

# Cosmología(: Algunos aspectos oscuros de nuestro universo)

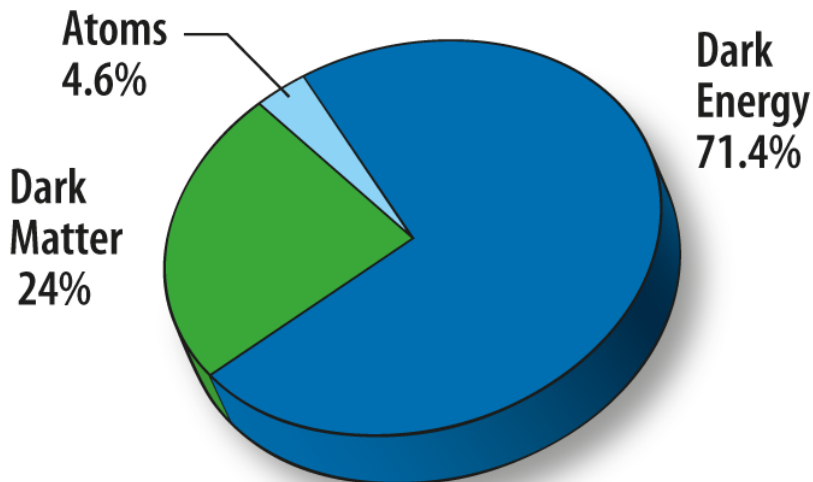
**Alberto Diez-Tejedor**

Departamento de Física  
División de Ciencias e Ingenierías  
Universidad de Guanajuato  
Campus León



XXX Reunión Anual de la División de Partículas y Campos

# Contenido de materia en el universo actual



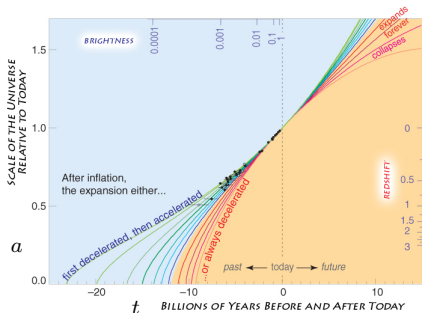
TODAY

# Átomos (4.6 %) – modelo estándar física partículas

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^c - \frac{1}{2}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{\psi}^i \gamma^\mu \psi^j) g_\mu^a + G^a \partial^\mu G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b G^c - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 Z_\nu^0 - \frac{M^2}{2\Lambda^2} Z_\mu^0 Z_\nu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}M_H^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\nu \phi^0 \partial_\nu \phi^0 - \frac{1}{2\Lambda^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \frac{2M_h^2}{g^2} + \\
 & \frac{2M_h}{g^2} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) + \frac{2M_h^2}{g^2} \alpha_h - ig_{cw} [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- W_\nu^+) - Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+) + Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+)] - ig_{sw} \partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\mu^- W_\nu^+) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^+ W_\mu^- W_\nu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\mu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\mu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- W_\nu^+) - 2A_\mu Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\partial^\mu \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gMW_\mu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\nu^0 H - \frac{1}{2}ig[W_\mu^+ (\partial^\mu \partial_\nu \phi^- - \phi^- \partial_\nu \partial^\mu) - \\
 & W_\mu^- (\partial^\mu \partial_\nu \phi^+ - \phi^+ \partial_\nu \partial^\mu)] + \frac{1}{2}g[W_\mu^+ (H\partial_\nu \phi^- - \phi^- \partial_\nu H) - W_\mu^- (H\partial_\nu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\nu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H\partial_\nu \phi^0 - \phi^0 \partial_\nu H) - ig \frac{2M}{c_w} MZ_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_{sw} MA_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\nu \phi^- - \phi^- \partial_\nu \phi^+) + \\
 & ig_{sw} A_\nu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\nu^+ [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{2c_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{2c_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{2s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\nu \phi^0 \phi^- - \\
 & g^4 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - e^2 (\gamma \partial + m_\nu^2) e^\lambda - e^\lambda \gamma \partial e^\lambda - \tilde{u}_2^2 (\gamma \partial + m_\nu^2) u_2^2 - \partial_\mu^2 (\gamma \partial + \\
 & m_\nu^2) d_\mu^2 + ig_{sw} A_\mu [-(e^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{1}{2}(\tilde{u}_2^2 \gamma u_2^2) - \frac{1}{2}(\tilde{d}_2^2 \gamma d_2^2)] + \frac{ig}{2c_w} [(\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda (1 + \\
 & \gamma^5) \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\tilde{u}_2^2 \gamma^\mu (\frac{1}{2}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_2^2) + \\
 & (\tilde{d}_2^2 \gamma^\mu (1 - \frac{1}{2}s_w^2 - \gamma^5) d_2^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\tilde{u}_2^2 \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) C_{\lambda\mu} d_\mu^2)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(e^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\tilde{d}_2^2 \gamma_{\lambda\mu}^\mu (1 + \gamma^5) u_2^2)] + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\nu^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (e^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H [e^\lambda e^\lambda) + \\
 & i\phi^0 (e^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} W_\mu^+ [-m_\nu^2 (\tilde{u}_2^2 C_{\lambda\mu} (1 - \gamma^5) d_\mu^2) + m_\nu^2 (\tilde{u}_2^2 C_{\lambda\mu} (1 + \\
 & \gamma^5) d_\mu^2) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\nu^2 (\tilde{d}_2^2 C_{\lambda\mu} (1 + \gamma^5) u_2^2) - m_\nu^2 (\tilde{d}_2^2 C_{\lambda\mu} (1 - \gamma^5) u_2^2) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\tilde{u}_2^2 u_2^2) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\tilde{d}_2^2 d_2^2) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (u_2^2 \gamma^5 u_2^2) - \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\tilde{d}_2^2 \gamma^5 d_2^2) + \\
 & X^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + X^- (\partial^2 - M^2) X^- + X^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{\Lambda^2}) X^0 + Y \partial^\mu Y + \\
 & ig_{cw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + \\
 & ig_{cw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + \\
 & ig_{cw} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \\
 & \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{\Lambda^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM[\bar{X}^+ X^0 \phi^- - \\
 & \bar{X}^- X^0 \phi^+] + \frac{1}{2c_w} igM[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igM_{sw}[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \\
 & \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

# Energía Oscura (71.4 %) – supernovas 1998

Trazando la historia del universo usando nuevas candelas estelares



**Ecuaciones de Friedmann** para la **expansión** de un universo H&I

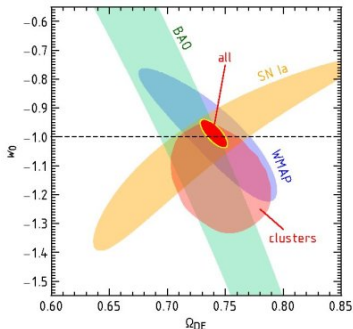
$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi}{3M_{\text{Pl}}^2} \sum_i \rho_i - \frac{k}{a^2}$$

$$\left(\frac{\ddot{a}}{a}\right) = -\frac{4\pi}{3M_{\text{Pl}}^2} \sum_i (\rho_i + 3p_i)$$

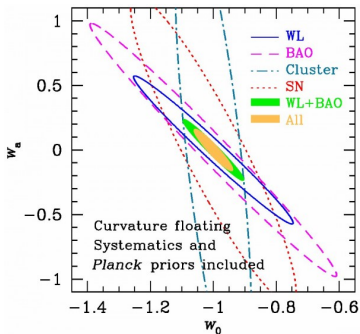
El contenido material del universo nos determina su historia,  $a = a(t)$

# Fenomenología de energía oscura

La manera más sencilla de entender por qué el **universo se acelera** es a través de una **componente oscura** con  $p_{\text{DE}} < -(1/3)\rho_{\text{DE}}$



$$\text{DE EoS: } w(z) = \frac{p_{\text{DE}}}{\rho_{\text{DE}}} = w_0$$



$$\text{CPL: } w(z) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}$$

A día de hoy no existe evidencia más allá de  $p_{\text{DE}} = -\rho_{\text{DE}}$

**C O N S T A N T E      C O S M O L Ó G I C A**

# Los “problemas” de una constante cosmológica

## “Problema” del ajuste fino:

¿Cómo calculamos el valor que toma la constante cosmológica?

a) La constante cosmológica como resultado de la *energía del vacío*

$$\rho_{\text{vac}} = -p_{\text{vac}} = \frac{1}{2} \int \frac{d^3 \vec{k}}{(2\pi)^3} \omega_k \sim \int_0^{\Lambda_{\text{Pl}}} k^3 dk \sim \Lambda_{\text{Pl}}^4 \sim 10^{110} \text{ erg/cm}^3$$

$$\text{observaciones: } \rho_{\text{DE}} = -p_{\text{DE}} \sim 10^{-10} \text{ erg/cm}^3$$

b) La constante cosmológica como *teoría efectiva* para la *gravedad*

$$S_{\text{grav}} = \int d^4 x \sqrt{-g} [c_1 \Lambda_{\text{Pl}}^4 + c_2 \Lambda_{\text{Pl}}^2 R + c_3 R^2 + \dots]$$

$$\text{observaciones: } c_1 \sim 10^{-120}, \quad c_2 = 8\pi, \quad c_3 = ???, \quad \dots$$

## “Problema” de la coincidencia:

¿Por qué es justo ahora que observamos una constante cosmológica?

$$\rho_{\text{atoms}} = \frac{\rho_{\text{atoms},0}}{a^3}, \quad \rho_{\text{DM}} = \frac{\rho_{\text{DM},0}}{a^3}, \quad \rho_{\Lambda} = \rho_{\Lambda,0}$$

# Effective Field Theory (sketch)

En vez de proponer modelos... ¿cuál es su descripción más general?

## Consideraciones (mínimas):

- Perturbaciones cosmológicas como grados de libertad relevantes
- Grupo difs. espontáneamente roto hasta difs. espaciales  $\sim$  cosmo
- Expansión sistemática en perturbaciones y sus gradientes  $\sim$  LS
- Ausencia taquiones y fantasmas en el espectro de bajas energías
- Acoplamiento mínimo con la materia  $\sim$  no 5ta-fuerzas

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{M_*^2}{2} f(t) R - \Lambda(t) - c(t) g^{00} + \frac{M_2^4(t)}{2} (\delta g^{00})^2 \right. \\ \left. - \frac{m_3^3(t)}{2} \delta K \delta g^{00} - m_4^2(t) (\delta K^2 - \delta K_{\mu\nu} \delta K^{\mu\nu}) \right. \\ \left. + \frac{\tilde{m}_4^2(t)}{2} {}^{(3)}R \delta g^{00} + \dots \right] + S_M[\psi_i, g_{\mu\nu}]$$

No hipótesis **modificación gravedad** o **componente material**

# Diccionario: EFT vs modelo (sketch)

Parameter	$f$	$\Lambda$	$c$	$M_2^4$	$m_3^3$	$m_4^2$	$\tilde{m}_2^4$
$\Lambda$ CDM	1	✓	0	-	-	-	-
Quintessence	$1/\checkmark$	✓	✓	-	-	-	-
$f(R)$	✓	✓	0	-	-	-	-
$k$ -essence	$1/\checkmark$	✓	✓	✓	-	-	-
Galileon	$1/\checkmark$	✓	✓	✓	✓	-	-
DGP	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
Ghost Condensate	$1/\checkmark$	✓	0	-	-	✓	-
Beyond Horndeski	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hořava-Lifshitz	1	✓	0	-	-	✓	-

**observaciones:** SNe, CMB, BAO, LSS, etc

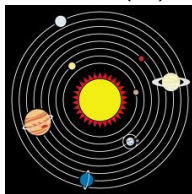
**Ninguna evidencia de física más allá de una  $\Lambda$  const.**

$M_* = M_{\text{Pl}}$ ,  $f(t) = 1$ ,  $\Lambda(t) = \Lambda$ , resto nulos

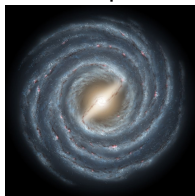


# Materia Oscura (24 %) – Zwicky, Rubin, Peebles...

0.1pc (✓)



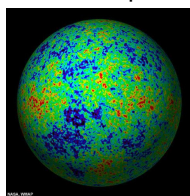
1Kpc



1Mpc



1,000Mpc



El contenido de materia en los campos del modelo estándar no puede explicar las observaciones por encima de 1 Kpc

mass: 1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2
charge: 2/3	2/3	2/3	2/3	0	0
spin: 1/2	1/2	1/2	1/2	1	1
	u	c	t	g	H
	up	charm	top	gluon	Higgs boson
	d	s	b	γ	
	down	strange	bottom	photon	
	e	μ	τ	Z	
	electron	muon	tau	Z boson	
	ν <sub>e</sub>	ν <sub>μ</sub>	ν <sub>τ</sub>	W	
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	W boson	
QUARKS					
LEPTONS					
					GAUGE BOSONS

+



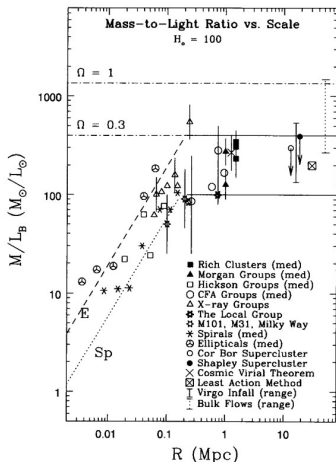
# Bueno... ¿pero hay algo más que podamos decir?

*Pensamos* que la DM no está completamente desacoplada del SM

- Nos gustaría poder **calcular/predecir** cosas (antropocéntrica)
- Nos gustaría poder **detectar** DM (antropocéntrica)
- Quizás la razón más importante... **milagro WIMP**

# ¿Realmente necesitamos una componente extra?

Relación **Masa/Luminosidad** en el universo a diferentes **escalas**



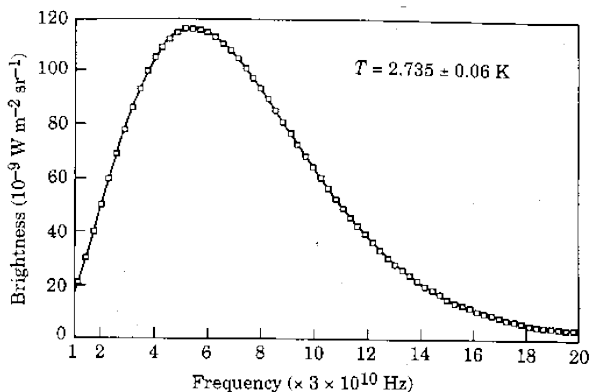
$$\Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{8\pi\rho}{3M_{Pl}^2 H^2}$$

$\Omega \times 100 = \# \%$  contenido de materia en el universo

¿Fotones? ¿Bariones? ¿Neutrinos?

# La materia oscura no puede estar hecha de fotones

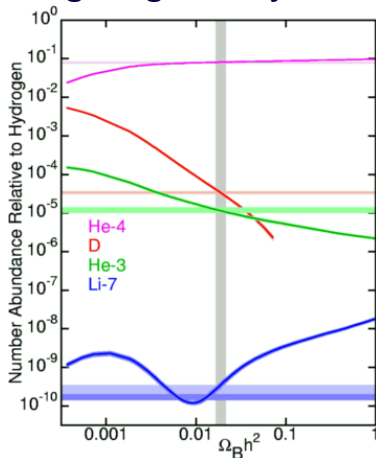
La radiación cósmica de fondo (CMB) a  $T = 2,7255 \pm 0,0006$  K



$$\rho_\gamma = \frac{2\pi^2}{30} T^4, \text{ y entonces } \Omega_\gamma \sim 10^{-5} \ll 0,3$$

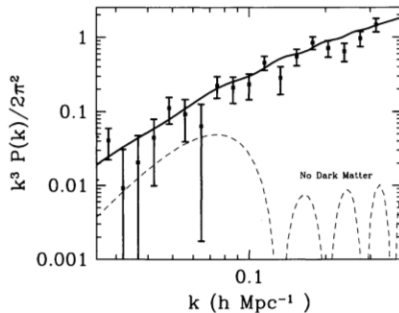
# La materia oscura no puede estar hecha de bariones

## Big-Bang nucleosynthesis



$$\Omega_b \sim 0,05 < 0,3$$

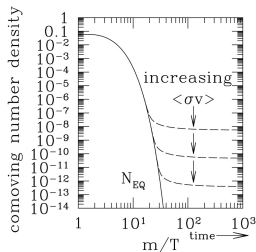
## Espectro de potencias



Necesitamos materia que no se acople a los fotones para que las estructuras en el universo puedan formarse a tiempo

# La materia oscura ¿puede estar hecha de neutrinos?

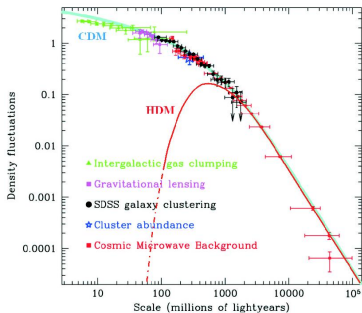
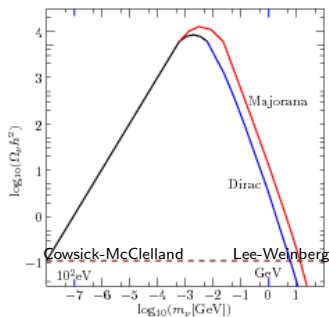
## Desacoplamiento térmico de neutrinos en el universo temprano



$$N \neq N_{\text{EQ}} \text{ cuando } \Gamma_A \sim H$$

**Relíquias calientes:**  $\Gamma_A \sim H$  para  $m/T \ll 1$

**Relíquias frías:**  $\Gamma_A \sim H$  para  $m/T \gg 1$



# El milagro WIMP

WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)  $\sim$  “neutrinos”



$$\Omega_{\text{WIMP}} h^2 \sim \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma_A | v | \rangle}$$

$m \sim 10 \text{ GeV} + \text{Weak Interactions}$

$$\langle \sigma_A | v | \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$\Omega_{\text{WIMP}} h^2 \sim \Omega_{\text{CDM}} h^2 \sim 0,1$$

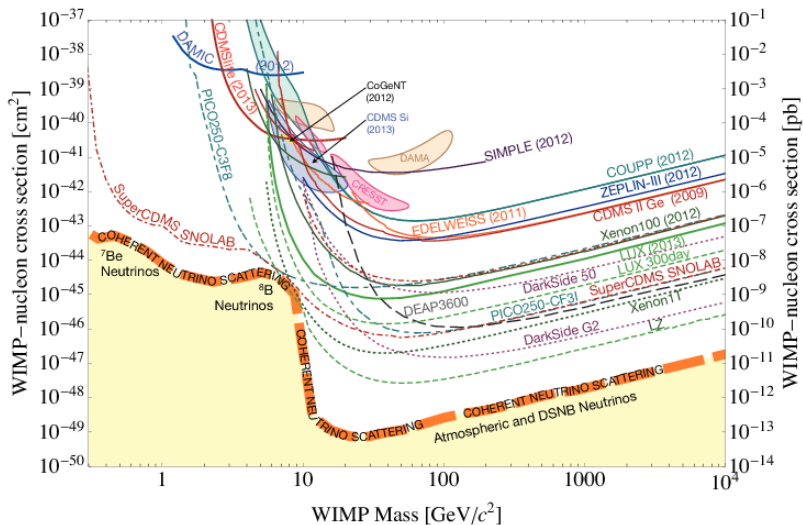
**¡WIMP miracle!**

# De nuevo literatura plagada de posibles realizaciones

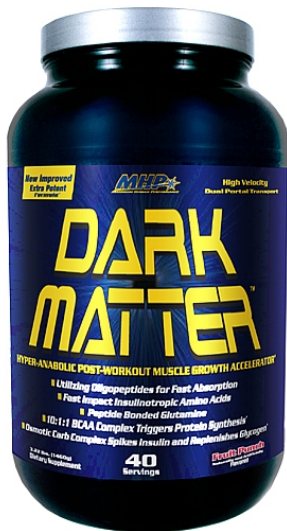
<i>DM candidate</i>	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	Result
	$\Omega h^2$	Cold	Neutral	BBN	Stars	Self	Direct	$\gamma$ -rays	Astro	Probed	
SM Neutrinos	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	×
Sterile Neutrinos	~	~	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	~
Neutralino	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gravitino	✓	✓	✓	~	✓	✓	✓	✓	✓	✓	~
Sneutrino $\tilde{\nu}_L$	~	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	×
Sneutrino $\tilde{\nu}_R$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Axino	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SUSY Q-balls	✓	✓	✓	✓	~	-	✓	✓	✓	✓	~
$B^1$ UED	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
First level graviton UED	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓	×
Axion	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Heavy photon	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Inert Higgs model	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Champs	✓	✓	×	✓	×	-	-	-	-	✓	×
Wimpzillas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	~	~



# Los “problemas” de la materia oscura



# ¡Gente afirma haberla visto haciendo el super!



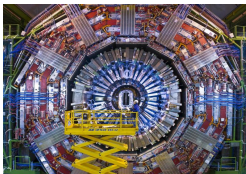
Las **observaciones cosmológicas actuales** apuntan a que muy posiblemente el sector de materia es más complejo de lo que nos dice el modelo estándar de física de partículas

Por un lado las observaciones parecen apuntar a una **constante cosmológica** no nula, cuya naturaleza aún no entendemos bien

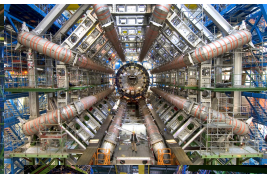
Por otro lado las observaciones parecen apuntar también hacia la existencia de una nueva **partícula** (o incluso partículas) que aún no hemos detectado de un modo directo

# Normalmente pensamos en física de partículas como

ALICE



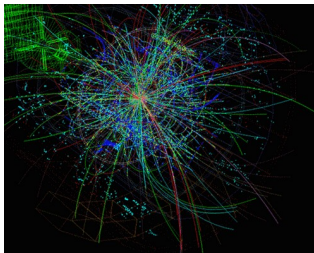
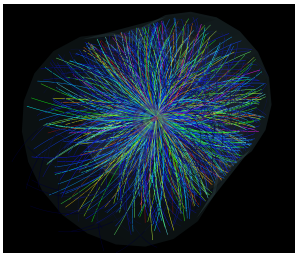
ATLAS



LHCb

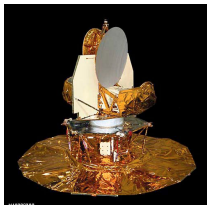


CMS

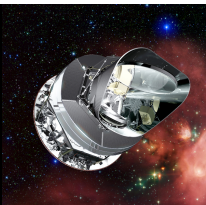


# Una manera diferente de hacer física de partículas

WMAP



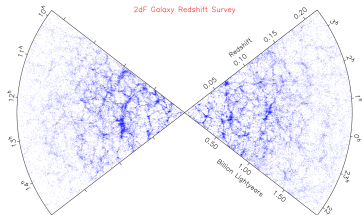
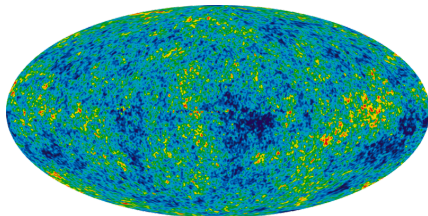
PLANCK



DESI



HUBBLE



# COSMOLOGY MARCHES ON



# Posibilidades de trabajo en la DCI–Guanajuato

Tenemos un grupo formado por **9 investigadores** y **6 postdocs**  
**¿Qué áreas nos interesan?** La Gravitación (clásica y cuántica),  
La Cosmología (teórica y observacional), La Teoría de Cuerdas, etc.

**Maestría:** examen admisión julio y octubre, ¡beca asegurada!

**Doctorado:** examen admisión julio y octubre, ¡beca asegurada!

**Postdoc:** ¡Cualquier momento del año, da igual la nacionalidad!



Dra. Nana Geraldine Cabo-Bizet

Dr. Alberto Díez-Tejedor

Dra. Alma Xóchitl González

Dr. Oscar Gerardo Loaiza-Brito

Dr. Gustavo Niz

Dr. Octavio José Obregón

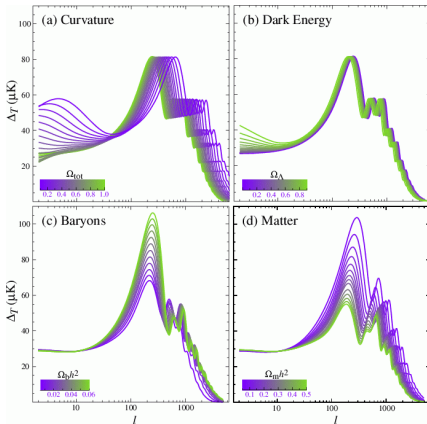
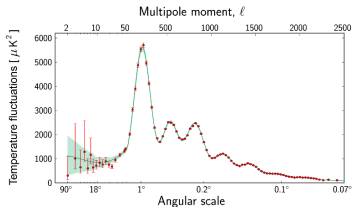
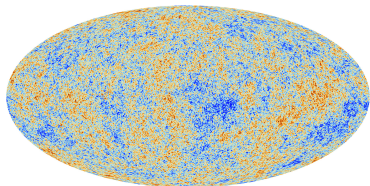
Dr. Oscar Miguel Sabido

Dr. José Socorro

Dr. Luis Arturo Ureña-López

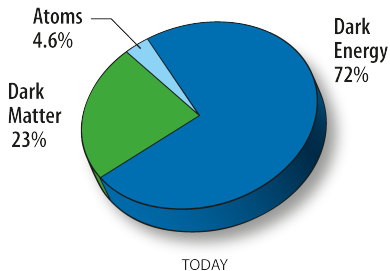
# El fondo cósmico de microondas

Información cosmológica a partir de la radiación cósmica de fondo





# Contenido de materia en el universo (de nuevo)

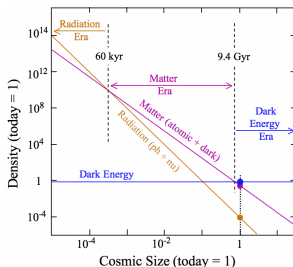
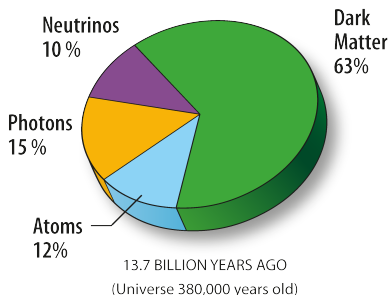


**conservación  
energía-momento**  
 $\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0$

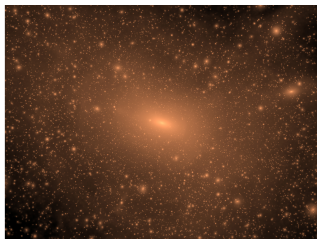
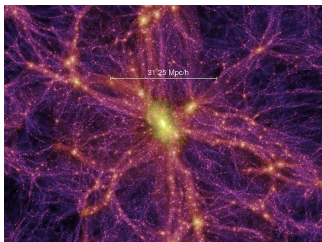
$$\rho_{\text{rad}} = \frac{\rho_{\text{rad},0}}{a^4}$$

$$\rho_{\text{mat}} = \frac{\rho_{\text{mat},0}}{a^3}$$

$$\rho_{\Lambda} = \rho_{\Lambda,0}$$

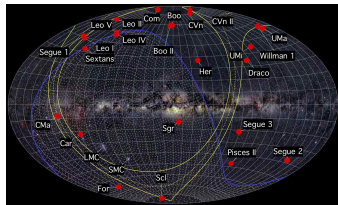


# Las simulaciones de N-cuerpos y sus “discrepacias”



**Core/cusp “problem”** Perfiles universales,  $\rho_{\text{NFW}}(r) = \frac{\rho_0 r_0^3}{r(r + r_0)^2}$

**Substructure “problem”**



- Observaciones son incompletas (?)
- Materia bariónica muy relevante (?)
- Necesitamos alternativas a DM (?)