

太陽系外惑星の普遍性と多様性

A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

Nature 378(1995)355

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

須藤靖

2019年12月11日 17:40-18:10

東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター講演会

共催：物理学専攻・地球惑星科学専攻



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

宇宙進化と太陽系外惑星が切り拓いた新たな世界観: 2019年ノーベル物理学賞紹介

古代ギリシャの世界観

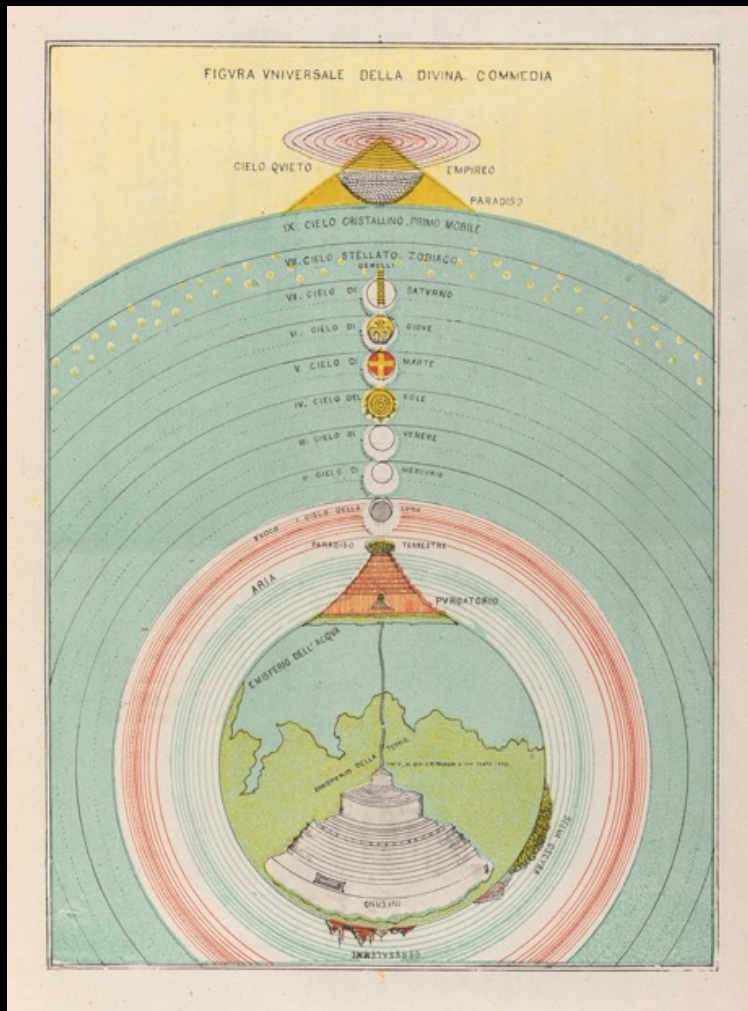
Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



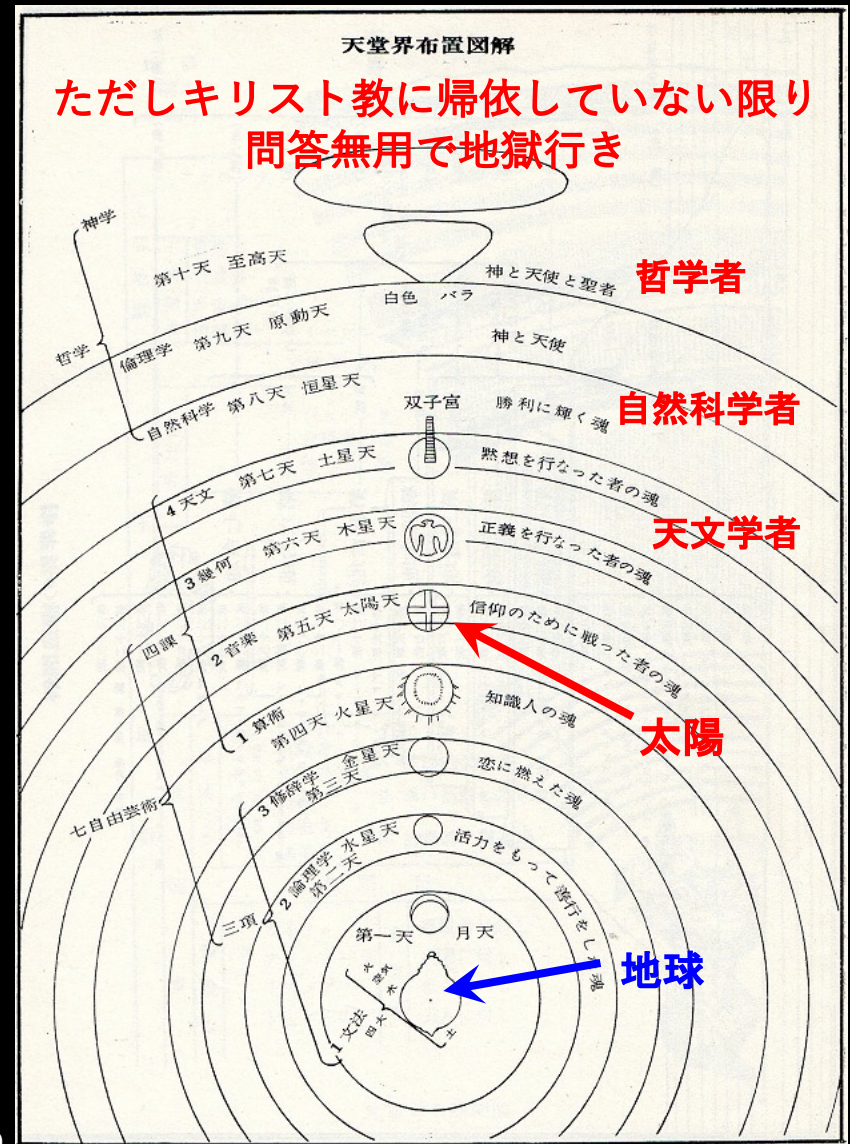
- プトレマイオス「アルマゲスト」(紀元150年頃)
- 古代ギリシャ天文学の集大成
- アリストテレス的宇宙観
- その後10世紀以上にわたって大きな影響を与え続けた

ペトルス・アピアヌス *Cosmographia* (1539年)
Wikipediaより

ダンテ「神曲」(1304-1321)



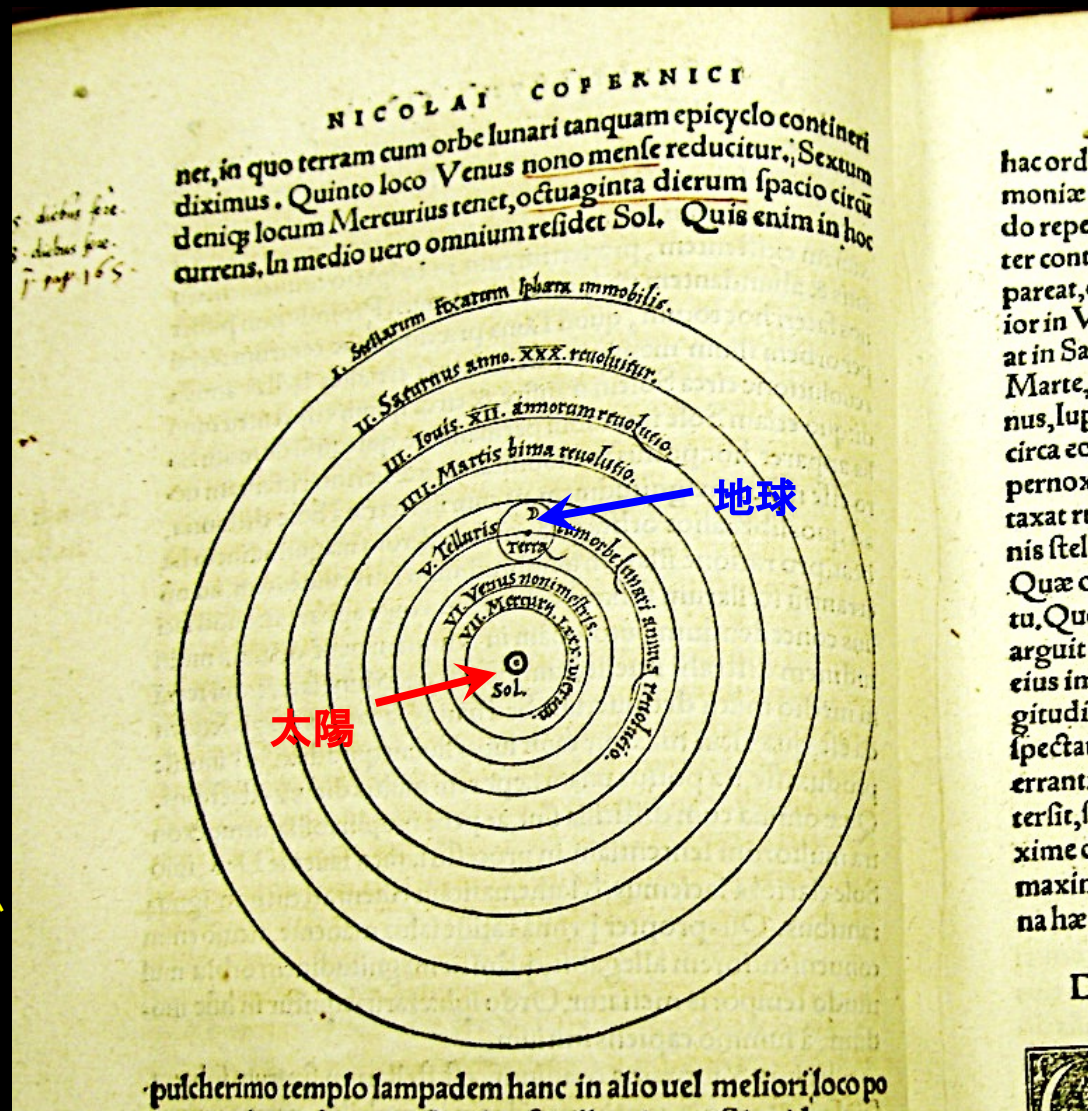
La materia della Divina commedia di Dante Alighieri, dichiarata in VI tavole, by Michelangelo Caetani (1804-1882) from Wikipedia



ニコラウス・コペルニクス 「天球の回転について」(1543)



2007年10月24日
日本学術振興会先端拠点形成プログラム
「ダークエネルギーネットワーク」
国際会議@エジンバラ王立天文台
の際に特別公開中の図書館で撮影



我々の世界の外にも世界はあるのか？

- 哲学的には1あるいは ∞ しかありえない
 - この宇宙とよく似た宇宙も全く異なる宇宙も無限に存在
(エピキュラス：紀元前341年～270年)
 - 我々以外の宇宙は存在し得ない
(アリストテレス：紀元前384年～322年)
 - 宇宙は無限であり、太陽系以外にも無数の惑星がある
(ジョルダーノ・ブルーノ：1548－1600)



ブルーノは異端審問で死刑判決を受け公開火刑
(1600年)



世が世なら、現在の宇宙論研究者はノーベル賞どころか、横山先生を始め、間違いなくほぼ全員が公開処刑されているに違いない

Bronze relief by Ettore Ferrari (Wikipedia)

アイザック・アシモフ 「Nightfall (夜来たる)」

- 6つの太陽を持つ惑星ラガッシュには「夜」がない
 - 空にいつも一つ以上の太陽が昇っているためいつも「昼」のまま
- 古来からの伝説によると、2049年に一度だけラガッシュに「夜」が訪れるという
 - これは、たまたま空に一つしか太陽が昇っていない時に、ラガッシュの内側の惑星が起こす皆既日食
 - 物語はこれから数時間で「夜」が訪れる時から始まる
 - 初めて「夜」を見た瞬間、ラガッシュの住民は何を知ったのか

http://mysite.du.edu/~treddell/3780/Asimov_Nightfall.pdf

"We did not know at all. We did not know anything."



- その瞬間に彼らの世界観が一変した
 - 「宇宙」の先を見て、自分の住む「世界」を知る
- イラスト： 羽馬有紗

系外惑星は存在しない(1991)？

Multiplicity among solar type stars in the solar neighbourhood. I. CORAVEL radial velocity observations of 291 stars*

A. Duquennoy¹, M. Mayor¹ and J.-L. Halbwachs²

¹ Observatoire de Genève, 51 chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

² Observatoire de Strasbourg, URA 1280, 11 rue de l'Université, F67000 Strasbourg, France

Received October 3; accepted November 15, 1990

Duquennoy, Mayor & Halbwachs
Astronomy & Astrophysics
Supplement
88 (1991) 281-324

1977年から13年
間モニターし続け
て発見なし

Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood*

II. Distribution of the orbital elements in an unbiased sample

A. Duquennoy and M. Mayor

Geneva Observatory, 51 chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

Received December 4, 1990; accepted January 30, 1991

Duquennoy & Mayor
Astronomy & Astrophysics
248 (1991) 485-524

Finally, we ask the question if orbits of companions in the mass range $0.001-0.010 M_{\odot}$ can be found around G-dwarf primaries, and if yes, whether their eccentricities are different from zero. The latter could be information about their formation process and could become a test to distinguish if we deal with stars (or brown dwarfs) or real extra solar system planets.

系外惑星は存在しない(1995)？

- カナダのグループが、恒星21個の視線速度を12年間モニターし続ける
 - 惑星のものと思われる周期的変動は何も発見できなかった(?)。。。。
- 1994年に投稿、1995年8月に否定的結論をまとめた論文を出版

A Search for Jupiter-Mass Companions to Nearby Stars

GORDON A. H. WALKER¹ AND ANDREW R. WALKER

Geophysics and Astronomy Department, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia V6T 1Z4, Canada
E-mail: walker@astro.ubc.ca

ALAN W. IRWIN,¹ ANA M. LARSON, AND STEPHENSON L. S. YANG¹

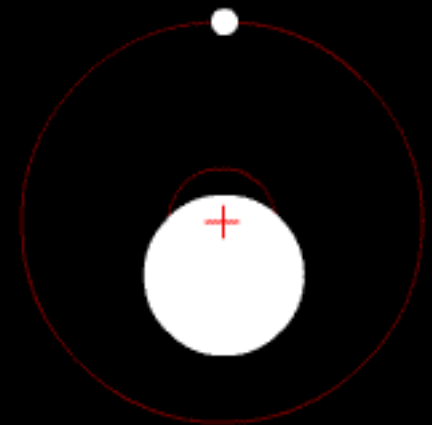
Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, P.O. Box 3055, Victoria, British Columbia V8W 3P6, Canada

Walker et al. *Icarus* 116(1995) 359-375
AND

DEREK C. RICHARDSON

Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, University of Toronto, 60, St. George Street, Toronto, Ontario M5S 1A7, Canada

Received September 30, 1994; revised February 6, 1995

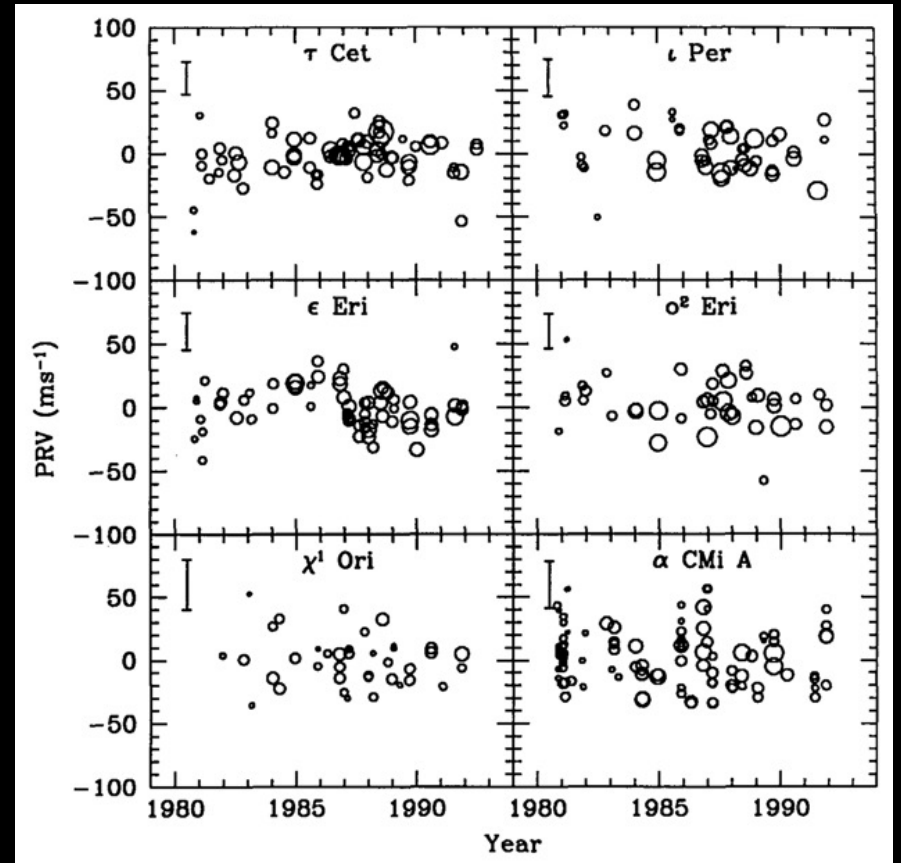


When we began this program over 14 years ago, we fully expected that, with sufficient precision, we would find several candidate giant planets. Not only is the Solar System dominated dynamically by Jupiter, but simulations such as those of Isaacman and Sagan (1977) suggested that a Solar System-like distribution of planetary masses and Bode's Law orbits would arise naturally around single stars. Very recently, Boss (1995) has predicted that Jupiter-mass planets will tend to form at distances of 4 to 5 AU around low-mass (0.1 to $1 M_{\odot}$) stars.

We have carefully monitored the radial velocities of 21 bright, solar-type stars for 12 years. None has shown any reflex motion due to a substellar companion to an upper limit of between 1 and 3 Jupiter masses ($\times \sin i$) for orbital periods less than 15 years. We can also rule out companions of more than 3 to 10 Jupiter masses ($\times \sin i$) at much longer periods based on long-term trends in the radial velocities, limits imposed by astrometry and zones of orbital stability in wide binaries.

“木星”（公転周期12年）の発見を念頭 においた極めて正しい観測戦略だった

Date	HJD	RV	ϵ_1	N	Observers
da-mo-yr	-2440000	km/s	km/s		
	HD 190360	20:02.4	+29:49		
11-08-77	3367.440	-46.30	0.23	1	IMBE PROV
12-08-77	3368.462	-46.11	0.25	1	IMBE PROV
18-08-77	3374.360	-46.17	0.20	1	IMBE PROV
29-05-83	5484.618	-46.01	0.27	1	HALB
14-07-83	5530.521	-46.11	0.27	1	BENZ
30-07-84	5912.518	-45.54	0.27	1	MAYO
06-06-85	6223.580	-45.80	0.27	1	DUQU
25-09-85	6334.404	-45.92	0.27	1	CARQ
26-09-85	6335.354	-45.73	0.37	1	CARQ
08-10-86	6712.392	-45.41	0.27	1	DUQU
17-10-86	6721.385	-45.60	0.29	1	CARQ
10-08-87	7018.364	-45.68	0.31	1	DE M
14-08-88	7388.468	-46.32	0.27	1	PERN
02-09-88	7407.397	-45.82	0.27	1	DE M
27-07-89	7735.535	-45.94	0.26	1	DUQU
03-08-89	7742.522	-45.86	0.26	1	MAYO
05-10-89	7805.325	-45.91	0.26	1	MERM



Duquennoy, Mayor & Halbwachs (1991)

Walker et al. (1995)

ホットジュピターの発見 (1995)

A Jupiter-mass companion to a solar-type star

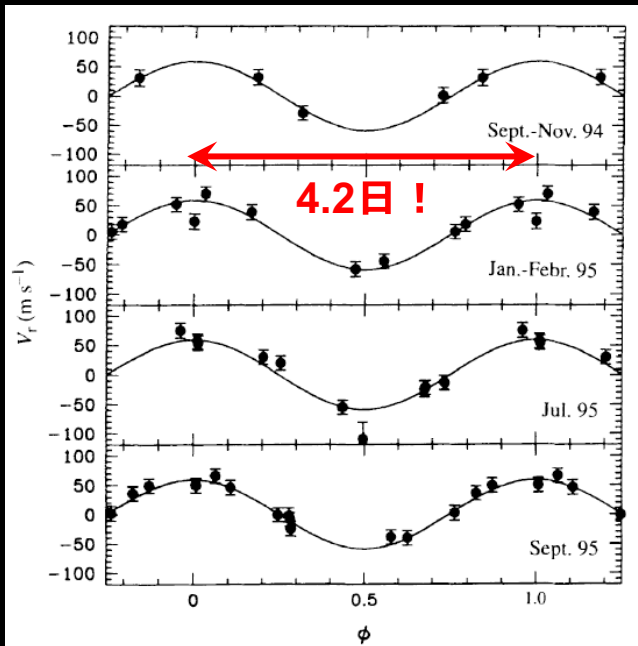
Michel Mayor & Didier Queloz

Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

Nature 378(1995)355

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

(太陽に似た恒星の周りの) 系外惑星の初発見 : 51Peg b
4.2日で公転するホットジュピター



2019年ノーベル物理学賞受賞
ディディエ・ケローとミシェル・マイヨール

高波長分解能分光器ELODIEの開発

ELODIE: A spectrograph for accurate radial velocity measurements

A. Baranne¹, D. Queloz², M. Mayor², G. Adrianzyk³, G. Knispel³, D. Kohler³, D. Lacroix³, J.-P. Meunier³, G. Rimbaud³ and A. Vin³

¹ Observatoire de Marseille, 2 Place Le Verrier, F-13248 Marseille

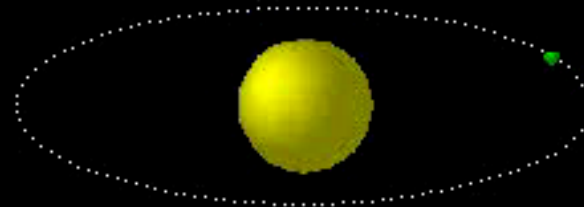
² Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny, Switzerland

³ Observatoire de Haute-Provence, F-04870 Saint Michel l'Observatoire

Received September 28, 1995; accepted February 15, 1996

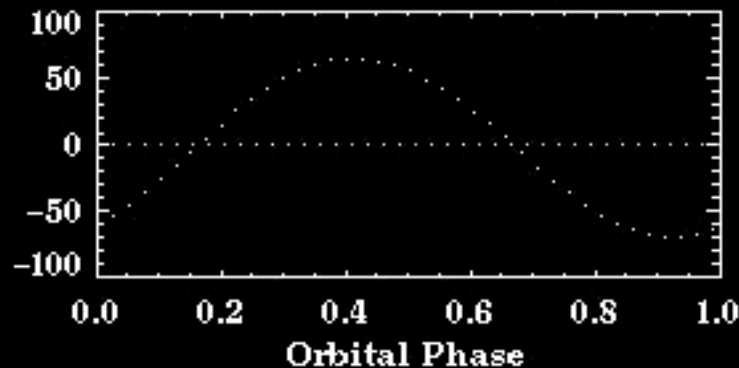
Abstract. — The fibre-fed echelle spectrograph of Observatoire de Marseille instrument has been in operation since the end of 1993 on the 1.9 m version of the cross-correlation spectrometer CORAVEL, to perform measurements such as needed in the search, by Doppler shift, for brown-dwarfs. In one single exposure a spectrum at a resolution of 42000 ($\lambda/\Delta\lambda$) is recorded on a 1024×1024 CCD. This performance is achieved by using a tan θ grating and a grism as cross-disperser. An automatic on-line data treatment software computes cross-correlation functions. The instrument design and the results are presented in this paper. The efficiency and accuracy of the instrument and its long-term stability are discussed. Radial velocities with an accuracy better than 15 m s⁻¹ for stars up to 16th magnitude are obtained. Observations of 16th magnitude stars are also possible to monitor their radial velocities. In classic spectroscopic studies ($S/N > 100$) 9th magnitude stars can be observed.

Circular Orbit: rho CrB

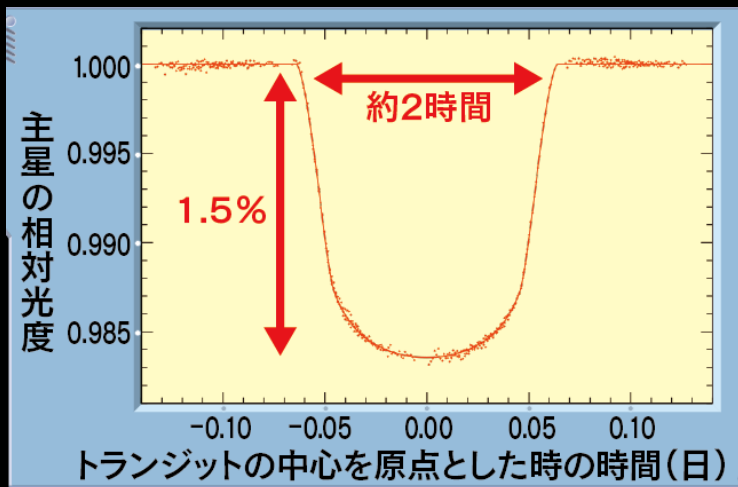
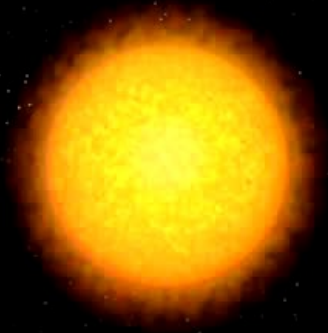
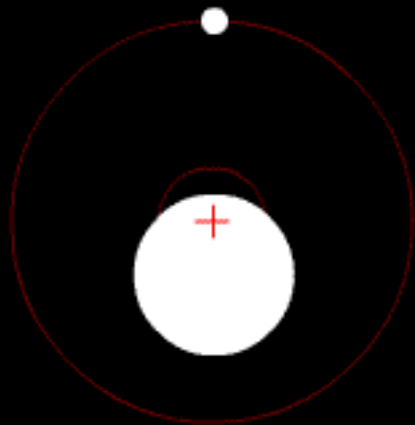


$K = 67.4 \text{ m/s}$ $e = 0.03$
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$ $\sin(i) = 0.3 (*)$

Radial Velocity Curve of the Star [m/s]



系外惑星検出方法



■ 視線速度法

- 惑星の公転に同期して中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動

■ トランジット法

- 中心星の正面を惑星が横切ることによって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

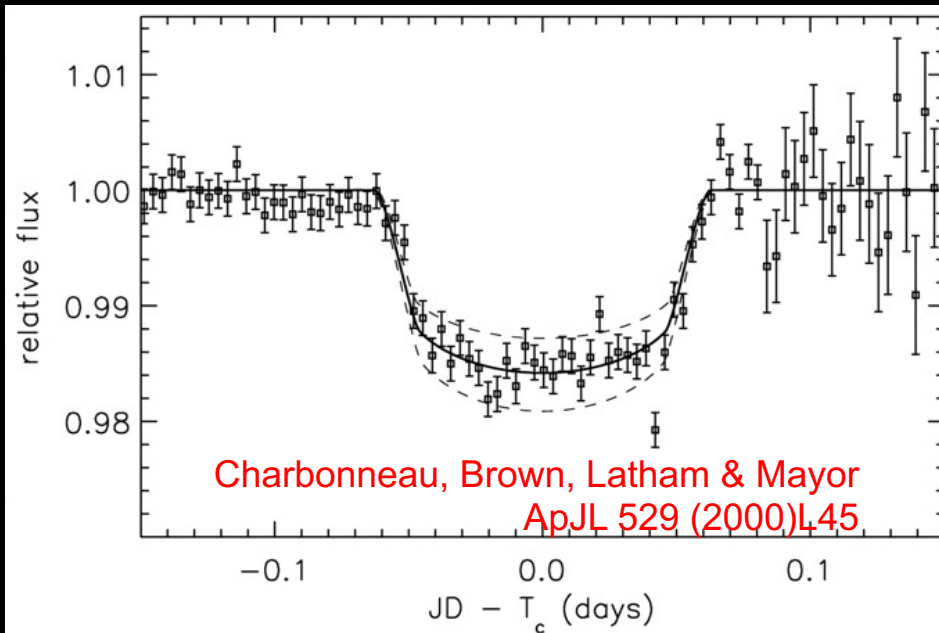
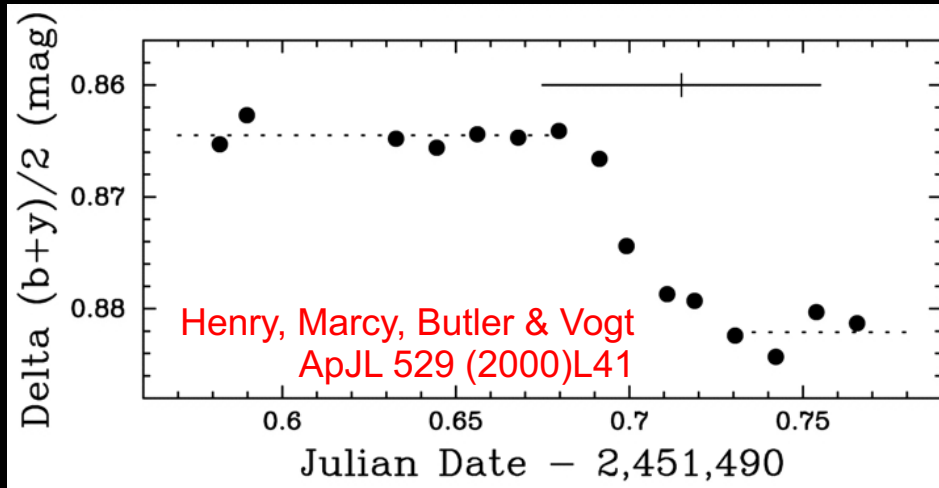
■ 直接撮像

- 中心星の光を隠して惑星の光を分離

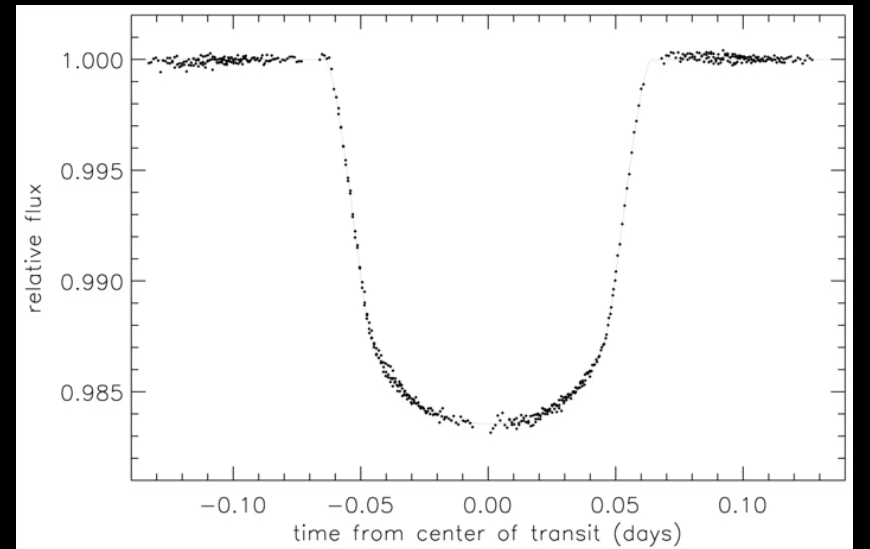
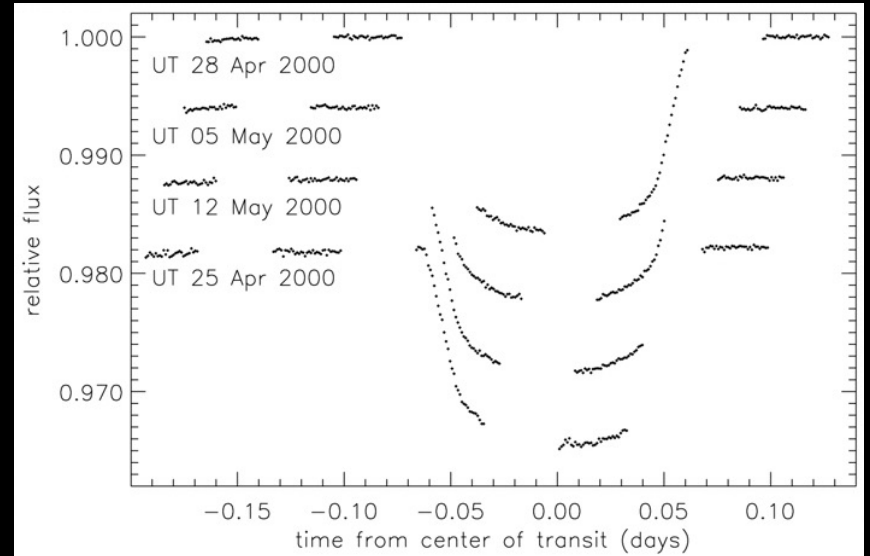
■ 重力レンズ

最初のトランジット惑星: HD209458b

地上望遠鏡



ハッブル宇宙望遠鏡



宇宙は惑星で満ちていた

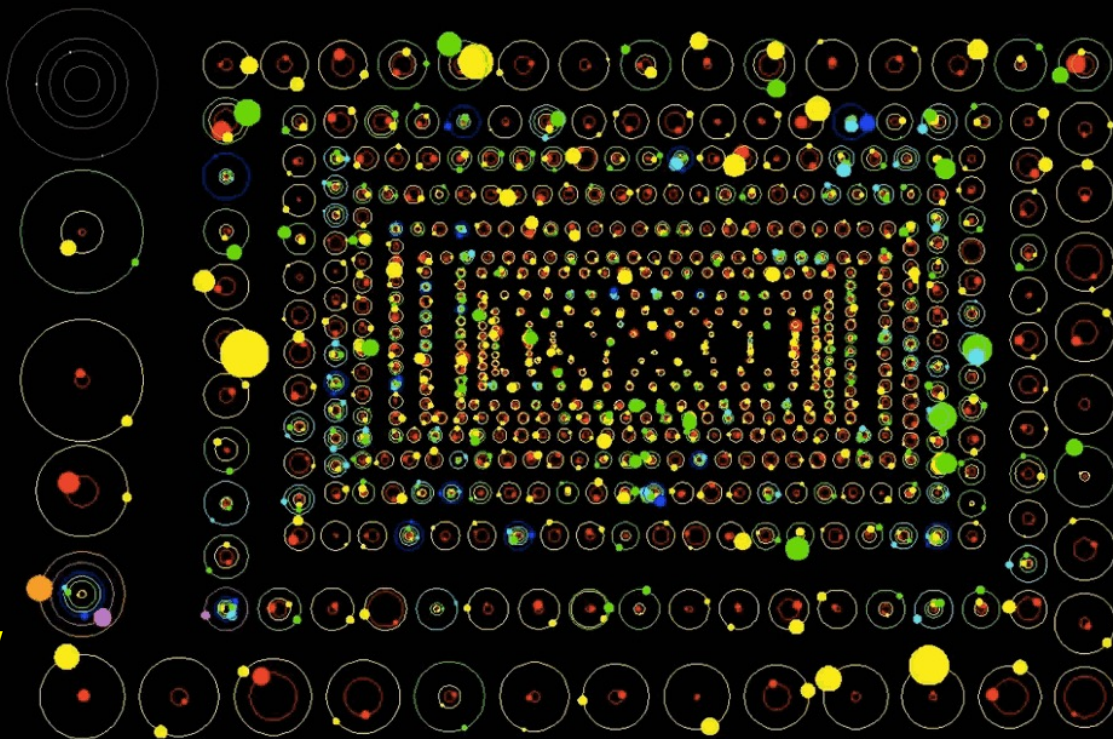
Kepler mission (March 6, 2009 launch)
dedicated for transiting planet search



Kepler planets (August 3, 2015)
©NASA/Daniel Fabrycky

The Kepler Orrery III

$t[\text{BJD}] = 2455215$

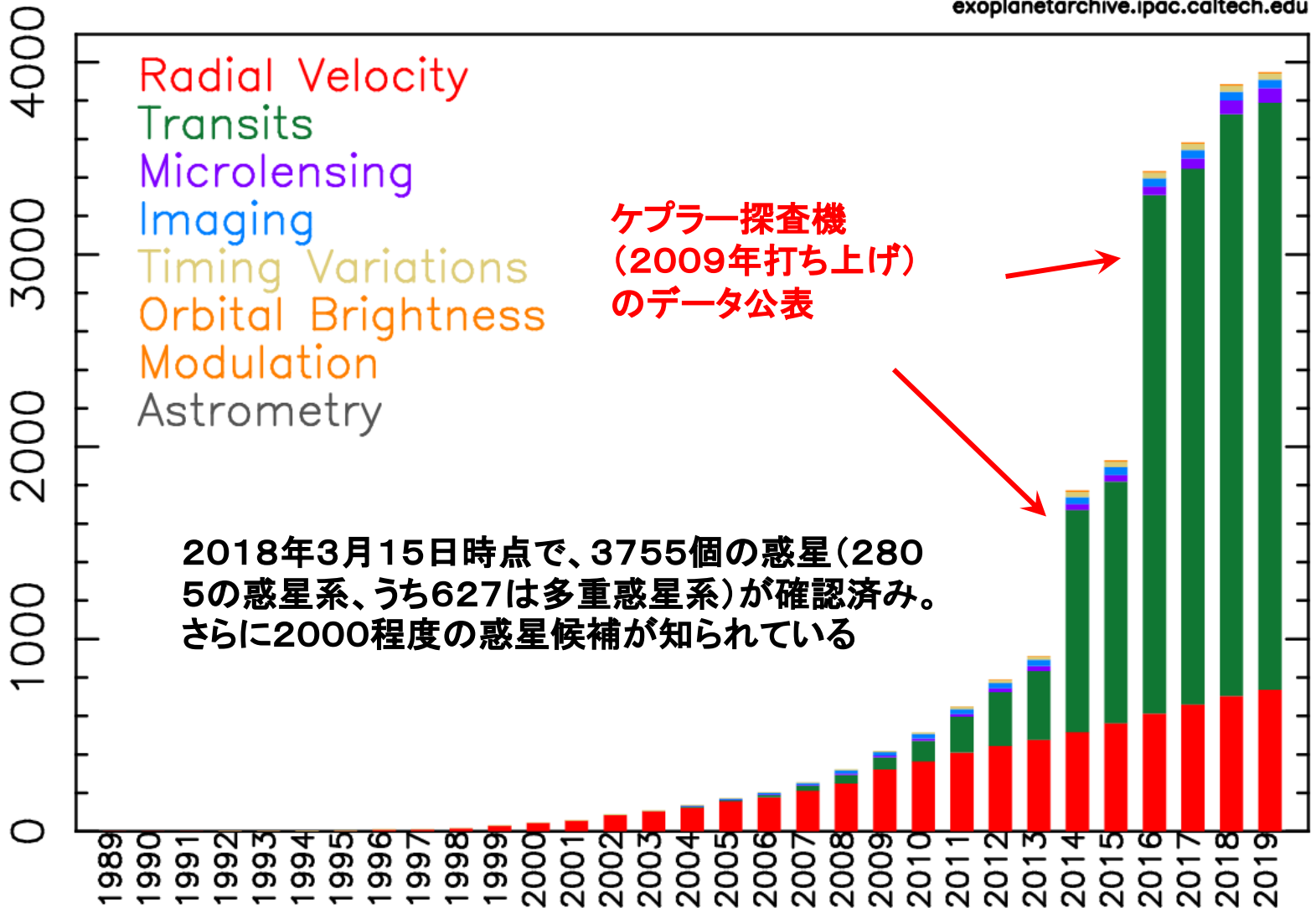


<https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/>

系外惑星の発見年表

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数



西暦

「初めての」太陽系外惑星発見

■ Wolszczan & Frail (1992)

A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12

A. Wolszczan* & D. A. Frail†

* National Astronomy and Ionosphere Center, Arecibo Observatory, Arecibo, Puerto Rico 00613, USA

† National Radio Astronomy Observatory, Socorro, New Mexico 87801, USA

MILLISECOND radio pulsars, which are old ($\sim 10^9$ yr), rapidly rotating neutron stars believed to be spun up by accretion of matter from their stellar companions, are usually found in binary systems with other degenerate stars¹. Using the 305-m Arecibo radiotelescope to make precise timing measurements of pulses from the recently discovered 6.2-ms pulsar PSR1257+12 (ref. 2), we demonstrate that, rather than being associated with a stellar object, the pulsar is orbited by two or more planet-sized bodies. The planets detected so far have masses of at least $2.8 M_{\oplus}$ and $3.4 M_{\oplus}$, where M_{\oplus} is the mass of the Earth. Their respective distances from the pulsar are 0.47 AU and 0.36 AU, and they move in almost circular orbits with periods of 98.2 and 66.6 days. Observations indicate that at least one more planet may be present in this system. The detection of a planetary system around a nearby (~ 500 pc), old neutron star, together with the recent report on a planetary companion to the pulsar PSR1829-10 (ref. 3) raises the tantalizing possibility that a non-negligible fraction of neutron stars observable as radio pulsars may be orbited by planet-like bodies.

The 6.2-ms pulsar PSR1257+12 (Fig. 1) was discovered during the search at high galactic latitudes for millisecond pulsars conducted in February 1990 with the 305-m Arecibo radiotelescope at a frequency of 430 MHz (ref. 2). The characteristics of this survey and the details of data analysis are described else-

NATURE · VOL 355 · 9 JANUARY 1992

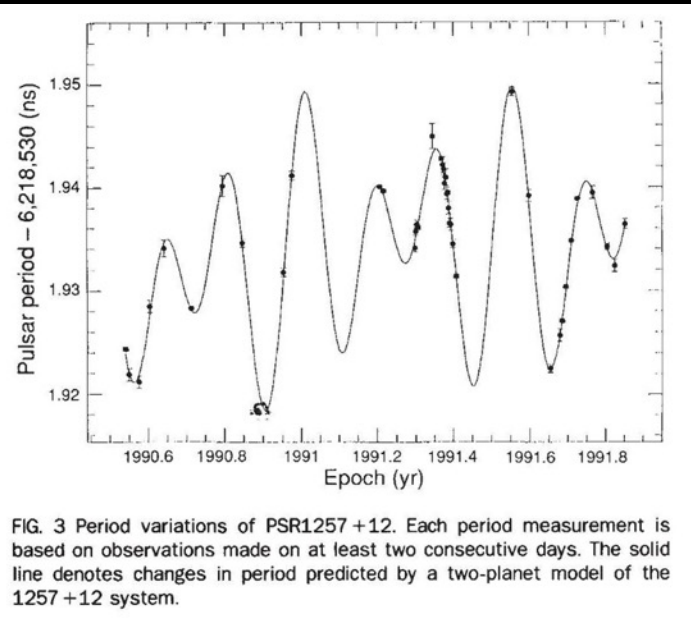


FIG. 3 Period variations of PSR1257+12. Each period measurement is based on observations made on at least two consecutive days. The solid line denotes changes in period predicted by a two-planet model of the 1257+12 system.

■ パルサープラネット

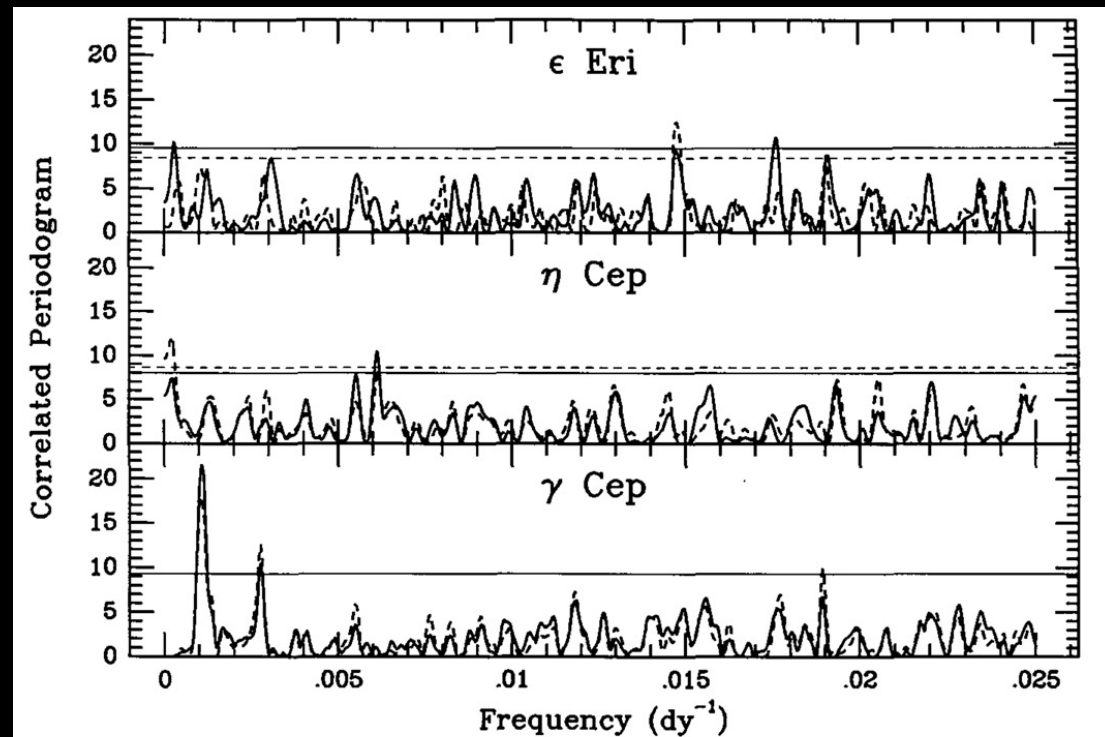
■ $3.4M_{\text{地球}}$ (周期66.6日)

■ $2.8M_{\text{地球}}$ (周期98.2日)

■ パルスの到着時刻変動

Walker et al. (1995) の定量的結論

Fig3. in Walker et al. (1995)



In contrast to the results for γ Cep, the values of the periodogram peaks for ϵ Eri and η Cep in Fig. 3 depend on our run corrections. We feel that these results are too marginal to qualify as a convincing periodicity. These periodogram analyses are the basis for our conclusion that we have detected no unequivocal planetary companion signatures in our data but, rather, can set interesting mass limits to any such companions.

Walker et al.は慎重過ぎた？

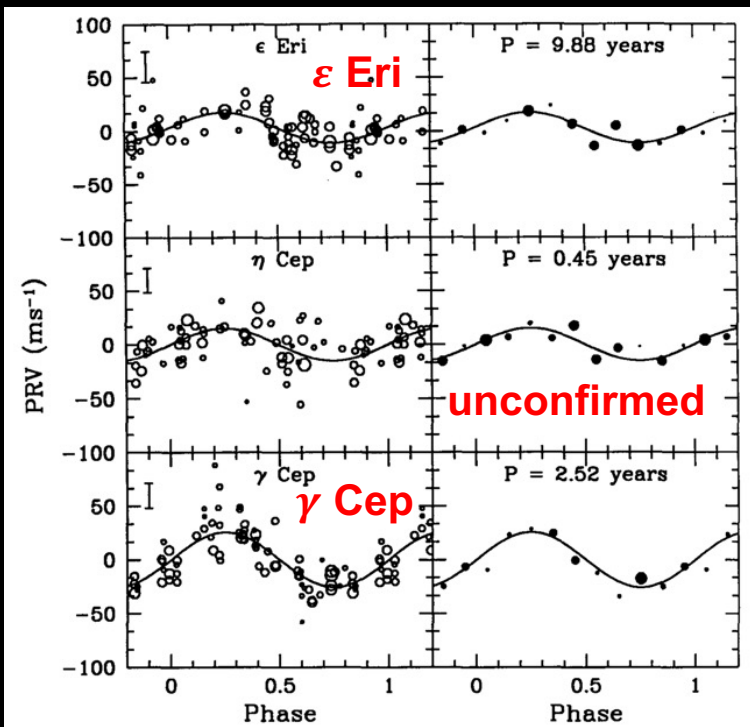
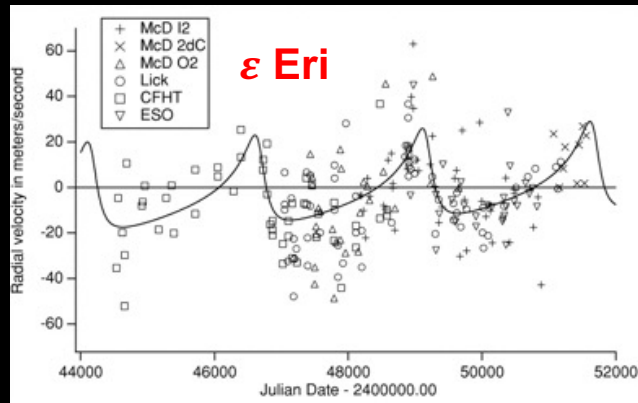
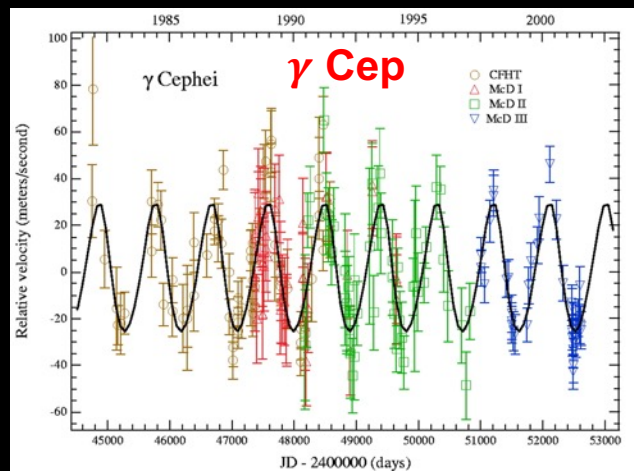


Fig4. in Walker et al. (1995)



Hatzes et al. (2000)
(including Walker)
0.86M_J planet;
P= 6.9yr, e=0.6



Hatzes et al. (2003)
(including Walker)
1.7M_J planet;
P= 2.5yr, e=0.1

- なぜ possible candidatesとしておかなかったのか、無念... (もちろん研究者としては尊敬すべきだが)

なぜ系外惑星だけで3人受賞しなかった？

驚いてホッとした2019年ノーベル物理学賞

予想通りの「系外惑星発見」マイヨールとケローの受賞

須藤靖 東京大学教授(宇宙物理学)

2011年の3つの予想

2019年10月15日

2019年のノーベル物理学賞が、米国プリンストン大のジェームズ・ピーブルズ教授、スイス・ジュネーブ大のミシェル・マイヨール教授と同大（英国ケンブリッジ大学兼任）のディディエ・ケロー教授に授与されることになった。この3名の業績は「宇宙の進化と宇宙における地球の立ち位置に関する人類の理解への貢献」(contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth's place in the cosmos)という言葉で総括されている。

2011年9月30日時点での私的「予言」

私は2011年9月30日付の本欄 で、2011年のノーベル物理学賞が天文・宇宙分野であればとの前提で、順位付きで以下の3分野と候補者を予想した（以下、人名の敬称は省略する）。

1. 太陽系外惑星の発見：ミッシェル・メイヨールとディディエ・ケロス、3人目があるならばジェフ・マーシー
2. 宇宙の加速膨張の発見：ソール・パールムター、アダム・リース、ブライアン・シュミット
3. 標準宇宙論モデルの確立：チャック・ベネット、ライマン・ページ、デイビット・スパーゲル

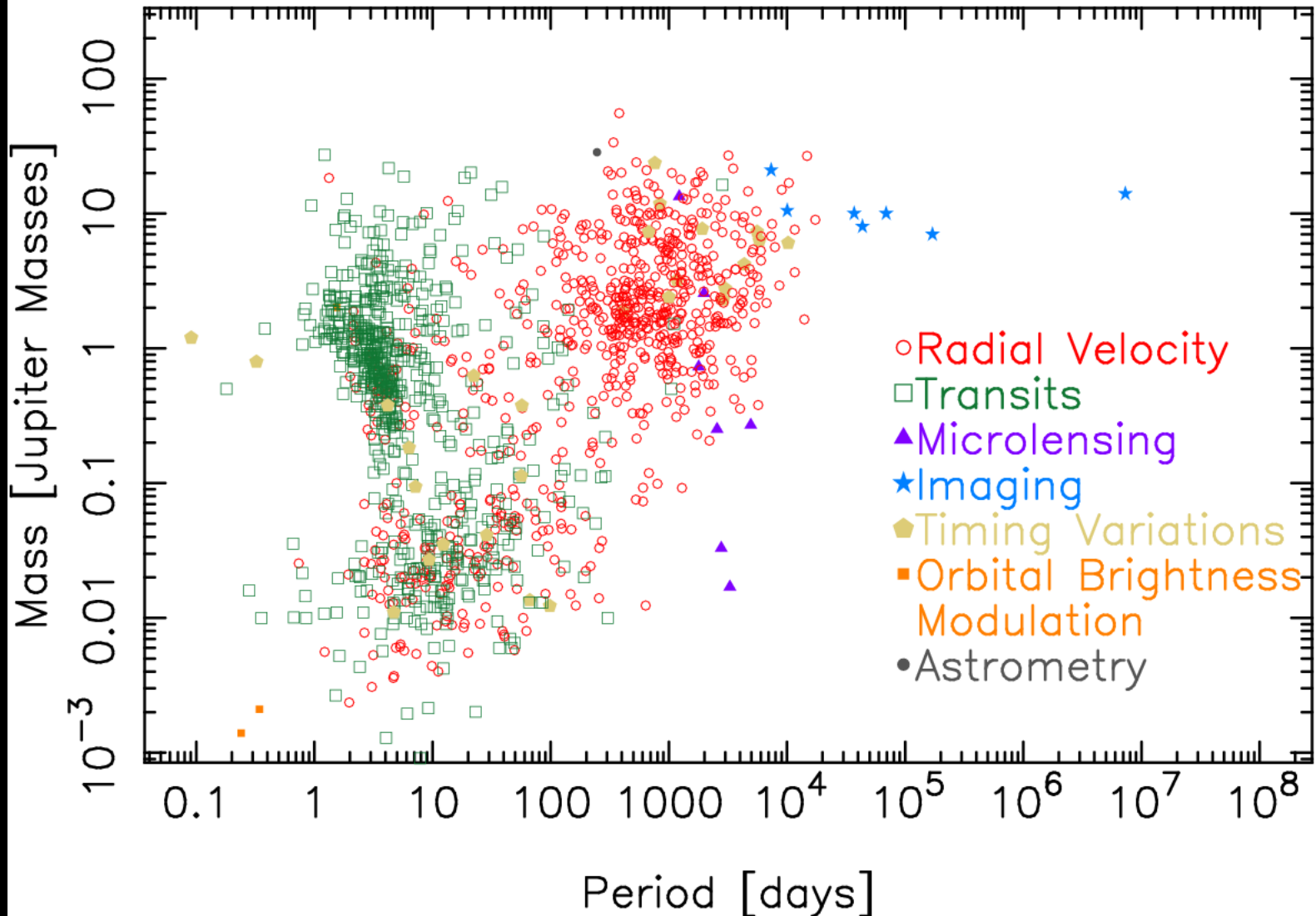
Asahi.com
論座

2019年10月15日

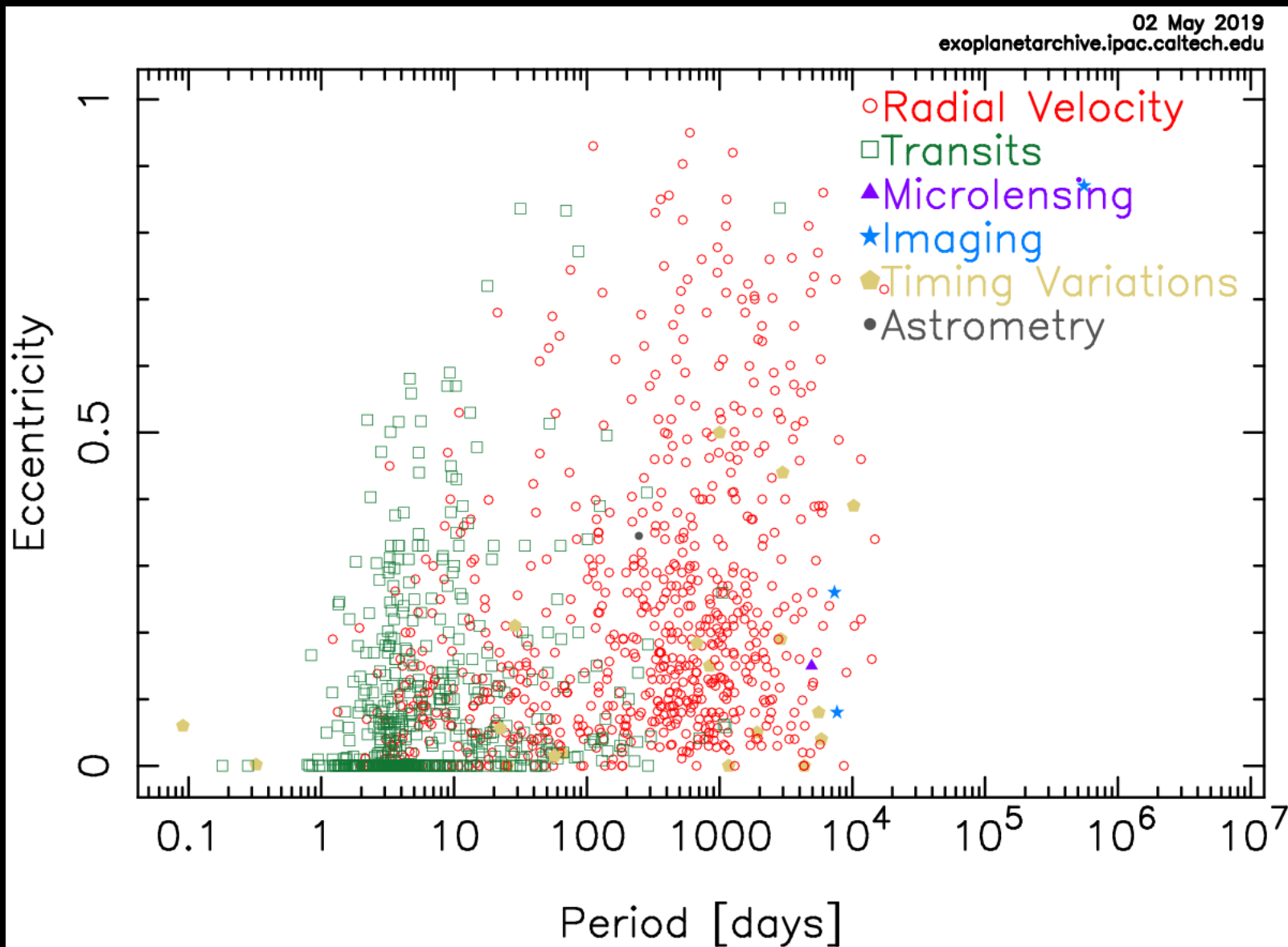
系外惑星の多様性：周期 vs. 質量

02 May 2019

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



系外惑星の多様性：周期 vs. 離心率



惑星系の普遍性と多様性

- 惑星系はフツーに存在する
 - 太陽と似た恒星の7割以上が惑星を持ち、2割以上は複数の惑星を持つと推定されている
- 太陽系と似た系もチョーかけ離れた系も存在
 - 恒星を数日で公転する巨大ガス惑星（ホットジュピター）
 - 大きな離心率の惑星（エキセントリックプラネット）
 - 地球程度の岩石惑星（スーパーアース）
 - 水が液体として存在できる温度のハビタブル惑星
- 普遍性と多様性の起源と進化 ⇒ 物理学
- 我々の地球以外に生命が存在するか？ ⇒ 宇宙生物学

結論：RESCEUへようこそ

- 我々の世界観を変革した宇宙論と系外惑星研究へ**2019年ノーベル物理学賞**が！
 - *There are more things in heaven and Earth, Horatio, than are dreamt of in your philosophy (Shakespeare 1602?)*
 - *We did not know at all. We did not know anything (Asimov 1941)*
- 公開処刑をおそれず研究に邁進する勇気をもつ若い皆さんを歓迎します！