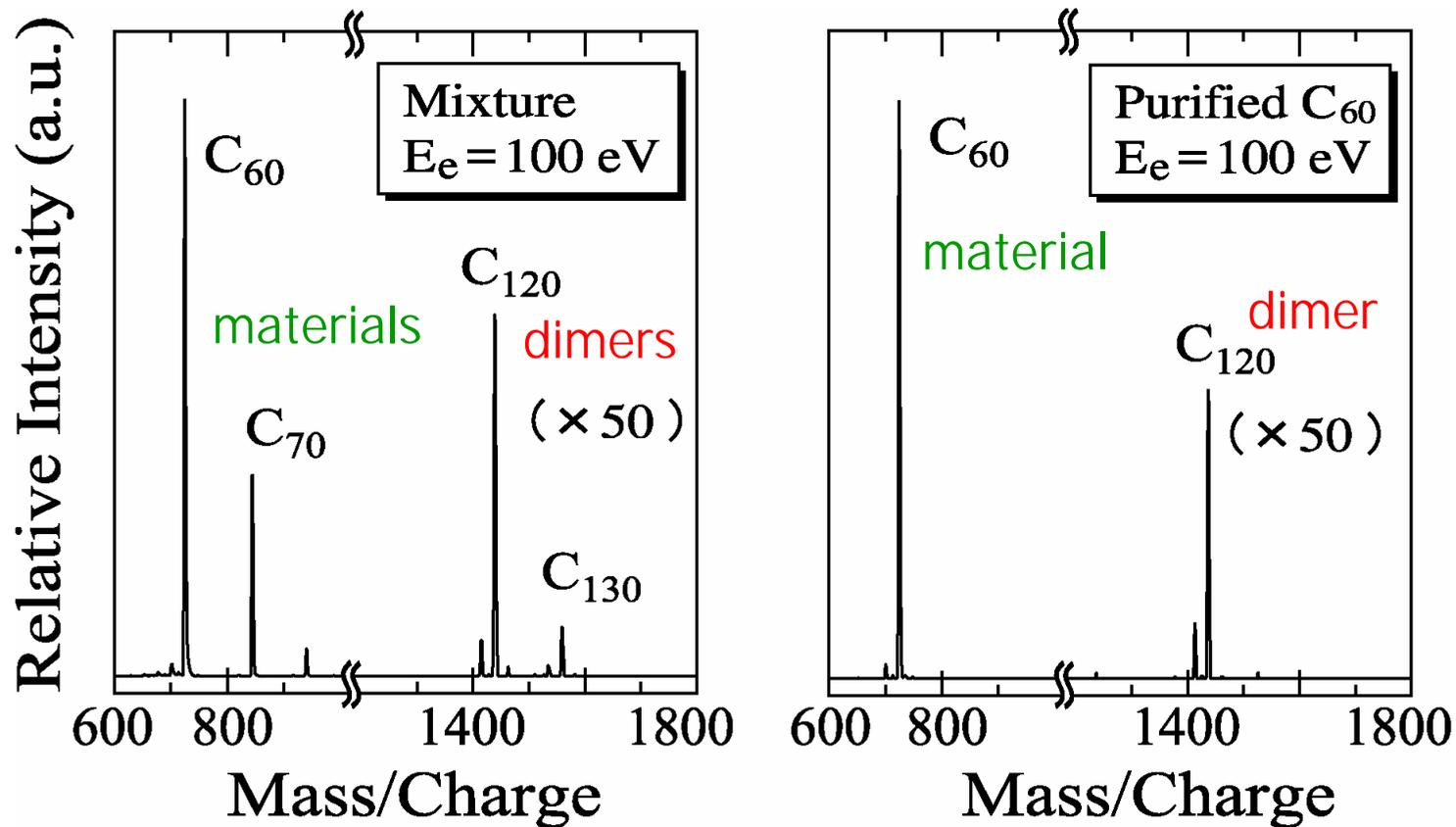
A grounded substrate is exposed to the plasma for 60 minutes at  $z = 70$  cm.



The deposit on substrate in Pair-Ion Plasma is evaluated by MALDI-TOF MS.

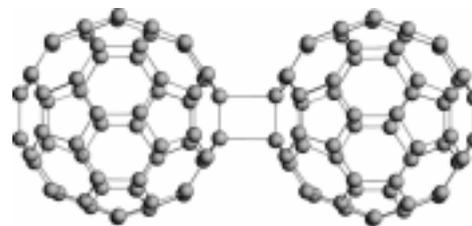
マトリックス支援によるレーザ脱離イオン化飛行時間型質量分析方法  
(Matrix Assisted Laser Desorption/Ionization – Time of Flight Mass Spectrometry)

# MALDI-TOFによる質量スペクトル



Fusion Type

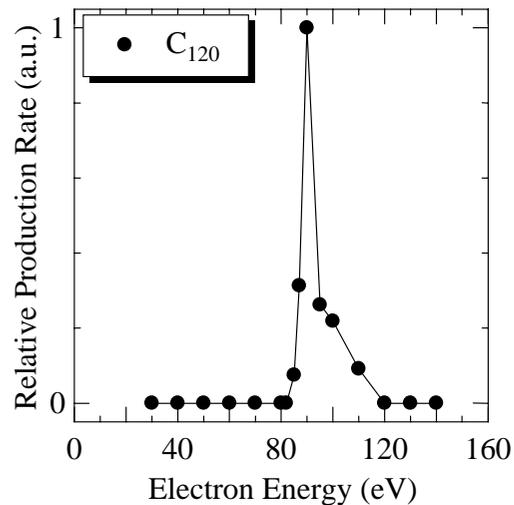
$C_{120}$



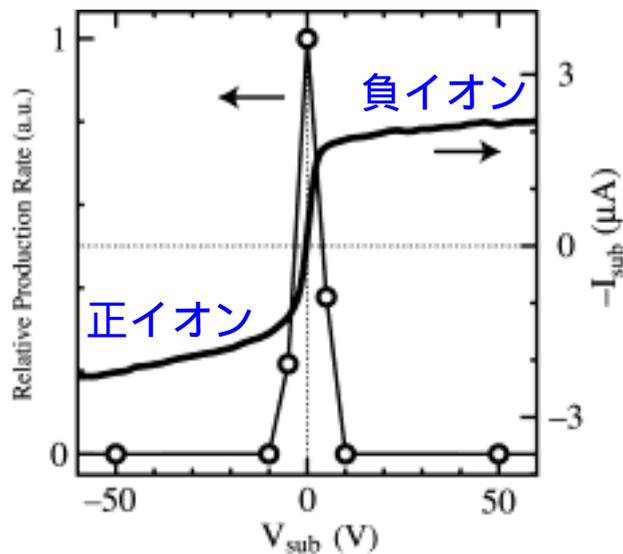
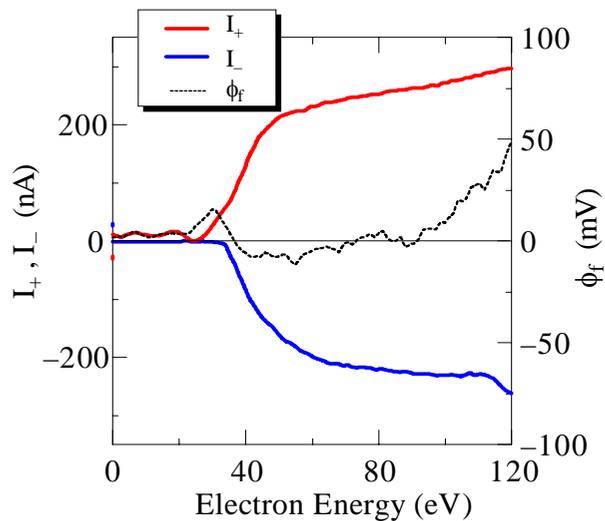
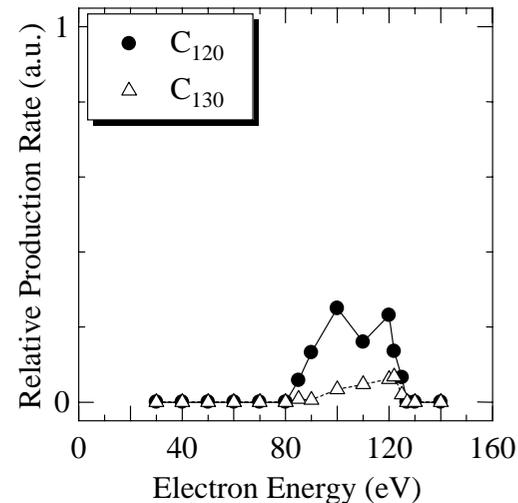
Connection Type

# ダイマー形成の電子ビームエネルギー依存性

Using Purified  $C_{60}$



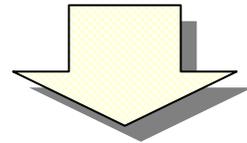
Using Mixture Fullerene



# ダイマーの形成条件

- ダイマーはプラズマがあれば形成される訳ではない
- 電子ビームエネルギーに依存している
- 基板にバイアスしてイオンを加速衝突させると、イオン衝撃によりダイマーが解離する

電子ビームがフラーレンにエネルギーを与えて、結合を促進させている



高周波電磁場による電子加熱・ダイマー形成が期待される

# まとめ

- ペアイオンプラズマの生成方法

$C_{60}$ を用いることにより容易にペアプラズマを実現

- ペアイオンプラズマ中の静電波動伝搬

イオン音波とサイクロトロン振動が関係するモードを確認

- ペアイオンプラズマを用いたフラーレンダイマー形成

$C_{60}$ から直接ダイマーを形成することが可能