

太陽系

Magda Stavinschi, Beatriz García, Andrea Sosa

International Astronomical Union
 Astronomical Institute of the Romanian Academy, Romania
 ITeDA and National Technological University, Argentina
 University of the Republic, Uruguay

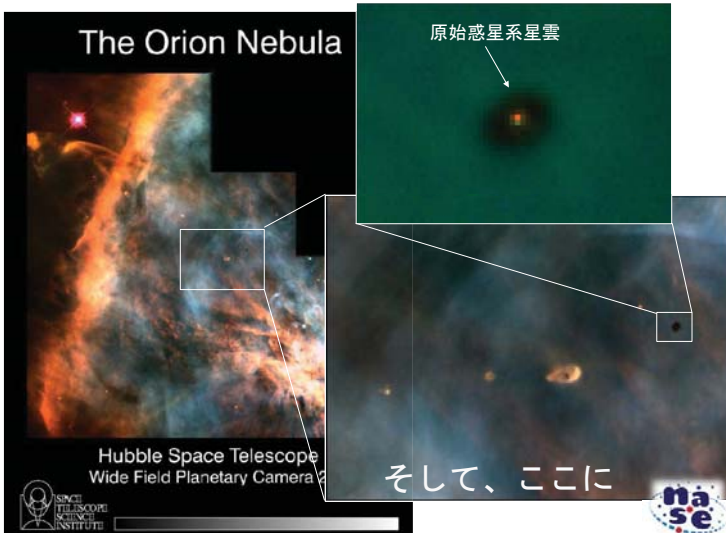
和訳: 上之山幸代、富田晃彦(和歌山大学)



星はここから生まれる。



M 16、創世の柱
 出典：ハッブル宇宙望遠鏡



かつて惑星は、目で見えるものだけを指していた。

水星 ↑ 日没時あるいは
 金星 ↓ 日出時に見える

火星
 木星
 土星

2002年5月、惑星「直列」



現代の太陽系像

太陽及び、重力によって太陽の周りを周回する全ての天体：

- 8つの惑星
- 数百の衛星
- いくつかの準惑星（ケレス、冥王星、ハウメア、マケマケ、エリス）
- 無数の小天体：小惑星、彗星、太陽系外縁天体（惑星形成の残骸）



太陽系はどこにあるのか

太陽系は、天の川銀河（銀河系）の渦状腕であるオリオン腕にある。



天の川銀河には2000億個の星が存在する。直径は約10万光年である。



太陽系は銀河系の中心から約2万5000光年離れており（半径の約半分）、中心を回るのは約2億5000万年かかる。公転速度は220 km/s（80万 km/h）である。



訳注：太陽系が銀河系中心からどのくらいかは今も重要な研究課題のひとつで、上記の値の研究が続いている。

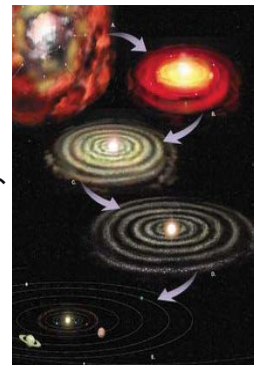
スピッツァーの赤外線観測による銀河系モデル（2005年）。私たちの銀河は棒渦巻銀河であることを示している。

訳注：銀河系全体の姿を、銀河系の中にいる者が描くのは大変難しい。腕の形や大きさは今も重要な研究課題になっており、銀河系の地図作成の研究が続いている。



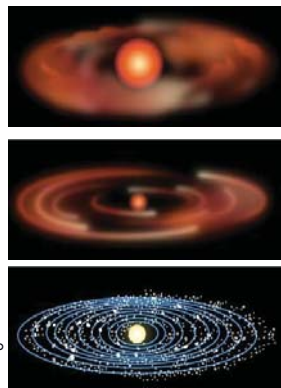
太陽系形成

- 標準的理論によると、太陽系は約46億年前、ガスとチリでできていた星間雲の重力収縮で誕生した。星間雲の収縮は、超新星爆発などの強い揺さぶりで、ガス圧より重力の効果が勝るようになったことで始まったと思われる。
- 原始太陽系星雲から惑星系が生まれたと考えれば、互いに円軌道を回りあう惑星軌道をよく説明できる。
- 角運動量の保存により、収縮するガス雲はどんどん速く回転し、扁平になった。中心では原始太陽が輝き始め、原始惑星系星雲が周囲を取り巻くようになった。



太陽系形成

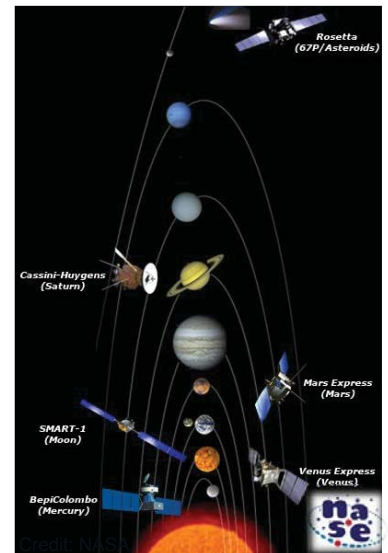
- 原始惑星系円盤内で小さな固体の核が凝集した（微惑星）。それらが互いに衝突合体しあって、惑星へと成長した。
- 他の恒星周りに原始惑星系円盤（星雲）が実際に観測され、またその中で惑星形成を示唆するものが見つかってきた。この標準的理論の大枠は受け入れられている。



太陽系探査

太陽は太陽系全質量の99.8%以上を占めている。角運動量の98%は惑星の公転運動が持っている。

太陽系の研究は、地上観測によるものだけでなく、衛星軌道上の望遠鏡、探査機、さらには天体表面への着陸によっても進められている。



私たちの星：太陽

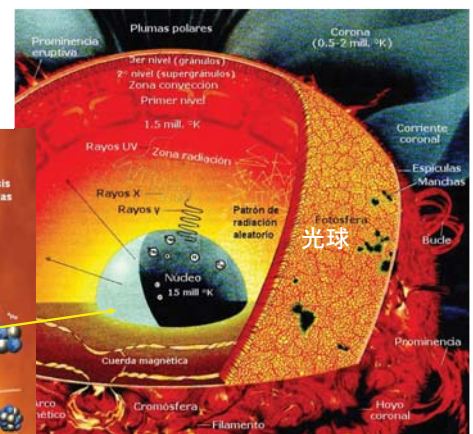
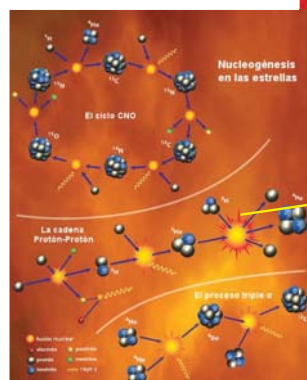
- 太陽は46億歳であり、その一生の間である。
- 毎秒、太陽の核は400万トンの物質をエネルギーに変換し、多くのニュートリノ、陽電子、そして放射を生成している。



太陽の71%が水素、27%がヘリウム、残り2%は重元素である（重量比で）。



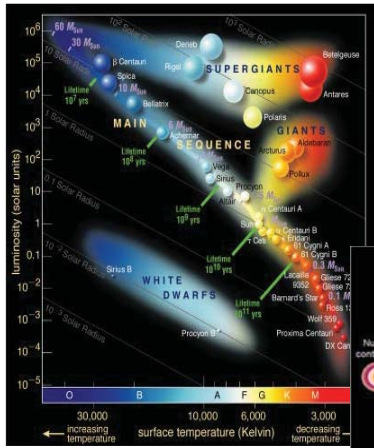
太陽の構造



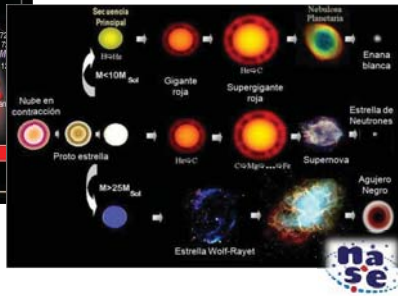
エネルギー生成：中心核での核融合

訳注：上図で太陽の各層の説明のための色付けがされており、目に見える太陽面である「光球」は、実際には白色に見える。



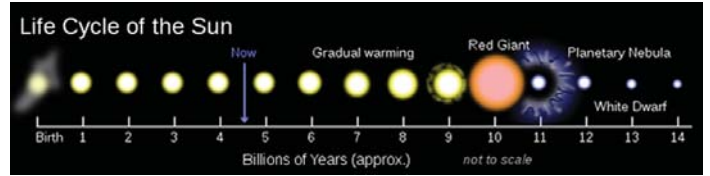


星の一生は、
その星の質量による。



太陽の一生

50億年後、太陽は膨らみ、赤色巨星になると予想される。外側の層を放出した後、惑星状星雲を作り、中心部はゆっくりと冷えていき、白色矮星と呼ばれる小さな天体になる。



惑星

第26回 IAU 総会での決議 (2006年、プラハ)



太陽系の惑星は以下のような天体である：

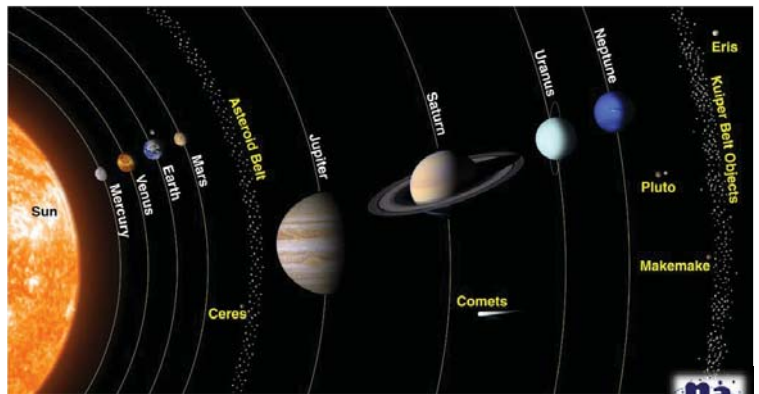
- 太陽の周りを公転している。
- 十分な質量を持ち、ほぼ球体の静水圧平衡を実現できる。
- 軌道上の他の天体を掃き切っている。

初めの2つの基準のみを満たし、かつ衛星でない天体は、「準惑星」に分類される。

第1の基準のみを満たし、かつ衛星でない天体は、「太陽系小天体」と呼ばれる。

現代の太陽系像

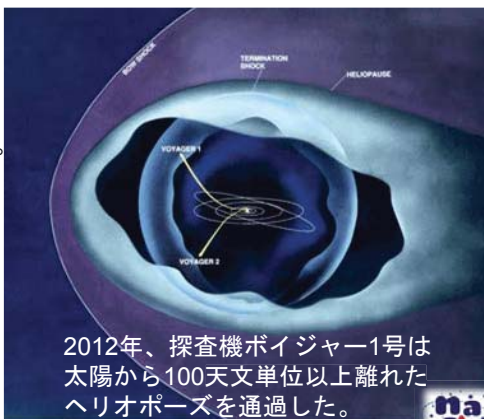
(天体大きさの比較は可能だが、天体間の距離は不正確)



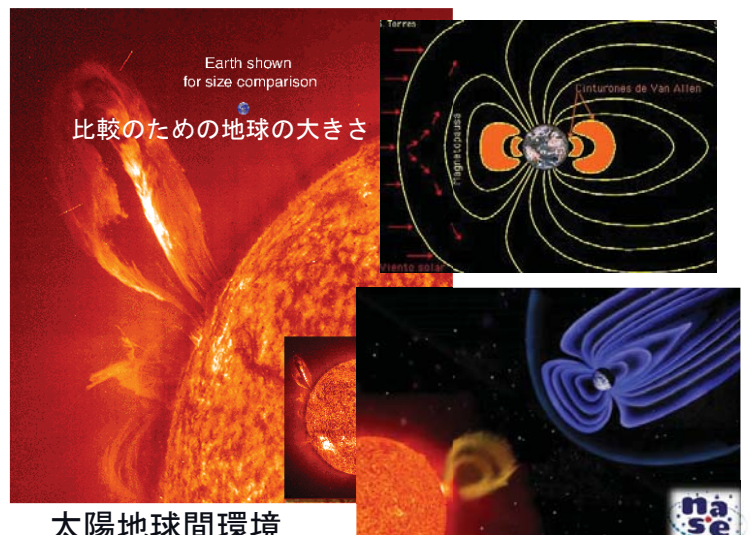
太陽系の果て

惑星はすべて、太陽起源の磁場とプラズマの「風」で満たされたヘリオスフィア (太陽圏) 内にある。

ヘリオポーズ (太陽圏界面) はヘリオスフィアの境界のことで、太陽風が星間物質に溶け込んでいるところである。



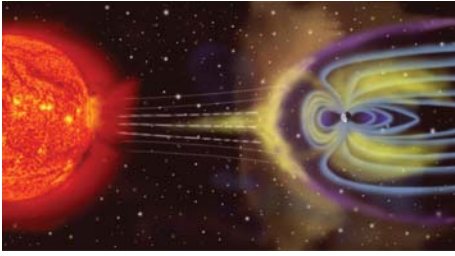
2012年、探査機ボイジャー1号は太陽から100天文単位以上離れたヘリオポーズを通過した。



太陽地球間環境

惑星間物質

太陽は電磁波とともに、太陽風という荷電粒子（プラズマ）の定常的な流れを放射している。



150万 km/h の速度でヘリオスフィア内を満ち、約100天文単位の太陽系全体を包み、端はヘリオポーズになっている。



地球の磁場は太陽風から地球を守っており、北極と南極でオーロラを発生させている。



ヘリオスフィア（太陽圏）は、太陽系外からの宇宙線から太陽系の領域をある程度守っている。磁場を持つ惑星は、それによってさらに保護されている。



「宇宙天気」は24時間監視体制



惑星

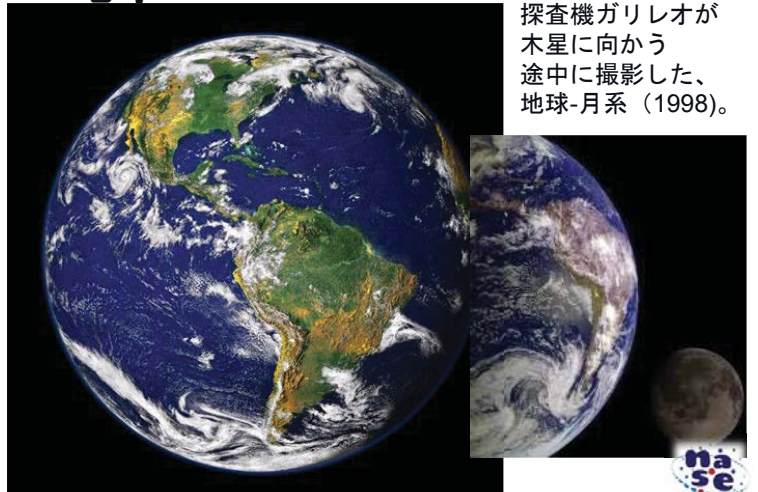
太陽系の8つの惑星は、以下のように分類できる：

- 内側の4つの地球型惑星(水星、金星、地球、火星)。岩石質で、密度は4から5 g/cm³となっている。
- 外側の4つの巨大惑星。さらに以下に分類される。
 - a) 巨大ガス惑星：木星と土星。水素とヘリウムに富み、太陽と化学組成が似る。
 - b) 巨大氷惑星：天王星と海王星。ガスより氷が卓越している。太陽とは化学組成がかなり違っている。
- 巨大惑星は地球型惑星より密度が小さく、0.7 g/cm³（土星）から2 g/cm³となっている。



地球

惑星は現在の場所で形成されたかもしれないが、形成中の巨大惑星どうしの角運動量交換や、微惑星の他領域への投げ飛ばしなどによって、移動があったかもしれない。



探査機ガリレオが木星に向かう途中に撮影した、地球-月系（1998）。



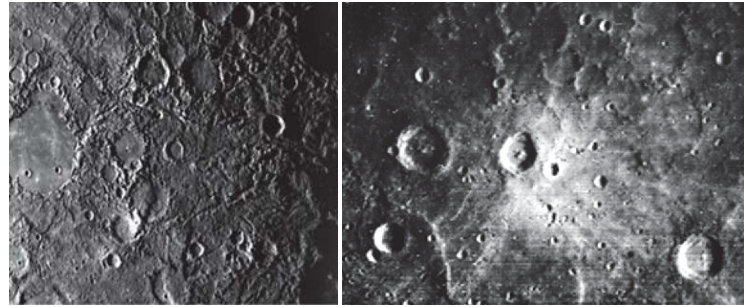


1961年4月12日、初めての有人地球周回飛行
ユーリ・ガガーリン



水星

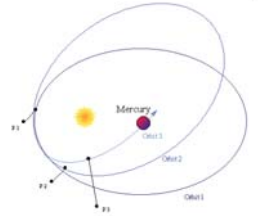
太陽に最も近く、
表面は多くのクレーター
で覆われている。



水星には多数のクレーターがある（右の写真はその例）。最大のクレーターは直径1500 kmのカロリス盆地である。それを引き起こした隕石衝突による表面波は、水星の反対の地点に、丘、山、谷が入り乱れた複雑な地形を作った（左の写真）。

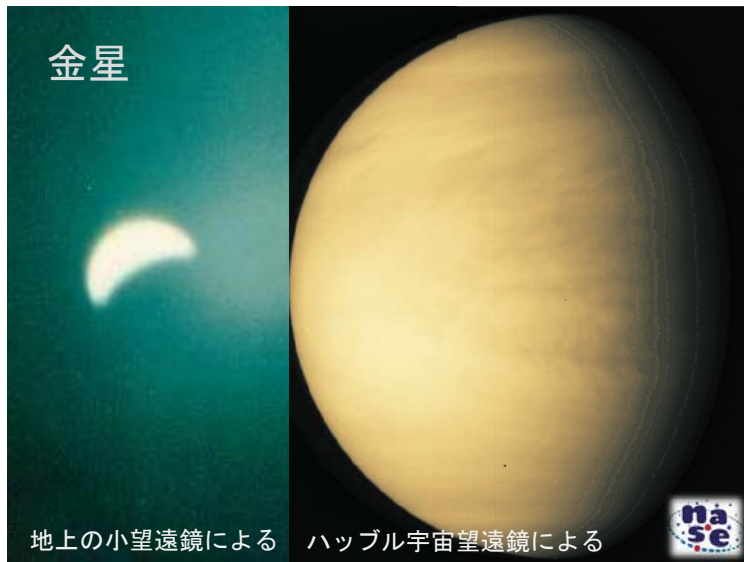
水星の近日点移動

水星の近日点移動は、ニュートンの古典天体力学の予測よりも速い。



近日点移動は、アインシュタインの一般相対性理論によって説明された。

原因は、太陽の重力による空間湾曲である。それは一般相対性理論の証明のひとつとなった。



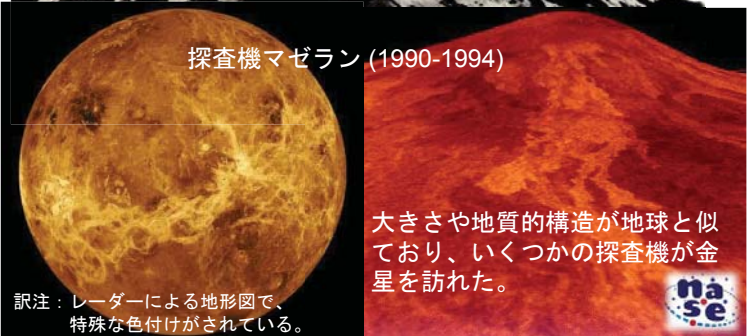
金星

地上の小望遠鏡による ハッブル宇宙望遠鏡による



探査機ベネラ (1976)

ВЕНЕРА-9 22.10.1975 ОБРАБОТКА ИППИ АН СССР 28.2.1976

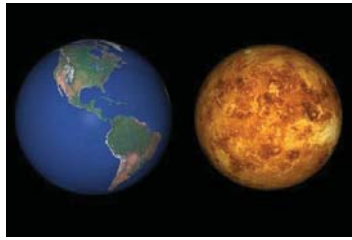


探査機マゼラン (1990-1994)

大きさや地質的構造が地球と似ており、いくつかの探査機が金星を訪れた。

訳注：レーダーによる地形図で、特殊な色付けがされている。

惑星の中で金星と天王星だけは、太陽周回の公転の方向と逆行する自転となっている。



- 金星の1年 = 地球の 224 日相当
- 金星の1日 = 地球の 243 日相当

二酸化炭素の大気と硫酸の雲は太陽系最大の温室効果を招き、水星よりも高温の 460°C となっている。

大気圧も地球の100倍あり、雲からは硫酸の雨が降っていることだろう。

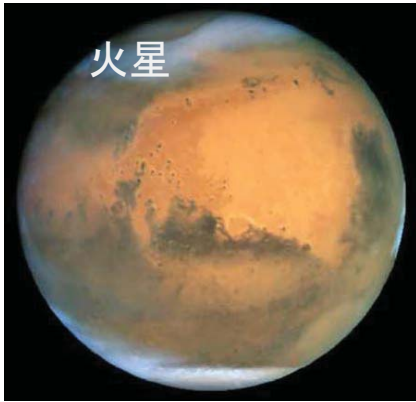
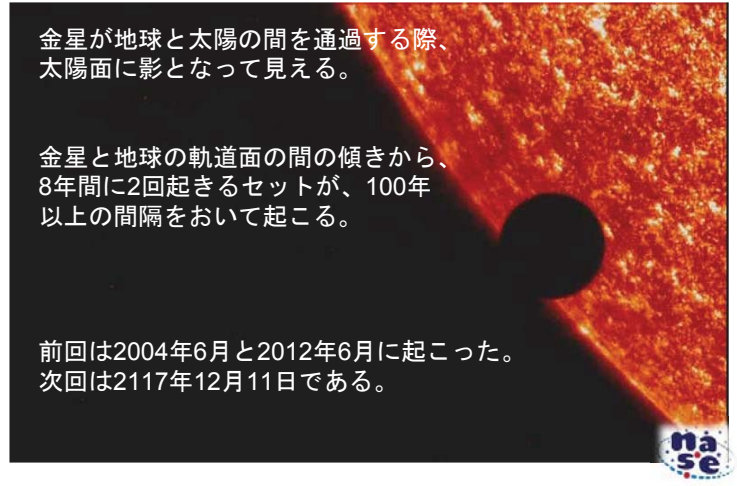


金星の太陽面通過

金星が地球と太陽の間を通過する際、太陽面に影となって見える。

金星と地球の軌道面の間の傾きから、8年間に2回起きるセットが、100年以上の間隔をおいて起こる。

今回は2004年6月と2012年6月に起こった。次回は2117年12月11日である。

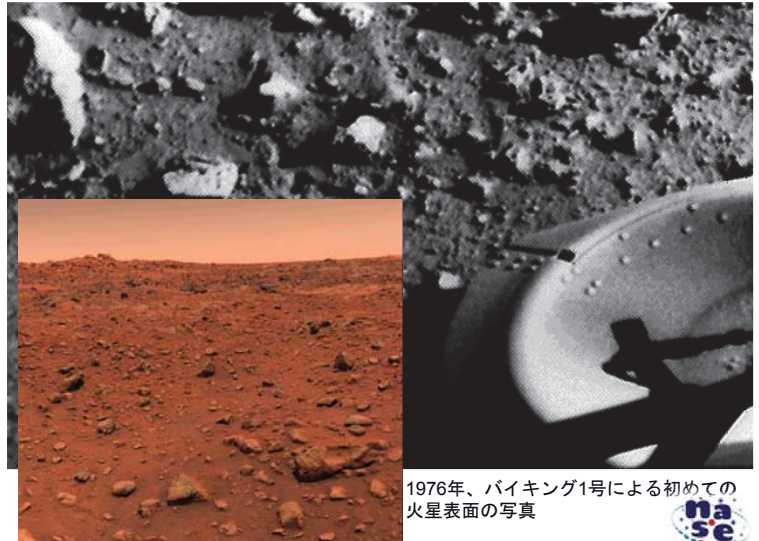


火星

薄い大気があり、主に二酸化炭素から成る。大気圧は地球の100分の1である。



オリンポス山 (2万6000 m)

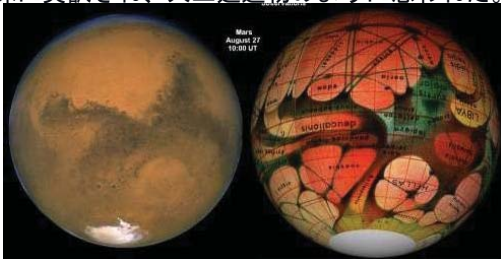


1976年、バイキング1号による初めての火星表面の写真

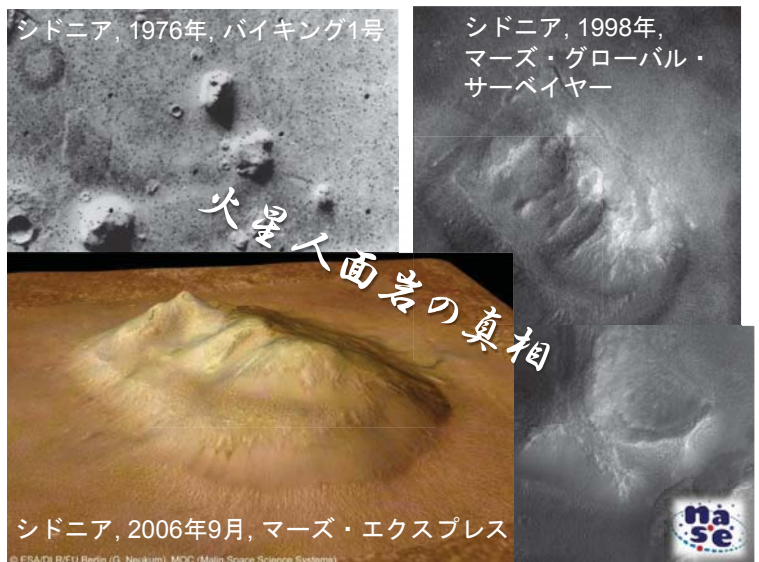


SF小説で、「宇宙人といえば火星」 という印象がある。

19世紀終わりころにジョバンニ・スカパレリによって発表された「カナリ」(水路、溝)は、その後、canal (運河)と誤訳気味に英訳され、人工建造物のように思われた。



火星の赤い色は、表面の鉱物に見られる酸化鉄(ヘマタイト)によるものである。



シドニア, 2006年9月, マーズ・エクスプレス

© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum), MOC (Mars Space Science Systems)



火星にかつて水があったことを示す痕跡が見られる。



水は現在、地下で凍結されているのだろう。

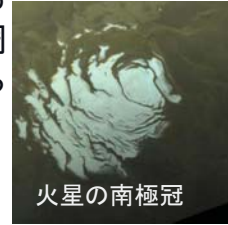


地球と同じように、火星にも季節変化がある。火星の自転軸が公転面に対して傾いているからであり、その自転軸の傾きを保ったまま、太陽の周りを公転するからである。

SEASONS on EARTH



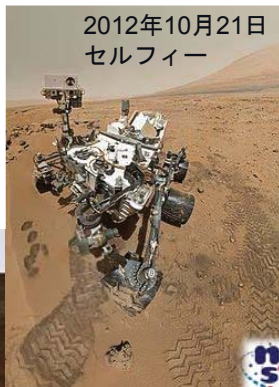
SEASONS on MARS



水と二酸化炭素から成る2種類の極冠があり、季節によって変化する。

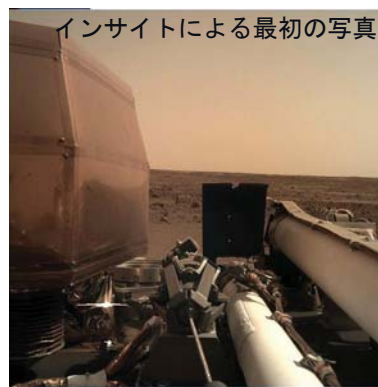


火星探査機キュリオシティ (2004年より)
科学と技術による歴史的的成功：微生物のための実験室



インサイト：2018年11月に火星到着

InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport)



インサイトによる最初の写真

探査の目的：
地球物理学ロボットを地面に設置する。火星内部、地熱、火星の砂の動きを調べる高性能の機器を備え、火星の初期地質進化を探る。



木星



太陽系最大の惑星で、60以上の衛星を従える。1610年、ガリレオは「メディチ家」と呼んだ4衛星を初めて観測した。同年、シモン・マリウスが、イオ、エウロパ、ガニメデ、カリストと命名した。

訳注：木星や土星の衛星は、地上観測の技術の大幅な進歩や惑星探査機の活躍により、発見数がどんどん増えている。数値はすぐに古くなる。



ハッブル宇宙望遠鏡による木星のオーロラ (紫外線観測)

大赤斑 (渦巻き)

おそらく小さな固体の核があり、それは地球質量の10から15倍だろう。

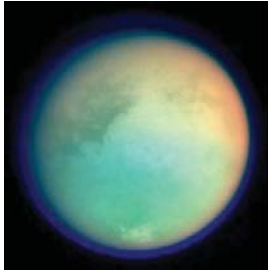
木星の環





60以上ある衛星の内、球形となる大型のものは7つである。最大はティタン（水星や冥王星より大きい）で、濃い大気を持つ太陽系内唯一の衛星である。

ティタン



ヒペリオン

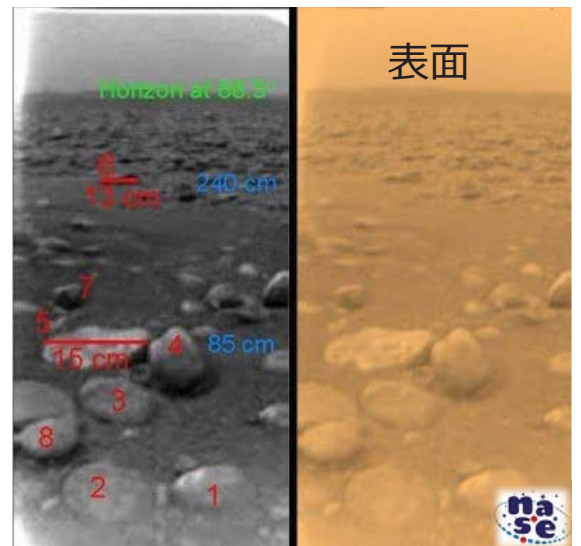
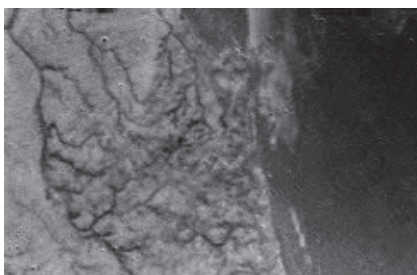


訳注：Titan は、学術用語なのでラテン読み「ティタン」と記すのが正しい。



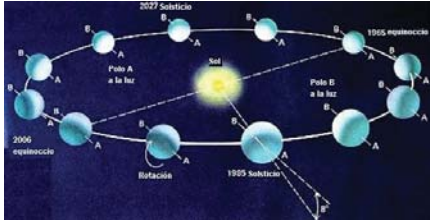
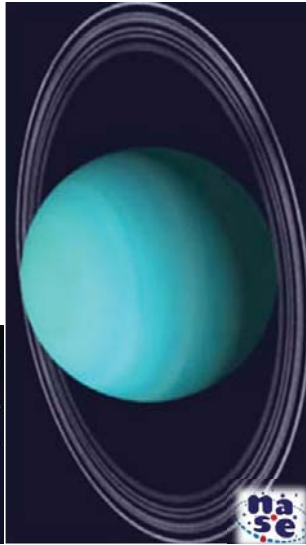
ティタン着陸のホイヘンスより (最初のパノラマ写真、2004年)

ティタン：メタンの海、河川、湖



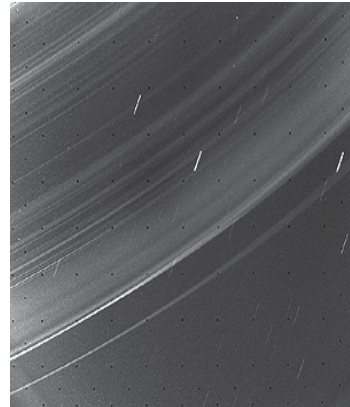
天王星

自転軸は、事実上、公転面内にある。

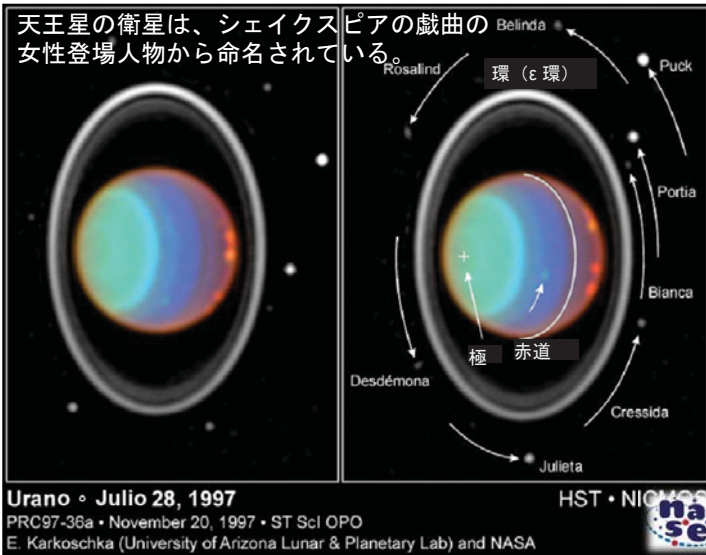


天王星の環

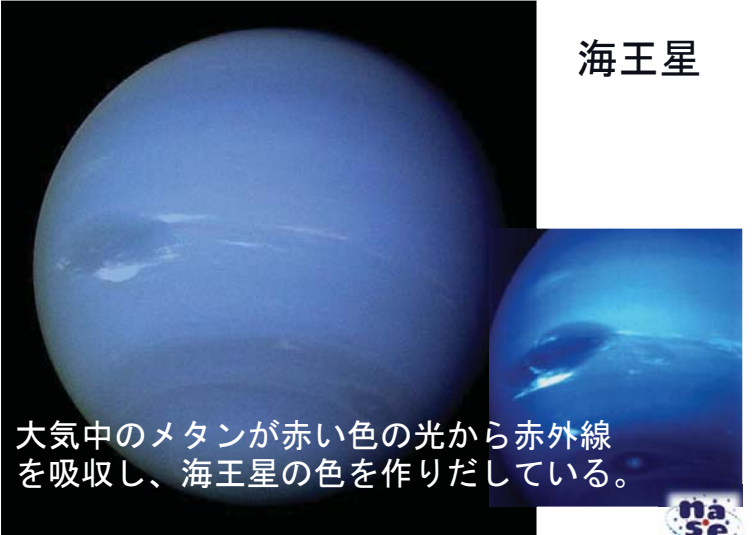
天王星は少なくとも27の衛星を持っている。最初の2つは1787年にウィリアム・ハーシェルによって発見された：ティタニアとオベロン



天王星の衛星は、シェイクスピアの戯曲の女性登場人物から命名されている。



海王星

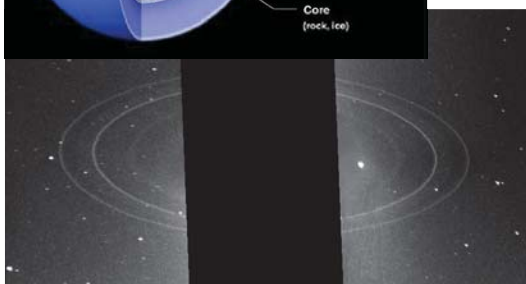
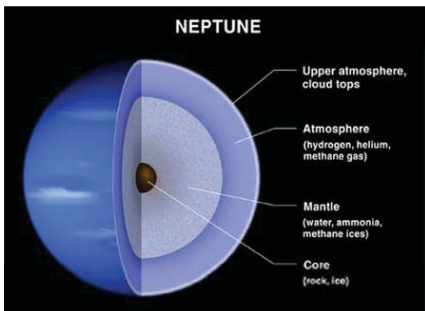


大気中のメタンが赤い色の光から赤外線を吸収し、海王星の色を作りだしている。

Urano • Julio 28, 1997
PRC97-36a • November 20, 1997 • ST ScI OPO
E. Karkoschka (University of Arizona Lunar & Planetary Lab) and NASA

ケイ素や鉄でできた、地球の大きさ程度の固体の核を持っていると思われる。

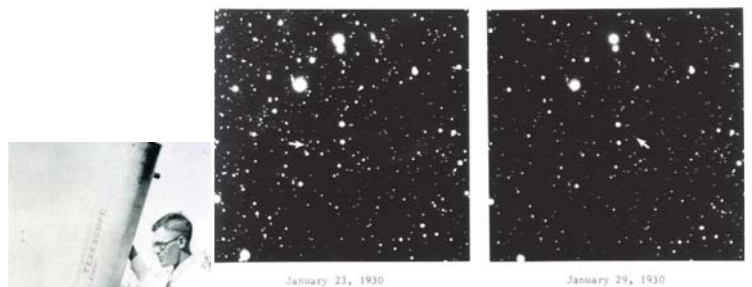
核の周りには氷やメタンが取り巻き、水素とヘリウムが取り巻いている。



暗い環がある。起源はよくわかっていない。

発見の写真 (1930)

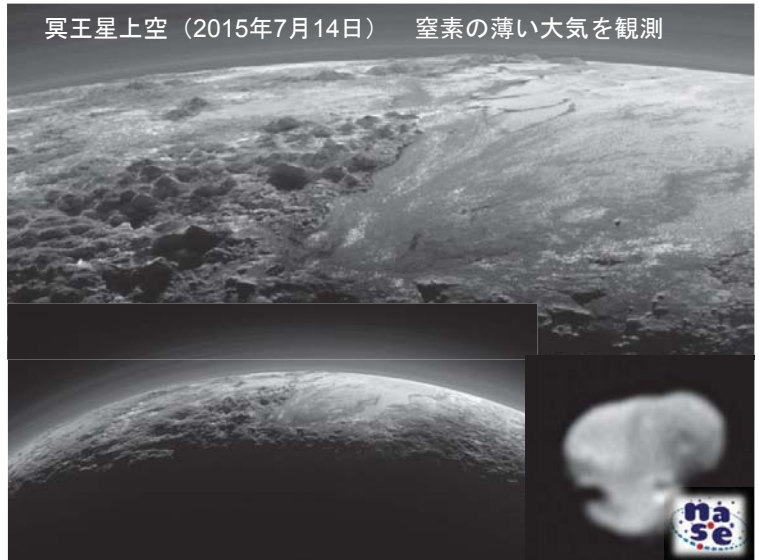
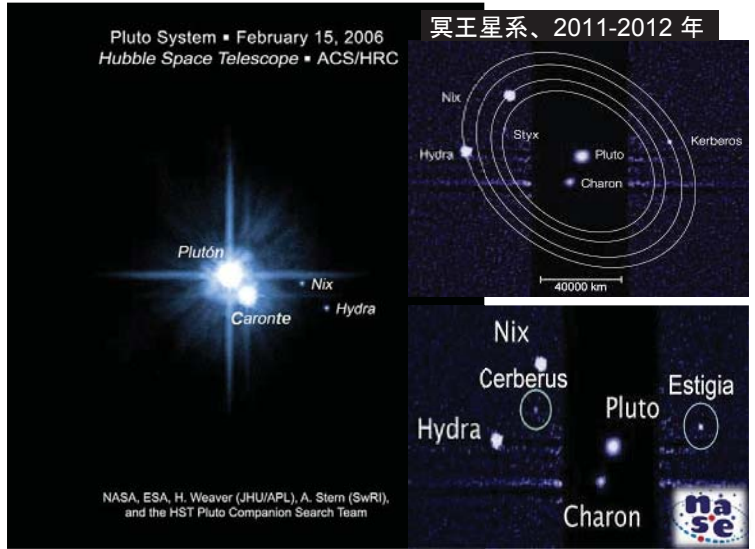
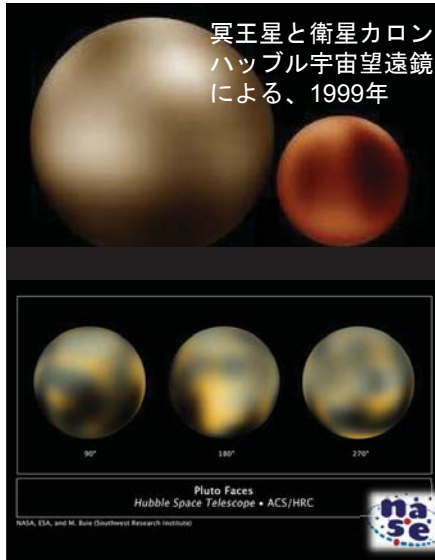
DISCOVERY OF THE PLANET PLUTO



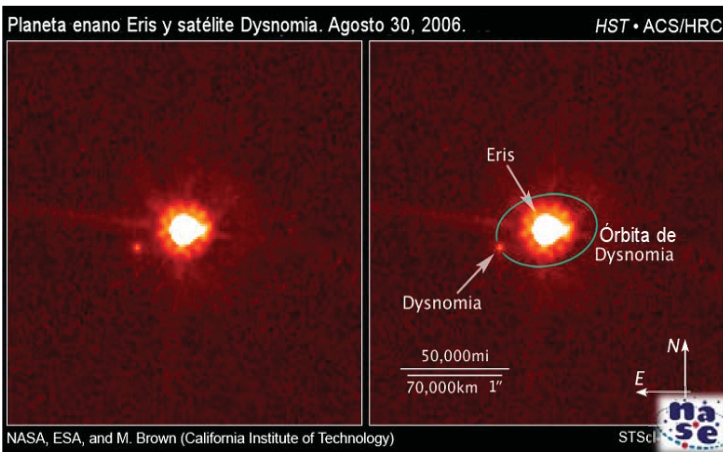
1930年2月18日、クライド・トンボーが冥王星を発見



冥王星は当初、海王星の軌道を乱すものとして存在が示唆され、ローウェルがその位置を予想までしていた。クライド・トンポーは黄道近くを系統的に写真掃天する中で、約13.5等級の冥王星を発見した。実際には海王星に影響を及ぼすような大きな天体ではなかった。



エリスの発見

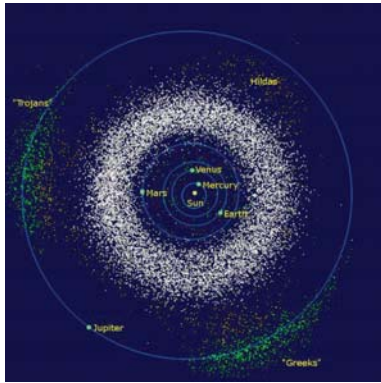


太陽系小天体

- 惑星になれなかった残骸が存在する。
- 小惑星、彗星、太陽系外縁天体といった、多様な天体の姿を取る。
- 小惑星は岩石質や金属質のもので、彗星は主に水の氷やチリでできた、もっとこわれやすく、多孔のものである。
- 小惑星のほとんどは火星と木星の軌道の間であり、「小惑星帯」(メインベルト)として知られている。
- 太陽系外縁天体は氷を多く含み、海王星軌道の外側に位置している。そのため、トランス・ネプチュニアン(海王星以遠)天体、また、その存在を最初に提唱したひとりのカイパーの名からカイパーベルト天体ともいわれる(訳注:別の提唱者のエッジワースにも敬意を表して、エッジワース・カイパーベルト天体と呼ばれることもある)。



小惑星帯（メインベルト）



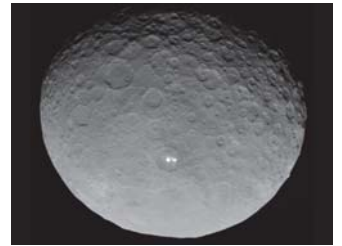
登録数だけでも数十万にのぼる。未発見のものを含めてすべて足し合わせても質量では地球の1000分の1を越えないだろうと思われる。



小惑星の大きさ：数100 km からメートル以下まで

ケレス

ジュゼッペ・ピアッツィによって1801年に発見された。他の同種の天体が多数発見されるまでの1850年まで、惑星として考えられていた。



約1000 km の直径があり、球形となるだけの自己重力を持つ。

小惑星帯での最大天体であり、2006年現在、小惑星帯で準惑星としてカタログされている唯一のものである。



他の小惑星はみな、小型で不規則な形状をしている。しかしパラスやベスタといった小惑星は、もし重力による静水圧平衡に達していると判断されれば、準惑星と認定されるかもしれない。



太陽系小天体が多数存在するところ

太陽系の年齢程度の時間、安定して存在し続けられる場所がある。もちろん、揺さぶりで軌道が変わることがある。

太陽系には3カ所、小天体が多数存在する場所がある：

- 小惑星帯：地球接近の小惑星（NEASと呼ばれる）といった天体は、ここからやってくる。
- エッジワース・カイパーベルト：短周期彗星のふるさと。
- オールトの雲：球状の分布をしており、惑星形成の際、巨大惑星によって投げ出された、凍った微惑星である。恒星や巨大分子雲の通過による揺さぶりが銀河系内の潮汐作用により、オールトの雲の中の天体が太陽系内部に落ち込むことがあり、これが長周期彗星となる。



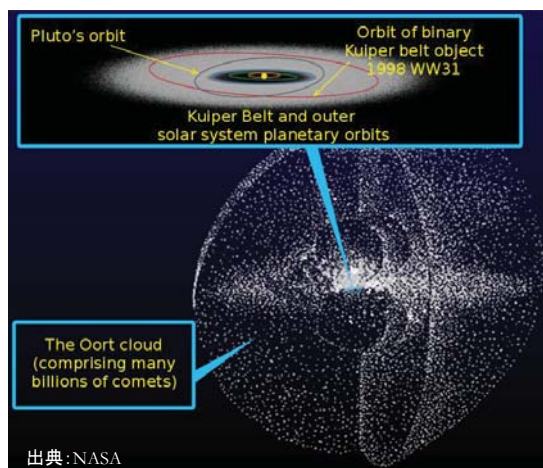
2019年4月17日現在

出典：NASA/JPL (<https://ssd.jpl.nasa.gov>)

- 知られている小惑星総数：79万8130
 - 小惑星帯：70万5913
 - 木星のトロヤ群：7236
 - 火星軌道より内側：3573
 - 地球接近小惑星：1万9996
 - 地球衝突の潜在的危険のある小惑星：1973
- 彗星
 - 楕円軌道：長周期（周期200年以上）420
 - 短周期（周期200年未満）860
 - 放物線軌道：1837
 - 双曲線軌道：347（太陽系外起源）
- 太陽系外縁天体：3218



エッジワースカイパーベルト天体とオールトの雲

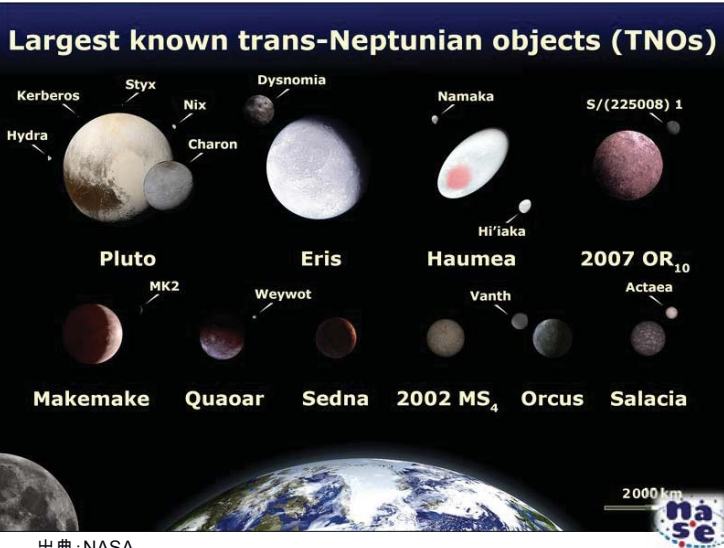


海王星以遠の天体

最大のものは準惑星

出典：NASA





彗星

彗星は数 km の大きさの小さな天体で、水の氷、二酸化炭素、メタン、アンモニアなどの揮発性物質やチリの粒を主成分としている。

太陽に近づくと、目に見えるようになる。

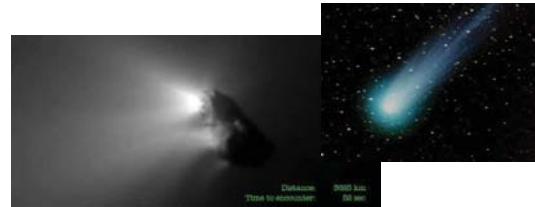
彗星は地球上の水の起源ではないか、とも考えられている。

- 彗星は一般に非常に離心率の高い軌道を持っている。長周期彗星は、特定の軌道面にそろっておらず、順行も逆行もありうる。短周期彗星は軌道面の傾きは小さく、順行の場合が多い。
- 太陽に近づくと、彗星表面の氷が気化し、「コマ」を形成し、「尾」をたなびかせる。ガスとともに引きずり出されたチリはチリの尾（ダスト・テイル）を形成し、原子や太陽風の影響でイオン化した分子がイオンの尾（イオン・テイル）を形成する。チリの尾は湾曲して見え、青いイオン・テイルは、まっすぐに太陽と反対の方向を指す。



ハレー彗星：もっとも有名な彗星

万有引力の法則と力学的揺さぶりの計算を使い、太陽への回帰を予想したエドモンド・ハレーの名を記念して名付けられた。ハレー自身はその予想を確かめる間もなく他界した。76年の周期で回帰する。



1986年、探査機ジオットが初めて近づき、彗星の核を撮影した。

探査機ロゼッタ：

67/P チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星へ

2014年11月12日、フィラエが彗星へ降下



Camera OSIRIS/ESA

他の惑星系



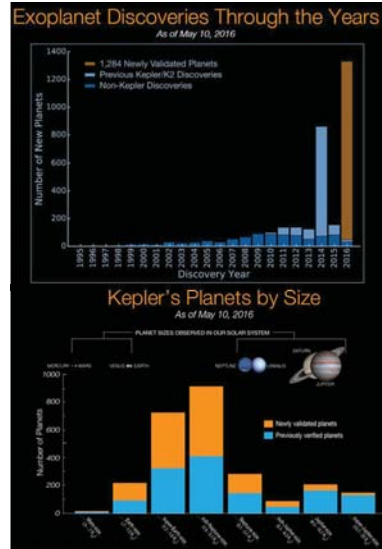
1995年、スイスの天文学者ミシェル・マイヨールとディディエ・ケローズは、ペガサス座51番星に惑星が周回していると発表した。



国際天文学連合は命名提案を世界に呼びかけ、2015年にこの恒星と惑星は、Helvetios と Dimidio と名付けられた。

2003年3月16日撮影、褐色矮星 2M1207（中心の青白いもの）とその惑星（左下）

訳注：写真はペガサス座51番星系ではない。



2009年3月に打ち上げられたケプラーは、NASAによる、地球程度の大きさの生命居住可能惑星の検出も目指した、初めての科学衛星である。

2016年5月10日、ケプラーによる大規模カタログが発表され、一般に公開されている。

系外惑星約5000の候補天体の内、3200以上の存在が確定され、そのうち2325はケプラーによるものである。

訳注：大規模カタログデータは、次々に発表されている。上記数値もすぐに古くなる。



2018年現在、NASAの科学衛星 TESS（トランジット系外惑星探索衛星）は、ケプラーと同じ方法を使い、近距離の明るい20万の恒星を監視している。特に地球の大きさ、あるいはそれよりやや大きい惑星（スーパーアース）の探索を目指している。



恒星の周りを、惑星が周回しているのは、どのくらいか

惑星の内、生命居住可能なものは、どのくらいか

その内、生命体を進化させているのは、どのくらいか

天文学が挑戦している課題である



ありがとうございました

