

The 2003 EL₆₁ Collisional Family

16 Feb 2009

寺居 剛

(神戸大学 理学研究科)

紹介論文

Prologue: 2003 EL₆₁ について

1. A Collisional Family of Icy Objects in the Kuiper Belt
Brown, M. E., Barkume, K. M., Ragozzine, D. & Schaller, E. L. (Nature, 2007)
2. On a Scattered-Disk Origin for the 2003 EL₆₁ Collisional Family —An Example of the Importance of Collisions on the Dynamics of Small Bodies
Levison, H. F., Morbidelli, A., Vokrouhlicky, D. & Bottke, W. F. (AJ, 2008)
3. The Youthful Appearance of the 2003 EL₆₁ Collisional Family
Rabinowitz, D. L., Schaefer, B. E., Schaefer, M. & Tourtellotte, S. W. (AJ, 2008)

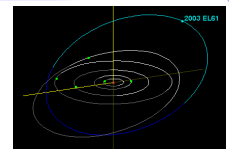
Prologue

2003 EL₆₁ について

2003 EL₆₁ (136108 Haumea)

■Ortizらによって2003年に発見された
カイパーベルト天体 (KBO)

軌道長半径 43.1 AU
軌道離心率 0.20
軌道傾斜角 28°

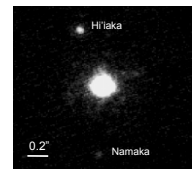


2003 EL₆₁ の軌道

■Brown et al. (2005, 2006) :

2個の衛星を発見 (Hi'iaka, Namaka)

⇒ 2003 EL₆₁ の質量 ~ 4×10^{21} kg
(冥王星の~30%)



Keck望遠鏡による2003 EL₆₁ の画像

■2008年に5個目の準惑星、および4個目の
冥王星型天体として分類されることが決定

2003 EL₆₁ の特徴

Rabinowitz et al. (2006) :

2003 EL₆₁ の可視多波長測光観測

■自転周期: 3.9 時間

→ かなり早い速度で自転している

■密度: >2600kg/m³ (静水圧平衡形状を仮定)

→ 大部分は岩石でできている

■長軸~2000km, 短軸~1000km

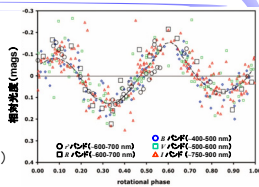
→ 非常に細長い形状

■アルベド: 0.7 ± 0.1

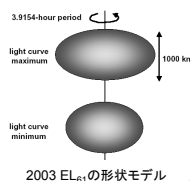
→ 表面はきれいな氷に覆われている

■波長による反射率の違いはほとんどない

→ 赤化物質は氷の下に隠されている



2003 EL₆₁ の光度曲線



2003 EL₆₁ の形状モデル

衛星の起源

Barkume, Brown, & Schaller (2006) :

2003 EL₆₁ の衛星Hi'iakaの近赤外線分光観測 (Keck望遠鏡)

■強い氷水の吸収を検出

(@1.5 μm, 2.0 μm)

■2003 EL₆₁ も通常のKBOsより

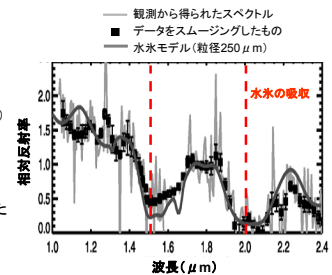
強い氷水の吸収を示す

(Trujillo et al. 2005)

⇒ 衛星は他の天体を捕獲して
できたのではない

■衛星は衝突によって破砕された
2003 EL₆₁ の破片では?

⇒ 高速自転・高密度を説明



衛星Hi'iakaの近赤外線スペクトル

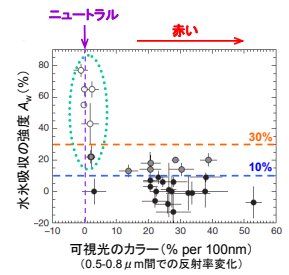
A Collisional Family of Icy Objects in the Kuiper Belt

Michael E. Brown, Kristina M. Barkume, Darin Ragozzine, & Emily L. Schaller

Nature, Volume 446, Issue 7133, pp. 294-296 (2007)

特異な表面特性を示すKBOs

- 2003 EL₆₁ およびその衛星がもつ特異な表面特性:
 - ・ 強い水氷の吸収
 - ・ メタンの吸収帯が見られない
 - ・ ニュートラルなカラーを示す
- KBOs 26天体の近赤外分光観測 + 公表されている6天体のスペクトル → 水氷の吸収強度 A_w を算出
- 6個のKBOsがそれらと同じ特徴の表面特性を示した



2003 EL₆₁ familyの発見

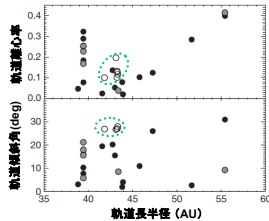
- 表面特性が似ているKBOs 6天体は軌道要素空間で1つの局所領域に分布が集中している

軌道長半径の広がり 2.15AU
軌道離心率の広がり 0.08
軌道傾斜角の広がり 1.4°

→ 偶然に起こる確率は 1×10^{-6}

collisional family

- 2003 EL₆₁は過去に巨大衝突を経験しており、その氷マンツルの破片が familyのメンバー天体&2個の衛星になったと推定される

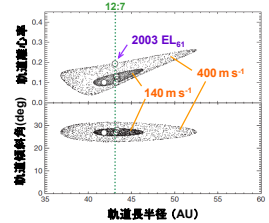


拡散速度

- 衝突による破片拡散モデル → proto- 2003 EL₆₁が黄道面を通過する際に衝突が起こったと仮定
- 軌道要素分布(右図)から考えられる拡散速度は $\sim 140 \text{ m s}^{-1}$
- 2003 EL₆₁だけ範囲から外れているが、これは海王星との12:7共鳴によって離心率が上昇したためと考えられる
- proto- 2003 EL₆₁の密度を 2.0 g cm^{-3} (冥王星や大型KBOsと同程度)と仮定

黄道面における衝突速度は $\sim 3 \text{ km s}^{-1}$

familyは直径 $\sim 1700 \text{ km}$ と $\sim 1000 \text{ km}$ の天体衝突により形成された



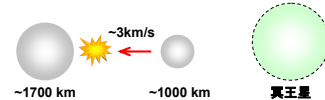
On a Scattered-Disk Origin for the 2003 EL₆₁ Collisional Family —An Example of the Importance of Collisions on the Dynamics of Small Bodies

Harold F. Levison, Alessandro Morbidelli, David Vokrouhlicky, & William F. Bottke

The Astronomical Journal, Volume 136, Issue 3, pp. 1079-1088 (2008)

2003 EL₆₁ familyの起源

- Brown et al.(2007)の衝突シナリオ



⇒ カイパーベルトには直径1000km以上の天体は少ないため、このような衝突が起こる確率は極めて低い

- EL₆₁ familyを形成し得る衝突の起こる条件を検証

3種類のモデル

- ① target: KBO, impactor: KBO
- ② target: KBO, impactor: 散乱天体 (SDO)
- ③ target: SDO, impactor: SDO

海王星に重力散乱された天体、近日点 < $\sim 34 \text{ AU}$

① KBOどうしの衝突

■ 時間 t_i の間に2個の天体が衝突する確率 (p) は

$$p = N_i N_t t_i (R_i + R_t)^2 \bar{Q}$$

$R_i + R_t = 1\text{km}$ と仮定したときの2天体の衝突確率 (軌道要素にのみ依存)

N_i : 個数, R : 半径, 添え字 i, t : impactors, targets, \bar{Q} : mean intrinsic 衝突率

■ Levison et al. (2008)の仮想KBO分布を用いて \bar{Q} を計算 (Botke et al. 1994)

KBOどうしの衝突 (添え字 kk) $\Rightarrow \bar{Q}_{kk} = 1.7 \times 10^{-22} \text{ km}^2 \text{ yr}^{-1}$ 既知KBO分布から得られる値との平均

■ 直径1000km以上のKBOsが3個存在すると仮定し, KBOsの累積サイズ分布 $N(>R) \propto R^{-3.8}$ (Petit et al. 2006)を用いると,

$$N_i \sim 5 \quad (R_i = 850 \text{ km}), \quad N_t \sim 40 \quad (R_t = 500 \text{ km})$$

■ 太陽系年代の間に2個のKBOsが衝突を起こす確率はわずか

$$p_{kk} = 2.5 \times 10^{-4}$$

② KBOとSDOの衝突

■ SDOsの総数は形成時から時間とともに減少 (Duncan & Levison, 1997)

■ 衝突確率 (添え字 sk) は $p_{sk} = (R_i + R_t)^2 \bar{Q}_{sk} N_i \int N_t(t) dt$ 軌道が不安定

■ SDOsの軌道進化モデル $f_s \equiv N_i(t=4\text{Gyr})/N_i(t=0)$

- Levison & Duncan (1997) [LD/DL97]
SDOsは海王星と接近する軌道のもつKBOsから進化するとして計算
 $\Rightarrow f_s = 1.25\%$
- Dones et al. (2004) [DWLD04]
面密度 $\propto r^{-3.2}$ で4-40AUに亘って分布する天体が起源として計算
 $\Rightarrow f_s = 0.63\%$
- Tsiganis et al. (2005) [TGML05]
"Niceモデル"に基づいたSDOsの進化モデル
 $\Rightarrow f_s = 0.41\%$

② KBOとSDOの衝突

■ SDOsの累積サイズ分布を $N(>R) \propto R^{-3}$ とすると (Trujillo et al. 2000), N_i の初期値 (N_{i0}) は

$$N_i(R) = \frac{N_{500\text{km}}}{f_s} \left(\frac{R}{50\text{km}} \right)^{-3}, \quad N_{500\text{km}} = N(>50\text{km})$$

から算出される ($R = 500 \text{ km}$, $N_{500\text{km}}$ はモデルに依存 (27,000-125,000))

■ targetの軌道要素をfamilyの質量中心とする ($a=43.1\text{AU}$, $e=0.12$, $i=28.2^\circ$)

$\rightarrow \bar{Q}_{sk} = (6.7-11) \times 10^{-22} \text{ km}^2 \text{ yr}^{-1}$ となり (Botke et al. 1994), \bar{Q}_{kk} とよく似た値が得られた

■ $R_i = 850 \text{ km}$ のKBOと $R_t = 500 \text{ km}$ のSDO間の衝突が起こる確率は

$$p_{sk} = 2.4 \times 10^{-4} - 4.5 \times 10^{-3}$$

\rightarrow KBOどうしの衝突よりは大きい値

③ SDOどうしの衝突

■ SDOどうしの衝突によるfamilyはKBO軌道になり得るか?
(※familyは衝突する2天体の質量中心周りで拡散)

■ family軌道の散乱円盤に対する最小相対速度を ΔV_{\min} , 衝突の質量中心と元のtarget軌道との速度差を δV_{\min} と定義
 $\rightarrow \Delta V_{\min} < \delta V_{\min}$ ならばEL61 family形成は可能 (十分条件ではない)

■ Nesvorný et al. (2007) のアルゴリズムを用いて ΔV_{\min} を計算 (次ページ)
 \rightarrow 全てのモデルで $\Delta V_{\min} < 265 \text{ m/s}$

■ $\delta V = |\vec{V}_{CM} - \vec{V}_i| = |\vec{v}_i - \vec{v}_t| / (1 + m_i/m_t)$, $\vec{V}_{CM} = (m_i \vec{v}_i + m_t \vec{v}_t) / (m_i + m_t)$
後の計算から $|\vec{v}_i - \vec{v}_t| \sim 3 \text{ km/s}$, $m_i/m_t \sim 5 \Rightarrow \delta V_{\min} \sim 450 \text{ m/s}$
target-impactorの質量中心速度
~2.7 km/s

$$\Delta V_{\min} < \delta V_{\min}$$

③ SDOどうしの衝突

緑色の領域... SDOsが(衝突せずに)訪れる軌道要素空間
黒点... 衝突によって散乱円盤から軌道進化したKBOs

$\Delta V_{\min} = 198 \text{ m/s}$ $\Delta V_{\min} = 263 \text{ m/s}$ $\Delta V_{\min} = 93 \text{ m/s}$

③ SDOどうしの衝突

■ 散乱円盤からEL61 familyが形成される確率 (p_{SD}) は,

$$p_{SD} = p_{SS} \times p_{KB}$$

p_{SS} : SDOどうしの衝突が起こる確率
 p_{KB} : 衝突天体の質量中心が安定したKBO軌道になる確率

■ SDO-SDO衝突 (添え字 ss) が起こる確率 p_{SS} は

$$p_{SS} = (R_i + R_t)^2 \bar{Q}_{ss} \int N_i(t) N_t(t) dt$$

LD/DL97: 1.1×10^{-22} , DWLD04: 8.0×10^{-23} , TGML05: 7.9×10^{-23} (Botke et al. 1994)

$R_i = 850 \text{ km}$, $R_t = 500 \text{ km}$ とすると, p_{SS} は

LD/DL97: 0.007-0.051, DWLD04: 0.16-1.27, TGML05: 0.16-1.26

③ SDOどうしの衝突

■衝突軌道がカイパーベルト上に描かれる確率 p_{KB} をモンテカルロ法により計算(詳細は省略)

LD/DL97: 0.19, DWLD04: 0.076, TGML05: 0.32

■得られた p_{ss} と p_{KB} から p_{SD} を計算すると、

LD/DL97 : $p_{SD} = 1.5 \times 10^{-3} - 0.011$
 DWLD04 : $p_{SD} = 0.012 - 0.10$
 TGML05 : $p_{SD} = 0.061 - 0.47$

→ EL₆₁ familyの起源は散乱円盤である可能性が高い

3

The Youthful Appearance of the 2003 EL₆₁ Collisional Family

David L. Rabinowitz, Bradley E. Schaefer, Martha Schaefer,
& Suzanne W. Tourtellotte

The Astronomical Journal, Volume 136, Issue 4, pp. 1502-1509 (2008).

EL₆₁ familyの可視カラー

■なぜEL₆₁ family天体のカラー(可視光)はニュートラルなのか?

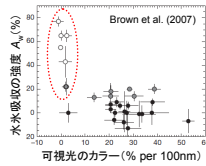
(多くのTNOsは炭素微粒子照射により表層氷が赤化している)

■2003 EL₆₁は表層の揮発性物質が周期的に融解→再凍結して再表面化が起こるが、family天体は表面重力が小さいため揮発性物質を保持できない

■その理由としていくつかのモデルが提案されている:

- ①形成時の加熱・分化で表層の有機物が失われた(Ragozzine & Brown 2007)
- ②2003 EL₆₁は炭素欠乏天体が起源(Pinilla-Alonso et al. 2007)
- ③氷火山(cryovolcanism)による再表面化(Pinilla-Alonso et al. 2007)

■位相曲線を求めることにより、天体表面の散乱特性を調べる



観測

■EL₆₁ family 5天体(うち2天体は既に取得済み)と familyメンバーではないKBOs 4天体(これまでに31天体以上を観測済み)を可視測光観測



■望遠鏡: Cerro Tololo 1.3m望遠鏡 @チリ

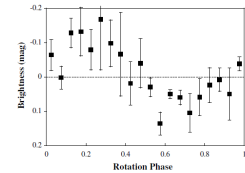
■装置: 可視・赤外CCDカメラ ANDICAM (2K×2K(2×2ピンニングモードで使用), 0.37"/pix, 6.3'×6.3')

■積分時間: 1夜あたり~15分(複数のフィルターで3 or 4回撮像)

■フィルター: B, V, I

■位相角: $\alpha < 2.0$ deg

2003 OP₃₂(EL₆₁ family)の光度曲線 →
自転周期 4.854 h, 振幅 0.26 mag



位相曲線

■位相曲線=位相角(α)ごとの絶対等級 (B_0, V_0, I_0)

■各バンドから得られた位相曲線の傾斜をそれぞれ位相係数 $\beta_B, \beta_V, \beta_I$ とする

$$\beta_{ave} = (\beta_B + \beta_V + \beta_I) / 3$$

■どの位相曲線も線形で、波長依存性はあまり見られない

■測定されたカラーと位相係数 ↓

Name	V_0 (mag)	V_0 error	$B_0 - V_0$ (mag)	$B_0 - V_0$ error	$V_0 - I_0$ (mag)	$V_0 - I_0$ error	β_{avg} (mag deg ⁻¹)	β_{avg} error	Relative Size
2003 EL ₆₁ ^a	0.428	0.011	0.646	0.015	0.686	0.014	0.097	0.007	1.0
2003 TX ₉₆ ^a	3.365	0.044	0.869	0.053	0.636	0.067	0.076	0.039	0.289
2003 OP ₃₂ ^a	4.097	0.033	0.698	0.052	0.773	0.052	0.040	0.022	0.184
2005 RR ₂₄ ^a	4.125	0.071	0.790	0.076	0.693	0.076	0.010	0.016	0.182
1995 SM ₄ ^a	4.490	0.030	0.628	0.023	0.683	0.050	0.060	0.027	0.154
2003 AZ ₂₄	3.775	0.019	0.615	0.030	0.649	0.036	0.061	0.026	0.214
2002 TC ₃₀₂	4.225	0.034	-	-	1.319	0.056	0.118	0.040	0.174
2004 CV ₃	4.263	0.020	0.843	0.028	1.150	0.026	0.127	0.011	0.171
2005 RM ₄₁	4.468	0.019	0.590	0.038	0.726	0.036	0.179	0.018	0.156

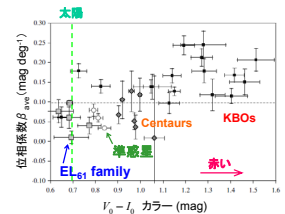
Note: ^a 2003 EL₆₁ family.

カラー vs 位相係数

■EL₆₁ familyはカラーが最も青く、位相曲線が最もフラット

■準惑星は皆よく似た位相係数(フラット)とカラー(やや赤い)を示す

■大半のKBOsと全てのCentaurusは非常に赤く、大きな位相係数をもつ



位相係数と(V-I)カラーには強い相関がある

■EL₆₁ familyメンバーは互いによく類似した表面特性をもつ



大型氷天体との比較

■ EL₆₁ familyメンバーの位相曲線をカラーが類似の氷天体と比較

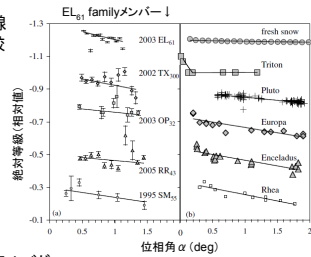
→ どちらもフラットで線形の曲線



EL₆₁ familyの表層構造は大型氷天体と類似かもしれない

■ このような大型氷天体は高いアルベド(>0.35)をもつ

→ EL₆₁ familyのメンバーも高いアルベドをもっているのでは？



アルベド vs 位相係数

■ 既知の氷天体の位相係数とアルベドをプロット

■ $\beta < 0.1$ mag/degの天体は $p_v > 0.35$ (2003 AZ₆₄を除く)

■ 逆に $\beta > 0.1$ mag/degの天体のアルベドは低い(中間値0.23)

→ EL₆₁ familyメンバーは高いアルベドをもち、表面が新鮮な氷で覆われている可能性が濃厚

■ アルベドの高い($p_v > 0.4$)氷天体は短いタイムスケール(<~100Myr)で再表面化が起こっている

→ EL₆₁ familyメンバーも同じような周期で再表面化されている？ (どのような過程かは不明のまま)

