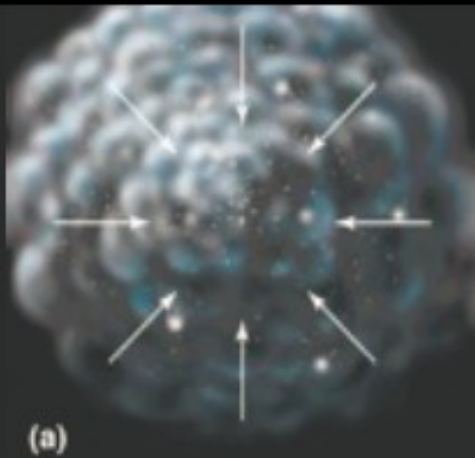




AST418
Gezegen Sistemleri
ve Oluşumu
Ders 2c :
Gezegen Oluşumu

3. Gezegen Oluşumu





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Credit: A.Doressoundiram

Başlangıç Koşulları:

Yıldız oluşum bölgesi ve öngezegen diskleri tarafından belirlenir.



Gezegen Oluşumu
(+ evrimi)



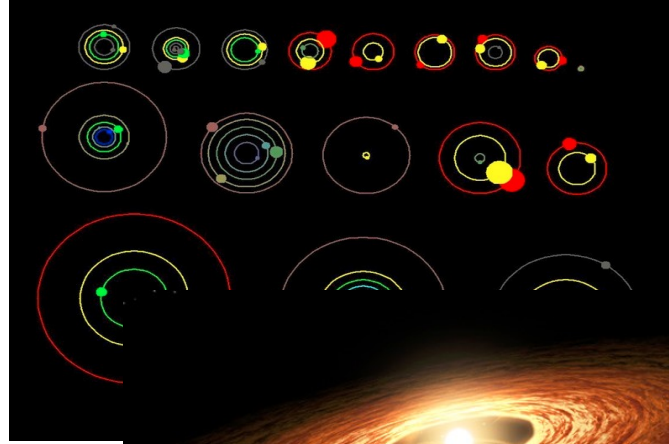
Sonuçta gözlenen yapılar:
İstatistiksel dağılım,
yörünge elemanları, barınak
yıldızın özellikleri



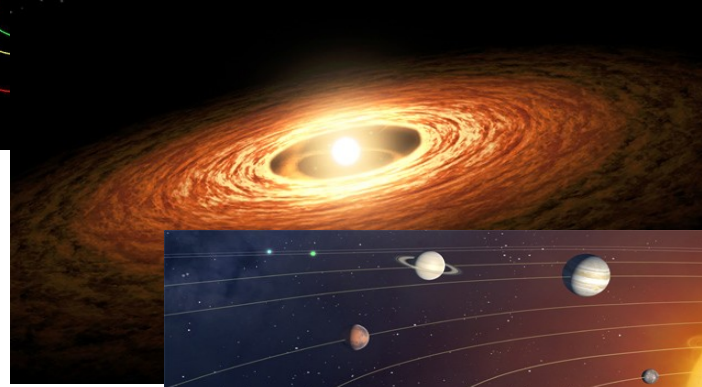
Modeller için
sınır koşulları
belirleyen
gözlemler

İyi bir oluşum senaryosu aşağıdaki sistemlerde gözlediğıimiz olguları açıklayabilmelidir.

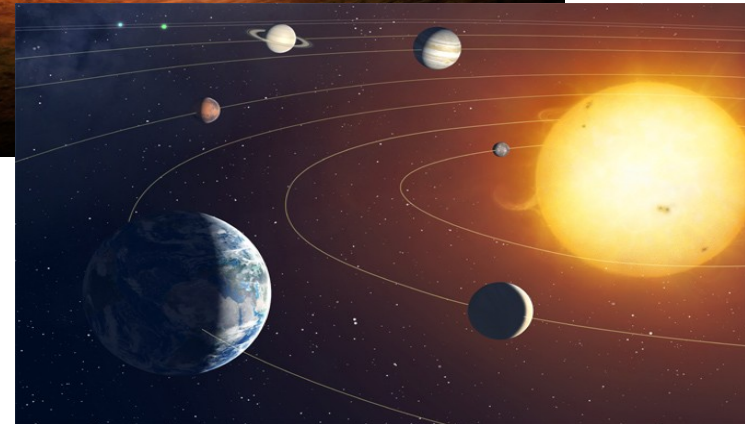
Ötegezegen Sistemleri



Öngezegen Diskleri



Güneş Sistemi



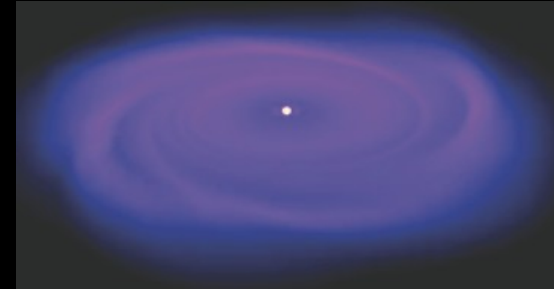
Gezegenler öngezegen disklerinde toz ve gazdan oluşurlar!

Safronov 69, Pollack vd. 96



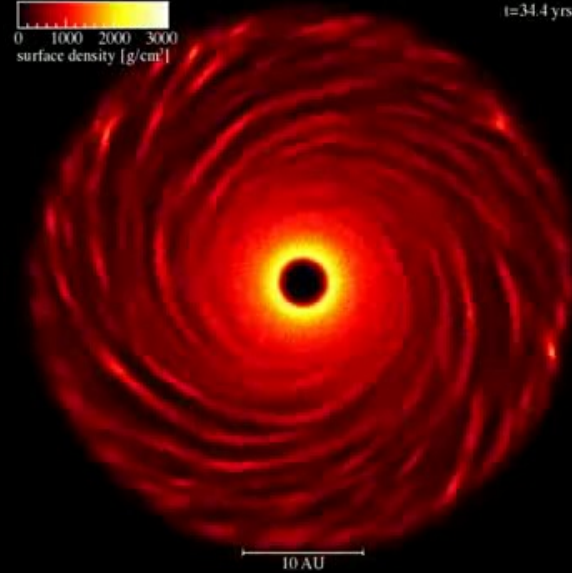
Çekirdek
Birikimi
Senaryosu

Disk
Kararsızlığı
Senaryosu



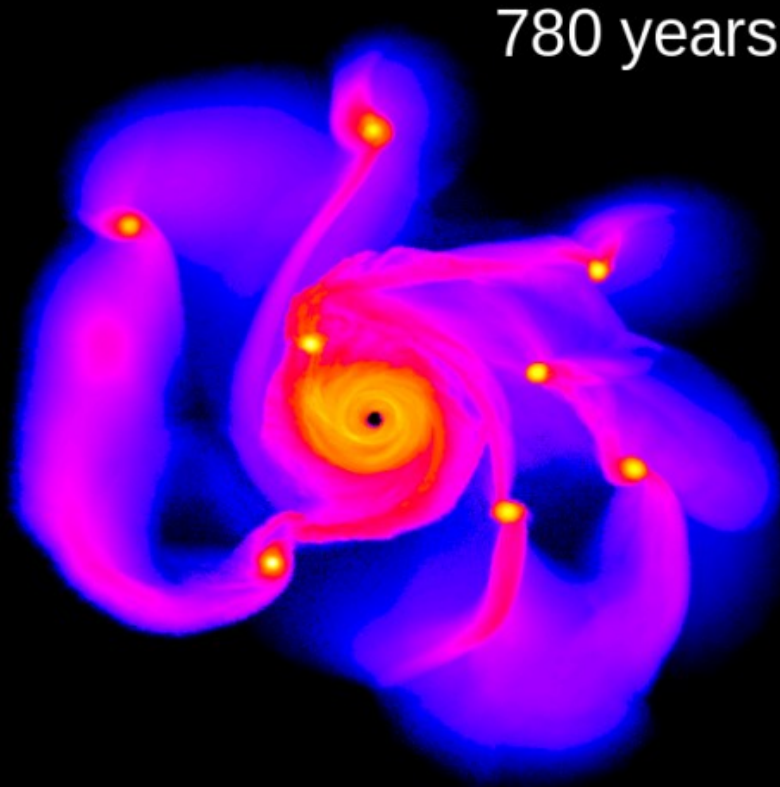
L. Meyer, T. Quinn

Disk Kararsızlığı Senaryosu



Disk kararsızlığı senaryosuna göre bir disk yeterince büyük kütleye sahipse kütleçekimsel olarak kararsız hale gelir. Kararsız bu öngezegen diskindeki gaz, spiral kollar ve bu kollarda topaklanmalar oluşturacak şekilde çökebilir. Bu topaklanmalar daha sonra yoğun bir çekirdek oluşturacak şekilde yerel olarak sıkışabilir. Bu parçalar ise dev gaz gezegenler oluşturacak şekilde hızla (birkaç yüz senede!) çökerler. Bu senaryoya göre gezegenler ilk oluştuklarında en az $2 M_{\text{jüp}}$ kütleye sahip olurlar. Ancak yakın zamanlı gözlemler bu sınırın daha küçük olabileceğini düşündürmektedir.

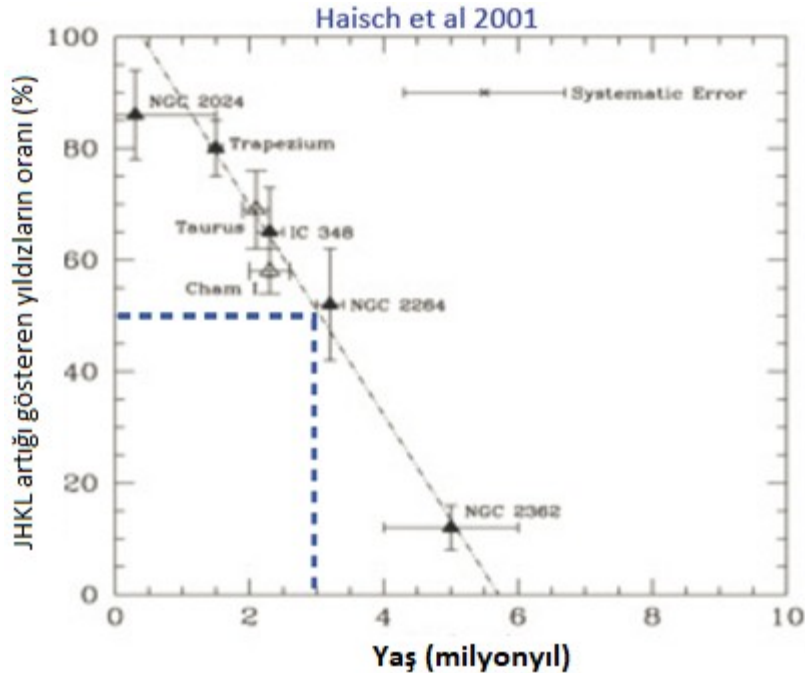
Disk Kararsızlığı Senaryosu



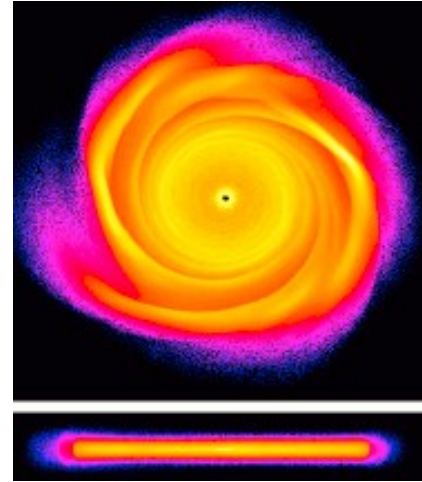
Disk kararsızlığı senaryosu temelinde oluşturulan bilgisayar simülasyonları, yaklaşık 10^4 sene gibi bir zaman ölçeğinde diskteki materyalin spiral kollar ve bu kollarda daha sonra dev gaz gezegenler olacak (ön)gezegenimsileri oluşturacak şekilde çökmesini öngörmektedir. Yukarıda L. Mayer & T. Quinn tarafından hazırlanan bir simülasyonun öngezegen diskinin oluşumundan 780 yıl (solda) ve 1942 yıl (sağda) iki anı görülmektedir.

Disk Kararsızlığı Modeli

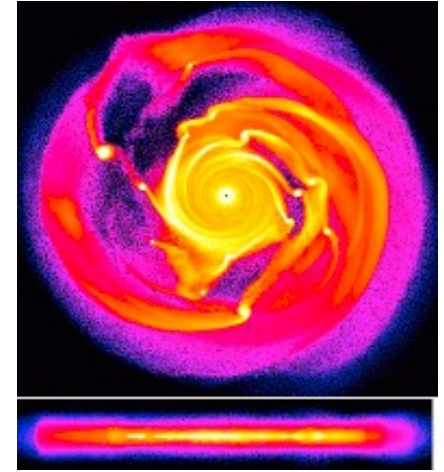
Motivasyon: Diskin hızla (2-3 milyon yıl) kaybolması ve gezegenlerin hızlı oluşumu!



Senaryonun **avantajı** diskte kararsızlığın çok çabuk oluşabilmesi bu nedenle gezegen oluşum zaman ölçeğini (2-3 milyon) daha iyi açıklayabilmesi, **dezavantajı** ise kararsızlığın oluşabildiği koşulların oldukça özel (**düşük sıcaklıklı ve büyük kütleli disk yapısı**) oluşudur.



T = 160 yıl



T = 350 yıl

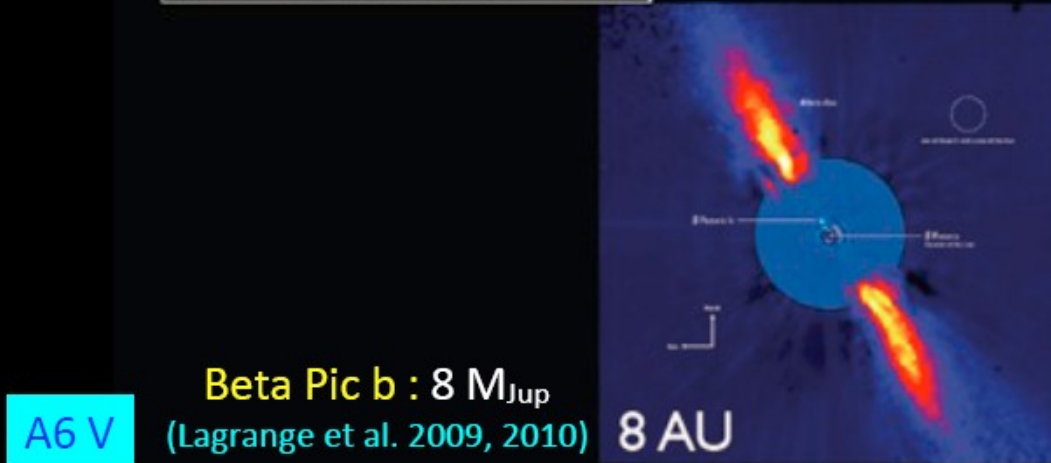
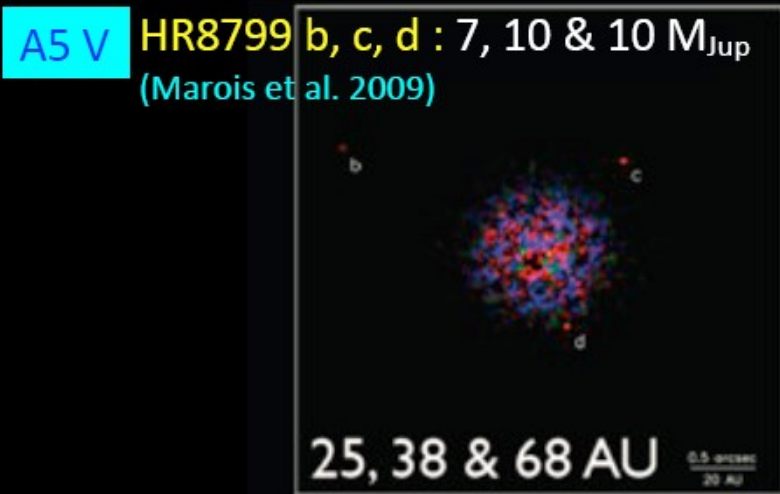
Disk Kararsızlığı Senaryosu

Disk kararsızlığı senaryosunun en önemli zayıflığı gerçekleşmesi için özel koşullara ihtiyaç duyulmasıdır. Öngezen diskinin kütleçekimsel olarak kararsız hale gelebilmesi için **Toomre Kriteri** (Toomre, 1964) 'ni sağlaması gerekir.

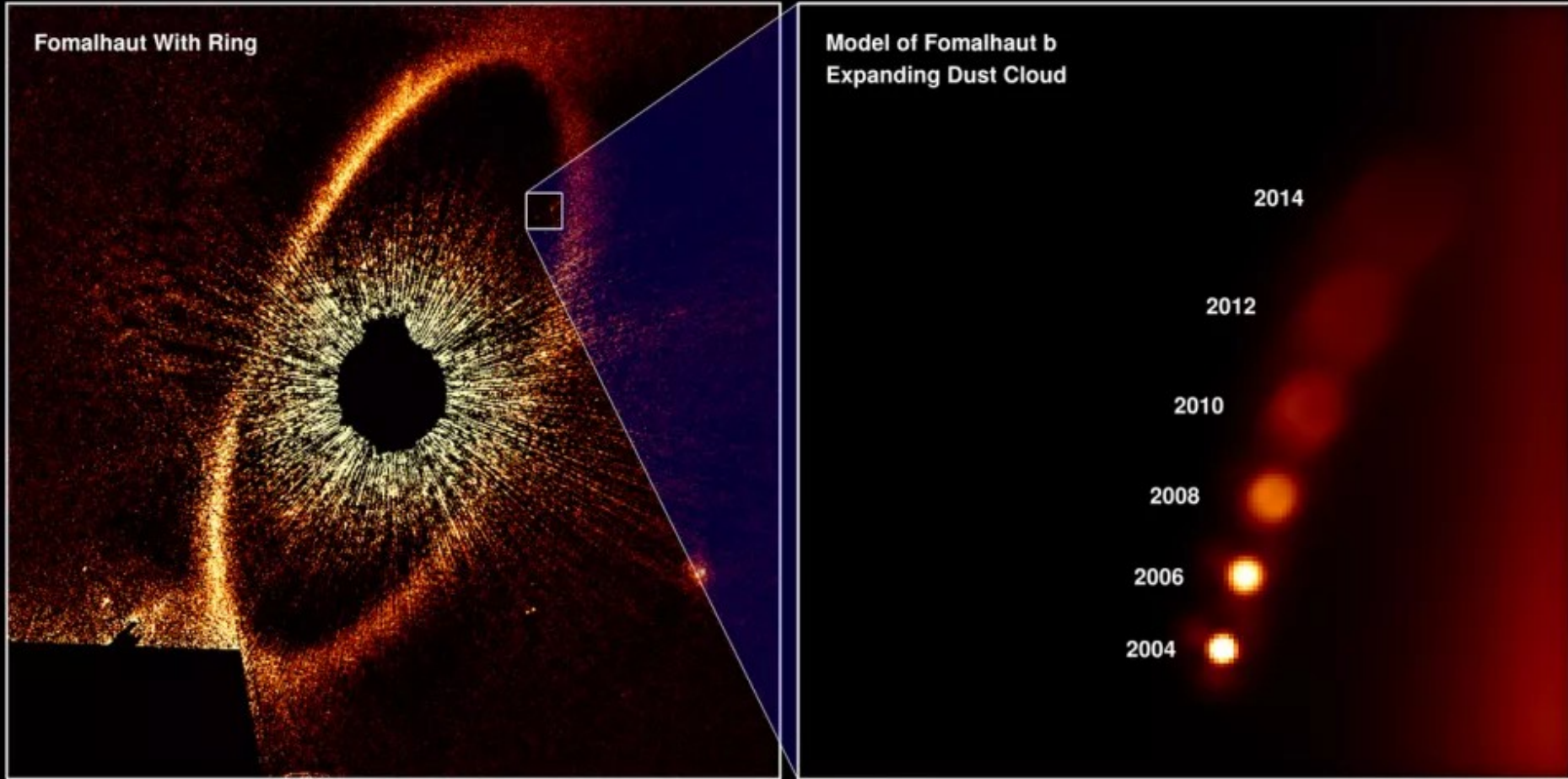
$$Q = \frac{c_s \Omega_k}{G \pi \Sigma}$$

Burada c_s , ses hızını; G , evrensel çekim sabitini gösterirken; Ω_k , gazın hangi hızda döndüğünü belirleyen yörünge frekansı [rad / s], Σ ise yüzey basıncıdır. $Q < 1$ olması durumunda disk kütleçekimsel olarak kararsız hale gelir. Buna karşın spiral kol oluşumunun $Q < 1.7$ (Durisen vd. 2007), eş-sıcaklıklı disklerde ufalanma süreçlerinin $Q < 1.4$ (Nelson vd. 1998) gerçekleştiği gösterilmiştir. Bu aradaki farkların (eşik değerler üzerindeki esnekliğin), kriterin sonsuz ince ve dönme eksenine göre simetrik diskler için geliştirilirken, gerçek öngezen disklerin bu yapıda olmamasından kaynaklanmaktadır. Diskin başlangıçta kararsız olup olmadığı, ne zaman kararsız hale geldiği ve herhangi bir zamanda gözlenen gezegenlerin disk kararsızlığı senaryosuyla oluşup oluşmadığını belirlemek ise çok güçtür.

Disk kararsızlığı senaryosunda dikkate alınması gereken bir diğer önemli koşul diskin **soğuma zaman ölçeği** ($\tau_{\text{soğuma}}$) ile ilişkilidir ($\beta = \tau_{\text{soğuma}} \Omega_k$). Gazın hızla soğuyup büzülmesi gerekir ki disk basıncı onu dağıtmasın. Herhangi bir disk yarıçapı için bu ölçeğin ne düzeyde olması gerektiği literatürde çok tartışılan bir konu olmakla (birkaç yörünge döneminden, 20-50 yörünge dönemine kadar) birlikte hızla soğuma ancak diskin uzak bölgelerinde (> 30 AU) gerçekleşebileceği için diskin başlangıç koşulu olarak kütleli olmasının yanı sıra soğuk da olması gerekir ki bu durum, disk kararsızlığı senaryosunun ancak özel koşullarda gerçekleşebileceği anlamına gelir.



Disk Karasızlığıyla Oluşmuş Olabilecek **Büyük Kütleli** ve **Yıldızından Uzak**
(sıcaklığın düşük olduğu diskin dış bölgelerindeki) Gezegenlere Örnekler

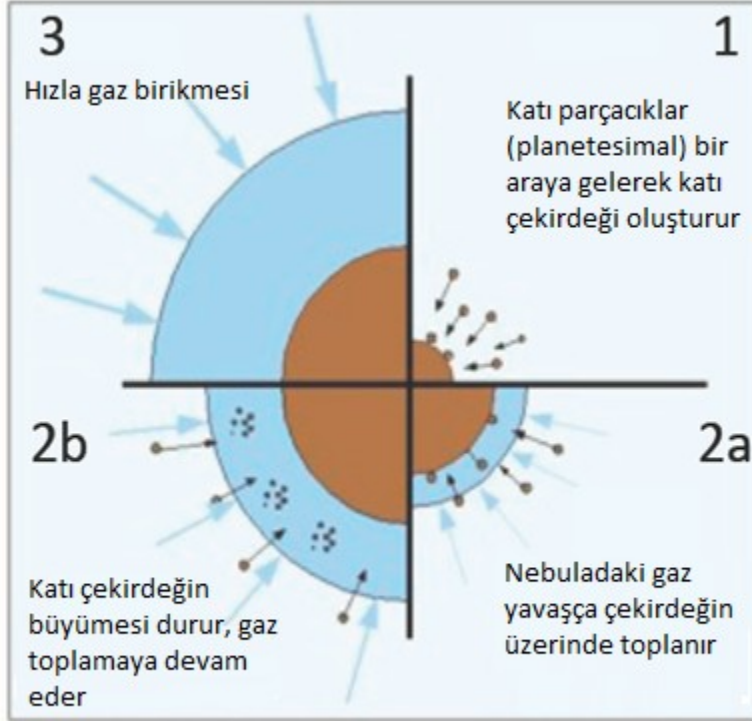


Fomalhaut diskinin içinde gözlenen yapının bir gezegen olmadığı birbirleriyle çarpışarak gerilerinde bir toz tabakası bırakan asteroidler olabileceği anlaşılmıştır (Gáspár & Rieke 2019). **Solda**, Fomalhaut çevresindeki diskin bir görüntüsü, **Sağda** bir zamanlar bir gezegen olduğuna inanılan, ancak şimdi bir asteroit çarpışmasının tozlu kalıntıları olduğu düşünülen bir nesnenin zaman içinde öngörülen değişimi verilmiştir (NASA, ESA, A. Gáspár ve G. Rieke (University of Arizona)).

Çekirdek Birikimi Senaryosu

Soharov 1969, Pollack vd. 1996

Özellikle diskin dış bölgelerinde önce gezegen çekirdeğinin oluşup sonra üstüne materyal biriktirmesi çok zaman alır.



(Courtesy of W. Benz, Y. Alibert)

Çekirdek Birikimi Senaryosunun 3 Aşaması

1. Gezegen oluşturacak katı parçacıklar (planetesimal) çevre bölgeden biriktirilir.
2. Katı ve gazların yavaş yavaş oluşan çekirdeğin üstüne doğru birikmesi ile gaz kütlesi arttıkça öngezegeni besleyen bölge genişler. Hill yarıçapı

$$r_{Hill} = \left[\frac{m_g}{3 M_*} \right]^{1/3} a$$

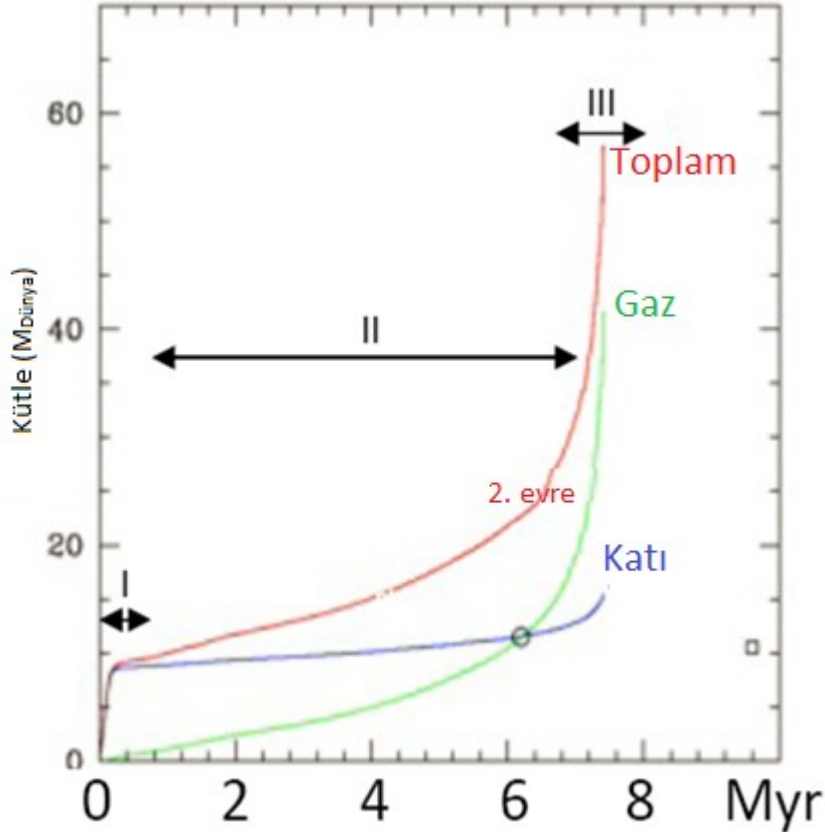
gezegeni besleyen bölgenin yarıçapı olarak tanımlandığında, gezegen kütlesi ile yıldız kütlesi oranının küp kökü ile bu bölgenin yarıçapının da büyüdüğü görülür.

3. Biriken gazın kütlesi, çekirdeğin kütlesine ulaştığı anda ($M_{gaz} = M_{çekirdek}$) denge bozulur ve hızla gaz biriktiren (runaway gas accretion) gezegen oluşur.

Çekirdek Birikimi Senaryosu

Soharov 1969, Pollack vd. 1996

Aşağıda katı, gaz ve toplam kütlenin zamanla artışı görülmektedir. Bu artışın 3 farklı evreye karşılık gelen 3 farklı karakteristiği gözlenmektedir.



I. Evre: Diskin öngezegeni besleyen bölgesinde topaklanmalar sonucu oluşan parçalar (planetesimal) çekirdeği oluşturur. Bu evre hızlı geçer.

II. Evre: Çevre maddeden gaz ve katı biriktirildikçe yavaş bir şekilde kütle artar ve buna bağlı olarak Hill Yarıçapı da büyür ve gezegenin beslendiği bölge genişler.

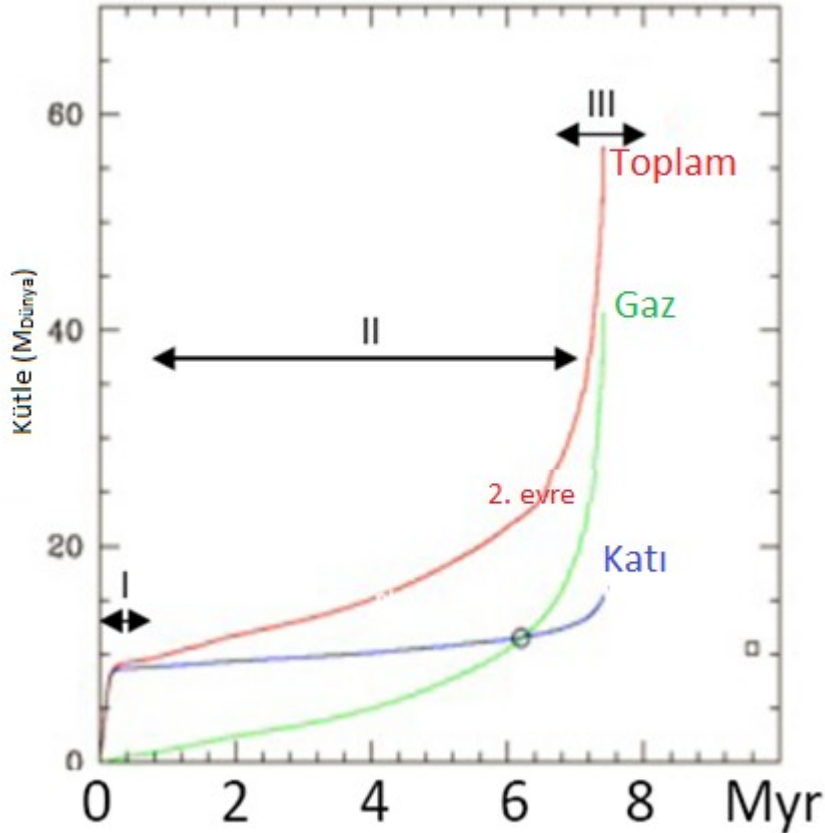
III. Evre: Çekirdek kritik kütleye ulaştığında ($5-20 M_{\text{yer}}$) madde (gaz) biriktirme süreci çok hızlanır ve gezegenin kütlesi hızla artar.

Oluşumun zaman ölçeğini II. Evre belirler. 10 milyon yıldan daha kısa bir sürede gezegen oluşması için büyük kütleli bir molekül bulutuna ihtiyaç vardır.

Eğer disk evrimi sırasında küçülmesi ve gezegenin disk içinde hareket ederek madde biriktirmeye devam etmesi dikkate alınacak olursa bu yavaş büyüme ve büyük kütleli bulutsu ihtiyacı aşılabılır! (Alibert 2004, Benz 2007)

Çekirdek Birikimi Senaryosu

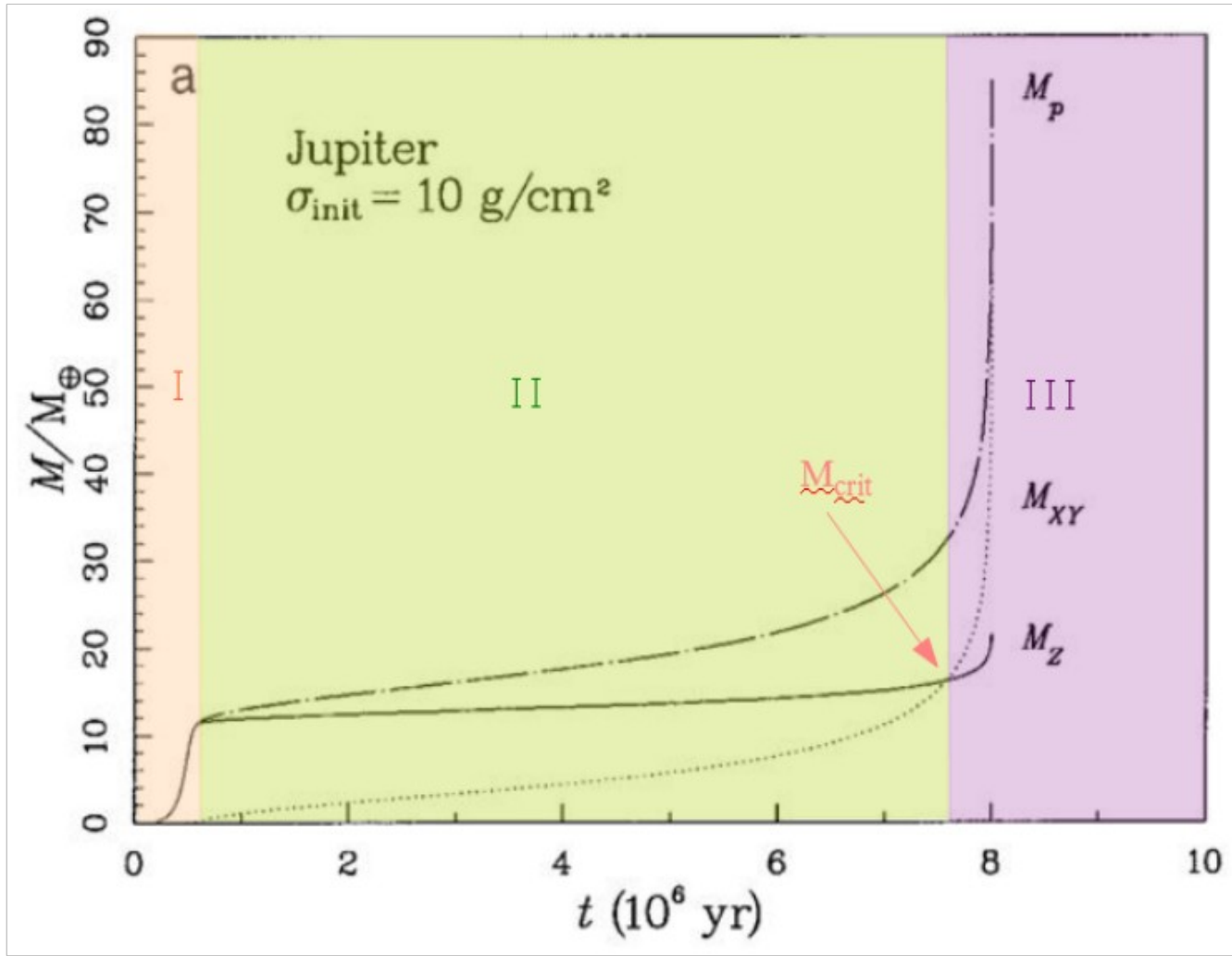
Soharov 1969, Pollack vd. 1996



III. Evre, o kadar hızlı geçilir ki gezegen ya katı bir çekirdek olarak kalır, ya da çok hızla bir gaz zarf biriktirir ve Jüpiter kütlesi boyutlarına ulaşır.

Bu ikiye dallanma, gezegen kütlelerinde iki modlu bir dağılımla karşılaşacağımızı söyler ki gözlenen de budur. Çok sayıda küçük kütleli gezegen ve az sayıda büyük kütleli ($M_{\text{gezegen}} > 20 M_{\text{yer}} - 1 M_{\text{Jüp}}$) gezegen.

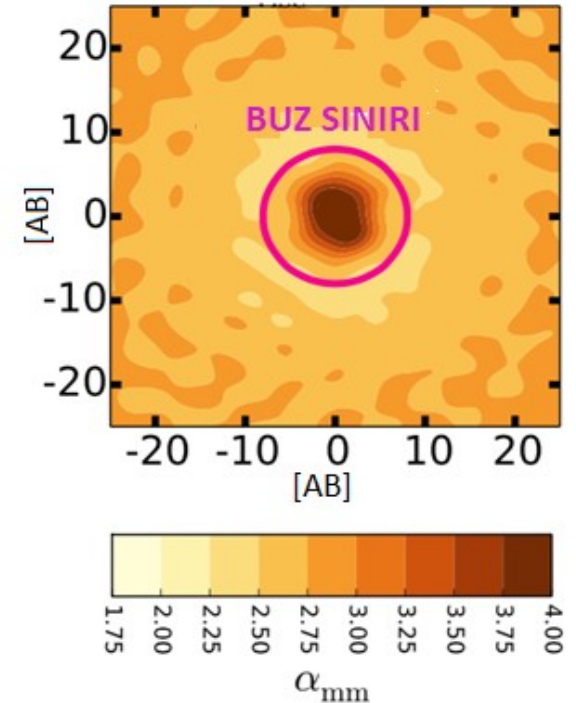
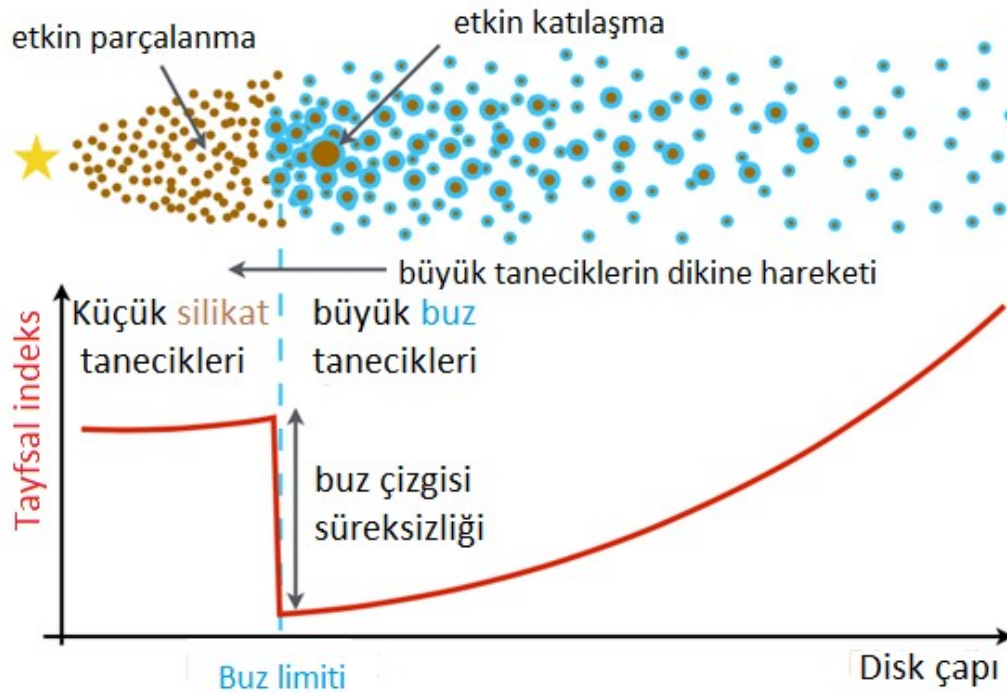
Dolayısı ile **katı gezegenler** (ing. **terrestrial planets**) çevresinden bir nedenle (küçük kütleli olmaları ya da etrafta fazlaca gaz kalmaması gibi) çok fazla gaz biriktirememiş öngezen çekirdeklerinin soğumasıyla oluşur.



Grafiğin arkaalan renkleri soldan sağa I, II ve III. Evrelere karşılık gelmektedir. Kırmızı ok ile gösterilen kritik kütle (M_{crit}) çekirdek ile zarf kütlelerinin eşitlenip; çekirdeğin çevreden hızla gaz biriktirdiği (ing. runaway gas accretion) evrenin başlangıcına karşılık gelmektedir (Pollack vd. 1996). M_{xy} gaz kütlelerini, M_z katı kütlelerini, M_p gezegenin toplam kütlelerini göstermektedir.

Buz Çizgisi (ing. Snow Line, Frost Line, Ice Line)

Buz çizgisi, disk merkezindeki önyıldızdan (ing. protostar) su (H_2O), amonyum (NH_4), metan (CH_4), CO_2 , CO gibi moleküllerin katı parçacıklar halinde bulunabileceği limit uzaklığı verilen isimdir. Bu limitin ötesinde bu parçacıklar katı halde bulunabildiği için, az sayıda ağır metallere oluşan katı parçacıklarla (ing. planetesimal) birlikte büyük bir çekirdeğin oluşmasını ve bu çekirdeğin hızla dev gezegen oluşturacak kadar kütle toplayabilecek bir kütle çekimine ulaşmasını sağlamaları açısından önemlidir. Çekirdek birikimi teorisine göre dev gaz gezegenler bu nedenle buz çizgisinin ötesinde oluşmalıdır. Ancak pek çok ötegezegen sisteminde (gözlemsel seçim etkileri nedeniyle çok sayıda) gözlediğimiz sıcak-Jüpiter türü gezegenlerin yıldızlarına çok yakın olduklarını biliyoruz. Bu tür gezegenlerin bugün bulundukları yere **göç (ing. migration)** mekanizmalarıyla taşındıkları düşünülmektedir.



Çekirdek Birikimi – Disk Kararsızlığı

Gözlemsel Kanıtlar

Çekirdek Birikimi

- ✓ Güneş Sistemi gözlemleriyle ulaşılan bulgular (Slayt 2) ile uyumlu.
- ✓ Ötegezegen gözlemlerinden gelen yıldızların metalisitesi ile dev gaz gezegen barındırma olasılıkları arasındaki korelasyon. Metalce zengin diskler → büyük çekirdekler
- ✓ Metalce zengin barınak yıldızların daha çok kısa yörünge dönemli gezegen içermeleri → “içeride” oluşan gezegenler
- ✓ Tip-II göçün ve türbülans etkilerinin gözleniyor oluşu → oluşum zaman ölçeğinin uzaması
- ✓ Disk kararsızlığı yaklaşımının iyi açıkladığı sıcak-Jüpiterlerin bulunma kolaylıkları nedeniyle neden oldukları seçim etkisi.

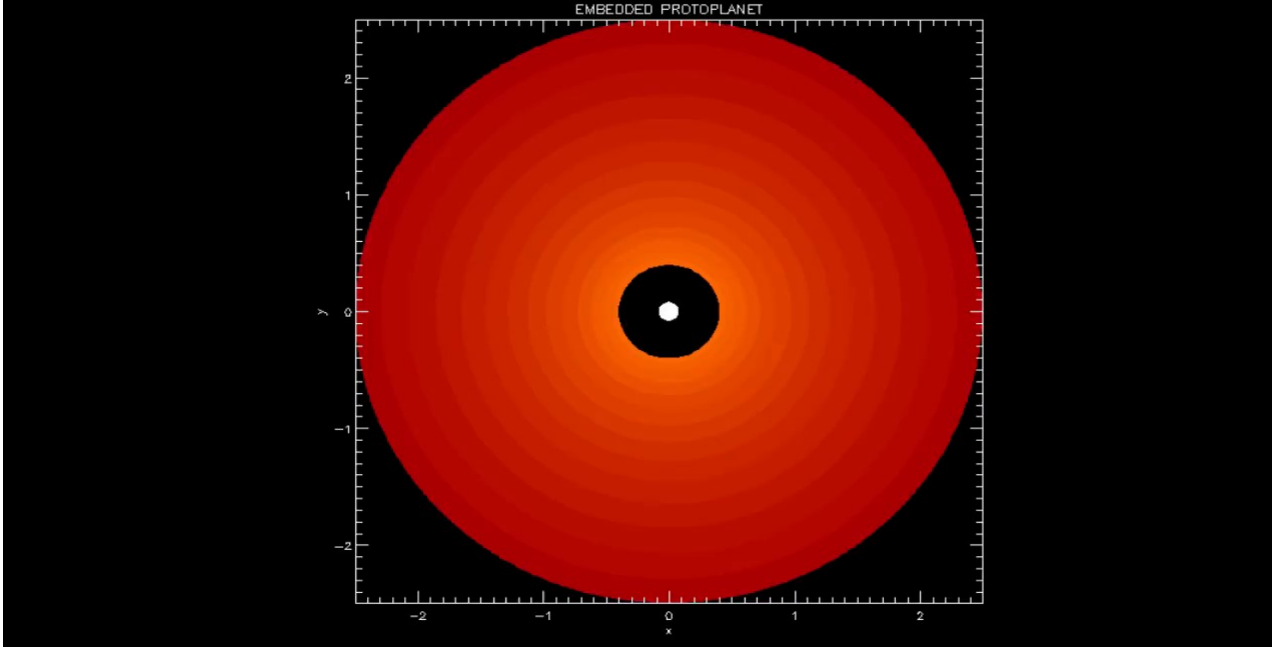
Disk Kararsızlığı

- ✓ Gaz gezegenlerin çekirdek birikimi senaryosuna göre diskin yaşam süresinden (2-3 milyon yıl) uzun bir sürede oluşmaları mümkünken (> 10 milyon yıl), bu senaryoda çok daha kısa sürede oluşurlar
- ✓ Metalce fakir yıldızların etrafında az da olsa bulunan dev gaz ötegezegenlerin çekirdek birikimi senaryosu ile oluşma olasılıkları daha zayıftır.
- ✓ Sıcak Jüpiterler çıkarıldığında barınak yıldızların metal bolluğu ile ötegezegen barındırma sıklığı arasındaki korelasyon kalkar.
- ✓ Genç yıldızların etrafındaki yıldızdan uzak ötegezegenler en önemli kanıttır.
- ✓ Gezegen yörüngesinin eğimi konusunda çekirdek birikimi teorisinin koyduğu kadar dar bir aralık şartı yoktur!
- ✓ Yakın zamanda yıldız oluşum bölgelerinde izole olarak oluştuğu gözlenen küçük kütleli cisimlerin varlığı

Gezegen Göçü ve Gezegen Sistemlerinin “Mimari” Evrimi

- ✓ **Gezegen-disk (gaz) etkileşimleri** yoluyla gezegenlerin **açısai momentum kaybederek içeri** ya da **kazanarak dışarı** göçleri
- ✓ **Gezegenlerin diskten kalan katı parçacıklarla (ing. planetisimals) etkileşimleri** yoluyla açısai momentum kazanarak / kaybederek göçleri
- ✓ **İki ya da daha fazla sayıda dev gezegen içeren sistemlerin kararsızlığı nedeniyle etkileşimler** gezegenlerin bir bölümünün yüksek dışmerkezli (eksantrik) yörüngelere, bir bölümünün sistem dışına göçüne; hatta gezegen çarpışma ve birleşmelerine yol açabilir.
- ✓ **Gezegenler arası, çift sistemlerde bileşenle, tek sistemlerde yakın bir yıldızla etkileşimler** nedeniyle gezegen yörüngelerinin von Zeipel-Kozai-Lidov mekanizmasıyla eksantrik hale gelmesi ve enberi geçişlerindeki tedirginlik etkileşimleriyle gezegenlerin sistemin içine göçleri.
- ✓ **Gezegenler arası ve barınak yıldızla tedirginlik etkileşimleri** nedeniyle gezegenlerin yörüngelerinin küçülmesi ve hatta barınak yıldızlarının üzerine “düşebilmeleri”

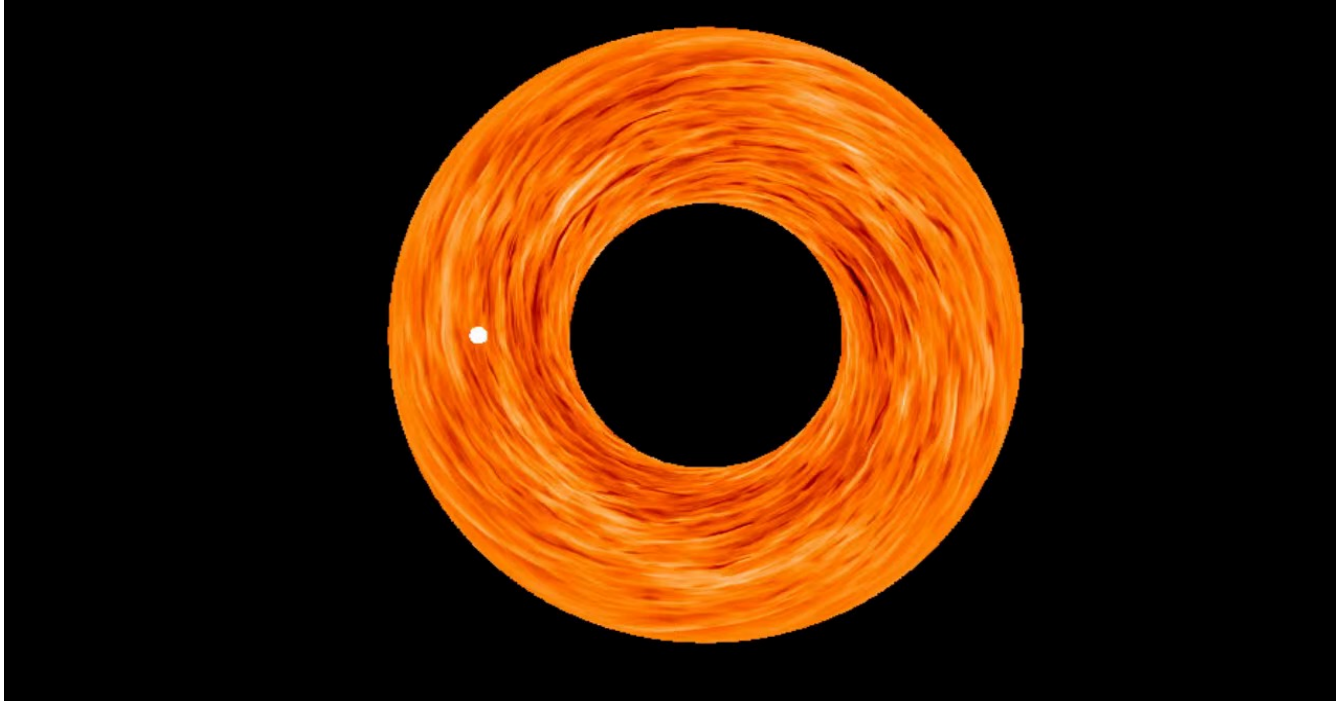
Disk-Gezegen Etkileşmesi



Gezegen Göçü Tip - I

- ✓ Küçük gezegenler içeri doğru göçleri sırasında disk üzerinde spiral yayılan yoğunluk dalgaları oluşturur; ancak diskte boşluk açamazlar.
- ✓ Gezegenle oluşan bu spiral yoğunluk dalgaları arasındaki etkileşim açısal momentum transferine neden olur. Dışarı doğru yayılan dalgalar gezegen üzerine negatif tork uygularken, içe doğru yayılan yayılan dalgalar pozitif tork uygular.
- ✓ Genellikle diskin dış bölgelerine doğru yayılan yoğunluk dalgaları baskın gelir ve negatif tork kazanan gezegen içe doğru göç eder.

Disk-Gezegen Etkileşmesi

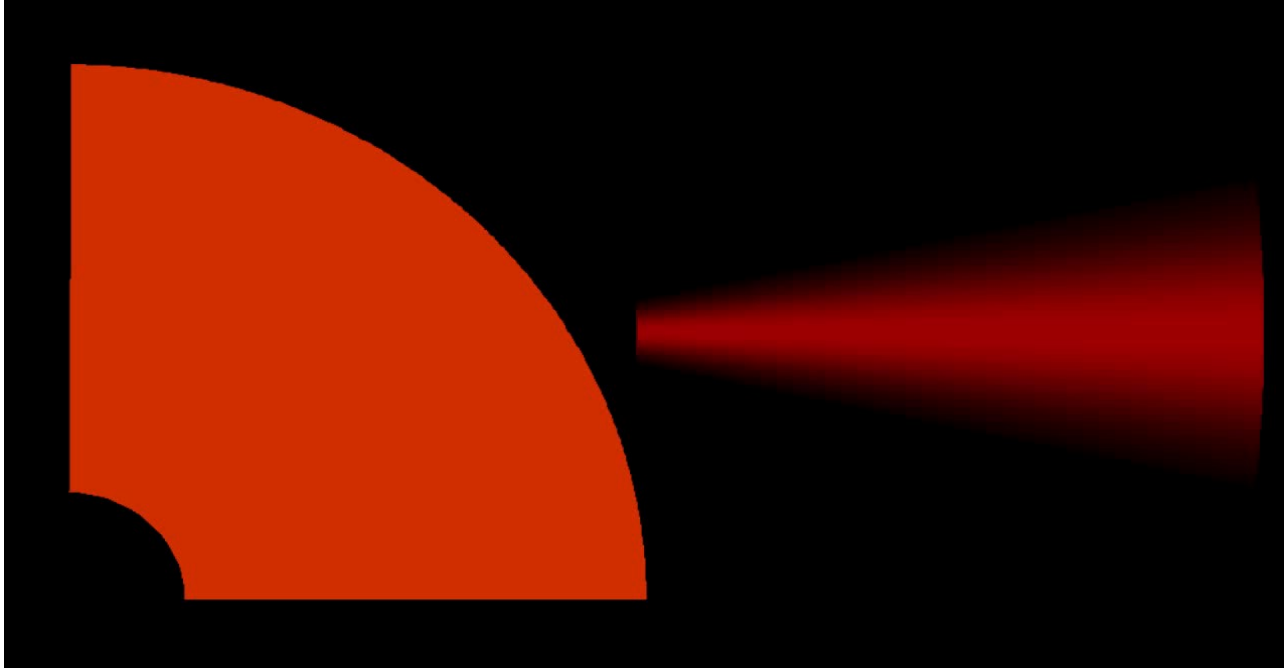


Gezegen Göçü Tip - I Türbülanslı Disk

Tip-I göçte zaman ölçeği $m_p = 10 M_{\text{yer}}$ bir gezegen için ~ 70000 yıl civarındadır ki bu kadar hızlı bir göç gezegenin yıldızın üstüne düşmesiyle sonuçlanmalı.

Çözüm: Rastgele yönlerde hareketin gerçekleştiği türbülanslı diskler bu sorunu çözmek üzere önerilmiş iyi bir açıklamadır. Türbülans, diskin dönmesi kaynaklı zayıf manyetizmasından ileri gelmekte ve içe göçü bir miktar yavaşlatabilmektedir.

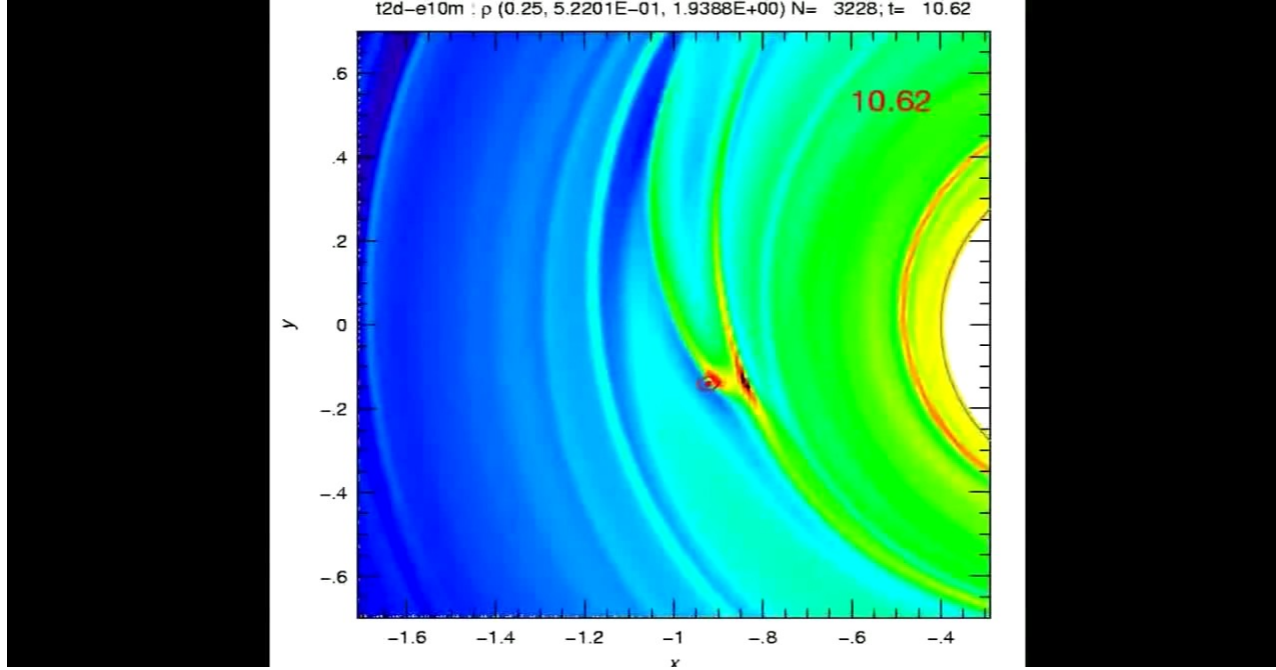
Disk-Gezegen Etkileşmesi



Gezegen Göçü Tip - II

- ✓ Büyük gezegenler içeri doğru göçleri sırasında disk üzerinde spiral yayılan yoğunluk dalgaları oluşturur ve diskte boşluk açabilirler.
- ✓ Dev gaz gezegenlerin açtıkları boşluk daha da büyüktür.
- ✓ Açılan bu boşlukta gezegen kendi yığılma diskini oluşturur.
- ✓ Göçün zaman ölçeği uzar; yıldızdan 5 AB uzaklıkta 0.5 milyon yıla kadar yavaşlar.

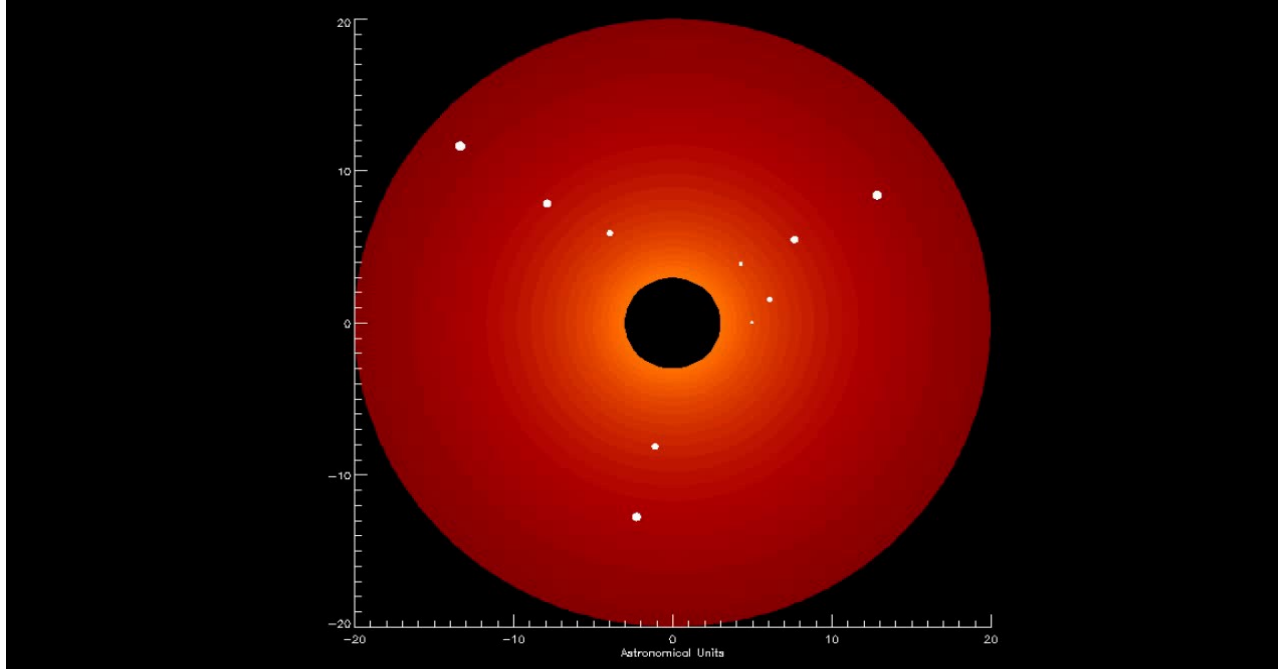
Disk-Gezegen Etkileşmesi



Dış Merkezli (Eksantrik) Yörünge

- ✓ Diskin gezegenin olduğu bölge civarındaki yoğunluğunun zamanla değişimi, gezegenin üzerine değişen miktarda tork uygulanmasına sebep olabilir.
- ✓ Gezegenin yörüngesine değişen şiddetteki yoğunluk dalgaları ile uygulanan tork, yörüngeyi enöte ve enberide farklı şekilde tedirgin eder.
- ✓ Sonuç olarak gezegenin yörüngesi eksantrik (dış merkezli) olur.

Disk-Gezegen Etkileşmesi

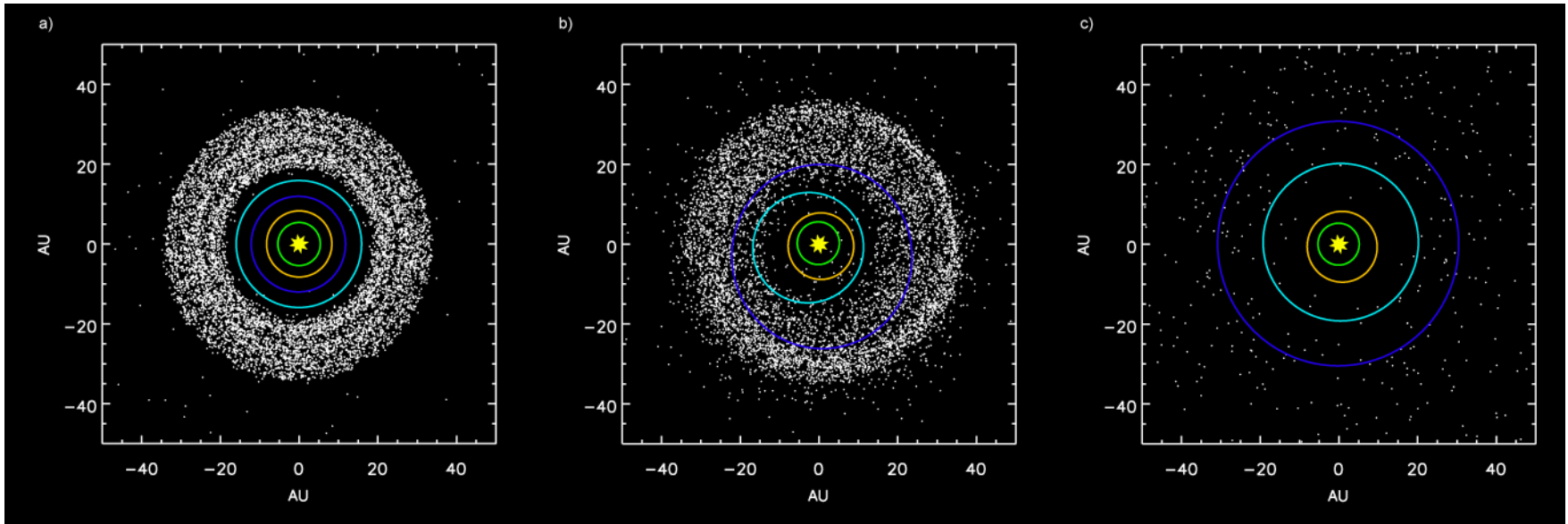


Çoklu Gezegen Sistemleri

- ✓ Bir disk yaşam süresi içerisinde çok sayıda gezegen oluşturabilir.
- ✓ Gezegenlerin birbirleri ve diskle (yoğunluk dalgaları yoluyla) etkileşimleri sonucunda bazıları sistemden atılabilir (ing. ejection), oluştukları yerden farklı yerlere göçedebilir (ing. migration) ya da birleşmeler (ing. merger) gerçekleşebilir.
- ✓ Gezegenlerin yörüngelerinin birbirleri üzerine uyguladıkları tedirginlik kuvvetleri yörüngelerin eliptik olmasının önemli nedenlerinden biridir.

Nice Modeli

Nice modeli, Güneş Sistemi'nin dış gezegenlerinin birbirlerine ve Güneş'e bugünkünden daha yakın, kompakt bir konfigürasyonda başladığı, disk kütlesinin azalmasıyla kararsız hale geldiği ve diskten kalan daha küçük cisimlerin çarpışmalarıyla birlikte gezegenlerin mevcut yörüngelerine evrildiği çeşitli dinamik senaryolara verilen isimdir. Bu isim bu simülasyonların geliştirildiği Observatoire de la Côte d'Azur gözlemevinin bulunduğu Fransa'nın Nice şehrinden gelmektedir.

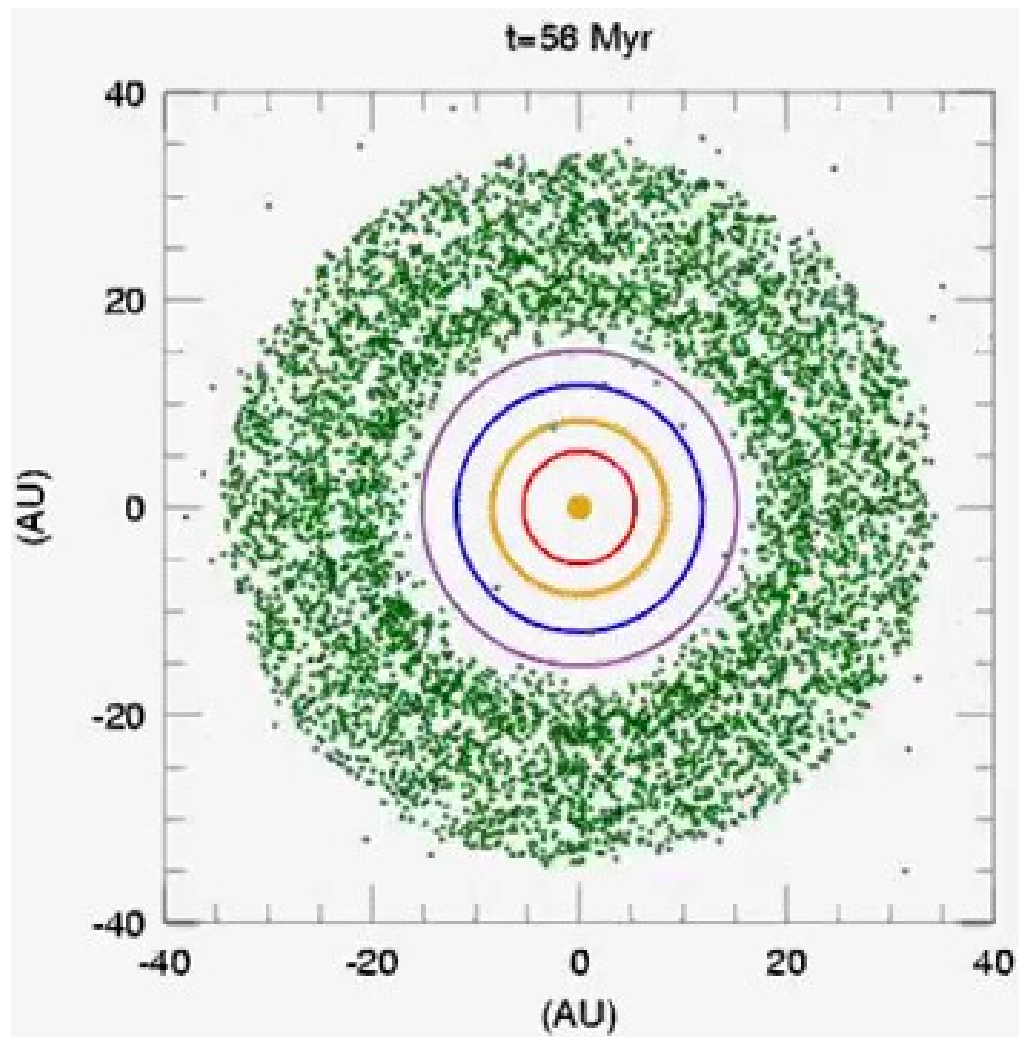


Dış gezegenleri ve Kuiper kuşağını gösteren Nice Modeli simülasyonu: **a)** Jüpiter ve Satürn arasındaki 2:1 rezonansı öncesi. **b)** Neptün'ün yörüngesinin değişimi sonrası Kuiper kuşağı nesnelerinin Güneş Sistemi'ne saçılması. **c)** Kuiper kuşağındaki nesnelerin Jüpiter tarafından sistemden uzaklaştırılması sonrası. Gösterilen gezegenler: Jüpiter (yeşil), Satürn (turuncu), Uranüs (açık mavi) ve Neptün (koyu mavi). Nice Modelinden alınan veriler kullanılarak oluşturulmuş bir simülasyondan alınmış görüntülerdir. (Mark Booth)

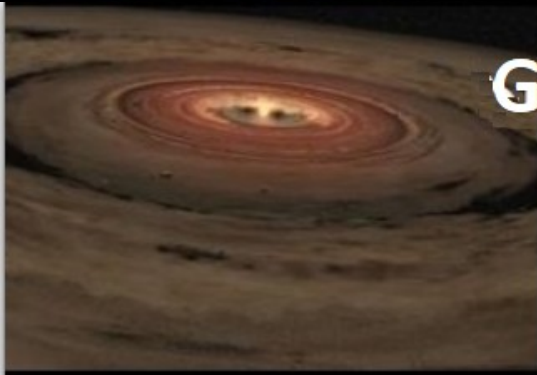
Nice Modeli

Birden fazla senaryo Güneş Sistemi'nin özellikle dış gaz gezegenlerinin dinamik evrimini açıklayabildiğinden modelin öngördüğü senaryoların genel ve ortak özellikleriyle parametrelerine bakmakta fayda vardır:

- ✓ Sistemin ilk konfigürasyonun bugün olduğundan daha kompakt yapıda olduğu ve muhtemelen dev gezegenlerin çoğunu veya tamamını bir rezonans zincirinde içerdiği varsayılır. Başlangıçta şu an bulunmayan ek bir buz devi gezegen daha var olmuş olabilir.
- ✓ Dev gezegen çekirdekleri, Tip-I göçle kabaca Jüpiter / Satürn bölgesine yakınsar ve Tip-II göç nedeniyle de rezonanslara hapsolabilir.
- ✓ İlk konfigürasyon, Neptün'ün ötesinde kalan ve gezegenimsilerden (planetesimal) oluşan disk ile gezegenlerin etkileşim yoluyla kararsız hale gelir.
- ✓ Etkileşim, doğrudan gezegenimsilerin çarpışmalarıyla olabilir ya da bu çarpışmalar kaynaklı tozun toplandığı daha uzakta bir kuşakta da gerçekleşebilir. Gezegenimsilerin bulunduğu kuşak 35 – 50 Dünya kütlesi civarında olmalıdır.
- ✓ Rezonans zinciri kırıldıktan sonra (veya rezonanslar aşıldığında), **(a)** dev gezegenler arasında yakınlaşmaların olduğu ve çarpışma / fırlatılmalara yol açan hızlı yörünge evrimi **(b)** gezegenimsilerle saçılmanın daha baskın olduğu, daha yavaş yörünge evrimi ya da bunların bir kombinasyonu gerçekleşir.
- ✓ Sonunda Kuiper Kuşağı'ndaki kütle, gezegenimsilerle etkileşimin ihmal edilebilecek hale geldiği bir zamana kadar azalır ve gezegenler mevcut yörüngelerine kararlı olarak yerleşir.



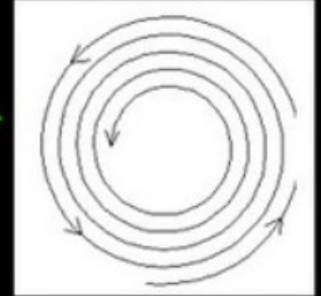
Gezegen Oluşum Aşamaları



Tanecikler



Aerodinamik hareket



İri taneler



Gezegencikler



Gezegen Embriyoları



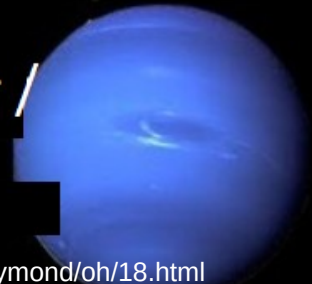
Gaz bittiğinde



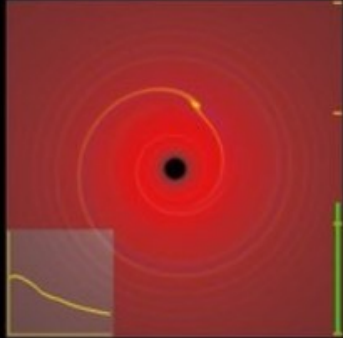
Devasa çarpışmalar

Süper Dünyalar /

Mini Neptünler

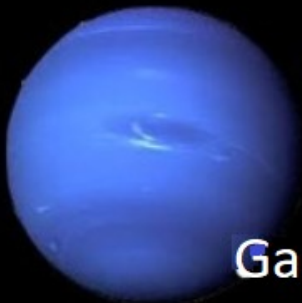


Tip-I Göç



gaz diskte kaldığında

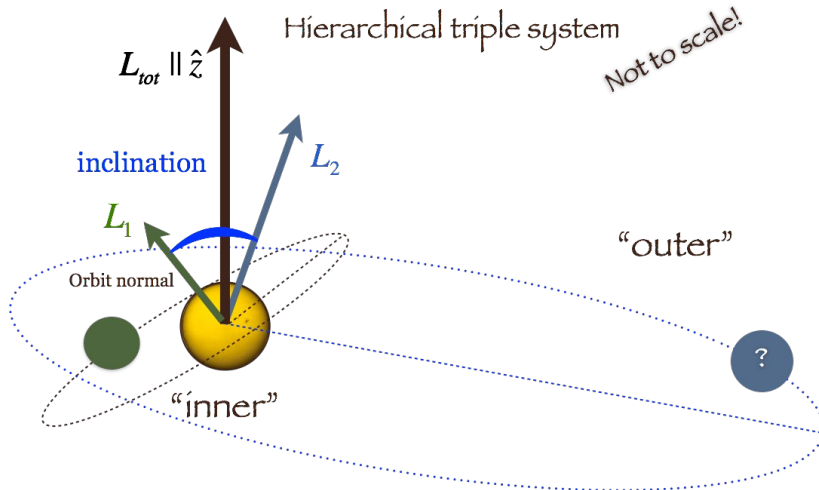
Gaz birikmesi



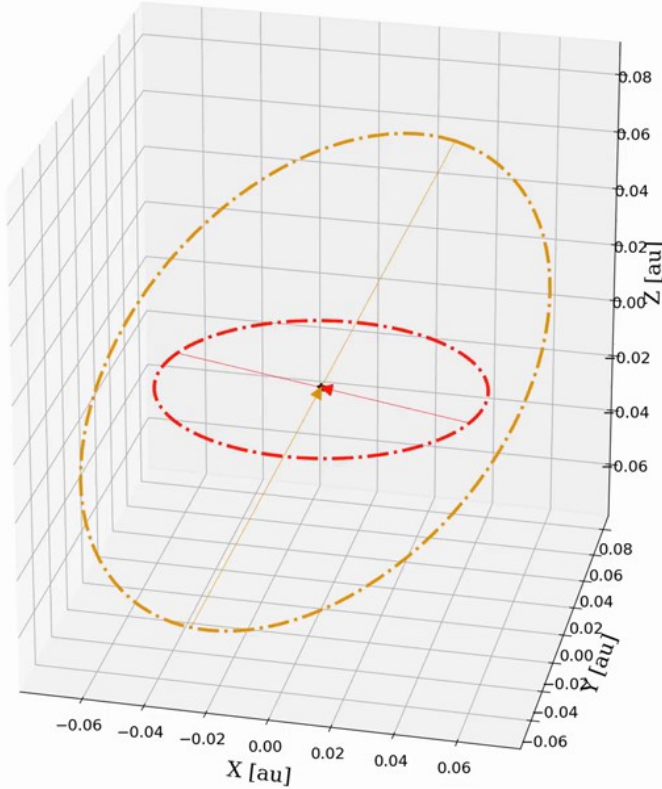
(von Zeipel)-Kozai-Lidov Etkileşimleri

Kısa Yörünge Dönemli Dev Gaz Gezegenler

- ✓ Dıştaki bir cismin yörüngesine (mavi renkli) göre yüksek eğimli bir yörüngede (gri renkli yörünge) dolanan iç gezegen onunla etkileşerek açısal momentum kaybeder.
- ✓ Toplam açısal momentumun korunumu gereği daha iç yörüngeye geçen gezegenin bu yörüngesi dış-merkezli olur.
- ✓ Yıldızla yaklaşan gezegen artık onunla tedirginlik etkileşimlerine (tidal interactions) girer ve yörüngesi hem yıldızın dönme eksenine dik hizalanır; hem de giderek çemberleşir ve küçülür.



Kozai-Lidov Etkileşimleri



Kısa Yörünge Dönemli Dev Gaz Gezegenler

- ✓ Dıştaki bir cismin yörüngesine (sarı yörünge) göre yüksek eğimli bir yörüngede (kırmızı yörünge) dolanan iç gezegen onunla etkileşerek açısal momentum kaybeder.
- ✓ Toplam açısal momentumun korunumu gereği daha iç yörüngeye geçen gezegenin bu yörüngesi dış-merkezli olur.
- ✓ Yıldıza yaklaşan gezegen artık onunla tedirginlik etkileşimlerine (tidal interactions) girer ve yörüngesi hem yıldızın dönme eksenine dik hizalanır; hem de giderek çemberleşir ve küçülür.

Kaynaklar

✓ Gezegen Göçü

Youtube videoları:

1. Planet-Disk Interaction and Orbital Migration. Movie 1. Low Mass Planet

<https://www.youtube.com/watch?v=ko52m9jjGTQ>

2. Planet-Disk Interaction and Orbital Migration. Movie 2. Corotation Region

<https://www.youtube.com/watch?v=9bQyQTEOu4U>

3. Planet-Disk Interaction and Orbital Migration. Movie 3. Gap Formation

<https://www.youtube.com/watch?v=nwSNU3-m0ew>

4. Planet-Disk Interaction and Orbital Migration. Movie 4. Eccentric Planet

<https://www.youtube.com/watch?v=65nqq9sEZdM>

5. Planet-Disk Interaction and Orbital Migration. Movie 5. Surface Density Evolution

<https://www.youtube.com/watch?v=L3mhnkcbINk>

6. Planet-Disk Interaction and Orbital Migration. Movie 6. Planet Turbulent Disc

<https://www.youtube.com/watch?v=7cYHTQA4EQ>

7. Planet-Disk Interaction and Orbital Migration. Movie 7. Multiple Planets

https://www.youtube.com/watch?v=Bilh_r-KTGM

8. Kozai-Lidov Etkileşimleri:

<https://www.youtube.com/shorts/3C7u9MbW9YE>

Kaynaklar

✓ Gezegen Göçü

Makaleler

1. Armitage, P.J., Rice, W.K.M., “*Planet Migration*”, 2005, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0507492>
2. Stamatellos, D., “*The Migration of Gas Giant Planets in Gravitationally Unstable Disks*”, 2015, ApJ, 810, L11
3. http://jilawwww.colorado.edu/~pja/planet_migration.html

✓ Gezegen Oluşumu Senaryoları

Makaleler

1. Shibai, M.T.H., Ootsubo, T., “*Planetary Formation Scenarios Revisited: Core Accretion versus Disk Instability*”, 2007, <http://arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0703/0703237.pdf>

Youtube video:

1. Gravitational instability in a protoplanetary disc (fast cooling) https://www.youtube.com/watch?v=_JgwIWDL3aw