

# Kosmische Laborexperimente (4)

von Ulrich v. Kusserow

*Ob es sich um turbulente oder selbstorganisierte Prozesse im Universum handelt, ob es um die Materieakkretion in den die Planeten, Sterne und Galaxien umkreisenden Scheiben oder um hochenergetische Prozesse bei solaren Eruptionen, Supernova-Explosionen und in kosmischen Jets geht, stets versuchen die Astrophysiker die dafür relevanten physikalischen Prozessabläufe auch mit Hilfe kosmischer Laborexperimente zu analysieren, vgl. Teil 1–3 dieser Artikelserie. Nicht nur bei Fusionsexperimenten zur Erforschung der Energieerzeugung in Sternen und zukünftigen Kraftwerken spielen dabei auch magnetische Einflussfaktoren eine zentrale Rolle. Ergebnisse von Experimenten ermöglichen heute ein tieferes Verständnis für die Erzeugung kosmischer Magnetfelder im frühen Universum und in den unterschiedlichsten Himmelsobjekten, für die Entwicklung des auch auf unser Leben Einfluss nehmenden Weltraumwetters. Im abschließenden 4. Teil werden kosmische Laborexperimente vorgestellt, die wichtige Erkenntnisse zur Entstehung von Planetesimalen in extrasolaren Planetensystemen sowie zum möglichen Einfluss der kosmischen Strahlung auf das Erdklima liefern.*

Die Verwirklichung des uralten Traums der Menschheit, zur unerschöpflichen Energieversorgung „die Sonne auf die Erde zu holen“, erfordert den Ablauf kontrollierter Kernfusionsprozesse in einem über genügend lange Zeiträume eingeschlossenen, extrem heißen Plasma. Im Rahmen der Trägheitsfusion durch Laserbeschuss eines in nur zentimetergroßen, kugelförmigen Behältern gelagerten Deuterium-Tritium-Gemischs wurden zwar teilweise schon Temperaturen von 2 Milliarden Grad erreicht. Als wettbewerbsfähiger Energieerzeugungsprozess müsste ein solcher Beschuss allerdings jede Sekunde ablaufen. Stattdessen erfordert die erneute Durchführung des Experiments heute noch Vorbereitungsarbeiten von etwa einem Tag.

Erstmals ist es Wissenschaftlern der National Ignition Facility (NIF) am kalifornischen Lawrence Livermore National Laboratory jetzt gelungen, Brenn-

stoffkapseln bei hoher Dichte und Temperatur so symmetrisch zu komprimieren, dass der Brennstoff selbst mehr Energie abgibt, als er vorher aufgenommen hat [47]. Optimistische Prognosen anhand von Ergebnissen numerischer Simulationen stimmten bisher nicht mit den erzielten Energieerzeugungsraten überein. Durch verstärkten Röntgenlaser-Beschuss bereits zu Beginn der Kompressionsphase des ionisierten Plasmas konnte diese Diskrepanz zwischen Theorie und Praxis aufgelöst werden. Die bei der Fusion erzeugten schnellen Heliumkerne erhöhen die Temperatur und vergrößern die Reaktionsrate effektiv [48].

In den Sandia National Laboratories der Vereinigten Staaten von Amerika wird eine Erfolg versprechende Variante der Trägheitsfusion erforscht, bei der die Komprimierung und Aufheizung des Plasmas durch extrem starke Ströme und die dabei erzeugten Ma-

gnetfelder sowie Röntgenbestrahlung erzwungen werden. Im Innern der sogenannten Z-Maschine mit einem Durchmesser von 32 m und einer Höhe von 6 m (**Bild 14a**, siehe unter <http://www.sandia.gov/z-machine/>) befindet sich eine 3 m große Vakuumkammer mit einer darin installierten, etwa 20 cm hohen, in vertikaler z-Richtung von 300 besonders dünnen Wolframdrähten mit jeweils einer Dicke von einem Zehntel eines Menschhaares durchlaufenden Anordnung (**Bild 14b**).

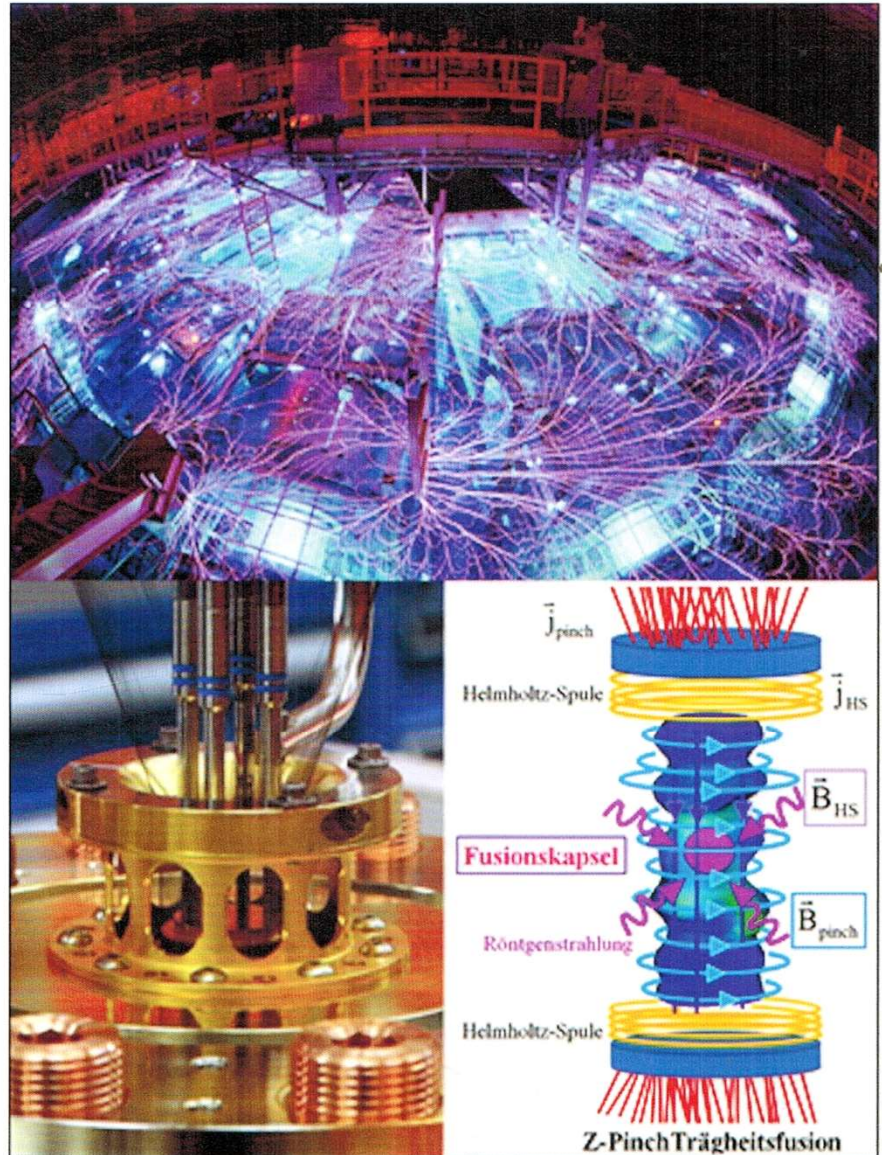
Die hier parallel ausgerichteten Drähte durchlaufen die pfefferkorngroße, mit Deuterium und Tritium gefüllte Fusionskapsel aus Plastik im Zentrum der Apparatur (**Bild 14c**). Durch die dünnen Wolframdrähte werden in 36 radialen Zuleitungen gleichzeitig 100 Nanosekunden kurze Stromimpulse  $\vec{J}_{\text{pinch}}$  von Stärken bis zu 20 Millionen Ampere geleitet. Nahezu gleichzeitig erzeugen diese Impulse starke Magnetfelder  $\vec{B}_{\text{pinch}}$  und lassen die Drähte augenblicklich verdampfen. Im dabei entstandenen heißen und ionisierten Gas wird pulsartig Röntgenstrahlung mit Spitzenleistungen von einigen 100 Megawatt freigesetzt. Gemeinsam mit den sich gemäß dem sogenannten z-pinch Effekt (Zusammendrücken des magnetisierten Plasmas auf Grund wirksamer magnetischer Spannung in azimuthal verlaufenden Feldstrukturen) verdichtenden, von Plasma durchsetzten Magnetfeldstrukturen bewirkt der große Strahlungsdruck der Röntgenemission eine besonders effektive Komprimierung, Aufheizung und damit auch die Verschmelzung des Brennstoffs in der Fusionskapsel. Neue Erkenntnisse zeigen, dass dabei auftretende magnetische Fusions-Instabilitäten, die eine optimale Komprimierung noch behindern könnten, durch das bei Stromfluss  $\vec{J}_{\text{HS}}$  in Helmholtz-Spulen erzeugte stabilisierende homogene Magnetfeld der

Flussdichte  $\vec{B}_{HS}$  erfolgreich vermieden werden können [48].

Die Öffentlichkeit hat aus guten Gründen großes Interesse an neuen Erkenntnissen über die Entwicklungsgeschichte unseres Sonnensystems, über die Entwicklung des Lebens auf unserer heute in zunehmendem Maße „überfüllten“ und „verunreinigten“ Erde. Im Zeitalter der Entdeckung von immer mehr Exoplaneten um entfernte sonnenähnliche Sterne möchten die Menschen wissen, wie die Planeten und ihre Biosphären entstanden sind, wie sie sich entwickeln können. Neben der Erforschung der Lösung dringlicher Energieversorgungsprobleme spielt auch die Frage nach den unterschiedlichen Einflussfaktoren auf das Erdklima eine zentrale Rolle in den aktuellen Diskussionen um die Erhaltung der Lebensqualität für immer mehr Menschen auf unserem Planeten. Am Ende dieser Artikelserie werden kosmische Laborexperimente vorgestellt, die wichtige Aufschlüsse über die Entstehung der Bausteine von Planeten liefern (Bild 15, 16) und anhand derer mögliche kosmische Einflüsse auf das Erdklima (Bild 17, 18) erforscht werden können. Welche Bedeutung werden Laborexperimente in Zukunft generell im Rahmen der Erkenntnisprozesse über Entwicklungen in unserem Universum haben?

### **Staubkoagulation, die Entstehung von Planetesimalen und Planeten**

Mit ganz unterschiedlichen Beobachtungstechniken (direkte Abbildung, Transitmethode, Dopplereffekt u. a.) konnte die Existenz von aktuell mehr als tausend Exoplaneten um entfernte Sterne nachgewiesen werden (Bild 15b). Wie in unserem Planetensystem wurden riesige Gas- und Eisplaneten wie Jupiter beziehungsweise Uranus, aber auch Gesteinsplaneten ähnlich unserer Erde entdeckt, die ihren Zentralstern in jeweils unterschiedlichen Abständen umkreisen (Bild 15a). Die Eigenschaften der extrasolaren Planetensysteme weichen dabei häufig in vielfältiger Weise von denen unseres Sonnensystems ab. Beispielsweise umkreisen die als „heiße Jupiter“ bezeichneten riesigen Gasplaneten ihren Zentralstern auf besonders engen Bahnen in nur wenigen Tagen. Exoplaneten zeigen eine breite Vertei-

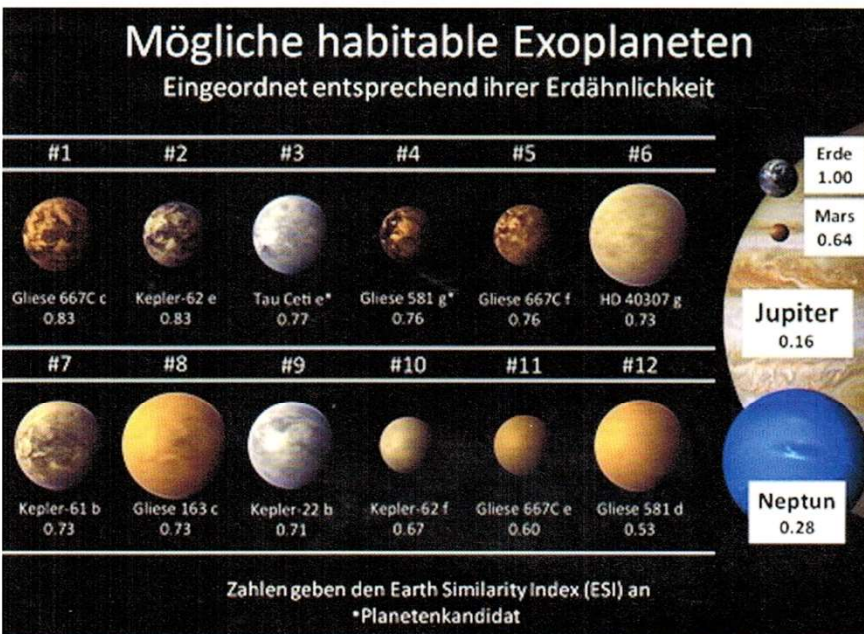
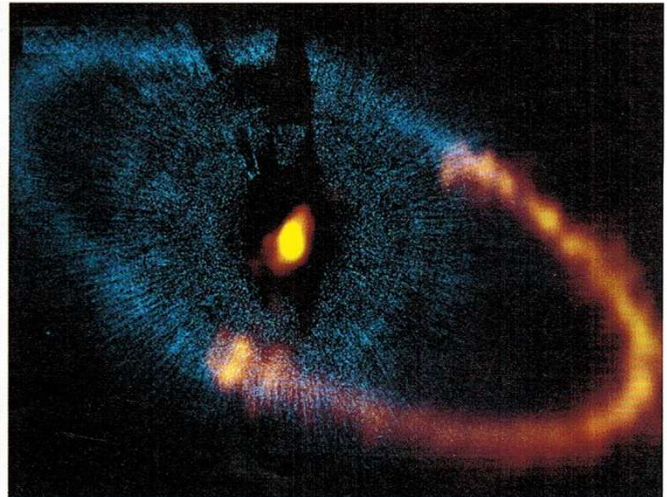
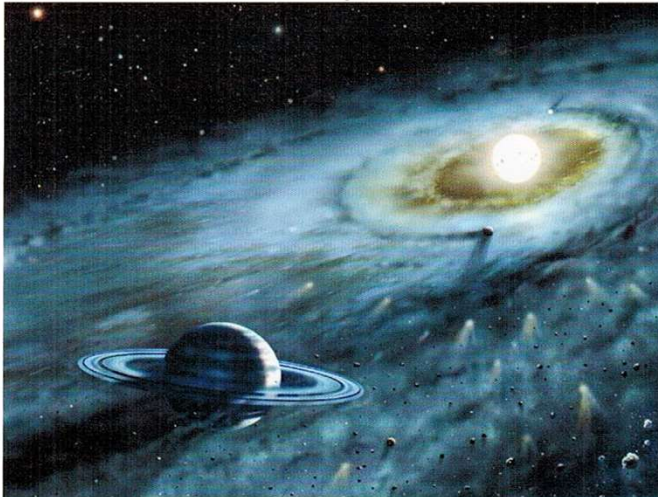


14 Trägheitsfusion mit Hilfe des Z-Pinch Effekts: Blick auf die Z-Maschine der Sandia National Laboratories (14a), Zuleitung der Wolframdrähte in die zylinderförmige Fusionskammer (14b), Darstellung des Prinzips der verbesserten Z-Pinch Trägheitsfusion (14c) Sandia National Laboratories (2), U. v. Kusserow

lung in der Exzentrizität und Neigung ihrer Bahnen zur Äquatorebene des Sterns. Sie können selbst in Mehrfachsternsystemen existieren. Für die als „Supererden“ bezeichneten Gesteinsplaneten mit etwas größerer Masse als unsere Erde erforschen Wissenschaftler die Habitabilität, die Erdähnlichkeit der Planeten als Maß für die Möglichkeit der Entwicklung von Leben (Bild 15c) [50].

Die Erforschung der Ursachen der beobachteten und vermessenen Diversität der extrasolaren Planetensysteme stellt für die Wissenschaftler eine große Herausforderung dar. Ausgerüstet mit neuen Einsichten und Modellvorstellungen, mit großer Datenfülle, mit

Statistiken zu den Eigenschaften der so unterschiedlichen Exoplaneten, mit Hilfe von Simulationsrechnungen am Computer, aber auch mit Ergebnissen „kosmischer“ Laborexperimente versuchen sie die bereits vor mehr als 250 Jahren von Immanuel Kant aufgestellten Theorien „Von dem Ursprunge des planetischen Weltbaues überhaupt, und den Ursachen ihrer Bewegung“ [51] zu verfeinern und zu erweitern. Wie sind die Planeten entstanden, und wie haben sich ihre Orbits im Laufe der Zeit entwickelt? Wie haben sich zunehmend größere feste Felsbrocken als Bausubstanz für erdähnliche Gesteinsplaneten sowie die massereiche-



15 Planeten und ihre Entstehung in Akkretionsscheiben um junge Sterne: künstlerische Darstellung der Entstehung von Planetesimalen, von erd- und mit saturnähnlichen Ringen umgebenen Gasplaneten in einer protoplanetaren Scheibe (15a), von ALMA beobachteter, durch zwei Planeten beeinflusster Stauring um den Stern Fomalhaut (15b), vermutete Erscheinungsformen potenziell bewohnbarer, mehr oder weniger erdähnlicher Exoplaneten im Vergleich zu Planeten unseres Sonnensystems (15c); D. A. Hardy/ROE/ATC/NSF/NASA, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO- NASA/ESA Hubble Space Telescope, PHL/UPR Arecibo, F. S. Masset/AIM/DSM/DAPNIA/Sap CEA

ausgehende Strahlungsdruck, so dass diese mit kleinerer Winkelgeschwindigkeit ( $\Omega = \sqrt{GM/R^3 - \Sigma_{\text{rad}} / \Sigma_{\text{rad}}}$  Korrekturterm aufgrund des Strahlungsdrucks) als die im Vergleich dazu sich mit Kepler-Rotation (siehe Teil 2 der Artikelserie) bewegendes Staubpartikel umlaufen. Häufige Zusammenstöße der Staub- und Gesteilchen können so zur Abbremsung der massereicheren Staubpartikel und zu einem viel zu schnellen Abtransport in Richtung zum Zentralstern führen [53]. Wie sich aus Staubpartikeln von etwa 1 cm Größe in einem geeigneten Bereich in der Akkretionsscheibe bei weiteren Zusammenstößen durch Agglomeration pre-Planetesimale von mehr als 10 m Größe und schließlich Planetesimale von 1000 km Größe bilden können, ist zur Zeit eine der zentralen Fragestellungen bei der Erforschung der Planetenentstehung. Unter Einfluss der Gravitationskräfte gelingt danach die Zusammenballung mehrerer Planetesimale, die Ausbildung noch schwererer Planetenembryos, auch als Kerne der riesigen Gasplaneten [54].

Aufgrund der exorbitanten Größenverhältnisse kann die Ausbildung von

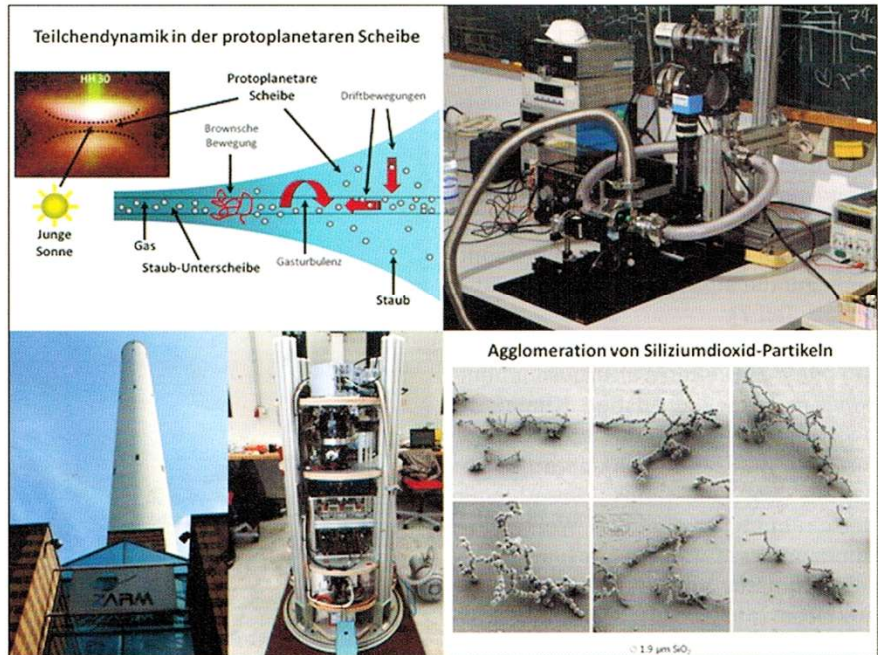
ren Kerne der Gas- und Eisplaneten in den ursprünglich nur aus Staub und Gas bestehenden Akkretionsscheiben um junge Protosterne bilden können? Welche Wechselwirkungsprozesse zwischen den bereits entstandenen Planetesimalen und den Geröllbestandteilen in der Staubscheibe oder den im Laufe der Entwicklung aneinander vorbeiziehenden Planetenembryos haben zu den als Migration bezeichneten komplexen Wanderungsprozessen der Protoplaneten in den jungen Planetensystemen geführt? Auch Planet-Planet- sowie Stern-Planet-Wechselwirkungen können für die große Vielfalt der Erscheinungsformen der exoplanetaren Systeme verantwortlich gemacht werden [52].

In den schmalen, magnetisierten protoplanetaren Scheiben mit typischen

Massen zwischen 0,01 % und 10 % der Masse ihres zentralen Protosterns wechselwirken die mm-großen Staub- und Eispartikel mit den turbulent sich bewegenden, anfangs zu ihnen im Massenverhältnis von etwa 100 zu 1 stehenden neutralen oder ionisierten geladenen Gasatomen und größeren Molekülen (Bild 16a). Abhängig von der Masse, Zusammensetzung, Dichteverteilung, Ladung und ihrer Relativgeschwindigkeit können Staubteilchen dabei nach Zusammenstößen auseinanderfallen, wie nach einem elastischen Stoß nahezu unverändert wieder auseinanderdriften oder aber aneinander haften bleiben und sich dabei vergrößern. Auf die Teilchen der rotierenden Scheibe in der gasförmigen Phase wirkt neben der Gravitations- und Zentrifugalkraft verstärkt auch der vom jungen Stern

16 Erforschung der protoplanetaren Koagulation von Staubteilchen: Darstellung dynamischer Einflussfaktoren auf Gas- und Staubpartikel in einer protoplanetaren Scheibe (16a), Laboraufbau zur Untersuchung von Stößen zwischen hochporösen Agglomeraten (16b), das Experiment MEDEA am Fallturm Bremen (16c), Ergebnisse zur Agglomeration von Siliziumdioxid-Partikeln (16d). J. Blum/TU Braunschweig (4), NASA, U. v. Kusserow

Planetesimalen im Labor natürlich experimentell nicht erforscht werden. Simulationsrechnungen ermöglichen dafür verlässlichere Erkenntnisse auf diesem Gebiet. Die Physik grundlegender Wechselwirkungsprozesse zwischen Staub- und kleineren Geröllpartikeln sowie die für die Durchführung solcher Modellrechnungen erforderlichen realistischen Parameterwerte können aber sehr wohl in Laborexperimenten untersucht werden. In einem Artikel über „Experimente zur staubigen Entstehungsgeschichte der Planeten“ [55] werden Versuchsapparaturen und Experimente beschrieben, mit Hilfe derer unter anderem die Haftwahrscheinlichkeiten und elektrostatischen Aufladungen bei Partikelstößen, die Agglomeration magnetischen Staubs sowie die Temperaturabhängigkeit poröser Agglomerate untersucht werden kann. Anhand von Laborexperimenten mit Siliziumdioxid-Partikeln (Bild 16d) kann gezeigt werden, dass das naive Bild vom kontinuierlich voranschreitenden Wachstum beim Zusammenstoß und Aneinanderhaften etwa gleichgroßer Agglomerate von circa 1 cm Durchmesser sich als nicht zutreffend erweist [56]. Ab etwa 1 m Größe werden diese teilweise hochporösen Materieverdichtungen bei Kollisionen nämlich möglicherweise wieder in kleinere Bestandteile zerlegt. Erst das Vorhandensein einzelner deutlich größerer Kieselsteine mit komplex strukturierten Oberflächen ist offensichtlich für ein schnelles Wachstum durch die Anlagerung vieler kleiner Agglomerate förderlich. In einer Dissertation über „Die Rolle der Staubkoagulation bei der Planetenentstehung“ [57] werden vor allem auch die Ergebnisse von Experimenten zum ladungsinduzierten Staubwachstum ausführlicher vorgestellt, die auf der Internationalen Raumstation ISS durchgeführt wurden. Bild 16b zeigt die Apparaturen eines im erdgebundenen Labor durchgeführten Experi-



ments, mit dem die Stöße hochporöser Agglomerate untersucht wurden. Um den Einfluss der Schwerkraft auf die Staubagglomeration zu unterbinden, können „kosmische“ Laborexperimente zur Erforschung der kritischen ersten Phasen der Planetenentstehung auch am Bremer Fallturm durchgeführt werden (Bild 16c).

### Kosmische Strahlung, Wolkenbildungsprozesse und die Entwicklung des Erdklimas

Aussagen wie „Der Weltklimarat ist sich sicher: Die Klimaerwärmung ist vom Menschen verschuldet“ beziehungsweise „Der Weltklimarat irrt ... Die Klimadebatte muss neu geführt werden ... Neueste Erkenntnisse zeigen, dass Ozeanzyklen und die Sonne, die kürzlich in eine längerfristige strahlungsarme Phase getreten ist, einen größeren Beitrag zum Klimageschehen leisten als bisher angenommen“ charakterisieren die beiden gegensätzlichen Positionen der „Treibhausfanatiker“ und der „Klimaskeptiker“, die in dem heftig diskutierten Buch mit dem Titel „Die kalte Sonne – warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet“ ausführlich erläutert werden [58]. Natürlich nimmt die Sonne als zentrale Energiequelle deutlichen Einfluss auf das Klimageschehen nicht nur auf unserem Planeten. Natürlich

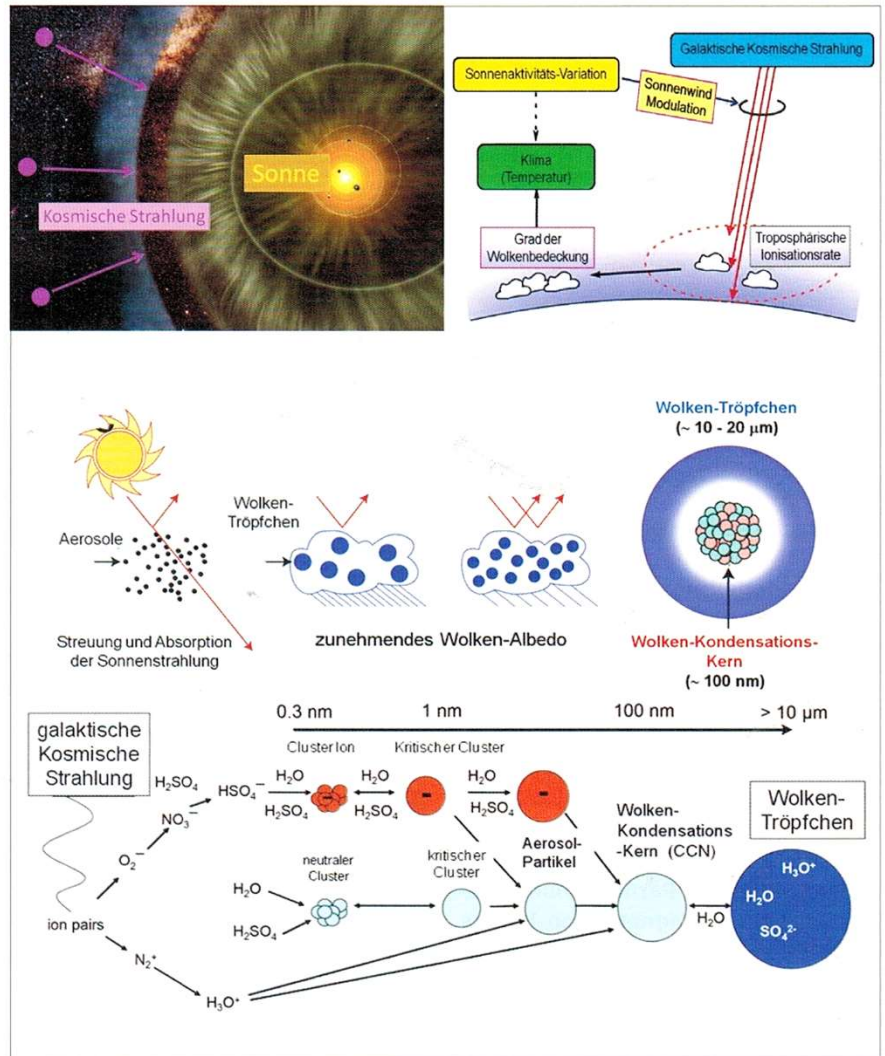
verstärken inzwischen aber auch immer mehr Menschen den anthropogenen Einfluss auf das Erdklima. Die Erhaltung der Lebensqualitäten für alle Bewohner unseres Planeten erfordert mit Sicherheit einen unverzüglichen Stopp des quantitativen Wachstums in fast allen Lebensbereichen, beispielsweise das Ausmaß der Weltbevölkerung, den Energieverbrauch oder die Ausbeutung lebenswichtiger Rohstoffe betreffend. Seit vielen Jahrzehnten ist die Menschheit für die aktuelle Aufheizung unseres Planeten zunehmend mitverantwortlich [59, Teil 8]. Es ist aber auch davon auszugehen, dass es nach der aktuellen Warmzeit in der aktuellen Eiszeitphase der Entwicklung des Erdklimas in einigen Jahrzehnten im Rahmen der Milankovitch-Zyklen ganz natürlich auch wieder eine Kaltzeit geben könnte [59, Teil 7].

Die Entwicklung des Erdklimas wird wesentlich durch die komplexe Wechselwirkung vielfältiger natürlicher und anthropogener Einflussfaktoren bestimmt. Die langjährig gemittelte extraterrestrische integrale Sonnenbestrahlungsstärke, die sogenannte Solarkonstante, bleibt zwar auch im Verlaufe der periodisch wechselnden Sonnenaktivität mit  $1367 \text{ W/m}^2$  sehr konstant. Sie kann damit nicht direkt für die in der Erdatmosphäre aktuell zu beobachtenden deutlichen Klimaveränderungen auf relativ kurzen Zeitskalen verantwortlich gemacht werden. Die deutliche Zunahme

der UV- und Röntgenstrahlung in Zeiten solarer Aktivitätsmaxima, die durch das Auftreten besonders starker magnetischer Feldstrukturen geprägt sind, nimmt jedoch klimarelevant wesentlichen Einfluss beispielsweise auf die stratosphärische Ozonschicht, die Ausbreitung der erdäquatornahen Hadley-Zellen, auf die Jet-Ströme und damit auch auf die atmosphärische Zirkulation [59, Teil 7].

Wolkenverteilungen können nicht nur das aktuelle Wettergeschehen, sondern auch langfristige Klimaentwicklungen stark beeinflussen. Klimaforscher sind heute sehr daran interessiert, das „Geheimnis“ des Ablaufs der strahlungsgesteuerten Wolkenbildungsprozesse und des Ausmaßes ihres Einflusses auf das Erdklima aufzuklären [59, Teil 5]. Der Einschuss radioaktiver Strahlung bei Nebelkammerversuchen oder die aus Flugzeugabgasen gebildeten Kondensstreifen machen deutlich, dass geladene und molekulare Kondensationskeime als zentrale Kernbausteine für die Anlagerung von Wassermolekülen für die Tröpfchen- und damit auch Wolkenbildung in der Erdatmosphäre von zentraler Bedeutung sein sollten. Könnte nicht der von Supernova-Explosionen aus dem fernen Universum ausgehende, aus unterschiedlichsten Gründen variable Einstrom geladener, besonders hochenergetischer kosmischer Teilchen solche Kondensationskeime für die Wolkenbildung zur Verfügung stellen (Bild 17a)? Würde sich dann nicht beim Durchgang unseres Sonnensystems durch einen der Spiralarme unserer Milchstraße sowohl die Intensität der von dort verstärkt ausgehenden Kosmischen Strahlung als auch die troposphärische Ionisationsrate und damit auch der Grad der Wolkenbedeckung deutlich vergrößern (Bild 17b)? Könnte dann nicht die nachgewiesene, unterschiedlich starke, ebenfalls periodisch im Rhythmus des 11-jährigen solaren Aktivitätszyklus schwankende Schutzfunktion der heliosphärischen Magnetfelder das Ausmaß der klimarelevanten Wolkenbedeckung bestimmen?

Nir Shaviv hat in seinem Artikel „Die Spiralstruktur der Milchstraße, Kosmische Strahlung und die Eiszeiten“ [60] Ergebnisse von Forschungsarbeiten zusammengetragen, die auf typischen Zeitskalen von wenigen 100 Millionen Jahren tatsächlich deutliche Hinwei-



17 Zum möglichen Einfluss von Kosmischer Strahlung und Sonnenaktivität auf das Erdklima: Begrenzung des Einstroms hochenergetischer kosmischer Teilchenstrahlung durch das in der Sonne erzeugte interplanetare Magnetfeld (17a), Darstellung des Zusammenhangs von Prozessabläufen zum möglichen, durch den magnetisierten Sonnenwind moderierten Einfluss galaktischer Kosmischer Strahlung auf die Wolkenbildung (17b), Erläuterungen zum Ablauf der Entwicklungsprozesse bei der Ausbildung von Wolken-Tröpfchen (17c); NASA/IBEX/Adler Planetarium, N. Shaviv/U. v. Kusserow, J. Kirkby/U. v. Kusserow, NASA

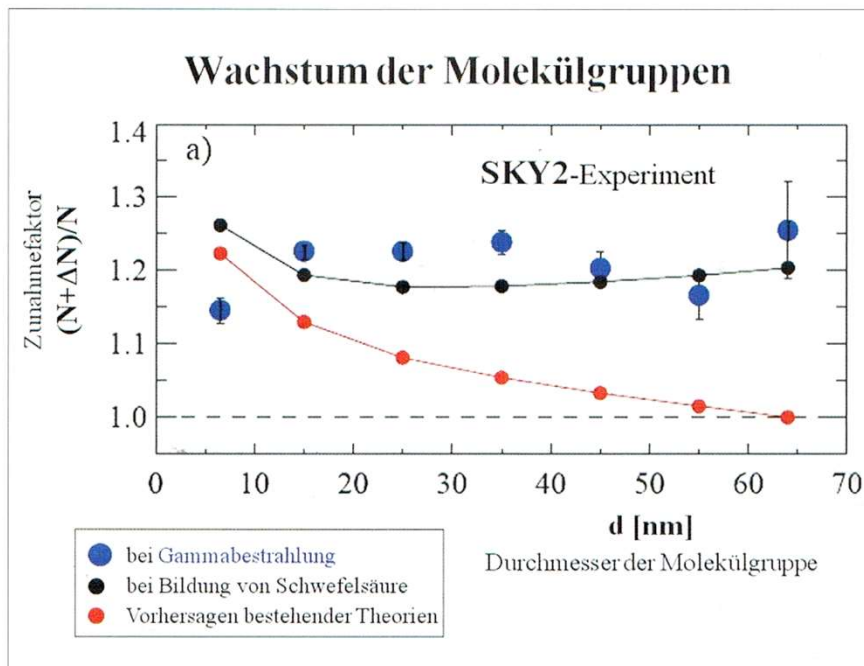
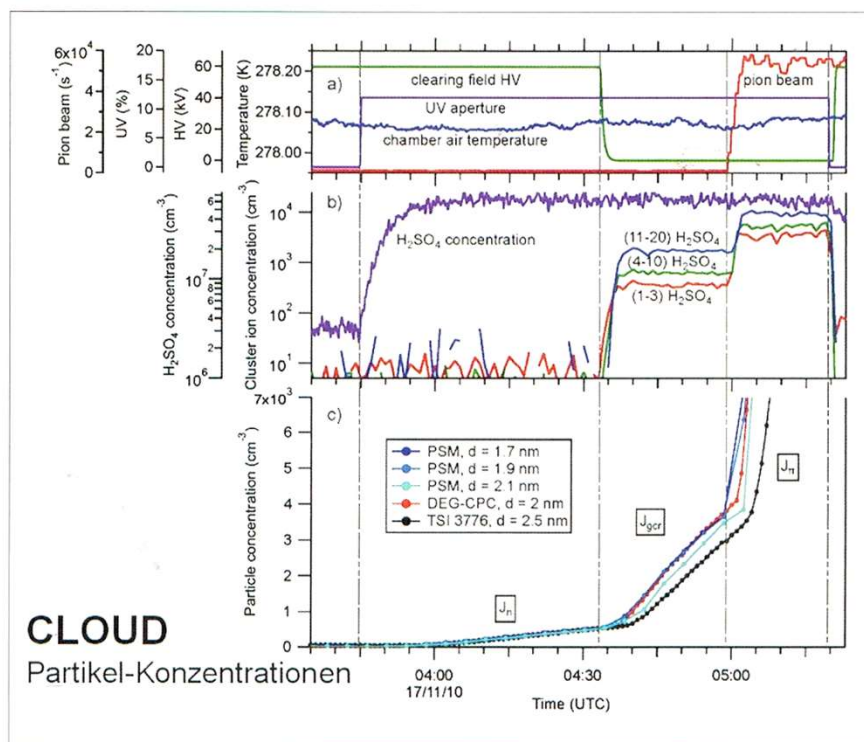
se auf die Abhängigkeit des Erdklimas von der Lage des Sonnensystems relativ zu den Spiralarmen der Milchstraße und damit auch vom Einstrom galaktischer Kosmischer Strahlung geben. Angeregt durch Arbeiten mit Eigil Friis-Christensen begann Hendrik Svensmark bereits 1997 mit der Entwicklung seiner Theorie über die „Kosmoklimatologie“ [61]. Danach steuert die Sonnenaktivität die Stärke der in die Erdatmosphäre eindringenden kosmischen Partikelstrahlung. Hochenergetische, geladene Partikel aus dem durch sie ausgelösten Teilchenschauer dringen bis in die tiefliegende Troposphäre vor. Sie dienen hier neben chemischen Substanzen als besonders

wirkungsvolle Kondensationskeime für den Ablauf der klimarelevanten Wolkenbildungsprozesse. Stark verminderte Sonnenaktivität wie in Zeiten des Maunder-Minimums (1645–1715) ermöglichte danach einen drastischen Anstieg der in die Erdatmosphäre eindringenden Kosmischen Strahlung, die im Rahmen dieser Theorie einhergehende Verstärkung der globalen troposphärischen Wolkenbildung und damit auch die im Verlaufe der Kleinen Eiszeit vor allem in Mitteleuropa beobachtete globalere starke Abkühlung über längere Zeiträume [59, Teil 5].

In den vergangenen Jahren wurde eine Fülle atmosphärischer Beobachtungsdaten zur Überprüfung der Aus-

sagen der Theorie zur „Kosmoklimatologie“ gesammelt und ausgewertet. Die Ergebnisse waren widersprüchlich, was die Diskussion über die Relevanz des Einflusses kosmischer Strahlung und der magnetisch vermittelten Sonnenaktivität auf das Erdklima weiter anheizte. Der bekannte theoretische Sonnenphysiker *Eugene N. Parker*, der unter anderem die Theorie des überschallschnellen Sonnenwindes entwickelte und nach dem die Parkerspirale, die Strukturform des heliosphärischen Magnetfeldes benannt wurde, ist ein engagierter Befürworter der weiteren Erforschung dieser Theorie auch unter kontrollierten Laborbedingungen. SKY ist der Name eines Laborexperimentes (**Bild 18c**), das *Hendrik Svensmark* schon seit über einem Jahrzehnt am Nationalen Dänischen Raumfahrtinstitut in Kopenhagen betreibt ([http://www.space.dtu.dk/english/Research/Research\\_divisions/Solar\\_System\\_Physics/Sun\\_Climate/Experiments\\_SC/SKY](http://www.space.dtu.dk/english/Research/Research_divisions/Solar_System_Physics/Sun_Climate/Experiments_SC/SKY)). Erst nach langen Bemühungen gelang es *Jasper Kirgby* 2006, auch das internationale CLOUD-Experiment (Cosmic Leaving Outdoor Droplets) am Kernforschungszentrum CERN zu starten (<http://home.web.cern.ch/about/experiments/cloud>). Beide Experimente erforschen, wie Aerosole als Kondensationskeime von Wassertröpfchen unter kontrollierten Laborbedingungen durch Zusatz atmosphärischer Moleküle bei UV- und Gammastrahlung beziehungsweise Pionenbestrahlung wachsen.

In seinem Artikel über die „Rolle der Schwefelsäure, von Ammoniak und der galaktischen Kosmischen Strahlung in der atmosphärischen Aerosol-Kernbildung“ [62] berichtete *Jasper Kirgby* 2011 über den beobachteten Anstieg der Partikelkonzentration bei Zufuhr von Schwefelsäure, wesentlich verstärkt noch durch Einstrahlung von Pionen aus einem benachbarten CERN-Beschleuniger (**Bild 18a**). Im vergangenen Jahr wurden neuere Ergebnisse vorgestellt, die dafür sprechen, dass insbesondere Dimethylamine das Wachstum von Kondensationskeimen wesentlich fördern, dass galaktische Kosmische Strahlung insbesondere bei höherer Teilchenkonzentration keinen großen Einfluss nimmt [63]. Nach Aussagen der CERN-Wissenschaftler sind die atmosphärischen Kernbildungsprozesse noch lange nicht verstanden, weitere CLOUD-Experimente werden deshalb



**18** Laborexperimente zum Einfluss der Kosmischen Strahlung auf das Erdklima: CLOUD-Experiment beim CERN, Anstieg der Teilchenkonzentrationen bei Einstrahlung von Pionen (**18a**), Wachstum der Molekülgruppen bei Gammabestrahlung im SKY2-Experiment (**18b**)

durchgeführt [64]. Neuere Ergebnisse vom SKY2-Experiment lassen vermuten, dass die ionisierende Wirkung von Gammastrahlen wesentlich zur Ausbildung von Schwefelsäuremolekülen beiträgt (**Bild 18b**), deren Existenz für Wolkenbildungsprozesse offensichtlich von großer Bedeutung ist [65]. Solche un-

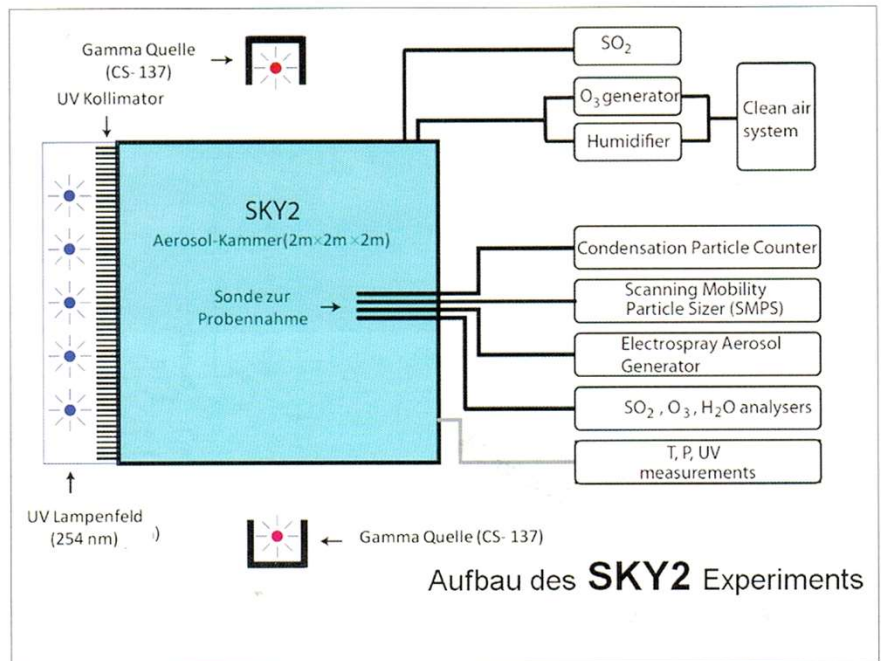
vorhergesehenen experimentellen Ergebnisse erfordern unter Umständen Korrekturen aktuell anerkannter theoretischer Modelle. Die Durchführung von Laborexperimenten ermöglicht offensichtlich tiefere Erkenntnisse über wichtige „kosmische“ Klimaeinflussfaktoren [66].

## Laborexperimente zur astrophysikalischen Erkenntnisgewinnung

„Es ist wissenschaftlich nicht korrekt, Aussagen zu machen oder Theorien zu bilden, für die es keinen experimentellen Nachweis gibt“ und „Es ist nicht von Bedeutung, wie schön eine Theorie ist ... Wenn sie nicht mit dem Experiment vereinbar ist, dann ist sie falsch“ sind klare Aussagen von *Michael Faraday* beziehungsweise *Richard Feynman* zur Bedeutung der Experimente im physikalischen Erkenntnisgewinnungsprozess. Aber natürlich hat andererseits auch *Albert Einstein* recht, wenn er sagt „Eine Theorie kann durch ein Experiment geprüft werden, aber kein Weg führt vom Experiment [direkt] zur Geburt einer Theorie“.

In der astrophysikalischen Forschung entstehen wertvolle Theorien in der Regel dadurch, dass nach der Beobachtung eines überraschenden Phänomens umfangreiches, für dessen Einordnung und tieferes Verstehen relevant erscheinendes Datenmaterial gesammelt wird, dass danach unter Zuhilfenahme bekannter physikalischer Gesetze Modelle zur Interpretation dieses Phänomens entwickelt werden. Die Überprüfung der im Rahmen solcher Modelle aufgestellten, plausibel erscheinenden Hypothesen erfolgte danach bisher häufig allein mit Hilfe numerischer Simulationen und dem anschließenden Vergleich der dabei erzielten Ergebnisse mit den möglichst präzisen Beobachtungsdaten. In dieser Artikelserie sollte gezeigt werden, dass heute ergänzend dazu Theoretiker und Experimentalphysiker im astrophysikalischen Forschungsbereich verstärkt zusammenarbeiten, um die aufgestellten Hypothesen zu Theorien über Vorgänge im so entfernten Universum gemeinsam und vergleichend anhand von sowohl numerischen Experimenten am Computer als auch mit Hilfe von „kosmischen“ Experimenten im Labor deutlich verlässlicher zu überprüfen.

Das Ausmaß der Forschungsarbeiten und die Dimensionierung der Large Hadron Collider-Experimente am Kernforschungszentrum CERN, mit dem die Wissenschaftler unter anderem auch Vorgänge im Zusammenhang mit den Theorien zum Urknall untersuchen möchten, macht exemplarisch überdeutlich, wie sehr sich heutige physikalische Experimente von denen der vergangenen Jahrhunderte unterscheiden.



18c Schematischer Aufbau des SKY2 Experiments in Kopenhagen (18c); CLOUD/CERN, J. Kirkby u.a./CLOUD/CERN, H. Svensmark u. a. (2)

den. In riesigen Experimenten, an denen häufig sehr viele Wissenschaftler arbeiten, wird eine teilweise unüberschaubare Datenmenge erzeugt, ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nicht unbedingt immer gewährleistet. Hat *Ernest Rutherford* recht gehabt, wenn er kritisch anmerkt „Wenn dein Experiment Statistik benötigt, dann solltest du lieber ein besseres Experiment durchführen“? Oder müssen wir uns eingestehen, dass die klassischen Prinzipien des Experimentierens in der Physik heute nicht mehr aktuell sein können?

Astronomische und astrophysikalische Inhalte umfassen sehr viele motivierende Elemente, die gewinnbringend in den unterschiedlichsten Unterrichts- und Bildungszusammenhängen an Schulen und Universitäten eingesetzt werden können. Die klassische Didaktik der Physik geht allerdings auch von der großen Bedeutung und einem notwendig und wertvoll erscheinenden, möglichst häufigen und vielfältigen Einsatz von Experimenten im Erkenntnisgewinnungsprozess für die Lernenden aus. Leider bieten astronomische Themenbereiche in diesem Zusammenhang in der Regel aber wenig Ansatzpunkte etwa zur experimentellen Überprüfung von Hypothesen, die von den zu Unterrichtenden zur Beantwortung zentraler Fragestellungen aufgestellt werden. Vielleicht ist es

für den astronomisch orientierten Unterricht förderlich, wenn Lehrende zur Motivation auch einmal den Aufbau und die Ergebnisse eines dafür geeigneten kosmischen Laborexperiments im Unterricht vorstellen. Die Lernenden sollten erkennen, welche große Bedeutung Experimente auch heute noch im Rahmen des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnungsprozesses haben.

### Literatur

- [47] Eidemüller, D.: Weiterer Schritt auf dem Weg zur Fusion, pro-physik.de, Februar 2014; [http://www.pro-physik.de/details/news/5839171/Weiterer\\_Schritt\\_auf\\_dem\\_Weg\\_zur\\_Fusion.html](http://www.pro-physik.de/details/news/5839171/Weiterer_Schritt_auf_dem_Weg_zur_Fusion.html)
- [48] Rose, S. J.: Viewpoint: Encouraging Signs on the Path to Fusion, APS Physics 7, 13, 2014; <http://physics.aps.org/articles/v7/13>
- [49] Singer, N.: Fusion instabilities lessened by unexpected effect, Sandia Labs News Releases, Januar 2014; [https://share.sandia.gov/news/resources/news\\_releases/fusion\\_instabilities/#\\_UwG\\_z\\_15N8E](https://share.sandia.gov/news/resources/news_releases/fusion_instabilities/#_UwG_z_15N8E)
- [50] v. Kusserow, U.: Über die Entstehung junger Sterne und Planeten (3). Planetesimale, Protoplaneten und die Planet-Scheiben Wechselwirkung, Nachrichten 245 der Olbers-Gesellschaft e. V. Bremen, 2014; <http://uvkusserow.magix.net/website#Artikel>
- [51] Kant, I.: Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels, Kindler Verlag GmbH München, 1971
- [52] Baruteau, C., Planet-Disc interactions and Early Evolution of Planetary Systems, 2013; <http://arxiv.org/pdf/1312.4293v1.pdf>; [http://www.mpia-hd.mpg.de/homes/ppvi/talks/baruteau\\_crida.pdf](http://www.mpia-hd.mpg.de/homes/ppvi/talks/baruteau_crida.pdf)
- [53] Testi, L. u. a.: Dust Evolution in Protoplanetary Disks, 2014; <http://arxiv.org/pdf/1402.1354v1.pdf>
- [54] Johansen, A. u. a.: The Multifaceted Planetesimal Formation Process, 2014; <http://arxiv.org/pdf/1402.1344v1.pdf>
- [55] Poppe, T.: Experimente zur staubigen Entstehungsgeschichte der Planeten, ASTRONOMIE + RAUMFAHRT im Unterricht 41 (2004), S. 4–8

[56] Kelling, T. u.a.: Experimental Study on Bouncing Barriers in Protoplanetary Discs, 2014; <http://arxiv.org/pdf/1401.4280v1.pdf>  
[57] Mokler, F. F. C.: Die Rolle der Staubkoagulation bei der Planetenentstehung – Coulomb-dipolinduzierte Gellierung im besonderen, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2007; [http://www.mpia-hd.mpg.de/homes/ppvi/talks/baruteau\\_crida.pdf](http://www.mpia-hd.mpg.de/homes/ppvi/talks/baruteau_crida.pdf)  
[58] Vahrenholt, F., Lüning, S.: Die kalte Sonne – warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet, Hoffmann und Campe Verlag Hamburg, 2012; <http://www.kaltesonne.de/>  
[59] v. Kusserow, U.: Die Sonne, das Erdklima und das Leben auf unserem Planeten, Nachrichten der Olbers-Gesellschaft e. V. Bremen, 2010 u. 2012; <http://uvkusserow.magix.net/website#Artikel>

[60] Shaviv, N. J.: The spiral structure of the Milky Way, cosmic rays, and ice age epochs on Earth, *New Astronomy* 8, 2003; <http://www.phys.huji.ac.il/~shaviv/articles/long-ice.pdf>  
[61] Svensmark, H.: *Cosmoclimatology: a new theory emerges*, A&G Oxford University Press, 2007; <http://astrogeo.oxfordjournals.org/content/48/1/1.18.full.pdf+html>  
[62] Kirkby, J. u. a.: Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation, *nature* 476, 2011; [http://www.mi.infn.it/~alimonti/press/docs/CLOUD\\_Nature.pdf](http://www.mi.infn.it/~alimonti/press/docs/CLOUD_Nature.pdf)  
[63] Almeida, J. u. a.: Molecular understanding of sulphuric acid–amine particle nucleation in the atmosphere, *Nature* 502, 2013; <http://www.nature.com/nature/journal/v502/n7471/full/nature12663.html>  
[64] Curtius, J. u. a.: Status and plans of the CLOUD experiment, Meeting of the SPSC CERN,

2013; <http://indico.cern.ch/event/244806/material/slides/1?contribId=1>

[65] Svensmark, H. u. a.: Response of Cloud Condensation Nuclei (> 50 nm) to changes in ion-nucleation, Center for Sun-Climate Research Copenhagen, 2012; [http://arxiv.org/pdf/1202.5156pdf?origin=publication\\_detail](http://arxiv.org/pdf/1202.5156pdf?origin=publication_detail)

[66] v. Kusserow, U.: SKY und CLOUD, Kosmische Strahlung und der solare Aktivitätszyklus, Wolkenbildung und das Erdklima, 2013; <http://kosmischemagnetfelder.wordpress.com/>

**Ulrich v. Kusserow**

Besselstr. 32–34

28203 Bremen

E-Mail: [uvkusserow@t-online.de](mailto:uvkusserow@t-online.de)