

Samanburður Mössbauerrofna af bergi frá Íslandi og Mars

Haraldur Páll Gunnlaugsson¹, Örn Helgason², Leó Kristjánsson² og Sigurður Steinþórsson²

¹Aarhus Universitet og ²Raunvísindastofnun Háskólans

Vefútgáfa: 13. desember 2004

Ágrip – Í janúar 2004 lentu tvö ómönnuð geimför, “Spirit” og “Opportunity”, á yfirborði Mars á vegum Geimferðastofnunar Bandaríkjanna (NASA). Geimför þessi eru á hjólum og geta ekið að áhugaverðum fyrirbærum í nágrenni landingarstaðanna og skoðað þau með mælitækjum um borð. Geimför af þessu tagi mætti nefna jepplinga á íslensku (e. rovers). Fyrstu niðurstöðurnar frá jepplingunum hafa breytt verulega mynd okkar af rauðu reikistjörnunni, og hafa tæki til Mössbauermælinga átt stóran þátt í því. Mössbauer-tækin eru fyrstu mælitækin á Mars sem geta gefið nákvæma mynd af hluta steindasamsetningar yfirborðsefnisins, bæði hlutfalli steinda sem innihalda járn og eiginleikum þeirra. Meðal þess sem komið hefur fram er að berg á yfirborðinu er að stórum hluta ólivínbasalt, svipað og finnst víðsvegar á Íslandi. Hér verður fyrstu Mössbauerrofnum sem borist hafa lýst nánar og rakið hvaða lærdóma megi af þeim draga, einkum í ljósi hliðstæðra rannsókna sem gerðar hafa verið á íslensku bergi. Þá verður einnig komið inn á hugmyndir um hvernig efla megi Mössbauer-mælingar í komandi ferðum til Mars.

1. Inngangur

Í [1] eru rakin helstu atriði er lúta að Mössbauer-mælingum, og hvernig þeim er beitt við rannsóknir á jörðinni. Á Raunvísindastofnun Háskólans hefur Mössbauerhrifum verið beitt við rannsóknir á íslensku basalti sem og fleiri fyrirbærum í jarðfræði um tveggja áratuga skeið (sjá t.d. umfjöllun í [1] og tilvísanir hér). Þegar unnið er með basalt og megináherslan er ekki nákvæm greining einstakra steinda, má segja að Mössbauergreining geti í fyrstu nálgun veitt upplýsingar um 8 mismunandi steindir þar sem járn kemur við sögu. Af meðseglandi steindum má greina tvígilt járn (Fe(II)) í olívíni $(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$, pýroxeni $\text{Ga}(\text{Mg, Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ og ilmeníti FeTiO_3 , og þrígilt járn (Fe(III)) sem sjaldnast er hægt að heimfæra upp á sérstaka steind. Oft er um að ræða þrígilt járn í pýroxeni. Af segulvirkum steindum má auðveldlega greina magnetít (Fe_3O_4) bæði hreint og með mismunandi íblöndun á titáni þ.e.a.s. títánómagnetít ($\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$). Hreinleika magnetítsins (x) má meta með góðri nákvæmni fyrir $x < 0,3$. Magnetít inniheldur bæði Fe(II) og Fe(III), og getur oxast yfir í hreint Fe(III) oxíð, maghemít ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$), sem hefur sömu

kristallabyggingu og magnetít, svonefnda spínílgrind. Einnig getur þetta ferli haldið áfram og spínillinn ummyndast í hematít ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$) sem hefur korúndgrind.

Styrkur Mössbauer-mælinga við rannsóknir á svona kerfi kemur fram í mörgum þáttum. Ekki þarf sérstaka meðhöndlun á bergsýninu áður en róf er mælt. Hver steind í sýninu hefur sína svörun og með tölvgreiningu á rófinu má fá mynd af hvaða steindir eru til staðar og í hvaða hlutföllum. Mikill munur er á svörun tvígilds og þrígilds járns og því má ráða oxunarstig sýnisins beint af rófinu. Oxunarstig bergs ræðst að hluta af súrefnisþrýstingi í bergkviku og er hann mikilvæg kennistærð í rannsóknum á basalti. Þá má nefna að sjálf mælingin veldur engum breytingum á sýninu og því er unnt að nota það til annarra rannsókna eftir að Mössbauergreining hefur farið fram.

2. Mars og Mössbauer-mælingar

Yfirborð Mars er rautt (sjá Mynd 1), og stafar liturinn af efnasamböndum sem innihalda þrígilt járn. Talið er að yfirborð Mars hafi að stærstum hluta orðið til við eldvirkni, en járníð í óveðruðu basalti er einkum tvígilt. Það er því ljóst að eitthvert ferli hefur

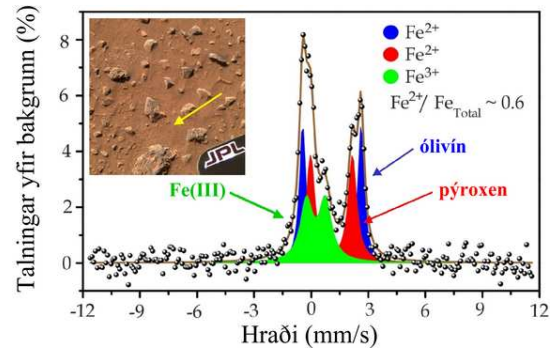


Mynd 1. Samsett Viking mynd af yfirborði Mars. Þrátt fyrir þunnan lofthjúp (~ 7 mbar CO_2 gas) er hann mettaður með fíngerðum rykögnum ($\sim 2 \mu\text{m}$) sem sjá má við sjóndeildarhringinn.

oxað yfirborðsefnið. Hvort þetta gerðist í vatni fyrir milljörðum ára, þegar Mars var heitari og votari, eða hvort um er að ræða stöðugt niðurbrot yfirborðsbergs og oxun sem enn á sér stað (ef til vill fyrir áhrif útfjólublárrar geislunar) er ekki vitað [2]. Þetta var ein meginástæða þess að velja Mössbauergreini í geimfar til Mars. Oft er unnt að greina með Mössbauerhrifum hvort þau þrígildu efnasambönd sem finnst í sýni hafi myndast við veðrun í tengslum við vatn eða hvort önnur vatnsóháð veðrun hafi átt sér stað.

Fyrir jepplingana Spirit og Opportunity varð fyrir valinu tæki sem þróað hefur verið í yfir áratug af G. Klingelhöfer [3] og í [1] eru tækinu gerð nánari skil og lýst hvernig unnt er að beita því án sérstakrar sýnagerðar eins og venja er í tilraunastofum á jörðu. Tæknin sem notuð er nefnist “backscatter Mössbauer spectroscopy” (b-MS).

Mælitæki jepplinganna (Mynd 8 í [1]) eru af margvíslegum toga [4]. Auk Mössbauergreinis eru þeir búnir myndavél er getur tekið myndir í 13 litrófsbilum á sýnilega sviðinu og inn á innrauða sviðið (440–1000 nm). Svokallað “MINI-TES”-tæki er notað til mælinga á innrauðri geislun (5–29 μm), en á þessu bylgjusviði er endurvarp háð steindasamsetningu sýnisins þannig að oft má fá af henni greinargóða mynd.



Mynd 2. Fyrsta Mössbauerróf frá Mars. Á innskotsmyndinni (ca. 30 cm í þvermál) er bent á staðinn þar sem rófið var tekið. Breytt frá [5].

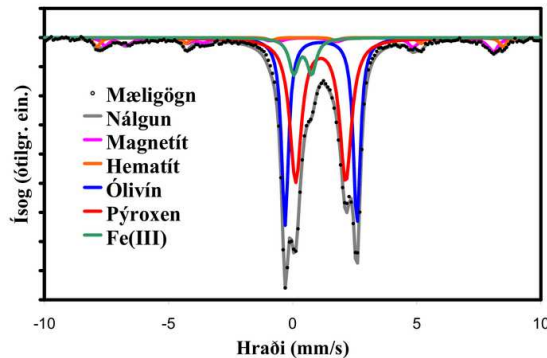
Einnig er sérstakur Röntgengreinir til að mæla frumefnasamsetningu yfirborðsins sem og smásjármynda vél sem getur tekið myndir með um 30 μm upplausn.

Engar alvarlegar bilanir hafa orðið á búnaði jepplinganna frá landingu. Ryk safnast að vísu smám saman fyrir á sólarraflöðunum svo orkuframleiðsla til mælinga, gagnasendinga og aksturs minnkar. Á endanum verður þetta líklega til þess að þeir hætta að starfa. Um þessar mundir (nóvember 2004) dugar orka jepplinganna til einnar klukkustundar vísindaathugana á sólarhring í stað 7–8 tíma í upphafi ferðarinnar. Seinustu fréttir benda til að bilanir séu að koma upp hjá Spirit sem valda erfiðleikum í akstri, en þó er talið að vinna megi bug á vandanum.

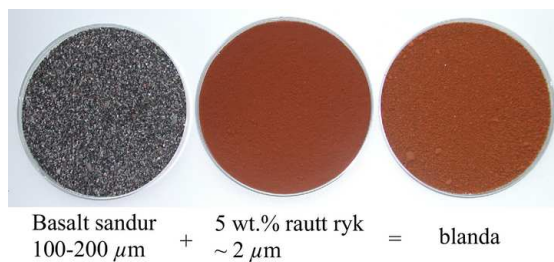
3. Fyrsta Mössbauerrófið frá Mars

Eitt fyrsta verkefni Spirit eftir að honum var ekið úr landingarfarinu var að beina tækjum hans að hinu rauða yfirborðsefni og 17. janúar 2004 barst fyrsta rófið til jarðar (sjá Mynd 2). Hér kom strax í ljós nokkuð sem gekk þvert á þær hugmyndir manna að rauðleita yfirborðsefnið innihéldi að langstærstum hluta þrígilt járn. Nálgun rófsins á Mynd 2 bendir til að einungis 30–40% járnins sé þrígilt og greina mátti tvígilt járn í steindunum olivíni og pýroxeni. Algengt er að rekast á sýni með svipað Mössbauerróf og sýnið frá Mars. Mynd 3 sýnir Mössbauerróf sýnis af svörtum basaltsandi frá Seltjarnarnesi (mulið Reykjavíkurgrágrýti) mælt við herbergishita.

Við höfum rekist á sand eða berg þar sem allt að 50% af járninu er þrígilt, en þessi sýni eiga eitt sameiginlegt. Þau eru svört! Þá vaknar spurningin: Ef jarðvegurinn sem skoðaður er á Mars er basaltsandur, hvers vegna er hann þá rauður? Þótt 30–40% Fe(III)



Mynd 3. Mössbauerróf basaltsands frá Seltjarnarnesi. Sami litakóði og á Mars rófinu er notaður, en sakir betri gæða má sjá línur frá magnetíti og hematíti.

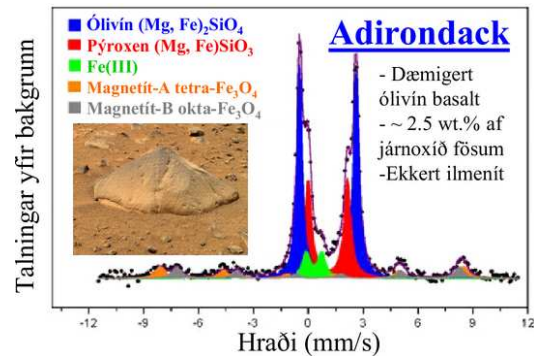


Mynd 4. Áhrif þess að blanda saman svörtum basaltsandi og fingerðu rauðu ryki.

bendi til oxaðs jarðvegs er í ljósi niðurstaðna frá Íslandi ekki hægt að álykta að basaltið á Mars sé rautt að lit. Einn möguleiki sem við höfum varpað fram til að skýra þennan mun er að jarðvegurinn sé samsettur úr tveimur þáttum, basaltsandi og mjög fingerðu ryki sem inniheldur einungis þrígilt járn. Mynd 4 sýnir hvað gerist þegar slíkum efnum er blandað saman.

Fingerða rykið nær að hylja allar sandagnirnar og myndar $\sim 2 \mu\text{m}$ lag utan um hverja sandögn. Þetta lag er hinsvegar ekki gegnsætt fyrir sýnilegt ljós og gefur það blöndunni rauða litinn. Mössbauergreinirinn “sér” hinsvegar $100\text{--}200 \mu\text{m}$ undir yfirborð kornanna, og rykið hefur því óveruleg áhrif á Mössbauerrófið.

Þessar niðurstöður benda til þess að minna sé af ryki á yfirborðinu en talið hefur verið. Það sem menn töldu áður vera ríkjandi rautt yfirborðsefni með járn í hleðsluástandinu $3+$, hefur líklega alltaf verið basalt-sandur blandaður örlitlu af fingerðu ryki þar sem þrígild járnambönd eru ríkjandi. Tækin sem eru á jepplingunum geta ekki skoðað þetta ryk eitt sér í smáatriðum, og því ekki lesið þá sögu það hefur að segja.



Mynd 5. Mössbauerróf Adirondack. Innskotsmyndin sýnir steininn, sem er um 10 cm hár. Breytt frá [5].

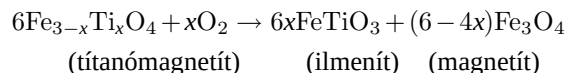
4. Annað Mössbauerrófið frá Mars

Nokkrum dögum síðar kom Spirit að steininum Adirondack, og tók Mössbauerróf af honum.

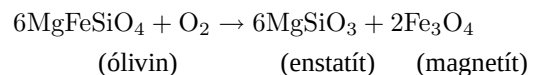
Rófið er að flestu leyti dæmigert fyrir ólivínbasalt, þar sem línur ólivíns og pýroxens koma vel fram. Hins vegar vekur magnetít-hlutrófið sérstaka athygli af tveimur ástæðum:

- Það sýnir hreint magnetít (þ.e.a.s. án títans)
- Magnetít er í óvenjulega miklu magni fyrir ólivínbasalt.

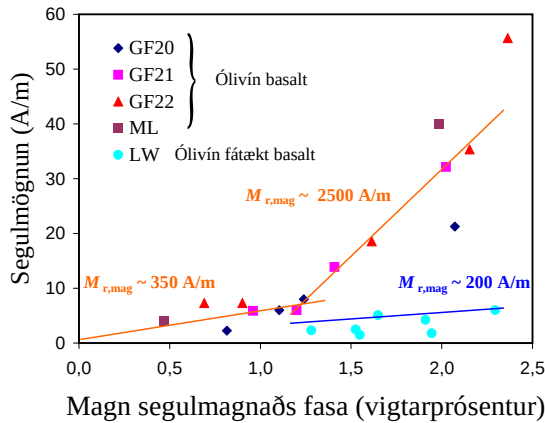
Frá nálgun rófsins og efnagreiningu má finna að steinninn inniheldur um 2,5 þungaprósentur af magnetíti og maghemíti. Hreint magnetít í basalti getur aðeins myndast með tvennum hætti, við solvus-afblöndun (e. exsolution) títánómagnetíts og við oxunaraflöndun járn úr t.d. ólivíni [8]. Í fyrra tilvikinu afblandast hið upprunanlega títánómagnetít yfir í ilmenít og hreint magnetít samkvæmt



en í hinu síðara oxast járnþáttur ólivíns í hreint magnetít. Þetta getur átt sér stað á mismunandi hátt [8], og einn möguleiki er



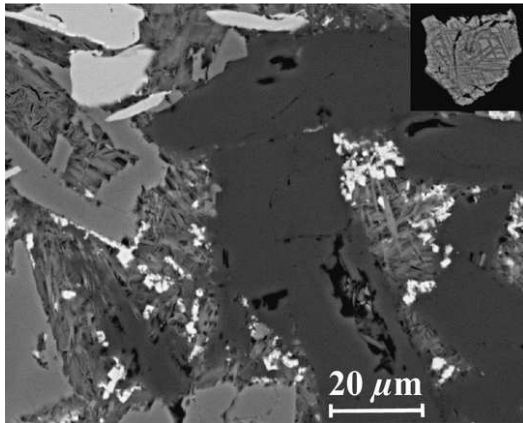
Magnetít sem myndast við þessi ferli er mjög smá-kornótt, sennilega yfirleitt einsátta seglað (e. single-domain), og það magnetít sem myndast í ólivíni er hrein viðbót við upphaflega segulfasann. Mynd 6 ber að skilja í ljósi þessa. Sérstaða ólivínbasalts er, að



Mynd 6. Náttúruleg segulmagnun bergs sem fall af magni hásegulmagnaðra steinda (magnetíts og maghemíts).

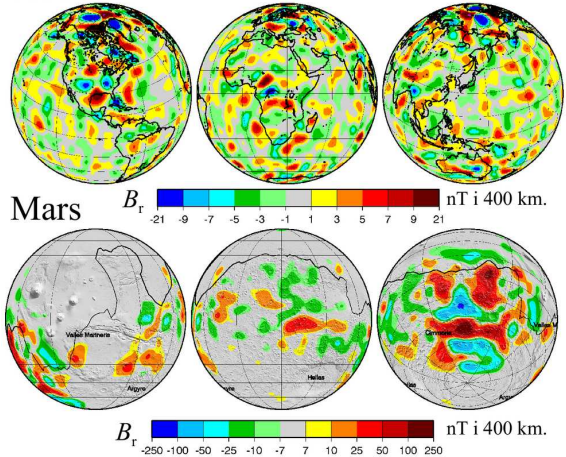
steindin ólivín er mun óstöðugri gagnvart ummyndun en pýroxen og plagíóklas, bæði við háan hita og lágan. Oxun, t.d. af völdum vatns, er mjög hröð í ólivíni miðað við pýroxen.

Á Mynd 6 sést að segulmagnun í ólivínbasalti getur orðið margfalt meiri en í öðru basalti sem ekki inniheldur ólivín, þó magn magnetíts sé nokkurn veginn hið sama. Skýringin er að magnetít sem leysist úr ólivíninu er smásætt ($< 1 \mu\text{m}$ í þvermál) og því einsátta og stærðargráðu segulmagnaðra en magnetít í stærri margátta (e. multi-domain) kornum. Efnagreiningar á slíkum magnetítkornum í ólivíninu [9] sýna að þar er ekkert títan, sem sannar að það hefur ekki kristallast beint úr bergkviku sem títanómagnetít, heldur mynd-



Mynd 7. Rafeindasmásjármynd (bakslagsrafeindir) sýnis frá Stardalssegulfrávikinu. Innskotsmyndin efst til hægri er andstæðuaukin af stærri járnnoxíðkornum sem t.d. má sjá efst til vinstri.

Jörðin

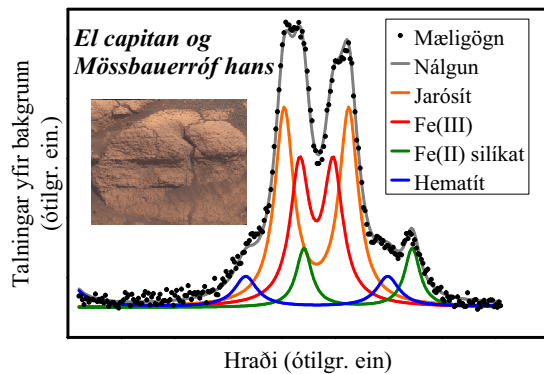


Mynd 8. Samanburður á fráviki í útþætti segulsviðs jarðar og segulsviðs Mars í 400 km hæð yfir yfirborðinu. Segulfrávikin á Mars virðast bundin við eldra yfirborð reikistjörnunnar, og er styrkur þeirra einni stærðargráðu meiri en mælist á jörðinni. Mynd breytt frá [13].

ast með oxunarafblöndun sem lýst var að ofan. Mynd 7 sýnir rafeindasmásjármynd af sýni frá segulfrávikinu í Stardal, sem hefur þessa eiginleika. Berg frá Stardalssegulfrávikinu [10, 11] er sérstakt að því leyti að segulfasinn er hreint magnetít [12]. Af rafeindasmásjármyndinni má sjá að það finnst í tveimur mismunandi formum: sem smásæjar agnir af hreinum járnfasa á svæðum sem bera greinileg merki afblöndunar, og sem stærri ($20\text{--}50 \mu\text{m}$) agnir sem innihalda bæði járn og títan. Ef þær síðarnefndu eru skoðaðar með andstæðuaukningu, sést að þær eru einnig afblandaðar á dæmigerðan hátt fyrir blöndu magnetíts og ilmeníts.

Af Mössbauerrófinu á Mynd 5 getum við ályktað að hefði steinninn Adirondack kólnað við ytra segulsvið hliðstætt því sem við þekkjum á jörðinni, hefði hann segulmagnast sem nemur $20\text{--}40 \text{ A/m}$. Sé steinninn Adirondack dæmigerður fyrir berg á yfirborði Mars, mætti álykta að sterk segulfrávik ættu að finnast á Mars. Þetta er einmitt raunin. Segulmælingar úr gervitungli (Mars Global Surveyor geimfarið) hafa sýnt að þótt Mars hafi ekki innra segulsvið, er yfirborðsberg reikistjörnunnar um stærðarþrepi meira segulmagnað að jafnaði en yfirborðsberg jarðar (Mynd 8).

Ofangreind skýring á seguleiginleikum ólivínbasalts bendir til að umhverfi á Mars hafi í eina tíð verið oxandi og aðstæður slíkar að bergkvika gat tekið upp vatn, annað hvort fljótandi eða bráðið úr ís, meðan



Mynd 9. Mössbauerróf “El Capitan” sem sýnir greinilegar línur frá jarósíti. Innskotsmyndin sýnir steininn (um 10 cm á hæð) og greinilega lagskiptingu hans (nálgun byggð á gögnum frá [14], þar sem felldar hafa verið saman mælingar við mismunandi hitastig).

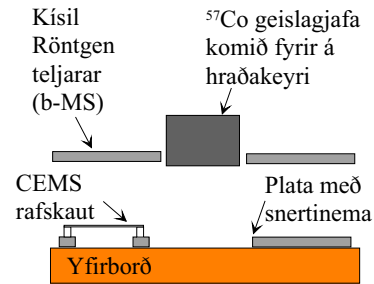
Mars hafði innra segulsvið einhverjum hundruðum milljóna ára eftir myndun reikistjörnnunnar (enn er deilt um nákvæma tímasetningu). Meðal loftsteina sem borist hafa frá Mars (svonefndir SNC loftsteinar) eru steinar með samsetningu basalts (Shergottites). Þeir eru jarðfræðilega fremur ungir (~130 milljón ár) og hafa myndast úr kviku með frekar lágan súrefnisþrýsting. Ýmislegt bendir til að þeir séu langt frá því að vera dæmigerðir fyrir elsta yfirborð Mars.

5. Mössbauerróf frá Opportunity

Þótt (hin frægu) Mössbauerróf frá Opportunity séu ekki á sama hátt tengd íslensku basalti og Adirondack-rófið, er ekki hægt að rita um Mössbauerróf frá Mars án þess að geta þeirra. Opportunity lenti á stað þar sem sáust einkennilega lagskiptir klettur sem gætu hafa myndast í vatni (sjá Mynd 9). Með Mössbauerhrifum var hægt að greina að í klettunum var að finna steindina jarósít ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), sem myndast meðal annars við veðrun bergs í súru vatni.

6. Næstu skref

Notkun Mössbauerhrifa á yfirborði Mars hefur margsannað ágæti sitt, og líkur þess að tæki til Mössbauer-mælinga verði send aftur til Mars í ómönnuðu geimfari eru taldar verulega góðar. Hægt er að auka vísindalegan afrakstur Mössbauer-mælinga á Mars á ýmsan hátt. Auk þess að mæla gamma- og Röntgengeislun (eins og nú er gert á Mars) má einnig telja rafeindirnar. Þessi aðferð er vel þekkt innan Mössbauerfræða og kallast CEMS (Conversion



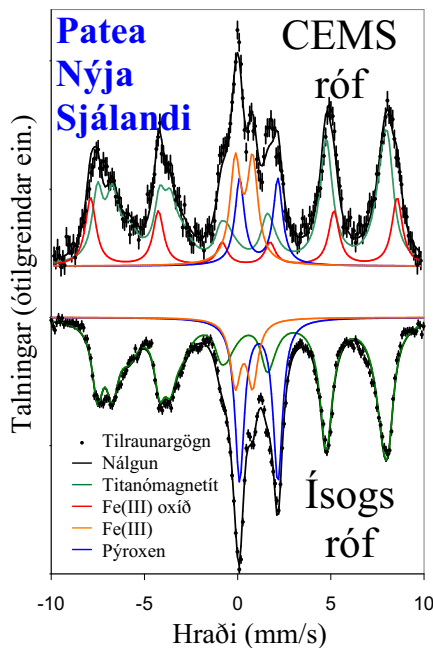
Mynd 10. Uppsetning til CEMS mælinga á Mars.

Electron Mössbauer Spectroscopy). Rafeindir frá hrörnun 14.4 keV Mössbauerkjarnastigsins í ^{57}Fe koma einungis frá 0.2 μm yfirborðslagi sýnisins, meðan Röntgen- og gammageislun berst frá 100-200 μm þykku lagi. Samanburður á b-MS rófum og CEMS rófum gefur því innsýn í dýptarháða oxun sýnisins. Mynd 10 sýnir á skematískan hátt hvernig breyta má tækjunum til að einnig megi mæla “CEMS” á Mars. Eina viðbótin búnaðinn er að gat er gert í snertiplötuna og rafskauti komið fyrir þar, u.þ.b. 2–4 mm ofan við sýnið sem verið er að skoða. Loftþjúpurninn á Mars (~7 mbar CO_2), er ekki slæmur sem teljaragas í rafeindanema. Á jarðneskum rannsóknastofum eru notaðar betri gasblöndur (~25 mbar Aceton eða He-Ne blöndur). Á Mars má ná um 30% af talningarhraða jarðneskrar rannsóknastofu og tölulegum gæðum samþarilegum við b-MS róf.

Styrkur þess að nota aðferðina á Mars liggur í tvennu: (1) Samanburður á b-MS rófum og CEMS rófum gefur innsýn í dýptarháða oxunarferli. (2) Þar sem ekki þarf nema um örfá μg efni til mælingar með CEMS, gefur aðferðin möguleika til mælinga á sýnum sem ekki væri hægt að mæla með b-MS. Til að sýna notagildi tækninnar eru hér að neðan tekin tvö dæmi.

7. Basaltsandur frá Nýja-Sjálandi

Mynd 11 sýnir samanburð Mössbauerrófa basaltsands frá Patea, Nýja-Sjálandi. Venjulega Mössbauerrófið sýnir línur frá títanómagnetíti (reyndar óvenju mikið af því) með $x=0,30(5)$ auk lína frá pýroxeni og ilmeníti, og er dæmigert fyrir basalt. Yfirborð þessara sömu agna inniheldur hinsvegar meira af títanómagnetíti og Fe(III) auk maghemíts. Maghemít er þekkt fyrir að myndast við oxun títanómagnetíts við ~500°C [15], en við það sama ferli ummyndast hluti títanómagnetítsins yfir í hreinna títanómagnetít ($x \sim 0,05$). Hér hefur það þó ekki gerst. Líklegasta skýringin er

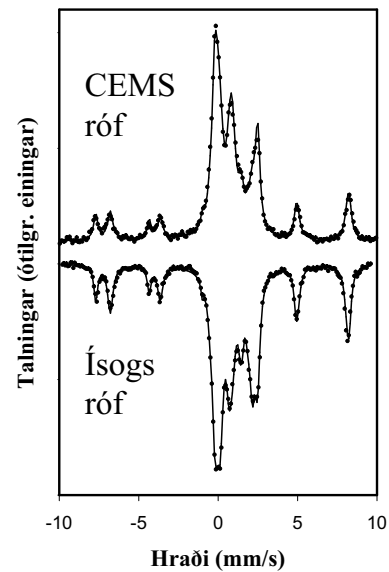


Mynd 11. CEMS og hefðbundið TMS róf af svörtum fjörusandi frá Patea, Nýja-Sjálandi, mæld við stofuhita.

langvinn efnaveðrun í vatni við lágt hitastig (stofuhita). Hærri styrk titanómagnetíts í yfirborðinu má skýra þannig að sandurinn hafi borist langa leið. Veikari kristallarnir (pýroxen) rofna hraðar og styrkur harðgerðari kristalla í yfirborðinu eykst. Sú saga sem Mössbauer mælingarnar segja kemur ekki á óvart: sýnið var tekið af strönd, og Patea er virkt eldfjall í um 20 km fjarlægð. Rófin sýna styrk Mössbauer mælinga á skemmtilegan hátt.

8. Mulið berg frá Stardal

Í Stardal er jákvætt segulfrávik, svo sterkt að segulsviðið við yfirborð mælist allt að 40% sterkara en meðalsegulsviðið [11]. Á áttunda áratugnum var boraður þar um 140 metra kjarni. Eftir 40 metra af lítt segulmögnum bergi var komið niður á hásegulmagnað basalt frá fyrri hluta ísaldar, með meðalsegulumögnun upp á 60 A/m [10]. Allmargar tilgátur um tilurð þessa segulfráviks hafa verið settar fram [11, 12] og hér bætum við þeirri tilgátu að segulfráviknið stafi af afblöndun í ólivíni sem lýst var að ofan. Mynd 12 sýnir Mössbauer róf af dæmigerðu sýni frá Stardal, sem malað hefur verið niður í $\sim 50 \mu\text{m}$ agnastærð. Mesti munurinn á rófunum felst í hlutfalli Fe(III), sem er allmiklu herra í yfirborðslagi kornanna. Þetta kemur ekki



Mynd 12. Mössbauer róf sýnis frá Stardal-segulsfrávikinu. Sama sýni var notað til rafeindasmásjarmyndatökunnar á Mynd 7.

á óvart. Þau svæði í berginu sem hafa oxast (innihalda Fe(III)) eru veikari fyrir. Við mölun er líklegra að sýnin brotni eftir slíkum svæðum, sem þýðir að hlutfall Fe(III) í yfirborði kornanna eftir mölun hefur aukist. Það sem hinsvegar kemur á óvart er hlutfallsleg aukning ólivíns í yfirborðinu (frá 9% til 21%). Ef litið er til Myndar 7, sést að einmitt í ólivíni hafur orðið afblöndun magnetíts. Því er auðvelt að ímynda sér að sá hluti bergsins sé sérlega veikur. Við mölun sýnisins brotnar það auðveldar á þessum svæðum, og hlutfall ólivíns í yfirborði agnanna eykst. Beiting CEMS á Mars getur gefið innsýn í veikleika efnisins og veitt þannig upplýsingar um ferlin sem áttu sér stað þegar bergið myndaðist og seinni tíma oxun.

9. Lokaorð

Mössbauer mælingar á Mars hafa átt þátt í að breyta hugmyndum okkar um tilurð jarðvegsins á yfirborði, og gefa færi á einfaldri mynd af hinum sterku segulfrávikum á Mars. Beiting á yfirborðsnæmum Mössbauerhrifum (CEMS) gæfi enn frekari upplýsingar um bergið og eiginleika þess. Hér geta rannsóknir á íslensku bergi gegnt mikilvægu hlutverki og möguleikarnir á frekari hagnýtingu þeirra nær óþrjótandi.

Upplýsingar um geimför á Mars má nálgast á marsrovers.jpl.nasa.gov (NASA) og www.esa.int/Marsexpress (ESA). Fyrstu

gögn frá Mars–jepplingunum urðu opinber í september, og ná yfir fyrsta mánuð ferðanna.

Þakkir

Danska rannsóknarráðinu er þakkað fyrir aðstoð (2006-01-0030) og einnig starfsfélögum Mars-rannsóknastofanna í Kaupmannahöfn og Árósum.

Heimildir

- [1] Ö. Helgason, H.P. Gunnlaugsson, Fyrstu Mössbauer-rófin frá Mars og greining bergsteinda, *Raust*, þetta bindi.
- [2] J.M. Knudsen, M.B. Madsen, M. Olsen, L. Vistisen, C.B. Koch, S. Mørup, E. Kankleit, G. Klingelhöfer, E.N. Elanov, V.N. Khromov, L.M. Mukhin, O.F. Prilutski, B. Zubkov, G.V. Smirnov, J. Juchniewicz, Mössbauer spectroscopy on Mars. Why? *Hyp. Int.* **68** (1991) 83–94.
- [3] G. Klingelhöfer, R.V. Morris, B. Bernhardt, D. Rodionov, P.A. de Souza Jr., S.W. Squyres, J. Foh, E. Kankleit, U. Bonnes, R. Gellert, C. Schröder, S. Linkin, E. Evlanov, B. Zubkov, O. Prilutski, Athena MIMOS II Mössbauer spectrometer investigation, *J. Geophys. Res.* (2003) **108**(E12), 8067, doi:10.1029/2003JE2138.
- [4] S.W. Squyres, R.E. Arvidson, E.T. Baumgartner, J.F. Bell III, P.R. Christensen, S. Gorevan, K.E. Herkenhoff, G. Klingelhöfer, M.B. Madsen, R.V. Morris, R. Rieder, R.A. Romero. Athena Mars rover science investigation, *J. Geophys. Res.* **108**(E12), 8062, (2003) doi:10.1029/2003JE002121.
- [5] G. Klingelhöfer, R.V. Morris, B. Bernhardt, C. Schröder, D. Rodionov, P.A. de Souza Jr., A. Yen, F. Renz, T. Wdowiak, S. Squyres and the Athena Science Team, Mössbauer spectroscopy of soils and rocks at Gusev crater and Meridiani planum (2004) LPSC XXXV, abstract no. 2184.
- [6] R.V. Morris, G. Klingelhöfer, B. Bernhardt, C. Schröder, D.S. Rodionov, P.A. de Souza, Jr., A. Yen, R. Gellert, E.N. Evlanov, J. Foh, E. Kankleit, P. Gülich, D.W. Ming, F. Renz, T. Wdowiak, S.W. Squyres, R.E. Arvidson, Mineralogy at Gusev crater from the Mössbauer spectrometer on the Spirit rover, *Science* **305** (2004) 833–836.
- [7] 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, J. Zipfel, Chemistry of rocks and soils in Gusev crater from the Alpha Particle X-ray spectrometer, *Science* **305** (2004) 829–832.
- [8] S.E. Haggerty, I. Baker, The alteration of olivine in basaltic and associated lavas, part I: High-temperature alteration, *Contr. Mineral. Petrol.* **16** (1967) 233–257.
- [9] H.P. Gunnlaugsson, Ö. Helgason, L. Kristjánsson, P. Nørnberg, H. Rasmussen, S. Steinþórsson and G. Weyer, Magnetic properties of Olivine basalt: Application to Mars, Submitted to Phys. Earth Planet. Int. (2004).
- [10] S. Steinþórsson, G.E. Sigvaldason, Skýrsla um berg-fræðirannsóknir við Stardal, *Science Inst., Univ. Iceland, Report* (1971).
- [11] I.B. Friðleifsson, L. Kristjánsson, The Stardalur magnetic anomaly, SW-Iceland, *Jökull* **22** (1972) 69–78.
- [12] Ö. Helgason, S. Steinthorsson, M.B. Madsen, S. Mørup, On anomalously magnetic basalt lavas from Stardalur, Iceland, *Hyp. Int.* **57** (1990) 2209–2214.
- [13] M. Purucker, D. Ravat, H. Frey, C. Voorhies, T. Sabaka, M. Acuna, An altitude-normalized magnetic map of Mars and its interpretation, *Geophys. Res. Lett.* **27** (2000) 2449–2452.
- [14] Gögn frá MER geimförum:
<http://anserver1.eprsl.wustl.edu>
- [15] H.P. Gunnlaugsson, G. Weyer and Ö. Helgason, Maghemite on Mars: Possible clues from titanomaghemite in Icelandic basalt, *Planetary and Space Science* **50**(2) (2002) 157–161.

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 near to the landing sites and study them with a 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 significantly contributed to that. Mössbauer spectroscopy is the first experimental technique sent to Mars that can give a 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.

In the paper, some of the first Mössbauer spectra are described. The lessons that can be learned from them, in terms of similar studies of Icelandic basalt, are described. These include soil-formation processes and the results allow us to suggest a simple explanation for the magnetic anomalies on Mars. Finally, ideas on how the technique can be expanded on future robotic missions to Mars are described.

Um höfundana:

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

Leó Kristjánsson er vísindamaður við Raunvísindastofnun Háskóla Íslands. Hann lauk B.Sc. Honours gráðu í eðlisfræði frá Edinborgarháskóla 1966, M.Sc. gráðu í jarðeðlisfræði frá eðlisfræðideild Háskólans í Newcastle upon Tyne 1967. Ph.D. frá Memorial-háskóla í St. John's, Kanada 1973.

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.

Sigurður Steinþórsson er prófessor í bergfræði við raunvísindadeild Háskóla Íslands. Hann er B.Sc. Honours í jarðfræði frá Háskólanum í St. Andrews, Skotlandi, 1964 og Ph.D. í berg- og jarðefnafræði frá Princetónháskóla 1974.

¹Institut for Fysik og Astronomi
Aarhus Universitet
Ny Munkegade
DK-8000 Århus C, Danmark

²Raunvísindastofnun Háskólans
Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík

Móttekin: 15. sept. 2004