



#1

Ilmakehän pienhiukkasten muodostumisen merkitys ilmastolle ja ilmanlaadulle

*Markku Kulmala, Runlong Cai,
Tom Kokkonen, Anna Lintunen,
Veli-Matti Kerminen*



Abstract

Atmospheric CO₂ concentrations are increasing. However, the total effect of ecosystems on climate is more complex than just the carbon balance. Ecosystems have a key role in aerosol formation in the atmosphere, which significantly contributes to the radiative balance. Without aerosols, there are no clouds or rain, and aerosols reflect part of the incoming solar radiation back to space, cooling the atmosphere. We established the SMEAR stations 25 years ago, to provide open comprehensive data. We would need similar comprehensive observations from different ecosystems globally, both for properly understanding the full climate forcing and for solving the global environmental challenges.

1. Johdanto / Tausta

Suuret haasteet

Globaalisti ihmiskunnan väkiluku kasvaa ja väestö muuttaa kaupunkeihin. Kasvava väestö tarvitsee paitsi hyvän sosiaalisen verkoston, myös puhdasta ilmaa ja vettä, ravitsevaa ruokaa, riittävästi energiaa sekä hyvää terveyttä. Mutta se, mitä saamme, on muuttuva ilmasto, paikoin erittäin huono ilmanlaatu, sietämättömän korkeaksi kohonneet lämpötilat kaupungeissa, riittämätön puhtaan veden ja ruoan saatavuus, kasvava happamoitumisen ja aavikoitumisen riski, heikkenevä biodiversiteetti ja paikoin epävarma energian riittävyys. Nämä kaikki suuret globaalit haasteet liittyvät toisiinsa, eikä niitä voi ratkaista yksitellen (esim. Kulmala ym., 2023a).

Perusedellytys suurten haasteiden ratkaisemiselle on riittävä, monipuolinen ympäristödata, joka on avoimesti kaikkien käytössä. Tällaisen datan tuottamiseksi olemme perustaneet SMEAR-asetat (Station for Measuring Earth surface - Atmosphere Relations; Hari ym., 2016; Kulmala ym., 2023a).

Ilmakehän hiilidioksidi ja aerosolihiukkaset

Ilmakehässä on sokerinpalan kokoisessa tilavuudessa 2.6×10^{19} ilmamolekyyliä, joista noin 420 miljoonasosaa on hiilidioksidimolekyyliä. Otsonia on noin 2×10^{11} molekyyliä samassa tilavuudessa ja rikkihappoa noin miljoona molekyyliä. Ilmassa leijuvia kiinteitä tai nestemäisiä hiukkasia on sokerinpalan kokoisessa tilavuudessa tyypillisesti noin kymmenentuhatta, kun otetaan huomioon myös nanohiukkaset (halkaisijaltaan 1-3 nm).

Huolimatta pienestä koostaan ja vähäisestä lukumäärästä, nämä hiukkaset ovat ratkaisevia veden kiertokulussa. Jos ilmassa ei ole pienhiukkasia eli aerosolihiukkasia, ei ole pilvipisaroita, ja ilman pilvipisaroita ei ole pilviä, eikä ilman pilviä ole sadetta. Pilvet ja aerosolihiukkaset heijastavat osan tulevasta auringonsäteilystä takaisin avaruuteen, joten aerosolihiukkaset omalta osaltaan viilentävät maanpintaa ja hidastavat ilmastonmuutosta. Toisaalta kaupunki-ilmassa hiukkasia saattaa olla myös liikaa, jolloin ne huonontavat ilmanlaatua ja aiheuttavat ennenaikaisia kuolemia

Aerosolihiukkaset ovat ilmassa leijuvia kiinteitä tai nestemäisiä hiukkasia. Niiden halkaisija vaihtelee 1 nm ja 100 um välillä. Suurin osa aerosolihiukkasista muodostuu ilmakehässä ja tätä prosessia kutsutaan uusien hiukkasten muodostumiseksi (New Particle Formation, NPF; Kerminen ym., 2018). Hiukkasmuodostumisen alkuvaiheessa kaasufaasissa tapahtuu ilmakehän reaktioita, joiden tuloksena syntyy erittäin alhaisen höyrynpaineen yhdisteitä, kuten rikkihappoa tai HOM:ja (Highly Oxidised Molecules). Nämä muodostavat yhdessä ammoniakki- tai amiinimolekyylien kanssa molekyyliyrppäitä, klustereita, jotka myöhemmin kasvavat tiivistymiskyisten molekyylien törmätessä niihin aerosolihiukkasiksi. Kasvaessaan 50-100 nm kokoisiksi nämä aerosolihiukkaset muodostavat pilvipisaroiden tiivistymistyimiä.

Tässä artikkelissa esittelemme SMEAR-konseptin mahdollisuuksia globaalien haasteiden ymmärtämisessä ja niiden ratkaisemisessa. Esitämme myös muutamia uusia tuloksia sekä yhteenvedon olemassa olevista tuloksista. Paneudumme erityisesti maaekosysteemien hiilinieluun ja Hiilinielu+ -konseptiin.

2. SMEAR-konsepti

Gloaalien suurten haasteiden ratkaisemiseen tarvitaan monipuolista avointa dataa. Data voi olla peräisin mittauksista tai malleista. Tarvitaan *in situ* -mittauksia, kaukokartoitusta ja mallinnusta. Malleja tarvitaan aina kvanttikemian ja soluprosessien malleista alueellisiin ja globaaleihin koko maapallosysteemiä kuvaaviin malleihin.

Edellä mainituista kaukokartoitus ja mallit ovat keskimäärin hyvässä kuosissa, mutta *in situ* -mittausasemien verkosto ei ole vielä globaalisti kovin kattava (Kulmala 2018; Kulmala ym., 2023a). Toisaalta erilaiset tutkimusyhteisöt ovat olleet historiallisesti ja ovat edelleen pirstaloituneita: on erikseen hiilidioksidi-, metaani-, otsoni-, ekosysteemi, aerosoli-, pilvi-, maaperä- ja ilmastotutkijaryhmittymiä. Tämä ei ole mitenkään odottamatonta, sillä viimeiset vuosisadat tiede on tutkijoiden erikoistumisen myötä mennyt koko ajan terävämpään ja kapeampaan suuntaan. Toisaalta globaalien suurten haasteiden ratkaiseminen vaatii kokonaisvaltaista integroivaa lähestymistapaa ja tutkimusta.

Perustimme SMEAR-asetat 25 vuotta sitten tuottamaan monipuolista avointa dataa, jonka avulla pystytään vastaamaan kokonaisvaltaisesti suuriin globaaleihin haasteisiin (kts. esim. Hari ja Kulmala, 2005). Tällä hetkellä SMEAR II -asemalla Hyytiälässä mitataan yli 1200 erilaista suuretta. Aseman mittaukset ovat ylivoimaisesti maailman monipuolisimmat alallaan. Mittaamme ilmakehää, maaperää, puita ja metsän aluskasvillisuutta. Mukana on useita eri tieteenaloja, kuten meteorologiaa, ilmakehää, aerosolifysiikkaa sekä metsä- ja maaperätiedettä.

SMEAR-konsepti käsittää jatkuvaa,

pitkäaikaista ja monipuolista mittausta ja dataa, joiden avulla voidaan vastata moniin avoimiin yhteiskuntien polttaviin kysymyksiin sekä sellaisiinkin tulevaisuuden kysymyksiin, joita ei vielä osata edes kysyä (Hari ym., 2016; Kulmala ym., 2023a). Nämä kysymykset voivat olla tieteellisiä, yhteiskunnallisia tai taloudellisia. Ne voivat liittyä esimerkiksi ilmastoon, ilmanlaatuun, biodiversiteettiin tai ruuan ja veden riittävyyteen.

"SMEAR-asemilla mitataan ilmakehää ja maanpinnan ekosysteemiä."

SMEAR-asemilla mitataan ilmakehää ja maanpinnan ekosysteemiä. Maanpinta voi olla metsää, peltoa, suota, järveä, jokea, jäätikköä, kaupunkia ja jopa suurkaupunkeja. Mittaukset sisältävät pitkiä aikasarjoja sisältäen mm. erilaisia pitoisuuksia (esim. kasvihuonekaasut, hivenkaasut ja aerosolihiukkaset), materia- ja energiavirtauksia (esim. vesihöyry ja havaittava lämpö) sekä prosesseja (esim. hiukkasten muodostuminen ja kasvillisuuden yhteyttäminen). Tällaisten mittausten avulla tutkitaan mm. meteorologiaa, aerosolidynamiikkaa, ilmastomuutosta, ekosysteemejä ja näiden välistä vuorovaikutusta ja takaisinkytkentöjä.

Monipuolisten ja jatkuvien mittausten avulla saadaan dataa myös ennakoimattomista muutoksista ympäristön tilassa, minkä lisäksi saadaan selville erilaisia yllättäviä asioita, kuten COVIDin vaikutus ilmanlaatuun, kuivuuden vaikutus hiilinieluun, uusien moottorien vaikutus ilmakehän pitoisuuksiin sekä tulivuorenpurkauksen, tulipalojen ja kemiallisten onnettomuuksien seurauksia ilmakehään ja erilaisiin ekosysteemeihin. Oleellista on datan avoimuus ja erilaisten datan käyttäjäkuntien integroiminen mukaan.

Mittaukset (havainnot ja kokeet) käsittävät mm seuraavia asioita:

A) Meteorologia: lämpötila, ilmakehän kosteus, tuuli, turbulenssi, sadanta, (auringon) säteily, pilvi- ja säätutkat, ...

B) Ilmakehän koostumus ja vuot: aerosolihiukkaset (halkaisija 1 nm – 10 um, koostumus, kokojakaumat), pilvet, ilmakehän kemiat (CO, O₃, NO_x, SO₂, VOCs, NH₃, H₂SO₄, HONO, HNO₃, ...), kasvihuonekaasut (CO₂, CH₄, N₂O), ionit (halkaisija 0.8-40 nm), ulkoinen säteily, kosminen säteily, radon, ...

C) Ekosysteemit: kasvien fotosynteesi, kasvien ja maaperän hengitys, kasvien ja maaperän haihdunta, puiden kasvu ja vedenkuljetus, kasvillisuuden hiilivetyjen tuotanto...

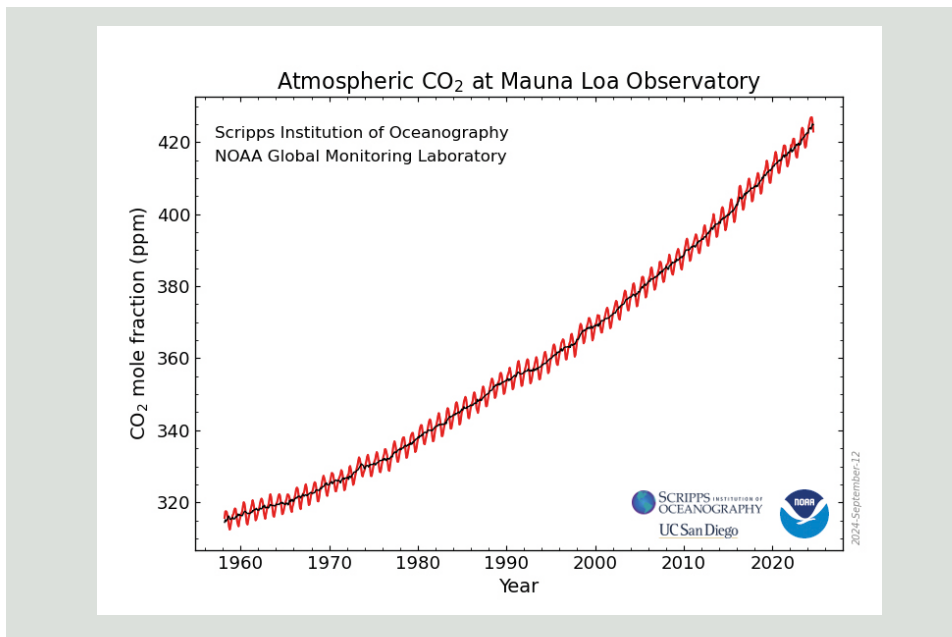
SMEAR-konsepti käsittää sekä *in situ* -mittauksia että maanpinnalta tapahtuvaa kaukokartoitusta. SMEAR-asetat kontribuivat moniin ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) -infrastruktuureihin ja lisäksi WMO (World Meteorological Organization), GEO(SS) ja IPCC (International Panel on Climate Change) -aktiviteetteihin. Tärkeimmät ESFRit ovat kasvihuonekaasuja mittaava ICOS (Integrated Carbon

Observation System), aerosoleja, pilviä ja hivenkaasuja mittaava ACTRIS (the Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure) ja ekosysteemien havaintoihin keskittyvä eLTER (Integrated European Long-Term Ecosystem, critical zone and socio-ecological Research).

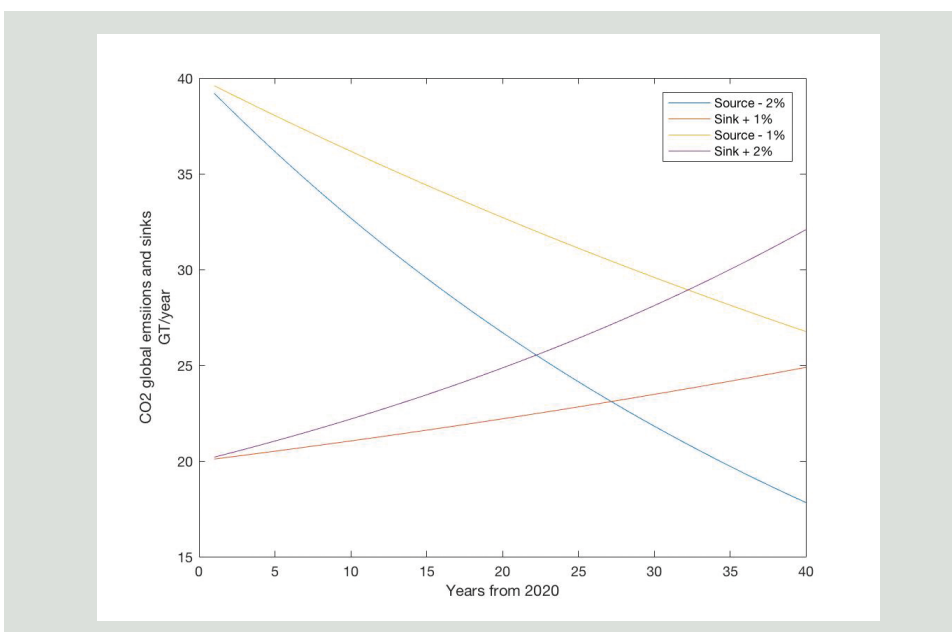
3. Tuloksia

Milloin CO₂ pitoisuudet alkavat laskea?

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kasvaa 2-4 ppm:ää vuodessa (kuva 1) ja kiihtyvällä nopeudella. Kasvunopeus oli 1960-luvulla noin 1 ppm vuodessa ja nykyään (2010-luvulla ja 2020 luvun alussa) noin 3 ppm vuodessa. Ainoa tapa saada ilmakehän hiilidioksidipitoisuus laskemaan on saada päästöt laskemaan ja nielut kasvamaan. Kuvassa 2 on esitetty tilanne, jossa päästöt vähenevät 1 %:n tai 2 %:a vuodessa ja mantereiset nielut lisääntyvät vastaavasti 1 %:n tai 2 %:a vuodessa. Merelliset nielut pysyvät tässä tarkastelussa nykyisellään. Nieluihin lasketaan kaikki niin luonnolliset kuin teknisetkin nielut. Jos sekä päästöt että nielut ovat 2 %:n muutostasolla, kestää 23 vuotta, ennen kuin ilmakehän CO₂-pitoisuus alkaa laskea. Jos päästöt laskevat 1 %:n ja nielut kasvavat 1 %:n, kestää yli 50 vuotta ennen kuin hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä alkaa laskea. Tällä hetkellä ei kuitenkaan näytä siltä, että globaalit päästöt olisivat vähenemässä näin nopeasti, ja myös nielujen kasvamisen kohdalla on sama tilanne. Luonnolliset nielut saattavat jopa vähentyä ja teknisten nielujen kasvuun tulee todennäköisesti menemään selvästi tätä pidempi aika.



Kuva 1. Mauna Loalla mitatut hiilidioksidipitoisuudet
<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>



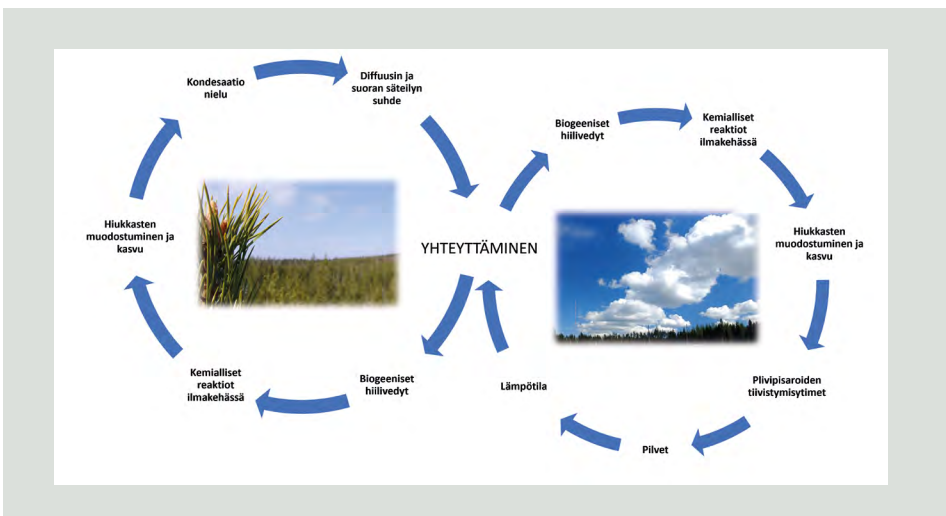
Kuva 2. Hiilidioksidipäästöjen ja -nielujen potentiaalinen kehitys. Kun käyrät leikkaavat, alkaa hiilidioksidin vuotuinen maksimipitoisuus laskea. X-akselilla oleva vuosi 2020 on myös hypoteettinen ja kuvaa sitä vuotta, jolloin globaalit päästöt oikeasti alkavat laskea.

Toisaalta kuvan 1 sahalaikakuviosta nähdään, että joka vuosi ilmakehän hiilidioksidipitoisuudessa on sekä maksimi että minimi. Se osoittaa, että hiilinielut pystyvät vähentämään globaalisti hiilidioksidipitoisuutta 5-6 ppm aina kesän aikana, koska silloin laajat pohjoisen pallonpuoliskon metsät ovat aktiivisia ja sitovat hiilidioksidia ilmakehästä yhteyttämällä.

Takaisinkytkentä, Hiilinielu+

Vaikuttaa siis siltä, että kestää vuosikymmeniä ennen kuin ilmakehän hiilidioksidipitoisuudet alkavat laskea. Vaikka joka tilanteessa ensisijainen pyrkimys on vähentää päästöjä, on ymmärrettävä myös erilaisten ekosysteemien kokonaisilmastovaikutus, koska hiilidioksidi ei ole ainoa säteilypakotteeseen vaikuttava tekijä. Olemme kehittäneet Hiilinielu+ -konseptin (Kulmala ym. 2024), joka ottaa huomioon periaatteessa kaikki jonkin ekosysteemin ilmastovaikutukset.

Aina kun kasvit yhteyttävät, ne poistavat ilmakehästä hiilidioksidia yhteyttämällä ja varastoivat sen hiilenä kasvien rakenteisiin ja maaperään. Fotosynteesin sivutuotteina kasvit päästävät ilmakehään hiilivetyjä, kuten isopreeniä, monoterpeenejä ja seskiterpeenejä. Nämä hiilivedyt reagoivat ilmakehässä erilaisten hapettimien, kuten OH-radikaalin ja otsonin kanssa, muodostaen erittäin tiivistymiskykyisiä yhdisteitä. Nämä yhdisteet osallistuvat pienhiukkasten muodostumiseen. Pienhiukkaset toimivat pilvipisaroiden tiivistymisytiminä ja ovat välttämättömiä veden kiertokululle, sillä ilman pienhiukkasia ei olisi pilviä eikä sadetta. Aerosolihiukkaset ja pilvet heijastavat säteilyä takaisin avaruuteen ja siten viilentävät ilmastoa. Lisäksi aerosolihiukkaset ja pilvet lisäävät hajasäteilyä. Hajasäteily pääsee suoraa säteilyä syvemmälle metsäekosysteemiin tehostaen näin yhteytystä. Kuvassa 3 on havainnollistettu ilmakehän ja metsän takaisinkytkentää ja sen eri osa-alueita. Tämän takaisinkytken-



Kuva 3. Ekosysteemien ja ilmakehän takaisinkytkentä.

nän perusteella olemme kehittäneet HiiliNielu+ -konseptin.

HiiliNielu+ -konseptia on sovellettu metsissä ja pelloilla sekä soilla toistaiseksi vain Suomessa. Mahdollisimman tarkka paikallisen hiukkastuoton mittaaminen ja tuoton vertaaminen Hyytiälän monipuolisiin mittauksiin mahdollistaa eri ekosysteemien hiukkastuoton arvioimisen ja myös niiden ilmastovaikutuksen arvioimisen.

Uusien hiukkasten muodostuminen ja sen vaikutus saastesumuun ja Hiilinielu+ :ssaan

Aiemmin saastesumun ajateltiin johtuvan aerosolihiukkasten suorista päästöistä ilmakehään. Olemme pystyneet osoittamaan pitkäaikaisten mittausten avulla, että uusien pienhiukkasten muodostuminen ilmakehässä tuottaa valtaosan saastesumun hiukkasista ja ilmakehän reaktiot yli 80 %:a hiukkasten massasta (Kulmala ym. 2021). Tämä tarkoittaa, että uusien hiukkasten muodostuminen vaikuttaa merkittävästi saastesumun muodostumiseen.

Pienhiukkasten muodostuminen ilmakehässä on erittäin epälineaarinen prosessi (Kulmala ym., 2014; Lee ym., 2019). Suorat ns. primääripäästöt ovat periaatteessa suoraviivaisia hallita ja vähentää, mutta ilmakehässä tapahtuvat prosessit ovat vaikeasti hallittavissa ja sitä kautta muodostuvat hiukkaset ovat merkittäviä ilmansaasteiden kannalta etenkin silloin, kun primääripäästöt ovat alhaiset.

Ilman saastumisen kannalta erilaiset ympäristöt voidaan jakaa kolmeen eri alueeseen (Kulmala ym. 2022): A) Alueet, joissa suorat päästöt ilmakehään dominoivat. Tällainen oli tilanne esim. Lontoon

savusumujen aikaan 1950-luvun alkupuolella. B) Alueet, joissa ilmakehän reaktiot dominoivat. Tällainen alue on esim. Peking 2020-luvulla. C) Alueet, jotka ovat suhteellisen puhtaita, kuten Hyytiälä.

Saasteisella alueella suorat päästöt ilmakehään dominoivat. Tällä hetkellä on jäljellä enää hyvin harvoja paikkoja maailmassa, jos ollenkaan, missä suorat ihmistominnasta peräisin olevat hiukkas-päästöt dominoisivat ilmakehän hiukkas-pitoisuuksia. Kun suorat päästöt vähenevät, ilmakehässä muodostuvien hiukkasten osuus kasvaa, ja nämä uudet hiukkaset korvaavat osan suorien päästöjen vaikutuksesta.

Alueilla, joissa ilmakehän reaktiot dominoivat, on reaktioiden epälineaarisuuden vuoksi huomattavasti hankalampaa vähentää hiukkasten muodostumista ja kasvua ilmakehässä. Tavallisesti näitä ilmakehässä syntyviä hiukkasia kutsutaan sekundäärisiksi hiukkasiksi ja suorita päästöjä primaareiksi. Koska ilmakehässä muodostuneet hiukkaset kuitenkin tyypillisesti dominoivat sekä hiukkasten lukumäärää että massaa, nimitys on oikeastaan harhaanjohtava, koska kyseiset hiukkaset eivät ole millään tavalla toissijaisia (sekundäärisiä).

Puhtailla alueilla ihmistoiminnan paikalliset päästöt ovat hyvin vähäisiä, ilmakehän hiukkas-pitoisuudet ovat huomattavan pieniä ja suurin osa ilmakehän hiukkasista muodostuu biogeenisten reaktioiden kautta. Myös näille alueille tulee usein jonkin verran ihmisperäisiä saasteita kaukokulkeutena.

Kuvassa 4 on esitetty, miten ilmakehän hiukkasten kykyä poistaa tiivistyviä höyryjä ilmakehästä kuvastava kondensationielu (Condensation Sink, CS) kasvaa kolmella eri hiukkastuotolla. Vertailun vuoksi Hyytiälässä viiden nanometrin

hiukkasten taustatuotanto vaihtelee välillä $0.001\text{--}0.01\text{ cm}^{-3}\text{ s}^{-1}$, kun taas selkeinä hiukkasmuodostuspäivinä se on noin $0.1\text{ cm}^{-3}\text{ s}^{-1}$ (Kulmala ym. 2023b).

Pekingissä vastaava tuotto on suuruusluokkaa $10\text{ cm}^{-3}\text{ s}^{-1}$ selkeinä hiukkasmuodostuspäivinä (Shang ym. 2023). Tyypilliset CS:n arvot ovat Hyytiälässä välillä $0.002\text{--}0.004\text{ s}^{-1}$ (Neeffes ym. 2022) ja Pekingissä välillä $0.01\text{--}0.03\text{ s}^{-1}$ (Shang ym., 2023).

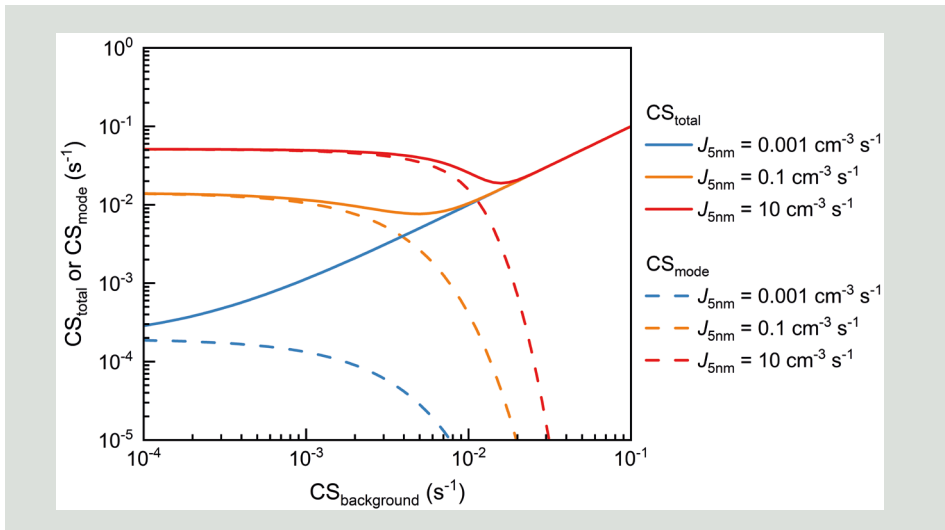
Kuvasta 4 nähdään, että varsinkin Hyytiälässä ja Pekingissä selkeät hiukkasmuodostuspäivät pystyvät selittämään koko CS:n. Toisaalta taustamuodostuminen selittää vain hyvin pienen osan tästä tuloksesta.

Globaalissa mittakaavassa ilmakehässä tapahtuva hiukkastuotanto on lukumäärällisesti selkeästi tärkein hiukkaslähde sekä varsin todennäköisesti myös tärkein lähde pilvipisaroiden tiivistymisymille (esim. Gordon ym. 2017).

4. Johtopäätökset

Pienhiukkaset ovat oleellisia ilmastolle, ilman laadulle ja veden kierto- ja kiertokululle. Ilman aerosolihiukkasia meillä ei olisi ollenkaan nykyisenkaltaista veden kierto- ja kulkua, sillä vesi ei pysty nykyisessä ilmanpaineessa ja lämpötilassa yksin muodostamaan pilvipisaroita. Todennäköisesti elämäkin olisi maapallolla varsin erilaista. Hiukkasmuodostus ilmakehässä on tärkeää, koska suorat päästöt ilmakehään muodostavat reilusti alle puolet globaalista aerosolihiukkasten ja todennäköisesti myös pilvipisaroiden tiivistymisydyntien lukumäärästä.

Biosfäärin hiilivetypäästöt toimivat ilmakehässä syntyvien pienhiukkasten edeltäjäkaasuina (precursor gases) eli kasvillisuus edesauttaa pienhiukkasten syntymä. Ja mitä isompi hiukkastuotto, sitä



Kuva 4. Uusien hiukkasten muodostaman tiivistymisnielun (CS_{mode}) ja kokonaistiivistymisnielun ($CS_{\text{total}} = CS_{\text{mode}} + CS_{\text{background}}$) lisääntyminen alkuperäisen taustatiivistymisnielun ($CS_{\text{background}}$) funktiona. Kuvan käyrät esittävät kolmea eri oletettua uusien hiukkasten muodostumisnopeutta (J_5) halkaisijaltaan 5 nm hiukkasille. Hiukkasmuodostuksen on oletettu kestävän viisi tuntia, ja uusien hiukkasten on oletettu kasvavan kokoa nopeudella 4 nm/h. Taustahiukkaspopulaatio on pidetty muuttumattomana.

isompi Hiilinielu+. Nämä ”ilmastohyvikset”, eli biogeeniset pienhiukkaset, lisäävät pilvipisaroiden määrää ja edelleen pilviä, vaikuttaen näin muun muassa sateisuuteen.

Metsien lisäksi myös esimerkiksi maatalous vaikuttaa hiukkasmuodostukseen (esim. Dada ym. 2023). Eläimet ja maaperä tuottavat amiineita ja ammoniakia ja kaikki kasvillisuus hiilivetyjä yhteyttämisen sivutuotteina. Kun tähän koktaliiniin lisätään vielä ilmasta tyypillisesti löytyvää rikkihappoa, muodostuu uusia hiukkasia, jotka kasvavat pilvipisaroiden tiivistymisytimien kokoon.

Tulevaisuudessa tarvitaan monipuolista dataa erilaisista ekosysteemeistä kattavasti ympäri maailmaa. Koska Hyttiälän aseman kaltaisia komplekseja ei voi olla kaikkialla, yksi ratkaisu on perustettavien mittausasemien hierarkia. Tarvitaan lippulaiva-asemia, kuten SMEAR, SORPES (Station for Observing Regional Processes of the Earth System) ja SIOS (Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System) -asemat, joita olisi hyvä olla muutama sata globaalisti. Tämän lisäksi tarvitaan iso joukko erilaisia virtauksia mittaavia asemia, kuten ICOS-asemat sekä sää- ja ilmanlaatuasemia.

Lopuksi tarvitaan kansalaistiedettä, halpoja sensoreita sekä niiden kalibroimista 5G/6G/7G verkkojen, tekoälyn ja SMEAR-asemien avulla. Tulevaisuudessa merkittäviä kysymyksiä ovat, kuka johtaa tätä prosessia, miten saadaan yhteinen data-analyysi ja tiedonsiirto toimimaan ja miten monipuolinen vaikuttavuustutkimus saadaan mukaan. Selkeitä avaimia näihin haasteisiin vastaamisessa ovat joka tapauksessa tiedonsiirto avoimesti eri toimijoiden välillä ja monipuolinen koulutus.

Ymmärtääksemme kokonaisvaltaisesti, mitä ilmakehässä tapahtuu ja miten nämä tapahtumat vaikuttavat globaaleihin suuriin haasteisiin, tarvitsemme integroivaa lähestymistapaa, monipuolisia mittauksia ja avointa dataa. Lisäksi tarvitsemme SMEAR-konseptia ja Hiilinielu+ -lähestymistapoja ja suurella todennäköisyydellä jatkossa vielä muuta-kin, jonka kehittämisen edellä mainitut askeleet mahdollistavat.

Kirjoittajat

**Markku Kulmala, Runlong Cai, Tom Kokkonen,
Anna Lintunen, Veli-Matti Kerminen**

Helsingin yliopisto, Ilmakehätieteiden osasto

Kiitokset

Kiitämme Suomen Akatemian rahoittamaa ACCC-lippulaivaa (no. 337549, 357902, 359340), Euroopan Unionin NextGenerationEU-instrumenttia ja Suomen Akatemian rahoittamaa ForClimate-projektia (no. 347782, 347780) sekä Wihurin rahaston rahoittamaa Gigacity-projektia.

Lähdeviitteet

Dada, L., Okuljar, M., Shen, J. L., Olin, M., Wu, Y. S., Heimsch, L., Herlin, I., Kankaanrinta, S., Lampimäki, M., Kalliokoski, J., Baalbaki, R., Lohila, A., Petäjä, T., Maso, M. D., Duplissy, J., Kerminen, V. M., & Kulmala, M. (2023). The synergistic role of sulfuric acid, ammonia and organics in particle formation over an agricultural land. *Environmental Science-Atmospheres*, 3(8), 1195-1211. <https://doi.org/10.1039/d3ea00065f>

Gordon, H., Kirkby, J., Baltensperger, U., Bianchi, F., Breitenlechner, M., Curtius, J., Dias, A., Dommen, J., Donahue, N. M., Dunne, E. M., Duplissy, J., Ehrhart, S., Flagan, R. C., Frege, C., Fuchs, C., Hansel, A., Hoyle, C. R., Kulmala, M., Kürten, A., Lehtipalo, K., Makhmutov, V., Molteni, U., Rissanen, M. P., Stozkhov, Y., Tröstl, J., Tsagkogeorgas, G., Wagner, R., Williamson, C., Wimmer, D., Winkler, P. M., Yan, C., & Carslaw, K. S. (2017). Causes and importance of new particle formation in the present-day and preindustrial atmospheres. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 122(16), 8739-8760. <https://doi.org/10.1002/2017jd026844>

Hari, P., & Kulmala, M. (2005). Station for measuring ecosystem-atmosphere relations (SMEAR II). *Boreal Environment Research*, 10(5), 315-322.

Hari, P., Petäjä, T., Bäck, J., Kerminen, V. M., Lappalainen, H. K., Vihma, T., Laurila, T., Viisanen, Y., Vesala, T., & Kulmala, M. (2016). Conceptual design of a measurement network of the global change. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(2), 1017-1028. <https://doi.org/10.5194/acp-16-1017-2016>

Kerminen, V. M., Chen, X. M., Vakkari, V., Petäjä, T., Kulmala, M., & Bianchi, F. (2018). Atmospheric new particle formation and growth: review of field observations. *Environmental Research Letters*, 13(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aadf3c>

Kulmala, M., Petäjä, T., Ehn, M., Thornton, J., Sipilä, M., Worsnop, D. R., & Kerminen, V. M. (2014). Chemistry of Atmospheric Nucleation: On the Recent Advances on Precursor Characterization and Atmospheric Cluster Composition in Connection with Atmospheric New Particle Formation. *Annual Review of Physical Chemistry*, Vol 65, 65, 21-37. <https://doi.org/10.1146/annurev-physchem-040412-110014>

Kulmala, M. (2018). Build a global Earth observatory. *Nature*, 553(7686), 21. <https://doi.org/10.1038/d41586-017-08967-y>

Kulmala, M., Dada, L., Daellenbach, K. R., Yan, C., Stolzenburg, D., Kontkanen, J., Ezhova, E., Hakala, S., Tuovinen, S., Kokkonen, T. V., Kurppa, M., Cai, R. L., Zhou, Y., Yin, R. J., Baalbaki, R., Chan, T., Chu, B. W., Deng, C. J., Fu, Y. Y., Ge, M. F., He, H., Heikkinen, L., Junninen, H., Liu, Y. L., Lu, Y. Q., Nie, W., Rusanen, A., Vakkari, V., Wang, Y. H., Yang, G., Yao, L., Zheng, J., Kujansuu, J., Kangasluoma, J., Petäjä, T., Paasonen, P., Järvi, L., Worsnop, D., Ding, A. J., Liu, Y. C., Wang, L., Jiang, J. K., Bianchi, F., & Kerminen, V. M. (2021). Is reducing new particle formation a plausible solution to mitigate particulate air pollution in Beijing and other Chinese megacities? *Faraday Discussions*, 226, 334-347. <https://doi.org/10.1039/D0fd00078g>

Kulmala, M., Cai, R. L., Stolzenburg, D., Zhou, Y., Dada, L., Guo, Y. S., Yan, C., Petäjä, T., Jiang, J. K., & Kerminen, V. M. (2022). The contribution of new particle formation and subsequent growth to haze formation. *Environmental Science-Atmospheres*, 2(3), 352-361. <https://doi.org/10.1039/d1ea00096a>

Kulmala, M., Lintunen, A., Lappalainen, H., Virtanen, A., Yan, C., Ezhova, E., Nieminen, T., Riipinen, I., Makkonen, R., Tamminen, J., Sundström, A. M., Arola, A., Hansel, A., Lehtinen, K., Vesala, T., Petäjä, T., Bäck, J., Kokkonen, T., & Kerminen, V. M. (2023a). Opinion: The strength of long-term comprehensive observations to meet multiple grand challenges in different environments and in the atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(23), 14949-14971. <https://doi.org/10.5194/acp-23-14949-2023>

Kulmala, M., Cai, R. L., Ezhova, E., Deng, C. J., Stolzenburg, D., Dada, L., Guo, Y. S., Yan, C., Peräkylä, O., Lintunen, A., Nieminen, T., Kokkonen, T. V., Sarnela, N., Petäjä, T., & Kerminen, V. M. (2023b). Direct link between the characteristics of atmospheric new particle formation and Continental Biosphere-Atmosphere-Cloud-Climate (COBACC) feedback loop. *Boreal Environment Research*, 28, 1-13.

Kulmala, M., Ke, P. P., Lintunen, A., Peräkylä, O., Lohtander, A., Tuovinen, S., Lampilahti, J., Kolari, P., Schiestl-Aalto, P., Kokkonen, T., Nieminen, T., Dada, L., Ylivinkka, I., Petäjä, T., Bäck, J., Lohila, A., Heimsch, L., Ezhova, E., & Kerminen, V. M. (2024). A novel concept

for assessing the potential of different boreal ecosystems to mitigate climate change (CarbonSink+ Potential). *Boreal Environment Research*, 29, 1-16.

Lee, S. H., Gordon, H., Yu, H., Lehtipalo, K., Haley, R., Li, Y. X., & Zhang, R. Y. (2019). New Particle Formation in the Atmosphere: From Molecular Clusters to Global Climate. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 124(13), 7098-7146. <https://doi.org/10.1029/2018jd029356>

Neefjes, I., Laapas, M., Liu, Y., Médus, E., Miettunen, E., Ahonen, L., Quéléver, L., Aalto, J., Bäcks, J., Kerminen, V. M., Lampilahti, J., Luomao, K., Mäki, M., Mammarella, I., Petäjä, T., Rätty, M., Sarnela, N., Ylivinkka, I., Hakala, S., Kulmala, M., Nieminen, T., & Lintunen, A. (2022). 25 years of atmospheric and ecosystem measurements in a boreal forest - Seasonal variation and responses to warm and dry years. *Boreal Environment Research*, 27, 1-31.

Shang, D. J., Hu, M., Tang, L. Z., Fang, X., Chen, S. Y., Zeng, L. M., Guo, S., Zhang, Y. H., & Wu, Z. J. (2023). New Particle Formation Occurrence in the Urban Atmosphere of Beijing During 2013-2020. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 128(9). <https://doi.org/10.1029/2022JD038334>