Das Plasma-Universum

Autor(en): **Benz, Arnold**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **60 (2002)**

Heft 308

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-898457

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Das Plasma-Universum

ARNOLD BENZ

Der grösste Teil des heute sichtbaren Universums ist im Plasmazustand. Das gilt nicht nur für das heisse Innere von Sternen und die Sternatmosphären. Auch in den kältesten Dunkelwolken trennen energiereiche kosmische Elementarteilchen Elektronen von den Atomkernen ab und ionisieren somit das Gas. Diese leichte Ionisation genügt, dass das Gas die Gesetze der Plasmaphysik befolgt. Im Universum ist Plasma die Regel, und Festkörper, wie die Erde, gasförmige Planetenatmosphären oder Neutronensterne sind die Ausnahmen.

Das frühe Universum etwa ab der ersten Mikrosekunde nach dem Urknall war ein sehr heisses, vollständig ionisiertes Plasma. Durch die allgemeine kosmische Expansion kühlte es sich ab. Als sich die Elektronen und Protonen zu Wasserstoff vereinten, etwa 300 000 Jahre später, verwandelte es sich in ein neutrales Gas und verliess den Plasmazustand für eine gewisse Zeit. In dieser Nicht-Plasma-Phase sind die Galaxien im kosmischen Gas entstanden. Ihre Zentralobjekte, die galaktischen Kerne, bildeten sich vermutlich im gleichen Vorgang. Zweifellos waren es kleine Störungen in der Gasdichte, die sich unter ihrer eigenen Schwerkraft verstärkten, bis sie zu riesigen Schwarzen Löchern von Millionen bis Milliarden von Sonnenmassen kollabierten, die heute das Zentrum der meisten Galaxien markieren.

Warum kollabieren heute die mächtigen Gaswolken im interstellaren Raum nicht mehr zu massiven Schwarzen Löchern, sondern zu vielen kleinen Sternen wie unsere Sonne? Auch heute noch enthalten Dunkelwolken Millionen von Sonnenmassen. Dunkelwolken sind interstellares Material von besonders hoher Dichte und geringer Temperatur. Die Gasdichte erreicht ungefähr den Wert der besten Vakuen in irdischen Laboratorien. Ihre dunkle Erscheinung verdanken sie einem sehr geringen Anteil an Staubpartikel, die etwa einen Kilometer voneinander entfernt sind, aber wegen der Grösse der Wolken das Licht trotzdem vollständig absorbieren. Der Grund, dass sie unter ihrer eigenen Schwerkraft nicht zusammenfallen, liegt an ihrem Verhalten als Plasma. Magnetfelder sind einem Plasma «eingefroren», das heisst, dass sich die Materie nicht quer zum Magnetfeld bewegen kann, ohne es mitzureissen. Es wirkt wie ein Gummifaden, der jeder Bewegung, auch der Kontraktion, entgegenwirkt. Die magnetische Kraft verhindert das Wirken der in Dunkelwolken allgegenwärtigen Gravitation nicht vollständig. Anstelle eines Kollapses im freien Fall tritt eine langsame Diffusion. Der wichtigste Punkt aber ist, dass es nun mehrere Zentren gibt, zu denen hin sich Konzentrationen ergeben. Es sind Orte mit höherer Anfangsdichte und kleinerem Magnetfeld. Die Entwicklung wird daher dezentral, die Konzentration fragmentiert und bildet Wolkenkerne mit Massen, die für das Entstehen von Sternen, aber nicht für massive Schwarze Löcher ausreichen.

Wolkenkerne haben einen Durchmesser von einem Lichtjahr und sind noch keine Sterne. Sie haben aber eine grössere Gasdichte und entsprechend höhere Gravitation als die umgebende Dunkelwolke. Weil Dunkelwolken nicht durchsichtig sind für optische Strahlung, können Wolkenkerne nur im Infrarotlicht beobachtet werden. Die Verdichtung geht so weit, bis die Gravitation schliesslich überwiegt. Dann kollabiert der Wolkenkern und reisst das Magnetfeld mit. Im freien Fall bleibt der Drehimpuls erhalten. Wenn also der Wolkenkern eine ursprünglich kleine Rotationsbewegung hatte, was immer in einem gewissen Mass der Fall ist, rotiert die zusammenfallende Gasmasse immer schneller, wie eine Eiskunstläuferin, die beide Arme anzieht zu einer Pirouette. Die Rotationsbewegung wird schliesslich so schnell, dass die Fliehkraft die Schwerkraft egalisiert. Der Kollaps endet an diesem Punkt in einer sich drehenden Scheibe, dessen Gas um ein Zentrum kreist wie Planeten um die Sonne. Solche «Akkretionsscheiben» haben die zehn- bis zwanzigfache Grösse unseres Sonnensystems. Man kann sie als dunkle Scheiben vor einem hellen Hintergrund oder im Infrarotlicht in Emission sehen.

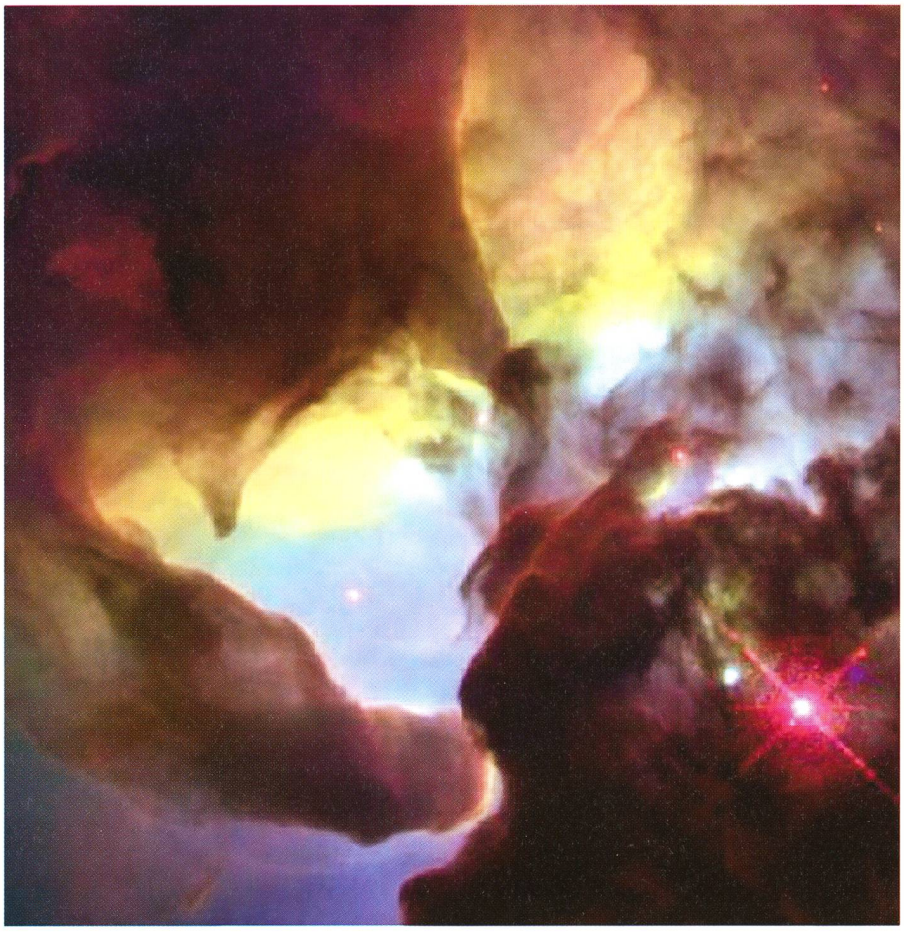


Abb. 1: Der Lagunen-Nebel (Distanz 4300 Lichtjahre) besteht aus Molekülwolken (dunkel) und durchsichtigem Gas. Beides sind Plasmen mit Temperaturen von -260, bzw. 10'000°C (Bild HST, NASA/ESA).

Die Rotation einer Akkretionsscheibe ist im Gleichgewicht und würde ewig weiter bestehen wie eine Planetenbahn. Kein Stern könnte sich im Zentrum bilden, wenn die Scheibe nicht abgebremst würde. Dass dies geschieht, ist wahrscheinlich wiederum das Verdienst des eingefrorenen Magnetfeldes, also der Plasmaeigenschaft der Scheibe, die wie das interstellare Gas infolge kosmischer Teilchen schwach ionisiert ist. Das Magnetfeld wird im Kollaps mitgerissen und dreht mit der Scheibe. Es wickelt sich spiralförmig auf und strahlt senkrecht zur Scheibe Spiralwellen ab. Diese sogenannten Alfvénwellen reissen auch Gas aus der Scheibe mit. Es wird in zwei «Jets» senkrecht zur Drehrichtung ausgeschleudert mit Geschwindigkeiten bis hundert Kilometern pro Sekunde. Die herausgeschleuderte Masse führt Drehimpuls mit und gibt ihn an den umgebenden Raum weiter. So tragen die Jets zur Abbremsung der Scheibe bei. Jets sind Merkmale von Akkretionsscheiben, die sich rasch entwickeln. Durch den Auswurf kann die Akkretion auf den Protostern beschleunigt werden oder wird erst eigentlich möglich. Die Scheibe kontrahiert zum zentralen Protostern, der mehr und mehr Masse gewinnt. Es gäbe keine Sterne ohne die Plasmaeigenschaft der Akkretionsscheiben.

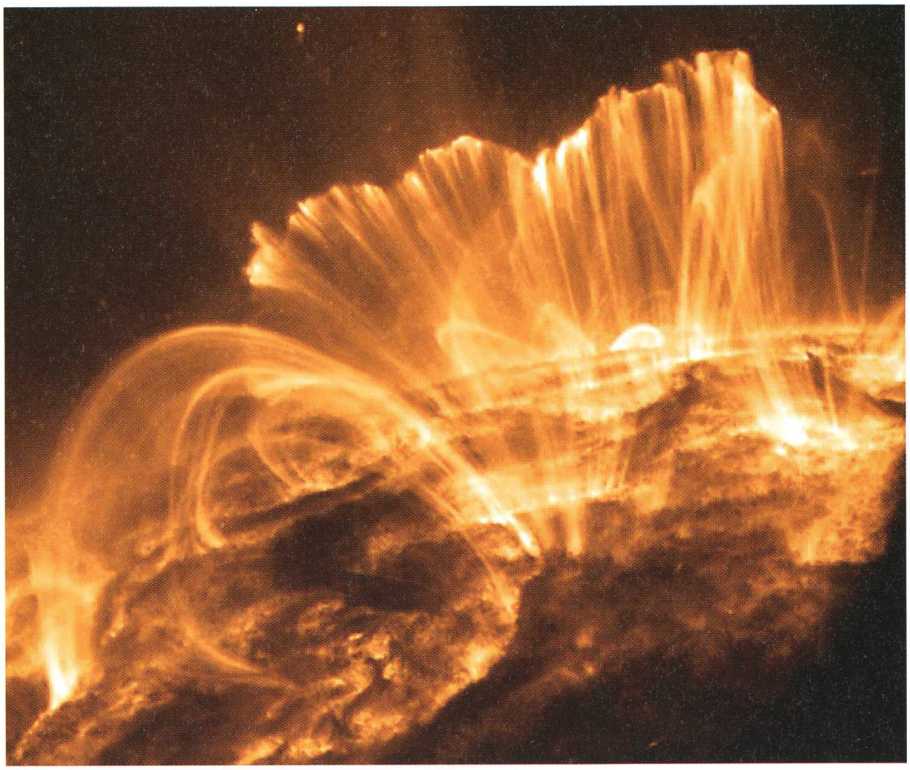
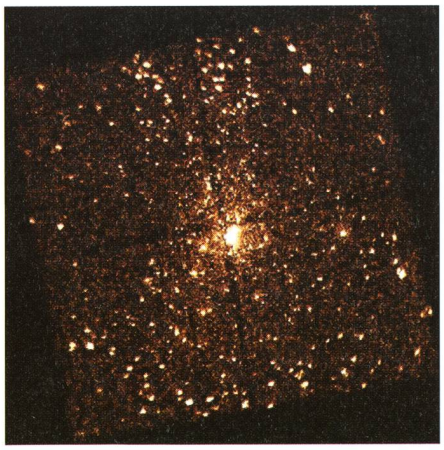


Abb. 3: Die Sonnenkorona im Lichte einer Spektrallinie von Fe XII bei 1,5 Millionen Grad (195Å) nach einem Flare wird durch die Form der Magnetlinien geprägt (Bild TRACE, NASA).

Abb. 2: Röntgenstrahlung entweicht aus dem optisch undurchsichtigen Teil des Orion-Nebels und enthüllt über tausend helle Koronen von jungen Sternen und Protosternen (Bild Chandra, NASA).



Protosterne haben an der Oberfläche Temperaturen bis zehntausend Grad. Sie sind riesige Gasbälle, rund zehnmal grösser als die heutige Sonne. Zunächst sind sie nicht sichtbar, da sie vollständig vom Gas eingehüllt sind, aus dem sie entstehen. Wenn in ihrem Zentrum die kritische Dichte und Temperatur zur Fusion von Deuterium und später Wasserstoff in Helium erreicht werden, ändert sich der innere Aufbau. Mit dem Start der Fusion wird der Protostern zum jungen Stern. Die neue Wärme wird mit turbulenten Plasmabewegungen nach aussen geleitet. Auch hier sind magnetische Felder vorhanden und werden mitgerissen. Sie werden durch die Bewegungen verstärkt und ragen weit über die Sternoberfläche hinaus. Mit diesen Magnetfeldern ist ein von der Sonne bekanntes aber noch unverstandenes stellares Phänomen verbunden: die *Korona*. Sie ist ein sehr dünnes Plasma von mehreren Millionen Grad Temperatur, jener Teil der Sternatmosphäre, der bei einer Sonnenfinsternis zum Vorschein kommt. Der Druck dieser heissen Atmosphäre ist so hoch, dass ständig ein Sternwind ins All wegfliesst. Der Sternwind und das Licht des neuen Sterns blasen nun die restlichen Gas- und Staubreste des stellaren Urnebels weg. Der junge Stern wird auch optisch sichtbar.

Die Heizung der Korona ist ein interessantes astrophysikalisches Forschungsthema. Die Sternoberflächen haben Temperaturen von einigen tausend bis zehntausend Grad. Wie kann die Schicht darüber fast wieder so heiss sein wie das Zentrum des Sterns? Für Fusionsreaktionen ist die Koronadichte viel zu klein. Bei der Sonne kann man sehr schön beobachten, wie die Heizung über den Sonnenflecken, wo die Magnetfelder besonders stark sind, erhöht ist. Die Koronaheizung mit einer Leistung von rund einer Billiarde (10^{15}) Megawatt muss also mit den magnetischen Feldern und den elektrischen Strömen, die sie erzeugen, im Zusammenhang stehen. Messungen der ETH Zürich mit dem europäischen Satelliten SOHO bei hohen Photonenergien zeigen, dass mindestens ein Teil der Heizung nicht kontinuierlich verläuft, sondern Energie impulsiv innerhalb weniger Minuten freigesetzt wird. Das sehr heisse Plasma heizt dann die darunterliegende Materie ebenfalls auf Millionen von Grad. Das heisse Material evaporiert, steigt auf und füllt die untere Korona fortlaufend mit neuem Plasma. Der gegenteilige Prozess findet ebenfalls statt: Das koronale Plasma kühlt sich ab und sinkt zurück in die unteren Schichten. Das Brodeln der unteren Korona regt vermutlich Wellen an, welche die Energie verteilen und so auch die äussere Korona heizen. Sie sind noch nicht nachgewiesen worden.

Es ist somit sehr wahrscheinlich, dass die Sonnenkorona elektrisch geheizt wird. Damit überhaupt so etwas möglich ist, müssen elektrische Ströme in der Korona vorhanden sein. Leider kann man sie noch nicht messen, aber es ist gelungen, sie in der Oberflächenschicht, der Photosphäre, nachzuwei-

sen. Die Stromstärke in einem Sonnenflecken beträgt bis einige Tausendstel Ampère pro Quadratmeter, und über den Flecken summiert sie sich zu beachtlichen Billionen von Ampères.

Die zentrale Frage bei der Koronaheizung ist, wie denn die elektromagnetische Energie freigesetzt wird. Schon lange ist bekannt, dass über den Sonnenflecken enorme elektrische Energiemengen in sogenannten Eruptionen umgesetzt werden. Energien bis zu einer Trillion (10^{18}) kWh werden dann nicht gleichmässig verheizt wie in einem Elektroofen, sondern in wenigen Minuten ins koronale Plasma ausgeschüttet. Am Ort der Energiefreisetzung steigt die Temperatur auf über hundert Millionen Grad. Einzelne Teilchen im Plasma erreichen Geschwindigkeiten nahe an jener des Lichtes. Die Physik dieser Umsetzung eines elektrischen Stromes in Beschleunigung versteht man noch nicht. Zweifellos handelt es sich um ein plasmaphysikalisches Phänomen, in dem sowohl die globalen Eigenschaften eines Stromkreises, der grösser als die Erde ist, eine Rolle spielen, wie auch die Mikrophysik hochfrequenter Wellen, welche wahrscheinlich lokal die Plasmaeigenschaften verändern.

Im gegenwärtigen Maximum in der elfjährigen Periode der Zahl von Sonnenflecken ist die Sonne sehr aktiv, und viele grosse Eruptionen haben im Jahr 2001 stattgefunden. Im Winter 2002 soll nun der verspätete High Energy Solar Spectrometric Imager, HESSI, gestartet werden, ein NASA-Satellit, an dem auch die Schweiz durch das Paul Scherrer Institut und die ETH Zürich massgeblich beteiligt ist. HESSI wird die Röntgen- und Gammastrahlen von hochenergetischen Teilchen in Sonneneruptionen beobachten. Das Teleskop wird erstmals Bilder in diesem Strahlungsbereich liefern und soll zum ersten Mal feststellen, an welchem Ort die Teilchen beschleunigt werden.

Es ist nun durchaus möglich, dass die Vorgänge, die in den riesigen Sonneneruptionen über Flecken stattfinden, in kleinerem Mass auch in den ruhigen Gebieten der Sonnenoberfläche die Korona auf ihre hohe Temperatur heizen. Bei den grossen Eruptionen gibt es mehr Möglichkeiten zur Beobachtung. Elektronen werden bis 100 Mev, Protonen bis über 10 GeV beschleunigt. Neben den hochenergetischen Strahlungen werden auch optische Signale und Radiowellen von Eruptionen gemessen. In der Schweiz stehen dazu das neue Radiospektrometer in Gränichen (AG) der ETH Zürich und das optische Teleskop in Locarno (IRSOL) zur Verfügung. Wir erwarten, dass das Verständnis der Sonneneruptionen viel zur Erklärung der Koronaheizung und der Entstehung des Sonnenwinds beitragen wird.

Bereits heute weiss man, dass elektrische Ströme in der Korona dadurch entstehen, indem neue Magnetfelder aus dem Sonneninnern aufsteigen. Zwischen alten und neuen Magnetfeldern bildet sich eine Stromschicht. Wird sie zusammengepresst, steigt die Stromdichte an, bis sie die Schwelle zu einer Instabilität überschreitet. In diesem Prozess werden bestimmte Wellen im Plasma verstärkt und wachsen exponentiell an. Die Wellen können soweit anwachsen, dass sie die Plasmaeigenschaften verändern. Von besonderer Wichtigkeit wird der elektrische Widerstand sein, der zunehmen kann und damit die Heizleistung des Stroms dramatisch erhöht. Die Energie des riesigen Stromkreises wird in der Folge in einem kleinen Gebiet deponiert. Noch unklar ist allerdings, wie und wo diese Instabilität auftritt. Insbesondere möchte man wissen, wie Teilchen beschleunigt werden. Noch sind die wesentlichen physikalischen Prozesse nicht bekannt, geschweige denn die Details. Es wird noch lange dauern, bis dieser Vorgang im Laboratorium kopiert werden kann.

Noch eine Stufe grösser als Eruptionen sind koronale Massenauswürfe. Sie haben auch mit dem Magnetfeld der Korona zu tun, das sich durch neuen Zuwachs aus den unteren Schichten dauernd verstärkt. Wenn die Korona magnetisch «überladen» wird, löst sich ein Teil der Korona ab und driftet weg. Oft ist dieser Vorgang mit einer grossen Eruption und Teilchenbeschleunigung verbunden. Ein Teil der schnellen Teilchen gelangt mit fast Lichtgeschwindigkeit in Erdnähe, wo sie Satelliten ausserhalb der schützenden Magnetosphäre mit einer erhöhten Strahlungsbelastung bombardieren. Besonders gefährdet sind auch Astronauten, die sich ausserhalb der Kapsel aufhalten.

Das koronale Material eines Massenauswurfs wird ebenfalls in den interplanetaren Raum ausgeschleudert und pflügt sich mit einer Geschwindigkeit von bis zu tausend Kilometern pro Sekunde durch das Plasma des Sonnenwinds. Schlägt diese Plasmawolke in etwa drei bis sechs Tagen auf das Erdmagnetfeld auf, spüren wir das in vielfältigen Formen auf der Erde. Der magnetische Stoss kann zum Beispiel in terrestrischen Stromleitungen eine Spannungsspitze verursachen und zu empfindlichen Störungen in grossen Stromnetzen führen. Ähnliche Plasmavorgänge wie in Sonneneruptionen spielen sich im Schweif des irdischen Magnetfeldes auf der sonnenabgewendeten Seite ab. Elektrische Ströme werden dort verstärkt, werden instabil und beschleunigen ebenfalls Teilchen. Diese folgen dem Magnetfeld nach unten und dringen in die Erdatmosphäre ein. Die Teilchen verursachen Polarlichter durch Stösse mit Atomen und Molekülen in der Erdatmosphäre. Während des Sonnenmaximums sind Polarlichter häufig und zum Teil bis in unsere Breitengrade sichtbar. Polarlichter sind das Resultat einer langen Kette plasmaphysikalischer Vorgänge zwischen Sonneninnerem und Erde.

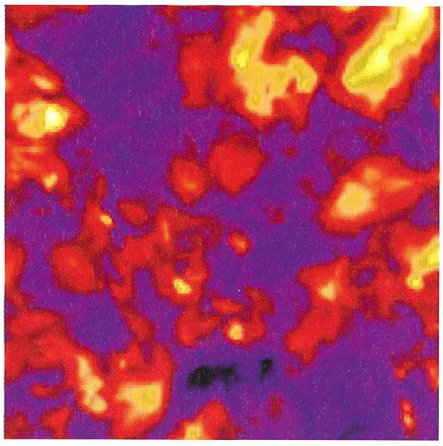


Abb. 4: Ein ruhiges Gebiet der Sonnenkorona in der Scheibenmitte und in der selben Spektrallinie von Fe XII wie Abb.3 von der Grösse von 290'000 km im Quadrat zeigt helle (gelb) und dunkle (blau) Flecken. Sie entstehen durch die Koronaheizung und variieren innerhalb von Minuten (Bild SOHO, ESA).

Plasmavorgänge im Universum sind an entscheidenden Punkten verantwortlich für Entwicklungen, die zu unserer Existenz geführt haben. Oft sind diese subtilen Vorgänge wegen der hochfrequenten Wellen, dem Magnetfeld und energiereicher Teilchen kompliziert und noch unverstanden. Die Plasma-Astrophysik gilt als besonders schwieriges Gebiet, wo aber dafür noch vieles zu erforschen ist. Im erdnahen Raum und auf der Sonne können die Plasmaparameter gemessen und Theorien überprüft werden. Dazu tragen die Resultate der Plasmaphysik im Laboratorium und im Zusammenhang mit der Fusionsforschung sehr viel bei. Die Zusammenarbeit zwischen Fusionsforschung und Astrophysik wird daher auch in Zukunft fruchtbar sein.

ARNOLD BENZ