

Prolog

„To Be or Not To Be“ – „Sein oder Nicht Sein“. Das ist die von Hamlet in der gleichnamigen Tragödie von William Shakespeare (1564–1616) für uns Menschen gestellte Existenzfrage des Lebens. Mit einer durch Weglassen des Buchstabens „e“ veränderten Überschrift „To B or Not To B?“ in ihrem Artikel über die astronomischen Highlights des Jahres 2000 wollte die amerikanische Astrophysikerin Virginia L. Trimble demgegenüber die Rolle kosmischer Magnetfelder für die Strukturbildung und Entwicklung von Galaxien, Sternen und Planeten (positiv gemeint) infrage stellen. Dass der Einfluss der durch den Buchstaben B gekennzeichneten magnetischen Flussdichte im Universum von gewaltiger Bedeutung sein könnte, darauf hatte bereits 1965 der niederländische Astronom Lodwijk Woltjer eindringlich hingewiesen. „Je größer unser Unverständnis [über ein astrophysikalisches Problem] ist, umso stärker muss [wohl in Wirklichkeit] der Einfluss der Magnetfelder sein“. Noch drastischer drückte es sein Landsmann Hendrik C. van de Hulst mehr als 20 Jahre danach in einem Vortrag aus: „Magnetfelder sind für die Astrophysik das, was der Sex für die Psychologie ist“.

Heute ist in der astronomischen Forschung die herausragende Bedeutung kosmischer Magnetfelder für ein tieferes Verständnis der im nahen und fernen Weltall zu beobachtenden faszinierenden und komplexen Vorgänge weitgehend anerkannt. „Um das Universum zu verstehen, untersuchen wir die von Galaxien und Sternen aus-

gehende Strahlung, klein- und großskalige Bewegungen, Temperaturen, chemische Zusammensetzungen und vieles mehr. Alles das, was wir danach nicht erklären können, führen wir auf die Magnetfelder zurück“. Dies ist ein Zitat aus einem Projektvorschlag zur Instrumentierung des mit fast 40 m Durchmesser zukünftig größten optischen Spiegelteleskops der Welt. Am Ende dieses Jahrzehnts wird das E-ELT (European-Extremely Large Telescope) der europäischen Südsternwarte ESO (European Southern Observatory) auch mit einem besonders leistungsfähigen Spektropolarimeter zur Vermessung kosmischer Magnetfeldstrukturen ausgerüstet sein.

Anders als die starken und schwachen Kernkräfte, die für die Fusion der Atomkerne beziehungsweise für radioaktive Zerfallsprozesse verantwortlich sind, spielen die Gravitations- und elektromagnetischen Kräfte aufgrund ihrer ins Unendliche reichenden Fernwirkung die zentrale Rolle für die Organisation und Entwicklung großskaliger Materiestrukturen im Universum. Isaac Newton, der Entdecker des Gravitationsgesetzes und Grundsteinleger der klassischen Mechanik, sowie Albert Einstein mit seinen Hauptwerken über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie waren die Forscher, die Wesentliches zum übermächtig erscheinenden Einfluss der Gravitationskraft auf Prozesse im Weltall entwickelten.

Auch wenn die anziehenden oder abstoßenden elektrischen Kräfte wesentlich stärker als die gravitativen Anziehungskräfte zwischen geladenen Partikeln ausfallen können, glaubte doch lange Zeit kaum jemand an ein „elektromagnetisch“ beeinflusstes Universum. Im Inneren der Erde sollte sich zwar ein großer Magnet befinden, der die Kompassnadeln der Seefahrer ausschlagen lässt. Aber wie könnten im nahezu „luftleeren“ Raum des Weltalls bewegte Ladungsträger existieren, die das Fließen elektrischer Ströme und die Erzeugung kosmischer Magnetfelder bewirken würden? Die Anwendung der von Wissenschaftlern wie Hans Christian Ørstedt, André-Marie Ampère, George Simon Ohm, Michael Faraday, Hendrik Lorentz und James Clerk Maxwell entdeckten Gesetze und entwickelten

Theorien zum Elektromagnetismus blieb so zunächst im Wesentlichen auf die fortschreitende Entwicklung der Elektrotechnik begrenzt.

Der norwegische Physiker Kristian Olaf Bernhard Birkeland erstellte 1896 eine erste zutreffende wissenschaftliche Analyse des Nordlichtphänomens. Anhand eines beeindruckenden Experiments überprüfte er die Hypothese, wonach die sagenumwobenen farbenprächtigen Polarlichter durch den Einstrom geladener Partikel von der Sonne in der Magnetosphäre der Erde erzeugt werden. 1936 erhielt der österreichische Physiker Viktor Franz Hess den Nobelpreis für die Entdeckung der kosmischen Strahlung, diesen meist geladenen, hochenergetischen Teilchen, die aus dem fernen Universum in die Erdatmosphäre eindringen können. Schließlich war es der 1970 mit dem Nobelpreis ausgezeichnete schwedische Physiker Hannes Olaf Alfvén, dem mit der Zusammenführung der Strömungslehre und der Elektrodynamik zur Magnetohydrodynamik ein erster Schritt zur Entwicklung einer konsistenten Theorie zur Erklärung von Vorgängen im „Plasmauniversum“ gelang.

Alfvén war ein Physiker und Mathematiker, ein Theoretiker, der seine kreativen Ideen über die Vorgänge im Universum gerne auch anhand von Laborexperimenten überprüft haben wollte. Er beschrieb das Plasma als einen besonderen Materiezustand, wonach die quasi-neutrale Materie fast überall im Universum, teilweise ionisiert aus meist positiv geladenen Ionen und negativen Elektronen bestehend, in charakteristischer Weise mit dem Fließen elektrischer Ströme sowie der Existenz kosmischer Magnetfelder verbunden ist. Er äußerte erste Ideen über magnetische Beschleunigungsmechanismen für die kosmische Strahlung, analysierte die Ringströme in der Magnetosphäre der Erde sowie den Einfluss erdmagnetischer Stürme auf die Polarlichtstrukturen.

Als einer der „Väter der Weltraumphysik“ entwickelte Hannes Alfvén grundlegendes Handwerkzeug nicht nur für die Theoretiker. Er

kreierte das anschauliche und wirkungsvolle Bild der sogenannten „Eingefrorenheit“ magnetischer Feldlinien in ein Plasma mit theoretisch unendlich hoher elektrischer Leitfähigkeit. Die Entwicklung magnetischer Feldstrukturen und die Bewegung der Plasmamaterie sind danach fast überall im Universum wechselseitig eng aneinander gebunden. Durch seine Intuition wurden die hydromagnetischen „Alfvén-Wellen“ entdeckt, deren Bedeutung heute in vielen Bereichen der Plasmaphysik so weitreichend ist. Auch der indische Nobelpreisträger Subrahmanyan Chandrasekhar, der 1983 für seine Arbeiten über Theorien zur späten Entwicklungsphase massereicherer Sterne ausgezeichnet wurde, zählt zu den frühen Begründern der Theorie der Magnetohydrodynamik. Er führte wichtige Stabilitätsanalysen für aufgeheizte, rotierende und von Magnetfeldern durchsetzte Plasmamaterie durch.

1955 entwickelte der amerikanische „solare“ Astrophysiker Eugene N. Parker ein erstes anschauliches Dynamomodell zur Erzeugung kosmischer Magnetfelder durch magnetische Induktionsprozesse. Als einer der Ersten hatte er die Idee von der Freisetzung gespeicherter magnetischer Energien in einem als Rekonnexion bezeichneten Prozess. In einem einfachen Modellbild treffen dabei magnetische Feldlinien mit entgegengesetzt orientierten Feldanteilen aufeinander. Sie werden „zerschnitten“ und im selben Moment unter Ausbildung veränderter magnetischer Strukturen wieder neu verbunden. Die Argumentation im Bild der Eingefrorenheit magnetischer Feldlinien muss bei einem solchen, in dünnen Stromschichten bei begrenzter elektrischer Leitfähigkeit ablaufenden Prozess vorübergehend außer Kraft gesetzt werden.

Während Materie, teilweise entkoppelt, durch die Magnetfeldstrukturen hindurch diffundieren kann, werden lokal elektrische Felder erzeugt, die geladene Teilchen beschleunigen, die Ausbreitung magnetohydrodynamischer Wellen anregen können. Parker entwickelte nicht nur Ideen über den Ursprung des Sonnenwindes und die Aufheizung der Sonnenkorona unter Magnetfeldeinfluss. Er erarbeitete

wesentliche theoretische Grundlagen über den Einfluss kosmischer Magnetfelder fast überall im Universum.

Die Organisation und Entwicklung kosmischer Materiestrukturen durch magnetische Kräfte unterscheidet sich von der durch Gravitationskräfte in ganz entscheidenden Punkten. Materie unter Gravitationseinfluss zieht sich zusammen und bildet eher kugel- oder scheibenförmige Strukturen sowie Orbitalbahnen aus. Demgegenüber vermitteln magnetische Kräfte verstärkt explosionsartige Expansionsbewegungen, die begrenzende schichten-, hüllen- oder röhrenförmige Gebilde erzeugen. Bei Freisetzung von Gravitationsenergie wird meist thermische elektromagnetische Strahlung ausgesandt. Die Dissipation magnetischer Energien führt demgegenüber eher zur Beschleunigung von Teilchen, zur Erzeugung heißerer nicht-thermischer Strahlung. Gravitativ dominierte Prozesse induzieren in der Regel verdichtende und ordnende, magnetische Prozesse verstärkt auftreibende und turbulente Bewegungsmuster. Kosmische Magnetfelder sind von daher eher als das „radikale Element“ im Universum anzusehen. Sie können den „kosmischen Frieden“ vehement stören. Überall im Universum treibt, kanalisiert und wandelt ein besonders wirksamer „magnetischer Organismus“ den von Sternen und Galaxien ausgehenden Energiefluss um.

Von den „unsichtbaren“ elektromagnetischen Kräften geht für viele Menschen eine besondere Faszination aus. Im täglichen Leben sind ihre verdienstvollen Einflüsse heute für uns unentbehrlich. Motoren, Generatoren und Transformatoren, Transport- und Telekommunikationseinrichtungen prägen nicht nur unseren Alltag in besonderem Maße. Ohne die Kenntnis über ihr Wirken könnte der Vorstoß der Menschheit ins Weltall nicht gelingen, ließen sich die Vorgänge im Universum von Wissenschaftler nicht erforschen. Wir wissen, dass elektrische Felder in technischen Einrichtungen geladene Teilchen bewegen, dass es die elektrischen Ströme sind, die magnetische Felder erzeugen. Wenn wir einen Schalter schließen, dann sind wir es gewohnt, dass die Folgen davon umgehend mit fast Lichtgeschwin-

digkeit gleichzeitig überall in den Stromkreis hineinkommuniziert werden. Eine Lichtquelle leuchtet, eine Heizungsquelle gibt Wärmestrahlung ab, ein Motor startet und ein Fernseher informiert uns durch Aussendung von Bild und Ton.

Ein tieferes Verständnis der im Plasma-Universum ablaufenden beeindruckenden Vorgänge erfordert einen deutlich veränderten Blick auf die Einflussnahme elektromagnetischer Felder. Hier ist es in erster Linie das Zusammenspiel von Magnetfeldern und den Geschwindigkeitsfeldern ionisierter Teilchen im besonders dünnen und stoßfreien Plasma, das die Dynamik der ablaufenden Prozesse bestimmt. Aufgrund der freien Beweglichkeit sowohl negativer als auch positiver Teilchen werden sich im strömenden Plasma kaum elektrische Felder ausbilden können. Dennoch müssen im Universum lokal doch immer wieder besonders starke elektrische Felder erzeugt werden. Ohne sie wäre die beobachtete Beschleunigung kosmischer Partikelstrahlung auf besonders hohe Geschwindigkeiten nicht zu erklären. Ganz anders als im Labor auf der Erde erfolgt die Kommunikation über Veränderungen in den Plasmastrukturen des Universums schwerfälliger entlang großskaliger Magnetfeldstrukturen durch sogenannte magnetosonische Wellen, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit deutlich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit ist.

Dieses Buch soll den Leser über all das informieren, was die Erforschung des Einflusses kosmischer Magnetfelder auf die vielfältigen und faszinierenden Vorgänge in unserem Universum auch für den Wissenschaftler so spannend macht. Die große Bedeutung dieser Krafteinwirkung für die Entwicklung von Galaxien, Sternen und Planeten, ihre wichtige Rolle im turbulenten interplanetaren, interstellaren und intergalaktischen Medium sowie beim Ablauf hoch-energetischer Prozesse im Universum wird dabei erst seit wenigen Jahrzehnten ausreichend gewürdigt.

Moderne bodengestützte Teleskope oder von Satelliten aus betriebene Observatorien mit ihren technisch hoch entwickelten Messinstrumenten und Kameras liefern heute eine Fülle räumlich, zeitlich und spektral hochaufgelöster Bilder und Messdaten. Informationen erhalten die Astronomen für alle möglichen Wellenlängen-Bereiche des elektromagnetischen Spektrums. Zunehmend „reifere“ Theorien werden wirkungsvoll modelliert, dafür hoch entwickelte Computer-Codes geschrieben. Umfangreiche Simulationsrechnungen können auf besonders leistungsfähigen und schnellen Rechnern mit hoher Speicherkapazität durchgeführt werden. Im Labor durchgeführte Analog-Experimente unterstützen heute grundlegende Erkenntnisgewinnungsprozesse.

Die Resultate von Computersimulationen lassen sich mit den Beobachtungsdaten vergleichen. Die Berücksichtigung unterschiedlicher physikalischer Einflussfaktoren sowie die Variation von Eingangsdaten ermöglichen dabei ein „numerisches Experimentieren“ am Computer. Den Forscher zufriedenstellende Ergebnisse liegen immer dann vor, wenn die beobachteten und berechneten Daten einigermaßen konsistent übereinstimmen. Farbenprächtige Abbildungen, vereinfachte Animationen oder die anschauliche Darstellung gerechneter Entwicklungsabläufe in Form von Videosequenzen bieten heute selbst dem astronomischen Laien tiefe und sie besonders beeindruckende Einblicke auch in das „magnetische“ Universum.

In Kap. 1 dieses Buches wird ein Überblick über die große Bedeutung kosmischer Magnetfelder gegeben. Es werden offensichtliche Indizien für deren Existenz im Universum aufgezeigt, historische Aspekte erläutert, Messmethoden zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte sowie Messergebnisse für Magnetfelder unterschiedlicher Himmelsobjekte vorgestellt. Das Sonnensystem als „Plasmalabor“ ist das Thema des 2. Kapitels. In relativ großer Nähe zur Erde bieten sich dem Wissenschaftler hier „vor Ort“ beste Möglichkeiten, grundlegende Eigenschaften kosmischer Magnet-

felder und der durch sie beeinflussten Entwicklungsprozesse zu studieren. Nach einer Erläuterung des Plasmabegriffs werden die magnetischen Feldstrukturen der Heliosphäre, der Planeten und Kometen vorgestellt. Parallel dazu werden die Erzeugung kosmischer Magnetfelder in sogenannten Dynamoprozessen sowie die Wirkungsweise magnetischer Rekonnexion als zentralem Prozess zur Freisetzung magnetischer Energien erläutert. Mit den Beschleunigungsprozessen an Schockfronten und der Ausbreitung magnetisch unterstützter Wellen sollen wichtige, nicht nur für die Entwicklung des „Weltraumwetters“ in der „heimischen“ Heliosphäre relevante grundlegende physikalische Prozessabläufe vorgestellt werden.

In Kap. 3 geht es um die Rolle der Magnetfelder im Laufe der Entwicklung unterschiedlicher Sterntypen und Sternsysteme von ihrer Geburt bis zum Lebensende. Unter anderem durch ihre Kopplung an die Plasmamaterie und die Unterstützung des Abtransports von Drehimpuls nehmen sie Einfluss auf die Verdichtung und den Kollaps von Molekülwolken, auf die Ausbildung von Scheiben-Jet-Strukturen sowie von Planetensystemen um junge Protosterne. Es werden die typischen Magnetfeldstrukturen unterschiedlich masse-reicher Sterntypen vorgestellt. Die magnetischen Prozesse werden erläutert, die am Ende des Sternenlebens von kompakten Objekten wie Weißen Zwergen, Neutronensternen oder Magnetaren eine zentrale Rolle spielen. Sie sind wesentlich für die Entwicklung von Supernova-Explosionen und Gammastrahlen-Ausbrüchen unter anderem auch in Doppelstern-Systemen.

Wie sind eigentlich die für den Dynamoprozess unentbehrlichen magnetischen Saatfelder im frühen Universum entstanden? Wie lassen sich die mit Magnetfeldern durchsetzten Spiralstrukturen vieler Galaxien erklären? Warum zeigen auch die aktiven Galaxien ähnlich wie die jungen Sterne eng kollimierte Jet-Strukturen, in denen Plasmamaterie gebündelt und beschleunigt in den intergalaktischen Raum geschossen wird? Kann die hochenergetische kosmische Strahlung auch bei der Kollision von Galaxienhaufen erzeugt wer-

den? Um eine mögliche Beantwortung all dieser Fragen soll es im 4. Kapitel über den Einfluss kosmischer Magnetfelder im besonders fernen Universum gehen.

Von der Beobachtung zur Theorie, über die Modellierung bis zur Simulationsrechnung werden im letzten Kapitel alle wichtigen Arbeitsschritte im wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnungsprozess zusammenfassend vorgestellt. Was werden die Astronomen und Astrophysiker in Zukunft alles unternehmen, um noch mehr über die im Plasma-Universum ablaufenden faszinierenden magnetischen Prozesse zu erfahren? Welche Rolle können in diesem Zusammenhang im Labor auf der Erde durchgeführte Analog-Experimente spielen? Welche neuen Teleskope werden den Theoretikern in Zukunft Zugang zu noch besseren Beobachtungsdaten verschaffen? In diesem 5. Kapitel geht es unter anderem um die Faszination, die Notwendigkeit, aber auch um die Grenzen der Erkenntnisgewinnung. Wissenschaftliches Arbeiten wird stets auch den Zweifel als Methode akzeptieren müssen. Werden wir jemals die im Universum ablaufenden magnetischen Prozesse zufriedenstellend verstanden haben, oder genießen wir einfach nur die wachsenden Erkenntnisse über die Wunder des Lebens in einem magnetischen Kosmos? Am Ende der einzelnen Kapitel dieses Buches findet der Leser jeweils Verzeichnisse mit weiterführender Literatur. Im Text selbst wird immer wieder auch auf farbige Bildtafeln im Anhang hingewiesen. Anspruchsvollere mathematisch-physikalische Grundlagen zum tieferen Verständnis magnetischer Prozesse werden in mehreren den Text begleitenden Einschüben erläutert. Im Glossar werden die Fachbegriffe definiert, die im Zusammenhang mit dem Studium kosmischer Magnetfelder bedeutsam sind.

Magnetischer Kosmos

To B or not to B

von Kusserow, U.

2013, XVI, 311 S. 63 Abb., 32 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-642-34756-6