

Ulrich von Kusserow

Magnetischer Kosmos

To B or not to B

SACHBUCH



Springer Spektrum

Magnetischer Kosmos

Ulrich von Kusserow

Magnetischer Kosmos

To B or not to B



Springer Spektrum

Ulrich von Kusserow
Bremen
Deutschland

ISBN 978-3-642-34756-6
DOI 10.1007/978-3-642-34757-3

ISBN 978-3-642-34757-3 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Planung und Lektorat: Dr. Vera Spillner, Stefanie Adam

Einbandabbildung: Hana Druckmüllerová, Úpice Observatory, Miloslav
Druckmüller 2008

Einbandentwurf: deblik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-spektrum.de

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, Georg 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 auftriebende 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 hochenergetischer 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.

Inhalt

Prolog	V
1 Magnetfelder im Universum	1
1.1 Indizien für ihre Existenz	4
1.2 Historisches über kosmische Magnetfelder	8
1.3 Bedeutung kosmischer Magnetfelder für die astrophysikalische Forschung	18
1.4 Vermessung kosmischer Magnetfelder	26
1.5 Bedeutung kosmischer Magnetfelder für den Menschen	39
2 Das Sonnensystem als Plasmalabor	43
2.1 Materie im Plasmazustand	44
2.2 Solare Magnetfelder	61
2.3 Dynamotheorien zur Erzeugung kosmischer Magnetfelder	78
2.4 Magnetfelder im Planetensystem	97
2.5 Magnetische Rekonnexionsprozesse	109
2.6 Heliophysik und das Weltraumwetter	120
2.7 Heliophysik und der magnetische Kosmos	142
3 Sternentwicklung und Magnetfelder	147
3.1 Sternentstehung in Molekülwolken	152
3.2 Protostellare Scheiben-Jet-Strukturen	158

3.3	Entwicklung der Sternsysteme.....	174
3.4	Supernova-Explosionen und Gammastrahlen-Ausbrüche	189
4	Magnetische Galaxien und Galaxienhaufen.....	199
4.1	Galaktische Magnetfelder	203
4.2	Ursprung galaktischer Magnetfelder	212
4.3	Dynamische galaktische Prozesse	222
4.4	Kosmologische Magnetfeldeinflüsse.....	228
5	Magnetische Erkenntnisgewinnungsprozesse	233
5.1	Von der Beobachtung zur Theorienbildung ...	234
5.2	Magnetische Laborexperimente	236
5.3	Die Zukunft der Erforschung kosmischer Magnetfelder	241
5.4	Faszination und Grenzen der Erkenntnisgewinnung	244
	Weiterführende Literatur.....	251
	Epilog.....	253
	Anhang	257
	Bildtafelnachweis.....	293
	Glossar.....	297
	Index	303

Magnetfelder im Universum

„Magnetische Felder sind für die Astrophysik das, was die Sexualität für die Psychoanalyse ist.“

Hendrik C. van de Hulst, 1987

Die Gestalt des Himmels der Fixsterne hat also keine andere Ursache, als eben eine dergleichen systematische Verfassung im Großen, als der planetische Weltbau im Kleinen hat, indem alle Sonnen ein System ausmachen, dessen allgemeine Beziehungsfläche die Milchstraße ist ... Wenn man einestheils erwägt: daß 6 Planeten mit 10 Begleitern, die um die Sonne, als ihren Mittelpunkt, Kreise beschreiben ... welche ihrer alle Umläufe durch die Kraft der Anziehung regieret ... so wird man bewogen, zu glauben ... daß die Einträchtigkeit in der Richtung und Stellung der planetischen Kreise eine Folge der Übereinstimmung sei, die sie alle mit derjenigen materialischen Ursache gehabt haben müssen, dadurch sie in Bewegung gesetzt worden. Wenn wir andertheils den Raum erwägen, in dem die Planeten unsers System herumlaufen, so ist er vollkommen leer und aller Materie beraubt ... Newton ... behauptete, die unmittelbare Hand Gottes habe diese Anordnung ohne die Anwendung der Kräfte der Natur ausgerichtet (Kant 1755).

Immanuel Kant (1724–1804) hat in seinen Abhandlungen über die „Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels“ die Rolle der Fixsterne in unserer Milchstraße, den Aufbau unseres Sonnensystems sowie die Bewegungsverhältnisse der Planeten und Monde bereits vor mehr als 250 Jahren in bemerkenswerter Klarheit

umrissen. Die vor ihm geborenen Naturphilosophen, Mathematiker, Physiker und Astronomen Nikolaus Kopernikus (1473–1543), Johannes Kepler (1571–1630), Galileo Galilei (1564–1642) und vor allem Isaac Newton (1642–1726) waren es wohl, denen der Professor für Philosophie seine tiefen Einsichten zu verdanken hatte. Die Wiederentdeckung des heliozentrischen Weltbildes, die Gesetze der Planetenbewegung, die Benutzung des Teleskops zur Himmelsbeobachtung, die Erforschung der Fallgesetze und der Einsatz mathematischer Methoden zur Erkenntnisgewinnung müssen zu den überragenden, revolutionären Entwicklungen dieser Zeit gerechnet werden. Galilei konnte beobachten, dass die Milchstraße aus „unendlich“ vielen Fixsternen besteht, dass dunkle Flecken auf der Sonne sich sogar zeitlich entwickeln, entstehen und vergehen können.

Newton schaffte mit seiner Infinitesimalrechnung die Grundlagen nicht nur der klassischen Mechanik, er entdeckte die Schwerkraft als Verursacher der Planetenbewegung. Er führte eine Teilchentheorie des Lichts ein, erklärte die spektrale Lichtzerlegung mithilfe von Prismen. Das erste funktionierende Spiegelteleskop wurde von ihm angefertigt. Er erstellte einen Sternkatalog mit Sternkarten, machte sich Gedanken über die Entstehung der Fixsterne. Seine Aussagen über die Absolutheit von Raum und Zeit wurden erst fast 200 Jahre später durch die Relativitätstheorien von Albert Einstein (1879–1955) begründet widerlegt. In Abwandlung des Newton'schen Teilchenmodells wurde dieser bekannteste Wissenschaftler unserer Zeit für seine Interpretation des photoelektrischen Effekts, eines der Schlüsselexperimente zur Begründung der Quantenphysik, 1905 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Die Gravitationskraft spielt heute vor dem Hintergrund der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins eine zentrale Rolle in der modernen Astrophysik. Längst ist aber auch erkannt, welche große Bedeutung Rotationsbewegungen und der Transport von Drehimpuls für Strukturbildungs- und Entwicklungsprozesse überall im nahen und fernen Universum haben. Die vor knapp

100 Jahren entdeckten Kernfusionsprozesse bewirken bekanntlich die Energieerzeugung und dynamische Entwicklung von Sternen. Neben den hierfür verantwortlichen starken Kernkräften bestimmen die sogenannten schwachen Kernkräfte die Zerfälle und Umwandlungen radioaktiver Atomkerne. Diese beiden Grundkräfte der Physik wirken nur auf besonders kurzen Abständen. Die von ihnen ausgeübten Wechselwirkungsprozesse sind für uns im Alltag von daher kaum erfahrbar.

Wie die Gravitations- oder Trägheitskräfte, Zentrifugal- und Corioliskräfte in beschleunigten und rotierenden Systemen sind die Auswirkungen elektromagnetischer Kräfte auf großen Längenskalen spürbar. Die durch sie vermittelten Prozesse bestimmen in modernen Gesellschaften den Ablauf des täglichen Lebens in herausragender Weise. Das aktuelle Ausmaß der Strom-, Licht- und Energieerzeugung, die Anwendung der Elektronik hoch entwickelter technischer Systeme in Bereichen der Produktionstechnik, des Transportwesens, der Telekommunikation und der Nahrungsmittelherstellung wären ohne tiefgreifende Kenntnisse der zugrunde liegenden Physik undenkbar. Dieser Sachverhalt ist vielen Menschen heute mehr oder weniger bewusst. Über die große Bedeutung und den Ablauf elektromagnetisch vermittelter Prozesse im fernen Universum sind sie in der Regel aber sehr viel weniger informiert. Selbst Albert Einstein hielt die häufige Umpolung des Erdmagnetfeldes für eines der ungeklärtesten Phänomene seiner Zeit. Wir wissen heute, dass kosmische Magnetfelder auf die Strukturbildungs- und Entwicklungsprozesse in Stern-, Galaxien- und Planetensystemen Einfluss nehmen können. Neben der Gravitationskraft bestimmen sie den Ablauf hochenergetischer Prozesse überall im Universum. Und ohne sie wäre unser Leben auf der Erde wohl auch gar nicht möglich.

Auch wenn von der Stärke eines Hufeisenmagneten und der beharrlichen Ausrichtung der Kompassnadel im Erdmagnetfeld für viele Menschen eine große Faszination ausgeht, so blieb die besondere

Bedeutung magnetischer Prozesse selbst im frühen und fernen Universum häufig doch im Dunkeln. Das von Planeten und Kometen, der Sonne und anderen Sternen, der Milchstraße, der Andromeda-Galaxie und den Magellan'schen Wolken ausgesandte Licht fällt beim Blick auf den Sternenhimmel unter geeigneten Beobachtungsbedingungen in unser Auge. Diese Objekte können wir sehen, bewundern und „erleben“. Wir haben aber kein Sinnesorgan, das die fernen magnetischen Eindrücke registrieren und für uns direkt erfahrbar machen könnte. Welche Magnetfeldstrukturen würde man im Universum erblicken, wenn es eine Brille gäbe, mit der sie sich direkt beobachten ließen?

Im folgenden Abschnitt werden die mit Sonnenfinsternis-, Kometen- und Polarlichterscheinungen verbundenen Phänomene aufgezeigt, anhand derer man bereits durch Beobachtung mit dem „unbewaffneten“ Auge auf die Existenz kosmischer Magnetfelder schließen, zumindest indirekt den Verlauf magnetischer Feldstrukturen erkennen könnte. Anschließend sollen die historischen Aspekte der Entdeckung dieser Felder in den unterschiedlichsten Himmelsobjekten betrachtet, ihre weitreichende Bedeutung für die unterschiedlichsten Prozesse im Universum überblickartig erläutert werden. Wie lassen sich die so weit entfernten kosmischen Magnetfeldstrukturen eigentlich vermessen, und wie stark sind sie im Vergleich zum Erdmagnetfeld? Nach Beantwortung dieser Fragen soll noch einmal die Bedeutung und besondere Faszination der Auseinandersetzung mit Prozessen im magnetischen Kosmos für die Wissenschaft, aber auch für den das Universum „erforschenden“ Menschen herausgestellt werden. Auf einflussreiche Magnetfelder trifft man fast überall im Kosmos.

1.1 Indizien für ihre Existenz

Der Ablauf einer vollständigen Sonnenfinsternis wird in der Regel von vielen Millionen Menschen mit großer Faszination verfolgt. Neben der besonderen Stimmung am plötzlich dunklen Beobachtungsort

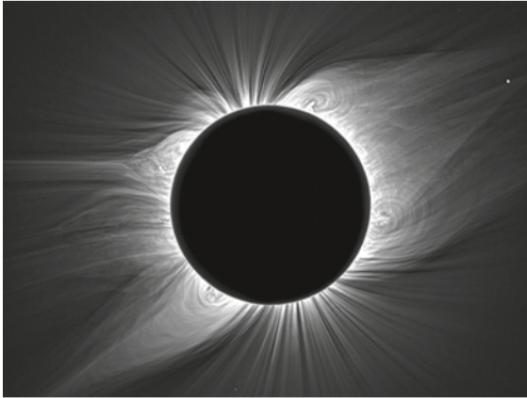


Abb. 1.1 Blick auf die Sonnenkorona während einer Sonnenfinsternis. Die mit hoch entwickelten mathematischen Methoden aufbereitete Abbildung zeigt kontrastverstärkt feinste solare magnetische Feldstrukturen bis in den interplanetaren Raum hinaus. Die Betrachtung des Verlaufs der magnetischen „Polstrahlen“ in höheren sowie der „helmförmigen Wimpel“ in niedrigeren heliografischen Breiten vermittelt einen Einblick in die komplexe Dynamik des magnetisierten koronalen Plasmas. (© H. Druckmüllerová, M. Druckmüller, BNRO Univ. of Technology)

beeindruckt vor allem der Blick auf die hell und filigran strukturiert erscheinende Sonnenkorona. Viele Amateurastronomen setzen heute moderne Teleskope und Kameras ein, um die Feinstrukturen der äußeren solaren Atmosphärenschichten möglichst hochaufgelöst sichtbar zu machen. Nach geeigneter Bildbearbeitung erkennen sie auf ihren Aufnahmen rötlich leuchtende Strukturen in der tieferliegenden Chromosphäre sowie feingliedrige, strahlen- oder wimpelförmige Aufhellungen in der Korona der Sonne (Abb. 1.1, BT 01). Jedem interessierten Beobachter müsste sich dabei die Frage stellen, wodurch diese auffallende Strukturierung wohl entstanden sein könnte. So mancher Amateurastronom hat natürlich davon gehört, dass das relativ zum Erdmagnetfeld starke Magnetfeld der Sonne Verursacher dieses beeindruckenden Phänomens ist.

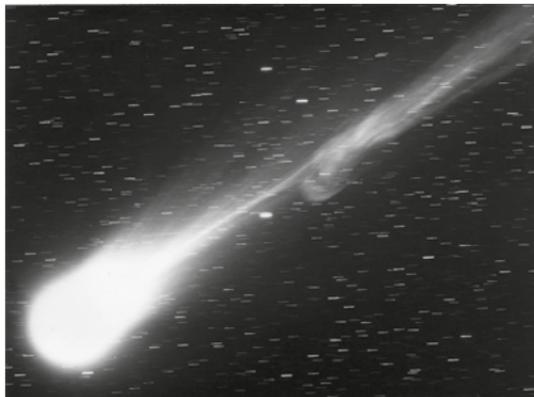


Abb. 1.2 Koma- und Schweifstruktur des Kometen Hyakutake. Auf dieser mehrere Minuten lang belichteten Kometenaufnahme erkennt man vor den Lichtspuren der Sterne besonders lang gestreckte und geradlinige helle Bänder im Kometenschweif. Sie haben sich unter dem Einfluss der am Kometenkopf gefalteten interplanetaren Magnetfeldstrukturen ausgebildet. Im hinteren Teil des Schweifs haben magnetische Instabilitäten einen teilweisen Schweifabbriss ausgelöst. (© E. Kolmhofer, H. Raab, Johannes-Kepler-Observatory, Linz, Österreich)

Um das Jahr 1997 konnte der „Große Komet“ Hale-Bopp von sehr vielen Menschen über einen Zeitraum von insgesamt 16 Monaten mit bloßem Auge bewundert werden. Für manche Beobachter war der 1996 nur sehr viel kürzer mit „unbewaffnetem“ Auge zu verfolgende Komet Hyakutake allerdings eine noch beeindruckendere Erscheinung am Sternenhimmel (BT 02). Die Länge seines besonders schmalen, filamentartig und teilweise fadenförmig strukturierten Schweifs betrug immerhin mehr als 500 Mio. km, und Amateurastronomen konnten schon mit relativ kleinen Teleskopen spektakuläre Kometenschweifabbrisse beobachten (Abb. 1.2).

Wie vielen Menschen ist eigentlich bewusst, dass die von der Sonne ausgehenden interplanetaren Magnetfelder generell für die Ausprägung der so charakteristischen und komplexen Erscheinungsbilder von Kometenstrukturen wesentlich mitverantwortlich sind, dass



Abb. 1.3 Polarlichterscheinungen. Komplex strukturierte Leuchterscheinungsmuster der Aurora borealis, der in nördlichen Breiten zu beobachtenden Polarlichter. Durch das Einströmen des Sonnenwindes ausgelöst, werden elektrisch geladene Teilchen aus der Magnetosphäre der Erde in elektrischen Feldern innerhalb der Ionosphäre stark beschleunigt. Sie treffen hier auf Atome und Moleküle, regen diese zum Leuchten an. Zugrundeliegende erdmagnetische Feldstrukturen nehmen deutlichen Einfluss auf die Formgebung der zu beobachtenden charakteristischen Lichtstrukturen. (© A. Hamann, M. Heinrich, Leipzig)

magnetische Instabilität die Ablösungen von Teilen der Kometschweife bewirken können?

Die sich häufig auch dynamisch entwickelnden farbenprächtigen Polarlichter haben die Menschen schon immer fasziniert (Abb. 1.3, BT 03). Sie haben zu Spekulationen über ihre Herkunft und Bedeutung angeregt. Mehr als 2000 Jahre alte Berichte zeugen davon, dass damals die Bewohner in hohen nördlichen und südlichen geografischen Breiten vorrangig den Einfluss von Göttern und Geistern für diese beeindruckenden Leuchterscheinungen verantwortlich machten. Sie interpretierten diese Erscheinungen oft als Vorboten drohenden Unheils. Auch wenn heute längst nicht alle Hintergründe im Zusammenhang mit ihrem Auftreten im Detail geklärt sind, so gelten die zugrunde liegenden physikalischen Entwicklungsprozesse doch in wesentlichen Teilen als verstanden. Die sich hinsichtlich ihrer Form und Lage mehr oder weniger schnell ändernden, grünlich, rot oder violett gefärbten Leuchterscheinungen werden durch

die in der Magnetosphäre und Ionosphäre der Erde ablaufenden Prozesse erzeugt. Anhand des Verlaufs der bänder- oder bogenförmigen, vorhangartigen Polarlichtstrukturen kann der Beobachter indirekt auf die mögliche Ausrichtung magnetosphärischer Feldstrukturen schließen.

Schon vor Christi Geburt waren Menschen von der Kraftwirkung der Magneten tief beeindruckt. Für die beharrliche Ausrichtung einer frei beweglichen magnetisierten Kompassnadel in eine nord-südliche Vorzugsrichtung wurde zunächst entweder ein himmlischer oder aber ein auf der Erdoberfläche befindlicher Anziehungspunkt verantwortlich gemacht. Erst 1600 stellte William Gilbert (1544–1603), Hofarzt der Königin Elisabeth I. von England, in dem ersten wissenschaftlichen Buch über den Magnetismus mit dem Titel „De magnete“ die Hypothese auf, dass die Erde als Ganzes ein großer Kugel-Magnet sei. Heute haben viele Menschen schon einmal einen Kompass in der Hand gehalten. Sie gehen wie selbstverständlich davon aus, dass die Erde ein globales Magnetfeld besitzen muss. Welche speziellen Eigenschaften es hat, wie und wo genau es entsteht, wie es sich entwickelt, darüber haben sie in der Regel keine allzu sicheren Vorstellungen. Die bisher aufgezeigten Indizien für die grundsätzliche Existenz von Magnetfeldern im Kosmos sind vielleicht noch nicht überzeugend genug. Auch historisch gesehen hat der Nachweis des Vorhandenseins und der besonderen Bedeutung dieser Kraftfelder lange auf sich warten lassen (Tab. 1.1).

1.2 Historisches über kosmische Magnetfelder

Christoph Columbus (1446–1506) und der Instrumentenmacher Georg Hartmann (1489–1564) entdeckten bis 1510 die Deklination und Inklination, die ortsabhängige, horizontale beziehungsweise vertikale Abweichung der magnetischen Kompassnadeln von der

Tab. 1.1 Sammlung einiger historisch bedeutsamer Entdeckungen und Entwicklungen für die Erforschung der kosmischen Magnetfelder. Aufgelistet sind die Zeitangaben, Namen der mit dem jeweils aufgeführten Ereignis verbundenen Wissenschaftler sowie eine kurze Beschreibung des relevanten Sachverhalts

Jahreszahl	Name	Sachverhalt
1600	Gilbert	Hypothese über die Existenz eines globalen Erdmagnetfeldes
1741	Celsius	Beobachtung des Zusammenhangs zwischen den Kompassnadel-Auslenkungen und Polarlichterscheinungen
1851	Lamont	Bestätigung der Periodizität erdmagnetischer Stürme
1852	Wolf	Erkenntnisse über Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Sonnenflecken und erdmagnetischen Stürmen
1900-1908	Birkeland	Durchführung des Terella-Experiments, Erkenntnisse über die Entstehung der Polarlichter durch solare Partikel
1908	Hale	Erste Vermessung der Magnetfelder in Sonnenflecken
1919	Larmor	Entwicklung des Dynamoprinzips für die Erzeugung kosmischer Magnetfelder
1942	Alfvén	Entwicklung der Theorie der Magnetohydrodynamik
1945	Elsasser	Entwicklung einer Dynamo-Theorie für das Erdmagnetfeld
1946/49	Giovanelli/Hoyle	Erste Ideen zur magnetischen Rekonnexion
1949	Teller	Entwicklung einer Theorie des Interstellaren Magnetismus
1953	Chandrasekhar	Entwicklung einer Theorie des Galaktischen Magnetismus

Tab. 1.1 (Fortsetzung)

Jahreszahl	Name	Sachverhalt
1950	Kiepenheuer	Erklärung der galaktischen Radiostrahlung als Synchrotron-Strahlung
1951	Biermann	Hypothese über die Existenz des Sonnenwinds
1953-55	Babcock	Erfindung eines Magnetographen zur Messung solarer und stellarer Magnetfeldstärken
1957/58	Parker/Sweet	Erstes Modell zur magnetischen Rekonnexion
1958	Allen	Entdeckung und Vermessung des Strahlungsgürtels der Erde
1958	Babcock	Entdeckung der Umpolung des solaren Magnetfeldes
1960er-Jahre	Zeldovitch/Parker/Steenbeck/Krause/Rädler	Entwicklung der Dynamotheorie
1961	Price	Bestätigung der Existenz des Magnetfeldes der Milchstraße
1967	Bell/Hewish	Entdeckung der Pulsare
1968	Gerrit, Verschuur	Erste Vermessung des interstellaren Magnetfeldes
1976	Trümper	Messung des Magnetfeldes eines Neutronensterns
1977	Blandford/Znajek	Theorie zur Entwicklung von Jets in der Umgebung Schwarzer Löcher
1978	Beck/Berkhuijsen/Wielebinski	Entdeckung der Synchrotron-Polarisation in der Andromeda-Galaxie
1991	Balbus/Hawley	Theorie zum Drehimpuls-Transport durch Einsetzen der Magneto-Rotationsinstabilität
1996	Feretti, Giovannini	Entdeckung des Radio-Halos im Galaxienhaufen

exakten Ausrichtung zum Nordpol der Erde. Der englische Astronomieprofessor Henry Gellibrand (1597–1636) stellte 1635 in seinem Werk die These auf, dass sich die magnetische Deklination grundsätzlich im Laufe der Zeit ändern würde. Als Ursache dafür wurde später unter anderem die Wanderung der erdmagnetischen Pole verantwortlich gemacht. Immanuel Kant und Alexander von Humboldt (1769–1859) gehörten zu den Naturforschern, die die spontanen Änderungen der Kompassnadelausrichtungen auch nach Erdbeben oder Vulkanausbrüchen nachwiesen. Schon 1761 machte Edmond Halley (1656–1742), der Entdecker des nach ihm benannten berühmten Kometen, der eine erste Deklinationskarte der Welt gezeichnet hatte, auf einen möglichen Zusammenhang magnetosphärischer Prozesse mit dem Auftreten von Polarlichtern aufmerksam.

Die als „Aurora Borealis“ bezeichneten Polarlichter gehörten sicherlich zu allen Zeiten der Menschheitsgeschichte zu den faszinierendsten Erscheinungen am nördlichen Sternenhimmel. Erstmals 1561 beschrieb der Schweizer Konrad Geisner (1516–1565) sogar über Mitteleuropa beobachtbare Polarlichter detaillierter. Dass die dann als „Aurora Australis“ bezeichneten Polarlichter auch am Südsternhimmel auftreten, konnte Kapitän James Cook (1728–1779) 1773 auf seiner Südseereise nachweisen. Bereits 1741 wies der schwedische Naturforscher Anders Celsius (1701–1744) nach, dass Magnetnadeln während der dynamischen Entwicklung der Polarlichter Zitterbewegungen durchführen. Bei den beobachteten Schwankungen des Erdmagnetfeldes unterschied man später zwischen den regulären, sich täglich mehr oder weniger periodisch wiederholenden, sowie den irregulären, den in größeren Zeitabständen und während besonders starken Polarlichtererscheinungen auftretenden „erdmagnetischen Störungen“. Nach Einführung des Telegrafnetzes in der Mitte des 19. Jahrhunderts konnten immer wieder größere Unregelmäßigkeiten bei der Datenübertragung während des Auftretens starker Polarlichter beobachtet werden. Sogenannte „Magnetische Stürme“ wurden als Verursacher für die in elektrischen Leitungen gemessenen Spannungsschwankungen angesehen.

Leuchterscheinungen in elektrischen Gasentladungsröhren brachten den norwegischen Polarforscher Kristian Birkeland (1867–1917) auf die Idee, dass die von der Sonne ausgehenden beschleunigten und geladenen Partikel im Erdmagnetfeld die Polarlichter erzeugen könnten. Im sogenannten „Terrella“-Experiment beschoss er eine im Laborvakuum aufgehängte, von einem dipolartigen Magnetfeld durchsetzte Kugel mit einem Elektronenstrahl. Mit diesem Experiment konnte er im Jahre 1900 demonstrieren, dass dabei Polarlichtern ähnliche Leuchterscheinungen in beiden polnahen Bereichen der magnetisierten Kugel entstehen. Aktuelle Beobachtungen bestätigen, dass die nicht direkt an den Polen im Bereich der beiden Polarlichtovale der Erde auftretenden „Aurora Borealis“ und „Aurora Australis“ beinahe identische Merkmale aufweisen und sich zeitlich simultan verändern.

Auch der deutsche Physiker und Philosoph Johann Wilhelm Ritter (1776–1810) beschäftigte sich mit den Polarlichtern. Er äußerte 1803 die Vermutung, dass die Stärke dieser „magnetischen Gewitter“ mit einer Periode von etwa 10 Jahren schwankt. Der Astronom Heinrich Schwabe (1789–1875) war es, der passend dazu 1843 fast genau diese Schwankungsperiode in der Häufigkeit des Auftretens der schon mit kleineren Teleskopen auf der Sonne zu beobachtenden dunklen Flecken feststellte. 1851 entdeckte der Münchner Astronom und Physiker Johann von Lamont (1805–1879) solche periodischen Schwankungen auch für die erdmagnetischen Störungen. Der norwegische Astronom Christopher Hansteen (1784–1875) postulierte schließlich 1859 einen ursächlichen Zusammenhang zwischen den drei auf der Sonne, im Magnetfeld sowie in der Atmosphäre der Erde auftretenden Phänomene. Rudolf Wolf (1816–1893) erkannte, dass die gemeinsame Periodenlänge in Wirklichkeit etwa 11 Jahre beträgt.

Schon bald nach der Erfindung des Fernrohres waren es Forscher wie Galileo Galilei, die um 1610 „Sonnenverschmutzungen“ auf der Sonne entdeckt hatten. Sie hielten diese Sonnenflecken für Planeten

oder dunkle Wolken. Während solche Flecken von 1645 bis 1715 kaum noch beobachtet werden konnten, traten sie danach stets mehr oder weniger regelmäßig mit deutlich schwankender Häufigkeit und individueller Größe als Einzelflecken oder in Gruppen auf. Erste in Ansätzen physikalisch begründbare Zusammenhänge zwischen dem Auftreten dieser Sonnenflecken und den in der Erdmagnetosphäre ablaufenden Prozessen konnte Richard Christopher Carrington (1826–1875) im Jahre 1859 aufzeigen. Er beobachtete auf der Sonne erstmals einen sogenannten „Flare“, eine an diesem besonderen Tag sogar im sichtbaren Licht beobachtbare blitzartige Aufhellung in der Nähe einer Fleckengruppe. Als die damals bereits eingerichteten magnetischen Beobachtungsstationen in der darauffolgenden Nacht heftige magnetische Stürme vermeldeten, war er von dem nach Durchführung des Birkeland-Experiments vermuteten Zusammenhang zwischen diesen beiden Ereignissen überzeugt.

Nach der von William Gilbert stark beeinflussten, irreführenden „Magnetischen Theorie“ von Johannes Kepler mussten Magnetfelder nicht nur für die Bewegung der Planeten verantwortlich sein. Wie selbstverständlich gingen in den folgenden Jahrhunderten viele Gelehrte davon aus, dass es natürlich auch einen Sonnenmagnetismus geben müsste. Nach der Entdeckung der Induktionsgesetze durch Michael Faraday (1791–1867) wurde sogar schon darüber nachgedacht, ob ein solcher solarer Magnetismus möglicherweise über den Induktionsprozess nicht auch Einfluss auf das Erdmagnetfeld nehmen könnte. 1908 machte George Ellery Hale (1868–1938) schließlich einen entscheidenden Schritt nicht nur für Entwicklungsgeschichte der Sonnenforschung. Er wies nach, dass Sonnenflecken stets von magnetischen Feldstrukturen durchsetzt sind. Hierfür nutzte er den nach dem holländischen Physiker Peter Zeeman (1865–1943) benannten Zeeman-Effekt aus. Geeignete Spektrallinien des elektromagnetischen Spektrums spalten sich danach in starken Magnetfeldern in charakteristischer Weise in mehrere Linien auf. Die Stärke der Aufspaltung und die Art der Polarisation der einzelnen Linienkomponenten solcher magnetisch empfind-

licher Spektrallinien ermöglicht die genaue Vermessung zugrunde liegender Feldstrukturen. 1951 entwickelte Harold Delos Babcock (1882–1968) den ersten Magnetografen zur Vermessung von Magnetfeldern im Kosmos. 1958 zeigten er und sein Sohn Horace Welcome, dass die Periodenlänge eines magnetischen Aktivitätszyklus der Sonne etwa 22 Jahre betragen müsste. Sie konnten nachweisen, dass sich die magnetischen Polaritäten in den solaren Aktivitätsgebieten periodisch etwa alle 11 Jahre umkehren.

Der deutsche Astronom Ludwig Biermann (1907–1986) stellte 1951 die Hypothese auf, dass der Sonnenwind, ein von der Sonne in alle Richtungen ausgehender Strom teilweise ionisierter Gase, für die Ausbildung der Kometenschweife in Sonnennähe verantwortlich ist. Der schwedische Nobelpreisträger Hannes Olaf Alfvén (1908–1995) erkannte 1957, dass die von der Sonne stammenden, in die Plasmamaterie des Sonnenwindes eingelagerten interplanetaren Magnetfeldstrukturen wichtige Elemente der Kometenphysik darstellen. Diese einströmenden Felder werden am Kometenkopf so gefaltet, dass sie die Ausbildung der lang gestreckten Struktur des mit geladener Plasmamaterie gefüllten Kometenschweifs unterstützen. Erste „magnetische“ Theorien über die häufiger zu beobachtenden Kometenschweif-Abrisse und Zerfallsprozesse des Kometenkopfes wurden um 1980 gemacht. Danach strukturiert sich die als magnetische Topologie bezeichnete Geometrie der magnetischen Felder am Kopf oder im Schweif des Kometen in magnetischen Rekonnexionsprozessen kurzschlussartig um.

Können kosmische Magnetfelder durch das große Vakuum des Welt-raums hindurch eigentlich auch Einfluss auf entferntere Himmelskörper nehmen? Bereits 1659 bewies dies Robert Boyle (1626–1691) in seinen Experimenten. Er zeigte, dass magnetische Kraftfelder in einem von ihm erzeugten Vakuum tatsächlich den gleichen Einfluss nehmen wie in einem mit normaler Luft gefüllten Raum. Aber gibt es solche Magnetfelder überhaupt im fernen Universum?

Schon 1937 hatte Alfvén die Existenz stellarer Magnetfelder und von Magnetfeldern im Medium zwischen den Sternen anhand theoretischer Überlegungen vorhergesagt. 1946 wies Babcock als Erster ein starkes Magnetfeld in einem Stern mit der Bezeichnung 78 Virginis nach. Mithilfe des Zeeman-Effektes wurden danach weitere magnetische Sterne mit Magnetfeldern deutlich stärker als dem der Sonne entdeckt. 1949 erkannten Forscher die charakteristische Polarisation des von einem Doppelstern kommenden Licht, die durch die Ausrichtung von länglichen Staubpartikeln in einem zwischen den Sternen vermuteten Magnetfeld hätte kommen können. Den experimentellen Nachweis für die tatsächliche Existenz solcher interstellaren Magnetfelder erbrachte aber erst Gerrit L. Verschuur im Jahre 1968. Aus Richtung eines Supernova-Überrestes durch Wasserstoff-Wolken laufende zirkular polarisierte Radiowellen zeigten eine deutliche Aufspaltung. Mithilfe des Zeeman-Effektes konnte so im interstellaren Medium eine im Vergleich zur Erde etwa 100.000-mal schwächere magnetische Flussdichte gemessen werden (siehe Kap. 1.4).

Weißer Zwerge sowie Neutronensterne sind die Endprodukte in der Entwicklung unterschiedlich massereicher Sterne nach der Entstehung eines Planetarischen Nebels beziehungsweise nach einer Supernova-Explosion. Patrick M. S. Blackett (1897–1974) postulierte 1947 die Existenz von Magnetfeldern in Weißen Zwergen mit einer Stärke, die proportional zu deren Drehimpuls sein sollte. Seine niemals anerkannte Theorie wurde später durch die Vorstellung ersetzt, dass eingefrorene Magnetfeldstrukturen bei der Kontraktion eines dabei schneller werdenden Sterns an dessen Lebensende verdichtet und verstärkt werden müssten. 1970 wurde der Stern GJ 742 als Erster von bisher mehr als 100 magnetischen Weißen Zwergen entdeckt. Die Magnetfelder dieser alten Sterne können millionenfach so stark wie das der Sonne sein. Man geht heute davon aus, dass mindestens 10% der Weißen Zwerge relativ starke Magnetfelder besitzen.