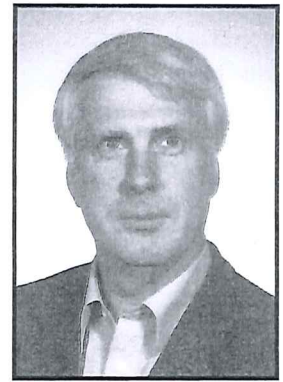




**Einar H.  
Guðmundsson**

Fæddur árið 1947. Stúdent frá MR 1967, B. S. í eðlisfræði frá H.Í., árið 1973. M. Sc. í eðlisfræði frá University of Wisconsin árið 1974 og Ph. D. í stjarnfræði frá Kaupmannahafnarháskóla 1981. Einar starfaði sem sérfræðingur við Raunvísindastofnun og er nú prófessor í stjarnfræði við Háskóla Íslands.

**Gunnlaugur  
Björnsson**



Fæddur árið 1958. Stúdent frá MR. Nam við Háskóla Íslands. Lauk doktorsprófi í stjarnfræði við háskóla í Illinois árið 1990. Starfar nú sem vísindamaður hjá Raunvísindastofnun HÍ, en hefur auk þess kennt við HÍ, FVA, MR og Háskólann í Illinois.

## Myrk framtíð?

Nýlegar mælingar, annars vegar á birtu fjarlæggra sprengistjarna og hins vegar á stefnuhneigð örbylgjukliðsins, benda eindregið til þess að þensluhraði alheimsins fari vaxandi og að hann hafi verið að vaxa frá því löngu áður en sólkerfið okkar varð til. Slík hegðun gæti stafað af áhrifum jákvæðs heimsfasta eða svokallaðar eisu (e. *quintessence*), sem hefur svipuð áhrif. Áhrifavaldurinn, hver sem hann nú er, gengur almennt undir nafninu hulduorka. Í þessum pistli verður fjallað stuttlega um áhrif hulduorkunnar á þróun alheimsins og þó einkum á þann hluta hans sem við sjáum héðan frá jörðinni.

### 1 Heimsmýnd nútímans

Heimsfræðingar nota venjulega svokallað Friedmann-Robertson-Walker (FRW) líkan til þess að lýsa alheimi og þróun hans. Kennistærðir líkanins eru meðal annars Hubblesstuðullinn  $H$  og þéttleikastíkinn  $\Omega$ . Sá fyrrnefndi er mælikvarði á þensluhraða alheims og gefur vísbendingar um aldur hans, en sá síðarnefndi segir til um heildarorkuþéttleika alheimsins í hlutfalli við svonefndan markþéttleika. Markþéttleikinn skilur á milli opins og lokaðs heims þannig að  $\Omega < 1$  svarar til opins heims með neikvæða sveigju, en  $\Omega > 1$  svarar til lokaðs heims með jákvæða sveigju. Í líkönum án heimsfasta nær lokaður heimur endanlegri stærð þegar útpenslan stöðvast og samdráttur hefst. Marktilfellið  $\Omega = 1$  lýsir evklíðskum heimi.

Þeir þættir sem taldir eru ráðandi um stærð  $\Omega$  eru annars vegar venjulegt sýnilegt efni og hið ósýnilega hulduefni og hins vegar svonefndur heimsfasti,  $\Lambda$ . Núgildi þéttleikastíkans má því tákna með  $\Omega_0 = \Omega_{m0} + \Omega_{\Lambda 0}$ , þar sem  $\Omega_{m0}$  táknar framlag venjulegs efnis og hulduefnis og  $\Omega_{\Lambda 0}$  framlag heimsfastans eða hulduorkunnar. Bæði mælingar á fjarlægum sprengistjörnum og á stefnuhneigð örbylgjukliðsins benda til þess að  $\Omega_0 \approx 1$ , þar sem  $\Omega_{m0} \sim 0.3$  og  $\Omega_{\Lambda 0} \sim 0.7$  (sjá Mynd 1). Afleiðing þessa er sú að heimurinn mun halda áfram að þenjast

út með sívaxandi hraða um alla framtíð. Um þetta verður fjallað nánar hér á eftir. Svonefnd eisa getur einnig valdið svipuðum áhrifum og heimsfastinn, en ekki verður fjallað nánar um hana hér. Lesendum er bent á greinar höfundna (Guðmundsson & Björnsson 2002 og Einar H. Guðmundsson og Gunnlaugur Björnsson 2002) þar sem ítarlega er fjallað um alla ofangreinda þætti og áhrif þeirra á þróun alheimsins lýst. Einnig er vakin athygli á alþýðlegri grein um sama efni (Einar H. Guðmundsson 2001).

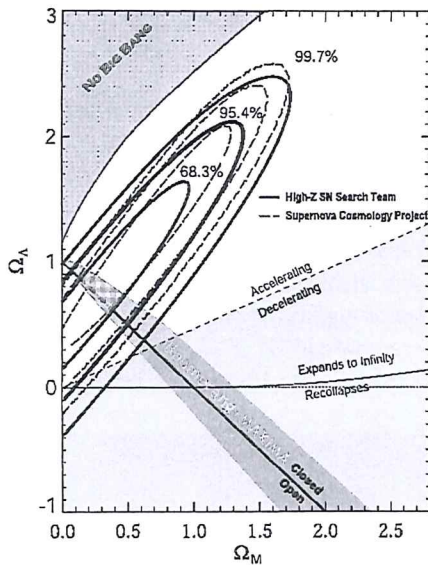
Áður en lengra er haldið er rétt að minna á að gildi Hubblesstuðulsins í dag,  $H_0$ , er samkvæmt mælingum talið vera um  $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , sem oftast er ritað  $h_0 = H_0 / (100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}) = 0.7$ . Svonefndur Hubblestími, sem líta má á sem mælikvarða á aldur alheims hefur þá gildið  $t_0 = 1/H_0 = 9.8h_0^{-1}$  milljarðar ára og svokallaður Hubblesradíus  $R_{H_0} = c/H_0$  er um  $14h_0^{-1}$  milljarðar ljósára. Við munum lýsa þróun fjarlægða í alheimi með stærðinni  $a = a(t)$ , sem er fall af heimstímanum  $t$ . Allar frjálsar eiginfjarlægðir, til dæmis fjarlægð milli tveggja vetrarbrautahópa, vaxa í réttu hlutfalli við  $a$ . Í dag hefur  $a$  gildið 1. Loks munum við kvarða tímann með Hubblestímanum og nota hér á eftir einingarlausu heimstímann  $\tau = t/t_0$ .

### 2 Þróun alheims

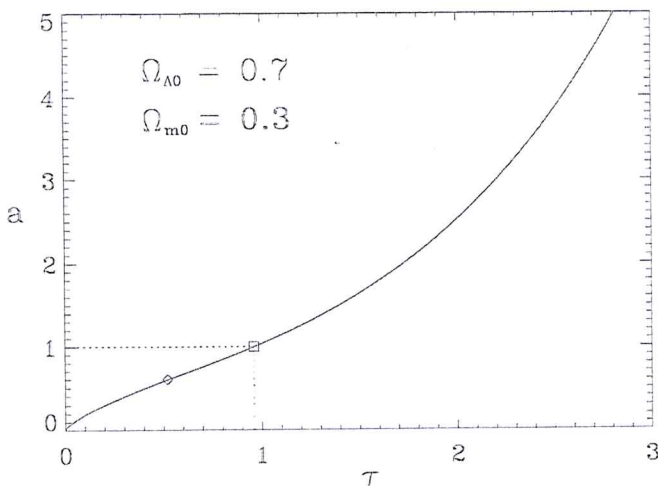
Til þess að lýsa þróun alheims einbeitum við okkur að einu FRW-líkani með  $\Omega_{m0} = 0.3$  og  $\Omega_{\Lambda 0} = 0.7$ , svo  $\Omega_0 = 1.0$ . Þetta er flatur heimur en mælingarnar sem fyrir er getið benda einmitt til þess að þannig sé okkar heimur.

Mynd 2 sýnir hvernig skalarþáttur þessa heimslíkans vex sem fall af tíma. Eftir um tvo Hubblestíma hefur útpenslan náð veldisvexti þar sem áhrif heimsfastans eru þá orðin ráðandi í þróuninni. Hubblesstuðullinn á hverjum tíma má reikna samkvæmt  $H(\tau)/H_0 = d \ln a / d\tau$  og hið vel þekktu Hubbleslögmál





Mynd 1: Yfirlit yfir mælingar á  $\Omega_{m0}$  og  $\Omega_{\Lambda 0}$ . Þau gildi sem helst koma til greina út frá mælingum á sprengistjörnum af gerð Ia liggja innan sporöskjuferlanna á myndinni. Þau gildi sem lesa má út úr mælingum á örbylgjukliðnum eru skyggð með dökkgráu. Líklegasta gildi kennistærðanna er þar sem svæðin tvö skarast (köflótt á myndinni) og hafa nýjar mælingar með WMAP gervitunglinu rennt enn styrkari stöðum undir þá niðurstöðu. (Myndin er fengin af heimasíðu Sprengistjörnuhópsins <http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/Research/supernova/home.html>. Heimasíða WMAP er <http://map.gsfc.nasa.gov/index.html>).



Mynd 2: Skalarþáttur alheims sem fall af tíma fyrir gefin gildi á  $\Omega$ . Núgildið, merkt með ferningi, er  $a_0 = 1$  og  $\tau_0 = 0.96$  svo aldur alheims í þessu líkani er  $t_0 = 13.5$  Gár ef  $h_0 = 0.7$ . Beygjuskil ferilsins eru auðkennd með tígli.

er þá

$$v = Hd, \quad (1)$$

þar sem  $v$  er burthraði tiltekinnar vetrarbautar og  $d$ , sem er í réttu hlutfalli við  $a$ , er eiginfjarlægðin til hennar. Vert er að benda á að þar sem bæði  $H$  og  $d$  eru háð tíma þá breytist  $v$  með tímanum. Þegar áhrif  $\Lambda$  eru orðin allsráðandi um þróunina vex skalarþátturinn veldisvexti,  $a \propto e^{\tau\sqrt{\Omega_0}}$ , svo Hubblesstuðullinn  $H/H_0 = \sqrt{\Omega_0}$  verður óháður tíma, og burthraðinn vex því einnig veldisvexti,  $v \propto e^{\tau\sqrt{\Omega_0}}$ .

Við skilgreinum skeið hulduorkunnar sem tímabilið frá því áhrifa  $\Lambda$  á útþensluna fer fyrst verulega að gæta, en það gerist við beygjuskil ferilsins á Mynd 2 (tígullinn). Þau má auðveldlega finna út frá skilyrðinu  $d^2a/d\tau^2 = 0$ . Fyrir líkanið sem sýnt er á Mynd 2, fæst að beygjuskilin eru í punktinum  $a_\Lambda = 0.60$  og  $\tau_\Lambda = 0.52$ . Áhrifa heimsfastans var því farið að gæta fyrir 6.1 milljarði ára, þegar aldur alheims var 7.4 milljarðar ára, en þá var hvorki sólin né sólkerfið til. Við 7.4 milljarða ára aldur hefst því skeið hulduorkunnar í þróun alheimsins.

### 3 Skynmörk

Í heimum með heimsfasta koma fram skynmörk vegna vaxandi þensluhraða og endanlegs hraða ljóssins. Þegar útþensla alheimsins nær veldisvexti kemur að því að hraði ljóssins verður minni en þensluhraðann og nær ekki að halda orsakasambandi milli fjarlæggra athugenda. Því má líta á skynmörkin sem mörk orsakatengsla tveggja athugenda. Sérhver athugandi er umlukinn sjóndeildarfleti sem afmarkar þann hluta alheimsins er athugandinn er í orsakatengslum við. Þetta er hliðstætt sjóndeildarfleti umhverfis svarthol þar sem athugandi innan svart-holsins getur ekki sent skilaboð út fyrir flötinn, en ólíkt að því leyti að hér berst ljós frá uppsprettu utan flatarins aldrei til athugandans fyrir innan.

Þegar heimsfastinn er orðinn ráðandi um þróun alheimsins og þenslan vex veldisvexti er auðvelt að reikna fjarlægðina til skynmarkanna. Í ljós kemur að þau eru í fastri fjarlægð,  $d = R_{H_0}/\Omega_{\Lambda_0}^{1/2} = 17$  milljarðar ljósára frá athugandanum, í því líkani sem hér er til umfjöllunar (þ.e. ef  $\Omega_{\Lambda_0} = 0.7$  og  $h_0 = 0.7$ ).

Athugum nú nánar tvö atriði. Reikna má út að uppspretta með rauðvik, sem okkur mælist vera  $z = 0.68$ , er á mörkum þess að vera í orsakatengslum við okkur. Skilaboð sem við sendum í átt til hennar nú munu berast til hennar á því augnabliki er hún fer yfir skynmörkin. Hún mun því ekki geta svarað skilaboðunum. Á sama hátt mun ljós sem hún sendir frá sér nú, ekki ná til okkar fyrir en uppsprettan er komin yfir skynmörkin. Allar þær uppsprettur sem hafa þetta sama rauðvik eða hærra eru því nú þegar úr orsakatengslum við okkur. Þá er einnig hægt að sjá með einföldum útreikningi að uppspretta með rauðvik  $z = 1.7$  er að fara yfir skynmörkin núna og er því löngu úr orsakasambandi við okkur. Allar uppsprettur með hærra rauðvik en  $z = 1.7$  eru fyrir löngu komnar yfir skynmörkin. Ástæða þess að við sjáum þær ennþá er að ljósið þarf sinn tíma til að berast til okkar og það ljós sem við mælum í dag lagði af stað til okkar löngu áður en uppsprettur náðu skynmörkunum. Til samanburðar er rétt að nefna að fjarlægasta uppspretta sem

þekkt er, hefur rauðvik  $z \approx 6.5$  og er að sjálfsögðu fyrir löngu komin yfir skynmörkin og úr öllum orsakatengslum við okkur, þótt við sjáum hana ennþá.

Framtíðarsýn í heimi af þeirri gerð sem hér hefur verið rædd er fremur dökk, raunar væri réttara að segja myrk, frá sjónarhóli hugsandi vera sem stunda athuganir á alheimi. Fjarlæggar vetrarbrautar fara hver af annarri yfir skynmörkin á nokkrum Hubblestímum. Bæði fjarlægð þeirra og rauðvik vaxa veldisvexti svo ljósið sem frá þeim berst dofna skjótt niður fyrir mælanleg mörk. Sérhver athugandi yrði þá einn innan síns sýnilega heims, yrði í raun eyland í óráviddum alheimsins og algerlega sambandslaus við umheiminn.

Nýjustu athuganir með WMAP gervitunglinu benda sterkt til þess að þær hugmyndir, sem hér hefur verið fjallað um,

geti reynst réttar. Það vekur aftur nýjar og áhugaverðar spurningar, því svo virðist sem vissir þættir þessarar heimsmyndar stangist á við viðteknar hugmyndir í öreindafræði og skammtasviðsfræði. Við slíkar aðstæður verður oftast fjörug og frjó umræða um grundvöll vísindanna sem stundum leiðir til hressilegrar endurnýjunar þess hugmyndaheims sem vísindamenn lifa og hrærast í.

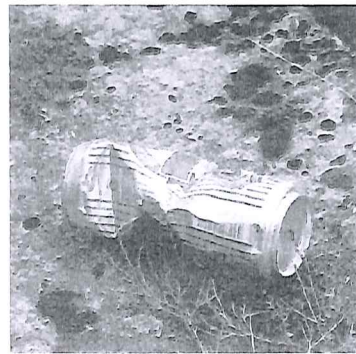
### Tilvísanir

Einar H. Guðmundsson, 2001, „Endimörk hins sýnilega heims”, Morgunblaðið 24. júní, bls. B4

Guðmundsson, E. H. & Björnsson, G., „Dark Energy and the Observable Universe”, 2002, ApJ, **565**, 1

Einar H. Guðmundsson & Gunnlaugur Björnsson, 2002, „Hulduorka og þróun hins sýnilega heims”, í *Eðlisfræði á Íslandi X*, ritstj. Ari Ólafsson.

## ÞETTA ERU SLYS...



...sem auðvelt er að forðast

# ATVR