

T. 1 - ESTRUCTURA ATÓMICA + ÁTOMOS DE 1 ELECTRÓN

- Peso relativo, H-O → H₂O → 1/18
- Rayos catódicos: e⁻ (Thompson), gas AV → rayos X
- Struc. periódico (Mendeliev) → Townshend
- Millikan: carga e⁻, aceite, NA, me
- Rutherford Nisp α $\frac{z^2}{E^2 \sin^4(\theta/2)}$ N·v → núcleo puntual; Rat ~ 1 Å

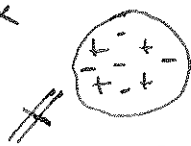


lámina Au, cantalleador ZnS.
 $R = \frac{D}{2} \left(1 + \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \right)$; $R \approx 1,4 \cdot A^{1/3} \text{ fm}$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 \hbar c}$$

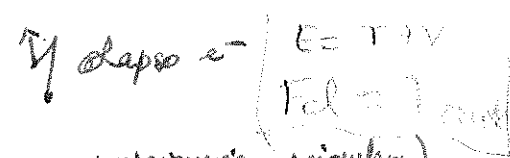
- Espectroscopía atómica

↳ Balmer $G \frac{n^2}{n^2 - 4}$ ↳ Rydberg $\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right)$ $n_b > n_a$
 $b \rightarrow a$

- R_H = 109677, 5810 cm⁻¹; Kirchoff, Bausen $\lambda = \frac{m \cdot c \cdot \lambda^2}{h \cdot c} \cdot \left(\frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right)$
- Lyman, Balmer, Paschen, Bracket, Pfund, Humphreys
- $\lambda_{nm} = T_n - T_m$; $T_n = \frac{R_H c}{n^2}$ términos

• Principio de combinación de Ritz
 • interferometría exacta

- Ley de Planck (cuerpo negro) $E = h\nu$ 1900
- Einstein (ef. fotoeléctrico), $E = pc$ 1905
- ↳ Ritz, Pl, Ein.



Bohr (1913) postula $\left\{ \begin{array}{l} \text{órbitas estables } e^- \text{ no radian (estacionaria + circular)} \\ \text{radian en transiciones entre orb. estables, } \Delta E = h\nu \\ \text{ppo. corresponde: } \left(\begin{array}{l} r_{n\infty} = \frac{a_0 \cdot n^2}{Z} \\ \text{si } n \rightarrow \infty \end{array} \right)$

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m = R_H h c \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = T + V \quad \downarrow n \rightarrow \infty$$

$$\rightarrow R_{H\infty} = \frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} \rightarrow R_H$$

$$R_H = R_\infty \cdot \frac{1}{1 + \frac{m_e}{M}}$$

$$E_n = -13,6 \text{ eV} \cdot \frac{Z^2}{n^2}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow L &= n\hbar \\ m v &= a_0 \cdot n \cdot \frac{Z}{0,529 \text{ Å}} = \frac{1}{137} R_H c Z \end{aligned}$$

- Espectroscopía de masas → separación isotópica $\Delta \lambda = \lambda_H \left(1 - \frac{R_H}{R_D} \right)$

↳ átomos hidrogenoideos $R_H = Z^2 R_\infty$ (1e⁻): U⁹¹⁺ (6si) → rayos X (keV)

X Modelo de Sommerfeld → $l \neq \pm 1$ + órbitas elípticas.

• Átomos muónicos (Zμ⁻) → a_B ~ f_m → ves núcleo $\rho(r) = \rho_0 / (1 + e^{-r/a})$

X Bohr falla 2p_{1/2} → 1s_{1/2}; 2p_{3/2} → 1s_{1/2}

- fusión termonuclear catalizada por μ⁻
- muonio (μ⁺ · e⁻)
- positronio (e⁺ · e⁻) < orto (s=1) → 2 perdicetes, defectos material
 para (s=0)
- Átomos piónicos (Zπ⁻) → int. fuerte, n=16, → Δ(3/2, 1/2)
- " kaónicos, hiperónicos, antiprotonicos
- Antihidrógeno (p⁺ e⁻)

$$r_c = 137 \cdot \lambda_D \text{ fm}$$

Atomos de Rydberg

$We^- = W_{ion}$ si $n \rightarrow \infty \rightarrow n \approx 350 \sim 500 \rightarrow E_{ion} = 0,5 \cdot 10^{-4} eV$
 $\hookrightarrow Z_{eff} = 1$ (apantallamiento) \hookrightarrow dye lasers
 $a_B \propto \frac{n^2 a_0}{Z_{eff}} \sim \mu m$

$R_{n,l}, Y_{l,m} \rightarrow l = 0, \dots, n-1 \rightarrow -l \leq m \leq l \rightarrow n-l-1$ nodos

$s = \pm \frac{1}{2} \rightarrow$ Pauli $\rightarrow 1 e^- / \text{estado}$ (fermiones)

$l = 0$	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$
s	p	d	f

s: sharp
 p: principal, intereste
 d: difusa, borrosa

n = 1	2	3
capa K	L	M

la + serie del núcleo

$(2l+1) \rightarrow 2n^2$; $j = 0$ si capa cerrada ; $j = l + s$
 Dirac $\rightarrow E(n, j)$ $n = 2 \left\{ \begin{array}{l} 2P_{3/2} \\ 2P_{1/2} \end{array} \right. j$ (estructura fina)
 $V_{es} \propto \frac{1}{r} \cdot s$

Transiciones ópticas

$2s \rightarrow 1s \rightarrow$ regla de selección $\Delta l = \pm 1$ \rightarrow fotón: transporta $l = 1$
 simetría \vec{r} , operador dipolar
 \hookrightarrow transición "prohibida"

$I \sim 23 eV$

Alcalinos $\rightarrow H$ modificado $\rightarrow n_{eff} = n - \Delta(n, l)$ defecto cuántico
 $\vec{V}_p \rightarrow s = R_{nl} \left[\frac{1}{(n - \Delta(n, 0))^2} - \frac{1}{(n - \Delta(n, l))^2} \right]$ $n_0 = 3$ principal
 $\vec{V}_s \rightarrow p$ sharp 1
 $\vec{V}_d \rightarrow p$ difusa 1
 $\vec{V}_f \rightarrow d$ fundamental 2
 n^2 de la capa donde últimos e^-

simplete \rightarrow antisimétrico 1-2
 triplete \rightarrow simétrico 1-2 \rightarrow nunca en fundamental $\rightarrow R_{\geq 2}$ anti-sim.
 de espín

Ppo Pauli $2e^-$ No todos n^2 cuánticos $\Rightarrow s$.
 $\psi(\vec{r}_i, \vec{s}_i)$ de n fermiones \rightarrow debe ser anti-sim. en intercambio de coord.

$\Delta S = 0 \rightarrow$ op. dipolar \rightarrow regla selección
 estados excitados \rightarrow tripletes E más baja

$P \rightarrow 2e^-$ en un estado $\rightarrow s_1 + s_2 \rightarrow$ multiplicidad $2S + 1$
 $2S + 1 \dots$ multiplicidad orbital
 $n \left[\begin{array}{l} \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} \right] \rightarrow$ total $j = L + S \dots L - S \rightarrow S = 1 \rightarrow 3 P_{0,1,2} \rightarrow$ triplete pegado E

$E_{ion} = 24,8 eV, E_{2s} = 54,4 eV \rightarrow E_{xp} = -79 eV$
 $\vec{L} \cdot \vec{S} \rightarrow$ espín-órbita $\rightarrow \vec{L} \cdot \vec{S} = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + S^2 - J^2}$

• Átomos muy pesados:
 \hookrightarrow acoplamiento $j_j \quad J = j_1 + j_2 ; j_i = l_i + s_i$

Propiedades químicas → Stna. periódica

- 1) H 1s²
- 2) gases nobles 1s²/ns²np⁶ → capas completas, no interaccionan
- 3) Alcalinos / Alkaliotérricos / Térreos → ns¹/ns²/ns²np
- 4) Semicond / semimetales ns²np², capa $\frac{1}{2}$ llena ; C, Si, Ge, Sn, Pb
- 5) Metales de transición ~~nt~~
- 6) Metales → dan fácil e⁻, pasa a banda conducción : Cu, Ag, Au → capa $< \frac{1}{2}$ llena
- 7) \hookrightarrow "malos" cond. Zn, Cd, Hg, e⁻ más ligada → $>$ medio llena
- 8) No metales, arrancan e⁻
- 9) Tierras raras, → lantánidos + actínidos

$$2s+1 \quad L_f$$

Reglas de Hundt:

- 1) Capas cerradas no contribuyen a S, L, J
- 2) Si no cerrada → spin e⁻ / veces máximo compatible con Pauli ↑↑↑
- 3) Dentro de máx spin → máximo L
- 4) J \rightarrow e⁻: mínimo $|L-S| \leq J \leq |L+S|$
 \rightarrow veces: máximo

Hartree-Fock → total ϕ antisim → det()

T. 2 - RAYOS X

- rayos catódicos, Röntgen película fotográfica → radiación neutra
- producen ionización → Geiger
- Experimento de Moseley 1913 → $\sqrt{\nu_m} = C_n (Z - \sigma)^2$, difracción cristales

↳ modelo de Bohr: $\nu_{nm} = RC (Z - \sigma) \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ m=1 → K
↳ pantalla ϕ m=2 → L
⋮

- intensidad $I(\nu) = C Z (\nu_{max} - \nu)$
- espectro característico + continuo $\dots e^-$ quieto
↳ agrupados en series ↳ radiación dipolar, Bremsstrahlung

- e⁻ Auger → NO ionizados x rayos X
 $h\nu_K = E_K - E_L \rightarrow$ fotón $\left\{ \begin{array}{l} \text{real} \rightarrow \text{línea } K\alpha \\ \text{virtual} \rightarrow e^- \text{ Auger} \end{array} \right.$ $E_{e^-} = h\nu_K - E_L = E_K - 2E_L$
↳ ef. fotoeléctrico con capa L.

Medida de energía de e⁻

- a) Campos magnéticos → p = qBp
- a) \dots Tiempo de vuelo

Fuentes de rayos X y UV

Fuentes de rayos X y UV

→ monocromador → ν definida

- 1) Lámparas de gases
- 2) Tubos de rayos X (1-500keV)
- 3) Fuentes de radiación sincrotrón, anillos almacenados

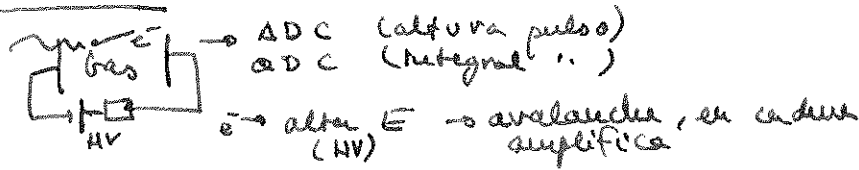
- a) Cátodo rotante
- b) 2 filamentos (x si uno se rompe)
- c) → Imagen (alta E, baja E) ~30keV
 - Radioterapia, 10 uas - intenso, $x_0 + E : \sim 100-500keV$

Detección rayos X, conversión radiación a carga



- capas KLM → e^- arranca e^-
- Valancia → luz

Ionidad



- Resistentes
 - alta radiación
 - x Impreciso
 - x $N^0 e^-$ pequeño
- $\Delta E \propto \sqrt{N}$
 $\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$

Semiconductores

h^+ hueco e^- , Si, Ge

intrínsecos o dopar
 γ → zona de deserción



- se rompen en avalancha
- $\frac{\Delta E}{E} \sim 3\%$
- con KeV → muchos portadores
- $efic. E \propto prob. int \propto Z^2/E$

- bajas E → Si(Li), criogenia, $E \sim 100\%$ $\Delta E/E \sim 4\%$ x criogenia
- altas E → HPGe, $10^{10}/cm^3$ $\Delta E/E \sim 2\%$

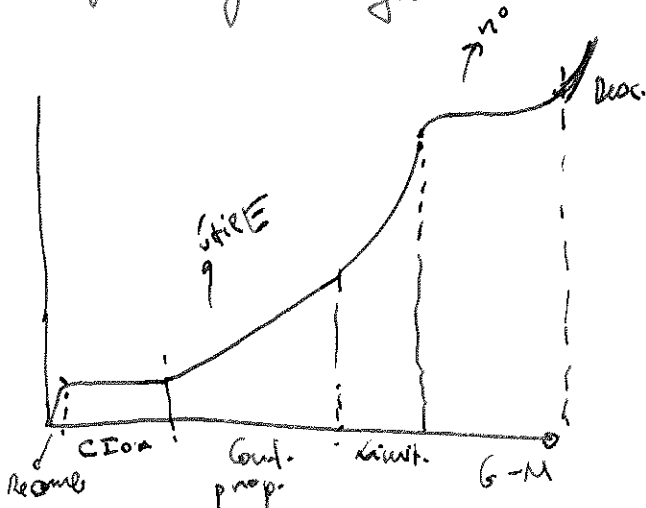
= radiación ionizante (e^- , α , $Tamb$)

- detectores de Si a $T = 300K$
- radiación genera pares e^- -hueco

Dosímetros termoluminiscentes



calentar \equiv liberar lo q emite (luz) → tubo fotomultiplicador
 quem → quemar defectos



- KRFA → Resonancia fluorescente rayos X
x sonda tubo rayos X → + X
- PIXE → composición química de materiales
? sonda: protones, → salen rayos X
- HIXE → sonda: iones pesados → salen X
- PIGE → sonda: prot → salen γ nucleares
- NRA → reacciones nucleares

Sondas → Tubos X
 ↳ Aceleradores e^-
 ↳ Hechos protones, α , iones pesadas

- medir sonda → carga luz
 producto → Si(Li)

→ Síntesis $\left\{ \begin{array}{l} \text{medicina} \\ \text{investigación} \end{array} \right.$

- aire
 - vacío

Estructura fina de rayos X

$\Delta l = \pm 1, \Delta j = 0, \pm 1 ; \Delta s = 0$

Ves
 LMNO → huecos

Absorción de rayos X

no e^- ionización

$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$

distancia de semiabsorción $d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$

T.3 - ÁTOMOS EN CAMPOS MAGNÉTICOS

- cambian niveles con \vec{E}, \vec{B}

$\vec{\mu} = -\mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar}$
 $V_{mag} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ (cte girromagnética) $\mu_B = \frac{e\hbar}{2mc}$ (magneton de Bohr)

$\vec{\mu}_{at} = g_L \mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar}$ (parte de darwin) 

- precisión m_{0p} angular $\rightarrow \omega_p = \omega_L = \frac{eB}{\hbar}$

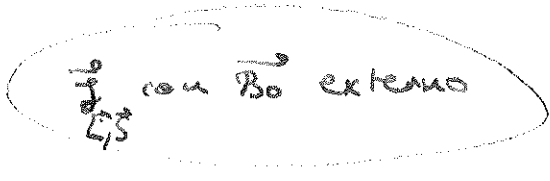
$\mu_s = -g_s \frac{e}{2m_e} \vec{S}$ $\rightarrow g_s = 2,0023 \cdot \frac{2m_e}{m_e}$
 $\mu_s = 1,00116 \mu_B \rightarrow$ partículas virtuales

- Campos internos

• Biot-Savart / interacción espín-orbita $V_{es} = a \vec{L} \cdot \vec{S} \sim 10^{-4} eV \leftrightarrow 13,6 eV$

$V = -\vec{B}_0 \cdot g_s \vec{S} \mu_B / \hbar$

- Efecto Zeeman
 normal: campos fuertes
 anómalo: " débiles
 Paschen-Back: " intermedios



Normal

$V = -B_0 (m_l + 2m_s)$ $\rightarrow \Delta E = -B_0 m_l \mu_B$ (transiciones)

$s = \frac{1}{2}, l = 1 \rightarrow 5$ niveles

Simultáneamente \rightarrow transiciones con luz polarizada
 dipolo oscilante, transic. dipolar, aprox.
 sentido polariz \rightarrow saber transic.
 $\Delta m_s = 0: \pi$
 $\Delta m_s = \pm 1: \sigma$



Anómalo

$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \rightarrow V_m = -\vec{\mu}_J \cdot \vec{B}_0 = g_J \mu_B m_J B_0$
 $g_J = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)}$

$g_J \vec{J} = \vec{L} + 2\vec{S}$
 $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$
 $g_J \vec{J} \cdot \vec{J}$

transición dipolar $\rightarrow \Delta j = 0, \pm 1, \Delta m_j = 0, \pm 1, \Delta m_s = 0, \Delta l = 1$

estructura fina (\vec{L}, \vec{S}) - Campos INTERNOS

$V_{fs} = -\vec{B}_L \cdot \vec{S} = -a_{fs} \frac{J(J+1) - L(L+1) - S(S+1)}{2} \propto$ Ef. Zeeman

estructura hiperfina (\vec{J}, \vec{I}) \vec{I} : espín nuclear

$V_{HFS} = -\vec{B}_J \cdot \vec{\mu}_I; \mu_I = g_I \frac{\mu_N}{\hbar} \vec{I} \quad \mu_N = \frac{e\hbar}{2mp}$

$\vec{F} = \vec{J} + \vec{I} = \vec{L} + \vec{S} + \vec{I}$
 $V_{HFS} = \frac{g_I \mu_N B_J}{2 \sqrt{j(j+1)}} \cdot (F(F+1) - J(J+1) - I(I+1))$ $|F-J| \leq F \leq |F+J|$
 $2F+1$ subniveles

$\Delta W_{HFS} = \frac{a}{2} \Delta F \cdot (F+1) \quad \Delta F = 0, \pm 1; \Delta J = 0, \pm 1, \Delta l = \pm 1, \Delta s = 0$

$a = 6 \cdot 10^{-6} eV \rightarrow \lambda = 21 cm \sim 1420 MHz$ ($F=1 \rightarrow 0$)

Lo Ef. Zeeman de la estructura hiperfina $\vec{J}, \vec{I}, \vec{B}_0$

- débiles $\vec{F} = \vec{I} + \vec{J}$
- fuertes \rightarrow proceder independientes

• CAMPOS DÉBILES

$\vec{F} \rightarrow 2F + \vec{j} : (u_{ip}) \rightarrow$ metros \vec{B}_0 rompers de igualdad

$V = -\vec{\mu}_F \cdot \vec{B}_0$

$\vec{\mu}_F = \mu_I \vec{i} + \mu_J \vec{j}$

$\vec{\mu}_F \cdot \vec{F} = -g_F \mu_B \vec{F} \cdot \vec{F}$

$|\vec{F}| = |\vec{i} + \vec{j}|$

$g_F = g_I \frac{F^2 + J^2 - I^2}{2F^2} - g_J \frac{\mu_I}{\mu_B} \frac{F^2 + I^2 - J^2}{2F^2}$

$\vec{\mu}_F = -g_F \frac{\mu_B}{h} \vec{F}$

$\Delta E_{HFS} = g_F \mu_B B_0 m_F$

• CAMPOS FUERTES

acoplado

$V_{HFS} = -\vec{\mu}_F \cdot \vec{B}_0 - \mu_J \vec{B}_0 = -g_I \mu_N m_I B_0 + g_J \mu_B m_J B_0$

Resonancia del espín del electrón (ESR)

$V_{m_j} = \pm \frac{1}{2} g_J \mu_B B_0$
 $\vec{B} \propto \vec{i} \propto \vec{j}$

$\Delta E_{HFS} = g_J \mu_B m_J B_0 - g_I \mu_N B_0 m_I$

no acoplado $\langle m_I m_J \rangle = 0$ RWA

$\Delta m_J = \pm 1$
 $\Delta m_I = 0$ } ESR

$\Delta m_I = \pm 1$
 $\Delta m_J = 0$ } NMR



$\nu'' - \nu = a$

acoplados $\rightarrow \frac{a}{2} (F^2 - I^2 - J^2)$

distancias xa distancia $m_I = -1, 0, 1, 2$ valores de m_J

Medida de μ_N

Strom-Gerlach $d = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} \frac{F}{m} \left(\frac{L}{v}\right)^2$

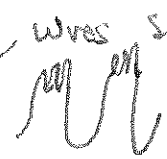
• **RMN** Rabi 1937 \rightarrow Resonancia de haces moleculares

- seleccionar con campo RF

$\frac{\omega_e}{\omega_p} \sim \frac{\mu_e}{\mu_p} \rightarrow \frac{\Delta B_0}{B_0} \sim 10^{-8}$

frecue fijo, B variable, métodos, impulsos \rightarrow FFT, wres según eula cl

• FFT



6 picos x tipo
 10 picos

• Técnicas imagen, reconstrucción 3D a partir modos 2D

• 2 relaj (soluciones), bogano, temperatura \rightarrow ecua. de Bloch

RELOJES ATÓMICOS

GPS, precisión 10^{-15}
 si 1956 \rightarrow $\frac{1}{\dots}$ del año 1900

Rayleigh propone λ_{opt}

Transición:

- 1) Isótopo único estable
- 2) Solo 2 valores F
- 3) Fácil de preparar en forma de haces

\rightarrow 3 candidatos $\left\{ \begin{array}{l} 87Rb \\ 133Cs \\ 133Ba \end{array} \right.$

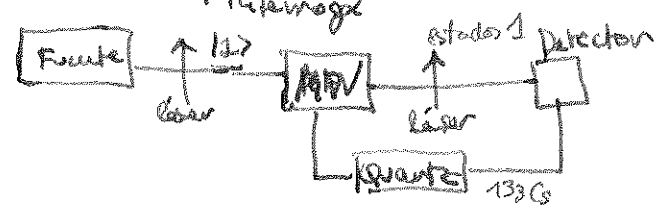
$\Rightarrow 137Cs \quad I = 7/2, \quad J = 1/2 \rightarrow F = \left\langle \begin{array}{l} 3 \\ 4 \end{array} \right\rangle$

- extrapolable a $B = 0$
- 1952 Zacharias \rightarrow reloj de cesio, 1960 metrología
- frecuencia controlada x reloj de cuarzo, retroalimentación, resonancia

- 1) Temperatura afecta \rightarrow Doppler \Rightarrow confinar + enfriar (se evaporan)
- 2) circuito estable, medir continuamente \rightarrow tiempo preparar paquete, de intensidad, \rightarrow propuestas al stms.
- 3) Medidas a realizar con mayor frecuencia posible \Rightarrow En Atoms, trampa atómica, λ largo

$\frac{\Delta \nu}{\nu} \sim \frac{v}{c} \sim \frac{2\pi \nu \Delta \nu \Delta t}{h}$ medidas atómicas + interrogar

\hookrightarrow sintonía óptica, melaza con inversión de población \rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \uparrow \text{trampa} \\ \downarrow \text{direct} \end{array} \right.$



Reloj de rubidio

$F = 1, 2 \rightarrow$ miniatura, vapor, 10^{-10}

Reloj de hidrógeno $F = 0, 1 \rightarrow 10^{-15}$, a escape

- 1) Melazas \rightarrow λ con micrograves \rightarrow λ con $T \sim 1 \mu K$
- 2) Transic. ópticas \rightarrow divisor de frecuencias (28 etapas)
- 3) Trampas iones \rightarrow confinar 6-7 iones $\sim 1 \mu K$

Aplicaciones

- Transiciones $^1H \rightarrow$ mejora $\frac{\Delta h}{h}, \frac{\Delta mc}{mc}, \frac{\Delta c}{c}, \frac{\Delta \alpha}{\alpha}$
- $\frac{\Delta t}{t}$ relatividad general
- pulsars binarios, 2 telescopios sincronizados
- GPS
- Viaje espacial

T. 4 - DESINTEGRACIÓN RADIOACTIVA

• núcleos $\begin{cases} \text{estables} \\ \text{inestables} \end{cases} \begin{cases} \text{naturaliza} \\ \text{artificial} \end{cases}$

• $\alpha, \beta^\pm, \text{EC}, \beta\beta^-, \gamma$ fisión, ^{14}C (exótico)

$\alpha, ^{14}\text{C}, \text{fisión}, \text{p} \rightarrow$ int. fuerte

$\gamma \rightarrow \text{EM}$

$\beta^\pm, \text{EC} \rightarrow$ int. débil

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

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

Rad. natural:

1) isótopos aislados: ^{40}K

2) Rayos cósmicos, ^{14}C

3) series radiactivas ($^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th}, ^{235}\text{U}$) + hijos

100 ppm U

$Q_\alpha \sim 5-10 \text{ MeV}$

$A = \lambda N \rightarrow$ actividad

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

(100 g Ra)

$\sim 30 \text{ Sv} \rightarrow$ letal

Bateman $\rightarrow N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$

1) Δ secular $T_2 \gg T_1, \lambda_1 \ll \lambda_2$

$$\hookrightarrow A_2 = A_1$$



2) Δ transitorio $T_2 \approx T_1$

$$\hookrightarrow A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1$$



3) No Δ $T_2 > T_1, \lambda_2 < \lambda_1$

$$\hookrightarrow N_2(t) \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

\downarrow
Especie



Actividad específica

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$SA = \frac{A}{m} = \frac{\lambda N_A}{PA}$$

radón, α : daño radiológico

PAEC: Potential Alpha Energy Concentration

\hookrightarrow generada x to2 hijos de un padre

$$PAEC = \sum N_i E_i$$

\hookrightarrow isótopos hasta Pb^{210}

Factor de Δ

$$\equiv \frac{\text{Concentración real}}{\text{Concentración en } \Delta \text{ secular}}$$

\rightarrow te dice cuántos hijos se pierden aire, nac. quím, superf, forma agua
 \hookrightarrow se usa de atmósfera, tiempo Δ secular

T.5 INTERACCIÓN PARTÍCULAS MATERIA

Radios $\left\{ \begin{array}{l} \text{no ionizantes } (E < E_{\text{eig}} \sim 13,6 \text{ eV}) \\ \text{ionizantes } \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{directos } \rightarrow \alpha, \gamma, e^-, p, \text{iones } (\pm \text{ paso}) \rightarrow \text{cargados} \\ \text{in " } \rightarrow \nu, n \end{array} \right.$

e^- : fot, Comp, par, β , β^+ , CI, MV, Auger-Kron

p : H
 γ : X característicos, bremsstrahlung, γ nuclear, aniquilación

σ nuclear baja

$e^+, e^- \rightarrow$ emátia, gran $\Delta E \sim 100\%$

$$\sigma_{\text{MAX}} \propto TM \frac{4\pi M^2}{(M+W)^2} \cos^2 \varphi$$

cargadas pasadas \rightarrow recta, peque $\Delta E \sim 0,2\%$

Poder frenante: $S = -\frac{dT}{dx}$ (part. cargadas) \rightarrow prop. medio, Z^2, β^2

\hookrightarrow energía perdida \times la " \neq en. absorbida

• Excita, Ioniza, X, Bremsstr.

• Bethe 1933 $\propto Z^2/\beta^2 \cdot n$, depende I_p ; NO de M

$$n = NA \rho \frac{Z}{A}$$

• $\frac{dT}{\rho dx} \approx \text{cte}$ ($\frac{Z}{A} \sim \frac{1}{2}$)

• Regla Bragg-Kleeman $\rightarrow S_m = a_i \cdot \frac{A_i}{A_c} \cdot S_{m,i}$

• mip \rightarrow ceden mínima E al medio

Alcance, straggling \rightarrow distancia a la q pierden toda la E $R_{\text{CSDA}} = \left(\frac{dT}{dx} \right)^{-1} \cdot dT$

$L_0 \neq 0 \rightarrow$

$$L_0 = \text{velocid} : R_2(L_0) Z_1^2 \approx R_2(L_0) Z_2^2 \quad (\text{my material})$$

$\rho R \sim$ indep. medio y $\frac{M_1}{M_2}$
 $R_x \ll R_e (\approx E) \rightarrow \Delta E/E > \text{Bremsstrahl.}$

$$S = S_{\text{col}} + S_{\text{rad}} ; S_{\text{rad}} \sim \frac{Z^2}{750} \cdot S_{\text{col}}$$

Alcance e^-

Pico de Bragg

- estocástica interacciones, pérdida E
- straggling en energía y alcance



$\gamma \rightarrow$ Compt, par, fot $\rightarrow e^-, X, \gamma_{\text{sec}}$

$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-\mu x}$; μ : coef. atenua lineal $= \mu_s + \mu_a = \frac{NA \rho}{A} \cdot a \cdot \sigma_{\text{tot}}$ (las estrechas, blanco delgado, fotones monoenergéticos)

Compton $T_{\text{max}} = h\nu \frac{2\alpha}{1+2\alpha}$

σ (secc. eficaz total de colisión) $e\sigma_s \propto \frac{7\pi}{2} \frac{v^4}{c^4}$

$a\sigma = Z e\sigma_s$; $\sigma = N \cdot a\sigma \rightarrow \Phi = \Phi_0 \cdot e^{-\sigma x}$ $e\sigma_{tr} \propto \frac{1}{h\nu^2} = \left(\frac{T_{\text{AVG}}}{E\gamma} \cdot \sigma \right)$

$\sigma_s = N Z e\sigma_s$; $\sigma_{tr} = N Z e\sigma_{tr} \rightarrow \sigma = \sigma_s + \sigma_{tr}$

Efecto fotoeléctrico:

$T = h\nu - B_e$

$a \tau \propto \frac{Z^4}{E^3}$

$Z = NAZ$

$\frac{Z_{\text{thr}}}{Z} = \frac{h\nu - \delta}{h\nu}$

$\frac{Z_s}{Z} = \frac{\delta}{h\nu}$

$Z_{tr} \approx h\nu - \delta$

13 eV \times H

Salto \rightarrow aparecen blancos de repente

Producción de pares

$$\gamma \rightarrow N \Rightarrow N \begin{cases} e^+ \\ e^- \end{cases}$$

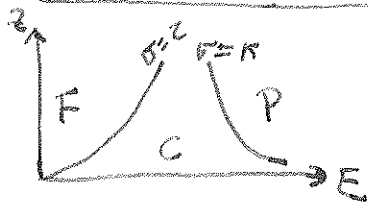
$$aK \approx z^2 f(h\nu, z)$$

$$K = NaK \text{ coef. lin. de atenua}$$

$$K_{\text{total}} = K_{\text{B}} + K_{\text{eV}}$$

$$\frac{K_{\text{eV}}}{K} = 1 - \frac{2mc^2}{h\nu}$$

$$\frac{K_{\text{B}}}{K} = \frac{2mc^2}{h\nu}$$



$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot e^{-\mu x}$$

μ : coef. atenua lineal total

C

e^- libre

$$\sigma \propto 1/E$$

$$\sigma \propto 1/E$$

$$E_{\text{B}}/h\nu \propto E$$

100keV - 300keV
 $h\nu$ lo + imxto

F

e^- ligado

$$\sigma \propto z^3/E^3$$

γ al e^-

$E = h\nu$ resonancia

$$\text{abs} = \text{trans} = E_{\text{B}}$$

P

nucleo, \Rightarrow neutral

$$\sigma \propto z^2/E$$

γ al par

$$h\nu - 1.02 \text{ MeV}$$

fotones aniquila

$$\mu = N \cdot a \sigma_{\text{tot}} \Rightarrow \sigma_{\text{tot}} = \sigma + \tau + \kappa$$

$$\frac{\mu}{\rho} \Rightarrow \frac{N_A}{A} \cdot a \sigma_{\text{tot}}$$

Energía absorbida

\neq transferida

$$dE_{\text{abs}} = S (\psi_0 - \psi)$$

$$\mu_{\text{abs}} = \mu_{\text{tr}} (1 - g)$$

frac. E perdida \times Brausetrockung
 y aniquila en vuels

$$\dot{D} = \psi_0 \cdot \frac{\mu_{\text{abs}}}{\rho}$$

(no avg) μ_{tr}
 \hookrightarrow fotones γ

$$\dot{D} = \int_0^x \Phi_0 \cdot dT$$

(cargados)

$N, \dot{N}, \Phi = \frac{dN}{dt}, \dot{\Phi}; R, \dot{R}, \Psi, \dot{\Psi}$
 $\therefore \text{flux}$

Coef. atómico $\rightarrow \mu_{tr}$ Poder frenado más $\frac{S}{\rho} = \frac{dE}{\rho dx}$
 transf. $\rightarrow \mu_{tr}/\rho$ LET = $(\frac{dE}{dx})_0$
 absorb. $\rightarrow \mu_{en}/\rho$ ΔE para la ioniz. : $W = \frac{E}{N}$

$\frac{dE_{tr}}{dm} = \Psi \cdot \frac{\mu_{tr}}{\rho} \rightarrow E/m$

Exposición: $\frac{dQ}{dm}$ (fotones) \rightarrow carga iónica tras e^- quietos
 \times alta E, e^- medio alcance

Kerma: $\cdot E$ transf. por la radiación ionizante no cargada (γ, n) / dm
 \rightarrow en. cinéticas iniciales de iones liberados

$\dot{K} = \dot{\Psi} \cdot \frac{\mu_{tr}}{\rho} \neq \dot{D}_0 = \dot{\Psi}_0 \cdot \frac{\mu_{en}}{\rho} \rightarrow$ si CPE $\left. \begin{array}{l} K = K_{rad} + K_{col} \\ K_c = \Psi \cdot \frac{\mu_{en}}{\rho} \end{array} \right\}$

Kerma de coherencia: \rightarrow en. baja transferida \times radiat. (scattered) $K_c = \Psi \cdot \frac{\mu_{en}}{\rho}$
 excluir pérdidas

Dosis: energía absorbida (cualquier tipo de radiat.) $D = \frac{dE}{dm}$

$K, D \rightarrow Gy; X \rightarrow C/kg$ $1 Gy = 100 rad$

$\mu_{en} = \mu_{tr}(1-g)$ $K \rightarrow$ transf
 $\left(\frac{e}{Whicr} = \frac{1}{27.27} \frac{C}{J}\right)$ $D \rightarrow$ abs.

Equilibrio electrónico

$\dot{X} = X = \rho \frac{A}{d^2} = \rho h \nu \frac{d\sigma}{\rho} = \frac{1}{40000000}$; $K_c = X \cdot \frac{W}{e}$; $\frac{\Psi}{X} = \frac{W/e}{\mu_{tr}}$

Radiobiología:

- E + probable apl. q depositan los e^- : 23 eV
- Físicos 10^{-20} q químicos $10^{-18} - 10^{-5}$ (rad) q 10^{-3} (repar); Biol. ^{mutual (horas)}
_{clases (años)}



Radical \rightarrow n.º ejpls de una especie producidos x depósito de eV

Efectos biológicos $\left\{ \begin{array}{l} \text{directos de las radics} \rightarrow \text{estocásticos} \\ \text{indirectos} \rightarrow \text{No estocásticos (deterministas)} \end{array} \right.$

Dosis celular \rightarrow Directo: ionizad
 \rightarrow Indirecto: " agua \rightarrow radicales libres

= Dosis \rightarrow = n.º / casos ionizad x a toda radiat, x a dta efectividad

$e^- \rightarrow$ nube $\leftrightarrow \alpha$: flecha

LET = dE/dx (e^- pod. frenado x a $\sqrt{\text{cargados}}$) $\left\{ \begin{array}{l} X, \gamma \text{ baja LET} \\ \alpha, \text{ iones alto "} \end{array} \right.$

RBE $\rightarrow \frac{R_x}{R_{ref}}$ $RBE = \frac{D_x}{D}$ necesaria x a cierto efecto

100.000 ionizad / Gy / célula, $I_p = 25 eV$

1 traza (X) \rightarrow 100 ion/cél. - 1mGy

1 traza (α) \rightarrow 25000 " \rightarrow flecha, poco probable, si de lo mata $\left\{ \begin{array}{l} e^- \text{ depende de dosis} \\ \text{dosis sólo no da la peligrosidad} \end{array} \right.$

ADN: Ramo crítico \rightarrow SCGT

- Rotura simple → reparable / doble + complicado
- Múltiples roturas → ya no rep. → mueren o se replica mal
- idem con radicales libres • OH

- Síndrome de la radix aguda → 4 Gy → death
- Cataratas: efecto no estocástico (~2 Gy)
- Cáncer: depende dosis, tipo, edad, sexo
↳ dosis bajas → acortado de la vida
↳ efectos genéticos



Fración de supervivencia

- 1 blanco/célula - 1 colisión
Poisson $P_k = \frac{e^{-D/D_0} (D/D_0)^k}{k!}$ → $\frac{S}{S_0} = P_0 = e^{-D/D_0}$ D_0 : dosis letal media
- n-blancos/célula - 1 colisión
 $S/S_0 = 1 - (1 - P_1)^n = 1 - (1 - k_1 \cdot e^{-D/D_0})^n$

Magnitudes dosimétricas factor calidad (LET) de la radix

- Dosis equivalente $H(Sr) = Q \times D$
- Dosis absorbida en tejido/órgano → $D_T \equiv$ promedio sobre volumen
- Dosis equivalente en " " → $H_T = \sum W_R \cdot D_{TR}$

$$W_R = \begin{cases} 1 & \alpha, e^- \\ 5 & p \\ 20 & \alpha \end{cases} \quad n(5-20)$$

- Dosis efectiva $E(S_0)$ = suma pond. de dosis equivalentes $\sum W_T = 1$

$$E = \sum W_T H_T \quad H_p(d) \quad H_{\alpha} \quad H_{\beta/\gamma}$$

- Dosis equivalente personal, ambiental, piel, direccional H'
↳ activa con tiempo, retrodispersión cuerpo → dosímetro

- límites de dosis
→ no incluye rad. natural ni tratamientos médicos

• se limitan estocásticos → lim. dosis efect.
↳ deterministas → " " equivalente en órganos afectados: cristalino y piel

- Trabajadores ~ 100 mSv/5 años (50/año)

feto: 2 órdenes, sinovio, calcio

- Público → ~ 1 mSv/año

- Exposiciones excepcionales

- Autorizadas
- Accidentales
- Emergencia