重力レンズ法による
太陽系外惑星系の発見

MOAによる暗天体の研究

名古屋大学太陽地球環境研究所
村木　綏

目次

1. 研究目的 (dark matter, extra-solar planets)
2. 研究方法　ー　マイクロ重力レンズ法
3. バリオニックダークマターは存在するのか？(LMC)
4. 2000-2004年のMOA I システムの成果 （GC)
5. 太陽系外地球型惑星の発見(Nature event)
6. 新MOA計画　ーMOA IIスタート とその現状

MOA = Microlensing Observations in Astrophysics

共同研究者

村木　綏、 伊藤好孝、 阿部文雄、 増田公明
松原　豊、 埣　隆志、 住　貴宏、 神谷浩紀
（名大STE研） 佐藤修二（名大理）、中村卓史
（京大理）、 大西浩次（長野高専）
M1 + M2　~6名

P. Yock (Auckland), J. Hearnshaw (Canterbury),
P. Kilmartin (Mt. John observatory), D. Sullivan
(Victoria), I. Bond (Massey univ. New Zealand)

1.　研究目的

（I)　我々の銀河のダークマターの研究

Paczynski's suggestion　　1986

Discovery of Macho　　1993

Famous debates in　　1998

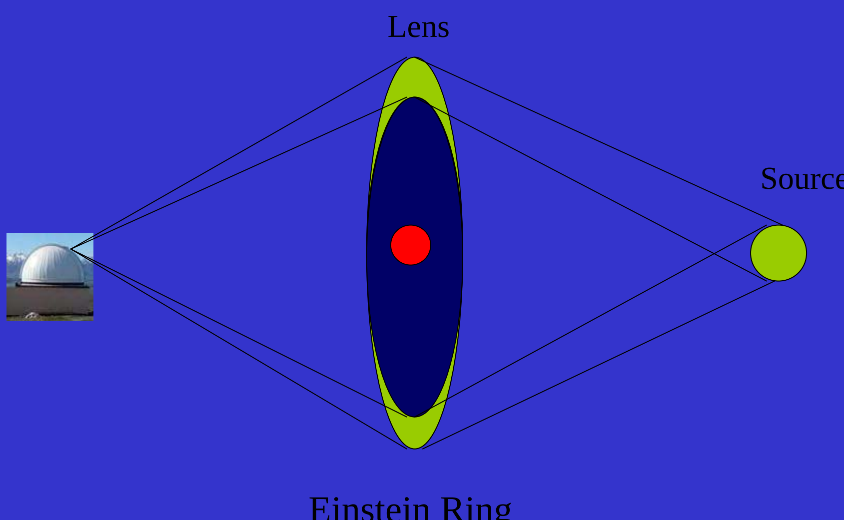
（II)　太陽系外地球型惑星の発見

Discovery of Planet

by OGLE and MOA　　2003

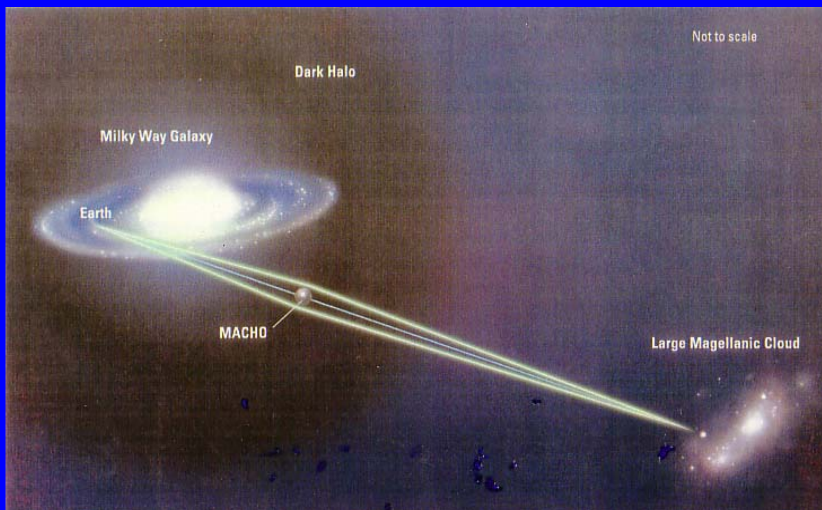
Macho = MAssive Compact Halo Objects

Gravitational microlensing



2. 研究方法

重力レンズで暗天体を見つけよう

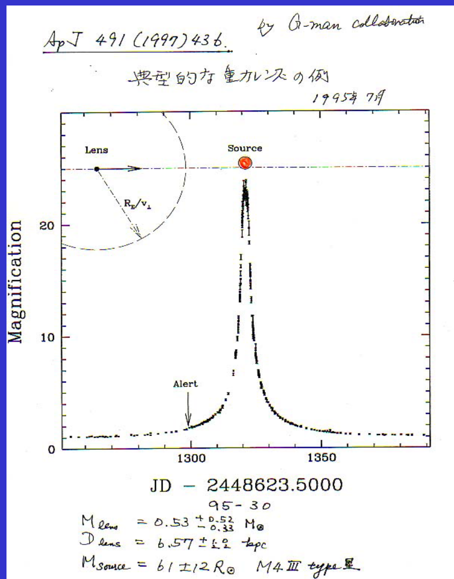


3. MACHOの探索の結果

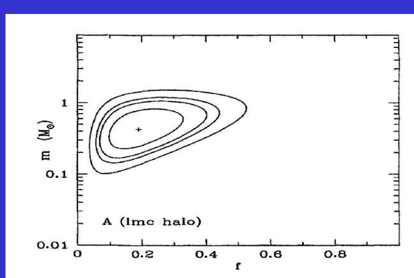
（1）確かにマイクロ重力レンズ効果はある

（2）白色矮星か褐色矮星かは論争中

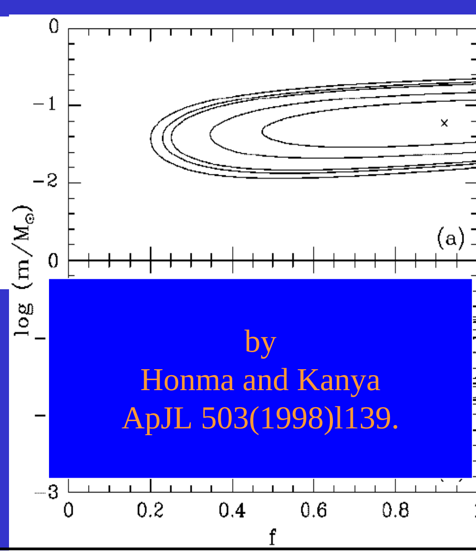
（1）確かにマイクロ重力レンズ効果はある



（2） 白色矮星か褐色矮星かは未定



by MACHO
collaboration
ApJ 486(1997)697



by
Honma and Kanya
ApJL 503(1998)l139.

(2)の論争の内容

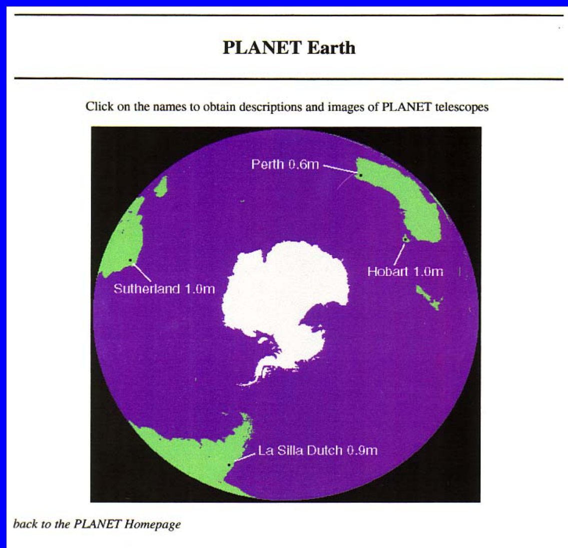
① HaloにMACHOは少なくとも20%はある。
MACHO collaborationの結論

② Haloには褐色矮星が一杯つまっている。
本間-官谷の解析 → VELAに期待

MACHOがあるという結論そのものに対してクレームがついた。

→ 1998年のScience に載った論争
Science 281 (1998) 332 by J Glanz

4.Planet groupからの新しい問題提起

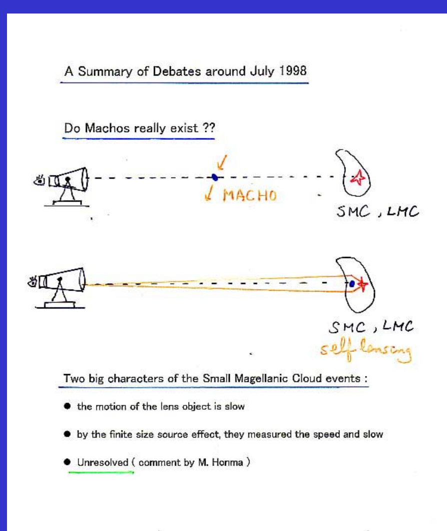


PLANET Earth

Click on the names to obtain descriptions and images of PLANET telescopes

back to the PLANET Homepage

Machoは本当にあるのか？ Self lensing と違うのか？



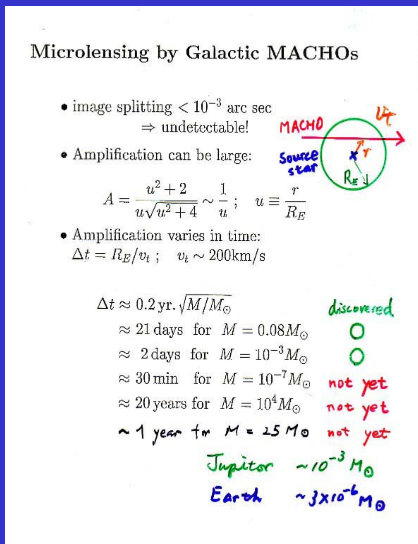
A Summary of Debates around July 1998

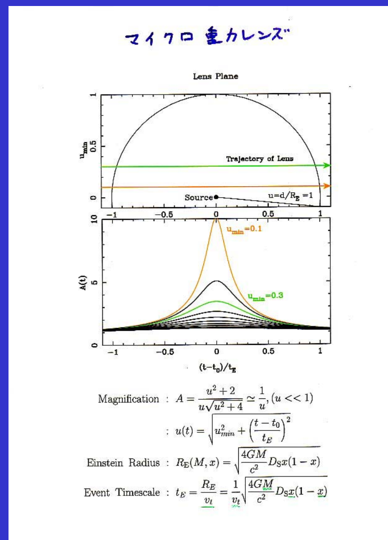
Do Machos really exist ??

Two big characters of the Small Magellanic Cloud events :

- the motion of the lens object is slow
- by the finite size source effect, they measured the speed and slow
- Unresolved (comment by M. Honma)

Microlensing Basics (2)
縮退を解く





5. 結論

- Machoの存在は依然不明である。 何故なら Machoの距離が測れないからである。
- そこで縮退を解く方法が提案された。

(1) EAGLE eventsをねらえ！

by Nakamura and Nishi

(2) finite source effectをねらえ！

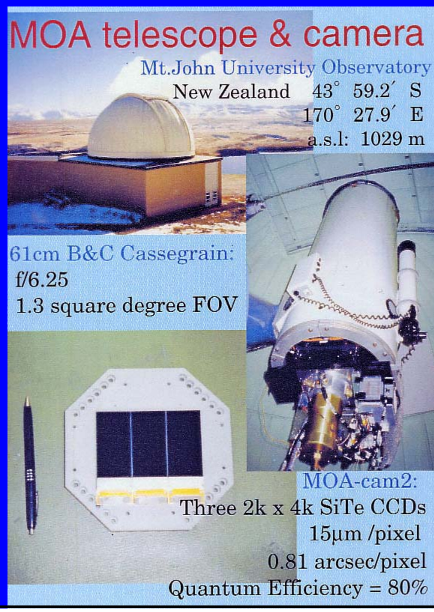
binary lens events を集める

(3) Parallax eventを集めよ！

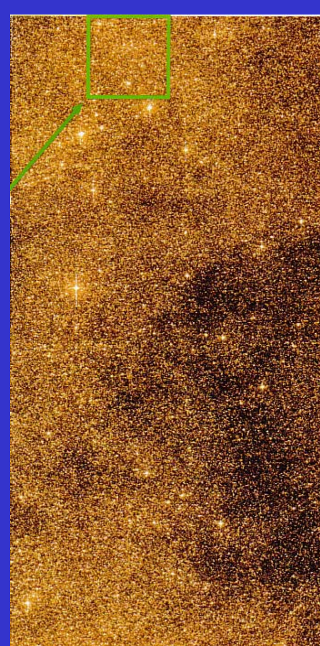
従って大型装置が必要となる。

(1.8m望遠鏡 ＋ 80million pixel CCD camera)

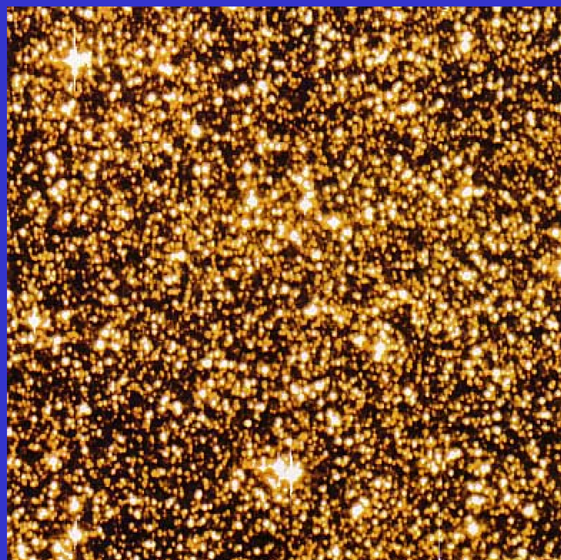
6. MOA　2000-2004 年度の紹介



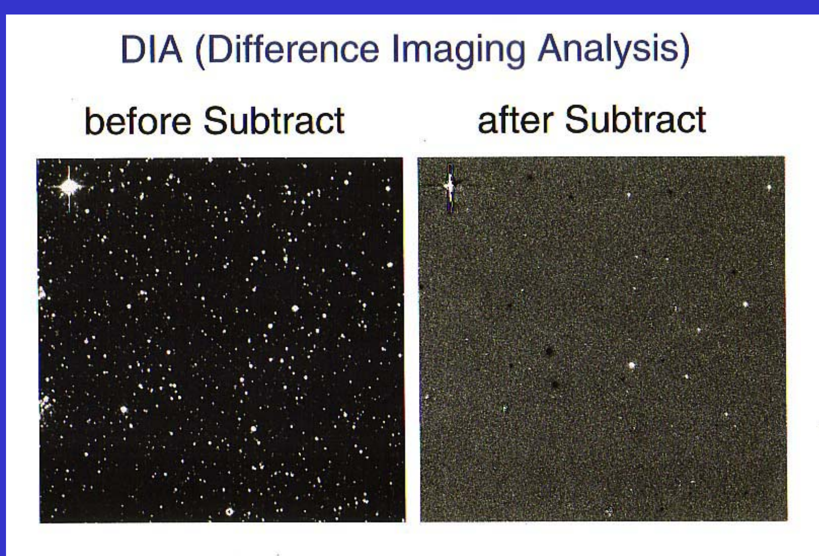
One tip of CCD
ngb1-1
Dophot　50 min
DIA　　10 min
green zone 1/32



Ngb1-1 (1/32) 800万画素/32＝25K

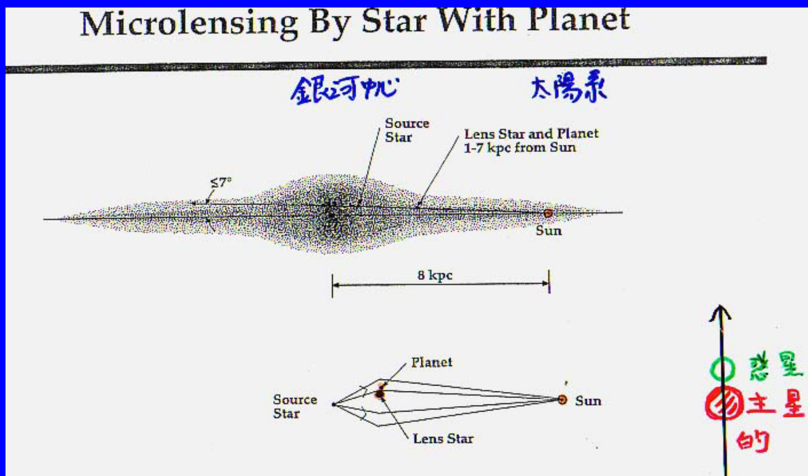


差分測光法

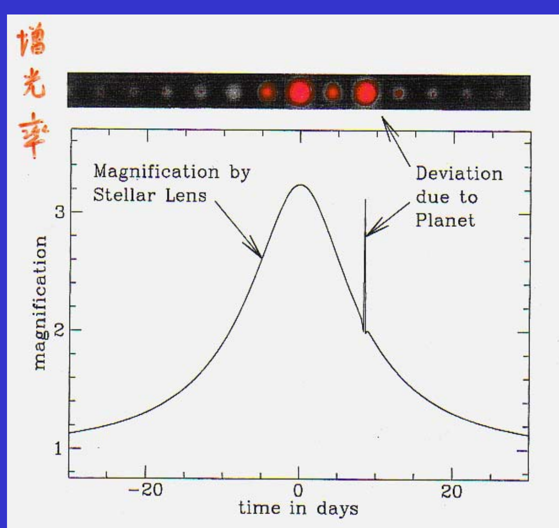


7. 太陽系外惑星探査

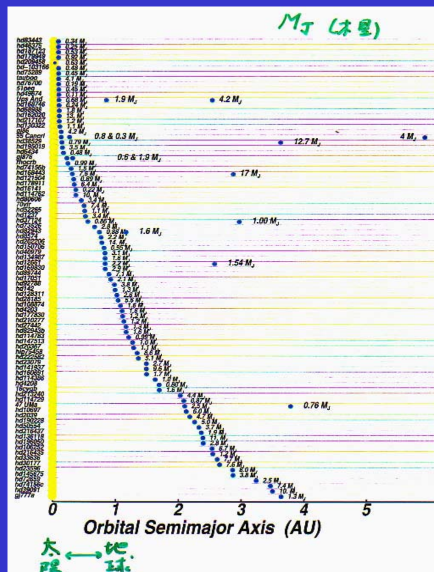
銀河中心方向を見る



惑星特有の増光度曲線

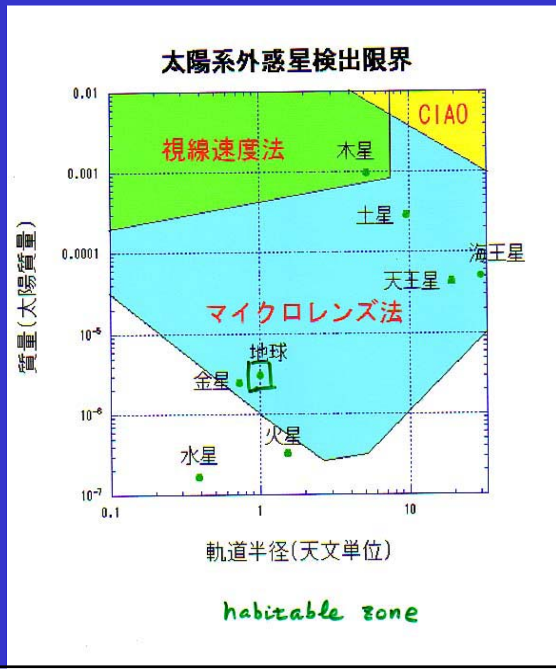


最近の太陽系外の惑星リスト

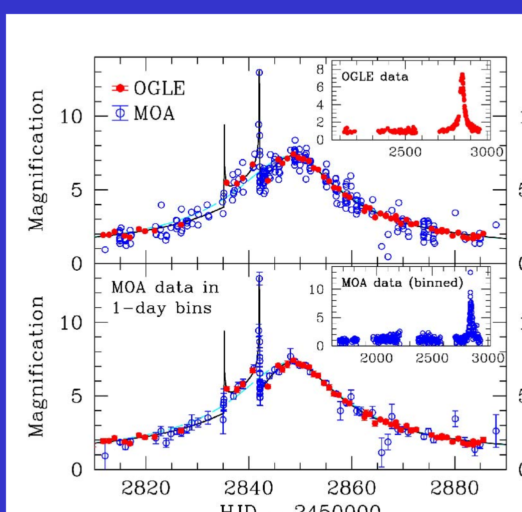


太陽系外惑星

- 太陽の回りを周回する重い惑星が多い
- これは単なる観測のバイアスではないのか？
- 理論的には最初の分子雲の重さによる
- 地球型惑星を見れるのは現在重力レンズのみ
- ここにMOA-OGLEへの期待がある



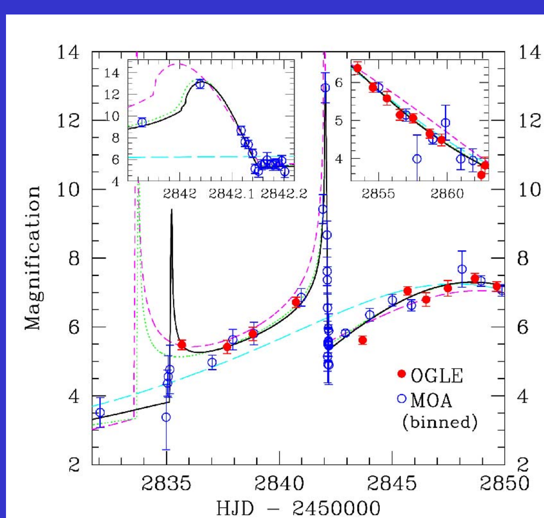
OGLE 2003-BLG-235
MOA 2003-BLG-53 event



Finite source effectを使うと何がわかるか

1. Source starの色から星の大きさが推定できる
   今回はG-starで　等級がI=19.7等だから
   銀河中心部の星であることがわかる。（8kpc）
2. すると星の視野角がわかる。
   (今回は0.50±0.05 μ arc sec)
3. するとレンズ天体の相対速度が求まる
   （今回は$R^*=5.8\text{x}10^5$km, 1.4hours, v=50km/s)
4. するとレンズ天体のEinstein半径が求まる
   （今回は50km x 61days/2≈$1.3\text{x}10^8$km≈1AU)

MOA-2003-BLG-53 OGLE2003-BLG-235 event
APJL 606 (2004) L155



- Fit parameter

t_E = 61.6 ± 1.8 days

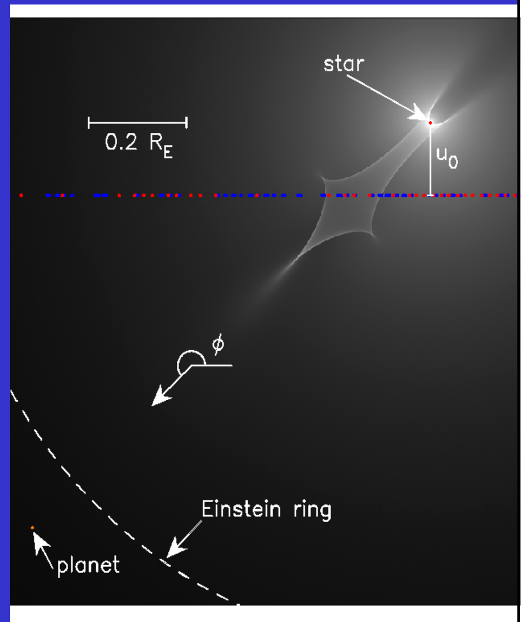
u_{min}= 0.133 ±0.003

$A_{projection}$ = 1.12R_E

M_{planet}/M_{source}=
0.0039 ±0.007

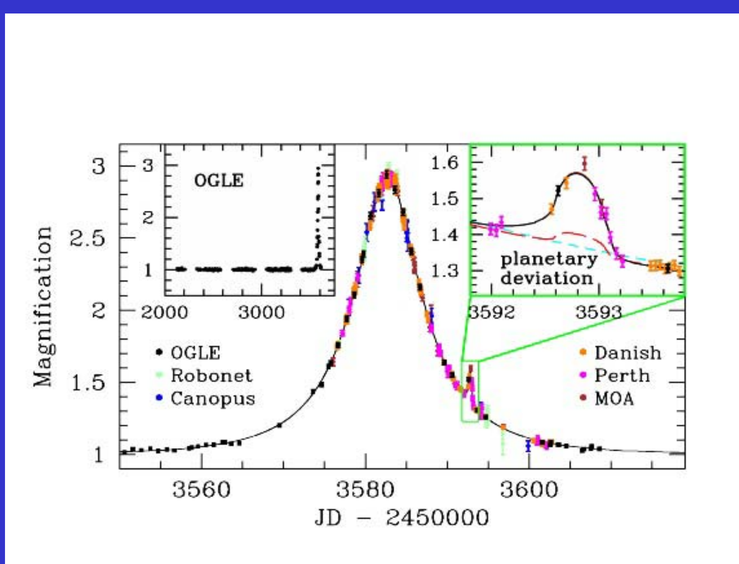
t*= 0.059 ±0.007 days or
θ_*/θ_E=0.00096
±0.00011

D_{lens}=5.2kpc, M_{lens}=0.36
Planet mass=1.5 J +0.1-1.2
3AU +0.1+1.7 AU

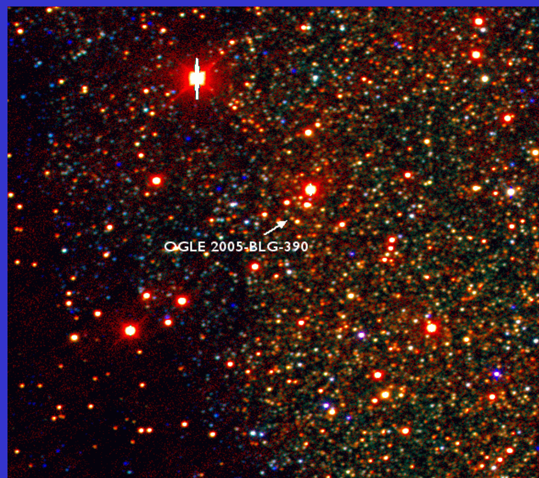


nature event

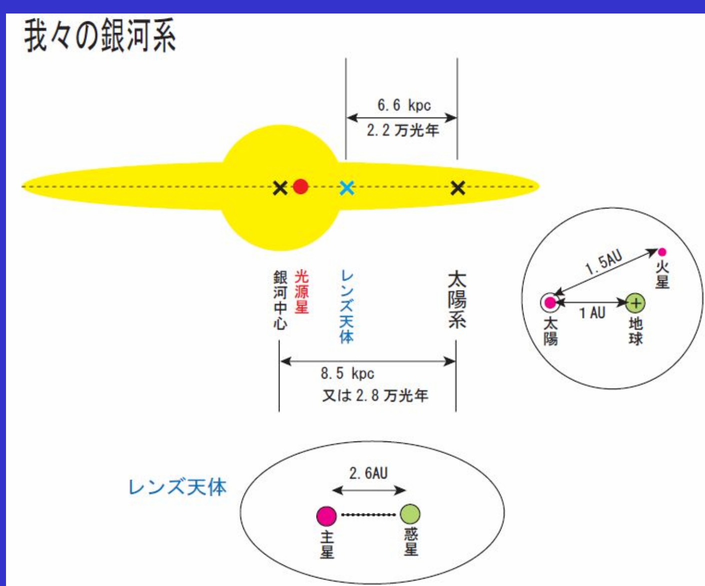
2005年8月9日に見つかった惑星



光源に利用した星



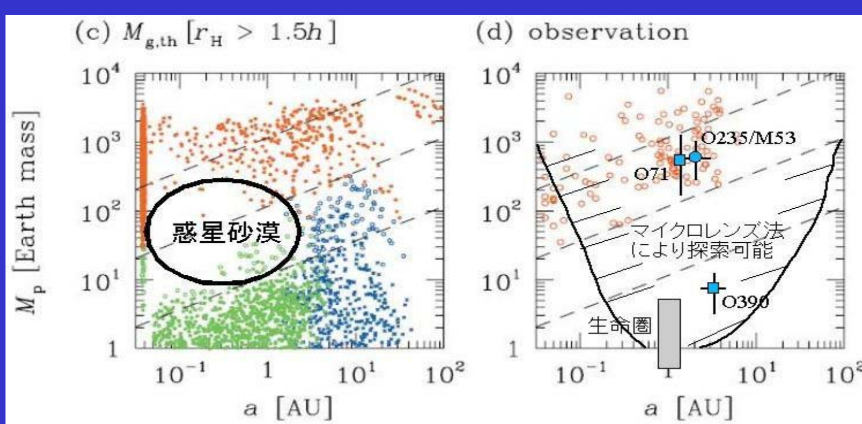
我々の太陽系との比較



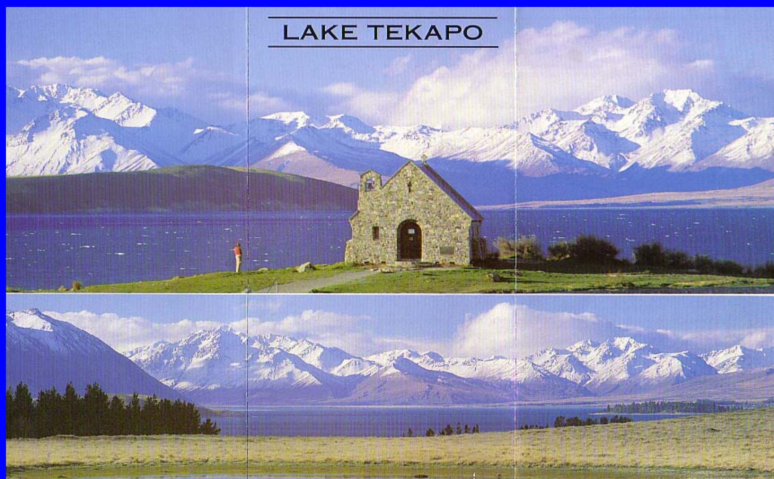
“太陽系の兄弟”のパラメーター

- 主な数値
- 光源として利用した星の性質
- 距離：　2.8万光年かなた、銀河中心近傍の星
- 半径：　太陽の9.6倍の赤色巨星
- 惑星系
- 距離：　2.2万光年かなた、銀河中心付近
- 質量(主星）：　太陽の1/5
- (惑星）：　地球の5.5倍
- 軌道：　惑星は太陽-地球間の2.6倍
- 温度：　零下 – 220度と予想

今回の発見の科学的意義

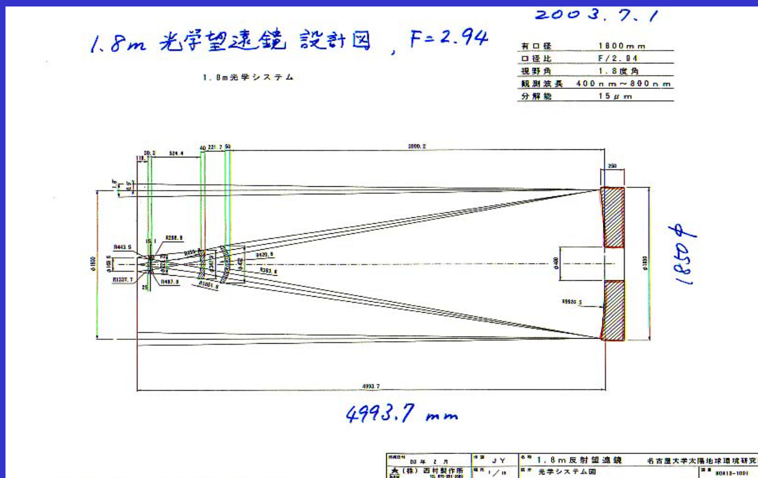


8. MOA 1.8m の建設報告

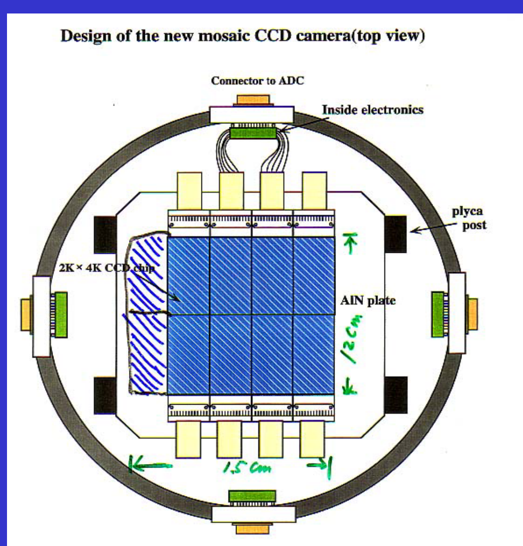


Mt. John observatory of Canterbury university (1031m) Lake Tekapo (713m)

1.8m　望遠鏡設計図



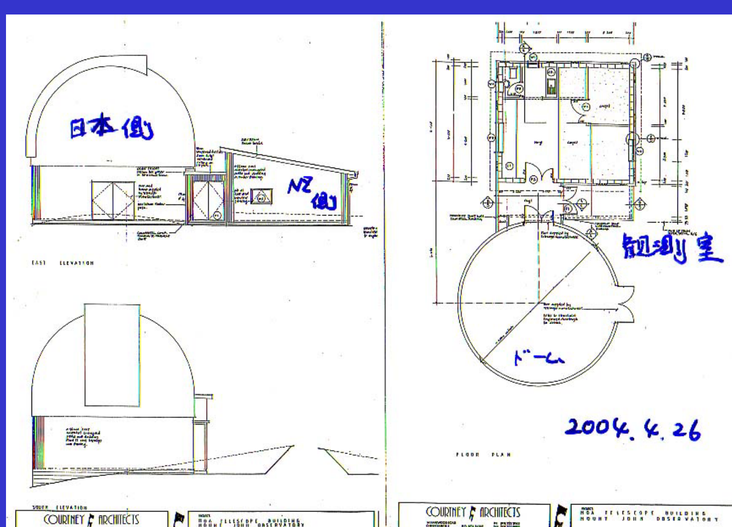
Large CCD camera 8k x 10k で
２ 平方度を一挙に見よう！



CCD Mount and Array

10 chips were mounted in July 2004.

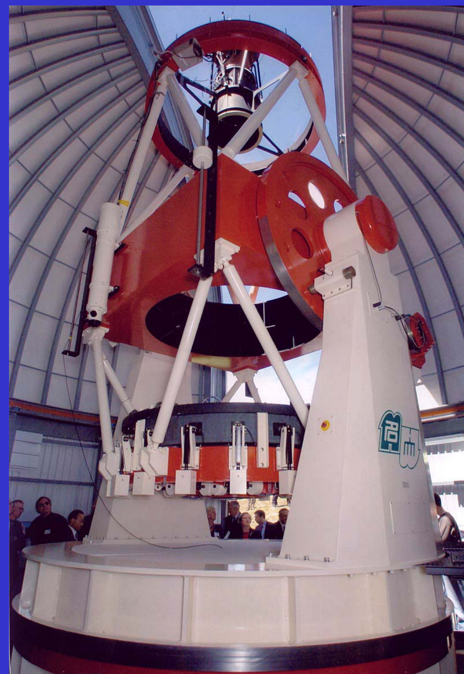
MOA1.8m 望遠鏡用ドームと計算機用建物



2004年9月　ドームの建設始まる

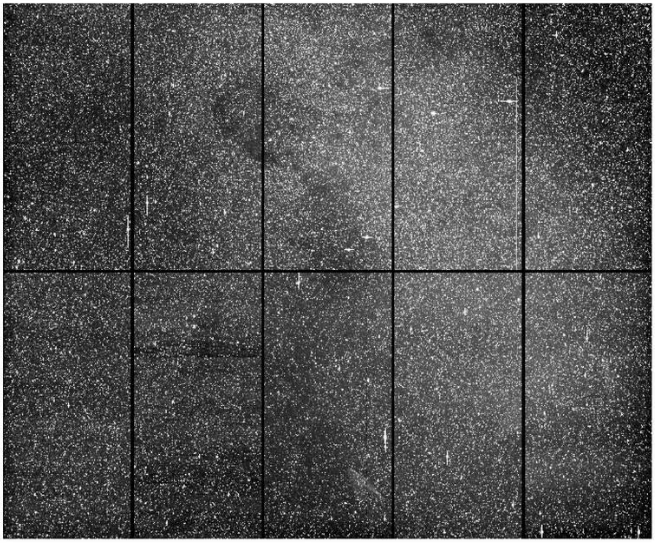
2004年9月12日　骨組み完成

1.8m望遠鏡の完成
2004年10月末



December 1st 2004 opening ceremony

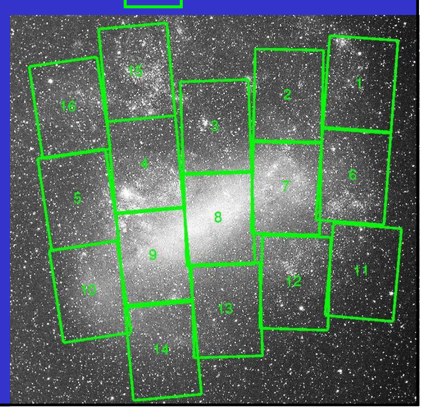
Image of the Galactic Bulge



Observation target(LMC)

- 16 fields
- 300 seconds exposure (@new moon)
- 90 minutes for 1 cycle

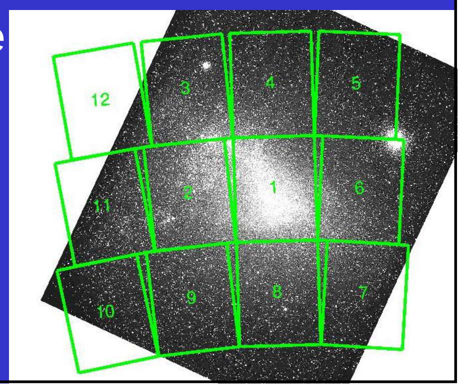
=2.2deg^2



Observation target(SMC)

- 12 fields
- 300 seconds exposure (@new moon)
- 70 minutes for 1 cycle

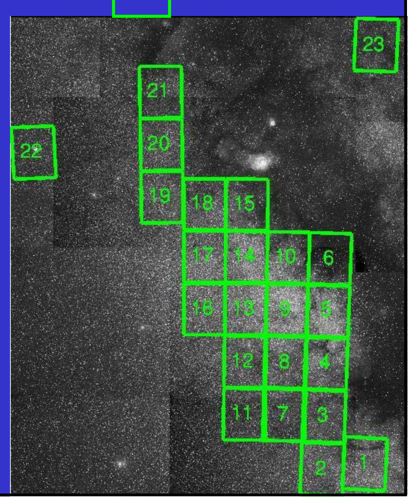
=2.2deg^2



Observation target(GB)

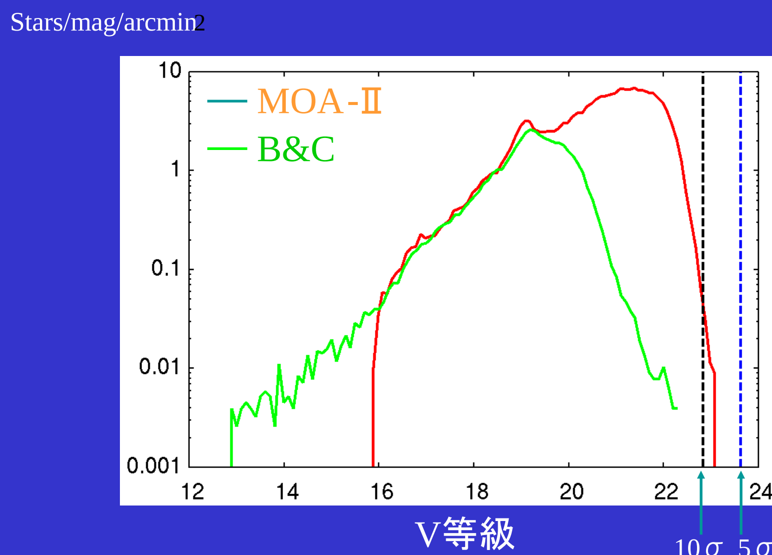
- 23 fields
- 100 seconds exposure (@new moon)
- 60 minutes for 1 cycle

=2.2deg^2



イベント数見積り(観測される星の数)

DoPHOTによる光度関数(LMC2)と限界等級



Limiting magnitude

- Estimating V-band limit magnitudes for uncondensed field(lmc2) & dense field(lmc8)

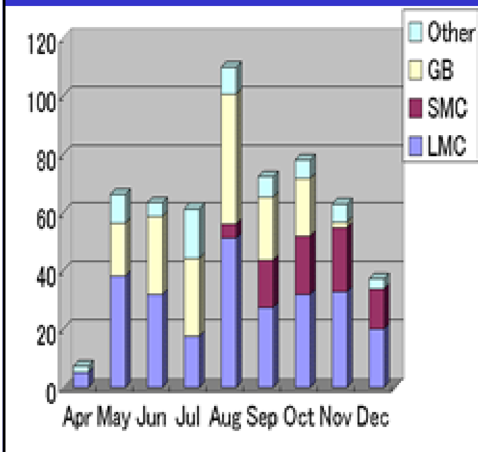
Airmass: 1.1
Seeing: 1.5 arcsec
Readout noise: 3.7 ADU
Gain: 1.9 electrons/ADU

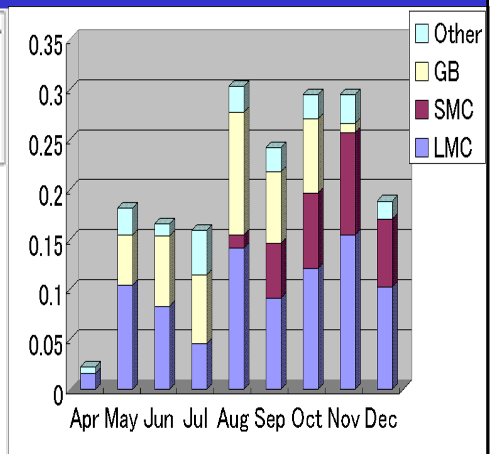
lmc2: sky background=21.63mag/arcsec^2
-> V_{limit} = 22.8 mag(S/N>10)
lmc8: sky background=20.85mag/arcsec^2
-> V_{limit} = 22.5 mag(S/N>10)

観測実績

(hour) observation time

observation rate





observation rate=observation time / night time

Number of stars

- Estimation of observing number of stars in whole our LMC fields
- assumption: core 3 fields, each region we observe 12M stars/field; outer 13 fields we see 5M stars/field

12.3Mstars * 3fields + 4.8Mstars * 13fields

~ 100Mstars

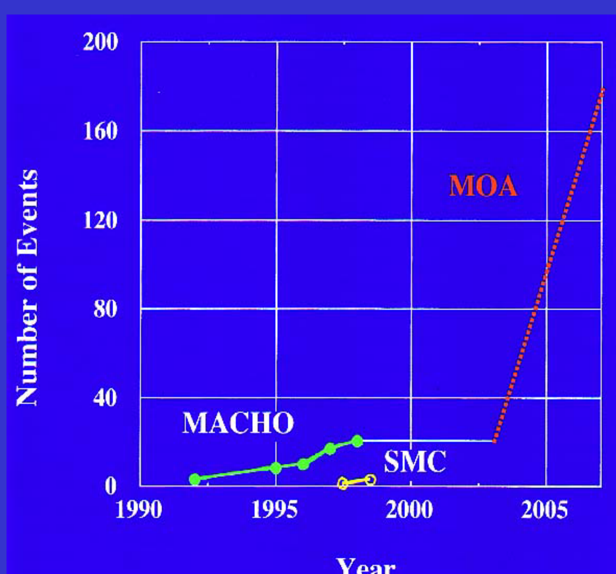
Event rate

- Event rate can be estimated roughly with observing number of stars

100Mstars * (365 / t) * ε * τ events/year
where t~80 days: event time scale,
ε : detection efficiency,
$\tau \sim 10^{-7}$: optical depth

-> 46 * ε events/year

1.8m専用望遠鏡でイベントを10倍にする

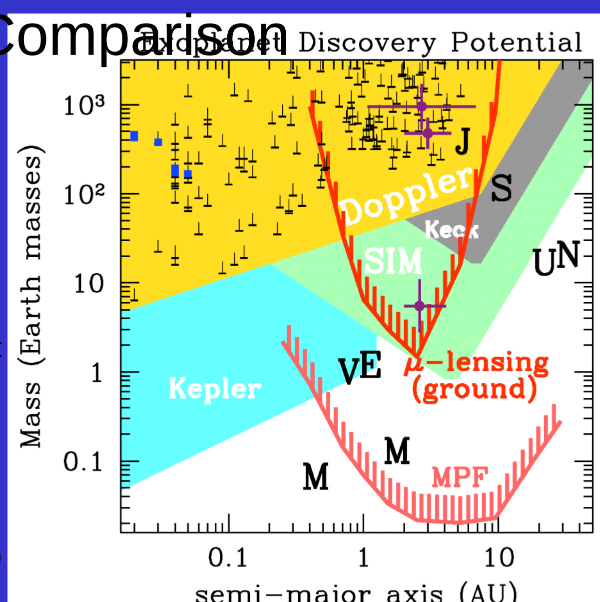


将来計画

- 衛星から
- 地上から

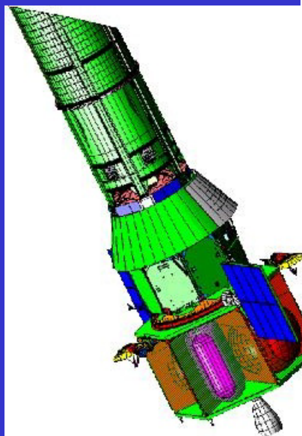
Planet Detection Sensitivity Comparison

- Sensitivity to all Solar System-like planets
  - –Except for Mercury & Pluto
- most sensitive technique for a ≥ 1 AU
- Good sensitivity to “outer” habitable zone (Mars-like orbits) where detection by TPF is

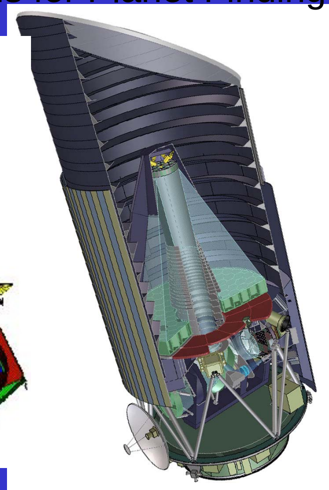


Updated from Bennett & Rhie (2002) ApJ 574, 985

Similar Designs for Planet Finding & Dark Energy



MPF



SNAP

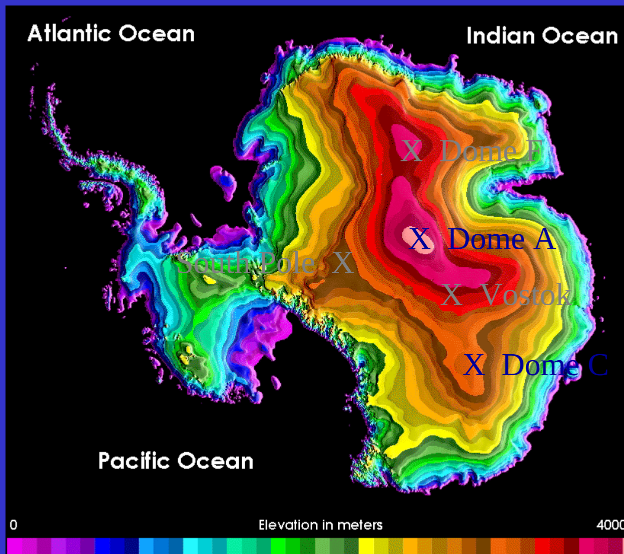
DESTINY

Wide-FOV near-IR optimized telescopes: Joint Mission?

- 3-mirror anatigmatic telescopes, ~1 sq. deg. FOV & <1.7μm HgCdTe detectors

将来計画　南極点での観測

Antarctica is also very high



USGS image

もっとイベントを！

・美しい自然と南十字星の
　輝く　Tekapo　に来てね。

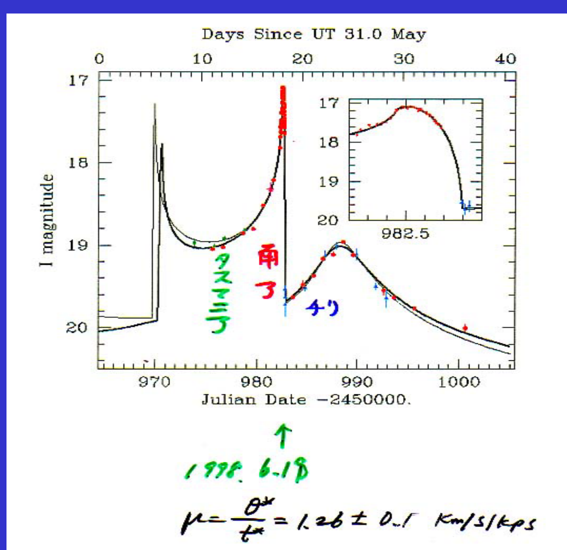
・今後ともMOAを宜しく！

・ご静聴ありがとうございました。
The End

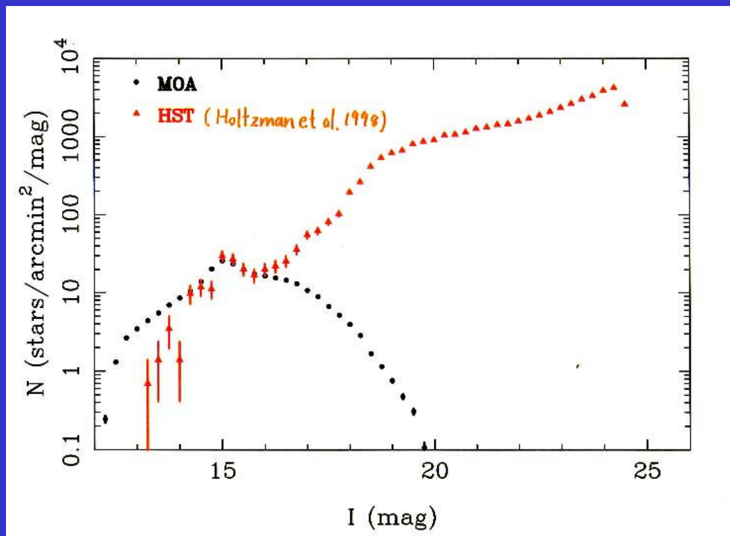
New MOA telescope f=3, d=1.8m

MOA

SMC event by the Planet collaboration

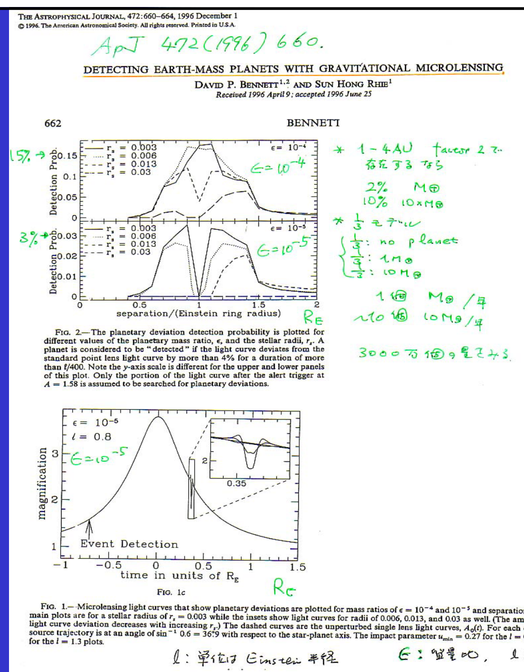


星の等級と個数



どのくらいの確立で観測できるか？

1－10M_J
for 3000万個



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 472:660–664, 1996 December 1

© 1996. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

ApJ 472(1996) 660.

DETECTING EARTH-MASS PLANETS WITH GRAVITATIONAL MICROLENSING

DAVID P. BENNETT[1,2] AND SUN HONG RHIE[1]

Received 1996 April 9; accepted 1996 June 25

662 BENNETT

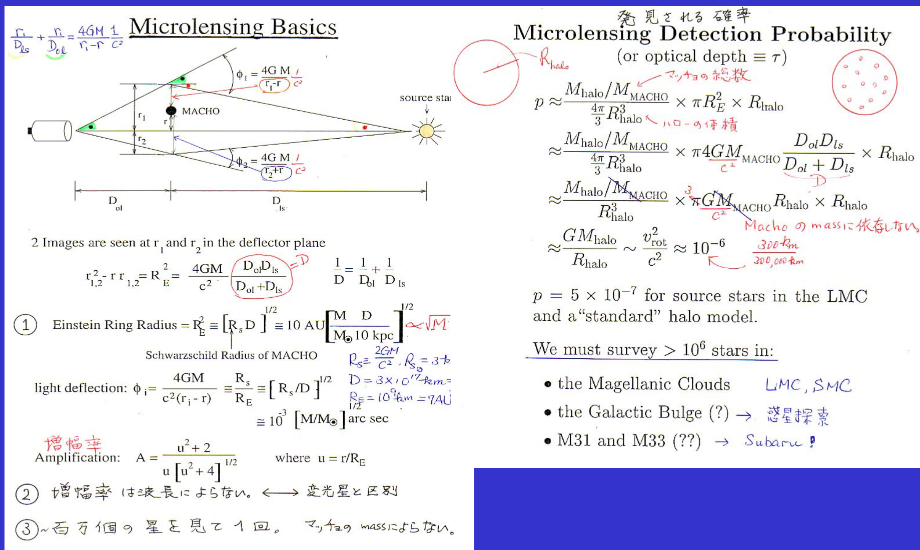
FIG. 2.—The planetary deviation detection probability is plotted for different values of the planetary mass ratio, ϵ, and the stellar radii, r_s. A planet is considered to be "detected" if the light curve deviates from the standard point lens light curve by more than 4% for a duration of more than $\hat{t}$/400. Note the y-axis scale is different for the upper and lower panels of this plot. Only the portion of the light curve after the alert trigger at $A = 1.58$ is assumed to be searched for planetary deviations.

FIG. 1c

FIG. 1.—Microlensing light curves that show planetary deviations are plotted for mass ratios of $\epsilon = 10^{-4}$ and 10^{-5} and separations main plots are for a stellar radius of $r_s = 0.003$ while the insets show light curves for radii of 0.006, 0.013, and 0.03 as well. (The ampl light curve deviation decreases with increasing r_s.) The dashed curves are the unperturbed single lens light curves, $A_0(t)$. For each of source trajectory is at an angle of $\sin^{-1} 0.6 = 36.9°$ with respect to the star-planet axis. The impact parameter $u_{min} = 0.27$ for the $l = 0.$ for the $l = 1.3$ plots.

l：単位は Einstein 半径 ϵ：質量比，

Microlensing Basics （1）



Microlensing Basics

$\frac{r_1}{D_{ls}} + \frac{r_1}{D_{ol}} = \frac{4GM}{r_1 - r}\frac{1}{c^2}$

2 Images are seen at r_1 and r_2 in the deflector plane

$r_{1,2}^2 - r\, r_{1,2} = R_E^2 = \frac{4GM}{c^2}\frac{D_{ol}D_{ls}}{D_{ol}+D_{ls}}$ (= D) $\quad \frac{1}{D} = \frac{1}{D_{ol}} + \frac{1}{D_{ls}}$

① Einstein Ring Radius $= R_E^2 \cong [R_s D]^{1/2} \cong 10\ \mathrm{AU}\left[\frac{M}{M_\odot}\frac{D}{10\ \mathrm{kpc}}\right]^{1/2} \propto \sqrt{M}$

Schwarzschild Radius of MACHO

$R_s = \frac{2GM}{c^2}$, $R_{s\odot} = 3$ km
$D = 3\times10^{17}$ km
$R_E = 10^9$ km $= 7$ AU

light deflection: $\phi_i = \frac{4GM}{c^2(r_i - r)} \cong \frac{R_s}{R_E} \cong [R_s/D]^{1/2}$

$\cong 10^{-3}\ [M/M_\odot]^{1/2}$ arc sec

増幅率
Amplification: $A = \frac{u^2+2}{u[u^2+4]^{1/2}}$ where $u = r/R_E$

② 増幅率は波長によらない。 ⟷ 変光星と区別

③ ~百万個の星を見て1回。 マッチョのmassによらない。

Microlensing Detection Probability

発見される確率

(or optical depth $\equiv \tau$)

R_{halo}

$$p \approx \frac{M_{halo}/M_{MACHO}}{\frac{4\pi}{3}R^3_{halo}} \times \pi R_E^2 \times R_{halo}$$

(マッチョの総数; ハローの体積)

$$\approx \frac{M_{halo}/M_{MACHO}}{\frac{4\pi}{3}R^3_{halo}} \times \pi \frac{4GM_{MACHO}}{c^2}\frac{D_{ol}D_{ls}}{D_{ol}+D_{ls}} \times R_{halo}$$

$$\approx \frac{M_{halo}/M_{MACHO}}{R^3_{halo}} \times 3\pi\frac{GM_{MACHO}}{c^2} R_{halo} \times R_{halo}$$

Macho の massに依存しない

$$\approx \frac{GM_{halo}}{R_{halo}} \sim \frac{v^2_{rot}}{c^2} \approx 10^{-6}$$

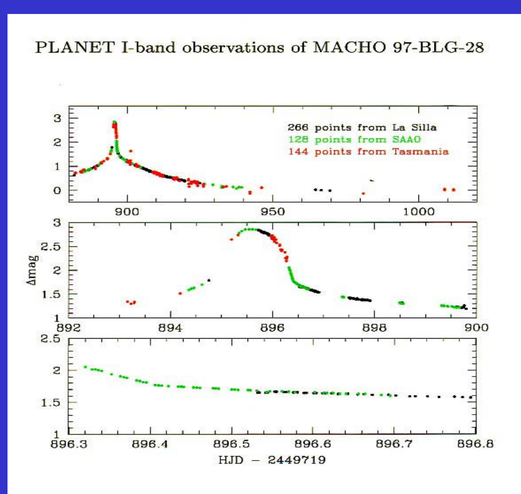
300 km / 300,000 km

$p = 5\times10^{-7}$ for source stars in the LMC and a "standard" halo model.

We must survey $> 10^6$ stars in:

- the Magellanic Clouds LMC, SMC
- the Galactic Bulge (?) → 惑星探索
- M31 and M33 (??) → Subaru!

MACHO 97-BLG-28event observed by the PLANET collaboration



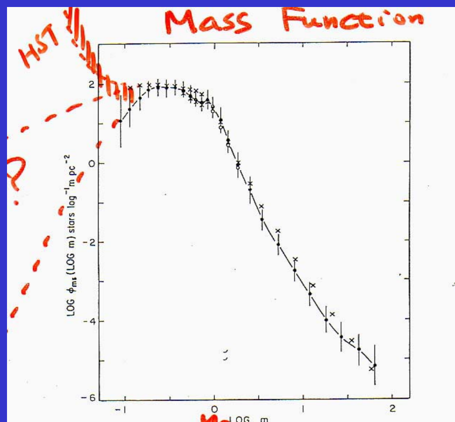
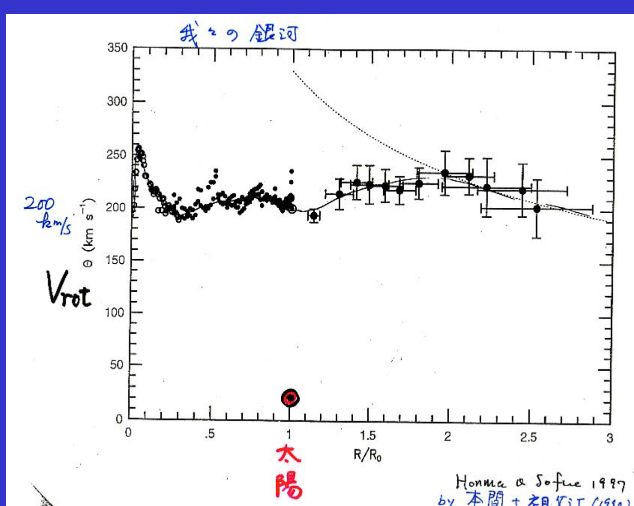
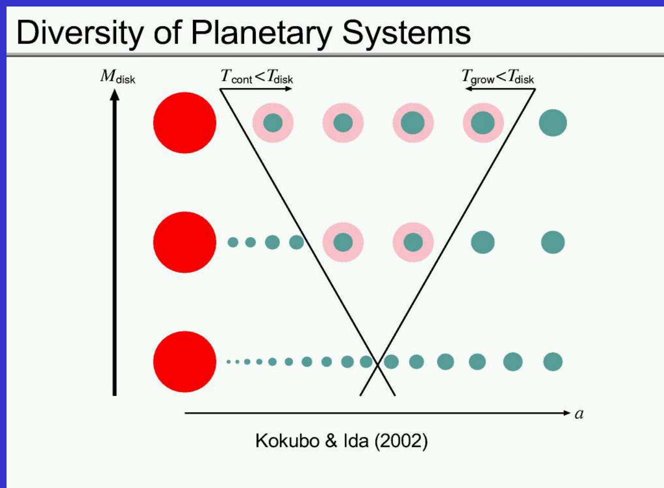


FIGURE 12 Present day mass function (PDMF) with uncertainty estimates. Crosses represent the PDMF derived in Miller and Scalo (1979).

なぜこのような差がでるのか？



by Kokubo-Ida (2002)



もっとイベントを！

・美しい自然と南十字星の
displayが愛地球博
NZパビリオンで待っています。
MOA望遠鏡もでます。

・今後ともMOAを宜しく！

・ご静聴ありがとうございました。

The End