

# Propriedades Físicas de Pequenos Corpos do Sistema Solar

Jorge M. Carvano

Observatório Nacional  
Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

Escola de Inverno 2025

- 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

## Tamanho, Forma

- Diametro equivalente
- Forma
- Massa

## Estado Rotacional

- Período de rotação
- Direção do polo

## Estrutura Interna

- Densidade
- Macroporosidade

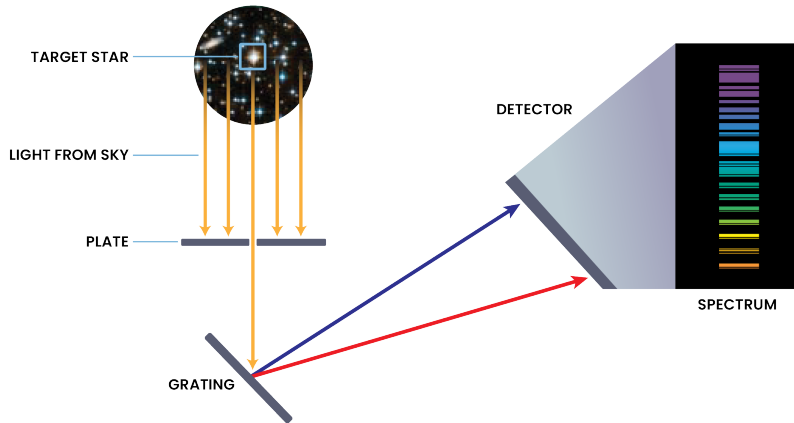
## Composição

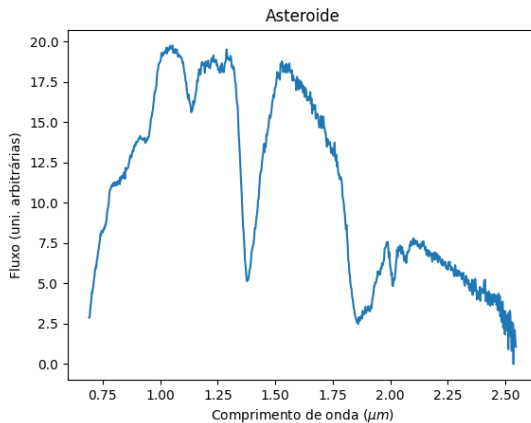
- Albedo
- Espectros

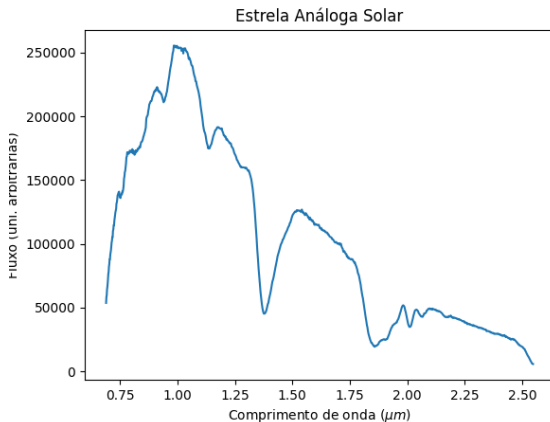
## Observações

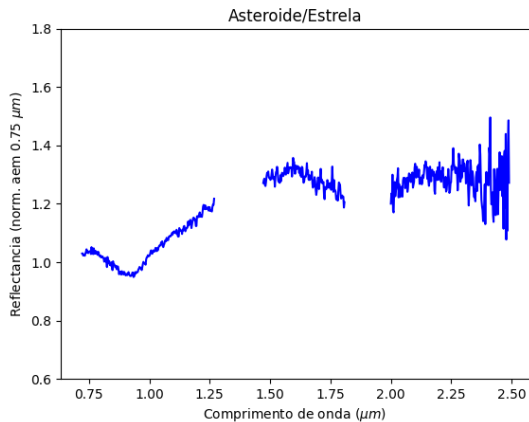
- Espectro-fotometria/Espectros de reflectância
  - Fração da luz refletida em função do comprimento de onda
  - Obtidos como razão entre espectros observados e espectros solares (ou diferença entre cores medidas e cores solares)
  - Medida relativa (normalizada em algum comprimento de onda)
- Albedo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

# Espectroscopia









## Métodos:

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

# Meteoritos



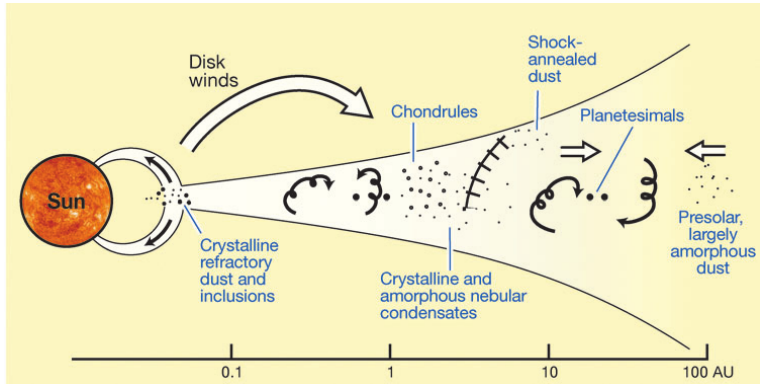
## Meteoritos "Primitivos"

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

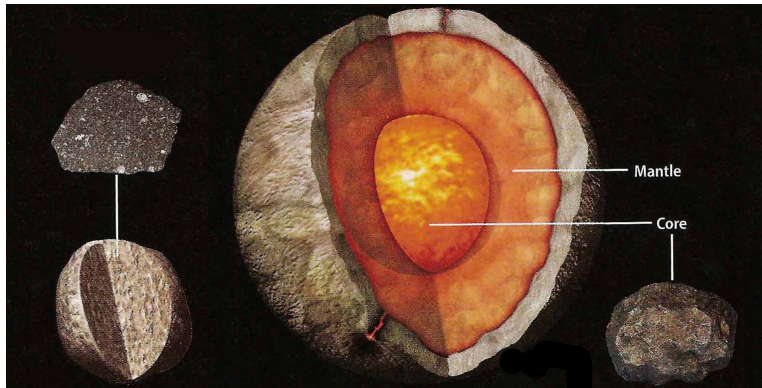
## Meteoritos Diferenciados

- 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



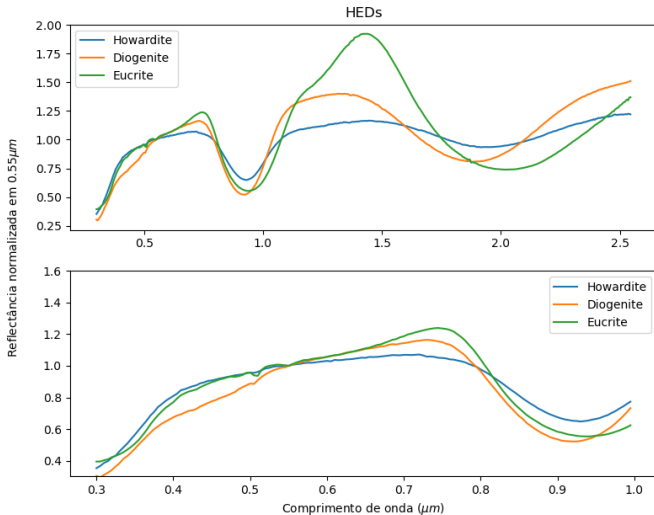
# Meteoritos Diferenciados



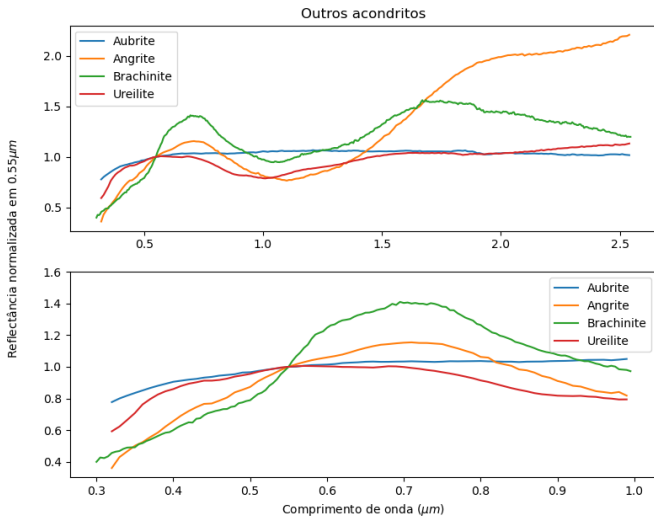
## Espectros de laboratório

- 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

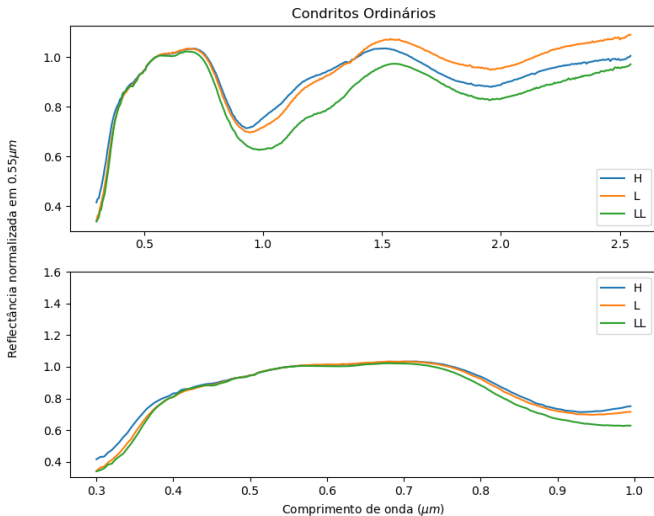
# Espectros Normalizados - Acondritos HEDs



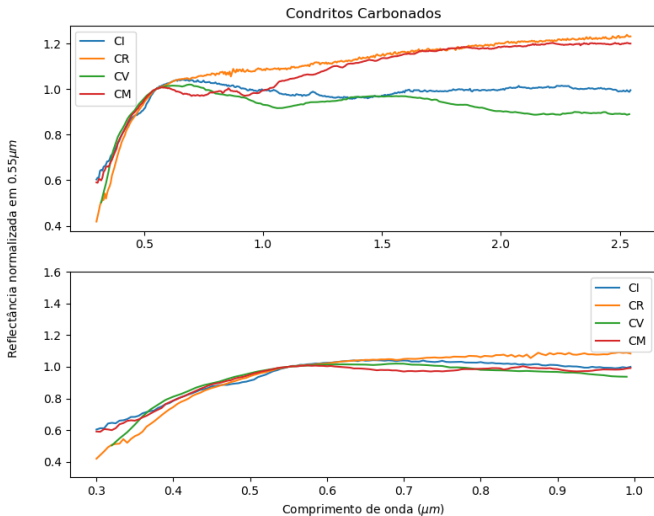
# Espectros Normalizados - Outros Acondritos



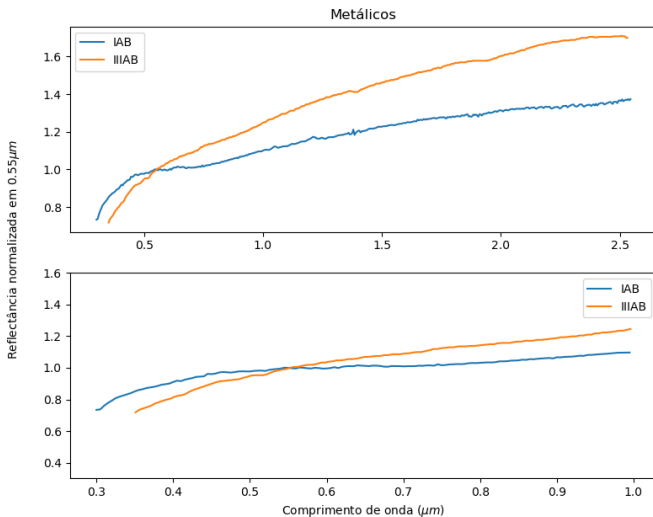
# Espectros Normalizados - Condritos Ordinários



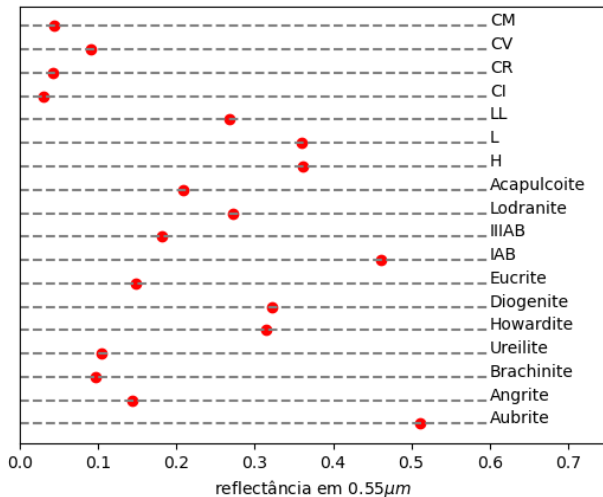
# Espectros Normalizados - Condritos Carbonados



# Espectros Normalizados - Meteoritos Metálicos

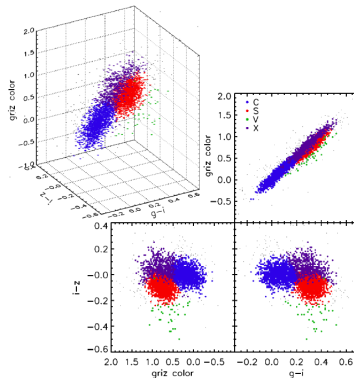


# Reflectâncias absolutas



# Taxonomia de Asteroides

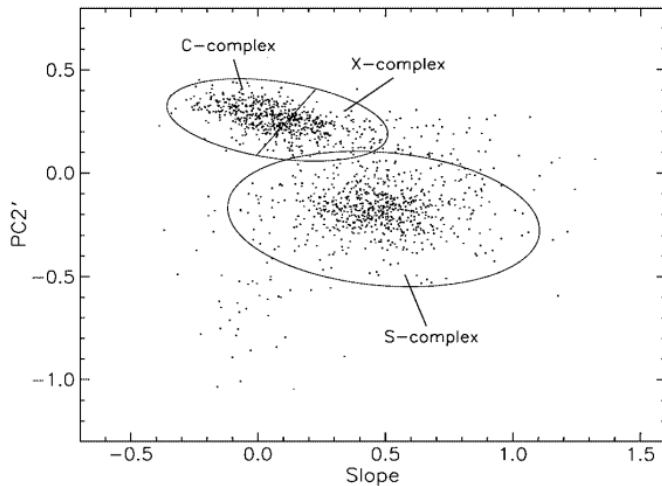
- Segregação de asteroides em grupos a partir de propriedades observacionais
- Inferência de composição
- Distribuição orbital



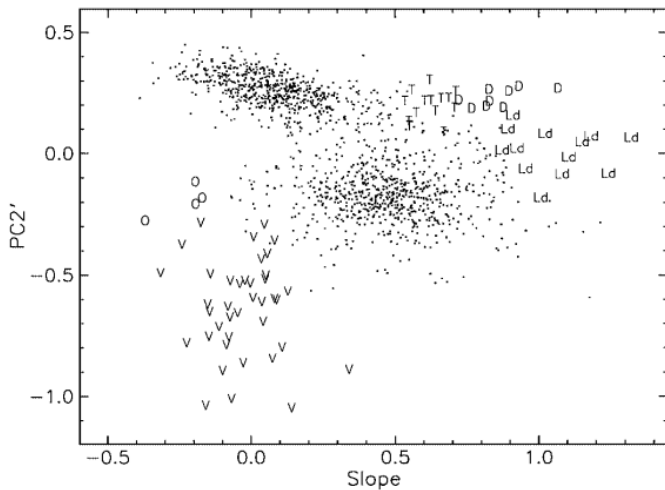
# Taxonomias baseadas em espectros

- Taxonomia de Bus (1999):
  - Campanhas SMASS e SMASS2:
    - Espectros de baixa resolução entre 0.43 e 0.9  $\mu m$  para  $\sim 350$  e  $\sim 1190$  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

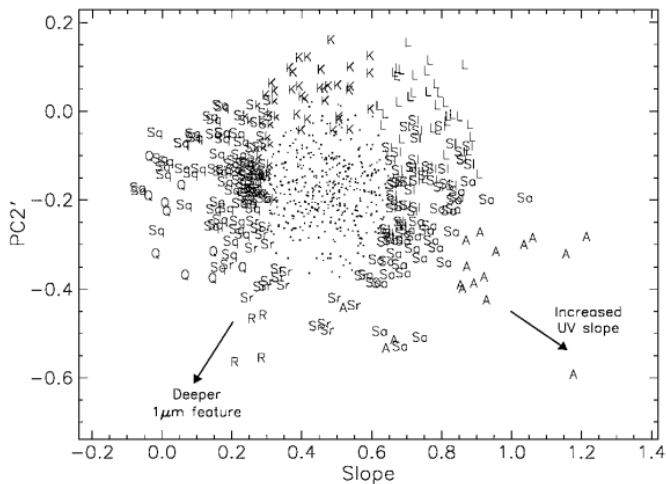
# Taxonomia de Bus



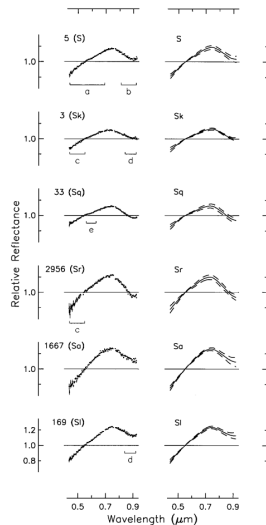
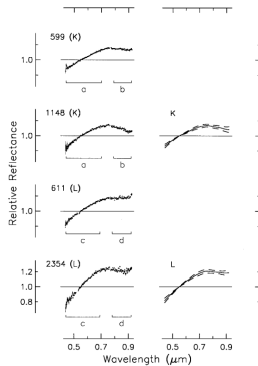
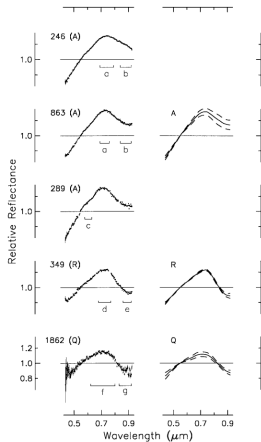
# Taxonomia de Bus



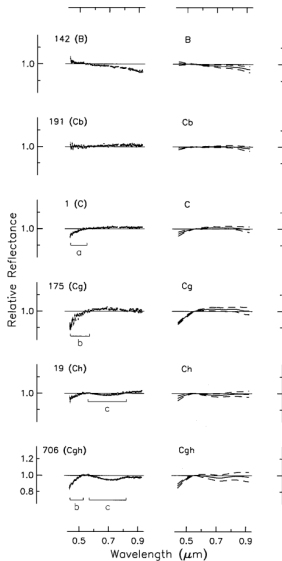
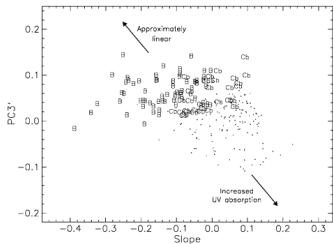
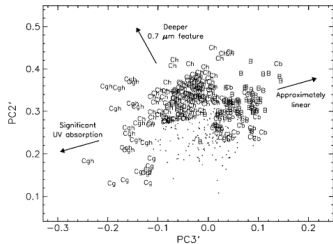
# Taxonomia de Bus - Complexo S



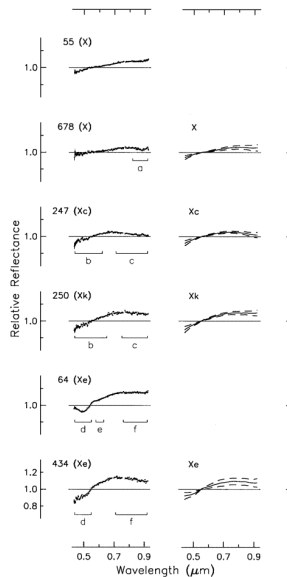
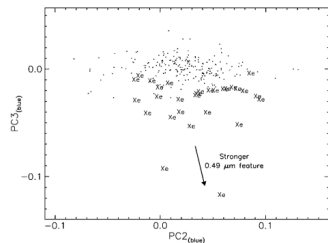
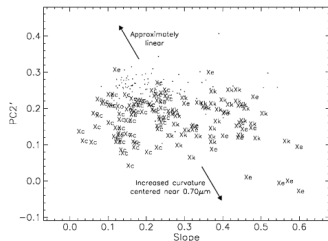
# Taxonomia de Bus



# Taxonomia de Bus - Complexo C



# Taxonomia de Bus - Complexo X



# Taxonomia de Bus - 26 classes

## Complexo S

A	S
Q	Sa
L	Sq
K	Sl
R	Sk
	Sr

## Complexo C

B  
C  
Cb  
Cg  
Ch  
Cgh

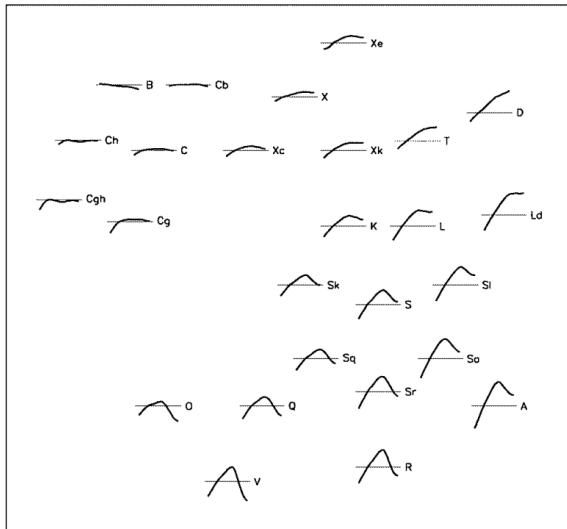
## Complexo X

X  
Xc  
Xk  
Xe

## Outras classes

V  
O  
T  
D  
Ld

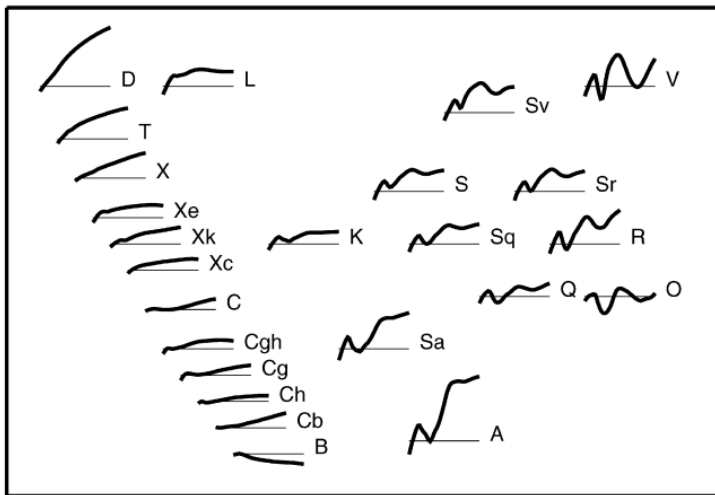
# Taxonomia de Bus



# Taxonomia de DeMeo-Bus (2009)

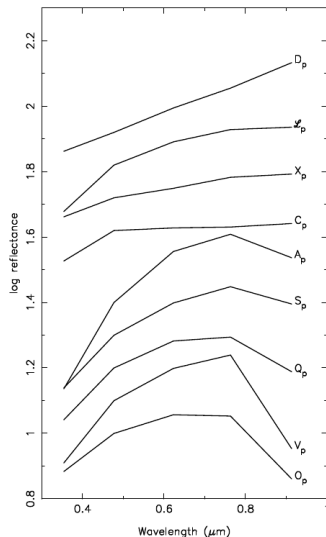
- Extensão da taxonomia de Bus para espectros na faixa 0.45-2.45  $\mu m$
- baseada em 371 espectros
- Classes em geral permanecem consistentes no NIR
- Total de 24 classes:
  - Classes Ld,Sk,Sl excluídas
  - Nova classe: Sv

# Taxonomia de Bus-DeMeo

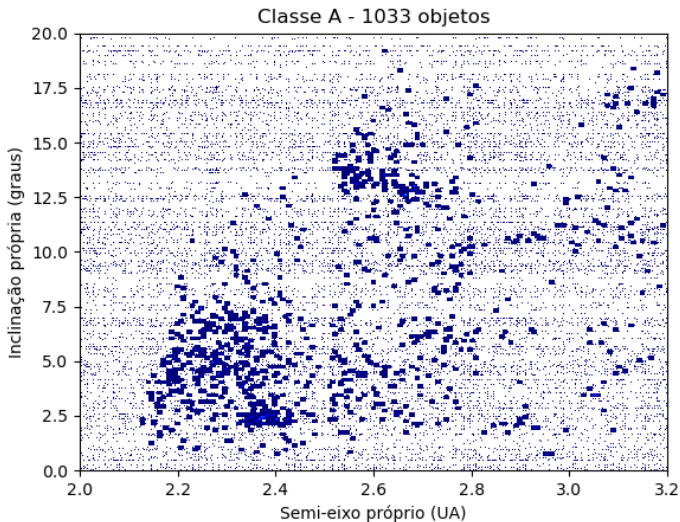


# Distribuição de taxonomias no Cinturão Principal

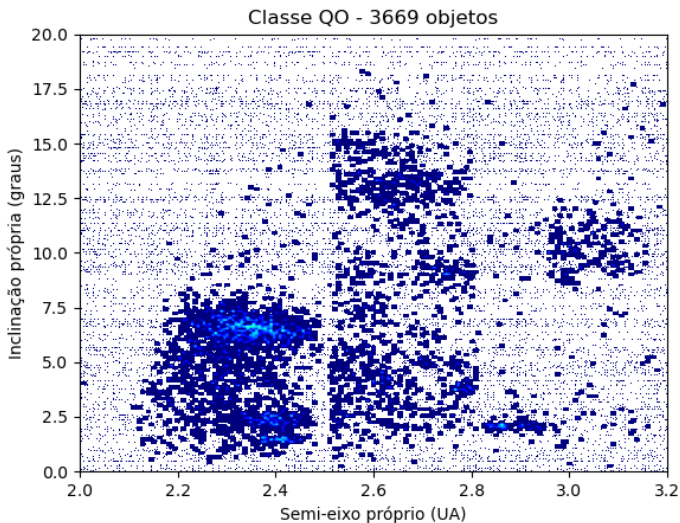
- Relativamente poucos (<5000) asteroides observados com espectroscopia
- Campanha fotométrica SDSS
  - 5 filtros entre 0.3 e 1.0  $\mu m$
  - >500.000 observações de asteroides



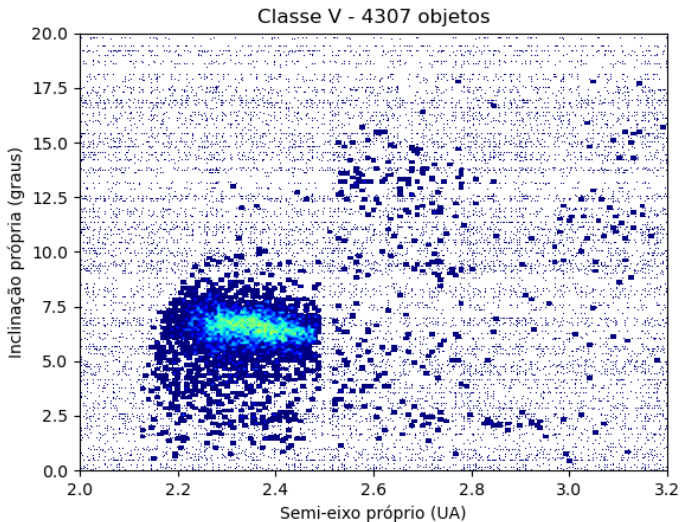
# Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



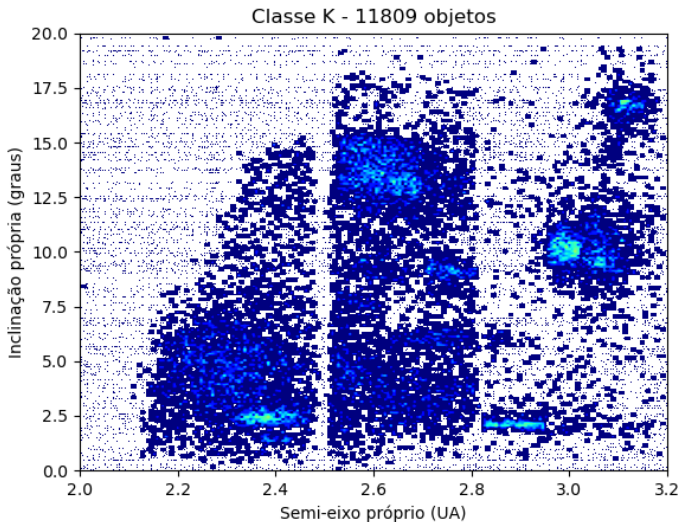
# Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



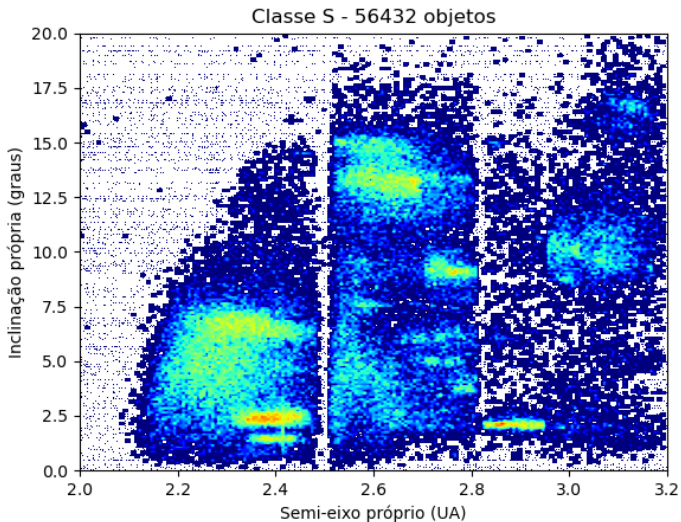
# Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



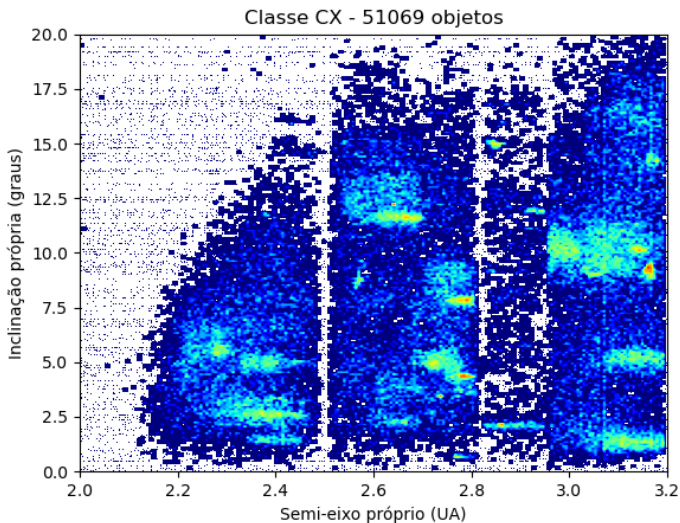
# Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



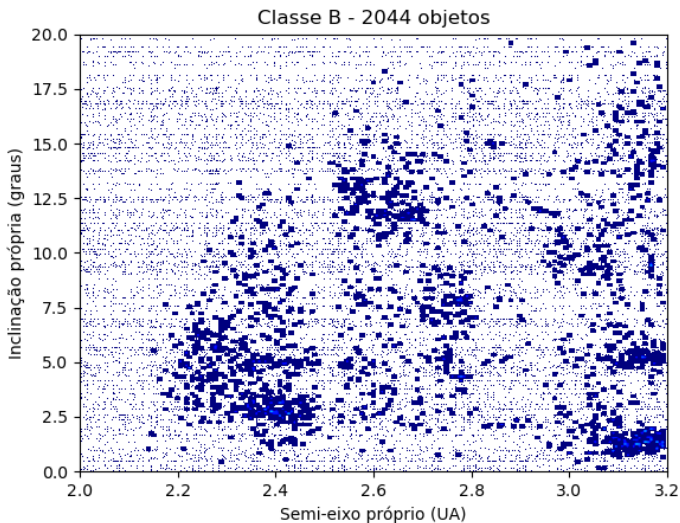
# Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



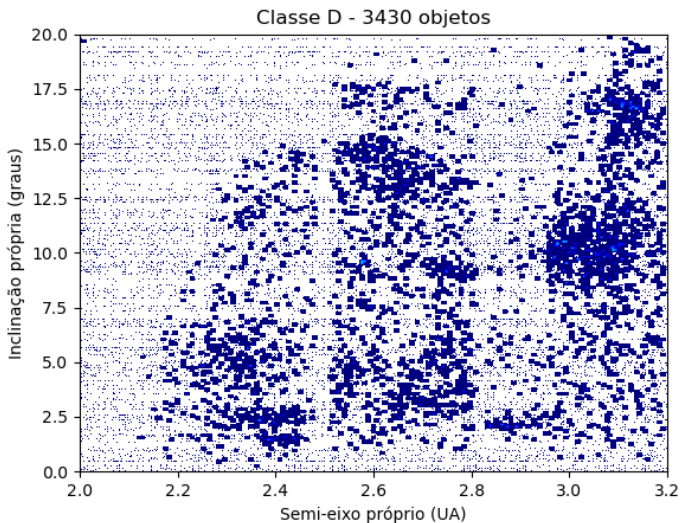
# Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



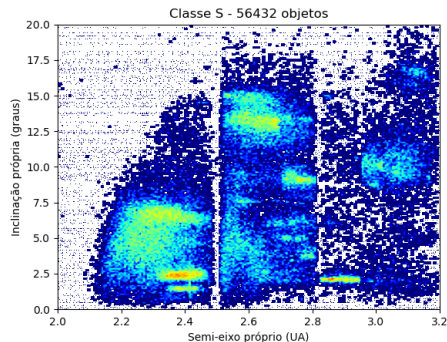
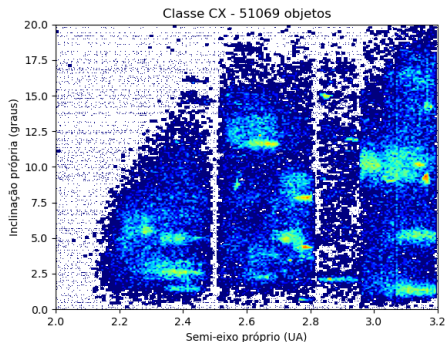
# Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



# Distribuição de Taxonomias no Cinturão Principal



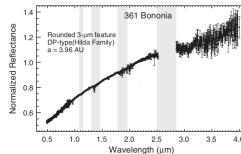
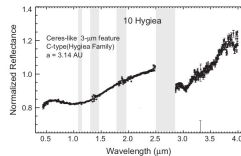
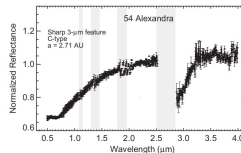
# Distribuição - Ricos e Pobres em Voláteis



# Bandas de filossilicatos/hidratação na parte externa do CP

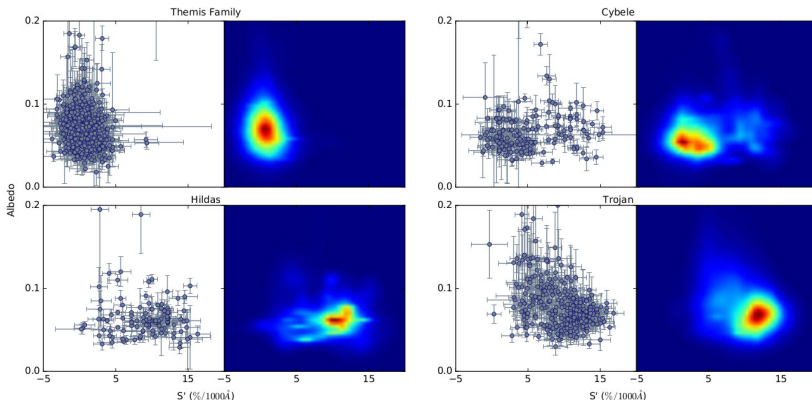
Takir & Emery. 2012

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



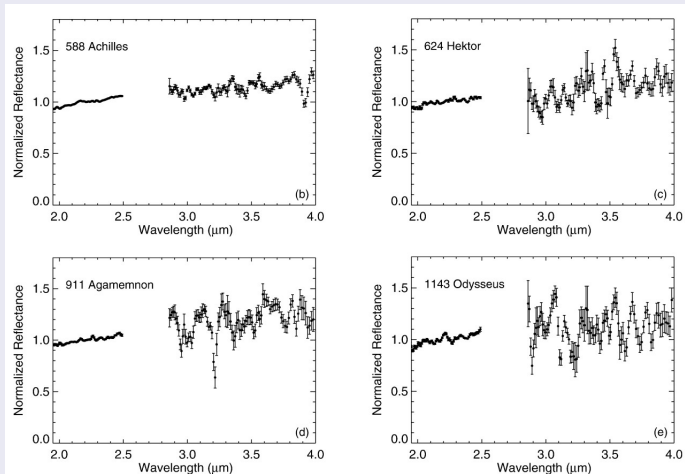
# Distribuição até os Troianos

- 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 pro 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