

Kosmische Laborexperimente (3)

von Ulrich von Kusserow

Ergebnisse im Labor durchgeführter analoger „kosmischer“ Experimente ermöglichen Astrophysikern heute tiefere Erkenntnisse über die im fernen Universum ablaufenden zentralen Strukturbildungs- und Entwicklungsprozesse. Im zweiten Teil dieses Artikels wurden Experimente zur Entstehung früher protogalaktischer Magnetfelder nach dem Prinzip der Biermann-Batterie, zum Drehimpulstransport-Problem in protostellaren Sternsystemen, zum Turbulenzphänomen und zur selbstorganisierten Strukturbildung sowie zur Energiefreisetzung einleitend magnetische Rekonnexionsprozesse vorgestellt. Im dritten Teil werden jetzt Laborexperimente erläutert, die die bei Eruptionen, in jetartig ausströmenden Winden sowie bei Supernova- und Gammastrahlenausbrüchen ablaufenden hochenergetischen Beschleunigungsprozesse erklären helfen. Es werden schließlich aktuell im Bau befindliche Fusionsreaktoren vorgestellt, mit deren Hilfe neben der Energiegewinnung experimentell möglicherweise auch einige neue Einsichten über die in Sternen ablaufenden Energieerzeugungsprozesse gewonnen werden können.

Nicht nur bei Heizungs- und eruptiven Prozessen in der Sonnenatmosphäre oder beim Auftreffen des magnetisierten Sonnenwindes auf die planetaren Magnetosphären spielen magnetische Rekonnexionsprozesse im Kosmos eine wichtige Rolle [28]. Auch die Dynamik

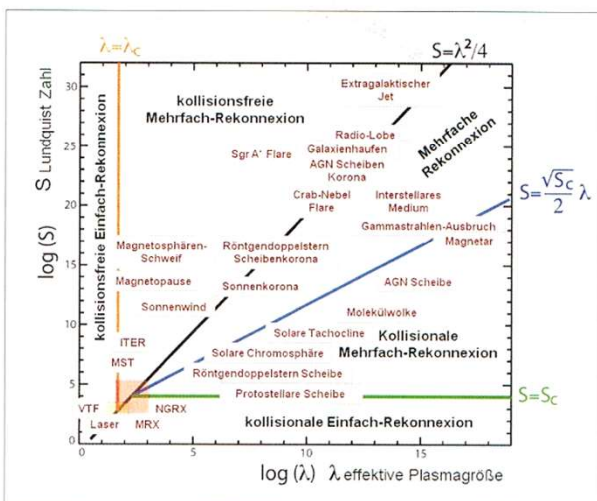
von Flare-Prozessen in Galaxienzentren, magnetischen Neutronensternen oder bei Gammastrahlen-Ausbrüchen wird vermutlich wesentlich durch sie bestimmt (Bild 10). Je nach relativer Längenabmessung λ der Stromschicht im Verhältnis zur Skin-Tiefe der Io-

nen und je nach dem Zeitverhältnis S der typischen Durchlaufzeiten von Alfvén-Wellen im Vergleich zur Zeitskala der resistiven Diffusion der Magnetfelder fällt die Art der Rekonnexionsprozesse dabei sehr unterschiedlich aus. Während beispielsweise in turbulenten Molekülwolken bei Kollisionsprozessen eine ganze Hierarchie eng benachbarter Stromschichten miteinander wechselwirken, läuft eine solche Mehrfach-Rekonnexion im Magnetosphären-Schweif der Erde eher kollisionsfrei ab. Bei Laser-, Fusions- oder Rekonnexions-Experimenten erwartet beziehungsweise befürchtet man demgegenüber eher einfache magnetische Neuverbindungsprozesse in den sich ausbildenden Stromschichten [29].

Solare Eruptionen, von jungen Protosternen, Pulsaren oder massereichen Schwarzen Löchern im Zentrum aktiver Galaxien ausgehende Jets und die mit Supernovae-Explosionen oder Gammastrahlen-Ausbrüchen verbundenen Phänomene sind besonders eindrucksvolle Zeugen extrem dynamischer Entwicklungen im Universum. Unter dem Einfluss kosmischer Magnetfelder bei in schmalen Stromschichten erzeugten starken elektrischen Feldern wird die Materie in besonders hochenergetischen Prozessen aufgeheizt und gebündelt, werden Partikel in Stoßfronten beschleunigt. Laborexperimente im Zusammenspiel mit numerischen Simulationen bieten heute die Möglichkeit, solche dynamischen Vorgänge durch Variation der Anfangs- und Randbedingungen im Detail näher zu studieren.

Solare Eruptionen und kosmische Jets

„Die Sonne im Labor“ ist die Überschrift eines Artikels, in dem die Ergebnisse von Laborexperimenten vorgestellt wer-



10 Zustandsdiagramm mit der Positionierung unterschiedlicher heliophysikalischer, astrophysikalischer Plasmen sowie von Laborplasmen, in denen der Prozess der magnetischen Rekonnexion als relevant angesehen wird. In Abhängigkeit von der effektiven Plasmagröße λ und der Lundquist Zahl S ist das Diagramm in Gebiete unterteilt, in denen das Plasma kollisionsfrei ist oder nicht, in denen Rekonnexion lokal nur an einer Stelle oder, durch Plasmoid-Instabilitäten ausgelöst, an mehreren, eng benachbarten Stellen einsetzt.
H. Ji/W. Daughton/CMSO

den, anhand derer die Entwicklung von Plasmabögen studiert werden kann, wie sie ähnlich in der Sonnenkorona zu beobachten sind [30]. Die Rolle aufsteigender und miteinander verschmelzender magnetischer Flussröhren im Zusammenhang mit der Aufheizung der Sonnenatmosphäre sowie dem Auswurf solarer Eruptionen ist trotz wesentlich verbesserter Beobachtungsmöglichkeiten durch den Einsatz moderner Sonnentelkope noch nicht vollständig verstanden. Mikroskopische Prozesse können im Detail mit den Teleskopen nicht gut genug aufgelöst werden, und die Reproduzierbarkeit gewünschter Prozessabläufe ist in einer komplex strukturierten und sich dynamisch entwickelnden Sternatmosphäre nicht gewährleistet. Auch wenn bisher schon Simulationsrechnungen am Computer wesentliche Erkenntnisse reproduzieren können, ermöglichen heute zusätzlich reale, im Labor in technischen Geräten durchgeführte Experimente ein tieferes Verständnis nicht nur solarer Prozesse.

Bild 11a veranschaulicht den prinzipiellen Aufbau eines Experiments, mit dem die Ausbildung, Kollimation, Expansion sowie das Aufbrechen sonnenähnlicher magnetisierter Plasmabögen erforscht werden kann. In einer Vakuumkammer wird Wasserstoff-, Helium- oder Stickstoffgas, das durch kurzzeitiges Anlegen einer Hochspannung ionisiert wird, in ein hufeisenförmiges Magnetfeld geblasen. Es bildet sich ein bogenförmiger, leuchtender Plasmaschlauch aus, durch den Strom von einer Elektrode zur anderen fließt. Auf Grund der magnetischen Lorentzkraft expandiert das bogenförmige Magnetfeld (**Bild 11b**). Im Zusammenspiel mit entstehenden Druckgradienten wird es zusammengehalten, behält anfangs eine kollimierte, schlauchartige Form. In numerischen Simulationsrechnungen erkannte Knickinstabilitäten sind schließlich für das Aufbrechen der Feldstrukturen und die mögliche Ausbildung langgestreckter jetartiger Aufhellungen verantwortlich [31]. Trotz der auf den ersten Blick verblüffenden Ähnlichkeit mit den auf der Sonne über Stunden beobachtbaren koronalen Bögen können die Erkenntnisse über diese im Labor erzeugten magnetisierten Plasmawolken aufgrund ihrer Kurzlebigkeit im Nanosekundenbereich geeignet nur zum Studium schneller Flare-

artiger Strahlungsausbrüche verwendet werden. In Zukunft sollen Plasmabögen mit einer deutlich längeren Lebensdauer erzeugt werden.

Bild 11d zeigt den veränderten Aufbau eines ähnlichen Experiments, mit dem im Labor die Entwicklung astrophysikalischer Jets erforscht wird. Solche langgestreckten, eng gebündelten Überschall-Plasmaströme entstehen in Sternatmosphären, in der Umgebung von Akkretionsscheiben und kompakten Objekten. In protostellaren Systemen, bei Weißen Zwergen, Neutronensternen, stellaren Schwarzen Löchern, bei Gammastrahlen-Ausbrüchen, in Doppelsternsystemen und aktiven Galaxienkernen wird durch die Drehimpuls effektiv abgeführt [32]. Ein allgemein anerkanntes Paradigma geht davon aus, dass ein solcher Abtransport des Drehimpulses in den unterschiedlichsten Scheiben-Jet-Systemen wesentlich durch magnetische Prozesse ausgelöst und gesteuert wird. Magnetozentrifugale, durch Lorentzkräfte, durch magnetische Spannung angetriebene und kollimierte Winde bewirken den Transport von Materie, Impuls und Energie in ganz unterschiedlichen, sich besonders dynamisch entwickelnden Gebieten des Universums [6].

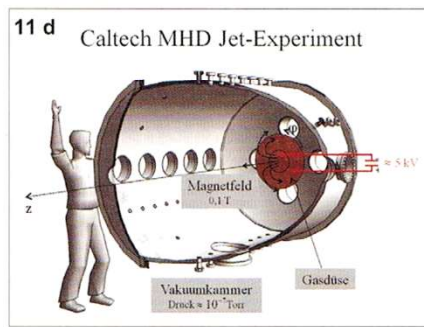
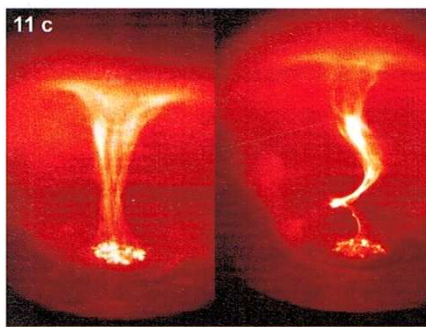
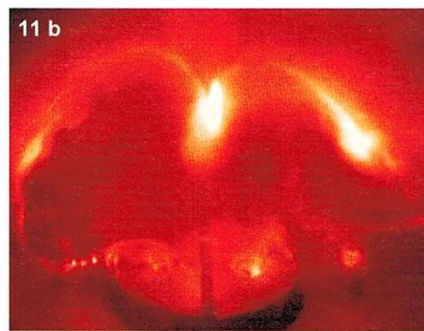
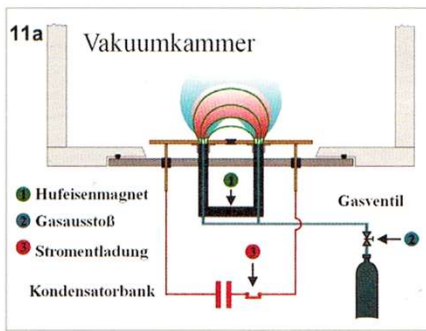
Aus mehreren Düsen eines um eine zentrale Scheibe rotierenden Kreisrings wird mit einer Plasmakanone ionisiertes Gas in eine geräumige Vakuumkammer geblasen. Zwischen dem Kreisring und der Scheibe liegt eine Spannung an, die in der Plasmamaterie elektrische Ströme treibt. Im starken Magnetfeld erfährt die geladene Materie Lorentzkräfte. Über Zeiträume von etwa 10 Mikrosekunden lassen sich die dynamischen Entwicklungen der leuchtenden Plasmastrukturen in diesem Laborexperiment hochaufgelöst beobachten, vermessen und analysieren. Mehrere der Düsen entweichende leuchtende Plasmaansammlungen verbinden sich zunächst zu einer langgestreckten, jetartigen zentralen Säule, bevor Knickinstabilitäten einsetzen und eine deutliche Verdrehung der magnetisierten Plasmasäule sichtbar wird (**Bild 11c**).

Auch im Zusammenhang mit astrophysikalischen Jets diskutieren Astronomen und Astrophysiker heute auf Tagungen immer wieder gemeinsam gleichzeitig über neueste Beobachtungen, Ergebnisse von numerischen Simulationsrechnungen und

Laborexperimenten. Sie betonen dabei die Notwendigkeit und Vorzüge der Zusammenführung der mit so unterschiedlichen Methoden gewonnenen Erkenntnisse [33]. Schon in seinem 1981 erschienenen Buch mit dem Titel „Cosmic Plasma“ plädierte *Hannes Alfvén* dringend dafür, Beobachtungen, Modellierungen und Laborexperimente im Rahmen der für die kosmischen Prozesse so wichtigen Plasmaphysik miteinander zu koordinieren. „... die Theorien waren mathematisch elegant und beanspruchten, alle Eigenschaften eines Plasmas aus Grundprinzipien ableiten zu können. In Wirklichkeit war das nicht wahr. Wegen der Komplexität des Problems waren eine Anzahl von Näherungen notwendig, die nicht immer angebracht waren. Die Theorien hatten wenig Kontakt mit der experimentellen Plasmaphysik: Alle heiklen und komplizierten Phänomene, die im Zusammenhang mit Gasentladungen hatten beobachtet werden können, wurden einfach vernachlässigt.“

Hochenergetische Prozesse in Neutronensternen und bei Supernova-Explosionen

Kompakte, mehr oder weniger schnell rotierende und von starken Magnetfelder durchsetzte Neutronensterne, Pulsare oder Magnetare können am Ende des Lebens massereicher Sterne mit Anfangsmassen von mehr als dem Achtfachen der Sonnenmasse entstehen. Wenn die energieerzeugenden Fusionsprozesse im Innern solcher Sterne plötzlich versiegen, fällt die von außen einstürzende Sternhülle auf den sich schnell verdichtenden, vorwiegend aus Neutronen im entarteten Materiezustand befindlichen Kernbereich. Die Hüllenmaterie erfährt einen Rückstoß beim Auftreffen auf die starre Oberfläche des sich hier neu ausbildenden zentralen Proto-Neutronensterns. Sie wird nach außen zurückgeschleudert. Bei Zusammenstößen mit der weiter von außen einfallenden Hüllenmaterie werden hochenergetische Neutrinos erzeugt. Möglicherweise in Verbindung mit den bei diesem Sternkollaps in besonders schnell ablaufenden Dynamoprozessen erzeugten starken Magnetfeldern bewirken sie den explosionsartig verlaufenden Materieauswurf in Form einer Supernova. Wie auch beim Zusammenstoß zweier



11 Laborexperimente zur Erforschung solarer Eruptionen und kosmischer Jets: Schematische Darstellung des Flare-Lab Experiments in Bochum (11a), Ergebnis eines Labor-Experiments zur Erforschung solarer Eruptionen (11b), eines Laborexperiments zur Ausbreitung kosmischer Jets (11c), schematische Darstellung des Caltech-MHD Experiments (11d).
Flare-Lab/RUB, Bellan Plasma Group/CTI (3)

kompekter Objekte in einem Doppelpsternsystem könnten dabei zusätzlich blitzartige, kollimierte Gammastrahlen-Ausbrüche erfolgen. In analogen Laborexperimenten versuchen heute Wissenschaftler, die mit Hilfe von Simulationsrechnungen gewonnenen Erkenntnisse über die dabei ablaufenden hochenergetischen Prozesse zu vertiefen (Bild 12).

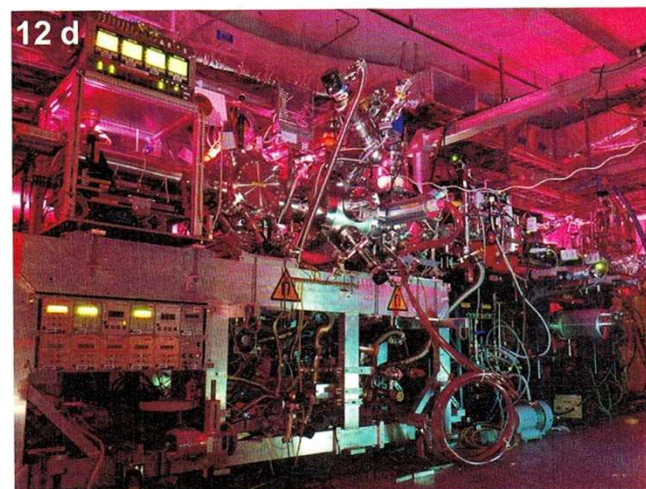
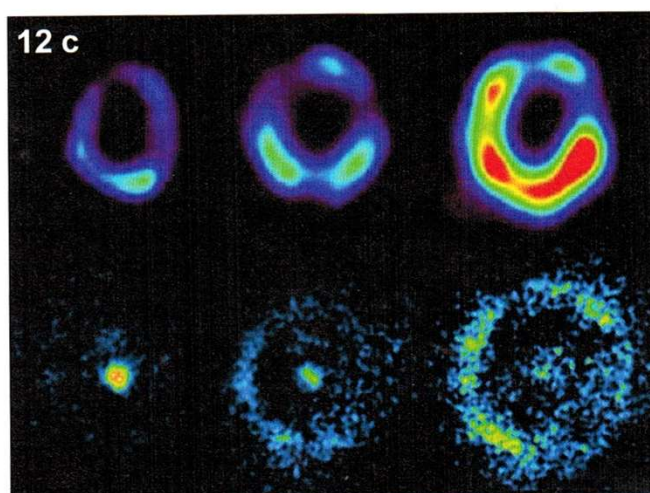
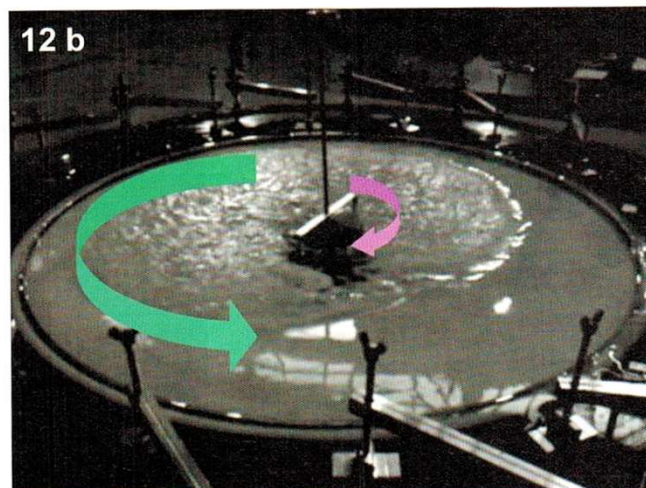
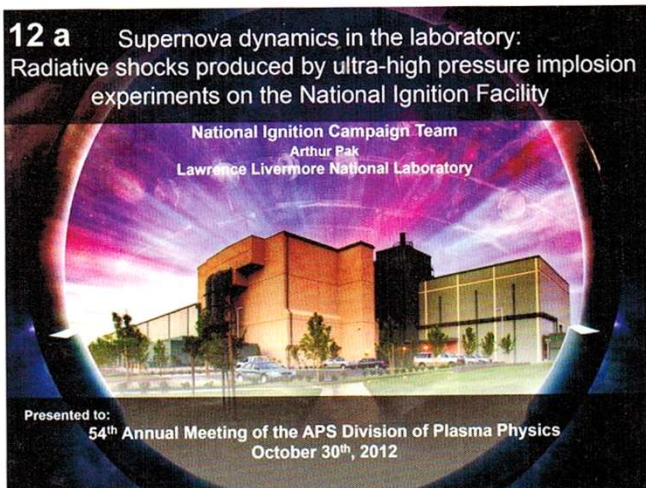
Die bei der Ausbildung von Neutronensternen und Supernova-Explosionen wirksamen physikalischen Prozesse laufen offensichtlich nicht kugelsymmetrisch ab. Einsetzende Instabilitäten bewirken die zu beobachtenden Asymmetrien. Die Form der ausgestoßenen Materiehüllen ist häufig nicht ganz regelmäßig, und die Neutronensterne erfahren teilweise starke Beschleunigungen in eine Vorzugsrichtung [34]. Ergebnisse von Simulationsrechnungen über die „Turbulente Geburt von Neutronensternen“ lassen solche Unregelmäßigkeiten verständlich erscheinen [35]. Neben den erwarteten konvektiven Strömungsmustern beobachteten die Wissenschaftler bei ihren numerischen Experimenten charakteristische Schwipp-Schwapp- und schnelle, kraftvolle Rotationsbewegungen, die aufgrund einsetzender Akkretionsstoß-Instabilitäten pulsierende Asymmetrien erzeugen.

Weder lassen sich die Vorgänge im Innern explodierender Sterne direkt beobachten, noch kann man sie im Labor

experimentell vollständig nachahmen. In einem Pariser Forschungsinstitut ist es Wissenschaftlern aber gelungen, ein tieferes Verständnis der Wachstumsbedingungen der im kollabierenden Materiestrom um das Supernova-Zentrum wirksamen Instabilität zu entwickeln. Analog zu den dort auftretenden Stoßwellen haben sie ein als SWASI (Shallow Water Analogue of Shock Instability) bezeichnetes Phänomen an den Eigenschaften des in ein Loch fließenden Wassers mit Hilfe eines preiswerten Tischexperiments untersucht [36]. Es basiert auf der auch formelmäßigen Analogie von akustischen Wellen im Gas und den Oberflächenwellen im flachen Wasser. Bild 12b zeigt die sich beim stetig und regelmäßigen Einstromen von Wasser in ein zentrales Loch ausbildenden Stoßwellen, die weiter außen entgegengesetzt zum Innenbereich rotieren. Dieser hydraulische Sprung trennt Regionen, in denen sich das Wasser schneller als die Oberflächenwellen ausbreitet, von denen mit umgekehrten Verhältnissen. Während dieser Sprung anfangs konzentrisch verläuft, setzt schließlich die SWASI-Instabilität ein, wenn die steuerbare Strömungsgeschwindigkeit bei diesem Experiment einen charakteristischen Grenzwert überschreitet. Das Erscheinungsbild des Wasserströmungsverlaufs und der überlagerten wellenförmigen Strukturen verliert dabei seinen symmetrischen Charakter. Noch ist allerdings nicht aus-

reichend geklärt, ob diese Instabilität tatsächlich auch im Neutronenstern-Supernova-System wirksam werden kann und damit wirklich für das Auftreten der dort beobachteten Asymmetrien verantwortlich ist.

Um die Stoß- und Beschleunigungsprozesse sowie einsetzende Instabilitäten im kollisionsfreien Plasma der sich ausbreitenden Supernova-Überreste zu erforschen, werden Laborexperimente vor allem mit hochenergetischen Lasern durchgeführt [37]. An der Universität von Rochester ist es am Laboratory for Laser Energetics (LLE) das OMEGA Instrument, an der Universität von Michigan der HERCULES Laser und am Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) die als National Ignition Facility (NIF) bezeichnete größte Laser-Einrichtung der Welt. Das große Interesse an der Erforschung der kollisionsfreien Schock-Physik liegt zum einen darin begründet, dass in solchen Stoßfronten Teilchen wie die Partikel der kosmischen Strahlung durch unterschiedliche, im Detail noch genauer zu erforschende Mechanismen (Einfang von Teilchen, Magnetfeldverstärkung, Surfen auf Stoßfronten und magnetohydrodynamischen Wellen, Fermi-Prozesse, magnetische Rekonnexion) auf extrem hohe Energien beschleunigt werden können. Zum anderen soll damit auch die in kollektiven Wechselwirkungsprozessen erfolgende irreversible Umwandlung von Bewegungsenergie in thermi-



12 Laborexperimente zur Erforschung hochenergetischer Prozesse in Neutronensternen und bei Supernova-Explosionen: Titelbild einer Präsentation über Laborexperimente zur Dynamik von Supernova-Explosionen (**12a**), analoges Wassereperiment zur turbulenten Geburt von Neutronensternen (**12b**), Satelliten-Aufnahmen zur Entwicklung des Supernova-Überrestes der SN 87A im Vergleich zu Ergebnissen von Laser-Experimenten (**12c**), leistungsstarker Röntgen-Laser am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) beim Einsatz für astrophysikalische Experimente (**12d**)
NICTeam/LLNL, Th. Foglizzo/AIM, NICTeam/LLNL, J. R. Crespo Lopez-Urrutia/MPIK

sche Energie etwa im Zusammenhang mit Fusionsprozessen zur Energieerzeugung näher untersucht werden. In der Präsentation über die „Supernova dynamics in the laboratory“ (**Bild 12a**) werden die Forschungsgrundlagen und aktuellen Ergebnisse neuerer Experimente zur Erforschung der Dynamik in Supernovae in analogen Laborexperimenten ausführlicher dargestellt [38]. Unter anderem wird in diesem Beitrag die mit dem CHANDRA-Röntgensatelliten der NASA registrierte zeitliche Entwicklung der sich ausbreitenden SN 87A-Supernova-Überreste mit den Ergebnissen von Laser-Experimenten verglichen (**Bild 12c**), werden in diesem Zusammenhang auch Ergebnisse von Simulationsrechnungen vorgestellt.

Röntgenstrahlung wird bei Prozessen in der Umgebung Schwarzer Löcher, in besonders aktiven Doppelsternsystemen, in den Atmosphären dynamischer Sterne oder in den Supernova-

Überresten freigesetzt. Um die dort vorherrschenden extremen Bedingungen und wirkenden Kräfte zu modellieren und zu analysieren, nutzen die Wissenschaftler räumlich, zeitlich und spektral möglichst hochaufgelöste Beobachtungsdaten und interpretieren sie anhand von Computer-Simulationen. Die in den Modellrechnungen entwickelten theoretischen Vorhersagen stimmen offensichtlich aber nicht mit den von Röntgensatelliten ermittelten, dabei zu niedrig erscheinenden Beobachtungsdaten überein. Wissenschaftler führten deshalb Experimente am leistungsstarken Linac Coherent Light Source Laser (LCLS) (**Bild 12d**) am Stanford National Acceleration Laboratory (SLAC) mit besonders hochionisiertem Eisen durch, um die offensichtlich noch unverstandenen Schlüsselprozesse für das Verständnis extremer Plasmazustände weiter zu entwickeln [39]. Tatsächlich zeigten die Ergebnisse der

Untersuchungen, dass unter anderem wohl eher ein Mangel in der korrekten Modellierung der Struktur des 16-fach ionisierten Eisens für die sich widersprechenden Ergebnisse verantwortlich ist. Laborexperimente ermöglichen so eine wichtige Klärung, die für das Erfassen zugrundeliegender komplexer physikalischer Prozesse ausschlaggebend ist.

Energieerzeugung in Fusionsprozessen

Von der Strahlungsleistung der Sonne geht für uns Menschen auch im Zusammenhang mit der Entwicklung des Lebens auf unserem Planeten, mit der Energieversorgung und aktuell mit der Klimaproblematik eine große Faszination aus. Schon Prometheus entwendete das Sonnenfeuer nach der griechischen Mythologie zum Wohle der Menschen

vom Sonnenwagen des Sonnengottes Helios. Mitte des 19. Jahrhunderts ging der Physiologe und Physiker *Hermann von Helmholtz*, nach dem heute auch die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V. benannt ist, noch fälschlicherweise davon aus, dass die Sonne ihre Energie durch Knallgasreaktionen, durch chemische Verschmelzung von Wasserstoff und Helium, gewinnen würde, dass ihr Energievorrat wohl kaum mehr als 3000 Jahre reichen würde. Nachdem *Ernest Rutherford* 1917 erste Fusionsreaktionen beobachtet hatte, schlug *Arthur Eddington* bereits drei Jahre später vor, dass die physikalische Verschmelzung von Atomkernen als Energiequelle der Sterne in Frage käme.

Spektroskopische Beobachtungen der Sonne ließen auf die Verschmelzung des hier vorherrschenden Wasserstoffs zu Helium schließen. 1939 schlug *Hans Bethe* verschiedene Mechanismen dafür vor, wie diese Reaktionen in Sternen ablaufen könnten. Mit der Proton-Proton-Reaktion und dem unter Einflussnahme von Kohlenstoff- und Stickstoffatomkernen ablaufenden Bethe-Weizsäcker-Zyklus sind die Mechanismen der im Sonneninneren ablaufenden Fusionsreaktionen heute bekannt. 1951 schlug *Lyman Spitzer*, der Namensgeber des im Infraroten die Vorgänge am Sternenhimmel beobachtenden Spitzer Space Telescopes, vor, wie man das „Sonnenfeuer auf die Erde holen“ könnte. Man müsste die geladenen Teilchen des notwendigerweise extrem heißen Plasmas, in dem die Fusionsprozesse ablaufen könnten, in einem geschlossenen Magnetfeldkäfig aufeinandertreffen lassen [40]. 1952 wurde eine erste Wasserstoffbombe im Eniwetok-Atoll gezündet, die die möglichen verheerenden Wirkungen von Wasserstoff-Verschmelzungen eindrucksvoll demonstrierte. In den 1990er Jahren gelang erstmals die kontrollierte Kernfusion im JET, in der europäischen Forschungseinrichtung Joint European Torus.

Die Idee der Nachahmung der solaren Energieerzeugung in Reaktoren auf der Erde ist sicherlich genial und faszinierend. Ihre Realisierung erweist sich jedoch aufgrund der so stark voneinander abweichenden Rahmenbedingungen als besonders schwierig. Im Innern der massereichen Sonne laufen die Fusionsprozesse bei Temperaturen von etwa 15 Millionen Grad unter hohem Druck

ab. In zukünftigen Fusionsreaktoren auf der Erde darf die geladene Plasmamaterie mit einer Gesamtmasse von weniger als einem Gramm und einer 250 000 Mal geringeren Dichte als der Luft auf Meereshöhe wegen ihres erforderlichen Einschlusses in magnetische Felder nur sehr dünn verteilt sein. Der Druck im Reaktor darf den der Luft in einem Fahrradschlauch nicht übersteigen. Damit unter diesen Bedingungen Fusionsprozesse überhaupt starten können, müssen unter extrem hohen Temperaturen von bis zu 300 Millionen Grad mit den schwereren Wasserstoffkernen Deuterium und Tritium unbedingt andere Reaktionspartner als einfache Protonen gewählt werden. Die in Fusionsreaktoren ablaufenden Vorgänge sind „keine einfache Kopie des Sonnenfeuers“ [41].

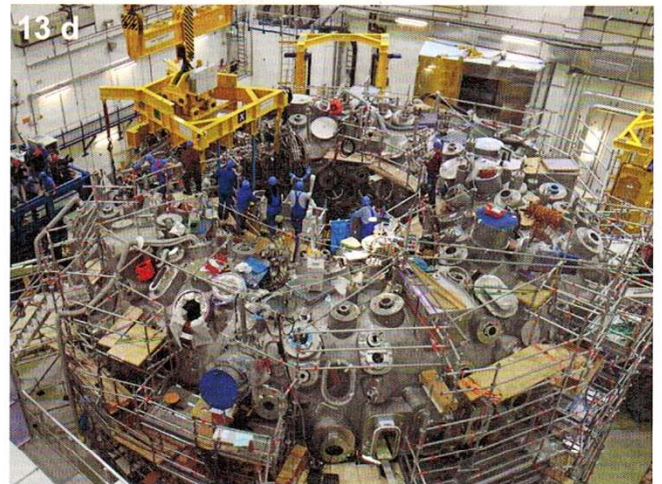
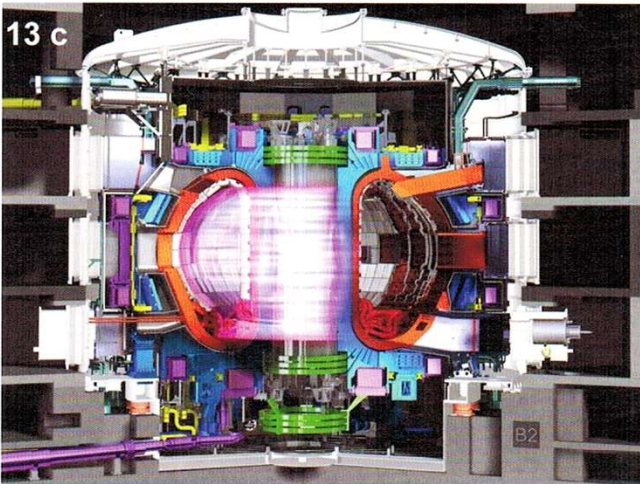
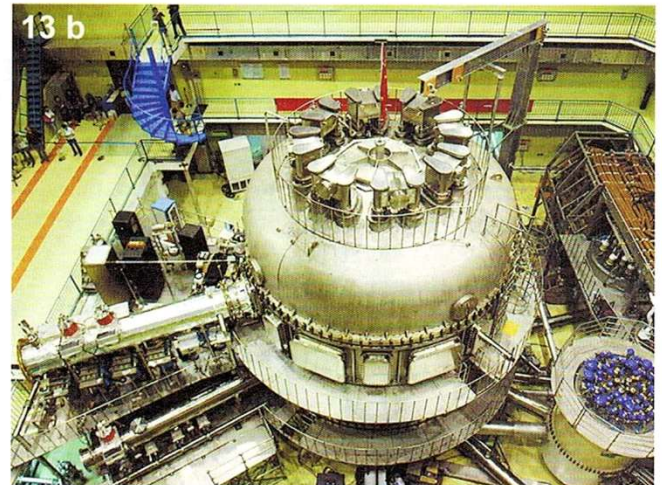
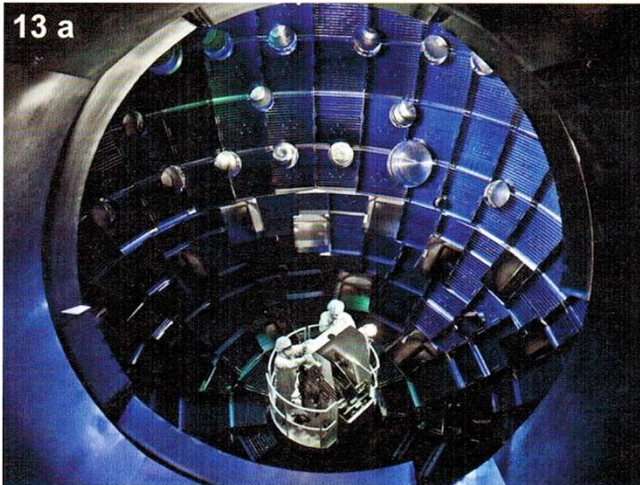
Stellarator (Stella als lateinisches Wort für Stern) war der Name einer ringförmigen Vakuumkammer in einem verdrillten magnetischen Feld, in der *Lyman Spitzer* zunächst vergeblich versuchte, Plasmatemperaturen von einer Million Grad zu erzeugen. Beginnend 1959 baute *Hannes Alfvén* eine Apparatur, in der ihm und seinen Mitarbeitern der stabile Einschluss eines solchen ringförmigen Plasmas in einem durch eine spezielle Helizität ausgezeichneten Magnetfeld erstmals gelang. In den als Spheromak bezeichneten Geräten, bei denen Wissenschaftler in toroidalen Plasmaschläuchen lange Einschlusszeiten des Plasmas in komplexen Magnetfeldstrukturen erreichen können, werden bis heute Turbulenzen, Instabilitäten, möglicherweise einsetzende, nachhaltige Fusionsabläufe störende magnetische Rekonnexions- oder Dynamoprozesse sowie Selbstorganisationsentwicklungen im magnetisierten Plasma untersucht.

Während vorwiegend in den USA noch die Erzeugung von Fusionsenergie in Reaktoren mit Trägheitseinschluss durch gezielten, besonders hochenergetischen Laserbeschuss kleiner kugelförmiger, mit dichter Plasmamaterie gefüllter Behälter erprobt wird, stellen die nach dem Tokamak- beziehungsweise Stellaratorprinzip mit magnetischem Einschluss arbeitenden Reaktortypen offensichtlich doch das erfolgreichere Konzept dar. In modernen Stellaratoren zwingen die durch Stromfluss in einer einzigen, dafür besonders komplizierten Spulenanordnung erzeugten Magnetfelder die Plasmaschläuche in ein

verdrilltes Fünfeck. In einem sogenannten Tokamak-Reaktor wird der Plasmaschlauch, in dem die Fusionsprozesse ablaufen sollen, durch drei sich überlagernde Magnetfeldsysteme in eine ideal ringförmige Form gebracht. Ein im Plasmaschlauch fließender Strom wird dabei durch eine Transformatorspule induktiv eingespeist. Nach dem bisherigen Prinzip müssen deshalb die einfacher gebauten Tokamak-Generatoren im Gegensatz zu den Stellaratoren noch mit einer gepulsten Stromzufuhr arbeiten, was eine starke Belastung des Materials zur Folge hat. Eine Vielzahl komplexer Probleme im Zusammenhang mit der Fusionsenergie-Erzeugung werden in dem Buch mit dem Titel „Heißer als das Sonnenfeuer – Plasmaphysik und Kernfusion“ ausführlich und besonders anschaulich erläutert [42].

In **Bild 13** sind geplante, im Bau oder schon im Betrieb befindliche Fusionsreaktoren abgebildet. In der Reaktionskammer des NIF (National Ignition Facility) zur Erforschung der Trägheitsfusion (**Bild 13a**) lassen sich die erforderlichen Bedingungen zur kommerziellen Erzeugung von Energie in absehbarer Zeit aus den unterschiedlichsten Gründen, vor allem auch wegen eines viel zu kleinen Wirkungsgrads, wahrscheinlich überhaupt nicht erfüllen [43]. Während der chinesische Forschungsreaktor EAST (**Bild 13b**) seinen Betrieb aufgenommen und die Einschlusszeit des Plasmas gerade um eine Zehnerpotenz erfolgreich gesteigert hat, wird sich die Inbetriebnahme des mindestens 13 Milliarden Euro teuren, ebenfalls nach dem Tokamak-Prinzip arbeitenden ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)-Großreaktors (**Bild 13c**) vermutlich noch bis zum Jahre 2030 hinauszögern [44]. Die Basismaschine des nach dem Stellarator-Prinzip zu betreibenden Grundlagen-Experiments Wendelstein 7-X (**Bild 13d**) ist im Greifswalder Teilinstitut des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP) bereits komplett aufgebaut. Es werden jetzt noch die Arbeiten im Innern des Plasmagefäßes und an der Peripherie der Anlage durchgeführt. 2015 soll der Reaktor erstmals mit Plasma gefüllt werden [45].

Astrophysikalische Erkenntnisse waren die Ideengeber für die aktuelle Realisierung von Großexperimenten zur Fusionsforschung. Es bleibt zu hoffen, dass die Verwirklichung dieser Projekte positive Auswirkungen für die Lebens-



13 Geplante, im Bau oder schon im Betrieb befindliche Reaktoren zur Erforschung von Kernfusionsprozessen: Reaktionskammer des NIF (National Ignition Facility) zur Erforschung der Trägheitsfusion (**13a**), der chinesische Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) Fusionsreaktor (**13b**), Modell des International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) (**13c**), Einbau des letzten Moduls des Stellarator Experiments Wendelstein 7-X (**13d**) NIF/ Lawrence Livermore National Laboratory, Chinese Academy of Sciences (CAS) Hefei, ITER, IPP

bedingungen auf unserem Planeten haben werden [46]. Anhand der Ergebnisse dieser kosmischen Laborexperimente können nicht nur die sich mit der Nukleosynthese in Sternen beschäftigten Astrophysiker einige neue, wertvolle Einsichten gewinnen.

Fortsetzung folgt.

Literatur:

[28] Zweibel, E. G.; Yamada, M.: Magnetic Reconnection in Astrophysical and Laboratory Plasmas. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 2009 <http://www.pha.jhu.edu/~kknizhni/Plasma/Plasma-Reconnection.pdf>
 [29] Ji, H.; Daughton, W.: Phase diagram for magnetic reconnection in heliophysical, astrophysical, and laboratory plasmas. *Physics of Plasmas* 18, 2011 <http://arxiv.org/pdf/1109.0756v1.pdf>
 [30] Peter, H.: Die Sonne im Labor – In Laborexperimenten erzeugte Plasmabögen ähneln denen in der Sonnenkorona. *Physik Journal* 11, Wiley-VCH Verlag, 2012 s. u. http://www.pro-physik.de/details/physikjournalissue/2777641/PJ_11_2012.html
 [31] Bellan, P. M. u. a.: Laboratory simulations of astrophysical jets and solar coronal loops: new results. *Sitzungsberichte zum Internationalen Symposium „Plasma in the Laboratory and in the Universe: interactions, patterns, and turbulence“*, 2009

<http://ve4xm.caltech.edu/webpub/2010-Bellan-Como-submit-Jan-25-2010.pdf>
 [32] Clarke, D. A.: Astrophysical Jets. *Physics in Canada*, Vol. 64 No. 2, 2008 <http://www.cap.ca/sites/cap.ca/files/article/1052/apr08-offprint-clarke.pdf>
 [33] Bellan, P. M. u. a.: Astrophysical jets: Observations, numerical simulations, and laboratory experiments. *Physics of Plasma* 16, 2009 http://authors.library.caltech.edu/14855/1/Bellan-2009p4544Phys_Plasmas.pdf
 [34] Lai, D.: Neutron Star Kicks and Supernova Asymmetry, 2013 <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0312542v1.pdf>
 [35] Turbulente Geburt von Neutronensternen. MPA, 2013 http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/institute/news_archives/news1306_ddd/news1306_ddd-de.html
 [36] Foglizzo, Th.: A Shallow Water Analogue of the Standing Accretion Shock Instability: Experimental Demonstration and Two-Dimensional Model, 2011 <http://arxiv.org/pdf/1112.3448v1.pdf>
 [37] Huntington, Ch. M.: High-Energy-Density Physics Experiments Relevant to Astrophysical Systems. Dissertation University of Michigan, 2012 <http://www.ile.rochester.edu/media/publications/documents/theses/Huntington.pdf>
 [38] Pak, A.: Supernova dynamics in the laboratory: Radiative shocks produced by ultra-high pressure implosion experiments on the National Ignition Facility. Präsentation des National Ignition Campaign (NIC) Teams, 2012 (siehe pdf-Datei im Internet)
 [39] Freeberg, A.: X-ray Laser Takes Aim at Cosmic Mystery. SLAC Pressemitteilung, 2012 [https://www6.](https://www6.slac.stanford.edu/news/2012-12-12-cosmic-lcls.aspx)

[slac.stanford.edu/news/2012-12-12-cosmic-lcls.aspx](http://www6.slac.stanford.edu/news/2012-12-12-cosmic-lcls.aspx)
 [40] Wengenmayr, R.: Die Sonne im Tank – Wie Fusionsforscher das Feuer einfangen. *MPG TECHMAX* 9, 2007 <http://www.max-wissen.de/Fachwissen/show/5415.html>
 [41] Wengenmayr, R.: Magnetfelder bändigen Urgewalt. *MaxPlanckForschung* 2/2006 http://www.mpg.de/969423/F002_Fokus_026_030.pdf
 [42] Rebhan, E.: Heißer als das Sonnenfeuer – Plasmaphysik und Kernfusion. R. Piper GmbH & Co. KG München, 1992
 [43] Häfner, St.: National Ignition Facility NIF Trägheitsfusion – Kern- und Teilchenphysik, Präsentation, 2011 (siehe pdf-Datei im Internet)
 [44] Connor, St.: One giant leap for mankind: *One World Chronicle*, 2013 <http://www.oneworldchronicle.com/?p=13948>
 [45] IPP-Projekte – Wendelstein 7-X. IPP, 2013 <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/forschung/w7x/>
 [46] Romanelli, F. u. a.: Fusion Electricity – A roadmap to the realisation of fusion energy. / *European Fusion Development Agreement (EFDA)*, 2012 <http://www.efda.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>

Ulrich v. Kusserow
 Besselstr. 32–34
 28203 Bremen
 E-Mail uvkusserow@t-online.de