

Uudenlaisen geofysiikan äärellä:

Osa 1 – Myonit ja myonigrafian yleisimmät sovellukset

MARKO HOLMA, PASI KUUSINIEMI, PERTTI SARALA JA JARMO KORTENIEMI

Myonigrafia on aineen tiheyden uusi kuvantamismenetelmä. Se perustuu ilmakehässä syntyvien myonien havaitsemiseen, jähka ne ovat ensin kulkeneet kuvattavan kohteen läpi. Myonigrafialla on geotieteissä erittäin monenlaisia käyttökohteita.

Tämä on ensimmäinen kirjoitus sarjassa, joka esittelee myonigrafian (engl. *muography*) historiaa, perusteita, ilmaisimia, haasteita ja geotieteellisiä sovelluksia. Sarjan tavoite on edistää tämän uuden alan ymmärrystä ja hyödyntämistä Suomessa. Tiedossamme on vain yksi aiempi myonigrafiaa käsittelevä suomenkielinen julkaisu (Holma ym. 2019) sekä yksi julkaisematon LuK-tutkielma (Kauppinen 2020). Sarjan tässä osassa perehdymme itse myoneihin ja tarjoamme lyhyen katsauksen myonigrafian historialliseen käyttöön. Se avaa myonigrafian mahdollisuuksia ja rajoitteita geotieteissä.

Elämme keskellä taukoamatonta myonisadetta, vaikkemme sitä huomaakaan. Myonit ovat alkeishiukkasia, joista ei paljon puhuta ja jotka voivat siksi kuulostaa eksoottisilta. Ne ovat kuitenkin tuiki tavallisia. Niitä viuhuu taukoamatta lävitsemme huimalla nopeudella. Myonit vuorovaikuttavat lävistämänsä aineen kanssa vain vähän, minkä vuoksi ne etenevät myös syvälle kallioon. Ja se tekee niistä oivan apuvälineen vaikkapa kallion sisuksien tutkimisessa.

Myonien avulla voidaan tutkia monia mielenkiintoisia kohteita. Arkeologit ovat selvittäneet sen avulla pyramidien ja muiden isojen rakennelmien rakennetta. Geotiteilijät

taas ovat kuvantaneet tulivuoria, vuoria, maaperämuodostumia, kallioperää ja jopa ilmakehääkin (esim. Tanaka ym. 2022).

Myonigrafian perusteet

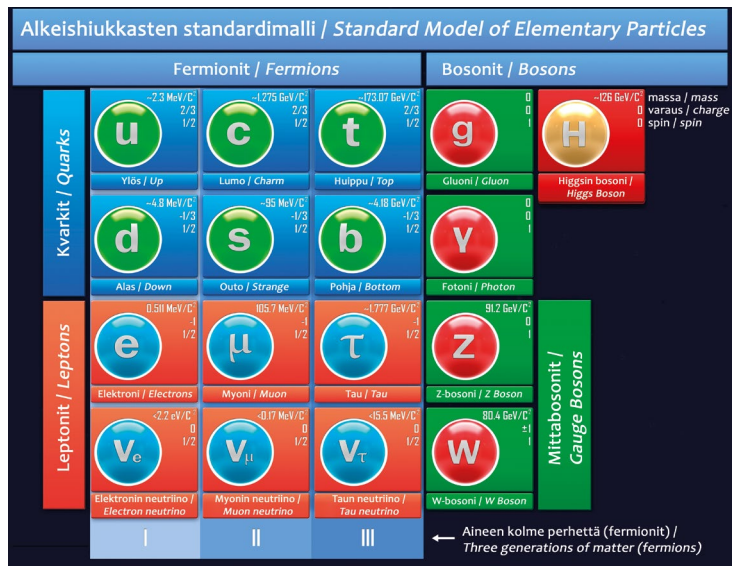
Myonigrafia on monelle vielä toistaiseksi hyvin vieras asia. Tekniikkaa on kenties helpointa ajatella lääketieteellisen röntgenkuvantamisen kaltaisena tekniikkana. Röntgenhän perustuu fotonien absorptioon niin, että säteilyn väimeneminen – sen nopeus tai aste – riippuu kuvattavan kohteen rakenteiden tiheydestä. Tiheät luut tekevät siis kuviin varjoja, koska ne vaimentavat säteilyä enemmän kuin harvempi pehmytkudos. Tämän vuoksi luista jää kuvaan selvä varjo. Tässä vaiheessa kannattaa muistaa, että lääkärinen käyttämät röntgenkuvat, joissa luut näkyvät kirkkaina, ovat negatiiveja.

Myonografiassa saadaan aikaan samankaltainen kuva havaitsemalla fotonien sijaan myoneja (kuva 1). Röntgenin tavoin myös myonit menettävät energiaansa tiheyden funktiona – sitä enemmän, mitä tiheämpää tai paksumpaa kuvattava materiaali on. Ja, aivan kuten röntgenissä, myös myonografiassa suuri määrä myoneja jostain tietyistä suunnista tarkoittaa keskimääräistä alhaisempaa tiheyttä, tai ehkäpä ohuempaa materiaalikerrosta. Kuvattavan kohteen pinnanmuoto on siis olennainen tieto data-analyysin kannalta (tämä topografiakorjauksesta lisää myöhemmin sarjassamme).

Kuten röntgenissä, myös myonografiassa aikaansaatu kuva voi olla joko kaksikulotteinen (myoniradiografia; *muon radiography*) tai kolmiulotteinen (myonitomografia; *muon*

Kuva 1. Myonin (μ , keskellä) paikka alkeishiukkasten joukossa. Se on negatiivisesti varautunut leptoni, samoin kuin elektroni ja tauhiukkanen. Niistä jokaisella on myös positiivisesti varautunut antihiiukkanen. Myonigrafiaa varauksella ei ole merkitystä. Kuva: Muon Solutions Oy / Marko Holma.

Figure 1. The place of the muon (μ) among elementary particles. It is a negatively charged lepton, like electrons and tau particles. Each of them has its positively charged antiparticle. Muon charge is irrelevant in muography. Figure: Muon Solutions Oy / Marko Holma.



tomography). Esimerkkejä myonigrafian soveluksista ja muista säteilyn absorptioon perustuvista kuvantamismenetelmistä löytyy kuvasta 2. Myonigrafiaa voidaan toteuttaa myös ”neliulotteisena” aikasarjakuvantamisena (aika-sarjamyonigrafia; *time-lapse muography*, *time-sequential muography*), jolloin päästään käsiksi kohteessa ajan myötä tapahtuviin muutoksiin. Myonigrafia on siis kattotermi erilaisille tekniikoille, joilla kaikilla on omat vahvuutensa ja käyttökohteensa. Näistä lisää artikkelisarjan tulevissa osissa.

Tiedonjanoisten kannattaa etsiä käsiinsä vastikään ilmestynyt ensimmäinen myonigrafiaa laajalti käsittelevä kirja (Oláh ym. 2022), jossa esitellään alan kehitystä, sen tekniikoita, sekä geotieteellisiä sovelluksia. Se, että ensimmäinen myonigrafialle omistettu kirja käsittelee juuri sen hyötykäyttöä geotieteissä, on vakuuttava todiste alan potentiaalista oman planeettamme – ja miksei muidenkin planeettojen – tutkimuksessa.

Röntgensäteiden ja myonien avulla tapahtuvien kuvantamistekniikoiden välillä on myös joitain olennaisia eroja. Ensimmäinen on kantama. Korkeaenergisinkin ihmisen tuottama röntgensäteily tukahtuu tunkeuduttuaan jo vain muutamia metrejä mihin ta-

hansa kiinteään tai nestemäiseen materiaaliin. Energeettisimmät myonit taas voivat läpäistä moista ainetta jopa muutamia kilometrejä. Myoneilla kuvattavat kohteet voivat olla lähes minkä kokoisia vain, aina muutamista metreistä jopa kilometreihin.

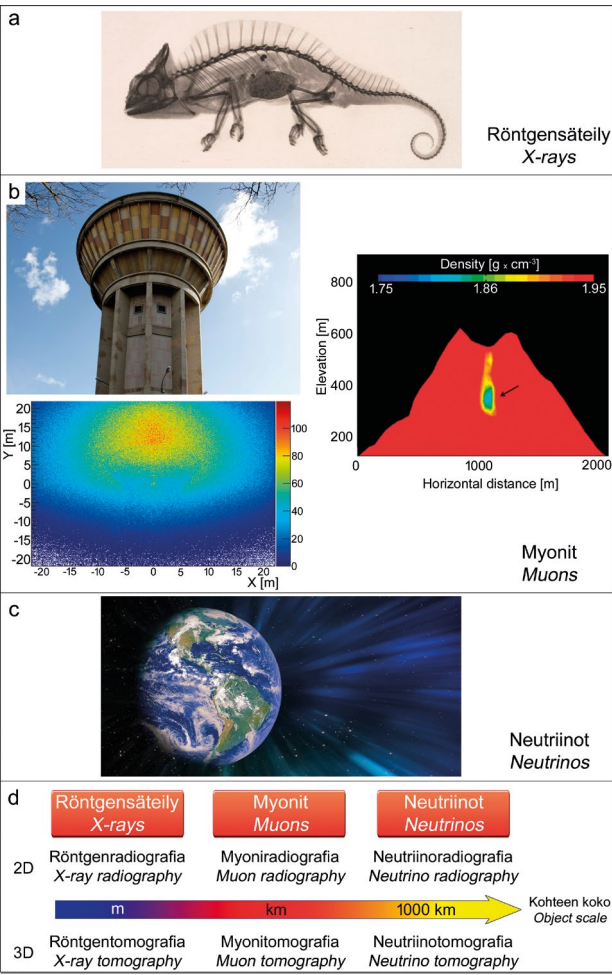
Toinen ero on säteilylähteen tyyppi. Röntgenissä sen on oltava aina aktiivinen ja se tuottaa kuvattavalle kohteelle ylimääräisen säteilyannoksen. Myonigrafian menetelmät taas ovat aina passiivisia. Myoneja ei siis generoida itse, vaan ne ovat osa luonnon taustasäteilyä, eikä ylimääräistä säteilykuormaa synny. Passiivisuudella on etuja, kuten energiatehokkuus, turvallisuus sekä helppous. Ei ole myöskään tarvetta erilliselle luvitukselle säteilyn käyttöön tai säteilytyöhön liittyen.

Kolmas ero on saadun tiedon laatu. Siinä missä röntgenlaitteessa havaitaan yhdestä lähteestä tulevaa säteilyä, myonigrafiaa lähdesäteily tulee ympäristöstä, kaikkialta yläviistosta. Ilmaisin on siis havaittavan aineen alapuolella tai sivulla. Suuntaherkät myoni-ilmaisimet rakennetaan kuitenkin niin, että myonien lentoradat voidaan määrittää varsin tarkasti.

Neljäs ero on mittauksiin kuluva aika. Röntgenkuvaus on nykyään hyvin nopea ta-

Kuva 2. Esimerkkejä säteilyn absorptioon perustuvista kuvantamismenetelmistä. Röntgensäteitä käytetään pienessä mittakaavassa (a). Myonit soveltuvat pienten ja keski suurten kohteiden tiheysmäärittelyyn (b). Neutriinoilla kuvannetaan erittäin suuria rakenteita, kuten maapallon ydintä, vaippaa tai näiden välistä rajapintaa (c). Kuvantamistekniikat toimivat aivan eri mittakaavoilla (kuva on vain suuntaa antava) (d). Kuva a: J. M. Eder ja E. Valenta, 1896. Kuva b: Vasemmanpuoleiset kuvat muokattu Bouteillen (2017) ja oikeanpuoleinen kuva muokattu Tanakan (2022) alkuperäisistä kuvista. Kuvat c ja d: Muon Solutions Oy / Marko Holma.

Figure 2. Examples of radiation absorption-based imaging methods. X-rays are used when studying very small-scale targets (a). Muons are suitable for the density characterisation of small to medium size targets (b). The structures analysed with neutrinos are very large, such as the Earth's core, mantle, or the core-mantle interface. (c). Each method operates at considerably different scales (the scale here is only indicative) (d). Photo a: J. M. Eder and E. Valenta, 1896. Figure b: Left-hand images edited from Bouteille (2017) and right-hand image edited from Tanaka (2022). Images c and d: Muon Solutions Oy / Marko Holma.



pahtuma (alan kehityksen alussa ei niinkään). Myonigrafiaa mittaussuuna taas on pidempi, vähintään kymmeniä minutteja, mutta paljon yleisemmin viikkoja tai jopa kuukausia. Aika riippuu siitä, mitä selvitetään ja kuinka tarkasti.

Ilmasuihkut ja myonien ominaisuuksia

Meidän lähiympäristössämme myoneja syntyy lähes yksinomaan Maan ilmakehässä, noin 15–25 kilometrin korkeudessa. Prosessin periaate on yksinkertainen: Suurenerginen nopea kosminen hiukkanen törmää ilmakehään ja synnyttää huiman vauhdikkaita ja läpäisykykyisiä myoneja (kuva 3). Kuljettuaan vä-

liaineen läpi myonit havaitaan myonigrafian keinoin.

Mutta tutustutaanpa asiaan hieman tarkemmin. Siksi varoitus: tiedossa on hetki hiukkasfysiikkaa. Ihan vähän vain, ilman kaa-voja.

Kosminen hiukkas säteily muodostuu protoneista (vety-ytimistä) ja pienissä määrin alfahiukkasista (heliumytimistä) sekä vieläkin raskaammista atomiytimistä. Myonigrafian edellytyksenä ovat erittäin suurenergiset kosmiset hiukkaset. Ne ovat peräisin syvältä avaruudesta, lähinnä oman Linnunrata-galaksimme uumenista. Maan ilmakehään (enimmäkseen typpi- ja happimolekyyleihin) osuessaan kukin kosmisen säteilyn hiukkanen

synnyttää kapeana keilana lähes valonnopeudella etenevän ilmasuihkun (*air shower*; kuva 3). Suihku muodostuu tyypillisesti sadoistatuhansista tai jopa miljoonista ”sekundäärisistä” kosmisista hiukkasista. Sitä enemmän, mitä enemmän energiaa alkuperäisellä hiukkasella oli. Kuhunkin ilmasuihkuun kuuluu monia erilaisia hiukkasia, mutta kiinnostuksemme kohdistuu tietysti vain myoneihin.

Mainittakoon, että myös Aurinko lähettää meille kosmisia hiukkasia. Niiden energia on kuitenkin pieni, joten niistä syntyy vain matalaenergisiä myoneja. Ne eivät läpäise kiinteää ainetta kuin korkeintaan vain metrejä. Lisäksi niiden hyödyntäminen öisin olisi luonnollisesti lähestulkoon mahdotonta. Aurinkokunnan ulkopuolelta tulevien suurenergisten hiukkasien synnyttämiä myonisuihkuja taas syntyy tasaisesti aina ja kaikkialla, täysin riippumatta vuorokauden- tai vuodenajasta.

Myonit etenevät aineen läpi yleensä lähes suoria ratoja. Sironta eli myonin poikkeaminen suorasta radasta on oleellinen asia vain, jos myoni on hidastunut tai sen energia on lähitökohtaisesti matala. Lisäksi sironta on voimakasta vain hyvin tiheissä aineissa, kuten vaikkapa ydinjätteessä. Myonit voivat materiaalien läpi kulkiessaan hidastua useammallakin tavalla, kuten jarrutussäteilyn (*bremsstrahlung*), parinmuodostuksen (*pair production*) ja fotonukleaarisen vuorovaikutuksen (*photonuclear interaction*) seurauksena. Näistä ilmiöistä voi lukea lisää fysiikan oppikirjoista.

Myoneista suurin osa tulee taivaalta eli jostakin ylhäältä päin. Vinommilla tulokulmilla myonien määrä vähenee varsin tasaisesti. Helppo muistisääntö: Asteluvun puolittuessa myös myonien määrä putoaa puoleen. Esimerkiksi 45° kulmassa tulee puolet siitä mitä pystysuorassa, ja 22,5° kulmassa taas puolet edellisestä. Myoneja saapuu myös ihan vaakatasossakin, mutta poikkeustapauksia lukuun ottamatta myonien määrä on tilastojen keräämiseen liian vähäinen. Käytännön kuvantamiseen myonien määrät riittävät, kun tulokulma

on 10° horisontin yllä tai enemmän. Kannattaa huomata, että kun geotieteilijälle vaakataso on luonnollisesti 0° ja pystysuora 90°, ajattelee hiukkasfyysikko suunnat päinvastoin. Myonijakauma noudattaa siis muotoa $\cos^2\theta$, missä θ on tulokulma pystysuorasta. ”Hulluja nuo hiukkasfyysikot!”, sanoi jo Obelix.

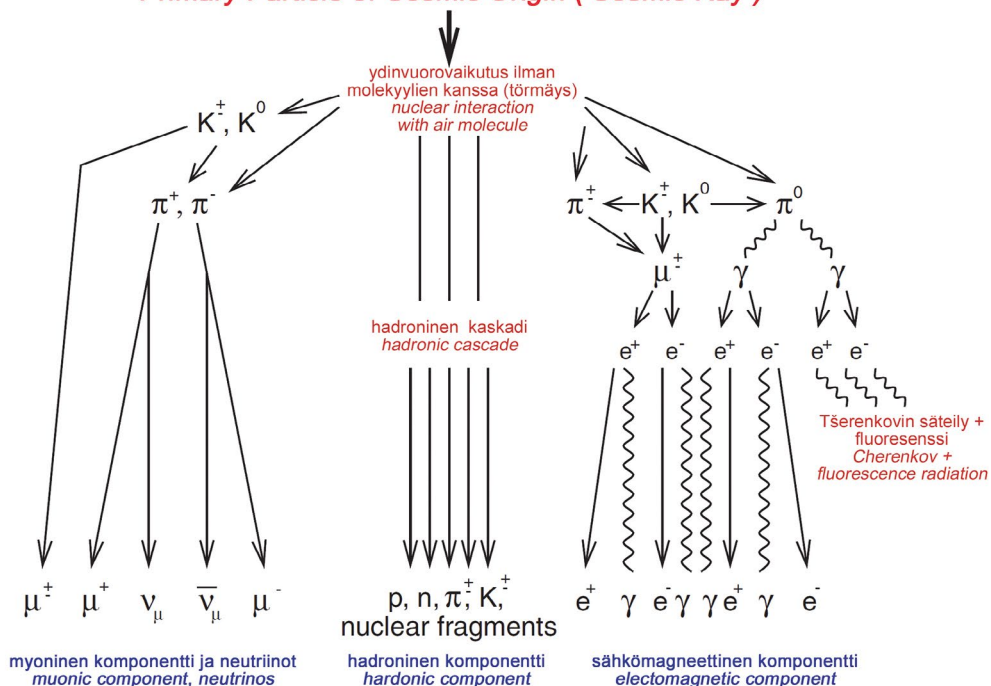
Kulmajakaumasta johtuen myoni-ilmais ei käytännössä havaitse myoneja suoraan sivuilta tai alapuolelta. Laitteen tallentama datapilvi muodostuukin kartion muotoiseksi, kunhan mittausta vain jatketaan tarpeeksi kauan (kuva 4).

Alkeishiukkasina myonit ovat ikään kuin elektronien raskaita serkkuja (kuva 1), joiden massa on 207 kertaa elektronin verran. Elektronien tavoin myonitkin kuuluvat ns. leptoneihin, joiden ei ajatella koostuvan mistään pienemmistä osista. Myonilla ei siis tiettävästi ole sisäistä rakennetta. Niihin ei myöskään vaikuta vahva vuorovaikutus, joka pitää koossa kaikkea meille tuttua ainetta eli sitoo kvarkkeja yhteen protoneiksi ja neutroneiksi, ja niitä edelleen atomiytimiksi. Myonit kyllä vuorovaikuttavat tuon tavallisen materian kanssa hieman heikon vuorovaikutuksen kautta, mutta enimmäkseen vuorovaikutus tapahtuu sähkömagneettisesti fotonien välityksellä. Myonien havaitseminen perustuu juuri sähkömagneettiseen vuorovaikutukseen.

Myonigrafiaassa puhutaan tavallisesti vain ”myoneista”. Tarkalleen ottaen tilanne on kuitenkin mutkikkaampi: elektronin tavoin negatiivisesti varautuneen myonin lisäksi esiintyy myös niiden antishiukkasia, positiivisesti varautuneita antimyoneja. Hiukkasilla on kuitenkin yhtä suuret massat ja spinin (joita voi ajatella tavallaan niiden pyörimismäärinä), eikä varauksella ole myonigrafiaassa mitään merkitystä. Myonia ja antimyonia ei siis yleensä erotella toisistaan puhe- tai edes kirjoitetussa kielessä.

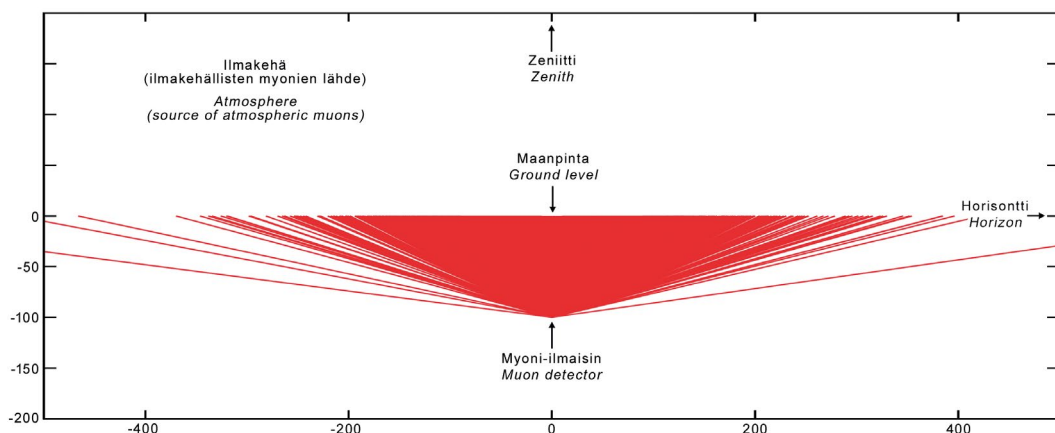
Myonit ovat epävakaita hiukkasia, joiden keskimääräinen elinaika on vain vaivaiset 2,2 mikrosekuntia (μs). Toisaalta ne ovat hyvin nopeita, paahtaen eteenpäin yli 95 % valonno-

Kosmista alkuperää oleva primääri hiukkanen ("kosminen säde")
Primary Particle of Cosmic Origin ('Cosmic Ray')



Kuva 3. Kaaviokuva ilmasuihkujen syntymekanismista (ei mittakaavassa). Symbolit osoittavat erityyppisiä alkeishiukkasia. Alempi kuva havainnollistaa myoneille tyypillisiä tulokulmia (myonit peräisin useasta eri ilmasuihkusta). Ylempi kuva: Muokattu Haungs ym. (2003). Alempi kuva: Muon Solutions Oy / Marko Holma.

Figure 3. Schematic illustration of the air shower generation mechanism (not to scale). The lower figure illustrates the typical muon entry angles, with muons originating from several different air showers. Upper figure: Modified from Haungs et al. (2003). Lower figure: Muon Solutions Oy / Marko Holma.



Kuva 4. Tilastolliseen simulaatioon perustuva kaavamainen esitys yksittäisen maanalaisen myoni-ilmaisimen kartiomaisesta "näkökentästä" suhteessa maanpinnan alaiseen kokonaistilavuuteen. Kukin punainen viiva kuvaa yhden myonin liikerataa. Kokonaiskuvaan ei ole merkitystä ilmansuunnalla, leveys- tai pituuspiirillä, eikä vuorokauden- tai vuodenajalla. Myoniratojen maanpinnan yläpuoliset osat on selkeyden vuoksi leikattu kuvasta pois. Kuva: Muon Solutions Oy / Marko Holma, Pasi Kuusiniemi.

Figure 4. A schematic simulated representation of the conical "field of view" of a single underground muon detector, relative to the total subsurface volume of the ground. Each red line describes the trajectory of one muon. The overall picture is not dependent on the compass point, latitude, longitude, time of day, or the time of year. The above-ground parts of the muon tracks are cut from the figure for clarity. Figure: Muon Solutions Oy / Marko Holma, Pasi Kuusiniemi.

peudesta. Mutta edes noin huimalla vauhdilla ne ehtivät kulkea vain alle kilometrin matkan ennen hajoamistaan. Mitä ihmettä – kuinka kummassa useimmat myonit kuitenkin sitten päätyvät korkeuksista aina merenpinnan tasolle asti ja vielä syvälle kallion sisäänkin? Kyse on siitä, että nopeutensa vuoksi myonien toimintaa täytyy käsitellä suhteellisuusteorian kautta. Näin paljastuu, että myonit kokevat ns. aikadilataatiota eli aikavenymää, jossa niiden oma sisäinen aika kuluukin hitaammin kuin miltä asia ulkopuolisen tarkkailijan (eli meidän) silmissä näyttää. Tuo pidentää myonien *kokemaa* elinikää niin paljon, että useimmat niistä ehtivät aivan hyvin maan tai meren pinnalle ja tunkeutumaan edelleen syvälle maan alle ennen hajoamistaan. Kaikki on suhteellista.

Suurenergisiä myoneja ei voida aktiivisin toimin mitenkään pysäyttää. Sen sijaan ne havaitaan ns. energijätön eli myonin menettämisen kautta. Käytännössä tuo tarkoittaa yleensä myonien mittalaitteen läpi kulkiessaan jälkeensä jättämän signaalin havait-

semista, ei itse energian mittaamista suoraan. Tavallisesti myoneista tallennetaan siis energian sijaan signaalin voimakkuus ja se hetki, jolloin ne läpäisivät ilmaimen (joita voi olla useampia kerroksia). Signaali on sitä voimakkaampi mitä enemmän energiaa myoni ilmaimen läpi kiitäessään jätti. Sarjan seuraavassa osassa kerrotaan tästä lisää. Tässä vaiheessa on kuitenkin tarpeen sanoa, että yleisesti ottaen energijätto on sitä suurempi, mitä tiheämpää materiaali on. Lopulta, jähka myoni on menettänyt tarpeeksi energiaa, se pysähtyy, tai oikeammin hajoaa elektroniksi, antineutriinoksi ja neutriinoksi.

Myonigrafian historia ja yleisimmät sovellukset

Myonit havaittiin ensimmäisen kerran vuonna 1936, ja niiden olemassaolo varmistettiin 1937. Uutta alkeishiukkasta kutsuttiin aluksi mesotroniksi, koska sen massa jäi elektronin ja protonin massojen väliin. Sitten nimi vaihtui myy-mesoniksi, ja lopulta vakiintui

myoniksi, mukaillen kreikan kielen kirjainta ”μ” eli ”mu”, suomalaisittain ”myy”.

Ensimmäisen myoneja hyödyntävän tutkimuksen suoritti E. P. George vuonna 1955. Hän käytti myoneja arvioidessaan Australian Snowy Mountainin vesivoimalaitoksen tunnelin yläpuolisen kallion paksuutta. Mittaukset tehtiin Geiger-mittarilla, joka ei rekisteröinyt myonien suuntatietoa. Täten tunneliin asennetun laitteen yläpuolisen kivimassan rakenteiden kuvaaminen ei ollut mahdollista. Tutkimus kuitenkin jätti niin sanotusti siemenen itämään syvälle tiedeyhteisön mieliin.

Seuraavan kerran myoneja hyödynsi Luiz Alvarezin tutkimusryhmä 1960-luvun lopulla. He läpivalaisivat Egyptin Gizassa sijaitsevaa Khfrenin pyramidia myonien avulla, ajatukseenaan etsiä pyramidin sisäisiä tuntemattomia kammioita (Alvarez ym. 1970). Alvarezin epäonneksi juuri Khfrenin pyramidissa niitä ei kuitenkaan mitä ilmeisimmin ole, sillä he tai mitkään myöhemmätkään tutkimukset eivät ole moisia havainneet. Alvarezin tutkimusryhmän käyttämä alkeellinen myonigrafinen kuvantamisteknologia kuitenkin selvästi toimi. He osoittivat, että myoneilla on vielä paljon annettavaa tutkimukselle. 1960-luvun teknologinen taso ei kuitenkaan ollut vielä kypsä myonigrafian laajemmalle esiinmarssille.

Myonien käytön kaivosteollisuuden soveluksissa otti ensimmäisenä esille Malmqvist ym. (1978, 1979). Teknologia ei vielä tuolloinkaan ollut riittävän kehittyntä käytännön tiheysanalyysiin, mutta myonigrafian tärkeimmät periaatteet näkyivät jo heidän julkaisuissaan. He esimerkiksi huomasivat, että prosentin ero kahden kivilajin keskitiheydessä vastaa noin 3 % eroa havaittujen myonien määrissä. Sama edullinen suhdeluku säilyy suuremmissakin tiheyseroissa: 10 % tiheysero tarkoittaa 30 % eroa myonimäärissä. Tuo on useimmiten erittäin helposti mitattavissa.

Yhtenä myonigrafian eduista Malmqvist ja muut (1979) mainitsevat sen mahdolli-

suudet täydentää gravimetrisia mittauksia. Gravimetrit kun ovat herkkiä sekä ylä- että alapuolisten kivien tiheysvaihteluille. Jälkimmäisessä tapauksessa painovoima-anomalian aiheuttajan syvyys on hankalampi paikantaa. Myoni-ilmaisimet taas ovat herkkiä vain ilmaisen yläpuolisille kiviaineksille.

Modernin myonigrafian pioneerina pidetään japanilaista tulivuoritutkimusta vuodelta 1995 (Nagamine ym. 1995). Artikkeliki käsittelee tulivuorten matalien osien kuvantamista lähes vaakatasossa tulevien myonien avulla. Sittenkin sikäläisten tulivuorten myonigrafinen kuvantaminen ja seuranta on tuottanut jo kymmenittäin julkaisuja. Tutkimuskeino on myös alkanut leviätä muuallekin geotieteisiin sekä muillekin aloille, kuten uudelleen arkeologiaan. Kannattaa myös huomata, että termi ”myonigrafia” otettiin käyttöön vasta 2000-luvulla.

Suomessa myonigrafinen tutkimus alkoi käytännössä vuonna 2016. Tuolloin Pyhäsalmen kaivoksessa kosmisia säteitä myonien avulla tutkivan EMMA-kokeen (Kuusiniemi ym. 2018) oheisyriksenä perustettiin Muon Solutions Oy. Nyt tutkimus on Suomessakin leviämässä myös akateemiseen maailmaan. Suomen olosuhteissa myonigrafiaa on sovellettu toistaiseksi malminetsintään, kaivostointintaan ja pohjavesitutkimuksiin.

Myonigrafian paikka tieteiden joukossa

Myonigrafian kehitys on hyvä esimerkki tieteen yleisestä edistymisestä ja siitä kuinka uudet tutkimusalat syntyvät. Tässä tapauksessa astrohiukkasfysiikan alan piirissä tapahtunut teoreettinen ja laitekehitys on johtanut uuden, selvästi omanlaisensa tutkimusalan syntyyn.

Näkökulmasta riippuen myonigrafiaa voidaan pitää joko astrohiukkasfysiikan (*astroparticle physics*); tai hiukkasgeofysiikan (*particle geophysics*; Tanaka 2014) soveltavana menetelmänä. Suomenkielisen sanaston kannalta näistä jälkimmäinen, Tanakan (2014)

lanseeraama termi lienee hivenen osuvampi. Kokonaisuudessaan kyse on kuitenkin yhdestä geofysiikan monista alalajeista. Moinen jaottelu auttaa ehkä paremmin ymmärtämään perinteisen geofysiikan klassiset ja toisaalta myonigrafian kvanttimekaaniset lähtökohdat.

Myonigrafian historiaa tarkasteltaessa on selvää, että alalla toimii tutkijoita monesta eri tieteenhaarasta. Jo alusta asti mukana on ollut esimerkiksi hiukkasfysikkoja, arkeologeja ja geotieteilijöitä. Nykyinen aktiivinen kehitysvaihe alkoi hiukkasfysikoiden kiinnostuttua siitä, voisivatko he käyttää myonien avulla tuotettuja radiografisia tiheyskuvia tulivuorten läpivalaisuun, ja tätä kautta mukaan tuli mm. vulkanologeja ja geofysikoita. Tällä hetkellä tutkijakuntaan kuuluu astrohiukkas-, hiukkas- ja ydinfysiikan osajien lisäksi mm. laiterakentajia, koodaajia, kaivosgeologeja, malminetsintägeologeja, hydrologeja, geofysikoita ja eri alojen insinöörejä. Tutkijakunnan monipuolistuminen näkyy siinäkin, että astrohiukkasfysiikan julkaisuihin viitataan nyt myös muiden kuin alan itsensä sisällä (Holma ym. 2021).

Monimuotoisimmillaan myonigrafiaa voidaan pitää siis tieteidenvälisenä (*interdisciplinary*) tai poikkitieteellisenä (*transdisciplinary*) tutkimus- ja sovellusalueena (Holma ym. 2022b). Myonigrafialla on monipuolisia mahdollisuuksia erilaisten loppukäyttäjien keskuudessa. Ala tarvitseekin laaja-alaista yhteistyötä eri alojen kesken kehittyäkseen edelleen.

Myonigrafian nykyinen haaste on, että menetelmän peruseräkkeet ja monet sen sovelluksista edustavat hyvin erillisiä perinteisiä tutkimusaloja. Myonigrafian tieteelliset periaatteet ovat tuttuja ensisijaisesti teoreettisille fyysikoille, astrohiukkasfysikoille ja ilmaisinsuunnittelijoille, jotka myös siirtävät teknologioitaan hyvin sujuvasti alalta toiselle.

Sen sijaan he, jotka todennäköisesti eniten myonigrafiaa hyötyisivät, ovat yleensä aivan muilta tieteenaloilta tai työskentelevät teollisuuden leivissä, eivätkä siksi ole tutustuneet aiheeseen. Myonigrafian ilmaisintekniikat taas perustuvat astrohiukkas-, hiukkas- ja ydinfysiikassa käytettyihin teknologioihin, ja poikkeavat perinteisessä geofysiikassa käytetyistä. Vaikka myonigrafialla onkin lukemattomia potentiaalisia sovelluksia, ovat alan ja sovelluskohteiden väliset esteet todellisia. Ne on voitettava, jotta myonigrafia voi saavuttaa asemansa muiden yleisesti hyödynnettyjen geofysikaalisten menetelmien joukossa.

Muuta taustatietoa

Marko Holma piti 10.2.2022 Suomen Geologisen Seuran kuukausikokouksessa kutsuesitelmän otsikolla ”Myonigrafian käyttö geotieteissä”. Tämä artikkeli perustuu ym. esitelmän sisältöön.

Artikkeli on myös kontribuutio meneillään olevan (2022–2025) Horisontti Eurooppa -ohjelman rahoittamaan AGEMERA-projektiin (Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw materials, nro 101058178). Kerromme sarjamme myöhemmissä osissa projektin myonigrafiaan liittyvistä tuloksista. AGEMERA-projektin laajempaan sisältöön voi tutustua lukemalla julkaisun Holma ja muut 2022a.

Kirjoitussarjan seuraavassa osassa kerrotaan esimerkkien avulla lisää myonigrafiaa ja perehdytään myoni-ilmaisimiin sekä tekniikan vahvuuksiin ja heikkouksiin. Lisäksi vertaamme myonigrafiaa perinteisiin geofysikaalisiin menetelmiin.

FM MARKO HOLMA

(marko.holma@muon-solutions.com)

(marko.holma@oulu.fi)

Muon Solutions Oy

Kerttu Saalasti Instituutti, Oulun yliopisto

Arktinen planeettatutkimusinstituutti (APSI)

International Virtual Muography Institute (VMI)

DOS., FT PASI KUUSINIEMI

(pasi.kuusiniemi@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

Arktinen planeettatutkimusinstituutti (APSI)

International Virtual Muography Institute (VMI)

PROF. PERTTI SARALA

(pertti.sarala@oulu.fi)

Oulun yliopiston kaivannaisalan yksikkö OMS

FM JARMO KORTENIEMI

(jarmo.korteniemi@muon-solutions.com)

Muon Solutions Oy

Arktinen planeettatutkimusinstituutti (APSI)

*Lisätietoa Arktisesta planeettatutkimusinstituutista
(Arctic Planetary Science Institute, APSI):
<http://planetaryscience.fi/>.*

Marko Holma on geologi ja Muon Solutions Oy:n toimitusjohtaja sekä työskentelee lisäksi Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutissa projektigeologina. Fysiikan dosentti Pasi Kuusiniemi toimii Muon Solutions Oy:n operatiivisena johtajana. Pertti Sarala (EurGeol) on professori Oulun yliopiston kaivannaisalan yksikössä. Jarmo Korteniemi on planetologi ja vapaa tiedetoimittaja sekä toimii Muon Solutions Oy:n viestintäpäällikkönä.

Summary

**On the verge of a new kind of geophysics:
Part 1 — Muons and the most common
applications of muography**

This article summarises the principles of muography and introduces the main applications of the technique to Finnish-speaking geoscientists.

Muography is a method used for detecting density differences. The method can be subdivided into techniques, such as two-dimensional muon radiography, three-dimensional muon tomography, and “four-dimensional” time-series muon monitoring. The observed muons are elemental particles, which originate from collisions between energetic cosmic-ray radiation and upper atmospheric molecules (Figs. 1 & 3). Muons penetrate both the atmosphere and the topmost kilometre of the subsurface. The various muon detector technologies are based on passive detection of these muons, after they have passed through the object of interest (Fig. 4). Muography is suitable for imaging targets of varying dimensions, from metres up to a few kilometres (Fig. 2).

In this work, we also discuss the place of muography among other fundamental and applied sciences, such as astroparticle physics, particle physics and nuclear physics. In addition, we address the current state of muography research, both in Finland, and globally.

The current challenges of muography stem from the fact that its basic working principles are in separate fields of research from most of its foreseeable applications. The scientific principles are familiar primarily to theoretical physicists, astroparticle physicists and detector designers. Unfortunately, the people who would benefit the most from muography tend to work in different branches of science (e.g., geosciences), or in the industry sector. Moreover, detector technologies enabling muography are based on astroparticle physics, particle physics or nuclear physics instead of conventional geophysics. This means that barriers between this novel method and its potential applications are all too real. These issues need be tackled in order to affirm the position of muography amongst the array of geophysical tools.

The next part of the series will contin-

ue to address the basics of muography with examples and discuss muon detectors as well as the methodical strengths and weaknesses of muography. In addition, we will compare muography with traditional geophysical methods. The series is a response to the great interest attracted by the invited Geological Society of Finland talk by Marko Holma in February 2022. This article is a contribution to the 2022–2025 AGEMERA project (Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw materials; see Holma et al. 2022a for details).

Lähdeluettelo

- Alvarez, L. W., Anderson, J. A., Bedwei, F. E., Burkhard, J., Fakhry, A., ym., 1970. Search for Hidden Chambers in the Pyramids. *Science* 167, 832–839. <https://doi.org/10.1126/science.167.3919.832>
- Bouteille, S., 2017. Development and applications of micro-pattern gaseous detectors for muon tomography. *Instrumentation and Detectors [physics.ins-det]*, Doctoral Thesis, Université Paris-Saclay, 104 s.
- George, E. P., 1955. Cosmic rays measure overburden of tunnel. *Commonwealth Engineer* 43, 455–457.
- Haungs, A., Rebel, H. & Roth, M., 2003. Energy spectrum and mass composition of high-energy cosmic rays. *Reports on Progress in Physics* 66 (7), 1145–1206. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/66/7/202>
- Holma, M., Aittola, M., Enqvist, T., Jalas, P., Joutsenvaara, J., ym., 2019. Uusi menetelmä: Myonigrafian soveltaminen maa- ja kallioperän suhteellisten tiheysvaihteluiden kartoittamisessa. *Materia* 2, 54–56.
- Holma, M., Joutsenvaara, J. & Kuusiniemi, P., 2021. Astroparticle physics obtaining more attention from a new type of audience. *Journal of Physics: Conference Series* 2156, 012178. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2156/1/012178>
- Holma, M., Korteniemi, J., Casini, G., Saura, E., Šumanovac, F., ym., 2022a. Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw Materials - Introduction to the AGEMERA project. Institute of Seismology, University of Helsinki, Report S-72, 51–54.
- Holma, M., Kuusiniemi, P. & Joutsenvaara, J., 2022b. Muography, Outreach, and Transdisciplinarity: Toward the Golden Age of Muography. *Journal for Advanced Instrumentation in Science*, Vol. 2022 (1). <https://doi.org/10.31526/jais.2022.258>
- Kauppinen, E., 2020. Myonigrafia suurien rakenteiden tutkimuksessa. Julkaisematon filosofian kandidaatin tutkielma, Jyväskylän yliopisto.
- Kuusiniemi, P., Bezrukov, L., Dzaparova, I., Enqvist, T., Fynbo, H., ym., 2018. Performance of tracking stations of the underground cosmic-ray detector array EMMA. *Astroparticle Physics* 102, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2018.05.001>
- Malmqvist, L., Jönsson, G. & Kristiansson, K., 1978. In-situ density determination by means of underground cosmic-ray intensity measurements a theoretical study. *Geoeexploration* 16 (4), 318 s.
- Malmqvist, L., Jönsson, G., Kristiansson, K. & Jacobsson, L., 1979. Theoretical studies of in-situ rock density determination using cosmic-ray muon intensity measurements with application in mining geophysics. *Geophysics* 44, 1549–1569.
- Nagamine, K., Iwasaki, M., Shimomura, K. & Ishida, K., 1995. Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 356, 585–595. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01169-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01169-9)
- Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Varga, D. (toim.), 2022. Muography: Exploring Earth's Subsurface with Elementary Particles. *Geophysical Monograph Series* 270, American Geophysical Union and John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 306 s. <https://doi.org/10.1002/9781119722748>
- Tanaka, H. K. M., 2014. Particle Geophysics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 42, 535–549. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054632>
- Tanaka, H. K. M., 2022. Principles of Muography and Pioneering Works. *Geophysical Monograph Series* 270, 1–17. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch1>
- Tanaka, H. K. M., Gluyas, J., Holma, M., Joutsenvaara, J., Kuusiniemi, P., ym., 2022. Atmospheric Muography for Imaging and Monitoring Mesoscale Convective Systems. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1523711/v1>