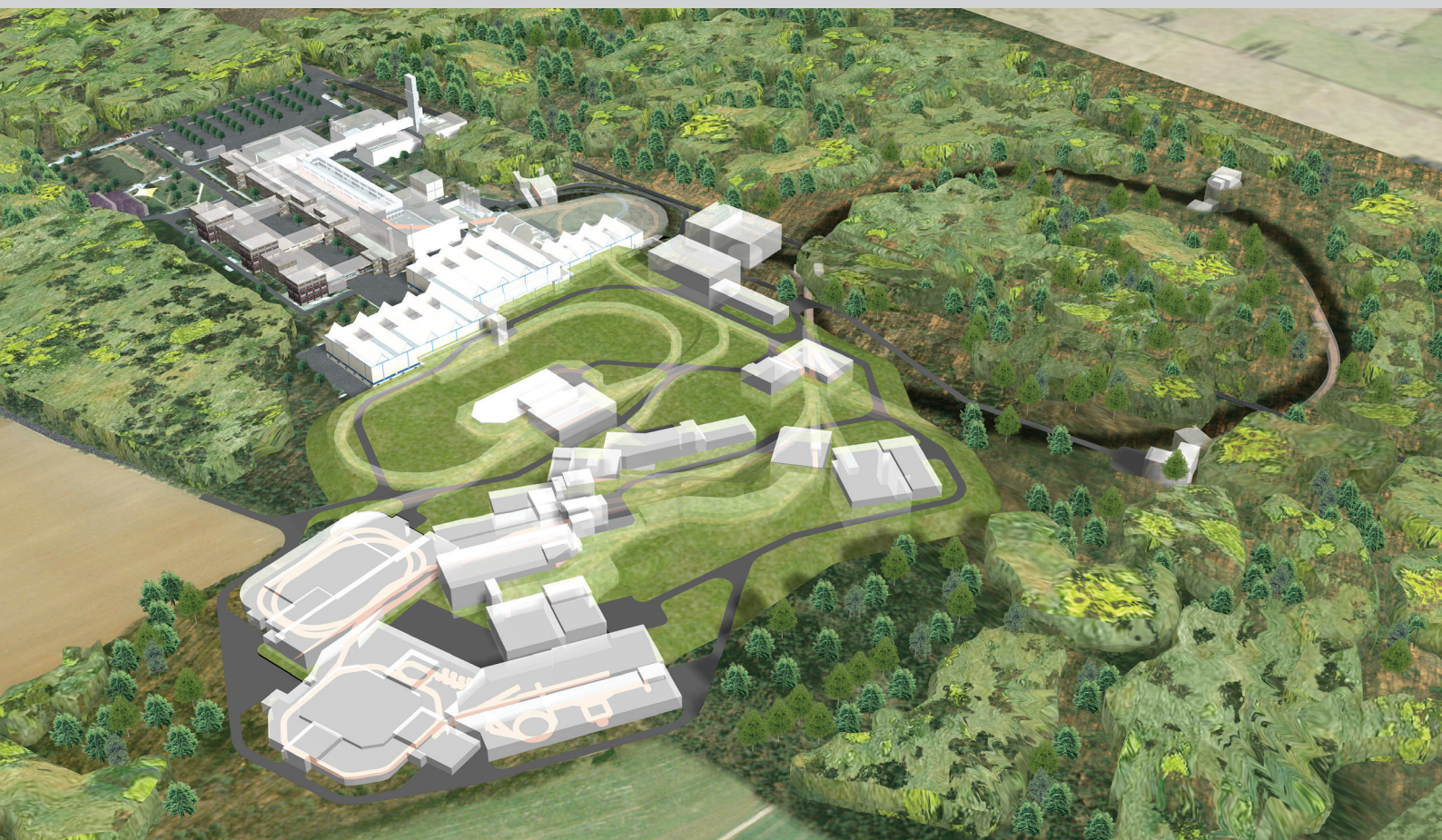
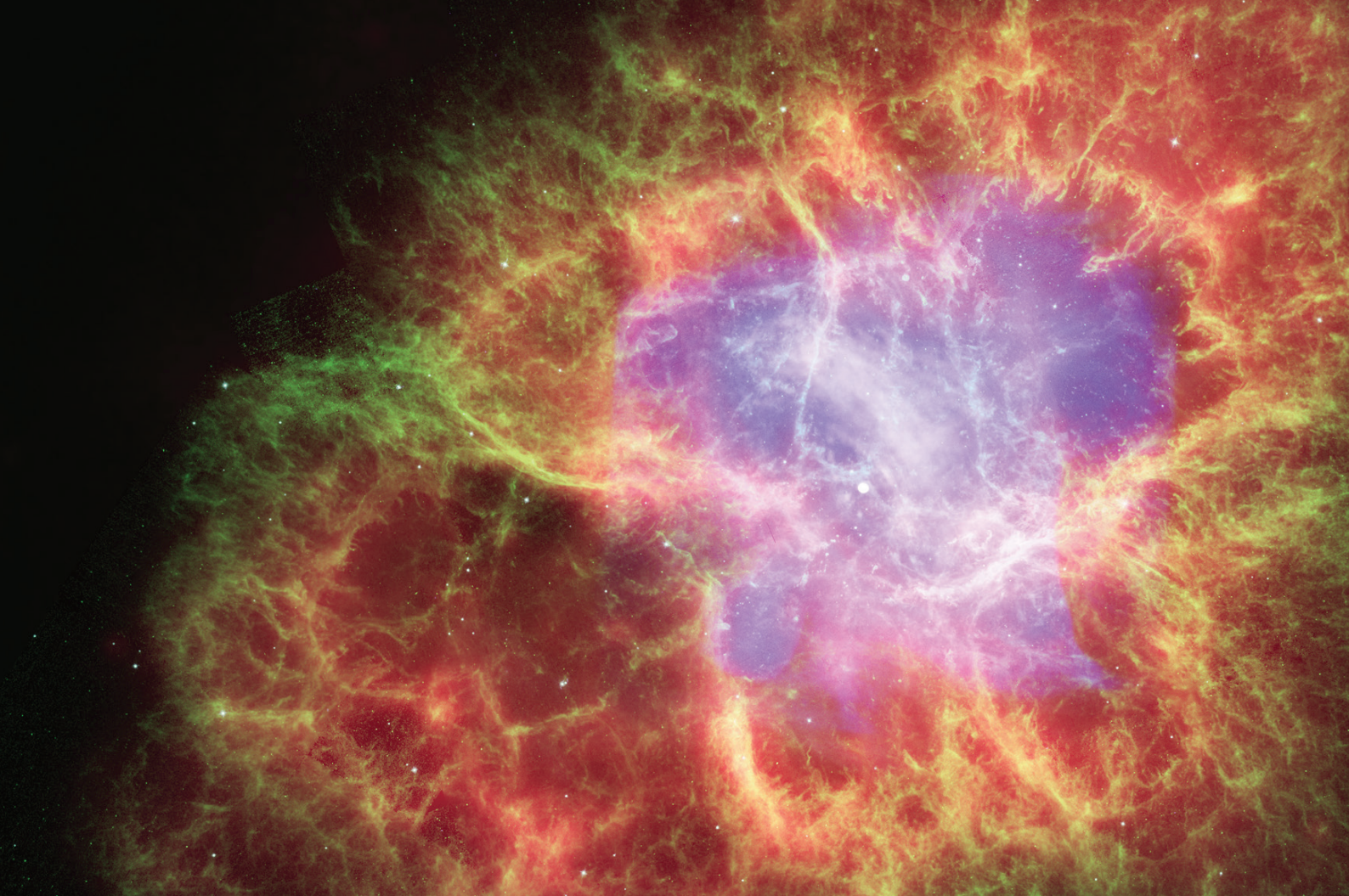


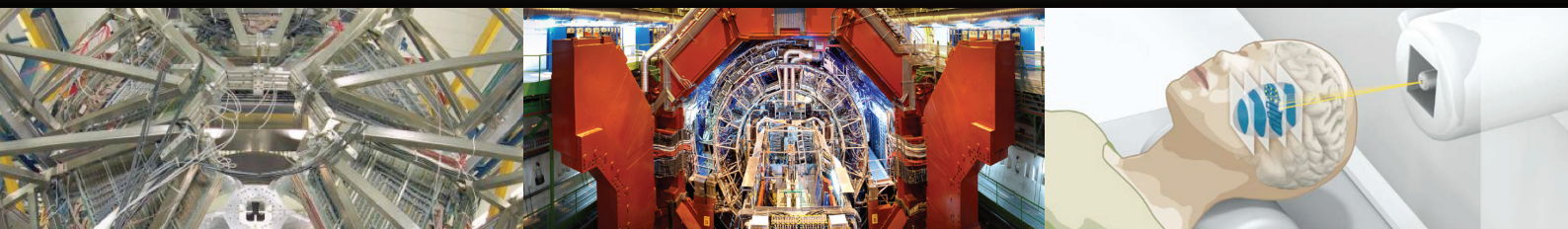


Die zukünftige „Facility for Antiproton and Ion Research“ in Darmstadt



Forschen für die Zukunft

Hadronen- und Kernphysik in Deutschland



STATUS UND PERSPEKTIVEN **2012**

KHUK

Inhalt

Forschen für die Zukunft Hadronen- und Kernphysik in Deutschland

STATUS UND PERSPEKTIVEN 2012

Erkennen, was die Welt im Innersten zusammenhält...	Seite	3
Hadronen- und Kernphysik im Überblick – Der Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums. . . .	Seite	4
Atomkerne – Bausteine unserer Welt	Seite	8
Kerne und Sterne – Die Entstehung der Elemente	Seite	12
Materie und Antimaterie – Fundamentale Symmetrien	Seite	14
Hadronen – Verbindungen der Starken Kraft	Seite	16
Kernmaterie unter extremen Bedingungen – Von der „Ursuppe“ zum Neutronenstern	Seite	18
Beschleuniger – Großgeräte für Forschung und Anwendung	Seite	20
Instrumente der Hadronen- und Kernphysik – Hochtechnologie für die Grundlagenforschung	Seite	22
FAIR – Ein internationales Beschleunigerzentrum für die Erforschung der Materie	Seite	24
Methoden der Hadronen- und Kernphysik in Medizin, Technik und Forschung	Seite	26
Ausbildung in der Hadronen- und Kernphysik – Wissenschaftlicher Nachwuchs für Forschung und Wirtschaft . . .	Seite	28
Hadronen- und Kernphysik in Deutschland	Seite	30
▶ Das Komitee für Hadronen- und Kernphysik		
▶ Empfehlungen des KHuK zur Hadronen- und Kernphysik		
▶ Forschungseinrichtungen		
Glossar	Seite	34

Physikerinnen und Physiker

Das Komitee für Hadronen- und Kernphysik (KHuK) freut sich sehr darüber, dass sich mehr und mehr Frauen in der Physik etablieren. In den vergangenen 20 Jahren ist der Anteil der Physikerinnen von wenigen Prozent auf 14 Prozent gestiegen und steigt weiter an: Heute sind nach einer Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft bereits 20 Prozent der Physik-Diplomanden Frauen. Das KHuK ist überzeugt, dass jedes Talent der Fachgemeinschaft wie der Gesellschaft insgesamt zugute kommt und ermutigt besonders Schülerinnen und junge Frauen, der Faszination Physik nachzugehen und eine Karriere als Physikerin anzustreben. Wenn in dieser Broschüre von Physikern, Wissenschaftlern oder Forschern die Rede ist, schließt das Frauen ausdrücklich und besonders ein und ist lediglich dem Umstand geschuldet, den Text leichter lesbar zu halten.

– Das Komitee für Hadronen- und Kernphysik

Titelbild: Der Krebsnebel ist der Überrest einer Supernova-Explosion, die im Jahre 1054 beobachtet wurde. Im Zentrum des Krebsnebels befindet sich ein Neutronenstern der heute als Pulsar sichtbar ist. Er dreht sich 33 Mal pro Sekunde um die eigene Achse und sendet dabei periodische Strahlungspulse aus.

Erkennen, was die Welt im Innersten zusammenhält ...

Bei der Suche nach einer Erklärung dafür, "was die Welt im Innersten zusammenhält", stießen die Physiker in immer kleinere Dimensionen vor. Dabei wurden nicht nur neue Strukturen der Materie, sondern auch bislang unbekannte Kräfte entdeckt.

Die wissenschaftliche Erforschung des Mikrokosmos begann vor etwa zweihundert Jahren mit der Beobachtung, dass sich die chemischen Elemente nur in bestimmten ganzzahligen Verhältnissen zu Molekülen verbanden. Dieses Phänomen wurde damals dadurch erklärt, dass die Elemente aus unteilbaren Grundbausteinen (griechisch atomos) bestehen. Am Ende des 19. Jahrhunderts wurde jedoch nachgewiesen, dass die Atome kleinere, elektrisch geladene Teilchen enthalten – die Elektronen. Man stellte sich jetzt die Atome als winzige, elastische Kügelchen vor, in denen die Masse, die positive elektrische Ladung und die negativ geladenen Elektronen gleichmäßig verteilt sind. Dieses Atommodell wurde bereits kurze Zeit später durch Ernest Rutherford und seinen Kollegen experimentell widerlegt. Sie entdeckten, dass ein Atom aus einem sehr kleinen, positiv geladenen Kern – in dem die Masse des Atoms konzentriert ist – und einer Elektronenhülle besteht. Dies war die Geburtsstunde der Kernphysik.

In den 1930er Jahren erkannte man, dass die Atomkerne aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt und durch eine besonders starke Kraft gebunden sind. Der Einsatz von Teilchenbeschleunigern ermöglichte schließlich den Vorstoß in das Innere der Protonen: man entdeckte, dass diese aus noch kleineren Partikeln bestehen, den so genannten „Quarks“, die wir heute als Elementarteilchen ansehen. Damit wurde die Hadronenphysik begründet. Sie befasst sich mit der Erforschung aller Teilchen, die Quarks enthalten und als Hadronen bezeichnet werden.

Unser heutiges Wissen über die Quarks und die zwischen ihnen wirkende Starke Kraft, über die Struktur der Hadronen und den Aufbau der Atomkerne hat entscheidend zu unserem modernen Weltbild beigetragen. Dank dieser in Labor-Experimenten gewonnenen Erkenntnisse haben wir heute eine Vorstellung von der Entwicklung des Universums kurz nach dem Urknall, von der Entstehung der Elemente im Inneren der Sterne bis zur Geburt von Neutronensternen in Supernovae.

Doch die Suche geht weiter. Bei der Erforschung der fundamentalen Kräfte zwischen den elementaren Bausteinen der Materie stoßen wir auf viele grundlegende, noch offene Fragen. Noch ist im Detail unverstanden, woher die Masse des uns bekannten Universums kommt, was mit den ungeheuren Mengen von Antimaterie passierte, die im Urknall gleichzeitig mit Materie erzeugt wurde, wie die schwersten Elemente im Kosmos entstanden, und warum die Quarks in den Hadronen gefangen sind.

Die Hadronen- und Kernphysik erlebte in den vergangenen zwei Jahrzehnten eine Renaissance, die ganz wesentlich auf den Fortschritten der Beschleuniger- und Experimentiertechnik sowie auf der verstärkten Nutzung von Hochleistungsrechnern beruht.

Dadurch konnten Präzision und Empfindlichkeit der Experimente enorm gesteigert und die Signifikanz der gewonnenen Daten dramatisch verbessert werden. Dies hat auch dazu beigetragen, Querverbindungen zur Kosmologie, Astrophysik und Teilchenphysik herzustellen und zu vertiefen.

Die gesellschaftliche Relevanz der Hadronen- und Kernphysik reicht jedoch weit über die Grundlagenforschung hinaus. Ihre Methoden haben schon längst Eingang gefunden in die Medizintechnik, Materialforschung, Produktions-, Energie- und Sicherheitstechnik und zahlreiche andere Wissenschafts- und Wirtschaftsbereiche. Viele Entwicklungen in der Beschleuniger- und Detektortechnologie, Mikroelektronik und im „High Performance Computing“ erfolgen in enger Zusammenarbeit mit der Industrie und sorgen somit für einen unmittelbaren Technologietransfer von der Forschung zur Anwendung. Eine tragende Rolle spielt hierbei der hochqualifizierte naturwissenschaftlich-technische Nachwuchs, der seine Ausbildung in der Grundlagenforschung erhält.

Deutschland gehört zu den führenden Nationen in der Hadronen- und Kernphysik. Dies spiegelt sich in hervorragenden, zum Teil einzigartigen Forschungsanlagen wider, an denen Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker zusammenarbeiten. Das im Bau befindliche internationale Beschleunigerzentrum „Facility for Antiproton and Ion Research“ (FAIR) in Darmstadt wird weltweit eine führende Rolle in der Grundlagenforschung einnehmen. Das Zentrum, in dem ab 2018 jährlich etwa 3.000 Wissenschaftler aus aller Welt forschen werden, wird die Spitzenstellung des Wissenschafts- und Technologiestandorts Deutschland ausbauen.

Im Jahre 2000 wurde das Komitee für Hadronen und Kernphysik (KHuK) als Interessensvertretung und Sprachrohr der Forschergemeinde gegründet. Aufgabe des KHuK ist es, einen kohärenten und konstruktiven Diskussionsprozess zu Status und Perspektiven der Hadronen- und Kernphysik in Deutschland zu organisieren, und das Bundesministerium für Bildung und Forschung hinsichtlich der zukünftigen Forschungs- und Förderungsschwerpunkte des Gebietes zu beraten. Mit dieser Broschüre möchte das KHuK die Forschungsschwerpunkte und die grundlegenden Fragestellungen der Hadronen- und Kernphysik einer breiteren Öffentlichkeit nahe bringen.

August 2012

Komitee für Hadronen und Kernphysik (KHuK)



Hadronen- und Kernphysik im Überblick

– Der Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums

Der Aufbau der Materie

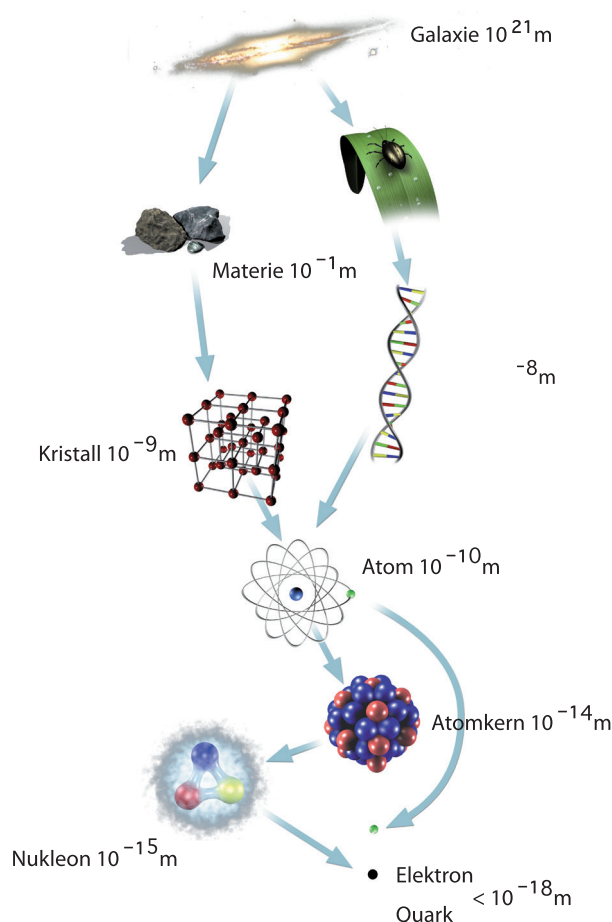
Alle Galaxien, Sterne und Planeten, die Dinge unseres alltäglichen Lebens und auch wir Menschen sind aus Materie aufgebaut, die nur aus drei Teilchenarten besteht: den positiv geladenen Protonen, den elektrisch neutralen Neutronen und den negativ geladenen Elektronen. Protonen und Neutronen sind die Bausteine des Atomkerns, der von einer Hülle aus Elektronen umgeben ist. Die verschiedenen chemischen Elemente unterscheiden sich durch die Zahl der Protonen im Kern, und die Elektronen verbinden die Atome zu Kristallen oder Biomolekülen. So entstehen die komplexen Strukturen der unbelebten wie belebten Natur (siehe Abbildung 1).

Seit etwa 30 Jahren wissen wir, dass die Protonen und Neutronen, zusammenfassend Nukleonen genannt, selbst wiederum eine innere Struktur besitzen und aus elementaren Teilchen zusammengesetzt sind, den Quarks. Es wurde jedoch noch nie ein freies Quark beobachtet. Diese rätselhafte Eigenschaft unterscheidet sie von allen anderen Teilchen.

Vier Naturkräfte bewirken den Zusammenhalt der Materie. Die Galaxien des Universums und unser Sonnensystem entstanden und existieren durch die Gravitation, die wir auf der Erde als Schwerkraft erleben. Auf atomarer Ebene dominiert die elektromagnetische Kraft zwischen den positiv geladenen Atomkernen und den negativ geladenen Elektronen. Die Atomkerne werden durch die Starke Kraft stabilisiert, die sowohl die Nukleonen zusammenhält als auch die Quarks in den Nukleonen. Auf nuklearer Ebene wirkt eine weitere Kraft, die so genannte Schwache Wechselwirkung. Sie ist für den radioaktiven Zerfall der Atomkerne verantwortlich und für die Fusion leichter Atomkerne, die als Energiequelle von Sternen wie unserer Sonne das Leben auf der Erde ermöglicht.

Besonders die Starke Kraft gibt den Physikern noch viele Rätsel auf. Zwischen den Quarks wird die Starke Kraft durch den Austausch von Teilchen, den so genannten Gluonen (von engl. *glue* = Klebstoff) vermittelt. Die Gluonen verbinden Quarks wie Gummibänder, und das hat erstaunliche Konsequenzen. Ist der Abstand zweier Quarks sehr klein, ist die anziehende Kraft zwischen ihnen sehr schwach. Je größer jedoch der Abstand zwischen den Quarks ist, desto stärker wird die Kraft zwischen ihnen.

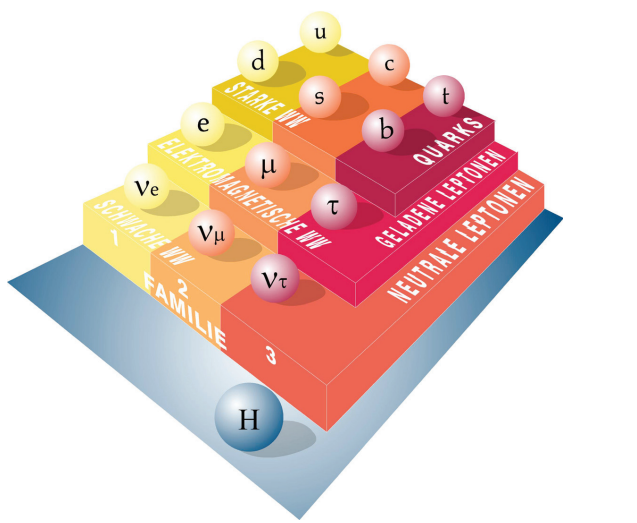
Quarks können daher niemals isoliert auftreten, Physiker sprechen von *Confinement*. In den Nukleonen sind Quarks als Dreiergruppen gefangen. Damit verbunden ist ein weiteres rätselhaftes Phänomen: Ein Nukleon ist schwerer als die Summe seiner Bestandteile. Die Masse der Quarks trägt weniger als zwei Prozent zur Nukleonenmasse bei, und die Gluonen sind masselos. Die Masse der punktförmigen Quarks wird erzeugt durch ihre Wechselwirkung mit dem so genannten *Higgs*-Teilchen, das vom Standardmodell der Elementarteilchenphysik vorhergesagt wird.



■ Abbildung 1: Aufbau der Materie: Galaxien, Sterne, Planeten, Gestein und Lebewesen bestehen letztendlich aus Quarks und Elektronen.

In Experimenten am Large-Hadron-Collider des CERN wurde jüngst ein neues Teilchen entdeckt, das Eigenschaften des seit langem gesuchten Higgs-Teilchens besitzt. Die Masse der Nukleonen – und damit die Masse des sichtbaren Universums – lässt sich durch das Higgs-Teilchen allerdings nicht erklären. Gemäß der Theorie der Starken Kraft steckt ein großer Teil der Masse der Nukleonen in der Bewegungsenergie der Quarks und in der Energie des Gluonenfeldes, das die Quarks zusammenhält. Damit würden die Atomkerne und die Materie insgesamt hauptsächlich aus Bewegungs- und Feldenergie bestehen! Albert Einstein beschrieb diese Äquivalenz von Energie und Masse in seiner berühmten Formel $E = mc^2$.

In der kosmischen Strahlung und in Laborexperimenten mit Beschleunigern wurden weitere – allerdings sehr kurzlebige – Teilchen entdeckt. Sie bestehen entweder aus drei Quarks oder aus Paaren von Quarks und ihren Antiteilchen, den so genannten Antiquarks. Es gibt sogar Teilchen, die aus drei Antiquarks bestehen, diese bilden die Grundbausteine der Antimaterie. Heute sind sechs verschiedene Quarksorten bekannt, die sich sehr stark in ihrer Masse unterscheiden. Nukleonen bestehen aus leichten Quarks, die eine Masse von nur etwa einem Prozent eines Nukleons besitzen. Das schwerste Quark hingegen hat fast die 200-fache Masse eines Nukleons. Alle aus Quarks oder Antiquarks zusammengesetzten Teilchen werden als Hadronen bezeichnet.



■ **Abbildung 2:** Die elementaren Bausteine der Materie und die Kräfte, die sie zusammenhalten. Insgesamt gibt es zwölf Materieteilchen, die sich in drei Familien mit jeweils zwei Quarks und zwei Leptonen gliedern. Zur ersten Familie zählen die Up- und Down-Quarks zusammen mit dem Elektron und dem Elektron-Neutrino. Die Charm- und Strange-Quarks zusammen mit dem Myon und dem Myon-Neutrino bilden die zweite Familie. Die dritte Familie besteht aus den Top- und Bottom-Quarks zusammen mit dem Tau und dem Tau-Neutrino. Die Quarks und Leptonen der zweiten und dritten Familie haben größere Massen als die der ersten Familie und sind instabil. Deshalb sind alle im Urknall erzeugten schweren Elementarteilchen zerfallen und die uns heute umgebende Materie besteht nur noch aus Teilchen der ersten Familie. Die punktförmigen Elementarteilchen erhalten ihre Masse durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Teilchen (H), dem letzten Baustein des Standardmodells. Kürzlich wurde in Experimenten am LHC ein neues Teilchen entdeckt, das ähnliche Eigenschaften wie das vorhergesagte Higgs-Teilchen besitzt und etwa 133 mal so schwer wie ein Proton ist. Zu jedem Quark und Lepton gibt es ein entsprechendes Antiteilchen.

Name	Symbol	Ladung [e]	Masse [p]
Up	u	+2/3	0,0025
Down	d	-1/3	0,005
Strange	s	-1/3	0,11
Charm	c	+2/3	1,35
Bottom	b	-1/3	4,48
Top	t	+2/3	182

■ **Tabelle der Quarks.** Ihre elektrischen Ladungen sind in Einheiten der Elektronenladungen angegeben, ihre Massen in Einheiten der Protonenmasse. Zu jedem Quark existiert ein Antiquark mit entgegengesetzter Ladung aber gleicher Masse. Die bisher bekannten Hadronen bestehen im Wesentlichen entweder aus drei Quarks, oder aus einem Quark-Antiquark Paar. Das positiv geladene Proton enthält zwei Up-Quarks und ein Down-Quark, das ungeladene Neutron zwei Down-Quarks und ein Up-Quark.

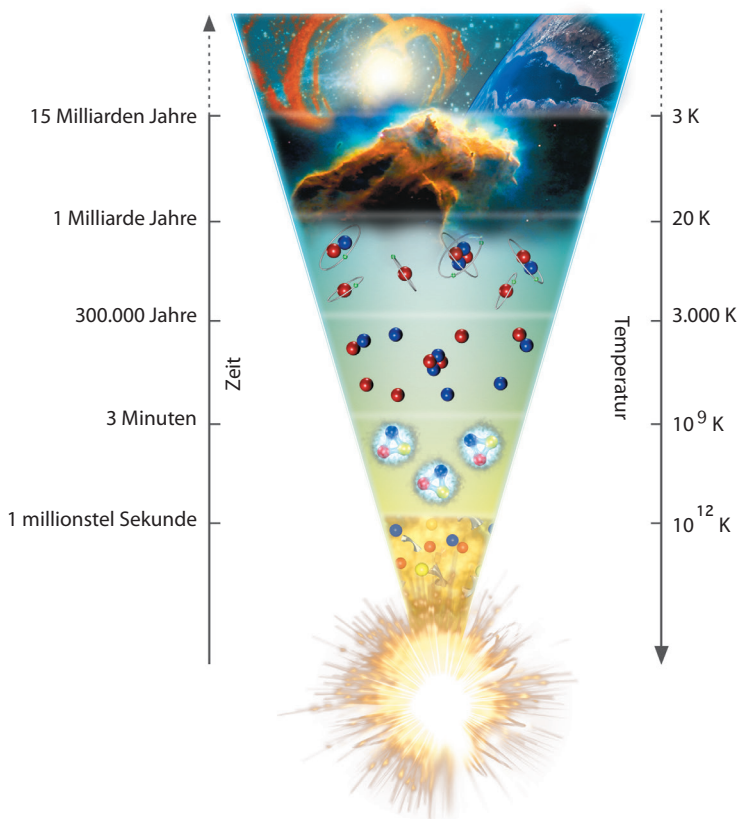
Die Entwicklung des Universums

Nach unserem heutigen Verständnis wurde unser Universum in einem Urknall geboren. Alle Energie war in einem Punkt konzentriert, und mit der Expansion des Universums entstand Raum und Zeit. Die Energie verwandelte sich in eine „Ursuppe“ aus Elementarteilchen wie Quarks und Antiquarks, Gluonen, Elektronen und Photonen. Hierbei entstanden Materie und Antimaterie zu gleichen Teilen, die teilweise wieder in Energie zerstrahlten und wieder erzeugt wurden. Durch die Expansion kühlte sich das Universum ab, und der Vernichtungsprozess wurde plötzlich asymmetrisch. Es bildete sich ein winziger Überschuss an Materie, auf eine Milliarde Teilchen-Antiteilchen Paare blieb ein Teilchen übrig. Daraus ging unser heutiges Universum hervor.

Eine millionstel Sekunde nach dem Urknall war die Ursuppe so weit abgekühlt, dass Quarks und Gluonen zu Nukleonen verschmolzen. Es fand ein Phasenübergang statt, ähnlich der Kondensation von Dampf zu Wasser. Damit verbunden war ein mysteriöser Prozess der Massenerzeugung: aus sehr leichten Quarks und masselosen Gluonen wurden schwere Nukleonen.

Etwa drei Minuten nach dem Urknall war die Temperatur so weit gesunken, dass sich Protonen und Neutronen zu leichten Kernen vereinigten, die später Elektronen einfingen und elektrisch neutrale Atome bildeten. So entstanden Wasserstoff und Helium, bis heute die häufigsten Elemente im Universum.

Einige hundert Millionen Jahre später ballten sich die aus leichten Atomen bestehenden gewaltigen Gaswolken unter dem Einfluss der Gravitation zusammen und formten die ersten Sterne. Im Zentrum der Sterne setzten nukleare Fusionsprozesse ein, in denen schwerere Atomkerne gebildet und große Energiemengen freigesetzt wurden, wie heute in unserer Sonne. Die schwersten Elemente wurden durch Kernreaktionen in gewaltigen Supernova-Explosionen sehr massereicher Sterne gebildet und ins Weltall geschleudert. Überreste dieser gigantischen Sternexplosionen sind Neutronensterne oder Schwarze Löcher.



■ **Abbildung 3:** Die Entwicklung des Universums: Seit dem Urknall expandiert das Universum und kühlt sich ab. Dadurch entstanden zunehmend komplexere Strukturen.

Die Hadronen- und Kernphysikforschung hat wesentlich zu unserem heutigen Wissen über die Struktur der Materie und die Entwicklung des Universums beigetragen. Dennoch sind wichtige Fragen noch ungeklärt. Sie werden im Folgenden angerissen.

Fragestellungen der modernen Hadronen- und Kernphysik

Ein wichtiger Fragenkomplex betrifft den Aufbau der Hadronen aus Quarks und Gluonen und die Kräfte zwischen diesen Elementarteilchen. Eine in der Teilchenphysik einzigartige Eigenschaft ist die „Gefangenschaft“ der Quarks (Confinement) im Innern der Nukleonen. Die wesentlichen offenen Fragen sind:

Warum lassen sich keine isolierten Quarks beobachten?

Warum sind die Hadronen so viel schwerer als die Summe ihrer Bestandteile?

Wie setzt sich der Eigendrehimpuls des Protons aus den Drehimpulsen der Quarks und Gluonen zusammen?

Von fundamentaler physikalischer und kosmologischer Bedeutung ist die Entwicklung des frühen Universums, das kurz nach dem Urknall aus einer Art Quark-Gluon-Plasma bestand, in dem sich die masselosen Quarks und Gluonen frei bewegten.

Im darauffolgenden Phasenübergang kondensierten die Quarks und Gluonen zu massiven Nukleonen und waren fortan darin gefangen. Zentrale Fragestellungen sind hier:

Lässt sich ein Plasma aus Quarks und Gluonen herstellen durch Kollisionen schwerer Atomkerne bei sehr hohen Energien?

Welche Eigenschaften hat diese aus Elementarteilchen bestehende Materie?

Kann man Phasenübergänge ähnlich dem im frühen Universum im Labor studieren?

Gibt es weitere exotische Phasen von Kernmaterie?

Die Vielfalt der Atomkerne entsteht noch heute durch Kernreaktionen im Innern von Sternen oder in Sternexplosionen (Supernovae). Welche Kernreaktionen an dieser Nukleosynthese beteiligt sind und welche Rolle die instabilen Atomkerne dabei spielen, ist Gegenstand aktueller Forschung. Ungeklärte Fragen in diesem Zusammenhang sind:

Gibt es superschwere Elemente, und wenn ja, welche Eigenschaften haben sie?

Bis zu welcher Größe sind Atomkerne noch stabil und was verrät die Grenze der Stabilität über die Kräfte in den Atomkernen?

Wie sind die uns bekannten schweren Atomkerne entstanden und welche instabilen Atomkerne sind an der Synthese der schweren Elemente beteiligt?

Welche Eigenschaften haben diese instabilen Atomkerne?

Wenn ein massereicher Stern am Ende seines Lebens als Supernova explodiert, bleibt häufig ein kompakter Neutronenstern übrig. Im Zentrum eines solchen Neutronensterns herrschen unvorstellbar extreme Bedingungen. Der Gravitationsdruck komprimiert die Materie auf bis zu zehnfache Dichte eines Atomkerns. Unter diesen Umständen hat Materie von der Größe eines Stück Würfelzuckers eine Masse von fast drei Milliarden Tonnen. Der zeitliche Ablauf einer Supernova und die inneren Eigenschaften des entstehenden Neutronensterns hängen vom Verhalten der Kernmaterie in Abhängigkeit von Druck und Temperatur ab. Physiker sprechen hier von der nuklearen Zustandsgleichung. Man vermutet, dass sich die massiven Nukleonen bei sehr hohen Drücken in nahezu masselose Quarks auflösen. Die wesentlichen Fragen sind hier:

Wie reagiert Kernmaterie auf Erhöhung des Druckes oder der Temperatur?

Kann man Materiedichten wie im Zentrum eines Neutronensterns in Kollisionen schwerer Atomkerne erzeugen?

Wie verändern sich die Eigenschaften von Hadronen in dichter Kernmaterie?

Ein faszinierender Fragenkomplex betrifft die Symmetrien und ihre Verletzungen in der Natur. Als sich nach dem Urknall Energie in Materie verwandelte und diese wieder zurück in Energie, ereignete sich eine fundamentale und noch unverstandene Symmetrieverletzung, die letztlich die Ursache unserer Existenz ist:

Warum haben sich nach dem Urknall Materie und Antimaterie nicht vollständig vernichtet?

Was ist der Unterschied zwischen Materie und Antimaterie?

Die hochpräzise Messung von Symmetrieverletzungen ist ein vielversprechender Ansatz zur Suche nach neuen physikalischen Gesetzmäßigkeiten jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik. Hadronen und Kerne bieten als „Mikrolaboratorien“, die von äußeren Einflüssen weitgehend ungestört sind, die einzigartige Möglichkeit solche Präzisionsmessungen durchzuführen.

All diese Fragenstellungen werden in Experimenten an Teilchenbeschleunigern des CERN, an der GSI, am FZ Jülich und an

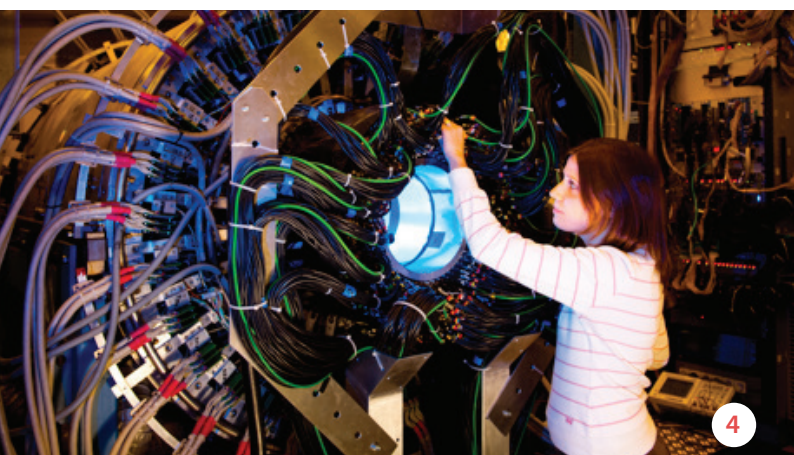
verschiedenen Universitäten mit Elektronen, Protonen, Antiprotonen oder Schwerionen untersucht.

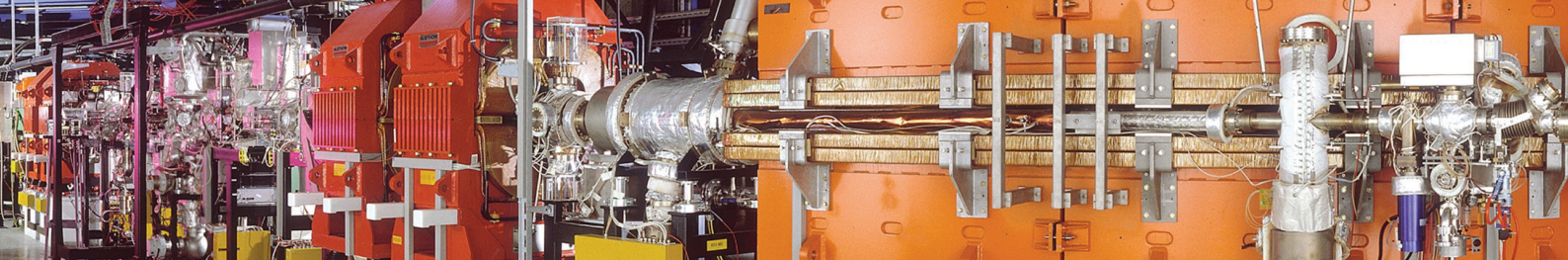
Wissenschaftlicher Fortschritt erfordert neben neuen experimentellen Ergebnissen auch neue theoretische Erkenntnisse, die zunehmend mithilfe modernster Computertechnologie gewonnen werden. Neben den existierenden Forschungseinrichtungen wird vor allem die zukünftige Beschleunigeranlage FAIR in Darmstadt mit ihrer breiten Palette an intensiven Teilchenstrahlen, neuartigen Experimentiereinrichtungen und einem energieeffizienten Hochleistungsrechenzentrum neue exzellente Forschungsmöglichkeiten auch auf dem Gebiet der Hadronen- und Kernphysik bieten. Die im Rahmen von FAIR in vielen Bereichen entwickelte Hochtechnologie bildet die Grundlage für zukünftige Spitzenforschung und für Anwendungen in Industrie und Technik.

■ Abbildung 4: Der Crystal-Barrel-Detektor am Beschleuniger ELSA der Universität Bonn.

■ Abbildung 5: Der HADES-Detektor am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung.

■ Abbildung 6: Die ALICE-Kollaboration vor ihrem Experiment am LHC des CERN.





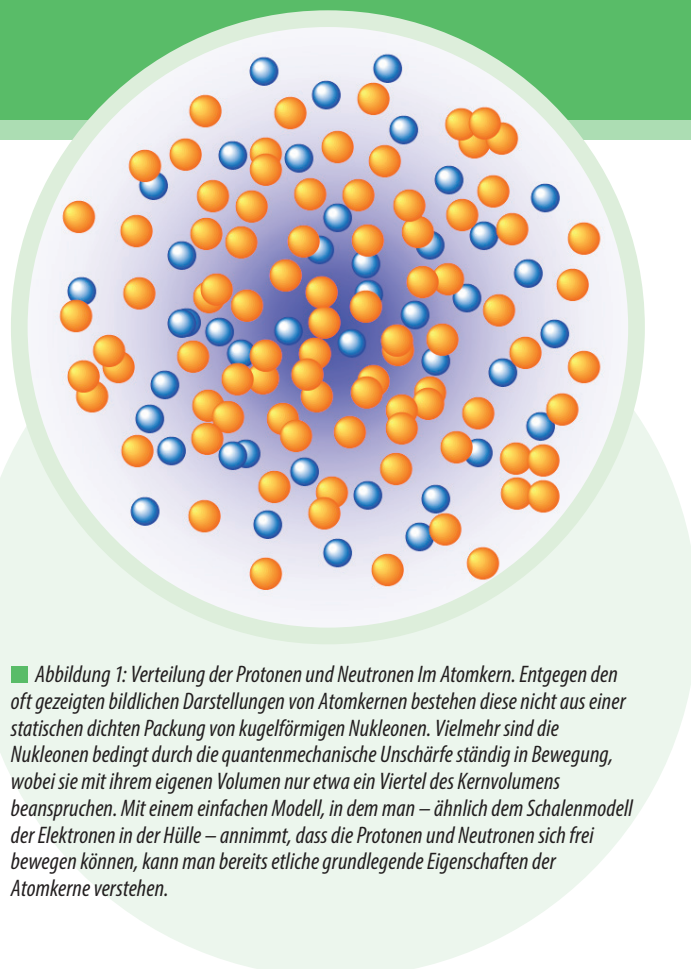
Atomkerne

– Bausteine unserer Welt

Die Starke Kraft bindet Quarks und Gluonen zu Protonen oder Neutronen, den Nukleonen. Sie wirkt in abgeschwächter Form auch noch in der näheren Umgebung der Nukleonen und verbindet sie zu Atomkernen. Die Wechselwirkung zwischen den Nukleonen ist sehr komplex, mit anziehenden und abstoßenden Komponenten, die auch von der Ausrichtung der Spins der Nukleonen abhängen. *Abbildung 1* illustriert eine typische Verteilung der Protonen und Neutronen im Atomkern.

Die Eigenschaften der Atomkerne werden durch die Starke Kraft im Zusammenspiel mit zwei weiteren fundamentalen Kräften festgelegt: der elektromagnetischen und der Schwachen Kraft. Diese Kräfte bestimmen, wie viele Protonen- und Neutronen in einem Kern vereint sein können und wie viele Nukleonen er maximal enthalten kann. Bei zu vielen Protonen wird die abstoßende Wirkung ihrer positiven elektrischen Ladung zu groß und die Kerne zerfallen. Hierbei wird durch die Schwache Kraft das überschüssige Proton in ein Neutron verwandelt, wobei noch ein Positron und ein Neutrino entstehen und emittiert werden. Ist die Zahl der Neutronen zu hoch, zerfällt das überschüssige Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Diese so genannten Beta-Zerfälle finden immer dann statt, wenn der daraus entstehende Tochterkern besser gebunden ist als sein Mutterkern. Schwere Kerne mit Protonenüberschuss zerfallen bevorzugt durch Emission eines Helium-Kerns (Alpha-Zerfall) oder durch Spaltung.

Die Kräfte zwischen den Nukleonen bestimmen die detaillierte Struktur der Atomkerne. Dazu zählen Eigenschaften wie die Zahl der Protonen, die das jeweilige chemische Element festlegt, die Masse der Kerne, ihre Stabilität gegenüber radioaktivem Zerfall oder ihre Lebensdauer. Diese Kräfte legen auch fest, auf welche Weise die Atomkerne kurz nach dem Urknall oder später im Innern der Sterne gebildet wurden. Die Struktur der Kerne ist ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis der Materie, insbesondere der natürlich vorkommenden chemischen Elemente, aus denen unsere Umgebung einschließlich aller Organismen und auch wir selbst bestehen.



■ *Abbildung 1: Verteilung der Protonen und Neutronen im Atomkern. Entgegen den oft gezeigten bildlichen Darstellungen von Atomkernen bestehen diese nicht aus einer statischen dichten Packung von kugelförmigen Nukleonen. Vielmehr sind die Nukleonen bedingt durch die quantenmechanische Unschärfe ständig in Bewegung, wobei sie mit ihrem eigenen Volumen nur etwa ein Viertel des Kernvolumens beanspruchen. Mit einem einfachen Modell, in dem man – ähnlich dem Schalenmodell der Elektronen in der Hülle – annimmt, dass die Protonen und Neutronen sich frei bewegen können, kann man bereits etliche grundlegende Eigenschaften der Atomkerne verstehen.*

Die Landkarte der Nuklide

Ordnet man alle Atomkerne so an, dass horizontal die Anzahl der Neutronen und vertikal die Anzahl der Protonen aufgetragen ist, erhält man die Nuklidkarte (*siehe Abbildung 2*). Auf der Erde finden wir 85 chemische Elemente mit ihren Isotopen, was insgesamt etwa 300 verschiedene stabile Atomkerne ergibt (Atomkerne, die zum gleichen Element gehören, sich aber in der Anzahl der Neutronen unterscheiden, nennt man Isotope). Diese stabilen Atomkerne sind als schwarze Quadrate eingetragen. Sie sind so gut gebunden, dass weder die schwache Wechselwirkung, noch die Spaltung oder der Alpha-Zerfall sie spontan in noch besser gebundene Nuklide umwandeln kann.

Darüber hinaus haben Physiker in Laborversuchen und an Teilchenbeschleunigern mehr als 2500 weitere instabile Kerne synthetisiert. Die Lebensdauer der künstlich erzeugten instabilen Nuklide mit einem Überschuss an Protonen oder Neutronen ist zwar kurz – teilweise nur Bruchteile einer Sekunde – aber doch ausreichend, um ihre Struktur zu untersuchen.

Obwohl instabile Nuklide auf der Erde nicht vorkommen, sind sie in stellaren Prozessen als Zwischenstufe von entscheidender Bedeutung für die Erzeugung vieler stabiler Atomkerne, die wir im Sonnensystem und im Universum vorfinden.

Die bereits bekannten instabilen Nuklide sind in der Landkarte farbig dargestellt. Die roten oder blauen Quadrate symbolisieren Kerne mit Protonen- oder Neutronenüberschuss, die durch die Schwache Wechselwirkung zerfallen. Die gelben Quadrate repräsentieren Nuklide, die sich durch die Emission eines Heliumkerns umwandeln (Alpha-Zerfall), und Kerne, die durch Spaltung zerfallen, sind als grüne Quadrate eingetragen. Basierend auf theoretischen Überlegungen erwartet man, insbesondere im Gebiet der sehr neutronenreichen Nuklide, dass noch viele weitere bisher unbekannte Atomkerne existieren, die nur über die schwache Wechselwirkung zerfallen (hellgrüner Bereich).

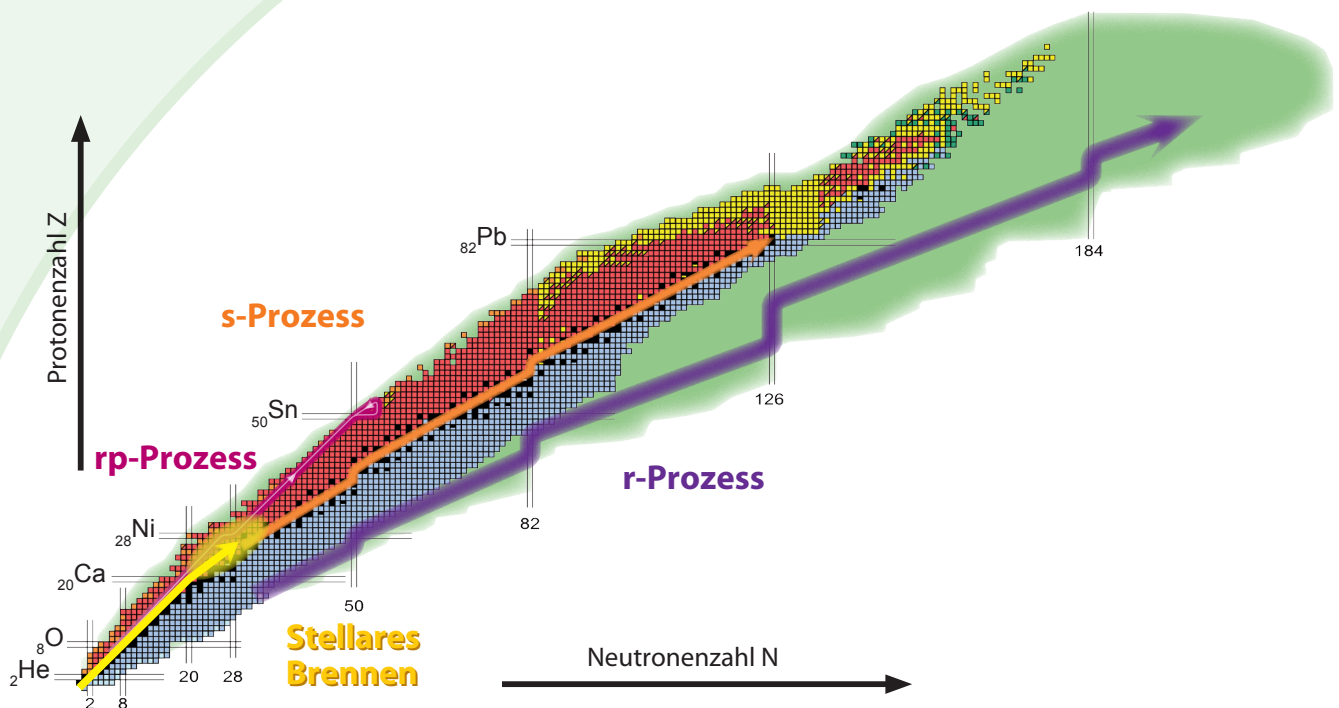
Ein Vorstoß in diese Terra Incognita verspricht sowohl für unser Verständnis der Kernkräfte wie auch für die Erforschung der Entstehungsprozesse der Elemente in Sternen neue Erkenntnisse. Letztendlich wird die Entwicklung von Sternen von den Eigenschaften der Atomkerne beeinflusst.

Die Grenzen der Stabilität von Kernen

Eines der wichtigen experimentellen und theoretischen Ziele der Kernphysik ist es, die Grenzen der Stabilität herauszufinden. Aufgrund der kurzen Reichweite der Starken Kraft ist die Grösse der Atomkerne begrenzt. Lagert man an einen Kern immer mehr Nukleonen an, so verringert sich deren Bindungsenergie immer stärker bis sie schließlich ganz verschwindet. Diese Grenzlinien im Isotopendiagramm, innerhalb derer Kerne, wenn auch nur kurzfristig, existieren können, werden Protonenbeziehungsweise Neutronenabbruchkante genannt.

Für Kerne in der Nähe der Abbruchkante wurden neue und bislang unbekannte Eigenschaften beobachtet und weitere werden vorausgesagt. Solche Kerne ermöglichen zum Beispiel über die Messung ihrer bloßen Existenz, ihrer Massen oder ihres Zerfalls einen kritischen Test der besten heutigen Kernmodelle.

Für sehr große Protonen- und Neutronenzahlen erreicht man eine weitere Grenze der Stabilität. Die elektrische Abstoßung wird so groß, dass sich der Kern immer stärker zigarrenförmig deformiert und schließlich in zwei etwa gleich große Fragmente aufspaltet, die auseinander fliegen. Auch an dieser Grenze der Stabilität findet man außergewöhnliche Phänomene, wie die superschweren Atome.



■ Abbildung 2: In der Nuklidkarte sind die Atomkerne (Nuklide) in der Weise angeordnet, dass die Zahl der Neutronen waagrecht und die Zahl der Protonen, die Kernladungszahl, senkrecht aufgetragen ist. Die Kernladungszahl definiert das Element. Atomkerne mit gleicher Kernladungszahl aber verschiedener Neutronenzahl nennt man Isotope eines Elements. Die stabilen Nuklide sind als schwarze Quadrate dargestellt. Die bereits bekannten, instabilen Nuklide sind durch farbige Quadrate repräsentiert: rot oder blau markiert sind Kerne mit Protonen- oder Neutronenüberschuss, die sich durch einen Beta-Zerfall umwandeln, gelb dargestellt sind Kerne, die ein Alpha-Teilchen emittieren, und grün markiert sind Kerne, die durch Spaltung zerfallen. Im hellgrünen Gebiet liegen sehr neutronenreiche Isotope, deren Existenz theoretisch vorhergesagt wird.

Die verschiedenen Produktionspfade der Elementsynthese sind durch Pfeile gekennzeichnet. Die Fusion leichter Atomkerne in Sternen bringt Nuklide bis zum Eisen hervor (stellares Brennen). Die wichtigsten Produktionspfade zur Bildung schwerer Kerne sind der langsame (slow) Neutroneneinfang (s-Prozess), der ebenfalls in Sternen abläuft, und der schnelle (rapid) Neutroneneinfang (r-Prozess), der in Supernovae oder in Kollisionen von Neutronensternen passiert. Außerdem gibt es noch andere Prozesse, die zu den protonenreichen schweren Kernen führen. Einer davon ist der schnelle Protoneneinfang (rp-Prozess). Der rp- und der r-Prozess laufen durch Gebiete weitab der stabilen Isotope und sollen an der geplanten Teilchenbeschleunigeranlage FAIR systematisch erforscht werden. Die Elementsynthese in Sternen wird in dem nächsten Beitrag ausführlicher dargestellt.



Taufe des Elements Copernicium an der GSI im Jahre 2010.

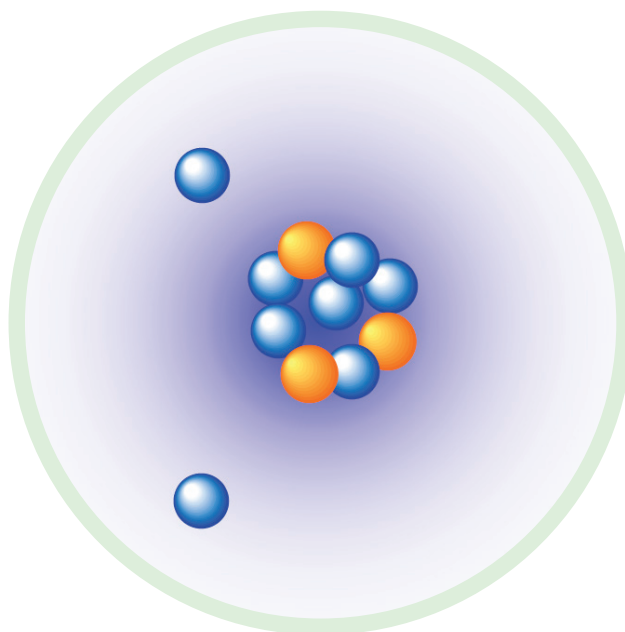
Exotische Kerne

Die Größe von stabilen Atomkernen lässt sich recht gut im Rahmen eines einfachen „Tröpfchenmodells“ verstehen, in dem bestimmte Eigenschaften eines Atomkerns ähnlich denen eines Wassertropfens beschrieben werden. Hierin sollte der Radius der Kerne etwa mit der dritten Wurzel der Nukleonenzahl zunehmen.

Dieses Bild stößt jedoch für Kerne mit großem Neutronen- oder Protonenüberschuss an seine Grenzen. So wurde für leichte, sehr neutronenreiche Kerne beobachtet, dass sich ein oder zwei Neutronen bevorzugt im äußersten Randbereich des Kerns aufhalten. Da sich diese Neutronen sogar außerhalb des Anziehungsbereichs der nuklearen Kraft befinden, werden sie möglicherweise durch subtile Korrelationen zwischen den Neutronen an den Kern gebunden. Physiker sprechen in diesem Fall von einem Halo-Kern. Aufgrund dieses Effekts bläht sich zum Beispiel Lithium-11 (mit drei Protonen und acht Neutronen, Abbildung 3) auf die Größe des wesentlich schwereren Kerns von Kalzium-48 (mit 20 Protonen und 28 Neutronen) auf. Für schwerere neutronenreiche Kerne, wie Zinn-132, wird sogar die Bildung von dicken Neutronenhäuten vorhergesagt, bei denen sich mehrere Neutronen in einem großen Abstand vom Zentrum des Kerns aufhalten.

Im Mittelpunkt moderner Forschung stehen Fragen nach der räumlichen Verteilung der Protonen und Neutronen in Halo-Kernen und nach der Wechselwirkung der äußeren Neutronen untereinander und mit den Nukleonen des inneren Kerns. Das Ziel ist, im Wechselspiel zwischen Experiment und Theorie Kernstrukturmodelle zu entwickeln, die dann auch zum Verständnis der Elemententstehung in Sternen oder in Supernova-Explosionen beitragen können.

Auch „normale“ Atomkerne können unter bestimmten Umständen exotisches Verhalten offenbaren, und etwa molekulartige Strukturen aufweisen. Ein wichtiges Beispiel hierfür ist der Atomkern Kohlenstoff-12, der ein wichtiger Baustein irdischen Lebens ist. Seine Produktionsrate im heißen Inneren von Sternen wird wesentlich dadurch beeinflusst, dass er in dieser Umgebung aus drei lose verbundenen Heliumkernen besteht.



■ Abbildung 3: Der leichte, neutronenreiche Kern Lithium-11 ist außergewöhnlich groß. Die Wissenschaftler führen dies darauf zurück, dass sich in diesem Kern ein weit ausgedehnter Halo aus zwei Neutronen um einen Lithium-9-Kern bewegt.

Standardmodell der Teilchenphysik

Letztlich wird die Struktur der Kerne – das heißt ihre Eigenschaften, wie etwa Masse, Größe, Anregungsspektren, Verhalten in Kernreaktionen oder radioaktivem Zerfall – durch die Bausteine des Standardmodells der Teilchenphysik und deren Starke, Schwache und elektromagnetische Wechselwirkung bestimmt. Deshalb verwundert es auch nicht, dass man zum Beispiel Symmetrien des Standardmodells mit Präzisionsmessungen an Atomkernen untersucht. Insbesondere grundlegende Fragestellungen zu Eigenschaften von Neutrinos benötigen detaillierte Kenntnisse der Kernstruktur. Genannt sei hier der doppelte neutrinolose Betazerfall, mit dem man klären will, ob das Neutrino sein eigenes Antiteilchen ist.

Das Ende des Periodensystems: Superschwere Elemente

Schaut man auf das Mendelejewsche Periodensystem der Elemente fällt auf, dass bis bis zum Copernicium (Ladungszahl 112) alle Elemente einen Namen tragen. Jüngst getauft wurden die Elemente Flerovium (Ladungszahl 114) und Livermorium (Ladungszahl 116). Eingetragen sind auch die Elemente mit den Ladungszahlen 113, 115, 117 und 118, allerdings ohne Namen. Wo endet das Periodensystem oder wie viele Protonen kann ein Atomkern maximal haben, bevor ihre abstoßenden Ladungen zur sofortigen Kernspaltung führen? Uran-238 mit 92 Protonen ist das letzte in der Natur gefundene stabile Element. Die Atomkerne mit größerer Ladung wurden im Labor durch Fusion zweier kleinerer Kerne erzeugt.

Diese superschweren Elemente sind aber instabil und zerfallen großteils nach sehr kurzer Zeit. Theoretische Rechnungen, die auf dem Schalenmodell des Atomkerns aufbauen, sagen allerdings voraus, dass es stabile Kerne mit 114 bis 126 Protonen und 184 Neutronen gibt. Physiker sprechen von einer „Insel der Stabilität“. Die Eigenschaften der bisher in Teilchenbeschleunigern erzeugten neuen Kerne mit Protonenzahlen in diesem Bereich unterstützen die theoretische Vorhersage.

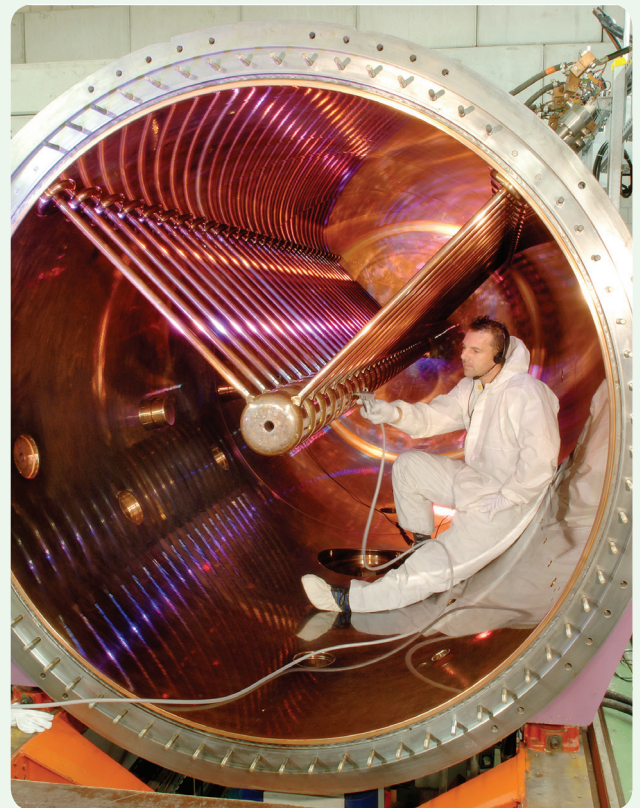
Die Physiker hoffen, in künftigen Experimenten mit hochintensiven Ionenstrahlen weitere Elemente zum Periodensystem hinzufügen zu können, um mehr und mehr zum Zentrum der Insel der Stabilität vorzustoßen und diese präziser zu vermessen. Solche Studien tragen ebenfalls zur steten Verbesserung theoretischer Modelle des Atomkerns bei, wie sie beispielsweise für das Verständnis der Produktion der schwersten auf der Erde vorkommenden Elemente in astrophysikalischen Prozessen von Bedeutung sind.

Experiment und Theorie

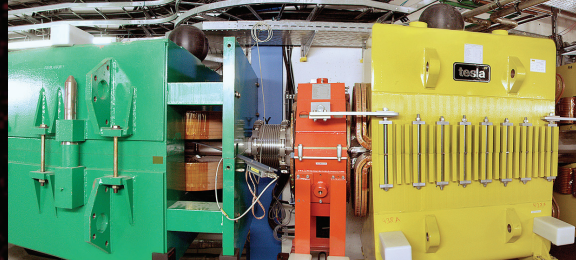
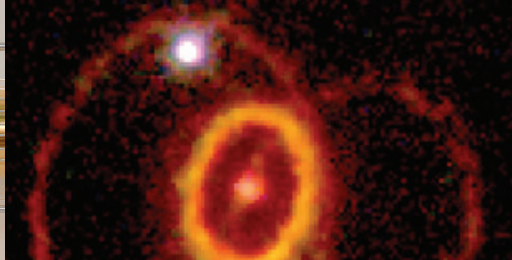
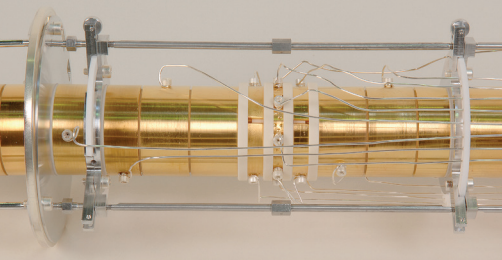
Die Eigenschaften der Atomkerne sind eine Konsequenz der komplexen quantenmechanischen Dynamik der Nukleonen unter dem Einfluss der Starken Kraft. Die Theorie der Struktur der Atomkerne hat die Aufgabe, eine Brücke zwischen der fundamentalen Theorie der Starken Wechselwirkung, der Quantenchromodynamik (QCD), und den Phänomenen der Kernstruktur zu schlagen.

Theorie und Experiment haben sich in den vergangenen Jahren besonders stark gegenseitig beflügelt. So ist es möglich geworden, die nukleonischen Wechselwirkungen ausgehend von der QCD zu beschreiben. Mit neuen computergestützten Methoden versuchen die Wissenschaftler, die komplizierte Wechselwirkung mehrerer Nukleonen quantenmechanisch zu erklären. Auf diese Weise lassen sich quantitative Vorhersagen zu Struktur und Eigenschaften von Kernen machen.

Je weiter die Experimente in unbekanntes Gebiet vorstoßen, desto wichtiger wird der Beitrag der modernen Kernstrukturtheorie: Sie liefert die physikalische Interpretation der experimentellen Daten und stellt die Verbindung zur Physik der Starken Kraft her. Sie liefert Informationen zu Kernen und Beobachtungsgrößen, die (noch) nicht experimentell zugänglich sind, und bildet damit auch eine Brücke zur nuklearen Astrophysik.



■ Abbildung 4: Der Unilac-Beschleuniger des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung in Darmstadt.



Kerne und Sterne

– Die Entstehung der Elemente

Die Natur hat die chemischen Elemente, aus denen alle Sterne und Planeten, alle Organismen und auch wir Menschen bestehen, in zwei Phasen erzeugt. Die erste Phase endete bereits wenige Minuten nach dem Urknall. Bis dahin waren nur die leichtesten Elemente Wasserstoff und Helium sowie in geringen Mengen Lithium und Beryllium entstanden. Danach sanken Temperatur und Dichte im expandierenden Universum so weit, dass keine schwereren Atomkerne mehr gebildet werden konnten.

Die zweite Phase der Nukleosynthese begann erst einige hundert Millionen Jahre später. Damals bildeten sich durch Gravitationsdruck aus dem Urgas die ersten Sterne. In deren heißen Zentren setzten Kernreaktionen ein, in denen die leichten Elemente Wasserstoff und Helium nach und nach zu schwereren Elementen bis zum Eisen fusionierten. Atomkerne schwerer als Eisen entstanden in den letzten Lebensphasen massereicher Sterne, den so genannten Roten Riesen, und in gewaltigen Sternexplosionen, den Supernovae. Der berühmte Satz: „Wir sind aus Sternenstaub gemacht“ ist daher nicht etwa metaphorisch, sondern im Wortsinn zu verstehen: Jedes Atom schwerer als Beryllium in unserem Körper oder wo auch immer im Universum verdankt seine Existenz der Elementsynthese im Innern der Sterne.

Diese Prozesse mit den Gesetzen der Physik zu beschreiben, ist ein Ziel der nuklearen Astrophysik. Der Anspruch ist hoch: Es ist der Versuch, die Häufigkeitsverteilung der Elemente quantitativ zu erklären. Eng damit verbunden ist die Frage, wie sich die astrophysikalischen Objekte entwickelt haben, die bis heute die Elemente erzeugen. Ohne ein Wissen über die Struktur der Atomkerne und die Dynamik von Kernreaktionen ist dieses Unterfangen aussichtslos. Nukleare Astrophysik und Kernphysik sind daher eng miteinander verbunden.

Stellare Nukleosynthese im Labor

Die Energiequelle, die Sterne zum Leuchten bringt, ist die Kernfusion. Hierbei verschmelzen leichte Kerne zu schwereren, wodurch neue Elemente entstehen und riesige Mengen an Energie freigesetzt werden. Zum Beispiel verbrennt unsere Sonne in jeder Sekunde mehr als 600 Millionen Tonnen Wasserstoff zu Helium.

Ihr großes Reservoir an Wasserstoff reicht aber aus, um eine Lebensdauer von mehreren Milliarden Jahren zu erreichen. Stellare Fusionsprozesse laufen allerdings bei so niedrigen Energien ab, dass ihre Reaktionsraten extrem klein sind. Direkte Messungen in irdischen Laboratorien sind selbst mithilfe von äußerst intensiven Teilchenstrahlen fast unmöglich, da die kosmische Strahlung einen sehr viel höheren Untergrund von Störsignalen erzeugt. Dennoch sind solche Messungen in den letzten Jahren erstmals einer internationalen Kollaboration unter starker deutscher Beteiligung mit einem Experiment im italienischen Gran-Sasso-Labor gelungen. Dieses Labor befindet sich tief unten im Appenin-Gebirgsmassiv, dessen Fels einen Großteil der störenden kosmischen Strahlung absorbiert. Nur so konnten im Experiment die sehr seltenen Reaktionssignale nachgewiesen werden.

Sternexplosionen

Wenn Sterne plötzlich am Himmel hell aufleuchten, sind meist gigantische Explosionen die Ursache, wie Novae oder Supernovae. Die größten Explosionen im Weltall überhaupt bleiben allerdings für das menschliche Auge unsichtbar und können nur mit speziellen Teleskopen gemessen werden: gewaltige Ausbrüche von Gamma- und Röntgenstrahlen, die möglicherweise auf die Kollision zweier Neutronensterne zurückzuführen sind. Dabei werden ungeheure Mengen Energie ins All geschleudert, die wahrscheinlich durch explosionsartig verlaufende Kernreaktionen freigesetzt werden.

In diesen Prozessen spielen offenbar auch kurzlebige Kerne, die auf der Erde nicht vorkommen, eine zentrale Rolle. Zur Beschreibung der astrophysikalischen Ereignisse ist es wichtig, die Eigenschaften dieser Kerne wie Masse, Lebensdauer und Reaktionsraten zu kennen. Hierzu müssen die Kerne künstlich im Labor hergestellt werden. Dies ist für einige Kerne in den letzten Jahren an Forschungszentren wie dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt oder an der Anlage ISOLDE am CERN gelungen. Die meisten dieser exotischen Kerne werden allerdings erst an der neuen Teilchenbeschleunigeranlage FAIR in Darmstadt erzeugt und untersucht werden können.

Von der Supernova zum Neutronenstern

Ein massereicher Stern erzeugt in seinem Inneren durch Fusion leichter Atomkerne zunehmend schwere Elemente. Auf diese Weise entsteht dort ein Zentralgebiet aus Eisen und Nickel. Eine weitere Fusion dieser Elemente ist nicht möglich, weil dadurch keine Energie mehr freigesetzt, sondern benötigt würde. Sobald der Brennmaterialvorrat an leichten Kernen verbraucht ist, versiegt die innere Energiequelle des Sterns. Der Fusionsprozess hatte bis dahin einen Strahlungsdruck erzeugt und so die nach Innen gerichtete Gravitationskraft kompensiert. In dem Moment wo die Fusion erlischt, bricht der Zentralbereich des Sterns unter seinem eigenen Gravitationsdruck zusammen.

Dieser Kollaps setzt sich fort, bis sich im Inneren ein riesiger „Atomkern“ von etwa einer halben Sonnenmasse mit einem Radius von nur einigen 10 km gebildet hat. Weitere Materie, die auf dieses Zentrum fällt, wird zurückgeworfen, vergleichbar mit einem Gummiball, den man gegen eine Wand wirft. Es entsteht eine gewaltige Stoßwelle, die vom Zentralgebiet des Sterns nach außen läuft und dessen äußere Schalen wegsprengt. Gleichzeitig setzen heftige Kernreaktionen ein, bei denen enorme Mengen an elektrisch neutralen, fast masselosen Elementarteilchen entstehen, so genannte Neutrinos. Die Neutrinos schießen ins All hinaus und reißen die Materie mit sich. Der heiße, expandierende Gasball leuchtet nun als Supernova auf. Hierbei gelangen auch jene Elemente in den interstellaren Raum, die im Laufe des langen Sternlebens produziert worden sind. Darunter befinden sich unter anderem die Kerne der Elemente Sauerstoff und Kohlenstoff, aus denen auf der Erde Leben entstanden ist. Nach der Supernova-Explosion bleibt vom Stern ein extrem komprimiertes Gebilde übrig, mit einem Radius von 10 bis 15 Kilometern und einer Masse, die etwa dem Anderthalbfachen der Sonne entspricht – ein Neutronenstern.

In groben Zügen sind Supernova-Explosionen gut verstanden, unsere Vorstellungen wurden durch die unterschiedlichen Beobachtungen der Supernova 1987a in der Großen Magellanschen Wolke bestätigt. Viele Details lassen sich allerdings gegenwärtig noch nicht zufriedenstellend beschreiben, wie etwa die innere Struktur von Neutronensternen. So ist noch weitgehend unbekannt, in welcher Form die hoch komprimierte Materie im Zentrum eines Neutronensterns vorliegt. Dazu müsste man wissen, wie sich Kernmaterie bei hohen Dichten und Temperaturen verhält, mit anderen Worten, wie die Zustandsgleichung von Kernmaterie aussieht. Die einzige Möglichkeit, diese Frage im Labor zu untersuchen, besteht darin, schwere Atomkerne auf hohe Energien zu beschleunigen und aufeinander prallen zu lassen. Dabei wird kurzfristig extrem heiße und dichte Kernmaterie erzeugt. Solche Experimente werden an der GSI in Darmstadt und am CERN in Genf durchgeführt und sind



ein zentraler Bestandteil des Forschungsprogramms an der zukünftigen Beschleunigeranlage FAIR.

Synthese der schweren Elemente im s- und r-Prozess

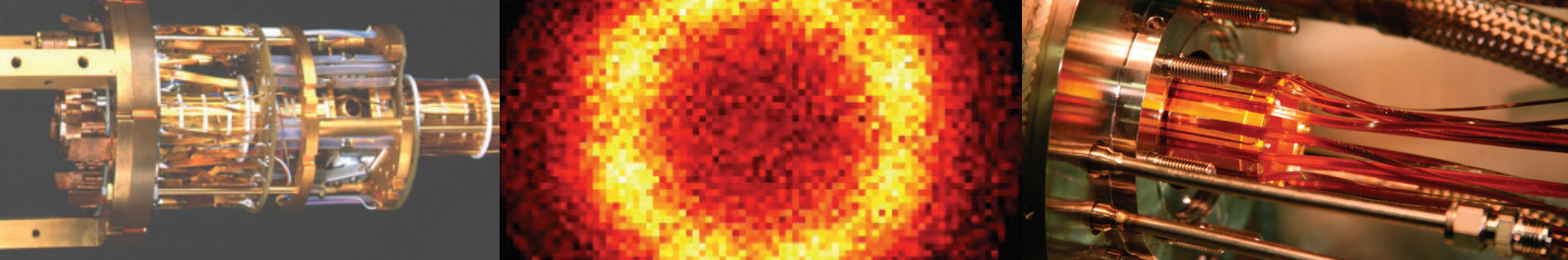
Da sich im Innern von Sternen keine Elemente schwerer als Eisen durch Fusion leichter Kerne bilden können, müssen schwere Elemente durch andere Prozesse entstanden sein. Die Natur hat dazu zwei verschiedene Wege eingeschlagen, die beide darauf beruhen, dass sich Neutronen an bereits vorhandene Kerne anlagern. Die eingefangenen Neutronen wandeln sich anschließend wieder durch einen so genannten Beta-Zerfall in Protonen um, wodurch sich die Kernladungszahl erhöht und neue Elemente entstehen. Die möglichen Produktionspfade sind in der Nuklidkarte auf Seite 9 (Abbildung 2) eingezeichnet.

Ein Prozess der Elementsynthese läuft hauptsächlich im Zentralbereich von Sternen während der Fusion von Helium ab. Hier sind die Temperaturen und Neutronendichten verhältnismäßig gering, und der Einfang der Neutronen geht relativ langsam vonstatten, daher die Bezeichnung s-Prozess (slow neutron capture). Hierbei fängt ein Kern ein Neutron ein, so dass sich die Massenzahl des Atomkerns um eine Einheit erhöht. Der nachfolgende Beta-Zerfall wandelt das Neutron in ein Proton um und erhöht die Kernladungszahl um eine Einheit. Dieser Prozess, dessen kernphysikalische Gesetzmäßigkeiten im Allgemeinen gut erforscht sind, findet viele Male hintereinander statt und endet schließlich bei Blei und Wismut. Hierbei entsteht etwa die Hälfte aller stabilen Atomkerne, die schwerer sind als Eisen.

Die andere Hälfte der schweren Kerne und zusätzlich alle Elemente, die schwerer sind als Wismut, entstehen in einem zweiten Prozess, dem schnellen r-Prozess (rapid neutron capture). Dabei nehmen vorhandene Kerne mehrere Neutronen gleichzeitig auf und zerfallen dann rasch zu stabilen neutronenreichen Kernen oder zu instabilen langlebigen Isotopen von Uran und Plutonium. Da dieser r-Prozess einen extrem großen Neutronenfluss voraussetzt und in wenigen Sekunden abläuft, ist er nur in einem explosiven Szenario wie einer Supernova oder dem Verschmelzen zweier Neutronensterne vorstellbar.

Der genaue Ablauf der kernphysikalischen Reaktionen weitab der Kernstabilität ist bislang noch weitgehend ungeklärt. Daher stellt der r-Prozess gegenwärtig eine der größten Herausforderungen der experimentellen und theoretischen nuklearen Astrophysik dar. Neue Erkenntnisse kann man hier nur gewinnen, wenn es gelingt, Atomkerne mit extremem Neutronenüberschuss zu erzeugen. Dies ist nur mit äußerst intensiven Strahlen instabiler Kerne möglich, wie sie an der neuen Beschleunigeranlage FAIR zur Verfügung stehen werden. Die Kombination solcher Strahlen mit einzigartigen Experimentiereinrichtungen erlaubt die Erzeugung und Untersuchung von Atomkernen, die sonst nur flüchtig in Supernova-Explosionen existieren. Damit wird ein Tor aufgestoßen auf unserer Suche nach einer Erklärung dafür, wie aus Sternenstaub die Welt entstand.

■ Hubble Space Telescope-Bild der Supernova 1994D (SN1994D) am Rand der Galaxie NGC 4526. Die SN 1994D ist der helle Fleck unten links.



Materie und Antimaterie

– Fundamentale Symmetrien

Eigentlich dürfte es die Welt gar nicht geben. Denn im Urknall sind aus Energie zu gleichen Teilen Materie und Antimaterie entstanden, Teilchen und Antiteilchen. Wenn diese sich trafen, zerstrahlten sie wieder zu Energie. Die Erzeugung und Vernichtung von Materie und Antimaterie lässt sich noch heute beobachten. Wenn zum Beispiel ein Anti-Elektron aus der kosmischen Strahlung, ein so genanntes Positron, auf ein Elektron in der Erdatmosphäre trifft, zerstrahlen die beiden zu zwei Lichtteilchen, wobei jedes dieser Photonen exakt die Energie besitzt, die der Masse eines Elektrons entspricht. Umgekehrt kann ein Elektron-Positron-Paar auch durch ein hochenergetisches Photon erzeugt werden.

Solange das frühe Universum noch sehr heiß war, befanden sich die Erzeugungs- und Vernichtungsprozesse im Gleichgewicht. Doch dann, mit abnehmender Temperatur, geschah etwas, dessen Ursache bis heute unverstanden ist: Die Symmetrie von Materie und Antimaterie war plötzlich verletzt. Von einer Milliarde vernichteter Teilchen-Antiteilchen-Paare blieb schließlich ein Teilchen übrig. Diese Symmetriebrechung ist die Ursache unserer Existenz, denn aus diesem Rest ist unser heutiges Universum hervorgegangen. Die milliardenfach häufigere Vernichtungsstrahlung existiert noch heute als kosmische Hintergrundstrahlung.

Dieses unvorstellbare Verhältnis lässt sich vielleicht durch folgenden Vergleich verdeutlichen. Hätten die Teilchen und Antiteilchen des frühen Universums die Größe eines Sandkorns von einem Millimeter Durchmesser, würde von fast einem Kubikmeter Sand nur ein einziges Sandkorn die Vernichtung überleben, und dieser Rest entspräche der Menge der sichtbaren Materie im heutigen Universum.

Auch die vier bekannten Grundkräfte der Natur entstanden durch eine fundamentale Symmetriebrechung. Unserem heutigen Verständnis zufolge waren kurz nach dem Urknall alle vier Kräfte gleich stark und es existierte nur eine einzige Kraft: die Urkraft. Mit abnehmender Temperatur spalteten sich nacheinander die Gravitation, die Starke Kraft, die Schwache und die elektromagnetische Kraft von der Urkraft ab, und die ursprüngliche Symmetrie der Kräfte war gebrochen. Die Suche nach Symmetrien und Symmetrieverletzungen in den elementaren Naturgesetzen ist ein zentrales Anliegen

moderner physikalischer Forschung und ein wichtiges Arbeitsgebiet der Hadronen- und Kernphysik. Laufen Prozesse auf der Skala der Elementarteilchen genauso ab, wenn man sie spiegelt, wenn man Teilchen mit Antiteilchen vertauscht oder die Zeitrichtung umkehrt? Lange Zeit glaubten die Physiker, dass alle elementaren Prozesse unverändert unter den drei Symmetrietransformationen Spiegelung, Teilchen-Antiteilchen-Vertauschung und Zeitumkehr ablaufen. Umso überraschender war die Entdeckung vor etwa 50 Jahren, dass beim radioaktiven Beta-Zerfall die Spiegelsymmetrie verletzt ist. Beim Beta-Zerfall kann ein Neutron im Atomkern in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino zerfallen. Neutrinos und Antineutrinos sind elektrisch neutrale Teilchen mit sehr geringer Masse. Das aus dem Kern herausfliegende Elektron besitzt bevorzugt eine linkshändige Eigenrotation (Spin) in Flugrichtung, während das Antineutrino rechtshändig rotiert. Der zum Beta-Zerfall gespiegelte Prozess mit rechtshändigen Elektronen und linkshändigen Antineutrinos kommt in der Natur nicht vor.

Wie das Beispiel des Beta-Zerfalls zeigt, lassen sich fundamentale Symmetrien und Wechselwirkungen der Natur ideal an ausgewählten Hadronen und Kernen untersuchen. Die bislang gefundenen Fälle von Symmetrieverletzung reichen jedoch nicht aus, um die heute vorhandene Materiemenge im Universum zu erklären. Physiker suchen deswegen nach weiteren Beispielen, die sie insbesondere für Hadronen mit schweren Quarks erwarten.

Physik jenseits des Standardmodells

Seit nahezu vierzig Jahren beschreibt das Standardmodell die Elementarteilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte. Es umfasst die Theorie der Starken und Schwachen sowie der elektromagnetischen Kraft. Die Physiker vermuten, dass das Standardmodell erweitert oder durch ein noch umfassenderes Modell ersetzt werden muss. So lässt sich das Standardmodell bei sehr hohen Energien mathematisch nicht mehr beschreiben. Außerdem enthält es eine Vielzahl von Parametern, die nicht im Rahmen des Standardmodells erklärt werden können, sondern experimentell bestimmt werden müssen. Nicht zuletzt erfordert die Einbeziehung der Gravitation eine grundlegende

Erweiterung des Standardmodells. Infolgedessen sind die Teilchen-, Hadronen- und Kernphysiker auf der Suche nach Prozessen, die auf Physik jenseits des Standardmodells hinweisen.

Der größte Teilchenbeschleuniger der Welt, der *Large Hadron Collider* (LHC) am CERN wurde speziell dafür gebaut, um Antworten auf zumindest einige dieser fundamentalen Fragen zu suchen. Ein Ziel der Experimente am LHC wurde höchstwahrscheinlich bereits erreicht: die Physiker fanden ein Teilchen mit Eigenschaften des Higgs-Teilchens, dem letzten fehlenden Baustein des Standardmodells. Ein weiteres Ziel ist, nach neuen physikalischen Prozessen und Teilchen zu suchen, die nicht in dem Rahmen des Standardmodells erklärt werden können. Das Entdeckungspotential der LHC-Experimente ist aber begrenzt durch unsere unzureichenden Kenntnisse der Struktur der kollidierenden Protonen und der Starken Kraft zwischen Quarks und Gluonen. In anderen Worten, der quantitative wissenschaftliche Fortschritt bei der Suche nach Physik jenseits des Standardmodells erfordert ein Zusammenspiel von Teilchen- und Hadronenphysik.

In der Kernphysik sind Niederenergie-Präzisionsexperimente zur Schwachen Kraft besonders erfolgversprechend, um Symmetrieverletzungen zu studieren. Solche Experimente beinhalten empfindliche Tests der Spiegel- und Zeitumkehrsymmetrie. Neben Kernen und Hadronen bietet auch der elementarste aller Beta-Zerfälle, der des Neutrons, ein für diese Zwecke ideales Untersuchungsobjekt. Hierfür eignen sich besonders kalte und ultrakalte Neutronen, die an Instituten in Grenoble, Mainz (Abbildung 1), München und am Paul-Scherrer-Institut (Schweiz) erzeugt werden können.

Der erste Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik kam aus dem Studium von Neutrinos. Wie bereits erwähnt, sind nur linkshändige Neutrinos und rechtshändige Antineutrinos bekannt, womit die Spiegelsymmetrie gebrochen ist. Für große Überraschung sorgte die Entdeckung, dass sich die drei in der Natur vorkommenden Neutrinoarten ineinander umwandeln können. Diese so genannten Neutrino-Oszillationen können auftreten, wenn die Massen der drei Neutrinoarten winzige Differenzen aufweisen.

Nach wie vor unbekannt sind jedoch die absoluten Massen der Neutrinos. In verschiedenen Kernphysik-Experimenten wird versucht, die Neutrinomassen zu bestimmen. Dies geschieht entweder durch die hochpräzise Vermessung der Elektronenenergie

im Beta-Zerfall wie im Experiment KATRIN am Karlsruher Institut für Technologie, oder durch die Suche nach dem so genannten „neutrinolosen Doppel-Beta-Zerfall“ wie im Experiment GERDA im Untergrundlabor des Gran Sasso (Abbildung 2).

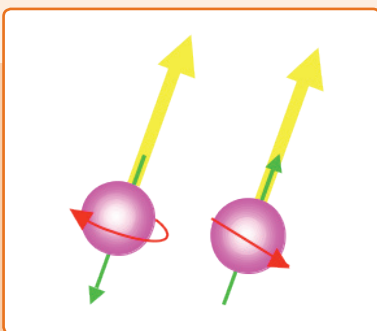
Die Entdeckung des neutrinolosen Doppel-Beta-Zerfalls hätte noch eine weitere, äußerst weitreichende Konsequenz: damit wäre bewiesen, dass Neutrinos und Antineutrinos identisch sind. Das Neutrino wäre damit das erste massive Teilchen, das sowohl Materie wie Antimaterie ist. Neben den Hochenergie-Experimenten am LHC sind es vor allem die Messungen der Neutrino-Oszillationen und des Beta-Zerfalls, die eine Tür zur Physik jenseits des Standardmodells aufstoßen. Auch hier hätte das Ergebnis aus dem Labor weitreichende Konsequenzen für unser Verständnis der Astrophysik, der Kosmologie und des Ursprungs der Materie.



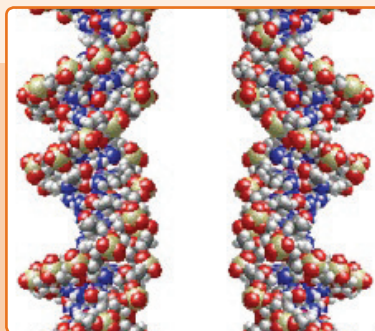
■ Abbildung 1: Am Forschungsreaktor TRIGA an der Universität Mainz werden ultrakalte Neutronen hergestellt.



■ Abbildung 2: Das Experiment GERDA (GERmanium Detector Array) am Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) sucht nach dem neutrinolosen Doppel- Beta-Zerfall. Ziel ist die Messung der Neutrinomasse und die Beantwortung der Frage, ob das Neutrino sein eigenes Antiteilchen ist.



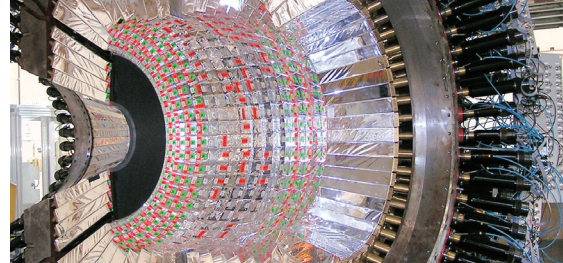
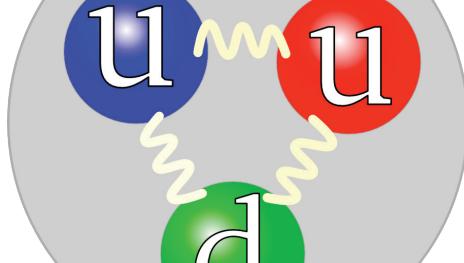
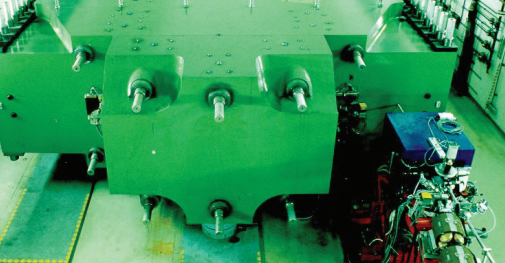
■ In der Natur kommen nur linkshändige Neutrinos vor, die relativ zur Bewegungsrichtung (gelber Pfeil) links herum rotieren (linkes Bild).



■ Die DNS kommt in der Natur nur als Rechtschraube vor (linkes Bild).



■ Taj Mahal: Natur und Spiegelbild sind identisch!



Hadronen

– Verbindungen der Starken Kraft

Die elementaren Bausteine der Protonen und Neutronen – die Quarks – werden durch die Starke Kraft zusammengehalten. Es gibt sechs verschiedene Sorten von Quarks und entsprechende Antiquarks, die auf unterschiedliche Weise verknüpft werden können und somit eine Vielzahl von so genannten Hadronen bilden. Bis auf die Protonen und die in Atomkernen gebundenen Neutronen sind jedoch alle Hadronen instabil und lassen sich nur für kurze Zeit in Beschleunigerexperimenten erzeugen. Protonen und Neutronen bestehen aus den zwei leichtesten Quarks, genannt Up- und Down-Quarks.

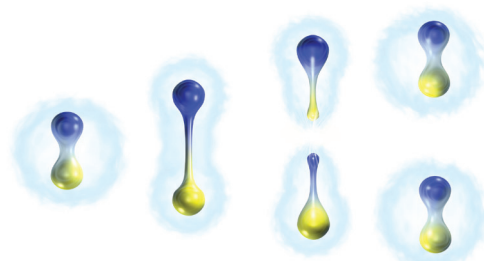
Anders als die Moleküle, die wir weitgehend aus den Eigenschaften der Atome verstehen können, geben uns die Hadronen noch immer große Rätsel auf. Um diese aufzuklären, ist ein viel tiefergehendes Verständnis der Starken Kraft erforderlich. So kann die Theorie der Starken Kraft – die Quantenchromodynamik – bisher nicht beschreiben wie die Quarks in Hadronen gefangen sind. Erfolgversprechend zur Lösung dieser Frage sind Ansätze, in denen die Eigenschaften von Hadronen mit Hochleistungscomputern berechnet werden.

Die Gefangenschaft der Quarks

Hadronen lassen sich nicht in einzelne Quarks aufspalten. Trotz intensiver Suche wurden bisher keine isolierten Quarks in der Natur beobachtet. Phänomenologisch erklärt man sich die Gefangenschaft der Quarks dadurch, dass die durch Gluonen vermittelte Starke Kraft ähnlich wie ein Gummiband wirkt. Zieht man die Quarks auseinander, so erfordert dies Arbeit, die als potenzielle Energie im Gummiband gespeichert wird, das heißt im Gluonenfeld zwischen den Quarks. Das Gummiband reißt erst, wenn die Energie zur Bildung eines Quark-Antiquark-Paares ausreicht, was zur Bildung neuer Hadronen führt, aber keine Quarks freisetzt (*Abbildung 1*). Hierbei wandelt sich also gemäß der Einsteinschen Formel $E = mc^2$ Energie in Materie um. Die Gefangenschaft der Quarks in den Hadronen wird als Confinement bezeichnet. Es ist eine der großen Herausforderungen der modernen Physik, das Confinement nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ im Rahmen der Theorie der Starken Kraft zu verstehen.

Die Masse des Protons

Eigentlich sollte sich die Masse eines Protons aus der Summe der Massen seiner Bestandteile ergeben, bis auf kleine Korrekturen durch Bindungseffekte, die die Masse des zusammengesetzten Systems geringfügig verringern. Umso überraschender war die Beobachtung, dass die Quarks weniger als zwei Prozent zur Protonen- beziehungsweise Neutronenmasse beitragen. Die Masse der Quarks wird erzeugt durch ihre Wechselwirkung mit dem so genannten *Higgs*-Teilchen, das vom Standardmodell der Teilchenphysik vorhergesagt wird. In Experimenten am Large-Hadron-Collider des CERN wurde inzwischen ein neues Teilchen entdeckt, das Eigenschaften des postulierten *Higgs*-Teilchens besitzt.



■ *Abbildung 1: In der Natur treten Quarks nicht isoliert auf, sondern immer nur in Paaren oder Dreierkombinationen. Versucht man Quarks zu trennen, so erfordert das riesige Energien, und es entstehen neue Quark-Antiquark-Paare.*

Die Masse der Nukleonen – und damit die Masse des sichtbaren Universums – lässt sich durch den Higgs-Mechanismus allerdings nicht erklären. Nach heutigem Verständnis ergibt sich die Masse der Nukleonen zum überwiegenden Teil aus der Bewegungsenergie der Quarks und der Energie des Gluonenfeldes zwischen ihnen. Auch hier gilt wieder die Äquivalenz von Energie und Masse ($E = mc^2$). Die Physiker nehmen an, dass ein weiterer Prozess bei der Erzeugung der Hadronenmasse eine wichtige Rolle spielte: die Verletzung der chiralen Symmetrie. Die so genannte Chiralität ist eine der wichtigsten Symmetrien in der Natur. Sie bezeichnet die Tatsache, dass es Gegenstände gibt, die sich zueinander wie Bild und Spiegelbild verhalten, sich also trotz ihrer Ähnlichkeit niemals zur Deckung bringen lassen, so wie die beiden Hände eines Menschen.

Daher der Begriff Chiralität, der aus dem Griechischen „χείρ“ für „Hand“ abgeleitet ist und mit „Händigkeit“ übersetzt werden kann.

Die fundamentale Theorie der Starken Kraft, die Quantenchromodynamik, basiert auf der chiralen Symmetrie. Das heißt, dass es rechtshändige und linkshändige Quarks gibt, wobei hier die Händigkeit durch die Kombination von Flugrichtung und Eigendrehimpuls (Spin) der Quarks definiert ist. Bei rechtshändigen Quarks zeigen Flugrichtung und Spin in die gleiche Richtung, bei linkshändigen Quarks sind sie entgegengesetzt. Rechts- und linkshändige Quarks können nicht zur Deckung gebracht werden, weil masselos sind und sich daher wie Photonen mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Durch die Wechselwirkung mit den Higgs-Teilchen erhalten die Quarks eine Masse, Physiker bezeichnen dies als explizite Brechung der chiralen Symmetrie. In diesem Zustand existierten die Quarks kurz nach dem Urknall, als sie sich frei im heißen Quark-Gluon-Plasma bewegten. Dieses Plasma aus leichten Quarks und masselosen Gluonen kondensierte zu massiven Hadronen, die um ein Vielfaches schwerer sind als die Summe ihrer Bestandteile. Physiker sprechen hier von einer spontanen Brechung der chiralen Symmetrie der Starken Kraft. Die Erzeugung der Masse der Hadronen und der Materie ist also eng mit der Brechung der chiralen Symmetrie im frühen Universum verknüpft.

Es gibt weitere Hinweise darauf, dass die chirale Symmetrie in unserer hadronischen Welt verletzt ist. Es gibt bestimmte Paare von Hadronen, die sich wie Bild und Spiegelbild verhalten. Diese so genannten chiralen Partner müssten gleiche Massen besitzen, wäre die chirale Symmetrie erfüllt. Die beobachteten Hadronenmassen von chiralen Partnern sind aber deutlich unterschiedlich. Dies lässt sich über die spontane Brechung der chiralen Symmetrie erklären, die eine Verschiebung und Aufspaltung der Massen chiraler Partner bewirkt und somit zu ihrer hadronischen Masse beiträgt.

Der Eigendrehimpuls des Protons

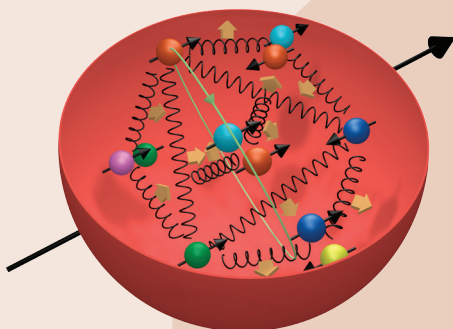
Protonen besitzen einen Eigendrehimpuls, von den Physikern als Spin bezeichnet. Lange Zeit wurde angenommen, dass sich der Spin des Protons in einfacher Weise aus den Spins der Quarks zusammensetzt. Streuexperimente mit hochenergetischen Elektronen zeigten dann aber, dass die Spins der Quarks weniger als 30 Prozent zum Spin des Protons beitragen. Physiker vermuteten daher, dass auch der Bahndrehimpuls der Quarks und der Spin der Gluonen zum Gesamtdrehimpuls des Protons beitragen. Neue experimentelle Daten von COMPASS am CERN und HERMES am DESY zeigen, dass der Beitrag der Gluonen klein ist.

Dagegen gibt es erste experimentelle Hinweise, dass die Bahnbewegung der Quarks einen endlichen Beitrag zum Gesamtdrehimpuls des Protons liefert. Neue theoretische Beschreibungen ermöglichen ein dreidimensionales Bild von der inneren Struktur der Hadronen. Um dieses Bild experimentell zu überprüfen, benötigt man höchst intensive Strahlen polarisierter Elektronen, das heißt Elektronen mit definierter Spinrichtung relativ zur Flugrichtung. Diese sind gegenwärtig aber nicht verfügbar. Planungen für entsprechende neue Beschleunigeranlagen und Nachweissysteme haben begonnen.

Suche nach neuen hadronischen Formen der Materie

Die Starke Kraft hat eine besondere Eigenschaft, die sie von allen anderen Kräften unterscheidet: die Gluonen, die die Anziehung zwischen den Quarks vermitteln, ziehen sich auch gegenseitig an. Diese Anziehung der Gluonen untereinander ist die Ursache der extremen Stärke der Starken Kraft und führt zu einem komplexen Bild für die in der Natur beobachteten Hadronen, die aus Quarks, Antiquarks und Gluonen zusammengesetzt sind. Qualitativ lassen sich viele der bislang beobachteten Hadronen vereinfacht als Zwei- bzw. Drei-Teilchensysteme von Quarks beschreiben, in diesem Fall spricht man von Konstituenten-Quarks. Die Frage, welche Strukturen durch die starke Wechselwirkung tatsächlich hervorgebracht werden können, ist offen und wird gegenwärtig intensiv erforscht. Theoretisch sollte es auch möglich sein, dass zum Beispiel Hadronen existieren, die als Hybridzustände aus zwei Konstituentenquarks und einem Gluon zusammengesetzt sind. Es ist auch nicht ausgeschlossen, dass es Teilchen gibt, die nur aus Gluonen bestehen.

Das – noch ferne – Ziel der Physiker ist eine effektive Beschreibung der Starken Wechselwirkung zu finden, mit deren Hilfe sie die Struktur der Hadronen verstehen könnten. Diese Beschreibung sollte sowohl die experimentell gewonnenen Daten erklären können als auch den physikalischen Prinzipien genügen, die in der Quantenchromodynamik zusammengefasst sind. Dazu suchen die Physiker nach geeigneten abstrakten Eigenschaften der Hadronen, diese „Freiheitsgrade“ nennen. Ein Alltagsbeispiel für einen solchen Freiheitsgrad ist der Schwerpunkt eines Tennisballs. Er wird auch Massemittelpunkt genannt und liegt im Innern des Balls – wo gar keine Masse ist. Trotzdem lässt sich mit dem Schwerpunkt die Flugbahn des Balls gut berechnen. Fänden die Physiker geeignete Freiheitsgrade für die Starke Wechselwirkung, könnten sie vorher-sagen, welche Hadronenformen oder Teilchenkombinationen unter welchen Bedingungen entstehen. Einzigartige Möglichkeiten für die Erzeugung und das Studium neuer hadronischer Zustandsformen bieten Kollisionen zwischen Protonen und Antiprotonen bei hohen Energien, wie sie an der zukünftigen Beschleunigeranlage FAIR in Darmstadt zur Verfügung stehen werden.



■ **Abbildung 2:** Unsere Vorstellung vom Inneren eines Protons: Drei so genannte Valenz-Quarks (dargestellt durch einzelne rote, grüne und blaue Kugeln) sind durch Gluonen (schwarze Federn) miteinander verbunden. Diese Gluonen können sich kurzzeitig in Quark-Antiquark-Paare verwandeln, sodass die Valenz-Quarks in einem See dieser virtuellen Paare schwimmen. Die Masse des Protons wird in diesem Bild durch die Bewegungs- und Wechselwirkungsenergie der Protonen-Bestandteile bestimmt. Außerdem besitzen Quarks und Gluonen einen Eigendrehimpuls (kleine schwarze Pfeile) und durch ihre Bewegung auch einen Bahndrehimpuls, die zum Gesamtdrehimpuls des Protons (großer schwarzer Pfeil) beitragen.



Kernmaterie unter extremen Bedingungen

– Von der „Ursuppe“ zum Neutronenstern

Weltweit werden an den größten Beschleunigeranlagen Experimente mit hochenergetischen Ionenstrahlen durchgeführt, um die Eigenschaften von Kernmaterie bei extrem hohen Dichten und Temperaturen zu untersuchen. Dazu werden zwei schwere Atomkerne auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und dann zur Kollision gebracht. Dabei entsteht für Bruchteile von Sekunden ein hoch komprimierter und heißer Feuerball. Dieser explodiert in Tausende subatomarer Teilchen, von denen die meisten erst in der Kollision entstehen. Die Dichte im Feuerball übersteigt um etwa das Zehnfache die ohnehin schon enorme Dichte in normalen Atomkernen. Wäre der Feuerball so groß wie ein Stück Würfelzucker, besäße er eine Masse von drei Milliarden Tonnen. Solche Materiedichten kommen in der Natur nur im Zentrum von Neutronensternen vor. Die Temperatur des Feuerballs ist hunderttausendfach höher als die im Zentrum der Sonne.

Bei solch hohen Dichten und Temperaturen lösen sich die Protonen und Neutronen in ihre Bestandteile, Quarks und Gluonen, auf. Damit sind diese nicht mehr in Nukleonen gebunden und das Confinement ist aufgehoben. Die Theorie der Starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik (QCD), sagt hier einen Phasenübergang von Kernmaterie in ein Plasma aus Quarks und Gluonen voraus. Kernmaterie kann also verschiedene Zustandsformen in Abhängigkeit von Temperatur und Druck annehmen, ähnlich wie Wasser, das je nach Temperatur und Druck flüssig, fest oder gasförmig sein kann.

Das theoretisch vorhergesagte Phasendiagramm von Kernmaterie ist in *Abbildung 1* skizziert. Aufgetragen ist dort die Temperatur in Einheiten von Millionen Elektronenvolt¹ gegen die Dichte in Einheiten der normalen Atomkernsdichte. Für besonders hohe Temperaturen oder Dichten erwartet man, dass sich ein Quark-Gluon-Plasma bildet. Man nimmt heute an, dass dieser Phasenübergang je nach Temperatur und Dichte unterschiedlich abläuft: Bei hohen Dichten und niedrigen Temperaturen bildet sich erst eine gemischte Phase aus Hadronen, Quarks und Gluonen, ähnlich wie Wasser am Siedepunkt in eine Phase aus Tröpfchen und Dampf übergeht. In Analogie zum Wasser wird auch für Kernmaterie ein kritischer Punkt vermutet, in dem besonders große Dichteschwankungen erwartet werden.

Jenseits des kritischen Punktes, bei kleinen Dichten und hohen Temperaturen, gehen die Hadronen kontinuierlich in das Quark-Gluon-Plasma über. Nach unserem heutigen Verständnis war dies die „Ursuppe“, aus der das heiße Universum kurz nach dem Urknall bestand. Heute könnte Quark-Gluon-Materie noch im Zentrum von Neutronensternen existieren, allerdings bei sehr hohen Dichten und vergleichsweise niedrigen Temperaturen.

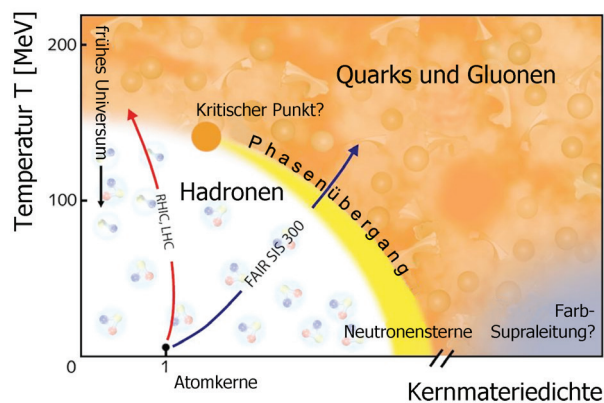


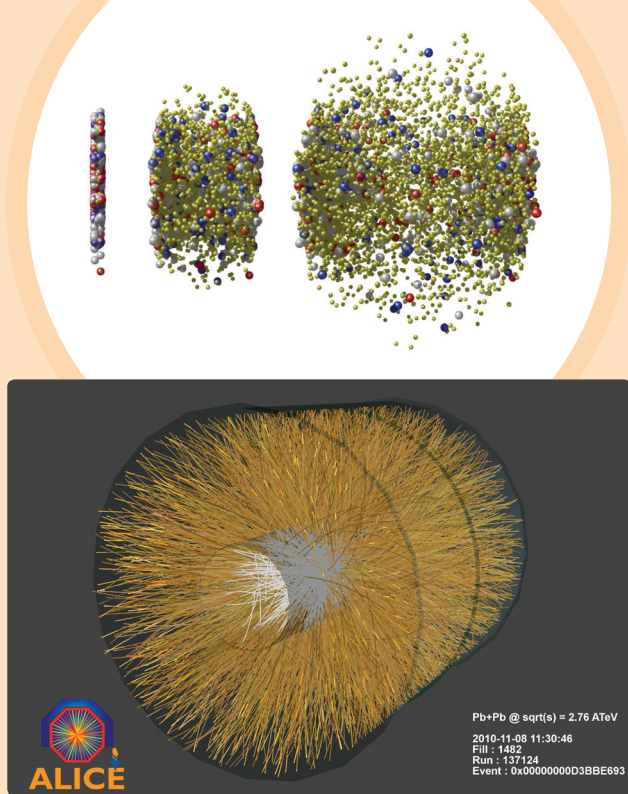
Abbildung 1: Schematische Darstellung der Phasen von Kernmaterie für verschiedene Dichten und Temperaturen. Ähnlich wie Wasser, das bei einer Temperatur von 100°C und bei einem Druck von 1 bar einen Phasenübergang von Flüssigkeit nach Dampf durchläuft, wird für Kernmaterie bei hohem Druck und moderaten Temperaturen ein Phasenübergang von Hadronen ins Quark-Gluon-Plasma erwartet. Der Phasenübergang im Wasser endet bei einer Temperatur von 374°C in einem kritischen Punkt. Jenseits des kritischen Punktes geht die flüssige Phase kontinuierlich in die gasförmige über. Ein kontinuierlicher Übergang vom Quark-Gluon-Plasma zu Hadronen wird auch von der Theorie für Kernmaterie bei hohen Temperaturen, wie sie im frühen Universum herrschten, vorhergesagt. Bei extrem hohen Kernmateriedichten, wie sie im Zentrum von Neutronensternen vorkommen können, werden neuartige Materiezustände ähnlich einem Supraleiter vermutet.

Gegenwärtige und zukünftige Experimente konzentrieren sich auf die Erforschung von zwei Bereichen des Phasendiagramms von Kernmaterie: Bei hohen Temperaturen und niedrigen Materiedichten sollen die Eigenschaften des Quark-Gluon-Plasmas detailliert untersucht werden. Bei hohen Materiedichten und niedrigen Temperaturen wird nach dem Phasenübergang, dem kritischen Punkt und neuen Formen von komprimierter Kernmaterie gesucht. Die Temperatur und die Dichte der Materie im Feuerball beeinflussen die Anzahl und die Eigenschaften der im Stoß herausgeschleuderten Teilchen, ihre Energie, ihre Masse und Zusammensetzung.

¹ 100 Millionen Elektronenvolt (eV) entsprechen einer Temperatur von 1,2 Billionen Grad Celsius.
Zum Vergleich: im Zentrum unserer Sonne herrscht eine Temperatur von knapp 16 Millionen Grad Celsius

Eine besondere Rolle spielen hierbei solche Teilchen, die aus der frühen und dichten Phase des Feuerballs stammen und nur wenig durch die spätere hadronische Phase beeinflusst werden. Dazu gehören besonders Teilchen, die bereits im Inneren des Feuerballs zum Beispiel in Elektron-Positron-Paare zerfallen. Interessant sind auch instabile Teilchen, die aus schweren Quarks bestehen.

Experimente mit Kernmaterie bei höchsten Temperaturen – Einblicke in die Frühphase des Universums



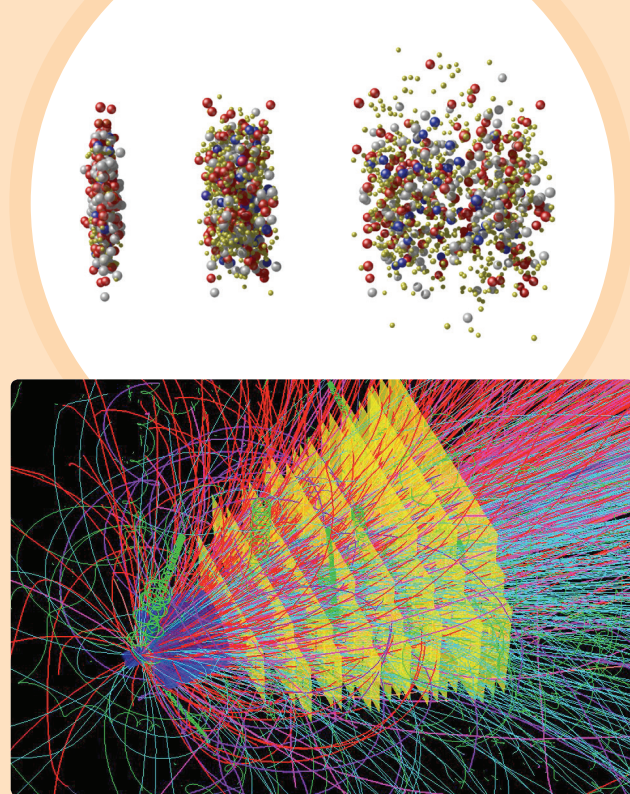
■ **Abbildung 2 – oben:** Computersimulation der zentralen Kollision zweier Atomkerne im Large Hadron Collider des Teilchenbeschleunigerzentrums CERN. Kurz vor dem Stoß sehen die Kerne aus wie flache Scheiben, da sie mit fast Lichtgeschwindigkeit fliegen und aufgrund der speziellen Relativitätstheorie stark in Flugrichtung kontrahiert sind.

■ **Unten:** Zentrale Kollision zweier Bleikerne bei einer Schwerpunktsenergie von 2,76 TeV pro Nukleon. Die daraus resultierenden Teilchenspuren wurden mit der Zeitprojektionskammer des ALICE-Experimentes am LHC aufgenommen.

Ein extrem heißes Quark-Gluon-Plasma, wie es wenige Mikrosekunden nach dem Urknall vorlag, lässt sich künstlich erzeugen, indem man Atomkerne bei sehr hohen Energien zur Kollision bringt. Die detaillierte Untersuchung der Eigenschaften dieser nur aus Elementarteilchen bestehenden Materie ist das Ziel der Experimente am Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) in den USA und am Large Hadron Collider (LHC) des CERN mit dem ALICE-Detektor. Letzterer wurde von einer Kollaboration von über 1.200 Physikern aufgebaut und zeichnet seit November 2010 Daten auf (**Abbildung 2**). Erste experimentelle Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich das Quark-Gluon-Plasma wie eine perfekte Flüssigkeit verhält.

Eine weitere wichtige Beobachtungsgröße ist das Expansionsverhalten der Materie nach einer Kollision, der sogenannte kollektive Fluss der Teilchen. Ähnlich wie die Hubble-Konstante die Expansion des Universums charakterisiert und damit Rückschlüsse auf den Urknall ermöglicht, erlaubt der kollektive Teilchenfluss Rückschlüsse auf den Zustand der Materie im frühen Feuerball.

Experimente mit Kernmaterie bei höchsten Dichten – Expedition in das Innere von Neutronensternen



■ **Abbildung 3 – oben:** Computersimulation einer zentralen Kollision zweier schwerer Atomkerne bei Energien, wie sie in der neuen Beschleunigeranlage FAIR in Darmstadt zur Verfügung stehen werden. Die einlaufenden Kerne sind weniger stark kontrahiert als bei LHC-Energien.

■ **Unten:** Simulation einer zentralen Kollision zweier Goldkerne, bei der ein Kern mit einer Energie von 25 GeV pro Nukleon auf einen ruhenden Atomkern trifft. Die Spuren sind das Ergebnis von Rechnungen, die im Rahmen der Entwicklung des Experiments CBM an FAIR durchgeführt werden.

Einen anderen Weg gehen die Experimente der geplanten Beschleunigeranlage FAIR. Die Energien, bei denen dort die Atomkerne zur Kollision gebracht werden, führen zur Entstehung eines Feuerballs mit einem Vielfachen der normalen Kerndichte. Das auf diese Weise erzeugte Quark-Gluon-Plasma ähnelt in seiner Zusammensetzung dem Inneren von Neutronensternen. Mehr als 400 Wissenschaftler aus dem In- und Ausland entwickeln derzeit ein Detektorsystem für FAIR, das Compressed Baryonic Matter (CBM)-Experiment (**Abbildung 3**). Das Ziel der Messungen mit dem CBM-Detektor ist die Erforschung der bisher unbekannten Gebiete des Phasendiagramms von Kernmaterie bei hohen Dichten, wo Phasenübergänge, der kritischen Punkt und neue Formen von Kernmaterie vermutet werden.

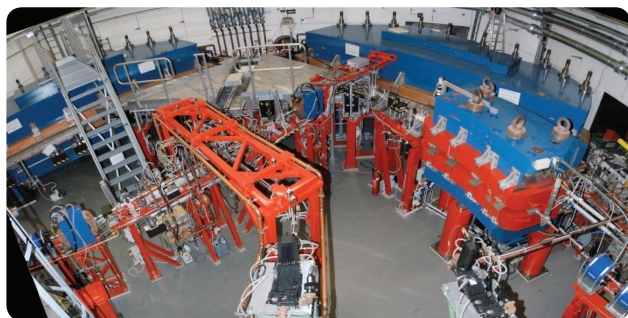


Beschleuniger

– Großgeräte für Forschung und Anwendung

Aktuell betriebene Beschleunigeranlagen

Die Struktur von Atomkernen und Hadronen kann sehr präzise mit Elektronenstrahlen vermessen werden. Für solche Experimente werden gegenwärtig der supraleitende S-DALINAC an der TU Darmstadt, die Mikrotronanlage MAMI mit der kürzlich fertig gestellten Ausbaustufe C (*Abbildung 1*) an der Universität Mainz sowie die Ringanlage ELSA an der Universität Bonn eingesetzt.



■ *Abbildung 1: Die Ausbaustufe MAMI C in Mainz mit 180-Grad-Umlenkung.*

An der Synchrotronanlage COSY des FZ Jülich werden kurzlebige Hadronen erzeugt und mit verschiedenen Detektorsystemen untersucht. Hierfür stehen Strahlen aus Deuteronen (Kerne des schweren Wasserstoffatoms Deuterium) und spinpolarisierten Protonen zur Verfügung. Dies bedeutet, dass die Spins (eine Art Eigenrotation) der Protonen alle gleich ausgerichtet sind. Auch das Target mit den zu untersuchenden Kernen lässt sich polarisieren. Das COSY zeichnet sich unter anderem durch eine besonders leistungsstarke stochastische Kühlereinrichtung aus, die Strahlen hoher Brillanz und kleiner Energieunschärfe erzeugen kann. Hierzu werden Abweichungen der Bewegung eines Teilchenensembles von der Sollbahn an einer Stelle der Umlaufbahn erfasst und anschließend an einer anderen Stelle durch Anlegen einer elektrischen Spannung korrigiert.

Am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt wird der Linearbeschleuniger Unilac mit variabler Energie und Ionensorten von Protonen bis hoch zu Uran traditionell für Experimente bei niedrigen Energien betrieben. Der Unilac, der schwere Ionen auf etwa 10% Lichtgeschwindigkeit beschleunigen kann, dient auch als Injektor für die Synchrotron-

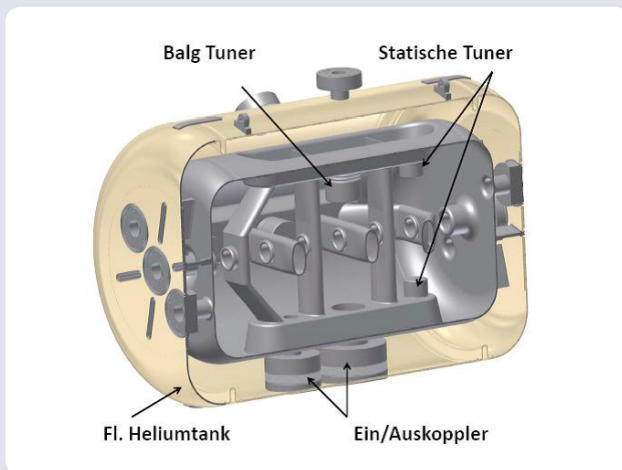
und Speicherringanlage SIS18 und ESR. Im Schwerionensynchrotron SIS18 können die Atomkerne auf etwa 90% Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Diese hochenergetischen Strahlen ermöglichen ein breites Spektrum an Experimenten in den Bereichen Kern-, Hadronen-, Atom-, Plasma-, Bio- und Materialphysik.

An der Rex-Isolde-Anlage am CERN in Genf werden radioaktive Ionen erzeugt und beschleunigt und an der Coulomb-Barriere untersucht.

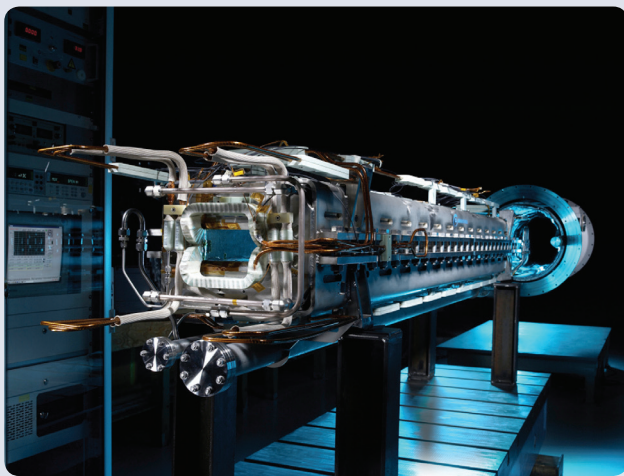
Die Beschleunigeranlage FAIR

Die Realisierung der Forschungsanlage „Facility for Antiproton and Ion Research“ (FAIR) in Darmstadt stellt besondere Anforderungen an die Beschleunigertechnologie. Die FAIR-Anlage nutzt die existierenden Beschleuniger der GSI (Unilac und SIS18) als erste Beschleunigungsstufe (Injektor). Wegen der gewünschten hohen Primärintensitäten von bis zu 10^{12} Ionen pro Sekunde und 10^{13} Protonen pro Sekunde muss der Injektorkomplex ausgebaut werden. Derzeit wird hierfür ein Hochstromprotoneninjektor sowie ein supraleitender Dauerstrich-linearbeschleuniger mit variabler Ionenenergie entwickelt (*Abbildung 2*). Letzterer wird insbesondere die erfolgreiche Fortsetzung der Suche nach superschweren Elementen bei der GSI ermöglichen.

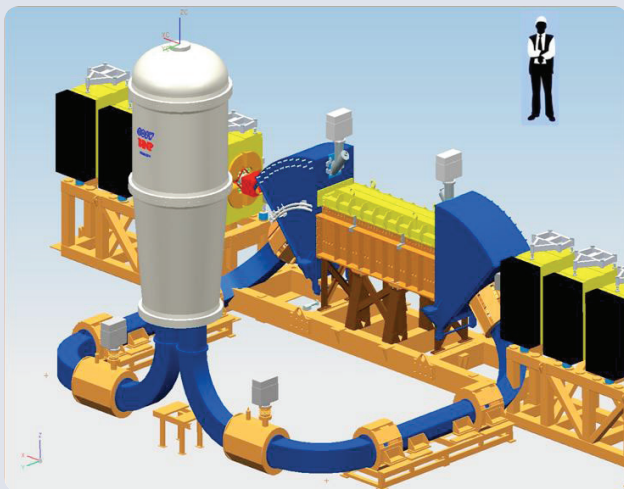
Die weitere Teilchenbeschleunigung erfolgt dann in einem Synchrotron SIS100 mit supraleitenden Magnetspulen und Eisenjochen, um den Energieverbrauch niedrig zu halten. Weltweit erstmalig werden Magnete entwickelt (*Abbildung 3*), die schnelle Feldänderungen von bis zu 4 Tesla pro Sekunde erlauben, um innerhalb von nur einer viertel Sekunde den Strahl im SIS100 auf die Maximalenergie beschleunigen zu können. Diese technische Neuerung wird viele Anwendungen in anderen Gebieten finden. Darüber hinaus erfordert die hohe Taktrate die Entwicklung von neuartigen, kompakten Beschleunigereinheiten in den Ringen sowie von Strahlkollimatoren. Diese entfernen Teilchen aus dem Randbereich des Strahls und vermeiden dadurch unkontrollierte Strahlverluste, die das Vakuum in der Maschine verschlechtern. Schließlich wird ein im SIS100-Tunnel untergebrachtes zweites Synchrotron SIS300 eine Erhöhung der Strahlenergie und den Parallelbetrieb von verschiedenen Experimenten ermöglichen.



■ Abbildung 2: Mehrzellige supraleitende Kavität aus hochreinem Niob zur Teilchenbeschleunigung im Nieder- und Mittlerenergiebereich.



■ Abbildung 3: Erfolgreich getesteter, schnell gepulster SIS100-Dipol mit supraleitender Spule und ferromagnetischem Joch.



■ Abbildung 4: Computergrafik des Elektronenkühlers am COSY in Jülich. Die Elektronen werden durch die blauen Strahlrohre in den Beschleuniger ein- und wieder ausgelenkt.

Für FAIR werden vier nachfolgende Ringe benötigt, um die erzeugten Sekundärteilchen zu sammeln, die Strahlqualität durch Kühlprozesse zu verbessern sowie schließlich Präzisionsexperimente durchzuführen. Am Hochenergiespeicherring HESR wird insbesondere mit elektronengekühlten und nachbeschleunigten Antiprotonen, am neuen Experimentierspeicherring NESR mit seltenen Radionukliden experimentiert.

Am Ringbeschleuniger COSY in Jülich wird derzeit in Zusammenarbeit mit dem Budker-Institut Novosibirsk ein ambitionierter Elektronenkühler entwickelt und aufgebaut (Abbildung 4). Er dient als Zwischenschritt zur Entwicklung des endgültigen Elektronenkühlers für den HESR bei FAIR. Dazu wird ein kalter Elektronenstrahl mit Sollgeschwindigkeit und Bewegungsrichtung des Ionenstrahls über einige Meter auf die Ionenumlaufbahn eingelenkt. Ionen, die von der Sollflugbahn abweichen, erfahren „Reibung“ an den mitfliegenden Elektronen und gelangen dadurch wieder näher an ihre Sollbahn heran.

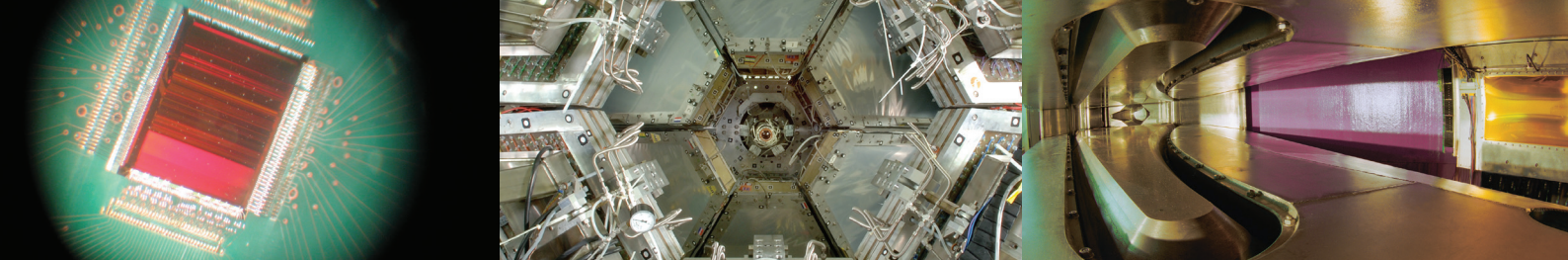
Initiativen zur Unterstützung der FAIR-Beschleunigerentwicklung

Die an mehreren Hochschulen vorhandene Beschleuniger-Expertise wird intensiv in die Entwicklung von FAIR eingebunden. Hierfür wurde 2008 innerhalb der hessischen Förderinitiative LOEWE das Helmholtz International Center HIC for FAIR und 2009 das Helmholtz-Institut Mainz HIM gegründet.

Die Universität Frankfurt baut gegenwärtig die intensive Frankfurter Neutronenquelle FRANZ für thermische Neutronenspektren für den Energiebereich von 30 keV auf. Sie wird das FAIR-Programm zur nuklearen Astrophysik ergänzen.

Kompakte Beschleunigeranlage am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum HIT

An der GSI in Darmstadt wurde im Verlauf mehrerer Jahre die Methode der Tumorthherapie mit Kohlenstoffstrahlen entwickelt. Daraus entstand das Konzept einer auf Tumorbestrahlungen optimierten Beschleunigeranlage, welche schließlich am Universitätsklinikum Heidelberg realisiert wurde. In diesem Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum HIT werden seit November 2009 Patienten behandelt. Diese Anlage setzte neue Maßstäbe in der Effizienz einer Ionenstrahltherapieanlage. Auf dieser Erfahrung aufbauend werden inzwischen mehrere Anlagen dieser Art an verschiedenen Standorten gebaut. Die Anlagen CNAO bei Mailand sowie MedAustron in Wiener Neustadt orientieren sich ebenfalls an HIT.



Instrumente der Hadronen- und Kernphysik

– Hochtechnologie für die Grundlagenforschung

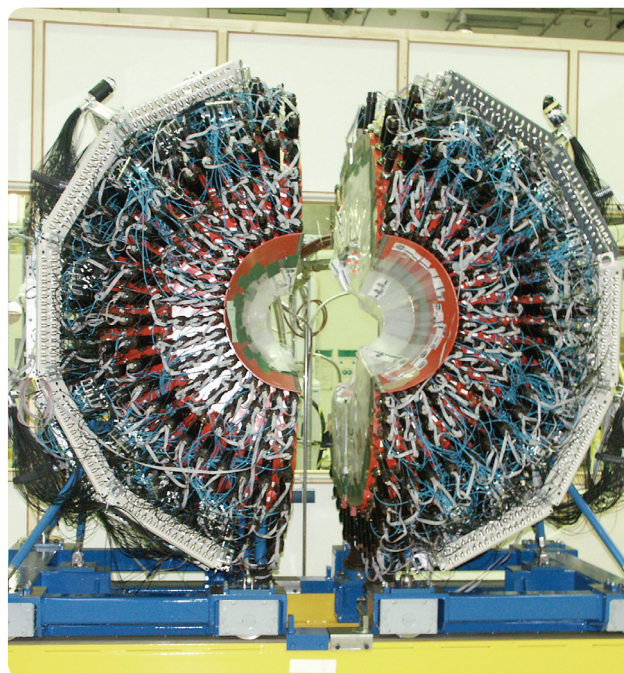
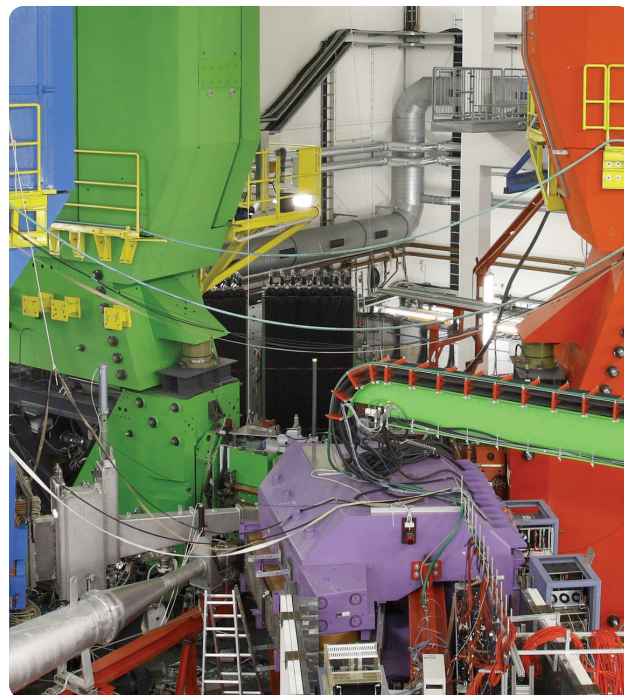
Die Hadronen- und Kernphysik wurde in der Vergangenheit und wird auch in Zukunft ganz wesentlich durch neue Experimentiermöglichkeiten vorangetrieben. Bedeutende Fortschritte in der Forschung hängen daher stark ab von neuen technologischen Entwicklungen in den Bereichen Beschleuniger, Detektorsysteme sowie Datenaufnahme- und Analysesysteme.

An den Universitäten Bonn, Darmstadt und Mainz werden Elektronenbeschleuniger betrieben, deren Strahlen sich besonders gut zur präzisen Vermessung der Struktur von Atomkernen und Hadronen eignen. Die Experimente werden zum Beispiel mit hochauflösenden Spektrometern durchgeführt.

Am Ringbeschleuniger COSY des Forschungszentrums Jülich befinden sich mehrere Experimentaufbauten zur Untersuchung der Struktur von kurzlebigen Hadronen, die in Stößen zwischen Protonen und verschiedenen Atomkernen erzeugt werden.

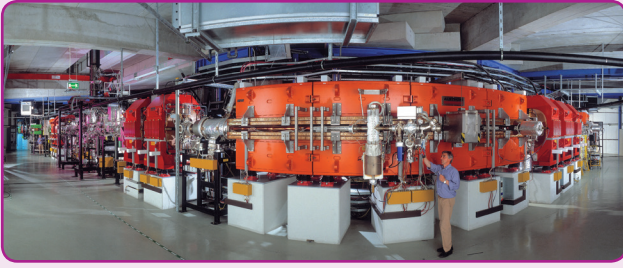
An der ISOLDE-Anlage am CERN in Genf werden inzwischen weit über tausend verschiedene Radionuklide erzeugt und untersucht. Die Nachbeschleuniger REX-ISOLDE und die daran installierte Detektoranordnung MINIBALL, die atomphysikalischen Methoden wie die hochauflösende Laserspektroskopie und die Präzisions-Massenspektrometrie mit Penningfallen sind ideale Werkzeuge zur Erforschung der Grundzustandseigenschaften kurzlebiger Radionuklide.

An der Beschleunigeranlage des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung in Darmstadt wird ein breites Spektrum von Experimenten zur Kern-, Hadronen-, Atom-, Plasma-, Material- und Biophysik durchgeführt. Die Strahlen aus dem Unilac-Beschleuniger dienen zur Erzeugung neuer superschwerer Elemente. Am GSI-Fragmentseparator sowie in den nachfolgenden Versuchsaufbauten und im Experimentierspeicherring ESR werden Experimente zur Nukleosynthese in Sternen oder in Supernovae durchgeführt. In hochenergetischen Stößen zwischen Atomkernen wird kurzzeitig dichte Kernmaterie erzeugt und untersucht.

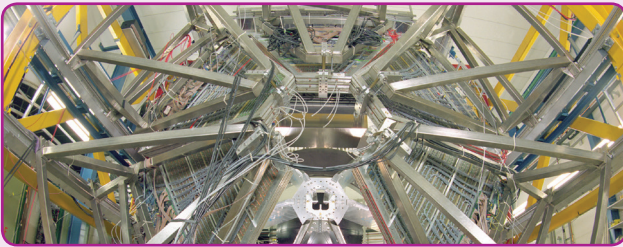


■ *Abbildung 1: Vier-Spektrometeranlage am Elektronenbeschleuniger MAMI der Universität Mainz.*

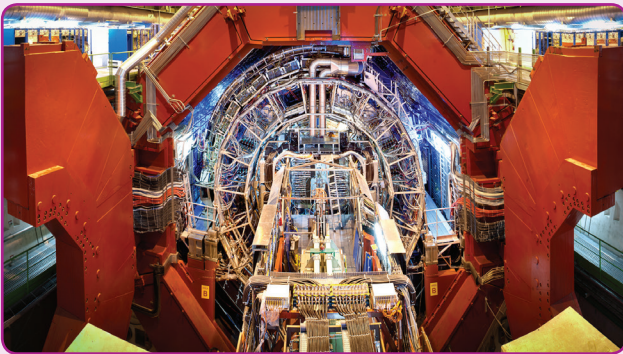
■ *Abbildung 2: Der WASA Detektor am COSY Beschleuniger des Forschungszentrums Jülich.*



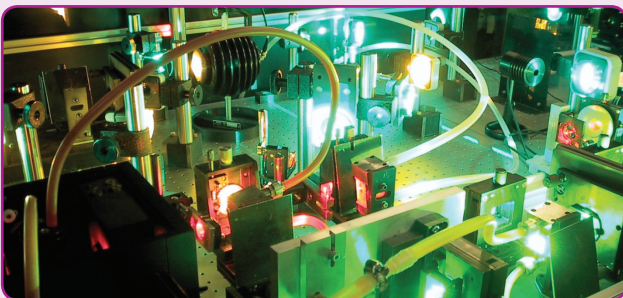
■ **Abbildung 3:** Im Experimentierspeicherring ESR der GSI können einzelne Ionen untersucht werden.



■ **Abbildung 4:** Das Experiment HADES an der GSI misst Elektronenpaare und Hadronen um die Eigenschaften von Kernmaterie zu studieren.



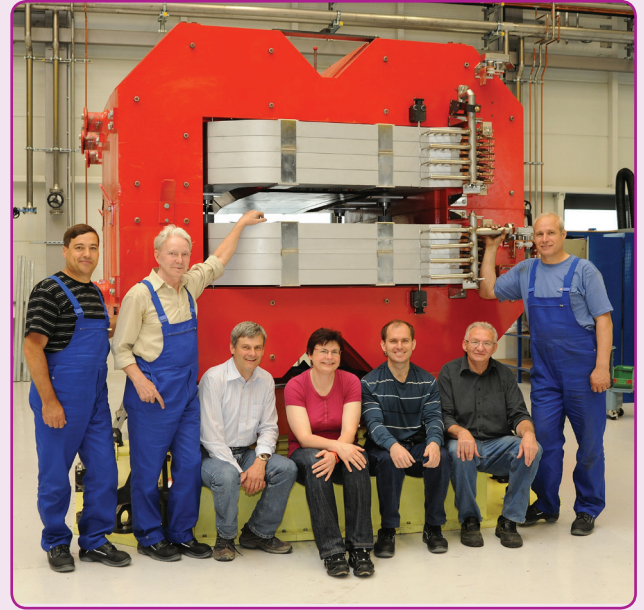
■ **Abbildung 5:** ALICE gehört zu den vier großen Experimenten am LHC des CERN. Es ist 25 Meter lang, 16 Meter breit, 16 Meter hoch und wiegt 10.000 Tonnen.



■ **Abbildung 6:** Lasersystem zur resonanten Ionisation von Radionukliden an ISOLDE.



■ **Abbildung 7:** Der Hochleistungsrechner LOEWE-CSC an der Universität Frankfurt.

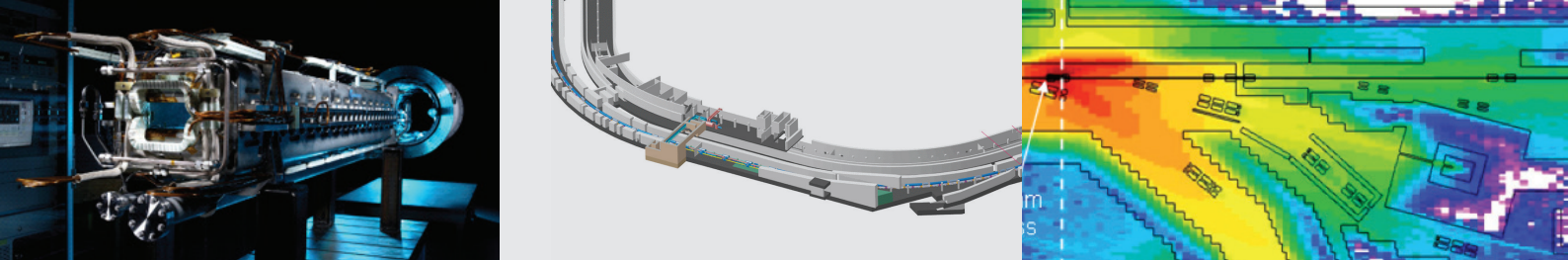


■ **Abbildung 8:** Den ersten supraleitenden Dipolmagneten für den Super-Fragmentseparator bei FAIR hat das Budker-Institut in Nowosibirsk gebaut und an die GSI geliefert.

Deutsche Hadronen- und Kernphysiker waren und sind wesentlich am Aufbau und Betrieb des Detektorsystems ALICE am LHC des CERN beteiligt. Ziel dieses Experiments ist die Erforschung der Eigenschaften eines extremen Zustands von Kernmaterie, dem so genannten Quark-Gluon-Plasma. Es wird in sehr energiereichen Stößen zwischen Atomkernen erzeugt. Man nimmt an, dass sich die Urmaterie kurz nach dem Urknall in einem solchen Zustand befand.

Hochleistungsrechner sind heute ein unverzichtbares Instrument der Forschung. Sie dienen sowohl der Datenverarbeitung großer Experimente als auch der Durchführung komplexer Simulationen und theoretischer Berechnungen. Als besonders wirtschaftlich und energieeffizient haben sich moderne Computerfarmen erwiesen, die aus mehreren hundert Rechnerknoten mit Many-core-CPUs und GPUs bestehen. Um die bereitgestellte Leistung voll auszuschöpfen, muss hoch optimierte Software entwickelt werden, die Parallelisierung, Vektorisierung und GPU-Programmierung beinhaltet.

Im Rahmen der Realisierung des internationalen Forschungszentrums FAIR in Darmstadt wird die Entwicklung modernster Technologien auf den Gebieten Teilchenbeschleuniger, Experimentieranlagen und Hochleistungsrechner weiter vorangetrieben. Für die FAIR-Experimente werden ultraschnelle und strahlenharte Detektorsysteme mit neuartiger Ausleseelektronik entwickelt. Gleichzeitig entsteht an der GSI ein besonders energieeffizientes Hochleistungs-Rechenzentrum („GreenIT-Cube“). Die im Rahmen von FAIR vorangetriebenen technischen Innovationen werden viele Anwendungen in anderen Gebieten von Wissenschaft, Gewerbe und Industrie finden.



FAIR – Ein internationales Beschleunigerzentrum für die Erforschung der Materie



Das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung und die Facility for Antiproton and Ion Research (Fotomontage)

Die Beschleunigeranlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research in Europe) ist weltweit eines der größten Projekte der Grundlagenforschung in der laufenden Dekade. Ihre hochintensiven und hochenergetischen Schwerionen- und Antiprotonenstrahlen werden in Verbindung mit modernsten Versuchseinrichtungen einzigartige Experimentiermöglichkeiten auf den Gebieten der Hadronen-, Kern-, Atom-, Plasma-, Bio- und Materialphysik bieten.

Im Endausbau wird die Anlage aus einem Doppelringbeschleuniger mit 1.100 Metern Umfang bestehen, an den sich ein komplexes System von acht Speicherringen und zahlreichen Experimentierstationen anschließt. Die bestehenden Beschleuniger des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung in Darmstadt werden als Injektoren dienen. Die hochintensiven Ionenstrahlen werden entweder direkt verwendet zur Erzeugung hochdichter Plasmen und komprimierter Kernmaterie, oder zur Produktion von intensiven Sekundärstrahlen aus exotischen Atomkernen oder Antiprotonen. Die Doppelringanlage kann gleichzeitig unterschiedliche Strahlen liefern und somit einen höchst effizienten Parallelbetrieb mehrerer Experimentprogramme ermöglichen.

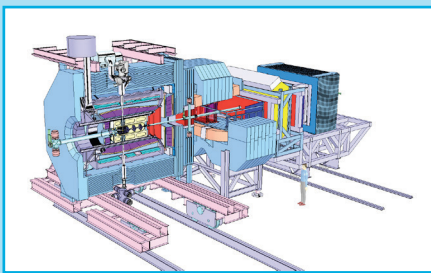
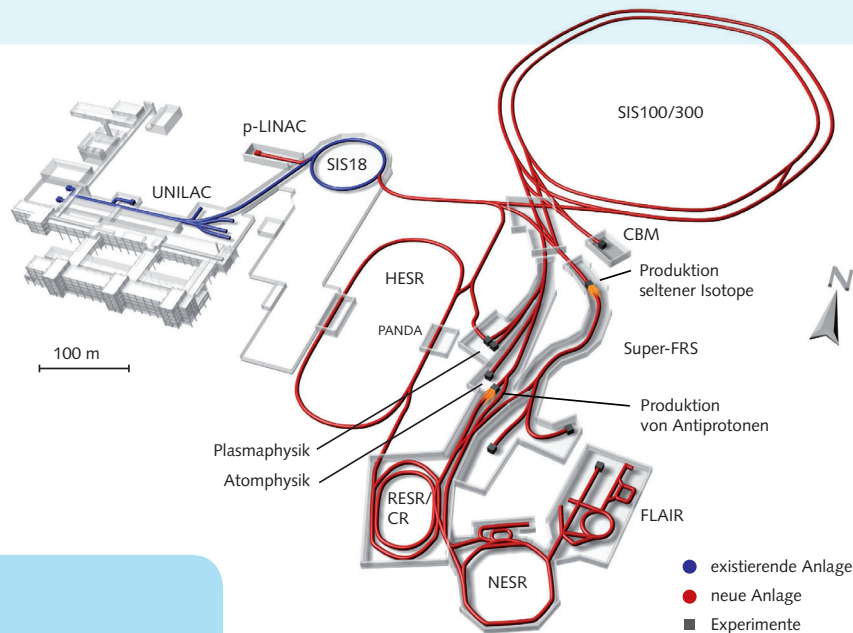
Ziel der Experimente an FAIR ist es, die noch offenen Fragen zu fundamentalen Eigenschaften der Materie und der Evolution des Universums zu erforschen. Neben grundlegenden neuen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen verspricht FAIR Innovationen und Anwendungen in Bereichen wie Materialwissenschaft, Magnettechnologie, Energieerzeugung, Strahlenbiologie und Strahlenschutz, Detektorbau, Elektronik, Computer- und Informationstechnologie.

Die herausragenden Forschungsmöglichkeiten machen FAIR zu einem Anziehungspunkt für Studenten und Wissenschaftler aus aller Welt. Damit leistet FAIR einen wichtigen Beitrag zur Ausbildung des hochqualifizierten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses. Wenn FAIR in Betrieb gehen wird, werden jährlich bis zu 3.000 Wissenschaftler und Studenten aus der ganzen Welt die Anlage nutzen. Durch die Entwicklung neuester Technologien, oft in enger Kooperation mit industriellen Partnern, und durch die Ausbildung zukünftiger Forscher- und Technikergenerationen trägt das FAIR-Projekt zur nachhaltigen Stärkung des Wissenschafts- und Technologiestandorts Deutschland bei.

Die FAIR GmbH wurde im Oktober 2010 gegründet. Die derzeitigen Partnerländer – Finnland, Frankreich, Indien, Polen, Rumänien, Russland, Schweden, Slowenien und Spanien – tragen zusammen etwa 30% der Gesamtkosten von rund einer Milliarde Euro (Bezugspunkt Januar 2005) für die FAIR Startversion.

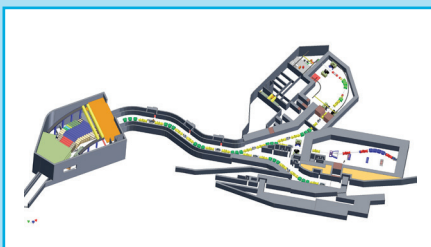
Die Bundesrepublik Deutschland und Hessen übernehmen den Hauptanteil der Kosten. Die Bauarbeiten haben im Winter 2011 begonnen und werden voraussichtlich bis 2017 abgeschlossen sein, sodass nach der Installation der Anlagen ab 2018 die Experimente in Betrieb genommen werden können.

Die im Bau befindliche Beschleunigeranlage FAIR (rot) wird die vorhandenen Beschleuniger des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung (blau) als Injektoren nutzen.



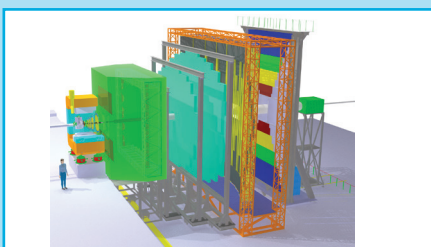
PANDA – Quarks und Hadronen

Die Untersuchung der Kräfte zwischen Quarks, den elementaren Bausteinen der Materie, und der Struktur der Hadronen sind Schwerpunkt des Forschungsprogramms mit hochenergetischen Antiprotonenstrahlen am Experiment PANDA.



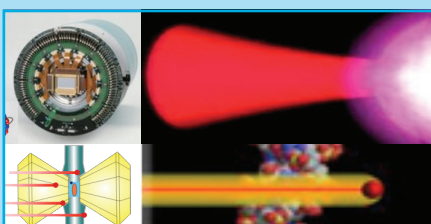
NuSTAR – Astrophysik und exotische Kerne

Im Rahmen des Programms NuSTAR werden die am Super-Fragmentseparator erzeugten hochintensiven Sekundärstrahlen benutzt um die Synthese der chemischen Elemente im Kosmos und die Struktur exotischer Atomkerne zu untersuchen.



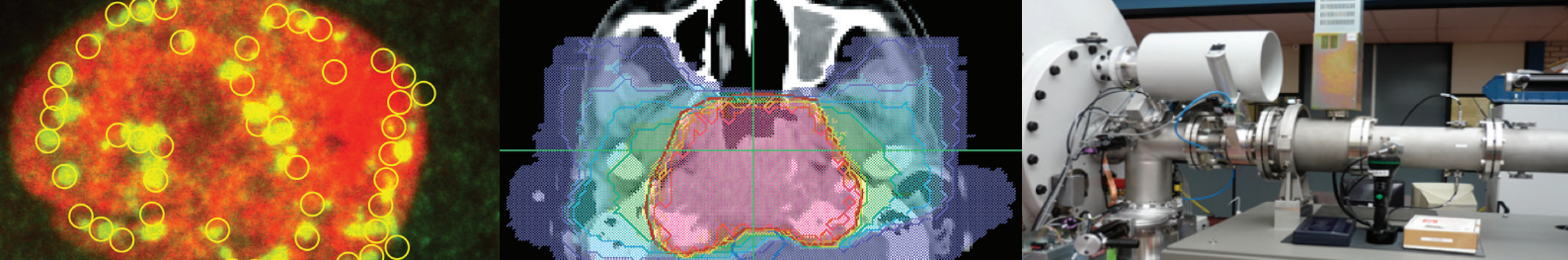
CBM – hoch komprimierte Kernmaterie

Die Erforschung der Eigenschaften hochkomprimierter Kernmaterie, wie sie im Zentrum eines Neutronensterns vorkommt, und die Suche nach neuen Formen von Quarkmaterie werden mit hochintensiven Schwerionenstrahlen am Experiment CBM durchgeführt.



APPA – Atom-, Plasma-, Bio- und Materialphysik

Die APPA-Kollaborationen nutzen die künftige FAIR-Anlage für ein breites, interdisziplinär ausgerichtetes Forschungsprogramm, das die Gebiete der Atom-, Bio-, und Plasmaphysik und Materialforschung umfasst. Fundamentale Fragestellungen beinhalten die Materie-Antimaterie-Asymmetrie und elektromagnetische Wechselwirkungen bei extrem hohen Feldern. Intensive Schwerionenstrahlen bieten einmalige Möglichkeiten zur Erforschung neuer plasmaartiger Materiezustände. Zudem werden Materialmodifikationen unter extremen Bedingungen und die Wirkung hochenergetischer Ionenstrahlen auf biologisches Gewebe untersucht.



Methoden der Hadronen- und Kernphysik

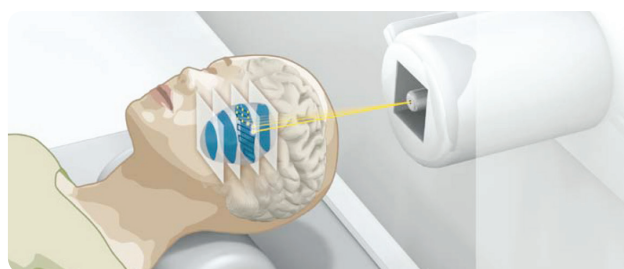
in Medizin, Technik und Forschung

Wenn Ärzte innere Organe untersuchen, Archäologen Schriftrollen datieren oder Computer-Hersteller Prozessoren fertigen, greifen sie häufig auf Methoden zurück, die unmittelbar auf den Erkenntnissen der Hadronen- und Kernphysik beruhen.

Radionuklide und neue Diagnose- und Therapiemethoden in der Medizin

Mithilfe von Beschleunigern werden maßgeschneiderte Radionuklide für die Untersuchung praktisch aller menschlichen Organe hergestellt – eine kaum zu überschätzende Hilfe für die medizinische Diagnostik. In der biologischen Forschung werden Radionuklide eingesetzt, etwa um Vorgänge und Strukturen in Zellen sichtbar zu machen. Neue bildgebende Verfahren beruhen auf der direkten Visualisierung kernphysikalischer Prozesse, wie die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und die Kernspin- oder Magnetresonanztomographie (MRT). Beide Verfahren sind aus der medizinischen Diagnostik nicht mehr wegzudenken.

Für die Bestrahlung schwierig zu behandelnder Tumore werden zunehmend Protonen und seit wenigen Jahren auch Kohlenstoff-Ionen eingesetzt. Der Vorteil gegenüber den üblichen Gammastrahlen besteht darin, dass diese Teilchenstrahlen den Großteil ihrer Energie erst am Ende ihrer Reichweite im Gewebe abgeben. Die Reichweite ist abhängig von der Energie und kann daher mithilfe des Beschleunigers so eingestellt werden, dass die Teilchen im Tumor gestoppt werden und ihn zerstören. So wird das umliegende gesunde Gewebe geschont. Durch Ablenkung des Strahls und Variation seiner Energie wird das Volumen des Tumors vollständig und exakt abgerastert. Diese Rastertechnik mit Hilfe von Magnetfeldern haben Forscher am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung entwickelt (Abbildung 1). Dort wurden auch seit 1997 rund 440 Patienten mit Tumoren vorwiegend an der Schädelbasis mit Kohlenstoff-Ionen bestrahlt. Seit 2009 ist das Verfahren routinemäßig am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT) im Einsatz. Dort lassen sich jährlich etwa 1300 Patienten behandeln (Abbildung 2).



■ **Abbildung 1:** Das Prinzip der hochpräzisen Bestrahlung von Gehirntumoren bei gleichzeitiger Schonung des gesunden Gewebes wurde ursprünglich am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung entwickelt.



■ **Abbildung 2:** Das Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum besitzt einen fünf Meter langen Linearbeschleuniger und einen Ringbeschleuniger mit 20 Meter Durchmesser. Daran schließen sich drei Behandlungsplätze an. Die Beschleunigeranlage und die Bestrahlungstechnik haben Wissenschaftler und Techniker der GSI entwickelt und gebaut.

Archäologie, Kulturgeschichte und Kunst

Die Radiokarbondatierung mit Kohlenstoff-14 wird seit langer Zeit routinemäßig genutzt, um das Alter abgestorbener, organischer Substanzen innerhalb eines Zeitraums von vielen tausend Jahren präzise festzustellen (Abbildung 3). Speziell die Entwicklung der Beschleuniger-Massenspektroskopie ermöglicht es heute, kleinste Proben zu analysieren und somit archäologische Objekte, Grabfunde wie die Gletschermumie Ötzi, Kunstwerke oder kulturgeschichtlich bedeutsame Objekte wie das Turiner Grabtuch zerstörungsfrei zu datieren.

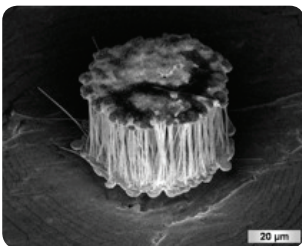
Protonen- und Ionenstrahlen erlauben es, ohne Probenentnahme Informationen über Materialien und deren chemische Zusammensetzung zu erhalten. Durch die zerstörungsfreie Ionenstrahlanalyse gelingt es zum Beispiel, Schichtabfolgen kunstgeschichtlicher oder archäologischer Gegenstände zu identifizieren, Kenntnis über verwendete Pigmente zu erhalten oder in tieferen Lagen versteckte Strukturen sichtbar zu machen.



■ *Abbildung 3: Mit zerstörungsfreien Methoden zur Material- und Isotopenanalyse konnte die Himmelscheibe von Nebra auf etwa 1.600 vor Christus datiert werden. Außerdem ergab die Prüfung in einem Teilchenbeschleuniger, dass der Goldbogen am rechten Rand später angebracht wurde.*

Materialforschung und Festkörperphysik

Durch die Bestrahlung mit hochenergetischen Teilchen (Protonen, Neutronen, Ionen) lassen sich mikroskopische und makroskopische Materialeigenschaften verändern. Deswegen sind Ionenstrahlverfahren in unserer technologisch hochentwickelten Gesellschaft nicht mehr wegzudenken und werden in zahlreichen industriellen Bereichen routinemäßig eingesetzt. Sie sind insbesondere unverzichtbar, um Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften herzustellen. Dazu gehört das Dotieren von Halbleiterelementen, das Härten metallischer Werkstoffe oder die hochpräzise Bearbeitung von Festkörperoberflächen. Ionenstrahlen lassen sich sehr exakt ausrichten und ihre Energie lässt sich genau einstellen. Deshalb sind sie auch ein wichtiges Werkzeug zur Synthese von Nanostrukturen für neuartige Anwendungen wie elektronische, optische, optoelektronische oder sensorische Bauteile (Abbildung 4).



■ *Abbildung 4: Mit hochenergetischen Ionenstrahlen hergestellte metallische Mikrostruktur mit integrierten Nanodrähten zur möglichen Anwendung als chemischer Sensor oder Mikrokatalysator.*

Simulation kosmischer Strahlung

Beschleunigeranlagen bieten zudem einzigartige Möglichkeiten zur Simulation kosmischer Teilchenstrahlung. Für Weltraummissionen werden strahlenunempfindliche Komponenten und elektronische Bauteile benötigt, beispielsweise für die zuverlässige Datenübertragung. Diese Geräte werden im Labor in Bestrahlungsexperimenten getestet, indem sie mit Ionen beschossen werden, wie sie in der kosmischen Strahlung vorkommen. Für die bemannte Raumfahrt sind zudem systematische Untersuchungen an biologischen Zellen unverzichtbar, um vorab Risiken und Strahlenschäden bei Langzeitmissionen abzuschätzen (Abbildung 5).



■ *Abbildung 5: Astronauten sind abhängig von der einwandfreien Funktion der Raumfahrttechnik. Durch kosmische Strahlung verursachte Fehlfunktionen in Mikrochips können fatale Folgen haben. Am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung werden mikroelektronische Bauteile mit Ionenstrahlen getestet, deren Zusammensetzung und Energien denen der kosmischen Strahlung entsprechen.*

Geowissenschaften, Umweltphysik und Klimaforschung

Das Alter von Gesteinen, Sedimenten, Meteoriten und der Erde selbst kann mit Hilfe langlebiger radioaktiver Nuklide präzise bestimmt werden. Erosionsraten sowie Vorgänge in der Atmosphäre lassen sich durch die Analyse spezifischer Radionuklide wie Beryllium-10, Aluminium-26 und Mangan-53 über einen weiten Zeitbereich verfolgen.

Die Massenspektrometrie wurde mithilfe von Beschleunigern zu einer hochempfindlichen Technik weiterentwickelt, die es erlaubt, winzige Konzentrationen von Spurenelementen oder Schadstoffmolekülen in Erde, Wasser und Atmosphäre nachzuweisen bis weit unter eine relative Konzentration von 10^{-15} (ein Atom oder Molekül auf eine Trillion). Das entspricht etwa der Fähigkeit, ein Glas Alkohol im Bodensee nachzuweisen.

Für die Klimadiskussion sind Erkenntnisse, die mit kernphysikalischen Methoden gewonnen werden, ganz wesentlich. In mächtigen Eisbohrkernen der Arktis und Antarktis wird aus dem Isotopenverhältnis von Sauerstoff-16 und Sauerstoff-18 die mittlere Jahrestemperatur über einen Bereich von vielen tausend Jahren genau analysiert. Die Daten erlauben es unter anderem auch, langfristige Änderungen der Sonneneinstrahlung und deren mögliche Auswirkung auf das Klima der Erde in der Vergangenheit festzustellen.

Ausbildung in der Hadronen- und Kernphysik – Wissenschaftlicher Nachwuchs für Forschung und Wirtschaft



In Deutschland sind auf dem Gebiet der Hadronen- und Kernphysik etwa 350 Masterstudenten, 670 Doktoranden und 300 Nachwuchswissenschaftler tätig. Die Ausbildung in der Hadronen- und Kernphysik ist außerordentlich breit gefächert und qualifiziert daher die Studierenden für viele Gebiete auch außerhalb der Grundlagenforschung. Junge Experimentalphysiker entwickeln zum Beispiel technisch anspruchsvolle Detektoren und Beschleunigerkomponenten und sind an deren Aufbau und Betrieb beteiligt. Hierbei nutzen die jungen Physiker moderne Mikroelektronik, die oft in enger Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt wird.

Ein wichtiger Bestandteil der wissenschaftlichen Ausbildung ist die Entwicklung von Hardware und Software zur Steuerung von großen Datenflüssen, Datenreduktion und Datenverteilung. Die Nachwuchswissenschaftler erstellen und bearbeiten große Programmpakete um umfangreiche Computersimulationen durchzuführen, um Daten aufzunehmen und sie anschließend auszuwerten.

Die theoretische Forschung basiert zunehmend auf dem Einsatz von superschnellen Hochleistungsrechnern. Für spezielle Anwendungen werden große Prozessornetzwerke von Physikern zusammen mit Ingenieuren und Informatikern entwickelt. Dies erfordert ebenfalls die Entwicklung von Algorithmen und Computerprogrammen, die an die modernen Rechnerarchitekturen angepasst sind.

Zusätzliche Qualifikationen im Bereich Kommunikation und Organisation erwerben sich die Nachwuchswissenschaftler durch die Arbeit an Großprojekten, die von internationalen Kollaborationen durchgeführt werden. Dies erfordert Durchsetzungsvermögen gepaart mit Teamgeist, und fördert Kenntnisse in Projektmanagement, Kommunikation und Präsentation in Fremdsprachen, auch auf internationalen Konferenzen. Dieses breite Spektrum an Qualifikationen eröffnet sehr gute Berufs- und Karrieremöglichkeiten in Forschung und Lehre, Industrie und Handel, Energie und Verkehr, Medizintechnik und Telekommunikation, bis hin zu Banken, Versicherungen und Unternehmensberatungen.

Um Jugendliche für Naturwissenschaften zu begeistern und Nachwuchs für die Hadronen- und Kernphysik zu gewinnen, organisieren viele Institute Tage der Forschung, Studentenprogramme und Schülerlabore (Übersicht unter: www.lernort-labor.de).



Impressum

Herausgeber:

Komitee für Hadronen- und Kernphysik (KHuK)

Erscheinungsdatum:

Oktober 2012

Internet:

www.khuk.de

Kontakt:

Peter Senger (Vorsitzender des KHuK)

c/o GSI Helmholtzzentrum für

Schwerionenforschung

Planckstr. 1

64291 Darmstadt

Telefon: 06159-712652

E-Mail: p.senger@gsi.de

Redaktion:

P. Senger

Beiträge von:

R. Beck, M. Bernards, K. Blaum, T. Bürke, H. Feldmeier,
C. Greiner, K. Langanke, M.F.M. Lutz, U. Ratzinger,
J. Ritman, P. Senger, T. Stöhlker, J. Wambach, J. Wessels,
C. Weinheimer

Fotos:

NASA, ESA (S 1, S 4 Kopfleiste links, S 12 Kopfleiste
Mitte, S 18 Kopfleiste Mitte, S 13, S 27 Abb.5), G. Otto,
GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
(S 1 Bildleiste links, S 4 Kopfleiste rechts, S 4
Kopfleiste Mitte, S 7 Abb.5, S 10 oben, S 11 Abb.4, S
12 Kopfleiste links und rechts, S 22 Kopfleiste links
und Mitte, S. 23 Abb.4, S 23 Abb.8, S 28 oben, S 29
oben, Mitte, unten), J. Mai, GSI (S 8 Kopfleiste, S 23
Abb.3), A. Zschau, GSI (S 20 Kopfleiste links, S 22
Kopfleiste rechts, S 30 Kopfleiste links), CERN (S 1
Bildleiste links, S 14 Kopfleiste Mitte und rechts, S 20
Kopfleiste Mitte, S 23 Abb.5, S 30 Kopfleiste rechts),
Babcock-Noell (S 20 Kopfleiste rechts, S 21 Abb. 3,
S 24 Kopfleiste links), ALICE-Kollaboration (S 7 Abb.
6), FZ Jülich (S 16 Kopfleiste rechts, S 22 Abb.2),
Universität Frankfurt (S 23 Abb.7), J. Kluge (S 23
Abb.6), Universität Mainz (S 14 Kopfleiste links, S 15
Abb.1, S 20 Abb.1, S 16 Kopfleiste links, S 22 Abb.1),
ELSA, Universität Bonn (S. 7 Abb.4, S 28 Mitte, 28
unten), HIT Universität Heidelberg (S 26 Abb. 2, S
30 Bildleiste Mitte), Universität Köln (S 26 Kopfleiste
rechts), LDA Sachsen-Anhalt, J. Lipták (S 27 Abb. 3.),
M. Rauber (S 27 Abb. 4).

Grafiken und Abbildungen:

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung
(S 4 Abb.1, S 6 Abb.3, S 16 Abb.1, S 18 Abb.1, S 24
Kopfleiste rechts, S 25 oben, S 26 Kopfleiste links
und Mitte), A. Senger (S 8 Abb.1, S 10 Abb.3, S 33),
EMMI 2012 Different Arts (S 9 Abb.2), DESY (S 5
Abb.2), GERDA-Kollaboration (S 15 Abb.2), J. Rith
(S 17 Abb.2), UrQMD-Gruppe Universität Frankfurt
(S 18 Kopfleiste rechts, S 19 Abb.2 oben u. Abb. 3
oben), STAR-Kollaboration (S 18 Kopfleiste links),
CBM-Kollaboration (S 19 Abb.3 unten, S 25 Abb.
CBM), PANDA-Kollaboration (S 25 Abb. PANDA),
NuSTAR-Kollaboration (S 25 Abb. NuSTAR), APPA-
Kollaboration (S 25 Abb. APPA), ion42/FAIR (S 24
Kopfleiste Mitte, S 24, S 36), ALICE-Kollaboration (19
Abb.2 unten), IAP Universität Frankfurt (S 21 Abb.2),
FZ Jülich (S 21 Abb.4), HIT Universität Heidelberg (S 1
Bildleiste rechts, S 26 Abb.1).

Layout und Satz:

helllicht – Agentur für Medienentwicklung
Goschin und Schäfer GbR

Druck:

GSI-Hausdruckerei



Hadronen- und Kernphysik in Deutschland

Die Forschergemeinde

Die deutsche Hadronen- und Kernphysik hat historisch eine der Führungsrollen in diesem Forschungsgebiet inne. Heute wird das Gebiet gegenwärtig von etwa 180 Professuren an mehr als 25 Hochschulen vertreten. An neun Forschungseinrichtungen bildet die Hadronen- und Kernphysik entweder das Hauptforschungsgebiet oder einen wesentlichen Schwerpunkt. Den Wissenschaftlern stehen sowohl an den Universitäten als auch an den nationalen Forschungszentren hervorragende, zum Teil einzigartige Forschungsmöglichkeiten zur Verfügung. Zusammen mit der Beteiligung an großen internationalen Projekten wie am CERN haben sie den Grundstein für die herausragende Rolle Deutschlands in der Hadronen- und Kernphysik gelegt. Damit verknüpft ist die an vorderster Front der Forschung wie auch vieler technischer Neuentwicklungen orientierte Ausbildung des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ist zusammen mit den zuständigen Länderministerien der wesentliche Träger der Hadronen- und Kernphysik. Gemeinsam mit den Ländern finanziert das BMBF insbesondere die großen Beschleunigeranlagen und Großexperimente der Forschungszentren mit ihren in vielen Aspekten einmaligen Experimentiermöglichkeiten. Darüber hinaus vergeben die Verbundforschung des BMBF und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) in erheblichem Umfang Projektmittel an wissenschaftliche Arbeitsgruppen sowie Fördermittel für universitäre Forschungsanlagen.

Das Komitee für Hadronen- und Kernphysik (KHuK)

Im Jahre 2000 wurde das KHuK als Beratungsgremium der Bundesregierung und Interessensvertretung der deutschen Hadronen- und Kernphysikgemeinschaft gegründet. Acht KHuK-Mitglieder werden von den Hadronen- und Kernphysikern in Deutschland gewählt. Kraft ihres Amtes gehören dem KHuK vier weitere Mitglieder an, die für das Fach wichtige nationale und internationale Gremien vertreten: das Gutachtergremium für Verbundprojekte, die durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert werden, die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG)- und das Nuclear Physics European Collaboration Committee (NuPECC) der European Science Foundation (ESF).

Das KHuK berichtet fortlaufend über den Stand der Hadronen- und Kernphysik, entwickelt und diskutiert Perspektiven für die Zukunft und gibt auf dieser Basis Empfehlungen für die Entwicklung und Stärkung des Gebiets und der Forschergemeinde. Die Empfehlungen des Komitees finden Eingang in europäische Strategiepapiere der Hadronen- und Kernphysik (zuletzt in den NuPECC Long Range Plan 2010: Perspectives of Nuclear Physics in Europe). Darüber hinaus berät das Komitee das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) bei förderpolitischen Entscheidungen.

Liste der KHuK-Mitglieder 2010 – 2013:

Gewählte Mitglieder:

Reinhard Beck

(Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn)

Klaus Blaum

(Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg)

Carsten Greiner

(Goethe-Universität Frankfurt am Main)

Matthias Lutz

(GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt)

Ulrich Ratzinger

(Goethe-Universität Frankfurt am Main)

James Ritman, stellv. Vorsitzender

(Forschungszentrum Jülich und Ruhr-Universität Bochum)

Peter Senger, Vorsitzender

(GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt, und Goethe-Universität Frankfurt am Main)

Thomas Stöhlker

(GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt, und Friedrich-Schiller-Universität Jena)

Mitglieder Kraft Amtes:

Ulf Meißner (ab Dezember 2011)

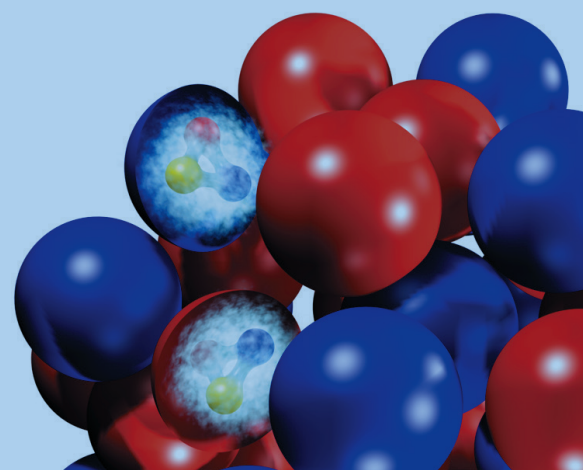
(Universität Bonn und Forschungszentrum Jülich)
Vorsitzender BMBF-Gutachter-Ausschuss
und DFG-Fachkollegium

Jochen Wambach

(Technische Universität Darmstadt)
Vertreter des Nuclear Physics European
Collaboration Committee (NuPECC)

Johannes Wessels

(Westfälische Wilhelms- Universität Münster)
Vorsitzender DPG-Fachverband
Hadronen und Kerne



Empfehlungen des KHuK zur Hadronen- und Kernphysik

Der wissenschaftliche Fortschritt der Grundlagenforschung wurde in der Vergangenheit und wird auch in Zukunft ganz wesentlich durch neue Experimentiermöglichkeiten vorangetrieben. Dies gilt insbesondere für die Hadronen- und Kernphysik, deren Erfolge auf innovativen technologischen Entwicklungen in den Bereichen Beschleuniger, Spektrometer, Detektoren und Datenverarbeitung basieren. Die Beantwortung der fundamentalen Fragen in der Hadronen- und Kernphysik – mit all ihren faszinierenden Implikationen für unser Verständnis der Materie auf der Erde, in Sternen bis hin zur Evolution des Universums – erfordert eine neue Generation von Beschleuniger- und Experimentieranlagen. Der theoretischen Kern- und Hadronenphysik kommt die wichtige Aufgabe zu, die wesentlichen Fragestellungen des Feldes zu erarbeiten sowie die Experimente zu begleiten und ihre Ergebnisse zu interpretieren. Eine entscheidende Voraussetzung für exzellente Forschung sind hochqualifizierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, deren Ausbildung und berufliche Perspektive gewährleistet sein muss.

Das KHuK empfiehlt mit höchster Priorität den vollständigen Ausbau der „Facility for Antiproton and Ion Research“ (FAIR).

Das geplante Beschleunigerzentrum FAIR bietet weltweit einmalige Forschungsmöglichkeiten auf dem Gebiet der Hadronen- und Kernphysik. Mit über 2000 beteiligten Wissenschaftlern wird FAIR die internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit stärken und wichtige Impulse für interdisziplinäre Forschung geben. Der Bau der FAIR-Startversion und der Beginn des Physikprogramms sind von höchster Dringlichkeit und müssen ohne weitere Verzögerungen in Angriff genommen werden. Das Ziel muss die zügige Verwirklichung der kompletten Anlage sein. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass während der Bauphase von FAIR die an den beteiligten Forschungsinstituten betriebene Spitzenforschung weitergeführt werden kann. Dies schließt eine ausgewogene Förderung der für FAIR relevanten Theorieaktivitäten ein.

Das KHuK empfiehlt mit Nachdruck die Förderung existierender Experimentieranlagen zur Erforschung der Struktur der Materie und ihr Verhalten unter extremen Bedingungen.

Die Erzeugung und Untersuchung von Materie mit bisher im Labor unerreichten Energiedichten ist das Ziel des Schwerionenprogramms am LHC. Diese Messungen haben ein hohes Entdeckungspotenzial und erfordern kontinuierliche finanzielle Zuwendungen. Ebenfalls muss der Betrieb der mit signifikanter deutscher Beteiligung am CERN aufgebauten Experimente zur Kern- und Hadronenphysik finanziell unterstützt werden. International beachtete Präzisionsexperimente mit elektromagnetischen Sonden verbinden sich in idealer Weise mit theoretischen Untersuchungen zur Struktur und Spektroskopie von Hadronen und Kernen. Eine gesicherte Finanzierung dieser Forschung ist dringend erforderlich. Sie ist die Basis für ein quantitatives Verständnis der starken Wechselwirkung und bildet die Grundlage für Untersuchungen zur Realisierbarkeit einer zukünftigen Elektronenmaschine.

Das KHuK empfiehlt dringend eine Initiative zur Sicherung des wissenschaftlichen Nachwuchses.

Die zukünftige Rolle Deutschlands als Technologie- und Wissenschaftsstandort – mit den daraus resultierenden Folgen für die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft – hängt entscheidend von den Investitionen in den Bildungs- und Forschungssektor ab. Die Hadronen- und Kernphysik bietet ideale Bedingungen für eine exzellente Ausbildung, wobei insbesondere die universitären Forschungsinstitute eine sehr wichtige Rolle spielen. Der Erfolg von Forschungsanlagen wie FAIR beruht wesentlich auf dem Engagement hoch motivierter und hoch qualifizierter Nachwuchskräfte. Das KHuK sieht mit großer Sorge, dass dem wissenschaftlichen und technischen Nachwuchs in Deutschland aufgrund der Stellenknappheit an Universitäten und Forschungszentren keine berufliche Perspektive geboten werden kann. Das KHuK empfiehlt daher dringend eine bundesweite Initiative mit dem Ziel, hochtechnologische Spitzenforschung personell abzusichern.

Großgeräte der Hadronen- und Kernphysik in Deutschland:

COSY, Cooler Synchrotron

Polarisierte, gekühlte Protonen- und Deuteronenstrahlen
Forschungszentrum Jülich
<http://www2.fz-juelich.de/ikp/cosy/de>

DESY, Deutsches Elektronen-Synchrotron

Photonen-, Elektronen- und Positronenstrahlen
<http://www.desy.de/>

ELBE, Supraleitender Elektronen-Linearbeschleuniger

Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf
<http://www.hzdr.de>

ELSA, Elektronen-Stretcher-Anlage

Polarisierte Elektronen- und Photonenstrahlen
Universität Bonn
<http://www-elsa.physik.uni-bonn.de>

FAIR, Facility for Antiproton and Ion Research (im Bau)

Hochintensive und hochenergetische Ionenstrahlen aller
Elemente bis Uran, Strahlen instabiler Kerne und Antiprotonen
FAIR GmbH, Darmstadt
<http://www.fair-center.eu>

FRM-II, Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz

Neutronenstrahlen
Technische Universität München
<http://www.frm2.tum.de>

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt:

UNILAC: Universal Linear Accelerator

SIS: Schwerionen-Synchrotron

ESR: Experimentier-Speicherring

Gekühlte Ionenstrahlen aller Elemente bis Uran,
radioaktive Sekundärstrahlen, Pionenstrahlen
<http://www.gsi.de>

MAMI, Mainz Mikrotron

Polarisierte Elektronen- und Photonenstrahlen
Universität Mainz
<http://www.kph.uni-mainz.de>

S-Dalinac, Superconducting Darmstadt

Linear Accelerator
Elektronen- und Photonenstrahlen
Technische Universität Darmstadt
<http://www.ikp.tu-darmstadt.de>

TRIGA Mark II, Forschungsreaktor mit Pulsfunktion

Gepulste Neutronenstrahlen
Universität Mainz
<http://www.kernchemie.uni-mainz.de/234.php>

Internationale Großexperimente mit signifikanter deutscher Beteiligung:

ALICE, A Large Ion Collider Experiment

Stark wechselwirkende Materie unter extremen
Eigenschaften (Quark-Gluon-Plasma) CERN-LHC
<http://aliceinfo.cern.ch>

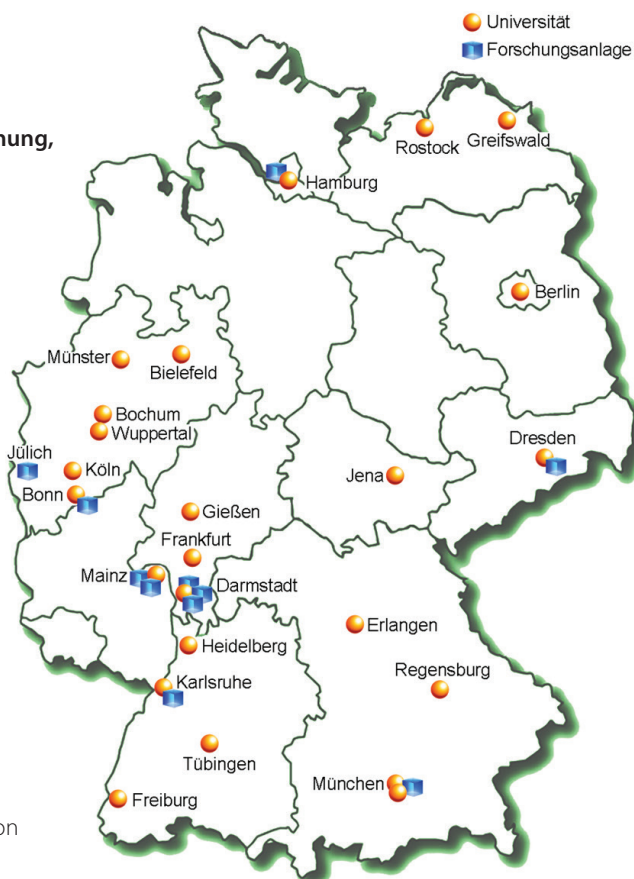
COMPASS, Common Muon and Proton Apparatus

for Structure and Spectroscopy
Struktur und Spektroskopie von Hadronen
CERN-SPS
<http://www.compass.cern.ch>

ISOLDE

Radioaktive Strahlen
CERN
<http://www.cern.ch/isolde>

Universitäten mit Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Hadronen- und Kernphysik:



- TU Berlin
- Universität Bielefeld
- Universität Bochum
- Universität Bonn
- TU Darmstadt
- TU Dresden
- Universität Erlangen
- Universität Frankfurt/Main
- Universität Freiburg
- Universität Giessen
- Universität Greifswald
- Universität Hamburg
- Universität Heidelberg
- Universität und MPI für Kernphysik Heidelberg
- Universität Jena
- KIT Karlsruhe
- Universität Köln
- Universität Mainz
- LMU München
- TU München
- Universität Münster
- Universität Regensburg
- Universität Rostock
- Universität Tübingen
- Universität Wuppertal

Alpha-Zerfall: Radioaktiver Zerfall eines instabilen Atomkerns unter Aussendung eines Heliumkerns, der in diesem Fall Alpha-Teilchen genannt wird. Da ein Heliumkern aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, nimmt die Kernladungszahl des Mutterkerns um zwei Einheiten und die Massenzahl um vier Einheiten ab.

Antimaterie: Materie, die aus Antiteilchen aufgebaut ist.

Antiteilchen: Zu jedem Elementarteilchen gibt es ein Partnerteilchen (Antiteilchen) aus derselben Teilchenfamilie mit gleicher Masse, aber sonst entgegengesetzten Eigenschaften wie z. B. entgegengesetzter Ladung. Treffen Teilchen und Antiteilchen zusammen, so zerstrahlen sie zu Photonen oder anderen Teilchen.

Atom: Atome bestehen aus einem positiv geladenen Atomkern und einer Elektronenhülle. Die Zahl der negativ geladenen Elektronen in der Hülle ist gleich der Zahl der positiv geladenen Protonen im Atomkern, so dass das Gesamtsystem elektrisch neutral ist.

Atomkern: besteht aus Protonen und Neutronen in denen sich praktisch die gesamte Masse konzentriert.

Austauschteilchen: Im Standardmodell spezielle Partikel, welche die Kräfte zwischen Teilchen vermitteln. Als Austauschteilchen fungieren die Gluonen für die Starke Kraft, das Photon für die Elektromagnetische Kraft sowie die W- und Z-Bosonen für die Schwache Kraft.

Baryonen: Aus drei Quarks aufgebaute Teilchen, die der Starke Kraft unterliegen. Bekannteste Beispiele für Baryonen sind Protonen und Neutronen, aus denen der Atomkern besteht.

Beschleuniger: Anlagen, in denen elektrisch geladene Teilchen (z. B. Elektronen, Protonen oder deren Antiteilchen oder Ionen) in elektrischen Feldern auf hohe Energien gebracht werden. Beschleuniger werden in der Physik zur Erforschung der Struktur der Materie und zur Untersuchung von Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen eingesetzt. Je nach Bauform unterscheidet man Linear- und Ringbeschleuniger.

Beta-Zerfall: Umwandlung von Quarks durch die schwache Kraft unter Aussendung von Leptonenpaaren, zum Beispiel der Zerfall des Neutrons in ein Proton, Elektron und Antineutrino. Durch eine Abfolge von Beta-Zerfällen wandeln sich instabile neutronenreiche Atomkerne in stabile Atomkerne um.

CERN: Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire; Europäisches Institut für Teilchenphysik in Genf (Schweiz).

Chirale Symmetrie: Allgemein: Invarianz unter Vertauschung von links und rechtshändigen Systemen wie z. B. Makromolekülen; speziell hier: Erhaltung der Händigkeit von (masselosen) Quarks bei der Starke Kraft.

Detektor (Nachweisgerät): Komplexes Instrument aus zahlreichen verschiedenen Einzelkomponenten zum Nachweis von Teilchen durch Aufzeichnung ihrer Spuren und Messung ihrer Energie.

Dunkle Materie: Materie im Universum, die nicht strahlt und daher nicht direkt beobachtet werden kann. Auf ihre Existenz wird aus der von ihr ausgehenden Gravitationswirkung geschlossen. Man vermutet, dass die Dunkle Materie den größten Teil der Gesamtmasse im Universum ausmacht.

Elektromagnetische Kraft: Eine der vier Grundkräfte der Natur. Sie bewirkt die Anziehung zwischen positiv geladenen Atomkernen und negativ geladenen Elektronen, den Zusammenhalt der Moleküle, chemische Reaktionen und ist für alltägliche Phänomene wie Magnetismus, Elektrizität und Licht verantwortlich.

Elektronenvolt (eV): In der Atom-, Kern- und Teilchenphysik übliche Energieeinheit. 1 eV entspricht der Energie, die ein Elektron mit der Elementarladung e beim Durchlaufen der Spannung von 1 V erhält.

Elementarteilchen: Kleinste Bausteine, aus denen die Materie aufgebaut ist und die sich nach heutigem Kenntnisstand nicht weiter zerlegen lassen. Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik sind dies die Quarks und Leptonen.

FAIR: Facility for Antiproton and Ion Research in Europe. Ein internationales Beschleunigerzentrum für Forschung mit Ionen- und Antiprotonenstrahlen in den Bereichen Atom-, Kern-, Hadronen-, Plasma-, Bio- und Materialphysik. FAIR wird zurzeit in Darmstadt bei der GSI aufgebaut.

Gluonen: Austauschteilchen der Starke Kraft. Es gibt acht verschiedene Gluonen, welche die Kraft zwischen den Quarks übertragen. Sie sind elektrisch neutral und haben keine Masse.

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung: Beschleunigerzentrum für die Forschung mit Ionenstrahlen in den Bereichen Atom-, Kern-, Hadronen-, Plasma-, Bio- und Materialphysik in Darmstadt. Ursprünglicher Name: Gesellschaft für Schwerionenforschung.

Hadronen: Zusammengesetzte Teilchen, die der Starke Kraft unterliegen. Man unterscheidet Baryonen, die aus drei Quarks bestehen, und Mesonen, die aus einem Quark und einem Antiquark bestehen.

Händigkeit (Chiralität): Relative Ausrichtung von Bewegungsrichtung und Eigendrehimpuls (Spin) eines Teilchens. Für masselose Teilchen können Bewegungsrichtung und Eigendrehimpuls nur parallel oder antiparallel zueinander gerichtet sein.

Higgs-Teilchen: Das theoretisch lang vorhergesagte Higgs-Teilchen spielt eine zentrale Rolle im Standardmodell der Elementarteilchenphysik: erst durch die Wechselwirkung mit den Higgs-Teilchen erhalten die punktförmigen Elementarteilchen ihre Masse. Zur Masse der Protonen und Neutronen, die aus leichten Quarks bestehen, trägt der Higgs-Mechanismus allerdings nur unwesentlich bei. Die Suche nach dem Higgs-Teilchen, dem letzten Baustein des Standardmodells, ist ein zentrales Ziel der Experimente am LHC des CERN. Im Jahre 2012 wurde am CERN die Entdeckung eines Teilchens verkündet, das ähnliche Eigenschaften wie das Higgs-Teilchen besitzt und 133 mal so schwer wie ein Proton ist. Allerdings sind weitere Messungen notwendig, um die Identität dieses neuen Teilchens einwandfrei zu bestimmen.

Ionen: Atome, bei denen die Anzahl der negativ geladenen Elektronen in der Hülle nicht mit der Zahl der positiv geladenen Protonen im Atomkern übereinstimmt, so dass sich eine elektrische Netto-Ladung ergibt. Ionen können z. B. durch eine Gasentladung hergestellt werden, in der den Atomen einzelne Elektronen aus der Elektronenhülle entzogen werden. Durch die elektrische Netto-Ladung lassen sich Ionen in Beschleunigeranlagen auf hohe Energien beschleunigen.

Isotope: Atomkerne mit gleicher Protonen- aber unterschiedlicher Neutronenzahl.

Kernfusion: Verschmelzung zweier Atomkerne zu einem größeren Kern.

Kernladungszahl: Anzahl der Protonen im Atomkern.

Kernreaktion: Zusammenstoß eines Atomkerns mit einem anderen Kern oder Teilchen, bei dem mindestens ein Kern umgewandelt wird oder zerfällt.

Leptonen: Gehören mit den Quarks zu den Grundbausteinen der Materie. Es gibt drei Paare von Leptonen, zu denen je ein elektrisch geladenes Teilchen und ein Neutrino gehören: Elektron und Elektron-Neutrino, Myon und Myon-Neutrino, Tau und Tau-Neutrino. Dazu gibt's noch die jeweiligen Antiteilchen.

LHC: Large Hadron Collider, Kreisbeschleuniger für Protonen und Atomkerne am CERN in Genf mit einem Tunnelumfang von fast 27 km.

Linearbeschleuniger: Eine Anordnung magnetischer und elektrischer Felder in einem langgestreckten Vakuumrohr, mit der elektrisch geladene Teilchen beschleunigt werden.

Massenzahl: Anzahl der Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Atomkern.

Materie: Die Materie unserer Erde und die sichtbare Materie im Universum besteht in der Hauptsache aus Protonen, Neutronen und Elektronen, die sämtliche Atome bilden.

Meson: Aus einem Quark und einem Antiquark aufgebautes Teilchen, das der Starken Kraft unterliegt. Das leichteste Meson ist das Pion.

Neutron: Elektrisch neutrales Teilchen bestehend aus drei leichten Quarks. Neutronen bilden zusammen mit Protonen die Atomkerne.

Neutrino: Elektrisch neutrales, nahezu masseloses Elementarteilchen, das zur Gruppe der Leptonen gehört. Man unterscheidet Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos.

Neutronenstern: Kompakter Stern (Durchmesser etwa 20 km), der im Wesentlichen aus Neutronen besteht. Ein solcher Stern kann nach einer Supernova-Explosion übrig bleiben. Bei der hohen Dichte im Zentrum von Neutronensternen könnte Materie als Quark-Gluon-Plasma vorliegen.

Nukleon: Baustein des Atomkerns. Man unterscheidet die elektrisch positiv geladenen Protonen und die elektrisch neutralen Neutronen.

Nukleosynthese: Bildung von Atomkernen in Kernreaktionen. Im Universum laufen derartige Reaktionen im Inneren von Sternen und in Sternexplosionen ab.

Phasen: Unterschiedliche Zustandsformen der Materie wie z. B. Eis, Wasser und Wasserdampf. Durch Energiezufuhr oder -entzug lassen sich die verschiedenen Zustandsformen ineinander umwandeln. Die verschiedenen Phasen können in einem Phasendiagramm dargestellt werden, in dem z. B. die Temperatur über der Dichte des Systems aufgetragen ist.

Photon: Austauschteilchen der elektromagnetischen Kraft. Das Photon ist masselos und elektrisch neutral. Elektromagnetische Strahlung, z. B. Licht, Radiowellen oder Röntgenstrahlen, besteht aus Photonen.

Plasma: Zustand der Materie aus freien Ionen und Elektronen, der durch Energiezufuhr aus normaler Materie entsteht.

Positron: Positiv geladenes Antiteilchen des Elektrons.

Proton: Positiv geladenes Teilchen bestehend aus drei Quarks. Protonen bilden zusammen mit Neutronen die Atomkerne.

Quark-Gluon-Plasma: Zustandsform von Kernmaterie bei hohen Temperaturen und/oder Dichten. Die sonst im Inneren von Nukleonen gebundenen Quarks und Gluonen bewegen sich in dieser Phase wie freie Teilchen.

Quarks: Gehören mit den Leptonen zu den Grundbausteinen der Materie. Es gibt drei Paare von Quarks: up und down, charm und strange, top und bottom. Quarks können entweder paarweise (Quark und Antiquark) auftreten oder als Dreierkombination aus nur Quarks oder nur Antiquarks.

Radioaktiver Zerfall: Spontane Umwandlung instabiler Atomkerne. Die dabei freiwerdende Energie wird meist als ionisierende Strahlung in Form von Elektronen, Positronen, Heliumkernen oder Gammastrahlung abgegeben. Bei sehr schweren Atomkernen kann auch Spaltung auftreten.

RHIC: Relativistic Heavy-Ion Collider. Kreisbeschleuniger am Brookhaven National Laboratory, USA, in dem zwei entgegengesetzt umlaufende Strahlen von Atomkernen mit jeweils einer Energie von 100 GeV pro Nukleon (Gigaelektronenvolt, 1 Giga entspricht einer Milliarde) zur Kollision gebracht werden können.

r-Prozess: Abfolge von Kernreaktionen, bei denen durch schnelle (rapid) Anlagerung von Neutronen an Atomkerne besonders neutronenreiche Kerne entstehen. Die so gebildeten Atomkerne gehen durch radioaktive Zerfälle in mehreren Schritten in stabile Atomkerne über.

Über den r-Prozess sind fast alle Elemente schwerer als Eisen im Universum entstanden, insbesondere die schwersten, wie etwa Thorium und Uran. Die für den r-Prozess benötigten hohen Neutronenflüsse entstehen entweder durch Supernova-Explosionen oder durch das Verschmelzen zweier Neutronensterne.

rp-Prozess: Bildung protonenreicher Atomkerne durch die schnelle Anlagerung von Protonen.

Schwache Kraft: Eine der vier fundamentalen Kräfte. Sie bewirkt u. a. die Umwandlung von Quarks und verursacht damit den Beta-Zerfall von Neutronen oder von Atomkernen.

Schwarzes Loch: Ein Schwarzes Loch ist ein Objekt im Universum, an dessen Oberfläche die Schwerkraft so stark ist, dass nichts dieses Objekt verlassen kann – noch nicht einmal Licht. Daher sind Schwarze Löcher auch nicht direkt beobachtbar, man kann nur durch ihre Auswirkungen auf ihre Umgebung auf ihre Existenz schließen. Schwarze Löcher können in Supernova-Explosionen sehr massenreicher Sterne entstehen.

Schwerionen: Ionen, bei denen der Atomkern eine große Masse (Zahl von Nukleonen) besitzt.

Speicherring: Anlage, in der auf hohe Energien beschleunigte Teilchen für Experimentierzwecke gespeichert werden. Dabei vollführen sie viele Millionen Umläufe pro Sekunde.

Spin: Eigendrehimpuls von Elementarteilchen, die sich, einem Kreisel vergleichbar, um sich selbst zu drehen scheinen. Der Spin kann nur bestimmte (gequantelte) Werte annehmen.

s-Prozess: Bildung neutronenreicher Atomkerne durch langsamen (slow) Neutroneneinfang im Inneren der Sterne.

Standardmodell der Elementarteilchenphysik: Umfassendes Modell zur Beschreibung aller elementaren Teilchen und Vorgänge in der Teilchenphysik.

Starke Kraft: Eine der vier fundamentalen Kräfte. Sie bindet die Quarks aneinander und wird durch Gluonen als Austauschteilchen übertragen.

Supernova: Explosion eines großen Sterns am Ende seiner Entwicklung, bei der eine große Zahl von Neutronen und Neutrinos freigesetzt wird. Der Kern des Sterns kollabiert dabei entweder zu einem Neutronenstern oder zu einem Schwarzen Loch.

Supraleitung: Eigenschaft bestimmter Materialien, bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt den elektrischen Strom verlustfrei zu leiten. In modernen Beschleunigern oder Experimenten werden oft supraleitende Magnete eingesetzt, um die Stromkosten zu minimieren.

Symmetrie: Die Eigenschaft, dass Naturgesetze sich unter bestimmten Symmetrioperationen nicht ändern, wie zum Beispiel bei Drehungen oder Spiegelungen. Dies bedeutet, dass für jeden Vorgang der Natur der durch die Symmetrioperation, z. B. die Spiegelung, hervorgehende Vorgang auch erlaubt ist.

Symmetrieverletzung: Wenn Naturgesetze eine gegebene Symmetrie nicht erfüllen.

Synchrotron: Ringbeschleuniger, bei dem die Teilchen auf Kreisbahnen beschleunigt werden und dabei immer durch die gleiche Beschleunigungsstruktur fliegen. Dabei wird mit wachsender Energie der beschleunigten Teilchen synchron die Hochfrequenz der Beschleunigungsstruktur und das Feld der Magnete hochgefahren, um die Teilchen auf einer vorgegebenen Umlaufbahn zu halten.

Urknall: Ausgangspunkt des Universums; Zustand extrem hoher Energiedichte, aus dem das Universum durch Ausdehnung bei gleichzeitiger Abkühlung entstanden ist.