

プラズマ理工学

第1回 イン트로ダクション、 原子分子過程とプラズマの生成

エネルギー理工学科 3年秋学期

日時: 月曜日 午前10時30分～12時00分

場所: 522講義室

教員: 藤田隆明(ふじたたかあき)

工学部8号館南棟4階

<本講座の目的及び狙い>

プラズマの物理と工学の基礎を習得する。特に、プラズマを構成する荷電粒子の単一粒子としての運動とプラズマの流体としての運動を理解する。

達成目標

1. 自然界や実験室でどのようなプラズマがあるかを理解し、説明できる。
2. プラズマの振舞いを記述するための基礎方程式を理解し、説明できる。
3. プラズマの磁場閉じ込めを理解し、説明できる。

<バックグラウンドとなる科目>

力学I, 力学II, 電磁気学I, 電磁気学II, 応用電磁気学演習, 数学1及び演習, 数学2及び演習, 量子力学A

特に、**電磁気学とベクトル解析**をよく復習しておくこと。

<講義の予定>

対面で実施。10/28(土)、11/27(月)は休講

講義: 10/2, 16, 23, 30, 11/6, 13, 20, 12/4, 11, 18, 25, 1/15, 22

試験: 1/29(月)

●講義の進め方

教科書は特に指定しない。講義内容のプリントを配付する。プリントの復習を十分におこなうこと。また、**2～3週に1回(全部で5回程度)、レポート課題を提示する**。返却時にレポートの解答を説明するので、理解を深めること。プリント、レポート課題はTACTのリソースへupする。連絡は(掲示板でなく)TACTのお知らせまたはメッセージで行う。

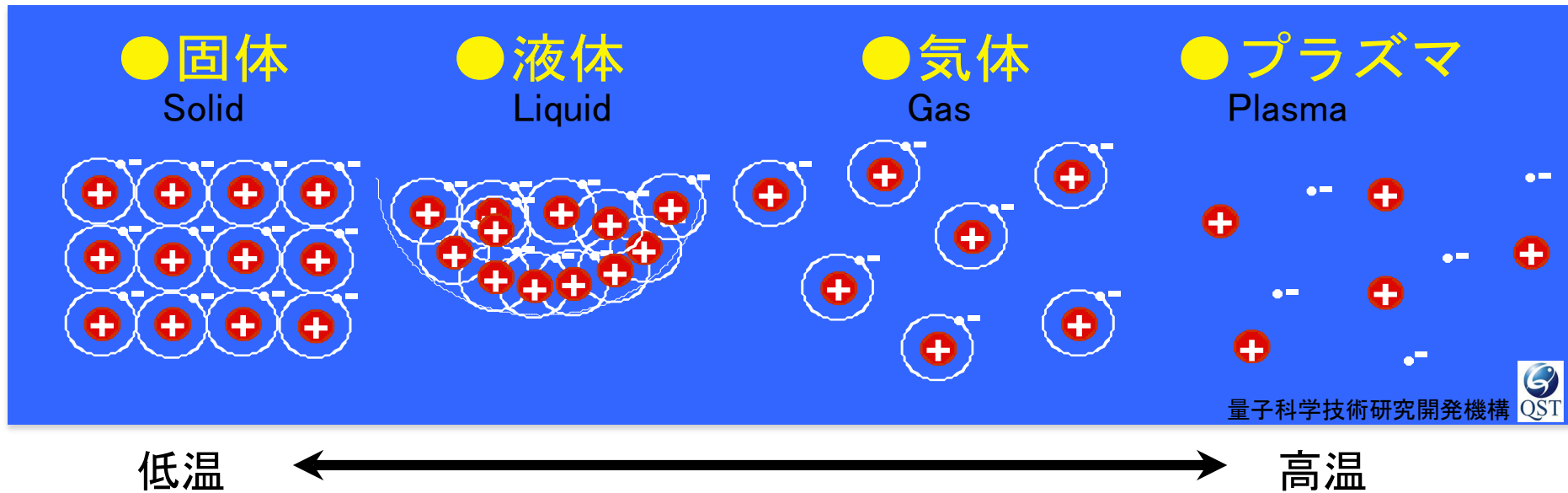
●成績評価の方法

- 出席(13%程度)、レポート(27%程度)
- 定期試験(60%):ノート、教科書、参考書の持ち込みは不可。
- 全体で60%以上のポイントで単位を認定する。
- **レポートを半数以上提出しなかった者**及び定期試験を欠席した者は「欠席」とする。

●参考書

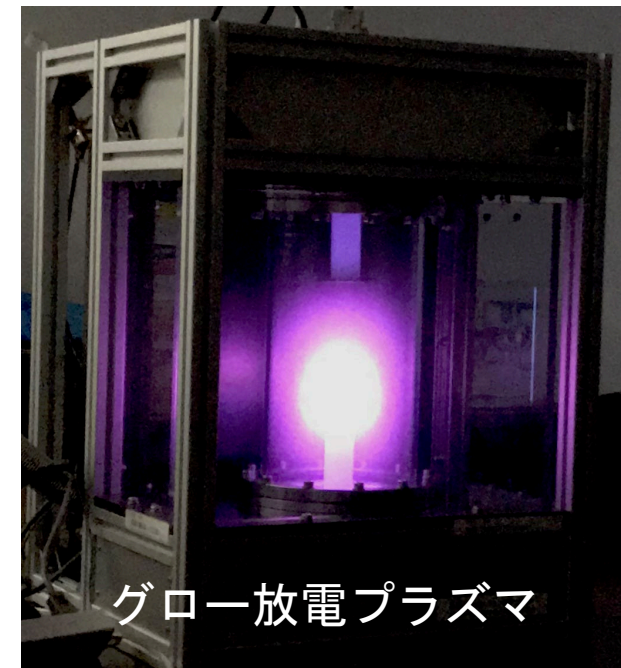
- (1)プラズマ物理入門 F.F.チェン著 内田岱二郎訳 丸善
- (2)プラズマ理工学 高村秀一 森下出版

プラズマ：物質の第4の状態。イオンと電子がバラバラに飛び交う



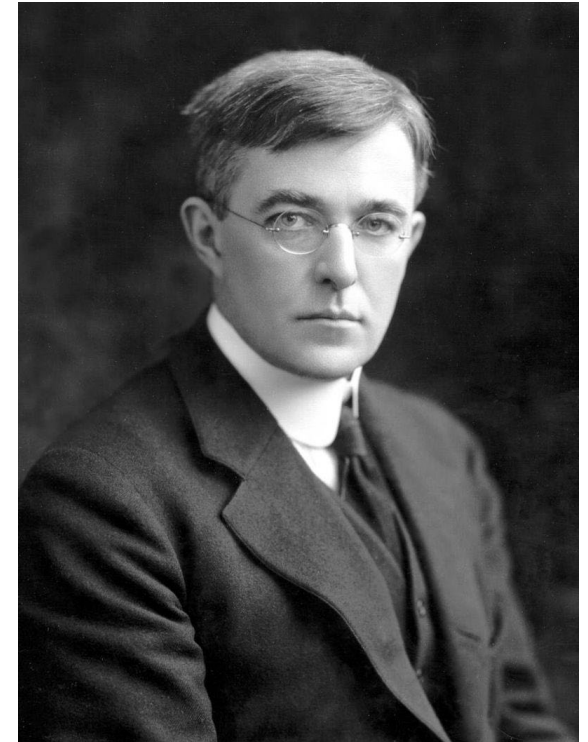
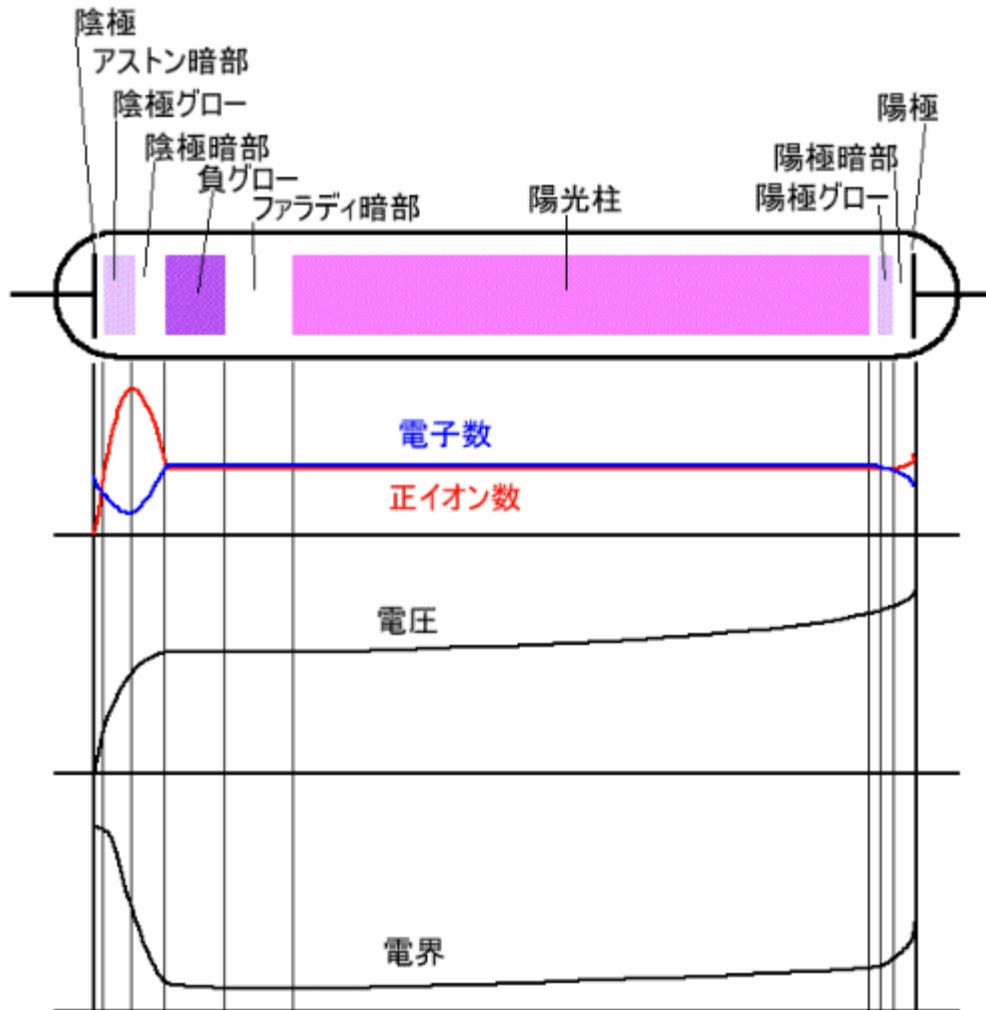
Langmuir (ラングミュア、プラズマの命名者)によるプラズマの定義

自由電子とイオンから成り、全体としてほぼ電氣的に中性を保っている粒子集合体。集団的な振る舞い(振動など)を示す。



グロー放電プラズマ

陽光柱プラズマ(グロー放電)とラングミュア博士

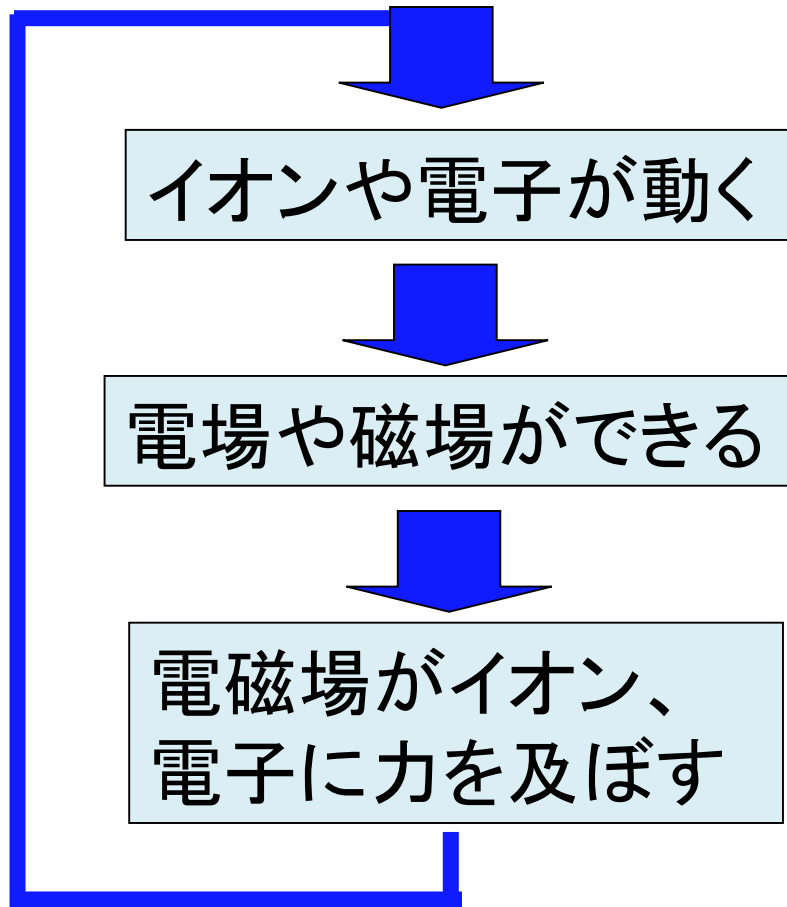


Irving Langmuir 1881~1957
ノーベル化学賞 1932年

低圧(大気圧の1/100程度)の
気体中での放電

最初の陽光柱プラズマ Faraday (~1835)
第4の物質の名付け親 Crookes (~1879)
「プラズマ」の名付け親 Langmuir (1928)

プラズマは複雑な振る舞いをする



イオンの密度と電子の密度の
違い⇒電荷分布⇒電場

イオンの流れと電子の流れの
違い⇒電流分布⇒磁場

プラズマの振る舞いの理解には、
電磁気学が基礎となる

意外と身近なプラズマ



雷

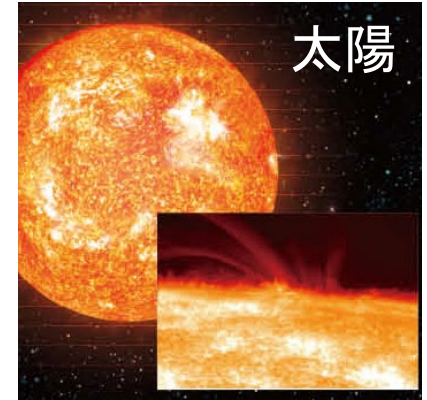
自然界のプラズマ



オーロラ



彗星



太陽

暮らしのなかのプラズマ

蛍光灯

星雲



炎



ネオンサイン



かに星雲

猫の目星雲

うみへび座

タランチュラ星雲

宇宙のプラズマ

プラズマテレビ



ガスコンロ

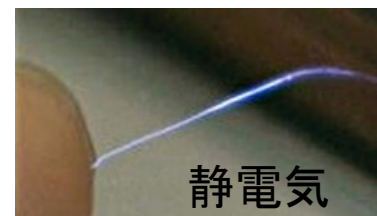


着火装置

プラズマボール



ヘッドライト

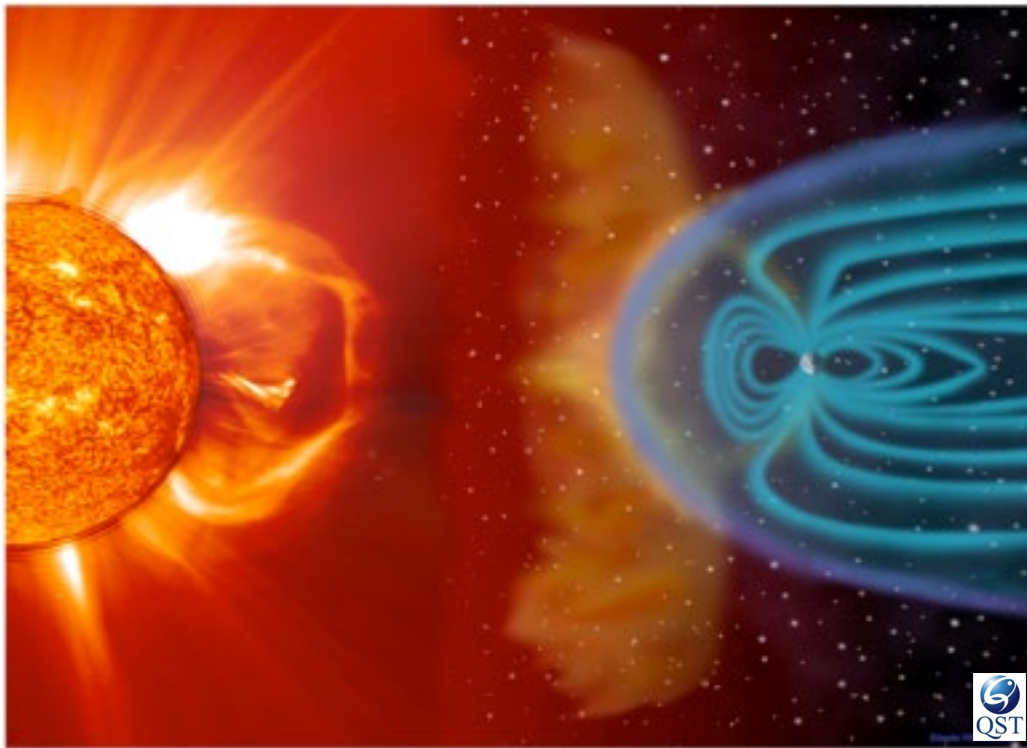
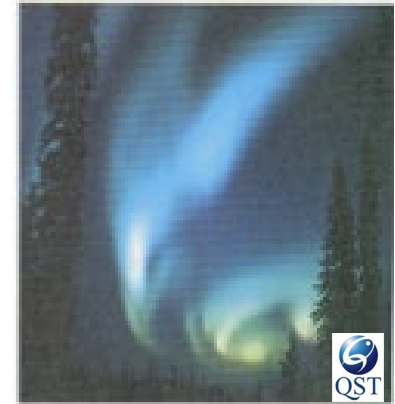


静電気

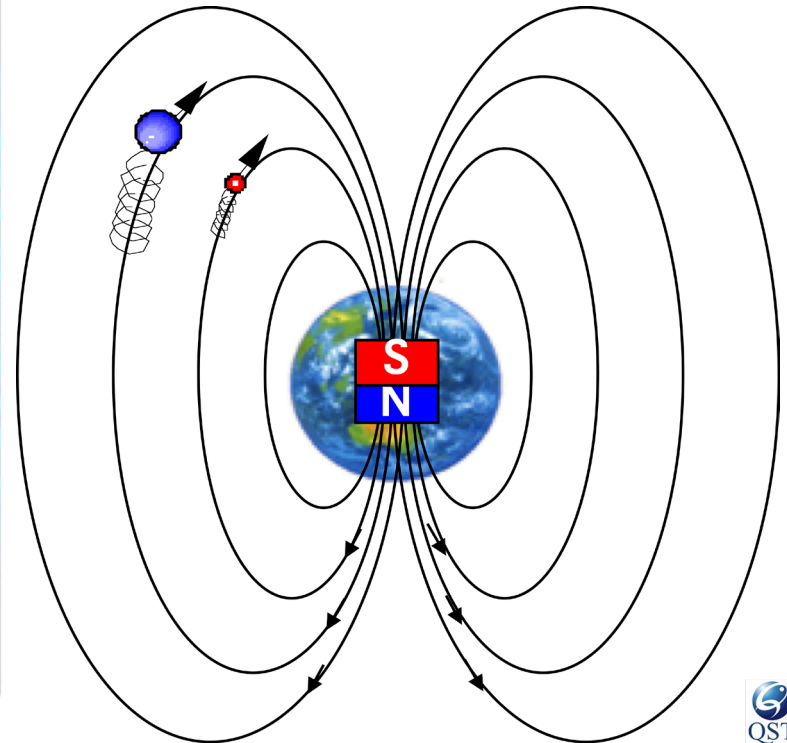
オーロラ

- 太陽からの荷電粒子は、地磁気を作る磁力線に巻き付いて、極地方上空で大気分子を電離しオーロラを発生する。

オーロラ



太陽風と地球磁気圏



太陽における磁力線再結合（リコネクション）によるエネルギー放出

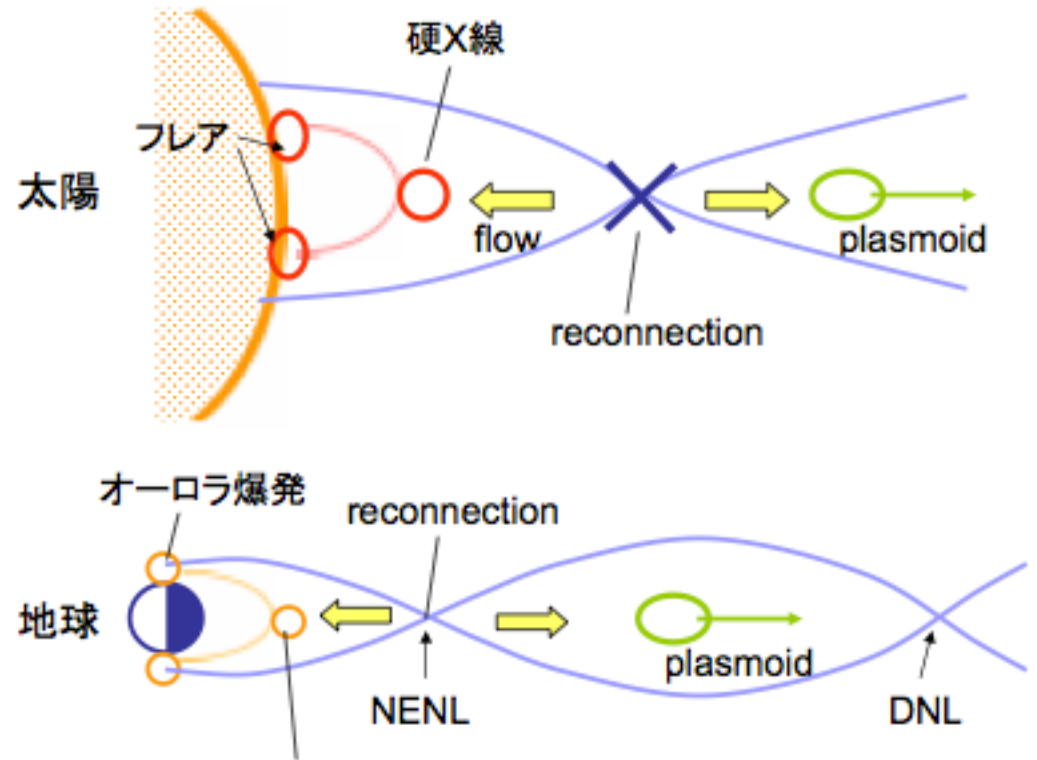
太陽フレア



太陽フレアにともなって放出される、太陽のコロナ質量放出（2012年4月）

©NASA/SDO/AIA
<https://wired.jp/2012/12/06/mysterious-radiation-event-of-774-might-be-a-little-less-mysterious/>

太陽と地球の磁気リコネクション



電流消失
(どのような過程で?)

Slow Shock ?
Fast Shock ?

プラズマの利用

- ・エネルギー源 制御核融合
(数億度の高温、高密度状態)
- ・光源 蛍光灯、水銀灯、
ネオンサイン、ナトリウムランプ
- ・熱源 アーク溶接、切断(8000度)、
プラズマ溶射
- ・エレクトロニクス 薄膜形成、エッチング(基盤製造)
プラズマディスプレイ
- ・直接発電 MHD発電
- ・ロケットの推進力 プラズマジェット

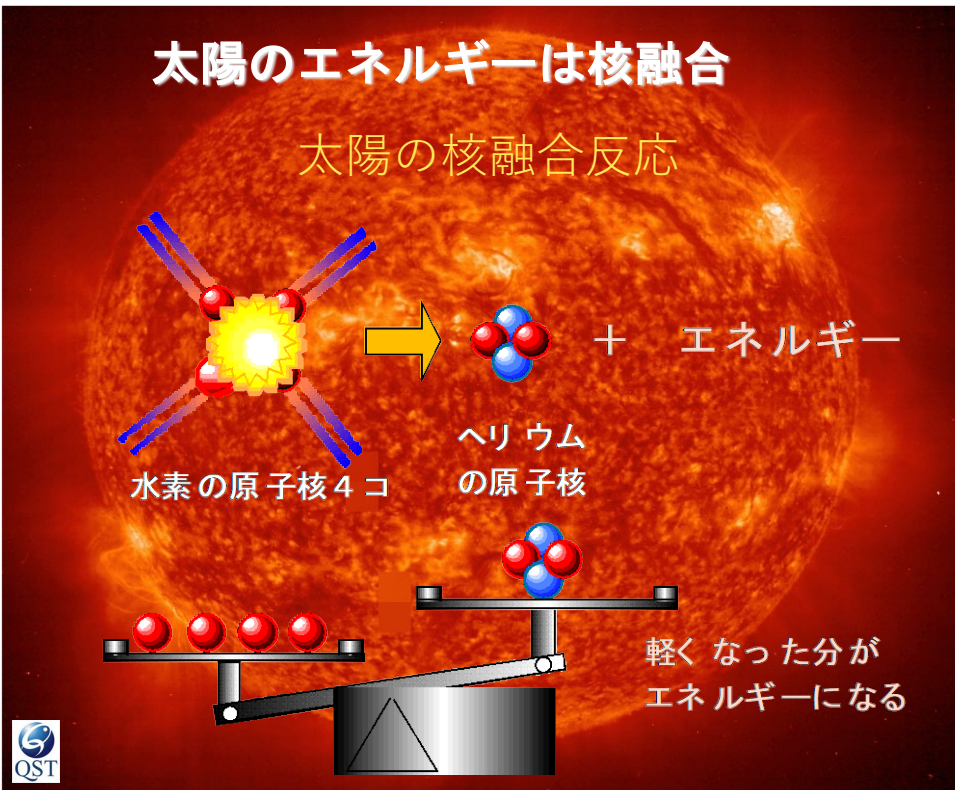
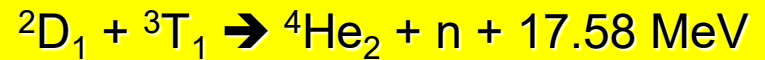
核融合反応

核融合反応:

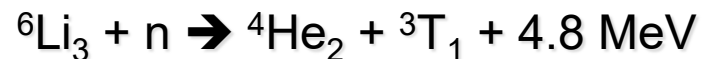
軽い元素の原子核同士を融合反応させると、膨大なエネルギーが発生する。自然界では太陽のPP反応。

核融合炉:

最も起こりやすい核融合反応である重水素とトリチウム(三重水素)の反応(DT反応)をターゲットとする。

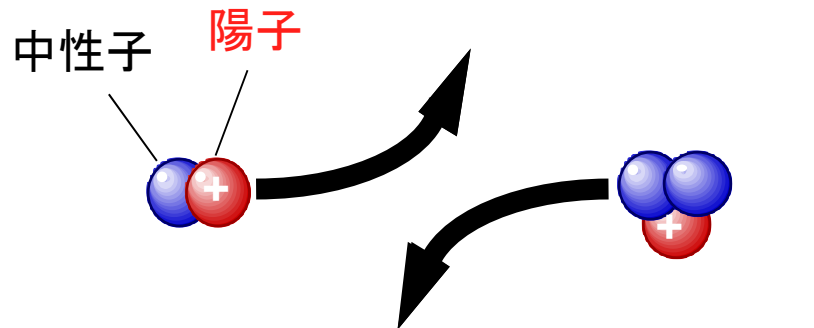


DとT 1gで石油8トン相当
トリチウムはリチウムに中性子を当てて作る

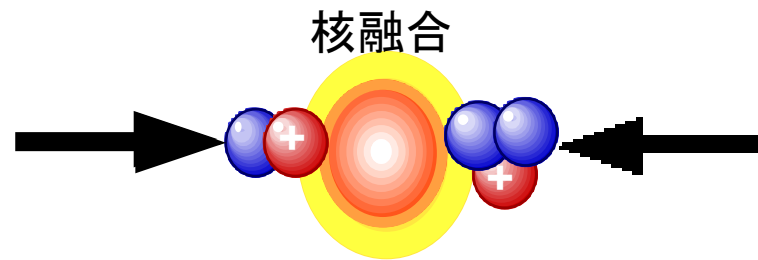


核融合を起こすには、1億度が必要！

温度が高い＝飛び交う原子核のスピードが速い



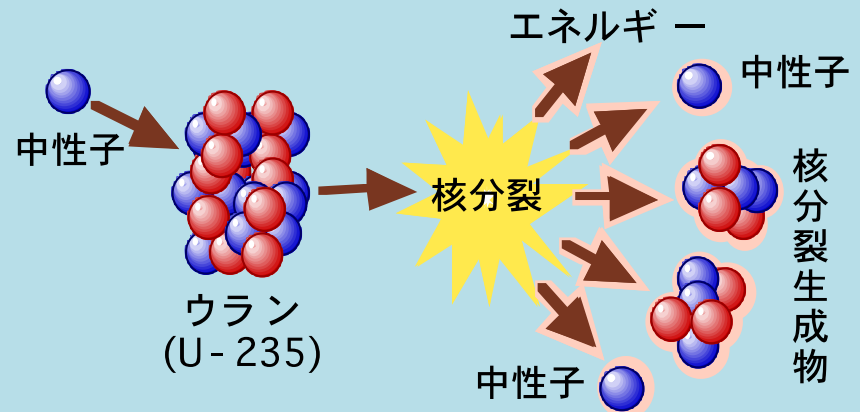
温度が低いと、プラス同士の反発力のため衝突できない



温度が高いと、反発力に打ち勝って衝突できる

核融合実現のため、超高温プラズマの研究が推進され、プラズマの理解が飛躍的に進歩した。

核分裂反応

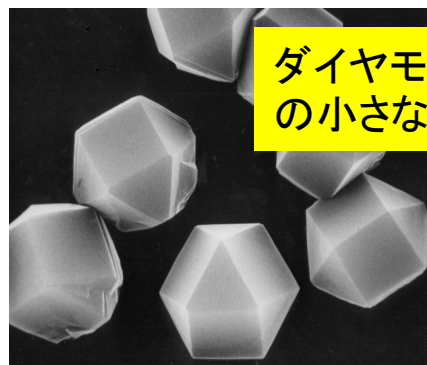
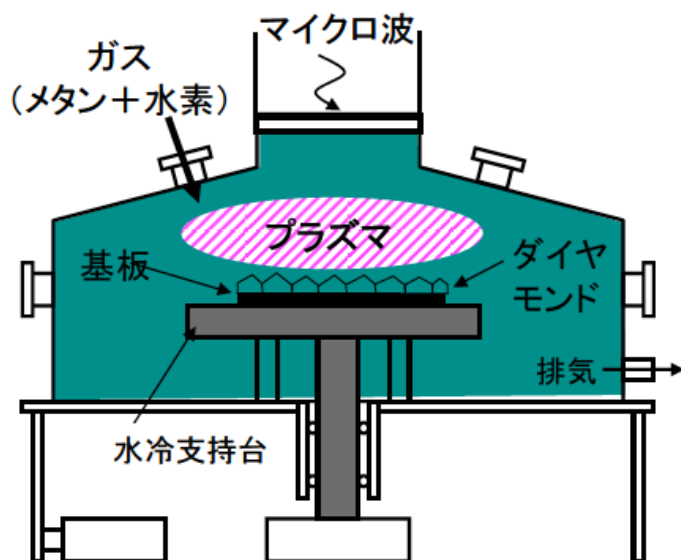


中性子は反発されないの、
常温でも起きる

プラズマから作る人工ダイヤモンド

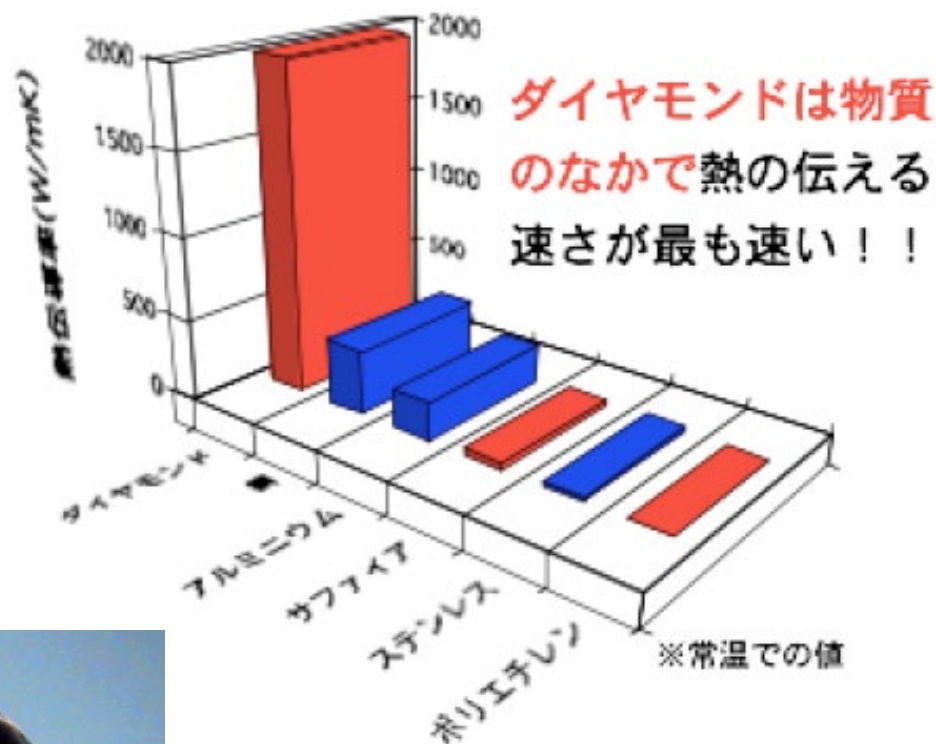
プラズマのナノテクノロジー技術の応用

プラズマ気相成長法 (プラズマCVD)



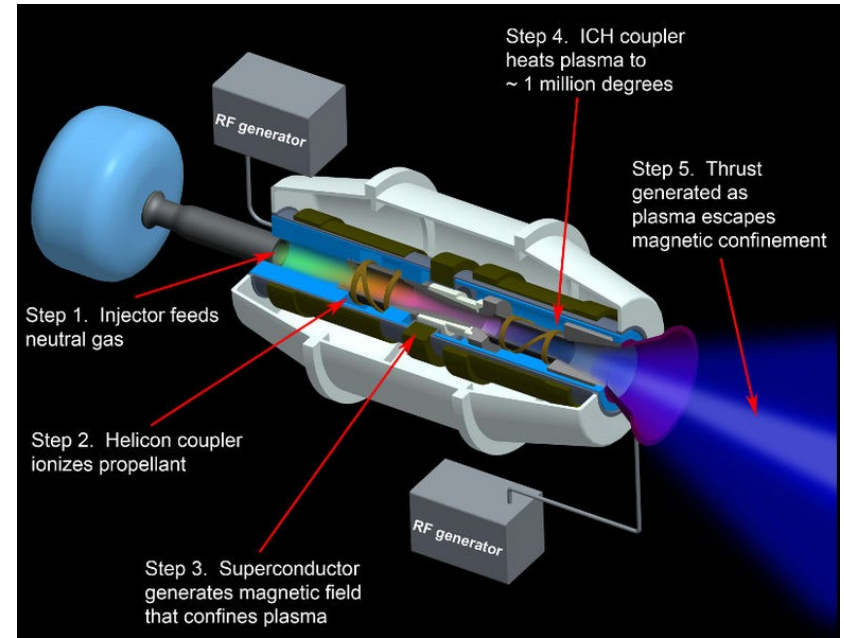
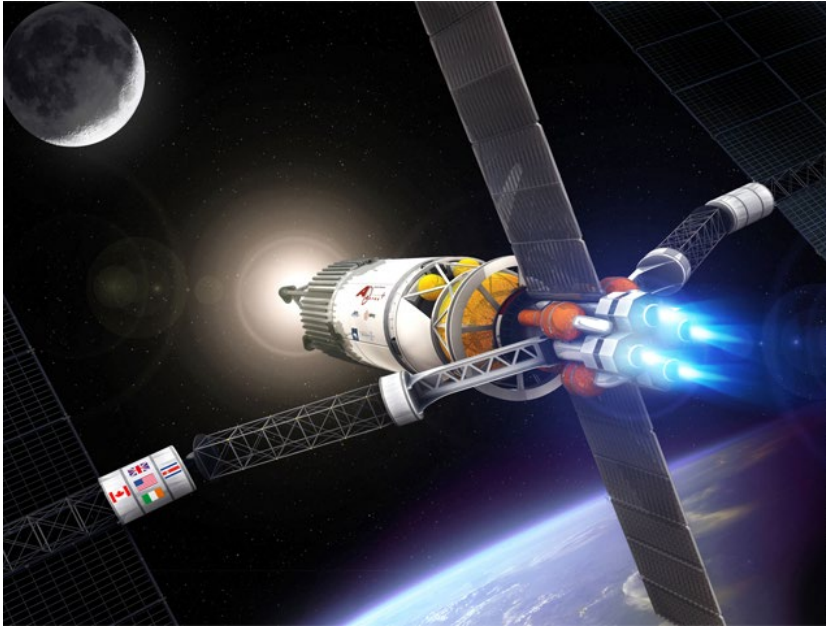
直径10cm、厚み2~3mm、重さ300カラットの人工ダイヤ

ダイヤモンドの特徴

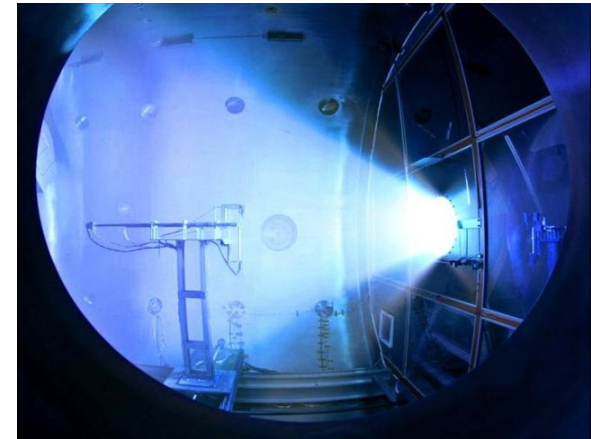


電気は通さないのに熱を良く通す

プラズマを用いたロケット



- 宇宙船の到達速度は、推進材排出速度 w と質量比 m_0/m で決まる(ツィオルコフスキーの公式)。
$$\dot{V} = w \ln \left(\frac{m_0}{m} \right)$$
- 化学燃料ロケットでは、 w =数km/s程度。高速を得るには膨大な推進材が必要。
- 高温プラズマを使えばより大きい排出速度が可能。ただし、エネルギー源が必要(太陽電池、原子力)。また推力が小さいので、地上からの発射は不可。
- VASIMR: 高周波でプラズマ加熱し100万度の高温にして噴射し、 $w=100\text{km/s}$ を得る。

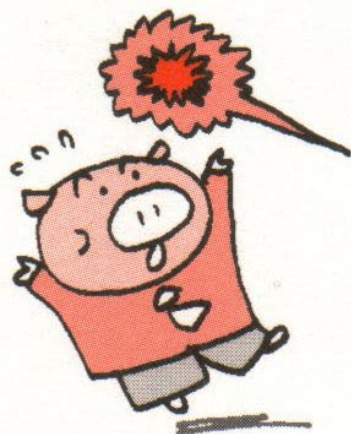
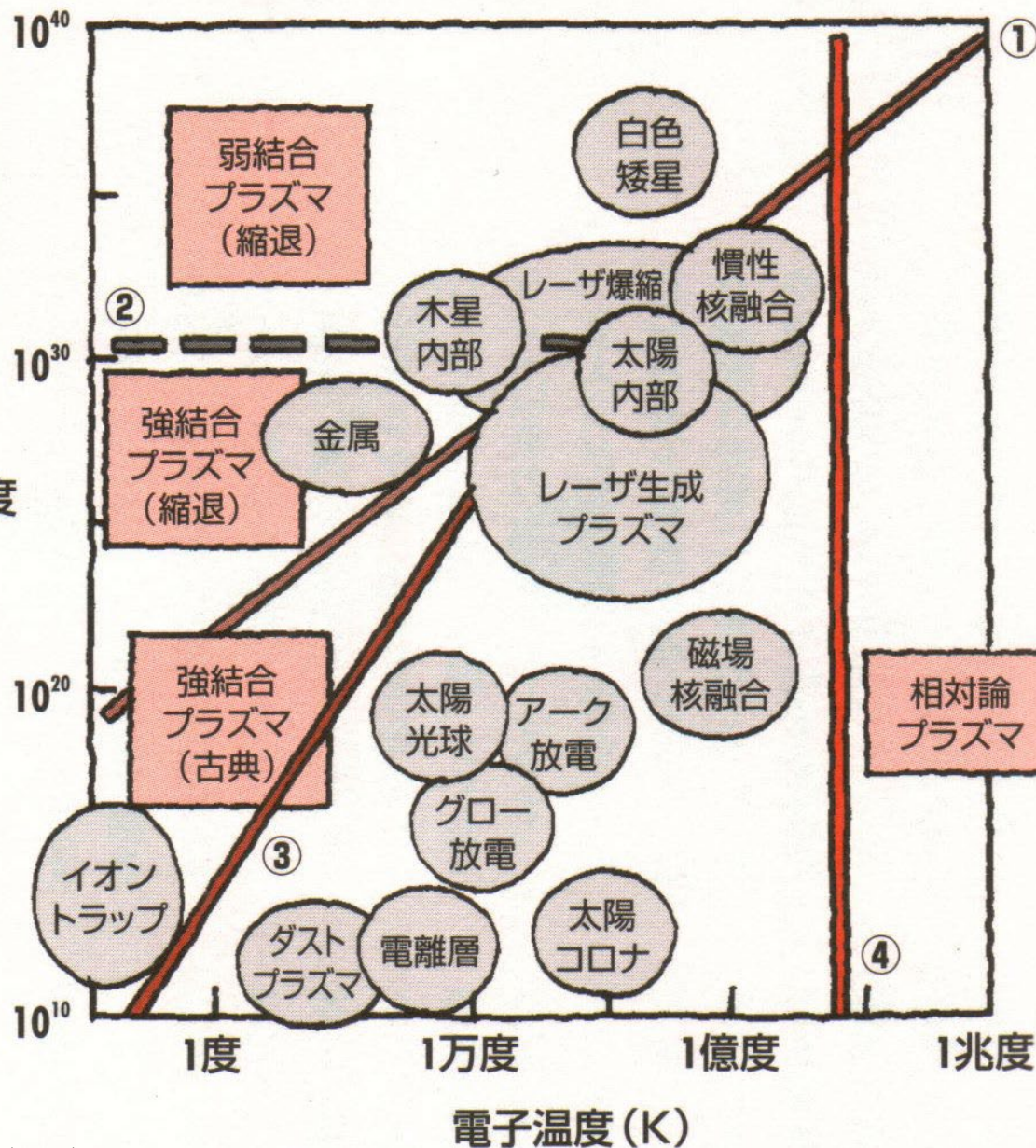


VX-200 (200kW)のテスト

極限プラズマの領域

- ①  温度=フェルミエネルギー
- ②  イオン球半径=ボーア半径
- ③  結合パラメータ=1
- ④  温度=質量エネルギー

電子密度
(m^{-3})



電子温度 (K)

講義の概略構成

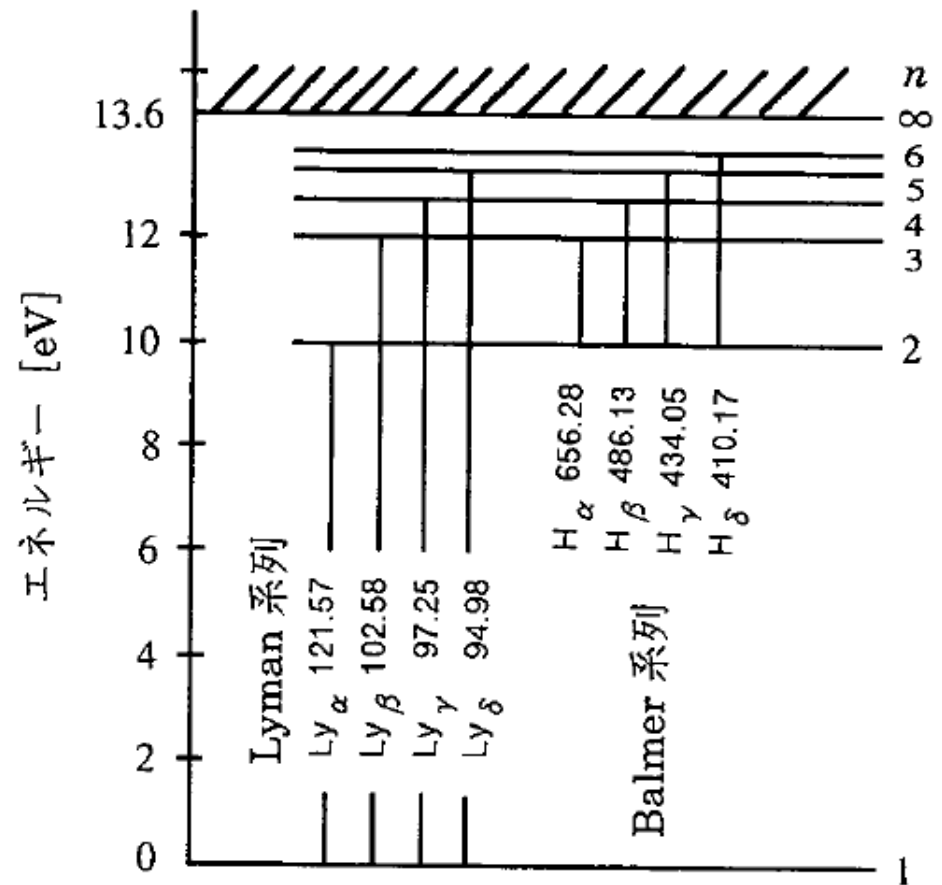
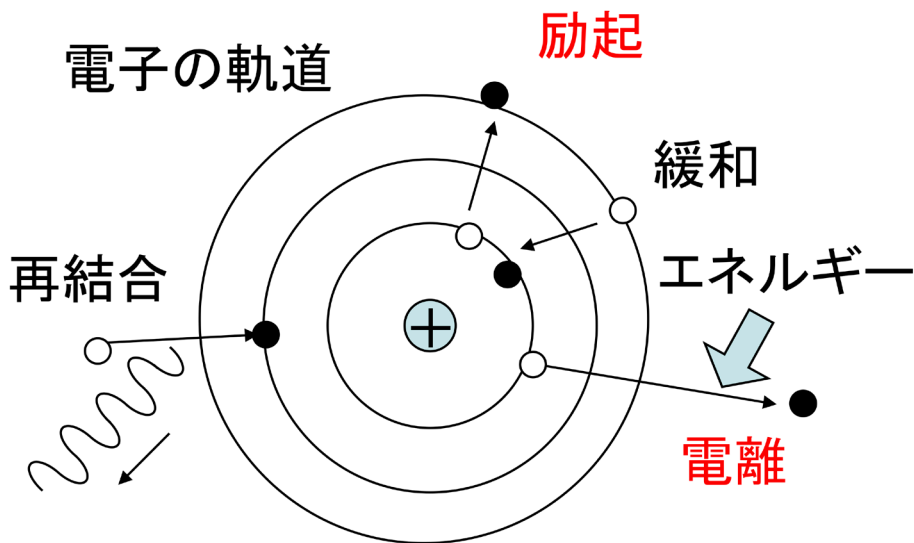
1. 原子分子過程とプラズマの生成
2. プラズマの基本的性質
3. 荷電粒子の運動
4. クーロン衝突と電気抵抗
5. 電磁流体力学とプラズマの流体としての運動
6. プラズマの波動
7. プラズマの平衡
8. プラズマにおける熱・粒子の輸送
9. プラズマ・材料相互作用
10. 核融合プラズマ

1項目は必ずしも1回の講義に対応しない。

1-1. 原子・分子過程

電子は量子条件で定まる飛び飛びのエネルギー準位にある

外界とのエネルギーのやり取りで準位が変わる
(励起／脱励起(緩和)、
電離／再結合)



水素原子のエネルギー準位

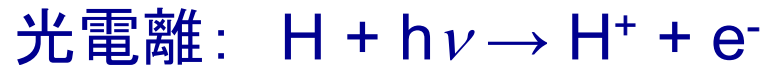
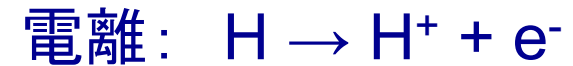
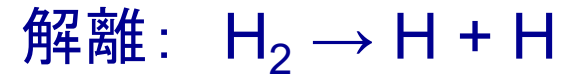
高村秀一「プラズマ理工学入門」森北出版(1997)図2.5

(1) 解離・励起・電離

気体分子あるいは原子がエネルギーを受け取ると、解離・(電子)励起・電離を起こす。実際には、解離と同時に、励起・電離が起きることもある。

エネルギーを受け取る相手は、電子、イオン、原子、分子、光(光子)など。

負イオンを生成することもある。



(2) 再結合

正イオンと電子(あるいは負イオン)が衝突して中性原子(分子)になる過程。エネルギーを放出する。

表面再結合: 固体表面

体積再結合: 自由空間



3体再結合:



イオン・イオン再結合:

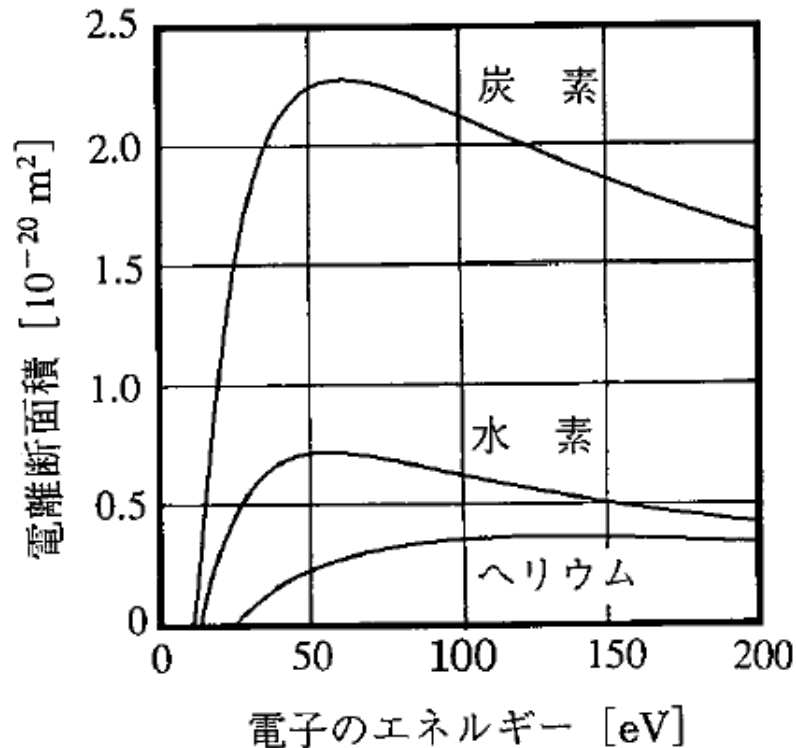


電離ポテンシャル(電離するのに必要なエネルギー)

H: 13.60 eV, He: 24.59 eV, Ar: 15.76 eV, Li: 5.39 eV,
C: 11.27 eV, N: 14.53 eV, O: 13.62 eV.

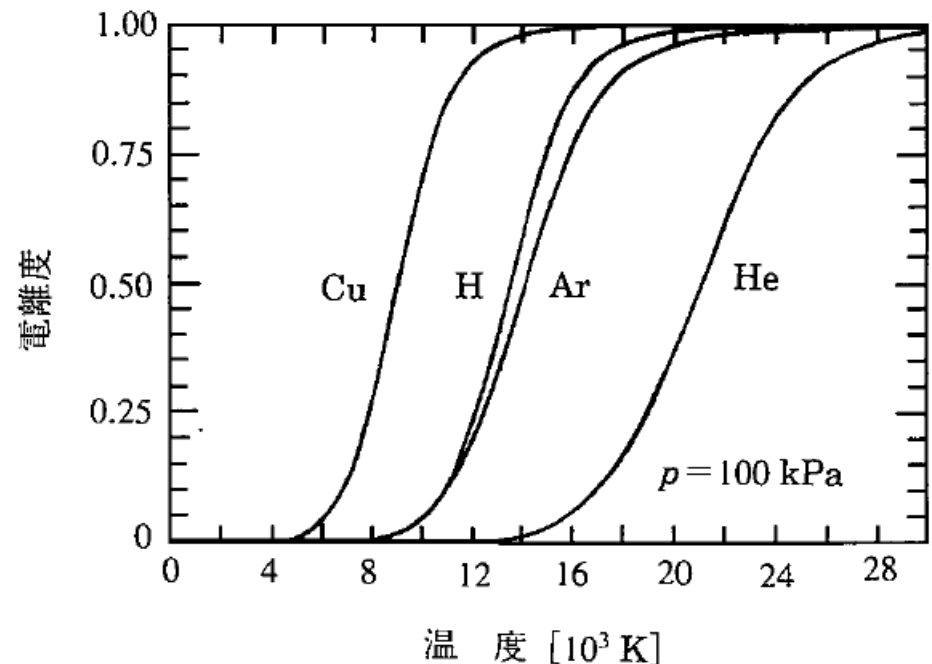
$$\frac{hc}{\lambda} > \phi \text{ より } \lambda[\text{nm}] < \frac{1239.8}{\phi[\text{eV}]} \quad (\text{紫外線})$$

ϕ : 電離ポテンシャル



電子衝突による電離の断面積

高村秀一「プラズマ理工学入門」森北出版(1997)図2.2



熱平衡状態における熱電離による電離度

高村秀一「プラズマ理工学入門」森北出版(1997)図2.14

(3) 荷電交換

イオンと原子が衝突し、イオンが原子に、原子がイオンになる。周辺プラズマでのエネルギー損失過程として重要。



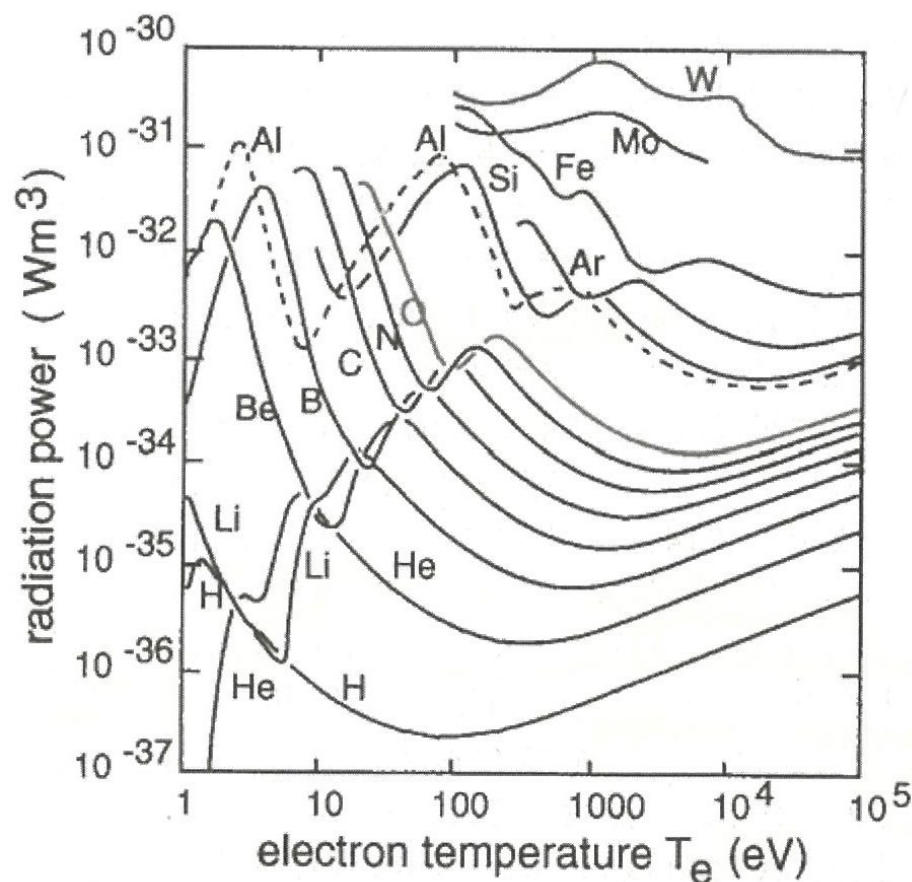
(4) イオン・原子からの発光

イオン・原子の励起準位にある電子が下の準位(基底準位)に遷移するときに光を発する。

準位差に応じた波長の線スペクトルとなる。

電子を持たない完全電離イオンからは発せられない(高温水素プラズマの中心部は光らない)。

原子番号の大きい不純物(タングステンなど)は高温でも完全電離とならないので、線スペクトル放射によるエネルギー損失が問題となる。



電離と再結合のバランス

- プラズマとなるかどうか(電離度)は、生成(電離)と消滅(再結合)のバランスで決まる。
- 電離度は、もともとあった原子の内、電離してイオンになっている割合。
(電離度) = (イオン密度) / (原子密度 + イオン密度)
弱電離プラズマ、完全電離プラズマ。
- 熱電離だけでは、プラズマとなるには超高温が必要だが、光電離や電子衝突電離の場合はそうでもない場合がある
- 密度が低ければ熱量は小さいので、「熱く」は感じない(国際宇宙ステーションの飛行士)

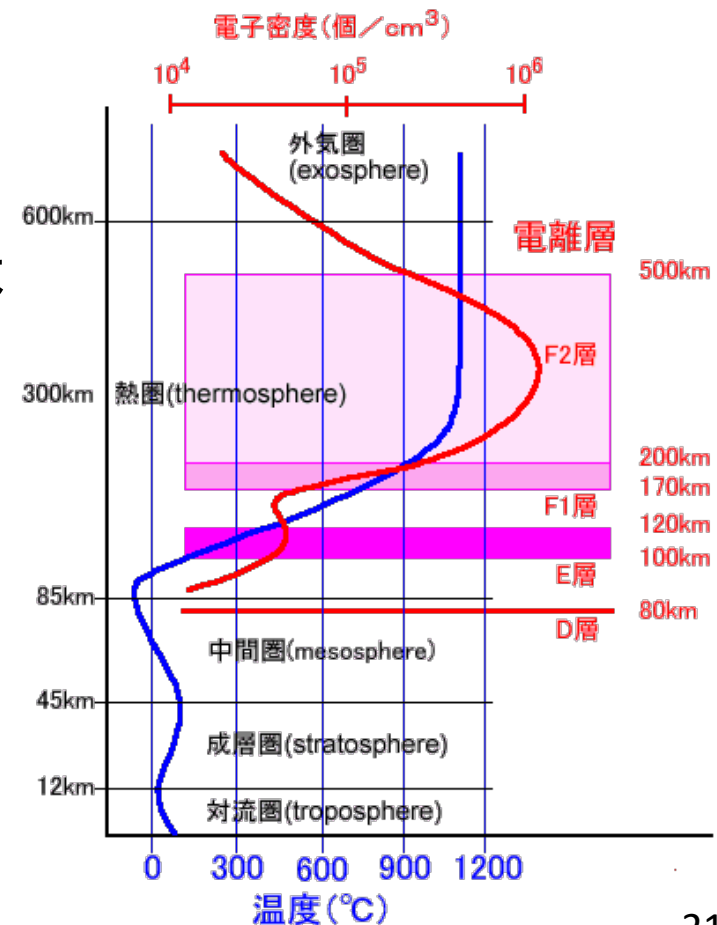
電離層(上空80~500km)

太陽紫外線により電離(光電離)。

密度: 大気の100万分の1以下(再結合小)

温度: 1000度程度

オーロラ: 太陽から飛来した電子との衝突により窒素、酸素分子が電離(電子衝突電離)。



1-2. プラズマの生成 (1) 直流放電

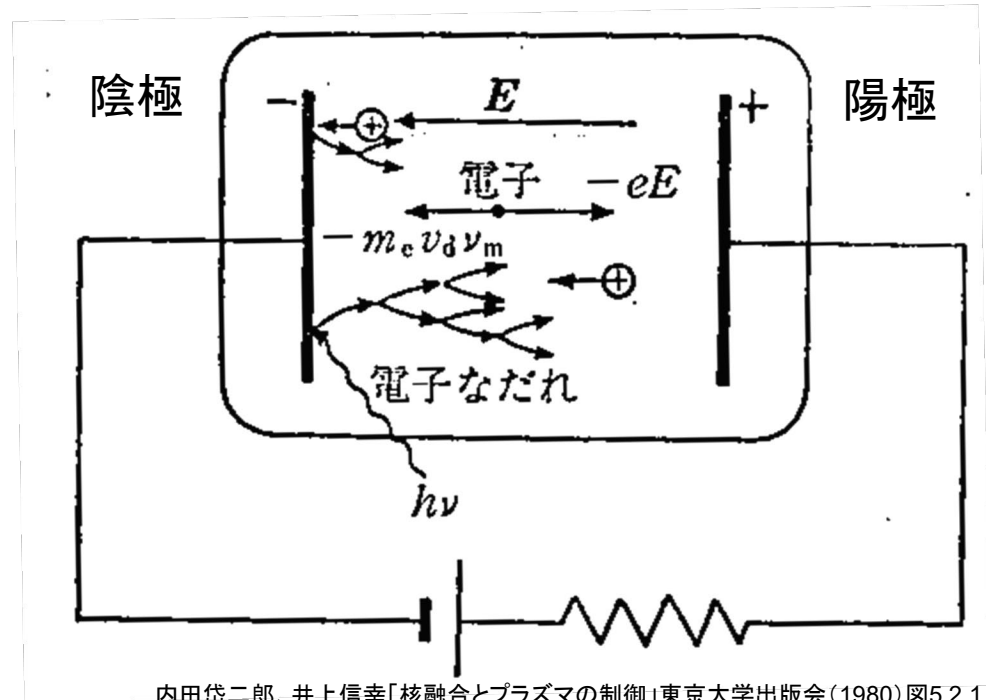
(圧力の低い) 気体に直流電場を印加し、絶縁破壊(放電)によりプラズマを生成する場合。

(1) 陰極での光電効果などで電子が発生

(2) 電場で電子が加速され高エネルギーになる

(3) 電子がガス原子に衝突して、電離させ、イオンと電子を発生する

(4a) 電子は電場で加速され、次の電離を起こし、増えていく(電子なだれ) ただし、陽極に到達した時点で電子の生成は終わる。



内田岱二郎、井上信幸「核融合とプラズマの制御」東京大学出版会(1980)図5.2.1

(4b) イオンは電場で加速され、陰極に衝突し、電子(二次電子)を放出する。(1)に戻る。この時放出される電子の個数が最初に放出された個数より多ければ、電子は際限なく増えていき、放電(絶縁破壊)がおこることになる。

α : 1個の電子が電場方向に単位長さ進む間に起こす電離の数(電離係数)

γ : 1個のイオンが陰極に衝突したときに発生する二次電子の数(二次電子放出係数)

Γ_0 : 電極間が真空のときに陰極から放出される電子束(単位時間単位面積当たりの数)。

Γ : 電極間にガスがあるときに陰極から放出される電子束。

電極間隔を d とすると、陽極に到達する電子数は $\Gamma e^{\alpha d}$ 、発生するイオン束は $\Gamma e^{\alpha d} - \Gamma$ なので、二次電子束は $\gamma \Gamma (e^{\alpha d} - 1)$ 。よって以下がなり立つ。

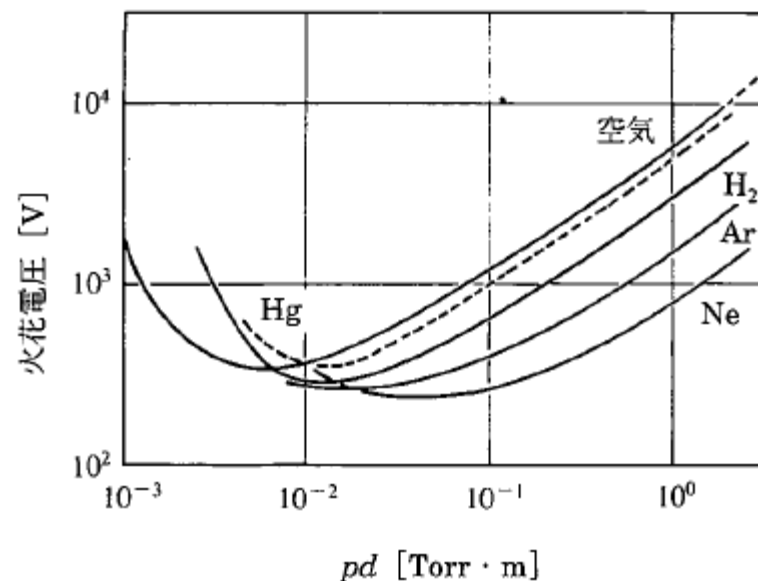
$$\Gamma = \Gamma_0 + \gamma \Gamma (e^{\alpha d} - 1) \rightarrow \Gamma = \frac{\Gamma_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

分母が0となるとき、すなわち

$$\alpha d = \ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right)$$

のとき、放電が開始する。これをタウンゼントの火花条件式という。

α の電場 E とガス圧 p に対する依存性から、放電開始電圧 V は pd の関数であり、極小値を有することが導かれる(パッシェンの法則)



1-2. プラズマの生成 (2) 高周波放電

プラズマの生成方法としては、直流電場を使う方法(直流放電)の他に、高周波を使う方法がある。電極を用いないプラズマ生成が可能(MHz帯ではコイル、GHz帯では導波管で高周波を入力する)。

とくに、磁場中の共鳴(電子サイクロトロン共鳴)を用いると効率的。

TOKASTAR-2における
マイクロ波(2.45GHz)
によるプラズマ生成

