

# Física Moderna y Radioquímica

1. Ondas versus Partículas
2. Evidencias de que la luz se comporta como partículas
  - i. Radiación de cuerpo negro (modelo de Planck)
  - ii. Efecto fotoeléctrico
  - iii. Dispersión de Compton
3. Relación de De Broglie: Dualidad onda-partícula
4. Difracción e interferencia de electrones.
5. Analogía macroscópica de la dualidad onda-partícula

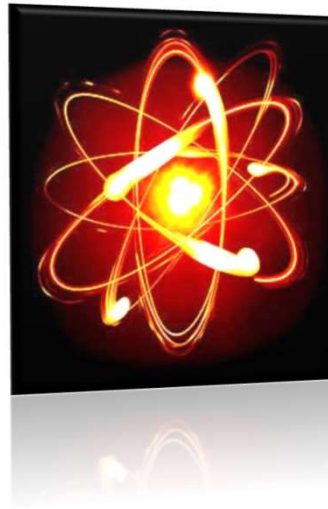


6. Modelos atómicos
7. Modelo estándar y partículas sub-atómicas

## 8. Física Nuclear




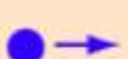








## 9. Radioquímica

- Elementos químicos
- Isótopos
- Radiactividad
  - Partículas alfa
  - Partícula beta
  - Rayos  $\gamma$
- Decaimiento radiactivo
  - Vida media
  - Actividad (Datación con  $^{14}\text{C}$ )
- Efectos Biológicos



# Teorías ondulatoria versus corpuscular



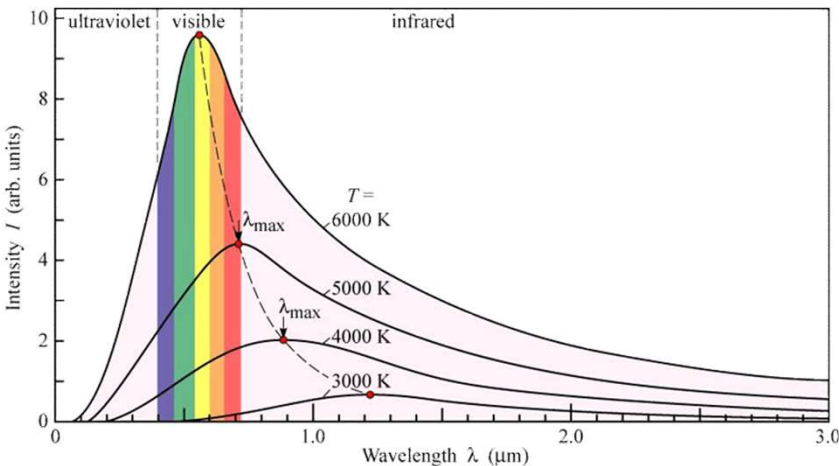
Reflexión →		✓		✓ ?
Refracción →		✓		✓ ?
Interferencia →		✓		⊗
Difracción →		✓		⊗
Polarización →		✓		⊗
Efecto fotoeléctrico y dispersión Compton →		⊗		✓

# La luz se comporta como una partícula...

→ Siglo 20:

- En 1900, Max Planck, al intentar explicar la radiación del cuerpo negro, sugirió que, aunque la luz era una onda, estas ondas podían ganar o perder energía solo en cantidades finitas relacionadas con su frecuencia. Planck llamó a estos "paquetes" de energía luminosa "*quanta*" (de la palabra latina que significa "cuánto" o "cantidad").

**1859:** Gustav Kirchhoff

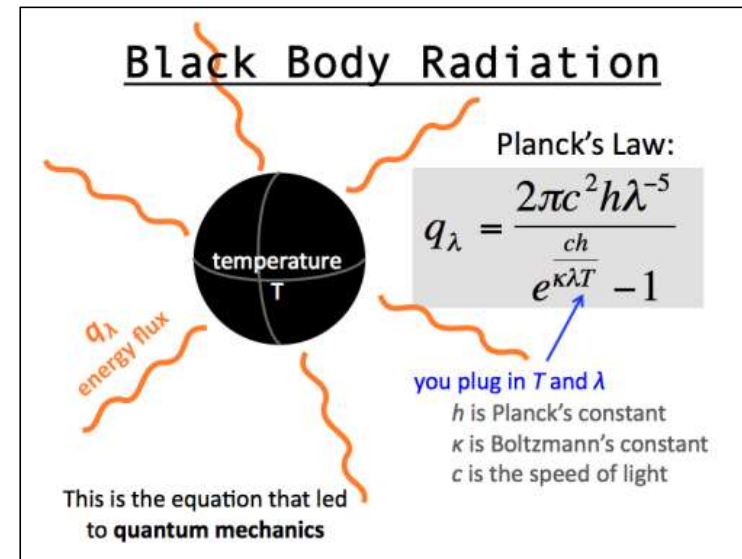


**1877:** Ludwig Boltzmann

$$F(\text{state}) \propto e^{-\frac{E}{kT}}$$

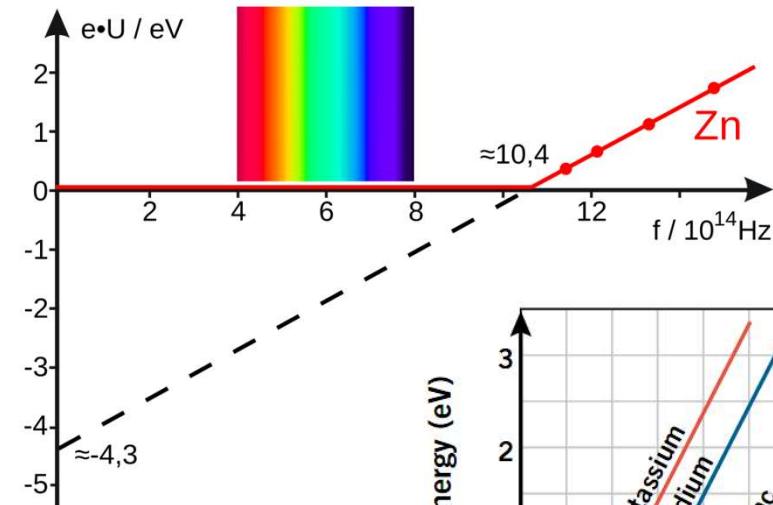
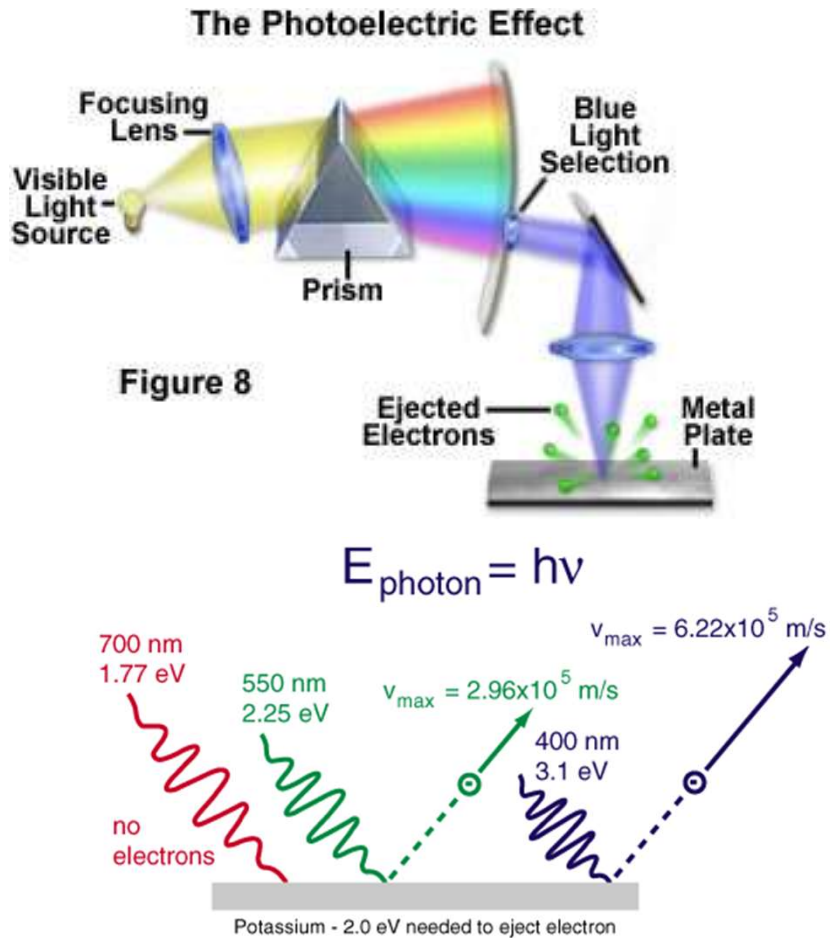
$$\frac{F(\text{state}2)}{F(\text{state}1)} = e^{\frac{E_1 - E_2}{kT}}$$

**1900:** Max Planck  $E = h \cdot f$



# La luz se comporta como una partícula...

- En 1905, Albert Einstein utilizó la idea de "cuantos" de luz para explicar el efecto fotoeléctrico, y sugirió que estos *cuantos* de luz tenían una existencia "real".



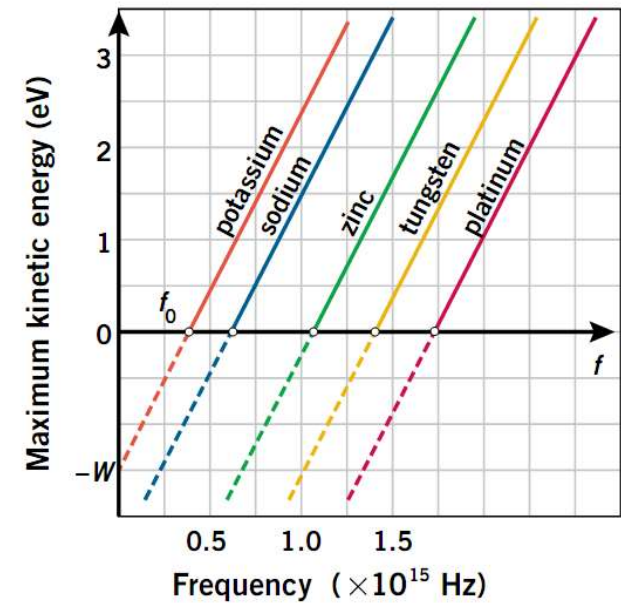
$$\rightarrow E_C + W = E_{\text{foton}}$$

$$\rightarrow E_{\text{foton}} = h \cdot f$$

$$\rightarrow c = f \cdot \lambda$$

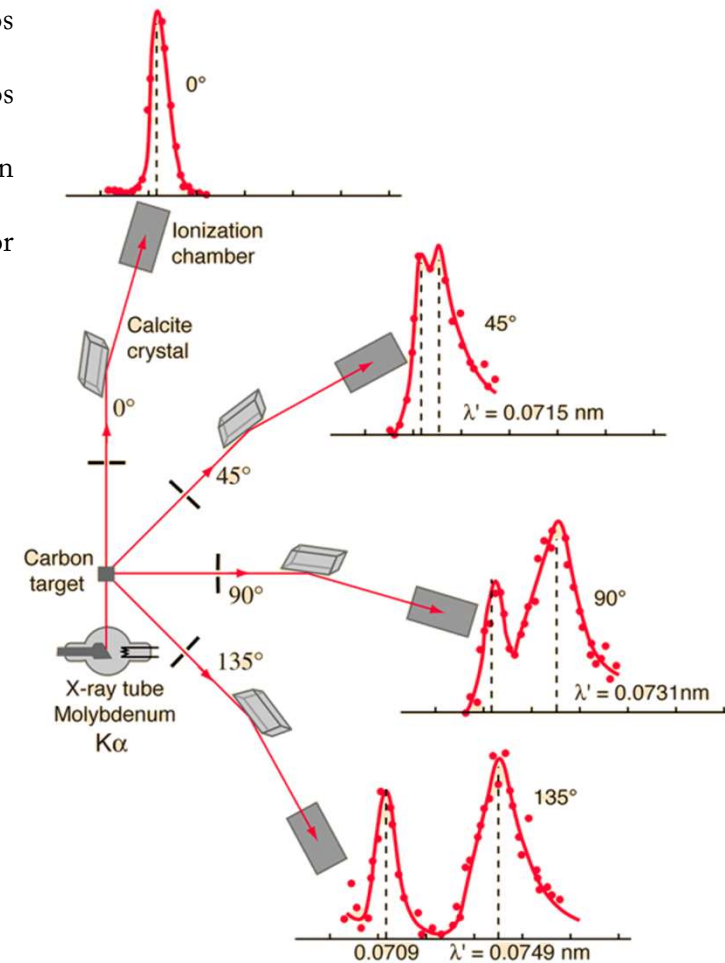
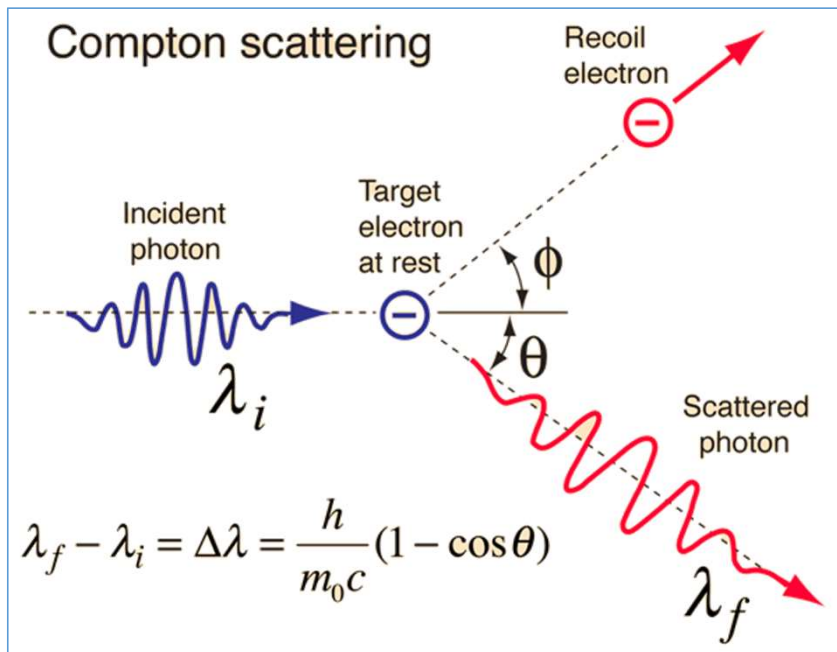
$$\rightarrow p = h / \lambda$$

$$\rightarrow p = h \cdot f / c$$



# La luz se comporta como una partícula...

- En 1923, Arthur H. Compton observó la dispersión de rayos X cuando estos interactúan con los electrones en una pieza de carbono.
- Encontró que los rayos X dispersados tenían una longitud de onda mayor (menor E) que los incidentes.
- El desplazamiento de la longitud de onda aumentaba con el ángulo de dispersión de acuerdo con la fórmula de Compton.
- La dispersión de Compton podría explicarse por una teoría de partículas de rayos X, pero no por una teoría de ondas.



# La luz se comporta como una onda a veces como una partícula...

## ¿Y si algunas partículas se comportan como ondas? *Louis De Broglie*

- De Broglie planteó en 1923 que si las ondas electromagnéticas (luz visible y ultravioleta, los rayos X, etc.) poseen una longitud de onda y además se comportan como partículas porque poseen momento ( $p=m \cdot v \rightarrow$  cantidad de movimiento), entonces quizás las partículas se, que poseen momento, también se comporten como ondas y posean una longitud de onda ( $\lambda$ ).
- De Broglie usó la ecuación de Max Planck para la energía cuantizada del fotón, y la ecuación de Albert Einstein, que relaciona la energía que posee una partícula con su masa y velocidad:

$$\begin{array}{l}
 \boxed{E = h \cdot f} \\
 \boxed{E = m \cdot c^2}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} E = h \cdot f \\ E = m \cdot c^2 \end{array}} \right\} \boxed{h \cdot f = m \cdot c^2}
 \xrightarrow{f = \frac{c}{\lambda}}
 \boxed{h \cdot \frac{c}{\lambda} = m \cdot c^2}
 \xrightarrow{\hspace{2cm}}
 \boxed{\frac{h}{\lambda} = m \cdot c = p}$$

### Ejemplos:

Onda Electromagnética: Conozco  $\lambda$ , calculo  $p$

→ ¿Cuál es el momento para un fotón de luz de 600 nm que viaja en el vacío?

→ ¿Y si ese haz de luz viaja por un medio con  $n=1,5$ ?

Partícula: Conozco  $p$ , calculo  $\lambda$

→ ¿Cuál es la longitud de onda de un electrón ( $m_0=9,1 \cdot 10^{-31}$  kg) que viaja en el vacío a una velocidad de  $2 \cdot 10^8$  m/s?

→ ¿Cuál es la longitud de onda de una persona de 75 kg, que está sentada?

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{m_r \cdot v} = \frac{h}{p}}$$

↓

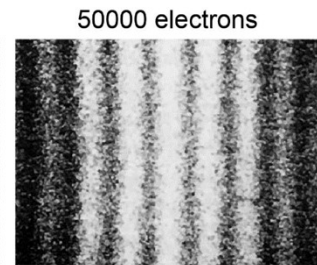
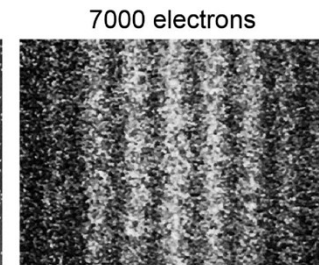
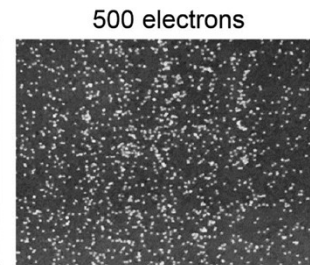
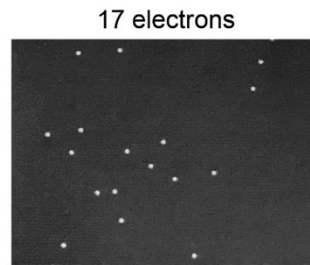
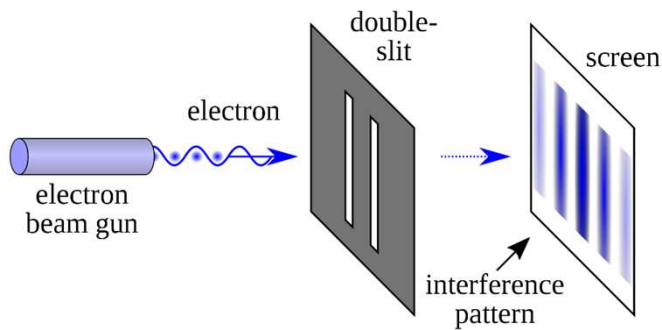
Masa Relativista

$$\boxed{m_r = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}}$$

# Los electrones se comportan como ondas



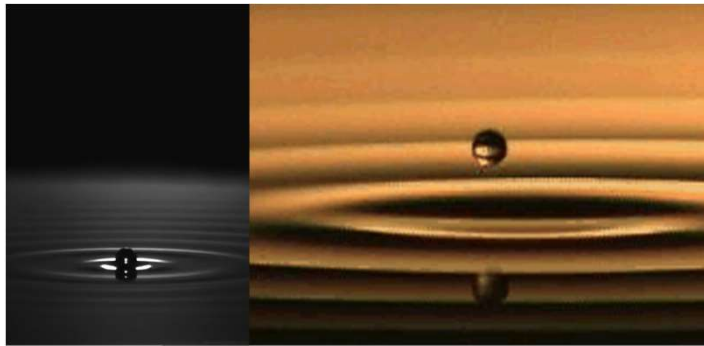
**Davisson y Germer en 1927 comprobaron la teoría de De Broglie**



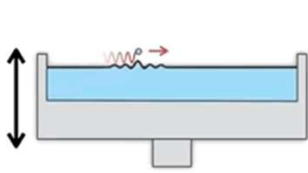
- El patrón de interferencia, fenómeno que se ha demostrado que ocurre con los fotones, también surge cuando partículas como electrones, átomos o incluso moléculas son disparadas de a una a través de la doble rendija.
- Esto demuestra la dualidad onda-partícula, que establece que toda la materia exhibe propiedades de onda y partícula.
- Los electrones, protones, neutrones e incluso entidades más grandes que normalmente se denominan partículas tienen su propia naturaleza de onda e incluso una longitud de onda (relacionada con su momento).
- Si se dispara una partícula a la vez, e igual se obtiene un patrón de interferencia, esto quiere decir que la onda asociada a cada partícula interfiere consigo misma, y no con la onda de otra partícula necesariamente.



# Analogía macroscópica con la teoría de De Broglie: La onda piloto



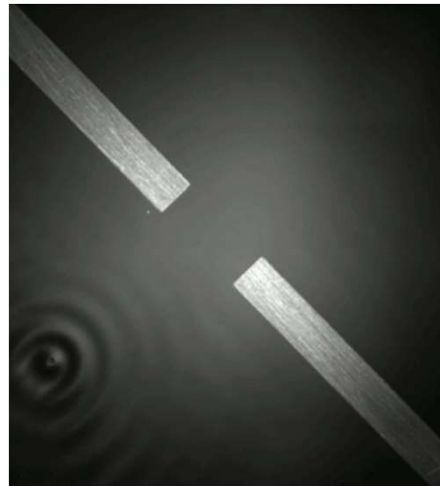
Yves Couder *et al.* (*Nature*, 2005) showed that millimetric liquid droplets can spontaneously walk across the surface of a vibrating liquid bath



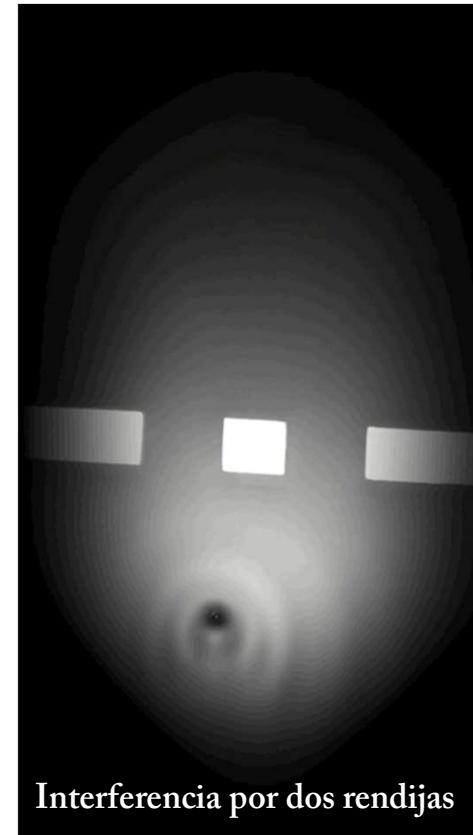
forcing acceleration:  $\gamma \cos(\omega t)$



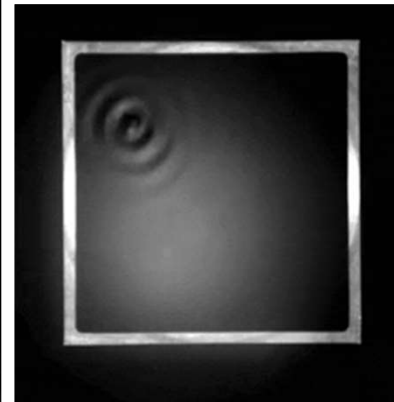
Walking arises as  $\gamma$  approaches the Faraday threshold  $\gamma_F$



Difracción por una rendija

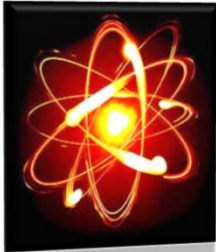


Interferencia por dos rendijas



Efecto túnel



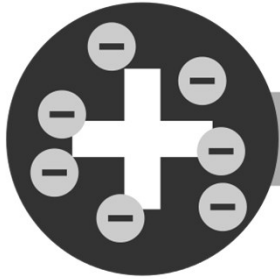


# Estructura del átomo

Partículas sub-atómicas: neutrones (n) y protones (p<sup>+</sup>) y electrons (e<sup>-</sup>)

1904

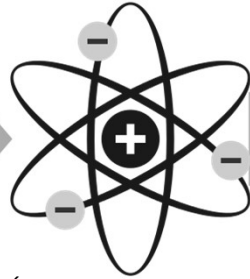
**Thomsom**



Los electrones se distribuyen uniformemente en el interior del átomo suspendidos en una nube de carga positiva.

1911

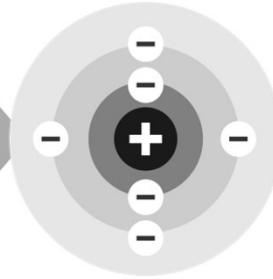
**Rutherford**



Átomo formado por dos partes: la periferia (electrones girando a gran velocidad) y un "núcleo" muy pequeño; que concentra toda la carga eléctrica positiva y casi toda la masa del átomo.

1913

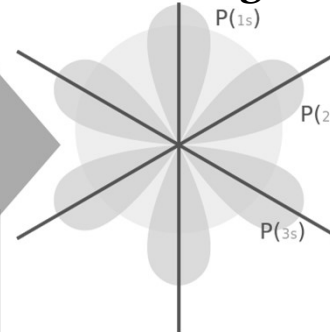
**Bohr**



Primer modelo atómico en el que se introduce la cuantización de la energía de los electrones. Explica porqué los electrones pueden tener órbitas estables alrededor del núcleo y la serie de Balmer.

1927

**Schrödinger**



$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V(x)\psi = E\psi$$

**Correcciones**  
**Dirac (1928)**  
**Schrödinger-Pauli**

- Espectros de emisión de átomos mas pesados que el H → e- de un mismo nivel energético tenían distinta energía => error en el modelo de Bohr.
- Dentro de un mismo nivel energético existen subniveles (s, p, d, f...).
- Incorporación de modelo relativista para electrones (velocidad de la luz).

1916  
**Sommerfeld**

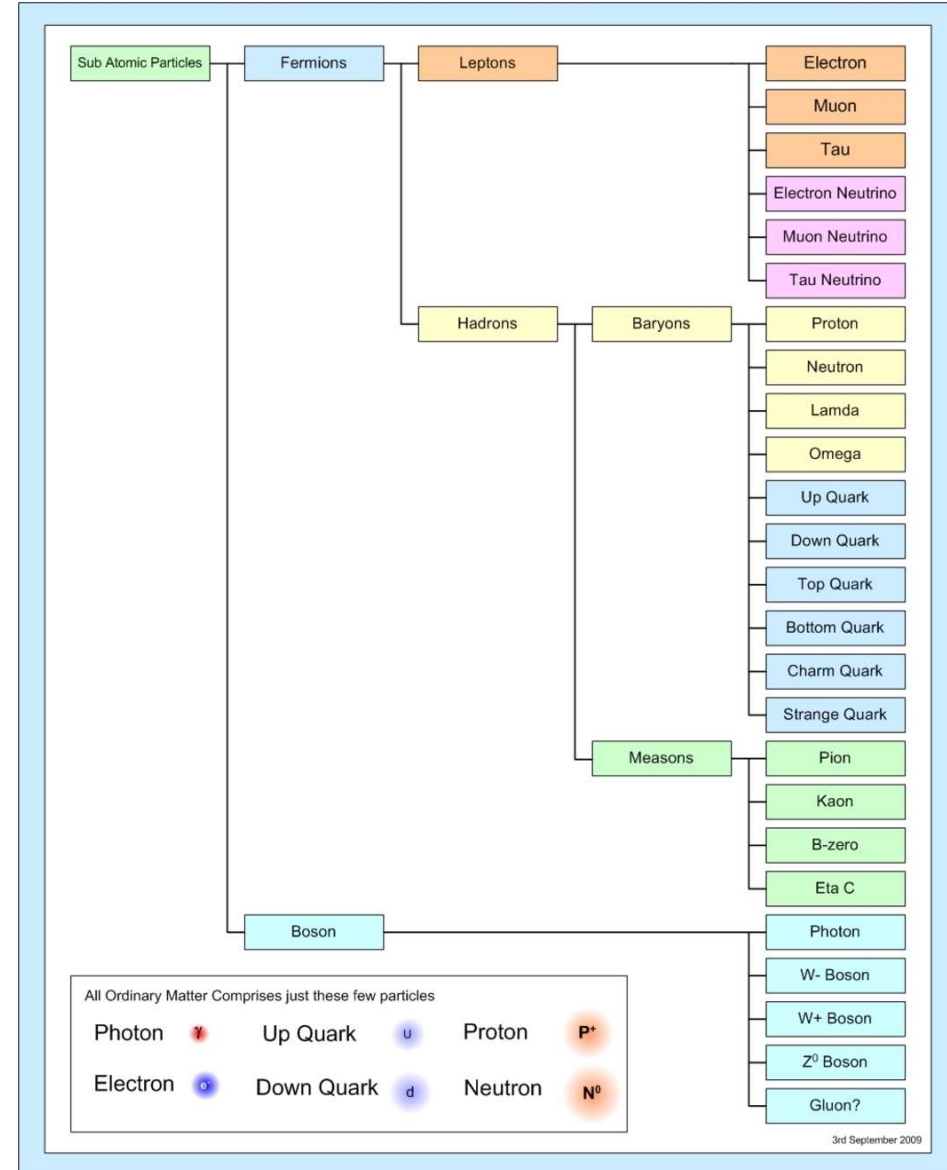
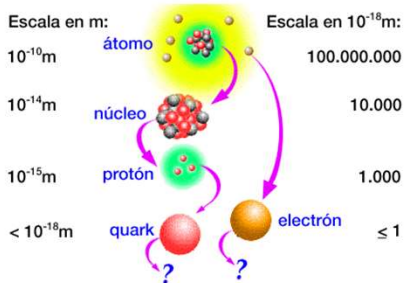
# Estructura del átomo

Partículas sub-atómicas: neutrones, protones y electrones ¿y sub-subatómicas? El modelo Estándar

Tres generaciones de la materia (fermiones)

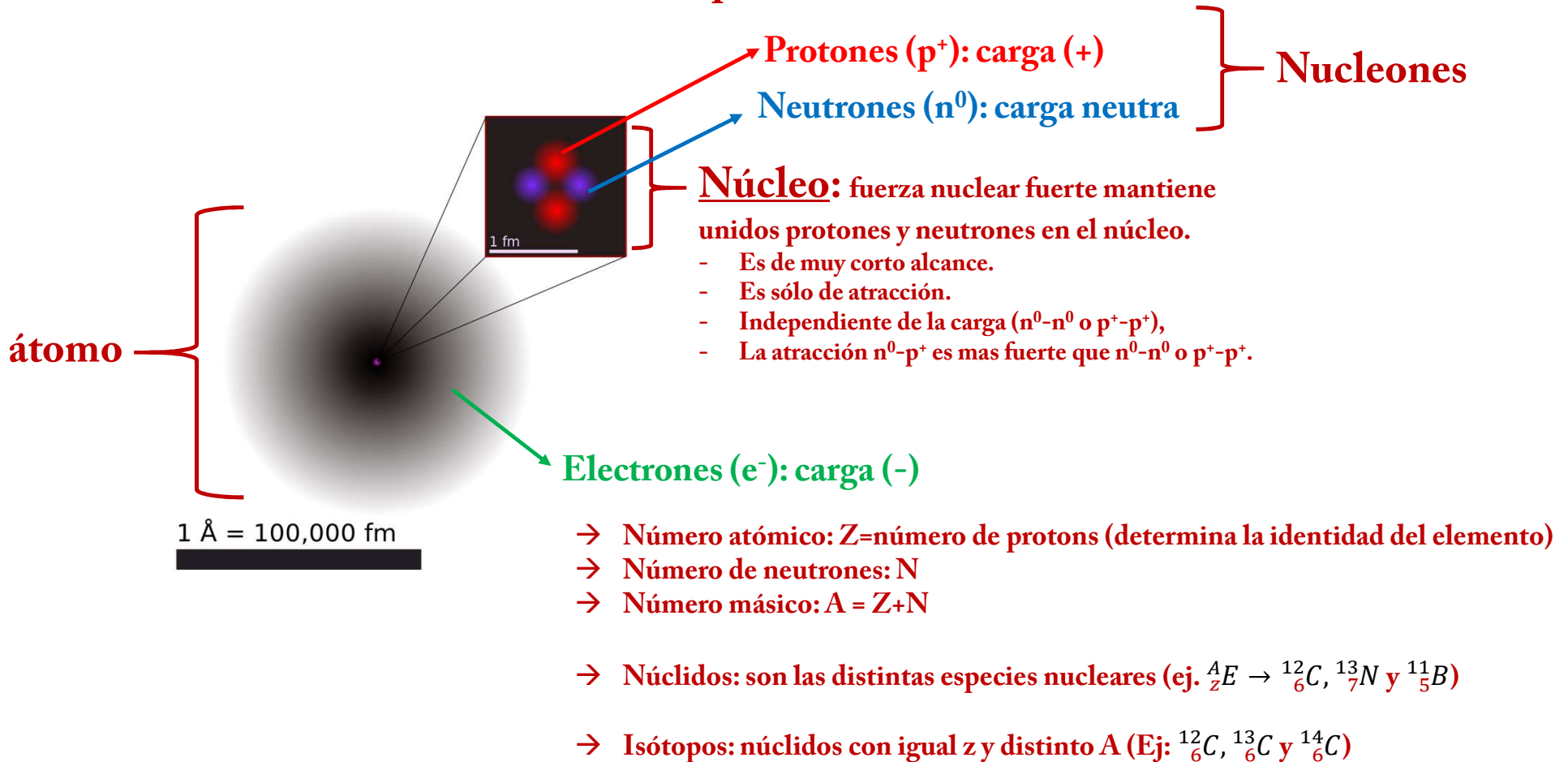
	I	II	III		
masa →	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	0
carga →	2/3	2/3	2/3	0	0
espín →	1/2	1/2	1/2	1	2
nombre →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Foton	<b>G</b> Graviton
	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0	7 GeV/c <sup>2</sup>
	-1/3	-1/3	-1/3	0	0
	1/2	1/2	1/2	1	0
Quark	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Boson Higgs
	<2,2 eV/c <sup>2</sup>	<0,17 MeV/c <sup>2</sup>	<15,5 MeV/c <sup>2</sup>	91,2 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> Neutrino electrónico	<b>ν<sub>μ</sub></b> Neutrino muónico	<b>ν<sub>τ</sub></b> Neutrino tauónico	<b>Z<sup>0</sup></b> Boson Z	
Lepton	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	1,777 GeV/c <sup>2</sup>	80,4 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> Electrón	<b>μ</b> Muón	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> Boson W	

Bosones de gauge



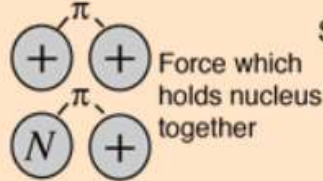
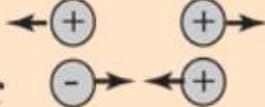
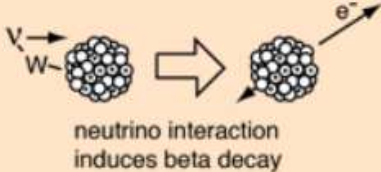
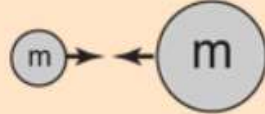
# Física Nuclear

## Conceptos básicos



# Física Nuclear

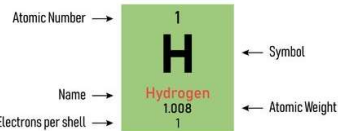
## Fuerzas de interacción en el núcleo atómico

Fundamental Forces						
<i>Strong</i>		Strength <b>1</b>	Range (m) $10^{-15}$ (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, $\pi$ (nucleons)		
<i>Electro-magnetic</i>		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1		
<i>Weak</i>		Strength $10^{-6}$	Range (m) $10^{-18}$ (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons $W^+$ , $W^-$ , $Z_0$ , mass > 80 GeV spin = 1		
<i>Gravity</i>		Strength $6 \times 10^{-39}$	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2		

# Física Nuclear: Elementos químicos

## La Tabla Periódica

1 IA											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIII A	
<b>1</b> <b>H</b> Hydrogen 1.008 1											<b>5</b> <b>B</b> Boron 10.81 2-3	<b>6</b> <b>C</b> Carbon 12.011 2-4	<b>7</b> <b>N</b> Nitrogen 14.007 2-3	<b>8</b> <b>O</b> Oxygen 15.999 2-4	<b>9</b> <b>F</b> Fluorine 18.998 2-7	<b>10</b> <b>Ne</b> Neon 20.180 2-8	
<b>3</b> <b>Li</b> Lithium 6.94 2-1	<b>4</b> <b>Be</b> Beryllium 9.012 2-2											<b>13</b> <b>Al</b> Aluminium 26.982 2-8-3	<b>14</b> <b>Si</b> Silicon 28.085 2-8-4	<b>15</b> <b>P</b> Phosphorus 30.974 2-8-5	<b>16</b> <b>S</b> Sulfur 32.06 2-8-6	<b>17</b> <b>Cl</b> Chlorine 35.45 2-8-7	<b>18</b> <b>Ar</b> Argon 39.948 2-8-8
<b>11</b> <b>Na</b> Sodium 22.98976928 2-8-1	<b>12</b> <b>Mg</b> Magnesium 24.305 2-8-2	<b>3</b> <b>IIIB</b>	<b>4</b> <b>IVB</b>	<b>5</b> <b>VB</b>	<b>6</b> <b>VIB</b>	<b>7</b> <b>VII B</b>	<b>8</b> <b>VIII B</b>	<b>9</b> <b>VIII B</b>	<b>10</b> <b>VIII B</b>	<b>11</b> <b>IB</b>	<b>12</b> <b>IIB</b>	<b>31</b> <b>Ga</b> Gallium 69.723 2-8-18-3	<b>32</b> <b>Ge</b> Germanium 72.63 2-8-18-4	<b>33</b> <b>As</b> Arsenic 74.922 2-8-18-5	<b>34</b> <b>Se</b> Selenium 78.971 2-8-18-6	<b>35</b> <b>Br</b> Bromine 79.904 2-8-18-7	<b>36</b> <b>Kr</b> Krypton 83.798 2-8-18-8
<b>19</b> <b>K</b> Potassium 39.0983 2-8-8-1	<b>20</b> <b>Ca</b> Calcium 40.078 2-8-8-2	<b>21</b> <b>Sc</b> Scandium 44.955908 2-8-9-2	<b>22</b> <b>Ti</b> Titanium 47.867 2-8-10-2	<b>23</b> <b>V</b> Vanadium 50.9415 2-8-10-1	<b>24</b> <b>Cr</b> Chromium 51.9961 2-8-10-1	<b>25</b> <b>Mn</b> Manganese 54.938044 2-8-10-2	<b>26</b> <b>Fe</b> Iron 55.845 2-8-14-2	<b>27</b> <b>Co</b> Cobalt 58.933 2-8-15-2	<b>28</b> <b>Ni</b> Nickel 58.693 2-8-16-1	<b>29</b> <b>Cu</b> Copper 63.546 2-8-18-1	<b>30</b> <b>Zn</b> Zinc 65.38 2-8-18-2	<b>49</b> <b>In</b> Indium 114.82 2-8-18-18-3	<b>50</b> <b>Sn</b> Tin 118.71 2-8-18-18-4	<b>51</b> <b>Sb</b> Antimony 121.76 2-8-18-18-5	<b>52</b> <b>Te</b> Tellurium 127.60 2-8-18-18-6	<b>53</b> <b>I</b> Iodine 126.905 2-8-18-18-7	<b>54</b> <b>Xe</b> Xenon 131.29 2-8-18-18-8
<b>37</b> <b>Rb</b> Rubidium 85.4678 2-8-18-8-1	<b>38</b> <b>Sr</b> Strontium 87.62 2-8-18-8-2	<b>39</b> <b>Y</b> Yttrium 88.90584 2-8-18-9-2	<b>40</b> <b>Zr</b> Zirconium 91.224 2-8-18-10-2	<b>41</b> <b>Nb</b> Niobium 92.90637 2-8-18-10-1	<b>42</b> <b>Mo</b> Molybdenum 95.95 2-8-18-10-1	<b>43</b> <b>Tc</b> Technetium (98) 2-8-18-10-2	<b>44</b> <b>Ru</b> Ruthenium 101.07 2-8-18-16-1	<b>45</b> <b>Rh</b> Rhodium 102.91 2-8-18-16-1	<b>46</b> <b>Pd</b> Palladium 106.42 2-8-18-18	<b>47</b> <b>Ag</b> Silver 107.87 2-8-18-18-1	<b>48</b> <b>Cd</b> Cadmium 112.41 2-8-18-18-2	<b>81</b> <b>Tl</b> Thallium 204.38 2-8-18-32-18-3	<b>82</b> <b>Pb</b> Lead 207.2 2-8-18-32-18-4	<b>83</b> <b>Bi</b> Bismuth 208.98 2-8-18-32-18-5	<b>84</b> <b>Po</b> Polonium (209) 2-8-18-32-18-6	<b>85</b> <b>At</b> Astatine (210) 2-8-18-32-18-7	<b>86</b> <b>Rn</b> Radon (222) 2-8-18-32-18-8
<b>55</b> <b>Cs</b> Caesium 132.90545196 2-8-18-18-8-1	<b>56</b> <b>Ba</b> Barium 137.327 2-8-18-18-8-2	<b>57-71</b> Lanthanides	<b>72</b> <b>Hf</b> Hafnium 178.49 2-8-18-32-18-2	<b>73</b> <b>Ta</b> Tantalum 180.94788 2-8-18-32-18-1	<b>74</b> <b>W</b> Tungsten 183.84 2-8-18-32-18-2	<b>75</b> <b>Re</b> Rhenium 186.21 2-8-18-32-18-2	<b>76</b> <b>Os</b> Osmium 192.22 2-8-18-32-18-2	<b>77</b> <b>Ir</b> Iridium 192.22 2-8-18-32-18-2	<b>78</b> <b>Pt</b> Platinum 195.08 2-8-18-32-18-1	<b>79</b> <b>Au</b> Gold 196.97 2-8-18-32-18-1	<b>80</b> <b>Hg</b> Mercury 200.59 2-8-18-32-18-2	<b>113</b> <b>Nh</b> Nihonium 284 2-8-18-32-32-18-3	<b>114</b> <b>Fl</b> Flerovium 289 2-8-18-32-32-18-4	<b>115</b> <b>Mc</b> Moscovium 289 2-8-18-32-32-18-5	<b>116</b> <b>Lv</b> Livermorium 293 2-8-18-32-32-18-6	<b>117</b> <b>Ts</b> Tennessine 293 2-8-18-32-32-18-7	<b>118</b> <b>Og</b> Oganesson 294 2-8-18-32-32-18-8
<b>87</b> <b>Fr</b> Francium (223) 2-8-18-32-18-8-1	<b>88</b> <b>Ra</b> Radium (226) 2-8-18-32-18-8-2	<b>89-103</b> Actinides	<b>104</b> <b>Rf</b> Rutherfordium 261 2-8-18-32-32-18-2	<b>105</b> <b>Db</b> Dubnium 261 2-8-18-32-32-18-1	<b>106</b> <b>Sg</b> Seaborgium 261 2-8-18-32-32-18-2	<b>107</b> <b>Bh</b> Bohrium 264 2-8-18-32-32-18-2	<b>108</b> <b>Hs</b> Hassium 265 2-8-18-32-32-18-2	<b>109</b> <b>Mt</b> Meitnerium (268) 2-8-18-32-32-18-2	<b>110</b> <b>Ds</b> Darmstadtium (271) 2-8-18-32-32-18-1	<b>111</b> <b>Rg</b> Roentgenium (272) 2-8-18-32-32-18-2	<b>112</b> <b>Cn</b> Copernicium (285) 2-8-18-32-32-18-2						
<b>57</b> <b>La</b> Lanthanum 138.91 2-8-18-18-9-2	<b>58</b> <b>Ce</b> Cerium 140.12 2-8-18-18-9-2	<b>59</b> <b>Pr</b> Praseodymium 140.91 2-8-18-21-8-2	<b>60</b> <b>Nd</b> Neodymium 144.24 2-8-18-22-8-2	<b>61</b> <b>Pm</b> Promethium (145) 2-8-18-22-8-2	<b>62</b> <b>Sm</b> Samarium 150.36 2-8-18-26-8-2	<b>63</b> <b>Eu</b> Europium 151.96 2-8-18-29-8-2	<b>64</b> <b>Gd</b> Gadolinium 157.25 2-8-18-29-8-2	<b>65</b> <b>Tb</b> Terbium 158.93 2-8-18-27-8-2	<b>66</b> <b>Dy</b> Dysprosium 162.50 2-8-18-29-8-2	<b>67</b> <b>Ho</b> Holmium 164.93 2-8-18-29-8-2	<b>68</b> <b>Er</b> Erbium 167.26 2-8-18-29-8-2	<b>69</b> <b>Tm</b> Thulium 168.93 2-8-18-31-8-2	<b>70</b> <b>Yb</b> Ytterbium 173.05 2-8-18-32-8-2	<b>71</b> <b>Lu</b> Lutetium 174.97 2-8-18-32-8-2			
<b>89</b> <b>Ac</b> Actinium (227) 2-8-18-32-18-9-2	<b>90</b> <b>Th</b> Thorium 232.04 2-8-18-32-18-9-2	<b>91</b> <b>Pa</b> Protactinium 231.04 2-8-18-32-20-9-2	<b>92</b> <b>U</b> Uranium 238.03 2-8-18-32-21-9-2	<b>93</b> <b>Np</b> Neptunium (237) 2-8-18-32-22-9-2	<b>94</b> <b>Pu</b> Plutonium (244) 2-8-18-32-24-9-2	<b>95</b> <b>Am</b> Americium (243) 2-8-18-32-25-9-2	<b>96</b> <b>Cm</b> Curium (247) 2-8-18-32-25-9-2	<b>97</b> <b>Bk</b> Berkelium (247) 2-8-18-32-27-8-2	<b>98</b> <b>Cf</b> Californium (251) 2-8-18-32-28-8-2	<b>99</b> <b>Es</b> Einsteinium (252) 2-8-18-32-29-8-2	<b>100</b> <b>Fm</b> Fermium (257) 2-8-18-32-30-8-2	<b>101</b> <b>Md</b> Mendelevium (258) 2-8-18-32-31-8-2	<b>102</b> <b>No</b> Nobelium (259) 2-8-18-32-32-8-2	<b>103</b> <b>Lr</b> Lawrencium (264) 2-8-18-32-32-8-3			



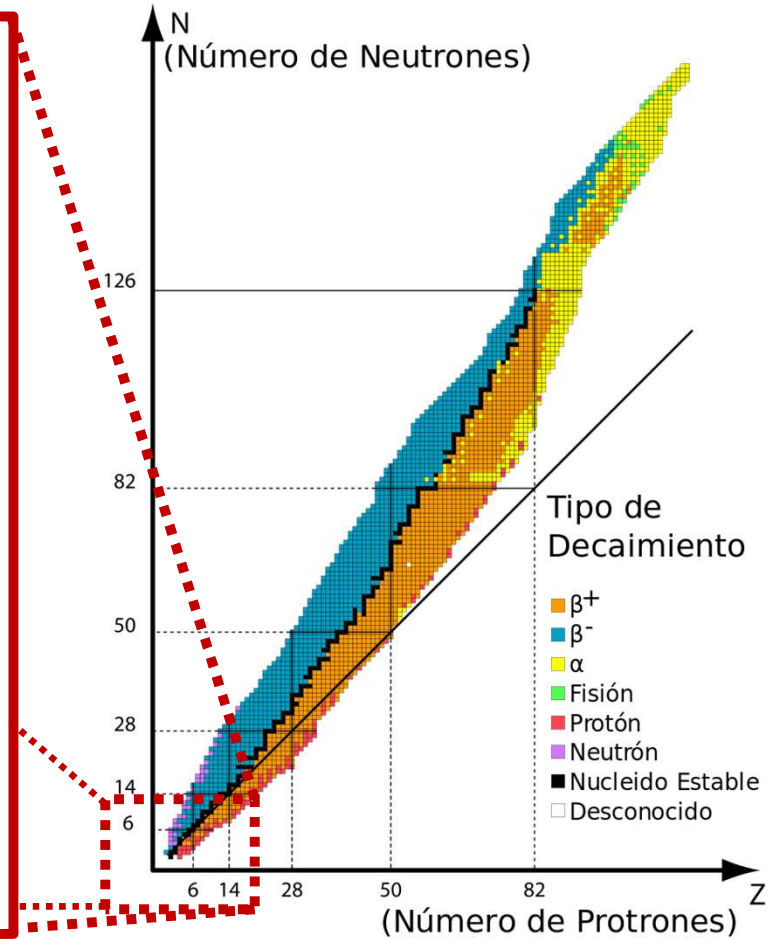
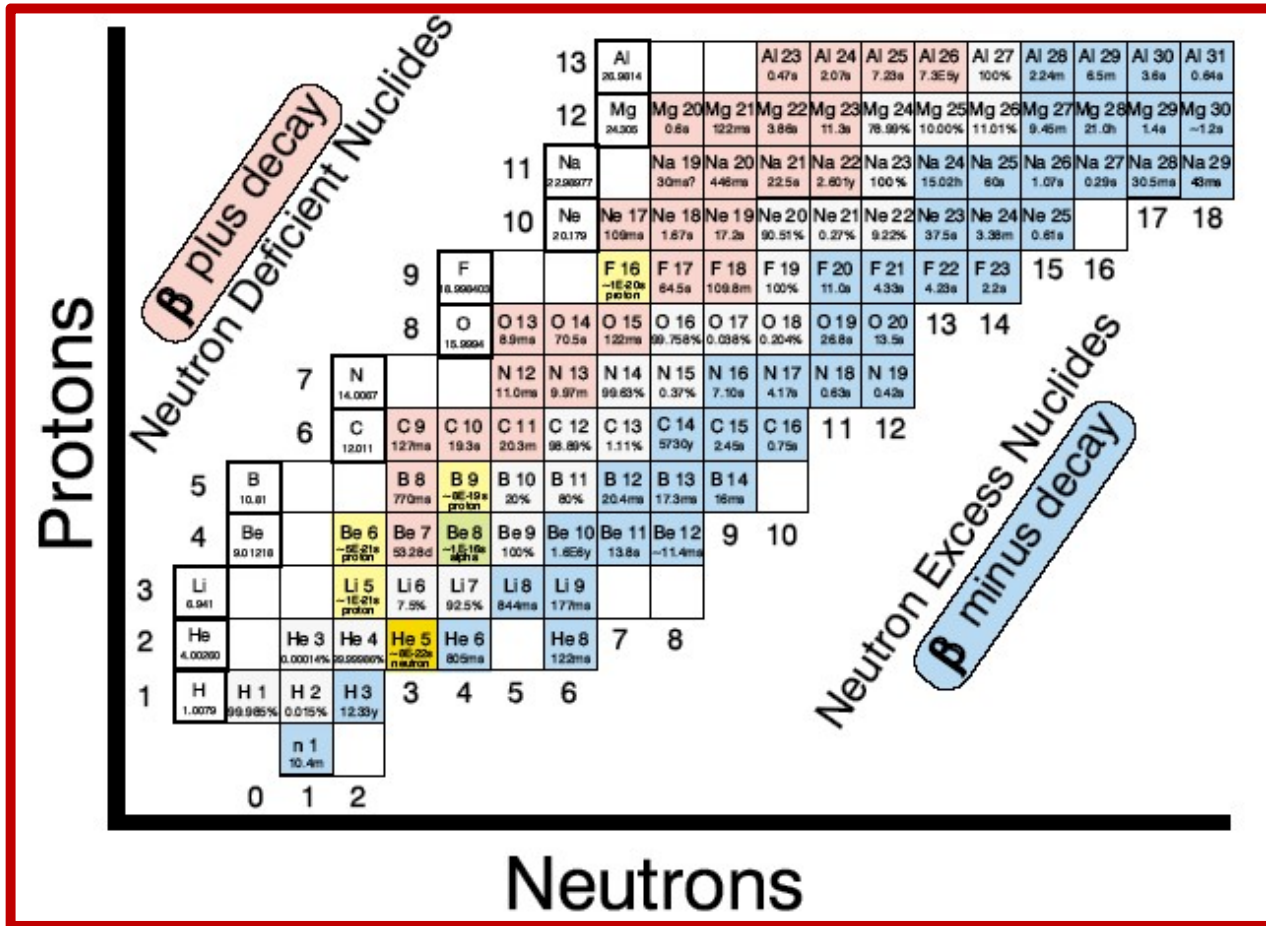
State of matter (color of name)  
 GAS LIQUID SOLID UNKNOWN

Subcategory in the metal-metalloid-nonmetal trend (color of background)

- Alkali metals
- Alkaline earth metals
- Transition metals
- Lanthanides
- Actinides
- Post-transition metals
- Metalloids
- Reactive nonmetals
- Noble gases
- Unknown chemical properties

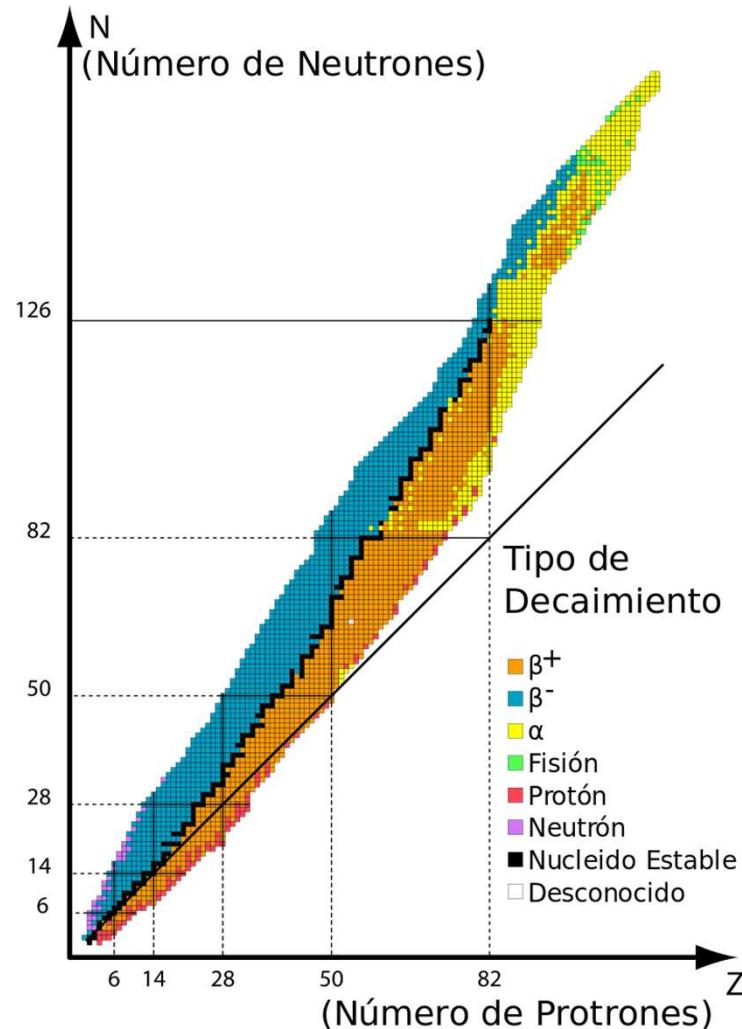
# Física Nuclear: Elementos químicos

## La Tabla de los Núclidos



# Física Nuclear: Radioquímica

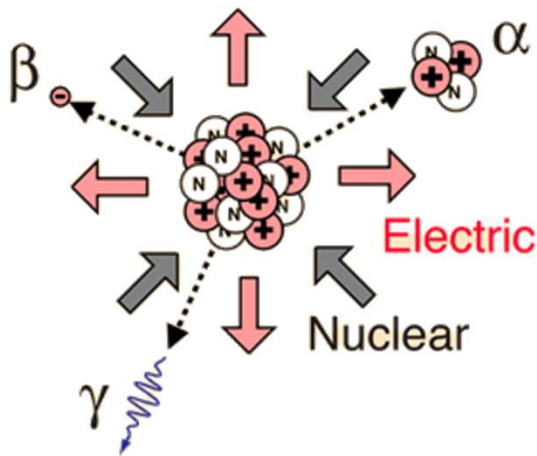
- Núcleos livianos: núclidos con  $z=A$
- Gráfica de Segrè: se representan los nucleidos (isótopos) por tipo de decaimiento:
  - Los nucleidos en color naranja y en color azul son inestables.
  - Los cuadrados negros entre estas regiones representan isótopos estables.
  - La línea negra continua que pasa por debajo de representa la posición teórica en el gráfico de nucleidos para la que el número de protones sea el mismo que el número de neutrones.
  - El gráfico muestra que los elementos con más de 20 protones deben de tener más neutrones que protones para ser estables.
  - Se conocen unos 2500 nucleidos, de los cuales son estables menos de 300.
  - Para  $Z=43$ ,  $Z=61$  o  $Z \geq 83$  no hay ningún nucleido estable.



- La fuerza nuclear fuerte mantiene unido el núcleo atómico, a pesar de que la fuerza electromagnética haga que los elementos con el mismo signo de carga eléctrica (protones) se repelan.
- La fuerza nuclear fuerte tiene un radio de acción muy pequeño, lo que explica que no se encuentren núcleos estables para  $Z \geq 83$ .
- Al aumentar el número de protones, aumenta el tamaño del núcleo, por lo que la fuerza nuclear fuerte se ve sobrepasada por la fuerza electromagnética, que logra llegar a expulsar algún protón.
- A la derecha de la franja de estabilidad los nucleidos tienen demasiados protones.

# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad



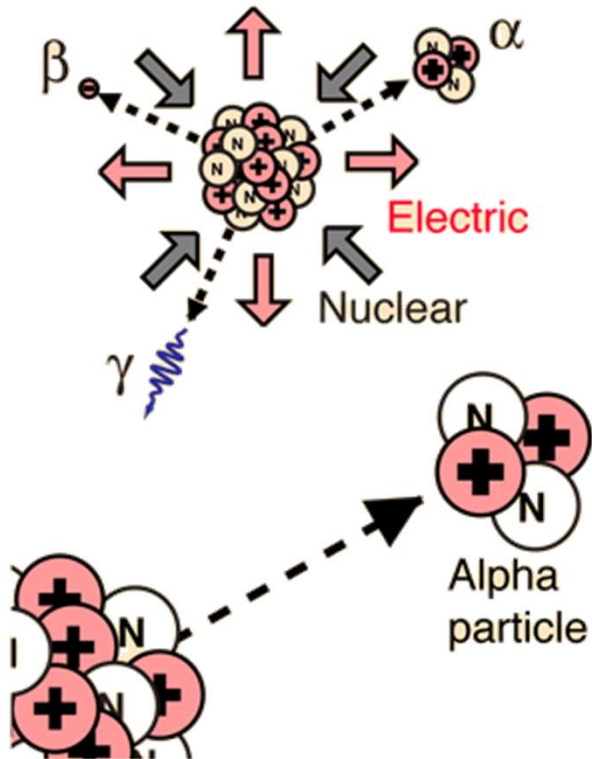
- La radiactividad se refiere a las partículas que se emiten desde los núcleos como resultado de la inestabilidad nuclear.
- Debido a que el núcleo experimenta el intenso conflicto entre las dos fuerzas más fuertes de la naturaleza (nuclear fuerte versus electromagnética), es normal que haya muchos isótopos nucleares que son inestables y emiten algún tipo de radiación.
- Los tipos más comunes de radiación se denominan:
  - Alfa ( $\alpha$ )
  - Beta ( $\beta$ )
  - Gamma ( $\gamma$ )
- Otras menos comunes:
  - Captura de electrón
  - Fisión espontánea



# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad

### Emisión alfa



- La producen nucleidos pesados ( $z \geq 83$ ).
- La partícula alfa está compuesta por dos protones y dos neutrones, o sea que es un núcleo del elemento helio.
- Debido a su gran masa (más de 7000 veces la masa de la partícula beta) y su carga, tiene un rango muy corto.
- No es adecuado para radioterapia ya que su rango es inferior a una décima de milímetro dentro del cuerpo.
- Su principal peligro de radiación se produce cuando se ingiere en el cuerpo
- Tiene un gran poder destructivo dentro de su corto alcance.
- En contacto con membranas de crecimiento rápido y células vivas produce el máximo daño.
- Ejemplo: Decaimiento del Uranio 238...



$$Z_{final} = Z_{inicial} - 2$$

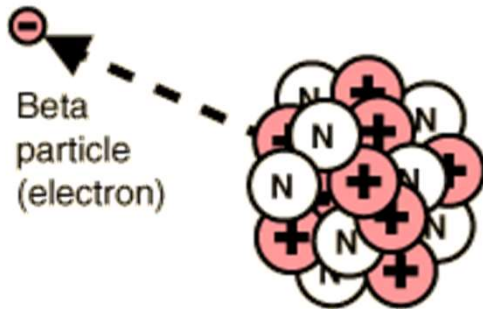
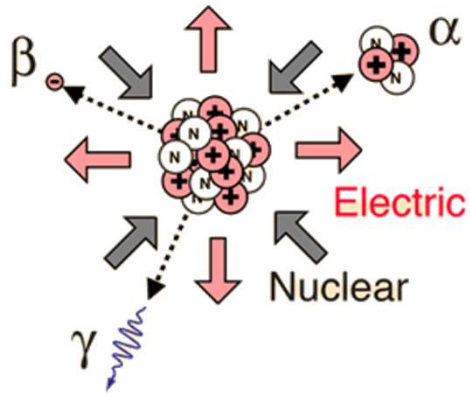
$$N_{final} = N_{inicial} - 2$$

$$A_{final} = A_{inicial} - 4$$

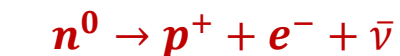
Diferente  
elemento  
químico

# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad Emisión beta(-)



- La producen nucleidos con exceso de neutrones.
- En la emisión  $\beta^-$ , un  $n^0$  se transforma en un  $p^+$  emitiendo un  $e^-$  nuclear.
- Los electrones de alta energía tienen un mayor rango de penetración que las partículas alfa, pero aún mucho menor que los rayos gamma.
- El peligro de radiación de beta es mayor si se ingieren nucleidos que emiten estas partículas.
- La emisión beta(-) es acompañada de la emisión de un antineutrino electrónico ( $\bar{\nu}$ ) que comparte el impulso y la energía de la descomposición.
- Ejemplo: Decaimiento del Carbono 14...



$$Z_{final} = Z_{inicial} + 1$$

$$N_{final} = N_{inicial} - 1$$

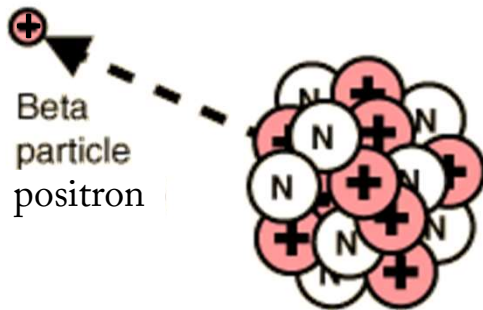
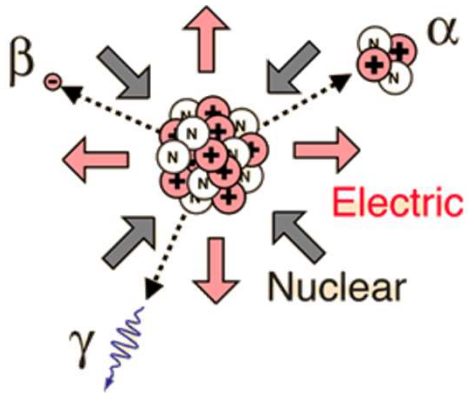
$$A_{final} = A_{inicial}$$

Diferente  
elemento  
químico

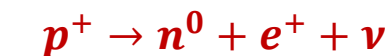
# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad

### Emisión beta(+)



- La producen nucleidos con exceso de protones.
- En la emission  $\beta^+$ , un  $p^+$  se transforma en un  $n^0$  emitiendo un positrón o antielectrón ( $e^+$ ) nuclear.
- No confundir positron con proton, el  $e^+$  tiene la misma masa que el  $e^-$ .
- Los electrones de alta energía tienen un mayor rango de penetración que las partículas alfa, pero aún mucho menor que los rayos gamma.
- El peligro de radiación de beta es mayor si se ingieren nucleidos que emiten estas partículas.
- La emisión beta(+) es acompañada de la emisión de un neutrino electrónico ( $\nu$ ) que comparte el impulso y la energía de la descomposición.
- Ejemplo: Decaimiento del Nitrógeno 13...



$$Z_{final} = Z_{inicial} - 1$$

$$N_{final} = N_{inicial} + 1$$

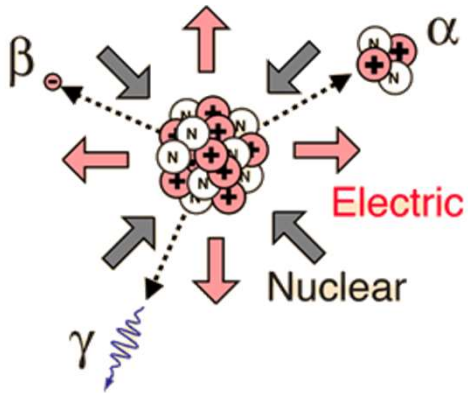
$$A_{final} = A_{inicial}$$

Diferente  
elemento  
químico

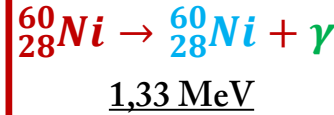
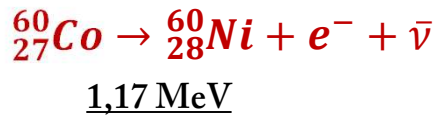
# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad

### Emisión Gamma



Gamma ray



$$Z_{\text{final}} = Z_{\text{inicial}}$$

$$N_{\text{final}} = N_{\text{inicial}}$$

$$A_{\text{final}} = A_{\text{inicial}}$$

Mismo elemento químico

- Un núcleo radiactivo puede descomponerse por emisión  $\alpha$  o  $\beta$ . El núcleo hijo resultante generalmente se obtiene en un estado excitado, por lo que puede decaer a un estado de menor energía emitiendo un fotón de rayos gamma: decaimiento gamma.
- La radiactividad gamma está compuesta de ondas electromagnéticas, por lo que son fotones.
- Se distingue de los rayos X solo por el hecho de que provienen del núcleo.
- Además la mayoría de los rayos gamma tienen más energía que los rayos X y por lo tanto son muy penetrantes.
- La radiación gamma es el tipo de radiación más útil para fines médicos, pero al mismo tiempo es la más peligrosa debido a su capacidad de penetrar grandes espesores de material.
- Ejemplo: Decaimiento del Cobalto 60...

# Física Nuclear: Radioquímica

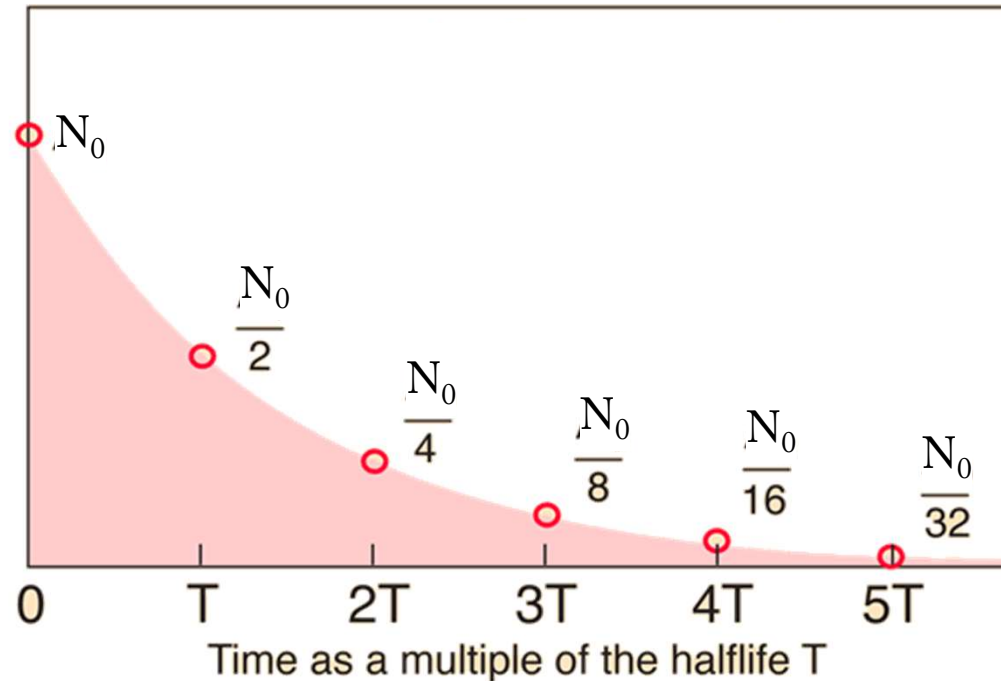
## Radiactividad: Vida Media

- La vida media radiactiva para un radioisótopo es el tiempo para que la mitad de los núcleos radioactivos en cualquier muestra experimente la desintegración radiactiva.
- Después de transcurrido un tiempo igual a dos vidas medias, habrá una cuarta parte de la muestra original.
- Después de tres vidas medias, habrá 1/8 de la muestra original, y así sucesivamente.
- Aunque la desintegración radiactiva implica eventos discretos de desintegración nuclear, el número de eventos es tan grande que puede tratarse como un continuo.
- El resultado de la probabilidad de descomposición se puede poner en forma diferencial:

$$dN = -\lambda N dt \quad \text{or} \quad \frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

$\lambda$ : constante de desintegración [s<sup>-1</sup>]

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$



# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad: Vida Media

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

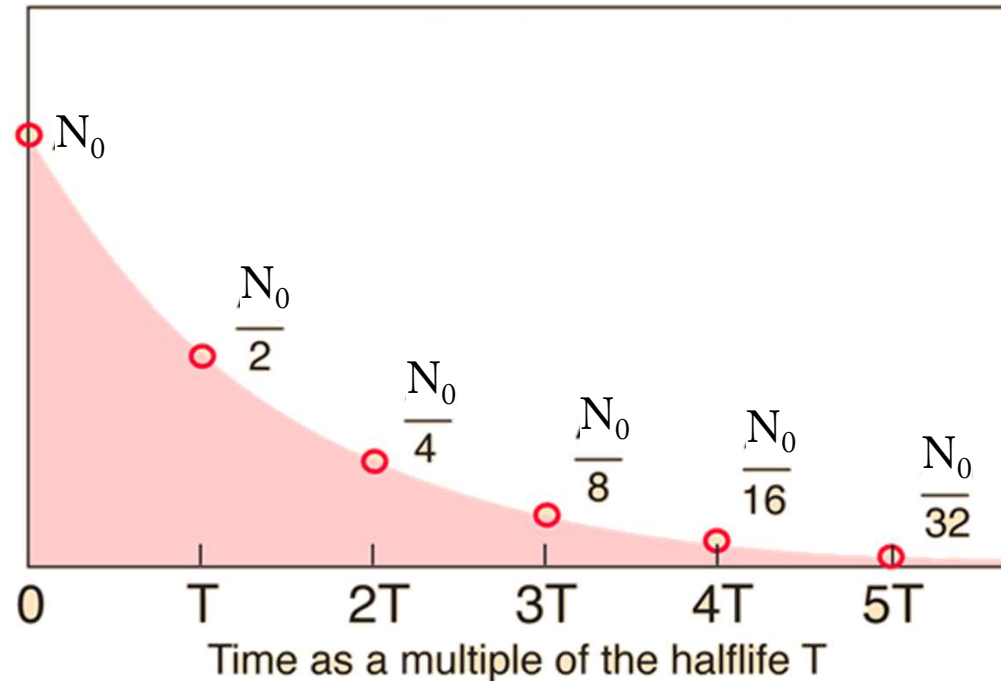
→ La tasa de desintegración radiactiva se expresa típicamente en términos de la vida media o la constante de desintegración.

→ Están relacionados de la siguiente manera:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} = \frac{1}{2} \Rightarrow e^{+\lambda t} = 2 \Rightarrow \lambda t = \ln 2$$

$$\begin{array}{c} \text{Vida} \\ \text{media} \\ \text{radiactiva} \end{array} T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda} \approx 0.693 \tau \begin{array}{c} \text{T} \\ \text{de} \\ \text{vida} \\ \text{promedio} \end{array}$$

Constante de decaimiento radiactivo



# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad: Actividad

→ La actividad se define como el número de desintegraciones por unidad de tiempo:

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

→ La actividad A es un valor positivo, debido a que el número de núcleos disminuye.

→ Teniendo en cuenta que:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

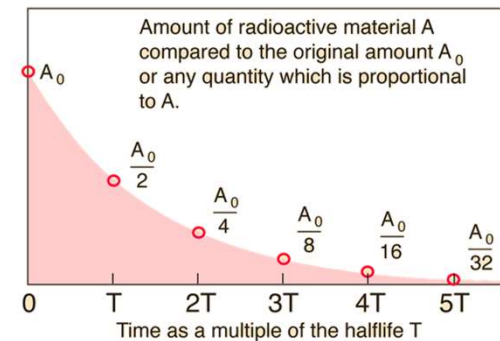
→  $A(t) = -\frac{d[N_0 \cdot e^{-\lambda t}]}{dt}$

→  $A(t) = -N_0 \frac{d[e^{-\lambda t}]}{dt}$

→  $A(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

$$A_0 = \lambda \cdot N_0$$
$$A(t) = \lambda \cdot N(t)$$

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$



$$A = \text{Becquerel} = [Bq] = \frac{1 \text{ desintegración}}{s}$$

$$A = \text{Curie} = [Ci] = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \text{ desintegraciones}}{s}$$

# Física Nuclear: Radioquímica

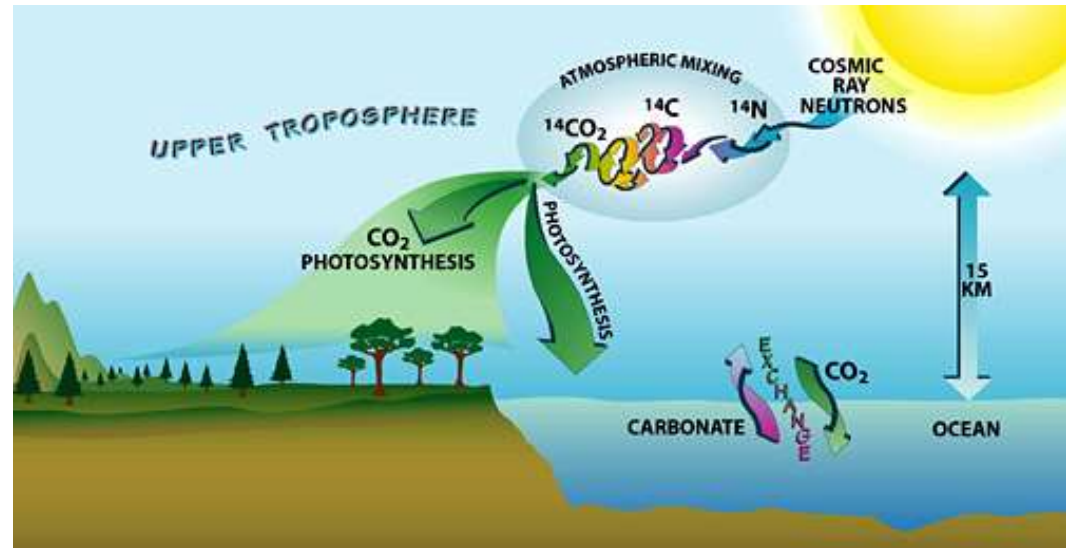
## Radiactividad: Actividad

→ Ejemplo: Datación con  $^{14}\text{C}$



- La vida media de un radioisótopo no se ve afectada por la temperatura, el estado físico o químico, o cualquier otra influencia del ambiente fuera del núcleo que no tenga interacciones directas con las partículas del núcleo.
- Las muestras radiactivas continúan decayendo a un tasa predecible. Es decir, cualquier núcleo radiactivo actúa como un reloj.
- Si se puede estimar la composición original de una muestra radiactiva, las cantidades de los radioisótopos presentes pueden proporcionar una medida del tiempo transcurrido.

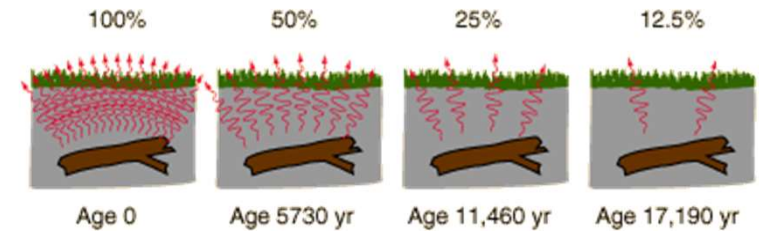
- En la atmósfera superior llegan protones de rayos cósmicos que destruyen núcleos de gases y compuestos.
- Estos liberan neutrones que a su vez bombardean el  $\text{N}_{2(g)}$ , el componente principal de la atmósfera.
- Debido al bombardeo con neutrones, el  $^{14}\text{N}$  del  $\text{N}_{2(g)}$  es convertido en el isótopo radiactivo  $^{14}\text{C}$ .
- El  $^{14}\text{C}$  radiactivo se combina con el  $\text{O}_{2(g)}$  para formar  $\text{CO}_{2(g)}$ , que se incorpora al ciclo de los seres vivos (fotosíntesis...).
- El proceso de formación de  $^{14}\text{C}$  es constante.
- O sea que al medir las emisiones radiactivas de la que alguna vez estuvo viva, y comparar su actividad con el nivel de equilibrio de los seres vivos, se puede medir el tiempo transcurrido.





# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad: Actividad



→ Ejemplo: Datación con  $^{14}\text{C}$



- O sea que...durante su vida, una planta o animal está en equilibrio con su entorno mediante el intercambio de C con la atmósfera o mediante su dieta. Por lo tanto, tendrá la misma proporción de  $^{14}\text{C}$  que existe en la atmósfera para vegetales y animales terrestres, o en el océano para el caso de animales o plantas marinas.
- Una vez que el ser vivo muere, deja de adquirir  $^{14}\text{C}$ , y el  $^{14}\text{C}$  dentro de su cuerpo en ese momento irá decayendo, por lo que la proporción de  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  en sus restos disminuirá gradualmente.
- El  $^{14}\text{C}$  se descompone con una vida media de aproximadamente 5730 años ( $T_{1/2}$ ) por la emisión de un electrón nuclear.
- En equilibrio con la atmósfera, un gramo de  $^{14}\text{C}$  muestra una actividad de aproximadamente 15 desintegraciones por minuto ( $A_0$ ).
- Si la actividad actual de una muestra fósil es 0,025 Bq, ¿cuantos años tiene esa muestra?

→ Constante de desintegración

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{5730 \text{ años}} = 1,2 \cdot 10^{-4} [\text{años}^{-1}]$$

$$A = 0,025 \text{ Bq} = 0,025 \frac{\text{desint}}{\text{s}}$$

$$A_0 = 15 \frac{\text{desint}}{\text{min}} = 0,25 \text{ Bq}$$

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$t = -\lambda \ln \frac{A}{A_0} = \lambda \ln \frac{A_0}{A}$$

$$t = \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-4} [\text{a}^{-1}]} \ln \frac{0,25 \text{ Bq}}{0,025 \text{ Bq}} = \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-4} [\text{a}^{-1}]} \ln 10$$

$$t = 19038 \text{ años}$$

# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad: Daño Biológico

- En general, la radiación ionizante es dañina y potencialmente letal para los seres vivos, pero puede tener beneficios para la salud en la radioterapia para el tratamiento del cáncer y la tirotoxicosis.
- El cuerpo humano no puede detectar la radiación ionizante, excepto en dosis muy altas, pero los efectos de la ionización se pueden utilizar para caracterizar la radiación.

→ Dosis de radiación:

- Dosis absorbida: es una cantidad de dosis física (D) que representa la energía media impartida a la materia por unidad de masa mediante radiación ionizante. En el sistema de unidades SI, la unidad de medida  $J/kg = Gy$  (Grey). La unidad de [rad] (radios, CGS,  $0.01 Gy$ ) a veces se usa, principalmente en USA.
- Dosis Equivalente y Dosis Efectiva: para representar el riesgo estocástico (riesgo de cáncer, mutaciones, etc.), se usan la dosis equivalente ( $H_T$ ) y la dosis efectiva (E). Las unidades de  $H_T$  y E son los [rem] (*Roentgen Equivalent Man*) y Sievert [Sv].
- Debido a que las diferentes radiaciones (alfa, beta y gamma) causan diferentes daños,  $H_T$  y E son mejores medidas de daño biológico.

$$H_T = (RBE) \cdot (D)$$

RBE: *Relative Biological Effectiveness*  
Efectividad Biológica Relativa

Radiación	RBE
Rayos $\gamma$ y X	1
electrones	1-2
neutrones	3-20
protones	10
alfa	20

$$[1 Sv] = (RBE) \cdot (1 Gy)$$
$$[1 rem] = (RBE) \cdot (1 rad)$$
$$[1 R] = [2 rem]$$

$$E = H_T \cdot \text{Factor}$$

Parte cuerpo	Factor
Piel	0.01
Pulmón	0.12
Cuerpo	1

# Física Nuclear: Radioquímica

## Radiactividad: Daño Biológico

→ Calcular la Dosis Equivalente por año (E/año) que recibe nuestro cuerpo debido a el  $^{14}\text{C}$  presente en nuestro cuerpo!!!

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \text{masa} = 75 \text{ kg} \\ \rightarrow \text{Porcentaje de C en el cuerpo} = 18\% \\ \rightarrow ^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1,33 \cdot 10^{-12} \end{array} \right\} \rightarrow \text{masa de } ^{14}\text{C en el cuerpo} = \underbrace{75 \text{ kg} \times 0,18\%}_{13,5 \text{ kg de C total}} \times 1,33 \cdot 10^{-12} = 1,795 \times 10^{-11} \text{ kg de } ^{14}\text{C}$$

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \text{Masa atómica del } ^{14}\text{C} = 14 \text{ g/mol} \\ \rightarrow \text{Nro. de Avogadro} = 6,022 \times 10^{23} \text{ partículas /mol} \end{array} \right\} \rightarrow \text{átomos de } ^{14}\text{C en el cuerpo} = 1,795 \times 10^{-8} \text{ g} \times \frac{6,022 \times 10^{23} \text{ átomos/mol}}{14 \text{ g/mol}}$$

**átomos de  $^{14}\text{C}$  en el cuerpo =  $7,72 \times 10^{14}$**

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \text{Constante de desintegración del } ^{14}\text{C} \\ \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{5730 \text{ años}} = 1,2 \cdot 10^{-4} [\text{años}^{-1}] \end{array} \right\} \frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ años}^{-1} \times 7,72 \times 10^{14} = 9,26 \cdot 10^{10} \text{ decays/year} = 2938 \text{ decays/s}$$

$$\rightarrow \text{Energía liberada en cada desintegración} = 0,156 \text{ MeV} \left\{ \begin{array}{l} D = \frac{2938 \text{ decays/s} \times 0,156 \text{ MeV/decay} \times (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} / 10^{-6} \text{ MeV})}{75 \text{ kg}} = 9,8 \cdot 10^{-13} \text{ Gy/s} \end{array} \right.$$

$$H_T = (\text{RBE}) \cdot (D) = 1,5 \times 9,8 \cdot 10^{-13} \text{ Gy /s} = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ Sv/s} \quad \longrightarrow \quad \text{Anual } H_T = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ Sv/s} \times 31536000 \text{ s/año} = 47 \mu\text{Sv}$$

→ Nuestro cuerpo sopora perfectamente una dosis anual de 4 mSv/año.kg