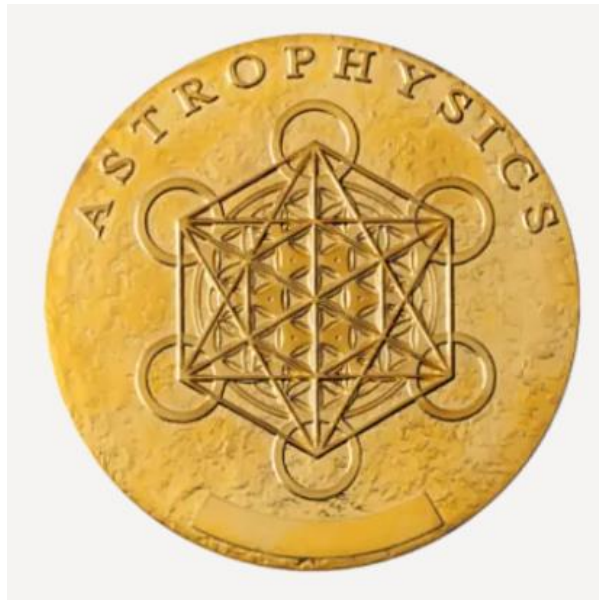


THE KAVLI PRIZE

2024 i astrofysikk Planeter utenfor solsystemet

Øyvind Grøn

Norsk Astronomisk Selskap



But what about more distant worlds? Thousands of years ago, Greek philosophers speculated.



“There are infinite worlds both like and unlike this world of ours...We must believe that in all worlds there are living creatures and planets and other things we see in this world.”

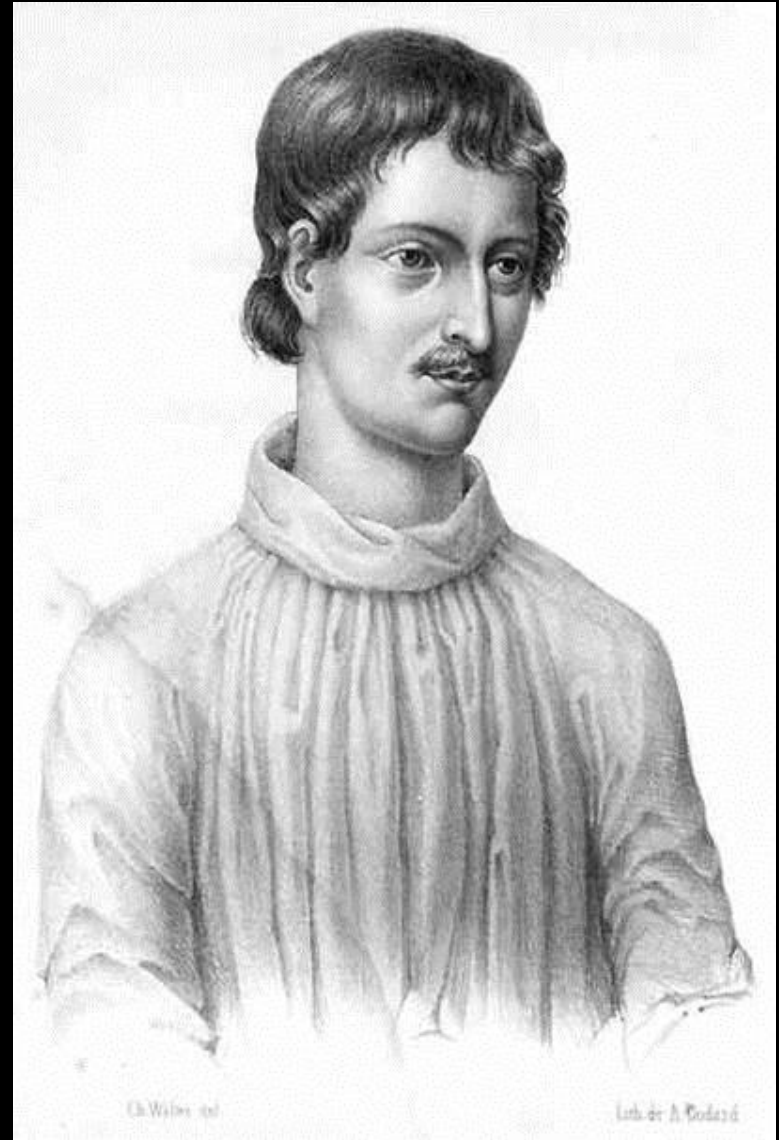
*Epicurius
c. 300 B.C*

And so did medieval scholars.

The year 1584

"There are countless suns and countless earths all rotating around their suns in exactly the same way as the seven planets of our system . . . The countless worlds in the universe are no worse and no less inhabited than our Earth"

Giordano Bruno
in *De L'infinito*
Universo E Mondi



Davis Charbonneau og Sara Seager har fått Kavliprisen i astrofysikk i 2024 for oppdagelser av planeter utenfor solsystemet og utvikling av nye metoder for å studere deres atmosfærer.



David Charbonneau



Sara Seager

I 1995 ble oppdagelsen av de første objektene som uten tvil var planeter i bane rundt en sol-lignende stjerne, annonsert av Michel Mayor og Didier Queloz.

Slike planeter kalles *eksoplaneter*.
Frem til 24. juli 2024 er det 5756 eksoplaneter på listen i NASA sitt eksoplanetarkiv, de fleste funnet ved hjelp av Kepler romteleskopet.

Dette åpnet et nytt forskningsfelt: [vitenskapen om eksoplaneter](#).

David Carbonneau og Sara Seager har begge vært viktige drivkrefter i utviklingen av dette forskningsfeltet.

David Charbonneau er Fred Kavli professor i astronomi ved Harvard University i USA.

Han er forfatter og medforfatter til ca. 320 vitenskapelige artikler. Fra omkring år 2000 har han vært en ledende forsker av eksoplaneter.

Han skriver på sin hjemmeside:

«Målet med min forskning har vært å registrere og karakterisere eksoplaneter.

Jeg er spesielt fascinert av planeter der jorda ligger i planetens baneplan, slik at planeten passerer foran modestjernen en gang per omløp sett fra jorda.

Slike planeter tilbyr unike muligheter til å studere egenskapene til planeter og deres atmosfærer. Jeg fokuserer særlig på jordlignende eksoplaneter – planeter som består av fjell og jern, og som har har tynne atmosfærer slik som jorda.»

Sara Seager er professor ved
Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) sitt Kavli-institutt i USA.

I sitt doktorarbeid fra 1999 utviklet hun modeller
for atmosfærene til ekstrasolare planeter.

Hennes forskningsarbeid har over en periode på over 25 år
vært rettet mot oppdagelse og analyser av eksoplaneter.

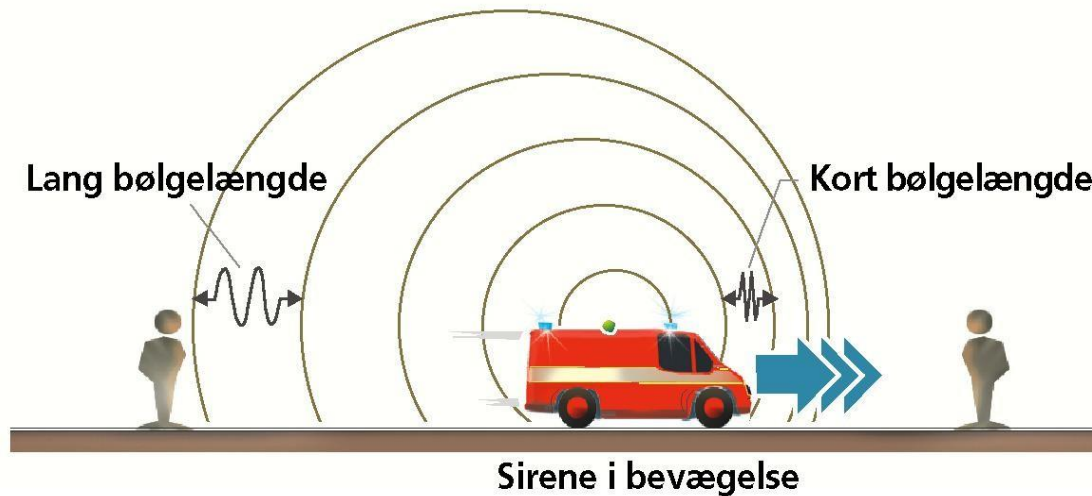
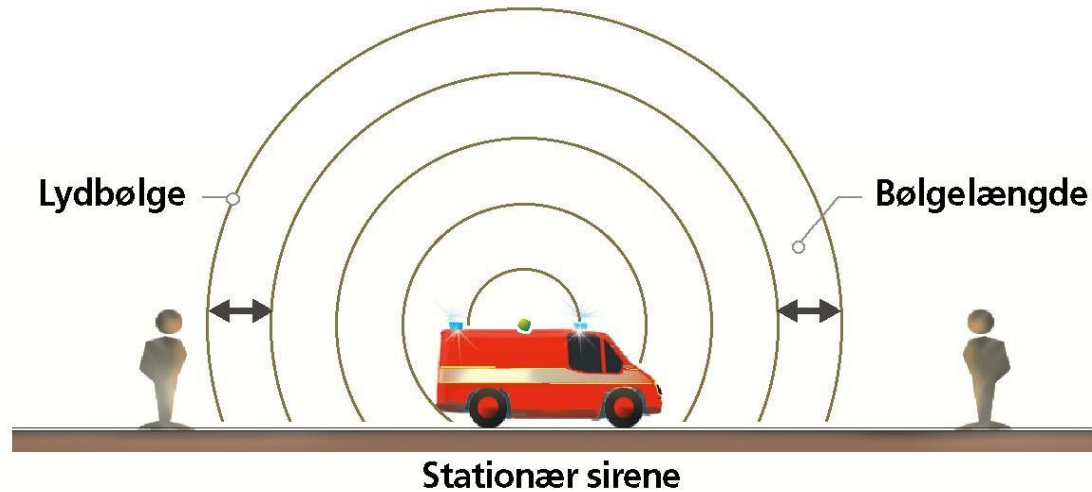
Hun har vært forfatter og medforfatter til
over 300 vitenskapelige artikler om dette temaet.
Blant annet har hun forutsagt eksistensen av karbonstjerner.

Hennes forskning ledet til
den første oppdagelsen av atmosfæren til en eksoplanet.

I et foredrag i 2015 sa Seager: «Er vi alene? Er det liv der ute?

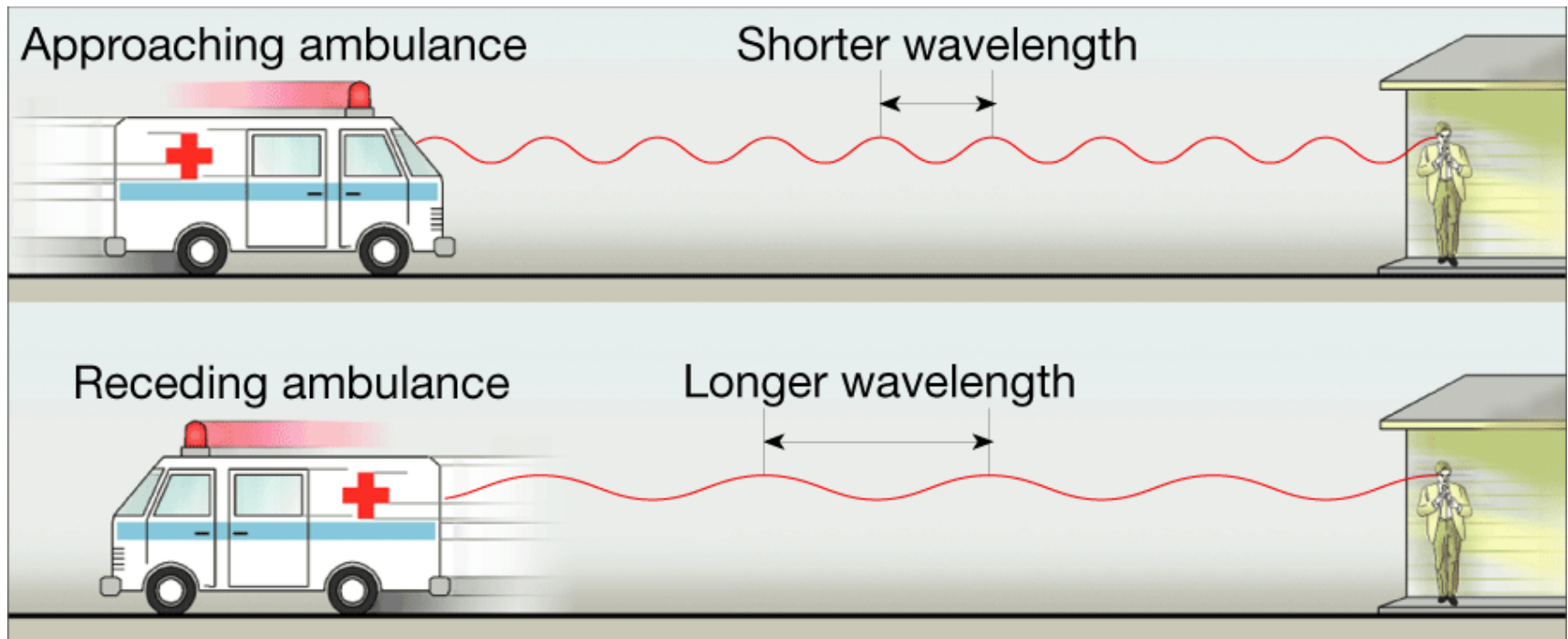
Slike spørsmål ble formulert for tusener av år siden
i de greske filosofenes dager.

Jeg er her for å fortelle dere hvor nær vi er kommet
et svar på slike spørsmål.»



DOPPLER EFFEKTEN ER MERE KENDT FOR LYD END FOR LYS,
SIMPELT HEN FORDI LYDENS HASTIGHED ER CA. 1.000.000
GANGE MINDRE END LYSETS HASTIGHED

dopplereffekten



Metoder for å oppdage planeter utenfor solsystemet

Dopplermetoden

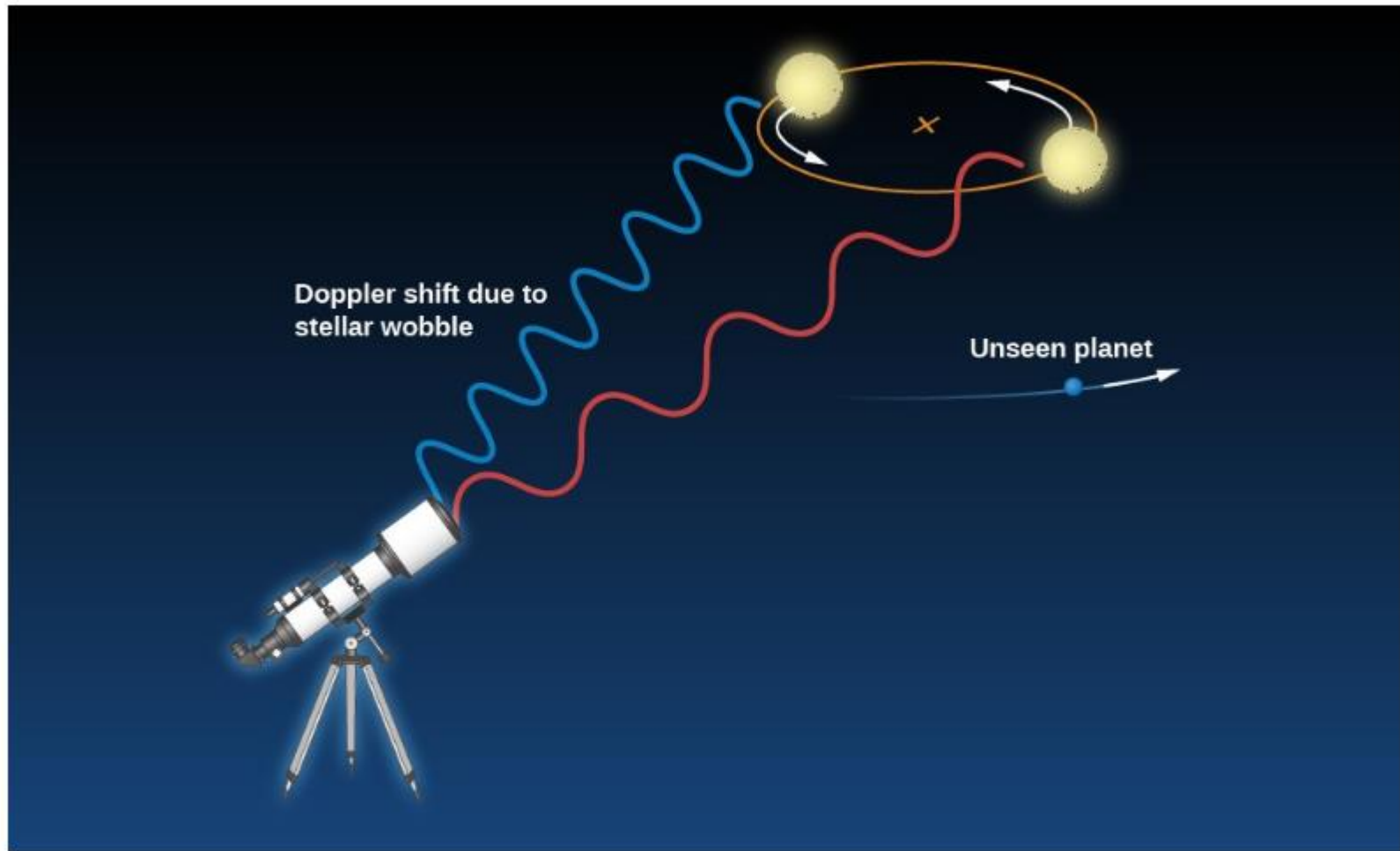
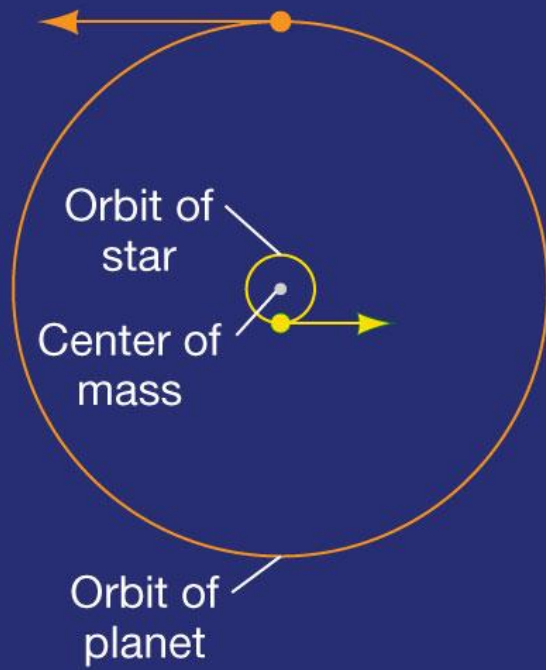
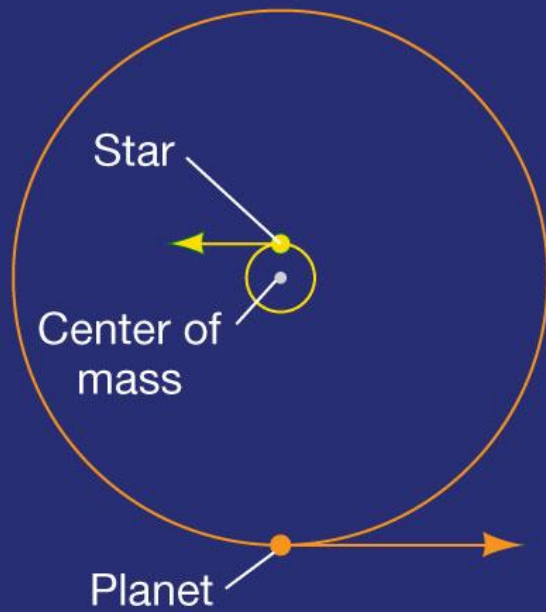


Figure 1: Doppler Method of Detecting Planets. The motion of a star around a common center of mass with an orbiting planet can be detected by measuring the changing speed of the star. When the star is moving away from us, the lines in its spectrum show a tiny redshift; when it is moving toward us, they show a tiny blueshift. The change in color (wavelength) has been exaggerated here for illustrative purposes. In reality, the Doppler shifts we measure are extremely small and require sophisticated equipment to be detected.

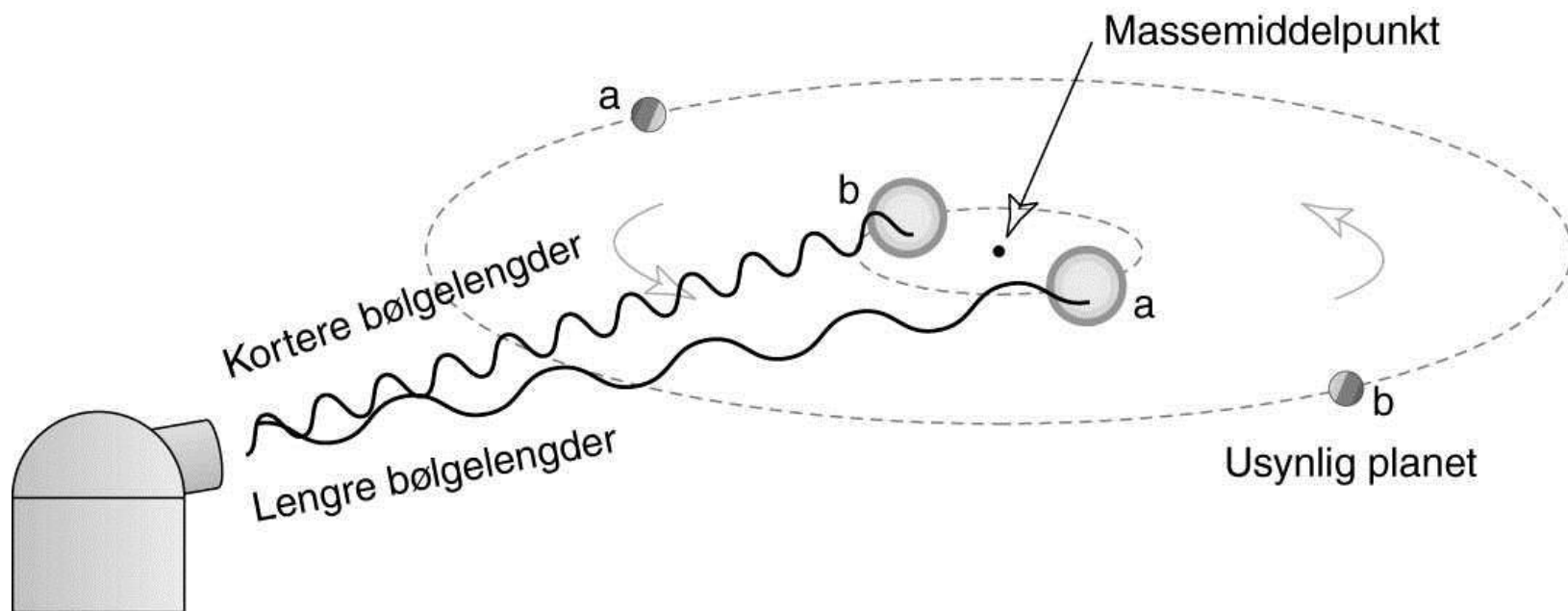


Observer
sees star
blueshifted



Observer
sees star
redshifted

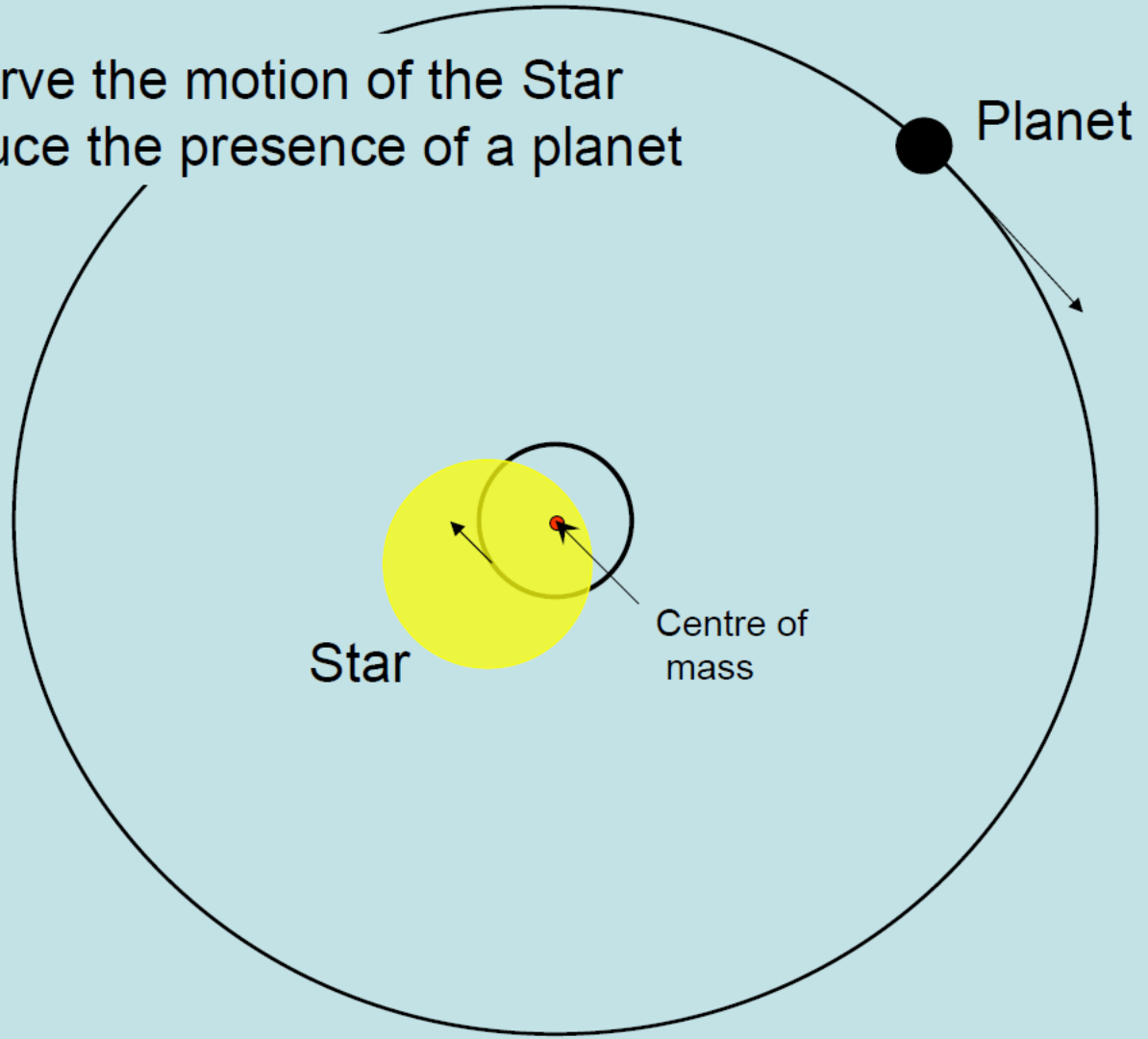
Dopplermetoden for å registrere ekstrasolare planeter

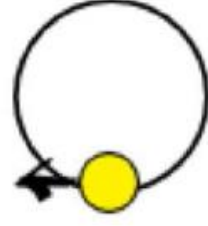
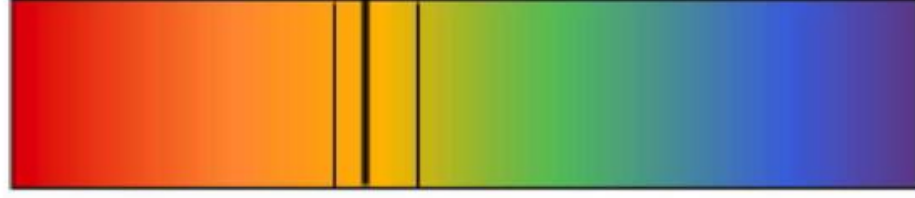
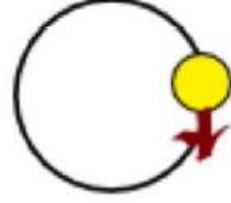
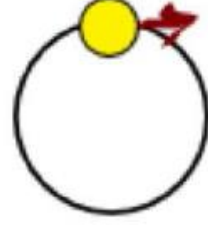
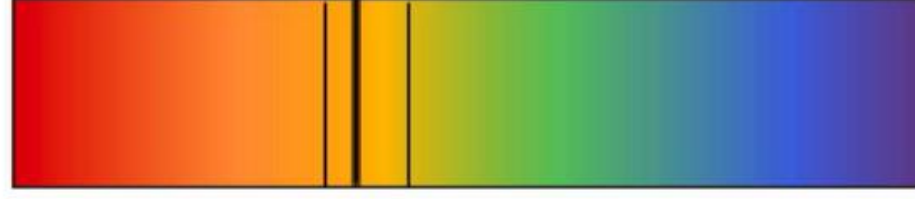
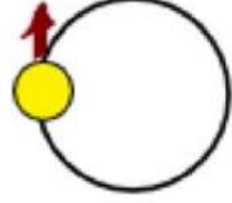
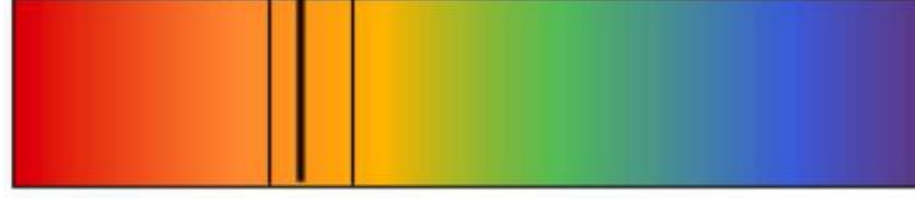
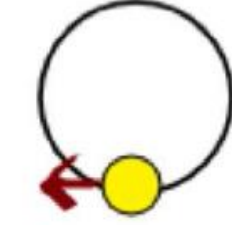
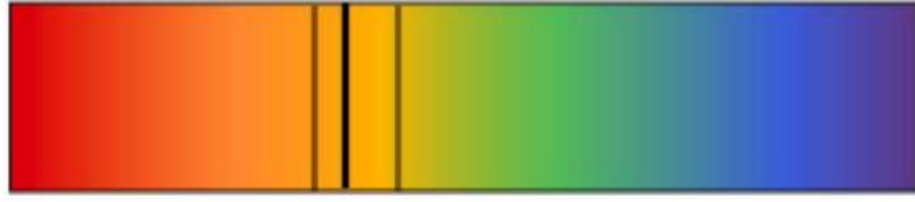


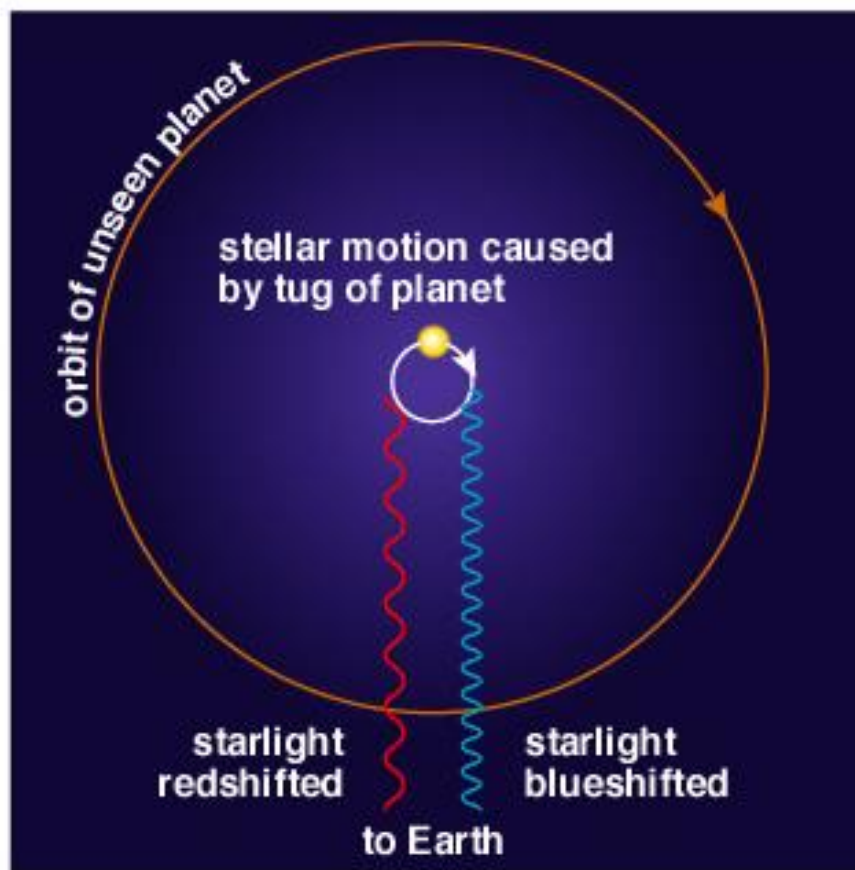
Planeten og moderstjernen roterer rundt systemets massesenter. Moderstjernens hastighetskomponent langs synslinjen observeres ved hjelp av dopplereffekten.

Metoden favoriserer å observere kjempeplaneter nær moderstjernen.

We observe the motion of the Star
and deduce the presence of a planet

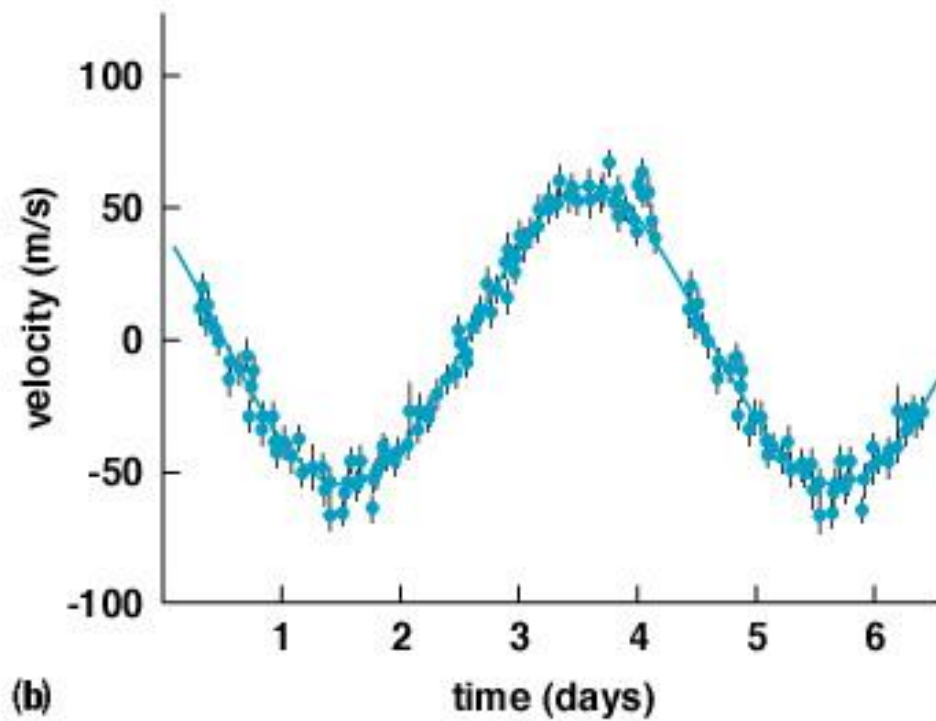






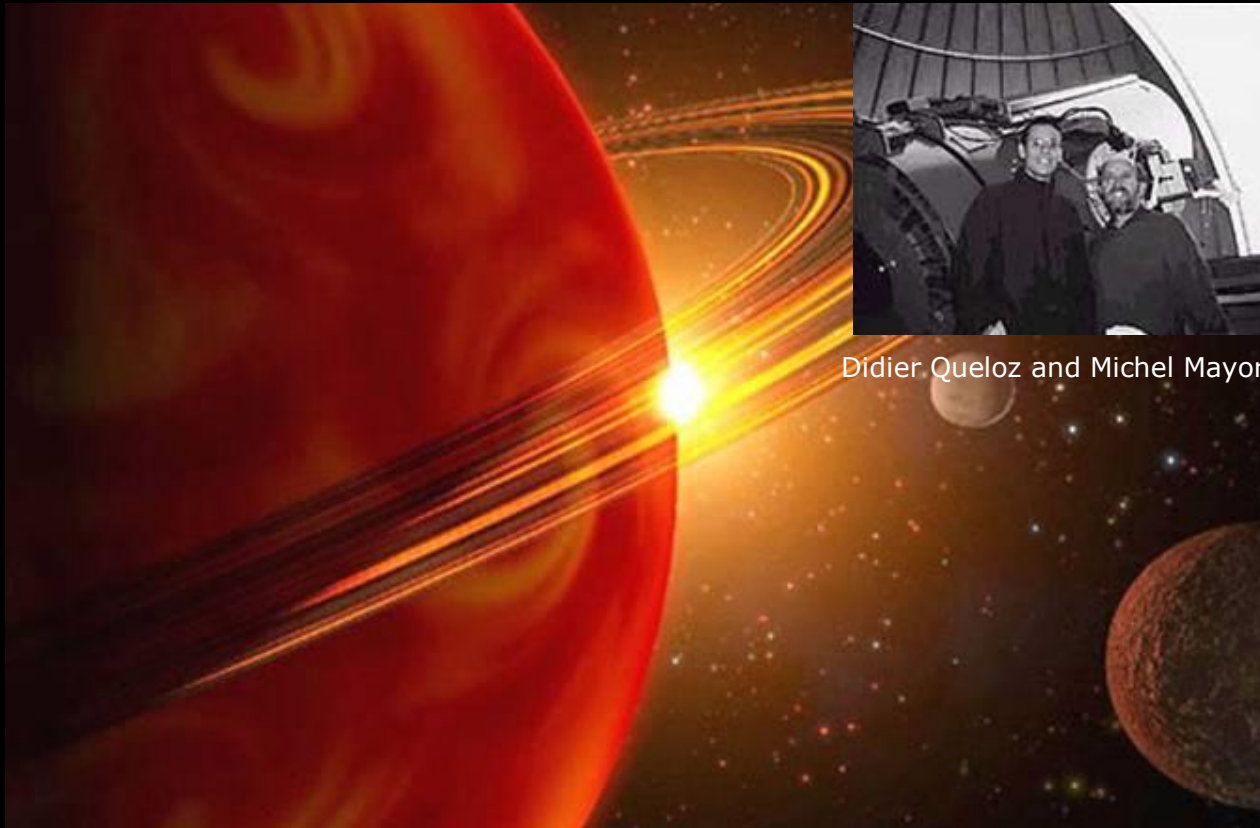
(a)

Copyright © Addison Wesley



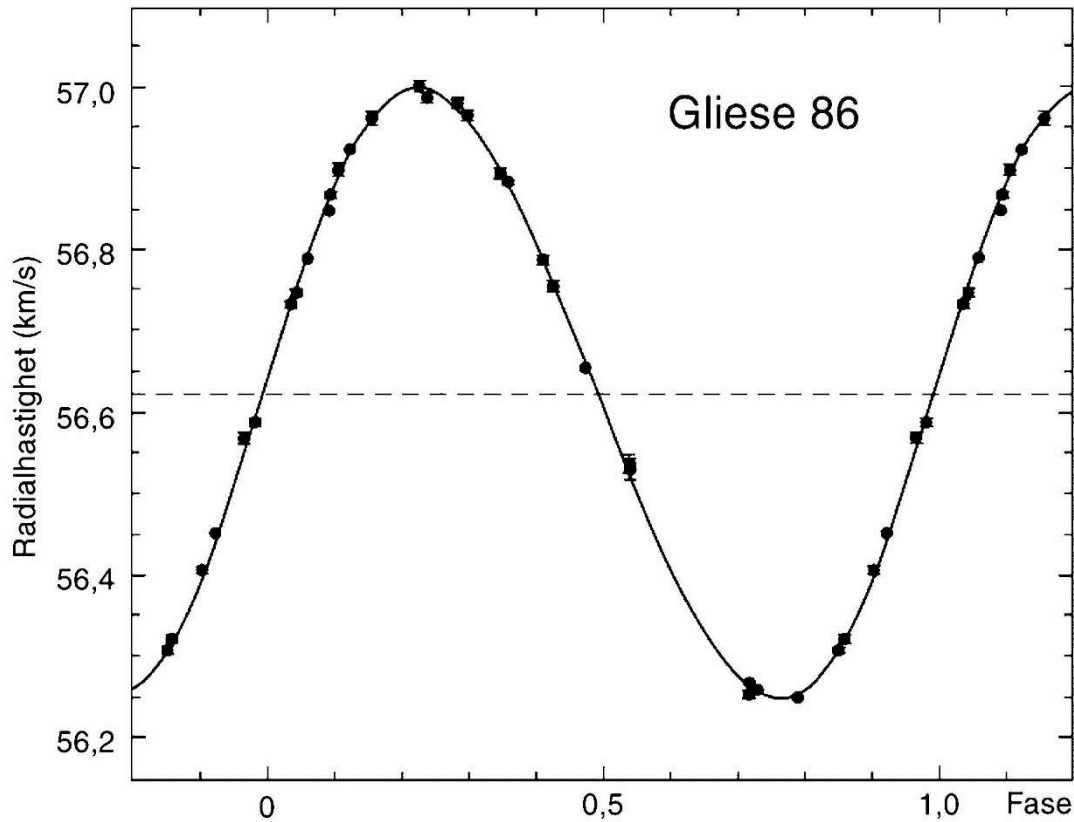
(b)

*In 1995, a breakthrough:
the first planet around another star.*



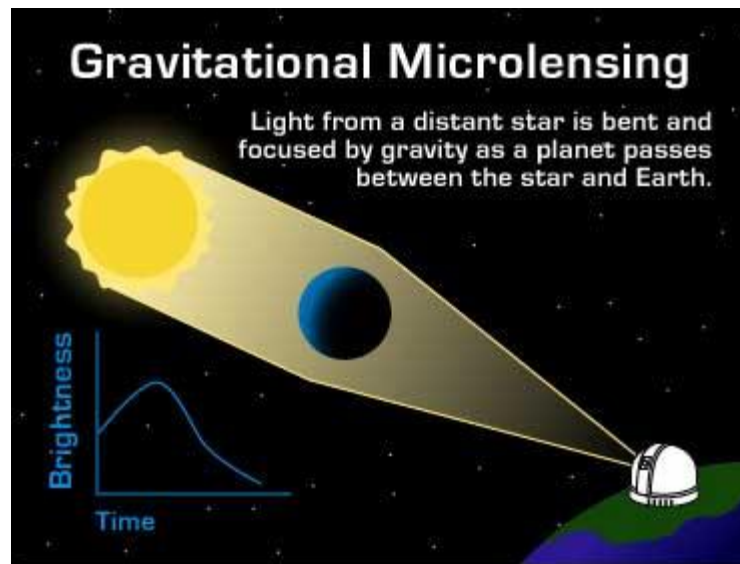
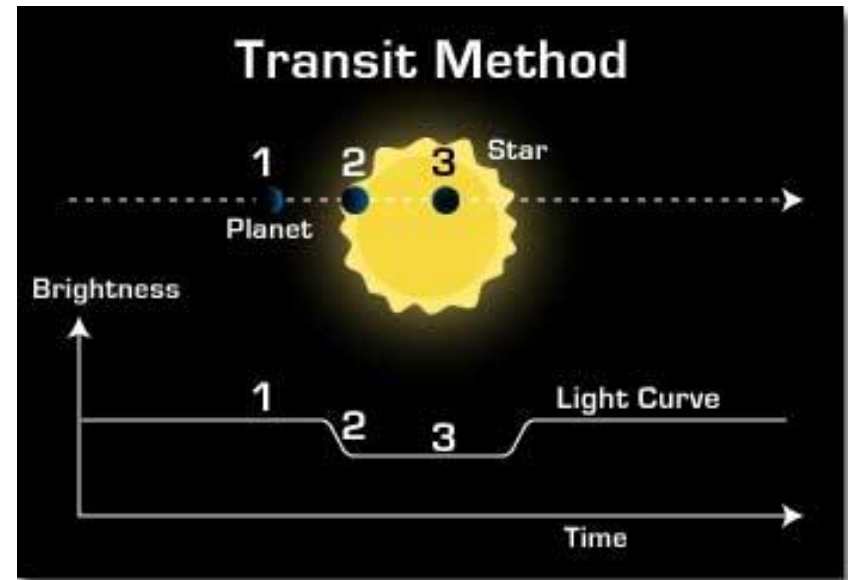
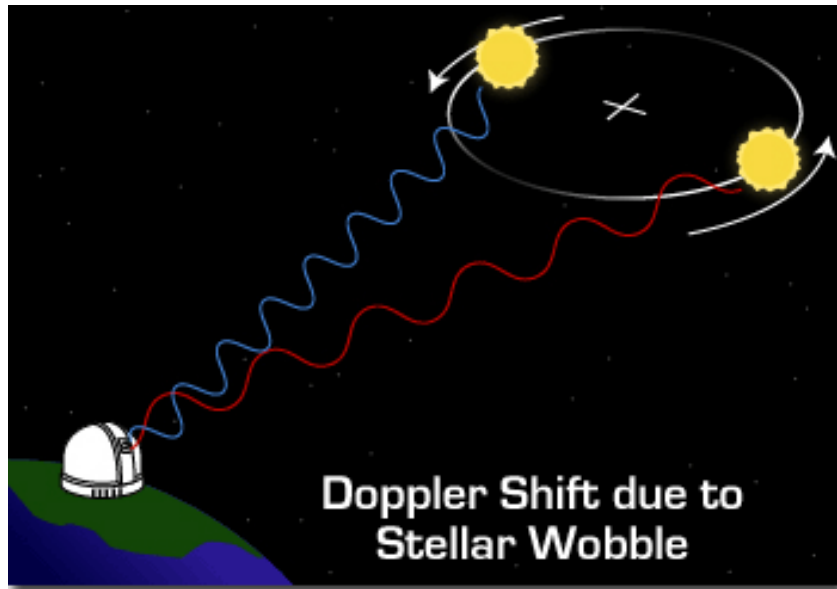
Didier Queloz and Michel Mayor

A Swiss team discovers a planet - 51 Pegasi -
48 light years from Earth.



Typisk hastighetskurve for stjerne med en planet: Banebevegelsen til moderstjernen rundt massesenteret gir opphav til en periodisk (sinusformet) hastighetsvariasjon langs synslinjen, her på 740 m/s. Planeten har 4,9 jupitermasser og er 0,11 AE fra stjernen.

Tre metoder to for å detektere planeter utenfor solsystemet



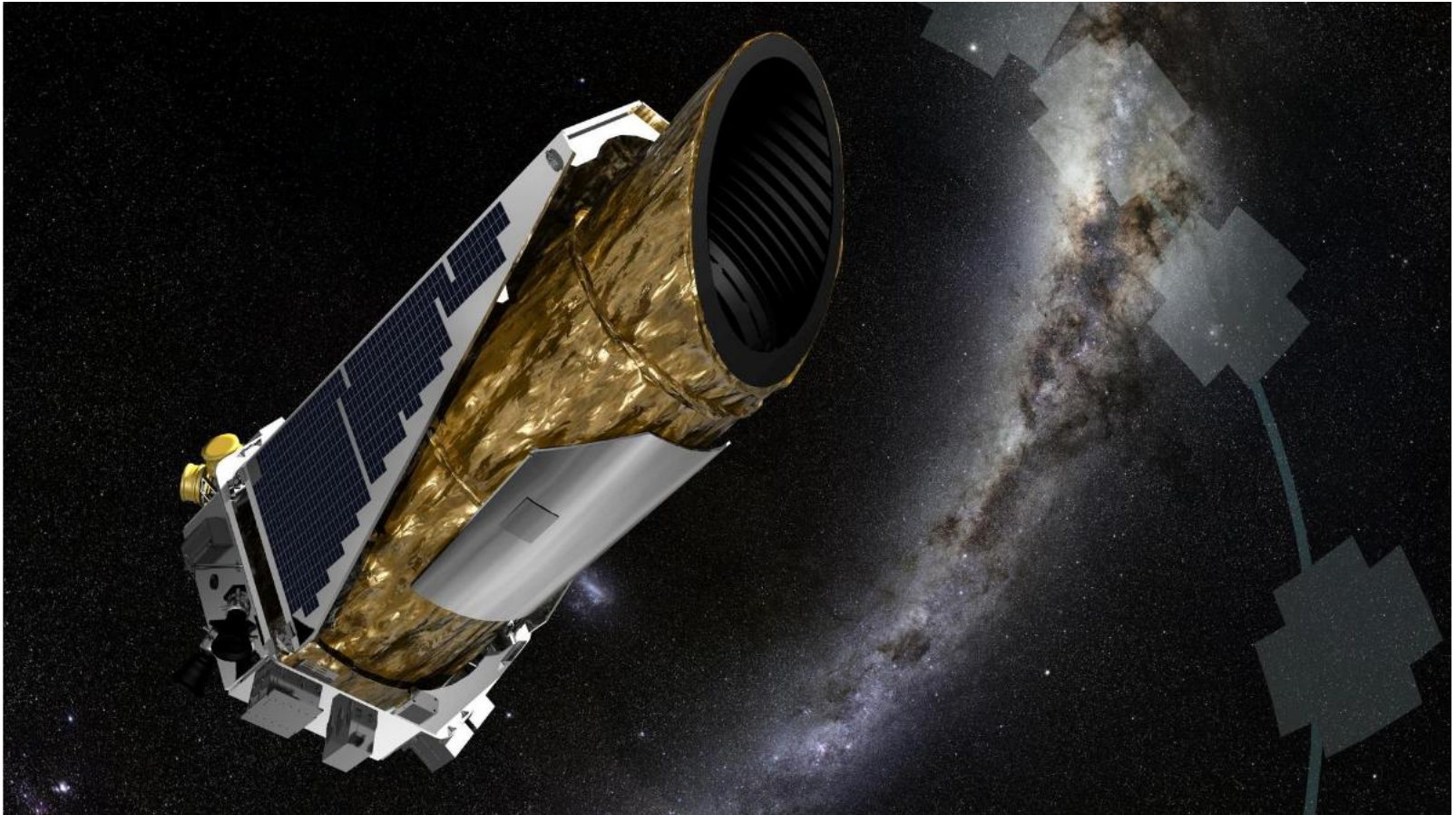
Stars are a billion times brighter...



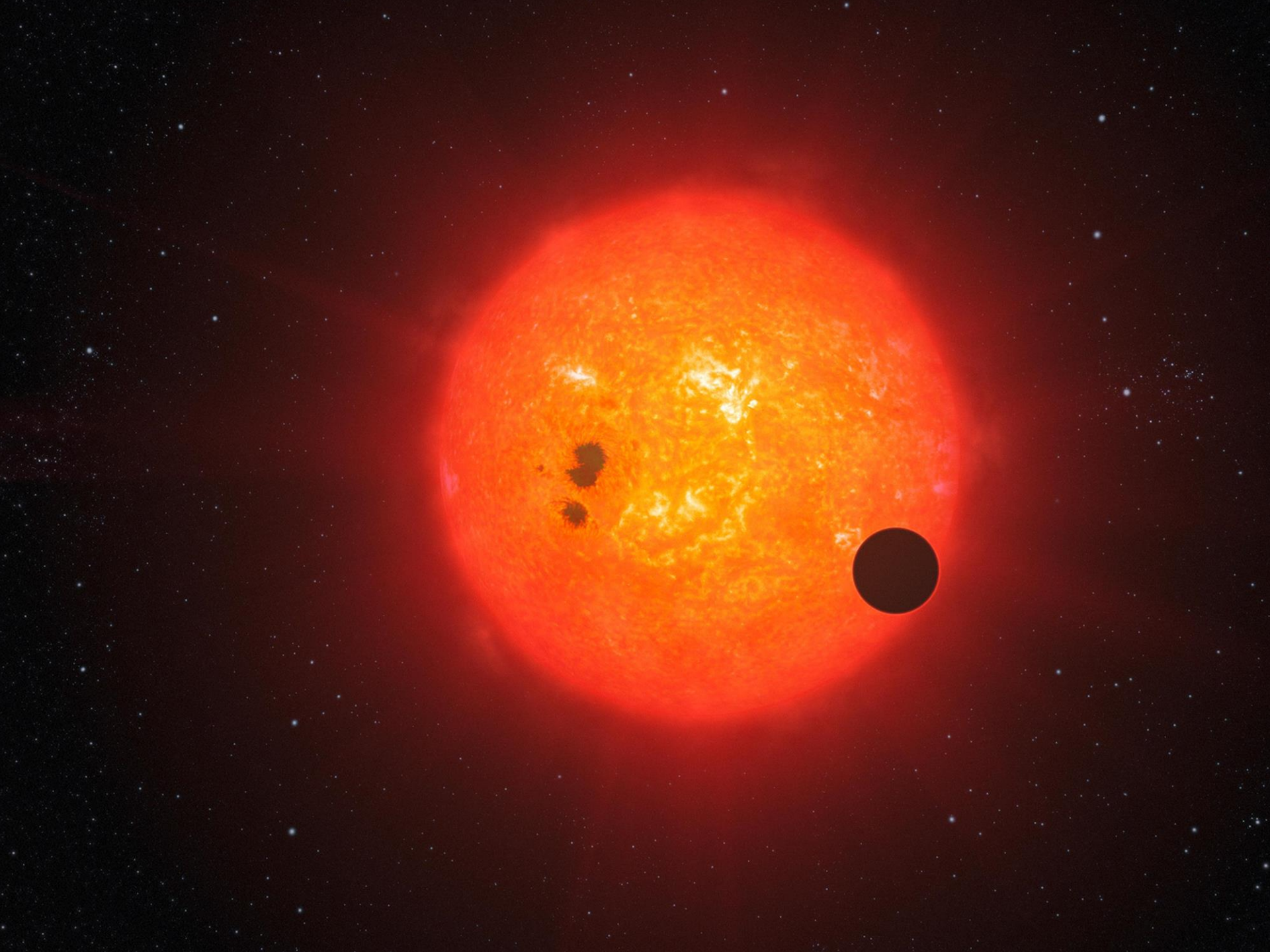
...than the planet



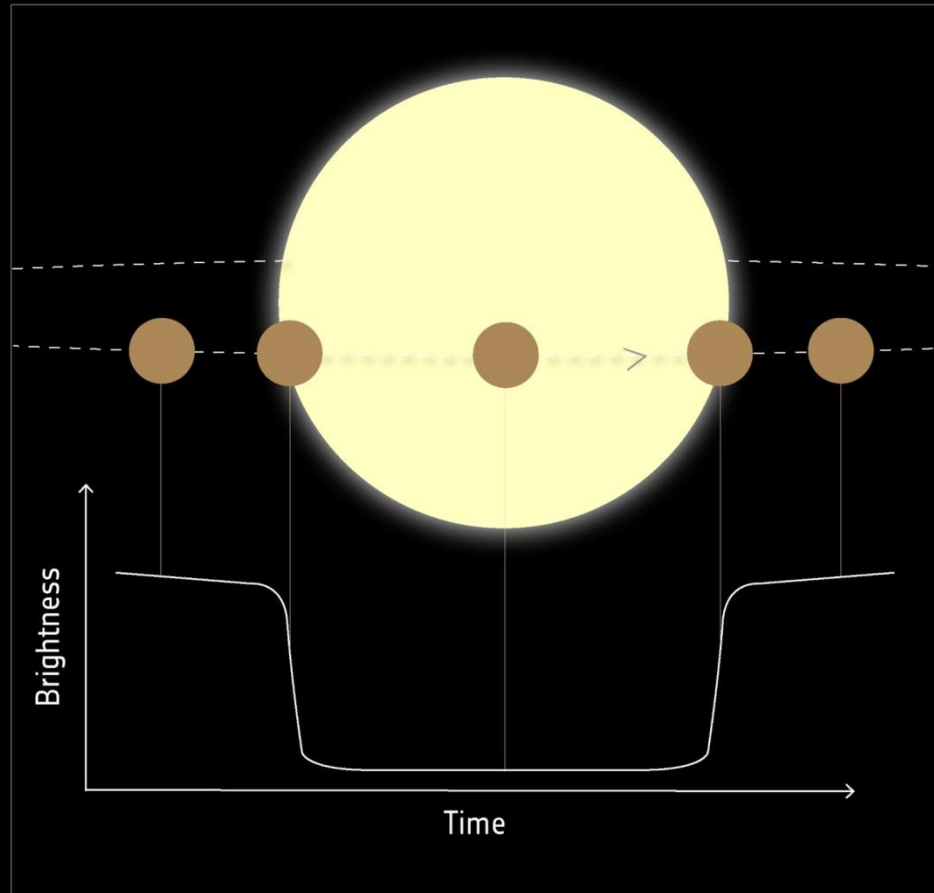
Formørkelsesmetoden

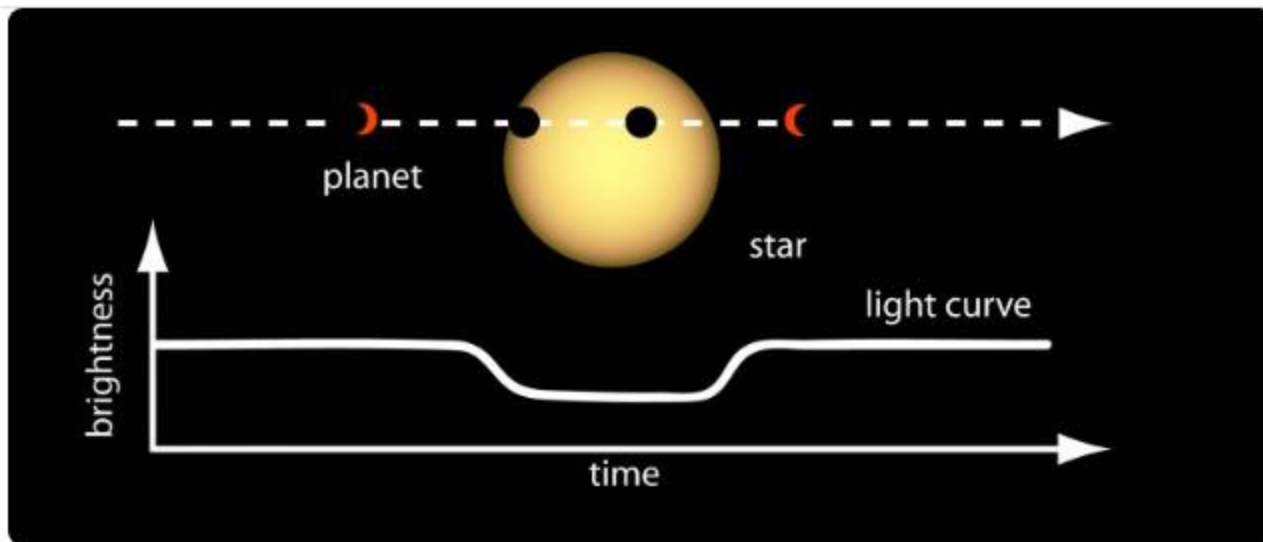


Kepler romteleskopet oppdaget eksoplaneter ved hjelp av formørkelsesmetoden.

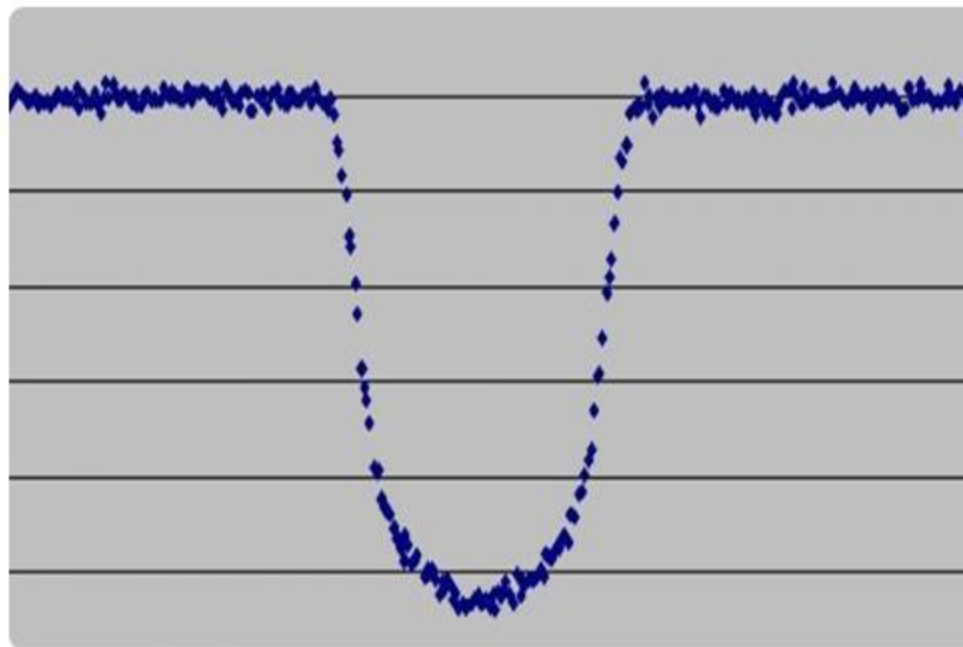


Transit photometry



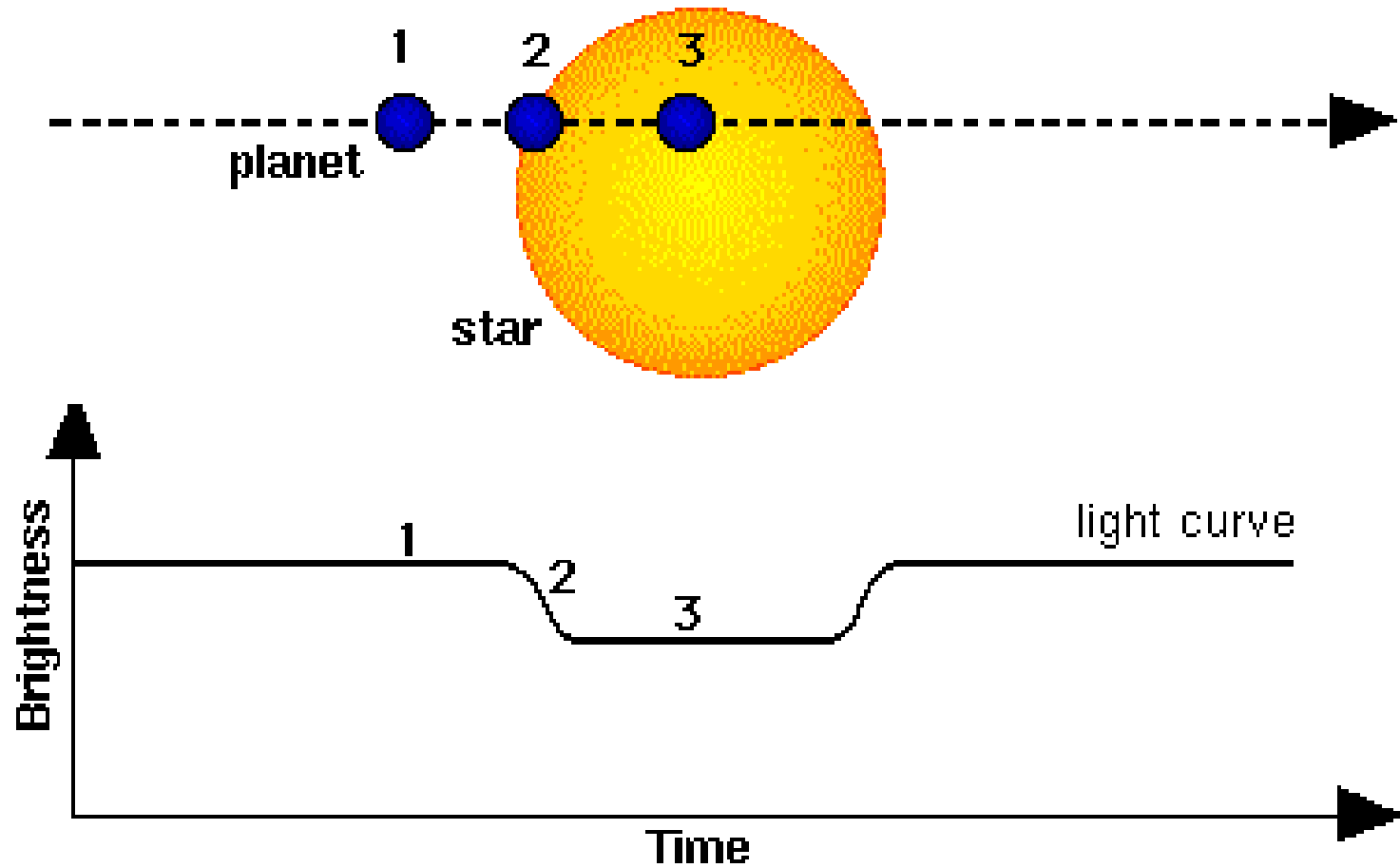


Transit via [NASA](#).

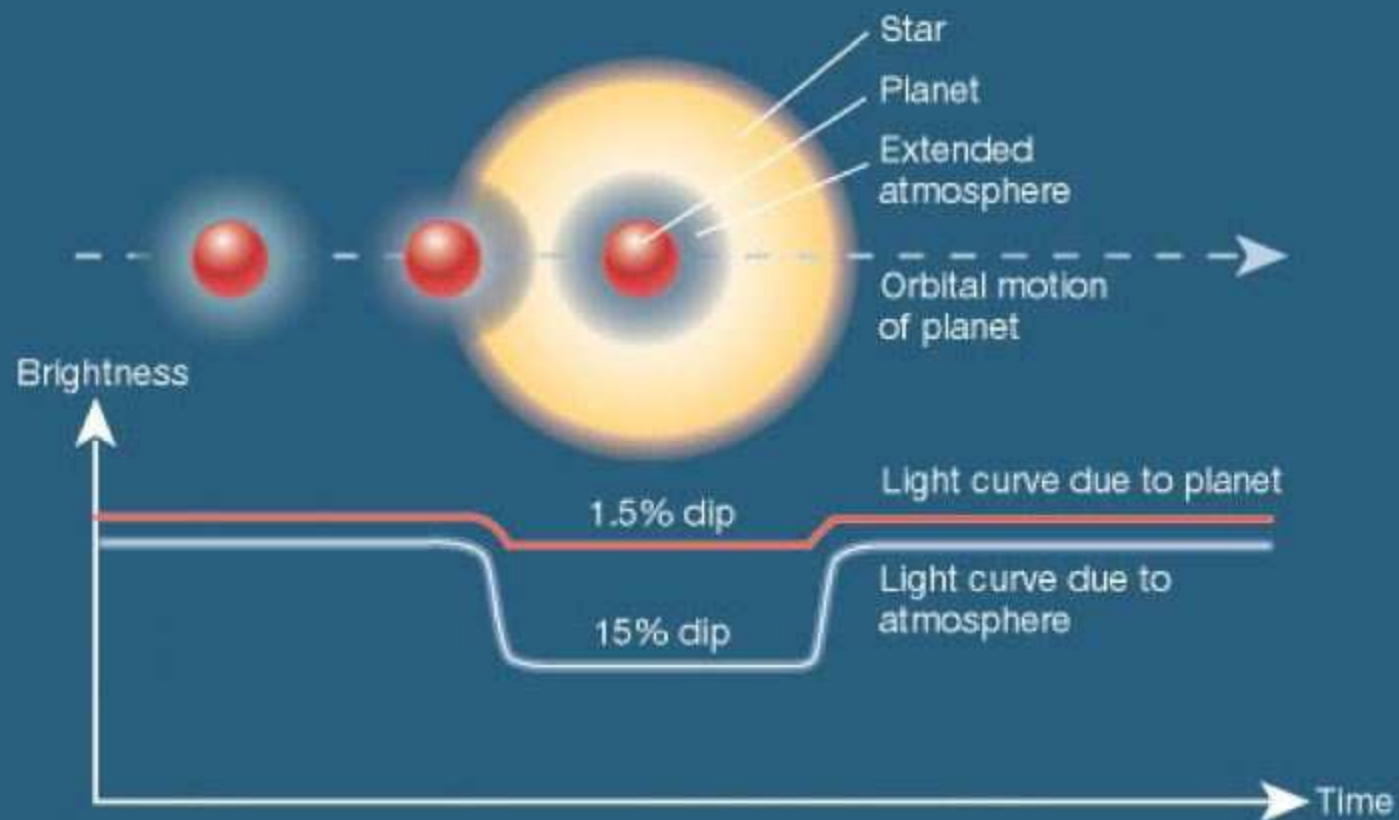


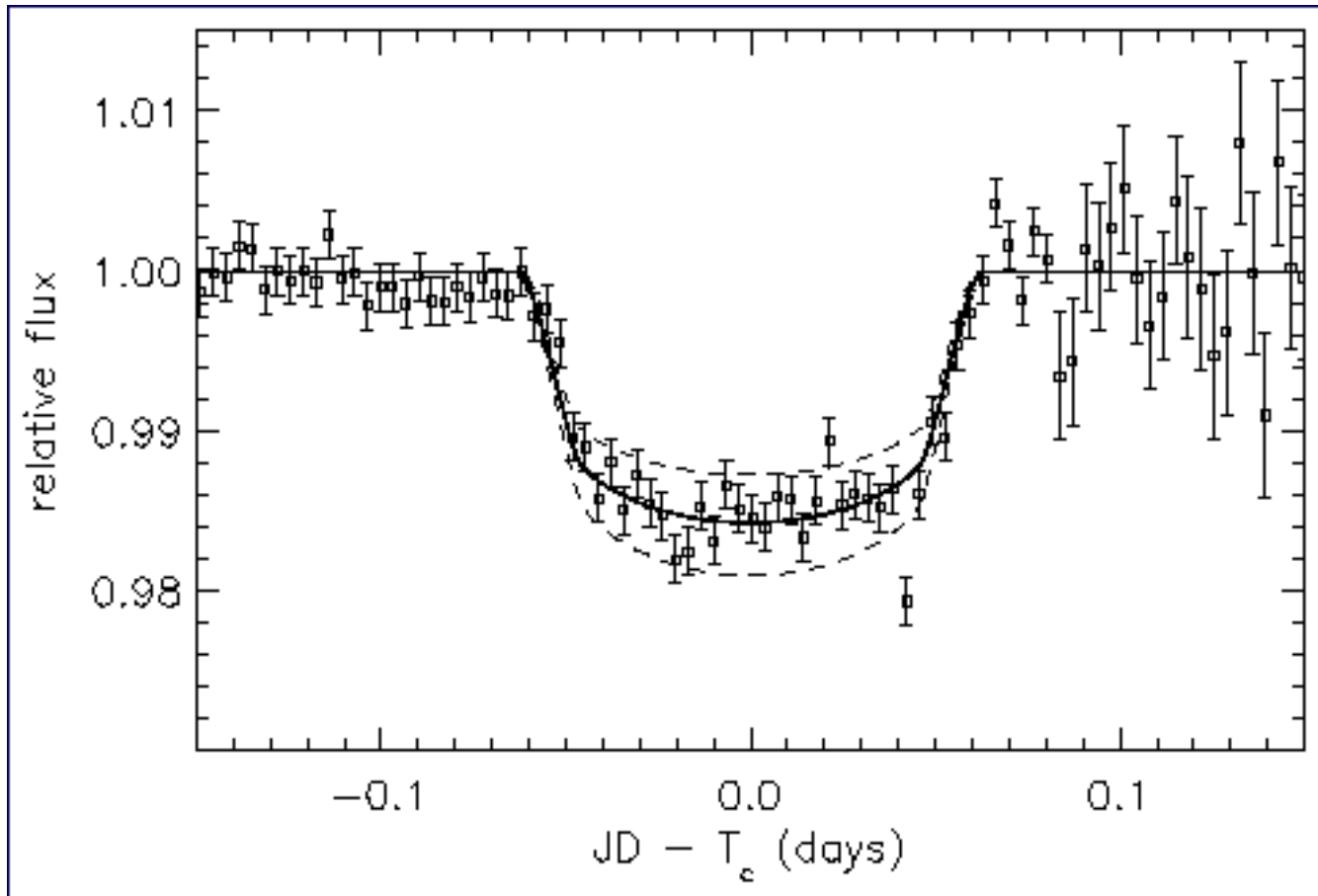
Light curve of Kepler-6b. The dip represents the transit of the planet. Image via [Wikimedia Commons](#).

Stjerneformørkelse



Lysstyrken til stjernen svekkes typisk med et par prosent.





Observerd lysstyrke for stjernen HD 209458 idet en planet passerer foran den. Målingene viste at den var 1,6 ganger så stor som Jupiter med en avstand på bare 0,05 AE fra stjernen.

Kepler - 9

Første system
med flere
formørkende
planeter

Kepler - 9c

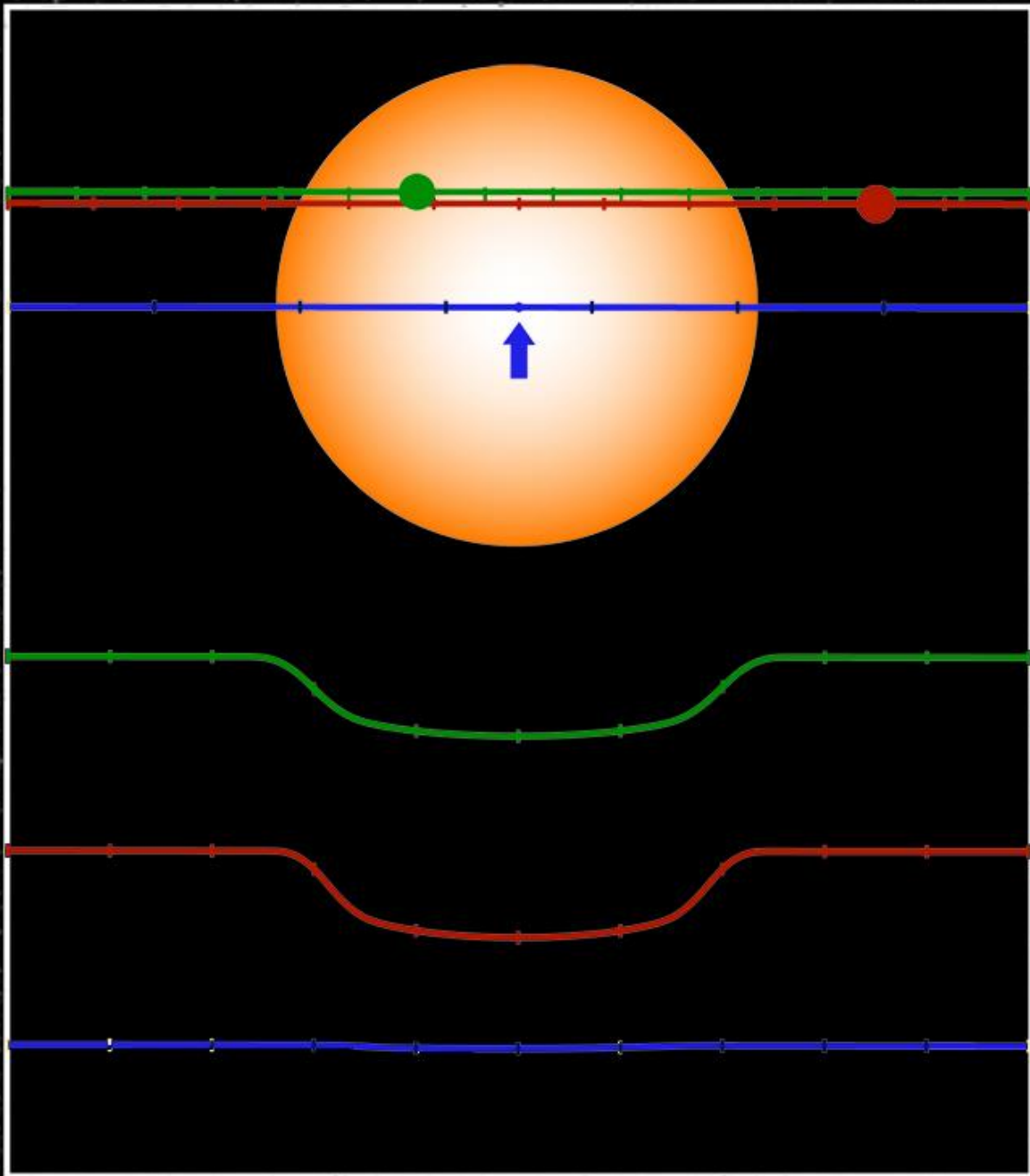
● 38,9d omløb

Kepler - 9b

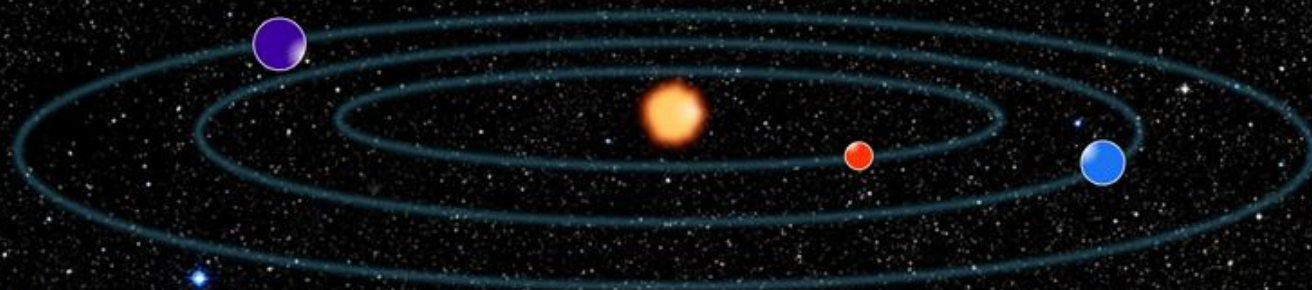
● 19,2d omløb

Mulig superjord

• 1,6d omløb



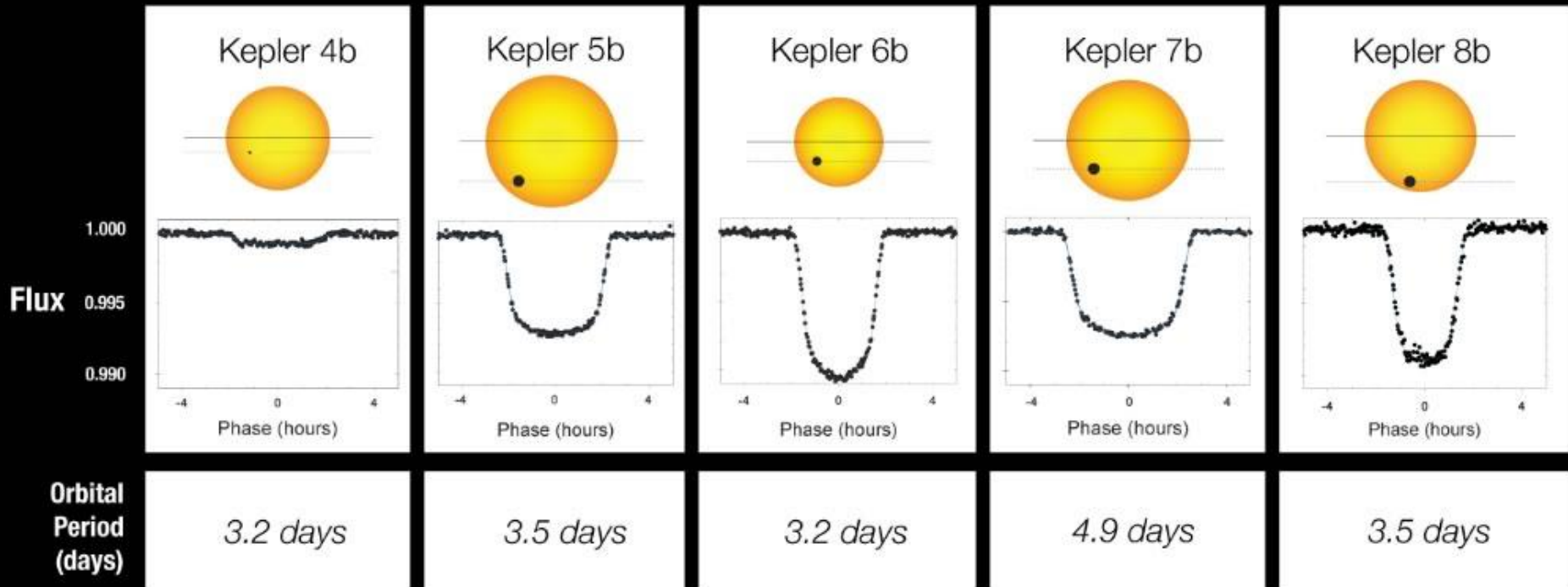
Slik skjernes planetene fra hverandre



Ulik omløpstid
Ulikt lysfall
Ulik varighet

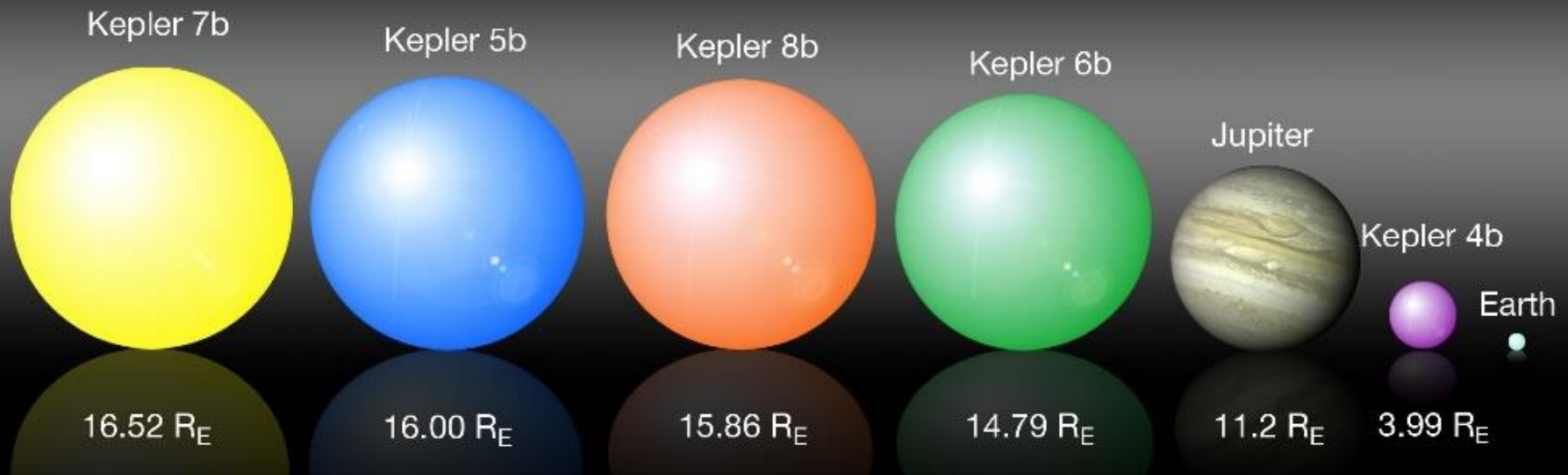


Transit Light Curves

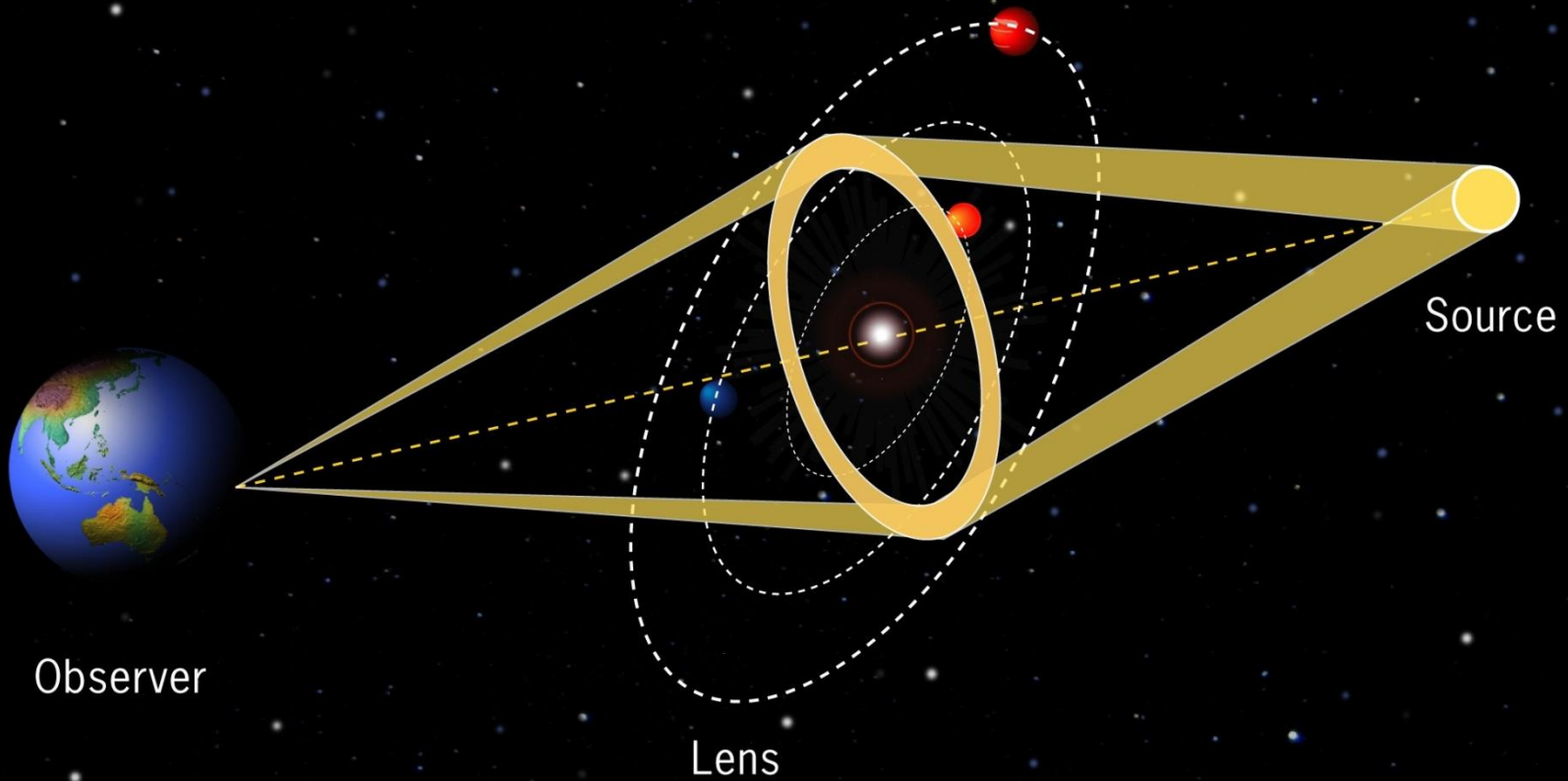


Stjerneformørkelser observert med Kepler romteleskopet.
Størrelsen av planetene som forårsaket formørkelsene, er vist på neste lysbilde.

Planet Size

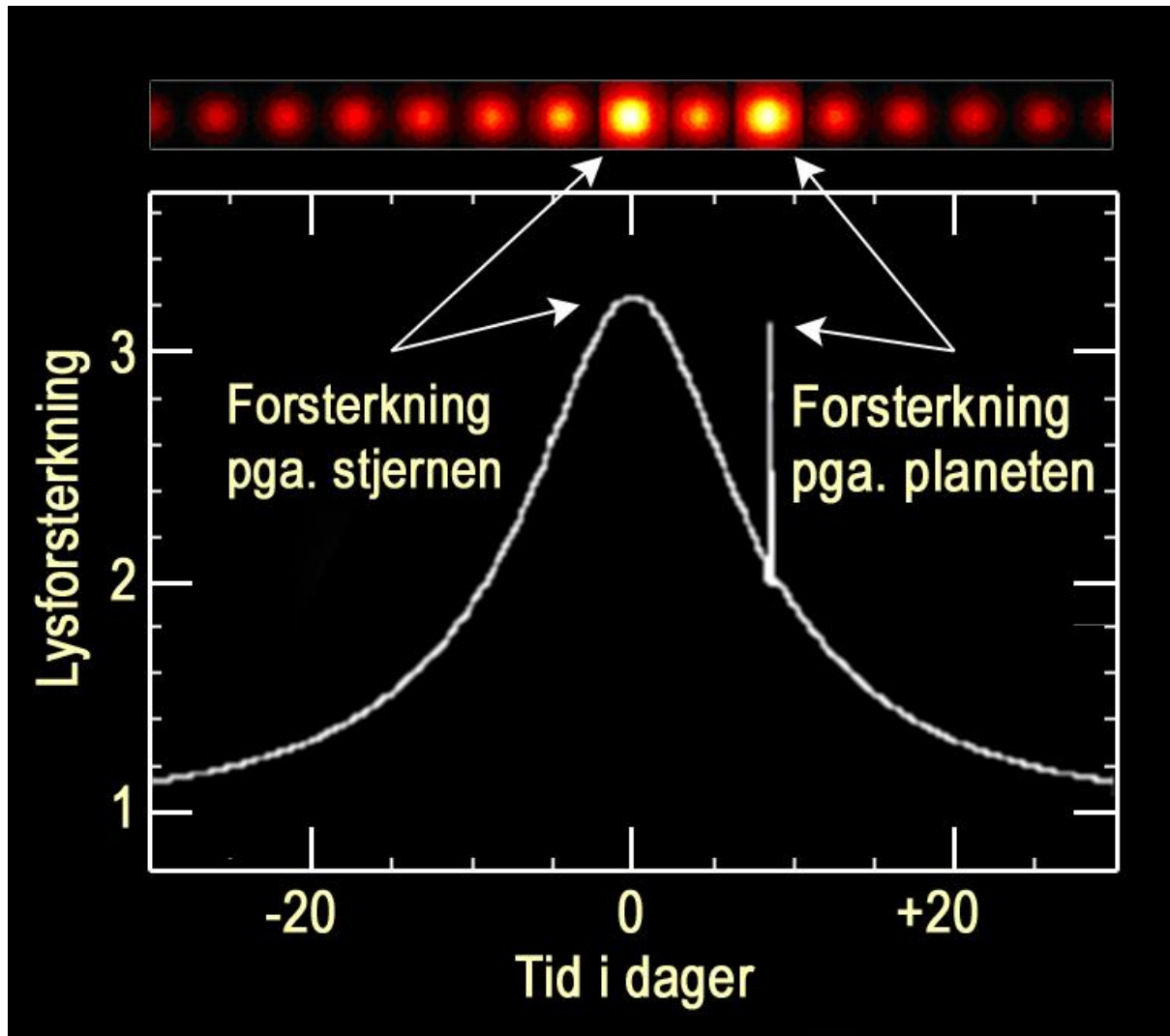


Størrelsen av planetene som forårsaket formørkelsene på forrige lysbilde.



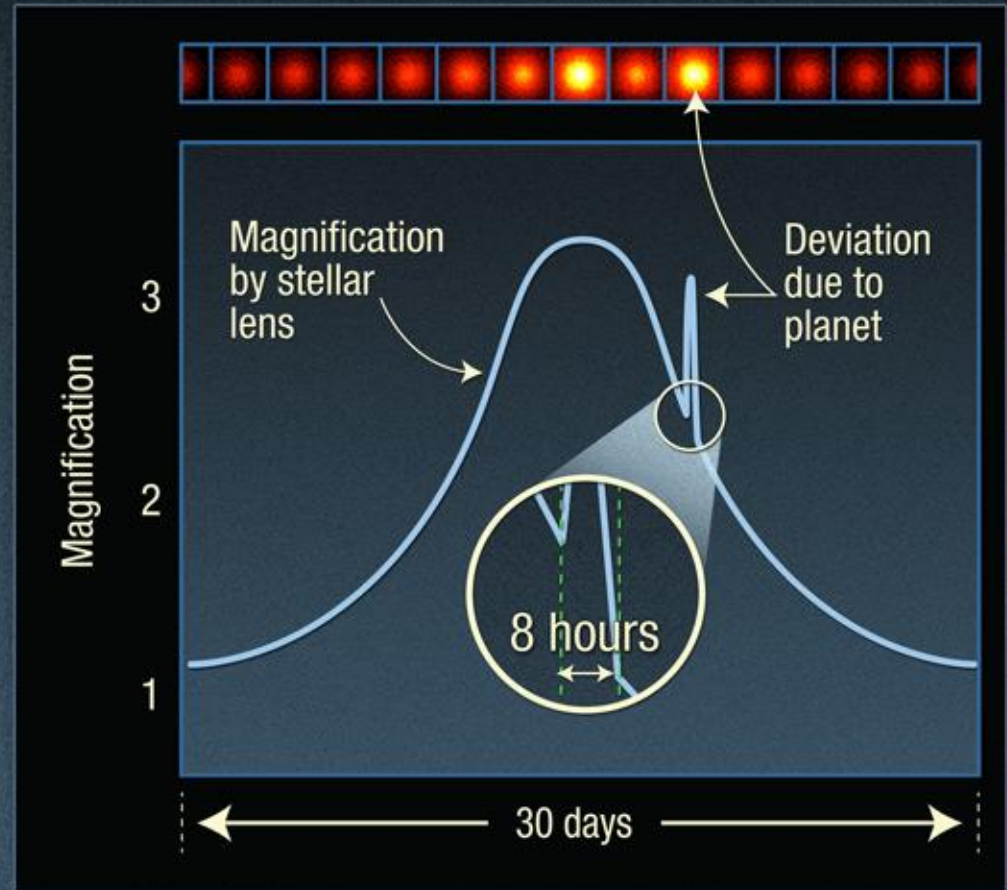
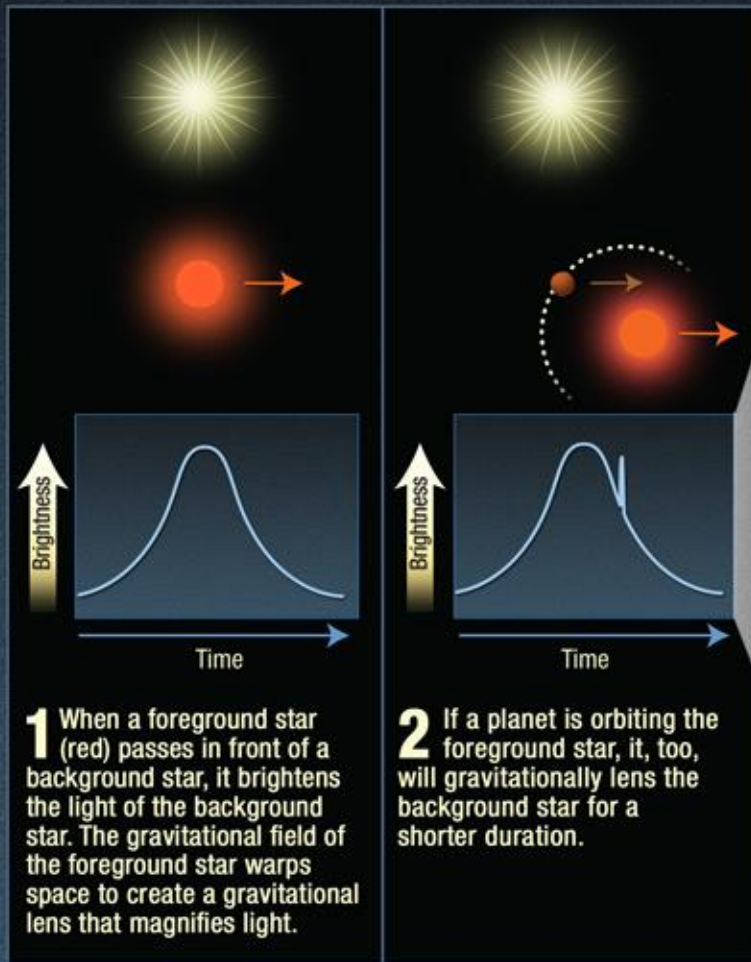
Illustrasjon av gravitasjonell linseffekt

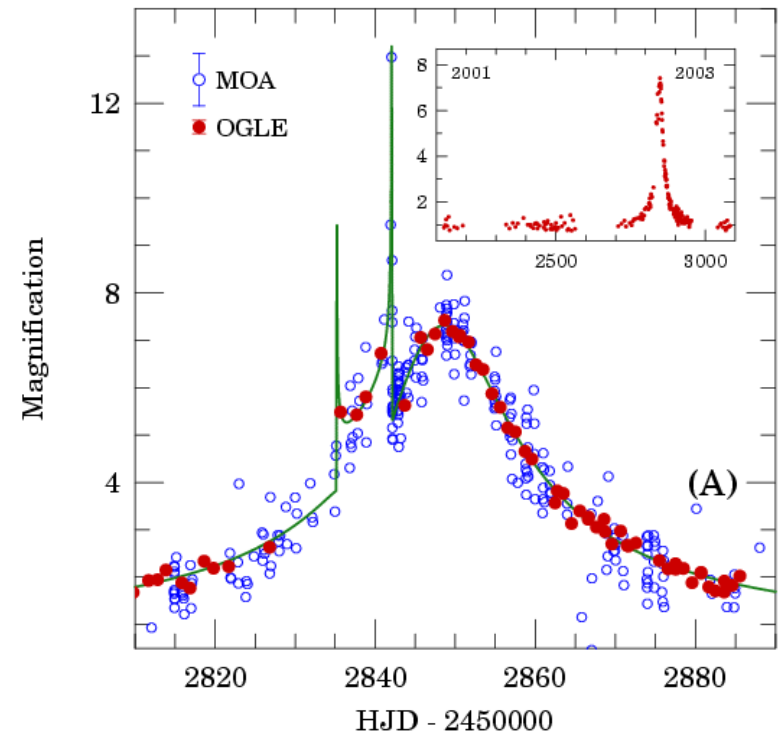
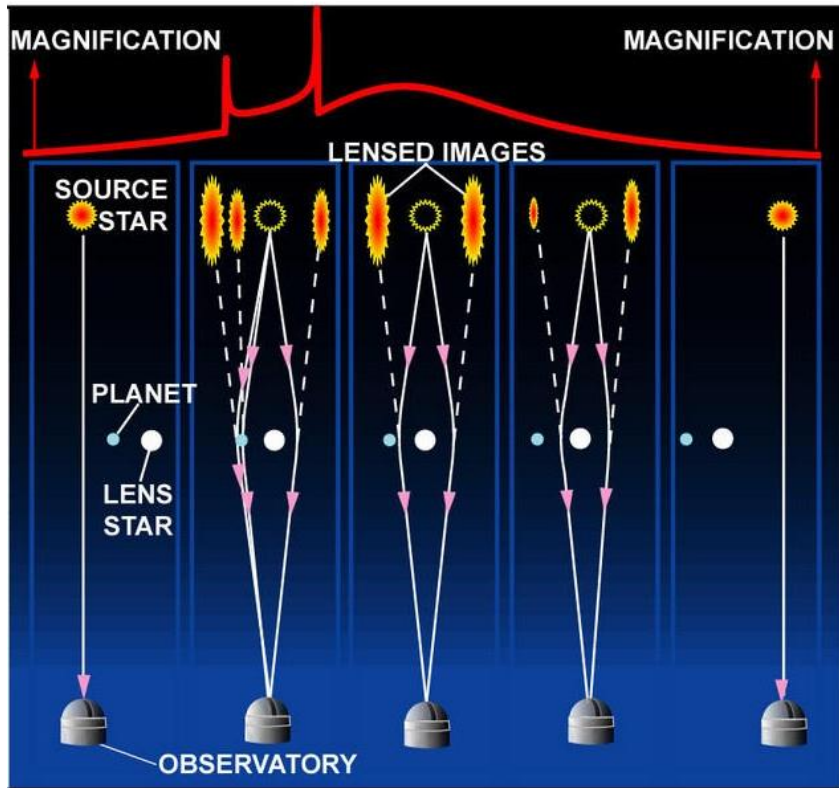
Mikrolinseeffekt



Lyskurven viser hvordan intensiteten varierer med tiden når en stjerne passerer rett foran en bakenforliggende lyskilde. Det kan oppstå en kortvarig intensitetsøkning dersom også en planet i bane rundt stjernen bidrar til å fokusere lyset.

Extrasolar planet detected by gravitational microlensing

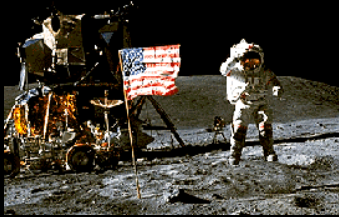




Observernt intensitet for stjernen HJD 2450000 da en rød dvergstjerne og en planet i bane rundt dvergstjernen passerte foran den. Den grønne kurven er den beregnete intensitetsvariasjonen for stjernen.

Just how far are these new planets?

IF YOU WANTED TO RADIO HOME



from the Moon...



it would take
one second



from Mars...



it would take
ten minutes



from the nearest
extrasolar planet...



it would take
over ten years!

FOR YOUR WORDS TO REACH EARTH

Komitéen for Kavliprisen i astrofysikk 2024 skriver blant annet:

«Vitenskapen om eksoplaneter har beveget seg fra
de første registreringer av kjempeplaneter
i bane rundt sol-liknende stjerner,

til å vise oss et mangfold av eksoplaneter og deres egenskaper,
og hvordan vi kan karakterisere deres atmosfærer fysisk.

Det siste ti-året har vist oss en rask utvikling av dette forskningsfeltet.

En ny type planeter – super-jordkloder – er blitt oppdaget,
og det ble innsett at

planeter med mindre masser enn kjempeplanetene er vanlige.

Melkeveien inneholder over hundre milliarder planeter,
der de som bare har masser opp til litt større enn jordas masse
er de mest vanlige.

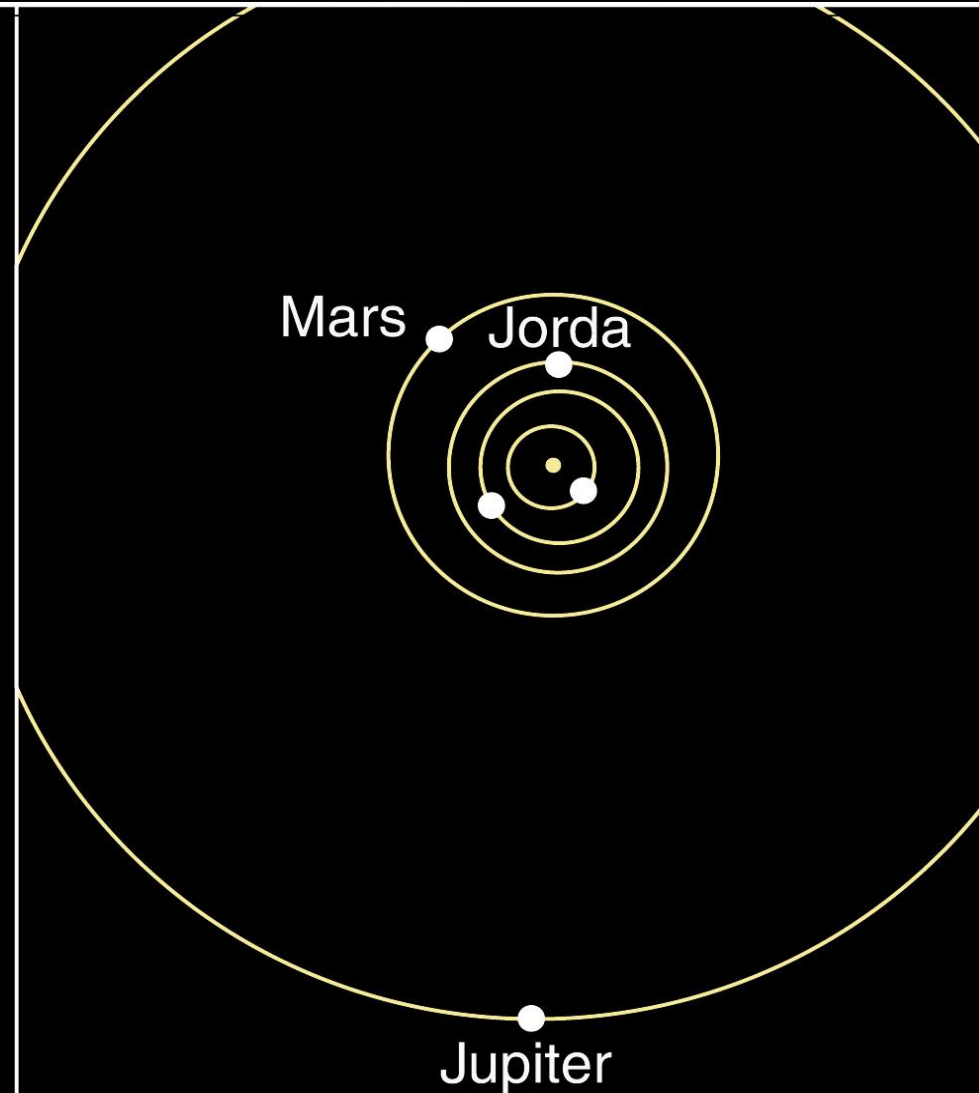
Bestemmelser av planetenes masse og radius
har gjort det mulig å beregne
den gjennomsnittlige tettheten av planetene,
og dermed skjelne mellom gasskjemper og steinplaneter.
I tillegg har astronomene nå greid å lokalisere steinplaneter i den
beboelige sonen til deres moderstjerner,
der det kan eksistere vann på planetenes overflater.

Et ekstrasolart planetsystem som minner om solsystemet

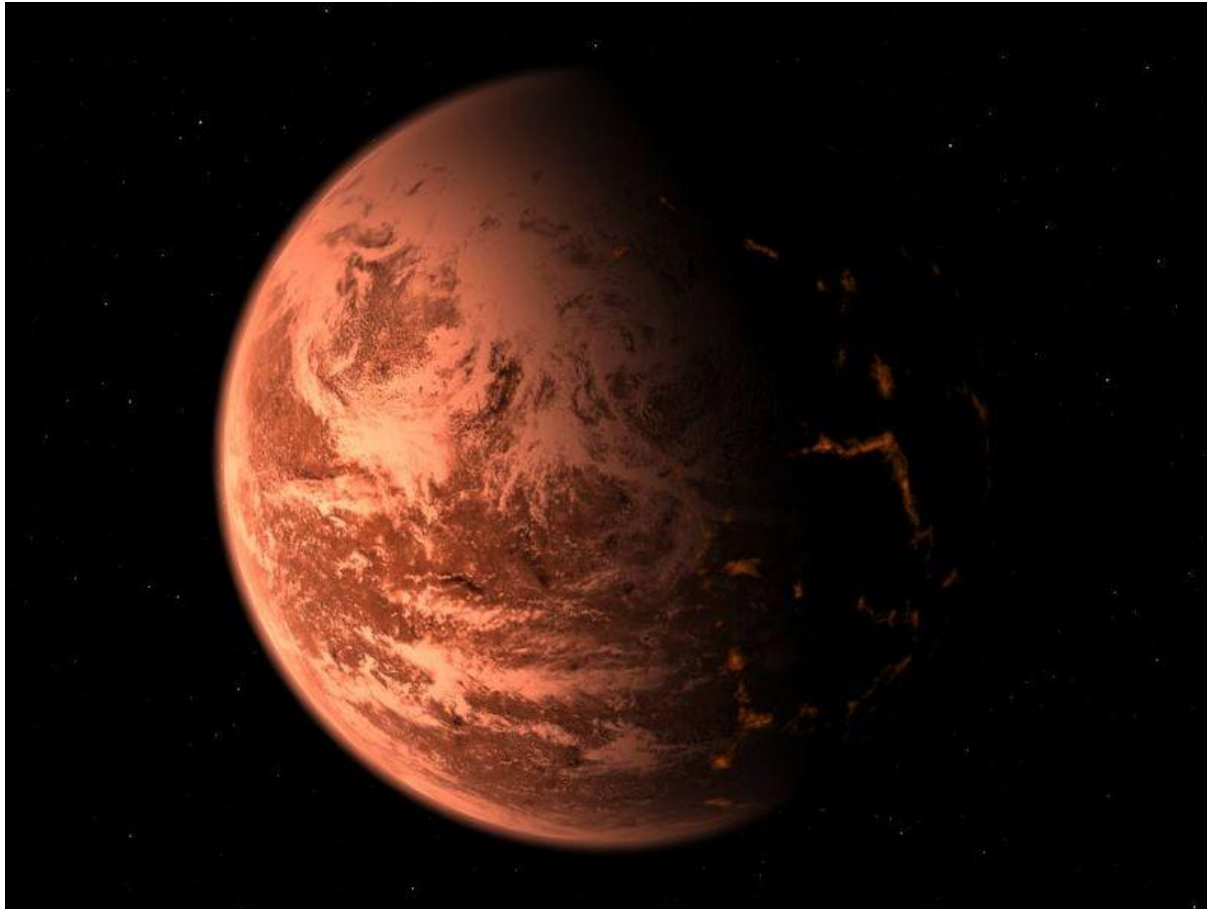
HD 74156 - systemet



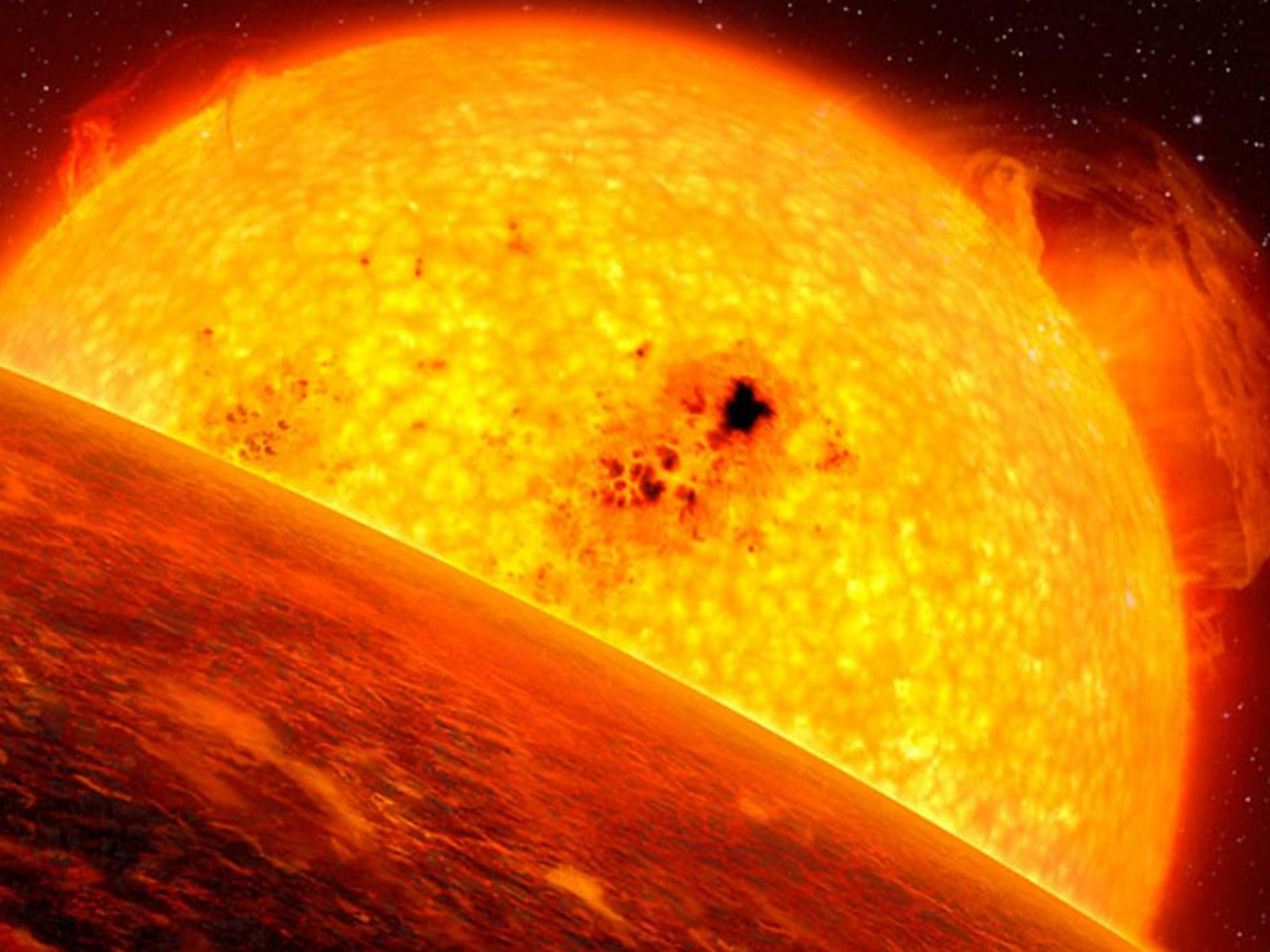
Vårt eget solsystem



På planeten Gliese 876d kan soloppgangen være farlig.
Denne planeten beveger seg i tett bane rundt den hvite dvergstjernen Gliese 876.
Det er oppdaget 3 planeter i bane rundt denne stjernen.

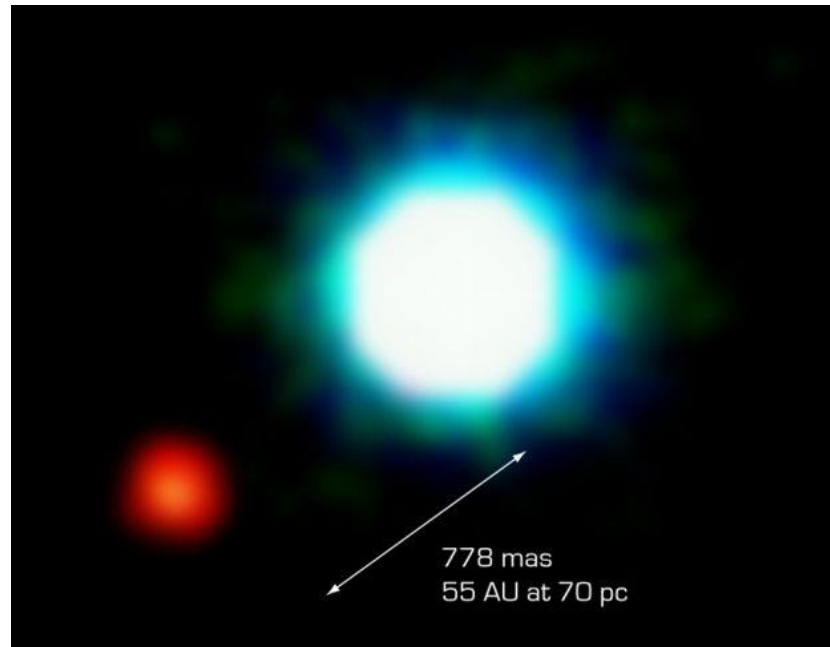


Illustrasjon av planeten Gliese 876d
På neste bilde er en illustrasjon av en soloppgang på Gliese 876.





2004: De første fotografiene av planeter utenfor solsystemet



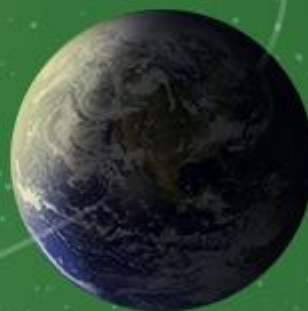
Den røde flekken er trolig en planet i bane rundt den brune dvergstjernen 2M1207 som her er avbildet som den store, hvite flekken. Vinkelavstanden mellom planeten og den brune dvergen er 778 tusendels buesekunder = 0,2 tusendels grad. Stjernen er 70 parsec = 230 lysår fra Sola. Det betyr at planeten er 55 ganger så langt fra stjernen som Jorda er fra Sola eller dobbelt så langt som Neptun er fra Sola.

Habitable Zone

TOO HOT



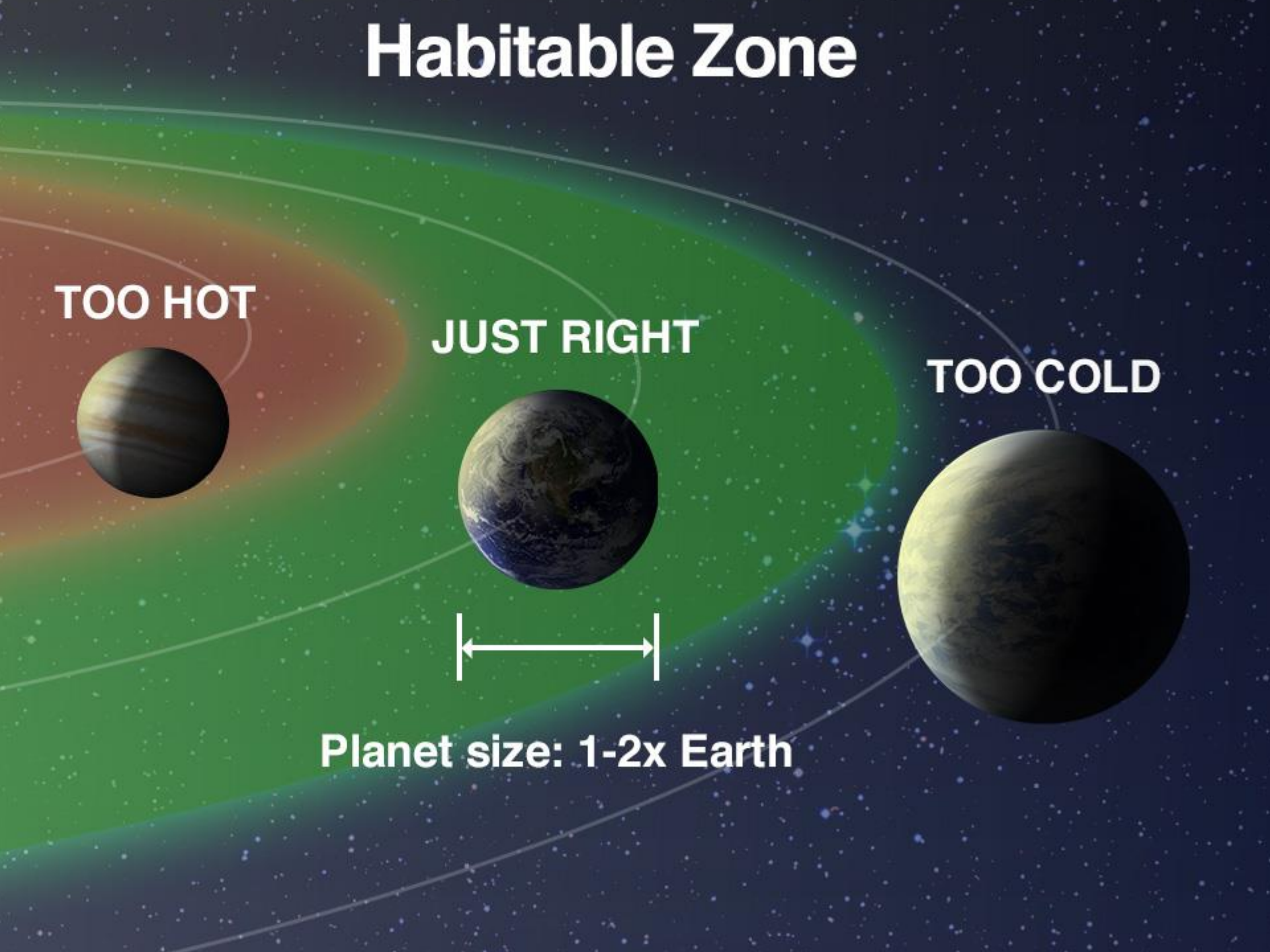
JUST RIGHT



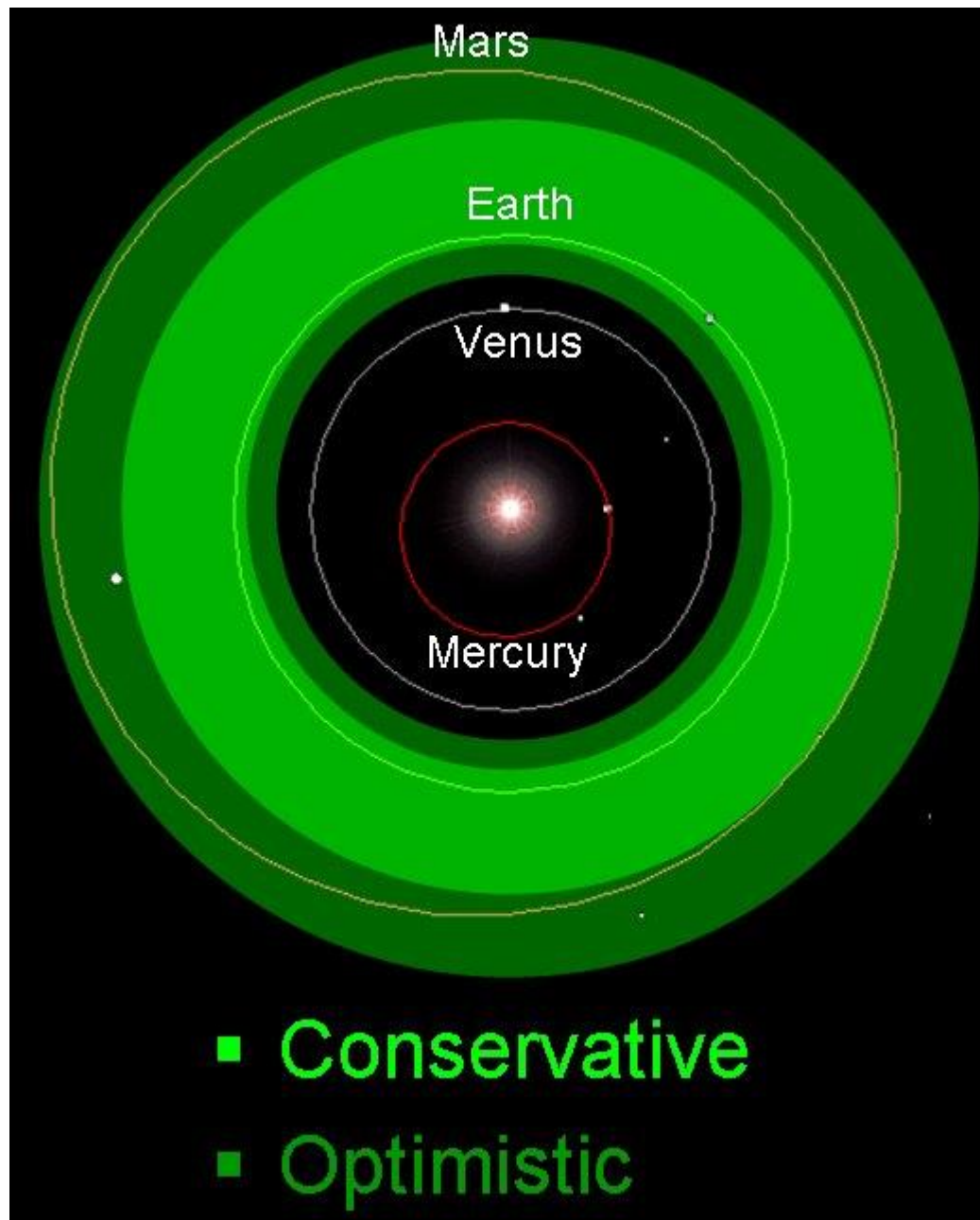
TOO COLD



Planet size: 1-2x Earth



Den beboelige sonen i solsystemet



Kepler-22 System

Solar System

Habitable Zone



Kepler-22b

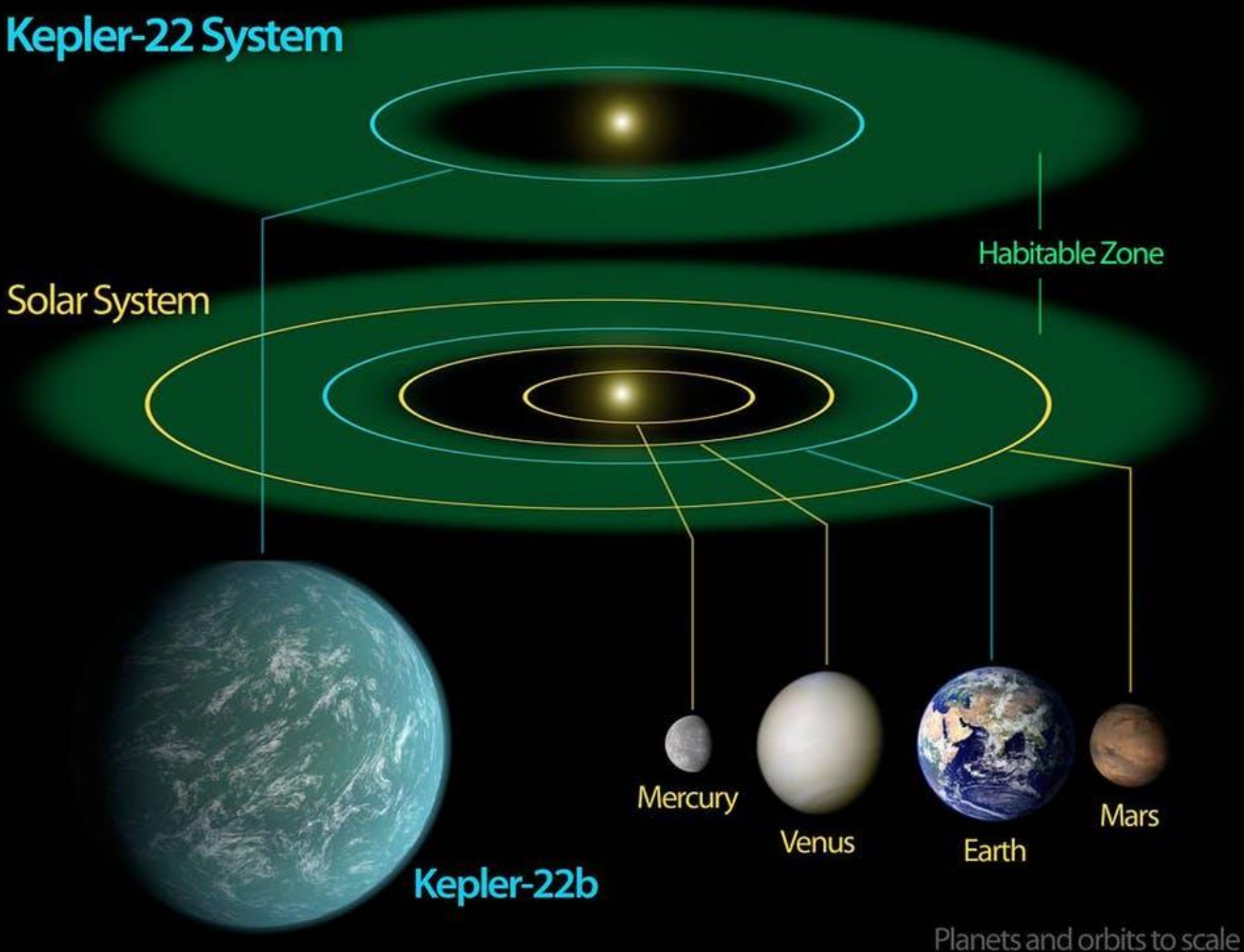
Mercury

Venus

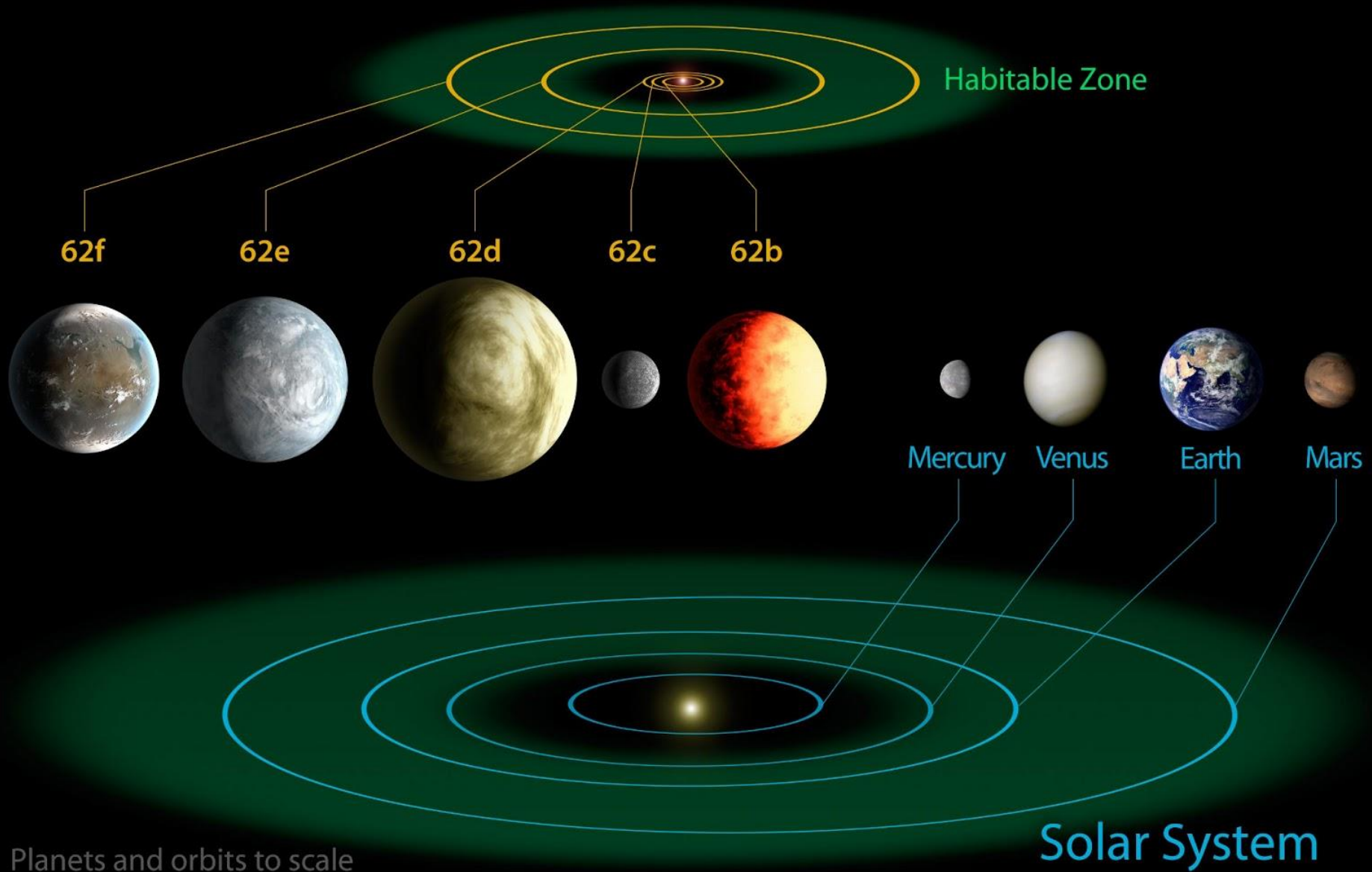
Earth

Mars

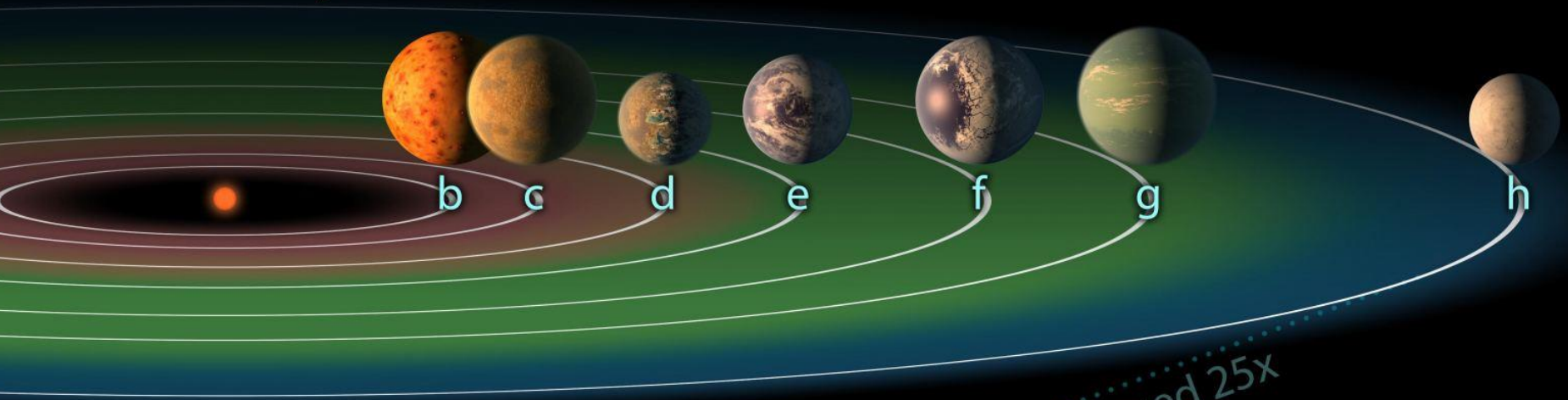
Planets and orbits to scale



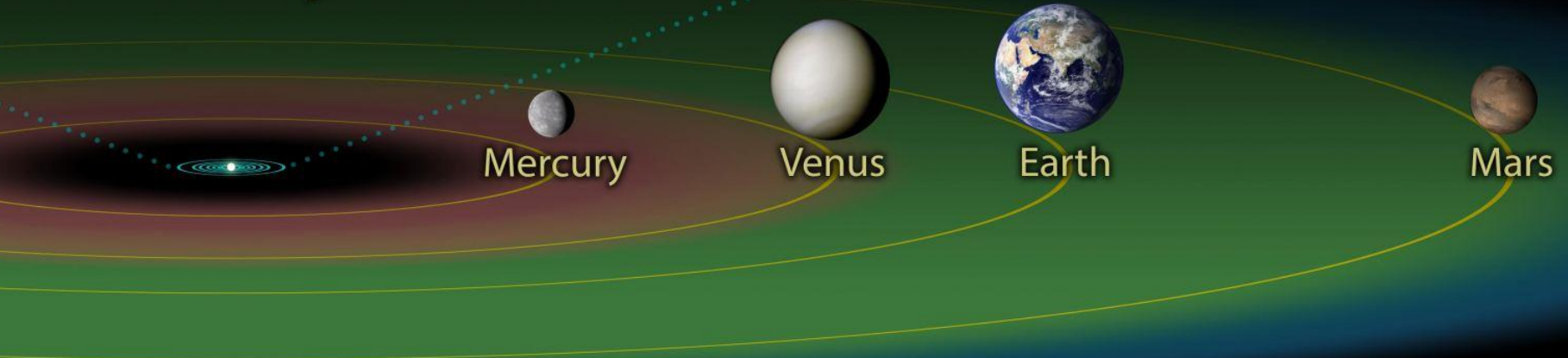
Kepler-62 System



TRAPPIST-1 System



Inner Solar System



I vår tid er spektroskopiske analyser
av stråling fra moderstjernen
som har passert gjennom atmosfæren til en planet
når den passerer foran stjernen,
et forskningsfelt i hurtig utvikling.

Seager og Charbonneau har vært pionerer i å utvikle metoder
for å undersøke hva slike atmosfærer består av,
samt å registrere infrarød stråling fra planetene.
Dette har gjort det mulig å oppnå informasjon
om hva slags stoffer atmosfærene består av.

Det molekylære fingeravtrykkene fra atmosfærene
til gasskjemper og steinplaneter
er i ferd med å bli synlige for oss,
slik at man kan lese den informasjonen de inneholder.

And how will we know a planet supports life?

Look for evidence of oxygen

O₃ Ozone, produced by plants, algae

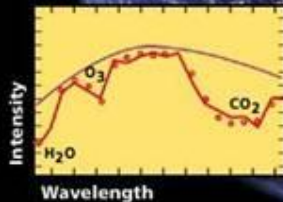


Look for liquid water

H₂O Liquid water



Analyze the reflected light from the planet to see if the planet has an atmosphere

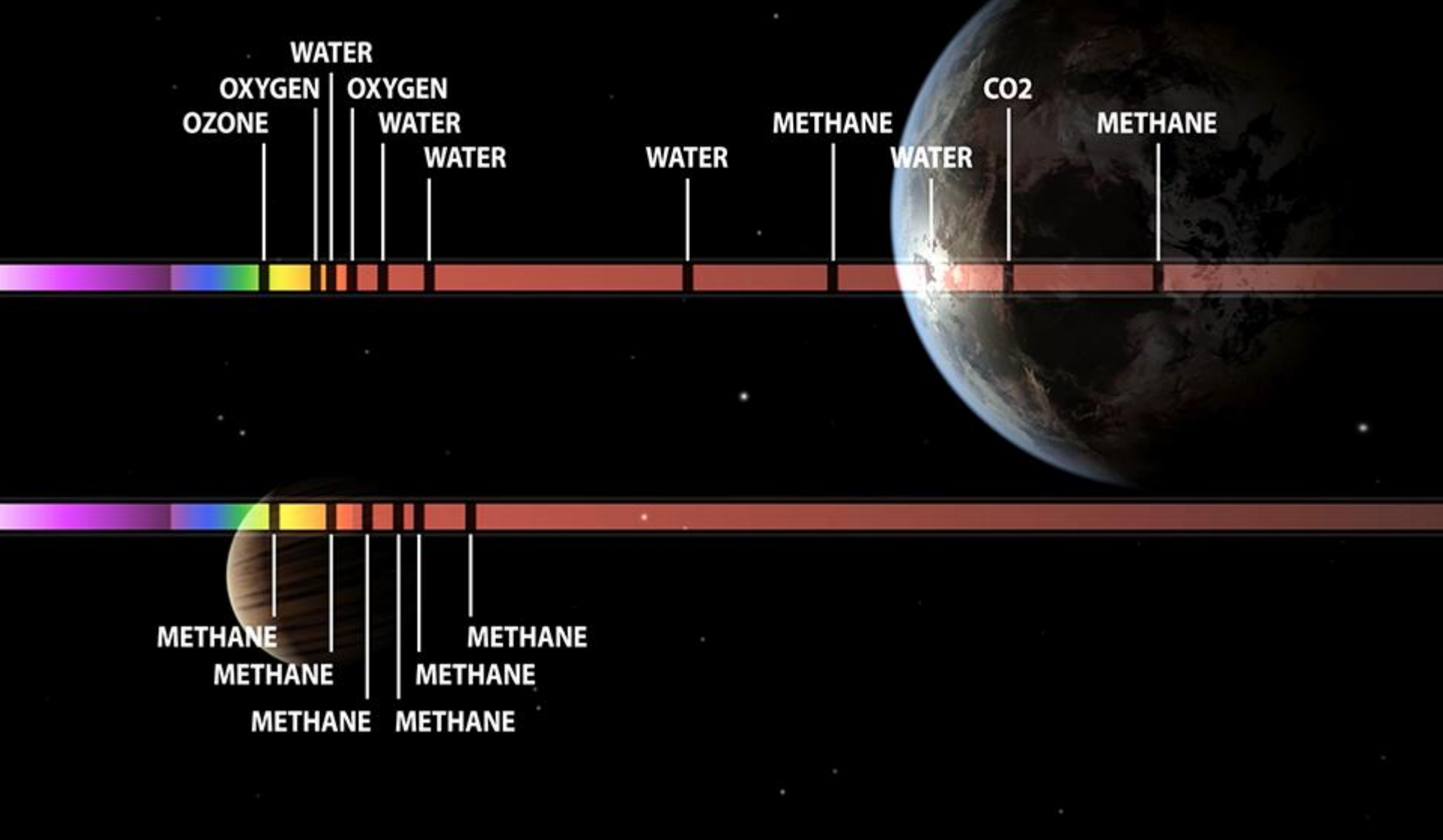


Look for signs of biological activity (methane)



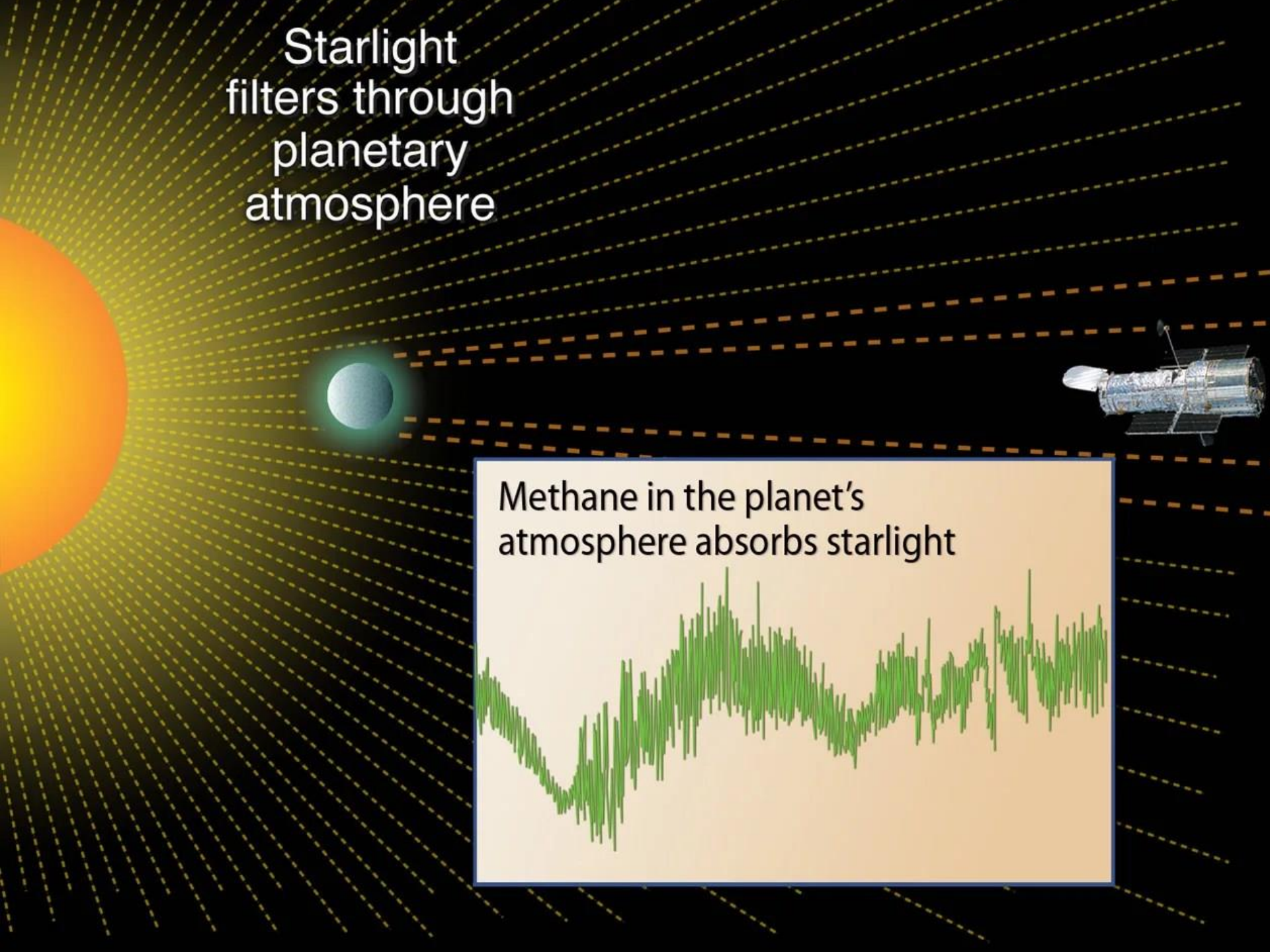
Methane produced by living organisms

and rule out other explanations.



Spektroskopiske tegn på forhold som kan tyde på liv. Spektrallinjer fra oson, oksygen, vann, metan og kulldioksyd. Bølgelengden øker mot høyre. Den ultrafiolette delen av spekteret er til venstre og den infrarøde til høyre. Den synlige delen er markert med en regnbue.

Starlight
filters through
planetary
atmosphere

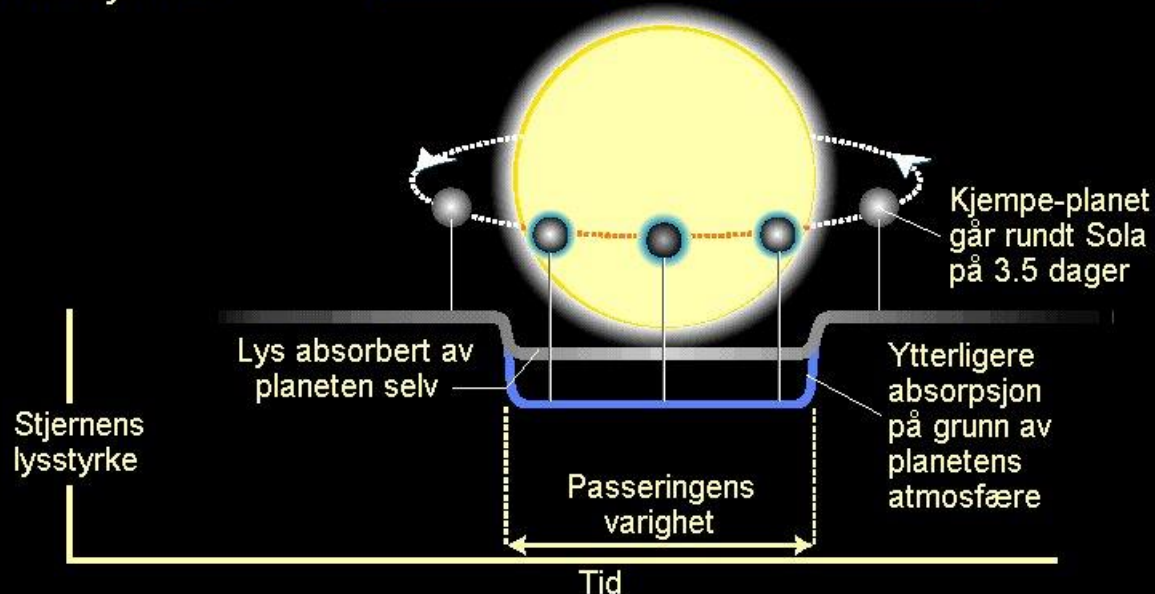
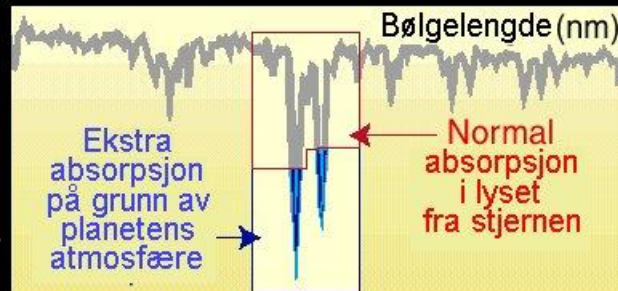


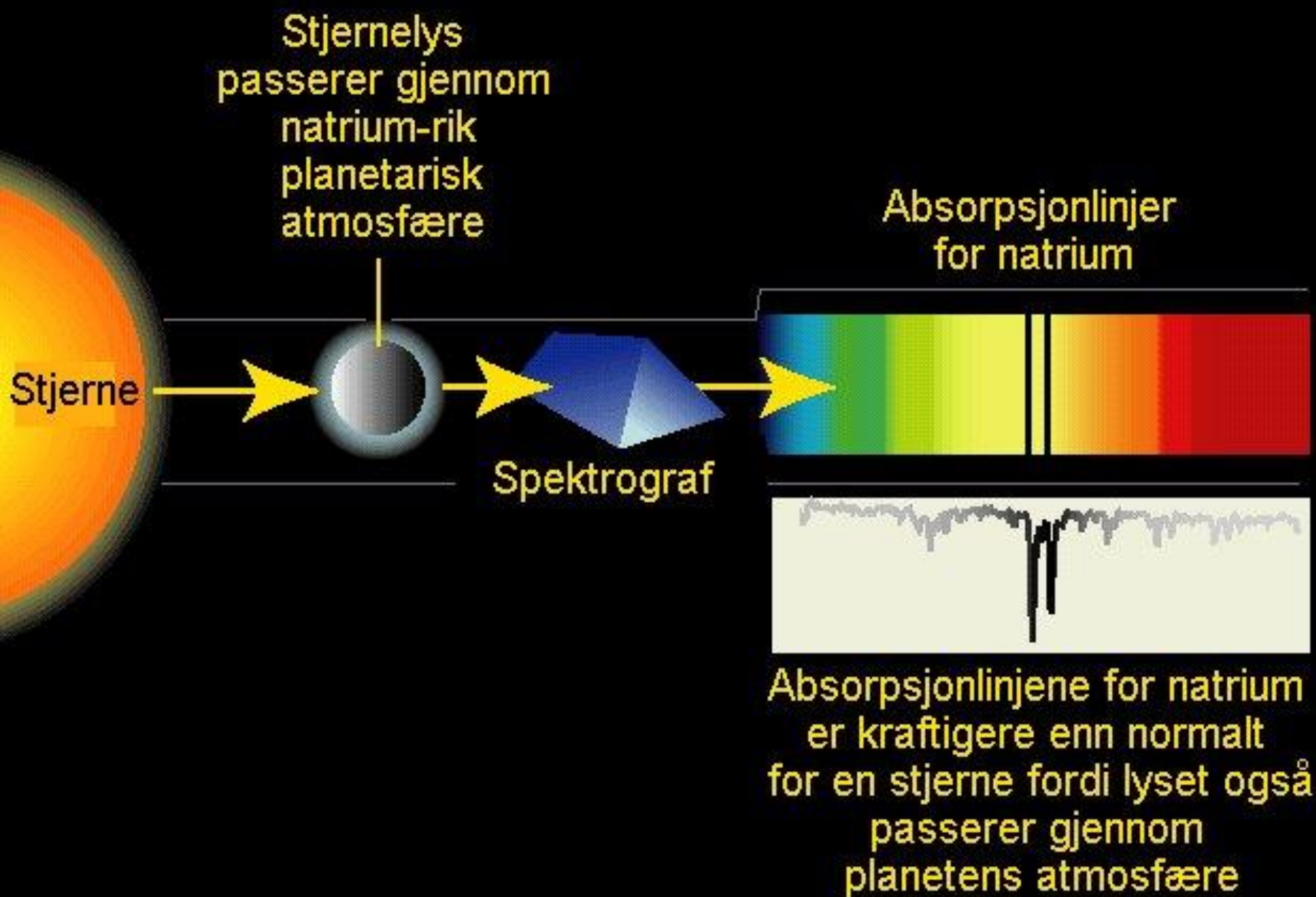
Methane in the planet's
atmosphere absorbs starlight

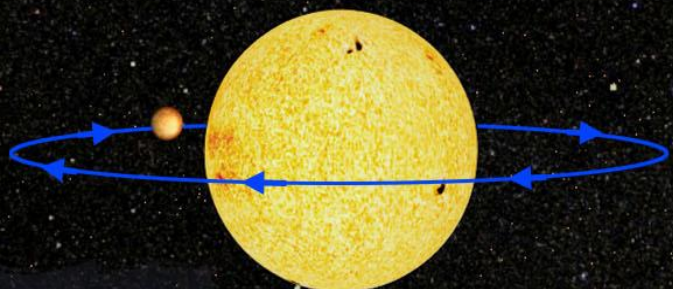


Observasjon av atmosfæren til den ekstrasolare planeten HD 209458b

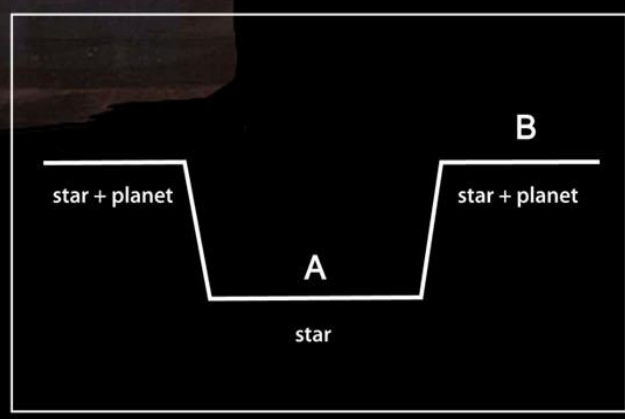
HST detekterer ekstra natrium absorpsjon fordi lys passerer gjennom en planets atmosfære når planeten passerer foran stjernen





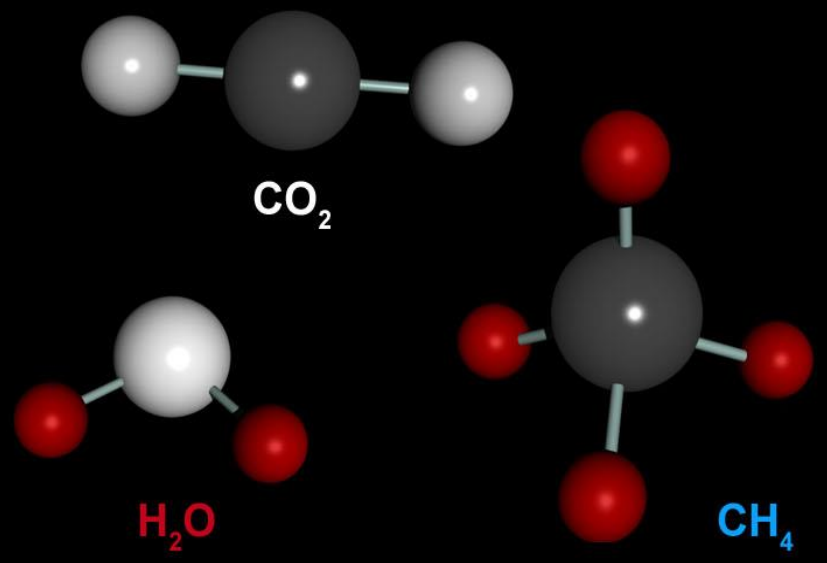
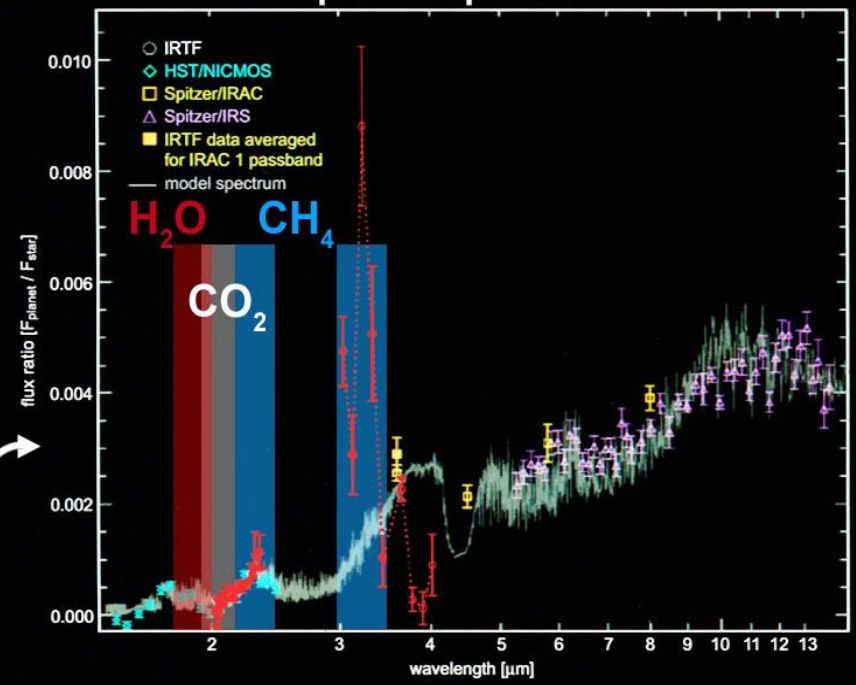


light



time

planet spectrum



Planeten Kepler-36c (representert ved Neptun) sett fra en by (representert ved Seattle) på planeten Kepler-36b når de to planetene er nærmest hverandre.

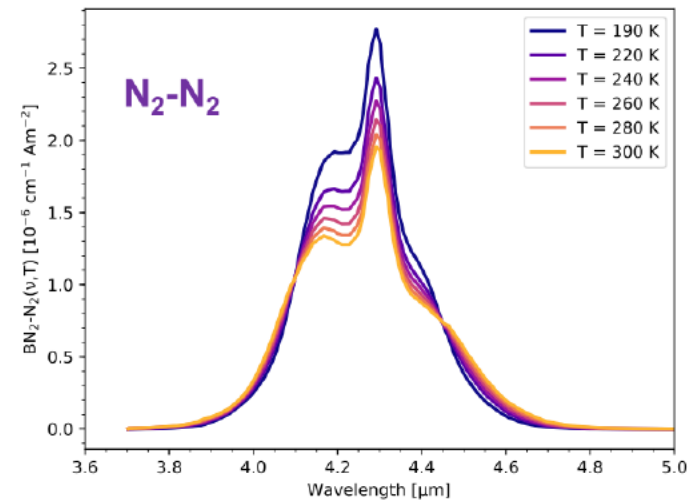
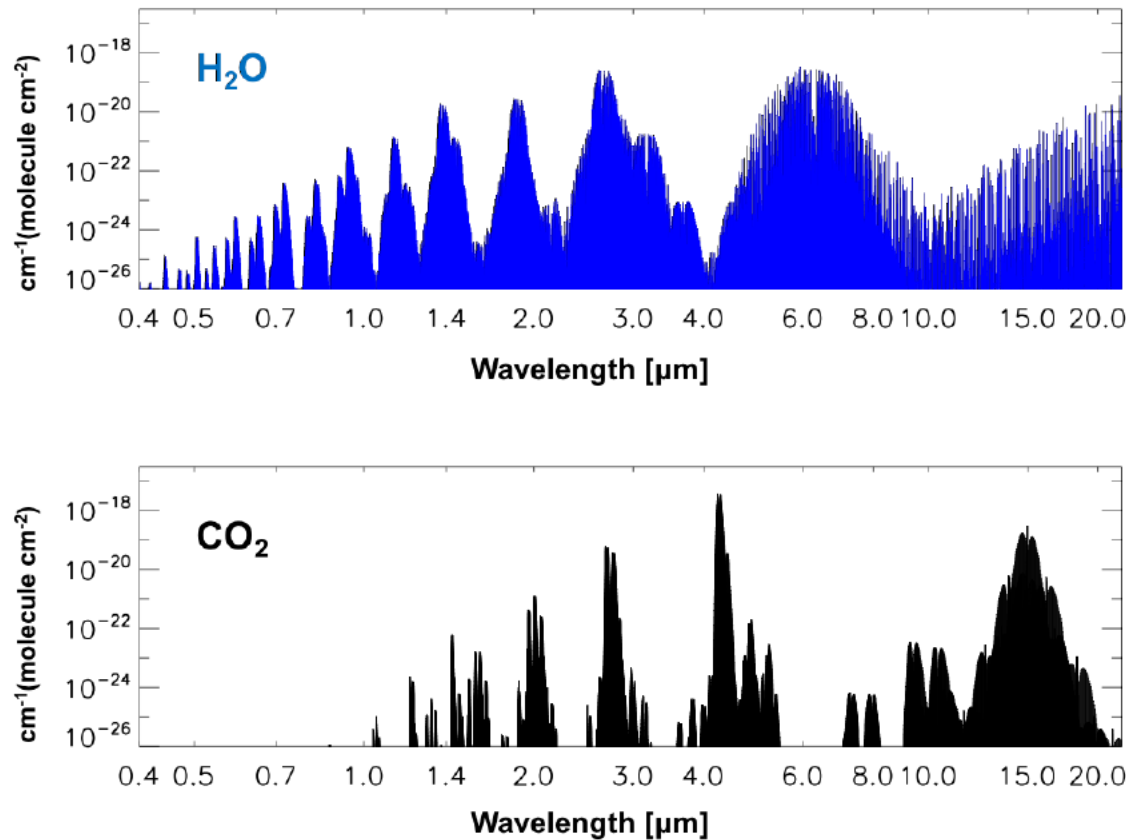


Det neste store skrittet består i å registrere molekylære tegn til liv – en oppgave som innebærer store tekniske utfordringer.

Seager og Charbonneau har ledet an også i denne sammenhengen, og kommet med forslag til ny instrumentering.

Dette vil danne grunnlag for både nåværende og fremtidig utforskning av eksoplaneter og deres atmosfærer.

Spor av liv på en planet



Figuren viser spektre fra vanndamp, kulldioksid og nitrogen.
Slike spektrale signaler fra atmosfæren til en planet kan være tegn til liv på planeten.

Drakes likning

I 1961 presenterte Frank Drake sin likning ved et kollokvium i National Radio Astronomy Observatory, Green Bank I USA.

Dette er en likning for å estimere antall nåværende sivilisasjoner i Melkeveien.

$$N = R f_p f_B f_L f_S f_K L$$

N= antall sivilisasjoner i Melkeveien
som det kan være mulig å kommunisere med.

	Optimistisk	pessimistisk
R = antall stjerner som dannes per år i Melkeveien:	10	1
f_p = andel stjerner med planeter:	1	0,4
f_B = andel planeter som er beboelige:	0,1	0,1
f_L = andel beboelige planeter med liv:	1	1
f_S = andel planeter med liv der det oppstår sivilisasjoner:	1	1
f_K = andel planeter med sivilisasjoner som velger å kommunisere med fremmede:	1	0,1
L = Levetiden til en slik sivilisasjon	10^7	100
N =	10^7	100

Konklusjon:

Det er sannsynligvis mange sivilisasjoner i Melkeveien.

Kommentar 22. oktober 2024

Det er nå oppdaget omtrent 5000 planeter utenfor solsystemet.

Det er i denne gruppen omtrent 1,5 planeter per stjerne.

Det er mellom 200 og 400 milliarder stjerner i Melkeveien,
dvs. mellom 300 og 600 milliarder planeter.

Jordliknende planeter defineres som planeter
med mellom 0,8 og 1,5 jordmasser.

Observasjonsmaterialet tyder på at det er
mellom 10 og 20 milliarder jordliknende planeter i Melkeveien.

Dersom hver tiende slike planet befinner seg
i den beboelige sonen til moderstjernen,
er det mellom 1 og 2 milliarder jordliknende planeter
i den beboelige sonen til moderstjernen, i Melkeveien.

Dersom en av ti slike planeter utvikler liv,
er det mellom 100 og 200 millioner planeter med liv i Melkeveien.

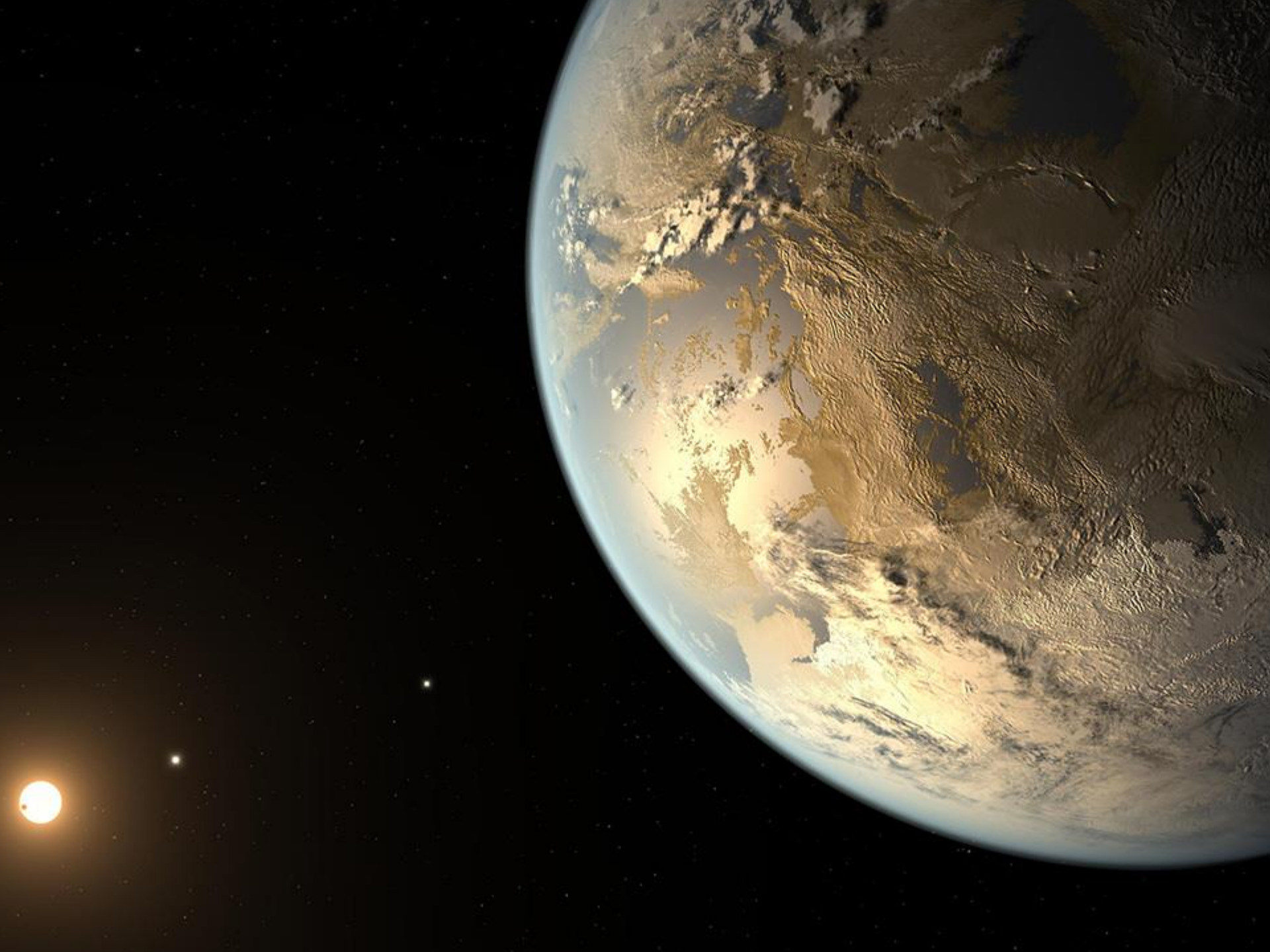
Dersom en av tusen planeter med liv har utviklet
en sivilisasjon som eksisterer nå,
er det mellom 100 tusen og 200 tusen sivilisasjoner i Melkeveien.

Space.com 27.april 2012

Odds of Finding Alien Life Boosted by Billions of Habitable Worlds



According to a recent study, tens of billions of planets around red dwarfs are likely capable of containing liquid water, dramatically increasing the potential to find signs of life somewhere other than Earth.



Det er funnet en planet i bane rundt solas nærmeste stjerne,
Proxima Centauri, omtrent 4 lysår fra Jorda.



Webb's Impact on Exoplanet Research

What are planets around other stars like? What are they made of? How did they form? How different are they from each other and the planets in our solar system?

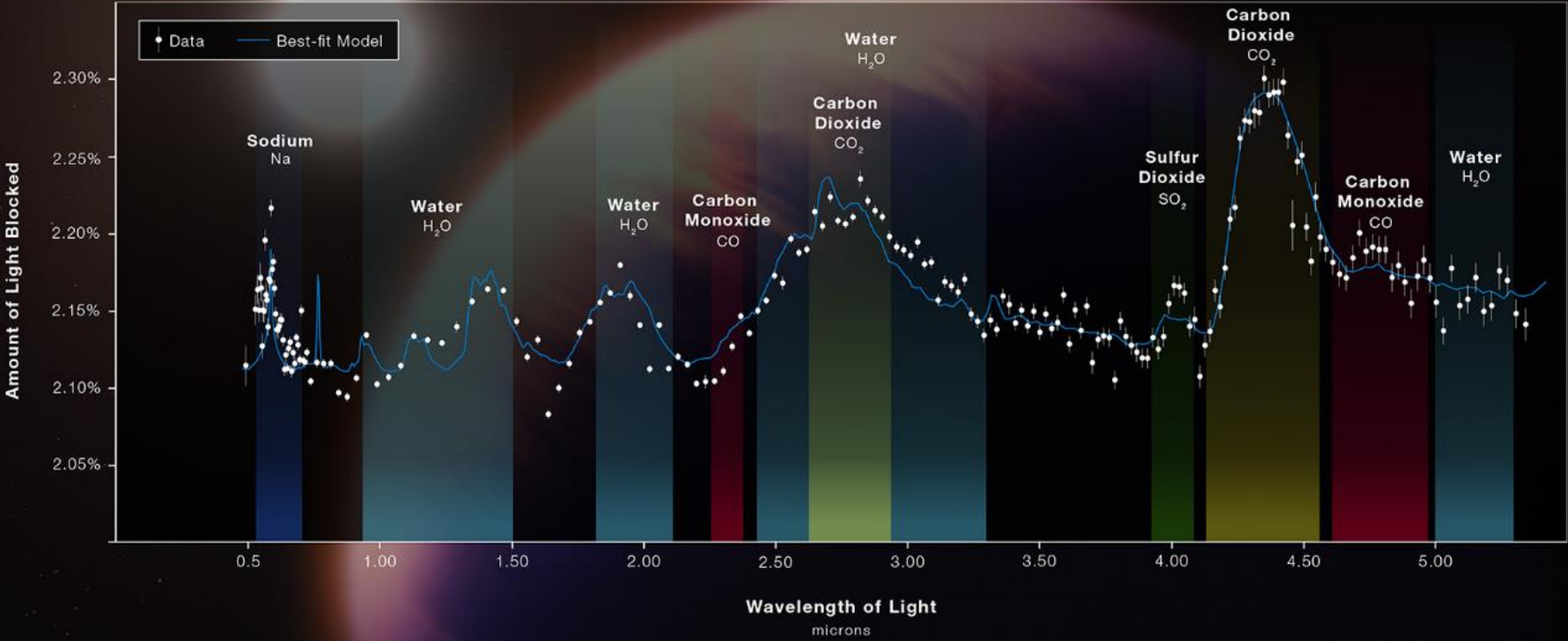
Building on the legacy of NASA's Hubble Space Telescope, Spitzer Space Telescope, and other ground- and space-based observatories, the James Webb Space Telescope is expanding our understanding of exoplanet atmospheres. A few are highlighted below.

- **WASP-96 b:** The first [exoplanet transmission spectrum](#) collected by Webb showed clear signs of water vapor that previous spectra only hinted at. It is the first transmission spectrum that includes wavelengths longer than 1.6 microns with high resolution and accuracy, and the first to cover the entire wavelength range from 0.6 microns (visible red light) to 2.8 microns (near-infrared) in a single shot. WASP-96 b is a gas giant exoplanet.
- **TRAPPIST-1 b:** Webb performed the first [thermal emission](#) observation on any planet as small as Earth and as cool as the rocky planets in our solar system. These observations suggest that the planet does not have a significant atmosphere.
- **WASP-39 b:** Webb detected carbon dioxide and sulfur dioxide in the atmosphere of a gas giant exoplanet for the first time. The detection of sulfur dioxide in the atmosphere of this "hot Saturn" provides evidence of photochemistry – chemical reactions initiated by energetic stellar light.

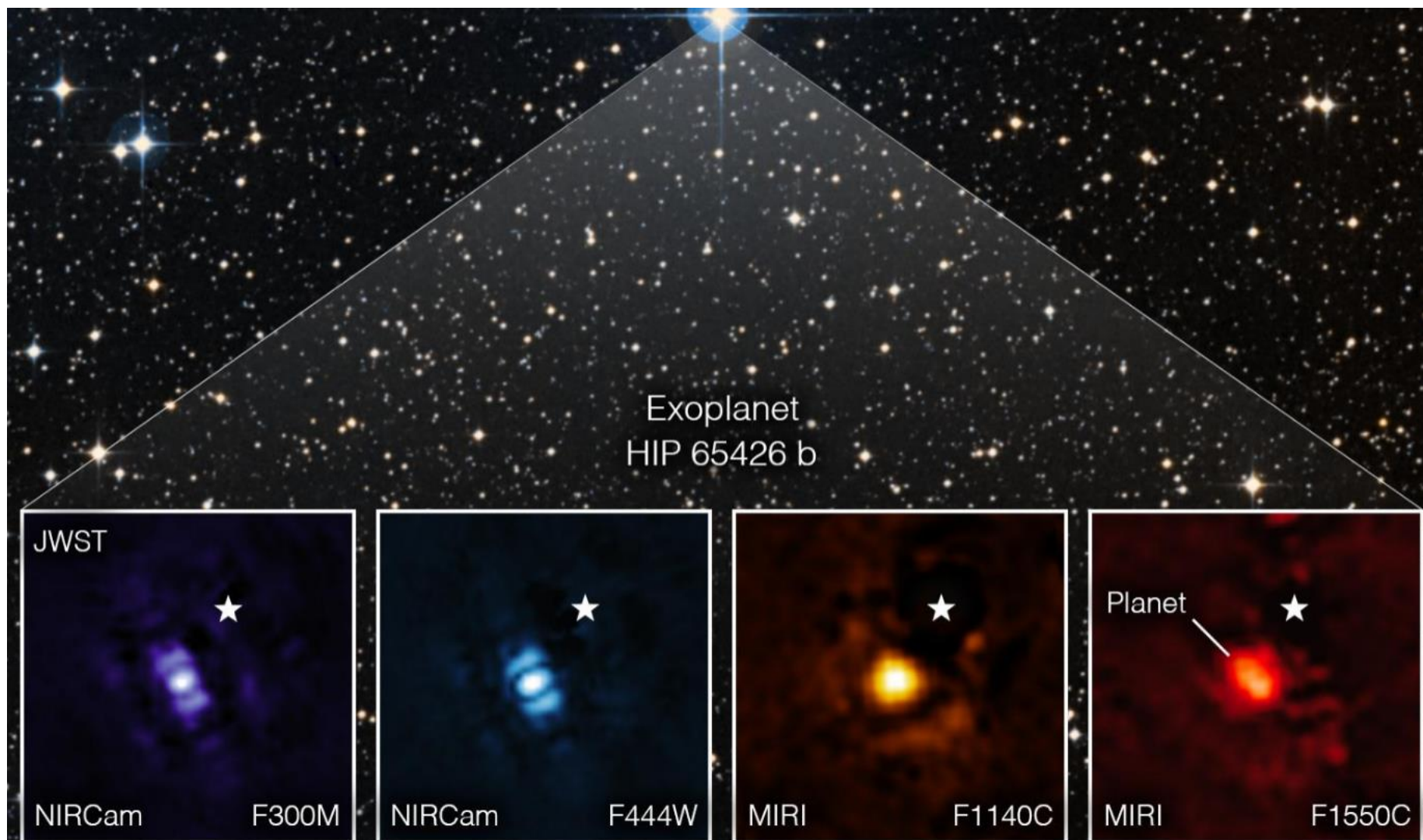
HOT GAS GIANT EXOPLANET WASP-39 b

ATMOSPHERE COMPOSITION

NIRSpec PRISM



Fotografi av en eksoplanet, HIP 65426 b, tatt med to av Webb-teleskopets kameraer. Stjernen er dekket over med en sirkulær skive.

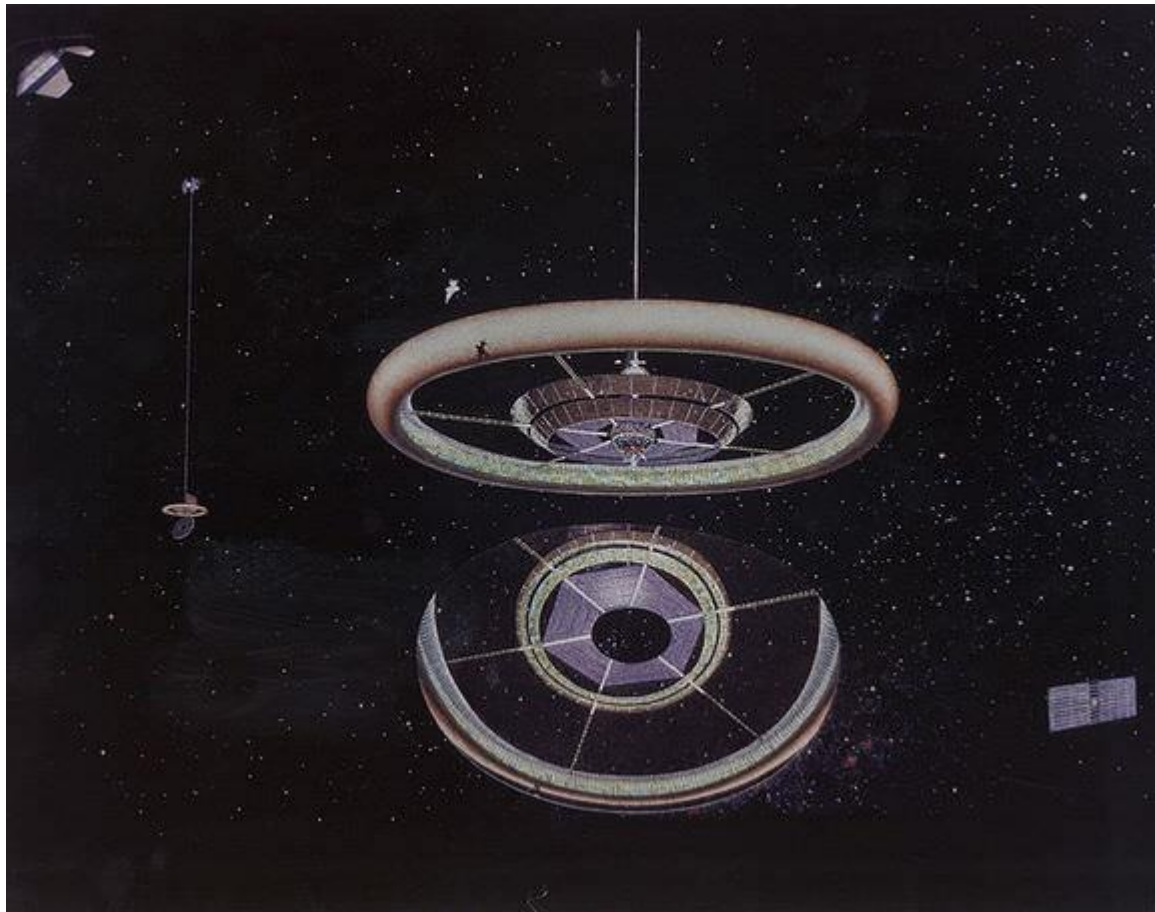












Romstasjon med diameter 1,8 km





Kanskje er det andre sivilisasjoner der ute som er kommet lengre enn oss.

