

プラズマとは...? そして集団的性質

―― いろいろなプラズマ

* 太陽・宇宙プラズマ、身近なプラズマ、プラズマの応用

(1) プラズマとは...?

- ・ 固体、液体、気体 ---- そして プラズマ
⇒ 「物質の第4の状態」、プラズマの定義

(2) プラズマの集団的性質 - 1

- ・ 多粒子による遮蔽効果(デバイ遮蔽) ―― デバイ長

(3) 同上 - 2

- ・ プラズマ振動と電磁波(電波、光)の伝搬・反射 ―― 身近な応用

(4) 同上 - 3

- ・ 電界磁界中の荷電粒子とプラズマ ―― 運動方程式と応用
⇒ 単純トラス・ミラー磁界中のプラズマの性質
⇒ 地球磁界中プラズマの振舞いとオーロラ

動する。決して電場の方向へは移動しない。これをE×Bドリフトと呼ぶ。(プラ
 だろ。！)

プラズマ振動と電磁波

プラズマの性質 その2 〔プラズマ振動〕

次に、プラズマの基本的性質のうち、荷電粒子が集団となって引き起こす現象
 に触れてみよう。

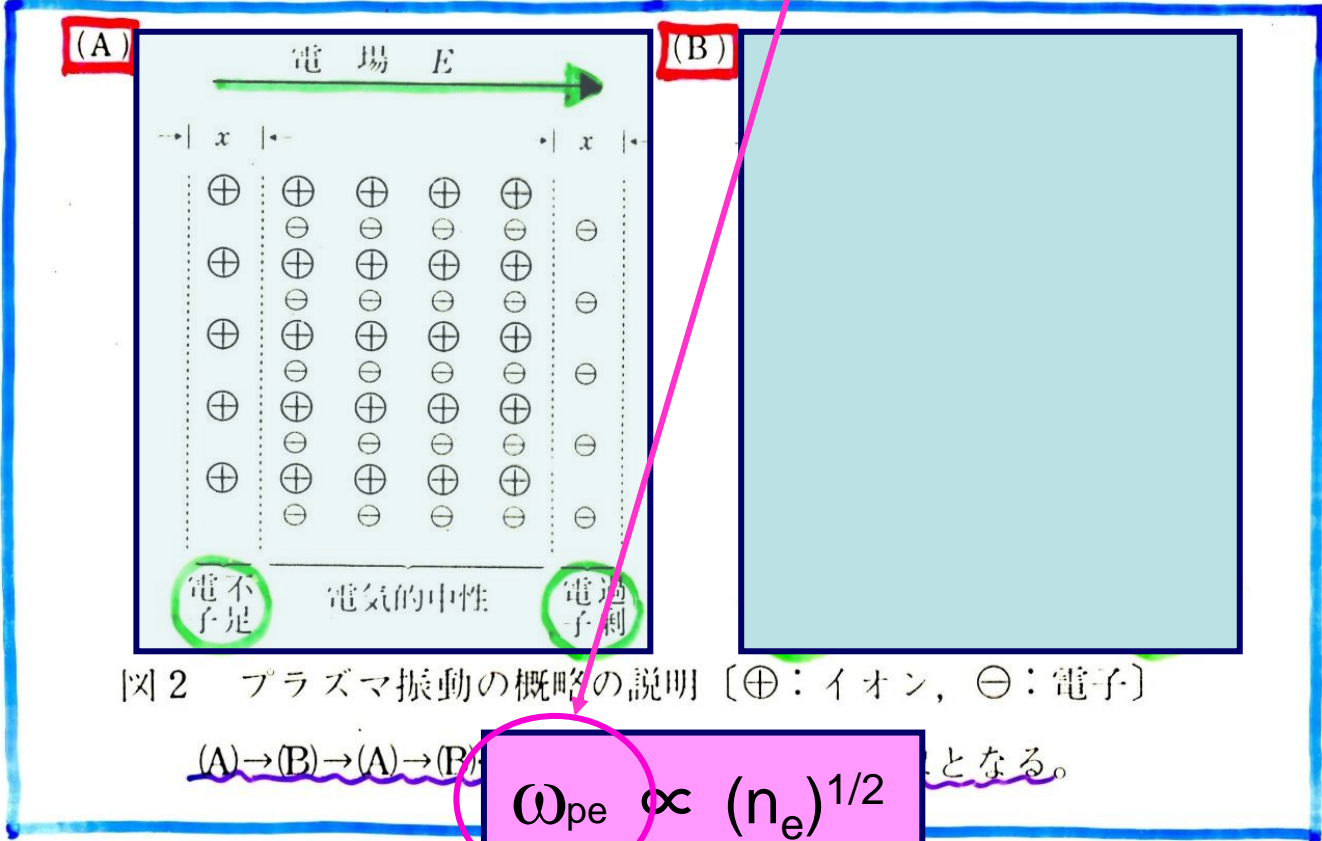


図2 プラズマ振動の概略の説明 [⊕：イオン，⊖：電子]

(A)→(B)→(A)→(B) となる。

$$\omega_{pe} \propto (n_e)^{1/2}$$

えてみよう。電子が過剰な領域が例えば平板状にできたとすると、もともと全体としては中性であったのであるから、一方において電子が不足する領域が生ずるはずである(図 1・13)。平板中の電子密度を n_e 、ずれの距離を x とすると、電荷の面密度 σ は $\sigma = en_e x$ であるから、生ずる電界 E は静電気学の知識から

$$\begin{aligned} E &= \sigma / \epsilon_0 \\ &= en_e x / \epsilon_0 \end{aligned} \quad (1 \cdot 54)$$

である。2枚の板は中性にもどろうとして力 eE で引き合うが、 $x=0$ (ほぼ中性) になるころには速度が生じていて慣性で通り過ぎてしまい、今度は逆方向に電界 $-E$ が発生することになる。つまり、この繰返しが続くわけで、これが“プラズマ振動”である。運動方程式 ($F = m\ddot{x} = -eE$) で表せば

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -(e^2 n_e / \epsilon_0 m_e) x \\ &= -\omega_{pe}^2 x \end{aligned} \quad (1 \cdot 55)$$

ただし

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} : \text{電子プラズマ周波数 (または振動数)} \quad (1 \cdot 56)$$

となり、振動数が ω_{pe} の単振動であることがわかる。 n_e を $[\text{cm}^{-3}]$ で表すと、このプラズ

マ周波数は

$$\omega_{pe} \cong 5.6 \times 10^4 \sqrt{n_e} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (1 \cdot 57)$$

と書け、例えば $n_e = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ では $\omega_{pe} \cong 5.6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ($f_{pe} = \omega_{pe}/2\pi \cong 9 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$), $n_e = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ では $\omega_{pe} \cong 5.6 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ ($f_{pe} = 9 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$) となり、通常はマイクロ波領域の高周波現象である。

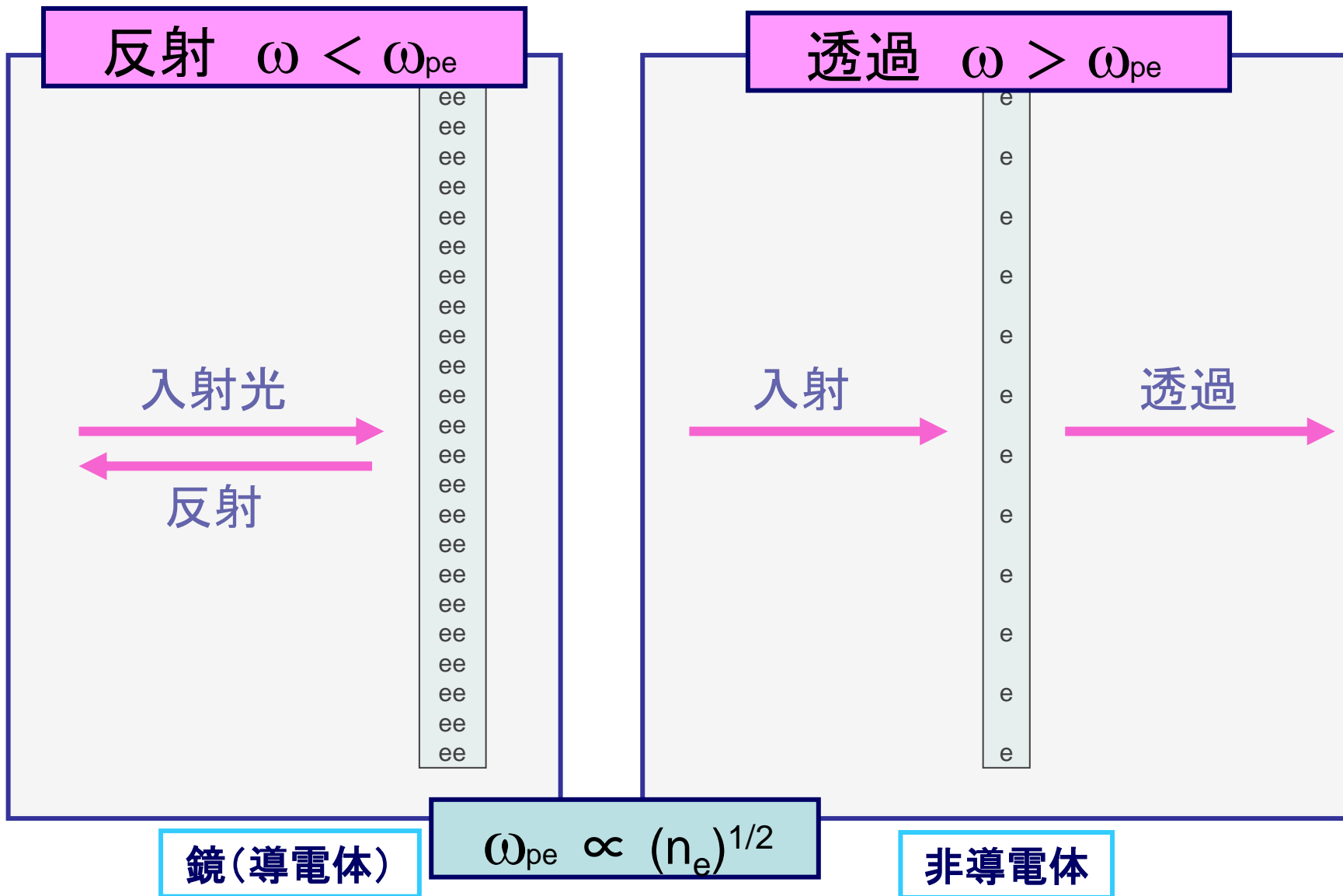
プラズマを誘電体とみなしたときの詳しい扱いは後に (第5章) 述べるが、電子プラズマ周波数に限って簡単に触れておこう。プラズマの誘電体としての屈折率 N_r は、ある周波数 ω の波に対して

$$N_r = \sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}} \quad (1 \cdot 58)$$

で与えられる。これから明らかなように、 $\omega > \omega_{pe}$ の範囲では波はプラズマ内を伝搬するが、 $\omega \rightarrow \omega_{pe}$ となると $N_r \rightarrow 0$ となり、ついにはカット・オフ (遮断: $N_r = 0$) 状態となる。つまり、 $\omega \ll \omega_{pe}$ では、電磁波にとってプラズマの表面は金属表面と同じものになり、反射することになる。 $N_r = 0$ となるときの電磁波の周波数を遮断 (カット・オフ) 周波数 ($f_c = \omega_{pe}/2\pi$) という。また逆に、波長 λ [cm] の電磁波に対してそれを反射するプラズマ密度の最小値を遮断 (カット・オフ) 密度と呼び

$$n_c = 1.11 \times 10^{18} / \lambda^2 \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (1 \cdot 59)$$

鏡での光の反射



で与えられる。例えば、 $\lambda=300\text{ m}$ ($f=1\text{ MHz}$) の高周波では $n_e \cong 10^4\text{ cm}^{-3}$ 、 $\lambda=4\text{ mm}$ ($f=75\text{ GHz}$) のマイクロ波では $n_e \cong 7 \times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$ 、また $\lambda=6943\text{ \AA}$ のルビー・レーザーでは $n_e \cong 2.3 \times 10^{21}\text{ cm}^{-3}$ となる。

るが、 $\omega < \omega_{pe}(x_2)$ となる所では電磁波は反射されてしまう。ラジオ波が電離層で反射され、FM波が透過するのはこのためである。

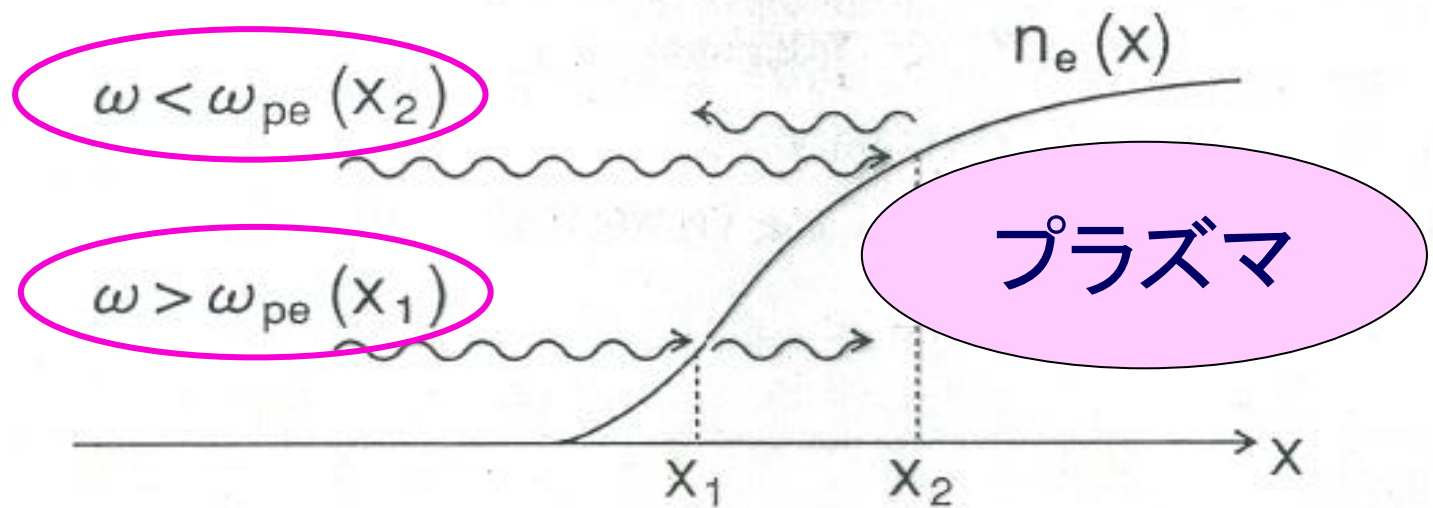


図 1.2 電磁波の透過と反射

$$2\pi V \epsilon_0 m$$

で決まる。(この式は静電気力の式と運動方程式を組み合わせるとすぐ導ける。諸君にも解けるはずだから、受験勉強の休み時間などに解いてみよう。もしかすると、来年のどこかの入試に出るかも……?!) この振動現象は、次に述べるように実はラジオなどの電波の受信に、大いに関係があるのだ。

我々の生活との結びつき

プラズマに対して、外から電波が入ってくるとどうなるだろうか。これは電波の周波数と上述したプラズマ周波数 f_p とによって決まる。もしも、電波の周波数 f が f_p より大きければ、電波はプラズマ中を伝搬できるが、 f が f_p より小さいと、電波はプラズマ中に入れず金属面でのように反射される。地上の発信局から発射された電波が、直線的には届くはずのな

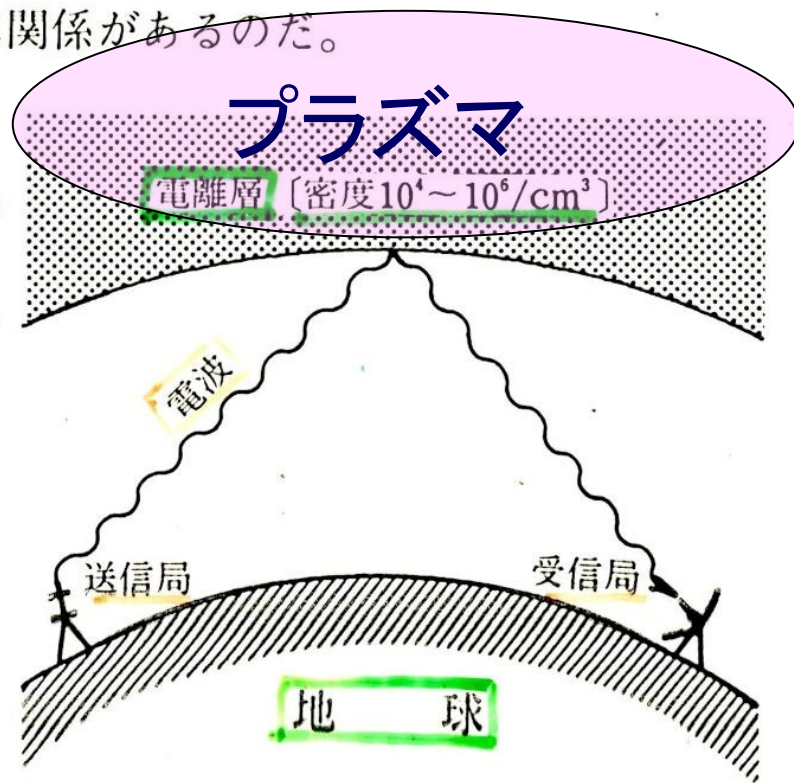


図3 電離層による電波の反射
電離層の密度が $10^4 \sim 10^6 / \text{cm}^3$ くらいなので、主として、周波数が $1 \sim 10 \text{ MHz}$ (メガヘルツ) 以下の電波がよく反射される。

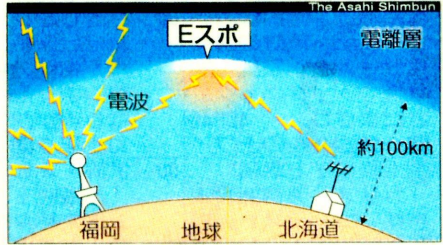
福岡のFM、北海道で受信★沖縄の無線、東京まで

いたずらに電離層 Eスポ大はしやぎ

夏場、約100km上空で突発的に発生するEスポ(ラディックE層(Eスポ))という電離層の一種が、このところ各地で珍しい現象を引き起こしている。福岡県内のFM放送が北海道で聞こえたほか、羽田空港周辺を飛ぶ飛行機が那覇空港の管制官と飛行機との交信を受信した。通信総合研究所(東京都小金井市)によると「Eスポによるいたずら。今年は特に活発なようだ」という。

北海道日高支庁平取町二風谷の主婦柴田紫さん(26)は7月30日午後、居間でラジオの周波数を含ませていたところ突然、1400kHz以上離れた北九州市のクロスFMの番組が聞こえてきた。何で九州の電波が入るのかとびっくりした。珍しいものが聞けてちよつと得したと柴田さん。同局にはこの日、北海道や東北地方からも、受信報告やリクエストが寄せられた。千葉県木更津市上空を飛んでいた航空機2機は、同日午前11時57分、「羽田の管制とは別の音声が届く」と羽田空港の管制官に連絡してきた。国土交通省羽田空港事務所羽田システム統制室が調べたところ、1600kHzかなたの那覇空港管制官と航空機の交信だったという。

同統制室によると、那覇空港では、離着陸する飛行機の誘導電波に羽田



と同じ周波数を使っており、羽田の地上では受信できなかったが、上空で30分間ほど聞こえた。武藤光治管制技術官は「Eスポによる電波より」羽田の電波の方が近いので圧倒的に強く、航行には問題ないが、とても珍しい現象だ」と話している。

電離層 太陽からの紫外線やエックス線により地球の大気の一部が電離して、イオンと電子が混在している領域。密度の違いでD層(地上60~90kHz)、E層(90~130kHz)、F層(130~1000kHz)に分かれる。電波の鏡にもたとえられ、短波はE層で反射するが、周波数が高い超短波の場合は通常、突き抜けてしまう。

今夏なぜか多発 暑と関係 無関係

い現象。今回のようなケースは初めて」と話す。Eスポは、FM局や消防無線などに使われる超短波(VHF)と呼ばれる電波を反射する。超短波は通常、アンテナから見通せる範囲でしか交信できない。ところがEスポが発生すると、宇宙へ進むはずの電波は反射され、思わぬ遠距離に到達する(図)。

全国4カ所で電離層の状態を監視している通信総合研究所電離層・超高层グループの観測によると、31日は、正午前後に東京上空と沖縄上空の両方で強いEスポが発生していた。30日のFMラジオのケースは、北海道と福岡の間でEスポが発生し、電波が反射したと考えられるという。

同研究所電離層・超高层グループの丸山隆リダーは「Eスポの発生メカニズムはよく分かっていない。いつどこで発生するかも分からないが、今年は今東地方が梅雨明けした7月ごろから多発している。宇宙に近いところで発生しているの、地上の猛暑とは直接関係ない。この時期に見られる現象です」と話している。

波が入るのかと
した。珍しいも
ちよつと得し
さん。同局には

北海道や東北地
受信報告やり
が寄せられた。

不更津市上空を

航空機2機は

午前11時57分、

管制とは別の音

「と羽田空

間に連絡してき

交通省羽田空港

田システム統制

ところ、16

たの那覇空港

航空機の交信だ

つ。

至によると、那

は、離着陸する

誘導電波に羽田



と同じ周波数を使つてお
り、羽田の地上では受信
できなかったが、上空で
30分間ほど聞こえた。武
藤光治管制技術官は「E
スポによる電波より」羽
田の電波の方が近いので
圧倒的に強く、航行には
問題ないが、とても珍し

今夏なせ

電離層 太陽からの紫外線やエック
ス線により地球の大気の一部が電離し
て、イオンと電子が混在している領
域。密度の違いでD層(地上60〜90
キロ)、E層(90〜130キロ)、F層
(130〜1000キロ)に分かれる。
電波の鏡にもたとえられ、短波はE、
F層で反射するが、周波数が高い超短
波の場合は通常、突き抜けてしまう。

と、31日は、正午
東京上空と沖縄上
方で強いEスポが
ていた。30日の
オのケースは、北
福岡の中間でEニ
生し、電波が反射
考えられるとい
同研究所電離層
層グループの丸山
ダーは「Eスポの
カニズムはよく
いない。いつどこ
するかも分からな
今年は関東地方が
けた7月ごろ、
している。宇宙
ころで発生して
で、地上の猛暑
関係ない。この
られる現象です
ている。

プラズマとは...? そして集団的性質

―― いろいろなプラズマ

* 太陽・宇宙プラズマ、身近なプラズマ、プラズマの応用

(1) プラズマとは...?

- ・ 固体、液体、気体 ---- そして プラズマ
⇒ 「物質の第4の状態」、プラズマの定義

(2) プラズマの集団的性質 - 1

- ・ 多粒子による遮蔽効果(デバイ遮蔽) ―― デバイ長

(3) 同上 - 2

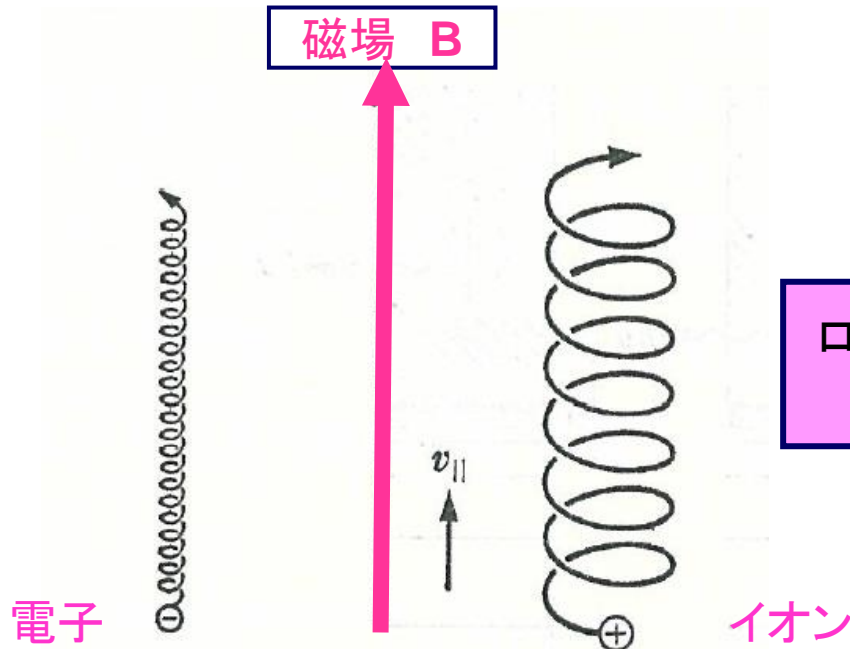
- ・ プラズマ振動と電磁波(電波、光)の伝搬・反射 ―― 身近な応用

(4) 同上 - 3

- ・ 電界磁界中の荷電粒子とプラズマ ―― 運動方程式と応用
⇒ 単純トラス・ミラー磁界中のプラズマの性質
⇒ 地球磁界中プラズマの振舞いとオーロラ

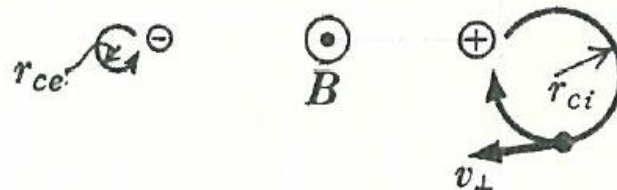
荷電粒子（電荷 $+$ $-$ を持った粒子）と磁場

横から
見た図



ローレンツ力による運動方程式
 $m \cdot dv / dt = q \cdot (E + v \times B)$

真上から
見た図



電荷（プラス $+$ 、マイナス $-$ ）を持った粒子は磁場の中で回転運動をする
＝ 磁力線に巻きつくように回転運動をする

磁界と垂直に電子サイクロトロン周波数の電界を加えて電子を共鳴的に加速す

電界磁界中の荷電粒子とプラズマ

の放電開始が可能となる。

この放電をECR放電と呼ぶ。ECRは、電子サイクロトロン共鳴 (electron cyclotron resonance) の略である。この方法により、 10^{-5} Torr 程度でもプラズマをつくることができる。周波数は工業用に割り当てられている 2.45 GHz が多く用いられている。この周波数帯の放電をマイクロ波放電という。

6.2 一様定常磁界と外力

6.2.1 外力ドリフト

定常磁界中の粒子に一定な外力 F (例えば、電界、重力) が作用する場合の運動方程式は

$$m\dot{\mathbf{v}} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{F}$$

である。これを磁界に垂直な成分と平行な成分に分解

$$m\dot{\mathbf{v}}_{\perp} = q(\mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B}) + \mathbf{F}_{\perp} \tag{6.15}$$

$$m\dot{\mathbf{v}}_{\parallel} = \mathbf{F}_{\parallel} \tag{6.16}$$

電場・磁場中の荷電粒子の運動

$$M (d\mathbf{v}/dt) = q (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

ローレンツ力 による運動方程式

磁界と垂直に電子サイクロトロン周波数の電界を加えて電子を共鳴的に加速する。こうすれば、図 6.3 に示すように、低い電界での放電開始が可能となる。この放電を **ECR 放電** という。ECR は、**電子サイクロトロン共鳴** (electron cyclotron resonance) の略である。この方法により、 10^{-5} Torr 程度でもプラズマをつくることができる。周波数は工業用に割り当てられている 2.45 GHz が多く用いられている。この周波数帯の放電をマイクロ波放電という。

6.2 一様定常磁界と外力

6.2.1 外力ドリフト

定常磁界中の粒子に一定な外力 F (例えば、電界、重力) が作用する場合の運動方程式は

$$m\dot{\mathbf{v}} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{F}$$

一般化



$$\begin{aligned} M (d\mathbf{v}/dt) &= q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ &= q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + q \cdot \mathbf{E} \end{aligned}$$

である。これを磁界に垂直な成分と平行な成分

$$m\dot{\mathbf{v}}_{\perp} = q(\mathbf{v}_{\perp} \times \mathbf{B}) + \mathbf{F}_{\perp} \tag{6.15}$$

$$m\dot{\mathbf{v}}_{\parallel} = \mathbf{F}_{\parallel} \tag{6.16}$$

一般化



ただし、 v_{\perp} , F_{\perp} は垂直成分、 v_{\parallel} , F_{\parallel} は平行成分を表す。

いま図 6.4 のように、 $\underline{B} = (0, 0, B)$, $\underline{F}_{\perp} = (0, F_{\perp}, 0)$ で、かつ B , F_{\perp} は空間的に一様とする。このとき、式 (6

$$m\dot{v}_x = qBv_y$$

$$m\dot{v}_y = -qB \left(v_x - \frac{F_{\perp}}{qB} \right)$$

となる。ここで

$$v_x - \frac{F_{\perp}}{qB} = v'_x$$

とおくと、式 (6.17), (6.18) は次のようになる。

$$m\dot{v}'_x = qBv_y \tag{6.20}$$

$$m\dot{v}_y = -qBv'_x \tag{6.21}$$

これは、式 (6.2), (6.3) と同形である。したがって $v'_x = v_{\perp} \cos \omega_c t$ とすれば

$$v_x = v_{\perp} \cos \omega_c t + \frac{F_{\perp}}{qB} \tag{6.22}$$

全く任意の電場 E 、および磁場 B に対して、
xyz 軸を自由にとることができる：

(1) z 軸を B の方向に (2) xy 軸を $F = (0, F_{\perp}, F_z)$ と取る

ただし、 v_{\perp} 、 F_{\perp} は垂直成分、 $v_{//}$ 、 $F_{//}$ は平行成分を表す。

いま図 6.4 のように、 $\mathbf{B} = (0, 0, B)$ 、 $\mathbf{F}_{\perp} = (0, F_{\perp}, 0)$ で、かつ B 、 F_{\perp} は空間的に一様とする。このとき、式 (6.15) を成分で表すと

$$m\dot{v}_x = qBv_y \quad (6.17)$$

$$m\dot{v}_y = -qB \left(v_x - \frac{F_{\perp}}{qB} \right) \quad (6.18)$$

となる。ここで

$$v_x - \frac{F_{\perp}}{qB} = v'_x \quad (6.19)$$

とおくと、式 (6.17)、(6.18) は次のようになる。

$$m\dot{v}'_x = qBv_y \quad (6.20)$$

$$m\dot{v}_y = -qBv'_x \quad (6.21)$$

v'_x と v_y に関する式 = 旋回運動の解

これは、式 (6.2)、(6.3) と同形である。したがって $v'_x = v_{\perp} \cos \omega_c t$ とすれば

$$v_x = v_{\perp} \cos \omega_c t + \frac{F_{\perp}}{qB} \quad (6.22)$$

$$v_y = \mp v_{\perp} \sin \omega_c t \quad (6.23)$$

となる。この 2 つの式は、粒子が旋回しつつ x 方向に一定速度でドリフトする

これは、式 (6.2), (6.3) と同形である。したがって $v'_x = v_{\perp} \cos \omega_c t$ とすれば

$$v_x = v_{\perp} \cos \omega_c t + \frac{F_{\perp}}{qB} \quad (6.22)$$

$$v_y = \mp v_{\perp} \sin \omega_c t \quad (6.23)$$

となる。この2つの式は、粒子が旋回しつつ x 方向に一定速度でドリフトすることを示している。ドリフトの方向は、 x 方向すなわち $F_{\perp} \times B$ の方向であり、その大きさは $F_{\perp}/(|q|B)$ であるから、このドリフトの速度 v_F は一般に

$$v_F = \frac{F_{\perp} \times B}{qB^2} = \frac{F \times B}{qB^2}$$

: F x B ドリフト (外力ドリフト)
 大切なポイントは、ドリフト方向がイオンと電子で逆方向！ (E x B ドリフトとの違い)

: もちろん F = qE と置けば E x B ドリフトに帰着

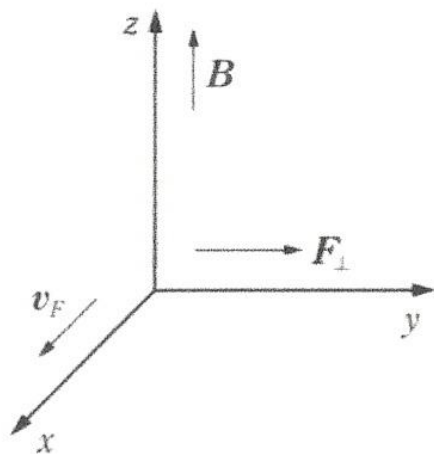


図 6.4 外力によるドリフト

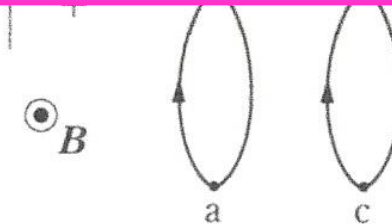


図 6.5 外力ドリフトの機構

磁界中プラズマの集団運動

—— F x B ドリフトの応用例 (a) 平板上プラズマの運動

依存する。したがって正イオンと電子とは反対方向にドリフトし、プラズマ中に電流を誘起する。その電流を運ぶのは、主として m の大きいイオンである。

6.2.4 磁界中プラズマの集団運動

磁界中に多数の正と負の荷電粒子が存在すると、集団としての特有な現象が生じる。 その例を次に示す。

a. 平板状プラズマの運動

一様定常磁界 $B = (0, 0, B)$ の中に平板状のプラズマがあり、重力が図 6.7 に示す方向に作用したとする。このとき、正イオンは左、電子は右方向に重力ドリフトを行う。その結果、平板状プラズマの左側の面に正、右側の面に負の空間電荷が生じる。このように、プラズマ中で正負の荷電粒子が分離することを荷電分離 (charge separation) という。荷電分離の結果、 x 方向に E が発



磁界中プラズマの集団運動

— F x Bドリフトの応用例

(a) 平板上プラズマの運動 (その1)

$v_F = F \times B / qB^2$ (F x Bドリフト)
大切なポイントは、ドリフト方向が
イオンと電子で逆方向！

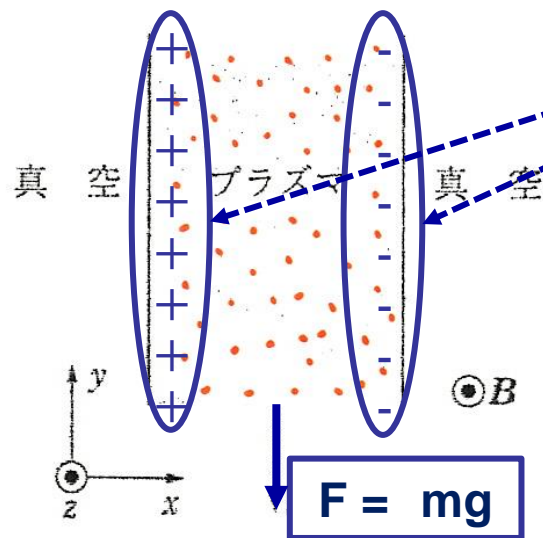


図 6.7 磁界中での平板状
プラズマの運動

磁界中プラズマの集団運動

— F x Bドリフトの応用例

(a) 平板上プラズマの運動 (その1)

$$v_F = F \times B / qB^2 \quad (F \times B \text{ドリフト})$$

大切なポイントは、ドリフト方向が
イオンと電子で逆方向！

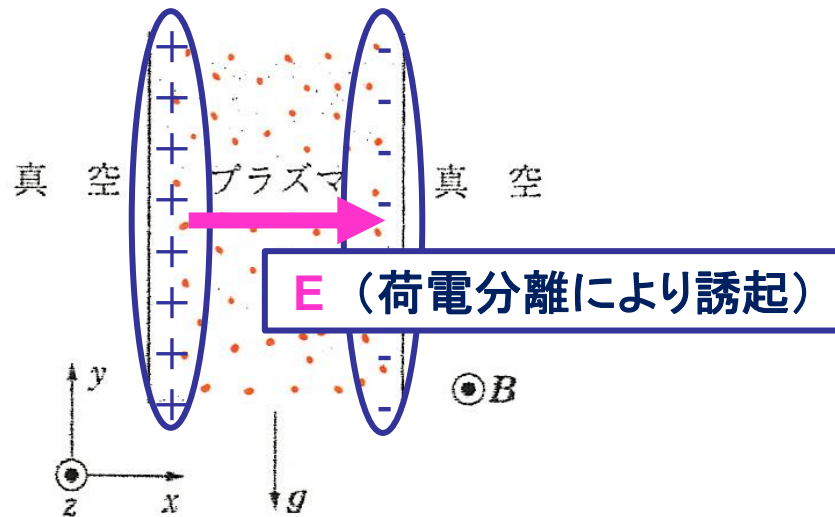


図 6.7 磁界中での平板状
プラズマの運動