

Trausti Jónsson veðurfræðingur
1.11. 2010.

Milankovicsveiflur og jarðbrautarþættir (fylgirit með blogginu Hungurdiskar)

Sú hugmynd kom fram fyrir miðja 19. öld að skýringa á forsögulegum jökulskeiðum væri að leita í hægfara afstöðubreytingum jarðar og sólar. Þetta var meira að segja áður en tilvera jökulskeiðanna var almennt viðurkennd meðal vísindamanna. Afstöðubreytingarnar greinast í fáeina þætti, en breyta þó ekki sólstuðlinum sjálfum en hann er skilgreindur út frá geislun við meðalfjarlægð jarðar frá sólu. Afstöðubreytingarnar hafa áhrif á dreifingu geislunar á árið á mismunandi hátt á mismunandi breiddarstigum en ársheildargeislun sólar við útmörk andrúmsloftsins breytist ekki.

Serbniski stjörnufræðingurinn Milutin Milankovič (oftar ritað að þýskum hætti „Milankovitch“) reiknaði um 1920 út áhrif þessa breytileika á geislunarbúskap á ýmsum breiddargráðum í talsverðum smáatriðum. Hann taldi að breytileikinn stýrði lengd og tímasetningu jökul- og hlýskeiða. Þó afstöðuþættirnir séu gjarnan kenndir við hann, kallaðir Milankovicþættir eða Milankovicsveiflur, voru þeir allir þekktir áður. Þýsku veðurfræðingarnir Köppen og Wegener fóru yfir reikningana og kynntu fyrir vísindaheiminum árið 1925. Eftir það könnuðust flestir jarðvísindamenn við kenningar Milankovic en hann hélt áfram að finna tölur allt fram til 1941.

Kenningarnar eignuðust fljótt stuðningsmenn en áhuginn minnkaði þegar í ljós kom að breytileikinn væri vart nægur til að skýra „stóru“ jökulskeiðin sem þá voru yfirleitt talin fjögur. Þegar farið var að búa til orkujafnvægislíkön af lofthjúpunum á 7. áratug 20. aldar kom hins vegar í ljós að við sérstakar aðstæður gætu afstöðubreytingarnar haft mjög mikil áhrif.

Snjóhula á stórum meginlöndum endurkastar stuttbylgjugeislum sólar beint út í geiminn aftur. Ef Milankovicþættirnir geta haft áhrif á snjóhulu geta þeir jafnframt haft umtalsverð áhrif á orkubúskap jarðar. Að jafnaði endurkastast um 30% stuttbylgjugeislunar frá sól. Svo virðist sem stór meginlönd í tempruðu beltunum séu einmitt svæði sem heppileg eru til mögnunar af þessu tagi.

Um og upp úr 1970 var farið að ná borkjörnum í tugatali upp frá botni sjávar. Í þeim eru leifar örsmárra sjávardýra og í ljós kom við rannsóknir á frumefnasamsætu hlutföllum í setinu að þau breyttust með reglulegum hætti. Flest benti til þess að þessar breytingar væru að allmiklu leyti í takt við Milankovic-sveiflurnar og menn fóru aftur að taka þær trúanlegar. Tölvutækni gerði það líka að verkum að tilraunareikningar þurftu ekki lengur nánast ofurmannlegrar þrautseigju við.

Lítum nú nánar á þessar afstöðubreytingar sem við skulum kalla brautarþætti (ágætar skýringarmyndir má víða finna, t.d hjá Wikipediu).

Breytingar á lögum brautar (hringvik - eccentricity)

Misjafnt er hve braut jarðar er hringlaga. Jarðbrautin er sporbaugur en ekki nákvæmlega hringur. Reyndar er frávik frá hring (svonefnt hringvik) svo lítið að það sést varla ef brautin er „rétt“ teiknuð. Hringvikið (skammstafað „e“) er 0 fyrir hring, en vex eftir því sem sporbaugurinn verður aflangari. Stærsta hringvik jarðbrautarinnar er 0,06, en minnst nálægt 0. Nú er hringvikið mjög lítið eða 0,016. Hringvikssveiflurnar eru reyndar fleiri en ein, en þær veigamestu hafa lotulengdirnar 95 þús ár og um 413 þús ár.

Möndulhalli

Möndull jarðar hallast mismikið miðað við flöt þann sem jarðbrautin myndar. Mest hallast hann um $24^{\circ}30'$, en minnst um 22° . Heimskautasvæðin eru því mun stærri þegar möndulhallinn er mestur en þegar hann er minnstur. Möndulhallinn er minnkandi um þessar mundir, heimskautsbaugarnir færast því hægt nær pólunum og hitabeltið (svæðið milli hvarfbauganna) minnkar líka. Þess má geta til gamans að minnkun hitabeltisins er nú um 1133 ferkílómetrar á ári og síðustu tæpu 100 árin hefur það því minnkað sem nemur stærð Íslands. Lotulengd möndulhallasveiflunnar er um 41 þúsund ár.

Möndulvelta – öxulvelta (axial precession)

Jörðin snýst um öxul sinn einu sinni á dag, líkt og skopparakringla. Ef horft er beint ofan á skopparakringlu sést að stefna öxulsins er gjörn á að snúast hægt og mynda hring. Jörðin hegðar sér á sama hátt. Öxull hennar snýst einn slíkan hring á um það bil 25.700 árum. Sumar er hér á norðurslóðum þegar norðurendi möndulsins vísar að sólu.

Ef möndulhallinn væri enginn kæmu sumar og vetur ekki á þann hátt sem við þekkjum og árstíðamunur réðist eingöngu af fjarlægð sólar frá jörð. Þegar jarðbrautin væri hringlaga væri árstíðamunur nákvæmlega enginn. Svo vill til að nú er sól næst jörðu um áramótin (3.janúar). Við erum nær sólu á veturna en á sumrin og því má segja að árstíðabundnar breytingar á fjarlægð til sólar vinni að nokkru gegn árstíðasveiflunni á norðurhveli um þessar mundir.

Þar sem sólstuðullinn er skilgreindur sem meðalgildi ársins breytist hann ekki, en sólgeislun við jarðbrautina er nú 1480 W/m^2 við sólnánd, en 1320 W/m^2 við sólfirrð. Meðalgeislun á flatareiningu við útjaðar lofthjúpsins er um 342 W/m^2 , við sólnánd 351, en 329 við sólfirrð. Munurinn er um 6%. Möndulveltan sér um að þetta er sífellt að breytast, ef hún réði alveg ein myndi sá dagur sem jörð er næst sólu færast á 25.700 árum í heilan hring eftir árinu.

Eftir 13 þúsund ár myndi jörð aftur vera næst sólu á norðurhvelssumri og sumrin yrðu þá að öllu óbreyttu ívið hlýrri en nú er. Svo vill til að annar þáttur, svonefndur sporbaugssnúningur, hefur sams konar áhrif.

Brautarsnúningur (sporbaugssnúningur)

Sporbaugurinn sem jörðin markar umhverfis sól snýst hægt og dagur sólnándar breytist líka af þeim sökum. Áhrifin eru sú að flýta lítilliga ferð þessa viðmiðunarpunkts í gegnum árið þannig að ferðin tekur um 21.600 ár (í stað árána 25.700 ef möndulveltan réði eins þessari færslu).

Jafndægur eru þegar flötur sem miðbaugur jarðar myndar fellur saman við þann flöt sem braut jarðar um sól myndar. Þetta gerist tvisvar á ári, í mars og september. Dagur sólnándar myndar breytilegt horn við vorjafndægur (vorpunktinn). Einu sinni á 22 þúsund árum tæpum falla dagur sólnándar og vorjafndægur saman og 22 þúsund árum síðar gerist það aftur.

Eftir öðru lögmáli Keplers er hraði jarðar í brautinni háður fjarlægðinni til sólar sem nú er minni á veturnum en á sumrin og hraði jarðar í brautinni er því meiri á þeim tíma árs en á sumrin. Sumarhelmingur ársins á norðurhveli (tíminn frá vorjafndægum til haustjafndægra) er því lengri en sumarhelmingur ársins á suðurhveli og nú munar 7 dögum og 16 klukkustundum.

Á erlendum málum nefnist öxulveltan „axial precession”, en sporbaugssnúningurinn „precession of the ellipse”. Saman eru þessir tveir þættir því kallaðir „precession” eða „precession of the equinoxes”.

Á íslensku er orðið „sólnáandarrek” nokkuð lýsandi, Jónas Hallgrímsson notaði „framsókn vorpunktsins” um þetta fyrirbrigði. „Jafndægrarek” kæmi einnig til greina, en það orð mætti einnig nota yfir annað fyrirbrigði (óskilt), „jafndægrarek” sem stafar af ónákvæmni í ákvörðun á lengd ársins í tímatölum. Varast ber að rugla þessu tvennu.

Sameiginleg áhrif sólnáandarreks og hringviks

Þegar hringvik er mjög lítið eru áhrif sólnáandarreksins mjög lítil og þá er fjarlægð til sólar nánast sú sama allt árið. Árstíðirnar haldast að sjálfsögðu (vegna möndulhallans), en þær breytast þá lítið í tíma þangað til hringvikið eykst aftur. Áhrif hringviks og sólnáandarreks má skrifa saman í einni einfaldri formúlu:

$$c_{pp} = k \cdot e_j \cdot \sin(w)$$

w er hornið milli jafndægra og sólnáandar, e_j er hér hringvik jarðbrautarinnar, k er fasti, en útkoman, c_{pp} , kallast „climatic precession parameter”, við gætum kallað hann „árstíðarekstuðul”.

Bæði e_j og w eru lotuföll af tíma. Vegna þess að lotulengd hringviksins er ekki hreint margfeldi af lotutíma sólnáandarreksins eru áhrif hringviksþáttarins þau að ýmist dempa eða magna árstíðarekstuðulinn. Reikningar sýna að þessi áhrif skipta honum á tvær sveiflur sem hafa lotutíma annars vegar um 19 þúsund ár og hins vegar um 23 þúsund ár. Takið eftir því að séu menn smámunasamir er tæknilegur munur á brautarþáttunum annars vegar og skilgreiningu Milankovicþáttanna hins vegar.

Hinar eiginlegu Milankovicsveiflur hafa því loturnar 19, 23, 41, og u.þ.b. 100 og 400 þúsund ár. Það eru þær sem ættu að koma fram í veðurfarsgögnum ef áhrifin eru einhver. Það sem ákvarðar þættina eru áhrif þyngdarafls í sólkerfinu á hreyfingar jarðar, mest sól og tungl (möndulveltan). Hinar reikistjörnurnar hafa allar áhrif (snúa sporbaugnum og aflaga hann), mjög mismikil að vísu.

Milankovichrifin hafa verið reiknuð nokkrar milljónir ára aftur í tímann. Þó óvissan sé mjög lítil (talin 1% aftur til 10 milljón ára) magnast hún smám saman upp og tugármilljóna reikningar eru taldir vafasamir. Ekki er vafi á því að sveiflur sem hafa svipað tíðniróf eru merkjanlegar í löngum tímaröðum, bæði í djúpsjávarkjörnum, iskjörnum og öðrum ámóta gögnum. Jafnframt er ljóst að þær einar og sér skýra ekki allar breytingar. Gagnvirkni sveiflnanna við innri áhrifaþætti er flókin og ekki alltaf auðskýrð.

Áhrif Milankovicsveiflanna á orkubúskapinn

Þegar Milankovic setti fram hugmyndir sínar um 1920 var komin upp nokkur vantrú á að skýringa á jökulskeiðum væri að leita í afstöðubreytingum sólar og jarðar. Í eldri hugmyndum fólst að jökulskeið réðust af sólgeislun að vetri og þau jökulskeið hæfust á norðurhveli þegar svo hagaði til að hringvikið væri mikið og sól væri fjærst jörðu við vetrarsólstöður. Einnig væri æskilegt að möndulhallinn væri lítill því þá væri heildargeislun á heimskautasvæðunum lítil. Samkvæmt útreikningum hefði síðasta jökulskeiði átt að ljúka fyrir 80 þúsund árum en ekki 10 þúsund eins og jarðfræðileg ummerki sýndu.

Önnur hugmynd hlaut enga náð fyrr en eftir 1920, hún gerði ráð fyrir því að langt, svalt sumar og stuttur, hlýr vetur réði upphafi jökulskeiða. Milankovic sagði jökulskeið hefjast þegar afstöðu jarðar og sólar væri þannig hátt að sólgeislun við sumarsólstöður væri undir meðaltali. Þá væri sumarbráðnun íss og snævar einnig undir meðallagi og það leiddi til jöklunar.

Áhrif breytinga á afstöðu sólar og jarðar felast fyrst og fremst í endurdreifingu stuttbylgjugeislunar sólar á jörðina og árið. Heildarsólgeislun á veturnum annars vegar og sumrum hins vegar breytist í öfuga átt, þannig að heildargeislun yfir árið breytist lítið. Breytileiki á einstökum stöðum og árstímum er þó umtalsverður. Sólnándarkeið hefur mest áhrif á breiddarbilinu frá miðbaug norður á 60°N. Árstíðamunur í stuttbylgjuendurkastni er minni á suðurhveli því þar eru ekki meginlönd á réttum breiddarstigum til að þau geti valdið breytilegri snjóhulu á við meginlönd norðurhvels.

Munur á geislun frá lágmarki (þegar sól er fjærst jörðu á sumrin) til hámarks (þegar hún er næst jörðu á sumrin) er um 8% (um 40 Wm⁻²) við sumarsólstöður. Þessi munur getur valdið breytingum á snjóhulu og þar með breytist endurskinshlutfall jarðar. Einfaldar líkantilraunir benda til þess að þegar hringvikið er stórt breytist árstíðasveiflan um 8°C til 10°C inni á meginlöndunum milli þess tíma þegar sumar og sólnánd falla saman annars vegar og þess tíma hins vegar þegar vetur og sólnánd falla saman. Yfir höfunum virðast áhrifin lítil.

Breytileika möndulhallans gætir mest á heimskautasvæðunum. Um háveturinn (í skammdeginu) meðan sólin er undir 15° í hæð á hádegi er inngeislunin lítil. Aukist möndulhallinn breiðist skammdegið yfir ívið stærra svæði, en sólgeislun er mjög lítil hvort eð er og verður aldrei minni en ekki neitt. Hún eykst hins vegar á sumrin við það að sól er þá hærra á lofti. Áhrifin eru mest um 17 Wm⁻² á þessum slóðum sem samsvarar 2°C til 3°C hækkun á sumari.

Hringvikssveiflan hefur mest óbein áhrif með því að hafa áhrif á sólnándarsveifluna, en auk þess veldur hún því að lítilsháttar breytingar verða á meðalfjarlægð til sólar yfir árið. Það samsvarar um 0,7 Wm⁻² breytingu á sólstuðlinum. Talið er að þetta geti hnikað meðalhita jarðar til um hálfu gráðu eða svo.

Sólnándarsveiflan nýtur sín best ef hringvikið er stórt og möndulhallinn mikill. Milankovic reiknaði sjálfur m.a. út áhrif brautarþátta á 65°N aftur um 600 þúsund ár. Hann komst að þeirri niðurstöðu að þegar sólgeislunin væri minnst á sumrin á 65°N jafngilti hún núverandi geislun á 72°N. Sumrin á Snæfellsnesi gætu þá hafa verið svipuð og er nú á Jan Mayen. Hvað sem raunveruleikanum líður segir dæmið okkur að þetta getur skipt máli.

Vandamál

Þó Milankovicþættirnir geti skýrt gang jökulskeiða á sannfærandi hátt er þó við margt misræmið að eiga, t.d. kemur fram fasamunur (tímamunur) milli þáttanna og þeirra veðurfarsbreytinga sem þeir eiga að skýra. Fáir efast um að einhver fasamunur sé eðlilegur, m.a. vegna þess að tíma tekur bæði fyrir haf og jökla að bregðast við breytingum á geislunarbúskap. Bæði sólnándarkeið og möndulhallasveiflan hafa með góðum árangri verið notuð í einföld geislunarlíkön og þar með hefur verið staðfest að tengsl brautarþáttanna og veðurfars eru ekki bara einhver tilviljun. Breytingar á vægi þeirra til lengri tíma hefur reynst erfitt að skýra, en meðan betri skýringar koma ekki fram munu skýringarhugmyndir Milankovic njóta yfirgnæfandi fylgis varðandi sveiflur með lotulengd frá 20 þúsund og upp í 400 þúsund ár. Eins og nefnt var að ofan eru reikningarnir þó taldir nokkuð vissir 5-10 milljón ár aftur í tímann.

Mælt er með eftirfarandi ritum, enda byggir ofangreint mest á þeim:

John Imbrie og Katherine Palmer Imbrie: Ice Ages. Solving the Mystery, Harvard University Press, 1979, 224 s.

Thomas J. Crowley og Gerald R. North: Paleoclimatology. Oxford University Press, 1991, 349 s.

Bók Imbrie-anna hefur til skamms tíma verið fáanleg, þrátt fyrir aldur heldur hún enn vinsældum sínum. Trúlega er erfiðara að ná í hina bókina en 2. útgáfa hlýtur að koma fyrir eða síðar.