

Auf der Suche nach dem Innersten der Welt

HIC for FAIR schafft Grundlagen für ein einmaliges Forschungszentrum

Von Christian Fischer, Claudia Höhne, Volker Metag, Ulrich Mosel, Alfred Müller und Christoph Scheidenberger



Wissenschaftler am zukünftigen internationalen Forschungszentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) in Darmstadt untersuchen in aufwendigen Experimenten die Eigenschaften der innersten Bausteine der Materie. Das von der Hessischen Landesregierung im Rahmen der Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz (LOEWE) geförderte Exzellenzzentrum „HIC for FAIR“ (Helmholtz International Center for FAIR) macht die Physiker der Justus-Liebig-Universität Gießen zu wichtigen Partnern in dem weltweit einmaligen Projekt auf der Suche nach der elementaren Struktur der Materie.

Wasser, Feuer, Erde und Luft sind die vier Elemente, die der griechische Naturphilosoph Empedokles im 5. Jahrhundert v. Chr. als Grundbausteine der Welt vorgeschlagen hat. Freilich basierten seine Theorien zur Struktur der Materie noch auf rein gedanklichen Überlegungen und konnten nicht durch Experimente abgesichert werden. Heute wissen wir, dass die Struktur der Materie noch um ein Vielfaches komplizierter ist, als das, was sich Empedokles in seinen kühnsten Träumen wohl hätte vorstellen können. Aus den vier klassischen Elementen sind inzwischen 112 bekannte und international in der Gemeinschaft der Naturwissenschaftler anerkannte chemische Elemente geworden, deren Atome ihrerseits wiederum aus elementaren Teilchen aufgebaut sind. Im so genannten Standardmodell der Elementarteilchenphysik gibt es zwölf verschiedene Teilchensorten, die auf einander vier verschiedene Arten von Kräften ausüben können.

Das internationale Forschungszentrum FAIR

Eine dieser Kräfte, die starke Wechselwirkung, steht im Mittelpunkt der Forschungsaktivitäten des zukünftigen internationalen Forschungszentrums FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) in Wixhausen bei Darmstadt. Besondere Beachtung finden aber auch die elektromagnetische und

die schwache Wechselwirkung. Der Bau der Anlage wurde 2011 begonnen und wird etwa acht Jahre intensiver Arbeit in Anspruch nehmen. In unterirdischen Tunnels entsteht dabei ein Komplex von ringförmigen Teilchenbeschleunigern, deren größter einen Umfang von etwa 1.100 Metern haben wird. Zusammen mit mehreren turnhallengroßen Experimentiereinrichtungen, mit seinen zahlreichen Labors und Büroräumen wird FAIR weltweit eine der größten Einrichtungen für physikalische Grundlagenforschung sein.

Etwa 3.000 Wissenschaftler aus aller Welt werden hier ständig arbeiten und physikalischen Fragestellungen nachgehen, die sonst nirgendwo erforscht werden können. Dabei soll unter anderem geklärt werden, was genau in den ersten Mikrosekunden nach dem Urknall passiert ist, wie das Innere von Neutronensternen aussehen könnte, wie die chemischen Elemente im Universum entstanden sind, wie die kleinsten Teilchen im Inneren des Atomkerns, die Quarks, zusammenhalten und woher die Materie ihre Masse bekommt. Die Fragen, die hier beantwortet werden sollen, betreffen aber auch den Aufbau der Stoffe in unserer täglichen Umgebung und die Auswirkungen atomarer Strukturen und Vorgänge auf die komplexe Welt technischer Materialien, lebender Zellen und Organismen bis hin zu der in den Weiten des Universums verteilten gasförmigen und teilweise ionisierten, d.h. elektrisch geladenen, Materie.

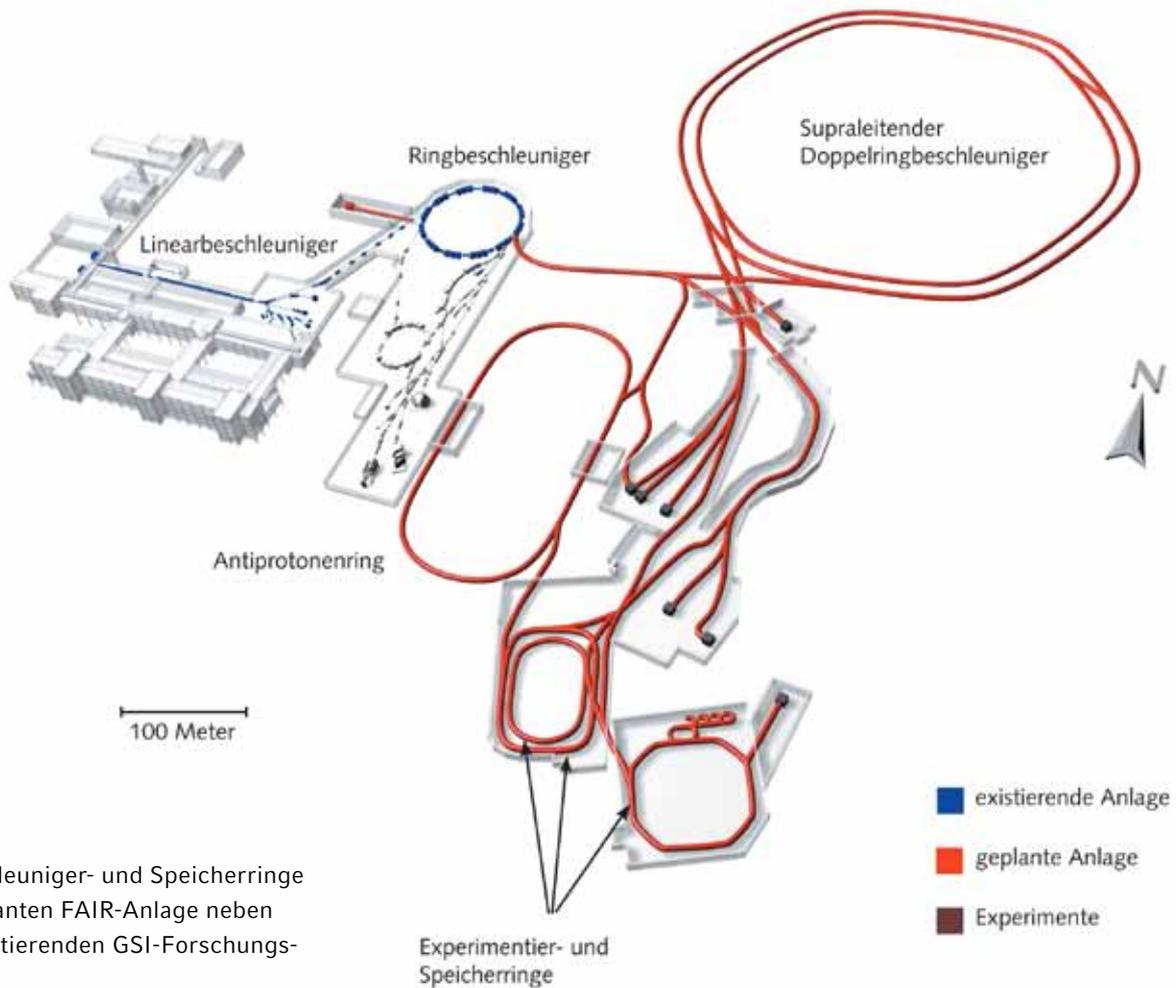
■ Die geplante Forschungsanlage FAIR neben den Gebäuden des GSI Helmholtzzentrums im Forst von Wixhausen bei Darmstadt.

Quelle: FAIR GmbH/GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Die FAIR-Beschleunigeranlage

Der neue Beschleunigerkomplex FAIR wird Ionen und Antiprotonenstrahlen in bisher unerreichter Intensität und Qualität liefern. Damit werden Experimente durchführbar, die sonst in dieser Art nirgendwo auf der Welt möglich sind. Als Quelle der Teilchen dient der bisher für das GSI-Forschungszentrum verwendete Beschleuniger UNILAC. Das Herzstück der neuen Anlage bildet ein großer Doppelringbeschleuniger mit 1100 Metern Umfang (SIS100), der in 24 Meter Tiefe unterirdisch verläuft. Eine technische Besonderheit in Darmstadt wird die Kühlung der Teilchenstrahlen sein. Sie sorgt dafür, dass die Teilchen mit nahezu

gleicher Geschwindigkeit fliegen, so dass besonders exakte Messungen möglich sind. Die Intensität der Teilchenstrahlen wird bis zu 10.000-mal höher sein als bei irgendeinem anderen Beschleuniger weltweit. FAIR wird rund 3.000 Wissenschaftlern, davon etwa die Hälfte aus dem Ausland, einzigartige Forschungsmöglichkeiten bieten. Hessische Hochschulen, und hier insbesondere auch ihre Doktoranden, haben durch HIC for FAIR die Chance, ganz vorne in der internationalen Spitzenforschung mitzuarbeiten.



■ Beschleuniger- und Speicherringe der geplanten FAIR-Anlage neben dem existierenden GSI-Forschungszentrum.

Quelle: FAIR GmbH/GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Die Beantwortung dieser Fragen erfordert Experimente, an deren Planung Hunderte von Wissenschaftlern beteiligt sind, deren Durchführung Jahre präziser Vorarbeit vorausgehen und für deren Auswertung die schnellsten und größten Rechneranlagen benötigt werden, um aus einer gigantischen Flut von Daten diejenigen heraus zu suchen, die neue Erkenntnisse versprechen. Die Antworten, die FAIR liefern wird, berühren zentrale naturwissenschaftliche Fragestellungen wie z.B. die nach der Entstehung unseres Universums und der Erzeugung von Masse. Zudem werden zahlreiche Anwendungen und Durchbrüche in benachbarten Forschungsfeldern wie der Materialwissenschaft und der Biomedizin erwartet.

Dabei kann kein Land alleine ein solch riesiges Projekt stemmen: Ein Großprojekt wie FAIR erfordert die Zusammenarbeit von Wissenschaft und Politik über die Landesgrenzen hinaus. Im Oktober 2010 haben neun Staaten ein völkerrechtliches Abkommen zur Errichtung von FAIR unterzeichnet. Neben der Bundesrepublik Deutschland sind dies Finnland, Frankreich, Indien, Polen, Rumänien, Russland, Schweden und Slowenien. Der Bund und das Land Hessen übernehmen dabei etwa drei Viertel der Kosten der Anlage von insgesamt mehr als einer Milliarde Euro.

Die Vorbereitungen für das Projekt haben längst begonnen. An zahlreichen Forschungseinrichtungen und Universitäten weltweit arbeiten Forscher an Plänen, Prototypen und Vorversionen der geplanten Experimentiereinrichtungen an FAIR und simulieren das komplexe Zusammenspiel von Teilchenstrahlen und Materie. Dies ist nötig, um die technischen Anforderungen für das Projekt zu erfüllen, die meist jenseits all dessen angesiedelt sind, was bisher geleistet werden konnte.

Hessische Exzellenz

FAIR ist eine einmalige Chance für die hessischen Universitäten, verlangt doch ein solch gigantisches Projekt unbedingt auch die Konzentration von Wissen, Know-How und Ressourcen vor Ort. Ziel der hessischen Universitäten ist es deswegen, hierbei eine international führende Rolle einzunehmen. Unterstützt werden sie da-

bei vom Land Hessen im Rahmen der Exzellenzinitiative LOEWE (Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz): Das Zentrum „Helmholtz-International Center for FAIR“ (HIC for FAIR) soll die Kompetenzen der Universität Gießen, der Universität Frankfurt, der Technischen Universität Darmstadt und des Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS) bündeln und die



Gemeinsam in Hessen international an der Spitze

Mit dem Helmholtz International Center für FAIR wurde eine Ideenschmiede für das größte Projekt der physikalischen Grundlagenforschung in Europa, FAIR bei Darmstadt, ins Leben gerufen. HIC for FAIR wurde 2008 im Rahmen der hessischen LOEWE-Initiative gegründet, die Fördersumme über sechs Jahre beläuft sich auf knapp 35 Millionen Euro. Partnerinstitutionen sind die Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt (federführend), die Justus-Liebig-Universität Gießen, die Technische Universität Darmstadt, das Frankfurt Institut for Advanced Studies (FIAS), das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung und die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren.

Gießener Arbeitsgruppen in HIC for FAIR:

Theoretische Teilchen-, Hadronen- und Kernphysik

- Prof. Dr. Dr. Wolfgang Cassing
- Prof. Dr. Christian Fischer
- Prof. Dr. Horst Lenske
- Prof. Dr. Ulrich Mosel

Experimentelle Teilchen-, Hadronen- und Kernphysik

- Dr. Iris Dillmann
- Prof. Dr. Michael Düren
- Prof. Dr. Dr. h.c. Hans Geissel
- Prof. Dr. Claudia Höhne
- Prof. Dr. Wolfgang Kühn
- Prof. Dr. Volker Metag
- Prof. Dr. Christoph Scheidenberger

Experimentelle Atomphysik

- Dr. Saskia Kraft-Bermuth
- Prof. Dr. Alfred Müller
- Prof. Dr. Stefan Schippers

gemeinsamen Aktivitäten im Hinblick auf FAIR konzentrieren. Dafür stehen Fördergelder von knapp 35 Millionen Euro verteilt auf sechs Jahre zur Verfügung. Durch die Schaffung von zahlreichen neuen Professuren, Mittel für die Graduiertenförderung, Stellen für Gastwissenschaftler aus aller Welt und Gelder für gemeinsame internationale Konferenzen werden die Weichen für eine erfolgreiche führende Beteiligung an FAIR gestellt.

Von den knapp 30 neuen Professuren mit Ausrichtung auf die FAIR-Wissenschaft aber auch auf die Beschleuniger- und Materialphysik konnten dabei bereits nahezu alle mit international hochkarätigen Wissenschaftlern besetzt werden; die restlichen Stellen werden voraussichtlich in den nächsten Monaten zur Berufung anstehen. Auch die Nachwuchsförderung ist ein wesentliches Element in HIC for FAIR. Zahlreiche Doktoranden werden im Rahmen von Stipendien gefördert und können sich im Verbund der international ausgerichteten Helmholtz-Graduiertenschule ‚HGS-HIRe for FAIR‘ (Helmholtz Graduate School for Hadron and Ion Research) mit ihren Kollegen aus Darmstadt, Frankfurt, Gießen, Heidelberg und Mainz kurzschließen, um gemeinsam an FAIR-relevanten Themen zu forschen. Mit einem reichen Programm an Workshops, Lecture-Weeks und weiteren Angeboten ist die Schule richtungsweisend für eine strukturierte Doktorandenausbildung. HIC for FAIR bietet somit den jungen Wissenschaftlern die Gelegenheit, sich in einer internationalen Umgebung zu profilieren und somit in die weltweite Gemeinschaft von Grundlagenforschern hineinzuwachsen. Auch bereits promovierte Nachwuchswissenschaftler und -wissenschaftlerinnen werden von HIC for FAIR besonders gefördert, z.B. durch die Bildung und Unterstützung von Nachwuchsgruppen. Für Wissenschaftlerinnen gibt es

ein spezielles Förderprogramm, und Dual-career-Optionen ermöglichen familienfreundliches wissenschaftliches Arbeiten.

Im Zentrum der Forschungsaktivitäten von HIC for FAIR steht die Arbeit am Verständnis der starken Wechselwirkung der fundamentalen Bausteine unserer Materie. Sie ist eine der vier bekannten Kräfte in unserem Universum und zusammen mit der schwachen Kraft für die Prozesse verantwortlich, die unsere Sonne strahlen lassen. Das Licht der Sonne wird durch die Elektromagnetische Wechselwirkung vermittelt, während die gegenseitige Anziehung von Sonne und Erde auf die Gravitations-Kraft zurückgeht. Zusammen können durch starke, schwache, elektromagnetische und die Gravitations-Kraft alle bekannten Phänomene der Physik beschrieben werden. Allerdings sind einige der spannendsten Aspekte dieser Kräfte weitgehend ungeklärt. Besonders gilt dies für die starke Wechselwirkung, aber auch die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung. Diese – sowie in Zukunft vielleicht auch die Gravitation – sind Gegenstand des Forschungsprogramms von HIC for FAIR.

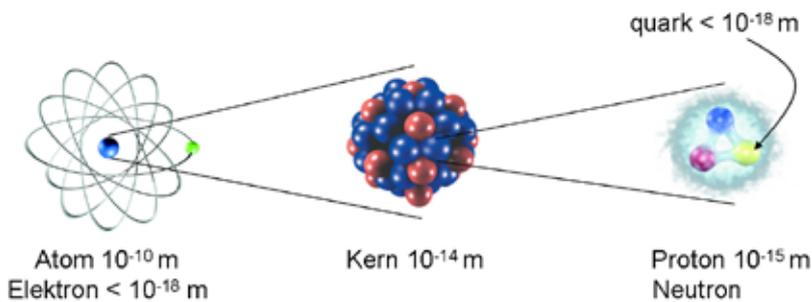
„Was die Welt im Innersten zusammenhält“

Die starke Kraft beschreibt die Wechselwirkung der fundamentalen Bausteine unserer Materie. Diese besteht aus Atomen mit einem Kern aus Protonen und Neutronen. Diese Kernbausteine bestehen wiederum aus je drei Quarks, die untereinander so genannte Gluonen austauschen (siehe Abb. 1). Die Gluonen (aus dem Englischen „glue=Klebstoff“) binden die Quarks zusammen; sie sind die Überträger der starken Wechselwirkung. Diese Bindung ist so stark, dass weder Quarks noch Gluonen aus den Protonen und Neutronen entfernt werden können. Damit begegnet uns zum

ersten Mal in der Naturwissenschaft ein physikalisches System aus Teilbausteinen, die wir prinzipiell *nicht* isolieren können. Diese überraschende Eigenschaft der starken Wechselwirkung wird als „Confinement“ bezeichnet nach dem englischen Wort „confined=eingesperrt“. Der genaue Mechanismus des Confinement ist noch nicht verstanden und wird zurzeit anhand verschiedenster Methoden untersucht. Interessant sind die Auswirkungen des Confinements auf das Experiment: Letztlich beobachtbar sind nicht die fundamentalsten Bausteine der Natur, Quarks und Gluonen, sondern zusammengesetzte komplexe Systeme aus drei Quarks oder aus je einem Quark und einem Antiquark, die so genannten Hadronen. Dabei sind die bekanntesten Hadronen die Protonen und Neutronen des Atomkerns.

Ebenso im Detail unverstanden ist der zweite zentrale Mechanismus der starken Kraft: die Erzeugung eines großen Teils der Massen derjenigen Quarks, aus denen die Protonen und Neutronen bestehen. In diesen ist nahezu die komplette Masse jedes Atoms konzentriert. Wenn wir also klären wollen, woher die Materie um uns herum ihre Masse bekommt, müssen wir verstehen, wie die starke Wechselwirkung die Massen der Quarks aus reiner Energie erzeugt („dynamische Massenerzeugung“). Auch wenn wir seit den Arbeiten von Yoishiro Nambu (Nobelpreis für Physik 2008) im Prinzip wissen, wie dies funktioniert, sind entscheidende Details noch ungeklärt.

Confinement und dynamische Massenerzeugung der Quarks sind Eigenschaften stark-wechselwirkender Materie, wie sie bei normalem Druck und Temperatur in Atomkernen auftreten. Beim Aufheizen oder Komprimieren dieser Kernmaterie zeigt sich aber, dass bei genügend hohen Temperaturen und Drücken ein relativ abrupter Übergang zu einer neuen Zustands-



■ **Abb. 1: Vom Atom zum Quark:**
Im Zentrum eines jeden Atoms befindet sich der Atomkern, der aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt ist. Jedes Proton und Neutron besteht wiederum aus drei Quarks, den fundamentalen Bausteinen der Materie.

form stark-wechselwirkender Materie zu erwarten ist. Diese Zustandsform wird als Quark-Gluon-Plasma bezeichnet und ist dadurch charakterisiert, dass die oben diskutierten fundamentalen Eigenschaften Confinement und dynamische Massenerzeugung verschwunden sind. Eine genauere Kenntnis der Details dieser so genannten Deconfinement- und chiralen Phasenübergänge zwischen den beiden Zustandsformen stark-wechselwirkender Materie fehlt bisher. Dabei ist dieser Übergang überaus interessant, hat er doch wesentlichen Anteil daran, dass unser Universum heute so aussieht, wie wir es kennen. Denn genau diese Phasenübergänge spielen eine entscheidende Rolle in der Entwicklung unseres Universums in den ersten Mikrosekunden nach seiner Entstehung, für das Verständnis des Kerns von Neutronensternen und nicht zuletzt für die Erklärung, woher die Materie ihre Masse bekommt.

Den spannenden Fragen auf der Ebene der elementaren Bausteine der Materie stehen die Rätsel der komplex zusammengesetzten Welt unserer

täglichen Erfahrung gegenüber. Hier wirken typischerweise ungeheure Mengen an Atomen bei der Realisierung von Vorgängen auf einer höheren Ebene, wie etwa bei biologischen Prozessen, zusammen. Zwar ist die elektromagnetische Wechselwirkung zweier geladener Teilchen seit langem bekannt, wie aber diese Wechselwirkung die Organisation von Atomen beispielsweise in Nanomaterialien oder in großen Biomolekülen und deren Zusammenwirken bei der Entstehung eines Individuums mit Hundert Billionen Zellen steuert, das ist noch völlig unverstanden.

Voraussetzung für unser Verstehen komplexer Vorgänge und Strukturen ist die Erforschung der elektromagnetischen Wechselwirkung in ihrer Auswirkung auf zusammengesetzte einfache Systeme wie Atome und Moleküle. An FAIR werden in diesem Zusammenhang vor allem Auswirkungen extremer elektromagnetischer Felder auf die Struktur und Dynamik von Atomen bzw. ihrer Ionen studiert (Ionen sind Atome, an die entweder zusätzliche Elektronen angelagert wurden bzw. denen Elektronen entrissen wurden und die deswegen elektrisch negativ bzw. positiv geladen sind).

HIC for FAIR in Gießen

An der Justus-Liebig-Universität hat die Arbeit an den beschriebenen Fragestellungen schon eine lange und erfolgreiche Tradition. Zwölf von 22 Physik-Professoren forschen auf diesem

Spezialgebiet. Weitere Verstärkung gibt es durch zwei von der Helmholtz-Gemeinschaft und der DFG geförderte Nachwuchsgruppen, „Tiefemperatur-Detektoren“ und „LISA-Lifetime Spectroscopy for Astrophysics“, die von jungen Wissenschaftlerinnen geleitet werden. All dies geschieht in enger Zusammenarbeit zwischen Theorie und Experiment. Neben vielen Diskussionen auf den Gängen der Institute findet dabei regelmäßiger wissenschaftlicher Austausch auch im gemeinsamen Kolloquium statt, in dem hochrangige Kollegen aus dem In- und Ausland über ihre Resultate berichten.

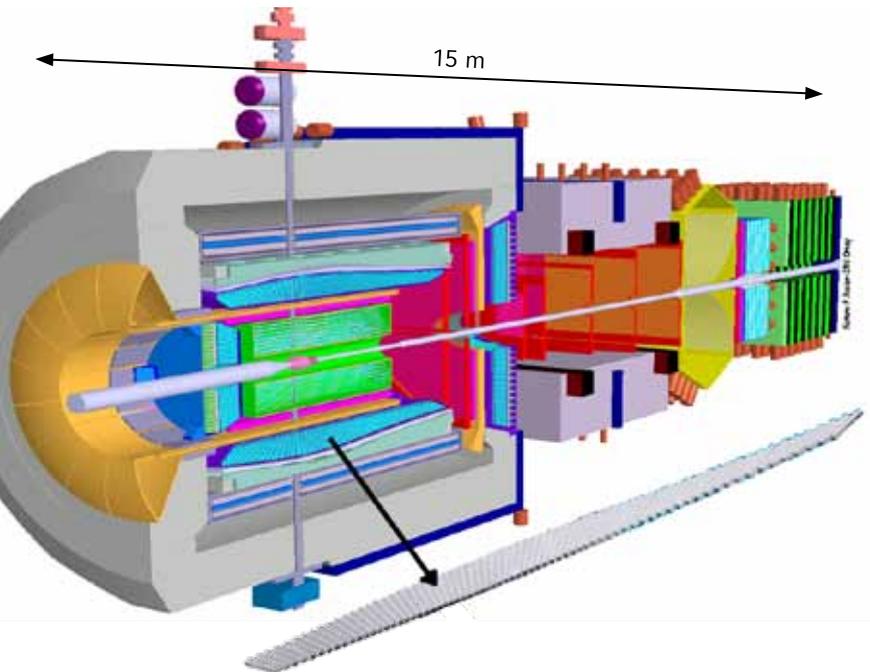
Im Rahmen der Graduiertenschule HGS-HIRE tauschen sich die Doktoranden mit ihren Kollegen an den Nachbaruniversitäten aus und tragen so zur Vernetzung der HIC for FAIR-Partner bei. Schließlich profitieren auch die Studierenden der Universität Gießen nicht nur vom erweiterten Lehrangebot, das durch die neuen HIC for FAIR-Professuren möglich gemacht wird, sondern auch von der innovativen und inspirierenden Forschungsumgebung an den Instituten der Gießener Physik rund um FAIR. Die fruchtbare Zusammenarbeit von Theorie und Experiment ist hierbei essentiell, um die noch unverstandenen aber grundlegenden Eigenschaften der stark-wechselwirkenden Materie zu verstehen. Gießener Forscher arbeiten an theoretischen Grundlagen und entwickeln und bauen Kernstücke der zwei größten FAIR-Experimente, des PANDA-Detektors (Anti-Proton-ANnihilation in DArmstadt) und des CBM-Experiments (Compressed Baryonic Matter). Sie sind zudem an den großen internationalen Kollaborationen NuSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions) und APPA (Atomic, Plasma Physics and Applications) maßgeblich beteiligt.

Im Institut für Theoretische Physik lösen die Forscher mit Hilfe aufwendiger Computersimulationen an den Gie-

ßener Hochleistungs-Rechenclustern „Skylia“ und „Lion“ die Bewegungsgleichungen der Theorie der starken Wechselwirkung und machen die Ergebnisse zum Verständnis der Eigenschaften der starken Kraft fruchtbar. Hierbei berechnen sie nicht nur die Eigenschaften der Quarks und Gluonen, sondern insbesondere auch die daraus resultierenden Eigenschaften gebundener Systeme wie Protonen, Neutronen oder Hadronen mit noch exotischerer Zusammensetzung. Besonders spannend ist die Frage, wie sich diese Teilchen nun z.B. verhalten, wenn sie sich in der oben erklärten Quark-Gluon-Materie befinden.

Die zugehörigen Simulationen erfordern die Entwicklung neuer Methoden und Modelle, die zum Verständnis der starken Kraft hilfreich sind. Die Gießener Wissenschaftler blicken auf langjährige Erfahrungen in diesem Gebiet zurück und bereiten realistische Modellsysteme vor, mit deren Hilfe sie die Phasenübergänge simulieren können und dabei im Rechencluster des Instituts den Zustand der Materie nachstellen, wie er etwa im frühen Universum vorgeherrscht hat. Die Bildung von Atomkernen und die Vielteilchendynamik von Nukleonen und Kernteilchen mit anderer innerer Zusammensetzung, wie z.B. Hyperonen, werden mit der nuklearen Dichtefunktionaltheorie untersucht. Die Ergebnisse der vielseitig anwendbaren numerischen Rechnungen werden auch in Analysen der Experimente benutzt. Sie dienen dem Verständnis der Reaktionsdynamik von kurzlebigen, so genannten exotischen Atomkernen in der Elementsynthese in stellaren Prozessen und der Physik der Neutronensterne.

Ihre Kollegen aus der Experimentalphysik bereiten mit ihren Arbeitsgruppen die geplanten Experimente an FAIR vor. Für diese werden in internationaler Zusammenarbeit hochkomplexe Mess- und Präparati-



onsverfahren, Messapparaturen und Detektoren entwickelt und gebaut, deren technische Anforderungen meist jenseits dessen liegen, was zu Beginn der Planungen machbar ist. Daher laufen intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten schon seit Jahren, obwohl FAIR und seine Experimente frühestens im Jahr 2018 starten sollen.

Wie lassen sich nun aber die fundamentalen Wechselwirkungen studieren, wie beispielsweise die Massenerzeugung von Quarks oder die Quark-Gluon-Materie messen? Wie oben geschildert sind ja die elementaren Bausteine der Materie, die Quarks und Gluonen, prinzipiell nicht isoliert beobachtbar, sondern nur als komplexe zusammengesetzte Systeme. Extreme Zustände der Materie wie die Quark-Gluon-Materie können im Experiment allenfalls für weitaus weniger als eine Milliardstel Sekunde erzeugt werden, genau gesagt für nur etwa 10^{-23} Sekunden (siehe Kasten „Feuerball und Asche“). Ähnlich wie man mit Röntgenstrahlen jedoch unseren Körper oder andere feste Materie zerstörungsfrei durchleuchten kann, sendet die Quark-Gluon-Materie charakteristische Lichtblitze aus, de-

■ Abb. 2: Schematisches Layout des geplanten PANDA-Detektors. Herausvergrößert ist eine komplette Ebene eines Segments des elektromagnetischen Kalorimeters zu sehen, das in Gießen entwickelt wird.

ren Messung uns erlaubt in das Innere dieser Materie zu blicken. Allerdings treten diese so genannten virtuellen Photonen grundsätzlich sehr selten auf; ungefähr einmal in etwa 1 Million Ereignissen. Auch andere, auf die erzeugte Materie oder auf die Frage nach der Massenerzeugung sensitive Teilchen werden leider nur sehr, sehr selten produziert und leben oft nur so kurz, dass sie selbst bei Lichtgeschwindigkeit nicht weiter fliegen als ein Haar dick ist, bevor sie wieder zerfallen. Die experimentelle Herausforderung ist daher, Beschleuniger und Detektoren zu bauen, die hochpräzises Arbeiten bei so hohen Intensitäten und Messraten erlauben, dass genügend der interessierenden Teilchen detektiert werden können.

Der **PANDA-Detektor** ist ein Musterbeispiel für die komplizierten De-

Feuerball und Asche

Wie können die Eigenschaften von extremen Formen von Kernmaterie untersucht werden?

Zur Erzeugung komprimierter und erhitzter Kernmaterie oder gar der Quark-Gluon-Materie im Labor schießt man zwei große Atomkerne mit sehr hoher Energie aufeinander (siehe Abbildung unten links). In der Kollision wird die Kernmaterie dann kurzzeitig sehr stark komprimiert und/oder erhitzt; je nach Energie der Kerne lassen sich Temperatur und Dichte variieren, und man kann Materieformen wie kurz nach dem Urknall (sehr heiß) oder aber wie im Inneren von Neutronensternen erzeugen (sehr dicht). Diese extreme Form der Materie, der „Feuerball“ (siehe Abbildung unten Mitte), existiert allerdings nur für extrem kurze Zeit, genauer gesagt für etwa 10^{-23} Sekunden. Das ist im Verhältnis zur Dauer einer Sekunde in etwa solange wie eine Millionstel Sekunde im Verhältnis zum Alter des Universums. Dann expandiert das System und kühlt ab. Während dieses Vorganges entstehen Fragmente und kurzlebige Teilchen, sozusagen die „Asche“ des Feuerballs (siehe Abbildung unten rechts).

Im Detektor gilt es nun, die Wege dieser Teilchen, ihre Sorte und Energie möglichst voll-

ständig zu bestimmen. Aus diesen Messungen kann dann mit Hilfe theoretischer Modelle rekonstruiert werden, welche Eigenschaften die extrem verdichtete Materie hatte und welche kurzlebigen Teilchen in dem Feuerball existiert haben könnten. Besondere Bedeutung kommt dabei Messgrößen zu, die den Feuerball möglichst unbeeinflusst durchdringen können: Ein Beispiel dafür sind hochenergetische Lichtblitze, so genannte virtuelle Photonen, die in Elektronen und deren Antiteilchen (Positronen) zerfallen und die Materie durchdringen, ähnlich wie Röntgenstrahlen unsere Körper. Ein anderes Beispiel sind „Charm-Quarks“; diese sind etwa 1000-mal schwerer als die ansonsten erzeugten leichten Quarks und werden deshalb wenig von ihnen beeinflusst. Beiden Messgrößen ist aber gemein, dass sie nur ausgesprochen selten erzeugt werden, etwa einmal in einer Million Ereignissen. Deshalb ist es so wichtig, dass der FAIR-Beschleuniger und die Experimente bei bislang unerreicht hohen Intensitäten und Raten arbeiten können, um genug Statistik zu sammeln.



■ Schematischer Verlauf einer Kollision zweier Atomkerne bei hohen Energien. Die Bilder basieren auf Modellen von Kollegen aus der theoretischen Physik an der Goethe-Universität Frankfurt.

tektoren, die notwendig sind, um zum Beispiel den Mechanismus der Massenerzeugung der Quarks und Hadronen zu entschlüsseln (siehe Abb.2). Nach der Formel $E=mc^2$ aus Einsteins Relativitätstheorie kann Materie zu Energie umgewandelt werden und umgekehrt, Energie zu Materie werden. Wenn Materie mit Antimaterie zusammentrifft, dann vernichten sich beide und zerstrahlen komplett zu Energie. Das soll in PANDA geschehen, wo Strahlen aus Antiprotonen, die in FAIR erzeugt und auf nahezu Lichtgeschwindigkeit be-

schleunigt werden, auf Materie prallen. Die dabei entstehende Energie ist so groß, dass sich sofort wieder exotische Materieteilchen bilden. PANDA dient dazu, diese Teilchen, von denen einige nur winzige Sekundenbruchteile lang existieren, zu beobachten und zu identifizieren.

Dazu verhelfen im elektromagnetischen Kalorimeter von PANDA 16.000 Blei-Wolfram-Kristalle, die in Russland gefertigt werden. Sie umschließen die Stelle, wo die Kollisionen passieren. Fliegen die Teilchen durch die 20cm

langen Kristalle, machen sie sich durch einen schwachen und extrem kurzen Lichtblitz bemerkbar. Durch Photosensoren am Ende der Kristalle werden diese Blitze registriert, Computer werten dies aus und rekonstruieren zusammen mit Informationen von Spurendetektoren die Bahn der Teilchen im starken Magnetfeld, das durch 500 Tonnen schwere Magnete erzeugt wird. Die Bahnkurven der Teilchen sind charakteristisch für ihre Energie und Masse. In Gießen werden alle Kristalle des Kalorimeters vor dem Einbau

DIE AUTOREN

Christian Fischer, Jahrgang 1971, studierte an der Universität Tübingen Physik (Diplom) und Philosophie (Magister). Nach der Promotion (2003) verbrachte er zwei Jahre als Postdoc am Institute for Particle Physics Phenomenology in Durham



(UK) und wurde 2007 als Juniorprofessor und Leiter einer Helmholtz-Nachwuchsgruppe an die TU Darmstadt berufen. Seit 2010 arbeitet er als Professor für Hadronenphysik an der Justus-Liebig-Universität Gießen und ist seit kurzem geschäftsführender Direktor des Instituts für Theoretische Physik. Er arbeitet an theoretischen Problemen der starken Wechselwirkung wie dem Confinement und der Erzeugung der Massen der Quarks sowie den daraus resultierenden Eigenschaften der fundamentalen Bausteine der Materie.

Claudia Höhne, Jahrgang 1974, studierte an der Universität Marburg Physik. Nach der Promotion (2003) mit Forschungsaufenthalten am CERN in Genf (Schweiz) ging sie als Postdoc zum GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darm-



stadt, um das CBM-Experiment an der künftigen Forschungsanlage FAIR vorzubereiten. 2010 wurde sie als Professorin für Experimentalphysik im Bereich Schwerionen- und Hadronenphysik nach Gießen berufen. Ihr Arbeitsgebiet ist die Untersuchung des QCD-Phasendiagramms in ultrarelativistischen Schwerionenkollisionen mit Experimenten an den Beschleunigern am CERN und der GSI/ FAIR. Dafür ist ein zentraler Schwerpunkt der gegenwärtigen Arbeiten die weitere Vorbereitung und der Bau von Detektorkomponenten für das CBM-Experiment.

Volker Metag, Jahrgang 1942, ist geschäftsführender Direktor des II. Physikalischen Instituts der Justus-Liebig-Universität Gießen. Sein zentrales Forschungsfeld ist die Hadronen- und Kernphysik. Er studierte an der TU Berlin und promovierte



an der Universität Heidelberg. Danach war er für mehrere Jahre am Niels Bohr-Institut in Kopenhagen, am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg und an der University of Washington in Seattle/ USA tätig. Seit 1982 ist er Professor für Experimentalphysik in Gießen. Er ist Mitglied verschiedener internationaler Forschungskollaborationen und wissenschaftlicher Beiräte. Von 1993 bis 1998 war er als Forschungsdirektor der GSI an den Vorbereitungen für das FAIR-Projekt verantwortlich beteiligt.

in den Detektor getestet und vermessen. Wichtig ist dabei vor allem, ob sie der starken Partikelstrahlung standhalten, die in dem Detektor erwartet wird. Gießener Forscher haben ein inzwischen patentiertes Verfahren gefunden, Strahlenschäden in den Kristallen während der Messungen durch Infrarotlicht auszuheilen.

Zusammen mit Ergebnissen von anderen Detektoren in PANDA, etwa dem differenzierenden und abbildenden Cherenkov-Zähler DISC DIRC, an dem ebenfalls in Gießen gearbeitet wird,

können die Physiker die Vorgänge beim Aufeinandertreffen von Materie und Antimaterie im Detail rekonstruieren. Weitere Vorarbeiten an PANDA in Gießen umfassen die Entwicklung eines neuartigen Datenerfassungskonzepts, das erlaubt, hohe Ereignisraten zu verarbeiten und gleichzeitig mittels schnellerer front-end-Rechner spezielle seltene Ereignisse, die von besonderem physikalischen Interesse sind, zu identifizieren und zu selektieren.

Das **CBM-Experiment** ist ein weiterer großer Detektor an FAIR und

wird vor allem die Eigenschaften der Quark-Gluon-Materie vermessen. Um diese zu erzeugen, lässt man Atomkerne zentral bei hohen Energien aufeinander prallen. Dabei wird die Kernmaterie soweit verdichtet und erhitzt, dass für etwa 10^{-23} Sekunden Quark-Gluon-Materie erzeugt wird (siehe Info-Kasten „Feuerball und Asche“). Neben den virtuellen Photonen stehen Hadronen mit so genannten „Charm-Quarks“ auf dem Messprogramm. Diese Quarks sind die etwa 1000-mal schwereren Brü-

Ulrich Mosel, Jahrgang 1943, arbeitet am Institut für Theoretische Physik der Justus-Liebig-Universität Gießen. Seine wesentlichen Forschungsarbeiten beschäftigten sich mit Kernstruktur-Physik und Schwerionen-Reaktionen,



bevor er sich der Hadronenphysik zuwandte. Nach dem Studium arbeitete er einige Jahre in den USA; seit 1972 ist er Professor für Theoretische Physik in Gießen. Er war Mitglied verschiedener wissenschaftlicher Beratungsgremien des Bundesforschungsministeriums (BMBF), im Beirat der GSI Darmstadt und Fachkollegiat und Vertrauensdozent der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Gegenwärtig ist er Mitglied des Sonderforschungsbereichs/Transregio TRR 16, der in der Hadronenphysik arbeitet.

Alfred Müller, Jahrgang 1949, studierte an der Universität Gießen Physik. Nach Promotion (1976) und Habilitation (1980) wurde er zum Fellow am Joint Institute for Laboratory Astrophysics in Boulder/USA ernannt. Von einer Professur



in Stuttgart 1995 nach Gießen berufen, führt er mit seiner Arbeitsgruppe am Institut für Atom- und Molekülphysik sowie an auswärtigen Forschungseinrichtungen in Berkeley, Darmstadt, Hamburg und Heidelberg Experimente zur Klärung elementarer Stoßvorgänge in astrophysikalischen und künstlichen Plasmen durch. Als Mitglied des SPARC Collaboration Board ist er besonders an der Forschung mit elektronischen Sonden im Grenzbereich zwischen Atomhülle und Atomkern interessiert.

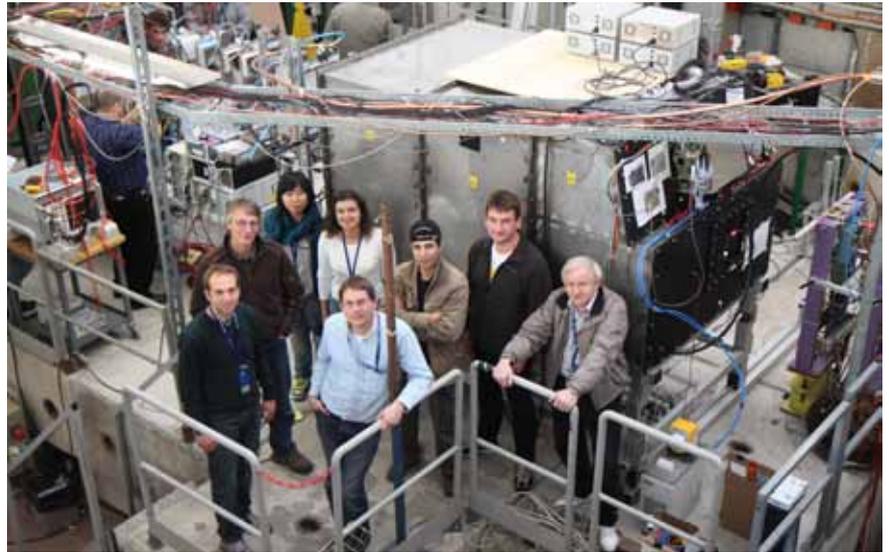
Christoph Scheidenberger, Jahrgang 1963, studierte Physik an der Universität Erlangen, promovierte und habilitierte sich in Gießen. Er verbrachte Forschungsaufenthalte in Oak Ridge (USA), Aarhus (Dänemark) und am CERN in Genf (Schweiz). Bei



der GSI in Darmstadt leitet er den Forschungsschwerpunkt NuSTAR, seit 2007 verknüpft mit einer Professur für experimentelle Kernphysik an der Universität Gießen. Sein Arbeitsgebiet sind atomare und nukleare Reaktionen bei relativistischen Energien und Untersuchungen der Struktur exotischer Kerne. Er befasst sich mit Präzisionsmassenspektrometrie und deren Anwendungen, z.B. in der nuklearen Astrophysik, der Umweltanalytik und der medizinischen Diagnostik. Er ist Mitglied verschiedener Programmkomitees am CERN und in RIKEN (Tokio, Japan).

■ Abb. 3: Das erfolgreiche Forscher-Team beim Testlauf des in Gießen entwickelten CBM-RICH-Detektor-Prototyps am CERN. Der Prototyp entspricht in seiner Länge (2,4 m) bereits dem zu bauenden Detektor, ist in seiner Breite und Höhe aber 20-mal kleiner.

der der Quarks in den Protonen und Neutronen. Ihr Auftreten zusammen mit denjenigen Quarks, mit denen sie Hadronen formen, lässt Rückschlüsse auf die erzeugte Materie zu: Die Charm-Quarks werden immer in Paaren erzeugt, manchmal bilden diese Paare auch einen gebundenen Zustand, das Charmonium. Meist jedoch verbinden sie sich mit einem normalen Quark zu so genannten Open-Charm-Mesonen. Erzeugt man Quark-Gluon-Materie, so sollten alle Charmonium-Zustände schmelzen und nur noch Open-Charm-Mesonen erzeugt werden. Das Charmonium zerfällt wie die virtuellen Photonen gleich in ein Elektron und sein Antiteilchen, das Positron. Um diese zu messen, wird in Gießen federführend ein großer RICH-(Ring Imaging Cherenkov)Detektor gebaut. Da allerdings das Charmonium wie auch die virtuellen Photonen nur etwa in einer von einer Million Ereignissen erzeugt werden, in jeder Kollision aber Hunderte von Elektronen und etwa Tausend Hadronen, muss dieser Detektor ausgesprochen sauber und präzise arbeiten. Daher haben die Gießener Wissenschaftler dank HIC for FAIR mit ihren Kollegen von anderen Instituten einen kleineren Testdetektor gebaut (siehe Abb. 3), um im Vorfeld die Eigenschaften des RICH-Detektors bis ins kleinste Detail verstehen zu können. Der RICH-Detektor wird aus den tausend Hadronen pro Kollision die Elektronen heraus sortieren können; wie auch in PANDA muss



aber die komplette Flugbahn der Teilchen vermessen werden. Dafür wird in CBM nur wenige cm hinter dem Kollisionspunkt ein Silizium-Detektor eingebaut, der wie in einem dreidimensionalen Film die Spuren der Teilchen misst. Kollegen von der Goethe-Universität Frankfurt haben dafür die von Digitalkameras bekannten Sensoren umfangreich überarbeitet, so dass 100.000 Bilder pro Sekunde aufgenommen werden können.

Mit solch einer Kombination aus Detektoren zur Rekonstruktion der einzelnen Flugbahnen sowie der Teilchenidentifizierung lassen sich dann alle Fragmente der erzeugten Materie aufspüren – und die Physiker können enträtseln, was geschah.

Die **NuSTAR-Kollaboration** erforscht Eigenschaften, Struktur und Dynamik von Atomkernen sowie den Ursprung und die Synthese der chemischen Elemente und ihrer Isotope (Isotope sind die leichteren oder schwereren Atomkerne desselben Elements, die die gleiche Anzahl von Protonen besitzen, sich aber in der Anzahl der Neutronen unterscheiden). Auf der Erde findet man etwa 300 unterschiedliche stabile Atomkerne, aus denen die Welt und alle Lebewesen aufgebaut sind. Insgesamt kennt man heute viel mehr, nämlich unge-

fähr 3.000 instabile Kerne, und man vermutet die Existenz von insgesamt etwa 6.000 Isotopen, die durch radioaktiven Zerfall in stabile Atomkerne übergehen können. Dies führt zu einer der zentralen Fragestellungen der NuSTAR-Kollaboration: In welchen Zusammensetzungen von Protonen- und Neutronenzahlen können Kerne vorkommen? Welche Kerne existieren überhaupt und warum? Welche neuen Eigenschaften besitzen diese sehr instabilen, „exotischen“ Kerne? Wo liegen die Grenzen der Stabilität? Aus Sicht der physikalischen Grundlagenforschung bieten die exotischen Kerne ein reiches Feld neuer Phänomene und Eigenschaften, die bei stabilen Kernen nicht bekannt sind.

Man weiß heute, dass – abgesehen von den leichtesten Elementen Wasserstoff, Helium und Lithium, die wenige Minuten nach dem Urknall in der so genannten primordialen Nukleosynthese entstanden sind – die meisten chemischen Elemente im Inneren von Sternen oder in Sternexplosionen gebildet wurden. Daher kommt die Erkenntnis, dass unser Sonnensystem und letztlich wir selbst aus „Sternenstaub“ bestehen. Dies führt zu einem weiteren Fragenkomplex: Welche Kernreaktionen laufen bei der Elementsynthese ab? Wel-

che Rolle spielen dabei die instabilen Kerne? Können wir die beobachteten Elementhäufigkeiten, z.B. in unserem Sonnensystem oder in den besonders metallarmen Sternen in der weiteren Umgebung unserer Milchstraße verstehen? Bisher gibt es nur ein qualitatives und grobes quantitatives Verständnis der Elementsynthese, denn die Prozesse sind im Detail noch weitgehend ungeklärt.

Der NuSTAR-Forschungsschwerpunkt zielt auf die Beantwortung dieser Fragen der modernen Kern- und Astrophysik, und die internationale NuSTAR-Kollaboration entwickelt theoretische und experimentelle Methoden und Instrumente, die bei FAIR zum Einsatz kommen werden. Die Gießener Arbeitsgruppen sind dabei federführend an Auslegung und Konstruktion des SuperFRS, dem zentralen NuSTAR-Experimentiergerät, beteiligt (siehe Abb. 4). Der SuperFRS ist ein supraleitendes hochauflösendes Spektrometer, mit dem exotische Kerne in nie da gewesener Vielfalt und Intensität, bis hin zu den Grenzen der Existenz, erzeugt und untersucht werden können.

Ein weiterer Gießener Schwerpunkt ist die Massen- und Zerfallsspektroskopie, für die spezielle Nachweisgeräte und neue Methoden entwickelt werden. Aus den Ergebnissen dieser

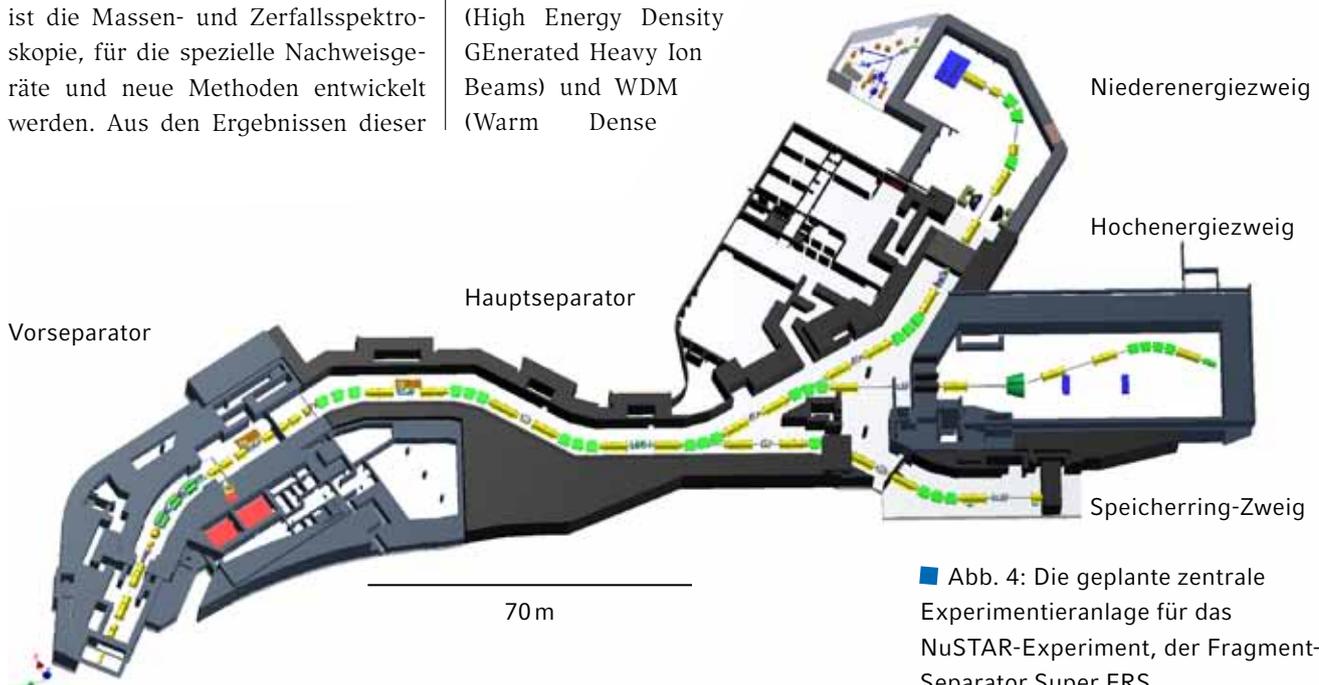
Experimente können Details der Nucleosynthese und insbesondere die Häufigkeitsverteilung schwerer Elemente wie Gold, Blei und Uran extrahiert werden.

Somit wird NuSTAR viele neue Phänomene und Eigenschaften exotischer Kerne aufspüren und auf mikroskopischer Ebene Wissen liefern, welches dazu beiträgt, den makroskopischen Kosmos besser zu verstehen.

Die **APPA**-Initiative vereint internationale Forscher-Teams, denen wichtige fundamentale und anwendungsorientierte Fragestellungen aus Bereichen außerhalb der reinen Hadronenphysik am Herzen liegen. Hierzu gehört das Studium von Strahleneffekten auf biologische Systeme unter anderem mit dem Ziel, die Schwerionentherapie von Krebspatienten weiter zu verbessern. Unter Nutzung der großen Beschleuniger von FAIR wird eine Bestrahlungsanlage eingerichtet (BIOMAT: High-energy irradiation facility for BIOphysics and MATerials Research), die auch das Studium neuer Materialien für die Technik und Grundlagenforschung mit neuen Strahlungsquellen ermöglicht. Die HEDgeHOB (High Energy Density Generated Heavy Ion Beams) und WDM (Warm Dense

Matter)-Kollaborationen befassen sich mit dem vierten Aggregatzustand der Materie, dem Plasmazustand, wie er im Inneren von Sternen und schweren Planeten vorliegt. Sie verwenden für ihre Studien neben den Schwerionenstrahlen von FAIR auch einen Hochenergie-Laser mit Kurz-Zeit-Leistungen im Bereich von Petawatt (eine Million mal höher als die Leistung eines normalen Kernkraftwerks). Das dritte Standbein von APPA ist FLAIR (Facility for Low Energy Antiproton Ion Research). Die damit verbundene Kollaboration untersucht unter anderem die Wechselwirkung von Materie und Antimaterie und wird z.B. Antiwasserstoff in bisher unerreichten Mengen erzeugen und mit größter Präzision dessen atomare Energiezustände studieren. Damit lassen sich fundamentale Symmetrien der Natur entschlüsseln, wie beispielsweise die Frage, ob Antimaterie im Schwerfeld der Erde fällt oder steigt.

Ähnlich fundamentalen Fragen widmet sich die innerhalb von APPA größte Kollaboration, SPARC (Stored Particle Atomic Physics Research Col-

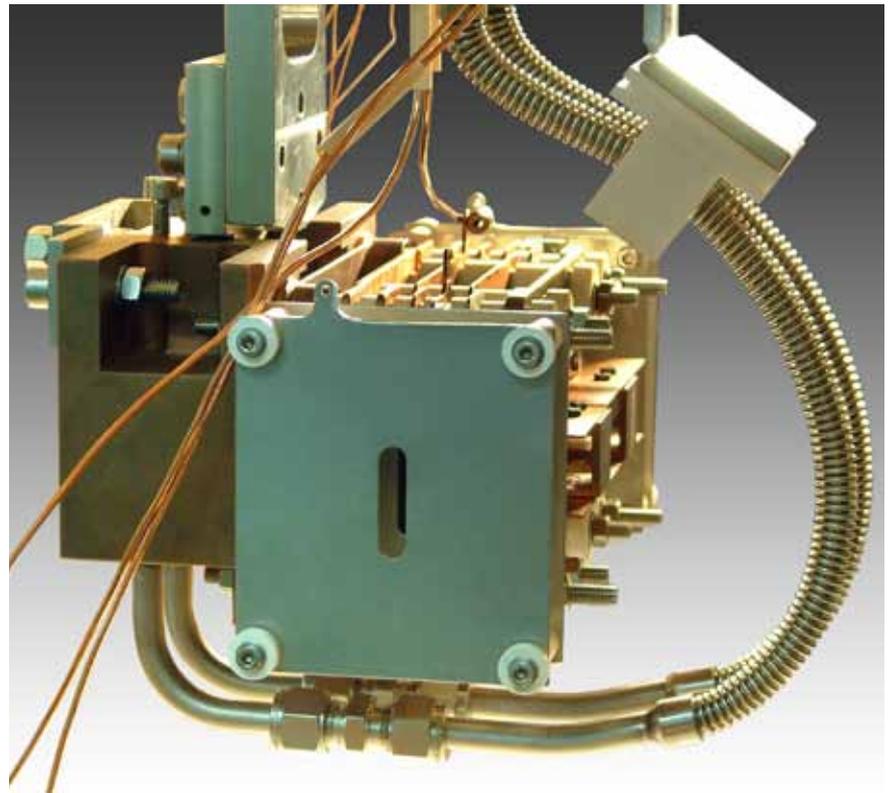


■ Abb. 4: Die geplante zentrale Experimentieranlage für das NuSTAR-Experiment, der Fragmentseparator SuperFRS.

■ Abb. 5: Prototyp einer am Gießener Institut für Atom- und Molekülphysik entwickelten Elektronenkanone, die Elektronenstrahlen höchster Brillanz für Experimente zum Studium von Elektron-Ion-Wechselwirkung an den Ionenstrahlen von FAIR bereitstellt.

laboration). Kernthema von SPARC, bei dem Gießener Experimentatoren eine federführende Rolle einnehmen, ist die Atomphysik in extrem starken elektromagnetischen Feldern, wie sie in der Nähe von Atomkernen oder in hochenergetischen ultrakurzen Hochleistungslaserpulsen herrschen. Elektrische Feldstärken können dort so hoch werden, dass das Vakuum "zerissen" wird und spontan Materie- und Antimaterie-Teilchen aus dem Nichts entstehen. So übersteigt z.B. die vom innersten Elektron eines Uran-Atoms gespürte elektrische Feldstärke die Auslösegrenze eines Blitzschlags um das Tausendmilliardenfache.

Mit ausgefeilten Methoden wird die Struktur und Dynamik hoch ionisierter schwerer Atome mit nur wenigen Elektronen präpariert und untersucht. Die Präzisionsmessungen der Energien dieser Elektronen rütteln an den Fundamenten des heute am weitesten entwickelten Theoriegebäudes, der Quantenelektrodynamik, das alle elektromagnetischen Prozesse beschreibt. Als besonders feine Sonden zur detaillierten Untersuchung der Atomhülle eignen sich freie Elektronen. Die Gießener Atomphysiker sind federführend an diesen Experimenten beteiligt und entwickeln hierzu Messverfahren und apparative Komponenten (siehe z.B. Abb. 5). Nebenbei liefern diese Experimente detaillierte Informationen über Eigenschaften der starken Kraft. Mit neu entwickelten, hochpräzisen Spektroskopiemethoden sind die Gießener Atomphysiker dabei maßgeblich beteiligt.



Gründliche Vorbereitung

Auch wenn es noch Jahre dauern wird, bis FAIR fertig gestellt ist, *jetzt* werden die entscheidenden Weichen für die Physik an FAIR gestellt. HIC for FAIR bietet der Justus-Liebig-Universität Gießen die Möglichkeit ganz vorne bei dem einzigartigen, neuen und internationalen Forschungszentrum mitzuarbeiten. Die beteiligten theoretischen Physiker haben die Chance, mit genügend Zeit im Vorfeld bereits die Modelle und Techniken zu entwickeln, die später zum Verständnis der Daten gebraucht werden. Die experimentellen Physiker haben die Möglichkeit die komplexen Detektoren und Messverfahren zu entwickeln, um dann, wenn FAIR läuft, bereit zu sein, noch nie zuvor messbare Daten aufzunehmen und zu analysieren. Beide zusammen, Theoretiker und Experimentatoren, können so international federführend unser Verständnis der fundamentalen Kräfte und Symmetrien in der Welt der Atome und Elementarteilchen vo-

ranbringen. Antworten auf Fragen wie etwa die nach der Herkunft der Masse unserer Materie, nach den ersten Anfängen des Universums über die Synthese erster leichter Atomkerne, die Bildung der ersten Atome bis hin zur Entstehung der ersten Sterne, nach der Erzeugung der chemischen Elemente und danach, wie es im Zentrum von Neutronensternen oder von Jupiter aussieht, rücken in greifbare Nähe. Lauter Fragen, von denen Empedokles noch nicht mal zu träumen wagte. Und wir sind aktiv dabei!

KONTAKT

Prof. Dr. Christian Fischer
Justus-Liebig-Universität
Institut für Theoretische Physik
Heinrich-Buff-Ring 16
35392 Gießen
Telefon: 0641 99-33347
Christian.Fischer@theo.physik.uni-giessen.de