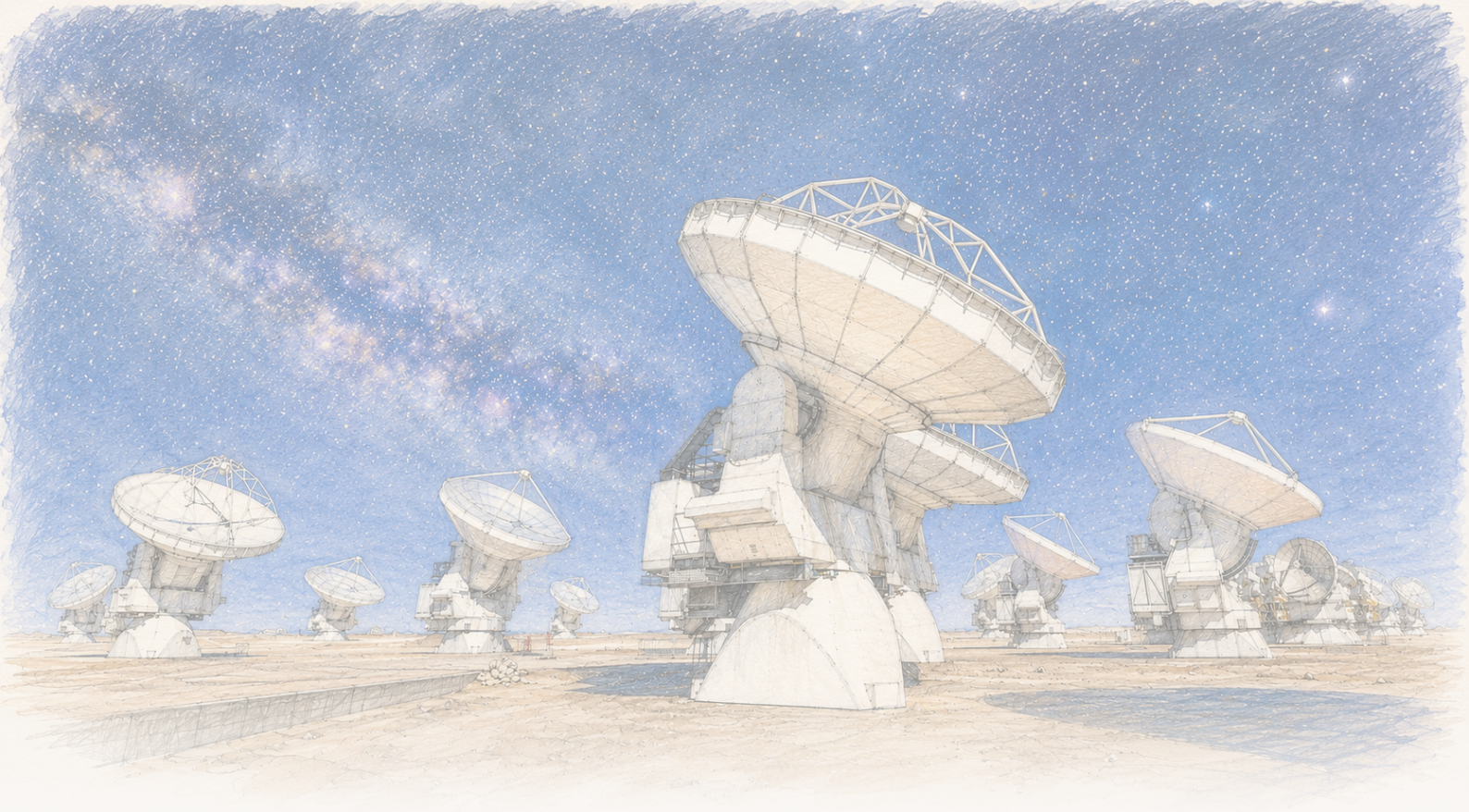


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Tähtedevahelise komeedi 3I/ATLAS vesi tekkis külmemates tingimustes kui meie komeetide oma — esimene keemiline lugem teise planetaarsüsteemi ainest

ALMA abil piirasid astronoomid „raske" ja tavalise vesiniku suhet 3I/ATLASE — kolmanda teadaoleva tähtedevahelise objekti — vees ning leidsid tugeva deuteeriumirikastuse: vähemalt umbes 40 korda Maa ookeanide ja 30 korda tüüpilise Päikesesüsteemi komeedi väärtusest. See osutab veele, mis tekkis külmemates tingimustes kui meie komeetide vesi. Tulemus on alumine piir ja saadud kaudselt (vett ennast ei tuvastatud otse) ning ei ütle midagi elu ega tehnoloogia kohta — ainult keemia ja külma kohta.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Water D/H in 3I/ATLAS as a Probe of Formation Conditions in Another Planetary System*, L. E. Salazar Manzano, T. Paneque-Carreño et al., Nature Astronomy (2026) · DOI: 10.1038/s41550-026-02850-5

Esiplaanil antenn DV-59, taustal mitu ALMA antenni vaatlemas kuuvalget öötaevast. Foto: Alex Pérez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

Teise tähe juurest pärit komeet ja sõrmejälg selle vees

Aeg-ajalt langeb läbi Päikesesüsteemi midagi, mis pole kunagi olnud meie oma. Mitte asteroidivööst eksinud kivi ega Oorti pilvest pika lõa otsas tagasi pöörduv komeet, vaid avatud hüperboolsel trajektooril objekt — mis saabus tähtedevahelisest ruumist, teeb ühe kaare ümber Päikese ja lahkub igaveseks. Nüüdseks oleme näinud kolme. Esimene, ʻOumuamua 2017. aastal, oli peaaegu kadunud enne, kui jõuti kokkuleppele, mis see üldse oli. Teine, 2I/Borisov 2019. aastal, oli selgelt komeet. Kolmas, 2025. aasta juulis avastatud 3I/ATLAS, saabus piisavalt aktiivse koomaga, et selle peal päriselt keemiat mõõta.

Enne müra algust tasub kinni hoida ühest asjast. Tähtedevaheline komeet on sõna otseses mõttes killuke teisest planetaarsüsteemist: jää ja tolm, mis kondenseerusid mõne teise tähe ümber, paisati tõenäoliselt ammu gravitatsioonilise tõukega välja, triivisid läbi Galaktika ning sattusid juhuslikult meie Päikesele piisavalt lähedale, et jää hakkaks aurustuma täpselt seal, kus teleskoobid seda näha saavad. See ongi tõeliselt erakordne fakt ning piisavalt hämmastav ilma lisanditeta.

Lisandeid kipub siiski tulema. Tähtedevahelised objektid tõmbavad ligi kindlat sorti hingeldavat kajastust — tuled hämaramaks, *aga mis siis, kui keegi selle ehitas* — ning 3I/ATLAS sai oma osa. Aus vastus

sellele küsimusele on igav, ja igav vastus on huvitavam: see on komeet. Päris küsimus polnud kunagi, kas keegi selle tegi. See oli vaiksem: kui saaks lugeda teise tähe ümber kokku pandud aine keemiat, mida ütleks see selle tähe perekonna kohta? Ja kuidas seda üldse lugeda?

Seekord on lugemisvahend vesi. Vesi koosneb kahest vesinikust ja ühest hapnikust, kuid väike osa selle vesinikust on *deuteerium* — raskem kaksik, tavaline vesinikuaatom ühe lisaneutroniga. Raske ja tavalise vesiniku suhe vees, mida kirjutatakse D/H, ei ole juhuslik. Keemia määrab selle suuresti selle järgi, kui külm oli paik, kus vesi algselt moodustus: mida külmem ja rahulikum sünnipaik, seda rohkem deuteeriumi lukustub molekulidesse. Ja kuna komeet on sisuliselt sügavkülmik — selline, mis võib oma jääd miljardeid aastaid külmhoius hoida — võib vee D/H suhe säilitada sõrmejälje tingimustest, milles vesi tekkis.

Oma süsteemi sõrmejälgi tunneme üsna hästi: Maa ookeanid ja Päikesesüsteemi eri komeediperekonnad koonduvad üsna kitsasse vahemikku. Seni polnud keegi suutnud sama sõrmejälge kindlaks teha *teise* tähe ümber tekkinud vees. Just seda püüdis see töö 3I/ATLASes lugeda.

Mida autorid tegid

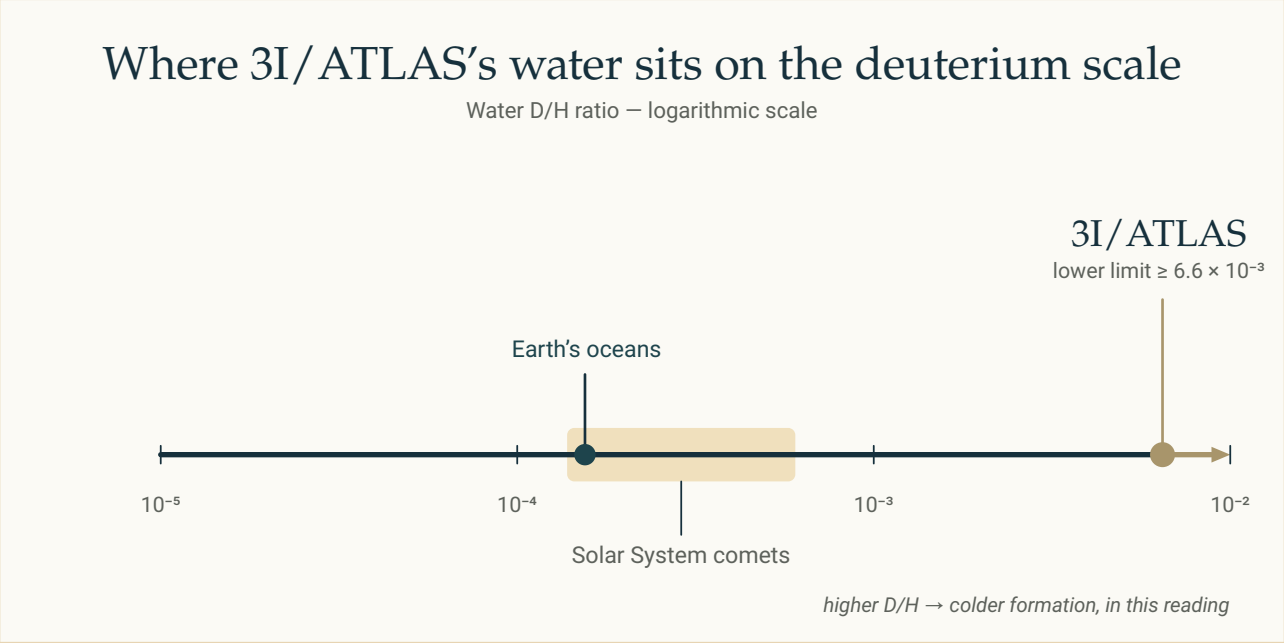
Nad suunasid ALMA — suure raadioantennide võrgustiku Tšiili kõrbes — 3I/ATLASE poole 4. novembril 2025, kuus päeva pärast komeedi möödumist Päikesest. Vastuvõtjad häälestati kolme koomas oleva molekuli nõrgale millimeeterlainekiirgusele: tavaline vesi (H_2O), *raske* vesi (HDO, kus üks vesinik on deuteerium) ja metanool (CH_3OH).

Otsitav D/H suhe on sisuliselt raske vee ja tavalise vee suhe. Seega oli vaja mõlemat. Seejärel lasti spektrid läbi paisuva komeediatmosfääri kiirgusülekande mudeli (kood nimega SUBLIME) ning sobitati neid samasuguse statistilise aparatuuriga, mida kasutatakse eksoplaneetide atmosfääride koostise leidmiseks, et hinnata temperatuuri, väljavoolu ja iga molekuli tootmiskiirust.

Üks konks kujundab kõike järgnevat: **vett ennast nad tegelikult ei tuvastanud.** HDO ja metanool ilmusid välja; H_2O jäi müratasemest allapoole. Põhjus pole tavalise vee vähesus — seda on raskest veest kaugelt rohkem. Spektrijoone nähtavus ei sõltu ainult molekuli hulgast, vaid ka sellest, kui hõlpsasti just seda joont saab vaadelda, ja siin töötavad veejoone vastu kaks asja. Esiteks atmosfäär: H_2O joon, mida nad said sihtida (umbes 183 GHz), paikneb täpselt seal, kus Maa enda veerikas õhk neelab kõige tugevamalt, nii et komeedi vee lugemine maapinnalt on veidi nagu küünla vaatamine läbi udu — töö märgib, et need madala energiaga veeribad kannatavad tugeva atmosfäärineeldumise all, samas kui raske vee HDO joon umbes 241 GHz juures langeb puhtamasse aknasse. Teiseks tundlikkus: veekanal oli palju mürarikkam — umbes 500 mJy kiire kohta võrreldes HDO 21-ga — nii et ka rohke signaal võis sinna kaduda. Udu ja müra koos hoidsid külluslikku tavalise vee lävest allpool, samal ajal kui palju haruldasem raske vesi ilmus puhtas ja vaikses aknas selgelt nähtavale. (Kosmosest, atmosfääri kohal, on sama vett palju lihtsam näha: JWST tuvastas hiljem pärast periheeli komeedi vee infrapunases — seega puudutab ALMA mittetuvastus üht konkreetset joont läbi Maa atmosfääri, mitte vee puudumist.) Tavalise vee kogus tuli seepärast hinnata *kaudselt* — peamiselt selle järgi, kuidas ergastusid metanooli jooned, sest see sõltub metanoolimolekulide kokkupõrgetest veega. See on päris mõõtmine, kuid mudelist sõltuv ning autorid ütlevad seda selgelt.

Mida nad leidsid

- **Raske vesi, kuid tavalist vett mitte.** HDO ja mitu metanoolijoont tuvastati selgelt; H_2O-d mitte. Kuna D/H suhe põhineb tavalise vee tootmiskiiruse *ülemisel piiril* — seda käsitletakse meelega nii, sest veejoon ise jäi mürasse — tuleb deuteeriumisuhe välja **alumise piirina**, mitte ühe kindla väärtusena.
- **Tugev deuteeriumirikastus.** Konservatiivses stsenaariumis on vee D/H suhe **suurem kui** 6.6×10^{-3} — üle ligikaudu **40 korra** Maa ookeanide väärtusest ja üle umbes **30 korra** tüüpilise Päikesesüsteemi komeedi väärtusest. Mõlema hinnangu järgi paikneb 3I/ATLAS seni mõõdetud vee D/H väärtuste kõige kõrgemas otsas.
- **Tõenäoliselt pole see ühe öö juhus.** Mõõtmine pärineb ühest vaatlusajast, kuid lähedaste ALMA andmete esialgne vaatlus ei näita suurt päevast kõikumist ning 3I/ATLASE sõltumatu JWST analüüs üle kuu aja hiljem näitab sama suunda — deuteeriumirikast vett.



3I/ATLASE vee asukoht deuteeriumiskaalal: kaugel deuteeriumirikka otsa poole, Maa ookeanidest ja kogu Päikesesüsteemi komeetide populatsioonist kaugemal (siin näidatud ligikaudse vahemikuna). Nool tähistab *alumist piiri* — tegelik väärtus võib olla kõrgem. Suur D/H suhe on vihje *külmadele tekketingimustele*, mitte koduaadress.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Mida see tõenäoliselt tähendab

Suur vee D/H suhe on märk veest, mis külmus väga külmas keskkonnas (alla umbes 30 K) ning mida soojus hiljem oluliselt ümber ei töötanud. Kõige puhtam tõlgendus on seega, et 3I/ATLASE vesi tekkis *külmemates ja rahulikumates* tingimustes kui meie Päikesesüsteemi komeetide vesi — ja järelikult

kujunesid selle algse planetaarsüsteemi jääd teisiti kui meie omad.

Autorid on järgmise sammu suhtes ettevaatlikud ja peaksime olema ka meie. Nii deuteeriumirikka vee tekkeks on kaks võimalust ning see mõõtmine ei suuda neid eristada: vesi võis rikastuse *pärida* külmast pilvest, milles süsteem sündis, või kujunes suhe hiljem komeedi tekkides külmas väliskettas. Mõlemal juhul jääb peamine järeldus alles — 3I/ATLASE kujundanud tingimused polnud samad mis meie komeete kujundanud tingimused — kuid *miks* nii läks, jääb lahtiseks.

See on seega esimene kord, kui on loetud teisest planetaarsüsteemist pärit aine vee tekkimise sõrmejälge ja leitud, et see ei ühti meie omaga.

Mida see *ei* tõesta

- See ei ütle **mitte midagi** elu, tehnoloogia ega kavatsuse kohta. Pole mingit ehitatud „seda"; „tähtedevaheline" kirjeldab trajektoori, mitte päritolulugu. See on veekeemia mõõtmine.
- See **ei ole** täpne D/H väärtus. See on *alumine piir* ning vett, millele see viitab, ei tuvastatud otse — selle hulka hinnati teise molekuli, metanooli, ergastuse põhjal eeldusel, et metanool põrkub peamiselt veega.
- See **ei** näita, kus 3I/ATLAS sündis. Algset tähte ei saa usaldusväärselt tuvastada ning suur D/H suhe on vihje *tingimustele*, mitte koduaadress.
- See **ei** lahenda küsimust, *miks* vesi on deuteeriumirikas. Andmetega sobivad nii „päritud külmast sünnipilvest" kui ka „kujunenud ketta tekkimise ajal"; töö ei vali nende vahel.
- See on **üks** objekt, mida mõõdeti **ühel** vaatlusajal. Toetav kinnitamine on julgustav, mitte pikk aegrida.

Kui tugevad on tõendid?

Kaht asja tuleb eraldi kaaluda: tulemuse suunda ja täpset arvu.

- **Suund on tugev.** 3I/ATLASE vee märkimisväärne deuteeriumirikastus on konservatiivne alumine piir, paikneb kõigist Päikesesüsteemi komeetide mõõtmistest selgelt kõrgemal ning seda toetab sõltumatu JWST analüüs. See osa pole habras.
- **Arv toetub modelleerimisahelale.** Kuna H_2O-d ei tuvastatud, sõltub vee hulk — ja seega D/H suhe — vee kaudsest hindamisest metanooli ergastuse põhjal. See eeldab, et vesi on koomas peamine kokkupõrkepartner (periheeli lähedal usutav, kuid CO_2 panust ei saa välistada) ning kasutab ligikaudseid kokkupõrkemäärasid, mida autorid ise nimetavad halvasti piiratud suurusteks. Autorid märgivad kõik selle ära ja annavad tulemuse teadlikult piirina, mitte mõõdetud väärtusena.
- **Tõlgendus on hästi põhjendatud, kuid mitte ainus.** Külm teke on suure D/H loomulik seletus; kas külmus pärandus või kujunes hiljem, pole lahendatud ning algset süsteemi ei saa tuvastada.

Lühidalt: et vesi tekkis külmas, on tugeval alusel; täpselt *kui* külmas ja täpselt *miks*, jäetakse ausalt

avatuks.

Miks see oluline on

Aastakümneid on küsimustele, kust tuli Maa vesi ja mis määrab vee deuteeriumi sõrmejälje kujunevates planetaarsüsteemides, vastatud ainult meie Päikesesüsteemi sees tehtud mõõtmistega. See on esimene kord, kui seda diagrammi laiendatakse ainele, mis on tõendatult tekkinud teise tähe ümber.

Vastus pole „kõikjal on nagu kodus". Vastupidi: teine süsteem võib oma jääd moodustada piisavalt külmades tingimustes, et neisse jääb sõrmejälg, mida meie komeedid kunagi ei kandnud. See on väike ja konkreetne tõend vaikselt suure asja kohta — planeete ehitavate tahkete ainete keemia ja ajalugu võivad tähesüsteemiti erineda. Ja me ei saanud seda kosmoselaevalt, mis saadeti valgusaastate taha, vaid püüdes kinni teise süsteemi eksinud killu meie lähedalt mööudes ning lugedes selle vett enne, kui see kadus.

Lühidalt

3I/ATLAS on kolmas teadaolev tähtedevaheline objekt ja teine aktiivne tähtedevaheline komeet — teise planetaarsüsteemi killuke, mis läbib meie süsteemi ühe korra. ALMA-ga komeedi Päikesele lähima lähenemise paiku vaatlemisel tuvastasid astronoomid selle koomas raske vee (HDO) ja metanooli, kuid mitte tavalist vett, ning järeldasid selle põhjal vee deuteeriumi ja vesiniku suhte. Vesi on tugevalt deuteeriumiga rikastunud — alumine piir üle 6.6×10^{-3}, ligikaudu 40 korda Maa ookeanide ja 30 korda tüüpilise Päikesesüsteemi komeedi väärtusest — mis osutab veele, mis tekkis külmemates ja vähem termiliselt ümbertöötatud tingimustes kui Päikesesüsteemi komeetide vesi. Arv on mudeli kaudu kaudselt saadud alumine piir, mitte otsene mõõtmine, ning ei ütle, kas rikastus pärandus külmast sünnipilvest või kujunes hiljem külmas kettas ega ka seda, kust komeet tuli. Sellest hoolimata on see esimene sellise keemilise sõrmejälje lugemine teise tähe veest — ja sõrmejälg ei ühti meie omaga.

Ilustamata kontroll

Mida töö näitab: ALMA vaatlustest tähtedevahelise komeedi 3I/ATLASE periheeli lähedal saadi selle vee D/H suhte alumiseks piiriks $>6.6 \times 10^{-3}$ (konservatiivses stsenaariumis) — umbes 40× Maa ookeanide ja 30× tüüpilise Päikesesüsteemi komeedi väärtusest — mis viitab veele, mis tekkis märgatavalt külmemates ja vähem termiliselt töödeldud tingimustes kui Päikesesüsteemi komeetide vesi. Sõltumatu JWST analüüs kinnitab suunda.

Mis on usutav, kuid tõestamata: Et rikastus pärandus otse külmast täheeelsest pilvest, mitte ei ku-

junenud komeedi tekkimise ajal külmas protoplanetaarses kettas. Mõlemad stsenaariumid sobivad; andmed neid ei erista.

Mida see ei näita: Midagi elu, tehnoloogia või tehisliku päritolu kohta; täpset D/H väärtust (see on alumine piir); ematähe identiteeti või asukohta; suure D/H konkreetset mehhanismi; ega seda, et ühe vaatlusaja tulemus oleks kooma varieeruvuse suhtes immuunne.

Peamised piirangud: H_2O-d ei tuvastatud otse, seega vee hulk — ja seetõttu D/H suhe — järeldatakse kaudselt metanooli ergastusest, eeldades, et vesi on peamine põrkeosaline, ning kasutades ligikaudseid kokkupõrkemäärasid, mida autorid nimetavad halvasti piiratuteks; tulemus on ühe vaatlusaja mudelist sõltuv piir; algset süsteemi ei saa tuvastada.

Kui palju võiks tavalugeja seda usaldada? Kõrge kindlus, et 3I/ATLASE vesi on päriselt deuteeriumirikas ja tekkis külmemas keskkonnas kui meie komeetide vesi ning et see ei ütle tulnukate kohta absoluutselt mitte midagi. Mõõdukas kindlus rikastuse täpse astme suhtes, sest see on mudelist sõltuv alumine piir. Madal kindlus konkreetse põhjuse ja sünnipaiga suhtes, mis jäävad avatuks. Mõistlik hoiak: vaikne imestus teisest tähesüsteemist saabunud keemilise postkaardi üle — mitte müsteerium ega kosmoselaev.

Allikad

Nature Astronomy (2026)
https://doi.org/10.1038/s41550-026-02850-5

arXiv 2603.07026
https://arxiv.org/abs/2603.07026

Independent JWST corroboration (Cordiner et al., arXiv 2603.06911)
https://arxiv.org/abs/2603.06911

ALMA data archive (project 2025.A.00002.T)
https://almascience.nrao.edu/aq/