

Propriedades Físicas de Pequenos Corpos do Sistema Solar

Jorge M. Carvano

Observatório Nacional
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Escola de Inverno 2025

Outline

- 1 Introdução
- 2 Meteoritos
- 3 Análise composicional de pequenos corpos
- 4 Distribuição de taxonomias/composições no Cinturão Principal
- 5 Distribuição de composições além do Cinturão Principal

Propriedades físicas

Tamanho, Forma

- Diametro equivalente
- Forma
- Massa

Estado Rotacional

- Período de rotação
- Direção do polo

Estrutura Interna

- Densidade
- Macroporosidade

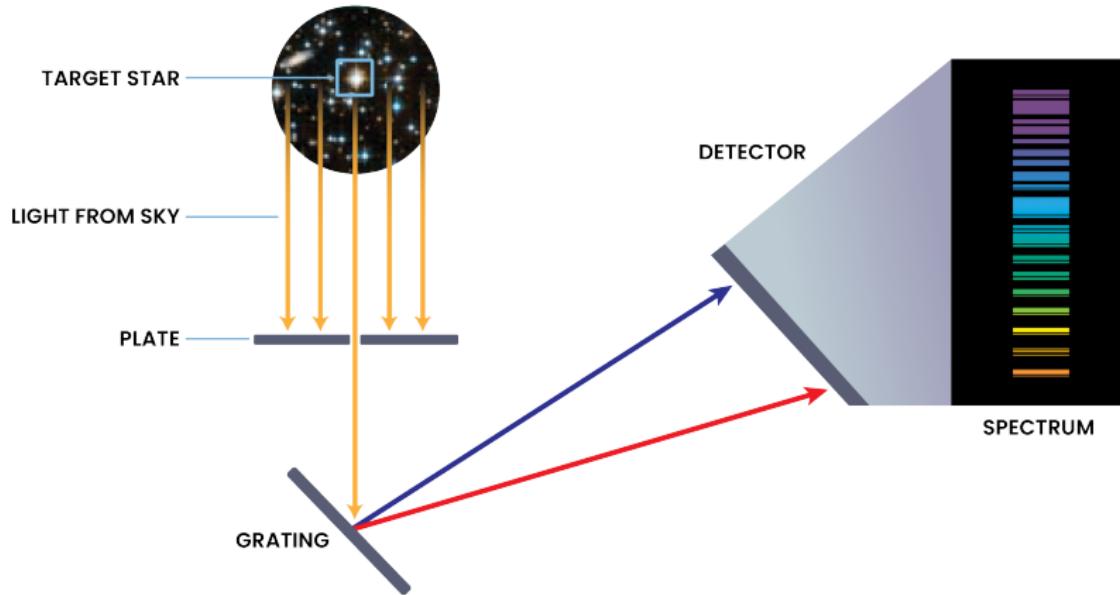
Composição

- Albedo
- Espectros

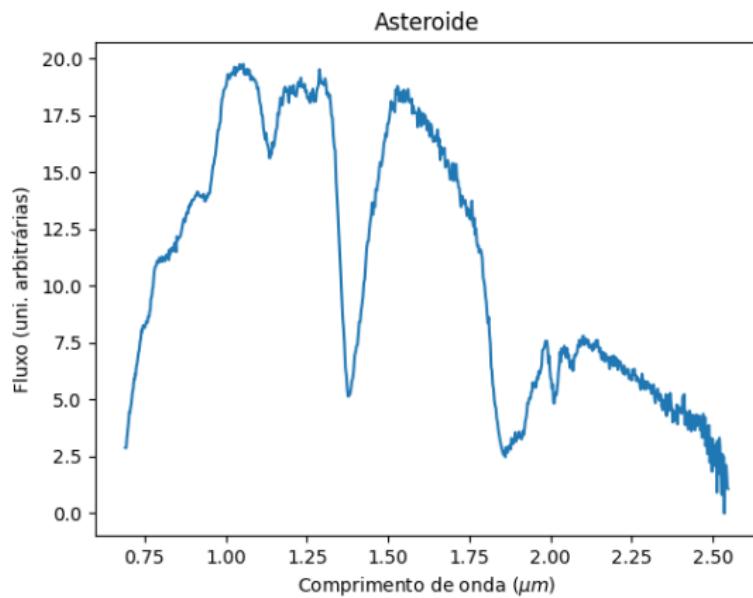
Observações

- Espectro-fotometria/Espectros de reflectância
 - Fração da luz refletida em função do comprimento de onda
 - Obtidos como razão entre espectros observados e espectros solares (ou diferença entre cores medidas e cores solares)
 - Medida relativa (normalizada em algum comprimento de onda)
- Albedo
 - Térmico, polarimétrico, ocultações
 - Medida absoluta da fração da luz em uma região do espectro
- Polarimetria

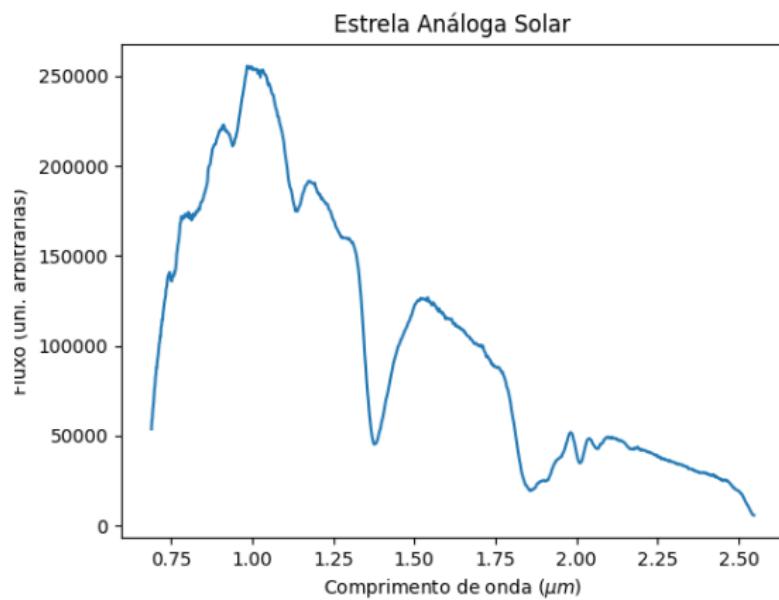
Espectroscopia



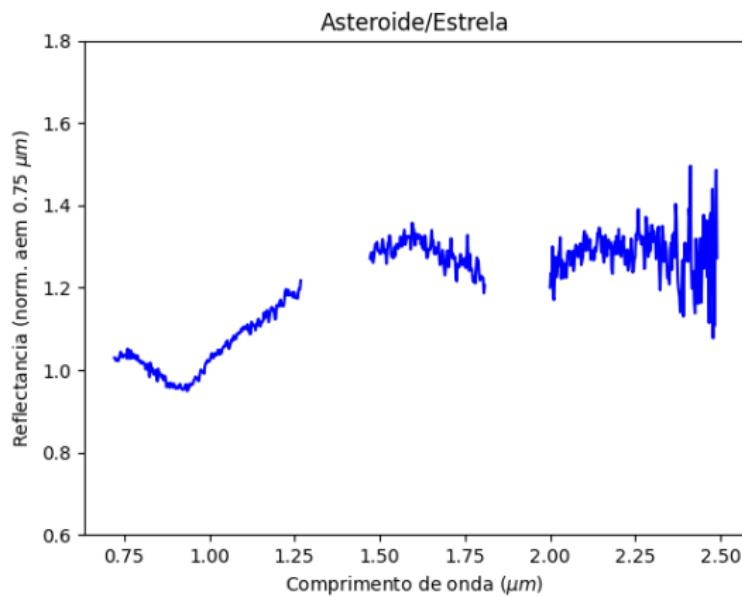
Espectroscopia



Espectroscopia



Espectroscopia



Métodos:

- Modelos
- Parametrizações empíricas
- Comparações com:
 - Minerais
 - Gelos
 - Meteoritos

Meteoritos



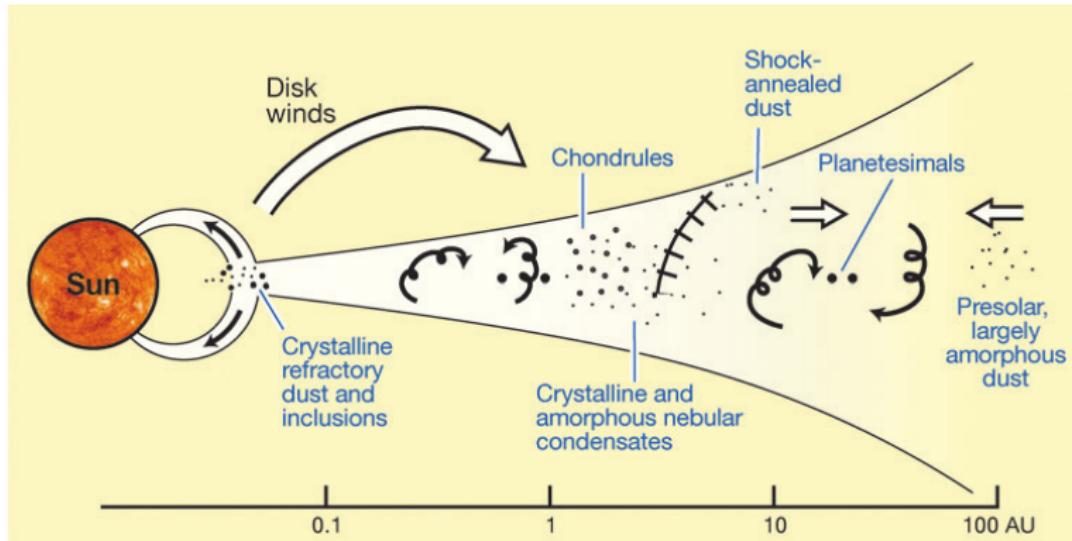
Meteoritos "Primitivos"

- Formados diretamente a partir da condensação e aglomeração de poeira no disco protoplanetário
- Não sofreram aquecimentos consideráveis
- Retém informação sobre condições e processos no disco
- Retém informação sobre processos sofridos pelo corpo
- **Condritos**

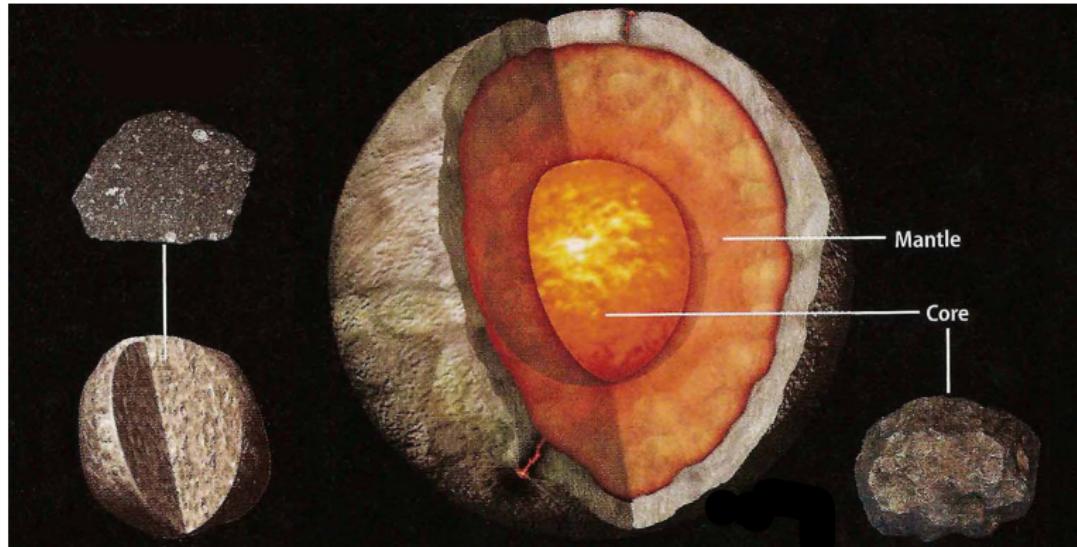
Meteoritos Diferenciados

- Formados a partir de derretimento total ou parcial de corpos precursores
- Segregação de fases segundo densidade dentro de corpos massivos
- Retêm informações sobre processos sofridos pelos corpos precursores
 - **Acondritos**
 - **Pallasitos**
 - **Ferrosos**

Meteoritos Primitivos



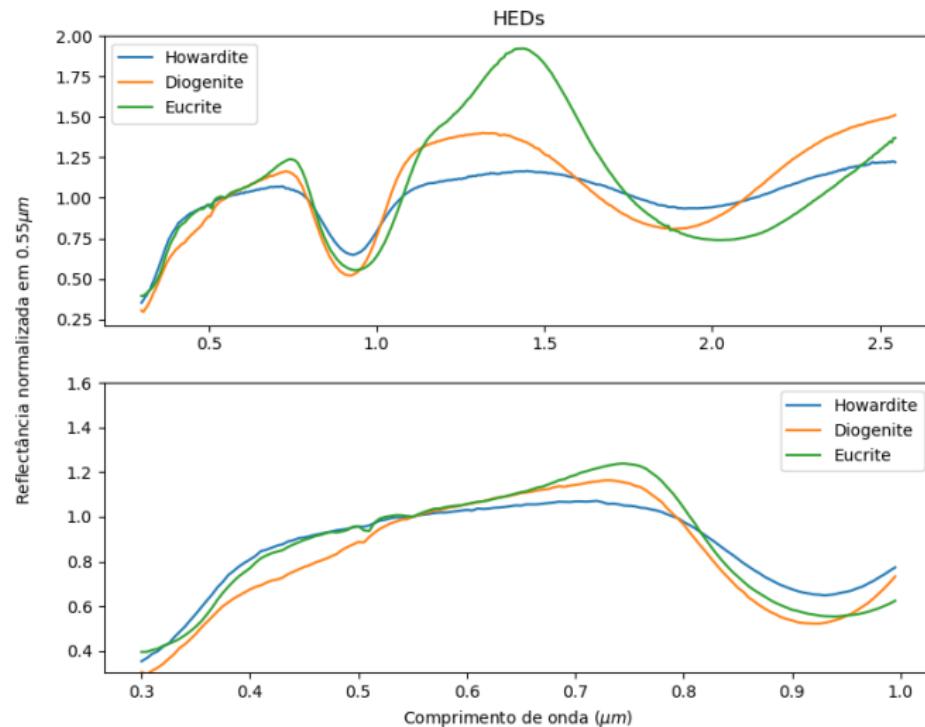
Meteoritos Diferenciados



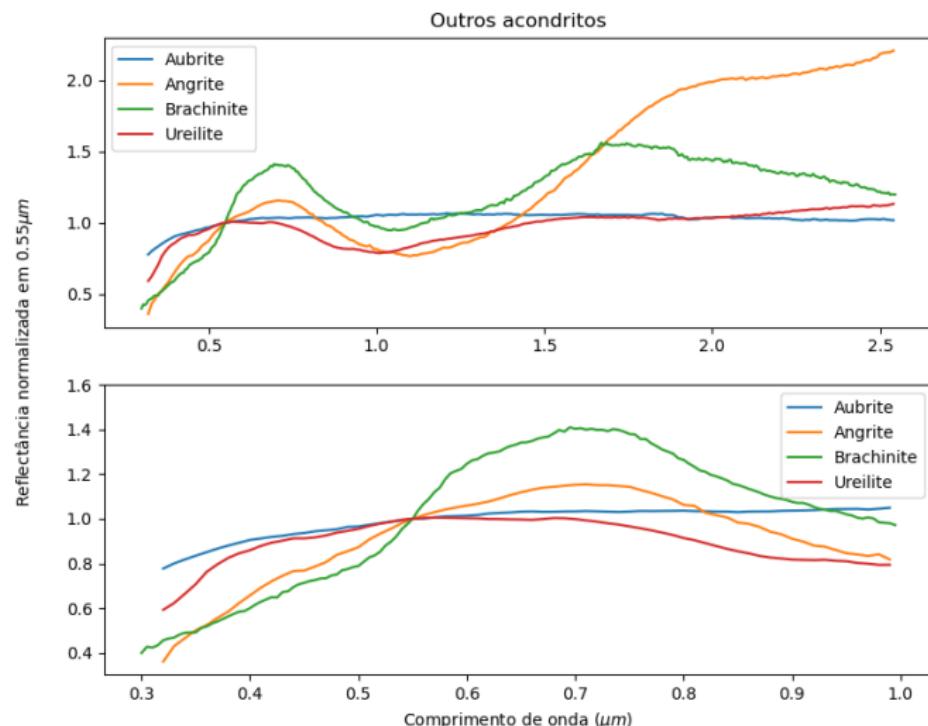
Espectros de laboratório

- Amostra moída e separada segundo intervalos de tamanho de grãos
- Geometria da medida pode variar segundo objetivo do experimento
- Medidas feitas (em geral) em condições normais de temperatura, pressão e umidade
- Forma e intensidade do espectro variam com geometria e textura da amostra

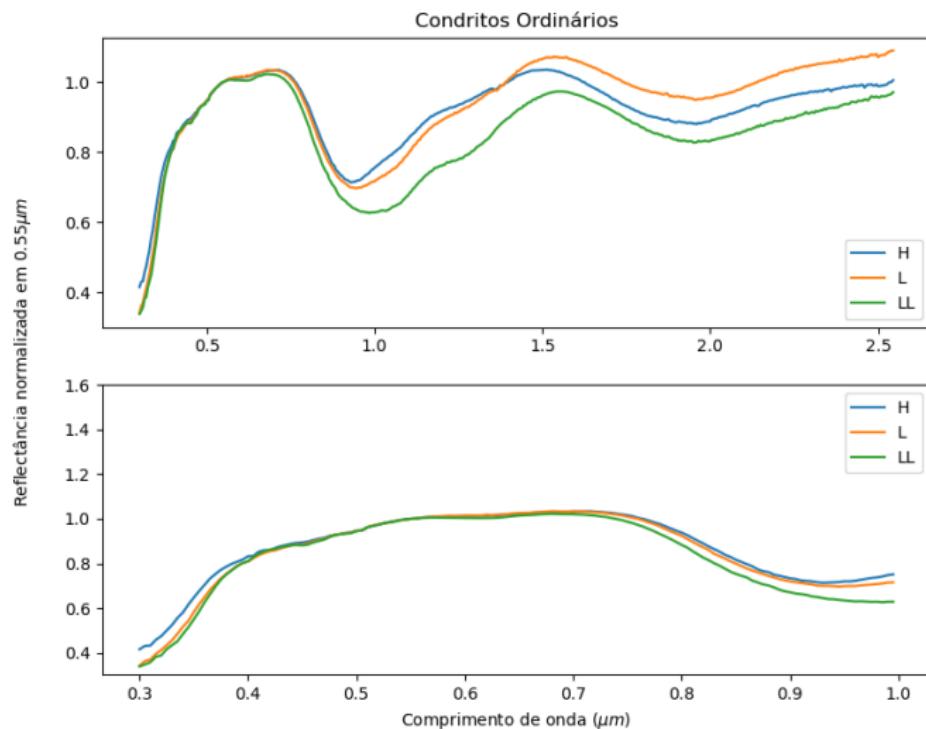
Espectros Normalizados - Acondritos HEDs



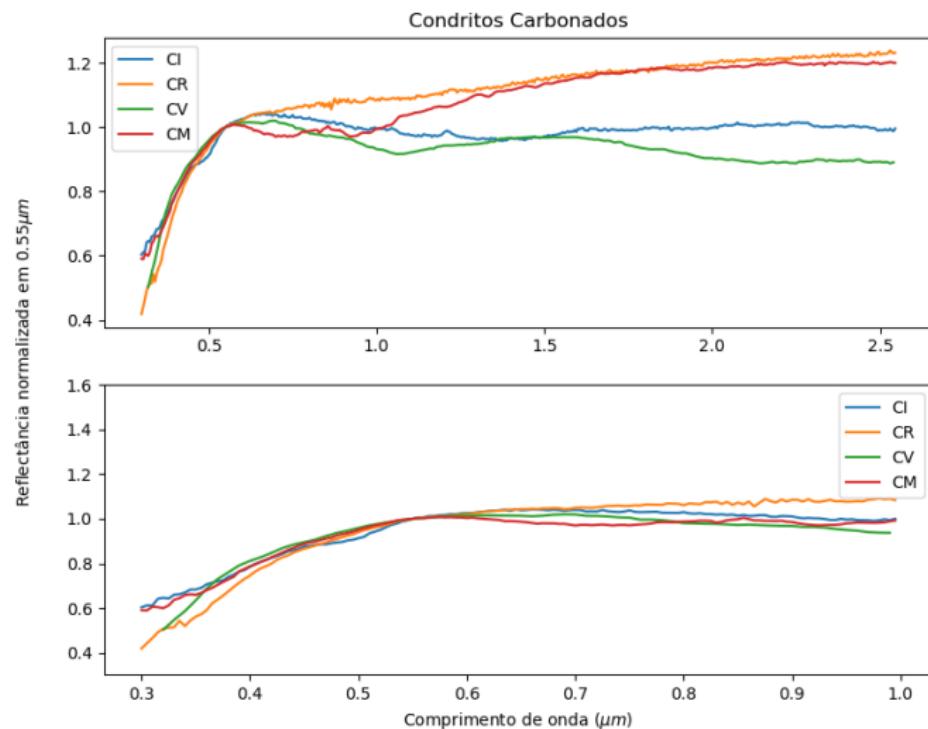
Espectros Normalizados - Outros Acondritos



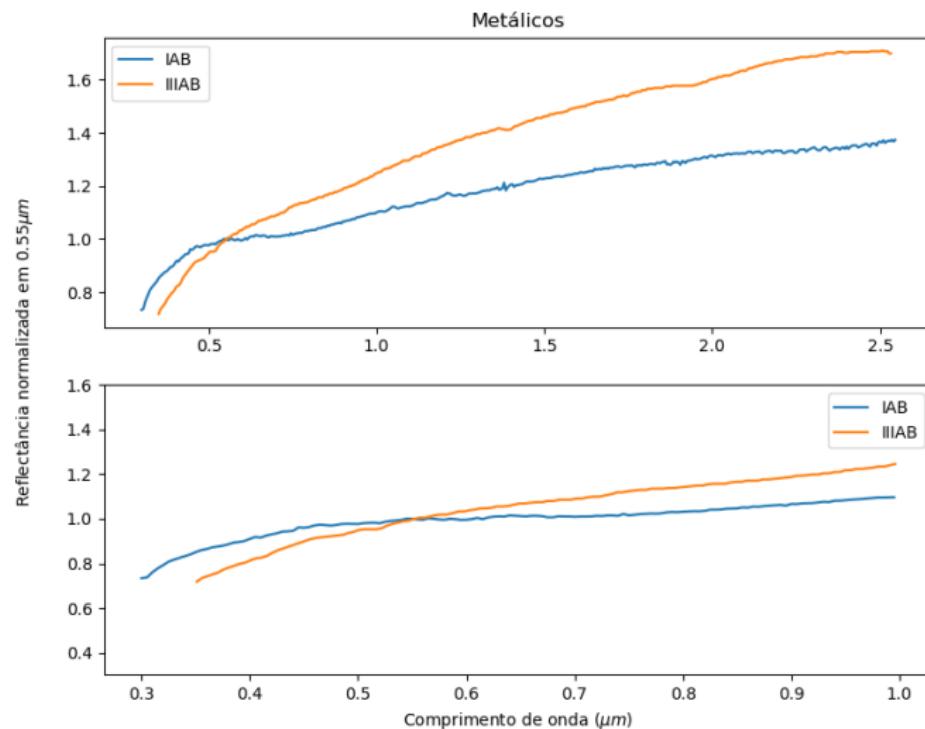
Espectros Normalizados - Condritos Ordinários



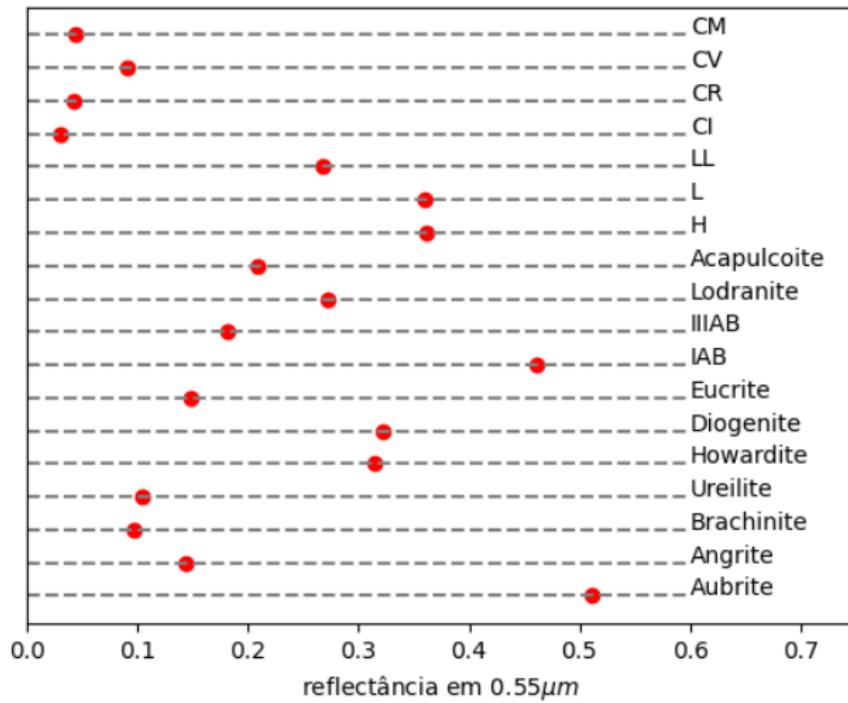
Espectros Normalizados - Condritos Carbonados



Espectros Normalizados - Meteoritos Metálicos

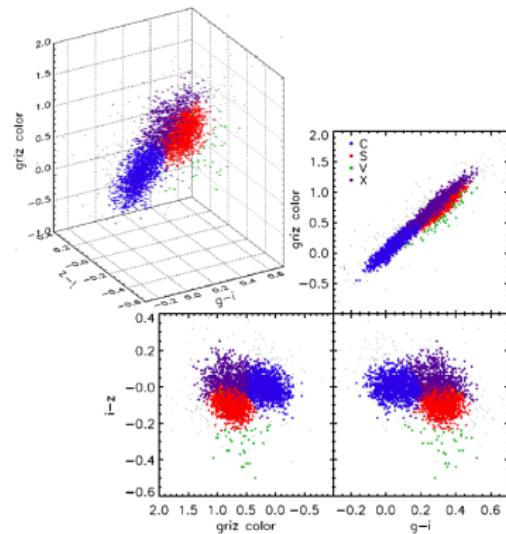


Reflectâncias absolutas



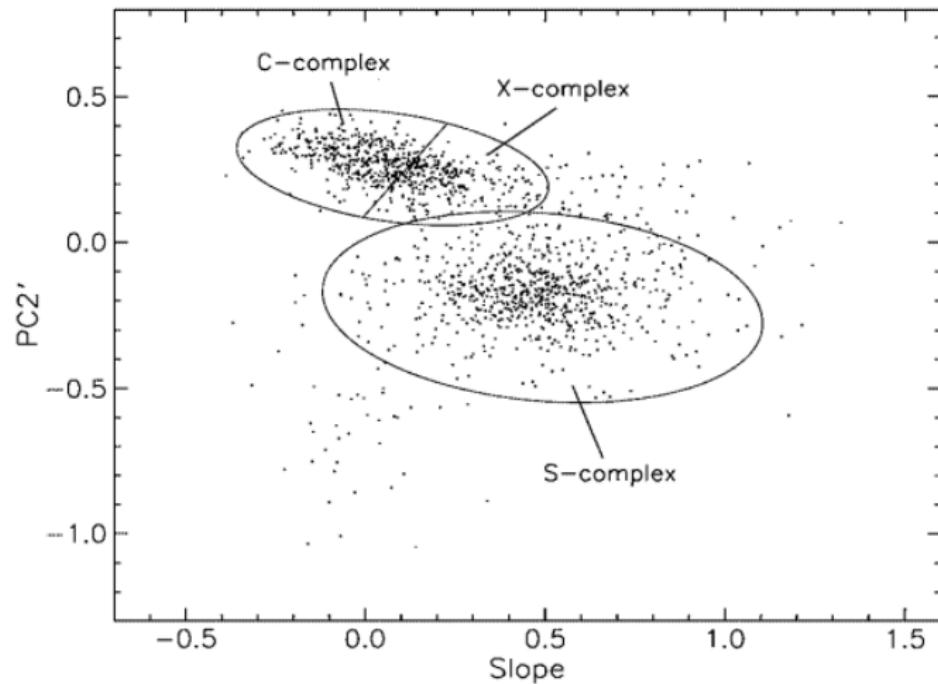
Taxonomia de Asteroides

- Segregação de asteroides em grupos a partir de propriedades observacionais
- Inferência de composição
- Distribuição orbital

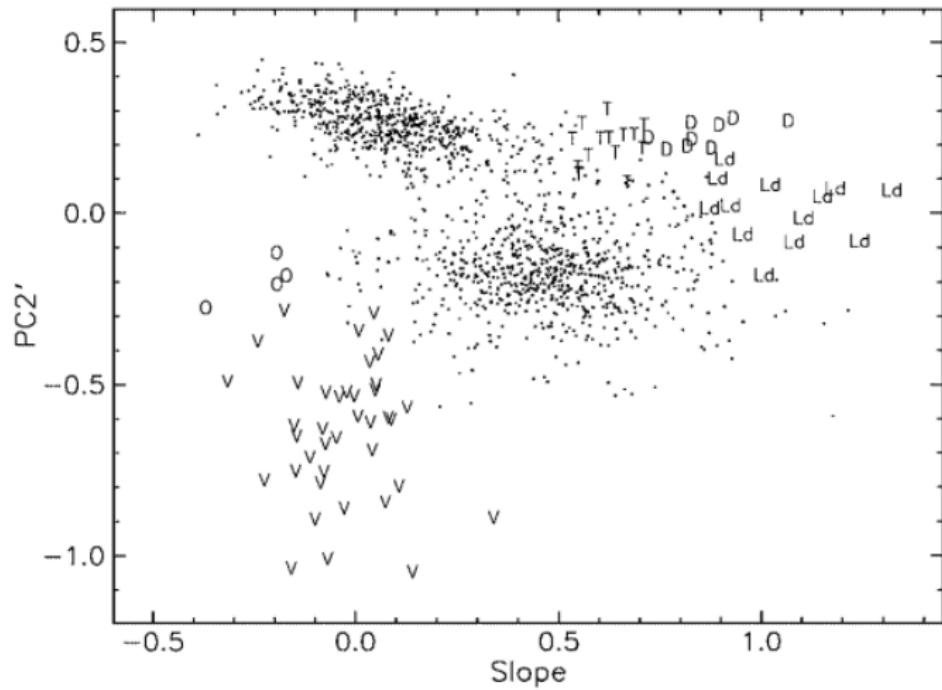


- Taxonomia de Bus (1999):
 - Campanhas SMASS e SMASS2:
 - Espectros de baixa resolução entre 0.43 e $0.9 \mu m$ para ~ 350 e ~ 1190 asteroides
 - Espectros amostrados em 48 pontos
 - Separação inicial usando componentes principais (após remoção da inclinação espectral) para definir maiores agrupamentos (complexos) e classes individuais
 - Complexos subdivididos a partir de componentes principais e características dos espectros

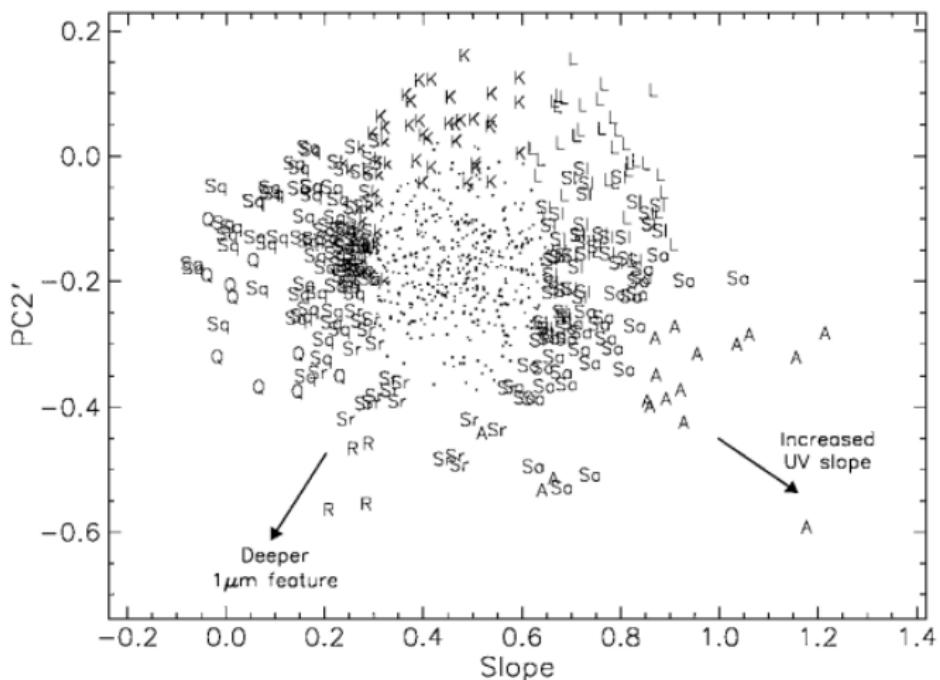
Taxonomia de Bus



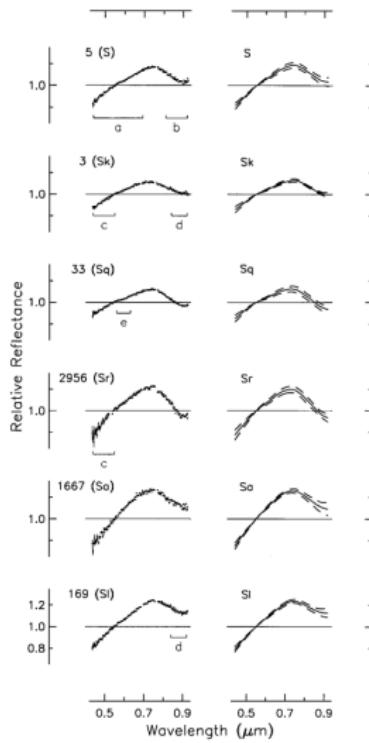
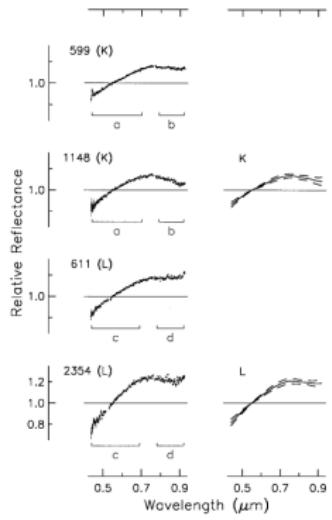
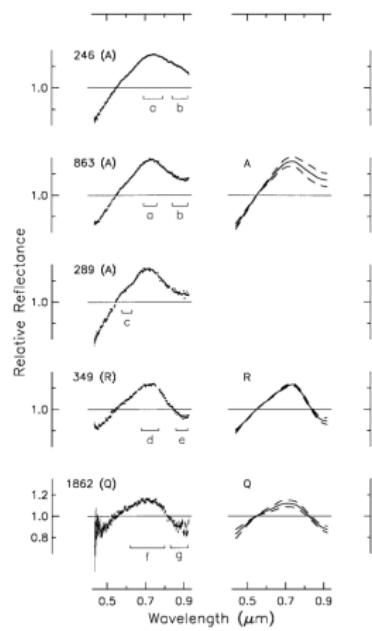
Taxonomia de Bus



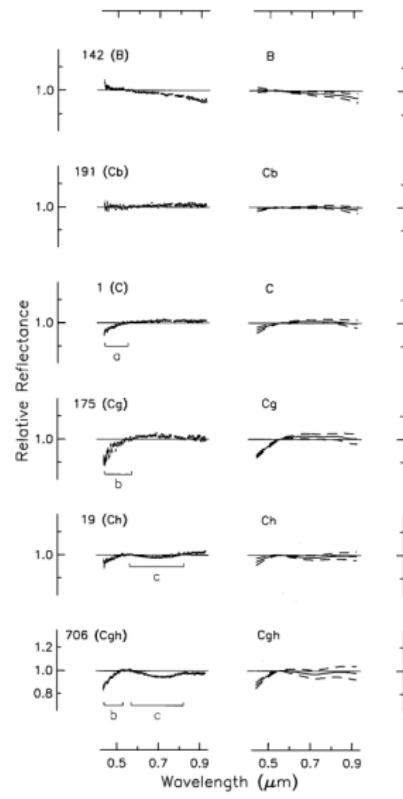
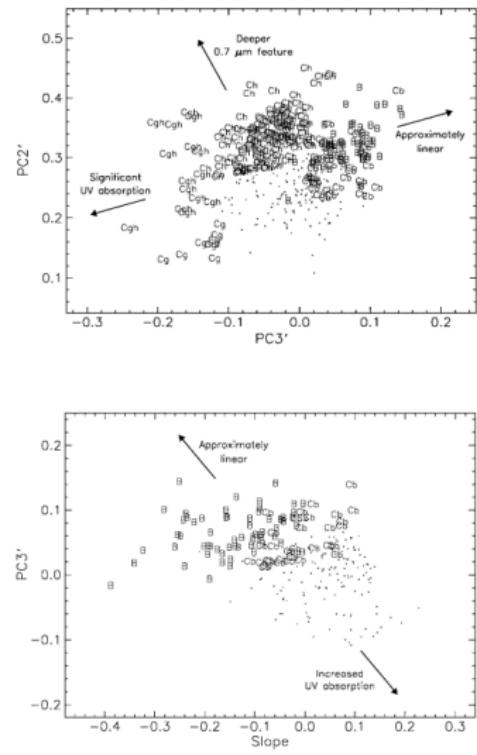
Taxonomia de Bus - Complexo S



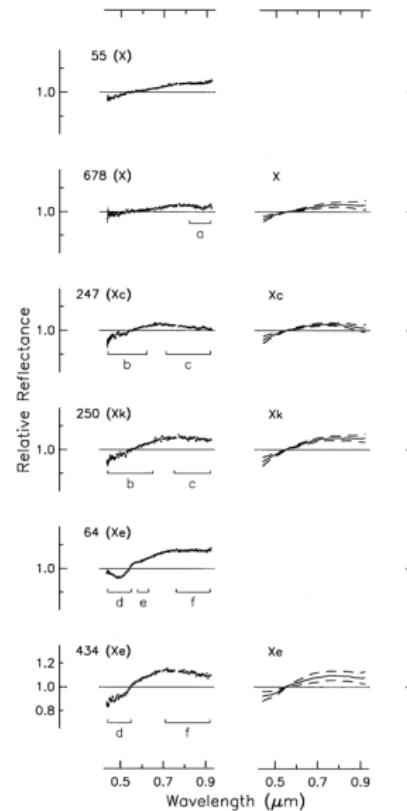
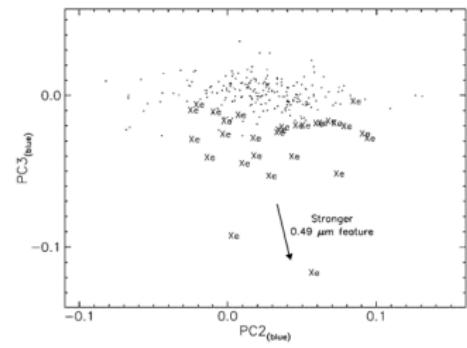
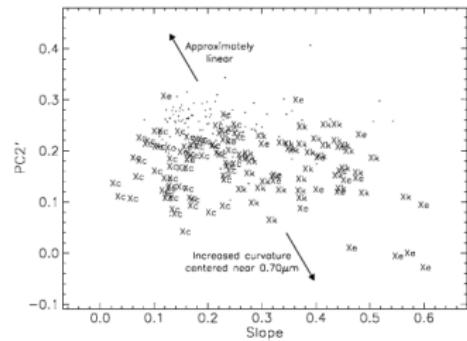
Taxonomia de Bus



Taxonomia de Bus - Complexo C



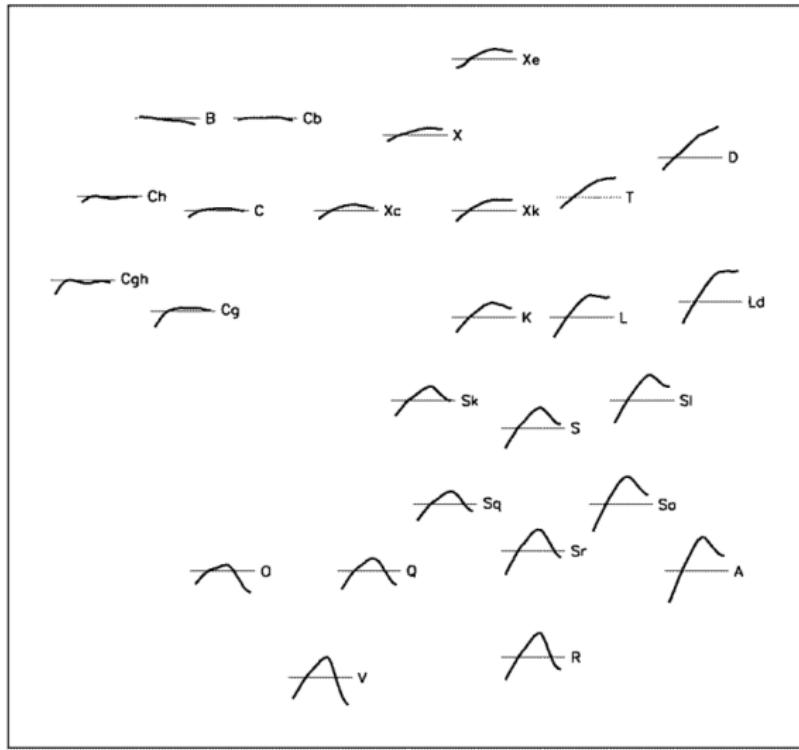
Taxonomia de Bus - Complexo X



Taxonomia de Bus - 26 classes

Complexo S		Complexo C		Complexo X		Outras classes	
A	S	B		X		V	
Q	Sa	C		Xc		O	
L	Sq	Cb		Xk		T	
K	SI	Cg		Xe		D	
R	Sk	Ch				Ld	
	Sr	Cgh					

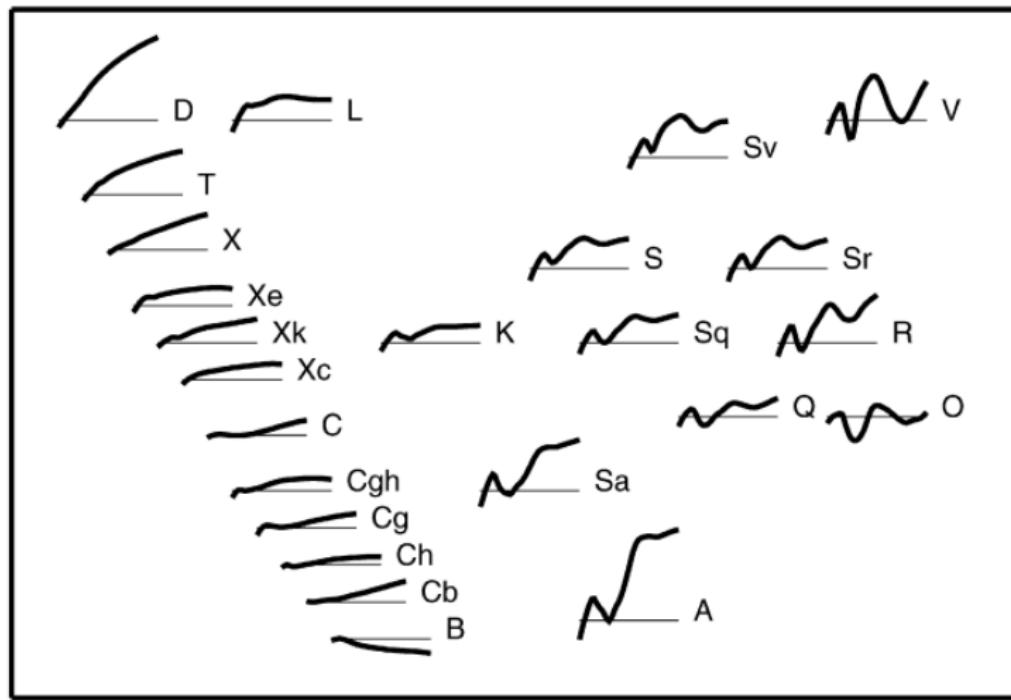
Taxonomia de Bus



Taxonomia de DeMeo-Bus (2009)

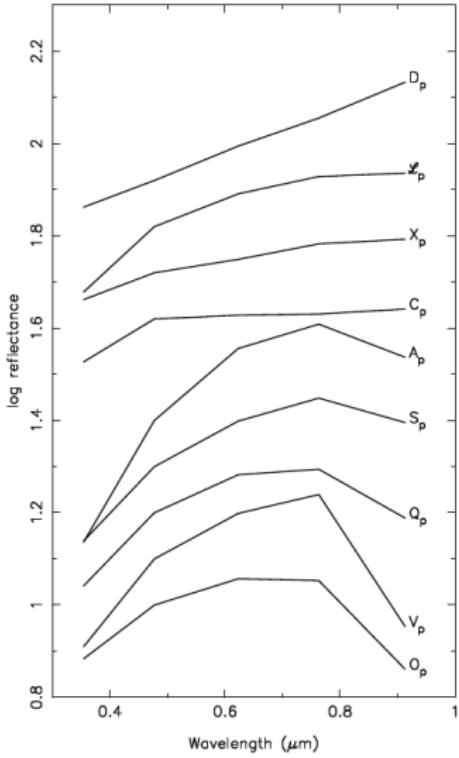
- Extensão da taxomia de Bus para espectros na faixa $0.45\text{--}2.45\ \mu\text{m}$
- baseada em 371 espectros
- Classes em geral permanecem consistentes no NIR
- Total de 24 classes:
 - Classes Ld,Sk,Sl excluídas
 - Nova classe: Sv

Taxonomia de Bus-DeMeo

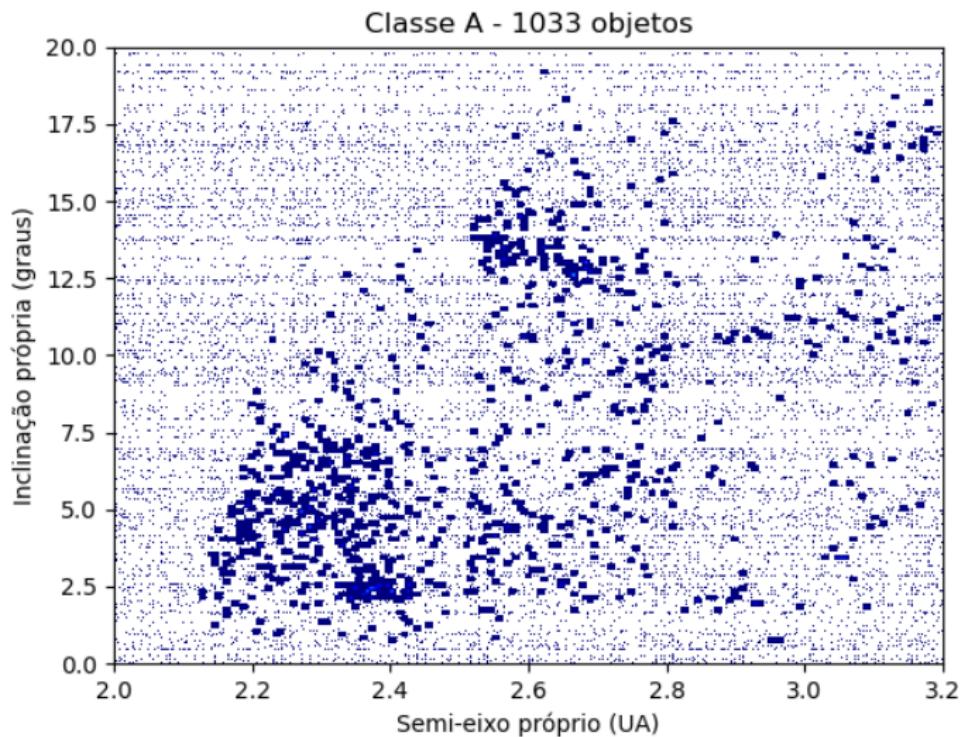


Distribuição de taxonomias no Cinturão Principal

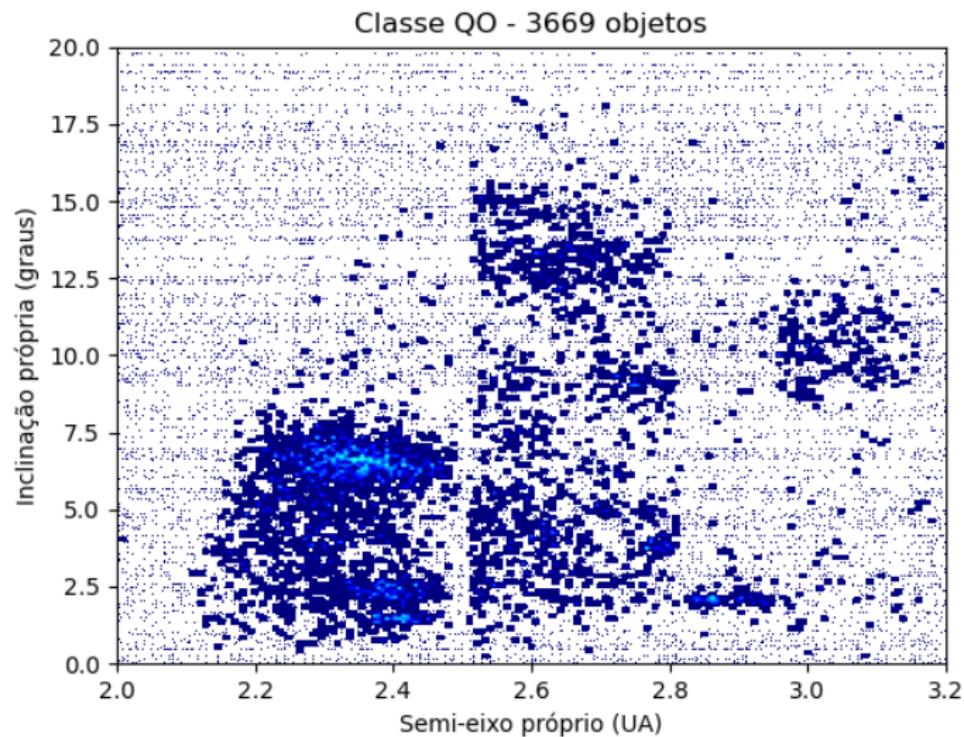
- Relativamente poucos (<5000) asteroides observados com espectroscopia
- Campanha fotométrica SDSS
 - 5 filtros entre 0.3 e 1.0 μm
 - >500.000 observações de asteroides



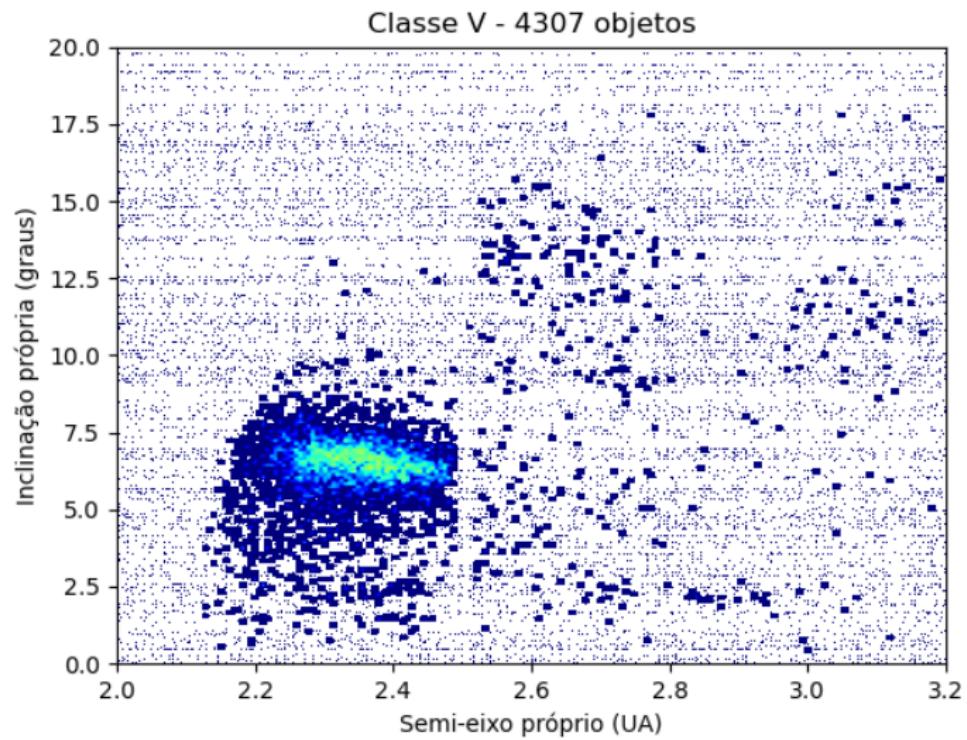
Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



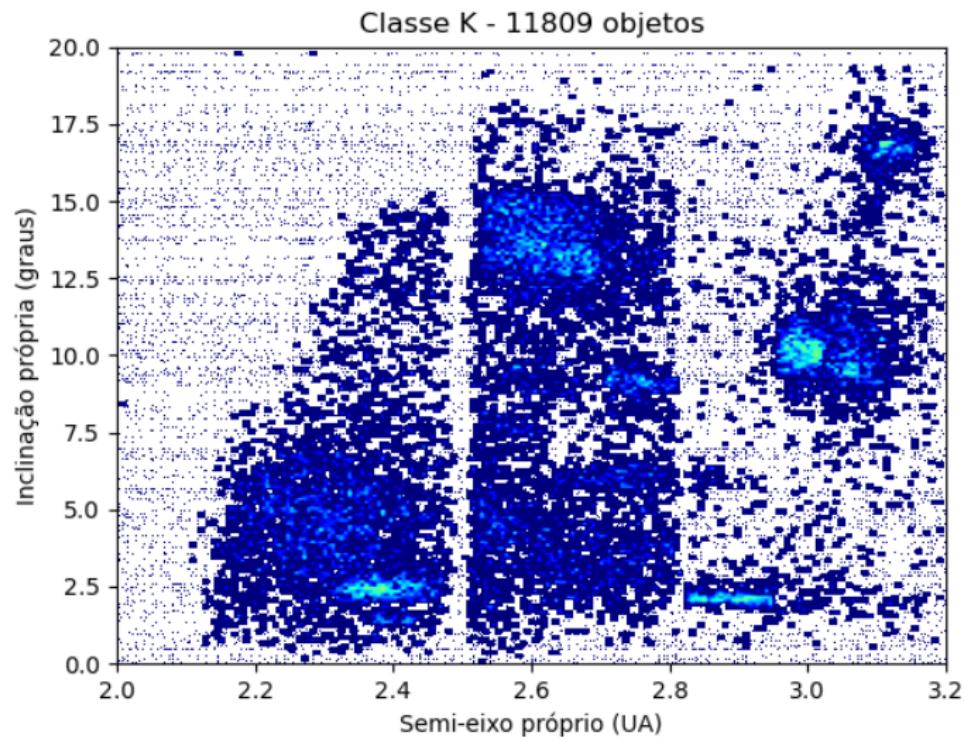
Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



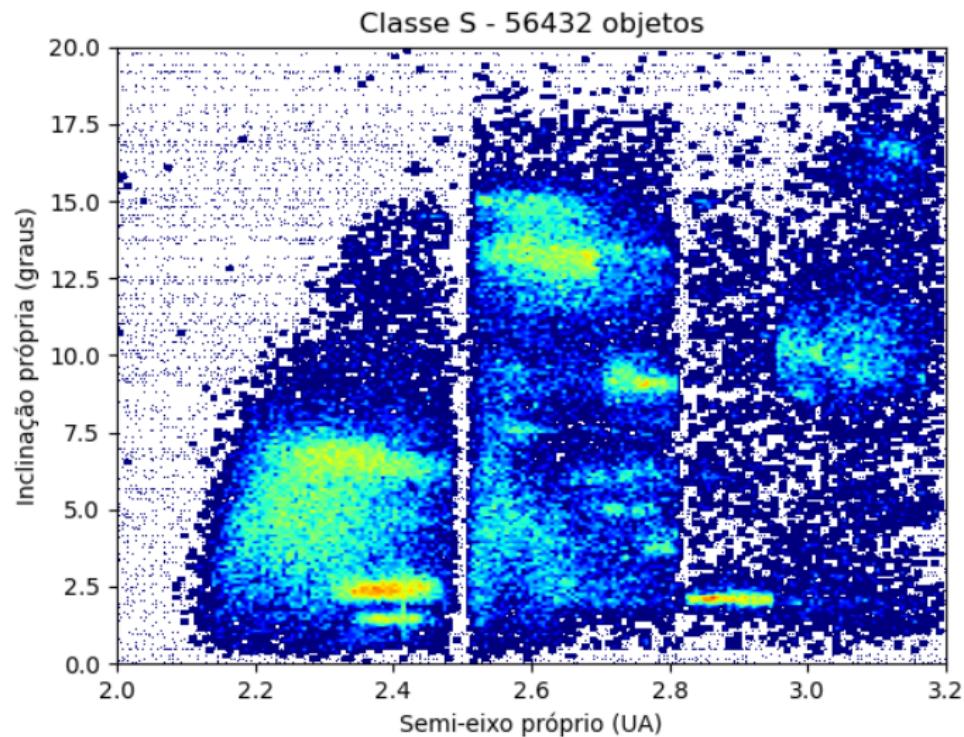
Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



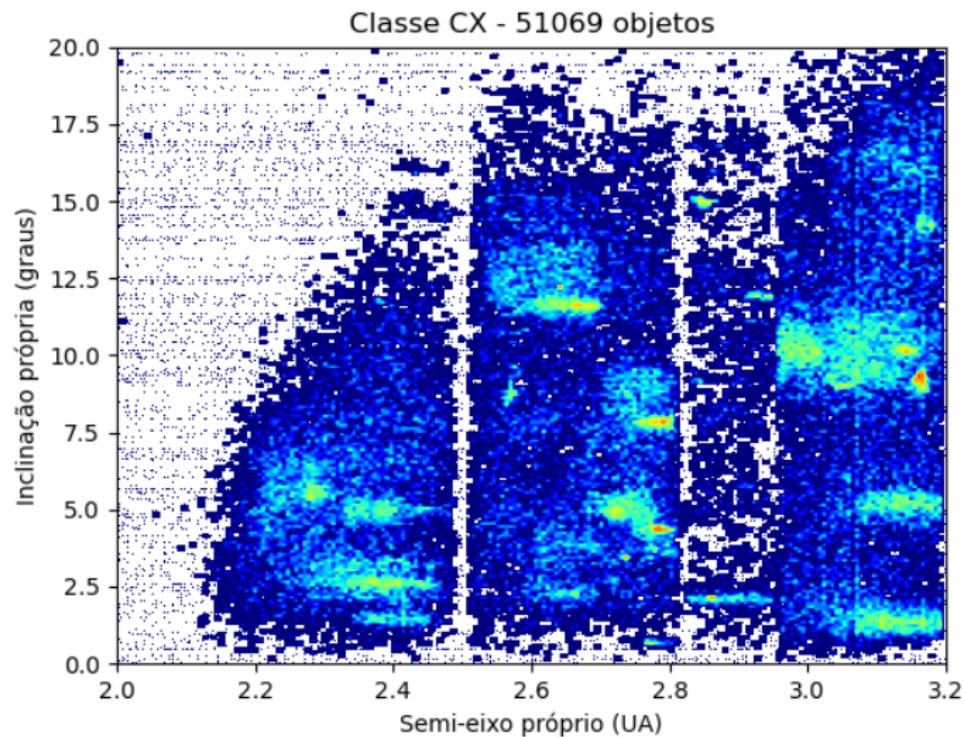
Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



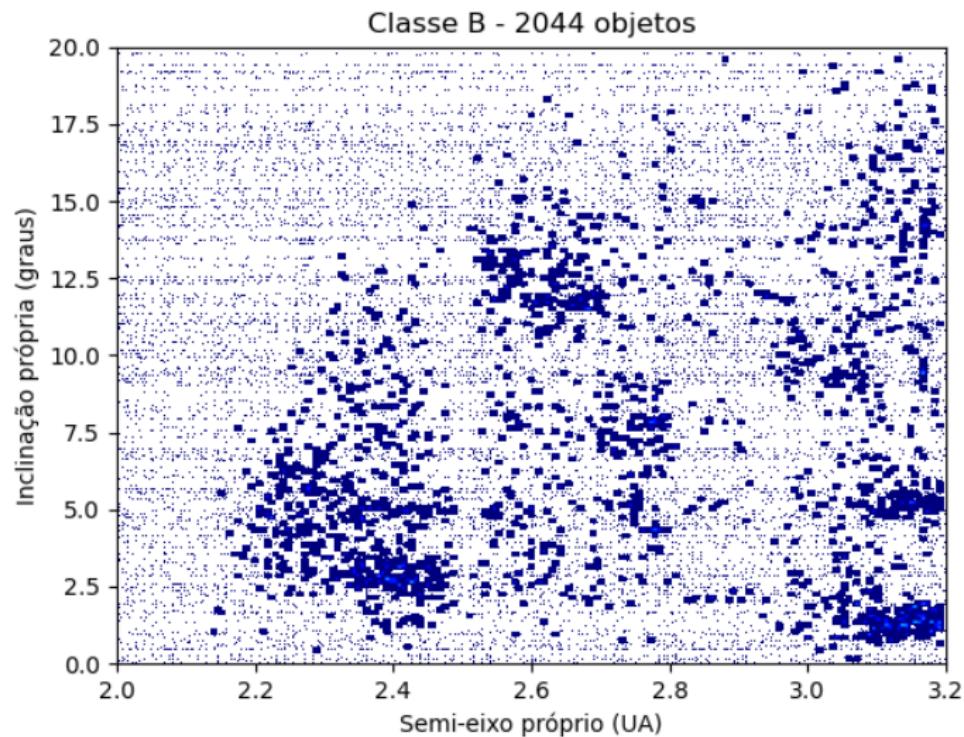
Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



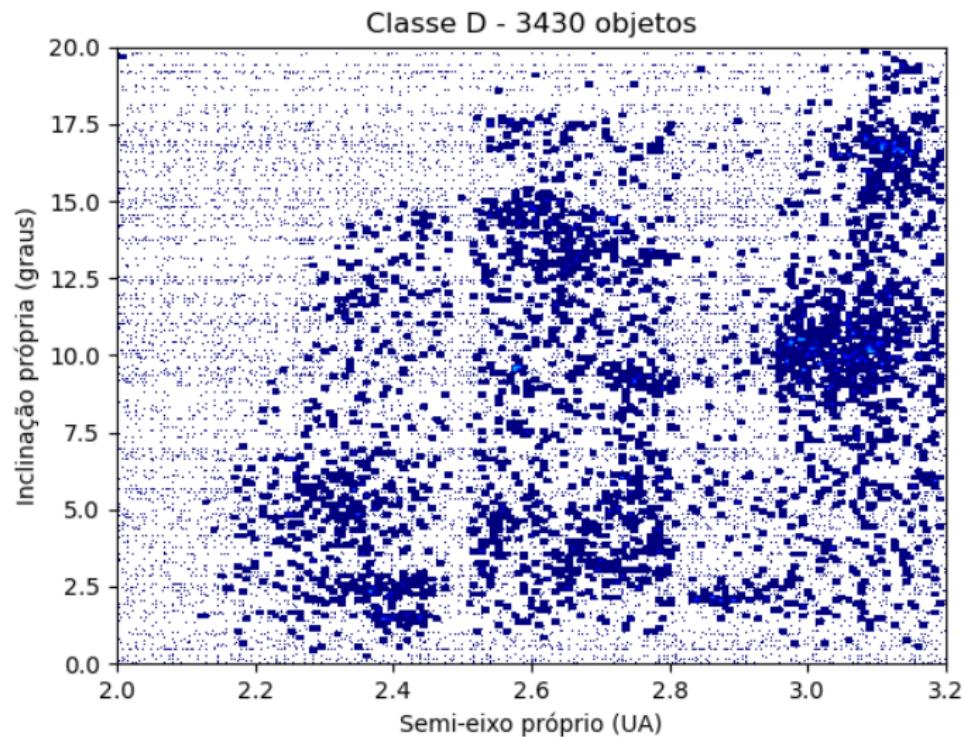
Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



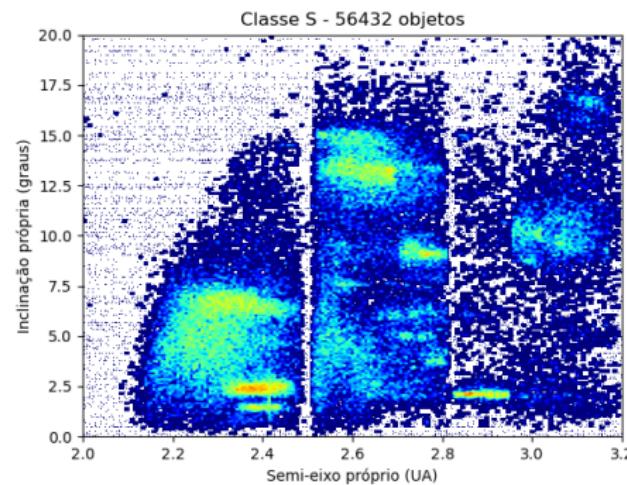
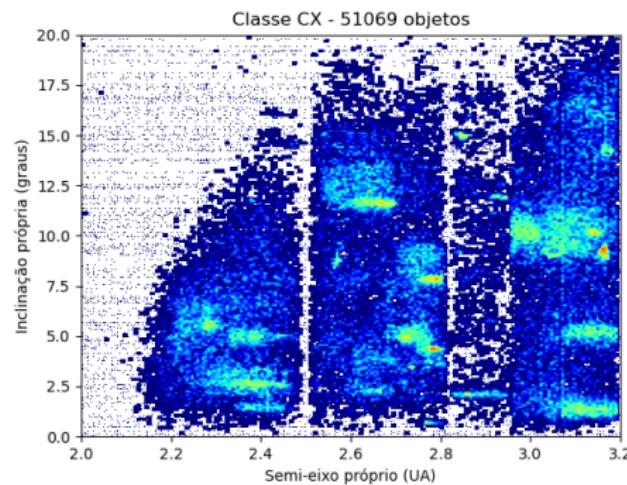
Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



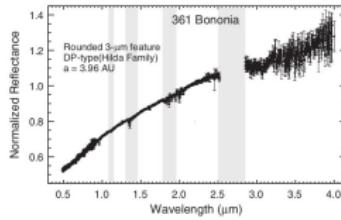
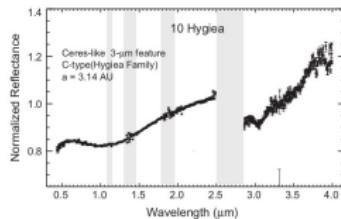
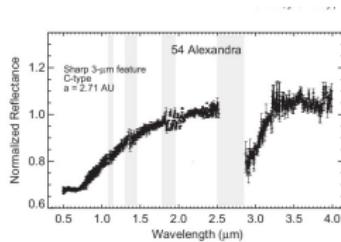
Distribuição - Ricos e Pobres em Voláteis



Bandas de filossilicatos/hidratação na parte externa do CP

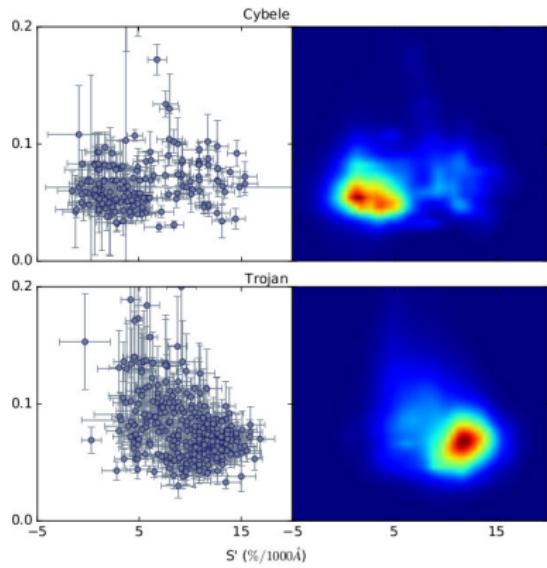
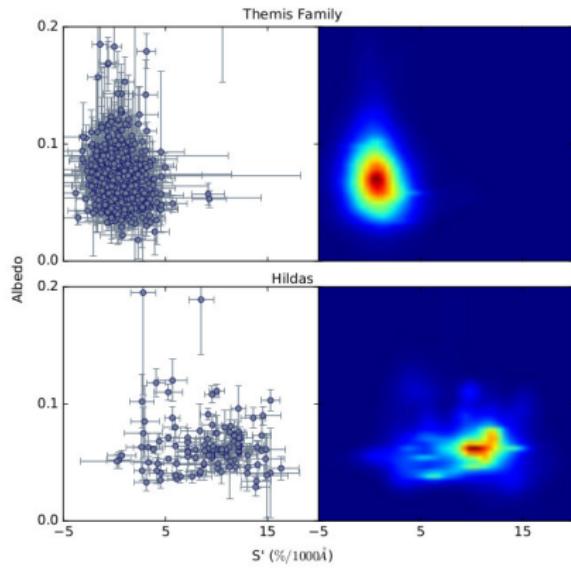
Takir & Emery. 2012

- Bandas em $3\mu m$ em asteroides tipo C/P/D na parte externa do Cinturão principal



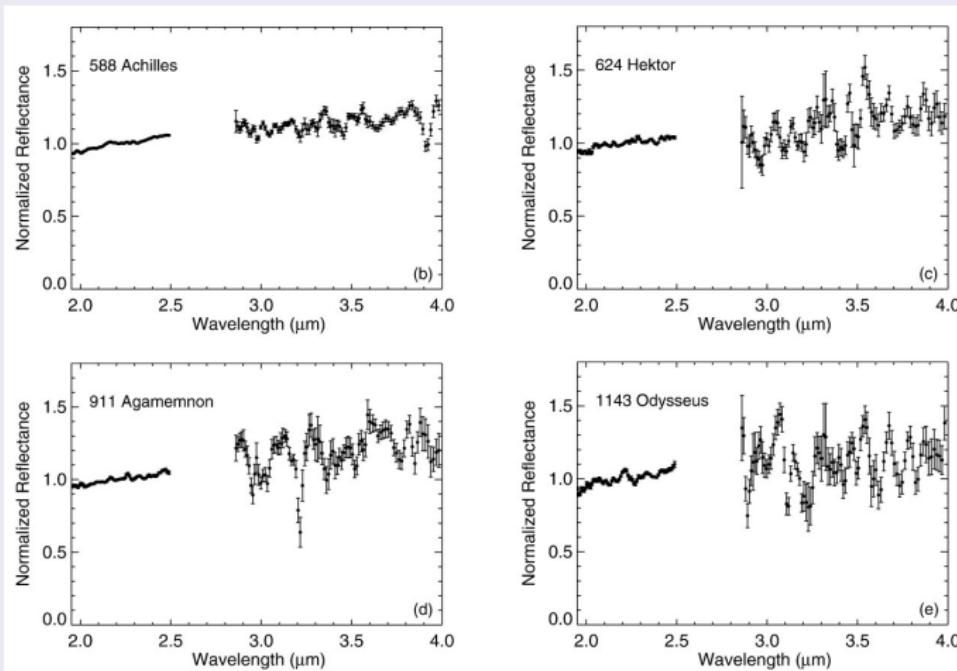
Distribuição até os Troianos

- Predomínio de classes X/D na parte externa
- Sem bandas no visível
- S' : inclinação espectral



Ausência de bandas de filosilicatos em troianos

Emery & Brown 2003



Distribuição de Composições de Pequenos corpos do Sistema Solar

- Objetos originalmente pobres em voláteis concentrados na parte interna do Cinturão Principal (mas com algum espalhamento)
- Objetos originalmente ricos em voláteis espalhados por todo o cinturão, mas com maior concentração na parte externa
- Objetos originalmente ricos em voláteis são a regra em toda a parte externa do Sistema Solar
- Bandas de alteração aquosa em silicatos detectados no Cinturão Principal mas não em populações mais distantes do Sol

Distribuição de Composições de Pequenos corpos do Sistema Solar

- Evidência de gradientes de composição, mas também de misturas entre populações com composições originalmente diferentes'
- Não há evidências claras de quebras de corpos completamente diferenciados