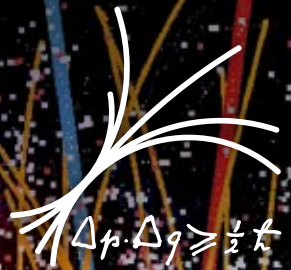


Max-Planck-Institut für Physik

(Werner-Heisenberg-Institut)



An den Grenzen des Wissens

Forschung zu den Extremen
des Universums



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

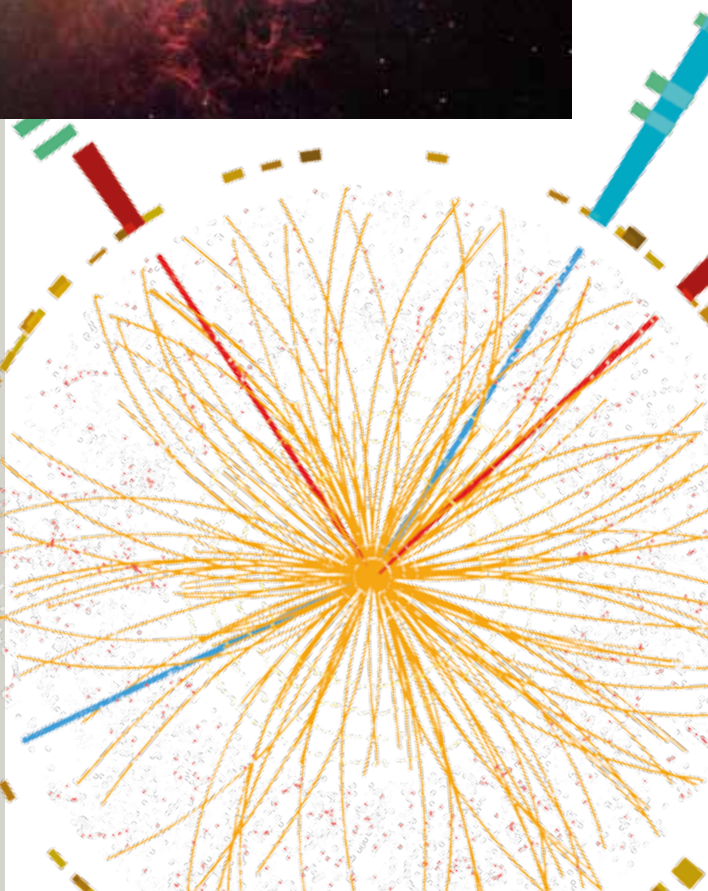


Sind Neutrinos identisch mit ihren Antiteilchen?

Gibt es unbekannte

Gibt es eine

Zwischen den größten und den kleinsten Dingen im Universum bewegen sich die Forschungen des Max-Planck-Instituts für Physik (Werner-Heisenberg-Institut): von den Spuren des Urknalls bis zur Grundfrage nach dem Aufbau der Materie, aus der auch wir bestehen.



Das 20. Jahrhundert war das Jahrhundert der Physik. Entdeckungen wurden gemacht, die unser Weltbild revolutionierten – von der Relativitätstheorie Albert Einsteins über die Quantenphysik von Max Planck und Werner Heisenberg bis zum Standardmodell der Teilchenphysik, an dem Physiker in aller Welt bis heute arbeiten. Diese Erfolge sind verknüpft mit dem Max-Planck- Institut für Physik (Werner-Heisenberg-Institut). Seit der Gründung 1917 gab das Institut immer wieder entscheidende Impulse bei der Suche nach den Bausteinen und Kräften, die unsere Welt im Innersten zusammenhalten.

Und im 21. Jahrhundert? Das Max-Planck-Institut für Physik (MPP) hat eine aufregende Zukunft vor sich. Denn die Bedeutung der Physik für das Verständnis unseres Universums und als Basis für den technischen Fortschritt nimmt eher noch zu. Je mehr Welträtsel gelöst werden, umso mehr neue, spannende Fragen tauchen auf und warten auf eine Antwort:

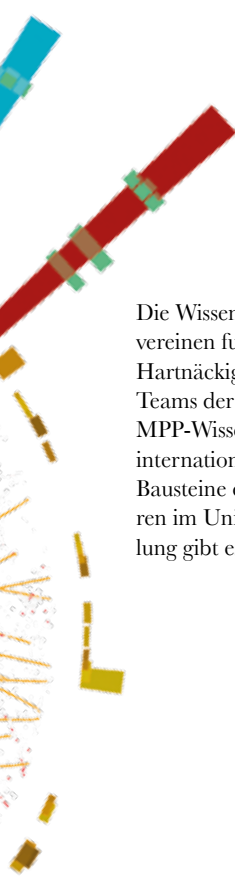
Gibt es verborgene Raumdimensionen?

Gibt es mehr fundamentale Kräfte als bisher bekannt?

Formen von Materie?

Universalkraft als gemeinsame Urkraft?

Warum haben sich Materie und Antimaterie in den Anfängen des Universums nicht ausgelöscht?



Die Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Physik vereinen fundiertes Fachwissen mit Kreativität und Hartnäckigkeit. Das macht sie zu begehrten Partnern in Teams der besten Physiker der Welt. Häufig übernehmen MPP-Wissenschaftler koordinierende Funktionen in internationalen Kollaborationen. Ob es um die kleinsten Bausteine der Materie geht oder um die größten Strukturen im Universum – für jede wissenschaftliche Fragestellung gibt es am MPP die richtigen Experten.

Gesucht

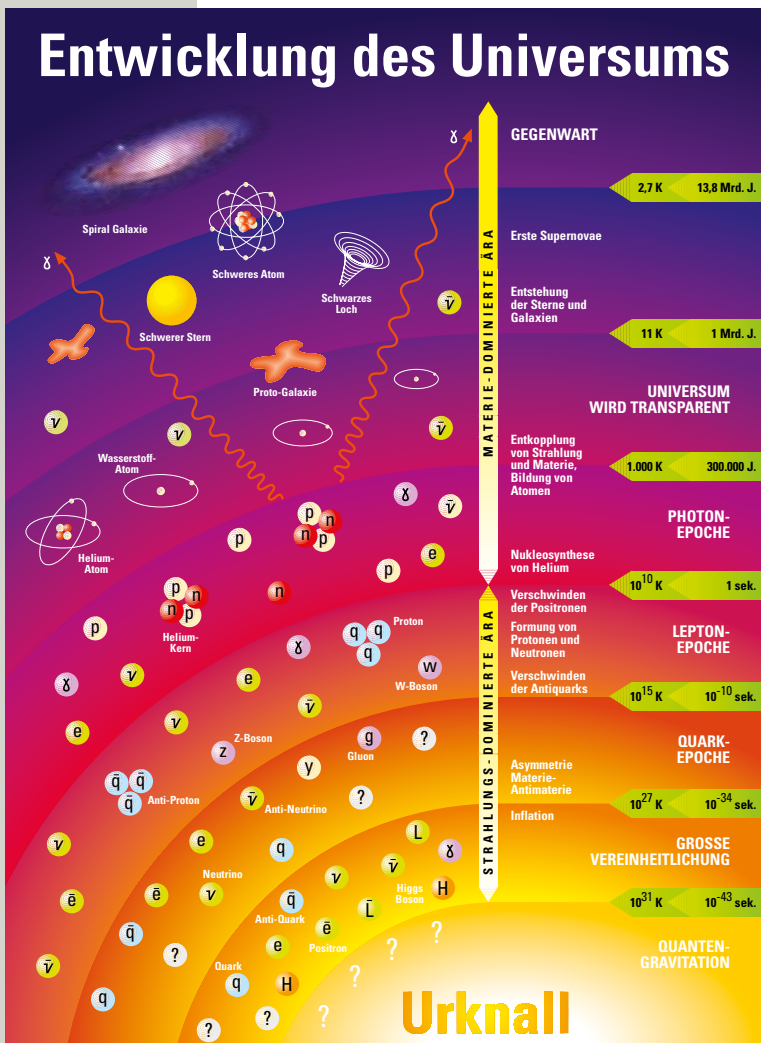
Erde, Wasser, Luft und Feuer als Quintessenz des Äthers – so stellte sich Aristoteles die Grundbausteine der Welt vor. Heute wissen wir, dass unsere Welt weit komplizierter gebaut ist. Mit dem Standardmodell haben die Teilchenphysiker ein Theoriegebäude geschaffen, in das sich alle Elementarteilchen und drei der vier Naturkräfte einordnen lassen.

Darin enthalten ist die wohl erfolgreichste physikalische Theorie des 20. Jahrhunderts: die Quantenmechanik, die untrennbar mit den Namen Max Planck und Werner Heisenberg verbunden ist – und mit dem Max-Planck-Institut für Physik, das seit seiner Gründung 1917 als Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik unser Weltbild mitgeprägt hat.

Doch viele Fragen sind noch offen: Galt das Standardmodell der Teilchenphysik auch unmittelbar nach dem Urknall? Wie lassen sich alle vier Naturkräfte – also auch die Gravitation – in eine einheitliche Theorie fassen? Warum können wir den größten Teil der Masse des Universums nicht sehen? Diese und viele weitere Fragen wollen die Physiker des Max-Planck-Instituts für Physik in den nächsten Jahrzehnten beantworten – getreu dem Motto von Max Planck:

„Wir dürfen nicht glauben, dass es irgendein physikalisches Gesetz gibt oder gab, das genauso auch in der Zukunft existieren wird“

Eine kurze Geschichte des Universums: Energie spielt die entscheidende Rolle für alle Geschehen im Weltall, vom Urknall bis heute. An der Entstehung des modernen Weltbilds der Physik war das Max-Planck-Institut für Physik beteiligt.



Gefunden

Wie erhalten Elementarteilchen – und damit jede Materie im Universum – ihre Masse? Der britische Physiker Peter Higgs erklärte das 1964 mit einem Feld, welches das gesamte Universum ausfüllt. Jedes Teilchen tritt mit diesem Feld in Wechselwirkung. Bildlich kann man sich das Higgsfeld wie Wasser vorstellen, in dem unterschiedlich große Kugeln (die Teilchen) unterschiedlich schnell zu Boden sinken. Das Higgsfeld ist dabei der Widerstand, der den Teilchen Masse verleiht – umso mehr, je größer die Teilchen sind. Und weil es laut Theorie zu dem Feld auch ein Teilchen geben muss, suchen die Physiker seit Jahrzehnten fieberhaft nach dem Higgs-Teilchen.

Das existiert – da sind sich die Wissenschaftler mittlerweile sicher. Auch für die Forscher am Max-Planck-Institut für Physik, die maßgeblich an den Experimenten des Large Hadron Colliders (LHC) am europäischen Kernforschungszentrum CERN beteiligt waren, deuten alle Beweise auf die Existenz des Teilchens hin. Zwar sind noch nicht alle Daten ausgewertet, doch aus den Milliarden Messungen hat sich ein Teilchen herauskristallisiert, dessen Eigenschaften bestens zur Higgs-Theorie passen. Mit rund 126 Gigaelektronenvolt ist es etwa 134-mal schwerer als ein Proton, es liegt damit genau im vorhergesagten Bereich.

Die Entdeckung ist nicht das Ende der Elementarteilchenforschung, denn auch mit dem Higgs-Teilchen gibt das Standardmodell keine Auskunft, was bei sehr hohen Energien passiert. Gibt es dort supersymmetrische Teilchen, wie die SUSY-Theorie vorhersagt? Voraussichtlich 2019 wird der LHC-Beschleuniger so aufgerüstet, dass er auch diese Frage beantworten kann. Dann wäre vielleicht auch die Weltformel zum Greifen nah: Sie würde die bekannten Kräfte in der Natur zu einer einheitlichen Kraft zusammenfassen.

Der riesige Elementarteilchenbeschleuniger LHC bei Genf (oben) hat mit Hilfe des gewaltigen ATLAS-Detektors (unten) eines der großen Rätsel der Physik geklärt: Warum hat Materie eine Masse? ATLAS hat das Higgs-Partikel gefunden, das sich durch Teilchenspuren im Detektor verrät (großes Bild).



Steckbrief Higgs-Teilchen

Existenz:	gesichert
Masse:	etwa 126 Gigaelektronenvolt
Benannt nach:	Peter Higgs (britischer Physiker)
Higgs-	Elementarteilchen erhalten ihre Masse durch
Mechanismus:	Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld

Heiß

Unter Tage auf den Spuren des Urknalls, hier der Tunnel des Beschleunigers LHC am CERN (großes Bild). Das verbindet die Physik an beiden Enden der Größenskala. Die Dimensionen sind gewaltig – der Tunnelring ist 27 Kilometer lang, der Detektor ATLAS würde eine Kathedrale füllen.



Am Anfang war der Urknall. Da passte unser Universum auf eine Nadelspitze und war unvorstellbare 10^{32} Grad Celsius (eine Zahl mit 32 Nullen) heiß. Schon eine milliardstel Sekunde danach hatte es sich auf die Größe unserer Sonne aufgebläht und auf immer noch heiße 10^{16} Grad abgekühlt. Erst viel später entstanden Sterne und Galaxien, die die Astronomen mit Teleskopen studieren.

Der Moment direkt nach dem Urknall lässt sich nicht direkt beobachten und muss mit riesigen Teilchenbeschleunigern wie dem Large Hadron Collider (LHC) am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf milliardenfach nachgestellt werden. In dem 27 Kilometer langen Beschleunigerring unter der französisch-schweizerischen Grenze kreisen Pakete aus Protonen – den Bausteinen der Atomkerne – mit 99,9999991 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, also fast 300.000 Kilometern pro Sekunde. Derart mit Energie und Masse aufgeladen, begegnen sich im Detektor zwei der Partikelpakete 40 Millionen Mal pro Sekunde und dabei vernichten sich beim Zusammenprall einzelne Protonen aus den Partikelpaketen in einem wahren Inferno. Aus diesem geballten Energieblitz materialisieren sich die elementaren Bausteine der Materie, aus denen unser Universum besteht: Quarks, geladene Leptonen und Neutrinos. Auf ihrer Flugbahn durch riesige Detektoren verraten die Materiebausteine ihre Masse, ihre Ladung und viele weitere Eigenschaften, aus denen die Physiker schließen können, wie unser Universum entstanden ist und welche Kräfte darin wirken.

So winzig die Teilchen sind, denen die Physiker auf der Spur sind, so groß ist ihr „Mikroskop“: Der größte Detektor am LHC namens ATLAS, der von Physikern des MPP mitentwickelt und mitgebaut wurde, würde den Kölner Dom vollständig ausfüllen. ATLAS – das größte Projekt am Institut – geht in die zweite Runde. Bis 2019 werden die Siliziumdetektoren, die nur wenige Zentimeter vom Kollisionspunkt entfernt sind, sowie weitere Komponenten der weiter außen liegenden Detektoren gegen leistungsfähigere ausgetauscht.



Steckbrief ATLAS-Detektor (A Toroidal LHC AparatuS)

Länge:	44 Meter
Durchmesser:	22 Meter
Gewicht:	7000 Tonnen
Auslesekanäle:	100 Millionen
Temperatur im Kollisionspunkt:	10.000.000.000.000 Grad Celsius
Ziele:	Genaue Vermessung des Higgs-Teilchens, Zugehörigkeit des Higgs-Teilchen zum Standardmodell der Teilchenphysik, supersymmetrische Teilchen, Extra-Dimensionen
Beitrag MPP:	Komponenten für den ATLAS-Detektor (400 Silizium-Streifenzähler, Hadron-Endkappenkalorimeter, 100 Myon-Kammern), Auswertung der Ergebnisse
Partner:	2200 Wissenschaftler von 176 Universitäten und Instituten aus 37 Ländern

Kalt

Im Universum ist es bitterkalt: minus 270 Grad Celsius – gerade einmal 3 Grad Celsius über dem absoluten Nullpunkt. Noch viel kälter, nämlich ein hundertstel Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt, ist es im CRESST-Experiment 1400 Meter tief im Bergmassiv des Gran-Sasso in den Abruzzen. Dort lauern 18 hochreine Kristalle aus Kalziumwolframat von der Größe einer Espressotasse auf so genannte WIMPs. Diese „Weakly Interacting Massive Particles“ bieten derzeit das beste Modell, um Dunkle Materie zu erklären. Erste Hinweise auf die Existenz der Dunklen Materie lieferten Beobachtungen von Galaxien, die eine viel größere Masse besitzen, als mit gewöhnlicher Materie erklärbar ist. Heute ist bekannt, dass ca. 90 Prozent der Materie des Universums aus Dunkler Materie bestehen. Bisher hat niemand die WIMPs zweifelsfrei beobachtet, auch das Standardmodell der Teilchenphysik sieht diese Teilchen nicht vor. Dennoch gehen die Astrophysiker davon aus, dass es Teilchen im Universum geben muss, die relativ schwer sind und die man nur mit hohem Aufwand messen kann.

Das CRESST-Experiment im Gran-Sasso-Tunnel fahndet nach ihnen. Stößt ein WIMP an einen Atomkern in einem der Kristalle, regt es die Atomkerne zu Schwingungen an und der Kristall heizt sich um wenige millionstel Grad auf. Dieser winzige Temperaturanstieg lässt sich mit einem supraleitenden Metallfilm im Phasenübergang messen, deshalb muss die Apparatur so nah an den absoluten Nullpunkt abgekühlt werden. Doch die Physiker müssen Geduld haben: Obwohl in jeder Sekunde Millionen der scheuen Teilchen durch den Detektor fliegen, findet eine Wechselwirkung nur etwa einmal im Monat statt. Die letzte Messkampagne über zwei Jahre hat Daten geliefert, die auf WIMPs hindeuten. Es gibt aber noch zu viele störende Signale, verursacht etwa durch Verunreinigungen mit radioaktiven Partikeln. Durch weitere Verbesserung der Detektoren und noch sorgfältigere Auswahl und Behandlung der eingesetzten Materialien ist es inzwischen gelungen, die Zahl der störenden Signale deutlich abzusenken. Nun sollte es in absehbarer Zeit möglich sein, das Resultat der letzten Messkampagne zu überprüfen.



Wo bleibt der Rest der Materie? Alle Sterne, Galaxien und Gaswolken zusammen machen nur 5 Prozent der Masse des Universums aus. Auf der Suche nach Spuren der rätselhaften „Dunkle Materie“ kühlen Physiker des Max-Planck-Instituts Kalziumwolframat-Kristalle bis zum absoluten Nullpunkt ab.

Steckbrief CRESST

(Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers)

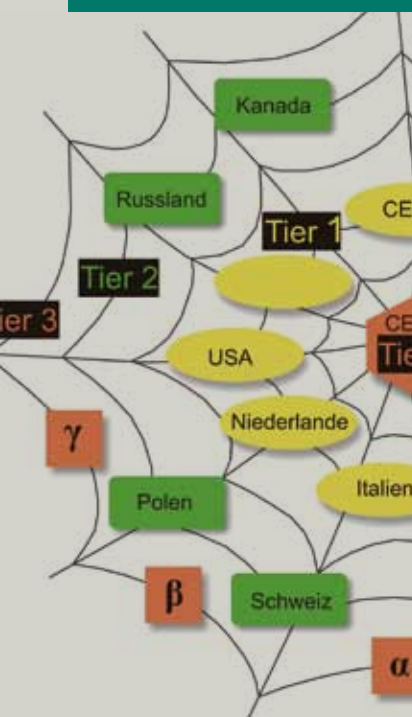
Ziel:	Nachweis schwach wechselwirkender Teilchen (WIMPs)
Ort:	Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italien
Detektoren:	18 Kristalle aus Kalziumwolframat à 300 Gramm
Temperatur:	0,012 Kelvin (minus 273,14 Grad Celsius)
Beitrag MPP:	Herstellung der Detektoren, Aufbau und Betrieb des Experiments, Auswertung der Daten
Partner:	TU München, Universität Tübingen, University of Oxford, Laboratori Nazionali del Gran-Sasso, HEPHY Wien

Flut



Steckbrief LHC-Grid

Tier-0-Zentrum:	CERN (Genf)
Tier-1-Zentren:	11 (weltweit)
Tier-2-Zentren:	über 100 in aller Welt sowie zahlreiche Tier-3 und Tier-4-Zentren
Datenübertragung zwischen Tier-0 und Tier-1:	10 GigaBit pro Sekunde
Datenspeicher:	ca. 39.000 GigaByte pro Jahr (ca. 55 Millionen CD-ROM)
Weltweite Rechenleistung:	entspricht etwa 300.000 PC
Beitrag MPP:	Beschaffung und Wartung von mehr als 200 Linux-Servern im Tier-2-Rechenzentrum am Rechenzentrum Garching, die etwa 2000 Rechnungen gleichzeitig bearbeiten können und mehr als 1.500 Terabyte Speicherplatz besitzen.



Die Experimente der Physiker erzeugen riesige Datenmengen, so viele, dass sie von Menschen allein längst nicht mehr bewältigt werden. Zahllose Computer (oben: bei CERN in Genf) arbeiten weltweit in einem GRID (unten) vernetzt zusammen, um aus den Daten Forschungsergebnisse zu destillieren.

Ein Papierstapel von der Erde bis zum Mond – so viele Seiten müssten bedruckt werden, um die Daten aufzuzeichnen, die die Detektoren des Large Hadron Colliders (LHC) am CERN in einem Jahr erzeugen. Selbst auf CDs gebrannt wäre der Stapel noch 48 Kilometer hoch. Die enorme Datenmenge fällt an, weil allein im ATLAS-Detektor, der unter Beteiligung des MPP gebaut wurde, pro Sekunde 40 Millionen Protonenpaare kollidieren. Dabei entsteht ein ständiger Datenstrom von 100 Terabyte pro Sekunde, was 50 Milliarden Telefongesprächen gleichzeitig entspricht. Diese Daten werden am Detektor gefiltert und weiter prozessiert, so dass mehrere hundert Megabyte pro Sekunde aufgezeichnet werden.

Weil ein einziges Rechenzentrum mit der Verarbeitung und Speicherung dieser Datenflut überfordert wäre, werden die Informationen an elf große so genannte Tier-1-Rechenzentren in aller Welt verteilt – das deutsche ist in Karlsruhe – und von dort zur Auswertung an über 100 Tier-2-Rechenzentren. Diese Idee des Grid-Computing wurde von anderen Forschungsdisziplinen mit hohem Bedarf an Rechenleistung aufgegriffen, etwa in der Klimavorhersage, der Erdbeobachtung oder in der Medikamentenforschung. Auch kommerzielle Anwendungen gibt es.

Das MPP finanziert und betreibt als Teil seiner Rechenanlage am Rechenzentrum Garching der Max-Planck-Gesellschaft ein Tier-2-Rechenzentrum für ATLAS. Die ATLAS-Gruppe am MPP beteiligt sich an der Organisation des Grid-Computings sowie an der Entwicklung von Software für ATLAS.

Grid-Computing ist nicht die erste Entwicklung der Teilchenphysiker, die bedeutende Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft hat. Das World Wide Web – das moderne Internet – wurde von Physikern am CERN in Genf zur einfacheren Organisation von Daten des LHC-Vorgängerbeschleunigers LEP erfunden.

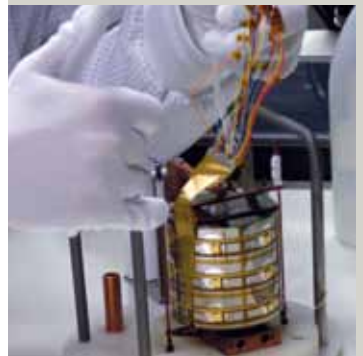
Ebbe

Warum existieren wir? Die Frage, warum vom Urknall nur Materie und keine Antimaterie übrig geblieben ist, ist bisher nicht geklärt. Eine Erklärung könnten schwere Neutrinos liefern, die kurz nach dem Urknall aufgrund einer Asymmetrie in den Naturgesetzen etwas häufiger in Materie als in Antimaterie zerfallen sind. So entstand ein Überschuss an Materieteilchen, die keine Partner zum Zerstrahlen fanden und übrig blieben. Ein solcher Mechanismus setzt voraus, dass Neutrinos identisch sind mit ihren eigenen Antiteilchen. Wenn das stimmt, müsste es den so genannten neutrinolosen Doppelbetazerfall geben, bei dem in einem Atomkern zwei Neutronen in zwei Protonen zerfallen und nichts außer zwei Elektronen aussenden. Schon der normale Doppelbetazerfall, der im Einklang mit dem Standardmodell der Teilchenphysik ist und bei dem zusätzlich zwei Neutrinos entstehen, ist extrem selten: Hundert Milliarden Milliarden Jahre – zehn Milliarden Mal das Alter des Universums – dauert es, bis die Hälfte eines Stoffs auf diese Weise zerfällt. Der neutrinolose Doppelbetazerfall, der im Standardmodell nicht vorgesehen ist, der aber ein wichtiger Baustein zum Verständnis des Universums wäre, ist noch mindestens 10.000-mal seltener.

Um ihn zu beobachten, haben die Physiker des MPP zusammen mit Kollegen aus 15 Instituten in sechs Ländern im Untergrundlabor im italienischen Gran-Sasso-Massiv GERDA (Germanium Detector Array) aufgebaut: In einem streng abgeschirmten Tank mit vier Metern Durchmesser werden hochreine zylindrische Germaniumkristalle in minus 170 Grad Celsius kaltes, flüssiges Argon getaucht. Die erste Messphase über eineinhalb Jahre zeigte kein Signal des neutrinolosen Doppelbetazerfalls. Damit widerlegt GERDA Resultate eines anderen Experiments, das den Nachweis eines solchen Signals erbracht haben will. Für die nächste zweijährige Messphase sollen die Menge des Germaniums in GERDA verdoppelt und Störsignale weiter unterdrückt werden.

Für künftige Experimente entwickelt die Forschungsgruppe GeDet am Institut noch leistungsfähigere Germaniumdetektoren, die erstmals gleichzeitig nach dunkler Materie und nach neutrinolosem Doppelbetazerfall suchen sollen. Die Gruppe arbeitet mit chinesischen Kollegen zusammen, die im Südwesten Chinas das Jinping Untergrundlabor betreiben, das tiefste Untergrundlabor der Welt, und dort bereits mit Germaniumdetektoren nach dunkler Materie suchen. Eine ganze Tonne hochreiner Germaniumkristalle soll einmal die Basis für eine kombinierte Suche bilden.

Das Zusammenspiel von Theorie und Praxis praktizieren Physiker des Max-Planck-Instituts tief unter dem Gran Sasso-Massiv in Italien (großes Bild). Sie suchen nach Beweisen für den theoretisch möglichen, aber extrem seltenen neutrinolosen Doppelbetazerfall.



Steckbrief GERDA (Germanium Detector Array)

Standort:	Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italien
Ziel:	Nachweis des neutrinolosen Doppelbetazerfalls
Beitrag des MPP:	Entwicklung der Detektoren, Bau der Technik zum Einbringen der Detektoren, Datenauswertung
Partner:	14 Institute, 6 Länder: Belgien, Deutschland, Italien, Polen, Russland und Schweiz.

Theorie

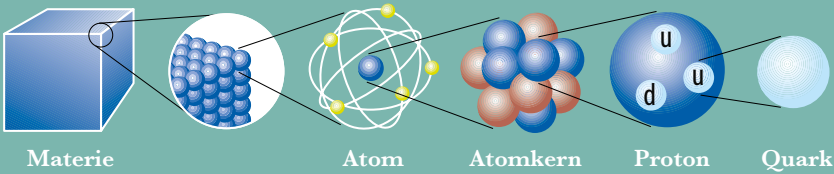
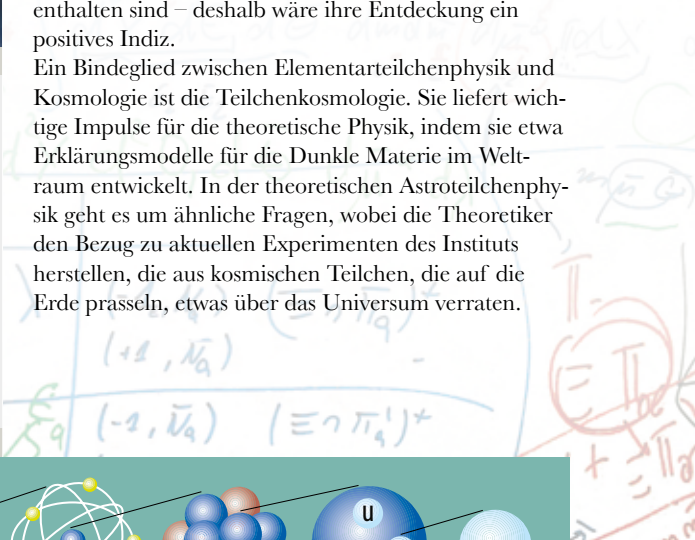
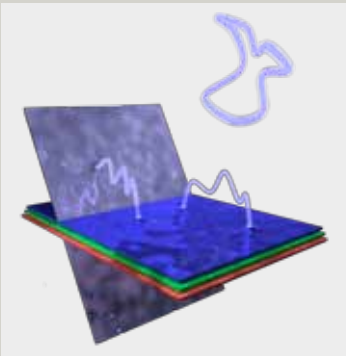
Schon Albert Einstein suchte die „Weltformel“, ein mathematisches Modell, das alle Elementarteilchen und die vier Naturkräfte – also auch die Gravitation – mit einer einheitlichen Quantentheorie beschreibt. Einstein schaffte es nicht, doch seine Erben lässt der Gedanke nicht los. Sie arbeiten daran, das erfolgreiche, aber unvollständige Standardmodell der Teilchenphysik zu erweitern.

Ein Weg ist die Phänomenologie, der anwendungsbezogene Bereich der theoretischen Physik, der mit mathematischen Methoden die Eigenschaften von drei der vier fundamentalen Kräfte des Universums beschreibt. Daraus macht die Phänomenologie Vorhersagen für Experimente an großen Beschleunigern. Das gleicht einem Detektivspiel: Die Physiker spielen Experimente auf dem Papier durch, fügen gezielt Varianten ein und berechnen beispielsweise wie verschiedene Materiesorten miteinander wechselwirken. Auch die Masse des Higgs-Teilchens haben sie auf diese Weise schon vor dessen Entdeckung eingrenzen können.

Eine weitere Vorhersage sind supersymmetrische Teilchen, spiegelbildliche Verwandte der Partikel, aus denen unsere Welt aufgebaut ist. Sie sind in der Superstring-Theorie enthalten, der zurzeit vielversprechendsten Theorie für eine Weltformel. Sie beschreibt Materie und Kräfte als Saiten, die in zehn Dimensionen schwingen. Noch gibt es keine Experimente, die die Existenz von Superstrings belegen. Der Beschleuniger LHC könnte erste Hinweise liefern. Er fahndet nach supersymmetrischen Teilchen, die in der Stringtheorie enthalten sind – deshalb wäre ihre Entdeckung ein positives Indiz.

Ein Bindeglied zwischen Elementarteilchenphysik und Kosmologie ist die Teilchenkosmologie. Sie liefert wichtige Impulse für die theoretische Physik, indem sie etwa Erklärungsmodelle für die Dunkle Materie im Welt- raum entwickelt. In der theoretischen Astroteilchenphy- sik geht es um ähnliche Fragen, wobei die Theoretiker den Bezug zu aktuellen Experimenten des Instituts herstellen, die aus kosmischen Teilchen, die auf die Erde prasseln, etwas über das Universum verraten.

Schon Albert Einstein suchte in diesem Institut nach der Weltformel. Heute heißt der aussichtsreichste Kandidat „Stringtheorie“ (unten). Es geht darum, in vielen Diskussionen (oben), mit unzähligen Formeln die Ergebnisse der Experimente zu verstehen. Auch das Standardmodell der Materie (großes Bild) ist noch voller Rätsel.



Quarks

Leptonen

Eichbosonen

u up Masse: 2,3 MeV Ladung: 2/3	c charm Masse: 1,3 GeV Ladung: 2/3	t top Masse: 173,2 GeV Ladung: 2/3	γ Photon Masse: 0 Ladung: 0	H Higgs-Boson Masse: 126 GeV Ladung: 0
d down Masse: 4,8 MeV Ladung: -1/3	s strange Masse: 95 MeV Ladung: -1/3	b bottom Masse: 4,2 GeV Ladung: -1/3	g Gluon Masse: 0 Ladung: 0	
ν_e Elektron-Neutrino Masse: < 2 eV Ladung: 0	ν_μ Myon-Neutrino Masse: < 2 eV Ladung: 0	ν_τ Tau-Neutrino Masse: < 2 eV Ladung: 0	Z⁰ Z-Boson Masse: 91,2 GeV Ladung: 0	
e Elektron Masse: 0,51 MeV Ladung: -1	μ Myon Masse: 105,7 MeV Ladung: -1	τ Tau Masse: 1,78 GeV Ladung: -1	W W-Boson Masse: 80,4 GeV Ladung: 1	

Praxis

Steckbrief Ausbildung

International Max Planck Research School on Elementary Particle Physics (IMPRS EPP)

Aufgabe: Die IMPRS EPP bietet exzellente Forschungs- und Trainingsmöglichkeiten für hochqualifizierte Doktoranden.
Doktoranden: 65

Betriebliche Ausbildung

Ausbildungsberufe: Elektroniker/in für Geräte und Systeme;
Industriemechaniker/in
Auszubildende: 20

Das Max-Planck-Institut für Physik ist maßgeblich an der Entwicklung riesiger Experimente wie dem ATLAS-Detektor am LHC-Teilchenbeschleuniger in Genf oder am MAGIC-Teleskop auf La Palma beteiligt. Ohne das Knowhow vieler hochqualifizierter Physiker ließen sich so komplexe Maschinen gar nicht bauen und nutzen. Das MPP ist deshalb auf exzellente junge Wissenschaftler angewiesen, die am Institut beste Ausbildungsbedingungen, sowohl in der experimentellen als auch in der theoretischen Physik, finden. Gemeinsam mit der Ludwig-Maximilians-Universität und der Technischen Universität München hat das Institut 2005 die IMPRS EPP gegründet, die International Max-Planck Research School for Elementary Particle Physics. 65 Doktoranden der drei Partnerinstitutionen lernen hier gemeinsam die neuesten Theorien und Experimente der Teilchenphysik kennen und für ihre wissenschaftliche Arbeit anzuwenden. Die IMPRS EPP ist ein einzigartiger Think-Tank für Nachwuchsforscher, die hier den Grundstein für ihre Karriere in der Wissenschaft oder Wirtschaft legen. Das dreijährige Curriculum vermittelt wissenschaftliches Knowhow und legt auch großen Wert auf das Präsentieren eigener Ergebnisse oder das Arbeiten in internationalen Teams.

Vergessen darf man aber nicht, dass enorm komplexe Instrumente wie der LHC auch gebaut werden müssen. Dazu sind viele Techniker und Ingenieure mit hochspezialisiertem Knowhow notwendig. Das Institut betreibt deshalb eigene Fachabteilungen für Elektronik und Mechanik. Letztere konstruiert und baut unter anderem die Gerüste von ATLAS und von MAGIC, die höchste Präzision bei gleichzeitiger Robustheit erfordern. Ist beispielsweise ATLAS einmal in Betrieb, kann der 7000 Tonnen Koloss für Jahre nicht mehr geöffnet und repariert werden.

Um diese einzigartige Expertise zu bewahren und zu erweitern, bildet das Institut laufend 20 junge Menschen zu Elektronikern für Geräte und Systeme sowie zu Industriemechanikern mit Spezialisierung Feingebäudebau aus. Die Palette der Ausbildungsinhalte reicht vom Bau von Elektronikgeräten und der Anwendung von CNC-Technik bis zur Automatisierungstechnik und Verarbeitung von Hightech-Materialien. Bereits während ihrer Ausbildung arbeiten die Auszubildenden eng mit den Forschungsgruppen zusammen und tragen zum Gelingen der Experimente bei.



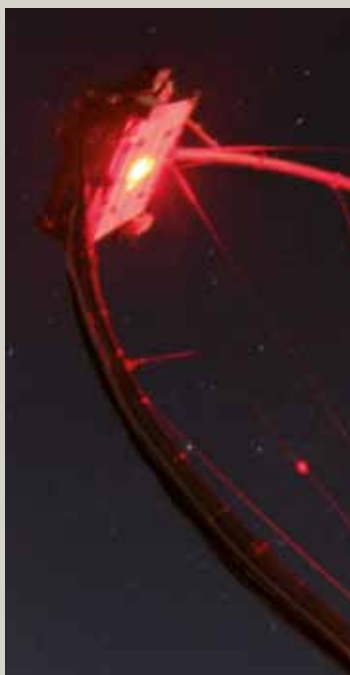
Das Institut bietet mit seiner Ausstattung exzellente Forschungs- und Trainingsmöglichkeiten für hochqualifizierte Nachwuchswissenschaftler der IMPRS EPP (großes Bild und kleines Bild oben).

In modernen Ausbildungswerkstätten (unten) erlangen die Auszubildenden praktische Fertigkeiten. Sie sind direkt in der Entwicklungsarbeit beteiligt und tragen so einen wichtigen Teil zu den Forschungsexperimenten bei.

Bremsen



Spuren von den gewaltigsten Katastrophen im Weltall suchen die Gammastrahlen-Teleskope MAGIC auf La Palma (oben/großes Bild) und das Nachfolgeprojekt CTA (unten). Sie spüren Cherenkov-Licht auf, schwache Lichtblitze, die durch Gammastrahlen in der Atmosphäre entstehen.



Wenn wir zum Nachthimmel schauen, sehen wir nur das schwache Licht der Sterne. Würden unsere Augen auch Gammastrahlung wahrnehmen, die hunderte Milliarden Mal mehr Energie hat als sichtbares Licht, würden wir noch viel mehr sehen. Zum Beispiel die Umgebung Schwarzer Löcher oder Sternexplosionen, die Milliarden Lichtjahre von uns entfernt sind und die ungeheuer energiereiche Gammastrahlung freisetzen. Was unseren Augen verborgen bleibt, sehen die beiden MAGIC-Teleskope (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope), die vom MPP auf der Kanareninsel La Palma errichtet wurden. Fällt die Gammastrahlung in die Erdatmosphäre, treffen die Gamma-Photonen in zehn bis fünfzehn Kilometer Höhe auf Luftmoleküle und erzeugen eine Kaskade von Millionen verschiedener Teilchen. Die werden abgebremst und senden dabei schwache bläuliche Lichtblitze aus – das so genannte Cherenkov-Licht. Dieser Lichtkegel am Himmel beleuchtet einen Kreis von rund 600 Metern Durchmesser auf der Erdoberfläche. MAGIC 1 und 2 fangen einen Teil dieses Lichts mit ihren Spiegeln auf und messen es mit empfindlichen Photodetektoren. Aus der Energie und der Verteilung des Lichts rekonstruieren die Astrophysiker, woher die Gamma-Strahlung kam. Die MAGIC-Teleskope sind die derzeit größten Instrumente ihrer Art weltweit. Sie lassen sich in 22 Sekunden auf eine beliebige Stelle am Himmel ausrichten, um das erste Aufleuchten der mysteriösen Gammastrahlungsblitze zu erfassen, die innerhalb von nur ein bis zwei Minuten ungeheure Energien freisetzen.

Bis 2017 werden die MAGIC-Teleskope rund 100 Gammaquellen entdecken – ob darunter auch Gammastrahlenblitze sind, ist ungewiss, auch für den Blick auf Strukturen ausgedehnter Objekte, etwa von Supernova-Überresten, könnten die MAGIC-Augen zu unscharf sein. Deshalb planen rund 100 Institute aus aller Welt schon das Nachfolgeprojekt: CTA (Cherenkov Telescope Array) besteht aus insgesamt rund 70 Teleskopen dreier unterschiedlicher Größen (23, 12 und 6 Meter Durchmesser) für zum Teil noch höhere Energien. Das MPP baut die Mechanik der großen 23-Meter-Teleskope. Die werden vor allem auf der Nordhalbkugel stehen, im größeren Observatorium auf der Südhalbkugel der Erde kommen alle drei Teleskoptypen zum Einsatz. So entsteht ein virtuelles Riesenteleskop, das zehnmal empfindlicher ist als MAGIC.

Steckbrief MAGIC und CTA

Standort:	La Palma, Kanarische Inseln (MAGIC) Nord-/Südhalbkugel (CTA)
Durchmesser:	je 17 Meter (MAGIC) je 23 Meter (großes CTA Teleskop)
Beteiligte Institute:	24 in 9 Ländern (MAGIC) 187 in 28 Ländern (CTA)
Ziel:	Untersuchung hochenergetischer Gammastrahlung u. a. aus der Umgebung Schwarzer Löcher oder von Supernova-Überresten.

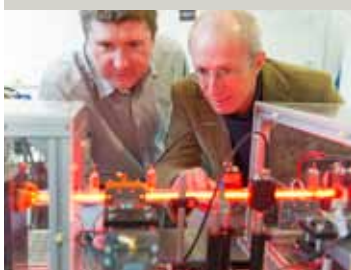


Beschleunigen

Mit ihren riesigen Beschleunigern schauen Teilchenphysiker in die Vergangenheit – bis zu den ersten Sekundenbruchteilen der Geburt unseres Universums. Gleichzeitig sind sie ihrer Zeit weit voraus, denn während ein riesiges Experiment wie der Large Hadron Collider in Genf noch mindestens 15 Jahre laufen wird, entwerfen die Physiker bereits neue Konzepte für Beschleuniger, die noch tiefer in die Materie eindringen. Das ist wichtig, weil die Physik keine feste Landkarte mit einigen weißen Flecken ist, die es noch abschließend zu beschreiben gilt. Vielmehr entdecken die Physiker immer neue, unbekannte Kontinente, mit jeder Erkenntnis ergeben sich neue Forschungsfragen. Das MPP macht sich schon heute Gedanken, wie der Nachfolger des LHC aussehen könnte. Die Fachwelt ist sich einig, dass als nächstes ein Linearbeschleuniger – der International Linear Collider (ILC) – gebaut werden soll, der Positronen und Elektronen auf zwei jeweils 15 Kilometer langen Rennstrecken auf Kollisionskurs bringt. Der ILC erlaubt viel präzisere Messungen, etwa des Higgs-Teilchens.

Schon heute entwickeln und testen weltweit mehrere tausend Wissenschaftler und Techniker Komponenten für den ILC. Zusammen mit Kollegen aus der ganzen Welt entwickeln MPP-Physiker ein Kalorimeter, das die Energie der Teilchen misst, die nach dem Zusammenprall entstehen. Darüber hinaus könnte auch der innerste Teil dieser Experimente, ein Halbleiterdetektor, der nur 1,5 Zentimeter vom Kollisionspunkt entfernt ist, auf Technologien basieren, die am MPP entwickelt wurden.

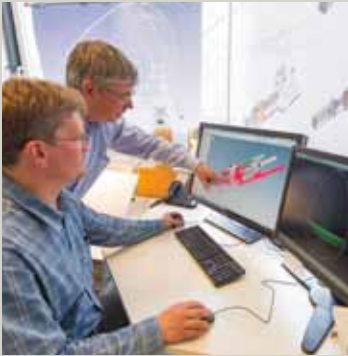
Auch wer heute erst die Schulbank drückt und mit einem Physikstudium liebäugelt, hat in der Teilchenphysik Perspektiven. Denn für die Zeit nach dem ILC gibt es auch schon Konzepte. Neben dem Compact Linear Collider CLIC, der die dreifache Energie des ILC erreichen könnte und dessen Physik und Experimente am MPP gemeinsam mit dem ILC-Projekt untersucht werden, sind das Plasmabeschleuniger. Darin surfen die zu beschleunigenden Teilchen auf Wellen geladener Teilchen. Die Wellen entstehen, wenn ein Strahl aus Protonen in ein Plasma schießt und die freien Elektronen mitreißt. MPP-Forscher planen in Genf Experimente dazu. Bei Erfolg würden Teilchenbeschleuniger in Zukunft hohe Energien mit viel kürzeren Beschleunigungsstrecken erreichen.



Noch immer harren grundlegende Fragen der Physik einer Antwort. Die Forscher am Max-Planck-Institut für Physik planen mit Instituten in aller Welt bereits den Beschleuniger der nächsten Generation. Der Linearbeschleuniger ILC (unten) wird das Standardmodell der Teilchenphysik noch präziser vermessen. Mit neuartigen Plasmabeschleunigern (oben) sollen Beschleunigungsstrecken verringert und somit Ressourcen für zukünftige Beschleuniger-Projekte eingespart werden.

Mechanik

Die Mitarbeiter der Fachabteilung Mechanik bei der Konstruktion, Fertigung und Montage der Forschungsexperimente.



Angepasste und spezielle technische Geräte für die experimentelle wissenschaftliche Arbeit der Physiker zu entwerfen, zu bauen und zu testen. So lässt sich die Aufgabe der Fachabteilung Mechanik am Max-Planck-Institut für Physik zutreffend beschreiben. Was sich hinter diesen nüchtern-technischen Worten verbirgt, ist jedoch nichts weniger als einer der faszinierendsten und abwechslungsreichsten Arbeitsplätze weltweit – jedenfalls aus Sicht der rund 30 hier beschäftigten Ingenieure, Techniker und Mechaniker. Denn wo so sonst hat man schon einmal die Chance, einen Silizium-Pixel-detektor zur Messung von Teilchenzerfällen oder das Gerüst eines Teleskops zur Messung der Cherenkov-Strahlung in Ultraleichtbauweise zu entwickeln und zu bauen?

Die besondere Faszination ergibt sich aus dem enormen Spektrum, das die tägliche Arbeit umfasst: Dieses reicht vom Bereich der Feinmechanik über den Gerätebau bis hin zu wuchtigen Baugruppen, wie den großen Myon-Kammern, die für das ATLAS-Experiment am Teilchenbeschleuniger LHC am CERN entwickelt wurden. Doch nicht nur die Größe und Komplexität der zu bauenden Geräte, sondern auch die Werkstoffe, mit denen gearbeitet wird, weisen eine enorme Bandbreite auf. Dabei wird fast immer an der Grenze des gerade noch machbaren entworfen und gefertigt. Neben Standardbaustoffen wie Edelstahl und Aluminium kommen häufig auch Sonderwerkstoffe wie kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK) und andere spezielle Kunststoffe zum Einsatz – je nachdem, welche besonderen Anforderungen an das Bauteil gestellt werden.

Von der ersten Ideenskizze bis zur tatsächlichen Umsetzung liegt dabei in der Regel ein langer Weg. In enger Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern, Ingenieuren und Mitarbeitern der mechanischen und elektronischen Fertigung werden die Bauteile und Baugruppen zunächst mittels CAD-Konstruktionsprogrammen am Bildschirm modelliert und anschließend in technische Zeichnungen umgesetzt. Die Bauteilbelastungen, die im Rahmen des Experimentes erwartet werden, werden beispielsweise mittels der Finite Element Methode (FEM) simuliert. So können die Bauteile und Baugruppen optimiert und die Anzahl der experimentellen Testreihen wirkungsvoll reduziert und damit Zeit und Kosten gespart werden. Ganz ersetzen lassen sich Versuche in der Realität damit jedoch nicht – und so gehören auch der Bau von Modellen und Prototypen sowie deren Erprobung unter realen Bedingungen zum Aufgabenspektrum.

Steckbrief Fachabteilung Mechanik

Mitarbeiter: 30
Abteilungen: Konstruktion und Fertigungstechnik
Arbeitsschwerpunkte: Entwicklung, Fertigung und Montage spezieller wissenschaftlicher Geräte – an den Grenzen des technisch Machbaren

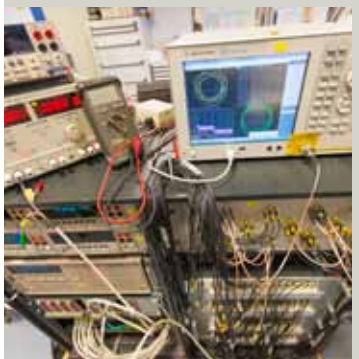
Elektronik

Fragt man bei gängigen Elektronikherstellern nach einem Transistor, der auch bei -190 °C und unter hoher radioaktiver Strahlung zuverlässig viele Jahre funktioniert, wird man in aller Regel ein ungläubiges Kopfschütteln ernten, ergänzt um den Hinweis, dass so etwas nicht geht.

„Geht nicht? Gib’s nicht!“ Jedenfalls gilt das für die Fachabteilung Elektronik am Max-Planck-Institut für Physik. Denn hier werden hochkomplexe Elektronikschaltungen für physikalische Experimente der Grundlagenforschung entwickelt. Immer am Rande des technisch Machbaren und immer für Anwendungen unter extremen Bedingungen – für den ATLAS-Detektor am LHC etwa unter der eingangs erwähnten radioaktiven Strahlung und bei extremer Kälte. Dementsprechend gilt es, geeignete Bauteile zu finden oder gegebenenfalls selbst zu konstruieren. Nicht unbedingt mit Komponenten aus dem Elektronikmarkt um die Ecke, aber wann immer es geht, tatsächlich mit Standard-Elektroniksystemen – die allerdings in der Regel deutlich modifiziert werden.

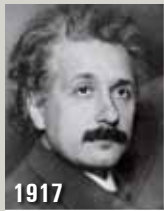
Die Fachabteilung Elektronik am MPP gliedert sich dabei in drei spezialisierte Gruppen mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Die Arbeitsgruppe „Elektronik Entwicklung“ erstellt Konzepte und Designs für elektronische Baugruppen sowie Systeme zur Messung physikalischer Größen und zur Datenerfassung und -verarbeitung. Aufbauend auf den hier erarbeiteten Parametern entwickelt die Gruppe „Elektronik Anlagen“ die Mess-, Steuer- und Regeltechnik sowie die Versorgung der elektronischen Komponenten mit Energie. Die Arbeitsgruppe „Elektronik Produktion“ ist schließlich zuständig für den Bau, die Bestückung sowie die Installation der elektronischen Bauteile und Schaltungen.

Soweit die Theorie. In der Praxis lässt sich diese Trennung jedoch meist nicht so klar vollziehen. Für die rund 30 Mitarbeiter der Fachabteilung Elektronik liegt der eigentliche Reiz in der interdisziplinären Arbeit zwischen Elektronik, Physik und anderen Disziplinen, wie beispielsweise Materialwissenschaften. Bei vielen Projekten des MPP betreten die Elektronikspezialisten Neuland. Jedes elektronische System wird speziell für das jeweilige Experiment gebaut und basiert auf komplexen Forschungs- und Entwicklungsprozessen. Viele der Lösungen sind einzigartig – was auch bedeutet, dass unterschiedlichste Entwicklungsphasen und detaillierte Testreihen von den Arbeitsgruppen durchgeführt werden. Alle drei Gruppen arbeiten dabei eng zusammen und tauschen sich auch regelmäßig mit anderen Forschungseinrichtungen aus, zum Beispiel mit den Kollegen der europäischen Weltraumorganisation ESA oder dem Europäischen Labor für Teilchenphysik CERN. Ob extreme Witterungsbedingungen, wie bei den MAGIC-Teleskopen auf La Palma, oder tiefe Temperaturen und Strahlung am LHC und dem ATLAS-Experiment – jedes Projekt hat dabei seine ganz eigenen Herausforderungen.



Die Labore der Fachabteilung Elektronik sind mit modernen Maschinen und einer Reihe hoch empfindlicher Messgeräte ausgestattet. Diese ermöglichen die Entwicklung von neuartigen Komponenten nahe der Grenze des technisch Machbaren und deren Fertigung nach höchsten Qualitätsstandards.

Tradition



1917

Gründung als Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin, Gründungsdirektor Albert Einstein



1918

Nobelpreis für Max Planck, Initiator des Instituts



1938

Institutsname „Max-Planck-Institut“



1942

Werner Heisenberg wird Direktor des Instituts, bleibt es bis 1970



1946

Wiedereröffnung des Instituts in Göttingen



1948

Eingliederung in die Max-Planck-Gesellschaft als Nachfolgerin der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft



1958

Umzug nach München



1992

Gründung des Halbleiterlabors mit dem MPI für extraterrestrische Physik



2006

Beteiligung am Exzellenzcluster „Ursprung und Struktur des Universums“ zur Förderung der Spitzenforschung in Deutschland

Das Max-Planck-Institut für Physik, gegründet am 1. Oktober 1917 als Kaiser-Wilhelm-Institut, blickt auf eine spannende Geschichte zurück. In den über 90 Jahren gab es Rückschläge, etwa durch den von den Nationalsozialisten erzwungenen Rückzug Albert Einsteins als Institutsdirektor oder durch die Schwierigkeiten nach dem Krieg. Vor allem aber setzte das Institut Maßstäbe in der physikalischen Forschung, besonders durch Wissenschaftler wie Albert Einstein, Peter Debye, Carl Friedrich von Weizsäcker oder Werner Heisenberg.

Das Institut war Keimzelle einiger weiterer Institute in der Max-Planck-Gesellschaft. So sind alle physikalischen Max-Planck-Institute in München Kinder oder Enkel des MPP, das Institut für Plasmaphysik, das erst als GmbH und seit 1971 als eigenes Max-Planck-Institut firmiert, sowie die Institute für Astrophysik und extraterrestrische Physik, alle in Garching, die seit 1991 eigenständig sind. Im Jahr 1992 wird zusammen mit dem Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) das Halbleiterlabor (HLL) gegründet.

Zur Förderung der Spitzenforschung in Deutschland nimmt das MPI für Physik am DFG-geförderten Exzellenzcluster „Ursprung und Struktur des Universums“ teil, das 2006 an der Technischen Universität München gegründet wurde. Mit diesem Projekt wollen etwa 200 Physiker aus verschiedenen Forschungsgebieten gemeinsam Antworten auf die Entstehung und Entwicklung des Universums finden. Damit unterstreicht das MPI für Physik sein Bemühen, aktuellen und relevanten Fragen der Physik in interdisziplinären Projekten nachzugehen, was der herausragenden Bedeutung des Instituts in der deutschen Forschungslandschaft entspricht. Im Juli 2012 gaben Physiker am CERN die Entdeckung eines neuen Teilchens bekannt. Vielleicht der letzte Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik: das Higgs-Boson. An der Entdeckung des Teilchens waren Forscher des Max-Planck-Instituts für Physik mit dem ATLAS-Experiment maßgeblich beteiligt.



Vision



Prof. Dr. Allen Caldwell
Geschäftsführender Direktor,
Leiter der Abteilung Hochenergiephysik II

„Das Standard-Modell, dessen Höhepunkt die Entdeckung des Higgs-Boson darstellt, ist ein großer Erfolg und macht uns stolz, Teilchenphysiker zu sein. Nun ist es Zeit, jenseits davon zu forschen, und Geheimnisse wie das Materie-Antimaterie-Ungleichgewicht im Universum oder die Natur der Dunklen Materie und der Dunklen Energie zu verstehen. Es gibt keinen offensichtlichen Weg, den wir nehmen können – das macht unsere Forschung jedoch noch interessanter. Wir sind bereit für das Unerwartete!“

Prof. Dr. Wolfgang Hollik
Direktor, Leiter der Abteilung Theoretische Physik,
Phänomenologie

„Wir erforschen die Ursachen für die Masse, die alle Materie besitzt, und die durch die Gravitation die Dynamik des Universums bestimmt. Eigentlich regeln Symmetrien unsere fundamentalen Gesetzmäßigkeiten, die Massen von Elementarteilchen entstammen aber einer Symmetriebrechung. Wie das geschieht, wollen wir entschlüsseln.“



Dr. Sandra Kortner
Projektleiterin in der ATLAS-Forschungsgruppe

„Im Rahmen des ATLAS-Experiments am Europäischen Forschungszentrum CERN untersuche ich in einer internationalen Arbeitsgruppe den Mechanismus, der für den Ursprung der Masse aller Elementarteilchen verantwortlich ist. Die Erfinder des Mechanismus wurden vor kurzem nach der Entdeckung des Higgs-Teilchens am CERN mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Es war für mich äußerst erfüllend zu wissen, dass ich zu dieser Entdeckung und damit zum besseren Verständnis der Natur, beitragen konnte. Eine Prise der Begeisterung im Arbeitsalltag, die man am Institut stets findet, sowie enge und kreative Teamarbeit bringen solche lohnenden Erlebnisse immer wieder hervor.“

Charlotte Sleight
Doktorandin in der theoretischen Physik,
Stringtheorie und Dualitäten zwischen Eich- und
Gravitationstheorien

„Meine Forschung mit Dualitäten zwischen Eich- und Gravitationstheorien behandelt zahlreiche Aspekte der theoretischen Physik. Dafür bietet das Institut die ideale Arbeitsumgebung. Die internationalen Forschungsgruppen, die eine große Anzahl von verschiedenen Arbeiten auf ähnlichem Gebiet vereinen, sorgen dafür, dass neue und kreative Ideen immer fließen – das ist es, was für mich zum besseren Verständnis unseres Universums erforderlich ist.“



Zahlen

Das Max-Planck-Institut für Physik gehört zu den ältesten Instituten der Max-Planck-Gesellschaft. Mit derzeit 82 Instituten und Forschungseinrichtungen ist die Max-Planck-Gesellschaft Deutschlands erfolgreichste Forschungsorganisation – seit ihrer Gründung 1948 finden sich alleine 17 Nobelpreisträger in den Reihen ihrer Wissenschaftler. Damit ist sie auf Augenhöhe mit

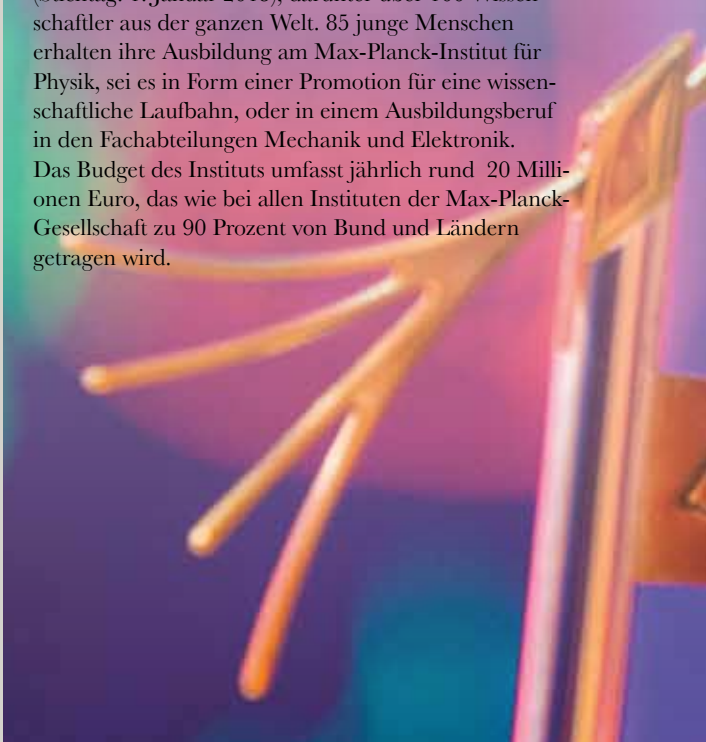
Das Institut beschäftigt 330 Mitarbeiter, darunter

den weltweit besten und angesehensten Forschungsinstitutionen. Spitzenforschung wird dabei am Max-Planck-Institut für Physik (Werner-Heisenberg-Institut) betrieben: von den Anfängen des Weltalls bis zu den innersten Geheimnissen der Materie – diese Dimensionen umspannen die Forschungsthemen, mit denen sich die Wissenschaftler in München befassen.

24 Forschungsgruppen in 8 Ländern

Das Institut besteht aus sechs Abteilungen, die je ein Direktor leitet. Drei Abteilungen arbeiten an Fragestellungen der experimentellen Physik, drei in der theoretischen Physik. An Experimenten arbeiten insgesamt 24 Forschungsgruppen in sieben Ländern der Welt. Die Arbeiten im Forschungsbereich theoretische Physik umfassen ein breites Spektrum grundlegender theoretischer Fragestellungen der Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik, mit denen sich acht Arbeitsgruppen befassen.

Insgesamt sind in München 330 Mitarbeiter beschäftigt (Stichtag: 1. Januar 2013), darunter über 100 Wissenschaftler aus der ganzen Welt. 85 junge Menschen erhalten ihre Ausbildung am Max-Planck-Institut für Physik, sei es in Form einer Promotion für eine wissenschaftliche Laufbahn, oder in einem Ausbildungsberuf in den Fachabteilungen Mechanik und Elektronik. Das Budget des Instituts umfasst jährlich rund 20 Millionen Euro, das wie bei allen Instituten der Max-Planck-Gesellschaft zu 90 Prozent von Bund und Ländern getragen wird.





20 Auszubildende,
100 Wissenschaftler,
65 Promovierende,

Impressum

Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)
Föhringer Ring 6
80805 München
Tel.: +49 89 323 54 - 0
Fax: +49 89 322 67 04

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Silke Zollinger (verantw.)
Tel.: +49 89 323 54 - 292
E-Mail: silke.zollinger@mpp.mpg.de

Dr. Stefan Stonjek
Referent des Geschäftsführenden
Direktors
Tel.: +49 89 323 54 - 296
E-Mail: stonjek@mpp.mpg.de

Weitere Informationen
zum Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut):

www.mpp.mpg.de

Texte:
Bernd Müller, 53173 Bonn
Tilman Weigelt, 70199 Stuttgart (14, 15)

Gestaltung:
Vasco Kintzel, 85625 Glonn bei München

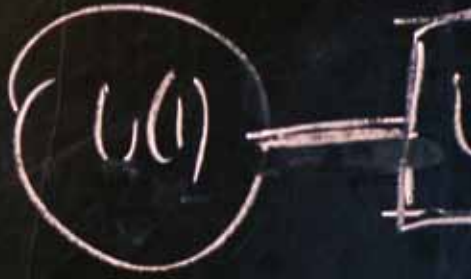
Bilder:
CERN, Hubble Space Telescope, KEK,
MPI für Physik, A. Griesch

Druckerei:
Medienhaus Biering, 80939 München


$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{1}{2} \hbar$$

8

9 ~~N D 7 S~~



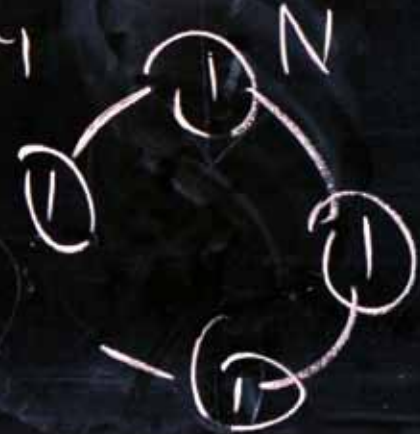
D^0

\mathbb{Z}^2



Higgs branch

Coulomb branch
= $\mathbb{C}^2 / \mathbb{Z}_n$



Higgs = \mathbb{C}^2

Coulomb = $\mathbb{C}^2 / SU(N)$



Max-Planck-Institut für Physik
 (Werner-Heisenberg-Institut)
 Föhringer Ring 6
 80805 München
 Tel.: +49 89 323 54 - 0
 Fax: +49 89 322 67 04

www.mpp.mpg.de