



Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
*Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica,
Matematica e Scienze Naturali*
142° (2024), Vol. V, fasc. 2, pp. 121-126
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-62-1

Dal Manoscritto B alla Ipotesi Gaia: fatti e misfatti dell'aerosol atmosferico*

DAVID CAPPELLETTI

Socio dell'Accademia dei XL. Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università degli Studi di Perugia, via Elce di Sotto 8 - 06123 Perugia. ORCID: 0000-0002-9652-2457
E.mail: david.cappelletti@unipg.it

Abstract – Atmospheric aerosols are solid, dry, or often moist particles dispersed in the air. Their small size, which ranges from nanometers to a few micrometers, allows them to remain suspended in the atmosphere long enough to significantly influence physical, chemical, and biological processes, thereby impacting climate and health. Conversely, these characteristics offer excellent potential for applications in medicine, warfare, and new materials.

Atmospheric aerosol particles occupy the boundary between molecular scales and condensed phases, serving as a testing ground for experiments, models, and theories. In this brief contribution, I outline the key characteristics of atmospheric aerosols within the historical development of aerosol science and technology, drawing on examples from Leonardo da Vinci to James Lovelock.

Keywords: atmospheric aerosols, human health, climate change

Riassunto – L'aerosol è materia particellare condensata dispersa in atmosfera. Le dimensioni ridotte, dai nanometri a pochi micrometri, consentono alle particelle di galleggiare in aria per un tempo sufficientemente lungo da condizionare processi fisici, chimici, biologici e quindi di poter esercitare effetti significativi su clima e salute. Da un altro punto di vista queste caratteristiche rappresentano un grande potenziale per applicazioni nel campo della medicina, della guerra, dei nuovi materiali.

Nel tempo l'aerosol atmosferico, materia al confine fra la scala molecolare e quella delle fasi condensate, ha costituito una palestra per esperimenti, modelli e teorie da parte di molti. In questo seminario le principali caratteristiche dell'aerosol atmosferico verranno discusse anche in un contesto di sviluppo storico della scienza e della tecnologia con esempi a partire da Leonardo da Vinci per arrivare a James Lovelock, fra gli altri.

Parole chiave: aerosol atmosferico, salute umana, cambiamento climatico

* Tratto dalla lettura tenuta il 22 novembre 2024 a Napoli, in occasione dell'Adunanza ordinaria congiunta dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL con l'Accademia Pontaniana.

L'aerosol atmosferico ed i suoi effetti sulla salute

L'aerosol atmosferico è definito come l'insieme delle particelle liquide e solide sospese in aria per un tempo sufficientemente lungo da essere rilevante per l'atmosfera. Questo tempo varia da minuti a giorni per le particelle nella bassa troposfera e si estende fino ai mesi o anni in stratosfera. L'aerosol non è certamente il componente più abbondante dell'atmosfera, raramente eccede il 10⁻⁵% in massa, ma, a dispetto della sua concentrazione relativamente bassa, altera significativamente la chimica dell'atmosfera promuovendo meccanismi chimici che possono avvenire solo sulle superfici o in fase condensata. Di conseguenza esercita degli effetti sproporzionatamente rilevanti sul clima e sulla salute umana. In effetti, nell'accezione più comune il termine *aerosol* è associato a strumenti di uso medico adatti per curare le patologie dell'apparato respiratorio. In questi strumenti un processo di aerosolizzazione trasforma una soluzione acquosa di un principio farmacologicamente attivo in fini goccioline che hanno la possibilità di penetrare efficacemente nel nostro apparato respiratorio ed esercitare effetti locali ma anche a livello sistemico. Questi concetti sono anche alla base delle prime forme di medicina della storia umana [1]. Naturalmente anche le particelle di natura patogena, come virus e batteri, ed aggregati di sostanze tossiche in forma di aerosol possono penetrare efficacemente nei nostri polmoni ed esercitare effetti dannosi sulla salute come accaduto negli episodi eclatanti della Meuse in Belgio (1930) o nel grande episodio di smog di Londra (1952). Spesso questi effetti sono di carattere cronico ed oggi sono una delle maggiori cause di mortalità a livello globale [2].

Le potenzialità letali dell'aerosol erano già state intuite da Leonardo da Vinci (1452-1519), genio universale e ricercatore visionario, nella sua perenne ricerca di tecnologie utili all'arte della guerra. In particolare al foglio 0069v del Manoscritto B di Francia, il più antico manoscritto vinciiano che si conosca come codice (1487-1490), Leonardo consiglia di utilizzare "...tre secchi e un trabocco per gittare veneno in polvere sulle galee...". Poi si dilunga in dettagli tecnici: "sia gittato in fra i navili nimichi con trabocchelli calcina e orpimento (trisolfuro di arsenico) sottile e verderame in polvere, e tutti quelli che nello anelito piglieranno detta polvere coll'anelito, stramortiranno". Infine raccomanda "ma guarda tu avere il vento che non ti mandi la polvere incontro, ovvero avere al naso e la bocca una sottile pezza bagnata, a ciò la polvere non passi". In sintesi Leonardo suggerisce di utilizzare un aerosol, nella forma di polvere fine di arseni-

co, per avvelenare i nemici attraverso l'inalazione dello stesso, ma di proteggersi con una mascherina per evitare di contaminarsi.

Leonardo da Vinci speculò anche sulla capacità delle particelle atmosferiche di diffondere ed assorbire la radiazione solare e terrestre, fenomeni di grande rilevanza per il bilancio radiativo dell'atmosfera e quindi per il clima del nostro pianeta. In particolare nel Codice di Leicester al foglio 0004r Leonardo parla del *colore dell'aria* dicendo che "...l'azzurro in che si mostra l'aria, non essendo suo proprio colore, ma è causato da umidità calda, vaporata in minutissimi e insensibili attimi la quale piglia dopo se la percussione de 'razzi solari e fassi luminosa sotto...". L'intuizione che le particelle atmosferiche diffondano la luce è chiara anche se successivamente Rayleigh dimostrerà che l'azzurro del cielo è dovuto alle molecole presenti in aria.

Comunque le proprietà ottiche dell'atmosfera nella regione del visibile sono dominate dall'aerosol con effetti diretti di diffusione ed assorbimento di luce ed effetti indiretti dovuti alla formazione delle nuvole. Complessivamente l'aerosol riduce l'effetto serra.

Sorgenti, composizione chimica e distribuzione dimensionale dell'aerosol

L'aerosol atmosferico mostra una notevole complessità di comportamento, a differenza dei gas che in condizioni normali ubbidiscono a leggi relativamente semplici. Questa complessità dell'aerosol è connessa con la sua composizione chimica e la sua distribuzione dimensionale, entrambe altamente variabili a causa delle molteplici sorgenti naturali ed antropiche, della diversità dei processi di formazione e della evoluzione nel tempo delle proprietà durante il tempo di vita delle particelle in atmosfera.

L'aerosol atmosferico si può categorizzare in *particelle primarie*, emesse in atmosfera direttamente dalle sorgenti, ed in *particelle secondarie*, generate direttamente in atmosfera per nucleazione omogenea e condensazione, entrambi processi di conversione di precursori gassosi organici ed inorganici in particelle. Mentre esistono solo pochi precursori inorganici (SO₂, NO₂, NH₃) esiste un enorme spettro di composti organici volatili che possono contribuire alla formazione dell'aerosol secondario organico (SOA). Si stima che esistano tra 10⁴ e 10⁵ diversi composti organici in atmosfera ciascuno dei quali può essere degradato per produrre un insieme di prodotti ossidati che possono contribuire alla formazione del SOA.

Le sorgenti di emissione di particelle di aerosol sono sia naturali che antropogeniche. I processi di *emissione*

naturale includono le eruzioni vulcaniche, il sollevamento meccanico di particelle di suolo o di spray marino causato dal vento, la combustione naturale della biomassa ed il rilascio in atmosfera di frammenti materiale biologico (spore, polline, batteri, virus, DNA). Le *emissioni antropogeniche* sono per lo più dovute ai processi di combustione e a tutti i processi di erosione dovuti alle attività estrattive e, più in generale, a qualsiasi parte meccanica in movimento. In termini di flusso di massa le emissioni più abbondanti (3000-20000 Tg anno) sono quelle di *spray marino* [3, 4]. Lo spray marino contiene inizialmente tutti i componenti chimici dell'acqua di mare, prevalentemente cloruro di sodio. In atmosfera la composizione chimica del sale marino può cambiare per processi di acidificazione che, ad esempio, rimuovono il cloruro sostituendolo con nitrati o solfati. Una seconda sorgente importante di aerosol primario sono le zone aride del pianeta dove, per effetto di erosione meccanica dovuta al vento, frammenti di suolo sufficientemente fini si possono sollevare fino a grandi altezze in atmosfera ed essere trasportati per distanze notevoli. Le polveri che si sollevano (1000-2150 Tg anno [4]) dal deserto del Sahara, la maggior sorgente globale, possono attraversare l'oceano atlantico fino a raggiungere le coste del sud America. Le particelle di *polvere desertica* hanno una composizione chimica che riflette la mineralogia dei suoli di provenienza (calcite, ematite, feldspati, gesso) tipicamente ricchi di elementi come Fe, Ca, Al, Si e Mg. Durante il trasporto queste particelle possono depositarsi sulla superficie delle acque dando luogo all'importante processo biogeochimico della fertilizzazione degli oceani, che favorisce lo sviluppo della biomassa marina ed indirettamente la cattura della CO₂ atmosferica attraverso il processo della fotosintesi [5]. Le eruzioni vulcaniche emettono in atmosfera particelle ricche di elementi caratteristici del mantello terrestre, come i minerali a base di Si. Le emissioni vulcaniche sono anche molte ricche di gas solforati, che possono raggiungere la stratosfera durante le eruzioni più potenti e quindi produrre nuove particelle attraverso processi di nucleazione e condensazione. Uno strato di queste particelle a base di acido solforico noto come lo strato di Junge [6] è stabilmente residente in stratosfera. La combustione delle biomasse, sia essa naturale o antropogenica, è una sorgente importante di particelle in atmosfera. Queste includono le ceneri, frammenti di materia organica parzialmente ossidata, e la fuliggine (*soot*), ricca principalmente di carbonio inorganico, noto come *black-carbon*, per la sua evidente capacità di assorbire la luce visibile.

A tale proposito, sempre nel Codice di Leicester al

foglio 0004r, Leonardo da Vinci ha una intuizione interessante “*del colore dell'aria alleghereno il fumo nato di legne secche e vecchie, lo quale, uscendo de' camini, pare forte azzurreggiare quando si trova infra l'occhio e 'l loco oscuro, ma, quando monta in alto e s'interpone infra l'occhio e l'aria illuminata, immediate di si dimostra di colore ceneregnolo, ..., e se tal fumo sarà di legne verdi e giovani, allora non penderà in azzurro, ma perché, non sendo trasparente, e pien di superchia umidità, esso fa ufizio di condensata nuvola...*”. Il fumo è effettivamente un aerosol atmosferico e Leonardo intuisce la capacità di questo aerosol carbonioso nella sua composizione chimica di diffondere ed assorbire la luce e soprattutto il suo ruolo nella formazione delle nuvole, elemento centrale del sistema climatico ed alla base del cosiddetto effetto indiretto dell'aerosol sul clima.

Durante la fase terminale della combustione nuclei di queste particelle carboniose possono essere rivestiti per condensazione di gas come idrocarburi alifatici ed aromatici e sostanze contenenti ossigeno ed azoto come acidi organici ed ammine. Queste particelle di combustione mostrano quindi una struttura chimica complessa e possono anche contenere i metalli tipici della vegetazione, come ad esempio Ti, Mn, Zn, K, Na. Anche la combustione di combustibili fossili spesso condotta durante processi industriali di varia natura, produce una miscela di composti solidi in atmosfera, tipicamente black-carbon, aerosol solfati, ceneri e particelle metalliche [7].

La distribuzione dimensionale dell'aerosol è una variazione di concentrazione (numero, area superficiale, volume o massa delle particelle) in funzione delle dimensioni delle particelle. Assumendo le particelle sferiche si utilizza tipicamente il diametro. Le distribuzioni dimensionali dell'aerosol variano in natura ma sono sempre costituite da più mode, che sono regioni dello spettro dimensionale dove si manifestano dei picchi distinti (Figura 1). Di solito le mode sono descritte formalmente con delle distribuzioni log-normali. Tipicamente una distribuzione dimensionale di aerosol include una moda di nucleazione, una o due mode di sub-accumulo ed una moda grossolana (*coarse*). La moda di nucleazione consiste di particelle ultrafini con diametri tra 2-3 nm e circa 100 nm. Queste nanoparticelle possono essere emesse direttamente da alcune sorgenti specifiche oppure, più frequentemente, si formano in atmosfera con eventi di nucleazione e crescono rapidamente per coagulazione con altre particelle o per condensazione di gas sulle particelle stesse. I processi di crescita delle dimensioni spostano le particelle dalla moda di nucleazione a quella di accumulo dove i diametri sono compresi fra

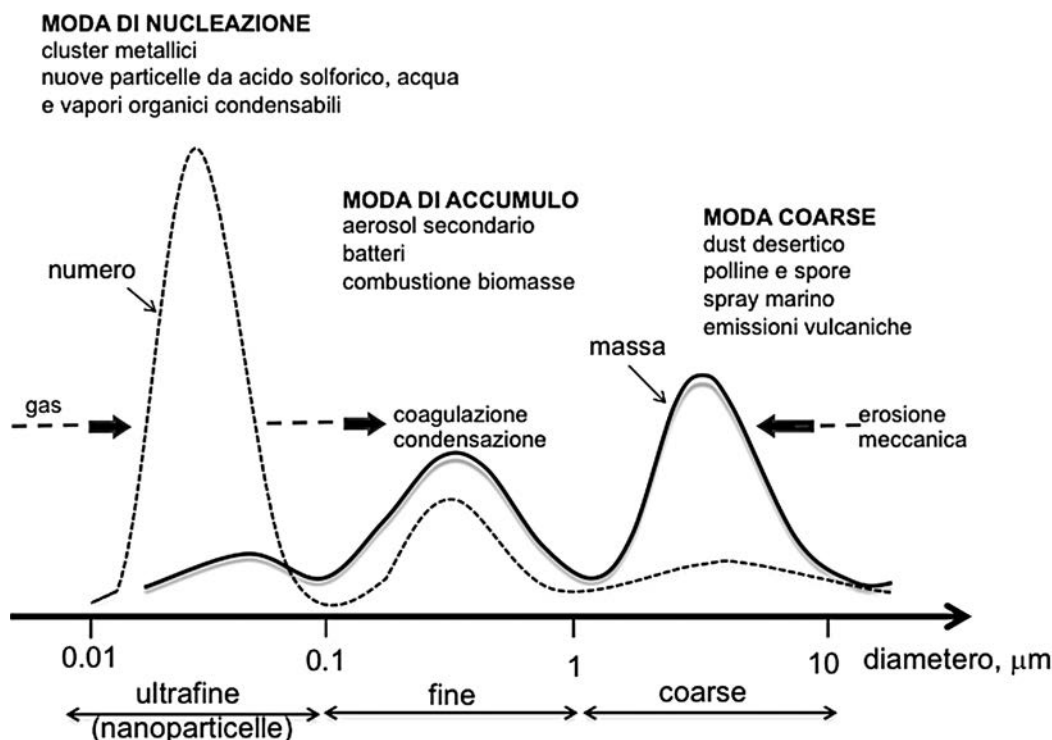


Figura 1. Distribuzione multimodale dell'aerosol atmosferico. Nel grafico sono mostrate qualitativamente una distribuzione di numero (linea tratteggiata) ed una di massa (linea continua) della stessa popolazione di aerosol. In generale il maggior numero di particelle si trova nella moda di nucleazione, la maggior area superficiale nella moda di accumulo mentre la moda coarse contiene il maggior volume e massa. I principali processi di formazione sono indicati con delle frecce.

0.1 μm e circa 2 μm . In genere queste particelle hanno tempi di residenza molti lunghi in atmosfera e possono quindi invecchiare per successivi processi di ossidazione o ulteriore condensazione, dando luogo a più sottomode di accumulo che complessivamente definiscono la classe delle particelle fini. Questa classe di particelle è la più rilevante per gli effetti sulla salute umana ed inoltre interagisce efficacemente con la radiazione elettromagnetica avendo dimensioni paragonabili con le lunghezze d'onda della regione spettrale del visibile e quindi condizionano la visibilità. La moda grossolana infine consiste di particelle di dimensioni superiori a 2 μm . Queste particelle, originate dai processi di erosione del vento e di fratturazione meccanica di particelle più grandi, sono la polvere desertica, lo spray marino, le emissioni dei vulcani, le particelle biologiche.

Formazione di nuove particelle

Al di là delle emissioni dirette, l'unica fonte di nuove particelle in atmosfera sono i processi di nucleazione omogenea. La nucleazione è un processo in cui singole molecole si aggregano per formare cluster. In atmosfera

le collisioni di gran lunga più frequenti sono quelle bimolecolari che però, a causa del principio di conservazione dell'energia, non possono portare alla formazione di un dimero stabile. Il processo di nucleazione quindi a livello molecolare è sfavorito dalla statistica e dalla energetica delle collisioni molecolari. Servono urti a tre corpi per poter stabilizzare un dimero e questi sono molto meno frequenti di quelli bimolecolari. Inoltre, una volta che il cluster iniziale si è formato il processo di crescita per condensazione di ulteriori molecole è sfavorito termodinamicamente.

Uno dei risultati più importanti nel campo della termodinamica degli aerosol è stato dato da W. Thomson, meglio noto come Lord Kelvin (1824-1907), con la sua equazione in cui dimostra come la tensione di vapore di una gocciolina di un certo liquido sia maggiore di quella di una superficie piana dello stesso liquido [8]. Solo quando il cluster raggiunge una dimensione critica, il raggio di Kelvin, esso diventa stabile perché l'effetto di stabilizzazione di volume diventa maggiore di quello di evaporazione superficiale e la gocciolina può quindi efficacemente crescere ulteriormente. Lord Kelvin certamente condivide con Leonardo da Vinci il fatto di essere

un visionario, basti pensare al paradosso di Kelvin in cui dimostra per assurdo che l'Universo non è eterno, ma anche di essere uno scienziato rigoroso, ed un inventore molto concreto e versatile come dimostrato dalle molteplici realizzazioni inclusa la famosa bussola nautica.

La nucleazione omogenea è effettivamente una sorgente di nuove particelle mentre la nucleazione eterogenea avviene quando un gas condensa su una superficie (particella o nucleo di condensazione) preesistente, quindi non produce di fatto nuove particelle. La nucleazione, omogenea o eterogenea, può essere omo-molecolare, binaria o ternaria. La nucleazione binaria avviene quando molecole di due gas diversi come acido solforico ed acqua si aggregano. La nucleazione ternaria avviene quando tre gas diversi, ad esempio acido solforico, ammoniacale ed acqua nucleano. La nucleazione più importante in atmosfera è quella binaria fra acido solforico ed acqua, molecole che hanno una affinità speciale dovuta alla peculiare interazione intermolecolare che le caratterizza ed alla tendenza alla reattività chimica. Particelle di nucleazione a base di acido solforico ed acqua raggiungono rapidamente dimensioni tipiche fra i 3 ed i 20 nm in diametro. Nella atmosfera reale i processi coinvolti possono essere molteplici [9] ma anche in ambienti relativamente pristini come la superficie dell'oceano, eventi di formazione di nuove particelle in presenza di acido solforico possono produrre più di 10^4 particelle cm^{-3} in un tempo relativamente breve (poche ore).

Biogeochimica dell'Aerosol

Un'altra figura rilevante nella storia scientifica che ha in qualche maniera intersecato la scienza dell'aerosol è quella di James Lovelock (1919-2022) noto insieme a Lynn Margoulis per l'Ipotesi Gaia [10]. Questa teoria, divenuta molto popolare negli anni '70 del secolo scorso, in una sua versione iniziale vede la Terra come un organismo vivente che include atmosfera, biosfera e geosfera e che tende a resistere ai cambiamenti ambientali ostili alla vita, mantenendo l'omeostasi grazie ad una serie di processi biogeochimici che sostanzialmente regolano il clima. Lovelock condivide con Leonardo Da Vinci e lord Kelvin l'attributo di inventore visionario. Nel campo della chimica analitica è ben noto per avere inventato il detector ECD [11], alla base dello sviluppo della moderna gas cromatografia. Nel 1987 Lovelock insieme a Andi Andreae, Robert Charlson e Steven Warren propose [12] che la produzione del dimetilsolfuro, un composto gassoso dello zolfo, da parte delle alghe

marine presenti negli oceani fosse la maggiore fonte dei nuclei di condensazione responsabili della formazione sopra gli oceani delle goccioline che danno origine alle nuvole per nucleazione eterogenea. Questo lavoro noto come teoria CLAW, pur assumendo un meccanismo estremamente semplificato e quindi con inevitabili incongruenze, ha avuto una grande influenza sulla ricerca nel campo dell'aerosol e, insieme alla ipotesi Gaia, è alla base dello sviluppo della moderna Earth System Science [13]. Effettivamente è interessante notare come la nucleazione omogenea dell'acqua non avvenga in condizioni tipiche dell'atmosfera. La nucleazione del vapor d'acqua è sempre eterogenea. Tutte le goccioline di acqua che costituiscono le nubi della nostra atmosfera consistono di acqua che si è condensata su una particella di aerosol preesistente, chiamate nuclei di condensazione delle nuvole (Cloud Condensation Nuclei, CCN). È interessante notare che non tutte le particelle di aerosol hanno questa capacità di nucleazione, che dipende dalla composizione chimica e dal processo di formazione. Oggi sappiamo che dal 40 al 70% dei CCN a livello globale è prodotto da eventi di formazione di nuove particelle [14] che quindi ha una influenza molto importante sulla microfisica delle nuvole e sul bilancio radiativo del sistema climatico globale.

Negli ultimi 20 anni lo sviluppo notevole della strumentazione ha consentito di misurare i processi di formazione di nuove particelle a livello globale [15] ed ha permesso di chiarire molti dettagli della ipotesi CLAW e di estendere notevolmente il numero delle specie gassose precursori, anche in ambienti relativamente remoti come l'Artico [16]. Per esempio in un recente lavoro [17] pubblicato dal team di ricercatori che lavorano all'esperimento CLOUD (Cosmic Leaving Outdoor Droplets) al CERN di Ginevra è stata dimostrata per la prima volta la capacità dell'isoprene, un idrocarburo volatile a 5 atomi di carbonio, rilasciato in grandi quantità naturalmente dalle piante, di generare nuove particelle attraverso un meccanismo di reazione chimica con il radicale ossidrilico, in condizioni atmosferiche (bassa pressione e bassa temperatura). La nucleazione dell'isoprene, mai stata osservata prima, non richiede altri vapori per avvenire. Se si aggiungono piccole quantità di acido solforico, tipiche dell'atmosfera naturale, la velocità di nucleazione dell'isoprene aumenta di un fattore 100. Questi esperimenti ambiscono a chiarire il ruolo estremamente rilevante delle nuvole, e quindi dell'aerosol, sul clima del nostro pianeta.

Nonostante i grandi progressi di questi ultimi 20 an-

ni molte domande rimangono aperte sul ruolo e sull'impatto degli aerosol. La misura di queste particelle direttamente all'interno delle nubi è estremamente complicata. Particelle di differente natura possono aggregarsi formando ibridi difficili da identificare. Ogni cambio di umidità o temperatura atmosferica può causare un cambiamento drastico nelle proprietà delle particelle e della loro capacità di interagire con le nuvole [18]. Certamente e più importante, le grandi incertezze che abbiamo nella conoscenza della abbondanza e delle proprietà specifiche dell'aerosol debbono essere ridotte. Solo migliori misure sperimentali e più sofisticati modelli basati su queste misure avranno la capacità di fornire le informazioni fondamentali per integrare il ruolo dell'aerosol nei modelli climatici e quindi ridurre le incertezze sulla nostra capacità di predire come il clima del futuro cambierà.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ANDERSON, P. J. (2005). History of Aerosol Therapy: Liquid Nebulization to MDIs to DPIs, *Respiratory Care*, 50, 1139.
- [2] SALANA, S., VERMA, V. (2024) Review of in vitro studies evaluating respiratory toxicity of aerosols: impact of cell types, chemical composition, and atmospheric processing, *Environ. Sci. Processes Impacts*, 26, 1922-1954.
- [3] MURPHY, D.M., et al. (2019) The distribution of sea-salt aerosol in the global troposphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 4093-4104.
- [4] ANDREAE, M.O. & ROSENFELD, D. (2008) Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth Science Review*, 89, 13-41.
- [5] JICKELLS, T.D. et al. (2005) Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate, *Science*, 308, 67.
- [6] JUNGE, C.E. (1961) Vertical profiles of condensation nuclei in the stratosphere. *J. Meteorol.* 18, 501-9.
- [7] JACOBSON, M.Z. (2002), in *Atmospheric Pollution*, Cambridge University Press.
- [8] THOMSON, W. (1871), On the equilibrium of vapour at a curved surface of liquid. *Philosophical Magazine*, 42, 448-452.
- [9] McMURRY, P.H. & FRIEDLANDER, S.K., (1979), New particle formation in the presence of aerosol, *Atmospheric Environment*, 13, 1635-1651
- [10] LOVELOCK, J.E. & MARGULIS, L. (1974) Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis, *Tellus*, 26, 1-10.
- [11] LOVELOCK, J.E. (1961), Ionization methods for the analysis of gases and vapors, *Analytical Chemistry*, 33, 162-178.
- [12] CARLSON, R.J., LOVELOCK, J.E., ANDREAE M.O., WARREN, S.G. (1987) Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate, *Nature*, 326, 655-661.
- [13] STEFFEN W., et al. (2020) The emergence and evolution of Earth System Science, *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 54-63.
- [14] MERIKANTO J., et al. (2009) Impact of nucleation on global CCN, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 8601-8616.
- [15] KULMALA, M. et al. (2012) Measurement of the nucleation of atmospheric aerosol particles, *Nature Protocols*, 7, 1651-1667.
- [16] BECK, L. et al. (2021) Differing mechanisms of new particle formation at two Arctic sites, *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091334.
- [17] SHEN, J. et al. (2024) New particle formation from isoprene under upper tropospheric conditions, *Nature*, 636, 115-123.
- [18] RIEMER, N., Ault, A.P., West, M., Craig, R.L., & Curtis, J.H. (2019). Aerosol mixing state: Measurements, modeling, and impacts. *Reviews of Geophysics*, 57, 187-249. <https://doi.org/10.1029/2018RG000615>