

On The Physics of Dusty Plasmas

Marcelo Camargo de Juli – IAG/USP

(juli@astro.iag.usp.br)

Abstract

Most of the material in the Universe is in the plasma state and it coexists with dust particles in many situations. It was suggested long time ago that dust grains become charged (negatively or positively) if they are immersed in a radiative environment. The system composed of charged dusts, electrons and ions forms a so called dusty plasma. In recent years the interest in dusty plasmas has increased significantly because it was recognized their importance in a number of applications in astrophysics and planetary physics, physics of strongly coupled systems, problems in laboratory including plasma processing and fusion devices., etc. There exists a number of physical effects, which distinguish a dusty plasma from a standard plasma of electrons and ions, for example: the charge fluctuation on dust particles, the mass distribution of dust particles, effects of the shape of dust particles, etc. However, the most fascinating effect that was observed in laboratory, is the crystallization of dusty plasmas. There is a phase transition in the dusty plasma. I intend to present an overview of the physical properties of the dusty plasmas, their occurrences and applications.

- Processo de Carregamento Estocástico

A natureza estocástica do processo de carregamento das partículas de poeira deve ser levada em consideração no caso em que as partículas de poeira possuem tamanho da ordem de nanômetros.

A função distribuição de carga $f(z)$, probabilidade de encontrar o grão no estado de carga z , é dada pela equação master de balanço da população

$$\frac{\partial f(z)}{\partial t} = I_c(z-1)f(z-1) + I_e(z+1)f(z+1) - [I_e(z) + I_c(z)]f(z),$$

que descreve a geração de passos e deflexões $z-1 \rightleftharpoons z \rightleftharpoons z+1$ das partículas no estado de carga z .

- Blindagem de Debye:

No caso em que existe um processo de carregamento das partículas de poeira a blindagem de Debye deixa de ser exponencial. A blindagem da carga da partícula de poeira não é perfeita.

Plasma Empoeirado:

- Gás totalmente ou parcialmente ionizado, de temperatura relativamente baixa;
- Constituído por elétrons, íons, partículas dispersas de material sólido, dielétrico ou condutor, extremamente massivas ($m_d \sim 10^6 - 10^{18} m_p$) e carregadas ($q \sim 10^3 e - 10^4 e$);
- A carga elétrica das partículas de poeira depende das condições do plasma ambiente, do tamanho e da composição do grão, podendo ser negativa ou positiva;
- Os grãos de poeira possuem uma distribuição de tamanho e diferentes formas.

Sistema Plasma-Poeira:

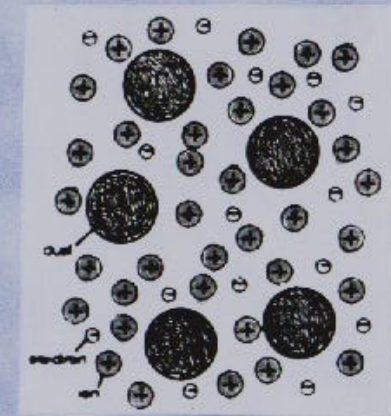
- Poeira no Plasma ($a \ll \lambda_D < \ell$) :

As partículas de poeira podem ser consideradas como uma coleção de grãos blindados isolados.

- Plasma Empoeirado ($a \ll \ell < \lambda_D$) :

As partículas de poeira carregadas participam no processo de blindagem e portanto no comportamento coletivo do plasma,

- $\left\{ \begin{array}{l} a \rightarrow \text{raio do grão de poeira} \\ \lambda_D \rightarrow \text{comprimento de Debye} \\ \ell \rightarrow \text{distância média entre os grãos de poeira} \end{array} \right.$



(1.)

Plasmas Empoeirados X Plasmas Convencionais

As características das partículas de poeira são as responsáveis pelo comportamento diferenciado de um plasma empoeirado em relação ao comportamento de um plasma convencional de elétrons e íons.

1) Razão carga-massa das partículas de poeira muito pequena

$$\frac{q}{m_d} \ll \frac{q_p}{m_p} \Rightarrow \omega_{pd} = \left(\frac{4\pi m_d n_d^2 e^2}{m_d} \right)^{1/2} \text{ e } |n_d| = \frac{\epsilon_d e B_0}{m_d c} \ll \omega_{pp}, n_p.$$

- Modos de íons $\rightarrow$ modos de baixa frequência ($\omega \leq n_i$), envolvem a inércia dos íons (poeiras imóveis)

- Modos de poeira $\rightarrow$ modos de frequência ultra-baixas ($\omega \leq n_d$), envolvem a dinâmica das partículas de poeira.

2) A grande massa das partículas de poeira $\Rightarrow$ força gravitacional desempenha um papel importante na dinâmica das mesmas (possíveis alterações na instabilidade de Jeans).

3) A presença de grãos de poeira carregados altera a condição de quase neutralidade de um plasma

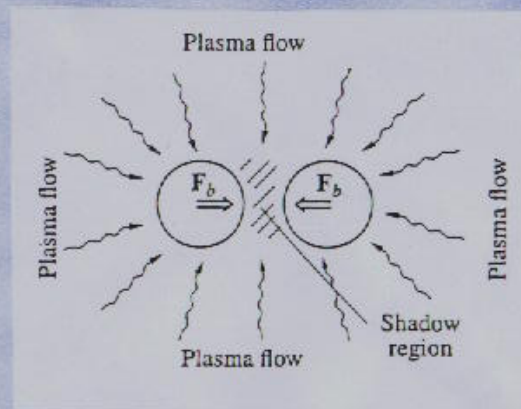
$$n_i m_i + \epsilon_d n_d m_d = n_e m_e$$

onde $\epsilon_d = 1, -1$.

4) A carga elétrica dos grãos de poeira é determinada pelo potencial elétrico do plasma ambiente e se uma onda modifica este potencial, a carga do grão será afetada. A carga elétrica das partículas de poeira flutuará e esta flutuação pode levar ao amortecimento das ondas. Como a carga das poeiras varia com o tempo, será necessário usar uma nova variável independente para descrever o plasma: $t_d = t_d(\vec{r}, \vec{p}, t, q)$.

5) Como $m_d \sim a^3$ e $q \sim a$, uma distribuição de tamanho dos grãos de poeira $\Rightarrow n_d$ e ω_{pd} serão contínuas.

(2)



Parâmetros Característicos de um Plasma Empoeirado

- Parâmetro de Acoplamento de Coulomb:

Razão entre a energia potencial de Coulomb dos grãos de poeira e a energia térmica destes grãos

$$\Gamma_d = \frac{q^2}{\ell \tau_d} e^{-\ell/\lambda_D}$$

onde $\lambda_D^{-2} = \lambda_{De}^{-2} + \lambda_{Di}^{-2}$ é o raio de Debye do plasma empoeirado.

a) $\Gamma_d \leq 1 \rightarrow$ Plasmas empoeirados fracamente acoplados

Ex: plasmas espaciais, onde as densidades envolvidas são relativamente baixas.

b) $\Gamma_d \gg 1 \rightarrow$ Plasmas empoeirados fortemente acoplados

A energia potencial de interação entre os grãos de poeira pode exceder sua energia cinética. Os grãos de poeira interagem fortemente e existe a possibilidade de formação de redes de Coulomb (dusty plasma crystal). Para $\Gamma_d \gg 170$ a cristalização das partículas de poeira pode ocorrer.

- Outros Parâmetros:

Table 8. Cosmic dust-laden plasmas.

Environment	Some typical values							
	n_e (cm ⁻³)	T (eV)	n_d (cm ⁻³)	a (μm)	n_a (cm ⁻³)	$ Z_d $	d/λ_D	Γ_d
Saturn's E-ring	10	10–100	10 ⁻⁷	1	1	~10 ⁴	0.1	<10 ⁻²
Saturn's F-ring	10	10–100	<10	1	—	~10–10 ²	<10 ⁻³	<10 ⁻⁴
Saturn's spokes	0.1–10 ²	2	1	1	—	~10	<10 ⁻²	~1
Red giant photospheres	2 × 10 ²	0.1	2	0.01	5 × 10 ⁸	1	~6 × 10 ⁻²	~2 × 10 ⁻⁶
Halley's comet								
Inside ionopause	10 ³ –10 ⁴	<0.1	10 ⁻³	0.1–10	10 ¹⁰	10–10 ³	>1	} <1
Outside ionopause	10 ² –10 ³	~1	10 ⁻⁶ –10 ⁻⁷	0.01–10	—	20–2 × 10 ⁴	>10	
Noctilucent clouds	10 ³	0.013	10–10 ³	0.01–0.1	10 ¹⁴	1–80	0.2	2 × 10 ⁻⁴ –0.5
Interstellar molecular clouds	10 ⁻³	0.001	10 ⁻⁷	0.2	10 ⁶	~1	0.3	<10 ⁻⁵
Zodiacal dust disc (1 AU)	5	10	10 ⁻¹²	10	—	10 ⁸	5	<10 ⁻⁶
Solar F-corona	5 × 10 ²	80	10 ⁻⁷	0.3	—	~5 × 10 ²	10	~10 ⁻⁸
Planetary Nebulae (cm)	10 ⁴	1	10 ⁻⁷	0.2	—	~3 × 10 ²	30	<10 ⁻⁹
Supernovae shells	10 ³	0.2	10	0.01	—	20	~5 × 10 ⁻²	~10 ⁻³

(3)

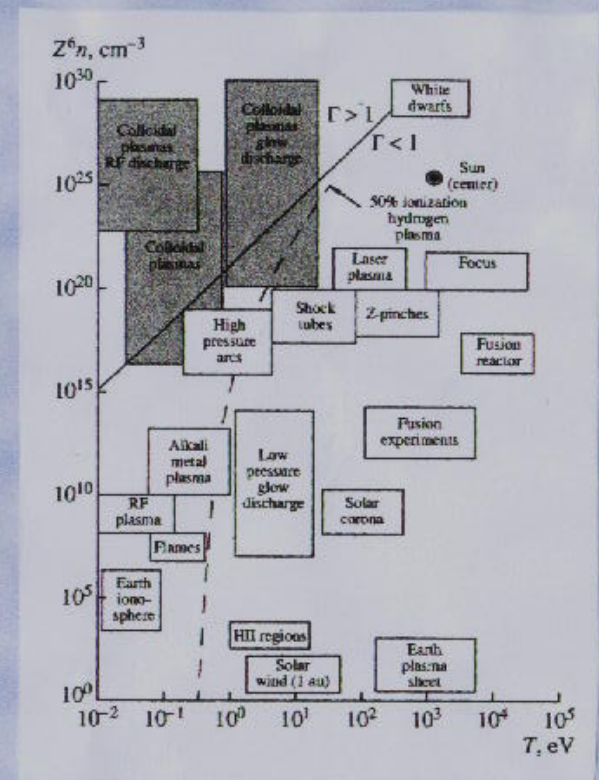
Progress in the study of dusty plasmas

Table 9. Dust-laden plasmas: terrestrial.

Environment	Some typical values							
	n_e (cm ⁻³)	T (eV)	n_d (cm ⁻³)	a (μm)	n_a (cm ⁻³)	$ Z_d $	d/λ_D	Γ_d
Rocket exhausts (near ground)	10 ¹²	0.3	3 × 10 ⁸	0.5	3 × 10 ¹⁸	10 ²	2	~0.1
Flames	>10 ¹¹	0.2	10 ¹¹	0.01	5 × 10 ¹⁸	2	0.5	~10 ⁻²
Lab-plasma (DA-wave)	10 ⁸	2–4	10 ⁴	5	5 × 10 ¹⁴	>10 ³	0.2–0.3	1–10
Lab-plasma (Dust-Hall)	10 ⁸	2–4	10 ³	5	5 × 10 ¹⁴	10 ³	0.4–0.6	~10
Process plasma (Chip manufacture)	3 × 10 ⁹	2	10 ³ –10 ⁸	≤1	10 ¹³	<3 × 10 ²	0.1–3	~10 ²
Coulomb dust crystal	10 ⁹	2	10 ⁴ –10 ⁵	5	10 ¹⁶	10 ⁴	0.3–1	~10 ³
Thermonuclear fireball (100 Megaton)	10 ¹⁴	1	10 ⁸	1	10 ¹⁸	10 ³	20	≤10 ⁻³
Meeker-burner ^a	10 ¹¹	~0.2	10 ⁷	≤0.5	5 × 10 ¹⁸	5 × 10 ² –10 ³	5	50

^a Propane—flame at atm pressure with CeO₂ grains, $\phi_w \approx 2.75$ eV (Fortov V E et al 1996 Phys. Rev. E 54 R2236).

(3)



(4)

A Carga da Poeira e os Processos de Carregamento

- Processo de Carregamento Contínuo

A carga elétrica que um grão de poeira possui em um dado instante de tempo é determinada pela equação

$$\frac{dq}{dt} = I(\vec{r}, q, t)$$

onde $I(\vec{r}, q, t)$ é a corrente total de carregamento no grão, dada por

$$I(\vec{r}, q, t) = I_{ext} + \sum_p I_p(\vec{r}, q, t)$$

-O termo $I_p(\vec{r}, q, t)$ pode ser:

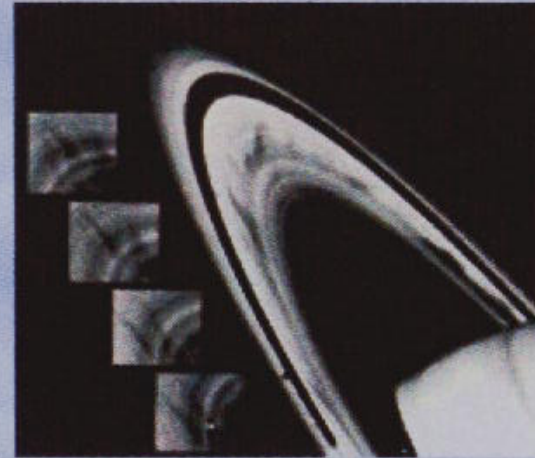
- a) fotoionização por radiação ultravioleta incidente;
- b) emissão secundária de elétrons devido ao impacto com elétrons e íons energéticos
- c) emissão termoiônica
- d) emissão radioativa de elétrons e partículas alfa

- O termo $I_p(\vec{r}, q, t)$ representa correntes constituídas por elétrons e íons do plasma que, ao colidirem inelasticamente com as partículas de poeira, provocam o seu carregamento.

Ocorrências

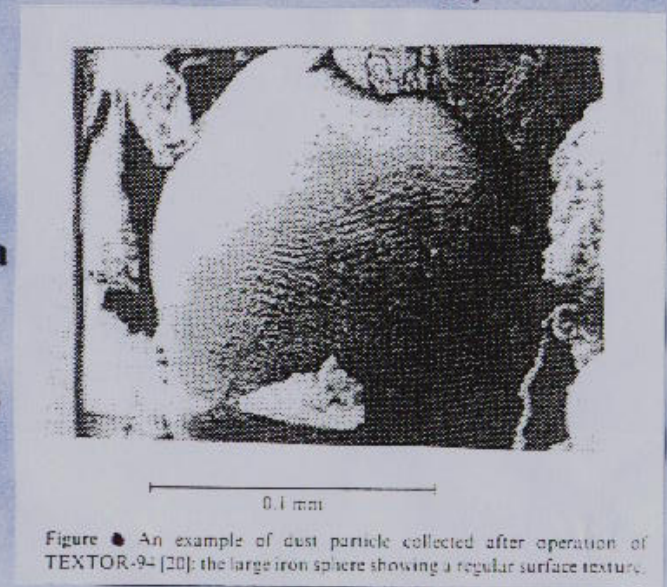
- Plasmas Empoeirados no Espaço

- Anéis planetários
- Cometas
- Nuvens interestelares
- Atmosfera da terra
- Magnetosfera dos planetas Jovianos
- Região de formação estelar (Região H II)



- Plasmas Empoeirados em Laboratório

- Descargas de corrente contínua (DC) e de rádio frequência
- Dispositivos de plasma de fusão
- Reatores de processamento a plasma (plasmas industriais)



Ondas e Instabilidades

As partículas de poeira tanto modificam os modos de oscilações existentes em um plasma de elétrons e íons (regime de baixa frequência) quanto dão origem a novos modos de oscilações associados a dinâmica das partículas de poeira (regime de ultra-baixa frequência).

- Exemplos de modos modificados:

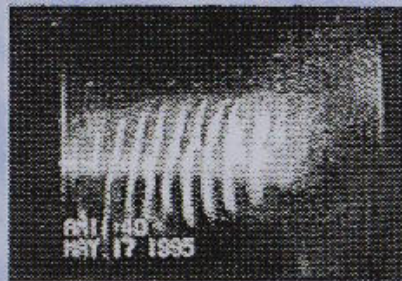
DIWA (dust-ion-acoustic waves) $\Rightarrow \omega \sim 3-5 \text{ kHz}$ e $n_{Td}, n_{Ti} \ll n_{pe} \ll n_{Te}$

EDICW (electrostatic dust-ion-cyclotron waves)

- Exemplos de modos novos:

DAW (dust acoustic waves) $\Rightarrow \omega \sim 12 \text{ Hz}$ e $v_{pe} \sim 6 \text{ cm/s}$ ($n_{Td} \ll n_{pe} \ll n_{Te}, n_{Ti}$)

EDCW (electrostatic dust-cyclotron waves) $\Rightarrow \omega \sim \Omega_d$



(7)

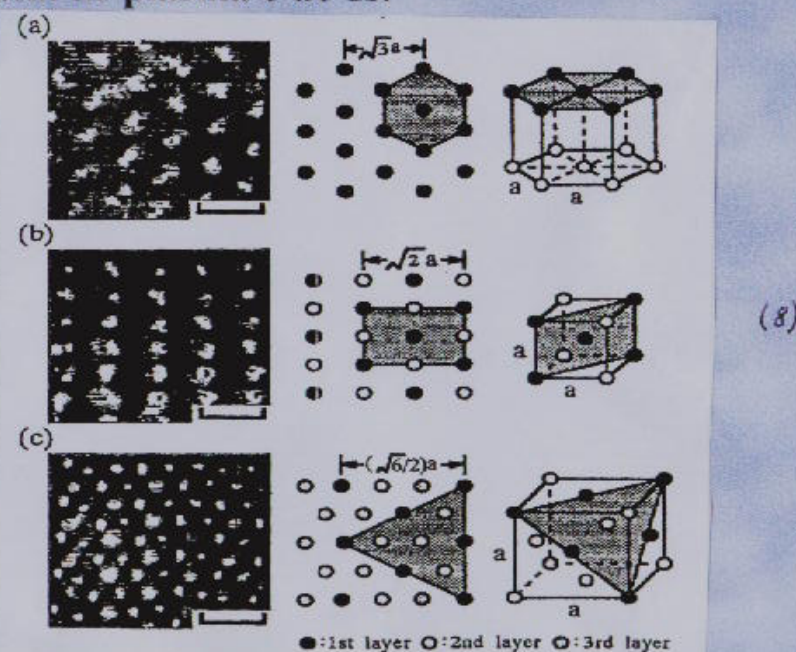
Cristais de Plasma

A competição entre a interação coulombiana e a flutuação térmica do plasma de fundo desempenha um papel chave na determinação do grau de ordenamento do sistema. Quando o parâmetro de acoplamento Γ_e aumenta, o sistema pode se auto-organizar indo de uma fase gasosa a uma fase cristalina.

- Aplicações:

- * Como um sistema macroscópico modelo para a física dos cristais (deslocação, transição de fase, etc..).
- * Na física de colóides e fenômenos que envolvem um tempo de resposta curto. A escala de tempo característica para a formação do cristal de plasma é de 1s.
- * Modelamento de sistemas de nanocristais.

Micrographs and sketches of the different crystal structures: (a) hexagonal, (b) bcc and (c) fcc. The central column corresponds to the structures in the micrographs. The graded areas in the sketches are normal to the optical axis. The bars correspond to 0.2 mm (after Chu and I 1994).



Referências:

- 1- Cramer, N., Vladimirov, S. Website of the Research Center for Theoretical Astrophysics (www.physics.usyd.edu.au/rcfta/dplasma.shtml).
- 2- Khodataev, Ya. K., Bingham, R., Tarakanov, V. P. , Tsytovich, V. N. *Plasma Physics Reports*, 22 (12), p. 932, 1996.
- 3- Mendis, D. A. *Plasma Sources Sci. Technol.* 11 , p. A219, 2002 (online at stack.iop.org/PSST/11/A219).
- 4- Tsytovich, V. N. *Plasma Physics Reports*, Vol. 28, n. 8, p. 623, 2002.
- 5- Jet Propulsion Laboratory (JPL).
- 6- Tystovich, V. N., Winter, J. *Physics Uspekhi* 41 , p. 815, 1998.
- 7- Thompson, C., Barkan, A., Merlino, R. L. And D' Angelo, N. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 27, p. 146, 1999.
- 8- Chu, J. H. And I, L. *Phys. Rev. Lett.* 72, 4009, 1994.