

# Kosmische Laborexperimente (1)

von Ulrich v. Kusserow

*Neue astrophysikalische Erkenntnisse werden in der Regel durch Beobachtung der Strukturen und Entwicklungen astronomischer Phänomene, durch Auswertung der mit hochauflösenden Teleskopen, Instrumenten und Bildbearbeitungstechniken oder vor Ort von Satelliten aus gewonnenen Daten im Rahmen zugrundeliegender Theorien mit Hilfe aufwendiger Modellrechnungen gewonnen. Während bisher auf schnellen Computern durchgeführte numerische Experimente dabei wesentliche Ergebnisse erbrachten, werden heute häufiger auch analoge Laborexperimente erfolgreich zur Erklärung kosmischer Erscheinungen und Prozessabläufe durchgeführt.*

„Das kosmische Magnetfeld am Ende eines Lasers“, „Ein Stern in einer Zentrifuge“, „Die Geburt von Planeten in einem Wassertank“, „Eine Supernova in einem Trichter“, „Ein Neutronenstern in einer Lithiumwolke“ und „Ein Schwarzes Loch in einer Glasfaseroptik“ sind Überschriften in dem aktuellen Artikel „On Sait Recréer L’Univers!“ im französischen Journal „Science & Vie“ [1]. In diesem Beitrag werden teilweise spektakuläre, unter Einsatz hochentwickelter Technologien im Labor durchgeführte astrophysikalische Experimente vorgestellt, mit Hilfe derer und anhand von Analogbetrachtungen teilweise ungelöste Rätsel des Universums entschlüsselt werden können. „Man versteht nicht wirklich, was man modelliert“, „Erst das Experiment besitzt die Fähigkeit, jedermann zufrieden zu stellen“ und „Der experimentelle Nachweis, obwohl nur analog, ist der Modellierung überlegen“ sind die Aussagen von Wissenschaftlern, die heute kosmische Laborexperimente durchführen. „Die Astronomie studieren bedeutet heute Physik machen ...“. Wie entstehen die unterschiedlichen Sterne, Planeten und Galaxien, die magnetischen Felder in ihnen? Welche hochenergetischen Prozesse laufen bei eruptiven Prozessen, bei solaren Eruptionen, Jet-

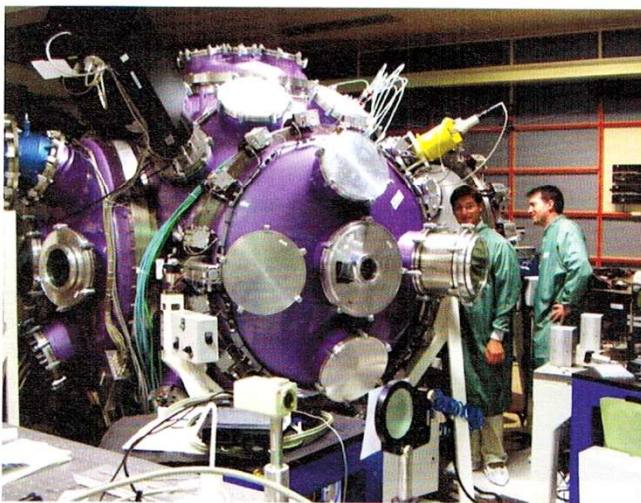
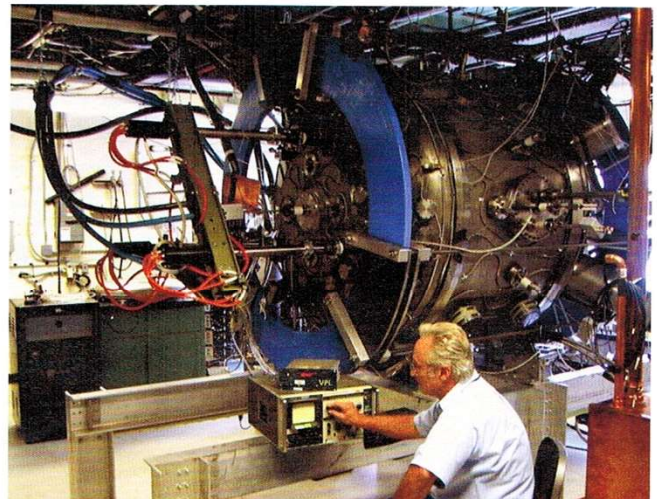
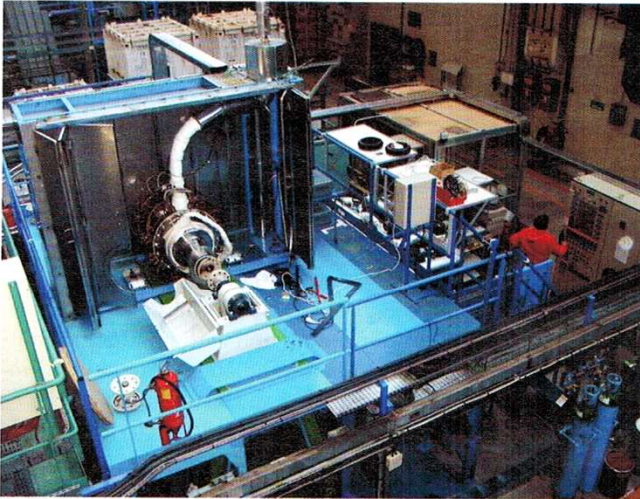
auswürfen oder Supernova-Explosionen ab? Und welche Rolle spielen magnetische Prozessabläufe bei der Beschleunigung kosmischer Partikel? Das sind die typischen Fragen, die sich nicht nur die Astrophysiker stellen, die auch in der Öffentlichkeit diskutiert werden, auf die auch Schüler und Studenten Antworten bekommen möchten. Diese mit faszinierenden Vorgängen im Universum verbundenen Problemkreise wurden bisher im Wesentlichen anhand von Beobachtungen, mit Hilfe umfangreichen Datenmaterials, mit Hilfe von Theorien, Modellvorstellungen, analytischen sowie numerischen Simulationsrechnungen analysiert. Die experimentelle Astronomie stellt heute „vor Ort“ im Labor auf der Erde eine ergänzende, ergiebige Methode für die Gewinnung tieferen Verständnisses unterschiedlicher kosmischer Strukturen und deren Entwicklungen zur Verfügung. (Bild 1a–d)

## Astrophysikalische Experimente

Als „Frage an die“ oder sogar als „Verhör der Natur“ haben *Immanuel Kant* (1724–1804) beziehungsweise *C. F. von Weizsäcker* (1912–2007) den Begriff des Experiments charakterisiert. Wissenschaftliche Versuche werden zur

Überprüfung von Hypothese durchgeführt, wodurch Antworten auf möglichst konkret formulierte Fragestellungen ursprünglich zur Deutung von in der Natur tatsächlich beobachtbaren Phänomenen gegeben werden sollten. Heute dienen Experimente unter anderem häufig auch der Optimierung technischer Einrichtungen. Im Bereich der Grundlagen-, neuerdings verstärkt auch in der astrophysikalischen Forschung ermöglichen sie die Überprüfung nicht direkt beobachtbarer, aber vermuteter Zusammenhänge im Rahmen hochentwickelter Theorien. Experimente sollten grundsätzlich gezielt und kontrolliert durchgeführt werden. Eine ausreichende Glaubwürdigkeit der erzielten Ergebnisse erfordert dabei die Gewährleistung der Reproduzierbarkeit sowie eine möglichst hohe Messgenauigkeit des wissenschaftlichen Experiments.

*Johannes Kepler* (1571–1630) und *Galileo Galilei* (1564–1642) gehörten zu den Begründern der modernen Naturwissenschaften. Sie machten die Optik zum Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen, entdeckten die Gültigkeit der Planetengesetze im Rahmen des heliozentrischen Weltbildes. 1600 veröffentlichte *William Gilbert* (1564–1603) mit dem Titel „Über den Magneten, magnetische Körper und den großen Magneten Erde“ ein erstes wissenschaftliches, im Wesentlichen auf Experimente gegründetes Buch über den Magnetismus. Anhand von kritisch geprüften Literaturzitatzen und Ergebnissen auch von ihm selbst durchgeführter Versuche entwickelte er ein bemerkenswertes naturwissenschaftliches Werk im Rahmen erster physikalischer Modellvorstellungen. Untersuchungen anhand der „Terella“, einer aus Magnetstein geformten Kugel als realem kleinen Modellabbild der Erde, verschafften ihm Aussagen über die grundsätzliche Existenz und die tat-



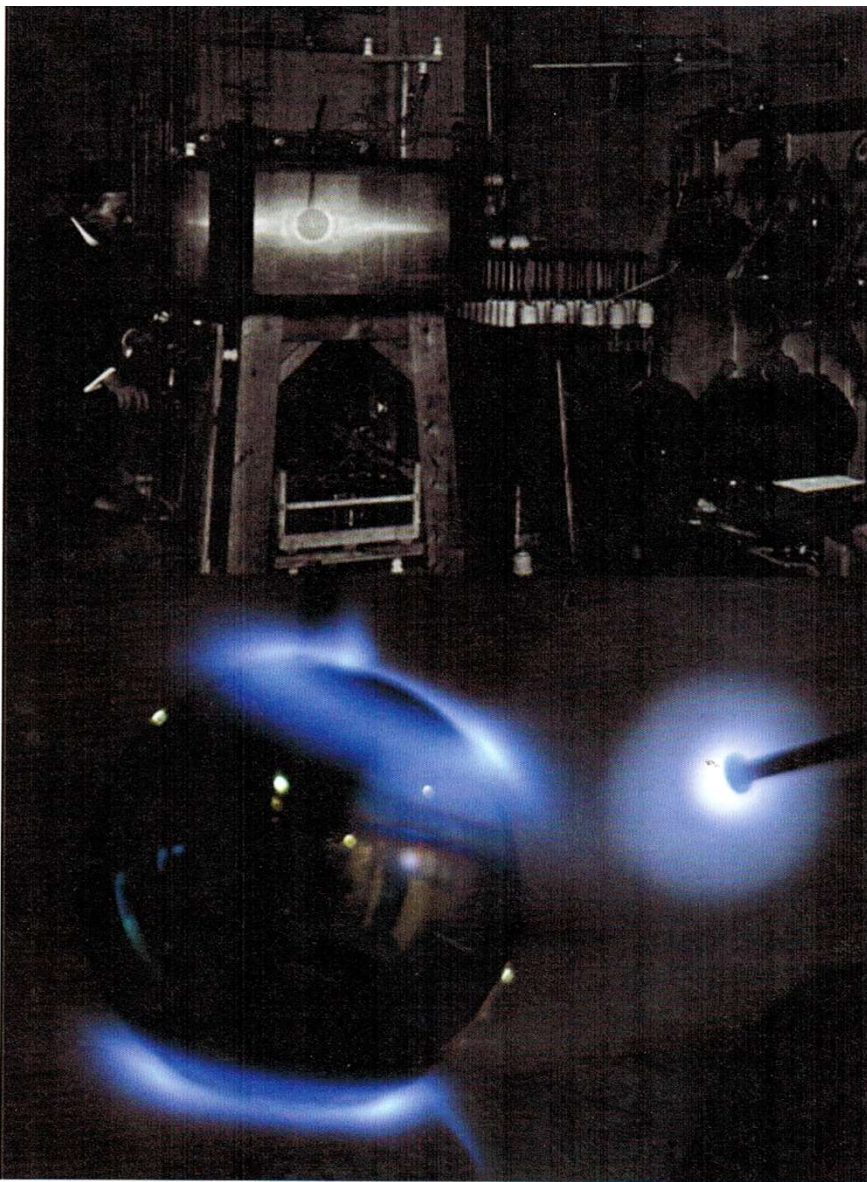
1a–d Astrophysikalische Laborexperimente zur Erforschung von Ursprung und Einfluss kosmischer Magnetfelder: das VKS-Dynamoexperiment (Bild 1a, links oben), das MRX-Experiment zur Erforschung der magnetischen Rekonnexion (Bild 1b, rechts oben), das LULI 2000-Experiment zum Nachweis der Wirkung der Biermann-Batterie (Bild 1c, links unten), das PROMISE-Experiment zur Erforschung der magnetischen Rotations-Instabilität (MRI) (Bild 1d, rechts unten); von Karman Sodium Kollaboration (CEA-ENS Lyon-ENS Paris-CNRS); Princeton Plasma Laboratory (PPPL); Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses (LULI)/CEA; U. v. Kusserow/HZDR.

sächlichen Eigenschaften des Erdmagnetfeldes. Während *Gilbert* noch an die Verursachung der Planetenbewegungen allein durch magnetische Kräfte glaubte, war es Jahrzehnte später schließlich *Isaac Newton* (1642–1726), der dafür die Gravitationskraft verantwortlich machte. Er entwickelte das Gravitationsgesetz, die Grundlage der klassischen Mechanik, und war einer der Begründer der Infinitesimalrechnung, durch die die Mathematik heute zu einem der wichtigen Grundpfeiler im wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnungsprozess geworden ist.

Farbenprächtige und dynamisch sich verändernde Polarlichterscheinungen haben die Menschen schon immer fasziniert, aber auch verängstigt. Allzu gerne wollte man verstehen, wodurch dieses großartige Naturphänomen in

seiner vielfältigen Form hervorgerufen wird. Man spekulierte über die Aktivitäten von Göttern und Geistern. Die Hypothese, dass dafür die Reflexion von Sonnenlicht an Eiskristallen oder Wolken verantwortlich sein könnte, wurde schon im 18. Jahrhundert experimentell untersucht, musste aber verworfen werden. Nachdem dann 1859 *Richard Carrington* (1826–1875) den Zusammenhang von Gasausbrüchen auf der Sonne sowie erdmagnetischen Stürmen durch Beobachtung eines solaren Flares beziehungsweise durch die Auswertung erdmagnetischer Daten festgestellt hatte, nachdem *Anders Jonas Ångström* (1814–1874) 1867 zeigen konnte, dass es sich bei den Polarlichtern um selbstleuchtendes Gas handelt, stellte *Kristian Birkeland* (1867–1917) im Jahre 1896 schließlich eine Theorie auf,

wonach von der Sonne ausgestoßene geladene Teilchen wie die Kathodenstrahlen in einer Entladungsröhre in Laborversuchen auch die höhere Atmosphäre der Erde zum Leuchten anregen können. In den folgenden Jahren führte *Birkeland* umfangreiche Versuchsreihen durch, in denen er typische Erscheinungsformen der ionosphärischen Polarlichter tatsächlich reproduzieren konnte. Systematisch versuchte er in seinem „ersten analogen kosmischen Laborexperiment“ physikalische Prozesse im heliosphärischen Plasma tiefer zu verstehen (Bild 2) [2]. Wie vor mehr als 100 Jahren repräsentiert in überall auf der Welt durchgeführten Demonstrationsexperimenten auch heute noch *Gilberts* Terella-Kugel die Erde und ihre Magnetosphäre, können durch Teilchenbeschuss entstandene, ovale polar-



2 Das Terella-Experiment zur Entstehung der Polarlichter von *Birkeland* (oben) und im Labor der Universität Paris-Sud, Orsay (unten); *Kristian Birkeland; Université Paris-Sud (Orsay)*

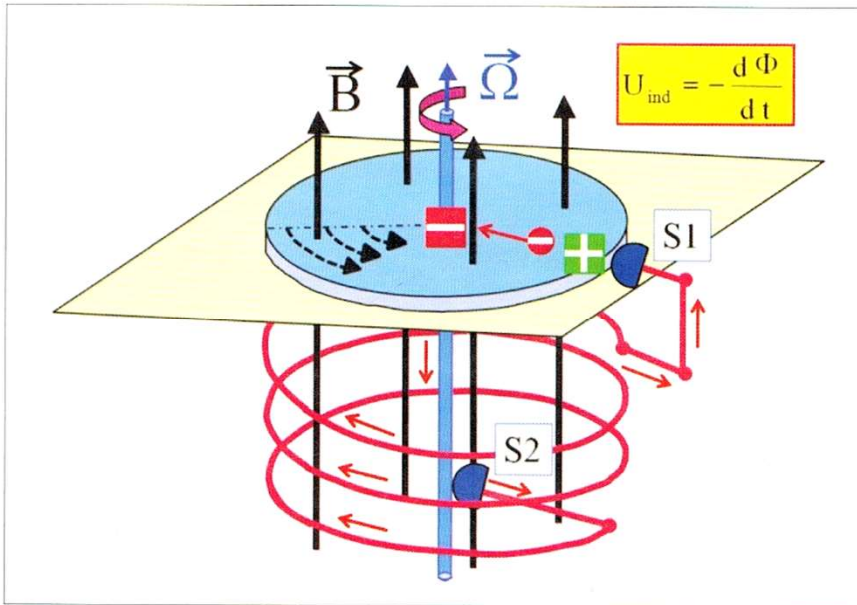
lichtähnliche Leuchterscheinungen in der mit Gas gefüllten Vakuumkammer nahe der Magnetfeldpole beobachtet, bestaunt und studiert werden [3].

Experimente im Rahmen der Ausbildung von Schülern und Studenten haben eine andere Aufgabe als echte wissenschaftliche Experimente. Die Lernenden setzen ihre („Demonstrations“-) Versuche im Wesentlichen zur Verwirklichung pädagogisch-didaktischer sowie wissenschaftstheoretischer oder anwendungsorientierter Konzepte nur zur Überprüfung längst erwiesener Zusammenhänge ein. Bei komplizierten, beispielsweise im Bereich der Grundlagenforschung durchgeführten wissenschaftlichen Experimenten sind die Ergebnisse möglicherweise nicht genau vorhersehbar. Es sollen vage Vermutungen verifiziert, Details und Hintergründe neu beobachtbarer Phänomene analysiert werden [4].

Laborexperimente wurden im Bereich der Astrophysik bisher aus guten Gründen in der Vergangenheit recht selten durchgeführt. Die Erforschung faszinierender kosmischer Phänomene, der Strukturen und Entwicklungen weit entfernter Planetensysteme, Gaswolken, Sterne und Galaxien gelang im wesentlichen durch Fernbeobachtung und Datengewinnung mit Hilfe hochauflösender Teleskope sowie anhand von Modellrechnungen. Nur mit Experimenten auf den in der erdnahen Heliosphäre fliegenden Satelliten können experimentelle Daten durch „in situ“-Messungen vor Ort gewonnen werden. Auf leistungsfähigen Computern durchgeführte, sogenannte „numerische Experimente“ ermöglichten den Astrophysikern bisher schon tiefere Erkenntnisse über den Ablauf komplexer Prozesse im fernen und frühen Universum. In den von ihnen durchgeführten Modellrech-

nungen werden Randbedingungen und vermutete physikalische Einflussfaktoren in Simulationsrechnungen so lange variiert, bis die erhaltenen Ergebnisse recht gut mit den Beobachtungsergebnissen übereinstimmen. Kosmische Prozessabläufe in physikalischer, teilweise auch nur in mathematischer Hinsicht widerspiegelnde analoge Laborexperimente ermöglichen heute den Wissenschaftlern die Gewinnung notwendiger, ergänzender und vertiefter Erkenntnisse über grundlegende komplexe Prozesse im fernen Universum.

Im Weltall befindet sich die Materie zu 99% im Plasmazustand, die Atome und Moleküle sind fast überall ionisiert. Magnetische Prozesse spielen im turbulent strömenden kosmischen Medium neben der Gravitation verbreitet eine zentrale Rolle. Zusammen mit den nur in Grenzbereichen innerhalb von Stromschichten induzierten starken elektrischen Feldern bestimmen sie die besonders dynamischen Prozessabläufe im Universum. Gegenüber den auf Großrechnern erfolgreich durchgeführten numerischen Experimenten zur Plasma-Astrophysik haben Laborexperimente einige Vorteile. Nichtlineare Vorgänge, insbesondere im Zusammenhang mit den komplexen, theoretisch noch immer nicht vollständig verstandenen Turbulenzphänomenen können durch analoge Experimente sehr viel realistischer nachgebildet werden. Die im Kosmos anzutreffenden extremen Parameterbereiche physikalischer Messgrößen werden auch in Zukunft wegen begrenzter Computerleistungen in numerischen Rechnungen nicht zufriedenstellend darstellbar sein. Durch Computer-Codes künstlich erzeugte Materialeigenschaften beeinträchtigen unter Umständen die Verlässlichkeit der Ergebnisse von Simulationsrechnungen. Und mit unterschiedlichen Computerprogrammen durchgeführte Modellrechnungen können zu gravierend voneinander abweichenden Resultaten führen. Demgegenüber ist die Reproduzierbarkeit in Laborexperimenten zum Teil eher gewährleistet. Spezielle Aspekte lassen sich hierbei oft auch höher aufgelöst darstellen, detaillierter und unter besser kontrollierbaren Randbedingungen erforschen. Es stellt sich bei solchen „Bonsai“-Experimenten allerdings auch immer wieder die Frage, wie sachdienlich deren Ergebnisse tatsächlich auf die Verhältnisse im Uni-



**3** Modellbild eines Scheibendynamos: die durch zeitliche Änderung des magnetischen Flusses  $\Phi$  in der mit der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  rotierenden, elektrisch leitfähigen Scheibe induzierte Spannung  $U_{\text{ind}}$  bewirkt das Fließen eines elektrischen Stroms in dem spulenförmig aufgewickelten Leiter und dadurch eine Verstärkung und Regenerierung eines anfänglichen Saatfeldes in einem selbsterregten Dynamoprozess; U. v. Kusserow.

versum übertragen werden können. Es sind schwierige Skalierungsprobleme zu lösen. Wie verlässlich lassen sich die im Labor realisierbaren Abmessungen und Materialeigenschaften der Materie maßstabsgetreu auf die realen Verhältnisse im Universum abbilden?

In diesem Artikel sollen aktuelle kosmische Laborexperimente vorgestellt werden, die, unterstützt von numerischen Simulationen, die Existenzen grundlegender, im Rahmen anerkannter theoretischer Überlegungen unterstellter wichtiger Prozessabläufe im Plasma-Universum nachweisen und mit verlässlichen Daten untermauern. Schwache magnetische Saatfelder konnten danach im frühen Universum erstmals durch die Wirkung einer sogenannten „Biermann-Batterie“ erzeugt werden. Das Erdmagnetfeld lässt sich in Dynamoprozessen regenerieren. Und die für den Transport des Drehimpulses und die verstärkte Ausbildung von Turbulenzen verantwortlich gemachte „Magne-to-Rotations-Instabilität“ ist tatsächlich wirksam. Sie ermöglicht die Materieverdichtung im Zentrum und innerhalb von Akkretionsscheiben, somit die Bildung von Sternen und Planeten. Experimentelle in Labor können den Auswurf solarer Eruptionen, die Bündelung und Beschleunigung kosmischer Jets unter magnetischem Einfluss nachbilden. Unter anderem mit Hilfe von Lasern lassen

sich Vorgänge in den Stoßfronten von Supernova-Explosionen, der Auswurf hochenergetischer kosmischer Strahlung simulieren. Selbst in Forschungsreaktoren, mit Hilfe derer wesentliche Grundlagen für die zukünftig geplante Energieerzeugung durch Kernfusion untersucht werden, erforscht man heute nicht nur aus technischen und Sicherheitsgründen die im Universum wirksamen Dynamoprozesse zur Erzeugung von Magnetfeldern, die Umwandlung und Freisetzung magnetischer Energien durch „magnetische Rekonnexion“ sowie die Aufheizung und Beschleunigung der kosmischen Materie [5].

### Der Scheibendynamo und die Erzeugung kosmischer Magnetfelder

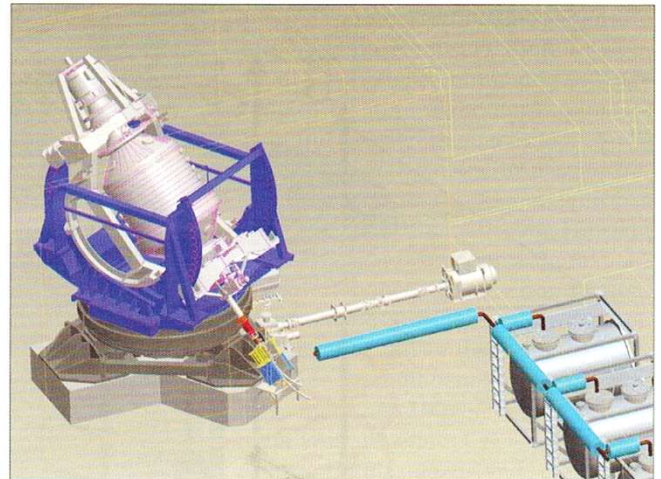
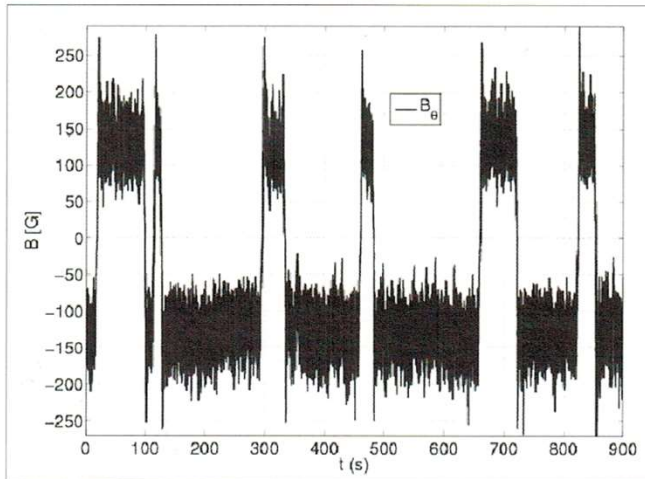
**Bild 3** veranschaulicht die mögliche Wirkungsweise eines selbsterregten Dynamos zur Erzeugung kosmischer Magnetfelder anhand des Modellbildes eines dem historischen Unipolar-Generator von *Michael Faraday* (1791–1867) aus dem Jahre 1831 nachempfundenen sogenannten Scheibendynamos. In einem solchen Gerät rotiert eine elektrisch leitfähige metallische Scheibe mit der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  in einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte  $\vec{B}$ . Ein spulenförmig in geeigneter Richtung das Magnetfeld umschließendes

raumfestes Leiterkabel verbindet dabei den Scheibenrand über zwei Schleifkontakte S1 und S2 mit der Rotationsachse des Generators. In Rotationsrichtung mit der Scheibe bewegte Elektronen erfahren als freie Ladungsträger Lorentzkräfte im Magnetfeld und strömen zur Rotationsachse. Über die beiden Schleifkontakte durchlaufen die Elektronen den aufgewickelten elektrischen Leiter in Pfeilrichtung so, dass das dadurch erzeugte Magnetfeld ein ursprüngliches magnetisches Saatfeld in einem Rückkopplungsprozess zunehmend bis zu einem Sättigungswert verstärken kann.

Die praktische Realisierung eines solchen Scheibendynamo-Modells in einem realen Laborexperiment stößt auf große Schwierigkeiten und ist bisher nicht gelungen. Neben der notwendigen extremen Größe und Umlaufgeschwindigkeit der Scheibe sind die an den beiden Schleifkontakten auftretenden hohen elektrischen Widerstände  $R$  das Hauptproblem. Es gibt Überlegungen zur Realisierung eines Experiments, bei dem diese Kontakte durch Rotation der Scheibe in einer metallischen Flüssigkeit wesentlich verbessert werden könnten [6].

„Viel Wirbel im Natrium“ [8] ist die Überschrift eines Artikels, in dem das französische VKS (Von Kármán Sodium)-Dynamoexperiment vorgestellt wird, in dem turbulente Strömungen im flüssigen, elektrisch sehr gut leitfähigen Natrium Magnetfelder erzeugen (Bild 1a). Zwei mit Turbinenschaufeln versehene, seitlich installierte, gegenläufig und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten rotierende Scheiben erzeugen in einem 40 cm großen Zylinder eine nach dem bekannten Physiker und Luftfahrttechniker *Theodore von Kármán* benannte charakteristische konvektive Strömungsstruktur. Ausgehend vom erdmagnetischen Saatfeld, unter speziellen Randbedingungen und unter dem Einfluss der Coriolis- und Zentrifugalkräfte im rotierenden, turbulenten System ist es den Wissenschaftlern mit diesem Experiment gelungen, in einem Dynamoprozess magnetische Flussdichten zu erzeugen, die mehr als hundert Mal so stark sind wie die des Erdmagnetfeldes, die sich entsprechend dem Feld unseres Planeten auch zufällig umpolen können (**Bild 4a**).

Bereits vorher konnte die Wirkung des Dynamoprozesses in Laborexperimenten mit flüssigen Metallen erstmals in Riga und Karlsruhe nachgewiesen



4a–b Darstellung der Ergebnisse zur Umpolung erzeugter magnetischer Felder im VKS-Dynamoexperiment (Bild 4a), 3-D-Modell für den Rotationsbehälter und das Natrium-Tanklager des Dynamoexperiment (Bild 4b). VKS Konsortium; DRESHDYN/HZDR; G. Gregori u. a. (2), bearbeitet durch U. v. Kusserow



4c Tiefengründung für das tonnenschwere DRESHDYN-Experiment (HZDR / Matthias Rietschel)

werden. Anders als beim VKS-Experiment in Cadarache wurde Natrium bei diesen Experimenten allerdings durch relativ zum Gesamtsystem kleine Rohre gepumpt. Dadurch war die Größenskala der für die Bildung der Magnetfelder so wichtigen ungeordneten Wirbel im flüssigen Medium als Analogexperiment zur Verdeutlichung der Entstehung kosmischer Magnetfelder nach oben hin in unrealistischer Weise begrenzt. Heute wird an der Realisierung weiterer Dynamoexperimente gearbeitet [9]. In Madison soll ein VKS-ähnlicher selbsterregter Dynamo mit rotierenden Propellern in einer 1 m großen Kugel wirken. Geplant sind hier Experimente auch mit Plasmamaterie anstelle flüssiger Metalle, deren Ergebnisse dann auch Anwendungsmöglichkeiten auf dem Gebiet der Stern- und Galaxienphysik finden werden. In Maryland werden in Zukunft magnetohydrodynamische Instabilitä-

ten sowie Dynamo-Effekte in einer rotierenden 3-m-Kugel erforscht. In New Mexiko soll ein Akkretionsscheiben-Dynamo als analoges Experiment zur Erforschung der Induktionseffekte für die Magnetfelderzeugung beispielsweise in aktiven Galaxienkernen realisiert werden. Und im Forschungszentrum Dresden-Rossendorf beginnen die Vorarbeiten für den Bau der großräumigen DRESHDYN (DRESden Sodium facility for DYNAMo and thermohydraulic studies)-Anlage als Plattform für geo- und astrophysikalische Experimente [10]. Im Rahmen dieses Projektes ist unter anderem die Realisierung eines (möglicherweise analog zur Erde) durch Präzessionsbewegungen im metallischen Fluid getriebenen Dynamos ein besonders ehrgeiziges Ziel (Bild 4b).

Der Bau des Gebäudes für das DRESHDYN-Experiment hat schon im April 2013 begonnen (Bild 4c) [11] [12].

Der 2. Teil dieses Artikels erscheint in der folgenden Ausgabe dieser Zeitschrift.

#### Literatur

- [1] Grousson, M. und Fontez, M.: On *Çait Recréer L'Univers! Trou noir, étoile, planète ...* Enquête dans les Labos de L'Extrême, Science & Vie No 1144, Mondadori France, Januar 2013
- [2] Rypdal, K. und Brundtland, T.: The Birkeland Terrella Experiments and their Importance for the Modern Synergy of Laboratory and Space Plasma Physics, *J. de Physique* 7, 1997; <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/25/55/64/PDF/ajp-jp4199707C408.pdf>
- [3] Lilensten, J. u. a.: The Planetterella experiment: from individual initiative to networking; <http://arxiv.org/pdf/1207.1866v1.pdf>
- [4] Radecke, H.-D. und Teufel, L.: Was zu bezweifeln war. Die Lüge von der objektiven Wissenschaft, Droemer Verlag, 2010
- [5] Research Opportunities in Plasma Astrophysics, Report of the Workshop in Plasma Astrophysics, Princeton New Jersey, 2010; [http://science.energy.gov/~media/fes/pdf/about/Wopa\\_report\\_march\\_2011.pdf](http://science.energy.gov/~media/fes/pdf/about/Wopa_report_march_2011.pdf)
- [6] v. Kusserow, U.: Magnetischer Kosmos. To B or not to B, Springer Spektrum, Heidelberg, 2013
- [7] Rädler, K.-H. und Rheinhardt, M.: Can a disk dynamo work in the laboratory? *Magnetohydrodynamics*, Vol. 38; [http://www.aip.de/People/khraedler/MHD\\_02\\_RaeRhei.pdf](http://www.aip.de/People/khraedler/MHD_02_RaeRhei.pdf)
- [8] Tilgner A.: Viel Wirbel im Natrium. Ein französisches Experiment zeigt, wie eine turbulente Strömung in flüssigem Natrium ein Magnetfeld erzeugen kann, *Physik Journal* 6, 2007
- [9] Stefani, F. u. a.: Magnetohydrodynamic experiments on cosmic magnetic fields, *Z. Angew. Math. Mech.* 88, 2008
- [10] Stefani, F. u. a.: DRESHDYN – A new facility for MHD experiments with liquid sodium, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 40, überarbeitet 2012 <http://arxiv.org/pdf/1201.5737v1.pdf>
- [11] Bohnet, Ch.: Taumelnde Erde im Experiment. Entdeckt – Das Forschungsmagazin aus dem HZDR, Ausgabe 01 2013 [https://www.hzdr.de/FZD/epaper/entdeckt\\_1\\_2013\\_DT/page25.html](https://www.hzdr.de/FZD/epaper/entdeckt_1_2013_DT/page25.html)
- [12] v. Kusserow, U.: Informationen über kosmische Magnetfelder <http://kosmischmagnetfelder.wordpress.com/>

Ulrich v. Kusserow  
Besselstr. 32–34  
28203 Bremen