

Kosmische Dynamos und magnetische Rekonnexionsprozesse

Ulrich v. Kusserow

Kurzfassung: Die Existenz und besonders vielfältige, auf unterschiedlichsten Raumabmessungen und Zeitskalen erfolgende Einflussnahme ganz unterschiedlich starker kosmischer Magnetfelder lässt sich heute fast überall im elektrisch sehr gut leitfähigen Universum nachweisen und plausibel erklären. Magnetische Felder können durch batterieähnlich getriebene Ströme erzeugt, bei Verdichtung magnetisierter Materie und in kosmischen Kollisionsfronten verstärkt und wesentlich vor allem in Dynamoprozessen generiert werden. Magnetische Rekonnexion bezeichnet eine im Kosmos offensichtlich verbreitet wirksame magnetische Instabilität, deren Einsetzen drastische Topologieveränderungen magnetischer Feldstrukturen sowie die Freisetzung der in Magnetfeldern gespeicherten Energien bewirkt. Sie löst Eruptionen aus, beeinflusst kosmische Turbulenzen, heizt Atmosphären auf und beschleunigt kosmische Partikel. In diesem Übersichtsartikel werden die geschichtlichen Aspekte der Entdeckung kosmischer Magnetfelder in den unterschiedlichen Himmelsobjekten ausführlicher behandelt, physikalisch-mathematische Modellvorstellungen zum Magnetismus in besonderer Weise didaktisch aufbereitet vorgestellt, um anschließend verschiedene Dynamotheorien und die physikalischen Hintergründe magnetischer Rekonnexionsprozesse möglichst anschaulich erklären zu können.

Stichworte: kosmische Magnetfelder – Geschichtliches – physikalisch-mathematische Modelle – Dynamotheorien – magnetische Rekonnexionsprozesse

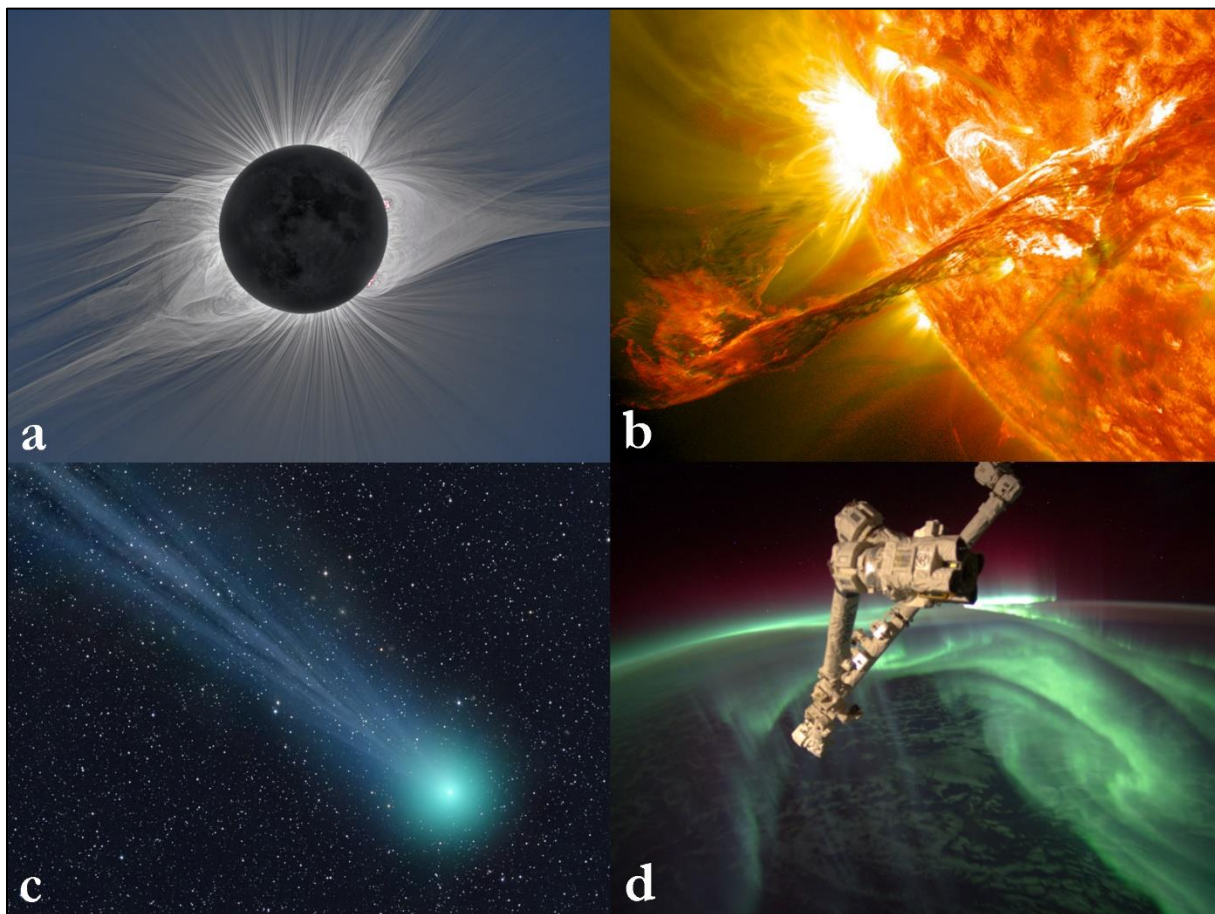


Abb. 1: Himmelsobjekte im Sonnensystem, bei denen kosmische Magnetfelder eine zentrale Rolle spielen: **a.** magnetisch strukturierte Sonnenkorona, **b.** solare Flares, Eruptionen und Koronale Masseauswürfe, **c.** magnetisierte Kometenschweife, **d.** ionosphärische Polarlichterscheinungen entlang erdmagnetischer Feldstrukturen. © M. Druckmüller/P. Aniol/S. Habbal, NASA/GSFC, P. Aniol/M. Druckmüller, NASA

1. Einführung

Geo-, Astrophysiker und Kosmologen haben in den vergangenen hundert Jahren erkannt und immer verlässlicher analysieren können, welchen dominierenden Einfluss kosmische Magnetfelder neben der Gravitationskraft auf unterschiedlichsten Längen- und Zeitskalen fast überall im Universum auf die Strukturbildungs- und Entwicklungsprozesse nehmen können. Die Erkenntnisse dieser Wissenschaftler beruhen zum einen auf der Auswertung einer immer größeren Anzahl verlässlicher und zunehmend höher aufgelöster Beobachtungs- und Messdaten, die mit Hilfe moderner bodengestützter oder von Satelliten aus arbeitender Teleskope und Messinstrumente gewonnen werden. Einhergehend mit den Ergebnissen hochentwickelter analytischer Modell- und numerischer Simulationsrechnungen, die in den letzten Jahrzehnten auf immer leistungsfähigeren Computersystemen durchgeführt werden konnten, sowie von „kosmischen“ Laborexperimenten, die sich in Forschungslabors selbständig und skaleninvariant realisieren lassen, werden die Gültigkeiten grundlegender, oft als paradigmatisch angesehener Theorien basierend auf bekannten physikalischen Gesetzen immer besser bestätigt.

Dynamoprozesse generieren die Magnetfelder in Planeten wie der Erde, in Sternen wie der Sonne und Galaxien wie unserer Milchstraße (Abb. 1, Abb. 4). Diese Prozesse laufen in elektrisch häufig sehr gut leitfähigen Plasmen und metallischen Fluiden ab, die in vermutlich etwa 99% des Universums anzutreffen sind. Hier wie in interplanetaren, interstellaren und intergalaktischen Räumen treiben kosmische Magnetfelder dynamische Prozesse, die Instabilitäten, gewaltige Eruptionen, die Entwicklung von Turbulenzen sowie wellenartig sich ausbreitende Störungen zur Folge haben können. Magnetische Felder unterstützen den Materie-, Drehimpuls- und Energietransport in den Scheibe-Jet-Strukturen junger protostellarer Systeme, im Umfeld kompakter Sternobjekte am Ende ihres Lebens, in aktiven galaktischen Kernen und bei Kollisionen von Galaxienhaufen. Sie ermöglichen Materieverdichtungen, bewirken die Heizung von Materie in den unterschiedlichsten Atmosphären, treiben und bündeln Materiewinde und bewerkstelligen die Strahlungsemission sowie die Beschleunigung hochenergetischer kosmischer Teilchen. Wenn es zu Beginn der Entwicklungsgeschichte unseres Universums tatsächlich einen Urknall gegeben haben sollte, so müssten nach neuesten Erkenntnissen Magnetfelder vermutlich danach bereits relativ früh die kosmische

Strukturbildung und Entwicklung entscheidend mitgeprägt haben.

In magnetisierten Plasmen und metallischen Fluiden setzen beim Aufeinandertreffen entgegengesetzter orientierter magnetischer Feldkomponenten in den dazwischenliegenden elektrischen Stromschichten die als magnetische Rekonnexion bezeichneten Instabilitäten ein. In lokal besonders eng begrenzten Gebieten lösen sich die topologischen Strukturen der Magnetfelder dabei plötzlich auf und verbinden sich ohne jegliche Zeitverzögerung mit unter Umständen gravierenden globalen Auswirkungen wieder neu (Abb. 2b). Die Einflussnahme dieser Instabilitäten ist unter anderem erforderlich, um die Erzeugung kosmischer Magnetfelder in Dynamoprozessen zu erklären. Rekonnexionsprozesse treiben die Entwicklung in Turbulenzfeldern, unterstützen die Aufheizung stellarer Atmosphären und ermöglichen die Beschleunigung hochenergetischer Teilchen in den bei diesen Prozessen induzierten elektrischen Feldern.

In diesem Artikel sollen die wesentlichen Aspekte der Erzeugung, Umwandlung und Einflussnahme kosmischer Magnetfelder vorgestellt und möglichst anschaulich erläutert werden. Nach ausführlicheren historischen Betrachtungen über die Entwicklung erster Theorien zum Magnetismus und dessen bedeutsamer Einflussnahme auf Prozesse im Sonnensystem, werden typische astrophysikalische Himmelsobjekte auch im entfernteren Universum vorgestellt, in denen die Bedeutung magnetischer Felder, insbesondere auch die Wirksamkeit magnetischer Dynamo- und Rekonnexionsprozesse beobachtet, nachgewiesen und vermessen oder aber zumindest vermutet werden kann.

Bekanntlich helfen uns Menschen einfache Feldlinienmodellbilder dabei, die Wirkungsweise magnetischer Kräfte im Alltag leichter zu verstehen. Unterstützt durch solche anschaulichen Modellvorstellungen haben wir vielleicht sogar begriffen, wie ein Transformator oder ein Fahrraddynamo im Prinzip funktioniert, wie elektrische Spannungen transformiert und elektrische Ströme in Generatoren erzeugt werden können. Es stellt sich aber doch die Frage, wie es ohne Kabel und Weicheisenkerne im entfernten Universum überhaupt gelingen kann, dass kosmische Dynamos teilweise offensichtlich sogar extrem starke Magnetfelder erzeugen. Da selbst Ingenieure im Rahmen ihrer Arbeit mit rein technischen elektrischen Strom-

kreisen in der Regel nur sehr selten etwas von „magnetischer Rekonnexion“ gehört haben, ist es sehr notwendig, insbesondere auch diesen physikalischen Prozess ausführlicher und didaktisch aufbereitet zu erläutern.

Von daher erweist es sich als unbedingt erforderlich, das klassische Feldlinienmodellbild, wie es viele von uns bereits aus dem Schulunterricht kennen, noch einmal zu rekapitulieren und in geeigneter Weise zu erweitern. Unter geeigneten Bedingungen müssen sich magnetische Feldlinien in gasförmigen oder flüssigen, elektrisch sehr gut

leitfähigen Medien bildlich gesehen offensichtlich unbedingt „zerschneiden“ und im selben Moment, unter Umständen drastisch verändert, auch wieder „neu verbinden“, also miteinander „verschmelzen“ lassen. Erst im Rahmen der Magnetohydrodynamik lässt sich danach die Dynamogenerierung kosmischer Magnetfelder sowie die Freisetzung und Umwandlung magnetischer Energien im Verlauf von Rekonnexionsprozessen mathematisch-physikalisch wirklich plausibel analysieren. In dieser Artikelserie sollen abschließend auch die neuesten theoretischen Erkenntnisse der Wissenschaftler vorgestellt werden.

2. Kosmische Magnetfelder

Magnetismus äußert sich durch physikalische Kraftwirkungen zwischen Magneten, magnetisierbaren Gegenständen sowie auf bzw. zwischen bewegten elektrischen Ladungen. Die Vermittlung dieser Kraftwirkungen erfolgt über Magnetfelder, die als räumliche Kraftfelder durch bewegte elektrische Ladungen, magnetische Dipole und in zeitlich stark veränderlichen elektrischen Feldern erzeugt werden und ihrerseits selbst wieder eine

Kraft auf solche Objekte ausüben. Die Eigenschaften dieser magnetischen Felder lassen sich im mathematischen Kontext durch sogenannte Vektoren charakterisieren, die orts- und zeitabhängig die spezielle Stärke und Ausrichtung (sowie Orientierung) des Magnetfeldes beschreiben. Überall im Kosmos kann der Einfluss unterschiedlich starker Magnetfelder eine sehr wichtige Rolle spielen.

2.1 Historisch Grundlegendes [1] [2] [3]

Magnetismus im Altertum

Schon vor Christi Geburt machten die Menschen erste Erfahrungen mit den Eigenschaften von Magneten. Thales VON MILET (etwa 624-546 v. Chr.) soll Magnetsteine und Bernstein als Beispiele für die Beseeltheit scheinbar toter Dinge angesehen haben. Der im alten Griechenland auch als Mathematiker, Astronom und Ingenieur angesehene Naturphilosoph entdeckte offenbar nicht nur die Elektrizität, die elektrostatische Aufladung durch Reiben von Bernstein an einem Tierfell. Ihm wird darüber hinaus auch die Entdeckung der Anziehungskraft des Magnetits in der thessalischen Landschaft Magnesia nachgesagt. Dieses Eisenoxid (Fe_3O_4 ; Fe Eisen, O Sauerstoff) zählt zu den stärksten (ferri)magnetischen Mineralen, die sich unterhalb der sogenannten Curie-Temperatur von 578°C in Richtung zum Erdmagnetfeld ausrichten. Auch in chinesischen Quellen aus dem dritten vorchristlichen Jahrhundert werden die anziehenden Eigenschaften dieses Magnetsteins erwähnt. In natürlicher Weise sich ausrichtende Magnetitlöffel wurden damals als eine Art Naturkompass vermutlich eher für Weissagungen, insbesondere auch zur „geeigneten“ Ausrichtung von Gebäuden im Rahmen daoistischer Harmonielehren benutzt. Die ersten gesicherten Hinweise auf

die Möglichkeit der Ausnutzung der magnetischen Richtungskraft zur Navigation stammen von SCHEN KUO (1031-1095 n. Chr.). Aber erst am Ende des 12. Jh. nach Christi Geburt wurde der gewinnbringende Einsatz eines magnetischen Kompasses durch den englischen Mönch Alexander NECKAM (1157-1217) in der europäischen Literatur erwähnt. Seeleute benutzten offensichtlich damals bereits drehbar gelagerte magnetisierte Nadeln, die sich unabhängig von störender Bewölkung zum Polarstern im Sternbild des Kleinen Bären, angenähert in Richtung zum geographischen Nordpol ausrichten.

Magnetismus im Mittelalter

Der Kreuzritter und Militäringenieur Pierre Pèlerin de MARICOURT, über dessen Lebenslauf es ansonsten keine verlässlichen Informationen gibt, hinterließ einen bemerkenswerten, mehr als 35 Seiten langen Brief, den er am 8. August 1269 im Feldlager während der Belagerung einer italienischen Stadt an einen Freund geschrieben hat, und in dem er seine praktischen und theoretischen Erkenntnisse über die geheime Kraft des Magnetismus zusammenfasste. Als Petrus PEREGRINUS beschrieb er in dieser ersten, als wissenschaftlich anzusehenden Abhandlung über die Lehre des

Magnetismus mit dem Titel „Epistola de Magnete“ seine drei sehr wesentlichen Entdeckungen über die Magnetpole. Sehr wahrscheinlich bemerkte er als erster, dass jeder Magnet zwei unterschiedliche Pole aufweist, und erforschte mit Hilfe von Eisennadeln, wo diese senkrecht zur Oberfläche eines kugelförmigen Magnetsteins angezogen werden. Er fand zweitens heraus, dass sich ungleichartige Magnetpole sowohl der Naturmagnete als auch magnetisierter Eisen anziehen und gleichartige sich abstoßen. Schließlich erkannte er die Unzerstörbarkeit des Dipolcharakters der

Magnete; die zwei Teile eines zerbrochenen Magneten weisen wiederum jeweils einen sogenannten Nord- und einen Südpol auf. Aus Sicht eines Technikers beschrieb er unterschiedliche Schwimm- und Trockenkompassse, teilte den Messkreis für die Bestimmung der Ausrichtung der Magnetkraft bereits damals in 360 Teile und hatte die Idee, dass sich ein rotierender Motor basierend auf dem Prinzip der magnetischen Anziehung und Abstoßung realisieren lassen müsste.

| Zur frühen Geschichte kosmischer Magnetfelder | |
|---|---|
| 3000 v. Chr. | Erwähnung von Polarlichterscheinungen im Nordosten Chinas |
| 624 v. Chr. | erste Aufzeichnungen über die Eigenschaften der Magnetsteine |
| 400 v. Chr. | erster illustrierter Kometenkatalog chinesischer Astronomen |
| 400-300 v. Chr. | THEOPHRASTOS V. ERESOS beobachtet Sonnenflecken |
| 200 v. Chr. | Hinweise auf Verwendung „magnetischer Löffel“ in China |
| um 1050 | erste Erkenntnis darüber, dass von Magneten Fäden ausgehen |
| ≈ 1200 n. Chr. | erste Erwähnung des Kompasses in der europäischen Literatur |
| 1269 | Petrus PEREGRINUS („Epistola de Magnete“) entdeckt Dipolcharakter der Magnete, führt erste Experimente durch |
| 1600 | William GILBERT („De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure“) beschreibt die Erde als Ganzes als Magneten, führt „Terrella“-Modellexperimente durch, wertet Ergebnisse in Form erster wissenschaftlicher Analysen aus |
| 1610-1611 | Galileo GALILEI u. a. beobachten die Entwicklung von Sonnenflecken erstmals mit dem Teleskop |
| 1629 | Niccolò CABEO („Philosophia magnetica“) erkennt, dass die magnetische Kraft Magnetsteine linienförmig umhüllt, veröffentlicht erste Abbildung magnetischer Feldlinien |
| 1741 | Anders CELSIUS erkennt Zusammenhang zwischen Polarlichtern und erdmagnetischen Fluktuationen |
| 1813 | Carl-Friedrich GAUSS formuliert Theorem über den Fluss von Vektorfeldern durch geschlossene Flächen |
| 1820 | Hans Christian OERSTEDT entdeckt Kompassnadelrotation infolge elektrischer Stromflussänderung André Marie AMPÈRE weist Kräfte zwischen stromdurchflossenen Drähten nach Jean-Baptiste BIOT und Felix SAVART entwickeln Gesetz, mit dem sich die Eigenschaften der Magnetfelder im Umfeld stationärer elektrischer Ströme berechnen lassen |
| 1821 | Michael FARADAY baut ersten Elektromotor |
| 1827 | Georg Simon OHM findet das Gesetz über die Proportionalität zwischen Stromstärke und Spannung in einem elektrischen Leiter |
| 1831 | Michael FARADAY entdeckt magnetische Induktion, führt den Feldlinienbegriff und den Begriff des magnetischen Flusses ein |
| 1832 | Carl Friedrich GAUSS installiert ein empfindliches Magnetometer im einem ersten geophysikalische Observatorium in Göttingen |
| 1834 | Michael FARADAY entdeckt Transformatoreffekt und Selbstinduktion Emil LENZ stellt Regel für Richtung induzierter Ströme auf Samuel Heinrich SCHWABE entdeckt den 11-jährigen Sonnenzyklus |
| 1851 | Michael FARADAY führt den Begriff der magnetischen Kraftlinie ein |
| 1852 | Edward SABINE erkennt Korrelation zwischen Stärke der Sonnenaktivität und Intensität der Polarlichterscheinungen |
| 18. Jh. | erstmalige Entdeckung von Polarlichtern auf der Südhalbkugel durch Seefahrer |
| 1859 | erste Beobachtung eines Sonnensturms durch Richard Christopher CARRINGTON |
| 1864 | James Clarke MAXWELL entwickelt die Gleichungen zur Beschreibung elektromagnetischer Prozesse |
| 1867 | Werner VON SIEMENS erfindet selberegte Dynamomaschinen zur Stromerzeugung |
| 1892 | Hendrik Antoon LORENTZ ermittelt Formel zur Berechnung der Kraft auf bewegte Elektronen im Magnetfeld |
| 1896 | Kristian BIRKELAND erklärt die Polarlichtentstehung anhand des Terrella-Experiments durch Elektronenstrom von der Sonne |
| 1908 | George Ellery HALE misst starke Magnetfelder in Sonnenflecken |
| 1919 | Joseph LAMOR postuliert die Erzeugung des Erdmagnetfeldes durch Dynamoprozesse im fluiden, elektrisch leitfähigen Erdkern |
| 1942 | Hannes Olof Gösta ALFVÉN formuliert eine erste Theorie zur Magneto hydrodynamik (MHD), entwickelt die Idee magneto hydrodynamischer Plasmawellen |
| 1945 | Walter Maurice ELSASSER entwickelt eine erste Dynamotheorie über die Erzeugung des Erdmagnetfeldes |
| 1946 | Ronald Gordon GIOVANELLI schlägt erstmals magnetische Rekonnexionsprozesse als Verursacher der Plasmamaterieaufheizung in der Sonnenatmosphäre, der Teilchenbeschleunigung in solaren Flares sowie der Polarlichterscheinungen vor. |
| 1947 | Ludwig Franz Benedict BIERMANN erklärt die Ausbildung von Kometenschweif mit der Existenz der Teilchenstrahlung des Sonnenwindes |
| 1950 | Ludwig Franz Benedict BIERMANN entdeckt den nach ihm benannten Batterieeffekt zur Erzeugung erster kosmischer magnetischer Saalfelder |
| 1953 | James Wynne DUNGEY (1823-1915) weist die Ausbildung elektrischer Stromschichten im Bereich des Auftreffpunktes von Magnetfeldkomponenten mit entgegengesetzter Orientierung nach, schlägt vor, dass magnetische Feldlinien dort „durchschnitten“ und wieder „neu verbunden“ werden können |
| 1958 | Eugene Newman PARKER entwickelt ein erstes Modell für den Sonnenwind |
| 1957/1958 | Eugene Newman PARKER und Peter Alan SWEET entwickeln ein erstes MHD-Modell für stationäre magnetische Rekonnexionsprozesse |
| 1966 | Max Christian Theodor STEENBECK, Fritz KRAUSE und Karl-Heinz RADLER entwickeln entscheidende Grundlagen zur Dynamotheorie mittlerer Felder |
| 1970 | Michael P. AUBREY, Christopher. T. RUSSELL und Margaret G. KIVELSON finden Indizien für magnetische Rekonnexionsprozesse im Schweif der Erdmagnetosphäre bei südlicher Orientierung des einströmenden interplanetaren Magnetfeldes |
| 1975 | John T. GOSLING erklärt das Auftreten solarer Eruptionen durch einsetzende magnetische Rekonnexionsprozesse in der Sonnenkorona |
| 1978 | Malcom B. NIEDNER und John C. BRANDT erklären dynamische Prozesse in Kometenschweif mit dem Einsetzen magnetischer Rekonnexionsprozesse |

Tab. 1: Zur frühen Geschichte kosmischer Magnetfelder © U. v. Kusserow

PEREGRINUS ging damals davon aus, dass der Kosmos selbst zwei Magnetpole besitzen müsste, von denen die Magnetnadeln angezogen werden. In seinem 1440 erschienenen Hauptwerk postulierte Nikolaus VON KUSA (1401-1464), dass sich die Erde mit der Sonne um solche Pole des Weltalls dreht. In seiner späteren Abhandlung über

„Statische Experimente“ äußerte dieser humanistische Denker bereits die Idee, dass sich die Magnetkräfte mithilfe von Gewichten messen lassen müssten. Nach Meinung des Arztes und Ordensmitgliedes Marsilio FICINO (1433-1499) erhalten Magneten ihre Kraft direkt von den Sternen des Kleinen Bären, weshalb die Magnetnadeln sich in

Richtung zum Polarstern ausrichten müssten. Auch Leonardo DA VINCI (1452-1519) war der gleichen Überzeugung. Der Arzt und Magier Agrippa VON NETTESHEIM (1486-1535) glaubte, dass Magnetsteine ihre Kraft vom Mars erhielten, dass Magnetnadeln vom Schwanz des großen Bären angezogen werden würden. Und der als PARACELSDUS berühmte Arzt, Chemiker und Philosoph Theophrast VON HOHENHEIM (1493-1541), der die Geschehnisse auf der Welt immer auch aus kosmischer Perspektive betrachtete, war überzeugt davon, dass die Sterne, sogar der Mond magnetisch seien, was Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen haben müsste, auch die Mondsucht erklären könnte.

Auch der Mathematiker Girolamo Cardano (1501-1576) ging noch davon aus, dass Kompassnadeln durch Magnetsterne angezogen werden. 1551 war es dann jedoch Martin Cortes (1507-1582), der Sohn des Eroberers des Aztekenreichs, der nicht mehr an die Anziehungskraft der Sterne glaubte und darüber hinaus auch darauf hinwies, dass der geographische Nordpol der Erde möglicherweise nicht mit dem erdmagnetischen Pol übereinstimmt. 1598 war es der Mathematiker und Astronom Johannes Kepler (1571-1630), der ein Experiment vorschlug, indem durch Messung der magnetischen Neigung der Kompassnadeln überprüft werden könnte, ob die Magnete eher zum Polarstern oder aber zu den „Bergen unter dem Pol“ weisen. Bereits 1546 hatte der flämische Geograf Gerhard Mercator (1512-1594) die sogenannte Magnetberghypothese unterstützt, wonach der Erdmagnetpol möglicherweise in einem magnetischen Gebirge, nämlich auf der russischen Insel Nowaja Semlja zu finden sei.

Jahrhundert der magnetischen Philosophie

Erst drei Jahre vor seinem Tod veröffentlichte William Gilbert (1544-1603) im Jahr 1600 sein epochales Werk „De magnete ...“ (übersetzt aus dem Lateinischen ins Deutsche: „Vom Magneten, von den magnetischen Kräften und dem großen Magneten Erde“), indem er die völlig neue Hypothese aufstellte, dass die Erde selbst als Ganzes ein großer Magnet sei. Dieses beeindruckende Werk des praktizierenden englischen Arztes stellt das erste wissenschaftliche Buch der Neuzeit über den Magnetismus dar. Anstelle von Spekulationen entwickelte Gilbert erstmals eine solidere Theorie über den Erdmagnetismus. Er führte eine Vielzahl sehr konkreter Experimente mit einem kugelförmigen, als „Terrella“ bezeichneten Magnetstein durch, der die Erde modellhaft repräsentieren sollte. Er ermittelte die breitenabgängige Neigung

(Inklination) von Magnetnadeln, die er an die „Terrella“ hielt und verglich seine Erkenntnisse mit den inzwischen gewonnenen realen erdmagnetischen Messergebnissen. Wie es in einem heutigen naturwissenschaftlichen Werk üblich ist, prüfte und bewertete er schon damals auch die Ergebnisse der Werke hundert anderer Autoren.

Nach seinen Schlussfolgerungen müsste die Magnetkraft etwas Immaterielles darstellen, gehört der Magnetismus zu den wichtigsten kosmischen Kräften. Er glaubte wie Kepler allerdings auch daran, dass dieser sowohl die Erde als auch das gesamte Sonnensystem bewegen könnte. Nach seiner „magnetischen Philosophie“ sah er die „Ursache aller Himmelsbewegungen in magnetischen Kräften“. So wurde die Magnetkraft der Sonne fälschlicherweise für die Planetenbewegungen verantwortlich gemacht. Selbst Galileo Galilei (1564-1642) war ein Anhänger der Theorie William Gilberts, auch wenn dieser gründlichere mathematische Abhandlungen und bessere geometrische Veranschaulichungen in dessen Arbeiten vermisste. 1616 war es William Barlow (1544-1625), der das Wort Magnetismus erstmals nachweisbar in seinen „Magnetical Advertisements“ („Magnetische Bekanntmachungen“) benutzte.

Beginn des Elektromagnetismus

1676 stellten Seeleute fest, dass sich die Ausrichtung einer Kompassnadel bei einem kräftigen Blitzeinschlag in einen Schiffsmast deutlich veränderte. Ähnlichkeiten elektrischer und magnetischer Kraftwirkungen waren aber auch schon antiken Naturphilosophen aufgefallen. Der deutsche Naturphilosoph Friedrich Wilhelm Joseph VON SCHELLING (1775-1854) äußerte 1799 die Vermutung, dass Magnetismus und Elektrizität nur zwei verschiedene Erscheinungsformen derselben physikalischen Kraft seien. Bereits 1708 hatte Stephen GRAY (1666-1736) erstmals über die Möglichkeit eines solchen Zusammenhangs berichtet. Bei Experimenten mit elektrisierten Glasrohren konnte er beobachten, dass entfernt aufgehängte Magnetnadeln aus ihrer Ruhelage gebracht wurden. 1746 gelang es dem Physikprofessor Georg Matthias BOSE (1710-1761) sogar, Magnete durch elektrische Entladungen umzupolen. Aber erst 1820 machte Hans-Christian OERSTEDT (1777-1851) die so bedeutsame Entdeckung, dass geschlossene galvanisch-elektrische Stromkreise die Ausrichtung von Magnetnadeln beeinflussen.

Kaum drei Monate später berichtete André Marie AMPÈRE (1775-1836) über seine experimentellen Befunde, wonach stromdurchflossene Drähte

nicht nur auf Magneten einwirken und in der Nähe liegende Eisenstücke magnetisieren können, sondern dass diese auch Kraftwirkungen auf benachbarte Stromleiter ausüben. Er führte die in ihrer Bedeutung sehr wohl zu unterscheidenden Begriffe „elektrischer Strom“ und „elektrische Spannung“ ein und hatte die geniale Idee, dass sowohl die von Magnetsteinen als auch der Erde als Ganzes ausgehenden magnetischen Kräfte letztlich auf dem Fließen elektrischer Ströme beruhen müssten.

Noch im selben Monat entwickelten die ebenfalls französischen Physiker, gleichzeitig aber auch Mathematiker Jean Baptist BIOT (1774-1862) und Felix SAVART (1791-1841) das nach ihnen benannte mathematisch-physikalische Gesetz, mit Hilfe dessen sich die ortsabhängige Ausrichtung frei beweglicher Kompassnadeln im Umfeld stromdurchflossener Leiter ermitteln lässt sowie die Stärke der Kraftwirkungen auf benachbarte Stromkreise berechnet werden kann. Mit der direkten Proportionalität zwischen der Stromstärke und der Spannung erkannte der deutsche Physiker und Mathematiker Georg Simon OHM (1787-1854) schließlich 1827 auch den quantitativen Zusammenhang zwischen diesen beiden prinzipiell unterschiedlichen physikalischen Messgrößen.

Faradays Induktionsgesetz

1629 hatte der italienische Theologe, Mathematiker und Ingenieur Niccolò CABEO (1585) in seiner „Philosophia magnetica“ erstmals magnetische Linien in einem Bild dargestellt, die einen Magnetstein umgeben. Das erste Bild eines die Erdkugel vollständig umgebenden Magnetlinienfeldes veröffentlichte der französische Physikprofessor Abbé DE VALLEMONT (1649-1721) 1696 in seinem „Physique occulte“ betitelten Werk. 1820 zeichnete der Berliner Akademiker Thomas Johann SEEBECK (1770-1832) die kreisförmig geschlossenen Magnetlinien im Umfeld eines stromdurchflossenen Leiters. Und 1821 war es schließlich der Buchbinderlehrling und später berühmt gewordene englische Physiker Michael FARADAY (1791-1867), der eine Vielzahl beeindruckender Experimente mit Permanentmagneten und stromdurchflossenen Leitern durchführte, bei denen er erstmals den typischen Verlauf magnetischer Linien durch das Austreten von Eisenfeilspäne auf Papierblätter im Umfeld unterschiedlichster Anordnungen von Magneten anschaulich nachzeichnete. FARADAY erkannte, dass sich die magnetischen Kräfte überall in der Raumumgebung der Magneten manifestieren, dass sich die Energie des magnetischen Systems nicht im Magnet selbst sondern in dem ihn umgebenden Feld befindet,

dass in solchen magnetischen Feldern Druck- und Spannungskräfte wirksam werden können.

FARADAY prägte nicht nur den Feld- und Feldlinienbegriff sowohl für elektrische und magnetische Felder und zeigte, dass magnetische Kraftlinien keinen Anfang und kein Ende haben, dass sie (anders als elektrische Feldlinien) nicht an einem Pol beginnen und am anderen enden können. Zu Beginn seiner Arbeiten zum Elektro-Magnetismus erfand er 1821 als Urbild des Elektromotors eine Rotationsapparatur, bei der ein stromdurchflossener Draht fortlaufend um einen Permanentmagneten kreist. Zehn Jahre später führte er den Begriff des „magnetischen Flusses“ als physikalische Größe ein, die das Ausmaß der eine Fläche insgesamt senkrecht durchsetzenden Magnetfeldkomponenten misst. 1831 entdeckte FARADAY vor allem auch das für unser Leben in den heute technisch hochentwickelten Gesellschaften so wertvolle Phänomen der magnetischen Induktion, aufgrund dessen elektrische Felder bei Änderung der magnetischen Flussdichte erzeugt werden. 1834 entwickelte er erste Transformatoren und entdeckte die Selbstinduktion, die magnetische Induktionswirkung eines Stromes auf seinen eigenen Leiterkreis. Nach der von Emil LENZ (1804-1865) aufgestellten Regel wird dabei eine Spannung induziert, die einen Strom fließen lässt, wodurch ein Magnetfeld erzeugt wird, welches der Änderung des magnetischen Flusses entgegenwirkt. Ohne die Entdeckungen des Michael FARADAY würde es heute keine Transformatoren, Elektromotoren und elektrischen Generatoren geben.

Die Maxwell'schen Gleichungen

Während OERSTEDT, AMPÈRE und FARADAY die experimentellen Erkenntnisse zusammengetragen hatten, entwickelte der mathematische Physiker James Clerk MAXWELL (1831-1879) bis 1864 das nach ihm benannte System partieller Differenzialgleichungen, mit Hilfe dessen sich, ergänzt durch die erst 1892 von Hendrik Antoon LORENTZ (1853-1928) hergeleitete Formel zur Berechnung der Kräfte auf elektrische Ladungsträger, alle elektromagnetischen Phänomene in besonders eleganter Weise zusammengefasst beschreiben und erklären lassen. Das 1813 von Carl-Friedrich GAUSS (1777-1855) formulierte Theorem über den Fluss von Vektorfeldern durch geschlossene Flächen benutzte er, um auszudrücken, dass isolierte elektrische Ladungen die Quelle elektrischer Felder sind, und dass das magnetische Feld demgegenüber grundsätzlich quellenfrei ist, magnetischen Monopole also nicht existieren. Das Induktionsgesetz von FARADAY und die LENZ'sche

Regel verwendete er, um zu berechnen, wie elektromotorische Kräfte durch die Interaktion der magnetischen Felder mit elektrischen Stromkreisen produziert werden. Und das (ursprüngliche) AMPÈRESche Gesetz (ergänzt durch einen, nur in zeitlich stark variablen elektrischen Feldern bedeutsamen Verschiebungsstrom) erklärt schließlich die Erzeugung magnetischer Wirbelfelder durch das Fließen elektrischer Ströme.

FARADAY verwendete ausgefeilte experimentelle Techniken und sah seine Chance darin, von der Natur zu lernen. MAXWELL suchte nach einer logisch konsistenten und möglichst einfachen mathematischen Beschreibung der Natur der Elektrizität und des Magnetismus. Er erkannte die besondere Bedeutung der Zeitentwicklung und Bewegung, die für die Erzeugung der Felder und elektrischen Ströme so entscheidend ist. Bewegte Ladungen erzeugen Magnetfelder und bewegte magnetische Felder produzieren Ströme. In seinem mathematischen Konzept spielen Vektoren als mathematische Größen, die durch ihre Beträge, vor allem aber auch ihre Ausrichtungen, Orientierungen und manchmal auch spezielle Angriffspunkte gekennzeichnet sind, eine wichtige Rolle. Anstelle der anschaulich darstellbaren elektrischen und magnetischen Feldlinien des Michael FARADAY benutzt er mathematisch händelbare Vektorfelder, in denen das Potenzial dafür besteht, dass in ihnen nach Einbringung von elektrischen Ladungen Wesentliches passiert.

Angeregt durch MAXWELL verwenden theoretische Physiker heute häufig den Begriff des Gradienten, der die Änderung einer Größe z. B. über die Distanz oder die Zeit hinweg beschreibt. Gleiches gilt auch für die Begriffe der Divergenz und Rotation. MAXWELL führte den Divergenz-Operator in sein Theoriegebäude ein, um die lokale Stärke des Auseinandertreibens (des Divergierens) der unterschiedlichen Feldstrukturen zu charakterisieren. FARADAY erkannte, dass sich die magnetischen Felder in der Umgebung stromdurchflossener elektrischer Leiter offensichtlich kreisförmig organisieren. Und MAXWELL führte den Rotationsbegriff ein, um solche orts- und zeitabhängigen Zirkulationen vor allem in elektrischen und magnetischen Vektorfeldern zu berechnen.

Magnetische Dynamos

Im Jahre 1867 war dem deutschen Erfinder und Industriellen Werner VON SIEMENS (1816-1892) erstmals der Bau einer sich selbsterregenden Dynamomaschine zur Erzeugung elektrischen Stroms gelungen. Das dynamoelektrische Prinzip

beschreibt, wie eine in einer solchen Maschine anfangs generierte relativ schwache elektrische Spannung durch magnetische Induktion bis zu einem stabilen Sättigungswert weiter erhöht wird. Dies geschieht durch einen positiven Rückkopplungsprozess, im Verlauf dessen der erzeugte Induktionsstrom auch zur Verstärkung der magnetischen Flussdichte im Erreger der Maschine verwendet wird. Ohne ein kleines, aber doch ausreichend großes anfängliches magnetisches Saatfeld kann eine solcher, auf dem Induktionsprinzip beruhender Dynamoprozess allerdings nicht starten.

1832 installierte Carl Friedrich GAUSS ein empfindliches Magnetometer zur Vermessung des Erdmagnetfeldes im ersten geophysikalischen Observatorium in Göttingen. 1908 konnte der amerikanische Sonnenphysiker George Ellery HALE (1868-1938) erstmals starke Magnetfelder in Sonnenflecken anhand der Aufspaltung von Spektrallinien nach dem vom holländischen Physiker Pieter ZEEMAN (1865-1943) erklärten Effekt nachweisen. 1919 schlug dann der irische Physiker und Mathematiker Joseph LAMOR (1857-1942) vor, dass die Erzeugung des Erdmagnetfeldes durch sogenannte Dynamoprozesse im fluiden, elektrisch leitfähigen Erdkern gelingen könnte. Aber erst 1945 gelang dem in Deutschland geborenen amerikanischen Physiker Walter Maurice ELSASSER (1904-1991) die mögliche Erklärung der Erzeugung des Erdmagnetfeldes im Rahmen einer ersten Dynamotheorie.

Basierend auf Ideen des amerikanischen theoretischen Sonnenphysikers Eugene Newman Parker konnten dann die deutschen und Mathematiker bzw. Physiker Max Christian Theodor Steenbeck (1904-1981), Fritz Krause und Karl-Heinz Rädler 1966 sehr entscheidende Grundlagen zur Dynamotheorie sogenannter mittlerer Felder entwickeln. Im Innern der von Magnetfeldern durchsetzten Planeten, Sterne oder Galaxien können nach dem dynamoelektrischen Prinzip elektrische Ströme erzeugt werden, wenn sich darin elektrisch sehr gut leitfähige Materie in geeignet gelenkten Geschwindigkeitsfeldern bewegt. Durch das Fließen induzierter elektrischer Ströme entstehen so die Magnetfelder. Die für die Dynamogenerierung erster früher kosmischer Magnetfelder unbedingt erforderlichen magnetischen Saatfelder könnten nach einem 1950 von dem deutschen Physiker Ludwig Franz Benedict BIERMANN (1907-1986) entwickelten Batterieeffekt entstanden sein, der aufgrund der Relativbewegung negativer (Elektronen) und positiver (Protonen, Ionen) Ladungsträger wirksam werden kann.

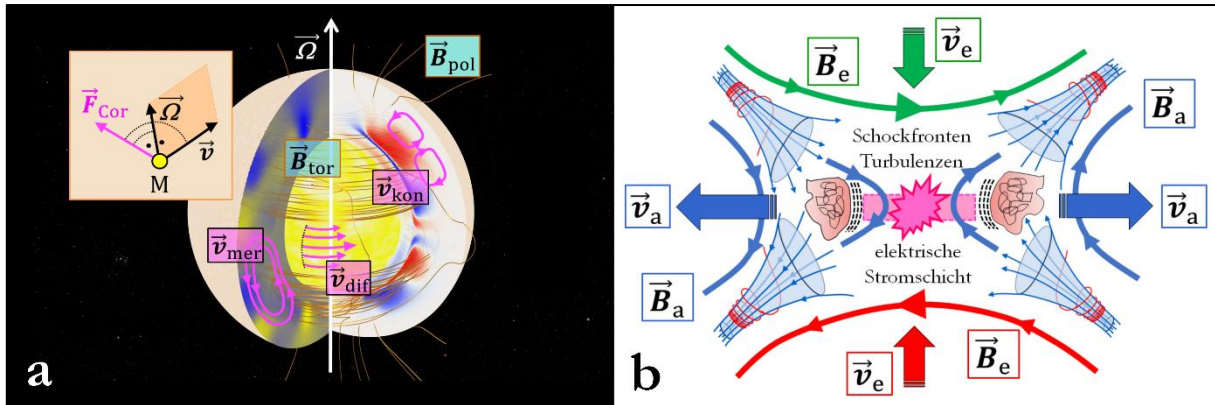


Abb. 2: Modellvorstellungen über kosmische Dynamo- und magnetische Rekonnexionsprozesse

a. Veranschaulichung des Funktionsprinzips eines magnetischen Flusstransportdynamos zur Erzeugung solarer Magnetfelder. Im Rhythmus des periodischen Sonnenzyklus wechselseitig ineinander umgewandelte, in der Meridianebene liegende poloidale (\vec{B}_{pol}) sowie azimuthal aufgewickelte toroidale (\vec{B}_{tor}) Magnetfeldkomponenten werden im Sterninneren jeweils durch magnetische Induktionsprozesse erzeugt. Die sehr gut elektrisch leitfähige Plasmamaterie strömt dafür relativ zu den aktuell jeweils bestehenden magnetischen Feldern, mehr oder weniger großräumig gelenkt, in differentiellen (\vec{v}_{dif}), meridionalen (\vec{v}_{mer}) bzw. konvektiven (\vec{v}_{kon}) Geschwindigkeitsfeldern. In der orts- und zeitabhängig mit unterschiedlicher Winkelgeschwindigkeit $\vec{\Omega}$ differentiell rotierenden kosmischen Plasmakugel wirkt die senkrecht zur Geschwindigkeit \vec{v} und zu $\vec{\Omega}$ ausgerichtete Corioliskraft \vec{F}_{Cor} auf die bewegte Materie M, wodurch die Konvektionsströmungen helikal mit Hemisphären-abhängiger Vorzugsrichtung verformt werden. Die meridionalen Materieströmungen unterstützen den Hin- und Her-Transport magnetischen Flusses in unterschiedlichen Tiefen der Konvektionszone zwischen dem Äquator- und den Polbereichen. Ohne zusätzliche Einwirkung magnetischer Rekonnexionsprozesse kann die Erzeugung kosmischer Magnetfelder in Dynamoprozessen allerdings nicht gelingen. © T. Bridgman (GST) et al./ NASA/GSFC Scientific Visualization Studio, U. v. Kusserow



Animationen im Internet: <https://svs.gsfc.nasa.gov/3583> *)

b. Veranschaulichung magnetischer Rekonnexionsprozesse beim Aufeinandertreffen entgegengesetzt orientierter magnetischer Feldkomponenten in elektrisch leitfähigen kosmischen Plasmen oder metallischen Fluiden. Es bilden sich elektrische Stromschichten aus, es findet eine Zunahme der elektrischen Resistivitäten statt, Materie und Magnetfelder entkoppeln voneinander, lokal werden magnetische Feldstrukturen „zerschnitten“ und „verschmelzen“ instantan wieder neu miteinander. Großräumig verändern sich dabei die magnetischen Topologien. Es bilden sich Schockfronten und Turbulenzen aus, und in induzierten elektrischen Feldern werden Teilchen beschleunigt. Die Vektoren \vec{v}_e und \vec{v}_a beschreiben die Geschwindigkeiten der in den Rekonnexionsbereich ein- bzw. aus ihm herausströmenden magnetisierten Materie. \vec{B}_e bzw. \vec{B}_a geben die darin jeweils anzutreffenden magnetischen Flussdichten an. Der als Rekonnexionsrate $R_{\text{Rec}} = |\vec{v}_e|/|\vec{v}_a|$ bezeichnete dimensionslose Quotient der Beträge der unterschiedlichen Geschwindigkeiten stellt ein Maß für die Schnelligkeit dar, mit der die Energien beim Rekonnexionsprozess umgewandelt und freigesetzt werden können. © U. v. Kusserow



Animation im Internet: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Reconnection.gif> *)

*) mit einer Mobiltelefon-Kamera kann auch der abgebildete QR-Code gescannt werden.

Magnetische Neuverbindungsprozesse als Verursacher heliosphärischer Entwicklungen

Bereits im dritten Jahrtausend vor Christi Geburt gab es offensichtlich eine erste, als verlässlich

anzusehende Erwähnung von Polarlichterscheinungen im Nordosten Chinas. Erst im 18. Jahrhundert nach Christi Geburt entdecken Seefahrer auch auffallend ähnliche Polarlichter auf der Süd-

halbkugel der Erde. Ein erster illustrierter Kometenkatalog wurde von chinesische Astronomen etwa 400 v. Chr. erstellt. Vermutlich bereits im folgenden Jahrhundert beobachtete der griechische Philosoph und Mathematiker Theophrastos VON ERESOS (371-287 v. Chr.) bewusst erstmals dunkle Fleckenstrukturen auf der Sonnenscheibe. In den Jahren 1610 und 1611 konnten der italienische Universalgelehrte Galileo GALILEI (1564-1642) sowie andere Beobachter mit ersten Teleskopen sogar die zeitliche Entwicklung komplexer Sonnenfleckensstrukturen im Detail verfolgen. Zu dieser Zeit ahnte keiner, dass sowohl die dynamischen Entwicklungsprozesse auf der Sonne, als auch in den Schweifen der Kometen sowie in den ionosphärischen Polarlichtzonen der Erde entscheidend durch die Einwirkung magnetischer Felder bestimmt werden, und dass zwischen diesen Phänomenen eine enge Wechselbeziehung besteht.

Erst 1741 erkannte der schwedische Astronom, Physiker und Mathematiker Anders CELSIUS (1701-1744) einen direkten Zusammenhang zwischen nachweisbaren erdmagnetischen Fluktuationen und der Entwicklung der Polarlichtstrukturen. Und 1852 stellte der irische Astronom und Geophysiker Edward SABINE (1788-1883) dann auch eine Korrelation zwischen der variierenden Stärke der Sonnenaktivität, die sich damals insbesondere anhand der unterschiedlichen Anzahl, Lage und Größe von Sonnenflecken dokumentieren ließ, und der Polarlichtaktivität fest. Bereits 1834 hatte der deutsche Astronom Samuel Heinrich SCHWABE (1789-1875) den etwa 11-jährigen Sonnenfleckenzzyklus entdeckt. 1859 beobachtete der englische Amateurastronom Richard Christopher CARRINGTON (1826-1875) einen Sonnensturm, bei dem, sichtbar für ihn, offensichtlich große Mengen an Energie freigesetzt wurden.

1896 entwickelte der norwegische Wissenschaftler Kristian Olaf Bernhard BIRKELAND (1867-1917) danach eine erste Theorie über die Entstehung der Polarlichter. Basierend auf beeindruckenden Ergebnissen seiner Terrella-Modellexperimente machte er den variablen Einstrom der

Elektronen von der Sonne in die höheren Erdatmosphärenschichten für die Ausbildung und Entwicklung der so faszinierenden, farbenprächtigen Leuchterscheinungen verantwortlich. 1908 gelangen dem amerikanischen Sonnenastronom George Ellery HALE (1868-1938) dann die ersten Messungen starker Magnetfelder in den Sonnenflecken. Und 1947 erklärte der deutsche Physiker Ludwig Franz Benedict BIERMANN (1907-1986) die Ausbildung von Kometenschweiften mit der Existenz der Teilchenstrahlung des Sonnenwindes, für die der theoretische Sonnenphysiker Eugene Newman PARKER im Jahre 1958 ein erstes realistisches Modell entwickelte.

Bereits 1946 hatte der australische Physiker und Sonnenforscher Ronald Gordon GIOVANELLI (1915-1984) magnetische Rekonnexionsprozesse als Verursacher der starken Aufheizung und Dynamiken in der der Sonnenatmosphäre, der Teilchenbeschleunigung in solaren Flares sowie der Polarlichterscheinungen im Bereich der Erdmagnetosphäre vorgeschlagen. 1953 wies der britische solarerterrestrische Physiker James Wynne DUNGEY (1923-2015) die Ausbildung elektrischer Stromschichten im Bereich des Auftreffpunktes von Magnetfeldkomponenten mit entgegengesetzter Orientierung nach Er erklärte, dass magnetische Feldlinien dort „durchschnitten“ und wieder „neu verbunden“ werden müssten.

1957 bzw. 1958 entwickelten dann PARKER und der britische Astrophysiker Peter Alan SWEET ein erstes magnetohydrodynamisches Modell für stationäre Rekonnexionsprozesse. 1970 fanden Michael P. AUBREY und Mitarbeiter Indizien für magnetische Rekonnexionsprozesse im Schweif der Erdmagnetosphäre bei südlicher Orientierung des einströmenden interplanetaren Magnetfeldes. 1975 erklärte John T. GOSLING auch das Auftreten solarer Eruptionen durch einsetzende magnetische Rekonnexionsprozesse in der Sonnenkorona. Und 1978 waren es Malcom B. NIEDNER und John C. BRANDT, die diese Prozesse schließlich auch für die Ausbildung und dynamischen Entwicklungen von Kometenschweiften verantwortlich machten (Abb. 3).

2.2 Charakteristische Eigenschaften [4] [5] [6]

Während Gravitationsfelder in der Umgebung von Materieverteilungen existieren, deren Massen als Erhaltungsgröße auftreten, besitzen kosmische Magnetfelder grundsätzlich keine materiellen

Quellen. Das Ampère'sche Gesetz besagt, dass bei Vernachlässigung zeitlicher Änderungen elektrischer Felder allein die elektrische Stromdichte für die Erzeugung der Magnetfelder verantwortlich

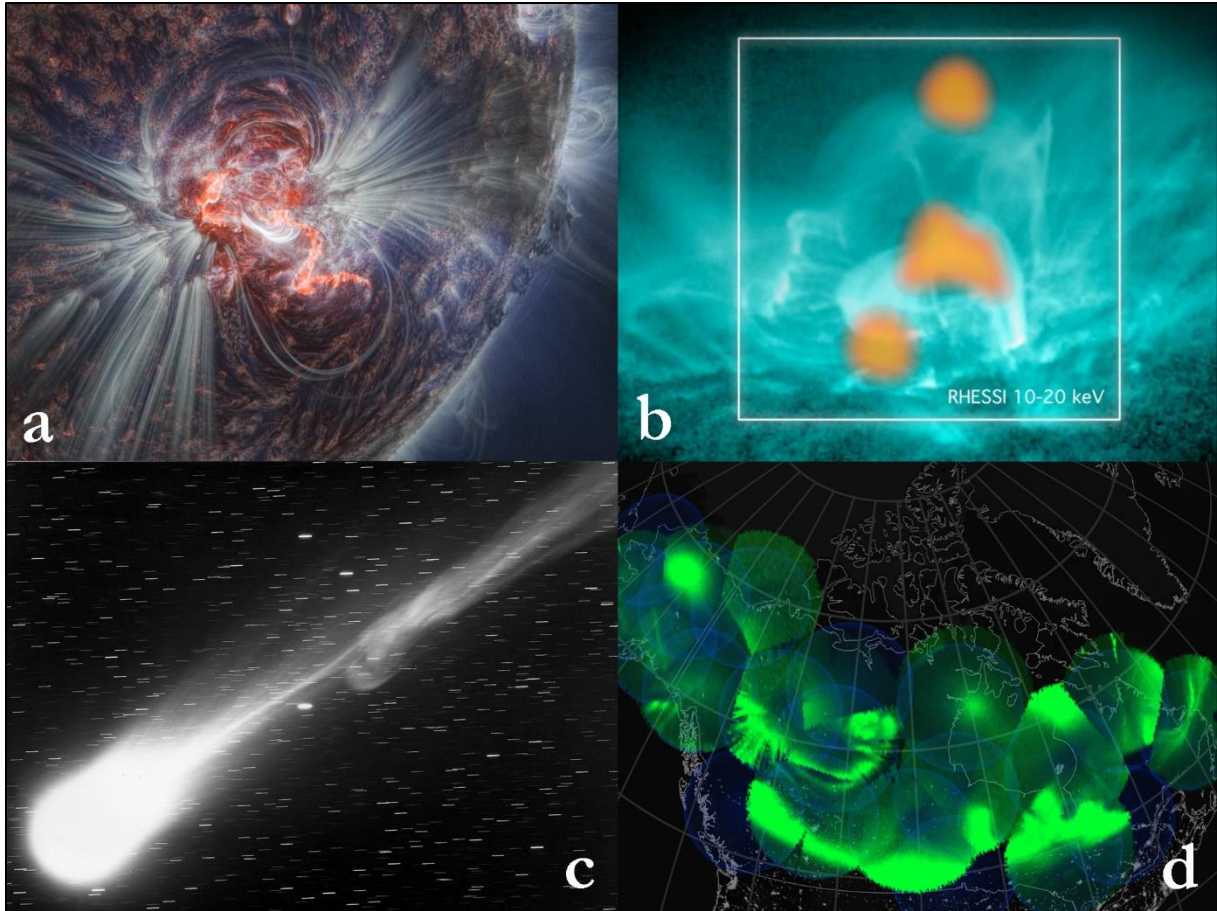


Abb. 3: Beobachtung der Resultate magnetischer Rekonnexionsprozesse im Sonnensystem.



a. Freisetzung magnetischer Energien in intensiven Flares in Zentralbereich einer Sonnenfleckengruppe. Beim Aufeinandertreffen entgegengesetzt orientierter magnetischer Feldkomponenten werden große Intensitäten an Strahlungsenergie freigesetzt, werden Materieteilchen auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt.
© SDO/AIA/NASA/GSFC/M. Druckmüller (PM-NAFE)

http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/Sdo/Pm-nafe/2014_10_25/0-info.htm



b. Nachweis magnetischer Rekonnexionsprozesse im Verlauf einer Sonneneruption. Aufnahmen der NASA-Satelliten SDO (Solar Dynamics Observatory) und RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) im ultravioletten bzw. im Gammastrahlenbereich veranschaulichen die Ergebnisse dynamischer Prozesse bei der Neuverschmelzung magnetischer Feldstrukturen, bei der gewaltige Mengen an magnetischer Energie freigesetzt werden.
© NASA/SDO/RHESSI/GSFC <https://svs.gsfc.nasa.gov/11199>



c. Koma- und Schweifstrukturen des Kometen Hyakutake. In den besonders langgestreckten, durch Faltung interplanetarer Magnetfelder am Kometenkopf entstandener, hell aufleuchtender Strukturen des Kometenschweifs haben einsetzende magnetische Rekonnexionsinstabilitäten einen teilweisen Schweifabriss ausgelöst.
© E. Kolmhofer, H. Raab https://www.youtube.com/watch?v=eDoHg_bqDm0



d. Komposit von Polarlichtaufnahmen, die mit einer Vielzahl von Kameras des THEMIS (Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms) -Projekts gleichzeitig an verschiedenen Orten von Kanada aus gemacht wurden. Die Energien zur Anregung dieser Leuchterscheinungen können durch explosive magnetosphärische Rekonnexionsprozesse in miteinander kollidieren elektrischen Stromschichten freigesetzt werden.
© NASA/GSFC Scientific Visualization Studio

https://www.nasa.gov/mission_pages/themis/news/auroras-collide.html

ist. Kosmische Magnetfelder werden in Dynamoprozessen regeneriert und verstärkt, magnetische Dissipationsprozesse führen zu ihrem Abbau und bewirken die Umwandlung magnetischer Energien in andere Energieformen. Lokale magnetische Rekonnexionsprozesse bewirken die Neuverknüpfung magnetischer Feldstrukturen, was drastische globale Veränderungen magnetischer Topologien zur Folge haben kann.

Die magnetische Lorentzkraft lässt sich additiv in einen richtungsunabhängigen Druckterm sowie einen nur entlang der Magnetfeldstrukturen wirksam werdenden Spannungsterm zerlegen. Die Wirksamkeit magnetische Kräfte lässt sich in ihrem Verhalten daher anschaulich mit der Wirkung der Kräfte vergleichen, die von einem zusammengedrückten Flummiball bzw. von der gespannten Sehne eines Flitzebogens ausgeübt werden. Tab. 2 macht im Überblick deutlich, wie stark und in welcher vielfältiger Weise sich die charakteristischen Eigenschaften magnetisch organisierter Materie von denen der durch Gravitationsfelder organisierten Materie unterscheiden.

| Unterschiede gravitativer und magnetischer Organisationsformen | | |
|--|--|--|
| Eigenschaften | gravitativ organisierte Materie | magnetisch organisierte Materie |
| Hierarchieformen | galaktische, stellare und planetare Ring- oder Satellitensysteme | magnetische Flussröhren, Filamente, Magnetosphären, Eruptionen und Plasmoide |
| Energiedissipation | thermische Strahlung | nichtthermische Strahlung und Teilchenbeschleunigung |
| Umwandlung in kinetische Energie | eher kontinuierlich | zeitlich zunehmend dynamischer, explosionsartig |
| Bewegungsmuster | geordnet, orbital | aufreibend, chaotisch oder turbulent |
| Kraftquelle → Wirkung | Massenerhaltung → Stabilität u. Kontinuität | elektrische Ströme → Auslöschung u. Neuerzeugung, Bildung von Grenzschichten und Diskontinuitäten |

Tab. 2: Vergleich gravitativer und magnetischer Organisationsformen © U. v. Kusserow

Gravitativ organisierte Materie neigt zur Kontraktion und Akkretion z. B. bei der Entstehung von Sternen, Galaxien und Planeten. Aufgrund ihres Drucks zeigt magnetisch organisierte Materie demgegenüber eher Tendenzen zur Expansion, zum Auftrieb und zu kosmischen Eruptionen. Unter dem Einfluss von Gravitationskräften bilden sich kugelförmige, vermittelt durch Rotationsbewegungen insbesondere auch scheibenförmige

2.3 Vielfalt magnetischer Existenzen [6]

Abb. 1 veranschaulicht charakteristische Erscheinungsformen besonders faszinierender kosmischer Himmelsobjekte und Phänomene, die für uns Menschen in der unseren Heimatstern direkt

Strukturen aus. Bewegungsabläufe unter gravitativem Einfluss erscheinen relativ geordnet und auf relativ stabilen Orbits zu erfolgen. Von magnetischen Spannungen durchsetzte Strukturen nehmen dagegen eher gebündelt oder kollimiert erscheinende schichten-, hüllen- oder tubenförmige Gestalt an.

Galaktische, stellare oder planetare Ring- oder Satellitensysteme lassen den Beobachter eher auf den dominierenden Einfluss der Schwerkraft schließen. Das Auftreten enger Flussröhren, langgestreckter Filamente oder der Auswurf gebündelter Plasmoide deuten demgegenüber auf die Streckungswirkungen magnetischer Felder hin. Die aufreibenden Bewegungsmuster magnetisch organisierter Materie können sehr chaotisch und verwirbelt erscheinen. Anders als im Fall gravitativ organisierter Prozesse laufen manche der häufig extrem dynamisch, sogar explosiv entwickelnden magnetischen Prozesse auf sehr kurzen Zeitskalen ab. Durch sie kann kosmische Partikelstrahlung auf extrem hohe Energien beschleunigt werden, und fern vom thermodynamischen Gleichgewicht erfolgt die Aussendung vorwiegend nichtthermische Strahlung bis hinein in den Röntgen- und Gammastrahlenbereich.

In offenen, komplexen kosmischen Systemen laufen Selbstorganisationsprozesse bekanntlich dann ab, wenn überschüssige freie Energien fern vom Gleichgewicht Instabilitäten und Turbulenzen auslösen, die das System durch Neuorganisation und Emergenz neuartiger, großskaliger Strukturelemente nachfolgend in einen Zustand möglichst geringer Energie überführen. Magnetische Instabilitäten erzeugen und ordnen räumlich und zeitlich fluktuierende Magnetfelder in veränderter Weise, treiben sehr charakteristische Selbstorganisationsprozesse, die rückwirkend die Strömungs- und Druckverhältnisse in den unterschiedlichsten ionisierten kosmischen Medien entscheidend beeinflussen können. Solche magnetischen Prozesse spielen eine zentrale Rolle bei der Sternbildung und Sternentwicklung, im Zusammenhang mit der galaktischen Strukturbildung, in Scheibe-Jet-Strukturen, insbesondere auch bei der Ausbildung von Planetensystemen.

[7] [8]

umgebenden Heliosphäre von besonderer Bedeutung sind. Diese Objekte und Vorgänge können von uns relativ einfach teilweise mit bloßem Auge beobachtet, von Astronomen mit Hilfe ihrer

modernen Teleskope hochaufgelöst abgebildet werden. Abb. 4 zeigt demgegenüber Aufnahmen auch sehr komplex strukturierter stellarer und galaktischer Himmelsobjekte aus dem wesentlich weiter von uns entfernt gelegenen Gebieten des Universums.

Der oft dominierende Einfluss kosmischer Magnetfelder in den in Abb. 1 dargestellten Objekten kann meist relativ einfach nachgewiesen und im Detail häufiger vermessen werden. Die darin auf relativ kurzen Zeitskalen ablaufenden Entwicklungen lassen sich sogar häufig direkt verfolgen. Dies ist für die in Abb. 4 abgebildeten Objekte aufgrund ihrer großen Entfernungen und den in ihnen auf vergleichsweise extrem langen Zeitskalen ablaufenden Entwicklungsprozessen demgegenüber in der Regel nicht so einfach möglich.

Die Sonne und unser Planetensystem stellen ein besonders geeignetes kosmisches Labor dar, in dem die meisten entscheidenden magnetischen Prozesse „vor Ort“ relativ gut erforscht werden können. Erst die im Sonnensystem von Geo-, Plasma- und Sonnenphysikern gewonnenen theoretischen Erkenntnisse ermöglichen es den Astrophysikern heute, auch die im sehr weiter entfernten Kosmos wirksam werdenden magnetischen Prozessentwicklungen zumindest ansatzweise wesentlich besser zu verstehen.

Magnetfelder im Sonnensystem

Hochaufgelöste Aufnahmen von Sonnenfinsternissen (Abb. 1a) lassen bereits vermuten, dass die auf sehr unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen wirksam werdenden physikalischen Prozesse nicht nur in der Atmosphäre unseres Heimatsterns entscheidend auch durch kosmische Magnetfelder mitbestimmt werden. Theoretische Sonnenphysiker modellieren die Entstehung relativ starker und im Rhythmus des periodischen solaren Aktivitätszyklus oszillierender Magnetfelder im äußeren Drittel des Sterninneren relativ erfolgreich durch Dynamoprozesse. Im Sonneninneren durch unterschiedliche Kräfte getriebene und gelenkte, elektrisch sehr gut leitfähige Plasmaströme durchlaufen die dortigen Magnetfeldstrukturen. Magnetische Induktionsprozesse sorgen dabei für die Erregung neuer Feldkomponente, die dem Ausgangsmagnetfeld überlagert werden (Abb. 2a). Solare Magnetfelder werden dadurch zeitlich variierend verstärkt, gesättigt oder geschwächt.

Magnetische Rekonnexionsprozesse (Abb. 2b), magnetisch vermittelte Welle-Teilchen-Wechselwirkungsprozesse sowie Turbulenzen bewirken

die Aufheizung der Sonnenatmosphäre, die Beschleunigung hochenergetischer Teilchen sowie des aus der Sonnenatmosphäre in den interplanetaren Raum abströmenden Sonnenwindes. Beim Einsetzen magnetischer Rekonnexionsinstabilitäten werden große Mengen der in solaren Plasmawolken gespeichert magnetischen Energien in sogenannten Flares (Abb. 3a) freigesetzt. Lokale Neuverbindungen magnetischer Feldstrukturen können relativ schnell auch gewaltige globale magnetische Topologieveränderungen zur Folge haben. Die als Protuberanzen bezeichneten, von Magnetfeldern durchsetzte Gaswolken können dabei instabil werden, zunehmend höher in die Atmosphäre aufsteigen und sich als Sonneneruptionen anschließend auch zu mächtigen koronalen Masseauswürfen entwickeln, die wie der Sonnenwind in die umgebende Heliosphäre der Sonne hinausschießen (Abb. 3b).

Unterschiedliche schnelle und dichte magnetisierte Sonnenwindkomponenten und Koronale Masseauswürfe wechselwirken miteinander. Beim Aufeinandertreffen bilden sich immer wieder Schockfronten aus, in denen sich die Stärke und Ausprägung der Turbulenzen wesentlich verändern kann. Diese Vorgänge prägen das sogenannte Weltraumwetter im heliosphärischen Einflussbereich der magnetischen Sonne. Wenn die abströmende magnetisierte Plasmamaterie in relativer Nähe zur Sonne mit Überschallgeschwindigkeit auf den Kopf eines Kometenkörpers trifft, dann werden die in ihm enthaltenen Magnetfeldstrukturen um diesen Kometenkopf gefaltet. Dadurch bildet sich ein sehr geordnet strukturierter, besonders langgestreckter, oft bläulich leuchtender gasförmiger Kometenschweif aus (Abb. 1c), in welchem einsetzende Instabilitäten, insbesondere magnetische Rekonnexionsprozesse für einen Teilabbruch des Kometenkerns sowie für Abrisse im Kometenschweif sorgen können (Abb. 3c).

Trifft ein stark turbulent verwirbelter magnetisierter Sonnenwind im Bereich einer Schockfront auf entgegengesetzt orientierte Feldkomponenten des Erdmagnetfeldes, dann können magnetische Rekonnexionsprozesse sowohl auf der Tag-, vor allem aber auch auf der Nachtseite dieses Feldes im Magnetosphärenschweif dafür sorgen, dass heftige erdmagnetische Stürme mehr oder weniger periodisch einsetzen.

Bei diesen Prozessen wird genügend Energie freigesetzt, um starke elektrische Ströme in der äußeren Erdatmosphäre zu treiben und die Ausbreitung magnetisierter Wellen anzuregen, wodurch geladene Teilchen so stark beschleunigt werden

können, dass sie beim Auftreffen auf Atome, Moleküle und Ionen der Erdatmosphäre diese zur Auslösung von Polarlichtern veranlassen. Von der Internationalen Weltraumstation ISS aus betrachtet, zeigt Abb. 1d solche faszinierenden und farbenprächtigen Leuchterscheinungen, deren strukturelle Verteilung wesentlich unter anderem auch durch die Ausrichtung der erdmagnetischen

Feldkomponenten geprägt wird. Wenn großräumig verteilte elektrische Stromschichten in der Erdmagnetosphäre miteinander kollidieren, dann könnten einsetzende magnetische Rekonnexionsprozesse für eine besonders explosive Entwicklung der Polarlichterscheinungen sorgen (Abb. 3d).

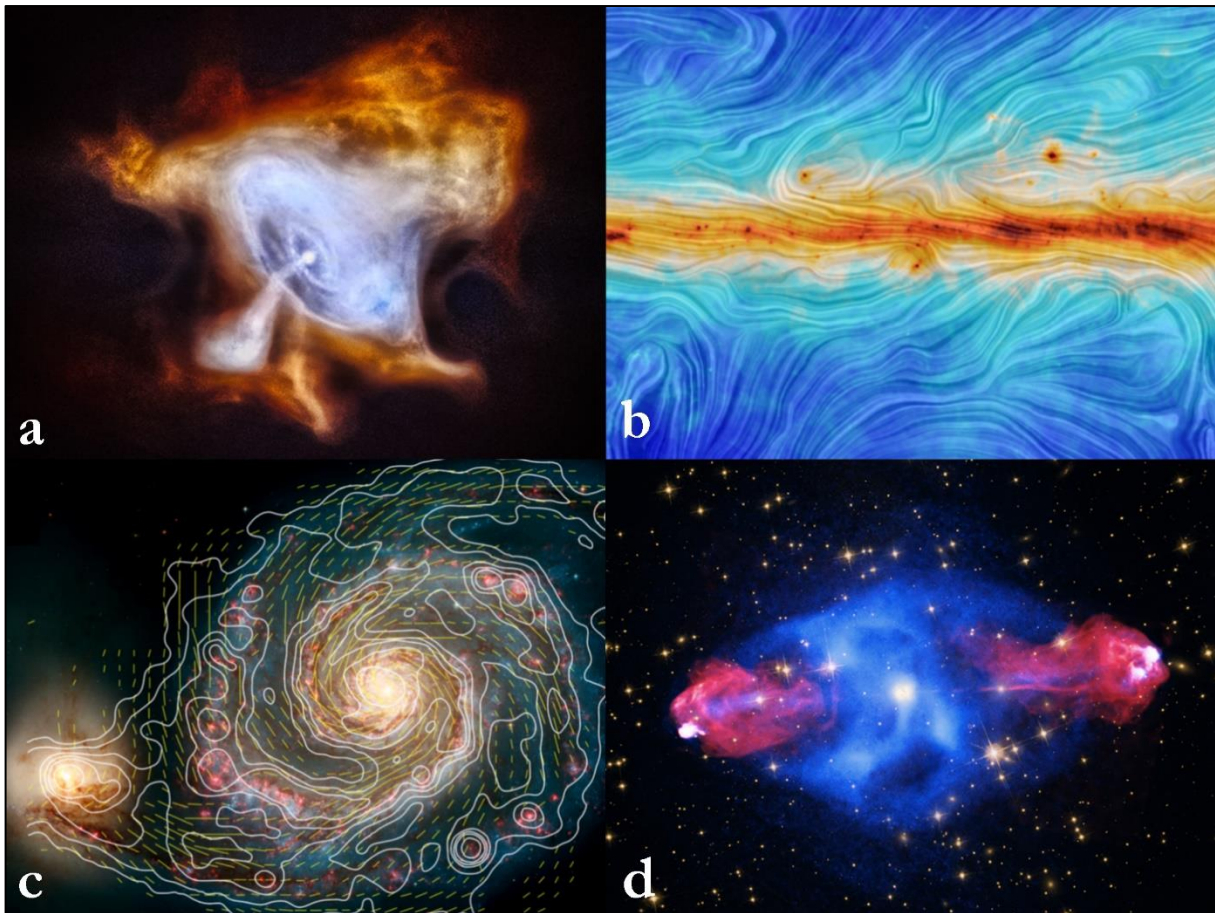


Abb. 4: Himmelsobjekte außerhalb des Sonnensystems, bei denen kosmische Magnetfelder und magnetische Rekonnexionsprozesse eine zentrale Rolle spielen können: **a.** magnetisierte Scheibe-Jet-Strukturen im Umfeld des Crab-Pulsars, **b.** Magnetfeldstrukturen im Umfeld der Milchstraßenebene, **c.** Stärke und Ausrichtung magnetischer Feldstrukturen in der „Strudelgalaxie“ M 51, **d.** Jetstrukturen und Schockfronten im Umfeld der magnetisch aktiven Cygnus A Galaxie. © NASA/CXC/SAO, ESA/Planck Collaboration, R. Beck(MPIfR)/A. Fletcher (Newcastle University), NASA/CXC/SAO/STScI/NSF/NRAO/AUI

Magnetfelder im entfernteren Universum

In Innern vieler Planeten wie z. B. der Erde, vermutlich in fast allen Sternen wie z. B. der Sonne sowie in den Galaxien wie in unserer Milchstraße werden unterschiedlich starke, periodisch oszillierende oder auf größeren Zeitskalen im Wesentlichen unverändert bleibende stationäre Magnetfelder in Dynamoprozessen erzeugt. Fast überall im Universum, auch in interplanetaren, interstellaren und intergalaktischen Räumen weisen die Astronomen und Astrophysiker heute die Existenz und

den vielfältigen Einfluss dieser Felder in diversen kosmischen Entwicklungsprozessen nach. In den so charakteristischen Scheibe-Jet-Systemen um kompakte Zentralobjekte, in jungen protostellaren Systemen oder Doppelsternsystemen, im Umfeld besonders massiver stellerer Objekte, die sich in der Endphase des Lebens besonders massereicher Sterne gebildet haben, oder in den Zentralbereich aktiver Galaxien unterstützen kosmische Magnetfelder den Abtransport von Drehimpuls und dadurch auch den Materietransport in den

Akkretionsscheiben um die jeweiligen Zentralobjekte. Sie ermöglichen, beschleunigen und lenken kosmische Winde, die beim Einströmen in die Umgebungsbereiche dieser Systeme magnetisch durchsetzte Schockfronten erzeugen. Magnetische Rekonnexionsprozesse lösen stellare Eruptionen aus und prägen den Ablauf besonders komplexer Entwicklungsprozesse in den unterschiedlichsten stellaren und galaktischen Turbulenzfeldern.

Vermutlich sind es sehr spezielle, sekunden-schnell ablaufende Dynamoprozesse am Ende des Lebens besonders massereicher Sterne, die nach einer sehr explosiv erfolgten Supernova die extrem starken Magnetfelder im Innern und in der Magnetosphäre von Neutronensternen, insbesondere auch der sogenannten Magnetare generiert. Abb. 4 a veranschaulicht die Ergebnisse hochenergetischer, magnetisch vermittelter Prozesse im Umfeld des sehr schnell rotierenden Neutronensterns im Krebsnebel. Umgeben von einer spiralförmig strukturierten Scheibe sendet dieser sogenannte Pulsar jetartig magnetisch stark gebündelte Sternwinde aus, in denen Teilchen auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden, die pulsartig auch von der Erde aus registriert werden können. Wie andere aktive Sterne sendet auch dieser Crab-Pulsar durch magnetische Rekonnexionsprozesse erzeugte Flares aus.

Besonders großräumig kohärent organisierte, durch den Einfluss magnetischer Kräfte erzeugte Feldstrukturen prägen das in Abb. 4 b dargestellte Erscheinungsbild unserer Milchstraße im Umfeld ihrer galaktischen Ebene. Die Farbskala in dieser Abbildung repräsentiert die gemessene Intensität des polarisierten Lichtes der Staubemission. Da sich die als Rotationsachsen fungierenden kurzen Achsen der Staubkörner weitgehend entlang der Magnetfeldstrukturen ausrichten, die Längsrichtung dieser Körner, in welche der die Polarisations Ebene dieser Strahlung charakterisierende elektrische Feldvektor am stärksten absorbiert wird, aber senkrecht zum magnetischen Feldvektor steht, bestimmt die Ausrichtung der Polarisations Ebene gleichzeitig auch die Ausrichtung des magnetischen Feldes.

Die magnetischen Feldstrukturen der Galaxien verlaufen in ihren Spiralarmen, verstärkt sogar auch zwischen ihnen, meist parallel zu diesen. Abb. 4 c veranschaulicht den durch gelbe Striche markierten Verlauf dieser Felder sowie deren Stärke durch unterschiedliche, in sich geschlossene Isolinien, entlang derer die gemessenen

magnetischen Flussdichten, hinsichtlich ihrer Stärke variierend, jeweils konstant sind.

Von aktiven Galaxien gehen jetartige, magnetisch gebündelte und beschleunigte Winde aus, die beim Auftreffen auf verdichtete intergalaktische Materie im galaktischen Umfeld Schockfronten auslösen (Abb. 4 d). Vermittelt durch darin erzeugte, starke Turbulenzen und Magnetfelder generierende kleinskalige Dynamoprozesse, die Ausbreitung magnetisierter Wellen sowie einsetzende magnetische Instabilitäten wie z. B. magnetische Rekonnexionsprozesse können kosmische Partikel hierbei auf relativistische Geschwindigkeit bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Literaturverzeichnis:

- [1] Kloss A. (1994) Geschichte des Magnetismus. VDE-Verlag GmbH, Berlin und Offenbach
- [2] Priest E., Forbes T. (2000) Magnetic Reconnection – MHD Theory and Application. Cambridge University Press, Cambridge (UK)
- [3] Verschuur G. L. (1993) Hidden Attraction – The Mystery and History of Magnetism. Oxford University Press, New York (USA)
- [4] Schrijver C. J., Siscoe G. L. (2009) Heliophysics – Plasma Physics of the Local Cosmos. Cambridge University Press, New York
- [5] v. Kusserow (2018) Chaos, Turbulenzen und kosmische Selbstorganisationsprozesse. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg
- [6] v. Kusserow U. (2013) Magnetischer Kosmos – To B or not to B. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg
- [7] Wielebinski R., Beck R. (Hrsg.) (2005) Cosmic Magnetic Fields. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- [8] Zirker J. B. (2009) The Magnetic Universe – The Elusive Traces of an Invisible Force. The John Hopkins University Press, Baltimore (USA)

(Fortsetzung folgt)