

数学月間 第9回 企画講演会
令和3年12月11日(土)15:30~17:00
オンライン講演(ZOOM)

プラズマの定義と神秘さ・面白さ

— 多様な集団的性質・応用 そして科学技術の将来 —

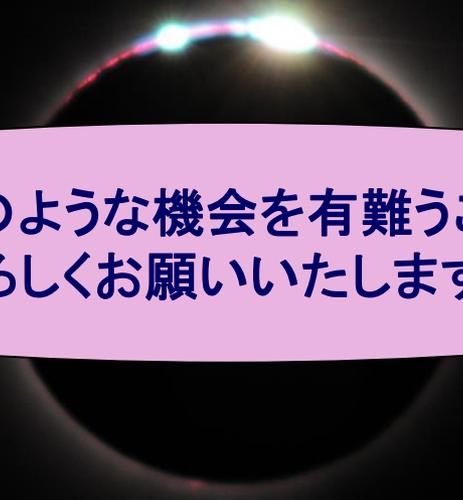


九州大学 名誉教授
核融合科学研究所 名誉教授
佐藤 浩之助

数学月間 第9回 企画講演会
令和3年12月11日(土) 15:30~17:00
オンライン講演 (ZOOM)

プラズマの定義と神秘さ・面白さ

— 多様な集団的性質・応用 そして科学技術の将来 —



本日は、このような機会を有難うございます。
よろしく願いいたします。

九州大学 名誉教授
核融合科学研究所 名誉教授
佐藤 浩之助

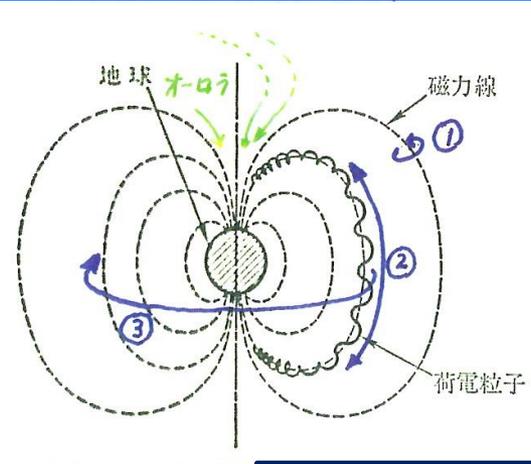
数学月間 第9回 企画講演会
令和3年12月11日(土) 15:30~17:00
オンライン講演 (ZOOM)

プラズマの定義と神秘さ・面白さ

—— 多様な集団的性質・応用 そして科学技術の将来 ——

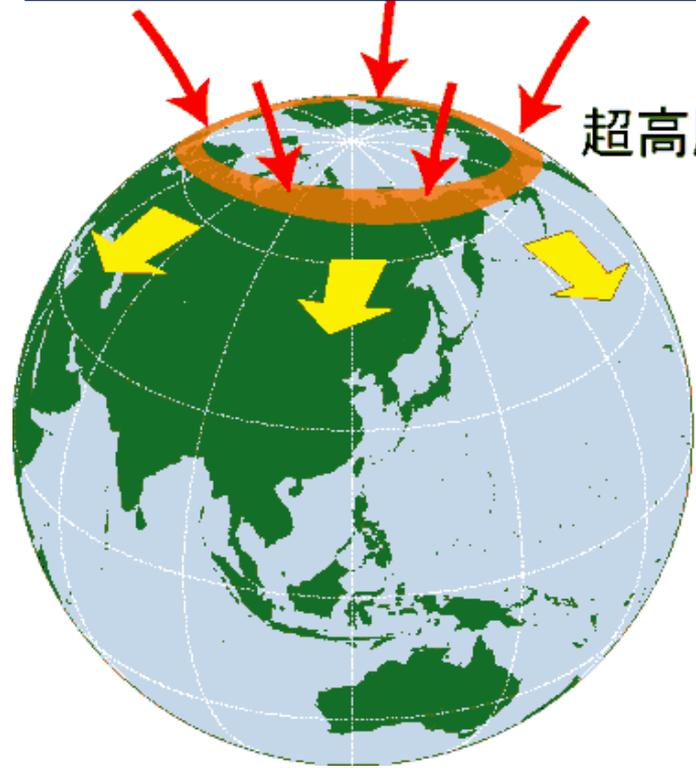
九州大学 名誉教授
核融合科学研究所 名誉教授
佐藤 浩之助

十分吟味しておく必要がある。



地球の周りの磁場は、遠方ではプラズマ流（太陽風, solar wind）の影響を受けて大きくゆがむが、地球の10倍程度以内の近い所では、双極子磁場と考えるとよい（2・18）。双極子磁場は図のように磁場の両端で強くなっており、ミラー磁場をつくるので、その中で荷電粒子が捕らわれる。これが放射線帯（Van Allen belt）である。この放射線帯に捕捉された荷電粒子は、

極域へのプラズマ流入



超高層大気加熱
組成の変化

低緯度への流入



電離圏擾乱

- ① ローレンツ力による旋回運動
- ② ミラー磁場効果による往復運動
- ③ 磁場湾曲+∇B効果による周回運動

陽子を考えると、それぞれの周期は次のようになる：

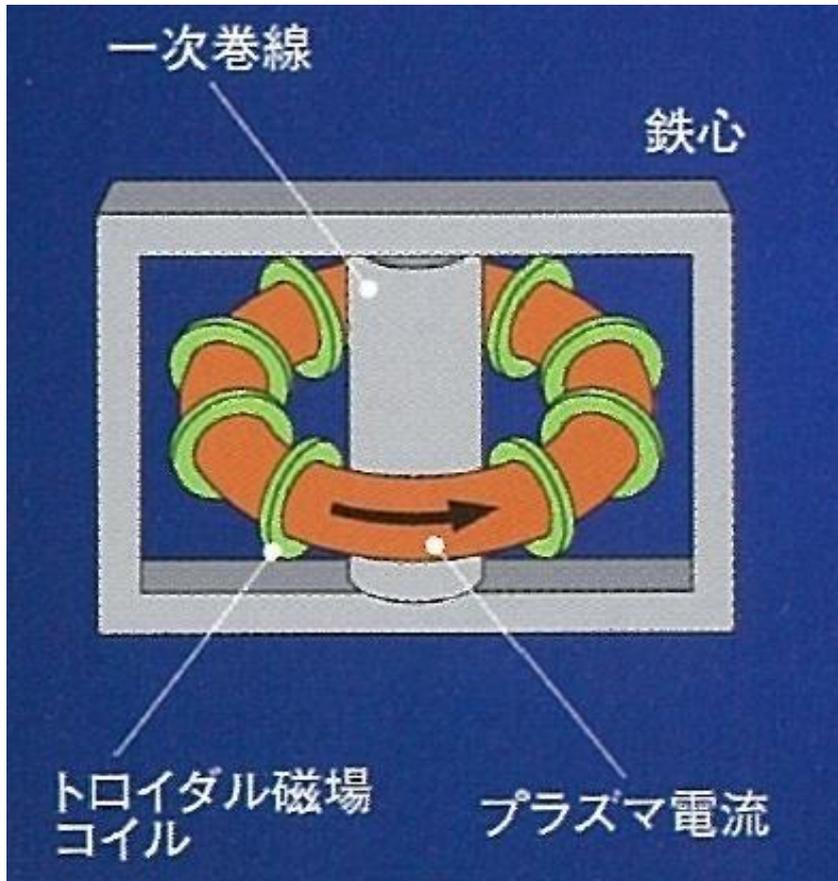
- ① 旋回運動 $\sim 10^{-2}$ s
- ② 往復運動 ~ 20 s
- ③ 周回運動 $\sim 10^4$ s

朝の間には大きな開きがあるので、この3種の周期運動は互いに独立と考えるとよい。ところで、太陽風の強さは一定不変ではなく、時間スケールで急激に変化し、そのため地球磁場も変化する。このJとIとは不変に保たれるが、Φは一定ではなくなる。このことは地球磁場に飛び込み、捕捉される機構の一つとなり得ると考えられる。

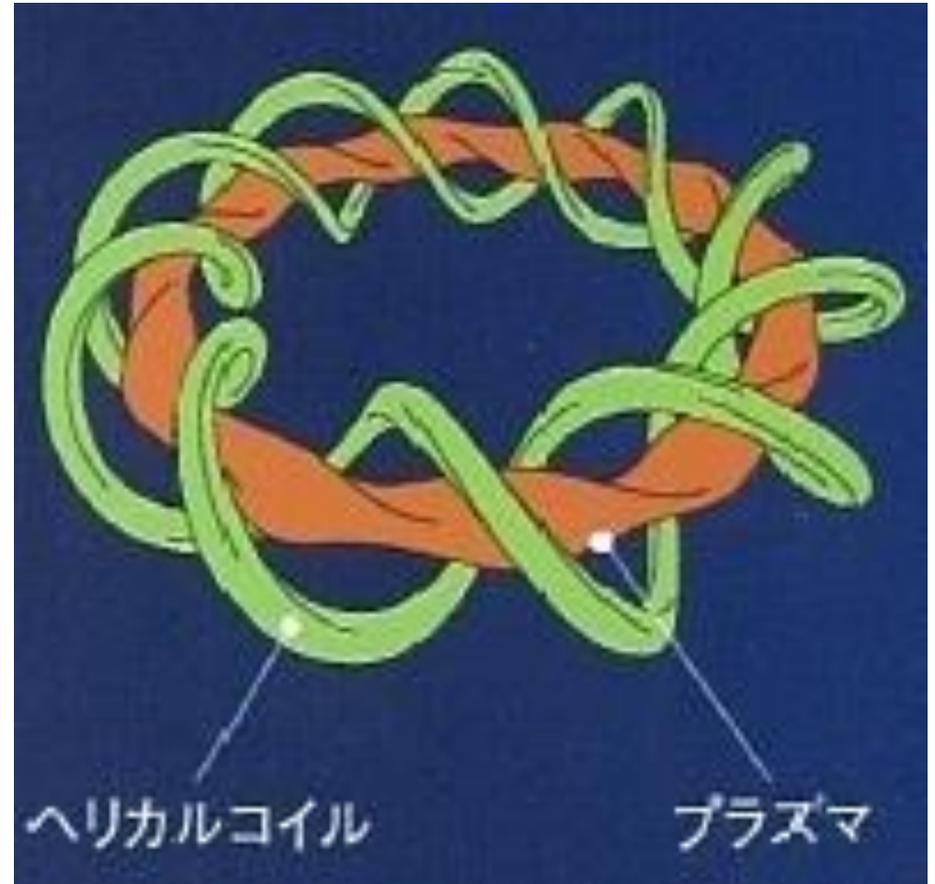
粒子間の衝突

外部から与えられた電磁場中にある1個の孤立した荷電粒子

核融合におけるトカマク型とヘリカル型



トカマク型



ヘリカル型

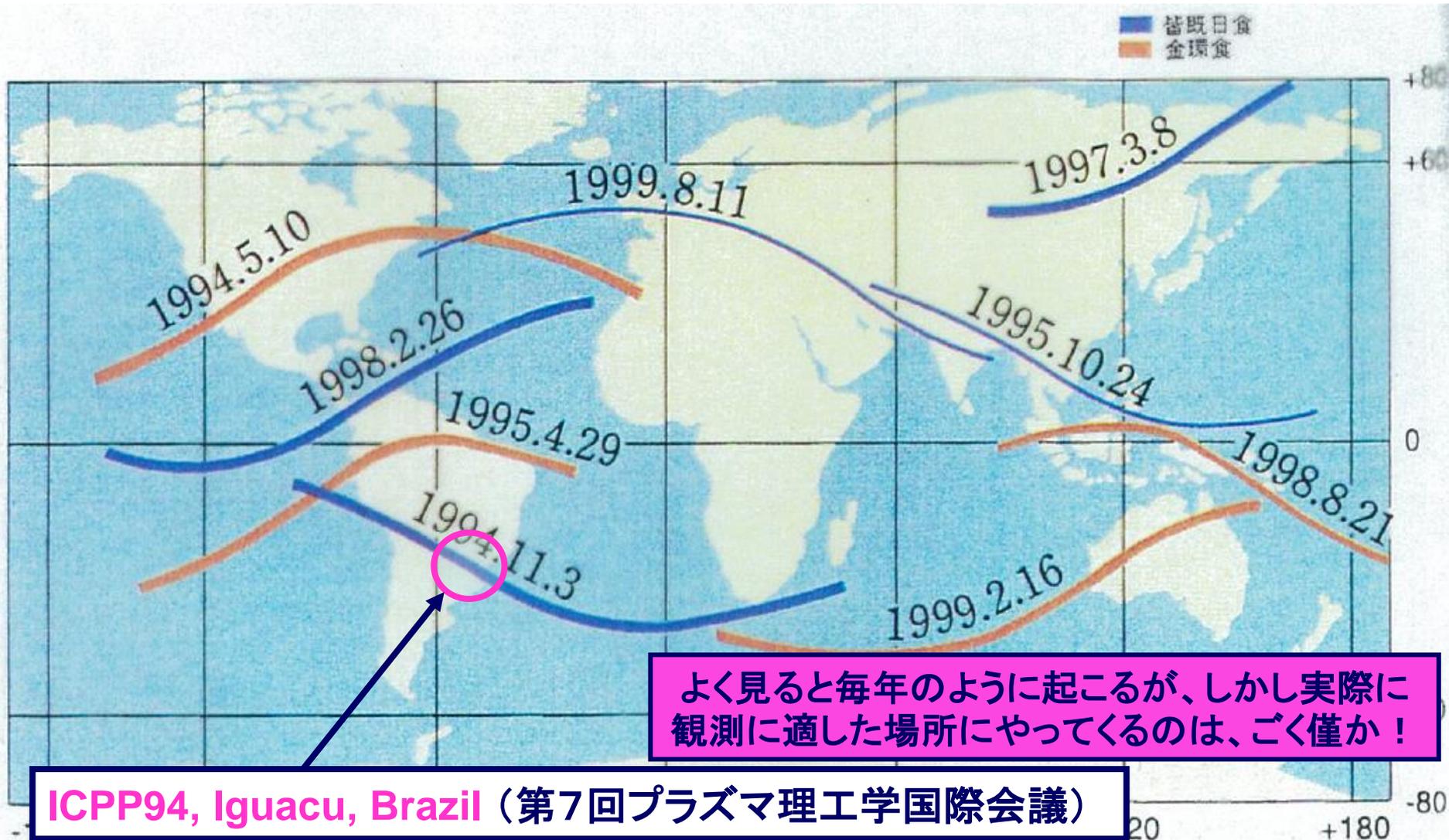
数学月間 第9回 企画講演会
令和3年12月11日(土) 15:30~17:00
オンライン講演 (ZOOM)

プラズマの定義と神秘さ・面白さ

— 多様な集団的性質・応用 そして科学技術の将来 —

九州大学 名誉教授
核融合科学研究所 名誉教授
佐藤 浩之助

世界の皆既日食・金環食(1994~1999)



太陽は人間の活動に不可欠！

太陽はプラズマそのもの
太陽は自然界での核融合炉

日頃は、まぶし過ぎて直視することができない太陽だが、
「皆既日食」は太陽のコロナを肉眼で直接見ることができ、

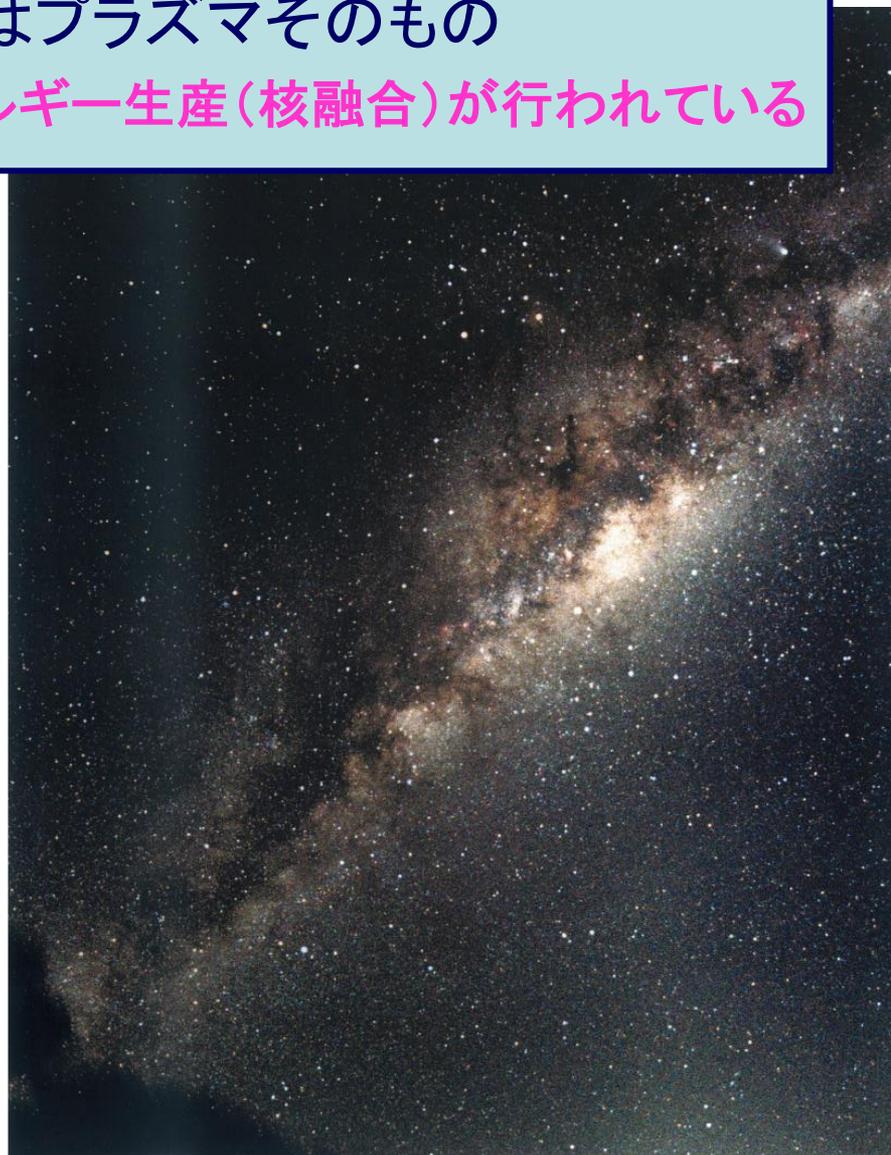
太陽に想いをさせる良い機会

Iguae
Len.
F=4
Photo by K.N.Sato

宇宙の99%以上はプラズマ！

太陽・恒星はプラズマそのもの

太陽・恒星では、日々エネルギー生産(核融合)が行われている



皆既日食軌跡：2017.8.21, USA

皆既日食

2019年7月2日(火) at La Serena, Chile





皆既日食

2019年7月2日(火) at La Serena, Chile



ラセレナ

チリ・エルモジェ

第1接触	15時23分00秒
第2接触	16時38分23秒
食の最大	16時39分34秒
第3接触	16時40分44秒

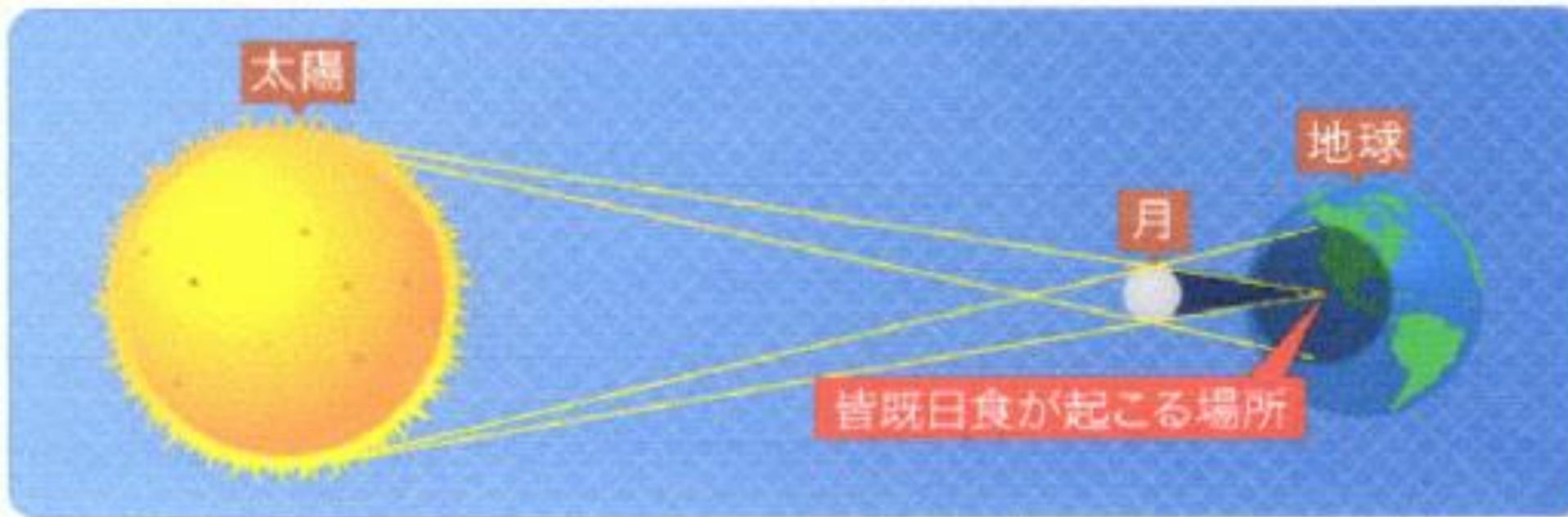
部分食終わり



金環日食と皆既日食

☀ 皆既日食とは？

太陽・月・地球が一直線に並び、月の影が地球を覆う時に起こる現象。空が夜のように暗くなり、太陽の外気層「コロナ」が影の外側に輝いてみえます。



数学月間 第9回 企画講演会
令和3年12月11日(土)15:30~17:00
オンライン講演(ZOOM)

プラズマの定義と神秘さ・面白さ

— 多様な集団的性質・応用 そして科学技術の将来 —



九州大学 名誉教授
核融合科学研究所 名誉教授
佐藤 浩之助

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

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

いろいろなプラズマ ----- “プラズマ Map”

文部科学省主管・関連学会協力協賛

なぜ宇宙(太陽系)はほとんどプラズマなのか?

プラズマとは何か?

オーロラもプラズマ!

雷もプラズマ!

いちばん身近なプラズマ

エコロジーと健康

人工太陽

水・空気の浄化

日本の主な対台工ネルギー実験装置のプラズマ

ナノテクノロジー

ヒトは太古よりプラズマを使用!

5000度!?

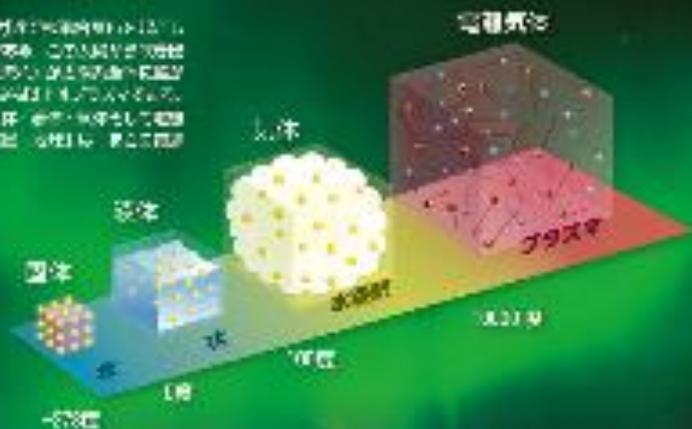
現代の安全術!

なぜプラズマは未来を創るのか?

文部科学省が音頭 多くの学会が協力して作成 私も以来を受け日食を

なぜ宇宙(太陽系)は ほとんどプラズマなのか?

プラズマは、地球上でも宇宙でも最も一般的な物質の状態です。通常の物質は固体、液体、気体、そしてプラズマの4つの状態があります。プラズマは、高温で原子や分子が電離して、自由電子と陽子・陰イオンから構成されています。宇宙空間はほとんどプラズマで満たされています。太陽系もほとんどプラズマで構成されています。太陽は巨大なプラズマ球です。地球の周囲にはプラズマのオーロラや磁気圏があります。プラズマは、宇宙のほとんどを占めています。



オーロラもプラズマ!

オーロラは、太陽からのプラズマが地球の磁気圏と相互作用して発生する現象です。プラズマの粒子が地球の大気と衝突して発光します。

雷もプラズマ!

雷は、雲の中の氷や水滴が衝突して電荷が蓄積され、放電することで発生する現象です。雷の放電はプラズマ状態になります。

プラズマテレビ



蛍光灯

PL 未来をつくる プラス

のぞいてみよう! プラズマ!

プラズマとは何か?

プラズマは物質の4つの状態の一つで、高温で原子や分子が電離して、自由電子と陽子・陰イオンから構成されています。プラズマは、宇宙のほとんどを占めています。太陽系もほとんどプラズマで構成されています。太陽は巨大なプラズマ球です。地球の周囲にはプラズマのオーロラや磁気圏があります。プラズマは、宇宙のほとんどを占めています。



いちばん身近な
プラズマ

エコロジーと健康

のぞいてみよう! プラズマワールド!

プラズマによる核融合



エコロジーと健康



ITER計画・幅広いアプローチ



日本の主要核融合エネルギー



プラズマの数密度 n [個/cm³]



プラズマの温度 T [K]

固体プラズマ

$kT = E_F$ (これより左上: 縮退したプラズマ)

衝突衝撃波
プラズマ

高気圧アーク・雷

$n\lambda_D = 1$
(これより右下: 理想プラズマに近くなる)

太陽中心

レーザープラズマ

核融合炉

D-D

D-D

トカマク型
ミラー型などの
プラズマ

太陽表面
発光灯

電離層
E層 F層
(オーロラ)

太陽コロナ

$\lambda_D = 10\text{cm}$ [これより上: 実験室ではプラズマらしい性質を示す]
[これより下: 実験室では荷電粒子だけの性質を示す]

磁気圏 (低温)

太陽風
地球近傍

磁気圏 (高温)

$kT = mc^2$ (これより右: 相対論的なプラズマ)

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

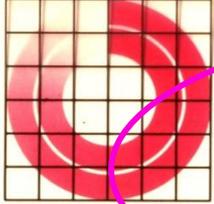
- ・ 多粒子による遮蔽効果(デバイ遮蔽) ―― デバイ長

(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



物質の第4の状態——“プラズマ”

固体、液体、気体……そしてプラズマ

ほとんどの物質は温度が高くなるにしたがって、固体から液体、そして気体とかわっていきます。

水を例にとれば氷→水→蒸気といった順です。気体をさらに高温にしていきますと、プラスの電気をもつイオン（原子核）とマイナスの電気をもつ電子とに分離した状態になります。

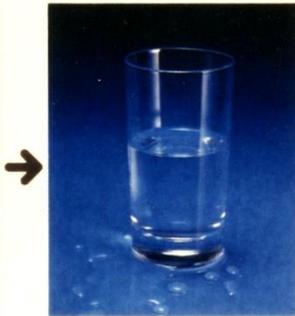
このように、イオンと電子がほぼ等

しい電荷をもってガス状に集まっている物質の状態がプラズマと呼ばれるものです。

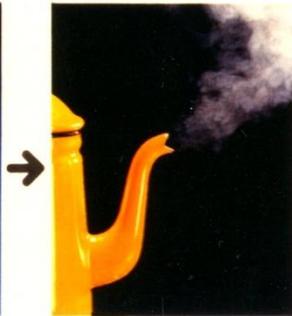
プラズマは固体、液体、気体のいずれでもないので物質の第4状態といわれています。すべての物質は高温になると必ずプラズマになります。たとえば、実験室では水素ガスは数万度以上でプラズマになります。



固体



液体



気体

プラズマ



●直流放電で作られたプラズマ(名大プラズマ研)

さて、プラズマは普通の気体とは著しく異なった性質をもっています。容易に帯電したり、電気を通したりする一方、電磁波を吸収、放射し、磁場の作用も強く受けます。

プラズマの興味深い振舞いはこうした性質から起こってくるわけです。

ところで、こうしたプラズマはわたしたちの身近にも数多く見かけられ、街路灯の水銀灯、ネオンサイン、電気溶接のアークなどがその代表的なものです。自然界でもオーロラ、太陽のコロナ、星などにプラズマが見られます。

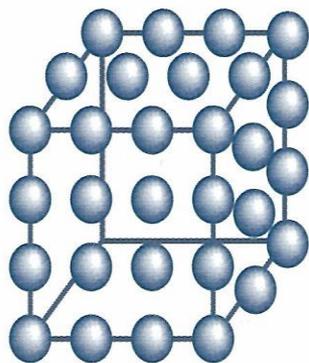
プラズマ———物質の状態

●プラズマ———物質の第4の状態

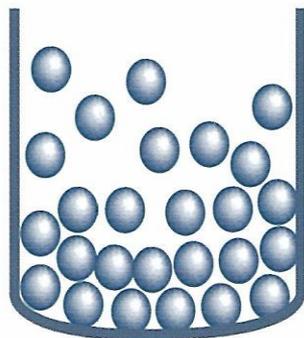


物質の4状

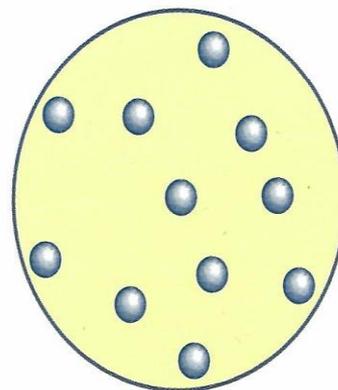
上に述べたような高温状態では、物質はそれを構成する個々の原子に分解して気体となり、さらにその原子をつくる電子とイオンも互いの電氣的引力に打ち勝ってバラバラになります。こうして現れる電気を帯びた粒子でつくられる高温気体を「プラズマ」と呼びます。「プラズマ」は、私たちの身近にある炎、ネオン管をはじめ、宇宙空間などに存在し、固体・液体・気体に次ぐいわば第4の物質状態です。今後の核融合プラズマ性能のより一層の向上のためにも、複雑で多様性をもつプラズマの振る舞いを解明することが必要です。



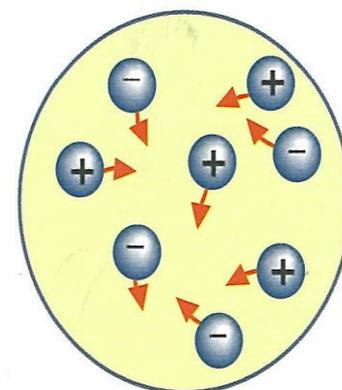
固 体



液 体



気 体



プラズマ

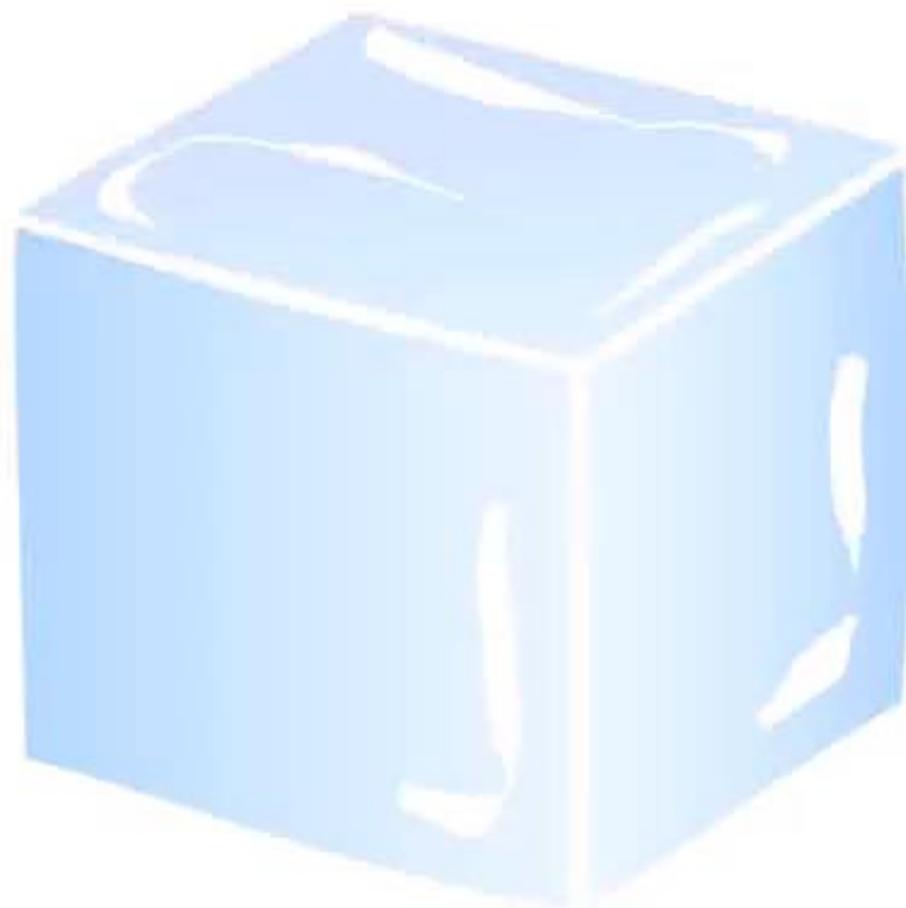
温度の上昇 / エネルギーの注入

第4の状態

高温



低温



プラズマの定義——4条件

“プラズマ”という言葉は、いつごろから使われるようになったのであろうか。それを、放電現象と関連して、現在とほぼ同様の意味で最初に用いたのは Langmuir と Tonks である。彼らは 1920 年代*1) に、アーク放電中の正電荷と負電荷とが数のうえでほぼバランスがとれている“電気的中性”の部分に荷電粒子の振動現象が存在するのを発見し、これに“プラズマ振動”と名付けた。

プラズマは、広い意味では“電離気体”（正負の荷電粒子を含み、全体として電気的にはほぼ中性を保つ粒子の集団）と同一と考えてもよいが、もう少し厳密には、次の諸条件を満たすような粒子の集合体を指す。すなわち

- ① プラス（正）とマイナス（負）の荷電粒子群を含んでいること。
- ② 全体として、ほぼ電気的中性が保たれていること。
- ③ この中の少なくとも 1 種の荷電粒子群が不規則な運動を行っていること。
- ④ 二つの荷電粒子が力を及ぼし合う平均距離（デバイ距離—— $1.4 [1]$ ）より大きな寸法を有すること。

プラズマと通常の気体とを比べたとき、はっきり異なる点は電磁界に対する振舞いである。気体は普通電気的な絶縁物であるのに対し、導電性を有するプラズマは電磁界と相互作用

プラズマの定義——4条件

すような粒子の集合体を指す。すなわち

- ① プラス（正）とマイナス（負）の荷電粒子群を含んでいること。
- ② 全体として、ほぼ電気的中性が保たれていること。
- ③ この中の少なくとも1種の荷電粒子群が不規則な運動を行っていること。
- ④ 二つの荷電粒子が力を及ぼし合う平均距離（デバイ距離—— $1.4 [1]$ ）より大きな寸法を有すること。

プラズマと通常の気体とを比べたとき、はっきり異なる点は電磁界に対する振舞いであろう。気体は普通電気的な絶縁物であるのに対し、導電性を有するプラズマは電磁界と相互作用

プラズマ定義の主なポイント

- (1) 荷電粒子の集合体 [プラスとマイナス電荷を含む]、熱的運動をしていること、および全体で中性
- (2) 集団的性質（デバイ遮蔽、プラズマ振動と電磁波に対する分散性、——磁界・外力下での集団効果 [誘起電場など]

1.4 集団としての性質

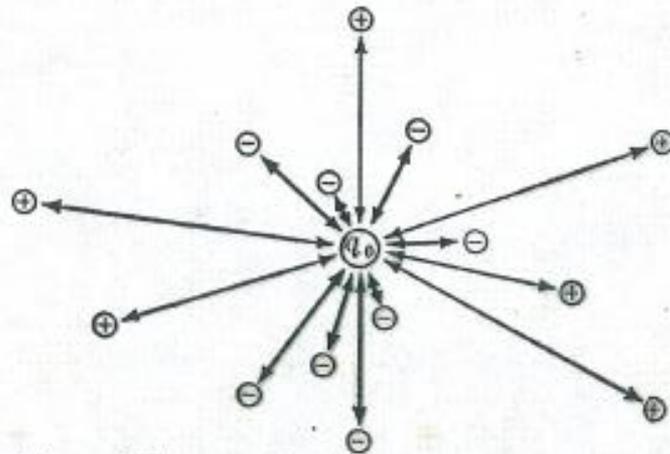
プラズマの振舞いを特徴づけるものとして、二つの集団的性質（非常に多くの粒子の集合体であることから現われる性質）がある。一つは、プラズマが準静的な平衡状態にあるときに、荷電粒子相互間で及ぼし合う静電遮へい効果（デバイ遮へい効果）であり、もう一つは、空間的な平衡状態からの過渡的なずれに起因する振動・波動現象である。この遮へい効果の特性的な距離であるデバイ距離と、プラズマ中の波動の重要な現象である“プラズマ振動”につき、以下に概説する。

[1] デバイ距離

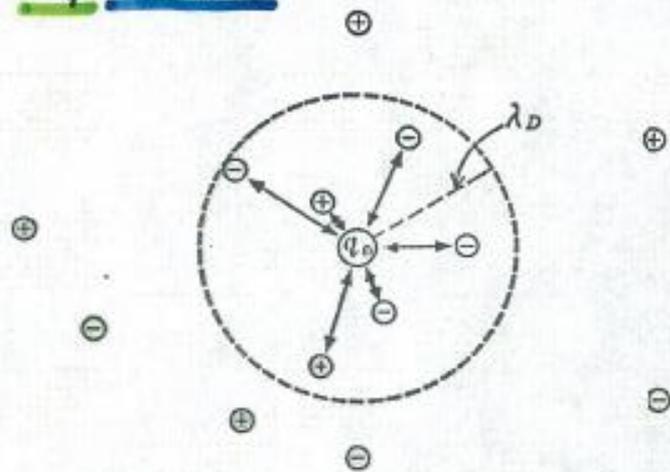
電荷 q_0 の粒子がそこから距離 r の地点につくり出す電位分布 $\varphi_0(r)$ は、真空中では、よく知られているように

$$\varphi_0(r) = q_0 / 4\pi\epsilon_0 r \quad (1.44)$$

である (ϵ_0 : 真空の誘電率)。しかし、プラズマ中ではこの電位分布とは異なり、距離 r とともに r^{-1} よりははるかに急激に減衰する。 $q_0 > 0$ であれば、主として多くの電子が少しずつ引き寄せられ、 $q_0 < 0$ では少しずつ遠のくことにより、 $-q_0$ の電荷が q_0 を中心にしてその周りを雲状に取り囲み、その結果、ある距離より遠いところへは q_0 の作用が及ばない（静



(a) 遮へい効果がない場合のクーロン・ポテンシャル
 $(\propto \frac{1}{r})$ が及ぶ領域



(b) プラズマ中で「遮へいされた」ポテンシャル
 $(\propto \frac{1}{r} e^{-r/\lambda_D})$ が及ぶ領域

1・4 集団としての性質

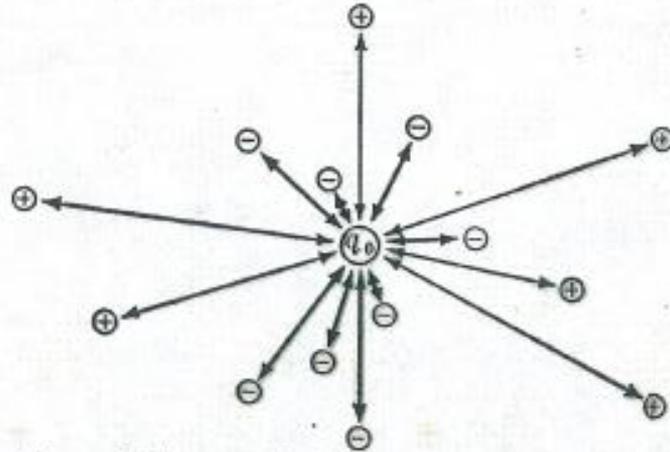
プラズマの振舞いを特徴づけるものとして、二つの集団的性質（非常に多くの粒子の集合体であることから現われる性質）がある。一つは、プラズマが準静的な平衡状態にあるときに、荷電粒子相互間で及ぼし合う静電遮へい効果（デバイ遮へい効果）であり、もう一つは、空間的な平衡状態からの過渡的なずれに起因する振動・波動現象である。この遮へい効果の特性的な距離であるデバイ距離と、プラズマ中の波動の重要な現象である“プラズマ振動”につき、以下に概説する。

[1] デバイ距離

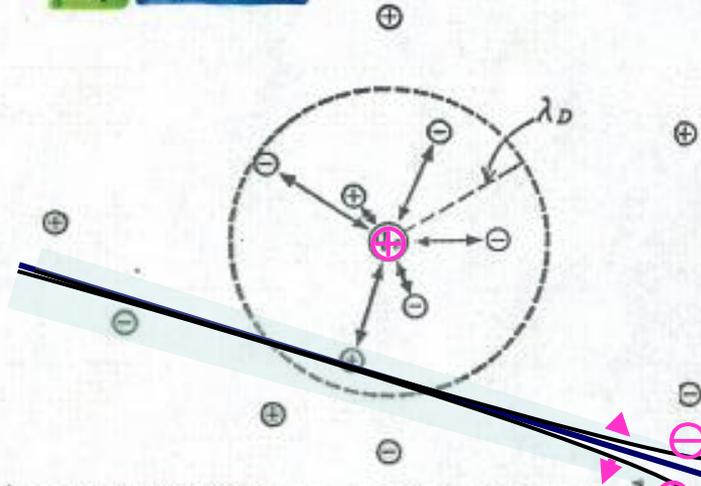
電荷 q_0 の粒子がそこから距離 r の地点につくり出す電位分布 $\varphi_0(r)$ は、真空中では、よく知られているように

$$\varphi_0(r) = q_0 / 4\pi\epsilon_0 r \quad (1 \cdot 44)$$

である (ϵ_0 : 真空の誘電率)。しかし、プラズマ中ではこの電位分布とは異なり、距離 r とともに r^{-1} よりははるかに急激に減衰する。 $q_0 > 0$ であれば、主として多くの電子が少しずつ引き寄せられ、 $q_0 < 0$ では少しずつ遠のくことにより、 $-q_0$ の電荷が q_0 を中心にしてその周りを雲状に取り囲み、その結果、ある距離より遠いところへは q_0 の作用が及ばない（静



(a) 遮へい効果がない場合のクーロン・ポテンシャル
 $(\propto \frac{1}{r})$ が及ぶ領域



(b) プラズマ中で「遮へいされた」ポテンシャル
 $(\propto \frac{1}{r} e^{-r/\lambda_D})$ が及ぶ領域

λ_D : 定性的考察

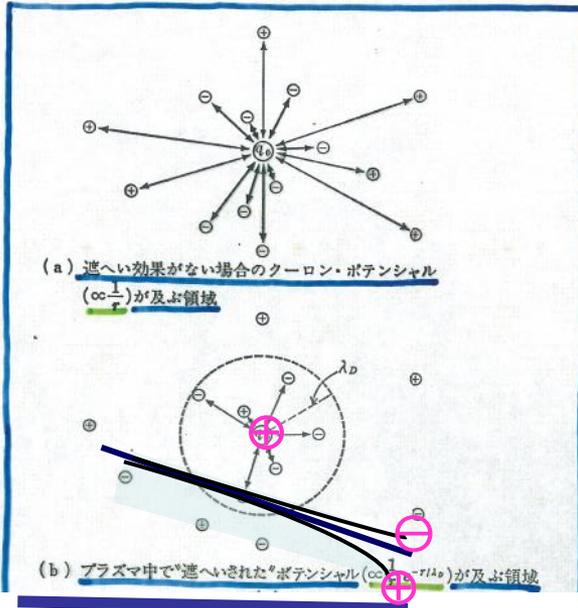
る) ことになる。これが“**デバイ遮へい効果**”であり、作用の及ばなくなる特性的な距離を“**デバイ距離**” (λ_D) と呼ぶ。 $q_0 > 0$ の場合、実際には周りに集まる電子は静止しているのではなく、温度 T_e に対応した平均速度 \bar{v}_e で飛び交っている。その軌道がクーロン力によって少しずつ曲げられることになるが、巨視的にみれば、結果としては同じである。この距離 λ_D がどの程度のものか、まずおおまかに考えてみよう。原点に電荷 q_0 があったとして、 $r = \lambda_D$ 近傍を通過する各電子が平均的に \bar{x} ずつ軌道が曲げられるとすると、それによる分極の大きさは $en_e\bar{x}$ であり、全体として $-4\pi\lambda_D^2 en_e\bar{x}$ の電荷が q_0 を中心に半径 λ_D の球面上に誘起されたものと等価になる。デバイ遮へいのためには、この全電荷量が $-q_0$ と等しくなることが必要である。おのこの電子は、走行中

$4\pi\epsilon_0\lambda_D^2$ を受けるが、作用の及ぶ時間 τ はほぼ $\tau \sim \lambda_D/\bar{v}_e \sim \lambda_D/v_e$ 均変位 \bar{x} は $\bar{x} \sim F \cdot \tau^2/m \sim -eq_0/4\pi\epsilon_0\kappa T_e$ となり、これを $-q_0$ と

$$(1.45)$$

り荒っぽい見積りであるが、結果的には、以下に示す正しい結果、 T_e を [電子ボルト-eV]、 n_e を [cm^{-3}] で表すと

$$\frac{T_e}{n_e} \quad [\text{cm}] \quad (1.46)$$

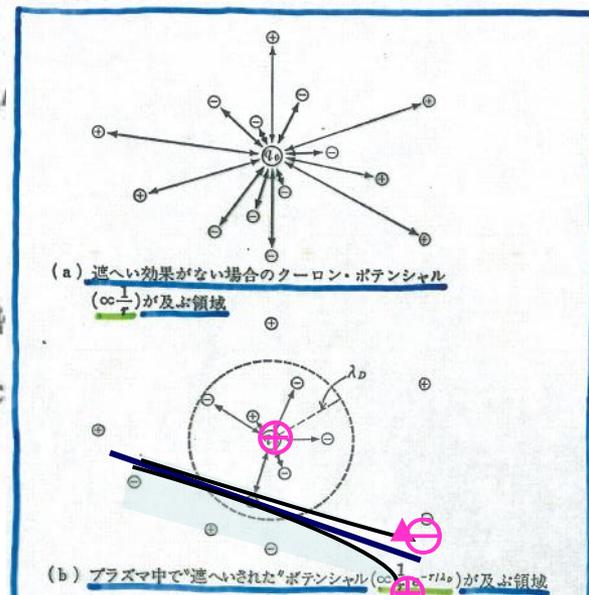


電的に遮へい——シールド——される) ことになる。これが“**デバイ遮へい効果**”であり、作用の及ばなくなる特性的な距離を“デバイ距離”(λ_D)と呼ぶ。 $q_0 > 0$ の場合、実際には周りに集まる電子は静止しているのではなく、温度 T_e に対応した平均速度 v_e で飛び交っている。その軌道がクーロン力によって少しずつ曲げられることになるが、巨視的にみれば、結果としては同じである。この距離 λ_D がどの程度のものか、まずおおまかに考えてみよう。原点に電荷 q_0 があったとして、 $r = \lambda_D$ 近傍を通過する各電子が平均的に \bar{x} ずつ軌道が曲げられるとすると、それによる分極の大きさは $en_e \bar{x}$ であり、全体として $-4\pi\lambda_D^2 en_e \bar{x}$ の電荷が q_0 を中心に半径 λ_D の球面上に誘起されたものと等価になる。デバイ遮へいのためには、この全電荷量が $-q_0$ と等しくなることが必要である。おのおのの電子は、走行中に q_0 による力 $F = -eq_0/4\pi\epsilon_0\lambda_D^2$ を受けるが、作用の及ぶ時間 $\sqrt{\kappa T_e/m}$ であるから、平均変位 \bar{x} は $\bar{x} \sim F \cdot \tau^2/m \sim -eq_0/4\pi\epsilon_0$ $= -4\pi\lambda_D^2 en_e \bar{x}$ に代入すれば

$$\lambda_D^2 = \epsilon_0 \kappa T_e / e^2 n_e$$

が得られる。以上は、かなり荒っぽい見積りであるが、結果的にと一致する。なお、単位を、 T_e を [電子ボルト-eV]、 n_e を [c

$$\lambda_D = 7.4 \times 10^2 \sqrt{T_e/n_e} \quad [\text{cm}]$$



λ_D : 定量的考察

である。次に同じ問題をもう少し正確に扱ってみよう。

電氣的にほぼ中性な媒質中の原点に電荷 q_0 を置いたときの電位 $\varphi(r)$ に関するポアソンの方程式は

$$\nabla^2 \varphi(r) = \frac{e}{\epsilon_0} \Delta n_e(r) - \frac{q_0}{\epsilon_0} \delta(r) \quad (1 \cdot 47)$$

である。ただし、 $\Delta n_e(r)$ は電子密度の静的平均値 n_{e0} からのずれ $[=n_e(r) - n_{e0}]$ を表し、 $\delta(r)$ は $r=0$ で 1, $r>0$ で 0 である。ところで、電子群はボルツマン分布をしていると仮定すれば、 $n_e(r) = n_{e0} \exp[e\varphi(r)/\kappa T_e]$ と書けるので

$$\Delta n_e(r) = n_{e0} \{ \exp[e\varphi(r)/\kappa T_e] - 1 \} \quad (1 \cdot 48)$$

であり、もし粒子の運動エネルギーに対して静電的なポテンシャルエネルギーが無視できれば (すなわち、 $e\varphi \ll \kappa T_e$ であれば)、(1.48) 式は展開でき、したがって (1.47) 式は

$$\nabla^2 \varphi(r) - \frac{e^2 n_{e0}}{\epsilon_0 \kappa T_e} \varphi(r) = -\frac{q_0}{\epsilon_0} \delta(r) \quad (1 \cdot 49)$$

となる。この解のうち、境界条件として $r \rightarrow \infty$ で $\varphi \rightarrow 0$ を満たすものが真の解であり

$$\varphi(r) \approx \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right) \quad (1 \cdot 50)$$

が得られる。ここで λ_D は (1.45) 式に示したものと一致する。このように、プラズマ中の

である。次に同じ問題をもう少し正確に扱ってみよう。

電氣的にほぼ中性な媒質中の原点に電荷 q_0 を置いたときの電位 $\varphi(r)$ に関するポアソンの方程式は

$$\nabla^2 \varphi(r) = \frac{e}{\epsilon_0} \Delta n_e(r) - \frac{q_0}{\epsilon_0} \delta(r) \quad (1 \cdot 47)$$

である。ただし、 $\Delta n_e(r)$ は電子密度の静的平均値 n_{e0} からのずれ $[=n_e(r) - n_{e0}]$ を表し、 $\delta(r)$ は $r=0$ で 1, $r>0$ で 0 である。ところで、電子群はボルツマン分布をしていると仮定すれば、 $n_e(r) = n_{e0} \exp[e\varphi(r)/\kappa T_e]$ と書けるので

$$\Delta n_e(r) = n_{e0} \{ \exp[e\varphi(r)/\kappa T_e] - 1 \} \quad (1 \cdot 48)$$

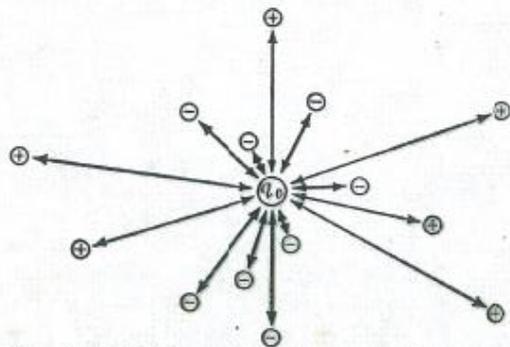
であり、もし粒子の運動エネルギーに対して静電的なポテンシャルエネルギーが無視できれば (すなわち、 $e\varphi \ll \kappa T_e$ であれば)、(1.48) 式は展開でき、したがって (1.47) 式は

$$\nabla^2 \varphi(r) - \frac{e^2 n_{e0}}{\epsilon_0 \kappa T_e} \varphi(r) = -\frac{q_0}{\epsilon_0} \delta(r) \quad (1 \cdot 49)$$

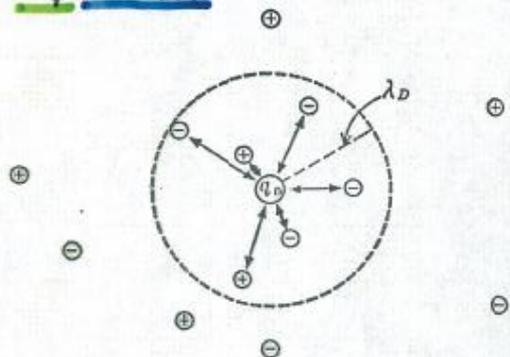
となる。この解のうち、境界条件として $r \rightarrow \infty$ で $\varphi \rightarrow 0$ を満たすものが真の解であり

$$\varphi(r) \approx \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right) \quad (1 \cdot 50)$$

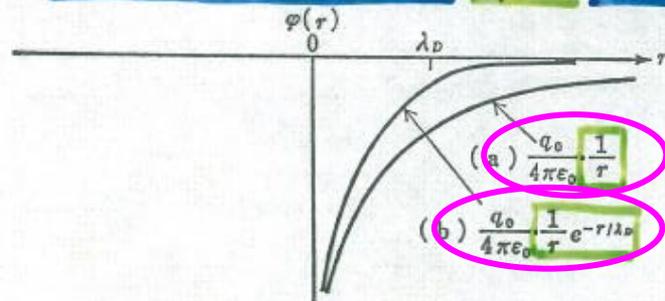
が得られる。ここで λ_D は (1.45) 式に示したものと一致する。このように、プラズマ中の



(a) 遮へい効果がない場合のクーロン・ポテンシャル
 $(\propto \frac{1}{r})$ が及ぶ領域



(b) プラズマ中で「遮へいされた」ポテンシャル
 $(\propto \frac{1}{r} e^{-r/\lambda_D})$ が及ぶ領域



(c) 上記の各場合に対するポテンシャル分布

図 1・11 デバイ遮へい効果

λ_D : プラズマの定義との関係

一つの電荷の近傍の電位分布は、普通のクーロン電位 ($q_0/4\pi\epsilon_0 r$) に比べて $\exp(-r/\lambda_D)$ だけ小さくなっており、この因子が遮へい効果を端的に表している。すなわち、 $1/r$ という荷電粒子間（クーロン相互作用）の長距離力が、ほぼ距離 λ_D 程度のところで断ち切られたようになり、それ以上の遠方には作用が及ばないことになる（図 1・11）。

プラズマ中に導体をそう入し、（絶縁破壊が起こらない程度の）適当な電圧 V をかけると、 $V > 0$ であれば周りに電子が、 $V < 0$ であればイオンが多く集まってきて過剰になる〔12・1 節〔1〕“静電プローブ”の項参照〕。この電子またはイオンが過剰となって中和条件が破れているような領域をシース (sheath; さや) と呼ぶ。また、両者を区別する場合、電子シースまたはイオンシースという。おのこのシースの厚さは、通常デバイ距離程度であり、この場合も、過剰に集まってきた荷電粒子の遮へい効果のために、電界はシースの外までしみ出していかない（図 1・12）。

ところで、デバイ距離は、プラズマの定義にかかわる大切な量である。すなわち、1・1 節に述べたように、プラズマの寸法を R とすると、そもそもプラズマとして扱いうるためには

$$R \gg \lambda_D$$

(1・51)

なる条件が必要である。もし $R < \lambda_D$ であれば、おのこの荷電粒子がすべての他の荷電粒子に対してほぼクーロン相互作用と同じ作用を及ぼし合うことによって、たんなる荷電粒子

$\lambda_D : n \cdot \lambda_D^3$ の意味

の集合体となってしまい、プラズマとしての集団的振舞いはみられなくなるからである。しかし、実際問題として、デバイ距離は、 n_e が極めて小さい宇宙空間プラズマのような特殊な場合を除けば、非常に小さく、問題となることは少ない(例えば、 $T_e = 10 \text{ keV}$, $n_e = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ とすると $\lambda_D \cong 7 \times 10^{-3} \text{ cm}$ 程度である)

最後に、遮へいされた電位分布を導いた際の条件について付言しておこう。デバイ距離を導いた考え方の過程で、平均粒子間距離はデバイ距離よりはるかに短いという前提を暗に用いた。すなわち、もし λ_D を半径とする球の中にプラズマ荷電粒子がほんのわずか(例えば 2~3

個)しか存在しないという状況がもしあるとすれば、前述した分極というような考え方は持ち込めないし、電位分布 $\phi(r)$ もなだらかな分布にはなりえない。平均的粒子間距離は $\sim n_{e0}^{-1/3}$ であるから、この条件は

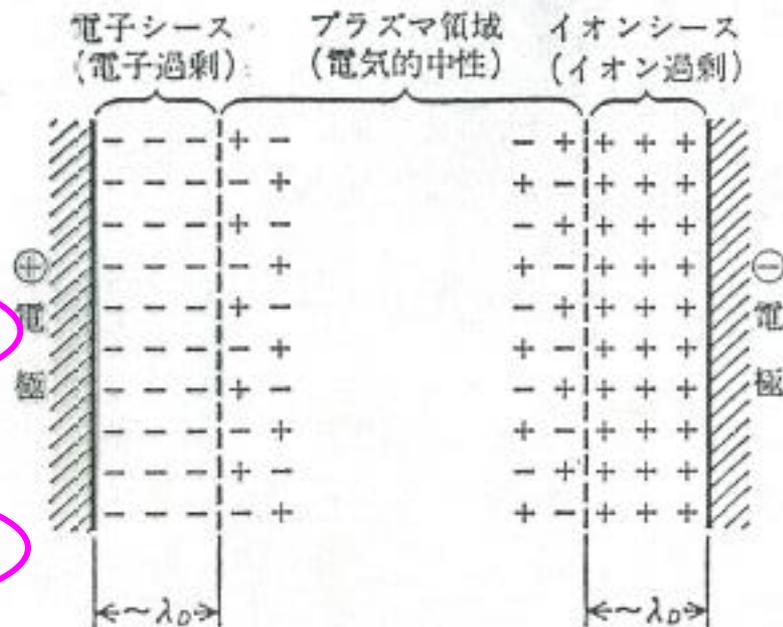


図 1・12 電子およびイオン・シースの概略図

$$\lambda_D \gg n_{e0}^{-1/3} \quad \text{または} \quad n_{e0} \lambda_D^3 \gg 1 \quad (1.52)$$

と表され、デバイ距離（遮蔽効果）そのものを定義できるかどうかの限界を意味する。上式を変形すると

$$\kappa T_e \gg (e^2/\epsilon_0) n_{e0}^{1/3} \cong e\varphi \quad (1.53)$$

となり、隣接した荷電粒子間の静電ポテンシャル $e\varphi \cong (e^2/\epsilon_0) n_{e0}^{1/3}$ に比べて熱エネルギーが非常に大きいことを意味する。これは、プラズマを理想気体と近似的に考えてよい根拠を与える。また、この条件は(1.49), (1.50)式を導出した際の仮定ともなっている。なお、(1.53)式を満たすプラズマを総称して、希薄な高温プラズマと呼ぶこともある。これに対して $n_e \lambda_D^3 \leq 1$ の状況は、比較的低温・高密度の熱電離プラズマ(7章)や固体中のプラズマなどに起こることがある。

《 プラズマパラメータ g と平均運動・静電エネルギーの
関係について 》

$$g = \frac{1}{n \lambda_D^3}$$

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k T}{e^2 n_e} \right)^{1/2}$$

$$= \frac{1}{n \left(\frac{\epsilon_0 k T}{e^2 n_e} \right)^{3/2}}$$

$$= \frac{e^3}{(\epsilon_0 k T)^{3/2}} \cdot n_e^{1/2}$$

$$= \frac{1}{(k T)^{3/2}} \cdot \left(\frac{e^2 n_e^{1/2}}{\epsilon_0} \right)^{3/2}$$

$$= \frac{1}{(k T)^{3/2}} \cdot \left\{ \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 r_{AV}} \cdot (4\pi) \cdot \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{1/3} \right\}^{3/2}$$

$$\therefore e^2 \frac{4}{3} \pi r_{AV}^2 = \frac{1}{n_e}$$

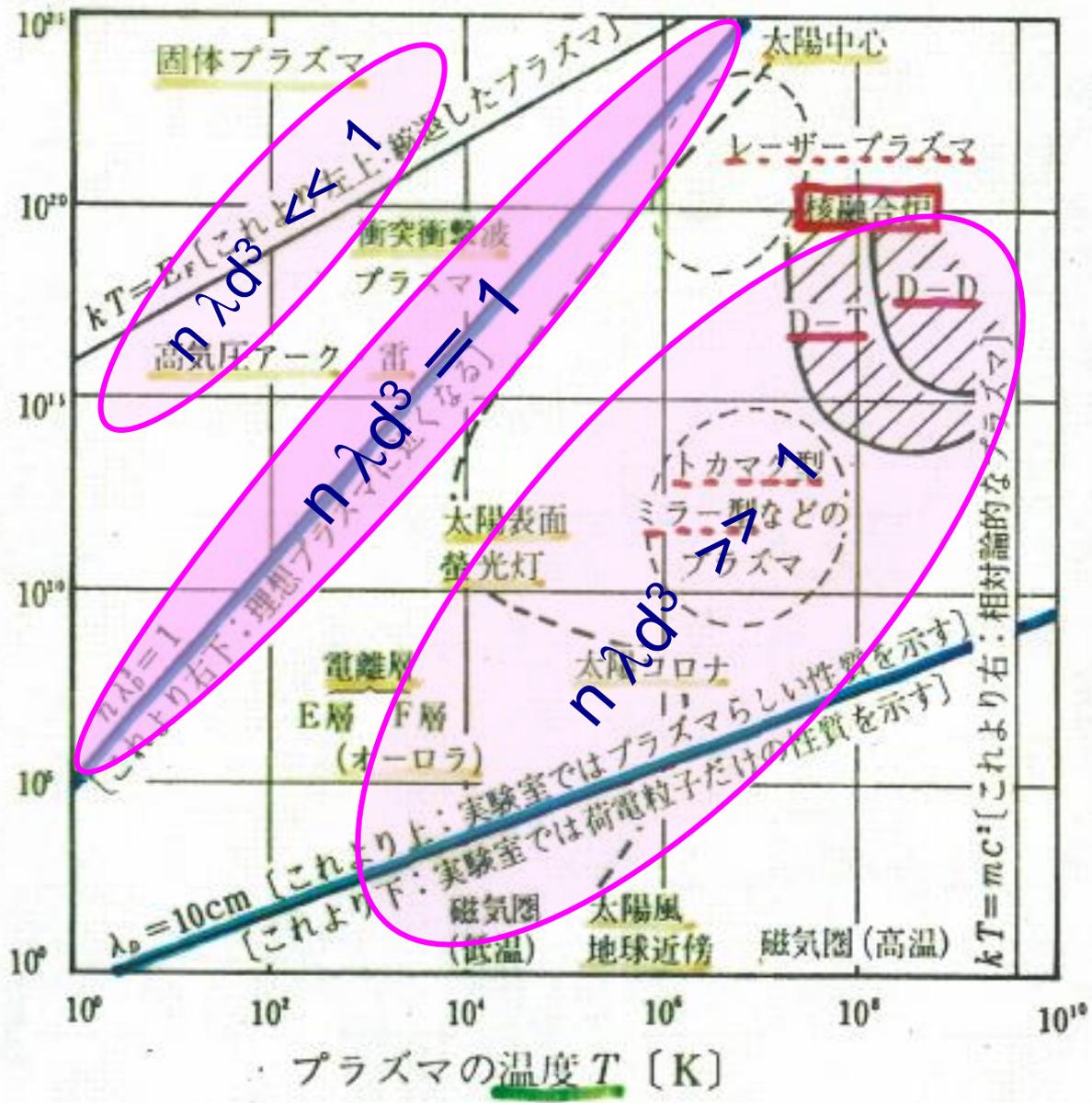
静電ポテンシャル (平均)

$$e \phi_{AV} = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 r_{AV}}$$

$$= \left(\frac{e \phi_{AV}}{k T} \right)^{3/2} \cdot (4\pi)^{3/2} \cdot \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{3/2}$$

$$= 4\pi \cdot 3^{1/2} \left(\frac{e \phi_{AV}}{k T} \right)^{3/2}$$

プラズマの数密度 n [個/cm³]



固体プラズマ

太陽中心

レーザープラズマ

核融合炉

D-D

D-T

トカマク型
ミラー型などの
プラズマ

太陽表面
蛍光灯

電離層
E層 F層
(オーロラ)

太陽コロナ

磁気圏
(低温)

太陽風
地球近傍

磁気圏 (高温)

プラズマの温度 T [K]

$\lambda_D = 10\text{cm}$ [これより上: 実験室ではプラズマらしい性質を示す]
[これより下: 実験室では荷電粒子だけの性質を示す]

$kT = mc^2$ [これより右: 相対論的なプラズマ]

$n\lambda_D^3 \ll 1$

$n\lambda_D^3 = 1$

$n\lambda_D^3 \gg 1$

$kT = E_F$ (これより左上: 縮退したプラズマ)