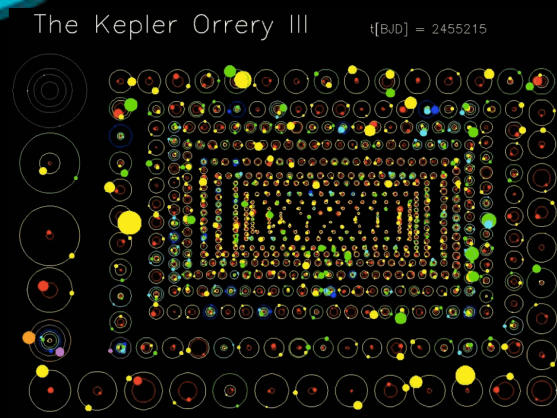
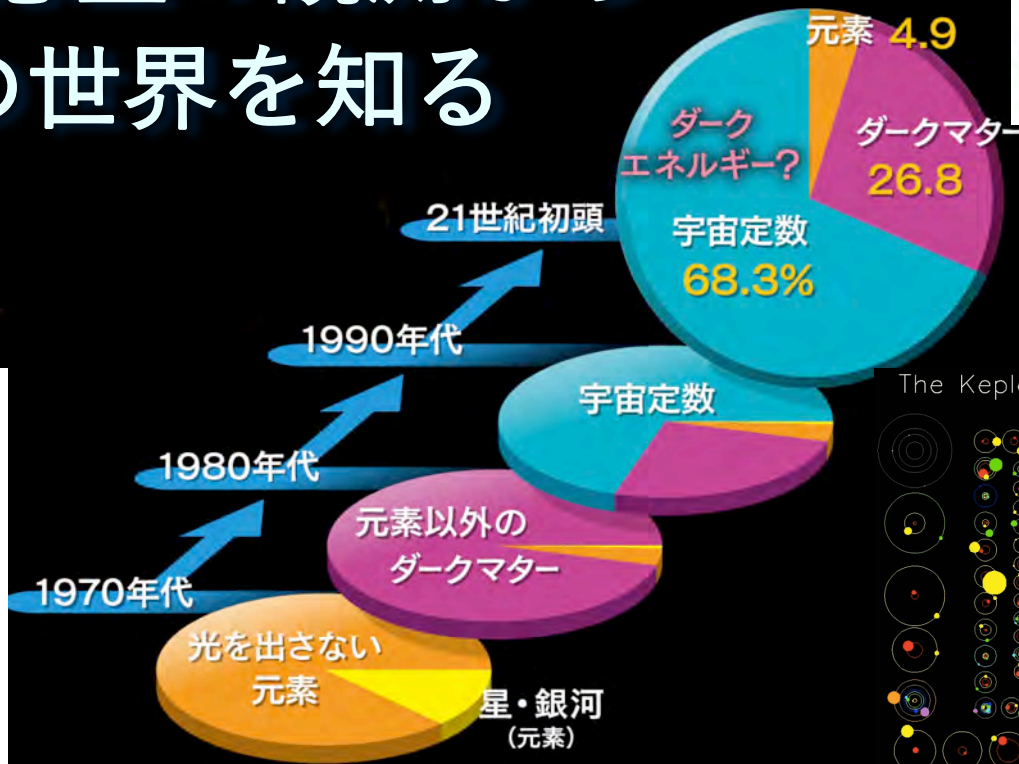


宇宙と惑星の観測から この世界を知る



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14日 14:00-15:00
 科学技術館 科学ライブショー
 「ユニバース」
 2019年ノーベル物理賞紹介



1 はじめに

役に立たない科学の意義

■ 役に立つ科学・技術

- 人々の生活を楽にし、健康寿命を延ばし、自由な時間を増やしてくれる
- かつては、ほとんどの時間が生き延びるため（食料の確保）に費やされていた



<https://www.irasutoya.com/p/faq.html>

- では、役に立つ科学・技術の進歩の結果、全く働かなくても健康と満ち足りた衣食住が保証される究極の未来が実現した場合、我々は何をして過ごし、何のために生きるのか？

アンパンマンに学ぶ

■ 作詞：やなせたかし

なんのために生まれて
なにをして生きるのか
こたえられないなんて
そんなのはいやだ！



働き者とニートの会話

- 「お前はなぜ毎日怠けてばかりで、真面目に働かないのだ？」
- 「じゃあ、君はなぜあくせく働いているの？」
- 「それはたくさんお金を稼ぎたいからだ」
- 「お金を稼いでどうする？」
- 「いい家に住み、おいしい物を食べ、好きな物を買い、、、」
- 「それから？」

- 「残りの人生をゆっくり楽しむつもりだ」
- 「だろ？俺は今まさにそうしているのさ」



ドラマ「俺の話は長い」
日本テレビ

社会人と天文学者の会話

- 「お前はなぜ毎晩星ばかり眺めるだけで、真面目に働こうとしないのか？」
 - 「じゃあ、君はなぜあくせく働いているの？」
 - 「それはたくさんお金を稼ぎたいからだ」
 - 「お金を手に入れてどうする？」
 - 「いい家に住み、おいしい物を食べ、好きな物を買い、、、」
 - 「それから？」
- 「星でも眺めてゆっくり人生を楽しむさ」
 - 「だろ？俺は今まさにそうしているのさ」

生きる意味自身を教えてくれる天文学

- 現役時代：家族・会社のために働き稼ぐ毎日
 - 限られた余暇に、趣味、飲み会、旅行、(様々な形態の) 恋愛、など
- 退職後 (ただし日本では、退職は許されず生涯働き続けなくてはならなくなるかも)
 - 稼ぐために何かする人はぐっと減る
 - 読書、社会貢献、ボランティア、学び直し、自分の世界観を広げる、(様々な形態の) 恋愛
 - 狭い意味では全く役に立たない天文学が、人生終盤になるほど大きな意義／生き甲斐を提供
- ***Useless = Invaluable***

2019年ノーベル物理学賞

- 宇宙の進化と宇宙におけるこの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)



ジェームズ・ピーブルズ

ミシェル・マイヨール

ディディエ・ケロー

2 この世界を知る

古代ギリシャの世界観

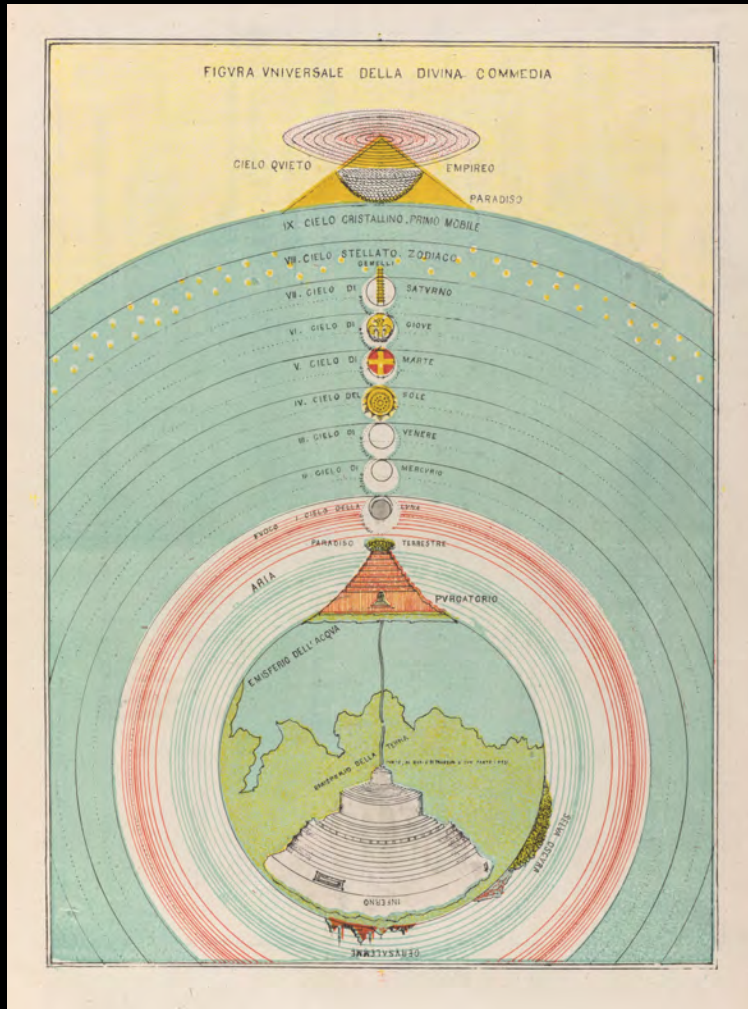
Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



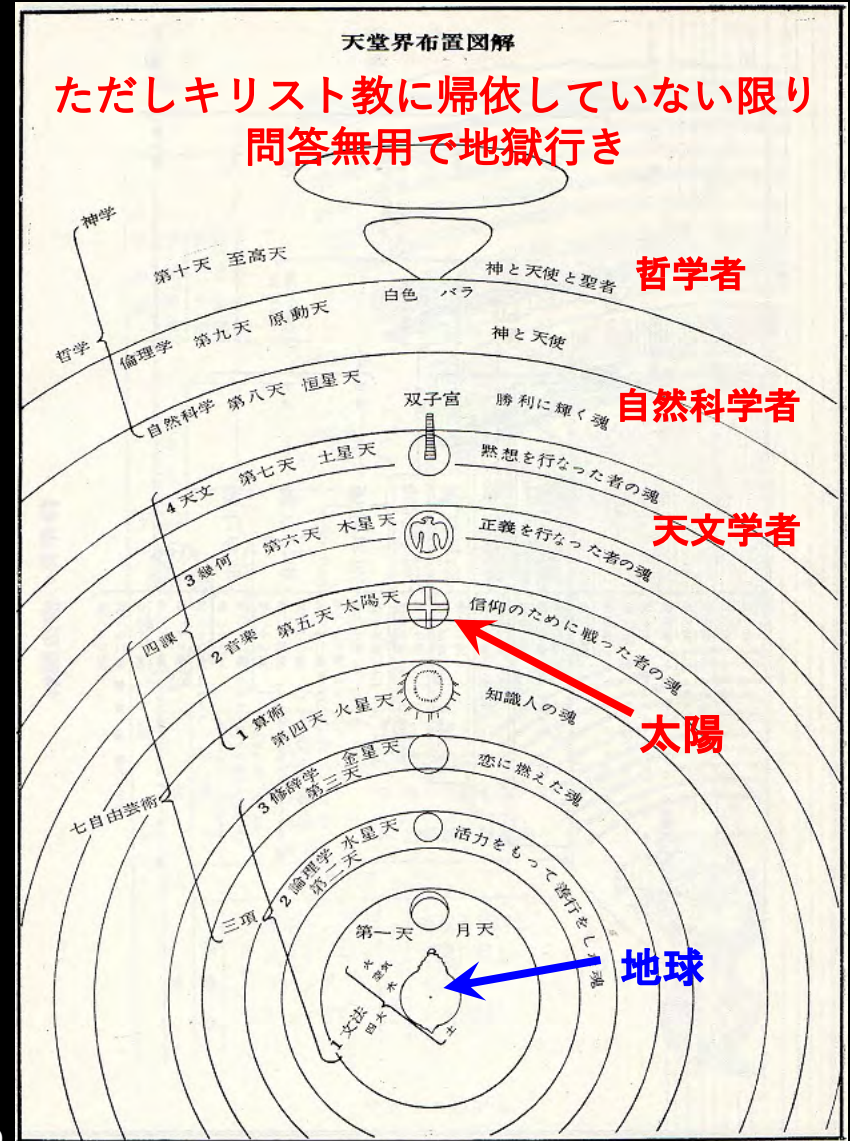
- プトレマイオス「アルマゲスト」(紀元150年頃)
- 古代ギリシャ天文学の集大成
- アリストテレス的宇宙観
- その後10世紀以上にわたって大きな影響を与え続けた

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

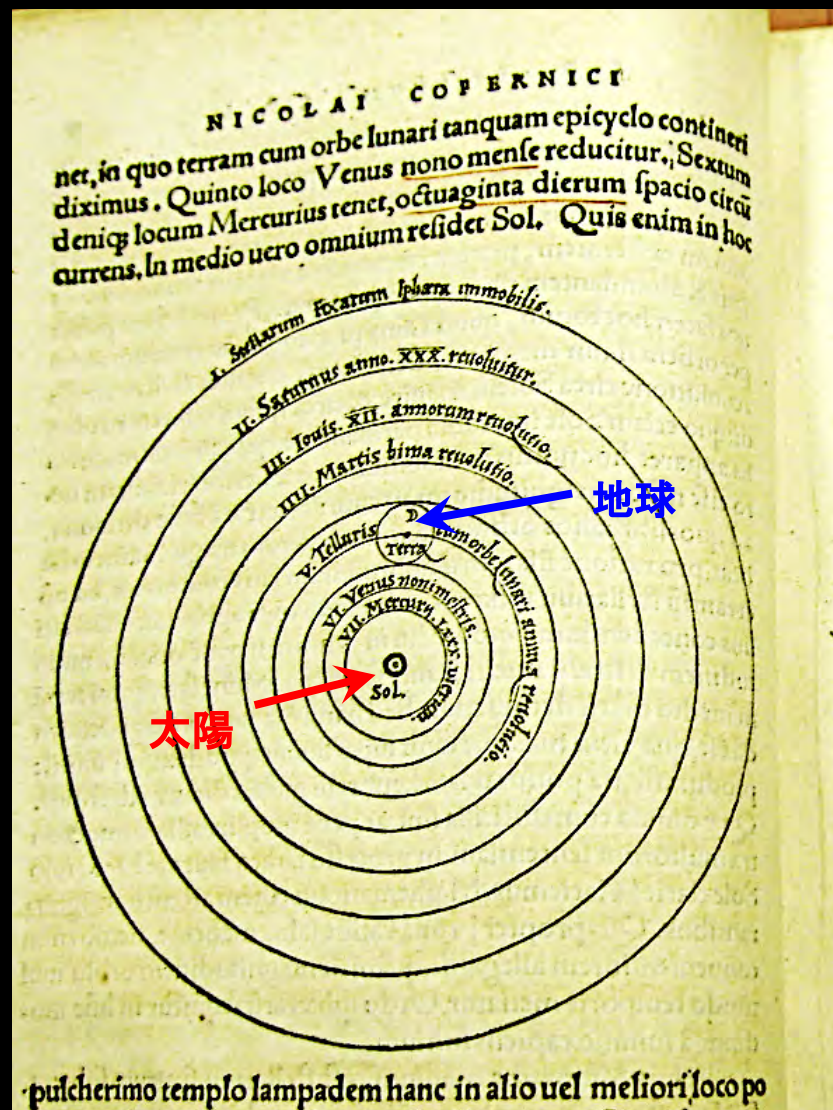
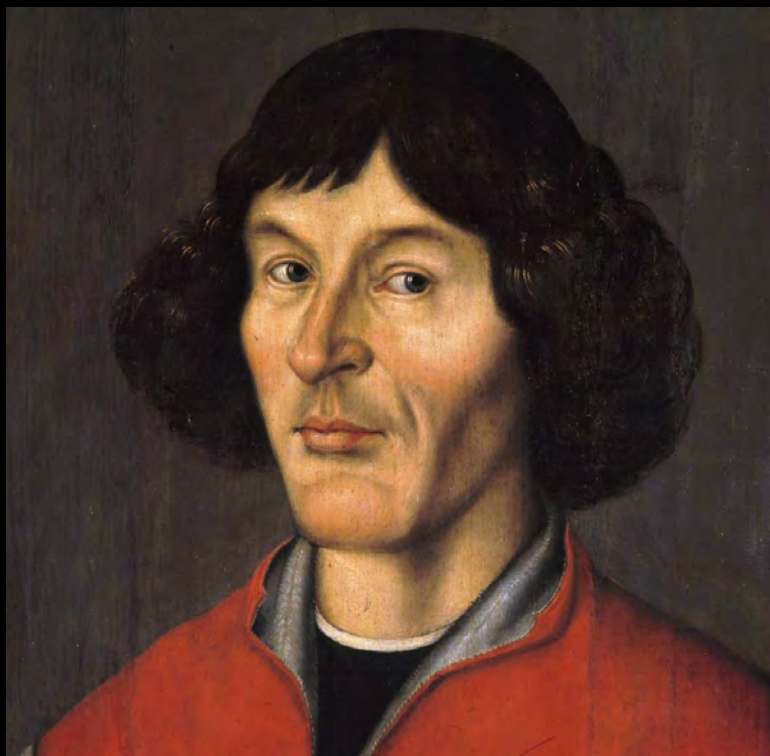
ダンテ「神曲」(1304-1321)



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？

- 哲学的に考えればすべては1あるいは ∞ のどちらか
 - 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
(ジョルダノー・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)

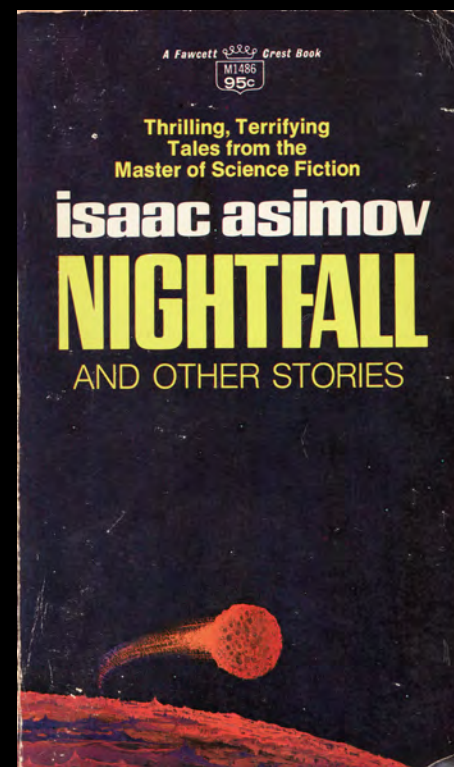


世が世なら、現在の宇宙論研究者はノーベル賞どころか、間違いなくほぼ全員公開処刑されている

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
 - 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



「我々は何も知らなかった」



イラスト：羽馬有紗

- その瞬間に彼らの世界観が一変した
- ホライズンの先を見て、自分の住む「世界」を知る

3 物理的宇宙論とピーブルズ

物理学に基づく宇宙論の歴史

- 1916年～ 相対論的宇宙モデル
(アインシュタイン、フリードマン、ルメートル)
- 1929年 宇宙膨張の発見(ルメートル、ハッブル)
- 1946年～ ビッグバンモデル(ガモフ)
- 1965年 CMBの発見(ペンジアス、ウィルソン)
- 1980年～ 宇宙の大構造の発見
素粒子論的宇宙論
宇宙論的数値シミュレーション
- 1992年 CMB温度ゆらぎの検出(COBE)
- 1990年代後半～ 宇宙論パラメータの精密決定
冷たいダークマター
宇宙定数(ダークエネルギー)

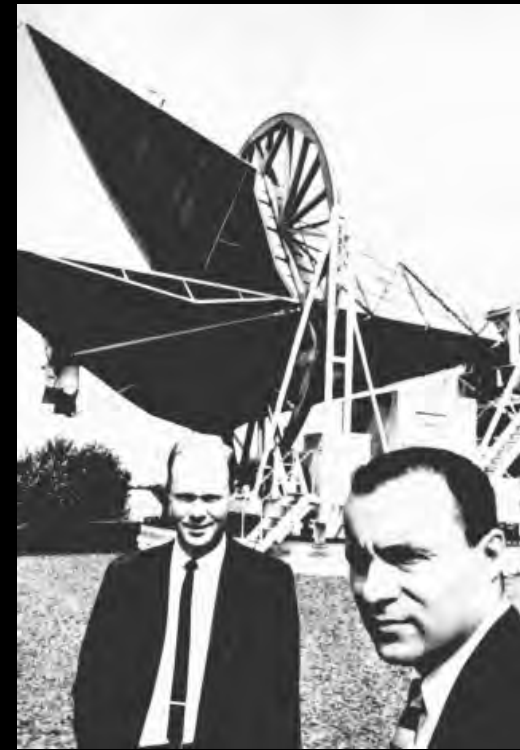
CMB: Cosmic Microwave Background

宇宙マイクロ波背景輻射

- **現在の宇宙を満たす等方的熱輻射分布**
 - 熱い火の玉宇宙の名残
 - ペンジアスとウィルソンが1964年に発見
 - ガモフが提案したビッグバンモデルが認められる観測的証拠となった
- 現在の宇宙の温度 = $2.728 \pm 0.002\text{K}$
- CMB温度揺らぎ全天地図は、宇宙論パラメータを知るためのもっとも重要な情報源

1978年ノーベル物理学賞 宇宙マイクロ波背景輻射の発見

- Arno Penzias and Robert Wilson
- For the discovery of cosmic microwave background radiation



A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5° K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and free from seasonal variations (July, 1964–April, 1965). A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue.

A.Penzias and R.Wilson: The Astrophysical Journal 142(1965)419

Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson (1965)

COSMIC BLACK-BODY RADIATION*

One of the basic problems of cosmology is the singularity characteristic of the familiar cosmological solutions of Einstein's field equations. Also puzzling is the presence of matter in excess over antimatter in the universe, for baryons and leptons are thought to be conserved. Thus, in the framework of conventional theory we cannot understand the origin of matter or of the universe. We can distinguish three main attempts to deal with these problems.

1. The assumption of continuous creation (Bondi and Gold 1948; Hoyle 1948), which avoids the singularity by postulating a universe expanding for all time and a continuous but slow creation of new matter in the universe.
2. The assumption (Wheeler 1964) that the creation of new matter is intimately related to the existence of the singularity, and that the resolution of both paradoxes may be found in a proper quantum mechanical treatment of Einstein's field equations.
3. The assumption that the singularity results from a mathematical over-idealization,

We deeply appreciate the helpfulness of Drs. Penzias and Wilson of the Bell Telephone Laboratories, Crawford Hill, Holmdel, New Jersey, in discussing with us the result of their measurements and in showing us their receiving system. We are also grateful for several helpful suggestions of Professor J. A. Wheeler.

ApJ 142(1965)414

5月7日付け

May 7, 1965

PALMER PHYSICAL LABORATORY
PRINCETON, NEW JERSEY

R. H. DICKE
P. J. E. PEEBLES
P. G. ROLL
D. T. WILKINSON

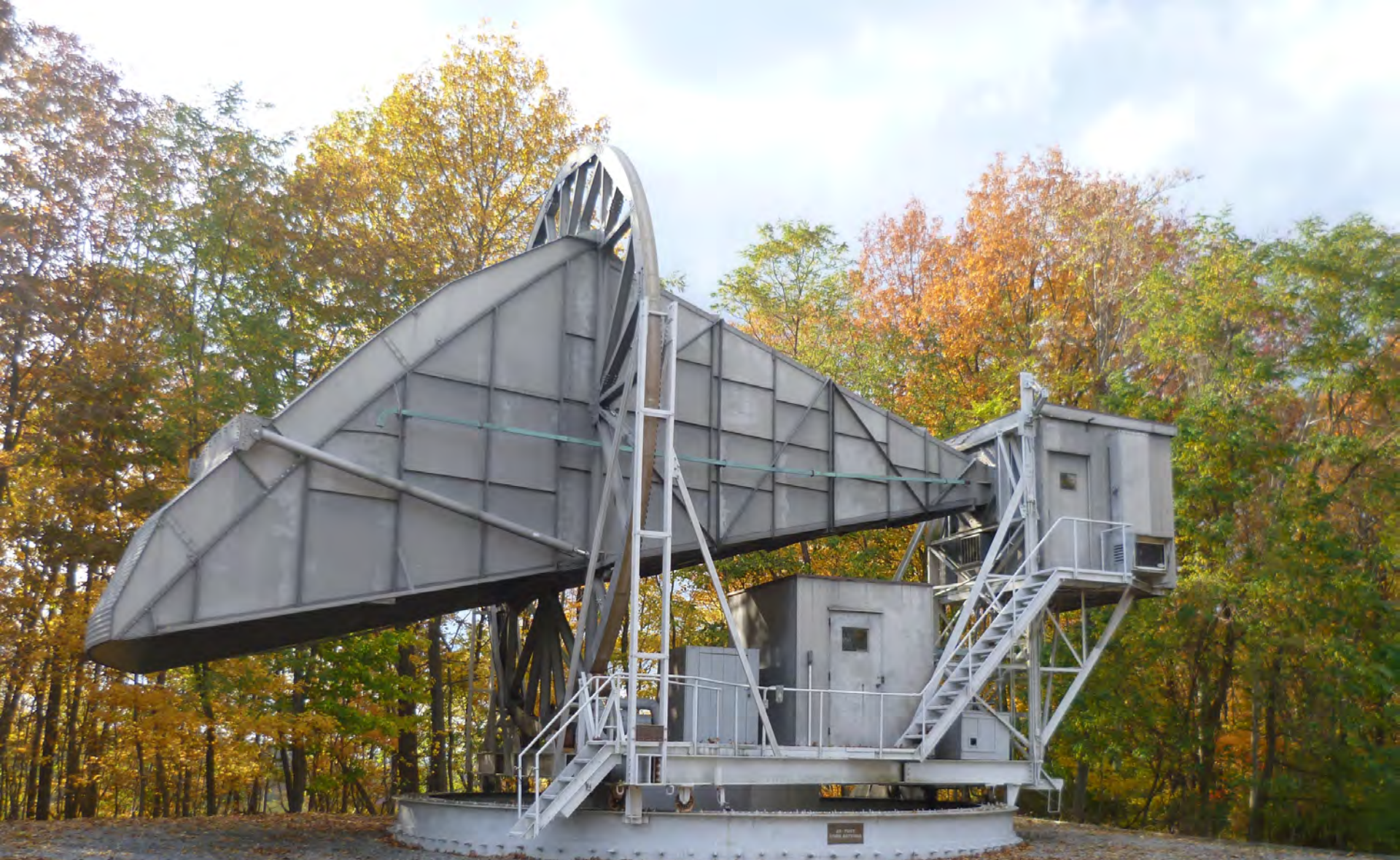
5月13日付け

May 13, 1965

BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY

A. A. PENZIAS
R. W. WILSON

ApJ 142(1965)419



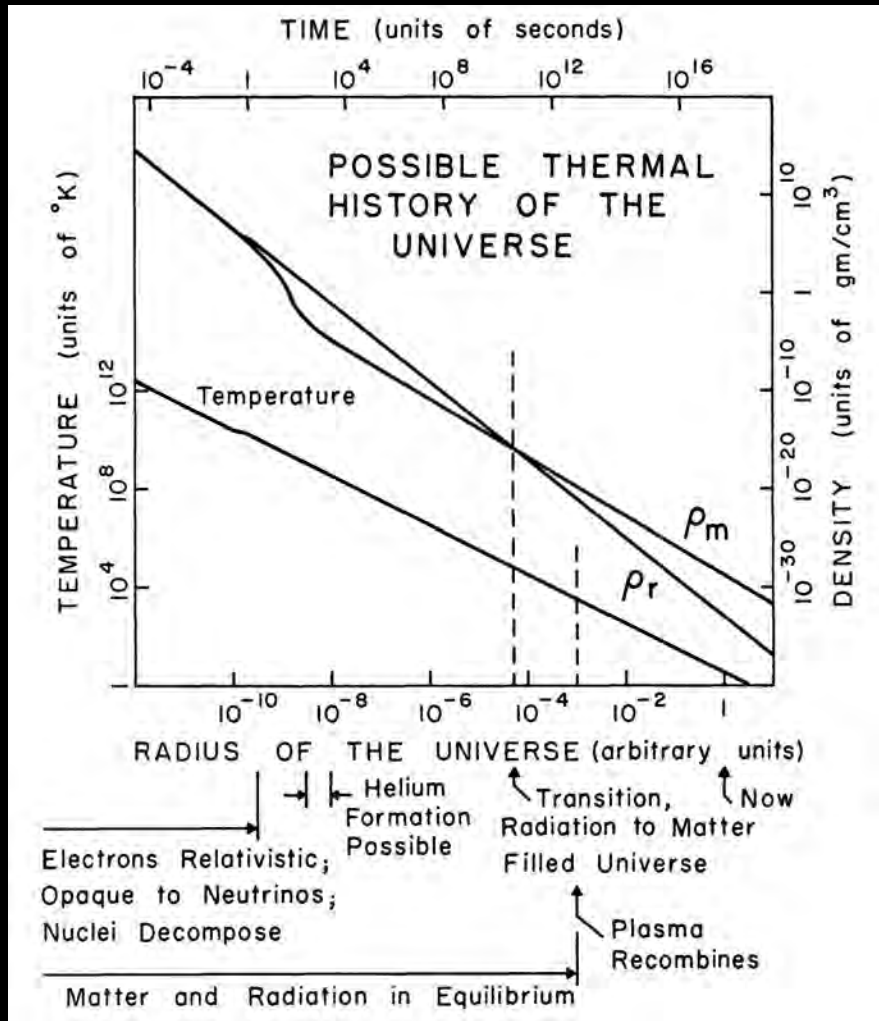
2013年11月2日 @Crawford Hill, NJ

With this large horn antenna, Arno Penzias and Robert Wilson discovered the cosmic background radiation in 1964. This unexpected discovery, the first evidence that the universe began with the Big Bang, ushered in experimental cosmology.

HISTORIC PHYSICS SITE, REGISTER OF HISTORIC SITES
AMERICAN PHYSICAL SOCIETY

2013年11月2日

ビッグバン宇宙の「温度」史



Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson
ApJ 142(1965)414

The Sept 29th 1963
Gamow Dacha
785 10th Street
Boulder, Colorado

Dear Dr. Penzias,

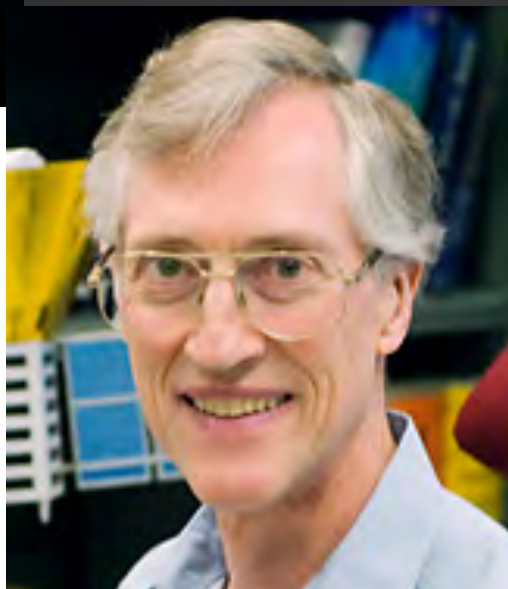
Send Thank you for sending me your paper on 3°K radiation. It is very nicely written except that "early history" is not "quite complete". The theory of, what is now known as "primal fireball" was first developed by me in 1946 (Phys. Rev. 70, 572, 1946; 74, 505, 1948; Nature 162, 680, 1948). The prediction of the numerical value of the present (residual) temperature could be found in Alpher & Herman's paper (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) who estimate it as 5°K, and ~~in~~ in my paper (Kong Dansk. Vid. Sels. 27 no 10, 1953) with the estimate of 7°K. Even in my popular book "Creation of Universe" (Viking 1952) you can find (app. 42) the formula $T = 1.5 \cdot 10^{10} / t^{1/2}$ °K, and the upper limit of 50 °K. Thus, you see the word did not start with mighty Dicke. Sincerely G. Gamow?

ガモフがペンジアスに宛てた手紙

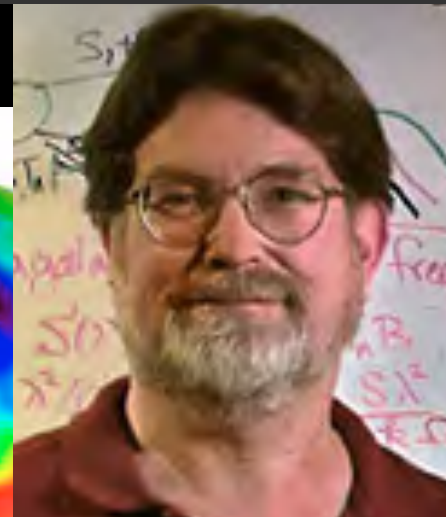
2006年ノーベル物理学賞

COBE衛星による宇宙マイクロ波背景輻射温度ゆらぎの発見

ジョン・マザー

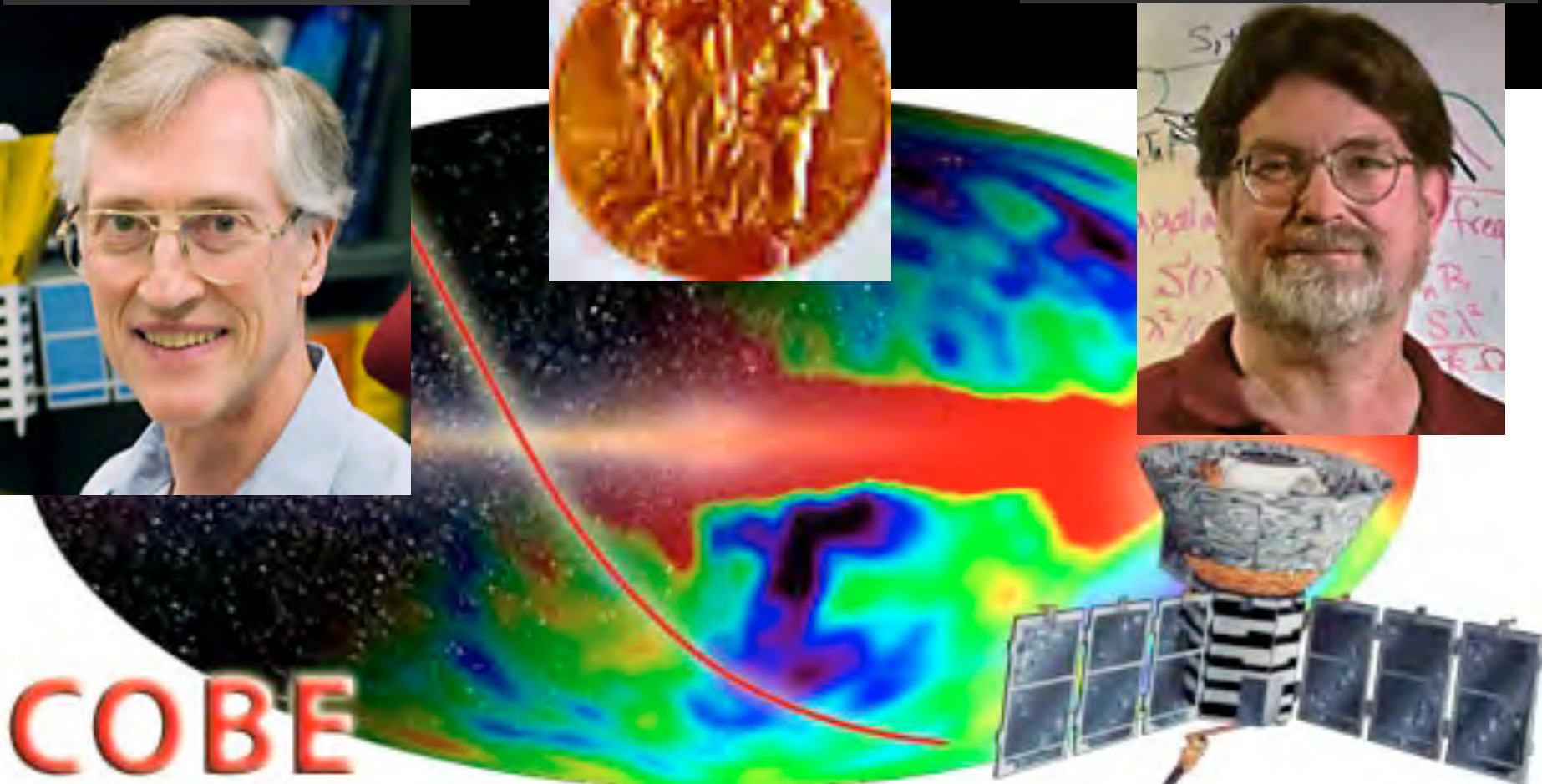


ジョージ・スムート

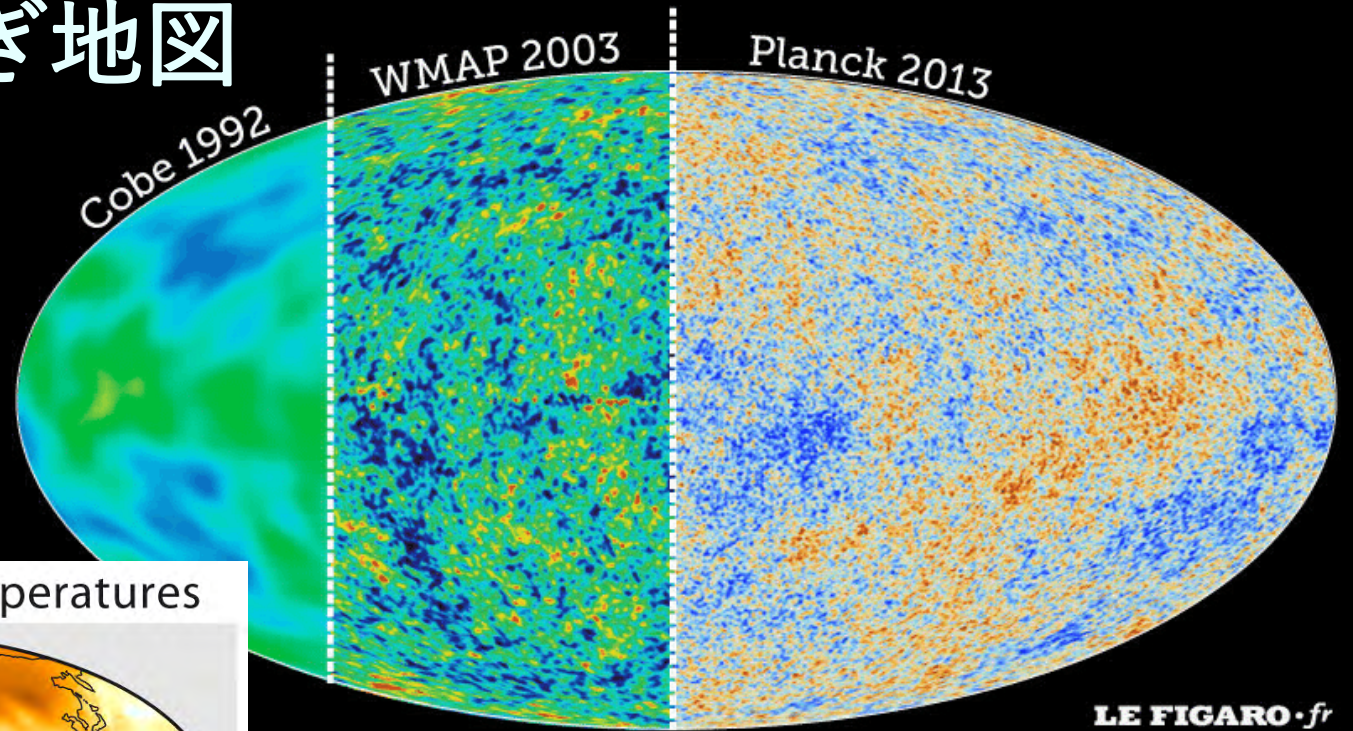
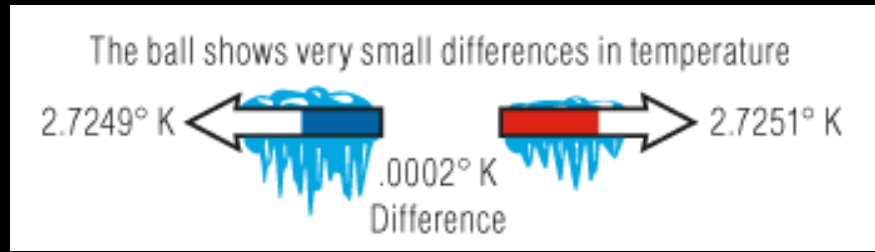


COBE

Cosmic Background Explorer

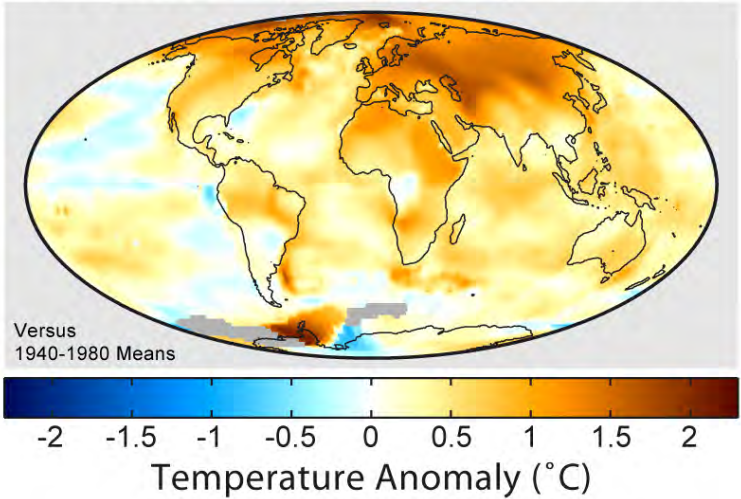


宇宙マイクロ波 背景輻射 温度ゆらぎ地図



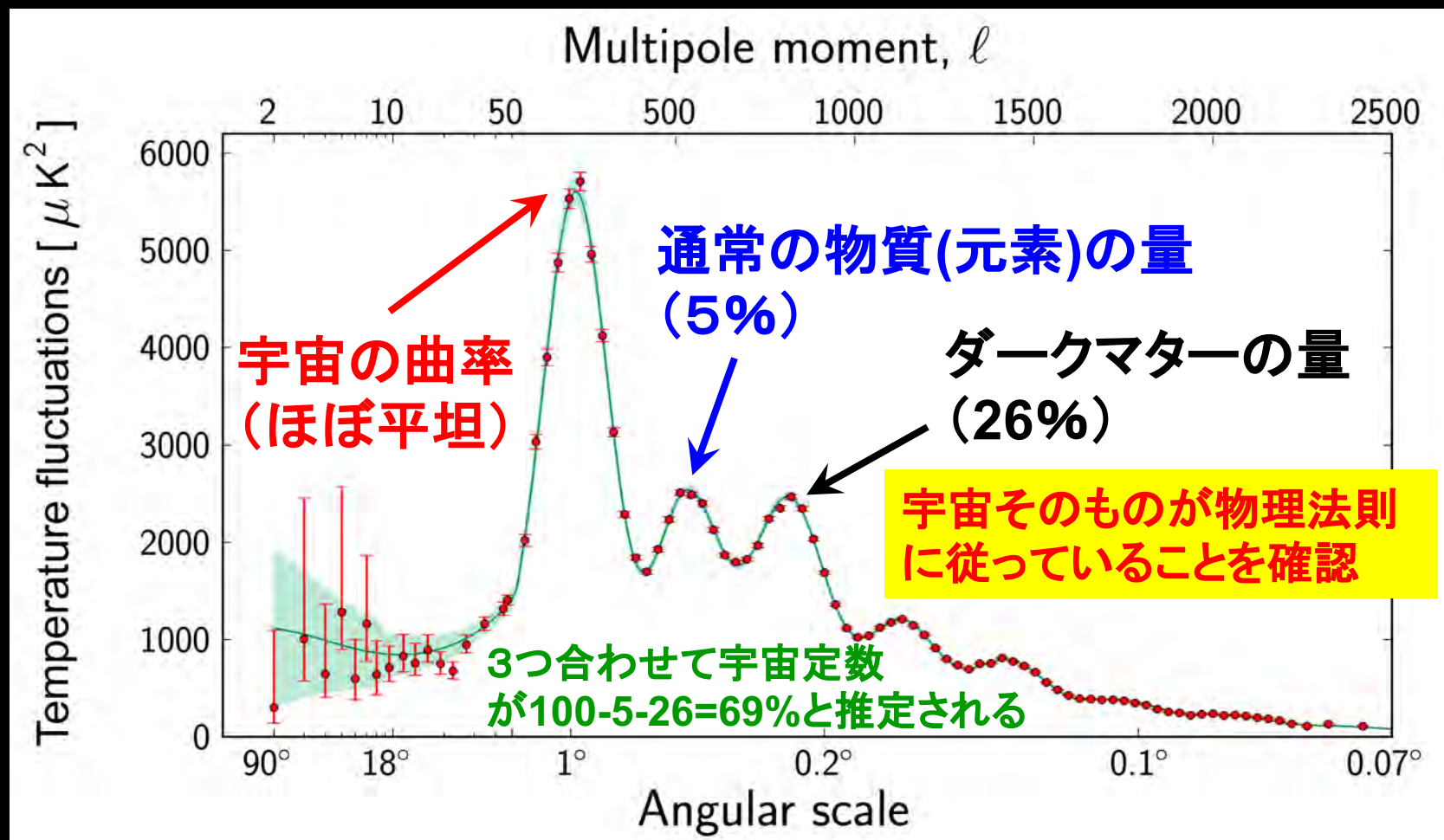
Vazquez, Padilla
& Matos (2018)

1999-2008 Mean Temperatures



COBE衛星
WMAP衛星 (Wilkinson Microwave
Anisotropy Probe)
Planck衛星

標準宇宙モデル: わずか6つのパラメータでぴったり説明できる



CMB温度 ゆらぎ 理論予言

PRIMEVAL ADIABATIC PERTURBATION IN AN EXPANDING UNIVERSE*

P. J. E. PEEBLES†

Joseph Henry Laboratories, Princeton University

AND

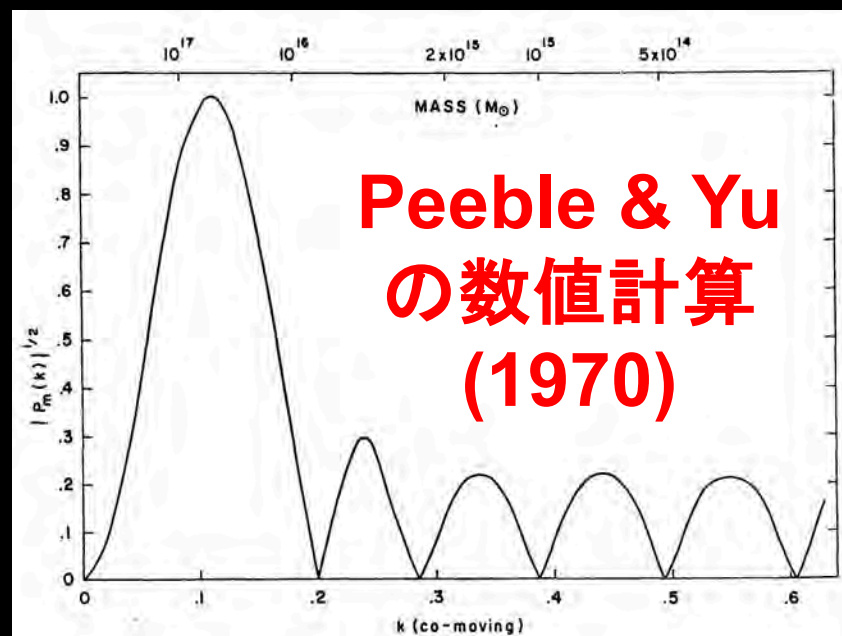
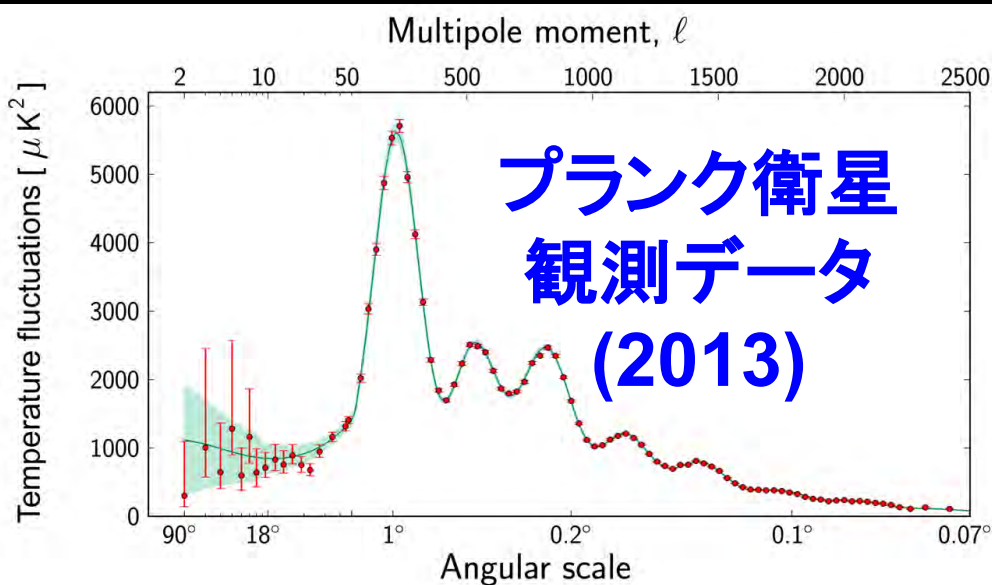
ApJ 162

J. T. YU‡

(1970)815

Goddard Institute for Space Studies, NASA, New York

Received 1970 January 5; revised 1970 April 1



宇宙の組成と宇宙定数

TESTS OF COSMOLOGICAL MODELS CONSTRAINED BY INFLATION

P. J. E. PEEBLES

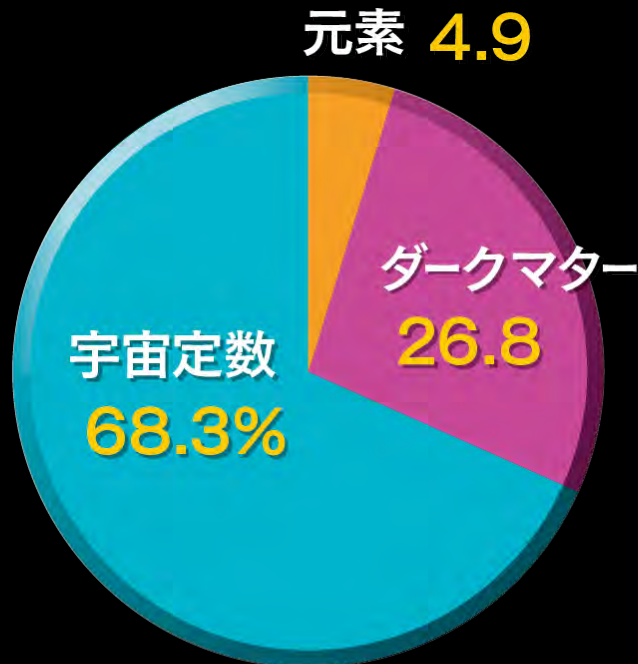
Joseph Henry Laboratories, Princeton University

Received 1984 February 6; accepted 1984 March 23

**ApJ 284
(1984) 439**

ABSTRACT

The inflationary scenario requires that the universe have negligible curvature along constant-density surfaces. In the Friedmann-Lemaître cosmology that leaves us with two free parameters, Hubble's constant H_0 and the density parameter Ω_0 (or, equivalently, the cosmological constant Λ) I discuss here tests of this set of models from local and high-redshift observations. The data agree reasonably well with $\Omega_0 \sim 0.2$.



- 宇宙の主成分は宇宙定数で約7割を占める
- その次は約3割を占めるダークマター
- 我々の身の回りの世界を構成している元素はわずか5%程度でしかない
- 宇宙の約95%はその正体が未だ解明されていない

2011年 ノーベル物理学賞

■ Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt and Adam G. Riess

- 1998年に、遠方の超新星の観測を通じて、宇宙の膨張が加速していることを発見
この観測事実を説明する最も有力な仮説が宇宙定数



宇宙の初期条件が現在の銀河分布を決める



NHK TV サイエンスZERO(2003年6月11日放送)
スローンデジタルスカイサーベイ 第一期データに基づく銀河の宇宙地図

ピーブルズは銀河分布に刻まれた宇宙の情報の解読法を確立した

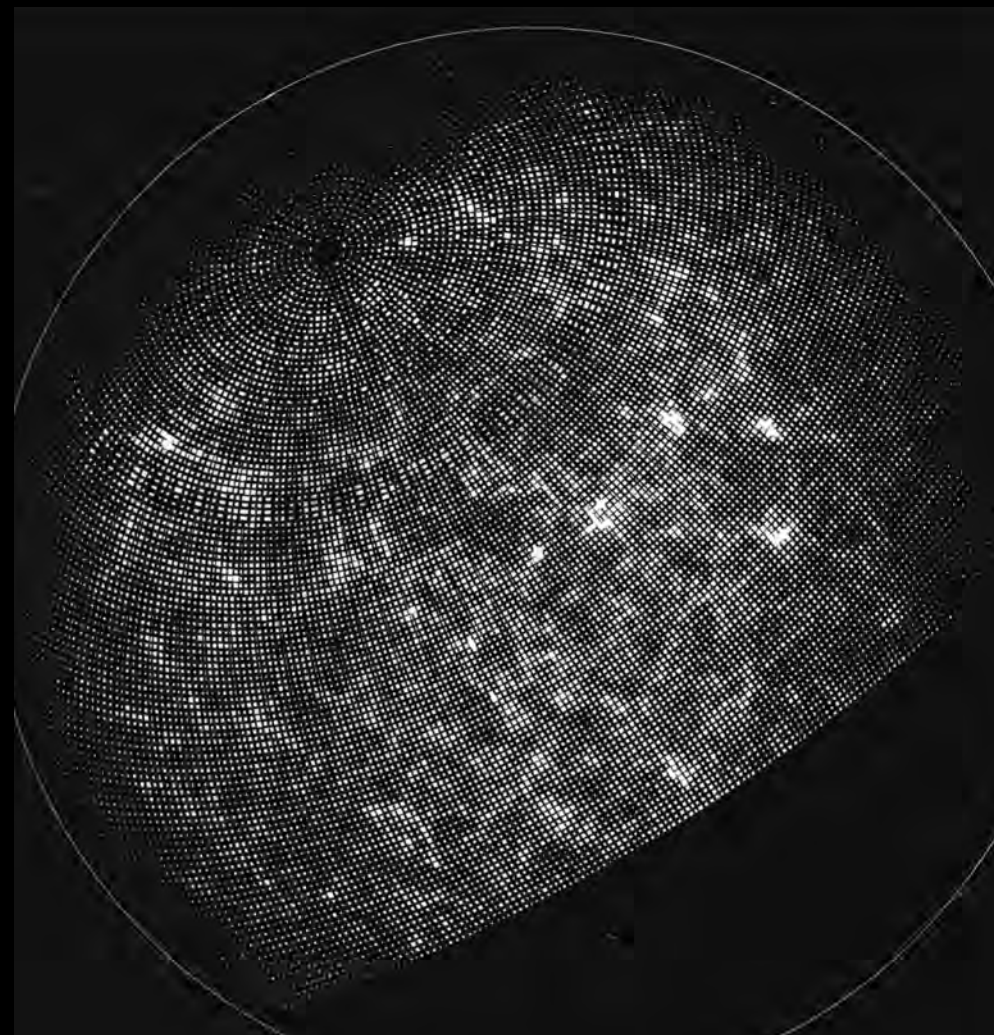
Peebles: "The Large-scale Structure of the Universe"の最初の図の作成法

2884-1

Frame 3 Count by CCD. 1970 June 20 - June 21

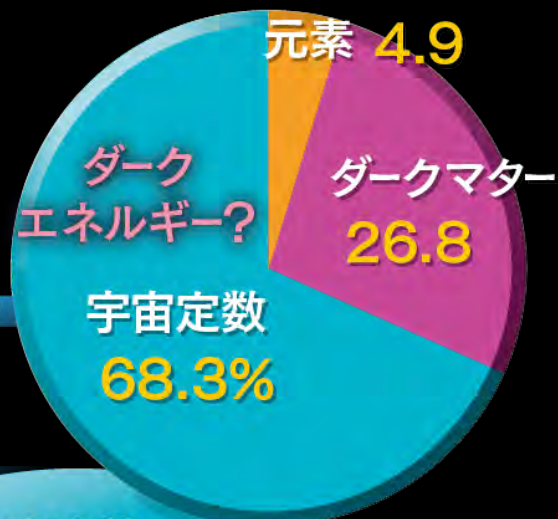
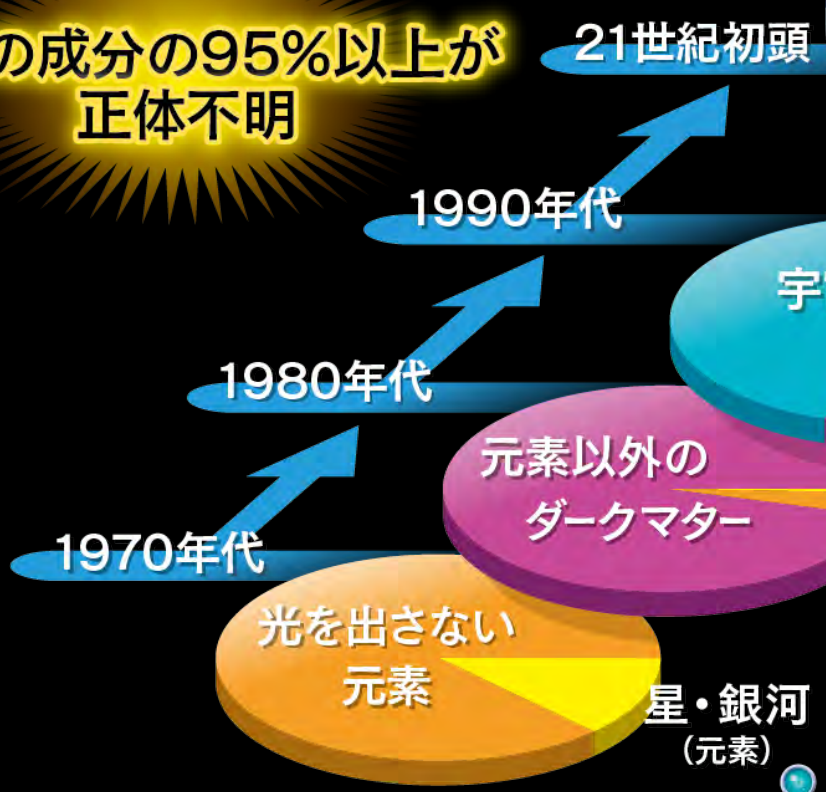
Repeat PDS Original 100 Stars at -112 -110 -105.6 116.2 116.2 116.1
Ch 1, 2, 3, 4 -112 -110 -105.6 116.2 116.2 116.1

802203	022221	210002	011201	012010	123100	1
240022	204120	011100	121111	016102	120100	2
000111	403120	110000	020002	120100	010200	0
001101	242110	112010	044020	310120	000111	1
013110	053221	221400	040100	300100	011201	1
252111	110534	011111	101011	100120	211012	3
021212	110532	233220	227223	110011	121200	0
122116	352421	112032	231321	200011	100003	0
030132	169016	230351	121201	102201	103160	0
213433	253300	242125	521136	222130	020231	1
012341	123121	513424	122313	321222	231033	2
301231	021223	012221	411222	121463	131101	1
342120	123201	313431	330110	140010	221111	1
013525	011001	221413	001333	202010	017222	0
102322	111001	000200	202240	003010	005333	0
223151	112111	000010	100500	300100	021030	0
510202	453102	011000	101111	012614	013202	1
203611	144121	211111	222121	030475	041221	1
202103	113110	110303	120102	031320	121200	1
036310	304010	100010	100110	012340	011011	1
310031	010012	100010	020001	212111	111102	0
110002	104000	120000	010000	173312	200212	2
011201	421020	011130	414201	000231	101201	1
210012	221000	111120	212210	112311	211142	1
322011	411121	120130	114222	020312	000112	1
100302	231112	214114	120021	012613	112001	1
210102	011221	168022	020030	204103	100001	1
111201	114222	411403	203210	210231	131001	1
121312	102023	310102	111104	333300	113200	0
111021	210210	210221	000207	013010	021001	1
200202	201001	231212	100310	171011	010001	1
103232	101217	311110	131352	112122	210101	1
025210	000001	311110	010212	125113	021000	1
033101	022001	210001	100241	106203	101102	1
110300	120110	010110	011613	234930	420201	1
101000	102010	032102	100010	120101	280100	1



宇宙観の進化

宇宙の成分の95%以上が
正体不明

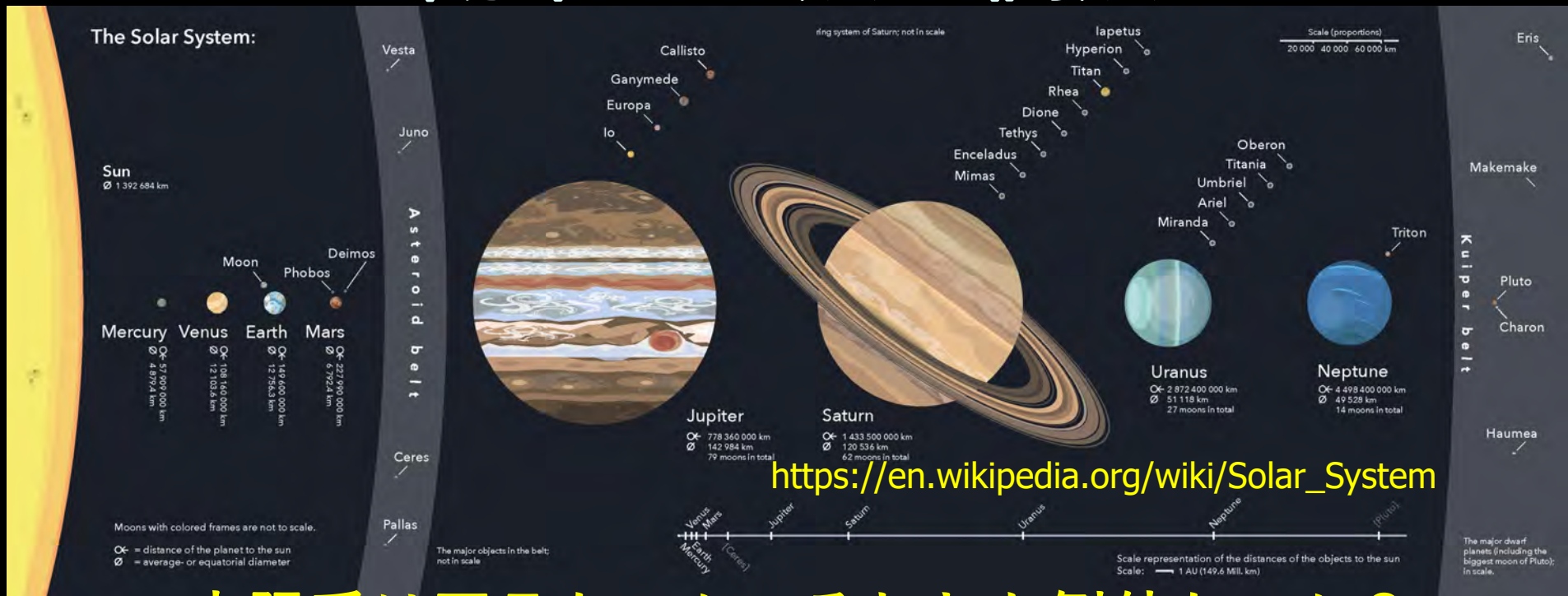


- ダークマターは未知の素粒子?
- ダークエネルギーは真空のもつエネルギー?あるいは一般相対論の破綻?
- いずれも21世紀科学を切り拓く鍵

標準宇宙論においてダークマターと宇宙定数(ダークエネルギー)の存在が確立する過程で、ピーブルズの研究は大きな影響力を持ち、宇宙観の進化に貢献した

4 系外惑星とマイヨール-ケロー

太陽系は必然か偶然か



■ 太陽系は平凡なのか、それとも例外なのか？

- ほぼ同一平面上の円軌道をなす 8 重惑星系
- 内側に岩石惑星、外側に巨大ガス惑星
- 力学的に極めて安定（約100億年程度は安定）
- ハビタブル惑星（地球）を持つ
- 惑星の多くは複数の衛星と環を持つ

太陽系以外に惑星は存在しない(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.

太陽系以外に惑星は存在しない(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(と判断) ……
- 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

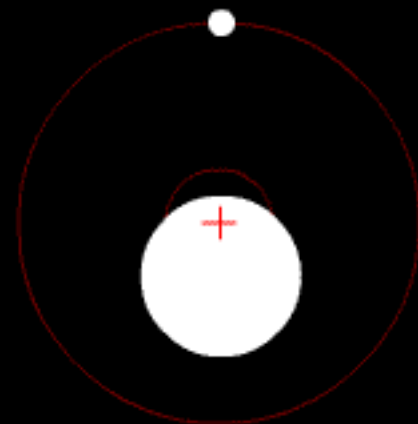
Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, P.O. Box 3055, Victoria, British Columbia V8W 3P6, Canada

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

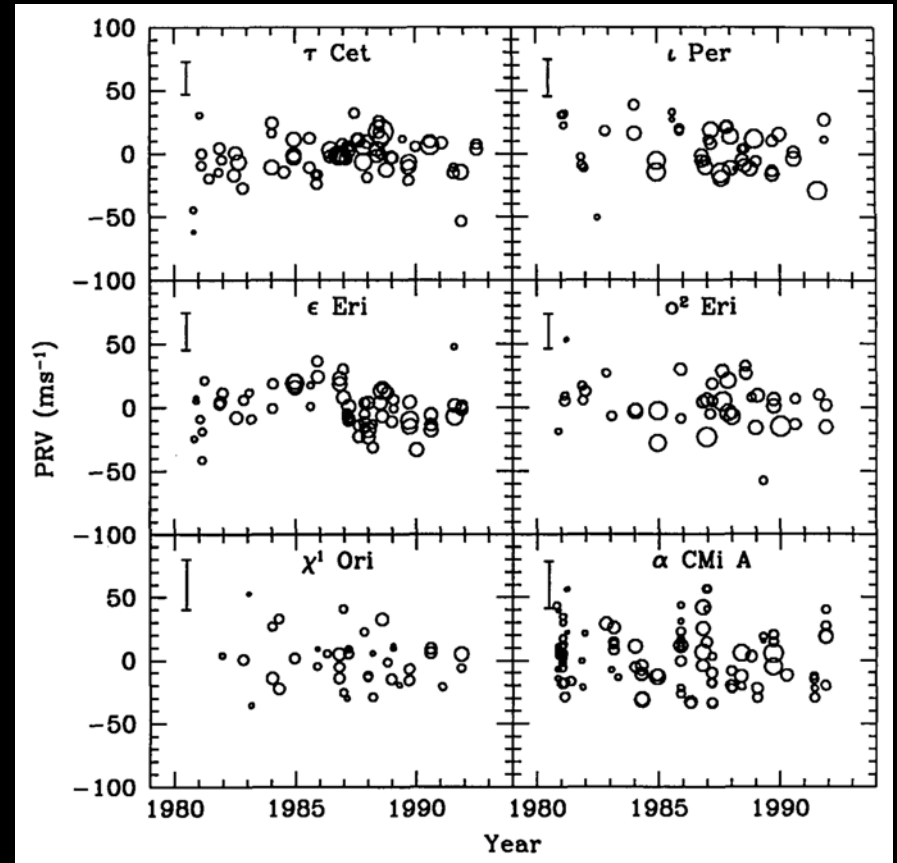


When we began this program over 14 years ago, we fully expected that, with sufficient precision, we would find several candidate giant planets. Not only is the Solar System dominated dynamically by Jupiter, but simulations such as those of Isaacman and Sagan (1977) suggested that a Solar System-like 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)

「我々は何も知らなかった」 ホットジュピターの発見 (1995)

A Jupiter-mass companion to a solar-type star

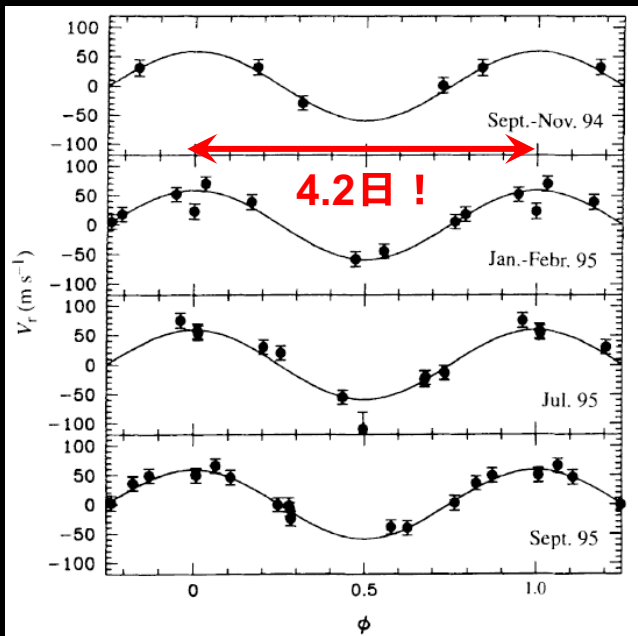
Michel Mayor & Didier Queloz

Nature 378(1995)355

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

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日というとんでもない短周期で公転していた！ (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

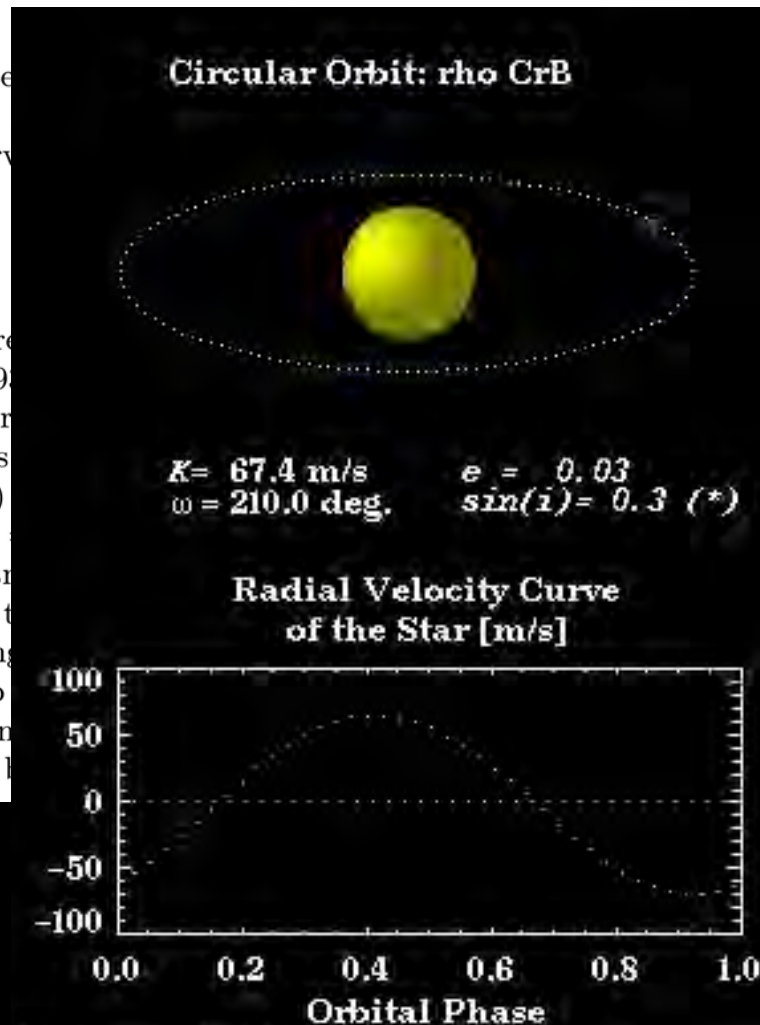
¹ Observatoire de Marseille, 2 Place Le Verrier, F-13248 Marseille

² Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny, Switzerland

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

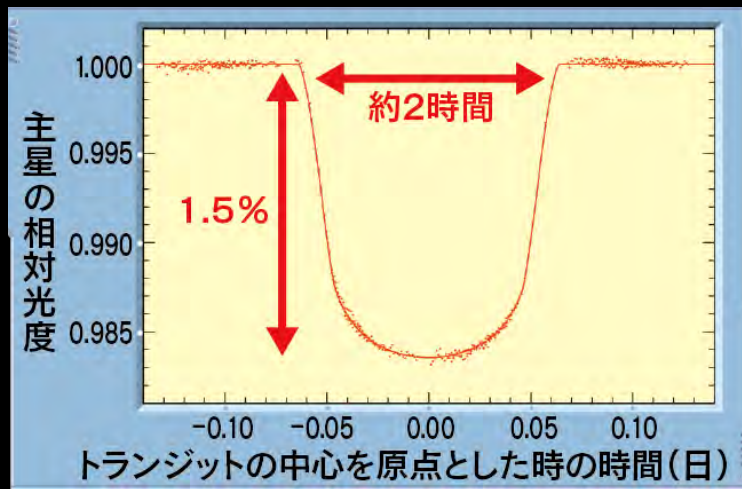
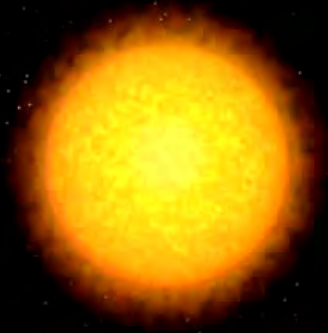
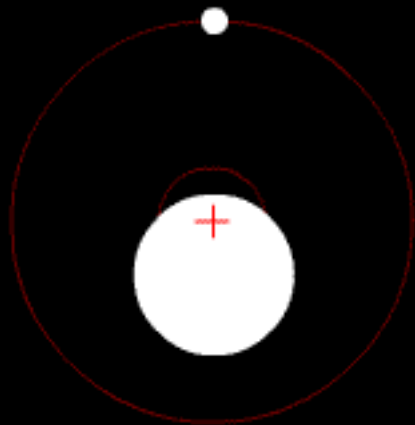
Received September 28, 1995; accepted February 15, 1996

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 echelle 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.



大発見の裏には、優れた装置開発と長年の(報われない)観測の積み重ねがあった

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

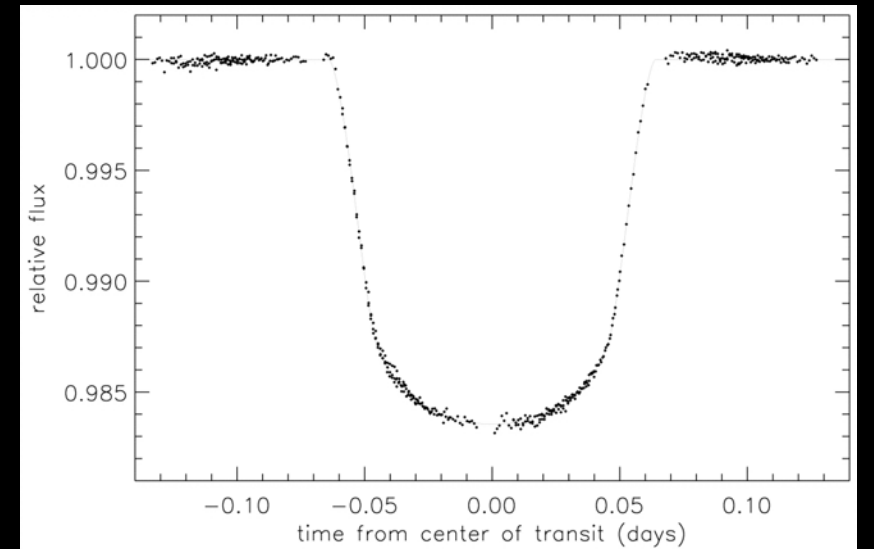
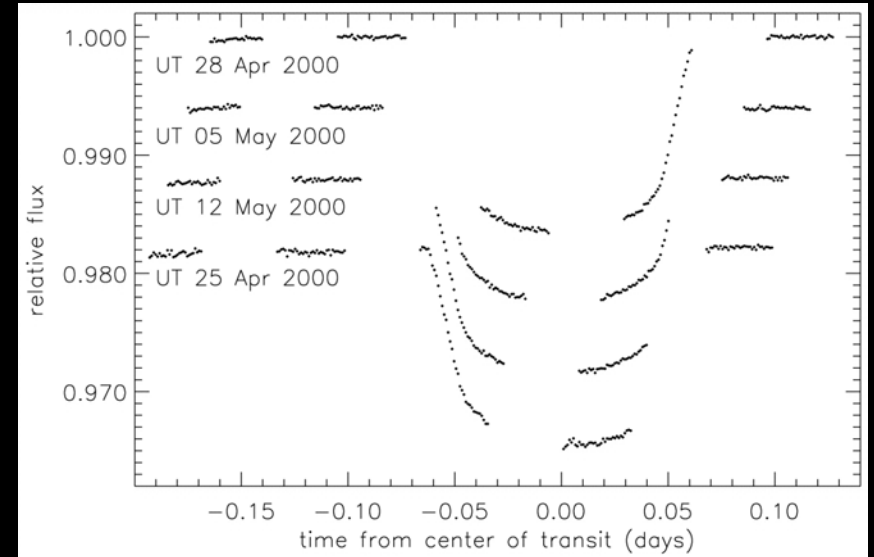
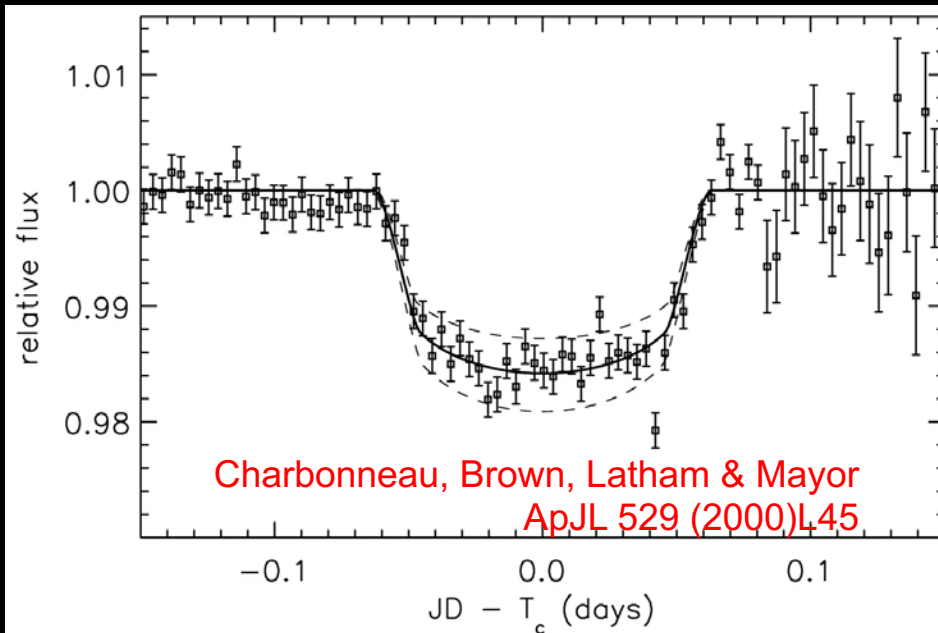
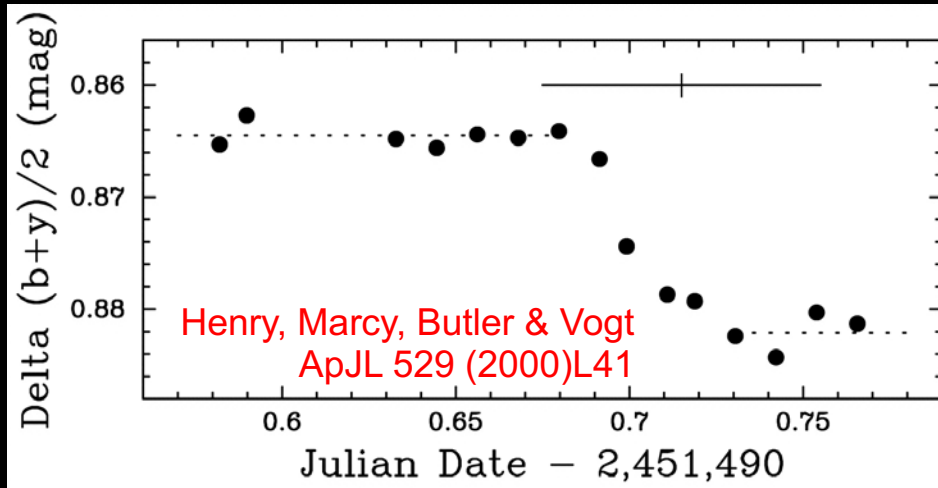
- 中心星の光を隠して惑星の光を分離

■ 重力レンズ

最初のトランジット惑星: HD209458b

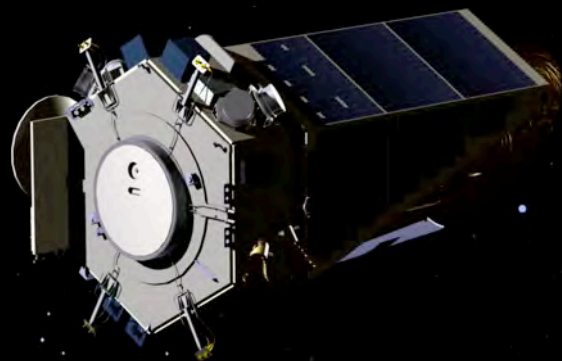
地上望遠鏡

ハッブル宇宙望遠鏡



宇宙は惑星で満ちていた

トランジット専用観測衛星ケプラー
(2009年打ち上げ)が、系外惑星観測
データに革命をもたらした

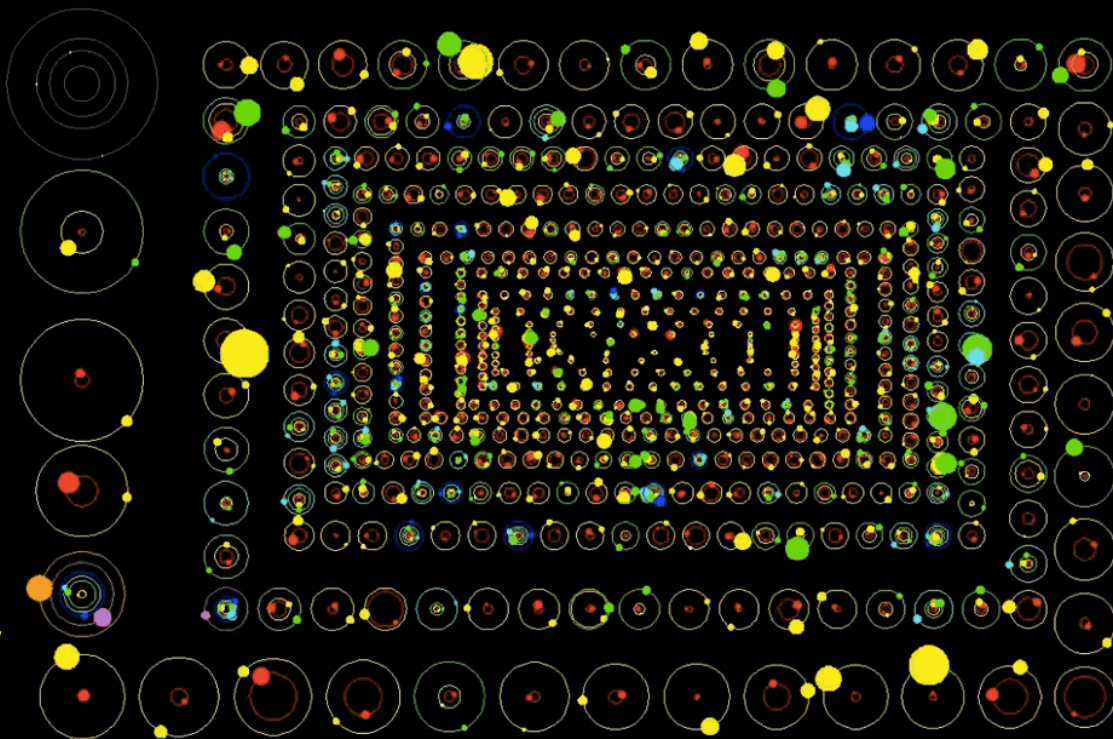
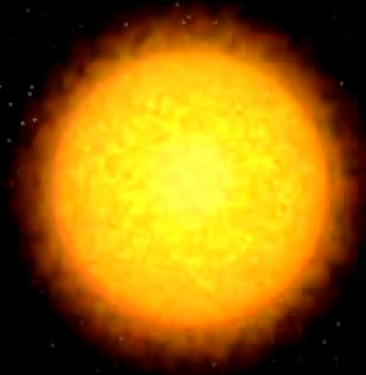


Kepler planets (August 3, 2015)

©NASA/Daniel Fabrycky

The Kepler Orrery III

t[BJD] = 2455215



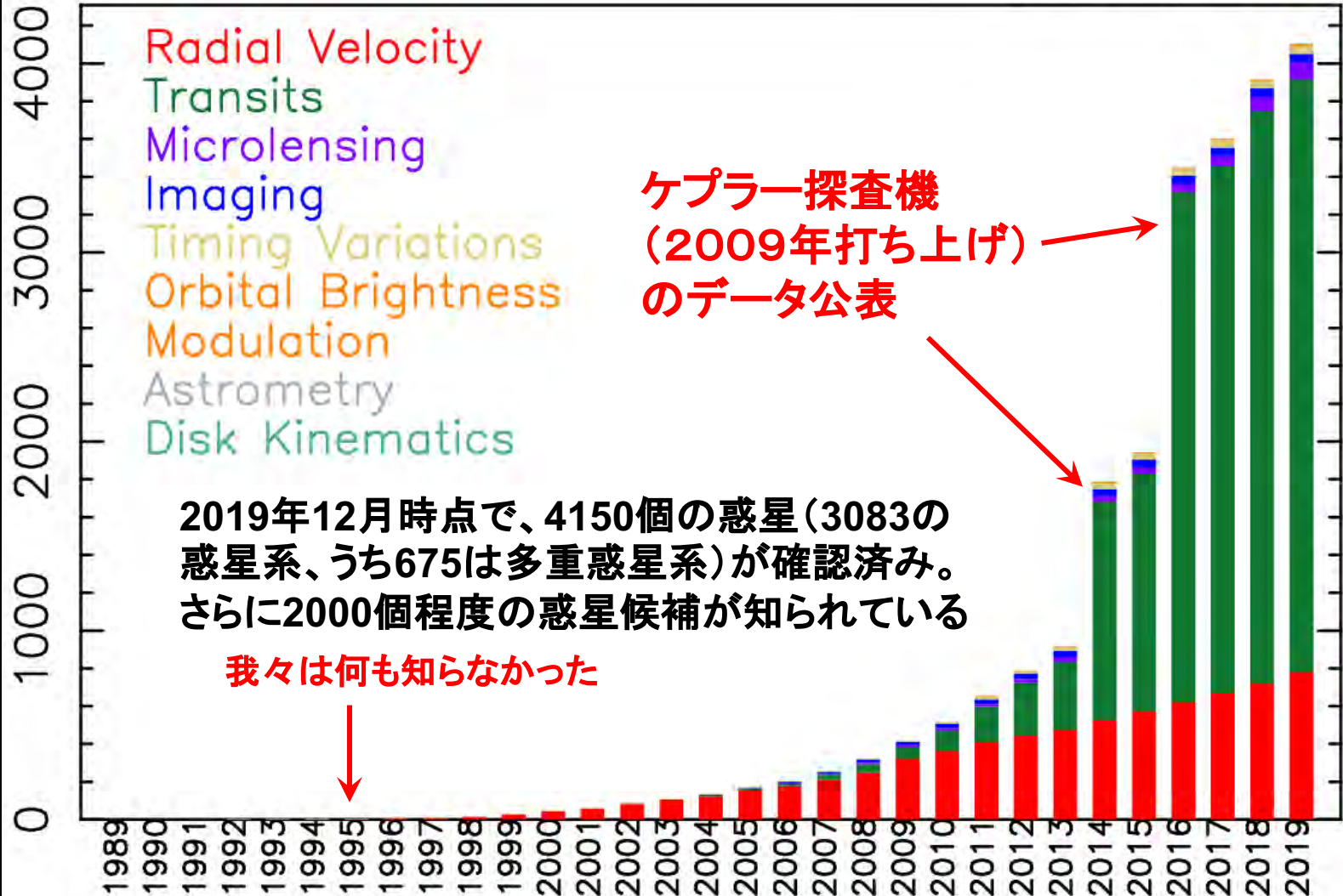
<https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/>

系外惑星の発見年表

05 Dec 2019

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

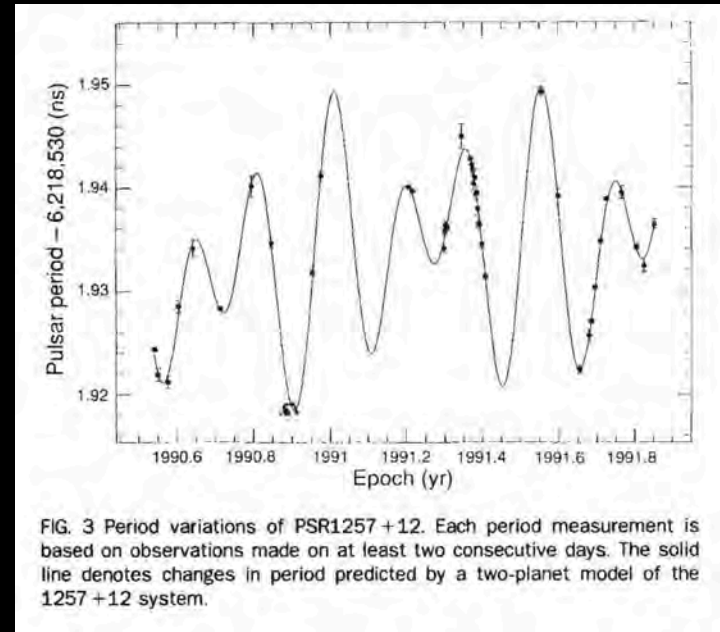


FIG. 3 Period variations of PSR1257+12. Each period measurement is based on observations made on at least two consecutive days. The solid line denotes changes in period predicted by a two-planet model of the 1257+12 system.

■ パルサープラネット

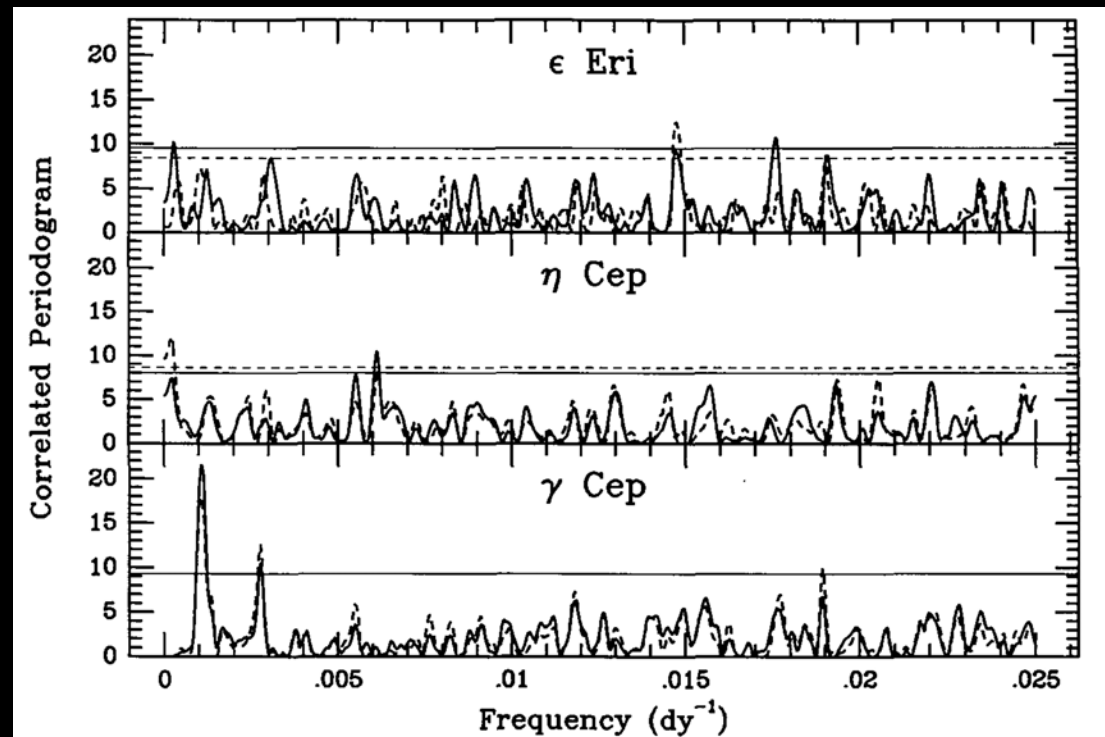
■ $3.4M_{\text{地球}}$ (周期66.6日)

■ $2.8M_{\text{地球}}$ (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？

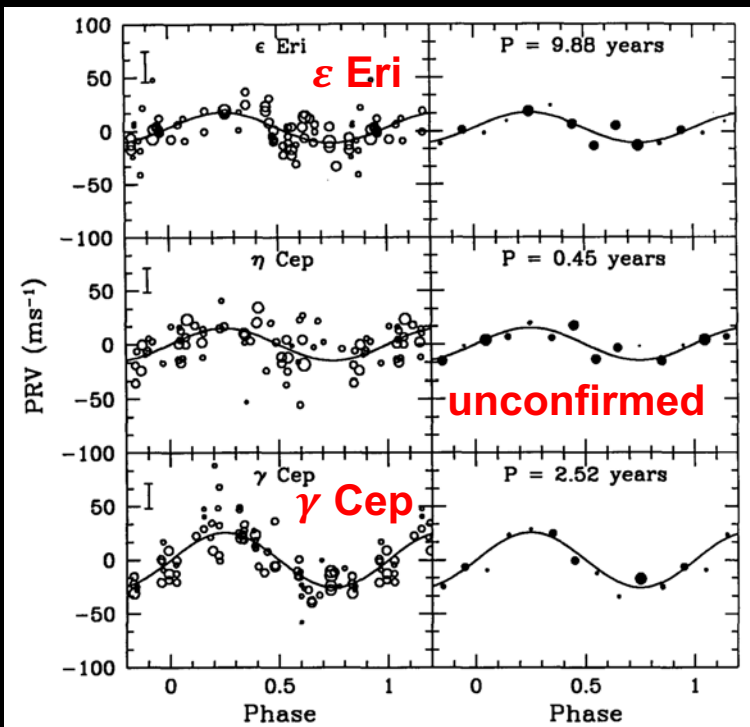
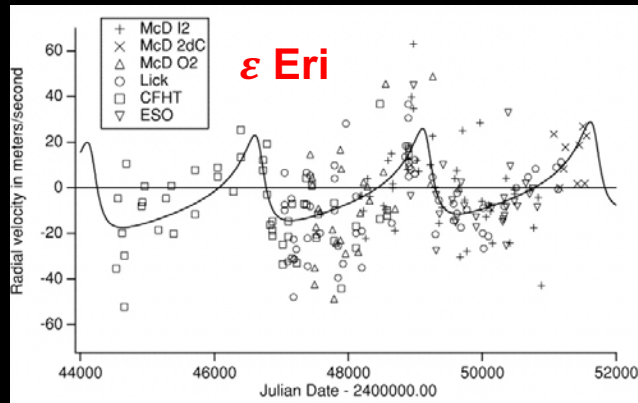
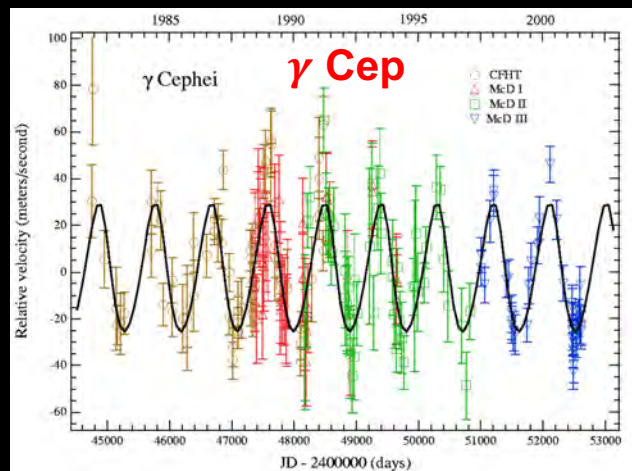


Fig4. in Walker et al. (1995)



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



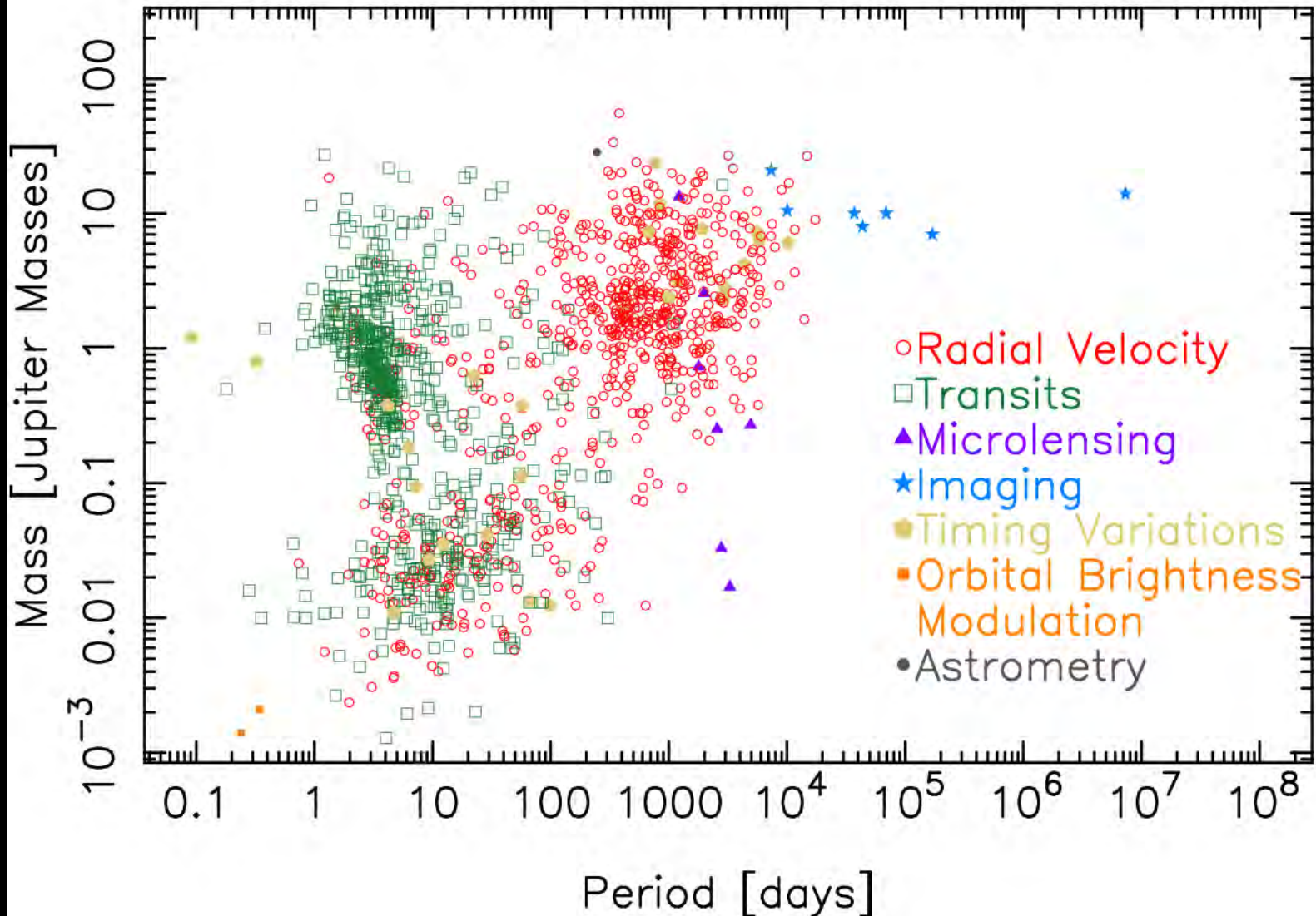
Hatzes et al. (2003)
(including Walker)
1.7M_J planet;
P= 2.5yr, e=0.1

- 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)

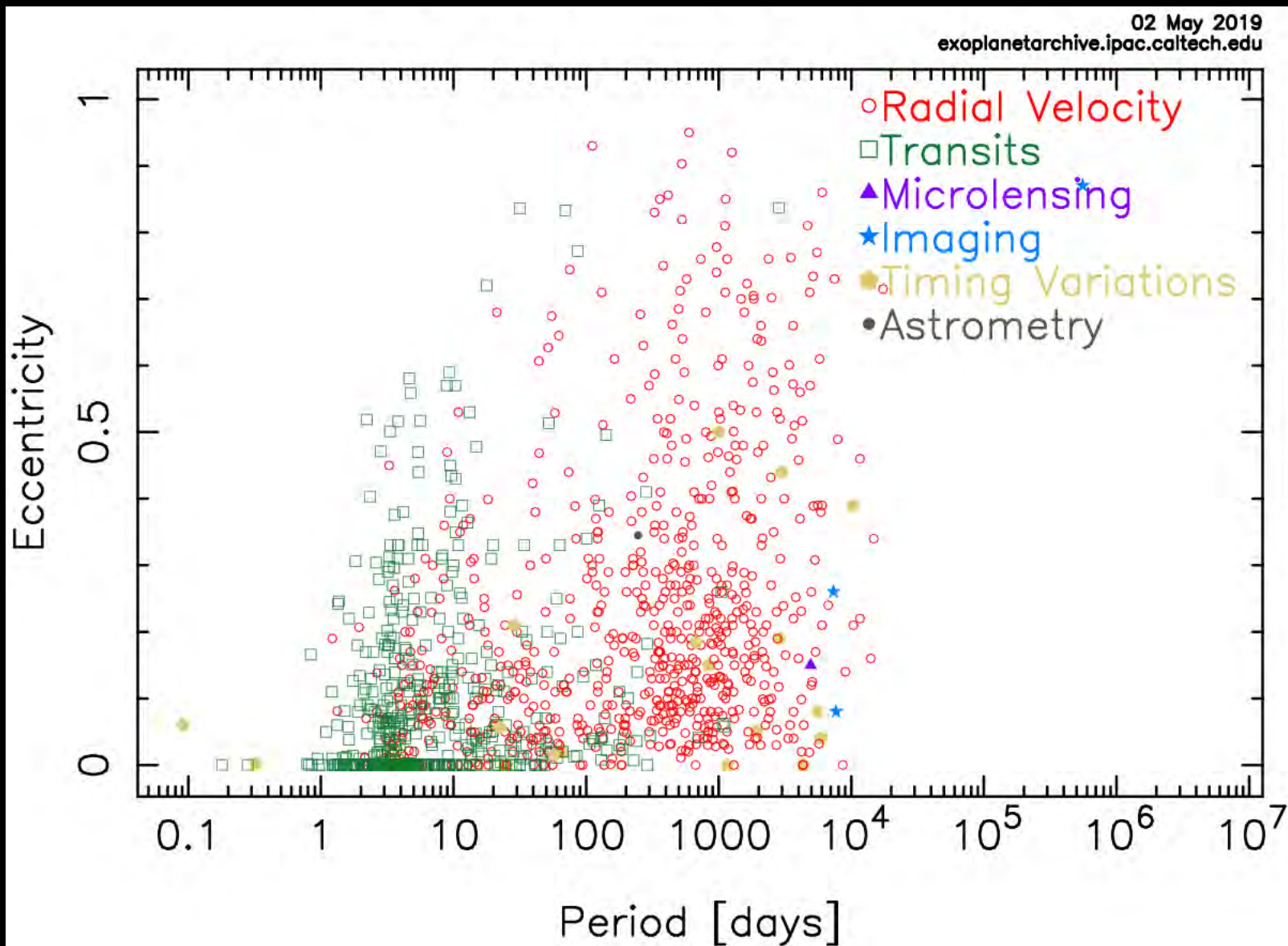
系外惑星の多様性：周期 vs. 質量

02 May 2019

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



系外惑星の多様性：周期 vs. 離心率



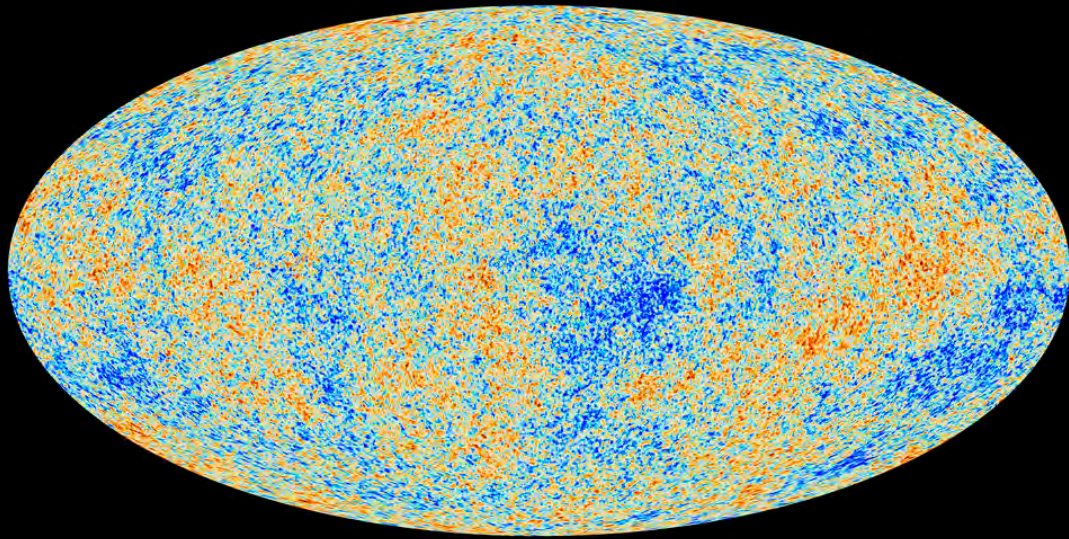
惑星系の普遍性と多様性

- 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

5 まとめ

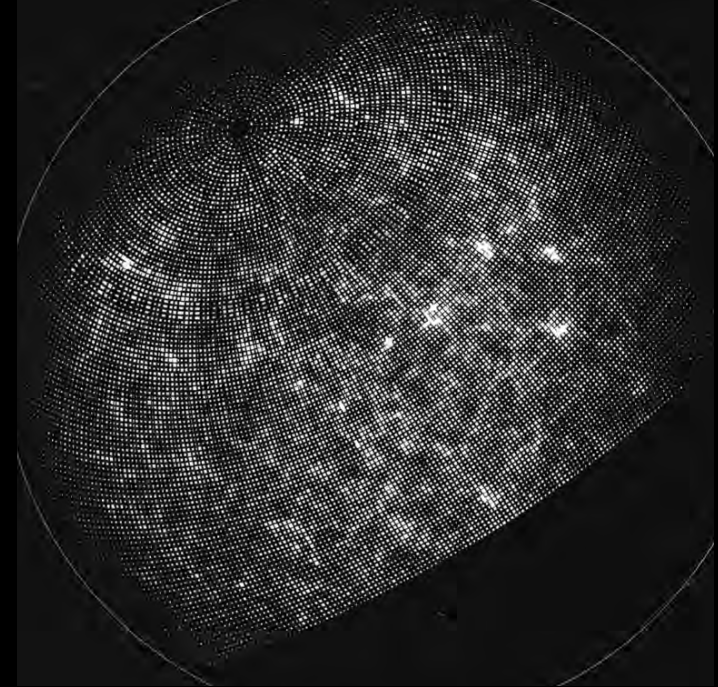
現在の宇宙（世界）に関する全情報が 原理的にはここに刻み尽くされている

誕生後38万年の宇宙の「初期条件」
(宇宙マイクロ波背景放射)



物理法則

宇宙の構造形成進化史
(現在の銀河の3次元分布)

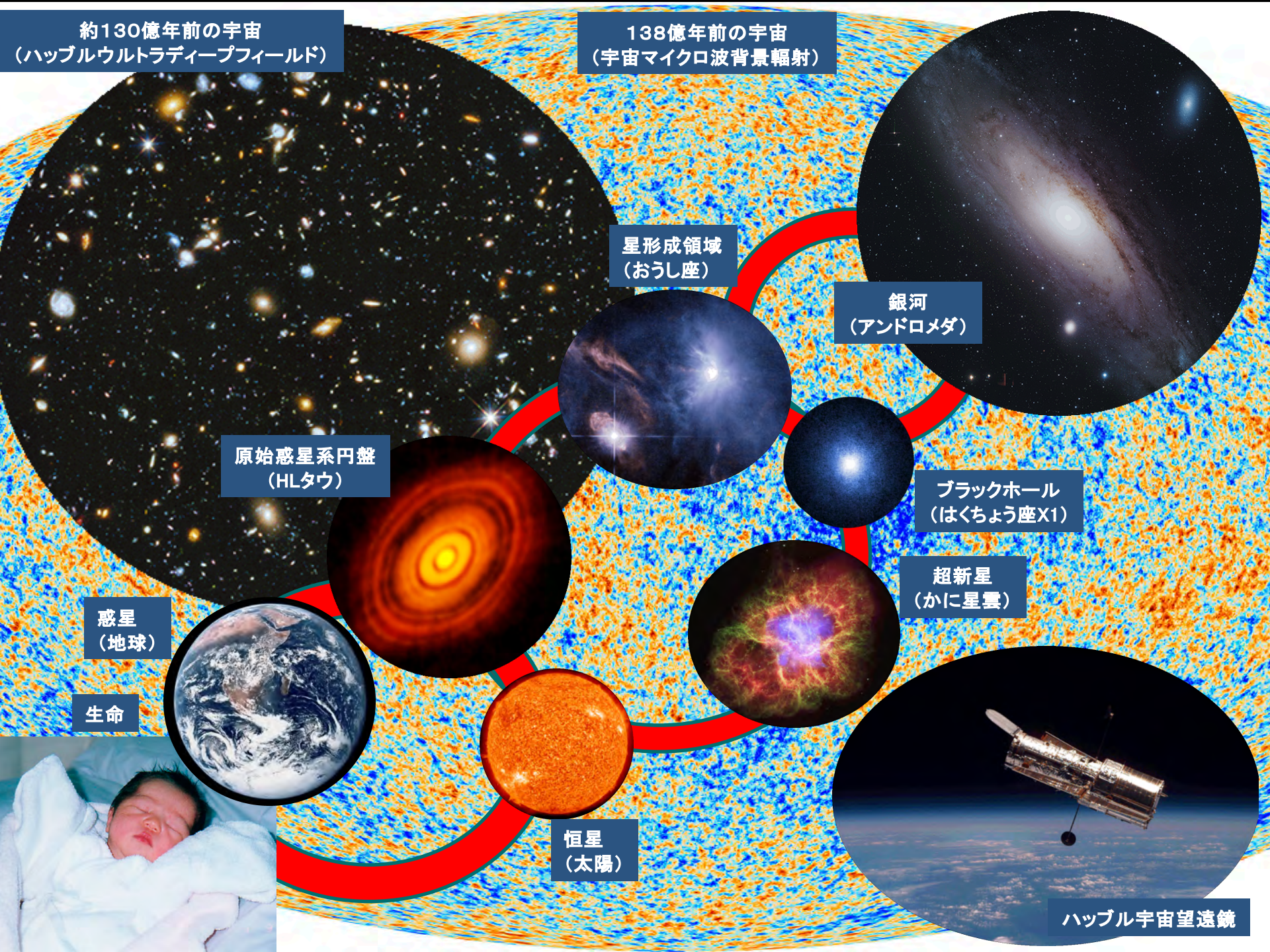


■ 宇宙論の中心的教義

初期条件+(既知の)物理法則 = 現在の宇宙

約130億年前の宇宙
(ハッブルウルトラディープフィールド)

138億年前の宇宙
(宇宙マイクロ波背景放射)



星形成領域
(おうし座)

銀河
(アンドロメダ)

原始惑星系円盤
(HLタウ)

ブラックホール
(はくちょう座X1)

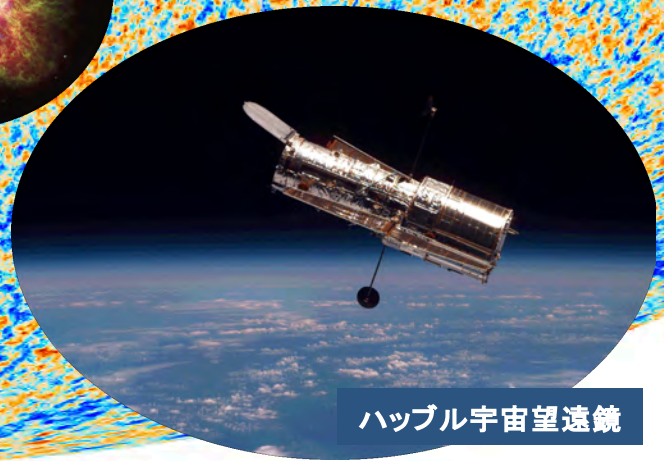
超新星
(かに星雲)

惑星
(地球)

生命

恒星
(太陽)

ハッブル宇宙望遠鏡



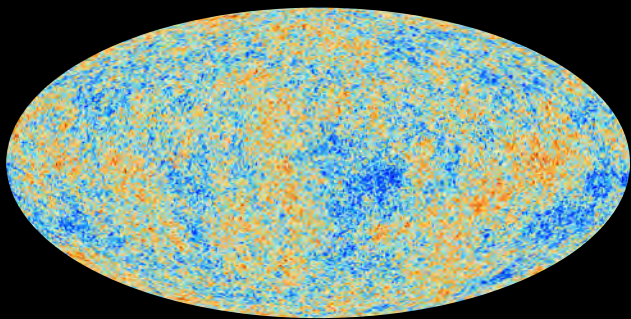
宇宙と惑星を見て世界を知る

- 宇宙論と系外惑星の研究を通じて世界観に革命をもたらした3人が2019年のノーベル物理学賞を受賞

- *There are more things in heaven and Earth, Horatio, than are dreamt of in your philosophy (Shakespeare 1616)*
- *We did not know at all. We did not know anything (Asimov 1941)*

宇宙を知り世界を問う

- **天文学・宇宙物理学の進歩 ⇔ 新たな世界観**
 - 宇宙・世界の始まりと終わり
 - 宇宙・世界は何からできているか
 - 宇宙と生命

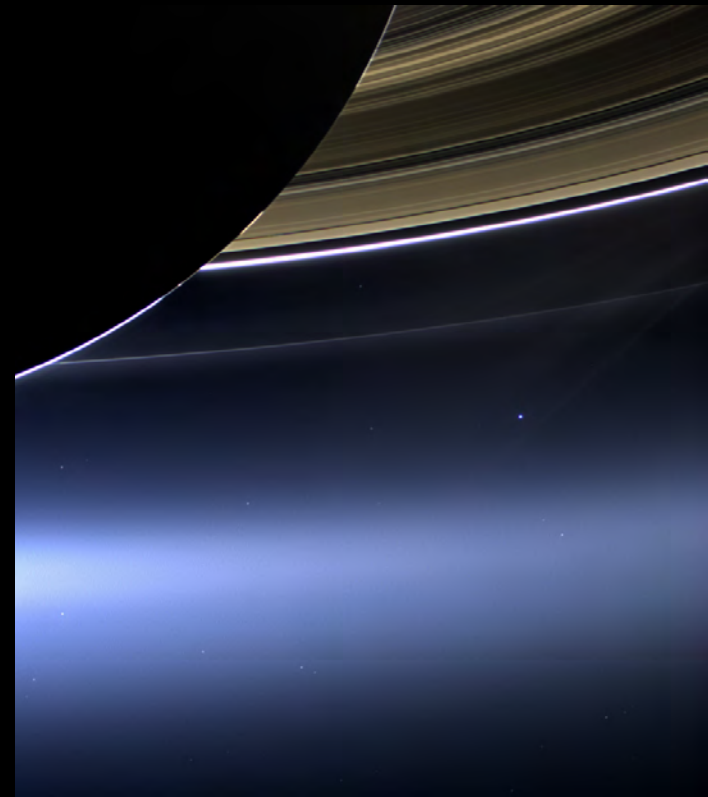


プランク探査機による
宇宙マイクロ波背景輻射全天温度地図
ESA and the Planck Collaboration - D. Ducros



ボイジャー1号が撮影した地球
(ペイル・ブルー・ドット)

NASA/JPL



カッシーニ探査機が撮影した地球

NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute