

Uudenlaisen geofysiikan äärellä:

Osa 2 – Myonien havaitseminen ja myonikuvauksen perusperiaatteet

MARKO HOLMA, PASI KUUSINIEMI JA JARMO KORTENIEMI

Tämä artikkeli on toinen osa myonikuvausta esittelevien kirjoitustemme sarjassa, jonka tarkoitus on tehdä menetelmä tutuksi geotieteelliselle yhteisölle suomen kielellä. Sarjan ensimmäisessä osassa käsitelimme myonien fysiikkaa, myonigrafian yleisimpiä sovelluksia ja alan kehitystä tähän päivään asti (Holma ym. 2022a). Emme kuitenkaan vielä kiinnittäneet sen tarkemmin huomiota myonien havaitsemiseen. Tässä toisessa osassa perehdymme juuri myoni-ilmaisimiin sekä mittauksen toteuttamiseen vaikuttaviin asioihin.

Luvassa on siis jonkin verran pureskeltavaa – ripaus fysiikkaa, hitunen tekniikkaa, mutta etenkin paljon mielenkiintoista asiaa.

Havaitsemisen perusperiaatteet

Ilmakehässä syntyvät myonit (*atmospheric muons*, kts. Bonechi ym. 2020) ovat elektronien kaltaisia alkeishiukkasia, joiden keskimääräinen elinaika on vain 2,2 mikrosekuntia. Näitä kosmisen hiukkassäteilyn synnyttämiä, lähes valonnopeudella suorilla ratoja eteneviä hiukkasia lentää lävitsemme useita kymmeniä sekunnissa.

Myonigrafian eli myonikuvauksen (*cosmic-ray muography, muography, muographic imaging*) avulla saadaan tietoa myonien läpäisemän väliaineen tiheyseroista. Menetelmällä voidaan

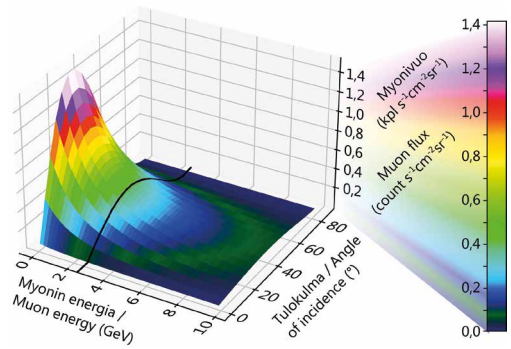
tuottaa tiheyskuvia kaksi- tai kolmiulotteisina sekä aikasarjana, jolloin päästään käsiksi kohteen muutoksiin ajan kuluessa. Myonigrafian perusidea voidaan kuvata prosessina. Ilmaisim eli detektori (*detector*) havaitsee suuren määrän myoneita sekä rekisteröi yleensä jokaisen osumishetken ja kulkusuunnan. Kun osumia kertyy tarpeeksi, niitä voidaan tarkastella tilastollisesti. Kerätyt tiedot kertovat väliaineesta, jonka läpi kukin myoni on tullut ennen ilmaisimelle saapumistaan. Tietoja oikein tulkitsemalla voidaan selvittää tuon aineen tiheysvaihteluita. Oleellisinta – ainakin geotieteissä – on tunnistaa datasta tiheyspoikkeamia eli anomaliaita. Myonigrafian tavoite on määrittää noiden poikkeavien kohtien ominaisuudet mahdollisimman tarkasti, jotta ne voidaan uskottavasti sitoa kohteen oletettuihin (tai tunnettuihin) rakenteisiin.

Myonografiasta puhuttaessa on tärkeää ymmärtää käsitteet myonivuo (*muon flux*) ja laskentataajuus (*counting rate*). **Myonivuolla** tarkoitetaan tietyn pinta-alan läpäisevien myonien määrää aikayksikössä. Esimerkiksi maan pinnalla merenpinnan tasossa tuo luku on 150–200 kpl/m²/s. Matalaenergisillä myoneilla tähän lukuun vaikuttaa jonkin verran mm. ilmanpaine. Pitkän ajan mittauksissa myonivuo kuitenkin tasoittuu ja virhelähteiden vaikutus vähenee. Tarkkaan myonivuo-lukuun

Huomionarvoinen asia: suomen- ja englanninkielisten termien – myoni ja myonigrafia sekä *muon* ja *muography* – erot voivat aiheuttaa pientä päänvaivaa. *Myograph* (y:llä) tarkoittaa lihaksen supistuksen aikana tuottamia voimia mittaavaa laitetta (kreikasta juontuva myo-etiiliite kun tarkoittaa lihasta). Vastaavasti ala ja tekniikka, jossa laitetta käytetään, on *myography*, edelleen y:llä. Suomeksi tämä fysiologian tutkimusala tunnetaan samalla tavoin myografiana.

vaikuttaa olennaisesti myös ns. **kynnysenergia**. Se tarkoittaa minimienergiaa, joka myonilla täytyy olla, jotta se voidaan havaita eli laskea myonivuohon. Kuvassa 1 on esitetty myonien energia- ja kulmajakauma maan pinnalla. **Laskentataajuus** tarkoittaa hieman eri asioita, riippuen mitä myonien avulla halutaan kulloinkin kuvata. Kokonaislaskentataajuus (*total counting rate*) kertoo taajuuden (eli kerrat sekunnissa), jolla ilmaisimien kerää havaintoja (esim. myoneja tai muuta signaalia). Luku siis sisältää myös taustakohinan. Vaikka myoni-ilmaisimen kokonaislaskentataajuus onkin hyödyllinen tieto, kiinnostaa myonien laskentataajuus (*muon counting rate*) usein enemmän, sillä siinä on mukana vain havaittujen myonien lukumäärä sekunnissa. Vielä hyödyllisempää on ottaa huomioon myös niiden tulosuunnat. Tällöin saadaan informaatiota siitä väliaineesta, jonka läpi kukin myoni on kulkenut ennen osumistaan ilmaisimeen.

Myonien **kulma- ja energiajakaumat** eivät ole tasaisia, vaan riippuvat tulokulmasta. Esimerkiksi maan alla tulokulmien jakauma muuttuu syvemmälle mentäessä: mitä syvemmällä ollaan, sitä vähemmän myoneja havaitaan. Kulmajakauman hahmottaa helpoiten ymmärtämällä, että mitä loivemmalla kulmalla myoni iskeytyy maahan, sitä pidemmän matkan se joutuu kulkemaan kivessä ennen kuin se saavuttaa myoni-ilmaisimen. Edelleen, mitä pidemmän matkan myoni joutuu tiheässä materiaalissa kulkemaan, sitä enemmän se menettää energiaansa ja todennäköisemmin sen matka pysähtyy ennen ilmaisinta. Loivista kulmista tulevia myoneja ei siksi havaita mittauksessa kovin usein, ja niinpä maanalaisen myoni-ilmaisimen näkökenttä muodostuukin vähitellen yhä kapeammaksi kartioksi (kuva 2). Loivalla kulmalla maankamaraan iskeytyvien myonien täytyy siis olla poikkeuksellisen suur-energisiiä, jotta ne voivat päästä syvälle maankamaraan ennen pysähtymistään. Koska suur-energisiiä myoneja on jo alun alkaenkin vähän, myonien kulma- ja energiajakaumat liittyvät vahvasti toisiinsa.



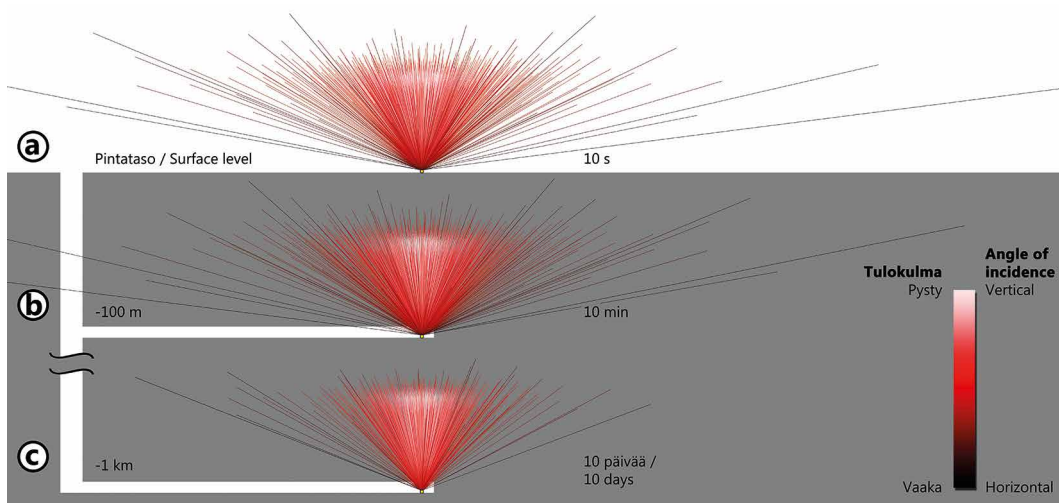
Kuva 1. Eriarisen tulokulman ja energian omaavien myonien määrät maan pinnalla (merenpinnan tasossa). Maanalaisessa myonigrafiaassa hyödynnettävien suurenergisten myonien minimienergia on merkitty mustalla viivalla. Kuva: Muon Solutions Oy / Pasi Kuusiniemi ja Antto Virkajärvi.

Figure 1. The number of muons arriving at different angles and energies above ground (at sea level). The minimum energy of muons usable in underground muography is marked with a black line. Figure: Muon Solutions Oy / Pasi Kuusiniemi and Antto Virkajärvi.

Suurin osa ilmaisimen rekisteröimistä myoneista tulee ylhäältäpäin. Toisaalta vinomat suunnat ovat usein hyvinkin kiinnostavia mittauksen kannalta. Näin voi olla vaikkapa tilanteessa, jossa etsitään malmiota, jonka oletetaan sijoittuvan yläviistoon ilmaisimesta.

Loivakulmaiset myonit (*near-horizontally arriving muons*) ovat kiinnostavia ennen kaikkea maanpäällisissä sovelluksissa, erityisesti erilaisten vuorien kuvantamisessa (Nagamine ym. 1995; Tanaka ym. 2003, 2005; Oláh ym. 2018a). Tanaka (2022) esitteli loivakulmaisten myonien hyödyntämiseen pohjautuvan sovelluksen, jossa myonigrafiaa ajatellaan sovellettavaksi vuorovesiaaltojen valvomisessa. Myös turvallisuussektori hyödyntää loivakulmaisia myoneja mielenkiintoisia kohteita kuvatesaamalla (Morris ym. 2014). Loivakulmaisista myoneista olisi luultavasti iloa myös Marsissa tapahtuvissa mittauksissa (Kedar ym. 2013).

On siis erittäin hyödyllistä tuntee myonien odotettavissa olevat laskentataajuudet eri suunnista, sillä tieto parantaa olennaisesti mittaustulosten arviointia.



Kuva 2. Myonien tulosuuntien kulmajakaumat maan pinnalla (a) ja 100 metrin syvyydellä maan alla (b) ovat käytännössä samanlaiset. Kilometrin syvyydellä (c) kulmajakauma on kapeampi ja tulokulmat ovat jo selvästi pystysuorempia. Huomaa, että saman myonimäärän havaitsemiseen tarvitaan syvemmällä paljon pidempi mittausaika. Kuva on vain suuntaa antava eikä perustu simulaatioihin. Kuva: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

Figure 2. The incidence angle distribution for muons detected above ground at sea level (a) and at 100 metres depth (b) are virtually identical. For muons detected at 1 km depth (c), the distribution cone is significantly narrower, i.e., closer to vertical. Note that at greater depths a much longer time is needed in order to detect the same number of muons. The figure is only schematic and is not based on simulations. Figure: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

Myonikuvauksen eri menetelmät

Myonigrafiasa käytetään erilaisia termejä kuvaamaan sitä, millaisesta kuvantamisesta on kulloinkin kyse. Tästä koituva termien runsaus kertoo alan nuoresta iästä sekä ennen kaikkea poikkitieteellisyydestä ja kansainvälisyydestä.

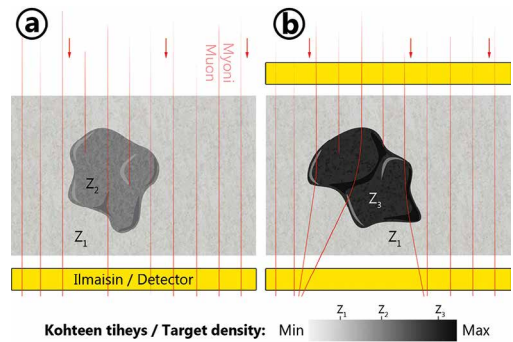
Myonigrafisia tekniikoita on kolmenlaisia: kaksiulotteinen **myoniradiografia** (*muon radiography*), kolmiulotteinen **myonitomografia** (*muon tomography*) sekä **aikasarjamyonigrafia** (*time-lapse muography*, *time-sequential muography*). Jälkimmäinen toimii kaksi- ja kolmiulotteisena. Tiheyskuvien muodostaminen alkaa aina yksittäisistä mittauksista. Jokainen ilmaisin tuottaa aluksi aineistoa, joka soveltuu ainoastaan 2D-kuvien laatimiseen. Jotta päästään 3D-myonitomografiaan, täytyy samaa kohdetta kuvata useasta eri suunnasta. Mittausuuntien määrä riippuu kohteen tilavuudesta,

mittausajasta, kohteen tiheyseroista ja halutun loppukuvan laadusta (esim. tarkkuudesta ja luotettavuudesta). Nyrkkisääntönä on kuvata sama kohde 5–8 eri suunnasta. Tämä lukumäärä voi tosin tulevaisuudessa jonkin verran pienentyä kuvantamisalgoritmien kehittymisen myötä. Vaatimus on suurin piirtein sama riippumatta siitä, toimitaanko maan alla vai pinnalla. Maan päältä on toki paljon helpompaa löytää mittauspisteitä kuin maan alta. Tomografisille mittauksille tarpeellisten mittauspisteiden lukumääriä ovat tutkineet mm. Nagahara ja Miyamoto (2018) sekä Nagahara ja muut (2020). Jotta 2D-kuvista voidaan lopulta tuottaa 3D-malli, tarvitaan myös tomografiseen inversioon kykenevä ohjelmisto sekä yksi tai useampi kuvantamisalgoritmi.

Myonien kuvantamisen peruseriaatteet jakautuvat vaimenemis- eli attenuaatiomyonigrafiaan (*attenuation muography*, *attenuation-based muography*) ja sen erityiseen alalajiin,

sirontamyonigrafiaan (*scattering muography, scattering-based muography, deviation muography*). Näissä käytetyt kuvantamisalgoritmit ovat erilaisia ja tutkimuksen kohteena (Blackwell & Kudryavtsev 2015; Vanini ym. 2019; Baccani 2020). Menetelmien erilaisia rooleja geotieteellisen myonigrafisen datan tulkinnassa ovat käsitelleet mm. Hivert ja muut (2017). Kuva 3 selvittää mittausrjestelmien välisiä eroja.

Geotieteissä sovelletaan lähes poikkeuksetta ”puhdasta” **attenuaatiomyonigrafiaa**. Siinä keskitytään tarkastelemaan myonivuon vaimenemista väliaineen tiheyden kasvaessa. Menetelmä vertautuu hyvin lääketieteelliseen röntgenkuvantamiseen: kummassakin kuvatun kohteen tiheyspoikkeamat luovat dataan tilastollisen ”varjon”, jonka voimakkuus riippuu mitattavan materiaalin tiheydestä. Myonigrafiaassa tiheiden alueiden suunnilta tulee siis vähemmän myoneja kuin harvempien alueiden suunnilta. Lukijaa sekoittavana nipplitietona kerrottakoon, että alalla törmää usein synonyymeihin, jotka tuntuvat toisinaan turhalta hiustenhalkomiselta. Attenuaatiomyonigrafiaa kutsutaan esimerkiksi välillä myös absorptiomyonigrafiksi (*absorption muography, absorption-based muography*: Bonechi ym. 2015, 2020; Saracino ym. 2019; Beni ym. 2022; Marteau ym. 2022; Yang ym. 2022). Tässä nimeämistavassa tähdennetään varjoalueiden ”puuttuvien” eli tilastollisesti epätodennäköisten myonien käsittelyä (Procureur 2018). Toisinaan tätä tekniikkaa kutsutaan myös läpivalaisu- eli transmissiomyonigrafiksi (*transmission muography: transmission ~ läpäisy; läpivalaisu*), jossa painotetaan ilmaisimeen saapuneiden myonien analyysia (Procureur 2018). Synonyymit ovat tavallaan täysin päinvastaisia. Toisaalta voi ajatella, että absorptiomyonigrafian on aluksi transmissiomyonigrafiaa (ks. esim. Niess ym. 2018), sillä varjokohdathan tunnistetaan ilmaisimeen saapuneiden myonien tilastollisista jakaumista. Kategorisointi on vaikea taiteenlaji, ja rakkaalla lapsella on monta nimeä.



Kuva 3. Attenuaatiomyonografiassa tarkkaillaan myonivuon vaimentumista tiheyserojen myötä (a). Ilmaisim (keltainen) havaitsee vain kuvattavan kohteen jo läpäisseitä myoneita (lentoradat punaisella). Sirontamyonografiassa verrataan kohteen lävistänyttä ja siihen tulevaa myonivuota, joten ilmaisimet asennetaan kohteen molemmin puolin (b). Näin saadaan tietoa erittäin tiheiden kohteiden (Z_3) aiheuttamista muutoksista myonien lentoradoissa. Selkeyden vuoksi kuvaan on merkitty vain alun perin yhdensuuntaisia myoneja. Kuva: Muon Solutions Oy / Marko Holma ja Jarmo Korteniemi.

Figure 3. Attenuation muography focuses on the loss of muon flux intensity caused by density differences (a). The detector (yellow) observes only muons that have already passed through the target (trails marked in red). In scattering muography, the detectors are placed on both sides of the target in order to compare the incoming and outgoing muon fluxes (b). This provides information on the changes in muon trajectories caused by very dense objects (Z_3). For clarity, only initially parallel muon trajectories are shown. Figure: Muons Solutions Oy / Marko Holma and Jarmo Korteniemi.

Sirontamyonigrafiaa käytetään lähinnä geotieteiden ulkopuolella, esimerkiksi rahtikonttien, teollisten rakennelmien ja käytetyn ydinpolttoaineen kuvantamisessa (Priedhorsky ym. 2003; Chatzidakis ym. 2016; Thomay ym. 2016; Dobrowolska ym. 2018; Hu ym. 2018; Frazão ym. 2019). Sirontaan perustuvissa myonigrafian menetelmissä hyödynnetään ns. Coulombin sirontaa (*Coulomb scattering*), josta voi lukea lisää fysiikan oppikirjoista. Sironnassa myonien kulkusuunnat muuttuvat, joten jo yksittäinen 2D-radiografinen myonikuva sisältää automaattisesti tietoa myös syvyysulottu-

vuudesta. Tämän vuoksi sirontamyonigrafiasa päästäänkin hyvin suoraan käsiksi 3D-myonitografiaan: Kattavan kolmiulotteisen mallin rakentamiseen riittää pienempi määrä eri suunnista otettuja kuvia kuin attenuaatiomyonigrafiasa. Sirontamyonigrafian kuvausjärjestelmät ovat tavallisesti järeitä ja hankalasti – tai ei ollenkaan – muokattavia, toisin kuin attenuaatiomyonigrafiset laitteistot. Tämän vuoksi kohde tuodaankin yleensä mittausta paikalle, toisin kuin attenuaatiomyonigrafiasa, jossa mittalaitteisto tuodaan kohteelle. Myonisäteilyn vaimenemista eli attenuaatiota tapahtuu toki sirontamyonigrafiasakin, vaikkei sitä terminologisella tasolla korostetakaan. Tarkalleen ottaen ilmaisimeen saapuvien myonien lukumäärä vähenee aina sekä vaimenemalla että siroamalla – niin kivissä kuin muissakin materiaaleissa.

Sironta on voimakkainta niillä myoneilla, joilla on matalin energia. Siksi sirontamyonigrafia toimii parhaiten maanpinnalla, sillä voimakkaimmin siroavat myonit leikkautuvat maaperässä pois jo ylimpien metrien matkalla. Sironnan voimakkuus on verrannollinen myös kohdeaineen atomien järjestys- eli protoniluvun (Z) neliöön. Toisin sanoen erityisen raskaat alkuaineet – eli ne, joiden Z on suuri, kuten uraani tai lyijy – sirottavat matalaenergisia myoneja paljon tehokkaammin kuin kevyemmät alkuaineet. Sironta toimii siis tavallaan myonihävikin vahvistimena: tiheän materiaalin läpi tulevista myoneista menetetään tavallisista syistä pysähtyvät (tiheä materiaalihan pysäyttää myoneja tehokkaammin kuin harva) sekä ne, jotka tiheä materiaali sirottaa pois suoralta radalta! Lisäksi on mahdollista yhdistää kaksi kuvaa: yksi, jossa näkyvät suoria ratoja kohteen läpi tulleet myonit, sekä toinen, jossa ovat sironnan vuoksi ratojaan muuttaneet myonit. Muuttuneiden ratojen käännoispiste on siis se erityisen tiheä – ja yleensä kiinnostava – myoneja sirottava kohde.

Myonigrafian menetelmiä voidaan luokitella myös mittausta paikan sijainnin mukaan. Kirjallisuudessa törmää eniten **maanpäälliseen**

(*ground-based muography, land-based muography*: Tanaka 2013) ja **maanalaiseen myonigrafiaan** (*underground muography*: Guardincerri ym. 2017; Holma & Kuusiniemi 2018; Kuusiniemi ym. 2021; Holma ym. 2022c; Surányi ym. 2022). Lisäksi myoni-ilmaisain voidaan sijoittaa ilma-alukseenkin, jolloin puhutaan **lentomyonigrafista** (*airborne muography*: Tanaka 2016). Sitä on kokeiltu toistaiseksi vähän, mutta esimerkiksi Tanakan (2016) tutkimuksessa myoniteleskooppi asennettiin paikallaan pörräävän helikopterin kyytiin. Myös **vedenalainen myonigrafia** (*underwater muography*: Tanaka 2022) on vielä toistaiseksi suhteellisen vähän harjoitettu myonigrafian muoto, vaikkei se vaadi muuta kuin mittalaitteen tekemisen vesitiiviiksi ja paineenkestäväksi. Myoni-ilmaisain voidaan esimerkiksi upottaa mittaamaan vedellä täyttyneeseen tunneliin, avolouhokseen, järveen tai mereen (Tanaka ym. 2021). Tämähän on selvää jo siksi, että **kairanreikämyonigrafia** (*borehole muography*: Bonneville ym. 2019; Oláh ym. 2018b; Holma ym. 2019, 2021c) toimii, vaikka useimmat kairanreiät ovatkin vedellä täyttyneitä. **Merenalainen myonigrafia** (*undersea muography*: Tanaka ym. 2021) ei nimestään huolimatta välttämättä tarkoita, että myoni-ilmaisain olisi sijoitettu merenpohjalle – tai edes vetisiin oloihin. Esimerkiksi Tanaka ja muut (2021) kuvaavat mittaustajärjestelmän, jossa myoni-ilmaisimet on sijoitettu merenpohjan alla olevaan tunneliin. Mittalaitteidenkin mukaan voidaan jaotella: kairanreikämyonigrafian lisäksi tunnetaan myös **teleskooppimyonigrafia** (*telescope muography*: Holma ym. 2022c, *telescope-based muography*: Holma & Kuusiniemi 2021) ja **Tšerenkov-myonigrafia** (*Cherenkov muography*: Del Santo ym. 2018) – näistä lisää ja tarkemmin alempana.

Erilaisiin myonigrafian menetelmiin tutustuessa törmää usein myös lisätermiin, jotka tarkentavat kuvausta kulloisen sovelluskohteen mukaan. Esimerkkeinä mainittakoon **tulivuorimyonigrafia** (*volcano muography*: Lo Presti ym. 2019a; Tioukov ym. 2019; Tanaka

2020; Vesga-Ramírez ym. 2021; Leone ym. 2021), **ilmakehämyonigrafia** (*atmospheric muography*; Tanaka ym. 2022) sekä **hydrofäärimyonigrafia** (*hydrospheric muography*). Viimeistä voi käyttää yleisterminä vetisten ympäristöjen kuvaukselle. Se on siis synonyymi **akvaattiselle myonigrafialle** (*aqueous muography*). Tämä termi tosin lähestyy tilannetta kohteen olomuodon kautta, samoin kuin sen vastapari **kiinteän aineen myonigrafia** (*solid muography*) (Tanaka ym. 2022).

Jaottelua voidaan tehdä myös mittauspisteiden lukumäärän mukaan. Esimerkiksi termi **monisuuntainen myonigrafia** (*multi-directional muography*; Miyamoto ym. 2022) kertoo mittauksen mahdollistavan kolmiulotteisen myonitomografisen kuvantamisen. Miyamoto ja Nagahara (2020) käyttivät saman asian kuvaamiseen termiä *omni-directional muography*. Moneen mittauspisteeseen voi tuki viitata myös käyttämällä kiertoilmaisuja – kuten esimerkiksi *three-dimensional density tomography using dozens of muon radiographies* (Nagahara & Miyamoto 2018) tai kertomalla suoraan kuinka monen mittauspisteen tiheyskuvista kokonaisuittain muodostuu, kuten ”11-suuntainen myonigrafia” (Nagahara ym. 2020).

Yllä esitettyjen tutkimustapojen lisäksi täytyy mainita vielä alan avaruustutkimukseen liittyvät mahdollisuudet, kuten esimerkiksi **Kuu-, Mars- ja asteroidimyonigrafia**. Pelkästään jo julkaisujen otsikoiden perusteella saa hyvän kuvan myonigrafian laajoista soveltamismahdollisuuksista myös maapallon ulkopuolella (Kedar ym. 2013; Miyamoto ym. 2016; Lo Presti ym. 2019b; Menicucci ym. 2019; Kamiyoshihara ym. 2020; Enqvist ym. 2021; Holma ym. 2021a, 2021b). Näistä ja muistakin myonigrafian sovelluksista kerromme sarjassamme myöhemmin lisää.

Myoni-ilmaisimet

Myonigrafiasa käytettyihin myoni-ilmaisimiin (*muon detectors*) viitataan toisinaan ter-

millä **myonigrafi** (*muograph*; esim. Tanaka ym. 2022). Nimitys ei ota kantaa laitteen tekniisiin yksityiskohtiin. Huomaa kuitenkin, että samaa termiä voidaan käyttää myös itse myonigrafisesti tuotetusta tiheyskuvasta (Cimmino 2021). Molemmille merkityksille on kuitenkin paikkansa tekstin elävöittäjinä.

Myonigrafiasa kuva muodostetaan rekisteröimällä ilmaisimen lävistävät ja kynnysarvon ylittävät myonit ensin sähköisiksi signaaleiksi, ja muuttamalla signaalit edelleen digitaalseksi dataksi. Mutta hetkinen – myoneillaan ei ole sädettä, ja lisäksi ne ovat erittäin nopeita, lyhytikäisiä, näkymättömiä, hajuttomia ja mauttomia. Kuinka myonit siis käytännössä havaitaan?

Myoneja ilmaisevat väliaineet

Myoni-ilmaisimien toimii niin, että sen läpi lentävien myonien liike-energiasta hyvin pieni osa absorboituu ilmaisimateriaaliin. Laitteet voidaan jakaa neljään kategoriaan: tuikeilmaisimet (*scintillation detectors*), kaasutäytteiset ilmaisimet (*gas-filled or gaseous detectors*), emulsiofilmipohjaiset ilmaisimet (*emulsion detectors*) ja puolijohdeilmaisimet (*semiconductor detectors*). Kahden viimeksi mainitun ilmaisintyyppien käyttö on ainakin toistaiseksi vähäistä: Emulsiofilmien kehitykseen liittyy käytännön hankaluuksia, ja puolijohdeilmaisimien haasteena ovat korkeat käyttö- ja valmistuskustannukset. Lähes kaikilla ilmaisintyypeillä myonien havaitsemistehokkuus on kuitenkin lähes tai jopa tasan 100 %.

Tuikeilmaisimissa myoni havaitaan sen tuottaman tuikeen eli valon perusteella (Menicelli ym. 2007; Ambrosino ym. 2015; Anghel ym. 2015; Liao ym. 2018; Liang ym. 2020; Marteau ym. 2022; Yang ym. 2022). Myoni läpäisee ilmaisimen sisällä olevan väliaineen ja irrottaa sen molekyyleistä elektroneja, jolloin syntyy valo. Valo muutetaan edelleen jännitesignaalksi erilaisilla valoherkillä ilmaisimilla tai antureilla, kuten esimerkiksi valomonistinputkilla (*photomultiplier tubes*, PMT) tai pii-valomonistimilla eli ns. SiPM-diodeilla

(*silicon photomultipliers*, SiPM). Väliaineet, joissa valopulssit syntyvät, ovat läpinäkyviä muoveja tai valoa läpäiseviä nesteitä (käytännössä öljyjä). Tuikemuovit ovat paremman valontuotonsa vuoksi yleensä tuikenesteitä herkempiä. Tuikenesteiden etuna taas on halvempi hinta. Mittaus tuikeilmaisimella on hyvin nopea, sillä fotonien vauhti on muovissakin hurja. Tuikemuovi- ja tuikenestepohjaisissa teleskoopeissa taustasäteily ei ole yleinen ongelma, sillä siitä päästään eroon muilla tavoin.

Kaasutäytteisiä ilmaisimia on monenlaisia (Giomataris ym. 1996; Sharma 2012; Varga ym. 2016, 2022; Oláh ym. 2018a, 2018b; Bonechi ym. 2020; Procureur ym. 2020; Giammanco ym. 2022; Bouteille & Procureur 2022). Kaikissa niissä signaali syntyy, kun myonit etenevät täytekaasun läpi ja ”potkivat” elektroneita tieltään ionisoiden siten kaasumolekyyliä (asiaan liittyvästä perusfysiikasta kirjoittaa mm. Klemola 2002). Syn-tyneiden ionien aiheuttama varaus kerätään anodille korkeajännitteen avulla ja muokataan jännitepulssiksi. Tämä ohjataan sitten edelleen tiedonkeruujärjestelmään (*data acquisition, DAQ*). Täytekaasut ovat tavallisesti palamattomia kaasuseoksia (esim. argon + hiilidioksidi). Kaasutäytteiset ilmaisimet ovat varsin hitaita rekisteröimään myoneja: varauksen kulkeutuminen anodille vie noin mikrosekunnin per 10 cm täytekaasua. Tämä nopeus riippuu mm. käyttöjännitteestä, kaasun koostumuksesta ja tiheydestä. Varausta voidaan myös ohjata haluttuun suuntaan sähkö- ja/tai magneettikentällä. Toisaalta kaasutäytteiset ilmaisimet ovat huomattavasti tuikeilmaisimia edullisempia, varsinkin ilmaisimen pinta-alan ollessa yli 1 m². Suurin osa kaasutäytteisistä ilmaisimista on niin sanottuja teleskoopeja, mutta myös muunlaisia ratkaisuja on kehitetty. Esimerkiksi Oláh ja muut (2018b) kuvaavat kaasutäyteisen kairanreikälaitteen.

Kaasutäytteisissä teleskoopeissa taustasäteilystä eli -kohinasta voidaan päästä eroon raskaiden lyijylevyjen avulla. Riippuen mallista, lyijylevyt voidaan tarvittaessa ottaa poisikin.

Tämä onkin kätevä ominaisuus, mikäli laitetta on tarkoitus käyttää muualla kuin maan pinnalla, tai jos sitä on tarkoitus siirrellä usein – sillä lyijyhän painaa kuin lyijy. Huomaa, että taustasäteily on yleinen ongelma vain maan pinnalla: maan alla on taivaalta tulevasta säteilystä leikkautunut pois merkittävä osa.

Emulsiofilmipohjaiset ilmaisimet ovat erinomaisia laitteita, jos kuvantamisen täytyy tapahtua ilman sähköä. Ydinemulsio muistuttaa valokuvafilmin valoherkältä puolelta löytyvää valokuvaemulsiota. Erona on, että ydinemulsio soveltuu myonien kaltaisten varattujen hiukkasten havaitsemiseen kolmiulotteisesti tarkalla sijaintitiedolla. Hiukkasen iskemäkohta emulsiolevyn läpi voidaan määrittää jopa alle mikrometrin tarkkuudella (Morishima ym. 2022). Kiintoisa yksityiskohta: ensimmäiset radioaktiivisuutta tutkineet kokeet tehtiin juuri emulsioilmaisimilla.

Emulsiopohjaisilla ilmaisimilla laitteen kulmatarkkuus on erittäin hyvä: suurempi kuin 10 milliradiaania (mrad) eli alle 0,57° (ks. esim. Oláh ym. 2018a). Emulsiopohjaisten ilmaisimien tuottamasta datasta puuttuu kuitenkin aikarakente, joten näitä ei voida käyttää muuttuvien ilmiöiden reaaliaikaiseen seurantaan – toisin kuin monia muita ilmaisintyyppisiä. Aikarakenteen puuttumisen vuoksi mittauksessa on myös oltava erittäin huolellinen esimerkiksi ilmaisimen paikallaan pysymisen kanssa mittauksen aikana: liikkuminen johtaisi systemaattisiin virheisiin tulosten tulkinnassa. Lisäksi on olemassa vain muutama laboratorio, jossa myonigrafiassa käytettyjä emulsiolevyjä voidaan yleensäkin ”kehittää”. Nykyaikaisten emulsiopohjaisten myoni-ilmaisimien teknologiasta ja käytöstä ovat kirjoittaneet mm. Tanaka ja muut (2007a), Morishima ja Nakano (2010), Morishima (2015), Nishio ja muut (2015, 2020), Bozza ja muut (2017), Ariga ja muut (2018), Miyamoto ja muut (2022) sekä Morishima ja muut (2022). Geotieteissä ydinemulsiopohjaisia myoni-ilmaisimia on käytetty lähinnä tulivuorien kuvantamiseen (Tanaka ym.

2007a, 2007b; Nishiyama ym. 2014, 2016; Bozza ym. 2017).

Puolijohdeilmaisimia käytetään ydin- ja hiukkasfysiikassa, kun halutaan tunnistaa ja mitata monenlaisia hiukkasia: esimerkiksi alfasäteilyä, gammasäteilyä, myoneja tai elektroneja. Puolijohdeilmaisimet soveltuvat erittäin hyvin eri hiukkasten liike-energian selvittämiseen, sillä niillä on erinomainen energian erotuskyky. Myonigrafiasa tätä ominaisuutta ei kuitenkaan tavallisesti hyödynnetä kovinkaan paljon eikä käytännön sovelluksia ole (vielä). Lisäksi puolijohdeilmaisimet ovat laitteen pinta-alaan suhteutettuna varsin kalliita niin hankinta- kuin toisinaan myös ylläpitokustannuksiltaan. Esimerkiksi melko yleisesti käytetty germanium-ilmaisimien vaatii toimiakseen -150 – -200 celsiusastetta, jolloin tarvitaan jatkuvatoiminen jäähdytys. Kannattaa myös huomata, että monet myonigrafiasa tavallisesti käytettävät ilmaisintyyppit sisältävät puolijohdekomponentteja, ilman että laite on varsinainen puolijohdeilmaisimien.

Kaikilla ilmaisintyypeillä on siis hyviä ja huonoja puolia, jotka on syytä huomioida laitesuunnittelussa ja joskus jopa yksittäisissä mittauksissa. Jos tavoitteena on saada suuri ilmaisinpinta-ala mahdollisimman edullisesti, on kaasutäytteinen ilmaisimien ylivertainen. Jos tavoite on rakentaa huoltovarma ja yksinkertainen laite, on tukeilmaisimien erinomainen valinta: se kun ei tarvitse toimiakseen mitään muuta kuin sähköä varsin vaatimattomalla tehonkulutuksella.

Ilmaisimia eri kokoluokissa

Myoni-ilmaisimet voidaan luontevasti jaotella kolmeen kokoluokkaan: (1) suuret, noin rekka-auton kokoiset järjestelmät, joita käytetään esimerkiksi rajavalvonnassa autojen ja rahtikonttien läpivalaisuun, (2) keskikokoiset, tavallisesti metrin tai kaksi leveät myoniteleskoopit (*muon telescope*, kuvat 4a ja 4b) sekä (3) pienen halkaisijan omaavat kairanreikälaitteet (*borehole detectors*, kuva 4d). Kunkin kokoluokan ilmaisimet voidaan toteuttaa

monella eri tavalla. Lisäksi on modulaarisia laitteistoja, joissa yksittäisiä ilmaisimia yhdistellään laajemmiksi ilmaisinyhdistelmiksi (*detector arrays*). Eri ilmaisintyypeissä taustasäteilyn poisleikkaaminen tapahtuu eri tavoin, koska myös myonisignaalin mittaustapa vaihtelee.

Myoniteleskoopit ovat kokonsa puolesta sopivia sijoitettaviksi maanalaisiin tunneleihin tai luoliin. Teleskooppeja voidaan toki käyttää myös maan pinnalla, mikäli kuvattava kohde on ympäröivää maastoa korkeammalla. Kuvan laadun (maksimaalisen tarkkuuden) ja mittausajan optimoinnin kannalta teleskoopit ovat useimmiten geotieteellisissä tutkimuksissa paras vaihtoehto. Toisaalta tunnelit ja luolat ovat verrattain harvinaisia, eikä Suomen kaltaisilla kohtuullisen laakeilla alueilla ole monia geologisesti mielenkiintoisia kohoumia.

Myoniteleskooppien rakenne muistuttaa optista teleskooppia vain päällisin puolin (kuva 5). Teleskoopit näkevät perinteisten kameroiden tavoin kerralla vain yhteen suuntaan. Niillä on tosin tavallisesti kohtuullisen laaja näkökenttä (*field of view*; esimerkiksi 120 – 130°). Teleskooppi voidaan yleensä kallistaa haluttuun suuntaan, (kuva 4a). Liikuteltavaksi tarkoitettujen teleskooppien koko on tyypillisesti korkeintaan 1 m^3 . Suurempiakin ilmaisimia on saatavilla, mutta ne ovat erikoiskäyttöön (esim. pitkäaikaisiin maanalaisiin mittauksiin) suunniteltuja ja yleensä kokonsa puolesta epäkäytännöllisiä muihin tarkoituksiin. Erilaisista myoniteleskooppeista voi lukea esimerkiksi: Lee ja Ng (1987), Lesparre ja muut (2012a, 2012b), Oláh ja muut (2012), Lázaro ja muut (2014), Bouteille ja muut (2016), Catalano ja muut (2016), Saracino ja muut (2017), Procureur ja Attié (2019), Wuyckens ja muut (2019), Peña-Rodríguez ja muut (2020), Vásquez-Ramírez ja muut (2020), Bouteille ja Procureur (2022), Giammanco ja muut (2022) sekä Varga ja muut (2022).

Poikkeuksellisista teleskooppityypeistä mainittakoon vielä Tšerenkov-teleskoopit (*Cherenkov telescopes*: Catalano ym. 2016; Del Santo ym. 2018; Lo Presti ym. 2019a;

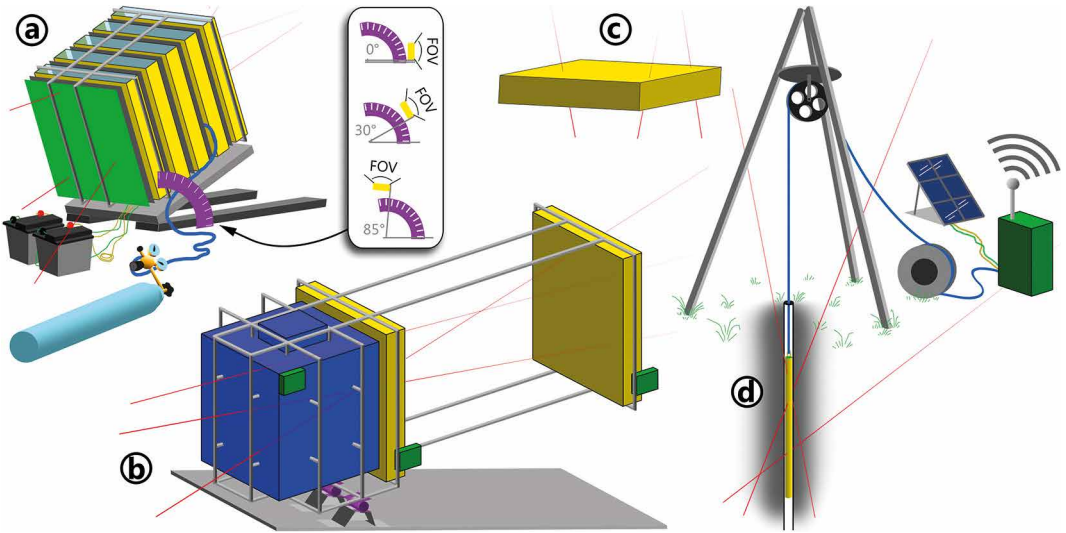
Peña-Rodríguez ym. 2020, 2022), jotka ovat tavallaan erikoisia tuikeilmaisimia. Ne hyödyntävät ns. Tšerenkovin säteilyä (*Cherenkov radiation*), jota syntyy, kun väliaine hidastaa fotonien liikkeen niin, että tietyt hiukkaset – kuten myonit – kulkevat niitä nopeammin. Näin syntyvää kajoa voidaan havaita esimerkiksi käynnissä olevan ydinreaktorin sydämessä. Myonigrafiaassa käytettävät Tšerenkov-teleskoopit ovat kuin monimutkaisia vesitankkeja, joissa kajon synnyttävät veden läpi kulkevat myonit. Tšerenkov-teleskooppien etuna on, ettei muu taustasäteily häiritse myonidataa. Tämän vuoksi niitä käytetään myonigrafiaassa lähinnä maan pinnalla (esimerkiksi tulivuorien kuvantamisessa), jossa taustasäteilyä on enemmän kuin maan alla. Näiden laitteiden heikkouksia ovat suuri koko ja vaatimaton kulmatarkkuus. Mitatun Tšerenkov-kartion kulman tarkka määrittäminen on vaikeaa – ja alle 1 m³ järjestelmällä jopa mahdotonta, minkä vuoksi laitteet ovat usein isoja ja hankalasti kuljetettavia. Myonigrafian ulkopuolisista Tšerenkov-teleskoopeista mainittakoon Etelämantereella jään sisään rakennettu noin 1 km³-kokoinen IceCube (Gaisser & Halzen 2014). Kyseessä on kuitenkin neutriino-observatorio, jonka kannalta ilmakehässä syntyvät myonit ovat vain harmittavaa taustasäteilyä.

Hiljattain myonigrafiaassa on ehdotettu uudentyypistä IACT-teleskooppia (*imaging atmospheric Cherenkov telescope*; Del Santo ym. 2018; Mollica ym. 2022; Gueta ym. 2022). Laite olisi vesitankiton ja mittaisi tulivuoren läpi selvinneiden myonien ilmassa synnyttämää Tšerenkovin säteilyä. Valo kerättäisiin fokusoimalla se erittäin nopeaan, valoherkkään ja pikselirikkaaseen kameraan. Tällaisia laitteita käytetään yleensä gamma-astronomiassa (Gueta ym. 2022; Mollica ym. 2022). Ideaa on toistaiseksi tutkittu vain simulointien avulla. Tässä menetelmässä päästäisiin eroon kookkaista vesitankeista, ja näin laite olisi kevyempi ja helpommin kuljetettava kuin perinteiset Tšerenkov-teleskoopit. Tällaisten laitteiden haasteena olisi kuitenkin se, että ne toimisivat

vain pimeään aikaan. Myös Lo Presti ja muut (2019a) sekä Gallo ja muut (2020) ovat esitelleet omaa kehitystekeillä olevaa vesitankitonta Tšerenkov-teleskooppiaan.

Kannattaa huomata, että sana ”teleskooppi” on tarkoitettu lähinnä yksinkertaistamaan päivittäistä kielenkäyttöä, eikä se kerro laitteen teknisistä ratkaisuista. Myoniteleskoopit voidaan rakentaa moneen muotoon ja kokoon, ja niissä käytetyt havaitsemistekniikat voivat vaihdella: tyypillisesti ne ovat joko kaasutäyhteisiä ilmaisimia tai tuikeilmaisimia. Lisäksi kaksi toisiaan täydentävää ilmaisintyyppiä voidaan yhdistää samaan laitteeseen eräänlaiseksi hybridimalliksi. Yksi esimerkki tällaisesta on perinteisen myoniteleskoopin ja Tšerenkov-teleskoopin yhdistelmä (kuva 4b). Hybridimallit eivät ole kuitenkaan vielä kovin yleisiä, sillä niiden rakentaminen on yleensä kallista. Laitteista voi tulla myös turhan kookkaita, mikä hankaloittaa niiden siirtelyä. Hybridimallien pohjimmainen tarkoitus on tehdä laitteista soveltuvia johonkin tiettyyn käyttö-tarkoitukseen. Hybridisyys ei ole kuitenkaan ratkaisu siellä, missä ongelmaa ei ole.

Kairanreikälaitteet havaitsevat kaikkiin suuntiin huolimatta siitä, onko laite pysty- tai vaakasuorassa tai kaltevassa asennossa. Ilmaisin siis mittaa kaikki siihen osuvat myonit, tulosuunnasta riippumatta. Näiden ilmaisinten haasteena on kuitenkin teleskoopeja huonompi kulman erotuskyky (jopa useita kymmeniä asteita) sekä pienemmästä koosta johtuvat pidemmät mittausajat. Näiden laitteiden mahtuminen kairanreikiin on kuitenkin iso etu suurempiin teleskoopeihin verrattuna, sillä kiinnostavien kohteiden ympärille on usein jo tehty kairauksia. Kairanreikäilmaisimista ovat kirjoittaneet mm. Menichelli ja muut (2007), Bonneville ja muut (2017, 2019), Oláh ja muut (2018b), Flygare ja muut (2018), Holma ja muut (2019, 2021c), Bonechi ja muut (2020) sekä Cimmino ja muut (2021). Luonnon taustasäteily ei tavallisesti ole näille laitteille ongelma, sillä maan alla ei taivaalta peräisin olevaa taustasäteilyä ole.



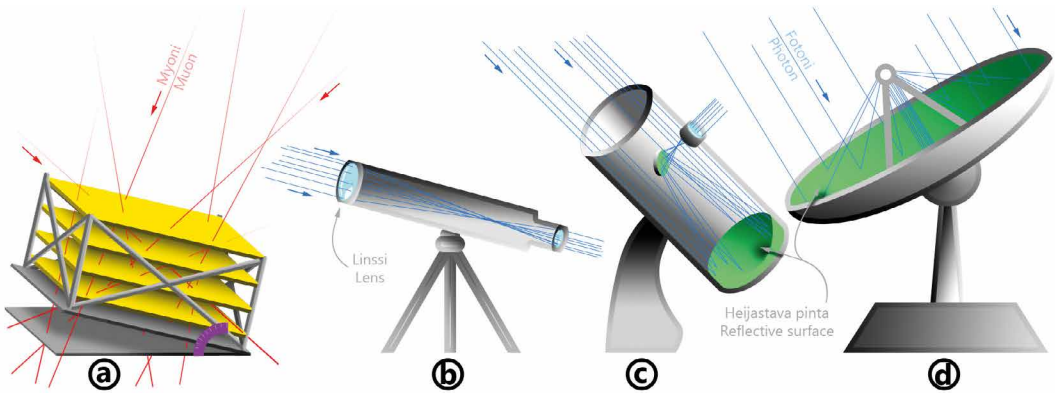
Kuva 4. Erilaisia myoni-ilmaisimia: kaasutäytteen ja akkukäyttöinen teleskooppi, jossa on kallistusmahdollisuus (FOV = näkökenttä) (a), hybriditeleskooppi, jossa Tšerenkov-vesitankki on sijoitettu kallistettavaan kehikkoon kahden paneelin perinteisen myoniteleskoopin kanssa (b), laattamainen ja joihinkin muihin ilmaisintyyppisiin verrattuna kohtalaisen yksinkertainen myonivuoilmaisim (c) sekä etäluettava ja aurinkopaneelista virtansa saava kairanreikäilmaisim (d). Keltainen = myoneja havaitseva ilmaisinosia, vihreä = elektroniikkaa, punaiset viivat = myonien lentoradat, violetti = kallistusmekanismi. Kuva: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

Figure 4. Various muon detectors: gas-filled and battery-powered telescope with a tilt possibility (FOV = field of view) (a), a hybrid telescope where a Cherenkov water tank is located in a tilting frame together with a more traditional two-panel muon telescope (b), a sheet-like muon flux detector, which has a relatively simple design compared to some other detector types (c), and a remotely readable and solar-panel-powered borehole detector (d). Yellow = muon-detection compartments, green = electronics, red lines = muon trajectories, purple = tilt mechanism. Figure: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

Myoni-ilmaisimet voidaan ryhmitellä vielä sen perusteella, kuinka tarkasti ne havaitsevat myonien liikeradat. Tällöin keskitytään laitteen suuntaherkkyyteen, kulmatarkkuuteen, kulmaresoluutioon (*angular resolution*) tai kulman erotuskykyyn (*resolving power*), jotka tarkoittavat tässä yhteydessä kutakuinkin samaa. Parhailta ilmaisimilla saavutetaan yleensä noin 10 mrad (0,57°) kulmatarkkuus, mutta emulsiopohjaiset laitteistot pystyvät tuottamaan vieläkin tarkempia tuloksia (Oláh ym. 2018a). Suuntaherkkää ilmaisinta kutsutaan englanniksi useilla sanoilla: *directional* (Ayuso ym. 2021), *high-definition* (Oláh ym. 2018a, 2019; Procureur & Attié 2019) tai *high-resolution* (Frazão ym. 2019; Gallo ym. 2019). Kaksi viimeistä tosin saattavat viitata vielä jonkin verran tarkempaan laitteeseen. Li-

säksi voidaan puhua myoni-ilmaisimista, jotka ovat hyviä jäljittämään (*tracking*) myonien liikeratoja. Näihin viitataan esimerkiksi sanoilla *muon-tracking detector* (Varga ym. 2016; Kuusiniemi ym. 2018; Oláh ym. 2018c, 2018a; Lo Presti ym. 2018; Yang ym. 2022), *muographic tracking detector* (Nyitrai ym. 2021) sekä pelkällä *tracker*-sanalla (Menichelli ym. 2007; Varga ym. 2022). Useimmat näistä laitteista ovat myoniteleskooppeja (Yang ym. 2022).

Yllä oleva jakaa myoni-ilmaisimet suuntaherkkiin ja ei-suuntaherkkiin. Jälkimmäisiä voidaan kutsua vaikkapa **myonivuoilmaisimiksi** (*muon flux detectors*, kuva 4c), joilla ei ole tarkoitukseen havaita myonien kulkemia liikeratoja. Ne on tehty yksinkertaisesti vain laskemaan laitteeseen osuneiden myonien määrä. Koska liikeratojen havaitsemisesta on



Kuva 5. Myoniteleskoopin näkökenttä on laaja (kameran kalansilmäobjektiivin kaltainen), mutta laite ei muuta havaitsemiensa myonien kulkureittejä (a). Optiset teleskoopit keräävät fotoneita pieneltä alueelta ja kääntävät niiden suuntia joko linssien refraktion (b) tai peilien heijastuksen avulla (c). Radioteleskoopin lautasantenni toimii optisen teleskoopin peilin tavoin, vaikkakin radioalueen fotoneilla (d). Kuva: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

Figure 5. A muon telescope has a wide field of view (similar to a fish-eye-lens in a camera), but the device does not alter the trajectories of detected muons (a). Optical telescopes gather photons from one small region and change their trajectories either by lens refraction (b) or by mirror reflection (c). The dish of a radio telescope operates similar to a mirror in an optical telescope but with radio photons (d). Figure: Muon Solutions Oy / Jarmo Korteniemi.

täysin luovuttu, on laite voitu rakentaa huomattavan kompaktiksi. Myonivuoilmaisimia voidaan kuitenkin rakentaa isompaankin kokoon (esim. kompensoimaan alentunutta myonivuota). Vaikka myonivuoilmaisimien saattaa näyttää yksinkertaiselta laitteelta, se voi silti sisältää runsaasti monimutkaista tekniikkaa ja automatiikkaa.

Mitä parempi suuntaherkkyys myoni-ilmaisimella on, sitä parempi kuvanlaatu sen avulla on mahdollista saavuttaa. Erilaisia käyttökohteita ja sovelluksia ajateltaessa täytyy kuitenkin ottaa huomioon myös mittauskustannukset: mitä tarkemmin myoni-ilmaisimien kykenee määrittämään myonien liikeratoja, sitä kalliimpaa sen rakentaminen usein on. Erilaisiin käytännön sovelluksiin tarvitaan siis erilaisia laiteratkaisuja.

Lisäksi kannattaa muistaa, että kaikkien myoni-ilmaisimien näkökenttien muotoa säätelee myös myonien tulokulma. Myonit tulevat yläviistosta taivaalta, ja niiden lukumäärät eri tulosuunnissa riippuvat kosmisen säteilyn synnyttämien myonisuihkujen kul-

majakaumasta. Sivusimme asiaa yllä laskenta-
taajuutta käsittelevässä osiossa sekä kirjoitussarjamme ensimmäisessä osassa (kuva 4, Holma ym. 2022a).

Ilmaisimien käytännön ominaisuudet

Suurin osa kirjallisuudessa esitellyistä myoni-ilmaisimista on tehty lähinnä laboratorioolosuhteisiin ja niitä vastaaviin mittaustilanteisiin. Siten niitä ei voi sellaisinaan käyttää geotieteellisiin sovelluksiin, joihin sopivien ilmaisimien suunnittelussa on tärkeää kiinnittää huomiota laitteiden toimintavaatimuksiin kenttäolosuhteissa. Mitä kaikkea näiltä voidaan sitten vaatia? Seuraava lista on suuntaa antava, eikä kaikkiin sovelluksiin tarvita samoja ominaisuuksia. Lähes mikä vain ominaisuus voi itse asiassa olla turha tai jopa epäedullinen jossain tilanteessa. Vaadittavat ominaisuudet ovat siis aina tapauskohtaisia.

Helppokäyttöisyys: hyödyllinen ominaisuus tilanteisiin, joissa mittauksen tilaaja siirtää myoni-ilmaisimet itse mittauspaikasta toiseen, vaihtaa laitteiden kaasusäiliöt ja/tai

hoitaa mittausdatan lataamisen ilmaisimesta toimittaakseen sen eteenpäin analysoijille.

Kuljetettavuus: käyttöpaikasta riippuen myoni-ilmaisimen täytyy olla pieni ja kevyt tai vähintään kätevästi kuljetettavissa. Poikkeuksena tähän sääntöön ovat ilmaisimet, jotka rakennetaan tiettyä pysyvää käyttötarkoitusta varten ja kootaan paikan päällä lopulliseen (yleensä varsin suureen) muotoonsa.

Kenttäkelppoisuus: riippuen käyttökohteesta, myoni-ilmaisimen täytyy pystyä kestämään korkea ilmankosteutta ja/tai voimakkaata lämpötilan vaihteluita. Esimerkiksi tropiikki, arktinen alue, aavikko ja maanalainen kaivos ovat hyvin erilaisia ympäristöjä. Kaivosteollisuuden sovelluksissa laitteen kotelon olisi hyvä kestää myös happamia olosuhteita sekä ainakin pieniä putoavia kiviä. Näiden laitteiden tulee kestää myös pölyä, kosteutta ja voimakasta värinää sekä räjäytyksistä aiheutuvia äkillisiä painealtoja. Vedenalaisissa olosuhteissa toimivien laitteiden tulee kestää veteen upottaminen ja mahdollisesti korkeakin vedenpaine.

Käyttövarmuus: ilmaisimen tulee pystyä toimimaan yhtäjaksoisesti yöstä päivää – jopa kuukausia – mieluusti omatoimisesti ja ilman isompia huoltotoimenpiteitä.

Sähköomavaraisuus: joissain käyttökohteissa myoni-ilmaisimen täytyy pystyä toimimaan ilman sähköverkkoa. Ratkaisuna laitteeseen voidaan kytkeä akkujärjestelmä. Akut voidaan ladata vaikkapa aurinkopaneelilla ja/tai tuulimyllyllä, tai tyhjentyneet akut voidaan vaihtaa huoltokäynnillä täysiin.

Alhainen tehonkulutus: tärkeä ominaisuus myoni-ilmaisimille, joita ei saada kytkettyä sähköverkkoon.

Etäluettavuus/-ohjattavuus: oleellinen ominaisuus myoni-ilmaisimille, joiden toimintaa ei voida jatkuvasti seurata paikan päällä. Maanpäällisissä mittauksista mittausdatan etäluettavuus on yleensä kohtuullisen helposti järjestettävissä.

Myonien tunnistuskyky: kaikki myoni-ilmaisimet luonnollisesti tunnistavat myoneja, mutta toisinaan muu luonnon taustasäteily

täytyy pystyä pysäyttämään tavallista tehokkaammin, jotta myonit erottuvat paremmin. Pysäyttämiseen käytetään tavallisesti raskaita lyijylevyjä. Tämä vaatimus on erityisen tärkeä maanpäällisissä mittauksissa, joissa laite altistuu jatkuvasti taivaalta tulevalle säteilylle.

Suuntaherkkyyt: myonien lentoradat tulee voida määrittää varsin tarkasti (Holma 2022b), jotta suuntatiedosta olisi hyötyä. Yleensä suuntaherkkien myoni-ilmaisimien suunnittelussa tavoitteena on siis hyvä kulmatarkkuus.

Pieni koko: esimerkiksi kairanreikiin ei mahdu suurikokoisia ilmaisimia.

Lyhyt mittausaika: jos kokonaismittausaika on rajattu, syvällä olevalle kohteelle tai suurelle pintakohteelle voidaan tehdä vain ylimalkainen tutkimus. Vaihtoehtona on suorittaa mittaus suuremmalla myoni-ilmaisimella tai modulaarisella laitejärjestelmällä.

Modulaarisuus: hyödyllinen ominaisuus tutkimuksiin, joissa tuloksia tarvitaan nopeasti tai mittausajan odotetaan olevan poikkeuksellisen pitkäkestoinen. Lisäämällä myoni-ilmaisimien lukumäärää, voidaan kokonaismittausaika lyhentää tehokkaasti.

Tässä yhteydessä täytyy jälleen korostaa, että kaikki myoni-ilmaisimet ovat passiivisia järjestelmiä. Ne eivät siis itse tuota myoneja tai mitään muutakaan säteilyä. Laitteet eivät yleensä myöskään vahingoitu edes kohtuullisen voimakkaassa taustasäteilyssä, eikä taustasäteily aiheuta dataan merkittävää virhelähdettä, koska ilmaisimet on suunniteltu erottamaan myonit muista hiukkasista.

Myonigrafia elää paraikaa nousukauttaan: tutkimusryhmien lukumäärät ja koot kasvavat, julkaisutoiminta on aktiivisempaa kuin koskaan ja tutkimusta tehdään yhä useammassa maailmankolkassa. Näyttää vahvasti siltä, että nykyinen kasvu jatkuu yhä lähitulevaisuudessa. Yksi moottori, joka tätä prosessia ajaa, on myoni-ilmaisimien kehitystyö. Ilmaisimien tarkka tuntemus on erityisesti asiantuntijoiden tehtävä, eikä varsinaisten loppukäyttäjien tarvitse ymmärtää laitteiden toimintaperiaatteita

läpikotaisin. Toivomme silti, että tämä katsaus antoi edes suurpiirteisen käsityksen monimuotoisten myoni-ilmaisimien toiminnasta. Onhan jokaisen hyvä tuntee myös työrukka-sensa – ainakin päällisin puolin.

Muuta taustatietoa

Sarjan ensimmäisessä osassa suunnitelimme, että vertaisimme myonikuvausta tässä osassa perinteisiin geofysikaalisiin menetelmiin. Tuollainen tietopaketti kuitenkin paisuttaisi tätä osaa niin paljon, että palaamme tähän asiaan myöhemmissä kirjoituksissamme.

Artikkeli on kontribuutio meneillään olevan (2022–2025) Horisontti Eurooppa-ohjelman rahoittamaan AGEMERA-projektiin (*Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw materials*, nro 101058178, ks. Holma ym. 2022b). Kerromme sarjamme myöhemmissä osissa projektin myonigrafiaan liittyvistä tuloksista.

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)

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, 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. 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 2 — Muon detection and the basic principles of muography.

This article summarises the principles of muon detection employed in muography and introduces the different ways to deploy muography.

As already explained in the first part of the series, muography is a method used for detecting density differences. The spectrum of muon detectors is currently rather broad varying from historical photographic emulsion films originally used in the discovery of radioactivity in the late 19th century to modern gas-filled and scintillation-based muon detectors designed especially for muographical investigations. In other words, delicate instruments originally designed for nuclear and particle physics studies in ‘soft’ laboratory conditions have been significantly modified in the name of muography in order to operate in very harsh environments, such as slopes of volcanoes and underground mines, that require robust designs, reliability and autonomy/automatic operation.

This article explains the basic principles of muon detection and lists a rather broad set of different applications used in muography, not forgetting to describe different types of muon detectors in detail, but at the same time keeping in mind that the reader may not have detailed knowledge of particle detection in general. Therefore, our discussion was built in a way that, for example, mathematical descriptions of different phenomena were deliberately omitted. We explain the basic principles of interactions and related media used for detecting muons, i.e., why muon detectors are gas-filled, made of plastics, semiconductors, or even emulsion films. We also explain why muon detectors appear in many different sizes and shapes, and what makes a good muon detector for muography.

Finally, we list some properties of modern muon detectors that are generally those one must consider while planning to conduct muography at any site. The list is not comprehensive but rather

demonstrates that measurements employing muography using a given plan are often case-dependent. What is good on one site may not be that good on the other, so careful planning well in advance often pays back in the end.

This article contributes to the 2022–2025 AGEMERA project (Agile Exploration and Geo-modelling for European Critical Raw materials; see Holma et al. 2022a).

Lähdeluettelo

- Ambrosino, F., Anastasio, A., Bross, A., Béné, S., Boivin, P., ym., 2015. Joint measurement of the atmospheric muon flux through the Puy de Dôme volcano with plastic scintillators and resistive plate chambers detectors. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 120, 7290–7307. <https://doi.org/10.1002/2015jb011969>
- Anghel, V., Armitage, J., Baig, F., Boniface, K., Boudjemline, K., ym., 2015. A plastic scintillator-based muon tomography system with an integrated muon spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 798, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.06.054>
- Ariga, A., Ariga, T., Ereditato, A., Käser, S., Lechmann, A., ym., 2018. A nuclear emulsion detector for the muon radiography of a glacier structure. *Instruments* 2 (2), 7. <https://doi.org/10.3390/instruments2020007>
- Ayuso, S., Blanco, J. J., García Tejedor, J. I., Gómez Herrero, R., Vrublevskyy, I., ym., 2021. MITO: a new directional muon telescope. *Journal of Space Weather and Space Climate* 11, 13. <https://doi.org/10.1051/swsc/2020079>
- Baccani, G., 2020. Muon absorption tomography of a lead structure through the use of iterative algorithms. *Journal of Instrumentation* 15, P12024. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/12/P12024>
- Beni, T., Baccani, G., Borselli, D., Bonechi, L., Massimo Bonghi, M., ym., 2022. Absorption-based muography for ore bodies prospecting: a case study from Temperino Mine (Italy). EGU General Assembly 23.–27.5.2022, Wien / online, abstrakti EGU22-8837. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-8837>
- Blackwell, T. B. & Kudryavtsev, V. A., 2015. Development of a 3D muon disappearance algorithm for muon scattering tomography. *Journal of Instrumentation* 10, T05006–T05006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/05/t05006>
- Bonechi, L., D'Alessandro, R., Mori, N. & Viliani, L., 2015. A projective reconstruction method of underground or hidden structures using atmospheric muon absorption data. *Journal of Instrumentation* 10 (02), P02003–P02003. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/02/p02003>
- Bonechi, L., D'Alessandro, R. & Giammanco, A., 2020. Atmospheric muons as an imaging tool. *Reviews in Physics* 5, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.revip.2020.100038>
- Bonneville, A., Kouzes, R. T., Yamaoka, J., Rowe, C., Guardincerri, E., ym., 2017. A novel muon detector for borehole density tomography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 851, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.023>
- Bonneville, A., Kouzes, R., Yamaoka, J., Lintereur, A., Flygare, J., ym., 2019. Borehole muography of subsurface reservoirs. *Philosophical Transactions A* 377, 20180060. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0060>
- Bouteille, S., Attié, D., Baron, P., Calvet, D., Magnier, P., ym., 2016. A Micromegas-based telescope for muon tomography: The WatTo experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 834, 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.08.002>
- Bouteille, S. & Procureur, S., 2022. Development of micro-pattern gaseous detectors for muography. Teoksessa: Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Varga, D. (toim.), *Muography: Exploring Earth's subsurface with elementary particles*. John Wiley & Sons, Hoboken, 279–288. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch20>
- Bozza, C., Consiglio, L., D'Ambrosio, N., De Lellis, G., De Sio, C., ym., 2017. Nuclear emulsion techniques for muography. *Annals of Geophysics* 60 (1), S0109. <https://doi.org/10.4401/ag-7384>
- Catalano, O., Del Santo, M., Mineo, T., Cusumano, G., Maccarone, M. C. & Pareschi, G., 2016. Volcanoes muon imaging using Cherenkov telescopes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 807, 5–12. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.10.065>
- Chatzidakis, S., Choi, C. K. & Tsoukalas, L. H., 2016. Analysis of spent nuclear fuel imaging using multiple Coulomb scattering of cosmic muons. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 63, 2866–2874. <https://doi.org/10.1109/tns.2016.2618009>
- Cimmino, L., 2021. Principles and perspectives of radiographic imaging with muons. *Journal of Imaging* 7 (12), 253. <https://doi.org/10.3390/jimaging7120253>
- Cimmino, L., Ambrosino, F., Anastasio, A., D'Errico, M., Masone, V., ym., 2021. A new cylindrical borehole detector for radiographic imaging with muons. *Scientific Reports* 11, 17425. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96247-1>
- Del Santo, M., Mollica, D., Catalano, O., Campana, R., Mineo, T., ym., 2018. Cherenkov muography for studying the internal structure of volcanoes. *American Geophysical Union, Fall Meeting* 10. –14.12.2018, Washington D.C., abstrakti NS23B-0712.
- Dobrowolska, M., Velthuis, J., Frazão, L. & Kikoła, D., 2018. A novel technique for finding gas bubbles in the nuclear waste containers using Muon Scattering Tomography. *Journal of Instrumentation* 13, P05015–P05015. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/p05015>
- Enqvist, T., Holma, M., Kuusiniemi, P. & Loo, K., 2021. Exploration of Lunar in situ resources can be conducted by applying density-sensitive cosmic-ray-based geophysical muon imaging method called muography. *SEG 100 Conference* 14–17.9.2021, Whistler, abstrakti ST.040.

- Flygare, J., Bonneville, A., Kouzes, R., Yamaoka, J. & Lintereur, A., 2018. Muon borehole detector design for use in 4D density overburden monitoring. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 65 (10), 2724–2731. <https://doi.org/10.1109/tns.2018.2869196>
- Frazão, L., Velthuis, J. J., Maddrell-Mander, S. & Thomay, C., 2019. High-resolution imaging of nuclear waste containers with Muon Scattering Tomography. *Journal of Instrumentation* 14, P08005–P08005. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/08/p08005>
- Gaisser, T. & Halzen, F., 2014. IceCube. *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 64, 101–123. <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102313-025321>
- Gallo, G., on the behalf of the MEV Project Collaboration, 2019. The MEV project: A new high-resolution telescope for the Muography of Etna Volcano. *Il Nuovo Cimento C* 42 (5), 1–10. <https://doi.org/10.1393/ncc/i2019-19230-7>
- Gallo, G., Lo Presti, D., Bonanno, D. L., Bonanno, G., La Rocca, P., ym., 2020. Proof-of-principle of a Cherenkov-Tag detector prototype. *Sensors* 20 (12), 3437. <https://doi.org/10.3390/s20123437>
- Giammanco, A., Andringa, S., Cortina Gil, E. & Tytgat, M., 2022. Resistive plate chambers in muography. Teoksessa: Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Varga, D. (toim.), *Muography: Exploring Earth's subsurface with elementary particles*. John Wiley & Sons, Hoboken, 253–265. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch18>
- Giomataris, Y., Rebourgeard, P., Robert, J. P. & Charpak, G., 1996. MICROMEAS: a high-granularity position sensitive gaseous detector for high particle flux environments. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 376 (1), 29–35. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00175-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00175-1)
- Guardincerri, E., Rowe, C., Schultz-Fellenz, E., Roy, M., George, N., ym., 2017. 3D cosmic ray muon tomography from an underground tunnel. *Pure and Applied Geophysics* 174, 2133–2141. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1526-x>
- Gueta, O., Abdalla, H., Abe, H., Abe, S., Abusleme, A., ym., 2022. The Cherenkov Telescope Array: layout, design and performance. *Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021)*, Berliini, 15 s. <https://doi.org/10.22323/1.395.0885>
- Hivert, F., Lázaro, I., Decitre, J. B., Brunner, J., Busto, J. & Gaffet, S., 2017. Muography sensitivity to hydrogeological rock density perturbation: Roles of the absorption and scattering on the muon flux measurement reliability. *Near Surface Geophysics* 15, 121–129. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016053>
- Holma, M. & Kuusiniemi, P., 2018. Underground muography: The raise of geoparticle physics as a soil, orebody and rock realm imaging method. Teoksessa: Kukkonen, I., Heinonen, S., Silvennoinen, H., Karell, F., Kozlovskaya, E., ym. (toim.), *Lithosphere 2018: Tenth symposium on the structure, composition and evolution of the lithosphere: Programme and extended abstracts*. Institute of Seismology, University of Helsinki, 27–30.
- Holma, M., Enqvist, T., Joutsenvaara, J., Kuusiniemi, P., Loo, K., ym., 2021a. A novel concept for exploration and characterization of subsurface water-ice on the Moon. *Lunar Surface Science Workshop: Fundamental and Applied Lunar Surface Research in Physical Sciences*, 18.-19.8.2021, online, abstrakti.
- Holma, M., Enqvist, T., Joutsenvaara, J., Kuusiniemi, P., Loo, K., ym., 2021b. Density characterization of the lunar lava tube surroundings with cosmic-ray based muography method. *Lunar Surface Science Workshop: Fundamental and Applied Lunar Surface Research in Physical Sciences*, 18.-19.8.2021, online, abstrakti.
- Holma, M., Kuusiniemi, P., Loo, K., Joutsenvaara, J., Aittola, M., ym., 2019. Borehole muography – A new geophysical tool. *XXIX Geofysiikan päivät Rovaniemellä* 21.–22.5.2019. Geofysiikan seura, Helsinki, 20–23.
- Holma, M., Kuusiniemi, P. & Loo, K., 2021c. An introduction to principles of muography in continental scientific boreholes. Teoksessa: Kukkonen, I., Heinonen, S., Silvennoinen, H., Karell, F., Kozlovskaya, E., ym. (toim.), *Lithosphere 2018: Tenth symposium on the structure, composition and evolution of the lithosphere: Programme and extended abstracts*. Institute of Seismology, University of Helsinki, 39–42.
- Holma, M., Korteniemi, J., Casini, G., Saura, E., Šumanovac, F., ym., 2022b. 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., Sarala, P. & Korteniemi, J., 2022a. Uudenlaisen geofysiikan äärellä: Osa 1 – Myonit ja myonigrafian yleisimmät sovellukset. *Geologi* 74 (6), 219–228.
- Holma, M., Zhang, Z.-X., Kuusiniemi, P., Loo, K. & Enqvist, T., 2022c. Future prospects of muography for geological research and geotechnical and mining engineering. Teoksessa: Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Varga, D. (toim.), *Muography: Exploring Earth's subsurface with elementary particles*. John Wiley & Sons, Hoboken, 199–219. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch15>
- Hu, X., Ökvist, L. S., Åström, E., Forsberg, F., Checchia, P., ym., 2018. Exploring the capability of muon scattering tomography for imaging the components in the blast furnace. *ISIJ International* 58, 35–42. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2017-384>
- Kamiyoshihara, H., Shimazoe, K., Ninomiya, T., Tanaka, H., Takahashi, H. & Miyamoto, H., 2020. Compact muography instrument for future Mars exploration: Experimental demonstrations. *51st Lunar and Planetary Science Conference, Texas*. LPI Contribution No. 2326, 1113.
- Kedar, S., Tanaka, H. K. M., Naudet, C. J., Jones, C. E., Plaut, J. P. & Webb, F. H., 2013. Muon radiography for exploration of Mars geology. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems* 2, 157–164. <https://doi.org/10.5194/gi-2-157-2013>
- Klemola, S., 2020. Säteilyn ilmaisimet. Teoksessa: Ikäheimonen, T. K. (toim.), *Säteily- ja ydinturvallisuus*. Säteilyturvakeskus, Helsinki, 115–136.

- 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>
- Kuusiniemi, P., Holma, M. & Zhang, Z.-X., 2021. Cosmic-ray muography applications in underground tunnelling. EGU General Assembly 19.–30.4.2021, online, abstrakti EGU21-9667. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9667>
- Lázaro, I., Hivert, F., Decitre, J.-B., De Oliveira, R., Pizzirusso, O., *ym.*, 2014. Muon telescope based on Micromegas detectors: From design to data acquisition. *i-DUST 2014 – Inter-Disciplinary Underground Science & Technology. E3S Web of Conferences* 4, 01002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20140401002>
- Lee, Y. W. & Ng, L. K., 1987. Observation of cosmic-ray intensity variation using an underground telescope. *Proceedings of the 20th International Cosmic Ray Conference*, 2.–15.8.1987, Moskova, 18–21.
- Leone, G., Tanaka, H. K. M., Holma, M., Kuusiniemi, P., Varga, D., *ym.*, 2021. Muography as a new complementary tool in monitoring volcanic hazard: implications for early warning systems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 447 (2255), 20210320. <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0320>
- Lesparre, N., Gibert, D. & Marteau, J., 2012a. Bayesian dual inversion of experimental telescope acceptance and integrated flux for geophysical muon tomography. *Geophysical Journal International* 188, 490–497. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05268.x>
- Lesparre, N., Marteau, J., Déclais, Y., Gibert, D., Carlu, B., *ym.*, 2012b. Design and operation of a field telescope for cosmic ray geophysical tomography. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems* 1, 33–42. <https://doi.org/10.5194/gi-1-33-2012>
- Liang, Z., Hu, T., Li, X., Wu, Y., Li, C. & Tang, Z., 2020. A cosmic ray imaging system based on plastic scintillator detector with SiPM readout. *Journal of Instrumentation* 15 (07), C07033–C07033. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/07/c07033>
- Liao, C., Yang, H., Liu, Z. & Hayward, J. P., 2018. Design and characterization of a scintillator-based position-sensitive detector for muon imaging. *Nuclear Technology* 205, 1–12. <https://doi.org/10.1080/00295450.2018.1522885>
- Lo Presti, D., Gallo, G., Bonanno, D. L., Bongiovanni, D. G., Carbone, D., *ym.*, 2018. The MEV project: design and testing of a new high-resolution telescope for Muography of Etna Volcano. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 904, 195–201. <https://doi.org/doi:10.1016/j.nima.2018.07.048>
- Lo Presti, D., Gallo, G., Bonanno, D. L., Bongiovanni, D. G., Carbone, D., *ym.*, 2019b. The MEV (Muography of Etna Volcano) project and its future applications to the Earth and Mars. *50th Lunar and Planetary Science Conference 2019, Texas. LPI Contrib. No. 2132*, 1884.
- Lo Presti, L. D., Gallo, G., Bonanno, D. L., Bongiovanni, D. G., Longhitano, F. & Reito, S., 2019a. Feasibility study of a new Cherenkov detector for improving volcano muography. *Sensors* 19, 1183. <https://doi.org/10.3390/s19051183>
- Marteau, J., de Bremond d'Ar, J., Carlu, B., Chevalier, A., Cohu, A., *ym.*, 2022. Development of scintillator-based muon detectors for muography. *Teoksessa: Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Varga, D. (toim.), Muography: Exploring Earth's subsurface with elementary particles. John Wiley & Sons, Hoboken*, 239–252. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch17>
- Menichelli, M., Ansoldi, S., Bari, M., Basset, M., Battiston, R., *ym.*, 2007. A scintillating fibres tracker detector for archaeological applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 572, 262–265. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.10.317>
- Menicucci, A., Stam, D. & Hodge, R. D. D., 2019. A compact muon detector for asteroid muography. *2019 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference* 26.10.–2.11.2019, Manchester, abstrakti 2147.
- Miyamoto, S. & Nagahara S., 2020. Three-dimensional density reconstruction analysis method for omnidirectional muography. *EGU General Assembly* 4.–8.5.2020, online, abstrakti EGU2020-13356. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-13356>
- Miyamoto, H., Tanaka, H., Yoshimitsu, T., Otsuki, M., Taguchi, M., *ym.*, 2016. Muography for future Phobos landing mission. *47th Lunar and Planetary Science Conference, Texas, LPI Contribution No. 1903*, 1684.
- Miyamoto, S., Nagahara, S., Morishima, K., Nakano, T., Koyama, M. *ym.*, 2022. A muographic study of a scoria cone from 11 directions using nuclear emulsion cloud chambers. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 11 (1), 127–147. <https://doi.org/10.5194/gi-11-127-2022>
- Mollica, D., Capalbi, M., Catalano, O., Contino, G., Conconi, P., *ym.*, 2022. MUCH: a compact imaging atmospheric Cherenkov telescope for volcano muography. *11th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors (RICH2022)* 12.–16.9.2022, Edinburgh, abstrakti.
- Morishima, K., 2015. Latest developments in nuclear emulsion technology. *Physics Procedia* 80, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.082>
- Morishima, K. & Nakano, T., 2010. Development of a new automatic nuclear emulsion scanning system, S-UTS, with continuous 3D tomographic image read-out. *Journal of Instrumentation* 5, P04011–P04011. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/5/04/p04011>
- Morishima, K., Kitagawa, N. & Nishio, A., 2022. Development of nuclear emulsions for muography. *Teoksessa: Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Varga, D. (toim.), Muography: Exploring Earth's subsurface with elementary particles. John Wiley & Sons, Hoboken*, 289–299. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch21>
- Morris, C. L., Bacon, J., Borozdin, K., Fabritius, J., Miyadera, H., *ym.*, 2014. Horizontal cosmic ray muon radiography for imaging nuclear threats. *Nuclear Instruments and*

- Methods in Physics Research B 330, 42–46. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.03.017>
- Nagahara, S. & Miyamoto, S., 2018. Feasibility of three-dimensional density tomography using dozens of muon radiographies and filtered back projection for volcanos. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems* 7, 307–316. <https://doi.org/10.5194/gi-7-307-2018>
- Nagahara, S., Miyamoto, S., Morishima, K., Nakano, T., Koyama, M. & Suzuki, Y., 2020. Demonstration of 11-directional muography in Omuro-yama Scoria cone, Izu, Japan. EGU General Assembly 4.–8.5.2020, online, abstrakti EGU2020-12807. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12807>
- 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 Section A* 356, 585–595. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)01169-9](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)01169-9)
- Niess, V., Barnoud, A., Carloganu, C. & Le Menedeu, E., 2018. Methods and tools for transmission muography. EGU General Assembly 4.–13.4.2018, Wien, abstrakti EGU2018-18110.
- Nishio, A., Morishima, K., Kuwabara, K. & Nakamura, M., 2015. Development of nuclear emulsion detector for muon radiography. *Physics Procedia* 80, 74–77. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.084>
- Nishio, A., Morishima, K., Kuwabara, K., Yoshida, T., Funakubo, T., ym., 2020. Nuclear emulsion with excellent long-term stability developed for cosmic-ray imaging. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 966, 163850. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163850>
- Nishiyama, R., Miyamoto, S. & Naganawa, N., 2014. Experimental study of source of background noise in muon radiography using emulsion film detectors. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 3, 29–39. <https://doi.org/10.5194/gi-3-29-2014>
- Nishiyama, R., Taketa, A., Miyamoto, S. & Kasahara, K., 2016. Monte Carlo simulation for background study of geophysical inspection with cosmic-ray muons. *Geophysical Journal International* 206, 1039–1050. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw191>
- Nyitrai, G., Hamar, G. & Varga, D., 2021. Toward low gas consumption of muographic tracking detectors in field applications. *Journal of Applied Physics* 129, 244901. <https://doi.org/10.1063/5.0053984>
- Oláh, L., Balogh, S. J., Gera, Á. L., Hamar, G., Nyitrai, G., ym., 2018c. Muography with multi-wire-proportional-chamber-based tracking detectors. *Journal of the Japan Society of Photographic Science* 81, 269–274. <https://doi.org/10.11454/photogrstr.81.269>
- Oláh, L., Barnaföldi, G. G., Hamar, G., Melegh, H. G., Surányi, G. & Varga, D., 2012. CCC-based muon telescope for examination of natural caves. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 1, 229–234. <https://doi.org/10.5194/gi-1-229-2012>
- Oláh, L., Hamar, G., Miyamoto, S., Tanaka, H. K. M. & Varga, D., 2018b. The first prototype of an MWPC-based borehole-detector and its application for muography of an underground pillar. *Butsuri-Tansa (Geophysical Exploration)* 71, 161–168. <https://doi.org/10.3124/segi.71.161>
- Oláh, L., Tanaka, H. K. M., Hamar, G. & Varga, D., 2019. Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt Sakurajima. *Philosophical Transactions A* 377, 20180135. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0135>
- Oláh, L., Tanaka, H. K. M., Ohminato, T. & Varga, D., 2018a. High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors. *Scientific Reports* 8, 3207. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21423-9>
- Peña-Rodríguez, J., Pisco-Guabave, J., Sierra-Porta, D., Suárez-Durán, M., Arenas-Flórez, M., ym., 2020. Design and construction of MuTe: a hybrid Muon Telescope to study Colombian Volcanoes. *Journal of Instrumentation* 15, P09006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/P09006>
- Peña-Rodríguez, J., Vesga-Ramírez, A., Vásquez-Ramírez, A., Suárez-Durán, M., de León-Barrios, R., ym., 2022. Muography in Colombia: simulation framework, instrumentation and data analysis. *Journal of Advanced Instrumentation in Science*, 2022, JAIS-271. <https://doi.org/10.31526/JAIS.2022.271>
- Priedhorsky, W. C., Borozdin, K. N., Hogan, G. E., Morris, C., Saunders, A., ym., 2003. Detection of high-Z objects using multiple scattering of cosmic ray muons. *Review of Scientific Instruments* 74, 4294–4297. <https://doi.org/10.1063/1.1606536>
- Procureur, S., 2018. Muon imaging: Principles, technologies and applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 878, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.08.004>
- Procureur, S. & Attié, D., 2019. Development of high-definition muon telescopes and muography of the Great Pyramid. *Comptes Rendus Physique* 20 (6), 521–528. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.09.003>
- Procureur, S., Attié, D., Bouteille, S., Calver, D., Coppolani, X., ym., 2020. Why do we flush gas in gaseous detectors? *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 955, 163290. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163290>
- Saracino, G., Ambrosino, F., Bonechi, L., Bross, A., Cimmino, L., ym., 2017. The MURAVES muon telescope: Technology and expected performances. *Annals of Geophysics* 60, S0103. <https://doi.org/10.4401/ag-7378>
- Saracino, G., Ambrosino, F., Bonechi, L., Cimmino, L., D'Alessandro, R., ym., 2019. Applications of muon absorption radiography to the fields of archaeology and civil engineering. *Philosophical Transactions A* 377, 20180057. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0057>
- Sharma, A., 2012. Muon tracking and triggering with gaseous detectors and some applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 666, 98–129. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.12.001>

- Surányi, G., Hamar, G., Nyitrai, G. & Gera, Á., 2022. Application examples of underground muography. EGU General Assembly 23.–27.5.2022, Wien / online, abstrakti EGU22-3551. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-3551>
- Tanaka, H. K. M., 2013. Subsurface density mapping of the earth with cosmic ray muons. Nuclear Physics B – Proceedings Supplements 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2013.09.020>
- Tanaka, H. K. M., 2016. Instant snapshot of the internal structure of Unzen lava dome, Japan with airborne muography. Scientific Reports 6, 39741. <https://doi.org/10.1038/srep39741>
- Tanaka, H. K. M., 2020. Development of automatic analysis and data visualization system for volcano muography. Journal of Disaster Research 15 (2), 203–211. <https://doi.org/10.20965/jdr.2020.p0203>
- Tanaka, H. K. M., 2022. Muography for a dense tide monitoring network. Scientific Reports 12, 6725. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10373-y>
- Tanaka, H. K. M., Aichi, M., Bozza, C., Coniglione, R., Gluyas, J., ym., 2021. First results of undersea muography with the Tokyo-Bay Seafloor Hyper-Kilometric Submarine Deep Detector. Scientific Reports 11, 19485. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98559-8>
- Tanaka, H. K. M., Gluyas, J., Holma, M., Joutsenvaara, J., Kuusiniemi, P., ym., 2022. Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones. Scientific Reports 12, 16710. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20039-4>
- Tanaka, H., Nagamine, K., Kawamura, N., Nakamura, S. N., Ishida, K. & Shimomura, K., 2003. Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 507, 657–669. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01372-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01372-X)
- Tanaka, H. K. M., Nagamine, K., Nakamura, S. N. & Ishida, K., 2005. Radiographic measurements of the internal structure of Mt. West Iwate with near horizontal cosmic ray muons and future developments. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 555, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.08.099>
- Tanaka, H. K. M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J. & Niwa, K., 2007a. Development of an emulsion imaging system for cosmic-ray muon radiography to explore the internal structure of a volcano, Mt. Asama. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 575, 489–497. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.02.104>
- Tanaka, H. K. M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Ohshima, H., ym., 2007b. Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan. Geophysical Research Letters 34, L22311. <https://doi.org/10.1029/2007GL031389>
- Thomay, C., Velthuis, J., Poffley, T., Baesso, P., Cussans, D. & Frazão, L., 2016. Passive 3D imaging of nuclear waste containers with muon scattering tomography. Journal of Instrumentation 11, P03008–P03008. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/p03008>
- Tioukov, V., Alexandrov, A., Bozza, C., Consiglio, L., D'Ambrosio, N., ym., 2019. First muography of Stromboli volcano. Scientific Reports 9, 6695. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43131-8>
- Vanini, S., Calvini, P., Checchia, P., Rigoni Garola, A., Klinger, J., ym., 2019. Muography of different structures using muon scattering and absorption algorithms. Philosophical Transactions A 377, 20180051. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0051>
- Varga, D., Hamar, G. & Oláh, L., 2022. Development of multi-wire proportional chamber-based trackers for muography. Teoksessa: Oláh, L., Tanaka, H. K. M. & Varga, D. (toim.), Muography: Exploring Earth's subsurface with elementary particles. John Wiley & Sons, Hoboken, 267–278. <https://doi.org/10.1002/9781119722748.ch19>
- Varga, D., Nyitrai, G., Hamar, G. & Oláh, L., 2016. High efficiency gaseous tracking detector for cosmic muon radiography. Advances in High Energy Physics, 1962317. <https://doi.org/10.1155/2016/1962317>
- Vásquez-Ramírez, A., Suárez-Durán, M., Jaimes-Motta, A., Calderón-Ardila, R., Peña-Rodríguez, J., ym., 2020. Simulated response of MuTe, a hybrid Muon Telescope. Journal of Instrumentation 15 (08), P08004–P08004. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/08/p08004>
- Vesga-Ramírez, A., Sanabria-Gómez, J. D., Sierra-Porta, D., Arana-Salinas, L., Asorey, H., ym., 2021. Simulated Annealing for volcano muography. Journal of South American Earth Sciences 109, 103248. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103248>
- Wuyckens, S., Giammanco, A., Cortina Gil, E. & Demin, P., 2019. A portable muon telescope based on small and gas-tight resistive plate chambers. Philosophical Transactions A 377, 20180139. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0139>
- Yang, H., Luo, G., Yu, T., Zhao, S., Hu., B., ym., 2022. MuGrid: A scintillator detector towards cosmic muon absorption imaging. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1042, 167402. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167402>