

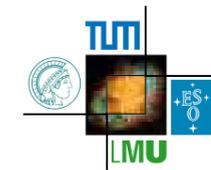


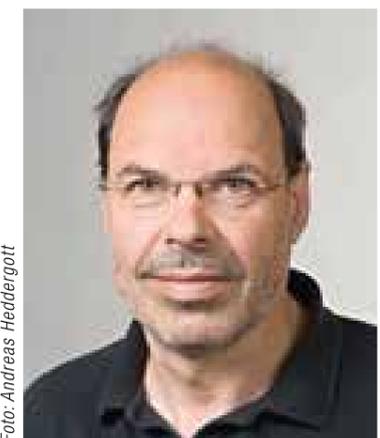
EXZELLENZCLUSTER UNIVERSE

URSPRUNG UND STRUKTUR DES UNIVERSUMS

EXZELLENZCLUSTER UNIVERSE

URSPRUNG UND STRUKTUR DES UNIVERSUMS





Prof. Dr. Stephan Paul



Prof. Dr. Andreas Burkert

VORWORT

Wie ist das Weltall entstanden? Warum gibt es Sterne und Galaxien? Woher stammen der Sauerstoff, den wir zum Atmen brauchen, und das Eisen in unserem Blut? Was befindet sich in einem Schwarzen Loch? Wie sieht die Zukunft unseres Universums aus? Das sind Fragen, die sich viele Menschen stellen, wenn sie den Blick in den Himmel richten oder über das Woher und Wohin unserer Welt nachdenken.

Der Exzellenzcluster Universe wurde im Jahr 2006 gegründet, um den Antworten auf diese Fragen näher zu kommen. Weil die Fragen viele Teildisziplinen der Physik betreffen, braucht es die Zusammenarbeit von Experten: von Kosmologen, die sich mit dem Ursprung und der Entwicklung des Universums beschäftigen, von Teilchenphysikern, welche die Elementarteilchen und ihre Kräfte ergründen, und von Astronomen und Astrophysikern, die Himmelsobjekte und -erscheinungen erforschen. Dem Exzellenzcluster Universe gehören daher Wissenschaftler der Technischen Universität München, der Ludwig-Maximilians-Universität München, der Max-Planck-Institute für Physik (MPP), Astrophysik (MPA), extraterrestrische Physik (MPE) und Plasmaphysik (IPP), der Europäischen Südsternwarte (ESO) und des Leibniz-Rechenzentrums der Bayerischen Akademie der Wissenschaften an. Insgesamt arbeiten mehr als 250 Forscher zusammen.

Die großen wissenschaftlichen Fragestellungen sind im Exzellenzcluster Universe sieben Research Areas zugeordnet. Seit dem Jahr 2012 sind mit dem Rechenzentrum C²PAP und dem internationalen Gastforschungszentrum MIAPP zwei weitere wichtige Säulen hinzugekommen. Wir möchten Ihnen in dieser Broschüre viele der Menschen vorstellen, die am Exzellenzcluster Universe arbeiten – und vor allem auch die Fragen, Experimente und Aufgaben, mit denen sie sich beschäftigen. Denjenigen, die noch mehr über unseren Kosmos wissen wollen, legen wir einen Besuch der Ausstellung „Entwicklung des Universums“ im Deutschen Museum ans Herz, die der Exzellenzcluster Universe gemeinsam mit seinen Partnern realisiert hat – mehr dazu erfahren Sie am Ende der Broschüre.

Wir wünschen Ihnen eine informative Lektüre.

Prof. Dr. Stephan Paul
Koordinator des Exzellenzclusters Universe

Prof. Dr. Andreas Burkert
Co-Koordinator des Exzellenzclusters Universe

Foto: Andreas Heddergott

Foto: Astrid Eckert

DEN BEGINN UNSERES UNIVERSUMS ENTRÄTSELN

Die meisten Physiker gehen davon aus, dass unser Weltall aus einem Urknall hervorgegangen ist. Demnach ist unser Universum in einem Moment höchster Energie auf kleinstem Raum entstanden. In diesem Anfang liegt nicht nur der Ursprung der Materie, sondern auch der Beginn von Raum und Zeit. Doch welche physikalischen Gesetze galten in diesem Moment?

Die beiden wichtigsten physikalischen Theorien des 20. Jahrhunderts, Quantenphysik und Allgemeine Relativitätstheorie, beschreiben unsere Welt für ganz kleine und ganz große Dimensionen.

Max Planck formulierte, dass die physikalischen Grundgrößen Energie, Länge und Zeit nicht beliebig klein sein können, sondern kleinste Einheiten haben müssen. Das Plancksche Wirkungsquantum h ist das Maß für die kleinste Portion Energie. Die kleinste Längeneinheit beträgt 10^{-35} Meter, die kürzeste Zeiteinheit 10^{-43} Sekunden, das entspricht der Zeit, die ein Lichtstrahl zum Durchlaufen dieser Länge braucht. Diese kleinste Zeiteinheit ist daher auch der früheste Zeitpunkt nach dem Urknall, zu dem eine physikalische Beschreibung unseres Universums einsetzen kann.

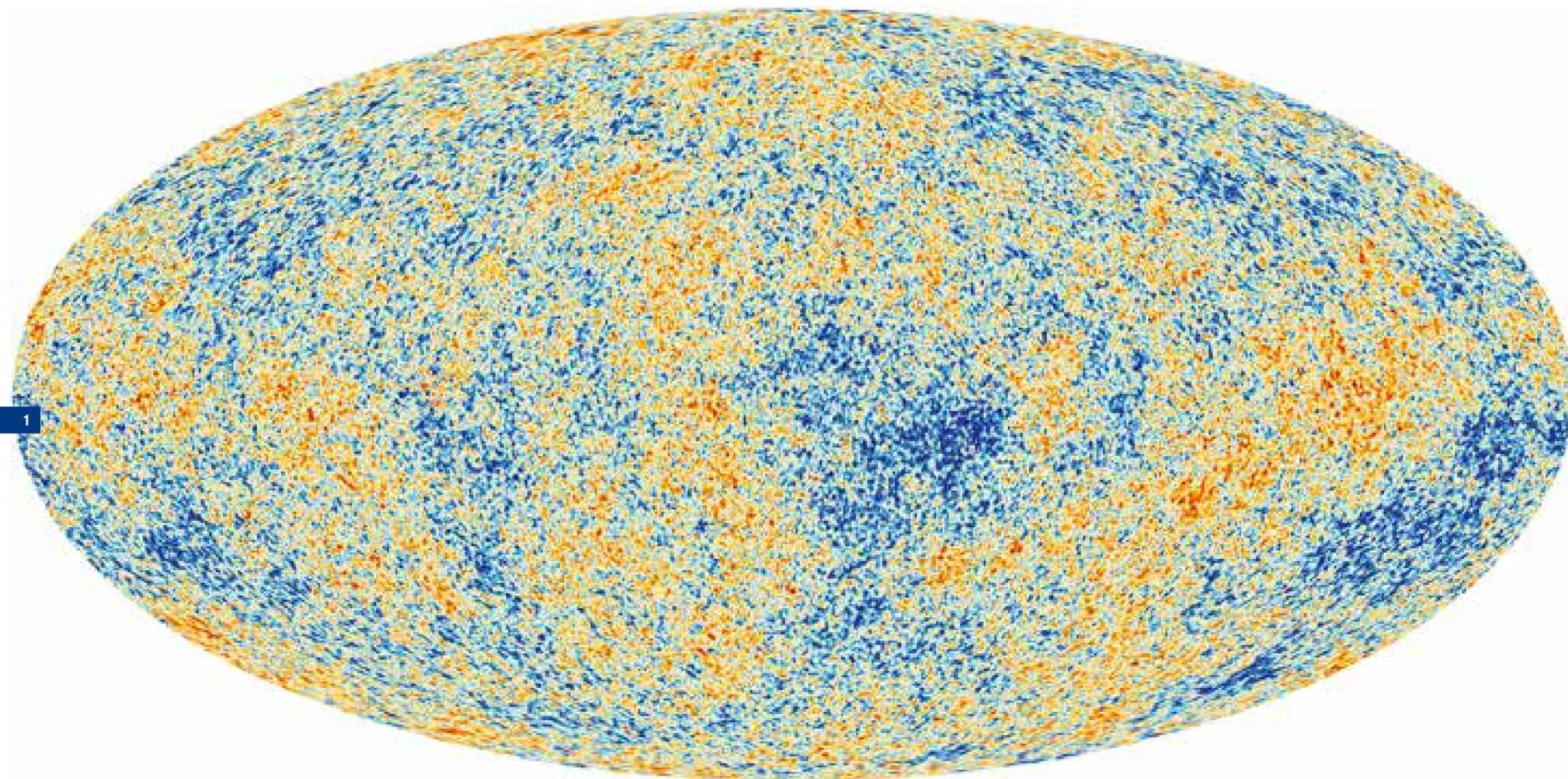
Auch Albert Einstein hat mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie unser Verständnis von Zeit, Raum und Energie revolutioniert. Raum und Zeit sind nicht die Bühne des Universums, auf der die Materie ihr Stück aufführt. Die Raumzeit ist selbst ein Teil der Aufführung, die von der Materie beeinflusst wird und ihrerseits Einfluss auf die Bewegung der Materie nimmt.

Beide Theorien sind experimentell aufs Beste bestätigt. Nur für den Moment des Urknalls liefern sie leider Widersprüche. Die Physiker sind deshalb auf der Suche nach einer Theorie, die beide vereint. Eine solche Theorie sollte außerdem die Frage nach dem Ursprung der Kräfte beantworten. Zwei der vier fundamentalen Kräfte der Physik sind uns unmittelbar vertraut: die Schwerkraft und die elektromagnetische Kraft. Die beiden anderen, die starke und die schwache Kernkraft, sorgen für den festen Zusammenhalt der Bestandteile der Atomkerne, spielen aber in unserem Alltag keine wahrnehmbare Rolle. Doch wie sind die vier aus der Urkraft am Anfang des Universums hervorgegangen?

An einer Lösung dieser theoretischen Fragen arbeiten die Wissenschaftler des Exzellenzclusters Universe in der **Research Area A**.

Von links: Daniel Jaud – Doktorand (LMU) | Patrick Vaudrevange – Research Fellow (TUM) | Ilka Brunner – Professorin (LMU)
Foto: Astrid Eckert





FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Überprüfbare Vorhersagen der String-Theorie

Die String-Theoretiker gehen davon aus, dass die uns bekannten Elementarteilchen Oberschwingungen eines saitenartigen Gebildes, eines „Strings“, von der Länge 10^{-34} Meter sind. Allerdings existieren diese Strings mathematisch nur in zehn oder elf Dimensionen. Vier davon sind die uns bekannten Raum- und Zeitdimensionen, dazu kommen sechs oder sieben „Extradimensionen“, die der Theorie nach so winzig zusammengewickelt sind, dass sie uns nicht auffallen. Diese Extradimensionen machen den Vorzug und die Schwierigkeit der String-Theorie aus: Ihre Längeneinheiten sind für die Entstehung des Universums relevant, experimentell aber schwer zu überprüfen. Für die String-Theorie spricht jedoch, dass sie als bislang einzige die Quantenphysik und die Allgemeine Relativitätstheorie vereinen und die vier fundamentalen Kräfte beschreiben kann. Die Wissenschaftler am Exzellenzcluster Universe arbeiten daher an weiteren Vorhersagen zur String-Theorie, die mit Teilchenbeschleunigern wie dem Large Hadron Collider nachprüfbar sind.

String-Kosmologie

Der spekulativen, aber unter Physikern sehr beliebten Inflationstheorie zufolge, hat sich unser Universum zu einem Zeitpunkt etwa 10^{-34} Sekunden nach dem Urknall um mindestens das 10^{26} -fache ausgedehnt. Eine solche kosmische Inflation könnte viele der erstaunlichen Eigenschaften unseres Universums erklären, etwa, dass unser Universum keine messbare Raumkrümmung aufweist und in großen Dimensionen in allen Richtungen gleich aussieht. Die Physiker haben jedoch keine Ahnung, welcher Mechanismus eine solche plötzliche Aufblähung verursacht haben könnte. Sie versuchen daher, aus der String-Theorie Modelle für eine solche kosmische Inflation abzuleiten, und sie mit den experimentellen Informationen über das frühe Universum zu vergleichen, die das Weltraumteleskop Planck in der kosmischen Hintergrundstrahlung abgebildet hat. Außerdem wollen die Physiker untersuchen, wie sich die Dunkle Materie und die Dunkle Energie in die String-Theorie integrieren lassen.

Quantengravitation

Es gibt noch keine Theorie für eine Quantengravitation, die sich experimentell bewährt hat. Die elektromagnetische Kraft wird in der Quantenelektrodynamik (QED) beschrieben, die starke Kernkraft in der Quantenchromodynamik (QCD) und die schwache Kernkraft zusammen mit der Quantenelektrodynamik in der Theorie der Elektroschwachen Wechselwirkung (ESW). Eine „Quantengravitationstheorie“ fehlt bisher. Die Theoretiker arbeiten daran, einen neuen methodischen Ansatz weiter zu untersuchen und ihn auf Quantenfeldtheorien auszuweiten, so dass sie damit auch einer Quantengravitationstheorie näher kommen.

1 Spuren des Urknalls: Von überall aus dem All erreicht uns Licht, das etwa 400.000 Jahre nach dem Urknall ausgesandt wurde und sich seither beinahe ungehindert durch das Weltall bewegt. Damals war der Kosmos noch einige tausend Grad heiß. Die Expansion des Universums hat dafür gesorgt, dass dieses Licht mittlerweile an Energie verloren hat und es heute als kosmischer Mikrowellenhintergrund mit einer Temperatur von minus 270 Grad Celsius (oder präzise 2,7 Kelvin) empfangen wird. Zuletzt hat das Weltraumteleskop Planck diesen Mikrowellen-

hintergrund mit höchster Präzision auf dem gesamten Himmel vermessen. Die Farben repräsentieren winzige Temperaturunterschiede von der Größe 0,000001 Grad Celsius (blau: kälter, rot: wärmer), diese wurden erzeugt von kleinen Unregelmäßigkeiten in der Verteilung der Materie im frühen Universum. Die Unregelmäßigkeiten sind der Ursprung aller großen kosmischen Strukturen des heutigen Universums, von Galaxien über Galaxiengruppen und -haufen bis hin zu dem weit verzweigten Netz aus Galaxienfilamenten. Foto: ESA und die Planck-Kollaboration



NACH NEUEN TEILCHEN SUCHEN

Mit der Entdeckung des Higgs-Teilchens wurden alle Elementarteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik bestätigt. 18 fundamentale Bausteine des Universums sind in den letzten rund 100 Jahren Physikern erst vorhergesagt und nach und nach experimentell nachgewiesen worden.

Dazu gehören zwölf Materieteilchen – die Quarks und Leptonen –, sowie fünf Kraftteilchen, die als Vermittler der fundamentalen Kräfte zwischen den Materieteilchen wirken: das Photon für die elektromagnetische Kraft, das Gluon für die starke und die beiden W-Bosonen und das Z-Boson für die schwache Kernkraft. Als letztes wurde im Jahr 2012 schließlich das vor 50 Jahren vorhergesagte Higgs-Teilchen gefunden, das den Elementarteilchen ihre Masse verleiht.

Doch sind das wirklich alle elementaren Bausteine? Die Physiker vermuten, dass das Universum noch weitere verborgen hält. Ein paar Anhaltspunkte gibt es: Die Schwerkraft fehlt in diesem Modell, denn es enthält kein Kraftteilchen der Gravitation. Außerdem wissen wir, dass es in unserem Universum eine weitere Substanz gibt, die sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht. Vieles spricht dafür, dass sich diese Dunkle Materie aus einer noch unbekanntem Teilchenart zusammensetzt.

Das Standardmodell hat auch keine Antwort auf die Frage, warum es in unserem Universum so viel Materie, aber so gut wie keine Antimaterie gibt. Aus der Energie des Urknalls müssen paarweise Teilchen und ihre Antiteilchen entstanden sein, die sogleich wieder miteinander zu Energie zerstrahlt sind. Offenbar sind jedoch Teilchen übrig geblieben – die Mate-

rie, aus der wir und das uns umgebende Universum aufgebaut sind –, sonst gäbe es im Universum nur Licht. Die Physiker können aufgrund der Lichtmenge abschätzen, wie viel überzählige Materie es gewesen sein muss: pro eine Milliarde Antiteilchen genau ein Teilchen. Sie rätseln jedoch, welcher Mechanismus dafür verantwortlich sein könnte.

Es gibt verschiedene Theorien, welche die Probleme des Standardmodells in den Griff zu bekommen versuchen. Am elegantesten gelingt dies der Supersymmetrie. Im Rahmen dieser Theorie verschwindet die Unterscheidung zwischen Materie- und Kraftteilchen – wobei sich die Anzahl der Teilchen verdoppelt und jedes bisher bekannte Elementarteilchen ein supersymmetrisches Partnerteilchen zugewiesen bekommt. Die Supersymmetrie hat auch ideale Kandidaten für die Dunkle Materie zu bieten.

Ist die Supersymmetrie nun das neue Modell, in dem das alte Standardmodell der Teilchenphysik aufgehen wird? Oder gibt es noch eine weitere Unterstruktur mit noch unbekanntem Bausteinen? Noch wissen es die Physiker nicht, denn sie haben noch kein Teilchen jenseits des Standardmodells gefunden.

Die Wissenschaftler des Exzellenzclusters Universe der **Research Area B** suchen daher in allen Richtungen nach weiteren elementaren Bausteinen des Universums.

hintere Reihe, v. l.: Ralf Hertenerberger – *wiss. Mitarbeiter (LMU)* | Christopher Unverdorben – *PostDoc (LMU)* | Frank Simon – *Gruppenleiter (MPP)* | Otmar Biebel – *Professor (LMU)*
 vordere Reihe, v. l.: Wolfgang Hollik – *Direktor (MPP)* | Jeanette Lorenz – *PostDoc (LMU)* | Dorothee Schäle – *Professorin (LMU)* | Alexander Mann – *PostDoc (LMU)*
 vorne: Frank Steffen – *wiss. Mitarbeiter (MPP)* Foto: Astrid Eckert

FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Jenseits des Standardmodells

Vieles deutet darauf hin, dass das Standardmodell der Teilchenphysik nur eine unvollständige Beschreibung der physikalischen Wirklichkeit ist. Die Physiker erwarten, dass sich bei noch höheren Kollisionsenergien am Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) am CERN neue, bisher nicht entdeckte, fundamentale Teilchen offenbaren werden. Daher wurde der LHC nach seinem ersten Lauf in den Jahren 2009 bis 2013 umgerüstet, so dass die Teilchen im zweiten Lauf seit 2015 mit doppelt so hohen Energien zusammenstoßen wie im ersten Lauf. Ob die Energien bereits hoch genug sind und sich eine der vorgeschlagenen neuen Theorien als richtig erweisen wird, muss sich zeigen. In Theorie und Experiment nach einer Physik jenseits des Standardmodells zu forschen, ist ein Hauptschwerpunkt des Exzellenzclusters Universe.

- Die 18 Elementarteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik: Alle Teilchen dieses Modells – zwölf Materie-, fünf Kraft- sowie das Higgs-Teilchen – wurden in Experimenten nachgewiesen und gelten bislang als die fundamentalen Bausteine des Universums.
Foto: wikipedia/MissMJ
- Blick in den Tunnel des Teilchenbeschleunigers LHC am Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf: In einem Ring mit 27 Kilometern Umfang, 100 Meter unter der

Zukünftige Beschleunigerexperimente

Die Bestätigung des Standardmodells der Teilchenphysik ist das Ergebnis vieler Generationen von Experimenten an Teilchenbeschleunigern und dem erfolgreichen Zusammenspiel von überprüfbareren Theorien und Experimenten. Immer höhere Kollisionsenergien haben die Entdeckung von neuen Teilchen ermöglicht. Es gibt viele Argumente, die dafür sprechen, dass sich bei den jetzt erreichten Kollisionsenergien Hinweise auf neue Teilchen ergeben sollten. Um weiter nach einer Physik jenseits des Standardmodells zu suchen, werden jedoch noch höhere Energien benötigt. Die Physiker am Exzellenzcluster Universe beschäftigen sich daher mit der Entwicklung von Konzepten und Technologien für zukünftige Teilchendetektoren und -beschleuniger.

- Erde, werden Teilchen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.
Foto: Claudia Marcelloni di Oliveira/CERN
- Vorbereitungen für den zweiten Lauf des LHC: Das Energiemessinstrument des Detektors ATLAS kurz vor dem Verschließen im Dezember 2014; der Detektor ist insgesamt 46 Meter lang und 25 Meter hoch und dient der Suche nach neuen fundamentalen Teilchen.
Foto: Jaques Fichet/CERN

1

Drei Generationen der Materie (Fermionen)				
	I	II	III	
Massen	0,2 MeV	1,275 MeV	173,107 MeV	125,9 MeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	up	charm	top	Photon
				Higgs Boson
Quarks				
	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
	down	strange	bottom	Gluon
Leptonen				
	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
	Electron-Neutrino	Myon-Neutrino	Tau-Neutrino	Z Boson
	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$
	Electron	Myon	Tau	W Boson

LECTURER





NEUE EIGENSCHAFTEN VON TEILCHEN AUFSPÜREN

Physiker haben die Materieteilchen nach ihren Eigenschaften in zwei Gruppen zu je sechs Mitgliedern sortiert: die Quarks (Up-, Down, Charm, Strange, Bottom, Top) und die Leptonen (Elektronen, Myonen, Tauonen und die zugehörigen Neutrinos). Nicht allen begegnen wir im Universum gleichermaßen: In unserem Kosmos gibt es vor allen Dingen Licht, also Photonen, und die leichtesten der Materieteilchen, die Up-, die Down-Quarks und die Elektronen, diese drei bilden die Atome, sowie Neutrinos.

Das Standardmodell beschreibt sehr genau, wie sich alle diese Teilchen verhalten: Quarks kommen nie alleine, sondern in Gruppen zu zweit oder zu dritt vor. Die Protonen und Neutronen in den Atomkernen setzen sich aus je drei Quarks zusammen. Darüber hinaus gibt es instabile Teilchen, die aus einem Quark-Antiquark-Paar bestehen, sie entstehen unter anderem in Prozessen der kosmischen Höhenstrahlung.

Die bisher bekannten fundamentalen Bausteine der Materie heißen zwar „elementar“, können jedoch nach dem Standardmodell der Teilchenphysik erzeugt und vernichtet werden – und sich sogar ineinander umwandeln. Unserem Alltagsverständnis nach können Kräfte das Wesen eines Körpers nicht ändern, nur beschleunigen oder abbremsen. Die schwache Kernkraft dagegen kann ein Materieteilchen verändern und ein Quark in ein anderes Quark unterschiedlicher Masse und Ladung verwandeln, das gleiche gilt für ein Lepton.

Die Physiker sind jedoch sicher, dass das Standardmodell der Teilchenphysik nur eine Annäherung an die Gesetze der Natur sein kann, nur ein Teil der Wahrheit. Rund um die Neutrinos gibt es eine Reihe von Hinweisen auf neue Phänomene: Neutrinos sollten keine Massen besitzen, Experimente offenbaren jedoch das Gegenteil. Auch die Gesetzmäßigkeiten, nach denen sich diese Teilchen ineinander umwandeln, geben Rätsel auf. Und schließlich gibt es die Hypothese, wonach Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind. Auch das würde nicht ins Standardmodell passen.

In der **Research Area C** untersuchen die Physiker daher die bisher bekannten fundamentalen Bausteine der Materie auf neue Eigenschaften, die das Standardmodell nicht vorhersagt.

hintere Reihe, v. l.: Kai Krings – Doktorand (TUM) | Joost Veenkamp – Master-Student (TUM) | Peter Stangl – Doktorand (TUM) | Björn Garbrecht – Professor (TUM)
vordere Reihe, v. l.: Anna Bernhard – Doktorandin (TUM) | Laura Vanhoefer – Doktorandin (MPP) | Elisa Resconi – Professorin (TUM)
Andrzej Buras – Professor (TUM) | Martin Jung – Research Fellow (TUM)
vorne: Christoph Niehoff – Doktorand (TUM) Foto: Astrid Eckert

FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Physik mit Neutrinos

Elektron-Neutrinos werden in großer Zahl bei Kernfusionsprozessen im Inneren der Sonne erzeugt. Erste Untersuchungen des Neutrino-Flusses der Sonne in den 1960-er Jahren zeigten, dass nur etwa ein Drittel der erwarteten Elektron-Neutrinos auf der Erde ankommen. Heute kennt man den Grund für dieses Defizit: Die Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos können sich ineinander umwandeln. Da sie dies mit bestimmten Perioden machen, sprechen Physiker auch von Neutrino-Oszillationen. Die Gesetzmäßigkeiten dafür sind jedoch noch nicht vollständig erforscht. Wissenschaftler am Exzellenzcluster sind an einer Reihe von Experimenten beteiligt, die sich der Erforschung der Eigenschaften von Neutrinos widmen, dazu gehören Borexino im italienischen Gran Sasso-Untergroundlabor, Double Chooz am Kernkraftwerk Chooz in Frankreich, IceCube an der Amundsen-Scott-Südpolstation in der Antarktis und Juno, das derzeit im Jiangmen-Untergroundlabor in China aufgebaut wird. Darüber hinaus sind Neutrinos auch als Boten von hochenergetischen kosmischen Ereignissen von Bedeutung, wie etwa Sternexplosionen.

Die Doppelnatur von Neutrinos

Im Widerspruch zum Standardmodell der Teilchenphysik hat sich experimentell gezeigt, dass Neutrinos winzig kleine Ruhemassen besitzen (exakt konnten diese allerdings noch nicht bestimmt werden). Eine Erklärung für diese Massen könnte sein, dass Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen, sogenannte Majorana-Teilchen, sind. Auch theoretische Erweiterungen des Standardmodells der Teilchenphysik legen die Majorana-Natur der Neutrinos nahe. Sollte diese Hypothese zutreffen, so könnten die Wissenschaftler die Entstehung unseres Universums und den Ursprung des Materie-Antimaterie-Ungleichgewichts besser verstehen. Physiker des Exzellenzclusters Universe sind maßgeblich an zwei voneinander unabhängigen Experimenten zur Überprüfung der Doppelnatur von Neutrinos beteiligt: Gerda im italienischen Gran Sasso-Untergroundlabor und EXO-200, das im US-Bundesstaat New Mexico angesiedelt ist. Beide Teams haben die bislang weltweit präzisesten Messungen vorgelegt, konnten die These aber weder endgültig bestätigen noch widerlegen.

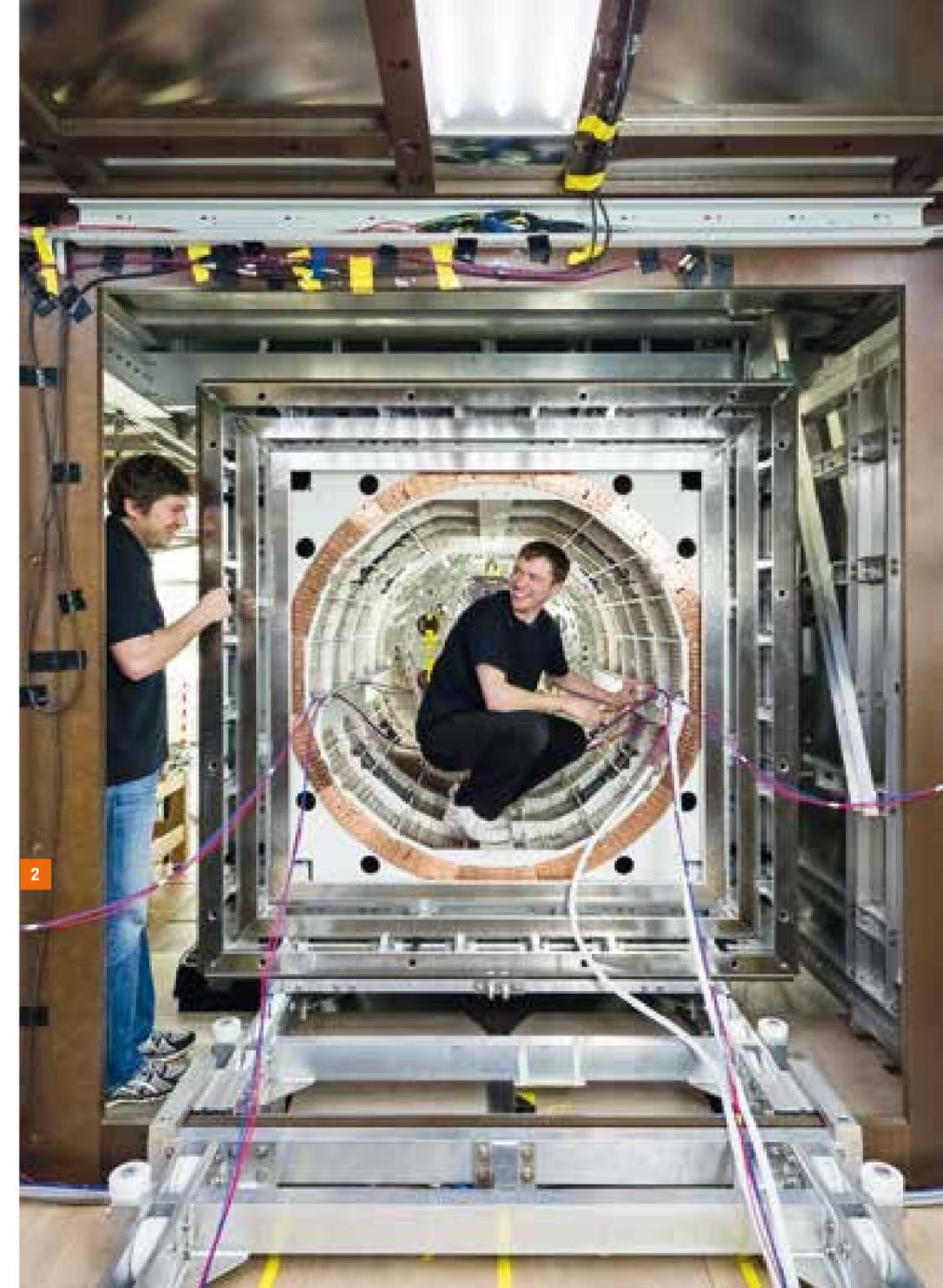
B-Physik

B-Mesonen, das sind Quark-Antiquark-Pärchen, die mindestens ein Bottom-Quark enthalten, eignen sich besonders gut für einen Test des Standardmodells der Teilchenphysik. Sie werden durch Kollision von Elektronen mit ihren Antiteilchen, den Positronen, an großen Teilchenbeschleunigern erzeugt. Ihre Lebensdauer beträgt nur eine Billionstel Sekunde, danach zerfallen sie – und es gibt Hunderte von Möglichkeiten, auf welche Weise sie dies tun. Das Standardmodell der Teilchenphysik sagt die Details der Zerfälle sehr genau voraus. Abweichungen können also Hinweise auf neue Teilchen oder neue Teilcheneigenschaften sein. Neben anderen Wissenschaftlern untersucht am Exzellenzcluster auch eine Nachwuchsforschungsgruppe systematisch B-Zerfälle nach Auffälligkeiten.



Physik mit Neutronen

Eine Forschungsgruppe am Exzellenzcluster Universe entwickelt derzeit ein Experiment, mit dem die Ladungsverteilung – Physiker sprechen vom elektrischen Dipolmoment – in Neutronen bestimmt werden soll. Neutronen sind aus drei Quarks zusammengesetzt, deren Ladungen sich nach außen aufheben. Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik sollte sich nur eine winzig kleine Ladungsverschiebung der Quarks ergeben, theoretische Erweiterungen des Standardmodells sagen jedoch ein um einige Größenordnungen höheres Dipolmoment vorher. Die am Exzellenzcluster Universe entwickelte Messanordnung ist so empfindlich, dass es erstmals möglich sein wird, diese Theorien zu überprüfen und so das Standardmodell zu testen.



1 Viele ungelöste Rätsel rund um Neutrinos: Die Professoren Stefan Schönert (links) und Lothar Oberauer (beide TUM) arbeiten im Reinraum des Untergroundlabors auf dem Forschungscampus Garching an der Optimierung von Detektoren für Neutrino-Experimente. Foto: Astrid Eckert

2 Forschung im kleinsten Magnetfeld des Sonnensystems: Professor Peter Fierlinger (links) und der Doktorand Michael Sturm (beide TUM) bei der Vorbereitung eines hochempfindlichen Experiments, das erstmals in der Lage sein wird, eine Ladungsverschiebung der drei Quarks in Neutronen zu messen. Foto: Astrid Eckert

DAS GESCHEHEN AM ANFANG REKONSTRUIEREN

Wie und warum unser Universum anfang zu existieren, dazu gibt es nur Spekulationen. Aus Experimenten können die Wissenschaftler jedoch recht genau rekonstruieren, was in den ersten drei Minuten der Existenz unseres Weltalls passiert sein muss. Diese Rekonstruktion beginnt einen Wimperschlag nach dem Urknall, genauer gesagt nach ungefähr 10^{-30} Sekunden. Das Universum war demnach mit 10^{25} Kelvin unvorstellbar heiß und dehnte sich mit großer Wucht aus. Teilchen konnten sich bei diesen Temperaturen noch nicht miteinander verbinden. Stattdessen bewegten sich die Quarks und ihre Kraftteilchen, die Gluonen, fast völlig unabhängig voneinander. Diese „Ursuppe“ des Universums nennen die Physiker Quark-Gluon-Plasma.

Nach etwa 10^{-6} Sekunden lag die Temperatur bei 10^{13} Kelvin und den Gluonen gelang es nun, erste Quarks aneinanderzubinden. Die ersten Protonen und Neutronen bildeten sich. Das Universum kühlte weiter ab und dehnte sich weiter aus; eine Sekunde lang waren die Bedingungen gerade so, dass sich Protonen und Neutronen ständig ineinander umwandeln konnten. Bei diesen Umwandlungen entstanden Neutrinos in großer Zahl.

Nach etwa zehn Sekunden war die Temperatur soweit gesunken, dass eine Phase der Kernfusion einsetzte und sich Protonen und Neutronen zu den ersten Wasserstoff-Atomkernen vereinigten. Diese Phase kam nach etwa drei Minuten zum Erliegen. Die übrig gebliebenen Neutronen zerfielen kurze Zeit später zu Protonen, Elektronen und Neutrinos.

Am Ende dieser ersten drei Minuten lag die Materie in Form von Protonen (75 Prozent), den späteren Wasserstoff-Atomkernen, vor, sowie Helium- (25 Prozent) und Spuren von Lithium- und Beryllium-Atomkernen. Für einige hundert Millionen Jahre waren dies die einzigen chemischen Elemente, die unser Universum bevölkerten – bis sich die ersten Sterne bildeten und eine neue Phase der Kernfusion einsetzte.

Der Ablauf dieser drei Minuten ist ein wichtiger Bestandteil des Standardmodells der Teilchenphysik. Doch viele Details sind noch unverstanden und konnten theoretisch bisher nicht erklärt und/oder experimentell nicht nachgewiesen werden: Welche Eigenschaften hat das Quark-Gluon-Plasma? Stimmen die Vorhersagen der Quantenchromodynamik, welche die starke Kernkraft theoretisch beschreibt? Warum können Quarks und Gluonen so viele verschiedene Verbindungen eingehen?

Diese Fragestellungen rund um die ersten drei Minuten unseres Universums bilden den Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten des Exzellenzclusters Universe in der **Research Area D**.

von links: Joachim Hartmann – *wiss. Mitarbeiter (TUM)* | Torsten Dahms – *Nachwuchsgruppenleiter (TUM)*
Siegfried Bethke – *Direktor (MPP)* | Hubert Kroha – *Gruppenleiter (MPP)* | Frank Simon – *Gruppenleiter (MPP)* | Stephan Paul – *Professor (TUM)*
vorne, v. l.: Martin Berger – *Doktorand (TUM)* | Jia-Chii Berger-Chen – *PostDoc (TUM)* | Rafal Lalik – *Doktorand (TUM)* Foto: Astrid Eckert



FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Das Quark-Gluon-Plasma

Kurz nach dem Urknall konnten sich die Quarks für Sekundenbruchteile als fast freie Teilchen in einem Quark-Gluon-Plasma bewegen. Diese „Ursuppe“ ist in der Natur nicht mehr zu beobachten, sondern muss durch Kollision schwerer Atomkerne in Teilchenbeschleunigern erzeugt werden. Wie sich daraus schließlich die ersten schwereren Teilchen und die Bausteine unserer Elemente gebildet haben, ist von großer Bedeutung für das Verständnis der Entstehung unseres Universums. Am Exzellenzcluster widmet sich eine Nachwuchsforschungsgruppe der experimentellen Untersuchung des Quark-Gluon-Plasmas am Experiment ALICE am Large Hadron Collider (LHC) am CERN.

Verständnis des Quark-Confinements

Die Kraftteilchen der starken Kernkraft, die Gluonen, wirken offenbar wie eine Feder zwischen den Quarks: Je weiter die Quarks voneinander entfernt werden, desto stärker zieht die Feder sie zusammen. Die Energie, die zur Entfernung der Quarks aufgebracht wird, ist in der Spannung der Feder gespeichert. Die Feder bricht erst, wenn die gespeicherte Energie so groß ist, dass sie für die Bildung eines neuen Quark-Antiquark-Paares reicht. Auf diese Weise kommen Quarks und Gluonen nie als einzelne Teilchen vor, sondern sind in Verbindungen „gefangen“. Physiker sprechen vom Quark-Confinement (englisch: Gefangenschaft). Warum das so ist, ist theoretisch im Rahmen der Quantenchromodynamik noch nicht vollständig geklärt und wird von den Physikern des Exzellenzclusters Universe weiter ergründet.

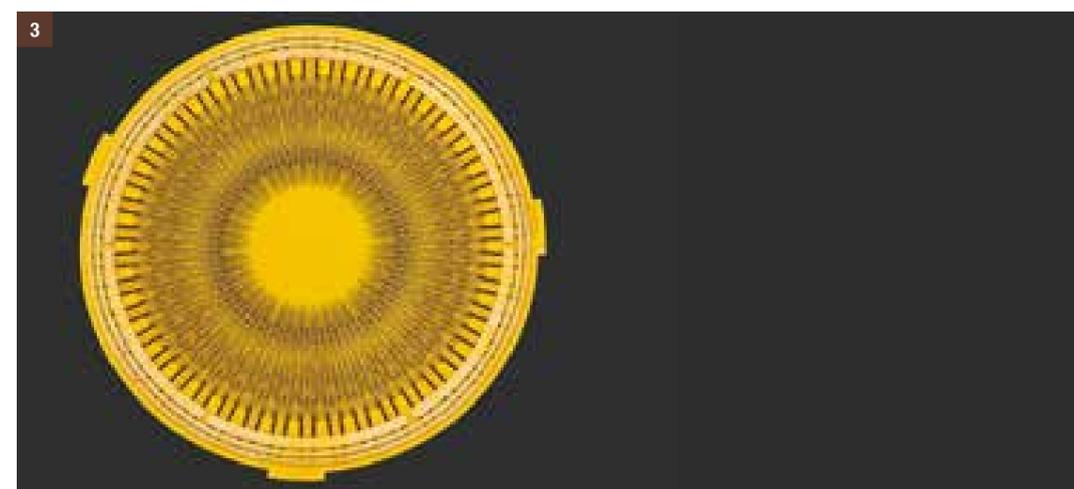
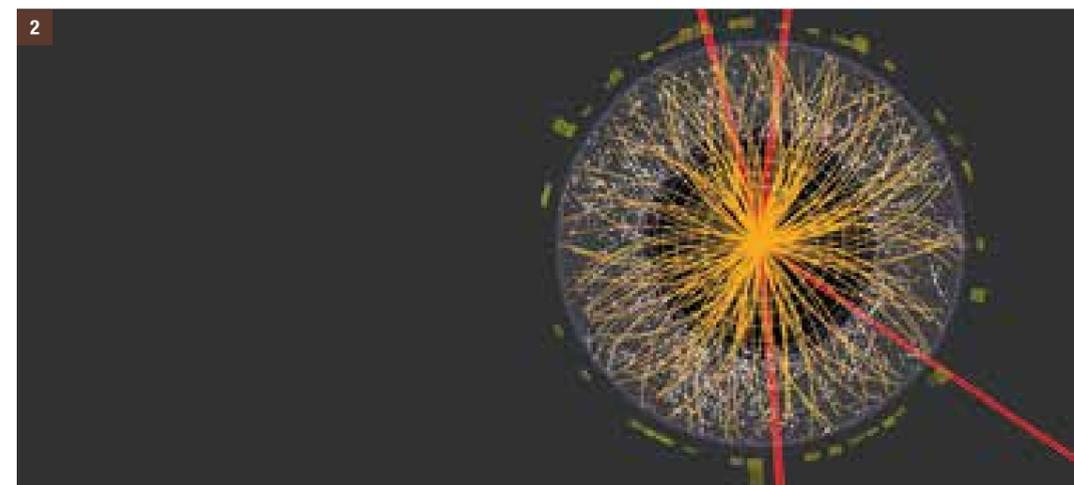
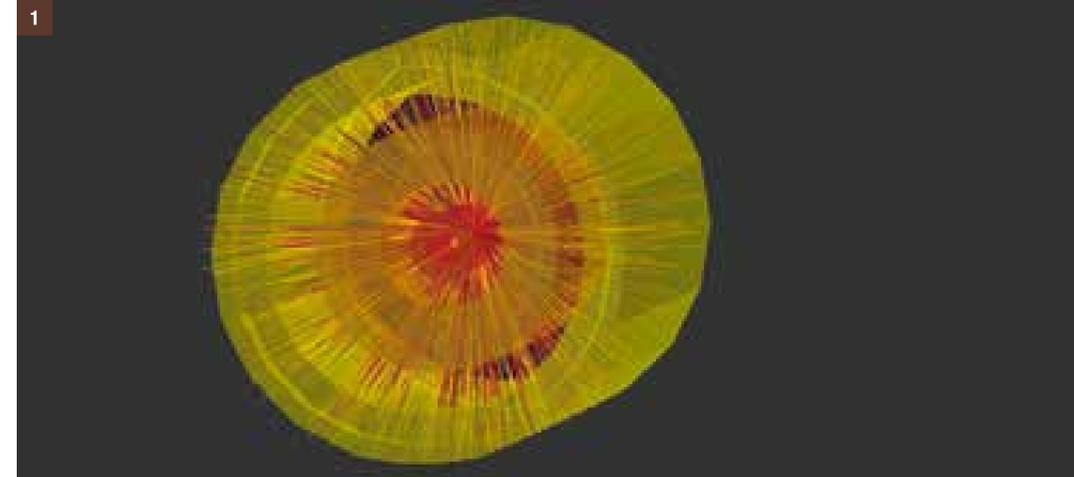
Verbindungen der starken Kernkraft

Die sechs Quarks und ihre Antiteilchen können miteinander fast beliebige Verbindungen eingehen, wobei sie vor allem Gruppen von zwei oder drei Quarks bilden. Dabei sind nur die Quark-Trios der Protonen stabil sowie die der Neutronen, solange die Neutronen in den Atomkernen fest gebunden sind. Alle anderen Quark-Kombinationen sind sehr kurzlebig und müssen zur Erforschung in Teilchenbeschleunigern erzeugt werden. Während die Physiker die Verbindungen von Atomen zu Molekülen mit den Gesetzen der Atomphysik sehr gut verstehen, stellen Verbindungen von Quarks sie immer noch vor Rätsel. Das theoretische und experimentelle Verständnis der starken Kernkraft zu verbessern, ist ein wichtiger Forschungsschwerpunkt des Exzellenzclusters Universe. Untersuchungen laufen dazu an zahlreichen Experimenten: ATLAS und ALICE am Large Hadron Collider am CERN, COMPASS am Super Proton Synchrotron am CERN, HADES und PANDA am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt – und zukünftig auch am Experiment BELLE II am KEK-Beschleuniger in Japan.

Vermessung des Higgs-Teilchens

Als das Higgs-Teilchen im Jahr 2012 entdeckt wurde, wussten die Wissenschaftler noch sehr wenig über dieses neue Teilchen, das den Elementarteilchen ihre Masse verleiht. Inzwischen, nach Auswertung von vielen weiteren Daten, sind sich die Physiker sehr sicher, dass das neue Teilchen genau die Eigenschaften hat, die Peter Higgs und andere Wissenschaftler vor 50 Jahren vorhergesagt haben. Die Physiker kennen nun die Masse, die Lebensdauer und den Spin des Higgs-Teilchens mit großer Genauigkeit. Allerdings gibt es weitere Eigenschaften des neuen Teilchens, die noch nicht ausreichend erforscht sind. Diese sollen nun in den nächsten Jahren am LHC am CERN untersucht werden. Am Experiment ATLAS am LHC tragen zahlreiche Teilchenphysiker des Exzellenzclusters Universe dazu bei, das Higgs besser kennen zu lernen.

- 1 Erste Kollisionen von Blei-Kernen: Rekonstruktion von Teilchenspuren, aufgenommen zu Beginn des ersten Laufs des LHC am Experiment ALICE.
Foto: ALICE-Team/CERN
- 2 Letztes fehlendes Teilchen des Standardmodells: Spuren eines Higgs-Zerfalls, beobachtet am Detektor ATLAS am LHC im Jahr 2012.
Foto: ATLAS-Kollaboration/CERN
- 3 Entwicklungsarbeit für das Experiment ALICE: Auslesevorrichtung einer an der TUM entwickelten neuartigen Detektorkammer, die zukünftig am LHC eingesetzt werden soll.
Foto: Wenzel Schürmann/TUM





LICHT INS DUNKLE UNIVERSUM BRINGEN

Die moderne Physik steht vor einem ihrer größten Rätsel: 95 Prozent des Universums sind von bisher unbekannter Natur. Offenbar kennen wir nur 5 Prozent der vorhandenen Materie – das ist der Stoff, aus dem wir und das uns umgebende sichtbare Universum bestehen.

Aus der Beobachtung von Galaxien, Galaxienhaufen und ihrer großräumigen Verteilung im Universum sowie aus der Beobachtung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes wissen wir, dass es im Universum eine Substanz geben muss, die sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht. Sie beläuft sich auf etwa 25 Prozent der kosmischen Materie. Diese Substanz besteht offenbar nicht aus einzelnen, kompakten Himmelskörpern, wie etwa Braunen Zwergen oder alten erloschenen und abgekühlten Sternen, sondern aus bisher unbekanntem Teilchen. Aufgrund der beobachteten Eigenschaften gehen die Physiker davon aus, dass die Dunkle Materie sich aus schwach wechselwirkenden massereichen Teilchen (WIMPs, aus dem Englischen: Weakly Interacting Massive Particles) zusammensetzt.

Noch irritierender ist, dass sich unser Universum in Zukunft immer schneller ausdehnen wird, wie wir seit etwa 15 Jahren wissen. Physiker nehmen an, dass diese Expansion durch eine Dunkle Energie verursacht wird, die etwa 70 Prozent der Energie im Universum ausmacht. Aber sie haben keine Ahnung, was ihre Natur sein könnte. Die Spekulationen gehen in verschiedene Richtungen: Ist die Dunkle Energie einfach eine grundlegende Eigenschaft unseres Universums, die mit einer kosmologischen Konstante ausgedrückt werden kann? Oder zeigt sich die Auswirkung einer „Quintessenz“, eine bisher unbekannte fünfte Kraft im Universum? Oder muss Einsteins Relativitätstheorie modifiziert werden, weil sie für extrem große Entfernungen nicht stimmt?

An einer Lösung dieser Rätsel arbeiten die Wissenschaftler des Exzellenzclusters Universe in der **Research Area E**.

von links: Stella Seitz – *wiss. Mitarbeiterin (LMU)* | Jörg Dietrich – *wiss. Mitarbeiter (LMU)* | Hans Böhringer – *Gruppenleiter (MPE)* | Korbinian Huber – *Doktorand (TUM)*
 Roberto Saglia – *wiss. Mitarbeiter (MPE)* | Marion Cadolle Bel – *PostDoc (LMU)* | Malin Renneby – *Doktorandin (TUM)* | Xavier Defay – *Research Fellow (TUM)*
 vorne, v. l.: Jens Jasche – *Research Fellow (TUM)* | Margarita Petkova – *PostDoc (LMU)* Foto: Astrid Eckert

FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Direkte Suche nach Dunkler Materie

Physiker verfolgen zwei Ansätze, um nach Dunkle-Materie-Teilchen zu suchen: Einerseits untersuchen sie die Kollisionsergebnisse des Large Hadron Colliders am CERN nach Hinweisen auf WIMPs. Und sie versuchen, die vermuteten WIMPs direkt zu beobachten. Hierzu sind Wissenschaftler des Exzellenzclusters Universe am Experiment CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) beteiligt, das im Gran Sasso Untergrundlabor in Italien untergebracht ist. Einfallende Teilchen können aufgrund des Lichts und der Wärme, die sie bei Zusammenstößen mit den Atomkernen eines hochreinen supraleitenden Kristalls erzeugen, nachgewiesen und bestimmt werden. Trotz weitreichender Suche von CRESST und anderen Experimenten wurde bisher jedoch kein WIMP gefunden.

Beobachtung von Dunkler Materie

Galaxien und Galaxienhaufen sind eingebettet in große Ansammlungen von Dunkler Materie. Um die Menge und Verteilung der Dunklen Materie zu bestimmen, machen sich Astronomen den von Albert Einstein erstmals beschriebenen Gravitationslinseneffekt zunutze: Licht wird von Materie abgelenkt, je größer deren Masse ist und je näher das Licht der Masse kommt. Dem Beobachter erscheint das Bild der Lichtquelle dann verzerrt. Die Physiker des Exzellenzclusters wollen durch genaue Vermessung von Gravitationslinsen den Anteil der Dunklen Materie in unserer Milchstraße und der uns nahen Galaxie, Andromeda, näher bestimmen. Die Wissenschaftler sind außerdem an einer großen Beobachtungskampagne mit einer der weltweit leistungsfähigsten Digitalkameras beteiligt, die vor allem der indirekten Beobachtung der Dunklen Energie dient: Im Rahmen des Dark Energy Survey (DES) werden derzeit auch Gravitationslinsen von mehr als 200 Millionen Galaxien vermessen, um mehr darüber zu erfahren, wie die Dunkle Materie in den Weiten des Weltalls verteilt ist.

Beobachtung der kosmischen Expansion

Zur Bestimmung von kosmischen Entfernungen orientieren sich Physiker an Supernovae. Je größer ihre Entfernung (und damit auch ihr Alter), desto schwächer ist das Licht, das von ihnen zu uns kommt. Weil sich das Universum ausdehnt, wird Supernova-Licht während der Ausbreitung außerdem zu energieärmeren, roten Wellenlängen verschoben – Astrophysiker sprechen von der kosmologischen Rotverschiebung. 1998 haben zwei Forscher-Teams erstmals festgestellt, dass sich unser Universum nicht konstant, wie bis dahin angenommen, sondern mit immer größerer Beschleunigung ausdehnt. Die Beobachtung von kosmologisch weit zurückliegenden Supernova-Ereignissen gibt daher Aufschluss darüber, wie sich die Expansionsgeschwindigkeit des Universums über große Zeiträume verändert hat. Die Physiker des Exzellenzclusters Universe sind hierbei an großen Beobachtungskampagnen beteiligt, vor allem mit dem Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte (ESO) und mit der DES-Kamera am Cerro Inter-American Observatory, beide befinden sich in Chile. Aufgrund der Beobachtungen nehmen die Physiker an, dass der Energieanteil der Dunklen Energie im Universum seit Milliarden von Jahren konstant sein muss. Daraus ergeben sich wiederum wichtige Rückschlüsse für theoretische Erklärungen der Dunklen Energie und für die kosmologischen Modelle.

Große Strukturen des Universums

In unserem Universum gibt es etwa 100 Milliarden Galaxien, sie haben typische Durchmesser von 100.000 Lichtjahren, und der Abstand von einer Galaxie zur nächsten beläuft sich auf einige Millionen Lichtjahre. Galaxien sind jedoch nicht zufällig verteilt – im Gegenteil: Eine Galaxie kommt selten allein. Oft befinden sich so viele auf einem Haufen, dass Astronomen von Galaxienhaufen oder Galaxien-Clustern sprechen (auch unsere Galaxie ist Teil einer kleineren Ansammlung von Galaxien, der Lokalen Gruppe, deren größte die Milchstraße und die Andromedagalaxie sind). Dann wiederum gibt es große, nahezu leere Regionen im Universum. Ganz offenbar haben sich Galaxien und Galaxienhaufen über Milliarden von Jahren entlang eines unsichtbaren kosmischen Netzes angeordnet, das unser Universum durchzieht. Kosmologen gehen davon aus, dass der Ursprung dieser Struktur in Quantenfluktuationen am Beginn unsers Universums liegt, die dann, so die Annahme, durch eine inflationäre Ausdehnung um mindestens den Faktor 10^{26} aufgebläht wurden. Die Physiker am Exzellenzcluster Universe wollen diese Zusammenhänge besser verstehen lernen.



- 1 Galaxien in 1,4 Milliarden Kilometer Entfernung: der große Galaxien-Cluster Abell 3827, aufgenommen vom Weltraumteleskop Hubble. Foto: NASA/ESA/ESO
- 2 Kristallzucht für die direkte Suche nach Dunkler Materie: Ein Kalziumwolframat-Einkristall wird langsam aus der 1.600 Grad Celsius heißen Schmelze gezogen; mit viel Know-how machen die Experten an der TUM aus ihm einen hochempfindlichen Detektor für das Experiment CRESST. Foto: Andreas Heddergott
- 3 Ein supraleitendes Thermometer: Jean-Côme Lanfranchi, Gruppenleiter (TUM) des Experiments CRESST, bereitet einen zylinderförmig geschliffenen Detektorkristall für einen Test vor; links der Apparat, der den Kristall auf ein zehntausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt kühlen kann. Foto: Andreas Heddergott

DIE ENTWICKLUNG DER HIMMELSOBJEKTE BEGREIFEN

In unserem Universum gibt es Milliarden von Galaxien. Sie unterscheiden sich stark in Aussehen, Größe, Zusammensetzung und Alter. Gemeinsam haben sie jedoch, dass sich in ihren Zentren jeweils superschwere Schwarze Löcher befinden – und sich innerhalb jeder Galaxie faszinierende Dinge abspielen: Kalte, sehr dichte Gaswolken brechen unter ihrer Schwerkraft zusammen und zünden neue Sterne. Durch Kernfusionen entstehen im Inneren eines Sterns neue schwere chemische Elemente, die im Laufe eines Sternenlebens wieder ins All geschleudert werden.

Aus dieser Materie formen sich neue Wolken, aus denen wiederum chemisch angereicherte Sterne hervorgehen. In den Staubscheiben um neue Sterne können sich außerdem Planeten bilden.

Diese Prozesse werden von der Schwerkraft angetrieben, vor allem von der dominanten Dunklen Materie, denn Galaxien sind in riesige Bereiche Dunkler Materie eingebettet.

Aus Beobachtungen, Modellen und Simulationen wissen die Forscher, dass sich die große Vielfalt an unterschiedlichen Galaxien aus ihrer Entwicklungsgeschichte erklären lässt: Normalerweise wächst eine Galaxie sehr langsam, indem sie die Gasströme ihrer kosmischen Umgebung an sich zieht. Form und Masse ändern sich jedoch dramatisch, wenn zwei Galaxien voneinander angezogen werden und miteinander verschmelzen – ein Ereignis, das sich über Millionen Jahre hinziehen kann.

Galaxien sind das Ergebnis einer komplexen Physik. Vieles ist noch nicht verstanden: Warum beheimatet fast jede Galaxie mindestens ein superschweres Schwarzes Loch? Wie ist es entstanden? Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Masse eines Schwarzen Lochs und den Eigenschaften seiner Heimatgalaxie? Wie formen sich Planeten?

In der **Research Area F** arbeiten die Wissenschaftler des Exzellenzclusters Universe daran, die Entwicklung dieser kosmischen Objekte besser zu verstehen.

von links: Ghazaleh Erfanianfar – *PostDoc (TUM)* | Andrea Merloni – *wiss. Mitarbeiter (MPE)* | Andreas Burkert – *Professor (LMU)*
Mara Salvato – *wiss. Mitarbeiterin (MPE)* | Paola Popesso – *Nachwuchsgruppenleiterin (TUM)* | Paola Mucciarelli – *PostDoc (TUM)*
vorne, v. l.: Laura Morselli – *Doktorandin (TUM)* | Michael Opitsch – *Doktorand (LMU)* Foto: Astrid Eckert



FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Planetenentstehung

Wie Planeten aus dem Chaos einer Sternentstehung hervorgehen, ist noch nicht in allen Details verstanden. Denn es müssen viele Dinge zusammentreffen, damit sich in Tausenden von Jahren in der Staubscheibe um einen jungen Stern große Brocken formen können, die sich in weiteren Millionen von Jahren tatsächlich zu Fels-, Eis- oder Gasplaneten verbinden. Die Astrophysiker des Exzellenzclusters Universe arbeiten daran, diese Vorgänge theoretisch zu verstehen und ihre Modelle mit Messungen wie dem Weltraumteleskop Kepler zu vergleichen, um so zu einem zutreffenden Bild der Planetenentstehung zu kommen.

1 Blaue Marmor: So sah die Besatzung der Mond-Mission Apollo 17 im Jahr 1972 unsere Erde aus rund 45.000 Kilometern Höhe. *Foto: Harrison Schmitt/NASA*

2 Milchstraßen-Zwilling: Diese Spiralgalaxie im Sternbild Jungfrau ist etwa 50 Millionen Lichtjahre von uns entfernt und ähnelt in Form und Größe unserer Heimatgalaxie. *Foto: ESO*



Galaxien und ihre Schwarzen Löcher

Physiker wissen, dass es eine starke Verbindung zwischen den Massen von superschweren Schwarzen Löchern und den Eigenschaften ihrer Heimatgalaxien gibt. Offenbar hängt die Entstehung eines galaktischen Zentrums sehr eng mit dem Wachstum seines Schwarzen Lochs und der Entstehungsgeschichte der Galaxie zusammen. Aber wie? Physiker verstehen vor allem eines noch nicht: Schon sehr früh im Universum gab es offenbar große, Materie verschlingende superschwere Schwarze Löcher, während kleinere, weniger materiegelige erst später entstanden sind. Dies widerspricht der Vorstellung, dass sich zunächst kleine Objekte bilden, die schließlich zu größeren verschmelzen.

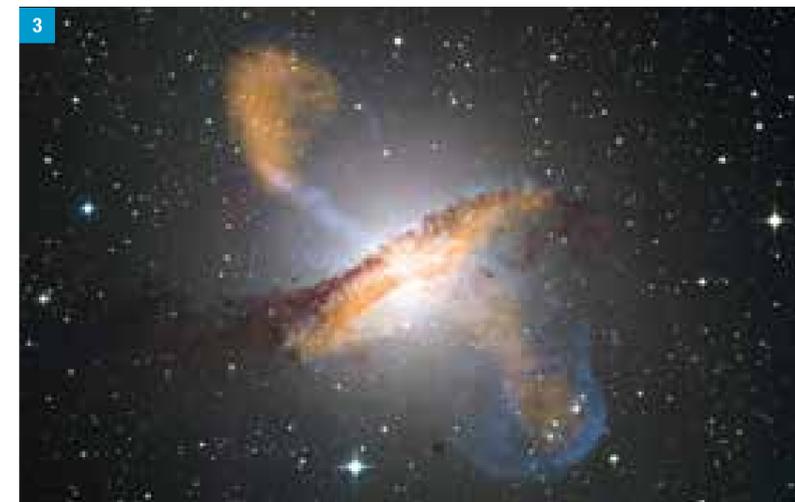
3 Enorme Wucht: Die aktive Galaxie Centaurus A wirft energiereiche Gasströme in das Universum zurück. *Foto: ESO/WFI (Optical), MPIfR/ESO/APEX/A.Weiss et al. (Submillimetre), NASA/CXC/CfA/R. Kraft et al. (X-ray)*

4 Sternenpracht: Die Zwerggalaxie Barnards im Sternbild Schütze besitzt zahlreiche Gebiete, in denen neue Sterne entstehen – zu erkennen an den roten Blasen. *Foto: ESO*



Aktive Galaxienkerne

Die enorme Schwerkraft eines superschweren Schwarzen Lochs im Zentrum einer Galaxie zieht alle Materie in dessen Bannkreis an. Die sich annähernde Materie fällt aufgrund ihres Drehimpulses jedoch nicht direkt in das Zentrum, sondern rotiert in einer Scheibe um das Schwarze Loch. Die rotierende Materie erhitzt sich durch Reibung, wobei sie an Energie verliert, dabei sehr helles Licht ausstrahlt und schließlich in das Schwarze Loch fällt. Die Erforschung solcher aktiven Galaxienkerne und ihrer Erscheinungsformen, etwa als Quasare oder Blazare, ist ein Schwerpunkt der Physiker am Exzellenzcluster Universe. Sie sind hierzu an wichtigen internationalen Forschungsprojekten beteiligt, so am Radiointerferometer LOFAR und am Weltraumteleskop eROSITA, das im Herbst 2016 gestartet werden soll. Beide wurden entwickelt, um mehr als 100.000 sehr ferne aktive Galaxien zu beobachten. Anschließend sollen daraus interessante Objekte zur weiteren Untersuchung ausgewählt werden.



Sternentstehungsgeschichte

Die ersten Sterne konnten sich erst einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall bilden, als sich die Urmaterie ausreichend abgekühlt hatte. In den zwei Milliarden Jahren danach entstanden immer mehr Sterne. Die Rate der neu entstehenden Sterne blieb dann über einen langen Zeitraum so gut wie konstant – bis sie vor etwa acht Milliarden Jahren in allen Galaxien dramatisch einbrach. Dieser Rückgang hält bis heute an. Am Exzellenzcluster Universe arbeitet eine Nachwuchsforschungsgruppe daran zu verstehen, was die Ursache für diese gebremste Sternentstehung sein könnte. Um ihre Modelle zu testen, brauchen die Physiker sehr gute Himmelskarten der Röntgen- und der Infrarotstrahlung. Das Weltraumteleskop eROSITA wird in den nächsten Jahren eine Röntgenkarte des Himmels mit bisher nicht erreichter Auflösung liefern – und eine ausgezeichnete Grundlage für ein besseres Verständnis.





DIE VIelfALT DER CHEMISCHEN ELEMENTE VERSTEHEN

Alle chemischen Elemente wie Wasserstoff, Sauerstoff, Eisen oder Gold, die wir auf der Erde vorfinden, sind „Made in Universe“. Schon in den ersten drei Minuten nach dem Urknall bildeten sich die Bausteine der Atomkerne, die Neutronen und Protonen. In Fusionsreaktionen arrangierten sich diese dann zu den Elementen, aus denen unser Weltall besteht. Das Universum dehnte sich kurz nach dem Urknall jedoch so schnell aus, dass sich zunächst nur wenige der leichten Atomkerne zusammenfinden konnten: Wasserstoff und Helium sowie Spuren von Lithium und Beryllium.

Die zweite Phase der Elemententstehung begann erst einige Hundert Millionen Jahre später mit der Geburt der ersten Sterne – und sie dauert bis heute an: Im heißen Sterninneren zünden Kernreaktionen, aus denen neue Atomkerne hervorgehen. Die dabei freigesetzte Energie bewahrt den Stern vor dem Zusammensturz unter seiner eigenen Schwerkraft und lässt ihn weithin sichtbar leuchten.

Beim Umbau von Wasserstoff zu Helium wird am meisten Energie frei. Deshalb kann ein Stern Milliarden von Jahren existieren, bevor sein Wasserstoffvorrat zur Neige geht. Die Fusion von Helium und der noch schwereren Atomkerne setzt immer weniger Energie frei, so dass der Brennvorrat immer rascher aufgebraucht wird.

Im Eisen-Atomkern sind die Protonen und Neutronen schließlich so stark gebunden, dass die Fusion zum Erliegen kommt. Ohne weitere innere Energiequelle muss der Stern mit seinem Eisenkern der Schwerkraft nachgeben und kollabiert. Das endet bei sehr massereichen Sternen mit der Bildung eines Schwarzen Lochs. Bei leichteren Sternen wird der Kollaps jedoch gebremst: In der Schockfront nahe des sehr dichten Zentrums zerlegen sich die schweren Atomkerne und fügen sich neu zusammen. Währenddessen wandeln sich viele Protonen in Neutronen um, wobei auch massenhaft Neutrinos ausgesandt werden.

Die Atomkerne werden nun intensiv von Neutronen bestrahlt. Durch Neutroneneinfang können jetzt noch schwerere Atomkerne bis hin zu Gold und Platin entstehen. Meist endet der auf diese Weise gebremste Kollaps in einer Supernova-Sternexplo-

sion. Als Reste bleiben ein kompakter Neutronenstern und die abgestoßene Supernova-Hülle übrig. Diese Hülle enthält auch die während der Explosion neu erzeugten Atomkerne.

Das Werden und Vergehen von Sternen hat unserem Weltall seinen Reichtum an verschiedenen Elementen beschert und für die Grundlagen des Lebens auf unserer Erde gesorgt. Im Detail ist allerdings noch unklar, wie insbesondere die sehr schweren Elemente gebildet werden.

Die Wissenschaftler der **Research Area G** befassen sich mit der Entstehung der Atomkerne und den astrophysikalischen Grundlagen, die zu deren Verständnis nötig sind.

Von links: Assaf Sternberg – *Research Fellow (TUM)* | Bruno Leibundgut – *Gruppenleiter (ESO)* | Wolfgang Hillebrandt – *Direktor i. R. (MPA)* | Thomas Siebert – *Doktorand (MPE)* | Roland Diehl – *Gruppenleiter (MPE)* | Katharina Fierlinger – *PostDoc (TUM)* Foto: Astrid Eckert

FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Elementbildung

Das Universum ist bevölkert von Sternen verschiedener Größe und verschiedenen Alters. Kleine Sterne werden meist sehr alt und sind häufig noch dabei, ihren Wasserstoffvorrat zu Helium zu verbrennen. Andererseits gibt es auch sehr massereiche und damit kurzlebige Sterne, die sich aus Gaswolken mit chemisch angereichertem Material aus früheren Sternengenerationen gebildet haben. Hauptsächlich die sich rasch entwickelnden massereichen Sterne sind für den Reichtum an chemischen Elementen verantwortlich, den wir im Universum vorfinden. Zur Modellierung dieser Prozesse brauchen die Physiker vielerlei Kenntnisse und Daten: Sie müssen zum Beispiel genau wissen, wie wahrscheinlich ein Neutroneneinfang für einen bestimmten Atomkern ist und welche Halbwertszeiten instabile Atomkerne haben. Sie müssen verstehen, wie ein Sternkollaps sich im Sterninneren in eine Explosion umkehren kann, und welche Rolle Neutrinos und Kernreaktionen hierbei spielen. Um die kosmische chemische Entwicklung zu erforschen, arbeiten die Physiker am Exzellenzcluster Universe mit Simulationen sowie Laborexperimenten, etwa am Maier-Leibnitz-Laboratorium, und sie werten Beobachtungen mit erdgebundenen Teleskopen der Europäischen Südsternwarte (ESO) oder Weltraumteleskopen der Europäischen Weltraumagentur (ESA) aus.

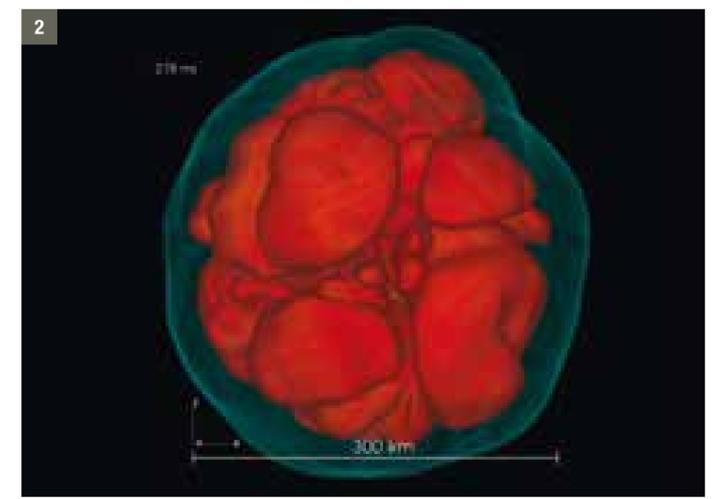
Neutronen und Atomkerne

Schwerere Atomkerne als Eisen können sich nur durch Anlagerung von elektrisch neutralen Neutronen bilden, weil Protonen aufgrund ihrer positiven Ladung vom Atomkern sofort abgestoßen würden. Wenn ein eingefangenes Neutron zerfällt und sich in ein Proton umwandelt, erhöht sich die Kernladungszahl, und ein neuer Atomkern entsteht. Die Physiker kennen hierfür zwei Möglichkeiten: Der langsamere der beiden Wege, auch s-Prozess (s für slow) genannt, findet vor allem in den äußeren Regionen von Riesensternen statt. Kernreaktionen setzen dort Neutronen frei, aber die Temperatur und die Anzahl der Neutronen sind so niedrig, dass ein Atomkern nur selten ein Neutron einfängt. Nach und nach können auf diese Weise jedoch Atomkerne bis hin zu Blei und Wismut entstehen. Bei dem schnellen Neutroneneinfang, dem r-Prozess (r für rapid), sind Kerne von so vielen Neutronen umgeben, dass ein Atomkern schnell hintereinander mehrere Neutronen aufnimmt. Diese zerfallen dann schließlich zu stabilen Atomkernen; so entstehen unter anderem auch radioaktive Isotope von Uran und Plutonium, aber auch seltene Elemente wie Gold. Während die Physiker sehr gute Vorstellungen des s-Prozesses haben, der sich in Experimenten auch leichter untersuchen lässt, stellt das Verständnis des r-Prozesses nach wie vor eine große Herausforderung dar.

Kosmisches Gas

Physiker nennen das Material, aus dem sich Sterne bilden, interstellares Medium. Bei diesem Gas kann es sich um ein Millionen Grad heißes Plasma handeln oder um eine ultrakalte Molekülwolke mit Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt; es kann aber auch alle Phasenzustände dazwischen annehmen. Das interstellare Medium bewegt sich zwischen den Sternsystemen der Galaxien und wird dabei angereichert von dem Material, das Sterne im Laufe ihres Lebens von der Sternoberfläche als Wind abgeben oder in der letzten Phase einer Sternexplosion herausgeschleudert haben. Die Dynamik eines interstellaren Gases ist sehr komplex. Die Physiker des Exzellenzclusters Universe analysieren es mit Hilfe von Simulationen und Modellen und vergleichen diese mit astronomischen Messungen unterschiedlich heißer und kalter Gasphasen, die zum Teil aus den Tiefen des Universums von Gammastrahlenausbrüchen oder Quasaren beleuchtet sind.

- 1 | **Sternen-Überreste:** Diese Gasblase in der Großen Magellanschen Wolke zeigt die Spuren einer Supernova, die sich vor etwa 400 Jahren ereignet hat.
Foto: NASA/ESA and the Hubble Heritage Team
- 2 | **Simulation einer Supernova:** Im Inneren des kollabierenden Sterns fällt die Materie zusammen, die massenhaft frei werdenden Neutrinos erhitzen das Gas (rot). Wie in kochendem Wasser bilden sich Blasen mit heißem Material, die nach außen steigen.
Simulation: Hans-Thomas Janka/MPA
- 3 | **Der Helix-Nebel,** gesehen vom Weltraumteleskop Spitzer: Dieses Himmelsobjekt in etwa 650 Lichtjahren Entfernung ist einer der Erde am nächsten gelegenen planetarischen Nebel; deutlich ist die Hülle aus Gas und Staub zu sehen, die der Stern am Ende seiner Entwicklung abgestoßen hat.
Foto: NASA/JPL_Caltech/Univ. of Arizona



DAS RECHENZENTRUM C²PAP

Ohne Hochleistungsrechner und fortgeschrittene Programmiermethoden ist in der Physik wie in vielen anderen Disziplinen wissenschaftliches Arbeiten kaum mehr möglich. Denn sowohl die theoretischen Modelle als auch die experimentellen Beobachtungsdaten sind meist so komplex, dass sie ohne die Hilfe von Computermethoden kaum mehr zu berechnen oder zu analysieren sind.

Zu den großen Herausforderungen in der theoretischen Teilchenphysik zählen zum Beispiel die Gleichungen der Quantenchromodynamik, die mit mathematischen Methoden nicht direkt lösbar sind. Eine Annäherung an die Lösung wird vor allem mit aufwendigen Computersimulationen erreicht, die sehr viel Rechenzeit beanspruchen.

Auch in der Astrophysik müssen Physiker immer größere Datenmengen bewältigen. Moderne Hochleistungsteleskope auf der Erde und im Weltraum durchmustern systematisch unseren Himmel in den verschiedenen Wellenlängenbereichen und haben große Datenarchive hervorgebracht, in denen sich neue Erkenntnisse über unser Universum verbergen – Schätze, die nur mit Hilfe von Computertechnik zu bergen sind. Insbesondere auf dem Gebiet der Astrophysik sind außerdem Simulationen wichtig, um zu vergleichen, ob die Anfänge des Universums sowie die wichtigen physikalischen Prozesse richtig verstanden sind, die seit Milliarden von Jahren die Entwicklung von Sternen, Planeten, Galaxien und Schwarzen Löchern vorantreiben, die wir heute beobachten.

In allen Forschungsgebieten des Exzellenzclusters Universe hat der Bedarf an Hochleistungs-Programmiermethoden, Rechenleistung und Speicherkapazität in der Vergangenheit enorm zugenommen. Der Exzellenzcluster Universe hat daher das *Computational Centre for Particle and Astrophysics* (C²PAP) gegründet, das von fünf Physikern betreut wird. Diese helfen den Wissenschaftlern des Exzellenzclusters, wenn es darum geht, Codes weiter zu entwickeln, mehrere Computerprozessoren gleichzeitig zu nutzen, neue Algorithmen in Analysen zu integrieren, Simulationen laufen zu lassen und Daten zu speichern. Das C²PAP wird am Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften betrieben, verfügt über zwei Prozent der Rechenleistung des Supercomputers SuperMUC des LRZ und hat einen direkten Anschluss an dessen Datenspeicher.

Die Wissenschaftler des Rechenzentrums C²PAP unterstützen die Theoretiker und Experimentalphysiker des Exzellenzclusters dabei, die Computertechnik effizient zu nutzen und zu neuen Forschungsergebnissen zu kommen.

von links: Frederik Beaujean – *PostDoc* (LMU) | Margarita Petkova – *PostDoc* (LMU) | Aliaksei Krukau – *PostDoc* (LRZ) | Jovan Mitrevski – *PostDoc* (LMU) Foto: Astrid Eckert



BEISPIELPROJEKTE

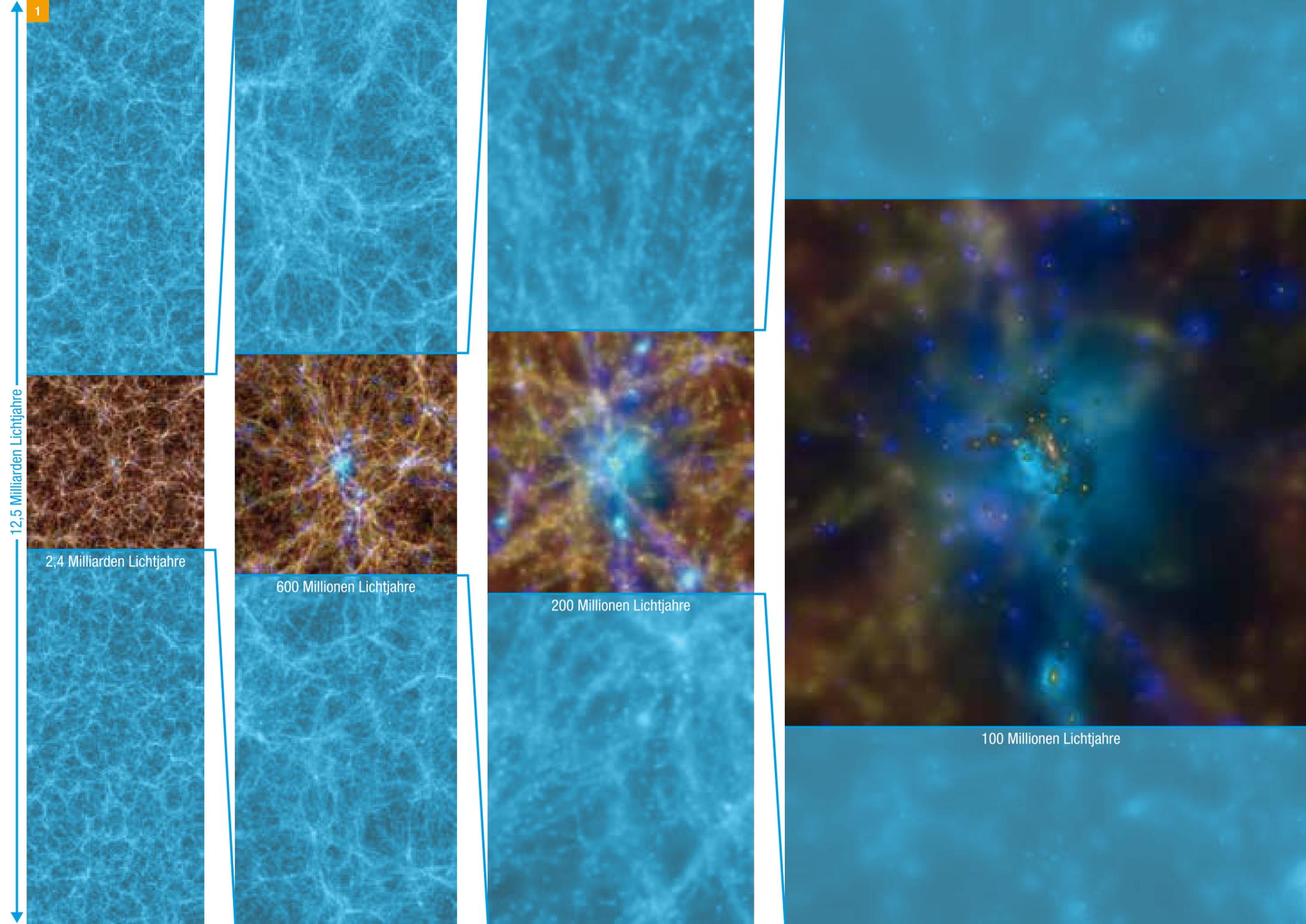
Ein Datenzentrum für kosmologische Simulationen

Ziel des Projektes ist es, am Rechenzentrum C²PAP ein Datenzentrum für kosmologische Simulationen aufzubauen, das den Wissenschaftlern des Exzellenzclusters sowie einer breiten Wissenschaftlergemeinschaft zur Verfügung steht. Gemeinsam mit Physikern des Exzellenzclusters Universe und Experten des Leibniz-Rechenzentrums haben die Wissenschaftler des C²PAP dazu im Rahmen des Magneticum Pathfinder-Projekts eine neue, umfangreiche hydrodynamische Simulation realisiert. Als Ergebnis liegen nun die weltweit größten, kosmologischen Simulationen vor. In ihnen sind die aktuellen Erkenntnisse der Kosmologie über die drei kosmischen Bestandteile des Universums – die Dunkle Energie, die Dunkle Materie und die sichtbare Materie – eingeflossen. Die Wissenschaftler haben in ihren Berechnungen außerdem eine Vielzahl von physikalischen Prozessen berücksichtigt, die als besonders wichtig für die Entwicklung des sichtbaren Universums gelten. Die bislang größte Simulation des Magneticum Pathfinder-Projekts verfolgt über Milliarden von Jahren die Entwicklung einer Rekordzahl von 180 Milliarden kleiner Raumelemente in einem bisher nicht erreichten Raumbereich von 12,5 Milliarden Lichtjahren Ausdehnung. Zum ersten Mal ist eine anspruchsvolle kosmologische Simulation damit groß genug, um sie direkt mit großräumigen astronomischen Vermessungen unseres Universums zu vergleichen.

Analyse von seltenen Zerfällen

Im Rahmen dieses Projektes werden seltene Zerfälle von B-Mesonen analysiert und untersucht, ob die in Experimenten beobachteten Auffälligkeiten Hinweise auf eine neue Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik geben. B-Mesonen sind Paare von Quark-Antiquarks, die mindestens ein Bottom-Quark enthalten. Sie werden an großen Teilchenbeschleunigern erzeugt und zerfallen nach äußerst kurzer Lebenszeit. Weil Bottom-Quarks mehr als viermal so schwer sind wie Protonen, können B-Mesonen auf hunderte verschiedene Arten in leichtere Teilchen zerfallen. Das macht B-Mesonen auch zu idealen Objekten, um das Standardmodell der Teilchenphysik systematisch zu testen, denn das Standardmodell sagt die Art und Weise selbst der seltensten dieser Zerfälle sehr genau voraus. Im Rahmen des Projekts untersuchen die Experten des C²PAP gemeinsam mit Teilchenphysikern des Exzellenzclusters neueste Messdaten der Experimente LHCb, CMS und ATLAS am Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) am CERN, von denen einige Abweichungen von den theoretischen Vorhersagen zeigen. Diese Analysen sind die umfangreichsten ihrer Art, weil sie darauf abzielen, alle relevanten theoretischen Unsicherheiten mit einzubeziehen. Die Aufgabe bedarf anspruchsvoller Algorithmen und leistungsfähiger Rechenressourcen, wie sie am Rechenzentrum C²PAP zur Verfügung stehen.

¹ Das Magneticum Pathfinder-Projekt: Die weltweit aufwendigste kosmologische Simulation der Entwicklung unseres Universums zeigt die großräumige Verteilung der Materie mit ihren Galaxiengruppen und -haufen und dem weitverzweigten Netz aus Galaxienfilamenten.
Simulationen: Klaus Dolag/LMU, www.magneticum.org





DAS INTERNATIONALE GASTFORSCHUNGSZENTRUM MIAPP

Der Austausch mit anderen Forscherinnen und Forschern ist eines der wichtigsten Grundelemente wissenschaftlichen Arbeitens. Der Exzellenzcluster Universe hat diesen Austausch von Anfang an mit einem umfangreichen Gäste- und Kooperationsprogramm unterstützt, an dem wichtige wissenschaftliche Einrichtungen weltweit beteiligt sind.

Um die internationale Vernetzung noch stärker zu fördern und den Forschungsstandort München/Garching weiter in der internationalen Spitzenforschung zu etablieren, wurde 2014 am Exzellenzcluster Universe das Gastforschungszentrum *Munich Institute for Astro- and Particle Physics* (MIAPP) eröffnet.

MIAPP veranstaltet im Jahr sechs vierwöchige Programme zu den Schlüsselfragen der Kern-, Teilchen-, Astrophysik und der Kosmologie. Die Programmenthemen können von Wissenschaftlern aus der ganzen Welt vorgeschlagen werden. Ein internationales Komitee wählt aus den eingegangenen Vorschlägen die sechs Themen für ein Jahresprogramm aus.

In den Räumen des Gastforschungszentrums auf dem Forschungscampus Garching haben internationale und lokale Spitzenforscher dann die Möglichkeit, sich abseits ihres wissenschaftlichen Tagesgeschäfts zu besprechen, neue Ideen zu entwickeln und neue Zusammenarbeiten zu begründen. Auch talentierte junge Nachwuchswissenschaftler haben auf diese Weise die einzigartige Chance, schon früh in ihrer akademischen Karriere herausragenden Forschern zu begegnen. Pro Programm nehmen im Schnitt rund 60 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler teil. Insbesondere die Einbettung in die exzellente akademische Umgebung der Physik-Departments der beiden Münchner Universitäten, der Max-Planck-Institute und der Europäischen Südsternwarte (ESO) bewirkt einen regen Austausch zwischen den internationalen Gästen und den ansässigen Wissenschaftlern.

Das Team des Gastforschungszentrums **MIAPP** des Exzellenzclusters Universe koordiniert und organisiert die Programme, betreut die Gäste und kümmert sich um Finanzen, Buchhaltung und IT-Support.

hintere Reihe, v. l.: Rolf-Peter Kudritzki – *Professor (Institute for Astronomy, Hawaii/LMU)* | Martin Beneke – *Professor (TUM)*
 Thomas Würstl – *Buchhalter (LMU)* | Mario Neßler – *System-Administrator (TUM)*
 vordere Reihe, v. l.: Sonja Lutz-Lamperteder – *Assistentin (TUM)* | Tina Jacobs – *Assistentin (TUM)*
 Gabriele Hartmann – *Buchhalterin (TUM)* | Ina Haneburger – *Programm-Managerin (TUM)* Foto: Astrid Eckert

ENTWICKLUNG DES UNIVERSUMS



AUSSTELLUNG IM DEUTSCHEN MUSEUM

Wie hat das Universum begonnen? Wie ist seine bisherige Entwicklung verlaufen? Wird es jemals enden? Die Ausstellung „Entwicklung des Universums“ im Deutschen Museum soll einen Eindruck vermitteln vom Ursprung und der Entwicklung unseres Weltalls.

Vor 13,8 Milliarden Jahren entstanden nach unserer heutigen Erkenntnis Materie, Raum und Zeit. Bereits wenige Minuten nach dem Urknall existierte der Teilchen- und Kräftenmix, aus dem sich Millionen und Milliarden Jahre später die Sterne und Galaxien bilden konnten – Vorgänge, die bis heute andauern. Die Astrophysiker wissen auch, dass das Universum expandiert: Die Galaxien treiben immer schneller und schneller auseinander. Die Distanzen zu den entferntesten und ältesten Objekten im Weltall messen die Physiker in Milliarden von Lichtjahren.

„Entwicklung des Universums“ beleuchtet die großen, aktuellen Erkenntnisse über unser Universum. Der aktuelle Stand der Forschung ist mit Exponaten, Video- und Bildmaterial anschaulich illustriert. Interaktive Stationen zeigen, was wir aus der kosmischen Hintergrundstrahlung lernen können, welche Bedeutung die Dunkle Materie hat und warum es auf der Erde Sauerstoff, Eisen und Gold gibt.

Die Ausstellung befindet sich im Rundraum der Ausstellung Astronomie im 5. Obergeschoß des Deutschen Museums und ist zu den Öffnungszeiten des Museums zu besichtigen. Geplant, finanziert und realisiert wurde „Entwicklung des Universums“ vom Exzellenzcluster Universe und den Partnerinstituten Europäische Südsternwarte (ESO), Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA), Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) und Max-Planck-Institut für Physik (MPP).

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Exzellenzcluster Universe
Technische Universität München
Boltzmannstraße 2
85748 Garching
Tel.: + 49 89 35831 - 7100
Fax: + 49 89 3299 - 4002
info@universe-cluster.de
www.universe-cluster.de

KOORDINATOREN

Prof. Dr. Stephan Paul (TUM)
Prof. Dr. Andreas Burkert (LMU)

KONZEPT, TEXT & REDAKTION

Petra Riedel
petra.riedel@universe-cluster.de

DRUCK

flyeralarm.com

GESTALTUNG

Sabine Kwauka
s.kwauka@muenchen-mail.de

TITELFOTO

Astrid Eckert

Stand: Oktober 2015

Der Exzellenzcluster Universe wird im Rahmen der Exzellenzinitiative von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert.

