

Í HLUTARINS EÐLI

Afmælisrit til heiðurs
Þorbirni Sigurgeirssyni prófessor

Ritstjóri
Þorsteinn I. Sigfússon
Raunvísindastofnun Háskólans



Menningarsíóður

EINAR JÚLIÚSSON

Geimgeislur

Rannsóknir á geimgeislum hafa verið stundaðar í þrjá aldarfjórðunga og hafa leitt til margvíslegra niðurstaðna, bæði um eðli efnisins og kjarnakraftanna, sem og um eðli alheimsins og Vetrarbrautarinnar. Ekki er unnt í stuttri grein að líta á nema lítil, og ef til vill ósamstæð, brot af sögu og viðfangsefni þessara rannsókna, en til að gefa strax í upphafi ákveðna yfirsýn, mætti skipta sögu geimgeislarannsókna í 4 tímabil sem hvert um sig nær yfir tvo áratugi.

Ekki er úr vegi að geta þess hér að nú eru 40 ár síðan Þorbjörn Sigurgeirsson ritaði athyglisverðar greinar um rannsóknir sínar á svokölluðum mýeindum, eins og drepíð verður á síðar.

I. Geislatímabilið, 1910–1930

Skeið þetta hefst með þeim mælingum úr loftbelgjum, sem benda til geislunar utan úr geimnum, og því lýkur með því að óyggjandi sönnur hafa verið færðar á tilvist geimgeisla. Fékk Victor Hess Nóbelsverðlaunin 1936 fyrir uppgötvun sína á þessari geislun. Rannsóknir voru ekki ýkja umfangsmiklar á þessum árum, árlegur fjöldi greina um geimgeisla telst vart í tugum. Mælingar voru að mestu gerðar á jafnsléttu með rafsja sem helsta mælitækið. Rafsja getur þó lítið sagt um eðli þessarar geislunar og t. d. ekkert um það úr hvaða átt hún kemur. Eðli hennar var mönnum því ráðgáta, en ljóst var að hún smaug betur gegnum efni en nokkur önnur þekkt geislun. Helst var álitíð að þetta væri mjög orkurík gammageislun. Um uppruna hennar gátu mælingar lítið sagt, en það hindrar ekki að fram komu margvíslegar tilgátur, eins og t. d. skyndileg umbreyting efnisatóma í orku, og leitað var að orkulínum svarandi til þekktra efna. Undir lok tímabilsins fór að verða ljóst að geislunin minnkaði lítilsháttar eftir því sem nær dró miðbaug. Þetta benti til þess að geislunin væri samsett af hlöðnum eindum, a. m. k. að hluta til.

II. Eindatímabilið 1930–1950

Hér komu til sögunnar ný mælitæki. Geigerteljarar gátu greint einstaka geisla og stilla mátti þeim í röð og samtengja þannig að stefna geislans varð ljós. Í þokuhyllki mátti sjá brautir eindanna, og ljósmyndafilmur mátti nota í

sama tilgangi. Rannsóknir á geimgeislum voru gerðar í vel útbúnum rannsóknarstofum sem komið var fyrir á hæstu fjallstindum. Umfang geimgeisla-rannsókna óx og hundruð greina birtust árlega. Ótal tilgátur komu fram um uppruna geimgeisla, en mælingar gátu þó lítið sýnt annað en að geimgeislunin ætti vart upptök sín í sólinni, eða utan Vetrarbrautarinnar. Þótt mælingar segi fremur lítið um stjarnedlisfræði, segja þær því meira um kjarneðlisfræði. Nýjar óstöðugar eindir finnast í geimgeislum, jáeindir og miðeindir. Það verður ljóst að þessi dularfulla geislun sem smaug í gegnum næstum hvað sem var samanstandur fyrst og fremst af miðeindum og rafeindum. Rannsóknir á miðeindum eru í fararbroddi, en flytjast síðar meira að eindahröðlum. Í lok tímabilsins, árið 1949, fær Japaninn H. Yukawa Nóbelsverðlaunin fyrir að hafa árið 1935 sagt fyrir um tilvist miðeinda.

III. Efniseindatímabilið 1950–1970

Miðeindir eru óstöðugar og geta aðeins skýrt tilvist geimgeisla í andrúmsloftinu. Utan úr geimnum hlýtur að koma annarskonar frumgeislun, sem virðist vera róteindir eða vetniskjarnar. Mælitækni þróast og nú eru mælingar byggðar á rafeindastýrðum mælitækjum, sem send eru upp í háloftin í loftbelgjum, oft risastórum. Þróunin er hröð, árlegan fjölda greina um geimgeisla er ekki lengur hægt að telja í hundruðum. Í byrjun tímabilsins finnast fyrstu merki um þyngri atómkjarna í geimgeislum; í lok tímabilsins er ljóst að efnissamsetning geimgeislanna er ekki mjög frábrugðin samsetningu alheimsins. Rafeindir finnast og orkuróf þeirra sem og kjarnanna er mælt nákvæmlega. Geimgeislar eru efni sem hraðað hefur verið upp í nánast ljóshraða einhversstaðar úti í geimnum. Enn er margt óljóst um uppruna geimgeisla, en mælingar gefa nú upplýsingar um aldur geimgeislanna sem og ástandið í Vetrarbrautinni, efnisþéttleika og segulsvið.

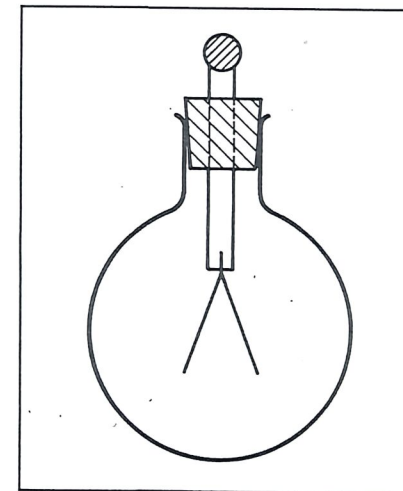
IV. Gammageislatímabilið 1970–1990

Enn heldur þróunin áfram, þó að umfang geimgeisla mælinga hafi sennilega ekki aukist til muna. Mælitæki eru send út í geiminn með eldflaugum og gervitunglum. Kjarnasamsetning geimgeislanna er mjög nákvæmlega mæld, en samsætumælingar (orðið samsæta er hér yfirleitt notað í merkingunni kjarnategund), sem og mælingar á rafsegulgeislun við háa orku, þ. e. röntgengeislum og gammageislum, eru þau svið sem í fararbroddi eru. Hin gamla spurning um uppruna geimgeislanna nálgast sitt fullnaðarsvar, og sjá má með gammageislum uppsprettur háorku geimgeisla í Vetrarbrautinni. Með gammageislum má og skoða innstu miðju Vetrarbrautarinnar og annarra stjörnukerfa, þaðan sem ljós á enga möguleika á að berast okkur.

— — —

1. Uppgötvun geimgeisla

Geislavirkni var uppgötvuð rétt fyrir síðustu aldamót af W. C. Röntgen og H. Becquerel. Eitt það mælitæki sem notað var til að mæla geislavirkni var rafsjá.



Mynd 1. Rafsjá.

Hún mælir rafhleðslu með því að tvö þunn gullblöð hrinda hvort öðru frá sér. Rafsjáin var hlaðin upp og hún afhjóðst í geislavirku umhverfi vegna þess að geislunin jónaði loftið og gerði það leiðandi. Vitað var að þó að engin þekkt geislavirk efni væru í nánd hélst rafsjá ekki endalaust á hleðslunni. Talið var víst að loftið sjálft einangraði betur ef það væri ójónað, og að þetta sýndi því ákveðna jónun loftsins.

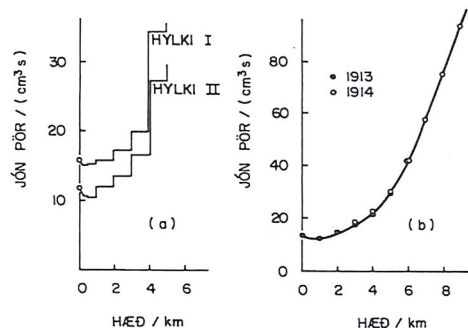
Eðlileg skýring var nú að þetta sýndi lítilsháttar almenna geislavirkni í umhverfinu, og eðlilegt framhald tilrauna því að breyta um umhverfi, rannsaka þessa bakgrunns geislun á sem flestum stöðum. Mælingarnar gáfu ekki mjög skýra niðurstöðu, en geislunin virtist þó vera nokkuð stöðug, bæði á sjó og á landi, á fjöllum og í dölum eða jarðgöngum.

C. T. R. Wilson, sá sem fann upp þokuhylikið, sýndi að jónunin var um 10 jónapör á sekúndu og í réttu hlutfalli við þrýsting. Hann lét þess getið að hann væri að athuga möguleikann á því að þetta gæti verið geislun utan úr geimnum, af sama toga og Röntgengeislun en miklu öflugri. Í þessum tilgangi tók hann rafsjána inn í djúp jarðgöng, en geislunin breyttist ekki mikið og hann gaf því þessa kenningu sína upp á bátinn. Geislunin virtist koma frá því jarðneska umhverfi sem við búum stöðugt við. Fyrstu hugmyndir um geimgeislun komu þannig fram strax um aldamótin, en niðurstaða Wilsons var, þótt óheppileg væri, alls ekki röng. Mest af þeirri geislun sem mælist við yfirborð jarðar stafar frá geislavirkni í umhverfinu fremur en geimgeislun. Hún

ætti þá að minnka ef mælitækjunum væri komið upp í mikla hæð, og mælingar úr Eiffeltorni virtust staðfesta það.

Austurríski eðlisfræðingurinn V. F. Hess var mikill áhugamaður um loftbelgi og hóf því flug upp í háloftin með rafsjá (1912). Hann var ekki fyrstur til að reyna þessa aðferð, en fyrri mælingar höfðu mistekist.

Loks virtust niðurstöður ætla að verða marktækar. Geislunin minnkaði fyrst, eins og búast mætti við ef hún væri af jarðneskum toga, en eftir að komið var upp í u. þ. b. 2 km hæð jókst hún aftur og hafði um það bil þrefaldast í þeirri mestu hæð sem loftbelgur Hess komst upp í, eða 5 km.



Mynd 2. Jónun í andrúmsloftinu, mælingar Hess (a) og Kolhörsters (b).

Árið eftir komst W. Kolhörster (1913) upp í 9 km hæð og geislunin hafði þá tífaldast. Færðar höfðu verið sönnur á tilvist geimgeisla. Ekki ber svo að skilja að þessar niðurstöður hafi strax verið viðurkenndar; áhrifamiklir vísindamenn eins og Millikan töldu þetta vera geislavirk efni sem einhvernveginn hefðu borist upp í háloftin, en að lokum (1936) hlaut Hess Nóbelsverðlaunin fyrir að hafa uppgötvað geimgeisla.

2. Hvað eru geimgeislar?

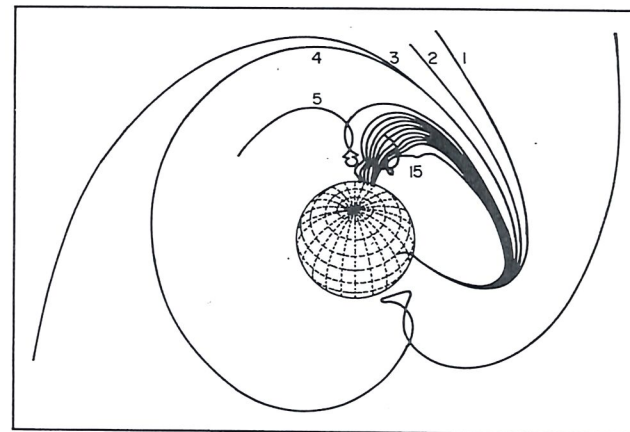
Hærra komust menn ekki næstu 20 árin, en það sýndi sig reyndar seinna að geislunin náði hámarki í ca. 16 km hæð og minnkaði síðan. Hvaðan kom og hvað var þessi geimgeislun?

Fyrir utan Röntgengeislun var þekkt alfa-, beta- og gammageislun. Alfa-geislun samanstendur af helínkjörnum og þeir komast ekki langt gegnum efni, aðeins nokkra cm gegnum jafnvel svo þunnt efni sem andrúmsloftið. Beta-geislar, sem eru rafeindir, komast lengra, en lengst komast gammageislarnir (a. m. k. nokkur hundruð metra í lofti). Það gildi um alla þessa geislun að hún komst því lengra sem orka hennar var meiri. Að vísu ekkert í líkingu við þá geislun sem nú hafði fundist, en sú skýring virtist þrátt fyrir allt nærtækust að geimgeislarnir væru geipiöflugir (orkuríkir) gammageislar.

Það komu þó fram vandkvæði á þessari kenningu, eftir því sem menn komust að fleiru um eðli gammageislunar og geimgeislanna. Háorku gamma-geislun myndaði t. d. rafeindapar þegar hún fór gegnum efni, svo ekki leit út fyrir að hún gæti komist gegnum allt andrúmsloftið.

Norðmaðurinn C. Störmer (1934) hafði lengi unnið að því að útskýra norðurljós og hann hafði reiknað út að hlaðnar eindir ættu greiðari aðgang að jörðinni við pólana en við miðbaug. Einnig varð ljóst af umfangsmiklum mælingum (Clay 1927) að geimgeislunin væri þrátt fyrir allt ekki allstaðar sú sama, heldur aðeins minni við miðbaug en nálægt pólunum.

Munurinn var ekki mikill, en þó vel mælanlegur. Vart er hægt að búast við slíkum mun ef geimgeislarnir eru óhlaðnir, en séu þeir hlaðnir verkar segulsvið jarðar á þá og sveigir brautina svo að þeir komast ekki inn að jörðinni við miðbaug. Þetta er sýnt á mynd 3. Sé neikvæðri eind skotið frá jörðu við miðbaug þá mun segulsviðið, sem hér stefnir út úr myndinni að norðurpól, sveigja braut hennar til austurs, og í hálfhring svo hún rekst á jörðina aftur.



Mynd 3. Braut geimgeisla í segulsviði jarðar við mismunandi orku.

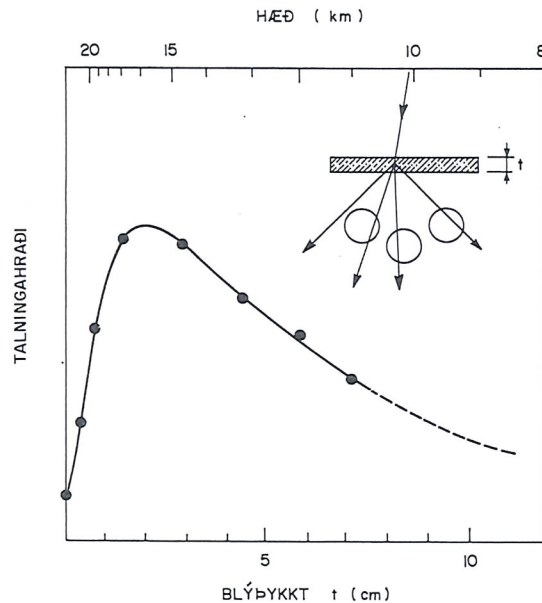
Nú er vandamálið að vísu ekki hvort geimgeislar komast frá jörðu, heldur hvort þeir komast til hennar, en við sjáum að ef eindir af neikvæðri hleðslu komast ekki frá jörðinni, komast geimgeislar af jákvæðri hleðslu heldur ekki til hennar, nema þeir hafi svo háa orku (brautir 1–4) að hringbraut þeirra í segulsviði jarðar sé stærri en sjálf jörðin. Við sjáum einnig í hendi okkar að það verða ekki jafnmargir geimgeislar sem koma frá austri og frá vestri, en rafsjáin er ófullkomið mælitæki og segir ekkert til um stefnu geimgeislanna. Úr þessu rættist, menn tóku í notkun Geiger-teljara (Geiger og Muller 1928) til að nema geislunina. Þeir voru mun næmari en rafsjáin og gátu greint einstaka geisla. Nota mátti (útvarps)lampa til að telja geislana (Ambrosen, Nielsen og Sigurgeirsson 1942) og setja mátti saman 2 eða fleiri Geiger-nema til að telja aðeins geisla í ákveðna stefnu. Þá þurfti að hanna rafeindarás þannig að sæist hvenær tveir eða fleiri teljarar teldu í einu. Fékk Þjóðverjinn Bothe Nóbelsverðlaunin 1954 fyrir að hanna (frumstæða) slíka rás, en annars var hún fullkomnuð af Ítalanum Bruno Rossi (1930), og í Róm urðu menn leiðandi í geimgeislarannsóknunum. Með tveimur teljurum mátti finna stefnu geislanna og sjá að þeir kæmu oftast lóðrétt niður, þ. e. utan úr geimnum.

Með þremur teljurum mátti finna hvernig brautin sveigði í segulsviði í þeim tilgangi að finna hleðslu og orku eindanna, eða það mátti nota teljarana til að kveikja á gufuhylki á réttu augnabliki til að athuga nánar brautirnar. Það varð ljóst að þessir geimgeislur væru ekki gammageislur heldur betageislur eða rafeindir, a. m. k. að hluta.

Loks hafði fengist haldbær vitneskja um það hvað geimgeislur eru og nýtt tímabil í sögu geimgeislarannsókna var að taka við. En hvernig í ósköpunum gátu þessar rafeindir komist gegnum allt gufuhvolfið og af hverju náði geislunin hámarki í 15 km hæð eins og fyrr sagði?

3. Frumgeislun, síðgeislun, geislaskúr

Það sást líka að þrír teljarar, sem ekki voru í beinni röð, áttu til að telja stundum allir í einu. Ljóst var að geislarnir komu oft margir saman. Rossi setti upp tilraun eins og sýnd er á mynd 4, þannig að sett var blýplata ofan við teljarana.



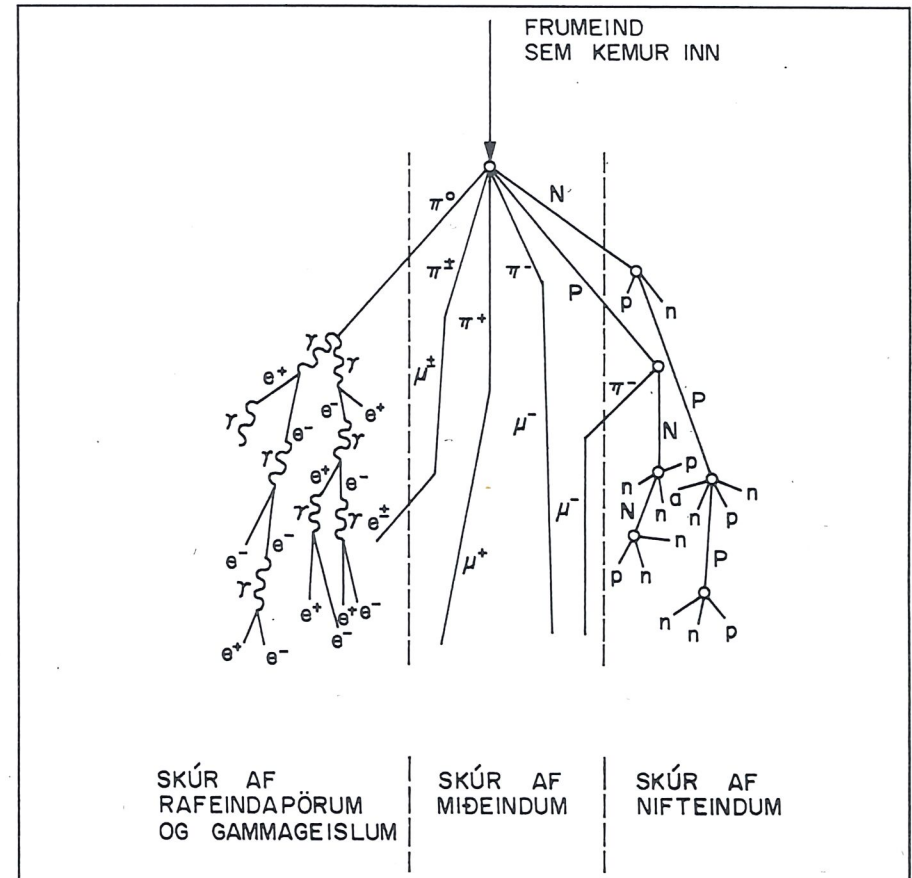
Mynd 4. Tilraun Rossi. Geislun undir blýplötu eða lofthjúpi.

Geislum fækkaði ekki heldur fjölgaði þeim, a. m. k. upp að vissu marki. Ljóst var að þessir „geim“geislur komu frá blýinu og ekki frá geimnum.

Myndin sýnir einnig nokkuð vel hvernig geimgeislun í andrúmsloftinu vex með vaxandi dýpi, þ. e. þrýstingi í því, og nær hámarki í um 16 km hæð við um 100 mm Hg þrýsting. Í raun sýnir mynd 4 því það sama og mynd 2. Myndin af geimgeislunum tók nú að skýrast. Það sem sást hér á jörðinni var ekki upprunalega geislunin, heldur það sem kalla mætti síðgerða geislun, sem myndaðist í andrúmsloftinu þegar frumgeislunin féll á það. Rafeindir við

mjög háa orku eru nokkuð seigar að komast gegnum mikið efnismagn. Þær hægja á sér, hemla, þegar þær lenda á efninu. Við það senda þær út hemlunargeislun, tvær gammaeindir. Þessir gammageislur komast heldur ekki ótakmarkað, en hver þeirra getur breyst í rafeindapar, jáeind og neieind, og leikurinn heldur áfram, rafeindunum fjölgar. Hámarki nær geislunin í 16 km hæð, eins og fyrr sagði, en ef frumgeislinn var af nægilegri orku gæti þessi rafeindaskúr teygst sig alla leið niður að yfirborði jarðar og dunið þar yfir jafnvel fleiri ferkílómetra svæði.

Geislunin var heldur minni frá austri en vestri, og því varð ljóst að frumgeislunin mundi vera jákvæð, þ. e. ekki rafeindir heldur öllu fremur róteindir eða prótónur. Myndin sýnir yfirlit um það sem gerist þegar þessar gífurlega orkumiklu róteindir lenda á andrúmsloftinu. Þær óstöðugu eindir er hér koma við sögu voru lítt eða ekki þekktar á þessum tíma og við lítum nánar á það í næstu köflum, hvað hér er að gerast.



Mynd 5. Geislaskúr í andrúmsloftinu.

4. Óstöðugar eindir í geimgeislum, mýeindir

Árekstur róteindarinnar við atómkjarna í háloftunum splundrar kjarnanum og getur vel verið nægilega öflugur til að skapa nýjar eindir. Mjög margar af þeim óstöðugu eindum sem við þekkjum, sem þætti efnisins, hafa einmitt fundist í geimgeislum, og þær halda áfram að finnast þar þó að miðstöð öreindafræðanna hafi að vísu færst frá geimgeislum yfir til hinna stóru öreindahraðla. Þar eru öflugir eindageislar til að gera tilraunir með, en orkan er þó hvergi nærri sú sem hún hæst getur orðið í geimgeislum.

Pannig fundust árið 1933 jákvæðar rafeindir eða jáeindir í geimgeislum (Anderson 1933). Jáeindirnar eru stöðugar einar sér í lofttæmi, en er þær stöðvast í efni sameinast þær venjulegum neikvæðum rafeindum og breytast í tvo gammakvanta eða gammaeindir. Árið 1937 fundust einnig miðeindir, eða mesónur, í geimgeislum (Anderson og Neddermeyer 1937). Fékk Anderson Nóbelsverðlaunin 1936 (með Hess) fyrir uppgötvun jáeindanna. Fundur miðeindanna vakti mikla athygli því að tveimur árum áður hafði japanski eðlisfræðingurinn Yukawa sett fram þá kenningu að líkt og skýra mætti rafkrafta með því að hlöðnu eindirnar skiptust á massalausum kvöntum, þ. e. fótónum eða ljóseindum, mætti skýra kjarnakraftana með því að kjarn eindirnar skiptust á eindum 200 sinnum massameiri en rafeindin. Þessar eindir hafa neikvæða orku, þ. e. þær eru bundnar við kjarneindirnar og geta ekki losnað við venjulegar kjarnaumbreytingar. Við harða árekstra kjarn einda gætu þær þó fengið nægilega orku til að sleppa lausar. Miðeindirnar sem fundust og eru nú kallaðar μ -mesónur eða mýeindir voru einmitt 210 sinnum massameiri en rafeindin, rétt eins og Yukawa hafði spáð. Samt passaði kenningin ekki vel, miðeindir geimgeislanna höfðu ekki alla þá eiginleika sem til þurfti. Þær virtust ekki bindast kjörnunum sérlega sterkt, en hegðuðu sér fremur eins og þungar rafeindir. Árið 1947 var það orðið ljóst að geimgeislamiðeindin eða mýeindin gat ekki verið sú kjarnamiðeind sem Yukawa hafði sagt fyrir um. En þá fannst önnur ögn, π -miðeindin eða píeindin (Lattes, Occhialini og Powell 1947). Hafði hún alla þá eiginleika er búist var við, þó að massinn væri að vísu nokkru hærri en spáð hafði verið eða nálægt 280 rafeindamössum. Pannig var þá komið sögu tæpum 4 áratugum eftir uppgötvun geimgeislanna. Frjósömu tímabili geimgeislarannsókna var að ljúka og fékk Yukawa Nóbelsverðlaunin árið 1949. Það sama ár skrifaði Þorbjörn Sigurgeirsson (1949) grein um geimgeisla í tímarit Verkfræðingafélags Íslands. Sú grein sem eflaust er fyrsta vísindalega grein sem birst hefur um geimgeisla á íslensku er öllum aðgengileg og full ástæða til að mæla með henni. Er hún mun ítarlegri um sögu geimgeislarannsókna fyrstu 4 áratugina en hér er rakið. Við skulum gefa Þorbirni orðið um þær mælingar er sýndu fram á að mýeindin var ekki sú eind er fyrst var álitð.

„Eftir því sem menn kynntust meira hátterni geimgeisla-mesónanna kom það betur og betur í ljós, að þær gátu ekki verið hin

þungu kvöntu, sem héldu kjörnunum saman. Eitt af gleggstu dæmunum er hegðun mesónanna, þegar þær stöðvast í léttum efnum. Pósitívar mesónur komast ekki nálægt atómkjörnunum vegna hinna fráhrindandi rafkrafta. Þær dvelja því í efninu þangað til þær, samkvæmt eðli sínu, senda frá sér pósitívar elektrónur og hverfa. Negatívu mesónurnar dragast aftur á móti að atómkjörnunum, og ef ekki væru aðrir kraftar en rafkraftarnir á milli þeirra og kjarnanna, mundu þær ganga um kjarnana svipað og elektrónurnar í atómunum [en miklu nær kjarnanum] þangað til ævi þeirra væri lokið. En samkvæmt mesónukenningunni ætti að vera mjög sterkt aðdráttarafi á milli mesónanna og kjarnans, svo að mesónurnar soguðust inn í kjarnann á tíma, sem væri mjög stuttur miðað við hina eðlilegu meðalævi mesónanna. Þetta er líka það, sem oftast nær gerist. Mesónurnar sogast inn í kjarnana áður en þær fá tíma til þess að senda frá sér elektrónu. Ef um mjög léttu atómkjarna er að ræða, haga geimgeisla-mesónurnar sér þó öðruvísi; þær sogast ekki inn í þessa kjarna, heldur fá þær tíma til þess að senda frá sér elektrónur, en það er í algerri mótsögn við niðurstöður mesónukenningarinnar.“

Við hina greinargóðu lýsingu Þorbjörns er aðeins því að bæta, sem Þorbjörn minnst ekki á: hver hafi gert þær mælingar sem sýndu svo ótvírætt að mýeindirnar gátu ekki verið þeir kvantar sem kjarnakraftana mynda. Þessum mælingum hafði Þorbjörn stungið upp á og framkvæmt með samstarfsmönnum sínum við Princeton háskóla (Sigurgeirsson og Yamakawa 1947, 1949). Ýmsir aðrir gerðu svipaðar tilraunir um líkt leyti eða rétt á eftir. Í Róm létu menn t. d. hér ekki sitt eftir liggja, og tókst (Conversi et al. 1947) að greina mýeindirnar bæði eftir hleðslu og orku á merkilega einfaldan hátt, áður en þær voru látnar sogast inn í kjarnana.

6. Píeindir og geimgeislar við mjög háa orku

Píeindirnar geta verið jákvæðar eða neikvæðar eða þá óhlaðnar. Þær óhlöðnu hafa mjög stuttan lífstíma og klofna strax í tvo gammageisla. Þessir gammageislar mynda síðan rafeinda- og gammageislaskriðu sem gæti náð niður til jarðar eins og við höfum séð. Þetta er oft kallað hinn mjúki, eða rafeindahluti, geimgeislanna. Hlöðnu píeindirnar lifa heldur lengur, en þó mjög stutt og komast ekki langt fyrr en þær breytast í mýeind og fiseind. Ekkert stöðvar fiseindina, hún fer til jarðar og beint í gegnum hana, svo vart er ástæða til að telja fiseindirnar með þegar talað er um eindir geimgeislanna.

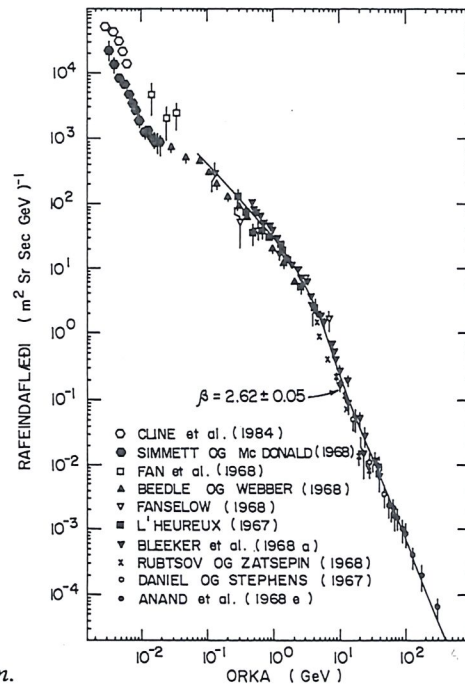
Mýeindirnar víxlverka lítt við kjarna fremur en rafeindir og þar sem þær eru svo miklu þyngri en rafeindir, senda þær ekki út teljandi hemlunargeislun. Þær komast því alla leið til jarðar og kallast oft harði hluti geimgeislanna því þær fara nokkuð auðveldlega gegnum efni, finnast jafnvel fleiri kílómetra undir yfirborði jarðar. Þær eru algengasti hluti geimgeislanna hér við yfirborð jarðar, en þeir geimgeislar sem rekast á okkur eru fyrst og

fremst mýeindir. Mýeindin er óstöðug og verður að rafeind og fiseind eftir u. þ. b. 2 mikrósekúndur, en sá tími nægir henni til að komast til jarðar því að ævi hefnar lengist við hraðann sem á henni er.

Þriðji hlutinn eru kjarneindir. Upphaflegi geimgeislinn, róteindin, kemst ekki langt fyrr en hún rekst á kjarna í andrúmsloftinu og splundrar honum, og breytir ef til vill mestum hluta orku sinnar í píeindir. Hún getur þó enn haft talsvert mikla orku og haldið áfram uns hún rekst á næsta kjarna í andrúmsloftinu. Kjarneindabrot fyrri loftkjarnans halda einnig áfram og kljúfa fleiri kjarna. Það myndast því skriða kjarneinda og hún getur náð a. m. k. langleiðina til jarðar, sérstaklega nifteindirnar.

Til að það nái yfir höfuð eitthvað til jarðar verður orka upphaflega geimgeislans að vera mikil, 100 GeV eða svo, þ. e. hundraðföld kyrrstöðuorka róteindarinnar. Orkan þarf þó að vera 100 sinnum meiri enn, til að á jörðina falli greinilegur og auðmælanlegur geislaskúr, fleiri eindir á fermetra, yfir fleiri þúsund fermetra svæði. Þær orkuríkustu eindir sem fundist hafa eru um og yfir 10^{20} eV, þ. e. fleiri Ws að orku. Það fellur minna en ein slík eind á ferkílómetra á ári, en skúrin er fleiri ferkílómetrar svo við getum fundið þessar eindir og mælt orku þeirra í teljurum sem dreift er um fleiri ferkílómetra svæði. Þannig finnast geimgeislur með gífurlega háa orku, en þeir eru sjaldgæfir.

Orkurófið er bratt en nokkuð beint veldisfall með rófvísi ca. -3.0 . Fjöldi geimgeisla á orkubili, $\Delta N/\Delta E$, fellur því með orkunni í þriðja veldi.



Mynd 6. Orkuróf rafeinda í geimgeislum.

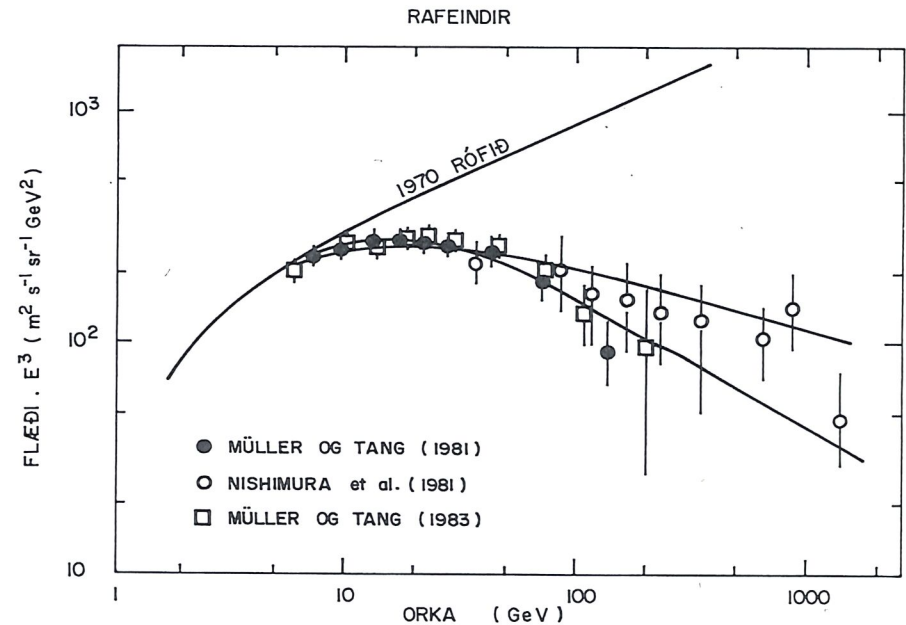
Orkuríkustu róteindirnar ættu ekki að sveigja mikið í segulsviði Vetrarbrautarinnar og því er vonast eftir að finna stefnuhneigð (anísótropíu) fyrir orkumestu geimgeislana. Við þekkjum stefnu þeirra, en stefnuhneigðin er lítil og það er ekki greinilegt að þeir komi frá Vetrarbrautarplaninu. Því halda margir að þessar allra orkuríkustu eindir komi frá uppsprettum utan Vetrarbrautarinnar.

Hvort þetta eru róteindir vita menn ekki glögg. Það er vel mögulegt að þetta séu járnkjarnar (Júlíusson 1975), en geimgeislarnir eru ekki aðeins róteindir heldur einnig þyngri efniskjarnar, og samsetning þessa geimgeislaefnis er fremur lík efnissamsetningu alheimsins að öðru leyti, eins og rætt verður nánar síðar.

7. Rafeindir í geimgeislum. Sólararmótun

Efnið samanstendur einnig af rafeindum en þær fundust ekki í geimgeislum fyrr en eftir 1960. (Meyer og Vogt 1961). Þær eru talsvert sjaldgæfari en róteindir ef miðað er við ákveðna orku, en orkuróf þeirra er svipað og róteindanna, veldisfall með rófvísi ca. -2.7 . (Mynd 6.)

Allar mælingarnar á myndinni voru gerðar á aðeins tveimur árum milli 1967 og 1968 og nýrri mælingar hafa yfirleitt sýnt talsvert minna af rafeindum við háa orku, eins og mynd 7 sýnir. Rafeindir tapa orku í árekstrum við segulsvið og ljóseindir Vetrarbrautarinnar. Við ákveðna háa orku er þetta orkutap meira en tap vegna leka út úr Vetrarbrautinni sem veldur því að



Mynd 7. Orkurófið margfaldað með orkunni í þriðja veldi.

orkurófið verður brattara ofan við það orkugildi. Þó að erfitt sé að segja til um það hvernig orkuróf kemur frá uppsprettum rafeindanna, liggur nærri að túlka nýjustu niðurstöður (Müller og Tang 1983) svo, að orkutapið og lekatapið sé sambærilegt við ca. 10 GeV, en það svarar til þess að dvalartími rafeindanna í Vetrarbrautinni sé nokkrar milljónir ára.

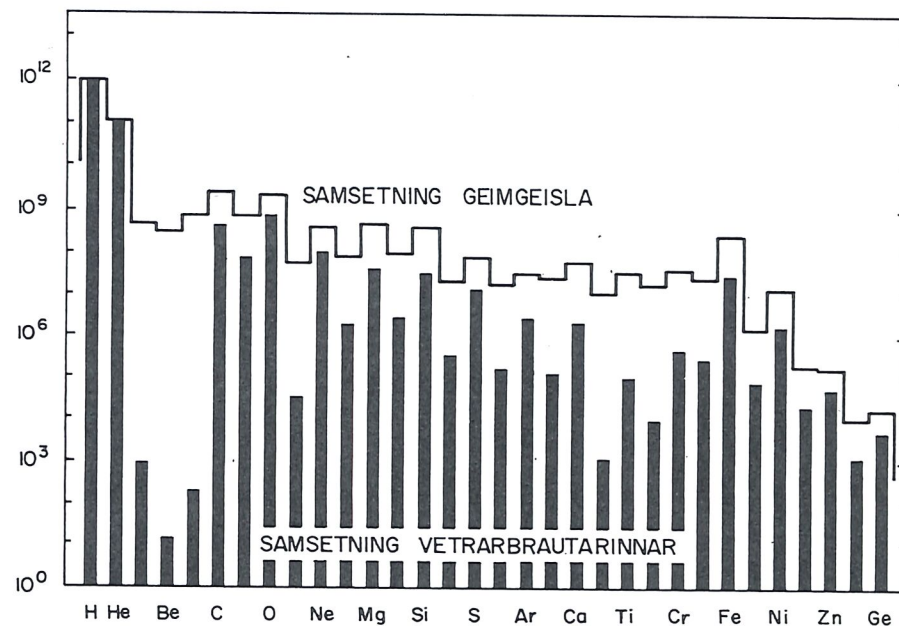
Orkurófið verður flatara er orkan lækkar, og stafar það af því að minna er um lágorku-geimgeisla í sólkerfinu en í Vetrarbrautinni almennt. Þessu veldur sólarmótunin; sólin hindrar lágorku-geislunina, rafeindir og róteindir, að komast inn í sólkerfið. Heit kóróna sólarinnar gufar stöðugt upp og streymir hratt frá henni í formi sólurvinds (Parker 1958). Þó að efni sólurvindsins sé þynnra en það besta lofttæmi sem fá má á jörðinni, þá er það jónað og hlaðnar eindirnar hrífa með sér segulsvið sólarinnar. Þessi segulsviðsvindur hrífur aftur með sér geimgeislana því hlaðnar eindir í segulsviði eru bundnar af því og neyddar til að hringa sig eftir segullínunum. Sólarmótunin er breytileg; hún er meiri þegar sólblettir eru í hámarki, og sé grannt skoðað má sjá áhrif einstakra sólgoða.

8. Kjarnasamsetning geimgeisla

Geimgeislar má segja að séu efni, eða efniseindir, sem ferðast um Vetrarbrautina með ljóshraða, eða því sem næst. Ólíklegt er að efninu haldist á rafeindum sínum við þá miklu hröðun sem það hefur fengið, og þótt svo væri, þá er það efni sem geimgeislarnir fara um, þótt þunnt sé, nægilegt til að slíta rafeindirnar frá atómunum. Geimgeislarnir eru því ekki atóm heldur aðeins atómkjarnar. Við skulum líta aðeins betur á samsetningu þessa efnis.

Aðalefnið í alheiminum er vetni og geimgeislarnir samanstanda einnig aðallega af vetniskjörnum eða róteindum. Nú má búast við því að í geimgeislunum séu einnig kjarnar þyngri efna. Það er þó ekki fyrr en 1948 sem örugg merki um þyngri efni finnast (Freier et al. 1948), sérstaklega helín, sem er um 5 prósent af magni vetnisins (þ. e. ef miðað er við fjölda kjarna, sem þýðir þá um 20% miðað við þunga). Þetta er í samræmi við samsetningu efnisins í alheiminum, en ef við höldum áfram upp hleðslustigann verða næst fyrir okkur 3 efni, litín, beryllín og bór, sem öll eru afar sjaldgæf í alheiminum. Magn þeirra er minna en einn milljarðasti hluti heildarefnismagnsins, eins og sést á mynd 8 (Lund 1986), sem og mynd 18.

Fyrir utan vetni og helín eru kolefni og súrefni algengustu efnin í alheiminum. Það er vart fyrr en eftir 1960 sem menn hafa mælt þessi efni í geimgeislum af einhverri nákvæmni. Magn þeirra er eitthvað nálægt 5% af helínmagninu, miðað við fjölda kjarna. Af þyngri efnum er járn með hleðsluna 26 algengast. Mælingar á kjarnasamsetningu voru yfirleitt gerðar með ljósmyndafilmum sendum upp í háloftin í loftbelgjum. Geimkjarnarnir mynda spor í filmuna þegar þeir fara þar í gegn og af þykkt sporsins má ráða um hleðslu geimgeislans. Þó filmurnar komist ekki út fyrir gufuhvolfið, geta þær komist út fyrir meira en 99% þess. Áhrif þess verða þá ekki svo mikil að ekki sé hægt að leiðrétta fyrir þeim án þess að það verði aðalskekkjuvaldurinn.



Mynd 8. Efnissamsetning alheims og geimgeisla.

Um og eftir 1960 fer að komast skriður á þessar rannsóknir. Fyrstu gervitunglin eru send út í geiminn með nákvæm rafeindastýrð mælitæki innanborðs og geimferðastofnun Bandaríkjanna, NASA, hefur nóg fé til að setja í rannsóknir á öllu því sem viðkemur geimnum. Stór mælitæki eru send upp í háloftin í risastórum loftbelgjum. Stærð þeirra er mæld í hundruðum þúsunda rúmmetra.

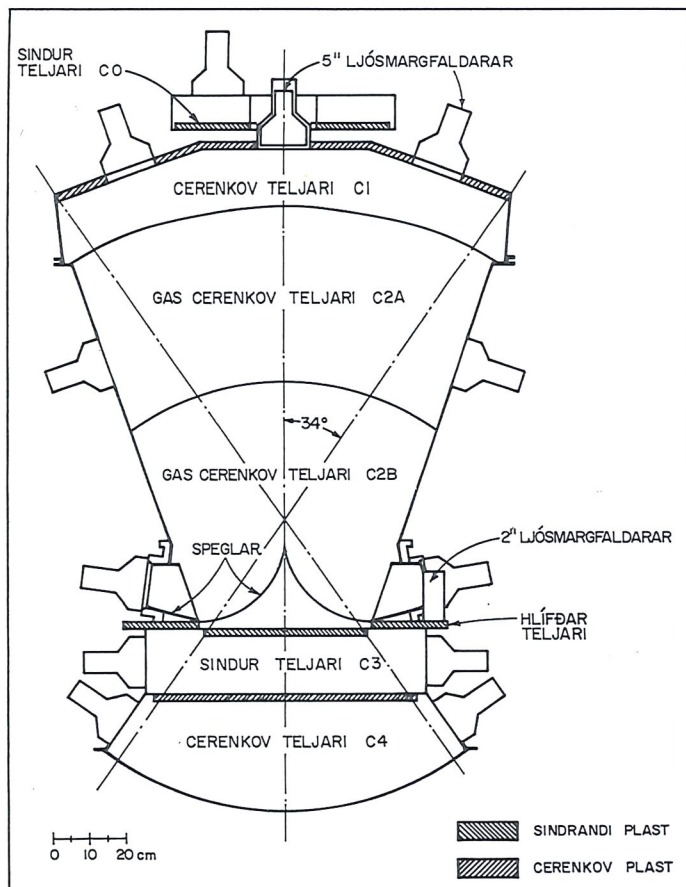
9. Kjarnasamsetning við háa orku. HEN

Hér verður lýst nánar einu slíku mælitæki. Við köllum það HEN eða high energy nuclei, og það er sérstaklega hannað til að mæla kjarnasamsetninguna með meiri nákvæmni og við hærri orku en áður hafði tekist. Það er samsett úr þunnum sindurteljurum og Cerenkov-teljurum, en þeir eiga það sammerkt að gefa frá sér ljósmerki þegar hlaðin eind fer í gegnum þá.

Ljósmerkið stendur í hlutfalli við hleðsluna í öðru veldi, en það er einnig háð hraðanum. Hér hegða þessir teljarar sér á ólíkan hátt. Í Cerenkov-teljaranum minnkar ljósið þegar orka eindarinnar minnkar, og hverfur alveg ef hún hefur ekki hraða sem svarar ljóshraða í efninu.

Cerenkov-ljósið er mjög dauft, en með því að hafa marga stóra ljósnema (ljósmargfaldara) og sem allra hvítast box utan um teljarann, sem er úr plasti, má ná í meirihlutann af þeim fótónum sem myndast og greina merkið. Sindurljósið er miklu öflugra og auðmælanlegra. Hér eykst ljósið ef orka

Mynd 9. HEN
(High Energy
Nuclei)-mæli-
tækið.



eindarinnar minnkar og því má með samsetningu þessara tveggja ólíku teljara greina bæði hleðslu og orku (hraða) í einu. (Mynd 10.)

Mælitækið, þ. e. teljararnir og allur sá rafeindabúnaður sem þarf til að greina og meðhöndla merkin frá teljurunum, er sett í loftþétt hylki, bætt við rafhlöðum til að knýja það og segulbandstækjum til að geyma upplýsingarnar.

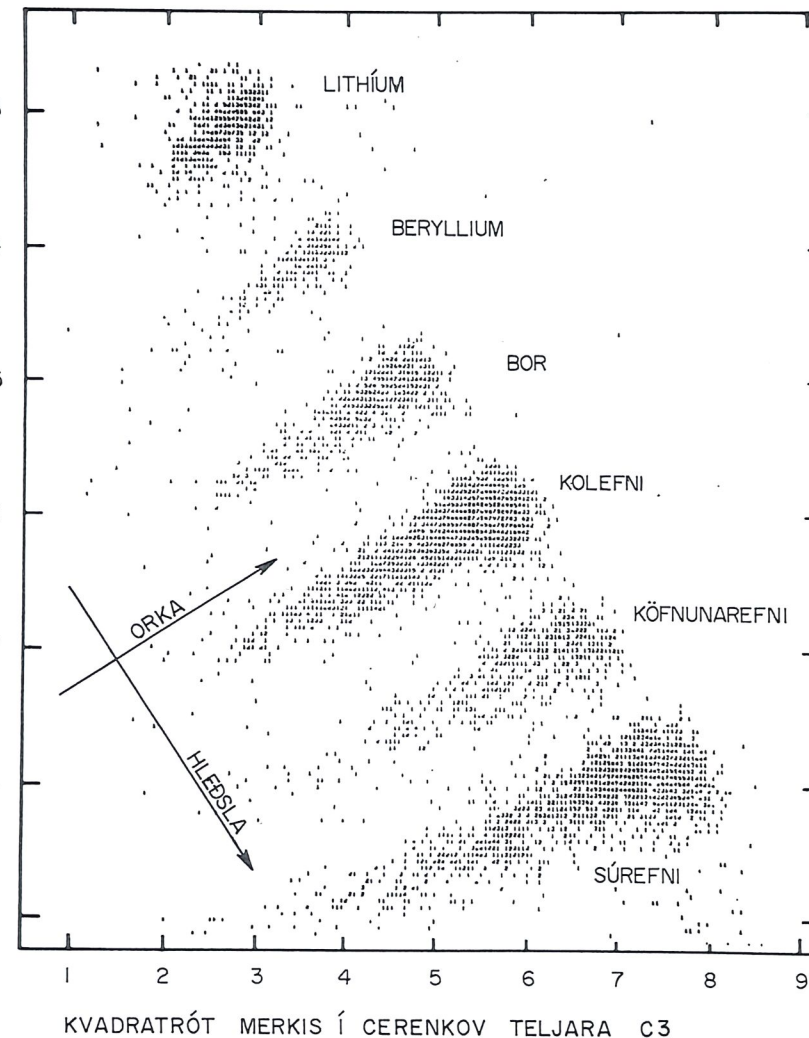
Hylkið er síðan sent upp í háloftin, þ. e. í u. þ. b. 40 km hæð í loftbelg sem er um hálf milljón rúmmetra, eða um 100 metra í þvermál.

Lítum á upplýsingarnar sem frá þessu mælitæki koma, og berum fyrst saman merkin frá sindur- og Cerenkovteljurunum. (Mynd 10.)

Hér sjást hleðslurnar aðskildar, og orkan vex með vaxandi Cerenkov-merki sem sett er á X-ásinn. Við getum því aðskilið hleðslurnar og mælt orku þeirra af mikilli nákvæmni. Að minnsta kosti ef hún er fremur lág, en merkin mettast og megnið af eindunum gefur því um það bil sama Cerenkov-merkið.

Þetta tæki var reyndar sérhannað til að mæla mjög háa orku og innihélt því

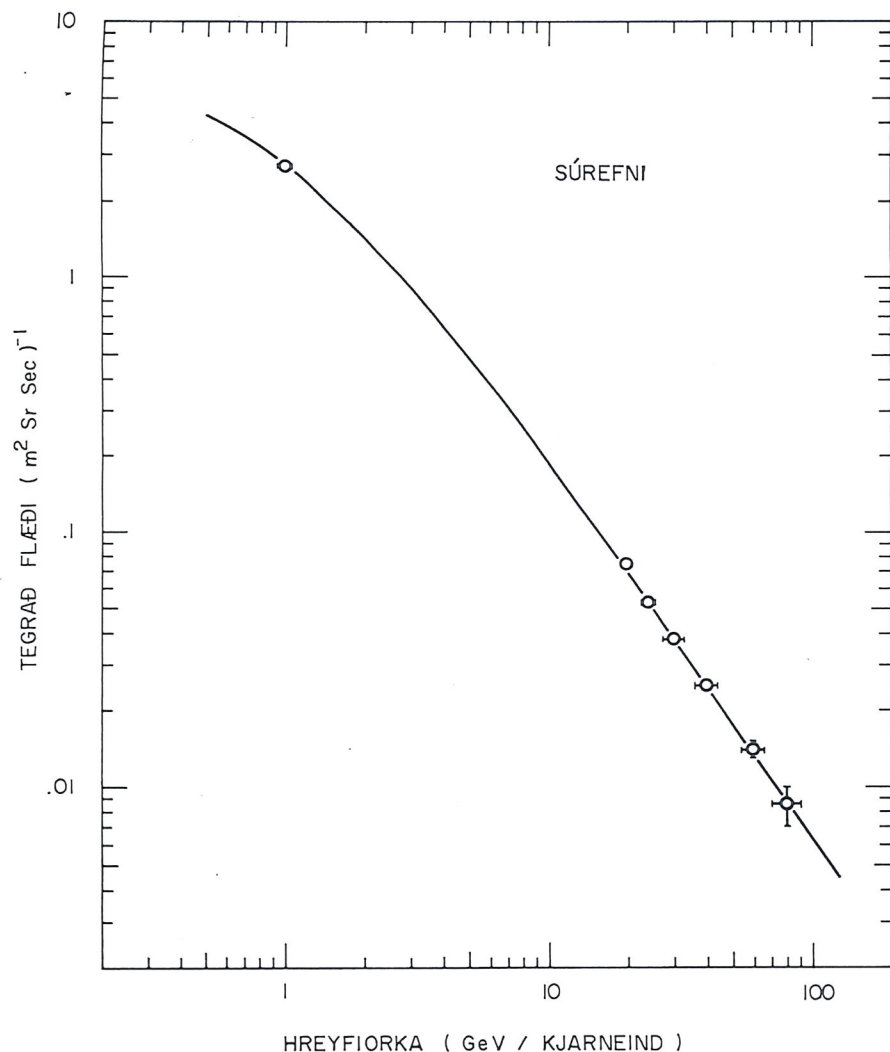
MEDALTAL KVADRATRÓTAR AF LÍNUGERÐRI STÆRÐ MERKIS Í SINDURTELJURUM C1 OG C4



Mynd 10. HEN. Hluti frumgagna.

gas-Cerenkov-teljara, en eindin þarf þá að hafa mikla orku til að gefa merki í þeim, því brotstuðullinn er nær einum og ljósbraðinn til muna meiri í gasi en föstum efnum. Niðurstaðan er sú að eindum fækkar hratt eftir því sem orkan er meiri. Orkurófið er veldisfall, veldisvísirinn nálægt -2.6 .

Hér er einungis sýnt orkurófið fyrir súrefnið (Júlíusson 1974), en orkuróf annarra efna er svipað. Ef efnissamsetningin breytist ekki með orkunni, þá verður orkuróf annarra efna nákvæmlega eins.



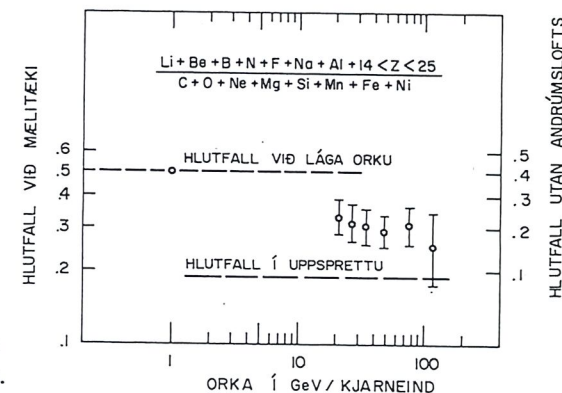
Mynd 11. Orkuróf súrefnis í geimgeislum.

En það sýnir sig nú að samsetningin er háð orkunni. Við höfum nefnt það að léttu efnin Li, Be og B eru mjög sjaldgæf í náttúrunni en þau finnast í talsverðu magni í geimgeislum. Ástæðan er sú að þyngri geimkjarnar eins og kolefni og súrefni hafa brotnað upp í þessi léttari efni í árekstrum við efnið milli stjarnanna.

Þar er ekki mikið efni, en geimgeislar eru lengi á sveimi fram og aftur um Vetrarbrautina, þar sem óreglulegt segulsvið hennar sveigir braut þeirra og tvístrar þeim fram og aftur. Þegar þeir loksins koma til jarðarinnar hafa þeir farið í gegnum nokkur grömm/cm² af efni (vetni) og það hefur orsakað þessar

breytingar á samsetningu þeirra. Léttu efnin eru þannig ekki upprunaleg í geimgeislunum, þ. e. komin frá uppsprettunum, heldur eru sem við segjum síðgerð, hafa myndast við splundrun geimkjarnanna á leið sinni í Vetrarbrautinni. Jafnvel hluti af algengari efnum eins og kolefni hafa orðið til við það að þyngri efni eins og súrefni hafa misst nokkrar af kjarneindum sínum, og við getum auðvitað aldrei sagt til um hvort tiltekinn geimkjarni er síðgerður eða upprunalegur.

Mynd 12. Hlutfall frumgerðra og síðgerðra efna í geimgeislum.



Ef við hinsvegar lítum á þau efni sem eru að mestu leyti síðgerð og berum saman við þau efni sem eru að mestu leyti upprunaleg þá sjáum við mun þar á. Síðgerðari efnunum fækkar eftir því sem orkan eykst (Júlíusson, Meyer og Müller 1972). Geimgeislarnir hafa farið gegnum stöðugt minna og minna efni eftir því sem orka þeirra eykst.

Þetta voru óvæntar niðurstöður, en ekki óeðlilegar; eftir því sem orkan eykst hefur segulsvið Vetrarbrautarinnar minni áhrif á geimgeislann og hann sleppur hraðar út úr henni.

11. Samsætusamsetning geimgeisla. HEAO-C geimathugunarstöðin

HEN-mælingarnar voru frá 1970–1974 og þróunin heldur áfram. Árið 1979 var sent upp gervitungl HEAO-C, hið þriðja og síðasta í röð HEAO-gervitungla, en stafirnir standa fyrir „High Energy Astrophysical Observatory“. Fyrri tækin í þessari tækjaröð voru notuð til Röntgengeislaathugana á himin-geimnum, en í HEAO-C var eitt mælitæki til gammageislaathugana, eitt sem leitaði að efnum þyngri en járn, og eitt til mælinga á kjarna- og samsætusamsetningu léttari efna.

Það er þetta síðastnefnda mælitæki til að mæla kjarnasamsetningu geimgeislanna sem ætlunin er að fjalla nánar um. Mælitækið er að mörgu leyti svipað hinu fyrra. Í því eru eingöngu Cerenkov-teljarar, en þar eð þeir hafa mismunandi brotstuðul má aðskilja hleðslu og orku. Þarna eru ekki gas-Cerenkov-teljarar, þannig að hámarksorkan sem mælanleg er er talsvert

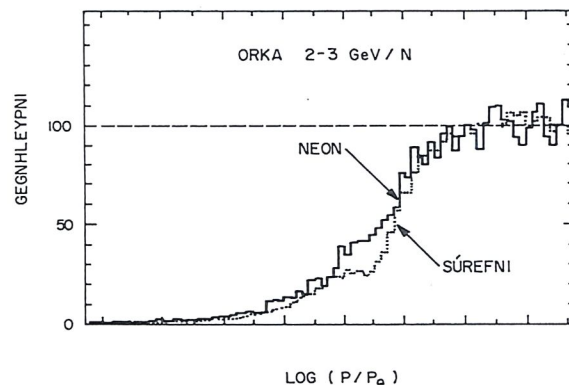
lægri en HEN-tækið mælir, en í því eru teljarar úr sérkennilegu efni, „aerogel“, sem er afar létt í sér, svipað og frauðplast t. d. en (nokkurnveginn) glært.

Þó að segja megi að þetta sé eins og frauðplast blanda af efni (kvarts) og lofti þá eru einstakur loft- eða kvartsbólur í efninu miklu minni en bylgju-lengd ljóss og þetta hegðar sér því eins og einsleitt (hómógent) fast efni, en með brotstuðul sem liggur á milli brotstuðla gasa og vökvá. Hér eru einnig bakkar með glerrörum í rafsviði, sem lýsa upp og gefa rafmerki þegar eindin fer í gegn og því má finna allnákvæmlega braut eindarinnar. Brautarupplýsingarnar má nota til að leiðrétta svörun nemanna.

Það sem er nýtt hérna er þó einkum að stefna eindarinnar miðað við jörðina er þekkt. Geimgeislar koma úr öllum áttum og stefna þeirra nú segir ekkert um stefnuna í uppsprettur þeirra. Það sem er mikilvægast hér er hegðun segulsviðs jarðarinnar sem segja má að verki eins og sía sem hleypir aðeins inn geimgeislum ef skriðþungi þeirra er fyrir ofan eitthvert ákveðið gildi, sem háð er staðsetningu á jörðinni og stefnunni sem geimgeislinn kemur úr.

Til að finna markgildi þessarar síu þarf nú að reikna út brautina fyrir öll möguleg orkugildi og fyrir hvern einstakan geimgeisla, og mynd 3 hér að framan er dæmi um þessa reikninga. (Koch 1981.) Hér er reiknað afturábak, ef eind kemst eftir ákveðinni braut frá jörðinni, komast eindir á sömu braut með öfugt formerki einnig til hennar. Ef orkan er mikil (brautir 1 til 3) sleppa eindirnar auðveldlega út, ef orkan er lítil rekast þær beint í jörðina aftur; en annars er þetta talsvert flókið að reikna út eins og mynd 3 gefur hugmynd um. Finnst á endanum sá lágmarksskriðþungi sem eindirnar þurfa að hafa til að komast til jarðar eftir mældri stefnu geimgeislans. Segja má þá að segulsviðið megi þannig nota til að mæla skriðþungann.

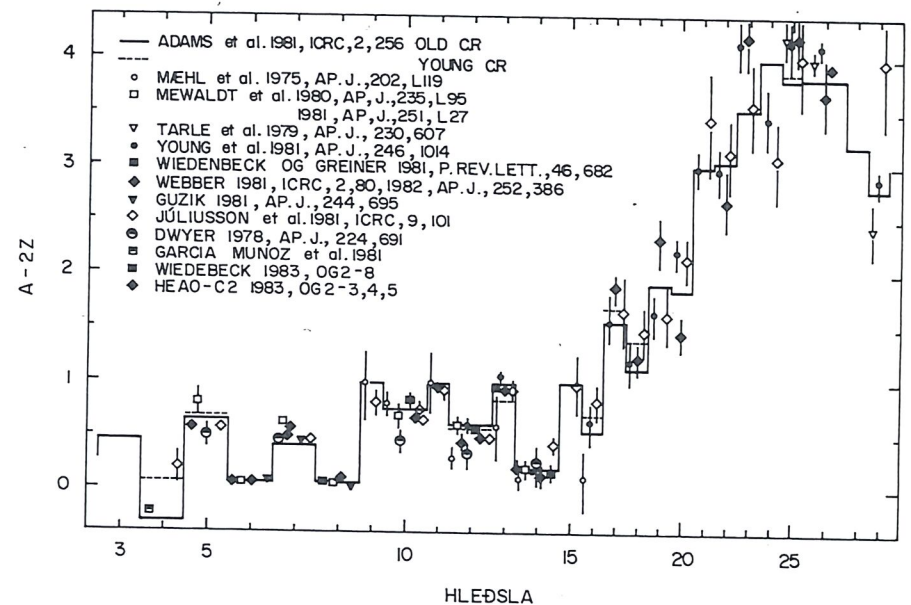
Að vísu gefur það okkur einungis lágmarksgildi fyrir skriðþungann á hverri einstakri ögn. Ef við finnum t. d. að á stað og við stefnu þar sem segulsvið jarðarinnar sker af við skriðþungann p° að geimgeislarnir hafi allir hraða sem er meiri en v° , þá getum við sagt að meðalmassi sé p°/v° , þ. e. klassískt



Mynd 13. Fundinn meðal massi súrefnis og neons.

reiknað ($p=mv$). Þetta er sýnt betur á mynd 13 (Koch 1981). Það sést að neon kemst gegnum þessa skriðþungasíu segulsviðsins með lægri orku en súrefni, þ. e. neon er hlutfallslega þyngra efni. Súrefni er aðallega O^{16} , en Ne^{22} er tiltölulega algengt í geimgeislum. Það er allgreinilegt að neon í geimgeislum er talsvert þyngra en annað neon og eins virðist magnesíum og kísill í geimgeislum innihalda meira af þungum samsætum en annað slíkt efni.

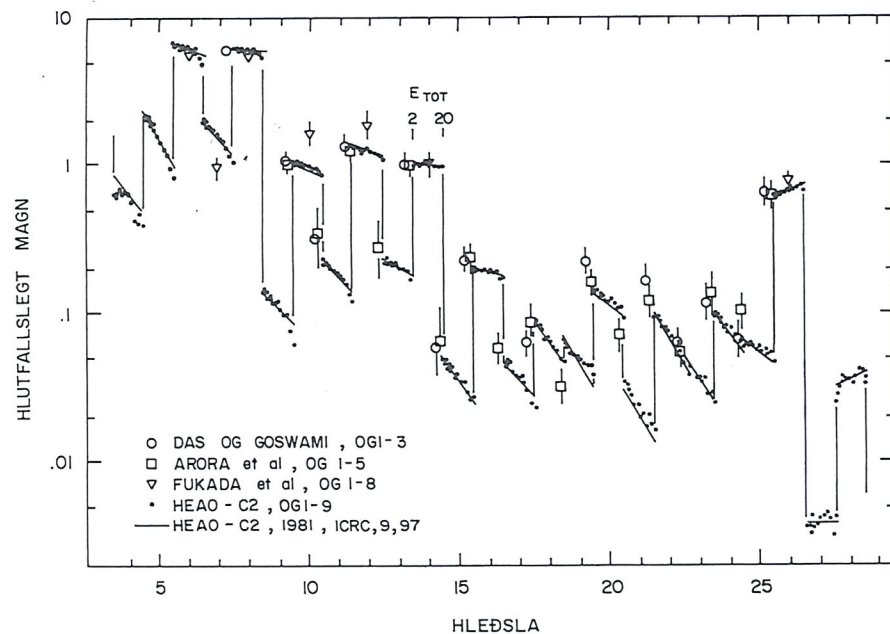
Mælitækið mælir þannig samsætusamsetninguna, þó vissulega verði þetta að kallast fremur gróf mæling. Við skulum líta aðeins á niðurstöður ýmissa mælinga á meðalmassa einstakra frumefna (Júlíusson 1983). Sumar af þessum mælingum geta aðgreint einstakar samsætur hvers frumefnis, en aðrar verða að láta sér nægja að finna meðalmassann eins og HEAO. Yfirleitt ber þessum mælingum vel saman við þá samsætusamsetningu sem þekkt er í öðru efni alheimsins (Cameron 1982), og sýnd er með heilu línunni á mynd 14. Neon er eina greinilega undantekningin, en reiknaða línán hefur þegar tekið þessa sérstöðu neons með í reikninginn, sem og þær kjarnabreytingar sem verða á sveimi geimgeislanna um Vetrarbrautina.



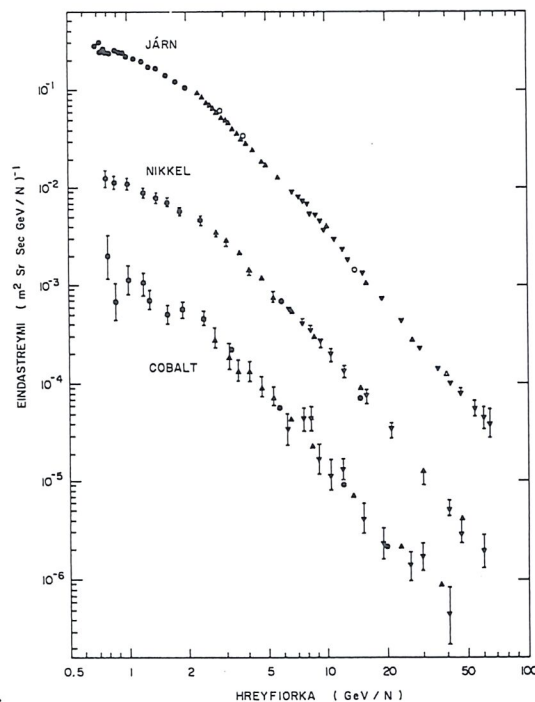
Mynd 14. Meðalmassi ($A-2Z$) einstakra frumefna í geimgeislum.

Það á enn talsvert í land að samsætusamsetning geimgeislanna sé orðin vel þekkt, en tæki þetta mælir hleðslusamsetninguna mjög nákvæmlega. Niðurstaðan er sýnd á mynd 15 (Engelmann et al. 1983), sem sýnir hlutfallslega efnissamsetningu (miðað við kísil) á orkubílinu 1–19 GeV/kjarneind.

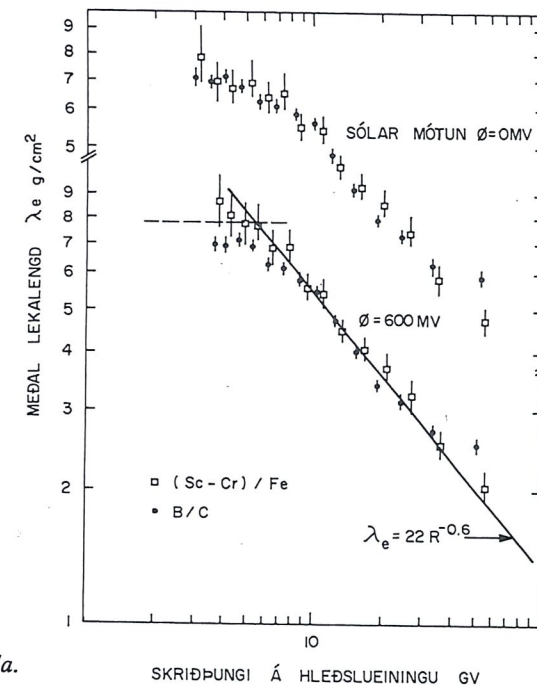
Hleðslur eru vel aðskildar eins og við sjáum yfir alla hleðsluröðina, og jafnvel orkuróf hinna sjaldgæfustu og erfiðustu efna eins og kóbolt og nikkell



Mynd 15. Efnissamsetning geimgeisla á orkubílinu 1-20 GeV/N.



Mynd 16. Orkuróf járns, kóbalt og nikkels.



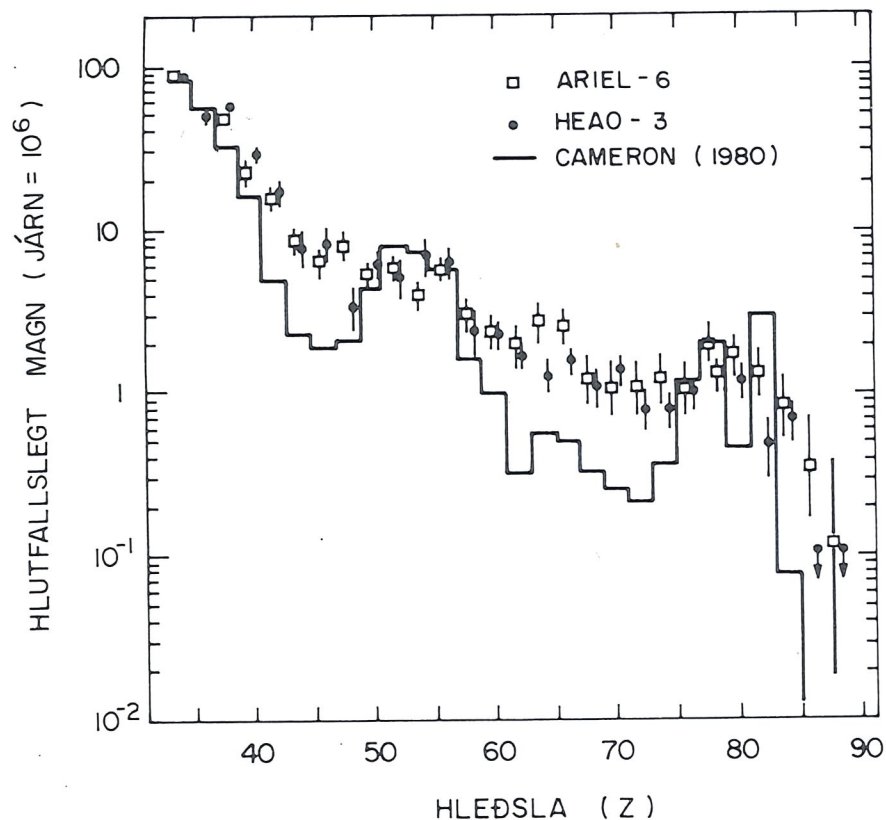
Mynd 17. Brautarlengd geimgeisla.

má mæla nákvæmlega, eins og sést á mynd 16 (Júlíusson et al. 1983). Við sjáum aftur mjög vel hvernig hinum síðgerðari efnum fer fækkandi eftir því sem orkan eykst. Lífstíminn í Vetrarbrautinni er háður orkunni, fellur með skriðþunga í veldinu 0.6, eins og sést á mynd 17. (Engelmann et al. 1983.)

Efnið mangan virðist hafa nokkra sérstöðu. Það er að langmestu leyti síðgert, hefur orðið til við það að járnkjarnar hafa í árekstrum sínum við efnið milli stjarnanna misst eina af róteindum sínum. Orkuróf þess er þó ekki eins bratt og við mætti búast. Það er erfitt að mæla þetta sjaldgæfa efni sem liggur í skugga járnsins sem er ca. 20 sinnum algengara, en þó þykjumst við fullviss um að þetta sé vegna Mn^{54} samsætunnar sem er geislavirk og verður að Fe^{54} . (Koch et al. 1983.) Svo er að sjá að lífstími Mn -samsætunnar sé jafnlangur aldri geimgeislanna við fáein GeV/N. Mn^{54} hefur breyst í Fe^{54} við lága orku því þar er aldur geimgeislanna meiri og lífstími Mn^{54} minni, en það lifir við háa orku þar sem aldur geimgeislanna er minni og lífstími Mn^{54} meiri. Enn hefur þó ekki tekist að mæla vel lífstíma þessa efnis, því á jörðinni eyðist það hratt með rafeindahremmingu.

15. Mjög þungir geimkjarnar

Í HEAO-gervitunglinu er einnig annað mælitæki fyrir geimgeisla, svipað og fyrrgreint mælitæki, en miklu stærra og notað til að mæla þyngri geimkjarna.



Mynd 18. Hleðslusamsetning þungra kjarna í geimgeislum og alheimi.

Með því hafa mælst kjarnar upp allan hleðslustigann upp að úrani, sem sést á myndinni, en magn þeirra er mjög lítið. Þessi efni verða einungis til við nifteindahremmingu (Burbidge et al. 1950) og í sprengistjörnu gæti orðið hraðfara hremming með sérkennandi efnissamsetningu.

Mælingar gefa þó ekki til kynna að geimgeislur séu nýskapað efni, orðið til við hraðfara nifteindahremmingu í sprengistjörnum.

16. Sveim geimgeisla um Vetrarbrautina. Kjarnasamsetning uppsprettu þeirra

Við höfum séð að geimgeislur eru hraðfara efni, og eins og sést t. d. á myndum 8, 14 og 18 er samsetning þess svipuð samsetningu annars efnis í alheiminum. En hvaðan koma þeir, hvað gefur þeim þennan hraða og hvernig ferðast þeir um Vetrarbrautina? Um þetta eru margar, langar og flóknar kenningar, en við skulum líta aðeins á nokkur þau atriði sem þær niðurstöður sem við höfum séð varpa helst ljósi á. Geimgeislarnir eru hlaðnir

og eins og margnefnt hefur verið eru hlaðnar eindir í segulsviði bundnar af því og neyddar til að hringa sig eftir segullínunum. Öfugt eru segullínurnar bundnar við jónað efni og ef segulsviðið er lokað og bundið við Vetrarbrautina, eru geimgeislarnir einnig bundnir við hana og sleppa ekki auðveldlega út. Ferð þeirra um Vetrarbrautina verður að líta á sem sveim og þeir haldast innan Vetrarbrautarinnar um milljónir ára meðan stjörnuljósið sleppur út á nokkrum þúsundum ára. Þótt efni Vetrarbrautarinnar sé þunnt, þá safnast þegar saman kemur, og geimgeislarnir hafa á þessu sveimi sínu farið gegnum nokkur grömm á fersentimetra af efni og það hefur áhrif á samsetningu þeirra. Þetta þýðir eins og við höfum séð að ekki eru allir þeir geimgeislur sem falla á jörðina frumgeislun í þeim skilningi að hún komi frá uppsprettunum heldur hafa kjarnar geimgeislanna brotnað upp í árekstrum við efnið milli stjarnanna og myndað nýja léttari kjarna. Af magni þeirra má reikna út það efnismagn sem geimgeislarnir hafa farið í gegnum.

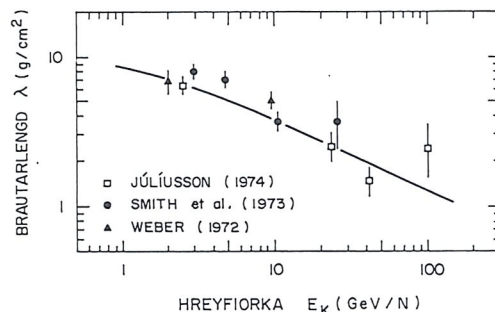
Ef allir geimgeislarnir hafa farið í gegnum sama efnismagn λ (grömm/cm²), þá eru kjarnasplundranir eina ástæða fyrir tapi geimgeisla af gerð j (t. d. súrefni), og eina uppspretta nýrra geimkjarna af gerð i (t. d. bór), og magnið af i -geislum (N_i) breytist samkvæmt

$$dN_i/d\lambda = \sum \sigma_{ij} N_j - \sigma_i N_i$$

þar sem σ_i táknar líkurnar á því að kjarni i eyðist vegna árekstra sinna við efnið, og σ_{ij} táknar líkurnar á því að kjarni i myndist vegna splundrunar þyngrir kjarna j í samskonar árekstri við efnið, en líkurnar eru táknaðar hér með þversniðinu λ^{-1} , þ. e. cm²/gramm. Til að gefa smá hugmynd um þessar stærðir getum við sagt að vetniskjarninn, prótónan, hefur radíus ca. 1.3 fm (femtómetrar eða 10⁻¹⁵ metrar) en járnkjarni hefur 56 kjarneindir og radíus því 56^{1/3} sinnum stærri eða tæplega 5 fm. Til að járnkjarni rekist á eina róteind þarf hann því að hitta hana með fráviki minna en 6 fm; þarf að hitta á flöt sem er um 100 fm² (10⁻²⁸ m², eða 10⁻²⁴ cm²) að stærð. En nú er þungi róteindarinnar 1.65·10⁻²⁴ grömm, þ. e. það eru um 6·10²³ róteindir í einu grammi og heildarflöturinn er þá um 0.6 cm². Járnkjarninn á þannig ekki mikla möguleika á að komast gegnum 1 g/cm² af vetni, líkurnar á að hitta aldrei eru exp(-0.6). Þannig má með jöfnunni rekja sig afturábak eða áfram lag fyrir lag og finna samsetningu uppsprettunnar N_i^s , eða t. d. samsetningu utan gufuhvolfsins ef samsetningin í háloftunum er þekkt o. s. frv. Við nefnum þetta gjarnan „lagkökulkanið“. Jafnan að ofan gerir ráð fyrir því að allir geimgeislarnir hafi farið gegn um jafnþykkt lag af efni. Vissulega getum við þó breytt þeirri forsendu og heildað okkur gegnum misþykkt lag fyrir geimgeisla af mismunandi orku, af mismunandi tegund, eða fyrir mismunandi kjarna sömu tegundar. Í geimgeisla-mælingum rekjum við okkur afturábak þar til magn efna sem við vitum að eru nánast eingöngu síðgerð verður núll eða þar til magn einhverra efna fer að verða neikvætt, og finnum þannig samsetningu geimgeislauppsprettunnar sem og efnisþykktina λ sem geimgeislarnir hafa farið í gegnum.

Niðurstöður úr mælingum HEN og fleiri sjást á mynd 19. Efnismagnið er

nokkur grömm á fersentimetra, en minnkar með orkunni í veldinu 0.5 (Júlíusson et al. 1975). Út frá því má reikna út hve lengi geimgeislarnir haldast innan Vetrarbrautarinnar og er það nokkur milljón ár. Fer sú niðurstaða eftir því hvort geimgeislarnir eru bundnir við Vetrarbrautar-skífuna þar sem efnispéttleikinn er um 1 atóm á rúmsentimetra, eða við kúlulaga hjúp kringum Vetrarbrautina þar sem efnispéttleikinn gæti verið 10 til 100 sinnum minni. Almennt bendir þetta þó til þess að geimgeislarnir séu bundnir við Vetrarbrautina.



Mynd 19. Brautarlengd geimgeisla í Vetrarbrautinni.

Spurningin er þá hvernig geimgeislarnir sleppa þá yfirhöfuð út. Hugmyndir Parkers og annarra þar að lútandi hafa verið að segullínur Vetrarbrautarinnar hnyklist fram og til baka um hana, bundnar við jónað gasið, og sleppi ekkert út úr Vetrarbrautinni. Geimgeislinn streymi hratt eftir línunum en hafi vissa möguleika til að sleppa út þegar segullínan fer nálægt yfirborði Vetrarbrautarinnar. Þrýstingur geimgeislagassins blæs upp þessa segulsviðsblöðru sem Vetrarbrautin er, þar til hún gefur sig á einhverjum stað og stór segulsviðskúla losnar frá Vetrarbrautinni ásamt þeim geimgeislum sem við hana eru bundnir. En þessi mynd gerir ekki mikinn greinarmun á geimgeislum eftir orku þeirra og samrýmist ekki vel þeim niðurstöðum að orkuríkir geimgeislar sleppi auðveldar frá Vetrarbrautinni. Sennilega er segulsvið Vetrarbrautarinnar talsvert opnara en þessi mynd vill vera láta, ef til vill haldið opnu af þrýstingi geimgeislagassins. Jafnvel þótt segullínurnar liggi beint út úr Vetrarbrautinni, er ekki svo auðvelt fyrir geimgeislana að streyma út eftir þeim. Smá óreglur í sviðinu dreifa brautarstefnunni og geimgeislinn gleymir því í hvora áttina hann er að fara eftir línunni, en sveimar fram og aftur. Þessum óreglum er stöðugt viðhaldið, því ef streymið verður mikið, jafngildir það rafstraumi eftir segullínunni og það truflar segulsviðið, sem aftur hindrar streymið. (Alfvén 1939).

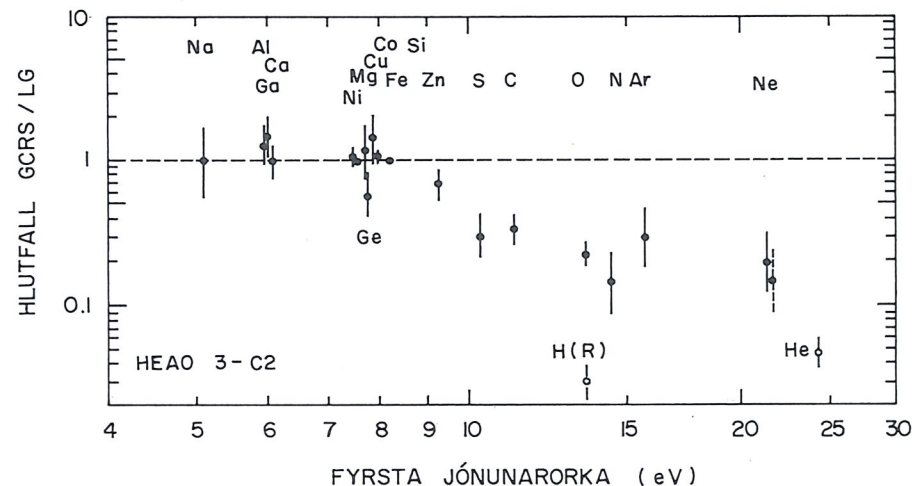
Ef geimgeislarnir hafa þannig vissa möguleika á að sleppa út þýðir það að þeir hafa ekki allir farið gegnum jafnþykkt lag af efni og þetta einfalda form lagkökúlíkansins gildir ekki. Dreifing efnismagnsins x verður þá ekki deltafall $\delta(x-\lambda)$ heldur öllu fremur veldisfall, þ. e. í hlutfalli við $\exp(-x/\lambda)$ þar sem λ er kallað lekalengdin (g/cm^2), sem þýðir að geimgeisli sleppur út þegar hann hefur að meðaltali farið gegnum $\lambda \text{ g/cm}^2$ af efni. Við notum þá frekar

„saltbaukslíkanið“, líkur á því að geimgeisli leki út getum við skrifað sem λ^{-1} . Nú er jafnvægi á og ef við setjum þá liði sem eyða geimgeislum af gerð i jafna þeim liðum sem mynda slíka geimgeisla fæst beint samsetning uppsprettunnar N_i^s

$$N_i^s = (\sigma_i + \lambda^{-1}) \cdot N_i - \sum_{ij} \sigma_{ij} N_j$$

Við þurfum ekki einu sinni að heilda neitt, þetta er einföld fylkjamargföldun, en lekalengdin λ finnst sem áður sem sú lengd er gefur magn síðgerðu efnanna í uppsprettunum núll. Þessi einfalda jafna felur þó í sér allviðamikla reikninga. Við þurfum að þekkja líkindaþversniðin σ_{ij} . Það eru fleiri hundruð samsætur i og j sem þyrfti að taka tillit til svo líkindaþversniðin skipta tugum þúsunda eða jafnvel milljónum ef spurt er almennt um σ_{ijk} , þ. e. líkurnar á því að kjarni j brotni í kjarna i þegar hann rekst á kjarna k. Öll þessi þversnið eru síðan háð orkunni. Fæst hafa þessi líkindaþversnið því enn verið mæld, en hin er reynt að innreikna eða framreikna eftir bestu getu út frá hinum þekktu gildum.

Þeir sömu reikningar og finna það efnismagn sem geimgeislarnir hafa farið um sýna einnig samsetningu sjálfrar geimgeislauppsprettunnar. Samsetning hennar virðist ekki breytast mikið með orkunni, en það virðist vera því meira af hinum þyngri efnum eftir því sem orkan eykst. Það er ljóst að samsetning geimgeislanna er mjög lík samsetningu alheimsins í heild sinni; þó er greinilegur ákveðinn mismunur. Það er meira af hinum þyngri efnum í geimgeislum t. d. og þennan mun má einnig sjá í „geim“geislum þeim sem frá sólinni koma, einkum við sólgeisla. Ennfremur, ef borið er saman efnismagn í geimgeislum og í alheiminum eða sólkerfinu, sem fall af fyrstu jónunarspennu efnisins kemur greinileg fylgni fram, eins og sést á myndinni. (Cassé og Goret 1978, Lund 1986.)



Mynd 20. Samsetning uppsprettu geimgeisla borin saman við samsetningu alheimsins.

Þessi fylgni er dálítið merkileg; geimgeislur eru háorku-kjarnar sem alls enga rafeind hafa, svo hví skyldi jónunarorka atómanna hafa hér eitthvað að segja? Hér hlýtur að vera spurning um það hvernig geimgeislarnir veljast inn á það svæði þar sem þeir fá sína fyrstu hröðun.

Skil virðast liggja yð ca. 10 eV, en það svarar til um 10000° sem vissulega er mjög algengt hitastig í alheimi, þ. e. við yfirborð stjarnanna. Þessi fylgni er einnig vel sýnileg í þeim „geim“geislum sem frá sólinni koma (Meyer 1985). Hafi geimgeislarnir komið frá sprengistjörnum, þá bera þeir a. m. k. engin sérstök merki þess.

17. Uppsprettur geimgeisla

Annað sem þessar mælingar geta varpað nokkru ljósi á, er hvernig geimgeislunum sé hraðað upp í þá miklu orku sem þeir hafa. Fyrsta raunhæfa hugmyndin um það hvernig geimgeislur fá sína miklu orku var sett fram af Swann (1932), og er það vafalaust merkasta hugmynd sem enn hefur komið fram um þetta efni. Hugmyndin er í sjálfu sér einföld, eða venjulegt rafspan eða rafall. Breytilegt segulsvið skapar rafsvið sem hraðar hlöðnum eindum. Það kann að koma á óvart hvernig eindirnar geta fengið orku sem svarar til milljarða volta, en þetta er reyndar gert á jörðinni í eindahröðlum þeim er betatrónar kallast og fyrst voru smíðaðir 1940. Rafsviðið sem í þeim er skapað er alls ekki sterkt, segjum 100 volt á metra. En það liggur í hring, og ef því er viðhaldið, og eindinni stýrt eftir því í einn hundraðasta úr sekúndu þá fer eindin næstum 3 þúsund kílómetra eftir því og fær við það orku upp á 300 milljón rafeindavolt. Þannig geta rafalar af stjarnfræðilegum stærðum auðveldlega hraðað eindum upp í stjarnfræðilega orku, þó að segulsviðið sé mun minna en ein segulsviðseining (Tesla).

Sjá má í sólblettum dæmi um sterkt og breytilegt segulsvið, og sjá má á jörðinni dæmi um eindir sem greinilega hefur verið hraðað í þessum sólblettum. Bæði orka og magn þessara „geim“geisla frá sólinni er þó minna en svo að sólin geti verið hin almenna uppspretta þeirra geimgeisla sem mælast á jörðinni og minna en svo að stjörnurnar geti verið uppspretta geimgeislanna, ef þær eru allar jafnsterkar uppsprettur og sólin. Á hinn bóginn er allt sem bendir til þess að sólin sé miklu rólegri en meðalstjarnan, svo vart er hægt að segja að útilokað sé að meginuppsprettur geimgeisla sé að finna í stjörnum Vetrarbrautarinnar.

Hugmyndir um sprengistjörnur sem uppsprettur geimgeislanna komu fyrst fram 1934 og hafa yfirleitt verið ríkjandi hugmyndir síðan. Orkuútspreymi frá hverri sprengistjörnu er gífurlegt, og ef umtalsverður hluti af þeirri orku fer í að hraða geimgeislum nægir það til að skýra magn geimgeisla í Vetrarbrautinni. Einnig er mögulegt að það séu leifar sprengingarinnar, tífstjarnan með sitt ógnarsterka segulsvið, sem gefur eindunum sinn mikla hraða. Ljós krabbapokunnar, leifar stjörnusprengingarinnar frá árinu 1054, kemur greinilega frá orkumiklum (billjón rafeindavolt) rafeindum í segulsviði þokunnar (Shklovskii 1953). Þessar rafeindir hafa ekki haft orku sína í þúsund ár.

Þeim gæti verið stöðugt hraðað af óreglum í segulsviðinu, óreglum sem berast t. d. frá tífstjörnunni í formi segulvökva-bylgna, eða þetta gæti verið síðgerð geislun frá róteindum sem gætu hafa fengið orku sína í sjálfri sprengingunni.

Hugmynd Fermi (1949) um að hröðunin eigi sér stað allstaðar í Vetrarbrautinni í árekstrum geimgeislanna við óreglur í segulsviðinu hefur alltaf átt fylgi að fagna. Geimgeislarnir geta bæði fengið og tapað orku í þessum árekstrum, en það er algengara að geimgeislinn komi á móti segulóreglunni og kastist því til baka með meiri orku en áður, en öfugt. Það verður einskonar jafndreifing orkunnar í geimgeisla-eindunum og í segulsviðsóreglunum. Eða við getum litið á þetta sem nokkurskonar sveim í hraðarúminu, hraðinn breytist óreglulega í allar áttir, en fjarlægist núllhraðann meira og meira (og hraðar og hraðar).

Nýrri hugmyndir um hröðun geimgeisla má með hæfilegri einföldun segja að séu breytilegar útgáfur á þessum möguleikum sem upp hafa verið taldir. Eindunum er hraðað af breytilegu segulsviði, t. d. vökvasegulbylgjum eða höggbylgjum. Í innsta eðli sínu er heldur ekki grundvallarmunur á betatrón-hröðun Swanns og handahófskenndri hröðun Fermis, en segja má að megin-spurningarnar um hvar uppsprettur geimgeislanna liggi séu:

1. Liggja uppsprettur geimgeisla utan Vetrarbrautarinnar eða innan hennar, eða jafnvel í sólkerfinu?
2. Er geimgeislum hraðað í geimnum milli stjarnanna eins og Fermi taldi, eða er þeim hraðað í eða við ákveðnar uppsprettur?
3. Ef þeim er hraðað í ákveðnum uppsprettum, er þeim þá hraðað í sjaldgæfum fyrirbrigðum eins og sprengistjörnum, eða í algengum fyrirbrigðum eins og blossastjörnum eða jafnvel stjörnum almennt?
4. Ef þeim er hraðað í sprengistjörnum, er það þá sjálf sprengingin sem hraðar þeim eitt stutt augnablik, eða er það leifar sprengingarinnar, tífstjarnan, sem hraðar þeim yfir lengri tíma?

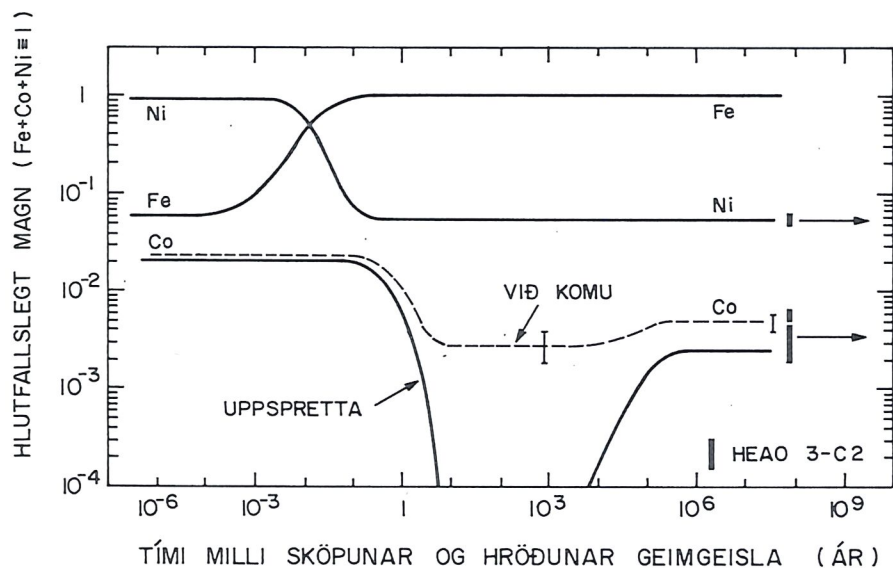
Þessum spurningum, nema þeirri fyrstu, hefur ekki verið svarað; allir möguleikar virðast koma jafnt til greina í dag, þó að sú hugmynd eigi sér efalaust fæsta formælendur, að uppsprettur geimgeislanna séu staðbundin algeng fyrirbrigði.

Þær mælingar á efnis- og orkusamsetningu geimgeisla sem hér hafa verið ræddar svara ekki endanlega þessum spurningum en þó er eins og þær bendi helst til staðbundinna algengari fyrirbrigða. Það er ekki auðvelt að sameina handahófskennda hröðun Fermis þeirri niðurstöðu að magn síðgerðra efna minnkar með orkunni. Ef hröðunin á sér stað í Vetrarbrautinni almennt þýðir það að orkumestu geimgeislarnir eru þeir elstu og þá mest brotnir upp í hin síðgerðari efni. Ef hröðun hvers geimgeisla er dreifð í tíma og rúmi ætti því að öðru jöfnu magn síðgerðra efna fremur að aukast með orku.

Vissulega gætu geimgeislur verið komnir frá sprengistjörnum, en í samsetningu þeirra finnast engar vísbendingar um slíkan uppruna. Það er að vísu fyrirfram mjög óljóst hvaða áhrif slíkur uppruni ætti að hafa á samsetningu

þeirra, en ýmislegt hefði hugsanlega getað komið fram. Við hefðum getað fundið einhverja óeðlilega efnissamsetningu geimgeisla, en myndir 8, 14 og 18 sýna fremur svipaða samsetningu og efni alheimsins hefur. Við hefðum getað fundið miklu meira af þungum efnum. Við hefðum getað fundið skýr dæmi um hraðfara þífteindahremmingu. Við hefðum getað fundið dæmi um tiltölulega nýskapað efni, t. d. efnin rétt fyrir neðan úran í lotukerfinu. Ekkert af þessu hefur fundist.

Það má líka reyna að komast að því hvort efnið sé ungt þegar það fær þessa miklu hröðun. Járníð í alheiminum er t. d. allt orðið til í sprengistjörnum. Mikið af því er vafalaust orðið til áður en stjarnan springur, en sprengingin framleiðir meira og sálðrar þessu lífsnauðsynlega efni út í Vetrarbrautina. Ef hún gefur þessu nýframleidda efni um leið þá miklu hröðun sem þarf til að gera það að geimgeislum, þá hefur það áhrif á samsetningu þeirra, því kjarnabreytingar verða ekki þær sömu í efni og í geimgeislun. (Soutoul et al. 1978).



Mynd 21. Tími milli sköpunar og hröðunar geimgeisla.

Myndin sýnir þá samsetningu efnanna í járngrúppunni sem búast má við eftir því hversu hratt efnunum er hraðað eftir að þau hafa myndast. Munurinn stafar af því að efni sem klofna með því að hremma eina af innri rafeindum sínum hafa enga rafeind til að gleypa eftir að þeim hefur verið hraðað. Niðurstöðurnar benda ekki til þess að það hafi verið ungt efni sem varð að geimgeislum. Ef til vill getur hin nálæga sprengistjarna, sem uppgötvuð var 1987 varpað ljósi á hvort geimgeislum sé hraðað á þennan hátt.

18. Gammageislar

Þriðja mælitækið í HEAO-C gervitunglinu leitar að gammageislum, einkum ákveðnum litrófslínunum við tiltölulega lága orku (MeV), sem geta gefið upplýsingar um t. d. ákveðnar kjarnamyndanir í Vetrarbrautinni.

Mælingar á gammageislum eru nú orðnar mikilvægt svið geimgeislarannsókna, sem hér er þó ekki tækifæri til að fjalla um. Stærsti kosturinn við gammageisla er að þeir komast auðveldlega gegnum allt það ryk vetrarbrautanna sem hylur okkur sýn í venjulegu ljósi. Hér sjáum við alheiminn í nýju og gagnsæju ljósi. Með háorku (100 MeV) gammageislum getum við skoðað t. d. geimgeisla- og gasþéttleikann í Vetrarbrautinni því geimgeislar mynda þéindir og þar með gammageisla þegar þeir rekast á gasið. En það er ekki allt of mikið af gammageislum til að mæla. Með því að beina augum okkar augnablik upp í stjörnuþjartan himininn gætum við safnað inn í þau fleiri ljóseindum en allar þær háorku-gammaeindir sem enn hafa verið greindar í þeim þremur gervitunglum, OSO-3, SAS-2 og COS-B, sem send hafa verið sérstaklega til að leita þeirra. Þetta er því svið framtíðarinnar þó vissulega hafi margar stórmerkar niðurstöður þegar fengist.

Almennt hafa geimgeislarannsóknir leitt til fullkomnari þekkingar á lögmálum og eðli alheimsins, en margt er órannsakað og áfram er leitinni haldið að hinum endanlega sannleika.

Heimildaskrá:

- Úrval eldri greina og heimildaskrá má finna í bókinni: *Selected Papers on Cosmic Ray Origin Theories*. Ed. Stephen Rosen. Dover Publ. N.Y. 1969.
- Yfirlit um ýmis atriði geimgeislarannsókna birtast reglulega í: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. *Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics*. *Annual Review of Nuclear (and Particle) Science*. *Handbuch der Physik*.
- Ágætar smákiljur um geimgeislarannsóknir almennt og sögu þeirra eru: M. A. Pomerantz: *Cosmic Rays*. Publ. Van Nostrand, 1971.
- J. G. Wilson: *Cosmic Rays*. Wykeham Publications, London 1976.
- Góð grein um fyrstu sögu geimgeislarannsókna er Q. Xu og L. M. Brown, 1987. „The early history of cosmic ray research.“ *Am. J. Rhys.* 55, 23.
- H. Alfvén, 1939. „On the Motion of Cosmic Rays in Interstellar Space.“ *Phys. Rev.* 55, 425.
- J. Ambrosen, F. Nielsen og P. Sigurgeirsson, 1942. „Electronröret ELL 1 som „Scale of two“.“ *Fysisk tidskrift*, 40, 101.
- C. D. Anderson, 1933. „The Positive Electron.“ *Phys. Rev.* 143, 491.
- C. Anderson and S. H. Neddermeyer, 1937. „Cosmic Ray Particles of Intermediate Mass.“ *Phys. Rev.* 54, 88.
- E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler and F. Hoyle, 1957. *Rev. Mod. Phys.* 29, 547. „Synthesis of the Elements in Stars.“
- A. G. W. Cameron, 1982. „Elemental and Nuclidic Abundances in the Solar System“ in *Essays in Nuclear Astrophysics*, ed. C. A. Barnes, D. D. Clayton and D. N. Schramm, Univ. Chicago Press. Einnig Appl. Space Science, 82, 123.
- M. Casse and P. Goret, 1978. „Ionization Models of Cosmic-Ray Sources.“ *Astrophys. Journal*. 221, 703.
- J. Clay, 1927. „Penetrating Radiation.“ *Proc. Acad. Sci. Amsterdam* 30, 1115.

- M. Conversi, E. Pancini og O. Piccioni, 1947. „On the Disintegration of Negative Mesons.“ *Phys. Rev.*, **71**, 209.
- J. J. Engelmann, P. Goret, E. Júlíusson, L. Koch-Miramond, P. Masse, A. Soutoul, B. Byrnak, N. Lund, B. Peters, I. L. Rasmussen, M. Rothenberg and N. J. Westergaard, 1983. „Elemental Composition of Cosmic Rays from Be to Ni as Measured by the French-Danish Instrument on HEAO-3.“ *Proc. 18th Int. Cosmic Ray Conf.* Bangalore. **2**, 17.
- E. Fermi, 1949. „On the Origin of Cosmic Radiation.“ *Phys. Rev.* **75**, 1169.
- P. Freier, E. J. Lofgren, F. Oppenheimer, H. L. Bradt, B. Peters, 1948. „The Heavy Component of Primary Cosmic Rays.“ *Phys. Rev.* **74**, 213.
- H. Geiger and W. Müller, 1928. „Elektronenzählrohr zur Messung Schwächster Aktivitäten.“ *Naturwiss.* **16**, 617.
- V. F. Hess, 1912. „Über Beobachtungen der Durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten.“ *Physik. Z.* **13**, 1084.
- E. Júlíusson, P. Meyer and D. Muller, 1972. „Composition of Cosmic-Ray Nuclei at High Energies.“ *Phys. Rev. Lett.* **29**, 445.
- E. Júlíusson, 1974. „Charge Composition and Energy Spectra of Cosmic Ray Nuclei at Energies Above 20 GeV/Nucleon.“ *Astrophys. Journal*, **191**, 331.
- E. Júlíusson, C. J. Cezarsky, M. Meneguzzi og M. Casse, 1975. „Source Composition of Cosmic Rays at High Energy.“ *Proc. 14th Int. C. R. Conf.* München, **2**, 653.
- E. Júlíusson, 1975. „Composition of Cosmic Rays at 10 to 10000 GeV/Nucleon.“ *Proc. 14th Int. C. R. Conf.* München, **8**, 2689.
- E. Júlíusson, 1983. „Composition of Cosmic Rays.“ *Proc. of the 18th Int. C. R. Conf.* Bangalore, **12**, 117.
- E. Júlíusson, J. J. Engelmann, J. Jorrand, L. Koch-Miramond, P. Masse, N. Petrou, N. Lund, I. L. Rasmussen and M. Rothenberg, 1983. „The Galactic Cosmic Ray Energy Spectra as Measured by the French-Danish Instrument on HEAO-3.“ *Proc. of the 18th Int. C. R. Conf.* Bangalore, **2**, 21.
- W. Kolhörster, 1913. „Messungen der Durchdringenden Strahlung im Freiballon in Grösserem Höhen.“ *Physik. Z.* **14**, 1153.
- L. Koch-Miramond, 1981. „Source Abundances and Propagation of Relativistic Cosmic Rays up to $Z=30$: HEAO-3 Results.“ *Proc. 17th Int. C. R. Conf.* Paris. **12**, 21.
- L. Koch-Miramond, J. J. Engelmann, P. Goret, E. Júlíusson, N. Petrou, Y. Rio, A. Soutoul, B. Byrnak, N. Lund, B. Peters, I. L. Rasmussen, M. Rothenberg og N. Westergaard, 1983. „The Relative Abundances of the Elements Scandium to Manganese in Relativistic Cosmic Rays and the Possible Radioactive Decay of Manganese-54.“ *Astron. Astrophys. Lett.* **102**, 19.
- C. M. G. Lattes, G. P. S. Occhialini and C. F. Powell, 1947. „Observations on the Tracks of Slow Mesons in Photographic Emulsions.“ *Nature* **160**, 453.
- N. Lund, 1986. „Cosmic Ray Abundances, Elemental and Isotopic“ í *Cosmic Radiation in Contemporary Astrophysics*. Ed. M. M. Shapiro, D. Reidel Publ., Holland.
- J. P. Meyer, 1985. „Solar Stellar Outer Atmospheres and Energetic Particles and Galactic Cosmic Rays.“ *Astrophys. Journal*, **57**, 173.
- P. Meyer and R. Vogt, 1961. „Electrons in the Primary Cosmic Radiation.“ *Phys. Rev. Letters* **6**, 193.
- E. N. Parker, 1958. „Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields.“ *Astrophys. J.* **128**, 664.
- D. Muller og J. Tang, 1983. „The Spectrum of High Energy Cosmic-Ray Electrons: Results and Interpretation.“ *Proc. 18th Int. C. R. Conf.* Bangalore. **2**, 60.
- B. Rossi, 1930. „Method of Registrering Multiple Simultaneous Impulses of Several Geiger Counters.“ *Nature*, **125**, 636.
- P. Sigurgeirsson og K. A. Yamakawa, 1947. „Decay of Mesons Stopped in Light Materials.“ *Phys. Rev.* **71**, 319.
- P. Sigurgeirsson og K. A. Yamakawa, 1949. „Electron Emitting Power of Stopped Mesons.“ *Rev. Mod. Phys.* **21**, 124.
- P. Sigurgeirsson, 1949. „Geimgeislur.“ *Tímarit Verkfræðingafélags Íslands*, **34**, 77 (6. hefti).

- J. A. Simpson, 1983. „Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Rays.“ *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **7**, 33, 323.
- A. Soutoul, M. Casse og E. Júlíusson, 1978. „Time Delay Between the Nucleosynthesis of Cosmic Rays and Their Acceleration to Relativistic Energies.“ *Astrophys. Journal*. **219**, 753.
- C. Störmer, 1934. „Critical Remarks on a Paper by G. Lemaitre and M. S. Vallarta on Cosmic Radiation.“ *Phys. Rev.* **45**, 835.
- I. S. Shklovskii, 1953. „On the Origin of Cosmic Rays.“ *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **91**, 475.
- W. F. G. Swann, 1932. „A Mechanism of Acquirement of Cosmic-Ray Energies by Electrons.“ *Phys. Rev.* **43**, 217.
- H. Yukawa, 1935. „On the Interaction of Elementary Particles.“ *Proc. Physico-Math. Soc. Japan* **17**, 48.