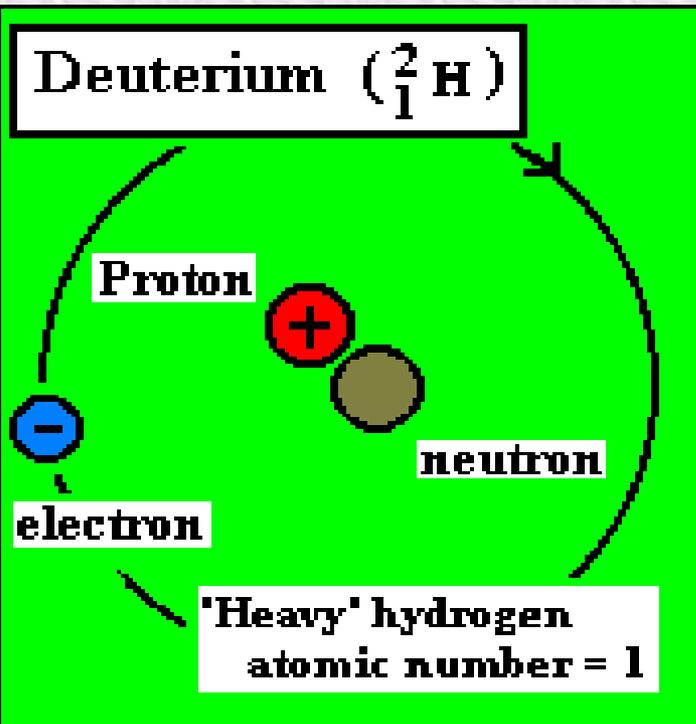


La formacion de deuterio (solo el nucleo)



formacion: $p + n \rightarrow D + \gamma$

ningun lepton involucrado \rightarrow interaccion fuerte

\rightarrow pasa muy rapido, pero:
energia de ligacion solo
 $2.22 \text{ MeV} \cong 2 \cdot 10^{10} \text{ K}$

dos procesos competitivos:

1 – formacion de D

2- foto-disociacion por fotones

\rightarrow solo cuando la temperatura esta mas baja que $8 \cdot 10^8 \text{ K}$ ($t \sim 3 \text{ min}$)
los fotones no pueden mas disociar el D

\rightarrow pero en este instante, muchos neutrones ya han decaidos
y $n/p = 1/7$

pero: empieza la formacion de He3 y He4

temperatura todavia suficientemente alta para superar la barra de

Coulomb

energia de ligacion de He4: 28 Mev --> no puede ser disociado

---> casi (!!) todo el D se transforma en He4 muy rapidamente

se queda un resto con una dependencia fuerte de la densidad de bariones (el parametro η):

si η esta alto --> formacion de He4 es muy efectivo

--> se queda menos D

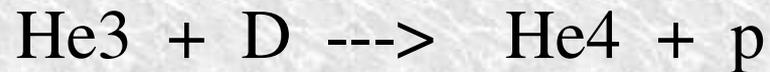
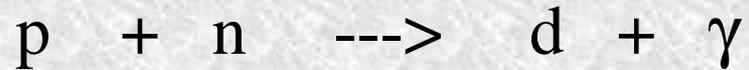
si η esta bajo ---> menos atomos de D encuentran una pareja para

formar He4

--> se queda mas D

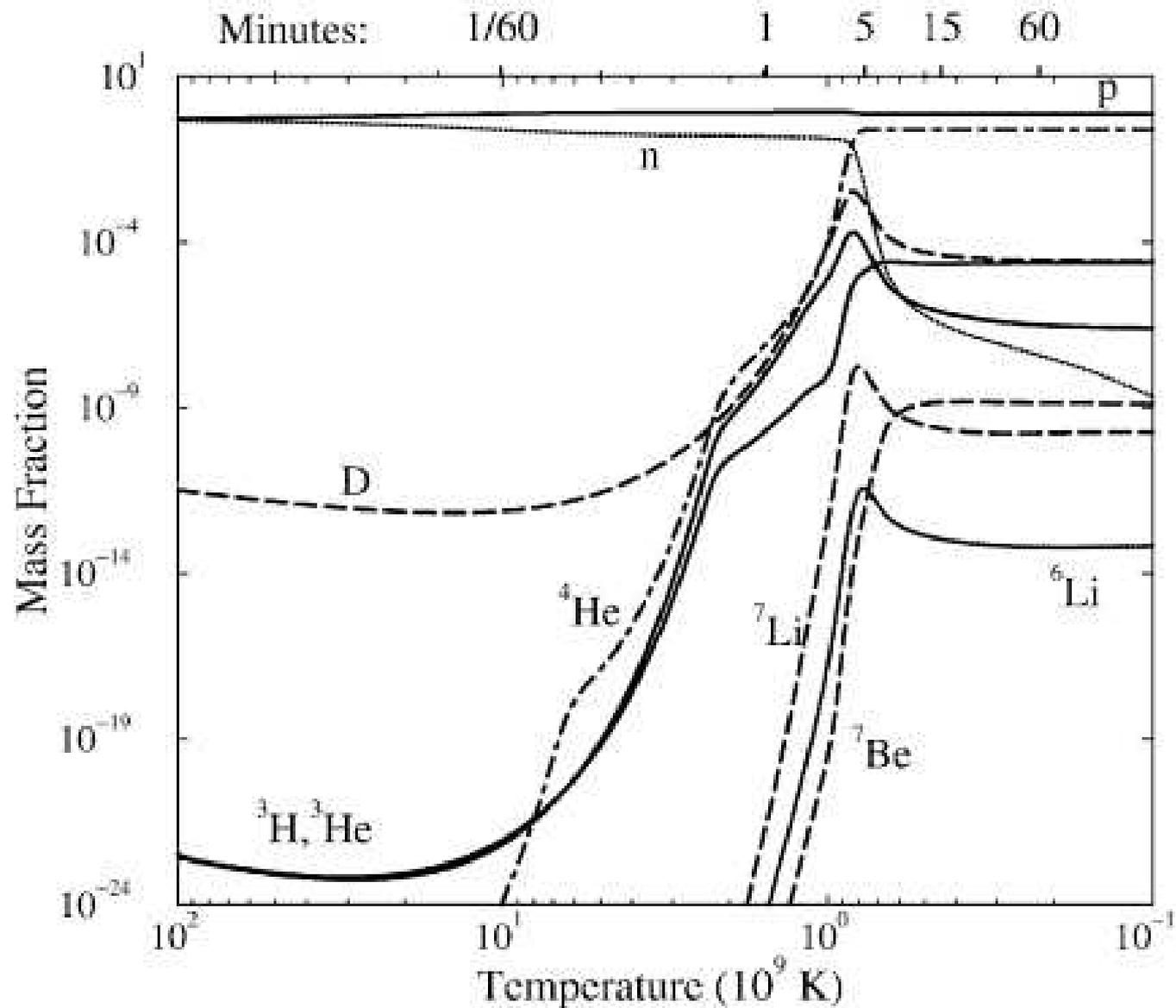
despues se forma Li, Be, Bo

las reacciones mas importantes:

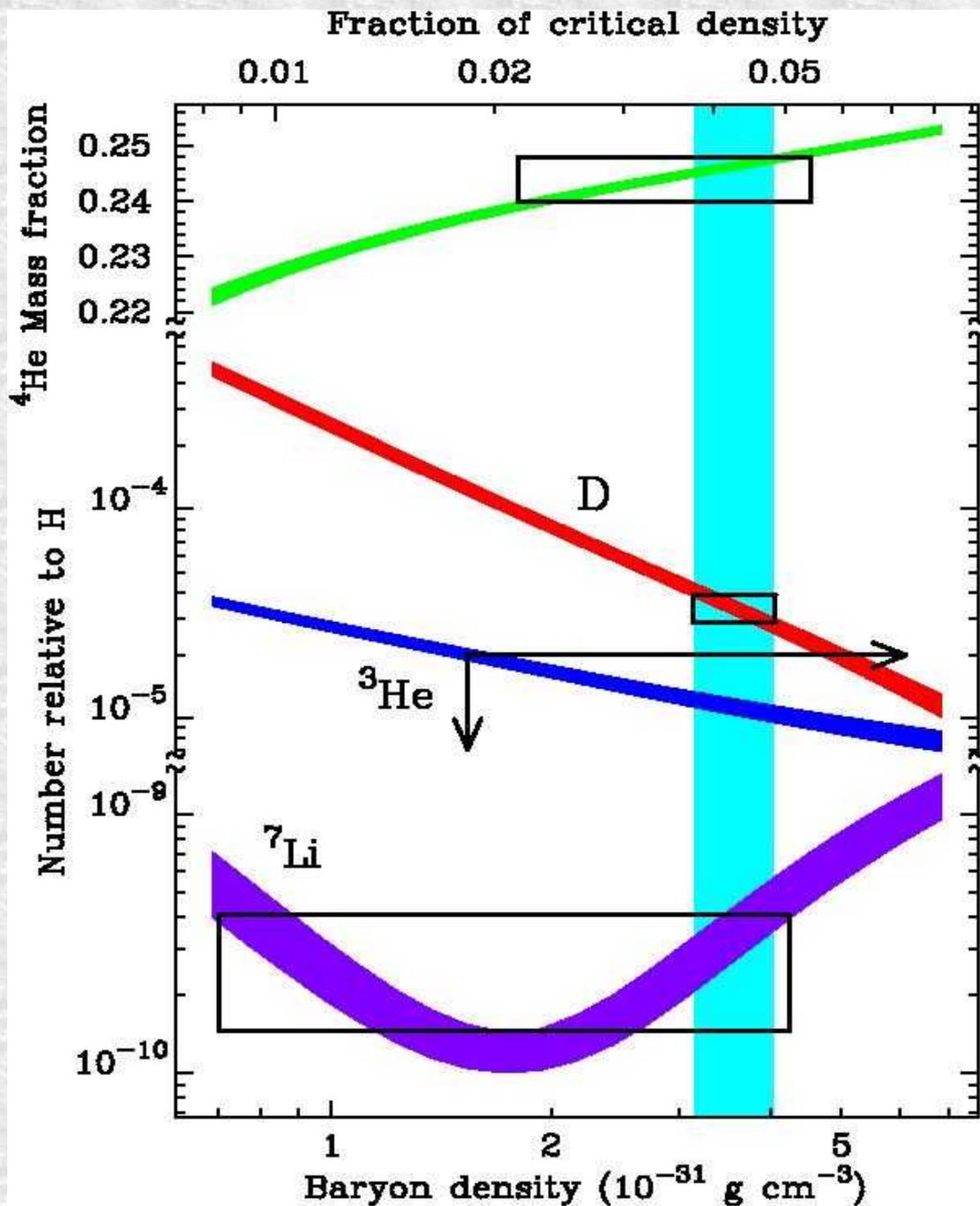


no se forman nucleos mas pesados: la unica manera seria capturar neutrones, pero los neutrones libres ya estan decaidos

desarrollo de abundancias de los elementos ligeros en los primeros minutos



dependencia de las abundancia de la densidad barionica



He no muy sensitivo

D muy sensitivo

franja vertical:
observacionalmente y
teoreticamente permitido:

$$0.03 < \Omega_m < 0.05$$

Supernovas indican $\Omega_m \approx 0.3$

----> 1) 24% de la masa en el U. existe en una forma no visible (materia oscura)

-----> 2) no se puede ser barionica

materia barionica, que es invisible:

agujeros negros (estelares, supermasivos, masa intermedia)

gas molecular bajo ciertas circunstancias (nubes pequeñas de H₂)

el modelo estandard no dice nada

---> 1. incorrecto ?

---> 2. incompleto (mas probable)

Atras del modelo estandard del particulas:

hay particulas estables que solo participan en la interaccion debil aparte de neutrinos?

Si estas particulas hipoteticas tendrian una masa $< 1\text{MeV}$

---> relativistas y decoplan como los neutrinos

---> tienen hoy dia la misma densidad numerica ($n = 110/\text{cm}^3$)

$$\Omega_{WIMPS} < \frac{110 \cdot m_{WIMPS} / \text{cm}^3}{10^{-29} \text{g} / \text{cm}^3} \approx \frac{m_{WIMPS}}{47 \text{eV}}$$

seguro que $\Omega_m < 2$ --> no hay WIMPS entre 100 eV y 1 MeV

particularmente: no hay neutrinos con estas masas

con $\Omega_m = 0.3$ ---> masa del neutrino (electronico) $< 15 \text{eV}$

necesitamos particulas que en la epoca de decoplamiento de los neutrinos ya eran no-relativistas --> masas mas altas
----> densidad numerica mas baja

modelo estandard no conoce este tipo de particulas

supersimetria: la particula con masa mas baja: neutralino $\cong > 100 \text{ GeV}$

Large Hadron Collider ??

Si no

materia oscura ??????

Hay materia oscura de toda manera?

O es un "epiciclo" introducido para obtener consistencia?

materia oscura aparece en varios contextos:

--- cosmologia ---> discrepancia entre bariones y Ω_m

--- dinamica de las galaxias y cumulos de galaxias:

--- relativista --> lentes gravitacionales

--- no-relativista ---> curvas de rotacion de
galaxias espirales

---> gas y galaxias en cumulos

situacion poco satisfactoria: ley de gravitacion incorrecta
o incompleta?

Modified Newtonian Gravity (MOND)- intento de introducir otra perspectiva

Milgrom (1983), Milgrom & Bekenstein (1984)

asumimos: cualquier distribución de masa esférica:

una masa de prueba m experimenta $a = \frac{F}{m} = \frac{G M(r)}{R^2}$

--> una órbita circular tendría la velocidad $v_c^2 = \frac{G M(r)}{R}$

receta de Milgrom: reemplaza la aceleración Newtoniana por

$$a_{MOND} = \sqrt{a_{New} \cdot a_0}$$

pero solo, cuando $a_{MOND} \ll a_0$

a_0 : constante de naturaleza, dimension cm/s^2 --> aceleracion

empiricamente: $a_0 \approx 1.3 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}^2$

$$v_{c,MOND}^2 = a_{MOND} R = \sqrt{a_{New} a_0} \cdot R = \sqrt{\frac{G M a_0 R^2}{R^2}} = \sqrt{G M (R) a_0}$$

entonces en el "regimen profundo de MOND", como galaxias no son infinitamente grandes ($M(R) = \text{cte.}$ para R grande):

$$v_{c,MOND} = (G M (R) a_0)^{1/4} = \text{cte}$$

si asumimos $M \sim L$ y en magnitudes ($\text{mag} \sim -2.5 \log L$)

$$\text{mag} = \text{cte.} - 4 \log v_c$$

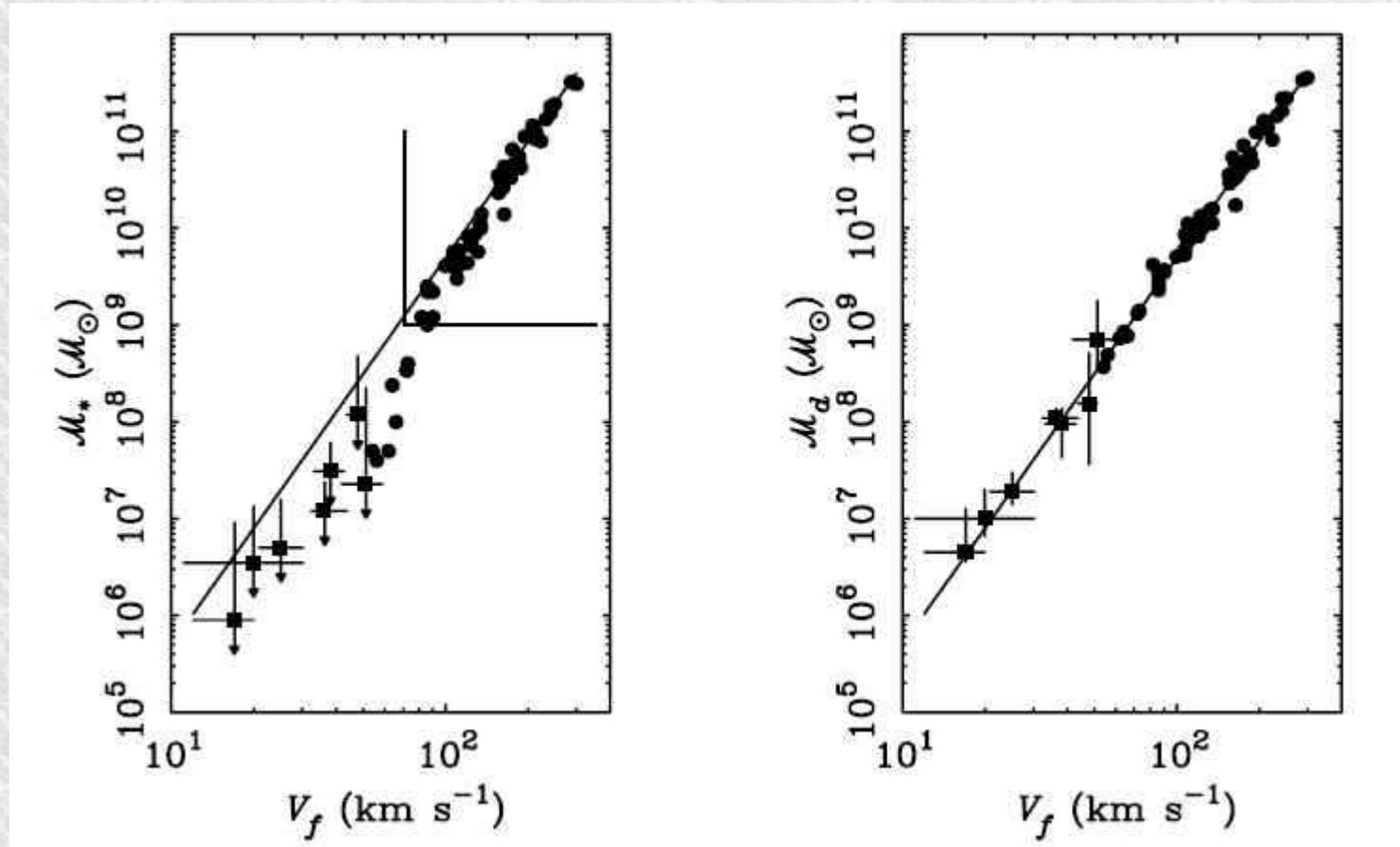
la relacion "Tully-Fisher" !!

La relacion Tully-Fisher barionica para galaxias con discos

(McGaugh 2005, ApJ 632, 859)

solo masa estelar

masa estelar + masa gaseosa

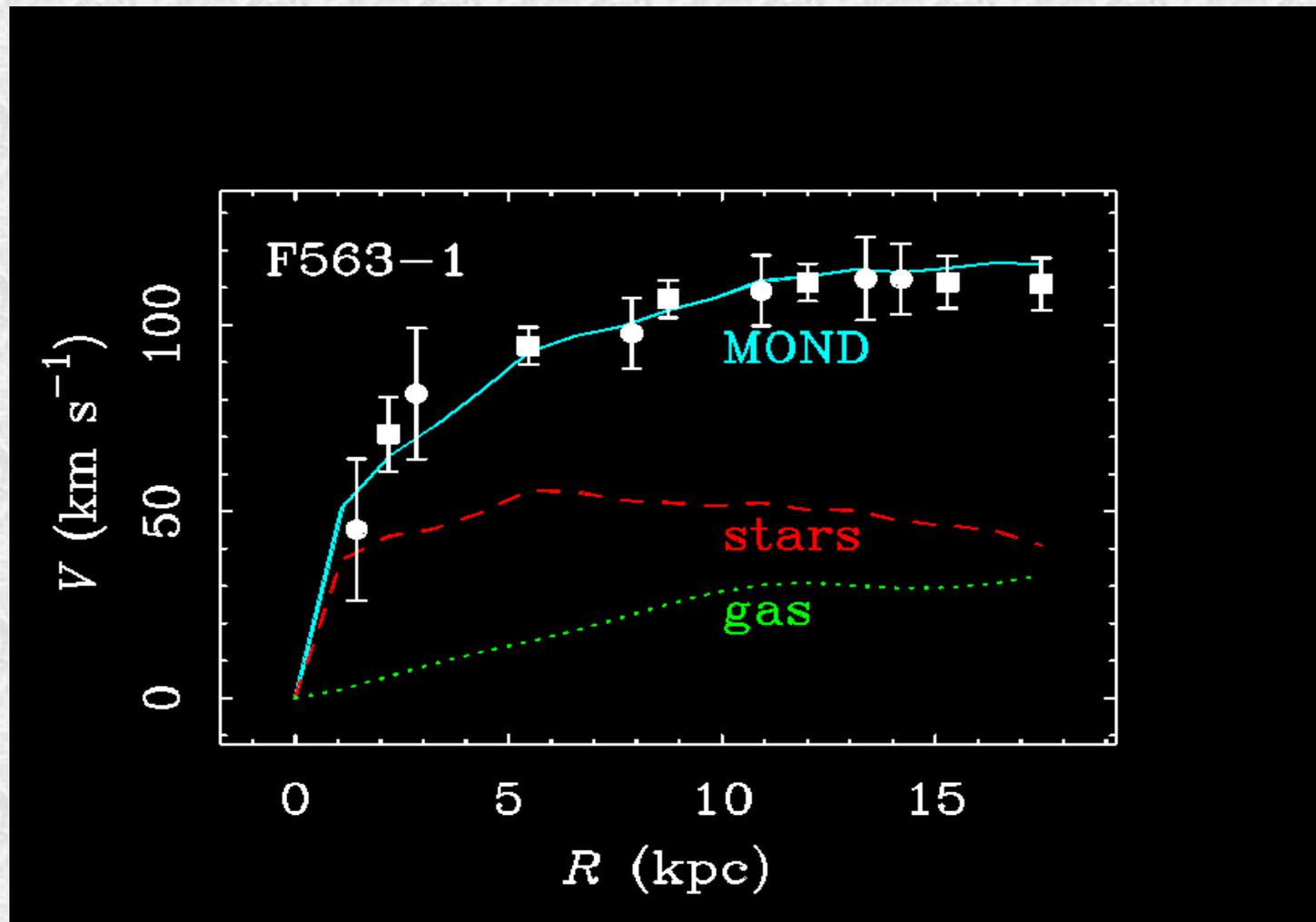


muy dificil de explicar con Cold Dark Matter

ademas: curvas de rotacion constantes como observada en galaxias
espirales grandes

--> explicacion de "conspiracion" entre materia luminosa y
materia oscura

tambien para galaxias enanas:



fuerzas de MOND – muchas predicciones confirmadas

- explica toda la fenomenologia de curvas de rotacion
- explica la relacion Tully-Fisher
- funciona tambien en galaxias elipticas (?)

debilidades

- hasta 2004: ningun fundamento teorico
- hasta 2004: teoria no-relativista (lentes gravitacionales no incluidos)
- hasta ahora: no explica la dinamica de cumulos de galaxias
---> materia oscura todavia necesaria

Bekenstein 2004 (Phys.Review D70, 083509):
Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm
TeVeS = TensorVectorScalar gravity

