

Reise zum Urknall

Teilchenphysik und Kernphysik

Urknall – das ist nach unseren heutigen Vorstellungen der Anfang unseres Universums, der Beginn von Raum und Zeit.

Vorher gab es nichts, was wir in den Kategorien der Physik beschreiben können. Das Universum und seine gesamte Energie war in einem Punkt konzentriert. Es existierten weder Materie noch Raum noch Zeit.

Dann – wir wissen nicht warum – begann das Universum explosionsartig zu expandieren.

Das war vor etwa 15 Milliarden Jahren. In dieser Anfangszeit herrschten unvorstellbar hohe Temperaturen und Dichten. Die gesamte Materie war – in ihre kleinsten Bausteine aufgelöst – in einer heißen kosmischen Ursuppe vereint.

Seither dehnt sich das Universum unaufhaltsam aus und kühlt dabei immer mehr ab. In einer dramatischen, vom Wechselspiel von Schöpfung und Vernichtung gekennzeichneten Entwicklungsgeschichte entstanden Atome, Sterne und Planeten – und das Leben.



Heute

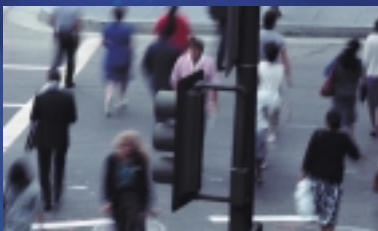
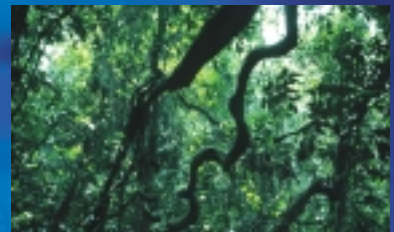
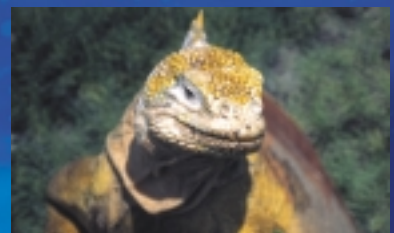
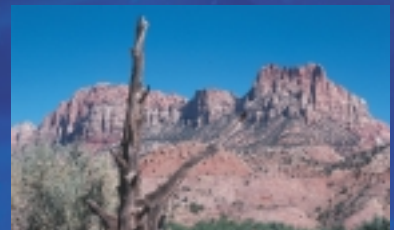
15 Milliarden Jahre nach dem Urknall

Die Erde – unser blauer Planet; Heimat unzähliger Pflanzen, Tiere und des Menschen. Wissenschaft, Forschung und Technik gehören zu den Errungenschaften des Menschen.

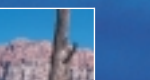
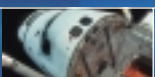
Wohl als einziges Lebewesen auf der Erde versuchen wir der Frage nach unserem Ursprung und damit verbunden nach der Entstehung und Entwicklung des Universums nachzugehen. Moderne Forschung vermag auf einen Teil unserer Fragen Antworten zu geben: die Astronomie durch die Beobachtung kosmischer Vorgänge, die Elementarteilchen- und Kernphysik über die Erforschung der Grundbausteine der Materie und ihrer Wechselwirkungen.

Wollen Sie mehr darüber erfahren?

Dann folgen Sie uns auf einer Reise zurück zum Urknall - mit den wichtigsten Stationen in der Geschichte des Universums.



Wir wünschen spannende Unterhaltung!



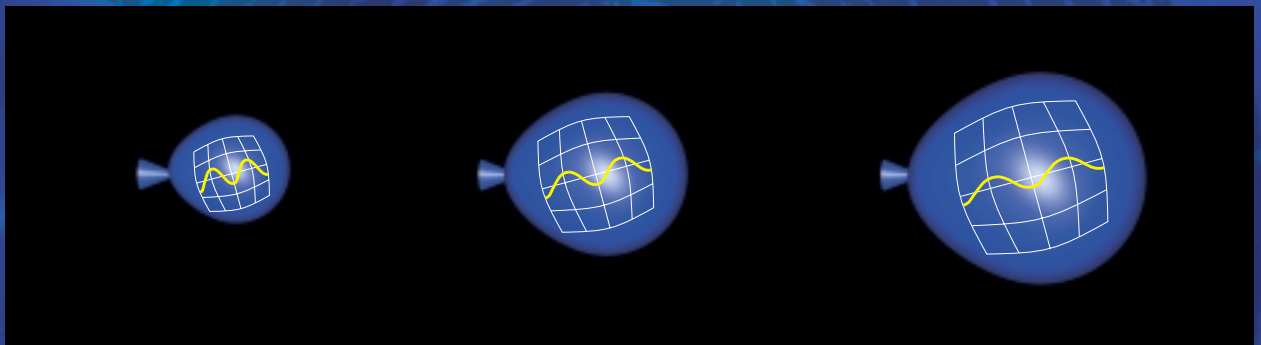


Fingerabdrücke des frühen Universums

Die 3 Kelvin Hintergrundstrahlung

Nach der Urknalltheorie war das Universum am Anfang sehr heiß und von einer energiereichen - extrem kurzwelligen - Hitzestrahlung durchsetzt. Danach begann es sich auszudehnen und abzukühlen. Mit zunehmender Expansion wurde die Wellenlänge der Strahlung immer größer.

Dieser Effekt lässt sich mit Hilfe eines Luftballons verdeutlichen, auf den wir eine Wellenlinie zeichnen. Blasen wir den Luftballon auf, was einer Expansion des Weltalls gleichkommt, so wird die Wellenlinie mehr und mehr gespreizt.



Einige Physiker hatten deshalb vorausgesagt, dass die ursprünglich intensive Hitzestrahlung heute noch als eine gleichmäßig den Raum erfüllende Mikrowellenstrahlung beobachtbar sein sollte, entsprechend der Temperatur des Weltraums von etwa 3 Kelvin. Diese so genannte 3-Kelvin-Hintergrundstrahlung wurde in den sechziger Jahren tatsächlich gefunden.

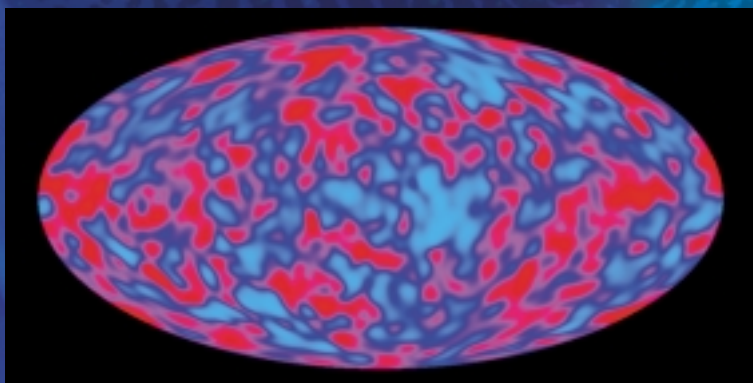
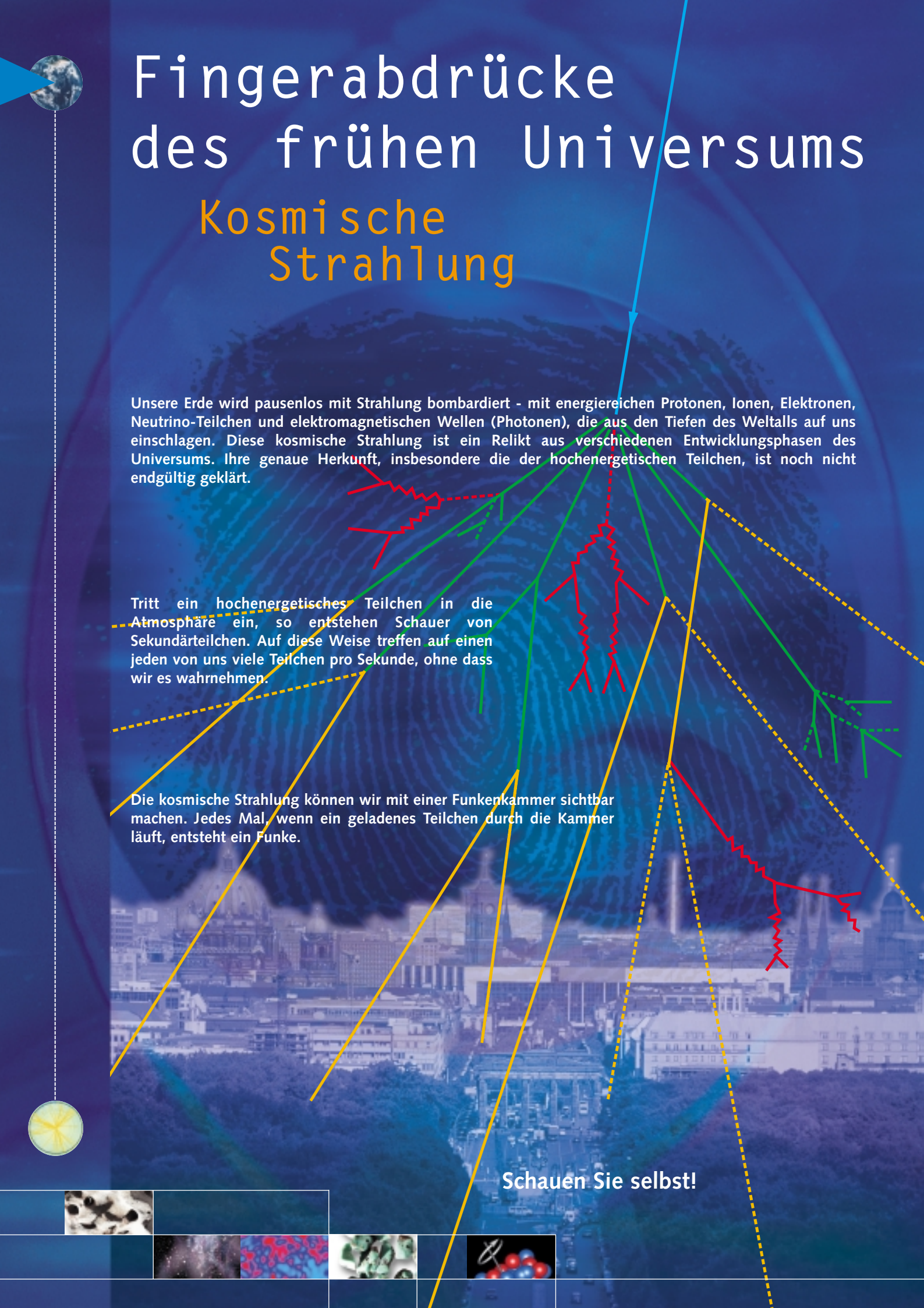


Bild:
3-Kelvin-Hintergrundstrahlung, gemessen mit dem NASA-Satelliten COBE. Die Intensitätsunterschiede (rot und blau) betragen weniger als ein Promille - eine Bestätigung der vorausgesagten Gleichmäßigkeit der Hintergrundstrahlung.

Sie ist ein wichtiger Pfeiler der Urknalltheorie des Universums.





Fingerabdrücke des frühen Universums

Kosmische Strahlung

Unsere Erde wird pausenlos mit Strahlung bombardiert - mit energiereichen Protonen, Ionen, Elektronen, Neutrino-Teilchen und elektromagnetischen Wellen (Photonen), die aus den Tiefen des Weltalls auf uns einschlagen. Diese kosmische Strahlung ist ein Relikt aus verschiedenen Entwicklungsphasen des Universums. Ihre genaue Herkunft, insbesondere die der hochenergetischen Teilchen, ist noch nicht endgültig geklärt.

Tritt ein hochenergetisches Teilchen in die Atmosphäre ein, so entstehen Schauer von Sekundärteilchen. Auf diese Weise treffen auf einen jeden von uns viele Teilchen pro Sekunde, ohne dass wir es wahrnehmen.

Die kosmische Strahlung können wir mit einer Funkenkammer sichtbar machen. Jedes Mal, wenn ein geladenes Teilchen durch die Kammer läuft, entsteht ein Funke.

Schauen Sie selbst!



Fingerabdrücke des frühen Universums

Natürliche Radioaktivität

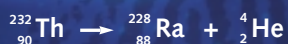
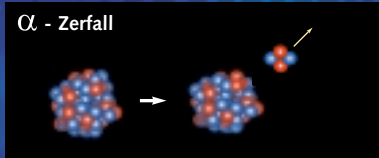
Alle Stoffe auf der Erde – wie auch unser eigener Körper – enthalten einen geringen Anteil radioaktiver Atomkerne.

Diese natürliche Radioaktivität rührt zum einen von der kosmischen Strahlung her, die in Kollisionen mit Molekülen der Atmosphäre ständig neue radioaktive Kerne erzeugt. Ein Beispiel hierfür ist Kohlenstoff-14, welches breite Anwendung bei Datierungsmessungen in der Archäologie und in der Klimaforschung findet.

Zum anderen ist die natürliche Radioaktivität ein Überbleibsel aus Kernreaktionen im Inneren von Sternen, die vor Milliarden von Jahren zur Entstehung der Elemente führten. Damals entstand eine Vielzahl von radioaktiven Atomkernen. Der größte Teil ist inzwischen zerfallen. Einige wenige Radionuklide sind noch heute in den Erdgesteinen nachweisbar, wie zum Beispiel Kalium-40, Thorium-232 und Uran-238.

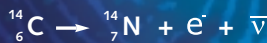
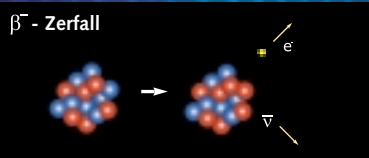
Radioaktivität bedeutet, dass sich ein Atomkern, bestehend aus Protonen (rot) und Neutronen (blau), ohne äußere Einwirkung umwandelt und dabei Teilchen aussendet. Es gibt vier natürliche Zerfallsarten:

α - Zerfall



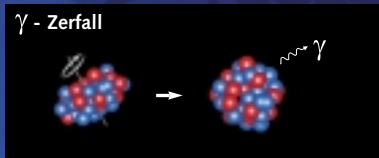
Alpha-Zerfall: Ein Atomkern wandelt sich in einen kleineren Kern um und emittiert dabei einen Heliumkern.

β^- - Zerfall



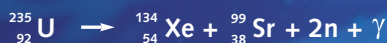
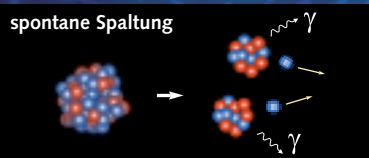
Beta⁻/Beta⁺-Zerfall: Ein Atomkern wandelt sich in einen um eine Ladungseinheit höheren/niedrigeren Kern um und sendet dabei ein Elektron und ein Antineutrino/ein Positron und ein Neutrino aus.

γ - Zerfall

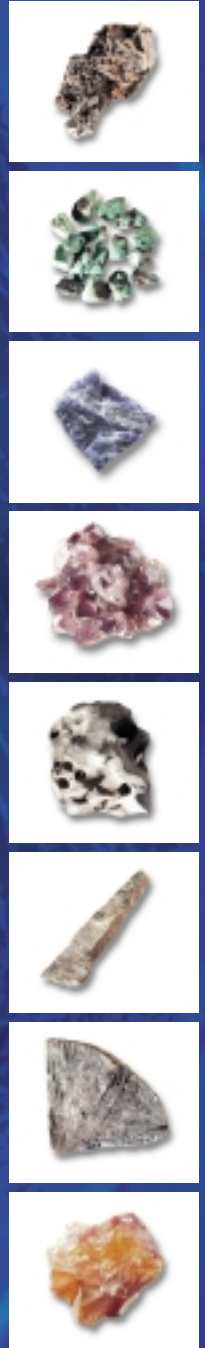


Gamma-Zerfall: Ein Atomkern verändert seine Gestalt und sendet dabei hochenergetisches Licht – ein so genanntes Gamma-Quant – aus.

spontane Spaltung



Spontane Spaltung: Ein Atomkern zerfällt unter Emission von Neutronen und Gamma-Quanten in zwei ungefähr gleich große Bruchstücke.



Überzeugen Sie sich selbst!

Messen Sie mit einem Zählrohr und einem Germanium-Detektor die Radioaktivität von Materialien aus unserer Umwelt, die Sie alle kennen.



Die chemischen Elemente entstehen

Eine Milliarde Jahre nach dem Urknall bis heute

Die chemischen Elemente – sie sind die Bausteine der Stoffe und die Grundlage für die Entstehung des Lebens.

Auf der Erde finden wir etwa 90 natürlich vorkommende Elemente, vom Wasserstoff, dem leichtesten, bis zum Uran, dem schwersten Element im Periodensystem.

Wie ist es zu der Vielfalt der Elemente gekommen?

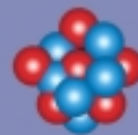
Welche Prozesse spielten dabei eine Rolle?

Die Elementsynthese begann ungefähr eine Milliarde Jahre nach dem Urknall, nachdem sich die ersten Galaxien und Sterne aus riesigen Wasserstoffwolken gebildet hatten. Durch die freigesetzte Gravitationsenergie wurde die Sternmaterie so aufgeheizt, dass im Inneren der Fusionsprozess von Wasserstoff zu Helium entfacht wurde. Seither vollzieht sich die Elementsynthese über komplexe Kernreaktionen in den Sternen.

So verdanken auch wir Menschen unsere Existenz der Elementsynthese in den Sternen. Denn wie alle Materie um uns herum, so stammt auch jedes Atom unseres eigenen Körpers aus Sternenstaub und wurde in früheren Sternengenerationen geschaffen.

1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H	He												B	C	N	O	F	Ne
Li	Be												Al	Si		S	Cl	Ar
Na	Mg																Br	Kr
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge					
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn					
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb					
Fr	Ra	Ac*	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	110	111	112							

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd												
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm												



Atom $\sim 0.000\,000\,1\text{ mm}$

Kern $\sim 0.000\,000\,000\,001\text{ mm}$

$^{12}_6\text{C}$

$^{56}_{26}\text{Fe}$

$^{238}_{92}\text{U}$

Mit Kernfusion bis zum Eisen

Elementsynthese im Inneren der Sterne

Unsere Sonne - ein Stern mittlerer Größe wie unzählige andere im Universum. In ihrem Inneren entsteht über Fusion von Wasserstoff Helium. Die dabei frei werdende Energie spendet uns Wärme und Licht und ist somit unmittelbare Voraussetzung für unser Leben.

Die Sterne liefern aber auch die Bausteine für das Leben – die chemischen Elemente. Durch Fusionsreaktionen von kleineren zu immer größeren Kernen können in ihrem Inneren nach und nach alle Elemente bis zum Eisen gebildet werden. Danach kommt die Fusion zum Stillstand, da bei der Verschmelzung zu noch schwereren Elementen Energie benötigt wird.

Die Elementsynthese bis zum Eisen vollzieht sich aber nur in sehr schweren Sternen mit einem Vielfachen der Sonnenmasse. In unserer Sonne, einem nur mittelgroßen Stern, wird die Fusion, so haben Wissenschaftler berechnet, keine schwereren Elemente als Kohlenstoff und Sauerstoff hervorbringen.

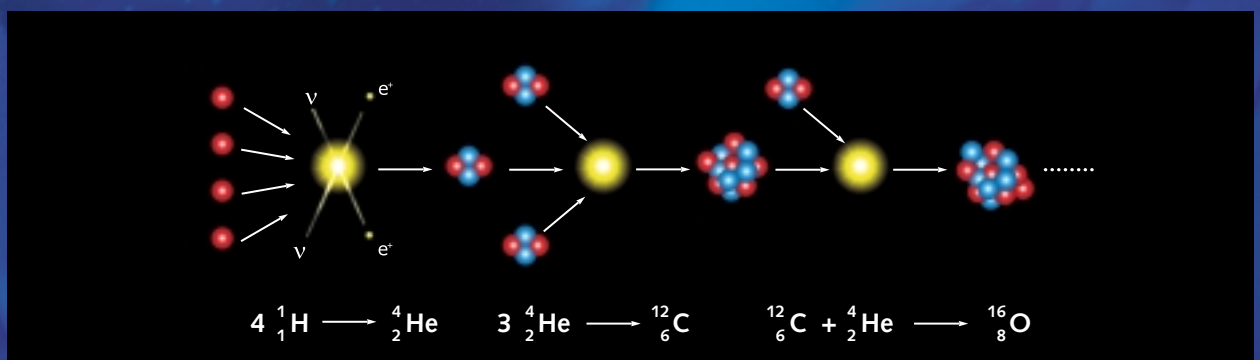


Bild: Kernfusionsreaktionen im Inneren der Sonne (Protonen: rot; Neutronen: blau).

${}^{12}_6\text{C}$

${}^{56}_{26}\text{Fe}$

${}^{238}_{92}\text{U}$



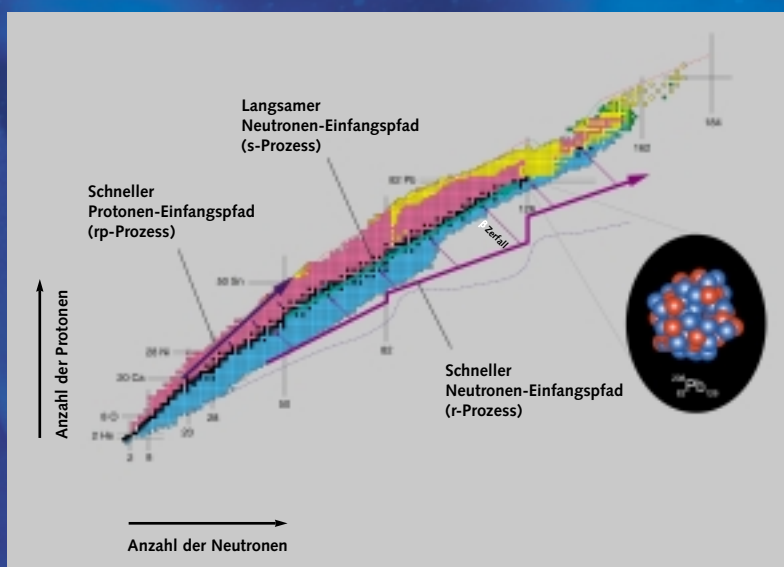
Über Umwege zum Uran

Elementsynthese in Roten Riesen und Supernova-Explosionen

Die Elemente, die schwerer als Eisen sind, entstehen am Ende der Lebenszeit großer Sterne in so genannten Roten Riesen oder in gewaltigen Supernova-Explosionen. Voraussetzung für die Bildung der schweren Elemente sind freie Neutronen, die über Kernreaktionen im Inneren der Roten Riesen und - in noch größerer Zahl - in Supernova-Explosionen freigesetzt werden.

Diese Neutronen lagern sich an die bereits vorhandenen leichten Kerne an. Auf diese Weise entstehen neutronenreiche radioaktive Kerne, die über Beta-Zerfall, das heißt die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton, in das nächst schwerere Element übergehen. Über mehrfache Wiederholung dieses Prozesses werden alle Elemente bis zum Uran gebildet.

Allen dabei auftretenden „Produktionspfaden“ ist gemeinsam, dass sie über den Umweg radioaktiver Kerne zu den stabilen schweren Elementen führen. Wir verdanken die Vielfalt der Stoffe auf der Erde also einer Vielzahl von radioaktiven Kernen und Kernreaktionen, die als Zwischenglieder bei der Elementsynthese dienen.



Mit Hilfe der Nuklidkarte lassen sich die verschiedenen Produktionspfade nachvollziehen. In der Nuklidkarte sind alle bekannten - über 2500 - Atomkerne, sortiert nach der Anzahl der Protonen und Neutronen, aufgetragen. Jedes Kästchen steht für einen Atomkern. Nur etwa 250 Kerne, das schmale Band schwarzer Kästchen, sind stabil. Aus ihnen besteht fast die gesamte Materie auf der Erde.

Die beiden wichtigsten Produktionspfade zur Bildung schwerer Elemente sind der langsame Neutroneneinfang (s-Prozess) in Roten Riesen und der schnelle Neutroneneinfang (r-Prozess) in Supernova-Explosionen. Der s-Prozess verläuft nahe dem Band der stabilen Elemente in einem bekannten Gebiet der Nuklidkarte und zieht sich über mehrere zehntausend Jahre hin. Dagegen erfolgt der r-Prozess entlang sehr neutronenreicher Kerne, die im Wesentlichen noch vollkommen unerforscht sind. Er ist in nur wenigen Sekunden abgeschlossen.

Neben s- und r-Prozess treten noch andere Prozesse auf. In ihnen werden die protonenreichen stabilen Kerne gebildet. Einer davon ist der rp-Prozess, der über den Einfang freier Protonen abläuft und zu den mittelschweren protonenreichen Kernen führt.

¹²₆C

⁵⁶₂₆Fe

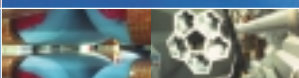
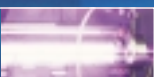
²³⁸₉₂U

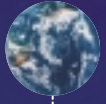




Zerfallskette von Element 112

The diagram illustrates the decay chain of Element 112. It begins with Fm (Z=100, A=253) and proceeds through a series of alpha decays to No (Z=102, A=257), Rf (Z=104, A=261), Sg (Z=106, A=265), Hs (Z=108, A=269), 110 (Z=110, A=273), and 112 (Z=112, A=277). The final product is CN (Z=114).



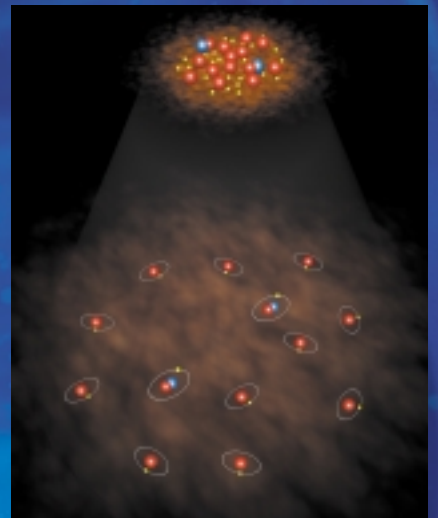


Das erste Wasserstoffatom

300.000 Jahre nach dem Urknall

Die Bildung neutraler Wasserstoffatome aus freien Protonen und freien Elektronen ist ein weiterer Meilenstein in der Geschichte des Universums. Dies geschah etwa 300.000 Jahre nach dem Urknall. Das Universum war zu diesem Zeitpunkt tausendfach kleiner und seine Temperatur tausendmal höher als heute.

Vorher lag die Materie als ein Plasma, bestehend aus Protonen, einigen leichten Atomkernen und Elektronen, vor.



Übergang: Wasserstoffplasma (oben) - Wasserstoffgas (unten).



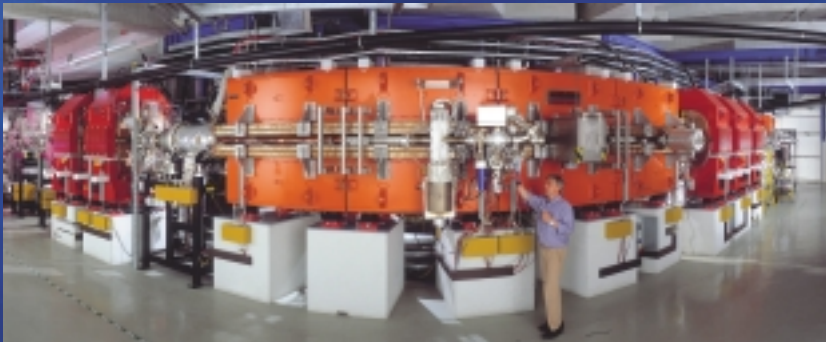
Bild: Wasserstoffnebel (Eta Carinae)

Erst als die Temperatur unter etwa 3000 Kelvin gesunken war, konnten sich Protonen und Elektronen zu Wasserstoff verbinden.

Auf diese Weise entstanden die ersten riesigen Wasserstoffwolken im Universum, die das Ausgangsmaterial für die Bildung von Sternen und die Elementsynthese bildeten.



Atom- und Plasmaphysik im Labor

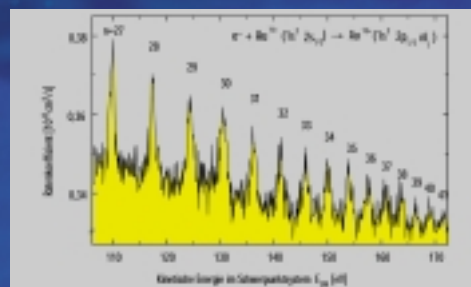
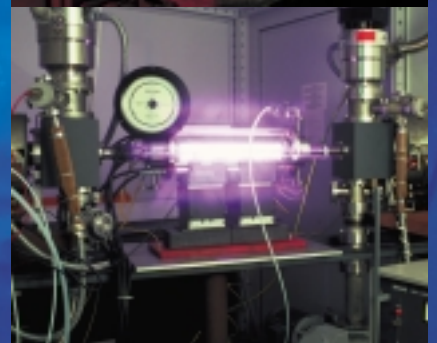


Bilder:
Experiment-Speicherring ESR für hochgeladene Ionen bei der GSI in Darmstadt (links), Detailaufnahme (oben). Laserexperiment (unten).

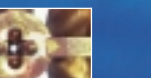
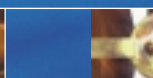
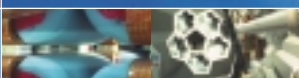
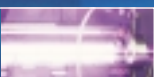
Mit Beschleunigeranlagen und Lasern können die Physiker das Verhalten von heißen Plasmen und von hochionisierten Atomen untersuchen, wie sie am Anfang des Universums existierten und heute noch im Inneren von Sternen vorkommen.

Auch hier haben die Forscher neue Rekorde aufstellen können. So gelang es ihnen, Uran, das schwerste natürliche Atom im Periodensystem, in einem Zustand zu präparieren und zu speichern, in dem alle 92 Elektronen abgestreift sind. Dies entspricht Plasmatemperaturen von etwa einer Milliarde Kelvin.

Die Untersuchung solcher exotischen Atomsysteme erlaubt Einblicke in die grundlegende Struktur der elektromagnetischen Wechselwirkung.



Bilder:
Zündung eines Plasmas (oben). Messung atomarer Übergänge in hochgeladenen Gold-Ionen (links).





Die Kernbausteine entstehen

Eine tausendstel Sekunde nach dem Urknall

Etwa eine tausendstel Sekunde nach dem Urknall bildeten sich die Bausteine der Atomkerne: Protonen und Neutronen. Davor war das Universum so heiß und dicht, dass die Materie als eine Ursuppe, bestehend aus Quarks, Gluonen und anderen Teilchen, existierte – das so genannte Quark-Gluon-Plasma.

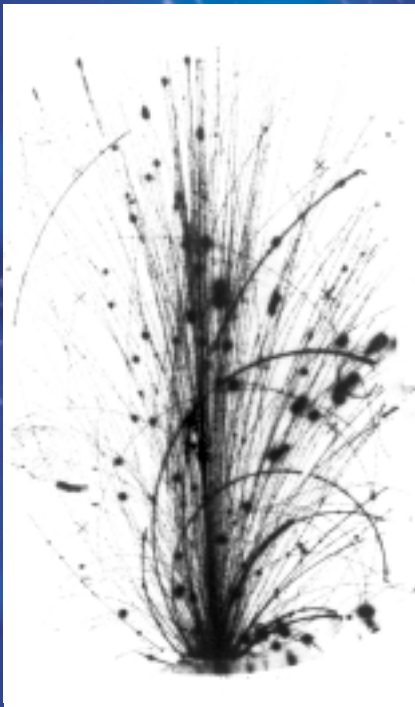
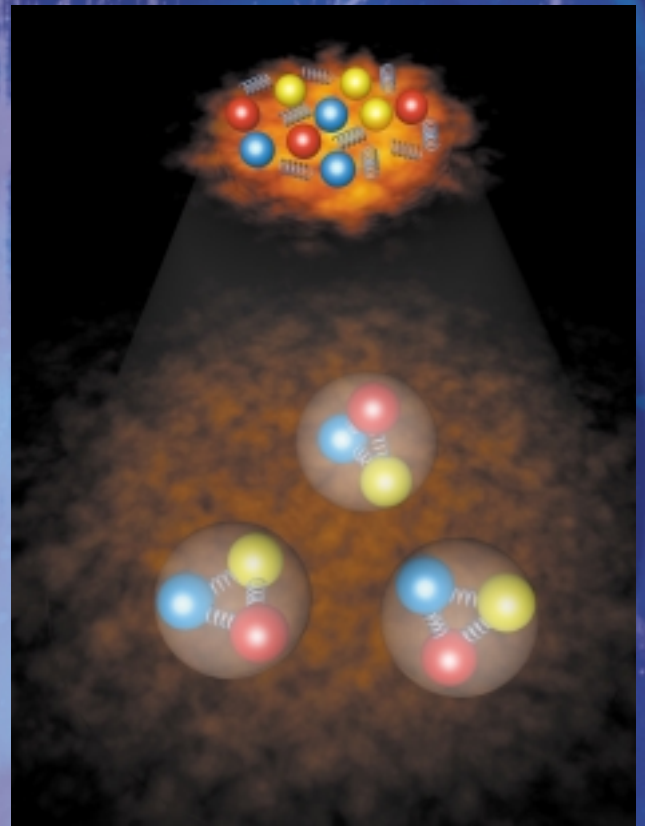


Bild: Teilchenspuren nach einer Kern-Kern-Kollision.



Übergang: Quark-Gluon-Plasma (oben) - Protonen und Neutronen (unten).

Seitdem kommen Quarks und Gluonen nicht mehr frei vor, sondern sind immer auf verschiedene Weise miteinander vereinigt. Protonen und Neutronen bestehen jeweils aus drei Quarks, die von Gluonen zusammengehalten werden. Im Anschluss an die Bildung der Protonen und Neutronen entstanden in den ersten drei Minuten des Universums die leichten Kerne von Wasserstoff, Deuterium, Helium und Lithium. Erst viel später – nach einer Milliarde Jahren – begann der Aufbau der schwereren Elemente in den Sternen.



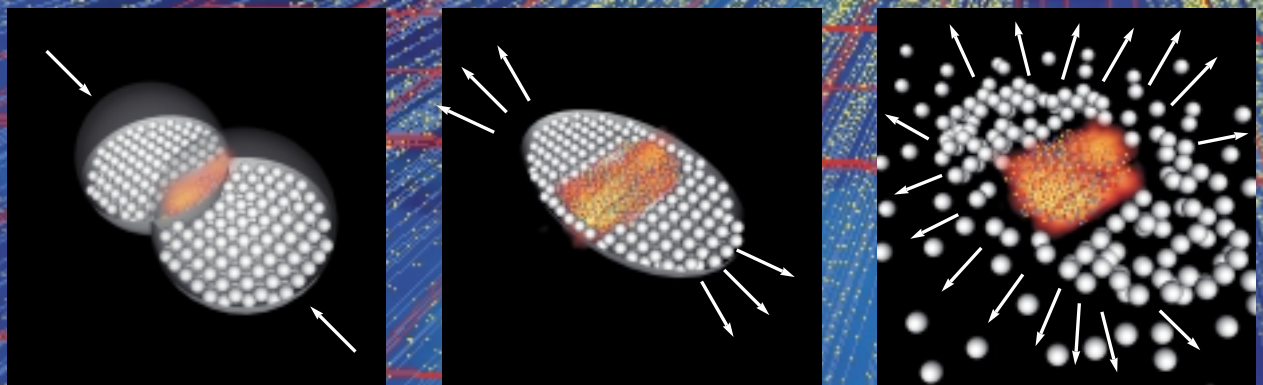
Die Suche nach dem Quark-Gluon-Plasma im Labor

In langjährigen Experimenten ist es am europäischen Forschungsinstitut CERN in Genf gelungen, die am Anfang des Universums bestehende kosmische Ursuppe künstlich zu erzeugen. Von deutscher Seite waren Physiker der Universitäten Frankfurt, Heidelberg und Münster sowie der Gesellschaft für Schwerionenforschung, GSI, in Darmstadt maßgeblich beteiligt.

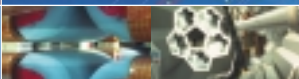
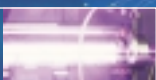
Das Prinzip der Versuche: Ein großer Beschleuniger bringt schwere Bleikerne nahezu auf Lichtgeschwindigkeit, um sie dann mit voller Wucht auf einen anderen Bleikern zu schießen. In der Kollisionszone entsteht dann für kurze Zeit ein heißer Feuerball, in dem sich ein Quark-Gluon-Plasma bilden kann.

Mit der Beobachtung des Quark-Gluon-Plasmas ist es den Wissenschaftlern gelungen, die Geschichte des Universums bis auf weniger als eine tausendstel Sekunde nach dem Urknall zurückzudrehen.

Um die Eigenschaften der kosmischen Ursuppe im Detail zu erforschen, müssen Kerne mit noch höheren Energien zur Kollision gebracht werden. Hierfür sind Experimente am kürzlich fertig gestellten RHIC-Beschleuniger in den USA und an dem im Aufbau befindlichen LHC-Beschleuniger am CERN geplant.

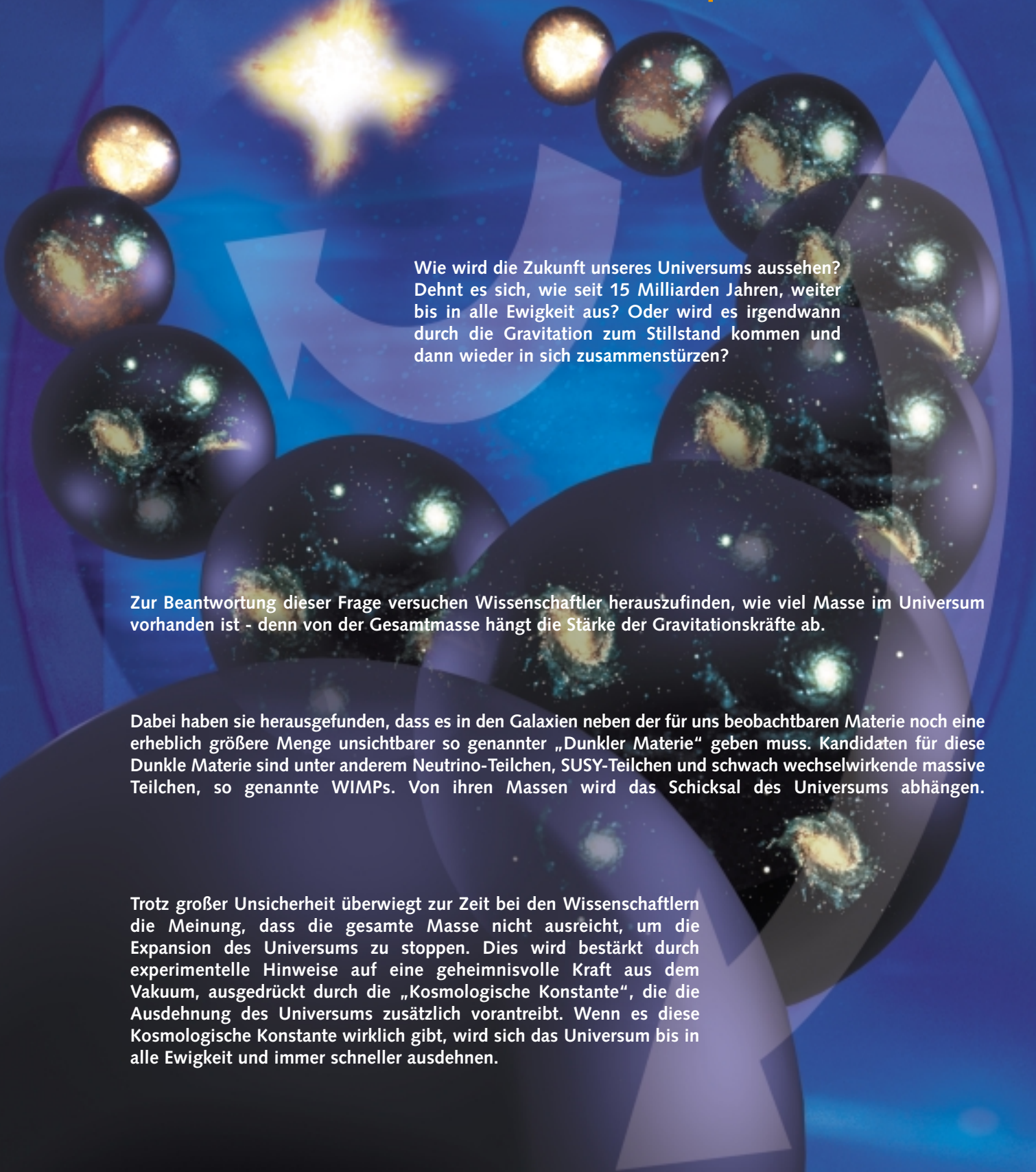


Bildfolge: Ablauf einer Kern-Kern-Kollision zur Erzeugung des Quark-Gluon-Plasmas.



Die Zukunft des Universums

Ausdehnung oder Kollaps?



Wie wird die Zukunft unseres Universums aussehen? Dehnt es sich, wie seit 15 Milliarden Jahren, weiter bis in alle Ewigkeit aus? Oder wird es irgendwann durch die Gravitation zum Stillstand kommen und dann wieder in sich zusammenstürzen?

Zur Beantwortung dieser Frage versuchen Wissenschaftler herauszufinden, wie viel Masse im Universum vorhanden ist - denn von der Gesamtmasse hängt die Stärke der Gravitationskräfte ab.

Dabei haben sie herausgefunden, dass es in den Galaxien neben der für uns beobachtbaren Materie noch eine erheblich größere Menge unsichtbarer so genannter „Dunkler Materie“ geben muss. Kandidaten für diese Dunkle Materie sind unter anderem Neutrino-Teilchen, SUSY-Teilchen und schwach wechselwirkende massive Teilchen, so genannte WIMPs. Von ihren Massen wird das Schicksal des Universums abhängen.

Trotz großer Unsicherheit überwiegt zur Zeit bei den Wissenschaftlern die Meinung, dass die gesamte Masse nicht ausreicht, um die Expansion des Universums zu stoppen. Dies wird bestärkt durch experimentelle Hinweise auf eine geheimnisvolle Kraft aus dem Vakuum, ausgedrückt durch die „Kosmologische Konstante“, die die Ausdehnung des Universums zusätzlich vorantreibt. Wenn es diese Kosmologische Konstante wirklich gibt, wird sich das Universum bis in alle Ewigkeit und immer schneller ausdehnen.