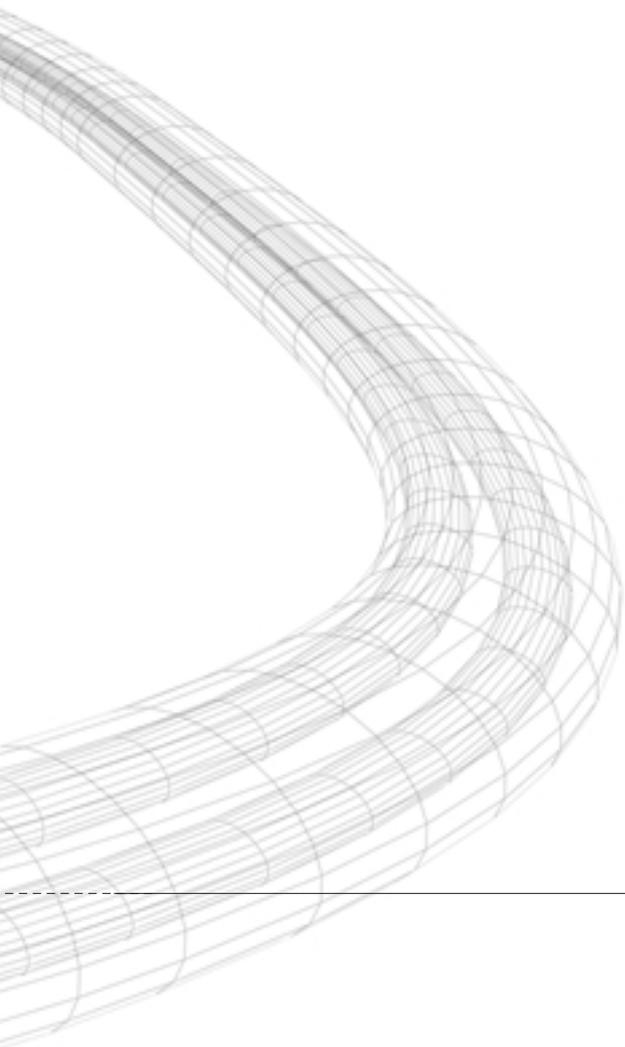




GESELLSCHAFT FÜR SCHWERIONENFORSCHUNG

Projektvorschlag für ein internationales Beschleunigerzentrum
für die Forschung mit Ionen- und Antiprotonenstrahlen

Von den Grundbausteinen... ...zur komplexen Materie



VORWORT

Warum ist die Natur so, wie sie ist? Wie ist die Materie aufgebaut? Welchen Ursprung hat das Universum? Schon immer zeichnet den Menschen sein Bestreben aus, die ihn umgebende Welt in ihrem Aufbau und Verhalten besser zu verstehen. Zum einen ist es die Neugier, die uns nach neuen Erkenntnissen suchen lässt, zum anderen der Ansporn, durch Anwendung des neu gewonnenen Wissens unsere Lebensbedingungen zu verbessern.

Die naturwissenschaftliche Forschung, insbesondere die des letzten Jahrhunderts, hat uns ein immer umfassenderes Bild von dem Bauplan des Universums und der Struktur der Materie geliefert. Zugleich haben die neu gewonnenen Erkenntnisse technische Entwicklungen und Anwendungen in einem bis dahin nicht bekannten Ausmaß angestoßen.

Die Suche geht weiter. Auf immer tieferer Ebene versuchen wir die elementaren Bausteine und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte zu erforschen. Wir wissen jedoch auch, dass sich die Struktur der Materie – vom Atomkern bis zu unserer biologischen Welt – nicht einfach aus einer Addition der elementaren Bausteine und Kräfte ergibt, sondern von einer grundlegenden Komplexität ist, die wir besser verstehen wollen.

Entscheidend für die großen Fortschritte auf diesem Gebiet der Forschung waren und sind auch in Zukunft leistungsfähige Teilchenbeschleuniger, die es – modernen Mikroskopen gleich – erlauben, ein immer genaueres Bild von der Struktur der Materie zu gewinnen. Zugleich eröffnen sie die faszinierende Möglichkeit, die stufenweise Entwicklung des Universums bis nahe an den Urknall zurückzuverfolgen.

Um auf diesem Weg einen weiteren großen Schritt nach vorne zu tun, planen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in enger Zusammenarbeit mit Hochschulen und Forschungsinstituten des In- und Auslandes

ein internationales Beschleunigerzentrum für die Forschung mit Ionen- und Antiprotonenstrahlen. Die in ihrer Konzeption weltweit einmalige Anlage eröffnet einen einzigartigen Zugang zur Untersuchung der Materie.

Die wissenschaftlichen Ziele des neuen Projekts sind komplementär zu denen der Teilchenphysik, welche die elementaren Bausteine der Materie erforscht. Demgegenüber zielt das vorgeschlagene Projekt auf die Beantwortung der Frage, wie aus diesen Grundbausteinen und den zwischen ihnen wirkenden Kräften die komplexen Strukturen der Materie entstanden sind, welche unsere heutige Welt bestimmen.

Zur Beantwortung dieser Frage eröffnet das neue Beschleunigerzentrum ein internationales, interdisziplinäres Forschungsprogramm, das von der Kern- und Atomphysik über die Astrophysik und Plasmaforschung bis zur Materialforschung und Biophysik reicht. Auf diese Weise führt das Projekt Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verschiedenster Nationen und Arbeitsrichtungen an einem zentralen Forschungslabor zusammen.



W. Henning

Prof. Dr. Walter F. Henning
Wissenschaftlicher Direktor der GSI

A detailed technical drawing of a particle accelerator structure, showing various components like pipes, valves, and electrical connections. The drawing is rendered in a fine-line, hatched style, typical of engineering blueprints. It shows a complex arrangement of components, likely part of a large-scale scientific facility.

Projektvorschlag für ein internationales Beschleunigerzentrum
für die Forschung mit Ionen- und Antiprotonenstrahlen

Von den Grundbausteinen... ...zur komplexen Materie

Inhalt

Seite	4 - 5	Die GSI
Seite	6 - 7	Aufbau der Materie
Seite	8 - 9	Evolution des Universums
Seite	10 - 13	Ionenbeschleuniger – Werkzeuge für die Erforschung der Materie
Seite	14 - 15	Die Eigenschaften der Starken Kraft
Seite	16 - 17	Der Ursprung der chemischen Elemente
Seite	18 - 19	Zustandsformen der Materie
Seite	20 - 21	Symmetrien, Symmetrieverletzungen, Symmetriebrechungen
Seite	22 - 23	Von der Grundlagenforschung zur Anwendung
Seite	24 - 25	Technologische Herausforderungen und Innovationen
Seite	26 - 27	Bauliche Realisation
Seite	28 - 29	Das Projekt im nationalen und internationalen Vergleich
Seite	30 - 31	Glossar
Seite	32	Impressum



Die GSI

HEUTE – DIE AUSGANGSLAGE

Die GSI verfügt bereits heute über eine hervorragende und in vielen Aspekten einmalige Beschleunigeranlage für Ionenstrahlen. Diese ermöglicht es den Wissenschaftlern, immer wieder neue und zum Teil unerwartete Entdeckungen in der Grundlagenforschung zu machen, und hat darüber hinaus auch zu eindrucksvollen Anwendungen geführt.

Die hohe Attraktivität der GSI-Beschleunigeranlage spiegelt sich in der Zahl ihrer wissenschaftlichen Nutzer wider. Jährlich experimentieren über 1000 Forscher aus dem In- und Ausland bei der GSI. Insbesondere mit Wissenschaftlern von deutschen und europäischen Universitäten bestehen enge Kollaborationen. Die GSI

übernimmt hier auch eine wichtige Rolle bei der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. So sind zum Beispiel über 220 Doktoranden an wissenschaftlichen Projekten bei der GSI beteiligt.

Die wohl bekanntesten Resultate sind die Entdeckung von sechs neuen chemischen Elementen mit den Ordnungszahlen 107 – 112 und die Entwicklung einer neuartigen Tumorthherapie unter Nutzung von Ionenstrahlen. Diese Ergebnisse sind auch über die Fachwelt hinaus in der breiten Öffentlichkeit bekannt geworden. Die GSI blickt jedoch auf ein viel breiteres Spektrum wissenschaftlich ebenso herausragender Resultate zurück – insbesondere auf den Gebieten Kern-, Atom- und Plasmaphysik – die ihr eine international führende Position in der Forschung mit Ionenstrahlen gesichert haben.



Das erfolgreiche Forscherteam nach der Entdeckung von Element 112.



Um die Eigenschaften von Atomkernen zu untersuchen, bauen die Wissenschaftler große Detektorsysteme.



Mit dem neuen Verfahren der Ionenstrahltherapie werden jährlich etwa 40 Patienten behandelt.

MORGEN – DIE VISION

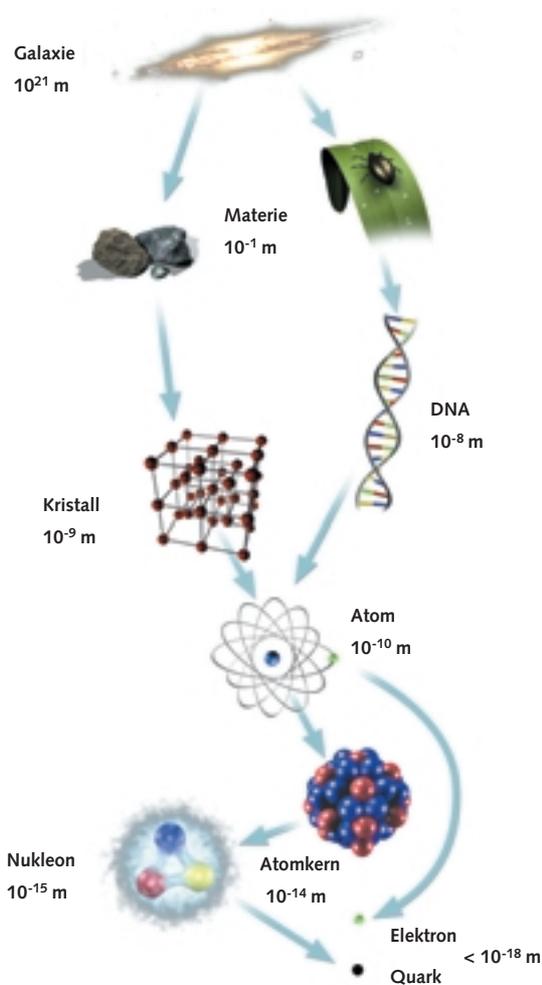
Mit dem vorliegenden Projektvorschlag für ein internationales Beschleunigerzentrum baut die GSI auf ihrer Erfahrung und Tradition im Bau von Beschleunigern und in der Forschung mit Ionenstrahlen auf. Das Ziel ist es, einen weiteren großen Schritt nach vorne bei der Erforschung der Materie und ihrer komplexen Erscheinungsformen zu tun.

Die Grundlage hierfür bildet eine neue Beschleuniger- und Experimentieranlage bei GSI. Diese erlaubt zum einen eine Erhöhung der Strahlintensität um das 100- bis 10000fache und der Strahlenergie um das 15fache. Zum anderen bietet sie die Möglichkeit, Antiprotonen- und Ionenstrahlen mit bester Qualität, das heißt mit einer präzise definierten Strahlenergie und einem sehr feinen Strahlprofil, für das Experimentierprogramm bereitzustellen. Das Forschungsprogramm sowie die höheren Strahlenergien und Intensitäten erfordern die Entwicklung neuer Detektorsysteme und innovativer Experimentiertechniken.

Die GSI will mit dem neuen Beschleunigerzentrum der Wissenschaft in Europa ein herausragendes zentrales Instrument für die Erforschung der Materie im Dimensionsbereich von Atomen, Atomkernen und den aus Quarks und Gluonen aufgebauten subnuklearen Teilchen – den so genannten Hadronen – zur Verfügung stellen.

Die neue Anlage eröffnet hierfür ein in vielen Aspekten weltweit einzigartiges Forschungsprogramm, das ein breites Spektrum von Fachdisziplinen zusammenführt. Hier können jährlich etwa 2000 Wissenschaftler aus den verschiedensten Arbeitsrichtungen experimentieren.

Aufbau der Materie



WAS WIR WISSEN....

Bei einer Reise in das Innere der Materie gelangen wir über Kristallgitter oder Moleküle zunächst auf die Stufe der Atome. Die Physik des letzten Jahrhunderts hat gezeigt, dass Atome keineswegs unteilbar sind, sondern dass sie aus einer ausgedehnten Elektronenhülle und einem kompakten Atomkern bestehen. Der Atomkern wiederum besteht aus den positiv geladenen Protonen und den elektrisch neutralen Neutronen. Beide werden unter dem Begriff Nukleon zusammengefasst. Seit etwa 30 Jahren wissen wir, dass auch Nukleonen eine innere Struktur besitzen. Die darin enthaltenen Teilchen, die Quarks, werden heute zusammen mit den Elektronen als die elementaren Bausteine der Materie angesehen.

Die uns umgebende Materie erweist sich so als eine Hierarchie verschiedener zusammengesetzter Systeme, die in ihren Abmessungen annähernd 40 Größenordnungen überdecken: von Galaxien über die makroskopische Materie, die wir anfassen können, bis zu den elementaren Bausteinen, den Quarks und Elektronen.

In den verschiedenen Hierarchien bewirken unterschiedliche Bindungskräfte den Zusammenhalt des jeweiligen Systems. Während die Vorgänge im Makrokosmos durch die Gravitation bestimmt werden, ist im Bereich der Atome die elektromagnetische Anziehung zwischen den negativen Elektronen und den positiven Atomkernen die stabilisierende Kraft. Atomkerne werden durch die so genannte Starke Kraft zusammengehalten, die zwischen den Nukleonen wirkt, aber auch zwischen den Quarks im

Inneren des Nukleons. Außerdem gibt es noch die für die Entstehung der Materie nicht minder wichtige Schwache Kraft, die zum Beispiel über den radioaktiven Beta-Zerfall die Umwandlung von Atomkernen bewirkt.

...UND WAS WIR WISSEN WOLLEN

Auch wenn wir die elementaren Bausteine kennen, so sind wir immer noch weit davon entfernt, die komplexen Eigenschaften der Materie und ihre vielfältigen Erscheinungsformen beschreiben zu können. Ein Grund liegt darin, dass wir die Kräfte und die ihnen innewohnenden Symmetrien noch zu wenig verstehen. Dies gilt insbesondere für die Starke Kraft zwischen den Quarks und zwischen den Nukleonen, die uns noch viele Rätsel aufgibt.

Ein zweiter Grund lässt sich mit dem Satz umschreiben: Das Ganze ist mehr als die Summe der Teile. Die Vielfalt der Erscheinungsformen der Materie im Kosmos ist das Resultat eines komplexen Zusammenspiels ihrer Bausteine. Dieses Zusammenspiel hat im Laufe der Universumsgeschichte verschiedene Metamorphosen der Materie bewirkt, die im Ergebnis zu immer größeren und komplexeren Strukturen führten.

DIE NEUE ANLAGE SOLL UNS HELFEN, DIE UNGELÖSTEN RÄTSEL BEIM AUFBAU DER MATERIE ZU LÖSEN.

Im Gegensatz zu Elektronen kommen Quarks nicht als isolierte Teilchen in der Natur vor, sondern sind immer in Dreier- oder Zweiergruppen aneinander gefesselt.

→ *Warum beobachten wir keine isolierten Quarks?*

Protonen und Neutronen enthalten je drei Quarks. Die Masse der elementaren Quarks beträgt weniger als zwei Prozent der Masse der Nukleonen.

→ *Warum sind die Protonen und Neutronen viel schwerer als ihre Bestandteile?*

Auf der Erde findet man etwa 300 stabile Atomkerne. Daneben existiert zusätzlich eine viel größere Zahl von instabilen Kernen, vermutlich mehr als 6000, die durch radioaktiven Zerfall in die stabilen Kerne übergehen.

→ *In welchen Mischungen von Protonen- zu Neutronenzahlen können Kerne vorkommen? Welche neuen Eigenschaften zeigen die sehr instabilen Kerne?*

Die Kräfte, die auf die Bausteine der Materie wirken, gehorchen bestimmten Symmetrien – mit dramatischen Auswirkungen auf den Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums.

→ *Welchen fundamentalen Symmetrien gehorchen die Naturgesetze? Unter welchen Bedingungen und mit welchen Folgen werden solche fundamentale Symmetrien verletzt?*



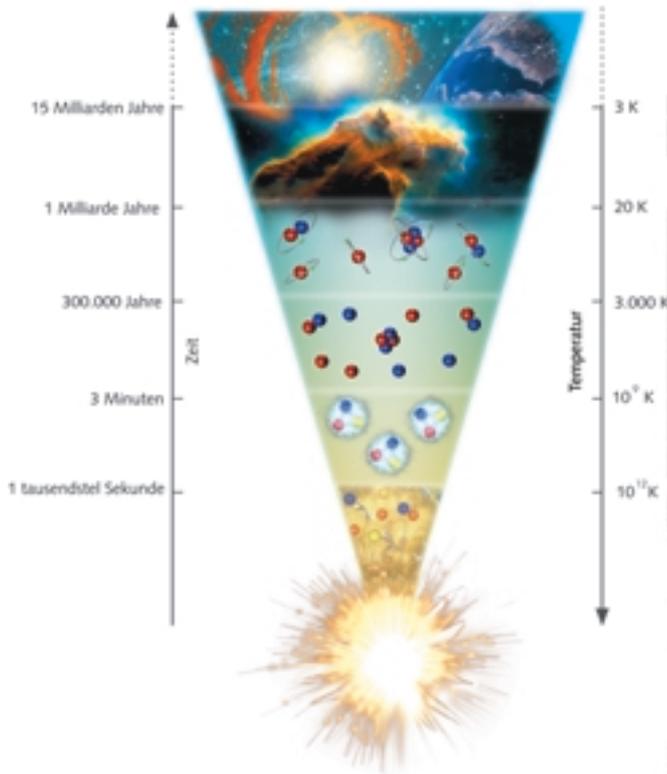


Evolution des Universums

WAS WIR WISSEN...

Der Aufbau der Materie, die Hierarchie der aufeinander folgenden Ebenen vom Mikro- zum Makrokosmos, ist eng verknüpft mit der Folge von evolutionären Epochen, welche unser Universum durchläuft. Im Urknall geboren, mit unvorstellbaren Temperaturen und Energiedichten, expandiert es explosionsartig, kühlt sich dabei langsam ab und durchläuft eine Sequenz von Metamorphosen bis zum heutigen Zustand und darüber hinaus.

Aus reinen Strahlungsfeldern werden zunächst masselose, dann massive Elementarteilchen, aus einer Ursuppe bestehend aus Quarks, Gluonen, Photonen und Leptonen formieren sich eine tausendstel Sekunde nach dem Urknall die Bausteine der Atomkerne – Neutronen und Protonen – und daraus in den ersten drei Minuten die leichtesten Atomkerne. Nach 300 000 Jahren entstehen die ersten neutralen Atome. Diese bilden riesige Gaswolken, aus denen etwa eine Milliarde Jahre nach dem Urknall die ersten Sterne geboren werden. Im Inneren der Sterne entstehen über Fusion von Atomkernen die chemischen Elemente bis zum Eisen. Die schwersten Elemente werden in gewaltigen Sternexplosionen gebildet, auch heute noch – 15 Milliarden Jahre nach dem Urknall – und in ferner Zukunft.



Die wichtigsten Entwicklungsstufen des Universums vom Urknall bis heute.

Die Abfolge der kosmischen Evolution ist diktiert durch die physikalischen Gesetze und die fundamentalen Symmetrien der Natur. Unser Streben, den Ursprung und die Entwicklung des Universums zu verstehen, ist eine der wesentlichen Triebfedern wissenschaftlicher Forschung und auch des hier vorgestellten Projekts.

...UND WAS WIR WISSEN WOLLEN

Auch wenn wir den groben Ablauf des kosmischen Schauspiels nachvollziehen können, so gibt es doch noch viele grundlegende Fragen zu den einzelnen Akten.

DIE NEUE ANLAGE SOLL UNS HELFEN, DIE FASZINIERENDE EVOLUTION DES UNIVERSUMS NACHZUVOLLZIEHEN.

Eine millionstel Sekunde nach dem Urknall lag die gesamte Materie als eine unvorstellbar heiße und dichte Ursuppe, bestehend aus Quarks, Gluonen und anderen Elementarteilchen, vor. Wie die Elektronen in einem Plasma, so konnten sich auch die Quarks in diesem Quark-Gluon-Plasma quasifrei bewegen. Ähnliche Materieformen vermutet man noch heute im Inneren von Neutronensternen.

→ ***Können wir in Kernreaktionen den Übergang von Kernmaterie in das Quark-Gluon-Plasma untersuchen?***

Die Vielfalt der Atomkerne und der chemischen Elemente entstand und entsteht auch noch heute im Inneren von Sternen und in Sternexplosionen.

→ ***Welche Kernreaktionen laufen bei der Elementsynthese ab? Welche Rolle spielen dabei die instabilen Kerne?***

Auf der Erde herrschen moderate Temperatur- und Druckbedingungen, welche die Entstehung des Lebens begünstigt haben. Im Inneren der Erde oder noch dramatischer im Zentrum großer Planeten und Sonnen herrschen jedoch extrem hohe Drücke und Temperaturen.

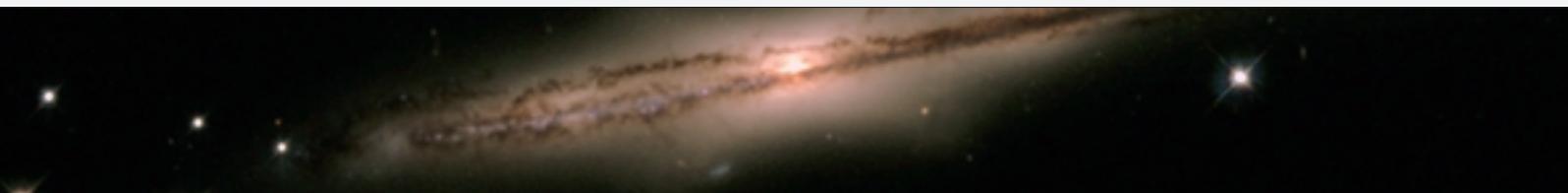
→ ***Welche Zustände nimmt Materie unter extrem hohen Drücken und Temperaturen an?***

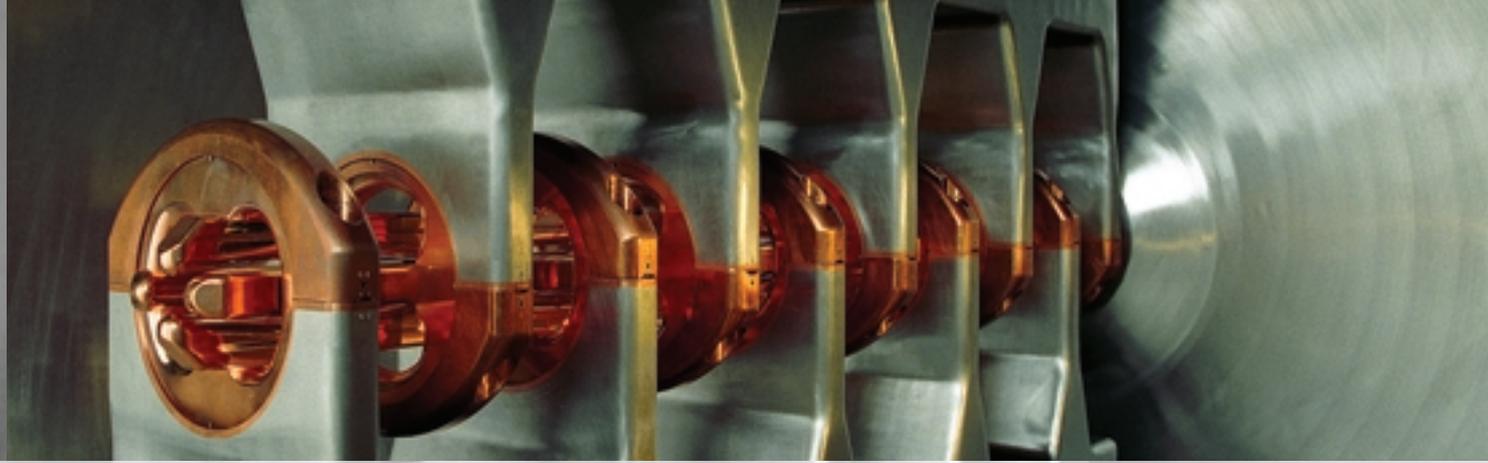
Astronomische Beobachtungen zeigen, dass es im Universum nur Materie und keine Antimaterie gibt. Dies erklären die Wissenschaftler qualitativ dadurch, dass die physikalischen Gesetze fundamentale Symmetrien verletzen. Die experimentell gefundenen Fälle jener Symmetrieverletzungen reichen jedoch nicht aus, um quantitativ das Überleben der Materie zu verstehen.

→ ***Lassen sich neue Hinweise auf fundamentale Symmetrieverletzungen in der Natur finden?***

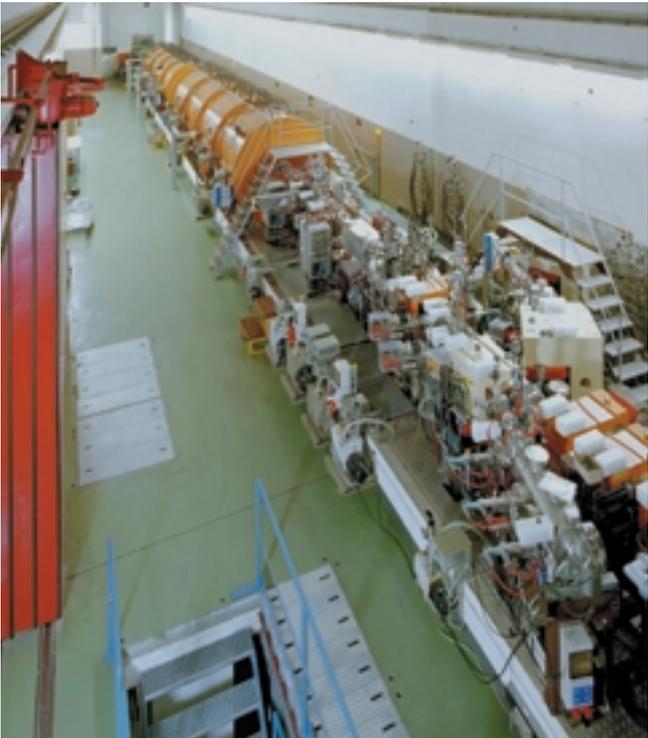
Aus der Bewegung der Galaxien wissen wir, dass es etwa 20fach mehr Materie im Universum geben muss, als wir direkt beobachten. Als Kandidaten für diese Dunkle Materie werden unter anderem auch neuartige Verbindungen der Starken Kraft vorgeschlagen, deren experimenteller Nachweis bisher jedoch noch nicht gelang.

→ ***Lassen sich unter verbesserten experimentellen Bedingungen Hinweise auf neuartige Materieformen finden?***





Ionenbeschleuniger – Werkzeuge für die Erforschung der Materie



Blick in den Tunnel des 120 m langen UNILAC Beschleunigers.

WAS BEI DER GSI BEREITS EXISTIERT...

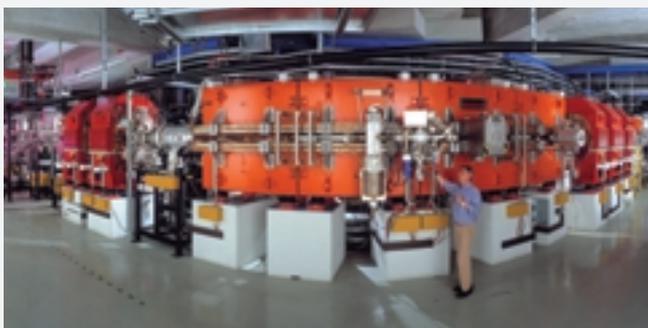
Das zentrale Instrument der Forschung, welches uns einen immer tieferen Blick in das Innere der Materie und ihren Aufbau erlaubt, ist der Teilchenbeschleuniger. Hiermit beschleunigen die Wissenschaftler Elektronen, Protonen oder Atomkerne auf sehr hohe Energien und lassen sie anschließend gegeneinander oder auf ein Stück Materie prallen. Eine Analyse der dabei entstehenden Bruchstücke und neuen Teilchen liefert Informationen über den Aufbau der untersuchten Materie. Je höher die Energie, auf welche die Teilchen beschleunigt werden, desto besser ist die mikroskopische Auflösung. Die Genauigkeit, mit der die Energie der Teilchenstrahlen eingestellt werden kann, ist eine andere wichtige Größe, die die Aussagekraft der Experimente bestimmt. Je nach der Natur der beschleunigten Teilchen – Elektronen, Protonen oder Atomkerne – werden unterschiedliche Aspekte der zu untersuchenden Materie angesprochen.

Die GSI betreibt seit über 25 Jahren eine weltweit einmalige Anlage für die Beschleunigung von Ionen. Ionen sind Atome, denen ein Teil der Elektronenhülle abgestreift wurde. Infolgedessen sind Ionen elektrisch geladen und können durch elektrische Felder auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden. An der GSI-Anlage stehen intensive Ionenstrahlen aller Elemente zur Verfügung, vom leichtesten, dem Wasserstoff bis zum schwersten in der Natur vorkommenden Element, dem Uran.

Die Beschleunigeranlage der GSI umfasst heute den Linearbeschleuniger UNILAC, das Schwerionensynchrotron SIS und den Experimentierspeicherring ESR. Der UNILAC ist der weltweit vielseitigste und stromstärkste Linearbeschleuniger für schwere Ionen. Mit dem Synchrotron SIS können Ionen aller Elemente des Periodensystems über einen großen Geschwindigkeitsbereich bis auf 90% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Außerdem ist es an der GSI-Anlage möglich, Sekundärstrahlen – zum Beispiel Strahlen instabiler Kerne, die in Reaktionen des primären Ionenstrahls mit Materie erzeugt werden – im Experimentierspeicherring ESR zu sammeln und dann für Experimente zu nutzen.



Im SIS werden die Ionen in einigen hunderttausend Umläufen bis auf 90% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.



Im ESR wurde erstmals die Elektronenkühlung von hochenergetischen schweren Ionenstrahlen wie z. B. Uran demonstriert und für Experimente genutzt.

GEKÜHLTE IONENSTRAHLEN

Zu den herausragenden beschleunigertechnischen Innovationen der SIS/ESR-Anlage gehört die so genannte Strahlkühlung, die von den GSI-Forschern erstmals und mit großem Erfolg für Strahlen hochenergetischer schwerer Ionen angewandt wurde. Die Primärstrahlen und insbesondere die über Kernreaktionen erzeugten Sekundärstrahlen haben für viele Präzisionsexperimente eine zu geringe Energieschärfe, das heißt, die Geschwindigkeiten der einzelnen Ionen im Strahl sind nicht exakt gleich, sondern um einen Mittelwert verteilt.

Um den Ionen eine möglichst einheitliche Geschwindigkeit aufzuprägen, haben die Beschleunigerphysiker verschiedene Techniken entwickelt. Eine Methode ist die Elektronenkühlung. Dabei wird dem umlaufenden Ionenstrahl entlang einer Strecke von einigen Metern ein paralleler Strahl von Elektronen mit einer genau definierten Geschwindigkeit überlagert. Durch tausendfache Elektron-Ion-Stöße der immer wieder durch den Elektronenstrahl laufenden Ionen nimmt der Ionenstrahl binnen Bruchteilen einer Sekunde die Geschwindigkeit des Elektronenstrahles an. Die anfangs breite Geschwindigkeitsverteilung der Ionen wird so schmal wie die der Elektronen. Gleichzeitig verkleinert sich das Strahlprofil und wird schärfer gebündelt. Dieser Vorgang entspricht einer Verringerung der ungeordneten Bewegung der einzelnen Ionen im Strahl, die in der Sprache der Beschleunigerphysiker einer Senkung der Strahltemperatur gleichkommt. Daher spricht man bei diesem Prozess von Strahlkühlung.

Neben der Elektronenkühlung kommt bei der GSI auch die so genannte stochastische Kühlung zum Einsatz. Bei diesem Verfahren wird mittels einer Sonde die Geschwindigkeit eines kleinen Ensembles von Ionen im Strahl gemessen und dann über phasenrichtig eingespeiste Korrekturpulse eine Angleichung an die Sollgeschwindigkeit erreicht.

Bei der GSI wurden in den vergangenen Jahren beide Strahlkühltechniken mit großem Erfolg für schwere Ionen weiter entwickelt und für Präzisionsmessungen angewendet.

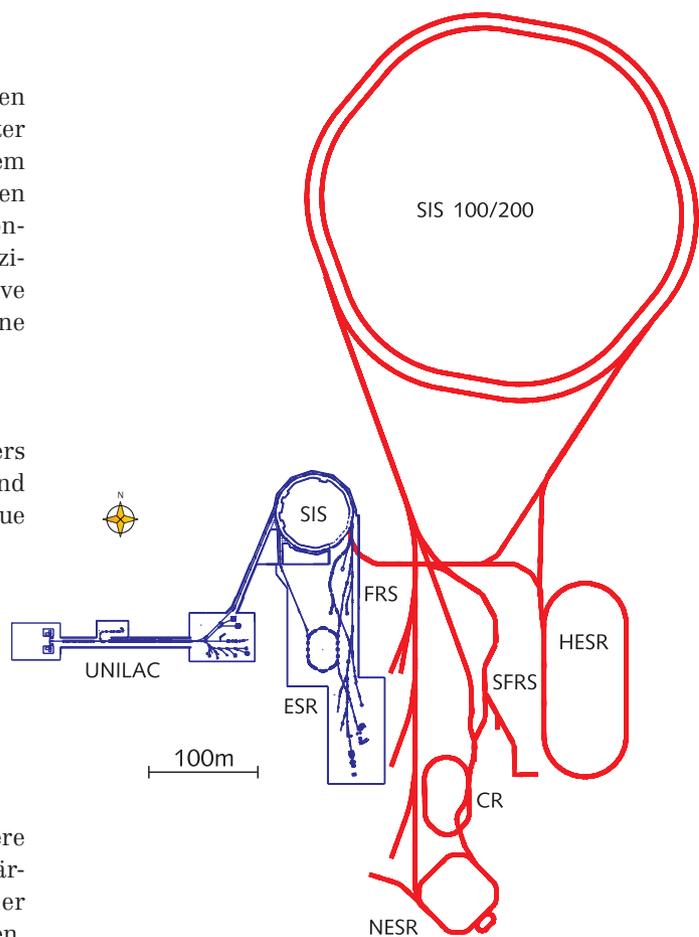




...UND WAS DIE KÜNFTIGE ANLAGE LEISTEN SOLL

Aufbauend auf den Erfahrungen und technologischen Entwicklungen an der bestehenden GSI-Anlage und unter Einbeziehung neuer technologischer Konzepte soll in dem geplanten Projekt eine Beschleunigeranlage der nächsten Generation entstehen. Ihr Herzstück ist eine Synchrotron-Doppelringanlage mit dem fünffachen Umfang des jetzigen SIS, an die sich Kühl- und Speicherringe für effektive Strahlkühlung bei hohen Energien sowie verschiedene Experimentierhallen anschließen.

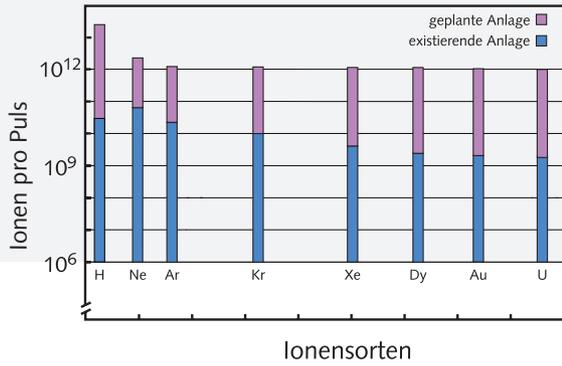
Was sind die Gewinnfaktoren des neuen Beschleunigers gegenüber der existierenden Anlage, welche neuen und speziellen Strahleigenschaften kennzeichnen das neue Projekt?



Mit dem großen Synchrotron können 100fach höhere Intensitäten als derzeit erreicht werden. Für Sekundärstrahlen instabiler Kerne wird die Steigerung der Intensität sogar bis zu einem Faktor 10000 betragen. Außerdem erreicht man mit dem zweiten Synchrotron der Doppelringanlage 15fach höhere Energien als im laufenden Synchrotron SIS. Aufgrund der hohen Energien und Intensitäten für Protonenstrahlen lassen sich an der geplanten Anlage zusätzlich intensive und gekühlte Sekundärstrahlen von Antiprotonen erzeugen und für neuartige Experimente zur Verfügung stellen.

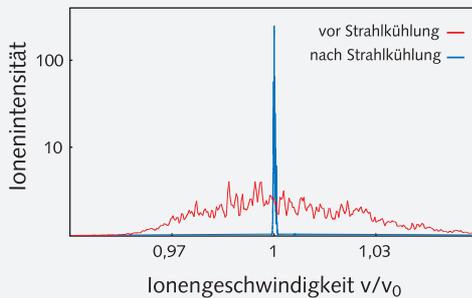
Die bestehende GSI-Anlage (blau) mit dem Linearbeschleuniger UNILAC, dem Synchrotron SIS, dem Experimentierspeicherring ESR und dem Fragmentseparator FRS dient als Injektor für den vorgeschlagenen Beschleunigerkomplex (rot). In dessen Zentrum steht die Synchrotron-Doppelringanlage SIS 100/200. An diese schließen sich an: der Hochenergie-Speicherring HESR, der Kollektor-Ring CR, der Neue Experimentierspeicherring NESR, der Super-Fragmentseparator SFRS und eine Reihe von Experimentieraufbauten.

→ **Höchste Strahlintensitäten**



Je höher die Intensität der Ionenstrahlen, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass auch seltene Reaktionen oder Reaktionsprodukte beobachtet werden können. Durch höchste Strahlintensitäten eröffnet die neue Anlage für die Forschung mit Sekundärstrahlen instabiler Kerne völlig neue Perspektiven. Für die Wissenschaftler wird eine Vielzahl neuer Kerne zugänglich, die bisher nicht im Labor hergestellt werden konnten. Dies schließt insbesondere Kerne ein, welche bei der Synthese der schweren Elemente in Supernovaexplosionen eine zentrale Rolle spielen.

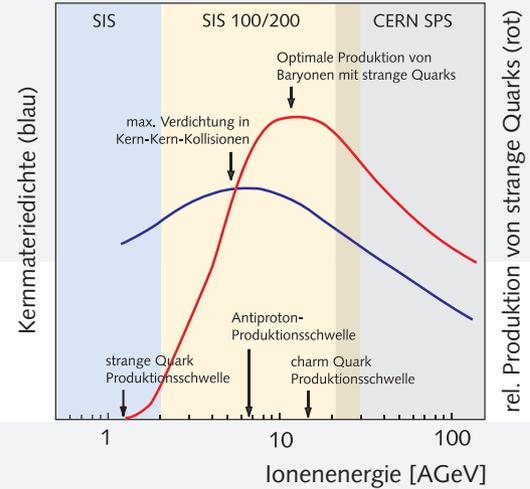
→ **Brillante Strahlqualität**



Durch Strahlkühlverfahren kann die Geschwindigkeitsunschärfe von instabilen Sekundärstrahlen von anfänglich 5% auf weniger als 0,001% verringert werden.

Präzisionsexperimente zur Bestimmung der Massen kurzlebiger instabiler Kerne oder zur Suche nach neuen Teilchen der Starken Kraft erfordern Ionen- und Antiprotonenstrahlen höchster Energieschärfe. Den bereits an der bestehenden Anlage etablierten Strahlkühltechniken – stochastische und Elektronenkühlung – kommt daher auch an dem neuen Beschleunigerzentrum eine herausragende Rolle zu. Wegen der höheren Strahlenergien gehört die Implementierung der Strahlkühltechniken zu den großen technologischen Herausforderungen der neuen Anlage.

→ **Höhere Strahlenergien**



Die neue Beschleunigeranlage liefert zugleich deutlich höhere Strahlenergien. Dadurch lässt sich in hochenergetischen Kern-Kern-Kollisionen eine sehr starke Verdichtung der Kernmaterie erreichen. Auf diese Weise möchten die Wissenschaftler extreme Zustände von Kernmaterie untersuchen, die am Anfang des Universums herrschten oder heute noch im Zentrum von Neutronensternen vorliegen. In diesem Energiebereich erwartet man außerdem eine maximale Produktion von Hadronen mit *strange* Quarks. Weiterhin wird die Energieschwelle für die Produktion von Hadronen mit *charm* Quarks und von Antiprotonen überschritten. Letzteres erlaubt die Produktion intensiver Antiprotonenstrahlen.

→ **Höchste Strahlleistungen**

Um Materie durch die Bestrahlung mit Ionen in ein Plasma zu verwandeln und deren Eigenschaften zu untersuchen, benötigt man hochintensive, kurze Ionenpulse. Hierfür können an der neuen Anlage Ionenpulse mit einer Leistung von Tausend Milliarden Watt erzeugt werden.

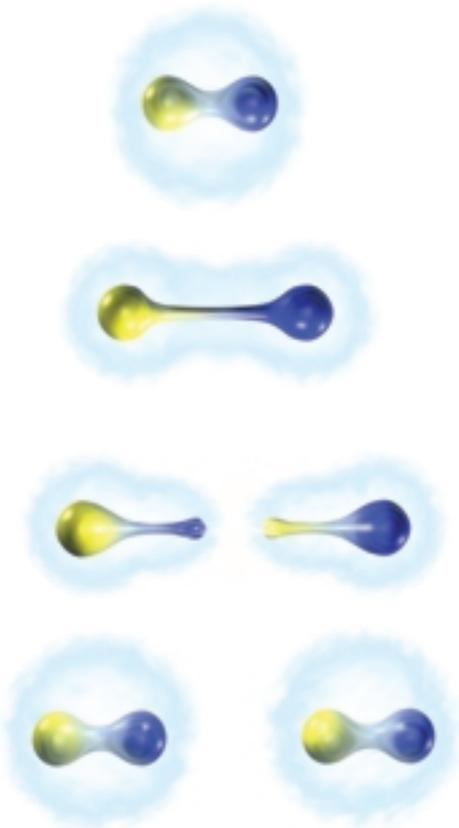
→ **Effizienter Parallelbetrieb**

Ein entscheidendes Argument für das Doppelring-Konzept der neuen Beschleunigeranlage bei GSI ist die Möglichkeit, bis zu vier verschiedene Forschungsprogramme zeitlich parallel mit unterschiedlichen Ionensorten zu betreiben. Dies ist aufgrund einer aufeinander abgestimmten Nutzung der verschiedenen Beschleuniger- und Speicherringe möglich. Hieraus erwächst ein besonderer Synergieeffekt bei der Nutzung der Gesamtanlage.





Die Eigenschaften der Starken Kraft



In der Natur treten Quarks nicht isoliert auf, sondern immer als Paare oder Dreierkombinationen. Versucht man Quarks zu trennen, so erfordert dies riesige Energien, und es entstehen neue Quark-Antiquark-Paare.

DIE GEFANGENSCHAFT DER QUARKS

Innerhalb des Nukleons werden die Quarks durch Bindeteilchen, so genannte Gluonen, aneinander gebunden. Die Kraftwirkung zwischen den Quarks zeigt ein ungewöhnliches Verhalten: sie ist sehr klein, wenn die Quarks einen kleinen Abstand haben, wird größer, wenn der Abstand zunimmt, und bleibt dann konstant. Man muss also immer mehr Energie aufwenden, um sie weiter voneinander zu entfernen. Schließlich wird die Energie so groß, dass ein Quark-Antiquark-Paar gebildet wird, was zur Entstehung neuer Hadronen führt.

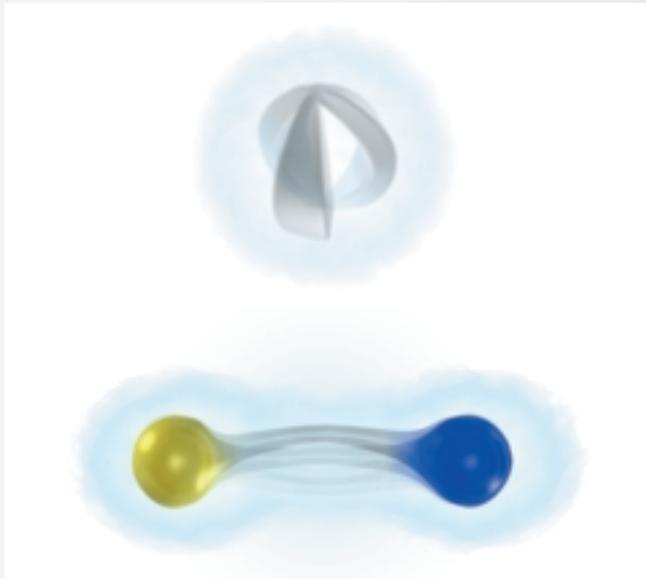
Der Grund für dieses ungewöhnliche Verhalten liegt darin, dass die Gluonen nicht nur mit den Quarks, sondern auch untereinander wechselwirken und sich anziehen. Dadurch bildet sich eine Art Schlauch aus Gluonen zwischen den Quarks, vergleichbar mit einem Gummiband oder einer Feder. Zwei Quarks sind paradoxerweise also nur dann frei, wenn ihr Abstand klein ist.

Trotz intensiver Suche hat man bislang noch keine isolierten Quarks in der Natur beobachtet. Diese absolute Gefangenschaft der Quarks bezeichnet man als *confinement*. Es ist eine der großen intellektuellen Herausforderungen der modernen Physik, das *confinement* nicht nur als Phänomen qualitativ, sondern auch quantitativ im Rahmen der Theorie der Starken Kraft zu verstehen. Experimente an dem neuen Beschleunigerzentrum werden hierzu wichtige Beiträge liefern.

DER URSPRUNG DER MASSE DER UNS UMGEBENDEN MATERIE

In der Regel ergibt sich die Masse eines zusammengesetzten Systems aus der Summe der Massen der einzelnen Bestandteile, bis auf kleine Korrekturen durch Bindungseffekte, die die Gesamtmasse geringfügig verringern. So ist die Masse eines Atoms im wesentlichen durch die Masse des Atomkerns und der Elektronen bestimmt und die des Atomkerns durch die Summe der Nukleonenmassen.

Beim Nukleon dagegen macht die Masse der Quarks weniger als zwei Prozent der Gesamtmasse aus. Wie also kann Masse aus nahezu masselosen Konstituenten entstehen? Nach unserem heutigen Verständnis ergibt sich die Masse hier aus der Bewegungsenergie plus der Wechselwirkungsenergie der Konstituenten im Nukleon, die nach Einsteins Beziehung $E = mc^2$ einer Masse äquivalent ist. Dieser Mechanismus ist aber im Einzelnen nicht verstanden. Die Theorie der Starken Kraft ist unter den im Nukleon herrschenden Bedingungen so komplex, dass eine Verbesserung des physikalischen Verständnisses nur durch weitere hochpräzise Messungen möglich ist. Die geplante Anlage eröffnet hierfür ideale Experimentierbedingungen. Von welcher grundlegender Bedeutung dieses Problem der Mikrophysik ist, zeigt sich daran, dass mehr als 99,9% der Masse der Atome – und damit der Masse der uns umgebenden sichtbaren Materie – in den Nukleonen des Atomkerns sitzen.



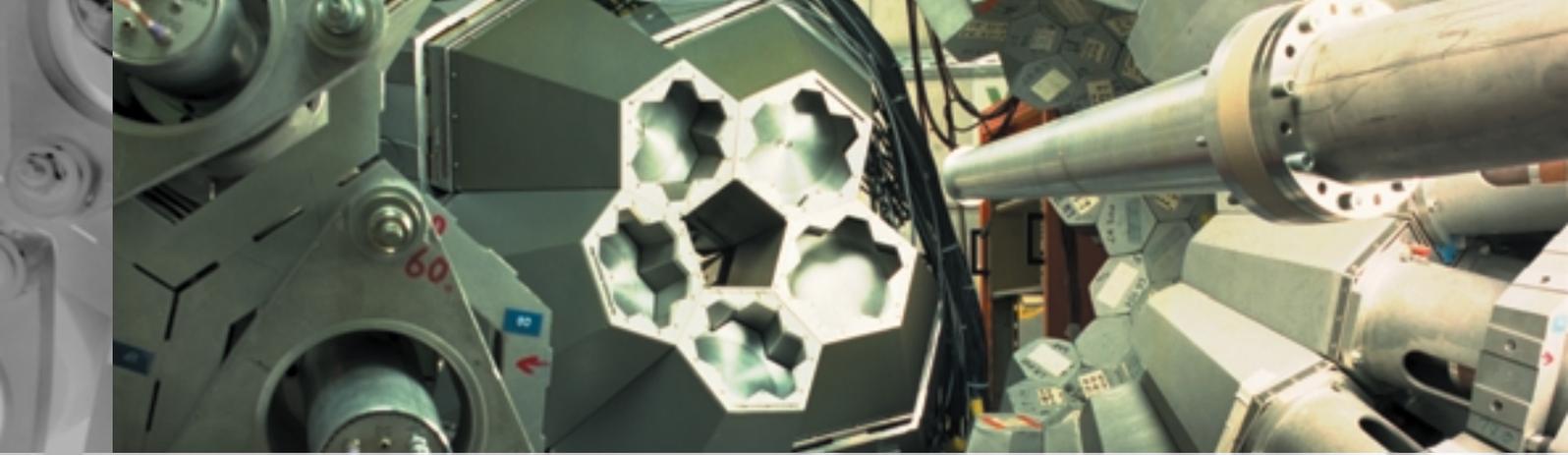
An der neuen Anlage soll nach unbekanntenen Formen hadronischer Materie gesucht werden. Die Theorie der Starken Kraft sagt zum Beispiel die Existenz von Gluonenbällen voraus, die nur aus Gluonen bestehen (oben), oder von so genannten Hybriden, die aus zwei Quarks und einem dazwischen schwingenden Gluon aufgebaut sind (unten).

SUCHE NACH NEUEN FORMEN DER MATERIE

Alle zusammengesetzten Teilchen, die durch die Starke Kraft gebunden sind, werden als Hadronen bezeichnet. Experimentell hat man bisher zwei Sorten von Hadronen gefunden. Diese sind die Baryonen, die aus drei Quarks bestehen – wie z. B. die Kernbausteine Proton und Neutron – und die Mesonen, die aus zwei Quarks, genauer gesagt einem Quark und einem Antiquark, bestehen.

Laut der Theorie der Starken Kraft sind weitere Verbindungen möglich, z. B. Hybridzustände, die aus zwei Quarks und einem Gluon bestehen oder reine Gluonenzustände, auch Gluonenbälle genannt. Für die Existenz dieser exotischen Hadronen gibt es erste experimentelle Hinweise, aber keine eindeutigen Signaturen. Darüber hinaus ist auch eine Vielzahl von Mehrfach-Quarkverbindungen theoretisch erlaubt.

Das neue Beschleunigerzentrum eröffnet mit hochenergetischen Antiprotonen- und Ionenstrahlen einzigartige Möglichkeiten für die Suche nach derartigen exotischen Hadronen. Einige gelten auch als Kandidaten für einen Teil der so genannten Dunklen Materie im Universum, so dass der Nachweis ihrer Existenz auch wichtige Implikationen für die Astrophysik hätte.



Der Ursprung der chemischen Elemente

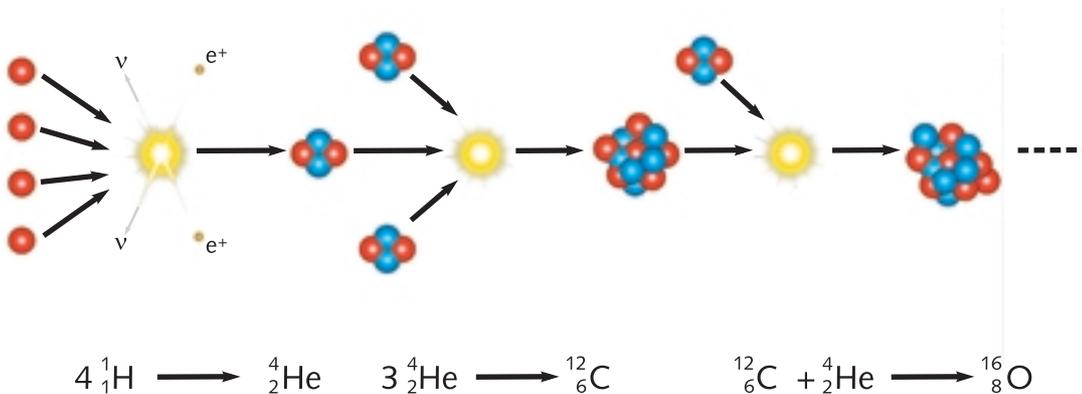
Die chemischen Elemente sind die Bausteine der Stoffe und die Grundlage für die Entstehung des Lebens. Wie ist es zur Vielfalt der Elemente gekommen? Welche Prozesse spielten hierbei eine Rolle?

Die Beantwortung dieser Fragen ist eines der zentralen Anliegen der modernen Kern- und Astrophysik und bildet auch an dem neuen Beschleunigerzentrum einen der Forschungsschwerpunkte.

Wir wissen, dass die chemischen Elemente über Kernreaktionen im Inneren von Sternen und in Sternexplosionen gebildet werden. Im Verlauf dieses als Nukleosynthese bezeichneten Prozesses entsteht eine Vielzahl von Kernsorten – so genannte Isotope. Die meisten sind instabil und wandeln sich direkt oder über mehrere Zwischenschritte in stabile Kerne um.

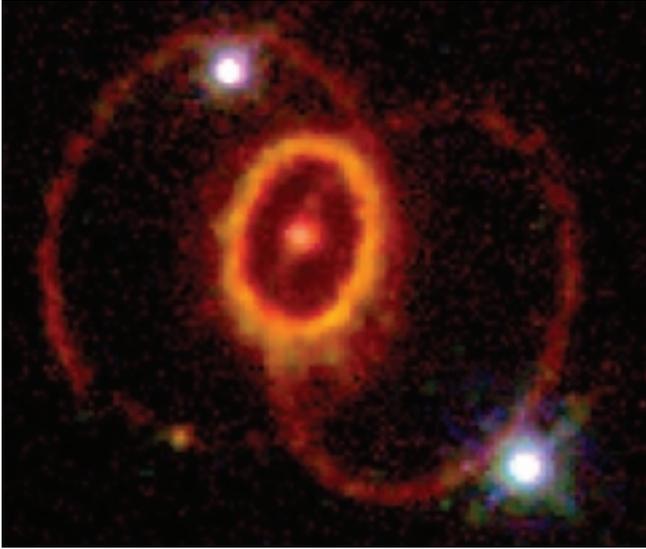
MIT FUSION BIS ZUM EISEN

Die Elemente bis zum Eisen entstehen im Inneren von Sternen durch Fusionsreaktionen. Dabei werden, angefangen mit der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium, immer größere Kerne gebildet. Dieser Prozess setzt Energie frei, deshalb leuchtet die Sonne und spendet uns Wärme. Beim Element Eisen kommt die Fusion zum Stillstand, da bei der Verschmelzung zu noch größeren Kernen Energie benötigt würde. Ein Stern brennt dann aus.



Kernfusionsreaktionen im Inneren von Sternen (Protonen: rot; Neutronen: blau).

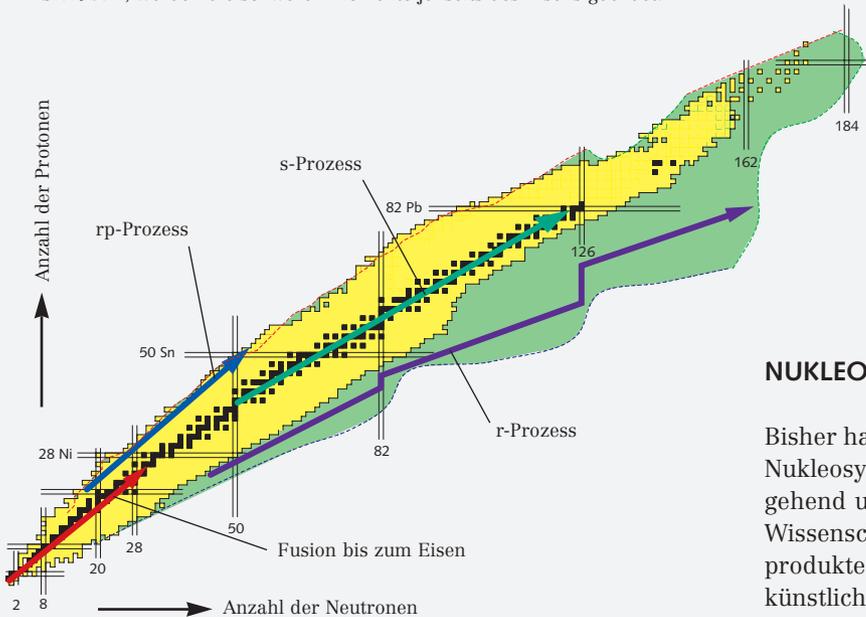
ÜBER UMWEGE ZUM URAN



In Stern-Explosionen, wie z.B. der 1987 beobachteten Supernova SN1987A, werden die schweren Elemente jenseits des Eisens gebildet.

Die Elemente, die schwerer als Eisen sind, entstehen am Ende der Ära großer Sterne in so genannten Roten Riesen und in gewaltigen Stern-Explosionen. Allen dabei auftretenden Produktionspfaden ist gemeinsam, dass sie über den Umweg radioaktiver Kerne zu den stabilen schweren Kernen führen.

Voraussetzung hierfür sind freie Nukleonen, Neutronen oder Protonen, die sich an die vorhandenen leichten Kerne anlagern können. Neutronen werden durch Kernreaktionen in Roten Riesen und – in wesentlich größerer Zahl – in Supernova-Explosionen freigesetzt, Protonen dagegen in Röntgen-Doppelsternsystemen, so genannten Röntgen-Bursters und Röntgen-Pulsaren. Durch Anlagerung dieser freien Nukleonen entstehen instabile neutronenreiche bzw. protonenreiche Kerne, die über anschließenden Zerfall zu den schwereren stabilen Isotopen führen. Auf diese Weise werden alle Elemente bis zum Uran gebildet.



NUKLEOSYNTHESE IM LABOR

Bisher haben wir nur ein qualitatives Verständnis von der Nukleosynthese, die detaillierten Abläufe sind noch weitgehend ungeklärt. Mit dem geplanten Projekt können die Wissenschaftler die Kerne, die als radioaktive Zwischenprodukte auf dem Weg zu den stabilen Isotopen auftreten, künstlich herstellen. Somit lassen sich die Prozesse der Nukleosynthese direkt im Labor vermessen und die verschlungenen Pfade der Nukleosynthese nachzeichnen. Auf diese Weise wird man auch die Häufigkeitsverteilung der Elemente im Universum besser verstehen. Die neue Anlage eröffnet uns somit faszinierende Erkenntnisse über den Ursprung der Elemente – und damit unserer eigenen Existenz.

In der Nuklidkarte sind alle Atomkerne, die im Universum existieren können – vermutlich über 6000 – sortiert nach der Anzahl der Protonen und Neutronen aufgetragen. Die schwarzen Kästchen markieren die stabilen Isotope (annähernd 300), die gelben Kästchen die bekannten instabilen Kerne (etwa 2500) und die grünen die noch unbekannt instabilen Kerne (über 3500). Die Pfeile geben verschiedene Produktionspfade der Nukleosynthese an. Die Fusion bringt die Kerne bis zum Eisen hervor. Die wichtigsten Produktionspfade zur Bildung schwerer Kerne sind der langsame (slow) Neutroneneinfang (s-Prozess) und der schnelle (rapid) Neutroneneinfang (r-Prozess). Außerdem gibt es noch andere Prozesse, die zu den protonenreichen schweren Kernen führen. Einer davon ist der schnelle Protoneneinfang (rp-Prozess). Der rp-Prozess und der r-Prozess laufen durch Gebiete weit ab der stabilen Isotope und sollen an der geplanten Anlage systematisch erforscht werden.

Zustandsformen der Materie

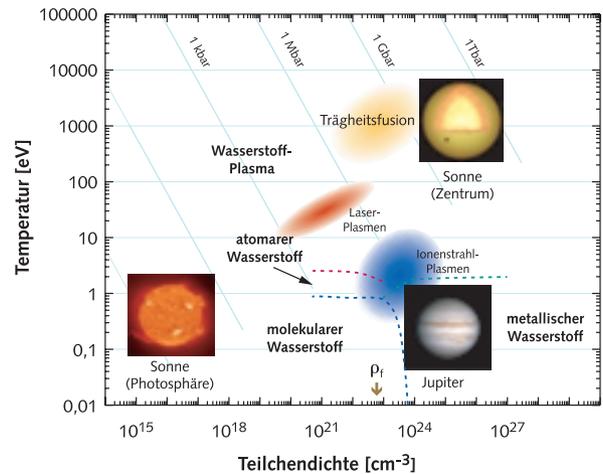
Die uns im Alltag umgebende Materie beeindruckt durch die Vielfalt ihrer Formen und Farben. Wasser zum Beispiel kennt jeder als Schnee oder Eis bei tiefen Temperaturen, als erfrischendes Getränk bei Zimmertemperatur oder als heißen Dampf im Kochtopf. Durch Änderung der Temperatur und des Druckes kann Wasser in diese drei verschiedenen Zustandsformen – fest, flüssig, gasförmig: so genannte Phasen – gebracht werden.

Eine weitere Zustandsform der Materie ist das Plasma. Dieser Zustand wird erreicht, wenn man so viel Energie zuführt, dass der Elektronenhülle der Atome einzelne oder alle Elektronen entrissen werden. Es entsteht ein System aus freien negativ geladenen Elektronen und positiven Ionen. Dieses Elektronen-Ionen-Plasma kann über einen großen Temperatur- und Dichtebereich existieren und dabei in verschiedene Erscheinungsformen übergehen.

WASSERSTOFF UND SEINE VIELFÄLTIGEN ERSCHEINUNGSFORMEN

Im nebenstehenden Diagramm ist dies für Wasserstoff gezeigt, der im Universum je nach Druck und Temperatur in sehr unterschiedlichen Zustandsformen und Eigenschaften auftritt: als kaltes Gas in großen Wasserstoffnebeln, als heißes dünnes Plasma in der Photosphäre der Sonne, als molekulare Flüssigkeit nahe der Oberfläche und als metallische Flüssigkeit im Zentrum großer Planeten oder als Fusionsplasma hoher Dichte im Inneren von Sternen. Auch im Inneren unserer Sonne herrscht ein solches Fusionsplasma, in dem Wasserstoff zu Helium verschmolzen wird.

Um heiße und dichte Plasmen im Labor herzustellen, beschießen die Wissenschaftler Feststoffe mit hochintensiven, zeitlich gepulsten Schwerionen- oder Laserstrahlen. Mit der geplanten Anlage wird es gelingen, in Temperatur- und Dichtebereiche des Plasmas vorzudringen, die den Verhältnissen im Inneren großer Planeten, wie dem Jupiter, nahe kommen. Diese Untersuchungen eröffnen zugleich die Möglichkeit, die physikalischen Grundlagen der Trägheitsfusion zu erforschen, in der einige Wissenschaftler die Zukunft der Energieversorgung für die Menschheit sehen.



Die Abbildung zeigt das theoretisch vorhergesagte Phasendiagramm von Wasserstoff. Aufgetragen ist die Temperatur in Elektronenvolt gegen die Teilchendichte. Die normale Festkörperdichte ρ_f von gefrorenem Wasserstoff ist durch den Pfeil angedeutet. 100 eV entspricht einer Temperatur von etwa 1 Millionen Grad Celsius. An der neuen Anlage soll der Phasenübergang von molekularem bzw. atomarem Wasserstoff in metallischen Wasserstoff untersucht werden. Außerdem können in der Kombination mit Laserstrahlen die Grundlagen der Trägheitsfusion erforscht werden.

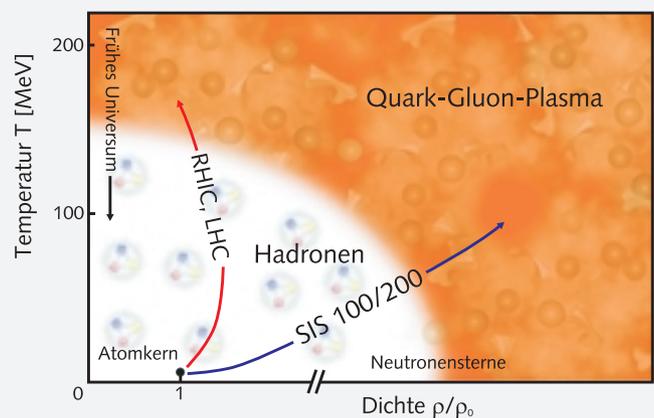
DER STOFF AUS DEM DIE ATOMKERNE SIND

Kernmaterie hat im Vergleich zu normaler Materie, zum Beispiel Wasser, eine mehr als 10^{14} fache höhere Dichte. Ein Stückchen von der Größe eines Würfelzuckers würde etwa 300 Millionen Tonnen wiegen. Wie normale Materie, so kann auch Kernmaterie unter extremen Druck- und Temperaturbedingungen unterschiedliche Erscheinungsformen annehmen, beispielsweise an der Oberfläche oder im Zentrum von Neutronensternen. Im Labor kann Kernmaterie in hochenergetischen Kern-Kern-Kollisionen komprimiert und erhitzt werden. Die Physiker nehmen an, dass dabei für sehr kurze Zeit ein Quark-Gluon-Plasma erzeugt wird, in dem sich die Quarks und Gluonen quasifrei bewegen. Als Produkte solcher Kern-Kern-Kollisionen treten viele neue Hadronen auf, darunter auch solche, die so genannte schwere Quarks enthalten.

Insgesamt gibt es sechs Sorten von Quarks mit unterschiedlicher Ladung und Masse, die zur Unterscheidung *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* und *top* genannt werden. Die leichten Quarks sind das *up* und das *down* Quark, aus denen das Proton und das Neutron aufgebaut sind. Die schwereren Quarks existierten nur im frühen Universum und eventuell heute noch in Neutronensternen. Für kurze Zeit lassen sie sich an Beschleunigeranlagen herstellen. Die mit der neuen Anlage erreichbaren Kollisionsenergien werden die über weite Strecken noch unerforschte Hadronenphysik mit den mittelschweren *strange* und *charm* Quarks erschließen.

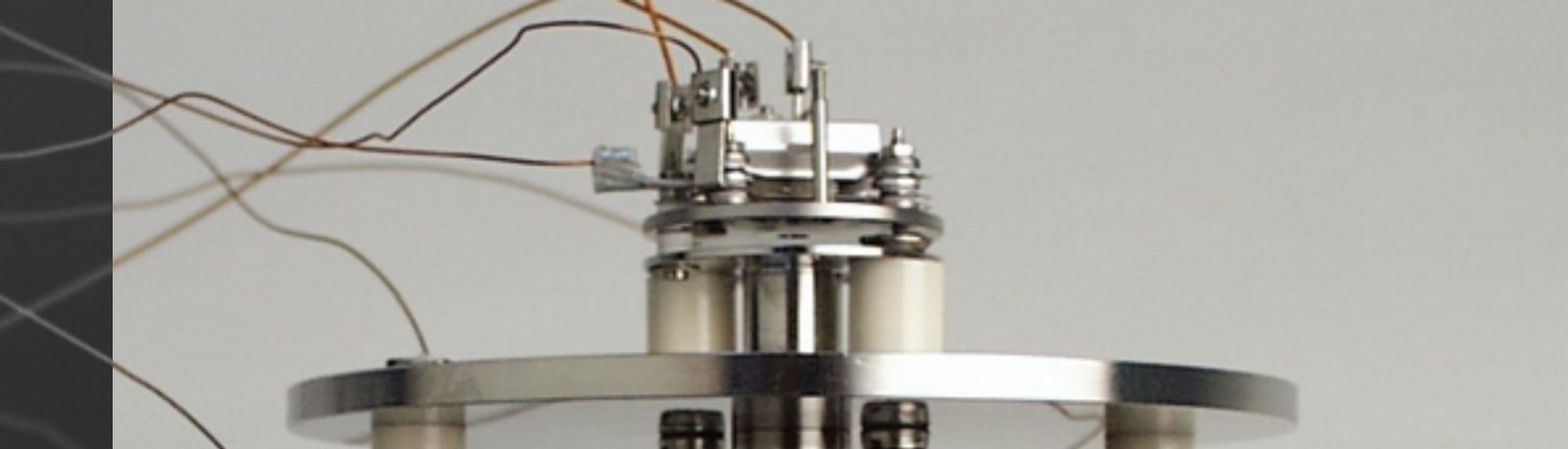
Erst kürzlich wurden am CERN unter starker Beteiligung von Wissenschaftlern der GSI erste Hinweise auf die Existenz des Quark-Gluon-Plasmas gefunden. Dessen Eigenschaften sollen nun bei sehr hohen Temperaturen am Beschleuniger RHIC in den USA und ab 2006 im ALICE-Experiment am LHC (CERN) näher untersucht werden.

Dagegen soll an der bei GSI geplanten Anlage das Verhalten von Kernmaterie – insbesondere auch der Phasenübergang zum Quark-Gluon-Plasma – im Bereich höchster Dichten erforscht werden. Mit bis zu 15fach höheren Energien als zur Zeit an der GSI verfügbar, sind die Schwerionenstrahlen von der neuen Beschleunigeranlage auf den Vorstoß in diesen unerforschten Teil des Phasendiagramms der Kernmaterie optimiert. Genau in diesem Gebiet erwartet man in Kern-Kern-Kollisionen – gestützt durch experimentelle Ergebnisse am CERN und am BNL in den USA – eine Produktion von hadronischer Materie mit einem erhöhten Anteil an *strange* Quarks, die neben anderen Möglichkeiten als ein Grundstoff für die Dunkle Materie im Universum diskutiert wird.



Die Abbildung zeigt das theoretisch vorhergesagte Phasendiagramm von hadronischer Materie. Aufgetragen ist die Temperatur in Einheiten von Millionen Elektronenvolt gegen die Dichte in Einheiten der normalen Atomkernsdichte ρ_0 . Für besonders hohe Temperaturen bzw. Dichten erwartet man, dass die ansonsten in den Nukleonen eingesperrten Quarks und Gluonen aus ihrer Gefangenschaft befreit werden und sich – wie die Elektronen und Ionen im Plasmazustand – als freie Teilchen im Quark-Gluon-Plasma bewegen. Die Physiker nehmen an, dass sich im frühen Universum der umgekehrte Phasenübergang vom Quark-Gluon-Plasma in hadronische Materie vollzogen hat. Heute existiert Quark-Gluon-Materie wahrscheinlich noch im Zentrum von Neutronensternen.



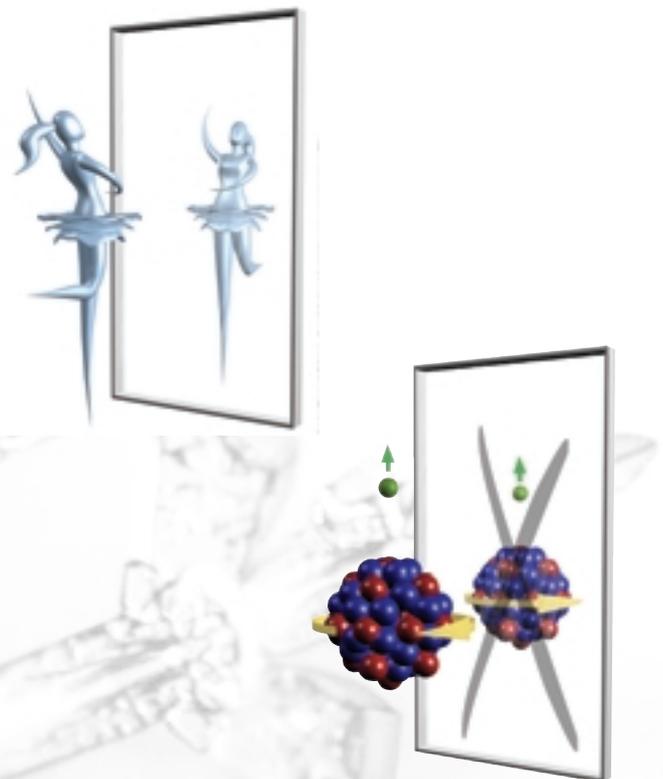


Symmetrien, Symmetrieverletzungen, Symmetriebrechungen

Symmetrien spielen eine zentrale Rolle für die Erscheinungsformen der Materie. Auf einfacher Ebene sehen wir dies in der geometrischen – und oft wunderschönen – Struktur von Kristallen oder einer Schneeflocke. Weniger anschaulich aber von fundamentaler Bedeutung sind Symmetrien im elementaren Regelwerk der Naturgesetze. Laufen elementare Prozesse unverändert ab, wenn man sie spiegelt, Teilchen mit Antiteilchen vertauscht oder die Zeit umkehrt wie bei einem rückwärtslaufenden Film?

Nehmen wir beispielsweise die Spiegelsymmetrie. Eine rechts gedrehte Pirouette kann ebenso gut gespiegelt, d.h. links herum gedreht werden. Um so überraschender war die Entdeckung, dass beim radioaktiven Beta-Zerfall, der durch die Schwache Kraft bewirkt wird, die Spiegelsymmetrie verletzt ist: Der zum Beta-Zerfall gespiegelte Prozess kommt in der Natur nicht vor. So wenig bedeutend uns solche Symmetrieverletzungen für unser Alltagsleben erscheinen, so entscheidend waren sie doch seit Anbeginn des Universums für die Existenz und die Zusammensetzung der Materie im Kosmos.

Die Suche nach Symmetrieverletzungen in der Natur ist daher ein zentrales Anliegen moderner physikalischer Forschung. Ungestört durch komplexe externe Einflüsse können diese im Mikrokosmos der Atome, der Atomkerne oder der Quarks mit hoher Präzision untersucht werden. Bereits kleinste Abweichungen von der angenommenen Symmetrie können einen Umbruch unseres physikalischen Weltbilds nach sich ziehen. In einigen Fällen spielen Symmetrieverletzungen auch eine Schlüsselrolle für die Entwicklung des Universums.

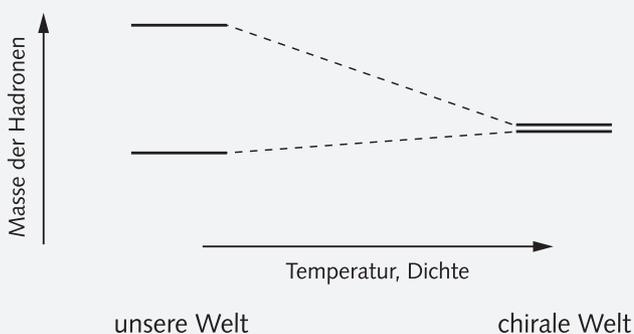


Alle Vorgänge im Alltagsleben, wie zum Beispiel das Drehen einer Pirouette, können auch spiegelsymmetrisch ablaufen. Im Mikrokosmos gibt es jedoch Prozesse, welche die Spiegelsymmetrie verletzen. Ein Beispiel dafür ist der Beta-Zerfall von Kobalt-60. Dieser instabile Kern hat einen Eigendrehimpuls (Spin), der durch den gelben Pfeil angedeutet ist. Im Experiment beobachtet man, dass bei der im Bild vorgegebenen Orientierung des Spins das im Beta-Zerfall freigesetzte Elektron immer nach oben emittiert wird. Der spiegelbildliche Prozess – Elektronenemission nach oben bei umgekehrter Orientierung des Spins – wird nicht beobachtet. Die Spiegelsymmetrie ist verletzt.

UNSERE EXISTENZ – ERGEBNIS EINER SYMMETRIEVERLETZUNG DER NATUR

Ein markantes Beispiel für die Bedeutung von Symmetrieverletzungen sind Prozesse, bei denen die Kombination von Spiegelsymmetrie und Teilchen-Antiteilchen-Vertauschungssymmetrie verletzt ist. Diese Art von Symmetrieverletzung ist essentiell für unser Dasein, denn ohne sie wäre die im Urknall symmetrisch entstandene Materie und Antimaterie wieder völlig zerstrahlt. Es gäbe keine Materie und keine Lebewesen; das Universum wäre allein von elektromagnetischer Strahlung erfüllt. Mit den wenigen bisher gefundenen Fällen dieses Typs von Symmetrieverletzung kann die im Universum vorhandene Materie jedoch nicht quantitativ erklärt werden. An dem neuen Beschleunigerzentrum möchten die Physiker daher nach weiteren Beispielen, insbesondere bei Hadronen mit *strange* und *charm* Quarks, suchen.

Ein anderes Thema ist die Suche nach Prozessen, bei denen eine Verletzung der Zeitumkehrsymmetrie vorliegt. Ihr Nachweis wäre auch aus philosophischer Sicht höchst bemerkenswert, denn damit gäbe es im Universum bereits auf der Ebene elementarer Prozesse eine definierte Zeitrichtung. Die geplante Anlage eröffnet den Wissenschaftlern über präzise Vermessungen des Beta-Zerfalls exotischer Kerne oder die Suche nach elektrischen Dipolmomenten in bestimmten Atomen und Kernen sehr sensitive Tests der Zeitumkehrsymmetrie.



In einer Welt, in der die chirale Symmetrie gilt, müssten bestimmte Paare von Hadronen, so genannte chirale Partner, die gleiche Masse haben. Die Brechung dieser Symmetrie in unserer Welt führt zu einer Massenaufspaltung und -verschiebung, die letztlich die Massen der Hadronen bestimmt. Die Physiker nehmen an, dass bei hohen Temperaturen und Dichten die chirale Symmetrie teilweise wieder hergestellt werden kann. Experimente an dem neuen Beschleunigerzentrum sollen hierüber genaueren Aufschluss geben.

DIE MASSE DER HADRONEN – FOLGE EINER SPONTANEN SYMMETRIEBRECHUNG

Neben Symmetrien und Symmetrieverletzungen haben spontane Symmetriebrechungen die Entwicklung des Universums und die Eigenschaften der Materie entscheidend mitbestimmt. Ein anschauliches Beispiel für eine spontane Symmetriebrechung ist der Phasenübergang von unmagnetischem Eisen in den ferromagnetischen Zustand, bei dem sich unterhalb einer kritischen Temperatur eine willkürlich ausgerichtete Magnetisierung einstellt. Dadurch wird eine Vorzugsrichtung ausgezeichnet und die ursprünglich vorhandene Rotationssymmetrie um eine beliebige Achse spontan gebrochen.

Die Physiker nehmen an, dass auch der Phasenübergang vom Quark-Gluon-Plasma zu den Hadronen von einer spontanen Symmetriebrechung begleitet war. Nach ihren Vorstellungen war in der Frühphase des Universums für die leichten *up* und *down* Quarks, aus denen fast die gesamte Materie aufgebaut ist, die so genannte chirale Symmetrie erfüllt. Diese besagt, dass die durch Flugrichtung und Drehsinn (Spin) definierte Händigkeit (Chiralität) eines *up* oder *down* Quarks unter Einwirkung der Starken Kraft erhalten bleibt. Wäre die chirale Symmetrie auch in unserer heutigen Welt erfüllt, so müsste sich dies in den Massen der aus leichten Quarks gebildeten Hadronen widerspiegeln. Insbesondere sollten bestimmte Paare von Hadronen, so genannte chirale Partner, gleiche Massen haben. Dies wird aber nicht beobachtet. Die Physiker erklären dies dadurch, dass die chirale Symmetrie beim Übergang vom Quark-Gluon-Plasma in die hadronische Phase spontan gebrochen wurde.

Weitergehende Überlegungen zeigen, dass in Kernmaterie, insbesondere bei hohen Temperaturen und Dichten, wie sie in energiereichen Stößen zweier Atomkerne auftreten, diese Symmetrie teilweise wieder hergestellt werden sollte.

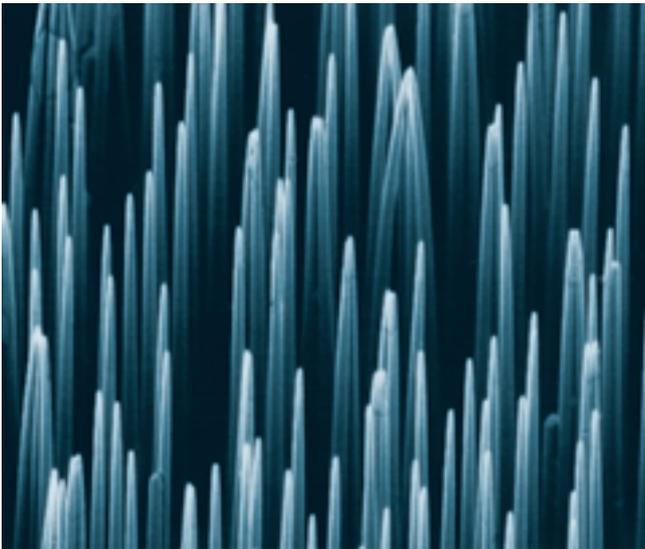
Die neue Anlage eröffnet mit energetischen Ionen- und Antiprotonenstrahlen ein weites Forschungsfeld, um das Phänomen der chiralen Symmetrie zu ergründen und damit dem Geheimnis näherzukommen, wie die aus Quarks zusammengesetzten Teilchen, die unsere Welt aufbauen, ihre Massen erhalten.





Von der Grundlagenforschung zur Anwendung

Forschung mit schweren Ionen hat in der Vergangenheit immer wieder zu vielfältigen Anwendungen und technologischen Neuerungen geführt. Eindrucksvolle Beispiele hierfür sind Techniken zur Werkstoffhärtung oder zur Herstellung von Mikrostrukturen und Mikroobjekten, Testapparaturen für Elektronikkomponenten in der Satelliten- und Raumfahrttechnik sowie insbesondere die Entwicklung einer neuen Tumorthherapie mit Ionenstrahlen.



Für die Mikrotechnologie können durch galvanische Replikation von Ionenkanälen mikroskopisch feine Kupfernadeln mit einer Länge von etwa 0,1 mm, einem Durchmesser von zwei tausendstel Millimeter (μm) und einem Spitzenkrümmungsradius von 0,2 μm hergestellt werden.

Die bei GSI entwickelte Ionenstrahltherapie wird gegenwärtig mit überaus vielversprechenden Ergebnissen in klinischen Studien erprobt. Und es ist auch schon der nächste Schritt hin zur breiten Patientenversorgung und zur großflächigen Umsetzung der hierfür entwickelten neuen Technologien in Sicht. Basierend auf dem Pilotprojekt bei GSI wird in den kommenden Jahren in Kooperation mit der Industrie und der Universitätsklinik Heidelberg das erste Zentrum für Ionenstrahltherapie in Europa gebaut.

Ein Großteil der Anwendungen, die aus der Forschung mit Ionenstrahlen hervorgegangen sind, benötigte lange Entwicklungszeiten – im Bereich der Krebstherapie mit Ionenstrahlen über 20 Jahre. Deshalb ist es sehr schwierig, konkrete Anwendungen aus dem Forschungsprogramm der geplanten Anlage vorauszusehen. Wie in der Vergangenheit erwarten die Wissenschaftler jedoch interessante neue Entwicklungen, von denen einige in spezifische Anwendungen münden werden. Aus heutiger Sicht sind hierfür mehrere Bereiche erkennbar.

NEUE SONDEN UND TECHNIKEN FÜR DIE FESTKÖRPERPHYSIK UND MATERIALFORSCHUNG

Radioaktive Atome werden mit großem Erfolg als Sonden eingesetzt, um Materialeigenschaften oder Prozessabläufe zu untersuchen. Das geplante Beschleunigerzentrum wird für derartige Studien neue radioaktive Sonden erschließen und bei Bedarf als isotopenreine Sekundärstrahlen bereitstellen. Darüber hinaus ergeben sich aus

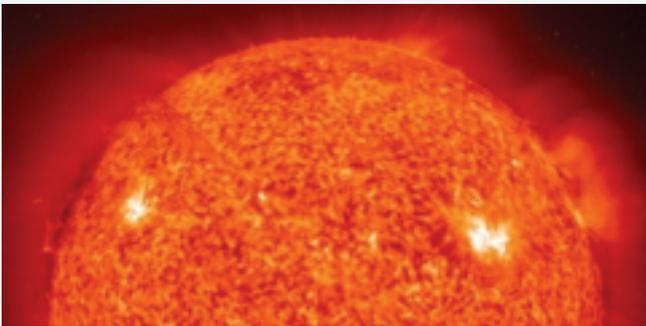
der hohen Energie der Sekundärstrahlen neuartige Möglichkeiten. So kann man die Sonden durch dicke Wandungen hindurch beispielsweise in Hochdruckzellen implantieren und auf diese Weise Materialeigenschaften unter extremen Bedingungen studieren.



Prototyp eines Teilchendetektors für den Einsatz auf der internationalen Raumstation ISS. Der Detektor wurde mit Ionenstrahlen bei der GSI geeicht.

STRAHLENBIOLOGISCHE RISIKOABSCHÄTZUNGEN FÜR BEMANNTE RAUMMISSIONEN

Bei bemannten Raummissionen, insbesondere den geplanten Langzeitflügen zum Mars, sind die Astronauten hohen Strahlenbelastungen ausgesetzt. Bisher weiß man nur wenig über den strahlenbiologischen Effekt der hochenergetischen Komponente der kosmischen Strahlung. Auch wenn die Teilchenflüsse bei diesen hohen Energien drastisch zurückgehen, so können doch Sekundärreaktionen in den Raumschiffwänden und daraus resultierende Teilchenschauer zu einem merklichen Beitrag zur Gesamtbelastung führen. Die neue Anlage erlaubt es, diese Effekte eingehend zu untersuchen und das daraus entstehende Risiko für die Astronauten abschätzen.



Es ist ein Traum der Menschheit, das Sonnenfeuer auf die Erde zu holen: Die Trägheitsfusion mit Ionenstrahlen könnte hierzu einen Zugang liefern.

TESTAPPARATUREN FÜR SATELLITEN ODER RAUMSCHIFFKOMPONENTEN

Ebenso wie die Astronauten, so sind auch empfindliche technische Komponenten in Satelliten und Raumschiffen der kosmischen Strahlung ausgesetzt. Dies kann in elektronischen Chips zu Informationsverfälschungen oder dauerhaften Schäden führen und im Extremfall die gesamte Mission gefährden. Beschleunigeranlagen ermöglichen es, den Einfluss der kosmischen Strahlung zu untersuchen. Speziell an der geplanten Anlage geht es darum, nicht nur einzelne Komponenten, sondern ganze Systeme bis hin zu Satelliten oder Raumschiffkomponenten in dem gesamten relevanten Energiebereich der kosmischen Strahlung zu überprüfen.



Strahlenbiologische Experimente mit hochenergetischen Ionenstrahlen ermöglichen es den Wissenschaftlern, das Strahlenrisiko für Astronauten zu bestimmen.

VORSTUDIEN ZUR ERZEUGUNG VON FUSIONSPLASMEN ÜBER TRÄGHEITSEINSCHLUSS

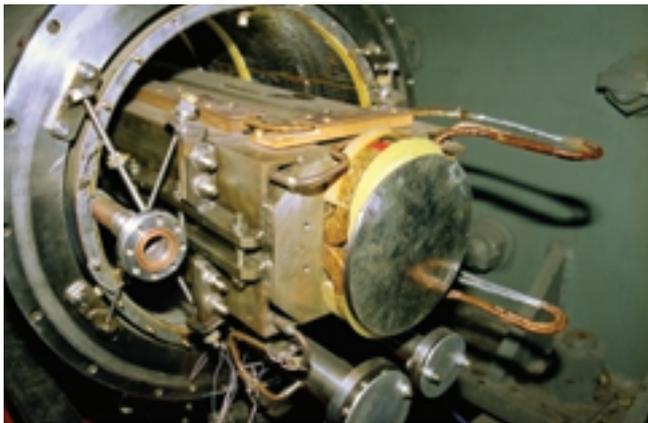
Die hochintensiven Ionenpulse aus der geplanten Anlage ermöglichen es den Wissenschaftlern, heiße dichte Plasmen zu erzeugen. Neben der Grundlagenforschung gibt es dabei auch ein langfristiges Anwendungsinteresse. Denn diese Forschung kann unter Umständen neue Wege aufzeigen, die Fusion von Wasserstoff zu Helium im Labor zu realisieren und in fernerer Zukunft für die Energieversorgung zu nutzen. Das neue Projekt eröffnet zusammen mit dem gegenwärtig bei GSI installierten Hochenergie/Hochleistungslaser PHELIX ideale Experimentierbedingungen für die Erforschung der physikalischen Grundlagen der Trägheitsfusion.





Technologische Herausforderungen und Innovationen

Fortschritte in der Teilchen- und Kernphysik waren in der Vergangenheit immer mit Innovationen in der Beschleunigertechnologie und Detektorentwicklung verknüpft. In gleicher Weise beinhaltet auch das geplante Projekt eine Reihe von ehrgeizigen Neuentwicklungen:



Prototyp eines supraleitenden Magneten für das große Synchrotron.

→ *Supraleitende Magnete mit schnell variierbaren Feldern*

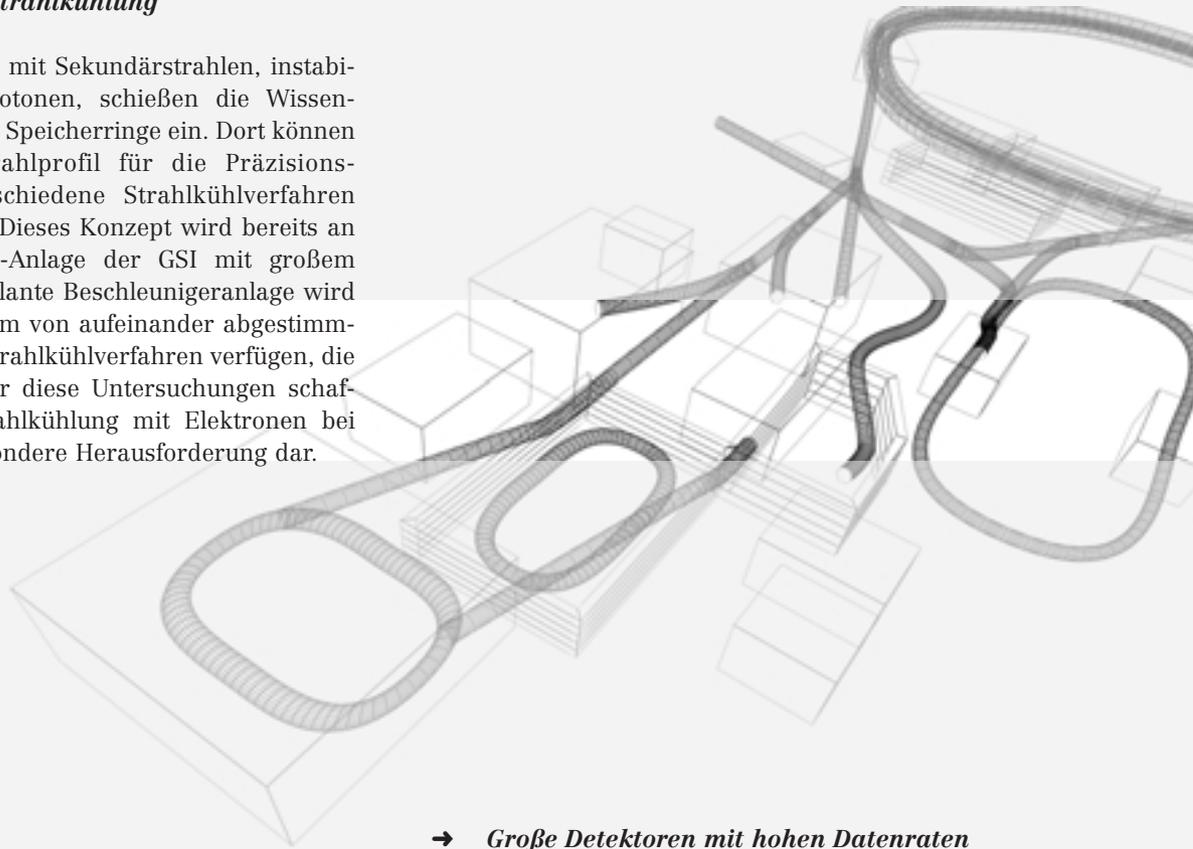
Um die Ionen in den Beschleuniger- und Speicherringen auf ihrer Bahn zu halten, setzt man starke Magnetfelder ein. Bei hohen Magnetfeldern ist es aus technischen und Kostengründen zweckmäßig, supraleitende Magnete zu verwenden. Diese Technik soll deshalb auch im neuen Projekt verwendet werden. Allerdings muss in den Synchrotronringen neben der Anforderung hoher Felder auch die Bedingung schnell variierbarer Felder erfüllt werden, was eine besondere technologische Herausforderung darstellt. Um die erforderlichen Spezifikationen zu erreichen, werden gegenwärtig in Kooperation mit Partnern aus den USA, Europa und Russland neue Entwicklungen für schnell taktbare Magnete vorangetrieben.

→ *Separator für Sekundärstrahlen instabiler Kerne*

Ein wichtiges Forschungsziel an dem neuen Beschleunigerzentrum ist die Erzeugung und Untersuchung von instabilen Kernen, die uns Aufschluss über die Nukleosynthese im Universum geben. Hierzu müssen diese instabilen Kerne zunächst in Kernreaktionen erzeugt und dann von der Vielzahl anderer Kerne, die dabei ebenfalls entstehen, abgetrennt werden. Im neuen Projekt ist hierfür ein großer, mit supraleitenden Magneten ausgelegter Separator mit über 100 Metern Länge vorgesehen, der eine isotonenreine Abtrennung der gewünschten Kerne erlaubt.

→ Speicherringe mit Strahlkühlung

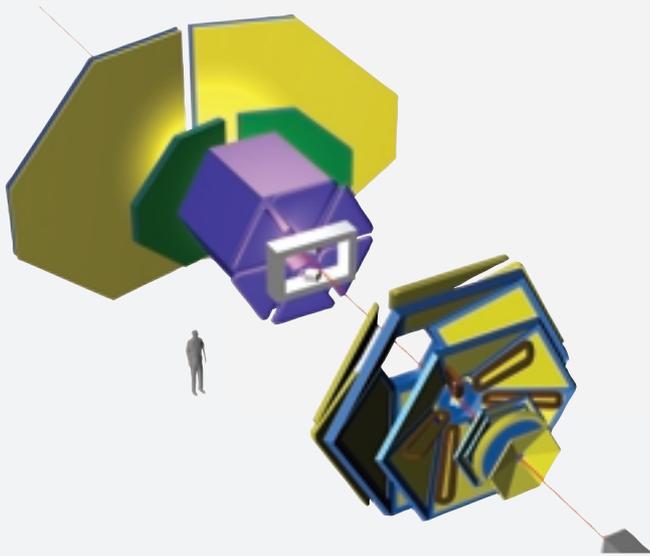
Für Präzisionsmessungen mit Sekundärstrahlen, instabilen Kernen oder Antiprotonen, schießen die Wissenschaftler diese Strahlen in Speicherringe ein. Dort können Energieschärfe und Strahlprofil für die Präzisionsexperimente durch verschiedene Strahlkühlverfahren noch verbessert werden. Dieses Konzept wird bereits an der bestehenden SIS/ESR-Anlage der GSI mit großem Erfolg eingesetzt. Die geplante Beschleunigeranlage wird über ein komplexes System von aufeinander abgestimmten Speicherringen und Strahlkühlverfahren verfügen, die optimale Bedingungen für diese Untersuchungen schaffen. Dabei stellt die Strahlkühlung mit Elektronen bei hohen Energien eine besondere Herausforderung dar.



→ Große Detektoren mit hohen Datenraten

Bei hochenergetischen Kern-Kern-Kollisionen brechen die Kerne in viele Bruchstücke auf und es entsteht eine Vielzahl von neuen Teilchen. Durch die möglichst vollständige Messung dieser Teilchen und ihrer Geschwindigkeiten können die Wissenschaftler auf die Eigenschaften der im Kern-Kern-Stoß erhitzten und verdichteten Kernmaterie rückschließen. Hierzu bauen die Physiker große, hochsegmentierte Detektoren, in denen die Teilchen entlang ihrer Flugbahn Spuren hinterlassen und auf diese Weise identifiziert werden können.

Die an dem neuen Beschleunigerzentrum geplanten Experimente müssen so ausgelegt sein, dass in den Detektoren im Abstand von einer millionstel Sekunde solche Kern-Kern-Kollisionsereignisse mit bis zu tausend auslaufenden Teilchen registriert werden können. Die damit verbundenen hohen Datenraten sprengen die heutigen Möglichkeiten der Datenverarbeitung und stellen eine besondere Herausforderung für künftige Entwicklungen im Bereich der Informationstechnologie dar.



Geplantes Detektorsystem für die Untersuchung von hochenergetischen Kern-Kern-Kollisionen an dem neuen Beschleunigerzentrum.





Bauliche Realisation

Wie in der Fotomontage dargestellt, soll das neue Beschleunigerzentrum östlich der bestehenden GSI-Anlage errichtet werden. Die geographische Anordnung der geplanten Anlage ist dadurch vorgegeben, dass sie die existierenden Beschleuniger als Injektor nutzt. Die bauliche Realisation orientiert sich außerdem an Erfordernissen des Strahlenschutzes sowie der gebotenen Kostenoptimierung für die Gebäude und technischen Einrichtungen. Daraus ergibt sich folgendes Baukonzept:

Der große Doppelring mit einem Umfang von knapp 1100 Metern wird unterirdisch in 24 Meter Tiefe in einem Ringtunnel angelegt. Die Tunnelbohrung kann sehr

kosteneffektiv mit dem Schildvortriebverfahren durchgeführt werden. Die unterirdische Anordnung bringt außerdem erhebliche Kosteneinsparungen bei den Abschirmmaßnahmen für den Strahlenschutz. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass der Wald im Bereich des Doppelringes erhalten bleibt.

Alle übrigen Gebäude werden südlich des großen Ringtunnels angeordnet. Wegen der großen Flächen ist hier eine oberirdische Realisation die günstigere Lösung. Für die Errichtung der oberirdischen Gebäude müssen etwa 14 Hektar Wald gerodet werden, die zur Kompensation an einem anderen Ort wieder aufgeforstet werden.



UMWELT UND SICHERHEIT

Umwelt- und Sicherheitsaspekte haben sowohl beim Betrieb der existierenden GSI-Beschleuniger wie auch bei der Planung des neuen Beschleunigerzentrums allerhöchste Priorität.

Während des Betriebes eines Beschleunigers entsteht Strahlung, die den Aufenthalt im Beschleunigertunnel und an den Experimentierplätzen verbietet. Durch Abschirmmaßnahmen wird verhindert, dass die Strahlung nach außen dringt.

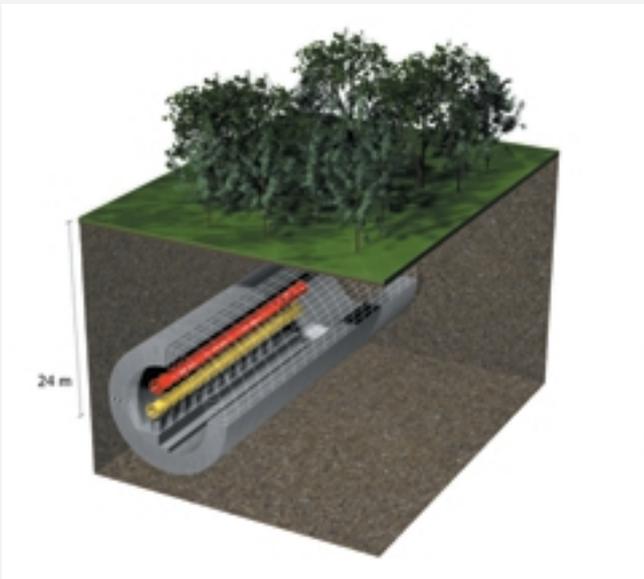
Für den Doppelring SIS 100/200 im geplanten Projekt wird die Strahlungsabschirmung durch eine dicke Betonröhre und die unterirdische Anordnung garantiert. Der Strahlenpegel an der Oberfläche wird so gering sein, dass er gegenüber der natürlichen, immer vorhandenen Strahlenbelastung vernachlässigbar ist. Bei der Auslegung der oberirdischen Anlagenbereiche werden – wie bei der existierenden GSI-Anlage – dicke Abschirmungen aus Beton vorgesehen, die den Strahlenpegel in gleicher Weise unter den Wert der natürlichen Strahlenbelastung reduzieren.

Sämtliche Planungen und Vorgaben an die Abschirmungsmaßnahmen werden von Sicherheitsexperten bei der GSI erarbeitet und von unabhängigen Gutachtern überprüft. Während der späteren Betriebsphase wird – wie bereits jetzt bei der GSI – ein ständiges Überwachungssystem die Strahlenbelastung innerhalb und außerhalb des GSI-Geländes kontrollieren.

Kann bei einer Betriebsstörung an der neuen Beschleunigeranlage etwas Unkontrolliertes passieren? Nein, denn dann wird der Strahlbetrieb automatisch unterbrochen. Damit kann keine weitere Strahlung entstehen, und der vorhandene Strahlenpegel im Beschleuniger klingt rasch ab. Insbesondere gelangt keine Strahlung in die Umwelt. Anders als ein Reaktor, enthält ein Beschleuniger keinerlei radioaktive Brennstoffe. Von der neuen Anlage werden daher ebenso wie von den existierenden GSI-Beschleunigern keine Gefährdungen für die Umwelt ausgehen.



Ein Zugangskontrollsystem stellt sicher, dass sich während des Strahlbetriebs keine Personen im Beschleunigertunnel und an den Experimentierplätzen aufhalten.



Die große Doppelringanlage SIS 100/200 wird unterirdisch in einem Tunnel aufgebaut.





Das Projekt im nationalen und internationalen Vergleich

DAS GEPLANTE PROJEKT...

...basiert auf einer eingehenden Diskussion der langfristigen Zukunftsperspektiven der Physik mit Ionen- und Antiprotonenstrahlen, geführt mit den Nutzern der GSI, insbesondere den Hochschulen, und mit den internationalen Communities der Kernphysik, der Hadronenphysik sowie der Atom- und Plasmaphysik.

...orientiert sich an Langzeitempfehlungen internationaler Expertenkomitees wie der Nuclear Physics Working Group des OECD-Megascience Forum oder des Nuclear Physics European Collaboration Committee (NuPECC) zu künftigen Großgeräten der Kern- und Hadronenphysik,

...konkurriert auf dem Gebiet radioaktiver Kernstrahlen mit Zukunftsplänen in den USA (*Rare Isotope Accelerator* RIA, in Planung) und Japan (*Radioactive Ion Beam Factory* RIBF, im Bau), geht aber über diese Vorhaben hinaus, da bei vergleichbaren Gesamtkosten zusätzlich für drei weitere große Arbeitsgebiete – die Hadronenphysik mit Antiprotonen, die Kernmateriephysik mit hochenergetischen Ionen und die Plasmaphysik mit intensiven Ionen- und Laserstrahlen – neue Forschungsmöglichkeiten erschlossen werden,

...erlaubt es, die führende Rolle Europas in der Kern- und Hadronenphysik sowie der Atom- und Plasmaphysik langfristig zu erhalten und auszubauen,

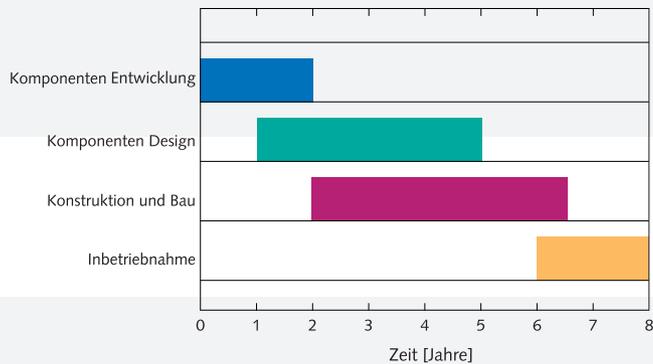
...trägt in enger Zusammenarbeit mit den Hochschulen zur hochqualifizierten Ausbildung des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses bei.



Die wissenschaftlichen Ziele des neuen Beschleunigerzentrums und seine Rolle im internationalen Umfeld wurden in zahlreichen Workshops mit den zukünftigen Nutzern diskutiert.

ZEITPLAN

Für die Realisation des Projektes werden etwa 8 Jahre angesetzt. Die Bauzeit gliedert sich in verschiedene z. T. überlappende Phasen:



KOSTEN

Die Kosten für das geplante Beschleunigerzentrum werden wie folgt abgeschätzt:

Gebäude und Infrastruktur:	225 Mio. €
Beschleuniger:	265 Mio. €
Experimentaufbauten:	185 Mio. €
<hr/>	
Gesamt:	675 Mio. €

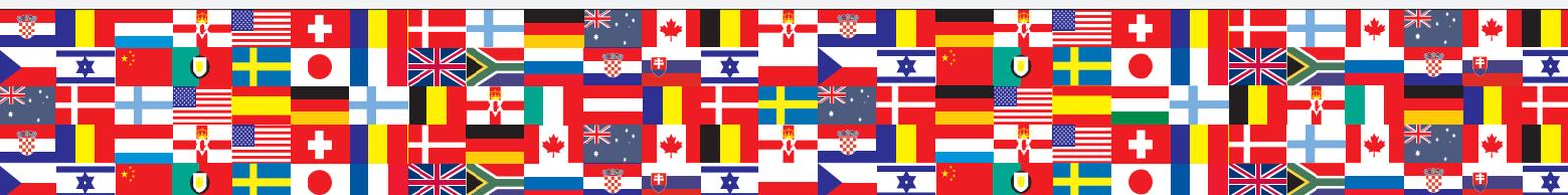
NATIONALE UND INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT

Die Größe des Projektes und seine Gesamtkosten bedingen, dass die neue Anlage in Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern realisiert wird. Unter den nationalen Partnern werden, wie in der Vergangenheit, die deutschen Hochschulen eine zentrale Rolle spielen. Darüber hinaus ist aber auch eine starke Beteiligung internationaler Partner vorgesehen, sowohl in der Planungs- und Bauphase als auch im späteren Betrieb.

Bereits jetzt gibt es enge Kollaborationen mit externen Partnern. So erfolgt die Entwicklung schnell taktbarer supraleitender Magnete und neuer Strahlkühlungstechniken in Kollaborationen mit europäischen, russischen und amerikanischen Instituten. Die Planung und der Bau der Detektoren sowie die Erarbeitung des Forschungsprogramms geschieht ebenfalls in Zusammenarbeit mit Hochschulen und Forschungsinstituten des In- und Auslands. Diese Zusammenarbeiten sind aus der langen Tradition der GSI als einer international kooperierenden Institution erwachsen, die seit ihrer Gründung ihr Forschungsprogramm gemeinsam mit vielen Nutzern erarbeitet hat.



In regelmäßigen Arbeitsbesprechungen werden mit den Kooperationspartnern die Fortschritte bei der Beschleunigerplanung ausgetauscht.



GLOSSAR

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. Dabei ist die Zahl der negativ geladenen Elektronen in der Hülle gleich der Zahl der positiv geladenen Protonen im Atomkern, so dass das Gesamtsystem nach außen elektrisch neutral ist.

Austauschteilchen: im Standard-Modell 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.

BNL: Brookhaven National Laboratory, USA

CERN: Laboratoire Européenne de Physique des Particules; 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.

Elektrischer Dipol: System aus zwei gleich großen elektrischen Ladungen entgegengesetzter Polarität in geringem Abstand.

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. Die neue Anlage wird Protonen auf 60 GeV (1 Giga-Elektronenvolt = 1 Milliarden-Elektronenvolt) und schwere Ionen auf 25 GeV pro Nukleon beschleunigen.

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

ESR: Experimentierspeicherring bei der GSI

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

Gluonenbälle: Teilchen, die nur aus Gluonen bestehen. Die Existenz dieser Teilchen beruht darauf, dass Gluonen untereinander wechselwirken und daher gebundene Systeme bilden können. Es gibt erste experimentelle Hinweise, aber noch keine vollständig gesicherten Signaturen für die Existenz von Gluonenbällen.

GSI: Gesellschaft für Schwerionenforschung

Hadronen: zusammengesetzte Teilchen, die der Starke Kraft unterliegen. Man unterscheidet Baryonen, die aus drei Quarks bestehen, und Mesonen, die aus Quarks und Antiquarks aufgebaut sind.

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

Hybride: Hadronen mit komplexer Struktur, z. B. Mesonen bestehend aus einem Quark-Antiquark und einem Gluon.

Invarianz: Unveränderlichkeit physikalischer Größen oder Prozesse bei bestimmten Transformationen, wie z. B. bei einer Drehung um eine Achse, einer Raumspiegelung oder einer Vertauschung von Teilchen mit Antiteilchen.

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 entrissen 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.

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.

LHC: Large Hadron Collider, im Aufbau befindlicher Beschleuniger für Protonen und Atomkerne, der am CERN (Genf) in einem bereits vorhandenen Tunnel aufgebaut wird und im Jahr 2006 in Betrieb gehen soll.

Linearbeschleuniger: Eine Anordnung magnetischer und elektrischer Felder in einer luftleer gepumpten langgestreckten Röhre, in der elektrisch geladene Teilchen beschleunigt werden. Der bei GSI seit 1975 betriebene Linearbeschleuniger wird UNILAC (Universal Linear Accelerator) genannt, da er Ionen aller Elemente vom Wasserstoff bis zum Uran beschleunigen kann.

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 Starke Kraft unterliegt. Das leichteste Meson ist das Pion.

Neutron: nicht geladenes Teilchen aus drei Quarks. Neutronen bilden zusammen mit Protonen die Atomkerne.

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

Neutronenstern: kompakter Stern (Durchmesser ca. 10 km), der im wesentlichen aus Neutronen besteht. Ein solcher Stern kann nach einer Supernova-Explosion übrig bleiben. Im Inneren von Neutronensternen vermutet man Materie mit einem hohen Gehalt an strange Quarks. Bei der hohen Dichte im Zentrum von Neutronensternen könnte Materie auch 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: Antiteilchen des Elektrons.

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

Quark-Gluon-Plasma: Zustandsform von Kernmaterie bei hohen Temperaturen bzw. Dichten. Die sonst im Inneren von Nucleonen gebundenen Quarks und Gluonen bewegen sich in dieser Phase wie freie Teilchen. Erste experimentelle Hinweise für die Existenz des Quark-Gluon-Plasmas wurde unter massgeblicher Mitwirkung von GSI-Gruppen am CERN in hochenergetischen Kern-Kern-Kollisionen gefunden.

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.

Röntgen-Doppelsternsystem (Röntgen-Burster, Röntgen-Pulsar): helle kosmische Röntgenquellen. Sie bestehen im Allgemeinen aus einem engen Doppelsternsystem, bei dem von einem gewöhnlichen, massereichen Stern mit ausgedehnter Atmosphäre Materie auf die Oberfläche eines kleinen, aber sehr massiven Begleiters – meist ein Neutronenstern – herüberströmt. Die von dem Neutronenstern angezogenen Gasmassen werden auf Temperaturen von mehreren hundert Millionen Kelvin aufgeheizt und führen zu einer thermonuklearen Oberflächenexplosion. Dabei werden kurzzeitig intensive Röntgenstrahlen emittiert. Unter diesen Bedingungen kann an der Oberfläche des Neutronensterns der so genannte rp-Prozess ablaufen, der zur Bildung protonenreicher Kerne führt.

RHIC: Relativistic Heavy-Ion Collider. Beschleuniger am Brookhaven National Laboratory, USA, in dem Atomkerne mit den zur Zeit höchsten Energien 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 alle Elemente schwerer als Eisen im Universum entstanden.

rp-Prozess: Bildung protonenreicher Atomkerne durch schnellen Protoneneinfang.

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.

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

SIS: Schwerionensynchrotron bei der GSI

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 Kreisell vergleichbar, um sich selbst zu drehen scheinen. Der Spin kann nur bestimmte (gequantelte) Werte annehmen.

Spontane Symmetriebrechung: Obwohl ein Naturgesetz eine Symmetrie erfüllt, weist der Zustand des betrachteten Systems diese Symmetrie nicht auf, z. B. beim Phasenübergang von unmagnetischem Eisen in den ferromagnetischen Zustand. Dabei richten sich die atomaren Spins parallel aus, und es wird eine Richtung ausgezeichnet, die die ursprüngliche Drehinvarianz des Systems um eine beliebige Raumachse spontan bricht. Der Phasenübergang von den freien Quarks zu den Hadronen ist von einer spontanen Brechung der chiralen Symmetrie begleitet. Dies hat erhebliche Konsequenzen für die Massen der Hadronen.

s-Prozess: Bildung neutronenreicher Atomkerne durch langsamen (slow) Neutroneneinfang

Standardmodell: umfassendes Modell zur Beschreibung aller elementaren Vorgänge in der Teilchenphysik.

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

Strahlkühlung: Verfahren zur Erhöhung der Energieschärfe und Verkleinerung des Durchmessers von Ionen- oder Antiprotonenstrahlen. Man unterscheidet die stochastische Kühlung mittels Hochfrequenz-einstrahlung und die Elektronenkühlung, bei der dem Teilchenstrahl ein energieschärfer Elektronenstrahl überlagert wird.

Supernova: Explosion eines großen Sterns am Ende seiner Entwicklung, bei der eine große Zahl von Neutronen und Neutrinos freigesetzt wird.

Supraleitung: Eigenschaft bestimmter Materialien, bei tiefen Temperaturen den elektrischen Strom verlustfrei zu leiten. Im geplanten Beschleunigerzentrum werden supraleitende Magnete eingesetzt, die bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt arbeiten.

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 mit wachsender Energie der beschleunigten Teilchen synchron die Hochfrequenz und das Magnetfeld hochgefahren werden, um die Teilchen auf einer vorgegebenen Umlaufbahn zu halten.

UNILAC: Universal Linear Accelerator bei der GSI.

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

IMPRESSUM

Herausgeberin und Copyright:

Gesellschaft für Schwerionenforschung
Planckstraße 1
64291 Darmstadt

Telefon: 0 61 59 – 71 25 98

Fax: 0 61 59 – 71 29 91

E-Mail: presse@gsi.de

Erscheinungsdatum:

Oktober 2001

Redaktion:

Norbert Angert, Fritz Bosch, Hans Feldmeier, Bengt Friman,
Klaus-Dieter Groß (verantwortlich), Hans H. Gutbrod,
Walter F. Henning, Jörn Knoll, Volker Metag, Jutta Reiß,
Reinhard Simon

Fotos:

Markus Konradt, Gabriele Otto, Achim Zschau, NASA, GSI,
snowcrystals.net (Kenneth Libbrecht, Caltech)

Grafiken:

BAUER & GUSE GmbH, GSI, Bung

Grafische Gestaltung:

Christoph Schäfer

Produktion:

BAUER & GUSE GmbH

Druck:

Druckhaus Darmstadt GmbH

Internet:

www.gsi.de



