

Candidatos escalares a materia oscura: diferentes mecanismos de producción

Adrián David Escañuela Copado

Grado en Física

TFG 2020/2021



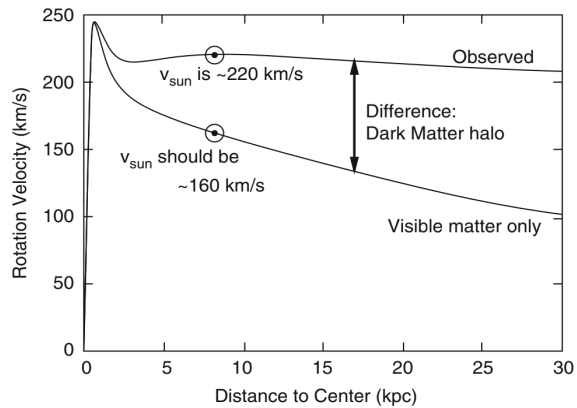
**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Contenidos

- Motivación
- Universo FLRW
- WIMPs y FIMPs: onda s y onda p
- WIMPs y FIMPs: portal de Higgs
- Cosmología no-estándar
- Axiones
- Conclusions

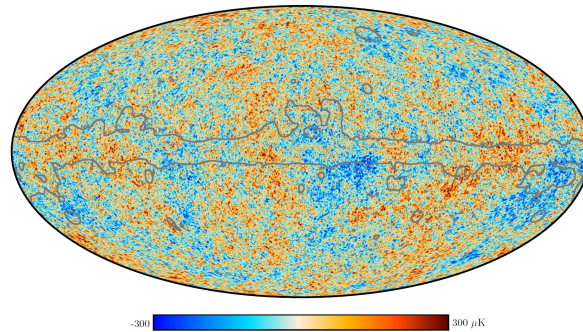
Motivación

Curvas de rotación en galaxias



(P. Schneider, “Extragalactic Astronomy and Cosmology”)

Anisotropías CMB




(ESA and the Planck Collaboration)



Modelos teóricos DM



(Bertone & Tait 2018)

Universo FLRW

- Métrica FLRW: $ds^2 = dt^2 - a^2(t) [dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2]$
Factor de escala 

- Parámetro de Hubble: $H = \frac{\dot{a}}{a} = \sqrt{\frac{\rho}{3m_p^2}}$
Densidad de energía 
Cociente presión/densidad 

- Evolución de la densidad de energía según expansión:

$$\dot{\rho} + 3H(1 + w)\rho = 0, \quad w = \begin{cases} 0, & \text{Materia} \\ 1/3, & \text{Radiación} \\ -1, & \text{Energía oscura} \end{cases}$$

- Desacoplo cuando el ritmo de expansión pasa a superar al ritmo de interacción, $H > \Gamma$
- Historia térmica: Transición de fase electrodébil (EW) $T \sim 100$ GeV, transición de fase QCD $T \sim 0.1$ GeV y nucleosíntesis del Big Bang (BBN)

Universo FLRW

- Aniquilación 2 a 2: $DM + DM \rightarrow X + X$

- Def. Abundancia: $Y = n/s$

- Ecuación de Boltzmann:

(Steigman, Dasgupta & Beacom 2012)

$$\frac{dY}{dx} = \frac{\lambda}{x^2} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{d \ln g_{*s}}{d \ln T} \right) \frac{g_{*s}}{g_*^{1/2}} (Y_{eq}^2 - Y^2)$$

Masa DM $\rightarrow m_p m$

Promedio térmico $\rightarrow \langle \sigma v \rangle$

Grados de libertad efectivos $\rightarrow g_{*s}, g_*$

Variable adimensional $x = m/T$

$$Y_{eq} = \frac{45}{4\pi^2} \frac{x^2 K_2(x)}{g_{*s}(T)}$$

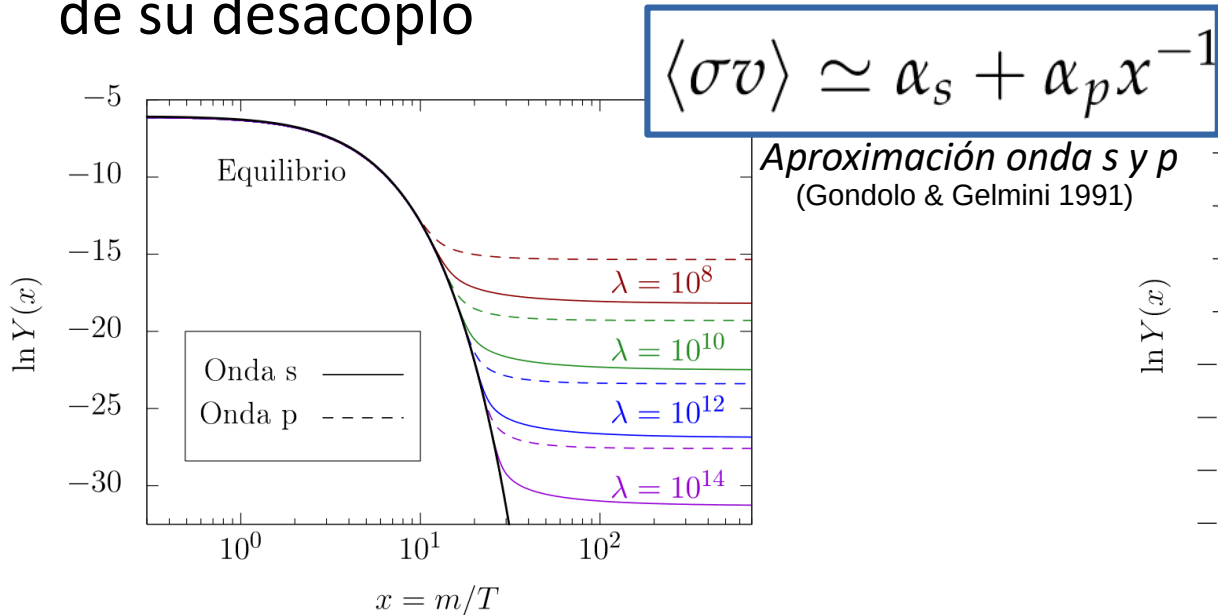
- Abundancia actual:

$$Y_{\infty}^* = 4,4 \times 10^{-10} \frac{\text{GeV}}{m_{\phi}}$$

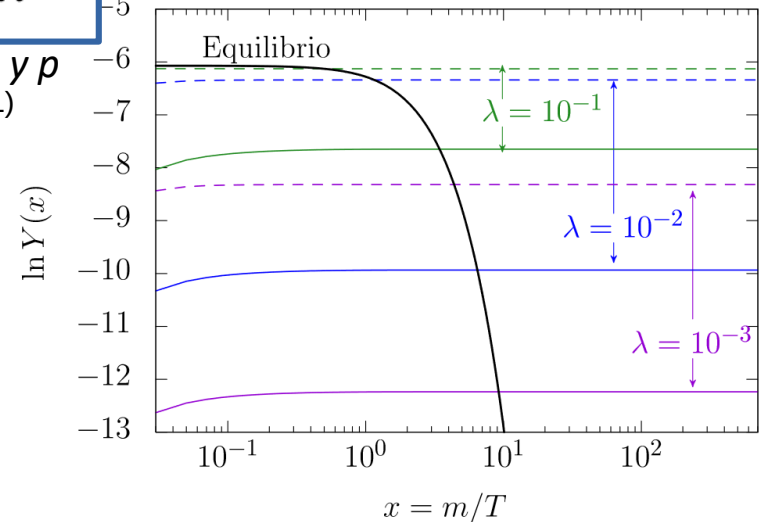
(Planck Collaboration 2020)

WIMPs y FIMPs: onda s y onda p

- **WIMPs:** ritmo de interacción **muy superior** al ritmo de expansión → **alcanza** el equilibrio antes de su desacoplo



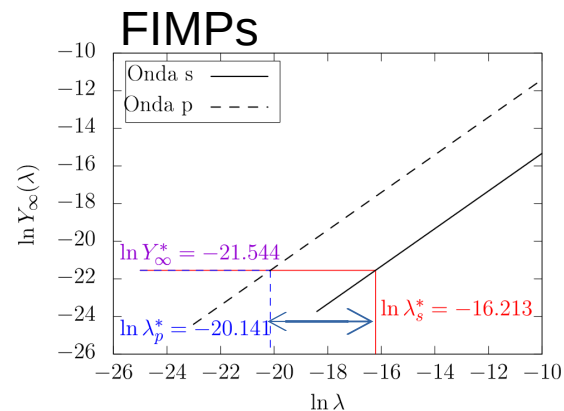
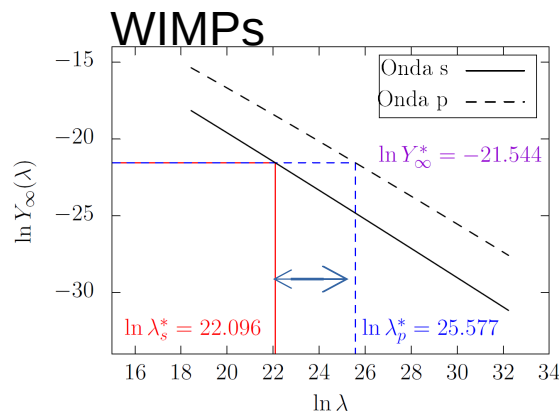
- **FIMPs:** ritmo de interacción **no tan grande** → **no alcanza** el equilibrio antes de su desacoplo



WIMPs y FIMPs: onda s y onda p

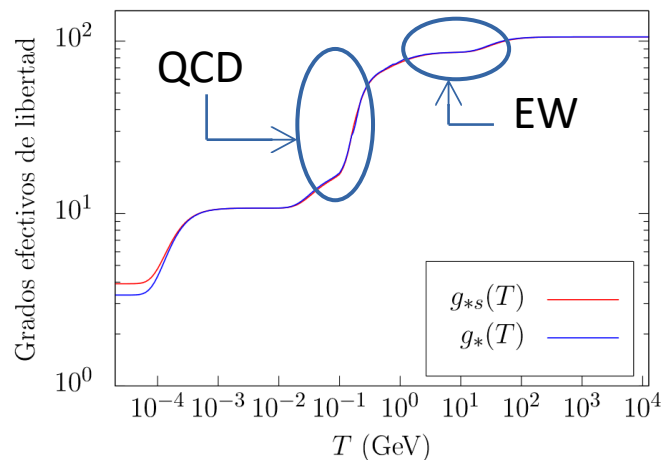
- Aproximación: **sin transiciones de fase**

$$\longrightarrow g_* = g_{*s} = 106,75$$



- Con transiciones de fase**

$$\longrightarrow g_*(T), g_{*s}(T)$$



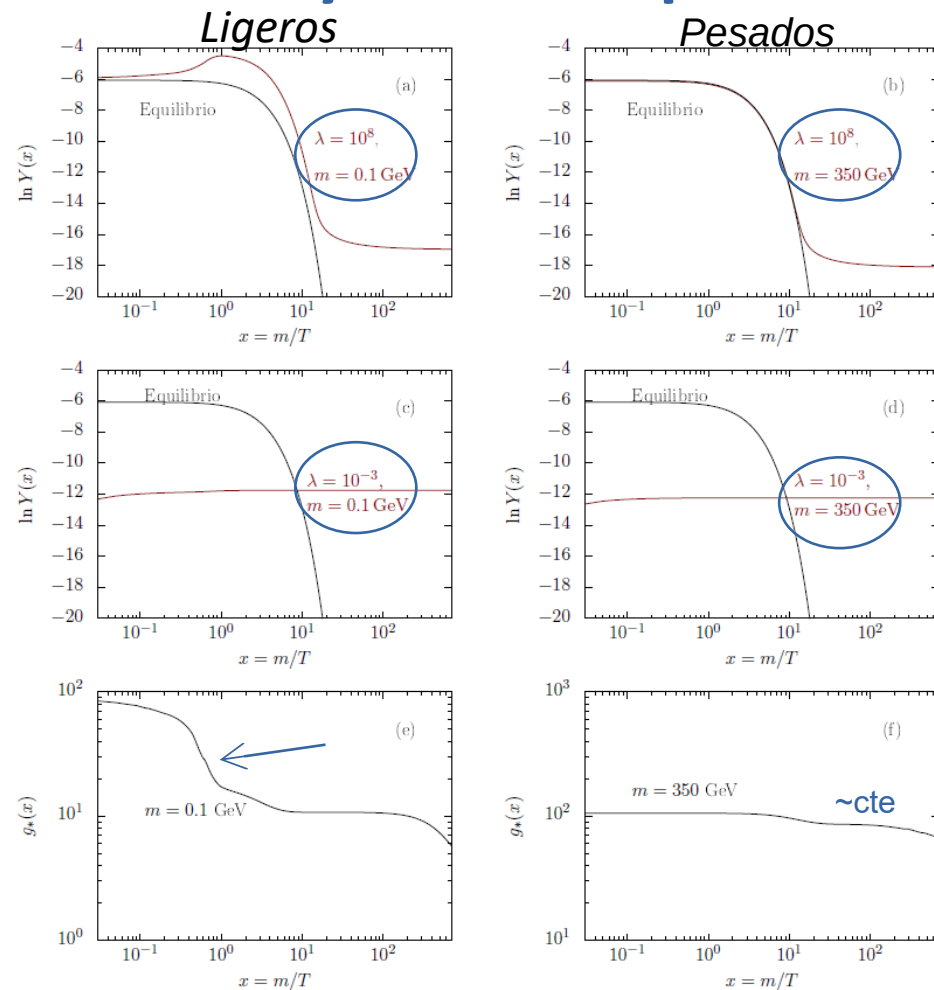
Afectará a las abundancias

$$Y_\infty$$

WIMPs y FIMPs: onda s y onda p

$$g_*(T), \quad g_{*s}(T)$$

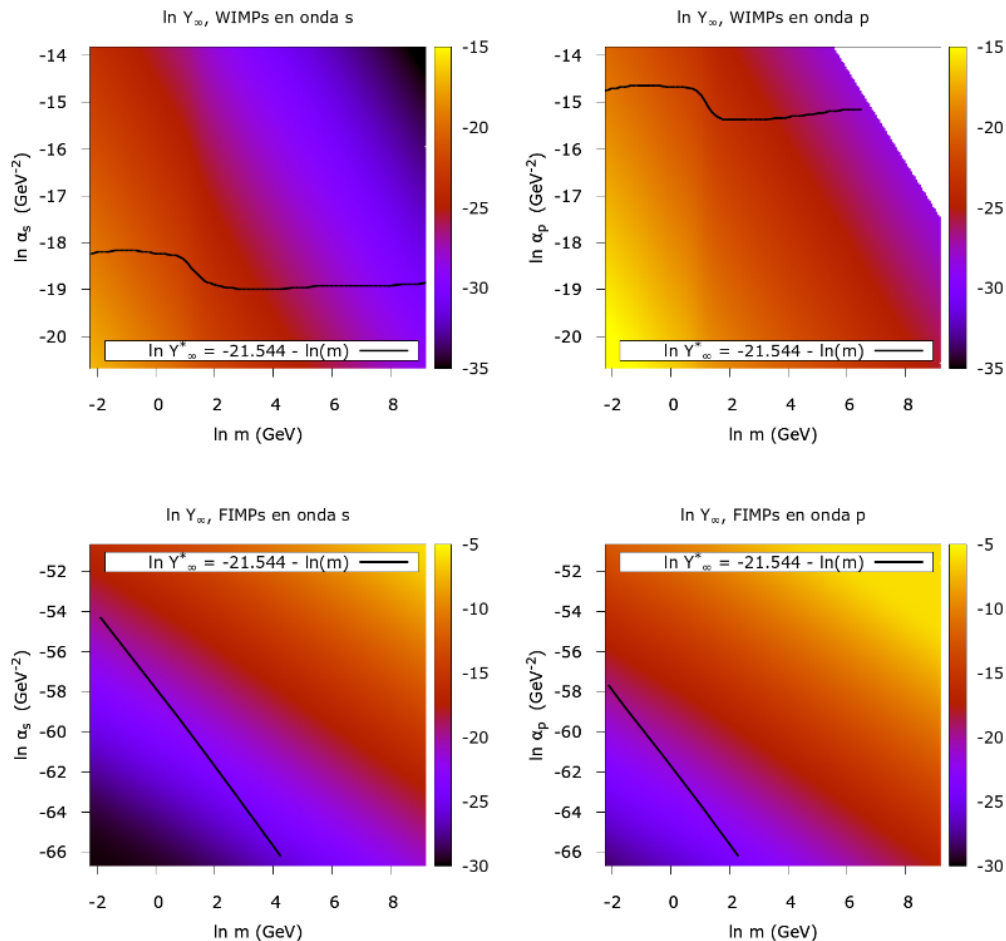
- Diferencias a igual λ
- **Candidatos ligeros especialmente afectados** por transiciones EW y QCD \rightarrow Sobre todo WIMPs



WIMPs y FIMPs: onda s y onda p

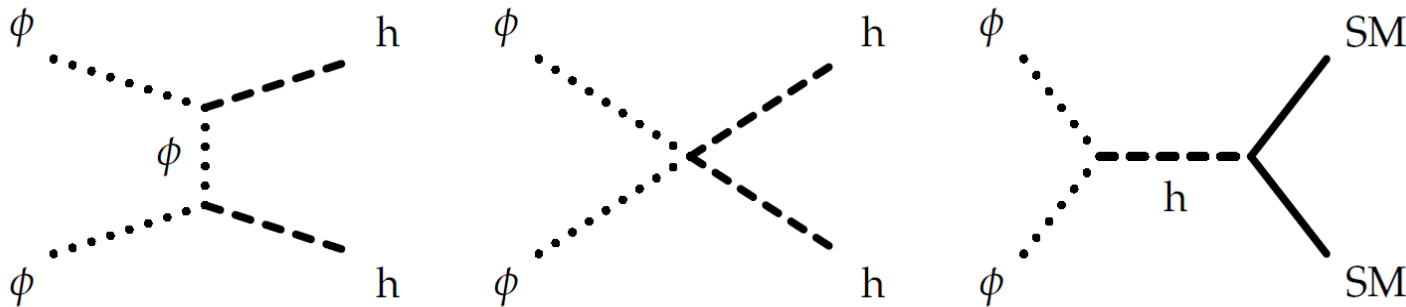
Diferencias a igual λ : ya no hay correspondencia $\lambda \leftrightarrow Y_\infty$

→ Variables físicas: masa y promedio térmico



WIMPs y FIMPs: portal de Higgs

$$\mathcal{L}_I = \frac{1}{4}\lambda_{\phi h}h^2\phi^2 + \frac{1}{2}\lambda_{\phi h}vh\phi^2 + \mathcal{L}_{\text{SM}}$$



(Lebedev 2021)

WIMPs y FIMPs: portal de Higgs

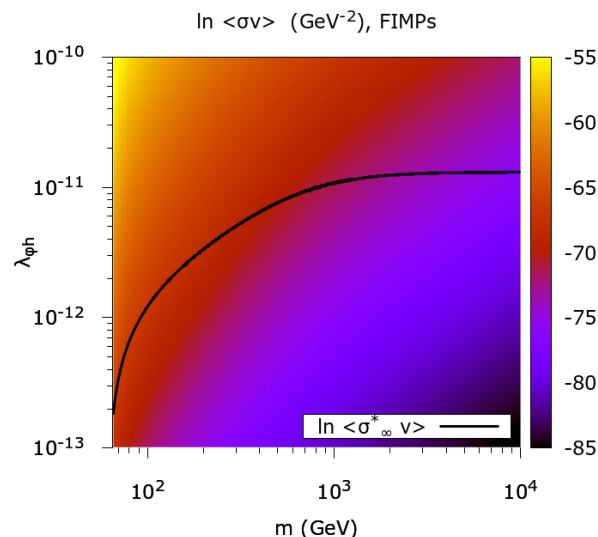
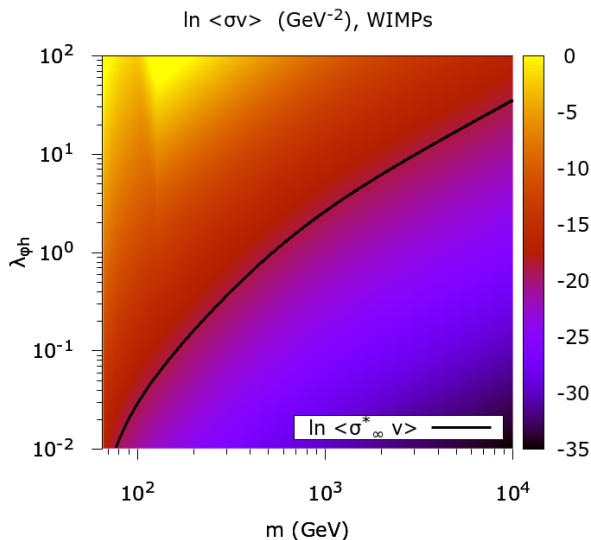
$y=2E_{\text{CM}}/T$ adimensional

secciones eficaces de los canales de aniquilación

$$\langle \sigma v \rangle = [4x^4 K_2^2(x)]^{-1} \int_{2x}^{\infty} \sigma(y) \left[1 - (2x/y)^2\right] y^4 K_1(y) dy$$

(Gondolo & Gelmini 1991)

➔ Prácticamente constantes: onda s $\rightarrow \langle \sigma v \rangle \simeq \alpha_s$



Promedios térmicos que resultan en abundancia actual

Cosmología no-estándar

Universo dominado por $\chi \rightarrow$ Universo dominado por radiación

$$\begin{aligned}\dot{\rho}_R + 4H\rho_R &= +\Gamma_\chi\rho_\chi \\ \dot{\rho}_\chi + 3H(1+w)\rho_\chi &= -\Gamma_\chi\rho_\chi\end{aligned}$$

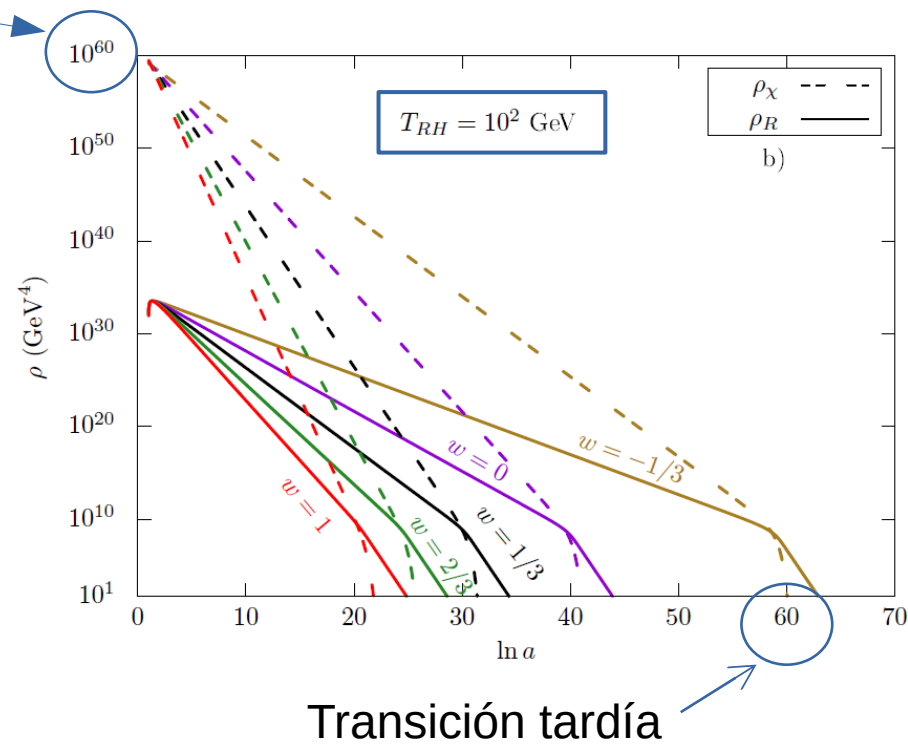
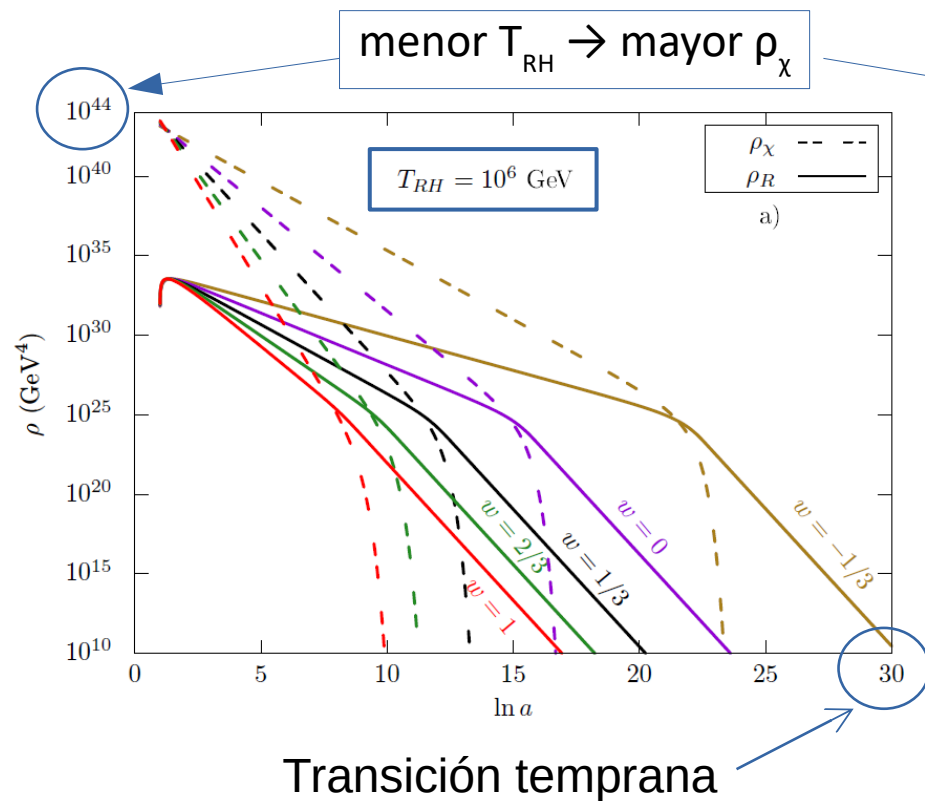
tasa de interacción

χ arbitrario, $\forall w$

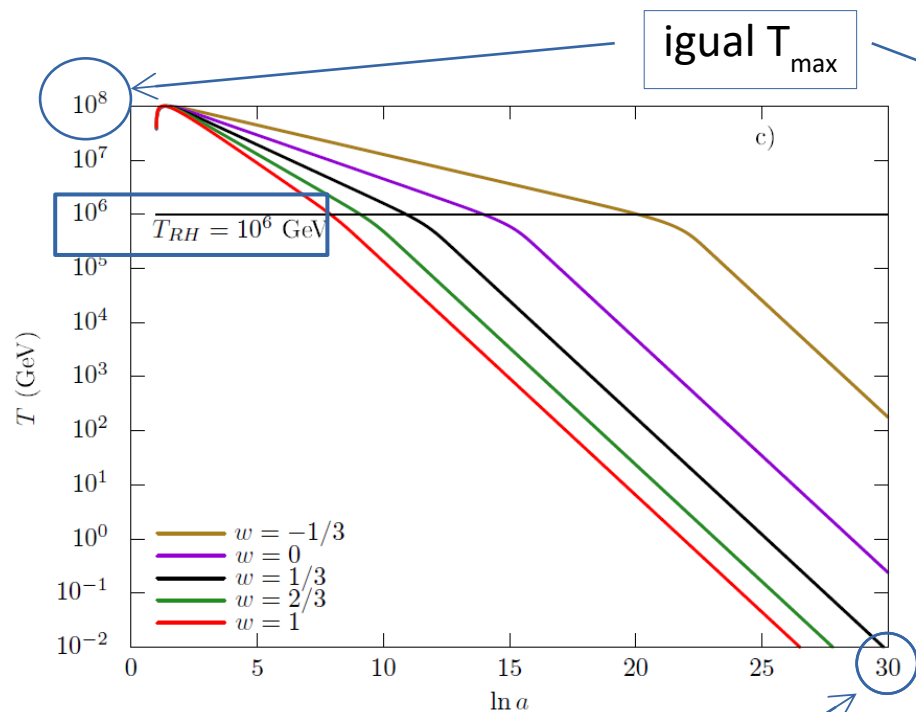
(Bernal, Elahi, Maldonado & Unwin 2019)

Temperatura de reheating T_{RH} : igualdad del ritmo de interacción y el ritmo de expansión, radiación pasa a dominar

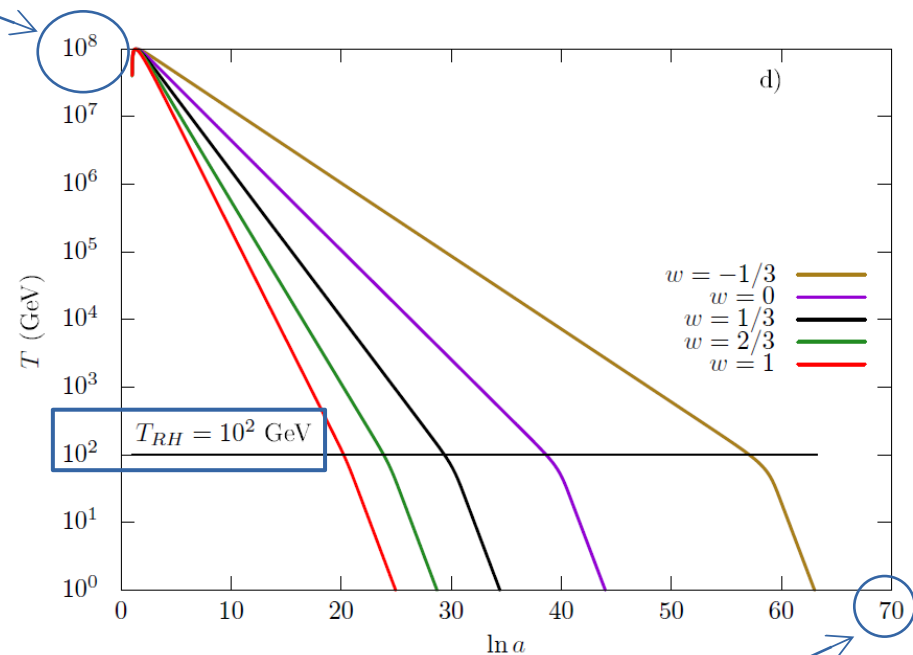
Cosmología no-estándar



Cosmología no-estándar



Transición temprana



Transición tardía

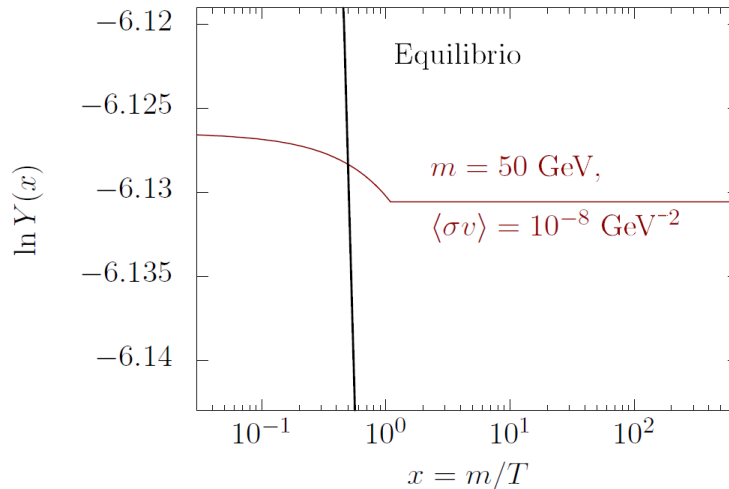
Cosmología no-estándar

Abundancia en cosmología no-estándar, para H cualquiera:

$$\frac{dY}{dx} = - \frac{\langle \sigma v \rangle s}{Hx} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{d \ln g_{*s}}{d \ln T} \right) (Y^2 - Y_{\text{eq}}^2)$$

$H(x) \propto \rho(x)^{1/2}$

→ Abundancia de un candidato en transición χ -radiación tardía ($T_{\text{RH}} = 100 \text{ GeV}$)



**Nacen
(casi)
desacoplados**

Axiones

Axión: partícula teórica que resuelve el problema CP-fuerte

$$d_n < 3.0 \times 10^{-13} \text{ e} \cdot \text{fm} \text{ (90 \% CL)}$$

$$d_n \sim 6\bar{\Theta} \times 10^{-4} \text{ e} \cdot \text{fm}$$

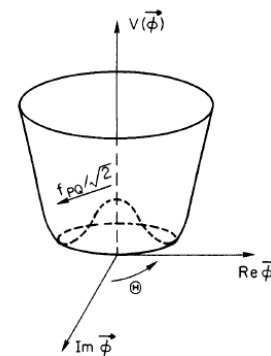


$$\bar{\Theta} \lesssim 10^{-10} \quad \text{Cantidad muy pequeña}$$

Rotura de simetría PQ \rightarrow bosón pseudo-Goldstone

(Peccei & Quinn 1977)

- Conversión parámetro Θ a variable θ .
- Ruptura simetría \rightarrow relación axión- θ : $a = \theta f_{\text{PQ}}/N$

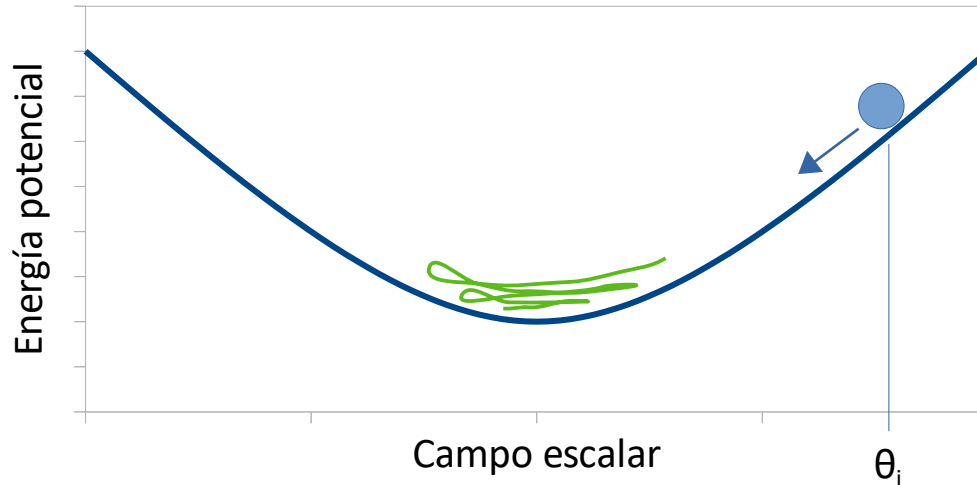


Efectos no-perturbativos QCD \rightarrow adquiere masa (potencial curvo)

$$V(a) \simeq \frac{1}{2} \left(\frac{f_{\text{PQ}}}{N} m_a \right)^2 \theta^2 \longrightarrow \text{aprox. oscilador armónico}$$

Axiones

Mecanismo de producción de DM
→ desviación: $\theta_i \neq 0$



(Dine & Fischler 1983)

(Preskill, Wise & Wilczek 1983)

- EoM de partícula masiva bajo potencial armónico en universo FLRW:

$$\ddot{\theta} + 3H\dot{\theta} + m_a^2(T)\theta = 0$$

- **Oscilador armónico amortiguado**
→ fricción Hubble
- Comienza a oscilar cuando $m > H$

Axiones

- Densidad de energía asociada a las oscilaciones → **materia:**

$$\rho_a(T) = f_{\text{PQ}}^2 \langle \dot{\theta}^2 \rangle \stackrel{\text{EoM}}{=} \rho_{a,0} m_a(T) a(T)^{-3} \leftarrow \rho \propto a^{-3}, \text{ como } \underline{\text{materia fría}}$$

$$f_{\text{PQ}} m_a(T_0) \sim 10^{-6} \text{ GeV}^2 \xrightarrow{m_a \sim \mu\text{eV}} f_{\text{PQ}} \sim 10^9 \text{ GeV} \longrightarrow \text{escala de energía ruptura simetría PQ: } T \sim f_{\text{PQ}}$$

- De su ocupación en el espacio de fases → **condensado:**

(Kolb & Turner 1990)

$$f_a(\mathbf{p}_a = 0) \sim \frac{m_a(T_i)(f_{\text{PQ}}/N)^2}{p_i^3} \sim 10^{50} (m_a/\text{eV})^{-2,7}$$

$$p_i \sim H^{-1}$$

Menor momento posible
(periodo de onda = edad del universo)

↳ Pico en ocupación para momento nulo
(energías más bajas disponibles)
→ Condensado

Conclusions

- The abundance of light WIMPs and FIMPs ($m \sim 0.1 - 10$ GeV) is significantly affected by EW and QCD phase transitions.
- A Higgs portal could connect DM with SM.
- A prolonged χ -radiation transitory period ($T_{\text{RH}} = 100$ GeV) drives our candidates to an early decoupling.
- Axions form a condensate and its energy density behaves like dark matter.