

# Lección 12: El más pequeño común en las leyes de la naturaleza

## Resumen

Los métodos experimentales van acompañados de modelos teóricos. Los descubrimientos llevan a mejorar gradualmente las teorías o también al abandonarlas por completo aunque parezcan generalmente aceptadas durante mucho tiempo. El estado actual en la física sigue enfrentándose a problemas aún no resueltos. Por un lado, se encuentra el caso menos fundamental de los problemas cuya solución puede, en principio, ser aproximada. Por otro lado, hay problemas para los cuales no se ve ninguna solución y tampoco está del todo claro si alguna vez existirá una solución.

## Tabla de contenidos

- Folio 2: La ley de la refracción
- Folio: 3: La termodinámica y la ley de desplazamiento según Wien
- Folio 4: La ley de radiación de Planck
- Folio 5 – 6: Cálculo de las constantes en las leyes de radiación (1-2)
- Folio 7: La tercera ley de Kepler
- Folio 8: La ley de Coulomb
- Folio 9: Leyes de conducción de corriente en semiconductores dopados
- Folio 10 – 13: Semiconductores – el diodo (1-4)
- Folio 14: Semiconductores – los transistores
- Folio 15 – 16: Las constantes fundamentales (1-2)
- Folio 17: Sinopsis

# La ley de la refracción

Una primera descripción cualitativa de los fenómenos observados en la naturaleza se expresa en forma de una ecuación con la ayuda de una o varias constantes. Para las predicciones cuantitativas, estas constantes deben determinarse numéricamente. Sin embargo, la comprensión física sólo se logra cuando dichas constantes empíricas se reducen al mínimo en la medida de lo posible. Esto tiene éxito en muchos casos, pero no siempre. Las constantes que no pueden reducirse más desde el punto de vista actual y cuyo valor numérico no puede derivarse de consideraciones teóricas pueden denominarse constantes fundamentales. Esto aparece en distintas áreas con diferentes constantes. A continuación se presentan algunos ejemplos de diferentes campos físicos. La ley de la refracción en la óptica es un buen comienzo.

$$\frac{\sin \alpha_{vacio}}{\sin \alpha_{medio}} = constante = n = \frac{c}{c_{medio}}$$

$n$ : índice de refracción



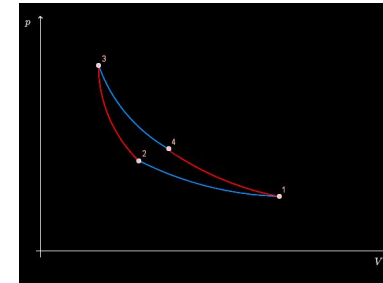
# La termodinámica y la ley de desplazamiento según Wien

Otro ejemplo lo puede encontrar en el campo de los motores térmicos para el producto de la presión y el volumen de un gas.

$$p \cdot V = \text{constante} = N \cdot kT$$

$N$ : número de átomos o moléculas

$kT$ : energía térmica ( $k$ : constante de Boltzmann,  $T$ : temperatura absoluta)

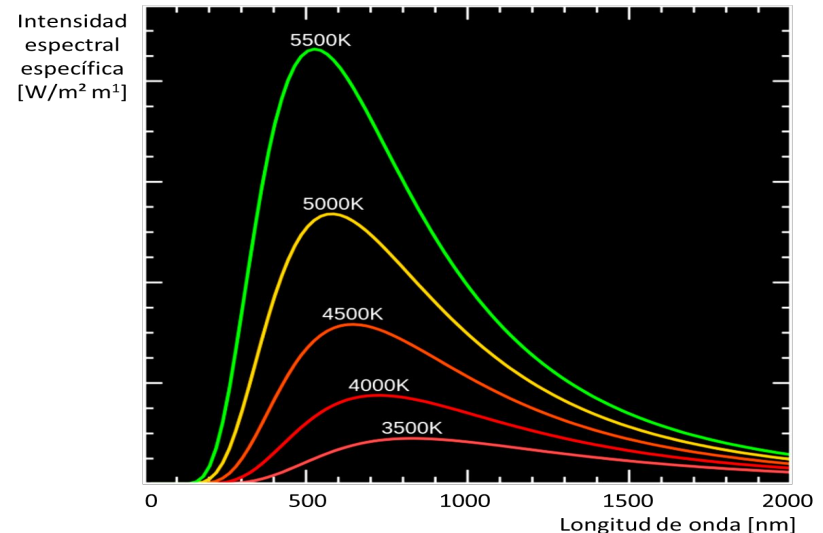


Otro ejemplo lo encontramos en las leyes de la radiación: la ley de desplazamiento de Wien.

$$\lambda_{\text{máximo}} \cdot T = \text{constante}$$

medición empírica:

$$\text{constante} = 2.9 \cdot 10^6 \text{ nm K}$$



# La ley de radiación de Planck

La ley establece que el producto de la longitud de onda  $\lambda_{m\acute{a}ximo}$  y la temperatura absoluta  $T$  donde un cuerpo negro emite la radiación más intensa es una constante. Con la formulación posterior de la ley de radiación de Planck se pudo entender este valor numérico empírico y derivarlo de otras constantes.

La ley de radiación de Planck (intensidad radiante en vatios por área y longitud de onda  $[W/m^2 \cdot m]$ ):

$$I(\lambda, T) = \frac{2 \cdot hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}} - 1}$$

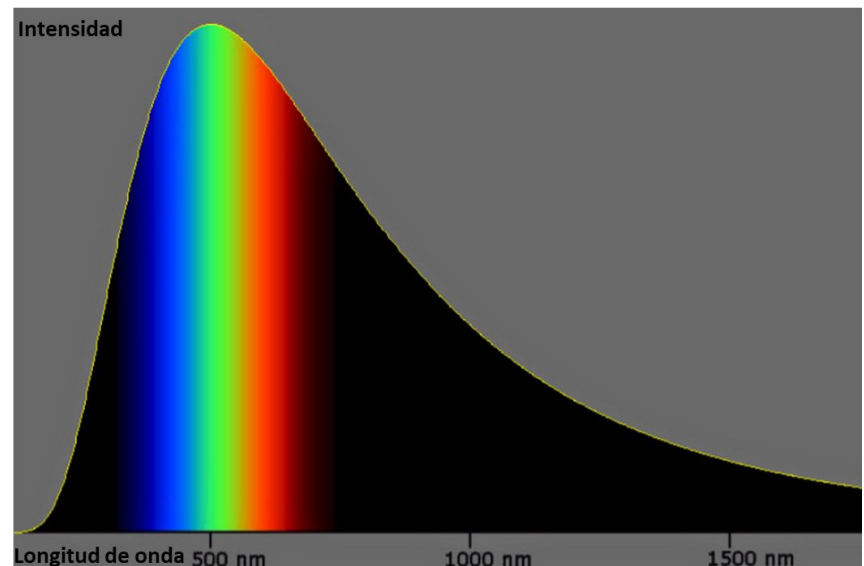
$\lambda$ : longitud de onda

$T$ : temperatura absoluta

$c$ : velocidad de la luz

$h$ : constante de Planck

$k$ : constante de Boltzmann



# Cálculo de las constantes en las leyes de radiación (1)

Para obtener la ley de desplazamiento de Wien, hay que calcular la longitud de onda en la cual la función de Planck alcanza su máximo. Es decir, la función tiene que ser derivada ( $d/d\lambda$  *con la regla del cociente*) y puesta a cero para obtener el valor extremo.

$$2 \cdot hc^2 \cdot \left( \frac{hc}{\lambda^7} \cdot \frac{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}}}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}} - 1\right)^2} - \frac{1}{\lambda^6} \cdot \frac{5}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}} - 1\right)} \right) = 0$$

$$\frac{hc}{\lambda \cdot kT} \cdot \frac{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}}}{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot kT}} - 1} - 5 = 0$$

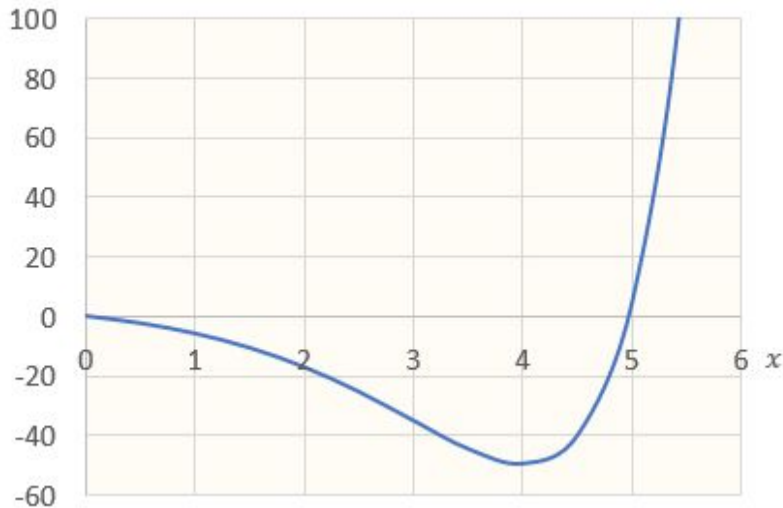
$$\text{sustitución: } x = \frac{hc}{\lambda \cdot kT}$$

$$(x - 5) \cdot e^x + 5 = 0$$

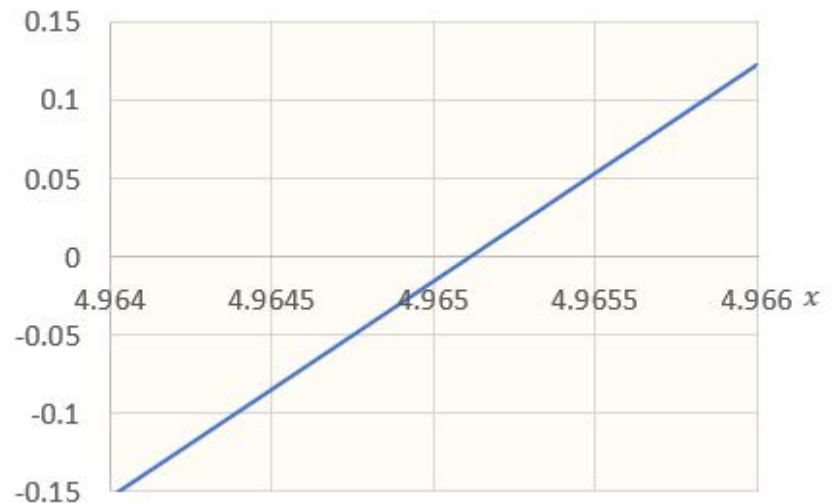
# Cálculo de las constantes en las leyes de radiación (2)

La ecuación del valor extremo puede solucionarse gráficamente o numéricamente.

$$y = (x-5) \cdot e^x + 5$$



$$y = (x-5) \cdot e^x + 5$$



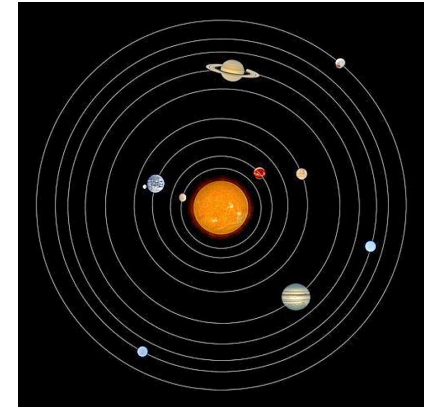
$$x = 4.965114$$

$$\lambda_{\text{máximo}} \cdot T = \frac{hc}{x \cdot k} = 2.89777 \cdot 10^6 \text{ nm K}$$

# La tercera ley de Kepler

Las leyes de Kepler son las principales leyes de la órbita de los planetas alrededor del Sol. Por tanto, la tercera ley establece que los cuadrados de los períodos orbitales  $T$  de dos planetas se comportan como las terceras potencias de los grandes semiejes  $a$  de sus elipses orbitales.

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{constante}$$



Posteriormente, Isaac Newton pudo demostrar que las tres leyes de Kepler dan la solución exacta del movimiento de un cuerpo bajo la acción de la gravitación. Esto se considera un paso importante en el desarrollo de la ciencia moderna.

$$F_{\text{gravitación}} = G \cdot \frac{M_{\text{sol}} \cdot m_{\text{planeta}}}{a^2} = m_{\text{planeta}} \cdot \omega^2 \cdot a$$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4 \cdot \pi^2}{G \cdot M}$$

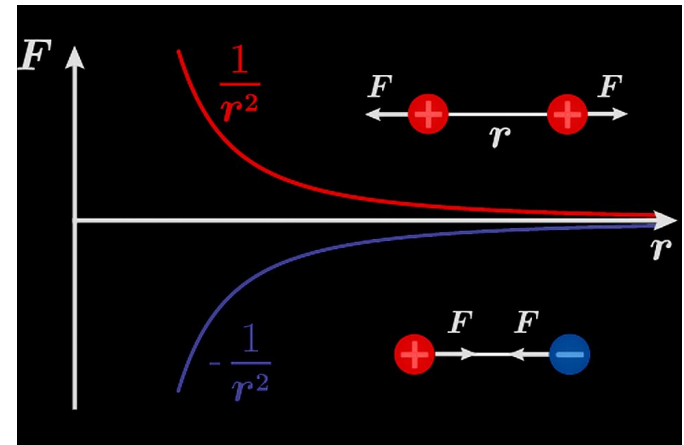
$G$ : constante de gravitación

# La ley de Coulomb

Una ley estructurada de forma similar describe las fuerzas de atracción o repulsión entre las cargas eléctricas, la ley de Coulomb.

$$F_{Coulomb} = 10^{-7} \left[ \frac{N}{A^2} \right] \cdot c^2 \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}$$

El primer término es una constante del sistema de medición utilizado; hay que multiplicarlo por el cuadrado de la velocidad de la luz, seguido de la ley cuadrática de la distancia. Las fuerzas de repulsión de cargas similares obligan medidas de focalización cuando, por ejemplo, los electrones, protones o iones son acelerados por altas velocidades para realizar experimentos. Las estructuras de los aceleradores lineales utilizan imanes cuadrupolares por los que el haz vuela a lo largo de su eje. Aquí, los elementos de enfoque están dispuestos alternativamente con los electrodos de aceleración.



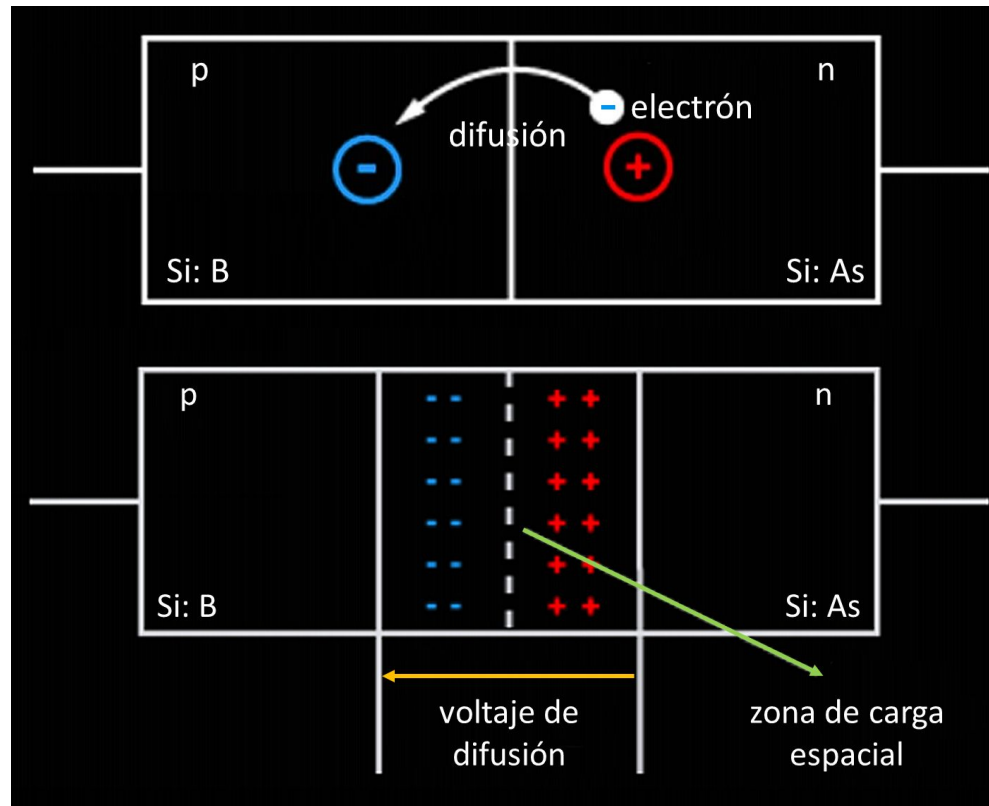


# Leyes de conducción de corriente en semiconductores dopados

Si los materiales se caracterizan según su conductividad eléctrica, los semiconductores se encuentran entre los metales y los aislantes. Desde el punto de vista químico, los semiconductores son elementos del cuarto grupo del sistema periódico (Ge, Si) o compuestos de elementos del tercer y quinto grupo (GaAs, InP). Los semiconductores pueden modificar sus propiedades eléctricas sustituyendo elementos de grupos vecinos del sistema periódico. En el caso del silicio (el material más utilizado), se trata de arsénico (As) o de fósforo (P) para producir un exceso de carga de electrones fácilmente movable a la temperatura del ambiente. Esto se llama conductividad negativa o dopaje n. La sustitución del silicio por boro (B) o galio (Ga) produce vacantes de electrones ligeramente móviles, que pueden interpretarse como conducción de huecos o movimiento de cargas positivas. Los materiales con esta propiedad son p-dopados. Si en un cristal de silicio se encuentran una región dopada con n y una región dopada con p, los electrones se difunden hacia la parte dopada p del cristal debido al gradiente de concentración, dejando huecos en la región dopada n.

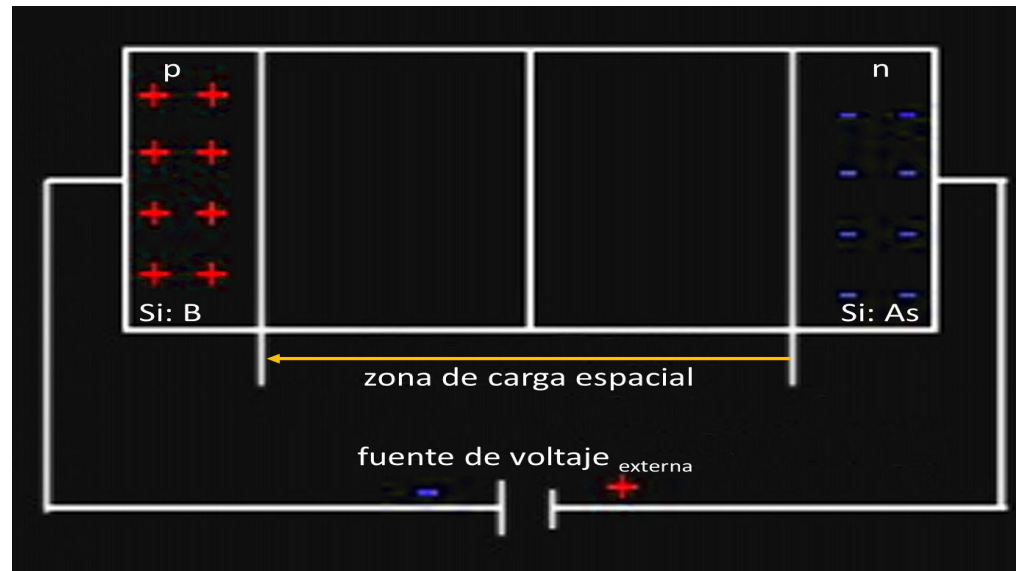
# Semiconductores – el diodo (1)

Esto forma la llamada zona de carga espacial, que está agotada de portadores de carga y, en consecuencia, tiene una resistencia eléctrica muy alta.



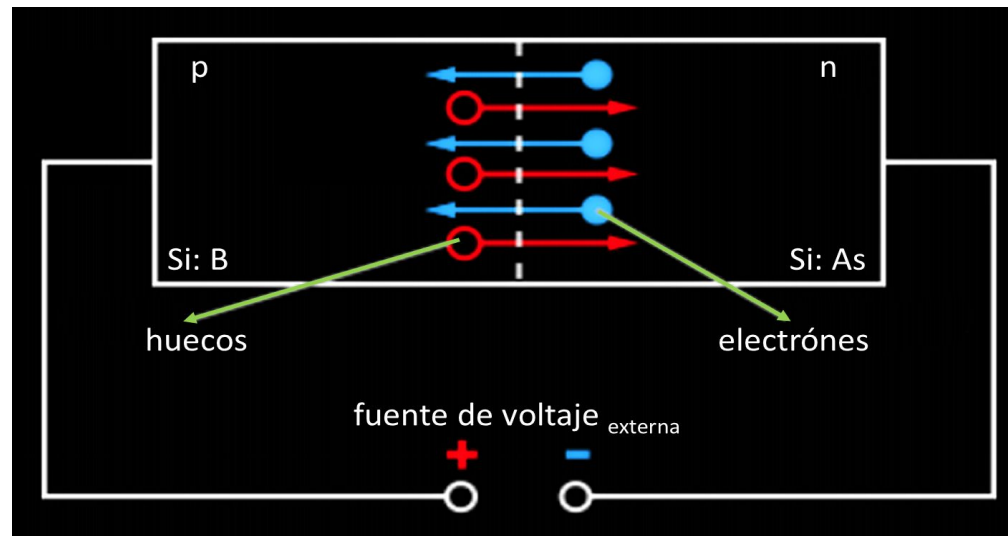
# Semiconductores – el diodo (2)

Aplicando una fuente de voltaje externa en la dirección inversa (- al lado del cristal p, Silicio dopado con Boro, + al lado del cristal n, Silicio dopado con Arsénico, ), se refuerza el campo eléctrico de la unión y aumenta la expansión de la zona de carga espacial. Los huecos y los electrones se alejan de la unión. Sólo fluye una corriente muy pequeña, generada por portadores de carga minoritarios (corriente inversa), a menos que se supere la voltaje de ruptura.



# Semiconductores – el diodo (3)

Cuando la polaridad está en la dirección de avance (+ en el cristal p, - en el cristal n), la barrera de potencial se elimina. El campo eléctrico de la unión se neutraliza por completo a partir de una determinada voltaje aplicada, que permite el transporte de carga a través de todo el cristal. Las nuevas cargas pasan de la fuente externa a la unión p-n y se recombinan aquí continuamente. Este dispositivo se llama diodo, que hace pasar una gran corriente eléctrica en una dirección.



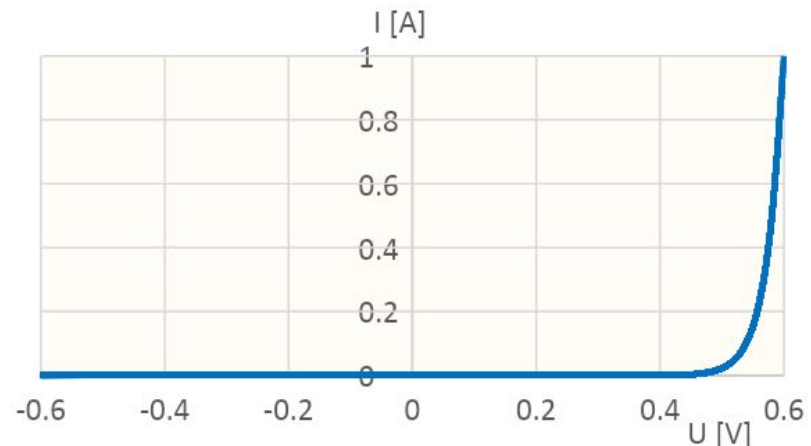
# Semiconductores – el diodo (4)

El voltaje  $U_T$  a través de la zona de carga espacial en un cristal semiconductor dopado p-n resulta de la energía térmica de los electrones.

$$U_T = \frac{kT}{e}$$

Por la temperature del ambiente se calcula

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

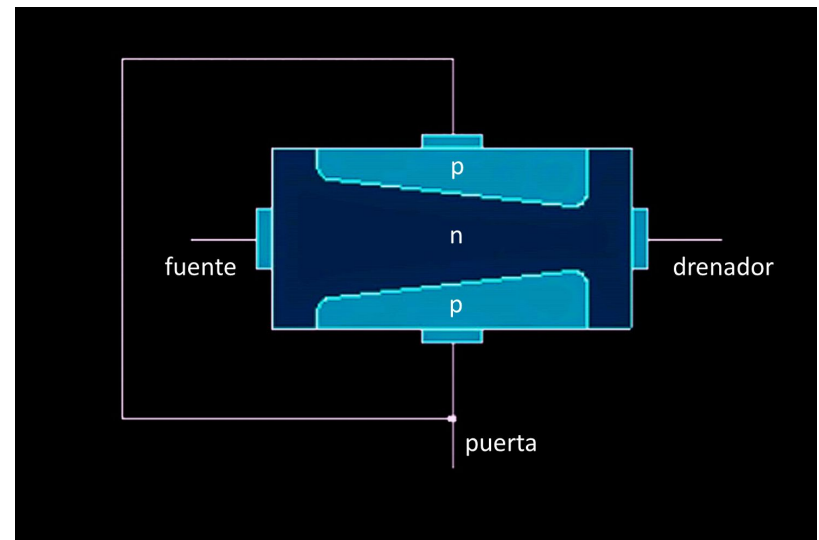
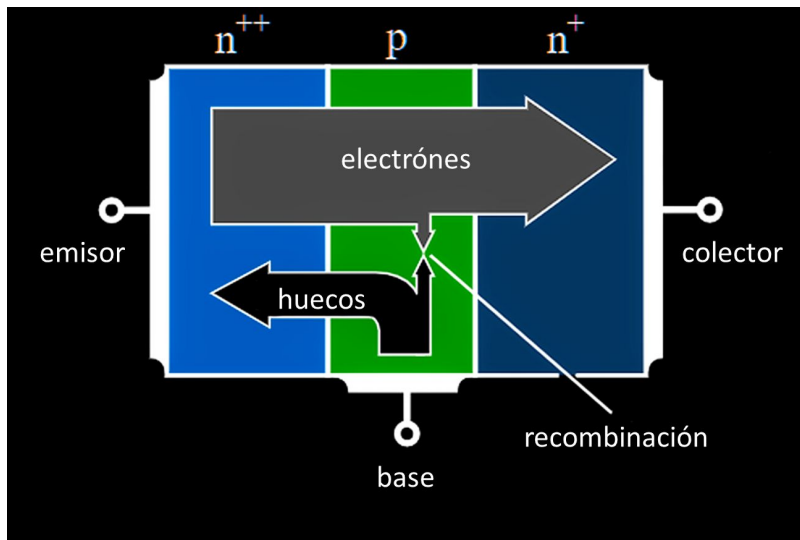


La ecuación de Arrhenius describe aproximadamente la dependencia de la temperatura de los procesos físicos y químicos en los cuales hay que superar una energía de activación. Esto permite calcular en una forma sencilla la corriente de avance  $I$  de un diodo como función del voltaje  $U$  ( $I_{inversa} \approx 10^{-10} \text{ A}$ ):

$$I \approx I_{inversa} \cdot e^{\frac{U}{U_T}} = I_{inversa} \cdot e^{\frac{eU}{kT}}$$

# Semiconductores – los transistores

Al incorporar una tercera capa conductora, se puede controlar la corriente que atraviesa el cristal dopado. Este principio es la base de todos los dispositivos electrónicos. Existen dos tipos: el transistor, con control por la corriente de la base, y el transistor de efecto campo, con control por el voltaje de la puerta.



# Las constantes fundamentales (1)

De los ejemplos se deduce que ciertas constantes se repiten una y otra vez y las regularidades relacionadas con ellas han demostrado ser leyes de la naturaleza. Por ejemplo, la velocidad de la luz como velocidad máxima está relacionada con los efectos relativistas, es decir, con los fenómenos a grandes escalas cósmicas en el macrocosmos. La constante de Planck es la porción más pequeña de energía que se puede intercambiar, es decir, representa la unidad más pequeña del microcosmos. La ley de la gravedad de Newton requiere la constante gravitatoria, que viene determinada por la masa total del universo. El acoplamiento entre la luz y la materia está ligado a la carga eléctrica, es decir, a la carga elemental más pequeña posible. El electrón siempre lleva la carga  $e$ . La relación entre la energía y el calor también muestra una limitación que, sencillamente, prohíbe fundamentalmente la construcción de una máquina de movimiento perpetuo. Estas propiedades son atribuidas a la constante de Boltzmann.

# Las constantes fundamentales (2)

Constante fundamental	Función	Teoría
<b><math>G</math> constante de la gravitación</b>	existencia del macrocosmo	estructura espacial
<b><math>k</math> constante de Ludwig Boltzmann</b>	temperatura y energía	termodinámica
<b><math>e</math> constante de la carga eléctrica</b>	unidad mínima, acoplamiento luz y materia	electromagnetismo
<b><math>c</math> constante de la velocidad de la luz (vacío)</b>	velocidad máxima, unidad en el macrocosmo, relación energía – masa	teoría de la relatividad, teoría de la relatividad especial
<b><math>h</math> constante de Max Planck</b>	unidad en el microcosmo, unidad mínima de energía	mecánica cuántica



# Sinopsis

Estamos en una época de descubrimientos de extraordinario impacto. Éstas están al alcance de la mano gracias a la aplicación de principios físicos y su puesta en práctica con instrumentos de medición en la perfección técnica. En varios campos, los resultados de las mediciones mostrarán cómo se comporta la antimateria en el campo gravitatorio de la materia, cómo intervienen los campos magnéticos en la formación y extinción de las estrellas, y también proporcionarán una mejor percepción de la dinámica del interior de la Tierra.

Aparte de estos ambiciosos descubrimientos, todavía hay deficiencias fundamentales en muchos campos, que se señalaron en las lecciones individuales. Para enfrentarse a ellos no se necesita una tecnología compleja y costosa, sino paciencia y persistencia para descifrar sus secretos. Sólo cuando se comprenden completamente los fundamentos, una ley de la naturaleza está a la altura de sus expectativas.

