

Efni og alheimur

Guðlaugur Jóhannesson

5. apríl 2016

Yfirlit fyrirlesturs

- ▶ Bylgjueiginleikar efnis og nokkrar efleiðingar þess
 - ▶ De Broglie bylgjulengd
 - ▶ Gerð atóma og litrófslínur
 - ▶ Bohr líkan vetnis
- ▶ Svarthlutargeislun
- ▶ Staðlaða eindalíkanið, öryfirferð
 - ▶ Listum helstu eindir í líkaninu
 - ▶ Skoðum víxlverkunarkrafta
- ▶ Saga alheims frá miklahvelli til framtíðar
 - ▶ Útþensla alheims
 - ▶ Hulduefni og hulduorka
 - ▶ Stórgerð alheims og þriggja gráðu bakgrunnsgeislunin

De Broglie bylgjulengd

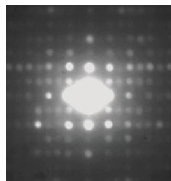
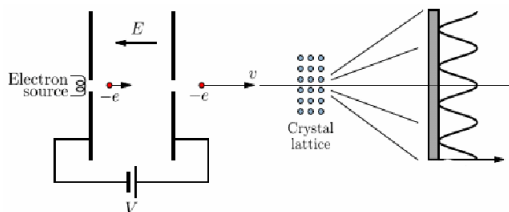
- ▶ Setti fram árið 1924 þá tilgátu að efni, líkt og ljós, hegðaði sér bæði eins og bylgja og eind.
- ▶ Bylgjulengd einda er fengin eins og bylgjulengd ljóss, þ.e.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

- ▶ Svipað gildir um tíðni bylgjunnar, þ.e.

$$E = hf$$

Bylgjubeygja rafeindageisla

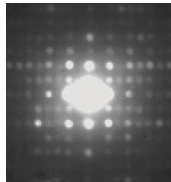
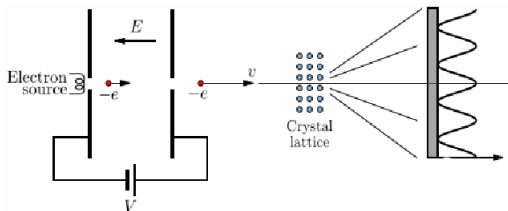


- ▶ Myndin að ofan og til vinstri sýnir tilraunauppsetningu sem sýnir bylgjubeygju rafeinda.
- ▶ Ef spennan er $V \approx 1000 \text{ V}$ er hreyfiorka hvernar rafeindar $K = eV \approx 1,6 \times 10^{-16} \text{ J}$ og hraði þeirra

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}} \approx 1,9 \times 10^7 \text{ m/s.}$$

De Broglie bylgjulengdin er því $\lambda = h/mv \approx 4 \times 10^{-11} \text{ m}$ eða 40 pm.

Bylgjubeygja rafeindageisla

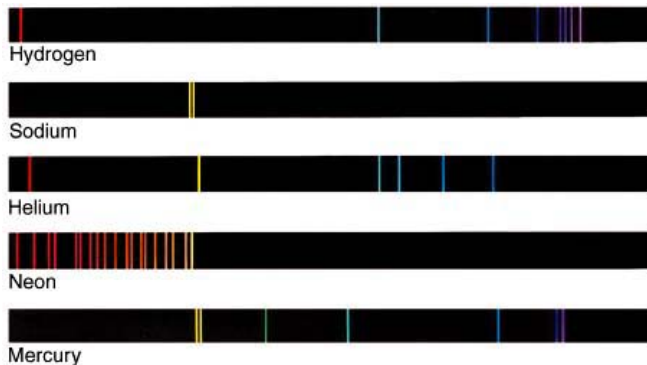


- ▶ Þetta svarar til bylgjulendgar röntgenljóseindar með u.þ.b. 3 keV orku. Bylgjubeygja rafeindanna samsvarar bylgjubeygju samsvarandi röntgengeisla nær fullkomnlega.
- ▶ Þessa bylgjubeygju er hægt að nota til að skoða uppbyggingu kristalgrindar og bilin milli atóma í grindinni.
- ▶ Af hverju tökum við ekki eftir þessu í daglegu lífi?

Atóm og litrófslínur



Atóm og litrófslínur

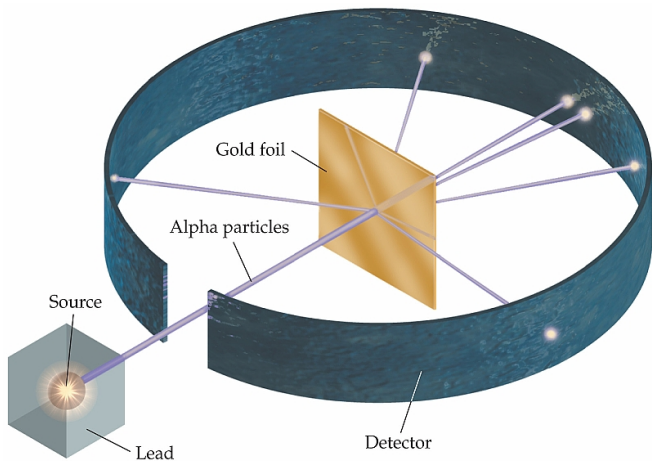


- ▶ Hér sjást litrófslínur nokkurra frumefna í geislun.
- ▶ Samskonar línur sjást í ísogi ef hvítu ljósi er beint í gegnum gas sem inniheldur frumefnin.
- ▶ Hvert litróf einkennandi fyrir efnasamsetningu ljósgjafans eða ísogs efnis.

Rúsinuköku líkan Thomson

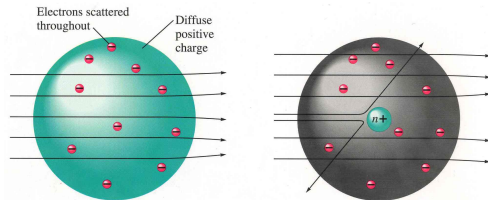
- ▶ Purfum líkan sem útskýrir litrófslínur, hefur enga nettó hleðslu en ákveðinn fjölda rafeinda.
- ▶ Thomson setti fram líkan þar sem rafeindunum var dreift í kúlu sem var gerð úr jákvætt hlöðnu efni, svipað rúsinum í jólaköku.
 - ▶ Uppfyllir kröfur um enga nettó hleðslu en hefur samt fjölda rafeinda.
 - ▶ Eigintíðnir rafeinda vegna dreifingar sinnar í efninu mynda litrófslínur.
- ▶ Galli líkansins var að eiginleikar jákvætt hlaðna efnisins eru ekki þekktir og þó hægt sé að útskýra litrófslínur var ekki hægt að útskýra tíðnidreifinguna.
- ▶ Stærri galli er þó að líkanið virkar ekki.

Tilraun Rutherford



Copyright © 2009 Pearson Prentice Hall, Inc.

Niðurstöður tilraunarinnar



- ▶ Mun meiri dreifing fékkst heldur en líkan Thomson sagði fyrir um.
- ▶ Hámarksstærð kjarnans var metin hafa radíus minna en 10^{-14} m, um fjórum stærðargráðum minni en stærð atóms.

Ath:

- ▶ α -eindin er í raun He kjarni. Þetta var ekki vitað í tíð Rutherford, einungis að þetta væri eind með jákvæða hleðslu $2e$.

Atómlíkan Bohrs

- ▶ Í klassískri eðlisfræði mundu rafeindir á hringhreyfingu um jákvætt hlaðinn kjarna fljótt tapa orku sinni með geislun sem væri ekki á formi litrófslína.
- ▶ Bohr "leysti" vandamálið með því að skammta orku atóma, þau gætu einungis haft ákveðin gildi á orku, E_j .
- ▶ Litrófslínur verða þá þegar orka fer frá einu ástandi, E_i , í annað, E_f . Orkuvarðveisla gefur að

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = E_f - E_i.$$

- ▶ Útskýrði línurnar fullkomnlega en ekkert útskýrði af hverju atómin höfðu þessi orkustig.

Vetnislíkan Bohrs

- ▶ Skoðum rafeind á hringhreyfingu um róteind, en lítum á hana sem bylgju en ekki eind.
- ▶ Til að bylgjan sé stöðug þarf hún að vera staðbylgja og uppfyllir því að

$$2\pi r_n = n\lambda_n \quad \text{með} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- ▶ Ef við stingum inn fyrir De Broglie bylgjulengd óafstæðilegrar rafeindar fæst

$$L_n = mv_n r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

eða skömmtun á hverfiþunga rafeindarinnar.

Vetnislíkan Bohrs - brautir rafeinda

- ▶ Notum okkur nú að það er rafkraftur milli rafeindar og róteindar sem myndar miðsóknarkraftinn og heldur rafeindinni á braut sinni. Því er

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} = \frac{mv_n^2}{r_n}$$

sem gefur

$$r_n = \epsilon_0 \frac{n^2 h^2}{\pi m e^2}$$
$$v_n = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{e^2}{2nh}$$

- ▶ Skilgreinum $a_0 = \epsilon_0 h^2 / \pi m e^2 = 5,3 \times 10^{-11}$ m og þá er

$$r_n = n^2 a_0$$

Vetnislíkan Bohrs - skömmtun orkunnar

- ▶ Getum reiknað heildarorku rafeindarinnar á hverri braut

$$E_n = K_n + U_n = -\frac{1}{\epsilon_0^2} \frac{me^4}{8n^2h^2} = -\frac{hcR}{n^2},$$

þar sem $R = me^4/(8\epsilon_0^2h^3c)$ er fasti Rydberg.

- ▶ Þetta gefur jöfnu fyrir bylgjulengd litrófslína vetnisatóms þegar það fer frá ástandi n_U í ástand $n_L < n_U$:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_U^2} \right)$$

- ▶ Niðurstöðurnar eru innan við 0,1% frá mæliniðurstöðum og að mestu leyti leiðréttanlegar ef notaður er skertur massi rafeindarinnar vegna þess að róteindin er ekki óendanlega miklu þyngri en rafeindin og hreyfist því líka.

Vetnislíkan Bohrs - útvíkkun

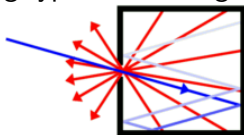
- ▶ Hægt er að útvíkka líkan Bohrs á jónir með einungis eina rafeind, t.d. He^+ og Li^{++} ásamt því að vera líka gillt um Alkalímálma með full innri rafeindahvolf.
- ▶ Líkanið er hins vegar ekki hægt að útvíkka fyrir fleiri rafeindir á ysta hvolfi og verkar ekki á He atóm.
- ▶ Líkanið segir ekkert um hvað gerist veldur því að rafeindirnar færast á milli orkustiga.
- ▶ Líkanið spáir fyrir um segulvægi vegna rafeindar á hringhreyfingu, en H atóm hefur ekki segulvægi í grunnástandi.
- ▶ Þörf er á skammtafræði til að leysa þessi vandamál Bohr líkansins.

Svarthlutargeislun

- ▶ Oft kallað varmageislun og hefur verið þekkt frá því um miðja 19. öld.
- ▶ Þrjár staðreyndir um svarthlutargeislun:
 - ▶ Heildar geislunarstyrkur $I = \sigma T^4$. σ er fasti Stefan-Boltzmann.
 - ▶ Dreifing geislunarinnar er ekki jöfn yfir bylgjulengdir og nær hámarki við bylgjulengdina $\lambda_m = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m K} / T$. Þetta er hliðrunarlögmál Wien.
 - ▶ Lögung dreifingarinnar er óháð hitastigi, þ.e. nóg er breyta skölun til að fá lögung við nýtt hitastig.

Svarthlutargeislun – líkan Rayleigh

- ▶ Skoðum einfalt líkan af svarthlut, kassa með lítið gat sem gleypir fullkomnlega alla geislun sem á það fellur.



- ▶ Rayleigh lávarður reiknaði geislunina með því að reikna með standandi bylgjum og öllum yfirtónum þeirra. Hver tónn hefur orkuna kT og dreifingin fæst með því að telja fjölda yfirtóna á bylgjulengdarbili. Hann fékk að dreifingin á geislunarstyrk með bylgjulengd er gefin sem

$$I(\lambda) = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

þar sem k er fasti Boltzmann.

- ▶ Þetta líkan virkar vel fyrir langar bylgjulengdir, en stefnir á óendanlegt fyrir stuttar sem er klárlega rangt.

Svarthlutargeislun – líkan Planck

- ▶ Planck gerði árið 1900 breytingar á líkani Rayleighs, hann skammtaði orku tónanna þannig að hver þeirra getur bara haft orku sem er hreint margfeldi af hf , þar sem f er tíðni tónsins og h er fasti Plancks.
- ▶ Með þessum endurbótum fækkaði verulega örvuðum yfirtónum á hárrí tíðni og geislunin frá þeim því hverfandi. Með flóknum reikningum (sjá bók) fæst

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}.$$

- ▶ Þetta líkan gefur fullkomna lýsingu á svarthlutargeislun og öllum eiginleikum hennar.
- ▶ Planck er samt ekki talinn vera fyrstur til að koma fram með ljóseindar hugmyndina því hann taldi skömmtnuna bara vera reiknilegs eðlis og því ekki eiga sér eðlisfræðilega skýringu.

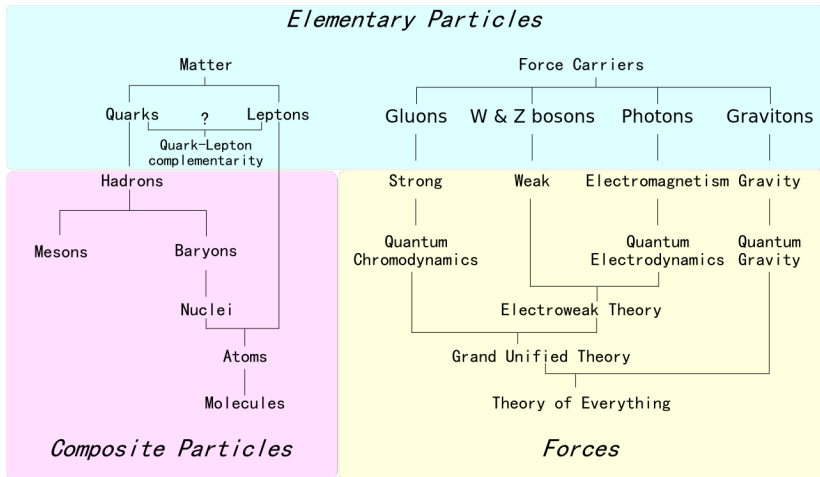
Saga eindanna

- ▶ Fyrir lok 19. aldar var talið að atómin væru minnstu byggingaeiningar og því óskiptanleg.
- ▶ Í lok 19. aldar og byrjun þeirra 20. var vitað að vetnisatóm var samsett úr rafeind og róteind og talið að þyngri atóm væru einnig gerð úr sömu tveimur eindum.
- ▶ Á svipuðum tíma uppgötvaðist ljóseindin.
- ▶ Upp úr 1930 fannst nifteindin og vandamálið með massa róteindarinnar var leyst.
- ▶ Á sama tíma uppgötvaðist jákvætt hlaðin eind, jáeind, sem hafði nánast alla sömu eiginleika og rafeind, fyrsta and-eindin var fundin.
- ▶ Nú fóru hlutirnir að gerast hratt. Mýeindir (*muons*) fundust 1936 og pí-miðeindir 10 árum seinna. ω - og ρ -miðeindir fundust svo seinna.

Flokkun eindanna

- ▶ Með tilkomu fjölda eindahraðla með sífellt hærri hámarksorku varð sprenging í fjölda þekktra einda. Flestar eru skammlífar.
- ▶ Eindum er nú skipt í tvo flokka miðað við víxlverkanir
 - ▶ Létteindir (*leptons*): Víxlverka ekki með sterka kraftinum.
 - ▶ Sterkeindir (*hadrons*): Víxlverka með sterka kraftinum. Bæði miðeindir og þungeindir (*baryons*) flokkast sem sterkeindir. Gerðar úr kvörkum (*quarks*).
- ▶ Fjórar víxlverkanir milli þessara flokka
 - ▶ Sterka víxlverkunin: Skammdræg, heldur saman kjörnum atóma.
 - ▶ Rafsegulkraftur: Langdrægur, krefst rafhleðslu.
 - ▶ Veika víxlverkunin: Skammdræg, getur breytt sterkeind í létteind og öfugt.
 - ▶ Pyngdarkraftur: Langdrægur, virkar á alla orku.

Flokkun eindanna – mynd



Víxlverkun og létt eindir

Table 44.1 Four Fundamental Interactions

Interaction	Relative Strength	Range	Mediating Particle			
			Name	Mass	Charge	Spin
Strong	1	Short (~ 1 fm)	Gluon	0	0	1
Electromagnetic	$\frac{1}{137}$	Long ($1/r^2$)	Photon	0	0	1
Weak	10^{-9}	Short (~ 0.001 fm)	W^\pm, Z^0	80.4, 91.2 GeV/c^2	$\pm e, 0$	1
Gravitational	10^{-38}	Long ($1/r^2$)	Graviton	0	0	2

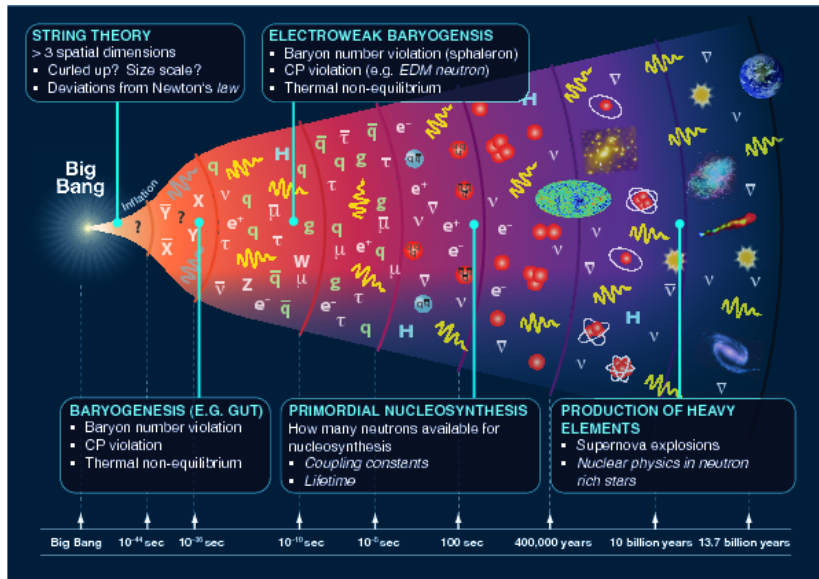
Table 44.2 The Six Leptons

Particle Name	Symbol	Anti-particle	Mass (MeV/c^2)	Lifetime			Principal Decay Modes
				L_e	L_μ	L_τ	
Electron	e^-	e^+	0.511	+1	0	0	Stable
Electron neutrino	ν_e	$\bar{\nu}_e$	$< 3 \times 10^{-6}$	+1	0	0	Stable
Muon	μ^-	μ^+	105.7	0	+1	0	2.20×10^{-6}
Muon neutrino	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	< 0.19	0	+1	0	Stable
Tau	τ^-	τ^+	1777	0	0	+1	2.9×10^{-13}
Tau neutrino	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	< 18.2	0	0	+1	Stable

Table 44.3 Some Hadrons and Their Properties

Particle	Mass (MeV/c ²)	Charge Ratio, Q/e	Spin	Baryon Number, B	Strangeness, S	Mean Lifetime (s)	Typical Decay Modes	Quark Content
<i>Mesons</i>								
π^0	135.0	0	0	0	0	8.4×10^{-17}	$\gamma \gamma$	$u\bar{u}, d\bar{d}$
π^+	139.6	+1	0	0	0	2.60×10^{-8}	$\mu^+ \bar{\nu}_\mu$	$u\bar{d}$
π^-	139.6	-1	0	0	0	2.60×10^{-8}	$\mu^- \bar{\nu}_\mu$	$\bar{u}d$
K^+	493.7	+1	0	0	+1	1.24×10^{-8}	$\mu^+ \bar{\nu}_\mu$	$u\bar{s}$
K^-	493.7	-1	0	0	-1	1.24×10^{-8}	$\mu^- \bar{\nu}_\mu$	$\bar{u}s$
η^0	547.3	0	0	0	0	$\approx 10^{-18}$	$\gamma \gamma$	$u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$
<i>Baryons</i>								
p	938.3	+1	$\frac{1}{2}$	1	0	Stable	—	uud
n	939.6	0	$\frac{1}{2}$	1	0	886	$pe^- \bar{\nu}_e$	udd
Λ^0	1116	0	$\frac{1}{2}$	1	-1	2.63×10^{-10}	$p\pi^-$ or $n\pi^0$	uds
Σ^+	1189	+1	$\frac{1}{2}$	1	-1	8.02×10^{-11}	$p\pi^0$ or $n\pi^+$	uus
Σ^0	1193	0	$\frac{1}{2}$	1	-1	7.4×10^{-20}	$\Lambda^0 \gamma$	uds
Σ^-	1197	-1	$\frac{1}{2}$	1	-1	1.48×10^{-10}	$n\pi^-$	dds
Ξ^0	1315	0	$\frac{1}{2}$	1	-2	2.90×10^{-10}	$\Lambda^0 \pi^0$	uss
Ξ^-	1321	-1	$\frac{1}{2}$	1	-2	1.64×10^{-10}	$\Lambda^0 \pi^-$	dss
Δ^{++}	1232	+2	$\frac{3}{2}$	1	0	$\approx 10^{-23}$	$p\pi^+$	uuu
Ω^-	1672	-1	$\frac{3}{2}$	1	-3	8.2×10^{-11}	$\Lambda^0 K^-$	sss
Λ_c^+	2285	+1	$\frac{1}{2}$	1	0	2.0×10^{-13}	$pK^- \pi^+$	udc

Saga alheims



Fyrsta sekúndan

- ▶ Meðal orka á eind svo mikil í upphafi að allir 4 kraftarnir renna saman í 1.
 - ▶ Miðað við að þyngdarkraftur falli út við Planck lengd
$$l_p = \sqrt{\hbar G/c^3} \approx 10^{-35} \text{ m.}$$
 - ▶ Þetta gerist við Planck tíma $t_p = l_p/c \approx 10^{-43} \text{ s.}$
- ▶ GUT (*Grand Unified Theory*) er sameining sterka, rafseguls og veika kraftsins. Þá er enginn munur á létteindum og sterkeindum og við höfum kvarka og létteinda súpu.
- ▶ Við 10^{-35} s hefur heimurinn kólnað nóg til að sterki krafturinn fellur frá veika og rafeindakraftinum.
 - ▶ Eftir það er fjöldi létteinda og kvarka varðveittur.
 - ▶ Þetta eru fasaskipti sem valda óðþenslu þar sem heimurinn stækkar um 50 stærðargráður á tímanum frá 10^{-35} s til 10^{-32} s.
- ▶ Við mjög háa orku brotna ákveðnar samhverfur niður þannig að myndun efnis er líklegri en myndun andefnis, því er meira af efni en andefni í heiminum.

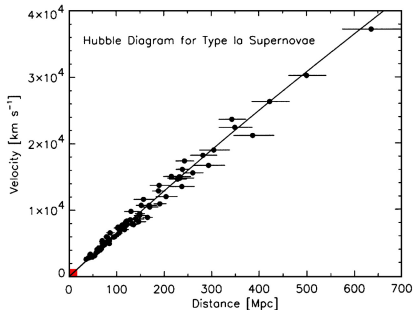
Fyrstu klukkustundirnar og árin

- ▶ Við 1 s hefur hitinn lækkað nóg þannig að nifteindir myndast ekki lengur og fara að hrörna yfir í róteindir og rafeindir.
- ▶ Við 14 s hefur hitinn lækkað niður í 1 MeV og ekki myndast lengur rafeinda og jáeindapör, fjöldi rafeinda í heiminum er ákvarðaður (að mestu).
- ▶ Við 225 s fara róteindir og nifteindir að sameinast í þyngri kjarna. Myndun þungvetnis og helíum hefst. Talið er að nærri allt helíum í alheimi myndist á þessum tíma. Eitthvað myndast af líþíum en þyngri efni myndast varla.
- ▶ Rafeindir sameinuðust kjörnunum og heimurinn varð ógegnsær, þ.e. ljóseindir voru í varmajafnvægi við restina af heiminum.
- ▶ Myndun fyrstu stjarna hefst eftir um 10^{13} s sem jóna heiminn og gera hann gagnsæann fyrir ljósi.
- ▶ Varmageislunin losnar og streymir nú stefnulaust um alheiminn. Þetta gerist þegar hitinn er um 3000 K. Nú mælist hitastig geislunarinnar 2,7 K.

Stórgerð alheims

- ▶ Allt efni þyngra en helíum myndast í stjörnum, efnaverksmiðjum alheims.
 - ▶ Þyngru stjörnurnar ná að mynda öll frumefni að járn.
 - ▶ Þyngru frumefni verða til í sprengistjörnum, stórkostlegum dauðdaga mjög massamikilla stjarna.
- ▶ Smávægilegar truflanir í annars nærri einsleitri massadreifingu olli þéttingu efnis og sagði til um stórgerð alheims.
- ▶ <https://www.youtube.com/watch?v=74lsySs3RGU>

Pensla alheims



- ▶ Með mælingum á rauðviki vetrarbrauta komst Hubble að því að fjarlægjar vetrarbrautir hafa hærra rauðvik en þær sem nær eru.
- ▶ Heimurinn er að þenjast út.
- ▶ Ekki er nægjanlegur massi í alheiminum til að halda honum saman, útpenslu kraftar eru meiri.
- ▶ Þessu veldur svokölluð hulduorka.