

題名	太陽系外惑星—人類古来の夢から現代科学の対象へ
Title	Extrasolar Planets: An Old Dream of Humanity—a Modern Reality of Astrophysics
著者名	ミシェル・マイヨール
Author(s)	Michel Mayor
言語 Language	日本語・英語 Japanese, English
書名	稲盛財団：京都賞と助成金
Book title	Inamori Foundation: Kyoto Prize & Inamori Grants
受賞回	31
受賞年度	2015
出版者	公益財団法人 稲盛財団
Publisher	Inamori Foundation
発行日 Issue Date	9/30/2016
開始ページ Start page	142
終了ページ End page	169
ISBN	978-4-900663-31-2

太陽系外惑星 —人類古来の夢から現代科学の対象へ

ミシェル・マイヨール

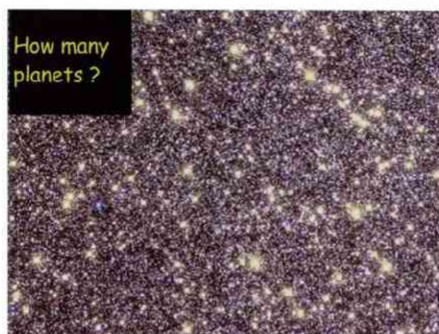


Fig. 1

このたび、基礎科学部門の地球科学・宇宙科学分野におきまして、第31回(2015)京都賞を受賞できたことを、大変光栄に存じます。そして私を受賞者に選んでくださった稲盛財団の皆様へ、心からお礼を申し上げます。また、太陽系外惑星の発見という、天文学の非常に刺激的な新分野における私の研究について、今回、このように皆様にお話しできますことを、大変うれしく思っております。

ご存じのように、私たちは、太陽に似た約2000億個の恒星が存在する天の川銀河という巨大な系の中で生きています。こうした恒星の周りを回る惑星系がほかにも存在するかどうか、何世紀もの間、私たちは問い続けてきました(Fig. 1)。宇宙に世界は複数存在するのだろうかという疑問は、私たちが2000年以上前から抱いてきたものです。ギリシアの哲学者エピクロスは、有名な手紙の中で、宇宙には無限に世界が存在するという考えを述べています。技術の進歩により太陽系外惑星の探査が可能になった今、私たちは、この問いに答えを出すチャンスを手に入れています。そこで、太陽系外惑星の研究について詳しくお話する前に、私の生い立ちと科学者としての経歴について、少し触れておきたいと思っております。

家族、そして子供時代

私は、1942年にジュネーブ湖畔にあるローザンヌという小さな町に生まれ、その小学校に入学しました(Fig. 2)。家族は皆、ハイキングやスキーが大好きでした(Fig. 3)。警察官だった父は転勤が多く、私が6歳の時、私たち一家は、ローザンヌと同じ湖畔の町で、ブドウ畑が広がるキュリー(Fig. 4)という美しい村に引っ越し

Extrasolar Planets: An Old Dream of Humanity—a Modern Reality of Astrophysics

Michel Mayor

It is a great honour to receive the Kyoto Prize for the Basic Sciences for 2015 in the field of astronomy. I am very grateful to the Inamori Foundation who chose me as the recipient of the Prize for that year. I am also very happy to have this opportunity to present what I am doing in this extremely exciting new field of astronomy, i.e., discovery of extrasolar planets in the universe.

As you know, we are a part of a very big system called the Milky Way galaxy with some 200 billion stars similar to our Sun. The question we have been asking for centuries is if there exist other planetary systems orbiting some of these stars (Fig. 1). The question of whether we have other worlds in the universe existed since more than 2000 years ago. Greek philosopher Epicurus, in a very famous letter, expressed his idea of an infinite number of worlds in the universe. Today we have a chance to address this question as we have technologies to detect extrasolar planets. Before I talk more about the research on extrasolar planets, I would like to give some hints about my origins and my evolution as a scientist.

My family and my childhood

I was born in Lausanne, a small town along the Lake of Geneva in 1942 where I started elementary school (Fig. 2). My family loved hiking and skiing (Fig. 3). My father was a police officer with positions in different cities. When I was six years old, my family moved to Cully (Fig. 4), a superb village in the vineyard along the same lake and four years later to Aigle, a small town of only 5000 inhabitants in the upper Rhone Valley. Aigle is also in a vineyard region and children spend their school vacations helping with the grape harvest and earning some pocket money.



Fig. 2



Fig. 3



Fig. 4



Fig. 5

ました。さらにその4年後には、ローヌ川上流にある人口わずか5000人の小さな町、エーグルに引っ越しました。ここもブドウ畑の広がる町で、子どもたちは学校が休みになると、ブドウの収穫を手伝ってちょっとした小遣い稼ぎをしたものです。

課外活動ではボーイスカウトに夢中になり、ハイキングにスキー、山でのキャンプなど、ありとあらゆるアウトドアスポーツに取り組みました。中でも十代の頃に始めた山登りは、私の一番好きなスポーツの一つになりました。山に近いエーグルに住んでいたため、こうしたスポーツの練習には適していました。山登りは私に計り知れない喜びを与えてくれますが、友人や家族がよく知るように、私はそのチャレンジ精神が原因で、これまでに何度も危険な目に遭っています。深いクレバスに転落し、奇跡的にかすり傷だけで助かったこともあるのです！

高校に進学する時期になると、私は高校のなかったエーグルを離れ、ローザンヌに戻らなければなりませんでした(Fig. 5)。高校卒業後はローザンヌ大学に進み、理論物理学を勉強しました。

洋服の仕立てをしていた母は、行動力と独創力のある人でした。父が亡くなった時、私は20歳で、まだ大学の1年生でした。母は、私が大学を卒業すると、慈善団体の一員としてアルジェリアに行き、保育園で数年間働くことにしました。

1966年、大学を卒業した私は、同じ大学で自然科学を学んでいたフランソワーズと結婚しました。私たちは2人とも、スキーや高山スキー、山登りといったアウトドアスポーツが趣味でした(Fig. 6)。



Fig. 6

妻のフランソワーズと
With my wife Françoise



Fig. 7

Apart from school, I was an active member of scouts: hiking, skiing, camping in the mountains and every kind of outdoor activity. As a teenager, I began doing one of my most exciting sports: climbing. With Aigle so close to mountains, living there allowed me to regularly practice these sports. Climbing provides me with immeasurable pleasure but as my friends and family know, my love of a challenge has often put me at the limit of danger: at one stage I was very happy to be rescued from a deep crevasse without too much damage!

I was obliged to move back to Lausanne to go to high school, as there was none in Aigle (Fig. 5). After high school, I went to Lausanne University to study theoretical physics.

My mother was a very active and creative dressmaker. My father died when I was 20 years old. At that moment I was only in the first year at the university. After my graduation, my mother decided to go to Algeria, as a member of a charity organisation and to work for several years in a nursery.

In 1966 when I finished my studies at the university, I got married to Françoise. She was then also a student in the natural sciences at Lausanne University. We loved external activities, such as skiing, high altitude skiing, and climbing (Fig. 6).

We have been blessed with three children, Anne, Claire and Julien (Fig. 7). For them, Haute-Provence Observatory was a second home as the whole family came with me for my numerous observing runs (at least during school holidays). It seems that our children have acquired the virus of scientific curiosity by listening to the discussions



Fig. 8

私たち夫婦はアンヌ、クレール、ジュリアンという3人の子どもに恵まれました (Fig. 7)。子どもたちにとって、オート＝プロヴァンス天文台は第二の故郷のようなものです。と言いますのも、観測活動のたびに(少なくとも学校が休みの間は)、私が家族全員を連れていったからです。自宅やオート＝プロヴァンス天文台で私と友人との議論を聞いていたせいで、3人に科学的な好奇心が伝染したらしく、分野はかなり違うものの、現在、全員が研究に対して同じ情熱を持っています (Fig. 8)。

科学者としての第一歩

子どもの頃の私は、ずっと科学に興味を持っていましたが、天文学者になるなど夢にも思いませんでした。私は、科学のあらゆる分野に夢中になりました。火山学、海洋学、地球物理学、地質学、そしてアルプスにも興味を持ったのです。数学も好きだったので、大学では物理学と数学を学ぶことにしました。2年生になる時にどちらかを選ばなければならなくなった私は、物理学を選びました。理論物理学者のG.シュテュッケルベルク教授は、私が最も影響を受けた人物です (Fig. 9)。学生は、物理学に関するシュテュッケルベルク教授の非常に深い洞察力に魅了され、私も修士課程では素粒子物理学を専攻することにしました。そして修士課程を修了すると、ジュネーブ大学の博士課程で理論宇宙物理学を研究することになりました。

銀河の渦状構造がどのように形成されたのかということは、長年論じられてきた問題でした。もしも銀河がその見かけのとおり強い差動回転によって形成されたとするならば、そうした銀河はその形を維持することはできず、幾重にも巻き付いてしまう

with friends at home or at Haute-Provence Observatory. Today, all of them share the same passion for research but in quite different domains (Fig. 8).

First steps in Science

When I was a child, I was always interested in science, but did not dream of being an astronomer. I was fascinated by every domain of sciences: volcanoes, oceanography, geophysics, geology, the Alps... I loved mathematics so I chose to study physics and maths at the university of Lausanne. After the first year I had to choose between them and I chose physics. Professor G. Stueckelberg was my most important professor for theoretical physics (Fig. 9). Students were fascinated by his very profound vision on physics and I chose to do my master in particle physics. After graduation, I got a position of Ph.D. student in the field of theoretical astrophysics at Geneva University.

The origin of galactic spiral structure had been a long-standing problem: if it was a result of a strong differential rotation, as appeared, then such galaxies would not keep their shape, but would wind themselves up (Fig. 10). Two Chinese-American professors C. C. Lin and F. Shu proposed a theoretical explanation in 1963, which received as a big success. I wanted to test the consequences of their idea on local velocity fields to see how they perturbed the mean flow of stars. This was the start of my interest in stellar kinematics, and I started my Ph.D. study in this domain.

By the end of my Ph.D. I was looking for observations to test these ideas, but the stellar velocities in catalogues were not good enough or not adapted to my question. I needed new data. This was really my critical motive to move from theory to instrumentation with a specific focus on the determination of the stellar kinematics.



Fig. 9



Fig. 10

はずです(Fig. 10)。これについて、1963年にC. C.リンとF.シューという2人の中国系アメリカ人研究者が一つの理論を提唱し、それは素晴らしい成果として受け取られました。私は、彼らの理論が局所的な速度場に与える影響を調べ、恒星の平均的な流れにどのような摂動を与えるのかを知りたいと思いました。そしてこれがきっかけとなって、私は恒星系力学に興味を持つようになり、博士課程ではこの分野を専攻することにしたのです。

博士課程修了前に、私は彼等の理論を調査すべく観測結果を探しましたが、当時のカタログ(星表)に掲載されていた恒星の速度に関するデータは、どれも私の疑問に答えるには不十分なものや不適切なものばかりでした。そこで新しいデータが必要になったのです。実はこのことが、私が理論研究から恒星系力学に関する測定装置の研究に専門分野を変える決定的な要因になりました。さらに、いくつかの予期せぬ出来事が起こりました。ケンブリッジで開催されたN体問題に関する学会で、偶然にも私はロジャー・グリフィンと出会い、分光装置を用いて、相互相関関数を求めることで恒星の速度を計算するという新しい方法について話し合う機会を得たのです(Griffin 1967)。私はこの手法に大きく心を動かされました。この分野で目覚ましい進捗が期待できるのは明らかでしたし、必要なデータを得るにはこの方法しかないと思ったのです。ジュネーブに戻り、この方法について天文台の台長と話し合ったところ、彼は天文台の発展に役立つと言って私の意見に賛成してくれました。でも恐らく彼はその時、理論が専門の私がどうやって装置を作るのだろうと疑問に思っただろうと思います。

装置の開発にはアドバイスが必要だったのですが、そのアドバイスをくれたのが、フランスのマルセイユ天文台の光学を専門とするアンドレ・バランス教授です。実際、この問題に興味を持った彼が、光学系の設計をしてくれました……。このように、科学の分野では、他の研究者との共同作業が簡単に実現することが時折あります。こうして私は、最初の相互相関分光装置を完成させたのでした。この装置は、技術的にはロジャー・グリフィンが予想していたよりも多くの可能性を持ち、コンピューターを用いることで高い効率を誇るものでした。私たちはこの装置を2基完成させ、1977年にそのうちの1基をオート＝プロヴァンス天文台に設置しました。

Some unexpected changes in life were added. By chance, at an N-Body Colloquium in Cambridge, I met Roger Griffin and we talked about a new spectrographic method to measure stellar velocities by cross-correlation (Griffin 1967). I was really impressed by this technique. It was evident we could do much progress in this domain, and I realized that this was what I needed to get my data. Back in Geneva, I discussed it with the director, who was in favour of this as a way to develop the observatory. But I think he wondered how I, a theorist, would fare building an instrument.

I needed advice, and André Baranne, professor of optics at Marseille Observatory in France, provided it. In fact, he found the problem interesting so he designed the optics... Sometimes it is easy to collaborate with people, like this case, in science. This was my first cross-correlation spectrograph with more technical possibilities than Roger had envisaged and with a computer that made it very efficient. We built two instruments, installing the first at Haute-Provence Observatory in 1977.

A small technical note!

What is the principle of a cross-correlation spectrograph? I would like to illustrate the key point of this technique. Stars with not too different masses compared to the Sun have different spectra, however they have thousands of atomic transition lines in common. When you disperse luminosity of a star into its different colours, these atomic lines appear as narrow lines in their spectra (Fig. 11). Stars are moving in the sky relatively to our solar system. The component along the line of sight of that velocity is called the *radial velocity*. Due to the motion of a star, you will see a small change in the position of lines resulting from the so-called Doppler effect. If you measure the wavelength shift of an atomic transition, you have the possibility to get the radial velocity

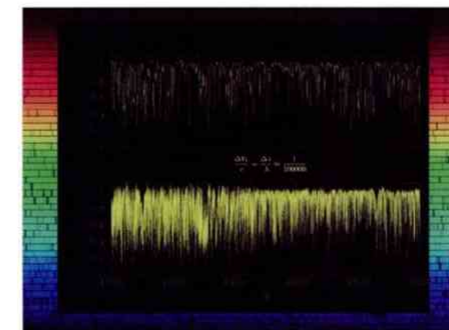


Fig. 11

少しばかり技術的なお話を!

相互相関分光装置の原理とはどのようなものでしょうか?ここで、この技術のキーポイントについてご説明しましょう。太陽とそれほど質量の異なる恒星の場合、スペクトルはさまざまですが、何千という原子線は同じです。恒星の光をいくつかの色に分光させると、こうした原子線は、スペクトルの中で細い線となって現れます (Fig. 11)。私たちの太陽系から見て、恒星は空を動いています。視線の方向に沿ったこの運動速度の成分のことを、視線速度といいます。恒星が動くと、いわゆるドップラー効果により、スペクトルの原子線の位置が微妙に変化します。波長の変化による原子線の位置のずれを測定すれば、その恒星の視線速度が分かる可能性があるのです。分光装置の基本的なアイデアは実に単純なのですが、測定は大変な作業です。

重要なのは吸収線の位置を正確に測定することですが、この場合、2つの問題が発生します。まず、ドップラー偏移について正確に測定しようとするれば、多くの光子が必要となりますが.....恒星の光はかすかです。相互相関分光装置最大の特徴は、何千もの原子線を一度に利用できるように設計された点です。この実現可能性が最初に証明されたのは1967年のことです。もっとも、1953年の段階で、すでにピーター・フェルゲットによって提唱されていたのですが。第2の問題として、惑星を発見するためには、恒星の波長の極めて微妙な変化を測定しなければなりません。現在、最新鋭の分光装置HARPSでは、毎秒0.3m(一般人が歩く速度の3分の1)のドップラー偏移を測定することができます。これは、波長においてわずか10億分の1メートル単位で測定されるもので.....私たちの装置においては珪素原子数個分の変化にすぎません。恒星の周りを回る惑星の影響で、恒星は少しふらつきます。たとえば太陽は、木星の重力の影響を受けて太陽系の重心の周りを毎秒11mで動いています。地球によっても太陽はふらつくのですが、この場合、毎秒8cmにすぎません。このことから、地球のような惑星の探査がいかに難しいかが分かります。

飽くなき精度の追求 —CORAVELによる第一段階

私たちが最初に分光装置を設置したのは、南フランスにあるオート=プロヴァンス天文台です。私たちが開発した最初の相互相関分光装置、CORAVELは、1977年に

of that star. This is a difficult task, although the basic idea of the instrument is quite simple.

What you need is to precisely measure the positions of the absorption lines, but there are two difficulties to be faced. Firstly, to have a precise determination of the Doppler shift, we need a lot of photons... but stars are faint. The central feature of the cross-correlation technique is an instrumental design allowing to use simultaneously thousands of atomic lines. The first demonstration of its feasibility appeared in 1967, while the first proposal had been made by Peter Felgett in 1953. Secondly, to detect planets, we have to measure extremely small changes of the stellar wavelengths. At present our most recent spectrograph HARPS is able to detect changes of velocities of 0.3 m/s (a third of a layman speed). This velocity corresponds to a Doppler shift of only a billionth of the wavelength... a shift of only a few silicium atoms on our detector. A planet hosted by a star will induce a small wobble of its velocity. For example the velocity of our Sun if affected by the gravitational influence of Jupiter and is moving at 11 m/s around the gravity centre of the solar system. The Earth also induces a wobble of the Sun velocity, but of only 8 cm/s—the discovery of Earth-type planets is a real challenge.

The permanent quest for higher and higher precision: the first step with CORAVEL

We started to build instruments at the Haute-Provence Observatory in the south of France. Our first cross-correlation spectrometer CORAVEL installed in 1977 on our 1 m-telescope, achieved a precision of 300 m/s (Fig. 12). It was a very exciting period of my life. The efficiency of CORAVEL was amazing, about 4000 times the efficiency of the ancient spectroscopic technique using photographic plates. With such an efficiency it



Fig. 12



Fig. 13

口径1 mの望遠鏡に設置されましたが、その精度は、毎秒300 mの視線速度の変化を測定できるほどでした(Fig. 12)。あの当時は、私の人生でとてもわくわくした時期でした。CORAVELの性能には目をみはるものがありました。と言いますのも、写真乾板を用いたかつての分光装置に比べ、性能が約4000倍も向上したからです。これほど性能が改善された結果、天体物理学のさまざまな分野の再検証が容易になりました。CORAVELは多方面の研究に活用されました。具体的には、 ω (オメガ)星団などの球状星団の力学や、マゼラン雲(地球から約15光年のところにある小さな銀河)の中にあるセファイドという脈動変光星に関する研究です。私は年間約2カ月の期間、この天文台で観測を続けました。学校が休みになると、家族も一緒に連れていきました(Fig. 13)。

太陽型恒星のほとんど(約3分の2)には、伴星があります。私は、アントワーヌ・デュケノワと共同で、15年にわたり、比較的太陽系に近い場所にある数百の恒星を観測しました。その目的は、連星の統計的性質を明らかにすることにあります。その特徴の分布は、恒星が形成されるメカニズムを示す化石のようなものです。理論上、CORAVELの精度では、太陽系外惑星の発見は難しいはずでした。しかし1989年、オークリッジ天文台のデビッド・レイサムと私たちのグループが、私たちの開発した分光装置を使って、HD 114762の視線速度を観測していたときのことです。その年の夏、デビッド・レイサムのおかげで、私は、質量が木星のわずか11倍という非常に小質量で見つけにくい伴星によって、視線速度のふらつきが生じていることに気づいたのです。共同で行った測定作業の結果、質量の小さい褐色矮星と質量の大きな巨大惑星の間に分類されるこの伴星の正確な軌道決定が可能になりました。この発見で、私たちが採用していた視線速度法の精度が、褐色矮星と巨大ガス惑星を含む、質量の小さい伴星の領域を調査するために必要な精度に近いことが証明されたのです。

was easy to revisit many areas of astrophysics. CORAVEL was used for a diverse range of studies including: the dynamics of globular clusters as for example Omega Centauri or the pulsation of Cepheids in Magellanic Clouds (small galaxies at some 150000 light years of the Earth). I spent quite a lot of time, almost two months per year, in this observatory. I took my family with me to the observatory when it was the time of school vacation (Fig. 13).

A majority (about 2/3) of solar type stars have a companion. Together Antoine Duquennoy and I made a 15 year-survey of several hundred stars relatively close to the solar system to determine the statistical properties of double stars: the distributions of their characteristics are seen as fossil traces of stellar formation mechanisms. A priori the CORAVEL precision was not adapted to search for exoplanets. However in 1989, both Dave Latham at Oak Ridge Observatory and ourselves were monitoring the radial velocity of HD 114762 with our spectrographs. In the summer of that year, Dave called my attention to a velocity wobble due to an elusive very low mass companion of only 11 times the mass of our Jupiter. Our combined measurements allowed a precise orbit determination of that companion at the frontier between low mass brown dwarfs and massive giant planets. This discovery indicated that our radial velocity measurements were close to the precision needed to explore the domain of low mass companions to stars: Brown dwarfs and gaseous giant planets.

The quest for a higher precision: the second step with ELODIE

By the end of the 1980s the evolution of technology allowed for the development of a new spectrograph (Fig. 14). In 1988, the director of the Haute-Provence Observatory asked André Baranne and myself to design a cross-correlation spectrograph adapted for the 1.93-meter telescope of that South France Observatory. Two significant technological developments were critical to improve the precision of the spectrograph: the possibility to have a large CCD detector and the existence of optical fibers of high quality. Here is not the place to present the technical details. I would just mention that we needed to have a very, very stable illumination of the optics of our instrument to achieve the expected precision and to maintain it over several years. Optical fibers offer that possibility, guiding the stellar light from the telescope to the spectrograph in a stable environment and thermally controlled enclosure below the telescope.

さらなる精度の向上を目指して—ELODIEによる第二段階



Fig. 14

1980年代末になると、技術の進歩によって新しい分光装置の開発が可能になりました(Fig. 14)。1988年、私とアンドレ・バラヌは、オート＝プロヴァンス天文台長から、この天文台にある口径1.93mの望遠鏡に設置する相互相関分光装置の設計を依頼されました。分光装置の精度を上げることができたのは、2つの目覚ましい技術的進歩のおかげです。それは、大型CCD検出器と質の高い光ファイバーです。ここでは、技術的な詳細までお話ししませんが、求められる精度を達成し数年間維持するためには、分光装置の光学系をほぼ完璧に安定させる必要があったということのみ申し上げておきます。光ファイバーを使う場合、望遠鏡に入射した光を、安定し熱的に制御された状態で、その下にある分光装置に導くことができるため、これが可能になるのです。

科学の場合、何もかも一人で成し遂げられるケースは極めて稀です。少なくとも、天文学の近代的な装置分野ではそうです。私は、新しい分光装置であるELODIEの開発に貢献してくれたオート＝プロヴァンスやジュネーブの各天文台の技術者やエンジニアの皆さん全員に感謝しなければなりません(Fig. 15)。とりわけ、私たちのグループのチーフ光学エンジニアを務めたアンドレ・バラヌと、当時まだ大学院生でしたが、このプロジェクトに専念し、ソフトウェアの開発で重要な役割を果たしてくれたデディエ・ケローに心から感謝しています。1993年以降、ELODIEは大きな成果を収めました。なぜなら、この装置のおかげで毎秒10~15m(以前の20~30倍)の



Fig. 15

In science, only in exceptional cases you can do things by yourself—at least in the field of modern instrument of astronomy. I have to thank all the technicians and engineers of Haute-Provence and Geneva for their contribution to the success of the new ELODIE instrument (Fig. 15). Special thanks are due to André Baranne, our chief optician, and Didier Queloz, still a graduate student at that time, for his dedication to that project, and his important contribution to the development of the software. ELODIE was a big success from 1993 onwards, resolving velocity variations down to 10-15 m/s (a factor of 20 to 30 better than before), providing a precision which allows the detection of extra-solar planets.

Searching for exoplanets

How could we detect a planet? A planet does not produce any luminosity. It just reflects a small part of luminosity of a star it receives. Let us look at our solar system. Jupiter reflects one billionth of luminosity of the Sun. In 1995, it was not possible to directly get images of exoplanets due this large luminosity contrast between the host star and planets. Therefore, we were obliged to use an indirect technique. As a result of the gravitational influence of a planet the host star moves around the gravity centre of the system. We could then measure shifts of wavelength caused by the Doppler effect.

During the spring of 1994, my two young collaborators, Antoine Duquennoy and Didier Queloz and I began a program with the new ELODIE instrument to search for possible brown dwarfs or gaseous giant planets orbiting solar-type stars. Antoine and I wanted to extend our study concerning double stars to explore the domain of very small mass ratios. But I had no a priori expectation of what we would find. At that time, brown

視線速度の変化が測定可能となり、太陽系外惑星の探査に必要な精度が実現したからです。

太陽系外惑星を探して

私たちはどのような方法で太陽系外惑星を見つけたのでしょうか？ 惑星は、それ自身が光を発するわけではなく、恒星から受ける光のほんの一部を反射しているにすぎません。たとえば、私たちの住む太陽系について考えてみましょう。木星が反射する太陽の光は、木星が受けている光全体のわずか10億分の1です。このように、主星と惑星では明るさがあまりにも違うために、1995年の段階では、太陽系外惑星の画像を直接撮影することはできませんでした。そのため、その存在の証明には、間接的な方法を使うしかなかったわけです。惑星からの重力の影響を受けて、主星はその系の重心の周りをふらつきます。当時の私たちのグループは、ドップラー効果による波長変化の測定に成功したのです。

1994年の春、私は、アントワヌ・デュケノワとデディエ・ケローという2人の若き共同研究者と一緒に、新しく開発したELODIEを使って、太陽型恒星の周りを回る褐色矮星や巨大ガス惑星の探査というプログラムに取りかかりました。アントワヌ・デュケノワと私は、当時取り組んでいた二重星に関する研究を、極めて小さな質量比の分野にまで広げたいと考えていました。しかし私は、私たちが発見することになるものについて、期待はしていませんでした。褐色矮星は中心部で核融合反応が起こるだけの質量を持っておらず、当時は全く発見されていませんでした。理論上、褐色矮星の下限質量は木星のわずか数倍だと考えられており、質量の大きい巨大ガス惑星と区別がつかないのです。

望遠鏡での観測時間は他の研究グループと奪い合いになります。私たちは2カ月ごとに7日間観測できることになりました。1994年春に、142個の太陽型恒星をサンプルとしてこの研究を開始し、最初の観測期間の終わりには、ペガス座51番星に、惑星の影響によると思われる速度の周期的変動があることを発見しました (Fig. 16)。その惑星は木星よりも質量の小さい惑星でした。観測の結果、その惑星の公転周期が4.2日であることが分かりましたが、これは理論上ありえないことでし

dwarfs, stars which are not massive enough to have nuclear reactions in their core, were still undetected. The lower limit for their masses was estimated to be only a few times the mass of Jupiter, overlapping the domain of massive gaseous giant planets.

Observing time on a telescope is only given on a competitive basis. We got seven observing nights every second month. That search among a sample of 142 solar type stars began during the Spring of 1994, and already at the end of our first season of observations we noted that the velocity of the star 51 Pegasi showed a periodic variation which could be interpreted as being caused by the influence of a planet (Fig. 16): a planet of a smaller mass than that of Jupiter. We observed an orbital period of 4.2 days which disagrees with theoretical predictions. We had found a planet with a period of four days rather than the 10 years everyone expected—a factor of 1000 out!

There had been many claims of discoveries of planets in the past, which were found wrong later. That is one of the reasons why we decided to postpone the publication of our finding for an additional season. We were sure of all of our measurements. But there was a risk of bad interpretations. We could be misled by other physical processes, such as those related with magnetic activities of the Sun. Another concern was more fundamental. As the quantity of dust is limited in an accretion disc, the formation of gaseous giant planets requires the agglomeration of ice particles. Ice particles only exist at sufficiently large distance of solar-type stars... and the formation of gaseous giant planets could only exist at distances larger than about five astronomical units and have orbital periods larger than 10 years!

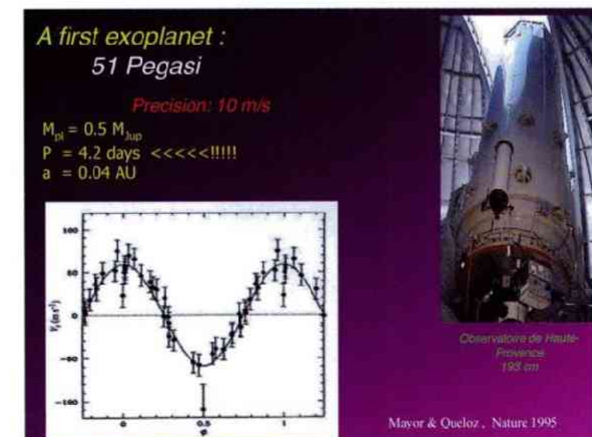


Fig. 16

た。私たちは、公転周期が誰もが予想するような10年ではなく、わずか4日、つまり予想の1000分の1の惑星を発見したのです！

それまでも幾度となく太陽系外惑星発見のニュースは流れましたが、いずれも後になって間違いであることが判明しました。私たちが次の観測期間まで惑星発見の発表を延期することにしたのも、それが理由の一つでした。私たちは、全ての測定結果に自信を持っていました。しかし、解釈が間違っている可能性も否定できませんでした。太陽の磁気活動に関するもののように、何か他の物理的なプロセスによって誤った解釈をすることも考えられたからです。それ以外にも、もっと基本的な懸念材料がありました。降着円盤中のダストの量が少ないため、巨大ガス惑星の形成には、氷粒子の凝集が必要になります。氷粒子は、太陽型恒星からかなり離れた場所にしか存在しません.....そのため、巨大ガス惑星は、恒星から約5天文単位以上離れた場所でのみ形成され、したがって公転周期も10年を超えることになるわけです！

ベガス座51番星の伴星の4.2日という公転周期はあまりにも短いものでした。このように公転周期の短い惑星の形成がなぜ起こりえたのかは分かりませんでした。1995年7月の段階で、データに矛盾がないことが明らかになったため、私たちは、太陽型恒星の周囲を公転する太陽系外惑星第一号の発見を発表することにしたのです (Mayor, Queloz 1995)。残念なことに、アントワヌ・デュケノウは、1994年6月に事故で他界していました。これは、オート＝プロヴァンス天文台の口径3.6m望遠鏡のドームの前で撮った、デディエ・ケローと私の写真です (Fig. 17)。

私たちが初めて発見した太陽系外惑星の公転周期が非常に短かったことで、降着円盤における形成時の惑星移動について検討する必要があることが分かりました。このメカニズムについては、51 Pegasi bの発見の15年前に、すでにピーター・ゴールドレイクとスコット・トレメインが研究していたものの、太陽系外惑星の移動についての彼らの予測が観測戦略の作成に活かされたことはなかったのです！1995年を境に、観測に基づく惑星移動の証拠は、惑星形成理論に大きな変化をもたらしました。

私たちは、北天で太陽系外惑星の探査を続けました。その後、探査の範囲を南天に移し、ESOが管理するチリのラ・シヤ天文台での観測を開始したのです (Fig. 18)。

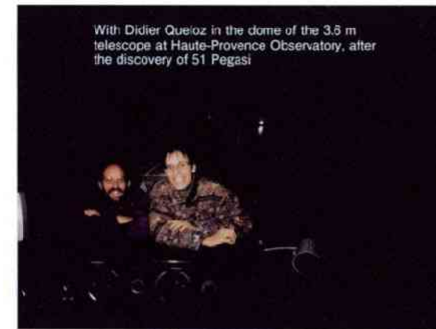


Fig. 17



Fig. 18

The period of the companion of 51 Pegasi, 4.2 days, was much too short. We did not understand how it was possible to produce a planet with such a short period, but by July 1995, our data was so consistent that we ventured to announce the discovery of the first extrasolar planet orbiting a Sun-like star. (Mayor, Queloz 1995). Sadly, Antoine died in an accident in June 1994. Here is a photo of Didier and I, in front of the dome for the 3.6 m telescope at Haute-Provence Observatory (Fig. 17).

The discovery of this first planet with its very short orbital period made it necessary to take into account the orbital migration of planets during their formation in an accretion disc. This mechanism had already been studied 15 years before the discovery of 51 Pegasi b by Peter Goldreich and Scott Tremaine, however, the prediction of the migration of exoplanets had never been used to build observing strategies! Since 1995, the observational evidence for orbital migration has deeply changed every scenario of planetary formation.

We continued the search of planets in the northern sky. We moved to the southern sky and started observation at La Silla Observatory (ESO) located in Chile (Fig. 18).

What did we learn in the last 20 years? Firstly, we have proven the existence of exoplanets. We also have demonstrated the huge occurrence of planetary systems. At least 70 percent of stars have a planetary system. Taking into account the present lack of sensibility to detect very low mass planets at large orbital periods, we can suspect that almost all stars should host a planetary system. Certainly one of the most amazing discovery from the numerous detected exoplanets is the diversity of existing planetary systems: orbital periods of some planets as short as few hours and orbits with quite

これまでの20年間で、私たちは何を学んだのでしょうか？まず、太陽系外惑星の存在を証明しました。さらに、惑星系が数多く存在することも明らかにしました。70%以上の恒星が惑星と共に系を構成しています。公転周期が長く質量の極めて小さい惑星を感知できるだけの感度が現在ないことを考えると、ほとんど全ての恒星が惑星系を持つのではないかと考えられます。多数の太陽系外惑星が発見されて最も驚いたことの一つは、間違いなくその多様さです。つまり、惑星には公転周期がわずか数時間というものもあれば、軌道離心率が非常に大きいものもあるということです。私たちの太陽系が、太陽系外惑星系の典型例ではないことは明らかです。このように、観測結果から明らかになった多様性は、惑星系の形成に関する私たちの認識を覆すものでした。

HARPS、さらなる精度の向上を目指す第三段階 — 岩石惑星探査への道

観測で用いる分光装置はさらに感度が向上し、今ではこれまでより質量の小さい惑星も発見できるようになりました。これは、岩石惑星探査への道が開けたことを意味します。と言いますのも、木星の影響で太陽の視線速度に毎秒11mのふらつきが生じていますが、地球の影響によって生じる太陽の視線速度のふらつきは、毎秒わずか8 cm程度だからです。ですから、岩石惑星の探査には、精度の高い装置が必要になるのです。

私たちは、温度変化がミリ・ケルビン程度に抑えられるよう管理された真空状態で夜間に稼働可能な、極めて精度の高い装置を新たに設計しました(Fig. 19)。2000年、私は、リーダーとして、新しい分光装置、HARPSの設置に携わりました。これは、極めて質量の小さい惑星の探査に最適な装置です。2003年にチリのラ・シヤ天文台に設置されたこの装置は、非常に感度が高く、毎秒約30cmの視線速度変化も探知し、これまでよりずっと質量の小さい、地球と同程度の質量の惑星まで発見できるものでした。この装置の開発にあたっては、フランチェスコ・ペペ教授が、プロジェクト・エンジニアとして中心的役割を担いました。

視線速度の精度を極限まで高めたいという私たちの飽くなき取り組みは成果を生んできました。HARPSによって、私たちは、質量が地球の数倍程度のスーパーアース

large eccentricities. Our solar system is certainly not typical of extrasolar planetary systems. That observed diversity is challenging for our understanding of the formation of these systems.

HARPS, the third step towards a higher precision— the path to the detection of rocky planets

The sensitivity of spectrograph we use has improved and it now allows us to detect lower mass planets. This can be considered as part of quests of rocky planets. This is because if Jupiter induces the change of velocity of the Sun at the level of 11 m/s, the Earth induces the change of velocity of the Sun at the level of only 8 cm/s. High precision is required in order to detect rocky planets.

We were able to design a new, much sophisticated instrument that works in vacuum with temperature controlled at the level of milli-Kelvin degree during the night (Fig. 19). In 2000, I took the lead of the construction of a new spectrograph called HARPS which was fully optimized to search for very low mass planets. That new spectrograph, installed at La Silla in Chile in 2003, was sensitive enough to detect velocity changes of about 30 cm per second and to discover even lighter planets, down to the mass of the Earth. Professor Francesco Pepe played a major role in the development of that instrument as project engineer.

Our obsessional search for higher and higher radial velocity precision has been rewarding. With the HARPS spectrograph we have detected a new population of Super-Earth and Neptune-mass planets: a population of extremely common planets orbiting

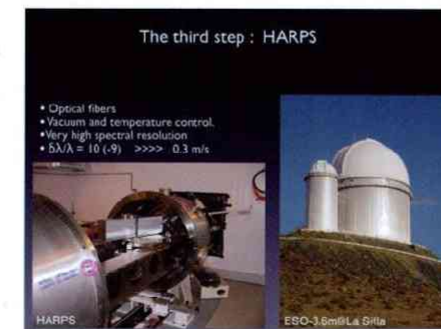


Fig. 19

から海王星レベルの新しい種族の惑星を発見しました。これらは、太陽型恒星の周りを回る典型的な惑星です(Fig. 20でお分かりのように、現代の天文学者は夜空を見上げたりしません。いくつものコンピュータを駆使して望遠鏡や分光装置を操作するのです)。

何千ものトランジット惑星の発見という成果をあげた観測衛星ケプラーの宇宙ミッションによって、数多くの地球型惑星の半径が明らかになりました。私たちは、これら惑星内部の密度を特定するために、惑星の質量を知る必要があります。ケプラーが発見した太陽系外惑星の候補は北天に位置しているため、HARPSと同じものを開発する必要性が生じました。そしてこの装置は、現在、ラ・パルマ天文台の口径3.5m望遠鏡に設置されています。私たちは、地球のわずか数倍の質量を持つ惑星の深部を研究するために、長期間にわたって観測を続けています。

この20年間に、太陽系外惑星の探査に携わってきたどの研究グループも目覚ましい成果を挙げ、精度も向上しています。Fig. 21は縦軸で惑星の質量を、横軸で惑星が発見された年を示しています。この図で最も顕著なのは、精度の向上です。今や、地球と同程度の質量を有する惑星を発見できるレベルにまで達しているのです。

すでに2000個も太陽系外惑星が発見されたというのに、なぜ探査を続けるのかと不思議に思われるかもしれません。実は、目的は単に別の太陽系外惑星を発見することではないのです。初期の頃はそれが目的だったのでしょうが、今や私たちの関心は、惑星系の全体像を把握し、その形成と進化の過程を明らかにすることに移っているのです。

惑星系の形成と進化には、物理的プロセスの非常に幅広い分野が関連しています。具体的には、軌道移動、降着円盤の一生、惑星形成の詳細なメカニズム、惑星間の相互作用などです。多様な惑星系の観測は、その理論上の形成モデルを限定するために活用されるべきです。研究グループの中には、こうしたさまざまなプロセスの相対的重要性について調査しているところもあります。惑星形成に関する知識は、理論と観測との対話から生まれるものなのです。

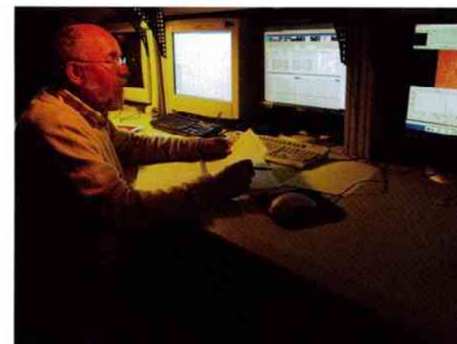


Fig. 20

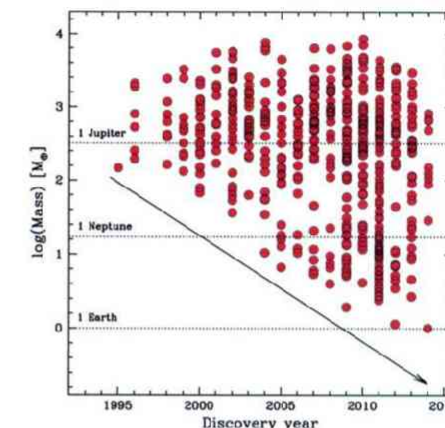


Fig. 21

solar-type stars. (As Fig. 20 shows, modern astronomers do not look up the sky. They control the telescope and the spectrograph from different computers).

The Kepler space mission with its harvest of several thousand of planetary transits has provided planetary radii for a large number of Earth-type planets. We need to know the mass of these planets to constrain the bulk density of their inner composition. As Kepler candidates are in the northern sky we have been obliged to develop a copy of HARPS, presently installed at La Palma Observatory on a 3.5 m telescope. We devote an extremely large number of observing nights to study the inner composition of planets having only of few times the mass of our Earth.

During the last 20 years, all the teams working in the domain of planet search have done tremendous progress and improvements of precision. The vertical and horizontal axes in Fig. 21 respectively indicate mass of planets and the year of discovery. In this figure, the most striking is the improvement of precision. We are now at the level to detect a planet of mass comparable with the Earth.

You may wonder why we continue to search for planets when we have already found 2000 of them. In fact, the goal is not simply to detect an additional planet. It probably was the case at the beginning, but today we want to have a global view of the planetary systems and to understand the formation and evolution of them.

太陽系外惑星の発見を可能にする非常に優れた方法がまた一つ増えました。惑星が恒星と観測者の視線の間を通過する時、その惑星は、恒星が発する光を少しだけ遮ることになります。その結果、惑星の移動によって恒星の光度が周期的に弱まる現象を観測することができます。この減光の割合は、主星に対する惑星の相対的な大きさに比例して大きくなります。

1999年夏、公転周期の短い惑星を新たに発見した時、私たちはその惑星が主星の前をトランジット(通過)する時期を予測することができました。私たちの予測時期、すなわちその年の9月9日に、デビット・シャーボノーとティム・ブラウンが、惑星のトランジットの観測に初めて成功しました。その結果、私たちが観測していたのが、木星や土星のような巨大ガス惑星であったことが明らかになりました(Fig. 22)。

その後すぐ、私たちは、この惑星のロシター・マクローリン効果の観測に成功しました。ロシター・マクローリン効果とは、トランジットについて分光装置を用いて検出され、それによって主星の自転軸と惑星の公転軸がなす角度を測定できるというものです。新たに明らかになったデータによれば、それらの角度は一様ではなく、大きく傾いている場合もあれば、逆行している場合もわずかに存在しました。このことを、惑星のトランジットだけで説明することはできません。惑星系の進化は、遠くに存在する伴星の重力摂動(古在効果)が考えられることで、これまで以上に複雑化しています。

こうした太陽系外惑星のトランジットの観測によって、惑星の内部組成に関する研究の扉が開かれ、天文学の新たな分野、系外惑星学(Exoplanetology)が誕生しました。さらに、初めて惑星のトランジットが観測されたことがきっかけになって、太陽系外惑星のトランジットを探索するための宇宙ミッションが実施されることになりました。

宇宙ミッションによってトランジット惑星を発見するという戦略は、まさに直接的な方法です。たとえば、空のある一点を望遠鏡でずっと観測することを想像してください。ミッションを行う衛星は、非常に高い精度で、何千もの恒星の光度を継続して測定することができます。何年も観測を続けるうちに、周期的な明るさの低下を見せ

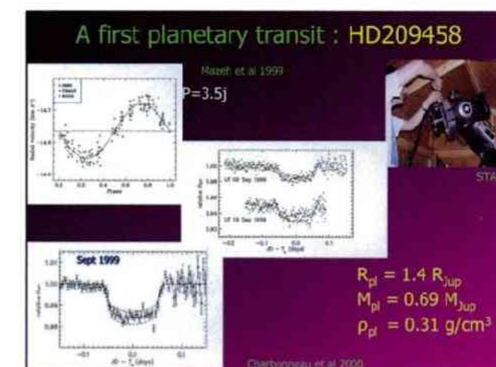


Fig. 22

The formation and evolution of planetary systems involves a very broad domain of physical process: orbital migration, life time of accretion discs, detailed mechanisms of planetary formation, interaction between planets, ... The observation of the diversity of planetary systems has to be used to constrain theoretical models of their formation. Several teams explore the relative importance of these different processes. Our understanding of planetary formation results from the dialogue between theory and observations.

We have a very nice additional possibility to detect a planet. If a planet passes between a star and an observer's line of sight, it blocks out a tiny part of the star's light. As a result, we can observe a periodic lessening of the stellar luminosity due to the transit of the planet. The depth of the depression is directly proportional to the relative size of the planet compared to its host star.

Upon detecting another short period planet in the summer 1999 we were able to predict the exact time when the planet might transit in front of its star. At the predicted time, on September 9 of that year, David Charbonneau and Tim Brown observed the first planetary transit, which proved that indeed, we were observing gas giant planets such as Jupiter or Saturn (Fig. 22).

Soon after we were able to measure the Rossiter-MacLaughlin effect for a planet: a spectroscopic transit which allows the measurement of the projected angle between the stellar spin axis and the planet's orbital axis. New results show a large variety of angles, with sometimes very inclined orbits and in few cases some retrograde orbits, which cannot be explained solely by planetary migration. The evolution of planetary systems

る恒星がいくつか見つかってきます。ケプラーは、何千ものトランジット惑星を発見し、1つの恒星の前を6個に上る数の惑星がトランジットするケースも観測しました。この技術によって、惑星の半径の算出が可能になり、すでに地球よりも半径の小さい惑星が複数発見されています。

Fig. 23は、ラ・パルマ天文台に設置されたHARPSの写真です。この装置は、ケプラーが発見した最も質量の小さい惑星を対象に、特に岩石惑星の成分を解明する目的で設置されました。Fig. 24は、ケプラーが発見した惑星の大きさと、ドップラー分光法で明らかになった惑星の質量との関係を示したものです。岩石惑星の質量が、地球の質量の5倍に満たない可能性があることが分かります。

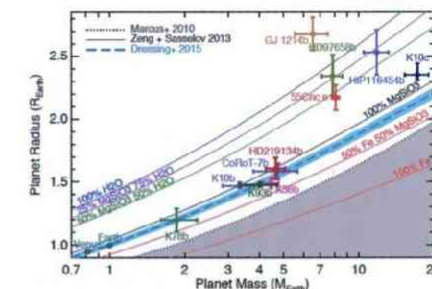
探査衛星COROTや、何よりもケプラーがもたらした目覚ましい成果によって、トランジット法の潜在的可能性が証明されました。私たちが次に目指すのは、地球の双子のような惑星の発見です。銀河には無数の岩石惑星が存在することが分かっています。問題は、追跡調査を行うために、できるだけ地球に近く、しかもいわゆる恒星のハビタブルゾーン(生命居住可能領域)に位置する惑星を発見することです。恒星からある程度離れたハビタブルゾーンでは、生命の進化に必要な複雑な化学反応が起こる可能性があります。今ある装置や次なる装置によって、地球の双子のような惑星を発見することはできるのでしょうか？

現在、ジュネーブで私たちが取り組んでいるプロジェクトの一つに、ハビタブルゾーンに位置する岩石惑星を持つ明るい恒星の小カタログ(星表)の作成があります。こうしたカタログは、次世代の宇宙ミッションで地球型惑星の調査を行う際に必要なものです。干渉計を使って宇宙観測を行うというDARWINのような壮大なミッションが実現できるならば、候補となる調査領域のリストが必要になるでしょう。

今から2000年以上前、ギリシアの哲学者は、宇宙に複数の世界が存在する可能性について既に論じ、そうした世界の中には、生物が存在するところもありうると考えていました。そして今、科学の学際的分野として、圏外生物学という分野が新たに誕生しています。



Fig. 23



What is the internal composition of low mass exoplanets?
What is the largest mass for rocky planets?

Fig. 24

becomes even more complicated with the possible dynamical influence of distant stellar companions (via the Kozai effect).

This observation of an exoplanetary transit opened the door to the study of the internal composition of planets, therefore creating a new field in astronomy: Exoplanetology. This first detection of a planetary transit also played a crucial role in the decision to build space missions devoted to detect exoplanetary transits.

The strategy to detect planetary transits by space missions is quite direct. Imagine a telescope looking continuously at the same spot on the sky. The satellite, continuously, measure the luminosity of several thousand stars with an extreme precision. Years after years you detect periodic dips of a few stars in the observed field. The Kepler mission was able to detect several thousands of transiting planets, some of them with up to six planets transiting in front of a star. This technique allows the estimation of planetary radii. Planets with radii smaller than the Earth radius have been detected.

Fig. 23 shows an image of the HARPS instrument at La Palma Observatory. This instrument was built to explore the lowest mass of planets discovered by the Kepler mission with a special focus on understanding composition of rocky planets. Fig. 24 indicates the size of planets detected by the Kepler mission as a function of the mass of planets detected by the Doppler spectroscopy. We can remark that rocky planets seems to have masses less than five Earth-mass.

The huge harvests of detections made by the space missions CoRoT and above all the Kepler mission have demonstrated the potential of the transit technique. Our next

「太陽系の外に、生命体は存在するのか？」

この根本的な問いに答えが出るまでにあと何年かかるのかは分かりません。しかし、この問いは、科学におけるあらゆる研究機関にとって今後も取り組むべき課題であるはずで、今日、太陽系外惑星の大気スペクトルを観測してバイオマーカー（生命体の存在する証拠）を検出する技術は、完成まであと一歩のところまで来ています。2000年以上もの間、私たち人類は、地球以外の世界に生命体が存在するのかという問いに答えが出る日を待ち続けてきたのですから、もう数十年くらい待つことができるでしょう。

step is to detect Earth twins. We know that we have a huge number of rocky planets in the galaxy. The problem is to detect planets as close as possible to us for follow-up studies and located in the so-called habitable zone of the star. A zone at a distance of the star where the complex chemistry for life development will have a chance to emerge. Do we have the possibility to detect Earth twins with the present instrumentation or with the coming-soon instrumentation?

One of our current projects in Geneva is to build a small catalogue of bright stars with rocky planets in the habitable zone. We need such an input catalogue for the next generation of missions to explore planets like Earth. If we were ever to build an ambitious mission, perhaps an interferometer like the Darwin (space mission), we want to have a list of likely places to look.

More than 2000 years ago, Greek philosophers were already discussing the question of the plurality of worlds in the universe, and speculating on the possibility that some of these worlds could have living species. Today, exobiology emerges as a new multidisciplinary domain of science.

Do we have living organisms outside the solar systems?

I do not know how many years will be necessary to give an answer to that fundamental question. However I am certain that this question will remain on the agenda of all scientific agencies. Today we are close to having the technology to detect biomarkers in the atmospheric spectra of exoplanets. For more than 2000 years, humanity has been waiting for an answer to the possible existence of life on other worlds, so we can afford to wait a few decades.

稲盛財団2015——第31回京都賞と助成金

発 行 2016年9月30日

制 作 公益財団法人 稲盛財団

〒600-8411 京都市下京区烏丸通四条下ル水銀屋町620番地

Phone: 075-353-7272 Fax: 075-353-7270

E-mail press@inamori-f.or.jp URL <http://www.inamori-f.or.jp/>

ISBN978-4-900663-31-2 C0000