

木曾太陽系外縁部サーベイ

木下 大輔¹, 山本 直孝¹, 渡部 潤一²

1. 太陽系外縁部

今世紀の半ば、海王星軌道以遠で物質の存在量が急激に減少することに疑問を抱いた Edgeworth と Kuiper は、相次いで冥王星軌道のさらに外側にも多数の天体がベルト状に存在することを主張した[2]。さらにそれらの天体は彗星の供給元である可能性も指摘している。この説はのちに Whipple や Fernandez により繰り返されている[3]。

Tombaugh により 1530deg^2 、そして Kowal により 6400deg^2 の探索が行われ、Kowal は 1977 年 10 月に日心距離 17 AU にこのとき遠日点付近にいた (2060) Chiron を発見している。この天体は土星軌道と天王星軌道の間はその軌道があるため、Saturn の息子で Uranus の孫である Chiron と名付けられた。現在までに軌道長半径が 5 AU (木星軌道) から 30 AU (海王星軌道) であるような天体が 17 個見つっているが、これらはケンタウルス天体 (Centaur) と呼ばれている。Chiron にはコマが検出されており、彗星活動のあることが分かっている、95P/Chiron という彗星の符合もつけられている。また、他にもこれまでに McDonald Survey, Palomar-Leiden Survey, Kiso Schmidt Survey などのメインベルト小惑星が狙いの広域のサーベイが行われている。それぞれ 14400deg^2 , 216deg^2 , 1944deg^2 の探索を行ったがいずれも遠方の天体は検出されていない。

1980 年代に入ると検出器として CCD (Charge-

Coupled Device, 電荷結合素子) が使われ始め、それまでの写真乾板による搜索よりもさらに深いサーベイが可能になった。にも関わらず、太陽系の外縁部には新たな天体はひとつも検出されなかった。

しかし、遂に 1992 年 8 月 30 日に Jewitt らはマウナケア山頂に設置されているハワイ大の 2.2-m 望遠鏡と 2048×2048 ピクセルの CCD カメラにより、見かけ上 1 時間あたり 3 秒角程度の速度でゆっくりと移動する天体を捉えた[5]。この 1992QB₁ という仮符合を与えられた R バンドで 22.8 等級の天体は小惑星中央局の Marsden により直ちに暫定軌道が計算され、追跡観測により軌道改良がなされた。1992

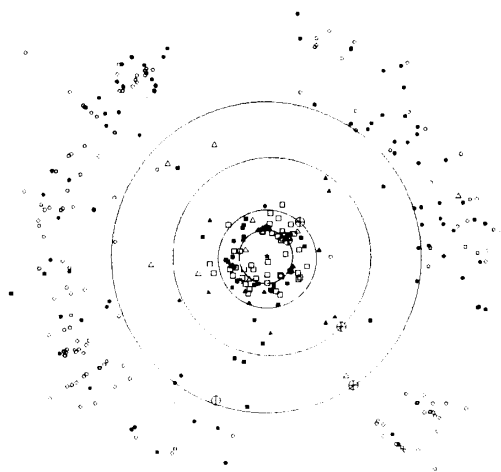


図1 2000年1月10日現在の太陽系外縁部の様子[10]円はそれぞれ木星、土星、天王星、海王星の軌道を表す。丸はEKBO、三角はケンタウルス天体、四角は短周期彗星を表す。塗りつぶしてある天体は複数回の衝での観測があるもの、そうでないものは一回の衝でのみ観測が行われた天体であることを示している。

¹ 東京理科大

² 国立天文台

QB₁の軌道長半径は $a=44.4$ AUで、冥王星軌道の外側に検出された初めての天体である。以後もさまざまなグループによるサーベイが行われ、2000年1月10日現在216個の天体のが海王星軌道の外側に存在することが分かっており、これらの天体はエッジワース・カイパーベルト天体 (Edgeworth-Kuiper Belt Object, 以下EKBOと略す) やKBO (Kuiper Belt Object), あるいはTNO (Trans-Neptunian Object) と呼ばれている。図1に2000年1月10日現在の太陽系外縁部の様子を示す。これらの天体は惑星集積過程で惑星の一部になることができずに取り残されてしまった微惑星の生き残りであり、また短周期彗星の供給源であると考えられている。その大きな日心距離のためEKBOは太陽による加熱の影響が少なく、太陽系形成初期の情報を比較的よく保存している。EKBOの空間分布やサイズ分布、表層物質の組成や物理状態などを明らかにすることを通して、太陽系の起源と進化の解明が期待されている。

2. エッジワース・カイパーベルト天体

これまでにEKBOには少なくとも3つのサブグループが存在することが分かっている[6]。その3つのグループはClassical Object, Resonant Object, そしてScattered Objectと呼ばれている。Classical Objectは軌道長半径が $42 \leq a \leq 47$ AUであり、他の天体と力学的な共鳴関係にないような天体のことを指す。最初に発見されたEKBOである1992QB₁もこのグループに属するためCubiwanoと呼ばれることもある。これらの天体は離心率が比較的小さいため、近日点付近でも海王星と大きな距離を保つことができる。離心率は $e_{\text{median}} \sim 0.06$ 程度である。一般に軌道傾斜角は小さいものが多い ($i_{\text{median}} \sim 2.2^\circ$) が、大きなものも存在する ($0.5 \leq i \leq 31.6^\circ$)。

ここで e_{median} , i_{median} は、それぞれ離心率と軌道傾斜角のメジアン値である。これらの値の算出にあたっては、軌道の信頼性の高い複数回の衝での観測のある天体のみを扱っている。軌道傾斜角の小さな天体が多いのは、サーベイ領域が黄道付近に偏っていることによる観測バイアスによるためである。Resonant Objectとは海王星と平均運動共鳴にあるものを指す。特に海王星と2:3の平均運動共鳴にある天体 ($a=39.4$ AU) が多い。冥王星も海王星と2:3の平均運動共鳴にあるため、このグループに属する天体は「小さな冥王星」という意味でPlutinoと呼ばれることもある。平均運動共鳴とは、その天体の平均運動と別の天体の平均運動が簡単な整数比になっていることを言う。つまり、あるEKBOが海王星と2:3の平均運動共鳴にあるというのは、海王星が軌道を3周する間にEKBOはきっかり2回その軌道を回ることを意味する。そのため、海王星とEKBOの相対的な位置関係が制限されるため、海王星と常にある程度の距離を保っているEKBOしか生き残ることができない。海王星と近づくような軌道を持つEKBOは海王星の摂動を受け、軌道を変えられてしまう。逆に、海王星と常に大きな距離を保つことのできる軌道を持つEKBOは近日点付近で海王星軌道の内側まで入り込んでくるような場合であっても、つまり離心率が大きくても比較的長期間安定に存在することが可能である。実際、Classical Objectに比べてResonant Objectは海王星方向、および海王星と反対の方向での検出がほとんどない。2:3の天体については、離心率は $0.11 \leq e \leq 0.34$ で、軌道傾斜角は $0.2^\circ \leq i \leq 19.5^\circ$ である。冥王星は $e=0.25$, $i=17^\circ$ であるから、この中に収まっている。Scattered Objectとは他の2つのグループと比べて非常に大きな軌道長半径をもつEKBOのことである。現在までに軌道長半径の非常に大きな天体が4つ見ついている。その4つの天体とは1996TL₆₆, 1999CV₁₁₈,

1999CY₁₁₈, 1999CF₁₁₉である。その軌道の特徴はそれぞれ、軌道長半径が85, 57, 95, 115AU, 離心率が0.59, 0.39, 0.64, 0.69, 軌道傾斜角が24, 6, 26, 20°となっている[9,12]。これらの天体は海王星による重力的な散乱を受けてしまった天体であると考えられている。これら4つの天体の軌道を図2に示す。

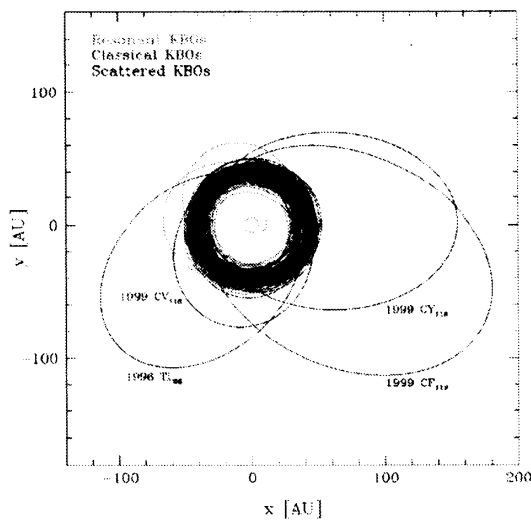


図2 Scattered Objectの軌道[12]。Scattered ObjectはClassical ObjectやResonant Objectと比べて非常に大きな軌道長半径と離心率を持つ。

EKBOの空間分布を軌道長半径と離心率の平面で表すと図3と図4のようになる。図3は $3 \leq a \leq 50$ AUの領域を、図4は $30 \leq a \leq 100$ AUの領域を示している。両方の図とも、四角は複数の衝での観測のある天体、三角は一回の衝でのみしか観測のない天体を示している。複数の衝での観測のある天体の方が軌道より信頼できるものになっている。また、 $e = 0$ である天体が存在するが、これは軌道決定の際にアークが短いため円軌道を仮定して軌道計算を行ったことによるものである。図3を見ると $a = 39.4$ AU付近に多数のResonant Object (海王星と2:3の平均運動共鳴にある天体) が分布していて、 $42 \leq a \leq 47$ に多数のClassical Objectが分布していることが分かる。また、曲線は実線の方

が近日点距離が30AUである (a, e) の組み合わせを示していて、グラフのなかでこの曲線よりも上に存在する天体は海王星軌道の内側まで入り込んでくることを意味している。破線で示された曲線は近日点距離が40AUであるような (a, e) の組み合わせである。海王星軌道に近づいたり、海王星軌道の内側に入り込んでくる天体はResonant Objectのみであることが分かる。図には3:4, 5:7, 2:3, 3:5, 4:7, 1:2の平均運動共鳴にある天体が存在する可能性のあるおよそ位置を直線で示しているが、Resonant Objectは実際にはこの直線の付近にある幅をもって存在することができる。ほとんどのClassical Objectは近日点付近であっても海王星と10AU以上の離れている。図4の3本の曲線はそれぞれ上から近日点距離が $q = 30, 35, 40$ AUであるような (a, e) である。軌道長半径の大きなScattered Objectは、遠方では非常に暗いため近日点付近でしか検出せず、ケプラーの面積速度一定の法則より近日点付近の滞在時間は非常に小さい。検出数が少ないことと、離心率の小さなScattered Objectがまったく検出されていないのは完全に観測バイアスによる影響である。

アルベドからは表層物質の推定が可能であり、

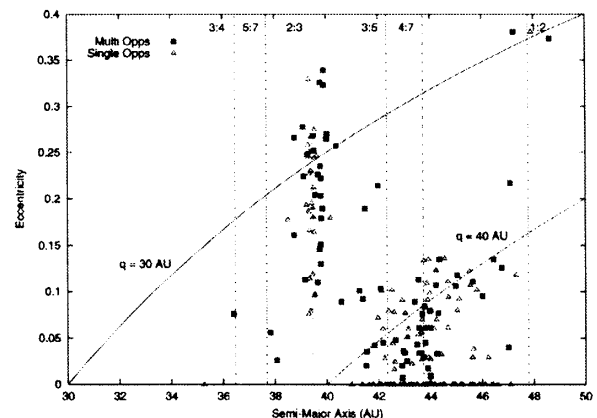


図3 EKBOの軌道長半径と離心率50AUまででプロットした。横軸が軌道長半径で、縦軸が離心率である。Resonant ObjectとClassical Objectの違いがよく分かる。軌道要素は国際天文学連合の小惑星中央局より得た。

またサイズを決めるためにはアルベドが既知である必要がある。しかし、これまでの観測ではEKBOからの熱放射を有意に検出できておらずアルベドが決定できずにいるため、EKBOのサイズは彗星と同程度の非常に低いアルベド（通常は4%）を仮定して求めている。赤外線衛星ISO (Infrared Space Observatory) による1992QB₁, 1993SC, 1994 TBと1996TL₆₆の観測が行われたが、そのシグナルレベルは装置の検出限界付近だった。1993SCはその2.5 σ レベルのシグナルから、サイズが 158^{+27}_{-33} km, アルベドが $0.020^{+0.013}_{-0.006}$ と求められている[11]。これはEKBOのアルベドが彗星やケンタウルス天体と同様に低いことを示唆している。一方、最大のEKBOと考えられている冥王星は0.54とアルベドが高い。アルベド分布からは始源的な天体と分化した天体の比率が得られるため、複数のEKBOのアルベドを決定することが望まれる。ここで図5にアルベドを0.04で球形を仮定した場合のEKBOの日心距離と見かけの等級の関係を示す。サイズが10, 30, 100, 300, 500, 1000, 2000kmであるようなEKBOがある日心距離にいた場合にRバンドで何等として観測されるかを表している。

EKBOの総数はおよそ10⁴個（サイズ100km以上, $30 < R < 50$ AU）で、総質量は0.1地球質量程度と見

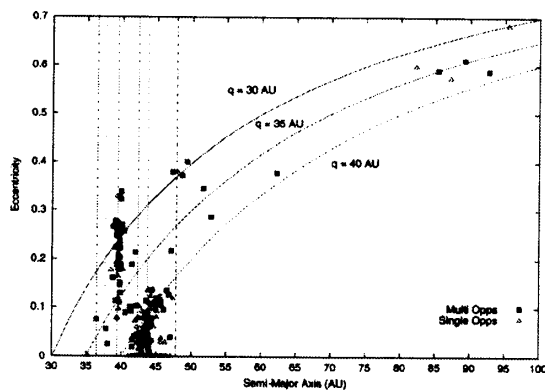


図4 EKBOの軌道長半径と離心率を100AUまででプロットした、軸は前の図と同じである。

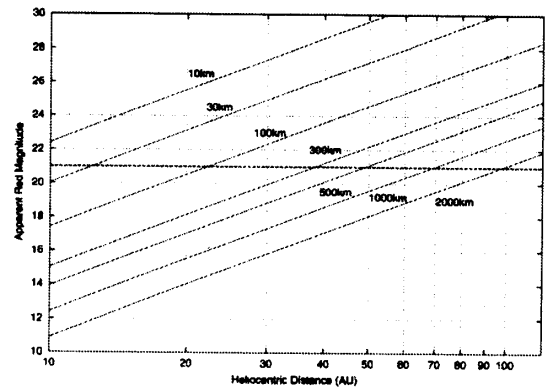


図5 球形で、アルベド 0.04だと仮定した場合のEKBOの日心距離と見かけの等級。横軸は日心距離(AU)で、縦軸はRバンドでの見かけの等級。点線は木曾シュミット望遠鏡の限界等級($m_R=21.0$)を表す。

積漏られている[6]。

表層物質の組成に関してはあまりよく分かっていない。これまでにスペクトルが得られている天体は1993SC（可視, 近赤外）, 1996TL₆₆（可視, 近赤外）, 1996TO₆₆（近赤外）のわずかに3つのみである。1993SCのスペクトルからは1.62, 1.79, 1.95, 2.20, 2.32 μ mに強い吸収が検出されていて、CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂などの炭化水素の固体の存在を示唆している。1996TO₆₆からは1.5および2.0 μ mに固体のH₂Oによる広い吸収バンドが検出されている[1]。このため、EKBOの組成は彗星とよく似たものであると推測されている。

光度関数、およびサイズ分布に関しては次の章で述べる。

3. 木曾太陽系外縁部サーベイ

サイズ分布は過去の天体同士の衝突の履歴を持っているという点で重要である。また、衝突破壊強度や初期状態の推定に役立つ。これまでに行われたサーベイによりRバンド 22等から26等の光度関数は比較的良好に決まっている。しかし、21等よりも明るい領域では掃天面積がまだまだに少なく存在密度が明らかになっていない。我々は特にサ

イズ分布に着目して、東京大学木曾観測所の口径105cmシュミット望遠鏡と2KCCDカメラを用いたシステムで、その広視野撮像能力を活かし、限界等級21.0等での太陽系外縁部のサーベイを継続的に行っている。このシュミット望遠鏡は焦点距離が3.3m、口径比がF/3.1の望遠鏡で、2KCCDカメラは画素サイズが24 μ mで、画素数が2047 \times 2047ピクセルの可視光のカメラである。このシステムでの視野は48分角 \times 48分角=0.64deg²であり、満月全体が余裕をもって入ってしまう広さである。このプロジェクトは黄道付近の広域サーベイによりサイズの大きな(>500km)EKBOの存在量を精密に評価し、サイズ分布の確定を目指している。また、現在計画中であるサイズの小さなEKBO(<30km)を狙ったすばる望遠鏡による深いサーベイと相補的な役割を担っており、このふたつのサーベイでサイズ分布の両端を決定することが目標である。木曾でのサーベイではサイズ分布のサイズの大きな領域でカットオフがあるかどうか注目している。カットオフある場合には太陽系の形成において重要なパラメータである外惑星の形成時間に対して制限を与えることが期待される。

EKBOはその見かけの動きにより、他の恒星や銀河と区別することが可能である。EKBO以外にも小惑星や彗星、ケンタウルス天体も見かけ上移動するため、一般に移動天体を検出することになる。検出数としてはメインベルト小惑星が圧倒的に多いことが容易に想像されるが、メインベルト小惑星とEKBOの区別はその見かけの移動量によって可能な場合が多い。衝付近での観測を考えた場合、メインベルト小惑星は典型的に1時間あたり数十秒角程度移動するが、EKBOの場合は1時間あたり数秒角しか移動しない。EKBOの見かけの移動量は次のように評価できる。EKBOも他の惑星や小惑星・彗星と同じく太陽をひとつの焦点とするケプラー運動をしている。そのため恒星時追

尾で撮像を行った場合、EKBOは見かけ上、恒星の間を移動することになる。その移動速度は地球とEKBOの位置関係により決まる。ところがEKBOの公転周期は200年以上であり、数時間という観測時間の間にはEKBOの公転はほとんど無視でき、見かけの動きを支配するのはむしろ地球の公転運動である。近似的にEKBOが止まっていると考えてよいため、見かけの動きは衝の付近にいるEKBOを対象とする場合

$$\frac{148}{R-1} \text{ arcsec/hr}$$

と非常に簡単な形で表現することができる。ここでRはEKBOの日心距離(単位はAU)である。日心距離が30AUのEKBOは見かけ上1時間あたり5秒角程度動き、日心距離が50AUのEKBOは見かけ上1時間あたり3秒角程度動く。EKBOが衝から離れた位置にいる場合には、見かけの動きは上の式で求められる量よりも小さくなるため、検出は困難になってくる。我々は、黄道上の反太陽方向を1時間インターバルで合計3回の撮像を行い、移動天体を探し出すという手法でEKBOのサーベイを行っている。一回ごとの積分時間は900秒である。

我々はこのサーベイのために、取得したデータから移動天体を自動的に検出するプログラムMODE(Moving Object Detection Engine)を開発した[8]。このソフトウェアは、

1. 一次処理
2. 導入誤差の見積り
3. スカイバックグラウンドの評価
4. 星像検出
5. それぞれの恒星の位置とフラックスの測定
6. 別フレームの恒星同士の同定
7. 移動方向、移動速度、等級による制限により移動天体を検出
8. 画像中の(x, y)から赤道座標への座標変換



1999年11月5日11:58 (UT)



1999年11月5日13:00 (UT)

図6 右上の方の四角で囲まれた天体が1996 TL₆₆である。左下の二つの天体はメインベルト小惑星。移動量の違いは明らかである。元のデータから12分角四方を切り出した。木曾観測所105cmシュミット望遠鏡により撮像。座標はR.A. 2°26′.0, Dec.+14°00′.

という手順で移動天体を探し出す。MODEは1998年より開発を行い、人工天体によるテストを繰り返し、また実際のデータでチェックすることにより現在では実用段階に入り、実際のサーベイで威力を発揮している。図6は1996TL₆₆ ($m_R \sim 20.7$, $R \sim 35$ AU) というEKBOを約1時間おきに撮像したものが、MODEはこのデータから実際のEKBOの自動検出に成功している。

4. サーベイの現状と今後

「木曾太陽系外縁部サーベイ」ではこれまでに黄道付近の20.4deg²の領域の捜索を行った。残念ながら新たなEKBOの検出はない。ポワソン分布を仮定した99%レベルでの $m_R < 21.0$ のEKBOの存在密度の上限値は 2.2×10^{-4} deg⁻²である。図7にEKBOの光度関数を示す。EKBOの光度関数は次のように単一の冪乗則により説明されている。

$$\log[\Sigma(m_R)] = \alpha(m_R - m_0)$$

ここで、 $\Sigma(m_R)$ はRバンドで m_R 等級よりも明るいEKBOの表面密度 (deg²) であり、 α と m_0 は定数である。 m_0 等級よりも明るいEKBOは1deg²あ

たり1個程度存在することになる。Jewittらは $\alpha = 0.58 \pm 0.05$, $m_0 = 23.27 \pm 0.11$ と求めている[6]。また、Gladmanらは $\alpha = 0.76^{+0.10}_{-0.11}$, $m_0 = 23.40^{+0.20}_{-0.18}$ と傾きのきつい値を出している[4]。明るい領域でカットオフがあるかどうかに興味深い点であるが、写真乾板によるサーベイしかなく、 $m_R < 21.0$ では上限値があるだけである。

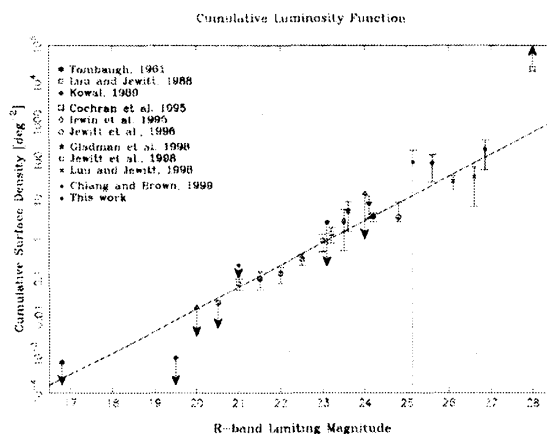


図7 これまでのサーベイにより得られているEKBOの光度関数を示す。横軸はサーベイの限界等級、縦軸はその限界等級よりも明るい1degあたりのEKBOの存在個数を表す。矢印はEKBOの検出がなく、上限値のみが求められていることを示す。直線はKenyonらによる微惑星集積のモデル計算により求められたサイズ分布を観測結果とフィッティングしたものである[7]。「木曾太陽系外縁部サーベイ」による上限値は「Thiswork」で示してある。

我々のサーベイによる上限値はまだサイズ分布に有意に制限を与えるものではないが、我々は今後もサーベイを継続してサイズの大きなEKBOの存在量を決定する。光度関数は観測から直接的に得られるが、観測では、明るい天体、すなわちサイズの大きな天体は遠くても観測しやすく、暗い天体、すなわちサイズの小さな天体は比較的近くに位置していても観測しにくいというバイアスがかかったデータしか得られない。光度関数からサイズ分布を求めるためには、現状では空間分布やアルベドを仮定しなくてはならない。真のサイズ分布を得るためにも、観測バイアスの少ない広域のサーベイを行い空間分布を決める必要がある。そのためには太陽系天体の観測に組織的にマシンタイムを投入できるように、広視野カメラを備えたサーベイ専用望遠鏡をシーイングが1.0秒角以下であるような条件のよいサイトに設置することが必要である。このような専用望遠鏡は、エッジワース・カイパーベルトだけでなく、惑星科学の他の分野をも大きく発展させると思われる。

最後になりましたが、「木曾太陽系外縁部サーベイ」は東京大学木曾観測所の所員のみなさまにサポートしていただいています。ここにお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Brown, R., Cruikshank, D. P., and Pendleton, Y., 1999, *ApJ*, 519, L101.
- [2] Edgeworth, K. E., 1949, *MNRAS*, 109, 600.
- [3] Fernandez, J. A., 1980, *MNRAS*, 192, 481.
- [4] Gladman, B., Kavelaars, J., Nicholson, P., Lored, T., Burns, J., 1998, *AJ*, 116, 2042.
- [5] Jewitt, D., and Luu J., 1993, *Nature*, 362, 730.
- [6] Jewitt, D., Luu., J., and Trujillo, C., 1998, *AJ*, 115, 2125.
- [7] Kenyon, S., and Luu, J., 1999, *ApJ*, 526, 465.
- [8] Kinoshita, D., Yamamoto, N., Sekiguchi, T., Abe, S., Watanabe, J., 1998, *Proceedings of ESO Workshop "Minor Bodies in the Outer Solar System"* (in press).
- [9] Luu, J., and Jewitt, D., 1997, *Nature*, 387, 573.
- [10] Marsden, B., "IAU: Minor Planet Center", <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/ps/mpc.html>
- [11] Thomas, N., Eggers, S., Ip, W.-H., Lichtenberg, G., Fitzsimmons, A., Keller, H. U., Williams, I. P., 1998, *Proceedings of ESO Workshop "Minor Bodies in the Outer Solar System"* (in press).
- [12] Trujillo, C., Jewitt, D., and Luu, J., 2000, *ApJ*, 529, L103