

# Reacciones nucleares de interés astrofísico:

la reacción  $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$   
en el laboratorio

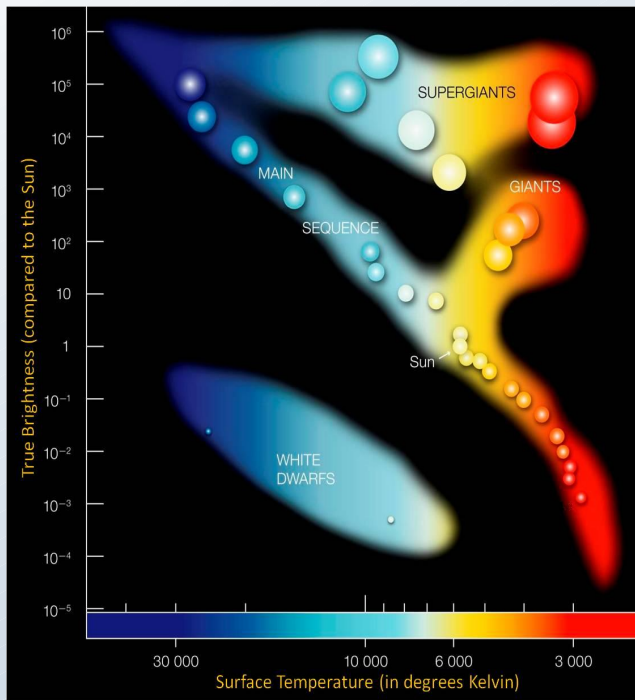
Jennifer Sánchez Rojo

Director: Luis Mario Fraile Prieto

# Contenidos

1. Fundamentos Astrofísicos
2. Fundamentos Termonucleares
3. Métodos de medida
4. Reacción  $^{40}\text{Ca}(\alpha,\gamma)^{44}\text{Ti}$
5. Propuesta de Medida del  $^{40}\text{Ca}(\alpha,\gamma)^{44}\text{Ti}$

# Fundamentos Astrofísicos



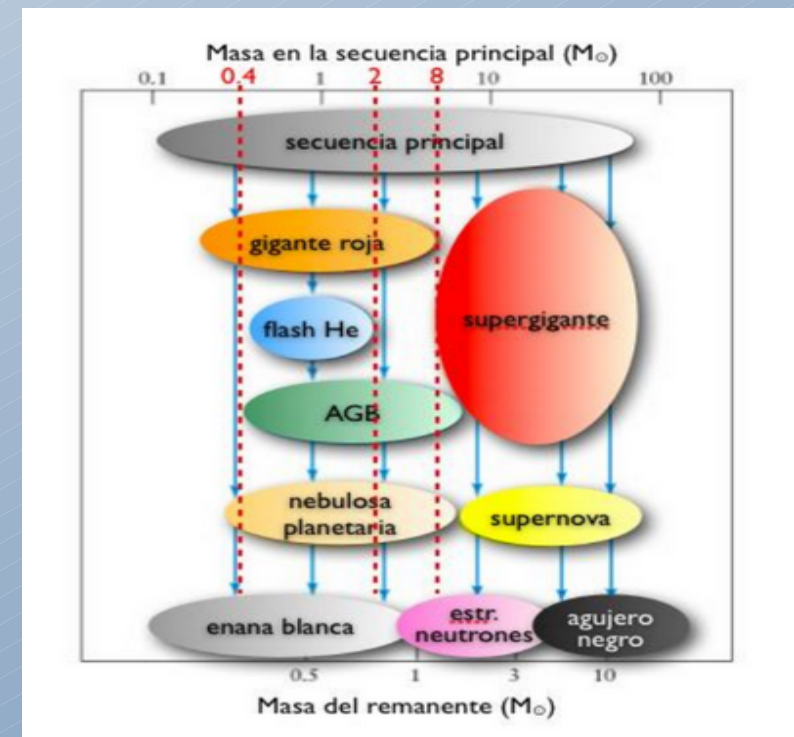
## Estrellas:

- Objetos ligados gravitacionalmente.
- Se produce energía debido a procesos nucleares.
- Evolución en especies nucleares distinta dependiendo de su masa inicial.

Las reacciones termonucleares juegan un papel crucial en la comprensión de la nucleosíntesis estelar.

Rango de temperaturas: **0.001-10 GK**

Distintas reacciones nucleares en los diferentes estados de evolución.



# Fundamentos Termonucleares

Reacciones termonucleares → papel crucial en la comprensión de la nucleosíntesis estelar.

- Reacciones de captura: (p,γ) (n,γ) (α, γ).
- Producción de núcleos radiactivos → Se desintegran emitiendo γ.

Importante conocer sus características y la P de que ocurran.

## Sección Eficaz

Probabilidad de que se produzca la reacción en unidades de área.

Depende de la naturaleza de la fuerza en juego.

$$\sigma = \frac{N_R/t}{[N_b/(tA)]N_t}$$

## Tasa de Reacción

Sección eficaz integrada.

Puede haber varias resonancias que contribuyan a la sección eficaz.

$$N_A \langle \sigma v \rangle = \frac{1.54 \times 10^{11}}{(\mu T)^{3/2}} \sum_{i=1}^N (\omega \gamma)_i \exp\left(-\frac{11.605 E_i}{T}\right)$$

$\omega \gamma$ : Fuerza de resonancia



# Métodos de Medida

Visión global de los métodos indirectos más utilizados

## Método de Activación

- Número de núcleos hijo observando la radiactividad después de bombardear la muestra.
- Detección de rayos  $\gamma$  y de la desexcitación del núcleo hijo.
- No hay fondo inducido por haz incidente.

$$\frac{dN_Y(t)}{dt} = P(t) - \lambda_Y N_Y(t)$$

## Productos de Reacción

- Detección del núcleo hijo retrodispersado.
- Si el hijo es inestable se puede detectar su radiactividad.

$$E_\gamma = Q + \frac{M}{M+m} E_p - E_x - \Delta E_{rec} - \Delta E_{Dop}$$

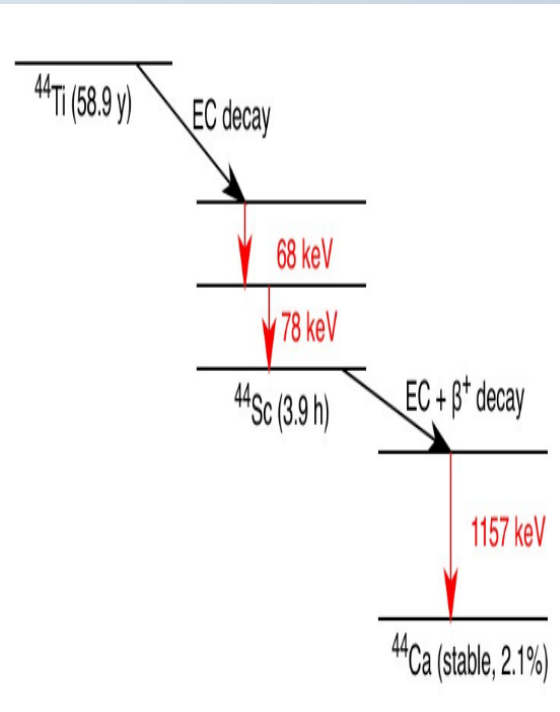
# Reacción $^{40}\text{Ca}(\alpha,\gamma)^{44}\text{Ti}$

## Escenario Astrofísico

Principal fuente de producción de  $^{44}\text{Ti}$ .

Se produce en Supernovas:

- Capas internas del colapso.
- Capas externas de combustión de Si.

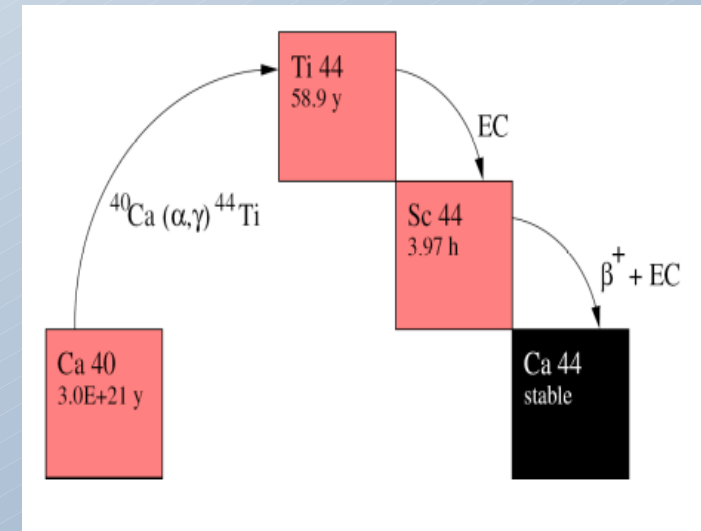


$$T_{1/2} (^{44}\text{Ti}) = 58.9 \pm 0.3 \text{ yr}$$

Emisiones detectadas por INTEGRAL y COMPTEL  
Supernova Casiopea A no se ajusta a los modelos.

$$T = 1 - 10 \text{ GK}$$

$$Q = 5.127 \text{ MeV}$$



# Reacción $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$

## Resultados Experimentales Disponibles

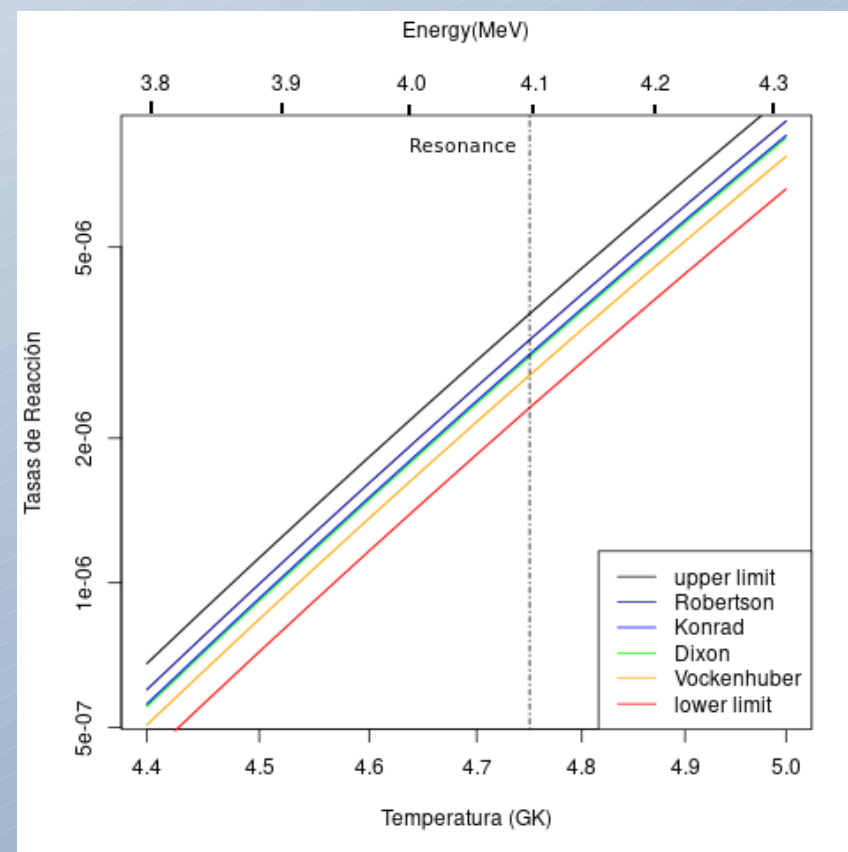
Triplete de resonancia a  $E = 4.5 \text{ MeV}$

$$E_{cm} = 4.091 \text{ MeV}$$



$$T = 4.75 \text{ GK}$$

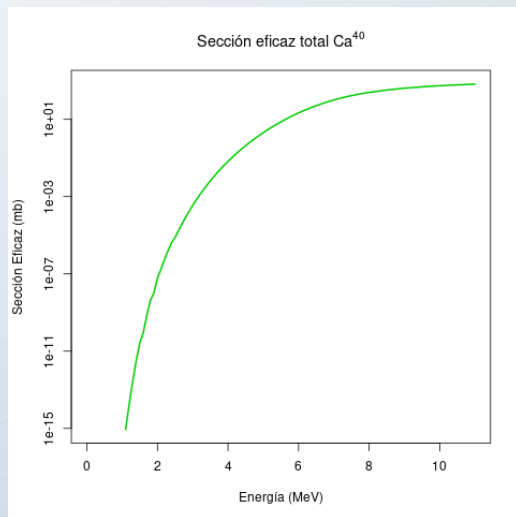
	$\omega\gamma$ (eV)	$N A \langle \sigma v \rangle$ ( $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$ )
Dixon [DIX]	$8.30 \pm 1.70$	$2.95 \times 10^{-6}$
Vockenhuber [VOC07]	$7.60 \pm 1.10$	$2.71 \times 10^{-6}$
Robertson [ROB12]	$9.00 \pm 1.20$	$3.20 \times 10^{-6}$
Schmidt [SCH13]	$8.40 \pm 0.60$	$2.99 \times 10^{-6}$



- Tasa de reacción hasta 60% modificada
- Gran repercusión en producción de  $^{44}\text{Ti}$

# Reacción $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$

## Simulación de TALYS



## Sección Eficaz

- Mismo orden que los valores experimentales
- Relevancia:

$$E_{\alpha} \geq 2 \text{ MeV}$$



$$T \geq 2.1 \text{ GK}$$

T9	Vockenhuber	Robertson	TALYS
1.0	$1.78 \times 10^{-10}$	$1.03 \times 10^{-10}$	$9.78 \times 10^{-10}$
1.5	$2.33 \times 10^{-6}$	$2.63 \times 10^{-6}$	$4.08 \times 10^{-6}$
2.0	$3.83 \times 10^{-4}$	$5.48 \times 10^{-4}$	$4.50 \times 10^{-4}$
2.5	$9.86 \times 10^{-3}$	$1.46 \times 10^{-2}$	$9.19 \times 10^{-2}$
3.0	0.093	0.135	0.076
3.5	0.471	0.676	0.362
4.0	1.61	2.27	1.22
5.0	9.04	12.30	7.22

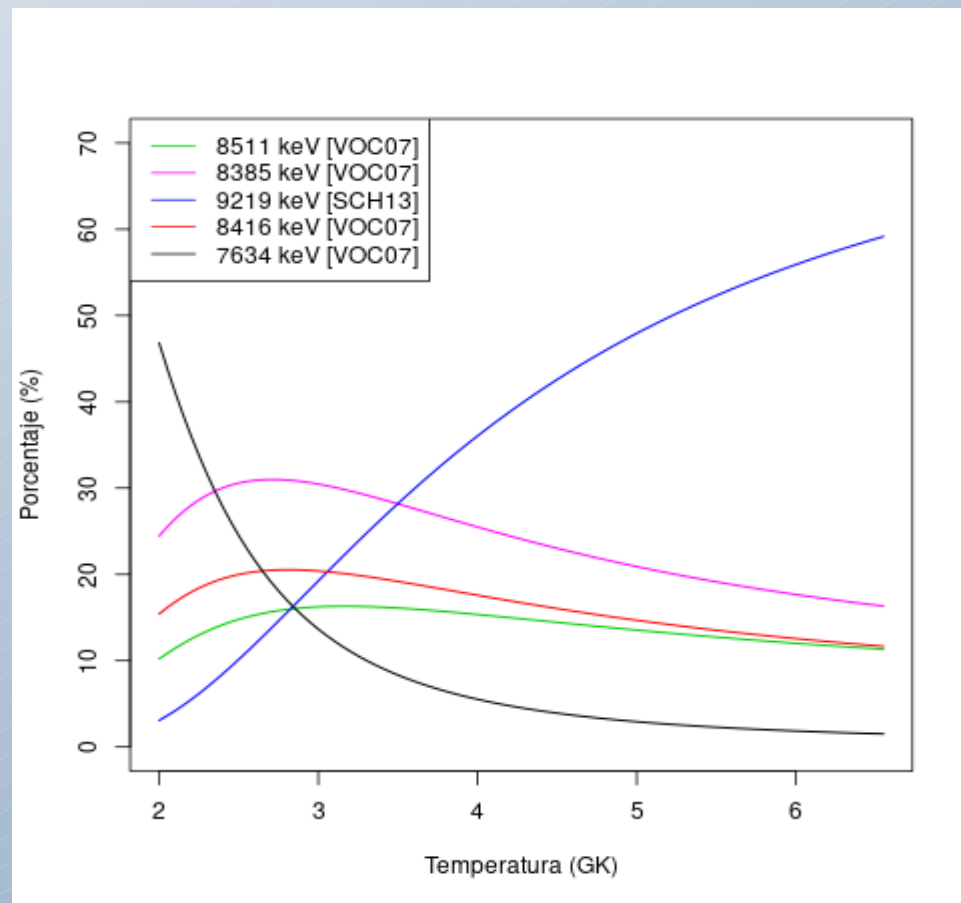
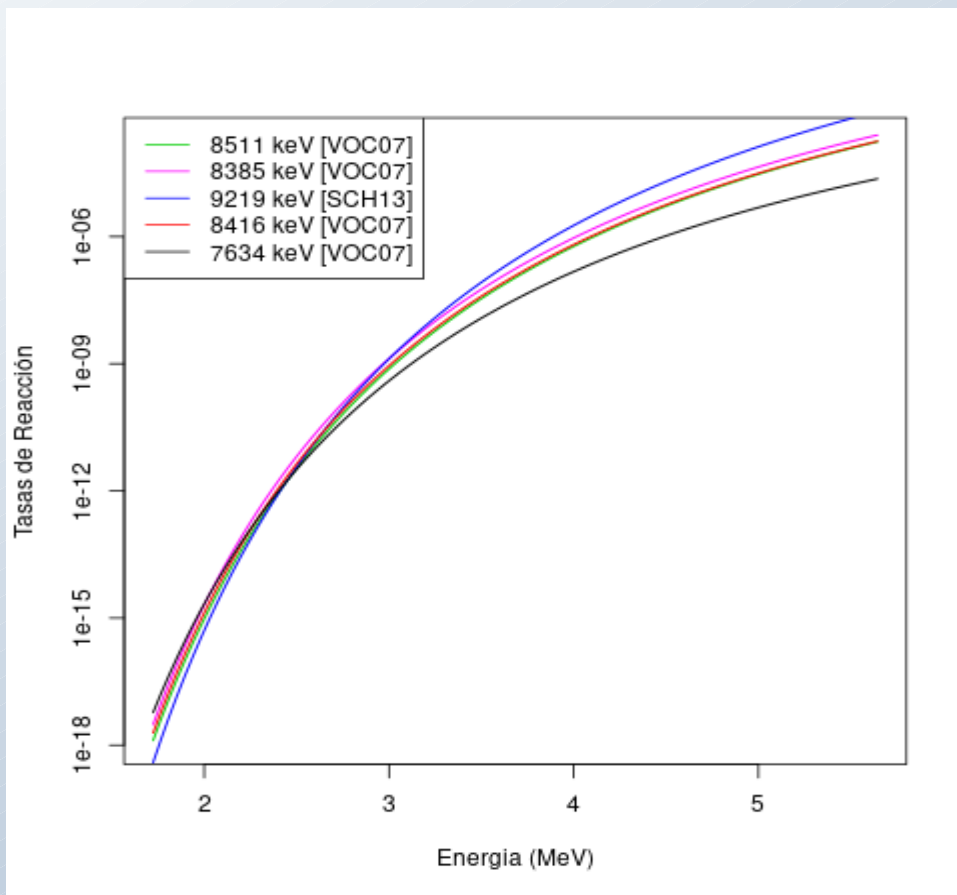
## Tasa de reacción

- TALYS < experimentales especialmente a 5 GK
- Reacción relevante para  $T > 3.5 \text{ GK}$



# Reacción $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$

## Contribución a las resonancias



- Energías altas:

- Contribuyen resonancias a mayor energía.

- Energías bajas:

- Contribuyen resonancias a menor energía.

# Propuesta de Medida: $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$

- Método de Activación
- Haz de partículas  $\alpha$ .
- Medida del triplete:  $E = 4.5 \text{ MeV}$
- Irradiación en:
  - Acelerador Tándem 5 MV (CMAM)
- Rendimiento de la activación:

$$Y = \omega \gamma S_{\text{eff}}^{-1} \frac{\pi \hbar}{E_{\alpha}^{\text{lab}} m_{\alpha}} \left( \frac{m_{\alpha} + m_{\text{Ca}}}{m_{\text{Ca}}} \right)^2$$

$$Y = \frac{N_{\gamma}}{I_{\alpha} T}$$

- Medida offline en LSC
- Fondo reducido



## Datos:

$$\omega \gamma = 10 \text{ eV}$$

$$A = 40 \text{ mBq} \longrightarrow q_t = 365 \text{ mC}$$

$$I = 2 \mu \text{ A}$$

$$T = 51 \text{ h}$$

# Propuesta de Medida: $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$

## Blanco de Activación

- Muestra de calcio natural en un soporte metálico.
- Blancos finos de Ca en forma de CaO, depositados en láminas de Ta (GSI, Lisboa).
- Necesario medir la proporción de Ca y O experimentalmente.
- Controlar reacciones contaminantes: con vidas medias muy cortas se pueden excluir.
- Refrigerar blanco.



# Propuesta de Medida: $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$

## Principales Contaminantes

- Calcio Natural tiene distintos isótopos.
- Reacciones con el Oxígeno y posible Flúor [SCH13].
- Importante conocer vidas medias de productos de reacción.

$^{40}\text{Ca} \Rightarrow 96.94 (16)\%$

$^{41}\text{Ca}, ^{42-44}\text{Ca}, ^{46}\text{Ca}, ^{48}\text{Ca} \Rightarrow \sim 3\%$

	Decay	Prompt $\gamma$	Decay $\gamma$ (keV)
$^{41}\text{Ca}(\alpha, p\gamma)^{44}\text{Sc}$	C.E.	✓	1157.0, (1499.5)
$^{44}\text{Ca}(\alpha, n\gamma)^{47}\text{Ti}$	Estable	✓	✗
$^{41}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{48}\text{Ti}$	Estable	✓	✗
$^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$	Estable	✓	✗
$^{18}\text{O}(\alpha, n\gamma)^{21}\text{Ne}$	Estable	✓	✗
$^{19}\text{F}(\alpha, n)^{22}\text{Na}$	$\beta^+$	✗	511, 1275

- Presencia de  $\gamma$  contaminantes.
- Desaparecen en gran medida en horas.



# Conclusiones

- Estudio de la reacción  $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$ .
- Simulaciones de reacciones de captura.
- Resonancias estrechas muy relevantes en tasas de reacción.
- Pequeñas variaciones de  $\omega\gamma$  producen grandes variaciones en tasas de reacción.
- Hace falta medidas precisas.
- Propuesta de medida para intentar mejorar valores experimentales.
- Mejorar modelos de nucleosíntesis estelar.



# Referencias

- [DIX] W.R. Dixon et al. Can. J. Phys., 58, 1360 (1980).
- [FOR08] A. Formicola et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35 (2008)
- [ILL11] C. Iliadis et al. The Astrophysical J. Sup. Series, 193:16 (23pp), (2011)
- [TALYS] A.J. Koning, S. Hilaire and M.C. Duijvestijn, "TALYS-1.0", EDP Sciences (2008)
- [ROB12] D. Robertson et al. Physical Review C 85, 045810 (2012).
- [SCH13] K. Schmidt et al. Physical Review C 88, 025803 (2013).
- [STRA12] O. Straniero et al. Astroph.SR (2012).
- [VOC07] C. Vockenhuber et al. Physical Review C 88, 025803 (2007).

**¡MUCHAS GRACIAS!**