

Astrofísica del Sistema Solar

Composición y Taxonomía

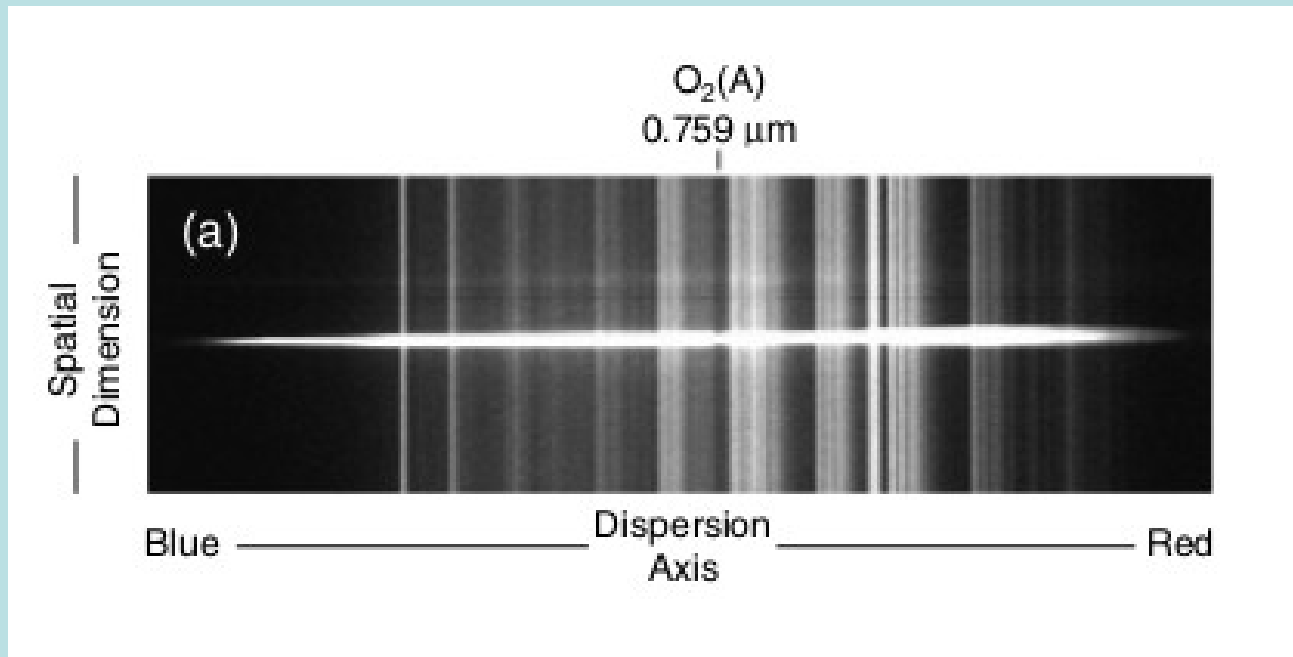
Introducción

- La luz incidente es reflejada o absorbida por granos del mineral superficial.
- Dependiendo de las propiedades ópticas de estos granos variará la fracción de luz reflejada.
- Originalmente se utilizaba la espectrofotometría con filtros de banda angosta (300 – 1000 nm):
 - Eight-color asteroid survey (ECAS) (Zellner et al. 1985)
 - Taxonomía de Tholen (1984).
- Espectrógrafos de ranura larga se comienzan a usar a principios de 1990.

Introducción

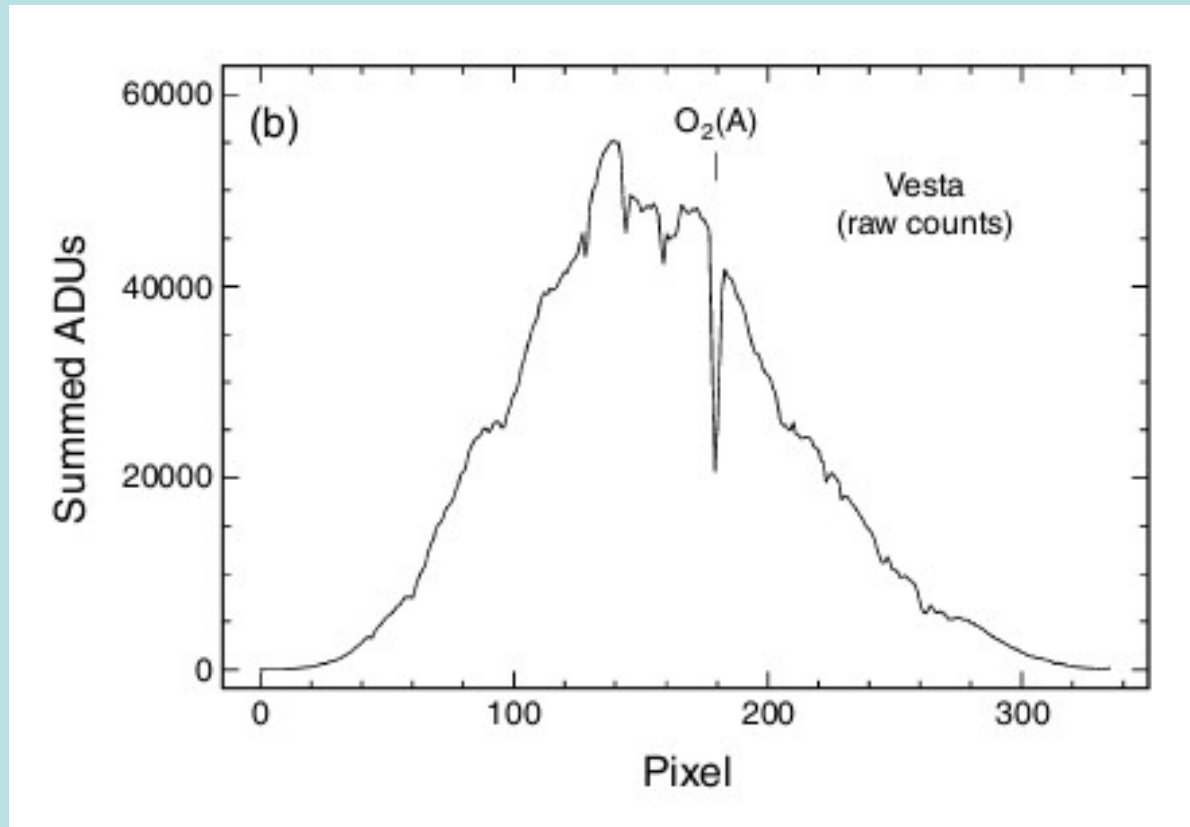
- El objetivo primario de la espectroscopía de reflexión es determinar la relación entre la luz incidente y reflejada.
- Es necesario el uso de estrellas análogas solares y pueden aparecer diferencias.
- Como el objeto no se resuelve desde Tierra, el espectro es el resultado promedio sobre el disco iluminado.
- Se utilizan resoluciones bajas a medias ($\lambda/\Delta\lambda \sim 100-5000$) y se bloquean con filtros órdenes superiores.
- El proceso de reducción está descrito en Vilas & Smith (1985), Luu & Jewitt (1990), Xu et al. (1995), Bus & Binzel (2002).

Introducción



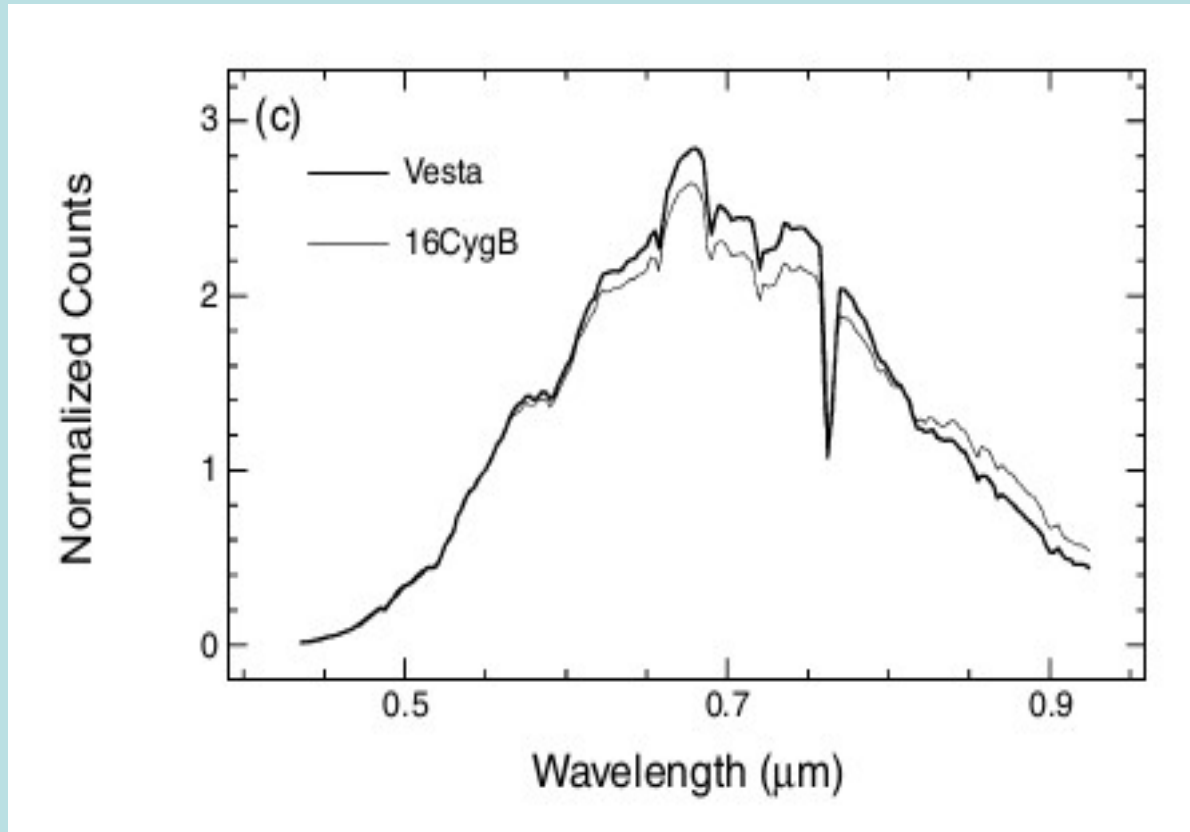
Bus et al. (2002)

Introducción



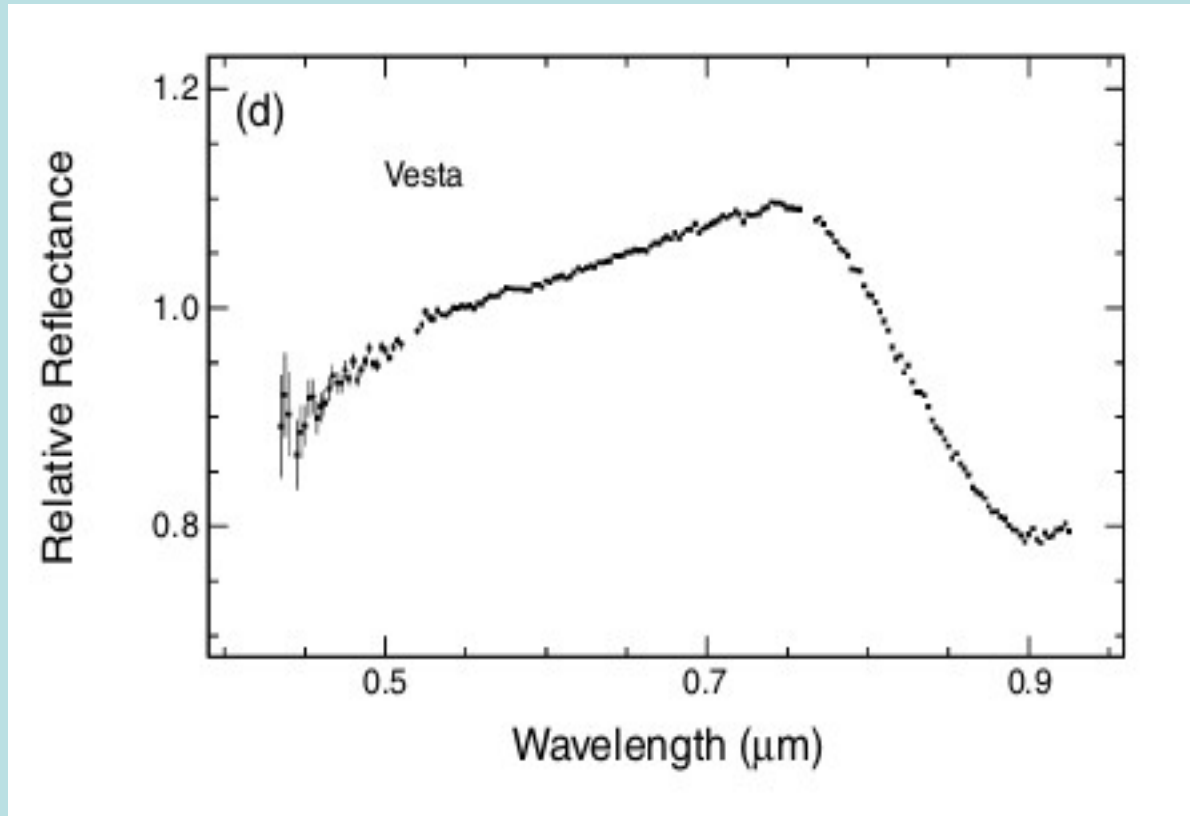
Bus et al. (2002)

Introducción



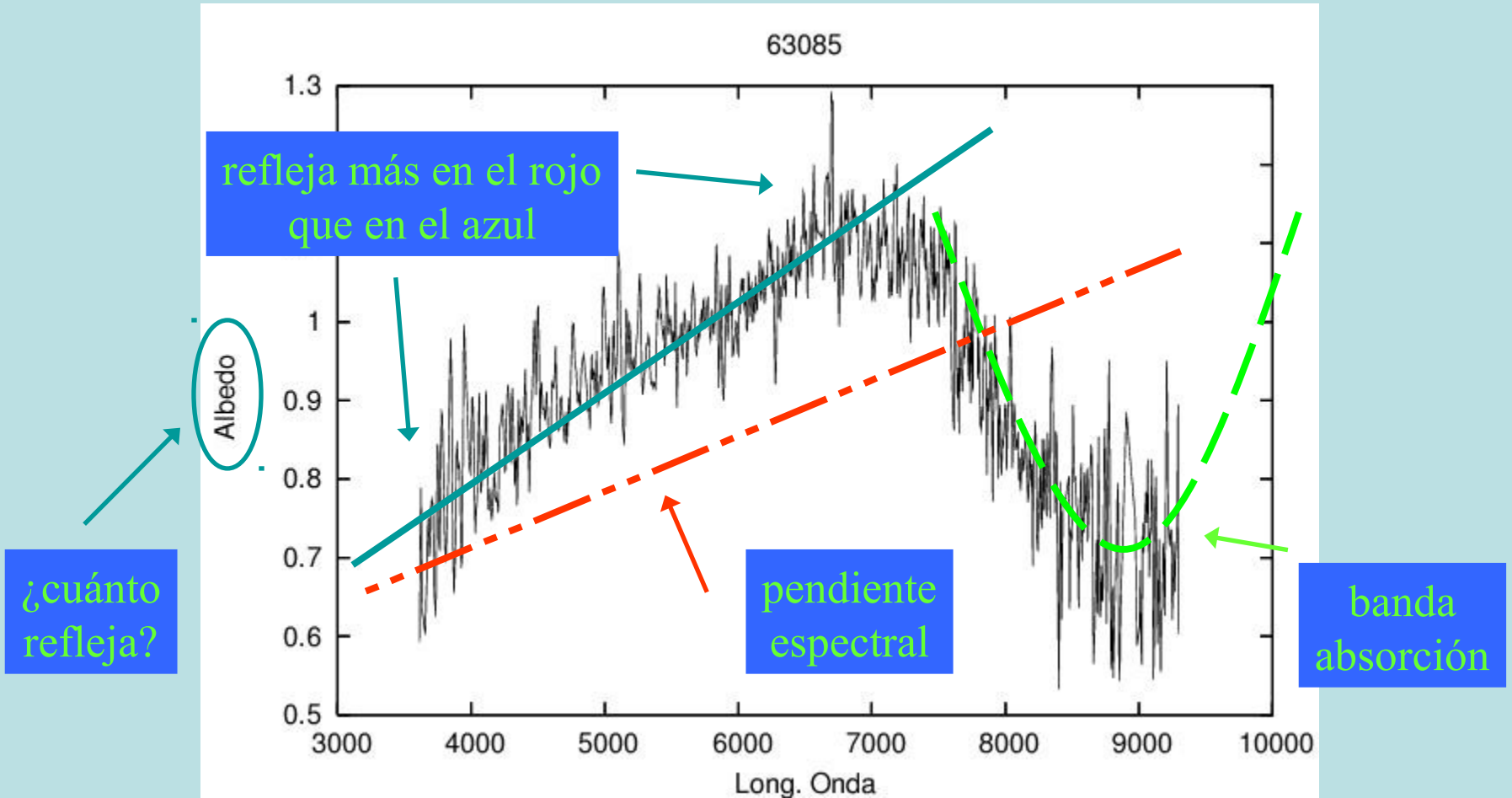
Bus et al. (2002)

Introducción



Bus et al. (2002)

Espectro de reflexión



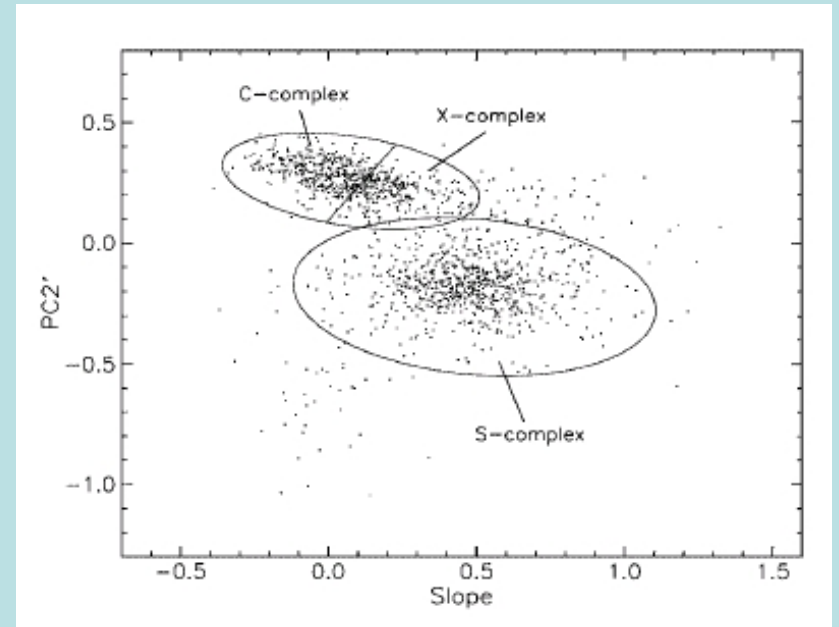
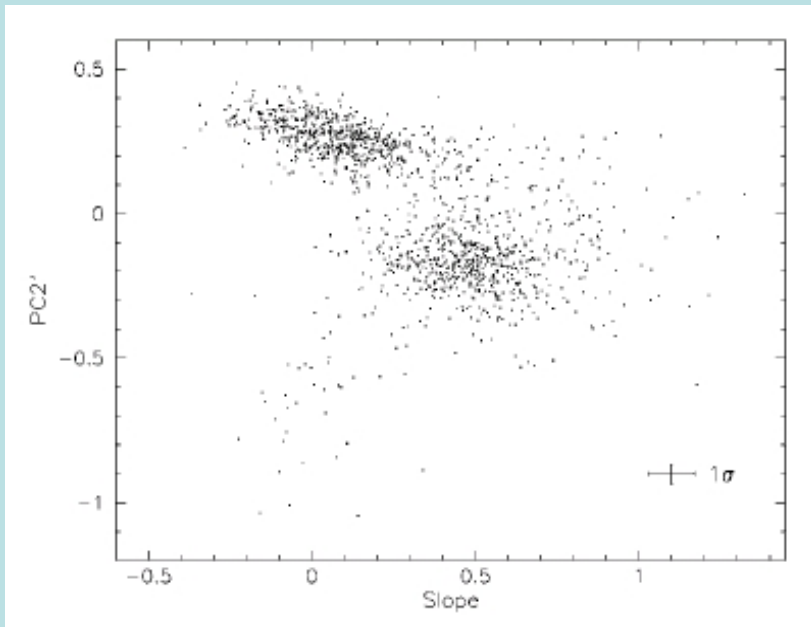
Espectro de reflexión

- El principal resultado en el visible es la determinación del color.
- Las bandas de absorción son diagnóstico de la presencia de ciertos minerales.
- Las características principales en el rango visible son:
 - existencia o no de absorción en el UV (Fe^{2+}).
 - la pendiente para $\lambda > 550$ nm debido a agentes de enrojecimiento (Fe – Ni u orgánicos).
 - la presencia o no de bandas de absorción debida a silicatos para $\lambda > 700$ nm.
 - bandas de absorción más débiles (1 – 5% debajo del continuo).

Taxonomía

- Los métodos más utilizados son la descomposición en Componentes principales y el análisis de disimilitud:
 - Componentes principales: minimiza respecto del eje ortogonal con mayor dispersión.
 - Disimilitud: compara el espectro con modelos determinados observacionalmente.

Componentes principales

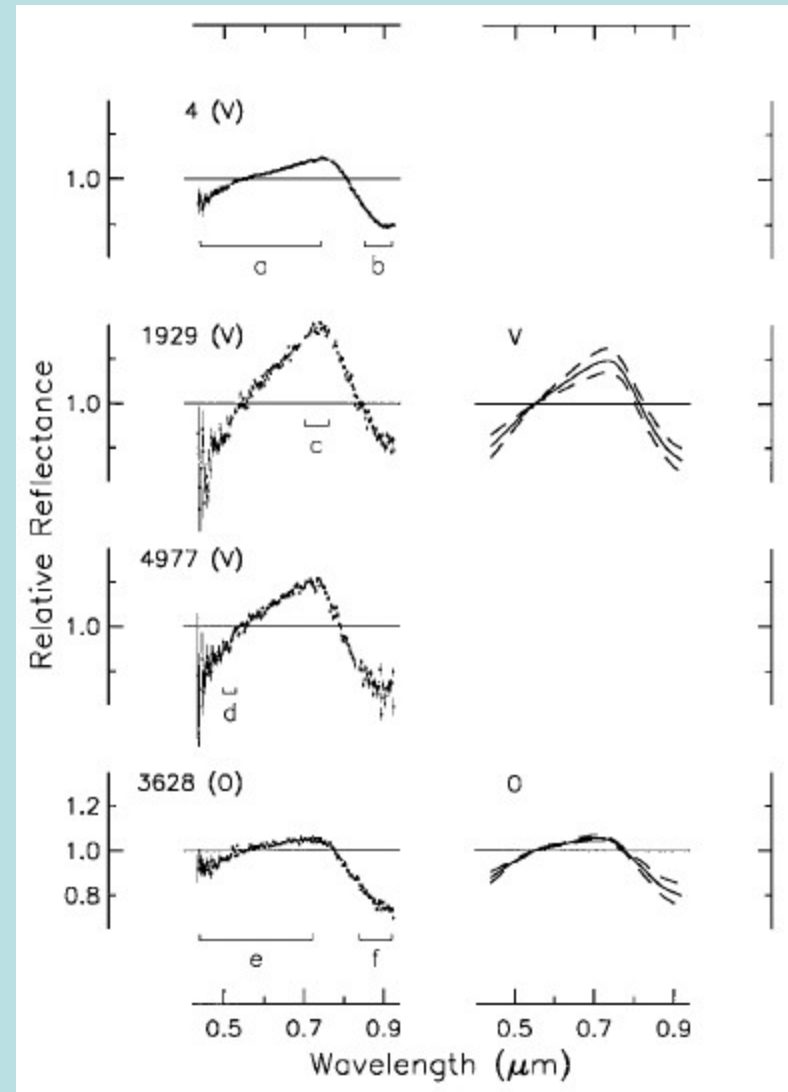


Bus & Binzel (2002)

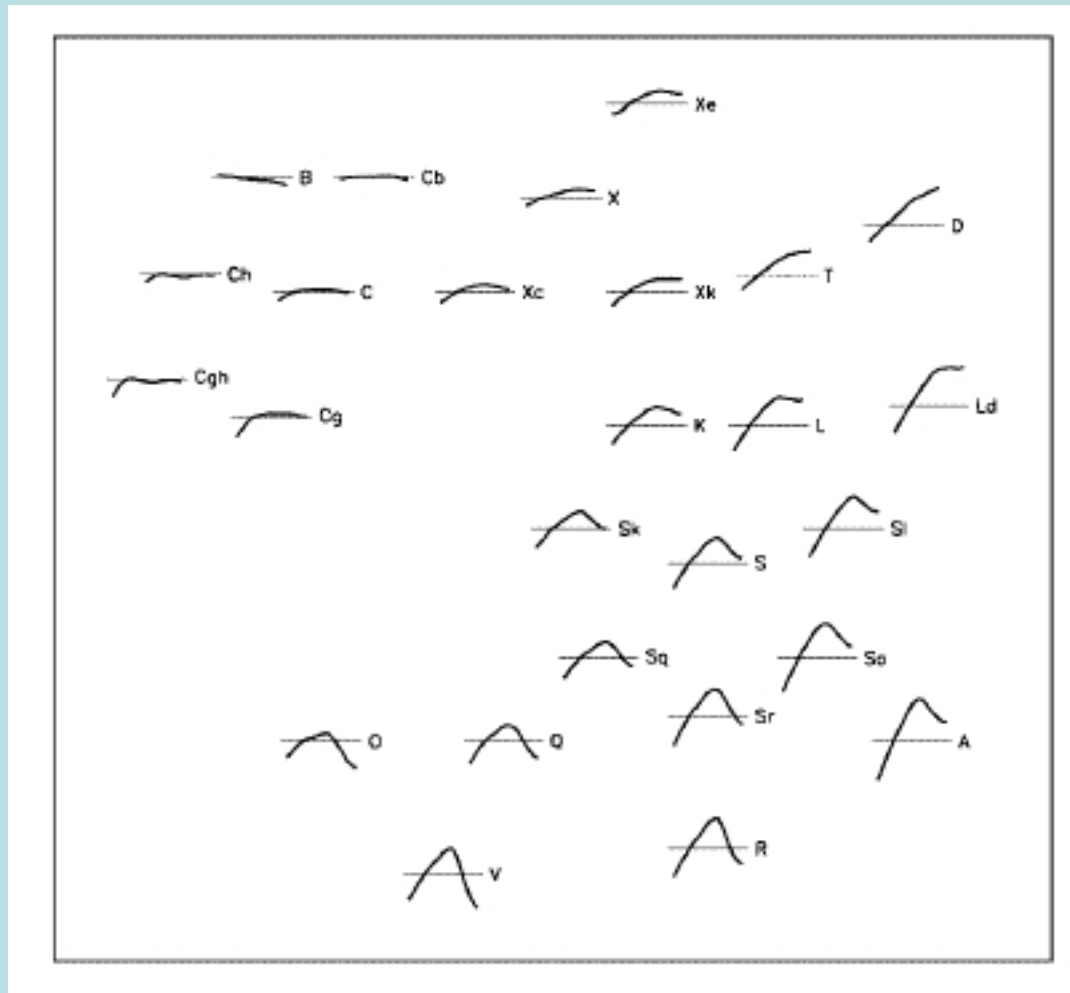
Disimilitud

- Utilizado principalmente con las observaciones espectrofotométricas (SDSS, Gil-Hutton & Licandro 2010):

$$d_{ij} = \left\{ \sum_{n=1}^p (X_{in} - X_{jn})^2 \right\}^{1/2},$$



Taxonomía de Bus & Binzel (2002)



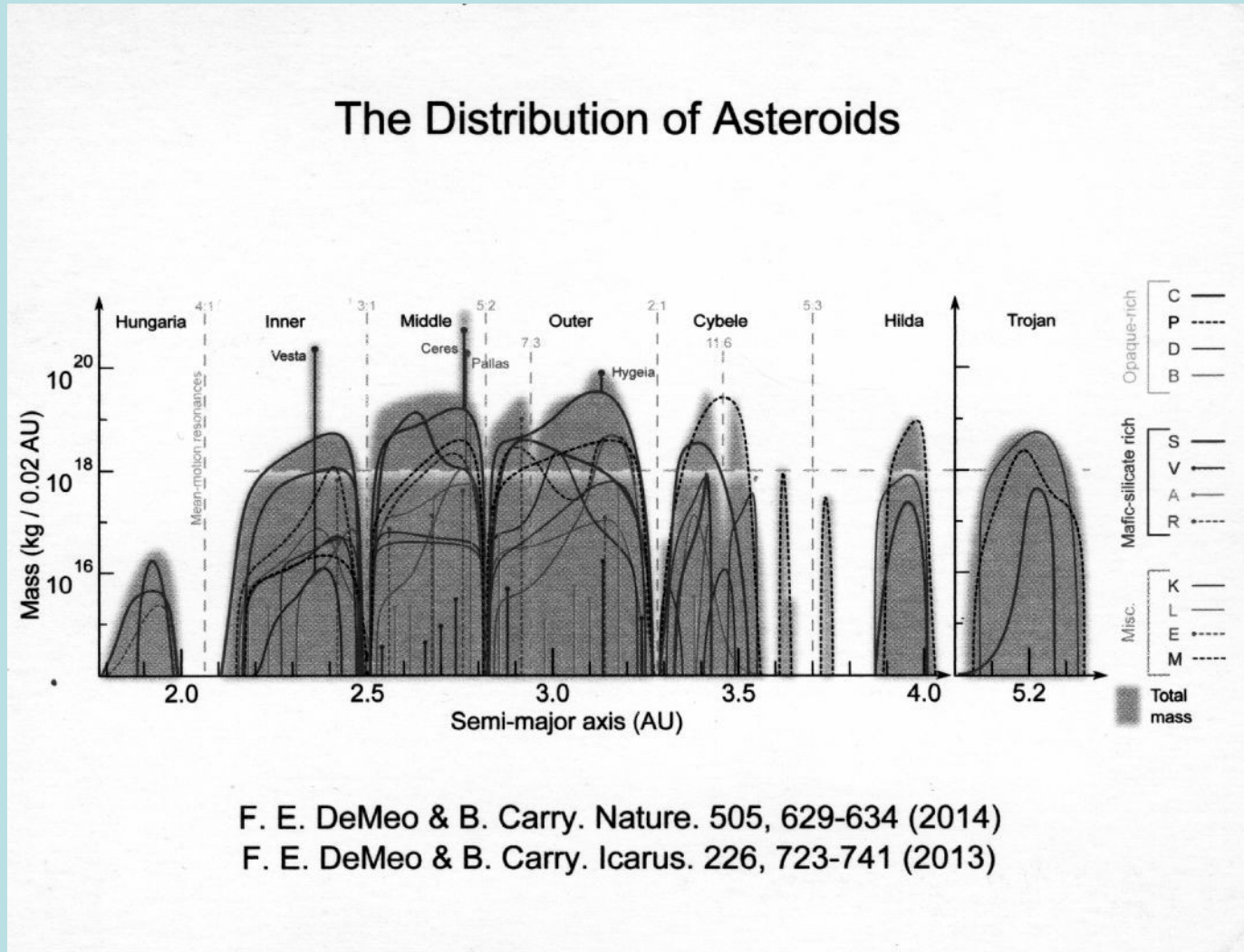
Taxonomía de Bus & Binzel (2002)

TABLE I
Table and Spectral Characteristics of the Bus and Binzel (2002b) Taxonomic Classes

Class	Spectral characteristics
A	Very steep red slope shortward of 0.75 μm and a moderately deep absorption longward of 0.75 μm
B	Linear, featureless spectrum over interval of 0.44–0.92 μm , with negative (bluish) to flat slope
C	Weak to medium UV absorption shortward of 0.55 μm , flat to slightly reddish longward of 0.55 μm
Cb	Linear, featureless spectrum over interval of 0.44–0.92 μm with a flat to slightly reddish spectral slope
Cg	Strong UV feature shortward of 0.55 μm and flat to slightly reddish slope longward of 0.55 μm
Ch	Similar to C type, except for addition of broad, relatively shallow absorption centered near 0.7 μm
Cgh	Similar to Cg spectrum, except for addition of broad, shallow absorption band centered near 0.7 μm
D	Relatively featureless spectrum with a very steep red slope
K	Moderately steep red slope shortward of 0.75 μm , a flat to slightly negative slope longward of 0.75 μm
L	Very steep red slope shortward of 0.75 μm and then becoming approximately flat
Ld	Very steep red slope shortward of 0.7 μm , becoming essentially flat longward of 0.75 μm
O	Red slope from 0.44 to 0.54 μm , less steep from 0.54 to 0.7 μm , deep absorption longward of 0.75 μm
Q	Moderately steep red slope shortward of 0.7 μm and deep, rounded absorption longward of 0.75 μm
R	Very steep red slope shortward of 0.7 μm , and a deep absorption longward of 0.75 μm
S	Steep, reddish slope shortward of 0.7 μm and a moderate to deep absorption longward of 0.75 μm
Sa	Spectrum intermediate between S and A types
Sk	Spectrum intermediate between S and K types
Sl	Spectrum intermediate between S and L types
Sq	Spectrum intermediate between S and Q types
Sr	Spectrum intermediate between S and R types
T	Moderately steep red slope shortward of 0.75 μm , becoming flat longward of 0.85 μm
V	Moderate to very steep red slope shortward of 0.7 μm with a deep absorption longward of 0.75 μm
X	Generally featureless spectrum, with a slight to moderate reddish slope
Xc	Slightly reddish spectrum, generally featureless except for a gentle curvature
Xe	Slightly to moderately red slope with a series of subtle absorption features such as one shortward of 0.55 μm
Xk	Moderately red slope shortward of about 0.75 μm , and generally flat longward of 0.75 μm

Note. This table is adapted from one in Bus and Binzel (2002b).

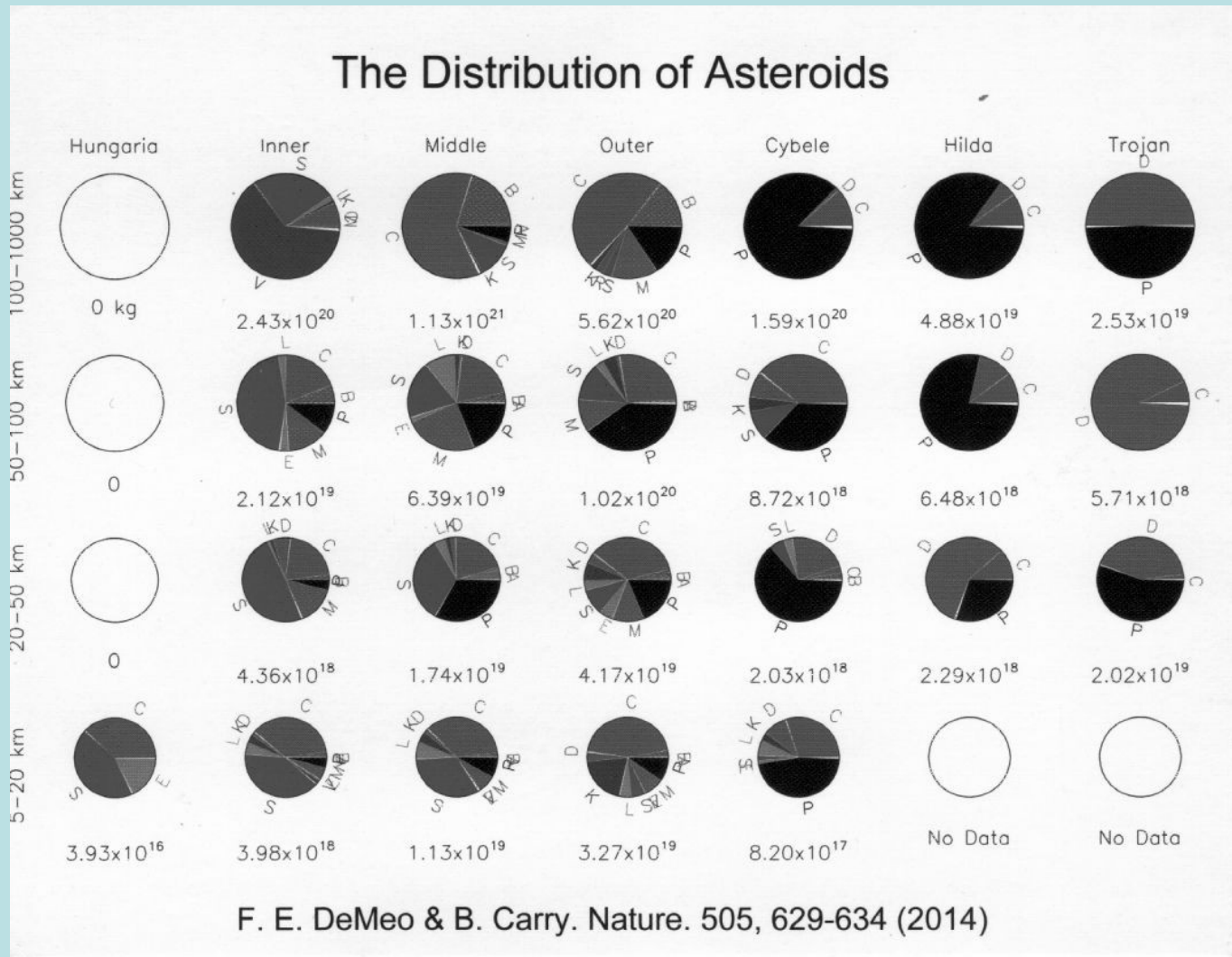
Distribución de tipos



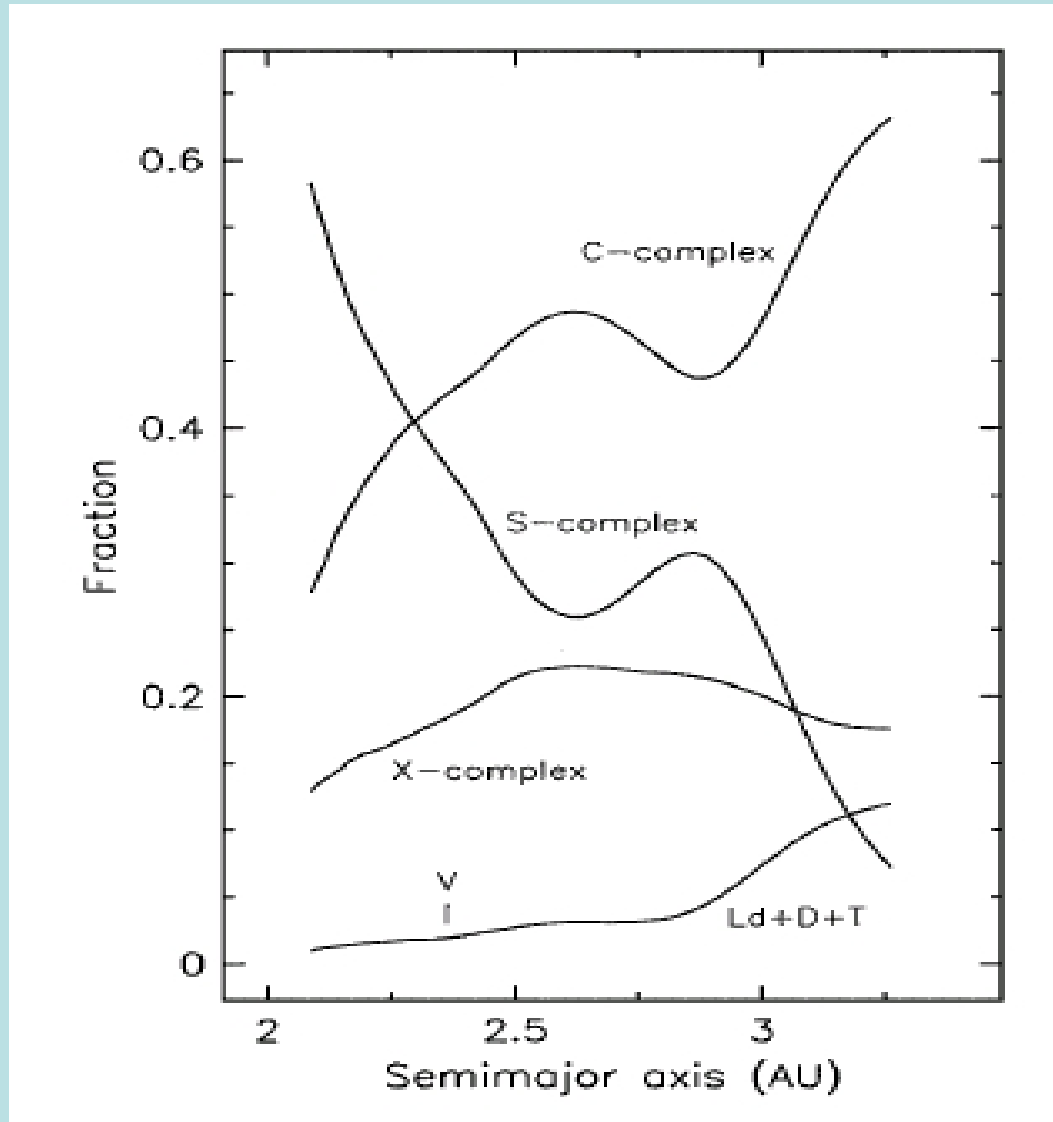
F. E. DeMeo & B. Carry. *Nature*. 505, 629-634 (2014)

F. E. DeMeo & B. Carry. *Icarus*. 226, 723-741 (2013)

Distribución de tipos

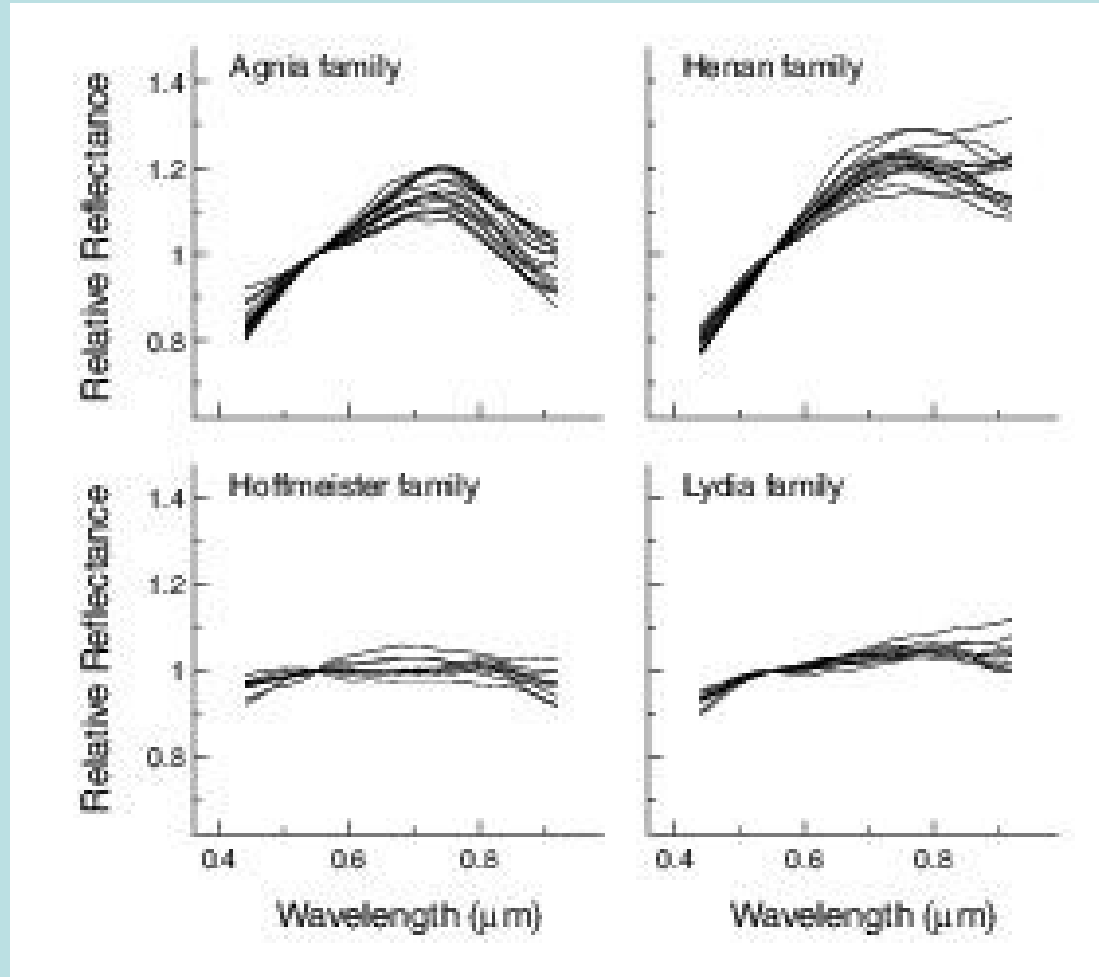


Distribución de tipos



Gradie et al.
(1989)

Homogeneidad en familias


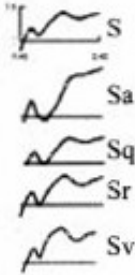
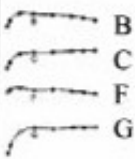
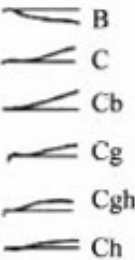


Bus (1999)

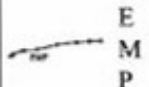
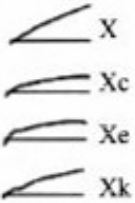
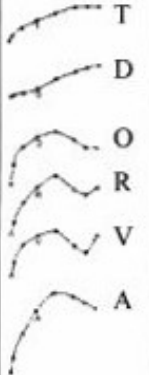
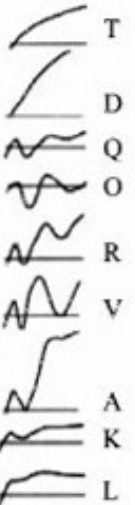
Taxonomía en el NIR

- Extender los espectros hasta 2500 nm para incluir bandas de absorción de diferentes materiales (Gaffey et al. 1989, 2002).
- Las técnicas observacionales son similares.
- La calibración es más complicada:
 - líneas de emisión nocturnas.
 - líneas de absorción atmosféricas (H₂O, CO₂) con profundidad variable.
 - calibración en λ bastante difícil.

Taxonomía en el NIR

Taxonomic System	Tholen (1984)	Gaffey (1993)	Bus (2002)	Bus-DeMeo (2009) (B-D)	Taxonomy Notes	Relevant Minerals and Possible Meteorite Analogs
Wavelength Range	0.33–1 μm	0.35–2.50 μm	0.45–0.90 μm	0.45–2.45 μm		
S-complex	 S	SI SII SIII SIV SV SVI SVII	S Sa Sq Sr Sk Sl		<p>Tholen: Defined only S.</p> <p>Gaffey: 7 mineralogic classes based on Band I center and Band II/Band I area ratio. Primarily separates olivine to orthopyroxene ratio.</p> <p>Bus: Separates based on strength of 0.9-μm drop, indicative of i-μm band.</p> <p>B-D: Definition largely preserved from Bus. Now includes full 1- and 2-μm feature in near-IR. Sl, Sk, and Ld are removed, Sv is added.</p>	<p>Minerals: olivine, pyroxene</p> <p>Meteorites: S(I): pallasites?, R chondrites, brachinites S(IV): many are ordinary-chondrite-like S(V): primitive achondrites? S(VII): basaltic achondrites</p>
C-complex	 B C F G		B C Cb Cg Cgh Ch		<p>Tholen: Primarily distinguished by the 0.3–0.5-μm UV dropoff region. Bus and B-D do not cover this region, thus do not make these distinctions.</p> <p>Bus: Defined by UV dropoff and/or by 0.7-μm Cgh, Ch feature.</p> <p>B-D: Definition largely preserved from Bus. Near-IR is largely degenerate.</p>	<p>Minerals: opaques, carbon, phyllosilicates, some have weak features indicating olivine, pyroxene</p> <p>Meteorites: carbonaceous chondrites (except CV), possibly impact melts from ordinary chondrites and HEDs?</p>

Taxonomía en el NIR

Taxonomic System	Tholen (1984)	Gaffey (1993)	Bus (2002)	Bus-DeMeo (2009) (B-D)	Taxonomy Notes	Relevant Minerals and Possible Meteorite Analogs
Wavelength Range	0.33–1 μm	0.35–2.50 μm	0.45–0.90 μm	0.45–2.45 μm		
X-complex	 <p>E M P</p>		<p>X Xc Xe Xk</p>	 <p>X Xc Xe Xk</p>	<p>Tholen: EMP are spectrally degenerate. Distinguished by high (E), med (M), and low (P) albedo. Bus: X class defined by shape of curve and/or 0.49-μm Xe feature. B-D: Definition largely preserved from Bus. Near-IR is largely degenerate.</p>	<p>Minerals: M,P: opaques, carbon, low-Fe pyroxene. E: enstatite, oldhamite Meteorites: M,P: carbonaceous chondrites (not CV). M w/high radar albedo: irons, CB chondrites, silicate-rich irons E: enstatites</p>
Other: End members, outliers	 <p>T D O R V A</p>		<p>T D Q O R V A K L Ld</p>	 <p>T D Q O R V A K L</p>	<p>Definitions for each of these classes are relatively consistent among taxonomies as they are each spectrally distinct.</p>	<p>D: opaques, organics Q: mostly LL OCs O: pyroxene, olivine R: olivine, pyroxene V: HEDs, pyroxene, plagioclase feldspar A: pallasite, brachinite, R chondrites, olivine K: CO, CV, olivine L: CAI-rich, spinel-rich</p>

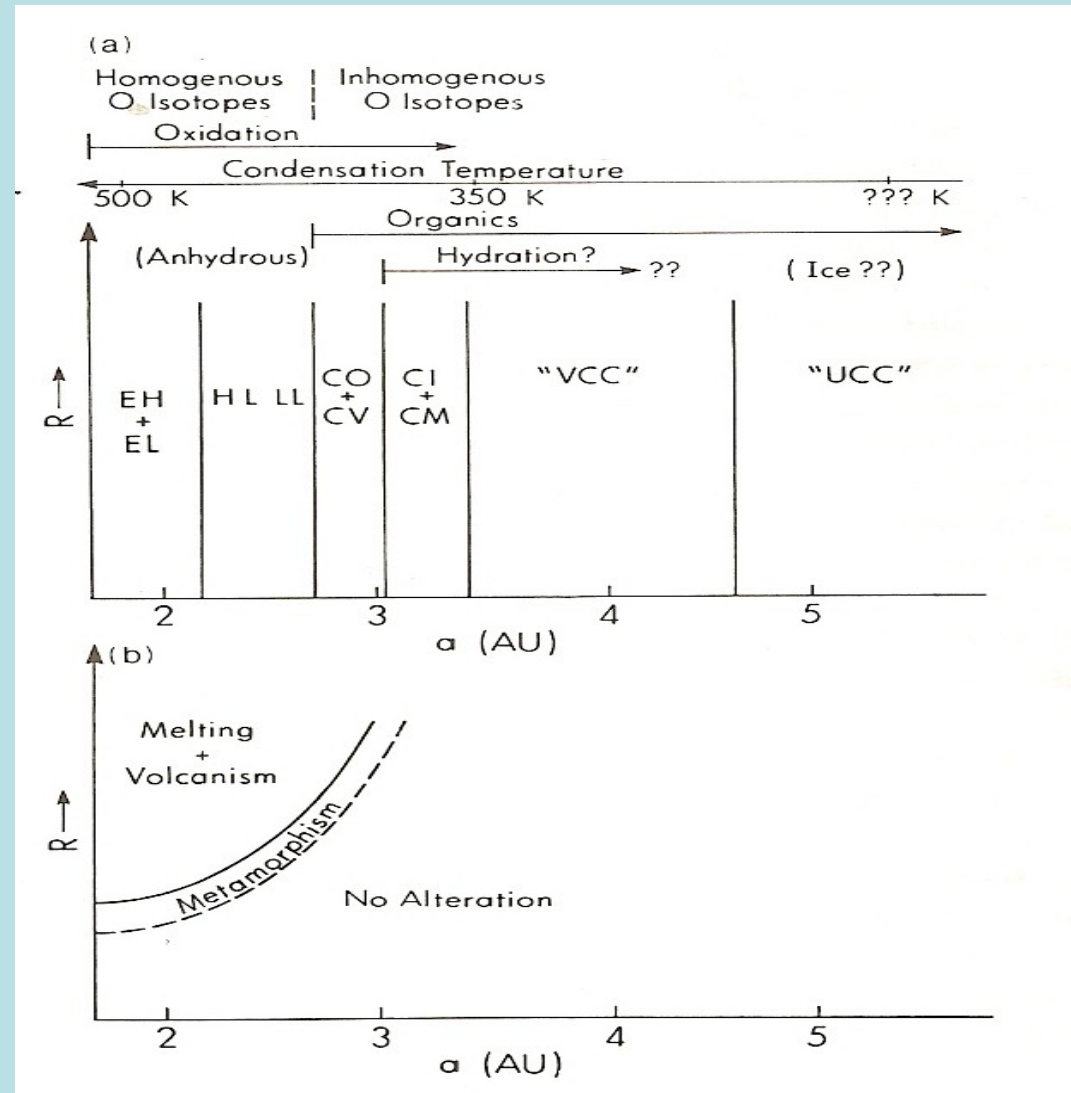
Meteoritos como análogos

- La cronología en meteoritos indican que todos los procesos químicos en el Sistema Solar se produjeron en los primeros 40 Myr.
- Los materiales en planetas sufrieron muchas modificaciones desde que fueron acretados.
- Los meteoritos proveen buena resolución temporal de los procesos en el Sistema Solar temprano, pero mala resolución espacial.
- Se busca relacionar tipos taxonómicos y meteoríticos.
- Las colecciones en la Tierra son incompletas e indican unos 100-150 objetos originales diferentes.

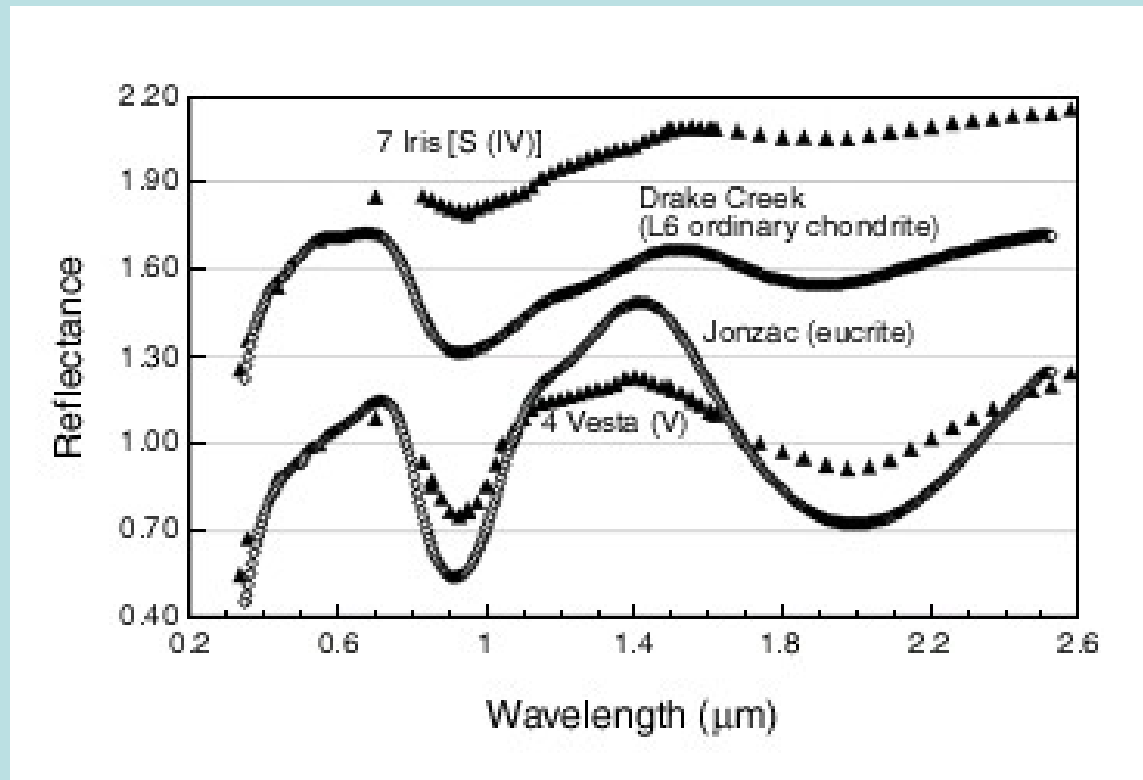
Meteoritos como análogos

Bell et al. (1989):

- Composición superficial afectada por procesos térmicos.
- El tipo depende de su posición en el cinturón.

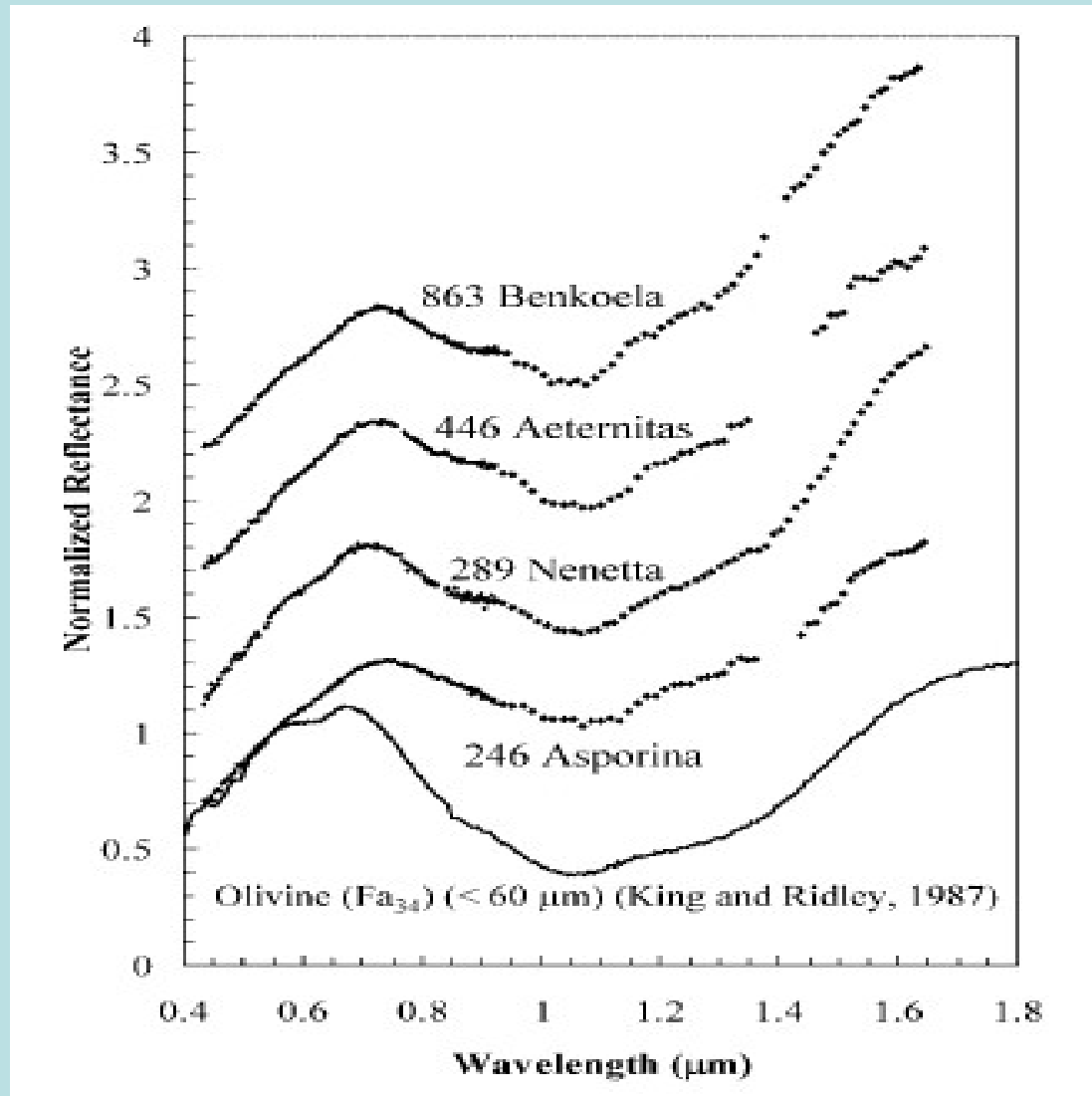


Meteoritos como análogos

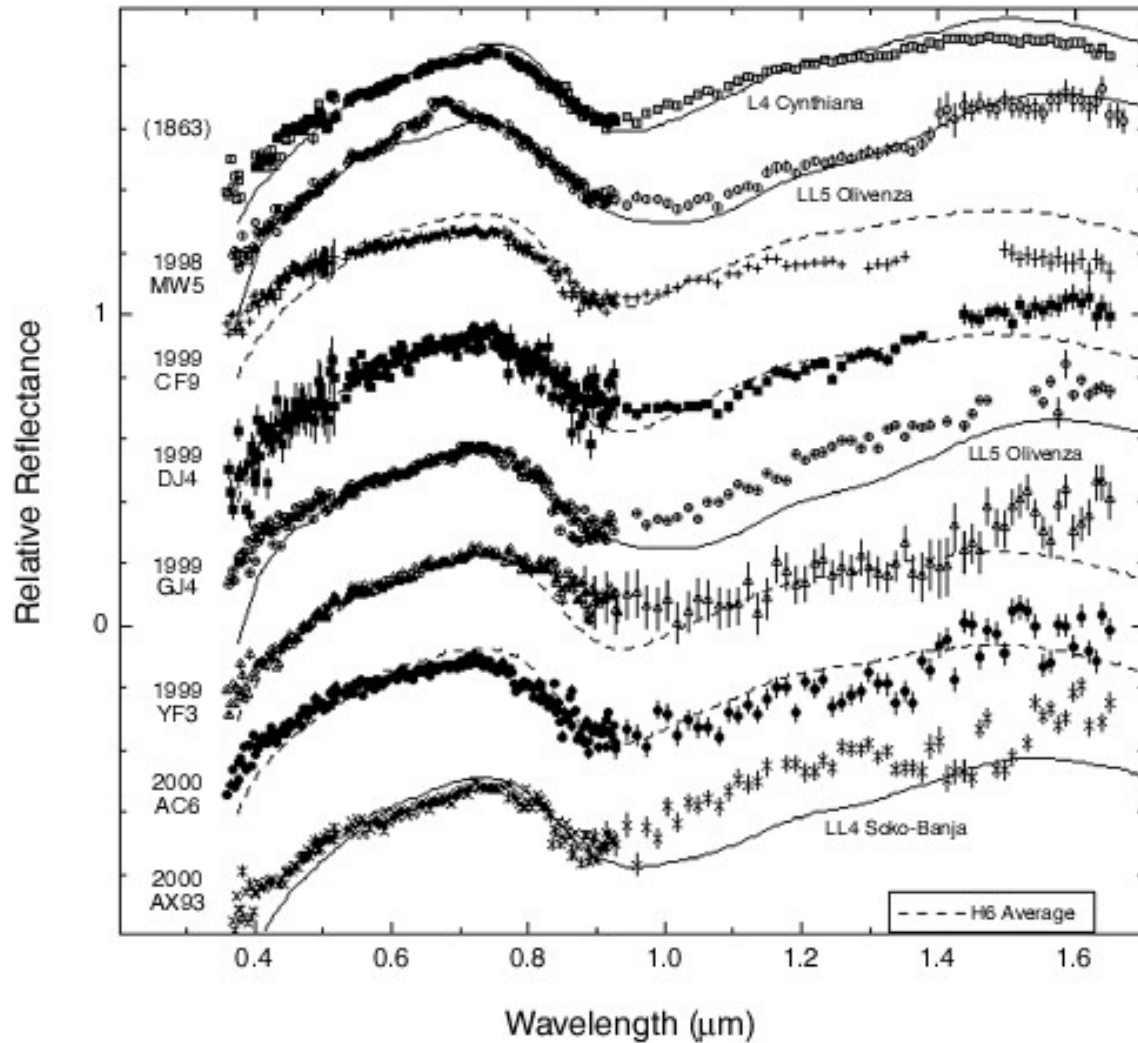


Clark et al. (2002)

Meteoritos como análogos



Meteoritos como análogos

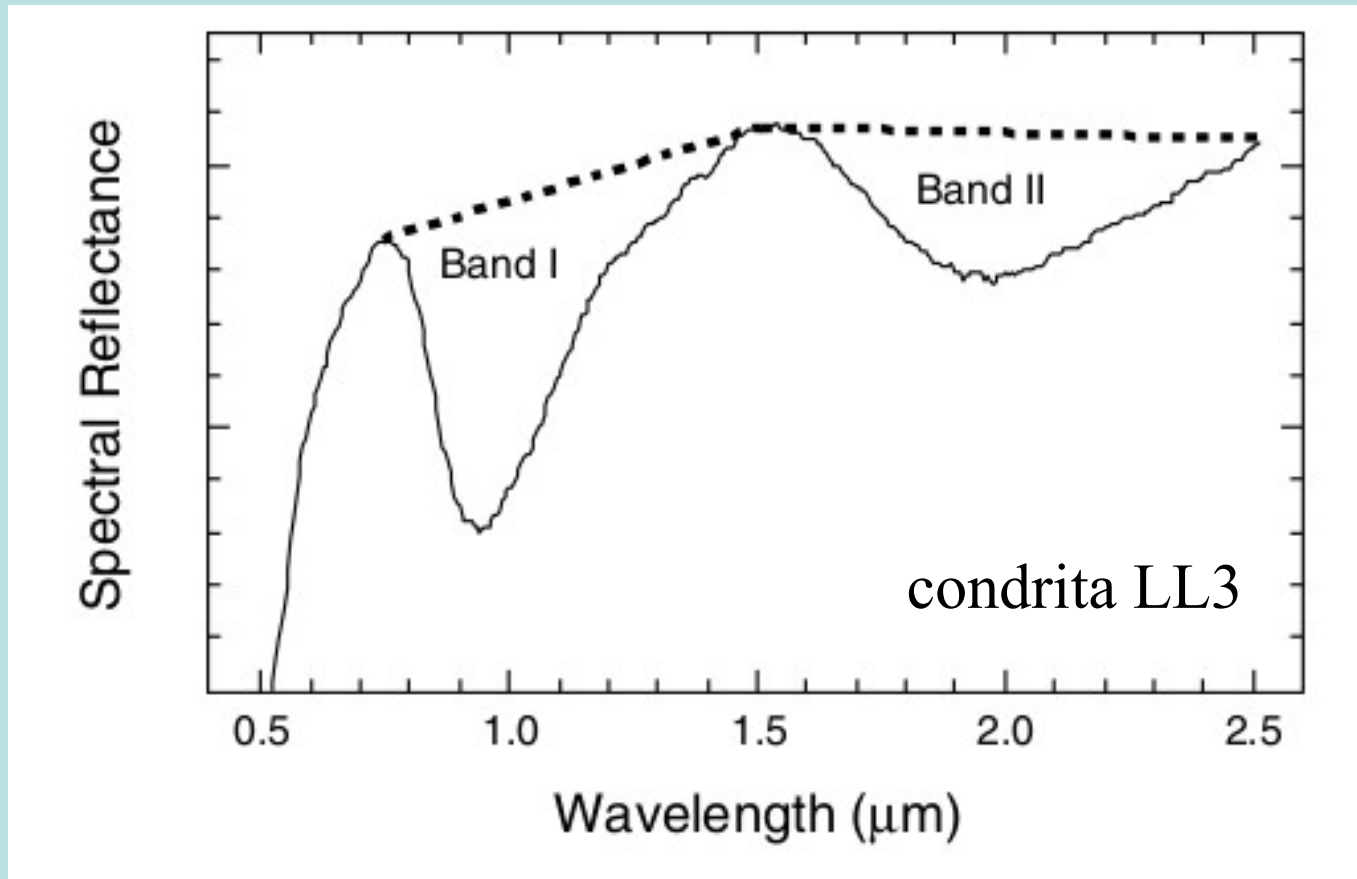


Binzel et al.
(2002)

Meteoritos como análogos

- La presencia y la composición de ciertos minerales se identifica con un análisis del espectro.
- No todos los minerales se pueden identificar a través de bandas.
- Los más importantes presentan absorciones de transiciones de metales ionizados en ciertos minerales máficos (base de Mg y Fe).
- Las olivinas y piroxenos son los materiales máficos más usuales en condritas y en la mayoría de aconditas.
- El centro, profundidad y ancho de estas bandas están controlados por la estructura y composición.

Meteoritos como análogos



Gaffey et al. (2002)

Meteoritos como análogos

Bell et al. (1989):

- Composición superficial afectada por procesos térmicos.
- El tipo depende de su posición en el cinturón.

