

Lima, Ago 2009

Descubriendo sistemas planetarios como el nuestro

Jorge Meléndez

Ciencia 2007 fellow

Centro de Astrofisica da Universidade do Porto

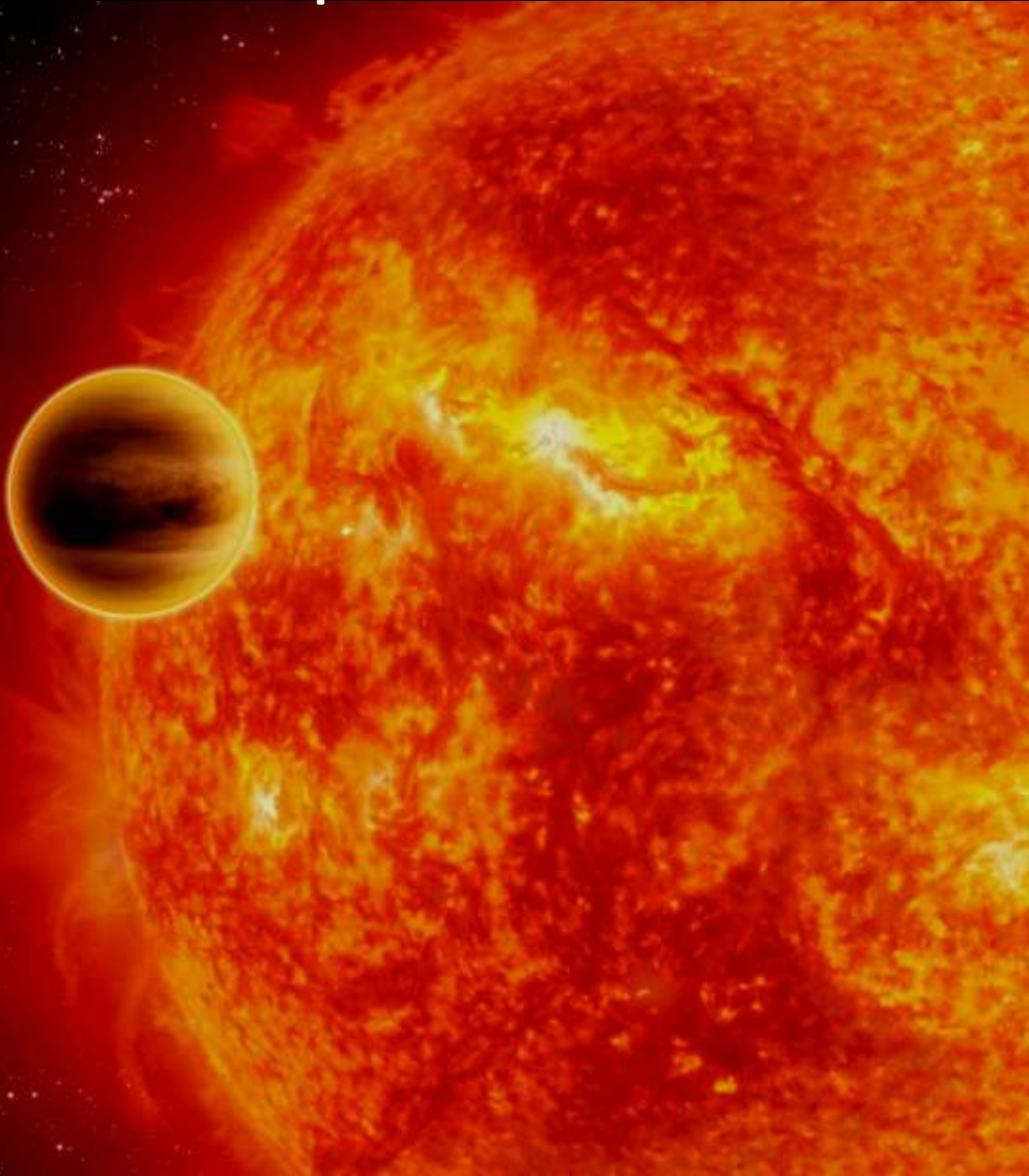
Iván Ramírez, MPA

Martin Asplund, MPA

Bengt Gustafsson, Uppsala

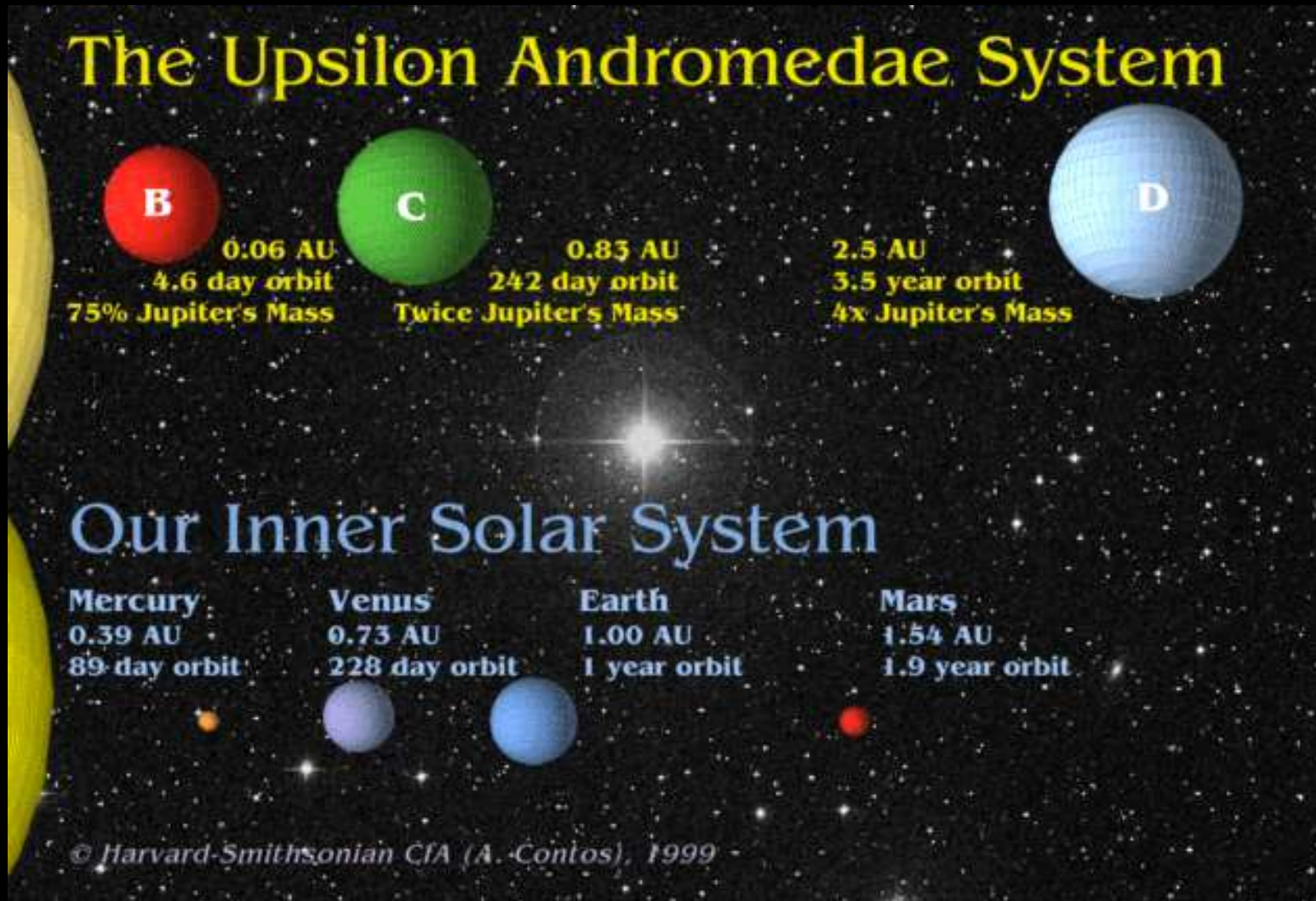
David Yong, ANU

Hasta ahora conocemos más de 300 sistemas planetarios extra-solares



Infelizmente ninguno de ellos es parecido al nuestro

La mayoría de sistemas planetarios extra-solares descubiertos tiene planetas gigantes internos



¿ Como encontrar sistemas planetarios como el nuestro?




¿Tiene el Sol alguna peculiaridad relacionada a planetas terrestres?



Sunset in Barranca, Peru

<http://www.flickr.com/photos/mannover>

¿Es la composición química del Sol inusual?

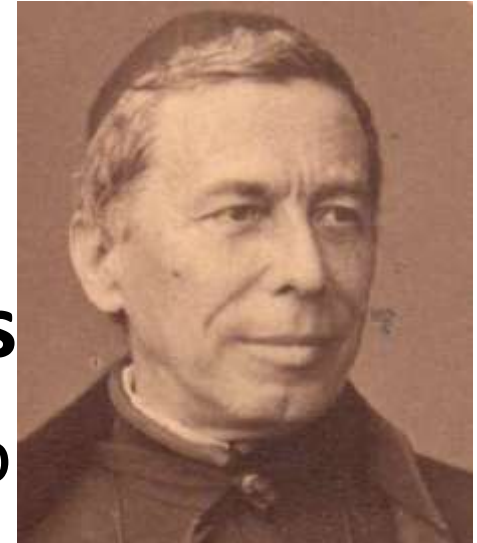


1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	103 Lr	104 Ku	105 Ha	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

¿Hay otras estrellas similares al Sol?

SUGLI SPETTRI PRISMATICI DELLE STELLE FISSE

P. A. SECCHI, 1818 - 1878
ROMA 1868



Secchi (1868): 3 tipos espectrales

- Tipo I: moderna clase A & F temprano
- Tipo II: moderna clase M
- Tipo III: **tipo solar** (moderna clase G, K, F tardío)



¿Hay otras estrellas similares al Sol?

Secchi (1868):

- Tipo III: **tipo solar** (moderna clase G, K, F tardio)
 δ CMa, γ Cyg: **F8lab**
 β Aqr: **G0Ib**; α Aqr: **G2Ib**; β Aql: **G9.5IV**
 β Gem: **K0IIIb**; Arcturus: **K1.5III**; γ Dra: **K5III**

β Gemelli. — Gialla; tipo solare perfetto : le righe sono finissime :
più fine che nella Capra. Si confronta con Marte vicino (28 dicembre) **K0IIIb**
e si vede la *F* al suo posto, e le principali combinano col Sole.

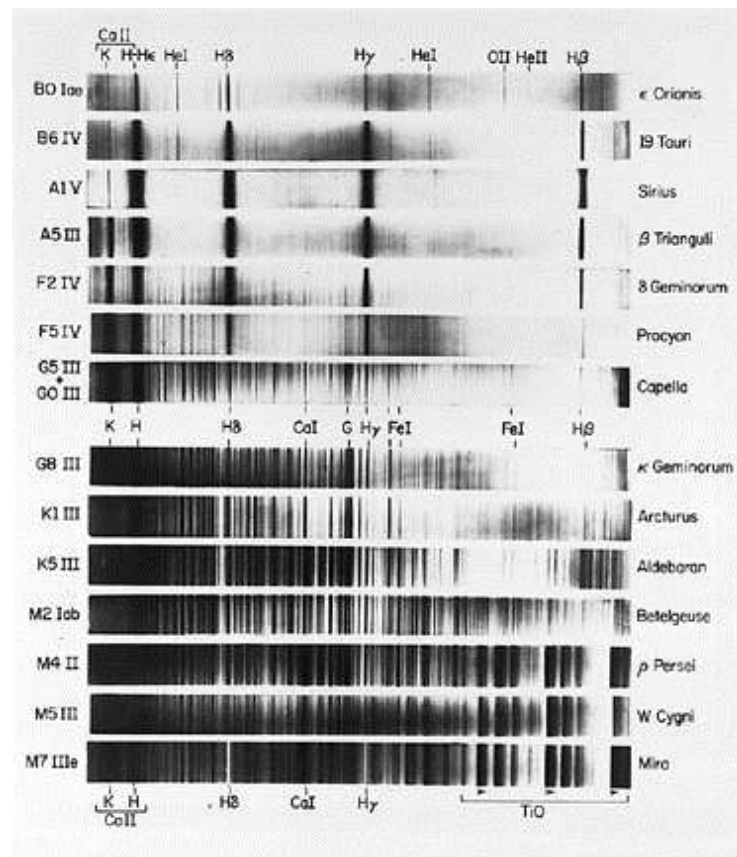
42 SUGLI SPETTRI PRISMATICI DELLE STELLE FISSE
melli sono più fine assai che in α Cocchiere , il che
pure può dipendere dalla temperatura. Tranne queste leg-
gere differenze, le stelle di questo terzo tipo mostrano
di avere una composizione identica a quella del nostro
Sole, almeno per la parte principale.

El sistema Harvard & catalogo HD

- 1890-1900s: clasificación de Harvard (E.C. Pickering + Williamina Fleming + Antonia Maury + Annie J. Cannon):

O, B, A, F, G, K, M

Basado en 100 000s espectros tomados en estaciones Harvard del Norte (USA) & Sur (Peru)



¿Es la composición química del Sol normal?



"The uniformity of the composition of stellar atmospheres appears to be an established fact"

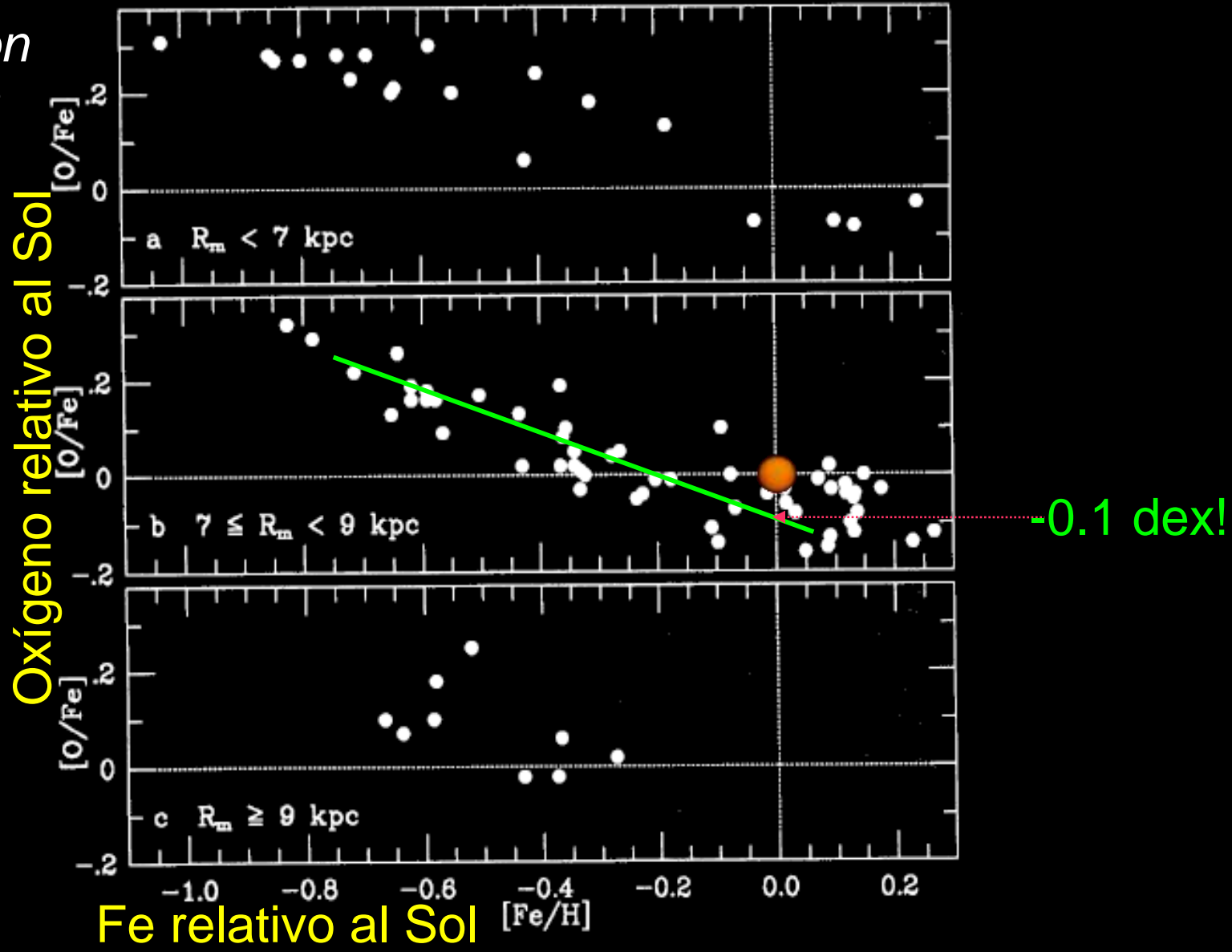
Cecilia Payne: Stellar Atmospheres (1925)

(O. Struve: "It is undoubtedly the most brilliant Ph.D. thesis ever written in astronomy")

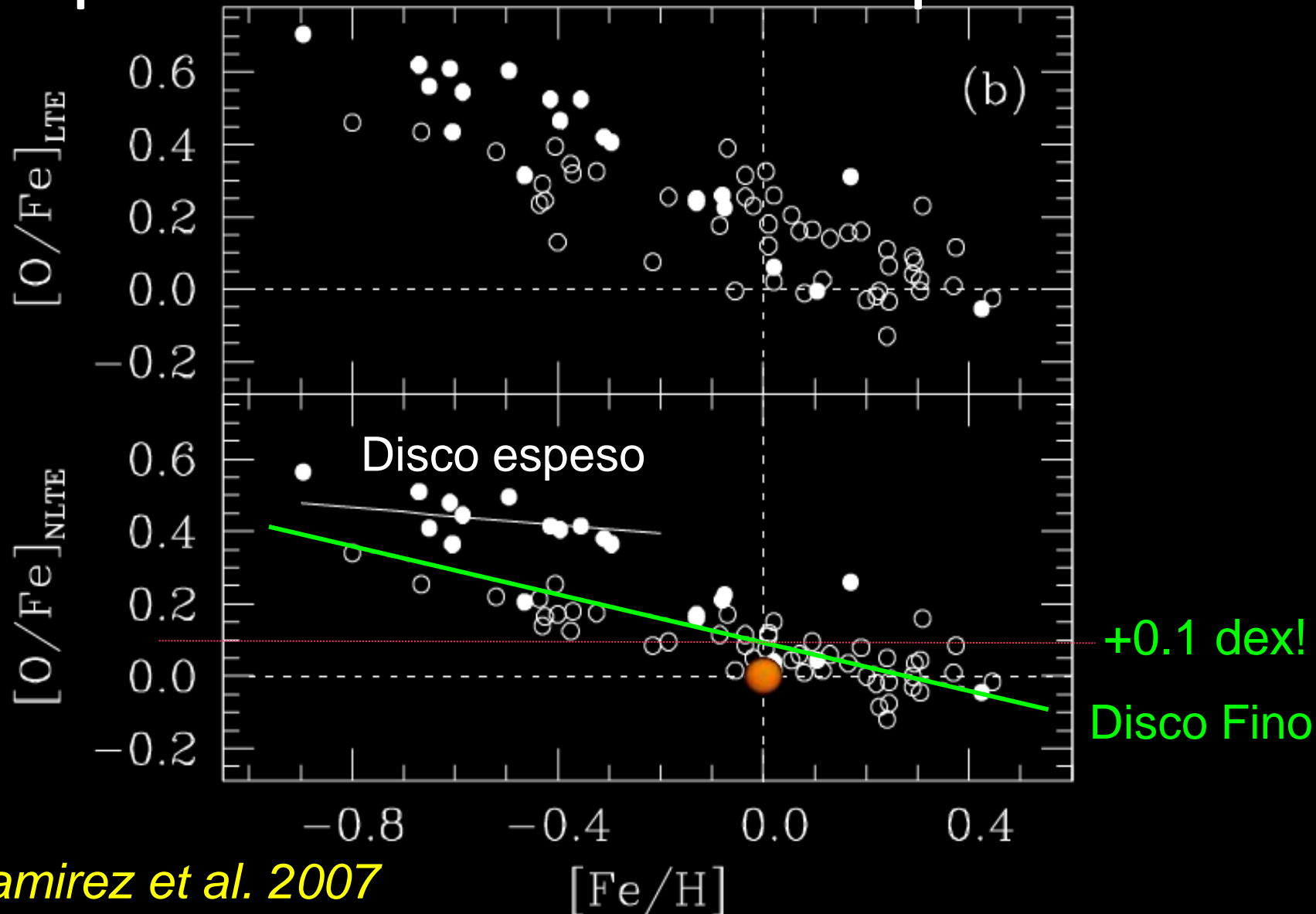
Paul Klee: "Cosmic composition" (1919)

¿Es el Sol rico en oxígeno comparado a estrellas de tipo solar?

Edvardsson et al. 1993



¿O es el Sol pobre en oxígeno comparado a estrellas de tipo solar?



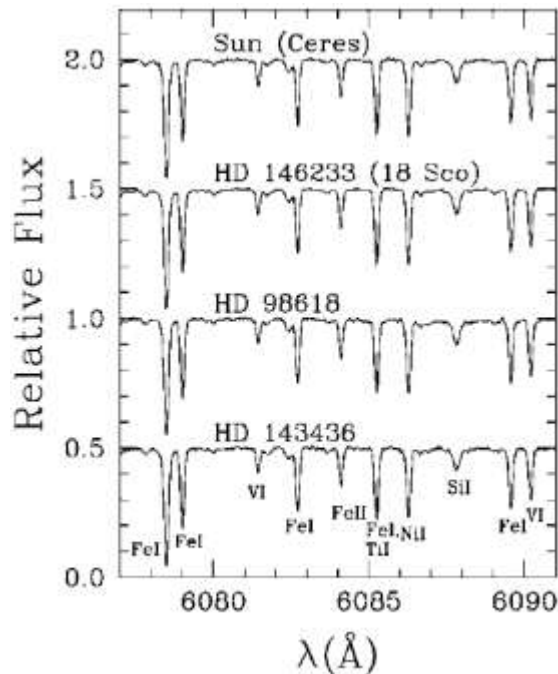
Ramirez et al. 2007

Por más de 140 años se ha creído que el Sol tiene una composición química "normal"

- Secchi (1868): El Sol es típico de estrellas de tipo solar
- Payne (1925): Composición química solar es universal
- Bent Gustafsson (1998, 2008): tal vez el Sol es anormal, pero los errores son aún muy grandes para establecer si el Sol es normal o no (**0.05-0.10 dex**)
- Carlos Allende Prieto (reunión de la IAU en Agosto 2009): debemos mejorar la exactitud de las abundancias químicas (**<0.05 dex**)

Como disminuir los errores en las abundancias químicas (<0.05 dex)?

- Alto señal/ruido: *reduce error en W_λ*
- Alta resolución espectral: *reduce error en W_λ*
- Cuidadosa selección de líneas: *reduce blends*
- Método estrictamente diferencial: *reduce errores de los modelos*



Como disminuir los errores en las abundancias químicas (<0.05 dex)?

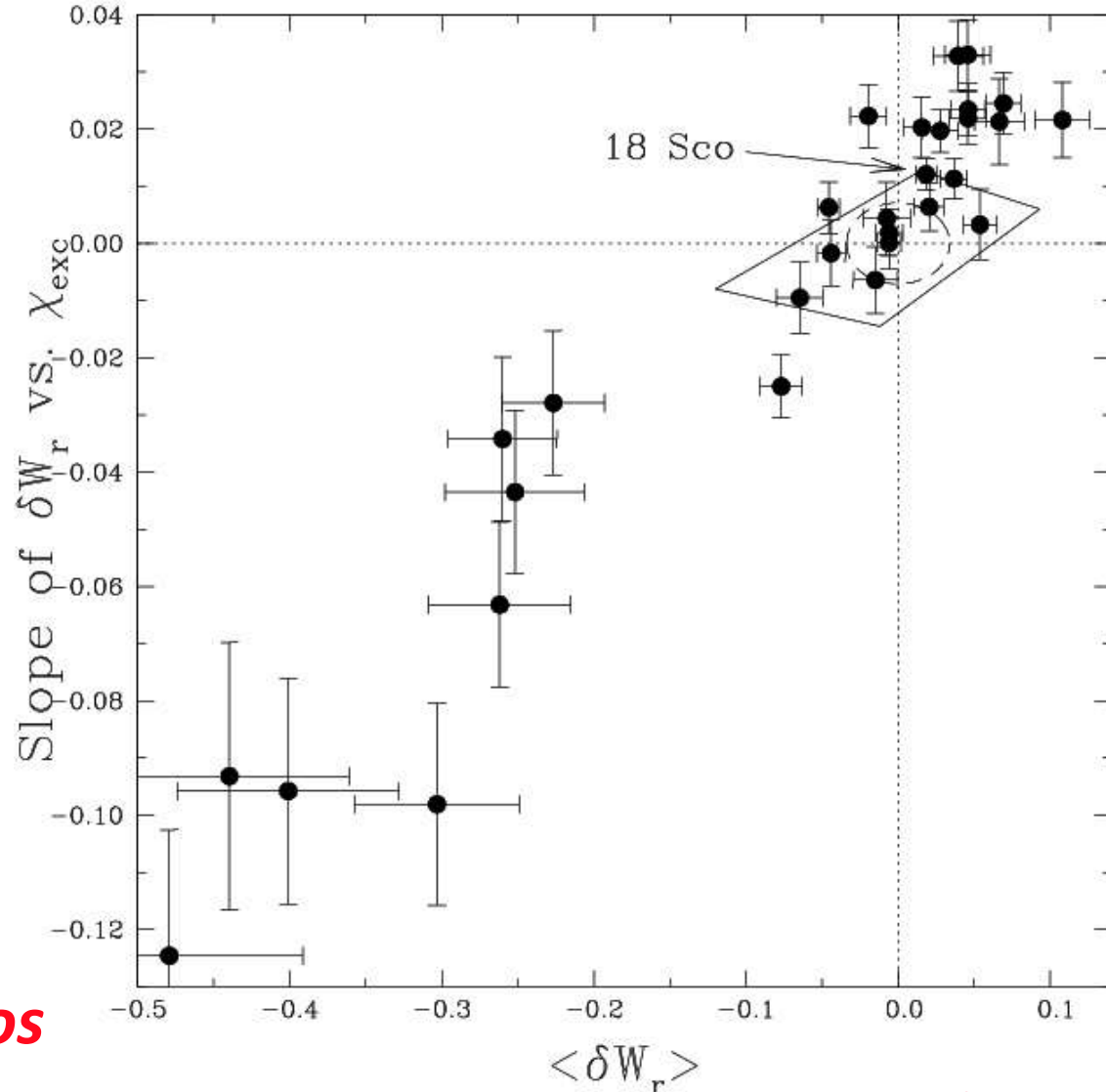
- Alto señal/ruido: *reduce error en W_λ*
- Alta resolución espectral: *reduce error en W_λ*
- Cuidadosa selección de líneas: *reduce blends*
- Método estrictamente diferencial:
 - *Sol como estrella (asteroides: Vesta, Ceres, ...)*
 - *Exactitud de la escala de temperatura T_{eff}*
 - *Comparación con **gemelos solares** (o analogos solares)*

¿Como encontrar gemelos solares?

Meléndez et al. (2006), Meléndez & Ramírez (2007)

- Hipparcos – 10^5 stars
- Parallaxes
- Photometry
- colour- T_{eff} calibrations
(Ramírez & Meléndez 2005)
- Age indicators
- High resolution spectra

$$\delta W_r = (W^{\text{Star}} - W^{\text{Sun}})/W^{\text{Sun}}$$



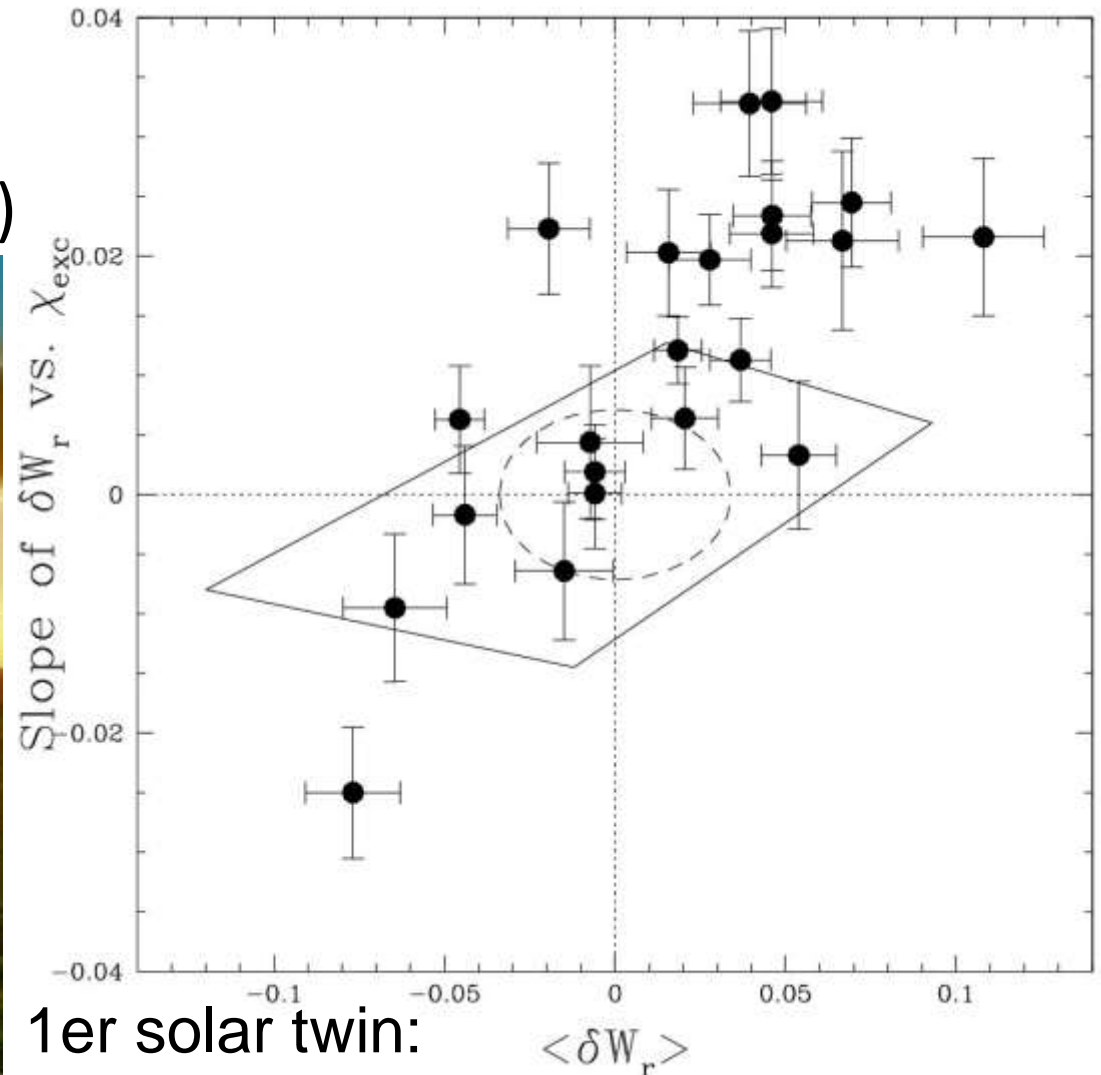
Independiente de modelos

(gemelos solares confirmados después con modelos de atmosferas)

Es difícil encontrar gemelos del Sol

Meléndez et al. (2006), Meléndez & Ramírez (2007)

Relatively few stars in the Hipparcos catalogue are solar twins ($\sim 0.01\text{-}0.03\%$)

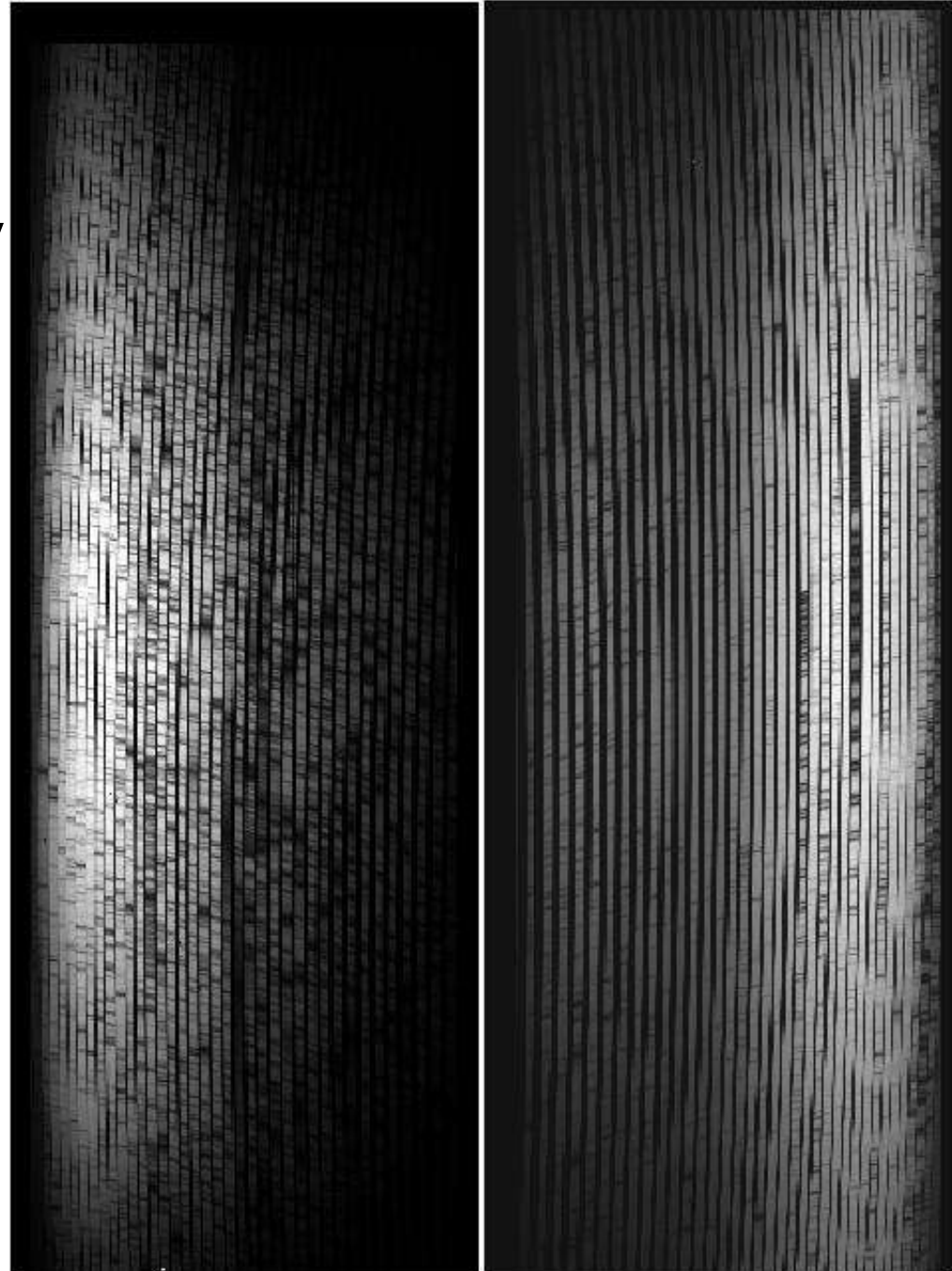


1er solar twin:

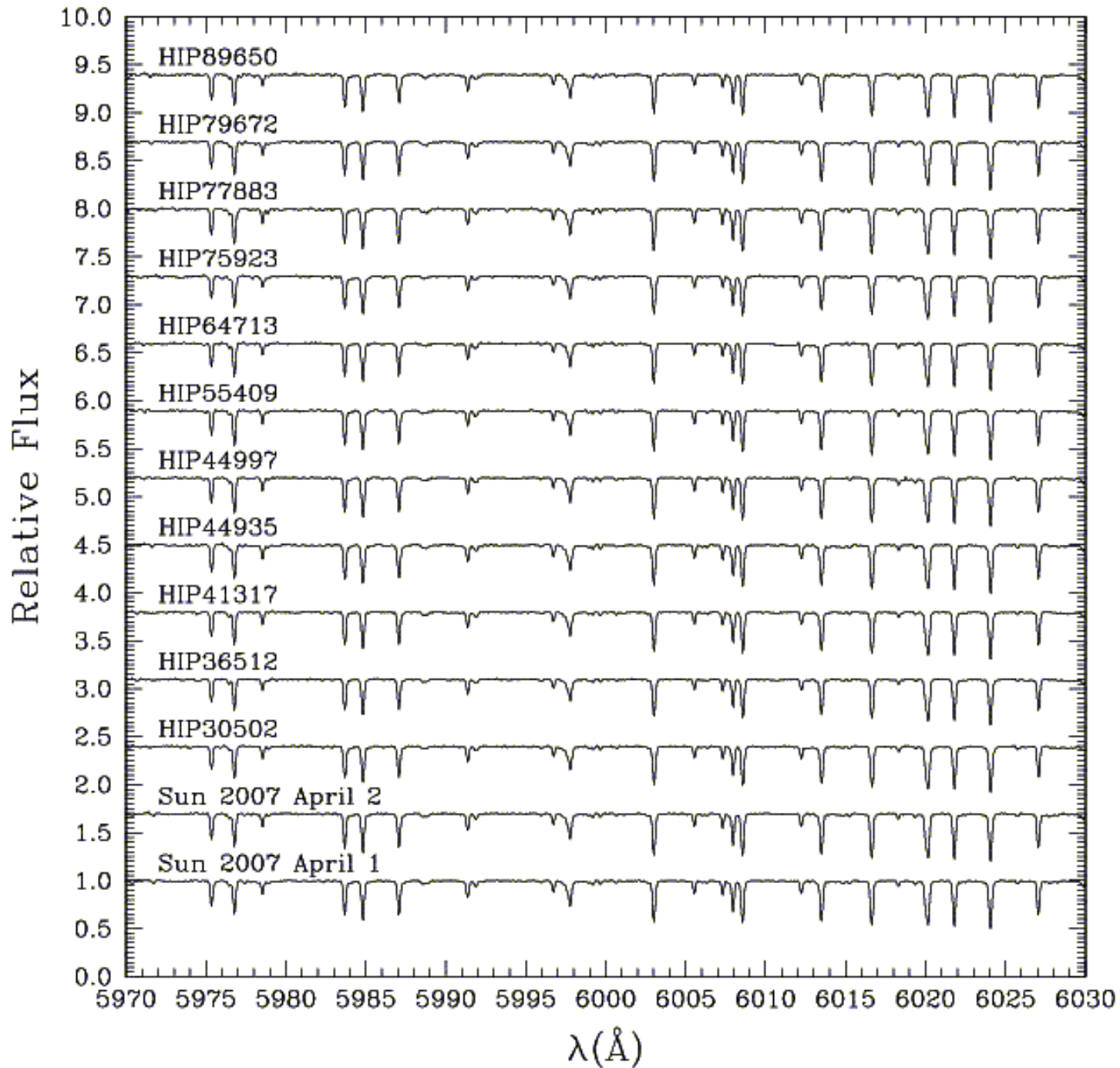
18 Sco (Porto de Mello & da Silva '97)

Observaciones espectroscopicas

- Telescopio Magellan 6.5m Clay & espectrografo MIKE
- $R = \lambda/\Delta\lambda = 65,000$
- S/N = 450 por pixel
- cobertura 340 – 1000 nm
- Espectro solar: Vesta
- 3 noches de observaciones



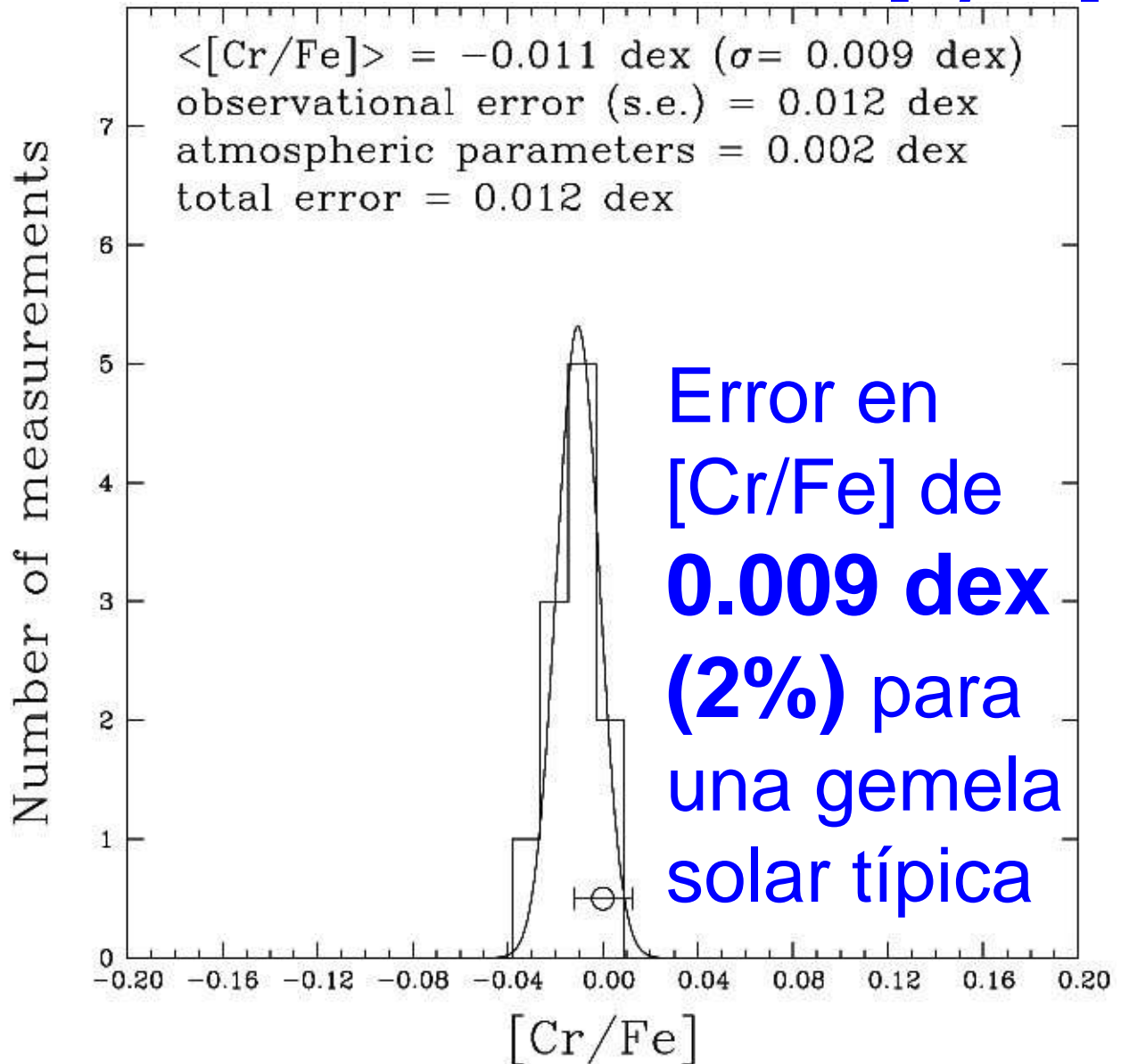
Espectros
de los
gemelos
solares y
del Sol en
la pequeña
región 597-
603nm.
Los
espectros
cubren
340-
1000nm



Analisis: alta precisión en parametros atmosfericos & razones de abundancia [X/Fe]

- Modelos estandard 1D + LTE
- T_{eff} , $\log g$, v_t & [Fe/H] de lineas de FeI & FeII
- Analisis linea a linea

Alta precisión en parámetros estelares (20 K en T_{eff} , 0.04 dex en $\log g$) y en razones de abundancia [X/Fe] (0.01-0.02 dex)



Resultados

$\Delta[X/Fe]$

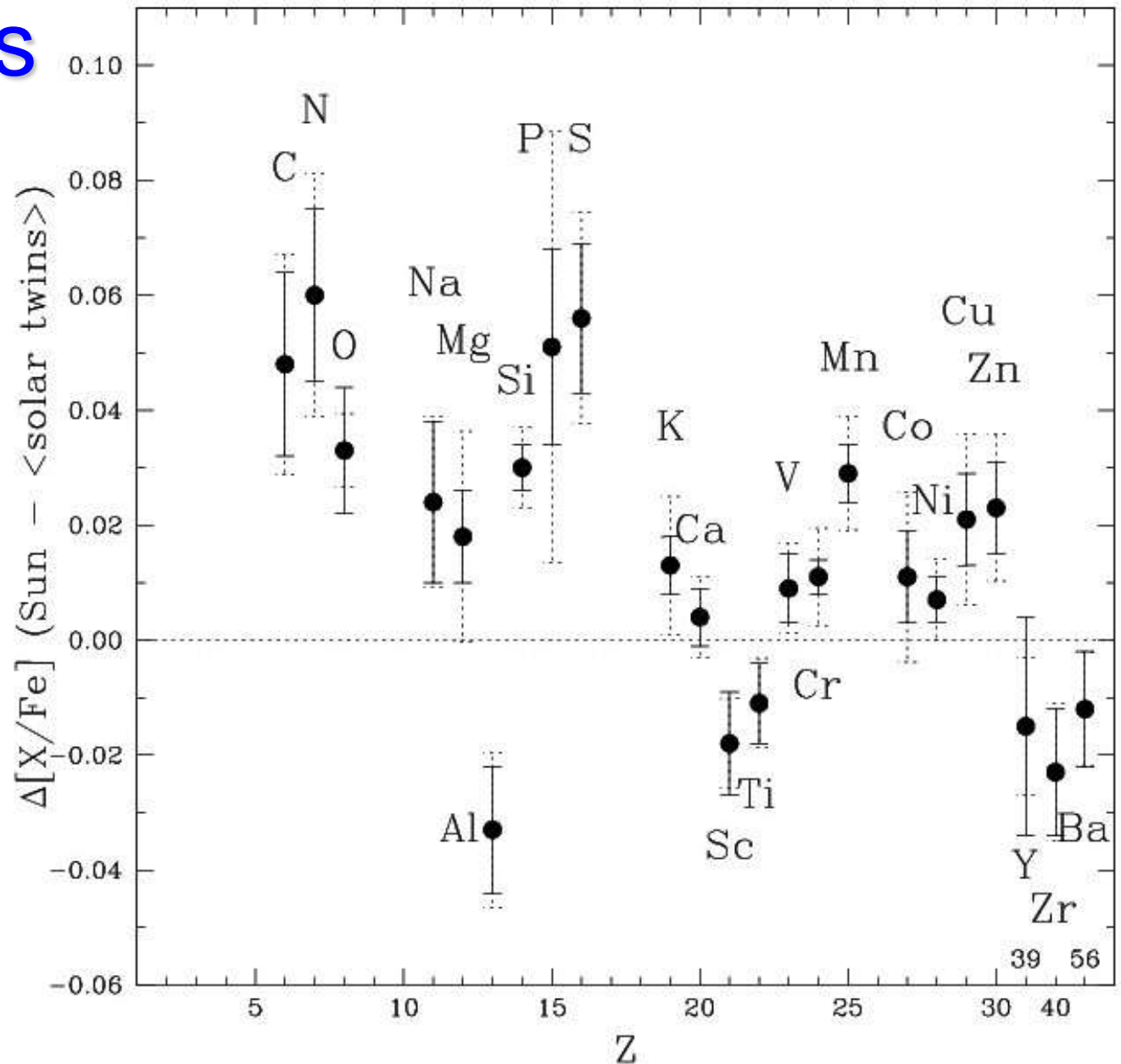
SOL *menos*

<gemelos> vs.

Numero

Atómico Z

Nuestro sistema solar tiene una estrella anormal !



¿Por qué tiene el Sol composición anormal?

PRODUCED BY THE FOUNDATION FOR EDUCATION, SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR NATIONAL DAY WEEK 2003

PERIODIC TABLE of the ELEMENTS



Privately sponsored by the SHUTTLEWORTH FOUNDATION

He
Helium 2
4.00

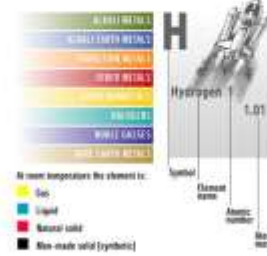
H Hydrogen 1.01

Li Lithium 3
6.94

Be Beryllium 4
9.01

Mg Magnesium 12
24.3

Na Sodium 11
22.99



DMITRI MENDELEYEV (1834 - 1907)

The Russian chemist, Dmitri Mendeleev, was the first to observe that if elements were listed in order of atomic mass, they showed regular (periodic) repeating properties. He formulated his discovery as a periodic table of elements, now regarded as the backbone of modern chemistry.

The crowning achievement of Mendeleev's periodic table lay in his prophecy of then undiscovered elements. In 1869, the year he published his periodic classification, the elements gallium, germanium and scandium were unknown. Mendeleev left spaces for them in his table and even predicted their atomic masses and other chemical properties. Six years later, gallium was discovered and his predictions were found to be accurate. Other discoveries followed and their chemical behaviour matched that predicted by Mendeleev.

This remarkable man, the youngest in a family of 17 children, has left the scientific community with a classification system so powerful that it became the cornerstone in chemistry teaching and the predictor of new elements ever since. In 1908, element 101 was named after him, Md, Mendeleevium.



B Boron 5
10.81

C Carbon 6
12.01

N Nitrogen 7
14.01

O Oxygen 8
16.00

F Fluorine 9
19.00

Ne Neon 10
20.18

Al Aluminium 13
26.98

Si Silicon 14
28.09

P Phosphorus 15
30.97

S Sulphur 16
32.06

Cl Chlorine 17
35.45

Ar Argon 18
39.95

K Potassium 19 39.10	Ca Calcium 20 40.08	Sc Scandium 21 44.96	Ti Titanium 22 47.88	V Vanadium 23 50.94	Cr Chromium 24 52.00	Mn Manganese 25 54.94	Fe Iron 26 55.85	Co Cobalt 27 58.93	Ni Nickel 28 58.69	Cu Copper 29 63.55	Zn Zinc 30 65.39	Ga Gallium 31 69.72	Ge Germanium 32 72.61	As Arsenic 33 74.92	Se Selenium 34 78.96	Br Bromine 35 79.90	Kr Krypton 36 83.80														
Rb Rubidium 37 85.47	Sr Strontium 38 87.62	Y Yttrium 39 88.91	Zr Zirconium 40 91.22	Nb Niobium 41 92.91	Mo Molybdenum 42 95.94	Tc Technetium 43 [98]	Ru Ruthenium 44 101.07	Rh Rhodium 45 102.91	Pd Palladium 46 106.42	Ag Silver 47 107.87	Cd Cadmium 48 112.41	In Indium 49 114.82	Sn Tin 50 118.71	Sb Antimony 51 121.76	Te Tellurium 52 127.60	I Iodine 53 126.90	Xe Xenon 54 131.29														
Ba Barium 56 137.33	La Lanthanide Series	Ta Tantalum 73 180.95	Hf Hafnium 72 178.49	W Tungsten 74 183.85	Re Rhenium 75 186.21	Os Osmium 76 190.23	Ir Iridium 77 192.22	Pt Platinum 78 195.08	Au Gold 79 196.97	Hg Mercury 80 200.59	Tl Thallium 81 204.38	Pb Lead 82 207.20	Bi Bismuth 83 208.98	Po Polonium 84 [209]	At Astatine 85 [210]	Rn Radon 86 [222]															
Cs Cesium 55 132.91	Ra Radium 88 [226]	Rf Rutherfordium 104 [261]	Db Dubnium 105 [262]	Sg Seaborgium 106 [263]	Bh Bohrium 107 [264]	Hs Hassium 108 [265]	Mt Meitnerium 109 [266]	La Lanthanide Series	Ce Cerium 58 140.12	Pr Praseodymium 59 140.91	Nd Neodymium 60 140.91	Pm Promethium 61 [145]	Sm Samarium 62 150.36	Eu Europium 63 151.96	Gd Gadolinium 64 157.25	Tb Terbium 65 158.93	Dy Dysprosium 66 162.50	Ho Holmium 67 164.93	Er Erbium 68 167.26	Tm Thulium 69 168.93	Yb Ytterbium 70 173.05	Lu Lutetium 71 174.97									
Fr Francium 87 [223]	Ac Actinide Series	La Lanthanide Series	Ce Cerium 58 140.12	Pr Praseodymium 59 140.91	Nd Neodymium 60 140.91	Pm Promethium 61 [145]	Sm Samarium 62 150.36	Eu Europium 63 151.96	Gd Gadolinium 64 157.25	Tb Terbium 65 158.93	Dy Dysprosium 66 162.50	Ho Holmium 67 164.93	Er Erbium 68 167.26	Tm Thulium 69 168.93	Yb Ytterbium 70 173.05	Lu Lutetium 71 174.97	Ac Actinide Series	Th Thorium 90 232.04	Pa Protactinium 91 231.04	U Uranium 92 238.03	Np Neptunium 93 [237]	Pu Plutonium 94 [244]	Am Americium 95 [243]	Cm Curium 96 [247]	Bk Berkelium 97 [247]	Cf Californium 98 [251]	Es Einsteinium 99 [252]	Fm Fermium 100 [257]	Md Mendelevium 101 [258]	No Nihonium 102 [289]	Lr Lawrencium 103 [260]



Ac Actinium 89 [227]	Th Thorium 90 232.04	Pa Protactinium 91 231.04	U Uranium 92 238.03	Np Neptunium 93 [237]	Pu Plutonium 94 [244]	Am Americium 95 [243]	Cm Curium 96 [247]	Bk Berkelium 97 [247]	Cf Californium 98 [251]	Es Einsteinium 99 [252]	Fm Fermium 100 [257]	Md Mendelevium 101 [258]	No Nihonium 102 [289]	Lr Lawrencium 103 [260]
-------------------------	-------------------------	------------------------------	------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	-----------------------	--------------------------	----------------------------	----------------------------	-------------------------	-----------------------------	--------------------------	----------------------------

Image and production: Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike license. Illustration: Shutterstock.com. © 2003, Department of Science and Technology, Government of India.

¿Son las anomalías en la composición del Sol relacionadas a nuestro sistema planetario?

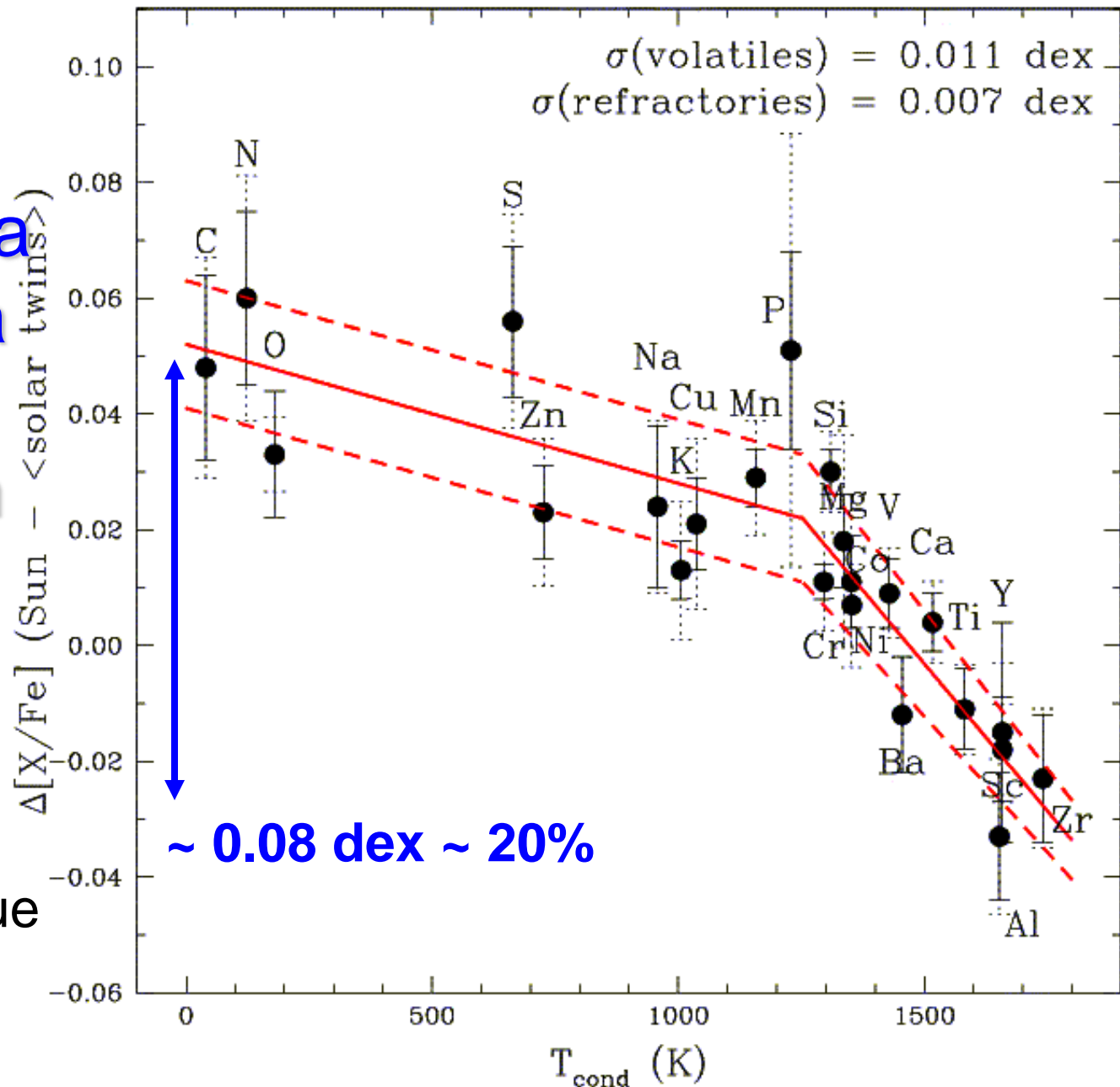


Anomalia en el Sol esta correlacionada a temperatura de condensación (T_{cond}) de los elementos

Correlación es significativa

Probabilidad de que sea falsa es $\sim 10^{-9}$

Es más probable ganar la lotería !

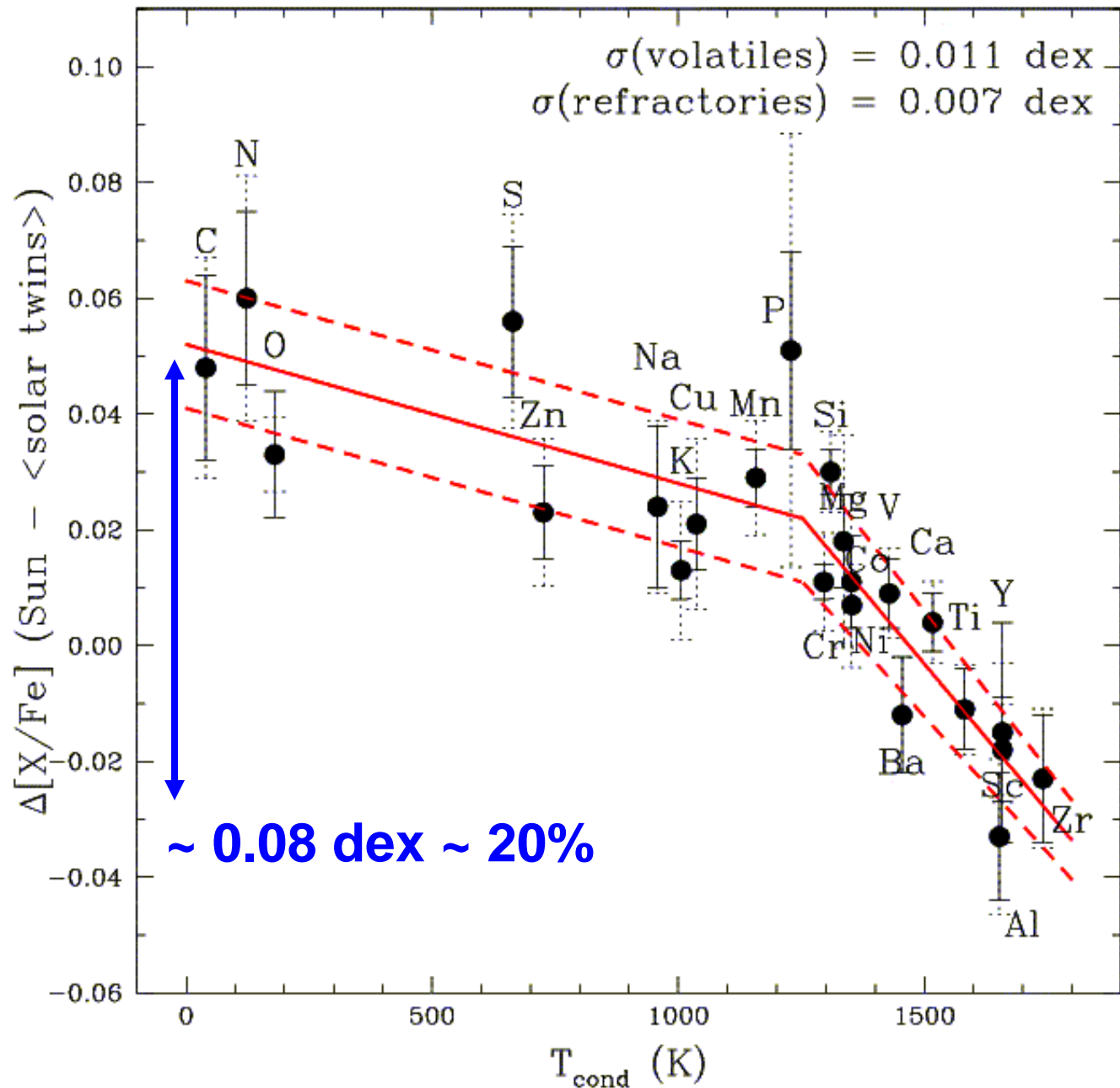


Temperatura de condensación

**Cuando el material (Fe, Al, etc) en la
región interna del Sol se condensa,
formo polvo, planetesimales y
posteriormente planetas terrestres**

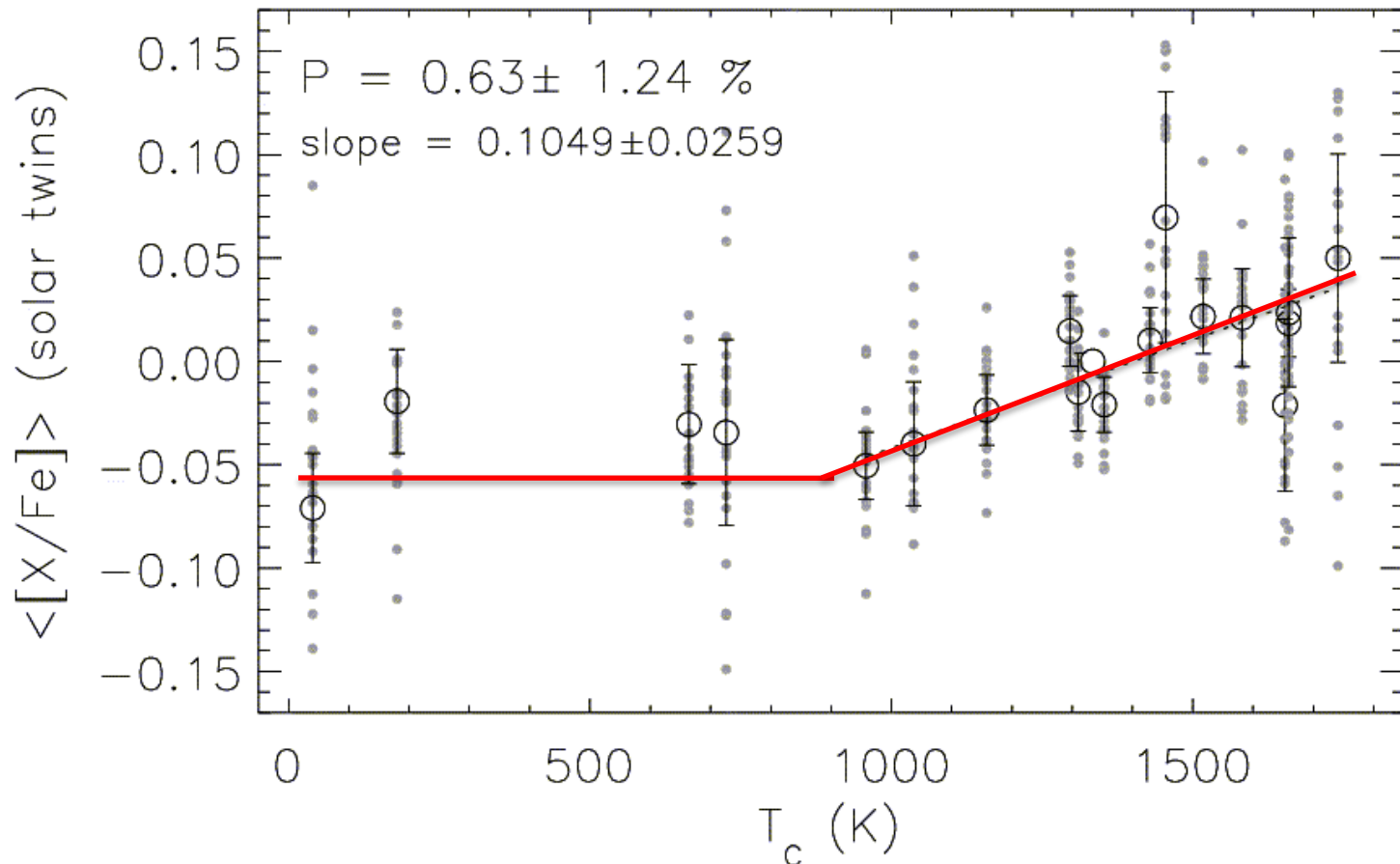


Por eso el Sol tiene una deficiencia de material refractario, pues esta en planetas terrestres !



Confirmación independiente de correlación con temperat. condensación

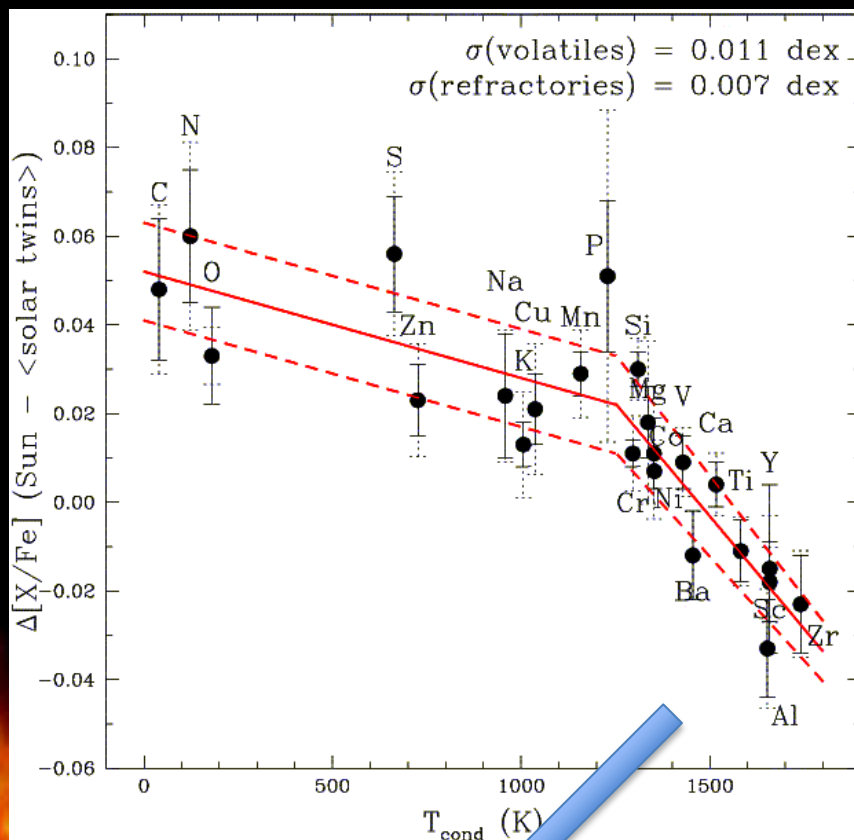
- *Ramirez et al. (2009)*: 22 solar twins with McDonald 2.7 m
R=60,000, S/N = 200. *Confirman el efecto observado.*



Note: eje Y inverso

Temperatura de condensación

El gas acretado en la zona convectiva solar fue deficiente en refractarios



The late-accreted gas in the Sun's convection zone was depleted in refractories which were used to form dust, planetesimals & terrestrial planets

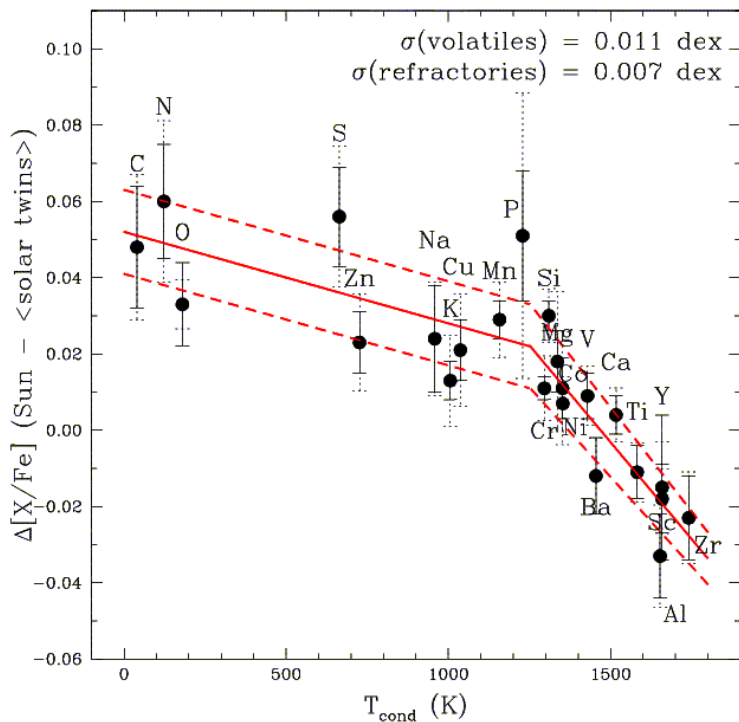
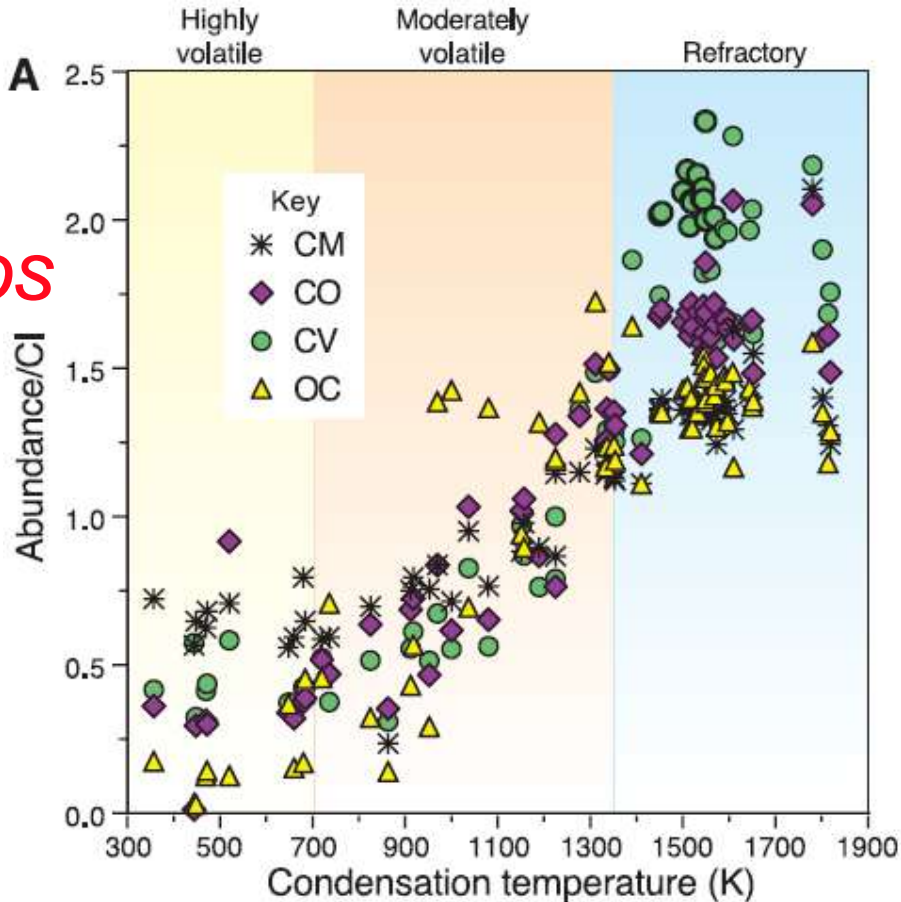


Relación con formación de planetas terrestres:

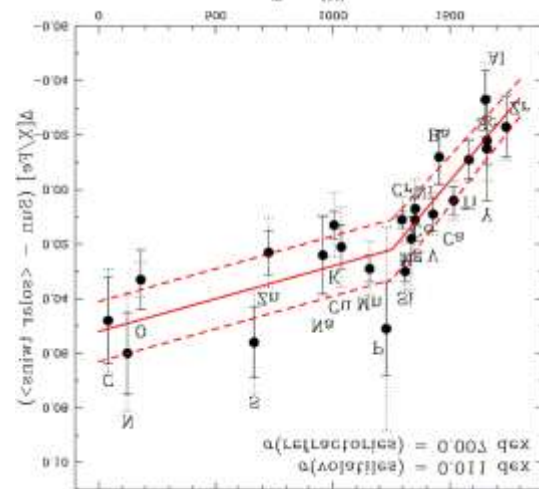
1. T_{cond} trend en meteoritos

Alexander et al. (2001)

Fig. 2. (A) The CI chondrite normalized elemental abundances in bulk carbonaceous (CM, CO, and CV) and ordinary chondrites (OC) (53) versus their 50% condensation temperatures (54). The correlation between abundance and condensation temperature (volatility) is striking. The elements are divided into refractory (>1350 K), moderately volatile (700 to 1350 K), and highly volatile (<700 K). The common



La anomalía solar es una imagen espejo de la anomalía presente en meteoritos



Relación con formación de planetas terrestres: 2. El polvo removido es suficiente para formar planetas terrestres

How much dust-cleansed gas is required to affect the Sun in this way?

Assume gas accretion until solar convection zone reached
~ present size ($\sim 0.02 M_{\text{sun}}$):

Refractories depleted in the Sun: $\sim 2 \cdot 10^{28} \text{ g} \approx 4 M_{\oplus}$

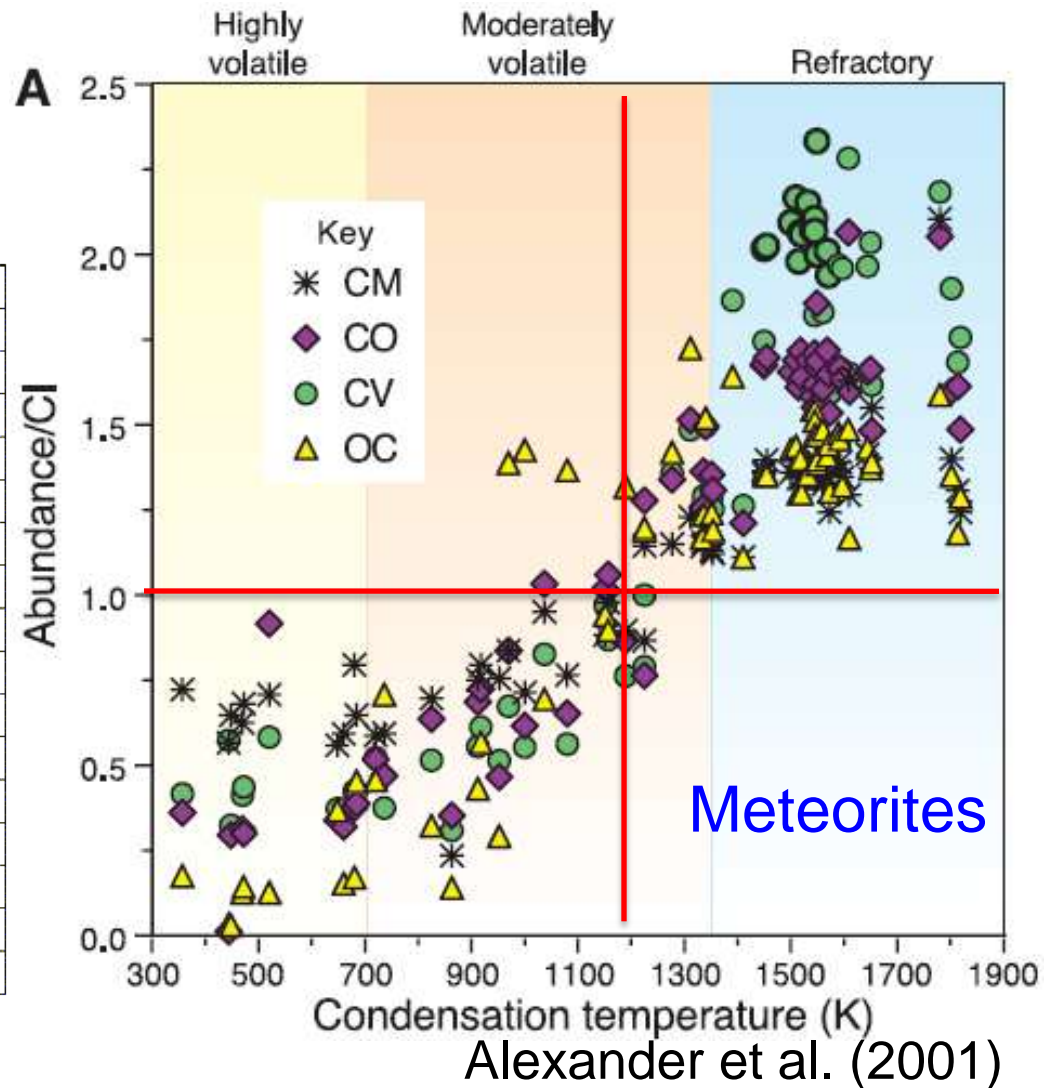
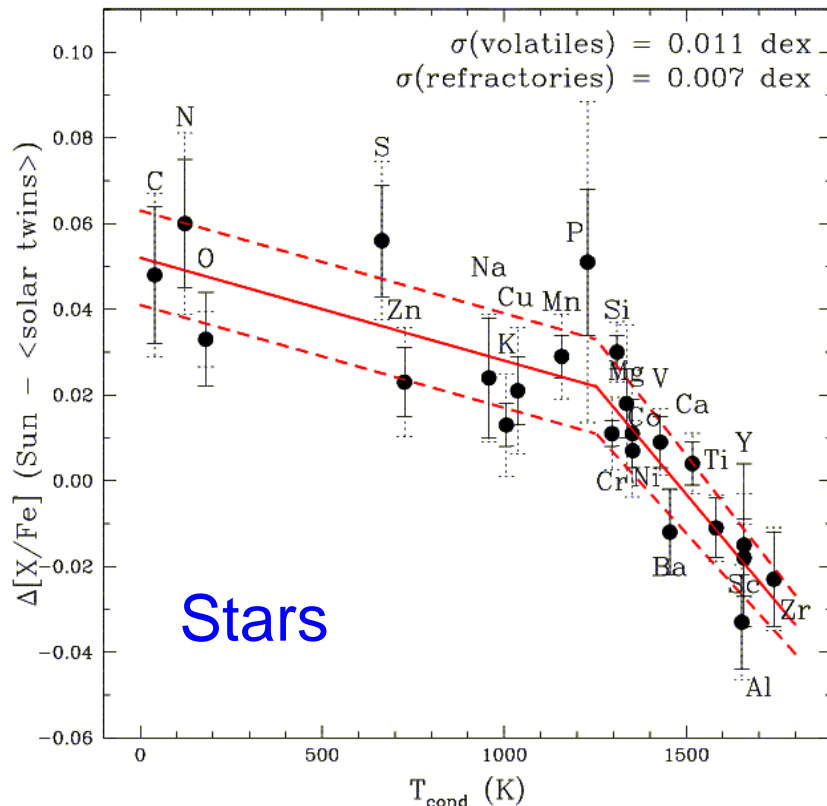
Refractories locked-up in terrestrial planets: $\sim 8 \cdot 10^{27} \text{ g} \approx 1.3 M_{\oplus}$



Relación con planetas terrestres:

3. Quiebre en $T_{\text{cond}} \sim 1200 \text{ K}$ es visto en el Sol y en meteoritos

$T_{\text{cond}} > 1200 \text{ K}$ are only found in inner ($< 3 \text{ AU}$) planetary disks



Relación con planetas terrestres.

4. Hay una deficiencia de elementos volátiles en el manto terrestre!

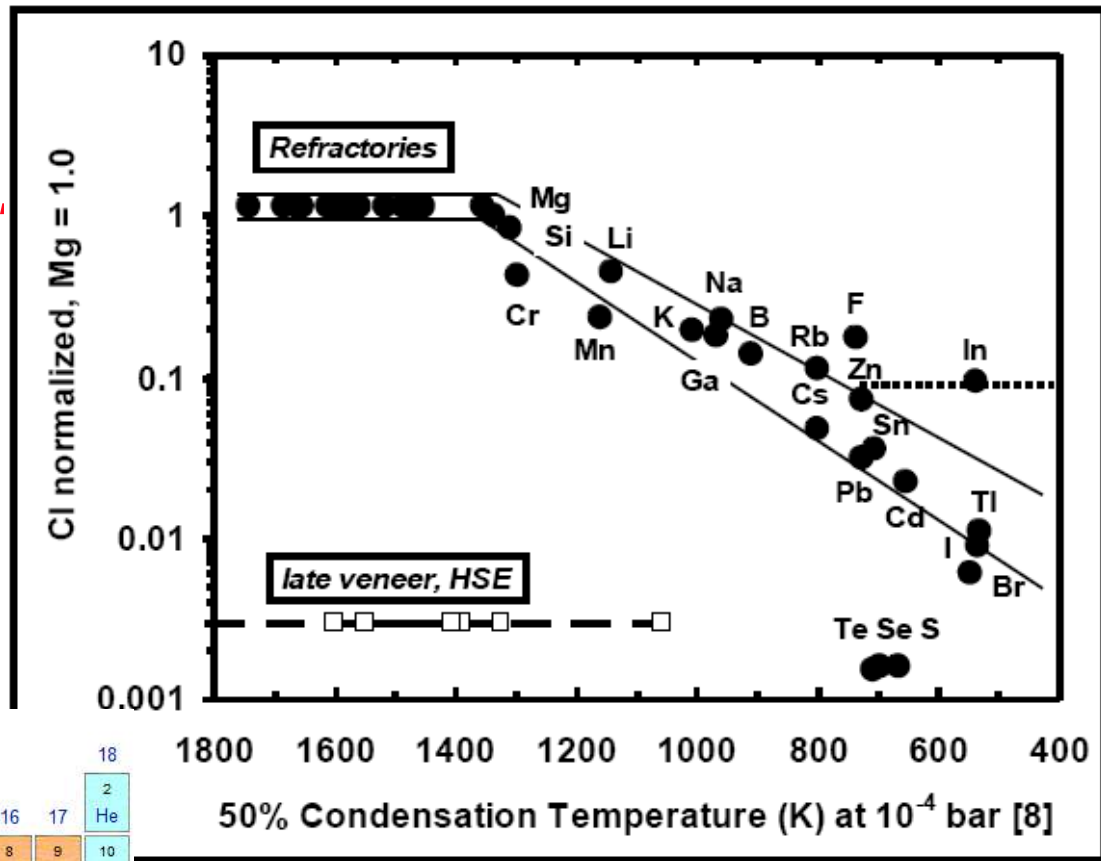
Goldschmidt classification in the Periodic Table

1	2											13	14	15	16	17	18																																					
1	H											5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																															
2	3	4											11	Na	12	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																
3	11	12											19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr						
4	37	38	39	40	41	42	(43)	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89-103	(104)	(105)	(106)	(107)	(108)	(109)	(110)	(111)	(112)	(113)	(114)	(115)	(116)	(117)	(118)
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																																				
6	Cs	Ba	Lan	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																																				
7	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																					

Legend:

Lithophile	Siderophile	Chalcophile	Atmophile	very rare
------------	-------------	-------------	-----------	-----------

Lithophile:
silicate loving



Witt-Eickschen et al. (2007)

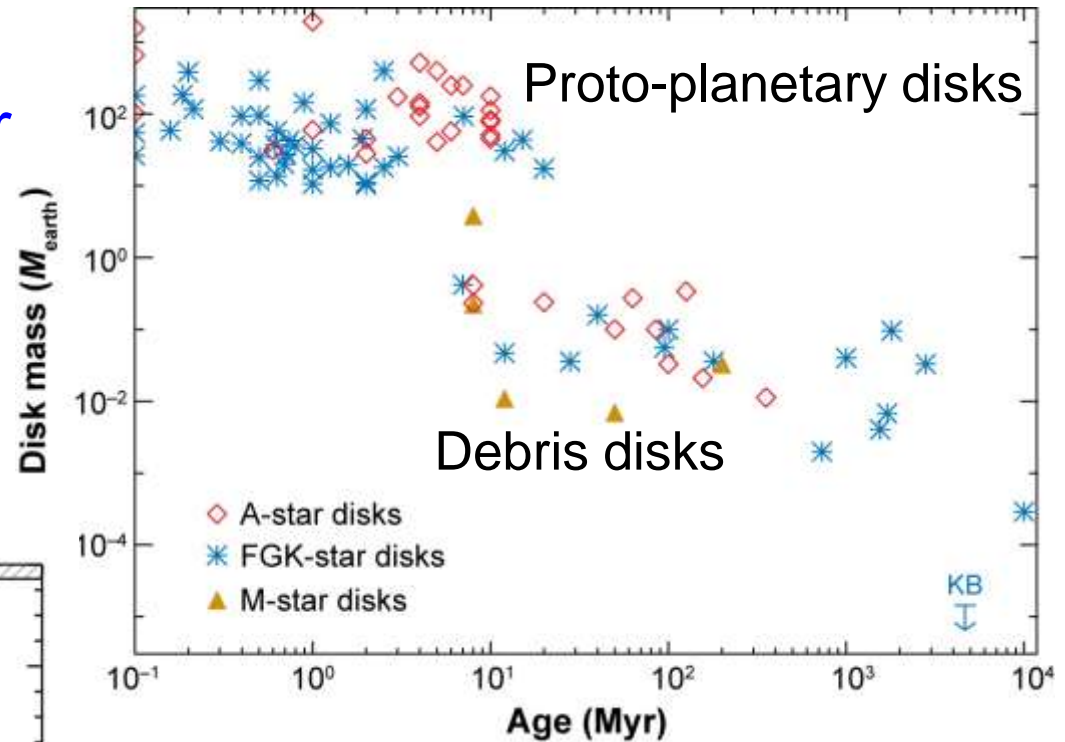
Depletion trend of volatiles in Earth's mantle probably reflects primary nebular depletion in the Earth making material (Witt-Eickschen et al. 2007).

Earth-making material was poor in volatiles, and the Sun rich in refractories !

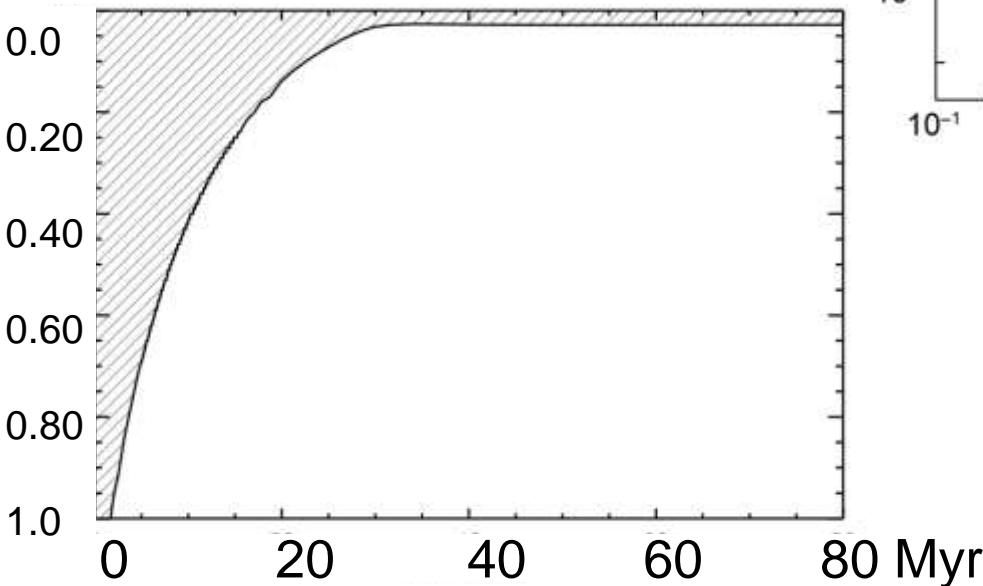
Problemas de escalas de tiempo

Wyatt (2008)

Edades de discos proto-planetarios tienen ≤ 10 Myr



Mass fraction
of convection zone



$M_{\text{cz}} \sim 0.02 M_{\text{Sun}}$ only > 30 Myr

$M_{\text{cz}} \sim 0.4 M_{\text{Sun}}$ at ~ 10 Myr

*El disco proto-solar fue
inusualmente de larga duración?*

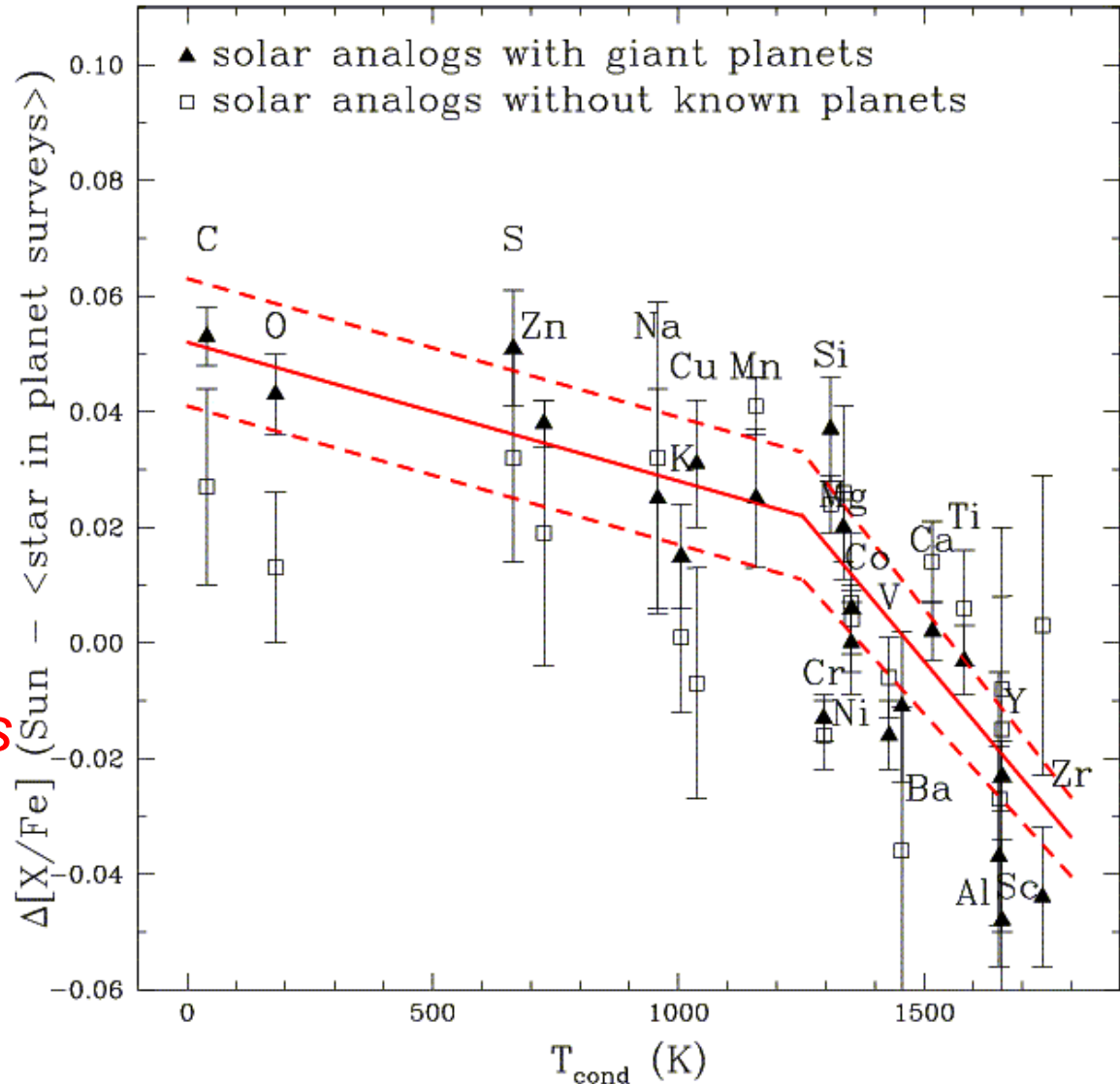
TEST: es el descubrimiento relacionado a planetas gigantes o terrestres?

Muestra de 10 *analogos solares* en surveys de velocidad radial para encontrar planetas

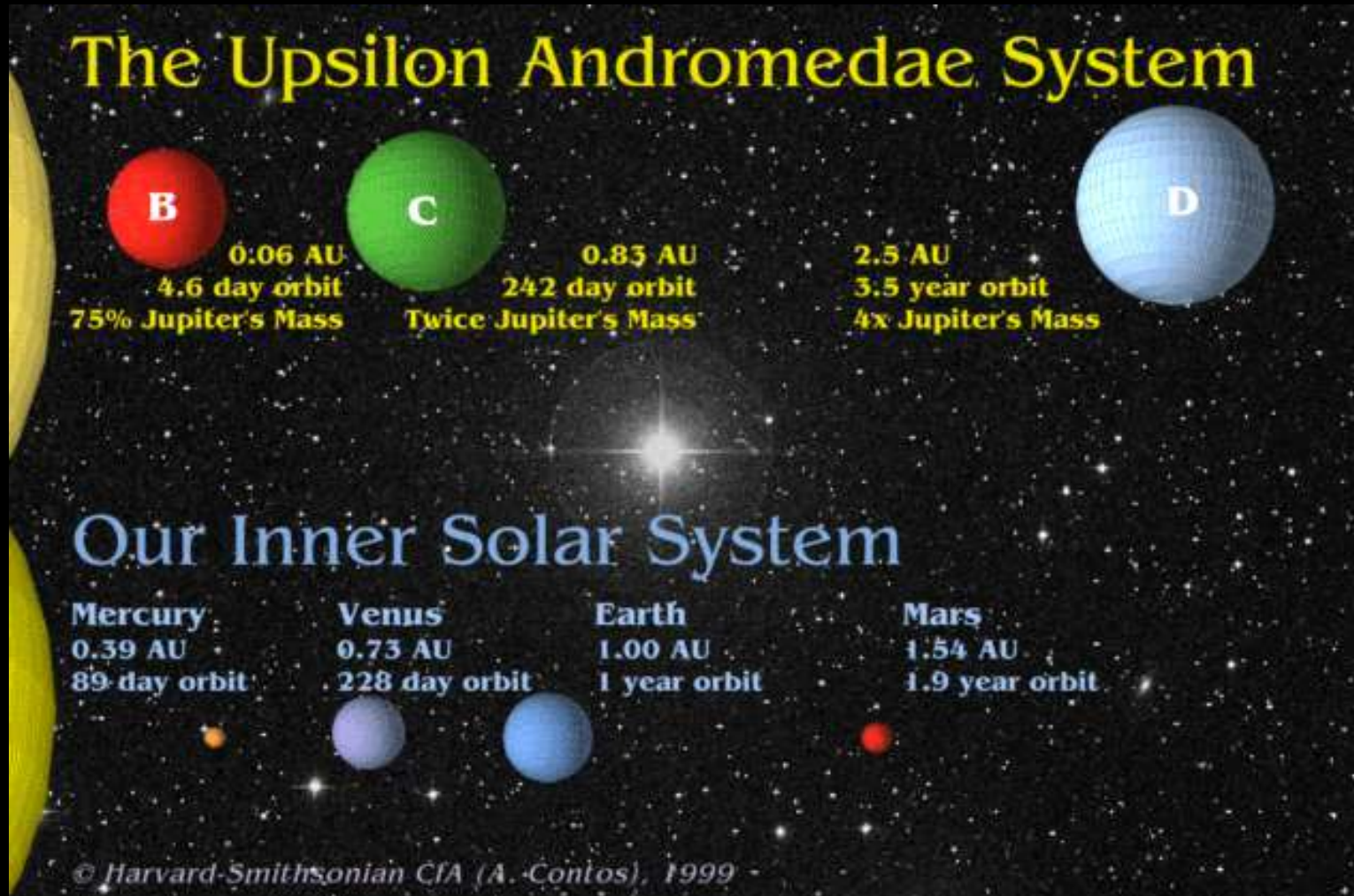
- 4 con planetas gigantes
- 6 no tienen planetas detectados

• *Estrellas con planetas son similares a gemelos solares !*

• *Estrellas sin planetas son similares al Sol !*



Las estrellas sin planetas gigantes detectados tal vez sean similares a nuestro sistema solar



El hecho de que las estrellas sin planetas gigantes tengan composición química similar al Sol tal vez indica que tengan planetas terrestres

Conclusiones

Analises detallados de la composición química de estrellas podra indicarnos cuales son las estrellas que albergan sistemas planetarios similares al nuestro

Conclusiones

A pesar del Sol no ser una estrella común, por lo menos el 20% de estrellas de tipo solar es similar al Sol, por lo cual tal vez también tengan planetas terrestres y quizás vida



$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$