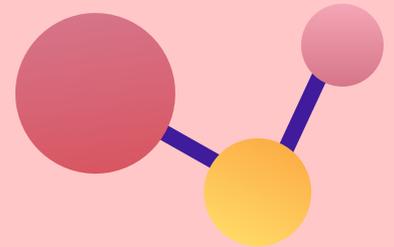
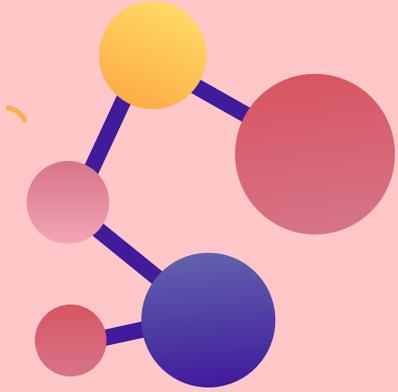


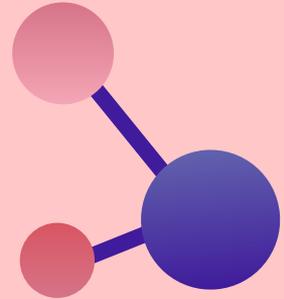
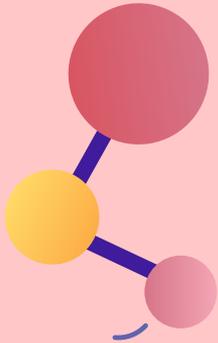
La física en la hadronterapia

◦ Jeremías Olivieri



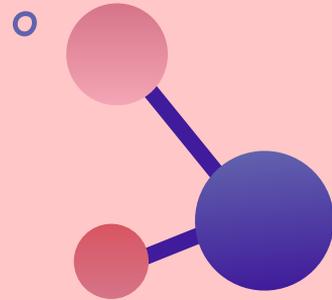
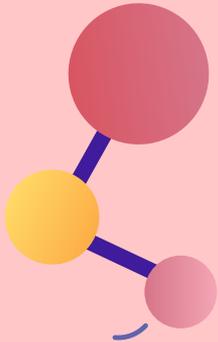
Introducción

La hadronterapia usa partículas cargadas (en su mayoría protones e iones de carbono) para irradiar tumores. Estos haces presentan ventajas en el momento de la deposición de energía en el final del recorrido (Bragg peak), en donde una gran dosis de rayos puede incidir en el tumor preservando los tejidos sanos a su alrededor. Por otro lado, la fragmentación nuclear de los proyectiles de carbono permite irradiar detrás del Bragg peak y así propagar la deposición de la dosis.



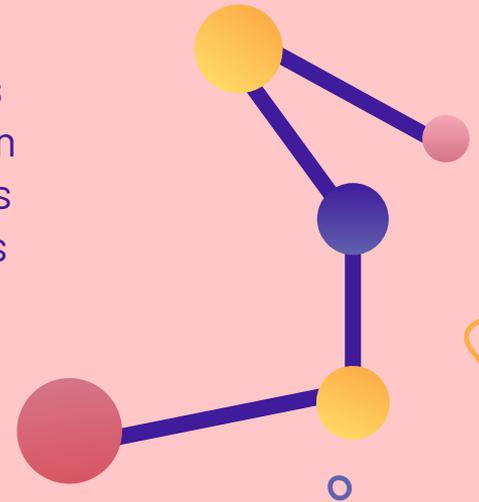
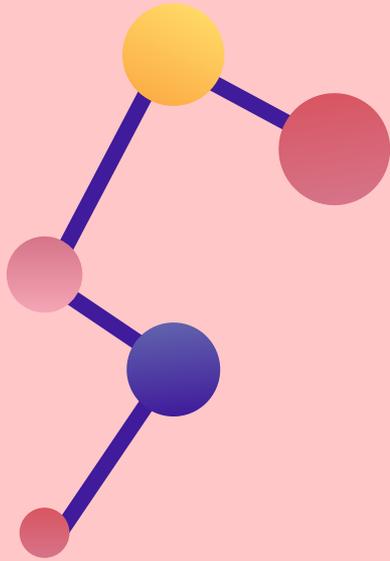
Motivación

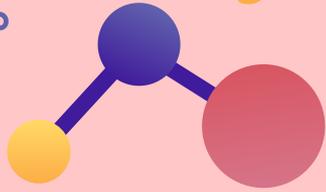
El uso de partículas cargadas para el tratamiento de tumores cancerígenos se está esparciendo rápidamente por todo el mundo. Son métodos muy prometedores para curar tumores resistentes y no operables, y a la vez se pueden complementar con otras terapias (quimioterapia, cirugía y rayos X).



¿Por qué hadronterapia?

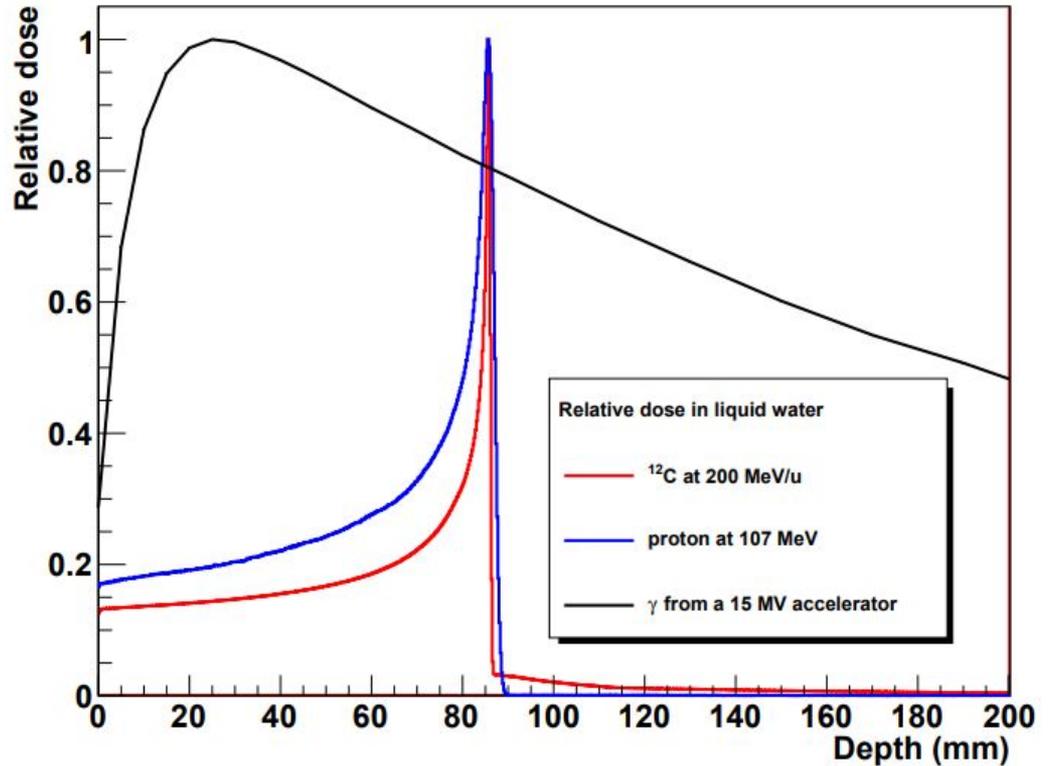
El objetivo de la radioterapia es el de destruir tejidos cancerígenos usando partículas ionizadas mientras se preservan los tejidos sanos a su alrededor. La hadronterapia es un tratamiento alternativo para atacar tumores cancerígenos que consiste en irradiar estos tumores con protones o nucleidos livianos.





- ✓ Mejor balística
- ✓ Mayor eficiencia

¡La posición del pico sólo depende de la energía incidente!

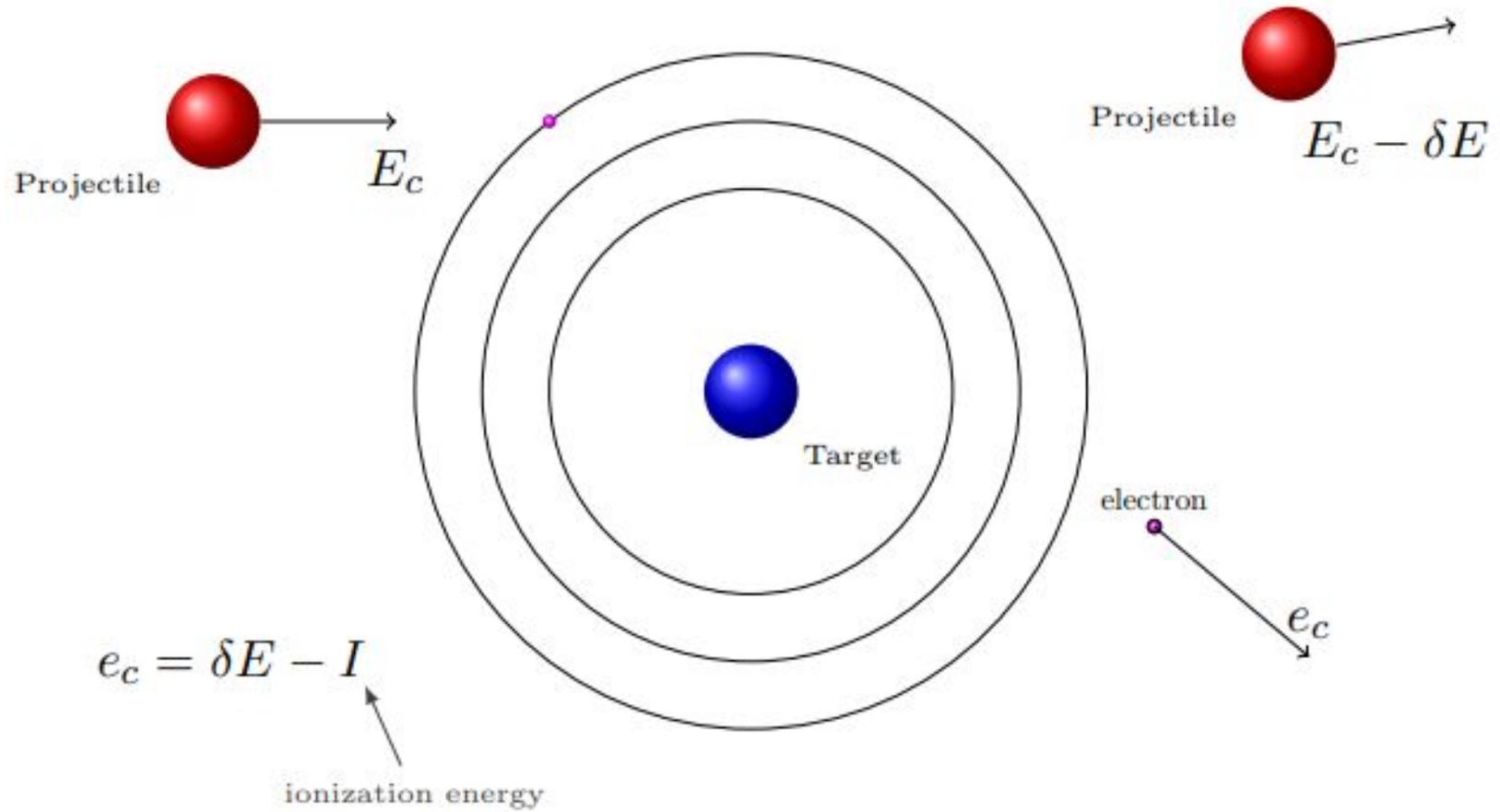


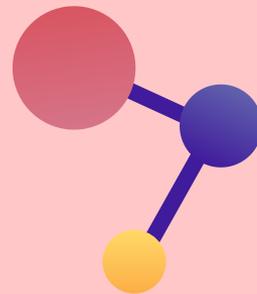
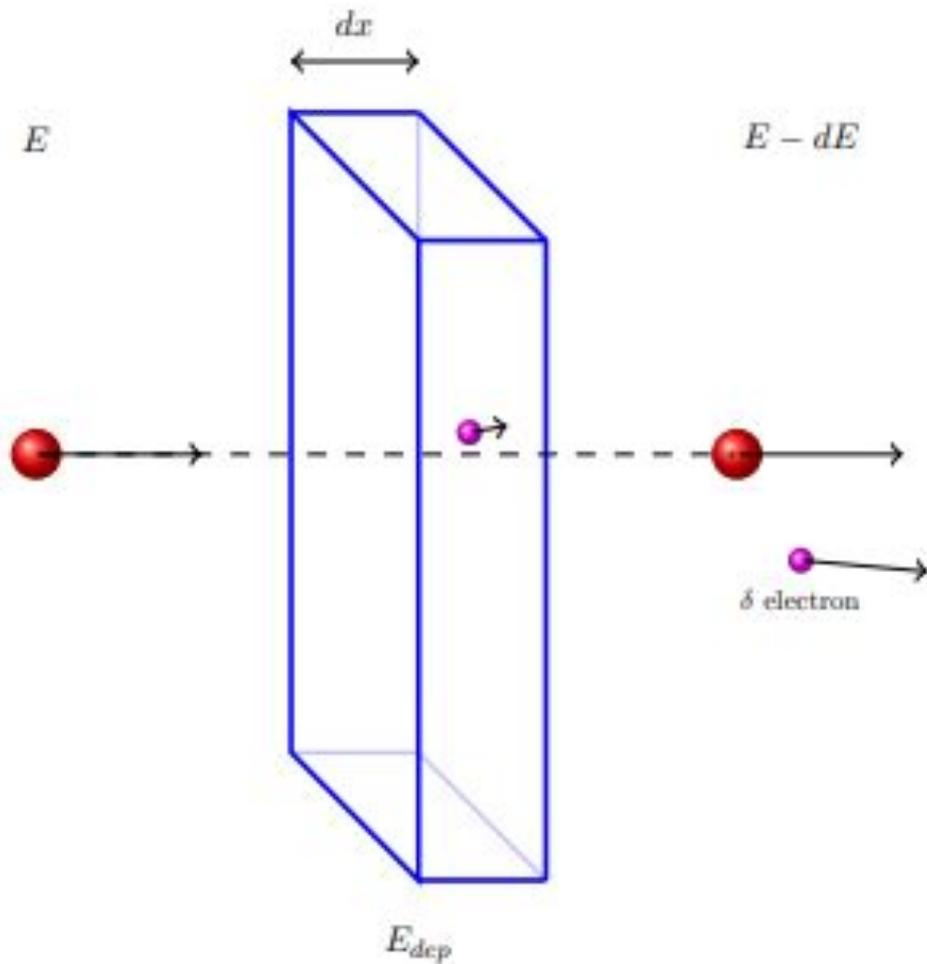
El uso de las partículas cargadas para fines terapéuticos requiere un control muy drástico de la dosis suministrada: la localización del Bragg peak tiene que ser conocida con un error de 1 mm y la dosis en el tumor tiene que ser suministrada con uno del 3 %.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \longrightarrow D = \frac{N}{dS} \frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)}{\rho}$$
$$[D] = Gy$$

Stopping power

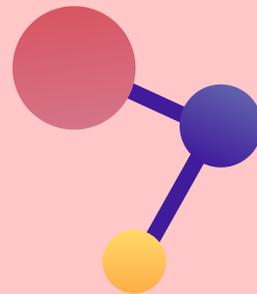
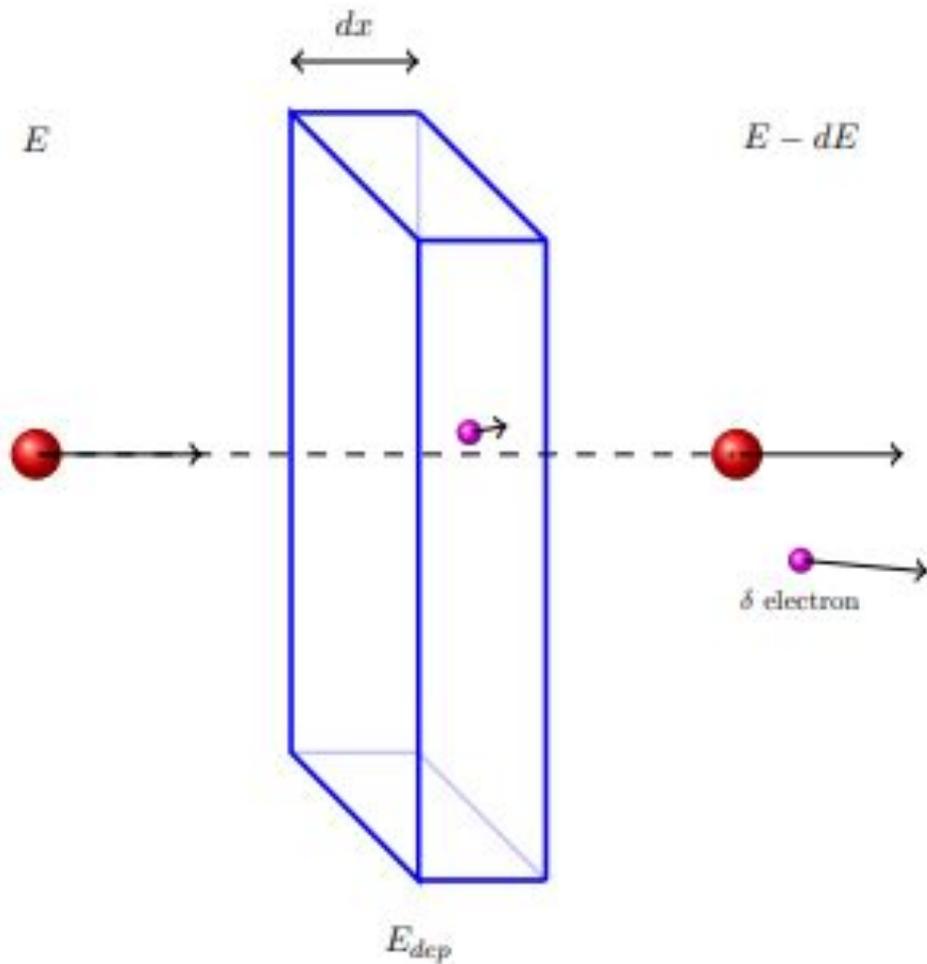
Uno tiene que identificar el proceso físico responsable de la deposición de la dosis y el frenado de partículas: el principal proceso físico involucrado es la colisión inelástica de nucleidos con los electrones de los átomos presentes en la materia





$$E_{dep} \neq \frac{dE}{dx}$$

$$LET = \left(\frac{dE}{dx} \right) - \sum E_c(e_\delta)$$



$$LET = \left(\frac{dE}{dx} \right) - \sum E_c(e_\delta)$$

$$\left(\frac{dE}{dx} \right) \approx LET \approx \frac{E_{dep}}{dx}$$

Un ejemplito

La LET para protones es de alrededor 3 MeV/mm en el Bragg peak. Para depositar 1 Gy en agua, podemos calcular la fluencia:

$$1Gy = \frac{N}{dS} \frac{3 \cdot 10^6 \times 1.6 \cdot 10^{-19}}{10^{-6}} \longrightarrow \frac{N}{dS} \approx 2 \cdot 10^6 \text{ protons/mm}^2$$

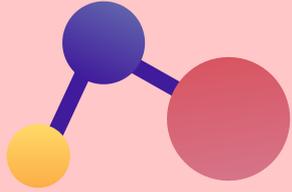
Para iones de carbono 12, es de alrededor 80 MeV/mm en el Bragg peak.
Entonces:

$$1Gy = \frac{N}{dS} \frac{80 \cdot 10^6 \times 1.6 \cdot 10^{-19}}{10^{-6}} \longrightarrow \frac{N}{dS} \approx 8 \cdot 10^4 \text{ }^{12}\text{C/mm}^2$$

La fórmula Bethe-Bloch

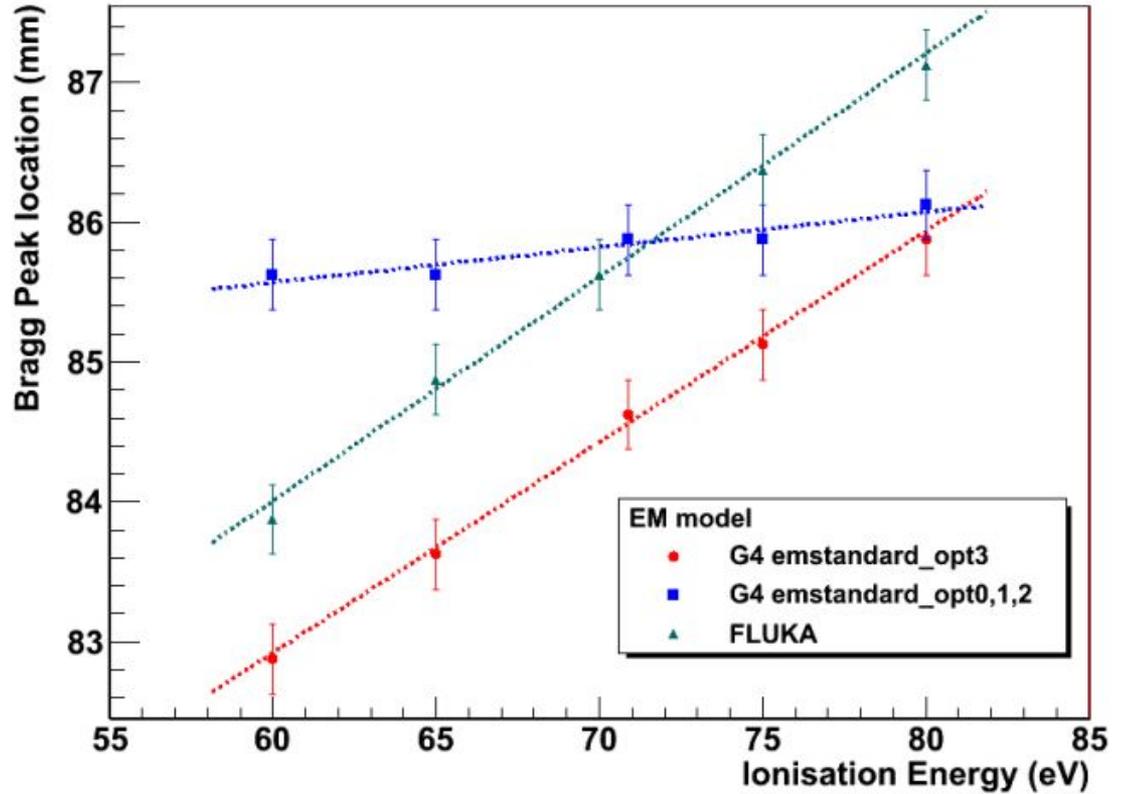
$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z_t Z_p^2}{m_e v^2} \left[\ln \frac{2m_e v^2}{\langle I \rangle} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \frac{C}{Z_t} - \frac{\delta}{2} \right]$$

$$\ln(\langle I \rangle) = \frac{\sum_i \frac{\omega_i Z_i}{A_i} \ln(I_i)}{\sum_i \frac{\omega_i Z_i}{A_i}}$$



El Bragg peak depende de:

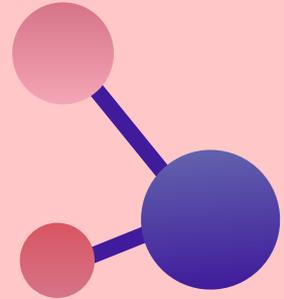
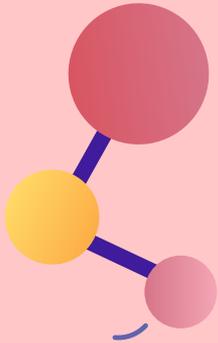
- el modelo de ionización
- El valor de $\langle l \rangle$

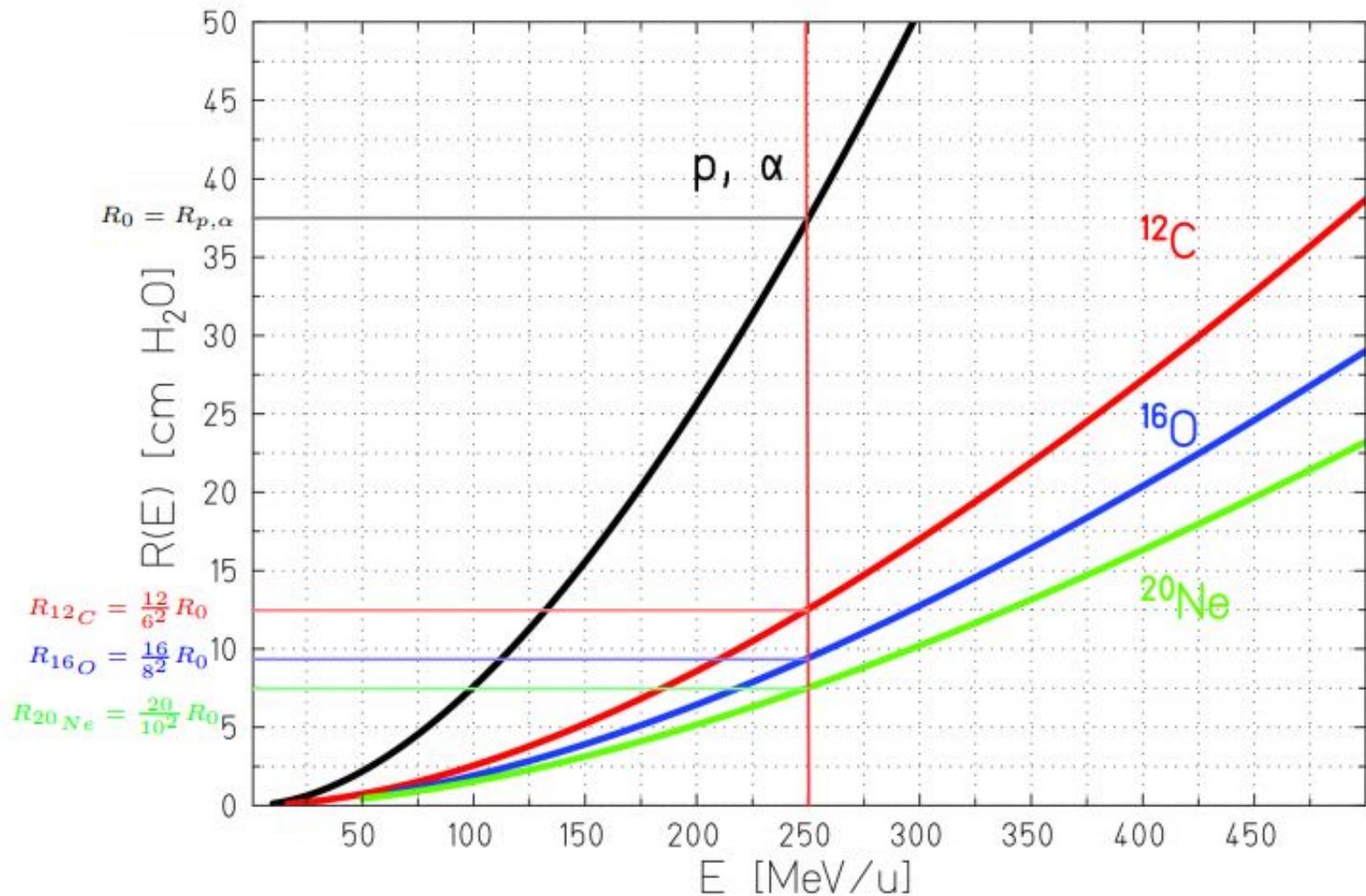


Otros efectos importantes para el frenado de partículas

- Scattering coulombiano elástico
- Rango y energía de las partículas
- Rango y dispersión angular debido a las colisiones inelásticas

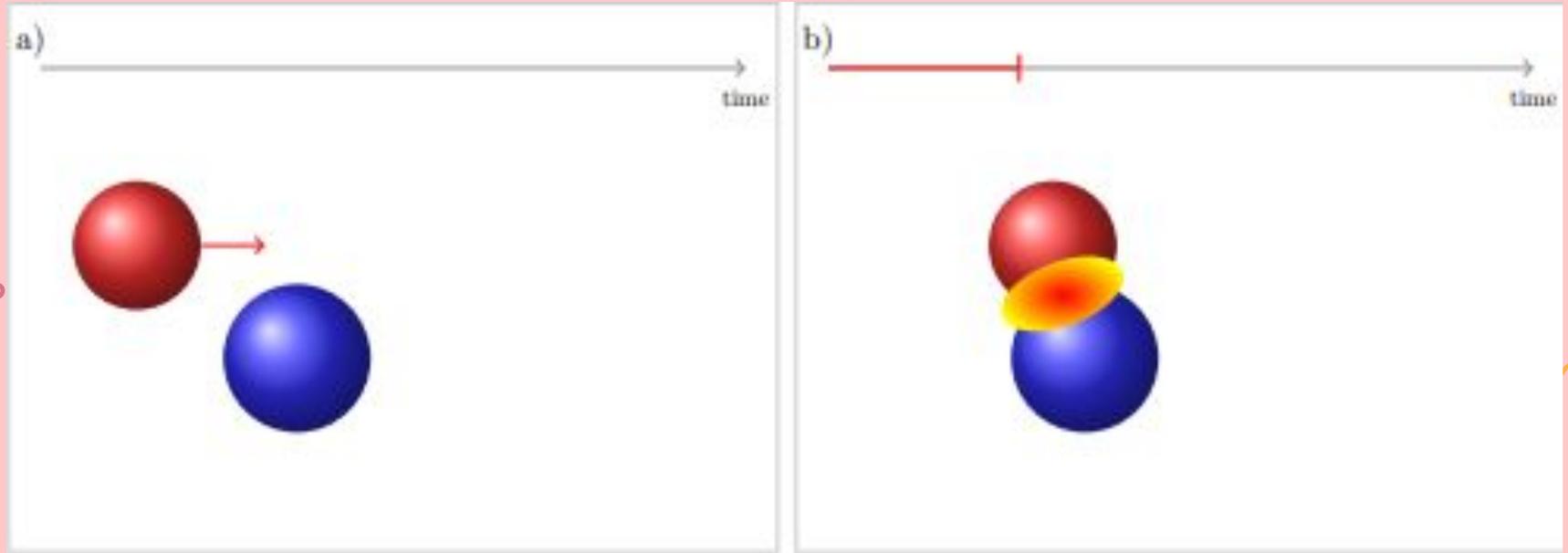
$$R(E) \propto \frac{A}{Z^2}$$



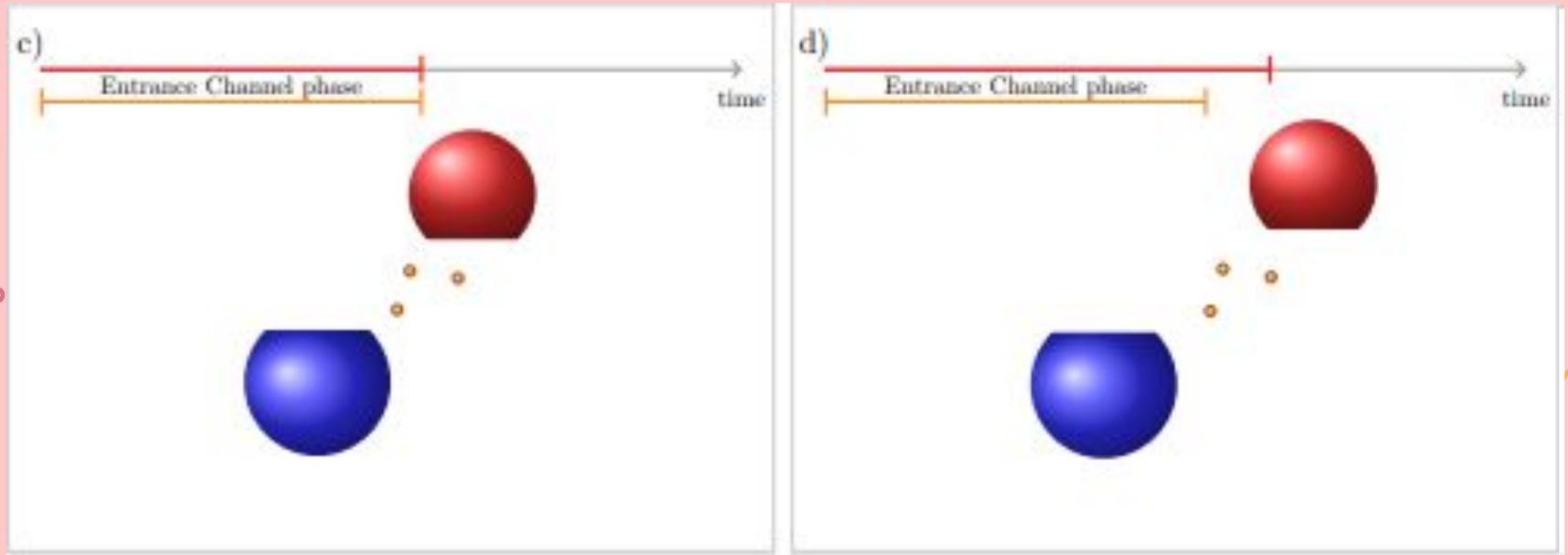


0

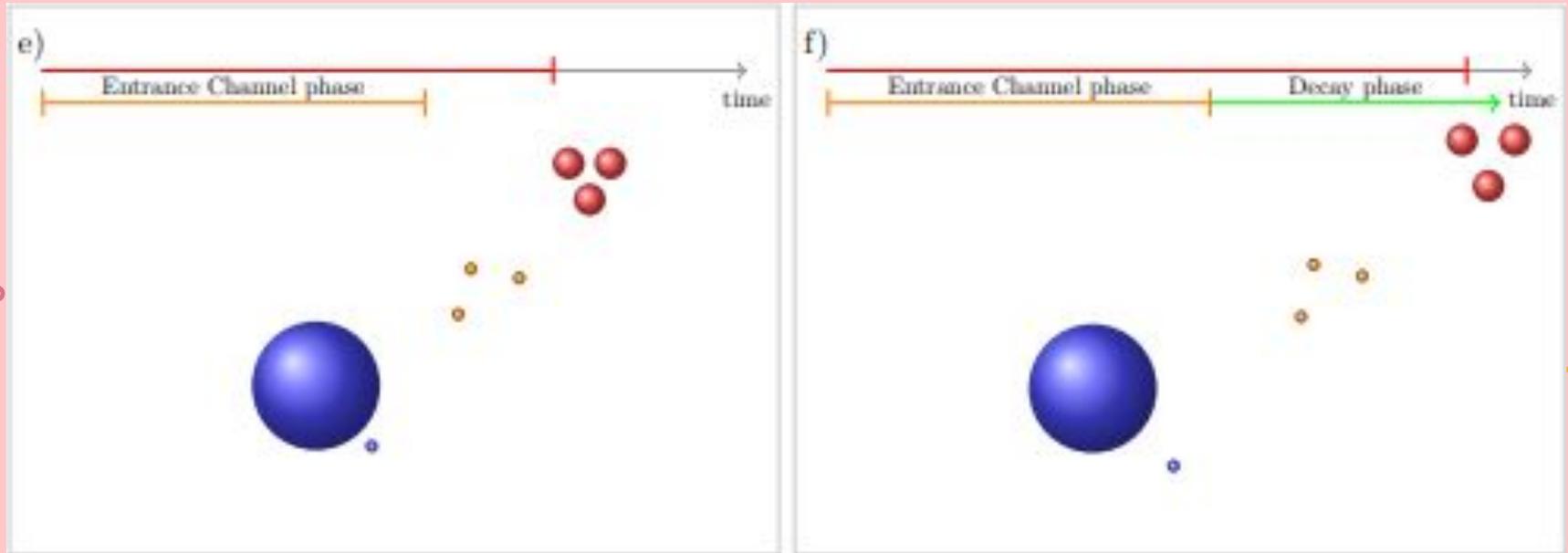
Colisiones núcleo-núcleo



Colisiones núcleo-núcleo

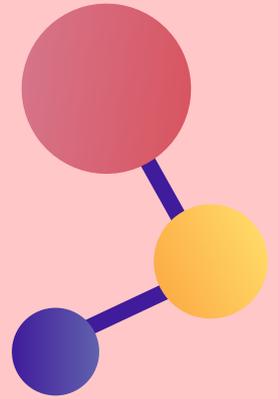


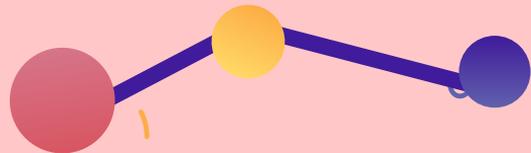
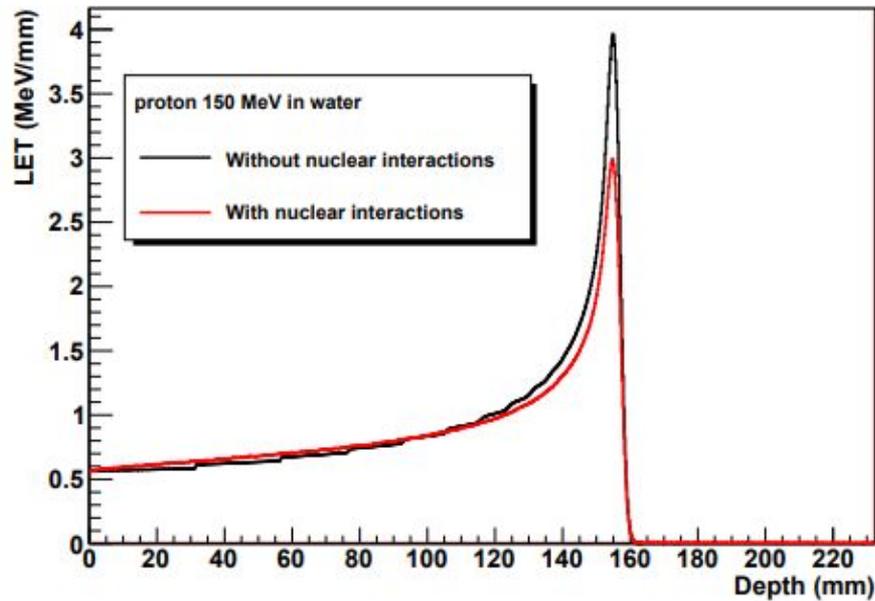
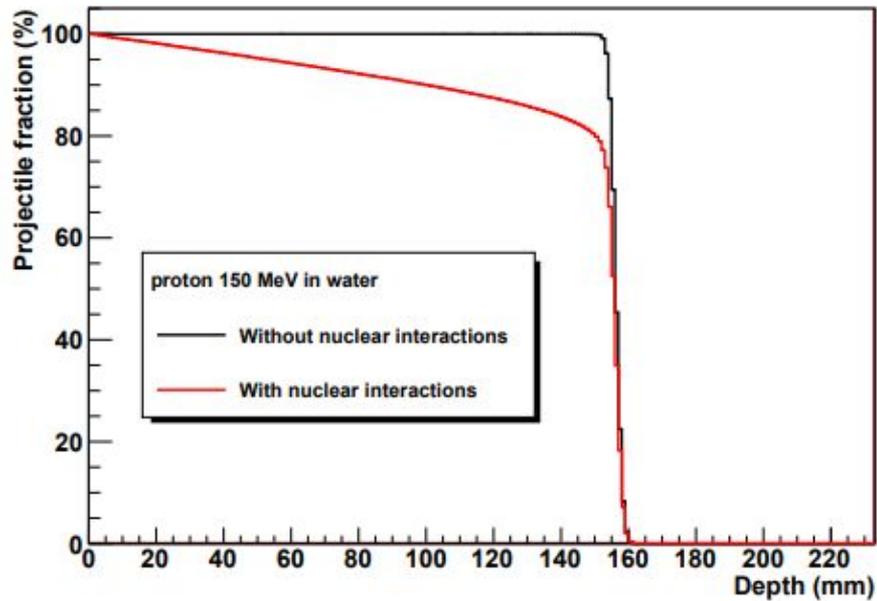
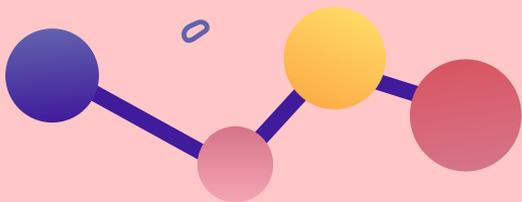
Colisiones núcleo-núcleo

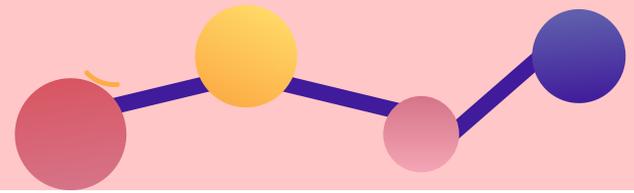
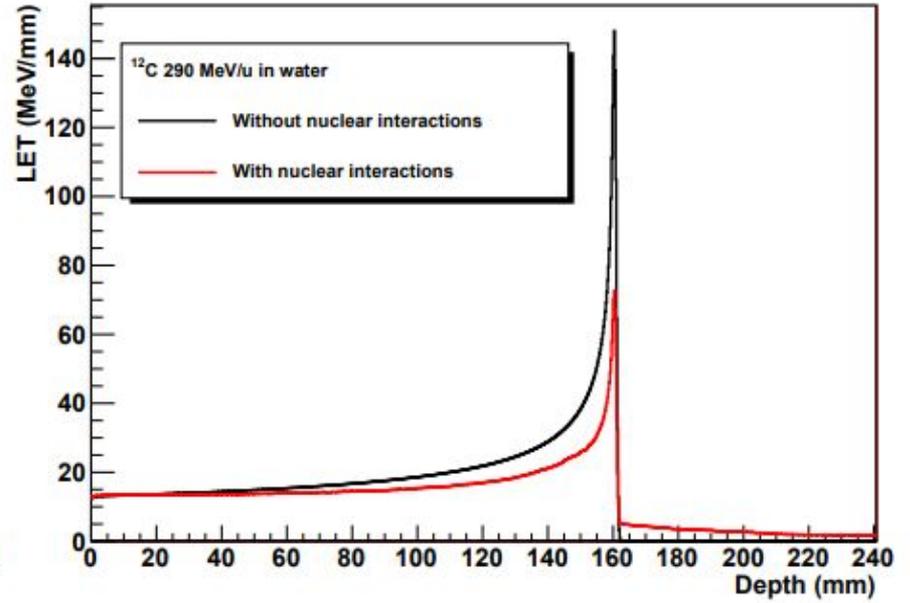
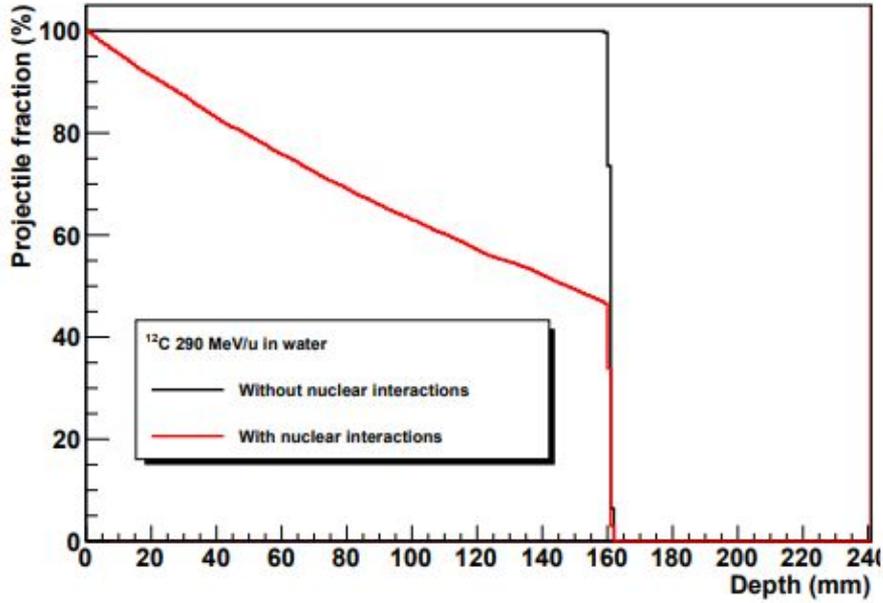


Tenemos 2 consecuencias inmediatas de las colisiones

1. Desaparición del proyectil
2. Producción de partículas secundarias







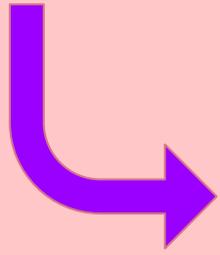
Influencia del cross section total de la reacción

Que sucedan las colisiones núcleo-núcleo depende de la sección total de la reacción

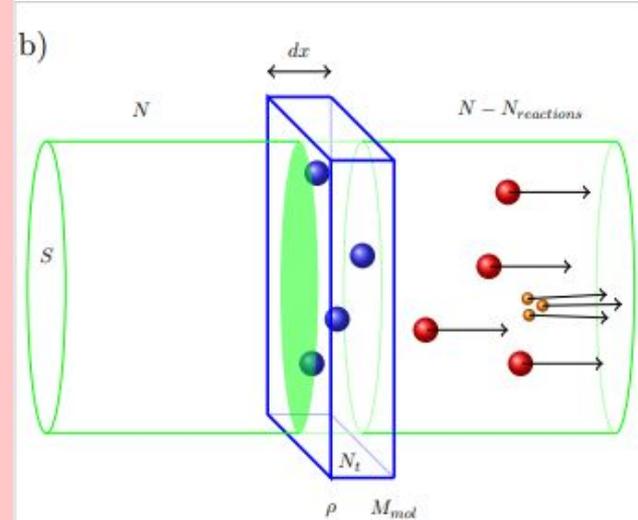
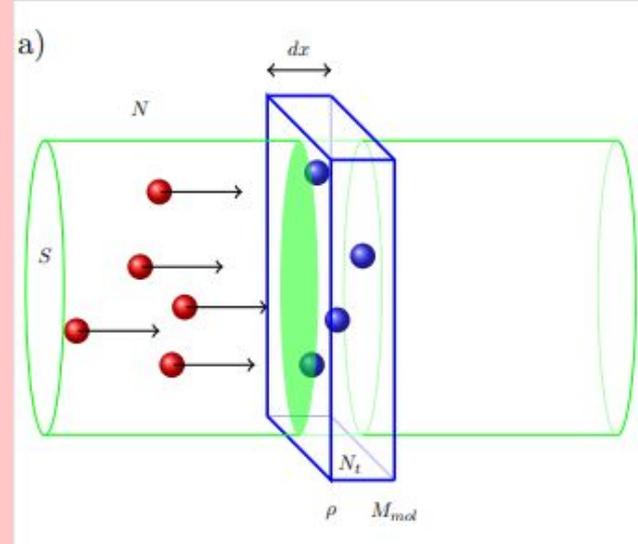
$$N_{\text{reactions}} = N \frac{N_t \sigma_R}{S} \quad N_t = \frac{N_a \rho S dx}{M_{\text{mol}}}$$

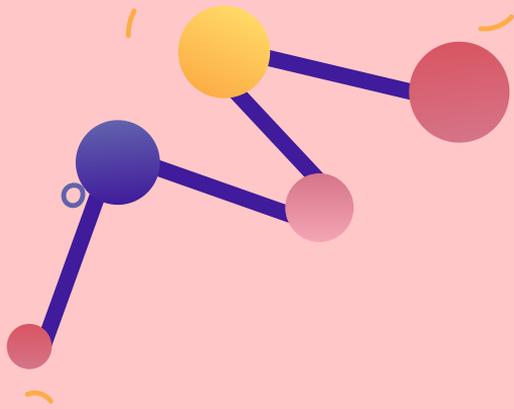
La variación del número de proyectiles que se encuentran sin cambios luego de la trayectoria es:

$$dN = -N_{reaction} = -N \frac{N_a \rho \sigma_R}{M_{mol}} dx$$


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

$$\lambda = \frac{M_{mol}}{N_a \rho \sigma_R}$$





Otro ejemplito

Vamos a calcular cuántos iones de carbono 12 llegan al Bragg peak en agua líquida, cuando son arrojados con 290 MeV/u.

$$\rho = 1\text{mg/cm}^3$$

$$M_{mol} = 18\text{g/mol}$$

$$N_a = 6.02 \times 10^{23}\text{molecules/mol}$$

$$\sigma_R = 2\sigma_{C,H} + 1\sigma_{C,O} \approx 1.4 \times 10^{-24}\text{cm}^2$$

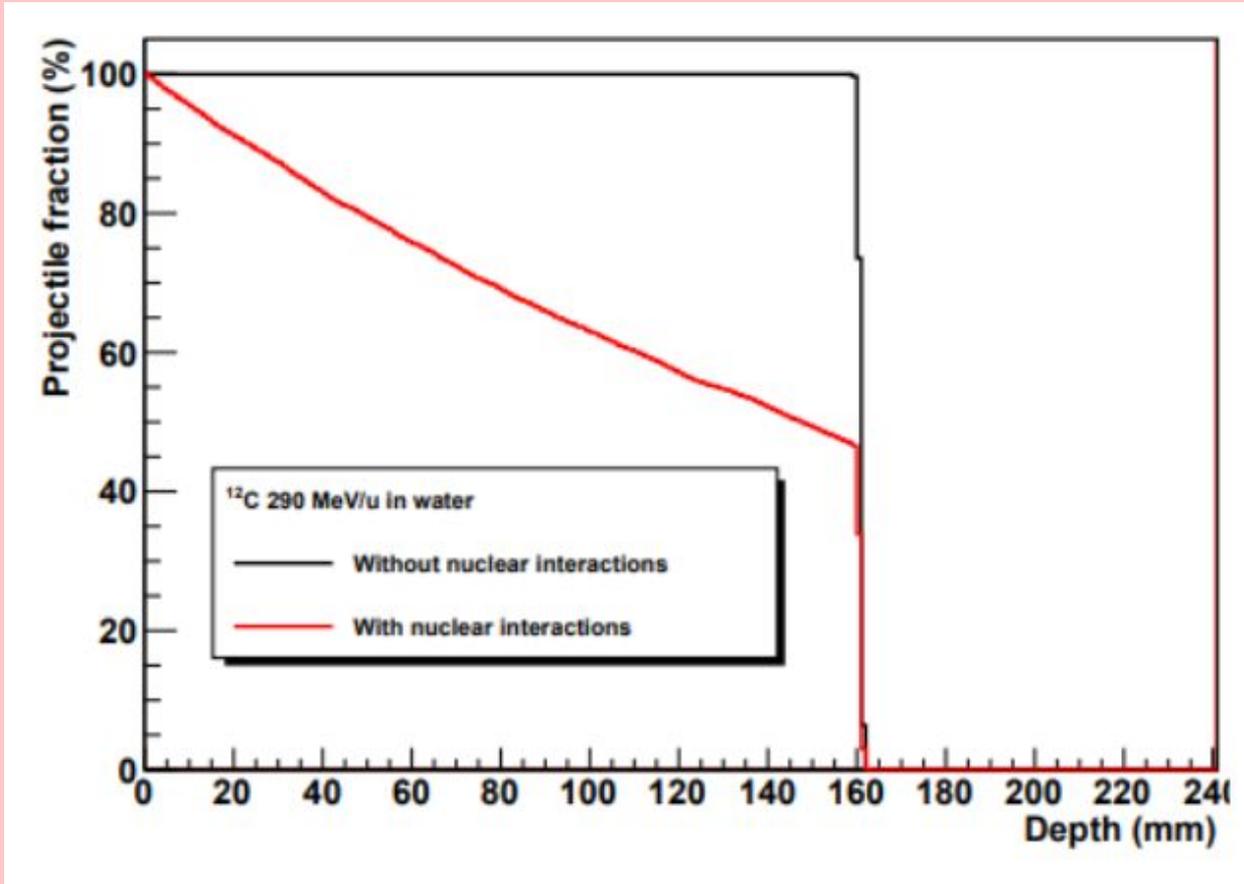
$$\lambda = \frac{M_{mol}}{N_a \rho \sigma_R} \approx 21.35\text{cm}$$

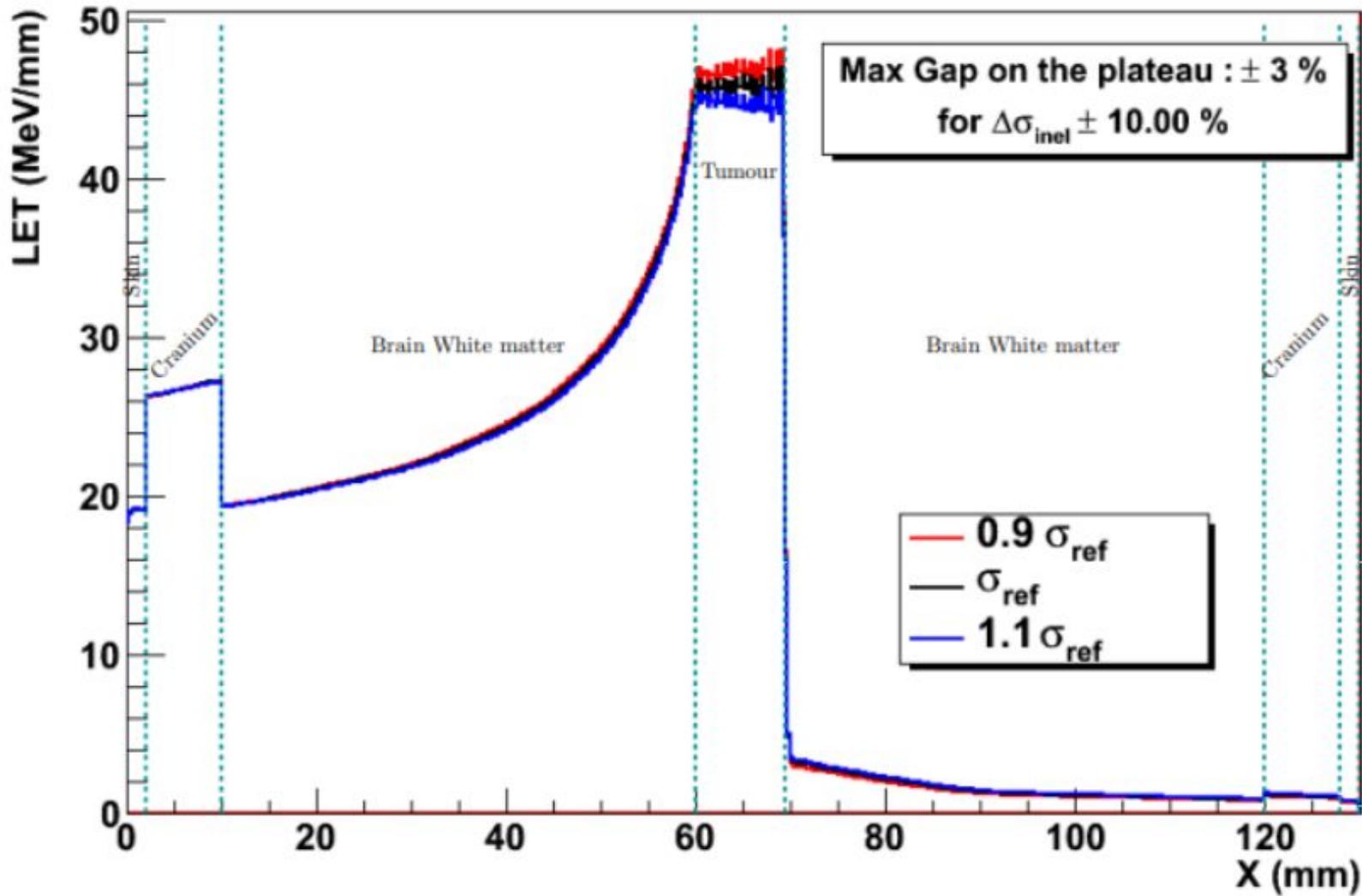
$$x_{BP} = 16\text{cm}$$

$$N(x_{xp}) \approx 0.47N_0$$

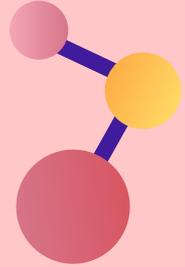
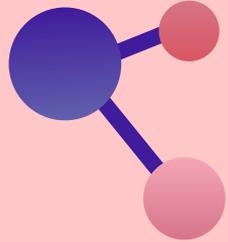


$$N(x_{xp}) \approx 0.47 N_0$$

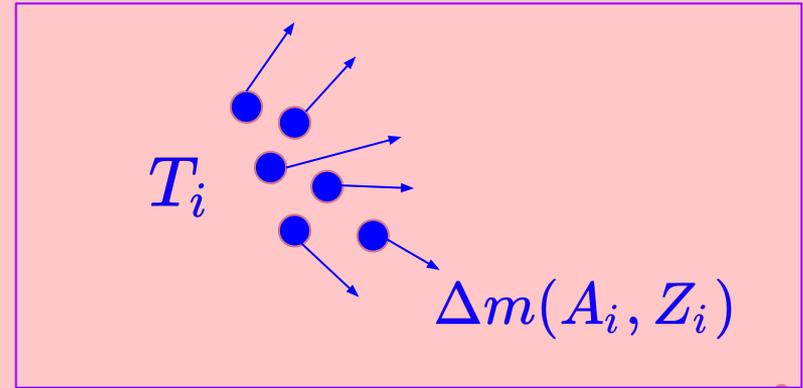
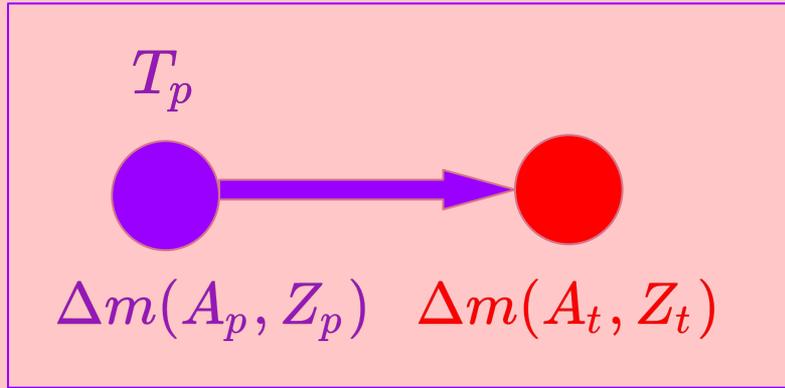




Contribución de partículas secundarias



Producción de fragmentos secundarios



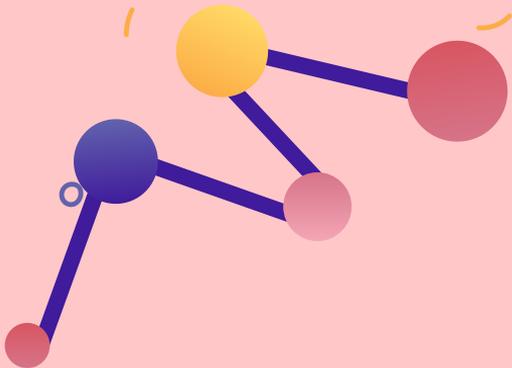
$$\Delta m(A_p, Z_p)c^2 + T_p + \Delta m(A_t, Z_t)c^2 = \sum_i [\Delta m(A_i, Z_i)c^2 + T_i]$$

$$\Delta m(A_p, Z_p)c^2 + T_p + \Delta m(A_t, Z_t)c^2 = \sum_i [\Delta m(A_i, Z_i)c^2 + T_i]$$

$$\sum_i T_i = T_p + Q$$

$$Q = \Delta m(A_p, Z_p)c^2 + \Delta m(A_t, Z_t)c^2 - \sum_i \Delta m(A_i, Z_i)c^2$$

¡Este balance de masa es negativo para sistemas pequeños!
($Z < 26$)



Último ejemplito

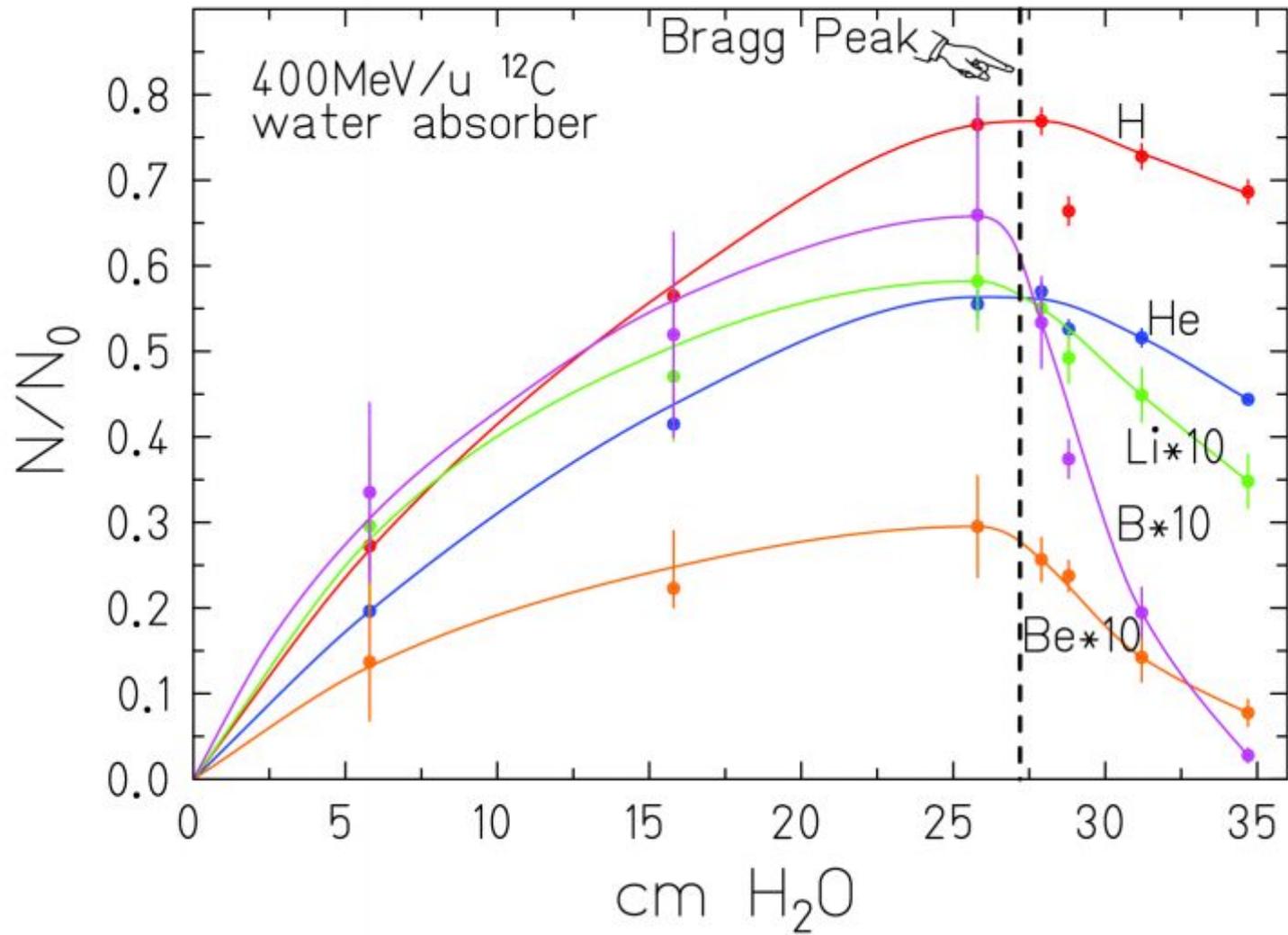


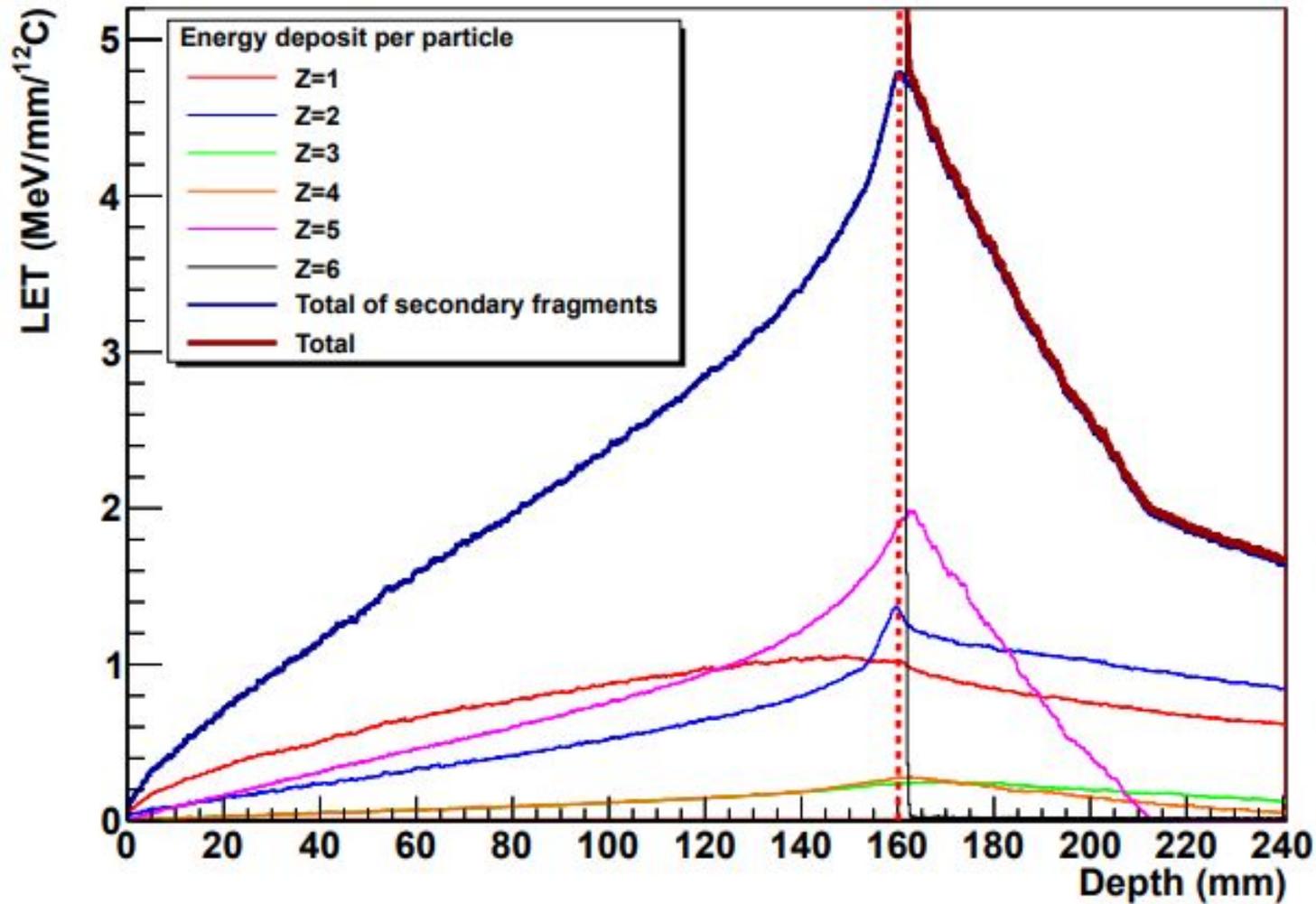
$$Q = \left\{ \begin{array}{l} \Delta m({}^{12}\text{C})c^2 + \Delta m({}^{16}\text{O})c^2 \\ -3\Delta m({}^4\text{H})c^2 - \Delta m({}^{12}\text{C})c^2 \\ -2\Delta m_p - \Delta m_n \end{array} \right\} = -42.7 \text{ MeV}$$

Energía depositada en el material

Las partículas producidas por los cuasi-proyectiles actuarán más allá del Bragg peak, pero como todas son producidas a lo largo de la trayectoria, van a depositar energía también antes y en el Bragg peak.

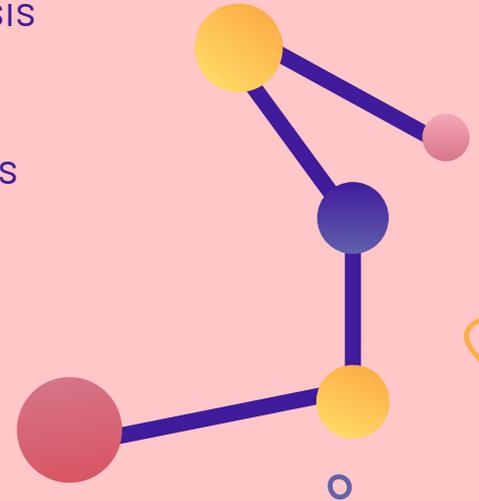
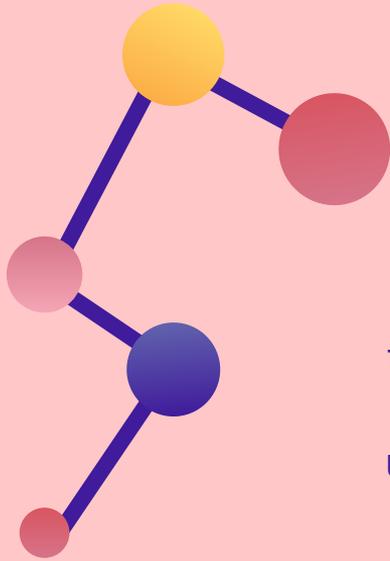
$$\overline{LET}(x) = \sum_i v_{A_i, Z_i}(x) \overline{LET}_{A_i, Z_i}(x)$$
$$v_{A_i, Z_i} \propto \frac{A}{Z^2}$$



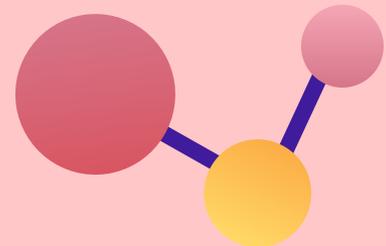
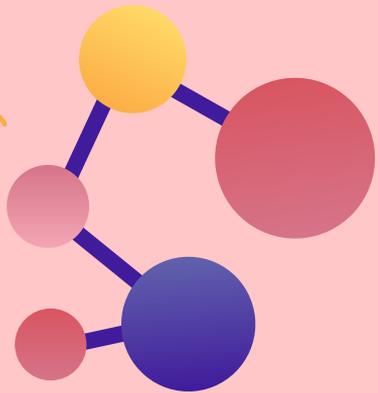


Conclusión

Vemos que la física nuclear tiene un papel fundamental en el desarrollo de la hadronterapia. Varios de los conceptos vistos en el curso son utilizados como la base para el cálculo de la dosis necesaria. Los físicos nucleares tienen un rol importante para optimizar el tratamiento de tumores. Tienen las herramientas y habilidades para desarrollar los cálculos y dispositivos de dosimetría para controlar y medir la dosis depositada por las partículas cargadas en materiales biológicos.



¡Muchas gracias!



◦ Bragg Pitt

