

高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星の 可視分光観測

天文・天体物理 夏の学校@福井
神戸大学M2 岩井彩

背景

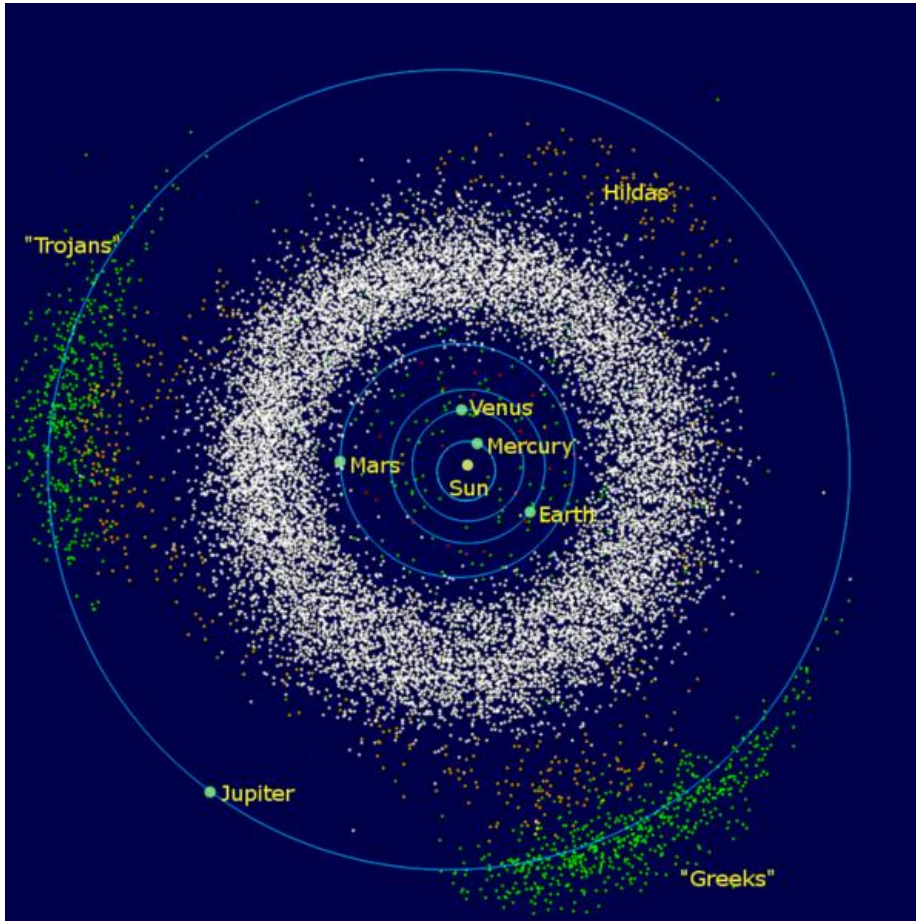
➤小惑星

岩石質の太陽系小天体であり、彗星活動を行わない

➤分類

軌道長半径による空間分布

可視光波長域のスペクトル形状(大きく5種類)



空間分布による分類

○メインベルト(小惑星帯)

太陽から2.1-3.3AU離れた環状の領域
軌道が確定した小惑星の約9割が存在

○トロヤ群

木星のラグランジュ点(L4,L5)に分布

図1:黄緯90度での空間分布

白:メインベルト小惑星

緑:トロヤ群小惑星

可視光波長域のスペクトル形状 大きく5種類(C,S,X,D,V)あり、表層の組成を反映

型	類似する主な隕石成分	主な空間分布
C	水和物や炭素質	メインベルトの外側
S	ケイ酸塩質	メインベルトの内側
X	鉄ニッケルやケイ酸塩質	メインベルトに均一
D	有機物	メインベルトの外側 ～木星軌道
V	玄武岩質	小惑星Vesta軌道周辺

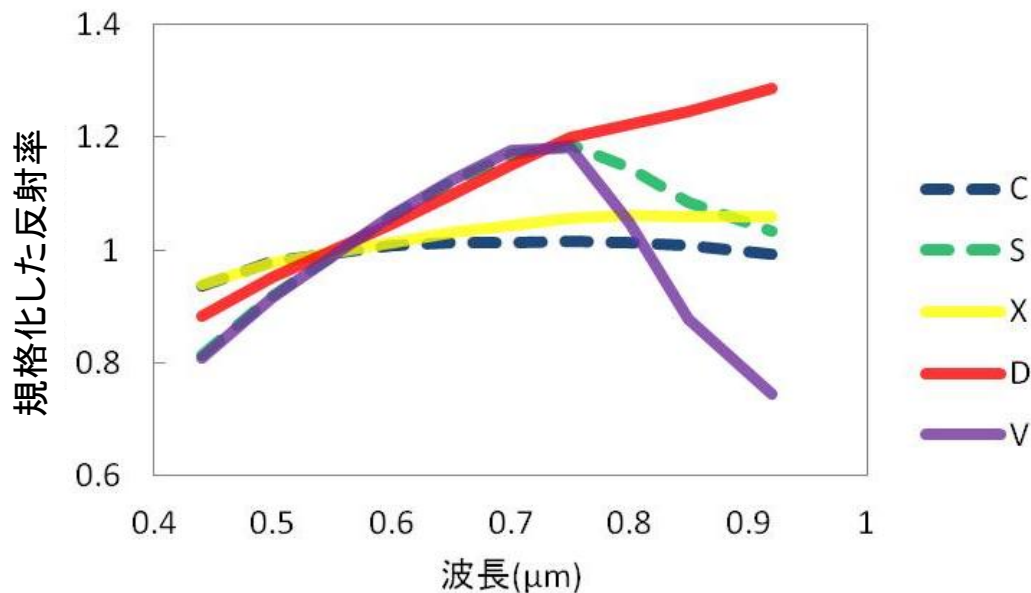


図2:各スペクトル型の平均スペクトル(Bus & Binzel 2002)

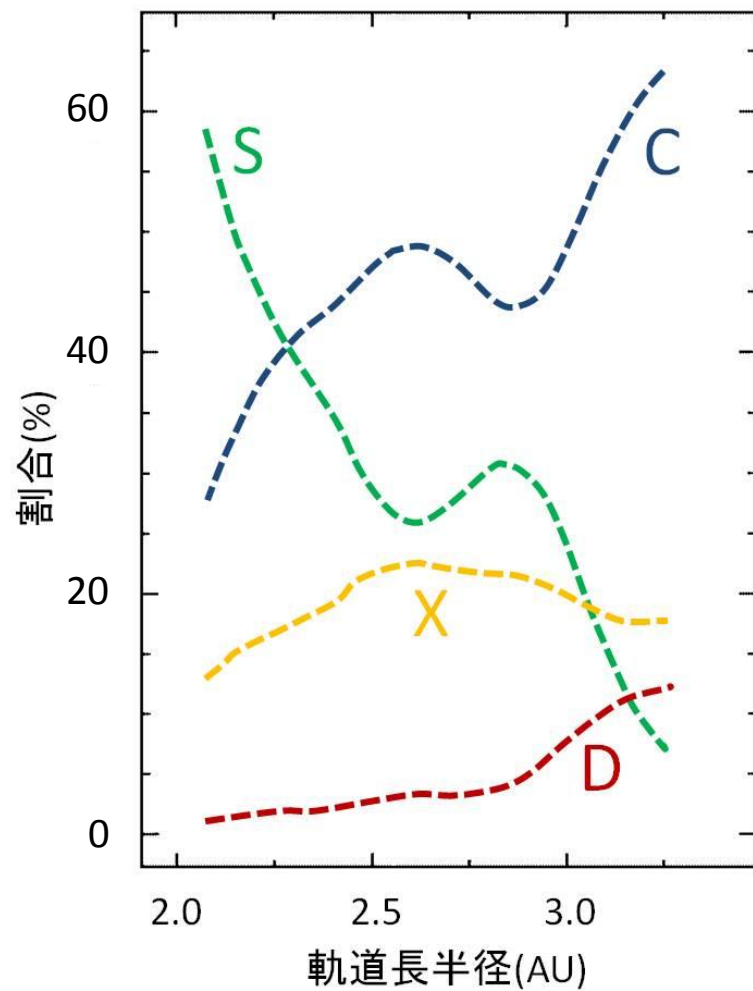


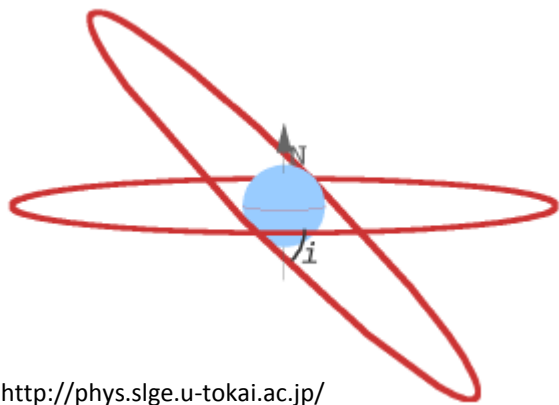
図3:メインベルト小惑星($D \geq 20\text{km}$)のスペクトル型別空間分布(Bus & Binzel 2002)

導入

高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星

軌道傾斜角(i) = 天体軌道面が黄道面となす角度

本研究では、10度以上を高軌道傾斜角とする



<http://phys.slge.u-tokai.ac.jp/>

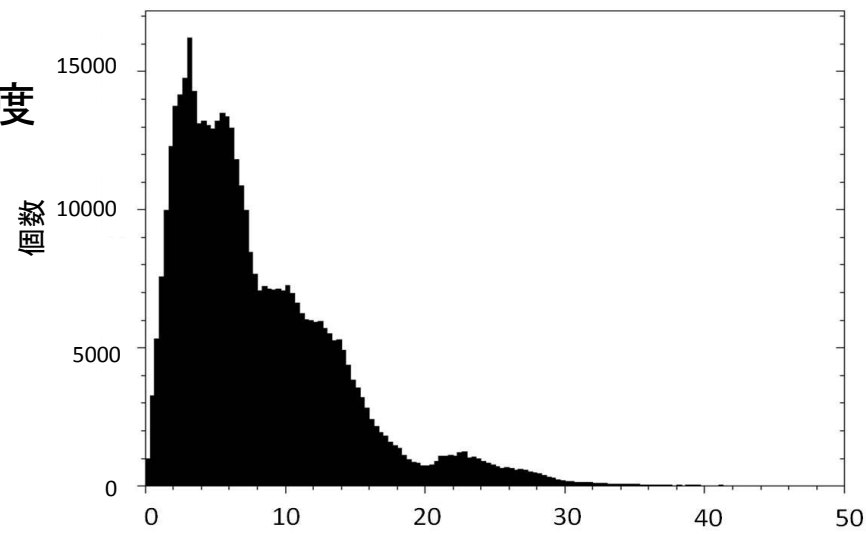


図4:軌道傾斜角ごとの個数分布(MPC) 軌道傾斜角(度)

○発見数は黄道面付近の小惑星より少ない

○他のメインベルト小惑星と同様に黄道面付近で形成後、**重力摂動**を受けたと考えられる

- 永年共鳴
- 重力散乱

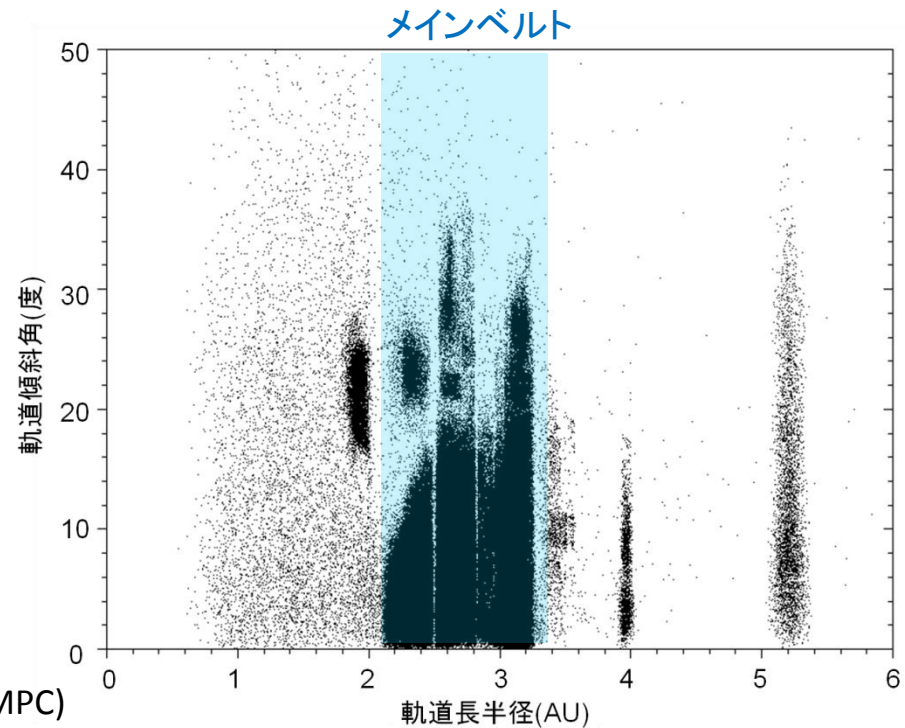


図5:軌道長半径ごとの軌道傾斜角分布(MPC)

導入

□木星・土星との永年共鳴

小惑星の軌道長半径を変えず、軌道離心率や軌道傾斜角を増加させる(Nagasawa et al., 2000)

➤太陽星雲消滅中の小惑星の軌道進化 (Nagasawa et al. 2000)

•木星、土星

JED(Julian Ephemeris Day)=2,440,400.5の速度、位置
現在の質量で配置

•小惑星

無質量、直径10km又は100km
18個を2.1-3.8AUに0.1AUごとに配置
軌道離心率と軌道傾斜角(=0.01)

•星雲ガス

木星付近で隙間を持つ
内側から外側に向けてガスが消滅するモデル
ガスの端は一定速度 1×10^{-5} AU/yrで移動
ガスの密度は最小質量($\sim 0.013 M_{\odot}$)太陽星雲モデル
(Hayashi 1981)

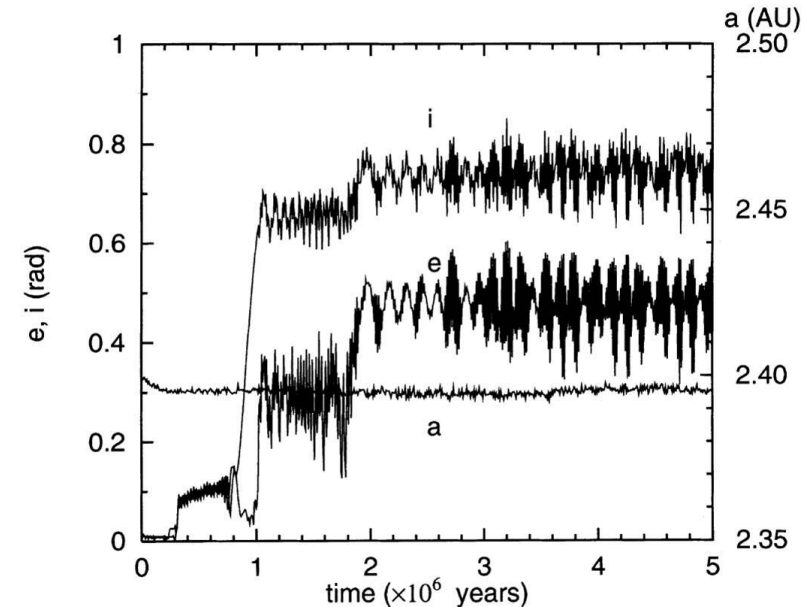


図6:a=2.4AUに配置した小惑星(直径100km)の軌道進化
a:軌道長半径 e:軌道離心率 i:軌道傾斜角

小惑星の軌道離心率と軌道傾斜角は増加したが、軌道長半径の変化は起こらなかった

導入

□原始惑星との重力散乱

微惑星の軌道長半径が変動し、軌道離心率と軌道傾斜角が増加する(Ida and Makino 1993)

➤重力散乱による微惑星の軌道進化(Ida and Makino 1993)

•原始惑星

1個を質量 $2 \times 10^{26} \text{g}$ 、軌道離心率と軌道傾斜角は0.01、
軌道長半径1AUで配置

•微惑星

800個を総質量 $2 \times 10^{24} \text{g}$ 、全て等質量、

$(e_m^2)^{1/2}$ と $(i_m^2)^{1/2} \sim 0.01$ 、

原始惑星周りに環状に配置、

表面質量密度 Σ は 10g/cm^2

(低質量[$\sim 0.01 M_\odot$]太陽星雲モデル)を想定

微惑星は原始惑星から離れるように軌道長半径が変動し、
軌道離心率と軌道傾斜角が増加する

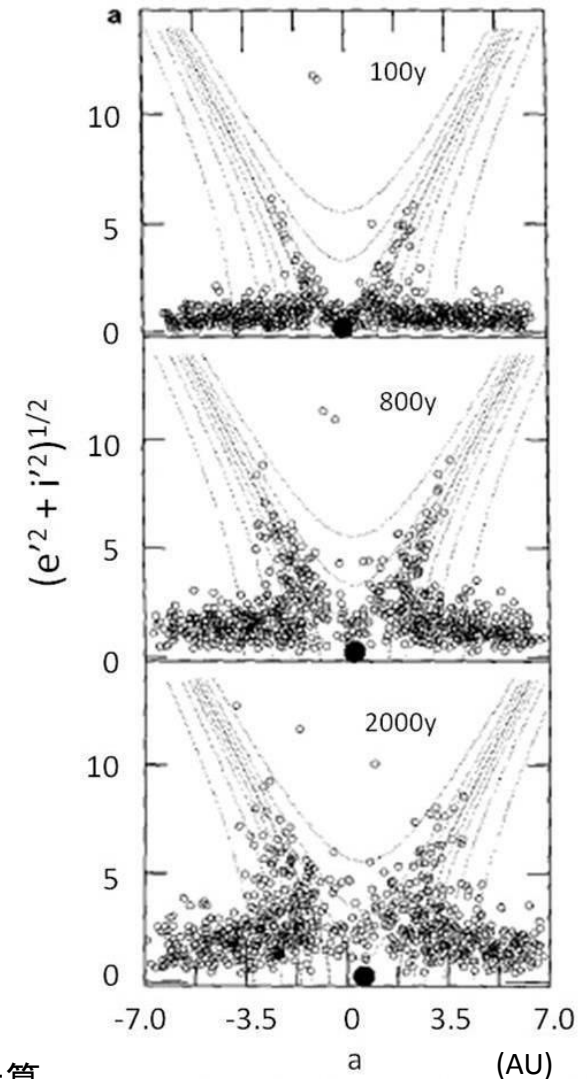
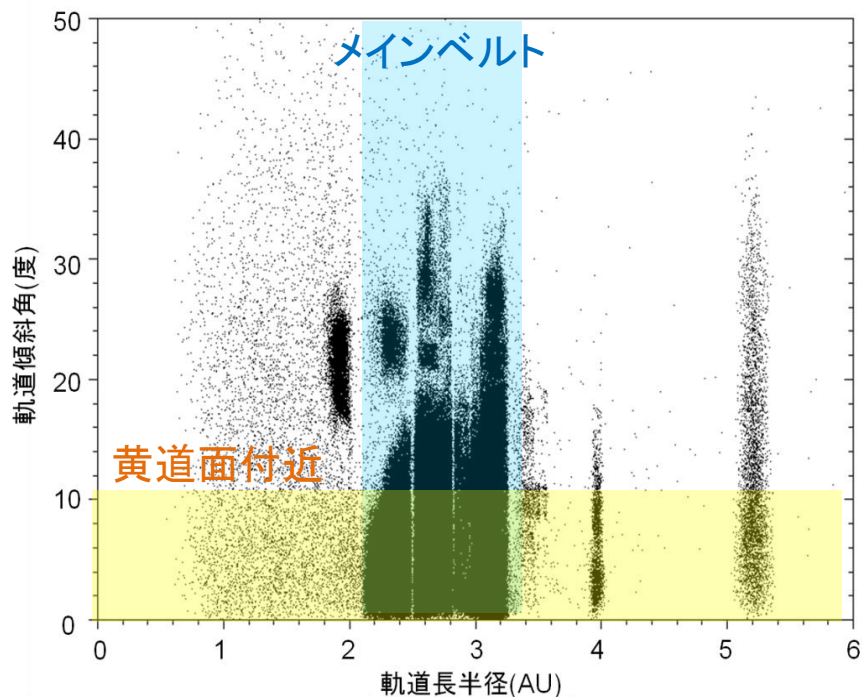


図7:原始惑星と微惑星の時間進化
V字のカーブは等ヤコビエネルギー線
原始惑星=現在の木星として横軸(距離)を計算

目的

- 重力摂動を特定するために、**D型**小惑星の空間分布に注目
- 黄道面付近では**メインベルト外側~木星軌道**に多く分布



重力摂動

軌道長半径

永年共鳴

変化せず

重力散乱

増加または減少

➤ **D型メインベルト小惑星**の空間分布

□ 永年共鳴

軌道傾斜角に依らず、分布は等しい

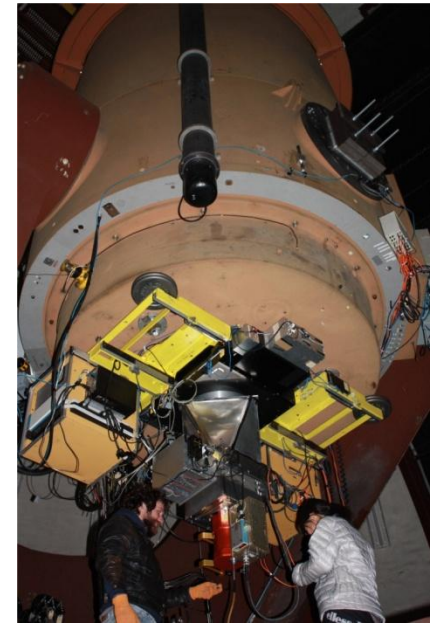
□ 重力散乱

高軌道傾斜角を持つ小惑星のほうが多く分布する

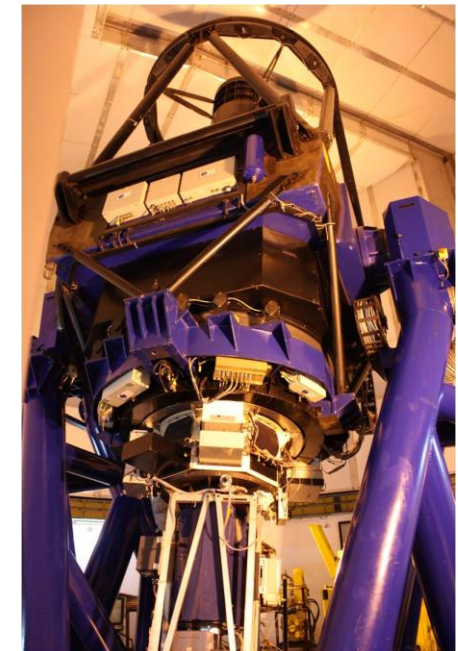
- 高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星を可視分光観測し、スペクトルを取得する
- 得られたスペクトルから、スペクトル型を分類する
- D型メインベルト小惑星の空間分布から、これらが受けた重力摂動を特定する

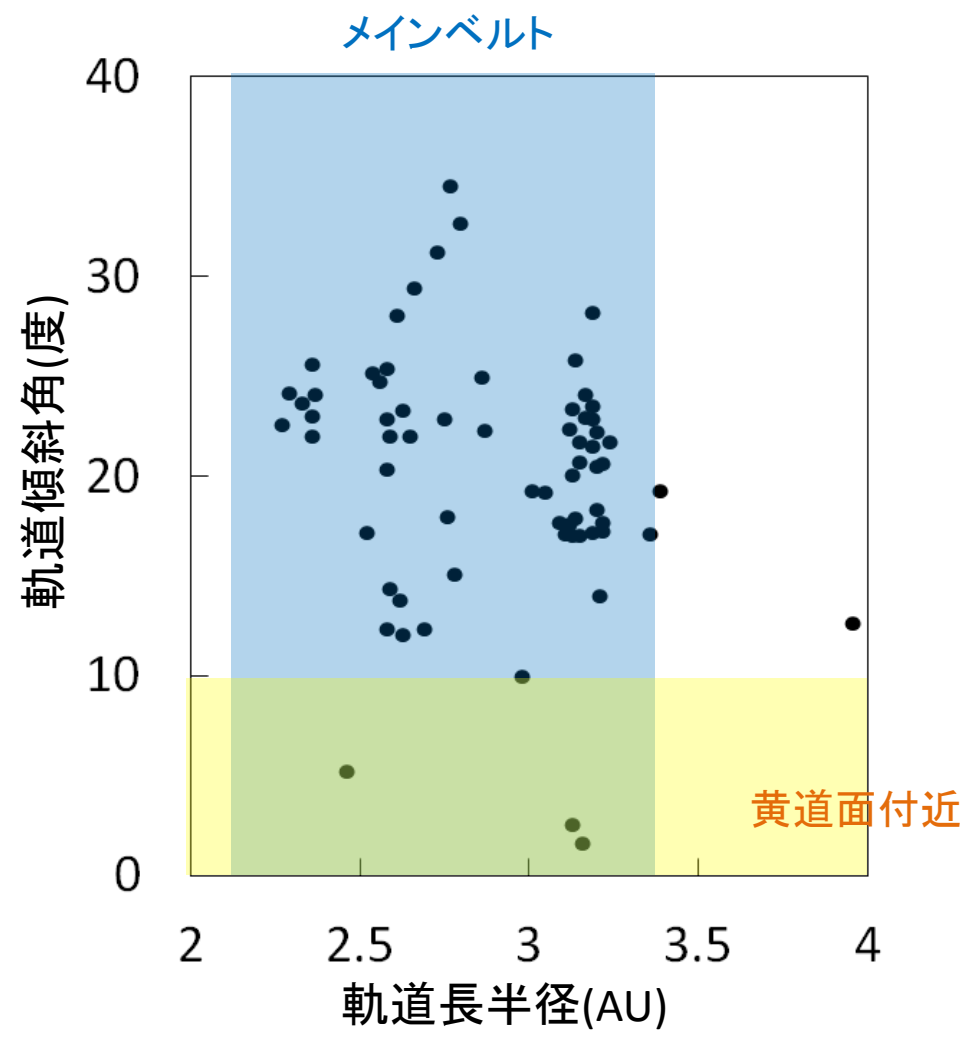
観測

- 日程 : 2008年10月30,31日、2011年10月19,20日
- 望遠鏡 : ハワイ大学2.2m望遠鏡(アメリカ)
- 装置 : WFGS2
- 有効波長域 : 0.44-0.83 μm
- 波長分解能 : 410 @0.65 μm
- 積分時間 : 180-600秒



- 日程 : 2008年12月28,29日
- 望遠鏡 : ギラワリ天文台2m望遠鏡(インド)
- 装置 : IFOSC
- 有効波長域 : 0.52-1.03 μm
- 波長分解能 : 650 @0.60 μm
- 積分時間 : 300-600秒





観測天体
:高軌道傾斜角(≥ 10 度) 64天体
:低軌道傾斜角(< 10 度) 3天体(確認用)
:Vバンド($0.53\mu\text{m}$) 12-17等

合計67天体のスペクトルを取得

図8: 観測した小惑星の空間分布

解析

➤ 一次処理

- バイアス、フラット処理、宇宙線の除去
- フリンジ除去(インドでの取得画像のみ)



図9:一次処理後画像

➤ 波長同定

- 大気のOH夜光、又はNe-Ar灯の輝線を用いてピクセル→Åに変換

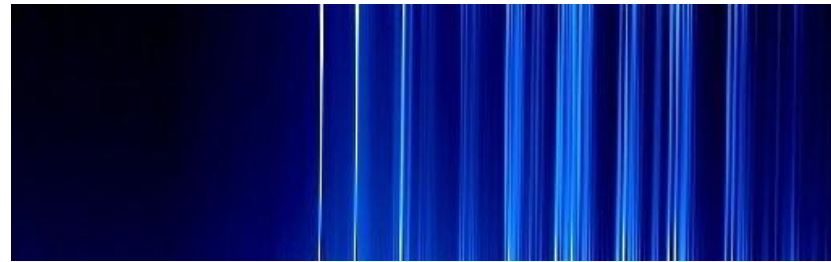


図10:波長同定用OH夜光画像

➤ スペクトル抽出

➤ 標準星補正

- スペクトル=太陽の反射スペクトル×小惑星の反射率
太陽と同じスペクトル型の恒星のスペクトルを用いて除算

➤ 規格化(@0.55μm)

- 0.55μmの値で除算(0.55μmでの値を1とする)

結果

➤スペクトル型分類

- SMASS (Bus and Binzel 2002)を用いて、各スペクトル(C,S,X,D,V)型の基準スペクトルを作成
- 小惑星スペクトルと基準スペクトルとの残差が最小になる型を、その小惑星のスペクトル型とする
- 最小残差が各基準スペクトル標準偏差(SMASS)の3倍(0.07)以上になるスペクトルは除外

38天体のスペクトルを分類
(高軌道傾斜角を持つ:35天体)

表1:SMASS基準スペクトル値(Bus & Binzel, 2002)

波長(μm)	C	S	X	D	V
0.44	0.936	0.813	0.94	0.882	0.808
0.5	0.979	0.92	0.977	0.951	0.916
0.6	1.007	1.06	1.013	1.046	1.063
0.65	1.013	1.121	1.03	1.098	1.124
0.7	1.014	1.17	1.045	1.15	1.176
0.75	1.016	1.188	1.057	1.199	1.183
0.8	1.014	1.145	1.062	1.222	1.048
0.85	1.008	1.084	1.06	1.247	0.879
0.92	0.993	1.034	1.058	1.287	0.745

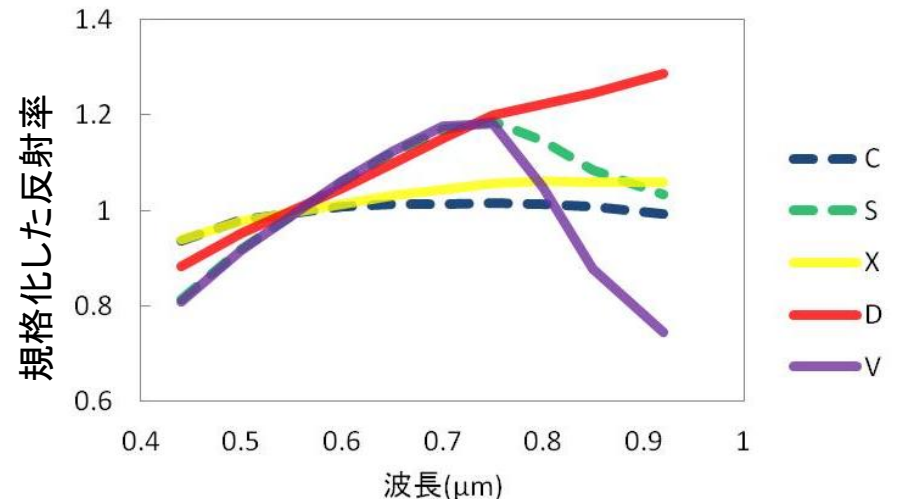
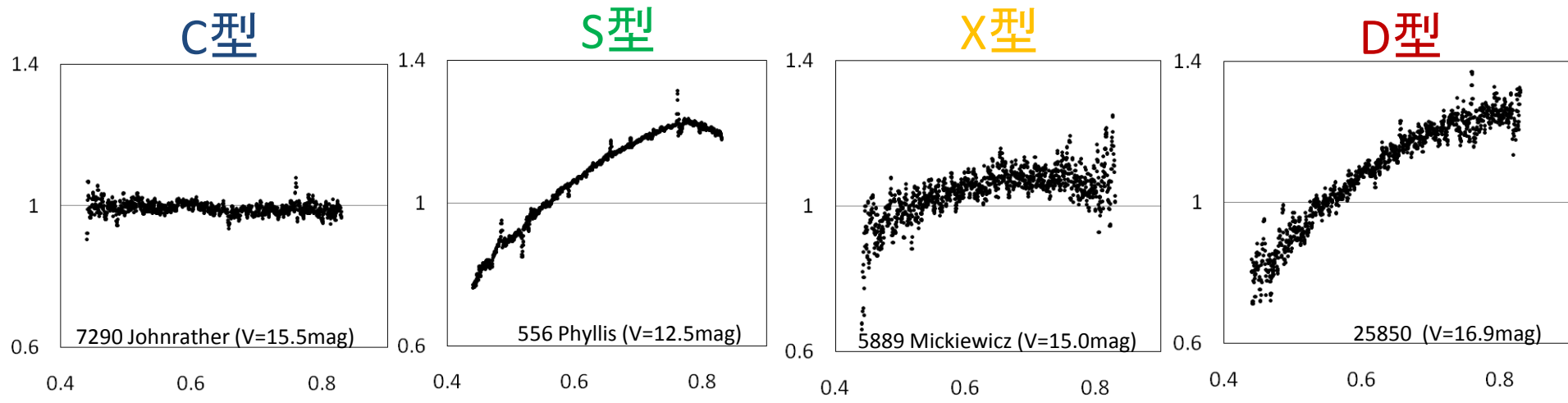


図13:各スペクトル型の基準スペクトル(Bus & Binzel 2002)

結果



横軸:波長(μm)、縦軸:規格化した反射率

分類した38天体の分類内訳(カッコ内は黄道面付近のもの)

スペクトル型	C	S	X	D
天体数	16(2)	9(1)	5	8

考察

➤D型メインベルト小惑星の、軌道傾斜角ごとの空間分布(単位:個)

□考察対象の小惑星

•SDSS-MOCで測光観測(g,r,iフィルター)が行われている

黄道面付近($i < 10$):67921 高軌道傾斜角($i \geq 10$):31396

□上記の中で、D型候補領域($g-r \geq 0.5, r-i \geq 0.2$)に分布

黄道面付近($i < 10$):26261 高軌道傾斜角($i \geq 10$):11786

□D型候補領域内でスペクトル型が既知

•SMASS(Bus and Binzel 2002),S³OS²(Lazzaro, et al. 2004),
本研究

黄道面付近($i < 10$):103 高軌道傾斜角($i \geq 10$):67

□D型候補領域の中で、D型に分類される

黄道面付近($i < 10$):8 高軌道傾斜角($i \geq 10$):13

□メインベルト全体に占めるD型小惑星の存在割合

黄道面付近($i < 10$) = $(26261/67921) \times (8/103) \times 100 = 3.0 \pm 1.1\%$

高軌道傾斜角($i \geq 10$) = $(11786/31396) \times (13/67) \times 100 = 7.2 \pm 2.1\%$

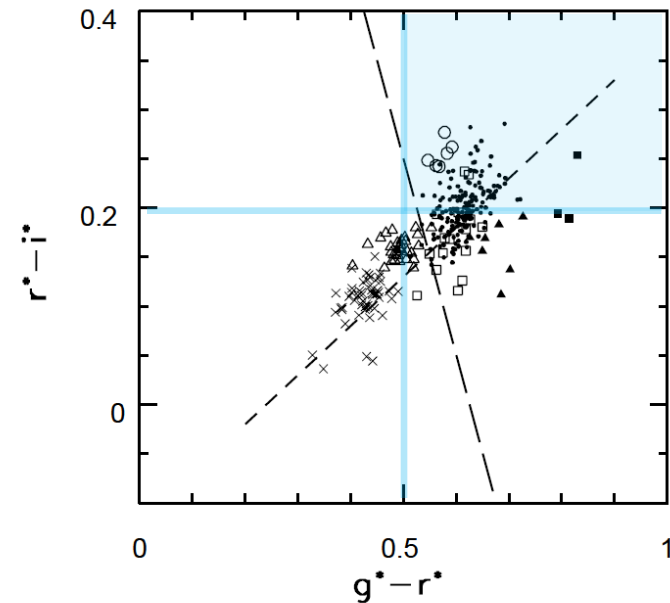


図14:g-r,r-iカラー図(Ivezic et al. 2001)
×:C型 ●,■:S型 △:X型 ○:D型 □:V型

考察・今後の予定

□メインベルト全体に占めるD型小惑星の存在割合

黄道面付近($i < 10$) : $3.0 \pm 1.1\%$ 高軌道傾斜角($i \geq 10$) : $7.2 \pm 2.1\%$

高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星のほうが、黄道面付近よりD型小惑星が多く分布

メインベルトより外縁で形成された小惑星が、木星など原始惑星の**重力散乱**によって、高軌道傾斜角を獲得しながらメインベルト領域へ移動した可能性がある

ご静聴ありがとうございました！！