

Fyrstu Mössbauerrófin frá Mars og greining bergsteinda

Örn Helgason¹ og Haraldur Páll Gunnlaugsson²

¹Raunvísindastofnun Háskólans og ²Aarhus Universitet

Vefútgáfa: 30. desember 2004

Ágrip – Á þessu ári hafa tvö geimför lent heilu og höldnu á yfirborði Mars. Með í för voru margvísleg mælitæki m.a. svonefndur Mössbauergreinir, lófastór að stærð. Þegar hafa borist allmörg Mössbauerróf til Jarðar, sem gefa margvíslegar upplýsingar um steindir á yfirborð reikistjörnunnar. Í þessari grein verður fyrst sagt í stuttu máli frá Mössbauertækninni, en síðan verður fjallað nánar um fyrstu rófin frá Mars og það sem þar sést verður borið saman við hliðstæð róf af íslensku bergi.

1. Inngangur

Reikistjarnan Mars hefur heillað mannsandann frá ómunatíð. Skær rauðleitur bjarmi sem af henni stafar sem og óregluleg ganga um himinhvelfinguna hefur örvað ímyndunarafl mannsins og gert hana að örlaga-valdi í margs konar brambolti hér á jörðu. Saga hennar í rannsóknum stjörnufræðinga er ekki síður áhugaverð og gildir það jafnt um rannsóknir á brautarhreyfingunni, nútíma fjarkönnun og nú síðast með lendingu ómannaðra geimfara á yfirborði plánetunnar.

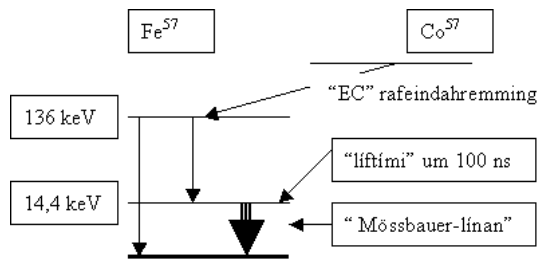
Fyrstu velheppnuðu landingar á yfirborði Mars urðu þegar geimförin Viking-1 og Viking-2 lentu þar árið 1976, en síðan þurfti að bíða í rúm 20 ár eftir næstu lendingu. Árið 1997 lenti Pathfinder á Mars og markaði sú landing upphaf nýrrar áætlunar um lendingu lítilla geimfara annað hvert ár á yfirborði Mars. Meðal tækjabúnaðar var syrpa af margskonar seglum sem raðað var með reglulegu millibili til að fá hugmynd um seguleiginleika ryks sem á þá féll og þar með eðli þeirra efna sem eru á yfirborði Mars [1]. En eins og oft vill verða vekur eitt svar nýjar spurningar. Rauðleiti blærinn á yfirborðinu, fyrstu rannsóknir á yfirborðsryki og fjarmælingar á segulsviði plánetunnar úr gervitunglum hafa vakið enn fleiri spurningar um þær aðstæður sem þar ríkjja.

Eftir misheppnaða lendingu Mars Polar Lander árið 1999, ákvað Geimferðastofnun Bandaríkjanna (NASA) að sleppa tækifærinu til landingar árin

2001/2002 en setja markið hátt árið 2004. Þá skyldi stefnt á lendingu tveggja farartækja sem gætu ekið um og beint fjarstýrðum mælitækjum að áhugaverðum fyrirbærum á yfirborðinu. Fargjald á hvert kíló er hátt á þessari leið og því þarf að vanda mjög val á þeim tækjum sem þangað eru send. Þegar búið var að ákveða hvað rannsaka skyldi var tekið til við að hanna, prófa og þróa þau tæki sem þangað áttu að fara. Á miðju ári 2003 lögðu síðan tvö bandarísk geimferðarstofnunin (ESA) sitt fyrsta geimfar til Mars, Mars Express. Evrópska gervitunglið fór á braut um Mars og með í för var lítið landingartæki, Beagle II, sem líklega hefur brotlent, en samband náðist aldrei við það. Þau bandarísku, Spirit og Opportunity, náðu hinsvegar óskemmd á áfangastað. Hér á eftir verður gerð nokkur grein fyrir þeim tækjakosti sem sendur var í þessa för og sérstaklega sagt frá svonefndum Mössbauergreini og hvernig honum er beitt. Þá verða fyrstu rófin frá Mars skoðuð og þau borin saman við hliðstæð róf af íslenskum bergsýnum.

2. Hvað eru Mössbauerhrif ?

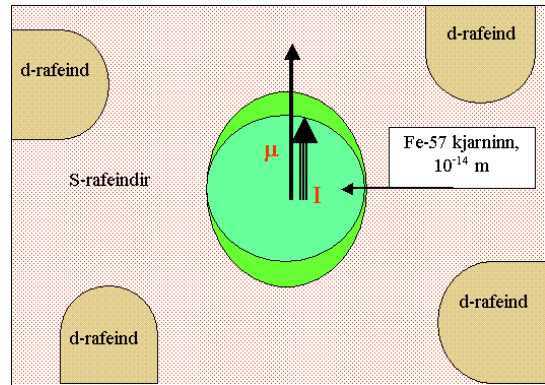
Skömmu fyrir 1960 uppgötvaði Þjóðverjinn Rudolf Mössbauer að gammageislun getur í vissum tilvikum átt sér stað án þess að kjarninn fái bakslag (e. recoil free emission) [2]. Þessi uppgötvun opnaði nýjar víddir í orkugreiningu og margs konar



Mynd 1. Geislaritið sýnir myndun 14,4 keV gammageislans sem gefur Mössbauerhrif. Geislavirkt ^{57}Co með 270 daga helmingunartíma hremmir rafeind og ummyndast í ^{57}Fe á 136 keV örvuðu orkustigi. Á leið niður á grunnstig sem hefur spunann $1/2$ fer hluti geislunarinnar um 14,4 keV orkustig með spunanum $3/2$.

rannsóknnum á innri gerð efnisins og 1961 hlaut Mössbauer Nóbelsverðlaunin í eðlisfræði fyrir uppgötvun sína.

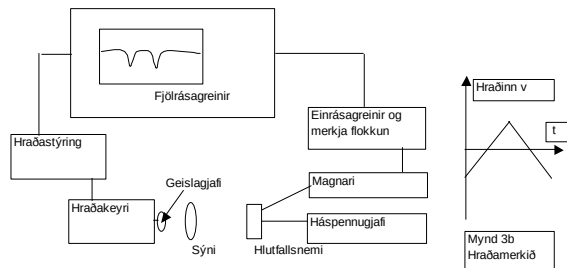
Skoðum þessi hrif aðeins nánar. Fræðleg mörk fyrir skerpu í orkugreiningu gammageisla eru tengd líftíma örvaða orkustigsins. Í þeirri geislun sem hér verður til umræðu er verið að skoða 14,36 keV orkustig járn-samsætu með massatöluna 57 (^{57}Fe), sjá mynd 1. Þar er líftíminn um 100 nanósekúndur ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$). Náttúruleg línubreidd gammageislans er því um 10^{-8} eV sem gefur skerpu í orku gammageislans, $E/\Delta E = 10^4/10^{-8}$, eða um 10^{12} . Almennt gildir að þegar atómkjarni í örvuðu ástandi sendir frá sér gammageisla fær hann bakslag (e. recoil) í samræmi við lögmálið um varðveislu skriðþungans. Þetta er ígildi þess að hluti þeirrar orku sem er til ráðstöfunar í kjarnahvarfinu tapast yfir á kjarnann og rýrir að sama skapi þá orku sem gammageislinn ber með sér. Í ofangreindu tilviki er bakslagsorkan u.þ.b. 10^{-3} eV eða milljón sinnum meiri en náttúrulega línubreiddin. Segja má að við venjulegar aðstæður valdi orkutap vegna bakslags sem og varmatitringur því að skerp-an minnkar verulega og verður aðeins brot af því sem gerist án bakslags. Fyrir geislun þar sem ^{57}Fe kemur við sögu verður $E/\Delta E = 10^6$ eða einn milljónasti þess sem fæst án bakslags. Rudolf Mössbauer uppgötvaði hins vegar að atómkjarni sem situr í kristallaumgjörð getur ekki tekið við hvaða bakslagi sem er og orka bakslagsins þarf að falla saman við þá sveiflumöguleika sem þar finnast. Þetta leiðir til þess að hluti gammageislanna kemur út án bakslags (fyrir ^{57}Fe er það hátt í 80%) og það er sá hluti sem býður upp á milljónfalda skerpu.



Mynd 2. Táknmynd sem lýsir næsta umhverfi járnkjarnans þar sem þau víxlhrif myndast sem greinast með Mössbauertækni sem örfín hliðrun á orkustigum. Örvunar tvær á kjarnanum tákna annars vegar segulvægi hans og hins vegar hverfitregðuvægið.

Þessi mikla skerpa opnaði strax nýjar leiðir í rannsóknnum og meðal annars höfðu menn skyndilega mælinákvæmni sem gerði kleift að sannreyna í „tilraunastofu“ fyrirbæri sem leiðir af almennu afstæðiskenningunni. Þegar árið 1960 beittu þeir Rebka og Pound Mössbauerhrifum til að mæla rauðvik í orku gammageisla sem sendir voru á móti þyngdarsviði jarðar upp um 22 m háan reyksháf við Harvard háskóla [3]. Þá dugar þessi skerpa til að kanna ýmis fyrirbæri í innri gerð efnisins sem tengjast því sem nefnd eru örfín víxlhrif (e. hyperfine interactions). Á mynd 2 er á táknrænan hátt reynt að sýna hvernig þessi hrif birtast í orkurófinu. Á miðri myndinni er sporöskjulagað svæði sem á að tákna kjarna járn-57 atómsins. Eins og þar kemur fram er kjarninn ekki nákvæmlega kúlulaga og hleðsludreifing róteindanna leiðir til þess að hann hefur svokallað fjórþólsvægi. Hverfitregða kjarnans og segulmætti eru táknuð með örvum. Umhverfis kjarnann, sem er um $1/10.000$ af þvermáli atómsins, eru rafeindaský og til einföldunar verður hér aðeins vísað til s - og d -rafeinda. Þó kjarnakraftar ráði mestu um orku gammageislans (hér 14,36 KeV) koma fram örfín víxlhrif milli hleðsludreifingar í kjarnanum og rafeindapétteleika innan hans og í næsta nágrenni við hann. Þessi hrif færa orkustigin til um nokkur nanó- eða míkroelektrónuvolt og þennan litla mun má greina með Mössbauertækni.

Í Mössbauerrófinu birtast þau einkum á þrjá vegu. Fyrst skal nefna hrif sem tengjast þéttleika s -rafeinda inni í járnkjarnanum og lúta að oxunarstigi

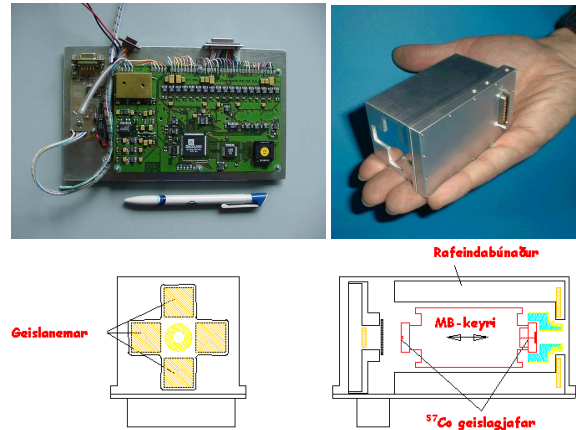


Mynd 3. Táknmynd sem lýsir meginatriðum í Mössbauer-greiningu þar sem mælt er gegnskin um sýnið. Til hægri er sýnt hvernig hraðinn á geislagjafanum breytist. Þetta ferli er endurtekið í sífellu.

járnatómsins. s -rafeindir hafa kúlusamhverfa dreifingu og það eru ákveðnar líkur á að þær nái inn í kjarnann. Þessar líkur minnkar smávegis (innan við eitt prómill) þegar Fe^{2+} breytist í Fe^{3+} og við það hliðrast orkustigin örlítið sem auðveldlega má greina með þessari tækni. Næst skal nefna áhrif vegna brautarlegu d -rafeinda. Í efnasamböndum járns eru það d -rafeindir sem mynda tengin við næstu atóm og afstaða þeirra ræðst því af hvernig járnatómið situr í kristallinum. Afstaða d -rafeinda veldur síðan breytilegu rafsviði inni í kjarnanum, sem aftur hefur áhrif á örvaða orkustigið. Þetta orkustig hefur spunann $3/2$ (sjá mynd 1) og fjórþólsvægi. Vegna áhrifa rafsviðsins klofnar það í tvennt og því sjást tvær línur í orkurófinu. Frávik frá samhverfu í kerfinu stjórna bili á milli þeirra. Í rannsóknum á steindum setur kristallagerðin einmitt mark sitt á þessa mælistærð. Loks má nefna að þegar kjarninn er í segulsviði klofnar bæði segulspuni grunnstigsins ($\pm 1/2$) og örvaða orkustigsins ($\pm 3/2$; $1/2$) og afleiðingin er að orkurófið klofnar upp í sex línur og er fjarlægðin milli ystu lína er í réttu hlutfalli við styrk segulsviðsins.

3. Hvernig má mæla Mössbauerhrif?

Mynd 3 sýnir á einfaldan hátt hvernig mælingin fer fram. Geislagjafinn er festur á hraðakeyri sem hreyfist fram og aftur eftir hraðaferli sem sýnt er á mynd 3b. Í gegnsmælingu (e. transmission) fer hluti geislarinnar gegnum sýnið (S) og geislanemi (G) mælir heimturnar. Merkið frá honum er flokkað og sent um teljara í fjölrásagreini. Þar er raðað saman heitum og merki frá hraðakeyrinu. Þannig fæst róf af geislaisogi sem fall af hraða. Hraði keyrisins veldur Dopplermótun á orku gammageislans í samræmi við



Mynd 4. Mössbauergreininir sem sendur var til Mars. Af efri myndunum má marka stærðina. Til vinstri er tölvuspjald-ið með öllum rafeindabúnaði og fjölrásagreini. Til hægri er hraðakeyri og geislanemar. Teikningin fyrir neðan sýnir hvernig hlutum er komið fyrir við endurvarpsmælingu.

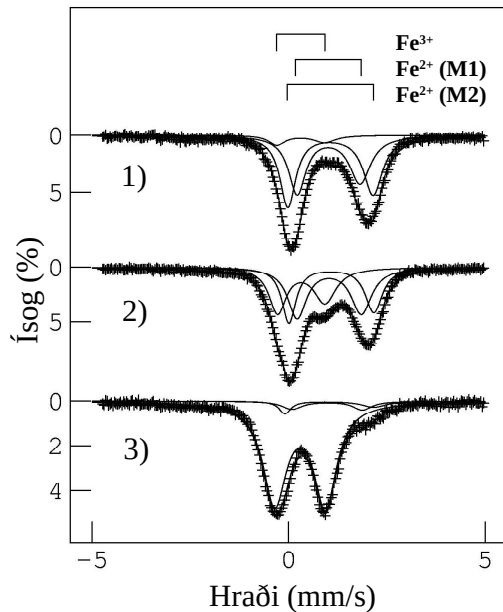
jöfnuna;

$$\Delta E = \frac{v}{c} * E \quad (1)$$

þar sem v er hraði keyrisins miðað við sýnið og c er ljóshraðinn, $3 \cdot 10^8$ m/s. Með hraða upp á nokkra mm/s fæst orkumótun upp á nokkur neV. Ísog (dæld í rófinu) vex þegar orka geislans er jöfn orkunum milli tiltekinnar orkustiga.

Mælingum á Mössbauerhrifum er beitt við margs konar rannsóknir og fjölmargar samsætur hafa þá eiginleika sem þarf til að framkalla þessi hrif. Ein þeirra er eins og áður sagði ^{57}Fe , en hún er um 2,2% af náttúrulegu járn. Algengt er að í bergsýnum séu járn-sambönd um 10%. Til að fá skaplegt róf á nokkrum klukkustundum þarf sýnið að innihalda um $200 \mu\text{g}$ af ^{57}Fe en það þýðir að um 50–100 mg af bergi duga við sýnagerð. Sýni getur verið á ýmsu formi eftir markmiði tilraunar en mælingin hefur ekki í för með sér breytingar á sýninu og það er því hæft til annarra rannsókna eftir að Mössbauerórf hefur verið tekið.

Uppsetningin á mynd 3 þar sem mælt er ísog eða gegnskin er afar algeng og í venjulegri tilraunastofu er umfang þessa búnaðar um einn til tveir rúmmetrar. En þegar mæla skal róf á Mars horfir málið öðruvísi við. Þar verður allt að vera létt, nett og fyrirferðarlítið. Mynd 4 sýnir tæki sem hannað var til að mæla Mössbauerórf á Mars [4]. Hér er teljurum komið hagnlega fyrir umhverfis keyrið og þegar geislagjafanum er beint að sýninu er endurvarpið (e. scattering) mælt en ekki gegnskin eins og sýnt er á mynd 3. Þessi

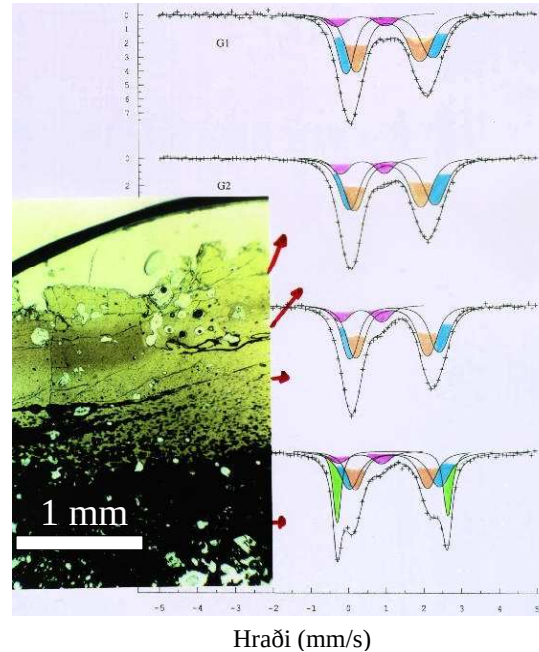


Mynd 5. Mössbauerróf af basaltgleri sem var brætt við 1300°C en við mismunandi súrefnisþrýsting áður en sýnið var snöggkælt. Efst var þrýstingurinn 10^{-9} loftþyngdir, þá 10^{-5} loftþyngdir og neðst eins og við venjulegan loftþrýsting en þá er súrefnisþrýstingurinn 0,2 loftþyngdir.

uppsetning kallar á afar sterkan geislagjafa, sterkari en æskilegt er að nota í tilraunastofu á jörðu niðri en vandamál vegna geislaengunar eru ekki til umræðu í rannsóknum á Mars.

4. Mössbauerhrif og mæling á íslensku bergi

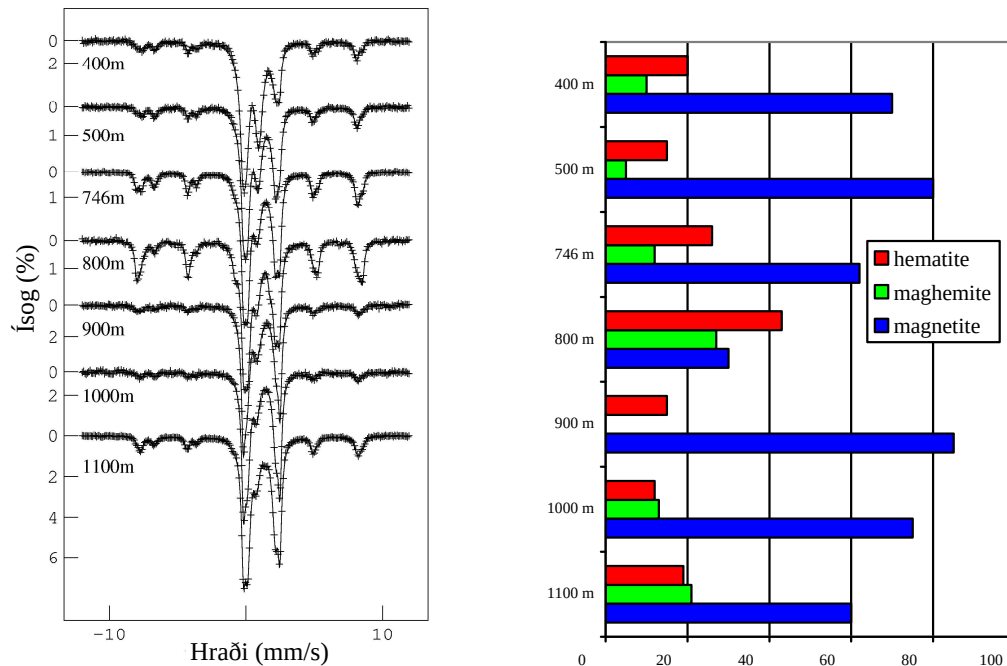
Til að átta okkur betur á hvernig beita megi Mössbauermælingum í jarðfræði skulum við skoða þrjú dæmi úr íslenskum rannsóknum. Styrkur súrefnis og þrýstingur er mikilvæg kennistærð um eðli bergkviku og myndun steinda. Mynd 5 sýnir þrjú róf frá tilraun þar sem rannsökuð eru viðbrögð basaltkviku við mismunandi súrefnisþrýstingi [5, 6]. Þrjú basaltsýni voru brædd við 1300°C í mismiklum súrefnisþrýstingi og síðan hraðkæld þannig að sýnið storknar sem hraungler. Við lægsta þrýsting (efsta rófið) sést línutvennd sem er einkennandi fyrir tvígilt járn. Þegar súrefnisþrýstingur er hins vegar orðinn ígildi þess sem er í lofthjúpi jarðar er allt járnið orðið þriggilt, sem endurspeglast í þröngri línutvennd eins og sjá má á neðsta rófinu. Við súrefnisþrýsting sem er um 10^{-5} loftþyngdir sýnir rófið blöndu af þessum er tveimur þáttum eins og sjá má af miðrófinu.



Mynd 6. Fjögur Mössbauerróf af yfirborðsefni bólstrabergs. Smásjármyndin til hliðar sýnir nokkurn veginn á hvaða „dýpi“ sýnin eru tekin. Ystu þrjú hafa nánast eingöngu einkenni glermyndunar en innst (neðsta rófið) sýnir greinileg merki um myndun ólivínsteindar (sjá einnig mynd 9).

Á mynd 6 er önnur syrpa. Þar er felld inn smásjármynd af yfirborði bólstrabergs. Í þessari tilraun er rannsókninni beint að hraunsýnum sem tengjast „frumstæðri kviku“ á Atlantshafshryggnum [5]. Í sýninu sem hér er sýnt er yst hraungler sem hefur myndast vegna hraðrar kælingar þegar kvikan lendir í vatni. Innar verður kælingin hægari og þar má sjá merki um kristallamyndun. Mössbauerrófin eru tekin af fjórum örfínnum sniðum frá yfirborðinu og inn eftir. Efsta rófið sýnir öll einkenni glers eins og öll rófin á mynd 5 en ljóst er á glerið er lítið oxað. Eftir því sem innar dregur eykst oxun glersins smávegis og á neðsta rófinu birtist línutvennd sem einkennandi er fyrir ólivín. En ólivín er ein fyrsta steindin sem fellur út, þegar súrefnissnaud basaltkvika kólnar.

Þriðja dæmið á mynd 7 sýnir róf fyrir sýni af mismunandi dýpi úr borholu á Nesjavöllum. Þar sjást bæði merki um ósegulmagnaðar steindir (birtast sem línutvenndir miðsvæðis í rófinu) og segulsteindir sem birtast sem línu-sextettar eins og áður hefur komið fram. Með því að rannsaka syrpu af þessu tagi má fá hugmynd um þróun segulsteinda í bergi bæði í tíma



Mynd 7. Sýrpa Mössbauerrófa úr basaltlögum af mismunandi dýpi úr borholu NG6 á Nesjavöllum. Til hægri er sýnt hvert er hlutfall einstakra segulsteinda í þessum sýnum. Oxuðu steindirnar maghemít og hematít eru mest árberandi á 800 og 1100 metra dýpi, en þar eru meginæðar heits vatns og gufu í þessari holu.

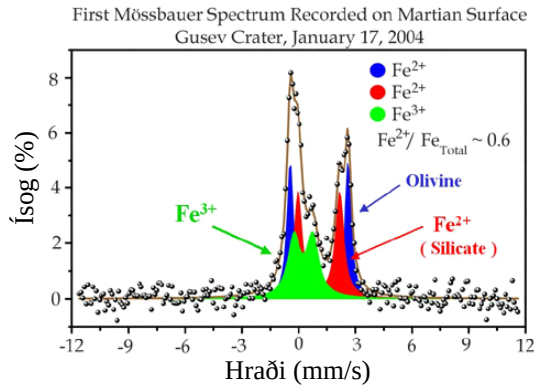
og einnig í tengslum við hugsanlega efna- og hitaáverka ef þeir eru til staðar [8]. Hægra hluti myndarinnar sýnir niðurstöður úr nánari greiningu segulsteinda og þar eru þær flokkaðar í þrjár meginsteindir, (títanó-)magnetít [$\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$], maghemít [$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$] og hematít [$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$]. Til gamans má benda á að aðalinnstreymi á heitri vatnsgufu í þessari holu er á um 800 m dýpi og einmitt þar er mest ummyndun af títanó-magnetíti yfir í oxuðu steindirnar maghemít [$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$] og hematít [$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$] sem er lokahykkurinn í þessu ferli.

5. Fyrstu rófin frá Mars og samanburður við mælingar á Íslandi

Eins og áður sagði lentu tvö geimför heilu og höldnu á Mars í byrjun árs 2004 með safn mælitækja sem komið var fyrir á litlum fjarstýrðum sex hjóla torfæruvagni, sem hér verður nefndur jepplingur. Helstu tækin má sjá á mynd 8. Efst á mastrinu er myndavél, sem getur tekið myndir í 13 litrófsböndum á sýnilega sviðinu og inn í innrauða sviðið (400–1000 nm). Þar fyrir neðan er svokallað “MINI-TES” sem er tæki til mælinga á innrauðri geislun (5–29 μm), en á þessu



Mynd 8. Jepplingur á Mars. Efst má sjá tækjakostinn sem lýst er nánar í textanum og á neðri hlutanum sést þegar mælíbúnaður á arminum nálgast stein sem rannsaka á.



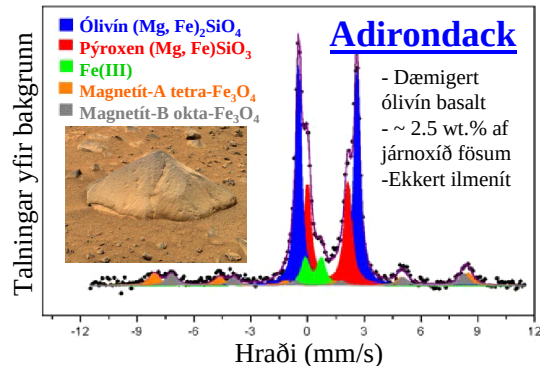
Mynd 9. Fyrsta Mössbauerróf sem barst frá Mars, 17. janúar 2004. Fróðlegt er að bera það saman við neðsta rófið á mynd 6. Hafa ber í huga að rófið hér er mælt sem endurvarpsróf en á mynd 6 eru rófin mæld sem gegnskin.

bylgjulengdarsviði er endurvarp háð steindasamsetningu sýna. Oft má fá greinagóða mynd af steindasamsetningunni á yfirborðinu með þess háttar greiningu. Neðan við pallinn með sólarrafhlöðum til orkuöflunar, er margstillanlegur armur. Þar er fremst vírbursti eða lítill fræsari til að hreinsa yfirborð steina, þá er þar svonefndur alfa-röntgen frumefnagreinar (sjá nánar á mynd 11), smásjármyndavél sem getur tekið myndir með um 30 μm upplausn og loks Mössbauergreinar eins nánar var sýndur á mynd 4. Fyrstu niðurstöður ferðar Spirit hafa nýverið verið birtar í alls 13 greinum í tímaritinu Science (2004 Vol. 305, no. 5685).

Eitt fyrsta verkefni Spirits eftir að hafa ekið af lendingarbúnaðnum var að beina sjónum að rauðu yfirborðsefninu. Mynd 9 sýnir fyrsta rófið sem barst hingað 17. janúar 2004.

Eins og áður er getið eru rófin þar tekin sem endurvarp og til að bera þetta beint saman við neðsta rófið á mynd 6 þarf að spegla því um grunnlínuna í rófinu sem og snúa við hraðakvarðanum. Það sem fyrst vekur athygli í þessu rófi eru mikil greinigæði, t.d. er línutvenndin sem einkennir ólivínsteindina mjög skörp. Í raun er rófið á mynd 9 mjög áþekkt neðsta rófi á mynd 6, en þó er hlutfall þrígilda járnsins greinilega hærra í rófinu frá Mars. En áttu menn von á þessu? Nei, menn áttu von á mun meiri oxun og því má segja að rófið gangi nokkuð á skjön við þær hugmyndir sem menn höfðu um yfirborðið.

Einungis 30 til 40% af járninu í sýninu er í þrígildum efnasamböndum, og greina má tvígilt járn í steindunum ólivín og pyroxene. Þó oxunin sé hér meiri en

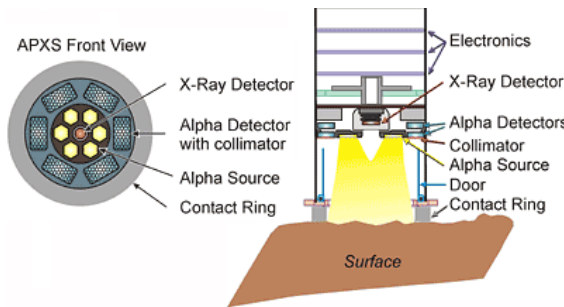


Mynd 10. Mössbauerróf af Adirondack-steininum, sem sést á innfelldu myndinni. Á rófinu sjást greinilega línusextettar sem stafa af segulsteinum í berginu, ekki ósvipað og sjá má á basaltrófunum á mynd 7.

í rófinu á mynd 6 dugar þetta eitt ekki til að skýra rauða litinn á yfirborðsefninu. Til frekari áréttingar má nefna að róf af svörtum sandi við Íslandsstrendur hefur nokkurn veginn sama form. Við höfum rekist á sand eða berg með allt að 50% járnatómanna í þrígildum samböndum, en þessi sýni eiga eitt sameiginlegt. Þau eru svört! Í annarri grein [9] í þessu hefti er fjallað nánar um þetta misræmi og sett fram tilgáta um hvernig skýra megi þessar niðurstöður.

Nokkru eftir að þetta róf var tekið kom jepplingurinn frá Spirit að áhugaverðum steini sem nefndur er Adirondack. Eftir að vírburstinn hafði hreinsað yfirborðið var Mössbauergreininum beint að steininum og tekið orkuróf sem sýnt er á mynd 10. Í þessu rófi koma greinilega fram merki um segulhrif ekki ósvipað því sem sást í basaltrógunum frá borholunni á Nesjavöllum. Þá var geislum alfangjafans (mynd 11) beint að steininum og með mælingu á þeirri röntgengeislun sem þá myndaðist fást upplýsingar um frumefnasamsetningu í yfirborði steinsins. Þar kemur fram að massahlutfall járns er allhótt eða um 13,4% [10]. Nákvæm túlkun á þessum gögnum liggur ekki enn fyrir, en í [9] er fjallað nánar um þessi róf og tilgátu um hvernig segulvirkir ólivínbasalt geti skýrt það segulsvið sem greinst hefur með fjarkönnun.

Í báðum þeim rófum sem hér hafa verið skoðuð kemur hematít, $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$, ekki við sögu nema að litlu leyti í rófinu á mynd 10. Spyrja má hvort lítið magn hematíts sé þarna á ferð. Hematít hefur einmitt verið ein þeirra steinda, sem menn hafa horft til í þeim



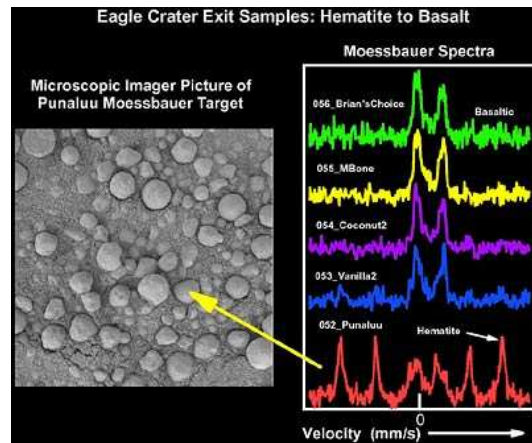
Mynd 11. APXS-frumefnagreinir á Marsfarinu. Orkuríki alfageislun er beint að yfirborðinu og veldur hún miklu róti í rafeindahjúp yfirborðsefnanna. Við það taka þau að geisla frá sér röntgengeislun en hvert frumefni í yfirborðinu hefur sína kennigeisla. Með mælingu á röntgenrófinu má finna hvaða frumefni eru á yfirborðinu og í hvaða mæli.

kenningum þar sem reynt er að skýra rauða bjarmann sem af Mars stafar.

Þessari spurningu er enn ósvarað eins og einnig kemur fram í grein [9]. Rannsóknir á yfirborði Mars eru rétt að byrja og margt enn óljóst. Þó má nefna að á “Sol 46”, þ.e. á 46. “Marsdegi” eftir landingu kom jepplingurinn Opportunity að sérkennilegu gili eða farvegi og þar var fjöldi kúlulaga smásteina á stærð við ber og fengu þeir því strax gælunafnið “blue berries”. Sjá vinstri hluta myndar 12. Hægri hluti myndar 12 sýnir fimm Mössbauerróf. Efsta rófið er tekið efst í farveginum en síðan færast greinirinn niður í átt að botni farvegsins. Næst neðsta rófið fæst þegar greininum er beint að “berjalousu” yfirborði farvegsins og hið neðsta þegar hann skoðar “berin”. Í neðstu tveimur þessara rófa er sexlínu þáttur sem einkennir hematít og í rófinu frá “berjunum” er hann sýnu öflugri og þar er steindin hematít nánast ríkjandi. Vangaveltur hafa verið um tilvist vatns á fyrri stigum í tengslum við þennan farveg sem og hvernig þessar steinkúlur hafa myndast. Hér eru þó enn margir lausir endar og það mál verður utan viðfangsefnis þessarar greinar.

Lokaorð

Enginn vafi er á því að fyrstu niðurstöður sem birtar hafa verið sýna ótrúlega góðan árangur af mælingum með fjarstýrðum búnaði í órafjarlægð. Auðvitað er myndin enn ófullkomin og aðeins örfá róf hafa verið birt. En innan tíðar verða meiri gögn gerð aðgengileg, sjá tilvísun [12]. Þá gefst öllum sem til þekkja kostur á að rýna í sjálf frumgögnin og taka þátt í frekari



Mynd 12. Steinvölur, “blue-berries”, í “einhvers konar” farvegi. Til hægri er syrpa af Mössbauerrófum. Efst er rófið tekið nálægt barminum en síðan færir tækið sig niður eftir hallanum niður á botn. Næst neðst er rófið frá botninum þar sem engar steinvölur eru en neðsta rófið er tekið af steinvölu. Greinilegt er hvernig línuxettinn sem er einkennandi fyrir hematít rís upp og verður yfirgnæfandi í rófi steinvölnnar.

úrvinnslu og mati og þar með draga sínar eigin ályktanir. Þá munu væntanlega koma fram mælisyrpur sem sýna orkuróf sem fall af hitastigi, en mikill hitamunur er milli dags og nætur á Mars. Slík syrpa getur gefið margháttað upplýsingar um eiginleika efnisins sem þar er. Fleira mætti nefna, en hér er rétt að staldra við og bíða þess sem koma skal.

Heimildir

- [1] H.P. Gunnlaugsson, S.F. Hviid, J.M. Knudsen, and M.B. Madsen, Instruments for the magnetic properties experiments on Mars Pathfinder. *Planet. Space Sci.* **46,4** (1998) 449-459.
- [2] R. Mössbauer, Kernresonanzfluoreszenz von Gammastrahlung in Ir191. *Z. Physik* **151** (1958) 124.
- [3] R.V. Pound and G.A. Rebka, Apparent weight of photon, *Phys. Rev. Lett.* **4,7** (1960) 337.
- [4] G. Klingelhöfer et al., Minos II. *Jour. Geophys. Res.* **108**(E12) (2003) 8067.
- [5] Ö. Helgason, S. Steinþórsson and S. Mørup, The Ferric/Ferrous Ratio in Basaltic Melts at Different Oxygen Pressure, *Hyperfine Interaction* **45** (1989) 287-294.
- [6] Ö. Helgason, S. Steinþórsson, and S. Mørup, Rates of Redox Reactions in Basaltic Melts Determined by Mössbauer Spectroscopy, *Hyperfine Interaction* **70** (1992) 985.

- [7] N. Óskarsson, Ö. Helgason and S. Steinhórssón, Oxidation State of Iron in Mantle-Derived Magmas of the Icelandic Rift-Zone, *Hyperfine Interaction* **91** (1994) 733.
- [8] Ö. Helgason, N. Óskarsson, K. Jónsson, and E. Gunnlaugsson, Redistribution of Iron Among Mineral Phases during Geothermal Alteration of Basalt, Recorded by *Mössbauer Spectroscopy*, *Il Nuovo Cimento, Conf. Proc.* **50** (1996) 749.
- [9] Haraldur Páll Gunnlaugsson, Örn Helgason, Sigurður Steinþórsson og Leó Kristjánsson, grein í þessu hefti
- [10] R. Gellert, R. Rieder, R.C. Anderson, J. Brückner, B.C. Clark, G. Dreibus, T. Economou, G. Klingelhöfer, G.W. Lugmair, D.W. Ming, S.W. Squyres, C. d'Uston, H. Wänke, A. Yen, and J. Zipfel, Chemistry of Rocks and Soils in Gusev Crater from the Alpha Particle X-ray Spectrometer, *Science* **305** (2004) 829-832.
- [11] Myndefni frá heimasíðu jepplinganna marsrovers.jpl.nasa.gov
- [12] Frekari gögn frá mælitækjum á Mars er að finna á slóðinni:
<http://anserver1.eprsl.wustl.edu/>

Um höfundana:

Örn Helgason er prófessor í eðlisfræði við raunvísindadeild Háskóla Íslands. Hann lauk prófi sem Mag. scient. í eðlisfræði með kjarneðlisfræði sem sérsvið frá Kaupmannahafnarháskóla 1965.

Haraldur Páll Gunnlaugsson er lektor í eðlisfræði við Árósarháskóla í Danmörku. Hann lauk B.S. prófi 1991 og M.S. prófi 1993 í eðlisfræði við Háskóla Íslands og Ph.D. í eðlisfræði við Kaupmannahafnarháskóla 1997.

¹Raunvísindastofnun Háskólans
Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík
ornh@raunvis.hi.is

²Institut for Fysik og Astronomi
Aarhus Universitet
Ny Munkegade
DK-8000 Århus C
Danmark

Móttækin: 16. september 2004

Summary: In January 2004, NASA landed, two robotic spacecrafts, "Spirit" and "Opportunity" on the surface of Mars. These spacecrafts are on wheels, and can drive to interesting geological features nearby the landing sites and study them with range of onboard scientific tools.

The first results have to a large extent changed our picture of the red planet, and instruments for Mössbauer spectroscopy have made a significant contribution to that. Mössbauer spectroscopy is the first experimental technique that is sent to Mars that can give quantitative picture of a part of the mineralogy, both in terms of relative fractions of minerals and their properties. The surface material has to a large extent been found to be olivine basalt, similar to what is found at many locations in Iceland.

The paper describes briefly some important features of the Mössbauer Spectroscopy. Examples from studies on samples of fast cooled lava and Icelandic basalt are described. These results are compared and discussed in relation to some of the first spectra recorded on Mars.