

# Termodinámica del plasma

Darío A. Castro Castro\*, Oleg G. Vásquez A.\*\*

## Resumen

*El plasma es un gas altamente ionizado que consiste de electrones e iones positivos. Puesto que el plasma consta de partículas cargadas su movimiento puede controlarse por campos magnéticos. El estudio termodinámico del plasma es una de las tres formas de estudiar el plasma; tanto el enfoque riguroso del estudio termodinámico, como las otras dos formas (teoría orbital y formulación hidromagnética) están más allá del alcance de este artículo.*

*Dentro de los fines de estudiar la termodinámica del plasma se encuentran, entre otros, obtener energía útil de las reacciones de fusión termonucleares controladas, producidas en el plasma; también se estudia la conductividad eléctrica y sus aplicaciones técnicas.*

## Abstract

*The plasma is a highly ionized gas it's composed of electrons and positive ions. Because it is made up of charge particles, its movement can be controlled by magnetic camps. The plasma termodinamic formulation is one of the three known ways of the plasma study; both the rigorous termodinamic approach, and the other two ways (orbit theory and hidromagnetic formulation) are outside of this articles reach same of the purposes of plasma termodinamic study are, to get useful energy of the controlled termonuclears fusion reactions, produced in the plasma, also the electric conductivity its technical applications ar studied.*

## 1. Generalidades

Se denomina «plasma» al gas ionizado en el cual todos o la mayoría de los átomos han perdido uno o varios electrones, transformándose en iones positivos. El plasma, en general, es una mezcla de tres componentes: electrones libres, iones positivos y átomos (o moléculas) neutras.

El plasma es el estado de la materia más difundido en el Universo. El Sol y las estrellas pueden ser considerados

cúmulos de plasma caliente. La superficie exterior de la atmósfera terrestre la ionosfera, está recubierta por una capa de plasma. Las zonas de radiación, ubicadas en el espacio circundante de la ionosfera, no son más que formaciones de plasma. Toda descarga gaseosa (relámpago, chispa, arco, etc.) está ligada a la aparición de plasma. En las auroras boreales, el principal actor es el plasma. La llama ordinaria, aunque en grado muy pequeño, está ionizada, es decir, es plasma.

Entre el plasma y un gas no existe una delimitación brusca. El plasma cumple las leyes de los gases, y en muchos sentidos se comporta como un gas. Sin embargo, cuando está sometido a un

\* Licenciado en Matemáticas y Física, Universidad del Atlántico. Profesor de Matemáticas, Universidad del Norte.

\*\* Licenciado en Matemáticas y Física, Universidad del Atlántico. Master en Proyectos Académicos.

potente campo magnético presenta unas cualidades nuevas y extraordinarias.

Una de las características del plasma consiste en que cuando está caliente ( $T \geq 10.000^\circ\text{K}$ ) casi no ofrece resistencia a la corriente eléctrica; su conductividad es grande. En el plasma frío ( $T < 10.000^\circ\text{K}$ ), por el contrario, la conductividad es muy baja.

El plasma se confina en las denominadas trampas magnéticas, puesto que ninguna pared sólida puede resistir ni un breve instante la temperatura del plasma.

Son muchas las aplicaciones del plasma, entre las cuales se cuenta el recubrimiento plásmico y la síntesis termonuclear controlada. La investigación de los fenómenos que se producen en el plasma presenta interés no sólo en relación con sus diferentes aplicaciones. La tarea de la física consiste en explicar el mecanismo de aquellos procesos que pueden producirse en este medio.

## 2. Temperatura del plasma

La Termodinámica es la ciencia que estudia las propiedades y el comportamiento de los sistemas que se hallan en estado de equilibrio térmico.

En un medio denso, los choques entre las partículas hacen que el estado de equilibrio se establezca rápidamente. Por el contrario, en el plasma enrarecido (poco denso), donde los choques son poco frecuentes, pueden existir durante mucho tiempo estados que distan

mucho de ser de equilibrio. En el plasma totalmente ionizado, la probabilidad de los choques entre partículas disminuye rápidamente al aumentar la temperatura. Por esto se puede decir que en el plasma frío ( $T \leq 10.000^\circ\text{K}$ ) denso, y en particular el que está débilmente ionizado, se encuentra en estado de equilibrio térmico. Las propiedades de este plasma se pueden definir valiéndose de la Termodinámica. Por el contrario, el plasma caliente enrarecido y totalmente ionizado puede encontrarse durante mucho tiempo en estado de \*desequilibrio.

El concepto fundamental de la Termodinámica es la Temperatura, magnitud que caracteriza la distribución de energía entre partículas de la sustancia.

En la Física Estadística, la temperatura se define como una magnitud inversamente proporcional al módulo de la así llamada distribución canónica:

$$\frac{1}{\beta} = KT$$

Por la temperatura se determina el valor medio de la energía térmica que le corresponde a cada grado de libertad del movimiento de las partículas.

Si la temperatura se mide en unidades ordinarias, es decir, en grados de la escala de temperatura absoluta de Kelvin, la energía media correspondiente a un grado de libertad será igual a  $KT/2$ . La energía media de las partículas simples (carecen de grados internos de li-

bertad) es igual  $3KT/2$ . En el plasma totalmente ionizado, los electrones y los iones sólo pueden tener movimiento de traslación. Por lo tanto, la energía térmica de un plasma totalmente ionizado que se encuentre en equilibrio es:

$$E = \frac{3}{2} KT$$

donde E es la energía de una partícula.

Desde el punto de vista termodinámico, el plasma se comporta, como un gas perfecto si la energía de interacción entre las partículas es pequeña comparada con la energía térmica, con la particularidad de que la energía total del plasma coincidirá prácticamente con su energía térmica y la presión podrá hallarse por medio de la ecuación de estado de los gases ideales:

$$p = (n_e + n_i)KT$$

siendo  $n_e$  y  $n_i$  respectivamente, las concentraciones de electrones e iones.

También es conveniente medir la temperatura en unidades energéticas. En este caso, se entiende por «temperatura» la magnitud  $KT$ , la cual, de acuerdo con el principio de equipartición de la energía, es igual a la energía media correspondiente a dos grados de libertad del movimiento de las partículas de la sustancia. En física del plasma se toma la constante de Boltzman igual a la unidad. Como unidad energética de temperatura se toma generalmente el electrón-voltio:

$$1\text{ev} = 1.6 \times 10^{-12}\text{erg} = 11.600^\circ\text{K}$$

Para el plasma caliente se utiliza el Kev. El plasma posee una temperatura determinada sólo si se encuentra en estado de equilibrio termodinámico total. Muy frecuentemente en el plasma hay que tratar con el equilibrio termodinámico parcial. Así, el intercambio de energía entre electrones e iones sucede mucho más lentamente que el intercambio entre partículas de masas próximas (parecía). Por eso, en un plasma no muy denso puede existir durante largo tiempo un estado caracterizado por dos temperaturas: la electrónica,  $T_e$ , y la iónica  $T_i$ . Al plasma con  $T_e = T_i$  se llama isotérmico.

La presión del plasma se halla por la correlación

$$p = 1.6 \times 10^{-12} (n_e + n_i) T$$

### 3. Equilibrio térmico

Cuando las densidades son pequeñas, el plasma no se encuentra en equilibrio térmico. Cuando el plasma no está en equilibrio térmico, diferentes partículas se moverán en él con distinta energía, y hablar de que el plasma tiene una temperatura determinada no tiene sentido.

Cuando las densidades son mayores puede darse un estado de equilibrio térmico parcial. Cuando la densidad del plasma es suficientemente elevada, éste debe entrar pronto en un estado de equilibrio termodinámico total, en el cual las temperaturas electrónicas e

iónicas sean iguales. Pero si la densidad sigue aumentando, las propiedades termodinámicas del plasma pueden variar, en cuyo caso éste dejará de comportarse como un gas ideal. Esta desviación de las leyes de los gases ideales depende de dos fenómenos nuevos cuya importancia se pone de manifiesto únicamente cuando las densidades son grandes. Estos fenómenos son: la interacción electrostática y la degeneración. En este trabajo sólo se estudiará la influencia de la interacción electrostática en el plasma.

#### 4. Energía térmica e interacción electrostática en el plasma

En cuanto a los principios termodinámicos, el plasma se diferencia del gas ideal en que además de la energía térmica, en él puede resultar esencial la energía de interacción electrostática, es decir, por la energía potencial de sus acciones mutuas.

En el plasma, cada partícula cargada está rodeada de una «atmósfera», en la que hay un exceso de partículas de signo contrario, que apantalla su campo eléctrico.

La distancia a la que tiene lugar este apantallamiento es del orden de la escala espacial de separación de las cargas.

La distancia de pantalla  $h$  (llamada longitud de Debye) se puede escribir como:

$$h = \frac{1}{2e\sqrt{\pi Z}} \sqrt{\frac{T}{n}}$$

$$\text{donde } Z = \frac{\sum n_k Z_k^2}{n}$$

se aproxima al número atómico medio de los iones, y  $n = n_e + n_i$  es la concentración total de las partículas.

La expresión de  $h$  indica que la distancia de pantalla será tanto mayor cuanto mayor sea la temperatura y menor la densidad del plasma.

En el plasma denso, la distancia de pantalla, incluso a altas temperaturas, es muy pequeña. En este caso, la energía del plasma disminuye debido a la atracción mutua entre cada partícula y la «atmósfera» con exceso de cargas de signo contrario que la rodea.

La energía correspondiente a cada partícula viene dada por

$$E = -\sqrt{\pi} e^3 (\bar{Z})^{3/2} \sqrt{\frac{n}{T}}$$

Esta magnitud recibe el nombre de energía electrostática, y es negativa, como toda energía de atracción. La energía electrostática es comparable a la que tendría el plasma si todas sus partículas con cargas de signo contrario se atrajeran desde una distancia igual a la de pantalla.

La relación entre la energía electrostática y la térmica será

$$\frac{\Delta E}{T} = 1.0 \times 10^{-10} \sqrt{n} \left( \frac{\bar{Z}}{T} \right)^{3/2}$$

El plasma se comportará como un gas ideal si

$$\frac{\Delta E}{T} \leq 1$$

o sea, cuando las densidades son suficientemente pequeñas o las temperaturas suficientemente altas.

La disminución de la energía del plasma va acompañada de una disminución de su presión que puede ser calculada por las fórmulas de la Termodinámica. Mientras la energía electrostática es pequeña en comparación con la térmica, la presión disminuye en la magnitud.

$$\Delta p = e_k/3$$

$$\text{donde } e_k = E \cdot n$$

La cantidad de partículas que entran en la esfera que tiene radio igual a la longitud de Debye (esfera de Debye) es inversamente proporcional a la relación que existe entre las energías electrostática y térmica:

$$\frac{4}{3} \pi h^3 \cdot n = \frac{1}{6} \cdot \frac{T}{\Delta E}$$

De esta manera, todas las fórmulas dadas anteriormente sólo sirven para comprobar hasta qué densidades puede aplicarse al plasma la Termodinámica del gas perfecto. Pasado este límite entramos en una región en la que el plasma se comporta como un gas comprimido o como un líquido calentado hasta una temperatura mayor que la crítica. En esta región, las propiedades del plasma no se pueden definir por medio de las leyes de la termodinámica.