

# System Erde (32) – Einführung in die Historische Geologie (2)

Die Entstehung von Planeten um massearme (sonnenähnliche) Sterne



— Neptunbahndurchmesser

HD 141569

# Molekülwolken

Molekülwolken bilden z.T. riesige Wolkenkomplexe mit einer Ausdehnung von teilweise über 100 pc (Riesenmolekülwolken, GMC („giant molecular cloud“))

Die Gasdichte liegt dabei im Durchschnitt bei wenigen 100 (diffuse Molekülwolken) bis zu 1 Million Moleküle pro Kubikzentimeter (GMC's)

Die meisten Molekülwolken sind kleiner (0.5 bis 50 pc) und im Bereich der Spiralarme angeordnet. Ihre Massen liegen zwischen 10 und 1 Million Sonnenmassen

Molekülwolken sind nicht gleichmäßig mit Gas gefüllt, sondern bilden fraktalähnliche Strukturen in Form von Verklumpungen und Filamenten, die sich durch eine jeweils unterschiedliche Gasdichte auszeichnen.

Staubinhalt ca. 1/100 der Gasmasse pro Volumeneinheit

→ **Interstellarer Staub: Wichtigster Bestandteil in Bezug auf die Entstehung von Planeten**



Typisches  
Bild im IR-  
Bereich eines  
Teils einer  
GMC

(IRAS)

## Sehr gut erforschte Molekülwolkenkomplexe

**Orion-Komplex:** Entstehungsgebiet massereicher Sterne  
( $M > 2$  Sonnenmassen)

**Rho-Ophiuchus-Komplex:** Entstehungsgebiet massearmer Sterne

Die Entstehungsmechanismen massereicher und massearmer Sterne unterscheiden sich. Für die Entstehung erdähnlicher Planeten ist nur die Entstehungsgeschichte massearmer Sterne relevant.

### → ENTSTEHUNG MASSEARMER STERNE

#### Fragestellung:

Wie entstehen aus einer kalten kosmischen Gas- und Staubwolke (wobei der Staub die Konsistenz der Partikel in gewöhnlichem Zigarettenrauch (\*) besitzt) Sterne und simultan dazu Planeten entstehen.

(\*) *Achtung: Rauchen kann tödlich sein – der Bundesgesundheitsminister*

Die abnormale Zusammensetzung der Materie im Sonnensystem in Bezug auf sehr schwere Elemente ist ein starker Hinweis darauf, dass die Explosion einer Supernova in unmittelbarer Nähe einer Molekülwolke zur Entstehung der Sonne und ihrer Planeten ursächlich verantwortlich war.

- Gold- und Urankonzentrationen im Sonnensystem sind bedeutend größer als in der ISM der galaktischen Scheibe
- In primitiven Meteoriten wurden Mikrodiamanten entdeckt
- Meteoriten enthalten seltene, langlebige Isotope, die nur beim Zerfall bestimmter kurzlebiger Isotope entstanden sein können. Diese speziellen Isotope können nur bei Supernovaexplosionen entstehen und sind heute quasi ausgestorben
- Eisen- und Steinmeteorite (also thermisch differenziertes Material) weisen darauf hin, dass in der Frühzeit sogar kleinere Himmelskörper (Durchmesser in der Größenordnung von 100 km) vollständig aufgeschmolzen waren. Das ist nur möglich, wenn genügend radioaktives Material (insbesondere  $^{26}\text{Al}$ ) vorhanden ist. Dessen Halbwertszeit ist aber so kurz, dass es sich unmittelbar vor der Entstehung des Sonnensystems gebildet haben muss.

## Gravitativer Kollaps einer Gaswolke – das Jeans-Kriterium

Beobachtung: Sterne entstehen selten einzeln, sondern oft in Form von Sternhaufen





Eine Gas- und Staubwolke kann lokal instabil werden (z.B. aufgrund einer Störung, z.B. Abkühlung, Stoßwelleneinwirkung etc.) und beginnen im freien Fall zu kontrahieren

→ **kaskadenartiger Prozess:** Fragmentation der Molekülwolke

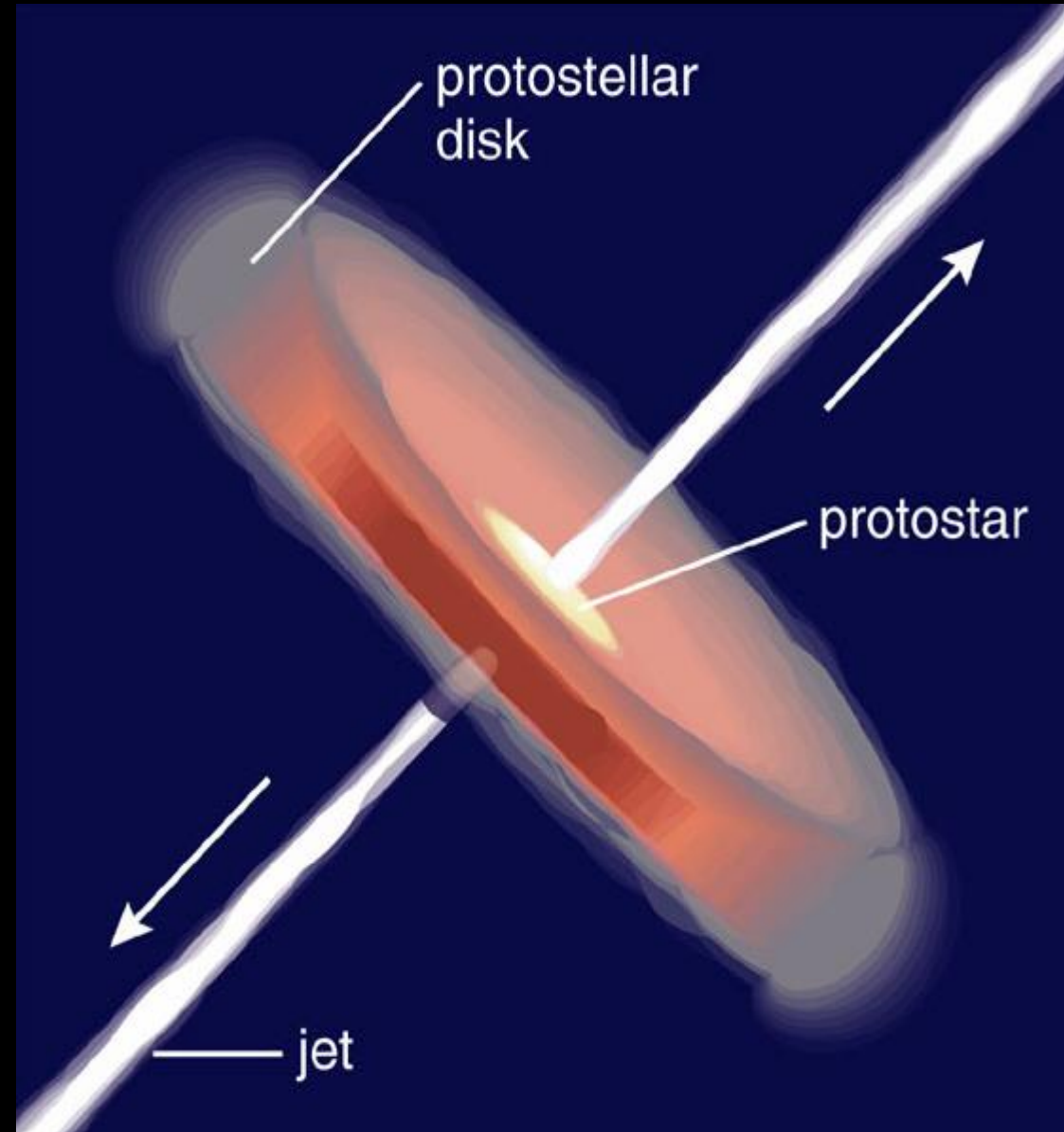
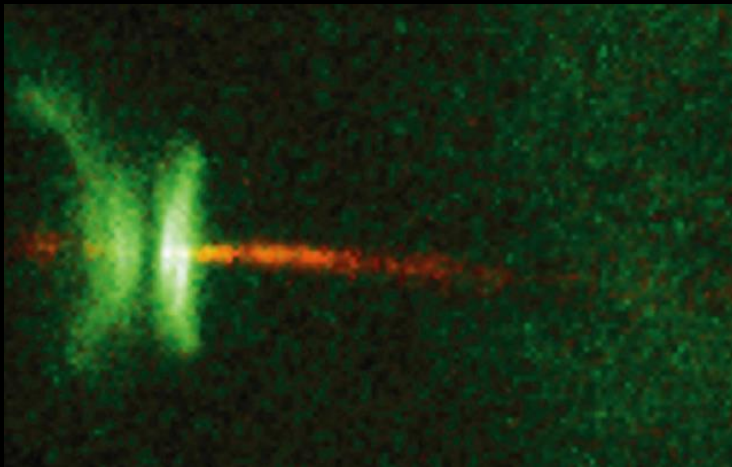
Bedingung: James Hopwood Jeans (1877-1946)

→ **Jeans-Kriterium**

## Entstehung eines Protosterns:

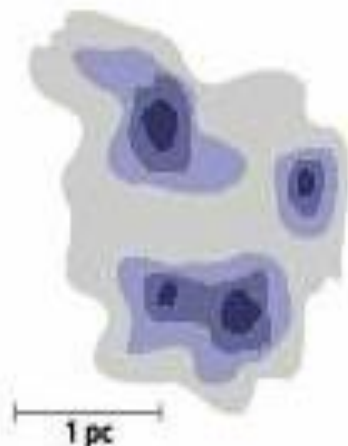
→ langsame Kontraktionsphase

- Entstehung einer rotierenden Gas- und Staubscheibe
- Später Ausbildung eines bipolaren Jets aufgrund der sich aufbauenden Magnetfeldstruktur
- Akkretionsphase
- T-Tauri Phase





Dark cloud cores



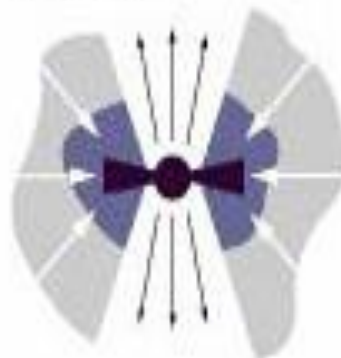
$t = 0$

Gravitational collapse



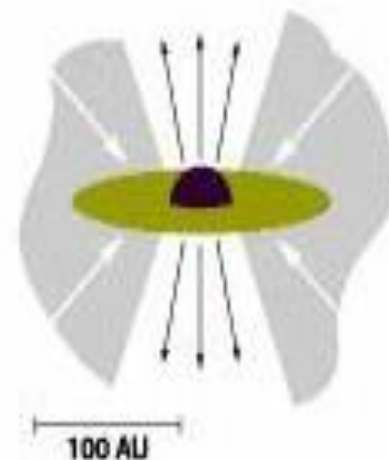
$t \sim 10^4 - 10^5$  years

Protostar, embedded in 8,000 AU envelope, disk, outflow



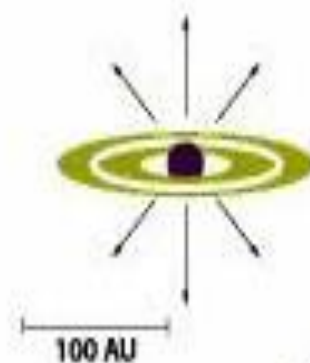
$t \sim 10^5 - 10^6$  years

T Tauri star, disk, outflow



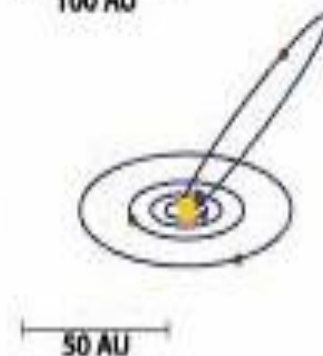
$t \sim 10^6 - 10^7$  years

Pre-main-sequence star, remnant disk

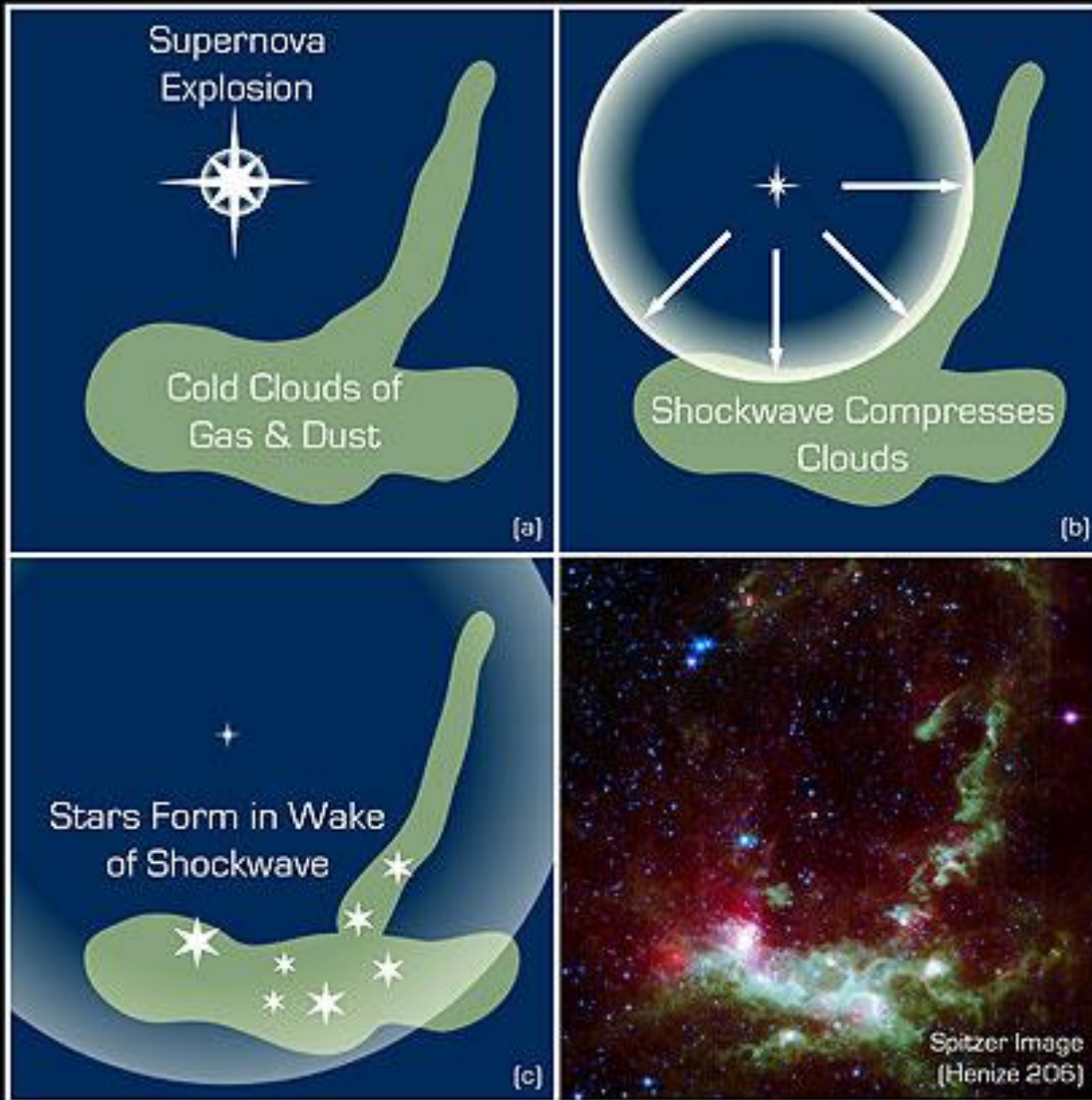


$t > 10^7$  years

Main-sequence star, planetary system (?)



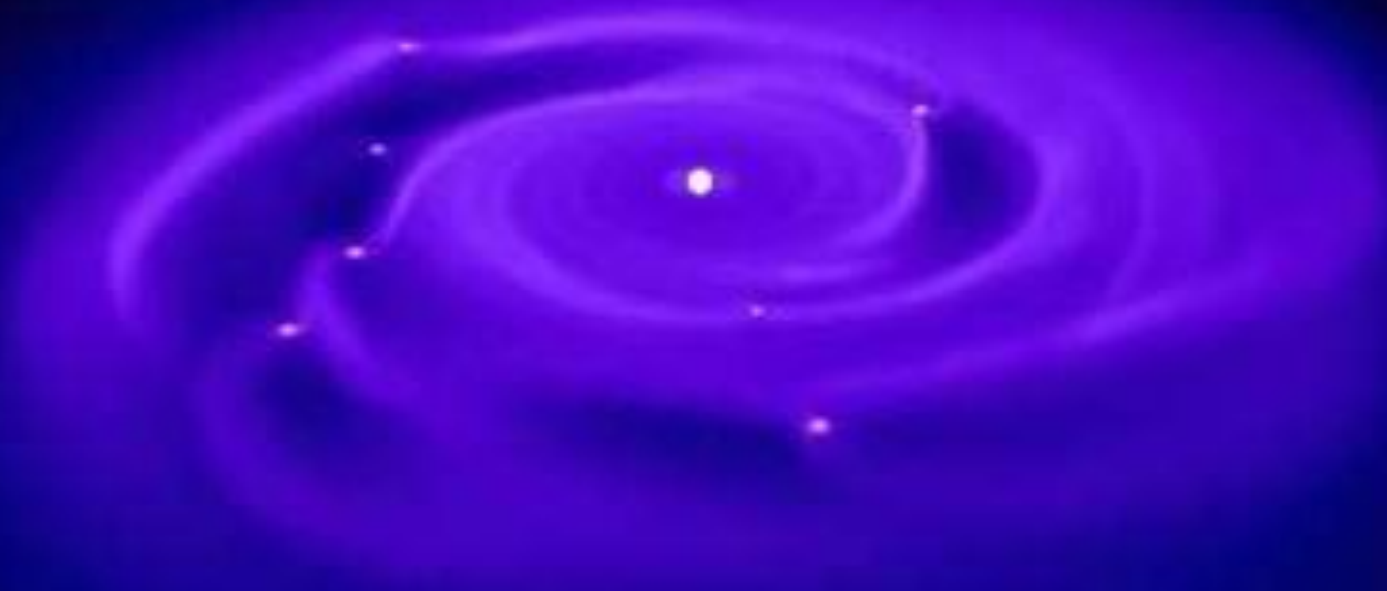
# Spezialfall: Entstehung der Sonne und des Planetensystems



Analogiebeispiel

Henize 206

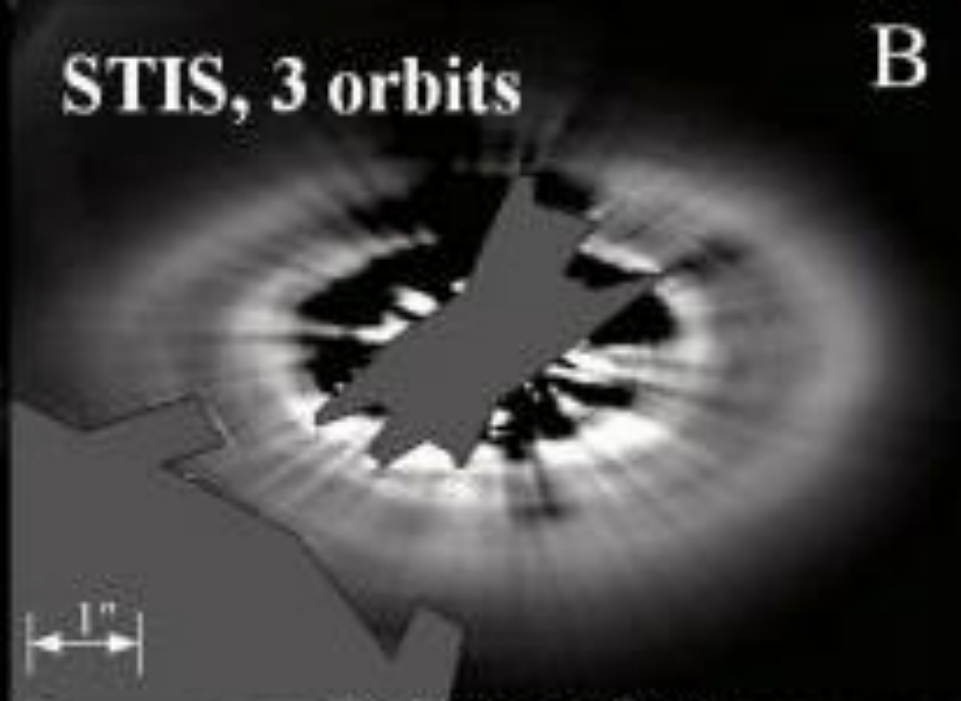
# Die Entstehung von Planeten in der zirkumstellaren Scheibe



NICMOS, 1 orbit



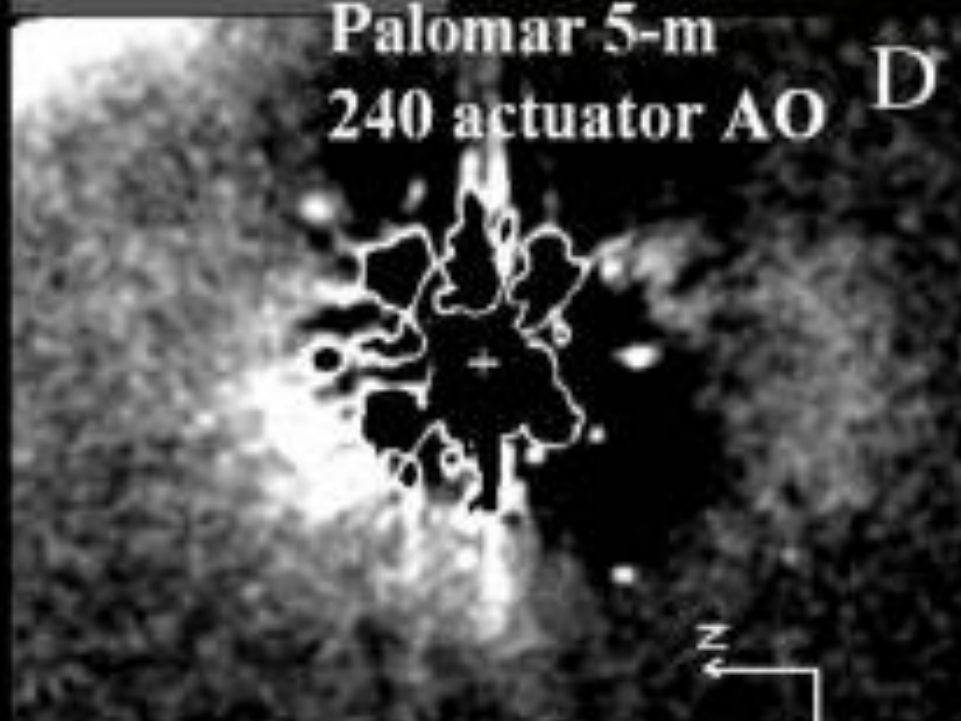
STIS, 3 orbits



ACS, 3 orbits



Palomar 5-m  
240 actuator AO



**Proplyds → Protoplanetare Scheiben  
(protoplanetary disks)**

Wurden in größerer Anzahl im Bereich des Orionnebels  
mit Hilfe des Hubble-Weltraumteleskops gefunden



# Stadien der Planetenentstehung in einer protoplanetaren Scheibe

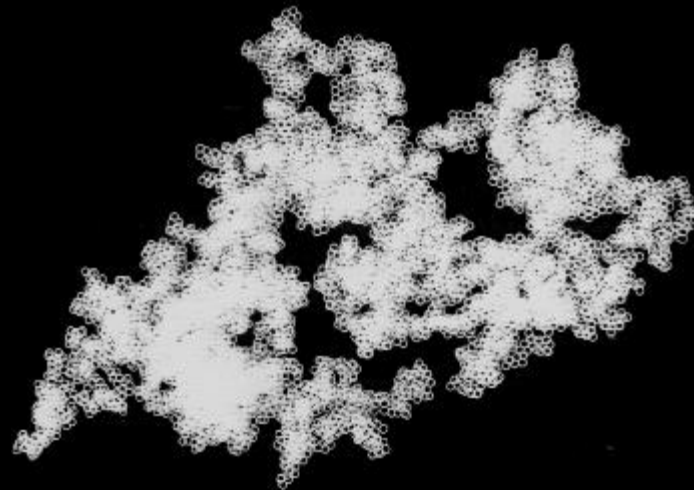
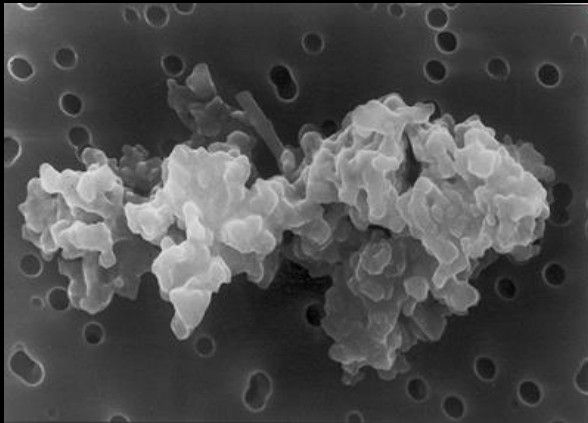
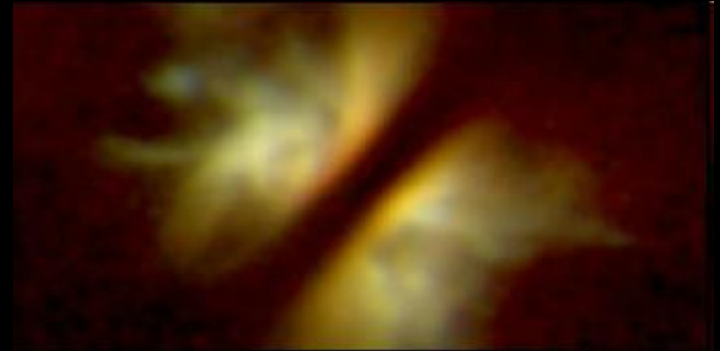
→ Kondensationsphase

→ Koagulationsphase

→ Agglomerationsphase

→ Akkretionsphase

→ Konsolidierungsphase



Staub → Agglomerate → Planetesimals → Protoplaneten

## **Kondensationsphase**

Ausgangspunkt: Elementhäufigkeit im Sonnennebel entspricht dem der heutigen Sonne: 76% H, 22% He, 2% „Metalle“, Staubanteil 1/100 Gas

Das Gas ist in einer flachen Scheibe konzentriert, die rotiert und die einen Temperatur- und Druckgradienten von Innen nach Außen aufweist

### **Radialer Aufbau der protosolaren Gas- und Staubscheibe**

- Protoplanetarer Kern
- Akkretionsstoßfront
- Gasphotosphäre
- Bereich geringer Opazität
- Staubzerfallsfront
- Gasscheibe mit langsam sich ändernder chem. Zusammensetzung
- Grenze der Staubphotosphäre
- interstellares Gas der Molekülwolke

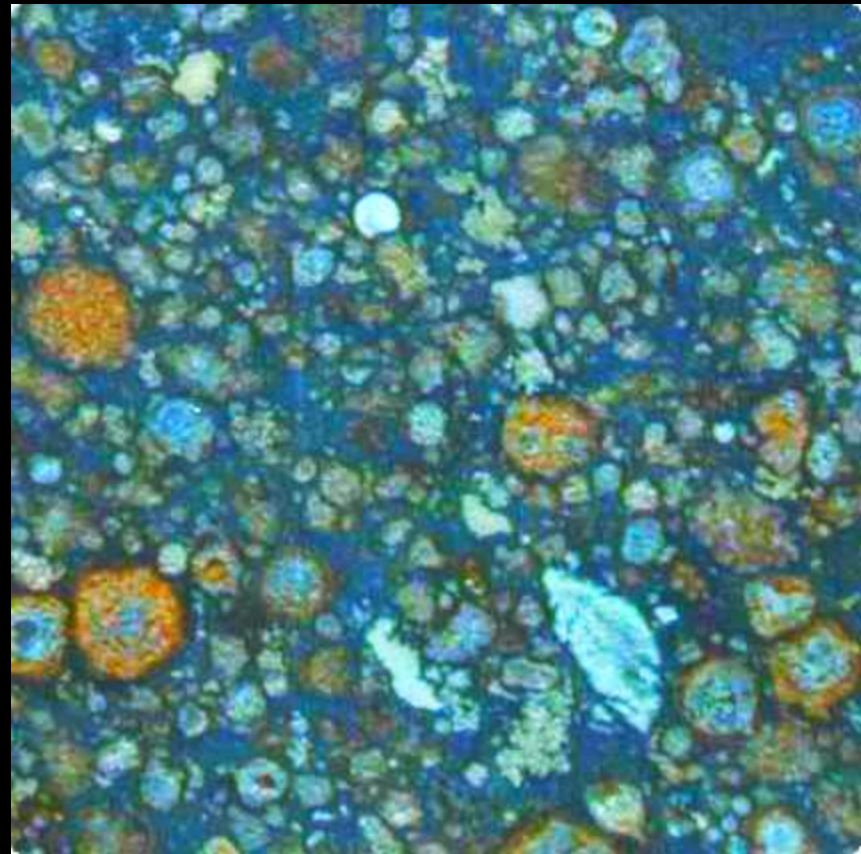
Die Planetenentstehung erfolgt innerhalb der Staubphotosphäre

## In der Gas- und Staubscheibe kondensieren Gase und feste Stoffe aus

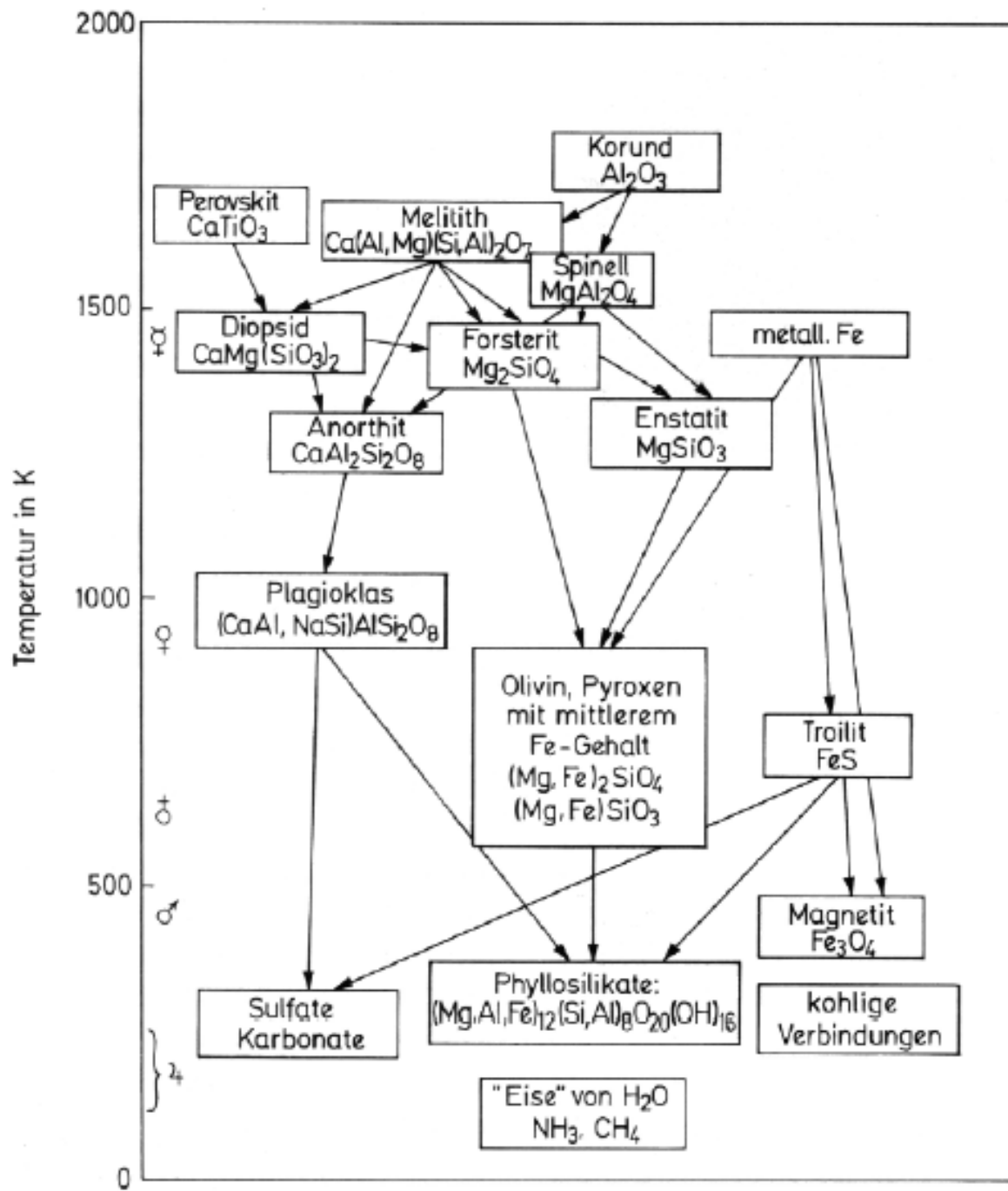
- Bildung von Molekülen
  - Bildung von Minerale und Mineralaggregationen (Staub, Tröpfchenform)
- Zusammensetzung entsprechend Temperatur am Bildungsort
- haben in primitiven Meteoriten (Chondriten) bis heute überlebt

„Chondren“ kugelförmige Mineralaggregationen eingebettet in einer amorphen Grundmasse, die thermisch unbeeinflusst ist (kohligen Chondriten)

→ Hinweise auf fraktionierte Mineralisation







Kondensationsreihenfolge verschiedener Minerale als Funktion der Temperatur im Sonnennebel

Al  
du  
Ga  
fa

# Koagulationsphase

Während der Koagulationsphase entstehen mikrometergroße Staubagglomerationen

## Voraussetzungen:

Hydrostatische Schichtung des Gases über der Scheibenebene  
Rotation der Gasscheibe (langsamer als „Kepler“ wegen innerer Reibung)

- Absetzbewegung (Sedimentation, dabei Koagulation)
- Partikelwachstum dadurch, daß größere Partikel nicht mehr vollständig vom Gas mitgeführt werden (Kollisionen + Haftung)
- Brownsche Bewegung

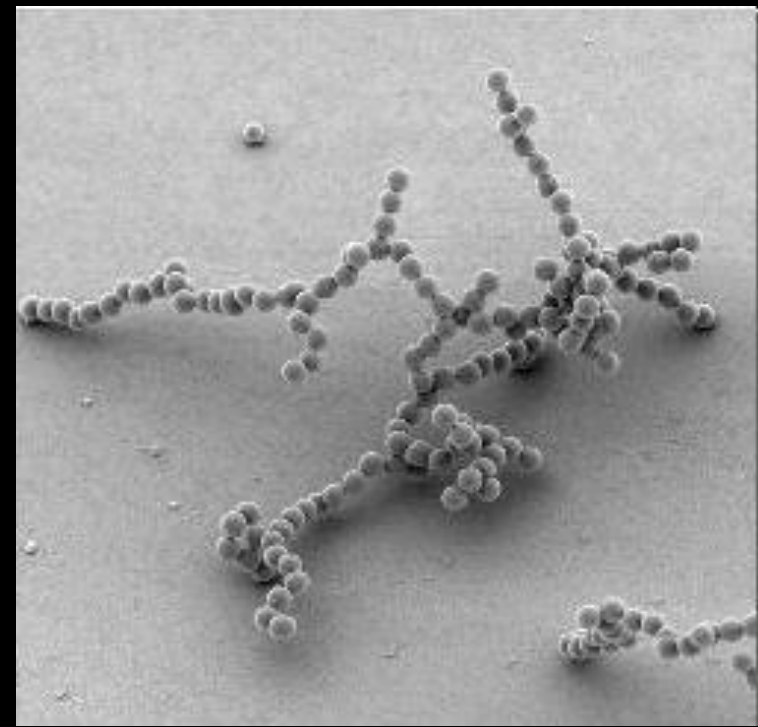
→ Als Ergebnis entstehen Staubagglomerate in der Größe von einigen 100 Mikrometern

Stoßquerschnitt

Stoßgeschwindigkeit

Haftwahrscheinlichkeit

→ exp. Astrophysik



## Agglomerationsphase

Wachsen der Staubagglomerationen auf makroskopische Größe  
(Zentimeterbereich → Meterbereich (= „Staubklumpen“))

Auftreffgeschwindigkeiten müssen in einem günstigen Bereich liegen  
Bei größeren Partikeln kommt es bei Stößen bereits zu Verdichtungen

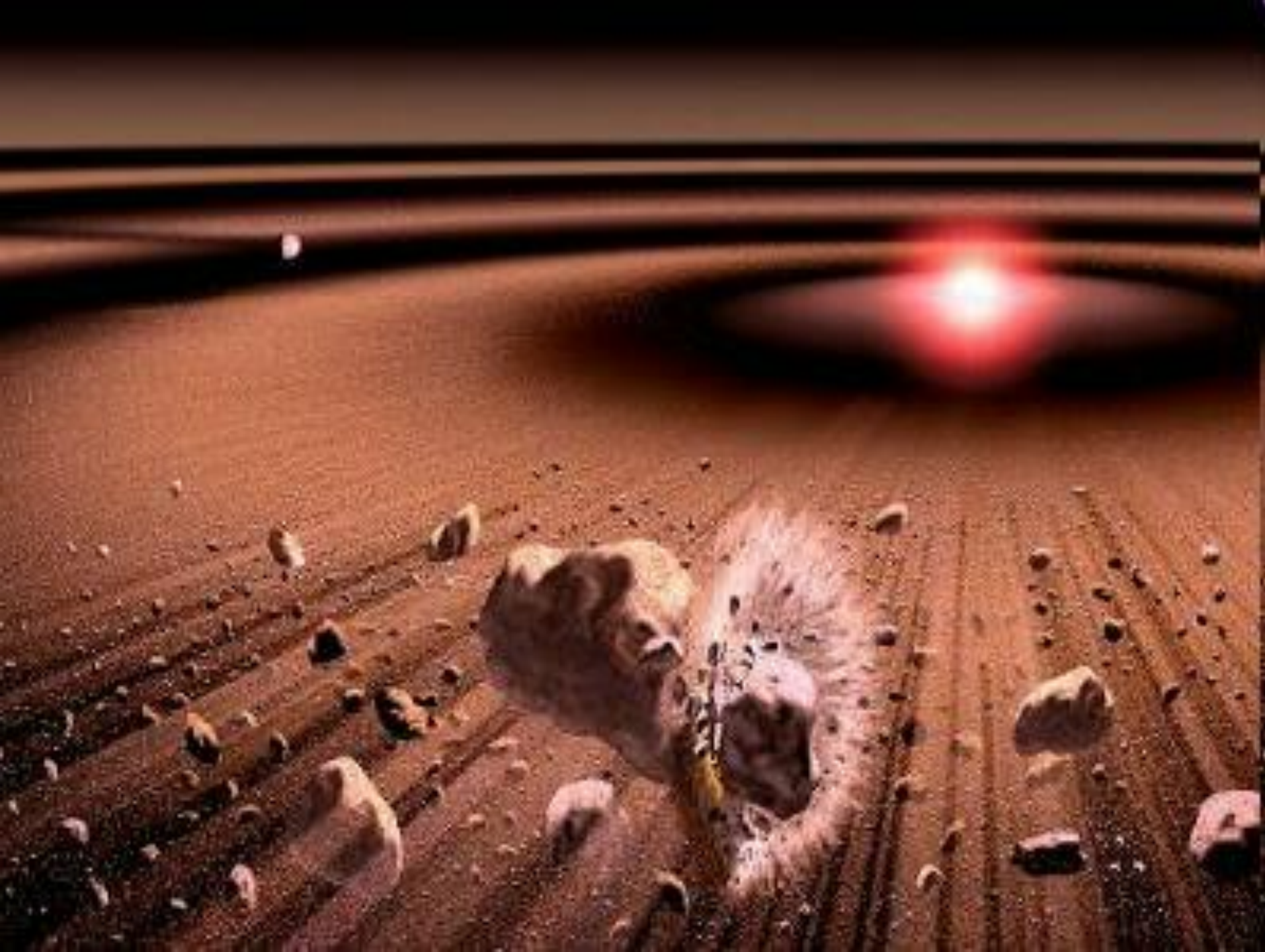
Kleinskalige Turbulenzen befördern ganz enorm die Bildung größerer  
Staubklumpen

→ Solange sich die Staubklumpen noch nicht von der Gasströmung abgekoppelt haben, spiralen Sie in der Scheibe nach Innen und werden an der Staubzerfallsfront aufgelöst

Das Wachstum der Staubklumpen muss äußerst schnell vonstatten gegangen sein

### **RUNAWAY – Wachstum**

Dauer der Agglomerationsphase einige 10000 bis 100000 Jahre



## Akkretionsphase

Nach dem Beginn der T-Tauri-Phase der Sonne wurde innerhalb kürzester Zeit das gesamte Gas aus dem inneren Sonnensystem entfernt (Strahlungsdruck)

Durch Stöße bei Relativgeschwindigkeiten von 1 bis 100 m/s wuchsen die Staubagglomerationen schnell auf eine Größe in der Größenordnung von 10 km an → Eigengravitation beginnt zu wirken

- Verdichtung des Materials durch Eigengravitation
- Einfangsquerschnitt für weiteres Material vergrößert sich rasch

→ Planetesimale

Immer weniger größere Körper dominieren in ihren Einflusssphären (Hills-Sphäre) und wachsen extrem schnell an → interne Aufschmelzungen

→ außerhalb der Frostgrenze entstehen innerhalb von wenigen Tausend Jahren die Riesen- und Großplaneten durch Akkretion von Gas (Kernmassen 10 bis 15 Erdmassen)

## Konsolidierungsphase

erdartige Planeten schmelzen vollständig auf und differenzieren sich nach der Dichte in Kern und Mantel → Existenz eines Magmaozeans

Zeitalter des massiven Bombardements begleitet die Krustenbildung

Entstehung des Erdmondes durch Kollision der Erde mit einem ca. marsgroßen planetaren Körper

Krustenbildung und danach Ausbildung einer Hydrosphäre durch Eintrag von Wasser durch Restakkretion bzw. durch Ausschwitzen von Wasserdampf aus dem Mantelgestein

→ Ab diesem Zeitpunkt gibt es geologische Hinweise auf der Erde (Zirkone)

Mit der Ausbildung einer festen Kruste und einer stabilen Hydrosphäre sowie einer primitiven, reduzierenden Uratmosphäre ist ca. 500 Millionen Jahre nach der Entstehung des solaren Nebels die Bildung der Erde und damit das Hadaekum abgeschlossen.

## Nächstes Mal:

Geologische Hinweise aus dem Hadaekum:

- Erdmond (Entstehung)
- Zirkone

## Das Archaikum



Zirkonkristall aus Island