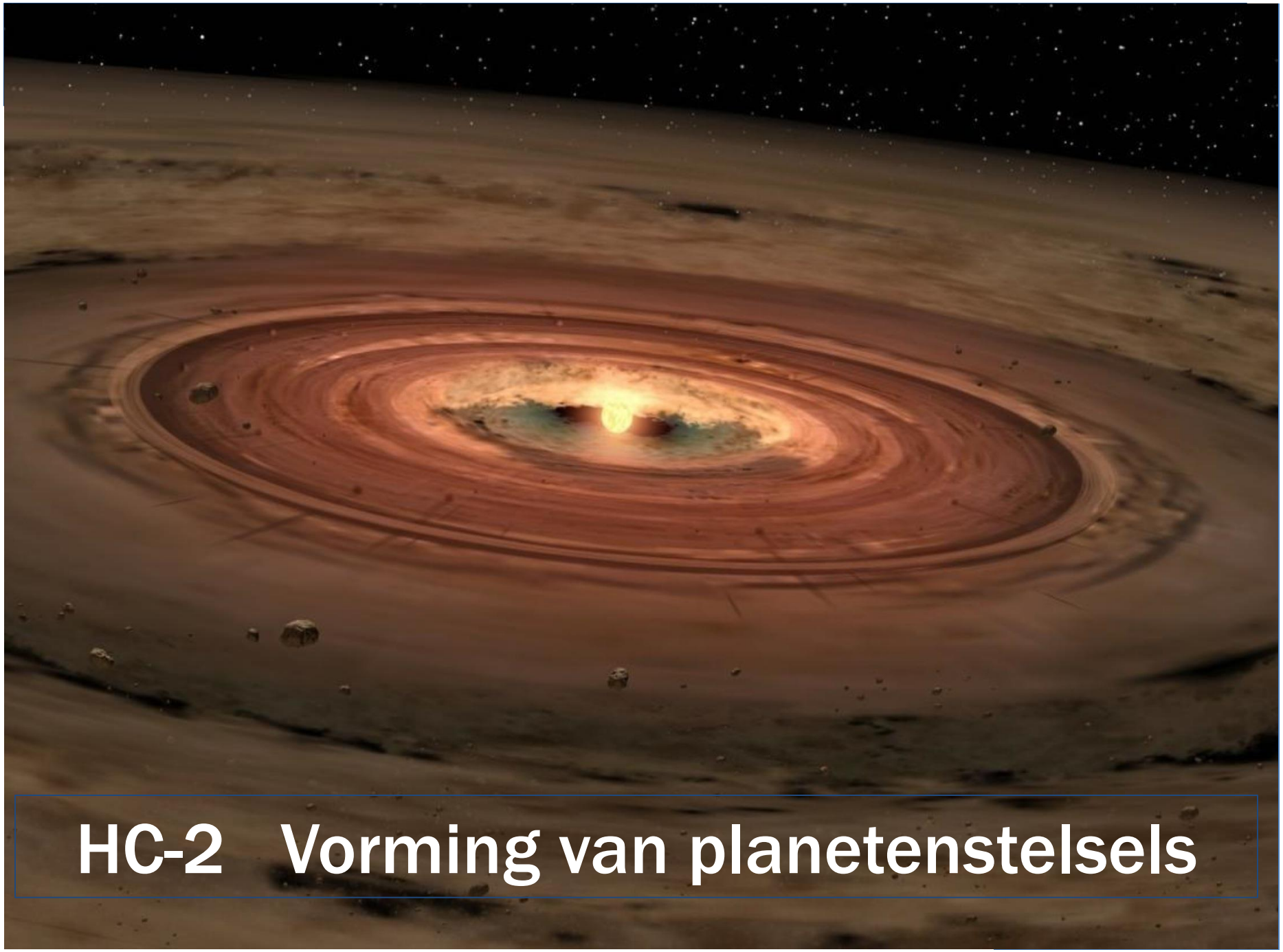


HC-2 Vorming van planetenstelsels

WAT KUNNEN WE ZO ZIEN ?

- Alle planeten bewegen in hetzelfde vlak
- Alle planeten bewegen in dezelfde richting in dat vlak
- Alle planeten bewegen op nagenoeg cirkelvormige banen

(Pluto vormt een uitzondering; beweegt niet in hetzelfde vlak en heeft een behoorlijk elliptische baan)

- Ook allerlei gruis draait in mooie banen om de zon (asteroïden)
- Alle planeten roteren in deze zelfde richting om hun as

(Alleen Venus heeft een retrograde beweging)

- Ook de zon roteert in deze richting om zijn as

***Nebular hypothesis van Laplace en Kant (1755)*:**

Planeten zijn ontstaan uit een roterende schijf van materiaal in een baan rond de zon, de zgn. *solar nebula* … maar wat is dan de oorsprong van die schijf ?

WAT KUNNEN WE MET WAT MEER MOEITE TE WETEN KOMEN ?

- Uit datering met radioactieve elementen (vervaltijden) kan de leeftijd van de Aarde en maan bepaald worden: ~ 4.5 Gyr.
- Uit stermodellen volgt de leeftijd van onze zon: ~4.5 Gyr

→ Blijkbaar zijn zon en Aarde/maan (en andere planeten) samen ontstaan.

- Ook meteorieten bevatten een schat aan Informatie over de vormingsgeschiedenis van ons zonnestelsel.
  bijv. temperatuur uit de samenstellende mineralen en isotopen en dynamica uit heterogeniteit van de samenstelling.

WAT KUNNEN WE MET WAT MEER MOEITE TE WETEN KOMEN ?

- Stel dat zon en planeten inderdaad uit een en dezelfde roterende stofschijf zijn ontstaan (dit verklaart vlak en draairichting van planeten) zou je dat dan ook op de een of andere manier 'mechanisch' aannemelijk kunnen maken ?

- Kun je een stofschijf bv. linken aan het hoekmoment van planeten ?
- Het hoek (of impuls)moment is een maat voor de hoeveelheid draaibeweging van een voorwerp en wordt gegeven door

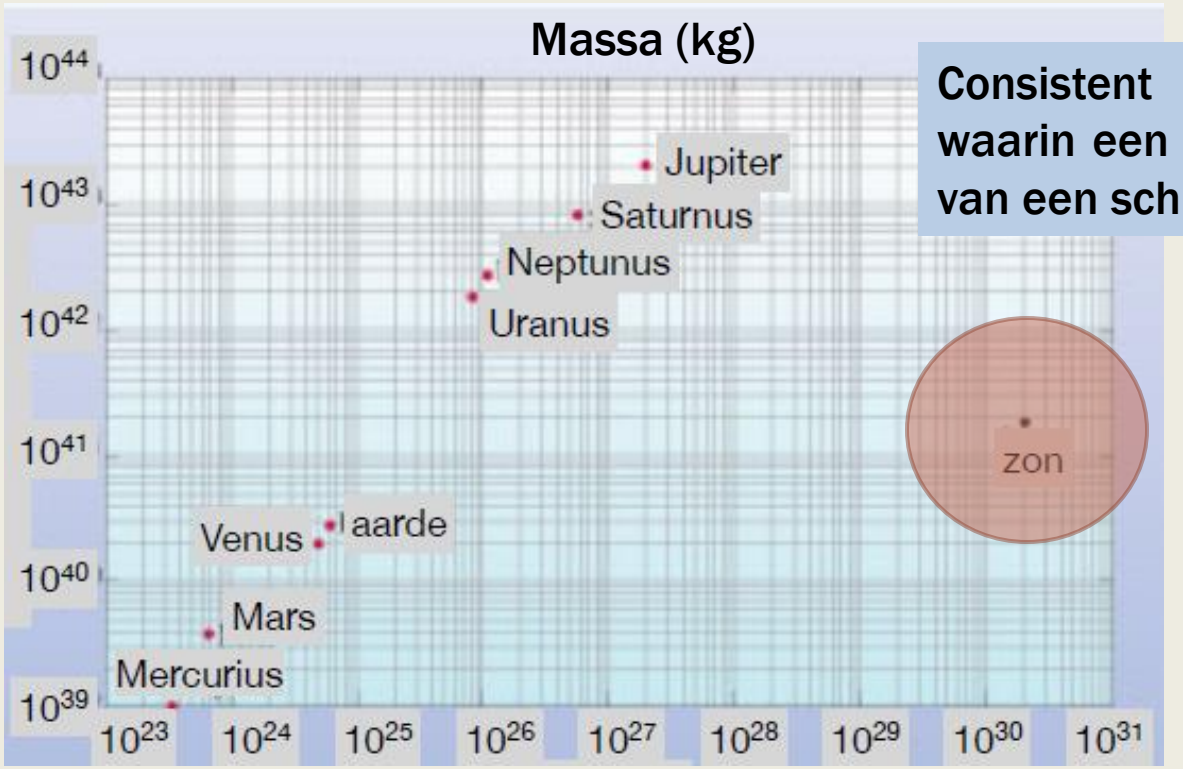
  $L = r \times p = R \times mv$

  (d.w.z. uitproduct van plaatsvector r en impuls p)

- De wet van behoud van hoekmoment zegt dat L alleen kan veranderen door hoekmoment aan een ander object te geven.

BEHOUD VAN HOEKMOMENT

L = RXP = RXMV (UITPRODUCT PLAATSVECTOR EN IMPULS)



Consistent met een model waarin een ster in het midden van een schijf vormt.

Zo'n 98% van het hoekmoment in ons zonnestelsel (~3.10^{43} kg m^2 s^{-1}) wordt gedragen door de planeten. Er zit veel minder hoekmoment in de zon.

WAT KUNNEN WE MET WAT MEER MOEITE TE WETEN KOMEN ?

- Stel dat het proces van planeet- en stervorming een universeel proces is, dan moet je dat elders in het heelal toch ook kunnen zien ?

- Inmiddels waarnemingen van

i) stofschijven in de ruimte

ii) jonge, pas gevormde sterren met een omringende schijf

iii) 'gaps' in stofschijven

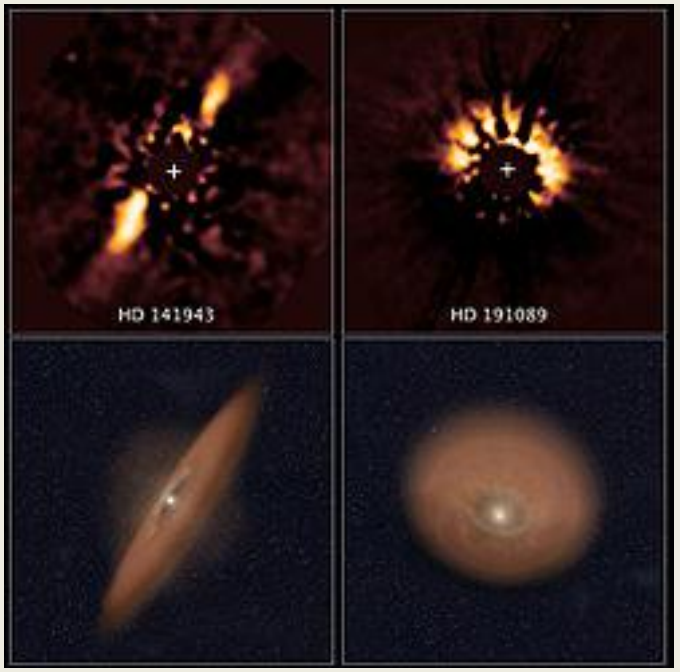
iv) van allerlei materiaal ('debris') rond die sterren

v) exo-planeten

Je kunt de fysische en chemische chronologie van de vorming van planeten en sterren a.h.w. waarnemen via 'snapshots in de ruimte'.

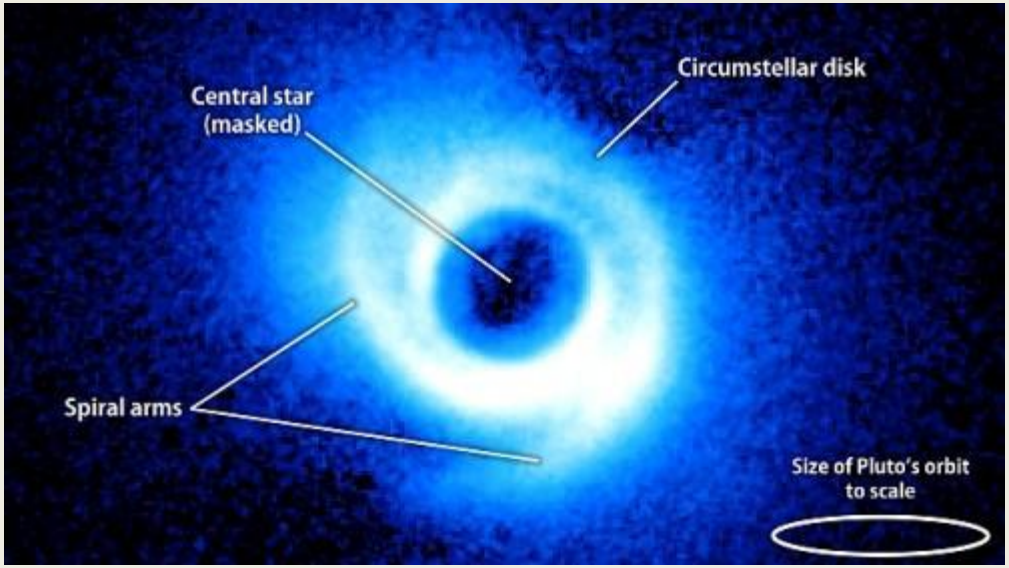
WAT KUNNEN WE MET WAT MEER MOEITE TE WETEN KOMEN ?

Proto-planetaire schijven in Orion nevel

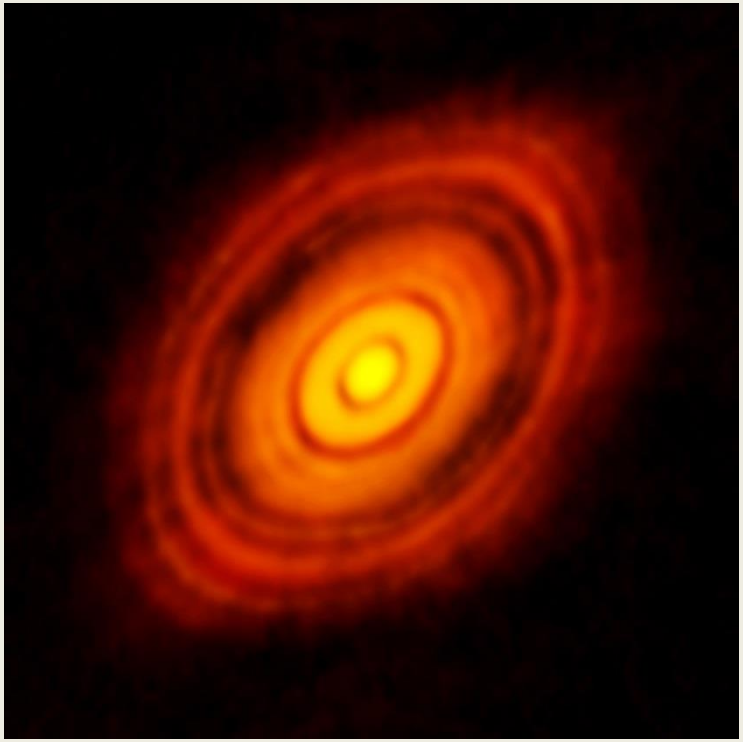


Debris schijf rond jonge sterren

WAT KUNNEN WE MET WAT MEER MOEITE TE WETEN KOMEN ?



Stofschijf met spiraalarmen, veroorzaakt (mogelijk) door planeten in wording.



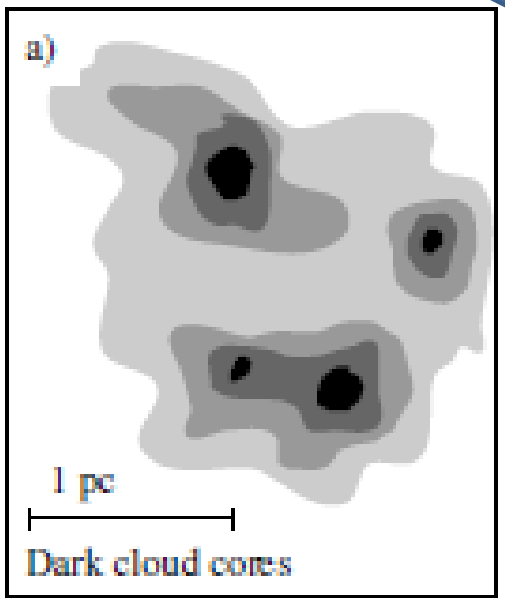
Stofschijf gemeten met ALMA (grote radiotelescoop in Chile) met duidelijk 'gaps'

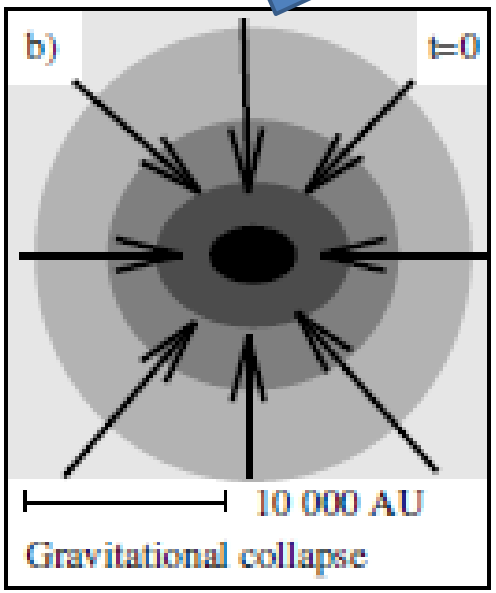
LATEN WE BIJ HET BEGIN STARTEN

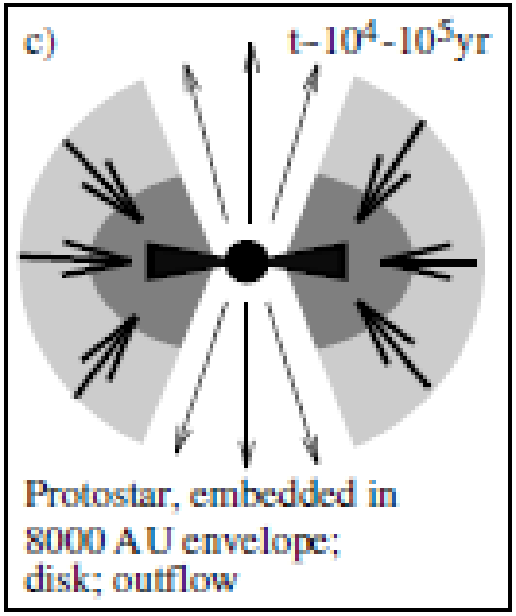
INTERSTELLAIRE WOLKEN

- Melkweg is gevuld met $5x10^9$ M_{zon} aan wolken van interstellair gas en stof.
- Deze ijle maar zeer grote wolken vormen het zogenaamde interstellaire medium (ISM).
- Het ISM omvat ongeveer ~2% van de totale massa van ons MWS
    - 99% van deze massa is gas: H_2 en He
    - 1% stof: silicaat/grafietkorreltjes met ~1 µm diameters.
- Er zijn verschillende soorten interstellaire wolken; transparante (translucent) en donkere (dark of dense) wolken.
- Deeltjesdichtheden variëren van een paar duizend tot enkele tientallen miljoenen per cm^{-3}. Dat is dus echt niet veel (drukken van 10^{-15} mbar of nog minder, dus beter dan welk vacuum op Aarde dan ook).
- De wolken zijn vooral gesitueerd langs de spiraalarmen.
- Zichtbaar als vlekken of donkere plekken aan de sterrenhemel, bv. Orionnevel (met blote oog te zien) of de 'Kolenzak' (aan zuidelijk halfrond).

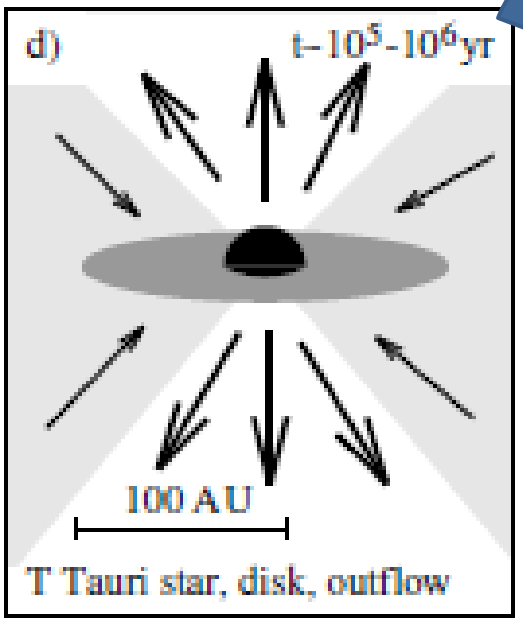
EERST EVEN SCHEMATISCH

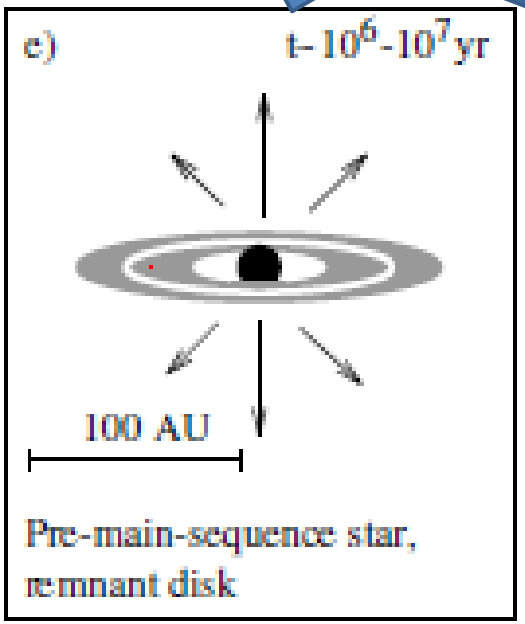


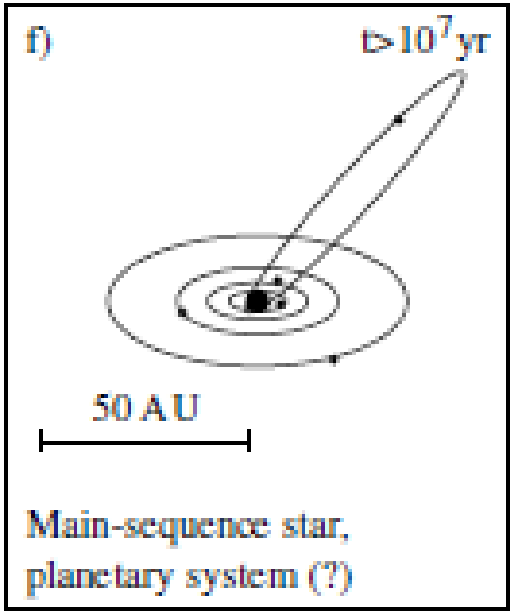




EERST SCHEMATISCH







DONKERE INTERSTELLAIRE WOLK

DONKERE INTERSTELLAIRE WOLK

- Zo'n wolk met massa m (H, H_2) , 'straal'r en temperatuur T moet gaan samentrekken. Er zijn verschillende 'triggers' mogelijk, die dat proces kunnen starten of versnellen (bv. een 'shock-golf' van een exploderende ster), maar hoe dan ook moet de wolk aan een tweetal voorwaarden voldoen.
- De wolk moet een minimale afmeting, de 'Jeans lengte', R_J, hebben, en daarmee corresponderend een minimale massa, de 'Jeans massa' hebben, om gravitationeel gebonden te zijn.
- Typische waarden

  Interstellaire wolk; 10^5 H-atomen cm^{-3}; 10-20 K, 0.2 pc

  → M_J = 76 M_{zon}; invaltijd = 3.10^5 jaar

[Je zit dus helemaal rechts in het HR diagram, in een bereik waar een object nog geen ster is]]

INTERMEZZO: JEANS MASSA

Samentrekkende gaswolk (H of H_2)

- Beschouw bol met straal R, totale massa M als som van m, de massa per deeltje, veronderstel uniforme dichtheid ρ, temperatuur T
  → Potentiële gravitationele energie: - 3/5 (GM^2/R)
  → Kinetische energie: 3/2 (M/m) kT

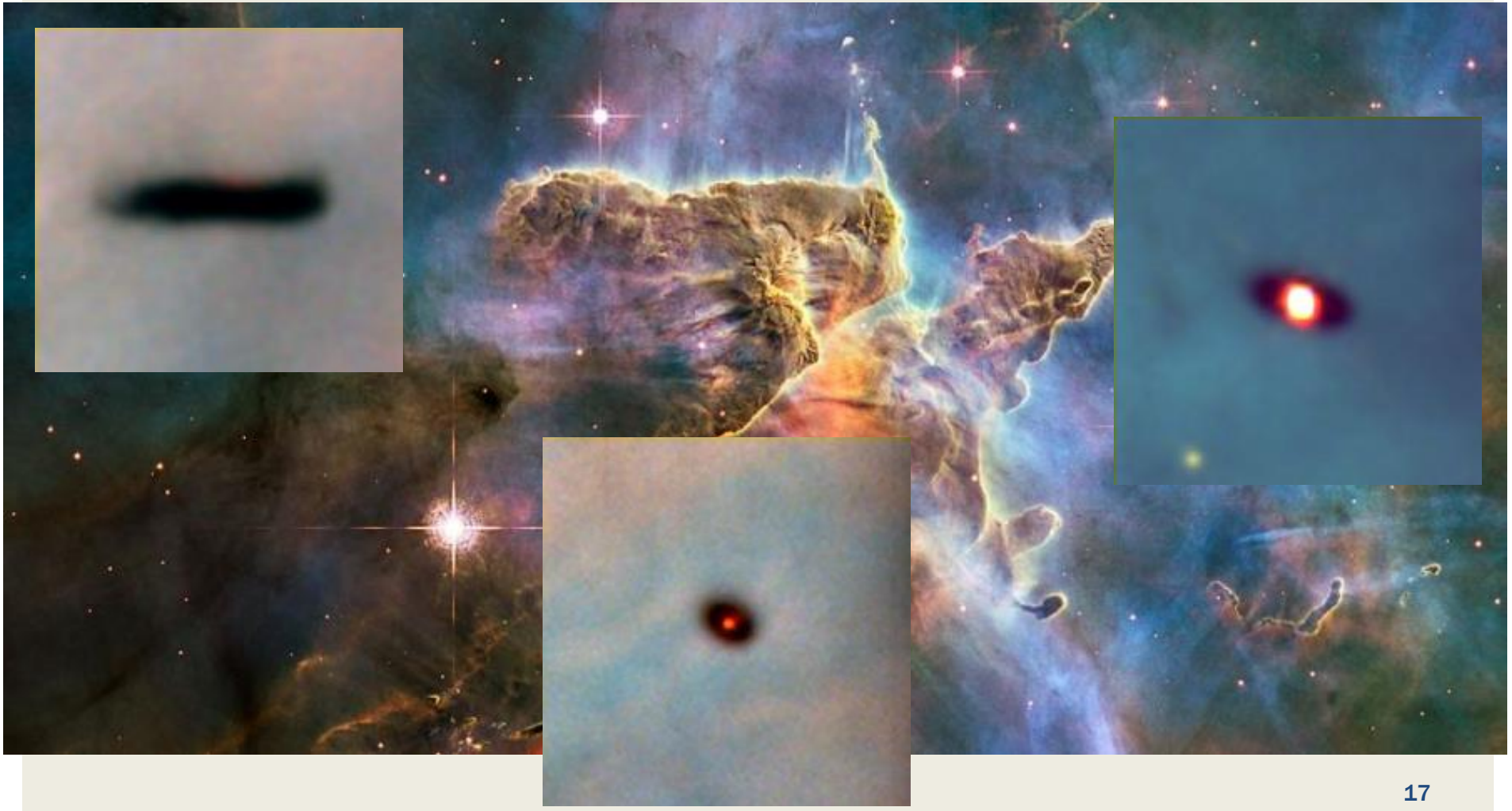
- Gas is gravitationeel gebonden wanneer bol samentrekt, dus wanneer thermische snelheid van gasdeeltjes lager is dan de ontsnappingssnelheid
  → $(3/5)(GM^2/R) \geq (3/2)(M/m)kT$
  → $(M/R) \geq (5/2)(kT/Gm)$

[Neem aan uniforme massa verdeling: $\rho = M / (4/3\ \pi R^3)$]

VORMING ACCRETIESCHIJF

- De oorspronkelijke wolk bevat altijd iets van hoekmoment (alleen al omdat er nog iets van willekeurige turbulentie over is)
- Hoekmoment blijft behouden tijdens ineenstorting: $L = r \times mv$
  - → r wordt kleiner, dus wordt v wordt groter
  - → totdat v gelijk wordt aan de snelheid rond de ingesloten massa en leidt tot de vorming van een schijf.
  - → totdat $v > v_{esc}$
- een groot deel van het hoekmoment van de samentrekkende ster wordt overgedragen op de uitgedreven massa.
  - → massa naar binnen; hoekmoment naar buiten → hoekmoment ster beperkt.
  - → accretieschijf = protoplanetaire schijf.

PROTOSTELLAIRE SCHIJF



ZEER JONGE STERREN

- Vraag: Zijn pas gevormde sterren inderdaad omgeven door een accretieschijf ? Antwoord: onderzoek jonge sterren.
- Hoe zou je een jonge ster definiëren ?

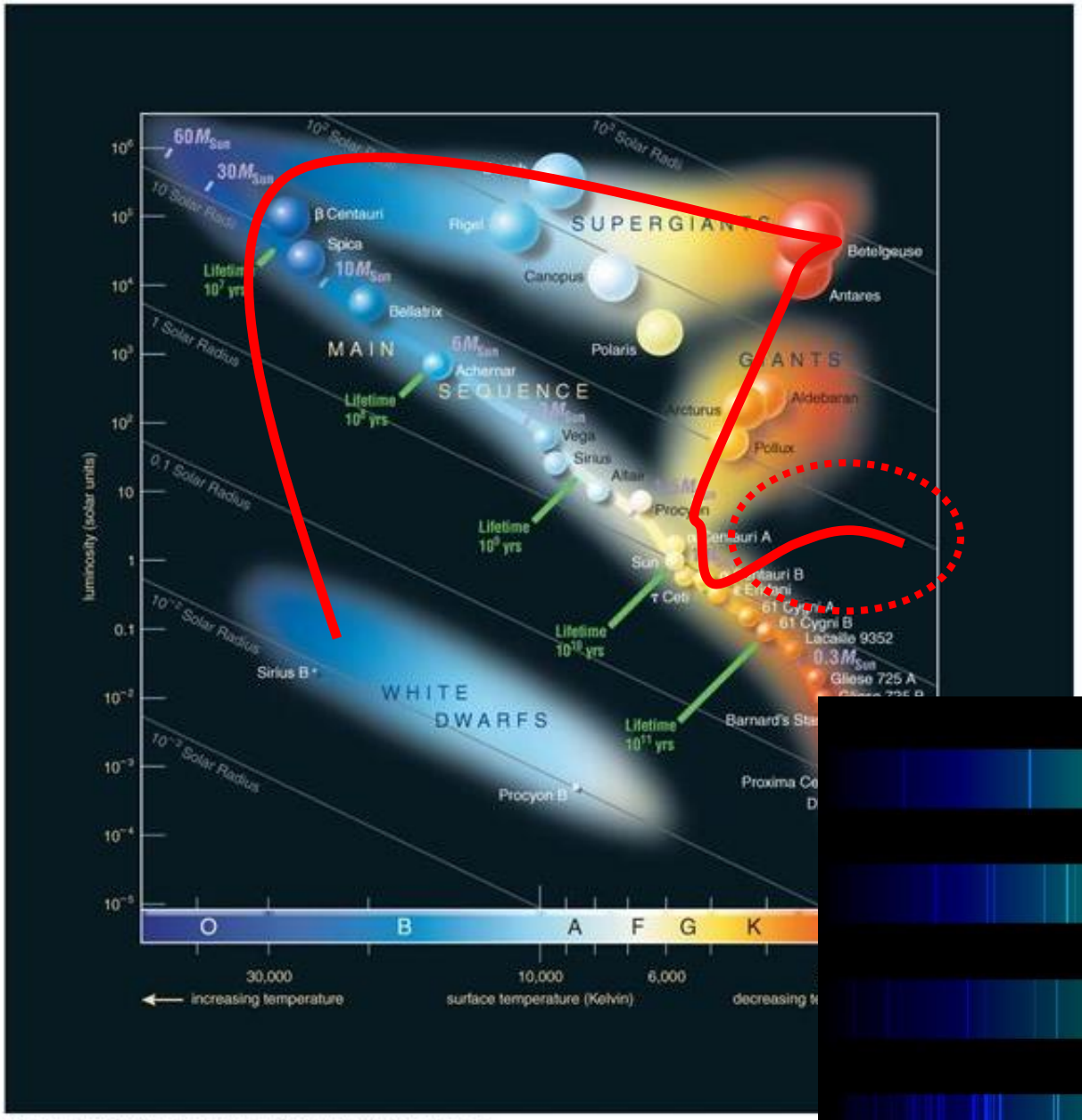
  → een ster die nog niet op de hoofdreeks is aangekomen.
- Hoe kun je een jonge ster herkennen ?

  → Temperatuur nog niet hoog genoeg voor reguliere kernfusie processen (proton-proton 4 x ^{1}H → ^{4}He; 3 x ^{4}He → ^{12}C; CNO-cyclus)

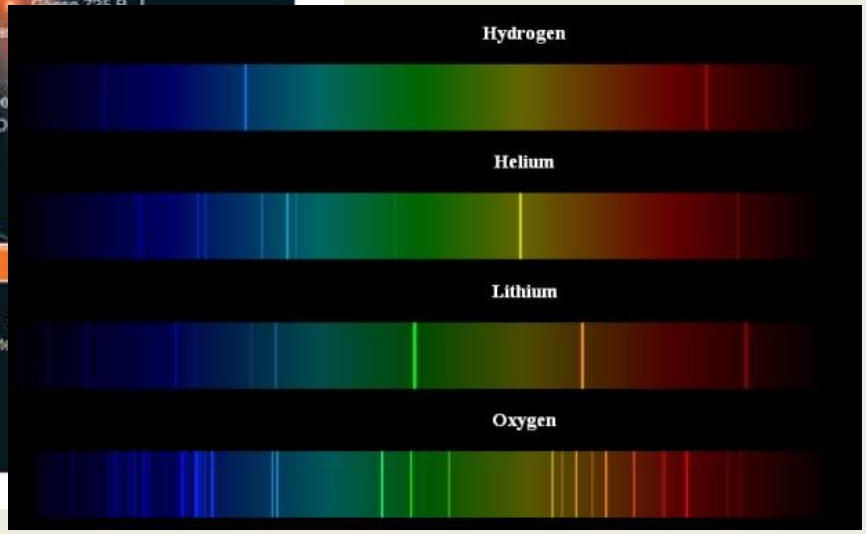
  → Alternatief

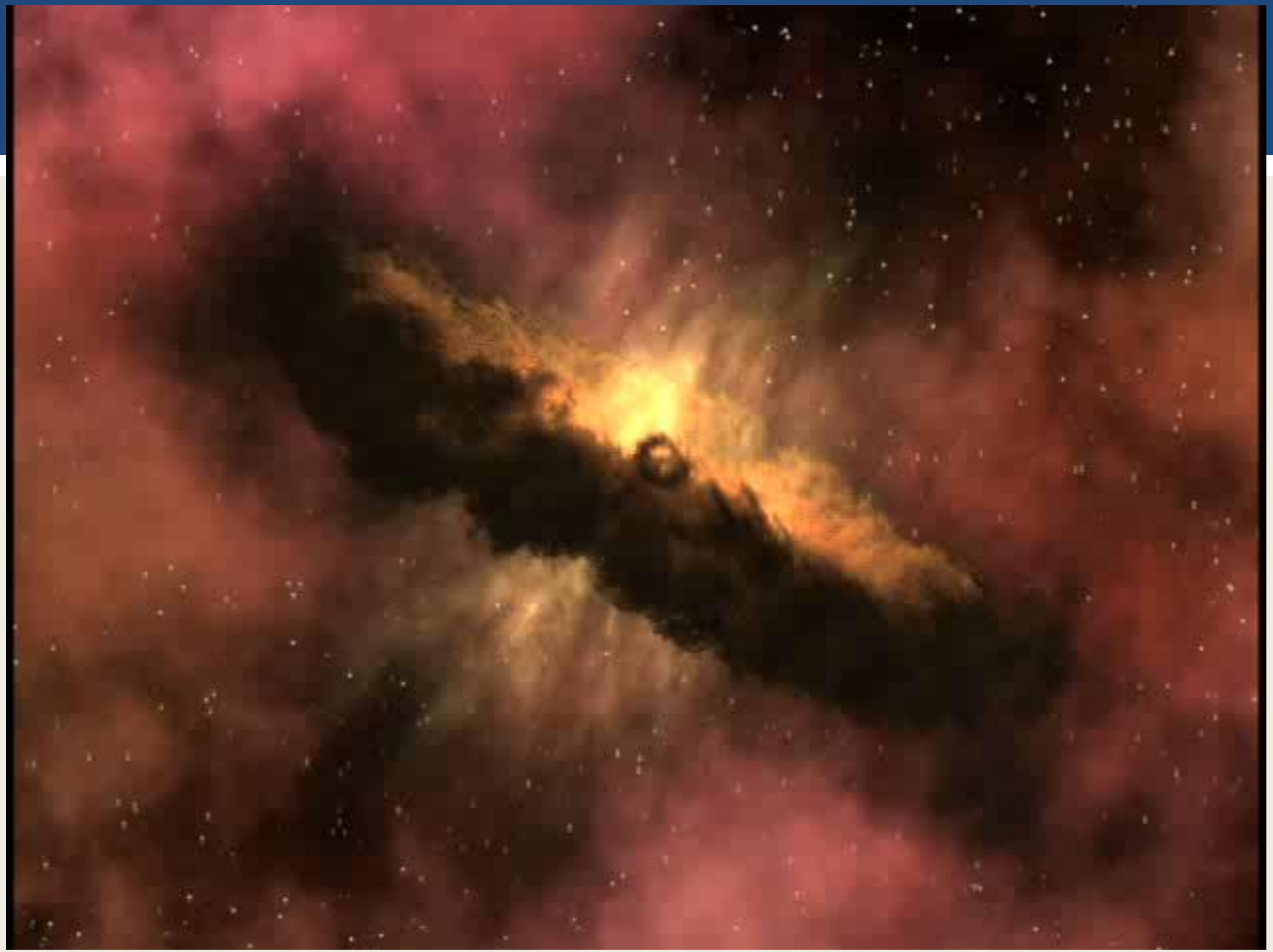
  deuterium-verbranding: $^{2}H+H \rightarrow {}^{3}He$

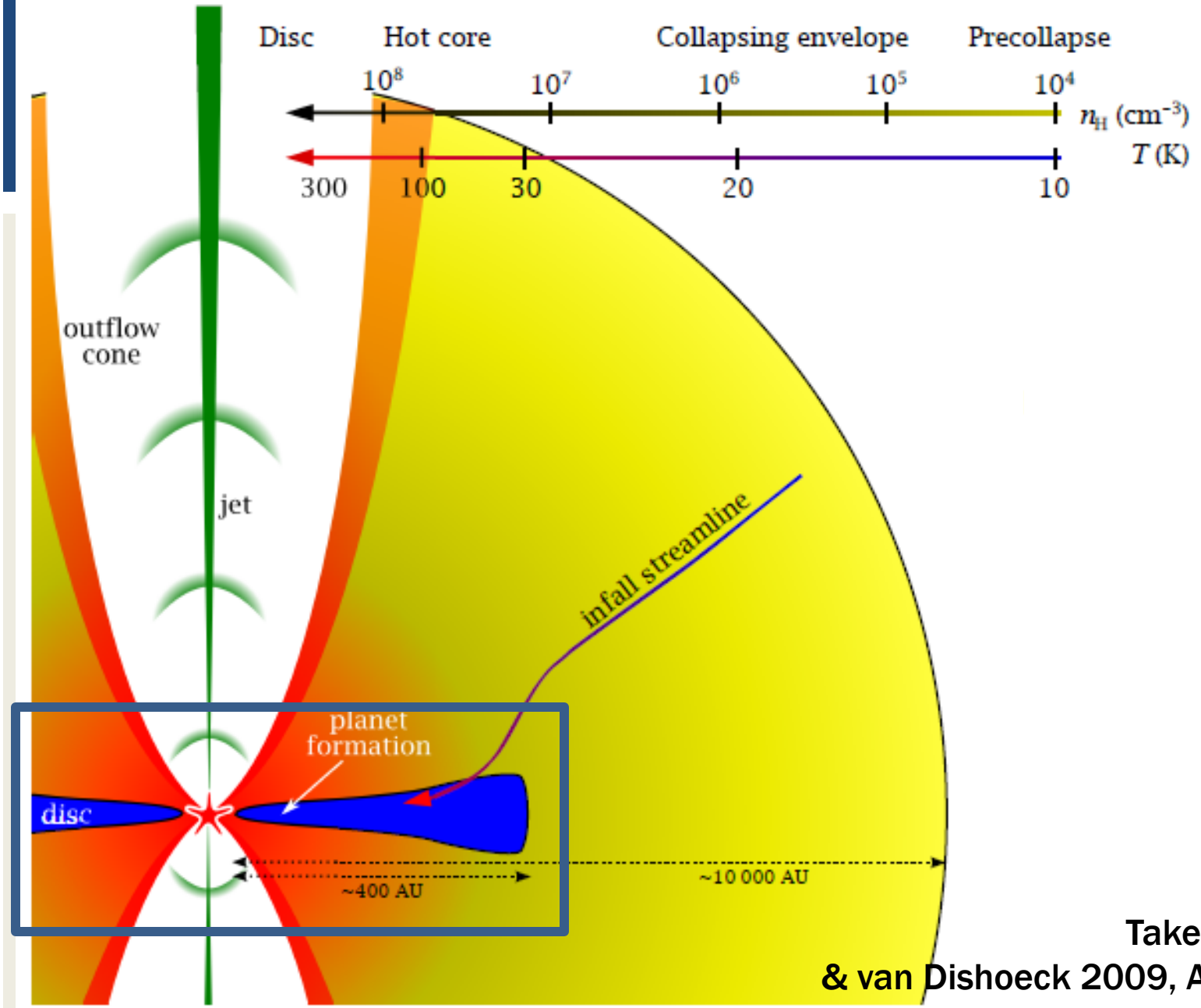
  lithium verbranding: $H+{}^{6}Li \rightarrow \ldots \rightarrow \ldots \rightarrow {}^{4}He+{}^{4}He$
- Een jonge ster 'verbrandt' dus zijn beschikbare hoeveelheid lithium, dus een ster met lithium lijnen in zijn spectrum moet een jonge ster zijn !
- Inderdaad: T Tauri sterren, gepositioneerd boven de hoofdreeks, met Li lijnen en stof in een schijf om de ster.



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley

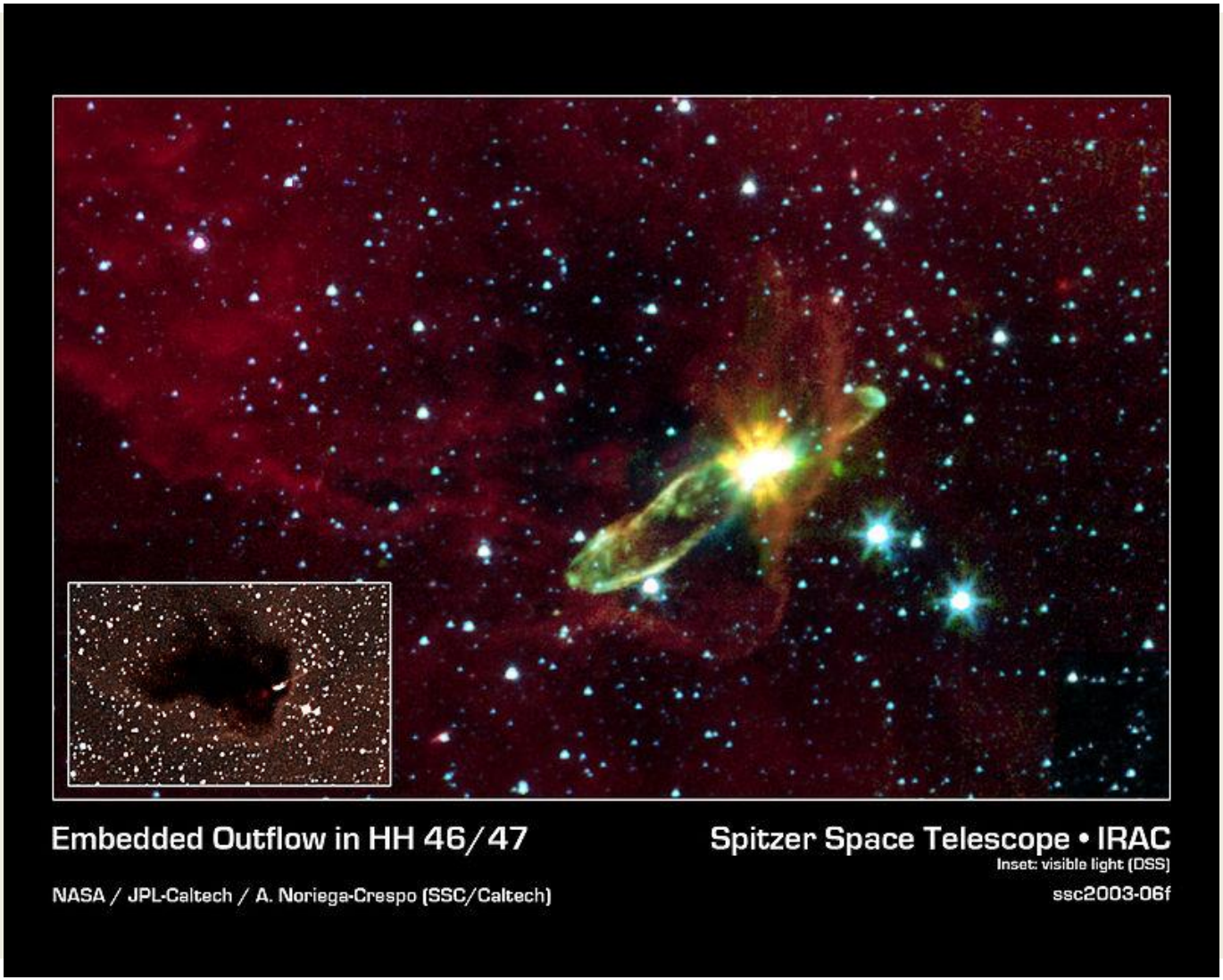




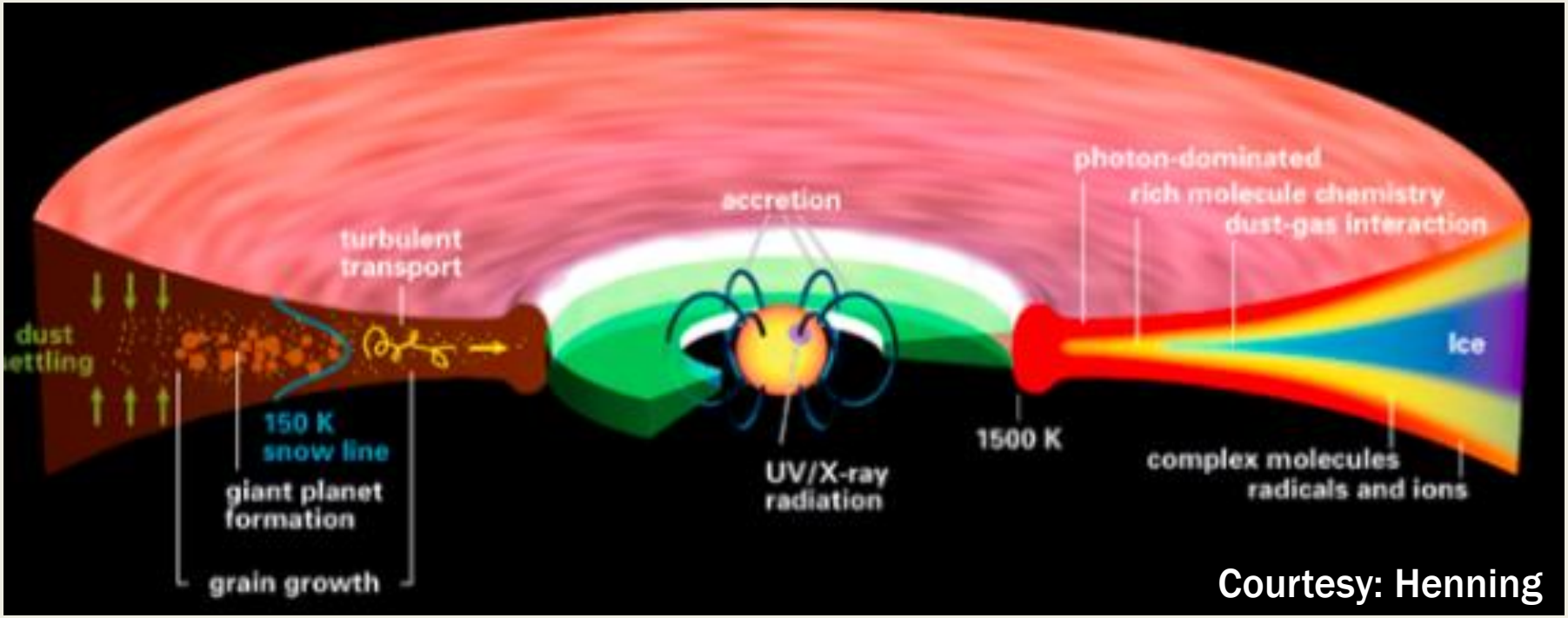


Taken from Herbst & van Dishoeck 2009, ARAA, 47, 427

INFRAROOD FOTO VAN EEN OUTFLOW



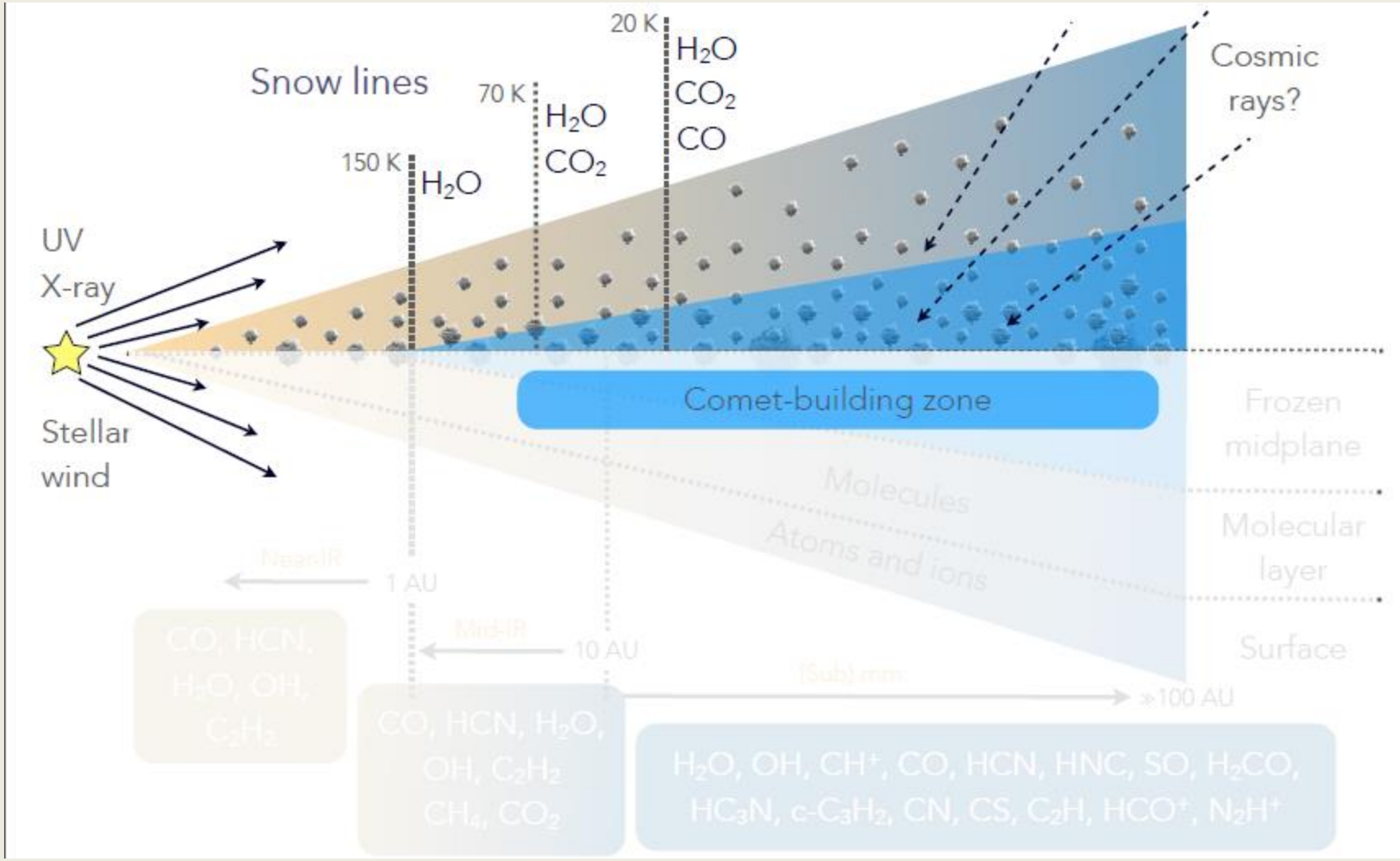
ANATOMIE VAN EEN PROTO-PLANETAIRE SCHIJF



In een protoplanetaire schijf bevinden zich meerdere zones waar verschillende fysische en chemische processen een rol spelen.

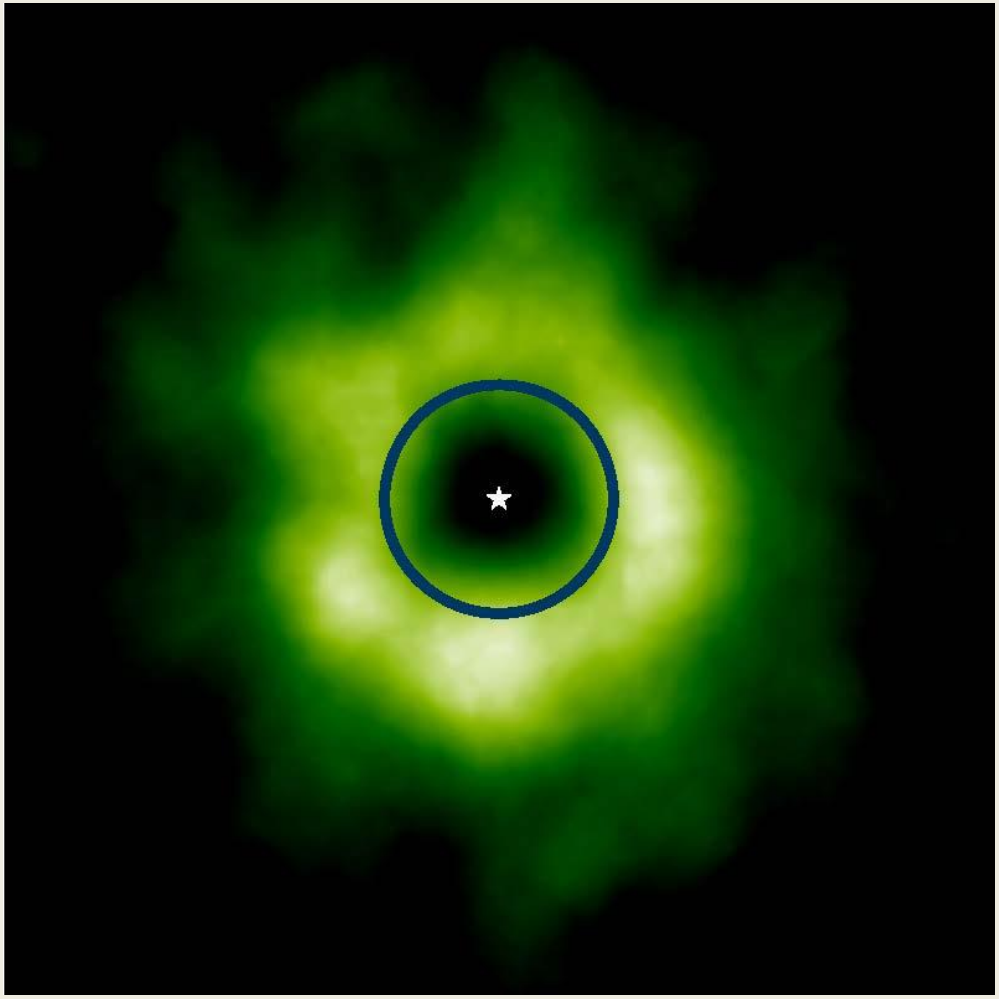
En ‘op de een of andere manier’ ontstaan daarbij planeten (?).

ANATOMIE VAN EEN PROTO-PLANETAIRE SCHIJF



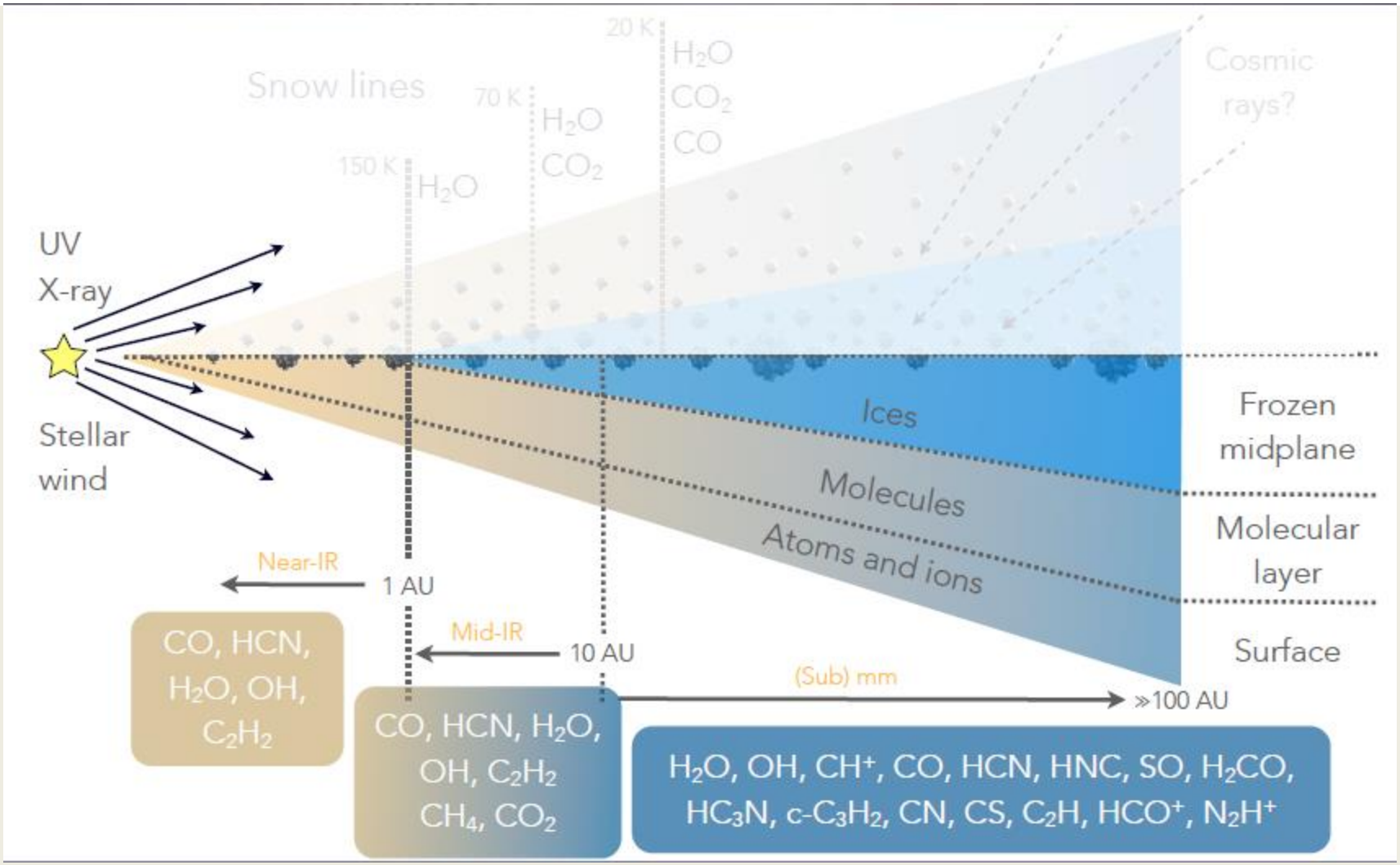
Courtesy Walsh (2016)

SNOWLINES



- Door de temperatuur gradient zijn bepaalde moleculen gasvormig in de buurt van de ster en vastgevroren op stof-deeltjes verder weg.
- De overgang van gas naar ijsvormig wordt snowline genoemd.
- Waargenomen voor CO en voor water.
- Mogelijk zeer belangrijk bij de vorming van planeten.
- Wat bepaalt de positie van de snowline ?

ANATOMIE VAN EEN PROTO-PLANETAIRE SCHIJF



Courtesy Walsh (2016)

ALMA
ATACAMA LARGE MILLIMETER ARRAY

- Kan op zoek naar moleculen in de ruimte met een oplossend vermogen dat zo goed is, dat je de verschillende zones in een proto-planetaire disk zichtbaar kunt maken.
- Hiervoor wordt gebruikt gemaakt van moleculaire spectroscopie.

INTERMEZZO: SPECTROSCOPIE

- De totale energie van een molecuul bestaat uit de energie van bewegingen van de electronen en kernen.
- De electronen kunnen van de ene naar de andere electronische toestand bewegen,
- Atomen in de kern kunnen t.o.v. elkaar vibreren (=trillen).
- Het nucleaire frame als geheel kan roteren.

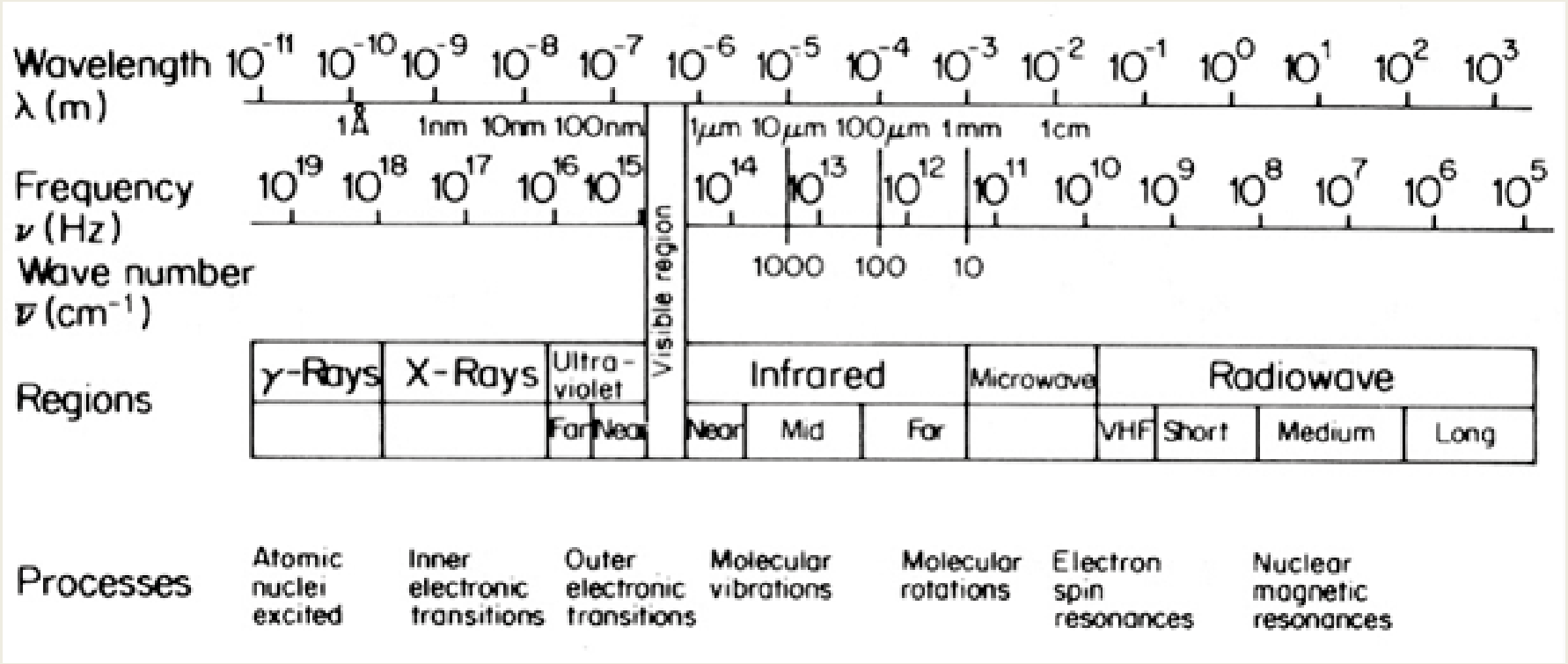
$$\rightarrow E_{tot} = E_{electronen} + E_{vibratie} + E_{rotatie}$$

- Typisch is $E_{electronen} >> E_{vibratie} >> E_{rotatie}$
- Wat zegt dat over wat je met welke golflengte kunt zien ?
- Waar kijk je dus met ALMA naar ?

INTERMEZZO: SPECTROSCOPIE

Volgens de Wet van Planck scaleert de energie met de frequentie:

$E = h.\nu$ met $h = 6.6262.10^{-34}$ Js



INTERMEZZO: SPECTROSCOPIE

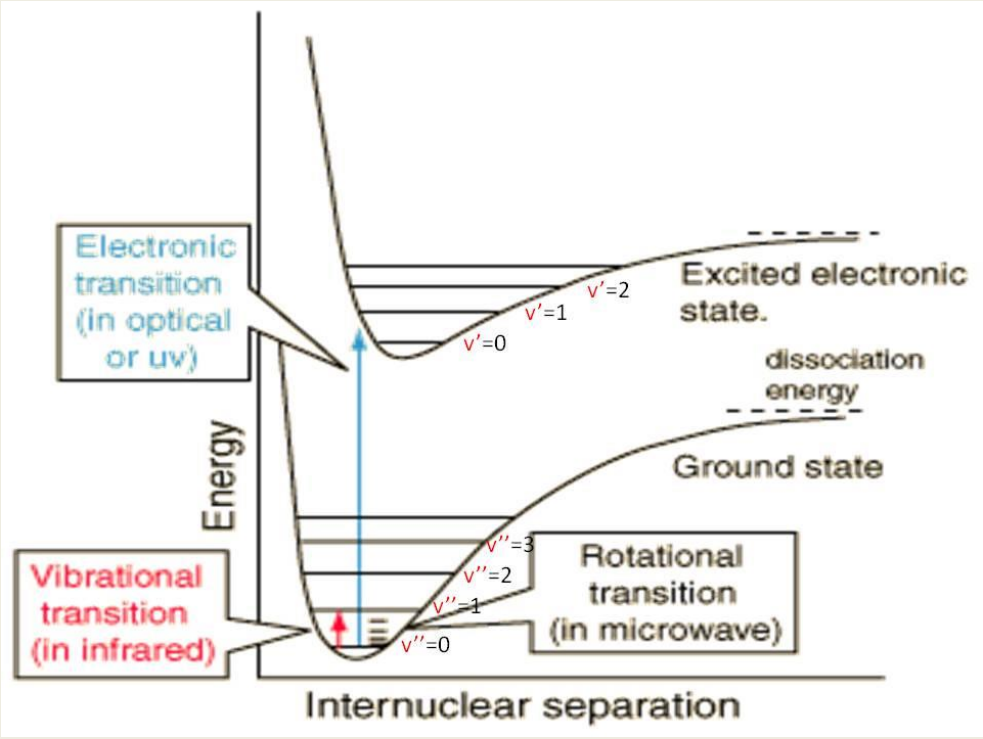
- De totale energie van een molecuul bestaat uit de energie van bewegingen van de electronen en kernen.
- De electronen kunnen van de ene naar de andere electronische toestand bewegen,
- Atomen in de kern kunnen t.o.v. elkaar vibreren (=trillen).
- Het nucleaire frame als geheel kan roteren.

$$\rightarrow E_{tot} = E_{electronen} + E_{vibratie} + E_{rotatie}$$

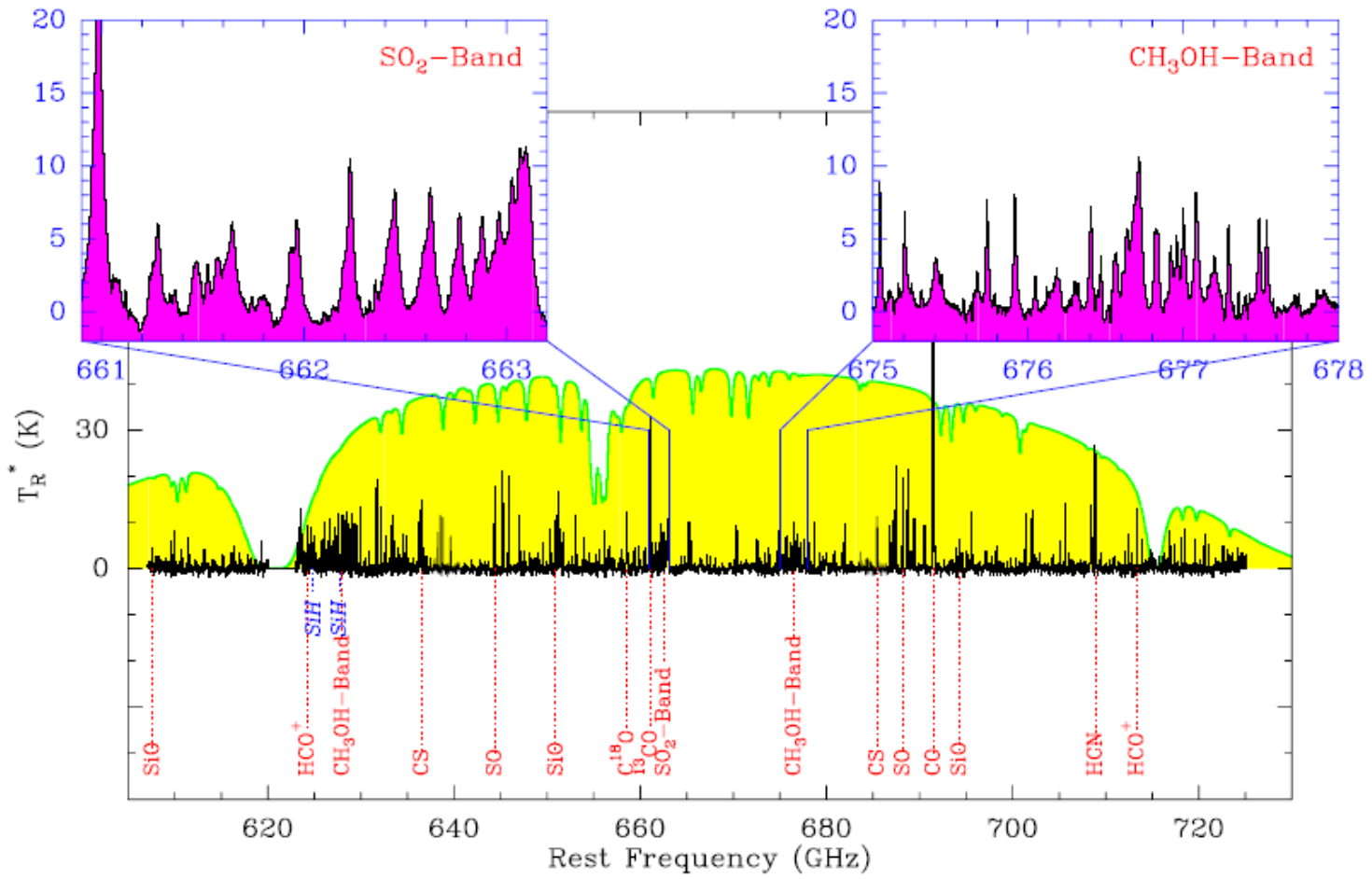
- Typisch is $E_{electronen} >> E_{vibratie} >> E_{rotatie}$
- Wat zegt dat over wat je met welke golflengte kunt zien ?

INTERMEZZO: SPECTROSCOPIE

- De quantummechanica leert dat energie niveaus gequantiseerd zijn; ze zijn discreet.
- Niet iedere mogelijke energietoestand is toegestaan, maar alleen welbepaalde veelvouden.
- Dat betekent ook, dat een molecuul alleen welbepaalde kleuren licht kan absorberen of uitstralen.
- De verzameling van kleuren heet spectrum en kan gezien worden als een moleculaire vingerafdruk.



STUKJE SPECTRUM ORION NEVEL



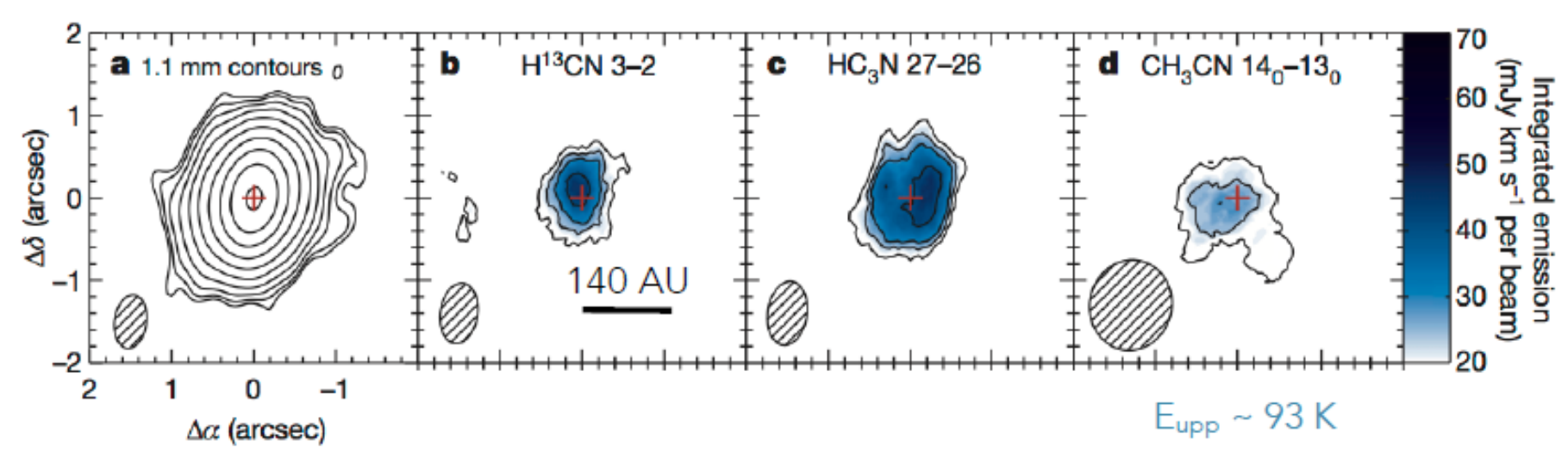
MOLECULEN ONTDEKT IN DE RUIMTE

2 atoms		3 atoms		4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms	8 atoms	9 atoms	≥ 10 atoms
H_2	HD	C_3	AlNC	*c*-C_3H	C5	C_5H	C_6H	CH_3C_3N	CH_3C_4H	CH_3C_5N
AlF	FeO ?	C_2H	SiNC	*l*-C_3H	C_4H	*l*-H_2C_4	CH_2CHCN	$HCOOCH_3$	CH_3CH_2CN	$(CH_3)_2CO$
AlCl	O_2	C_2O	HCP	C_3N	C_4Si	C_2H_4	CH_3C_2H	CH_3COOH	$(CH_3)_2O$	$(CH_2OH)_2$
C_2	CF^+	C_2S	CCP	C_3O	*l*-C_3H_2	CH_3CN	HC_5N	C_7H	CH_3CH_2OH	CH_3CH_2CHO
CH	SiH ?	CH_2	AlOH	C_3S	*c*-C_3H_2	CH_3NC	CH_3CHO	C_6H_2	HC_7N	HC_9N
CH^+	PO	HCN	H_2O^+	C_2H_2	H_2CCN	CH_3OH	CH_3NH_2	CH_2OHCHO	C_8H	CH_3C_6H
CN	AlO	HCO	H_2Cl^+	NH_3	CH_4	CH_3SH	*c*-C_2H_4O	*l*-HC_6H	CH_3CONH_2	C_2H_5OCHO
CO	OH^+	HCO^+	KCN	HCCN	HC_3N	HC_3NH^+	H_2CCHOH	CH_2CHCHO ?	C_8H^-	CH_3OCOCH_3
CO^+	CN^-	HCS^+	FeCN	$HCNH^+$	HC_2NC	HC_2CHO	C_6H^-	CH_2CCHCN	C_3H_6	*c*-C_6H_6
CP	SH^+	HOC^+	O_2H	HNCO	HCOOH	NH_2CHO		H_2NCH_2CN	CH_3CH_2SH	*n*-C_3H_7CN
SiC	SH	H_2O	TiO_2	HNCS	H_2CNH	C_5N		CH_3CHNH		*i*-C_3H_7CN
HCl	HCl^+	H_2S	C_2N	$HOCO^+$	H_2C_2O	*l*-HC_4H				$HC_{11}N$
KCl	TiO	HNC	Si_2C	H_2CO	H_2NCN	*l*-HC_4N				C_{60}
NH	ArH^+	HNO		H_2CN	HNC_3	*c*-H_2C_3O				C_{70}
NO	NO^+ ?	MgCN		H_2CS	SiH_4	H_2CCNH ?				
NS		MgNC		H_3O^+	H_2COH^+	C_5N^-				
NaCl		N_2H^+		*c*-SiC_3	C_4H^-	HNCHCN				
OH		N_2O		CH_3	HCOCN					
PN		NaCN		C_3N^-	HNCNH					
SO		OCS		PH_3	CH_3O					
SO^+		SO_2		HCNO	NH_4^+					
SiN		*c*-SiC_2		HSCN	H_2NCO^+ ?					
SiO		CO_2		H_2O_2	$HCCNH^+$					
SiS		NH_2		C_3H^+						
CS		H_3^+		HMgNC						
HF		SiCN		HCCO						

"Complex" molecules

- Cations (positively-charged)
- Anions (negatively-charged)
- Radicals (unpaired electrons)
- Unsaturated carbon chains
- Structural isomers
- Complex organic molecules (e.g., ethanol, acetone, ethylene glycol)
- > 180 and counting ...

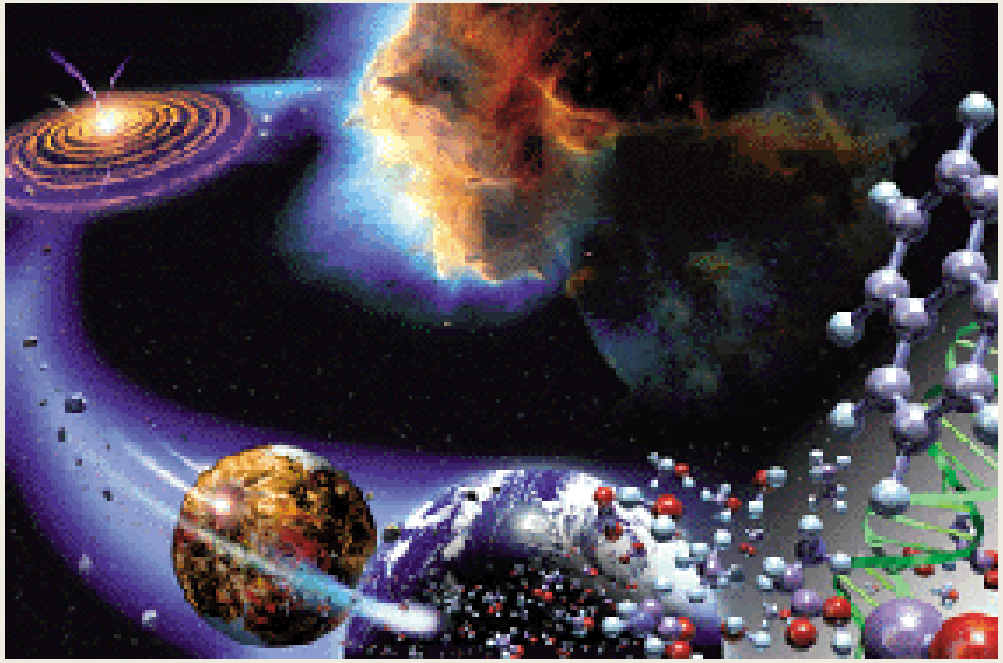
DICHTHEIDSCONTOUREN IN PROTO-PLANETAIRE SCHIJF



Taken from Oberg et al. 2013

- ALMA kan op zoek naar moleculen in de ruimte met een oplossend vermogen dat zo goed is, dat je de verschillende zones in een proto-planetaire disk zichtbaar kunt maken.
- Die moleculen leren ons welke processen plaats vinden in een protoplanetaire schijf en ook waar.

WAAROM IS DAT NOU BELANGRIJK ?



- Uiteindelijk zijn de planeten en de atmosferen van planeten opgebouwd uit materiaal dat chemisch gevormd kan worden in een proto-planetaire schijf.
- Daar horen ook de bouwstenen van het leven bij ....

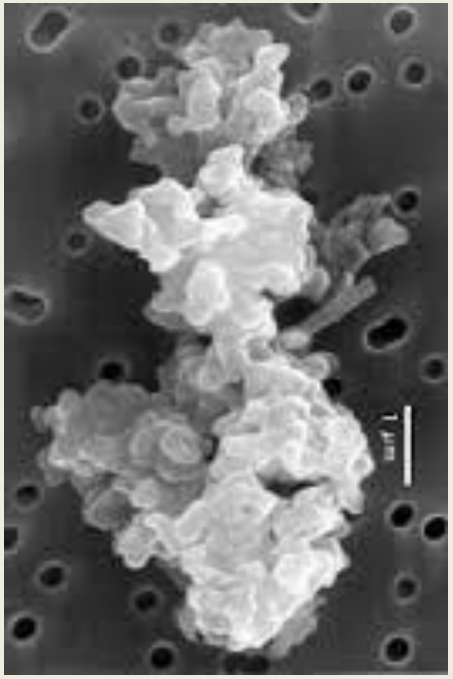
HOE ONTSTAAN DAN PLANETEN ?

- Het eerlijke antwoord is, dat we dat niet precies weten, maar we weten wel het een en ander.

Zero gravity experimenten: hoe plakt stof aan elkaar ?

HOE MAAK JE VAN STOF PLANETEN ?

- Wanneer stofdeeltjes (typisch μm groot) tegen elkaar botsen, dan kunnen deze, afhankelijk van snelheid en ook vorm en opbouw, i) afketsen (niets gebeurt), ii) versmelten – 'in elkaar haken, vd Waals wisselwerkingen of misschien ook electro-statisch of iii) uiteen vallen (terug bij af).
- Berekeningen en zero-gravity experimenten laten zien, dat het op
  - 1 AU ong. 2000 jaar kost om tot 1cm te groeien.
  - 5 AU ong. 5000 jaar kost om tot 1.5 cm te groeien, en
  - 30 AU wel 50000 jaar kost om tot 0.3 mm te groeien.



HOE MAAK JE VAN STOF PLANETEN ?

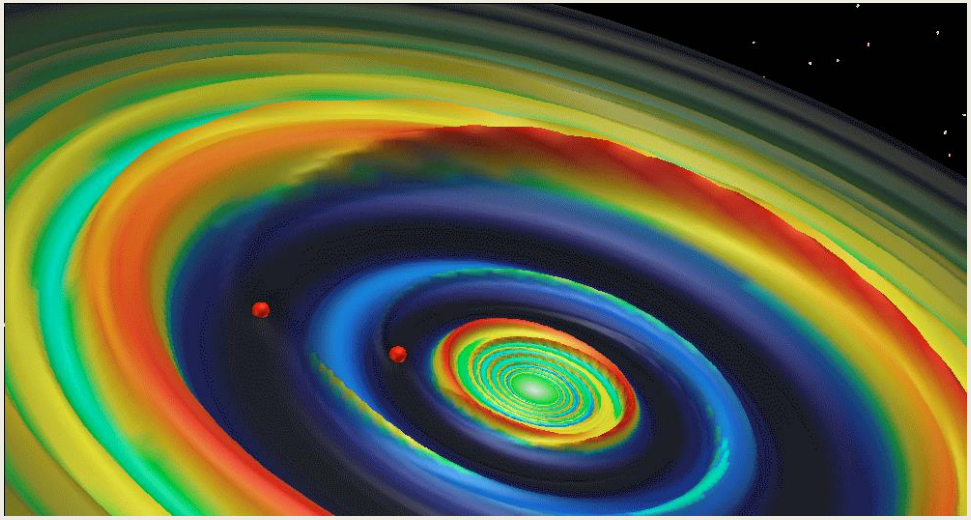
- Wanneer de stofdeeltjes met een ijslaagje zijn bedekt, clusteren ze gemakkelijker. Vandaar dat het belangrijk is te weten waar de snowlines liggen. De vraag is, of dit betekent, dat er geen planeten kunnen ontstaan binnen een snowline.
- Het ziet er nu naar uit, dat we wel snappen hoe we van micrometer grote stofdeeltjes naar kleine stenen van enkele cm kunnen komen, maar niet hoe je daarvan brokstukken kunt maken die zo groot zijn, dat de zwaartekracht het groeiproces gaat overnemen.
- Het is zeer waarschijnlijk dat er wervels optreden in een protoplanetaire schijf, waardoor relatief dichte gebieden ontstaan met deeltjes die t.o.v. elkaar geen grote snelheidsverschillen hebben.
- Onder zulke condities kunnen ook grotere brokstukken ontstaan.
- Zijn eenmaal km grote brokken ontstaan, dan treedt oligargische groei op: the winner takes it all.

NOG VEEL VRAAGTEKENS

- Simulaties laten zien dat op 1 AU in een paar tienduizenden jaren een object van ~1000 km gevormd kan worden; dit kan dan in de volgende miljoenen jaren uitgroeid tot ~ M_{aarde}.
- Op 5 AU kan een 10 M_{aarde} kern gevormd worden in 1 Myr, waarna deze zwaar genoeg is om een H+He atmosfeer te vormen → gasreus. Kost wel meerdere Myr en dat is lang vergeleken met een typische leeftijd van een schijf (2-3 Myr).
- Op 30 AU (huidige positie Neptunus) duurt dit wel 30 Myr: zolang hebben schijven echter niet.
- Daar komt bij dat planeten door (gravitationele) wisselwerking met ander materiaal in de schijf naar de zon toe zouden moeten migreren.
- Dat proces is dusdanig effectief (in de modellen) dat je helemaal niet verwacht dat planeten overleven.
- Toch zijn er aanwijzingen voor migratie.

NOG VEEL VRAAGTEKENS

- Er bestaan hot Jupiters (grote planeten) rond andere sterren; er is te weinig massa in de buurt van de ster zelf om de vorming van zo'n planeet te verklaren.
- De samenstelling van Jupiter suggereert dat deze bij lagere temperatuur gevormd is dan typisch rond 5 AU (moet dus ooit verder weg gestaan hebben).



NOG VEEL VRAAGTEKENS

- En dan blijft er nog heel veel materiaal over; wordt dat allemaal door planeten ingevangen ?
- Kunnen we zo verklaren waar ons water vandaan komt ?

(Bij de vorming van planeten hebben ze nog geen atmosfeer en is het oppervlak zo heet dat ons water vrij zeker niet op Aarde is gevormd).

- Hoe zit dat uit met organisch materiaal ? Wordt dat op dezelfde manier over planeten verdeeld ? Bv. door een bombardment met kometen en meteorieten ?
- Daarom is net nu het onderzoek aan komeet P67 zo interessant (meer in college 6).

MANEN – HETZELFDE VERHAAL

- De manen rond de reuzenplaneten hebben een vergelijkbare oorsprong als de planeten:
  - uit een accretieschijf rond de protoplaneet
  - maar sommige van hun manen zijn duidelijk later ingevangen, bijv. Tritron (Neptunus): beweegt in een retrograde baan!
- De manen rond de aardachtige planeten hebben een andere oorsprong
  - Phobos, Deimos zijn planetoïden ingevangen door Mars
  - De maan is uit een botsing tussen de proto-aarde en iets heel groot anders ontstaan.

IN 4.5 MILJARD JAAR KAN VEEL GEBEUREN

- Volgende week gaan we het hebben over baandynamica en dan zullen we ook zien, dat planeten elkaar gravitationeel zo kunnen beinvloeden, dat hun baan verandert.
- Sterker nog: planeten kunnen uit een zonnestelsel gekatapulteerd worden en het is goed mogelijk dat er miljarden zwerfplaneten (zonder begeleidende ster) door de Melkweg vliegen.
- Het is duidelijk, dat met de vorming van een ster en planeten het verhaal zeker niet af is.
- Meer daarover later in deze college.