

重カマイクロレンズを用いた浮遊惑星の探索 UNBOUND OR DISTANT PLANETARY MASS POPULATION DETECTED BY GRAVITATIONAL MICROLENSING

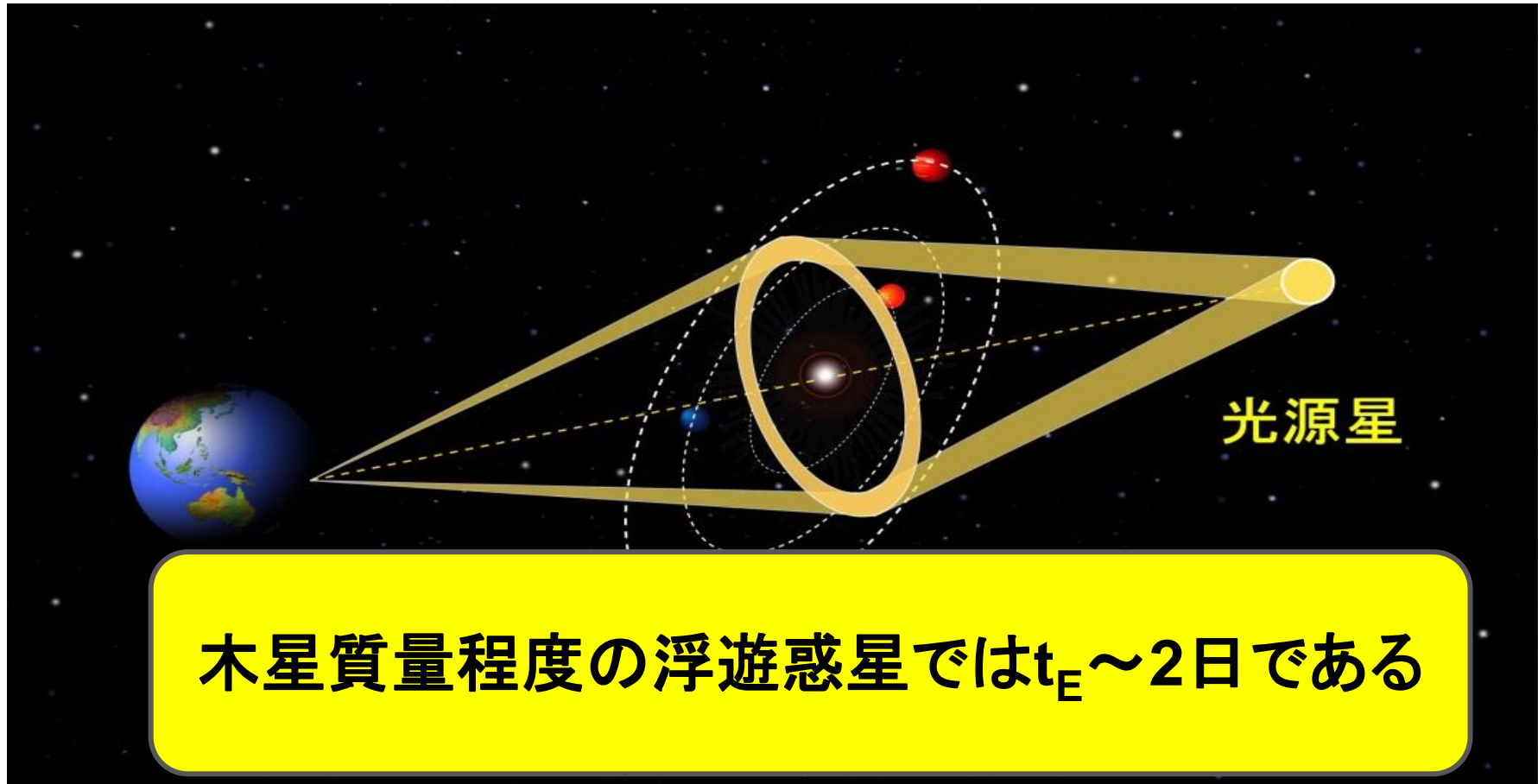
Sumi et al. 2011, Nature, 473, 349-352
arXiv:1105.3544v1

名古屋大学 CR研M1 鈴木浩太

発表内容

- 重力マイクロレンズとMOA
- 今回のイベント
 - Background events
 - Detection efficiency
- Unbound or distant planet
- 浮遊惑星の形成
- まとめ

重力マイクロレンズとは



$$t_E = \frac{R_E(M, D_l, D_s)}{v_t}, \text{ where } R_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_l(D_s - D_l)}{D_s}},$$

MOA-II

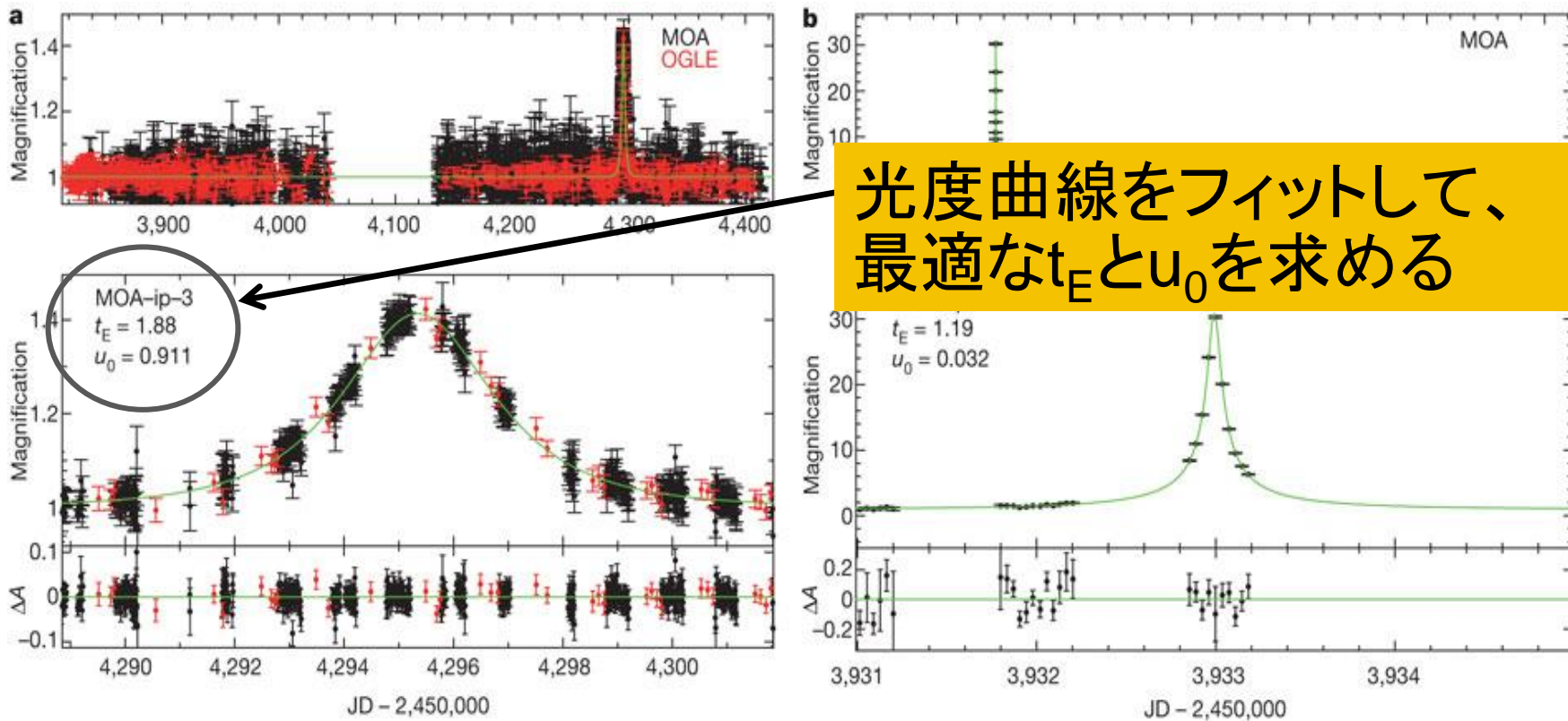
- 私たちMOA (microlensing observations in astronomy) グループではニュージーランドのMt. John天文台にある専用の望遠鏡を用いて観測をしている
- 銀河中心方向(バルジ)と大小マゼラン雲(LMC, SMC)を観測しており、特に重点を置いているバルジ方向では頻度の高いフィールドは20分に一度観測している

→この高い観測頻度により、木星質量程度の軽い天体の発見も可能になる



今回の浮遊惑星イベント

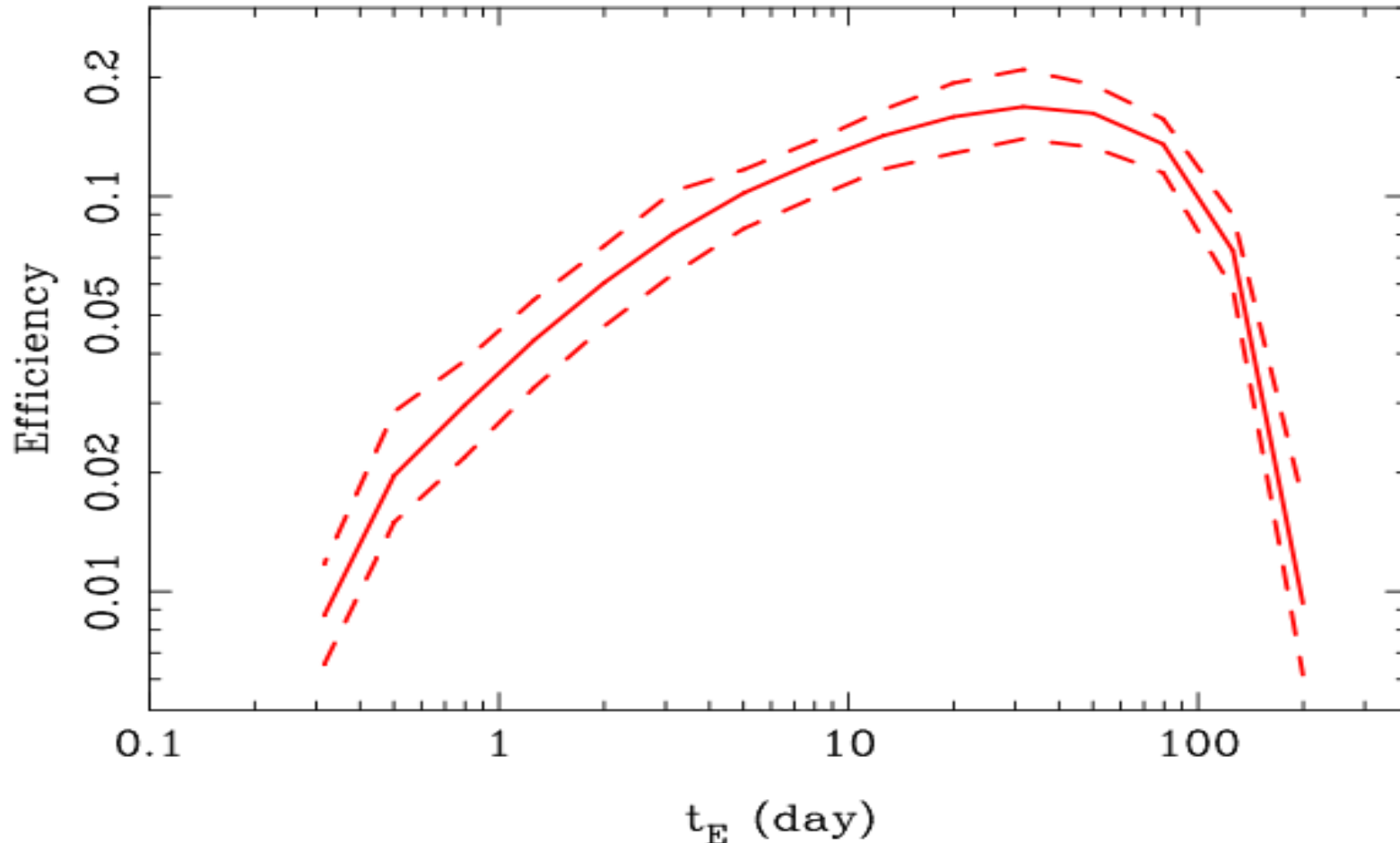
Light curves of event MOA-ip-3 and event MOA-ip-10.



MICROLENSING BY HIGH VELOCITY STARS AND GALACTIC HALO STELLAR REMNANTS

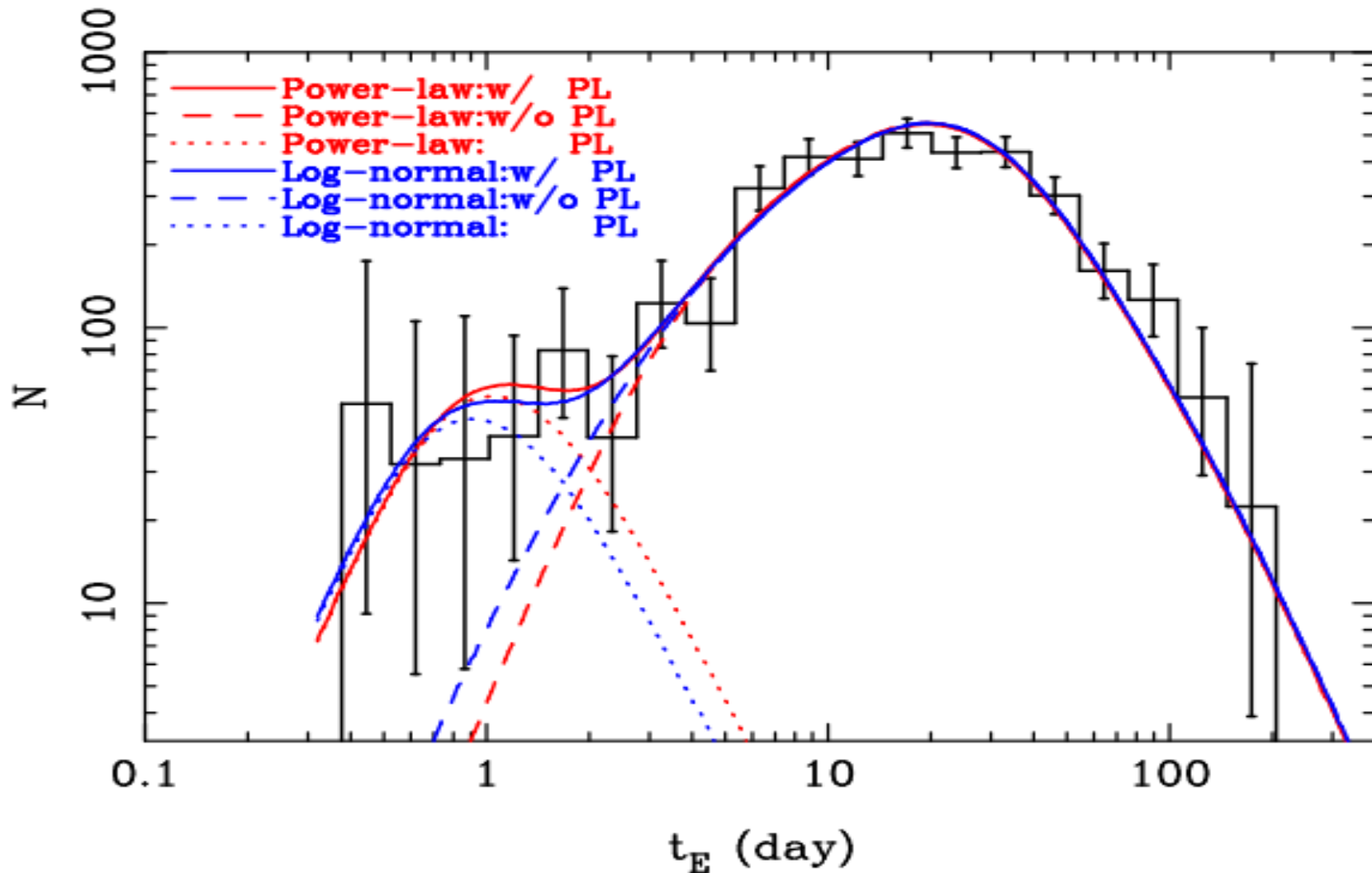
- バルジの星の平均的なイベントタイムスケールはおおよそ $t_E = R_E/v_t = R_E/(D|\mu) \sim 20$ 日
 - これを満たす μ (proper motion) は $\mu \sim 6 \text{ mas yr}^{-1}$
→ $t_E \leq 2$ 日となるためには $\mu \geq 60 \text{ mas yr}^{-1}$
- しかしそのような星は割合としてバルジの 6×10^{-5}
- イベントレートは $\sqrt{0.3M_\odot} / \sqrt{0.001M_\odot} \times 60/6 = 170$
→ よって $t_E \leq 2$ となるのは、 $6 \times 10^{-5} \times 170 = 0.01$ per star

DETECTION EFFICIENCY



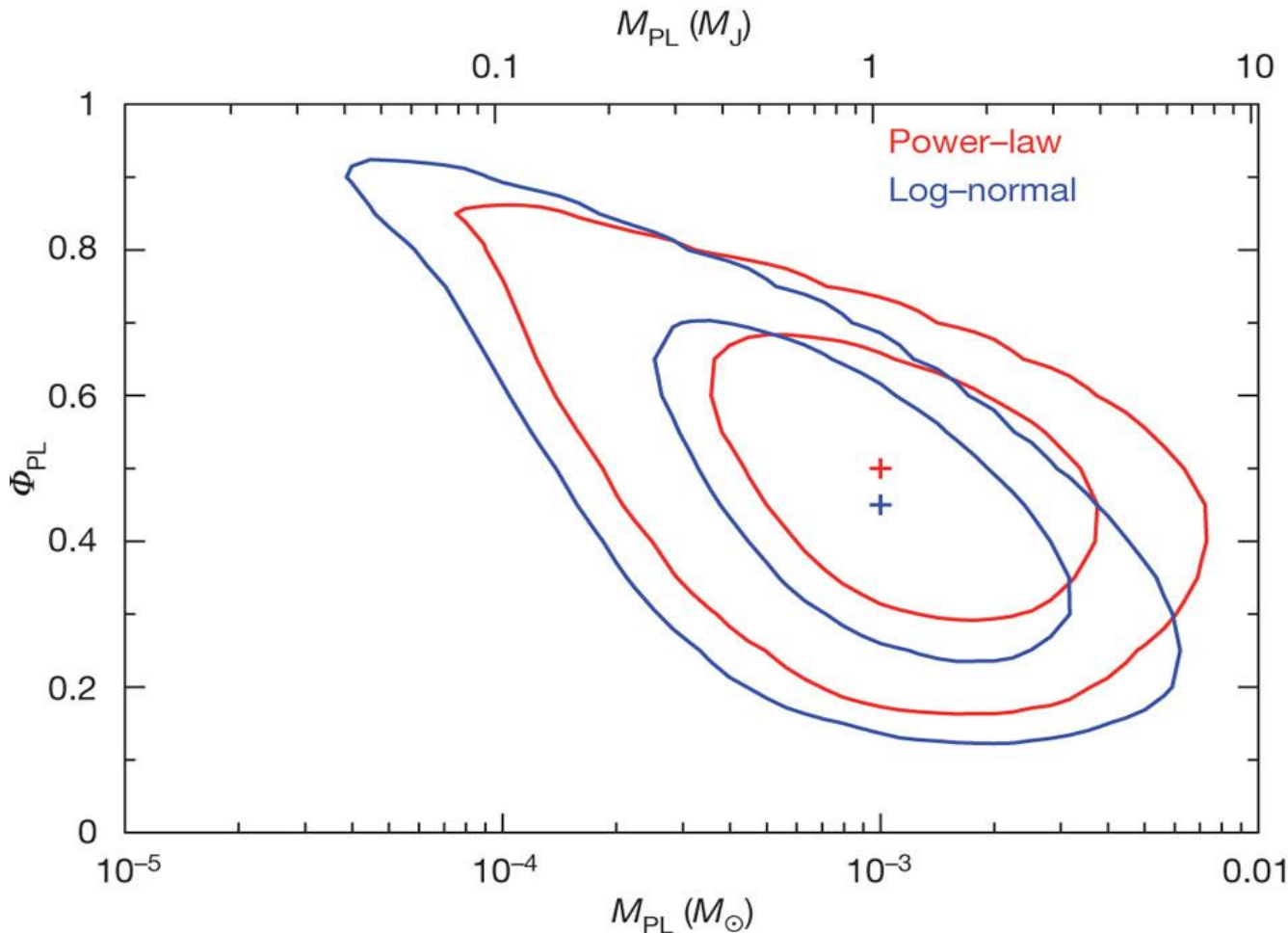
- 2000万のartificial eventをランダムに起こして、 t_E の分布を出した
 - $t_E \sim 1$ 日でも十分に検出できる

T_E DISTRIBUTION



- ヒストグラムは観測された474個のマイクロレンズイベント
- 青と赤の実線(mass function)はよく再現している

LIKELIHOOD CONTOUR

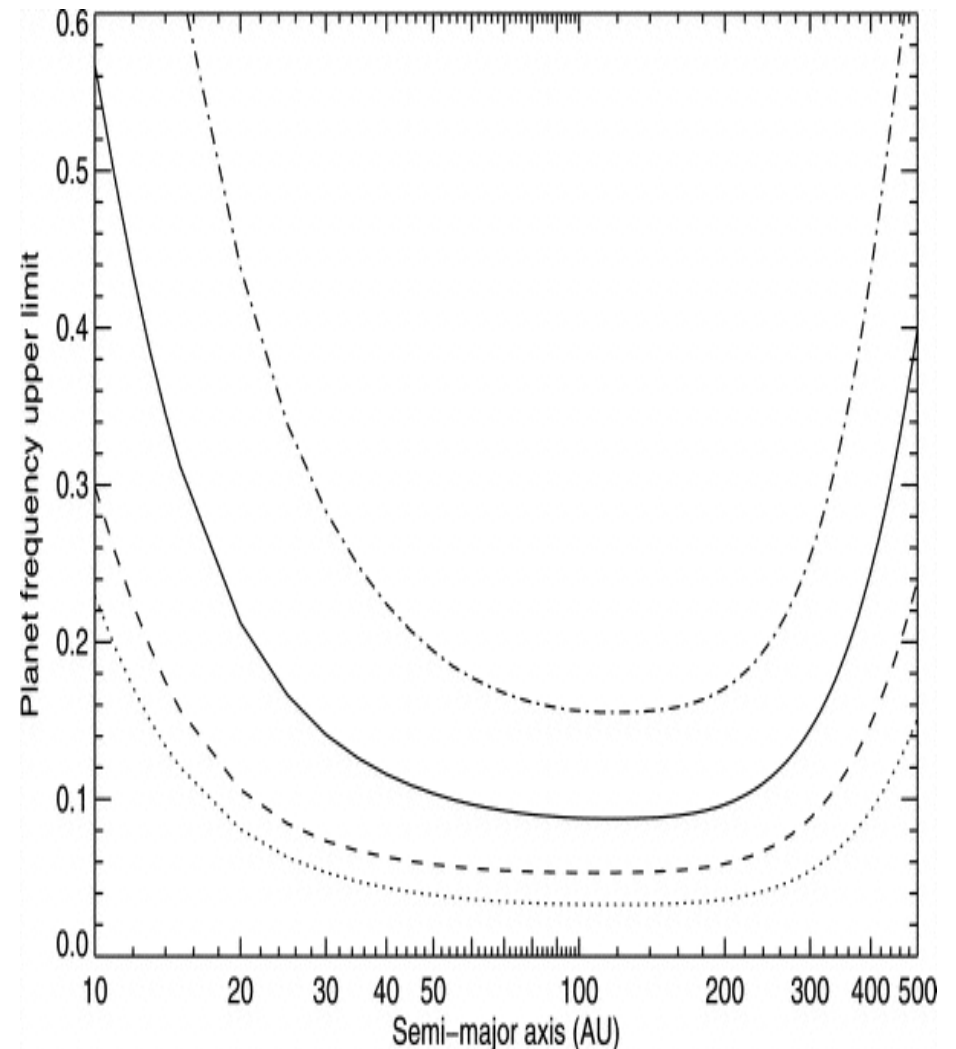


◆ どちらのモデルも内側のラインが68%のコンフィデンスレベル、外側のラインが95%のコンフィデンスレベル、”+”は maximum likelihood pointである

Power-law : $M_{PL} = 1.1^{+1.2}_{-0.6} \times 10^{-3}$, $\Phi_{PL} = 0.49^{+0.13}_{-0.13}$, より $N/N_* = 1.9^{+1.3}_{-0.8}$
 Log-normal : $M_{PL} = 0.83^{+1.2}_{-0.6} \times 10^{-3}$, $\Phi_{PL} = 0.46^{+0.13}_{-0.13}$, より $N/N_* = 1.8^{+1.7}_{-0.8}$

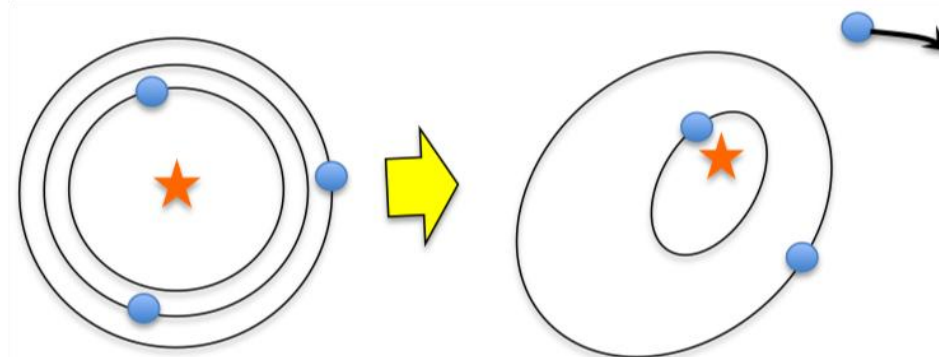
UNBOUND OR DISTANT PLANET

- Gemini Planet Imager (Lafreniere et al. 2007) により、軌道長半径が10-500AUの木星質量の惑星の数に上限がつけられている
 - 軌道長半径が10-500AUで木星質量以下の惑星をもつ星は全体の40%以下である
- 今回の発見で浮遊惑星が通常の恒星の1.8倍程度見ついているため、上の結果から75%は浮遊惑星であると考えられる
- ただし、土星質量程度以下の惑星である可能性は除外できない



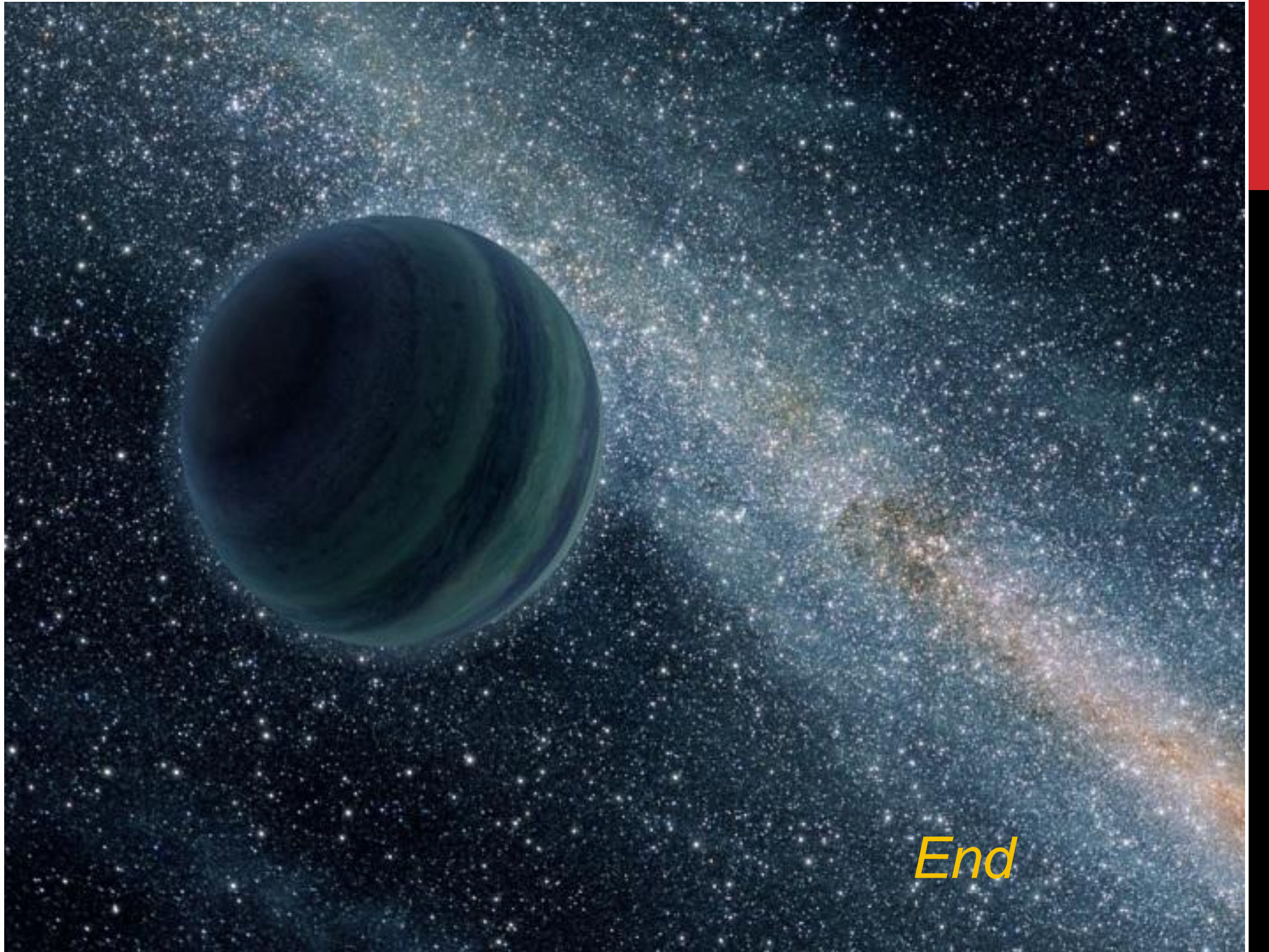
浮遊惑星の形成

- 原始惑星系円盤において複数の大型惑星が存在する場合、重力散乱され軌道から逸脱してしまったり、恒星との距離が大きな軌道に移動してしまうことが予想されている
- 最近の観測ではこれらの重力散乱が惑星を周期の短い軌道や離心率の大きい軌道に移動する大切な役割を果たしている
 - エキセントリックプラネット



まとめ

- 今回 $t_E \leq 2$ のイベントを10個発見した。この数から、木星質量の天体は最低でも通常の星の数のおよそ2倍 ($1.8^{+1.7}_{-0.8}$)存在することが分かった。
- これらの天体の多くは主星に束縛されておらず、浮遊惑星として宇宙空間に漂っているものだと考えられる
- 形成プロセスとしては原始惑星系円盤から形成され、重力散乱によりはじき飛ばされて出来た可能性が高い



End

PARAMETERS OF 10 SHORT-TIME EVENTS

ID	field	R.A. (2000)	Dec. (2000)	N_{t_E}	t_0 (JD')	t_E (days)	u_0 (R_E)	A_{\max}	I_s (mag)	d_{\min} (R_{E^*})
MOA-ip-1	gb1-4	17:46:24.506	-34:30:36.82	9	3883.24171	0.73 ± 0.08	0.028 ± 0.003	35.6	19.7	7.0
MOA-ip-2	gb4-3	17:52:34.143	-30:54:14.25	28	4223.88851	0.49 ± 0.10	0.400 ± 0.212	2.6	17.9	3.3
MOA-ip-3	gb5-7	17:54:58.325	-29:38:20.68	170	4295.34720	1.88 ± 0.12	0.911 ± 0.096	1.4	17.2	3.6
MOA-ip-4	gb5-8	17:54:24.543	-29:13:29.39	81	3961.38803	1.48 ± 0.12	0.271 ± 0.061	3.8	19.2	3.1
MOA-ip-5	gb9-2	17:57:17.008	-29:02:33.59	69	4169.60907	1.62 ± 0.69	0.126 ± 0.159	8.0	19.2	2.4
MOA-ip-6	gb9-4	17:59:19.977	-29:31:24.70	27	4189.49214	1.78 ± 0.24	0.499 ± 0.122	2.2	18.3	4.8
MOA-ip-7	gb9-5	17:57:36.678	-29:59:40.52	51	4370.69496	1.82 ± 0.87	0.143 ± 0.125	7.0	19.4	5.2
MOA-ip-8	gb9-5	17:59:34.877	-30:04:24.04	47	4013.14052	1.36 ± 0.15	0.103 ± 0.016	9.8	18.8	4.8
MOA-ip-9	gb10-5	17:57:52.952	-28:16:56.66	16	3910.81772	0.96 ± 0.21	0.163 ± 0.058	6.2	19.5	3.4
MOA-ip-10	gb11-9	18:09:00.076	-32:18:39.91	21	3932.99205	1.19 ± 0.04	0.032 ± 0.001	30.8	18.8	15.0

EVENT SELECTION CRITERIA

level	criteria	comments
cut0	$N_{\text{detect}} \geq 3$	Number of frames in which the object is detected.
cut1	$N_{\text{data}} \geq 500$ $N_{\text{out}} \geq 10$ $\chi_{\text{out}}^2/\text{dof} \leq 3$ $N_{\text{bump}} \geq 1$ $\chi_{3+} = \sum_i (F_i - F_{\text{base}}) / \sigma'_i \geq 80$	Number of data points Number of data points outside of the 120-day window χ^2 outside of the 120-day window Number of bumps in the window, where a bump has > 3 consecutive points $> 3\sigma'$ above baseline Total significance of consecutive points with $> 3\sigma'$
cut2	fitting converged $\chi^2/\text{dof} \leq 2$ $\chi_1^2/\text{dof} \leq 2$ $\chi_2^2/\text{dof} \leq 2$ $0.3 \leq t_E \leq 200$ days $\sigma_{t_E}/t_E \leq 0.5$ $\sigma_{t_E} \leq 12$ days $3824 \leq t_0 \leq 4420$ JD' $u_0 \leq 1$ $\sigma_{u_0} \leq 0.3$ $I_s \leq 20.0$ $(F_s - F_{\text{cat}})/F_{\text{cat}} \leq 3$ $\chi_{3+} \geq 70N_{2\sigma} - 500$ $\chi_{3+} \geq 45N_{3\sigma}$ OR $N_{3\sigma} \leq 2$	Fits never converge if parameters are degenerate χ^2 for all data χ^2 for $ t \leq t_E$ χ^2 for $ t \leq 2t_E$ Einstein radius crossing timescale Error in t_E Error in t_E Peak should be within observational period The minimum impact parameter Error in u_0 Apparent I -band source magnitude Source flux should not greatly exceed catalog flux Exclude systematic residuals (depending on total significance) same as above

BACKGROUND EVENTS

- **Cosmic-ray hits**
 - 同じ場所に続けてヒットすることはない
- **Fast moving objects**
 - イメージを見て判定できる、またはフィットされたパラメータが物理的ではない
- **Cataclysmic variables (CVs)**
 - 光度曲線が対象ではない、フィットパラメータが物理的ではない
 - 90%のコンフィデンスレベルでの混入の確率は11%
- **Background supernovae**
 - 非対称な光度曲線であり、増光期間が30日以上
- **Binary microlensing events**
 - 後述
- **Microlensing by high velocity stars and Galactic halo stellar remnants**
 - 後述