

# Universidad Nacional de Río Negro

## Física Moderna A - 2017

- **Unidad** 02 – Los inicios de la MC
- **Clase** 7/27(U02C04) Repaso
- **Fecha** 04 Abril 2017
- **Cont** Complementariedad – Correspondencia
- **Cátedra** Asorey
- **Web**



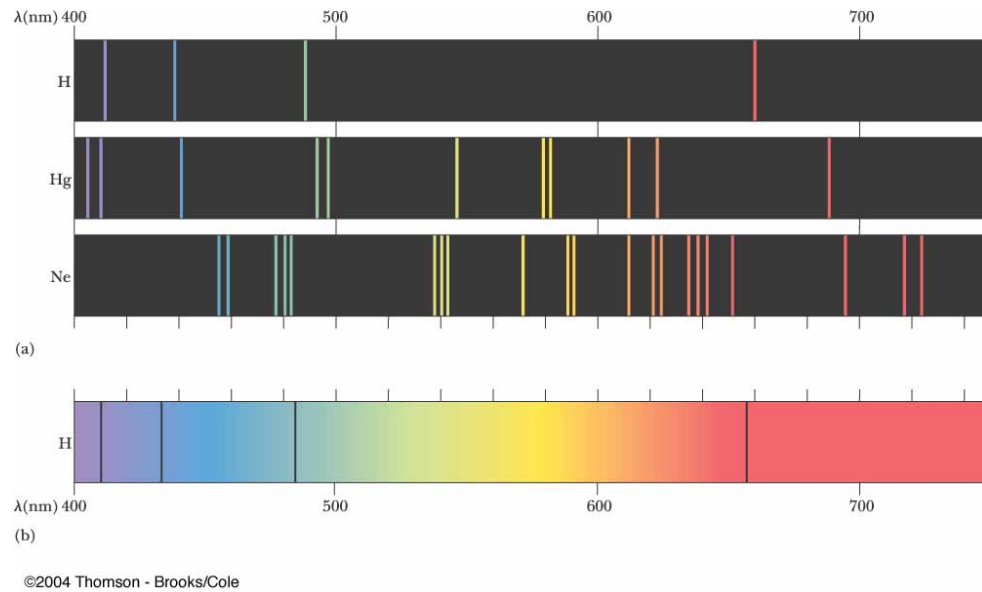
<https://github.com/asoreyh/unrn-moderna-a>

*“Los átomos se comportan como átomos, nada más”.*

John Gribbin

# Unidad 2: Los inicios de la mecánica cuántica

## Martes 21 de marzo al Martes 04 de abril



- Los espectros atómicos y la estructura del átomo. Modelos de Thomson y Rutherford, aciertos y desaciertos. Cuantización de Bohr-Sommerfeld. El modelo atómico de Bohr. El principio de correspondencia. La hipótesis de de Broglie. Difracción de ondas de materia. **Dualidad onda-corpúsculo.**



# El átomo de Bohr

- Los átomos tienen estados de energía definidos:

$$E_n = -\frac{Ry}{n^2} \text{ eV}$$

- Los **electrones sólo pueden ocupar órbitas permitidas**. Si están allí, no emiten radiación por aceleración
- Una transición se da cuando un electrón pasa de una órbita estable a otra órbita estable
- En una transición, se emite (o se absorbe) un fotón con energía igual a la diferencia de energía entre esos niveles

$$\frac{hc}{\lambda} = E_i - E_f$$

# Cuantización del momento angular

- **Bohr propone: el momento angular está cuantizado**, sólo se da en múltiplos enteros de  $h/2\pi$

$$L = mvr \rightarrow L = n \left( \frac{h}{2\pi} \right), \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} \rightarrow \boxed{L = n \hbar} \quad \text{Cuantización de Bohr-Sommerfeld}$$

- Sólo las órbitas que verifican esta relación son estables:

$$L_n = m_e v_n r_n = n \hbar$$

**n es el número  
cuántico principal**


- Con lo cual obtenemos (ver filmina 9):

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m e^2} n^2 \rightarrow r_n = a_0 n^2 \quad v_n = \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \right) \frac{1}{n}$$



# Entonces los niveles de Energía

- El modelo de Bohr explica los espectros:

$$E_n = - \underbrace{\left( \frac{m_e e^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \right)}_{E_1 = 13.6 \text{ eV}} \left( \frac{1}{n^2} \right) \rightarrow E_n = \frac{E_1}{n^2} = - \frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$$


- El momento angular está cuantizado, en múltiplos enteros de  $\hbar/2\pi$ .
- Ionizar al átomo  $\rightarrow n_i=1$  ( $E_1=-13.6 \text{ eV}$ )  $\rightarrow n_f=\text{infinito}$  ( $E_f=0$ )

$$E_{\text{ionización}} = 0 - (-13.6) \text{ eV} = 13.6 \text{ eV}$$

# Último ingrediente: De Broglie

- De la relatividad especial:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \text{ luego para un fotón } E = p c$$

$$p = \frac{E}{c} \rightarrow p = \frac{h c}{\lambda c} \rightarrow p = \frac{h}{\lambda}, \text{ o bien } \lambda = \frac{h}{p}$$

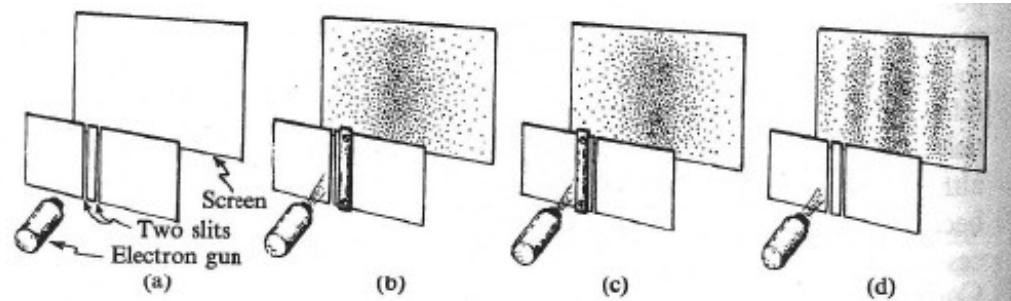
- De Broglie plantea que esta expresión es general:

***“Toda la materia presenta características tanto ondulatorias como corpusculares comportándose de uno u otro modo dependiendo del experimento específico”***

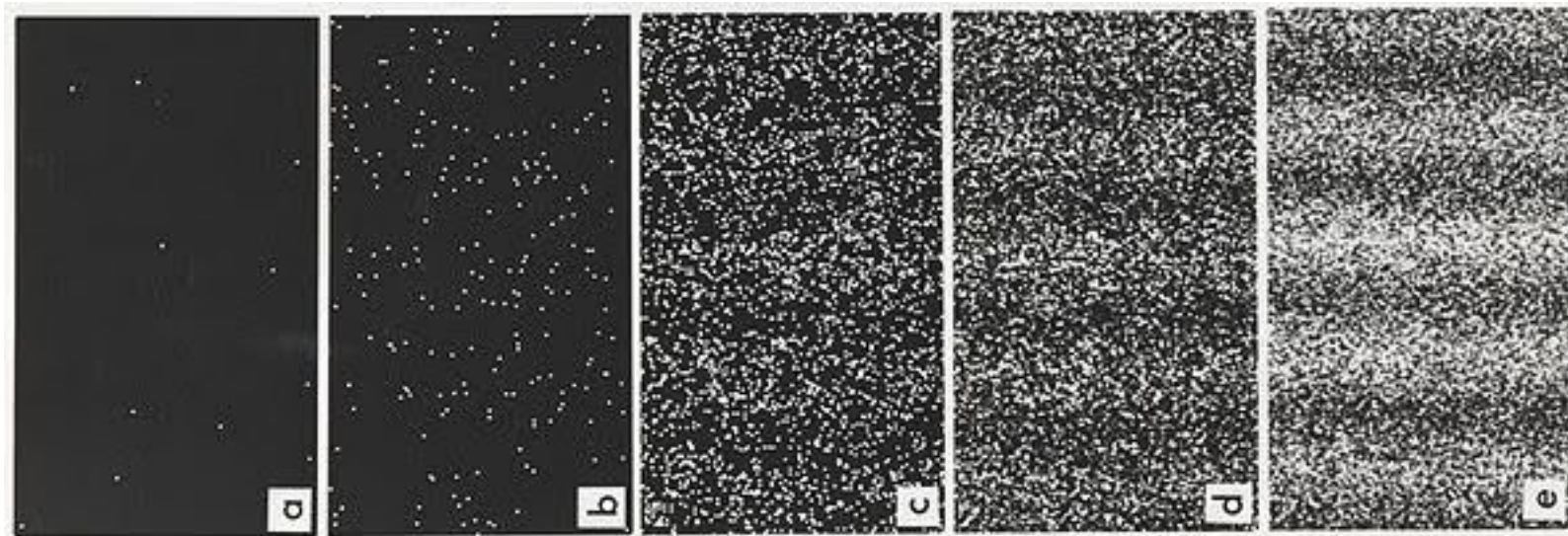
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m v}$$

***Hipótesis de De Broglie***

# ¡Los electrones se comportan como ondas!



**Fig. 21.4** (a) Arrangement for the two-slit experiment. One electron is emitted at a time, aimed at the screen through the pair of slits. (b) Pattern on the screen when the right-hand slit is covered. (c) The same, when the left-hand slit is covered. (d) Interference occurs when both slits are open. Some regions on the screen cannot now be reached despite the fact that they can be with just one or the other slit open.



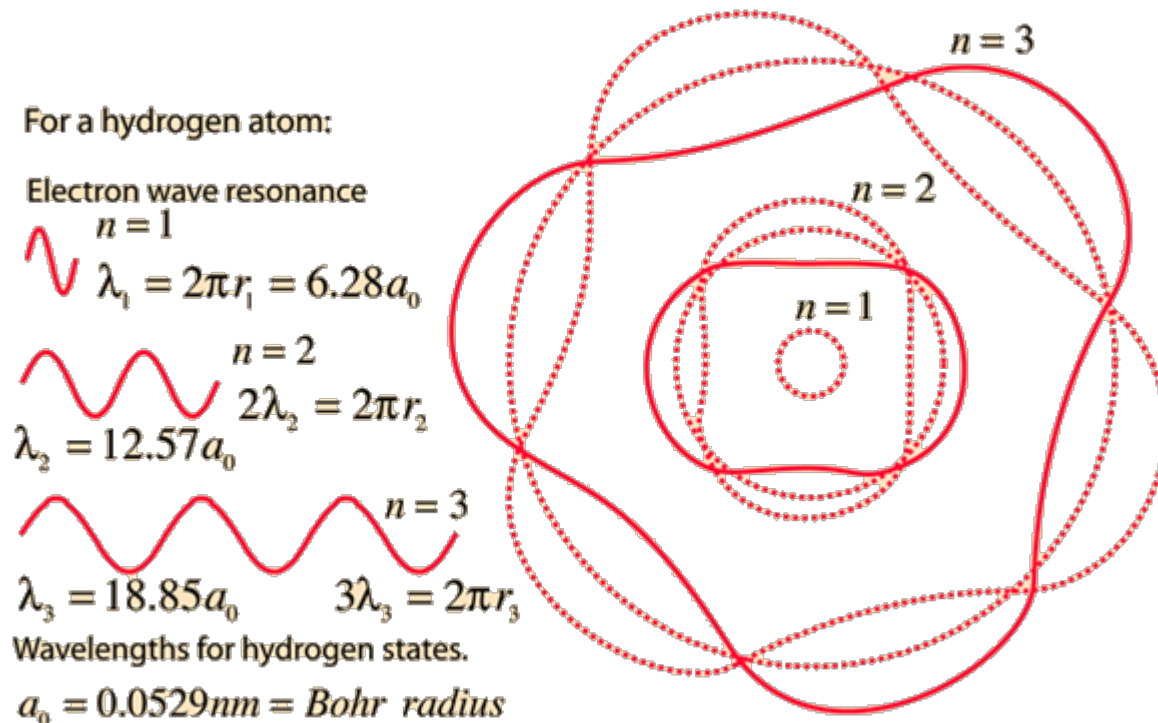


# Relación: órbitas estables de Bohr y De Broglie

- **órbitas estables** → **número entero de long. de onda**

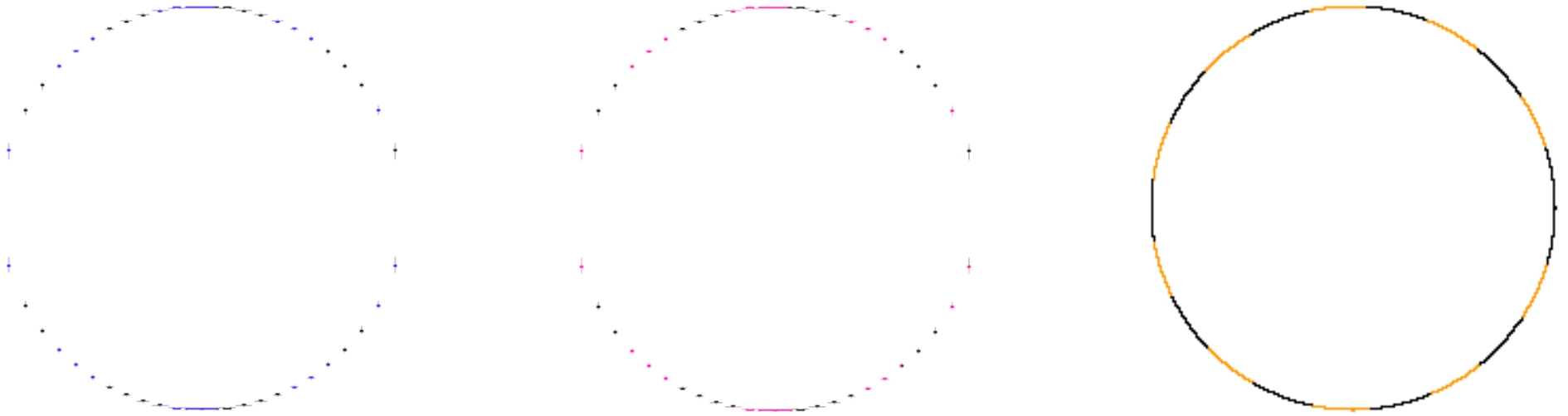
$$\boxed{n\lambda_n = 2\pi r_n} \rightarrow \lambda_n = \frac{2\pi r_n}{n}$$

- órbitas estables → estados estacionarios de las ondas





# Órbitas → estados estacionários



- Órbitas  $n=1$ ,  $n=2$ ,  $n=3$

$$\lambda_n = \frac{2\pi r_n}{n} \rightarrow \lambda_n = \frac{2\pi a_0 n^2}{n} \rightarrow \lambda_n = 2\pi a_0 n$$

$$\lambda_n = (0,332n) \text{ nm} = 0,332 \text{ nm}, 0,665 \text{ nm}, 0,998 \text{ nm}, \dots$$

# Principio de correspondencia

- Bohr (1923): “Cuánto mayor es el número cuántico ( $n$ ), la física cuántica se parece más a la física clásica”  
(Esto llevó a Bohr a establecer la cuantización de  $L$ )



# ¿ondas o partículas? → Dualidad

- Recordemos estas expresiones para la luz:

$$E_e = E_\gamma' - E_\gamma \qquad E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$$

- La primera (Compton) → el **fotón** transfiere energía a un electrón → colisión inelástica → **partícula**
- La segunda (Planck) → la energía de un **fotón** depende de la longitud de onda → **onda**
- Y para los electrones

$$E_e = E_\gamma' - E_\gamma \qquad \lambda_n = \frac{2\pi r_n}{n}$$

- La primera (Compton) → el **electrón** recibe energía en una colisión inelástica → **partícula**
- La segunda (de Broglie) → las órbitas estables del **electrón** corresponden a estados estacionarios → **ondas**

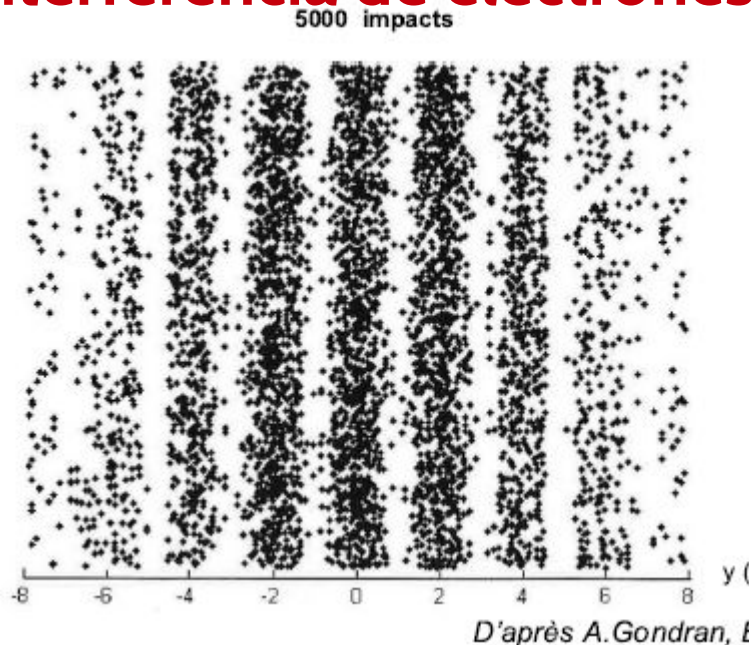




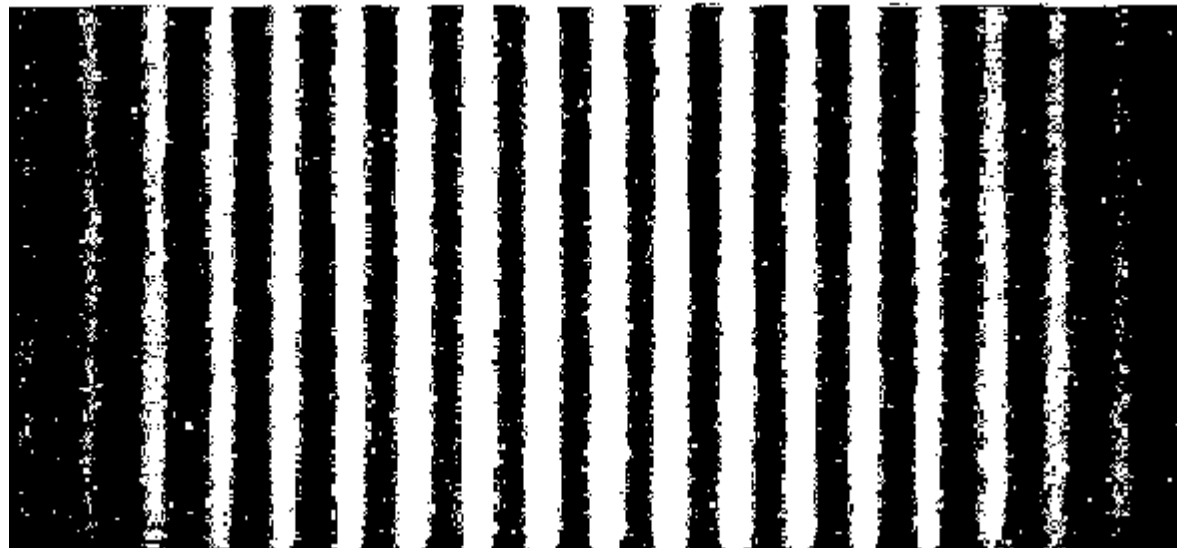
# Principio de complementariedad (Bohr, 1928)

- **Complementariedad**: las descripciones ondulatorias y corpusculares son complementarias  
→ *se necesitan ambas descripciones para obtener un modelo completo de la Naturaleza*

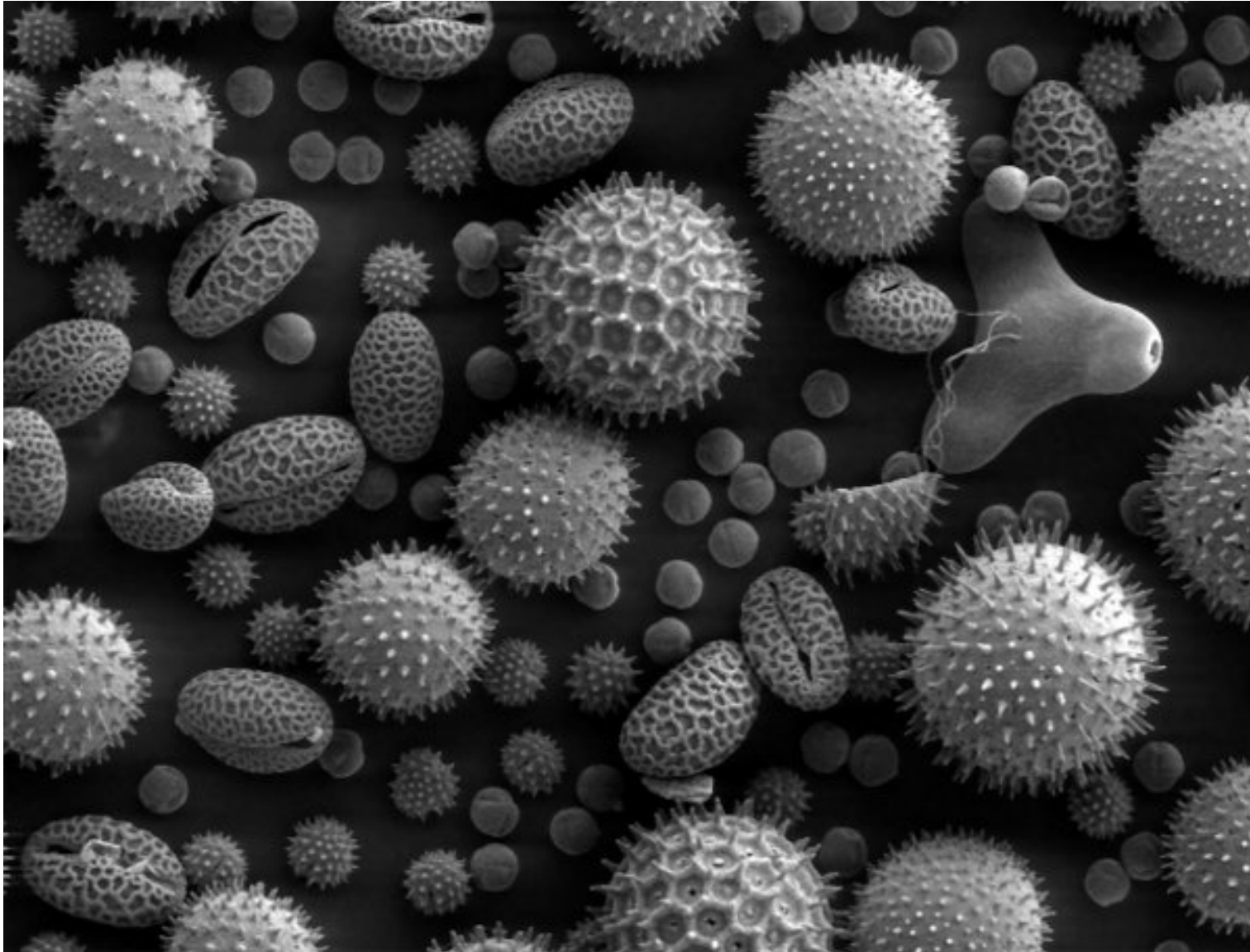
## Interferencia de electrones



## Interferencia de fotones

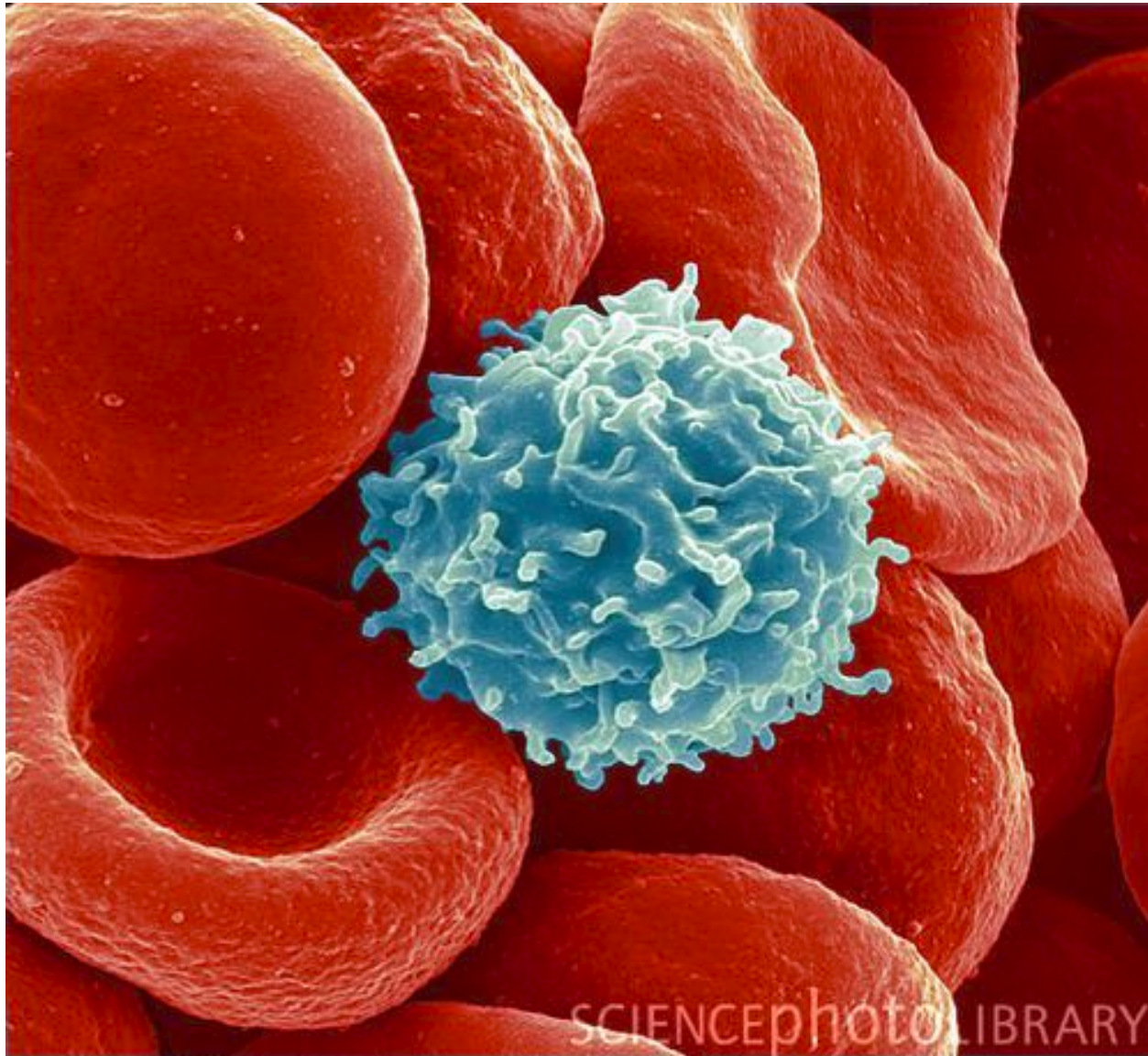


# Partículas como ondas: aplicaciones polen



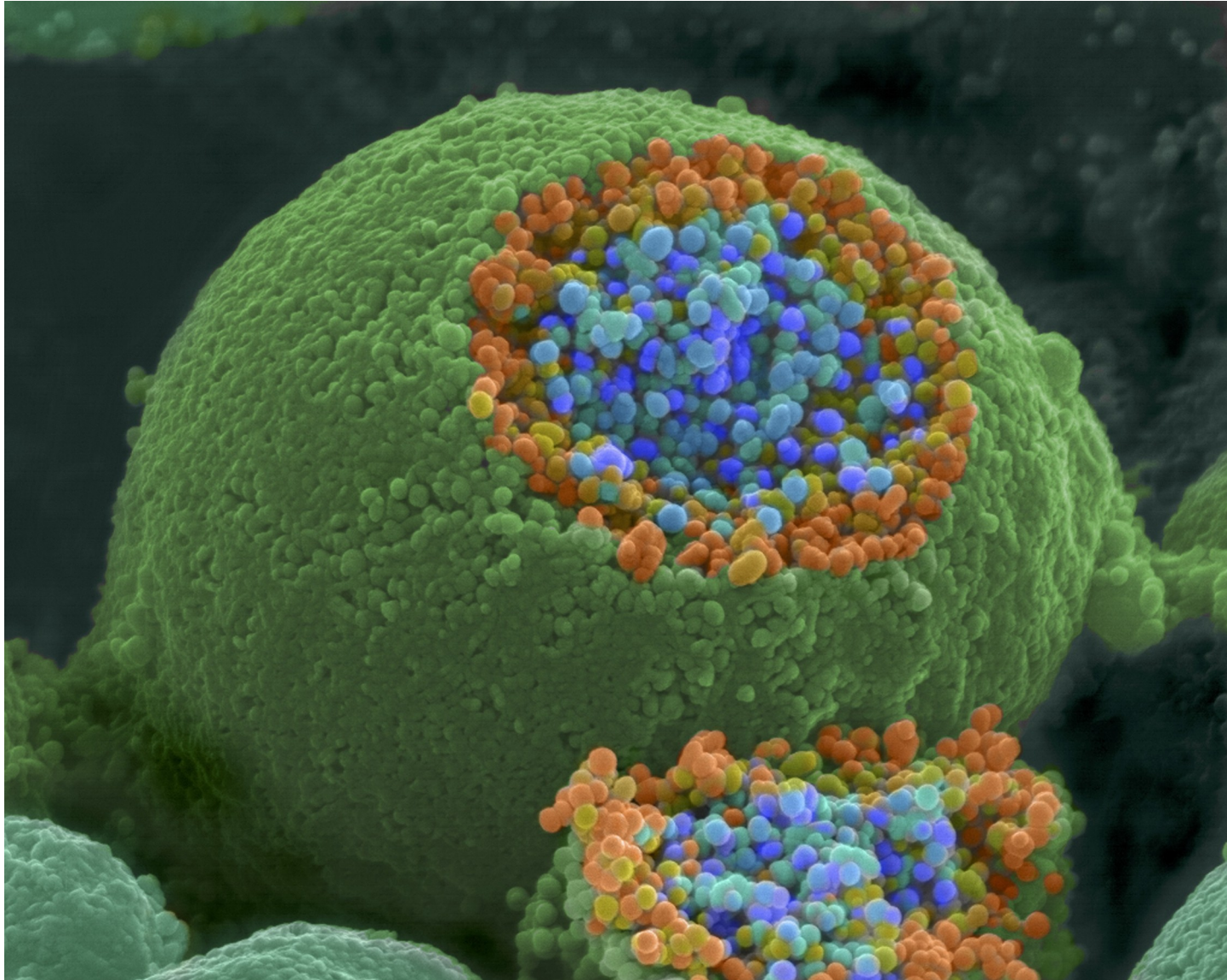


# Hematíes y linfocito

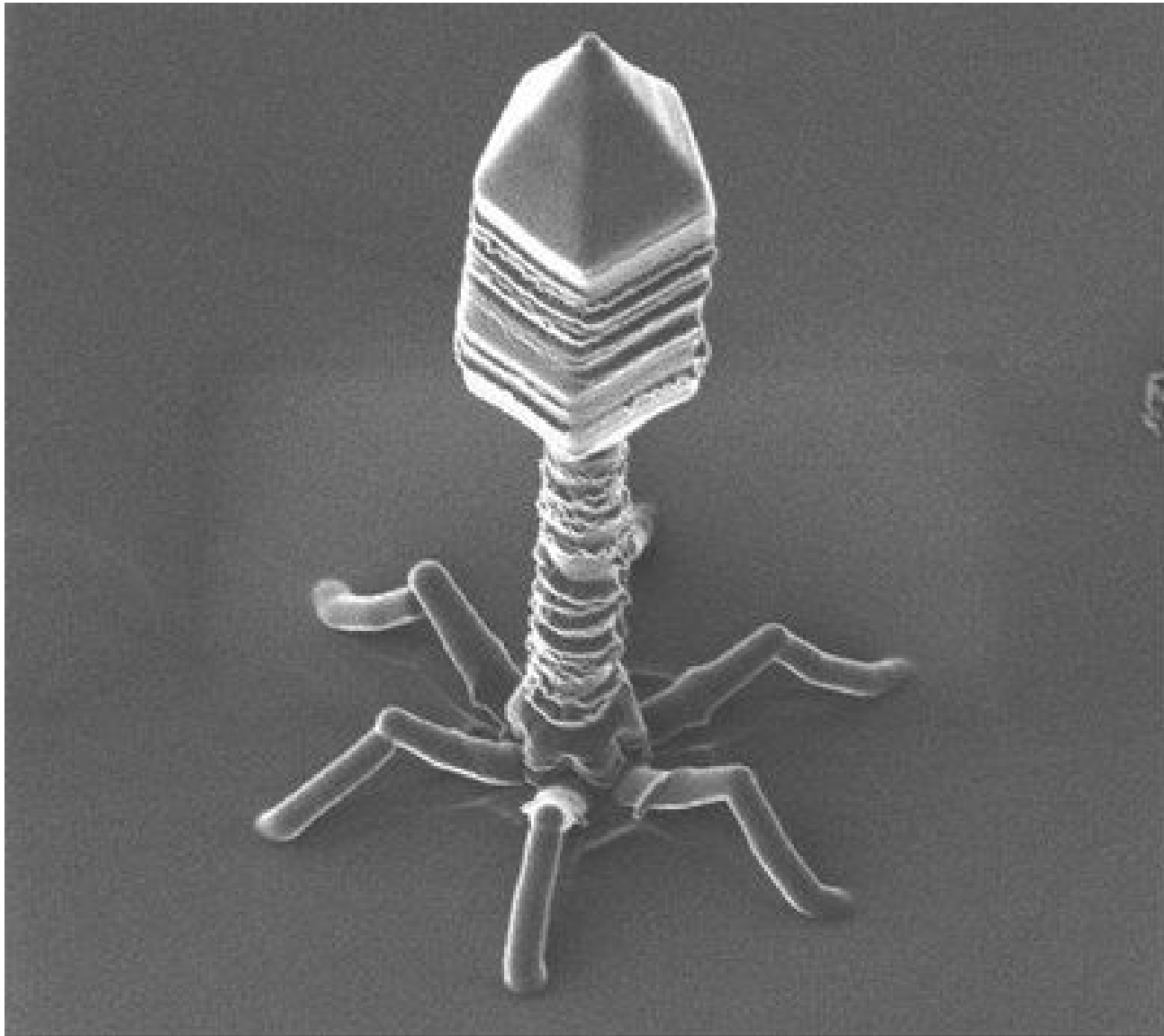




# Terminación nerviosa y neurotransmisores



# bacteriófago





# Ondas de electrones → microscópio electrónico

