

گزارش بررسی تاثیر ید جوی بر میزان بارش باران

ویرایش ۲

اردیبهشت ۱۴۰۴

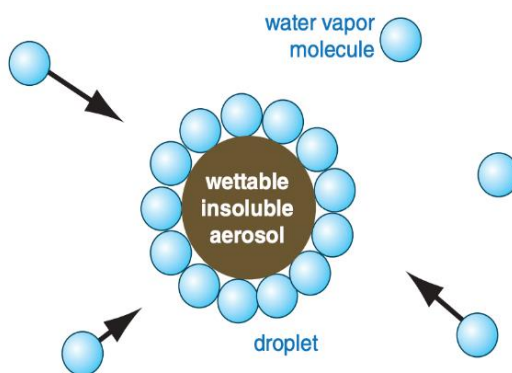
موضوع گزارش

این گزارش به منظور بررسی گمانه‌هایی همچون، تاثیر کارخانجات تولید ید استان بر روی میزان نزولات جوی بویژه باران تهیه شده است. لذا جهت پاسخ به برخی از شایعات غیر علمی در برخی محافل نیاز است اطلاعات معتبر و جدید در اختیار مسوولین مرتبط یا پایگاه‌های اطلاع‌رسانی (بویژه شبکه‌های اجتماعی) قرار گیرد تا از وارونه جلوه دادن نتایج علمی بر علیه شرکت و منافع استان، جلوگیری به عمل آید. در این بررسی از منابع به روز و معتبر علمی که در مجلات نیچر شیمی (IF:19)، نیچر کامیونیکیشن (IF:15) ساینس (IF:44) و PNAS (IF:9) و ... منتشر شده‌اند استفاده شده است. طی چند سال اخیر تحقیقات پیشرفته‌ای در سازمان اروپایی تحقیقات هسته‌ای (CERN) برای تعیین مکانیسم تشکیل و تراکم ابرها تحت عنوان پروژه CLOUD انجام شده است که در این تحقیقات ید به عنوان یکی عامل مهم در فرایند تراکم ابر معرفی شده است.

علی مختاری

مقدمه: نحوه تشکیل قطرات مایع در جو

معمولاً به بسیاری از مردم فقط یک نسخه ساده از فرآیند تشکیل ابر آموزش داده می‌شود. به عنوان مثال گفته می‌شود که ابرها زمانی تشکیل می‌شوند که بخار آب به قطرات آب مایع تبدیل می‌شود. اما در واقع این فرآیند کمی پیچیده‌تر است. برای ایجاد قطرات آب در جو، بخار آب باید بر روی یک سری ذرات ریز (به نام آئروسول^۱) متراکم شود. یعنی بخار آب برای تبدیل شدن به مایع نیاز به یک ذره با اندازه مناسب دارد. به این ذرات ریز، بذرها^۲ (CCN) گفته می‌شود. در هوای پاک و هنگامی که هیچ CCN وجود نداشته باشد، بخار آب بعد از حدود ۵ تا ۶ ساعت در دمای حدود ۱۳- درجه سانتیگراد، سوپر-سرد شده و قطرات به طور خود به خود تشکیل می‌شوند [1,2]. ذرات آئروسول یا باید در آب محلول باشند (مانند ذرات نمک مختلف)، یا قطر آنها به اندازه کافی بزرگ باشد (شعاع بزرگتر از ۰/۱ میکرومتر) و سطح خیس‌شونده‌ای داشته باشند یعنی آب‌دوست باشند (مانند شکل زیر [3]).



برای تشکیل یک قطره آب باران، آئروسول جامد به عنوان یک محل برای میعان ذرات بخار آب عمل می‌کند. در بارورسازی ابرها نیز ذرات کوچکی (از جنس یدید نقره) به جو اضافه می‌شوند تا تشکیل ابر و بارش را القا کنند. این کار از طریق پراکنده کردن املاح نقره یدید در جو با استفاده از روش‌های هوایی یا زمینی انجام می‌شود. آئروسول‌ها به طور طبیعی از گرد و غبار، دوده، کریستال‌های نمک یا مولکول‌های آزاد شده توسط گیاهان تشکیل می‌شوند [4]. اما مولکول‌های اسید سولفوریک و آمونیاک نیز می‌توانند در جو تجمع یافته و ذرات آئروسول جدیدی را تشکیل دهند. محاسبات و مدلسازی‌ها نشان می‌دهد که بیش از نیمی از قطرات ابر از ذرات آئروسول تشکیل شده‌اند که در جو تشکیل شده‌اند. این نکته را نیز باید اضافه نمود که برای تشکیل ابرها، اینکه ذرات آئروسول از چه چیزی ساخته شده‌اند، تعیین‌کننده نیست؛ آنچه بیش از همه اهمیت دارد اندازه آنهاست. ذرات آئروسول نهایتاً به اندازه‌ای حدود ۱۰۰ نانومتر و بالاتر تبدیل می‌شوند که هسته‌های تراکم قطرات ابر (CCN) خواهند بود [5,6].

^۱ آئروسول هر ذره ریز جامد یا مایع معلق در هوا است

^۲ Cloud Condensation Nuclei

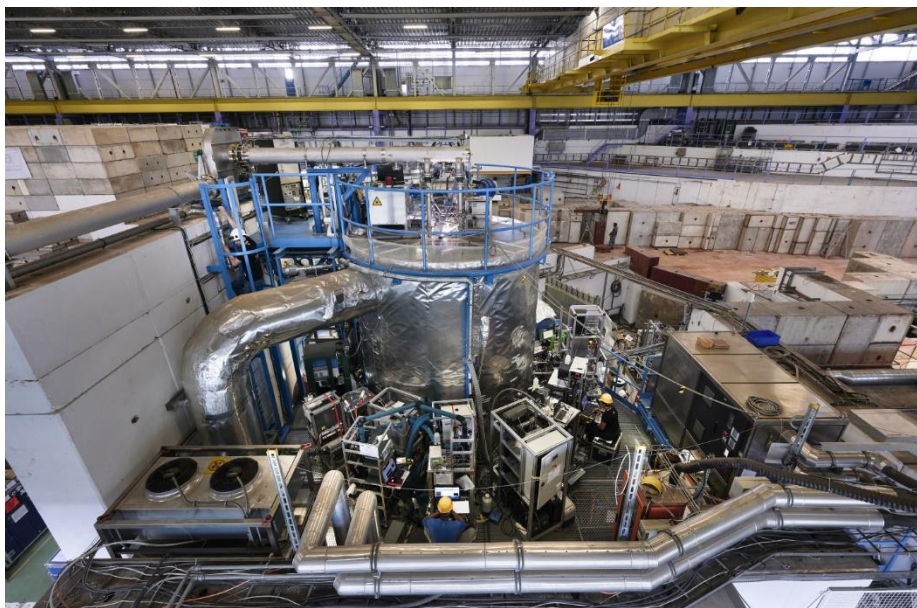
در طبیعت ذرات CCN می‌توانند از به هم پیوستن مولکولهای گازهای آلاینده یا اکسایش آنها در حضور نور خورشید تولید شوند. تراکم گازهای آلاینده و انعقاد آنها (چسبیدن به هم) باعث می‌شود که آئروسول‌ها به سرعت، به اندازه ۰/۱ تا ۱ میکرومتر رشد کنند که برای تراکم آب لازم است. بر فراز اقیانوس‌ها، بذره‌های تراکم ابر (CCN) می‌تواند از جنس ترکیبات گوگردی مانند سولفات و اسید سولفوریک باشند که از گازهایی مانند دی‌متیل سولفید و متان سولفونیک اسید تولید شده توسط فیتوپلانکتون‌ها تولید شده‌اند.

علاوه بر گوگرد محققان اکنون عنصر دیگری را مرتبط با جلبک‌های دریایی شناسایی کرده‌اند که واکنش‌های پیوسته‌ای را در جو دریا نشان می‌دهد. در این تحقیقات ید به عنوان ماده‌ای که بسیار مستعد تشکیل ذرات آئروسول است، معرفی شده است. این ذرات می‌توانند به مرور زمان به ذرات بزرگتری تبدیل شوند و به عنوان هسته‌های تراکم ابر عمل کنند و در نتیجه بر تشکیل ابر و بارش تأثیر مثبت بگذارند. خوب است بدانید که همه موجودات زنده مقداری عنصر ید در خود دارند. به عنوان مثال، در انسان، ید به ایجاد هورمون‌هایی کمک می‌کند که متابولیسم بدن را کنترل می‌کنند و از رشد استخوان و مغز در دوران بارداری پشتیبانی می‌کنند. پس از حادثه چرنوبیل در سال ۱۹۸۶، حتی تلاشی برای توزیع قرص‌های یدید پتاسیم با امید به دفع اثرات منفی تشعشعات بر سلامتی صورت گرفت. اما در حالی که ید صدها سال در محلول‌های آبی مورد مطالعه قرار گرفته است، دانشمندان تنها در دو دهه گذشته در بررسی چگونگی تأثیر فاز گازی آن بر رفتار جو زمین گام‌هایی برداشته‌اند. مطالعات جدید، واکنشهای شیمیایی در فاز گازی را نشان می‌دهند که در آنها ید به یک ترکیب شیمیایی به نام اسید یدیک تبدیل می‌گردد، و این ترکیب نقش کاتالیزوری در تشکیل ذرات جوی دارد [7]. در حال حاضر ثابت شده است که، ید تنها عنصری است که پس از آزاد شدن از سطح زمین، جو را ترک نمی‌کند، و می‌تواند از طریق واکنش‌های اکسایش-کاهش در حالی که هنوز در فاز ذره است، به فاز گازی بازگردد. این بدان معناست که ید می‌تواند به عنوان یک کاتالیزور مهم در تشکیل ابر عمل کند [8].

در حالی که اسید سولفوریک، متان سولفونیک اسید و اسید نیتریک همگی برای تشکیل ذرات آئروسول به آمونیاک یا دی‌متیل آمین نیاز دارند، ید می‌تواند با اکسایش مولکول‌های آلی فراوان موجود در جو ذرات آئروسول را تشکیل دهد. سرعت هسته‌زایی اسید یدیک (HIO_3) از اسید سولفوریک نیز بیشتر است. سطح اسید سولفوریک در جو به دلیل افزایش کنترل آلودگی در حال کاهش بوده است، در حالی که انتشار ید از دهه ۱۹۵۰ سه برابر شده و به دلایل زیادی از جمله افزایش غلظت ازن و نازک شدن یخ‌های قطب شمال همچنان در حال افزایش است [10,11]. اخیراً این موضوع به یک موضوع داغ تبدیل شده است که کنترل آلودگی هوا در شهرها باعث گرم شدن آب و هوا می‌شود زیرا منجر به غلظت کمتر اسید سولفوریک می‌شود [9].

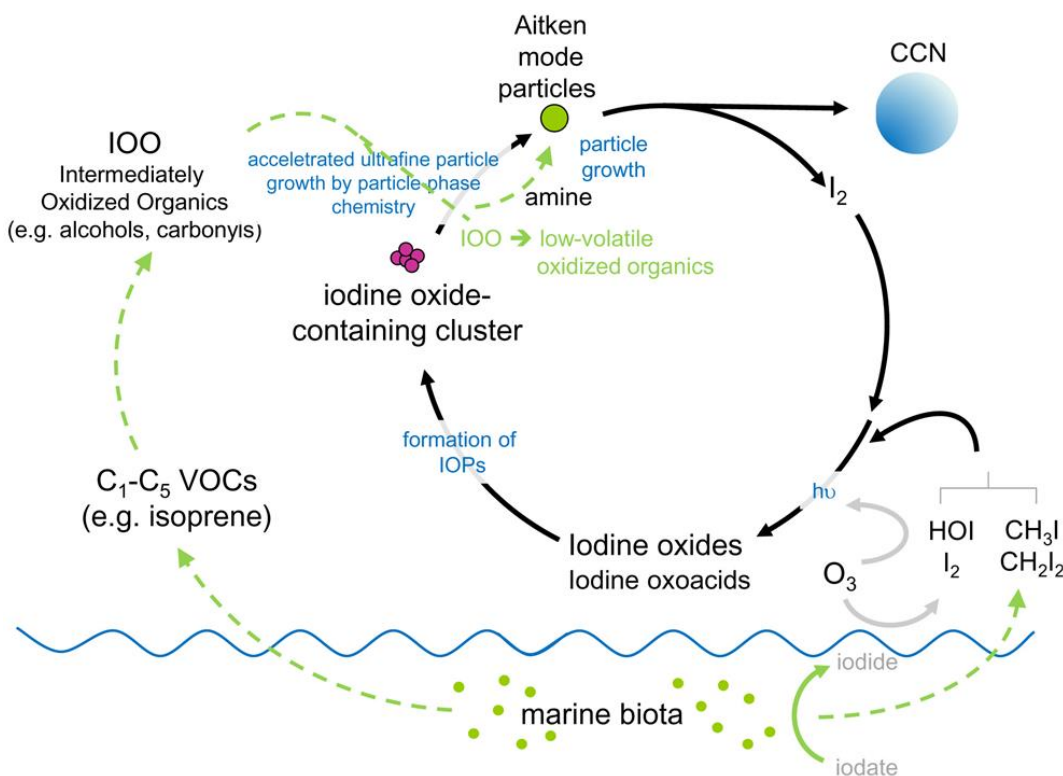
یافته های جدید درباره تاثیر مثبت ید بر تراکم ابرها و افزایش بارش

طی سال های اخیر، یک پروژه تحت عنوان Cosmics Leaving Outdoor Droplets (CLOUD) توسط یک کنسرسیوم بین المللی متشکل از ۲۱ موسسه در مرکز شتاب دهنده ذرات CERN در ژنو (شکل زیر)، انجام می شود که چگونگی تشکیل ذرات آئروسل از بخارات حاوی ید و ادامه رشد آنها به دانه های میعان (قطرات باران) را بررسی می کند [6,9,12]. بدین ترتیب تحقیقات CLOUD باعث ایجاد یک درک اساسی از تشکیل ابرها و ذرات معلق می گردد. محفظه اندازه گیری CLOUD با دانش موجود در CERN ساخته شده است و یکی از تمیزترین اتاق های آزمایشگاهی در جهان است. تیم CLOUD از ابزارهای اندازه گیری مختلفی برای بررسی فیزیکی و شیمیایی ذرات و گازهایی که جو را تشکیل می دهند، استفاده می کند [5]. در این محل آنها ترکیبات مختلفی از شرایط نزدیک به جو را برای مشاهده نحوه تشکیل و تکامل ذرات آزمایش نموده و سپس یافته های خود را در رصدخانه Mado در جزیره رئونیون، جزیره ای دورافتاده در شرق ماداگاسکار، نیز آزمایش کردند. در آنجا، اعضای تیم ۱۰ هفته را با استفاده از انواع ابزارهای علمی برای توصیف مولکول های مختلف در جزیره گذراندند. در نهایت، آنها به این نتیجه رسیدند که این داده های دنیای واقعی در واقع با نتایج آزمایشگاهی آنها مطابقت دارد [7].



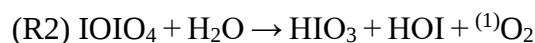
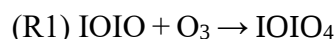
در پژوهشی که توسط تیم CLOUD در سال ۲۰۲۲ منتشر شد [13]، دو مکانیسم شیمیایی برای تاثیر ید بر تشکیل ابر کشف شد. در یک مکانیسم ید بدون کمک اسید سولفوریک ذرات آئروسل را تشکیل می دهد. در این مکانیسم شواهدی ارائه شده است که نشان می دهد فیتوپلانکتون های دریایی، یدات موجود در اقیانوس ها را به یدید تبدیل می کنند، احتمالاً به این دلیل که بتوانند از این

دید به عنوان یک آنتی اکسیدان معدنی ساده برای محافظت از دیواره‌های سلولی خود استفاده کنند. دید موجود در سطح آب نیز با ازن جوی واکنش می‌دهد و ید مولکولی یا ترکیبات آلی فرار ید دار (I_2 , HOI, VOI) تولید می‌کند که از سطح دریا به جو آزاد می‌شوند، سپس فتولیز شده و اکسید می‌شوند تا اکسیدهای ید (I_xO_y) یا اکسواسیدهای ید (HIO_2 و HIO_3) را تشکیل دهند [11]. تبدیل ید مولکولی به اسیدهای حاوی ید بسیار راحت انجام می‌شود و حتی به تابش فرابنفش و یا نور روز هم نیازی ندارد؛ به این ترتیب، مقادیر بسیار زیادی آئروسول می‌توانند خیلی سریع تشکیل شوند [5]. کلاسترهای اکسیدی و اکسواسیدی ید، مکانی را برای تجمع سریع ترکیبات آلی غیر فرار فراهم می‌کنند. در این مکان‌ها، ترکیبات آلی فرار C_1 - C_5 تولید شده توسط فیتوپلانکتونها، اکسید شده و الکل‌های پلی‌هیدریک (تترول‌ها) یا کربونیل‌های چند عاملی (گلیوکسال)، اسیدهای آلی با فراریت کم و نمک‌های آلکیل‌آمینوم بسیار جاذب رطوبت را تشکیل می‌دهند. تجمع این مولکول‌های غیر فرار باعث رشد اولیه کلاسترهای اکسیدی و اکسواسیدی ید و افزایش اندازه آنها تا ۱ میکرومتر (ذرات آیتکن^۳) می‌گردد که همان ذرات CCN هستند و برای تراکم (میعان) بخار آب و بارش نیاز هستند. بخش قابل توجهی از ید مرتبط با این ذرات در حال رشد، دوباره به فاز گازی بازیافت می‌شود و به عنوان یک «کاتالیزور» برای هسته‌زایی و متعاقباً تولید ذرات جدید در جو دریا عمل می‌کند [11].



^۳ هسته آیتکن به ذرات آئروسول اشاره دارد که با تراکم به اندازه‌های بزرگتر از ۱ میکرومتر رشد می‌کنند

در تحقیقی دیگر در همین ارتباط، مشاهدات میدانی این تیم نقش پررنگ HIO_3 را بر هسته زایی و تشکیل ذرات CCN ثابت نمود [10]. HIO_3 در هوای دریایی ساحلی، لایه مرزی قطب شمال و جنوب، مکان‌های مختلف قاره‌ای و در تروپوسفر آزاد پایینی شناسایی شده است. چندین پیش‌ساز برای HIO_3 پیشنهاد شده است که شامل اتم‌های ید هیدراته، رادیکال‌های IO هیدراته، رادیکال‌های دی‌اکسید ید (OIO) و اکسیدهای ید بزرگتر (I_2O_3 ، I_2O_4 و I_2O_5) است. اما مکانیسم تشکیل HIO_3 در سال ۲۰۲۳ کشف شد. این محققان در تحقیقی که در مجله نیچر-شیمی چاپ شد [10] حلقه مفقوده بین ید و ذرات CCN را کشف کردند و نقش کاتالیزوری ید در تشکیل آئروسول را نشان دادند. آنها نشان دادند که یدوکسی هیپویدیت، IOIO، از طریق واکنش‌های زیر به طور موثر به HIO_3 تبدیل می‌شود.



مکانیسم دیگر شامل برهمکنش بخارات اکسی‌اسید ید و اسید سولفوریک برای تشکیل CCN و تشکیل قطرات آب است [9]. برای تولید CCN، اسید سولفوریک به یک تثبیت‌کننده نیاز دارد که در مناطق شهری معمولاً آمونیاک این کار را انجام می‌دهد اما در محیط‌های بکر، مانند اقیانوس، آمونیاک بسیار کمیاب‌تر است. محققان در پروژه CLOUD در CERN کشف کردند که اسید یدیک حتی می‌تواند هسته‌زایی ناشی از یون اسید سولفوریک را افزایش دهد. عجیب‌تر اینکه، اسید یدوس می‌تواند جایگزین آمونیاک شود و به عنوان یک باز رفتار کند و یک پروتون از اسید سولفوریک بپذیرد تا یک دیمر خنثی تشکیل دهد. در واقع، یک جایگزینی بسیار مؤثرتر اتفاق می‌افتد. یعنی ید می‌تواند کارایی تولید ذرات از اسید سولفوریک را در مقایسه با آمونیاک ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر افزایش دهد [6,9,14] و در تولید ذرات CCN نقش داشته باشد.

جمع بندی

ابرها مجموعه‌ای از گاز نیستند بلکه مجموعه‌ای از قطرات ریز آب مایع و/یا بلورهای یخ هستند. ابرهای بارش‌زا معمولاً فقط در پایین‌ترین لایه جو، تروپوسفر، وجود دارند. وقتی ابری از قطرات آب بزرگ تشکیل شده باشد، خاکستری‌تر به نظر می‌رسد و احتمال بارندگی آن بیشتر است. قطرات آب و بلورهای یخی که این ابرها را تشکیل می‌دهند از بخار آبی تشکیل شده‌اند که متراکم شده یا رسوب پیدا کرده است (تا قطرات باران یا ذرات یخ تشکیل شود). برای تشکیل قطرات آب باید رطوبت، فشار و دما مناسب باشد و هسته یا دانه‌ای برای جمع‌آوری مولکول‌های بخار وجود داشته باشد (هسته‌های تراکم ابر، CCN). به عبارتی بخار آب باید در شرایط اشباع باشد تا بتواند بر روی یک هسته یا ذره میعان کند. با بالا رفتن توده‌های مرطوب هوا و کاهش دما در ارتفاعات، هوا از بخارات

آب اشباع شده و مقداری از بخار آب بر روی هسته های تراکم ابر میعان پیدا می کند. این موضوع باعث ایجاد، رشد ابرها و نهایتاً بارش می شود [15].

بررسی تحقیقات جدید در خصوص تاثیر ید مولکولی (I_2) بر میزان بارش، نشان می دهد که مولکول های ید با ایجاد هسته های تراکم ابر به بارورسازی ابرها و ایجاد باران کمک می کنند. بنابراین ید در فاز گازی نه تنها تاثیر منفی بر بارش نمی گذارند، بلکه تاثیر مثبت آن اثبات شده است. ید مولکولی از مکانیسم های مختلف به ایجاد ذرات آئروسل اولیه، رشد آنها و تبدیل شدن آنها به هسته های تراکم ابر کمک می کند و بدین ترتیب همانند ذرات یدید نقره که امروزه برای بارورسازی ابرها استفاده می شوند، باعث تراکم ابرها و ایجاد باران می شود. از طرفی با توجه به اینکه ید مانند اسید سولفوریک برای ایجاد ذرات آئروسل، به آمونیاک نیاز ندارد، سرعت هسته زایی و رشد هسته های تراکم ابر را به شدت افزایش می دهد.

جهت بررسی و تحقیقات بیشتر در زمینه تاثیر مثبت و جدی ید بر تراکم ابرها و بارش، ویدئو و مقالات زیر (که مربوط به سال های ۲۰۲۰ به بعد است)، معرفی می گردند.

Video:

<https://videos.cern.ch/record/2751109>

Research Papers about the effect of iodine on the formation of cloud condensation nuclei

1. Huang, Ru-Jin, et al. "Heterogeneous iodine-organic chemistry fast-tracks marine new particle formation." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119.32 (2022): e2201729119.
2. Rörup, Birte, et al. "Temperature, humidity, and ionisation effect of iodine oxoacid nucleation." *Environmental science: atmospheres* 4.5 (2024): 531-546.
3. He, Xu-Cheng, et al. "Role of iodine oxoacids in atmospheric aerosol nucleation." *Science* 371.6529 (2021): 589-595.
4. Xavier, Carlton, et al. "Role of Iodine-Assisted Aerosol Particle Formation in Antarctica." *Environmental Science & Technology* 58.17 (2024): 7314-7324.
5. Baccarini, Andrea, et al. "Frequent new particle formation over the high Arctic pack ice by enhanced iodine emissions." *Nature communications* 11.1 (2020): 4924.
6. de Jonge, Robin Wollesen, et al. "Natural marine precursors boost continental new particle formation and production of cloud condensation nuclei." *Environmental Science & Technology* 58.25 (2024): 10956-10968.

7. He, Xu-Cheng, et al. "Iodine oxoacids enhance nucleation of sulfuric acid particles in the atmosphere." *Science* 382.6676 (2023): 1308-1314.
8. Finkenzeller, Henning, et al. "The gas-phase formation mechanism of iodic acid as an atmospheric aerosol source." *Nature Chemistry* 15.1 (2023): 129-135.
9. Zhang, Rongjie, et al. "Critical role of iodous acid in neutral iodine oxoacid nucleation." *Environmental Science & Technology* 56.19 (2022): 14166-14177.
10. Wan, Yibei, et al. "Probing key organic substances driving new particle growth initiated by iodine nucleation in coastal atmosphere." *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 2020 (2020): 1-29.
11. Tham, Yee Jun, et al. "Direct field evidence of autocatalytic iodine release from atmospheric aerosol." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118.4 (2021): e2009951118.
12. Kirkby, Jasper, et al. "Atmospheric new particle formation from the CERN CLOUD experiment." *Nature Geoscience* 16.11 (2023): 948-957.
13. Shen, Jiali. "Oxidation of Dimethyl Sulfide and Iodine in the Marine Atmosphere, and their Contribution to new Particle Formation." (2023).
14. Shen, Jiali. "Oxidation of Dimethyl Sulfide and Iodine in the Marine Atmosphere, and their Contribution to new Particle Formation." (2023).
15. Ning, An, et al. "Overlooked significance of iodic acid in new particle formation in the continental atmosphere." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121.31 (2024): e2404595121.
16. Zhang, Ying, et al. "Iodine oxoacids and their roles in sub-3 nm particle growth in polluted urban environments." *Atmospheric Chemistry and Physics* 24.3 (2024): 1873-1893.
17. Engsvang, Morten, Haide Wu, and Jonas Elm. "Iodine clusters in the atmosphere I: Computational benchmark and dimer formation of oxyacids and oxides." *ACS omega* 9.29 (2024): 31521-31532.
18. Zhang, Ying, et al. "Iodine oxoacids and their roles in sub-3 nanometer particle growth in polluted urban environments." *EGUsphere* 2023 (2023): 1-39.
19. Baccarini, Andrea, et al. "Iodine Drives New Particle Formation in the Central Arctic Ocean." *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 2020. 2020.
20. Wan, Yibei, et al. "Chemical characterization of organic compounds involved in iodine-initiated new particle formation from coastal macroalgal emission." *Atmospheric Chemistry and Physics* 22.23 (2022): 15413-15423.

- [1] Climate Intervention, National Academies Press, Washington, D.C., 2015.
<https://doi.org/10.17226/18988>.
- [2] J.G. Hudson, Cloud condensation nuclei, *J. Appl. Meteorol.* (1993).
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1993\)032<0596:CCN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1993)032<0596:CCN>2.0.CO;2).
- [3] R. Stull, 7.2: Nucleation of Liquid Droplets - Geosciences LibreTexts, *Libr. Geosci.* (2022).
[https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_\(Stull\)/07%3A_Precipitation_Processes/7.02%3A_Nucleation_of_Liquid_Droplets](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_(Stull)/07%3A_Precipitation_Processes/7.02%3A_Nucleation_of_Liquid_Droplets) (accessed May 2, 2025).
- [4] K.R. Barry, T.C.J. Hill, E.J.T. Levin, C.H. Twohy, K.A. Moore, Z.D. Weller, D.W. Toohey, M. Reeves, T. Campos, R. Geiss, G.P. Schill, E. V. Fischer, S.M. Kreidenweis, P.J. DeMott, Observations of Ice Nucleating Particles in the Free Troposphere From Western US Wildfires, *J. Geophys. Res. Atmos.* (2021).
<https://doi.org/10.1029/2020JD033752>.
- [5] Goethe University — Climate research: rapid formation of iodine particles over the Arctic – more clouds could cause ice to melt faster, (n.d.). https://www.goethe-university-frankfurt.de/97794506/Climate_research__rapid_formation_of_iodine_particles_over_the_Arctic__more_clouds_could_cause_ice_to_melt_faster (accessed May 2, 2025).
- [6] X.C. He, Y.J. Tham, L. Dada, M. Wang, H. Finkenzeller, D. Stolzenburg, S. Iyer, M. Simon, A. Kürten, J. Shen, B. Rörup, M. Rissanen, S. Schobesberger, R. Baalbaki, D.S. Wang, T.K. Koenig, T. Jokinen, N. Sarnela, L.J. Beck, J. Almeida, S. Amanatidis, A. Amorim, F. Ataei, A. Baccarini, B. Bertozzi, F. Bianchi, S. Brilke, L. Caudillo, D. Chen, R. Chiu, B. Chu, A. Dias, A. Ding, J. Dommen, J. Duplissy, I. El Haddad, L.G. Carracedo, M. Granzin, A. Hansel, M. Heinritzi, V. Hofbauer, H. Junninen, J. Kangasluoma, D. Kemppainen, C. Kim, W. Kong, J.E. Krechmer, A. Kvashin, T. Laitinen, H. Lamkaddam, C.P. Lee, K. Lehtipalo, M. Leiminger, Z. Li, V. Makhmutov, H.E. Manninen, G. Marie, R. Marten, S. Mathot, R.L. Mauldin, B. Mentler, O. Möhler, T. Müller, W. Nie, A. Onnela, T. Petäjä, J. Pfeifer, M. Philippov, A. Ranjithkumar, A. Saiz-Lopez, I. Salma, W. Scholz, S. Schuchmann, B. Schulze, G. Steiner, Y. Stozhkov, C. Tauber, A. Tomé, R.C.

- Thakur, O. Väisänen, M. Vazquez-Pufleau, A.C. Wagner, Y. Wang, S.K. Weber, P.M. Winkler, Y. Wu, M. Xiao, C. Yan, Q. Ye, A. Ylisirniö, M. Zauner-Wieczorek, Q. Zha, P. Zhou, R.C. Flagan, J. Curtius, U. Baltensperger, M. Kulmala, V.M. Kerminen, T. Kurtén, N.M. Donahue, R. Volkamer, J. Kirkby, D.R. Worsnop, M. Sipilä, Role of iodine oxoacids in atmospheric aerosol nucleation, *Science* (80-.). 371 (2021) 589–595. <https://doi.org/10.1126/science.abe0298>.
- [7] Atmospheric iodine could contribute to more cloudy skies | Popular Science, (n.d.). <https://www.popsci.com/environment/iodine-cloud-formation-ozone/> (accessed May 3, 2025).
- [8] Iodine accelerates formation of cloud condensation nuclei in the atmosphere | Press and Public Relations, (n.d.). <https://press.uni-mainz.de/iodine-accelerates-formation-of-cloud-condensation-nuclei-in-the-atmosphere/> (accessed May 2, 2025).
- [9] X.C. He, M. Simon, S. Iyer, H. Bin Xie, B. Rörup, J. Shen, H. Finkenzeller, D. Stolzenburg, R. Zhang, A. Baccharini, Y.J. Tham, M. Wang, S. Amanatidis, A.A. Piedehierro, A. Amorim, R. Baalbaki, Z. Brasseur, L. Caudillo, B. Chu, L. Dada, J. Duplissy, I. El Haddad, R.C. Flagan, M. Granzin, A. Hansel, M. Heinritzi, V. Hofbauer, T. Jokinen, D. Kemppainen, W. Kong, J. Krechmer, A. Kürten, H. Lamkaddam, B. Lopez, F. Ma, N.G.A. Mahfouz, V. Makhmutov, H.E. Manninen, G. Marie, R. Marten, D. Massabò, R.L. Mauldin, B. Mentler, A. Onnela, T. Petäjä, J. Pfeifer, M. Philippov, A. Ranjithkumar, M.P. Rissanen, S. Schobesberger, W. Scholz, B. Schulze, M. Surdu, R.C. Thakur, A. Tomé, A.C. Wagner, D. Wang, Y. Wang, S.K. Weber, A. Welti, P.M. Winkler, M. Zauner-Wieczorek, U. Baltensperger, J. Curtius, T. Kurtén, D.R. Worsnop, R. Volkamer, K. Lehtipalo, J. Kirkby, N.M. Donahue, M. Sipilä, M. Kulmala, Iodine oxoacids enhance nucleation of sulfuric acid particles in the atmosphere, *Science* (80-.). (2023). <https://doi.org/10.1126/science.adh2526>.
- [10] H. Finkenzeller, S. Iyer, X.C. He, M. Simon, T.K. Koenig, C.F. Lee, R. Valiev, V. Hofbauer, A. Amorim, R. Baalbaki, A. Baccharini, L. Beck, D.M. Bell, L. Caudillo, D. Chen, R. Chiu, B. Chu, L. Dada, J. Duplissy, M. Heinritzi, D. Kemppainen, C. Kim, J. Krechmer, A. Kürten, A. Kvashnin, H. Lamkaddam, C.P. Lee, K. Lehtipalo, Z. Li, V. Makhmutov, H.E. Manninen, G. Marie, R. Marten, R.L. Mauldin, B. Mentler, T. Müller, T. Petäjä, M. Philippov, A. Ranjithkumar, B. Rörup, J. Shen, D. Stolzenburg, C. Tauber,

- Y.J. Tham, A. Tomé, M. Vazquez-Pufleau, A.C. Wagner, D.S. Wang, M. Wang, Y. Wang, S.K. Weber, W. Nie, Y. Wu, M. Xiao, Q. Ye, M. Zauner-Wieczorek, A. Hansel, U. Baltensperger, J. Brioude, J. Curtius, N.M. Donahue, I. El Haddad, R.C. Flagan, M. Kulmala, J. Kirkby, M. Sipilä, D.R. Worsnop, T. Kurten, M. Rissanen, R. Volkamer, The gas-phase formation mechanism of iodic acid as an atmospheric aerosol source, *Nat. Chem.* (2023). <https://doi.org/10.1038/s41557-022-01067-z>.
- [11] J.C. Gómez Martín, T.R. Lewis, M.A. Blitz, J.M.C. Plane, M. Kumar, J.S. Francisco, A. Saiz-Lopez, A gas-to-particle conversion mechanism helps to explain atmospheric particle formation through clustering of iodine oxides, *Nat. Commun.* (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18252-8>.
- [12] How iodine-containing molecules contribute to the formation of atmospheric aerosols, affect climate | ScienceDaily, (n.d.). <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/02/210208085521.htm> (accessed May 3, 2025).
- [13] R.J. Huang, T. Hoffmann, J. Ovadnevaite, A. Laaksonen, H. Kokkola, W. Xu, W. Xu, D. Ceburnis, R. Zhang, J.H. Seinfeld, C. O'Dowd, Heterogeneous iodine-organic chemistry fast-tracks marine new particle formation, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 119 (2022). <https://doi.org/10.1073/pnas.2201729119>.
- [14] H. Zu, S. Zhang, L. Liu, X. Zhang, The vital role of sulfuric acid in iodine oxoacids nucleation: impacts of urban pollutants on marine atmosphere, *Environ. Res. Lett.* 19 (2024) 014076. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad193f>.
- [15] S.T. Siems, Cloud seeding, in: *Encycl. Earth Sci. Ser.*, 2013: p. 92. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_63.