Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 70 (2013)

Artikel: Forschung im luftleeren Raum
Autor: Altwegg, Kathrin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-389792

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Kathrin Altwegg[1]

Forschung im luftleeren Raum

Zusammenfassung des Vortrags vom 28. April 2012

«Warum hat es im Weltraum keinen Sauerstoff?» (Sol, 11 Jahre). Ja, warum eigentlich? Und hat es wirklich keinen Sauerstoff oder nur sehr wenig? Anders gefragt: Gibt es den luftleeren Raum überhaupt?

Überlegen wir uns zuerst einmal woher das Material in unserem Universum stammt und wieso es räumlich so ungleich verteilt ist (siehe *Tab. 1* und *Abb. 1*).

Abbildung 1: Geschichte des Materials im Universum vom Urknall zu Planeten.

[1] Prof. Dr. Kathrin Altwegg, Center for Space and Habitability, Physikalisches Institut, Universität Bern

Teilchendichten: einige Zahlen		
Venus:	10^{21}	cm^{-3}
Bern:	$3x10^{19}$	cm^{-3}
Himalaya:	$1x10^{19}$	cm^{-3}
Mars:	10^{17}	cm^{-3}
International Space Station ISS:	10^{10}	cm^{-3}
Sonnenkorona:	10^{8}	cm^{-3}
Komet Halley, 600 km vom Kern:	10^{4}	cm^{-3}
Interplanetarer Raum:	1–10	cm^{-3}
Interstellares Medium:	10^{-4}	cm^{-3}

Tabelle 1: Typische Gasdichten in Atmosphären und im Weltall (Teilchen pro cm^{-3}). Intergalaktischer Raum: 10^{-4} cm^{-3}

Am Anfang, vor 13,8 Mia. Jahren, war der Urknall. Beim Urknall wurden, gemäss unserem heutigen Verständnis, aus Energie die leichten Atome (Wasserstoff, Helium bis Lithium) geschaffen. Aller Wasserstoff, den es heute gibt, stammt direkt aus dem Urknall.

Später wurden die ersten Sterne gebildet, wahrscheinlich als Folge statistischer Dichteschwankungen der Materie im All. In Sternen werden schwerere Elemente von Kohlenstoff bis Eisen durch Nukleosynthese hergestellt. Eisen hat dabei die grösste Bindungsenergie aller Elemente und ist daher für normale Nukleosynthese der Endpunkt der Entwicklung. Noch schwerere Elemente wie z.B. Gold stammen aus Supernovae-Explosionen, wo die Temperaturen und Dichten nochmals um viele Faktoren höher sind als in normalen Sternen. Wenn kleinere Sterne sterben, werden sie zu weissen Zwergen. Bei grösseren Sternen entsteht eine Supernova, die explodiert. In beiden Fällen kühlen die Temperaturen so weit ab, dass sich Moleküle bilden können. Allerdings brauchen diese Moleküle eine grosse Bindungsenergie, damit sie bei den immer noch hohen Temperaturen (ein paar tausend Grad Celsius) Bestand haben. In Frage kommen Moleküle wie SiO, FeC, etc., die typischen Ingredienzen von Staub. Dieser Staub wird vom sterbenden Stern weggeblasen in den interstellaren Raum. Der Staub von verschiedenen Stern-/Supernovaüberresten kann sich dann im interstellaren Raum zu sogenannten dunklen Molekülwolken anhäufen. Diese Wolken sind dunkel, weil sie kein Licht durchlassen, und sie sind auch sehr kalt (~10 K). Durch Oberflächenchemie können in diesen Wolken auch volatilere Moleküle wie Wasser oder Kohlendioxyd entstehen. Durch Gravitation können solche Molekülwolken kollabieren, und daraus entstehen dann solare Nebel, neue Sterne und auch Planeten.

Bei der Bildung von Sternen und Planeten gilt die Regel: «Wer hat, dem wird gegeben.» Die Sterne entstehen dort, wo die grösste Teilchendichte herrscht, das heisst in der Mitte des Nebels. Der Stern wächst schnell, wird schwer und zieht als Folge der Gravitationszunahme immer mehr Materie an. So besitzt unsere Sonne weit über 99% der Gesamtmaterie des Sonnensystems. Während die Dichte in der dunklen Molekülwolke ein paar hundert Teilchen pro cm^3 beträgt, ist sie im solaren Nebel 100 000 Mal grösser. Diese Materie wird zum

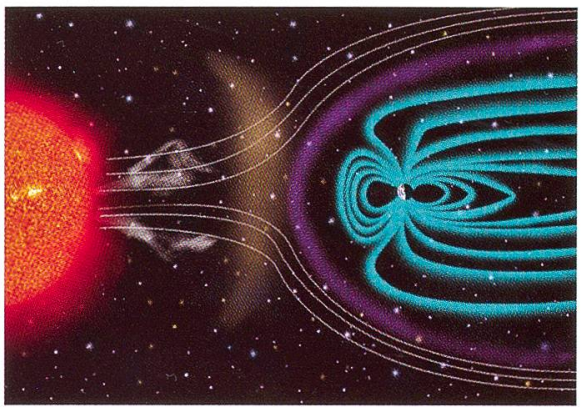

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Wechselwirkung zwischen dem Sonnenwind und der Erdatmosphäre. Das violette Band bezeichnet die Schockfront, die hellblauen Linien die Magnetfeldlinien der Erde. Copyright NASA

Abbildung 3: Aurora Borealis, copyright ESA

grössten Teil im Stern, bzw. in den Planeten eingebaut. Ein Teil wird aber auch durch Streuung aus dem Nebel entfernt. Am Schluss beträgt die Dichte zwischen den Planeten im Sonnensystem gerade noch zwischen 1 und 10 Teilchen pro cm^3. Dieses Gas geht zum Teil durch Interaktion mit der Sonne und den Planeten verloren, wird aber auch von diesen wieder nachgeliefert. Eine stetige Quelle von geladenen Teilchen verlässt die Sonne im sogenannten Sonnenwind, der eine Geschwindigkeit von ein paar hundert Kilometern pro Sekunde hat. Die Planeten besitzen sehr unterschiedliche Atmosphären, von der dichten Atmosphäre einer Venus (10^{21} pro cm^3) bis zum Merkur, mit einigen 10^4-Teilchen pro cm^3 in der unmittelbaren Umgebung seiner Oberfläche. Mindestens im äusseren Teil der Atmosphären werden die Teilchen durch die UV-Strahlung der Sonne geladen und bilden damit die Ionosphäre. Gegen diese prallt nun der Sonnenwind, der vor allem aus geladenem Wasserstoff und Helium besteht. Das führt zu einer Blase um den Planeten herum, in die der Sonnenwind nicht eindringen kann. Dies wird bei Planeten mit einem Magnetfeld, wie z.B. der Erde, noch zusätzlich durch die Wechselwirkung der Magnetfelder des Sonnenwindes und des Planeten beeinflusst. *Abbildung 2* veranschaulicht diese Wechselwirkung. Die Erdatmosphäre hat Teilchendichten von 10^{19} cm^{-3}, an der Oberfläche bis 10^{10} cm^{-3} am äusseren Rand. Durch die Wechselwirkung mit dem Sonnenwind ist das Gebiet der Atmosphäre auf der Sonnseite klar beschränkt, während auf der Nachtseite sich Teilchen der Erdatmosphäre sehr weit weg von der Erde befinden können. Nahe bei den magnetischen Polen können Sonnenwindteilchen in die Erdatmosphäre eindringen, was zu Stössen zwischen Sonnenwind und Atmosphärenteilchen (Stickstoff, Sauerstoff) führt. Dies erzeugt dann die Nordlichterscheinungen (Aurora, *Abb. 3.*). Besonders häufig sind diese, wenn die Sonne sehr aktiv ist, der Sonnenwind sich also mit höherer Geschwindigkeit gegen die Erde bewegt.

Abbildung 4: Komet Halley, copyright ESA

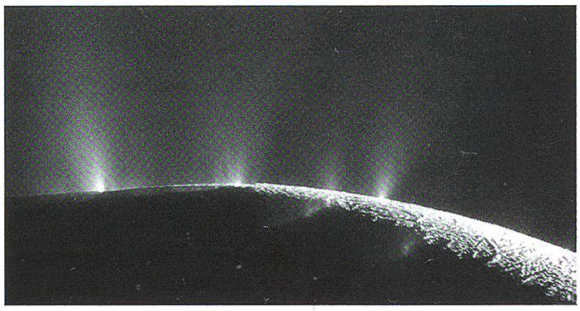

Abbildung 5: Enceladus, copyright NASA

Jeder Planet im Sonnensystem ist einzigartig, auch was seine Atmosphäre betrifft. So hat die Venus eine sehr dichte Atmosphäre, aber kein Magnetfeld, der Mars hat eine sehr dünne Atmosphäre und nur ein sehr kleines Magnetfeld. Die Riesenplaneten wie Jupiter bestehen vorwiegend aus Gas und haben zusätzlich Monde mit dünnen Atmosphären in ihrer Nachbarschaft, sodass die Wechselwirkungen zwischen Sonnenwind, Planeten- und Mondatmosphären sehr vielfältige Formen annehmen können.

Einige Himmelskörper im Sonnensystem verlieren dauernd Teilchen an den interplanetaren Raum. Dazu gehören vor allem Kometen, die, sobald sie in die Nähe der Sonne kommen, Wasser und andere flüchtige Substanzen verdampfen. Dazu werden von diesen auch Staubkörner mitgerissen, die Sonnenlicht streuen, was dann zu den schönen Erscheinungen am Himmel führt (siehe *Abb. 4.*). Ein weiterer Himmelskörper, der Saturnmond Enceladus, hat offensichtlich Geysire, flüssiges Wasser unter der Oberfläche, die Wassermoleküle an die Umgebung abgeben *(Abb. 5.)*.

Dies alles führt dazu, dass ausserhalb der Planetenatmosphären die Teilchendichten zwar sehr klein (1–10 cm^{-3}), aber nicht null sind.

Das Sonnensystem als Ganzes ist dem interstellaren Plasma ausgesetzt. Ähnlich wie bei der Erde durch die Interaktion mit dem Sonnenwind, bildet sich auch für die Gesamtheit des Sonnensystems eine Art Blase, diesmal aber innerhalb des interstellaren Plasmas. Diese Grenze liegt bei ca. 100 astronomischen Einheiten (100 x 150 Mio. km). Ausserhalb dieser Blase ist die Teilchendichte nochmals um einen Faktor 10 kleiner. Verlassen wir unsere Galaxie und dringen in den intergalaktischen Raum ein, nimmt die Teilchendichte um einen weiteren Faktor 10 000 ab.

Forschung im luftleeren Raum ist also im engsten Sinne gar nicht möglich, da selbst im intergalaktischen Medium noch Teilchen vorhanden sind. Das absolute Vakuum gibt es also nicht.

Seit neun Jahren ist die Europäische Kometensonde Rosetta unterwegs im Weltall auf ihrer Reise zum Kometen Churyumov-Gerasimenko. Im Moment schläft sie zwar, da die Sonnenzellen wegen der grossen Entfernung von über 600 Mio. km zur Sonne nur noch für die Heizung der Sonde genügend Energie liefern, nicht aber für Sende- und Empfangseinheiten und für die Instrumente. Wir haben allerdings während mehr als sechs Jahren immer wieder unsere Instrumente, zwei

Massenspektrometer und einen Drucksensor, auf der Sonde zu Testzwecken eingeschaltet. Statt der erwarteten Teilchendichte von 1–10 cm^{-3} zeigten alle unsere drei Sensoren Dichten von 100 000 cm^{-3}. Offensichtlich gast das Material der Raumsonde noch immer aus. Der zeitliche Verlauf der Dichte lässt drei Ausgasmechanismen erkennen *(Abb. 6.)*: Während den ersten 100 Tagen Desorption von der Oberfläche der Sonde, dann Diffusion von Material aus innenliegenden Schichten und zum Schluss noch Zerfallsprodukte von organischen Materialien im UV der Sonne und in der kosmischen Strahlung. Eine genaue Analyse zeigte sehr bald, dass wir neben Wasser alle möglichen Bruchstücke von organischem Material sehen, Material, aus dem Rosetta besteht, wie Epoxy-Harz, Vakuumfett und vieles mehr *(Abb. 7.)*. Offensichtlich gast Rosetta auch nach vielen Jahren im All aus, und diese Teilchen können sich während einiger Zeit in der Umgebung der Raumsonde befinden. Die genauen Mechanismen kennen wir noch nicht. Wenn Rosetta dereinst beim Kometen sein wird, sollte das Kometengas aber sehr viel dichter sein als die Wolke um Rosetta, und dann wird uns das Ausgasen kaum mehr stören. Aber es zeigt, dass Forschung im luftleeren Raum schwierig ist, nicht nur, weil es genau genommen den luftleeren Raum nicht gibt, sondern weil jede Sonde immer einen Teil unserer Erde mitnimmt.

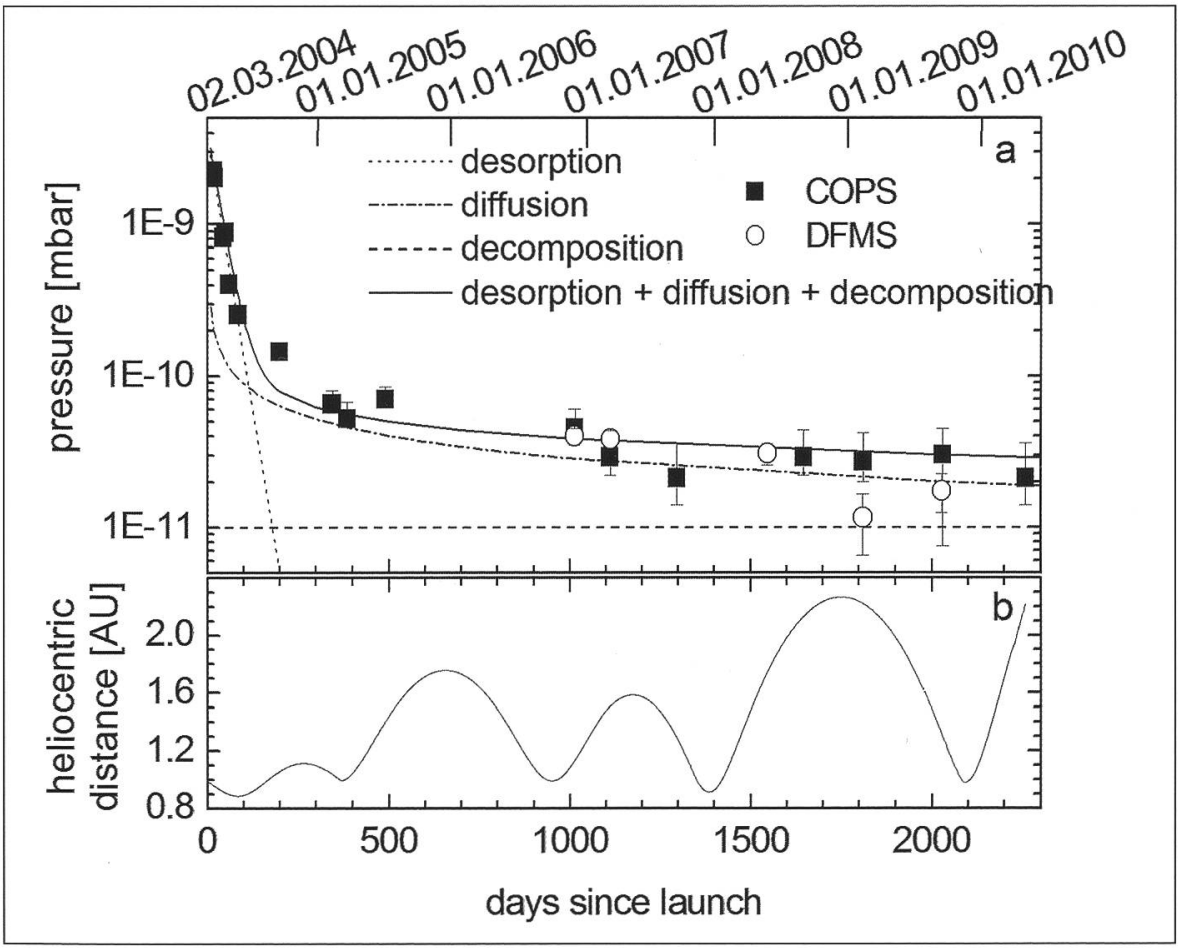

Abbildung 6: Druck als Funktion der Zeit, gemessen mit ROSINA/COPS

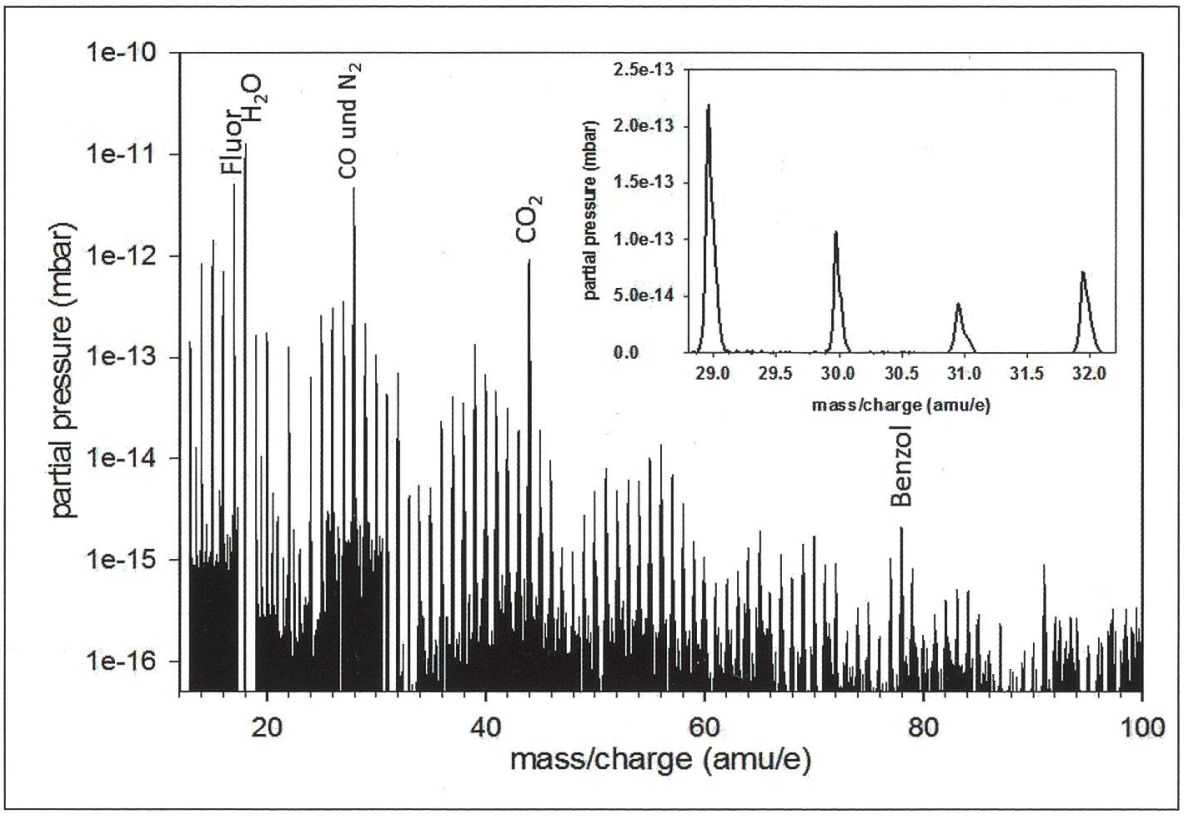

Abbildung 7: Massenspektrum von ROSINA/DFMS, 250 000 km von der Erde weg, nach sieben Jahren im Weltall