

Epilog

„Studenten, die astrophysikalische Lehrbücher verwenden, wissen im Wesentlichen nichts von der Existenz von Plasmakzepten, obwohl einige von ihnen seit einem halben Jahrhundert bekannt sind. Die Schlussfolgerung ist, dass die Astrophysik zu wichtig ist, um sie in die Hände von Astrophysikern zu geben, die ihr Hauptwissen aus diesen Lehrbüchern gewonnen haben. Erdgebundene und Weltraumteleskopdaten müssen von Wissenschaftlern verarbeitet werden, die mit Labor- und Magnetosphärenphysik, Schaltungstheorie und natürlich mit moderner Plasmatheorie vertraut sind.

Um die Phänomene in einem bestimmten Plasmabereich zu verstehen, müssen nicht nur das magnetische, sondern auch das elektrische Feld und die elektrischen Ströme abgebildet werden. Der Raum ist mit einem Netz von Strömen gefüllt, die Energie und Impuls über große oder sehr große Entfernungen übertragen. Die Ströme verengen sich häufig zu Filament- oder Oberflächenströmen. Letztere dürften dem Raum ebenso wie dem interstellaren und intergalaktischen Raum eine zelluläre Struktur verleihen.“

Hannes Alfvén (1909–1995), schwedischer Physiker, der 1970 den Nobelpreis „für seine grundlegenden Leistungen und Entdeckungen in der Magnetohydrodynamik mit fruchtbaren Anwendungen in verschiedenen Teilen der Plasmaphysik“ erhielt.

Ziel dieses Buchs war es, Sie als interessierten Leser über das heutige Verständnis des magnetischen Sonnensystems möglichst umfassend zu informieren. Dabei wurde über die Magnetfelder der Sonne und vieler Planeten berichtet, über Dynamos, die sie erzeugen, über die gewaltigen magnetischen Eruptionen und Stürme auf der Sonne, über die Eigenschaften und den Einfluss des dynamischen Sonnenwinds in der Heliosphäre, über seine Wechselwirkung mit Hindernissen wie Magnetosphären

sowie über die komplexen Phänomene des Weltraumwetters und seines möglichen Einflusses auf das Klima der Erde. Durch die Verwendung vieler Bilder und Schemazeichnungen wurde eine große Anschaulichkeit für den Leser angestrebt. Darüber hinaus war es auch ein wichtiges Ziel, die generelle Bedeutung der Auswirkung magnetischer Prozesse in den hochionisierten Plasmen und metallischen Fluiden im Sonnensystem aufzuzeigen und möglichst verständlich zu erklären.

Heute bieten sich den Plasma- und Sonnenphysikern völlig neue Möglichkeiten, die wichtigen Strahlungs- und Plasmaprozesse zu beobachten und zu analysieren, die für die Erzeugung kosmischer Magnetfelder, für die Aufheizung von Materie in stellaren Atmosphären sowie die effektive Beschleunigung von Partikeln in Astrosphären von entscheidender Bedeutung sind. In der Heliosphäre, diesem uns so nahe gelegenen Welt-raumlabor, lässt sich heute umfangreiches Datenmaterial in kurzen Zeitabständen und mit hoher räumlicher Auflösung sowohl durch Fernbeobachtung mithilfe von Teleskopen als auch durch In-situ-Messungen von Satelliten aus gewinnen. Die Aussagen von Theorien, die Gültigkeit von Modellvorstellungen sowie die Ergebnisse numerischer Simulationsrechnungen und von Laborexperimenten lassen sich hier an den unterschiedlichsten Himmelsobjekten zeitnah überprüfen. Wir können den Ablauf solarer Eruptionen mithilfe von Teleskopen und Messinstrumenten direkt verfolgen, die Entwicklung langgestreckter Kometenschweife und farbenprächtiger Polarlichter sogar mit bloßem Auge beobachten. Ja sogar Weitwinkelaufnahmen der gesamten inneren Heliosphäre mit den terrestrischen Planeten sind von Raumsonden aus möglich geworden. Mithilfe wissenschaftlicher Erkenntnisse erlangen wir ein tieferes Verständnis der physikalischen Vorgänge im Sonnensystem „direkt vor unserer Haustür“. Durch ihre Übertragung auf andere weit entfernte astrophysikalische Systeme (Abb. E.1) können wir auch die darin ablaufenden Prozesse wesentlich besser verstehen.

Man kann nachträglich nicht mit vollständiger Sicherheit und im Detail verlässlich rekonstruieren, wie genau die Sonne zu Beginn ihres Lebens vor etwa 4,6 Mrd. Jahren aus einer Molekül- und Staubwolke entstanden ist, wie sich die Planeten und andere Kleinkörper unseres Sonnensystems in der die Sonne umkreisenden Akkretionsscheibe über viele Millionen Jahre hinweg aus Gas-, Staub- und Eispartikeln gebildet und entwickelt haben. Inzwischen entdeckten die Astronomen und Planetenforscher aber bereits mehr als 4000 andere Sternsysteme und wiesen nach, dass diese Sterne, ähnlich wie in unserem Sonnensystem, manchmal sogar von mehreren Planeten auf ganz unterschiedlichen Orbits umkreist werden. Die Vorgänge in all

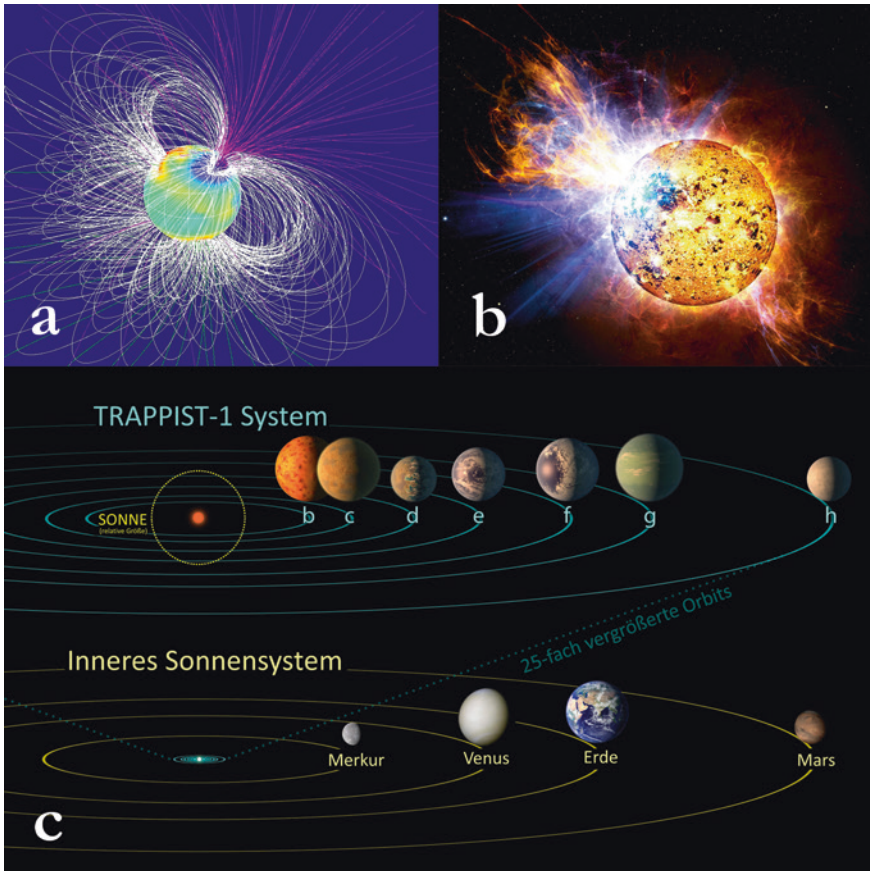


Abb. E.1 Extrasolare Planetensysteme um magnetisch aktive Sterne. **a** Berechneter Verlauf magnetischer Feldstrukturen des aktiven Sterns II Pegasi. **b** Vergleich des Trappist-1-Systems mit dem inneren Sonnensystem. **c** Künstlerische Darstellung einer Explosion auf dem aktiven Flare-Stern EV Lacertae

Yes, the Sun Is an Ordinary, Solar-Type Star After All: sn.pub/MRsbeF

TRAPPIST-1 Planet Animation: sn.pub/Yk65I2

NASA & TRAPPIST-1: A Treasure Trove of Planets Found: sn.pub/nheUj8

The Give and Take of Stellar Mega-Flares: sn.pub/9dXaG2

© a K. G. Strassmeier/AIP, b NASA/JPL-Caltech, c Casey Reed/NASA

diesen Planetensystemen werden nicht nur durch Gravitationskräfte und die in rotierenden Systemen wirkenden Zentrifugal- und Corioliskräfte bestimmt, sondern auch durch intensive Strahlungsprozesse und Stöße zwischen den Teilchen.

Die Entwicklungen hochionisierter metallischer Flüssigkeiten im Inneren der Exoplaneten, der elektrisch geladenen Plasmen im Inneren der Sterne

und in deren Atmosphären sowie in den von ihnen ausgehenden Sternwinden werden darüber hinaus vor allem auch durch magnetische Prozesse beeinflusst. Daher tragen Erkenntnisse, die in der Sonnenatmosphäre, im heliosphärischen Sonnenwind sowie in den Magnetosphären und Ionosphären der Planeten unseres Sonnensystems gewonnen werden, entscheidend dazu bei, dass auch die in entfernten extrasolaren Stern- und Planetensystemen ablaufenden Prozesse heute zunehmend besser verstanden werden.

So manche der bisher erforschten jungen, sonnenähnlichen Sterne besitzen offensichtlich ebenfalls Magnetfelder, die im Vergleich zur Sonne relativ stark sein können. Es ist sehr wahrscheinlich, dass auch diese wie im Fall der Sonne in Dynamoprozessen regeneriert werden. Mit hochentwickelten neuen Instrumenten können die Wissenschaftler heute die Existenz riesiger Sternflecken nachweisen, die sich in jungen und schnell rotierenden Sternen wesentlich näher zu den Polgebieten beim Durchstoß starker magnetischer Flussröhren durch die Sternoberfläche ausbilden. Mithilfe numerischer Simulationsrechnungen, deren Verlässlichkeit bei Anwendung auf die Sonne gezeigt wurde, lässt sich sogar der vermutliche Verlauf der magnetischen Feldstrukturen in solchen Sternkoronen ermitteln (Abb. E.1a). Die Eigenschaften extrasolarer Sternsysteme können sich wesentlich von denen unseres Sonnensystems unterscheiden. So handelt es sich beispielsweise bei dem Zentralstern des Trappist-1-Systems, das von unserem Sonnensystem etwa 40 Lichtjahre entfernt liegt, um einen im Vergleich zur Sonne relativ massearmen, sehr kleinen und leuchtschwachen roten Zwergstern. Eine größere Anzahl vermutlich erdähnlicher Planeten umkreist diesen Zentralstern auf relativ engen Umlaufbahnen, die in unserem Sonnensystem deutlich innerhalb der Merkurbahn liegen würden (Abb. E.1b). Auch wenn diese sich dabei strahlungsbezogen möglicherweise theoretisch in der sogenannten Habitabilitätszone dieses sehr leuchtschwachen Sterns befinden sollten, in der aufgrund geeigneter Temperaturen flüssiges Wasser existieren könnte, so kann diese Tatsache hier nicht als Grundlage für die Entwicklung von Leben angesehen werden.

So nahe an ihrem Zentralstern werden manche dieser Exoplaneten vermutlich eine gebundene Rotation aufweisen, bei der der Zwergstern stets nur eine Hälfte der Planetenoberfläche bestrahlt und erwärmt. Aufgrund der andauernden Temperaturunterschiede zwischen der Tag- und Nachtseite in gleichen Regionen der Planetenoberflächen würden einsetzende starke Winde in der Atmosphäre für ein sehr lebensfeindliches Klima sorgen. Darüber hinaus besitzen solche jungen, schnell rotierenden Zwerg-

sterne nach Erkenntnissen der Astrophysiker ein im Vergleich zur Sonne auch wesentlich stärkeres Magnetfeld. Die Auswirkungen starker Sternwinde und ein damit einhergehendes extremes Weltraumwetter würden die Entwicklung von Leben im Umfeld eines solchen Sterns noch unmöglicher machen. Wie bei dem aktiven Flare-Stern EV Lacertae (Abb. E.1c) sollten stellare Explosionen häufiger starke Flares, Eruptionen großer Protuberanzen und koronale Masseauswürfe auslösen, und dabei intensive Schauer hochenergetischer Partikel beschleunigen.

Die in diesem Buch kurz beschriebenen realistischen Bedrohungen der Astronauten durch das Weltraumwetter können verdeutlichen, dass bereits der bemannte Flug zum Erdmond und erst recht der zum Planeten Mars ein wirklich lebensgefährliches Abenteuer darstellen. Die Besatzungen der Raumschiffe werden auf ihrem etwa halbjährigen Flug zum Mars und erst recht während ihres vermutlich längeren Aufenthalts auf diesem staubigen und trockenen Planeten wohl zunächst einmal weitgehend ungeschützt sein, wenn es auf der Sonne vor allem in Zeiten nahe des solaren Aktivitätsmaximums zu heftigen Eruptionen kommen sollte. Bei gewaltigen Strahlungsausbrüchen in Form von Flares, bei koronalen Masseauswürfen und bei starkem Einstrom besonders energiereicher solarer oder galaktischer Partikel müssten sich die Astronauten dann – tief verschanzt in Felshöhlen, im Marsboden oder im Inneren künstlicher magnetischer Käfige mit ziemlich starken Feldern – vor den Auswirkungen des Weltraumwetters schützen. Was könnten sie in einer derart feindseligen und lebensbedrohenden Umgebung unternehmen, wenn sie beispielsweise an den verheerenden Folgen der gefährlichen Strahlenkrankheit leiden würden?

Die Forschungsergebnisse über die magnetischen Prozesse in der Heliosphäre, dem „natürlichen Plasmalabor“ unseres Sonnensystems, helfen den Astrophysikern, auch tiefere Einsichten in viele magnetische Prozesse der Strukturbildung und Entwicklung in den wesentlich weiter von uns entfernten Sternen und Galaxien des Universums zu erlangen. Die Sonnen- und Plasmaphysiker sowie die Planetenforscher können heute selbst mikroskopische physikalische Vorgänge innerhalb des Sonnensystems durch hochauflösende Fernerkundung sowie detaillierte In-situ-Messungen immer genauer beobachten und analysieren. Ihre dabei gewonnenen grundlegenden Erkenntnisse lassen sich zur Gewinnung auch eines tieferen Verständnisses so mancher stellarer und galaktischer Prozesse verwenden, die aufgrund der sehr großen Entfernung dieser Himmelsobjekte auch in Zukunft für den Theoretiker niemals zufriedenstellend hoch aufgelöst beobachtet werden können.

A Zur Geschichte der Entdeckung solarer und heliosphärischer Prozesse

A.1 Die Entdeckung des Sonnensystems

Um etwa 270 v. Chr. hatte der griechische Astronom und Mathematiker Aristarchos von Samos in seinem Werk *Über die Größen und Abstände von Sonne und Mond* wohl erstmals die Hypothese eines astrozentrischen Weltbilds aufgestellt. Er ging davon aus, dass sowohl die Fixsterne als auch die Sonne in der Himmelssphäre unbeweglich seien, dass sich die selbst rotierende Erde aber auf einer Kreisbahn um die wesentlich größere Sonne im Mittelpunkt des „Universums“ bewegen müsste. Um etwa 190 v. Chr. soll der ebenfalls griechische Astronom Seleukos von Seleukia als Einziger das heliozentrische Weltbild des Aristarchos von Samos verteidigt haben, der aufgrund inzwischen besserer Beobachtungsdaten sowie trigonometrischer Kenntnisse dies angeblich anhand theoretischer Überlegung sogar „beweisen“ konnte.

Erst etwa 1800 Jahre später, im Jahr 1543, setzte der polnische Astronom und Arzt Nikolaus Kopernikus (1473–1543) seinem Werk *De revolutionibus orbium coelestium* die Sonne wieder ins Zentrum des Universums. In der Zwischenzeit war das schon von Aristoteles (384–322 v. Chr.) entwickelte und später von Claudius Ptolemäus (ca. 100–160 n. Chr.) in seinem Werk *Mathematices syntaxeos biblia XIII* detailliert ausgearbeitete geozentrische Weltbild allgemein anerkannt. Die Erde wird darin als im Zentrum des Universums ruhend angesehen und wurde vom Mond, den damals bereits entdeckten inneren Planeten Merkur und Venus, der Sonne und den äußeren Planeten Jupiter und Saturn auf komplizierten Bahnkurven umkreist. Diese

Modellvorstellung passte allerdings nicht wirklich zu den Vorstellungen des Aristoteles über die Wirkung einer Art Schwerkraft, wonach alles Schwere eigentlich zum Mittelpunkt des Universums als seinem natürlichen Ort zustreben und sich die Himmelsobjekte mit konstanter Geschwindigkeit auf Kreisbahnen nur um die Erde bewegen sollten. Demgegenüber ging Kopernikus in seinem heliozentrischen Weltbild davon aus, dass sich die Erde und die anderen Planeten jeweils um sich selbst drehend auf Kreisbahnen um die Sonne bewegen müssten. Ebenfalls noch ohne Vorstellungen über den Einfluss der Gravitationskraft unterstützte der deutsche Astronom Johannes Kepler (1571–1630) das kopernikanische Weltbild, ging aber davon aus, dass alle Planeten gemäß der nach ihm benannten keplerschen Gesetzes auf elliptischen Bahnen mit der Sonne in einem der beiden Brennpunkte umlaufen. In seinen Werken *Astronomia nova* und *Harmonices mundi libri V* veröffentlichte er 1609 bzw. 1619 diese Gesetze, in dem er das Sonnensystem als ein dynamisches System betrachte, in dem die Sonne durch Fernwirkung die Planeten auf ihren Bahnen hält.

Erst Isaac Newton (1642–1727) formulierte 1687 in seinem Werk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* die entscheidenden Grundlagen der klassischen Mechanik. Basierend auf dem universell geltenden Gravitationsgesetz und dessen Fernwirkung, mit dem Konzept von absoluter Zeit und absolutem Raum, konnte er die Gültigkeit der drei keplerschen Grundgesetze der Bewegung beweisen und so die Bewegungen der Himmelsobjekte im Sonnensystem erklären.

A.2 Über die Eigenschaften der Magnete

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 zählt zu den stärksten (ferri)magnetischen Mineralen, die sich unterhalb der sogenannten Curie-Temperatur von 578 °C in Richtung des Erdmagnetfelds ausrichten.

Auch in chinesischen Quellen aus dem dritten vorchristlichen Jahrhundert werden die anziehenden Eigenschaften von Magnetsteinen 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 Shen Kuo (1031–1095 n. Chr.). Erst sehr viel später, 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 bereits damals drehbar gelagerte magnetisierte Nadeln, die sich (natürlich unabhängig von störender Bewölkung) in etwa zum Polstern im Sternbild des Kleinen Bären, angenähert zum geografischen Nordpol hin ausrichten.

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. In diesem Brief fasste er seine praktischen und theoretischen Erkenntnisse über die geheime Kraft des Magnetismus zusammen. 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 Eigenschaften der Magnetpole. Sehr wahrscheinlich bemerkte er als Erster, dass jeder Magnet zwei unterschiedliche Pole aufweist, und erforschte mithilfe von Eisennadeln, wo diese senkrecht zur Oberfläche eines kugelförmigen Magnetsteins angezogen werden. Er fand heraus, dass sich ungleichartige Magnetpole sowohl der Naturmagnete als auch magnetisierten Eisens anziehen und gleichartige abstoßen. Schließlich erkannte er die Unzerstörbarkeit des Dipolcharakters der Magnete. Die zwei Teile eines zerbrochenen Magneten weisen wiederum jeweils einen sogenannten Nord- und 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.

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 Kues (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 Ordensmitglieds Marsilio Ficino (1433–1499) erhalten Magneten ihre Kraft direkt von den Sternen des Kleinen Bären, weshalb sich die Magnetnadeln in Richtung zum Polarstern ausrichten müssten. Selbst Leonardo da Vinci (1452–1519) war dieser Überzeugung. Der Arzt und Magier Agrippa von Nettesheim (1486–1535) glaubte dagegen, dass Magnetsteine ihre Kraft vom Mars erhielten und dass Magnetnadeln vom Schwanz des großen Bären angezogen werden würden. Der als Paracelsus berühmt gewordene 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 und sogar der Mond magnetisch seien, was Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen haben müsste und u. a. 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 schon damals darauf hinwies, dass der geografische Nordpol der Erde möglicherweise nicht mit dem erdmagnetischen Pol übereinstimmt. 1598 schließlich schlug Johannes Kepler (1571–1630) ein Experiment vor, in dem durch Messung der magnetischen Neigung der Kompassnadeln überprüft werden könnte, ob die Magnete eher zum Polarstern oder aber zu „Bergen unter dem Pol“ weisen. Bereits 1546 hatte der flämische Geograf Gerhard Mercator (1512–1594) in diesem Zusammenhang die sogenannte Magnetberghypothese unterstützt, wonach der Erdmagnetpol möglicherweise in einem magnetischen Gebirge auf der russischen Insel Nowaja Semlja zu finden sei.

A.3 Historisches über das „magnetische Sonnensystem“

Erst drei Jahre vor seinem Tod veröffentlichte William Gilbert (1544–1603) (Abb. A.1) im Jahr 1600 sein epochales Werk *De magnete* („Vom Magneten, von den magnetischen Kräften und dem großen Magneten Erde“), in dem 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 ent-



Abb. A.1 Bekannte Naturforscher und Wissenschaftler erkennen den Einfluss kosmischer Magnetfelder im Sonnensystem in der Vergangenheit

© gemeinfrei, NASA, Image courtesy of the Observatories of the Carnegie Institution for Science Collection at the Huntington Library, San Marino, California

wickelte 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 damals schon gewonnenen erdmagnetischen Messergebnissen.

Wie es in einem naturwissenschaftlichen Werk heute üblich ist, prüfte und bewertete Gilbert schon damals auch die Ergebnisse der Werke von Hunderten anderer Autoren. Nach seinen Schlussfolgerungen müsste die Magnetkraft etwas Immaterielles darstellen und der Magnetismus zu den wichtigsten kosmischen Kräften gehören. Ohne Kenntnisse über die Gravitationskraft glaubte er wie Kepler daran, dass diese magische Kraft sowohl die Erde als auch das gesamte Sonnensystem bewegen könnte. Im Rahmen seiner „magnetischen Philosophie“ sah er die „Ursache aller Himmelsbewegungen in magnetischen Kräften“. Die Magnetkraft der

Sonne wurde von ihm und vielen anderen auch für die Planetenbewegungen verantwortlich gemacht. Selbst Galileo Galilei (1564–1642) war ein Anhänger dieser Theorie von William Gilbert, auch wenn er 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.

„Der Leib der Sonne ist magnetisch und dreht sich am Orte“ ist die Überschrift eines Kapitels des 1609 von Johannes Kepler veröffentlichten Werks *Astronomia Nova, eine neue, auf wahren Ursachen gegründete Sternkunde*. Fast 600 Jahre früher hatte u. a. der Ägypter Ali ben Ridwan (980–1052) die in der Zwischenzeit aufgrund von Beobachtungsergebnissen anerkannte Ansicht vertreten, dass von jedem Magneten faserartige Strukturen als Merkmal der von ihm vermittelten gerichteten Kraft herausströmen. So müssten nach Keplers Meinung magnetische Fasern auch von der rotierenden, magnetischen Sonne abströmen und die Zwischenräume der von diesen mitgerissenen Planeten durchfluten. Er benutzte damals offensichtlich eine frühe Form des wesentlich später von dem berühmten Naturforscher Michael Faraday (1791–1867) (Abb. A.1) um 1846 entwickelten Modells magnetischer Kraftlinien, um die Dynamik der Bewegungen der Himmelsobjekte im Sonnensystem sowie die Ausbreitung magnetischer Felder darin ganz ohne die Wirkung von Gravitationskräften zu erklären. 1620 zeichnete der englische Staatsmann Francis Bacon (1561–1626) erstmals magnetische Feldlinien und spekulierte über den Ursprung der magnetischen Fernkraftwirkung.

Basierend vor allem auch auf den Erkenntnissen von Michael Faraday, Carl Friedrich Gauß (1777–1855) und André-Marie Ampère (1775–1836) entwickelte James Clerk Maxwell (1831–1879) (Abb. A.1) zwischen 1861 und 1864 die nach ihm benannten Gleichungen, die die entscheidenden Grundlagen zur Beschreibung der Phänomene des Elektromagnetismus und zur Modellierung magnetischer Prozesse nicht nur in unserem Sonnensystem darstellen.

A.4 Die Entdeckung der Sonnenflecken

Der griechische Philosoph und Naturforscher Theophrastos von Eresos (371–287 v. Chr.) hatte einen dunklen Fleck auf der hellen Sonne als ein „Wetterzeichen“ interpretiert. Und in chinesischen Aufzeichnungen aus Zeiten der Han-Dynastie findet man erste Hinweise auf die Beobachtung solcher Flecken in den Jahren 165 sowie 28 v. Chr. Insbesondere größere

Sonnenflecken oder Sonnenfleckengruppen konnten sicherlich bei Sonnenaufgängen und Sonnenuntergängen oder bei etwas dunstigem Wetter aufgrund atmosphärischer Dämpfung des allzu grellen Sonnenlichts gut beobachtet werden. Der persische Naturforscher Aviacella (vor 980–1037) berichtete darüber, dass ein Fleck sogar über acht Tage zu sehen gewesen sei. Basierend auf der über Jahrtausende akzeptierten Vorstellung einer als „makellos, ohne einen Fleck“ angesehenen Sonne ging auch der englische Mönch und Chronist Johannes von Worcester noch im Jahr 1128 davon aus, dass die beobachteten dunklen Objekte sicherlich unentdeckte Planeten, Monde oder Wolken seien, die zwischen der Erde und der Sonne liegen müssten. Immer wieder tauchten andererseits aber auch Vorstellungen auf, dass es sich bei den Sonnenflecken um dunkle Löcher, schwimmende Schlacken oder kühlere Stellen auf der Sonne oder aber um Erscheinungen in der Erdatmosphäre handeln müsste.

Um nicht mit bloßem Auge in die allzu helle Sonne blicken zu müssen, beobachtete der englische Naturphilosoph Roger Bacon (um 1220 bis nach 1292) erstmals Sonnenflecken mithilfe einer sogenannten Camera obscura. Durch ein kleines Loch in der Wand eines dunklen Raums können darin eintretende Sonnenstrahlen ein höhen- und seitenverkehrtes Abbild des jeweils betrachteten Fleckenobjekts auf der gegenüberliegenden Wand erzeugen. 1607 hielt Johannes Kepler (1571–1630) einen mit einer solchen Lochkamera beobachteten Sonnenfleck noch für den Planeten Merkur.

Nach der Erfindung des Teleskops im Jahr 1607 u. a. durch den deutsch-niederländischen Brillenmacher Hans Lipperhey (1570–1619) konnten Sonnenflecken dann aber eindeutiger identifiziert werden. 1610 fertigte der englische Astronom Thomas Harriot (1560–1621) erste, noch private Aufzeichnungen von Sonnenfleckbeobachtungen mithilfe eines Teleskops an. Und 1611 publizierte der deutsche Astronom Johann Fabricius (1587–1617) erstmals öffentlich die Ergebnisse von derartigen Beobachtungen. Wie der österreichische Astronom Christoph Scheiner (1573–1650) begann auch Galileo Galilei (1564–1642) 1610 mit der Langzeitbeobachtung und Anfertigung von Zeichnungen von Sonnenflecken und anderer Strukturen auf der Sonnenoberfläche. Während Scheiner noch annahm, dass sich diese dunklen Flecken nicht auf der „reinen Sonne“ befinden könnten, ging Galilei nach seiner Entdeckung der etwa 28-tägigen Sonnenrotation anhand der Fleckenwanderung sicherlich davon aus, dass sich diese auf der Sonne befinden müssten.

Der schottische Astronom und Mathematiker Alexander Wilson (1714–1786) stellte 1769 die Einsenkung der Sonnenflecken zum Sonnenrand hin fest. Dieser nach ihm benannte Effekt wurde auch von dem deutschen

Amateurastronomen Johann Hieronymus Schroeter (1745–1816), dem Leiter einer der damals weltweit bedeutendsten Sternwarten, von Lilienthal bei Bremen aus über 15 Jahre hinweg intensiv beobachtet und beschrieben. Die Sonne mit ihren Flecken sowie den nur am Sonnenrand auftretenden hellen punktförmigen Fackeln erschienen ihm von daher als eine Kugel. Das Aussehen randnaher Flecken- und Fackelgebiete interpretierte er in diesem Zusammenhang als das Erscheinungsbild gebirgiger Kraterlandschaften, die sich ähnlich einem Wettergeschehen ständig verändern würden. Die damals schon als Umbra bezeichneten dunklen Fleckenkerne seien teilweise von Lichtadern (heute Lichtbrücken genannt) durchsetzt und von mattgrauen, nach außen hin unscharf begrenzten, streifenartigen Lichtnebeln (heute Penumbra genannt) umgeben. Schroeter stellte fest, dass sich die gehäuft in der Nähe des Sonnenäquators umlaufenden Flecken und Fackeln sehr rasch verändern können, dass die gesamte Oberfläche in deren Umfeld nicht einheitlich hell, sondern eher „marmoriert“ erscheint (heute als Granulation bezeichnet). Wie vieler seiner Zeitgenossen ging auch Schroeter damals davon aus, dass die Sonne im Inneren ein dunkler Körper sei, der von lichtaussendender Atmosphäre umgeben ist. Sonnenflecken werden danach durch die Schichtung dieser „Lichtatmosphäre“ gebildet. Im Fleckenbereich blickt der Beobachter danach ins Dunkle des Sonneninneren.

A.5 Die Entdeckung des magnetischen Sonnenzyklus

Erstmals 1775 vermutete der dänische Arzt und Astronom Christian Pedersen Horrebow (1718–1776) eine Periodizität in der Häufigkeit des Auftretens der Sonnenflecken. Aber erst 1844 stellte Samuel Heinrich Schwabe (1789–1875) (Abb. A.1) anhand der Auswertung umfangreichen Datenmaterials die Zyklizität der Sonnenfleckentätigkeit mit einer Periode von etwa zehn Jahren gesichert fest. Beginnend 1862 erkannte der ebenfalls deutsche Astronom Friederich Wilhelm Gustav Spörer (1822–1895) bei der systematischen Erforschung der Bewegung der Sonnenflecken nicht nur, dass die heliografischen Breitenbereiche, in denen Sonnenflecken auf der Nord- bzw. Südhalbkugel immer wieder gehäuft auftreten, sich gemäß dem später nach ihm benannten Gesetz im Verlauf des Sonnenzyklus in systematischer Weise verändern, sondern fand darüber hinaus erstmals Hinweise auf die Existenz von Zeiträumen, in denen die mit der Fleckenhäufigkeit assoziierte Sonnenaktivität deutlich verringert ist. Der englische Edward Walter Maunder (1851–1928) wies schließlich 1893 nach, dass es eine – später nach ihm als Maunder-Minimum bezeichnete – Phase

zwischen den Jahren 1645 und 1715 mit drastisch verringerter Fleckenhäufigkeit tatsächlich gegeben hat.

Im Jahr 1908 hatte der US-amerikanische Astronom George Ellery Hale (1868–1938) (Abb. A.1) nachweisen können, dass Sonnenflecken auffallend stark magnetisiert sind. Der Nachweis gelang ihm mithilfe des sogenannten Zeeman-Effekts, der nach dem niederländischen Physiker Pieter Zeeman (1865–1943) benannt ist. Dieser bezeichnet den Sachverhalt, dass in Magnetfeldern entstandene Spektrallinien in charakteristischer Weise in mehrere Komponenten aufgespalten werden. Die Tatsache, Art und Stärke der Aufspaltung sowie der Polarisationsart der einzelnen Spektrallinien ermöglichten so den Nachweis der Existenz sowie die Bestimmung der Stärke und Ausrichtung der magnetischen Flussdichte in dem jeweils betrachteten Medium.

Der englische Chemiker William Hyde Wollaston (1766–1828) sowie der Münchener Optiker und Physiker Joseph von Fraunhofer (1787–1826) hatten bereits 1802 bzw. 1814 unabhängig voneinander die Existenz Hunderter dunkler, sogenannter Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum nachgewiesen. Solche von dunklen Absorptionslinien durchsetzten Spektren sowie aus hell leuchtenden Linien bestehende Emissionsspektren entstehen dadurch, dass man das zu analysierende Licht nach Durchlaufen eines schmalen Spalts und mithilfe eines brechenden Mediums in einem Spektrometer in seine Komponenten mit verschiedenen Wellenlängen zerlegen kann. Erst um 1860 gelang dem deutschen Physiker Gustav Robert Kirchhoff (1834–1887) sowie dem Chemiker Robert Wilhelm Bunsen (1811–1899) die genaue wissenschaftliche Analyse derartiger Spektren.

Hale hatte den Spalt seines Spektrografen so orientiert, dass er durch die Mitte eines Sonnenflecks lief. Er konnte nachweisen, dass einzelne Fraunhoferlinien jeweils oberhalb sowie unterhalb des Sonnenflecks kaum verbreitert waren, jedoch im Bereich des Sonnenflecks und verstärkt zu dessen Zentrum hin aufgrund der Wirkung des Zeeman-Effekts deutlich aufgeweitet erschienen. Aus der Stärke dieser Verbreiterung konnte er auf die dazu proportionale Stärke des Magnetfelds schließen. Der lineare oder zirkulare Polarisationszustand ermöglichte ihm Aussagen über die Orientierung des Magnetfelds. Er fand heraus, dass die vorangehenden und benachbarten nachfolgenden Flecken einer Fleckengruppe in der Regel jeweils unterschiedliche magnetische Polaritäten aufweisen. Anhand der Ergebnisse umfangreicher Messreihen konnte er 1909 nachweisen, dass die magnetischen Polaritätsverhältnisse in Sonnenfleckengruppen im Verlauf des elfjährigen Sonnenfleckenzyklus zwar konstant bleiben, dass sie dabei allerdings in den beiden Hemisphären entgegengesetzt orientiert sind.

Zehn Jahre später fand er dann heraus, dass sich diese zu Beginn eines neuen Aktivitätszyklus offensichtlich vollständig umkehren. Der magnetische Aktivitätszyklus der Sonne besitzt somit eine im Durchschnitt 22-jährige Periode.

Harold Delos Babcock (1882–1968) (Abb. A.1) und sein Sohn Horace Welcome Babcock (1912–2003) waren zwei bedeutende amerikanische Astronomen, die sich auf die Sonnenspektroskopie und die präzise Vermessung der Verteilung der magnetischen Felder auf der Sonnenoberfläche spezialisiert hatten. Sie entwickelten und verwendeten dazu besonders leistungsfähige Messinstrumente. Mithilfe des um 1953 gebauten Magnetometers konnten sie sogar die Existenz eines nur relativ schwachen, von Pol zu Pol reichenden globalen solaren Dipolfelds und dessen zyklische Umpolung im Verlauf eines jeden Fleckenzyklus nachweisen. Darüber hinaus entwickelte Babcock 1961 zusammen mit dem amerikanischen Experimentalphysiker Robert Benjamin Leighton (1919–1997) auch ein qualitatives Modell für die Solardynamik, mit dem die Entwicklung des mit einer Periode von 22 Jahren oszillierenden Magnetfelds der Sonne im Großen und Ganzen erklärt werden könnte.

A.6 Sonnenfinsternisse, die Entdeckung der Sonnenkorona und solarer Gaswolken

Schon immer waren Menschen verständlicherweise tief beeindruckt, in frühen Zeiten meist auch voller Angst oder zumindest großer Ehrfurcht, wenn sie eine totale Sonnenfinsternis bei der Verdeckung der Sonnenscheibe durch den Mond erlebten. Es gibt die Legende, zwei chinesische Astrologen seien enthauptet worden, weil sie die „plötzliche Abwesenheit der Sonne“ am 22. Oktober 2134 v. Chr. nicht präzise vorherberechnet hatten. In der menschlichen Geschichte war dies offensichtlich der erste aufgezeichnete Bericht einer Sonnenfinsternis. Sie wurde früher oft als Ursache von Tod und Zerstörung angesehen. Im alten China waren daher in solchen Momenten die Gesundheit und der Erfolg des Kaisers gefährdet. Davon gingen auch die Babylonier aus, die u. a. die Sonnenfinsternis des 3. Mai 1375 v. Chr. nachweislich sehr präzise vorhersagten. So konnten sie jeweils vorher noch rechtzeitig einen vorübergehenden Ersatzkönig einsetzen, der anstelle des eigentlichen Königs dem Zorn der Götter ausgesetzt wurde. Der griechische Universalgelehrte Aristoteles (384 v. Chr.–322 v. Chr.) soll 322 v. Chr. vorgeschlagen haben, dass die Sonne eine Kugel reinen Feuers sein müsste. Und um 20 v. Chr. könnte es der chinesische Astronom

Liu Hsiang gewesen sein, der die Verdunklung der Sonne durch den direkten Vorbeizug des etwa gleich groß erscheinenden Monds erklärte und so die Ursache für die Entstehung einer Sonnenfinsternis aufdeckte.

Jedem Menschen, der mit bloßem Auge eine totale Sonnenfinsternis beobachtet, müsste eigentlich der hell leuchtende, mehr oder weniger geordnete Strahlenkranz aufgefallen sein, der die durch den Mond vollständig verdeckte Sonne umhüllt. Vermutlich hat der byzantinische Historiker Leo Diaconus (etwa 950–994) zum ersten Mal ausdrücklich erwähnt, dass eine heute als Korona bezeichnete äußere Atmosphäre der Sonne existiert. Am 22. Dezember 968 hatte er sie von Konstantinopel aus als schmales, strahlendes Band erkannt, das den Rand der vom Mond verdunkelten Sonnenscheibe umgibt.

Auch wenn Johannes Kepler persönlich niemals eine totale Sonnenfinsternis beobachtet hat, so machte er sich mehr als 600 Jahre später doch erstmals ernsthafte wissenschaftliche Gedanken über den Ursprung dieses Phänomens. Er schlug vor, dass das Sonnenlicht an der die Sonnen umgebenden Materie reflektiert werden könnte. 1724 ging der französisch-italienische Astronom Giacomo Filippo Maraldi (1665–1729) davon aus, dass die Korona ein Teil der Sonne sein müsste. Diese Ansicht unterstützte 1806 auch der spanisch-baskische Astronom José Joaquín de Ferrer (1763–1818), der nach Beobachtung einer Sonnenfinsternis dieser dünnen äußeren Atmosphäre dann auch den Namen „Korona“ gab.

In den Jahren 1871 und 1878 verglich der französische Astronom Pierre Jules César Janssen (1824–1907) das Erscheinungsbild der Sonnenkorona während zweier Sonnenfinsternisse spektroskopisch. Er stellte zum einen fest, dass sie sowohl aus heißem Gas als auch aus kalter Materie zusammengesetzt sein müsste, und zum anderen, dass sie in Zeiten nahe dem Sonnenfleckenmaximum (1871) runder und gleichmäßiger um die verdeckte Sonnenscheibe verteilt und nahe dem Minimum hin (1878) eher zum Sonnenäquator hin konzentriert zu sein scheint. Die US-amerikanischen Astronomen Samuel Pierpont Langley (1834–1906) und Cleveland Abbe (1838–1916) konnten bei der Sonnenfinsternis am 29. Juli 1878 feststellen, dass dabei in Äquatornähe helm- und wimpelförmige Aufhellungen bis zu 6° von der Sonnenoberfläche entfernt in die Ekliptik hinausreichten. Erst 1932 konnten der südafrikanische theoretische Physiker Gabriël Gideon Cillié (1910–2000) sowie der amerikanische Astronom Donald Howard Menzel (1901–1976) anhand spektroskopischer Untersuchungen während einer Sonnenfinsternis zeigen, dass die Temperaturen in der Sonnenkorona wesentlich höher als in der darunterliegenden Photosphäre sind und dass

sich die Teilchen in diesem dünneren Medium daher mit viel größeren Geschwindigkeiten bewegen sollten.

Die Inschrift „Drei plötzlich platzende Feuer fressen einen Teil der Sonne“ auf einem chinesischen Schildkrötenpanzer aus dem Jahr 1307 v. Chr. lässt möglicherweise darauf schließen, dass bei einer Sonnenfinsternis rötlich leuchtende Strukturen oberhalb des verdeckten Sonnenrands zu beobachten waren. Während der ringförmigen Sonnenfinsternis am 17. Juli 334, bei der der Mond die Sonne am Rand nicht ganz vollständig verdeckte, beobachtete der römische Senator und Astrologe Iulius Firmicus Maternus offensichtlich Gaswolken am Sonnenrand, die heute als Protuberanzen bezeichnet werden würden. „Es wurde sehr dunkel und Sterne konnten gesehen werden. Die Sonne sah dem Mond ähnlich, und aus ihren Hörnern kam so etwas wie lebende Glut heraus“ war die erste eindeutige Beschreibung solcher Gaswolken, die in einer russischen Chronik über die Beschreibung der Sonnenfinsternis vom 1. Mai 1185 zu finden ist: Ein englischer Schiffskapitän hat bei einer Sonnenfinsternis 1707 rötliche Streifen oberhalb des Sonnenrands beobachtet. Es spricht einiges dafür, dass er Strukturen, möglicherweise aufragende kühle Protuberanzen in der rötlich leuchtenden Chromosphäre zwischen der Photosphäre und der Korona beobachtet hat.

Der englische Astronom Edmond Halley (1656–1741) (Abb. A.1), der Entdecker des bekannten und nach ihm benannten, periodisch alle 74 bis 79 Jahre wiederkehrenden Kometen, entdeckte bei der Sonnenfinsternis am 3. Mai 1715 nicht nur die Asymmetrie der Sonnenkorona, sondern beobachtete auch helle rote Protuberanzen. Erstmals von der Sonnenfinsternis am 28. Juli 1851 wurde eine astronomische Fotografie mithilfe des Daguerreotypie-Verfahrens auf einer spiegelglatt polierten Metalloberfläche gemacht. Unter anderem der schottische Astronom Robert Grant (1814–1892) erkannte dabei während des Vorbeizugs des Mondes vor der Sonne, dass Protuberanzen wohl Teile der Sonne sein müssten. George Biddell Airy (1801–1892) war danach der Erste, der das von Protuberanzen geschaffene gezackte Erscheinungsbild der Chromosphäre der Sonne detaillierter beschrieb.

Im Jahr 1868 schließlich gab der ebenfalls englische Astronom Joseph Norman Lockyer (1836–1920) dieser Atmosphärenschicht aufgrund ihrer auffallenden (rötlichen) Färbung diesen Namen. Und bei der Sonnenfinsternis am 18. August dieses Jahres wurden Protuberanzen erstmals auch spektroskopisch untersucht. Verschiedene Astronomen konnten dabei feststellen, dass diese in erster Linie hauptsächlich aus dem Element Wasserstoff bestehen. Schließlich entwickelten die amerikanischen bzw. französischen

Astronomen George Ellery Hale (1868–1938) und Henri-Alexandre Deslandres (1853–1948) in den Jahren 1893 bzw. 1894 sogenannte Spektroheliografen, mit denen man die Chromosphäre, Protuberanzen sowie solare Flares jederzeit auch ohne das Warten auf eine Sonnenfinsternis beobachten konnte.

A.7 Über Solare Eruptionen und koronale Masseauswürfe

Möglicherweise haben bereits chinesische Beobachter mit bloßem Auge 1111 v. Chr. erstmals eine als Flare bezeichnete blitzartig auftretende, sehr starke Aufhellung auf der Sonnenscheibe gesehen. Mit Sicherheit entdeckten der Amateurastronom Richard Hodgson (1804–1872) sowie der englische Sonnenfleckenforscher Richard Christopher Carrington (1826–1875) (Abb. A.1) solche Flares am 1. September 1859. In der damals von Carrington angefertigten Zeichnung einer großen Sonnenfleckengruppe sind auch vier Aufhellungen zwischen den dunklen, die Flecken darstellenden Strukturen eingetragen. Diese dokumentieren die genauen Positionen besonders dynamischer Flare-Ereignisse, bei denen damals gewaltige Mengen an magnetischer Energie freigesetzt worden sein müssen. Nachdem George Ellery Hale 1893 den Spektroheliografen entwickelt hatte, ließen sich solare Flares als bedeutsame Phänomene solarer Eruptionen auch spektroskopisch beobachten und genauer analysieren. Erstmals 1937 wurde der Flare-Begriff in einer Ausgabe der Zeitschrift *Washington Post* verwendet. 20 Jahre später, im Jahr 1957, beschrieb der 1927 geborene US-amerikanische Astrophysiker Eugene Newman Parker mit der magnetischen Rekonnexion einen physikalischen Prozess, der eine plötzliche Freisetzung sehr großer Energiemengen durch die Verschmelzung magnetischer Feldstrukturen ermöglicht. 1963 modellierte er diesen Prozess schließlich für Flares.

Nachdem Joseph Lockyer und Jules Janssen 1868 gezeigt hatten, dass Protuberanzen zu jeder Zeit mithilfe eines Spektroskops sichtbar gemacht werden konnten, wuchs die Kenntnis über die Eigenschaften, das Aussehen und die Entwicklung dieser solaren Gaswolken recht schnell an. 1871 klassifizierte der italienische Physiker und Astronom Angelo Secchi (1818–1878) diese häufig über den Sonnenrand herausragenden „Prominences“, die er in seinem 1875 erschienenen Buch *Le Soleil* auch als „gigantische rosa oder Pfirsichblüten-farbige Flammen“ beschrieb. Er unterteilte sie in ruhige und aktive Protuberanzen. Um 1892 war es bereits verbreitetes Allgemeinwissen

unter interessierten Sonnenforschern, dass diese Gaswolken als Eruptionen mit Geschwindigkeiten von mehr als 100 km/s in der Atmosphäre der Sonne aufsteigen können.

Nach der Entwicklung des Spektroheliografen durch Hale und Deslandres in den 1890er Jahren war die hochaufgelöste Beobachtung der Chromosphäre der Sonne insbesondere im Licht der roten H-alpha-Linie des Wasserstoffs möglich. Die vorher nur über dem Sonnenrand gesehenen Protuberanzen waren dadurch auch in Form dunkler, oft recht langgestreckter Filamente auf der Sonnenscheibe zu beobachten. Im Bereich einer Fleckengruppe gelang George Ellery Hale am 2. Mai 1909 eine besonders spektakuläre Aufnahme einer gewaltigen Filamenteruption, bei der große Mengen an magnetischer Energie in Flare-Prozessen freigesetzt und gleichzeitig gewaltige Materiemengen hinausgestoßen wurden.

Der 1929 geborene H. Lawrence Helfer gehörte zu den Physikern, die in den 1950er-Jahren die Theorie von Schockwellen entwickelt hatten. 1953 betrachtete er in einer Arbeit die Möglichkeit, dass solche aufgesteigten Stoßwellen auch vor eruptiven solaren Protuberanzen in den interplanetaren Raum hinauslaufen könnten. Etwas später, im Jahr 1957, hatte Eugene Newman Parker Details über die Physik großräumiger ionisierter Gaswolken mit darin verwickelt eingelagerten Magnetfeldern herausgearbeitet, die als sogenannte magnetische Wolken von der Sonne ausgeworfen werden könnten. Bis zum 1. März 1969 blieb allerdings unklar, ob die Plasmamaterie innerhalb dieser Wolken wegen der starken Gravitationskraft der Sonne nicht immer wieder auf die Sonnenoberfläche zurückfallen würde. Anhand der Abbildungen, die mithilfe eines australischen solaren Radiospektrografens in zeitlicher Abfolge erstellt werden konnten, ließ sich an diesem Tag erstmals zeigen, dass dies offensichtlich nicht immer der Fall ist.

Die ersten optischen Aufnahmen eines Materieauswurfs aus der Sonnenkorona gelangen am 13. und 14. Dezember 1971 mithilfe des Weltraumkoronografen OSO-7 der NASA. Ebenfalls durch künstliche Verdeckung der Sonnenscheibe erstellten die US-Amerikaner von Bord ihrer Weltraumstation Skylab Aufnahmen solarer Eruptionen mit deutlich besserer Qualität über längere Beobachtungszeiten. Sie erkannten, dass diese mit Flare-Ereignissen assoziiert waren und immer dann erfolgten, wenn Protuberanzen in Höhen von mehr als 0,3 Sonnenradien aufstiegen, manchmal aber auch wieder zurückfielen. Bei oft bogenförmigen koronalen Masseauswürfen konnten Plasmawolken die Gravitationskraft der Sonne ohne Rückfall größerer Materiemengen überwinden und weiträumig in die Heliosphäre entweichen. Die typische dreiteilige Struktur dieser Masse-

auswürfe, bestehend aus einer voranlaufenden Schockfront, einem nachfolgenden Hohlraum mit reduzierter Teilchendichte sowie einem hellen, mit Protuberanzenmaterial gefüllten Kern, konnte erstmals am 18. August 1980 mithilfe der amerikanischen Solar-Maximum-Mission identifiziert werden. Knapp ein Jahr vorher war ein sogenannter Halo-Materieauswurf beobachtet worden, bei dem sich ein helles Emissionsband oberhalb der gesamten verdeckten Sonnenscheibe hinaus in die Heliosphäre bewegt.

A.8 Über Kometen, die heiße Sonnenkorona und den Sonnenwind

Dass geladene Teilchen in Form von Elektronen von der Sonne insbesondere auch in Richtung Erde gesendet werden, davon ging der norwegische Physiker Kristian Olaf Bernhard Birkeland (1867–1917) bereits 1898 aus. Als Erforscher der Polarlichter ging er in seiner Theorie davon aus, dass diese das Gasgemisch der oberen Erdatmosphäre zum Leuchten anregen müssten. 1909 konnte er diese Möglichkeit in seinem Terella-Experiment plausibel machen, indem er die polnahe gasförmige Umgebung einer kleinen, die Erde repräsentierende magnetisierte Modellkugel in einer Vakuumkammer durch Beschuss mit negativ geladener Kathodenstrahlung tatsächlich zum Leuchten brachte. Dass die Sonne geladene Partikel nicht nur sporadisch bei koronalen Masseauswürfen, sondern auch in Form eines stetig von ihrer Korona in die Heliosphäre abströmenden Partikelwinds aussendet, das vermutete der deutsche Physiker Ludwig Franz Benedikt Biermann (1907–1986) in seinen Überlegungen zur Ausrichtung der lang gestreckten Schweife der Kometen und der Strömung der Teilchen darin.

Die seltenen, dann aber plötzlich und unerwartet erscheinenden, mit bloßem Auge sichtbaren Kometen mit ihren in Sonnennähe bis zu Millionen Kilometer langen Schweifen waren früher für viele Menschen Himmelsobjekte, vor denen man sich fürchten musste. So assoziierte Homer, der bekannte früheste Dichter des Abendlands, etwa 800 v. Chr. Krankheit, Pest und Krieg mit dem „flammenden Haar“ der Kometen. Der besonders leuchtstarke und langlebige Komet Halley wurde dafür verantwortlich gemacht, dass König Harold 1066 in der Schlacht von Hastings von Wilhelm dem Eroberer besiegt worden war. Ein Papst hielt ihn 1456 für einen Vertreter des Teufels, dessen langer Schweif die Form eines Drachens oder Schwerts besaß. Und der Große Komet aus dem Jahr 1811 zog die Aufmerksamkeit des Kaisers Napoleon Bonaparte auf sich, der ihn als Weissagung für die Rechtfertigung der Invasion Russlands im Jahr 1812 ansah.

Während die frühen griechischen Astronomen zur Zeit des Aristoteles (384 v. Chr.–322 v. Chr.) Kometen als ein Himmelsobjekt in der Erdatmosphäre ansahen, stellte der berühmte dänische Astronom Tycho Brahe (1546–1601) anhand von Parallaxenentfernungsmessungen fest, dass der Große Komet des Jahres 1577 tatsächlich wesentlich weiter entfernt als der Mond von der Erde war. Es war schließlich Edward Halley, der unterstützt durch seinen Freund Isaac Newton (1643–1727), basierend auf den Grundlagen der Gravitationstheorie, ein erstes physikalisches Verständnis über die Natur der Kometen entwickelte. Er sagte (relativ korrekt) voraus, dass der nach ihm benannte Komet auf seiner Umlaufbahn um die Sonne von etwa 76 Jahren nach 1682 erst wieder 1759 (in Wirklichkeit bereits im Januar 1758) zu sehen sein würde.

Um das Jahr 1950 existierten zwei unterschiedliche Theorien über die Zusammensetzung des Kometenkerns. Nach dem Sandbank-Modell des britischen Astrophysikers Raymond Arthur Lyttleton (1911–1995) müsste er aus einer lockeren Ansammlung von Eis und Staub bestehen, der sich bei Annäherung an die Sonne zunehmend stärker erhitzt. Um den Kern herum würde sich dadurch eine als Koma bezeichnete Kometenatmosphäre sowie davon ausgehend ein charakteristischer Kometenschweif ausbilden. Der amerikanische Astronom Fred Lawrence Whipple (1906–2004) glaubte in seinem Schmutziger-Schneeball-Modell eher an die Existenz eines festen Kerns aus Wassereis, Felsbrocken und eingelagertem Staub. Die Richtigkeit dieser Theorie konnte erst 1986 bei der Annäherung mehrerer Weltraumsonden an den Kometen Halley bestätigt werden.

Deutlich erkennbar schon für frühe Beobachter großer Kometen, besteht deren Schweif, der sich erst in einem Abstand von etwa 2 AE von der Sonne ausbildet, in der Regel aus zwei unterschiedlichen Anteilen. Die Ausbildung des gekrümmten, diffus strukturierten und relativ stark aufgefächerten Staubschweifs ließe sich recht gut allein durch die Einwirkung des Drucks der von der Sonne ausgehenden elektromagnetischen Strahlung erklären. Für die Ausbildung des oft auffällig lang gestreckten und von der Sonne wegweisenden Gasschweifs sowie die Beschleunigung der geladenen Teilchen darin vermutete Ludwig Biermann 1951 aber zusätzlich auch den Einfluss einer von der Sonne kontinuierlich emittierten Partikelströmung. Deren Wechselwirkung mit den ionisierten Teilchen aus dem Kometenhalo und möglicherweise auch in der solaren Teilchenstrahlung mitgeführte Magnetfelder könnten so für die Ausbildung des gebündelten Plasmaschweifs eine wichtige Rolle spielen.

Dass eine stark aufgeheizte Sonnenkorona für die Beschleunigung eines regelmäßig aus der Sonnenatmosphäre abströmenden Teilchenwinds ver-

antwortlich sein könnte, dafür gab es bis zum Jahr 1943 nur wenige Indizien. Wie sollte es angesichts einer nur etwa 5500 °C warmen Photosphäre der Sonne überhaupt möglich sein, dass von weiter außen gelegenen Atmosphärenschichten der Sonne stetig Teilchen- sowie UV- und sogar Röntgenstrahlung ausgesandt werden sollten? Einigen Aufschluss hätte darüber eine damals noch nicht identifizierbare grüne Koronalinie geben können, die während einer Sonnenfinsternis im Jahr 1869 entdeckt worden war. Die Wellenlänge dieser Emissionslinie eines damals hypothetisch noch als Coronium bezeichneten Atoms konnte erst rund 20 Jahre später mit $\lambda = 530,3 \text{ nm}$ spektroskopisch bestimmt werden. Erst wesentlich später, im Jahr 1931, postulierte der deutsche Astrophysiker und Spektroskopiker Walter Robert Wilhelm Grotrian (1890–1954), dass die beobachteten Verbreiterungen von Absorptionslinien im Sonnenspektrum mithilfe der Streuung an freien Elektronen zu erklären seien, die in einer heißen Korona zur Verfügung stehen müssten. Deren Freisetzung aus Atomen würde aber unbedingt die lokale Einwirkung von UV- und Röntgenstrahlung oder auch hochenergetischer neutraler Teilchenstrahlung erfordern. 1938 konnte sich der US-amerikanische Geophysiker Edward Olson Hulburt (1890–1982) auch die nachgewiesene Teilchenionisation in der E-Schicht der Erdionosphäre nur durch solche von der Sonne ausgesandten harten Strahlung erklären. Am 10. Oktober 1946 konnte die Emission ultravioletter Strahlung von der Sonne erstmals mit amerikanischen Instrumenten geflogen auf einer erbeuteten deutschen V2-Rakete nachgewiesen werden.

1939 postulierte Grotrian (1939), dass die grüne Linie des Coroniums in Wirklichkeit eine Linie des 13-fach ionisierten Eisens sein müsste, was der schwedische Astrophysiker Bengt Edlén (1906–1993) im Jahr 1943 auch beweisen konnte. Beide Wissenschaftler identifizierten weitere Spektrallinien besonders hochionisierter Atome, u. a. die rote Linie des neunfach ionisierten Eisenatoms Fe X bei $\lambda = 637,4 \text{ nm}$. Während Grotrian damals nur von hohen Ionisationsgraden, aber noch nicht direkt von hohen Temperaturen sprach, ging Edlén bereits 1941 davon aus, dass der hohe Ionisationsgrad vieler Atome für typische Temperaturen von mehreren Hunderttausend Grad Celsius in der Sonnenkorona sprechen würde. In seinem ersten Artikel über die Heizung der Korona im selben Jahr schlossfolgerte der spätere schwedische Nobelpreisträger Hannes Gösta Alfvén (1908–1995) anhand einer Vielzahl von Argumenten ebenfalls, dass in der Korona extrem hohe Temperaturen anzutreffen sind. 1947 beschrieb er die dazu erforderliche Heizung der Korona durch magnetohydrodynamische Wellen, und 1950 ging er aufgrund der Identifikation der Koronalinien

hochionisierter Atome durch Bengt Edlén davon aus, dass die Temperaturen in der Korona 600000 °C betragen müssten. Basierend auf ersten Einsichten von Grotrian sowie dem Nachweis durch Edlén, waren es also wichtige physikalische Erkenntnisse von Alfvén, die die Existenz einer – heute sogar als 1 Mio. Grad Celsius heiß erkannten – Sonnenkorona bestätigen konnten.

Ludwig Biermann behauptete, dass von der so heißen Sonnenkorona ein stetiger Strom geladener Plasmapartikel, möglicherweise durchsetzt auch von Magnetfeldern, ausgesandt wird, der in größerer Sonnennähe für die Ausbildung der lang gestreckten Plasmaschweife der Kometen sorgt. Eugene Newman Parker konnte 1958 in einem anfangs umstrittenen Artikel zeigen, dass Biermann recht hatte. Seine Berechnungen gingen davon aus, dass die Sonnenkorona aufgrund ihrer hohen Temperatur nicht etwa als statisch angesehen werden darf, sondern eher als sehr dynamisch behandelt werden muss. Den von ihr ausströmenden überschallschnellen Teilchenwind, für dessen Beschreibung er eine erste magnetohydrodynamische Theorie entwickelte, bezeichnete er mit dem Begriff „Solar Wind“. Ausgehend von einer mehr als 1 Mio. Grad heißen Atmosphäre berechnete er die Geschwindigkeit der radialen Expansion der Sonnenkorona nach außen sowie die zu erwartende Dichte des Sonnenwindgases am Orbit der Erde.

Dieses ionisierte, elektrisch sehr gut leitfähige, als Plasma bezeichnete Gas müsste die Feldlinien des dipolartigen globalen Magnetfelds der Sonne wie eingefroren mit sich tragen. Bereits 1928 hatte der amerikanische Chemiker und Physiker Irving Langmuir (1881–1957) den Plasmabegriff als vierten Zustand der Materie neben fest, flüssig und gasförmig eingeführt. In seiner 1959 veröffentlichten Arbeit stellte Parker heraus, dass die interplanetaren Magnetfeldstrukturen aufgrund der Rotation der Sonne, zumindest in größerer Entfernung von ihr, deshalb in Form einer archimedischen Spirale aufgewickelt sein müssten. Auf eine mögliche Spiralstruktur heliosphärischer Magnetfelder, die heute mit dem Begriff „Parker-Spirale“ bezeichnet wird, hatte 1957 auch schon Hannes Alfvén im Zusammenhang mit der Entwicklung seiner Theorie der Kometenschweife hingewiesen.

Der erste Nachweis eines Ionenflusses im interplanetaren Medium außerhalb der Erdmagnetosphäre gelang 1959 von Bord sowjetischer Luna-Missionen. Obwohl die genauen Geschwindigkeiten und Richtungen der strömenden Protonen nicht ermittelt werden konnten, gingen die Wissenschaftler damals davon aus, dass diese Teilchen von der Sonne ausgesandt sein müssten. Plasmaströme von der Sonne mit mittleren Geschwindigkeiten von 300 km/s und Temperaturen von 500000 °C konnten erstmals 1962 von der amerikanischen Explorer-10-Mission nachgewiesen

werden. Eindeutige Indizien für die Existenz eines kontinuierlich von Sonne abströmenden Teilchenwinds konnten aber erst mit Daten von Bord der im selben Jahr gestarteten Mariner-2-Mission der Amerikaner zur Venus gewonnen werden. Über 104 Tage hinweg wurde ein stetiger Plasmafluss mit wechselnden Geschwindigkeiten zwischen 400 und 1250 km/s nachgewiesen, der von der Sonne weggerichtet war und in dem sich neben den Protonen auch ein kleinerer Prozentsatz an schweren Heliumkernen befand.

In seiner frühen Arbeit von 1958 ging Parker davon aus, dass die Ausdehnung der Korona durch den Gradienten des Drucks der so heißen Elektronen getrieben wird. Aufgrund des zu schnellen Abfalls der Elektronentemperaturen mit dem Abstand von der Sonne vermutete er allerdings bereits 1965, dass die Sonnenkorona noch weit außen zusätzlich durch die Dissipation von Wellenenergien geheizt werden müsste. In einem Zweikomponentenmodell versuchten die amerikanischen Astrophysiker R. E. Hartle und Peter E. Sturrock 1968, neben den Elektronen auch die Rolle der Protonen im Sonnenwind zu berücksichtigen. Da ihre Modellrechnungen viel zu geringe Geschwindigkeiten und Temperaturen für die Sonnenwindpartikel ermittelten, schlossen sie darauf, dass deren Heizung zusätzlich noch durch sogenannte nichtthermische Energien erfolgen müsste.

Bereits 1942 hatte Hannes Alfvén die Existenz später nach ihm benannter magnetohydrodynamischer Wellen vorgeschlagen. Er ging davon aus, dass derartige Wellen auch Energie aus der Photosphäre hinauf in höhere Atmosphärenschichten transportieren und so auch die Korona und sogar den Sonnenwind erwärmen könnten. 1971 konnten die amerikanischen Astronomen John Winston Belcher und Leverett Davis erstmals die allgegenwärtige Existenz solcher Alfvén-Wellen im Sonnenwind nachweisen. Später wurden weitere magnetische Wellentypen entdeckt, die für die Beschleunigung und Heizung des Sonnenwinds verantwortlich sein könnten. Philip A. Isenberg, Joseph V. Hollweg, Eckart Marsch und andere Forscher entwickelten von 1982 an eine Theorie der Heizung des Sonnenwinds durch Ionenzyklotronwellen. Ausgehend von der Sonnenkorona könnten solche Wellen nach erfolgter Dämpfung auch für die bevorzugte Heizung und Beschleunigung besonders von schweren Ionen im Sonnenwind verantwortlich sein.

A.9 Historisches über Variationen im Erdmagnetfeld

Erkenntnisse darüber, dass sich geeignet gelagerte Bruchstücke von Magnet-eisenstein ungefähr in geografischer Nord-Süd-Richtung ausrichten, gab es in China vermutlich seit etwa 200 v. Chr., möglicherweise auch bereits im antiken Griechenland. Die ersten gesicherten Hinweise für die Ausnutzung der magnetischen Richtungskraft auch zur Navigation stammen von dem chinesischen Naturwissenschaftler Shen Kuo (1031–1095 n. Chr.). Erst am Ende des 12. Jahrhundert wurde der gewinnbringende Einsatz eines magnetischen Kompasses durch den englischen Mönch Alexander Neckam (1157–1217) in der europäischen Literatur erwähnt. Seeleute benutzten offensichtlich bereits damals drehbar gelagerte magnetisierte Nadeln, die sich unabhängig von störender Bewölkung zum Polarstern im Sternbild des Kleinen Bären angenähert in Richtung zum geografischen Nordpol ausrichteten. Der italienische Seefahrer Christoph Kolumbus (1446–1461) entdeckte 1492 auf seinen Schiffsreisen ortsabhängige Veränderungen der Ausrichtung horizontal gelagerter magnetischer Kompassnadeln. Die sogenannte Deklination gibt in diesem Zusammenhang den zu messenden lokalen Winkel zwischen der Ausrichtung der Horizontalkomponente des Erdmagnetfelds und der geografischen Nordrichtung an. Auf dem Festland begann der Instrumentenmacher Georg Hartmann (1489–1564) mit den Messungen dieser Deklination.

Zufällig bemerkte er bereits 1510, dass eine geeignet aufgehängte Kompassnadel einen bestimmten Neigungswinkel zur Horizontalen einnimmt, „dass sie abwärts zieht“. Die Tatsache, dass ein solcher – heute als Inklination bezeichneter – Winkel von Bedeutung ist, wurde aber erst durch den englischen Seefahrer, Kompasshersteller und Wissenschaftler Robert Norman (vor 1560 bis nach 1596) wirklich bekannt gemacht. 1575 hatte er herausgefunden, dass sich eine in Richtung Norden weisende Magnetnadel in London leicht zur Erde neigt. Erst nachdem der praktizierende Arzt William Gilbert (1544–1603) im Jahr 1600 seine Hypothese aufgestellt hatte, dass die Erde als Ganzes ein großer Magnet sei, konnte er erklären, warum sich die auf der Erdoberfläche gemessene Inklination als so stark ortsabhängig erweisen musste. Gilbert experimentierte mit einem kugelförmigen Magnetstein, die als sogenannte Terella die Erde symbolisieren sollte. Er konnte zeigen, dass sich Kompassnadeln am Terella-Äquator mit einer Inklination von 0° horizontal zur Kugeloberfläche, an den beiden Polen mit dem Inklinationswinkel 90° senkrecht, dazwischen aber tatsächlich schräg zur Kugeloberfläche ausrichten.

Der englische Pfarrer und Astronomie-Professor Henry Gellibrand (1597–1636) stellte 1635 die These auf, dass sich das gesamte Magnetfeld der Erde mit der Zeit verändert. Durch Vergleich von Messdaten konnte er zeigen, dass sich der Deklinationswinkel in London innerhalb von 50 Jahren um mehr als 7° verändert hatte. Während der deutsche Astronom Johannes Hevelius (1611–1687) die Unregelmäßigkeiten des Erdmagnetfelds mit der Unregelmäßigkeit der Erdbewegung zu erklären versuchte, meinte der Navigationslehrer Henry Bond (1600–1678) im Jahr 1673, dass die erdmagnetischen Pole wie von selbst wandern würden. Und der Kometenforscher Edmond Halley entwickelte dafür 1691 eine Theorie, wonach im Erdinneren zwei verschiedene Magnete rotieren. Er war der Leiter einer ersten globalen magnetischen Vermessungskampagne (1698–1700), erstellte danach 1701 und 1702 Karten, die bereits recht detailliert die Verteilung der magnetischen Deklinationen über den Atlantik bzw. die ganze Welt zeigen. 1716 betonte er auch den möglichen Zusammenhang des Erdmagnetismus mit den Polarlichterscheinungen. Er war der Erste, der vorschlug, dass man neben der Deklination und Inklination auch die Kraft des Erdmagnetfelds mit Kompassnadeln vermessen sollte.

Der berühmte Forschungsreisende Friedrich Wilhelm Heinrich Alexander von Humboldt (1769–1859) (Abb. A.1) veröffentlichte 1798 in Paris mit anderen Wissenschaftlern die Ergebnisse der mit Kompassen durchgeführten Deklinationsmessungen. Zusammen mit dem französischen Mathematiker und Seemann Jean-Charles de Borda (1733–1799) machte er dort im selben Jahr auch erste Inklinationsmessungen. Bereits ein Jahr später ermittelte er sogar die relativen Stärken des Erdmagnetfelds an verschiedenen Orten in Spanien und Frankreich mithilfe eines saussureschen Magnetometers. Der Genfer Geologe, Meteorologe und Physiker Horace Bénédicte de Saussure (1740–1799) hatte dieses Messgerät entwickelt, bei dem ein Stabmagnet, der an einem Drahtseil horizontal gelagert aufgehängt ist, durch angelegte äußere Magnetfelder in Schwingungen versetzt wird. Für ein solches Schwingungssystem gilt, dass das Verhältnis T_2/T_1 zweier Schwingungsdauern stets gleich dem der Wurzel aus dem Kehrwert des Verhältnisses B_2/B_1 zweier magnetischer Flussdichten ist. Durch Messung der unterschiedlichen Schwingungsdauern T_1 und T_2 an zwei verschiedenen Orten konnte Humboldt so mithilfe dieses Messgeräts und der Gleichung $B_2/B_1 = (T_2/T_1)^2$ zumindest die Stärken der Magnetfelder an verschiedenen Orten relativ zueinander ermitteln.

Auf seiner Süd- und Mittelamerikareise führte er 1799 bis 1804 regelmäßig detaillierte Vermessungen des Erdmagnetfelds in sehr unterschiedlichen geografischen Breiten und unterschiedlichen Höhen über dem

Meeresspiegel durch. So wies er nach, dass die Intensität des terrestrischen Magnetfelds sowie dessen Inklinationwinkel zu den Polen hin deutlich zunehmen und dass die magnetische Stärke in den Gebirgen mit der Höhe abnimmt. Er ermittelte dort auch den ungefähren Verlauf des sogenannten magnetischen Äquators, einer Linie, die die Orte verbindet, an dem das Erdmagnetfeld horizontal zur Erdoberfläche verläuft. 1804 wurden seine Reiseergebnisse durch den französischen Physiker und Mathematiker Jean-Baptiste Biot (1774–1862) veröffentlicht, der den Verlauf des magnetischen Äquators danach noch genauer analysierte. 1808 definierte er zusammen mit dem französischen Chemiker und Physiker Joseph Louis Gay-Lussac (1778–1850) die magnetische Kraft über die Zahl horizontaler Schwingungen von Kompassnadeln pro Zeitraum.

Von 1805 bis 1807 führte Humboldt umfangreiche erdmagnetische Beobachtungen in Berlin durch. Am 20. Dezember 1806 beobachtete er hier intensive Polarlichterscheinungen, die er mit großer Begeisterung besonders anschaulich beschrieb. Allerdings war er weniger an einer physikalischen Erklärung dieser von ihm als „Erdlichter“ bezeichneten Phänomene interessiert als vielmehr am „Einfluss dieses Lichtmeteors auf die Magnetnadel“. Schon wenige Tage vorher hatte er die von ihm „magnetische Ungewitter“ genannten stärkeren Schwankungen des Erdmagnetfelds zusammen mit dem Bremer Arzt und Astronomen Heinrich Wilhelm Matthias Olbers (1758–1840) beobachtet, der ihn in Berlin besucht hatte. Olbers war es auch, der den Kontakt von Humboldt mit dem deutschen Mathematiker, Statistiker, Astronomen, Geodäten und Physiker Johann Carl Friedrich Gauß (1777–1855) vermittelte. Dieser war sehr an der umfangreichen erdmagnetischen Datensammlung Humboldts interessiert. 1812 sprach Humboldt mit Olbers in Paris über erdmagnetische Beobachtungen und die Veränderungen der Magnetnadelausrichtungen, 1826 führte er Inklinationsbestimmungen mit Carl Friedrich Gauß am Hainberg in Göttingen durch, der ihn zwei Jahre später auch in Berlin besuchte. 1823 hatte er den Bau eines ersten magnetischen Observatoriums aus Holz in Paris mit veranlasst. 1836 begann er seine systematischen magnetischen Beobachtungen und Forschungsarbeiten im magnetischen Observatorium in Berlin. Hier hielt er eine Vielzahl von beeindruckenden Vorträgen, in denen er eine Gesamtschau über die wissenschaftliche Welterforschung über die Sonne und ihre Flecken, über erdmagnetische Variationen und Polarlichter gegeben hat. Die Inhalte dieser Vorträge veröffentlichte er zwischen 1845 und 1862 in fünf Bänden unter dem Titel *Kosmos – Entwurf einer physischen Weltbeschreibung*.

Zusammen mit dem Physiker Wilhelm Eduard Weber (1804–1891) arbeitete Carl Friedrich Gauß in der Sternwarte Göttingen ab 1831 verstärkt

über den Magnetismus. 1833 wurde hier ein Magnetisches Observatorium fertig gestellt. Zusammen mit Weber entwickelte Gauß ein Magnetometer zur direkten Messung magnetischer Feldstärken. Entlang der weltweit ersten Telegrafenvorbindung tauschte er zwischen der Sternwarte und dem Physikalischen Institut Nachrichten über elektromagnetisch beeinflusste Kompassnadeln aus. 1839 entwickelte Gauß seine mathematische Potenzialtheorie, mit der es erstmals möglich war, Struktur und Stärke des globalen Erdmagnetfelds mithilfe einer nicht allzu großen Datenmenge für jeden Ort im Erdumfeld zu bestimmen. Anhand seiner Berechnungen stellte er dabei fest, dass der Hauptanteil des Magnetfelds zu ca. 95 % aus dem Erdinneren stammen müsste. Der Restanteil müsste außerhalb der Erde entstehen. Seine Allgemeine Theorie des Erdmagnetfelds wurde in Humboldts *Kosmos* später als „unsterbliches Werk“ bezeichnet.

Die Tatsache, dass sich die Stärke und Ausrichtung des Erdmagnetfelds in Form sogenannter Säkularvariationen räumlich und zeitlich merklich variiert, hatten viele Naturforscher des 18. Jahrhunderts bereits erkannt. Umfangreiche Datensammlungen wurden von ihnen danach auch kartografiert und wissenschaftlich ausgewertet. Dass darüber hinaus die magnetischen Pole der Erde aber immer wieder weiträumige Exkursionen durchführen, zeitweise sogar mehr als zwei Pole existieren können und sich das Erdmagnetfeld in der Vergangenheit obendrein häufiger vollständig umgepolt hat, das entdeckten Wissenschaftler erst im 19. Jahrhundert. Bernhard Brunhes (1867–1911), französischer Geophysiker und einer der Pioniere des Paläomagnetismus, entdeckte 1906 die entgegengesetzte Ausrichtung der Magnetisierung von vulkanischen Gesteinsproben. Er schloss daraus, dass sich das Erdmagnetfeld im Laufe der Erdgeschichte umgepolt haben muss.

Im Jahr 1963 interpretierten der kanadische Geophysiker Lawrence Whitaker Morley (1920–2013) sowie unabhängig von ihm der 1939 geborene britische Geophysiker Frederick John Vine und der Meeresgeologe Drummond Hoyle Matthews (1931–1997) das Auftreten der sich abwechselnden magnetischen Polarisierung auf beiden Seiten des Mittelatlantischen Meeresrückens im gleichen Sinne. In ihren Theorien vereinigten sie schlüssig die Konzepte der vom deutschen Geowissenschaftler Alfred Lothar Wegener (1880–1930 auf Grönland) entdeckten Kontinentaldrift, der Ausbreitung des Meeresbodens in diesem Bereich sowie der wiederholten globalen Umpolung des Erdmagnetfelds. 1964 veröffentlichten der US-amerikanische Allan Verne Cox (1926–1987) und seine Mitarbeiter schließlich ihr wegweisendes Papier mit dem Titel „Reversals of the Earth Magnetic Field“, indem sie weitere Beweise der gleichzeitigen Umpolung des

Erdmagnetfelds an verschiedensten Orten dokumentierten. Die letzte von ihnen nachgewiesene Umpolung datierten sie für die Zeit vor etwa 750 000 Jahren.

Schon 1919 hatte Joseph Larmor (1857–1942) erstmals die Wirkung selbsterregter Dynamoprozesse für die Erklärung des Ursprungs kosmischer Magnetfelder ins Spiel gebracht. Aber erst 1942 entwickelte Hannes Alfvén die Theorie der Magnetohydrodynamik, mit der die Entwicklungen solcher in der Sonne oder Erde wirksamen Dynamoprozesse berechnet werden konnten. Der deutsch-amerikanische Geophysiker Walter Elsasser (1904–1991) wird als Vater der Dynamotheorie bezeichnet. 1939 hatte er die grundlegenden Differenzialgleichungen für den Geodynamo aufgestellt und postulierte, dass das Erdmagnetfeld durch Wirbelströme innerhalb des flüssigen Erdkerns aufrechterhalten wird. 1950 entwickelte der britische Geophysiker Edward Crisp Bullard (1907–1980) die Theorie des Geodynamos weiter. Fünf Jahre später führte Eugene Parker mit dem magnetischen Auftrieb, der zyklonischen Konvektion in rotierenden Fluiden sowie der magnetischen Rekonnexion drei wichtige Konzepte ein, die sich für die Erklärung kosmischer Dynamoprozesse als sehr bedeutsam erwiesen haben.

A.10 Zur Geschichte der Polarlichter

Chinesische Höhlenmalereien aus der Zeit um 30 000 v. Chr. könnten als die Darstellung einer Aurora am Sternenhimmel interpretiert werden. Chinesische Inschriften, die etwa 2600 v. Chr. verfasst wurden, beschreiben plötzliche starke Aufhellungen, die sich am Sternenhimmel bewegen. Und in der Nacht vom 12. auf den 13. März 567 v. Chr. erlebten babylonische Astronomen, die für ihre besonders sorgfältigen astronomischen Aufzeichnungen bekannt waren, ein ungewöhnliches rotes Leuchten, das den wohl frühesten zuverlässigen, auf einer Tontafel dokumentierten Hinweis für die Beobachtung von Polarlichtern darstellt. Dies geschah in einer Zeit, als Babylon noch mehr als 13° näher am zeitlich bekanntlich wandernden magnetischen Pol der Erde lag. Der griechische Philosoph Aristoteles beschrieb 344 v. Chr. Nordlichter als Flammen von heiligen unterirdischen Lampen, die den Himmel überqueren. Während die Nordlichter seit dem 17. Jahrhundert n. Chr. bereits gründlicher erforscht wurden, gab es zumindest für Europäer kaum frühe Hinweise für die mögliche Existenz von Südlichtern. Der spanische Gelehrte Antonio de Ulloa (1716–1795) berichtete 1745 erstmals von deren Entdeckung während seiner

Umseglung von Kap Horn. 1770 sah dann auch die Mannschaft des britischen Seefahrers James Cook (1728–1779) auf ihrer Entdeckungsreise nach Australien Südlichter, die in ihrem Erscheinungsbild denen der bekannten Nordlichter auffallend ähnelten.

Schon vor Beginn solcher Aufzeichnungen haben die Menschen die nördlichen und südlichen Polarlichter in höheren geografischen, also arktischen und antarktischen Breiten regelmäßig beobachtet. In den unterschiedlichsten Kulturen schufen sie dafür schon früh Legenden und Mythen. So kämpften für die Chinesen gute und böse Drachen am Himmel miteinander. Sie glaubten, dass Kinder, die während einer Polarlichterscheinung gezeugt wurden, sehr intelligent, attraktiv und glücklich sein müssten. In der Bibel wurden die Leuchterscheinungen als Fegefeuer, Menschen- oder Tiergestalten angesehen. Römer betrachteten sie als atmosphärische Feuer, und in mittelalterlichen Texten wurden sie als ein brennender Himmel angesehen. Julius Caesar soll angeblich Truppen ausgesandt haben, um eine Aurora, die er für einen Brand in einer Stadt hielt, zu löschen. Die Griechen glaubten, dass das Nordlicht von Aurora, der Schwester des Sonnengotts Helios erschaffen wurde, die über den Himmel rast. In Nordamerika stellten die Polarlichter z. B. Geister verstorbener Vorfahren dar. Isländer assoziierten bei deren Anblick Ungutes für Schwangerschaften oder die Darstellung der Seelen verstorbener Babys. Die Wikinger erkannten in ihnen u. a. Spiegelbilder der Rüstungen und Schilde weiblicher Krieger oder Brücken ins Reich der Götter. Von Völkern, die in niedrigen geografischen Breiten nur sehr selten Polarlichterscheinungen erleben konnten, wurden diese aber auch oft als Vorboten von Kriegen, Katastrophen, Seuchen und massivem Leid angesehen.

Der französische Naturwissenschaftler Pierre Gassendi (1592–1655) begann mit der wissenschaftlichen Erforschung der nördlichen Polarlichter. Er bezeichnete diese 1621 erstmals mit dem Begriff „Aurora borealis“, wobei Aurora die römische Göttin der Morgenröte ist und Boreas im Griechischen für den Nordwind steht. „Aurora australis“ benennt heute die Lichterscheinungen auf der südlichen Halbkugel der Erde. Wegen der Befürchtungen der Bevölkerung, welche die 1716 beobachteten gewaltigen Polarlichter in Frankreich ausgelöst hatten, beauftragte die Royal Academy of Sciences den französischen Geophysiker Jean-Jacques Dortous de Mairan (1678–1771), eine rationale Erklärung dieser Naturphänomene zu finden. Er war der Erste, der deren Entstehung mit der Sonne und ihrer wechselnden Fleckenaktivität und nicht mit atmosphärischen Spiegelungen in Zusammenhang brachte. Mithilfe der von Edmond Halley entwickelten Triangulationsmethode führte er 1726 erstmals Messungen der Höhe der

Aurora borealis über dem Erdboden durch. Und 1733 veröffentlichte er das erste Lehrbuch mit dem Titel *Traité Physique et Historique de l'Aurore Boréale*. Kurz vor seinem Tod schlug er 1770 vor, dass die Aurorae durch das in die Erde eindringende Zodiakallicht entstehen könnten, das sich jedoch aus heutiger Sicht durch Reflexion und Streuung von Sonnenlicht an Partikeln der interplanetaren Staub- und Gaswolke ausbildet.

Galileo Galilei war 1619 davon ausgegangen, dass die Polarlichter durch Brechung des Sonnenlichts am Himmel entstehen. Nach intensiver Beobachtung der gewaltigen Aurorae von 1716 brachte Edward Halley die Form der sich entwickelnden Aurora-Lichtbögen in engen Zusammenhang mit der Geometrie der erdmagnetischen Felder und glaubte, dass die Lichtquelle für die Leuchterscheinungen aus der Erde stammen müsste. Der englische Astronom Henry Cavendish (1731–1810) beobachtete Polarlichter über viele Jahre, erkannte wie vor ihm Jean-Jacques Mairan, dass sie in der höheren Atmosphäre entstehen, und ermittelte mit 100–130 km einen auch heute recht anerkannten Wert für deren Höhenlage über der Erdoberfläche.

Der dänische Nordlichtforscher Sophus Tromholt (1851–1896) organisierte ein ganz Skandinavien umfassendes Beobachtungsnetz für Nordlichter. Anhand der ihm zur Verfügung stehenden Daten aus den Jahren 1780 bis 1880, die er 1880 veröffentlichte, konnte er aufzeigen, dass die Häufigkeit des Auftretens von Auroren mit der von Sonnenflecken auf der Sonne deutlich korrelierte. Auch der amerikanische Physiker, Astronom und Polarlichtbeobachter Denison Olmsted (1791–1859) kam 1856 zu der Erkenntnis, dass die Entstehung der Polarlichter von Ereignissen außerhalb der Erde verursacht sein müsste. 1852 erkannte auch der irische Astronom Edward Sabine (1788–1883), dass die Aurora-Erscheinungen eng mit dem Sonnenfleckenzyklus zusammenhängen.

1860 konnte der Meteorologe und Astronom Elias Loomis (1811–1889) anhand einer von ihm erstellten Karte über die geografische Verteilung der Nordlichter aufzeigen, dass diese besonders häufig in einem unregelmäßigen Polarlichtoval anzutreffen sind, das den geografischen Nordpol umgibt, aber gegenüber diesem merklich verschoben ist. 1867 untersuchte der schwedische Astrospektroskopiker Anders Jonas Ångström (1814–1874) Polarlichter erstmals spektroskopisch. Er erkannte und vermaß die charakteristischen hellen Linien im gelbgrünen Bereich. Erst 1923 wurde u. a. von Harold Babcock erkannt, dass die grüne Aurora-Spektrallinie von Sauerstoffatomen ausgesandt wird. 1885 fotografierte Sophus Tromholt erstmals Aurorae. Major Albert Veeder (1848–1915) entdeckte 1889, dass besonders starke Polarlichter wiederholt nach 27 Tage auftraten, also einem Zeitraum, der der typischen Umlaufzeit von Sonnenflecken entspricht. Der

amerikanische Mediziner, der 1895 einen Artikel zum Thema „Magnetic Storms and Sunspots“ veröffentlichte, war sehr an den Beziehungen zwischen aktiven Prozessen auf der Sonne und der Erde, insbesondere an denen zwischen der „solaren und terrestrischen Meteorologie“, interessiert.

Während der Aurora vom 17. November 1848 wurden elektromagnetische Telegrafverbindungen weltweit gestört. Auch der finnische Geophysiker Karl Selim Lemström (1838–1904) ging davon aus, dass die Aurora borealis ein elektrisches Phänomen darstellt. Er formulierte eine Theorie über dessen Entstehung basierend auf experimentellen Arbeiten und entwickelte 1875 ein erstes Gerät, in dem er mithilfe von Kathodenstrahlen Aurorae im Labor künstlich zu erzeugen versuchte. Diese hatte 1858 bereits der deutsche Physiker Julius Plücker (1801–1868) als Elektronenstrahlen, die von einer negativ geladenen Kathode ausgehen, entdeckt. 1882 schlug der schottische Physiker und Meteorologe Balfour Stewart (1828–1887) vor, dass in der höheren Atmosphäre polarlichterzeugende Ströme fließen müssten.

1898 machte Kristian Birkeland (1867–1917) (Abb. A.1) von der Sonne kommende elektrische Strahlen für die Polarlichtentstehung verantwortlich. Erst elf Jahre später, im Jahr 1909, gelang ihm die Erzeugung von Aurorae ähnelnden Leuchterscheinungen im berühmten Terella-Experiment. Anhand der Reflexion von Radiowellen entdeckten die englischen bzw. neuseeländischen Physiker Edward Victor Appleton (1892–1965) und Miles Aylmer Fulton Barnett (1901–1979) im Jahr 1925 die Ionosphäre die mit geladenen Partikeln und elektrischen Strömen gefüllte Erdatmosphärenschicht in Höhen oberhalb von etwa 80 km über dem Erdboden. Haupttreiber der Aurora-Emissionen in der Ionosphäre sind die Elektronen. An bestimmten Orten und zu bestimmten Zeiten, z. B. am Rand des abendlichen Polarlichtovals, können aber auch einströmende Protonen als Hauptenergiequelle fungieren. Erstmals 1939 wurde eine derartige Protonenaurora von dem norwegischen Physiker Lars Vegard (1880–1963) entdeckt.

A.11 Solarerterrestrische Beziehungen und das Weltraumwetter

1716 schlug Edmond Halley erstmals eine Verbindung zwischen dem Auftreten von Polarlichtern und magnetischen Stürmen, den plötzlichen Änderungen im Erdmagnetfeld, vor. 1741 bestätigten Olav Peter Hiorter (1696–1750) und sein Professor Anders Celsius (1701–1744) anhand

umfangreicher Beobachtungen diese auffällige Korrelation. Immer wieder stellten dies auch andere Naturforscher fest, insbesondere Alexander von Humboldt, der die dynamischen Entwicklungen der Aurorae und damit einhergehende Schwankungen im Erdmagnetfeld 1806 von Berlin aus fasziniert beobachtete. Natürlich sprach er darüber auch in seinen späteren Vorlesungen und schrieb darüber in seinem berühmten Buch *Kosmos*. Im dritten, 1850 erschienenen Band dieses umfangreichen Werks berichtete er ausführlich über die damaligen Erkenntnisse zur großen Bedeutung der Sonne als Licht- und Wärmequelle für die Entwicklung des Lebens auf der Erde sowie über die damals schon erkannten Eigenschaften der Sonnenflecken. Am Ende seines Buchabschnitts über die „Physische Constitution unseres Zentralkörpers“ lässt er den Amateur-Sonnenforscher Samuel Heinrich Schwabe zu Wort kommen, der ihm Folgendes mitgeteilt hatte: „Die in der nachfolgenden Tabelle enthaltenen Zahlen lassen wohl keinen Zweifel übrig, daß wenigstens vom Jahre 1826 bis 1850 eine *Periode der Sonnenflecken* von ohngefähr 10 Jahren in der Art stattgefunden hat: daß ihr Maximum in den Jahren 1828, 1837 und 1848; ihr Minimum in die Jahre 1833 und 1843 gefallen ist.“

Edward Sabine (1788–1883) (Abb. A.1) hatte 1839 das Magnetic and Meteorological Observatory in Toronto gegründet. Als Direktor des internationalen Magnetic-Crusade-Projekts interessierte er sich von diesem Zeitpunkt an für die weltweite Erfassung umfangreicher Messdaten des Erdmagnetfelds. Dabei stellte er fest, dass sich die magnetischen Variationen in Form eines regelmäßigeren Tageszyklus sowie eines unregelmäßig strukturierten, aber über eine Vielzahl von Jahren hinweg sich wiederholenden Zyklus darstellen lassen. Als seine Frau den Auftrag erhielt, den Text von Humboldts *Kosmos* ins Englische zu übersetzen, erfuhr er durch sie über die Existenz von Schwabes periodischem, etwa zehnjährigem Sonnenzyklus. Dabei entdeckte er im Jahr 1852, dass dessen Zykluslänge überraschend genau mit denen der langjährigen Schwankungen im Erdmagnetfeld und denen der Polarlichterscheinungen übereinstimmt und dass offensichtlich ein enger Zusammenhang zwischen den magnetischen Prozessen auf der Sonne und auf der Erde bestehen müsste. 1858 bzw. 1874 veröffentlichte der schottische Geophysiker John Allan Broun (1817–1879) (Abb. A.1) eine Vielzahl weiterer bemerkenswerter und wegweisender Ideen über mögliche Solarerterrestrische Beziehungen.

In den Jahren zwischen 1820 und 1830 hatten die Physiker Hans Christian Ørsted (1777–1851) bzw. André-Marie Ampère (1775–1836) bereits nachweisen können, dass stationäre elektrische Ströme ein Magnetfeld und stromdurchflossene Spulen im Außenraum ein dipolartiges

Magnetfeld erzeugen. Und Michael Faraday (1791–1867) erkannte die Wirkung der magnetischen Induktion, wonach bewegte Magneten in einer Spule dynamogeniert elektrische Ströme erzeugen können. Broun ging danach davon aus, dass Magnetfelder auch in der Sonne in Form von Elektromagneten existieren könnten und dass diese von Strömen in der Sonnenatmosphäre getrieben würden. Er fragte sich 1858, ob die Sonnenflecken durch gestörte Ströme unter dem Einfluss unterschiedlicher Planetenpositionen entstehen könnten. Wenn die Sonne wie ein Magnet agiert, dann wäre es analog zur Erde möglich, dass deren magnetische Achse auch nicht mit ihrer Rotationsachse übereinstimmt. Nachdem John Frederick William Herschel bereits vorgeschlagen hatte, dass Elektrizität die Kometenschweife ausrichtet, fragte er sich, ob dies nicht auch durch magnetische Gase geschehen könnte. Wenn die Sonne in solcher Weise auf die Gase der Kometen einwirkt, könnte sie dies dann nicht auch auf die Gase unserer Atmosphäre? Und würde die Atmosphäre der Erde aufgrund der Induktion auf den terrestrischen Magneten dann nicht eine ellipsoidale Form annehmen? Broun modellierte in Ansätzen bereits eine mögliche Interaktion ausgedehnter solarer Magnetfelder mit dem Erdmagnetfeld, vermittelt über das interplanetare Medium dazwischen. Er konnte sich vorstellen, dass die erdmagnetischen Störungen während der Entstehung der Flecken auf der Sonne durch Entladungen der elektrischen Sonnenatmosphäre entstehen und dass dies eine Abschwächung der magnetischen Kräfte zur Folge haben könnte. 1874 schlug er einen thermodynamischen Mechanismus vor, durch den die Korona expandiert und dadurch den Ausfluss des Sonnenwinds bewirkt.

John Frederick William Herschel (1792–1871) verwendete in Analogie zur terrestrischen Meteorologie den Begriff „solare Meteorologie“, als er 1847 über die Beobachtung der zeitlich sich deutlich verändernden Sonnenfleckengruppen schrieb. Gebräuchlich waren danach häufiger auch Bezeichnungen wie „solares Wetter“ oder „das Wetter auf der Sonne“, wenn es um die Sonnenaktivität oder die Bedingungen in der Sonnenatmosphäre ging. Auch der englische Astronom und Namensgeber der „Chromosphäre“ Joseph Norman Lockyer (1836–1920) fand es 1871 sehr erforderlich, den Wissensstand über die solare Meteorologie zu verbessern, um die Entwicklungen in den von ihm beobachteten Protuberanzen leichter erklären zu können. 1850 hatte der britische Geologe John Phillips (1800–1874) stattdessen erstmals den Begriff „magnetisches Wetter“ benutzt. Er betonte die Notwendigkeit, tiefere Erkenntnisse darüber zu gewinnen, um die Ursachen der so variablen erdmagnetischen Felder besser zu verstehen.

Der schottische Physiker Balfour Stewart (1828–1887) publizierte 1882 den Artikel „Über die Ähnlichkeiten des magnetischen und meteorologischen Wetters“. Aufgrund der häufig sehr schnellen Änderungen erdmagnetischer Feldkomponenten sprach er davon, dass es so scheint, als ob das „magnetische Wetter schneller reist als das meteorologische Wetter“. In der Ausgabe der *Britischen Enzyklopädie* von 1884 wurde der „terrestrische Magnetismus“ in einem Unterabschnitt des Kapitels „Meteorologie“ behandelt, und 1894 erschien ein Bericht über magnetische Stürme in einem amerikanischen Meteorologie-Journal. Wesentlich später, etwa ab 1955, wurde schließlich auch noch der Begriff „elektrisches Wetter“ populär, der die dynamischen Entwicklungen in der elektrisch geladenen Erdionosphäre charakterisieren sollte, die durch Störungen im Erdmagnetfeld hervorgerufen werden.

Die „solare Meteorologie“ und das „magnetische Wetter“ ließen sich so lange nicht als miteinander zusammenhängend erkennen, bis Edward Sabine 1852 die Beziehung zwischen den Aktivitäten im Sonnenfleckenzyklus und erdmagnetischen Störungen erkannte und Carrington 1858 besonders intensive Polarlichterscheinung kurze Zeit nach dem Auftreten gewaltiger Flares auf der Sonne beobachtet hatte. Der italienische Astronom Giovanni Donati (1826–1873) verwendete danach den Begriff „kosmische Meteorologie“ in einem Artikel über das beeindruckende Aurora-Ereignis im Februar 1872, um deutlich zu machen, dass dafür kosmische anstelle meteorologischer Quellen verantwortlich waren. Er diskutierte in diesem Zusammenhang auch die Möglichkeit, dass elektromagnetische Ströme zwischen der Sonne und der Erde die Entstehung der Polarlichter bewirken könnten. Der französische Astronom Hervé Auguste Étienne Albans Faye (1814–1902) benutzte den Begriff „kosmische Meteorologie“ nach 1874, um damit den Einfluss der Sonne, aber auch des Mondes, der Planeten und sogar anderer Sterne auf das terrestrische Wetter zu bezeichnen. Anfang 1900 verlor die Verwendung dieser Begriffe aber zunehmend an Bedeutung, weil es zu sehr den nichtirdischen Einfluss auf das atmosphärische Wetter betonte.

„Würde das Erdklima für extraterrestrische Lebewesen überhaupt erträglich sein, wo sie doch an das Weltraumwetter im All gewohnt sind?“ Dies ist eine ernsthafte Frage, die sich Außerirdische wohl stellen müssten, wenn sie die Erde besuchen wollten. In einem Geographie-Journal veröffentlichte Artikel aus dem Jahr 1953 ließ der Mittelschullehrer Fred Hague 1953 Aliens darüber diskutieren. Erstmals wurde darin nachweislich der Weltraumwetterbegriff verwendet. 1957 benutzte dann der amerikanische Physiker Lyman Spitzer (1914–1997) das Wort „Space Weather“ in einem

Artikel als Umschreibung des von ihm ein Jahr vorher bereits verwendeten Begriffs „interstellare Meteorologie“. Damit wollte er allerdings nur die Gesamtheit der im interstellaren, also extrasolaren Raum ablaufenden Vorgänge und Gesetzmäßigkeiten bezeichnen. „Chart Space Weather“ war die Überschrift eines 1959 erschienenen Artikels, in dem die Messergebnisse des US-amerikanischen Explorer-6-Satelliten ausgewertet wurden. Sie gaben damals Auskunft über die Eigenschaften energiereicher geladener Teilchen, die in den Van-Allen-Strahlungsgürteln der Erdmagnetosphären eingefangen sind.

1964 wurde über ein Team von Wissenschaftlern berichtet, das die Einrichtung eines Weltraumwetterbüros vorschlug, von dem aus Astronauten im Voraus vor Sonnenstürmen gewarnt werden könnten. Die Bedeutung verlässlicher Weltraumwettervorhersagen hatte William Ellis wohl schon 1879 erkannt, als er die Gemeinschaft der Telegrafie-Ingenieure und -Elektriker darüber informierte, dass das Auftreten von Sonnenflecken mit starker Aurora- und magnetischer Aktivität einhergehen würde. Er warnte sie rechtzeitig vor dem für das Jahr 1882 zu erwartenden solaren Aktivitätsmaximum und bat sie nachzuprüfen, ob ihre neuen, höherentwickelten elektrischen Apparaturen möglicherweise allzu empfindlich sein und zerstört werden könnten. Der australische Sonnenphysiker Ronald Gordon Giovanelli (1915–1984) veröffentlichte 1939 einen Artikel über die Beziehung zwischen solaren Eruptionen und Sonnenflecken, wertete darin eine umfangreiche Datensammlung über die Entwicklung solarer Flares statistisch aus und entwickelte eine erste quantitative Vorhersagemethode für deren Auftreten.

Kometenschweife, vor allem aber die so farbenprächtigen und sich zeitweise extrem dynamisch entwickelnden Polarlichter geben uns Menschen die einzig direkten, dabei sehr beeindruckenden Hinweise auf die Existenz und die Auswirkungen des Weltraumwetters in unserem Sonnensystem. Deutlichen Einfluss nimmt der von Magnetfeldern durchsetzte Sonnenwind aber natürlich nicht nur im Erde-Sonne-System in Form solarer-terrestrischer Beziehungen. Auch andere Planeten und kleinere Himmelsobjekte wie Monde, Asteroiden und Kometen sind von Magnetosphären oder zumindest Ionosphären umgeben, in denen Aurorae durch den Einsatz technischer Hilfsmittel direkt beobachtet oder vermessen werden können. Bekanntlich bezeichnet das Weltraumwetter ja nicht nur die Zustände und Veränderungen der Plasmen im Umfeld der Erde und in der Sonnenatmosphäre. Umfassend umschreibt es vielmehr alle im ionisierten und magnetisierten Medium innerhalb der gesamten Heliosphäre ablaufenden Prozesse. Das Weltraumwetter kann nicht nur Einfluss auf unser irdisches

Leben nehmen. Es bewirkt entscheidende und beeindruckende Vorgänge auch im wesentlich entfernten interplanetaren Raum.

Der Nachweis ihrer von Dynamos generierten Magnetfelder sowie die Vermessung der Magneto- und Ionosphären der riesigen Gasplaneten Jupiter und Saturn gelangen erstmals in den 1980er-Jahren mithilfe der amerikanischen Raumsonden Pioneer 10 und Voyager. Nach erstmaliger Durchquerung des Asteroidengürtels von einer Sonde im Februar durchflog Pioneer 10 dann am 26. November die Bugstoßwelle der Magnetosphäre des Jupiters und erreichte am 3. Dezember 1973 den kleinsten Abstand zu diesem Planeten. Voyager 1 gelangte im März 1979 zum Jupiter, im November 1980 auch zum Saturn. Nach dem Vorbeiflug am Jupiter im Juli 1979 untersuchte Voyager 2 insbesondere auch die neu entdeckten Ringe dieses Planeten. Nach einem Swing-by-Manöver um den Saturn begann die Voyager-1-Sonde im Rahmen der Voyager Interstellar Mission ihre Reise direkt zu den äußeren Bereichen des Sonnensystems. 2004 durchlief sie das Gebiet des Terminationsschocks, trat in die Heliohülle ein und erreichte etwa sechs Jahre später auch die Heliopause. 2012 verließ sie die Heliosphäre und bewegt sich seitdem durch das interstellare Medium.

Korrekturmanöver am Orbit von Voyager 2 führten dazu, dass diese Raumsonde nach einer Passage des Planeten Uranus Anfang des Jahres 1986 dann im August 1986 auch den Neptun erreichte. Mithilfe von Magnetometern wurden bei diesen beiden Planeten jeweils die Stärken der Magnetfelder sowie die im Vergleich zu Jupiter und Saturn allerdings nicht dipolaren, sondern auffallend multipolaren und vor allem nicht achsensymmetrischen Strukturen ihrer Magnetfelder vermessen. Bereits 1975 konnten Wissenschaftler mithilfe der Raumsonde Mariner 10 erstmals auch das erdähnliche, dipolartige Magnetfeld des Planeten Merkur ausführlicher analysieren, welches eine Stärke von nur etwa 1 % des Erdmagnetfelds aufweist. Die Galileo-Sonde konnte in den Jahren 1995 bis 2000 bei sechs engen Vorbeiflügen am größten Mond des Jupiters nachweisen, dass sogar Ganymed ein offensichtlich intern generiertes Magnetfeld besitzt. Messungen von Bord der Mars-Global-Surveyor-Raumsonde ergaben 1997, dass Teile der planetaren Kruste des Mars nebeneinanderliegend unterschiedlich orientierte magnetische Restfelder aufweisen. Dies spricht dafür, dass der Mars früher auch einmal ein dipolgeneriertes Magnetfeld besessen haben könnte. Vielleicht besaß auch der Erdmond früher einmal ein dauerhaftes Magnetfeld. Zumindest fanden die Apollo-17-Astronauten 1972 auf dem Mond einen Felsbrocken, der charakteristisch magnetisiert war.

Dass der Jupiter Polarlichter besitzt, wurde bereits 1979 von Voyager 1 entdeckt. Aber erst mithilfe der UV-Kamera des Hubble-Weltraumteleskops

sowie mithilfe von Röntgenaufnahmen konnte in den 1990er-Jahren gezeigt werden, dass diese 1000-mal intensiver sind als die in der Erdionosphäre zu beobachtenden Aurorae. 1996 wurde dabei zusätzlich die Existenz von Polarlichtern auf dem Jupitermond Ganymed nachgewiesen. 2015 gelang deren Abbildung in Form zweier Aurora-Gürtel. Bereits 1979 entdeckten die Wissenschaftler der Pioneer-11-Mission an den Saturnpolen deutliche Aufhellungen im extrem ultravioletten Licht. 2008 gelang auch hier eine spektakuläre Aufnahme mit dem Hubble-Weltraumteleskop. Die ersten Abbildungen der Polarlichter des Uranus aus dem Jahr 2011 verdeutlichen, dass diese eher diffus strukturiert sind und aufgrund der asymmetrischen Form des Magnetfelds dieses Planeten auch nicht polnah und in ovaler Form auftreten. Auch beim Neptun und sogar auf seinem Mond Triton haben die Wissenschaftler der Voyager-2-Mission im Jahr 1989 erstmals Anzeichen von Leuchterscheinungen gefunden, die den Polarlichtern der Erde ähneln. Und die ESA-Mission Mars Express entdeckte 2015 kurzlebige Spuren von Polarlichtern auf dem Mars, die Rosetta-Mission 2020 ebenfalls im ultravioletten Licht auf dem Kometen Tschurjumow-Gerassimenko. Historisches zur Entwicklung des Begriffs des Weltraumwetters sowie zur Entdeckung wichtiger solarer und heliosphärischer Prozesse ist in Tab [A.1](#) noch einmal kompakt zusammengefasst aufgelistet.

A.12 Zum Erdklima und kosmischen Wettergeschehen

Im Gegensatz zum Weltraumwetter erleben wir Menschen das meteorologische Wettergeschehen auf der Erde im Alltag sehr persönlich, beobachten es und wünschen uns verlässliche Vorhersagen über seine Entwicklung. Es nimmt massiven Einfluss auf unser Leben, und in Grenzen können wir es selbst beeinflussen. Versuche, das lokale Wetter oder sogar dessen als Klima bezeichnete langzeitige und globalere Entwicklung tiefer zu verstehen, die gemessenen Wetterdaten sorgfältig aufzuzeichnen und die Entwicklungsvorgänge des Wettergeschehens längerfristig vorherzusagen, hat es schon in vielen alten Kulturen gegeben. In seiner *Meteorologica* widmete sich Aristoteles der philosophischen Erklärung und den Ursachen der Wetterphänomene. Er erläuterte seine Ansichten darüber, was Luft und Wasser gemeinsam haben. Im Rahmen seiner geografischen und geologischen Überlegung analysierte er, aus welchen Teilen die Erde besteht und wie diese in welcher Art miteinander wechselwirken. Er berichtete über die Wasserverdunstung, über Erdbeben und die charakteristischen Wetterphänomene. In der Antike wurde das Wettergeschehen im Rahmen der Astrometeorologie astrologisch vorhergesagt. Die Konstellation der Planeten

Tab. A.1 Historisches zur Entwicklung des Begriffs des Weltraumwetters

Jahr	Begründer	Einführung des Begriffs	Ideen/Entdeckung/ Zusammenhänge
1716	Edward Halley		Ausrichtung der Polarlichtbögen am Erdmagnetfeld Gleichzeitiges Auftreten von Polarlichtern und erdmagnetischen Stürmen
1847	John Herschel	Solare Meteorologie	Entwicklung der Sonnenflecken und solarer Aktivitäten
1852	Edward Sabine		Auftreten der Aurorae hängt mit dem Sonnenfleckenzyklus zusammen
1858	John A. Broun		Vergleich solarer und erdmagnetischer Felder Interaktionen über interplanetares Medium
1858	Richard C. Carrington		Einwirkung der Sonne auf die Kometengase Starke Polarlichter nach sichtbaren solaren Flares
1872	Giovanni Donati	Kosmische Meteorologie	Kosmische statt meteorologischer Quellen der Polarlichter
1874	Hervé A. Faye	Kosmische Meteorologie	Einfluss der Sonne und der Planeten auf das Erdwetter
1879	William Ellis		Notwendigkeit der Vorhersagen über Entwicklung erdmagnetischer Stürme anhand eines zu erwartenden Maximums der Sonnenfleckenaktivität
1880	Sophus Tromholt		Korrelation der Häufigkeit von Sonnenflecken mit Polarlichtern
1880er	Alexander von Humboldt		Solare Wende in der Klimaforschung (Fortsetzung)

Tab. A.1 (Fortsetzung)

Jahr	Begründer	Einführung des Begriffs	Ideen/Entdeckung/ Zusammenhänge
1882	Balfour Stewart		Ähnlichkeit des meteorologischen und des magnetischen Wetters
1895	Major A. Veeder	Solare und terrestrische Meteorologie	Beziehung zwischen aktiven Prozessen auf der Sonne und auf der Erde
1898	Kristian Birkeland		Polarlichtentstehung durch elektrische Strahlen von der Sonne
1939	Ronald G. Giovanelli		Entwicklung einer Vorhersagemethode für solare Flares
1951	Ludwig Biermann		Ausrichtung der Kometenschweife durch den Sonnenwind
1953	Fred Hague	Weltraumwetter	... daran gewöhnte Aliens ... (in einem Buch)
1955		Elektrisches Wetter	Veränderungen in der Ionosphäre durch Störungen im Erdmagnetfeld
1957	Lyman Spitzer	Weltraumwetter	Umschreibung der „interstellaren Meteorologie“, der Prozesse im interstellaren Raum
1959		„Wetter“ im Weltraum	Artikel über Messergebnisse der Explorer-6-Sonde

wurde damals als bestimmend für dessen Entwicklung angesehen. Basierend auf langzeitigen Erfahrungen wurden ergänzend dazu aber auch Bauernregeln aufgestellt.

Ähnlich wie die Erforschung des Weltraumwetters entwickelte sich die Meteorologie erst spät ab 1850 zu einer wissenschaftlichen Disziplin. Vorher gingen die sogenannten Semiotiker davon aus, dass das Wettergeschehen durch eine Aneinanderreihung natürlicher Ereignisse vorherbestimmt sei. Die eigentlichen Ursachen der Wetterphänomene brauchte man daher nicht zu kennen. Deren zukünftige Entwicklung könnte man aber mithilfe

der Deutung geeigneter Wetterzeichen prognostizieren. Für die Organiker standen die Vorgänge in der Atmosphäre als zusammenhängender Teil des Ganzen in enger Wechselwirkung mit allen möglichen anderen Vorgängen. So sollten neben meteorologischen auch botanische und human- sowie veterinärmedizinische Beobachtungen durchgeführt und könnten Krankheiten sehr wohl durch auffällige Wetterlagen hervorgerufen werden. Schließlich waren da noch die Physiker, die die zugrunde liegenden Naturgesetze finden sowie komplexe Zusammenhänge in der Atmosphäre verstehen und quantifizieren wollten. Den Einsatz von Messinstrumenten bei den Wetterbeobachtungen sahen sie als unbedingt erforderlich an, aber ihre Aufgabe zunächst nur darin, die zugrunde liegenden Gesetze für die Wetterereignisse aufzustellen. Wie von Historikern keine Prognosen für zukünftige Entwicklungen menschlicher Gesellschaften verlangt wurden, so wollten auch sie anfangs keine Wettervorhersagen machen.

Alexander von Humboldt (1769–1859) war neben der botanischen und erdmagnetischen Forschung insbesondere auch an der Erforschung des Wettergeschehens auf der Erde interessiert. Er gehörte zu den Naturforschern, die nicht mehr an den Einfluss der Planetenkonstellationen und des Mondes auf das Wetter glaubten, sondern die Sonnenstrahlung als entscheidenden Verursacher für dessen Veränderungen sahen. Nach dieser „solaren Wende“ begann in den 1880er-Jahren schließlich auch die Entwicklung der klassischen Klimaforschung. Meteorologische Institute führten umfangreiche Wetterbeobachtungen durch, erstellten Wetterkarten und veröffentlichten erst einmal zumindest regionale Wettervorhersagen. Die Forscher interessierten sich nicht nur für die mittleren, sondern auch für die jeweils aktuellen Zustände in der Erdatmosphäre und interpretierten deren Veränderungen anhand bekannter thermodynamischer und hydrodynamischer Gesetzmäßigkeiten. Der globale Klimawandel wurde zunehmend auch durch die Wechselwirkungen zwischen den terrestrischen Ökosystemen zu erklären versucht.

Der schottische Naturforscher James Croll (1821–1890) veröffentlichte 1864 seine Ideen darüber, dass das wiederholte Auftreten von Eiszeiten mit den periodischen zeitlichen Veränderungen des Deformationsgrads der elliptischen Erdumlaufbahn zusammenhängen könnte. Über Jahrzehnte hinweg entwickelte der jugoslawische Mathematiker und Geologe Milutin Milanković (1879–1958) daran anknüpfend seine Theorie des Einflusses der nach ihm benannten Zyklen auf das Erdklima, die er unter dem Titel *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem* erst 1941 publizierte. Nach dieser Theorie sorgen die auf unterschiedlichen Zeitskalen ablaufenden periodischen Veränderungen nicht nur der Elliptizität

der Erdbahn, sondern auch der Neigung der Erdachse sowie die Präzessionsbewegung dieser rotierenden Achse für klimarelevante Änderungen der Sonneneinstrahlung. Damit kann erklärt werden, warum sich die Warm- und Kaltzeiten im aktuellen Eiszeitalter auf der Erde in den letzten mehr als 1 Mio. Jahren immer wieder in einem Zeitraum von etwa 100 000 Jahren so regelmäßig abwechseln. Mathematisch verifiziert, lassen sich die Schwankungen der Erdbahnparameter und damit auch die des Erdklimas doch auf die sich verändernden Planetenkonstellationen zurückführen.

Auf ihrem kreisähnlichen Orbit umläuft die magnetische Sonne das etwa 28 000 Lichtjahre entfernte Zentrum der Milchstraße in etwa 230 Mio. Jahren. Durchschnittlich nach etwa 150 Mio. durchläuft sie dabei immer wieder auch die verschiedenen spiralförmigen Milchstraßenarme. Bevorzugt in ihnen werden immer wieder viele neue Sterne geboren, die ihr Leben später nach Abstoßung Planetarischer Nebel als Weiße Zwerge oder nach heftigen Supernovaexplosionen als Neutronensterne oder als Schwarze Löcher beenden können. Der slowakische Geophysiker Ján Veizer veröffentlichte im Jahr 2000 einen Artikel in der Zeitschrift *Nature*, in dem er die ebenfalls auf typischen Zeitskalen von rund 150 Mio. ablaufenden periodischen Schwankungen tropischer Meerestemperaturen sowie die Phasen von Warm- und Kaltphasen des Erdklimas zu erklären versuchte. Und auf ein „Paradoxon der leuchtschwachen jungen Sonne“ wies 1972 u. a. der US-amerikanische Astronom Carl Edward Sagan (1934–1996) hin. Wie konnte sich frühes Leben auf der Erde wie nachgewiesen bereits vor 3,8 Mrd. entwickelt haben, obwohl es hier aufgrund der damals noch wesentlich leuchtschwächeren Sonne eigentlich viel zu kalt gewesen sein muss?

Von einem Fesselballon aus konnte der österreichische Physiker Victor Franz Hess (1883–1964) im Jahr 1912 die Existenz der kosmischen Strahlung nachweisen, einer Teilchenstrahlung, die in der Sonne, in der Milchstraße oder in fernen Galaxien bei hochenergetischen Prozessen erzeugt wird. Der US-amerikanische Geophysiker Scott Ellsworth Forbush (1904–1984) untersuchte in den 1930er- und 1940er-Jahren die zeitlichen Variationen der Stärke dieser kosmischen Strahlung. Er stellte fest, dass deren Intensität nach solaren Eruptionen mit koronalen Masseauswürfen plötzlich abfällt. Nach heutigen Erkenntnissen behindert dann der besonders intensive magnetisierte Sonnenwind den Eintritt hochenergetischer kosmischer Strahlung in die Erdatmosphäre effizient. Der dänische Physiker Eigil Friis-Christensen (1944–2018), der sehr an

interdisziplinären Aspekten solarerterrestrischer Beziehungen interessiert war, veröffentlichte 1991 einen Artikel, in dem er auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Sonnenaktivität und dem Erdklima hinwies. Er postulierte, dass der Fluss der kosmischen Strahlung in die Atmosphäre die Bildung von Aerosolen und damit auch die von Wolken beeinflussen könnte.

Aufgrund der Ergebnisse von Experimenten in Wolkenkammern und Simulationsrechnungen geht der dänische Physiker und Klimaforscher Hendrik Svensmark heute davon aus, dass besonders starke Sonnenaktivität den Einstrom geladener galaktischer kosmischer Strahlung behindert und aufgrund der dadurch fehlenden Kondensationskeime damit auch die troposphärischen Wolkenbildungsprozesse weniger wirksam wären. Dies müsste zu einer Erhöhung der Temperaturen in der Troposphäre der Erde führen. Im Rahmen seiner Kosmoklimatologie ließe sich so auch erklären, warum die Temperaturen in der Erdatmosphäre beim Durchlauf der Sonne durch die Spiralarme der Milchstraßengalaxie so stark absinken. Aufgrund der dort stets anzutreffenden besonders starken kosmischen Strahlung könnte es zu verstärkter Wolkenbildung und zur Abkühlung des Erdklimas kommen. Auch das Faint Young Sun Paradox ließe sich im Rahmen dieser Theorie lösen. Obwohl die junge Sonne durchaus 30 % leuchtschwächer als heute gewesen sein könnte, hat sie nach Erkenntnissen der Astrophysiker mit Sicherheit ein wesentlich stärkeres Magnetfeld besessen. Die aus dem fernen Universum in die Heliosphäre eintretende kosmische Strahlung müsste so wegen eines relativ zu heute besonders starken magnetisierten Sonnenwinds deutlich an Intensität verloren haben. Aufgrund der dadurch geringeren Anzahl von Kondensationskeimen würden sich weniger Wolken als heute in der Troposphäre gebildet haben, sodass die Temperatur damals für die Entwicklung des Lebens doch hoch genug gewesen sein könnte. Es spricht offensichtlich so einiges dafür, dass das Weltraumwetter auch merklichen Einfluss auf das Erdklima hat.

Weiterführende Literatur

- Kloss A (1994) Geschichte des Magnetismus. VDE-Verlag GmbH, Berlin
- Michell A (2018) The spinning magnet – the electromagnetic force that created the modern world – and could destroy it. Dutton, New York
- Odenwald S (2021) The history of space weather: from babylon to the 21st century. Independently published
- Schlegel B, Schlegel K (2011) Polarlichter zwischen Wunder und Wirklichkeit – Kurzgeschichte und Physik einer Himmelserscheinung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Schrijver C, Schrijver I (2015) Living with a star – how the human body is connected to the life cycles of the earth, the planets, and the stars. Oxford University Press
- Verschuur GL (1993) Hidden attraction – the mystery and history of magnetism. Oxford University Press, New York
- Wilde A (2019) Unsichtbar und überall – Den Geheimnissen des Erdmagnetfeldes auf der Spur. Franckh-Kosmos Verlags-GmbH (Springer), Stuttgart
- Zirker JB (2009) The magnetic universe – the elusive traces of an invisible force. The Johns Hopkins University Press, Baltimore

Glossar

Albedo Maß für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden und nicht selbst leuchtenden Oberflächen. Die Albedo wird als dimensionslose Zahl angegeben. Eine Albedo von 0,8 gibt an, dass 80 % der eingestrahnten Energie an einer Oberfläche reflektiert werden.

Alfvén-Radius Abstand von der Sonne, bei dem das Plasma der Korona aufhört, mit der Sonne zu rotieren, es sich ablöst und als Überschallströmung stetig in den Sonnenwind übergeht.

Alfvén-Wellen Wichtige, nach Hannes Alfvén benannte magneto hydrodynamische, inkompressible Welle, bei der die Fluidpakete infolge der Rückstellkraft der im Magnetfeld herrschenden Spannungen transversal zu den magnetischen Feldlinien oszillieren und sich dabei parallel zum Magnetfeld ausbreiten.

Alpha-Omega-Dynamo Dynamomodell zur Entstehung kosmischer Magnetfelder durch spezifische Induktionsprozesse. In rotierenden, elektrisch gut leitfähigen Himmelsobjekten können die meridionalen bzw. azimutalen magnetischen Feldkomponenten durch differenzielle Rotation (ω -Effekt) und Konvektionsströmungen unter dem Einfluss der Corioliskraft (α -Effekt), vermittelt durch die Induktionsgleichung, wechselseitig angeregt oder ineinander umgewandelt werden.

Asteroiden Auch als Kleinplaneten oder Planetoiden bezeichnete astronomische Kleinkörper mit Längenabmessungen zwischen 1 m und 1000 km, die sich auf keplerschen Umlaufbahnen um die Sonne bewegen.

Asteroidengürtel Zwischen den Planetenbahnen von Mars und Jupiter gelegener Bereich des Sonnensystems mit einer Ansammlung von mehr als 650 000 Asteroiden.

Astronomische Einheit (AE) Astronomisches Längenmaß, das mit exakt 149 597 870,7 km ungefähr den mittleren Abstand zwischen Erde und Sonne angibt.

- Atlantische Multidekaden-Oszillation (AMO)** Zyklische Zirkulationsschwankung der Ozeanströmungen im Nordatlantik, die über Zeiträume von 50 bis 70 Jahren relativ stabil bleibt.
- Baryzentrum** Auch als Massenmittelpunkt bezeichneter Ort in einem System von massiven Objekten, an dem sich der mit ihren Massen geometrisch gewichtete Schwerpunkt befindet.
- Beam-Instabilität** Instabilität, die in einem Plasma durch zusätzliche hochenergetische Partikel („beam“) oder durch den Stromfluss unterschiedlich geladener Teilchen mit voneinander abweichenden Geschwindigkeiten ausgelöst wird und die verschiedene Plasmawellen anregen kann.
- Biosphäre** Gesamtheit der von Lebewesen besiedelten Teile der Erde. Sie reicht vom Boden des Festlands über die Gewässer bis in die untersten Luftschichten der Troposphäre und wird in verschiedene Ökosysteme unterteilt.
- Boltzmann-Gleichung** Nach dem Physiker Ludwig Boltzmann benannte (Integro-) Differenzialgleichung der kinetischen Theorie, die in Gasen, Fluiden und Plasmen den Transport der Teilchen bestimmt, wobei deren Verteilung im Phasenraum durch eine statistische Zustandsfunktion beschrieben wird und in der Stoßprozesse sowie elektromagnetische und gravitative Kräfte berücksichtigt werden können.
- Campfire** Einem Lagerfeuer („campfire“) ähnelnde Aufhellung in der unteren Sonnenkorona, die nach ihrer Entdeckung im extremen ultravioletten Licht im Jahr 2020 als solche bezeichnet wurden. Sie lassen sich als sehr kleine Flares (Lichtblitze) interpretieren, die durch magnetische Prozesse energetisch angeregt werden.
- Chromosphäre** Bis etwa 2000 km oberhalb der Photosphäre gelegene Atmosphärenschicht der Sonne, die dem Beobachter bei einer totalen Sonnenfinsternis als unregelmäßig geformte, rötlich gefärbte Zone erscheint, in der die Temperatur im Vergleich zur Temperatur der Photosphäre mit der Höhe zunächst abfällt, dann aber wieder bis auf etwa 10 000 K ansteigt.
- Chromosphärisches Netzwerk** Magnetisches Netzwerk in der unteren Sonnenatmosphäre. Es strukturiert die Chromosphäre und die darüberliegende Übergangsregion in Form von Zellen, die durch aufquellende Konvektion erzeugt werden und an deren Rändern sich der magnetische Fluss stark konzentriert.
- CIR** Mit der Sonne rotierende Wechselwirkungszone („coronal interaction region“), die sich jenseits der Erdbahn durch kompressive Kollision zwischen Sonnenwindströmen unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbildet. Dabei entstehen mitrotierende Stoßwellen, an denen Teilchen effektiv beschleunigt werden können.
- Corioliskraft** In rotierenden Systemen auf bewegte Objekte einwirkende Trägheitskraft, die senkrecht zur Rotationsachse des Systems und zum Geschwindigkeitsvektor des Objekts gerichtet ist.
- Dämpfung** Zeitliche Abnahme der Amplitude, d. h. der Auslenkung einer Schwingung oder Welle, durch Umwandlung oder Abgabe von mechanischer Energie dieses schwingungsfähigen Systems.

- Differenzialgleichung** Gleichung zur mathematischen Modellierung naturwissenschaftlicher Prozesse, in der eine vor allem von räumlichen oder zeitlichen Variablen abhängige Funktion zu sich selbst und ihren Ableitungen in Beziehung gesetzt wird.
- Diffusion** Physikalischer Prozess, der den Abbau von Konzentrationsunterschieden einer physikalischen Größe (wie der Temperatur oder Dichte) bewirkt oder der zur Durchmischung und gleichmäßigeren Verteilung von mehreren meist mikroskopischen Objekten führt.
- Dissipation** Irreversibler Vorgang in dynamischen Systemen, bei denen sich unterschiedliche Energieformen ineinander umwandeln und schließlich als Wärmeenergie in einem Systemzustand enden, der weitgehend durch ungeordnete thermische Bewegung der Teilchen charakterisiert ist.
- Doppler-Effekt** Der nach dem österreichischem Physiker Christian Doppler (1803–1853) benannte Effekt beschreibt die zeitliche Stauchung bzw. Dehnung einer Welle durch Veränderung des Abstands zwischen Sender und Empfänger. Verkleinert sich der Abstand, so steigt die wahrgenommene Frequenz; vergrößert er sich, dann fällt sie (Martinhorn eines Polizeiwagens). Er gilt auch für Licht, sodass man über ihn die Bewegung einer Lichtquelle (Atome oder Ionen in der Sonne) bestimmen kann.
- Drehimpuls** Vektorielle physikalische Größe, deren Stärke und Ausrichtung den „Schwung“ eines rotierenden Systems charakterisiert. Der ungestörte Drehimpuls bleibt erhalten und kann nur durch ein von außen auf das System einwirkendes Drehmoment verändert werden.
- Dynamo** Elektrische Kraftmaschine (Generator), in der Bewegungsenergie nach dem Prinzip der magnetischen Induktion mittels elektrischer Ströme in elektromagnetische Feldenergie umgewandelt wird.
- Eingefrorenes Magnetfeld** Idealisertes Modellbild für ein Fluid mit theoretisch unendlich großer elektrischer Leitfähigkeit, in dem sich die magnetischen Feldlinien wie untrennbar an die Materie gebunden (eingefroren) mit ihr mitbewegen müssen.
- Ekliptik** Ebene, in der sich die Sonne und mit kleinen Abweichungen auch alle Planeten bewegen. Sie bezeichnet auch die von der Erde aus vor dem Hintergrund des Sternenhimmels gesehene Bahn der Sonne, die sich auf der Himmelskugel in Form eines Großkreises darstellen lässt.
- El Niño/La Niña-Effekt** Auftreten ungewöhnlicher, nichtzyklischer, stark veränderter Meeresströmungen im ozeanografisch-meteorologischen System des äquatorialen Pazifiks.
- Elektrisches Feld** Zustand des Raums im Umfeld geladener Körper oder in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld.
- Entropie** Thermodynamische Zustandsgröße, die ein Maß ist für die Unordnung in einem geschlossenen oder auch offenen System bei Materie- und Energieaustausch mit der Umgebung. Sie ändert sich nicht im abgeschlossenen System, muss aber im offenen System aufgrund irreversibler Prozesse stets zunehmen. Im

Rahmen der statistischen Mechanik wird sie durch den Logarithmus der großen Zahl von Mikrozuständen definiert, die zur gleichen makroskopischen Energie und gesamten Teilchenzahl des Systems führen.

Feld Beschreibung der raumzeitlichen Verteilung der Werte einer physikalischen Größe, die allen Raumzeitpunkten ohne Vorhandensein materieller Träger zugeordnet werden kann.

Flare Ausbrüche hochenergetischer elektromagnetischer und korpuskularer Strahlung (Photonen bzw. Elektronen und Ionen) nach Freisetzung großer Mengen magnetischer Energie, häufig ermöglicht durch magnetische Rekonnexion in ihren komplexen Magnetfeldstrukturen.

Fluid In der Strömungslehre und Plasmaphysik verwendeter Begriff zur Bezeichnung strömungsfähiger gasförmiger oder flüssiger (elektrisch leitfähiger) Materie (Magnetofluid für ein Plasma) oder von Substanzen, die neben dem thermischen Druck (und Magnetfeldruck im Plasma) durch Viskosität Schubspannungen (magnetische Spannungen) aufnehmen können.

Flusstransportmodell Dynamotheorie zur Entstehung kosmischer, insbesondere solarer Magnetfelder, bei welcher der Transport magnetischer Felder durch meridionale Zirkulation und magnetische Diffusion in der Konvektionszone des Himmelskörpers neben anderen Induktionsprozessen eine wichtige Rolle spielt.

Forbush-Effekt Plötzlicher Abfall des Einstroms hochenergetischer kosmischer Strahlung in die Erdatmosphäre infolge eines stärkeren koronalen Masseauswurfs nach einer Eruption auf der Sonne.

Frequenz Größe, die zahlenmäßig die Häufigkeit angibt, mit der sich ein periodischer zeitlicher Vorgang pro Zeiteinheit (Sekunde) wiederholt.

Gradient des Felds Im Rahmen der Vektoranalysis angewandter Differenzialoperator, der als ortsabhängiger Vektor an jedem Raumpunkt in Richtung des stärksten Anstiegs eines Felds zeigt und dessen Betrag jeweils seine größte lokale Änderungsrate angibt.

Gravitation Durch massive Objekte ausgeübte Anziehung eines anderen Körpers mit Masse, wobei diese nach Newton dem Produkt beider beteiligten Massen direkt und dem Quadrat ihres Abstands umgekehrt proportional ist.

Gyrationsbewegung Durch die Lorentz-Kraft erzwungene Kreisbewegung von Ionen und Elektronen senkrecht zum vorgegebenen Magnetfeld. Parallel zu diesem können sich diese Teilchen aber frei bewegen.

Hadley-Zelle Konvektive Zirkulation innerhalb der Troposphäre zwischen dem subtropischen Hochdruckgürtel und dem Äquator.

Heliobiologie Wissenschaft, die sich mit den möglichen Einflüssen des Weltraumwetters im engeren Sinne vor allem auf den Menschen und seine Gesundheit befasst. Im Erdsystem könnten elektromagnetische Felder auf biologische Systeme einwirken.

Heliohülle Zwischen dem Terminationsschock und der Heliopause gelegener Bereich der Heliosphäre des Sonnensystems, in dem die Strömungsgeschwindigkeit des Sonnenwinds durch Eindringen von Partikeln aus dem lokalen

interstellaren Medium auf eine Geschwindigkeit kleiner als die lokale Schallgeschwindigkeit abgebremst wird.

Heliopause Äußere Grenze der Heliosphäre, an der die Partikel des Sonnenwinds auf die Teilchen des angrenzenden lokalen interstellaren Mediums (LISM) treffen. Die geladenen Teilchen können sich wegen ihrer engen Gebundenheit an die jeweiligen Magnetfelder aber nicht miteinander mischen, sondern nur wechselseitig ablenken. Jedoch können die neutralen Teilchen aus dem interstellaren Medium ungehindert vom Magnetfeld in die Heliosphäre eindringen.

Heliophysik Die umfassende multidisziplinäre Wissenschaft aller physikalischen Vorgänge in der Sonne und ihrem Sonnensystem. Sie umfasst die Erforschung und das Verständnis der Prozesse in der Sonne, unserer erdnahen sowie fernen Weltraumumgebung mit Begriffen vor allem aus der Plasma- und Strahlungsphysik. Als Systemwissenschaft erforscht die Heliophysik eine Vielzahl miteinander verbundener physikalischer Phänomene.

Heliosphäre Der weiträumige, mehr als 100 AE großen blasenförmige Bereich um die Sonne, aus dem der magnetisierte Sonnenwind, der sich in alle Richtungen ausbreitet, die Partikel und das schwache Magnetfeld des lokalen interstellaren Mediums verdrängt.

Induktion Das von Michael Faraday gefundene Phänomen und nach ihm benannte physikalische Gesetz bezeichnet bzw. beschreibt die Erzeugung eines elektrischen Felds durch die Änderung eines magnetischen Felds. Bewegt sich ein Magnetfeld durch eine Leiterschleife oder verändert es sich darin zeitlich, wird in ihr eine elektrische Spannung induziert.

Instabilität Prozess in einem System, bei dem sich dessen Zustand durch innere oder äußere Wirkungen drastisch verändert, sodass es aus einem vormals bestehenden Gleichgewicht gebracht wird.

Interplanetarer koronaler Masseauswurf (ICME) Koronaler Masseauswurf (CME), dessen Ausbreitung sich bis weit in den interplanetaren Raum fortsetzt.

Interstellare Materie Aus Gas- und Staubpartikeln sowie Elektronen und Ionen bestehende, meist sehr dünn verteilte Materie im Raum zwischen den Sternen einer Galaxie.

Interstellarer Wind Im interstellaren Medium existierende magnetisierte Partikelströme von Ionen und Elektronen geringer Dichte sowie weniger neutraler Teilchen, die an der Heliopause auf den magnetisierten Sonnenwind treffen und die, mit Ausnahme der ungeladenen Partikel, dort weitgehend um die Heliosphäre herumgelenkt werden.

Interstellares Medium (ISM) Gesamtheit der Materie, der elektromagnetischen Strahlung und der Magnetfelder im Raum zwischen den Sternen.

Ion Atom, dem durch ausreichend energetische Photonen bzw. Stoß mit einem energiereichen Teilchen ein oder mehrere Elektronen entrissen oder auch hinzugefügt wurden und das dadurch den Kräften elektromagnetischer Felder ausgesetzt wird.

- Ionosphäre** Oberer Teil der Atmosphäre eines Himmelskörpers, der eine relativ große Anzahl von Ionen und freien Elektronen enthält, die vor allem durch die UV-Strahlung des Sterns ionisiert wurden.
- Irreversibilität** Unumkehrbare Zustandsänderung eines physikalischen, chemischen oder biologischen Systems.
- Kelvin (K)** Maßeinheit der Temperatur, die nach dem britischen Physiker William Thomson (Lord Kelvin, 1824–1907) benannt wurde. Der Zusammenhang zwischen einer Temperaturangabe T in Kelvin (K) und der Temperaturangabe t in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) lässt sich mithilfe der Gleichung $T = t + 273,15$, wobei $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ den absoluten Temperaturnullpunkt, die tiefstmögliche Temperatur, angibt.
- Kinetische Theorie** Komplexe mathematisch-statistische Theorie, mit deren Hilfe sich insbesondere in dünnen, nahezu kollisionsfreien magnetisierten Plasmen die mikroskopischen Prozesse und Interaktionen zwischen Teilchen und elektromagnetischen Feldern vollständig beschreiben lassen.
- Klima** Die über etwa drei Jahrzehnte gemittelten, typischen jahreszeitlichen und ortsabhängigen Wetterverhältnisse in den tieferen Atmosphärenschichten eines Planeten.
- Komet** Himmelskörper mit einem Durchmesser zwischen 100 m und einigen Kilometern, der im sonnennahen Bereich seiner Umlaufbahn um die Sonne unter Einfluss der Sonnenstrahlung und des Sonnenwinds eine durch Ausgasung erzeugte Koma um seinen Kernbereich sowie einen ausgedehnten Staub- und magnetisierten Plasmaschweif entwickelt.
- Korona** Strahlenkranz der Sonne, der nur selten bei totalen Sonnenfinsternissen, aber dauerhaft im Koronagrafen sichtbar ist. Die Korona ist der etwa 1 Mio. Grad Celsius heiße äußere dünnste Bereich der Sonnenatmosphäre, die ohne scharfe Begrenzung nach außen in den abströmenden Sonnenwind übergeht.
- Koronagraf** Optisches Sonneninstrument, das in seinem Strahlengang das Bild der Sonnenscheibe (wie der Mond bei einer Sonnenfinsternis) abdunkelt und damit die dünne Korona dauerhaft sichtbar macht, obwohl diese nur etwa ein Millionstel der Scheibenhelligkeit aufweist.
- Koronaler Masseauswurf (CME)** Im Englischen als „coronal mass ejection“ bezeichnete solare Eruption, bei der Materie durch magnetische Kräfte mit großer Geschwindigkeit weit hinaus in die Sonnenkorona geschleudert wird.
- Koronaloche** Großräumige, magnetisch offene Regionen des Magnetfelds der Sonne, die sich auf Bildern der Korona im ultravioletten und Röntgenlicht im Vergleich zu den sehr hell leuchtenden großen Magnetfeldbögen als relativ dunkle Bereiche zu erkennen geben. Sie sind der Entstehungsort der schnellen Sonnenwindströme.
- Kosmische Strahlung** In kosmischen galaktischen Beschleunigungsprozessen erzeugte, aus Protonen, Elektronen und ionisierten schwereren Atomen bestehende, hochenergetische Partikelstrahlung.

- Kosmischer Dynamo** In stellaren, planetaren und galaktischen Himmelskörpern wirksamer Dynamo, durch den, ausgehend von einem anfänglichen magnetischen Saatfeld, mehr oder weniger regelmäßig stationäre oder oszillierende Magnetfelder durch selbsterregte Induktionsprozesse generiert werden können, wenn die im Inneren dieser Himmelskörper strömende Materie elektrisch gut leitfähig ist.
- Kosmoklimatologie** Forschungsbereich, in dem der mögliche Klimaeinfluss der variablen Sonnenaktivität sowie der Partikel der kosmischen Strahlung auf die Aerosol- und Wolkenbildungsprozesse in der Erdatmosphäre untersucht wird.
- Kuipergürtel** Außerhalb der Neptunbahn zwischen 30 AE und 50 AE im Bereich der Ekliptik gelegene ringförmige Region des Sonnensystems, in dem vermutlich mehr als 70 000 sogenannte Kuipergürtelobjekte mit Durchmessern von mehr als 100 km existieren.
- Lichtgeschwindigkeit** Die Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum, die $c = 299\,792\,458$ m/s beträgt.
- Lichtwimpel** Weit über den Sonnenrand hinausragende helmartige Lichtfahnen („helmet streamers“), die das Erscheinungsbild der Korona bei einer Sonnenfinsternis oder im Koronografen prägen.
- Lorentz-Kraft** Im magnetischen Feld auf bewegte elektrische Ladungsträger wirkende Kraft, deren Größe sich als Produkt aus elektrischer Ladung und dem Vektorprodukt der Geschwindigkeit des Teilchens und der magnetischen Flussdichte ergibt. Der Vektor dieser Kraft steht senkrecht auf diesen beiden Vektoren und ist so gerichtet, dass er mit diesen ein rechts- bzw. linkshändiges System für positive (bzw. negative) Ladungen bildet.
- Magnetische Feldlinien** Gedachte, meist gekrümmte gezeichnete Linien, welche räumliche Struktur und ausgeübte Kräfte eines Magnetfelds veranschaulichen sollen. Die an eine Feldlinie angelegte Tangente gibt die Richtung der hier wirksamen Kraft des Felds an, und die lokale Dichte der Feldlinien stellt ein Maß für seine Stärke dar. Vereinbarungsgemäß wird die durch einen Pfeil gekennzeichnete Orientierung des Magnetfelds so gewählt, dass sie in Richtung des Nordpols zeigt.
- Magnetische Flussröhre** Im Rahmen eines idealisierten Modellbilds angenommene röhrenförmige Raumregion, innerhalb derer magnetische Feldlinien gebündelt verlaufen und diese nicht seitlich verlassen.
- Magnetische Rekonnexion** In elektrisch leitfähigen, aber resistiven, also mit elektrischem Widerstand versehenen Fluiden und Plasmen begrenzt und lokal einsetzende Verschmelzung aufeinandertreffender magnetischer Feldlinien mit entgegengesetzt orientierten Feldkomponenten. Diese ermöglicht großräumige Änderungen der magnetischen Topologie und die Erzeugung lokaler elektrischer Felder zur Beschleunigung geladener Partikel.
- Magnetische Stürme** Heftige Fluktuationen magnetischer Felder in planetaren Magnetosphären, die nach koronalen Masseauswürfen und durch starke schnelle Sonnenwindströme in den Magnetosphären verursacht werden.

- Magnetischer Fluss** Skalare physikalische Messgröße, die sich aus dem Skalarprodukt der magnetischen Flussdichte mit der durch ihre Normale ausgerichteten Fläche bestimmt. Im Feldlinienmodell lässt sich der magnetische Fluss durch die Anzahl der Feldlinien charakterisieren, die diese Fläche durchsetzen.
- Magnetischer Trichter** Trichterförmige, im UV Licht beobachtbare Struktur des solaren Magnetfelds im Bereich des Netzwerks bis zu Höhen von etwa 20 000 km, in denen, mithilfe des Doppler-Effekts bestimmbar, das Plasma typischerweise bereits mit 10 km/s aufwärts strömt.
- Magnetisches Feld** Zustand des Raums in der Umgebung eines Permanentmagneten, stromdurchflossenen Leiters oder in einem sich zeitlich ändernden elektrischen Feld.
- Magnetogramm** Magnetische Karte der Sonnenoberfläche, welche die Eigenschaften der Komponenten des solaren Magnetfelds wiedergibt, die in der Photosphäre oder Chromosphäre mithilfe des Zeeman-Effekts gemessen werden können. Die darin enthaltenen Daten ermöglichen die Berechnung des koronalen Magnetfelds, das allerdings bisher nicht messbar ist, durch Extrapolation der Magnetfelddaten aus den tieferliegenden Atmosphärenschichten.
- Magnetohydrodynamik (MHD)** Vom schwedischen Physiker Hannes Alfvén entwickelte Theorie, die das Verhalten elektrisch leitfähiger Medien, die von magnetischen und elektrischen Feldern durchdrungen werden, im Rahmen eines Fluidmodells mathematisch zuverlässig beschreibt.
- Magnetosphäre** Ausgedehnte Region um einen magnetischen Himmelskörpers, in der der Einfluss magnetischer Felder dominierend ist, in der das Plasma aus verschiedenen Quellen an der Oberfläche oder Atmosphäre des Himmelsobjekts stammt und deren Form sehr durch den dynamischen Sonnenwind beeinflusst wird.
- Meteoroid** Ein die Sonne umlaufendes Himmelsobjekt im Sonnensystem, das kleiner als ein Asteroid ist.
- Mittlere freie Weglänge** Durchschnittliche Länge der Strecke, die ein Teilchen bestimmter Energie ohne Stoß mit einem anderen Teilchen zurücklegen kann.
- Nordatlantische Oszillation (NAO)** Schwankungen des Luftdruckgegensatzes zwischen dem Azorenhoch im Süden und dem Islandtief im Norden des Nordatlantiks
- Oortsche Wolke** Vermutlich existierende kugelschalenförmige Ansammlung astronomischer Objekte im äußersten gravitativen Einflussbereich der Sonne in Entfernungen bis etwa 100 000 AE oder 1,6 Lichtjahren von der Sonne.
- Ozonschicht** Bereich erhöhter Konzentration des Spurengases Ozon (O_3) vor allem in der unteren Stratosphäre der Erde
- Parker-Spirale** Name des interplanetaren Magnetfelds im Sonnenwind, das im Mittel die Form einer Spirale hat. Die Magnetfeldlinien bewegen sich im Sonnenwind wie „eingefroren“ radial mit ihm fort, wobei ihre Fußpunkte, weiterhin an die Sonne gebunden, deren Rotation folgen. Strömungslinien der Plasmateilchen, die aus derselben Quelle in der Korona kommen, bilden daher eine spiralförmige Form aus.

- Pazifische Dekaden-Oszillation (PDO)** Abrupt einsetzende und wenige Jahrzehnte andauernde Änderung der Oberflächentemperatur im nördlichen Pazifischen Ozean.
- Perihelion** Der sonnennächste Punkt der elliptischen Keplerbahn eines Planeten oder einer Raumsonde bei der Umrundung der Sonne. Der fernste Punkt auf deren Orbits wird als Aphelion bezeichnet.
- Phase** Raum-Zeit-abhängiges Argument einer Exponential- oder Winkel-funktion, die eine Welle oder Schwingung beschreibt, oder auch als Phasen-differenz bezeichneter Winkel im Argument einer sinus- oder cosinusförmigen Schwingungsfunktion zu einer Anfangszeit.
- Phasenraum** Abstrakter, meist hochdimensionaler Konfigurationsraum, in dem die Menge aller möglichen Zustände eines physikalischen Systems, die sich jeweils durch die spezielle Lage eines Punkts in diesem Raum charakterisieren lassen, durch eine Punktwolke dargestellt wird. Die zeitliche Entwicklung eines Punkts im Phasenraum lässt sich allerdings nur für Systeme mit maximal drei Freiheits-graden durch Trajektorien grafisch veranschaulichen.
- Photon** Teilchen des Lichts, das ein masseloses Quantum von Energie und Impuls darstellt.
- Photosphäre** Unterste, am Boden etwa 5750 K heiße Schicht der Sonnen-atmosphäre, aus der das kontinuierliche Sonnenspektrum im sichtbaren Licht von der Sonnenscheibe abgestrahlt wird und die ein Beobachter im Weißlicht als scharfen Sonnenrand erkennt.
- Planet** Kompaktes festes, gasförmiges oder flüssiges Himmelsobjekt mit variabler Materiezusammensetzung, das sich auf einer mehr oder weniger elliptischen Bahn um einen oder mehrere Zentralsterne bewegt. Seine Masse ist groß genug, um im hydrostatischen Gleichgewicht eine kugelförmige Gestalt anzunehmen und als dominierender Körper in seiner Umlaufbahn kleinere Himmelsobjekte aus seinem Gravitationsfeld zu schleudern oder gar zu verschlingen.
- Planetare Welle** Großräumige Wellenbewegung im Ozean oder der Erdatmosphäre
- Planetesimale** Bis zu mehreren Hundert Kilometern große Bausteine massiver planetarer Himmelsobjekte, die in der protoplanetaren Scheibe eines sich aus-bildenden Planetensystems durch fortschreitende Verklebung von anfangs nur millimetergroßen Partikeln entstanden sind.
- Plasma** Der durch die Existenz frei beweglicher, elektrisch geladener Protonen, Ionen und Elektronen ausgezeichnete, neben „fest“, „flüssig“ und „gasförmig“ vierte mögliche Aggregatzustand der Materie, der wesentlich durch die Kräfte magnetischer und elektrischer Felder geprägt ist. Vermutlich 99 % der Materie des Universums befinden sich im Plasmazustand.
- Plasmafrequenz** Fundamentale Schwingungsfrequenz in einem Plasma, deren Größe neben der Masse und Ladung wesentlich von der Dichte der Elektronen abhängt. Die hochfrequenten Schwingungen der Elektronen kommen durch die elektrische Coulomb-Kraft zustande. Im Sonnenwind liegt die Plasmafrequenz im Bereich mehrerer MHz.

- Plasmawellen** Sammelbegriff für relativ kurzweilige und hochfrequente Wellen verschiedenen Typs im Plasma, die mehr oder weniger starke Dispersion zeigen, deren Phasengeschwindigkeit also eine Funktion ihrer Wellenlänge und Frequenz ist. Aufgrund einer großen Vielzahl unterschiedlichster Ionen in Weltraumplasmen und deren sehr verschiedener Eigenschaften gibt es einen entsprechend großen „Zoo“ unterschiedlichster Plasmawellen.
- Polarlicht** Atmosphärische Leuchterscheinung, die durch die Einwirkung des Sonnenwinds entsteht, wobei vor allem Elektronen, aber auch Protonen im Bereich planetarer Ionosphären so stark beschleunigt werden, dass sie unterschiedliche Atome, Moleküle und Ionen dazu anregen können, Licht in ihren charakteristischen Wellenlängen auszusenden. Das irdische Polarlicht wird im nördlichen Polargebiet als Aurora borealis, im südlichen Polargebiet als Aurora australis bezeichnet.
- Protuberanz** Meist große und langlebige magnetische Struktur in der Korona der Sonne, welche leuchtendes dichteres Plasma enthält, das dort gegen die Schwerkraft in Form einer Plasmawolke relativ stabil vom Magnetfeld gehalten wird und mit magnetischen „Halteseilen“ an der Oberfläche der Sonne verankert ist. Werden diese durch magnetische Rekonnexion abrupt gekappt, kann es zu einer Eruption und dabei häufiger zu einem Auswurf größerer Materiemengen in den interplanetaren Raum kommen.
- Raumsonde** Eine Raumsonde ist ein von Menschen hergestellter Flugkörper, der im Weltraum einen weit entfernten Himmelskörper zu seiner Erforschung besucht und für wissenschaftliche Zwecke eine meist komplexe Nutzlast von Messinstrumenten mit sich führt.
- Resonanz** Mitschwingen eines schwingungsfähigen Systems oder einzelner Teilchen durch geeignete zeitlich variable Einwirkung von äußeren, oft periodischen Kräften.
- Satellit** Menschengemachter Raumflugkörper, der einen Himmelskörper auf elliptischer Umlaufbahn zur Erfüllung wissenschaftlicher, technischer oder kommerzieller Zwecke umläuft.
- Schallgeschwindigkeit** Charakteristische Geschwindigkeit, mit der sich die kompressiven Schallwellen in einem Medium ausbreiten.
- Simulation** Nachahmung der Entwicklung eines physikalischen Systems mithilfe geeigneter mathematisch-physikalischen Gleichungen, die heute meist aufwendig numerisch auf Workstations oder Großrechnern gelöst werden. Die Ergebnisse lassen sich in Grafiken, Farbbildern oder Videos anschaulich visualisieren.
- Sonnenaktivitätszyklus** Zyklus mit einer mittleren Periodenlänge von etwa elf Jahren, innerhalb derer sich die Aktivität der Sonne, insbesondere die Anzahl auftretender Sonnenflecken, sowie solarer Eruptionen und koronaler Masseauswürfe und die Art und Zahl der Sonnenwindströme systematisch ändern. Die magnetischen Felder, die diese periodisch variierende Sonnenaktivität prägen, wechseln ihre Polaritäten alle elf Jahre im Verlauf des 22-jährigen magnetischen

Zyklus. Darüber hinaus gibt es weitere angenähert periodisch variierende Aktivitätszyklen mit wesentlich längeren Perioden.

Sonnenflecken In der Photosphäre der Sonne sichtbare größere, dunkel erscheinende Gebiete, die kühler als die sie umgebende Sonnenoberfläche sind, weil die hier durch die Sonnenoberfläche aufsteigenden starken Magnetfelder den Zustrom heißerer Materie aus dem Sonneninneren behindern.

Sonnensturm Heftige magnetische Eruption auf der Sonne, die meist die Emission harter elektromagnetischer und energetischer korpuskularer Strahlung zur Folge hat und die häufig am Anfang eines koronalen Massenauswurfs steht. Sonnenstürme sind die stärksten Phänomene des Weltraumwetters und nehmen starken Einfluss auch auf die Erde.

Sonnensystem Sternsystem, das aus der Sonne, vier erdähnlich felsartigen Planeten, zwei Gas- und zwei Eisplaneten, vielen Monden, Asteroiden, Meteoroiden sowie der Gesamtheit aller Gas- und Staubpartikel besteht.

Sonnenwind Überschallströmung eines aus Elektronen und Protonen mit einer Beimischung seltener schweren Ionen bestehenden Plasmas, das aus den höheren solaren Atmosphärenschichten, insbesondere der Sonnenkorona, hinaus in alle Raumrichtungen erfolgt. Dieser Teilchenwind schleppt das darin eingelagerte Magnetfeld mit, das nach außen hin immer schwächer wird.

Spektrometer Instrument zur Zerlegung elektromagnetischer Wellen in ihre verschiedenen Frequenzen und Wellenlängen. Ein Prisma ist ein einfaches optisches Spektrometer, welches das sichtbare Licht in seine Spektralfarben zerlegen kann. Ein Teilchenspektrometer kann in einem Strahl von Teilchen diese nach Ladung, Masse oder Energie sortieren, wobei dafür ihre Ablenkung in elektromagnetischen Feldern geschickt ausgenutzt wird.

Spikulen Spießförmige (lateinisch „spicula“) oder bogenartigen Leuchterscheinungen über dem Sonnenrand, die durch Plasmaströme erzeugt werden, die bis in etwa 10 000 km Höhe aufsteigen und möglicherweise zum Massenfluss in die Korona und in den Sonnenwind beitragen.

Stern Genügend massereiches, dichtes, kugelähnliches und selbstleuchtendes Himmelsobjekt, das seine Energie über relativ lange Zeiträume seines Lebens hinweg meist durch Kernfusion im Inneren erzeugt und diese durch Photonen von seiner Oberfläche abstrahlt.

Stoß- oder Schockwelle Starke Druckwelle mit scharfer Grenzfläche, die nur dort entstehen kann, wo sich die Materie mit einer Geschwindigkeit bewegt, die größer als die für das durchlaufene Medium charakteristische Signalgeschwindigkeit ist.

Strahlungsgürtel Torusförmiger Bereich innerhalb der Magnetosphären von Planeten, in dem energiereiche geladene Teilchen eingefangen sind, um die Magnetfelder gyrieren, zwischen den Magnetpolen entlang dieser Felder hin- und herwandern und vergleichsweise langsam auch um den Planeten driften. Der Strahlungsgürtel der Erde wurde nach seinem Entdecker, dem US-amerikanischen Astrophysiker James Alfred Van Allen (1914–2006), benannt.

- Stratosphäre** Atmosphärenschicht der Erde, die oberhalb der Troposphäre bis in eine Höhe von etwa 50 km über dem Erdboden reicht und in der die Temperatur im Mittel mit steigender Höhe wieder zunimmt.
- Switchback** Englisches Wort für die von mehreren Raumsonden vermessene Richtungsumkehrung des Magnetfeldvektors im Sonnenwind, die häufig sehr nahe und seltener weiter entfernt von der Sonne stattfindet.
- System** Aus mehreren Einzelteilen zusammengesetzte Gesamtheit, deren Elemente eng aufeinander bezogen sind sowie aufgaben-, sinn- oder zweckgebunden miteinander interagieren und das sich durch eine äußere Umrahmung gegenüber ihrer Umgebung abgrenzt.
- Teilchen** Körper, die sehr klein gegenüber der Abmessung eines betrachteten Systems sind, zu denen die Elektronen, Protonen, Neutronen, Atome, Ionen, z. B. die als Alphateilchen bezeichneten zweifach ionisierten Heliumatome, hochionisierte Eisenatome oder die Partikel der kosmischen Strahlung gehören, aber auch Staubpartikel sowie die als Aerosole bezeichneten festen oder flüssigen Schwebeteilchen in einem Gas.
- Telemetrie** Fernmessung und Übertragung von Messwerten eines am Messort befindlichen Sensors zu einer räumlich entfernten Empfangsstelle, wo die Messwerte gesammelt, aufgezeichnet oder ausgewertet werden können. Die Fernübertragung geschieht durch Antennen von den Raumsonden zum Erdboden.
- Terminationsschock** In einem Abstand von etwa 85 AE von der Sonne stehende Schockwelle im Sonnenwind, die sich aufgrund des Aufpralls der Sonnenwindpartikel auf Teilchen aus dem die Heliosphäre umgebenden interstellaren Medium ausbildet, wodurch der anfangs wesentlich schnellere Sonnenwind auf Unterschallgeschwindigkeit abgebremst wird.
- Thermodynamik** Auch als Wärmelehre bezeichnetes wichtiges Teilgebiet der Physik, das das Verhalten und die Entwicklung makroskopischer Zustandsvariablen eines Systems wie Temperatur, Druck oder Entropie analysiert und ihre Beziehung zur Energie und Arbeit herstellt. Die Gültigkeit der drei thermodynamischen Hauptsätze lässt sich im Rahmen der statistischen Physik auf mikroskopischer Ebene durch die klassische Mechanik und wesentlich fundamentaler durch die Quantenmechanik begründen.
- Thermodynamisches Gleichgewicht** Axiomatisches theoretisches Konzept, wonach in einem abgeschlossenen System im stationären Zustand bei konstanter Temperatur, Energie und maximaler Entropie keine makroskopischen Ströme von Materie und Energie mehr auftreten können.
- Thermosphäre** Oberhalb der Stratosphäre mit ihrer Ozonschicht und der kühleren Mesosphäre gelegener Bereich der irdischen Atmosphäre, in dem die Temperaturen durch solare Einstrahlung im UV- und Röntgenbereich stark ansteigen.
- Transit-(Übergangs-)Region** Nur wenige 1000 km breite Übergangsregion zwischen Chromosphäre und Korona der Sonne, in der die Materiedichte stark abnimmt

und die Temperatur von 10 000 K auf 700 000 K abrupt ansteigt, wodurch von dort verstärkt harte ultraviolette Strahlung emittiert wird.

Treibhausgase Klimarelevante Spurengase, die ursächlich für den sogenannten Treibhauseffekt verantwortlich gemacht werden, der die Erwärmung von Atmosphären zur Folge hat. Unterschiedlich effektiv absorbieren und reflektieren diese Gase infrarotes Licht, wodurch sich die atmosphärischen Temperaturen erhöhen können.

Turbulenz Erscheinungsbild von Fluktuationen, das in strömenden Fluiden und Plasmen auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen nach Überschreiten kritischer Reynoldszahlen einsetzt. Diese Fluktuationen sind meist groß und chaotisch verwirbelt und ermöglichen sowohl Diffusions-, Dissipations- und Durchmischungsprozesse als auch turbulenten Transport und Strukturbildung, z. B. in Form von Wirbeln oder kleinen Stromschichten.

Verteilungsfunktion Funktion, die die Anzahldichte und Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen im Phasenraum in Abhängigkeit von Raum und Zeit beinhaltet und deren Entwicklung sich im Rahmen der kinetischen Theorie beschreiben lässt.

Vlasov-Gleichung Nach dem russischen Physiker Anatoly Alexandrovich Vlasov (1938) benannte partielle Differenzialgleichung für ein Plasma, welche die komplexe Entwicklung der Zustandsfunktion der Teilchen im Phasenraum unter der Wirkung von elektromagnetischen Kräften beschreibt und die sich aus der Boltzmann-Gleichung durch Entfernen des Kollisionsterms ergibt.

Walker-Zelle Zirkularer Strömungskreislauf der Luft über dem äquatorialen Pazifik.

Wellenlänge Kürzeste Distanz, über die sich die Form einer Welle wiederholt, oder der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase einer Welle.

Wellenvektor Vektorielle Größe, die senkrecht auf der Wellenfront einer Welle steht und deren Betrag durch den Quotienten aus 2π und der Wellenlänge bestimmt ist.

Weltraumplasmaphysik Plasmaphysik, die sich mit physikalischen Vorgängen in teilweise oder vollständig ionisierter Materie im Weltraum beschäftigt, bei der elektrische Ladungen und Ströme sowie elektromagnetische Felder in meist heißen elektrisch leitfähigen Gasen eine zentrale Rolle spielen.

Weltraumwetter Auf ganz unterschiedlichen Zeitskalen veränderlicher Zustand der durch variierende magnetische Sonnenaktivität und den Einstrom kosmischer Strahlung geprägten Heliosphäre der Sonne und seine Auswirkungen auf die Himmelskörper im Sonnensystem, insbesondere auch auf die irdische Atmosphäre und Magnetosphäre.

Winkelgeschwindigkeit In Richtung einer Drehachse orientierte vektorielle Größe, die angibt, wie schnell der bei Drehung um diese Achse überstrichene Winkel mit der Zeit zunimmt.

Zeeman-Effekt Charakteristische Aufspaltung einer von einem Atom ausgesandten Spektrallinie unter dem Einfluss und in Abhängigkeit von der Stärke eines externen Magnetfelds. Je nach Beobachtungsrichtung relativ zum Magnet-

feld sind die einzelnen Linien in charakteristischer Weise linear oder zirkular polarisiert.

Zwergplaneten Astronomische Himmelsobjekte, die sich auf einem Orbit um die Sonne bewegen, durch ausreichend hohe Eigengravitation zwar eine annähernd runde Form ausbilden, aber wegen zu geringer Anziehungskraft ihre Bahn-umgebung nicht von störenden kleinen Körpern bereinigen oder diese akkretieren können.

Zyklotronwelle Hochfrequente zirkular polarisierte elektromagnetische Welle in einem magnetisierten Plasma, die sich parallel zum Magnetfeld ausbreitet und in Resonanz auf die helikalen Gyrationbewegungen der Elektronen oder Ionen einwirken kann.

Stichwortverzeichnis

A

Alfvén, Hannes Göran 33, 116
Alfvén-Fläche 119, 126, 207
Alfvén-Punkt 146
Alfvén-Welle 116, 144, 150, 155, 158,
198
torsionale 91, 112
 α - Ω -Dynamo-Modell 80
Ampère, André-Marie 84
analytische Modellierung 44, 45
Ångström, Anders Jonas 238
Apollo-Mission XXV, XXVI, XXVII
Aristoteles 221, 238
Armstrong, Neil XXV
Asteroid 3, 217
Astronomische Einheit (AE) 4

B

Babcock, Harold Delos 83
Babcock, Horace Welcome 86
Babcock-Leighton-Mechanismus 86
Bacon, Roger 17
Baryzentrum 339
Beschleunigung 292, 304
geladener Teilchen 265

schwerer Ionen 152
von Elektronen 238
von Protonen 266
Biermann, Ludwig Franz Benedikt 18,
116, 238
Birkeland, Kristian Olaf Bernhard 18,
116, 238
Birkeland-Strom 262
Boltzmann-Vlasov-Gleichung 170
Brandenburg, Axel 33
Braun, Wernher von XXVI
Bugstoßwelle 25, 211, 213, 260
der Heliophäre 211
vor Magnetosphären 212

C

Campfire (Lagerfeuer) 202
Carrington, Richard 20, 116
Celsius, Anders 238
Chizhevsky, Alexander Leonidovich 328
Christensen, Ulrich 33
Cook, James 236
Corioliskraft 77, 82, 85, 86, 254
Coulomb-Stoß 170, 176

D

Datenübertragungsrate 36, 187
 Deslandres, Henri-Alexandre 18
 differenzielle Rotation 76, 77, 81, 83, 86, 276
 Dissipation 109, 155, 158
 Doppler, Christian Andreas 42
 Doppler-Dimming 205, 206
 Doppler-Effekt 42
 Doppler-Geschwindigkeit 136
 Doppler-Verschiebung 182
 Drehimpulstransport 77
 Dynamoprozess 5, 50, 56
 α -Effekt 80–82, 254, 352
 α - Ω -Dynamo 82, 84, 85, 254
 Babcock-Leighton-Modell 83
 Diffusionsterm 86
 Dynamogleichung 86
 Erde 243, 250, 252–254
 Flusstransportmodell 86
 Jupiter 244, 277
 magnetische Induktion 75, 76, 80, 84
 magnetisches Saatfeld 76
 Mars 274
 Merkur 243, 270
 Mond 274
 Neptun 245
 Ω -Effekt 80, 81, 352
 Saturn 279
 selbsterregter 84
 Sonne 77, 79, 80, 82
 Uranus 245

E

Edlén, Bengt 108
 Eingefrorenheit magnetischer Feldlinien 66, 68, 69, 230
 Eiszeitalter 337
 Kaltzeit 335, 336
 Warmzeit 335, 336
 Ekliptik 3, 126, 338

elektrische Leitfähigkeit 69
 elektrischer Strom 69, 215, 249
 elektrisches Stromsystem
 Erde 240, 264
 Mars 276
 Merkur 270
 Venus 271
 elektrische Stromschicht 229
 elektromagnetische Induktion 39, 254, 313
 elektromagnetische Strahlung XXVII, 339
 Energieeintrag 340
 Gammastrahlung 99
 Radiostrahlung 99, 240
 Röntgenstrahlung 333, 342
 Solarkonstante 337, 339, 347
 Strahlungsgleichgewicht 334, 341
 ultraviolette 53, 63, 64, 333
 visuelle 342
 Wärmestrahlung 333, 341
 Elektronenstrahl 174
 Elektronenverteilung 174
 Elektronenwärmeleitung 59, 174
 Energie
 elektromagnetische Wellenenergie 145
 Energiekaskade 157
 pro Ladung 37
 Erdatmosphärenschicht 342
 Ionosphäre 333
 Mesosphäre 333, 345
 Stratosphäre 333, 345
 Thermosphäre 333, 345
 Troposphäre 333, 340, 345, 348
 Erdbahnparameter 337
 Achsenneigung 337, 339
 Elliptizität 337
 Präzession 337, 338
 Erdklima 297, 333
 Klimawandel 319
 Meteorologie 297
 Strahlungshaushalt 337

Erdmagnetfeld 19
Abschwächung 258
Exkursion 256, 257
magnetischer Sturm 239, 263
Stärke 257
Südatlantische Anomalie 256, 258
Teilsturm 266
Umpolung 254–258
Westwärtsdrift 262

Erdmagnetosphäre
Cusp-Region 260
Gradientendrift 264
Gyrationsbewegung 264
Ionosphäre 6
magnetische Flasche 264
Magnetohülle 248
Magnetopause 261
Magnetosphärenschweif 260
Oszillationsbewegung 264
Strahlungsgürtel 264
Stromsystem 260, 261
Vorschockbereich 249

Erdsystem
Albedo 340, 348
Energieabstrahlung 340
Energieeintrag 334, 340
Klimageschehen 333, 344
Klimamotor 333
Klimawandel 337, 343, 346
Konvektionszelle 344, 346
Sonneneinstrahlung 340

Exoplanet 357

F
Faint Young Sun Paradox 347
Faraday, Michael 17, 69, 75, 84
Faradaysches Induktionsgesetz 84

Feld
elektrisches 142, 292
elektromagnetisches 195
elektromagnetisches Wellenfeld 192
Fernerkundung 10, 35, 37

Fluchtgeschwindigkeit 142, 145
Fluktuation 154, 155, 159
des Drucks 158
elektromagnetische 178
Magnetfeld 143
magnetoakustische 159
Fluorchlorkohlenwasserstoff 335
Flusstransport-Dynamomodell 81
Forbush, Scott Ellsworth 350
Forbush-Effekt 350

G

Galilei, Galileo 238
Gammastrahlenausbruch 350
Gary, S. Peter 34
Gassendi, Pierre 238
Gauß, Carl Friedrich 19, 84, 239, 261
Geschwindigkeitsverteilung 16, 165,
168, 175, 194
Elektron 173, 176
Proton 177
Gezeitenkraft 351
Gilbert, William 16
Global Positioning System (GPS) 313
Gold, Thomas 239
Grand-Daddy-Heckenprotuberanz 97
Grotrian, Walter 108
Gyrationsbewegung 68

H

Habitabilitätszone 358
Hale, George Ellery 17, 43, 72
Halley, Edmond 18, 222, 238
Heizung
bogenförmige Arkade 111
der Chromosphäre 57, 112
der Korona 59, 108, 140, 144, 146,
149
des Sonnenwinds 155
durch magneto-hydrodynamische
Wellen 112

Heizungsprozess 111, 141
 Plasmamaterie 98, 141
 Heliobiologie 328
 Elektrosmog 330
 Erkrankungen 328, 330
 Magnetfeldschwankung 331
 Studien 329
 Weltraumwetter 329
 Heliohülle 241
 Heliopause 122
 Heliophysik 119
 Helioseismologie 79
 Heliosphäre XXX, 1, 7, 118, 122, 127,
 241
 Heliohülle 7
 Heliopause 7
 heliosphärische Stromschicht 161
 Magnetfeld 194
 Terminationsschock 219
 Wasserstoffwand 124
 Heliumion 191
 Herschel, John Frederick William 19
 Hess, Victor 239
 Hindernis 209, 215
 Hiorter, Olof Peter 238
 Hitzeschild 187
 Howes, G. G. 34
 HT-Bezugssystem 156
 Humboldt, Alexander von 19, 239,
 261

I
 IBEX 23
 Induktionsgesetz 84
 Induktionsgleichung 84, 86
 Inouye Solar Telescope 28, 60, 61
 interstellarer Wind 7, 120, 218
 interstellares Medium 2, 121, 219
 Ionenzusammensetzung 195, 196
 Ionopause 224
 Ionosphäre 210, 288, 291, 292

J
 Jupitermond 240, 247, 285–287

K
 Kant, Immanuel 222
 Kieler Neutronenmonitor 306
 Kiepenheuer, Otto 88
 Kinetik 168
 der Elektronen 174
 der Protonen 176
 kinetische Beschreibung 166
 kinetische Gleichung 170
 kinetische Instabilität 180
 kinetischer Plasmaprozess 183
 kinetischer Prozess 165, 212
 Klimaeinfluss
 Aerosol 341, 343, 349
 anthropogener 337, 345
 elektrisches Stromsystem 344
 Erdbeben 346
 fotochemischer Prozess 345
 Fotosynthese 343, 344
 Gezeitenantrieb 252, 339, 346, 347,
 351
 Jetstream 346
 Komplexität 342, 344, 350, 352
 Kontinentalverschiebung 251, 343
 kosmische Strahlung 342, 343, 345
 Leben in Biosphäre 343
 Meeresströmung 344
 Milanković-Zyklus 337, 339
 natürlicher 337
 Ozon 343
 Ozonschicht 345, 351
 planetare Welle 346
 solare energiereiche Partikel 342,
 345
 Sonneneinstrahlung 334
 Sonnenstrahlung 342
 Sonnenwind 345
 Temperaturveränderung 337

- Treibhauseffekt 335, 343, 348
 UV-Strahlung 342, 343
 Vulkan 346
 Weltraumwetter 334
 Wolkenbildung 335, 341, 344, 349,
 350
 Kohlendioxid 335, 336
 Kolmogorov, Andrey 157
 Komet 3, 221
 Albedo 224
 Ausgasungsprozess 224
 Bugstoßwelle 225
 extrasolarer 217
 Fragmentation 228
 Gasfontäne 232
 Hale-Bopp 217
 Halley 25, 222, 232
 Halo 221
 Hindernis 210, 216
 Hyakutake 229
 ISON 227
 Kern 223, 225
 Koma 216, 222, 224–226, 232
 Kometenkern 224
 Lovejoy 223, 227
 Magnetfeld 229
 magnetische Rekonexion 229
 magnetischer Schweif 211
 NEAT 227
 Neowise 223
 Oberfläche 232
 Plasmaschweif 116, 211, 216, 225,
 226
 schmutziger Schneeball 222
 Schweif 223
 Schweifabriss 228–230
 Schweifstruktur 222, 226
 Shoemaker-Levy 228
 Sonnenstreifer 227, 228
 Staubjet 231
 Staubschweif 217, 224–226
 Tschurjumow-Gerassimenko 222,
 230
 Kompressionszone 162, 323
 Kondensationskeim 340, 349
 Konvektion
 Konvektionsrolle 252
 Konvektionsssäule 253
 Konvektionszelle 59
 Konvektionsströmung 77, 78, 82, 85,
 243, 244, 252, 253, 274
 koronaler Masseauswurf 7, 51, 58, 105,
 126, 147, 148, 196, 297, 300,
 317
 koronaler Regen 99
 korotierende Magnetosphäre 146
 Korrelationskoeffizient 156, 160
 kosmische Strahlung XXX, 124, 163,
 240, 343
 anomale 306
 galaktische XXX, 306
 Kosmoklimatologie 348
 Krustenmagnetfeld 215, 241, 243
 Erde 249, 252
 Mars 268, 274, 275
 Mond 268
 Kuipergürtel 2, 23, 124, 216
- L**
 Ladungsträger 67
 Langmuir, Irving 67
 Larmor, Joseph 75
 Leighton, Robert B. 83
 Lithosphäre 251
 lokales interstellares Medium (LISM)
 121
 lokales thermisches Gleichgewicht 140
 Lorentz, Hendrik Antoon 43
 Lorentz-Kraft 36, 67, 121, 143
 Lyman-alpha-Linie 205
- M**
 Machzahl 142, 207, 211
 Magnetfeld

- der Sonnenwindquellen 190
- Dipolachse 246
- Geometrie in der Korona 201
- geschlossene Feldstruktur 132, 138
- helikale Flussröhre 147
- Leistungsspektrum 157
- lunares 215
- Magnetfeldstruktur 205
- Multipol 129, 288
- poloidales 80, 81, 85
- solares 79
- spiralförmiges 98, 104, 117
- toroidales 80–82, 85, 86
- Vektorfeld 195
- magnetische Diffusivität 85
- magnetische Eruption 201, 296
- magnetische Feldstruktur 95
- magnetische Flussröhre 6, 60, 138
- magnetische Gradientendrift 265
- magnetische Lorentz-Kraft 66, 67, 85, 254, 264
- magnetischer Aktivitätszyklus 308
- magnetischer Auftrieb 65, 83
- magnetischer Druck 109
- magnetische Rekonexion 12, 53, 96, 97, 112, 141, 161
 - Beschleunigung 88, 105
 - Erdmagnetosphäre 266, 267, 308, 309
 - Kometenschweif 228, 230
 - Resistivität 103
 - Sonnenatmosphäre 6, 98, 151, 200
 - Theorie 102
 - Venus 272
- magnetischer Schutzschirm 258, 292
- magnetischer Spiegel 265
- magnetischer Sturm 308
- magnetischer Trichter 135, 139, 201
- magnetische Spannung 88, 102
- magnetische Topologie 230
- magnetische Wolke 99
- Magnetismus 16
- magnetoakustisches Rauschen 159
- Magnetohydrodynamik 76, 171
- Magnetopause 212
- Magnetosphäre 210, 212, 215, 239, 258, 291
 - Abmessung 246
 - dynamogenerierte 240, 247
 - Ganymed 287
 - Hindernis 215
 - induzierte 271, 276
 - Magnetosphärenschweif 247, 267
 - planetare XXXI
 - Plasmasphäre 280
 - Schweif der Erdmagnetosphäre 327
- Magnetosphärenschweif 249
- Mairan, Jean-Jacques d'Ortous de 238
- Marsch, Eckart 34
- Materieakkretion 250
- Materiebewegung 50
 - Konvektion 55
- Maxwell-Gleichung 76
- meridionale Zirkulation 77, 83
- Messinstrument 30, 33, 35, 37
 - Antennenmessung 39, 40
 - elektromagnetisches Feld 39
 - Energiemessung 36
 - Faraday Cup 37
 - Flugzeitmessung 37, 38
 - Fluxgate-Magnetometer 39
 - Geschwindigkeitsmessung 36
 - In-situ-Messung 35
 - Magnetometer 19, 261
 - Massenspektrometer 37
 - Remote-Sensing-Registrierung 35
 - Spektrometer 38, 42
 - Teilchendetektor 37
 - Top-Head-Detektor 37, 38
- metallisches Fluid 243, 252, 357
- Methan 335
- mikroskopischer physikalischer Vorgang 359
- Milanković, Milutin 337
- Modellrechnung 79, 147, 176
- Molekülgeschwindigkeit 167

Mullen, George 348

N

Navigationssystem 10

Netzwerk

chromosphärisches 57, 87, 136,
142, 201

granulares 57, 60

magnetisches 151

penumbrales 62

supergranulares 81, 87

Newton, Isaac 16, 222

numerische Simulation 46, 100, 101,
181, 254, 267, 321, 323

O

Ohm, Georg Simon 69

Olbers, Heinrich Wilhelm Matthias 19

Oortsche Wolke 1, 216

Opazität 55

orbitaler Drehimpuls 4

organische Verbindung 231

Oszillation der Sonne 112

ozeanischer Zyklus 344

Ozon 335

Ozonloch 345

Ozonschicht 343

P

paläomagnetische Analyse 251

paläomagnetische Untersuchung 255

parametrischer Zerfall 158

Parker, Eugene Newman 18, 33, 117,
238

Parkers Alpha-Effekt 86

Parker Solar Probe 16, 24, 186, 189,
196, 197, 207

Sonnenwindaufnahme 197, 214

WISPR 197, 213

wissenschaftliche Instrumente 39,
191

wissenschaftliche Ziele 189

Parker-Spirale 123, 161

Paschmann, Götz 34

Pedersen-Strom 262

Phasenraum 36, 168

Pickup-Ion 218, 225

Planet 241

Gesteinsplanet 3

innerer Kern 5, 244, 245

Konstellation 73, 353

Ring 5

planetares Magnetfeld

dynamogeneriertes 241, 268

Erde s. Erdmagnetfeld

Jupiter 268, 276, 278

Merkur 268, 269

Neptun 269, 288

Saturn 269, 278

Uranus 269, 288

Planetensystem 11

Planetesimal 216

Plasma 4, 67–69

Mikroinstabilität 172, 178

Neutralität 173

Plasmafilament 132

Plasmafrequenz 119

Plasmaprozess 183

Plasmawolke 99

Stabilitätsanalyse 179, 181

Plasmabeta 109, 110, 181

Plasmadiagnostik 12

Plasmaphysik 11

kinetische 166, 171

von Astrosphären 165

Plasmatorus 240

Jupiter 285

Plasmoid 99, 260, 266

Polarlicht 8, 18, 236, 276, 280, 284

Aurora australis 236, 262, 263

Aurora borealis 236, 262, 263

Enceladus 287

- Entstehung 262
- Erde 262, 263, 265
- Farbe 262, 264
- Ganymed 286
- Jupiter 240, 281, 282
- Oval 237, 249, 262, 283, 288
- Saturn 283, 284
- Uranus 288–290
- Potenzialfeld 132, 133
- Potenzialstruktur 265
- Priest, Eric 34
- Protuberanz 18, 92, 104, 207
 - bogenförmige 58, 92
 - Eruption 103, 104
 - Filamentkanal 93, 94
 - Heckenprotuberanz 6, 91, 92, 95–97
 - sigmoidale 104
 - Wirbelsäule 94
- Proxima Centauri 4
- Puttkamer, Jesco von XXVI

- R
- Radiostrahlung 303
- Radiowelle 281
- Raumflug
 - Mars XXVIII, 324, 326
 - Mond XXVI, XXVII, XXVIII, 324, 326
- Raumsonde, Satellit 21
 - ACE 26
 - BepiColombo 24
 - Champ 25
 - Cluster 25
 - Galileo 24
 - Giotto 25, 222
 - GOES 100
 - Goode Solar Telescope 27
 - Helios 23, 177
 - Hinode 26, 51, 52, 92, 137
 - IBEX 124
 - ISEE 25
 - Mariner 24
 - Messenger 24
 - MMS 25
 - New Horizon 23, 124
 - Pioneersonde 20
 - PSP s. Parker Solar Probe
 - RHESSI 26
 - Rosetta 232
 - SDO 27, 51, 52, 63–65, 90, 100, 101, 111, 131, 133
 - Skylab 23
 - SOHO 26, 129, 136, 148, 197
 - SO s. Solar Orbiter
 - STEREO 26, 197, 227
 - THEMIS 25
 - Trace 26
 - Ulysses 23, 126, 128, 129, 154
 - Van Allen Probe 25
 - Vega 222
 - Voyager 20
 - WIND 25
 - Yohkoh 26, 128
- Rekonnexion 266
- Restmagnetismus 5
- Ringstruktur
 - Saturn 269, 278, 279
 - Uranus 290
- Röntgenemission 196, 290, 302
- Rotation
 - gebundene 358
- Rotationsdiskontinuität 156

- S
- Sabine, Edward 20
- Sagan, Carl 348
- Saturnmond 285, 286
- Schock
 - Bugstoßwelle 147, 211
 - interplanetare Stoßwelle 139
 - koronale Stoßwelle 304
 - planetare Schockfront 318
 - Schockwelle 308

- Stoßwelle 122, 123, 161, 162
Terminationsschock 2, 121, 242
Vorschockregion 212
- Schrijver, Karel 34
Schwabe, Samuel Heinrich 17, 70
Schwellenlinie für die Instabilität 181
Secchi, Angelo 88
Sensor 195
Siemens, Ernst Werner von 75
Solanki, Sami K. 34
Solar Orbiter 16, 24, 189, 193, 194,
195, 202, 205, 207
wissenschaftliche Instrumente 39,
194, 195
wissenschaftliche Ziele 192
- Sonnenaktivität 9
Aktivitätsgebiet 51, 52, 101, 132,
208
Aktivitätsmaximum 53, 74
Aktivitätsminimum 53, 74
Aktivitätszyklus 5, 52, 127, 130
Einfluss auf die Biosphäre 329
Fleckenrelativzahl 17, 60, 70, 128,
307
Gleissberg-Zyklus 70
Hallstatt-Zyklus 72
Langzeitminima 72
Planetenkonstellation 73
Schmetterlingsdiagramm 71
Schwabe-Zyklus 70, 339
Suess-de-Vries-Zyklus 72
- Sonnenatmosphäre 195
Chromosphäre 56, 57, 59, 202
Dichteverteilung 58
Korona XXXI, 9, 56, 59, 100, 109,
129, 130, 133
Photosphäre 56, 59, 109
Temperaturverteilung 58
Transitregion 56, 57, 59, 112, 202
Transitzone 137
- Sonnenfinsternis XXXI, 9, 17, 57, 73,
131
Sonnenfleck 6, 52
Entstehung 65
Fleckengruppe 51, 52, 63, 65, 70
Magnetfeld 60, 64
magnetische Polarität 71, 72
Penumbra 52, 57, 63, 66
Pore 63
Umbrä 52, 57, 61, 63
- Sonneninneres
Kernfusionsprozess 50, 54
Kernfusionszone 54
Konvektionszone 50
Overshoot-Region 56
Strahlungszone 54
Tachokline 56, 83
- Sonnenphänomen
CME s. Koronaler Masseauswurf
Eruption 6
Fackel 51, 53, 60, 61
Filament 64, 92
Flare 18, 26, 64, 99–101, 104, 105,
107
Fleck s. Sonnenfleck
granulare Gasse 62
Granulation 55, 86
Granule 60
koronales Loch 59, 129, 132, 137,
138
Plage 87
Plasmawolke s. Protuberanz
Protuberanz 93
Sonneneruption XXVII, 50, 105,
317
Sonnensturm 134, 146
Spikule 87–89
Supergranule 135, 201
Tornado 89, 90
- Sonnensystem 1, 3, 16, 19
Sonnenteleskop XXVI, 21, 27
BBSO XXVII, 90, 93
DKIST s. Inouye Solar Telescope
EST 30, 31
Gregor 27
HAO 97

- Hi-C 31
 - SSRT 28
 - SST 27, 63, 64, 87, 90
 - SUNRISE 30, 31
 - Sonnenwind XXVI, XXX, 118
 - archimedische Spirale 160
 - Beam 178
 - Beschleunigung 141, 145, 146, 152
 - Elektron 118
 - Feinstruktur 138
 - Geschwindigkeitsprofil 126
 - Gravitation 6
 - Hindernis 216, 247, 269
 - langsamer 125, 128, 132, 138
 - Mikrozustand 178
 - mitrotierende Wechselwirkungszone
 - 120, 163, 164
 - Proton 118
 - Quellregion 130
 - schneller 125, 128, 132, 135, 137, 138
 - Sonnenwindstrom 8, 126–128, 134, 136
 - Space Situational Awareness 298, 319
 - Spektrallinie 17
 - Eisen 100
 - H-alpha 63, 87, 94
 - Helium 100
 - Spektroskopie 182
 - Spektrum 204
 - ultraviolette 205
 - Verbreiterung 167, 204
 - Verschiebung 204
 - Spektroskopie 41
 - Spitzer, Lyman 20
 - Spörer, Friederich Wilhelm Gustav 17
 - Staub-Plasma-Wechselwirkung 214
 - Staudruck 211, 266, 267
 - Sternfleck 358
 - Stewart, Balfour 19
 - Strahlenbelastung 310, 317, 325
 - für Astronauten 314
 - Strahlenkrankheit 328
 - Strahlung
 - Abstrahlung 341
 - Bestrahlung organischer Materie 316
 - biologische Auswirkungen 315
 - Strahlenbelastung 315
 - Strahlungsausbruch 296
 - Strahlungstransport 351
 - Strahlungsgürtel 239, 280, 311
 - Enceladus 285
 - Jupiter 281, 286
 - Merkur 269
 - Neptun 280
 - Saturn 280, 286
 - Uranus 280, 288
 - Streamer Belt 205
 - Strom
 - elektrischer 334
 - erdmagnetischer 259
 - erdmagnetisches Stromsystem 259
 - feldparalleler elektrischer 309
 - ionische Leitfähigkeit 245
 - ionosphärischer Strom 251
 - metallischer Wasserstoff 277
 - Stromschicht 132
 - troposphärisches Stromsystem 346
 - Sturm
 - erdmagnetischer 248, 263, 291, 314, 326
 - Supernovaexplosion 219, 349
 - Switchback (Magnetfeldumkehrung) 198–200
 - Synchrotronstrahlung 281
 - Systemwissenschaft 119
- T
- Tayler, Roger John 353
 - Teilchen
 - Alphateilchen 124
 - Elektron 124, 191
 - energiereiches 119, 134, 306
 - Geschwindigkeit 166
 - hochenergetisches 262

- korpuskulare Strahlung 303
- Proton 124, 191
- schweres Ion 182
- solares 302
- Stoß 357
- suprathermisches 173
- Temperatur
 - Anisotropie 177, 180
 - kinetische 183
- thermodynamisches Gleichgewicht 108, 167, 168
- Treibhauseffekt 335
- Treibhausgas 335
- Turbulenz 154, 197

- U**
- Überschallströmung 211
- ultraviolette Emission der Sonnenkorona 195
- Ulysses-Mission 37

- V**
- Van Allen, James 239
- Van-Allen-Gürtel 240, 260, 280, 310, 311
- Van-Allen-Strahlungsgürtel 264
- Verteilungsfunktion 36
- Vorbeiflugmanöver 186
 - an der Venus 189
- Vulkanausbruch
 - Io 283

- W**
- Wanderung der Pole 251
- Wärmeleitung durch Elektronen 59, 174
- Wasserdampf 335
- Watson-Watt, Robert Alexander 239
- Weber, Wilhelm Eduard 19
- Welle 197

- Druckschwankung 159
- elektromagnetische 39
- elektromagnetisches Wechselfeld 313
- Emission 178
- ionenakustische 180
- Ionenzyklotronwelle 180
- Kelvin-Helmholtz-Welle 248
- kinetische Alfvén-Welle 180
- kompressive 159
- magnetoakustische 159, 198
- magnetohydrodynamische 109, 154
- Mikroinstabilität 179
- Plasma 179
- Spektrum der Wellenfelder 165
- Whistler-Welle 180
- Welle-Teilchen-Wechselwirkung 172, 177-179
- Weltraumklima 297
- Weltraummüll 318
- Weltraumwetter XXVIII, 8, 12, 52, 149, 294, 296, 328
 - auf dem Mond 326
 - Auswirkungen 312
 - Bedrohung der Astronauten 359
 - Carrington-Ereignis 319
 - heliosphärisches 307
 - ionosphärische Störung 313
 - Schutzvorkehrung 322
 - Strahlenkrankheit 359
 - Verursacher 312
 - Vorhersagezentrum 320, 321
- Wetterfühligkeit 327
- Whipple, Fred Lawrence 222
- Wimpelstruktur 73, 74, 96, 300

- Z**
- Zeeman, Pieter 17
- Zeeman-Effekt 17, 42
- Zwergplanet 241
- Zyklotroninstabilität 179
- Zyklotronresonanz 180, 182



Willkommen zu den Springer Alerts

Unser Neuerscheinungs-Service für Sie:
aktuell | kostenlos | passgenau | flexibel

Mit dem Springer Alert-Service informieren wir Sie individuell und kostenlos über aktuelle Entwicklungen in Ihren Fachgebieten.

Abonnieren Sie unseren Service und erhalten Sie per E-Mail frühzeitig Meldungen zu neuen Zeitschrifteninhalten, bevorstehenden Buchveröffentlichungen und speziellen Angeboten.

Sie können Ihr Springer Alerts-Profil individuell an Ihre Bedürfnisse anpassen. Wählen Sie aus über 500 Fachgebieten Ihre Interessensgebiete aus.

Bleiben Sie informiert mit den Springer Alerts.

Jetzt
anmelden!

Mehr Infos unter: springer.com/alert

Part of **SPRINGER NATURE**