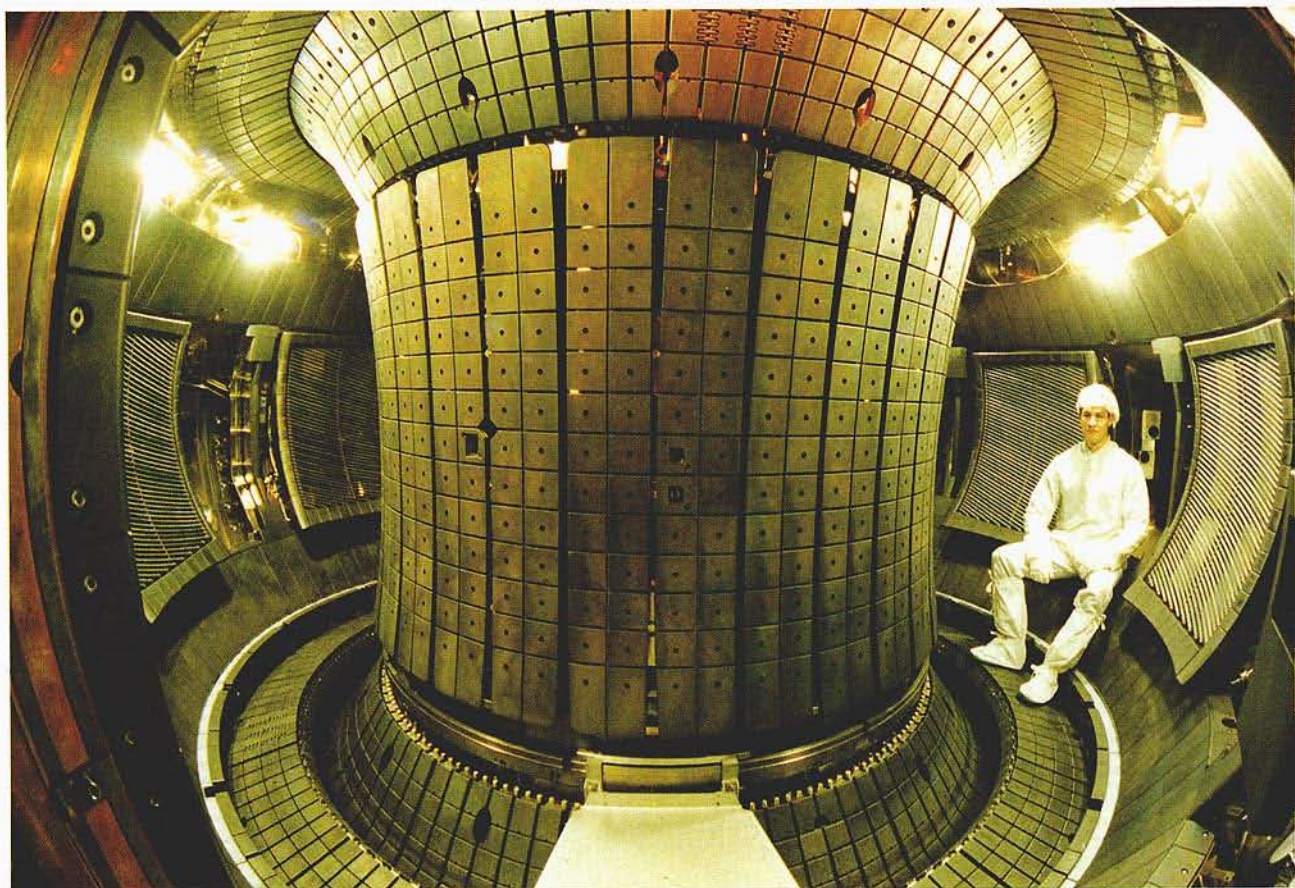


Blick in das Plasmagefäß des Fusionsexperiments Asdex Upgrade: An Boden und Decke sieht man die ringförmig umlaufenden Prallplatten des Divertors, über den Verunreinigungen des Plasmas abgeleitet werden. Schon ein Anteil von zwei Promille Wolfram-Ionen könnte soviel Energie abstrahlen, daß ein Fusionsreaktor nicht mehr zündet.

Foto: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)



Der vierte Zustand

99 Prozent des sichtbaren Weltalls bestehen aus Plasma

Drei Aggregatzustände gebe es, so lernen wir in der Schule: fest – flüsig – gasförmig. Und wenn die Physiklehrer ambitioniert sind, deuten sie an, daß es noch einen vierten Zustand gibt: das Plasma. Jeder Stoff kann in ein Plasma überführt werden, was gar nicht so geheimnisvoll ist, wie es sich anhört: Man zünde sich eine Kerze an. In der Flamme trennen sich Elektronen von ihren Atomen, zurück bleiben elektrisch geladene „Ionen“. Bei der Hitze stoßen Elektronen und Ionen sowie Ionen mit Ionen ständig zusammen, was eben den Plasma-Zustand charakterisiert. Weitere Beispiele für Plasmen finden sich in Leuchtstoffröhren und Explosionen, Gewitterblitzen und der Ionosphäre in der oberen Lufthülle.

Während auf der Erde die Bedingungen normalerweise ziemlich extrem sind, unter denen sich Plasmen bilden, ist im Weltall der vierte Zustand der Regelfall. 99 Prozent von dem, was wir dort sehen – die Sterne und die interstellaren Nebel – besteht aus Plasmen. Und noch auf einem weiteren Gebiet ist Plasmaphysik wichtig: In Fusionsreaktoren wird versucht, das Sonnenfeuer auf die Erde zu holen. Ob dies gelingen wird, hängt unter anderem von den Auswirkungen bisher unzureichend verstandener mikroskopischer Reaktionen bei Ion-Ion- und Ion-Elektron-Stößen im Plasma ab. Das Institut für Kernphysik im Strahlencentrum der Universität Gießen gehört weltweit zu kaum einer Handvoll von Forschungsinstituten, die solche atomphysikalischen Elementarprozesse untersuchen können. Vom Verständnis dieser Reaktionen hängt womöglich die Energieversorgung der Zukunft ab.

Wer Stöße von Ionen mit Ionen oder von Elektronen mit Ionen un-



Dr. Alexander Pfeiffer und Dipl.-Phys. Karsten von Diemar bei der Arbeit an der Ultrahochvakuumkammer des Ionenexperiments. Von links und rechts laufen Ionenstrahlen ein, die sich im Zentrum kreuzen. Die dabei auftretenden Stöße sind für das Verständnis so unterschiedlicher Phänomene wie die Sonnenkorona, die Ionosphäre der oberen Lufthülle oder die Kernfusion interessant.

Foto: Frank Timphus

tersuchen will, kann es sich leider nicht so einfach machen und eine Kerze anzünden. In der Flamme läuft eine Vielzahl verschiedenster Reaktionen ab, während das Interesse des Atomphysikers ist, möglichst jeden Reaktionstyp einzeln präparieren und untersuchen zu können. Das ist im Institut für Kernphysik durch langjährige Entwicklung von Meßverfahren gelungen, die auf der Überlagerung sauber präparierter Strahlen geladener Teilchen, eben von Ionen und Elektronen, beruhen. Eine besondere Spezialität der Schwerionenphysiker im Strahlencentrum ist dabei der Einsatz hochgeladener Ionen, die durch Ablösung mehrerer oder gar aller Elektronen eines Atoms erzeugt werden. Solche hochgeladenen Ionen treten in natürlichen und künstlichen Plasmen auf, die durch energiereiche Elektronen oder durch Röntgenstrahlung ionisiert werden. Ihre Existenz wurde in den dreißiger Jahren durch intensive Beobachtung der Sonne und speziell der Sonnenkorona entdeckt.

In Experimenten mit gekreuzten Strahlen aus mehrfach geladenen Ionen und Elektronen wurden ab 1977 weltweit zum ersten Mal am Strahlencentrum Ionisationsprozesse untersucht, bei denen einem bereits mehrfach geladenen Ion wei-

tere Elektronen entrissen werden. Dies markierte den Beginn einer bis heute äußerst fruchtbaren Erforschung der physikalischen Prozesse, die in Elektronenstößen zur Erzeugung hochgeladener Ionen führen. Aufbauend auf diesem Erfolg seiner Arbeitsgruppe wurde unter der Leitung von Prof. Erhard Salzborn ab 1981 auch die Erforschung von Ion-Ion-Stoßprozessen in Gießen in einem damals noch leeren Laborraum begonnen. Das Hauptproblem bei all solchen Experimenten mit Strahlen geladener Teilchen, seien es Ionen oder Elektronen, ist zunächst einmal technischer Art, nämlich die Herstellung eines wirklich leeren Raums, sprich die Erzeugung von Ultrahochvakuum. Andernfalls ertrinkt der Experimenta-

tor in einer Flut von Untergrundsignalen, so wie das Zwitschern eines Vogels im Hintergrundlärm beim Start eines Jumbojets untergeht.

Der Aufbau der neuen Ion-Ion-Streuapparatur stand in den Gründzügen bis 1983. Nach zwei Doktor- und mehreren Diplomarbeiten war die Meßtechnik soweit entwickelt, daß die ersten Ion-Ion-Stöße nachgewiesen werden konnten. Immer wieder kamen Kommissionen der Geldgeber vorbei, ließen sich von den Fortschritten berichten und vor allem davon überzeugen, daß das schwierige Ziel erreichbar war. Der lange Atem der Geldgeber hat sich gelohnt: 1985 wurden die ersten Ergebnisse veröffentlicht.

Im Zentrum der Bemühungen steht eine Versuchskammer von einem Meter Durchmesser (Abbildung links), in der die Physiker nur – wie Kriminalisten am Tatort – mit nicht-fuselnden Handschuhen hantieren. Nachdem der Deckel fest verschraubt ist, wird sie etwa eine Woche lang geheizt, um alle flüchtigen Substanzen auszutreiben. Am Ende des Pumpvorgangs steht das „beste Vakuum von ganz Gießen“, wie Prof. Salzborn mit leichtem Understatement meint, hundertbillionenfach schwächer als der umgebende Luftdruck. Und immer noch ist dann die Kammer nicht wirklich leer: In jedem Kubikzentimeter schwirren noch fast eine Million Moleküle vom Restgas herum. Dem steht in realistischen Ionenstrahlen eine Teilchendichte von 500.000 Ionen pro Kubikzentimeter gegenüber. Vakuumtechnisch ist auch deswegen der Versuchsaufbau so schwierig, weil die beiden Ionenstrahlen, die in der Versuchskammer gekreuzt werden, einen ständigen Teilchenstrom liefern, gegen den die Vakuumpumpen anarbeiten müssen.

An der Kreuzung der beiden Ionenstrahlen kommt es dann etwa einmal pro Sekunde zu dem erhofften Ereignis: Ein Ion stößt mit einem anderen zusammen. Im selben Zeitraum stoßen sich aber außerdem tausend Ionen mit je einem Molekül des Restgases, und es grenzt an ein Wunder der Meßtechnik, daß sich das interessante Signal wie die Nadel im Heuhaufen aus diesen Restgasstößen noch herausfiltern

JUSTUS-LIEBIG-



UNIVERSITÄT
GIESSEN

Prof. Dr. Erhard Salzborn

Institut für Kernphysik
Leihgesterner Weg 217
35392 Gießen
Telefon (0641) 99-15100
Telefax (0641) 99-15009



Erhard Salzborn studierte Physik in Erlangen. 1970 kam er an das Strahlenzentrum, wo er im Institut für Kernphysik die Arbeitsgruppe „Atomare Stoßprozesse“ aufbaute. Er wurde 1972 zum Professor ernannt und 1993 als Institutsleiter auf den Lehrstuhl für „Angewandte Schwerionenatomphysik“ berufen. Gastprofessuren führten ihn an die Kansas State University/USA und die Université Catholique de Louvain/Belgien. Von 1988 bis 1996 war er gewählter DFG-Fachgutachter für „Physik der Atome und Moleküle, Gase und Plasmen“.

läßt. Um überhaupt etwas messen zu können, werden die Ionenstrahlen gepulst, also in regelmäßigen Abständen unterbrochen. Alles, was während der Unterbrechungen gemessen wird, kann nicht von Ionenstößen stammen, argumentieren die Forscher. Tauchen weitere Signale auf, sobald beide Strahlen gemeinsam angeschaltet werden, müssen sie auf Ion-Ion-Stöße zurückgehen. Noch besser gelingt solche Aschenputtelarbeit, wenn man die Zeitintervalle zwischen dem Auftreffen der beiden Reaktionsprodukte auf den jeweiligen Detektoren mißt. Zwei Ionen, die in einer Kollision zusammengetroffen sind, durchlaufen mit bekannten Geschwindigkeiten die fest vorgegebenen Strecken zwischen dem Kreuzungspunkt der Strahlen und den Detektoren. Sie brauchen dazu beispielsweise eine millionstel Sekunde und zwischen den beiden Zieldurchläufen liegen beispielsweise nur 10 milliardstel Sekunden. Doch diese winzige Zeitspanne läßt sich genau messen. Nur wenn beide Reaktionsprodukte aus einem einzigen Stoß stammen und daher ihr Zeitabstand genau dem vorherberechneten Wert entspricht, kann es sich um eins der gesuchten Ion-Ion Stoßereignisse handeln, das Meßereignis kommt ins Töpfchen, der Rest ins Kröpfchen, wie bei Aschenputtel.

Bei einem Stoß können die sowie schon elektrisch geladenen Ionen ihre Ladung verändern. Entweder sie verlieren eines oder mehrere ihrer Elektronen, die in den Weiten der Versuchskammer verschwinden. Da ein Elektron negativ geladen ist, bleibt dann ein Ion zurück, das um denselben Betrag elektrisch positiver geworden ist. Oder die Elektronen werden beim Stoß von einem Ion zum anderen übertragen. Das eine Ion wird dann in dem Ausmaß positiver geladen, in dem das andere negativer wird. Diese ladungsändernden Stöße sind bis heute nur in ganz wenigen Fällen erforscht und im Detail überhaupt noch nicht verstanden, weil die Untersuchungsbedingungen am Rande des heute Machbaren in der Experimentiertechnik liegen.

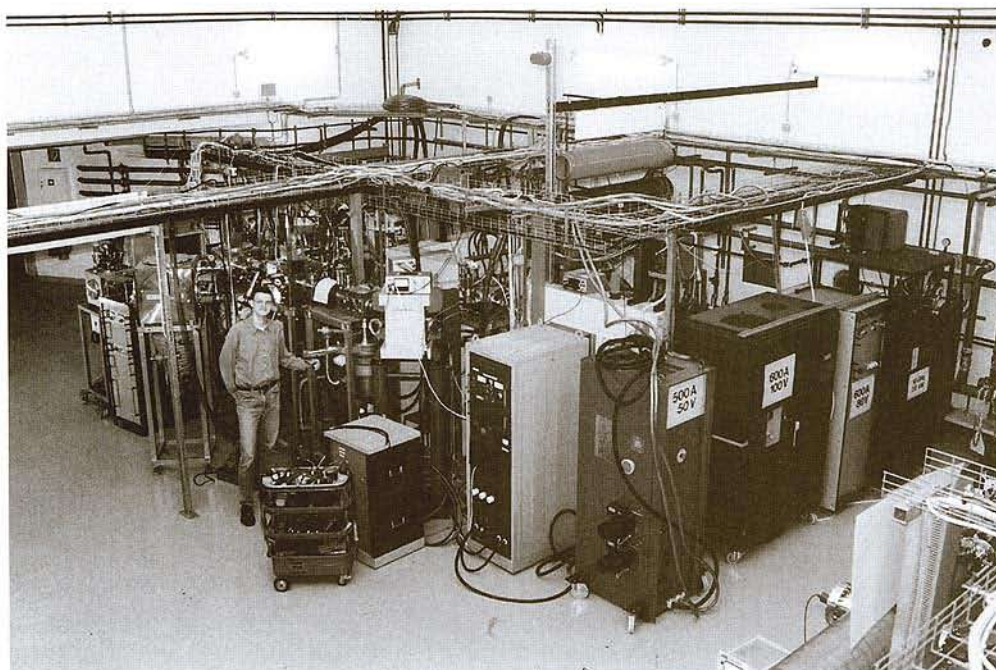
Mit den Gießener Versuchsaufbauten lassen sich Prozesse untersuchen, die von der Atmosphärenphy-

sik über Reaktionen in interstellaren Gasnebeln bis fast zum Urknall reichen.

Stöße zwischen Elektronen und Ionen markieren den Beginn der Atomphysik etwa 700.000 Jahre nach dem Urknall. Als sich das frühe Universum auf etwa 4000 Grad abgekühlt hatte, konnten sich Elektronen und Ionen erstmals dauerhaft zu Atomen zusammenfügen. Insbesondere kombinierten positiv geladene Protonen – die einfachste Form von Ionen – mit negativ geladenen Elektronen und formten so Wasserstoff, das einfachste aller Atome. Heute – mehr als ein Dutzend Milliarden Jahre später – liegt der größte Teil der sichtbaren Materie im Universum wieder als ionisiertes Plasma vor mit freien Ionen und Elektronen, häufig bei hohen Temperaturen. Aber auch die kalten interstellaren Leuchtnebel bestehen aus Plasma. Stöße zwischen Ionen und Ionen sowie Ionen und Elektronen gehören somit zu den fundamentalen Reaktionen, die die Entwicklung des Weltalls regieren. Näher an die Erde führen Phänomene wie die Sonnenkorona und die Ionosphäre über unserer Lufthülle.

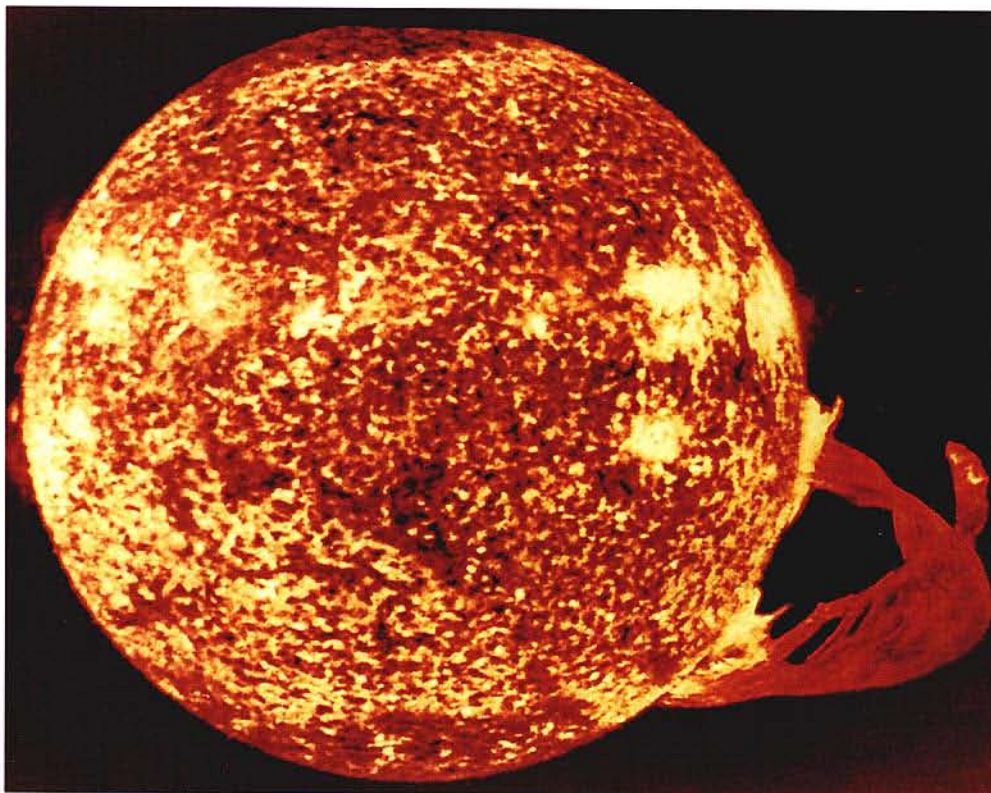
Der kurzzeitige Anteil des Sonnenlichts ionisiert in den oberen Schichten der Atmosphäre Atome, wobei zuerst einmal Elektronen und positive Ionen entstehen. In großen

Höhen ist die Intensität der Strahlung sehr groß, aber die Gasdichte sehr klein, so daß nur wenige Ionen und Elektronen gebildet werden. Auch in den unteren Schichten der Atmosphäre ist die Ionisierungsrate klein: Dort ist zwar die Dichte an Atomen und Molekülen groß, aber die harte, energiereiche UV-Strahlung wurde in den darüberliegenden Schichten der Atmosphäre fast vollständig absorbiert. Zwischen diesen Bereichen gibt es eine Schicht, in der sowohl die Gasdichte als auch die Intensität der Strahlung so hoch ist, daß die Ionisierungsrate ihr Maximum erreicht. In 200 bis 400 Kilometer Höhe trifft man auf die höchste Elektronendichte mit bis zu einer Million freier Elektronen pro Kubikzentimeter. Nachts, wenn die Sonneneinstrahlung fehlt, geht die Dichte freier Elektronen je nach Höhe über der Erde bis auf fünf bis zehn Prozent des Tageswertes zurück. Im Dunkel der Nacht fangen dann Atome und Moleküle sowie deren positiv geladene Ionen frei herumfliegende Elektronen ein. Moleküle brechen auf, negative Ionen entstehen und neutralisieren sich in Stößen mit positiven Ionen. Erst mit dem neuen Morgen beginnt wieder die Ionisationspumpe der Sonnenstrahlen die Ladungsträgerdichte zu erhöhen, und das Spiel beginnt von neuem.



Schwerionenanlage im Strahlenzentrum.

Foto: Frank Timphus



Diese Schwankungen in der Elektronendichte der Ionosphäre merkt jeder Funkamateur, vor allem wenn er über Kurzwelle Nachrichten senden oder empfangen will, denn die Ionosphärenschichten bestimmen die Ausbreitung von Radiowellen, sie wirken je nach Wellenlänge wie ein, möglicherweise etwas trüber, elektrischer Spiegel und gestatten durch die Reflexion von Kurzwellen erst die Nachrichtenausbreitung etwa über den Atlantik. Durch ein äußerst komplexes Netzwerk von physikalischen und chemischen Reaktionen, an denen Ionen und Elektronen maßgebend beteiligt sind, wird auch das für uns lebenswichtige Ozon erzeugt, das in Höhen von 20 bis 50 km als Filter gegenüber der lebensbedrohenden UV-Strahlung der Sonne wirkt.

Auch das Leuchten der Polarlichter ist auf atomphysikalische Elementarprozesse zurückzuführen. Es stammt von angeregten Zuständen atomarer Teilchen, die bei ihrer Abregung Licht aussenden. Solche angeregte Zustände werden beispielsweise erzeugt, wenn positive Stickstoff-Ionen und negative Sauerstoff-Ionen zusammenstoßen und einan-

der neutralisieren. Diese gegenseitige Neutralisation wurde erstmals 1968 in einem Experiment in den USA untersucht, in dem die beiden Ionen-Arten in zwei Strahlen parallel zueinander liefen.

Der experimentelle Erfolg ermutigte die Gießener Arbeitsgruppe zur Untersuchung einer besonders fundamentalen Reaktion: Wasserstoff ist das einfachste Element, das als positiv geladenes Ion nur aus einem Proton besteht und als negativ geladenes Ion aus einem Proton mit zwei Elektronen. Die gegenseitige Neutralisation von einem positiven und einem negativen Wasserstoffion ist einerseits für die theoretischen Physiker reizvoll, weil sie diese vergleichsweise einfache Situation noch am ehesten zuverlässig berechnen können, andererseits kommt der Reaktion eine besondere Bedeutung für die Astrophysik zu. Sie konnte im frühen Universum mit der Bildung von Wasserstoffatomen und deren negativen Ionen einsetzen und tritt auch in den Nebeln zwischen den Sternen auf. Sie beeinflusst das Gleichgewicht aus negativen, neutralen und positiven Wasserstoffvarianten im Weltall.

Dieses Bild wurde am 19. Dezember 1973 von der Skylab-Raumstation aus aufgenommen und zeigt eine der spektakulärsten Sonneneruptionen, die je aufgezeichnet wurden. Angetrieben von magnetischen Kräften hebt sich eine Fackel mehr als 588.000 Kilometer von der Sonnenoberfläche ab.

Foto: NASA

Fast alles, was wir über die Planeten, die Sonne, die Sterne, die Galaxien und das gesamte Universum wissen, basiert auf der Beobachtung elektromagnetischer Strahlung. Dazu gehört das sichtbare Licht, mit dem die Sonne die Erde wie den Mond anleuchtet, dazu gehört infrarote Strahlung, mit der uns die Sonne wärmt, und die UV-Strahlung mit der uns die Sonne bräunt oder rötet. Dazu gehört auch die Röntgenstrahlung, die von der Sonnenkorona emittiert und glücklicherweise in der Erdatmosphäre verschluckt wird, und die Hochenergiestrahlung, die aus dem Hexenkessel unvorstellbarer Sternkatastrophen herausbrodet. Und dazu gehört auch das flüsternde Echo des Urknalls, das als kosmische Hintergrundstrahlung im Mikrowellenbereich registriert werden kann. Das mit Teleskopen sichtbare Licht von farbenprächtigen Gasnebeln ist häufig auf die Rekombination von Protonen und Elektronen zurückzuführen. Aber auch kurzwelliges Licht bis hinein in den Röntgenbereich wird von Satelliten aus beobachtet, wenn in den Gasnebeln schwere Ionen vorkommen. Wird ein Gasnebel von einem sehr heißen Stern oder gar einer kosmischen Röntgenquelle angeleuchtet, dann werden schwere Atome sehr hoch ionisiert. Ein Beispiel für solche Atome ist Eisen, das wegen seiner pro Kernbaustein sehr hohen Bindungsenergie im Kosmos eine herausragende Rolle spielt und daher häufig auftritt. Die Ablösung von 15 bis 20 Elektronen von einem Atom ist keine Seltenheit, 20-fach geladene Eisenionen sind täglich Brot in der Sonnenkorona. Solche Ionen wirken auf ein Elektron wie ein Staubsauger. Beim Schlucken eines Elektrons muß das Ion überschüssige Energie abgeben, die wir als Röntgenlicht messen können, auch wenn das Ion tausende von Lichtjahren von uns entfernt ist. Aus den Intensitätsverhältnissen in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen dieser Rekombinationsstrahlung läßt sich bei Kenntnis der elementaren Stoßprozesse das Umfeld dieser Ionen rekonstruieren.

In ähnlicher Weise wird die Sonnenkorona erforscht, die sich bis zu Millionen von Kilometern über der

Sonnenoberfläche in das Weltall erstreckt und zum Beispiel den Zustand unserer Ionosphäre bestimmt. Durch Stöße von Elektronen mit Atomen werden in der Korona hochgeladene Ionen erzeugt, wobei schließlich der fortschreitenden Ionisation durch die Rekombination von Elektronen und Ionen Einhalt geboten wird. Solche elementaren Elektron-Ion Wechselwirkungen, die Ionisation und die Rekombination hochgeladener Ionen wie zum Beispiel von Eisenionen, denen nur noch wenige Elektronen von anfangs 26 geblieben sind, werden in der Arbeitsgruppe von Prof. Alfred Müller studiert.

Kernfusion

Bis in unser Jahrhundert blieb unverstanden, mit welchem Brennstoff eigentlich die Sonne brennt. Hermann von Helmholtz, der im letzten Jahrhundert den Ruf eines „Reichskanzlers der Wissenschaft“ genoß, hat einmal durchgerechnet, welche Energie bei der chemischen Reaktion entsteht, die bei kleinster Masse die größtmögliche Energiemenge freisetzt: die Vereinigung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser. Er kam auf eine Lebensdauer der Sonne von 3.021 Jahren, und dagegen spricht schon die Länge der menschlichen Geschichte in historischer Zeit. Stanley Eddington kam 1920 auf die Idee, daß bei der Umwandlung von Elementen Kernenergie frei werden könnte. Unter dem ungeheueren Gewicht der äußeren Schichten der Sonne fusioniert in ihrem Innern Wasserstoff zu Helium. Die Reaktionsprodukte sind um ein Prozent leichter als die Ausgangsstoffe, denn gemäß Einsteins berühmter Beziehung $E = m \cdot c^2$ wird Masse in Strahlungsenergie umgewandelt.

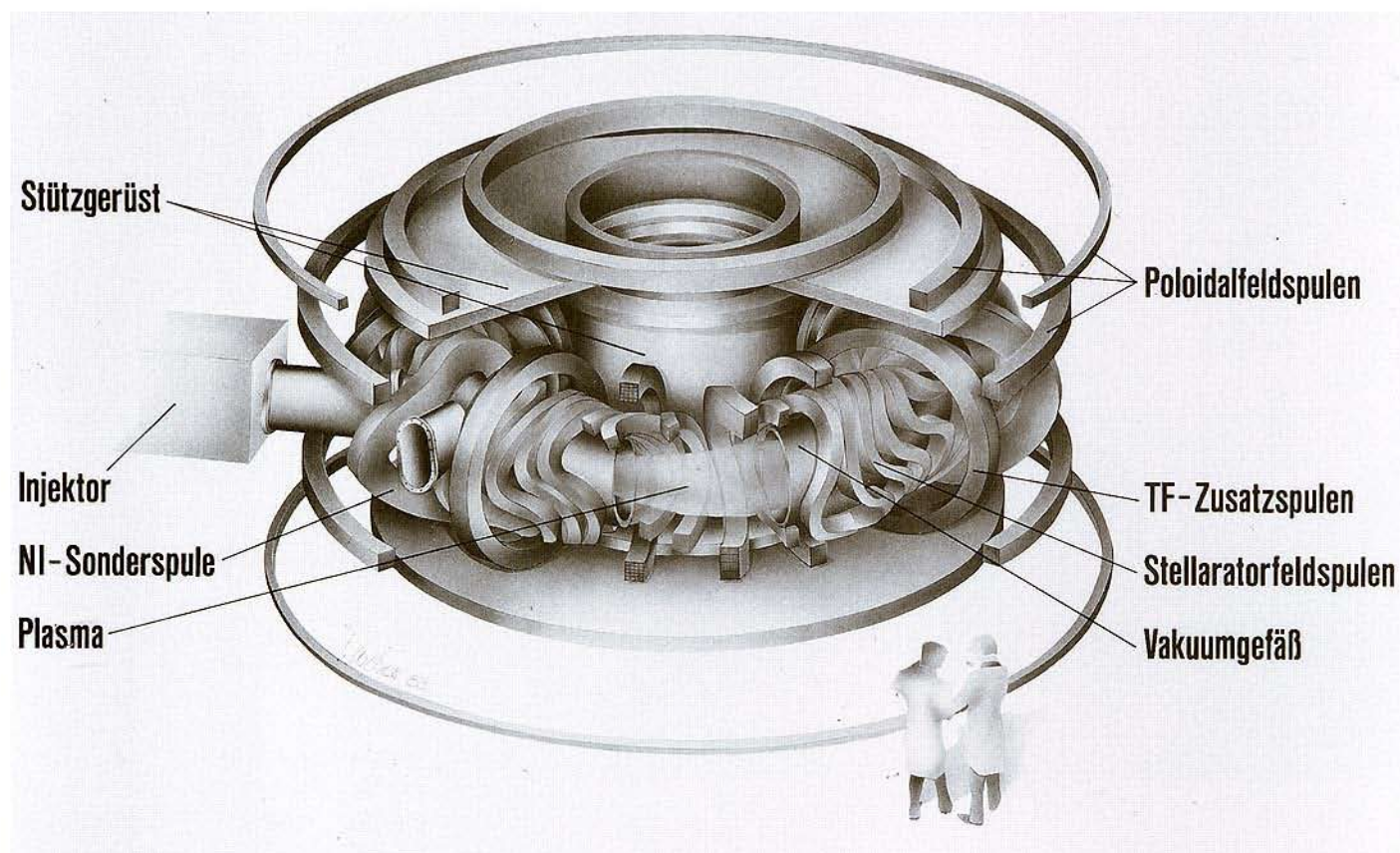
Für eine Kernfusion muß die elektrische Abstoßung der positiv geladenen Atomkerne überwunden werden. Erst wenn die Kerne einander fast berühren, führen die anziehenden Kernkräfte zur Fusion. An Beschleunigern kann die Fusion problemlos bewerkstelligt werden, jedoch verschlingt der technische Aufwand wesentlich mehr Energie als durch die Fusionsreaktion freigesetzt werden kann. Schlagartig wird die Fusionsenergie in der Was-

serstoff-Bombe freigesetzt, aber das ist natürlich kein Verfahren, das sich zur „Energiegewinnung“ nutzen ließe.

Die größten Hoffnungen auf eine friedliche Nutzung der Kernfusion konzentrieren sich zur Zeit auf die sogenannte thermonukleare Fusion. In Analogie zur „chemischen Fusion“ bei der Verschmelzung von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlendioxid spricht man auch bei einem Fusionsreaktor von „Brennen“ und Fusions„ofen“. Der Brennstoff wird dabei auf so hohe Temperaturen erhitzt, daß die thermische Energie ausreicht, die Abstoßung zwischen zwei Atomkernen zu überwinden. Das Vorbild, die Sonne, ist in ihrem Inneren mehr als 15 Millionen Grad heiß, wobei die ungeheueren Gravitationskräfte bei der Kernfusion durch die Erzeugung sehr hoher Materiedichten nachhelfen. In einem irdischen Fusionsreaktor, wo solche Dichten natürlich nicht erreicht werden können, müssen deshalb noch wesentlich höhere Temperaturen von über 100 Millionen Grad erzeugt werden. Inzwischen ist ein Stand erreicht, in dem ein Fusionsofen gebaut werden soll, der ein für etwa tausend Sekunden brennendes Plasma zu erzeugen gestattet. Dieser ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) soll gemeinsam von den USA, Japan, Rußland und Europa errichtet werden. Er wird mit einer Fusions-

leistung von 1,5 Gigawatt die Leistung eines großen Kraftwerks erreichen, wobei jedoch zu zeigen sein wird, ob der gesamte Energieaufwand, der für die Zündung der Fusion aufgewandt werden muß, auch wieder zurückgeliefert werden kann.

Vom Wasserstoff gibt es drei verschiedenen schwere Varianten, sogenannte Isotope. Während der gewöhnliche Wasserstoff aus einem Proton im Kern besteht, das von einem Elektron begleitet wird, kommt beim schweren Wasserstoff, dem Deuterium, ein Neutron im Kern hinzu und beim überschweren Wasserstoff, dem radioaktiven Tritium, noch ein zweites Neutron. Brennstoff für die Kernfusion sind diese schweren Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium; die Asche besteht aus stabilen Teilchen: Neutronen und Heliumkernen, sogenannten alpha-Teilchen. In der aussichtsreichsten Bauform für den Fusionsreaktor wird das brennende Plasma in magnetischen Feldern eingeschlossen. In diesem Fall können nur die freiwerdenden alpha-Teilchen zur Heizung des Plasmas verwendet werden, sie liefern ein Fünftel der Fusionsleistung. Am Institut für Kernphysik wurde in Zusammenarbeit mit dem Lebedev Institut für Physik in Moskau eine zentrale Reaktion aus dem Reaktorplasma untersucht, nämlich wie sich zwei alpha-Teilchen im Stoßprozeß ein Elektron teilen.



Im Schema des Fusionsexperiments Wendelstein VII-AS ist links ein Neutralteilcheninjektor zu erkennen, mit dem das Fusionsplasma zusätzlich aufgeheizt wird. Experimente am Institut für Kernphysik der Universität Gießen dienen der möglichst effizienten Herstellung der Neutralteilchen.

Grafik: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)

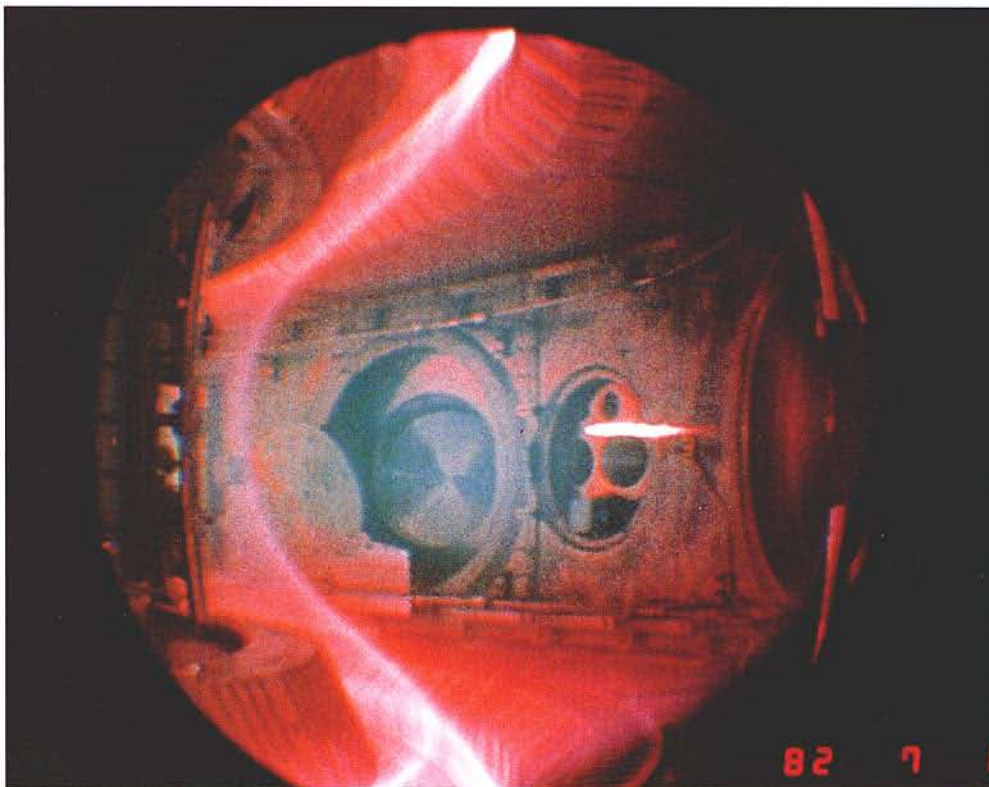
Bei der Kernfusion kommt es wesentlich auf die Ionentemperatur an, die, von den Physikern in der Einheit Kiloelektronenvolt (keV) angegeben, etwa 10 keV betragen muß. Dichte und Mindestlebensdauer des Plasmas müssen ebenfalls hinreichend groß sein, damit selbständiges Brennen möglich wird. Um ein Plasma zunächst auf die nötigen Temperaturen zu bringen, braucht man mehr als ein Zündholz.

Eine Heizung für den Fusionsofen

Die Injektion sehr schneller, neutraler Wasserstoffatome in das Plasma bewirkt neben anderen Methoden eine solche Heizung. Neutral müssen die Teilchen sein, weil sie nur so die umhüllenden Magnetfelder passieren können, die das Reaktorplasma in der Schwebe halten. Im Innern des Plasmas werden die Wasserstoffatome dann durch Stöße mit dem Plasma ionisiert und auf Spiralbahnen um die magnetischen Feldlinien gezwungen. Auf ihrem Weg geben sie ihre Bewegungsenergie in einer Vielzahl von Stößen an das Plasma ab und sorgen so für

den gewünschten Heizeffekt. Allerdings müssen die Wasserstoffatome beim Einschuss sehr energiereich, also schnell sein, und sie lassen sich nur effektiv beschleunigen, wenn sie zuvor elektrisch geladen sind. Diese widersprüchlichen Anforderungen setzen voraus, daß der Wasserstoff zwischen Beschleunigung und Einschuss in das Fusionsplasma noch neutralisiert werden kann. Große Fusionsreaktoren benötigen Injektionsleistungen von Neutralteilchen im Megawatt-Bereich, so daß der Frage nach der Neutralisationseffizienz der beschleunigten Wasserstoff-Ionen entscheidende Bedeutung zukommt. Neutralisationsverluste verschlechtern die Energiebilanz eines Fusionskraftwerks. Werden zum Beispiel 500 keV „heiße“ Deuterium-Ionen beim Durchschuss durch ein Gas neutralisiert, beträgt die Neutralisationseffizienz weniger als sechzig Prozent. Würde anstelle des Gases ein Plasma verwendet, könnte eine Effizienz von fast neunzig Prozent erreicht werden, wie Modellrechnungen zeigen, die auf den experimentellen

Daten des Instituts für Kernphysik beruhen. Die Ergebnisse der Modellrechnungen hängen sehr stark von Reaktionen ab, bei denen die negativ geladenen Heizungs-Ionen in Stößen mit positiv geladenen Plasma-Ionen ein oder zwei Elektronen verlieren. Nachdem am Institut für Kernphysik die Anlage für die Untersuchung von Ion-Ion Stößen entsprechend umgebaut worden war, gelang das erste Experiment mit negativen Wasserstoff-Ionen, die im Stoß mit mehrfach positiv geladenen Ionen neutralisiert werden. Eine Weltpremiere war vor allem auch das erste Experiment, in dem zwei Ionenstrahlen mit negativen Wasserstoff-Ionen gekreuzt wurden. Es lieferte wichtige Informationen für das Verhalten dieser Ionen wie sie zur Vorbereitung der Neutralteilcheninjektion benötigt werden. Da zur Zeit noch niemand so recht weiß, wie eine Plasma-Neutralisierung negativer Ionen für die Fusion zu verwirklichen wäre, ergänzt die Arbeitsgruppe von Prof. Salzborn ihre Experimente zum mikroskopischen Verständnis der Stoßprozesse durch



Blick in das Plasmagefäß des Fusions-experiments Asdex während einer Entladung: Da ein heißes Wasserstoffplasma nicht im sichtbaren Bereich des Spektrums leuchtet, ist nur das relativ kalte Plasma am Rand zu sehen. Die helle Spur von rechts stammt von einem zu Diagnostikzwecken eingeschossenen, gefrorenem Wasserstoffkügeln, das im Plasma verdampft, das Plasma dadurch abkühlt und sichtbar macht. Foto: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)

einen Testaufbau zur Untersuchung einer makroskopischen „Plasma-schleuse“ für negative Ionen.

Hochgeladene Feuerlöscher

Auch in einer anderen Hinsicht sind die Stoßprozesse, die am Institut für Kernphysik untersucht werden von außerordentlicher Bedeutung für die Machbarkeit der thermonuklearen Kernfusion. In einem 1 bis 10 keV heißen Plasma regieren Elektron-Ion Stöße das Geschehen. Ähnlich wie in der Sonnenkorona werden hochgeladene Ionen erzeugt und wieder ist das Eisen, das aus dem Stahl des Reaktorgefäßes in das Plasma gelangen kann, eine der wesentlichen Komponenten, weil es das Reaktorplasma „verunreinigt“. Die Röntgenstrahlung dieser Verunreinigungs-Ionen gibt einerseits wichtige Aufschlüsse über Dichte und Temperatur der Elektronen und auch der Ionen, sofern man die elementaren Stoßprozesse versteht, sie stellt aber gleichzeitig einen Energieverlust aus dem Plasma dar. Röntgenstrahlung durchdringt das Plasma und heizt letztlich die Kammerwand auf Kosten des Plasmas auf. Je höher die positive Ladung des Ions, umso höher sind die

Strahlungsverluste, die das Fusionsplasma abkühlen. Es ist bemerkenswert, daß schon eine Verunreinigung von einem Promille Wolfram im Plasma des geplanten ITER-Reaktors eine Leistung von 5 Megawatt pro Kubikmeter des Reaktorvolumens abstrahlt. Dabei ist allerdings nicht das ganze Reaktorvolumen von etwa 1000 Kubikmetern mit dem Fusionsplasma der vollen Dichte erfüllt. Die Abkühlung aufgrund dieser Strahlung ist so effizient, daß bereits schon bei einer Verunreinigung mit zwei Promille Wolfram das Zünden eines Fusionsreaktors unmöglich würde. Da das heiße Plasma durch Elektronentransferprozesse, wie sie am Institut untersucht werden, schnelle schwere Atome erzeugt, die auf die Wand des Plasmagefäßes prallen und dort weitere Verunreinigungsatome herausschlagen, ist die Sauberhaltung eines Fusionsplasmas von hochgeladenen Ionen eines der größten Probleme.

Der Ladungszustand von Ionen in Fusionsplasmen wird durch die Konkurrenz zwischen Ionisation und Rekombination in Elektron-Ion Stößen bestimmt. Bei ionisierenden Stößen werden Elektronen vom Ion abgelöst, bei der Rekombination lagert das Ion ein freies Elektron an und reduziert seine Ladung. Im Gleichgewicht liegen dann zum Beispiel 15-fach geladene Eisenionen vor, die einen zum Natriumatom ähnlichen Aufbau der Elektronenhülle besitzen. Die Besonderheit dieser Hüllenstruktur ist das Auftreten eines einzigen Elektrons außerhalb abgeschlossener innerer Schalen, die auch dem Natrium als Bestandteil von Kochsalz seine einzigartigen Eigenschaften gibt. Mit dieser einfachen, an Wasserstoff erinnernden Struktur der Atomhülle von Fe^{15+} , ist dieses Ion mit seiner Bedeutung in astrophysikalischen und künstlichen Plasmen auch aus der Sicht der Theorie besonders interessant. Bereits seit etwa 35 Jahren wurde von Theoretikern über das Verhalten dieses Ions in Elektronenstößen gerätselt. Experimente der Gießener in Zusammenarbeit mit externen Kollegen konnten erst kürzlich die jahrzehntelange Diskussion beenden.

Zur Verwirklichung der dazu notwendigen Messungen bedurfte es

JUSTUS-LIEBIG-



UNIVERSITÄT
GIESSEN

Prof. Dr. Alfred Müller

Institut für Kernphysik
Leihgesterner Weg 217
35392 Gießen
Telefon (0641) 99-15200
Telefax (0641) 99-15009

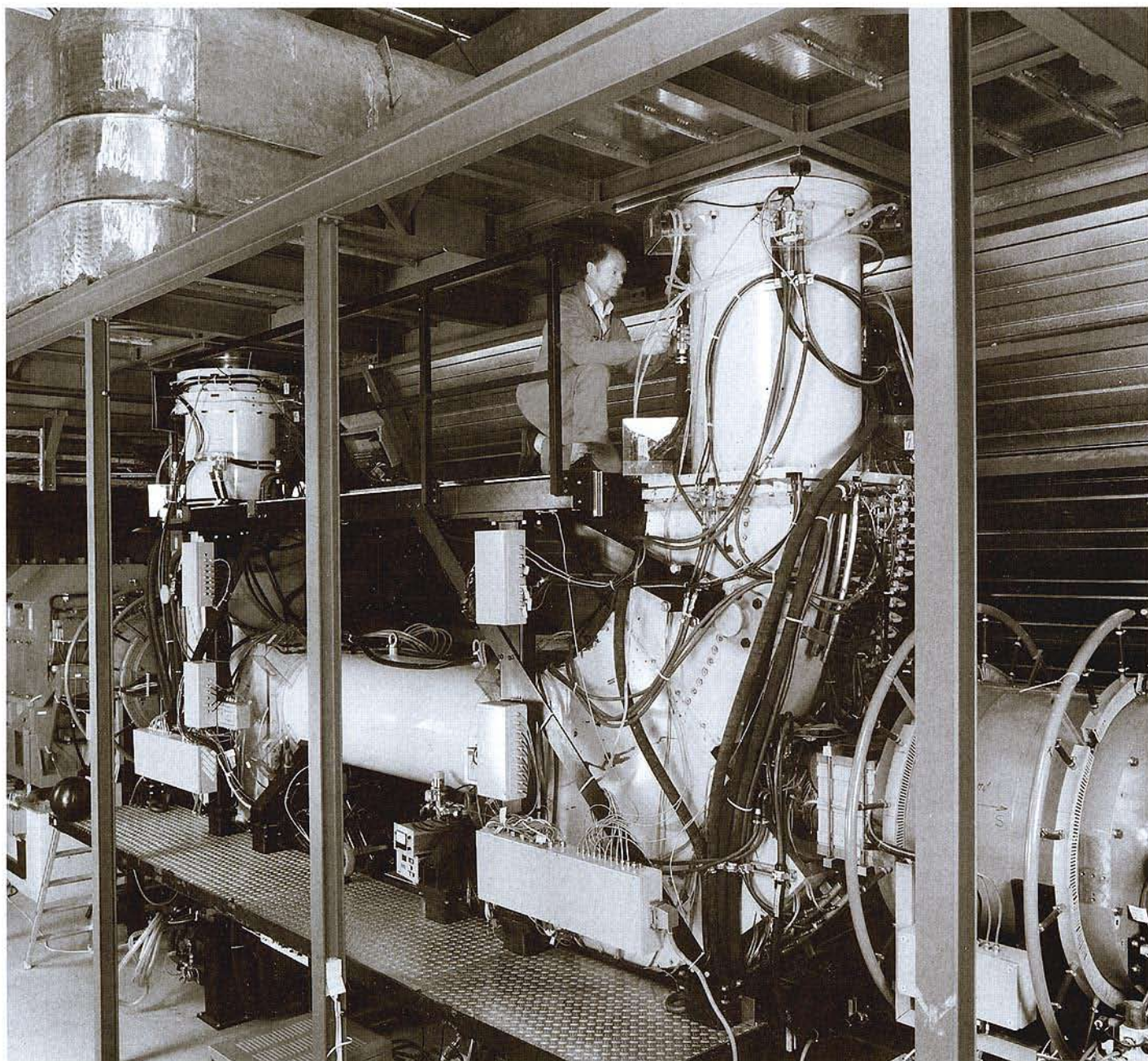
eines langen Wegs im Studium von Elektronenkollisionen. Der erste Schub kam vor etwa hundert Jahren mit der Entwicklung von Entladungsröhren. Der Fernseher und die Leuchtstoffröhre sind praktische Abfallprodukte dieser Forschung. 1961 wurde von einer Arbeitsgruppe in England zum ersten Mal ein Ionenstrahl aus einfach positiv geladenem Helium mit einem Elektronenstrahl gekreuzt. Knapp zwei Jahrzehnte lang waren diese Experimente allerdings auf ein- oder zweifach geladene Ionen beschränkt. Fast alle Daten wurden an kleinem Versuchsgerät gesammelt.

Die Atomphysiker im Institut für

Kernphysik gehörten zu den ersten, die mit Ionenquellen Strahlen mehrfach geladener Ionen herstellten. Mit bis zu fünfzehnfach geladenen Xenonionen konnten atomare Stoßexperimente durchgeführt werden, womit die Pionierrolle der Gießener auf diesem umfangreichen, neuen Arbeitsgebiet begründet war. Bei der Untersuchung von Stoßprozessen hochgeladener Ionen wie dem Fe^{15+} mit Elektronen reichten jedoch die Strahlintensitäten aus den Gießener Ionenquellen nicht aus. Immerhin konnten bald die ersten Resultate zur Ionisation bis zu 5-fach geladener Ionen erzielt werden, wobei eines oder mehrere der noch verblie-

Elektronenkühler bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt. Die Ionen in einem Ionenstrahl können auf eine gleichmäßige Geschwindigkeit getrimmt werden, indem man eine Zeitlang Elektronen mit derselben Geschwindigkeit im Strahl mitfliegen läßt, die aus einer Elektronenquelle rechts oben stammen. Wird dagegen das Tempo der Elektronen schneller oder langsamer als das der Ionen eingestellt, lassen sich Ion-Elektron-Stöße mit niedrigen Energien untersuchen.

Foto: Achim Zschau, Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI)





Alfred Müller, 48, studierte Physik in Gießen. Nach der Promotion 1976, die sich mit Stoßprozessen mehrfach geladener Ionen und Atome befaßte, verschrieb er sich zunehmend der Erforschung der Wechselwirkungen von Elektronen mit Ionen. Am Joint Institute for Laboratory Astrophysics in den USA wurde er in den Bann der Physik von Ion-Elektron-Resonanzen gezogen. Von einer Professur in Stuttgart 1995 nach Gießen berufen, führt er mit seiner Arbeitsgruppe am Institut für Kernphysik sowie an den Schwerionenspeicherringen in Darmstadt, Heidelberg und Stockholm Experimente zur Klärung elementarer Stoßvorgänge in Plasmen durch.

benen Hüllenelektronen zusätzlich entfernt wurde.

Schon in den ersten Messungen ergaben sich unerwartete Abweichungen von der Theorie. Durch die Entwicklung einer Technik, bei der ein Ionen- mit einem sehr intensiven Elektronenstrahl gekreuzt wurde, konnte die Arbeitsgruppe diesen Abweichungen in vorher nicht für möglich gehaltenem Detail nachgehen. Je intensiver ein Elektronenstrahl ist, desto mehr Stoßereignisse lassen sich nachweisen, doch hatte man bis dahin gedacht, daß das mit einem hohen Preis erkauft werden muß: In intensiven Strahlen besitzen die Elektronen keine scharf definierte Energie mehr, sondern „verschmieren“ in einem weiten Energiebereich. Mit der Kompensation der negativen Raumladung, die sich um den Strahl herum ausbildet, durch die positive Ladung von Ionen gelang es jedoch, die Energieschärfe der Elektronen im Strahl trotz der hohen Intensität zu retten. Zusätzlich wurde eine sogenannte Scanning-Technik eingeführt, die es erlaubt, feinste Details der Ionisierung zu erfassen. Die Energie des Elektronenstrahls wird von einem Computer so dosiert, daß innerhalb von drei Sekunden etwa tausend verschiedene Energien gemessen werden können. Durch eine Wiederholung des Scans kann nahezu jede erwünschte statistische Genauigkeit der Messung erreicht werden. Mit dieser Technik können nicht-statistische Fluktuationen umgangen werden, so daß der Meßfehler in manchen Fällen bis auf 0,01 Prozent gedrückt werden konnte.

Durch die weltweit einzigartige Methodik konnte experimentell eindeutig belegt werden, daß die Elektronenstoßionisation von Ionen, d.h. die Ablösung von Elektronen aus der Atomhülle, über sehr komplexe Mechanismen ablaufen kann. Neben dem einfachen Herausschlagen von gebundenen Elektronen vergleichbar mit einem Billiardstoß, laufen auch Mehrstufenprozesse ab, die in ihrer Ionisierungseffizienz sogar diese direkte Ionisation übertreffen können. Dabei wird beispielsweise das stoßende Elektron zunächst vom Ion eingefangen, wobei sich dessen Ladung sogar verringert. Dies geschieht jedoch

durch eine gleichzeitige, sehr starke innere Anregung des Ions, die letztlich dazu führt, daß das Ion wieder Elektronen „ausspucken“ muß und damit häufig am Ende „unter dem Strich“ doch Elektronen verloren hat.

Seitdem es große Ionenbeschleuniger und Ionenspeicherringe gibt, hat eine neue Ära dieser Experimente begonnen. Hochgeladene Ionen sind jetzt zugänglich, im Extremfall bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt das 92fach positiv geladene Uran-Ion, also ein vollkommen nackter Atomkern des Urans. Vor allem aber ist in den Speicherringen ein interessantes Gerät eingebaut: der Elektronenkühler. Bei den Experimenten mit gekreuzten Strahlen treffen die Elektronen mit Energien zwischen etwa fünf und fünftausend Elektronenvolt (eV) auf die Ionen. Im Elektronenkühler fliegen dagegen die Elektronen in einem Ionenspeicherring eine Weile in der gleichen Richtung wie der Ionenstrahl. Die Ionen bewegen sich wie ein Pulk Autos auf

der Autobahn, bei dem auch einmal ein Wagen vorprescht. Wenn sie aus der Reihe tanzen, stoßen sie allerdings an die mitfliegenden Elektronen, verlieren dabei Energie und ordnen sich wieder im Pulk ein. Da man die Geschwindigkeit der Ionen untereinander als Ausdruck einer Temperatur erfassen kann, besteht darin der Kühleffekt des Elektronenkühlers.

Die Gießener und ihre jeweiligen Gastgeber an den großen Beschleunigeranlagen machen mit dem Elektronenkühler allerdings etwas auf den ersten Blick Widersinniges. Sie verstimmen den Elektronenstrahl in seiner Energie, so daß die Elektronen schneller oder langsamer fliegen als die Ionen und zwangsläufig mit ihnen kollidieren. Stöße mit Energien unterhalb eines Elektronenvolts werden so zugänglich, wobei die Elektronenergien nur um 10 Milli-Elektronenvolt oder gar noch weniger verschmiert sind. Das sind aber Bedingungen wie sie in den relativ kalten interstellaren Nebeln herrschen, so daß hier Reak-



tionen aus dem Weltall – die für die Astrophysiker interessant sind – ins irdische Labor geholt werden können.

Mit der gleichen Technik lassen sich aber auch Energien von einigen tausend Elektronenvolt zwischen den Ionen und den Elektronen einstellen, wodurch schließlich auch das jahrzehntealte Rätsel der Ionisation von Fe^{15+} ein für allemal gelöst werden konnte.

Trägheitsfusion

Auch wenn die thermonuklearen Fusionsreaktoren vom Typ des ITER technisch am weitesten ausgereift sind, gibt es ein wichtiges alternatives Konzept für die Kernfusion, den sogenannten Trägheitseinschluß. Eine Hohlkugel mit dem Brennstoff Deuterium und Tritium wird in eine Kammer fallen gelassen und in diesem Moment mit einem Schwerionen- oder Laserstrahl beschossen. Innerhalb einer zehnmilliardstel Sekunde wird der Brennstoff auf die tausendfache Dichte normaler Materie komprimiert. Er wird dabei

derart aufgeheizt, daß die Fusion zündet und selbständig weiterbrennt – so lautet zumindest die Hoffnung.

HIBALL-II ist eine Konzeptstudie für ein Schwerionengetriebenes Fusionskraftwerk. Acht Ionenquellen erzeugen parallel Ionenstrahlen, die in Linearbeschleunigern vorbebeschleunigt und nacheinander zusammengefaßt werden bis ein einzelner Linearbeschleuniger die Ionen auf ihre Endenergie von zehn Giga-Elektronenvolt beschleunigt. In insgesamt zehn Speicherringen wird die Intensität akkumuliert, auf die nötige Pulsform gebracht und der Reaktorkammer zugeführt. Wismut ist ein heißer Kandidat für solche Ionenstrahlen, nur versagt leider bei diesen schweren Ionen bisher das Handwerkszeug der theoretischen Physiker. So sind beispielsweise die Reaktionen zwischen Wismut-Ionen in einem Ionenstrahl bisher nur experimentell in der Ion-Ion-Streuapparat des Instituts für Kernphysik untersucht worden. Theoretische Berechnungen dazu waren bisher

nicht möglich. Ändert sich in Ion-Ion-Stößen der Ladungszustand der gespeicherten Wismut-Ionen, folgen diese nicht mehr der vorberechneten Bahn und gehen aus dem Strahlführungssystem verloren. Bedenkt man, daß in den Ionenstrahlen eine Energie von fünf Megajoule gespeichert ist, und nimmt man einmal an, daß nur ein Promille davon in der Speicherzeit von einer Millisekunde durch Streuung innerhalb des Strahls verloren geht, hat man es mit einer Verlustleistung von fünf Megawatt zu tun, entsprechend dem gesamten durchschnittlichen Stromverbrauch der Stadt Gießen. Im Ultrahochvakuum des Strahlrohrs bedeutet dieser Leistungsverlust ein technisches Problem, dem durch geeignete Maßnahmen begegnet werden muß.

Antiwasserstoff

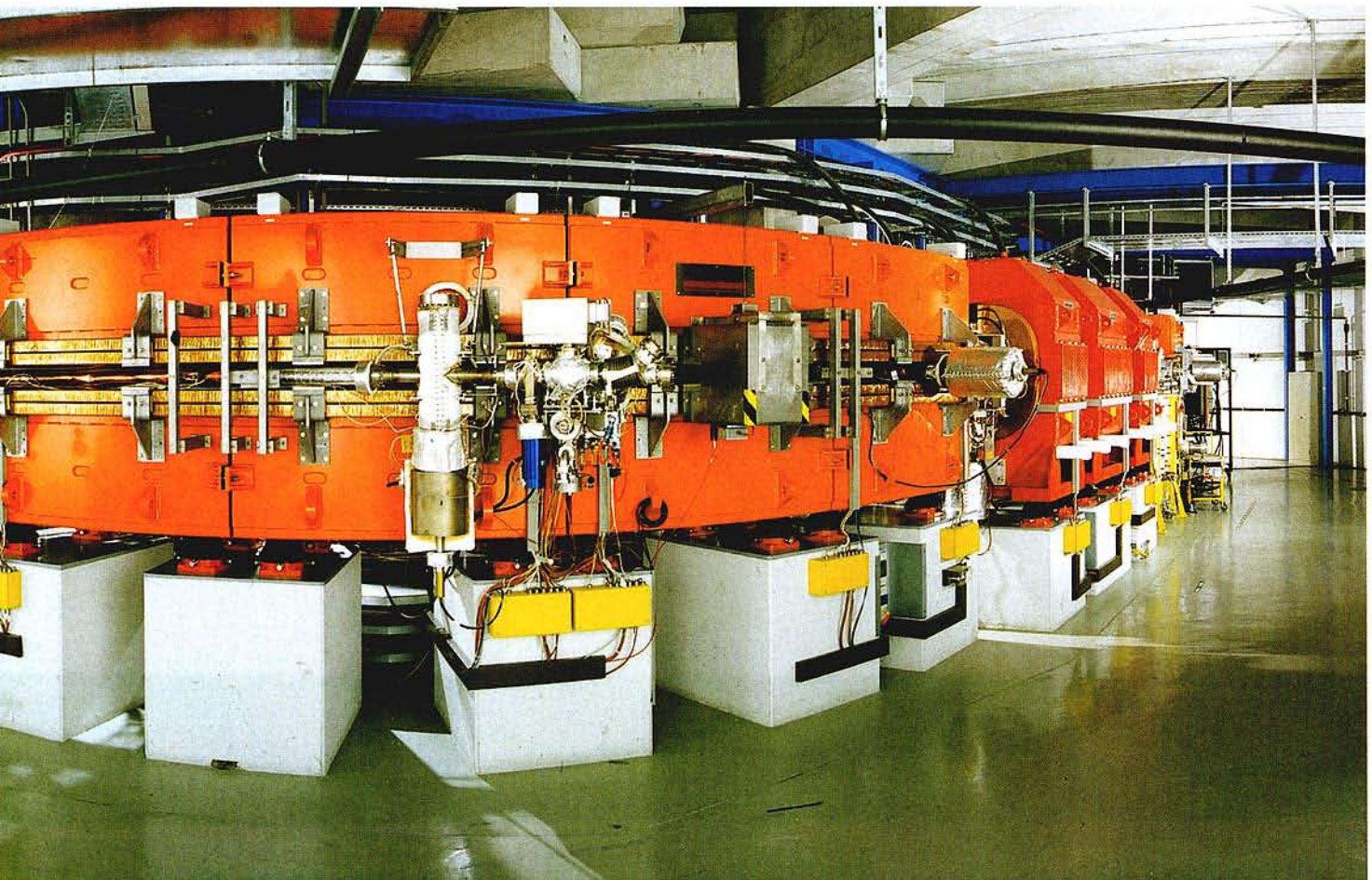
Als er gefragt wurde, was die erstaunlichste Entdeckung des 20. Jahrhunderts sei, zögerte der Physiker Werner Heisenberg keinen Augenblick. Nach seiner Ansicht



Utz Thimm ist Redakteur in der Pressestelle.

Schwerionen-speicherring

Foto: Achim Zschau, Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI)



war es die Vorhersage und Entdeckung von Antimaterie in den dreißiger Jahren. Damit hat sich ein Blick in einen Zauberspiegel eröffnet, hinter dem zu jedem Teilchen in dieser Welt ein Antiteilchen erscheint, das in vielen seiner Eigenschaften ein Spiegelbild ist. Berühren sich Materie und Antimaterie, verschwinden ihre Eigenschaften, und sie lösen sich in einem Blitz von Gammastrahlung auf.

Mit Antiteilchen stehen die Physiker inzwischen auf vertrautem Fuß, doch war lange Zeit offen, ob sich aus ihnen auch ganze Anti-Atome bauen lassen. Eigentlich müßte sich analog zum Periodensystem der Elemente ein ganzes Anti-Periodensystem mit Anti-Elementen konstruieren lassen. Anfang 1996 war der erste Schritt getan: Physikern gelang es bei CERN in Genf, einige Atome Anti-Wasserstoff herzustellen, was sogar der „Tagesschau“ eine Meldung wert war, die sich sonst selten als Publikationsorgan für Ereignisse aus der Welt der Atomphysik hervortut.

Wie schon erwähnt, ist Wasserstoff das einfachste denkbare Atom aus einem Proton und einem Elektron. Das Anti-Teilchen zum Elektron ist das Positron, das – wie der Name schon sagt – spiegelbildlich

zum Elektron eine positive Ladung trägt. Positronen entstehen beim Zerfall mancher radioaktiver Substanzen, was in der Medizin zum Beispiel für die Positronenemissionstomographie (PET) ausgenutzt wird, mit der die Hirn- oder Herzfunktion untersucht werden kann. Sobald die emittierten Positronen im Gewebe auf Elektronen treffen, vernichten sie einander und Gammastrahlung entsteht, die von einem PET-Scanner aufgenommen wird. Das Anti-Teilchen zum Proton ist das Anti-Proton. Am CERN wird es erzeugt, indem ein Protonenstrahl auf einen Iridiummetallblock gelenkt wird. Wenn die Kollisionsenergie der Protonen hoch genug ist, entstehen neue Teilchen, und nach den Gesetzen der Physik bestehen sie zu gleichen Teilen aus Materie oder Antimaterie. So lassen sich aus den Trümmern der Kollision auch Anti-Protonen gewinnen.

Wie bastelt man daraus Anti-Wasserstoff? Und warum ist der für die Physiker eigentlich so interessant? Mit Anti-Wasserstoff lassen sich grundlegende physikalische Theorien testen, zum Beispiel sollte er sich nicht in der Art von normalem Wasserstoff unterscheiden, wie er Licht absorbiert und emittiert. Auch müßte er im Gravitationsfeld der Erde

eigentlich genauso nach unten fallen wie gewöhnliche Materie. Wenn Anti-Wasserstoff allerdings „nach oben fällt“, haben die Theoretiker ein Problem, weil dann am physikalischen Theoriegebäude etwas nicht stimmt. Die Produktion von Anti-Wasserstoff entspringt also keinem Spieltrieb, sondern ist Voraussetzung für einen der empfindlichsten Tests für die Richtigkeit unserer Theorien von der Beschaffenheit der Welt.

Anders als im CERN-Experiment braucht man für die Testuntersuchungen mehr als nur einige wenige Anti-Atome und die müssen möglichst niedrige Geschwindigkeit besitzen, damit sie nicht innerhalb von Mikrosekunden, wie am CERN, aus der Meßapparatur verschwinden können. Als aussichtsreichste Methode wird die Anlagerung von Positronen an Anti-Protonen in einer magnetischen Falle bei ganz niedrigen Energien angesehen. Dies geschieht in der gleichen Weise, wie die Rekombination von Protonen und Elektronen in einem Speicherringkühler. Die Erfahrungen der Gießener Atomphysiker mit der Ion-Elektron-Rekombination bilden dabei eine wichtige Grundlage für die weitere technische Entwicklung zum Studium des Anti-Wasserstoffs. •