

Astrobiologian kurssi

- Harry Lehto, Dos, Ph.D. (Virginia), tähtitiede
Kirsi Lehto, Dos, Ph.D. (UCR), biokemia
- Parhaiten tavoitettavissa
 - heti luennon jälkeen tai
 - mieluiten sähköpostitse hlehto@utu.fi tai klehto@utu.fi
 - puh 02-3338290 (Harry) tai 02-3336266 (Kirsi)
 - Tuorlan Observatorio, Väisäläntie 20, 21500 Piikkiö
- Luennon kuvat omia ©, Wikipaedia commons tai NASA/JPL/USGS/ESO/ESA ellei erikseen mainita

Käytännön asioita

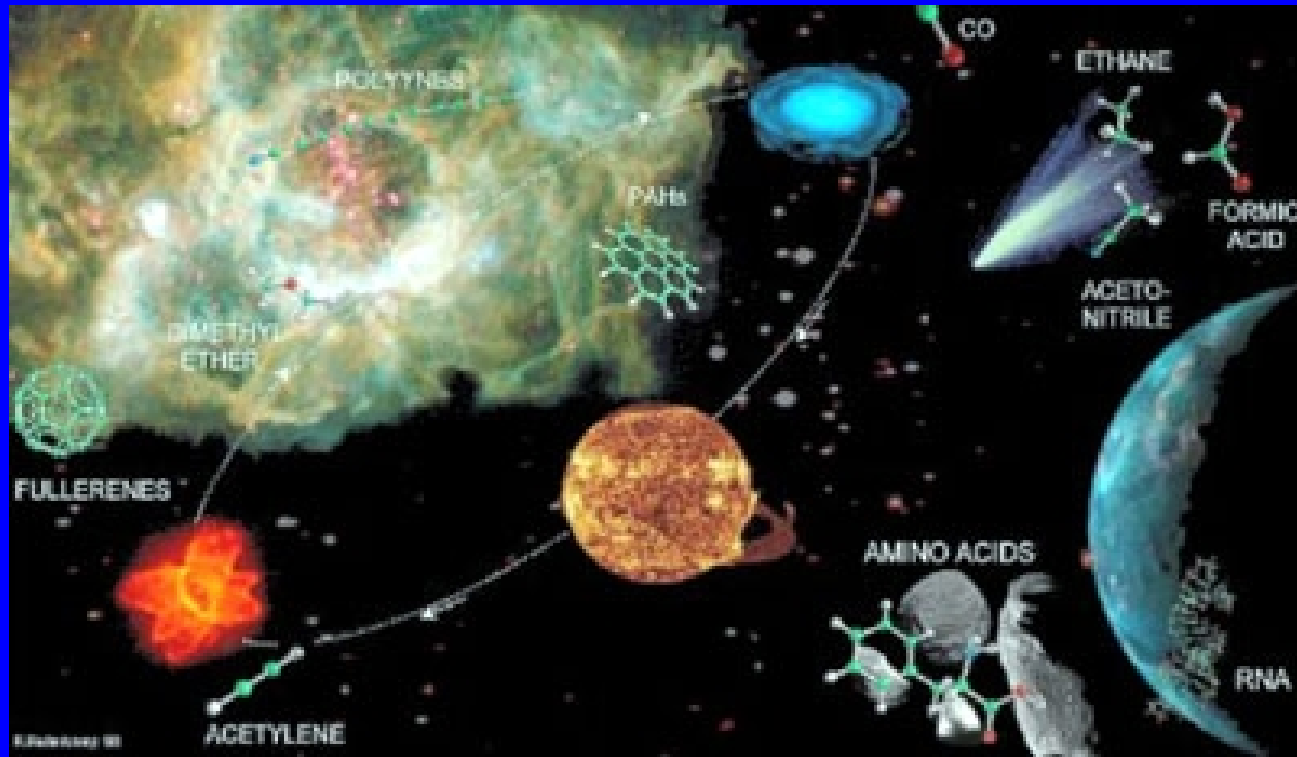
- Luennot tässä salissa I periodissa Ti ja To 16.15-18.00
- Tenttiajankohta 22.10 klo 16.00 (tasan)-18.00
- Luentokalvot linkistä <http://users.utu.fi/hlehto/>
- Kurssilla ilmoitetaan oheislukemisto, joka luetaan ennen seuraavaa tuntia, ja joka myös tulee tenttiin
- Kurssisuoritukseen vaaditaan 75% läsnäolo luennolla
- Sopivia muuta alaa käsitteleviä kirjoja ovat mm:
 - P Teerikorpi, M Valtonen, K Lehto, H Lehto, A Chernin ja G Byrd: The Evolving Universe and the Origin of Life: The Search for Our Cosmic Roots (julkaistu 2009, Springer)
 - Complete course in Astrobiology (eds. P Rettberg, G Horneck)

Astrobiologian sivuaine- kokonaisuus (25 op)

- Peruskurssi (4op)
- Aikavaellus.fi (1op) – järjestetään la 3.10. (?)
- Kansainvälinen astrobiologian kurssi (5 op)
 - ERASMUS-ohjelma: European Astrobiology Campus
- Kansainväliset kokoukset (2-4 op)
- Kansalliset kokoukset (1-2 op)
- Opintopäiväkirja (3op, ohjaa: Kirsi Lehto)
- Muita kursseja, siten että ne eivät ole omasta pääaineesta. ks.
<https://nettiopsu.utu.fi/opas/opetusohjelma/marjapuuro.htm?id=8758>

Astrobiologia – mitä se on?

“LIFE IN THE UNIVERSE”



- NASAn Exobiologia/Astrobiologia ohjelma, 50 vuotta (14.10.2010)

Kurssin sisältö

8.9. Etäisyys, Aika, Maailmankaikkeuden kuva

10.9. Tähdet, Aurinkokunta

15.9. Mitä elämä on: määrittely-yrityksiä; voisiko elämä olla toisenlaista

17.9. Elämän kemiaa: alkuaineet, rakennuspalikat, polymeerit, vesi, energia

22.9. Elämän synty: vaiheittain: prebioottinen kemia, rakennuspalikat, polymeerit, katalyytit, proteiinisynteesikoneisto; missä saattoi syntyä

24.9. Eliökunta kehittyi: 3 päähaaraa, eukaryoottien alkuperä, kompleksisuuden nousu eri tasoilla

29.9. Elämä muuttaa olosuhteita Maa-planeetalla: elämänkehä, ilmakehä, kivikehä; takaisinkytkennät

1.10. Elämälle sopivat ympäristöt: sopeutumisen rajat

6.10. EANA

8.10. EANA

13.10. Aurinkokunnan elämän paikat

14.10. Elämän vyöhyke, Eksoplaneetat

20.10. SETI ym

22.10. Tentti

Elämää maailmankaikkeudessa

Tunnetta vain yhden elämän

- Mitä elämä on?
- Miten elämä syntyi Maassa?
- Onko sitä muualla?
- Minkälaista se on?

- Kirsi kertoo tästä enemmän seuraavilla tunneilla



Elämän tärkeimmät alkuaineet

Atomien lukumäärällä mitattuna

bakteeri ihminen

H: 63.1 61.6 %

O: 29.0 26.0 %

C: 6.4 10.5 %

N: 1.4 2.4 %

S: 0.06 0.13%

P: 0.12 0.13%

Ca:0.0 0.23 %

Mg, Mn, Fe : <0.1%

Vesi + Hiili: H₂O, C

SOKERIT/LIPIDIT:

C, H, O /ja N, P)

AMINOHAPOT:

C, H, O ja N+S

DNA:

C, H, O, N, P

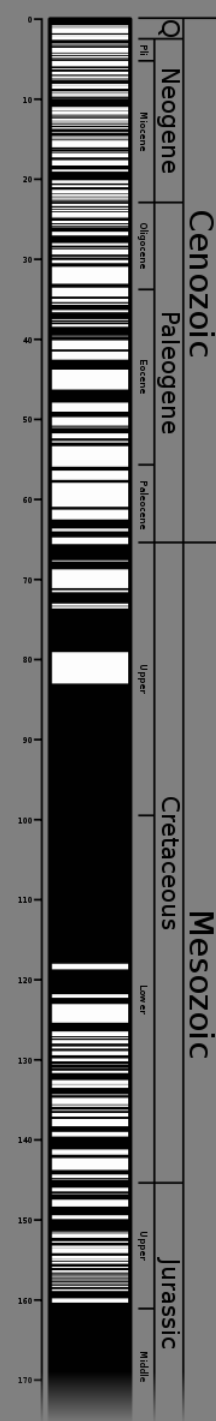
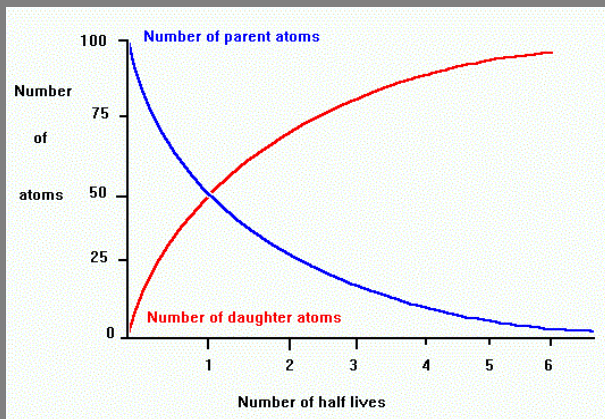
1. Elämän synnyn universaalit reunaehdot: Aika ja Alkuaineet

H1.1. Aika ja sen riittävyys

- 0, 000 000 001 5 | 20 Me
- 0, 000 000 36 | 5 000 Sumerit
- 0, 000 15 | 2 000 000 Homo habilis
- 0, 0047 | 65 000 000 Chicxulub (komeetta)
- 0, 040 | 542 000 000 Kambrikausi
- 0, 11 | 1 500 000 000 Eukaryootit
- 0, 18 | 2 500 000 000 O₂
- 0, 34 | 4 567 000 000 Maan/Aurinkokunnan synty
- 1, 00 | 13 700 000 000 Alkuperämaus

Ajanmittaus

- Sekuntikello < vuosisa
- Mummo 100 vuotta
- Dendrokronologia 0 – 12 000 vuotta
- ^{14}C 0 – 50 000 vuotta
- Thermoluminenssi 0 – 300 000 vuotta
- Geomagneettinen pol 780 000 – 200 miljoonaa vuotta
- $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ suhde 10 000 – 3 miljardia vuotta
- $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ (Zirkonikiteissä) 1 miljoona – 4.5 miljardia v.



Etäisyyden ja ajan yhteys

$$\text{ETÄISYYS} = \text{AIKA} * \text{NOPEUS}$$

Valon nopeus = 299 792,458 km/s

Valo kulkee 1 sekunnissa yhtä pitkän matkan kuin 112km/h kulkeva ambulanssi matkaa 112 vuorokaudessa

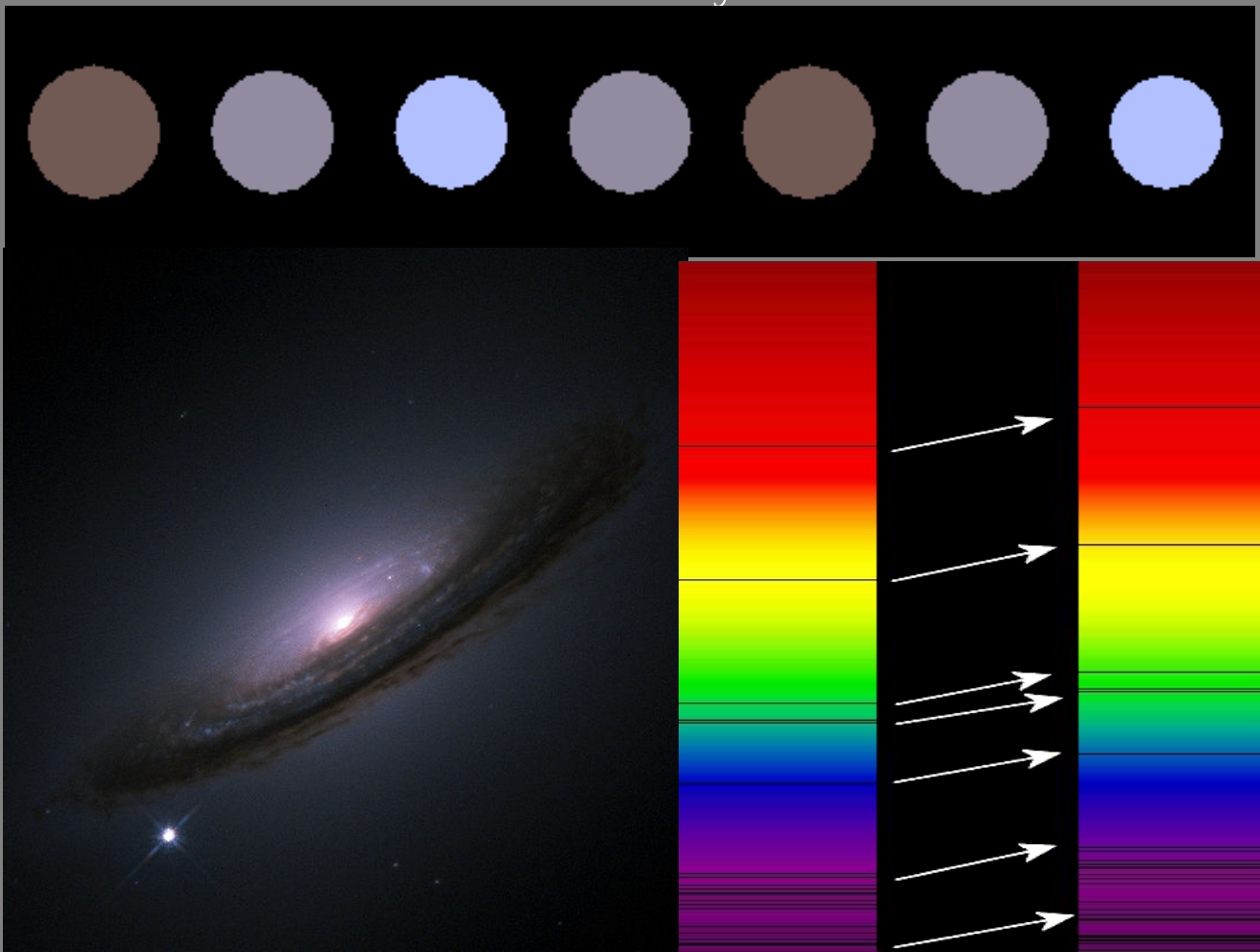
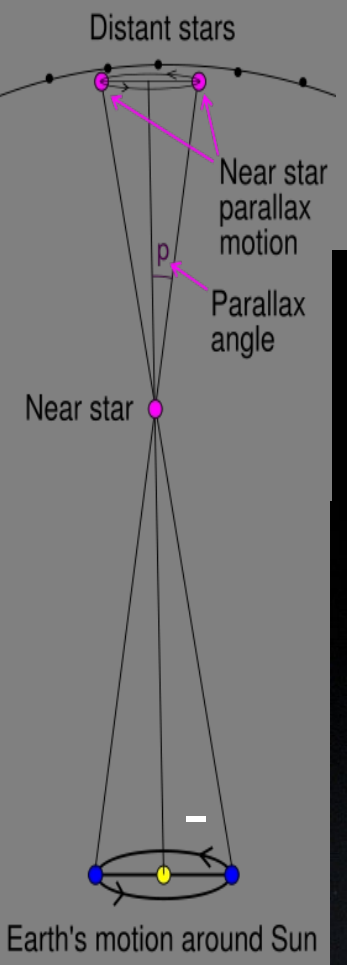
1 valovuosi = valon kulkema matka vuodessa

Tähtitieteelliset etäisyydet

- Kuu 1.3 valosekunti
- Aurinko 500 valosekuntia
- Aurinkokunnan läpimitta noin 12 valotuntia
- Auringon naapuri tähti noin 4 valovuotta
- Linnunradan keskusta 25 000 valovuotta
- Andromedan galaksi 2 000 000 valovuotta
- Muut isot galaksit paljon kauempana

Etäisyyden mittaus

- Parallaksi .. lähitähdet 4 – 1000 vv
- Kefeidit .. lähigalaksit 100 – 50 000 000 vv
- SN1a .. kaukaiset galaksit 10^6 – 10^{10} vv
- z .. kvasaarit yms 10^8 – 1.37×10^{10} vv



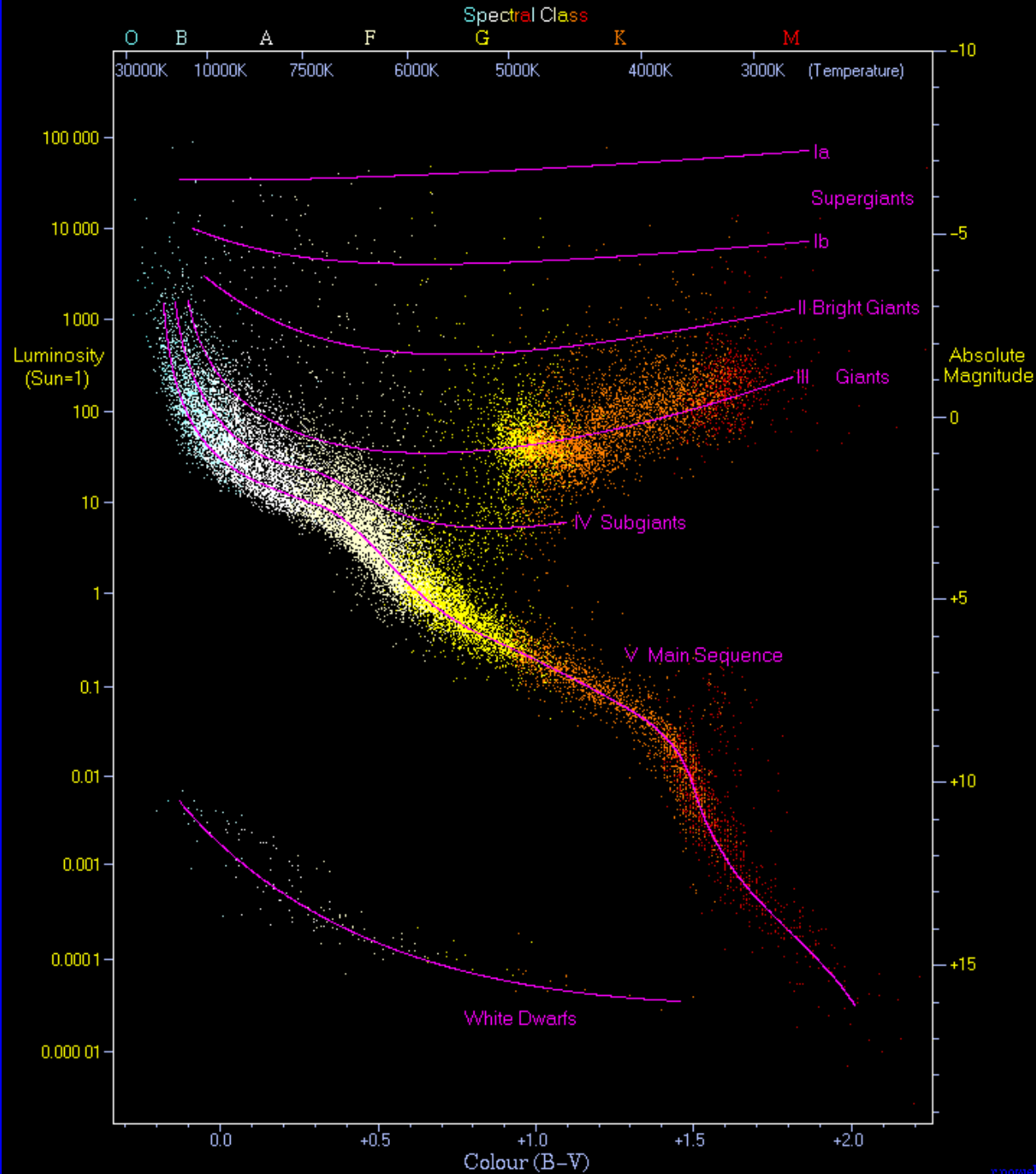
TÄHDET:

Hertzprung- Russellin

(HR)

Diagramma

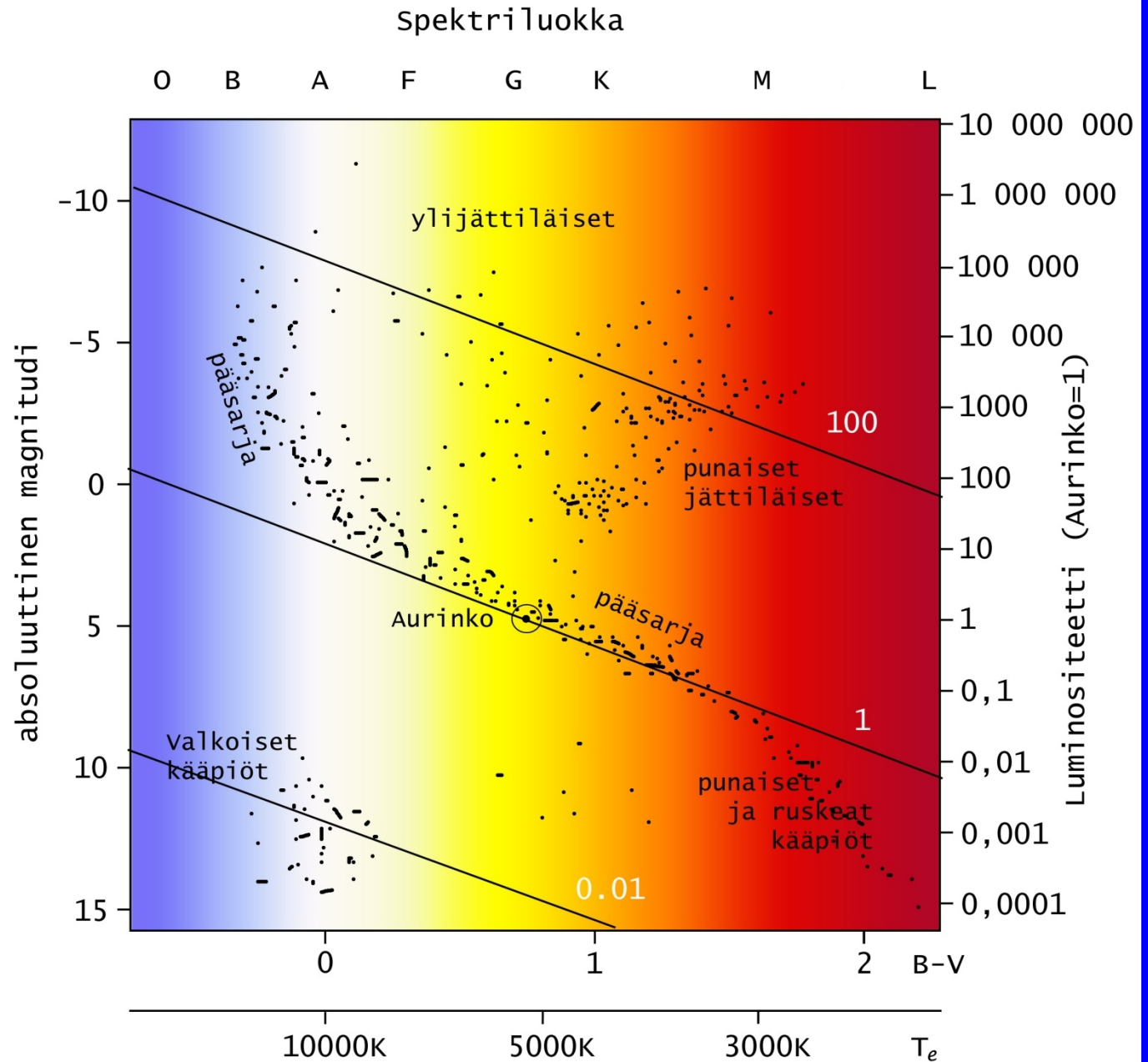
(Hipparkos)



Normaalit tähdet

- Tähdet lähinnä vedystä ja heliumista muodostuneita plasmapalloja (1% ”metalleja” kuten C, N, O). Tasapaino oman gravitaation ja tähden sisältä tulevan paineen aiheuttaman voiman välillä.
- Suuremman massan tähti → suurempi paine keskellä → suurempi keskuslämpötila → reaktiot nopeampia → suurempi energiantuotanto → korkeampi fotosfäärin (”pinnan”) lämpötila ja lyhyempi ikä
- Tähden sisällä lämpötila ja paine kasvavat keskustaa lähestyttäessä.

Hertz- sprung- Russel- lin dia- gramma



Tähden asettama aikaraja

- Pääsarjan tähdet kuumimmista kylmempiin kuuluvat spektriluokkiin OBAFGKMLT(Y)
- *Elämän kannalta kriittinen aika* on se aika, jonka tähti viettää vakaassa tilassa pääsarjassa. Tämän ydin-aikaskaalan kuluessa tähti kuluttaa H:n loppuun.

spektri	O5	A0	F2	G2	M0	M7
M_{\odot}	30	3	1.5	1	0.5	0.1
T (K)	44000	12000	7200	5700	3800	2800
t (Ga)	0.005	0.24	2	10	30	10000

Tähtijoukot ja galaksit

- Avoimia tähtijoukot, nuoria, muutama sata tähteä
- Pallomaiset tähtijoukot, vanhoja, 10^5 - 10^6 tähteä
- Galaksit, ”lennunratoja”, maailmankaikkeuden saarekkeitä, joihin kuuluu $\sim 10^5$ - 10^{13} tähteä, kaasua ja molekyylipilviä, avonaisia ja pallomaisia tähtijoukkoja ja paljon muuta.



Avoim tähtijoukko M45 Seur



pallomainen tähtijoukko ω Cen

Andromedan galaksi + satelliitit



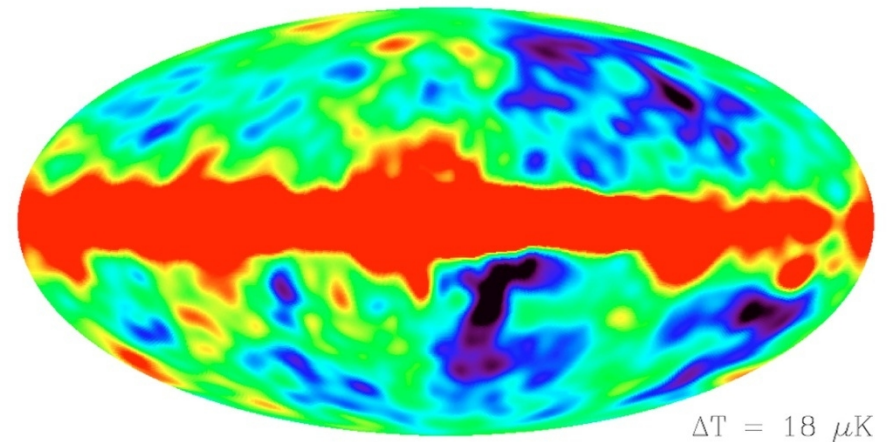
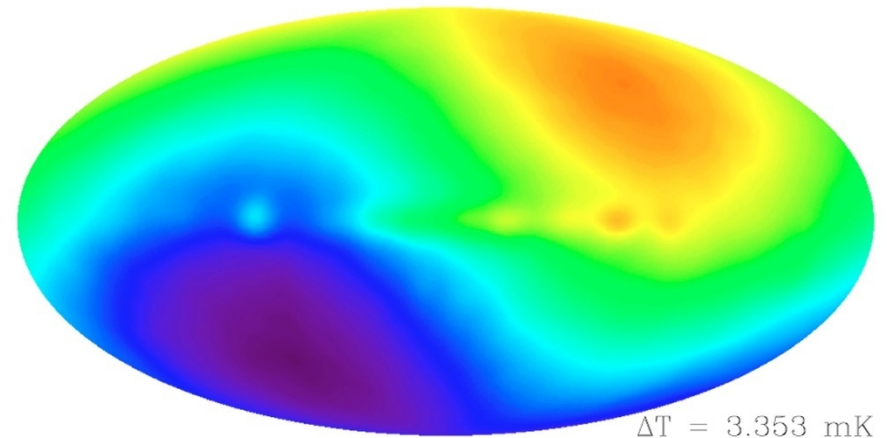
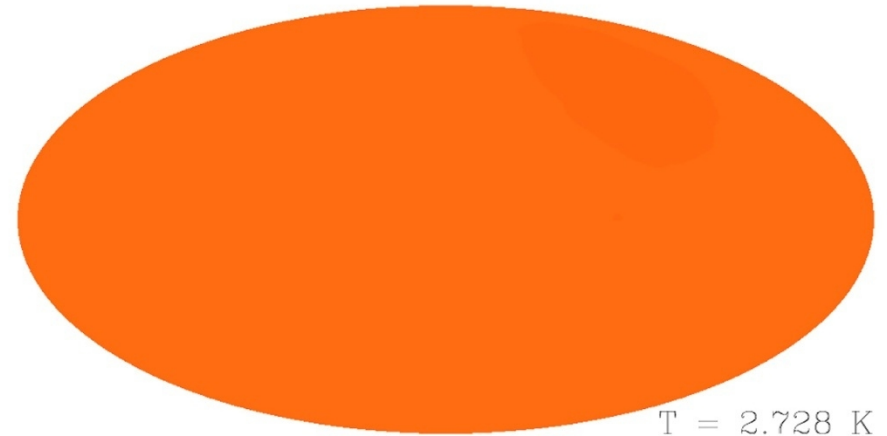
Galaksit M31, M32 ja NGC205

1.2. ALKUAINEIDEN SYNTY

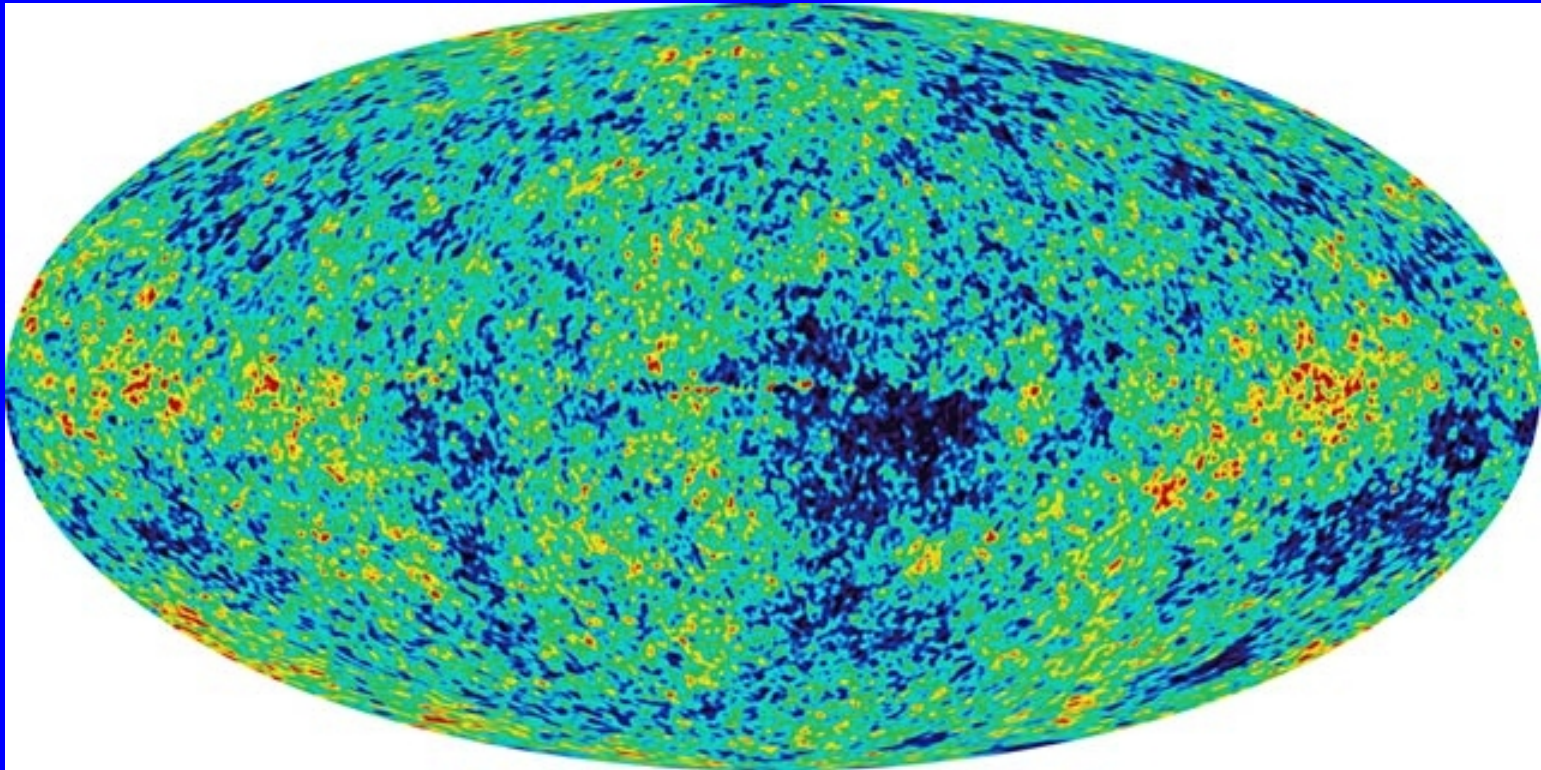
Maailmankaikkeuden alku I

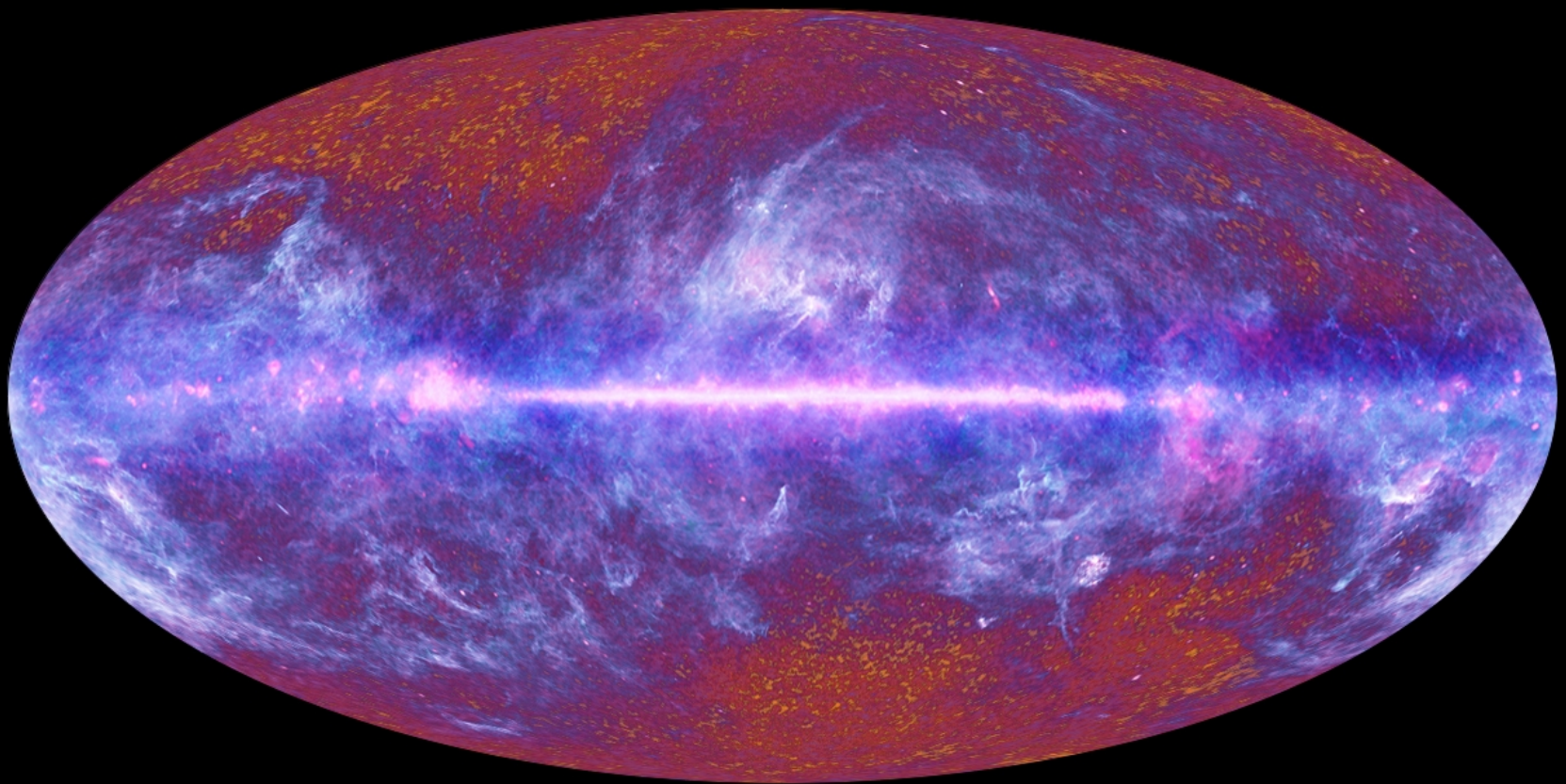
- 2.726K isotrooppinen taustasäteily
- Planck +WMAP kartta (380 000 vuoden ikäinen, 3000K)
- Syntyi suuressa pamauksessa (Big Bang)
13.82±0.05 miljardia vuotta
- $H_0=67.8\pm0.9\text{km/s /Mpc}$, $\rho_c=1.4\cdot 10^{-26}\text{g/m}^3$
- Pimeää kylmää massaa 23 %, Pimeää energiaa 69% - näiden luonnetta ei tunneta. Vuoden 2011 aikana on tullut viitteitä että pimeä massa saattaisi olla neutraliinoja.
- Baryoneja (”normaaleja atomeja”) 4.8%
- <http://www.cosmos.esa.int/web/planck/publications/#Planck2015>

Kosminen
mikro-
aalto-
tausta-
säteily
(COBE,
1990)



WMAP (2003)

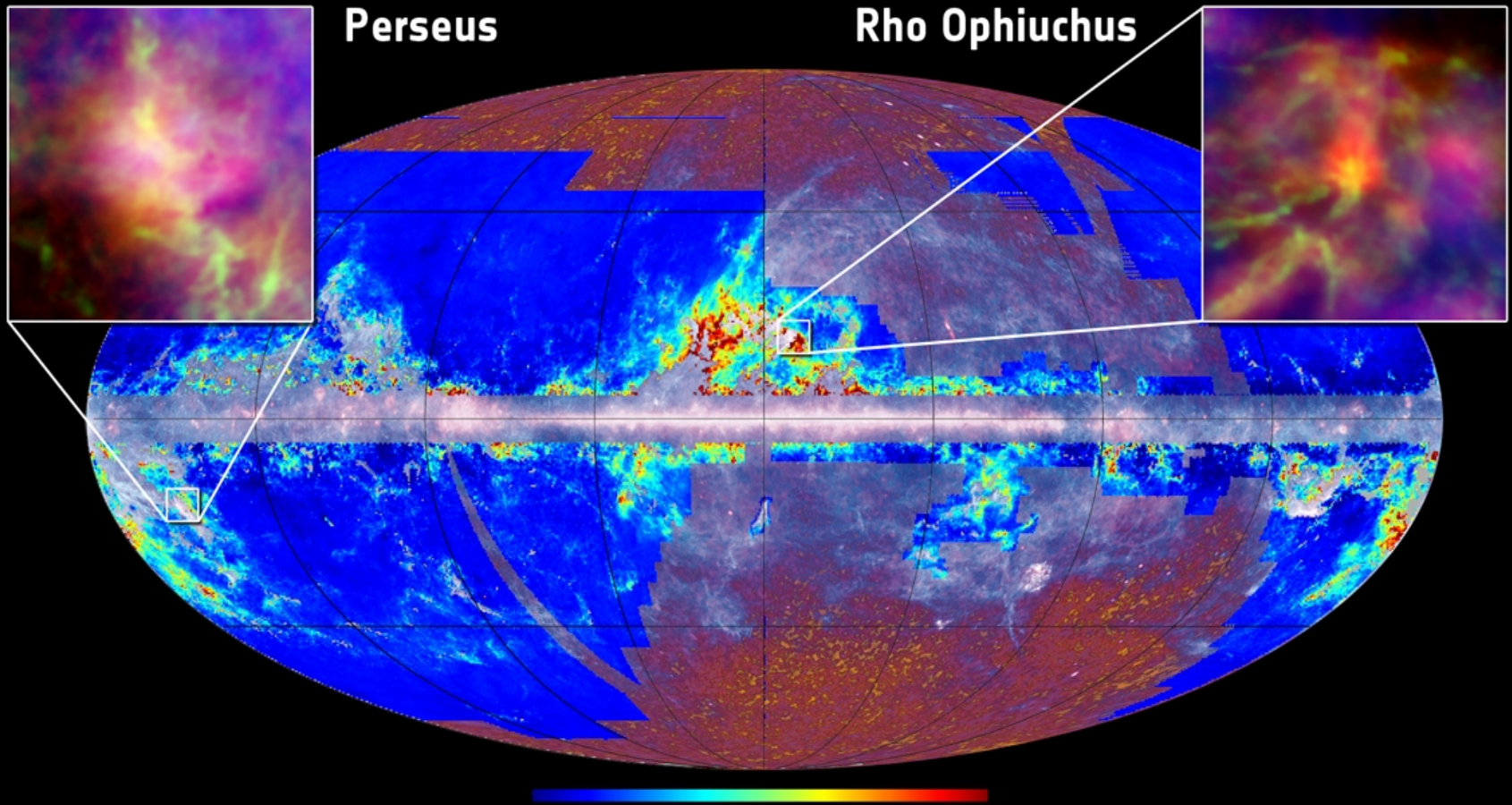




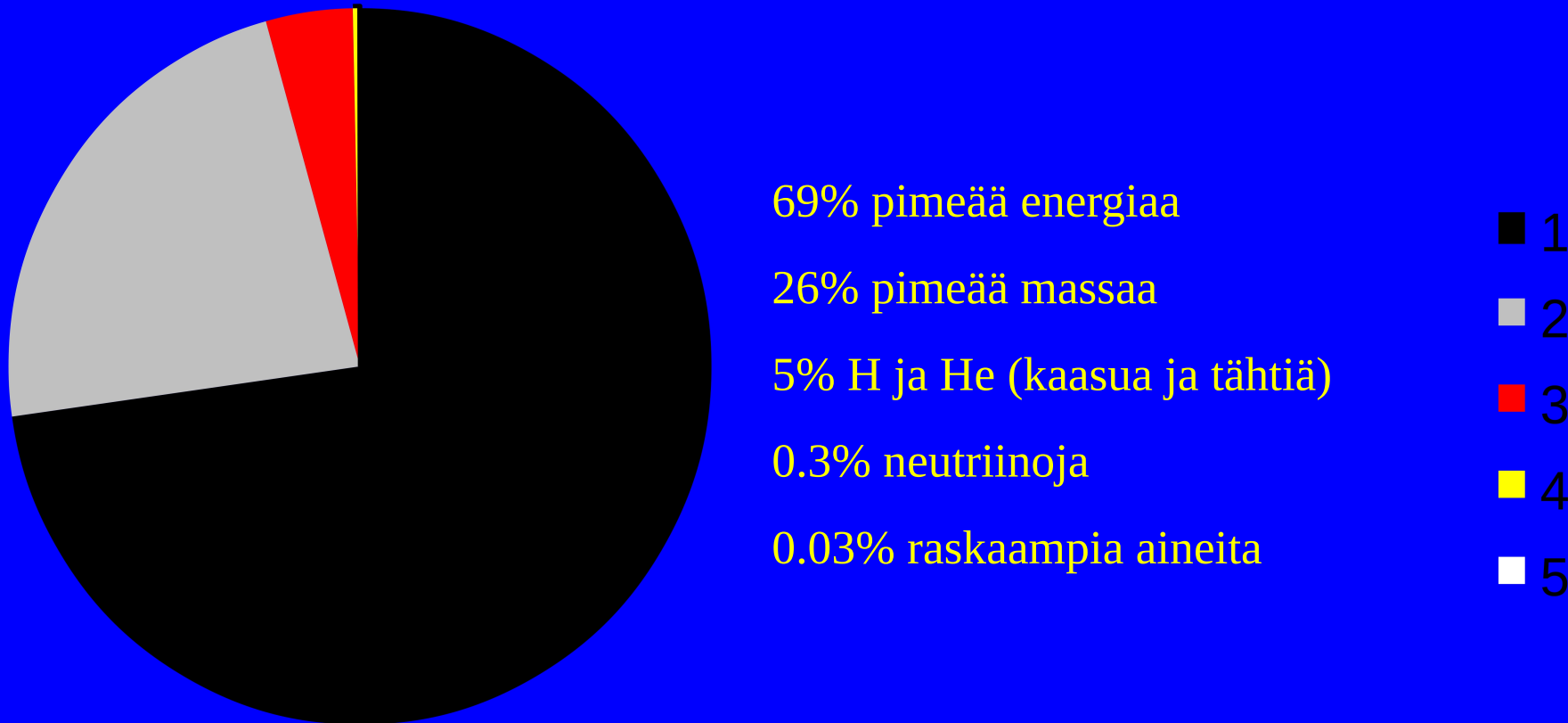
The Planck one-year all-sky survey



(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010



Maailmankaikkeuden sisältö (2013)

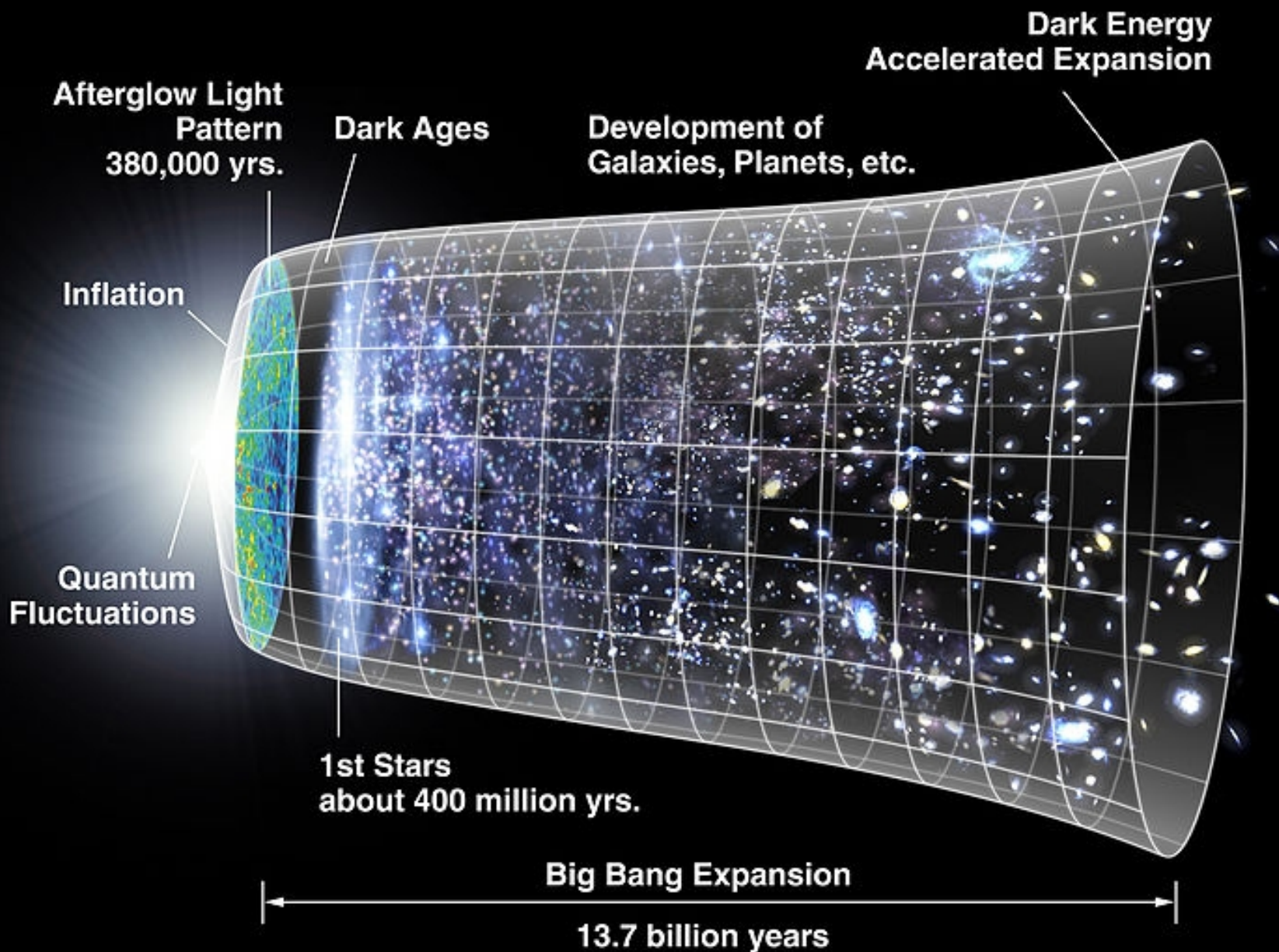


Maailmankaikkeuden alkua II

- Alussa oli tyhjiyden kvanttivärähtelyjä.
- Inflaatio
- Sen jälkeen kuumaa hiukkas- ja säteilypuuroa.
- Maailmankaikkeus lähti laajenemaan.
- Protonit syntyivät ensimmäisen 10^{-4} s kuluessa kun lämpötila oli $>10^{12}$ K
- 100 sekunnin päästä lämpötilan ollessa noin 100 miljoonaa astetta muodostui Helium
- Maailmankaikkeus jäähdyi sen verran nopeasti, että 16 protonin joukosta ehti muodostua vain yksi helium atomi → massaltaan heliumia oli 25% ja vetyä 75%.

Maailmankaikkeuden alkua III

- Raskaampia aineita ei juuri ehtinyt syntyä (pienen pieniä määriä Li, B ja Be), koska niiden fuusioimiseksi olisi tarvittu lämpötilat jotka olisivat olleet yli 100 miljoonaa astetta, mutta se aika oli jo ohi.
- Noin 380 000 vuoden kuluttua alusta on viimeisen sirottumisen pinta, joka vastaa suunnilleen hetkeä jolloin säteily ja aine erkaantuivat ja protonit ja elektronit yhdistyivät atomeiksi → WMAP/Plank kartta



Aivan ensimmäiset tähdet

- Syntyivät tiivistymällä vety-helium seoksesta.
- Vain 200 miljoonaa vuotta suuresta pamauksesta.
- Olivat epätavallisen suuria (ehkä 150-300M_☉)
- Elivät nopean ja intensiivisen elämän
- Tuottivat ilmeisesti hieman m.m. C, N, O:ta

Ekat normaalit tähdet ja raskaimpien alkuaineiden synty

- Tähdet muodostuivat vedystä ja heliumista.
- Kun lämpötila tähden ytimessä on yli $4 \times 10^6 \text{K}$ alkaa vety fuusioitua heliumiksi protoni-protoni törmäyksillä.
- Kun lämpötila nousee yli $17 \times 10^6 \text{K}$ käynnistyy ns. CNO-sykli, joka fuusioi vetyä heliumiksi, mutta tuottaa ”ylijäämänä” typpeä. Toimii vain jos on hiiltä katalyyttinä.
- Kun lämpötila nousee yli $100 \times 10^6 \text{K}$ alkaa helium fuusioitua hiileksi (kolmialfareaktio).
- Happea syntyy yli $500 \times 10^6 \text{K}$ lämpötilassa reaktiossa $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O} + 2^4\text{He}$, muina tuotteina $^{23/24}\text{Mg}$, ^{23}Na , ^{20}Ne .
- Raskaampia aineita syntyy tähdissä hieman korkeammissa lämpötiloissa ($^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{31/32}\text{S}$, ^{31}P , ^{28}Si , ^{24}Mg , $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni}$, ^{56}Fe)
- Huomaa neljällä (=He) jaollisuus useimmissa $_{33}$ atomimassoissa!

Ensimmäisten tähtien planeettakunnat

- Ei juuri hiiltä tai happea raaka-aineissa
- Ei vettä tai hiiliketjuja
- Ei elämää
- Kaasuplaneettoja voisi syntyä
- Maankaltaisia (kivisiä) planeettoja ei oikein voinut syntyä
- 47 Tuc: Tarkkailtiin 40 000 tähteä, odotettiin Auringon lähiseudun planeettakuntien perusteella 20-40 planeettadeteksiota. Havaittiin *nolla*.
- M4:ssä $2M_J$ planeetta kiertämässä 13 miljardia vuotta vanhaa kaksoistähteä (valkoinen kääpiö ja neutronitähti).

1.3. TÄHTIEN JÄÄNTEITÄ JA HAUTOMOITA

Supernovat

- Suurten tähtien ($M > 15M_{\odot}$) loppu on tähden räjähtäminen.
- Kaikkein massiivisten tähtien ydin on tähden räjähtäessä kehittynyt rautaan. Sen ympärillä ovat Si/S, Ne/Mg/O, O/C, He ja H -kuoret
- Supernovaräjähdyksessä kaikkia näitä aineita sinkoutuu ympäröivään avaruuteen (joskus voi lisäksi syntyä esim. neutronitähti tai musta aukko)
- Rautaa raskaammat alkuaineet jalometallit, lyijy ja uraani syntyvät käytännössä kaikki neutronisieppauksella joko *supernovaräjähdyksissä* tai esim. *neutronitähtien törmäyksissä*
- Noin $3-15M_{\odot}$ massan tähtien räjähtäessä on niiden ydin hiiltä, happea tai piitä. Ydintä ympäröivät

Rapusumu (supernova- jäännös)



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FOR2)

Tähtituulet

- Suunnilleen Auringon massan ($0.26M_{\odot}$ - $3M_{\odot}$) tähtien kehitysvaiheen loppuosissa tähden ytimeen tulee hiiliydin.
- Tähti ei kuitenkaan räjähdä supernovana.
- Levittää kuitenkin vetyä, heliumia, hiiltä ja joskus happea ympäristöönsä tähtituulena ja näistä massiivisemmat voivat muodostaa planetaarisen sumun.

Pieni-
massai-
sen
tähden
loppu-
vaiheita
(plane-
taarinen
sumu)



NGC 6543

PR95-01a • ST ScI OPO • January 1995 • P. Harrington (U.MD), NASA

HST • WFPC2

12/13/94 zgl

Tähtien väliset kaasu- ja pölypilvet

- Tähtien vapauttamat raskaammat alkuaineet palautuvat tähtienvälisiin kaasupilviin
- ”Metalleja” (Heliumia raskaampia aineita) 1-2%.
- Linnunradan massasta 10% kaasupilvissä
- Pölyä noin 1% kaasupilvien massasta.
- Pöly ja jää toimivat molekyylien katalyyttipintoina.

Molekyyliä synty

Löydetty ainakin 160 molekyyliä

<http://www.astro.uni-koeln.de/cdms/molecules>

Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2009, 47:427-480

- Paljon vettä, hiiliketjuja, ja lyhyitä molekyylejä
- Yleisin molekyyli H_2
- Monimutkaisimmat
 - $HC_{11}N$ (pisin hiiliketju)
 - CH_2OHCHO (glycoaldehydi, monosakkariidi)
 - NH_2CH_2COOH (glysiini, aminohappo, kyseenalaistettu)
 - C_{60} , C_{70} fullereenit, Polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH)
- Prebioottisen evoluution kannalta tärkeät: H_2O , HCN , H_2CO

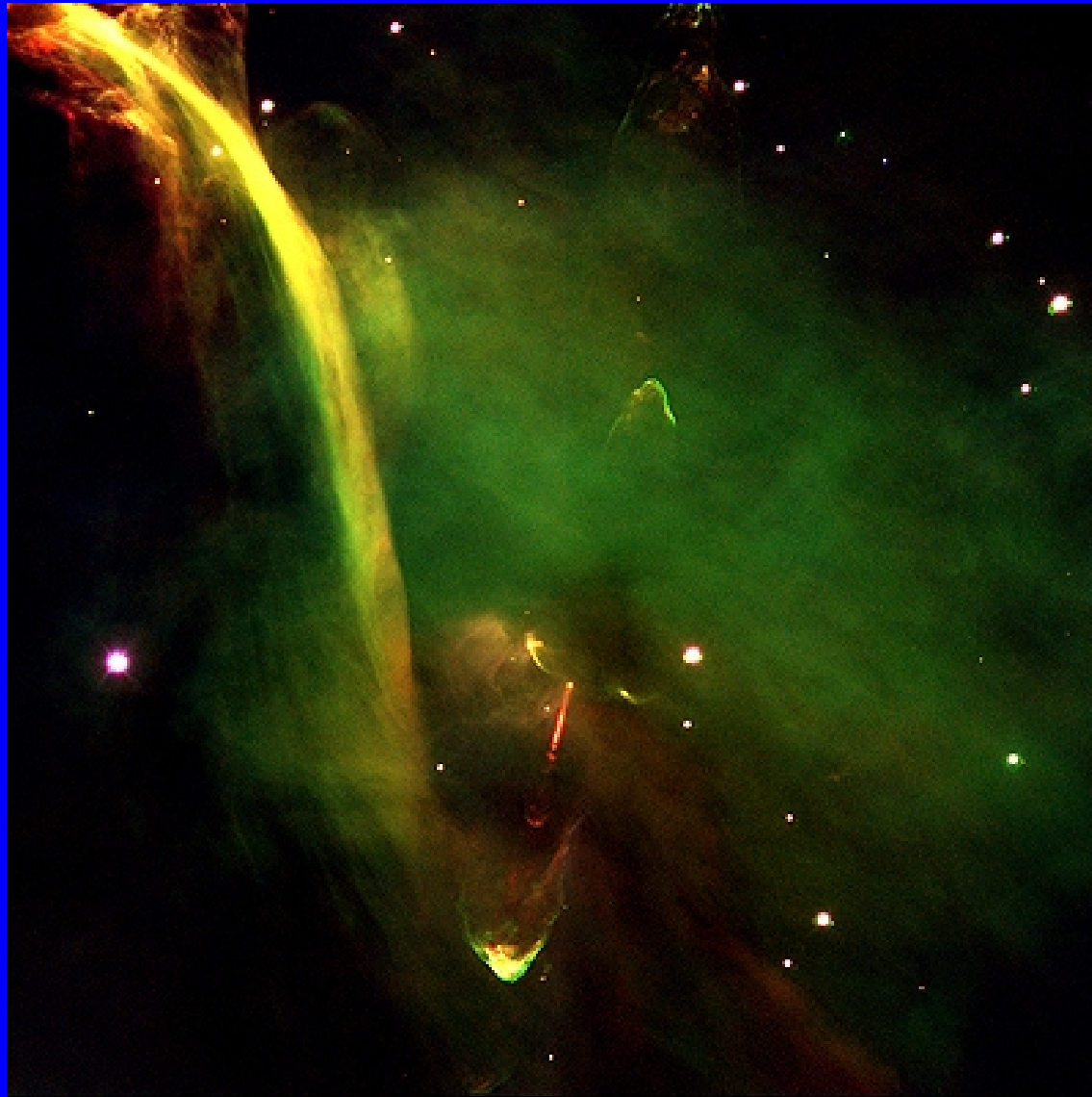
Orionin kaasusumu



Protostellaarisen pilven romahdus

- Kaasupilvessä syntyy pieniä kaasutihentymiä, kooltaan ne ovat luokkaa 1pc ($3 \cdot 10^{18}$ cm), läpimitaltaan ja massaltaan useita Auringon massoja ($\sim 10^{30-31}$ kg). Monasti ne ovat erittäin kylmiä ($\sim 10^1$ K) ja tiheitä ($n \sim 10^6$ cm⁻³).
- Tällainen protostellaarinen kaasupilvi alkaa romahtaa oman painonsa alla. Tarkka aikaskaala vaihtelee ja riippuu esim. tiheyden vaihteluista sen sisällä. Se on kuitenkin 10^5 vuoden luokkaa.

Protostellaarinen pilvi



Protostar HH-34 in Orion (VLT KUEYEN + FORS2)

Toisen sukupolven tähdet

- Toisen sukupolven tähdet syntyivät kaasu- ja pölypilvistä, jotka olivat rikastuneet heliumia raskaammilla alkuaineilla.
- Tähtiä ympäröivässä kaasupilvessä kaasua, orgaanisia molekyylejä, pölyä, meteoroideja, asteroideja, ja jäitä.
- Tämän polven tähdet tunnistaa siitä, että niiden metallisuus on korkeampi kuin vanhojen tähtien.
- Ne ovat tavallisesti linnunradan tasossa.
- Huomaa, että nykyisin on sekaisin nuoria tähtiä kaikista spektriluokista sekä vanhoja metalliköyhiä K, M, L, T, Y-spektriluokkien tähtiä.

Kaksoistähdet

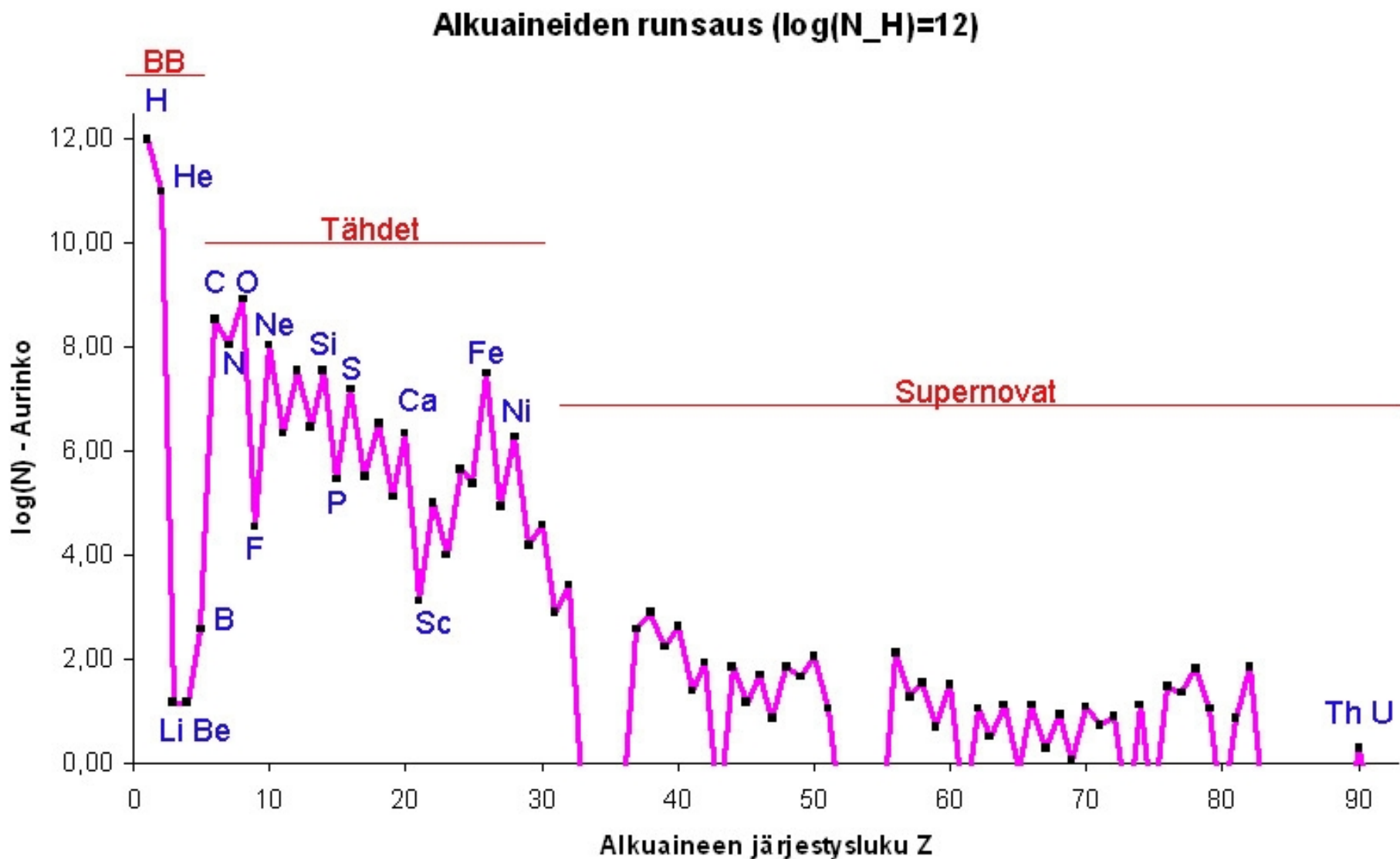
- Noin puolet tähdistä kuuluu kaksoistähtijärjestelmiin
- Mikäli tähdet kiertävät lähellä toisiaan vaikuttavat ne voimakkaasti toistensa kehitykseen
- Lopputuloksena näiden kehityksessä on kuitenkin likimain sama kuin yksittäisissä tähdissä eli raskaampia aineita päätyy lähiavaruuteen.

Alkuaineet

runsauksien mittaaminen

- Suoraan kohteesta (elävät oliot, Maa, Kuu, Mars, komeetat) (biologia, geologia y.m.)
- Meteoriiitit (geologia)
- Kosmiset säteet (hiukkanen/avaruusfysiikka)
- Spektroskooppisesti (tähtitiede)
- **KAIKKI HELIUMIA RASKAAMMAT
AINEET SYNTYNEET TÄHDISSÄ**

Kosmoksen alkuaineet



Metallien merkitys planeettojen kehittymiselle ja elämälle

- Maankaltaisia planeettoja ei voi kehittyä ilman ”metalleja”
- Kaasuplaneettojenkin muodostuminen lienee myös vaikeaa (47Tuc, M4)
- Planeettojen ja elämän raaka-aineiden esiintyminen ilmeisempää metallirikkaiden tähtien läheisyydessä (linnunradan tasossa)
- Elämälle lienevät suotuisimpia noin F-K spektriluokan tähdet.

Sattumoisin alkuainesoppaako

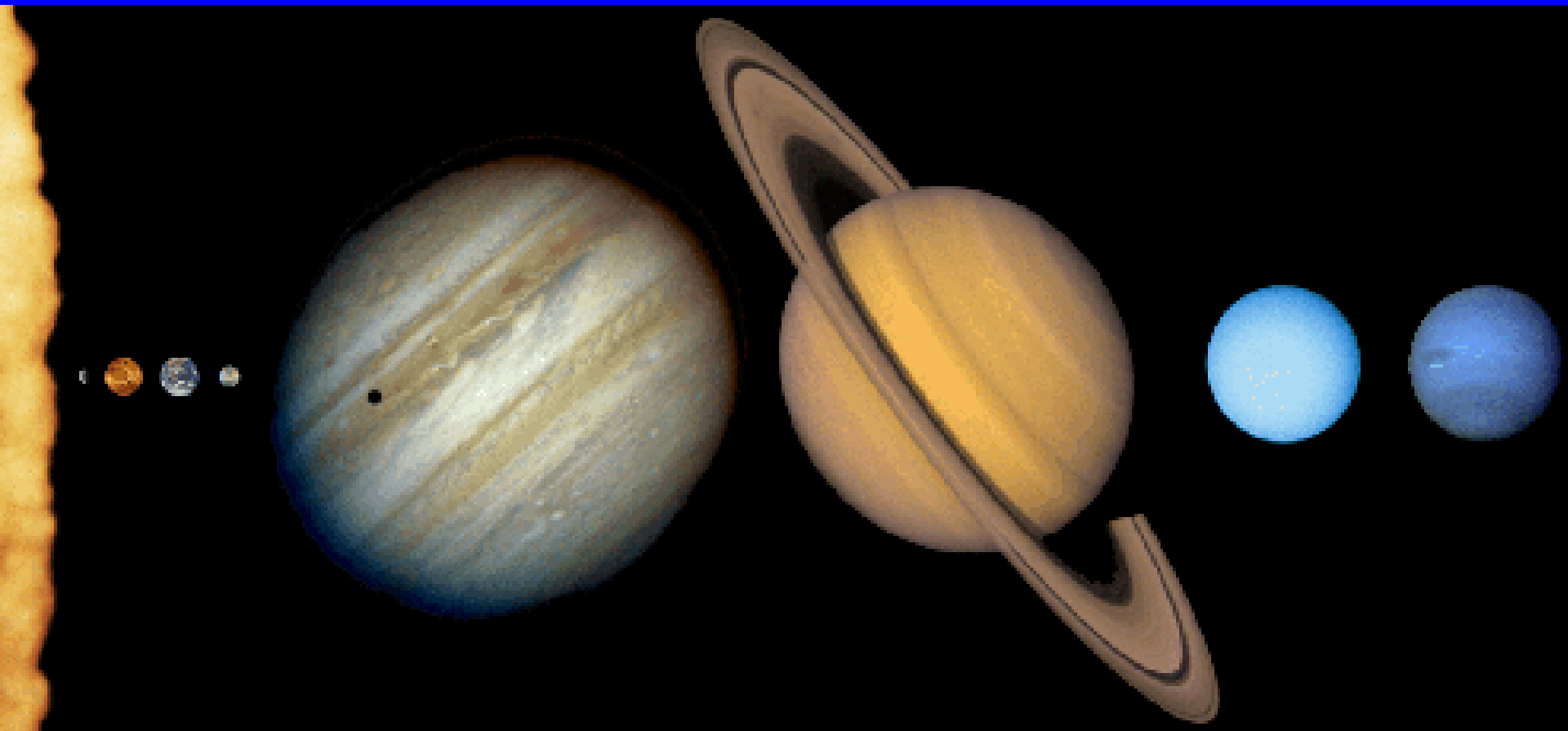
- H, C, N, O, S, P, Fe kaikki yleisiä aineita elävissä
- H, He, C, N, O, S, Si, Fe yleisiä aineita kosmoksessa
- Mikä tekee alkuainesopan eläväksi? Mistä informaatioisältö?
- Entä ”hienoviritykset” kuten hiilen resonanssi 7.65 MeV:n kohdalla, neutronin puoliintumisaika, vain osa vedystä heliumiksi, miksi keskitiheys näyttää sittenkin olevan kriittinen tiheys? antropinen periaate?

2 Aurinkokunnan synty

Aurinkokunnan jäsenet

- Aurinko, tavallinen keltainen tähti.
 - 1.4 milj km läpimitaltaan
 - 330000 Maan massaa
 - 5700K pinnalla, 14 milj K keskellä.
- 8 planeettaa (Merkurius, Venus, Maa, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus)
- Pienet aurinkokunnan kappaleet
 - Kääpiöplaneettoja
 - Kuita
 - Asteroideja
 - Komeettoja
 - Pölyä ja erilaisia hiukkasia

Aurinkokunnan planeetat



Numerotietoja planeetoista

	Isoakselin puolikas	Eksentrisyys	Radan kaltev.		Planeetan massa	Akselin kaltevuus	Planeetan säde	Planeetan keskitiheys
	a/AU	e	i/°	kuita	m(kg)	kalt/°	R(km)	$\rho(\text{g/cm}^3)$
Mer	0.39	0.21	7.0	0	3E23	0	2440	5.4
Ven	0.72	0.01	3.4	0+(1)	5E24	177	6052	5.2
Maa	1.00	0.02	0.0	1+(2)	6E24	23	6378	5.5
Mar	1.52	0.09	1.8	0+2	6E23	25	3397	3.9
Jup	5.20	0.05	1.3	4+46 +14	2E27	3	71492	1.3
Sat	9.56	0.05	2.5	9+44 +9	6E26	27	60268	0.7
Ura	19.3	0.04	0.8	5+22	9E25	98	25559	1.3
Nep	30.3	0.01	1.8	2+11	1E26	28	24764	1.8

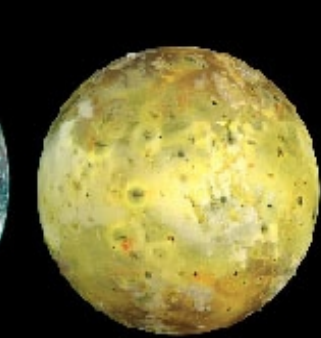
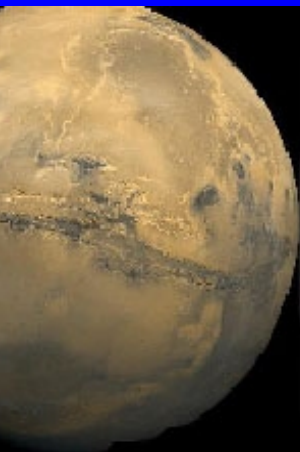
Aurinkokunnan pikkukappaleet

- Kuita
- Kääpiöplaneettoja (>800km: Eris, Pluto + Charon, Ceres + yli 10kandidaattia)
- Asteroideja (Suurin asteroidi on tavallaan kääpiöplaneetta: Ceres D=950km)
- Komeettoja
- Suurimmat Neptunuksen radan takana sijaitsevat komeettamaiset kappaleet, joita kutsutaan plutoideiksi, myös Neptunuksen tällä puolella kiertävä Chiron lienee samankaltainen
- Pienempiä kiviä (meteoroides)
- Pölyä (eläinratavalo)

Aurinkokunnan ominaisuudet

- Massasta 98,5% Auringossa
- Impulssimomentista 99% planeetoilla
- Planeettojen ratatasot suunnilleen yhteneväiset ja Auringon ekvaattorin kanssa.
- Useimpien planeettojen ekvaattori on ratatasossa
- Radat melko pyöreitä
- Sisäplaneetat pieniä kiviplaneettoja, ulkoplaneettoina suuria kaasuplaneettoja
- Planeettojen takana suuria komeettamaisia kappaleita (Eris, Pluto+Charon, Eris, Orcus, Sedna, Quaoar + 1000 muuta, osa näistä kääpiöplaneettoja)
- Suurten planeettojen renkaat ja kuujärjestelmät
- Asteroidit (mukaanlukien Ceres) ja komeetat
- Titiuksen-Boden sääntö:

$$a = 0.4 + 0.3 \times 2^n, n = -\infty, 0, 1, 2, \dots$$



Mars
6804.9 km

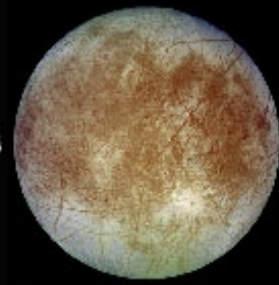
Ganymede
5262 km

Titan
5150 km

Mercury
4879.4 km

Callisto
4821 km

Io
3643 km



Moon
3476.2 km

Europa
3122 km

Triton
2706.8 km

Pluto
2390 km

Sedna
~ 1500 km

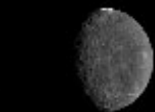
Titania
1578 km

Rhea
1528 km

Oberon
1523 km

Iapetus
1436 km

Quaoar
1200 km



Charon
1186 km

Umbriel
1169.4 km

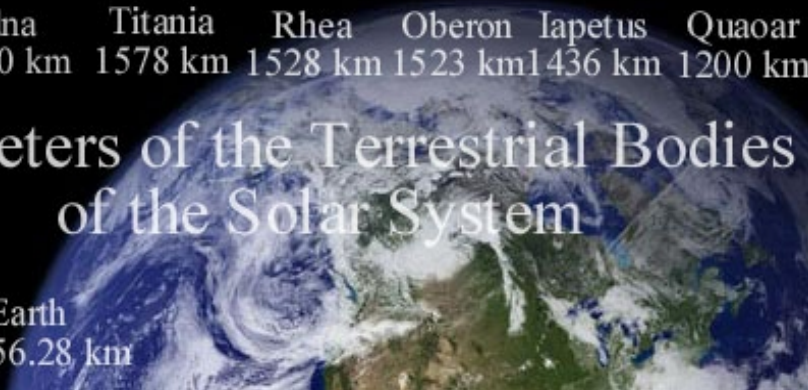
Ariel
1158 km

Dione
1118 km

Tethys
1059 km

Earth
12,756.28 km

Diameters of the Terrestrial Bodies of the Solar System



2.1. Esiplanetaarinen kiekko ja planetesimaalit

- Tähtien välisessä kaasussa syntyi tiheydeltään hieman suurempi alue, ”pilvi” joka oli hitaassa pyörimisliikkeessä.
- Protostellaarinen pilvi alkoi romahtaa oman painonsa vuoksi litistyen samalla. Keskellä tiheys $\uparrow \rightarrow$ keskuspaino $\uparrow \rightarrow$ lämpötila \uparrow . Kun
 - $T = 1800\text{K}$, vetymolekyylit dissosioituvat (romahdus alkoi)
 - $T = 10^4\text{--}10^5\text{ K}$, vety ja heliumatomit ionisoituvat
 - $T = 4 \times 10^6\text{K}$ alkavat ydinreaktiot \rightarrow Tähti on syntynyt

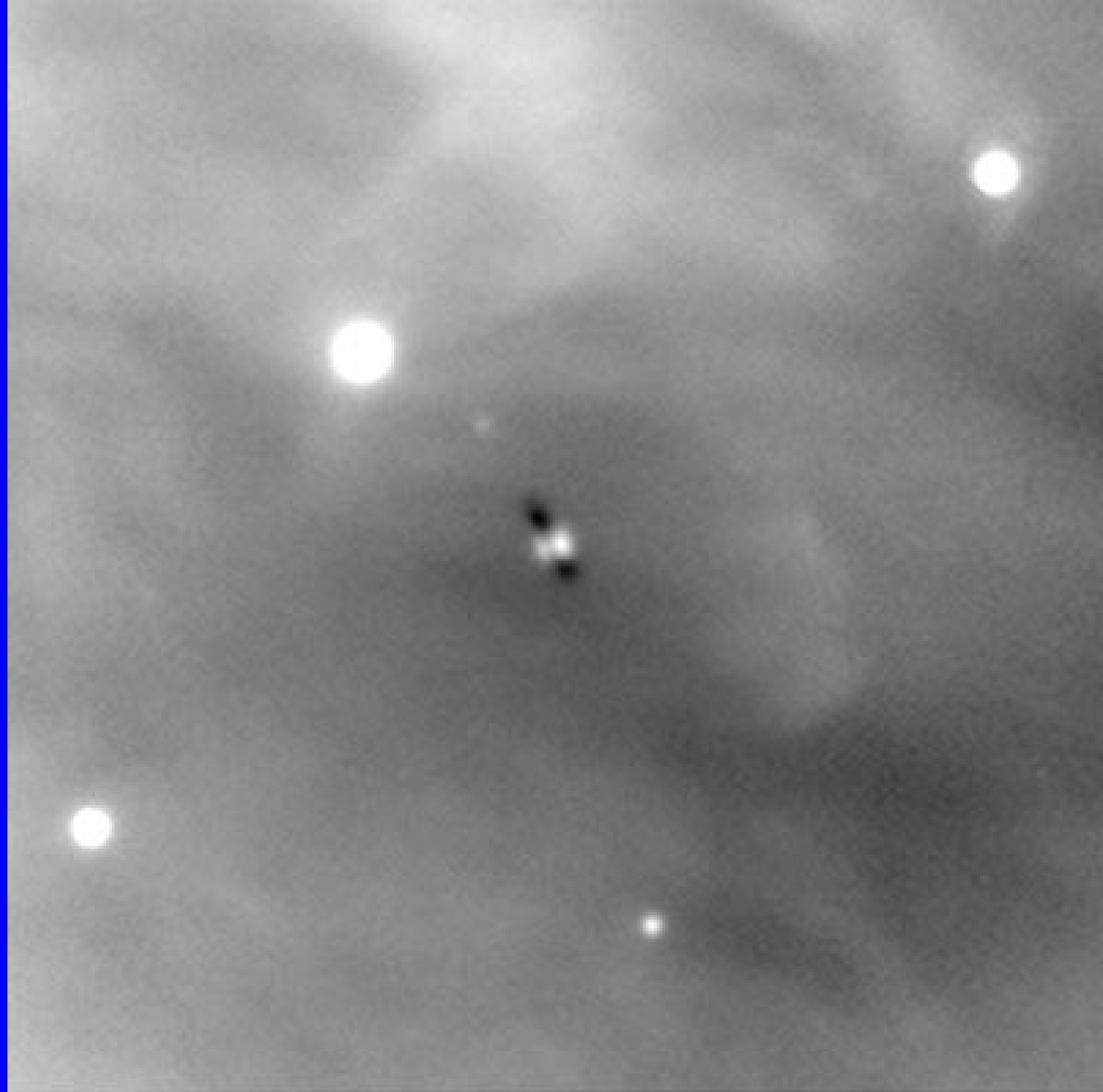
Esiplanetaarisen kiekon ominaisuudet

- Kiekon keskellä on suurin tiheys ja sinne kehittyy lopulta tähti. Muuten kiekon tiheys, paine ja lämpötila ovat suurimmat aivan kiekon ratatasossa.
- Kiekon ratatason tarkka lämpötila riippuu sisäisestä kitkan suuruudesta, mutta lämpötilan gradientti on siitä (melkein) riippumaton.
- Kiekon kaasun sisäisestä paineesta johtuen kiekko ei ole aivan paperinohut, vaan siinä on jonkin verran korkeutta. Kiekon tiheys ja paine pienenevät ylös- ja alaspäin.

Materia asettuu ohueen tasoon

- Vielä syttymättömällä Auringolla ympäröivä aine on siis sedimentoitunut ohueen kiekkoon, ja koostuu enimmäkseen pienistä mikronin kokoisista pölyhiukkasista.
- Vastaavanlaisia kertymäkiekkoja havaitaan toisten tähtien ympärillä esim. Orionin suuressa kaasupilvessä. Näissä kiekot ovat vielä pääasiassa pölyä ja suuren kokonaisvaikutusalansa takia näkyvät selvästi infrapuna-alueella.

Esiplane- taarinen kiekko



Silhouette Disk Orion 114-426 (J_s -band)
(VLT ANTU + ISAAC)



Eläinratavalo



Auringon esiplanetaarisen kiekon lämpötilajakauma juuri ennen sedimentoitumista

- Arvio kiekon lämpötilasta riippuu kiekkomallista
- Lämpötilan riippuvuus säteen funktiona on samankaltainen eri mallissa ($\propto r^{-0.9}$ tai $\propto r^{-1}$), joten jos kiekon lämpötila saadaan kiinnitettyä jollekin etäisyydelle Auringosta saadaan koko kertymäkiekon lämpötilajakauma selvitettyä.
- Tässä kondriitit ovat näytelleet tärkeää osaa.

Auringon esiplanetaarisen kiekon lämpötilajakauma juuri ennen sedimentoitumista

- Arvio kiekon lämpötilasta riippuu kiekkomallista
- Lämpötilan riippuvuus säteen funktiona on samankaltainen eri mallissa ($\propto r^{-0.9}$ tai $\propto r^{-1}$), joten jos kiekon lämpötila saadaan kiinnitettyä jollekin etäisyydelle Auringosta saadaan koko kertymäkiekon lämpötilajakauma selvitettyä.
- Tässä kondriitit ovat näytelleet tärkeää osaa.

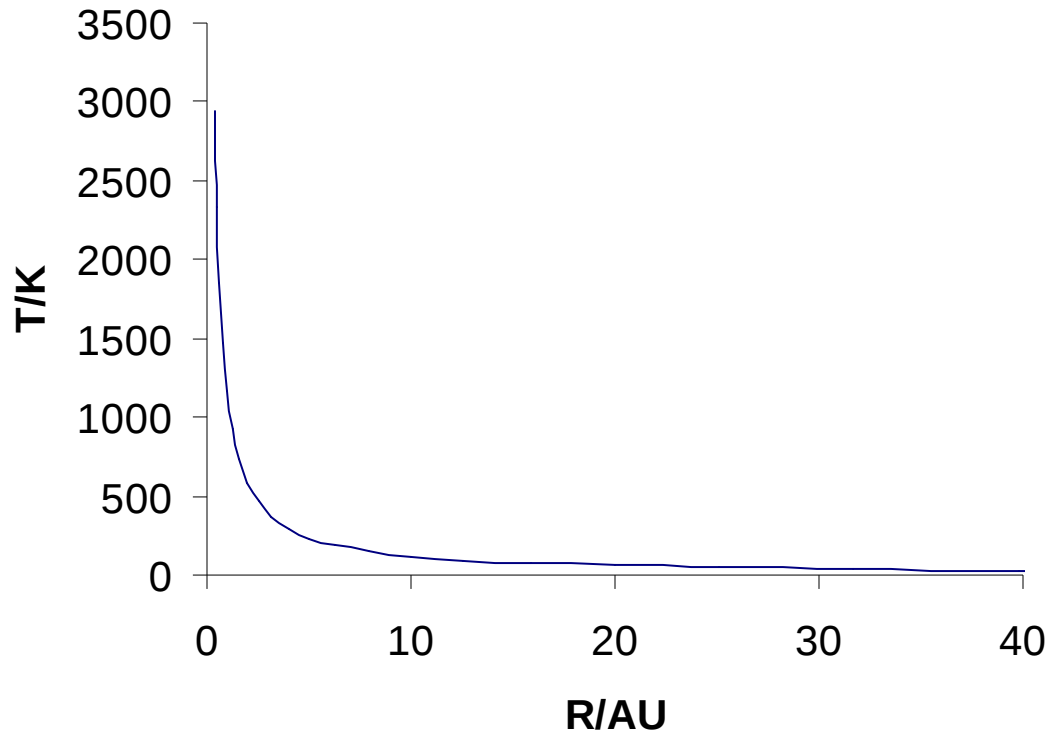
Tähdenlento



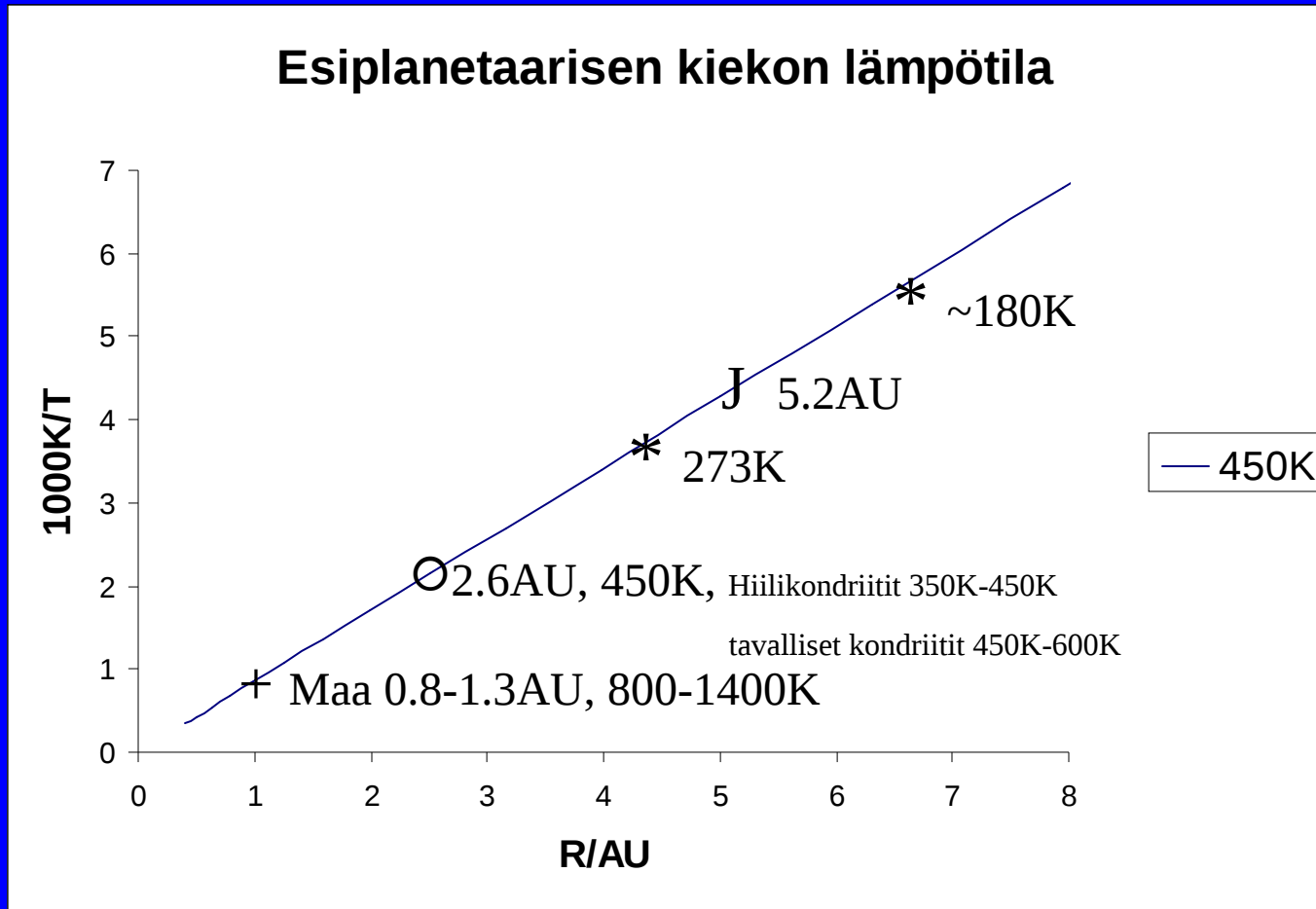
Kondriitit

- Kondriitit ovat lähtöisin 2-4 AU:n etäisyydeltä (N=3+30), noin 100 km kokoisten asteroidien sirpaleista.
- Ne ovat kivimeteoritteja, ja ne luokitellaan hiili-, tavallisiin ja enstatiitikondritteihin alenevan hapettumisen mukaan (oliviini/pyrekseeni suhde).
- Joissakin hiilikondriiteissa on jopa 6% hiiltä.
- Eri kondriittiluokat näyttävät olevan lähtöisin eri osista asteroidivyökettä.
- Hiilikondriitit on yhdistetty C-asteroidien jotka ovat yleisimpiä >2.6AU:n etäisyydellä.
- Hyviä kosmolämpömittareita (Pb, Bi, Tl ja In määrä)
- Kaikki hiilikondriitit sedimentoituivat < 450K lämpötilassa kun tavalliset kondriiteilla oli sedimentoitumislämpötila välillä 450K...530K.

Esiplanetaarisen kiekon lämpötila



Kondriittien merkitys



Kiekon sisäreuna

- Mineraalit alkavat sulaa noin 1500-1800 K
- Tämä on myös havaittu olevan esiplanetaaristen kiekkojen sisäreunan lämpötilan (infrapuna-alueen kontinuumi).
- 1800 astetta vastaisi etäisyyttä noin $2.4 * 450 / 1800 = 0.6 \text{AU}$ (jos $r^{-1.0}$) tai $2.4 * (450 / 1800)^{1/0.9} = 0.5 \text{AU}$ (jos $r^{-0.9}$)
- Vrt Merkurius ja Venus 0.4AU, 0.7AU

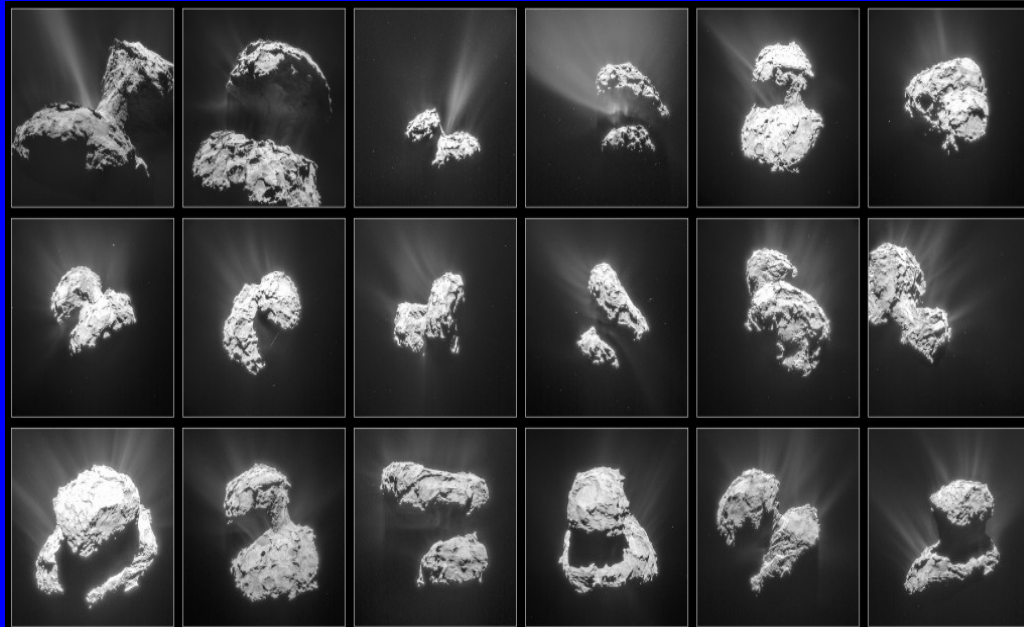
Jääraja/lumituiskuraja

- Vesi jäätyy normaalipaineessa noin 273K, kertymäkiekossa tuo lämpötila saavutettiin noin $2.6(450/273)=4.3$ AU:n etäisyydellä.
- Alemmassa paineessa sublimoitumisen ja höyrystymisen raja voi laskea noin 180K:iin.
- Noin 4-5 AU:ta kauempana syntyivät jääpitoiset komeetat, ja tätä lähempänä jäättömät asteroidit.

Ko-
meetta
Hale-
Bopp



67P Churyumov-Gerasimenko

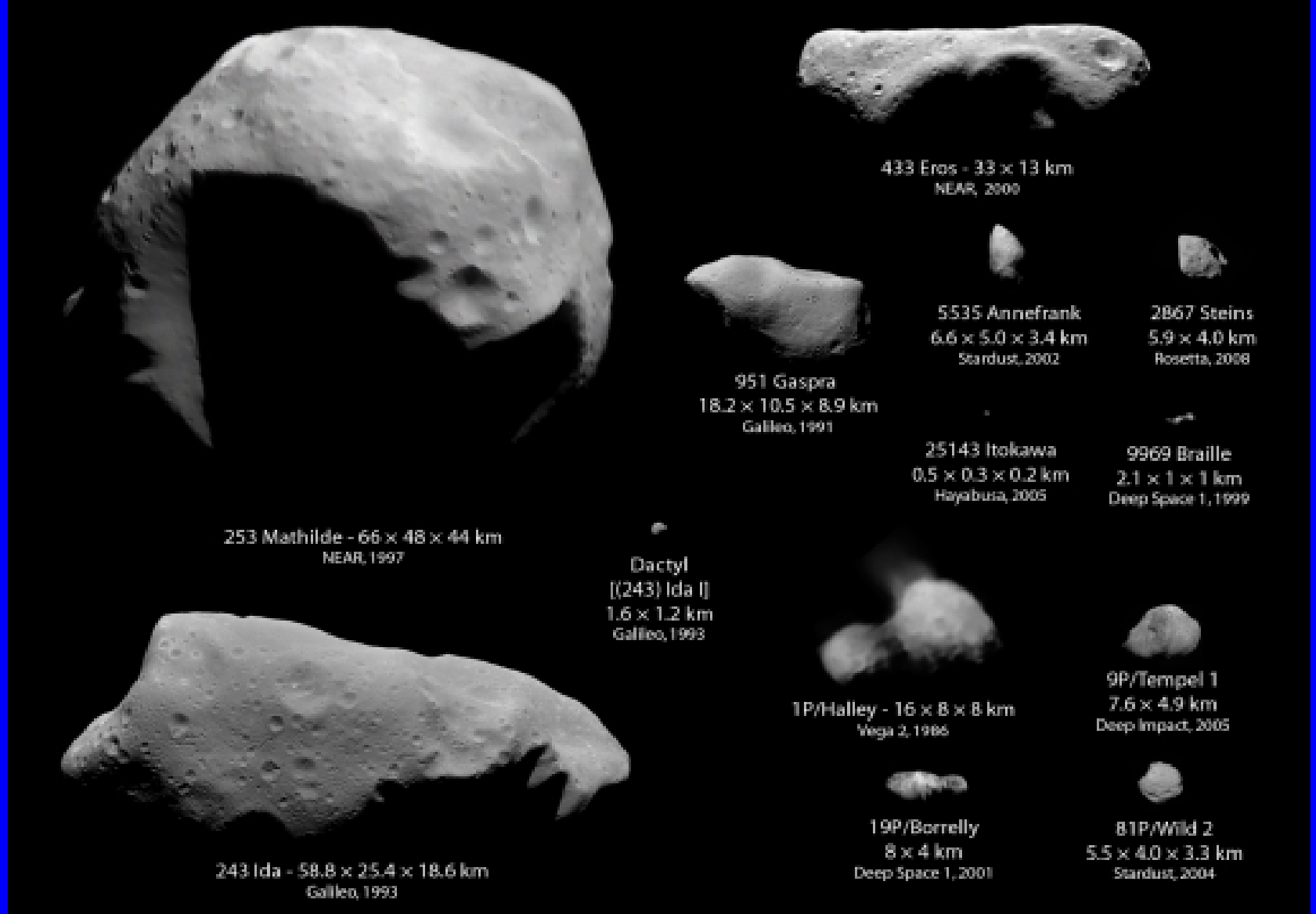


Planetesimaalien synty

- Lukemattomien pehmeiden törmäysten seurauksena pölyhiukkaset tarttuivat toisiinsa ja muodostivat noin metrin kokoluokkaa olevia kappaleita muutamassa tuhannessa vuodessa. (TESTATTU, OK)
- Metrin kokoiset kappaleet kasaantuivat edelleen noin kilometrin kokoluokkaan muutamana tuhannen vuoden kuluessa. (KIEKON SISÄLLÄ KYLMISSÄ OSISSA OK)
- Näiden pienten hiukkasten törmäyksissä ei kappaleiden oma gravitaatio ollut merkittävä.

Gaspra





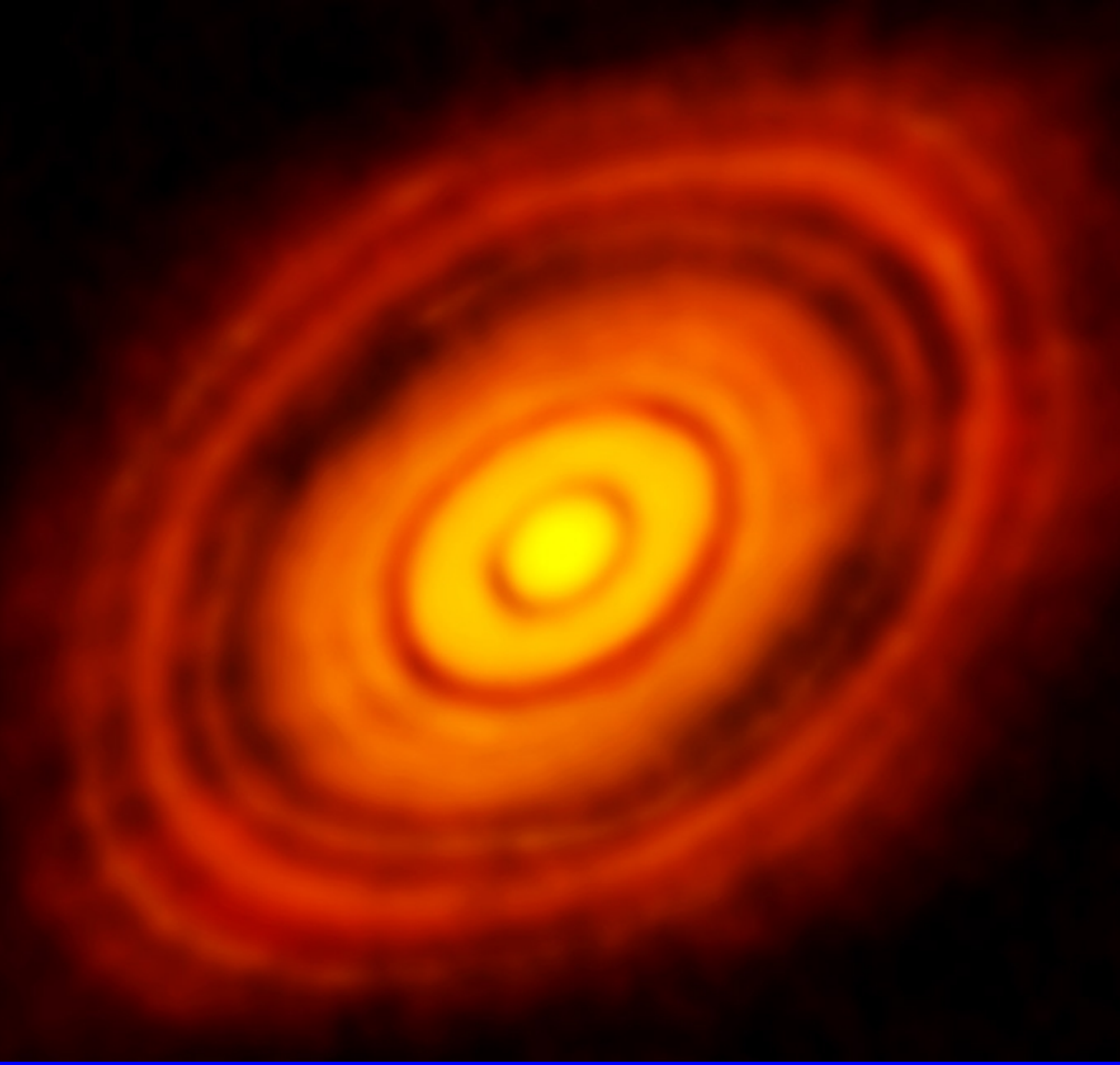
Credits: All images NASA / JPL / Ted Stryk except: Mathilde: NASA / JHUAPL / Ted Stryk; Steins: ESA / OSIRIS team; Eros: NASA / JHUAPL; Itokawa: ISAS / JAXA / Emily Lakdawalla; Halley: Russian Academy of Sciences / Ted Stryk; Tempel 1: NASA / JPL / UMD; Wild 2: NASA / JPL.

Esi-planeettojen synty

- Seuraavan 10-100 miljoonan vuoden kuluessa kilometrien kokoiset planetesimaalit kasvoivat esi-planeetoiksi. Niihin törmäsi edelleen melko suuriakin kappaleita. Näin syntyneet esi-planeetat pyyhkivät pihansa puhtaaksi, esim. Maa keräsi itseensä noin 0.8-1.3 AU:n välisen alueen kappaleet. (Havaittu muissa kertymäkiekoissa)
- Kaikki muutkin planeetat pyyhkivät pihansa puhtaaksi. Jupiterin vuoksi Mars jäi pieneksi, eikä asteroidivyöhykkeen etäisyydelle syntynyt planeettaa.

Jättiläisplaneettojen syntyminen

- Jättiläisplaneetoilla (Jupiter, Saturnus, Uranus ja Neptunus) tiedetään olevan isohko tiheä ydin, joten on ilmeistä, että ydin oli muodostunut ennen kuin ne saivat valtavat kaasukehänsä.
- Jupiterin etäisyydellä Auringosta (5.2AU) olivat ensimmäiset vettä ja jäätä sisältävät komeetat, jotka olivat näiden protoplaneettojen pääraaka-aineena. CHON jäätä oli noin 5 kertaa enemmän kuin maan etäisyydellä oli silikaatteja. Jupiter kasvoi hitaasti noin Maan massan kokoiseksi, ja sen jälkeen keräämällä komeettoja hyvin nopeasti noin 10-30 Maan massan kokoiseksi. Lopuksi se rohmusi kaiken saatavillaan olevan kaasun (317 Maan massaa).



HL Tau, ALMA / ESO

Aurinkokunnan alun aikoja

Esiplanetaarisen kiekon sedimentoituminen	0v
10km kappaleet	10^4 v
10^2 - 10^3 km kappaleet	muutama 10^4 v
Esiplaneetat	1Mv
Jupiterin kasvu	10Mv
Saturnuksen kasvu	20Mv
Kaasukiekon poistuminen	7-30Mv
Kuun synnyttävä törmäys	50Mv
Maa lähes valmis, differentioitunut	40-100Mv
Uranuksen ja Neptunuksen kasvu	50-100Mv
Pölykiekon poistuminen	200-400Mv
Myöhäinen suuri pommitus, radat siirtyvät	800Mv

3. MAAN ALKUVAIHEET



Kuuma ja autio alkumaa

- Planetesimaalit, joista Maa syntyi olivat lämpötilaltaan noin $450 \times (2.6/1.3) = 900\text{K}$... $450 \times (2.6/0.8) = 1400\text{K}$:n välillä.
- Maaksi muodostuvat planetesimaalit olivat vedetöntä silikaattia ja pelkistynyttä rautaa ja niin kuumaa, että kaikki kaasumainen aine oli karannut niistä.
- Uunituoreessa sulassa esimaassa ei siis ollut vettä, typpeä, happea, ei orgaanista hiiltä.
- Vielä kertymäkiekossa syntymässä olessaan maan primääriilmakehä muodostui kiekon kaasuista kerätystä vedystä, H_2 , ja ehkä pienistä määristä $\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + \text{NH}_3$

Vanhimmat kivilöydökset?

- Maapallon alun ($4.567 \pm 0.001 \text{ Ga}$) ajoilta ei ole kivilöydöksiä (maahan oli enimmäkseen sula silloin!). Geologisesti ns. Haadeksen kausi. Sen jälkeen eroosio ja tektoniikka on sekoittanut litosfääriä.
- Maan vanhimmat mineraalit ovat zirkonikiteitä (noin 4.4 Ga vuoden takaa) (Nature 2002, Nature 2007)
- Maan vanhin vaipasta peräisin oleva aines: 4.45-4.55Ga (Baffininsaari ja Länsigrönlanti) Nature 2010, 466, 853
- Vanhimmat kuukivet (noin (4.44-)4.47-4.52 Ga)
- Vanhimmat meteoriitit ((4.27-)4.37-4.57 Ga)

Nuori Maa

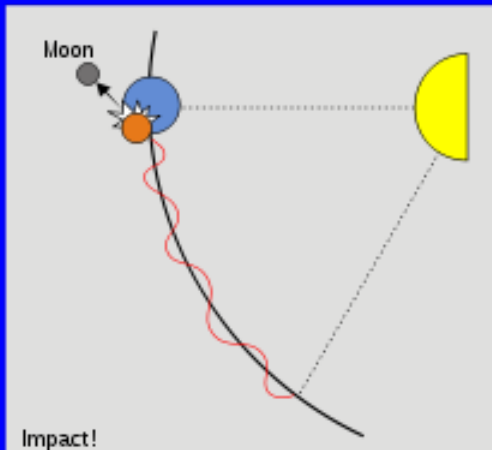
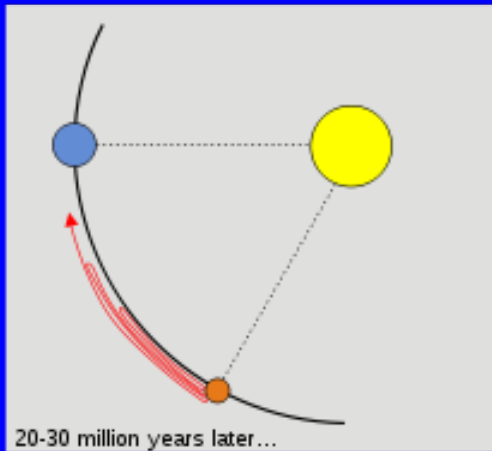
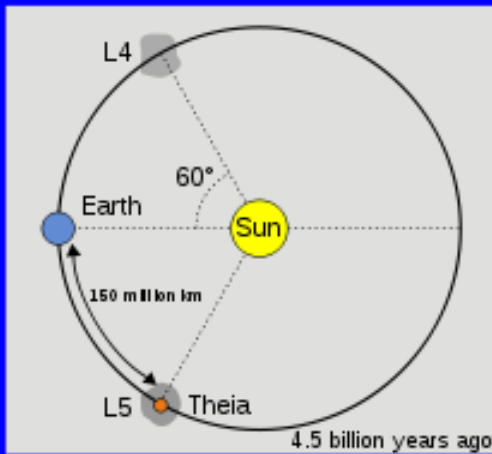
- Maahan törmäsi asteroideja, komeettoja ja muita planetesimaaleja.
- Asteroidien, meteoroidien ja komeettojen mukana tuli vettä, typpeä ja hiilidioksidia.
- Nämä synnyttivät $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 (+\text{CO} + \text{H}_2)$ -protoilmakehän, jossa oli erittäin voimakas kasvihuoneilmiö, maanpinnan lämpötila oli noin 2000-3000K ja ilmanpaine 200-300 baria.
- Maata peitti magmavaltameri
- Maa differentioitui, maan ydin muodostui alle 100 miljoonassa vuodessa.
- Maapallo jäähtyi säteilemällä



Kuun synty

- Kuun uskotaan syntyneen kun noin Marsin kokoinen kappale hipaisutörmäsi maahan 4.527 ± 0.010 miljardia vuotta sitten.
- Törmäyksen seurauksena kappaleiden pintakerrokset sekoittuivat syvältä (kokonaan?).
- Aluksi Kuu kiersi lähellä maata aiheuttaen suuret vuorovedet myös ”kiinteään” maahan ([kymmeniä]metrejä / silloinen vuorokausi = 5h)
- Kuun magma kiteytyi noin 4.47-4.52Ga sitten (tai 4.44 ± 0.02 Ga)
- Vastaavanlaisista (ja suuremmista törmäyksistä) epäsuoria jälkiä muissa planeetoissa
 - Kiertoakselien kaltevuudet
 - Merkuriuksen tiheys (silikaatit poistuivat suuren törmäyksen vaikutuksesta)

Kuun synty



<http://www.boulder.swri.edu/~robin/c03finalrev.pdf>

Maapallon jäähtyminen ja valtamerien syntyminen

- Maapallo alkoi hitaasti jäähtyä säteilemällä infrapunassa.
- Kun lämpötila putosi alle kiehumispisteen, joka oli ehkä 200C-400C, korkean paineen takia, alkoi kuuma sade, jota jatkui muutaman sadan vuoden ajan. Valtameret muodostuivat. Yli 90% ilmakehän vedestä satoi.
- Vesihöyry poistui ilmakehästä → kasvihuoneilmiö heikkeni.
- Ilmanpaine putoaa noin 200-300 barista muutaman kymmeneen bariin. Ilmakehä oli nyt valtaosin CO₂ +CO-pitoinen.



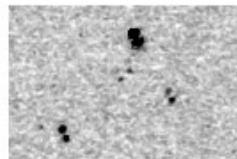
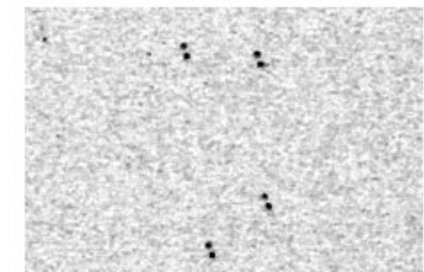
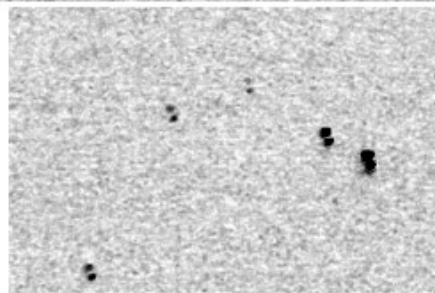
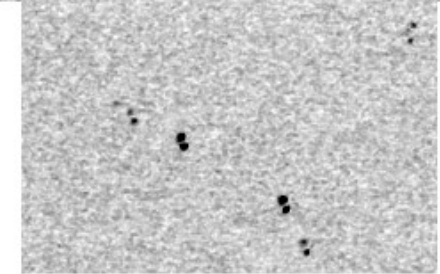
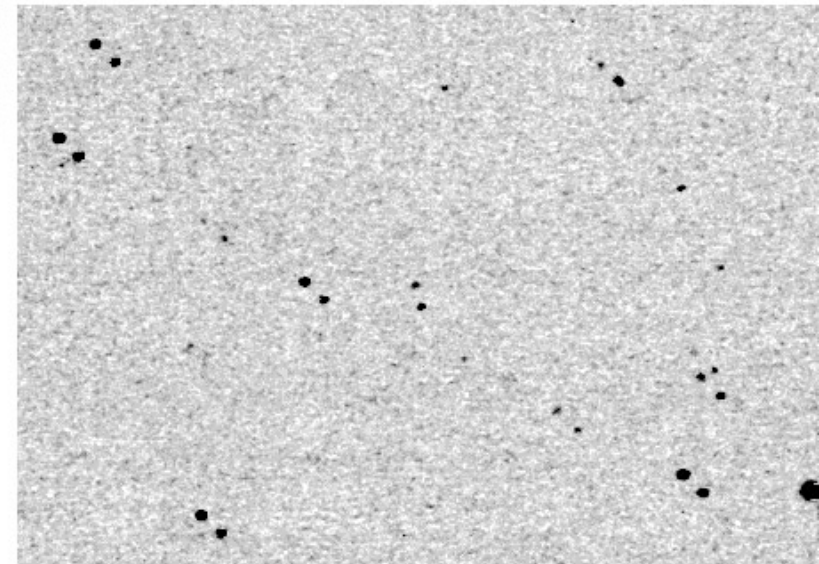
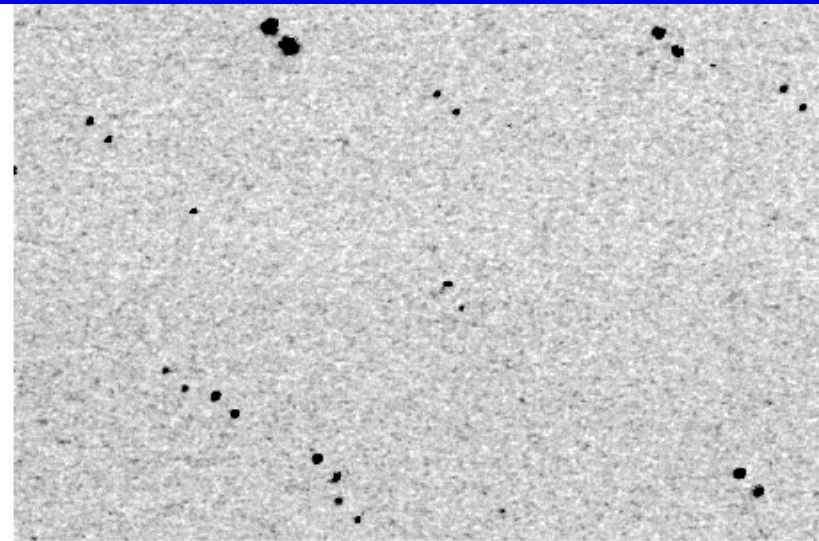
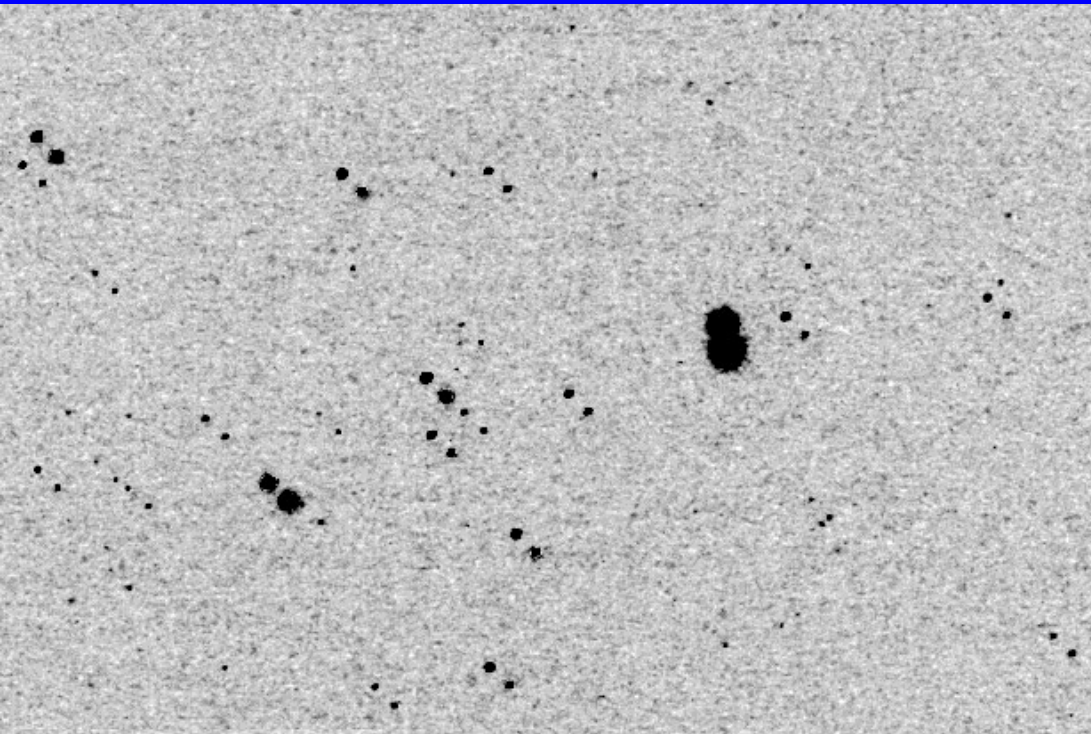
Komeettojen diffusio

- Kaikki Aurinkokunnan komeetat ja asteroidit eivät törmänneet Jupiteriin tai muihin jättiläisplaneettoihin vaan osa sinkoutui pois Aurinkokunnasta avaruuden syvyyksiin ja osa Aurinkokunnan keskiosiin.
- Kukin jättiläisplaneetta vaikutti aikanaan eniten maahan.

Komeetta/Asteroidipommitus

- Intensiivisin pommitus kesti vajaan miljardin vuoden (puoliintumisaika 100Mv).
- Intensiivinen myöhäinen pommitus noin 3900Mv sitten, johtui siitä että jättiläisplaneetat häiritsivät toistensa ratoja.
- Törmäysjälkiä esim. kuussa ja maan kraattereissa.
- K/T (hiili- ja tertiäärikauden) raja, Ir anomalia, vastaavia ja suurempia joukkosukupuuuttoja on ollut useita, kaikista ei kuitenkaan selvää syytä.
- Kevyempää tavaraa kuin alkumaassa → mannerlaatat.

Vesta 7.4.2003 klo 2222-2322



Mare Imbrium

Copernicus

Tycho



Veden ja Typen saapuminen

- Veden merkitys on ollut tärkeä maan historialle, samoin kuin kaasukehän merkitys.
- VESI ja TYPPI saapuivat maahan asteroideissa ja komeetoissa.
- Komeetoista tullut vesi olisi riittänyt peittämään maan noin 30 km vesivaippaan.
- Kevyitä silikaatteja ja orgaanisia aineita saapui sekä asteroideissa että komeetoissa.
- Vaihtoehtoinen teorian mukaan nämä aineet tulivat maahan jo planetesimaaleissa, mutta ongelmana mahdollinen volatiilien aineiden haihtuminen kertymäkiekon sisäosista!

Komeettojen vaikutus maahan

	Sili- kaatit	Vesi	Hiili	Ilmakehä	aika
Kondriitit	2km	0km	0km	-	<500
Jupiter	9km	35km	13km	1300bar	<500
Sat+Ura+Nep	2km	6km	2km	200bar	500-1000
Yht.	12km	45km	15km	1500bar	1000-

Oikea ensimmäinen vakaa ilmakehä

- Viimeisen ilmakehän tuhoavan törmäyksen jälkeinen tullut vakaa ensimmäinen oikea ilmakehä lienee ollut lievästi pelkistävä $N_2 + CO_2 (+H_2O)$ tai kohtalaisen pelkistävä $N_2 + CO + CH_4 (+H_2O + CO_2)$
- Vapaata happea ei ollut lainkaan.

Muut Maan kaltaiset planeetat

- Aurinkokunnan sisäosissa ei ollut volatiilejä aineita.
- Volatiilit aineet saapuivat asteroidien ja komeettojen mukana
- Syntyneissä planeetoissa on riippuvuus etäisyyden ja keskitiheyden välillä.
- Mars jäi pieneksi Jupiterin vaikutuksesta.

Maan alkun liittyviä aikaskaaloja

