

Kosmische Dynamos und magnetische Rekonnectionsprozesse (Teil 2)*

Ulrich v. Kusserow

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 (siehe im Folgenden auch die Tabelle „Zur frühen Geschichte kosmischer Magnetfelder“ in Teil 1 dieser Artikelserie). Dieses dynamoelektrische Prinzip beschreibt, wie die in einer solchen Maschine generierte elektrische Spannung durch magnetische Induktion zunehmend weiter erhöht wird, bis die schließlich erzeugte Spannung einen stabilen, relativ hohen Sättigungswert erreicht hat. Dies gelingt, weil anfangs erzeugte schwächere Induktionsströme positiv rückgekoppelt auch für ein stetiges Anwachsen der magnetischen Flussdichte im Erreger der Maschine sorgen. Sättigung erfolgt dabei nach der LENZ'schen Regel durch die Rückwirkung der erzeugten Magnetfelder und Ströme auf die Rotation des von außen angetriebenen Rotors der Dynamomaschine. Ohne ein anfangs vorhandenes zumindest kleines magnetisches Saatfeld können solche, aufgrund des FARADAY'schen Induktionsprinzips wirksam werdenden selbsterregten Dynamoprozesse allerdings gar nicht erst 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 so genannte 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 1966 die deutschen Mathematiker bzw. Physiker Max Christian Theodor STEENBECK (1904-1981), Fritz KRAUSE und Karl-Heinz RÄDLER entscheidende Grundlagen zur Dynamotheorie so genannter 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, unterschiedlich großskaligen Geschwindigkeitsfeldern bewegt. Durch das Fließen induzierter elektrischer Ströme entstehen darin die Magnetfelder. Die für die Dynamogenerierung erster kosmischer Magnetfelder unbedingt erforderlichen magnetischen Saatfelder könnten nach einem 1950 von dem deutschen Physiker Ludwig Franz Benedict BIERMANN (1907-1986) entwickelten Effekt entstanden sein. Experimentell im Laborexperiment verifiziert, sollte dieser Biermann-Batterieeffekt wirksam werden, wenn die Ausrichtungen von Druck- und Dichtegradienten in einem besonders turbulent verwirbelten, elektrisch leitfähigen Medium z. B. in hinausgeschleuderten Supernova-Überresten nicht mehr übereinstimmen. Primordiale Magnetfelder bereits vor der Entstehung erster kosmischer Strukturen könnten sich aufgrund der durch Rotationsvorgänge ausgelösten Relativbewegungen negativer (Elektronen) relativ zu positiven Ladungsträger (Ionen) schon in sehr frühen Entwicklungsphasen des Universums ausgebildet haben.

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 entdeckten Seefahrer sehr ähnliche Polarlichter auch auf der Südhalbkugel der Erde. Ein erster illustrierter Kometenkatalog wurde von chinesischen Astronomen etwa 400 v. Chr. erstellt. Vermutlich bereits im folgenden Jahrhundert beobachtete der griechische Philosoph und Mathematiker Theophrastos VON ERESOS (371-287 v. Chr.) erstmals zweifelsfrei dunkle Fleckenstrukturen auf der Sonnenscheibe. Und mit ersten Teleskopen konnten der italienische Universalgelehrte Galileo GALILEI (1564-1642) und andere Naturforscher in den Jahren 1610 und 1611 erstmals sogar die Entwicklung komplexer Sonnenfleckenstrukturen im Detail verfolgen. Zu dieser Zeit ahnte noch niemand, dass die dynamischen Entwicklungsprozesse auf der Sonne, in den Schweifen der Kometen sowie in den ionosphärischen Polarlichtzonen der Erde entscheidend vor allem auch durch die Einwirkung magnetischer Felder bestimmt sein könnten.

* Der vorangegangene 1. Teil dieser Artikelserie ist auch im Internet unter der Adresse <https://ulrich-vonkusserow.de/index.php/artikel> mit jeweils farbigen Abbildungen veröffentlicht. Unter den Abbildungen angegebene Internetverbindungen, die auf weiteres Bild- und Videomaterial im Internet verweisen, können dort jeweils durch Anklicken direkt aktiviert werden.

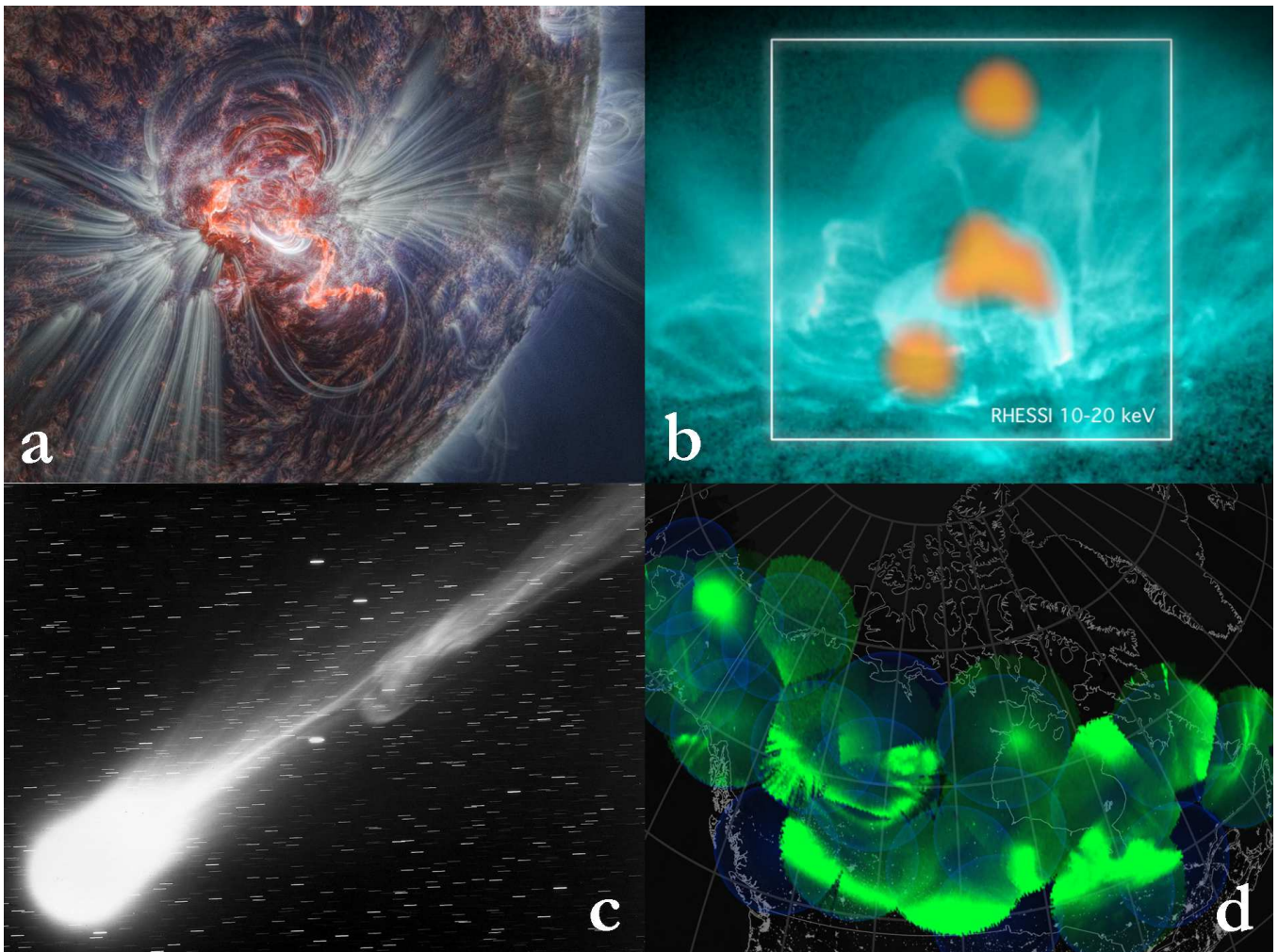


Abb. 3: Beobachtung der Resultate magnetischer Rekonnexionsprozesse im Sonnensystem.



a. Freisetzung magnetischer Energien in intensiven Flares im 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 Neuerschmelzung 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 im Rahmen 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

Erst 1741 erkannte der schwedische Astronom, Physiker und Mathematiker Anders CELSIUS (1701-1744) einen direkten Zusammenhang zwischen den damals bereits 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 Sonnenfleckenzyklus entdeckt. 1859 beobachtete der englische Amateurastronom Richard Christopher CARRINGTON (1826-1875) einen Sturm auf der Sonnenoberfläche, bei dem, im optisch Bereich für ihn deutlich sichtbar, 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 sehr faszinierenden, teilweise sehr filigran strukturierten, farbenprächtigen und dynamisch sich entwickelnden Leuchterscheinungen verantwortlich. 1908 gelangen dem amerikanischen Sonnenastronom George Ellery HALE (1868-1938) die ersten Messungen starker Magnetfelder in den Sonnenflecken. Und 1947 erklärte Ludwig Franz Benedict BIERMANN (1907-1986) die Ausbildung von Kometenschweiften mit der Existenz der Teilchenstrahlung des Sonnenwindes, für den der theoretische Sonnenphysiker Eugene Newman PARKER 1958 ein erstes einigermaßen realistisches theoretisches Modell entwickelte. Bereits 1946 hatte der australische Physiker und Sonnenforscher Ronald Gordon GIOVANELLI (1915-1984) „magnetische Rekonnexionsprozesse“ als Verursacher der starken Aufheizung und Dynamik in 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 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 das Auftreten solarer Eruptionen ebenfalls 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 sowie die dynamischen Entwicklungen von Kometenschweiften verantwortlich machten.

2.2 Charakteristische Eigenschaften magnetisierter Materie [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 des elektrischen Feldes allein die elektrische Stromdichte für die Erzeugung der Magnetfelder verantwortlich ist. Kosmische Magnetfelder werden in Dynamoprosessen regeneriert und verstärkt, magnetische Dissipationsprozesse führen zu ihrem Abbau und bewirken die Umwandlung magnetischer Energien in andere Energieformen. Lokale magnetische Rekonnexionsprozesse bewirken Neuverknüpfungen magnetischer Feldstrukturen, was häufiger auch globale drastische Veränderungen magnetischer Topologien zur Folge haben kann. Die magnetische Lorentzkraft lässt sich dabei additiv in einen richtungsunabhängigen Druckterm sowie einen nur entlang der Magnetfeldstrukturen wirksam werdenden Spannungsterm zerlegen. Die Wirksamkeit magnetische Kräfte kann in ihrem Verhalten anschaulich mit den Kräften verglichen werden, die von einem zusammengedrückten Flummiball bzw. von der gespannten Sehne eines Flitzebogens ausgeübt werden. Tab. 1 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. Gravitativ organisierte Materie neigt zur Kontraktion und zur Akkretion (Zusammenführung und Aufsammlung) von Materie insbesondere bei der Entstehung der Sterne, Galaxien und Planeten. Aufgrund des in ihr wirksamen Drucks zeigt magnetisch organisierte Materie demgegenüber eher die Tendenz zur Expansion, zum Auftrieb und löst häufiger kosmische Eruptionen aus. Unter dem Einfluss von Gravitationskräften bilden sich kugelförmige, vermittelt durch Rotationsbewegungen ergänzend auch scheibenförmige Strukturen aus, deren Bewegungsabläufe geordnet erscheinen und auf relativ stabilen Orbits erfolgen.

Unterschiede gravitativer und magnetischer Organisationsformen		
Eigenschaften	gravitativ organisierte Materie	magnetisch organisierte Materie
Hierarchieformen	galaktische, stellare oder planetare Ring- oder Satellitensysteme	magnetische Flussröhren, Filamente, Magnetosphären, Eruptionen und Plasmoide
Energiedissipation	thermische Strahlung	nichtthermische Strahlung und Teilchenbeschleunigung
Umwandlung in kinetische Energie	mehr oder weniger kontinuierlich	zeitlich zunehmend dynamischer und explosionsartig
Bewegungsmuster	geordnet, orbital	auftreibend, chaotisch oder turbulent
Kraftquelle → Wirkung	beruht oft auf eher räumlich begrenzter, zeitlich wenig variabler Materieverdichtungen → Stabilität und Kontinuität	wird getrieben durch das Fließen elektrischer Ströme → Auslöschung und Neuerzeugung, Bildung von Grenzschichten und Diskontinuitäten

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

Von magnetischen Spannungen durchsetzte kosmische Strukturen nehmen dagegen eher gebündelt oder besonders stark kollimiert erscheinende schichten-, hüllen- oder tubenförmige Gestalten an. Galaktische, stellare oder planetare Ring- oder Satellitensysteme lassen den Beobachter eher auf einen dominierenden Einfluss der Schwerkraft schließen. Das Auftreten enger Flussröhren, langgestreckter Filamente oder der Auswurf gebündelter Plasmoide deuten demgegenüber auf die Streckungswirkungen magnetischer Felder hin. Auftreibende Bewegungsmuster magnetisch organisierter Materie können sehr chaotisch und verwirbelt erscheinen. Anders als im Fall gravitativ organisierter Prozesse laufen manche der sich extrem dynamisch, sogar explosiv entwickelnden magnetischen Prozesse auf vergleichsweise sehr kurzen Zeitskalen ab. Dabei kann kosmische Partikelstrahlung auf extrem hohe Energien beschleunigt werden. Und von Himmelsobjekten, in denen sich magnetisierte Materie in einem Zustand fern vom thermodynamischen Gleichgewicht befindet, erfolgt die Aussendung besonders hochenergetischer, so genannter nichtthermischer Strahlung bis hinein in den Röntgen- und Gammastrahlenbereich.

In offenen, komplexen kosmischen Systemen laufen Selbstorganisationsprozesse bekanntlich dann ab, wenn überschüssige freie Energien fern von Gleichgewichtszuständen Instabilitäten und Turbulenzen

auslösen, die komplexe kosmische Systeme durch Neuorganisation und Ausbildung neuartiger, großskaliger Strukturelemente in einen Zustand möglichst geringer Energie überführen. Magnetische Instabilitäten erzeugen und ordnen räumlich und zeitlich fluktuierende Magnetfelder in variabler Weise, treiben dadurch die magnetischen Prozesse der Selbstorganisation, die rückwirkend auch die Strömungs- und Druckverhältnisse in den unterschiedlichsten ionisierten Medien stark beeinflussen. Solche magnetischen Prozesse spielen nachweislich eine zentrale Rolle bei der Sternentstehung und deren Entwicklung, im Zusammenhang mit der galaktischen Strukturbildung, in Scheibe-Jet-Systemen sowie bei der Entstehung von Planetensystemen.

2.3 Vielfalt magnetischer Existenzen [6] [7] [8]

Abb. 1 (siehe in Teil 1 der Artikelserie) veranschaulicht charakteristische Erscheinungsformen besonders faszinierender kosmischer Himmelsobjekte und Phänomene, die für uns Menschen in der unseren Heimatstern direkt umgebenden Heliosphäre von besonderer Bedeutung sind. Diese Objekte und Vorgänge können von uns relativ einfach teilweise mit bloßem Auge beobachtet und von Astronomen mit ihren Teleskopen besonders hochaufgelöst abgebildet werden.

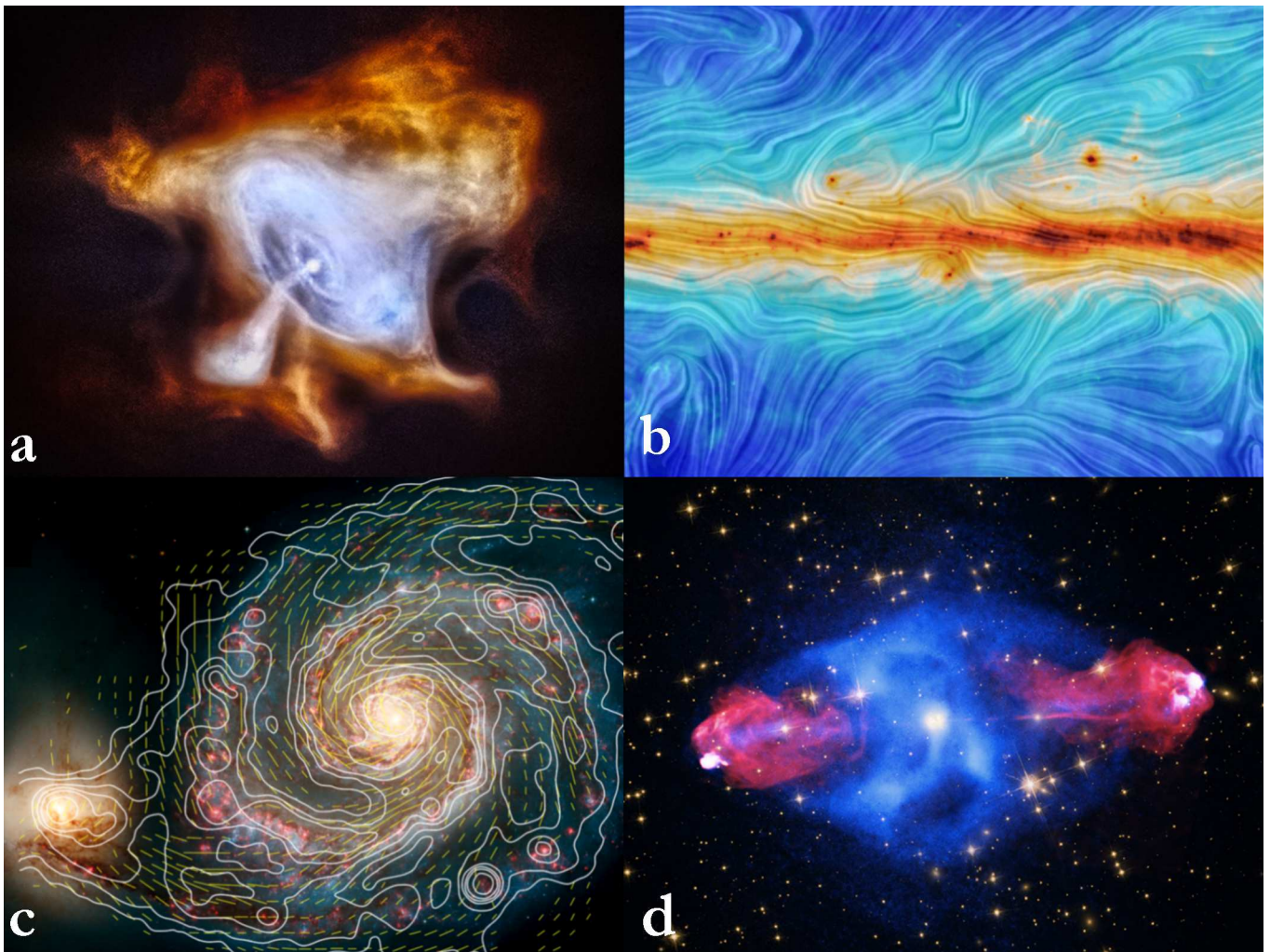


Abb. 4: Himmelsobjekte außerhalb des Sonnensystems, bei denen kosmische Magnetfelder und magnetische Rekonnexionsprozesse eine zentrale Rolle spielen können: **a.** magnetisierte Scheibe-Jet-Strukturen im Umfeld des Crab-Pulsars, **b.** Magnetfeldstrukturen im Umfeld der Milchstraßenebene, **c.** Stärke 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

Abb. 4 zeigt demgegenüber Aufnahmen sehr komplex strukturierter stellarer und galaktischer Himmelsobjekte aus dem wesentlich weiter von uns entfernten Universum. Der oft dominierende Einfluss kosmischer Magnetfelder in den in Abb. 1 dargestellten Objekten kann meist relativ einfach nachgewiesen und sogar im Detail 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 meist sehr langen Zeitskalen ablaufenden Entwicklungsprozesse demgegenüber in der Regel nicht so einfach möglich. Die Sonne und unser Planetensystem stellen von daher ein besonders geeignetes kosmisches Labor dar, in dem die meisten, oft auch entscheidenden magnetischen Prozesse „vor Ort“ relativ gut erforscht werden können. Erst die im Sonnensystem von Geo-,

Plasma- und Sonnenphysikern gewonnenen tieferen theoretischen Erkenntnisse ermöglichen es den Astrophysikern heute, auch die im sehr weiter entfernten Kosmos ablaufenden magnetischen stellaren und galaktischen Prozessentwicklungen zumindest ansatzweise besser zu verstehen.

Magnetfelder im Sonnensystem

Hochaufgelöste Aufnahmen von Sonnenfinsternissen (Abb. 1a) lassen bereits vermuten, dass die auf sehr unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen wirksamen physikalischen Prozesse nicht nur in der Sonnenatmosphäre entscheidend auch durch kosmische Magnetfelder bestimmt werden. Theoretische Sonnenphysiker modellieren die Entstehung relativ starker und im Rhythmus des solaren Aktivitätszyklusses periodisch oszillierender Magnetfelder im äußeren Drittel des Sterninneren inzwischen relativ verlässlich durch Dynamoprozesse. Im Sonnen-

inneren durch unterschiedliche Kräfte getriebene und gelenkte, elektrisch sehr gut leitfähige Plasmaströme durchlaufen die jeweils bestehenden Magnetfeldstrukturen. Einsetzende magnetische Induktionsprozesse sorgen dabei für die Erregung neuer Feldkomponente, die dem Ausgangsmagnetfeld überlagert werden (Abb. 2a, siehe Teil 1). 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 und die Beschleunigung hochenergetischer Teilchen sowie die des aus der Sonnenatmosphäre in den interplanetaren Raum abströmenden Sonnenwindes. Beim Einsetzen magnetischer Rekonnexionsinstabilitäten werden große Mengen der in solaren Plasmawolken gespeicherten magnetischen Energien in so genannten Flares 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 häufiger auch zu mächtigen koronalen Masseauswürfen entwickeln, die wie der Sonnenwind in die umgebende Heliosphäre der Sonne hinausschießen (Abb. 1b). Unterschiedlich schnelle und dichte magnetisierte Sonnenwindkomponenten sowie Koronale Masseauswürfe wechselwirken miteinander. Beim Aufeinandertreffen bilden sich immer wieder Schockfronten aus, in denen sich die Ausprägung der Turbulenzen wesentlich verstärken kann. Diese Vorgänge prägen das so genannte 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 Kometenschweif aus (Abb. 1c), in welchem einsetzende Instabilitäten, insbesondere magnetische Rekonnexionsprozesse für einen Teilabbruch des Kometenkerns sowie für Abrisse im Kometenschweif sorgen können. Trifft ein stärker turbulent verwirbelter und magnetisierter Sonnenwind in einer Schockfront insbesondere 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

oszillierend einsetzen. Bei diesen Prozessen wird genügend Energie freigesetzt, um starke elektrische Ströme in der äußeren Erdatmosphäre zu treiben und die Ausbreitung magnetischer Wellen anzuregen, wodurch geladene Teilchen so stark beschleunigt werden können, dass sie beim Auftreffen auf unterschiedliche Atome, Moleküle und Ionen der Erdsionosphäre diese zur Aussendung von jeweils charakteristisch gefärbten Polarlichtern veranlassen. Abb. 1d zeigt solche faszinierenden und farbenprächtigen Leuchterscheinungen, deren strukturelle Verteilung und Dynamik wesentlich insbesondere auch durch die Stärke und Ausrichtung der erdmagnetischen Feldkomponenten bestimmt wird.

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 z. B. in unserer Milchstraße werden mehr oder weniger starke, oszillierende oder auf größeren Zeitskalen im Wesentlichen unverändert bleibende stationäre Magnetfelder in Dynamo Prozessen 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 sehr charakteristischen Scheibe-Jet-Systemen um kompakte Zentralobjekte, in jungen protostellaren Systemen oder Doppelsternsystemen, im Umfeld besonders kompakter stellarer Objekte, die sich in der Endphase des Lebens besonders massereicher Sterne gebildet haben, sowie in den Zentralbereichen aktiver Galaxien unterstützen kosmische Magnetfelder den Abtransport von Drehimpuls, dadurch auch den Materietransport in den Akkretionsscheiben um die jeweiligen Zentralobjekte. Diese ermöglichen, beschleunigen und lenken kosmische Winde, die beim Einströmen in die Umgebungsbereiche dieser Systeme von Magnetfeldern 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, sekundenschnell 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 von so genannten Magnetaren generiert. Abb. 3a veranschaulicht die Einflussmöglichkeiten hochenergetischer, magnetisch vermittelter Prozesse im Umfeld des sehr schnell rotierenden Neutronensterns im Krebsnebel. Umgeben von einer spiralförmig

strukturierten Scheibe sendet dieser so genannte Pulsar jetartig stark gebündelte, magnetisierte Sternwinde aus, in denen Teilchen auf Geschwindigkeiten sogar bis nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, die sich pulsartig auch von der Erde aus registrieren lassen. Wie bei anderen aktiven Sternen werden auch von diesem Crab-Pulsar immer wieder, vermutlich durch magnetische Rekonnexionsprozesse erzeugte Flares ausgesandt.

Besonders großräumig kohärent organisierte, durch den Einfluss magnetischer Kräfte erzeugte Feldstrukturen prägen das in Abb. 3b dargestellte Erscheinungsbild unserer Milchstraße im Umfeld ihrer galaktischen Ebene. Die Farbskala in dieser Abbildung repräsentiert die gemessene Intensität des polarisierten Lichtes der Staubemission. Die als Rotationsachse fungierenden kurzen Achsen der Staubkörner richten sich weitgehend in Richtung der magnetischen Feldstrukturen aus. In Längsrichtung dieser Körner wird die Polarisationssebene der von ihnen ausgehenden Strahlung am stärksten absorbiert. Die senkrecht dazu verlaufende lokale Ausrichtung der Magnetfelder lässt sich daher durch möglichst exakte Vermessung der dort jeweils vorzufindenden Ausrichtung der Polarisationssebene bestimmen. Die magnetischen Feldstrukturen der Galaxien verlaufen meist in den Spiralarmen, verstärkt sogar auch zwischen ihnen, ebenfalls meist parallel zu diesen. Abb. 3c veranschaulicht den durch gelbe Striche markierten Verlauf dieser Felder sowie deren Stärke durch unterschiedliche, in sich geschlossene Iso-

linien, entlang derer die gemessene magnetische Flussdichte jeweils konstant ist, von Isolinie zu Isolinie hinsichtlich ihrer Stärke jedoch systematisch zu- bzw. abnimmt. Von aktiven Galaxien gehen meist jetartige, magnetisch gebündelte, gelenkte und beschleunigte Winde aus, die beim Auftreffen auf verdichtete intergalaktische Materiewolken Schockfronten auslösen (Abb. 3d). Vermittelt durch darin erzeugte Turbulenzen und Magnetfelder generierende kleinskalige Dynamoprozesse, die Ausbreitung magnetisierter Wellen sowie einsetzende magnetische Instabilitäten wie insbesondere auch magnetische Rekonnexionsprozesse, können kosmische Partikel in einem solchen Umfeld auf relativistische Geschwindigkeit bis auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.

Literaturhinweise

[4] Schrijver C. J., Siscoe G. L. (2009) Heliophysics – Plasma Physics of the Local Cosmos. Cambridge University Press, New York
 [5] v. Kusserow U. (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)

Zur Geschichte kosmischer Magnetfelder im entfernten Universum	
1814	Der deutsche Optiker und Physiker Joseph FRAUNHOFER (1787-1826) entdeckt die nach ihm benannten Linien im Sonnenspektrum
1845	Michael FARADAY (1791-1867) entdeckt den nach ihm benannten magnetooptischen Effekt, der die Drehung der Polarisationssebene einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle beim Durchlauf durch ein magnetisiertes Medium beschreibt, in dem das Magnetfeld parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle ausgerichtet ist
1852	Der irische Physiker und Mathematiker Physiker George Gabriel STOKES (1819-1903) definiert die nach ihm benannten vier Parameter , die den Polarisationszustand elektromagnetischer Strahlung beschreiben
1862	James Clerk MAXWELL (1831-1879) setzt sich mit der Drehung der Ebene der Polarisierung von Licht in einem Magnetfeld auseinander
1888	Der deutsche Physiker Heinrich Rudolph HERTZ (1857-1894) macht die Entdeckung, dass sich Mikrowellen- und Radiostrahlung wie sichtbares Licht polarisieren lässt
1896	Der holländische Physiker Pieter ZEEMAN (1865-1943) weist den nach ihm benannten Effekt experimentell nach, der die in systematischer Weise, proportional zur Größe der magnetischen Flussdichte erfolgende Stärke der Aufspaltung magnetisch sensibler, insbesondere auch durch unterschiedliche Polarisierung gekennzeichnete Spektrallinien in Magnetfeldern bezeichnet
1937	Der schwedische Plasmaphysiker Hannes Olof Gösta ALFVÉN (1908-1995) unterstellt die generelle Existenz von Magnetfeldern in Sternen und dem dazwischenliegenden interstellaren Medium
1944	Die sowjetischen theoretischen Physiker Dmitri Dmitrijewitsch IWANENKO (1904-1994) und Isaak Jakowlewitsch POMERANTSCHUK (1913-1966) postulieren die Existenz der Synchrotronstrahlung , die tangential zur Bewegungsrichtung geladener, vor allem auch in Magnetfeldern beschleunigter Teilchen abgestrahlt wird.
1946	Erster experimentelle Nachweis der Synchrotronstrahlung in einem zyklischen Synchrotron-Teilchenbeschleuniger. Der deutsche Astrophysiker Karl-Otto KIEPENHEUER (1910-1975) diskutiert die Emission von Radiowellen , ausgehend von beschleunigten Elektronen in Magnetfeldern

1947	Der amerikanische Astronom Horace Welcome BABCOCK (1912-2003) entdeckt das Magnetfeld des schnell rotierenden, chemisch eigenartigen Ap-Sterns 78 Virginis im Sternbild Jungfrau
1948	Horace Welcome BABCOCK schlägt vor, dass magnetische variable Sterne Quelle kosmischer Partikelstrahlung sein könnte.
1949	Der ungarisch-amerikanische theoretische Physiker Edward TELLER (1908-2003) entwickelt eine erste Theorie zum interstellaren Magnetismus . Der amerikanische theoretische Physiker Julian Seymour SCHWINGER (1918-1994) und bereits ein Jahr vor ihm F. R. ELDER bezeichnen die von Elektronen im Magnetfeld ausgesandte polarisierte Strahlung als Synchrotronstrahlung . Erste Beobachtung der optischen Polarisation kosmischer elektromagnetischer Strahlung. Der italienisch-amerikanische Physiker Enrico FERMI (1901-1954) schlägt vor, dass die gesamte Milchstraße mit kosmischer Strahlung gefüllt ist, und dass hier großskalige magnetische Felder existieren
1950	Entwicklung der Idee, dass die Einflussnahme kosmischer Magnetfelder für die Erzeugung hochenergetischer kosmischer Partikelstrahlung und zu deren Einkapselung in unserer Galaxie erforderlich ist
1951	Leverett DAVIS (1914-2003) und Jesse Leonard GREENSTEIN (1909-2002) begründen den nach ihnen benannten Effekt, wonach die Polarisation optischer und infraroter Emission aus dem Weltall durch längliche Staubkörner verursacht werden kann, die sich in magnetischen Feldern ausrichten Der japanische Physiker Yataro SEKIDO und Mitarbeiter identifizieren the Krebsnebel als Quelle kosmischer Strahlung
1953	Der indisch-amerikanische Astrophysiker Subrahmanyan CHANDRASEKHAR (1910-1995) entwickelt eine Theorie zum galaktischen Magnetismus . Der sowjetische Astrophysiker Iosif Samuilovich SHKLOVSKY (1916-1985) schlägt vor, dass die vom Krebsnebel im Optischen und Radiobereich ausgesandte Strahlung die von relativistischen Elektronen im Magnetfeld ausgesandte Synchrotronstrahlung darstellt
1954	Nachweis der linearen Polarisation des vom Krebsnebel im Optischen ausgesandten Lichts durch den sowjetischen Astronomen V. A. DOMBROWSKI
1956	Der russische Astronom Grigory Abramovich SHAJN (1892-1956) schließt aus der auffallenden Elongation diffuser Nebel entlang der galaktischen Ebene auf die Einflussnahme eines großskaligen interstellaren magnetischen Feldes
1950er Jahre	Horace Welcome BABCOCK baut Magnetometer zur Vermessung stellarer Magnetfelder, die nur ein Zehntel so stark sind wie die in Sonnenflecken
1960	Horace Welcome BABCOCK misst das 34 kG Magnetfeld des Ap-Sterns HD 215441
1961	Horace Welcome BABCOCK entwickelt das nach ihm und dem amerikanischen Experimentalphysiker Robert Benjamin LEIGHTON (1919-1997) benannte Modellszenario zur Erklärung des magnetischen solaren Aktivitätszyklusses
1962	Nachweis der linearen Polarisation der von der Milchstraße ausgesandten Radiostrahlung durch den holländisch-amerikanischen Astronomen Gart WESTERHOUT (1927-2012) sowie den in Polen geborenen amerikanischen Radioastronom Richard WIELEBINSKI Nachweis der Polarisation der Cygnus A Radiostrahlung Entdeckung der Drehung des Polarisationswinkels (FARADAY-Effekt) linear polarisierter Radioemissionen der aktiven Centaurus A Galaxie .
1964	Dave MORRIS und B. L. BERGE führen die ersten Messungen der Faraday-Rotation der von extragalaktischen Radioquellen ausgehenden polarisierten Strahlung durch
1967	Die nordirische Astrophysikerin Susan Jocelyn BELL BURNELL und der britische Radioastronom Antony HEWISH entdecken den ersten Radiopulsar PSR B1919+21 . Der deutsche Astrophysiker Joachim Ernst TRÜMPER misst erstmals das Magnetfeld eines Neutronensterns ($4 \cdot 10^{12} \text{ G} = 4 \cdot 10^8 \text{ T}$) nach Entdeckung der Zyklotronresonanz im Spektrum von Hercules X-1
1968	Der in Südafrika geborene amerikanische Radioastronom Gerrit L. VERSCHUUR weist zum ersten Mal eine Zeeman-Aufspaltung in Wolken mit neutralem Wasserstoff nach Entdeckung des Krebspulsars im Zentrum des Krebsnebels, eines Supernova- Überrests
1971	Eugene N. PARKER entwickelt das erste Modell für einen galaktischen Dynamo
1978	Erste Entdeckung polarisierter Radioemission von einer externen Spiralgalaxie (M31) durch den deutschen Radioastronomen Rainer BECK
1999	Der italienische Astrophysiker Roberto FUSCO-FEMIANO und sein Team weisen die Existenz 0,15µG starker intergalaktischer galaktischer Magnetfelder im Halo des Coma-Galaxienhaufens nach
2007	Durch Vermessung der Synchrotronstrahlung gelingt dem kanadischen Radiophysiker Philipp KRONBERG und seinem Team die Bestimmung einer Magnetfeldstärke von etwa 0,35µG innerhalb des Coma-Galaxiensuperhaufens