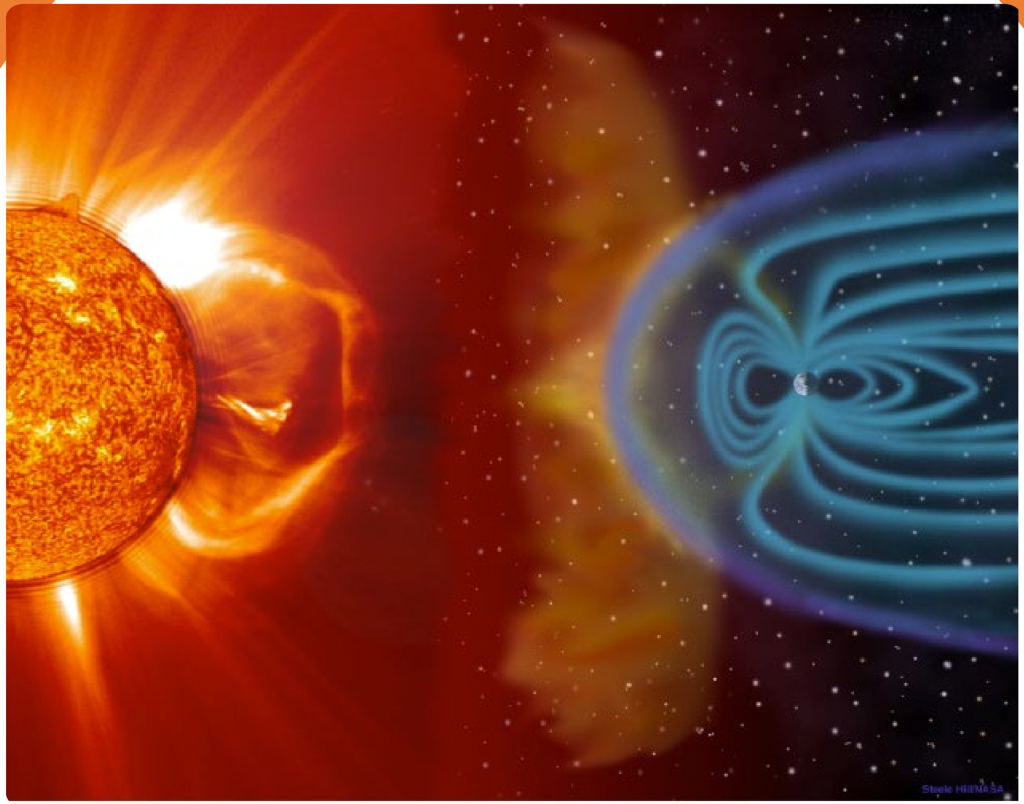
Conceptos fundamentales de plasmas

Dr. Antonio Juárez Reyes

Instituto de Ciencias Físicas

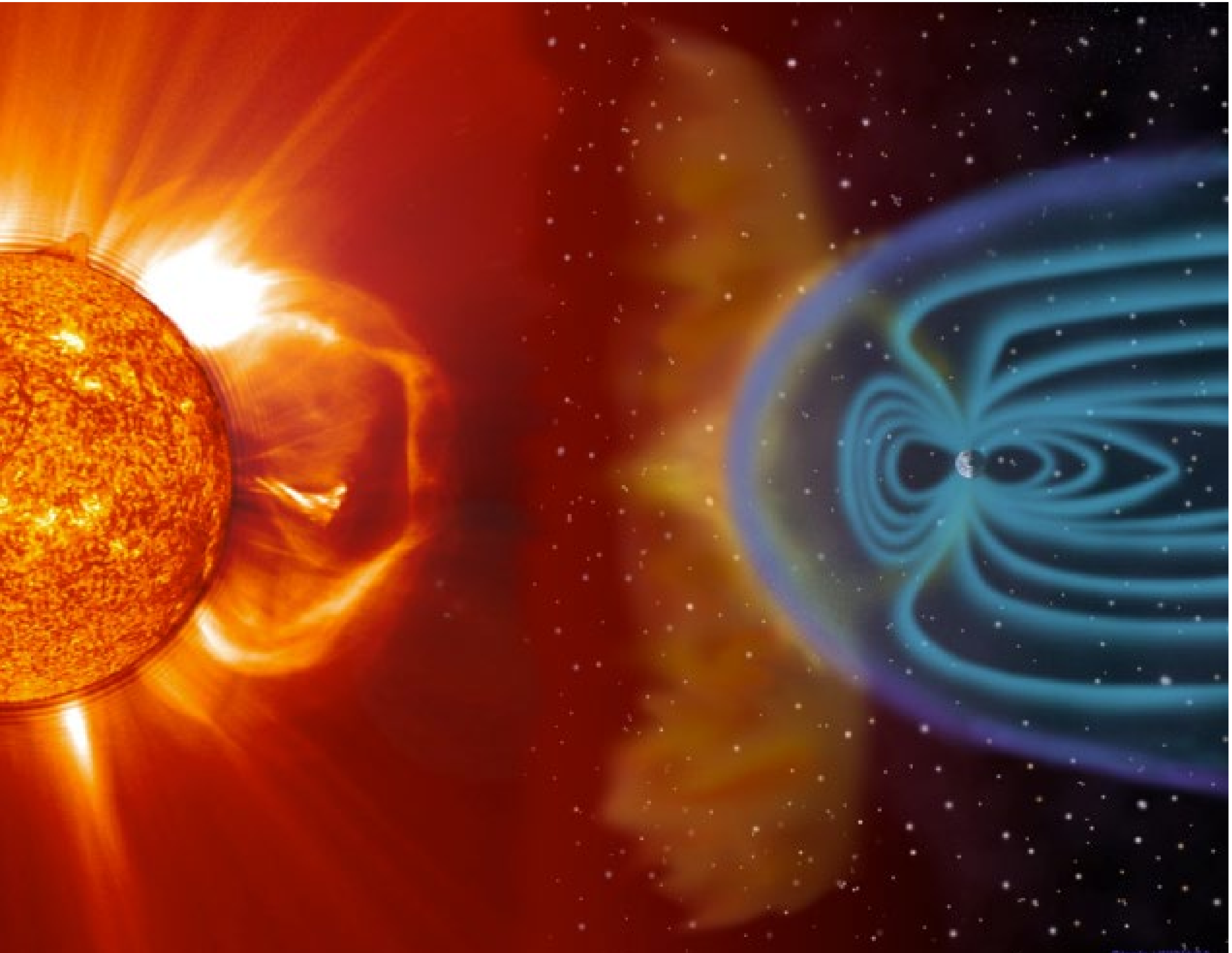
amjuarez@icf.unam.mx

https://www.fis.unam.mx/laboratorios/48/laboratorio-de-fotodinamica-molecular



Introducción

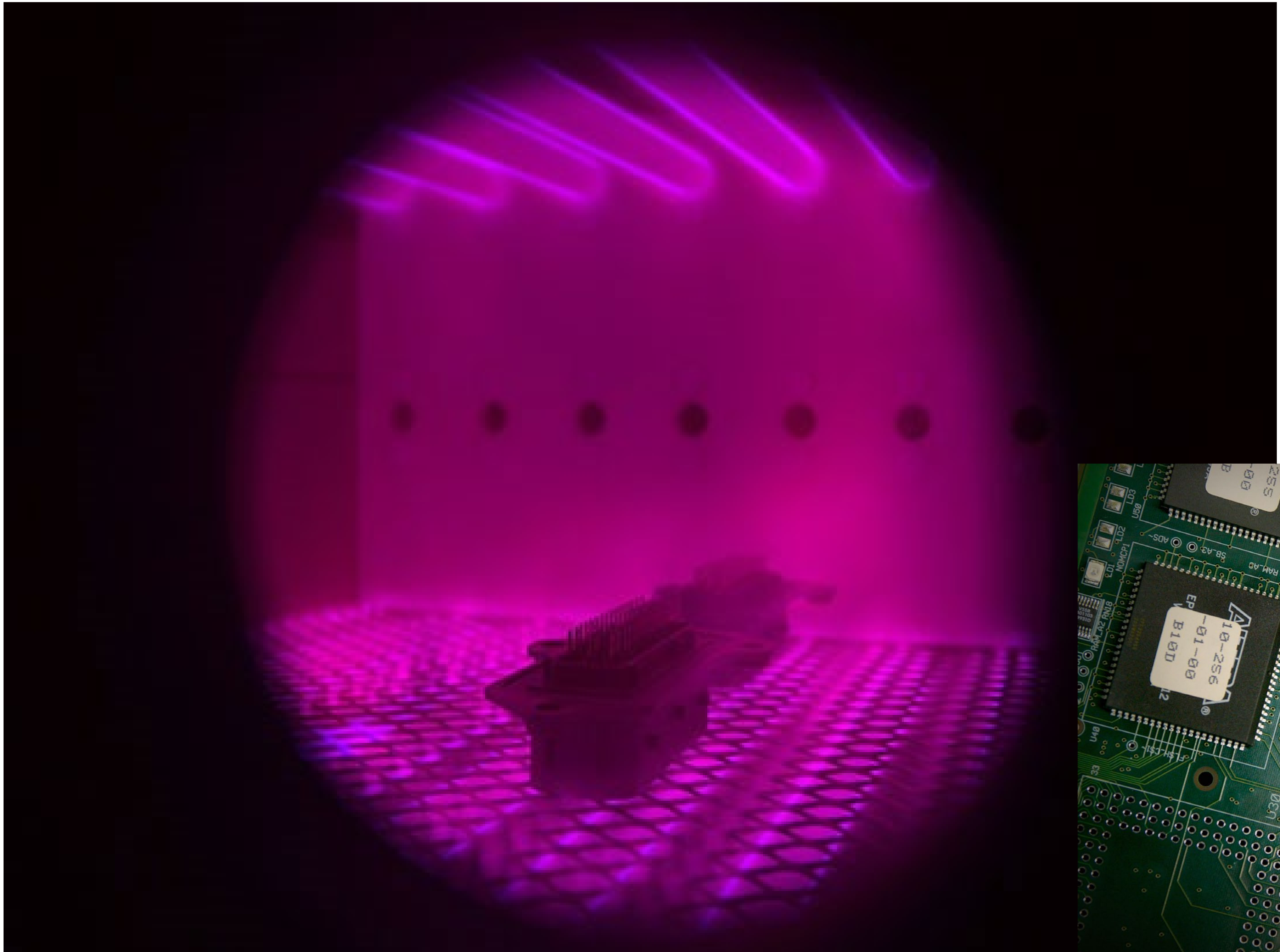
Plasmas en todas partes…



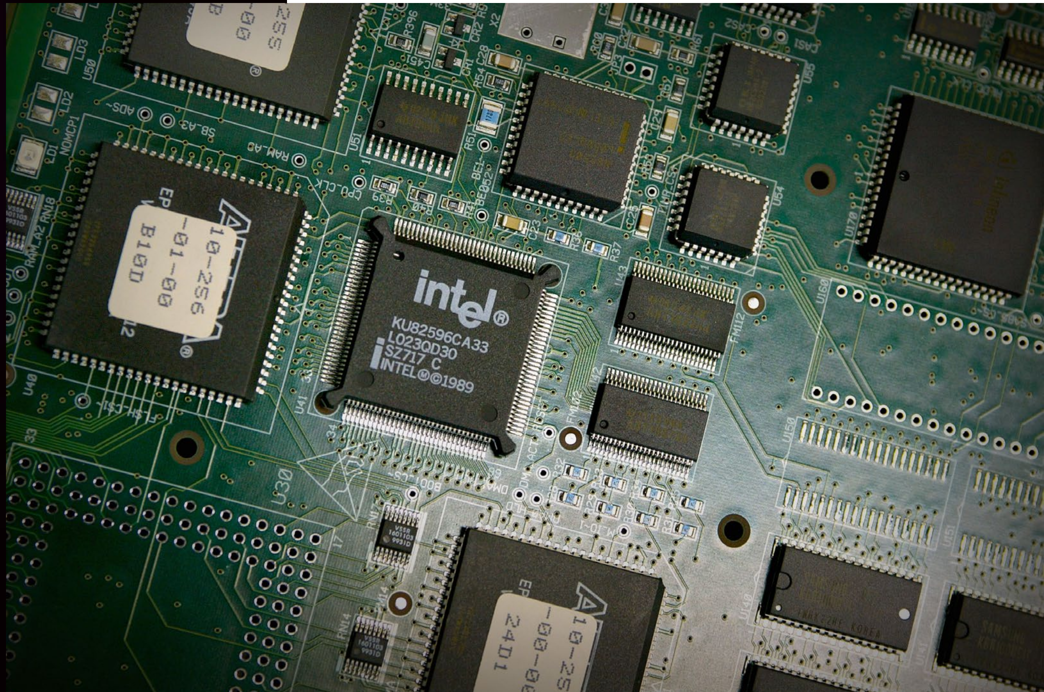
99% del universo observable se
Encuentra en el estado de plasma

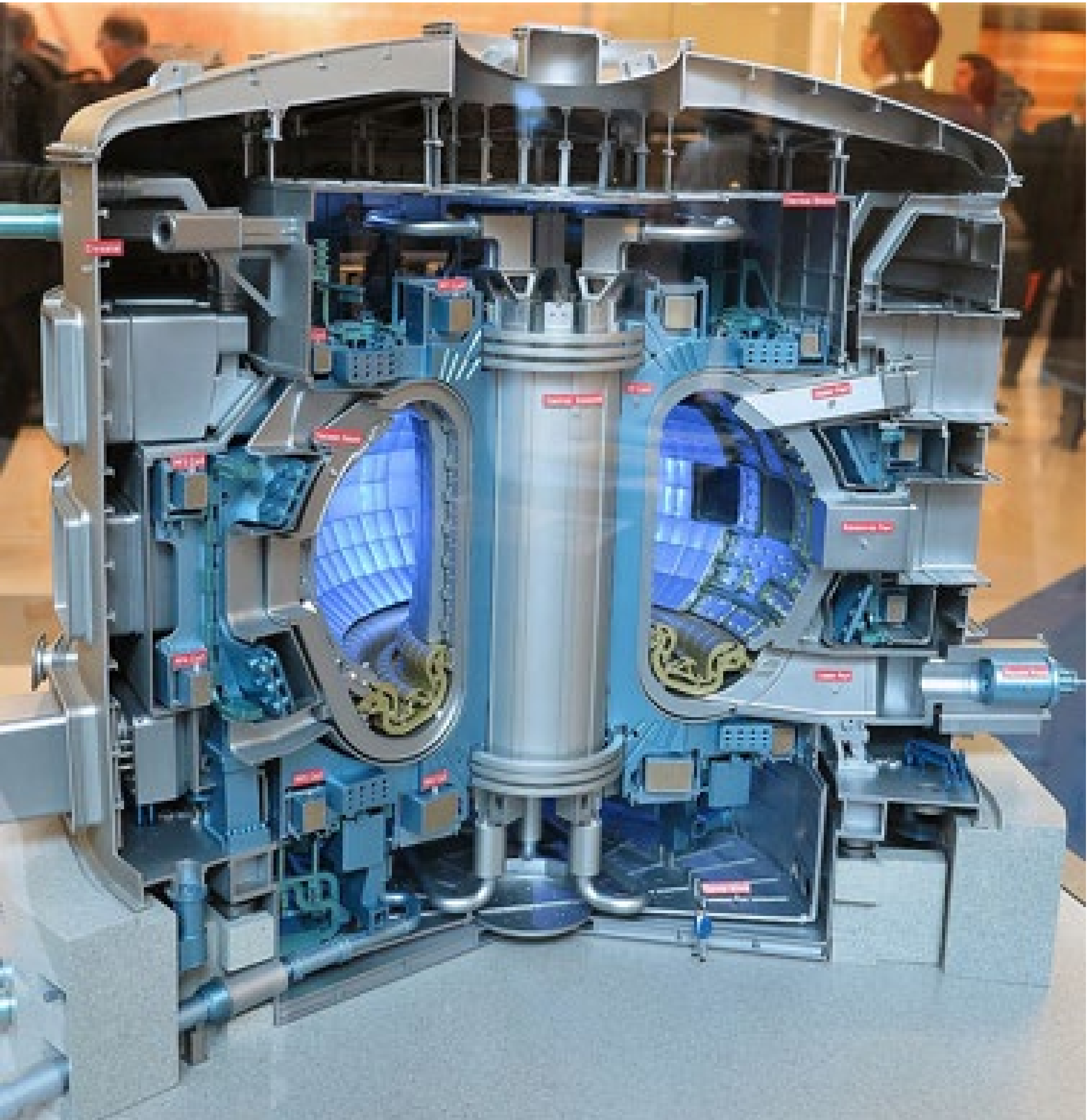
Temperatura de la corona solar

2,000,000 ^{o}K



Plasma etching. Fabricación de
Toda la micro electrónica conocida

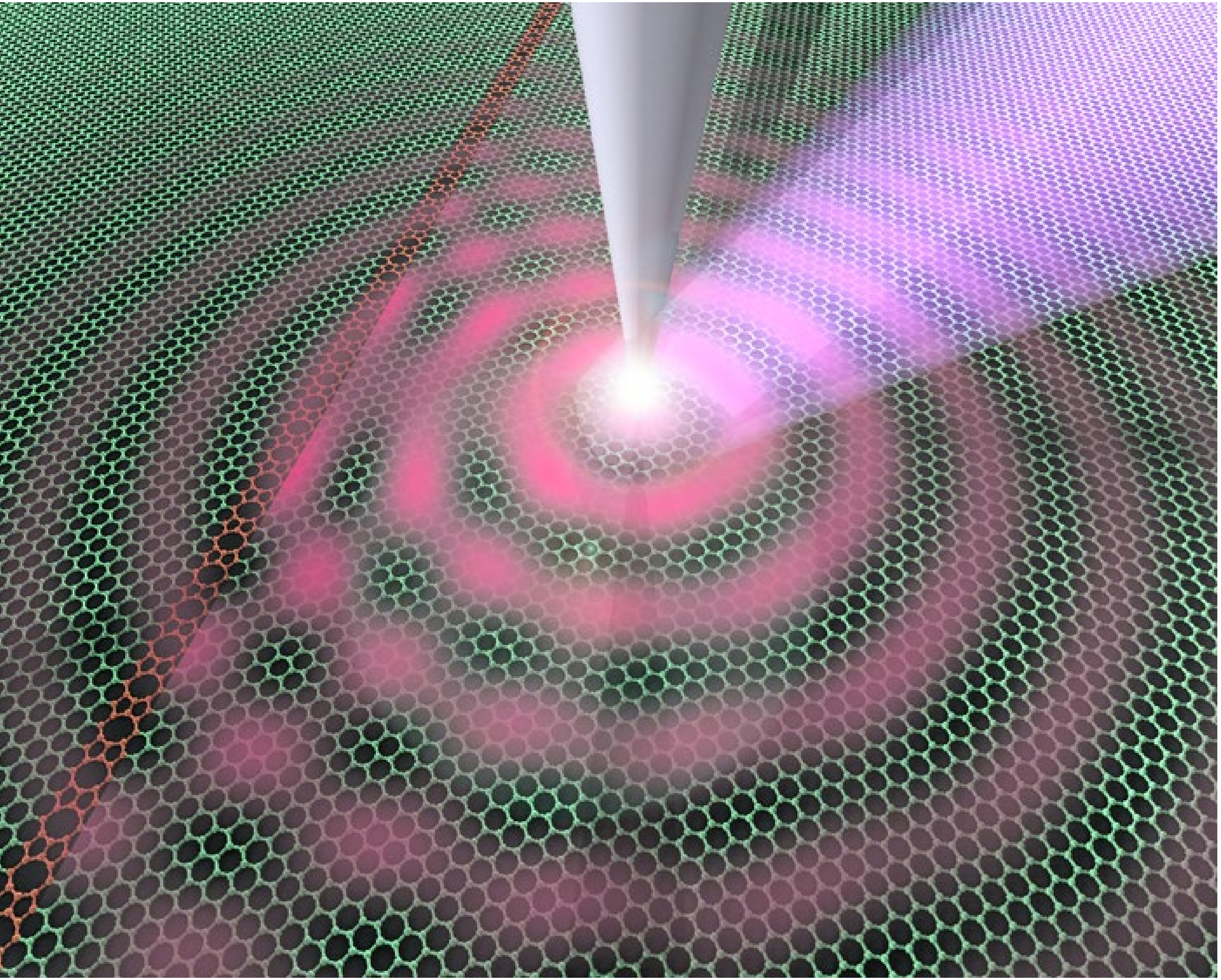




1 Introducción

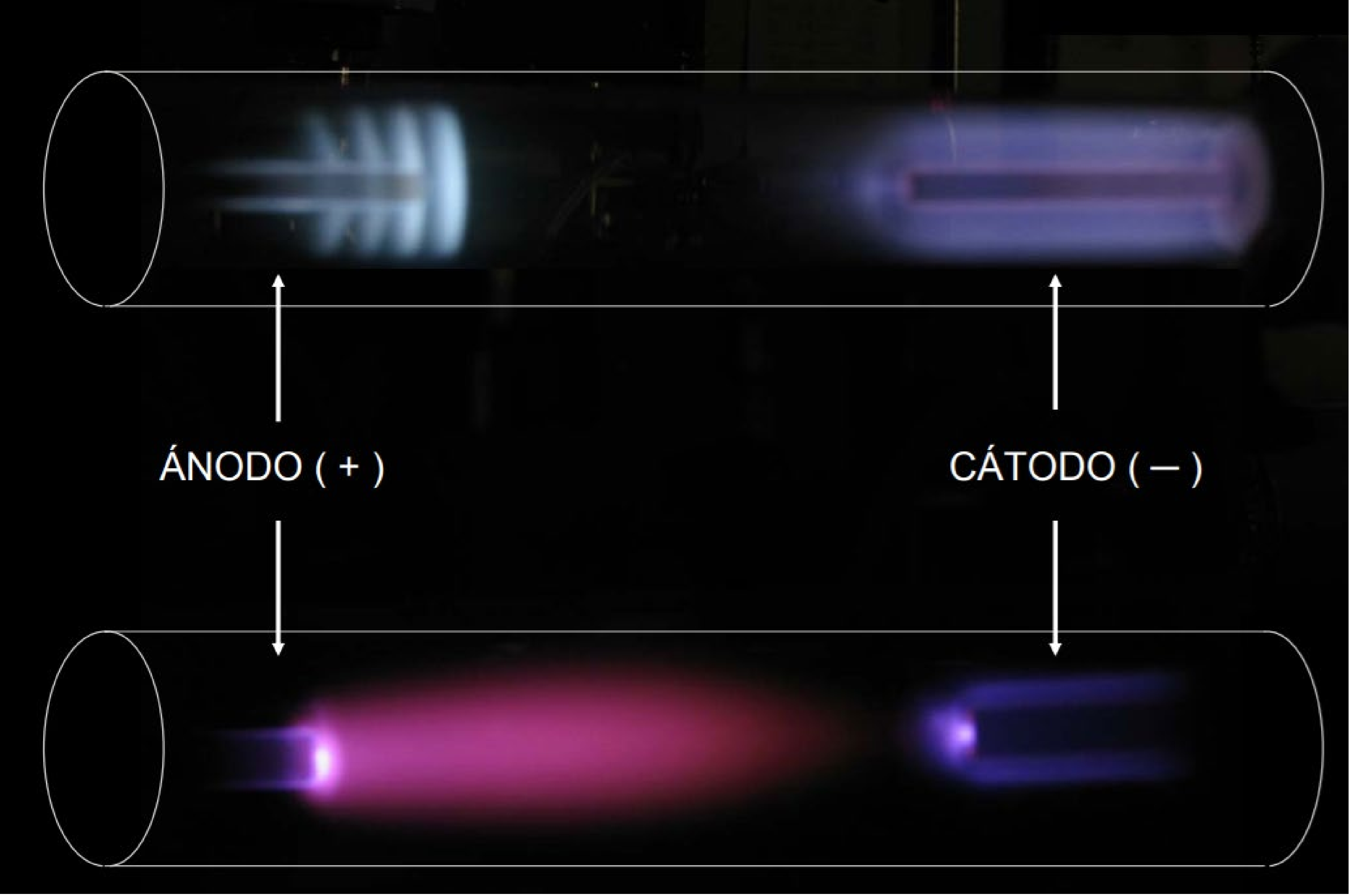
Reactor de fusión ITER Un sol en la tierra

***I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor*



Plasmas ¿En sólidos?

Plasmones de superficie

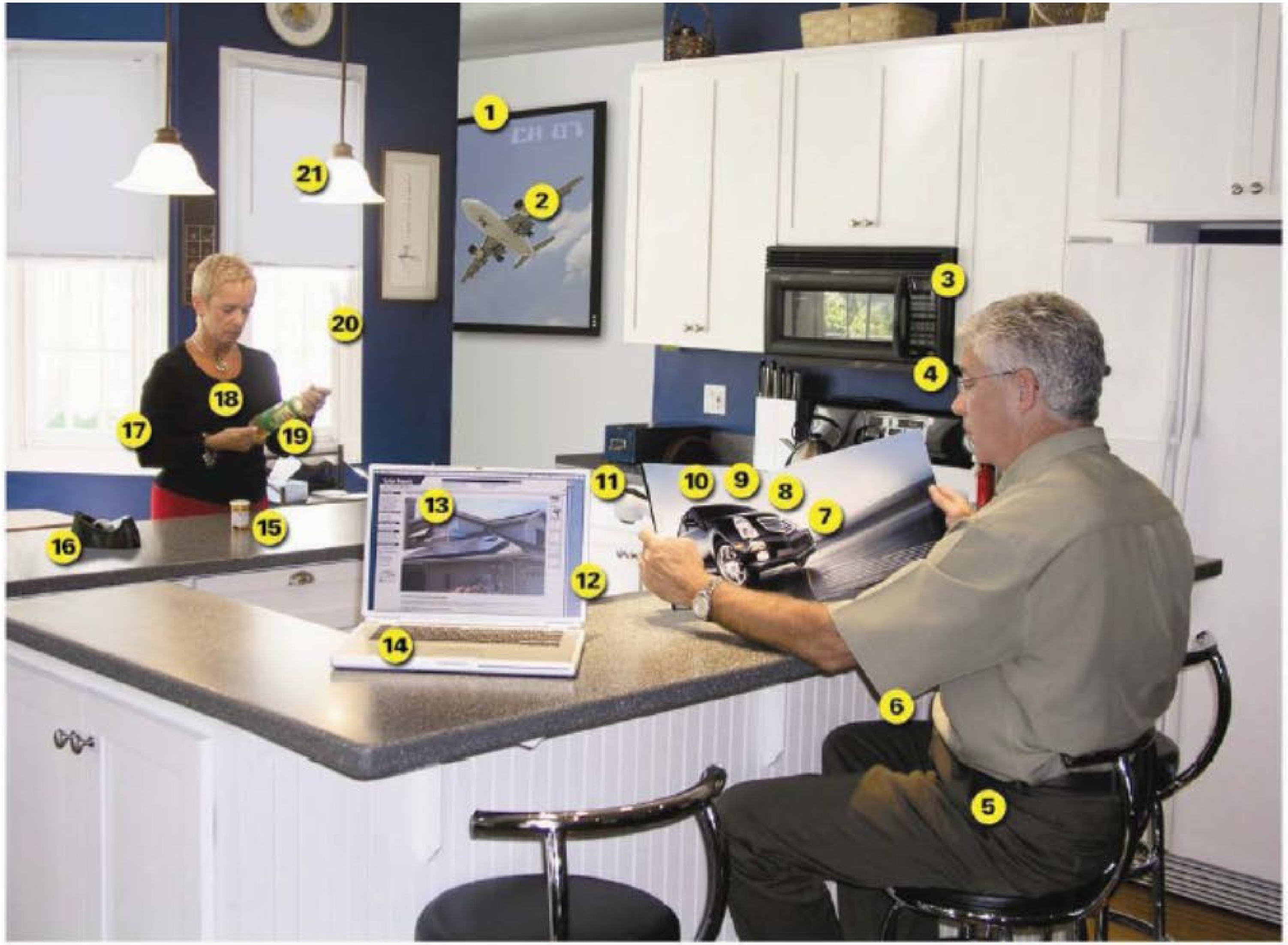


En el laboratorio

Descarga en régimen
luminiscente

Noten la estructura compleja

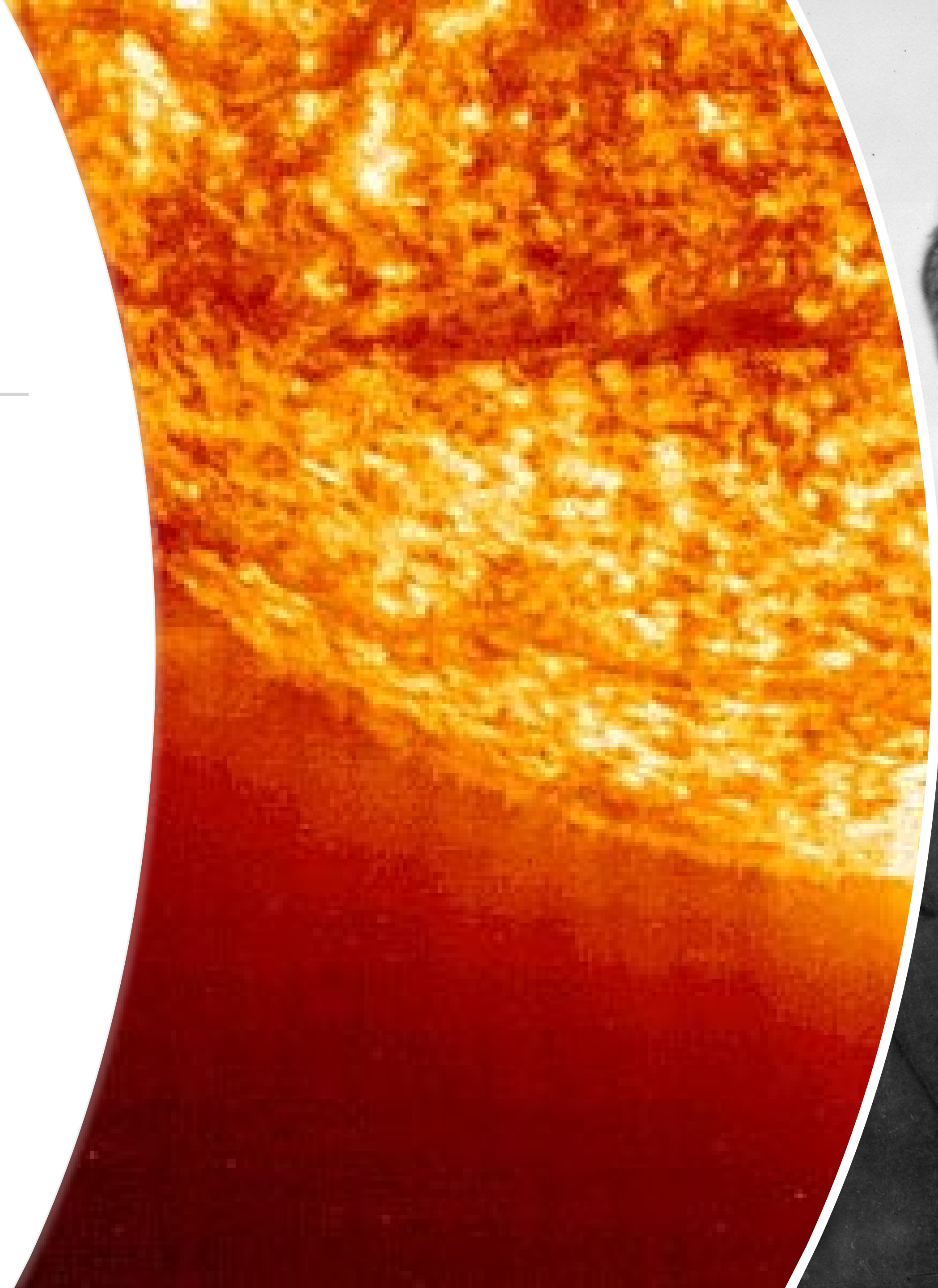
Plasmas en la vida cotidiana…



01 – Plasma TV
02 – Plasma-coated jet turbine blades
03 – Plasma – manufactured LEDs in panel
04 – Plasma CVD eyeglass coating
05 – Plasma-ion implanted artificial hip
06 – Plasma laser-cut cloth
07 – Plasma HID headlamps
08 – Plasma-produced H, in fuel cell
09 – Plasma-aided combustion
10 – Plasma muffler
11 – Plasma ozone water purification
12 – Plasma-deposited LCD screen
13 – Plasma-deposited silicon for solar cell
14 – Plasma-processes microelectronics
15 – Plasma-sterilization
16 – Plasma-treated polymers
17 – Plasma-treated textiles
18 – Plasma-treated heart stent
19 – Plasma-deposited diffusion

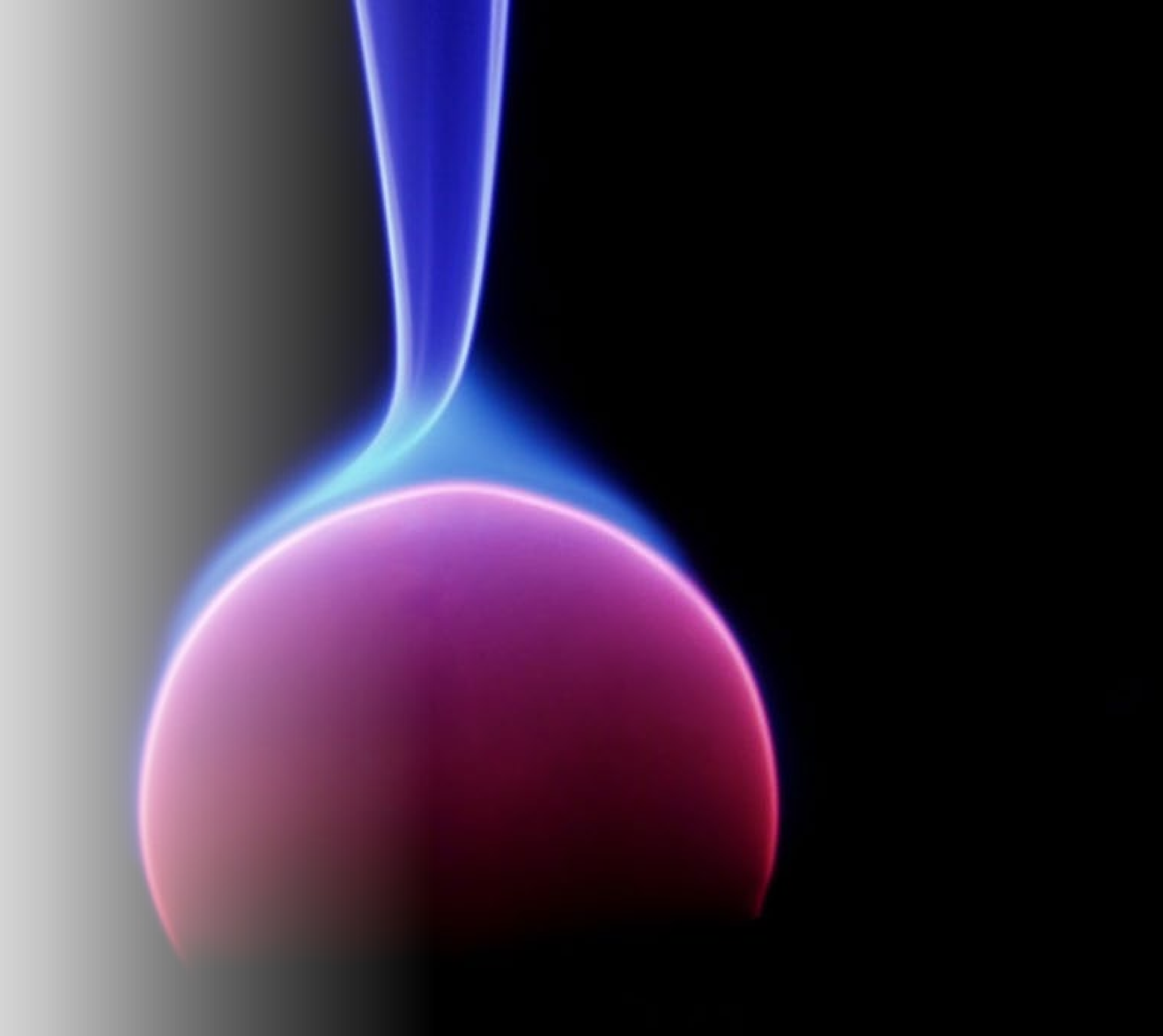
Plasma

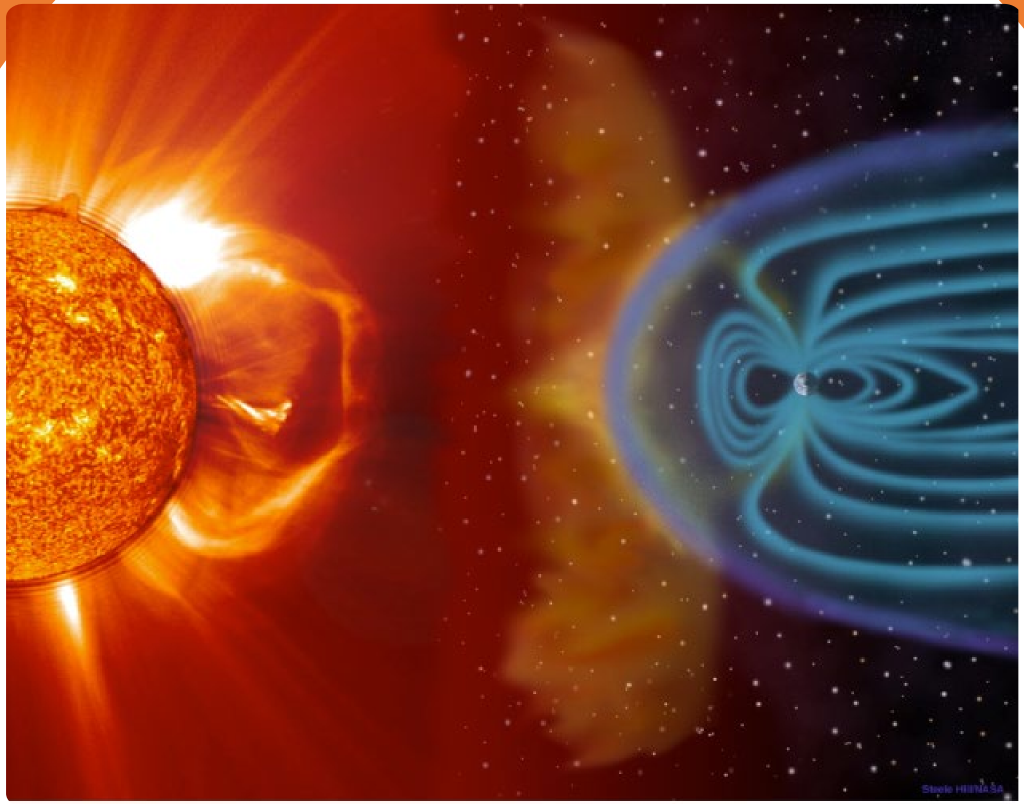
- El plasma (del griego antiguo πλάσμα 'sustancia moldeable’)
- es uno de los cuatro estados fundamentales de la materia,
- estudiado sistemáticamente por primera vez por Irving Langmuir en la década de 1920



Definición formal de plasma

"Es un estado de la materia compuesto de materia ionizada, globalmente neutro, altamente conductor de electricidad hasta el punto de que campos eléctricos y magnéticos intrínsecos y externos dominan su comportamiento"





Conceptos fundamentales 1

Longitud de Debye

Definición rigurosa

“Es un estado de la materia compuesto de materia ionizada, globalmente neutro, altamente conductor de electricidad hasta el punto de que campos eléctricos y magnéticos intrínsecos y externos dominan su comportamiento”

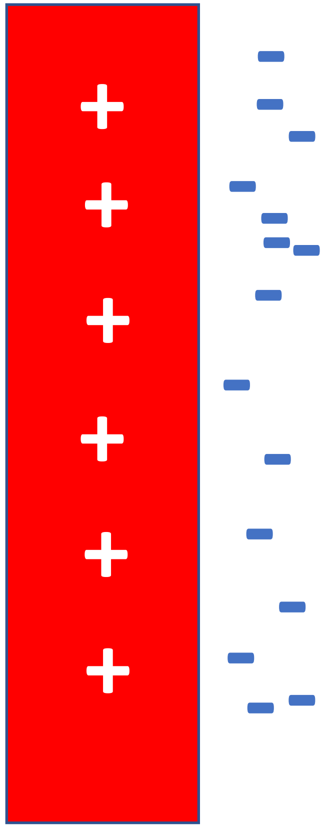
Para revisar esta definición hay que revisar algunos conceptos fundamentales:

Longitud de Debye

Frecuencia de Plasma

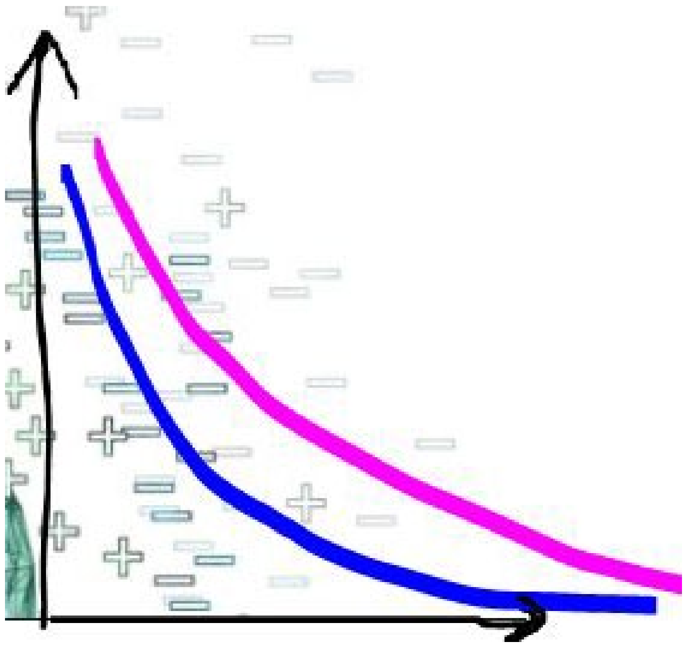
Frecuencia colisional

Longitud de debye:



Consideren un objeto positivamente cargado que se sumerge en un Plasma, compuesto de igual número de cargas positivas y negativas

¿ Cuál es la distribución de cargas final, cuando uno sumerge este objeto En el plasma?

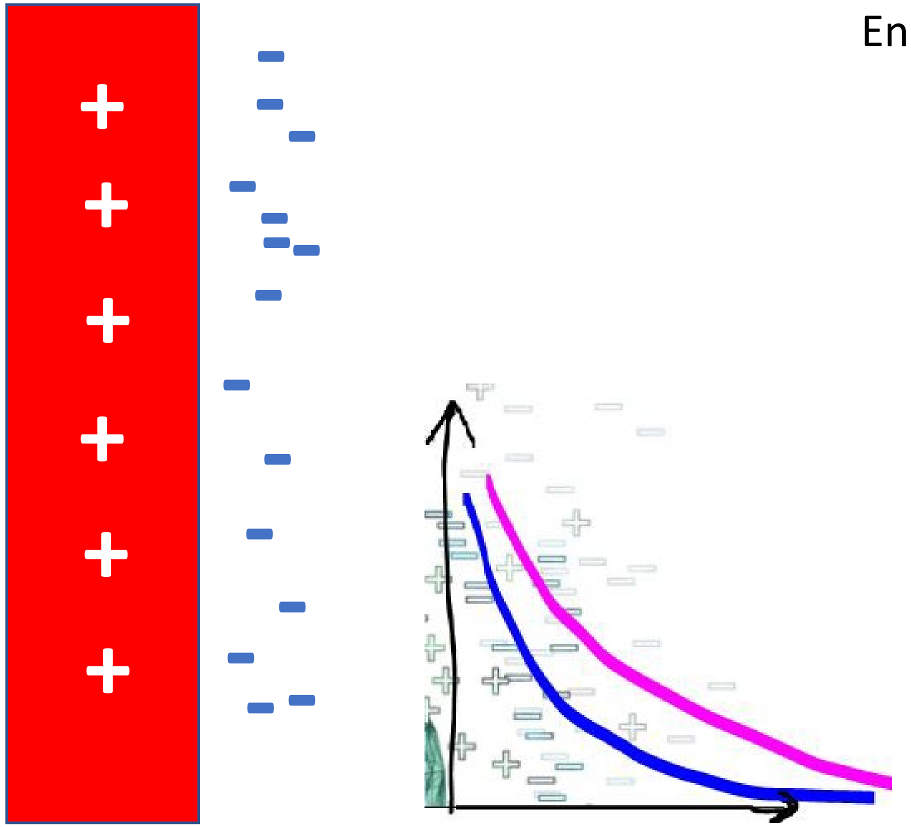


El efecto de sumergir un objeto cargado es que el potencial original se atenúa o apantalla, haciéndose más corto en su alcance.

Intuitivamente, la longitud de Debye cuantifica este rango de el potencial apantallado.

Longitud de debye:

¿ Cuál es la distribución de cargas final, cuando uno sumerge este objeto
En el plasma?



$$n_e = n_i = n_0$$

$$\nabla^2\Phi = -\frac{1}{\epsilon_0}\left[q_T\delta(\vec{r}) + en_i(\vec{r}) - en_e(\vec{r})\right]$$

Se resuelve la ecuación de Poisson con algunas suposiciones

$$\left.\begin{array}{l} \bullet m_e \to 0 \\ \bullet \vec{E} = -\nabla\Phi \\ \bullet T_e \simeq const \end{array}\right\} 0 \simeq e\nabla\Phi - T_e\frac{\nabla n_e}{n_e}$$

$$0 \simeq \nabla\left(e\Phi - T_e \log n_e\right) \quad \Rightarrow e\Phi - T_e \log n_e \simeq const \Rightarrow n_e = n_0 \exp\left(\frac{e\Phi}{T_e}\right)$$

Longitud de debye:

$$\nabla^2\Phi = -\frac{1}{\epsilon_0}\left[q_T\delta(\vec{r}) + en_i(\vec{r}) - en_e(\vec{r})\right]$$

$$\Phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_T}{r}\exp\left(-\frac{r}{\lambda_{De}}\right)$$

$$\cdot\; n_e = n_0 \exp\left(\frac{e\Phi}{T_e}\right)$$

$$\nabla^2\Phi = -\frac{1}{\epsilon_0}\left[q_T\delta(\vec{r}) + en_0 - en_0\exp\left(\frac{e\Phi}{T_e}\right)\right]$$

$$\frac{e\Phi}{T_e} \ll 1$$

$$\boxed{\lambda_{De} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{e^2 n_0}}}$$

Longitud de debye:

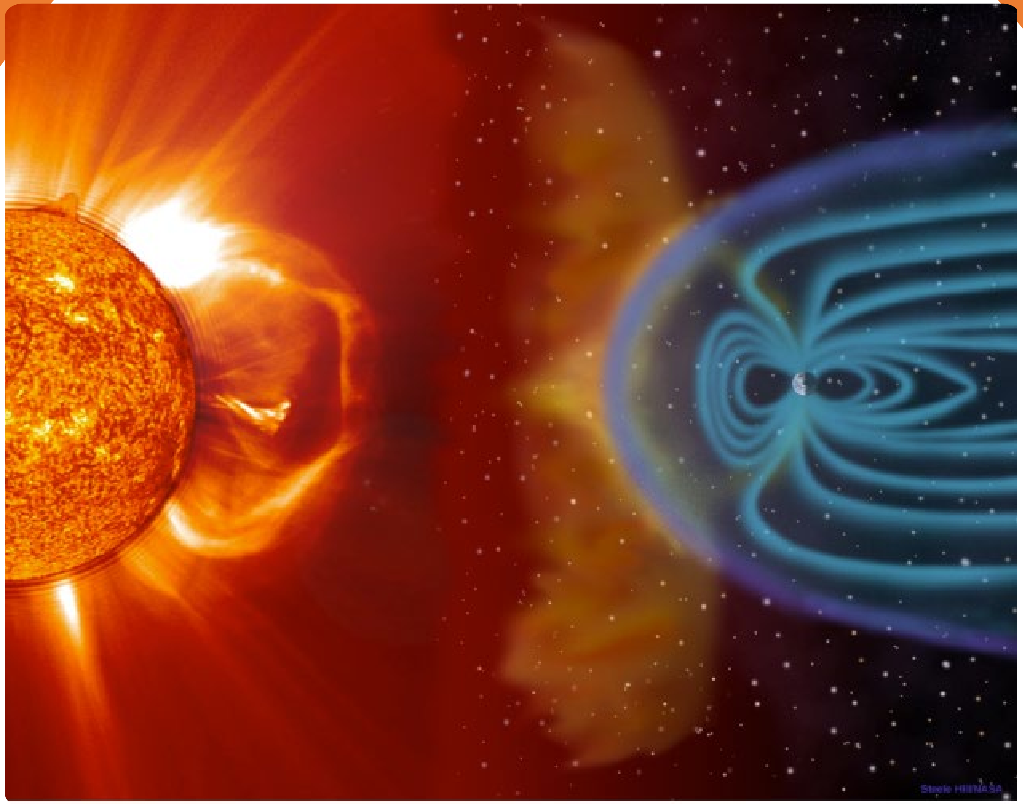
$$\boxed{\lambda_{De} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{e^2 n_0}}}$$

- La longitud de Debye es uno de los parámetros característicos y fundamentales de un plasma.
- Otro parámetro fundamental es la densidad de electrones
- El tercer parámetro esencial es la velocidad de los electrones y de los iones (Que no necesariamente son las mismas, dado que los plasmas no obedecen en general condiciones de equilibrio termodinámico)

La neutralidad de un plasma ocurre solo a distancias mayores de la longitud de Debye. Debajo de la longitud de Debye hay efectos de carga fuertes. Por esta razón a los plasmas se les denomina “ Cuasi Neutrales”

Algunos datos de plasmas característicos:

Plasma	Densidad n_e(m^{-3})	Temperatura de electrones T(K)	Campo magnético B(T)	Longitud de Debye λ_D(m)
Núcleo solar	10^{32}	10^{7}	--	10^{-11}
Tokamak	10^{20}	10^{8}	10	10^{-4}
Descarga de gas	10^{16}	10^{4}	--	10^{-4}
Ionosfera	10^{12}	10^{3}	10^{-5}	10^{-3}
Magnetosfera	10^{7}	10^{7}	10^{-8}	10^{2}
Viento solar	10^{6}	10^{5}	10^{-9}	10
Medio interestelar	10^{5}	10^{4}	10^{-10}	10
Medio intergaláctico	1	10^{6}	--	10^{5}



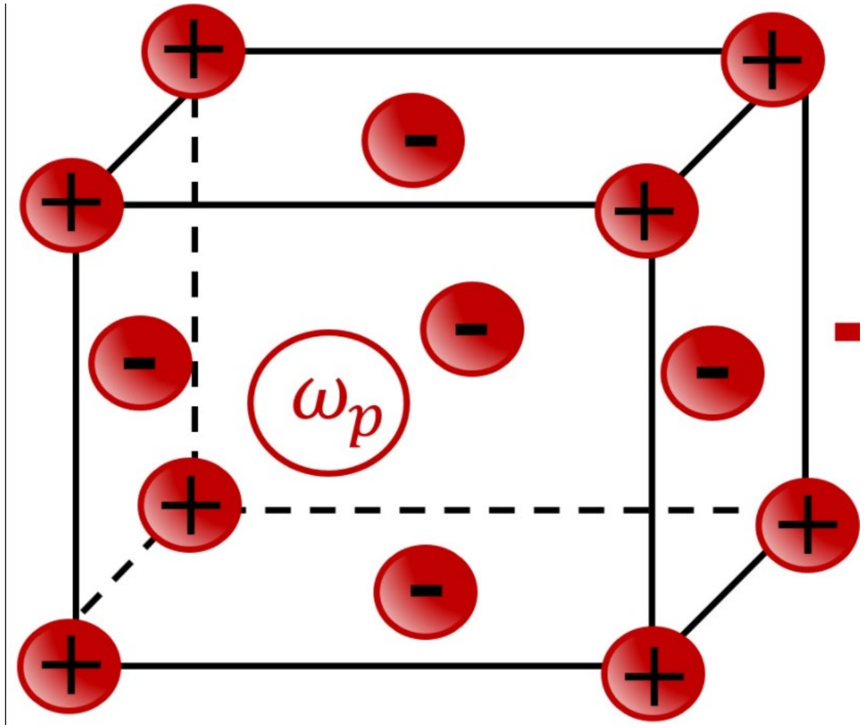
Conceptos fundamentales 2

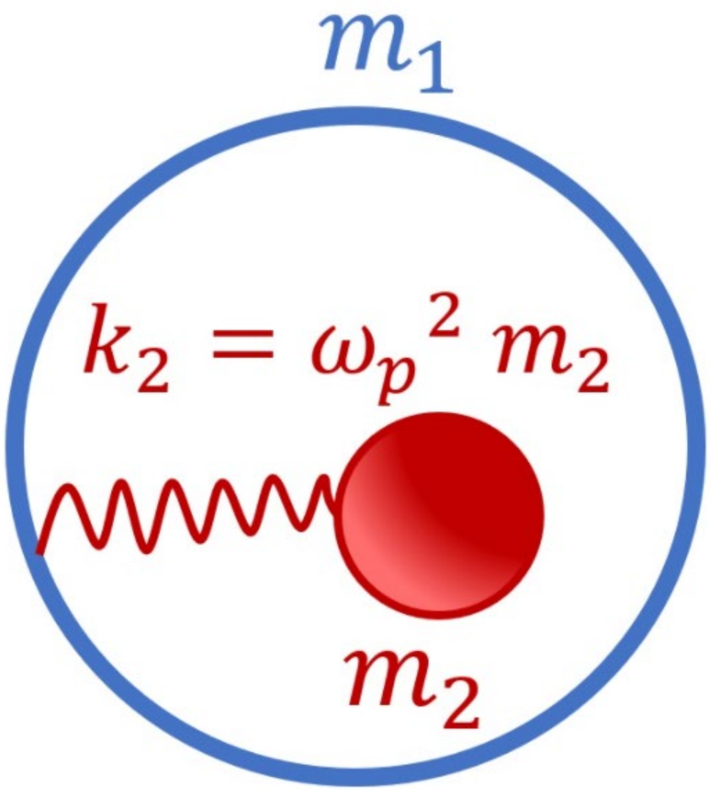
Frecuencia de plasma

Frecuencia de oscilación de plasmas

Consideren un plasma en el que se tienen la misma densidad volumétrica de iones que de electrones.

¿ Qué ocurre si desplazamos una pequeña distancia a las cargas negativas (más ligeras) de las positivas?



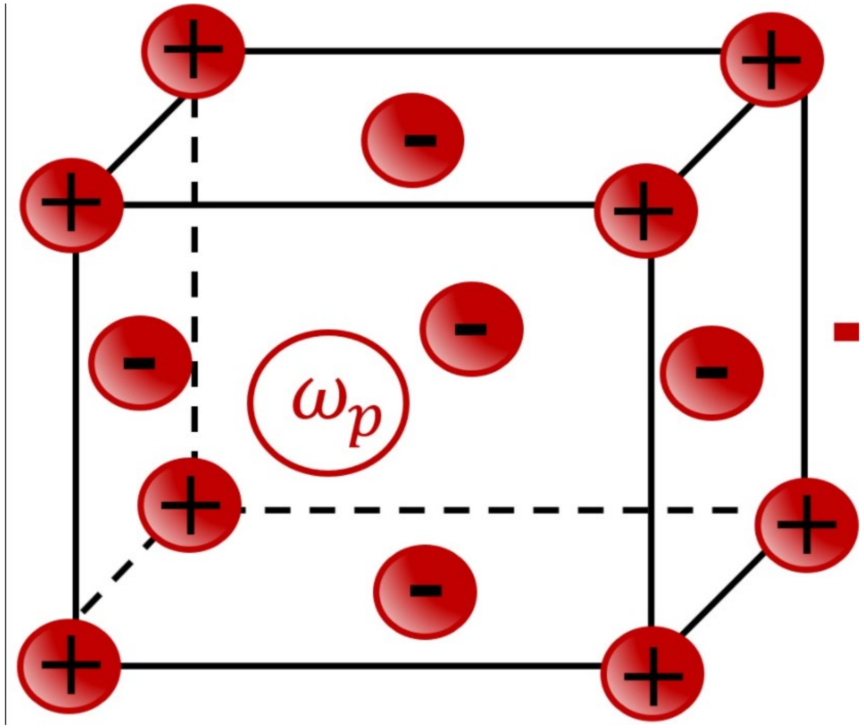


El potencial positivo creará una fuerza restitutiva y las partículas negativas oscilarán con movimiento armónico a una frecuencia w_p

Frecuencia de oscilación de plasmas

Consideren un plasma en el que se tienen la misma densidad volumétrica de iones que de electrones.

¿ Qué ocurre si desplazamos una pequeña distancia a las cargas negativas (más ligeras) de las positivas?



$$m_e \frac{\mathrm{d}^2 \Delta x}{\mathrm{d}t^2} = -eE = -\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0} \Delta x$$

El término de la derecha se puede deducir
Usando la ley de Gauss.

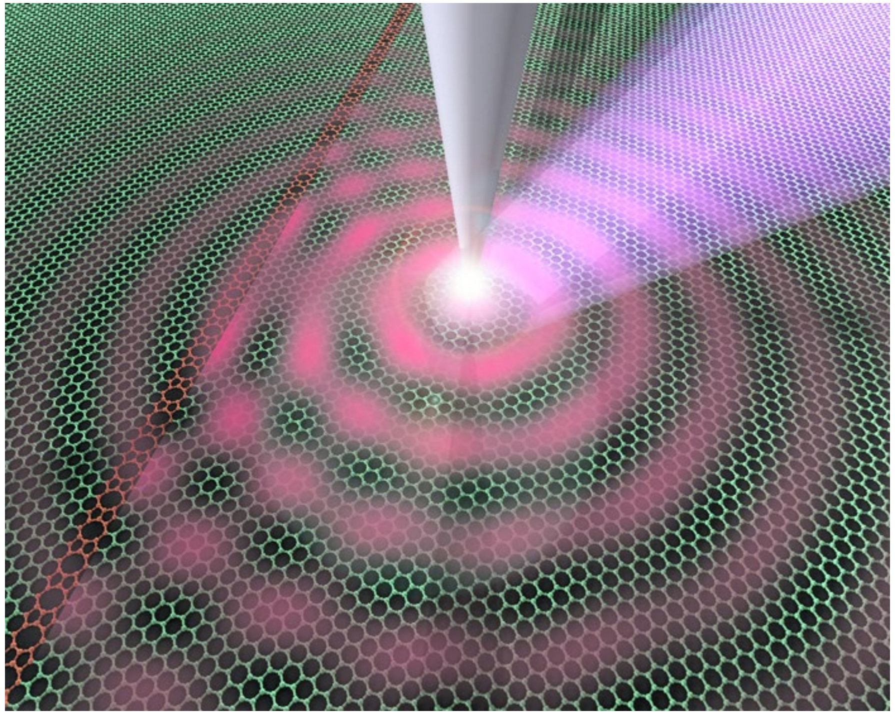
Resolviendo este sencillo
sistema de ecuaciones diferenciales se obtiene el valor
De la frecuencia de plasma:

$$\boxed{\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

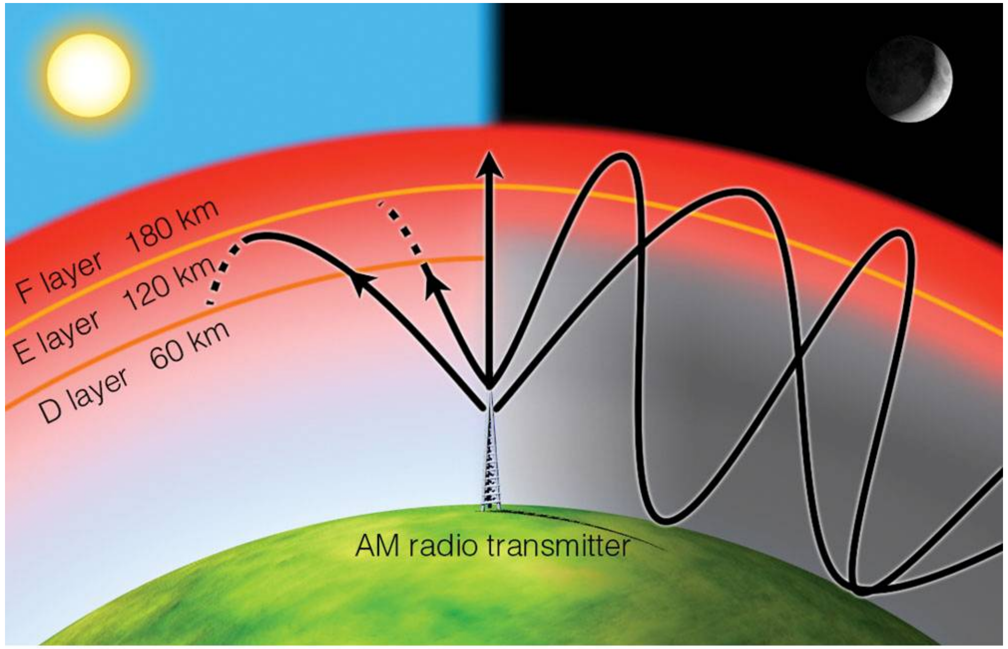
Frecuencia de oscilación de plasmas

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m_e}} = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 T_e}\frac{T_e}{m_e}} = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 T_e}}\sqrt{\frac{T_e}{m_e}} = \frac{v_{th,e}}{\lambda_{De}}$$

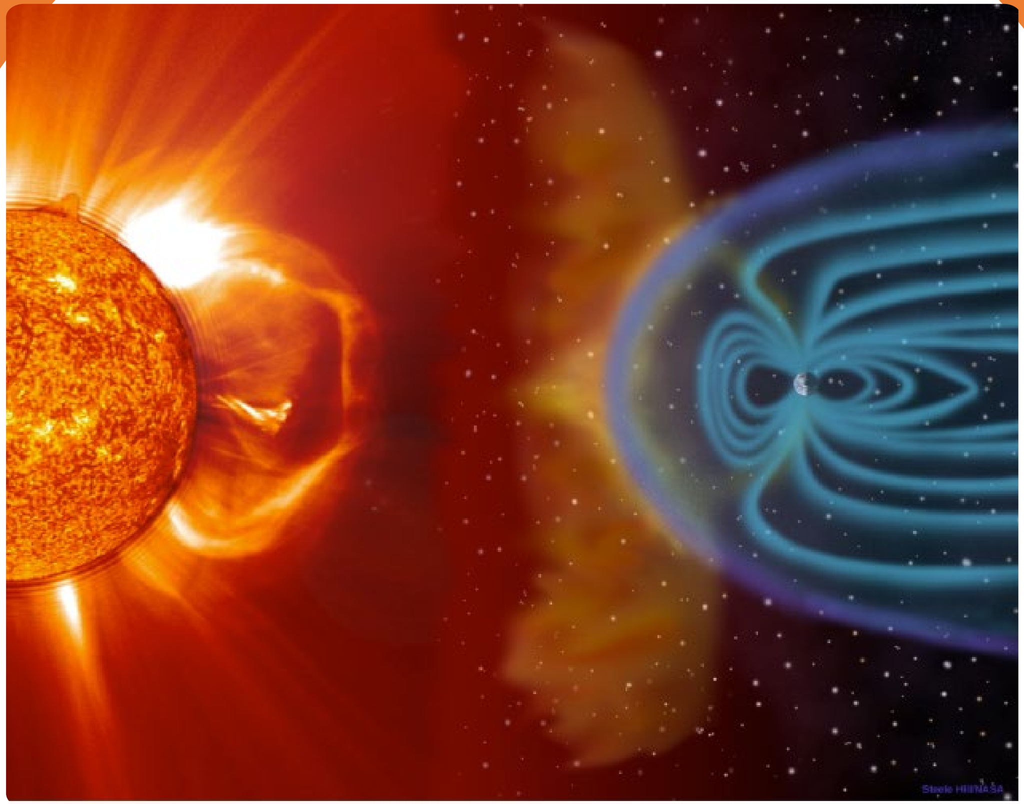
$$f_{pe} = 8980\sqrt{n_0}\ \mathrm{Hz}$$



Plasmones de superficie



Ondas de plasma en la ionosfera



Conceptos fundamentales 3

Descripción autoconsistente

Descripción formal para estudiar plasmas

He aquí TODA la física de Plasmas:

$$\vec{E}, \vec{B} \rightarrow \vec{F}_i$$

$$\vec{F}_i = q_i \left[\vec{E}(\vec{r}_i, t) + \vec{v}_i \wedge \vec{B}(\vec{r}_i, t) \right]$$

$$\vec{F}_i \rightarrow \vec{r}_i, \vec{v}_i \qquad \text{Newton law} \quad i = 1, 2, 3 \ldots N$$

$$m_i \frac{\mathrm{d}^2 \vec{r}_i}{\mathrm{d}t^2} = \vec{F}_i = q_i \left[\vec{E}(\vec{r}_i, t) + \vec{v}_i \wedge \vec{B}(\vec{r}_i, t) \right]$$

$$\rho, \vec{j} \rightarrow \vec{E}, \vec{B} \qquad \text{Maxwell equations}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \nabla \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\vec{r}_i, \vec{v}_i \rightarrow \rho, \vec{j}$$

$$\rho = \sum_{i=1}^{N} q_i \delta \left(\vec{r} - \vec{r}_i \right)$$

$$\vec{j} = \sum_{i=1}^{N} q_i \vec{v}_i \delta \left(\vec{r} - \vec{r}_i \right)$$

Descripción formal para estudiar plasmas

Los campos fundamentales E y B nos permiten calcular las fuerzas sobre cada una de las partículas cargadas
Del plasma:

$$\vec{E}, \vec{B} \rightarrow \vec{F}_i$$

$$\vec{F}_i = q_i \left[\vec{E}(\vec{r}_i, t) + \vec{v}_i \wedge \vec{B}(\vec{r}_i, t) \right]$$

$$\vec{r}_i, \vec{v}_i \qquad \text{Newton law}$$

$$i = 1, 2, 3 \ldots N$$

$$= \vec{F}_i$$

$$\rho, \vec{j} \rightarrow \vec{E}, \vec{B} \quad \text{Maxwell equat}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Descripción formal para estudiar plasmas

Esas fuerzas nos permiten calcular la dinámica de las partículas

$$\vec{E}, \vec{B} \rightarrow \vec{F}_i$$

$$\vec{F}_i = q_i \left[\vec{E}(\vec{r}_i, t) + \vec{v}_i \wedge$$

$$\vec{F}_i \rightarrow \vec{r}_i, \vec{v}_i$$

Newton law

$$i = 1, 2, 3 \ldots N$$

$$m_i \frac{\mathrm{d}^2 \vec{r}_i}{\mathrm{d}t^2} = \vec{F}_i$$

$$= q_i \left[\vec{E}(\vec{r}_i, t) + \vec{v}_i \wedge \vec{B}(\vec{r}_i, t) \right]$$

$$\vec{r}_i, \vec{v}_i \rightarrow \rho, \vec{j}$$

$$\vec{r_i}, \vec{v_i} \rightarrow \rho, \vec{j}$$

$$\rho = \sum_{i=1}^{N} q_i \delta\left(\vec{r} - \vec{r_i}\right)$$

$$\vec{j} = \sum_{i=1}^{N} q_i \vec{v_i} \delta\left(\vec{r} - \vec{r_i}\right)$$

Una vez que calculamos posiciones de todas las partículas, podemos calcular las densidades de carga y las densidades De corriente

Descripción formal para estudiar plasmas

$$\rho, \vec{j} \rightarrow \vec{E}, \vec{B} \quad \text{Maxwell equations}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \nabla \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Estas densidades de corriente y carga permiten calcular los campos de manera autoconsistente.

Plasma

Descripción formal para estudiar plasmas

Descripción formal para estudiar plasmas

$$\vec{E}, \vec{B} \rightarrow \vec{F}_i$$

$$\vec{F}_i = q_i \left[\vec{E}(\vec{r}_i, t) + \vec{v}_i \wedge \vec{B}(\vec{r}_i, t) \right]$$

$\vec{F}_i \rightarrow \vec{r}_i, \vec{v}_i$ Newton law $i = 1, 2, 3 \ldots N$

$$m_i \frac{\mathrm{d}^2 \vec{r}_i}{\mathrm{d}t^2} = \vec{F}_i = q_i \left[\vec{E}(\vec{r}_i, t) + \vec{v}_i \wedge \vec{B}(\vec{r}_i, t) \right]$$

$$\vec{r}_i, \vec{v}_i \rightarrow \rho, \vec{j}$$

$$\rho = \sum_{i=1}^{N} q_i \delta\left(\vec{r} - \vec{r}_i\right)$$

$$\vec{j} = \sum_{i=1}^{N} q_i \vec{v}_i \delta\left(\vec{r} - \vec{r}_i\right)$$

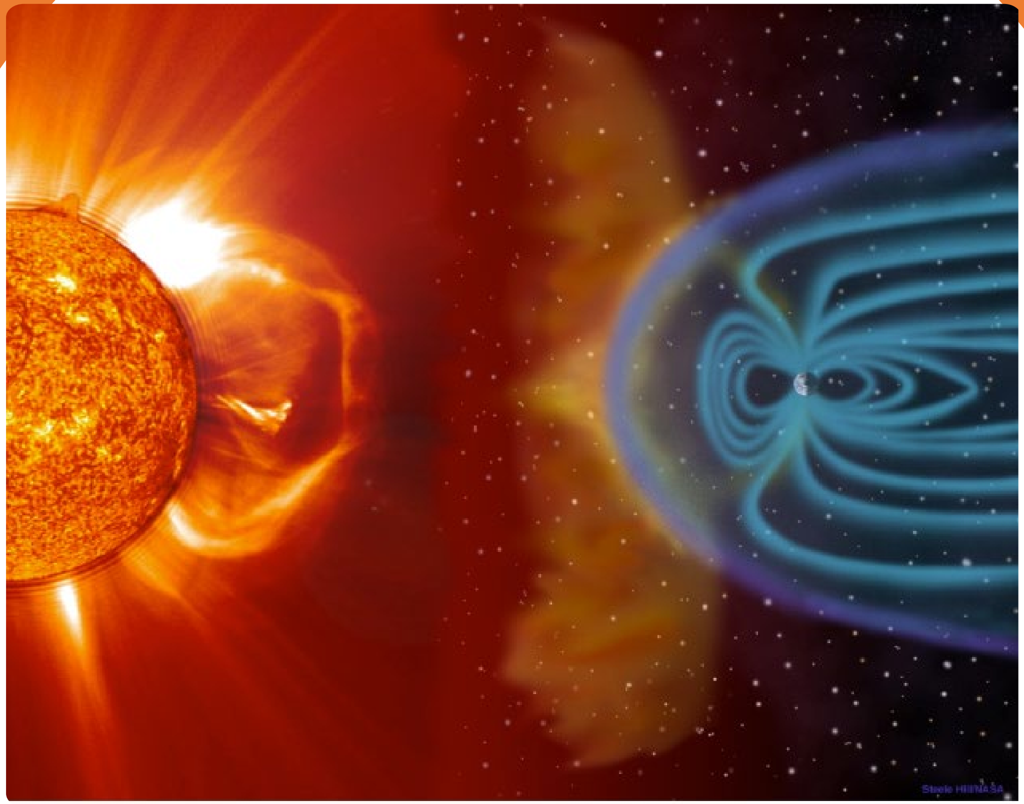
$\rho, \vec{j} \rightarrow \vec{E}, \vec{B}$ Maxwell equations

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \nabla \wedge \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Plasma

Este hermoso esquema es, sin embargo, imposible de llevar a cabo en la práctica.
No es posible resolver 10^{23} ecuaciones acopladas



Conceptos fundamentales 4

Ecuación de Boltzmann

Para poder resolver los problemas prácticos de plasmas hace falta entonces otra manera. Esto es, empleando funciones De distribución de densidad, carga, velocidades…

Definamos una distribución de partículas

$$f(\vec{r}, \vec{v}, t)d\vec{r}d\vec{v}$$

Donde f representa el número de partículas al tiempo t en el espacio fase de volumen $d\vec{r}d\vec{v}$

Centrado en r y v.

Con base en esta distribución podemos definir algunas cantidades útiles:

Para poder resolver los problemas prácticos de plasmas hace falta entonces otra manera. Esto es, empleando funciones De distribución de densidad, carga, velocidades…

Definamos una distribución de partículas

$$f(\vec{r}, \vec{v}, t)d\vec{r}d\vec{v}$$

Con base en esta distribución podemos definir algunas cantidades útiles:

Número total de partículas

$$N_S = \int d\vec{r} \int \vec{d}v f_S(\vec{r}, \vec{v}, t)$$

Densidad

$$n_S(\vec{r}, t) = \int d\vec{v} f_S(\vec{r}, \vec{v}, t)$$

Velocidad promedio

$$\vec{u_S} = \frac{1}{n_S} \int d\vec{v}\vec{v} f_S(\vec{r}, \vec{v}, t)$$

Ejemplo

$$F_0(\vec{v}) = n_0 \left(\frac{1}{2\pi v_{th}^2} \right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{v^2}{2v_{th}^2} \right)$$

$$F_0(v) = n_0 \left(\frac{1}{2\pi v_{th}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{v^2}{2v_{th}^2} \right)$$

Distribución de Maxwell Boltzmann

Si no hay fuentes o sumideros de partículas, podemos escribir la ecuación de conservación de partículas:

$$\frac{\partial f_S}{\partial t} = -\nabla_{6D} \cdot (\vec{u} f_S)$$

Con:

$$\nabla_{6D} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}, \frac{\partial}{\partial v_x}, \frac{\partial}{\partial v_y}, \frac{\partial}{\partial v_z} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial \vec{r}}, \frac{\partial}{\partial \vec{v}} \right)$$

$$\vec{u} = \left(\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}, \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} \right) = \left(\vec{v}, \frac{\vec{F}}{m_S} \right) = \left(\vec{v}, \frac{\vec{F}^{l.r.} + \vec{F}^{s.r.}}{m_S} \right)$$

Descripción formal para estudiar plasmas

Por lo tanto, nuestro principio de conservación de partículas en el espacio fase indica que:

$$\frac{\partial f_S}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial \vec{r}} \cdot (\vec{v} f_S) - \frac{\partial}{\partial \vec{v}} \cdot \left[\left(\frac{\vec{F}^{l.r.} + \vec{F}^{s.r.}}{m_S} \right) f_S \right]$$

Suponiendo que las velocidades son independientes de la posición, se llega a la siguiente ecuaciión

$$\boxed{\frac{\partial f_S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f_S}{\partial \vec{r}} + \frac{q_S}{m_S} \left(\vec{E}^{l.r.} + \vec{v} \wedge \vec{B}^{l.r.} \right) \cdot \frac{\partial f_S}{\partial \vec{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_c}$$

Esta es la ecuación de Boltzmann.

$$\boxed{\frac{\partial f_S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f_S}{\partial \vec{r}} + \frac{q_S}{m_S} \left(\vec{E}^{l.r.} + \vec{v} \wedge \vec{B}^{l.r.} \right) \cdot \frac{\partial f_S}{\partial \vec{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_c}$$

La física de plasmas se basa en parte en la solución de esta ecuación.

$$\int g_i(\vec{v}) \, [\mathrm{Boltzmann}] \, \mathrm{d}\vec{v} = 0$$

$$\boxed{\frac{\partial f_S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f_S}{\partial \vec{r}} + \frac{q_S}{m_S} \left(\vec{E}^{l.r.} + \vec{v} \wedge \vec{B}^{l.r.} \right) \cdot \frac{\partial f_S}{\partial \vec{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_c}$$

La física de plasmas se basa en parte en la solución de esta ecuación.

$$\int g_i(\vec{v}) \, [\mathrm{Boltzmann}] \, \mathrm{d}\vec{v} = 0$$

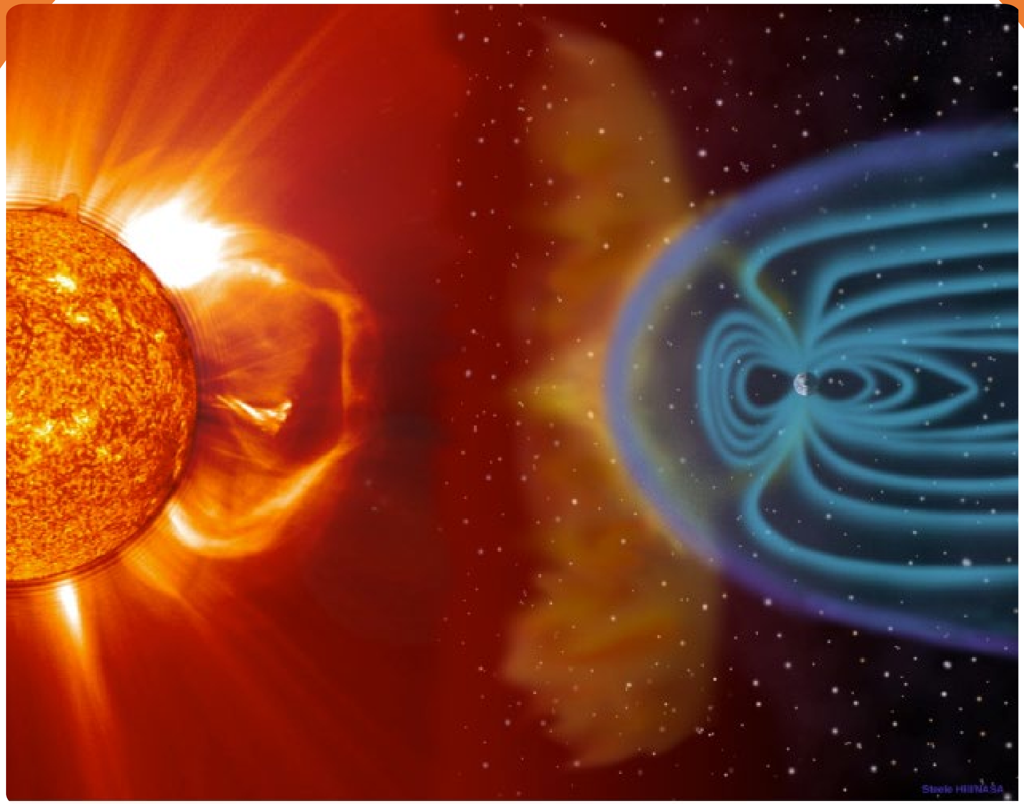
$$\boxed{\frac{\partial f_S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f_S}{\partial \vec{r}} + \frac{q_S}{m_S} \left(\vec{E}^{l.r.} + \vec{v} \wedge \vec{B}^{l.r.} \right) \cdot \frac{\partial f_S}{\partial \vec{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_c}$$

$$\int g_i(\vec{v}) \, [\mathrm{Boltzmann}] \, \mathrm{d}\vec{v} = 0$$

Continuidad $\rightarrow \quad g_1(\vec{v}) = 1$

Momento $\rightarrow \quad g_2(\vec{v}) = m_S \vec{v}$

Energía $\rightarrow \quad g_3(\vec{v}) = m_S \frac{v^2}{2}$



Aplicaciones de Física Molecular y Plasmas

(Mañana)