



---

# Apresentando o Plasma Clássico

Jefferson Stafusa Elias Portela

(stafusa@if.usp.br)

*Instituto de Física da Universidade de São Paulo*

# Livro

---

Esta apresentação é a primeira de uma série do Grupo de Estudos Plasmáticos.

Ela é essencialmente baseada no capítulo 1 do livro:

INTRODUCTION TO  
PLASMA PHYSICS AND  
CONTROLLED FUSION

Vol. 1: Plasmas Physics

2<sup>a</sup> edição (1984), de Francis F. Chen



# Resumo da Apresentação

---

- O Nome
- Definição Intuitiva
- Ocorrência de Plasmas na Natureza
- Blindagem de Debye
- Definição de Plasma
- Aplicações

# O Nome

O primeiro a utilizá-lo foi o americano Irving Langmuir, no artigo “Oscillations in Ionized Gases” nos *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.* em 1928.

Trata-se de uma referência ao plasma sanguíneo.

Mas há ao menos duas versões para a razão desta conexão:

- o significado, *moldar*, da origem grega do termo - devido à maneira como as descargas brilhantes no plasma se amoldam ao seu recipiente;
- o modo como ambos os plasmas carregam partículas.

fonte: <http://www.plasmacoalition.org/what.htm>



# Definição Intuitiva

---

**Plasmas** são gases em que a presença de *partículas carregadas* é suficiente para que seu movimento seja essencialmente controlado por forças eletromagnéticas (de longo alcance), apresentando comportamento coletivo e não sendo totalmente descrito pela hidrodinâmica de gases usual.



# Definição Intuitiva

**Plasmas** são gases em que a presença de *partículas carregadas* é suficiente para que seu movimento seja essencialmente controlado por forças eletromagnéticas (de longo alcance), apresentando comportamento coletivo e não sendo totalmente descrito pela hidrodinâmica de gases usual.

*Comportamento coletivo* denota comportamentos que não dependem apenas de condições locais (como em um gás comum), mas também de condições em regiões mais distantes do plasma.

# Definição Intuitiva

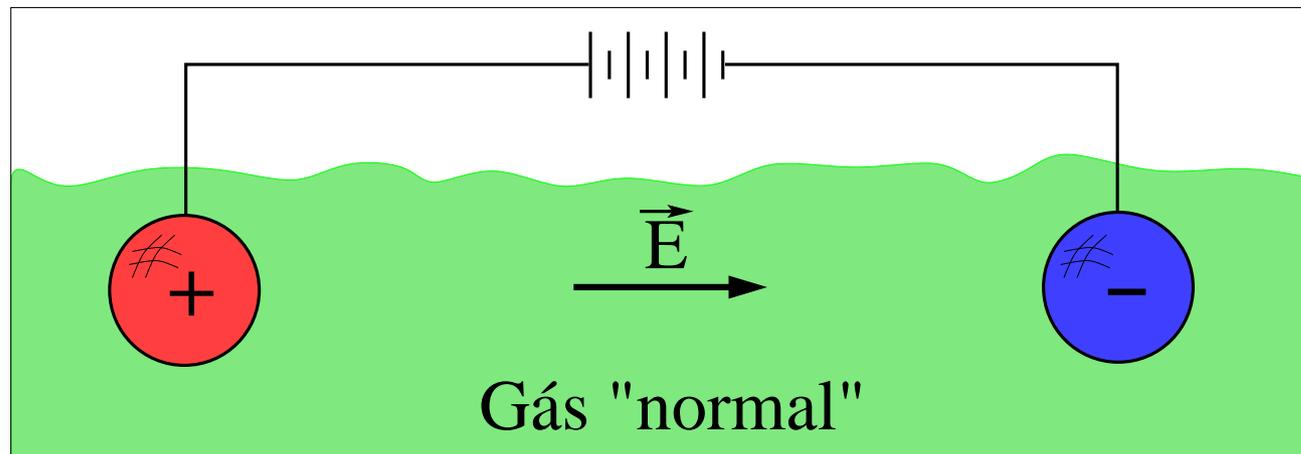
**Plasmas** são gases em que a presença de *partículas carregadas* é suficiente para que seu movimento seja essencialmente controlado por forças eletromagnéticas (de longo alcance), apresentando comportamento coletivo e não sendo totalmente descrito pela hidrodinâmica de gases usual.

- Plasmas também devem apresentar a *Blindagem de Debye*, i.e., devem ser capazes de “blindar” campos elétricos aplicados sobre eles.

# Definição Intuitiva

**Plasmas** são gases em que a presença de *partículas carregadas* é suficiente para que seu movimento seja essencialmente controlado por forças eletromagnéticas (de longo alcance), apresentando comportamento coletivo e não sendo totalmente descrito pela hidrodinâmica de gases usual.

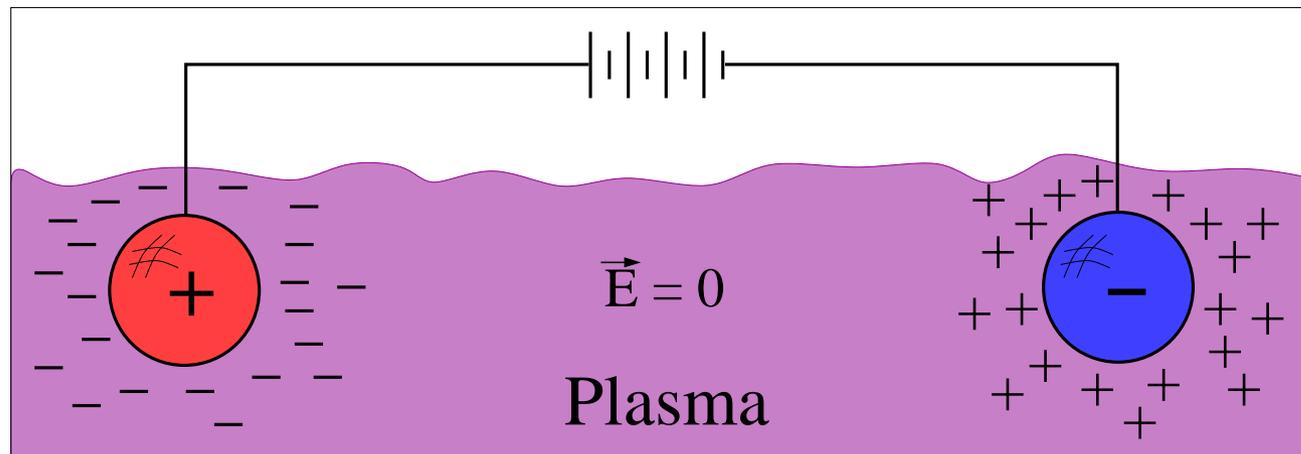
- Plasmas também devem apresentar a *Blindagem de Debye*, i.e., devem ser capazes de “blindar” campos elétricos aplicados sobre eles.



# Definição Intuitiva

**Plasmas** são gases em que a presença de *partículas carregadas* é suficiente para que seu movimento seja essencialmente controlado por forças eletromagnéticas (de longo alcance), apresentando comportamento coletivo e não sendo totalmente descrito pela hidrodinâmica de gases usual.

- Plasmas também devem apresentar a *Blindagem de Debye*, i.e., devem ser capazes de “blindar” campos elétricos aplicados sobre eles.



# Definição Intuitiva

**Plasmas** são gases em que a presença de *partículas carregadas* é suficiente para que seu movimento seja essencialmente controlado por forças eletromagnéticas (de longo alcance), apresentando comportamento coletivo e não sendo totalmente descrito pela hidrodinâmica de gases usual.

- Plasmas também devem apresentar a *Blindagem de Debye*, i.e., devem ser capazes de “blindar” campos elétricos aplicados sobre eles.

Obs.: a capacidade de apresentar a blindagem de Debye é chamada, nos plasmas usuais (i. e., neutros, como o do esquema anterior), de *quasineutralidade*, devido a haver uma neutralidade líquida acompanhada de possíveis concentrações locais de carga.

Obs.: naturalmente a quantidade de partículas envolvidas na blindagem de Debye deve ser estatisticamente significativa.

# Ocorrência de Plasmas

O grau de ionização de um gás em equilíbrio térmico é dado pela equação de Saha:

$$\frac{n_i}{n_n} = 2,4 \cdot 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{-U_i/KT},$$

em que  $n_i$  e  $n_n$  são as densidades (número por  $m^3$ ) de átomos ionizados e neutros, respectivamente,  $T$  é a temperatura do gás em K,  $K$  é a cte de Boltzmann e  $U_i$  é a energia de ionização do gás.

A equação acima pode ser escrita na forma:

# Ocorrência de Plasmas

O grau de ionização de um gás em equilíbrio térmico é dado pela equação de Saha:

$$\frac{n_i}{n_n} = 4,9 \cdot 10^{10} \frac{T^{\frac{3}{4}}}{n_n^{\frac{1}{2}}} e^{-U_i/2KT}.$$

# Ocorrência de Plasmas

O grau de ionização de um gás em equilíbrio térmico é dado pela equação de Saha:

$$\frac{n_i}{n_n} = 4,9 \cdot 10^{10} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_n^{\frac{1}{2}}} e^{-U_i/2KT}.$$

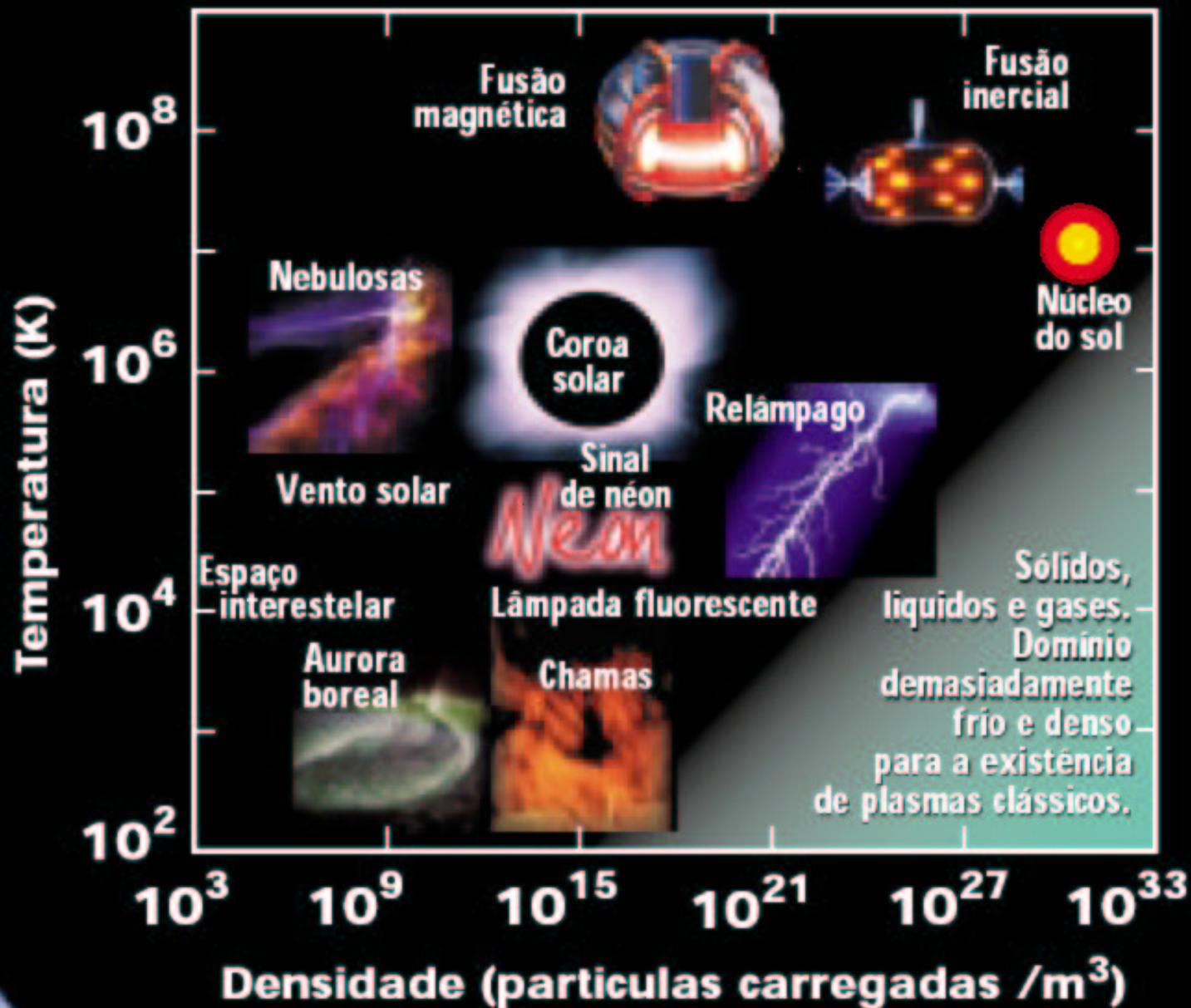
Exemplificando com alguns valores:

material	parâmetros	$\frac{n_i}{n_n}$	ionização, $\frac{n_i}{n_T}$
N, ambiente	$T = 300 \text{ K},$ $U_i = 14,5 \text{ eV},$ $n_n \approx 3 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$	$\sim 10^{-121}$	$\frac{10^{-121}}{1+10^{-121}} \approx 0$
H, TCA-BR	$T = 5 \cdot 10^6 \text{ K},$ $U_i = 13,6 \text{ eV},$ $n_n \approx 6 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$	$\sim 10^{11}$	$\frac{10^{11}}{1+10^{11}} \approx 1$

---

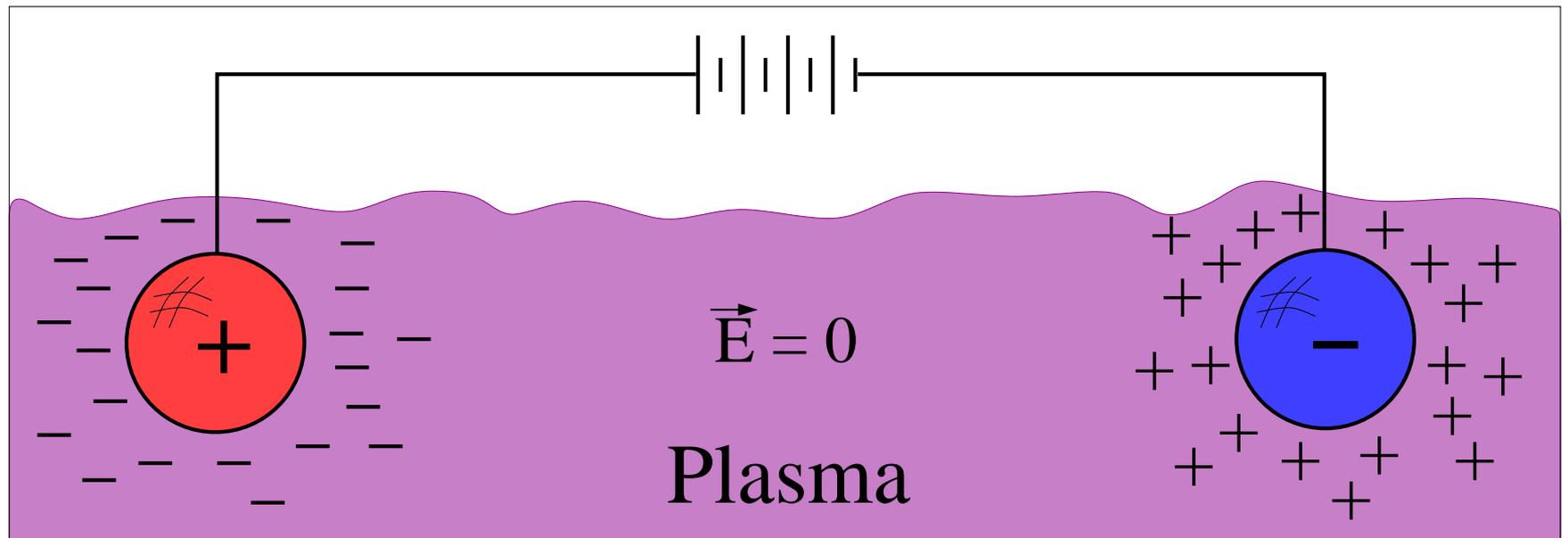
$$\frac{n_i}{n_T} = \frac{n_i}{n_n + n_i} = \frac{n_i/n_n}{1 + n_i/n_n}$$

# Ocorrência de Plasmas - *cont.*



# Blindagem de Debye

Sabemos que plasmas apresentam blindagem de carga:



Convém considerar o fenômeno de modo mais quantitativo.

# Blindagem de Debye

Para facilitar as contas, utilizamos um modelo simplificado:

- Seja uma grade dielétrica plana carregada positivamente, possuindo um potencial  $\phi_0$  em relação ao infinito, imersa num plasma infinito; uma vez que  $m_{\bar{e}}/m_{\text{ion}} \ll 1$ , consideraremos que apenas os elétrons são responsáveis pela blindagem;
- mas, a partir de alguma distância da grade, tem-se  $\phi \lesssim KT/\bar{e}$ , ou seja,  $KT \gtrsim \bar{e}\phi$ , i. e.,  $U_{\text{térmica}} \gtrsim U_{\text{eletrostática}}$ , de modo que os elétrons podem “escapar”, e a blindagem não é perfeita;
- queremos calcular como varia  $\phi$  com a distância  $x$  à grade, para tal usaremos a equação de Poisson:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}, \quad \mathbf{E} = -\nabla\phi \Rightarrow \nabla^2\phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad \Longrightarrow \quad \frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\bar{e}}{\epsilon}(n_i - n_e).$$

---

$\bar{e}$  é a carga do elétron.

# Blindagem de Debye

Para conhecer  $n_e$ , precisaremos da distribuição da densidade de elétrons:

$$f(u) = A \exp \left[ - \left( \frac{1}{2} m u^2 - \bar{e} \phi \right) / (K T_e) \right],$$

em que  $f(u)du$  é o número de elétrons por  $m^3$  com velocidade entre  $u$  e  $u + du$ . Logo

$$\begin{aligned} n_e &= \int_0^{\infty} f(u) du \\ &= A \exp \left( \frac{\bar{e} \phi}{K T_e} \right) \underbrace{\int_0^{\infty} \exp \left( \frac{-m u^2}{2 K T_e} \right) du}_{\text{cte}} \\ &= A' \exp \left( \frac{\bar{e} \phi}{K T_e} \right), \end{aligned}$$

# Blindagem de Debye

temos  $A' = n_e(\phi = 0) = n_e(x \rightarrow \infty)$  e, com  $n_e(x \rightarrow \infty) \equiv n_\infty$ , obtemos

$$n_e = n_\infty \exp\left(\frac{\bar{e}\phi}{KT_e}\right),$$

e como, devido à quase-neutralidade, tem-se  $n_i = n_\infty$ , a equação de Poisson torna-se

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\bar{e}}{\epsilon}(n_i - n_e) = \frac{\bar{e}}{\epsilon}n_\infty \left[ \exp\left(\frac{\bar{e}\phi}{KT_e}\right) - 1 \right]$$

Na região distante da grade, onde  $|\bar{e}\phi/KT_e| \ll 1$ , podemos expandir a exponencial em Taylor (abreviando  $n_\infty$  por  $n$ )

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{\bar{e}}{\epsilon}n \left[ \frac{\bar{e}\phi}{KT_e} + \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{e}\phi}{KT_e}\right)^2 + \dots \right].$$

# Blindagem de Debye

Mantendo apenas o termo linear ficamos com

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{n\bar{e}^2}{\epsilon KT_e}\phi = \frac{1}{\lambda_D^2}\phi,$$

que tem como solução

$$\phi = \phi_0 e^{-x/\lambda_D}$$

sendo

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon KT_e}{n\bar{e}^2} \right)^{1/2},$$

o *comprimento de Debye*, que nos dá uma ordem de grandeza para a espessura da blindagem.

# Definição de Plasma

Condições para que um *gás ionizado* seja um plasma:

- ter seu comportamento dominado por forças eletromagnéticas (de longo alcance) e não hidrodinâmicas (“colisionais”):  $\omega_p > \omega_c$  em que  $\omega_p$  e  $\omega_c$  são as frequências de oscilações típicas de plasma e de colisões, respectivamente;
- ter capacidade de apresentar a blindagem de Debye:  $\lambda_D \ll L$  em que  $L$  é a menor dimensão do sistema (gás).

A blindagem de Debye deve ser estatisticamente significativa, i.e.,

$$N_D \gg 1$$

em que  $N_D$  é o número de partículas responsáveis pela blindagem - partículas dentro de uma “esfera de Debye” de raio  $\lambda_D$ .



# Aplicações

---

Descreveremos brevemente algumas das muitas aplicações dos plasmas e da física de plasmas.

# Aplicações

## Fusão termonuclear controlada

Reações nucleares do tipo  $D + T \rightarrow He^4 + n$  liberam grande quantidade de energia, mas exigem altas temperaturas.

Um caminho promissor para o uso pacífico desta energia são os tokamaks, em que  $D$  e  $T$  são, na forma de plasma, confinados magneticamente.

As pesquisas em tokamaks motivaram e motivam grande parte das pesquisas em plasma.

# Aplicações

## Física “atmosférica”

Diversos fenômenos físicos que ocorrem na ionosfera, no vento solar e na interação entre estes podem ser compreendidos à luz da física de plasmas.

A ionosfera tem relação direta com comunicações, especialmente via rádio, e o vento solar também exerce influência nas comunicações via satélite.

As descargas mais intensas dos relâmpagos se dão através de plasmas criados na atmosfera por descargas piloto.

---

A ionosfera se estende de 50 km à 10 raios terrestres



# Aplicações

## Astrofísica

O meio espacial é o mais rico em plasmas (nas estrelas, em nebulosas, no meio interestelar, no centro de galáxias,...), que, direta ou indiretamente, estão envolvidos em grande parte dos fenômenos observados.

Plasmas podem tomar parte na aceleração dos raios cósmicos.

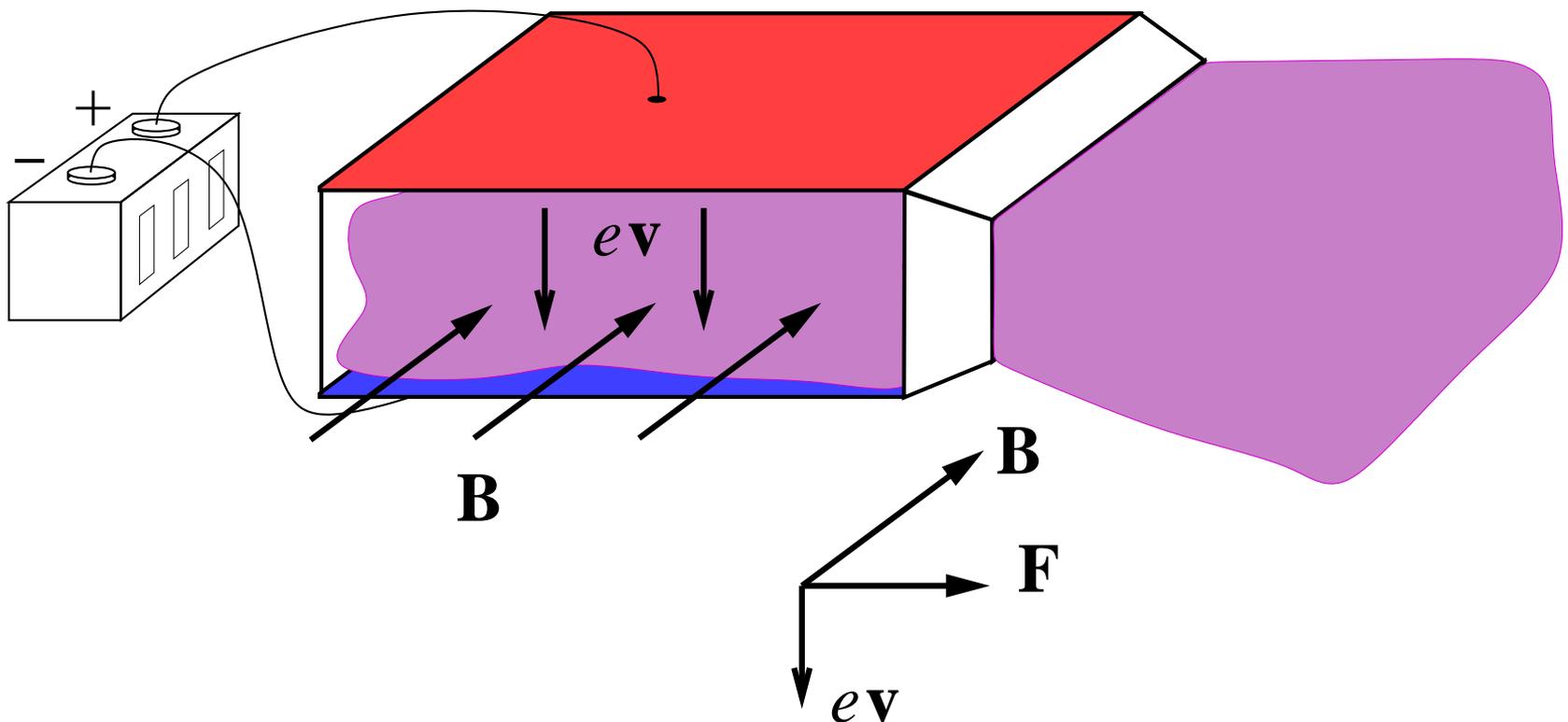
Nuvens de plasma, violentamente distorcidas pela gravidade, são responsáveis por muitas das emissões de radiação observadas.

E mesmo estrelas numa galáxia puderam ser descritas como partículas num plasma.

# Aplicações

## Propulsão magneto-hidrodinâmica

Um fluxo propulsor pode ser obtido pela passagem de uma corrente elétrica pelo plasma na presença de um campo magnético ortogonal.

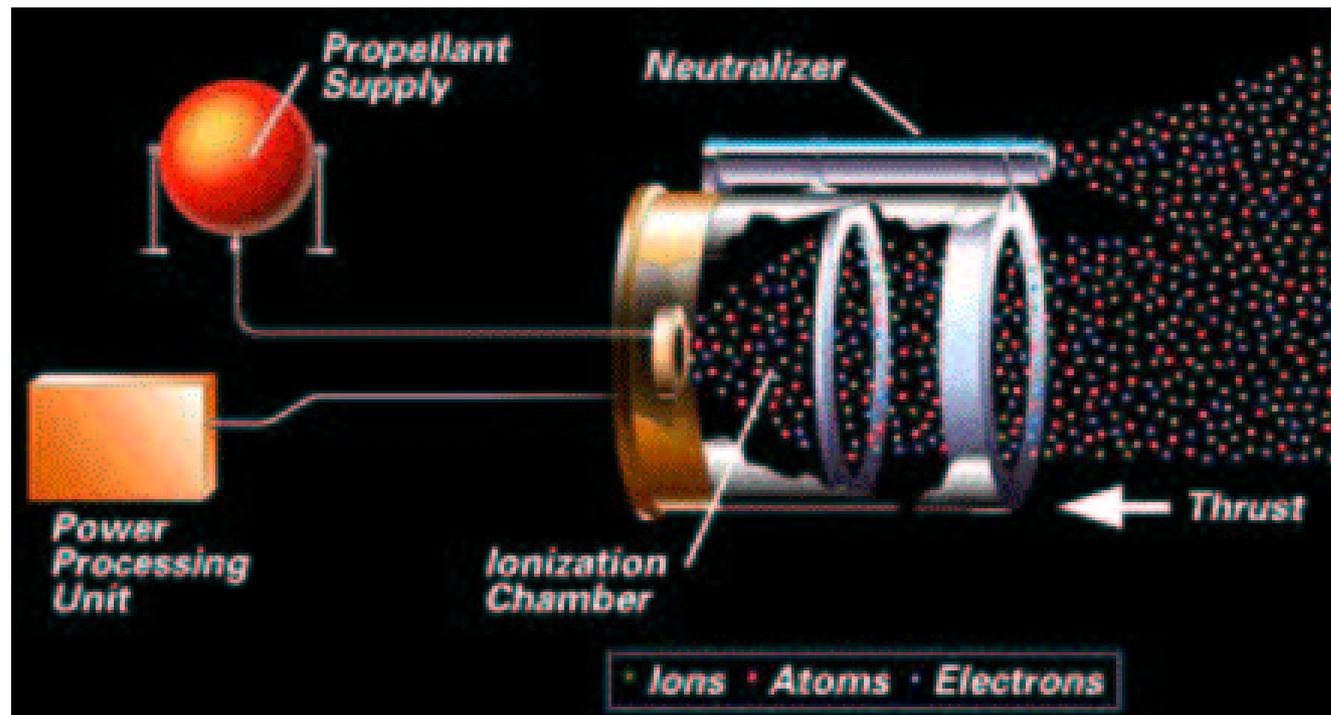


Yamato-1: [http://www.sof.or.jp/ship/nf/yamato\\_1/index.html.en](http://www.sof.or.jp/ship/nf/yamato_1/index.html.en)

# Aplicações

## Propulsão iônica

Propulsão por aceleração eletrostática de plasma.



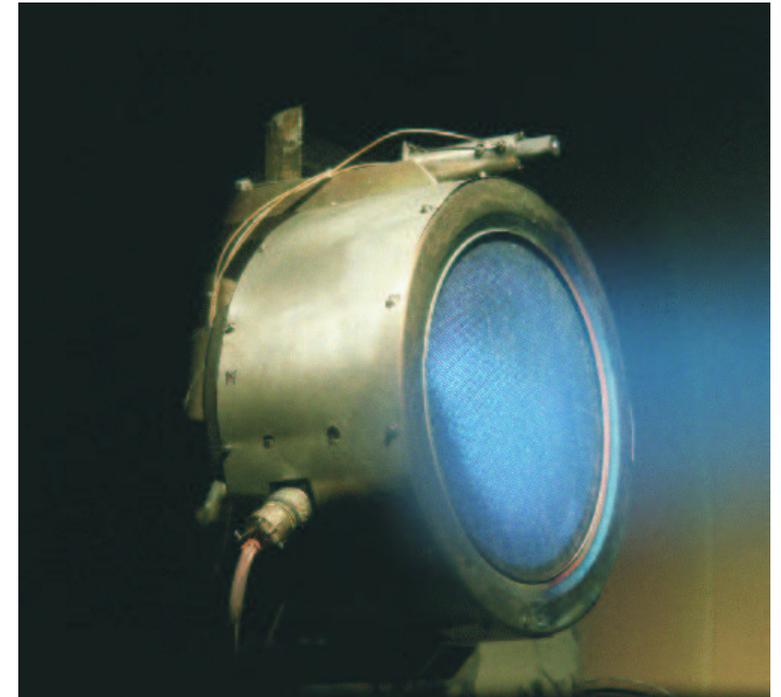
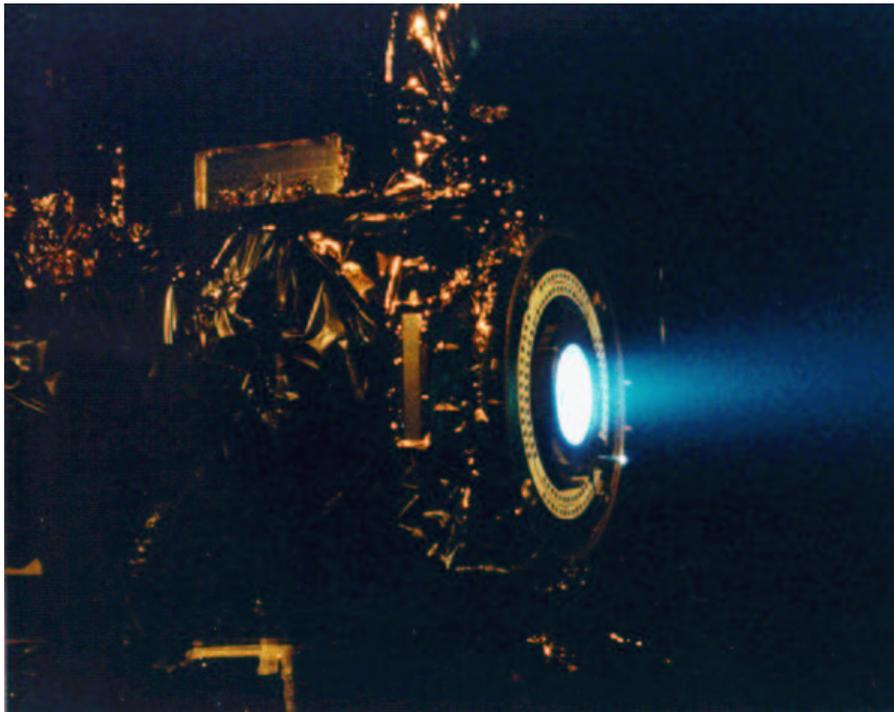
Xenon Ion Propulsion System (XIPS):

<http://www.boeing.com/defense-space/space/bss/factsheets/xips/xips.html>

# Aplicações

## Propulsão iônica

Propulsão por aceleração eletrostática de plasma.



Deep Space 1: <http://nmp.jpl.nasa.gov/ds1/>

# Aplicações

## “Gerador” magneto-hidrodinâmico

Um fluxo de plasma através de duas placas condutoras paralelas, com um campo magnético ortogonal pode carregá-las, e delas se poderia extrair uma corrente elétrica.

