

# PHYSIK AM FREITAG

20. Januar 2017 – Christoph Mordasini

**Ein neuer Planet im Sonnensystem?  
Planeten kandidat 9 und seine  
entfernten Verwandten**

27. Januar 2017 – Uwe-Jens Wiese

**Suprafluessig, magnetisch,  
topologisch: Exotische Materie und  
der Physik Nobelpreis 2016**

3. März 2017 – Fortunat Joos

**CO2 im Klimasystem**

10. März 2017 – Saverio Braccini

**Mit Antimaterie zum Durchblick:  
Teilchenphysik in der Medizin**

17. März 2017 – Martin Frenz

**Nanoteilchen in der Theranostik**

**u<sup>b</sup>**

---

**UNIVERSITÄT  
BERN**

Ein Anlass des Fachbereichs Physik und des  
Albert Einstein Center for Fundamental Physics,  
Universität Bern

Die Vorträge richten sich an GymnasiastInnen  
und die interessierte Öffentlichkeit

Gebäude Exakte Wissenschaften (ExWi)  
Sidlerstrasse 5, 3012 Bern  
Hörsaal 099, 16:30 Uhr

[www.physics.unibe.ch](http://www.physics.unibe.ch)



*Ein neuer Planet im Sonnensystem?*

*Planetenkandidat 9 und seine entfernten  
Verwandten*

Christoph Mordasini  
Physikalisches Institut  
Universität Bern

# Übersicht des Vortrages

1. Historischer Rückblick

2. Planetenkandidat 9

*Teil I*

*Historischer Rückblick*



# Wie viele Planeten im Sonnensystem?

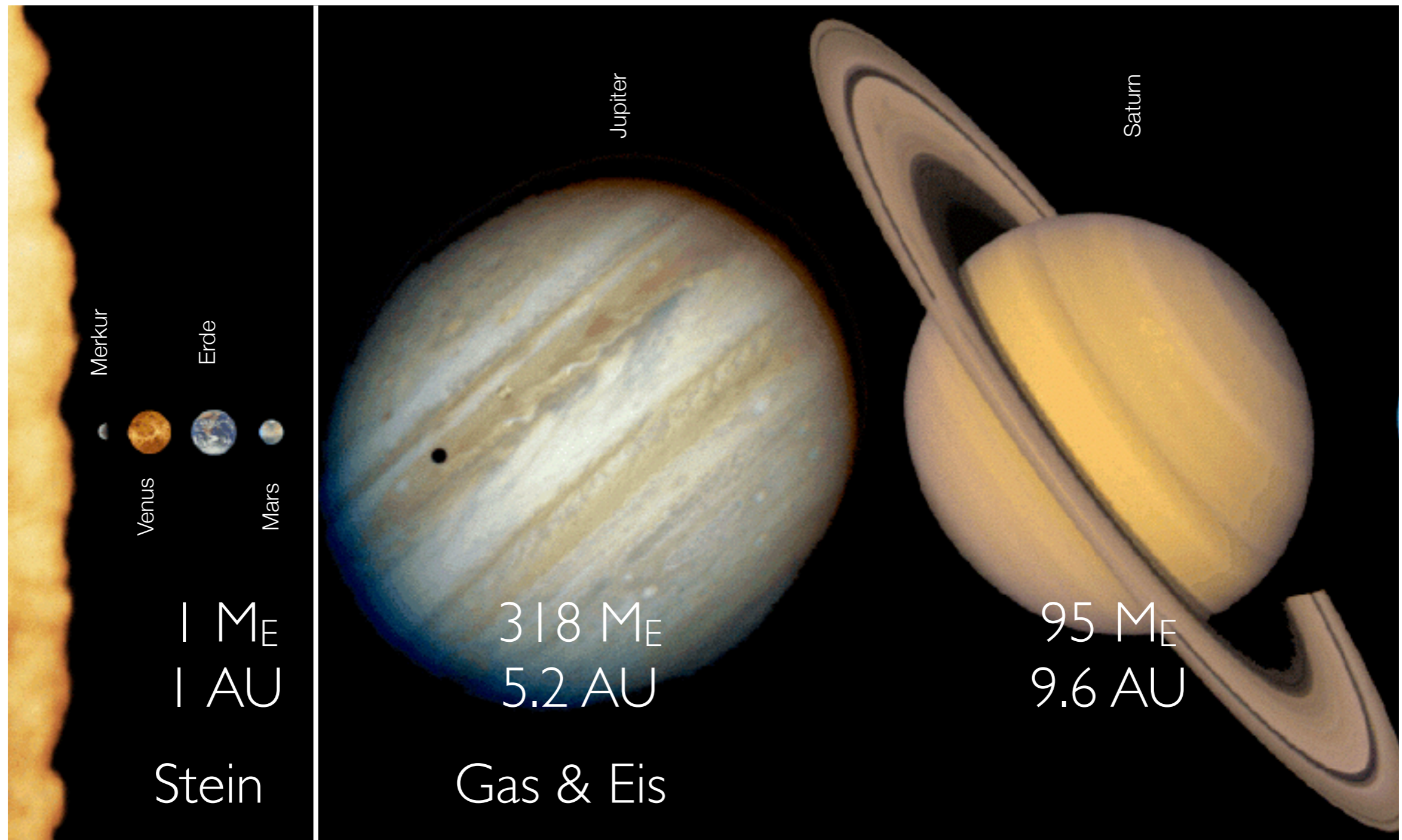
Seit jeher (Antike) bekannt: 6 Planeten

nahe

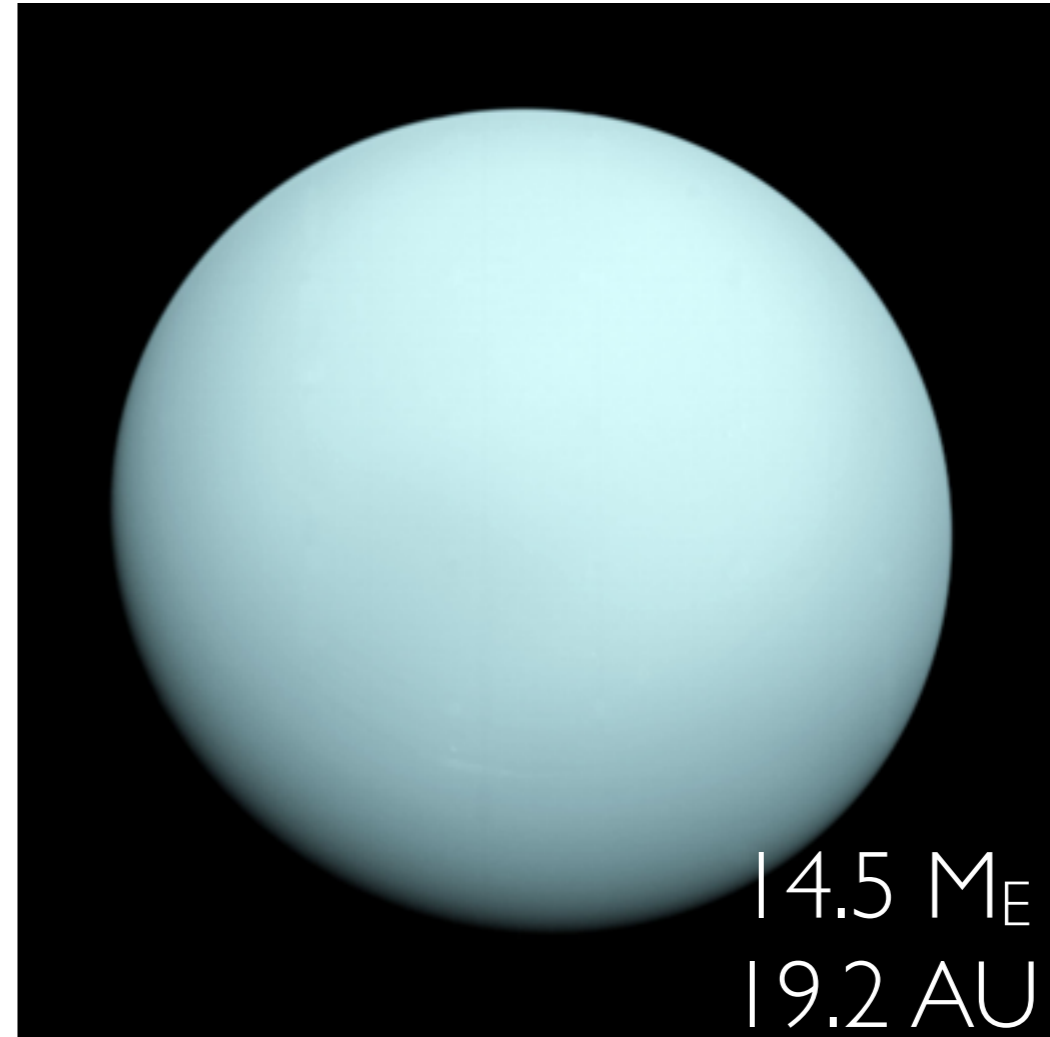
weit

1 AU = 150 Mio km

1  $M_E$  =  $6 \times 10^{24}$  kg



# 1781: 7 Planeten - Uranus



Beobachtung Nacht für Nacht:  
Sterne und Galaxien bewegen sich  
nicht relativ zueinander  
Planeten schon (πλανήτης, Wanderer)

# TABLES ASTRONOMIQUES

PUBLIÉES

PAR LE BUREAU DES LONGITUDES DE FRANCE,

CONTENANT

LES TABLES DE JUPITER, DE SATURNE ET D'URANUS,

CONSTRUITES D'APRÈS LA THÉORIE DE LA MÉCANIQUE CÉLESTE;

PAR M. A. **BOUVARD**,

Chevalier de l'Ordre royal de la Légion-d'Honneur, Membre de l'Académie royale des Sciences et du Bureau des Longitudes; des Académies royales des Sciences de Turin et de Munich; de la Société astronomique de Londres et de la Société helvétique des Sciences naturelles, etc., etc.

---

PARIS,

BACHELIER et HUZARD, Gendres et Successeurs de M<sup>me</sup> V<sup>e</sup> Courcier, Libraires pour les Sciences,  
Rue du Jardinnet-Saint-André-des-Arcs.

1821.

Schon vorher gesehen.  
Aber Uranus bewegt sich  
nicht so wie erwartet.



ment aux observations modernes, mais qui ne pourront satisfaire convenablement aux observations anciennes. Il fallait se décider entre ces deux partis; j'ai dû m'en tenir au second, comme étant celui qui réunit le plus de probabilités en faveur de la vérité, et je laisse aux tems à venir le soin de faire connaître si la difficulté de concilier les deux systèmes tient réellement à l'inexactitude des observations anciennes, ou si elle dépend de quelque action étrangère et inaperçue, qui aurait agi sur la planète.

Maintenant, en conservant la notation adoptée pour les Tables de Jupiter et de Saturne, on aura de même la formule suivante pour type des équations de condition :

$$(1 + 2e \cos \phi) x + t(1 + 2e \cos \phi) y + z \sin \phi - u \cos \phi = dV''.$$

En désignant par  $V''$  la longitude héliocentrique d'Uranus, pour la même époque que pour Jupiter et Saturne, j'ai trouvé la formule suivante :

$$V'' = \phi'' + 154''{,}63.t.$$

- |           |   |   |
|-----------|---|---|
| I.....    | { | $\begin{aligned} &+ (59{,}427''{,}54 - t.0''{,}3216) \sin(\phi'' - \phi''') \\ &+ (1733{,}14 - t.0{,}0188) \sin 2(\phi'' - \phi''') \\ &+ (70{,}08 - t.0{,}0011) \sin 3(\phi'' - \phi''') \\ &+ (3{,}25 - t.0{,}0001) \sin 4(\phi'' - \phi''') \\ &+ (0{,}16 - t.0{,}0000) \sin 5(\phi'' - \phi'''). \end{aligned}$ |
| II.....   | { | $\begin{aligned} &+ 68''{,}55 \sin(\phi' - \phi'' + 23''{,}56) - 12''{,}49 \sin 2(\phi' - \phi'') \\ &- 2''{,}55 \sin 3(\phi' - \phi'') - 0''{,}72 \sin 4(\phi' - \phi'') - 0''{,}24 \sin 5(\phi' - \phi''). \end{aligned}$   |
| III.....  | { | $\begin{aligned} &- (436''{,}41 - t.0''{,}034) \sin(\phi' - 2\phi'' + 79''{,}28 + t.48''{,}7) \\ &- 5''{,}07 \sin(2\phi' - 4\phi'' + 42''{,}87). \end{aligned}$   |
| IV.....   |   | $+ 160''{,}92 \sin(\phi - \phi'') - 0''{,}59 \sin 2(\phi - \phi'')$   |
| V.....    |   | $- 10{,}60 \sin(\phi - 2\phi'' - 16''{,}50).$   |
| VI.....   |   | $+ 7{,}79 \sin(2\phi' - 3\phi'' + 25''{,}92).$  |
| VII.....  |   | $+ 4{,}07 \sin(\phi' + 5''{,}09).$  |
| VIII..... |   | $+ 3{,}89 \sin(2\phi - \phi'' - 11''{,}49).$  |
| IX.....   |   | $+ 3{,}81 \sin(\phi + 14''{,}87).$  |
| X.....    |   | $+ 2{,}86 \sin(2\phi' - 5\phi'' + 75''{,}99).$  |
| XI.....   |   | $+ 2{,}55 \sin(2\phi' - \phi'' - 81''{,}89).$   |
| XII.....  |   | $+ 1{,}38 \sin(3\phi' - 4\phi'' + 26''{,}24).$  |

La réduction à l'écliptique est

$$- 29''{,}04 \sin(2V'' - 2\theta'').$$

Le rayon vecteur  $r''$  d'Uranus est donné par la formule

$$r'' = 19{,}212098 - t.0{,}00000023.$$

Années.	Erreurs.	Années.	Erreurs.	Années.	Erreurs.	Années.	Erreurs.	Années.	Erreurs.
1690	+ 68,7	1783	+ 16,7	1792	- 13,0	1803	- 44,5	1814	+ 41,3
1712	+ 62,0	1784	+ 19,4	1793	- 19,5	1804	- 27,8	1815	+ 41,2
1715	- 4,5	1785	+ 6,7	1794	- 18,3	1805	- 38,2	1816	+ 47,6
1750	- 124,0	1785	+ 6,5	1794	- 18,5	1806	- 23,1	1816	+ 49,1
1750	- 101,4	1785	+ 12,5	1795	- 20,6	1806	- 8,5	1816	+ 57,7
1753	- 69,8	1786	+ 11,7	1795	- 25,8	1807	- 26,5	1817	+ 52,9
1756	- 75,7	1786	+ 10,5	1796	- 13,0	1807	- 0,9	1818	+ 56,7
1764	- 23,8	1787	+ 12,1	1796	- 35,0	1808	- 14,1	1819	+ 76,2
1769	+ 10,9	1788	- 8,1	1797	- 18,9	1809	- 19,6		
1771	+ 50,9	1788	+ 8,9	1797	- 37,9	1810	- 5,9		
1781	+ 17,6	1789	- 1,4	1798	- 37,6	1811	+ 9,3		
1781	+ 22,9	1789	+ 23,5	1799	- 53,4	1811	+ 1,0		
1782	+ 27,6	1790	+ 14,8	1799	- 45,4	1812	+ 0,1		
1782	+ 17,7	1790	- 16,9	1800	- 25,8	1812	+ 22,0		
1782	+ 13,9	1791	- 12,6	1801	- 44,3	1813	+ 16,6		
1783	+ 24,9	1791	- 5,1	1802	- 49,7	1813	+ 42,4		
1783	+ 24,8	1792	- 7,6	1802	- 34,2	1814	+ 27,3		

Il est difficile d'admettre que les observations modernes comportent de telles erreurs. On ne peut, non plus, les rejeter sur la théorie, ni sur l'oubli de quelque terme important. Cette théorie est connue, et les soins que j'ai mis à mes calculs ne permettent pas qu'on s'arrête sur ce dernier point. Ce serait donc sur l'exactitude des observations anciennes que le doute retomberait. En effet, il est difficile de s'en défendre, quand on discute les circonstances dans lesquelles elles ont été faites : l'observation de Bradley est unique, le passage n'a été observé qu'au cinquième fil et la hauteur n'a été estimée qu'en degrés et minutes. La même remarque s'applique à l'observation de Mayer. Les observations de Flamsteed sont jugées depuis longtemps, et l'on sait que ses instrumens n'étaient ni bien exécutés, ni exactement placés dans le méridien. Quant à celles de Lemonnier, on peut voir dans la Connaissance des Tems pour 1821 ce qu'il est permis d'en penser.

D'après ces considérations, j'ai supprimé les dix-sept observations anciennes et formé de nouvelles Tables avec les seules observations modernes. On peut voir dans le tableau suivant des équations de condition, avec quelle approximation ces dernières sont représentées; une seule va à 32'',4 centésimales, ou 10'' sexagésimales, et toutes les autres sont généralement beaucoup plus petites. Mais les observations anciennes sont moins bien satisfaites, et l'une des erreurs s'élève jusqu'à 227'',7, ou 73''{,}8 sexagésimales.

Telle est donc l'alternative que présente la formation des Tables de la planète Uranus, que si l'on combine les observations anciennes avec les modernes, les premières seront passablement représentées, tandis que les secondes ne le seront pas avec la précision qu'elles comportent; et que si l'on rejette les unes pour ne conserver que les autres, il en résultera des Tables qui auront toute l'exactitude désirable relative-

Fehler in den Daten?

Oder stimmen sie?

Könnte es noch einen Planeten geben?

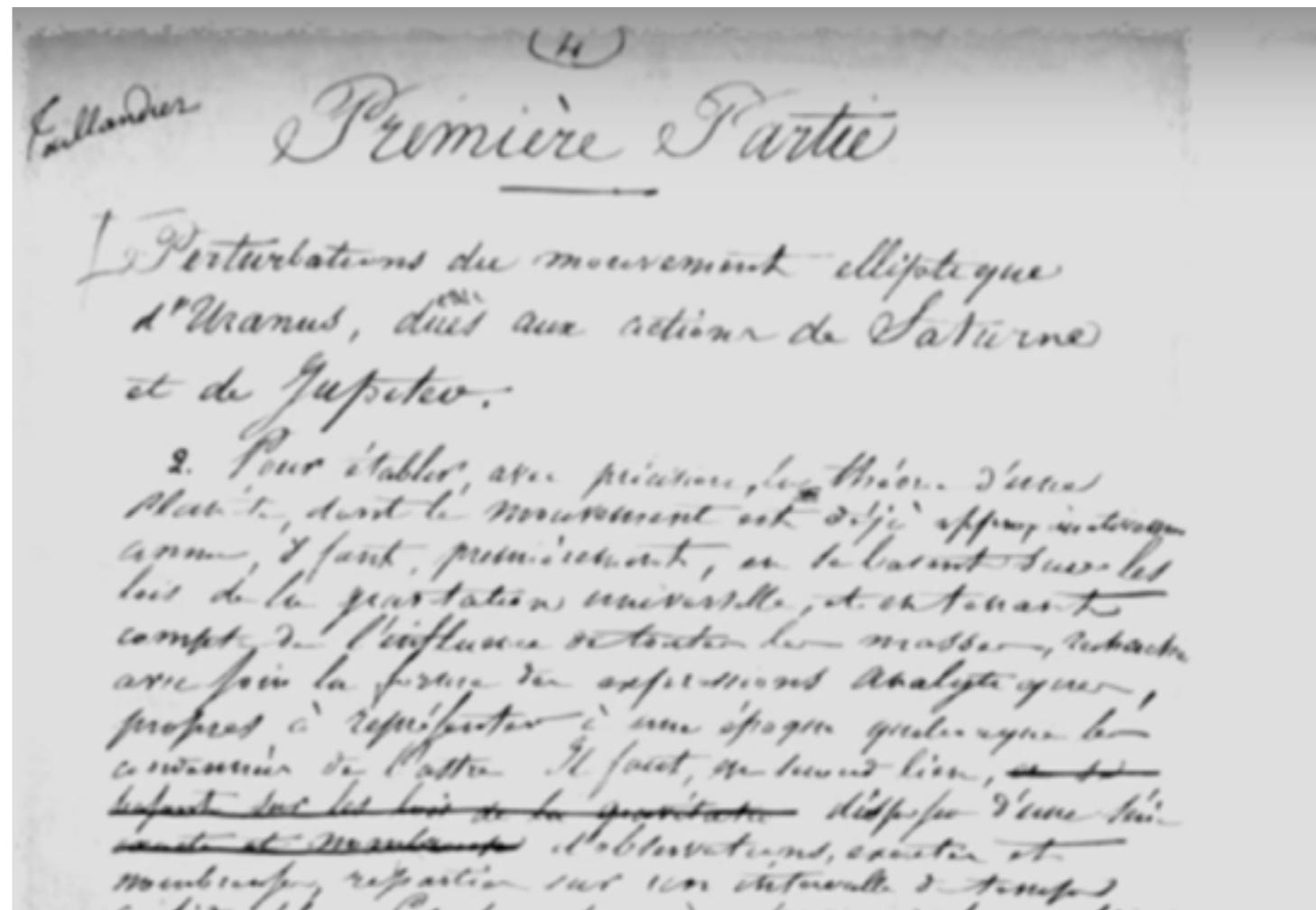
Jahrelange  
himmelsmechanische  
Berechnungen

Position theoretisch  
vorausgesagt aus  
Bahnstörungen von Uranus

Le Verrier und J. Adams



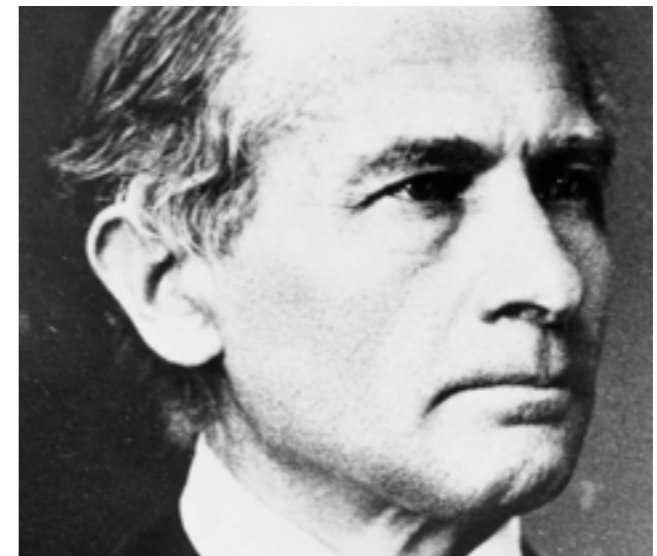
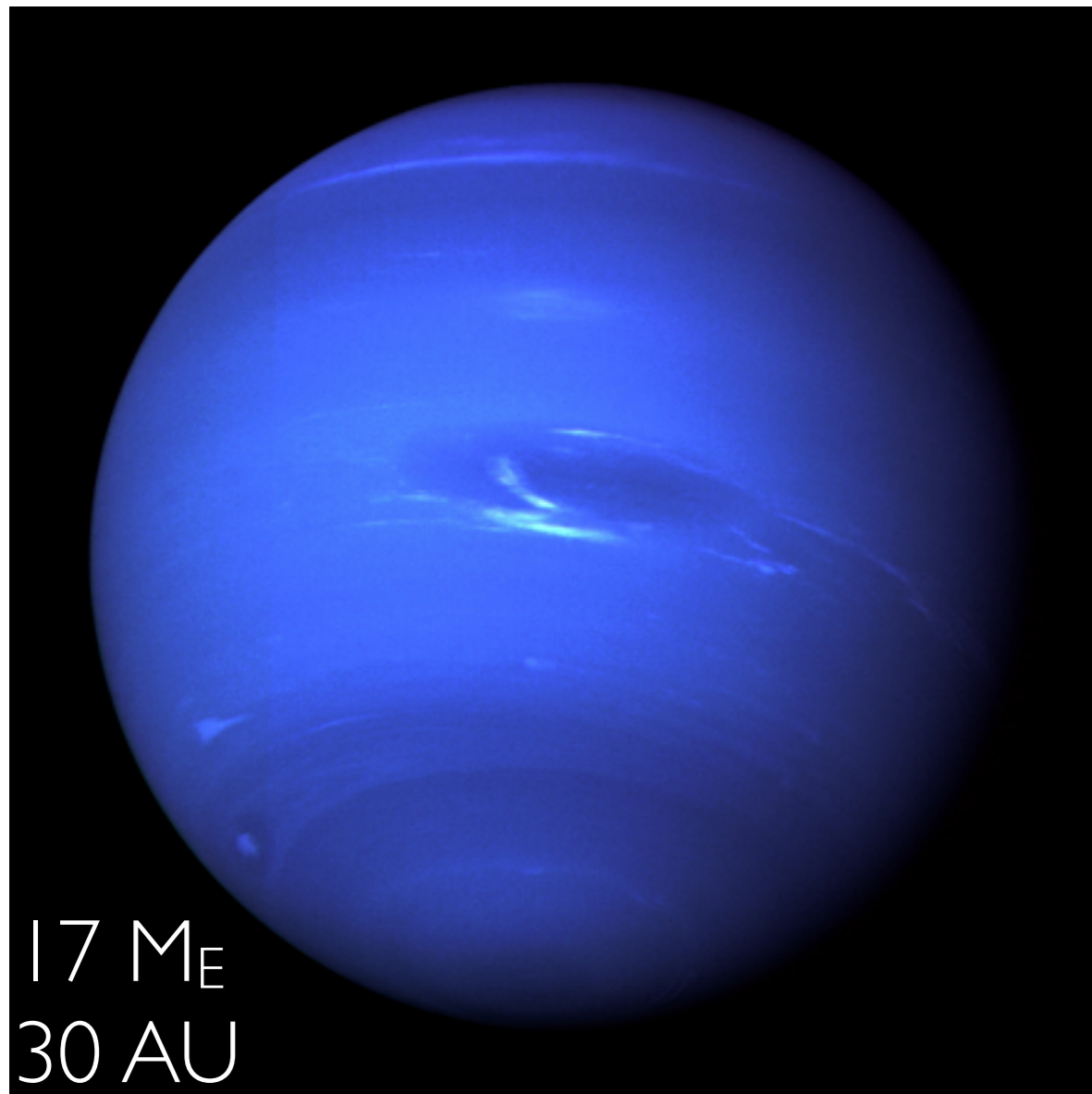
Urbain Le Verrier (1811-1877)





# 1846: der 8. Planet - Neptun

Le Verrier kontaktiert J. Galle (Berlin)



J. Galle (1812-1910)

In der ersten Nacht gefunden  
Grosser Erfolg der Theorie



# Noch mehr Planeten ?

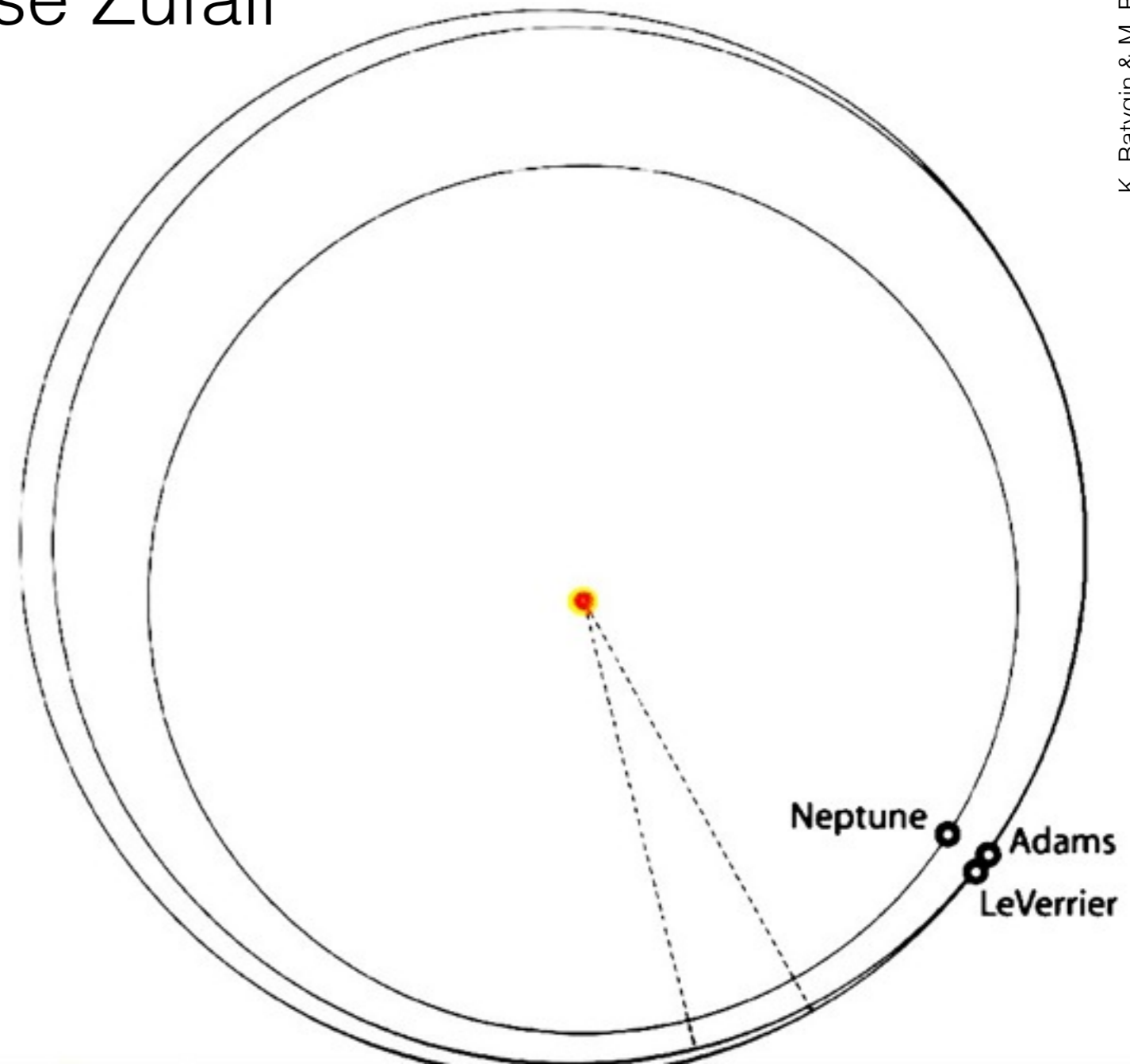
Annahme Le Verrier: Titus-Bodes Regel  $a = 0.4 + 0.3 \times 2^m \text{ AU}$   
 $m = -\infty, 0, 1, 2, \dots$

Wahre Position deutlich weiter innen.  
Dass am richtigen Ort teilweise Zufall

Seit 1846 ~ein Umlauf: ein  
Neptunjahr dauert 165 Jahre

Uranus Orbit immer noch  
Abweichungen.  
Neptune erklärt das Meiste

Noch ein Planet?

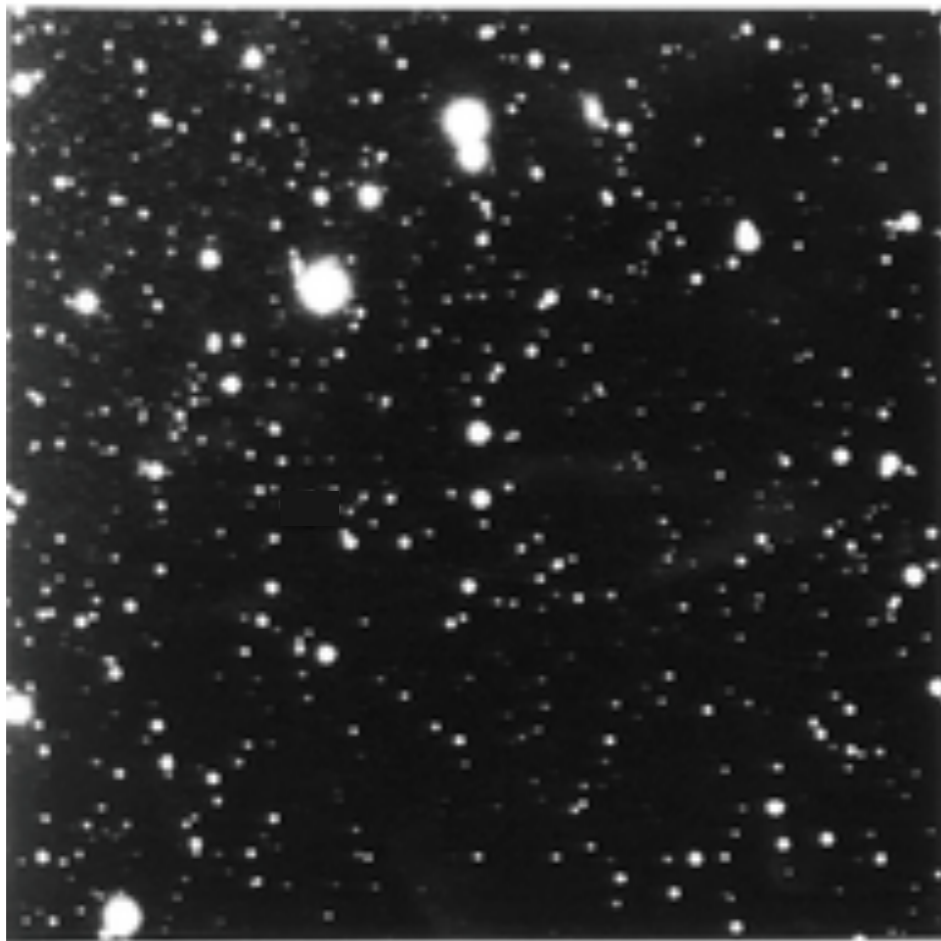


# *1930: der erste 9. Planet - Pluto*

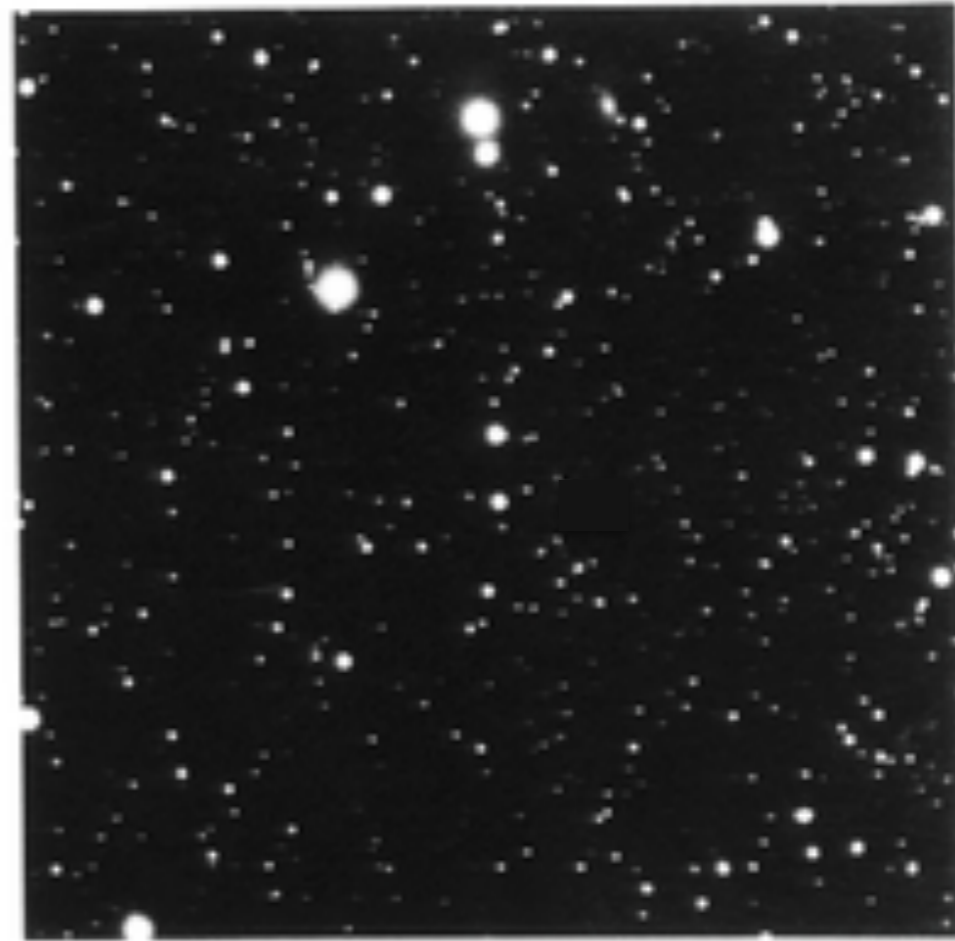
Jahre der Berechnung analog zu Le Verrier und suche am Lowell Observatorium (USA)

Schwierigkeit: Helligkeit nimmt mit  $1/r^4$  ab

DISCOVERY OF THE PLANET PLUTO



January 23, 1930



January 29, 1930

# Pluto



Pluto ist kleiner als  
der Mond

Seine Masse ist nur  
 $0.00218 M_E$

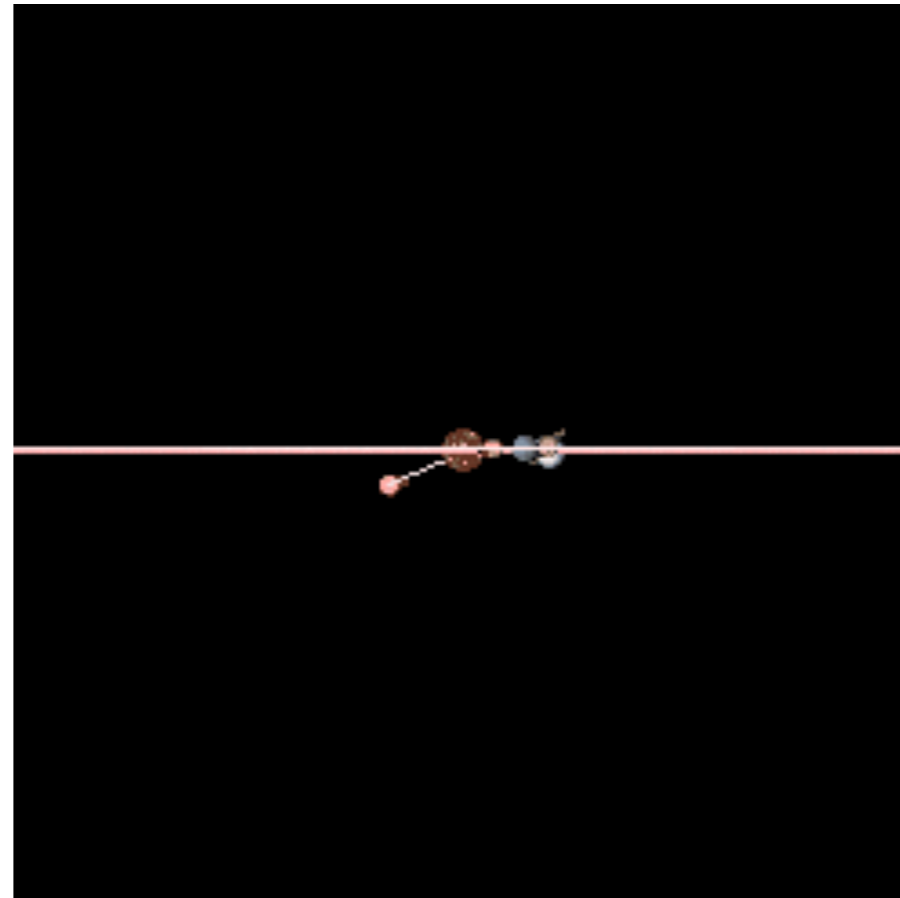
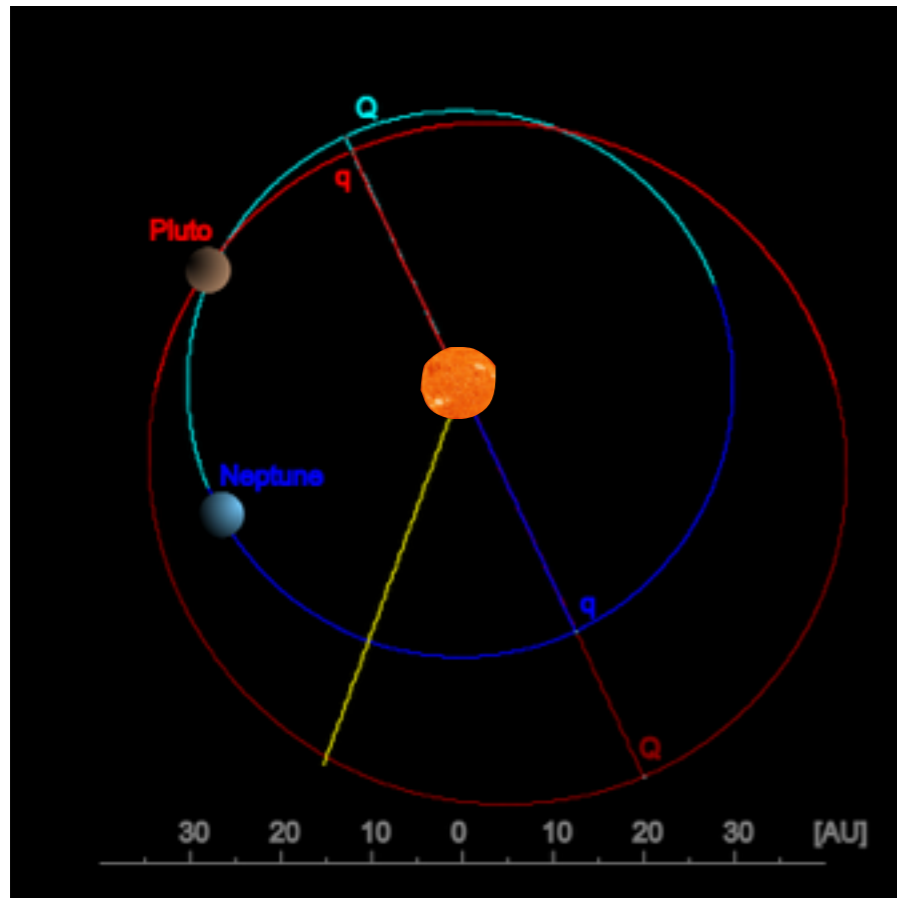
Abweichungen in Uranus Bahn: Kann nicht wegen Pluto sein.

Schlussendlich zeigte sich: falsche Masse von Neptun



# 2006: zurück auf 8 Planeten

## Pluto degradiert



Pluto ist anders: Exzentrische (elliptische) Bahn z.T. innerhalb Neptuns und ausserhalb der Ekliptik

Planeten  
Kriterien:

- umkreist die Sonne
- sphärische Gestalt
- gravitativ dominanter Körper



degradiert zu  
Kleinplanet

# Der Kuipergürtel

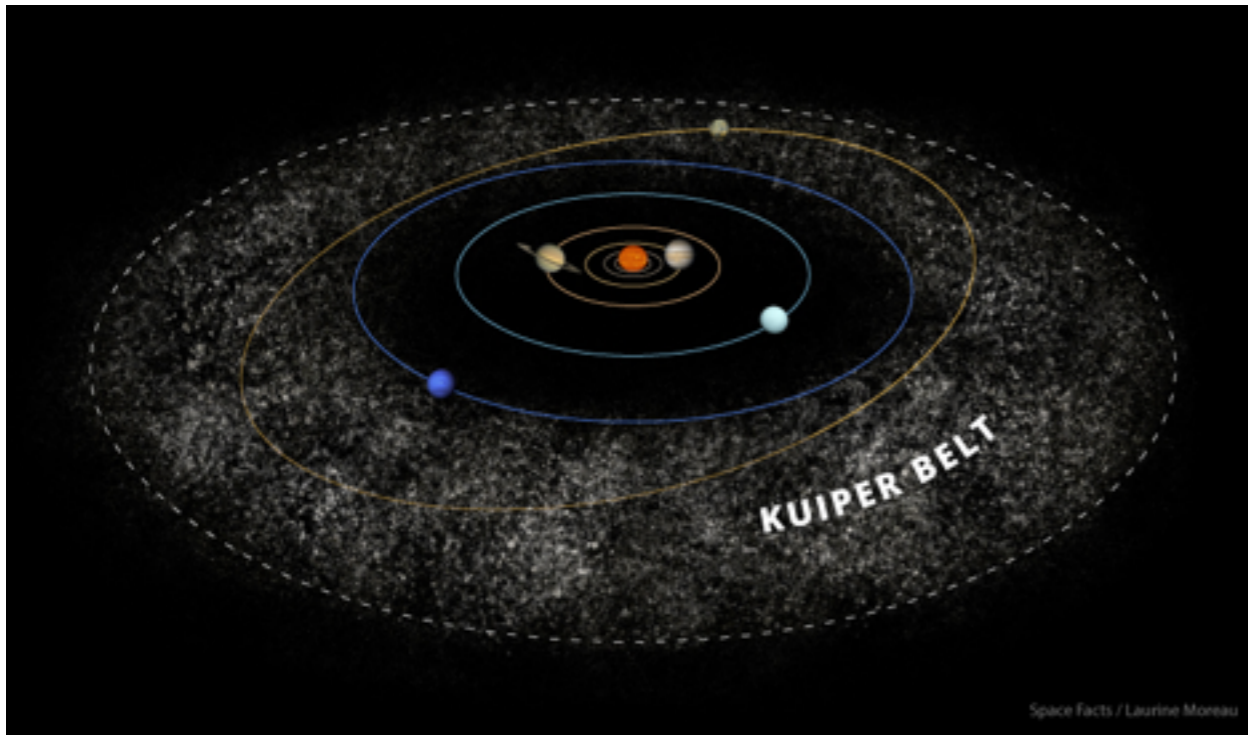


Ab 1992 wurde eine Vielzahl von Objekten mit Bahnen ähnlich wie Pluto entdeckt. Manche ähnlich massiv wie Pluto.

Pluto ist nur das erste bekannte Objekt von Tausenden kleinen Objekten (100-1000 km) ausserhalb von Neptuns Bahn.

Sie bilden den Kuipergürtel.

# Unter Neptuns Kontrolle



Der Kuipergürtel liegt bei 30 - 55 AU in einem scheibenförmigen Bereich (oder Donut) ausserhalb von Neptuns Bahn.

Die Gesamtmasse ist nur ca. 0.1 Erdmassen.

Zusammen genommen interessant: Orbit der Kuiper Belt Objekte (KBO) lassen Rückschlüsse auf Dynamik zu.

Einige chaotische Bahnen, kaum voraussagbar

Orbits von KBOs kontrolliert durch Neptun: Perihel (sonnennächster Punkt) nahe bei Neptun. Erhaltung von Energie und Drehimpuls bei gravitativer Streuung (Ablenkung) bei nahem Vorbeigang.





# PLUTO AND THE KUIPER BELT

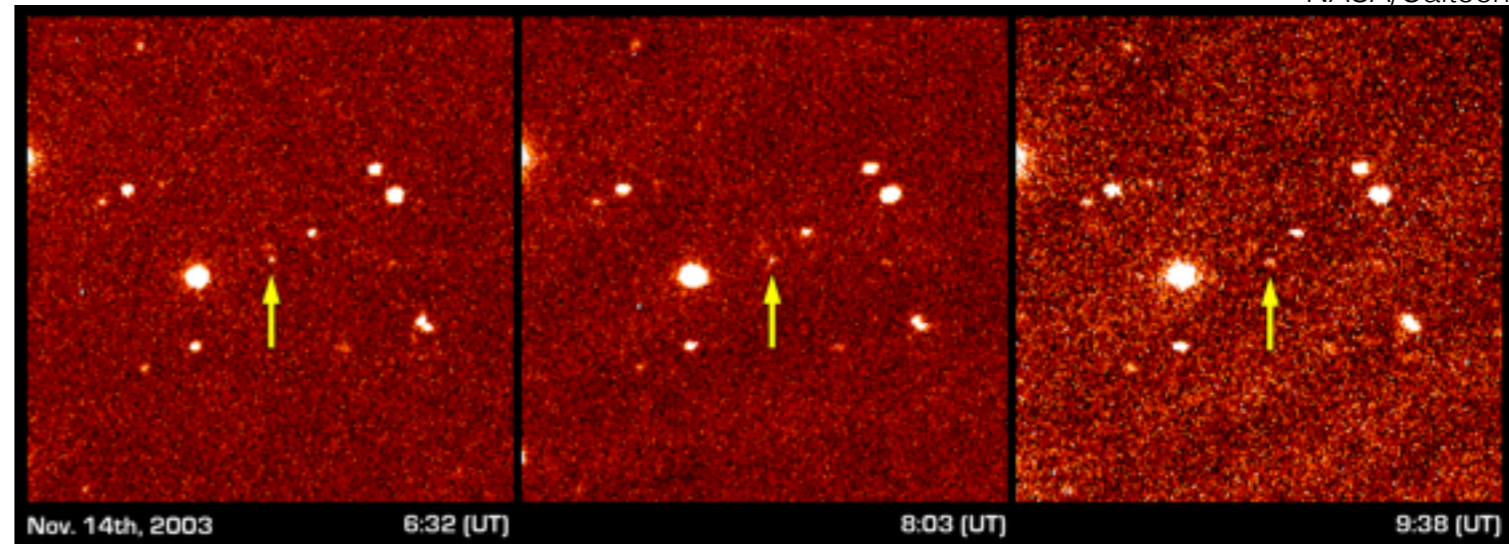
Mike Brown (Caltech) Mark Subbarao (Adler) Patrick McPike (Adler)

*Teil 2*

*Planetenkandidat 9*

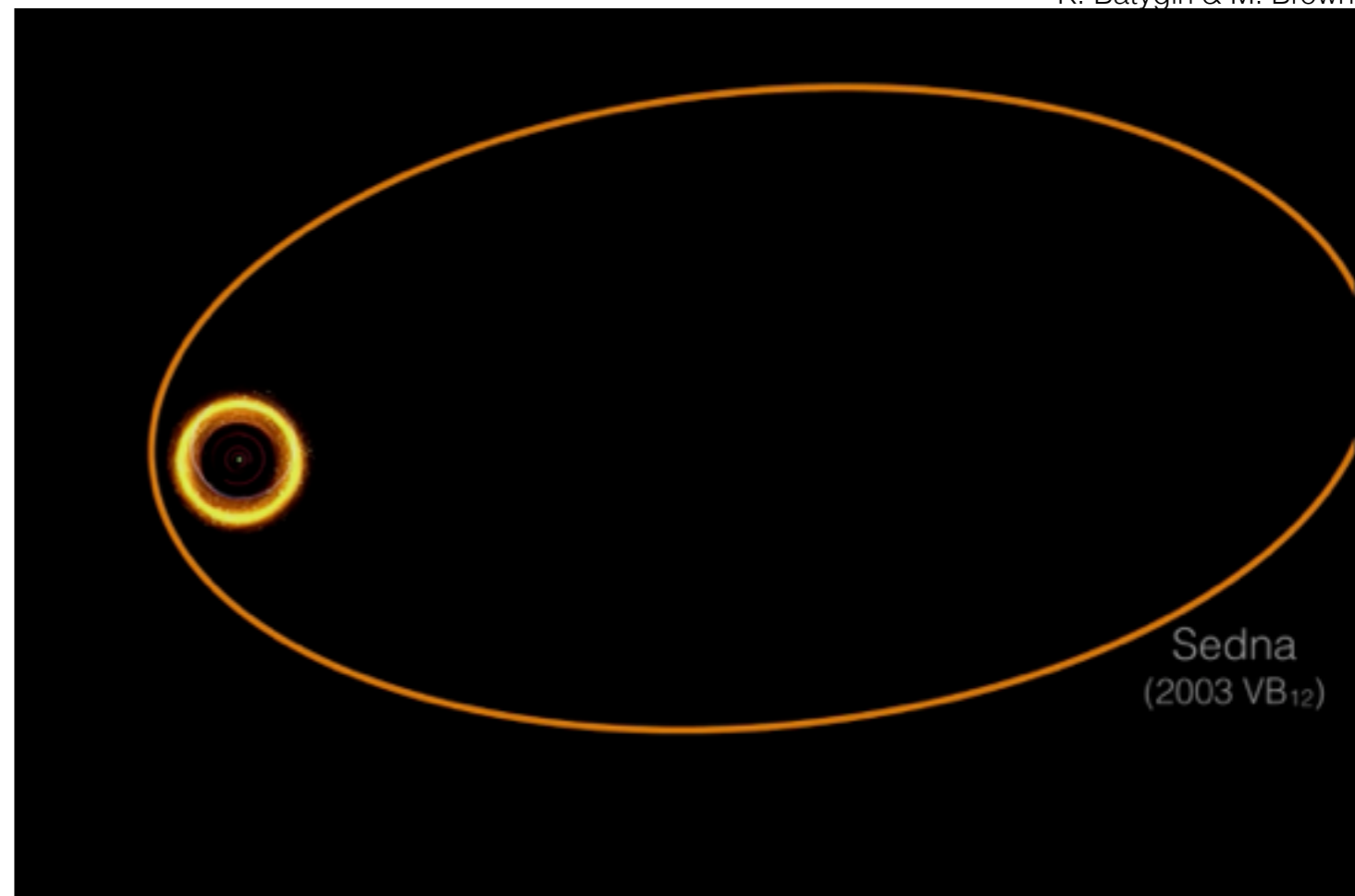
# Der Weg zu Planetenkandidat 9

Erster Hinweis: Sedna  
Entdeckt 2003 Mike Brown  
Grösse  $\sim 1000$  km  
Aphelion: 1000 AU



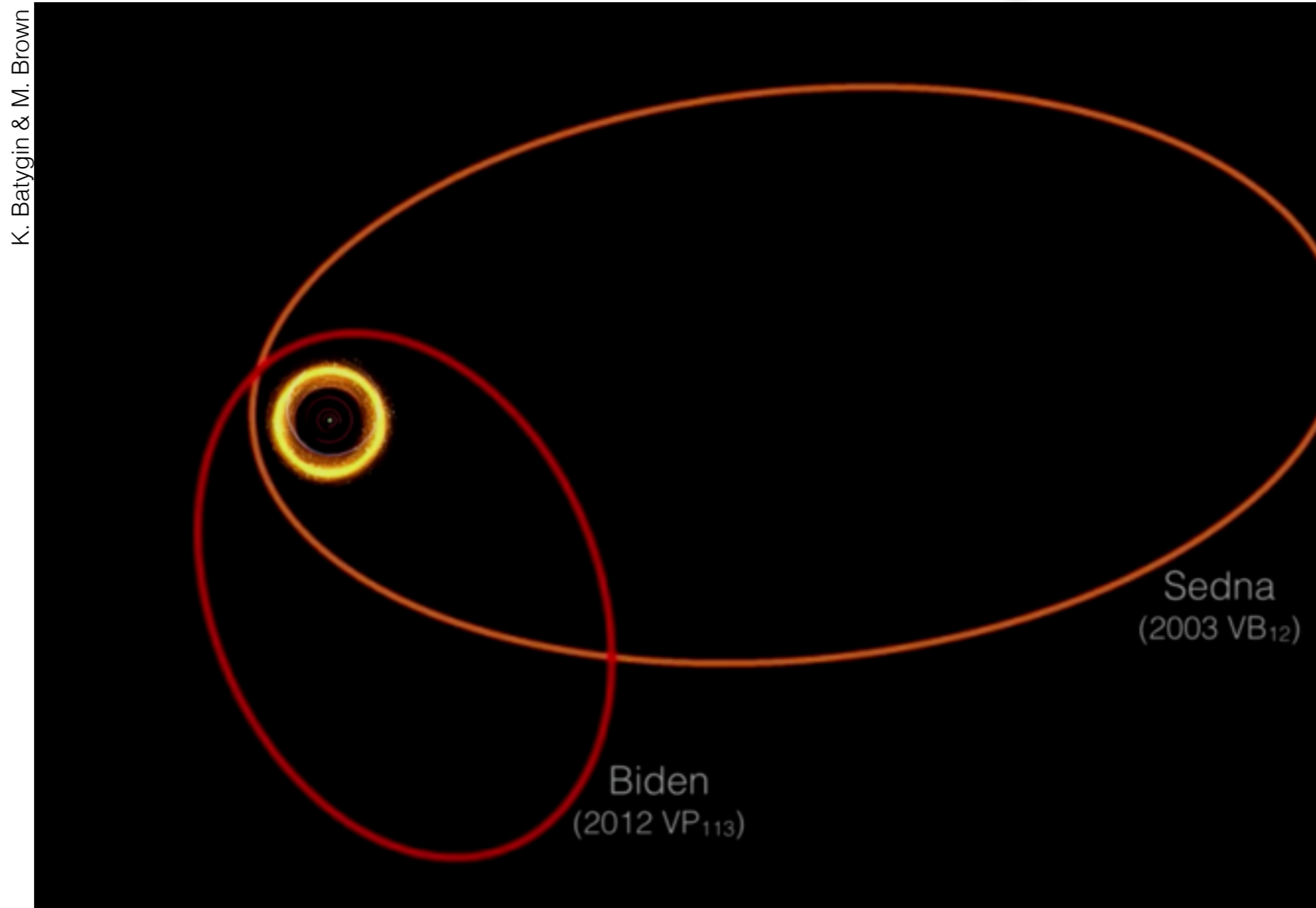
Überraschung: Perihel liegt  
*ausserhalb* der Neptunbahn

Nicht von Neptun dorthin  
gestreut. Wie möglich?





# Der zweite Hinweis: Biden (2012 VP<sub>113</sub>)



2014 Trujillo & Sheppard entdecken "Biden"

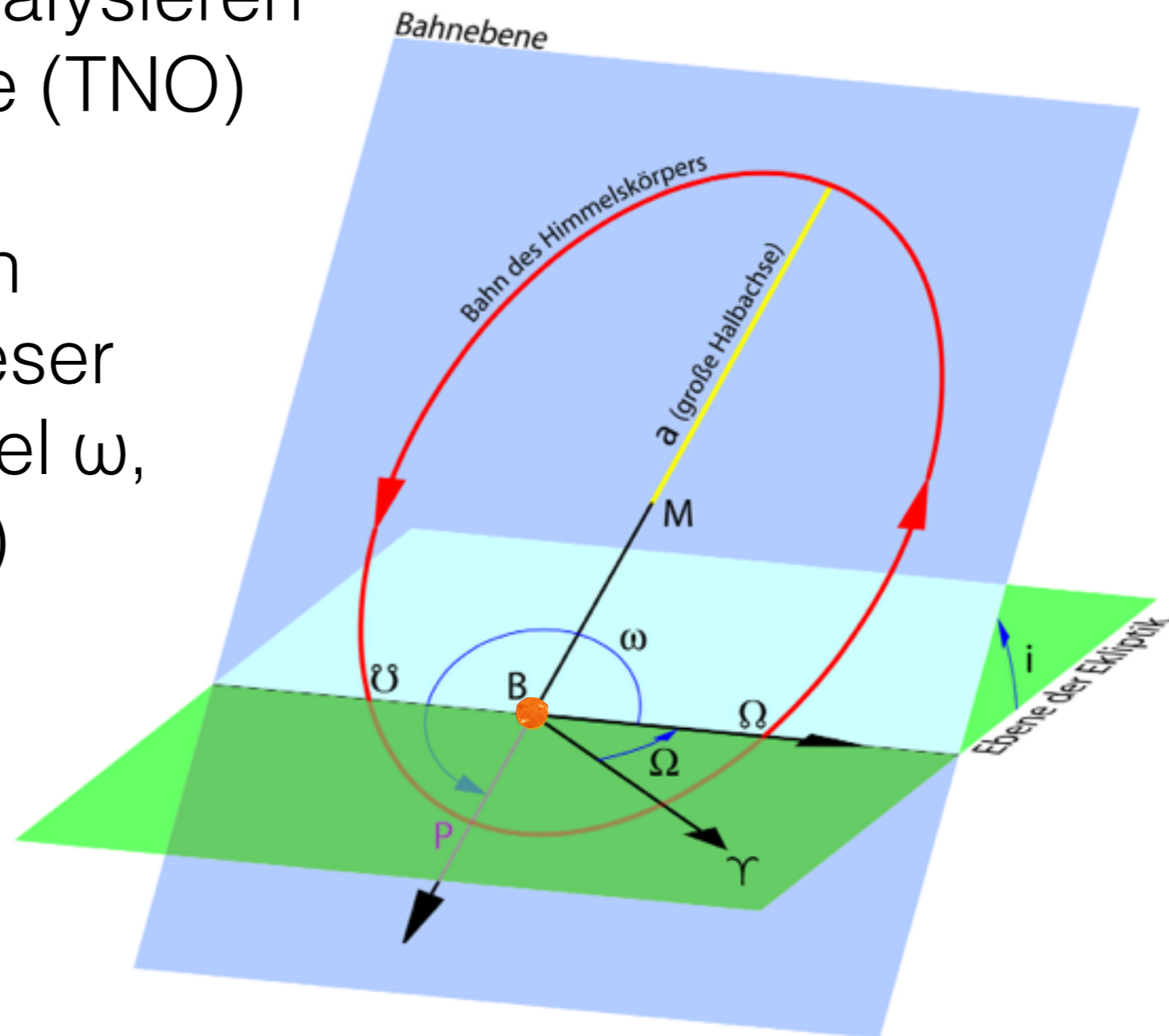
Perihel (80 AU) noch weiter draussen als Sedna,  
noch weiter weg Neptun.

Jetzt schon zwei merkwürdige Objekte

2014: Trujillo & Sheppard analysieren weitere Transneptun-Objekte (TNO)

Sie sehen: die Absidienlinien (Ausrichtung der Ellipse) dieser Objekte gleichen sich (Winkel  $\omega$ , sog. Argument des Perihels)

Diese Analyse inspiriert Batygin & Brown (Caltech)



Sie finden: nicht nur  $\omega$ , sondern auch  $i$  (Inklination) und  $\Omega$  (Länge des aufsteigenden Knotens) haben ähnliche Werte



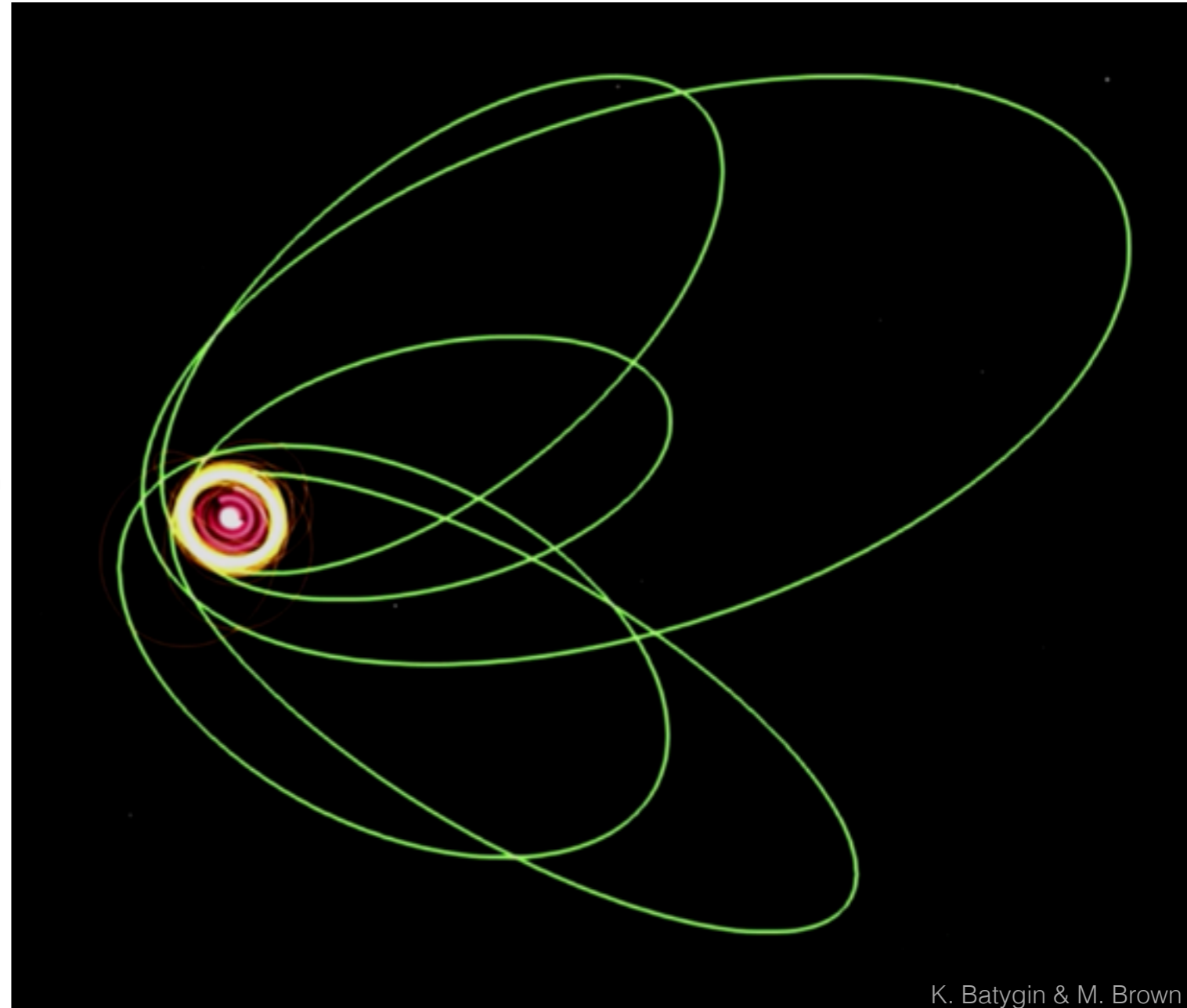


# *Merkwürdig ausgerichtete Bahnen*

Nur sechs Objekte so weit draussen ( $a > 150$  AU). Enthält Sedna und Byden.

Bahnen nur auf einer Seite, nur in einer Ebene.

Dies ist ganz anders als im klassischen Kuipergürtel (isotrope Verteilung).

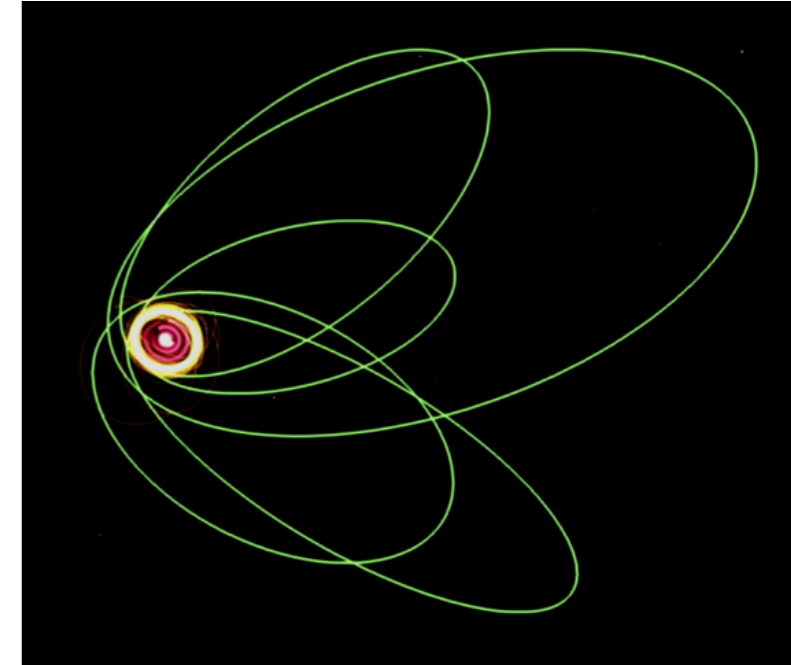


K. Batygin & M. Brown

Mit 8 Planeten würden sie nicht so auf nur einer Seite bleiben. In  $\sim 100$  Mio. Jahren würden sich die Bahnen isotrop verteilen.

# Mögliche Erklärungen

- Auswahleffekt ? Nein, ganzer Himmel wird gleich abgesucht.
- Zufall (nur sechs Objekte)? Nein, kleine Wahrscheinlichkeit von nur 0.007 %.
- Einfluss eines anderen, vorbeiziehenden Sterns? Nein, da zu kurzlebiger Effekt.



# *Planetenkandidat 9 als Erklärung*

Batygin & Brown (2016) schlagen eine andere Erklärung vor:

Die sechs weit entfernten Transneptun-Objekte werden durch die Gravitationskraft *von einem bisher unbekanntem Körper* in ihren speziellen Bahnen gehalten.

Dieser hypothetische Körper wird Planetenkandidat 9 genannt.

Der nächste Schritt ist:

Wie Le Verrier vorgehen

Welches Objekt könnte die beobachteten Bahnen erzeugen?



# Bestimmung der Eigenschaften von Planet 9

Batygin und Brown verwenden wie Le Verrier analytische Methoden der Himmelsmechanik.

Neues Tool: numerische Integrationen (Berechnung) der Bahnen (Newton. Gravitationsgesetz)

Start mit 8 Planeten, Planetenkandidat 9 und dem Kuipergürtel

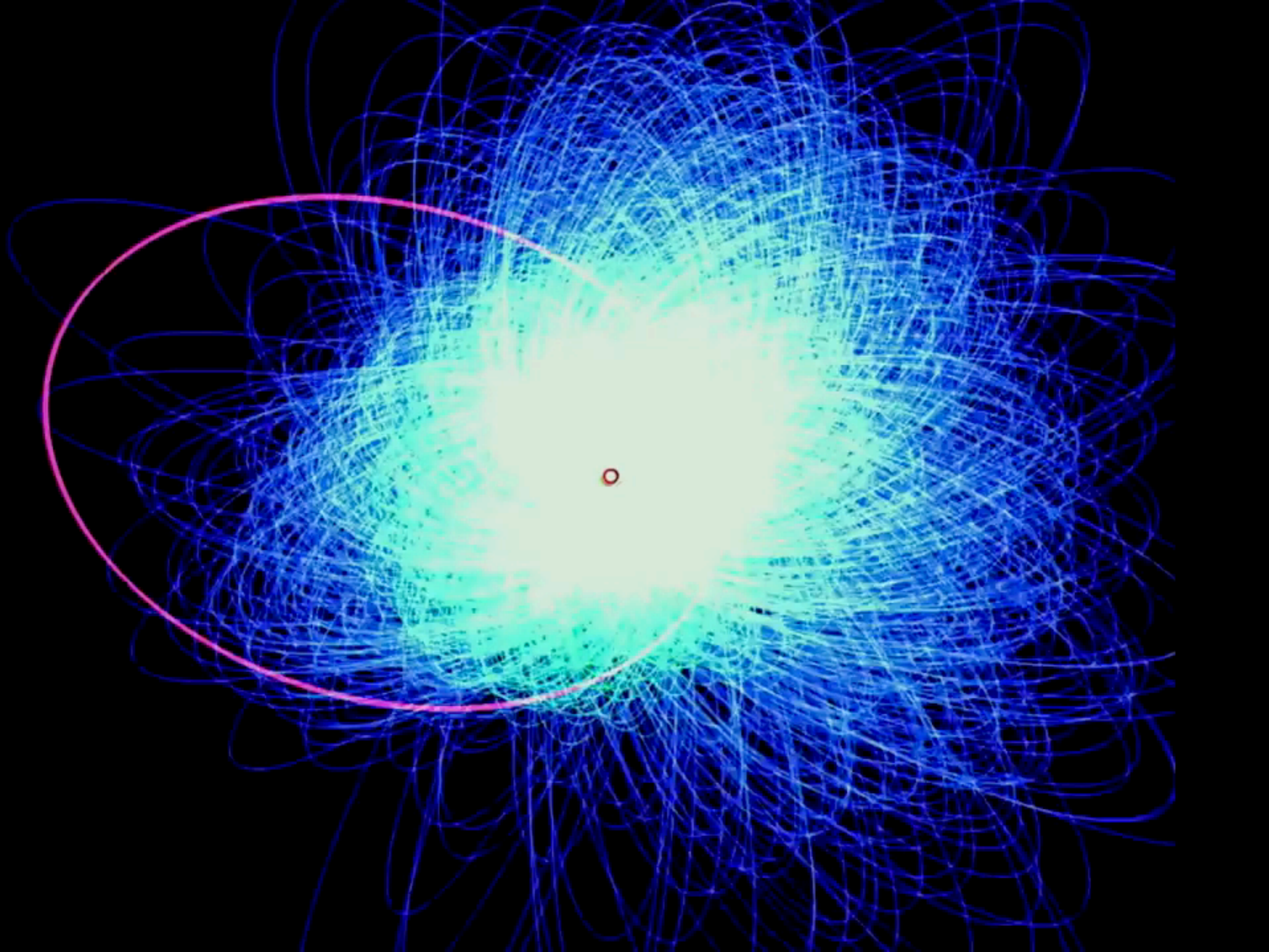
Bahnen der Objekte im Kuipergürtel anfangs zufällig in alle Richtungen verteilt

Veränderung der Parameter des Planeten 9 (Masse, Abstand, Bahnform, Ausrichtung, etc.)

Dauert viele Wochen zu rechnen











The diagram shows a central yellow star with a white dot representing the Sun. A large orange elliptical orbit labeled 'Planet 9' is shown. Several purple elliptical orbits of Trans-Neptunian Objects (TNOs) are also shown, all appearing to be in the same plane and having similar orientations. The TNOs are labeled with their names and discovery numbers: 2007 TG422, 2013 RF98, 2004 VN112, 2012 VP113, Sedna, and 2012 GB174. The orbits are highly elliptical and clustered together, suggesting a common dynamical origin.

**Planet 9**

2007 TG422

2013 RF98

2004 VN112

2012 VP113

Sedna

2012 GB174

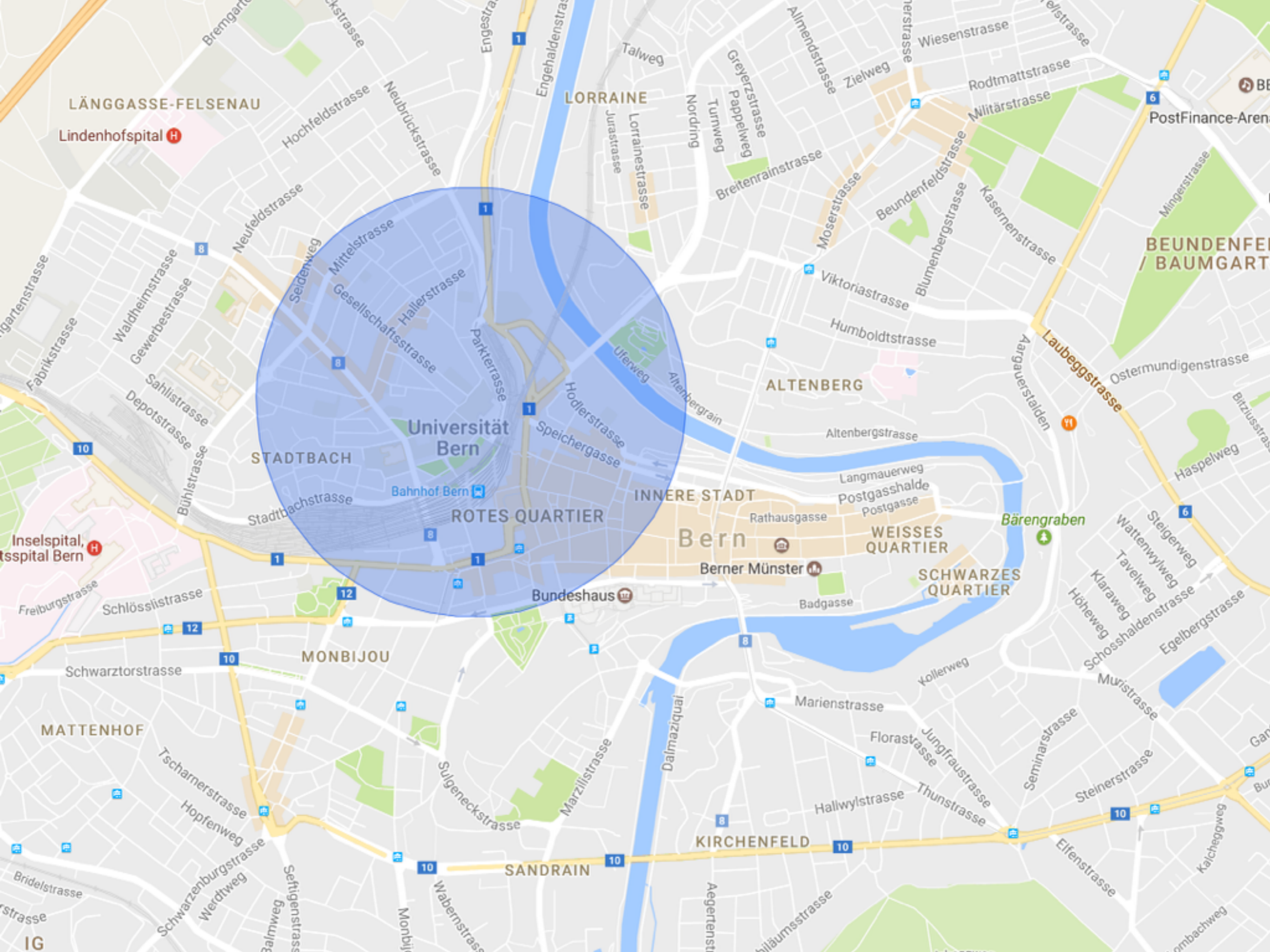
Umgekehrte Ausrichtung, gleiche Ebene wie TNOs

Stark exzentrische Bahn

Masse: Zirka 10 Erdmassen: sonst zu schwacher Effekt

Grosse Halbachse: 600-700 AU, Umlaufzeit ~20'000 Jahre





LÄNGGASSE-FELSENAU

Lindenhofspital

LORRAINE

BEUNDENFELD  
/ BAUMGARTEN

Universität  
Bern

ROTEN QUARTIER

Bern

WEISSER  
QUARTIER

SCHWARZES  
QUARTIER

SANDRAIN

KIRCHENFELD

MATTENHOF

MONBIJOU

ALTENBERG

STADTBACH

INNERE STADT

Bärengraben

Bundeshaus

Berner Münster

Inselspital,  
Krankenhaus Bern

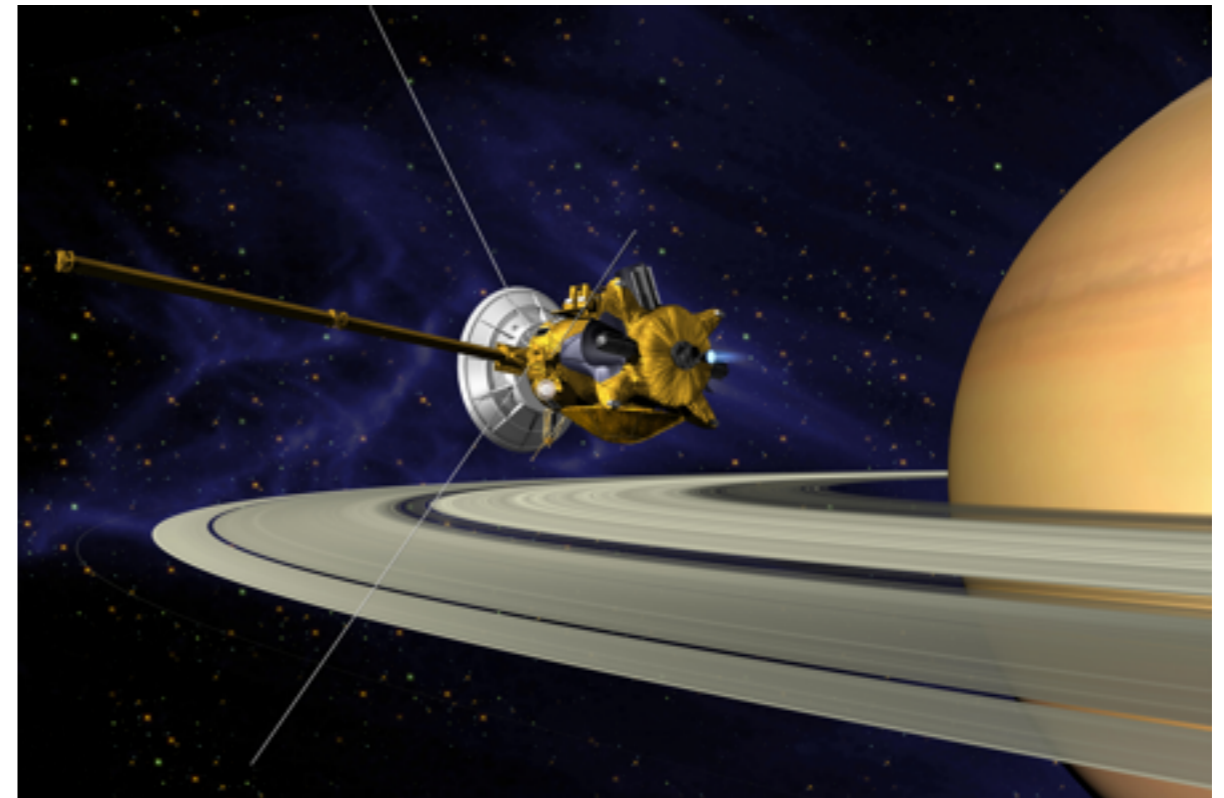
PostFinance-Arena



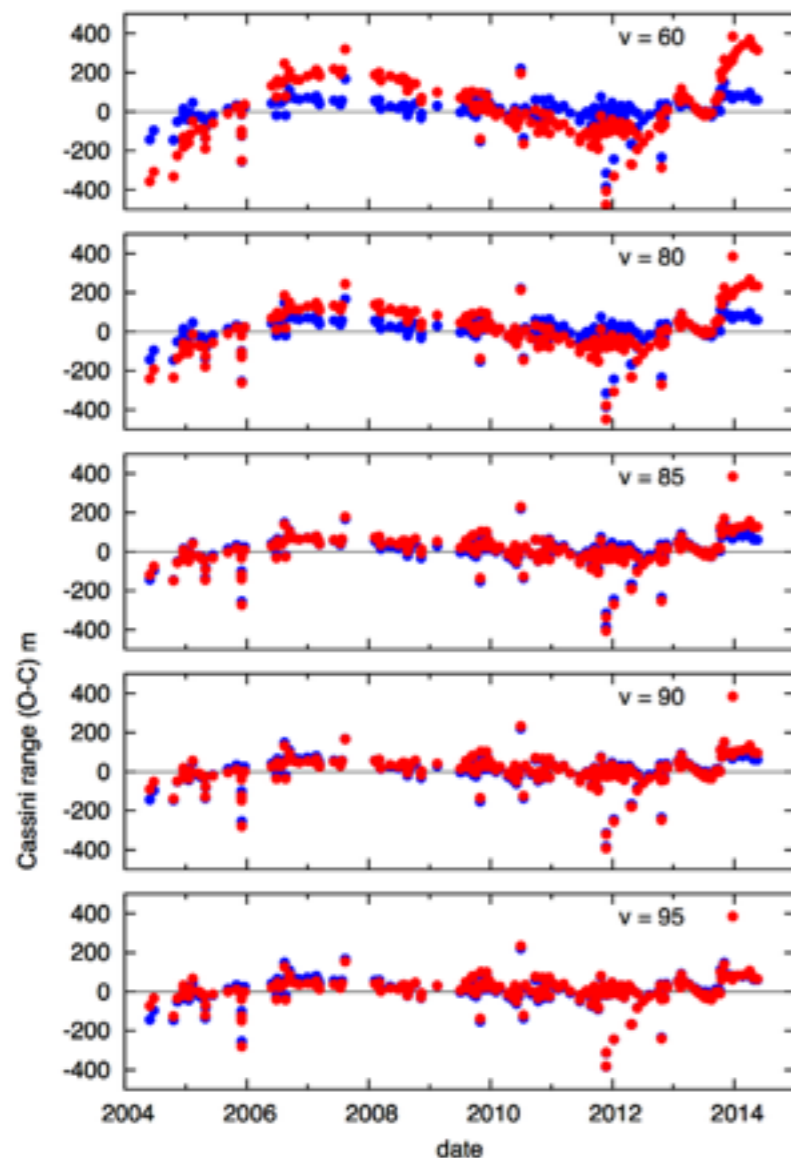
# Ein unabhängiger Test

Die Sonde Cassini kreist seit 2004 um Saturn.

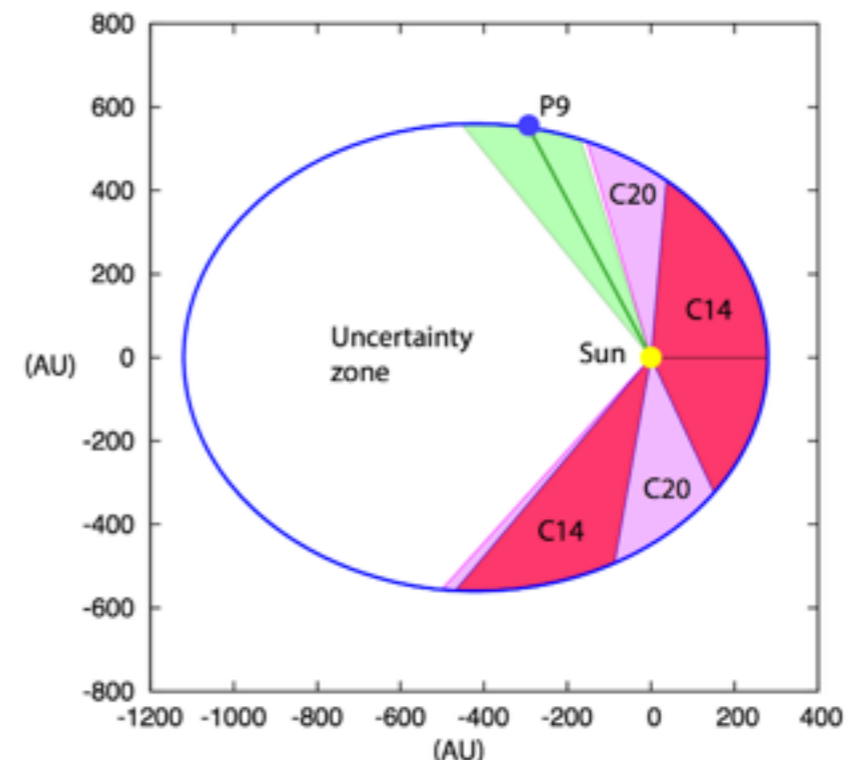
Mit Radiowellen lässt sich der Abstand Erde-Cassini extrem genau bestimmen und damit Saturns Bahn.



Planet 9 bewirkt leichte Veränderung der Bahn.



mit  
ohne

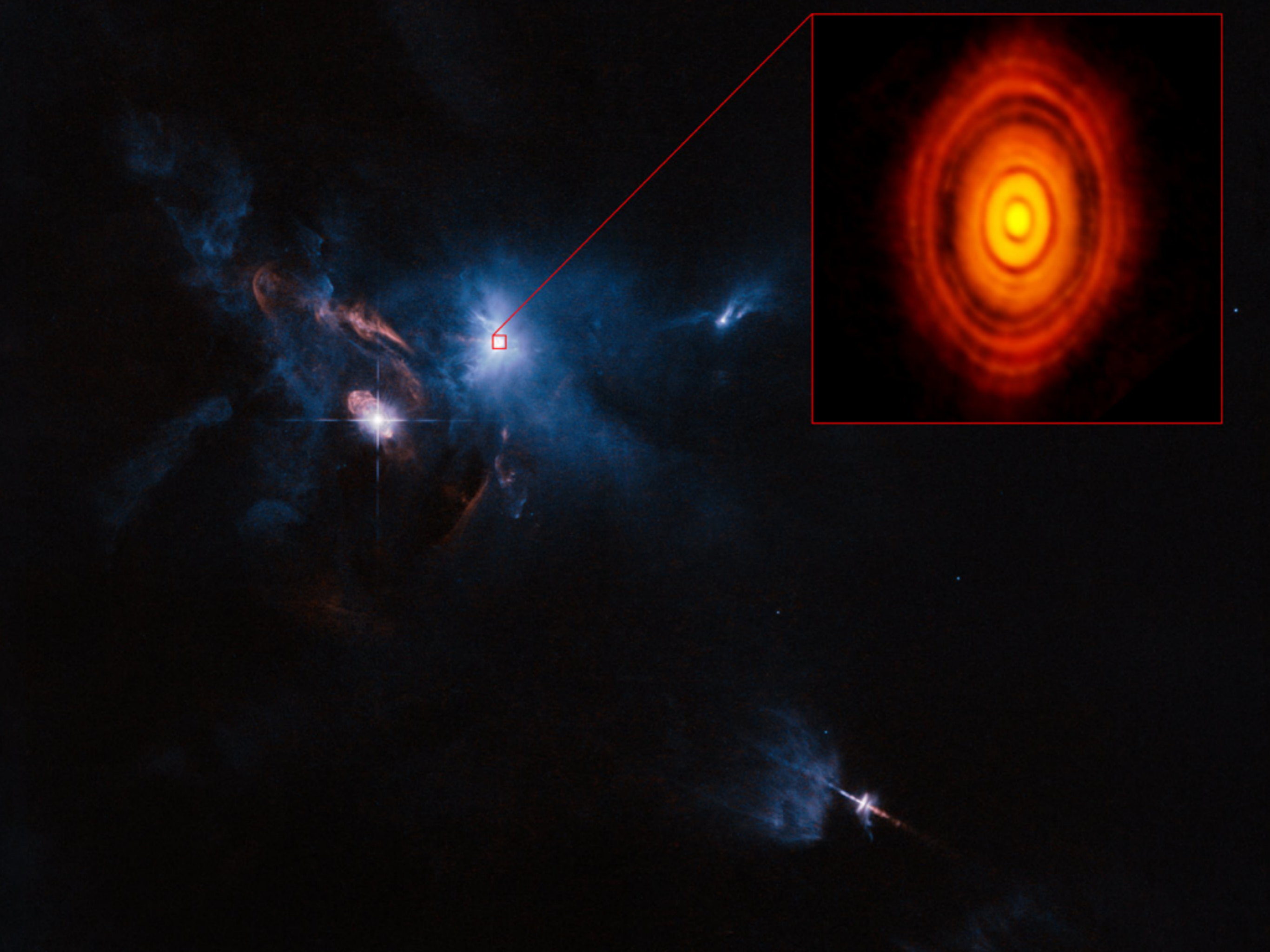


# *Zwei wichtige Fragen*

Falls Planetenkandidat wirklich existiert, öffnen sich folgende Fragen:

1. Wie ist Planet 9 entstanden?
2. Wie sieht er aus? Wir wollen den Planeten ja finden!



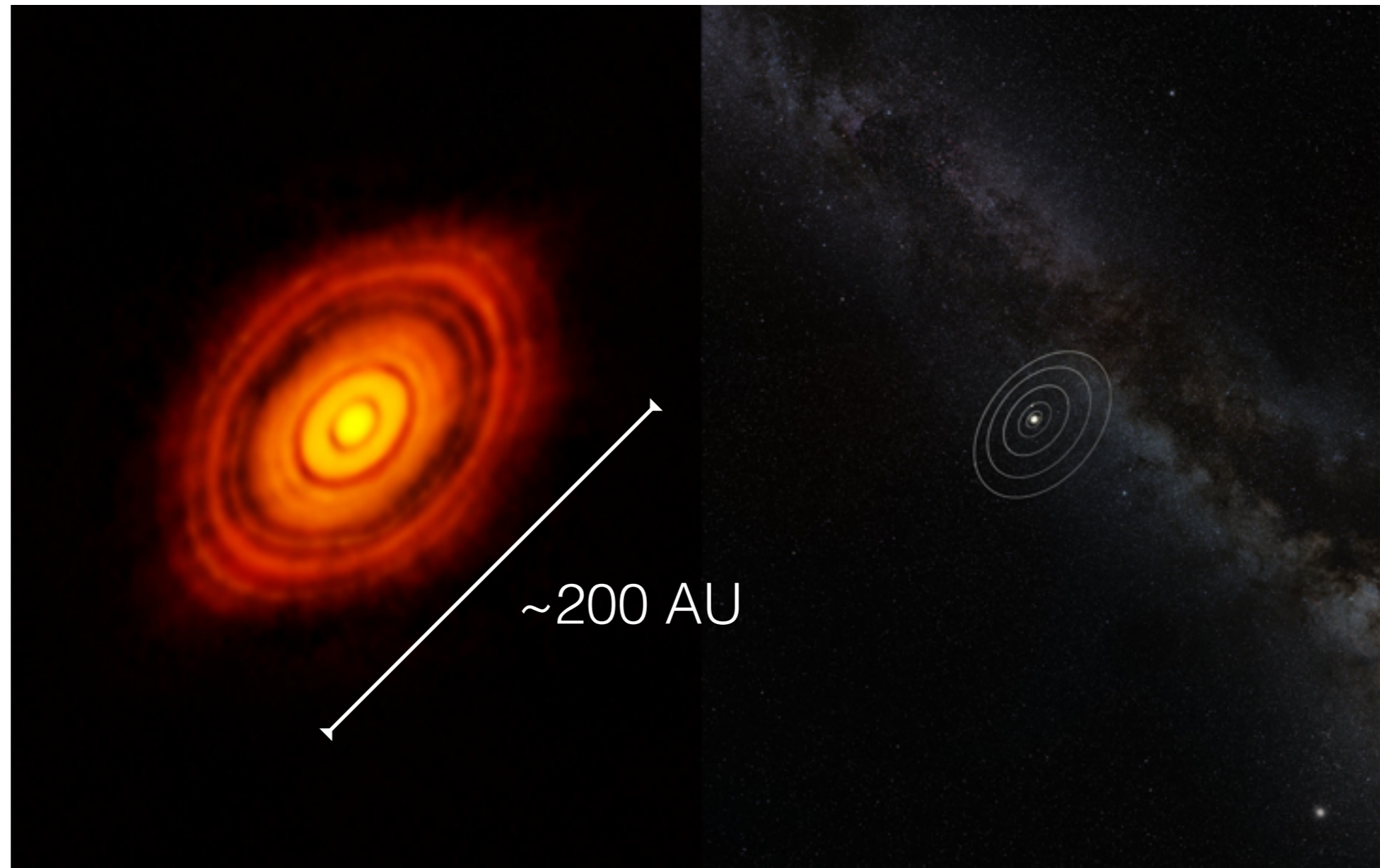


# Entstehung von Planet 9

3 Möglichkeiten

## 1. Entstehung am Ort

Dauert extrem (zu) lange, wenig Material dort, wenig Kollisionen

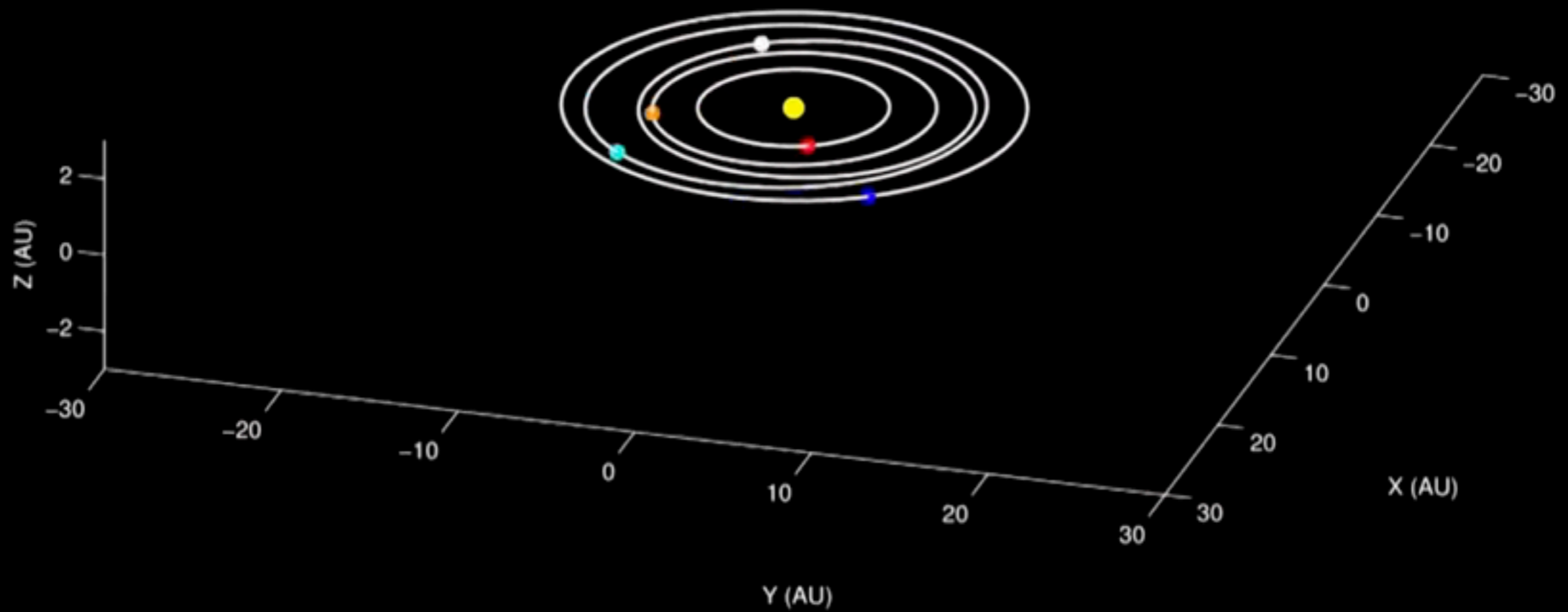




# Entstehung von Planet 9



Time: 740.00 Years

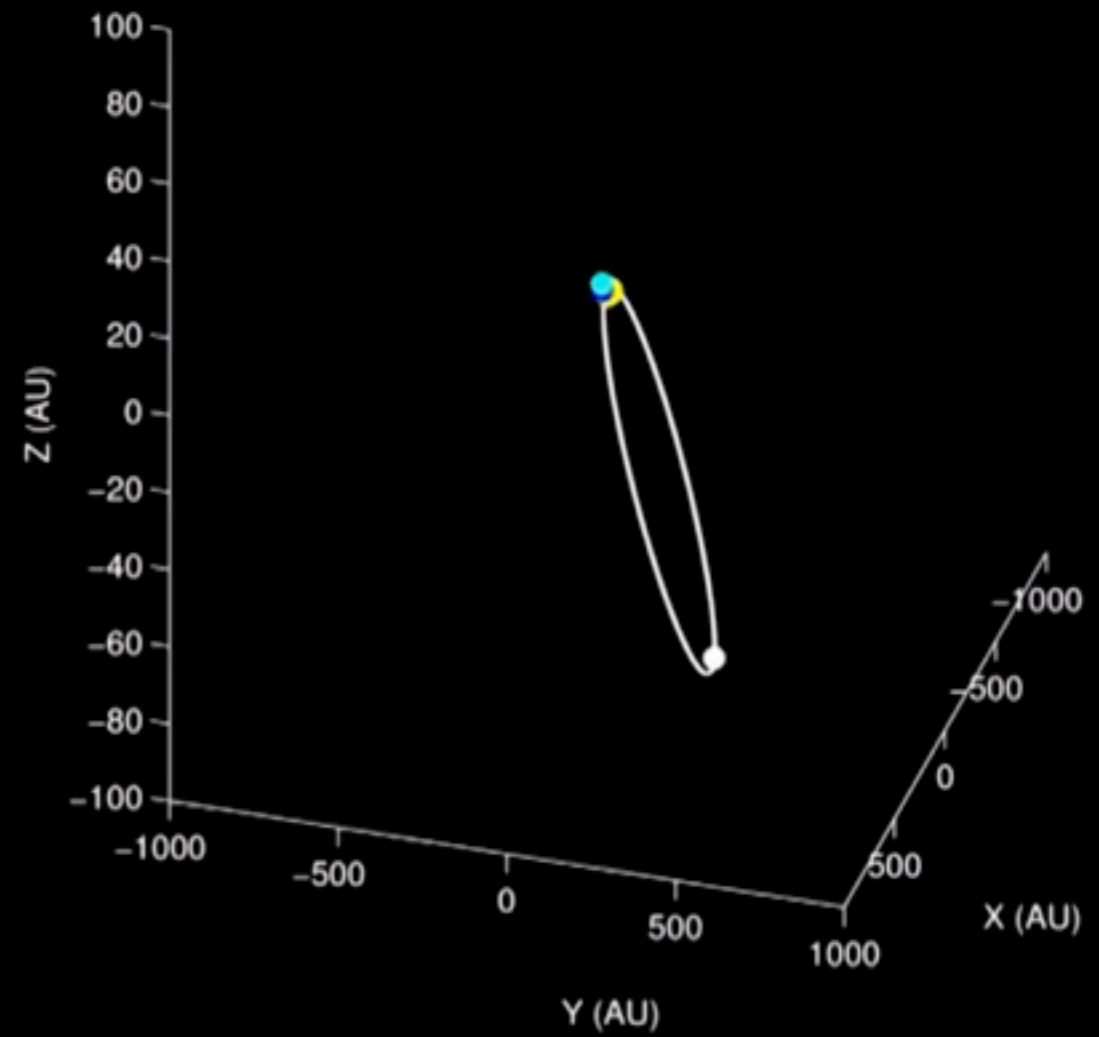
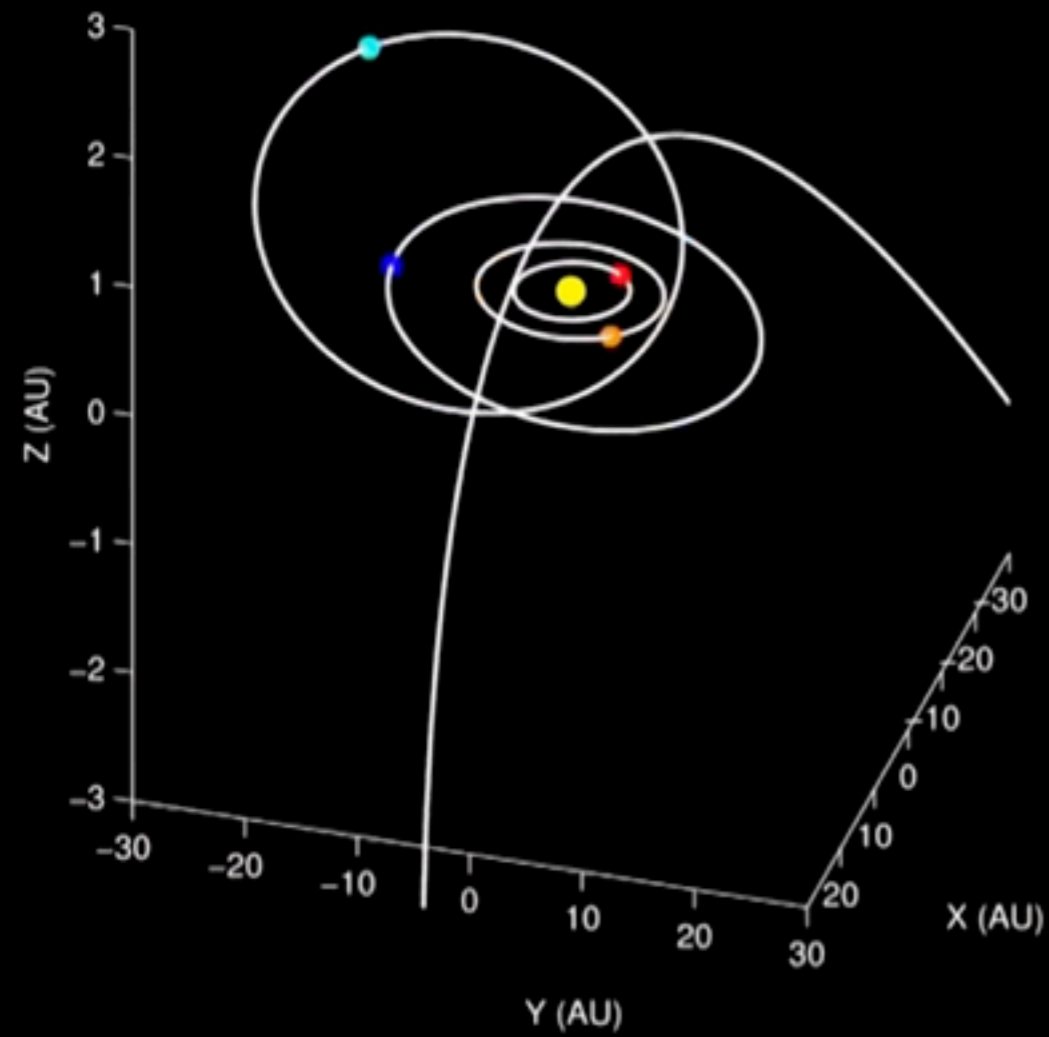




# Entstehung von Planet 9



Time: 160500.00 Years



## 2. Streuung nach aussen

Planet 9 entsteht ursprünglich weiter drin, bei Jupiter und Saturn, dann rausgeworfen durch gravitative Interaktion.

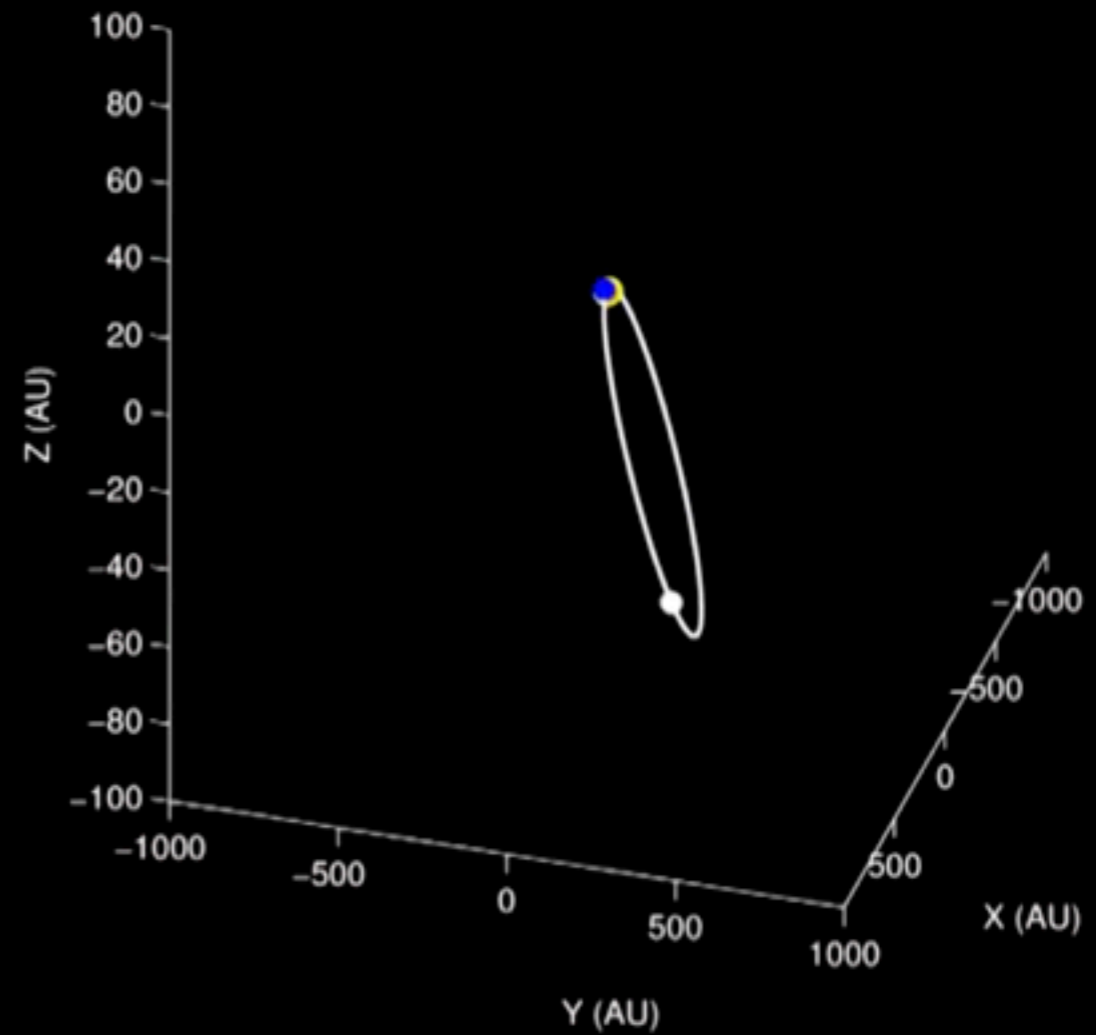
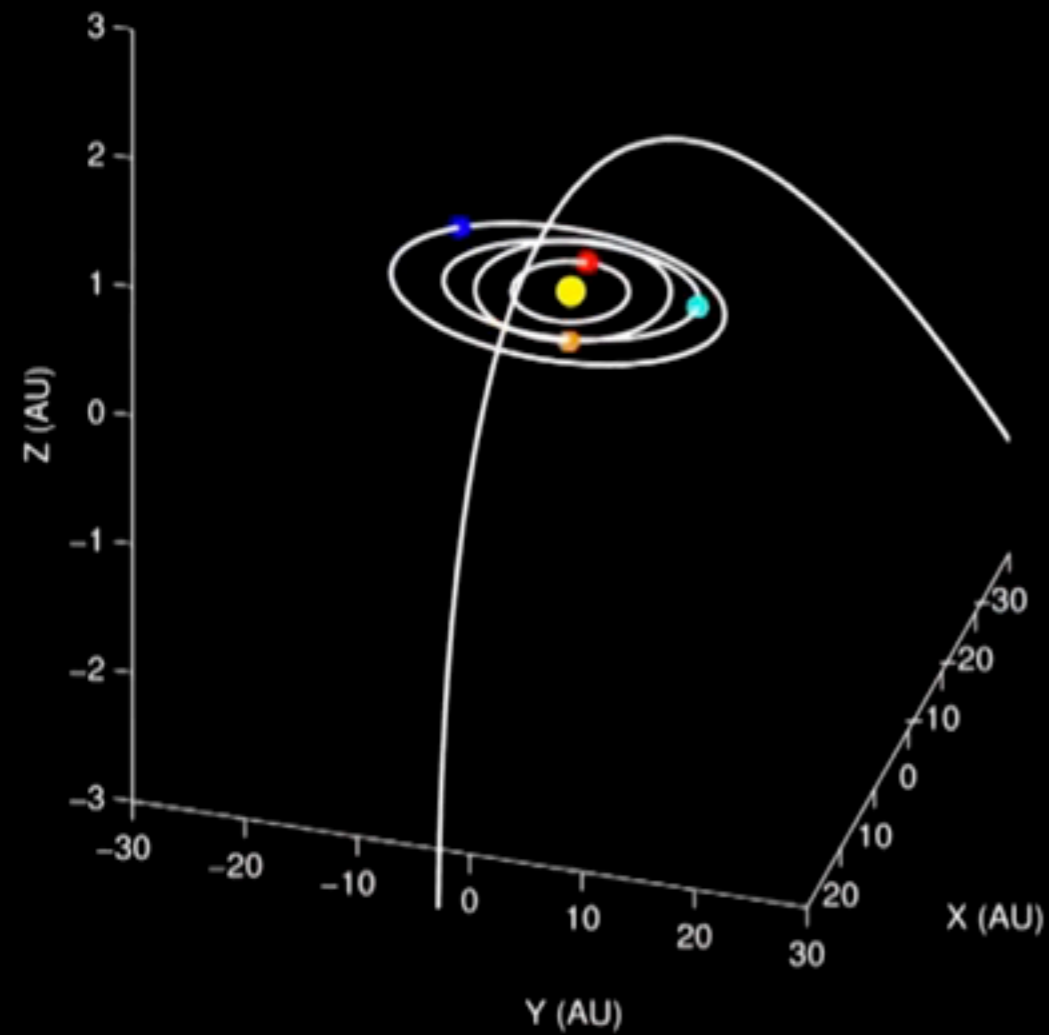
Aber nicht so einfach:

Kommt zurück zum Perihel bei 5-10 AU, bis ganz aus Sonnensystem herausgeworfen

# Entstehung von Planet 9



Time: 127900.00 Years



Es braucht einen zusätzlichen nahen Stern

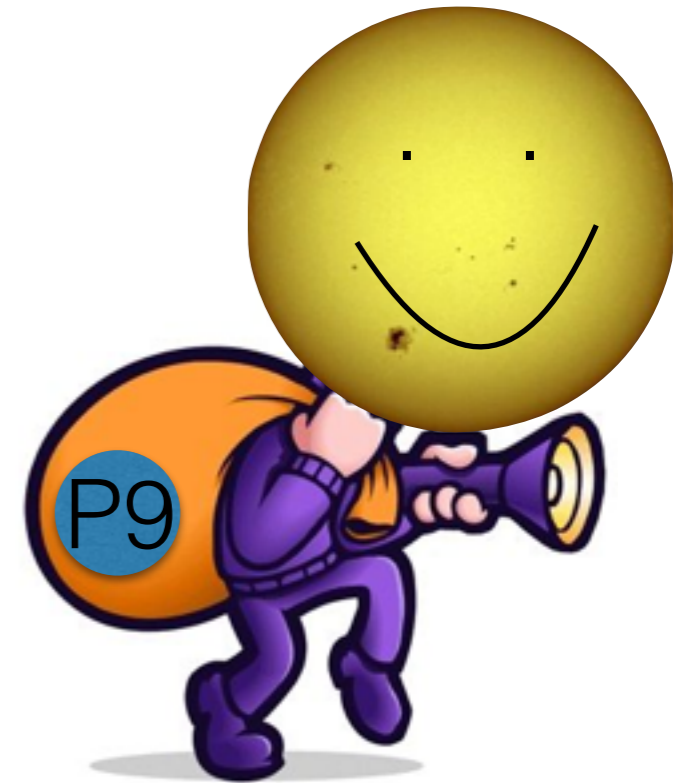
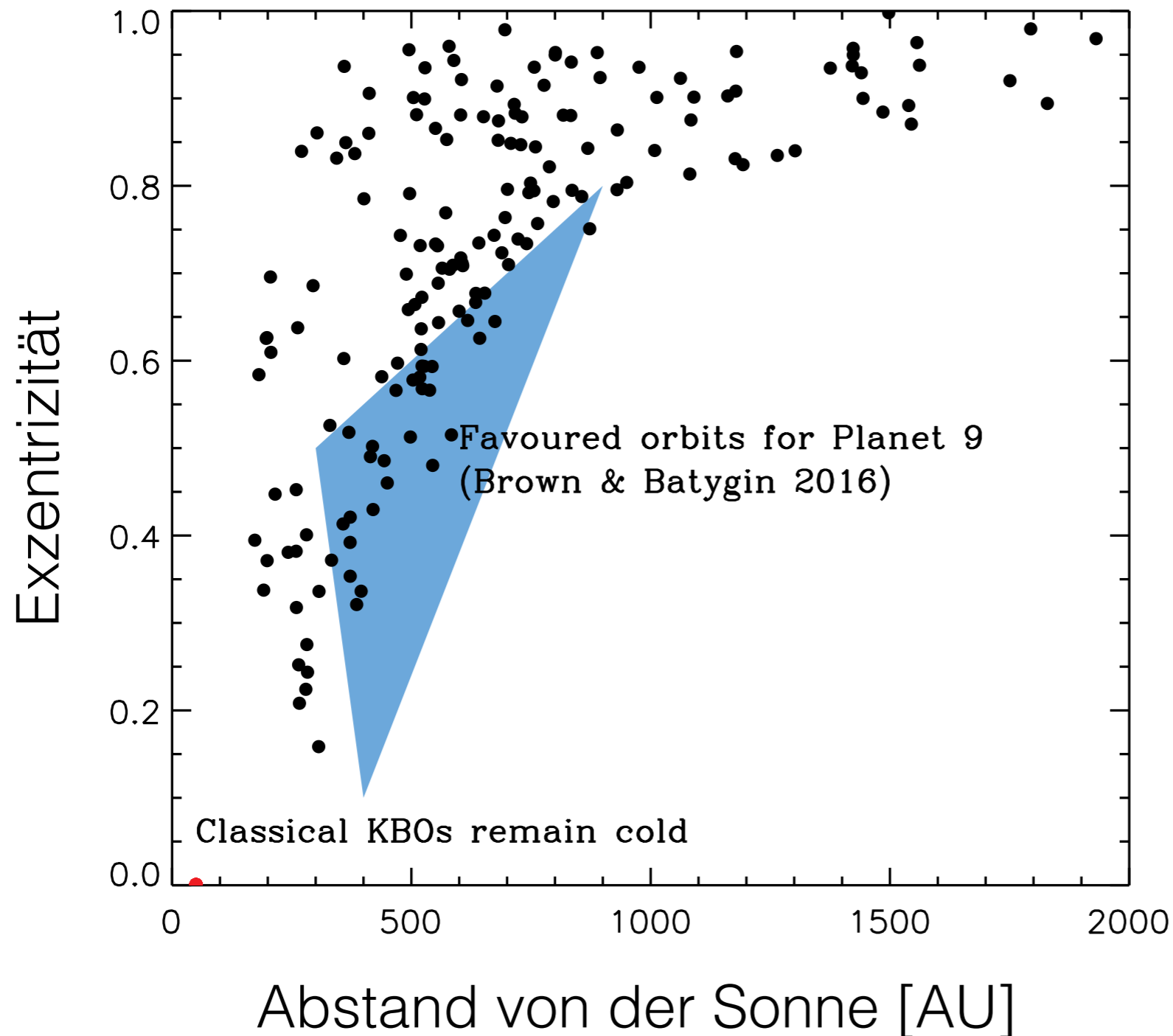






### 3. Planet 9 ist ein Fremdling und die Sonne ein Dieb

Planet 9 entstand ursprünglich um einen anderen Stern und wurde dann von der Sonne eingefangen.



Planeten die die Sonne in ihrer Jugend von anderen Sternen stehlen kann gleichen Planet 9.

# Wie könnte Planet 9 aussehen?

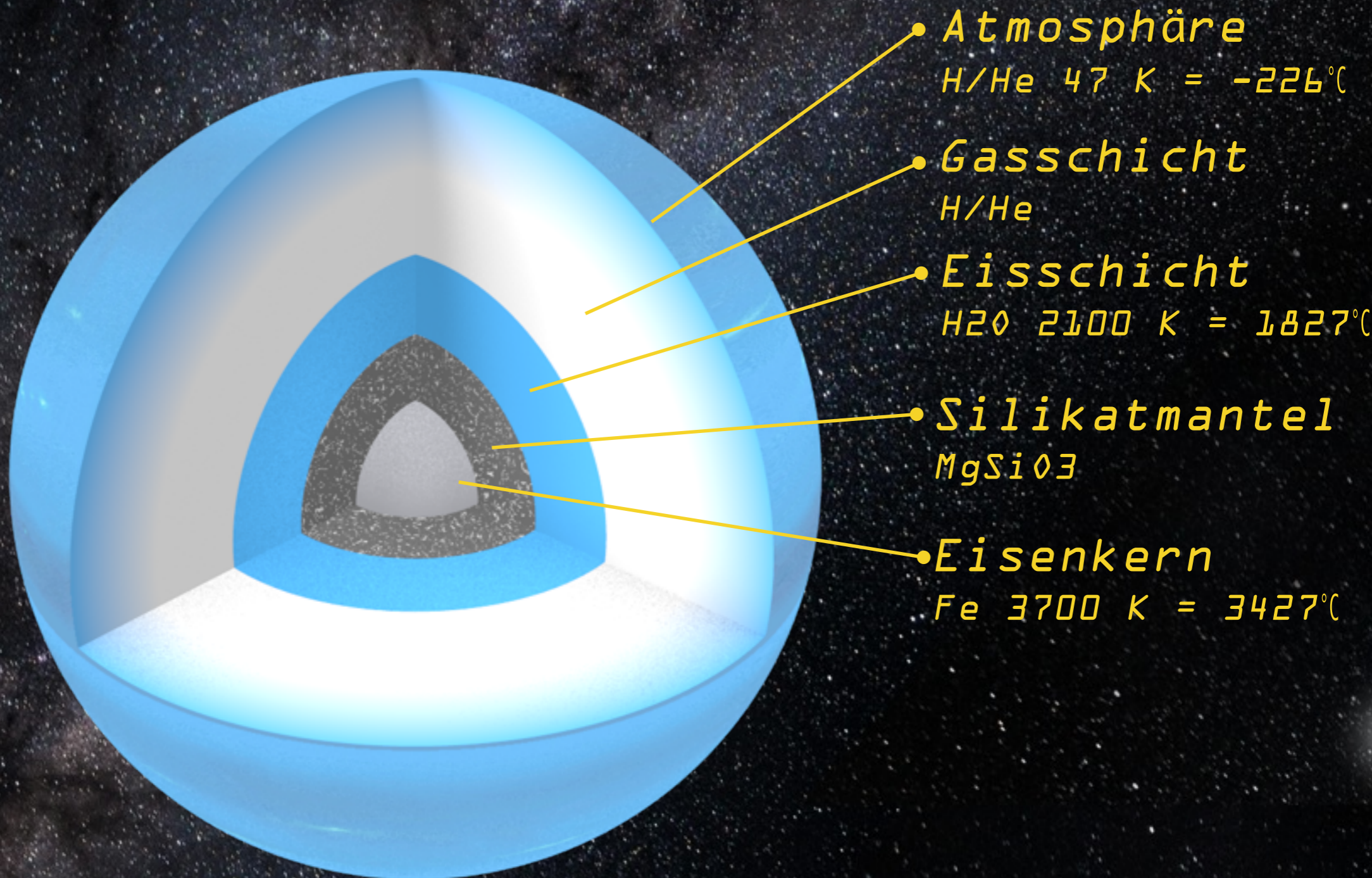
Wenn wir Planet 9 mit astronomischen Beobachtungen finden wollen wie damals Galle bei Neptun müssen wir wissen wie Planet 9 aussehen könnte.

Von seiner Masse und Position weit draussen her erscheint es wahrscheinlich dass Planet 9 ein *Mini-Eisriese* ist.

Also eine kleinere Version von Uranus und Neptune. Er würde dann vor allem aus Eis und ~10 % Wasserstoff und Helium bestehen.

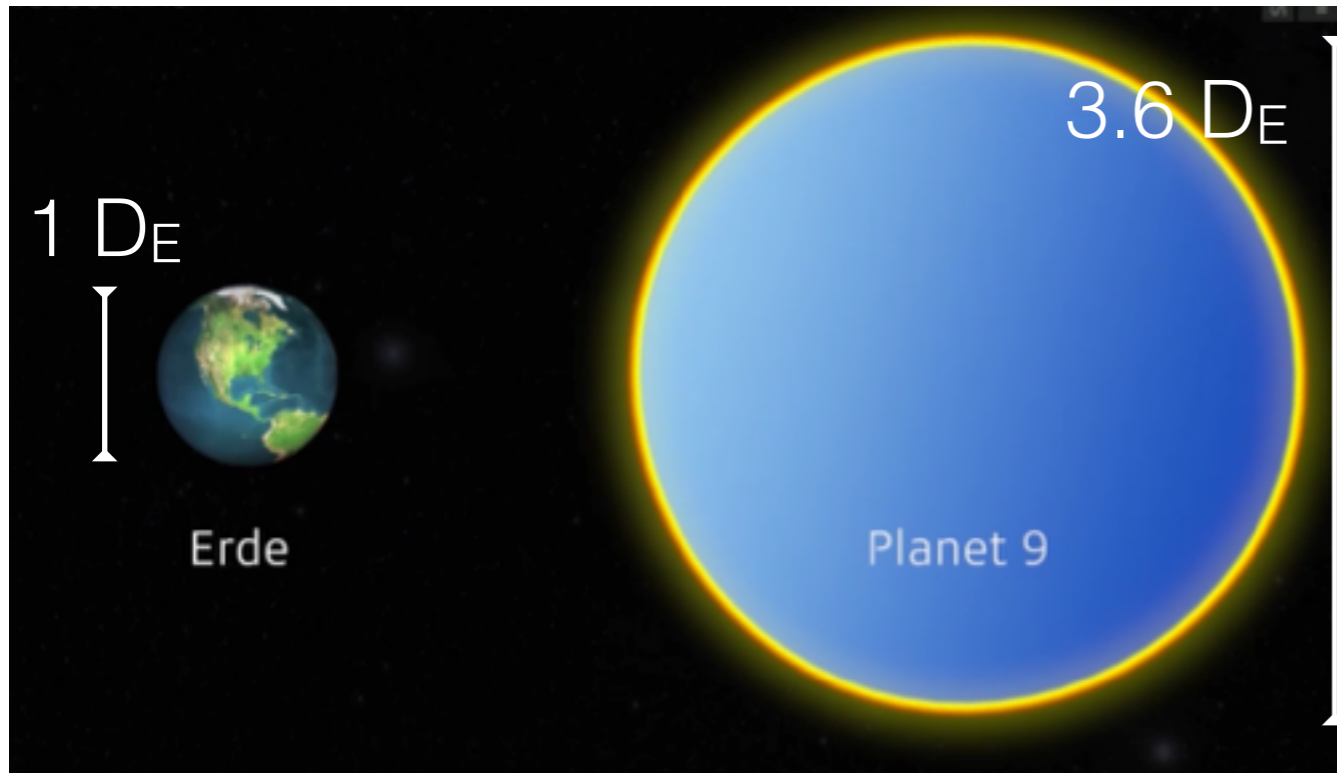
Unter dieser Annahme kann man die Struktur von Planet 9 berechnen.







# Grösse und Temperatur

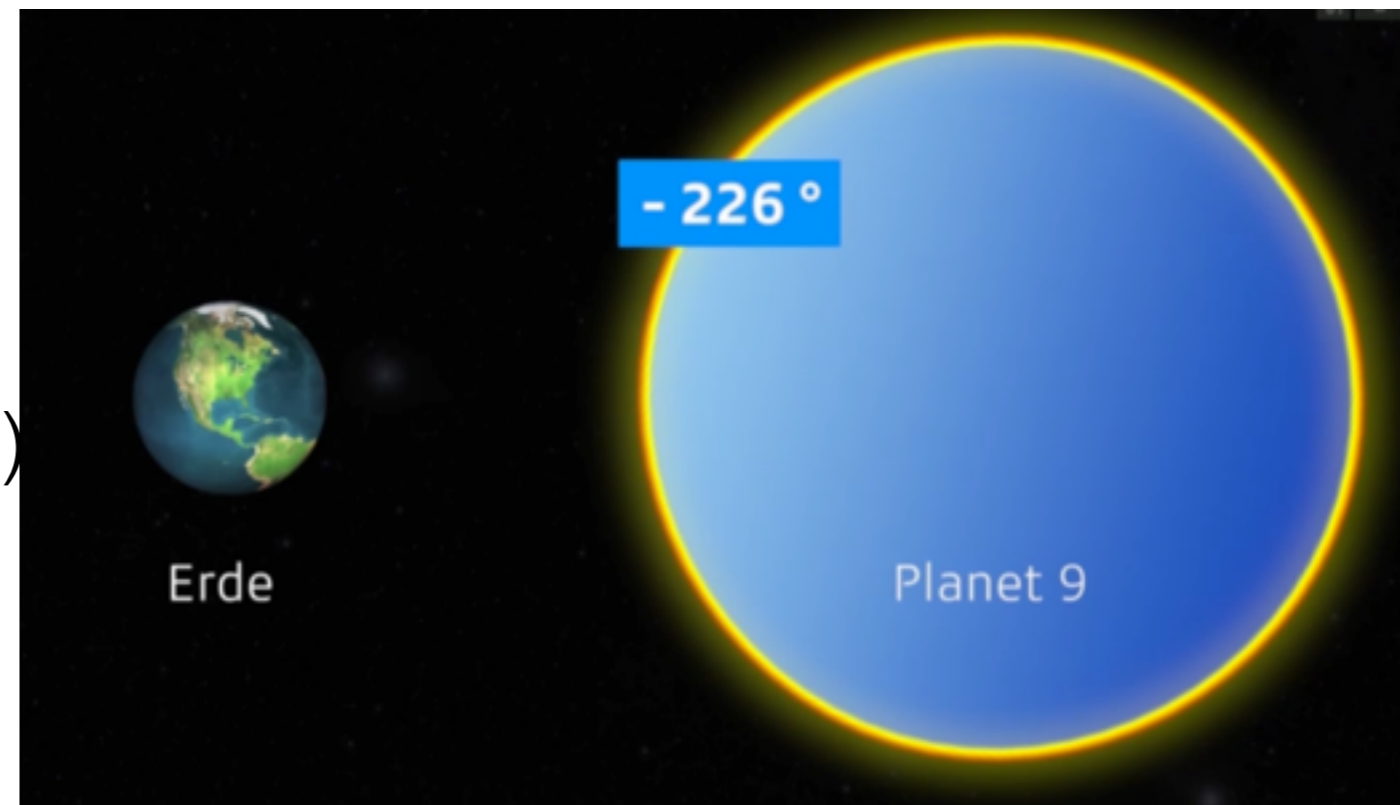


Planet 9 ist 2-4 mal so gross wie die Erde.  
Er hat keine feste Oberfläche.

In der Atmosphäre von Planet 9  
ca. 47 Kelvin = - 226 °C

Kalt, aber klar mehr als sog. Gleichgewichtstemperatur (11 K = - 262 °C)

Planet 9 strahlt Wärme aus seinem Innern ab (selbstleuchtend)



# Wie hell ist Planetenkandidat 9 ?

Planet 9 gibt zwei Arten Strahlung ab:

- reflektiertes Licht von der Sonne im sichtbaren Wellenlängenbereich
- intrinsische Strahlung vom Abkühlen im Infrarot

Helligkeit misst man in sogenannten *Magnituden*.

Nach Ptolemäus (100-160 nach Chr.) setzte man ursprünglich:

Hellste Sterne: 1 Magnitude

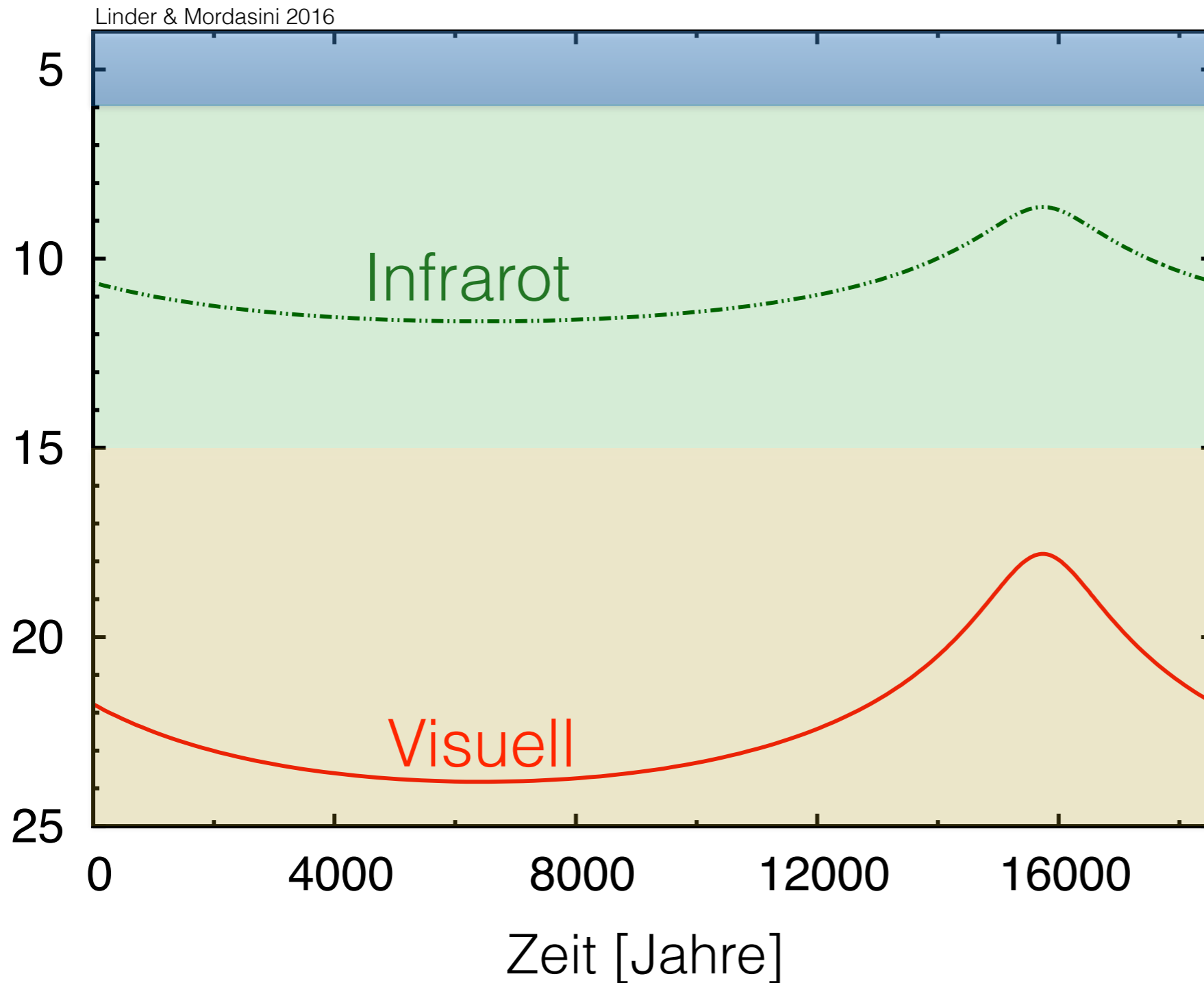
Schwächste Sterne (noch gerade erkennbar mit bloßem Auge): 6 Magnitude





# Helligkeit auf der Bahn

Scheinbare Helligkeit [Magnituden]

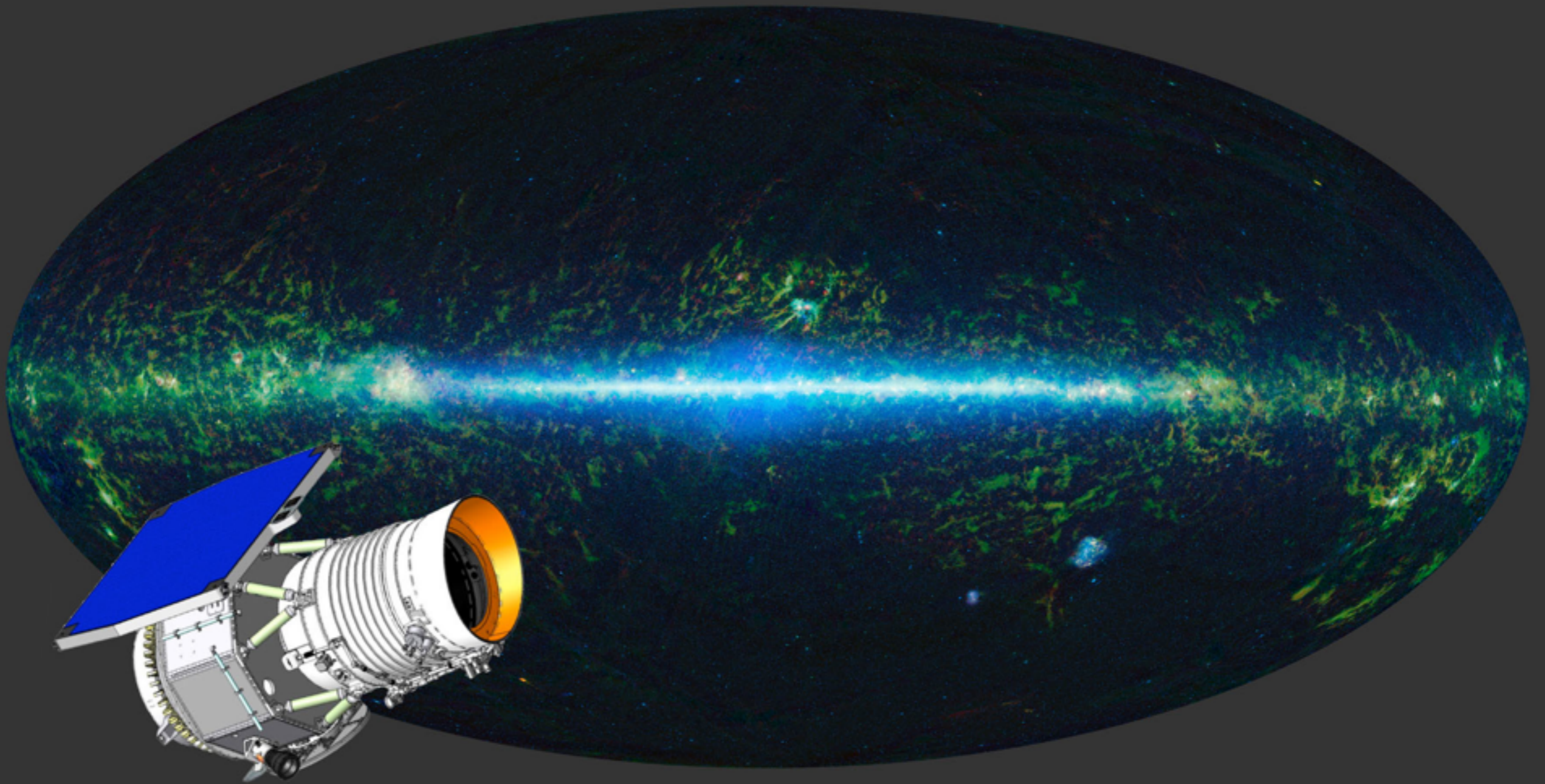


heller

- Im visuellen Wellenlängen: typisch 22-24 Magnitude. 24 Mag bedeutet  $\sim 15$  Mio. mal weniger Licht als von einem Mag 6 Stern (!).
- Im Infraroten: 8-11 Magnitude. Leider nur vom Weltraum aus!

# *Masse des Planeten 9*

Je massiver Planet 9, desto heller, vor allem im Infraroten.



Der NASA WISE hat den ganzen Himmel im Infrarot abgesucht.

Wäre Planet 9 massiver als ca. 50 Erdmassen, hätte er ihn gefunden.

# *Momentane Suche nach Planet 9*

Analoge Situation zu Neptune als Le Verrier seine Position vorausgesagt hatte, aber noch nicht von Galle beobachtet worden war.

## Unterschiede

- Datenlage weniger klar und komplexer
- Möglicher Himmelsbereich viel grösser
- Planet 9 viel leuchtschwächer

Vergangene Himmelsdurchmusterungen zu wenig “tief” (nur bis zur 21 Magnitude) oder am “falschen” Ort (nicht vor der Milchstrasse).

Deshalb nicht erstaunlich dass Planet 9 bisher unentdeckt.  
Jetzt: neue (geheime) Durchmusterungen.



# *Suchkampagnen nach Planet 9*

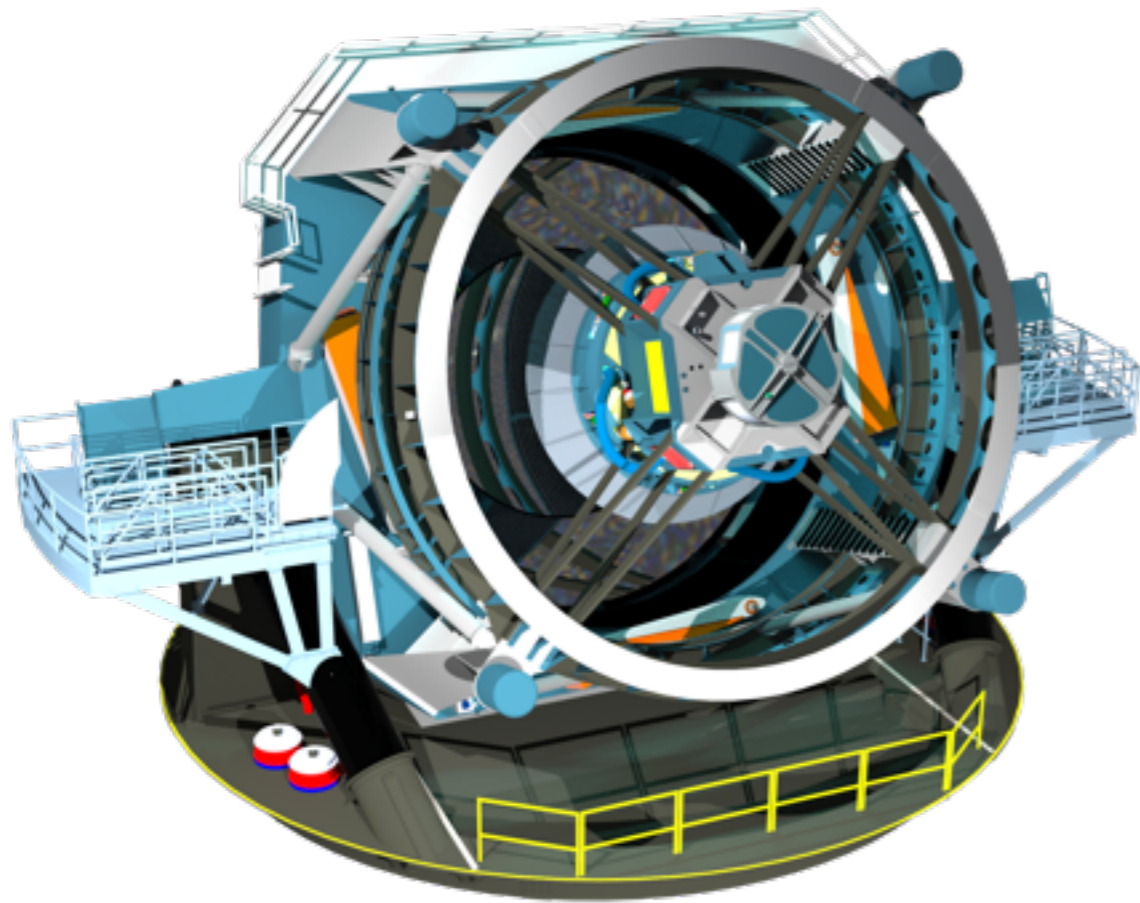
## Subaru Teleskop

- Teleskopdurchmesser: 8 Meter
- Manoa Kea Hawaii (4200 MüM)
- Durchmusterung in 8 Jahren





# Suchkampagnen nach Planet 9



## Large Synoptic Survey Telescope

- Beobachtung ab 2023 bis 26 Magnitude
- 3.2 Milliarden-Pixel Kamera
- Der ganze Himmel wird innerhalb von drei Tagen aufgenommen.

Wenn es Planet 9 wirklich gibt, sollten wir ihn innerhalb von 5-10 Jahren finden.



Mit dem E-ELT wird es möglich sein, nicht nur spielend “unseren” Planeten 9 zu untersuchen (Zusammensetzung), sondern auch extrasolare Planeten 9 zu entdecken.






[www.eso.org](http://www.eso.org)

Ein letzter Tipp falls Sie selbst suchen wollen:



Das Aphelion der Bahn von Planet 9 liegt im Orion... Vielleicht!





Vielen Dank  
für die  
Aufmerksamkeit