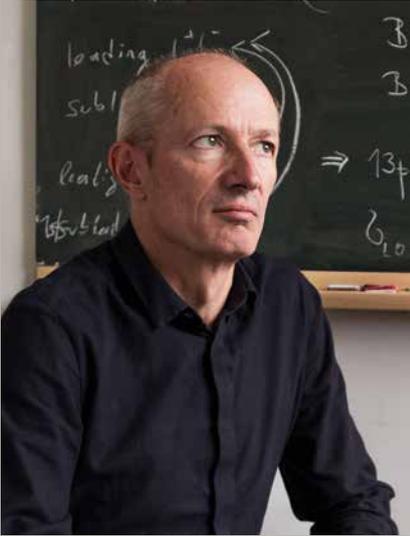


100 Jahre

MAX-PLANCK-
INSTITUT
FÜR PHYSIK



Prof. Dr. Allen Caldwell

*Geschäftsführender
Direktor am Max-Planck-
Institut für Physik*

BEREIT *für neue* ENTDECKUNGEN

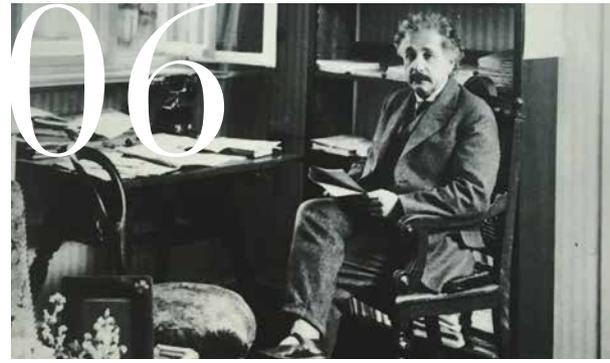
Unser Institut feiert seinen 100. Geburtstag – und mit diesem Magazin geben wir Ihnen einen kurzen und unterhaltsamen Blick auf unsere Geschichte, auf die frühere und die aktuelle Forschung und auf Menschen, die zu verschiedenen Zeiten hier aktiv waren. Max Planck, Albert Einstein und Werner Heisenberg – diese Wissenschaftler sind aufs Engste mit unserer Geschichte verbunden und werden noch heute von Physikern und Nichtphysikern gleichermaßen verehrt.

Der weitaus größte Teil des Universums liegt noch im Verborgenen. Die uns bekannte Materie macht nur etwa fünf Prozent aus. Woraus besteht die Dunkle Materie? Und auch die bekannten Bestandteile stellen uns vor Rätsel: Warum gibt es mehr Materie als Antimaterie? Gibt es eine vereinheitlichte Theorie aller Naturkräfte – Gravitation, Elektromagnetismus sowie schwache und starke Wechselwirkung?

Wir sind bereit für neue Entdeckungen sowohl in der theoretischen als auch in der experimentellen Physik und blicken erwartungsvoll auf die nächsten Jahre.

06__Geschichte

100 Jahre Forschung am
Max-Planck-Institut für Physik



12__Forschung

Teilchenphysik: Wie Wissenschaftler
die kleinsten Bausteine des Universums
erforschen



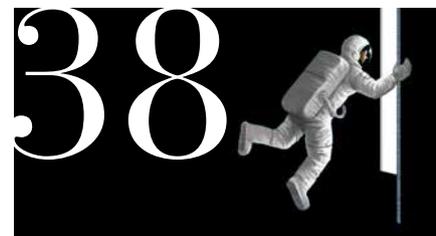
26__Profile

Menschen, die am Institut
forschen und arbeiten



38__Grundlagenforschung

Forschen ohne unmittelbare
praktische Anwendung – wozu?



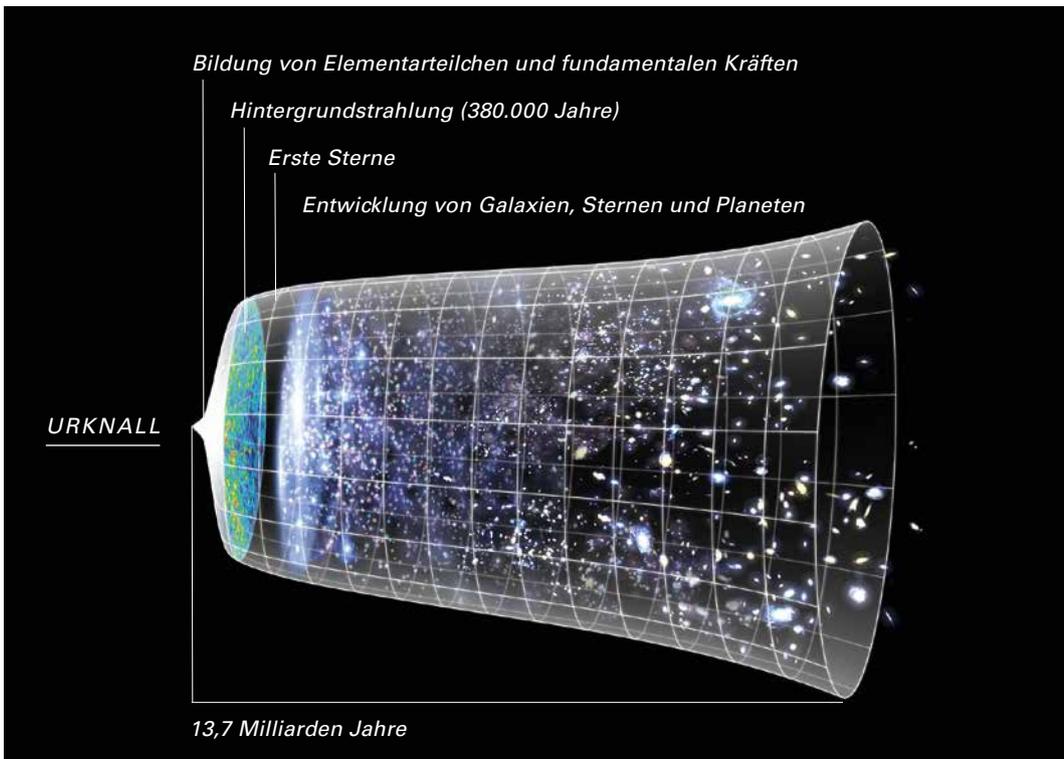
42__Wie geht's weiter?

Die Projekte der Zukunft



43__Impressum

Abkürzungen, Kontakt,
Bildnachweis



Die Entwicklung des Universums

Wann und wie formten sich Elementarteilchen? Was sind die Eigenschaften von Materie? Wie lassen sich bisher unverstandene physikalische Phänomene erklären? Diesen Fragen geht das Max-Planck-Institut für Physik nach – mit dem Ziel, die Geheimnisse des Universums zu ergründen.

» D A S *Kleinste*
E R F O R S C H E N ,
U M D A S
Größte Z U
V E R S T E H E N «

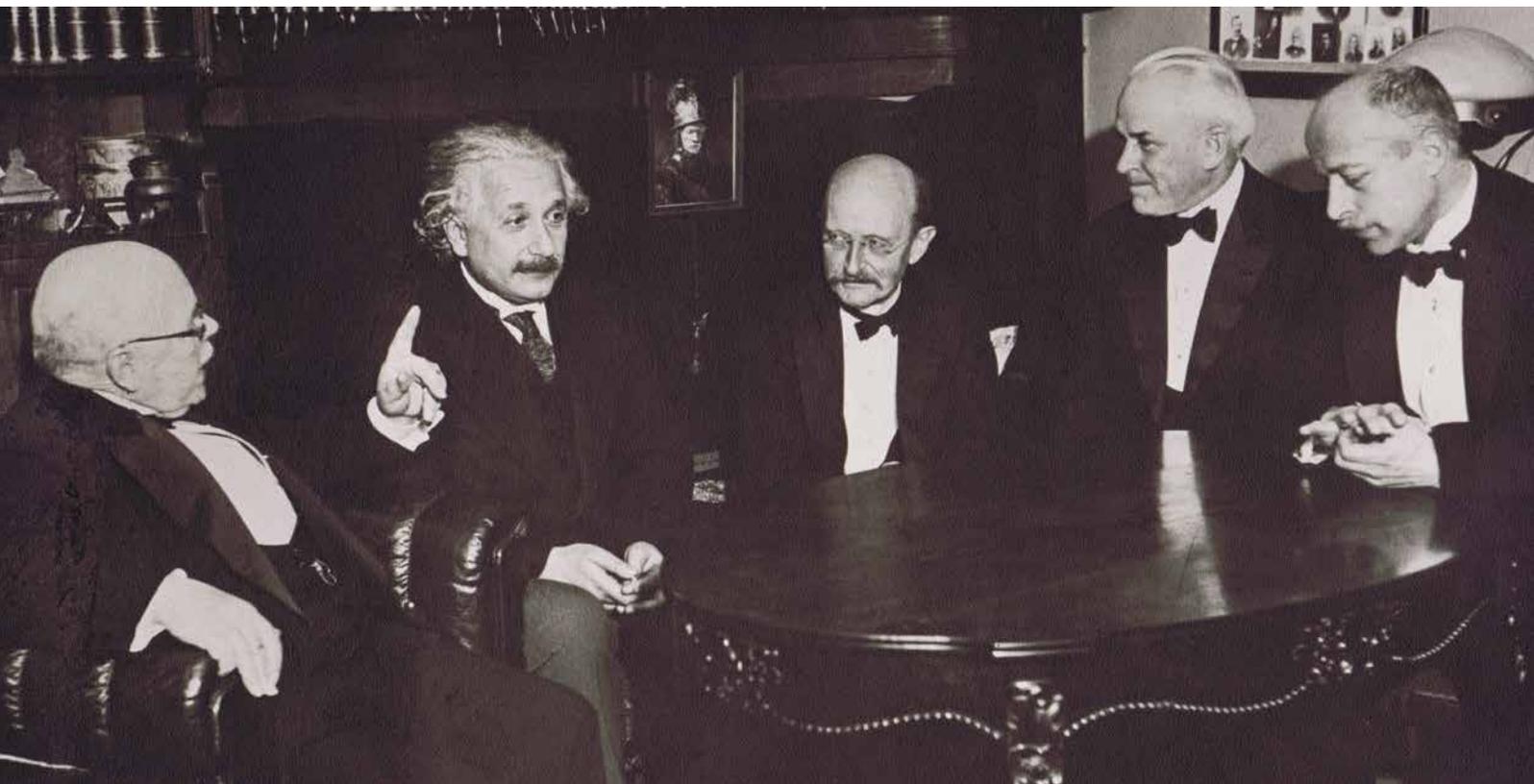
*Leitgedanke der Forschung am
Max-Planck-Institut für Physik*



100 Jahre MAX-PLANCK- INSTITUT FÜR PHYSIK

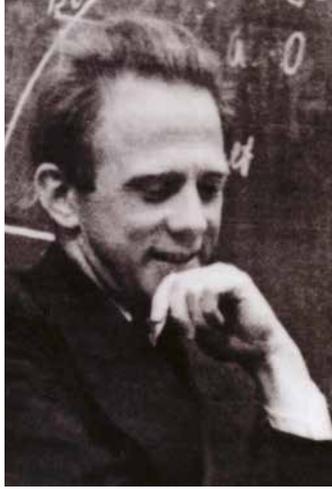
06

DIE GRÜNDUNG unter dem Namen »Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik« fiel noch in den Ersten Weltkrieg. Sein Quartier schlug das Institut im Wohnzimmer von Albert Einstein auf, bevor es 1937 ein eigenes Gebäude in Berlin-Dahlem bezog. Das Forschungsprogramm war mit Relativitätstheorie, Quanten-, Kern-, Tieftemperatur- und Hochspannungsphysik breit gefächert. 2017 setzt das Max-Planck-Institut (MPI) für Physik seinen Schwerpunkt auf Teilchen- und Astroteilchenphysik.





1 Das Kaiser-Wilhelm-Institut für Physik in Berlin



2 Werner Heisenberg als junger Mann



3 Der schwedische König überreicht Heisenberg den Nobelpreis

01.10.1917

Gründung des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik, Berlin. 1
Direktor: Albert Einstein (bis 1933).

09.11.1922

Albert Einstein erhält den Nobelpreis für Physik für seine Verdienste um die theoretische Physik.

1932 (verliehen 1933)

Werner Heisenberg 2, damals Professor an der Universität Leipzig, erhält den Nobelpreis für Physik. 3

1936/37

Neubau des Instituts in Berlin-Dahlem.
Direktor: Peter Debye.

1939

Unterstellung unter das Heereswaffenamt (Uran-Forschung mit dem Ziel, Einsatzmöglichkeiten für die Kernspaltung zu erforschen).

Albert Einstein

Links:
Im Kreis von Kollegen am 11. November 1931 in Berlin (von links: Walther Nernst, Albert Einstein, Max Planck, Robert Millikan, Max von Laue)

1917

Vorhandene grundlegende Theorien:

Elektrodynamik, Relativitätstheorie

Bekannte Teilchen:

Protonen, Elektronen

Weltbild der Kosmologie:

Planeten, Sterne, Galaxien, Annahme eines statischen Weltraums

1920 – 1940

Vorhandene grundlegende Theorien:

- Quantenmechanik (Heisenberg 1923)
- Existenz des Neutrinos (Pauli 1930)
- Theorie des radioaktiven Betazerfalls wegen schwacher Wechselwirkung (Fermi 1934)

Bekannte Teilchen:

Neutronen (Chadwick 1932), Myonen, Positronen, Pionen (Anderson 1932/36)

Weltbild der Kosmologie:

Expandierendes Weltall (Friedmann 1922, Lemaître 1927, Hubble 1929)



4 Nach der Kapitulation Deutschlands durchsuchen alliierte Streitkräfte den Forschungsstandort Haigerloch



5 Werkshalle im Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen



5 Mitarbeiterin beim Auswerten von Teilchenkollisionen

1942

Der Versuch, Uran 235 als Spaltstoff für eine Atombombe anzureichern, wird aufgegeben. Rückgabe des Instituts an die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (s. Kasten); Werner Heisenberg wird Direktor.

1943 – 1945

Verlagerung von Teilen des Instituts nach Hechingen und Haigerloch.

April/Mai 1945

Besetzung durch amerikanische und sowjetische Truppen. 4 Verlust von Geräten und der Bibliothek; Internierung von Direktoren und einigen Institutsmitgliedern.

1946

Neubau und Neueröffnung als Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen 5, Werner Heisenberg erneut Direktor. Erstmals zwei Abteilungen: für theoretische Physik (Leitung: Carl Friedrich von Weizsäcker) und experimentelle Physik (Leitung: Karl Wirtz).



Niels Bohr und Werner Heisenberg 1924

1933 – 1945

Welche Rolle spielte Werner Heisenberg im Uranprogramm des Dritten Reichs?

Zusammen mit anderen Wissenschaftlern, darunter Otto Hahn und Carl Friedrich von Weizsäcker, wurde Werner Heisenberg in das Heereswaffenprogramm berufen. Im dort initiierten Uranprojekt sollten die Forscher Einsatzmöglichkeiten für die Kernspaltung prüfen – wobei die Entwicklung einer Atombombe sicherlich im Vordergrund stand.

Der Versuch, Uran 235 anzureichern und damit »kritisch« zu machen, wurde 1942 aufgegeben. Allerdings existieren unterschiedliche Deutungen, wie es dazu kam: Einige Wissenschaftshistoriker sind davon überzeugt, dass Heisenberg das Uranprojekt bewusst verschleppte, um dem Nazi-Regime keine Atomwaffen an die Hand zu geben. Anderen Autoren zufolge scheiterte die Gruppe um Heisenberg schlichtweg an der Aufgabe. Zum Thema

»Nuklearwaffen« führte Heisenberg mit seinem dänischen Freund und Mentor Niels Bohr 1941 mehrere Gespräche. Außerdem schrieb Bohr zwischen 1950 und 1960 mehrere Briefe an Heisenberg, schickte diese aber nie ab. Auch das Studium dieser Quellen lässt keine abschließende Bewertung der Rolle Heisenbergs im Uranprojekt zu.

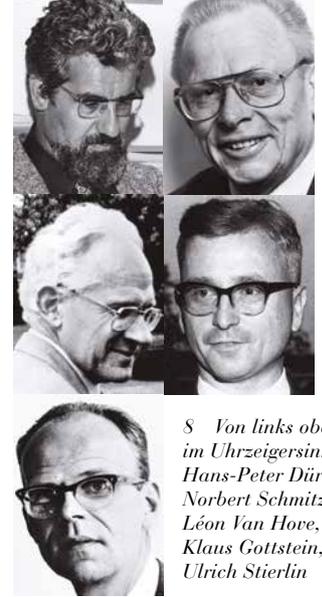
Klaus Gottstein, emeritiertes wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Instituts für Physik und langjähriger Wegbegleiter Heisenbergs, führt in seinem Artikel »Werner Heisenberg and the German Uranium Project (1939 – 1945). Myths and Facts« die wichtigsten Fragen und Antworten aus. Der Text ist auf www.heisenberg-gesellschaft.de veröffentlicht. Dort finden sich weitere Verweise auf biografische Werke.



6 Das neue Gebäude des Max-Planck-Instituts für Physik



7 Raketen vom Typ Centaur transportierten wissenschaftliche Instrumente in den Weltraum



8 Von links oben im Uhrzeigersinn: Hans-Peter Dürr, Norbert Schmitz, Léon Van Hove, Klaus Gottstein, Ulrich Stierlin

01.09.1958

Umzug nach München als Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik. 6 Direktor: Werner Heisenberg (emeritiert 1970).

28.06.1960

Ausgründung des selbstständigen Instituts für Plasmaphysik als GmbH.

1963

Gründung des Instituts für extraterrestrische Physik: Erforschung der Physik des Weltraums mithilfe von Ballons, Sonden und Satelliten. 7

01.10.1971

Erstmals leitet ein Direktorium aus mehreren wissenschaftlichen Mitgliedern das Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik. 8

Oktober 1979

Das Institut für Astrophysik zieht nach Garching um.

1990

Julius Wess, Begründer der Supersymmetrie, wird ans Max-Planck-Institut für Physik berufen.

1940 – 1960

Vorhandene grundlegende Theorien:

- Paritätsverletzung in schwacher Wechselwirkung (Lee, Wang, Wu 1956/57)
- Dunkle Materie (Zwicky)
- Nukleosynthese (Entstehung von Kernen, z. B. Helium, Lithium) im Universum

Bekannte Teilchen:

Kaonen, Lambda-Teilchen – Prägung des Begriffs »Teilchenzoo«

Weltbild der Kosmologie:

Urknall-Theorien zur Entstehung des Universums (Gamov, Bethe)

1960 – 1980

Vorhandene grundlegende Theorien:

- Entwicklung des Standardmodells der Teilchenphysik (Glashow, Salam, Weinberg) – Ordnung im Teilchenzoo!
- Quarkmodell
- Quantenchromodynamik

Bekannte Teilchen:

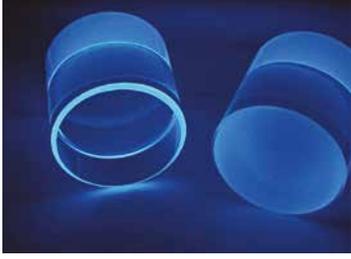
Quarks (up, down, strange, charm, bottom), Leptonen, Vektorbosonen (W, Z), Gluon als Austauschteilchen der starken Wechselwirkung

Weltbild der Kosmologie:

Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung (»Echo des Urknalls«, Penzias, Wilson 1964)

April 1991

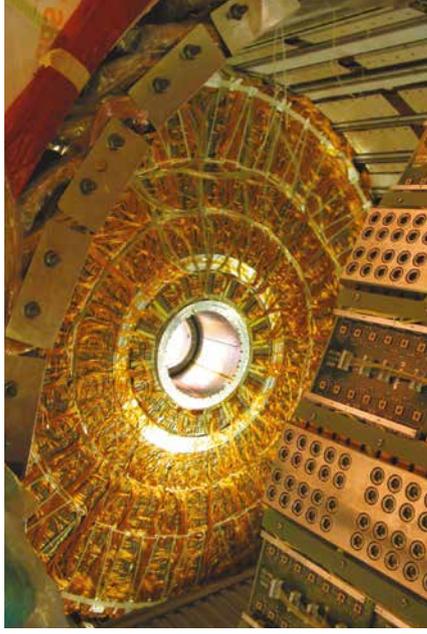
Teilung in drei selbstständige Institute: »Max-Planck-Institut für Physik« (Werner Heisenberg Institut, München), »Max-Planck-Institut für Astrophysik« und »Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik« (Garching)



9 CRESST setzt auf Kristalle aus Kalziumwolframat, um Dunkle-Materie-Teilchen nachzuweisen

1996

Das CRESST-Experiment ⁹ zur Suche nach Dunkler Materie startet.
Heutige Leitung: Direktor Masahiro Teshima.



10 Der ATLAS-Detektor am CERN

1999

Das MPI für Physik tritt dem ATLAS-Experiment ¹⁰ am CERN bei. Leitung: Direktor Siegfried Bethke.

2002

Einrichtung der Abteilung für Phänomenologie.
Leitung: Direktor Wolfgang Hollik.



11 Reinraum-Labor am MPI für Physik: Montage einer Komponente für das GERDA-Experiment

2003

Mit Dieter Lüst als Direktor wird das Forschungsgebiet der Stringtheorie am MPI für Physik verankert. Das erste der beiden MAGIC-Teleskope wird eingeweiht – das zweite folgt 2009.
Leitung: Direktor Masahiro Teshima.

1980 bis heute

Vorhandene grundlegende Theorien:

- Präzise Berechnung der Teilchen des Standardmodells
- Entwicklung der Stringtheorie
- Entwicklung der Supersymmetrie

Bekannte Teilchen:

Top-Quark als bisher letztes Mitglied der Quarkfamilie, Higgs-Boson

Weltbild der Kosmologie:

- Nachweis der beschleunigten Ausdehnung des Universums
- Bestandteile des Kosmos: 5% uns bekannte Materie, 25% Dunkle Materie, 70% Dunkle Energie
- Strukturbildung des Universums
- Inflation nach dem Urknall
- Nachweis der von Einstein postulierten Gravitationswellen

2004

Start des GERDA-Experiments ¹¹ zum Nachweis des neutrinolosen Doppelbetazerfalls. Leitung: Direktor Allen Caldwell.

2006

Das MPI für Physik nimmt die Entwicklung hochreiner Germaniumdetektoren (GeDet) auf. Leitung: Direktor Allen Caldwell.

2008 und 2009

Das Institut wird Mitglied im Belle-II-Forschungsverbund, der die Erforschung des Ungleichgewichts von Materie und Antimaterie zum Ziel hat. ¹² Leitung: Direktor Allen Caldwell.

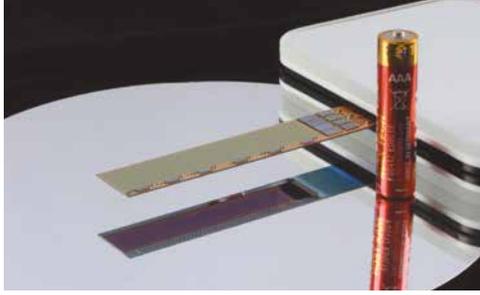
Giorgi Dvali wird Direktor am MPI für Physik und etabliert das Forschungsgebiet Teilchenphysik und Kosmologie.

2012

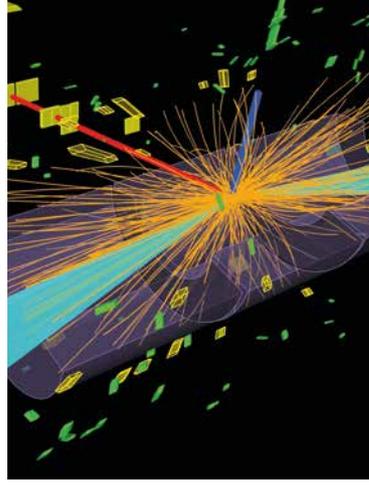
Entdeckung des Higgs-Teilchens, an der das MPI für Physik mit dem ATLAS-Experiment ¹³ maßgeblich beteiligt war. Mit AWAKE ¹⁴ initiiert das MPI für Physik eine Kooperation zur Entwicklung einer neuen Beschleunigungstechnologie. Leitung: Direktor Allen Caldwell.

2016

Das MPI für Physik startet das Projekt MADMAX für die Axionforschung und richtet eine neue Arbeitsgruppe für Neutrino-Physik ein. Leitung: Direktor Allen Caldwell.



12 Siliziumchip für den Pixeldetektor, der am Institut für Belle II entwickelt wird



13 Higgs-Boson-Zerfall im ATLAS-Detektor



14 Kernstück des AWAKE-Experiments: die zehn Meter lange Plasmazelle

Zukunft

Niemand vermag zu sagen, wann und auf welchem Gebiet der nächste Durchbruch in der Teilchenphysik kommt. An offenen Themen herrscht kein Mangel: Die Natur der Dunklen Materie, die Rätsel der Neutrino-Physik oder die gemeinsame Theorie für alle Naturkräfte, um nur einige zu nennen.

Viele Experimente haben ihr Potenzial noch nicht ausgeschöpft: Ab dem Jahr 2025 wird zum Beispiel ein Upgrade des Large Hadron Collider (LHC) weitaus mehr Daten als heute liefern, möglicherweise verbergen sich darin die bisher vergeblich gesuchten Teilchen der Supersymmetrie.

Und wenn nicht? Physiker gewinnen trotz allem viele Erkenntnisse, mit denen Theorien permanent verfeinert und an neues Wissen angepasst werden. Auf der experimentellen Seite gibt es genügend Ideen für neue Projekte – mehr dazu auf Seite 42.

FORSCHEN *auf der* GANZEN WELT

12

Marie Curie, Ernest Rutherford, Albert Einstein und Werner Heisenberg zählen zu den Wegbereitern der modernen Physik. Sie forschten auf unterschiedlichen Gebieten, doch hatten sie eines gemeinsam: Ihre Erkenntnisse erzielten sie allein oder allenfalls in kleinen Arbeitsgruppen.

Das Bild des einsamen Forschers gehört der Vergangenheit an, insbesondere in der experimentellen Teilchenphysik. Um hier Forschungsziele zu verwirklichen, bedarf es aufwendiger, teils mächtiger Apparaturen: etwa für Teilchenbeschleuniger, Teleskope oder Instrumente zum Nachweis seltener Zerfälle.

Solche Projekte erfordern enorme intellektuelle und finanzielle Ressourcen. Physiker schließen sich daher mit Partnern zusammen, häufig zu GROSSEN INTERNATIONALEN FORSCHUNGSVERBÜNDEN. Das Max-Planck-Institut für Physik ist an 13 derartigen Kooperationen beteiligt, deren Standorte weltweit verteilt sind. Dass Teamarbeit zum Erfolg führt, zeigt das Beispiel von ATLAS: Am Bau des riesigen Detektors arbeiteten 3.200 Wissenschaftler aus 38 Ländern mit.



1 Atacama-Wüste

C T A

KATRIN

GEDET, MADMAX

ATLAS, AWAKE, CLIC

CRESST, GERDA

2 La Palma

CTA, MAGIC

4 Karlsruhe
5 München
3 Genf
6 Gran Sasso

7 Tsukuba

ATLAS (3)
AWAKE (3)
Belle II (7)

CERN, Genf, Schweiz
CERN, Genf, Schweiz
KEK-Forschungszentrum,
Tsukuba, Japan

CALICE

internationaler Forschungs-
verbund (17 Nationen,
57 Forschungseinrichtungen,
noch kein Beschluss über
künftigen Standort)

CLIC (3)
CRESST (6)

CERN, Genf, Schweiz
Laboratori Nazionali del
Gran Sasso, Italien

CTA (1,2)

Observatorio del Roque de los
Muchachos, La Palma, Spanien,
und Paranal-Observatorium,
Atacama-Wüste, Chile

GeDet (5)

Max-Planck-Institut für Physik,
München, Deutschland

GERDA (6)

Laboratori Nazionali del
Gran Sasso, Italien

ILC

internationaler Forschungs-
verbund (35 Nationen,
mehrere hundert Forschungs-
einrichtungen, noch kein
Beschluss über Standort)

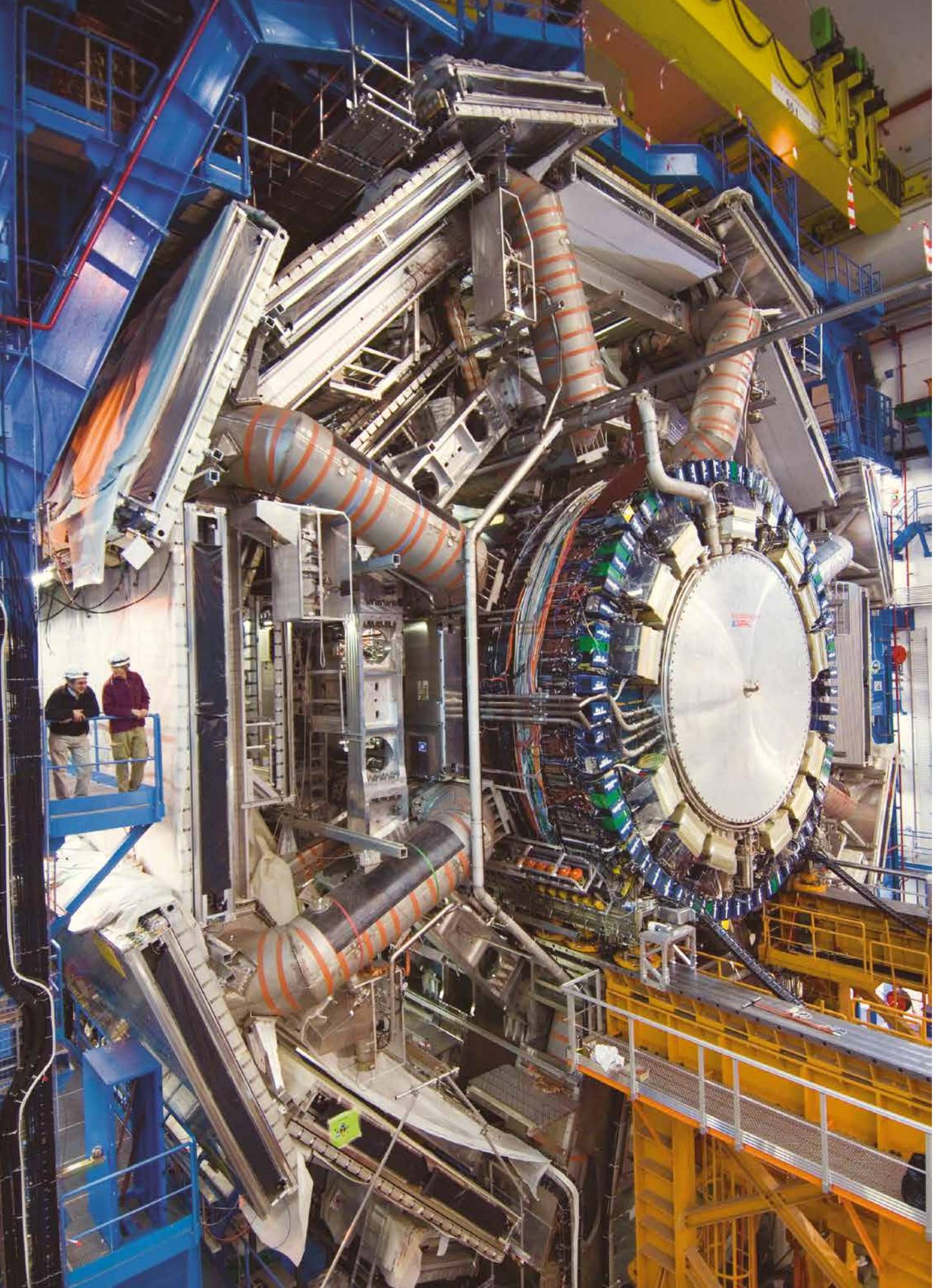
KATRIN (4)
MADMAX (5)

Karlsruhe, Deutschland
Max-Planck-Institut für Physik,
München, Deutschland

MAGIC (2)

La Palma, Spanien

BELLE II



TEILCHEN auf TOUREN

Warum gibt es Galaxien, Sterne, Planeten – und uns?
Physiker sehen hier ein ausgeklügeltes Zusammenspiel von
Naturgesetzen, die jedoch noch nicht komplett verstanden sind.
Mithilfe von [TEILCHENBESCHLEUNIGERN](#) versuchen sie,
dem Universum einige seiner Geheimnisse zu entlocken.

ATLAS-Detektor: Physik bei höchsten Energien

*Links:
Die größte je von
Menschen gebaute
Maschine sucht in
Teilchenzerfällen
nach Hinweisen
auf Neue Physik,
zum Beispiel nach
supersymmetrischen
Teilchen.*

Präzise Spuren- auslese mit dem Belle-II-Detektor

*Rechts:
Belle II untersucht
die Teilchenzerfälle,
die nach der Kollisi-
on von Elektronen
und Positronen
auftreten. Ziel ist es,
die Ursache für das
Materie-Antimaterie-
Ungleichgewicht
zu finden.*

Vor knapp 14 Milliarden Jahren begann das Universum in einem Urknall. Physiker lassen nichts unversucht, die Zeit zurückzudrehen und den Urknall im Miniaturformat zu wiederholen. Die größte Zeitmaschine ist der Beschleuniger LHC am CERN in Genf. Er schießt Protonen aufeinander und erzeugt für Sekundenbruchteile einen Zustand wie unmittelbar nach dem Urknall. 2012 vermeldeten die Physiker am CMS-Detektor und am 7.000 Tonnen schweren ATLAS-Detektor einen großen Erfolg: die Entdeckung des Higgs-Teilchens, mit dem das Standardmodell der Teilchenphysik komplettiert wird.

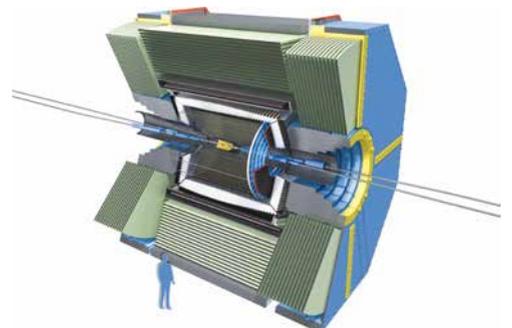
Bei ATLAS sind Forscher des Instituts seit den ersten Planungen vor 25 Jahren federführend beteiligt. Aus München stammen Konzeption und wesentliche Teile für einige Schlüsselkomponenten: den hochpräzisen Innendetektor, der den Weg der »Splitter« aus der Kollision verfolgt, für die Kalorimeter, die die Energien der Teilchen bestimmen, und für das Myonspektrometer, das nach speziellen Zerfallsprodukten sucht.

Fast so beeindruckend wie ATLAS sind die Computer, die in einer klimatisierten Halle die Signale nach interessanten Spuren durchforsten. Nach dem Fund des Higgs-Teilchens konzentriert sich die Suche in Zukunft vor allem auf die Supersymmetrie. Dabei geht es um Elementarteilchen, die viel schwerer sind als die bisher bekannten. Nach schrittweisen technischen Aufrüstungen sollte der LHC spätestens 2025 ausreichend Protonen zur Kollision bringen, um solche Teilchen in genügender Anzahl zu erzeugen.

Doch sicher ist das keineswegs: Vielleicht sind die supersymmetrischen Teilchen so schwer, dass sie selbst der LHC nicht zustande bringt und der

ATLAS-Detektor folglich auch nicht finden kann. Dann sind wieder die Theoretiker mit neuen Ideen für neue Experimente gefragt. Denn für den Bau eines noch größeren Teilchenbeschleunigers bedarf es einer konkreten physikalischen Motivation.

Ein weiteres Rätsel aus der Anfangszeit des Universums: Warum existiert im Universum nur Materie, aber keine Antimaterie? Denn eigentlich sollten beide beim Urknall zu exakt gleichen Anteilen entstanden sein und sich rasch gegenseitig vernichtet haben. Doch dann gäbe es uns nicht. Ein Schlupfloch könnte die sogenannte CP-Verletzung sein. Sie besagt, dass Teilchen und Antiteilchen doch nicht so symmetrisch sind, wie man anfangs dachte. Diese Asymmetrie könnte die Ursache sein, warum nach dem Urknall mehr Materie als Antimaterie übrig blieb. Dass die CP-Verletzung existiert, weiß man seit Langem. Man kann sie zum Beispiel präzise in Beschleunigerexperimenten nachweisen, in denen Elektronen und ihre Antiteilchen, die



Positronen, aufeinanderprallen. Dabei entstehen Paare von B-Mesonen und ihre Antiteilchen, eine Teilchensorte, an denen sich dieser Effekt gut nachweisen lässt. Mit dem Experiment Belle I am KEKB-Beschleuniger in Japan haben die Physiker jede Menge Daten gesammelt, die diese Theorie untermauern.

Die bisher beobachtete CP-Verletzung reicht leider nicht aus, um die Existenz unseres materie-dominierten Universums zu erklären. »Es gibt Spannungen in den alten Daten von Belle I und es ist unausweichlich, dass es jenseits des Standardmodells Neue Physik gibt«, sagt Prof. Dr. Christian Kiesling, Sprecher des Belle-Teams. Das Max-Planck-Institut für Physik beteiligt sich deshalb am Nachfolgeexperiment Belle II, das 2018 in Betrieb gehen soll. Derzeit wird der Beschleuniger zum Super-KEKB nachgerüstet und mit dem neuen

Detektor ausgestattet. Im Herzen von Belle II lauert eine äußerst sensitive Präzisionskamera auf die B-Mesonen, etwa 1.000 von ihnen entstehen hier pro Sekunde und zerfallen sofort wieder. Dieser in München entwickelte »Pixel-Vertex-Detektor« zeichnet auf zehntausendstel Millimeter genau auf, welche Wege die Kollisionsspuren nehmen. Daraus berechnen schnelle Computerprogramme den genauen Ort, wo die B-Mesonen und ihre Antiteilchen zerfallen sind.

ATLAS und Belle II haben das Potenzial, die Grenzen des Wissens hinauszuschieben. Einen Konkurrenzkampf zwischen den Teams gebe es dabei nicht, sagt Christian Kiesling: »Wir drücken unseren ATLAS-Kollegen die Daumen, denn nur wenn mehrere unabhängige Experimente fündig werden, können wir unserer Sache sicher sein.« *

Magische MONSTER

Gammastrahlen sind die energiereichsten elektromagnetischen Wellen. Im Universum entstehen sie überall dort, wo hohe Energien im Spiel sind, also zum Beispiel bei Sternexplosionen oder im Umfeld von aktiven Schwarzen Löchern im Zentrum von Galaxien. Die MAGIC-Teleskope **FANGEN GAMMASTRAHLEN AUF** – und gewähren so einen tiefen Blick ins Universum.

MAGIC: Blicke ins unbekannte Universum

Eines der beiden MAGIC-Teleskope, die auf La Palma Himmelsobjekte ins Visier nehmen, die energiereiche Gammastrahlen aussenden.

Der Himmel ist blau, die Blätter grün und die Banane gelb: Die Wahrnehmung von Farben ist eine der faszinierendsten Sinnesleistungen. Dabei sehen unsere Augen nur in einem winzigen Spektralbereich überhaupt etwas, für alle anderen Bereiche sind sie blind: Dies gilt auch für Gammastrahlen, die milliardenfach energiereicher sind als das sichtbare Licht. Doch gerade für solche »Farben« interessieren sich die Astrophysiker besonders. Denn diese Strahlung entsteht im Universum, wo enorme Materie- und Energiemengen in Bewegung sind. Sie lassen sich nur mit empfindlichen Teleskopen empfangen. Zum Beispiel mit den beiden MAGIC-Teleskopen (Major Atmospheric Gamma-Ray

Imaging Cherenkov Telescopes), die unter der Leitung des Max-Planck-Instituts für Physik auf der Kanareninsel La Palma errichtet wurden.

Tritt Gammastrahlung aus dem All in die Erdatmosphäre, rempelt sie dort Atome an, in zehn bis fünfzehn Kilometer Höhe entstehen dabei in wenigen milliardstel Sekunden leichtere Elementarteilchen, die schneller als das Licht zur Erde rasen und dabei eine Art Überlichtknall aussenden – die sogenannte Tscherenkov-Strahlung. Dieser Lichtkegel am Himmel beleuchtet einen Kreis von rund 500 Meter Durchmesser auf der Erdoberfläche. Die beiden MAGIC-Teleskope fangen einen Teil dieses Lichts mit ihren 17 Meter großen



Roque de los Muchachos – Gipfel der Observatorien

Auf der höchsten Erhebung der Kanareninsel La Palma herrschen ideale Beobachtungsbedingungen. Das MAGIC-Teleskop ist nur eines von insgesamt über einem Dutzend Observatorien auf dem 2.426 Meter hohen Berg.

Sammelspiegeln auf und messen es mit empfindlichen Kameras, die wenige Nanosekunden dauernde Aufnahmen schießen. Aus der Helligkeit und der Verteilung des Lichts rekonstruieren die Astrophysiker, woher die Gammastrahlung kam, ihre Energie und was die Quelle war.

Die Gammastrahlenastronomie ist eine junge Disziplin, die erst 1989 mit der Beobachtung des Krebsnebels im Sternbild Stier Fahrt aufnahm und seit den 2000er-Jahren boomt, vor allem dank des Baus des ersten MAGIC-Teleskops 2003 sowie vergleichbarer Teleskope wie H.E.S.S. in Namibia (2002) und VERITAS in den USA (2007). Waren in den 1990ern im Universum nur sechs Quellen für Gammastrahlen bekannt, wuchs ihre Zahl mit den neuen Teleskopen rasch. Heute kennen die Astrophysiker rund 200 Quellen und ständig kommen neue hinzu.

MAGIC nimmt unter den Gammastrahlenteleskopen eine führende Rolle ein – es ist derzeit das weltgrößte Tscherenkov-Stereo-Teleskop. Je größer der Spiegel, mit dem das Tscherenkov-Licht aufgefangen wird, umso größer die Empfindlichkeit für Licht niedriger Energie. Auch der Aufbau mit zwei Teleskopen in 85 Meter Abstand hat Vorteile, weil man störende Untergrundsignale von den echten Signalen trennen und die Richtung der eintreffenden Strahlung genauer bestimmen kann. So ist MAGIC das einzige Tscherenkov-Teleskop, das Spektren mit Energien unter 50 Gigaelektronenvolt (GeV) aufgezeichnet hat. Das ist wichtig, um Objekte wie Pulsare oder weit entfernte Blazare zu studieren, die Gammastrahlen mit maximal einigen zehn Gigaelektronenvolt aussenden. Blazare sind supermassive Schwarze Löcher, die magnetisierte Materie schlucken, dabei entsteht Gammastrahlung. Doch unterwegs bleiben energiereiche Gammastrahlen

eher auf der Strecke, sodass man entfernte Blazare nur mit einem sehr empfindlichen Teleskop für energieärmere Strahlen sehen kann. MAGIC hat bereits zwei Blazare entdeckt, die sieben Milliarden Lichtjahre entfernt sind. Die von ihnen ausgesandte Gammastrahlung stammt also aus einer Zeit, als das Universum halb so alt war wie heute. »Mit MAGIC können wir Archäologie betreiben und sehen, wie das Gammastrahlen-Universum früher aussah«, sagt Dr. David Paneque, Physikkoordinator der MAGIC-Kollaboration.

Die aktuellen Tscherenkov-Teleskope haben die Astronomie mit energiereichen Gammastrahlen in den letzten 15 Jahren erfolgreich etabliert. Jetzt wollen die Wissenschaftler den nächsten Schritt machen und gemeinsam ein CTA (Cherenkov Telescope Array) bauen. Es wird zehnfach so empfindlich sein wie die aktuellen Observatorien. Zudem soll es niedrige Energien von 20 GeV genauso abdecken wie hohe Energien über 300 Teraelektronenvolt. Durch diesen enormen Fortschritt wird sich die Zahl der bekannten Höchstenergie-Gammaquellen von Hunderten auf Tausende erhöhen, das erlaubt detaillierte Studien solcher Quellen.

CTA wird aus zwei Observatorien bestehen. So kann es größere Himmelsregionen beobachten und ein umfassenderes Bild von den extremen Gammastrahlenquellen im Universum liefern. Das Observatorium im Norden wird am Standort von MAGIC auf La Palma gebaut, das südliche Observatorium entsteht in den nächsten Jahren in der chilenischen Atacama-Wüste. Auf La Palma hat der Bau des ersten großen Teleskops mit 23-Meter-Spiegel bereits begonnen. Wenn dieses Teleskop 2018 seinen Betrieb aufgenommen hat, werden weitere Teleskope dazukommen. *



Die MATHEMATIK des UNIVERSUMS

OHNE EXPERIMENT KEINE THEORIE – OHNE THEORIE KEIN EXPERIMENT.

Theoretische Physiker entwickeln Modelle, um experimentell bekannte Fakten im Rahmen mathematisch formulierter Gesetzmäßigkeiten zu verstehen und neue Zusammenhänge vorherzusagen. Wenn das gelingt, kann der nächste Schritt folgen: der Versuch, die mathematisch gefundenen Vorhersagen im Experiment nachzuweisen.



Die Kaffeeküche

Ohne (guten!) Kaffee läuft nichts in der theoretischen Physik. Die Kaffeeküche ist daher ein wichtiger und gut frequentierter Ort am Institut – mit riesiger Tafel, an der die Wissenschaftler ihre Ideen entwickeln und diskutieren können.

Am 10. April 2014 brach für viele Physiker eine Welt zusammen. In Episode 155 der TV-Serie »The Big Bang Theory« gab Physikgenie und Nervensäge Dr. Sheldon Cooper bekannt, sich in Zukunft nicht mehr mit der Stringtheorie beschäftigen zu wollen. Er haderte mit der Aussicht, dass diese Theorie vielleicht nie bewiesen werden kann. Coopers Zweifel sind verständlich – und doch unberechtigt, denn die Aufgabe eines theoretischen Physikers ist es gerade, die Welt mit Formeln zu erklären, auch wenn ein experimenteller Beweis noch fern sein mag.

Theoretische Physiker empfinden es als ein Geschenk, wie nah man mit Mathematik den Gesetzen der Natur kommen kann. Rund 50 von ihnen arbeiten am Max-Planck-Institut für Physik, wo sie eng mit ihren Kollegen aus der Experimentalphysik zusammenarbeiten. Die Theoretiker berechnen die »Statik« und legen Begrenzungen für ein neues theoretisches Modell fest. Erst wenn dieses Modell in sich schlüssig ist und die Fachwelt überzeugt hat,

$\mu + 4e = 0.618$
 $2e2\mu = 0.617$

$1 + \frac{p_{11}^2}{2^2}$

adding l^+l^-
 bleading e^+e^-
 ally lepton
 bleed

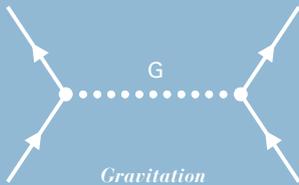
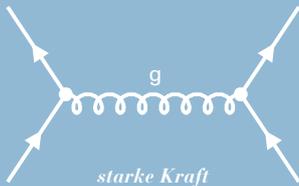
$\sigma(pp \rightarrow h) \sim 15 \text{ pb}$
 I get + 13 pb
 $\mathcal{B}(h \rightarrow ZZ) = 0.02619$
 $\mathcal{B}(Z \rightarrow ee) = 0.03363$
 $\mathcal{B}(Z \rightarrow \mu\mu) = 0.03366$

$\Rightarrow 13 \text{ pb} \times 0.0262 \times (0.0336)^2 \approx 0.38 \text{ fb}$
 $\sigma_{10}(pp \rightarrow h + ee\mu\mu) \approx 0.826 \text{ fb}$

FID
 $E_T = E_{\text{sub}} - E_{\text{...}}$
 $\sigma(h, \text{prod})$
 $\sigma(h, \text{prod})$
 Story unclear
 0.383
 150.305
 $p_1^2 + p_2^2 = p^2 (\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi)$



»Die Weltformel ist nicht das alleinige Ziel – schon der Weg dorthin lohnt sich.«



Feynman-Diagramme:
Kurzschrift für Theoretiker

Mit den von dem Physiker Richard Feynman entwickelten Diagrammen lassen sich komplexe Wechselwirkungen einfach und übersichtlich darstellen. Sie liefern daher ein einfaches Bild, um Kräfte zwischen Teilchen zu veranschaulichen. Die Feynman-Diagramme oben zeigen die vier fundamentalen Kräfte des Universums: die elektromagnetische, die starke und die schwache Wechselwirkung sowie die Gravitation.

Links:
Heisenbergs Büro ist kein Museum innerhalb des Instituts – es wird auch heute noch von den Wissenschaftlern genutzt.

denken die Experimentalphysiker darüber nach, wie sie diese Theorie auf Herz und Nieren überprüfen können. Manche Projekte kommen sogar auf Anregung der Theoretiker zustande wie CRESST oder MADMAX. Beide suchen nach Dunkler Materie – in völlig unterschiedlicher Form. Die Ergebnisse von Experimenten fließen in einigen Jahren wieder in die Theorie ein, die Partner spielen eine Art Ideen-Pingpong.

Auf diese Weise hat sich das Standardmodell entwickelt, um die grundlegenden Strukturen der Materie und Kräfte im Einklang mit den Gesetzmäßigkeiten der Quantentheorie zu beschreiben. Drei der fundamentalen Wechselwirkungen – elektromagnetische, starke und schwache Kraft – werden durch die Quanten der jeweiligen Kraftfelder, die »Kraftteilchen«, als Austausch- teilchen zwischen den Materiebausteinen vermittelt. Für die Schwerkraft, die vierte fundamentale Wechselwirkung, ist eine solche mikroskopische Beschreibung bisher allerdings rein hypothetisch und theoretisch unbefriedigend.

Eines der Forschungsfelder am Institut ist die theoretische Astroteilchenphysik.

Sie ist das Bindeglied zwischen Elementarteilchenphysik und Kosmologie und untersucht systematisch den Mikrokosmos. Ein zentrales Thema sind Untersuchungen, welchen Einfluss Neutrinos auf Supernova-Explosionen haben, und was man daraus über Neutrinoeigenschaften lernen kann.

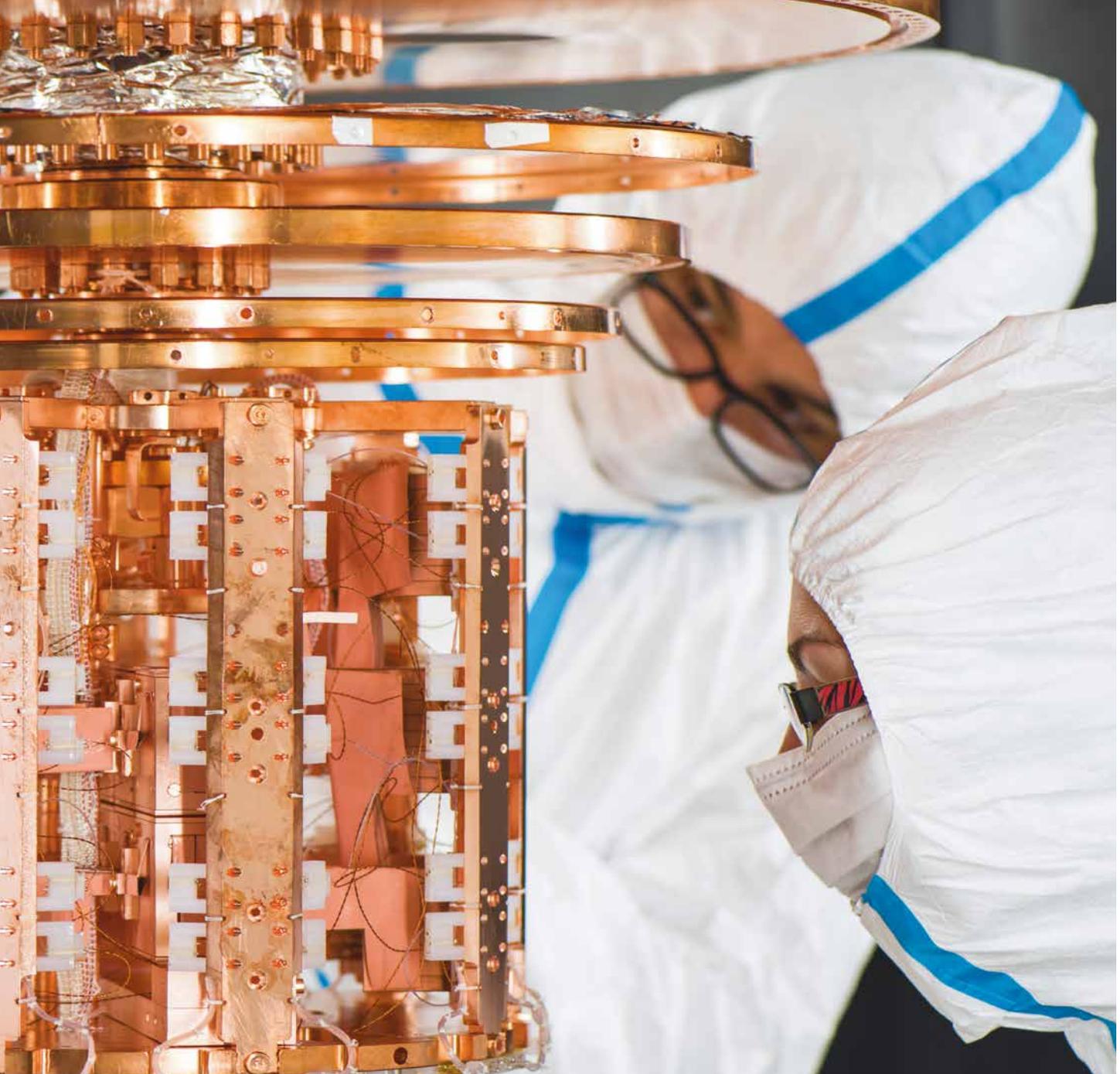
Ein weiteres Feld ist die Teilchenkosmologie: Ein Ziel der Wissenschaftler ist es das Standardmodell der Teilchenphysik zu vervollständigen und bekannte Schwachpunkte zu überwinden. Dazu zählen die Fragen, wie sich die Zahl der Quark- und Leptonfamilien, die Herkunft von Dunkler Materie und Energie und des mikroskopischen Ursprungs der Inflation erklären lassen. Die Physiker untersuchen außerdem die Quantenstruktur Schwarzer Löcher und kosmologischer Raumzeiten.

Dritte im Bunde ist die experimentennahe Phänomenologie. Die Phänomenologen erarbeiten konkrete Vorhersagen von Modellen, fügen gezielt Varianten ein und berechnen so beispielsweise, wie verschiedene Materiesorten miteinander wechselwirken und welche Spuren sie dabei im Detektor hinterlassen. Das hilft ihren Kollegen an Beschleunigerexperimenten, die Nadel im Heuhaufen zu finden. Denn die Teilchenspuren, die zum Beispiel der ATLAS-Detektor am leistungsstärksten Teilchenbeschleuniger der Welt in Genf ausspuckt, besteht zum allergrößten Teil aus Müll. Nur ganz selten taucht auf den Bildschirmen eine interessante Spur auf, etwa des Higgs-Teilchens, das 1964 schon vorhergesagt, aber erst 2012 endlich in ATLAS nachgewiesen wurde. Um den enormen Rechenaufwand bewältigen zu können, entwickeln die Phänomenologen raffinierte mathematische Methoden und komplexe Computerprogramme und erhalten heute viel präzisere Vorhersagen als vor zehn Jahren. Nicht nur weil die Computer schneller wurden, sondern weil die Physiker heute die physikalischen Wechselwirkungen und die mathematischen Strukturen besser verstehen.

Und die Stringtheorie? Sie ist die vierte und mathematischste Säule im Theoriegebäude. Sie sucht nach einer »Weltformel«, die die Theorien des Allerkleinsten – die Quantentheorie – mit der Theorie des Universums – der Gravitation – unter einem Dach vereint. Auch wenn es bis zum Erreichen dieses Ziels ein sehr weiter Weg ist, trägt die Stringtheorie bereits Früchte. In den letzten Jahren wurden bedeutende Fortschritte beim Verständnis von Gravitation und von Schwarzen Löchern erzielt. Ferner kommen die neuen mathematischen Methoden, die in dem weit verzweigten Forschungsgebiet entwickelt wurden, nun in anderen Disziplinen zum Einsatz, etwa in der Phänomenologie, in der Kosmologie, aber auch in traditionellen Disziplinen wie der Festkörperphysik.

Immer mehr zeigt sich: Die »Weltformel« ist nicht das alleinige Ziel der theoretischen Physiker, vielmehr ist schon der Weg dorthin lohnend. Egal wohin dieser Weg führt: Ein finales Theoriegebäude oder gar das Ende der Physik liegen in weiter Ferne.

*



DIE SUCHE *nach dem* UNSICHTBAREN

Kaum ein anderes Forschungsthema in der Teilchenphysik birgt so viel Faszination wie die Suche nach der [DUNKLEN MATERIE](#). Während es starke Hinweise für die Existenz dieser unsichtbaren Masse gibt, ist noch völlig unklar, woraus sie besteht.

Suche nach Dunkler Materie mit CRESST

Links: Mit dem Einbau neuer Kristall-detektoren haben Wissenschaftler das Experiment noch empfindlicher gemacht. CRESST kann jetzt auch Teilchen mit sehr geringer Masse nachweisen.

Das Axion: ein Teilchen für zwei Fragen

Rechts: Testaufbau für ein neu geplantes Experiment: Die Existenz von Axionen könnte zwei offene Probleme in der Teilchenphysik lösen – eines davon ist die Natur der Dunklen Materie.

Das Wesentliche ist für die Augen unsichtbar.« Das berühmte Zitat aus dem Buch »Der kleine Prinz« könnte auch für die Physiker gelten. Denn im Universum scheint es Dinge zu geben, die sie selbst mit den besten Teleskopen nicht beobachten können. Addiert man nämlich die gesamte Masse der sichtbaren Galaxien und Sterne, der Atome und der Moleküle, kommt man nur auf fünf Prozent der gesamten Energiedichte im Universum. Dass es fünfmal so viel Materie geben sollte, lässt sich indirekt zeigen: aus der Drehgeschwindigkeit von Galaxien oder aus der kosmischen Hintergrundstrahlung. Unsichtbare Massen scheinen an den sichtbaren zu zerrren und deren Bewegung zu beeinflussen. »Dunkle Materie« haben die Physiker sie getauft. Bleibt noch der große Rest – 70 Prozent – übrig. Die Wissenschaftler vermuten dahinter eine sogenannte Dunkle Energie.

Wie kann man die geheimnisvolle Dunkle Materie ans Licht holen? Sicher nicht mit dem Herzen allein, wie es der Fuchs dem kleinen Prinzen in Saint-Exupéry's Buch empfiehlt. Aber mit hochempfindlichen Experimenten. Eines ist CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers), das seit 1996 im Untergrundlabor im Gran-Sasso-Gebirge (Italien) nach Dunkler Materie sucht und das 2016 nach technischen Verbesserungen seine dritte Messperiode begonnen hat. Um es gleich vorwegzusagen: Gefunden hat CRESST die Dunkle Materie noch nicht, vielversprechende Messwerte haben sich allesamt als vagabundierende natürliche Radioaktivität entpuppt. Doch Aufgeben gilt nicht. Mit CRESST-III ist die Empfindlichkeit gestiegen, es könnte nun Dunkle Materie mit Massen bis herunter auf 300 Megaelektronenvolt sehen. Ob man jemals etwas finden wird?

»Das hängt davon ab, was die Natur entschieden hat«, sagt Dr. Federica Petricca, Sprecherin des CRESST-Teams.

Das Team hat seine Hausaufgaben gemacht und einen hochempfindlichen Kristalldetektor entwickelt. Wenn ein Dunkle-Materie-Teilchen auf die Atomkerne des Kristalls trifft, werden diese geringfügig weggeschubst, dabei erhöht sich dessen Temperatur minimal. Damit man diese Erwärmung messen kann, wird der Detektor auf unter minus 273 Grad Celsius gekühlt, kälter geht es kaum noch.

Und wenn auch CRESST-III nichts findet? Dann heiße das dennoch nicht, dass die Theorie von der Dunklen Materie ganz vom Tisch sei, sagt Petricca. Vielleicht sind nur die »Maschen« des Experiments zu groß und die Teilchen zu leicht. Dann könnte die Stunde von MADMAX (Magnetized Disc and Mirror Axion Experiment) schlagen. Hinter dem grimmigen Namen verbirgt sich das Konzept für ein Experiment, welches am Max-Planck-Institut für Physik entwickelt

wurde und mit internationalen Partnern geplant wird. Standort und Starttermin stehen noch nicht fest. MADMAX könnte empfindlich auf Axionen sein, hypothetische Teilchen, die ein Phänomen erklären könnten, das auf Symmetrien zwischen Materie und Antimaterie beruht. Wenn Axionen existieren, wären sie auch ein Kandidat für die Dunkle Materie. Allerdings wären sie sehr leicht: zwischen einem Nano- und tausend Mikroelektronenvolt – wohl noch deutlich leichter als Neutrinos also, die bisher leichtesten Teilchen. MADMAX könnte Axionen schon ab wenigen zehn Mikroelektronenvolt »wiegen«.

Die Physiker wollen zur Messung eine besondere Eigenschaft des Axions ausnutzen. In einem Magnetfeld besitzt es ein elektrisches Feld – es gleicht damit Lichtteilchen, Photonen genannt. Am Übergang zwischen nicht elektrisch leitenden Medien – zum Beispiel zwischen Luft und Kunststoff – wird dieses Feld gebrochen und es entsteht Mikrowellenstrahlung. Deren Leistung ist aber so schwach, dass kein Sensor sie messen kann. Die Physiker bedienen sich eines Tricks: Sie bauen viele solche Übergänge – geplant sind 80 – hintereinander und verstärken die Mikrowellen durch Interferenz. Das Signal schaukelt sich so bis zum Hunderttausendfachen auf. Für Teilchenexperimente ist MADMAX erstaunlich klein: Die Scheiben haben nur einen Meter Durchmesser, müssen aber auf einige tausendstel Millimeter präzise positioniert werden.

Und wenn es gar keine Axionen gibt? Dr. Béla Majorovits, Projektleiter des geplanten Experiments, ist entspannt: »Ich habe da volles Vertrauen in unsere Theoretiker.« *



Doppelte IDENTITÄT

NEUTRINOS wurden 1930 von Wolfgang Pauli vorhergesagt und 1956 nachgewiesen. Zahlreiche Experimente bemühen sich seither, grundlegende Fragen zu klären, zum Beispiel: Welche Masse haben Neutrinos? Und: Sind sie ihre eigenen Antiteilchen?

24

Germaniumdetektoren für GERDA

1 Germaniumdetektoren werden zur Suche nach dem neutrinolosen Doppelbetazerfall eingesetzt. Sie haben eine empfindliche Oberfläche und werden in speziell gesäuberten Vakuumbehältern gelagert (umgebauten Schnellkochtöpfen).

Das GERDA-Experiment

2 Blick von oben in das GERDA-Experiment: Germaniumdetektoren werden in den mit flüssigem Argon gefüllten Tank gesenkt.

KATRIN – Waage für Neutrinos

3 Arbeiten am KATRIN-Experiment, das am Karlsruher Institut für Technologie entsteht. Hier soll die Masse des Neutrinos exakt bestimmt werden.

Eines der Neutrino-Experimente ist GERDA. Das »Germanium Detector Array« ist dem neutrinolosen Doppelbetazerfall auf der Spur. Bei diesem Prozess zerfallen in einem Atomkern zwei Neutronen in zwei Protonen, dabei senden sie zwei Elektronen aus – aber keine Neutrinos. Nur wenn das Neutrino identisch mit seinem Antiteilchen ist, kann dieser Prozess stattfinden. Und er würde den Physikern aus einer Verlegenheit helfen. Wären Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen, könnte dies helfen, das Überleben von mehr Materie als Antimaterie im Universum nach dem Urknall zu erklären und damit den Umstand, dass es das Universum – und uns – überhaupt gibt.

Den neutrinolosen Betazerfall in einem Experiment nachweisen zu wollen, erfordert viel Zuversicht. Schon der normale Doppelbetazerfall, bei dem zusätzlich zwei Neutrinos entstehen, ist extrem selten: Etwa hundert Milliarden Jahre dauert es, bis die Hälfte eines Stoffs auf diese Weise zerfällt. Der neutrinolose Doppelbetazerfall ist noch mindestens 10.000-mal seltener. Im Untergrundlabor im Gran-Sasso-Massiv in Italien wartet GERDA auf diese unvorstellbar seltenen Ereignisse – bisher vergebens. Dennoch ist das Experiment ein Erfolg, denn tatsächlich ist es gelungen, die 35 Kilogramm Germaniumkristalle, in denen der Zerfall stattfinden soll und die gleichzeitig das Ereignis messen sollen, extrem gut gegen natürliche Radioaktivität abzuschirmen. Dazu dient ein Tank mit flüssigem Argon, der wiederum in einem zehn Meter hohen Wassertank steht. »Wir beobachten im relevanten Bereich keine natürliche Radioaktivität«, sagt Dr. Béla Majorovits, GERDA-Projektleiter am Institut.

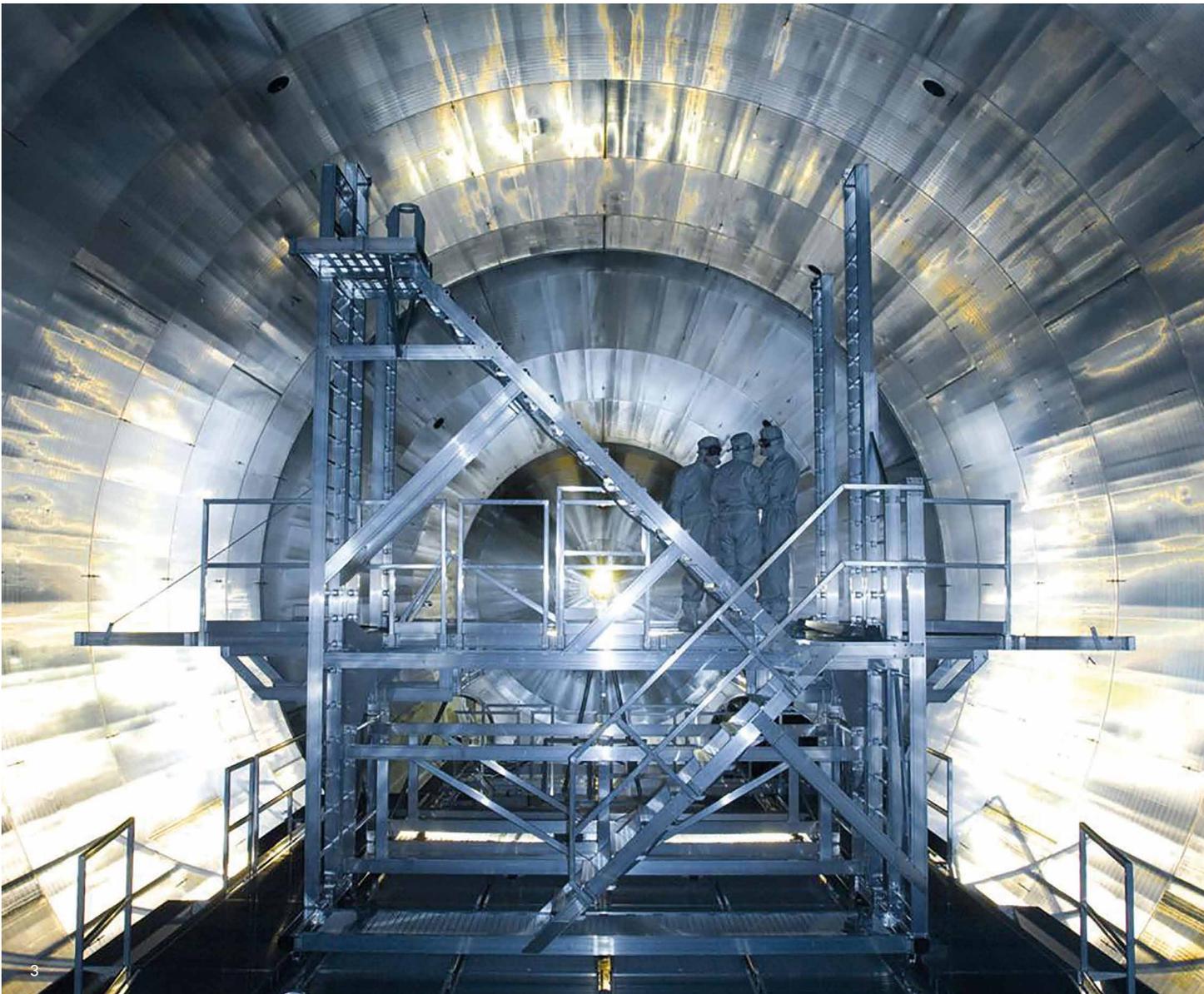
Wenn GERDA nichts findet, bietet das Nachfolgeprojekt LEGEND eine neue Chance. Es soll in einigen Jahren seine Arbeit aufnehmen, dann in mehreren Stufen mit bis zu 1.000 Kilogramm Germanium. Dafür werden die Eigenschaften von

neuartigen Germaniumdetektoren und neue Möglichkeiten ihrer aktiven Abschirmung aufs Genaueste untersucht. Mit LEGEND wird es möglich werden, neutrinolosen Doppelbetazerfall nachzuweisen, wenn die Masse der Neutrinos im theoretisch als interessant vorhergesagtem Bereich liegt. »Mit hochreinen Germaniumdetektoren können wir aber auch nach Signalen von Dunkler Materie suchen, der unsichtbaren Masse im Universum«, sagt Dr. Iris Abt, Leiterin des LEGEND-Teams.

GERDA und LEGEND sind nicht die einzigen Neutrino-Experimente, an denen das Institut beteiligt ist. Am Karlsruher Institut für Technologie geht 2017 KATRIN in Betrieb, das »Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment«, mit dem Ziel, das Neutrino zu wiegen. Nach der Entdeckung der Neutrinos dachte man zunächst, sie seien masselos. Heute weiß man, dass Neutrinos doch eine Masse haben, wenn auch eine sehr geringe. Die Neutrino-Waage bestimmt eigentlich die Energie des Elektrons, das beim Zerfall radioaktiven Tritiums entsteht. Das Neutrino, das ebenfalls im Tritiumzerfall frei wird, stiehlt dem Elektron allerdings mindestens so viel Energie, wie seiner Masse entspricht. Die Neutrinomasse lässt sich also aus der Energie schließen, die dem Elektron fehlt.

Die Physiker am Institut konzentrieren sich zum einen auf die Datenanalyse von KATRIN, zum anderen entwickeln sie mit TRISTAN (Tritium Beta Decay to Search for Sterile Neutrinos) einen neuen Detektor für KATRIN, der nach neuartigen Neutrinos – sogenannten sterilen Neutrinos – suchen soll. Der Name hat nichts mit Desinfektion zu tun, sondern bezeichnet den bisher noch nicht beobachteten rechtshändigen Partner des bekannten (immer linkshändigen) Neutrinos. Dr. Susanne Mertens, Leiterin des TRISTAN-Projekts: »Falls es sterile Neutrinos gibt – und davon gehen Theoretiker aus –, könnten sie einen großen Teil der Dunklen Materie im Universum erklären.«

*



DAS INSTITUT HEUTE *und die* PERSONEN

Fotos *Niko Schmid-Burgk*

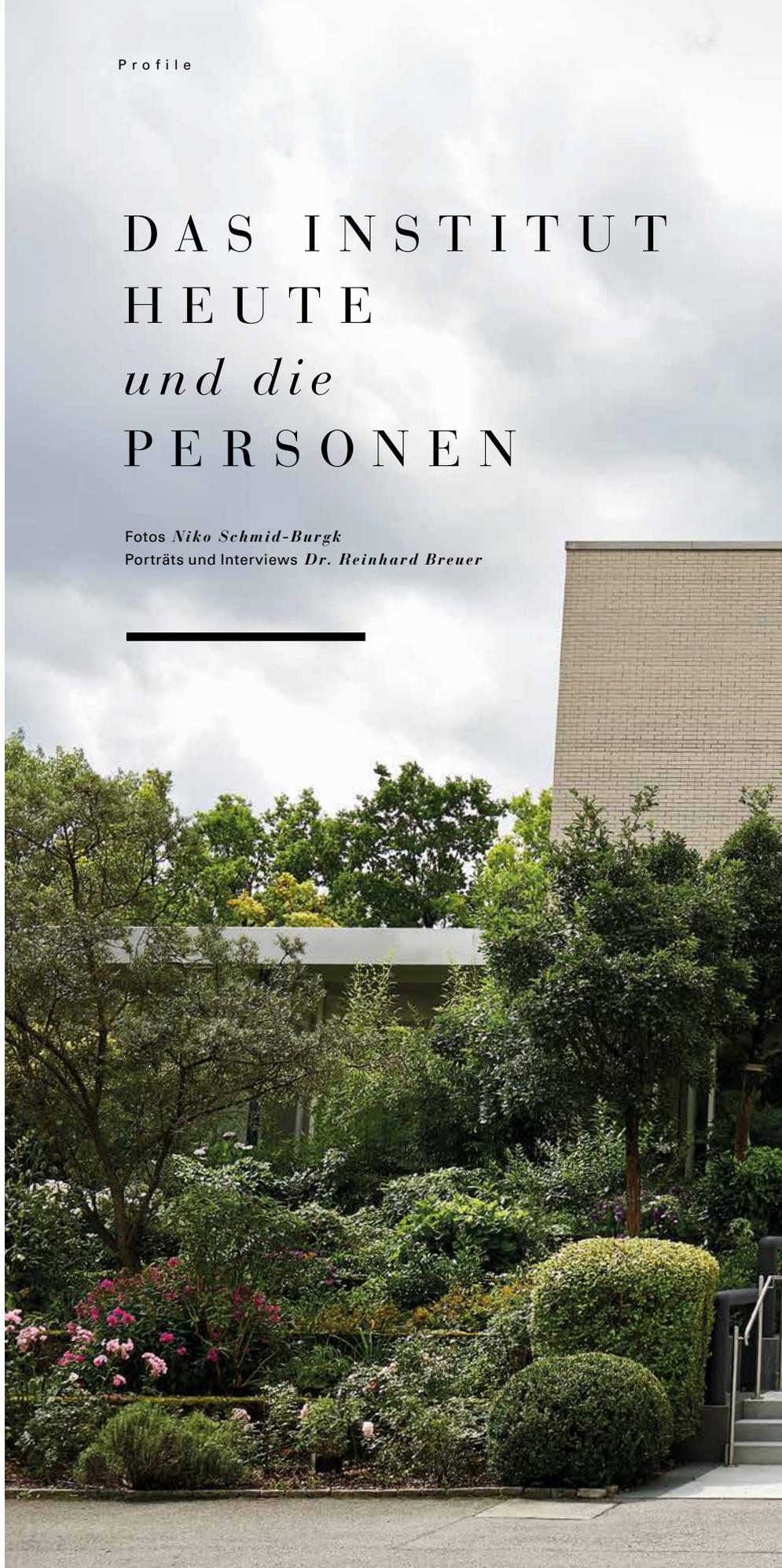
Porträts und Interviews *Dr. Reinhard Breuer*

26



Die Menschen am Max-Planck-Institut für Physik

Drei Forschungsabteilungen arbeiten in der Theorie, drei widmen sich Experimenten. Insgesamt sind am MPI für Physik 330 Mitarbeiter beschäftigt: Rund 100 Wissenschaftler und 75 Doktoranden aus verschiedenen Ländern sind mit der Forschung am Institut befasst. Dazu kommen 110 Mitarbeiter in den Bereichen Technik und Verwaltung sowie 15 Auszubildende in den Abteilungen Elektronik und Mechanik.



WISSENSCHAFT WIRD VON MENSCHEN GEMACHT – nicht von Computern, Satelliten, Teleskopen oder Teilchenbeschleunigern. Am Max-Planck-Institut für Physik ergründen Forscherinnen und Forscher Fundamentalfragen der Teilchen- und Astroteilchenphysik, ihnen stehen Mitarbeiter der technischen Abteilungen und der Verwaltung zur Seite. Ohne sie wären die vielfältigen Forschungsaufgaben nicht zu leisten. *Fünf Mitarbeiter des Instituts geben hier einen Einblick in ihre Arbeit.*





DIE NATUR erklären

RALPH BLUMENHAGEN

ist Leiter einer
Theoriegruppe am
Max-Planck-Institut für
Physik und Privatdozent
an der Ludwig-
Maximilians-Universität
München.

Der mathematische
Physiker arbeitet
an der sogenannten
Stringtheorie: dem
ehrgeizigen Projekt,
*alle Kräfte der Natur
mathematisch zu
vereinigen.*

Der Gral der theoretischen Physik liegt auf einer Bergspitze. Der Weg dorthin ist mit steiniger Mathematik gepflastert. Dr. Ralph Blumenhagen ist einer der Bergsteiger – und wer sich mit ihm unterhält, muss gewärtig sein, dass ihm Fachausdrücke um die Ohren fliegen, die bisweilen eher an Science-Fiction erinnern als an Erklärungen für die physikalischen Wunder der Welt. »Ich gebe zu«, meint der Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Physik heiter, »dass man besser einige höhere mathematische Weihen intus haben sollte, bevor man mit mir direkt über meine Arbeit sprechen kann.«

Der Gral: Das ist nichts weniger als die Vereinigung aller Naturkräfte innerhalb einer Rahmentheorie. Idealerweise sollten sich aus so einer »Grand Unified Theory« wesentliche Eigenschaften unserer Welt und des Kosmos ableiten lassen: Naturgesetze, Raum- und Zeitdimensionen (zusammen vier), Stärke und Anzahl der Fundamentalkräfte (vier an der Zahl), die Massen der Elementarteilchen.

Seit rund vier Jahrzehnten explorieren die Forscher dafür den Ansatz der sogenannten Stringtheorie. »Als fundamental betrachten wir nicht punktförmige Elementarteilchen, wie Quarks oder Elektronen, sondern winzige Fäden.« Und wie in Omas Nähstube gebe es davon zwei Sorten: offene und ringförmig geschlossene Fäden. In Schwingungen versetzt, bilden die eindimensionalen Gebilde erst die bekannten Elementarteilchen. Doch um aus solchen Fundamentalfäden eine geschlossene Theorie zu entwerfen, werden sie in mathematische Räume von zehn oder elf Dimensionen eingebettet. »Ich weiß«, räumt der mathematische Physiker ein, »das ist für viele schwer zu verdauen.« Auch sei unklar, wie sich in einer elfdimensionalen Theorie unsere vierdimensionale Physik einbetten lässt.

Wie geriet Blumenhagen in so abstrakte Fahrwasser? »Es hat mich schon sehr früh beeindruckt«, berichtet der 51-Jährige, »dass man mit der Kraft mathematischer Formeln Dinge in der Natur klären kann, so wie es in der Relativitätstheorie oder Quantenmechanik passiert.« Zuerst studierte er an der TU Clausthal: »Mit 22 Erstsemestern in meinem Fach, eine idyllische Situation!« Anschließend, in Bonn, wurde es sozusagen ernst. In seiner Diplom- und Doktorarbeit bei Werner Nahm ging es dort bereits um spezielle Feldtheorien, die damals schon in der Stringtheorie eine wichtige Rolle spielten.

Als Postdoktorand in den USA war er zunächst an der University of North Carolina in Chapel Hill und anschließend am prestigeträchtigen Institute for Advanced Study in Princeton. Dort traf er auf den Guru der Stringforschung: Edward Witten hatte 1995 einen großen Durchbruch in der Stringtheorie geschafft. Ihm war es gelungen, die seinerzeit noch kursierenden fünf verschiedenen Stringmodelle in elf Dimensionen miteinander zu vereinigen. »Das ganze Gebiet bekam durch diese »String-Revolution«, wie manche das bald nannten, einen riesigen Schub.«

Danach führt sein Weg zurück nach Berlin an die Humboldt-Universität, wo er sich habilitiert. An dieser Universität kommt es zur für ihn fast schicksalhaften Begegnung mit Dieter Lüst, einem weiteren Pionier der Stringtheorie und damals dort Professor. Als Lüst später als Direktor ans MPI für Physik berufen wird, folgt er ihm – über einen Umweg nach Cambridge in England – 2004 nach München. »Hier fühle ich mich jetzt wirklich am richtigen Platz«, bekundet der Stringforscher. »Am Institut habe ich große Freiheit, die theoretischen Probleme weiterzutreiben, die es eines Tages vielleicht ermöglicht, von einer einheitlichen Theorie aller Naturkräfte zu sprechen.«

Frau Geib, warum sind Sie Physikerin geworden?

Schon an der Schule in Korntal hatte ich einen tollen Lehrer, der in seinem Leistungskurs uns Frauen und speziell mein Interesse für Physik gefördert hat. Das hat mich geprägt und so motiviert, dass ich dieses Fach auch als Studium wählte.

Wie ging es weiter und wie kamen Sie an das Max-Planck-Institut für Physik?

Studiert habe ich Physik dann an der Technischen Universität München (TUM). Für den Master-Studiengang bietet die TUM die Richtung »Kern-, Teilchen-, Astrophysik« an. Ich habe mich auf theoretische Teilchenphysik spezialisiert und auch meine Masterarbeit in diesem Bereich geschrieben. Einer meiner Kommilitonen war zu der Zeit bereits am MPI für Physik und hat mir erzählt, wie gut ihm die Betreuung und Arbeitsatmosphäre am Institut gefielen. So bewarb ich mich für das Promotionsprogramm und wurde akzeptiert, worüber ich mich sehr gefreut habe.

Was bietet Ihnen das Max-Planck-Institut für Physik?

Zum einen eine exzellente Betreuung meiner Forschungsarbeit, und zum anderen gibt es einen regen Austausch unter den Wissenschaftlern, sei es in der Kaffeeküche oder im Kolloquium. Die Mitarbeiter am Institut gehen offen und freundlich miteinander um, sodass ich schnell Anschluss gefunden habe. Außerdem spürt man, dass es der Verwaltung wichtig ist, uns zu unterstützen – etwa bei Reisen, Verträgen, oder Veranstaltungen wie dem Career Day (siehe unten). Auch ist die finanzielle Situation in der Max-Planck-Gesellschaft etwas anders als an Universitäten. Alle Doktoranden haben hier von vornherein Dreijahresverträge, plus die Option auf ein viertes Jahr.

Was bedeutet das konkret für Ihre Arbeit?

Die wird von allen Seiten gefördert. Im Rahmen unserer Doktorarbeit können wir eigene Ideen einbringen und Einfluss darauf nehmen, welche Projekte wir machen. Wir dürfen unsere Ergebnisse auf internationalen Konferenzen vorstellen und Fortbildungsprogramme besuchen, um unser Spezialwissen zu vertiefen. Das bringt uns in Kontakt mit der internationalen Forscherszene und baut ein Netzwerk auf. So können wir gleich Projekt-Kooperationen schmieden – für Doktoranden ein riesiger Pluspunkt.

Was ist das Thema Ihrer Doktorarbeit?

Im Grunde suchen alle Teilchenphysiker nach neuer Physik, die über das Standardmodell hinausgeht. Aus experimentellen Beobachtungen wissen wir zum Beispiel, dass Neutrinos Masse haben, was nicht mit dem Standardmodell zu erklären ist. Wir müssen daher das Standardmodell erweitern. Dafür gibt es viele verschiedene Möglichkeiten. Welche davon in der Natur realisiert ist, lässt sich noch nicht sagen. In meiner Doktorarbeit beschäftige ich mich mit der Berechnung von Prozessen, die uns helfen können, die vorgeschlagenen Modelle im Experiment zu überprüfen.

Ein anderes Thema: Sie engagieren sich stark bei der Berufsorientierung von Doktoranden, haben sogar einen sogenannten Career Day mit veranstaltet. Worum geht es da?

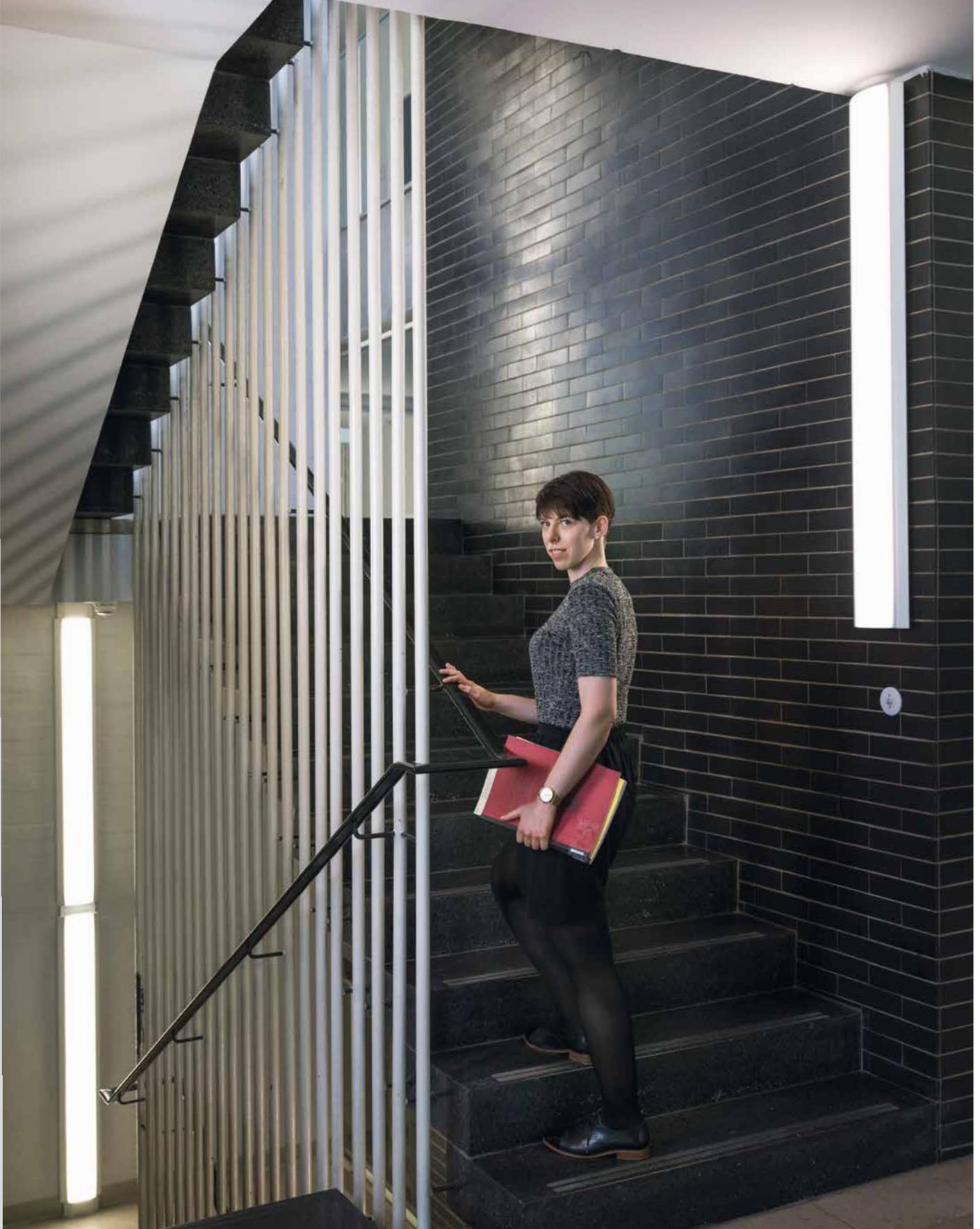
Jeder von uns weiß eigentlich, dass nur wenige Prozent aller Doktoranden in der Forschung bleiben werden. Doch viele fangen erst gegen Ende ihrer Arbeit an, sich über ihre berufliche Zukunft Gedanken zu machen. Unser Career Day hatte das Ziel, den Doktoranden bewusst zu machen, wie gefragt ihre Fähigkeiten auch außerhalb der Wissenschaft sind. Wir haben daher Unternehmen eingeladen, die für Physiker interessant sein könnten. Viele der Firmenvertreter waren ursprünglich selbst in der Forschung und konnten ihre eigenen Erfahrungen weitergeben. So haben wir einen guten Einblick in Berufswege und-perspektiven in der Wirtschaft bekommen. Auch in Unternehmen gibt es spannende Jobs!

*



Im Grünen

Blick auf den Hörsaal des Instituts – innen wie außen wiederholen sich die filigranen Stangenelemente des Bauwerks von Sep Ruf aus dem Jahr 1958.



[TANJA GEIB](#) ist Doktorandin am Max-Planck-Institut für Physik. Die aus Korntal bei Stuttgart stammende Physikerin forscht im Bereich der theoretischen Neutrinophysik. Auch über das Leben jenseits der Promotion macht sie sich Gedanken – und engagiert sich im Bereich Karriereplanung. *»Unsere Fähigkeiten sind gefragt.«*



[KARLHEINZ ACKERMANN](#) zählt am Max-Planck-Institut für Physik zur Stamm-Mannschaft der Konstruktionsabteilung. Der 62-jährige Maschinenbautechniker hat schon viele Experimente der Teilchenphysik aktiv begleitet. Was ihm daran immer noch Spaß macht? *»Ständig gibt es neue Herausforderungen.«*

Herr Ackermann, wie sind Sie ans Max-Planck-Institut für Physik gekommen?

Das liegt schon eine Weile zurück. Man kann sagen, ich habe fast mein ganzes Berufsleben hier verbracht, in verschiedenen Funktionen und mit unterschiedlichen Aufgaben, eine aufregende Zeit. Angefangen habe ich 1977 als technischer Zeichner. Später habe ich mich dann zum Maschinenbautechniker qualifiziert, damit konnte ich auch technisch anspruchsvollste Aufgaben unserer Abteilung übernehmen.

Wer arbeitet da, was sind Ihre Aufgaben?

Wir haben vier deutsche und zwei russische Ingenieure, dazu sechs Techniker. Die Wissenschaftler nennen uns ihre Wünsche, und die setzen wir dann in Instrumente um. Das umfasst Konstruktion, Fertigungszeichnungen, Auswahl und Steuerung der Firmen, die uns zuarbeiten, mit Bauteilen oder Fertigung von Komponenten. Zuletzt wird alles montiert und getestet.

Sie fungieren also als Bindeglied zwischen der Wissenschaft und der Industrie?

Absolut. Zuerst sprechen wir mit den Forschern, was sie wollen und brauchen. Dann suchen wir uns die Firmen aus und beraten mit diesen, ob sie unsere Dinge fertigen können. Dann bestellen wir und wickeln das ab.

Wie viel machen Sie selbst, wie viel holen Sie von externen Firmen?

Unser Prinzip ist: Was man von außen einkaufen kann, das sollte man auch einkaufen. Einzel- und Sonderteile fertigen wir selber, auch wenn es mal eilt.

Wird auch mit anderen Instituten kooperiert?

Das hat sich im Laufe der Zeit stark verändert. Früher dominierten eher die kleinen Experimente. Die ließen sich noch weitgehend im Institut selbst abwickeln, zusammen mit vielleicht ein oder zwei externen Partnern. Heute sind die Experimente von solchen Dimensionen, dass sie sich nur in komplexen, internationalen Kooperationen abwickeln lassen – europa- oder weltweit.

Was für Spezialisten brauchen Sie in der Konstruktion?

Wirkliche Spezialisten haben wir nicht und brauchen sie auch nicht. Wir benötigen Allrounder. Jedes Experiment ist anders und bringt neue Herausforderungen. Spezialisten müssten da ständig umlernen, da sich die Technik alle zehn Jahre radikal verändert. Leider sind auch Allrounder schwer zu bekommen, da die Industrie immer mehr zahlen kann als wir.

Mit welchen Projekten haben Sie zu tun?

Einige Jahre war ich mit dem ALEPH-Detektor des LEP-Beschleunigers am CERN bei Genf beschäftigt, später mit ATLAS, einem der beiden gigantischen Detektoren am LEP-Nachfolger LHC (Large Hadron Collider). In den letzten Jahren geht es bei mir um Belle II in Tsukuba in Japan. Dafür konstruieren wir einen sogenannten Pixeldetektor. Ein Test-Instrument wird Ende 2017 in den Kollisionspunkt des dortigen KEKB-Beschleunigers eingebaut. 2018 soll es ja mit den Messungen losgehen, dann auch mit unserem richtigen Pixeldetektor. Die Wissenschaftler haben große Erwartungen. Es geht wie immer um Suche nach Neuer Physik.

Wie ist die Wechselwirkung mit den Forschern?

Wir arbeiten mit Wissenschaftlern, die auf Experimente spezialisiert sind, da sprechen wir die gleiche Sprache. Wir müssen oft herausfinden, was an ihren hochfliegenden Ideen wirklich umsetzbar ist. Die Realität unterscheidet sich ja durchaus von der Theorie. Bei unseren Projekten kommen wir häufig an die Grenzen des Machbaren.

Was sind für Sie die größten Herausforderungen?

In der Endphase einer fast fertigen Anlage geht es oft heiß her (*lacht*). Die wirkliche Herausforderung für mich war aber immer, die Aufgabenstellung des Wissenschaftlers mit der besten in dem Moment verfügbaren Technologie umzusetzen. Das kostet beim Fertiger schon mal Überredungsarbeit. *



Moderne und Tradition

Neben modernsten Software-gesteuerten Fräs- und Drehmaschinen (links) kommt am MPI für Physik auch noch »gute alte Technik« zum Einsatz (oben).

Frau Dr. Mertens, was hat Sie in die Physik geführt?

Ich habe Physik tatsächlich schon in der Schule gemocht, der Leistungskurs hat mir Spaß gemacht. Gleichwohl erwog ich nach dem Abitur auch meine anderen Interessen: Kunst, Philosophie und Psychologie. Aber dann ist die Physik einfach so passiert – und ich habe das bis heute nicht bereut.

Wie sind Sie an das Max-Planck-Institut für Physik gekommen?

Nicht so schnell. Zuerst habe ich in Karlsruhe Physik studiert und dachte zuerst, es müsse theoretische Physik sein. Ich schrieb dann auch meine Diplomarbeit über die sogenannte Supersymmetrie, eine Theorie zur Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik.

Aber damit waren Sie nicht zufrieden.

Nein. Ich hatte bald das deutliche Gefühl, dass ich zur Forschung mehr in der Experimentalphysik beitragen könne. Da ergab es sich, dass in Karlsruhe gerade das Neutrino-Experiment KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment) aufgebaut wurde. Da bewarb ich mich um eine Doktorarbeit – und wurde gleich genommen!

War das ein einfacher Schritt?

Anfangs fiel es mir durchaus schwer. Bei Experimenten muss man dauernd auch über sehr technische Fragen nachdenken, Elektroden, Hochspannungstechnik und anderes. Aber da konnte ich mich zum Glück rasch einarbeiten. Mir fiel auf: Ich kann das auch im Detail verstehen und sogar Lösungen finden.

Was fasziniert Sie an der Neutrino-Physik?

Gefühlsmäßig fand ich Neutrinos schon immer sympathisch, sehr rätselhafte Gebilde! Außerdem helfen sie uns, die großen Fragen zu verstehen: Woraus besteht unser Universum? Warum existieren wir überhaupt? Zum Beispiel hängt das große Geheimnis der Dunklen Materie eng mit Neutrinos zusammen. Es geht um die fundamentale Beobachtung, dass die sichtbare Materie im Kosmos nur fünf Prozent der gesamten Massen-Energie ausmacht. Der Rest ist uns völlig unbekannt.

Und was hat das mit Neutrinos zu tun?

Die drei bekannten Neutrino-Typen können tatsächlich nur wenig zur Dunklen Materie beitragen. Dafür sind ihre Massen zu klein. Wir wollen aber nach einem neuen, noch hypothetischen Neutrino-Typ suchen, der sehr viel schwerer sein könnte. Diese Neutrinos nennen wir »steril«, weil sie noch scheuer sind als die bekannten Neutrinos. Falls es sie gibt und sie auch die passende Masse haben, könnten sie sogar das Problem der Dunklen Materie erklären. Nach diesen Teilchen werden wir mit einer Erweiterung des KATRIN-Experiments suchen, das den schönen Namen TRISTAN trägt.

Was hätten Neutrinos denn mit unserer Existenz zu tun?

Wir bestehen ja aus Materie, doch die entsprechende Antimaterie ist nirgends zu finden. Im Urknall sollte ja beides zu gleichen Teilen entstehen und sich gegenseitig vernichten. Warum das nicht geschah, kann eigentlich nur an einer Asymmetrie in Teilchenprozessen liegen, in denen Neutrinos eine entscheidende Rolle spielen. Dabei geht es darum, ob Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind. Das wollen wir mit dem sogenannten LEGEND-Experiment herausfinden. Das wird größer und empfindlicher sein als alle bisherigen dieser Versuche – sehr aufregend!

Sie leiten nicht nur eine Forschungsgruppe am MPI für Physik, Sie halten auch an der Technischen Universität in München eine Tenure-Track-Professur, also eine Position, die zu einer vollen Professur führen kann. Wie kam es dazu?

Ja, das ist ein relativ neues Programm für die Kooperation zwischen Max-Planck-Instituten und der TUM. Das hat den Vorteil, dass ich auch Studenten unterrichten und Doktoranden betreuen kann. Mir macht die Lehre sehr viel Spaß. Und es bringt viel für unsere Forschung und ebenso viel für die Lehre an der TUM. Ich bin sehr froh über diese Möglichkeit.

*



Außenansichten

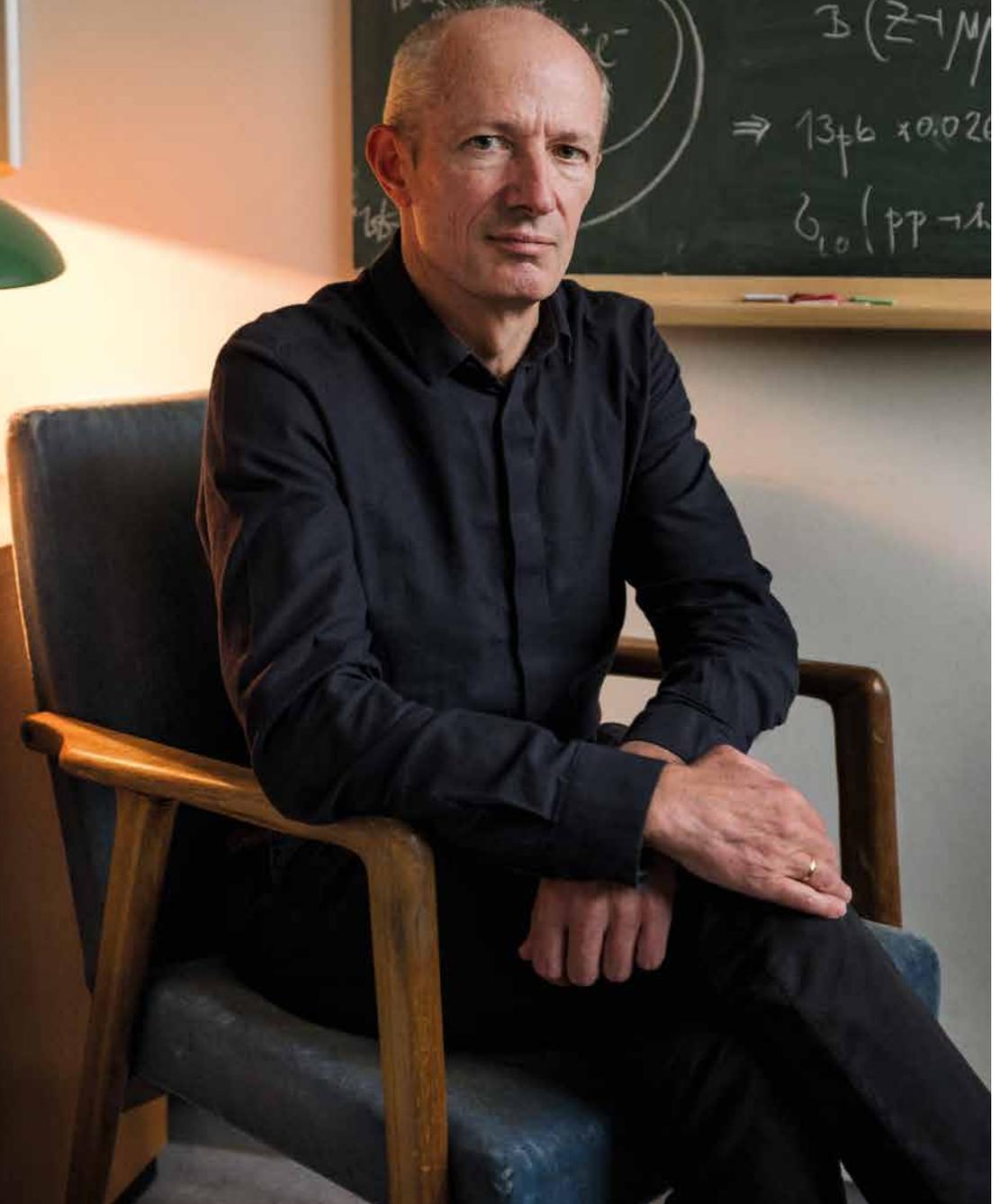
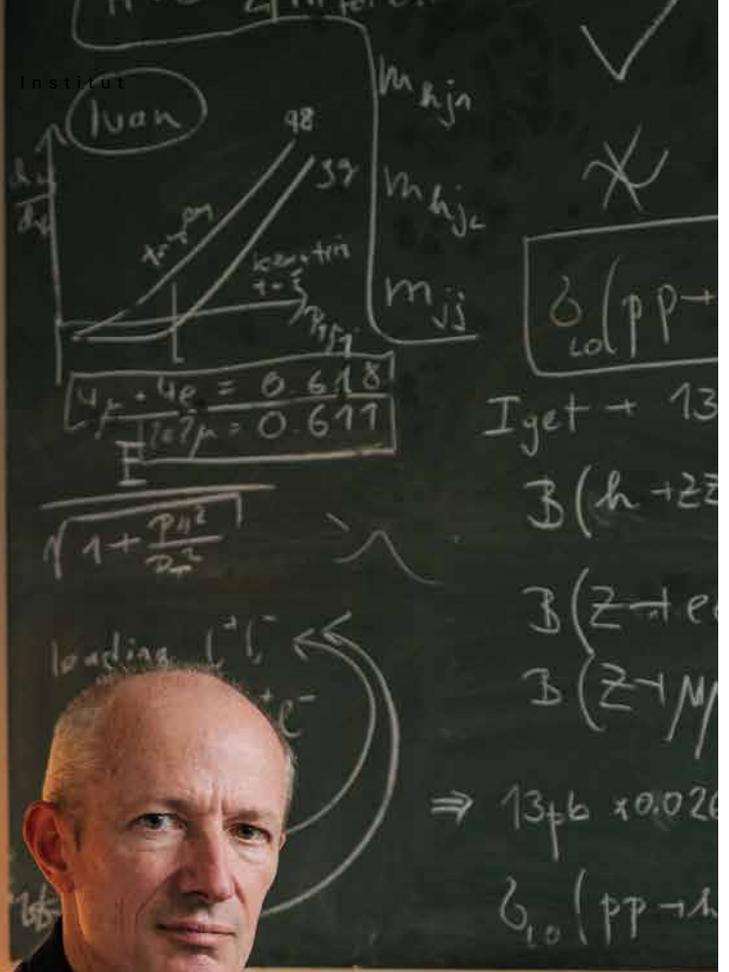
Das von Sep Ruf entworfene Gebäude folgt einer klaren architektonischen Linie und steht unter Denkmalschutz.



SUSANNE MERTENS leitet am Max-Planck-Institut für Physik eine Forschungsgruppe, die sich mit experimenteller Neutrinophysik beschäftigt. Zugleich hält sie an der Technischen Universität München eine sogenannte Tenure-Track-Professur. Was sie umtreibt? *»Ich will wissen, warum das Universum existiert!«*



Institut



UNMÖGLICHES *versuchen*

Der US-Amerikaner
ALLEN CALDWELL
ist Geschäftsführender Direktor am Max-Planck-Institut für Physik und leitet dort die Abteilung »Experimentelle Teilchenphysik«.
Sein Motto:
»Immer nach neuen Wegen suchen.«

Sich mit Prof. Dr. Allen Caldwell zu treffen und über seine Forschung zu sprechen, ist ein besonderes Vergnügen. Der US-Amerikaner hat am Max-Planck-Institut für Physik die experimentelle Teilchenphysik unter seinen Fittichen. Dahinter verbergen sich bei ihm eine Reihe ehrgeiziger Projekte, die eine Reihe fundamentaler Probleme der Physik attackieren sollen: alternative Beschleuniger, Dunkle Materie, Neutrinos, Antimaterie.

Jeder, der sich etwas für Physik interessiert, weiß, dass es hier um die Kronjuwelen des Gebiets geht. Und überall stoßen die Forscher derzeit an Grenzen, von denen unklar ist, ob sie jemals überschritten werden können. »Ja, wir müssen experimentell oft das schier Unmögliche versuchen und dabei ständig neue Wege gehen«, sagt der Max-Planck-Physiker. »Und wir wissen nicht, ob wir damit jemals Erfolg haben werden.«

Aber der Reihe nach. Der akademische Werdegang des 58-Jährigen lässt sich sozusagen als ein amerikanisch-europäisches Gemeinschaftswerk begreifen. Geboren in Frankreich, der Vater Amerikaner, die Mutter Französin, Studium in Houston/Texas, Promotion an der University of Wisconsin. Später hält der Physiker abwechselnd Positionen in New York an der feinen Columbia University sowie am Forschungsinstitut DESY in Hamburg, wo er auch seine spätere deutsche Frau kennenlernt. »Als wir dann, in Manhattan, zwei Kinder bekamen«, erinnert sich der Amerikaner, »haben wir es vorgezogen, wieder nach Deutschland zurückzugehen.« Das Angebot, 2002 Direktor am MPI für Physik zu werden, kam da gerade recht. »Für eine Familie ist das Leben in München äußerst angenehm«, berichtet Caldwell. Auch sein Rennrad komme hier häufig zum Einsatz. »Mit Freunden fahre ich regelmäßig Teilstrecken der Tour de France ab. Auch der berühmte Mont Ventoux war schon dabei.«

Dass die Teilchenbeschleuniger derzeit eine kritische Phase erreicht haben, ist den Forschern schon lange klar. Geplante Nachfolger stoßen an Grenzen von Technologie und Finanzierbarkeit. So soll der geplante Future Circular Collider rund 100 Kilometer Umfang haben und entsprechend kosten.

Caldwell sucht hier nach neuen Wegen, zum Beispiel nach neuartigen kompakten Beschleunigern. AWAKE heißt das Experiment am CERN, dessen Sprecher er ist. In einer zehn Meter langen Plasmaröhre können darin Elektronen hundertfach effektiver beschleunigt werden als in normalen Anlagen. Das hätte dramatische Auswirkungen: »Solche Plasmabeschleuniger könnten deutlich kompakter und damit kostengünstiger sein als konventionelle Systeme.«

Auch an der Jagd nach der Dunklen Materie ist er beteiligt. Das Mysterium, dass rund 80 Prozent aller Materie im Kosmos aus einem Stoff besteht, den noch niemand gesehen hat, verfolgt die Forscher schon seit Langem. »Wir suchen speziell nach einem hypothetischen Kandidaten-Teilchen, dem sogenannten Axion«, erläutert Allen Caldwell. »Axionen aufzuspüren ist trickreich. Unser Experiment hat aber Entdeckungspotenzial. Das bedeutet: Wenn es diese Partikel überhaupt gibt, dann sollten wir einmal ein klares Mess-Signal beobachten.«

Sein Amt als Geschäftsführender Direktor sieht er nicht als trockene Verwaltungsaufgabe – im Gegenteil: »Das Institut steht vor großen Veränderungen«, sagt der Max-Planck-Forscher. »Zurzeit planen wir gerade einen Neubau in Garching, eine sehr interessante Phase für uns. Außerdem durchläuft das Institut derzeit einen Generationenwechsel, einige meiner Direktoren-Kollegen werden emeritiert. Die Berufung der Nachfolger beeinflusst ganz zentral unsere künftige Forschung. In beiden Fällen geht es um die Zukunft des Max-Planck-Instituts für Physik.« *

Essay



VOM WERT *der* FORSCHUNG

Text *Dr. Patrick Illinger*
Illustration *Marco Melgrati*

100 Jahre Max-Planck-Institut für Physik – 100 Jahre Grundlagenforschung in der Physik: Warum engagieren sich Wissenschaftler für THEMEN, DIE KEINE UNMITTELBARE ANWENDUNG HABEN?

Die keine sauberen Motoren oder neuen Arzneien hervorbringen?

Auch uns am MPI für Physik wird diese Frage häufig gestellt. Daher haben wir den Wissenschaftsjournalisten *Dr. Patrick Illinger* gebeten aufzuzeigen, was Grundlagenforschung treibt und wertvoll macht.



Die aufgehende Erde

Grundlagenforschung eröffnet neue Sichtweisen, wie dieser Blick auf unseren Planeten zeigt. Das Bild wurde während der Mondumkreisung von Apollo 8 im Jahr 1968 aufgenommen.

Grundlagenforschung kann wehtun. Sehr sogar. Wenn die Datenlage eine lieb gewonnene Theorie einfach nicht bestätigen will. Wenn die Messwerte widerlegen, was auf dem Papier so elegant formuliert ist. Noch schlimmer: wenn das Selbstverständnis der gesamten Menschheit angekratzt wird. Es war eine Kränkung zu erfahren, dass wir Menschen uns nicht im Zentrum des Sonnensystems befinden, ja nicht einmal, wie noch am Beginn des 20. Jahrhundert vermutet, wenigstens im Zentrum aller Galaxien. Und es schmerzt, wenn Evolutionsbiologen zu dem Schluss kommen, dass der Homo sapiens nicht die »Krone der Schöpfung« ist, sondern einfach ein Primat (wenngleich mit komplexeren kognitiven Fähigkeiten als ein Lemur).

Doch genau solche Dinge über uns selbst, das Universum und unseren Platz darin zu erkunden, ist das Größte, was eine denkende, zur Selbstreflexion fähige und deshalb eben doch einzigartige biologische Spezies leisten kann. Und das gewissenhaft betriebene Wechselspiel von Empirie und Theorie weckt am Ende doch ein Gefühl von Ehrfurcht und Erhabenheit. Zum Beispiel, wenn die Erkundung von Exoplaneten mehr und mehr ahnen lässt, dass unsere Erde zwar geometrisch nicht im Zentrum des Universums angesiedelt ist, aber einen extrem kostbaren und seltenen Lebensraum in den Weiten des Kosmos darstellt. Oder wenn Physiker ein Materieteilchen finden, das bereits ein halbes Jahrhundert zuvor von Theoretikern vorhergesagt wurde, wie das Higgs-Boson.

Grundlagenforschung ist viel mehr als die Befriedigung unmittelbarer körperlicher Bedürfnisse und musischer Gelüste. Sie ist das Werkzeug, mit dem sich eine vergängliche biologische Spezies einen Zugang zur Unendlichkeit verschafft. Zu Unrecht wird Wissenschaft häufig mit der reinen Suche nach Wissen gleichgesetzt, als ginge es nur darum, Fakten wie Erz aus einer Mine zu schürfen. Die Vorstellung, unwiderlegbares Wissen anzuhäufen, widerspricht geradezu den Prinzipien guter Wissenschaft. Letztere muss sich, wie von Karl Popper ausgeführt, stets den Todesstößen einer möglichen Falsifizierung aussetzen. Wichtiger als neues Wissen, das bei richtig betriebener Wissenschaft irgendwann von noch besserem Wissen abgelöst wird, siehe Newton und Einstein, ist das beständige Wissenwollen.

Solche philosophischen Prinzipien stoßen im Forscheralltag natürlich auf allerlei Hürden, finanzielle, organisatorische – und menschliche. Schon im Mittelalter waren es keineswegs nur Kirchenvertreter, die auf dem geozentrischen Weltbild beharrten. Auch die Astronomen jener Zeit feilten akribisch an der heute vergessenen Theorie der »Epizykel«, um jene seltsamen Kapriolen zu deuten, die Planeten am Nachthimmel vollführen, statt die einfachste Erklärung zu akzeptieren: Die Erde kreist um die Sonne, und nicht andersherum. Die im Wortsinne übermenschliche Stärke des wissenschaftlichen Prinzips setzt sich auf Dauer gegen solche und andere Hemmnisse durch. Wissenschaft ist ein Korrektiv für Eitelkeiten, falsche Sehnsüchte und, ja, auch unredliche Forscher.

Angesichts der komplexen Fragen von heute müssen Naturwissenschaftler viel stärker in Teamarbeit über Instituts-, Fach- und Landesgrenzen hinweg kooperieren. Und es braucht teure Maschinen. Der Abstimmungsbedarf mit Politik und Gesellschaft nimmt zu. Was dürfen ein paar rasende Protonen kosten? Rechtfertigen die Mittel den zu erwartenden Gewinn? Welchen Gewinn überhaupt?

Pragmatisch lässt sich entgegnen: Gute Wissenschaft wirft stets auch das ab, was Ökonomen als Spin-off bezeichnen. Der Bau eines Teilchenbeschleunigers oder Neutrinodetektors benötigt jede Menge neuer, avantgardistischer Technologie, die oft erst erfunden werden muss und später in gewinnbringende Produkte fließt. Schon der britische Physiker Michael Faraday soll auf die Frage nach dem Zweck der ersten elektrischen Generatoren gesagt haben, dass er diesen auch nicht kenne, aber sicher sei, man werde sie eines Tages besteuern.

Gefährlich an dieser Argumentation ist, dass Forscher in die Pflicht geraten, ihr Tun ökonomisch zu rechtfertigen. Dabei gilt es, unmissverständlich klarzumachen, dass Spin-offs, Patente, neue Produkte, verwertbare Erkenntnisse erfreuliche Nebenprodukte guter Forschung sind, aber niemals deren eigentlicher Zweck. Zum Wesen der Grundlagenforschung gehört, dass ihre Wertschöpfung nicht mit betriebswirtschaftlichen Instrumenten messbar ist. Vieles muss probiert werden, auch wenn sich nur manches als in einem ökonomischen Sinn nützlich erweisen wird. Das Wissen um die Herkunft seiner eigenen Spezies oder die Entdeckung der Dunklen Materie im Universum – für solche Erkenntnisse gibt es keine Preisschilder.

Grundlagenforschung ist kein hübscher Rosengarten im Hinterhof der Deutschland AG.

Wissenschaft ist die Basis jeder zukunftsfähigen Gesellschaft. Kulturelles, ökonomisches und soziales Fortkommen hängen schicksalhaft davon ab, dass ständig neue Erkenntnisse gewonnen werden. Natürlich darf es nicht darum gehen, Wissenschaftler planlos mit Geld zu überschütten und sich selbst zu überlassen. In Zeiten globaler Herausforderungen muss es Politik und Gesellschaft gestattet sein, der Wissenschaft dringende Themen anzudienen, zum Beispiel Ozeanversauerung, Antibiotika-Resistenzen und demografischer Wandel.

Die Möglichkeiten hierfür sind gegeben. Die weltweiten Ausgaben für Forschung und Entwicklung haben sich in den vergangenen zehn Jahren verdoppelt. Und die Zahl der akademischen Publikationen hat die Grenze von einer Million erreicht. Doch hierin liegt auch eine Gefahr. Die Gefahr, dass das expandierende und zunehmend auf sich selbst fixierte System Wissenschaft am eigenen Erfolg erkrankt. Zu sehr geht es heute darum, möglichst viel Durchsatz zu produzieren, zu viele Daten und Veröffentlichungen. Die Länge der Publikationsliste entscheidet heute stärker über Karrieren als die Qualität einzelner Arbeiten oder der Einfallsreichtum des einzelnen Forschers. Die Dicke von Dissertationen, die Zahl der Doktoranden am Lehrstuhl, der eigene h-Index, all diese in der akademischen Welt üblichen, allzu numerischen Indikatoren haben eine absurde Bedeutung erlangt. Manche Universitäten unterhalten Abteilungen, die sich einzig darum kümmern, das eigene Haus in internationalen Ranglisten hochzuhalten. Manche Forschungsorganisationen und Institute betreiben aggressives Marketing statt ausgewogener Öffentlichkeitsarbeit. Forscher sollten den Wert ihrer Arbeit aber nicht nur in Publikationslisten, Rankings und Hochglanzbroschüren sichtbar machen, sondern vor allem durch ihr Tun an sich. Es gilt, Werte zu schaffen, nicht nur im Sinne von Messwerten.

Allen Widrigkeiten zum Trotz erweisen sich Wissenschaft und Bildung weiterhin als Erfolgsmotor. Das werden auch jene spüren, die heute die Demokratie infrage stellen, den Klimawandel negieren und am medizinischen Nutzen von Impfungen zweifeln. Mehr wissen zu wollen ist stets die Lösung, und niemals ein Fehler.

**»Wichtiger als neues Wissen,
das irgendwann von noch besserem
Wissen abgelöst wird, ist
das beständige Wissenwollen.«**



Wie geht's WEITER?

42

Eines ist sicher:
der Umzug des
Max-Planck-
Instituts für Physik

In einigen Jahren verlassen die Teilchenphysiker den Standort München und ziehen auf den Forschungscampus Garching. Dort stehen auch die Max-Planck-Institute für Plasmaphysik, extraterrestrische Physik, Astrophysik und Quantenoptik. Weniger sicher ist, wie es in der Teilchenphysik selbst weitergeht. Es bleibt spannend.

Die Mitte des letzten Jahrhunderts kann man getrost als Goldgräberzeit der Teilchenphysik bezeichnen: Alle paar Jahre entdeckten Wissenschaftler neue Zusammenhänge und Teilchen, etwa die Tau-Leptonen oder Bottom-Quarks. Das Standardmodell etablierte sich – alles war aufregend und dynamisch. Die Epoche der schnellen Forschungserfolge scheint vorbei. Heute kämpfen Physiker mit den großen fundamentalen Fragen: Warum gibt es Materie und kaum Antimaterie? Woraus besteht die Dunkle Materie? Was ist Dunkle Energie?

Der nächste große Erkenntnisschritt in der Teilchenphysik lässt sich weder planen noch vorher-sagen, auch nicht, ob er sich in der Supersymmetrie oder der Neutrino-Physik, als theoretisches Modell oder im Experiment manifestieren wird. Fest steht allerdings, dass bereits heute die Weichen für die Zukunft gestellt werden – und dass das Max-Planck-Institut an vielen dieser Projekte beteiligt ist.

Ein Linearbeschleuniger soll die Forschung am Large Hadron Collider komplettieren und irgendwann ablösen. Derzeit konkurrieren mit CLIC und ILC noch zwei verschiedene Konzepte. Obwohl unklar ist, welches davon – und wann – letztlich realisiert wird, tüfteln Physiker schon jetzt an den dazu passenden Detektoren. Neben bekannten Beschleunigertechnologien kommen künftig wohl auch völlig neue Ansätze ins Spiel: So experimentiert AWAKE mit der Plasmabeschleunigung von Elektronen, eine vielversprechende und kostengünstige Methode, weil damit auf kürzester Strecke höchste Energien erreichbar sind.

Die schwer zu fassenden Neutrinos bieten ebenfalls noch viel Raum für neue Entdeckungen: Ist das Neutrino sein eigenes Antiteilchen? Welche Masse hat es? Existiert vielleicht ein neuer, bisher rein hypothetischer »steriler« Neutrino-Typ? Die Projekte LEGEND, KATRIN und TRISTAN könnten hier in einigen Jahren Aufschluss bringen.

Wie sterile Neutrinos sind auch die Axionen das Ergebnis theoretischer, mathematisch formulierter Überlegungen. Als weitere Gemeinsamkeit kommen beide Teilchen als »Stoff« für die Dunkle Materie infrage; Axionen könnten außerdem noch eine bisher unverstandene Eigenschaft der starken Wechselwirkung, einer der vier fundamentalen Kräfte, erklären. Ein Axion-Experiment namens MADMAX befindet sich derzeit im Aufbau.

Noch offen sind die Entwicklungen und Trends in der theoretischen Physik. Ob Astroteilchenphysiker, Phänomenologen oder Kosmologen: Alle beschäftigen sich mit den Detailfragen der Neuen Physik, die jenseits des Standardmodells existieren muss, von der man aber noch wenig weiß. Auf dem Gebiet der Stringtheorie treiben die Forscher zwei grundlegende Probleme um. Einmal: Wie sieht diese Theorie genau aus mit ihren mathematischen elf Dimensionen? Und zum Zweiten: Wie lässt sich aus den vielen Lösungen der Theorie dann unsere vierdimensionale Welt herauschälen, in der wir leben?

Wann und ob wir Antworten auf all diese Fragen bekommen, liegt, wie man so schön sagt, in den Sternen. Doch die Erfolge der vergangenen 100 Jahre sollten uns motivieren, immer weiter zu denken und zu forschen. *

ABKÜRZUNGEN

ALEPH-Detektor — Apparatus for LEP Physics
(Detektor am LEP-Teilchenbeschleuniger)

ATLAS — AToroidal LHC Apparatus
(Teilchendetektor am Large Hadron Collider)

AWAKE — Proton Driven Plasma Wakefield
Acceleration Experiment (Experiment für
neue Beschleunigertechnologie am CERN)

Belle I, II — Teilchendetektor am KEKB-
Beschleuniger in Japan

CALICE — Calorimeter for Linear
Collider Experiment (Kalorimeter für das
Linearbeschleuniger-Experiment)

CERN — Europäische Organisation
für Kernforschung

CLIC — Compact Linear Collider
(Kompakter Linearbeschleuniger)

CRESST — Cryogenic Rare Event Search
with Superconducting Thermometers
(Experiment zum Nachweis von Dunklen
Materie-Teilchen)

CTA — Cherenkov Telescope Array
(Gammastrahlenobservatorium auf
La Palma, Spanien, und in Chile)

GeDet — Germaniumdetektoren

GERDA — Germanium Detector
Array (Experiment zum Nachweis des
neutrinosen Doppelbetazerfalls)

H.E.S.S. — High Energy Stereoscopic
System (Gammastrahlenobservatorium
in Namibia)

ILC — International Linear Collider
(Teilchenbeschleuniger)

KATRIN — Karlsruhe Tritium Neutrino
Experiment

KEK — Institut für Hochenergiephysik
in Tsukuba, Japan

KEKB — Teilchenbeschleuniger am KEK

LEGEND — Large Enriched Germanium
Experiment for Neutrinoless $\beta\beta$ Decay
(Experiment zum Nachweis des
neutrinosen Doppelbetazerfalls)

LEP — Large Electron-Positron Collider
(Teilchenbeschleuniger am CERN)

LHC — Large Hadron Collider
(Teilchenbeschleuniger am CERN)

MADMAX — Magnetized Disc and Mirror
Axion Experiment (Experiment zum
Nachweis von Axionen)

MAGIC (-Teleskope) — Major Atmospheric
Gamma-Ray Imaging Cherenkov
(Gammastrahlenteleskope auf La Palma,
Spanien)

TRISTAN — Tritium Beta Decay to Search
for Sterile Neutrinos (Detektor für sterile
Neutrinos)

VERITAS — Very Energetic Radiation
Imaging Telescope Array System
(Gammastrahlenobservatorium in den USA)

HERAUSGEBER

Max-Planck-Institut für Physik /
Werner-Heisenberg-Institut (MPP)
Föhringer Ring 6, 80805 München
info@mpp.mpg.de, mpp.mpg.de

KONZEPT UND REDAKTION

Barbara Wankerl (V.i.S.d.P.)

KREATION, GESTALTUNG, REALISATION

Lively Brand Ideas GmbH,
Robert Wohlgemuth

Anne Bauer, München

AUTOREN

Prof. Dr. Allen Caldwell
Dr. Reinhard Breuer
Dr. Patrick Illinger
Bernd Müller
Barbara Wankerl

SCHLUSSREDAKTION

Redaktionsbüro Eva Bachmann

DRUCK

G. Peschke Druckerei GmbH

BILDNACHWEIS

| | |
|--------------|---|
| Titel | Robert Staudinger |
| Seite 02 | Niko Schmid-Burgk |
| Seite 03 | Bild 1: MPP Bild 2: Mark Heisel, GERDA Collaboration Bild 3: MPP Bild 4: Marco Melgrati Bild 5: Brechensbauer Weinhart + Partner Architekten |
| Seite 04 | NASA: WMAP Science Team |
| Seite 06–11 | Bild 1–5: MPP Bild 6: Archiv Die Neue Sammlung München Bild 7: MPE Bild 8: MPP Bild 9: R. Lang, MPP Bild 10: ATLAS Experiment, © 2016 CERN Bild 11: Axel Griesch, MPP Bild 12: Laci Andricek, HLL@MPG Bild 13: ATLAS Experiment, © 2016 CERN Bild 14: Maximilien Brice, CERN |
| Seite 12/13 | Anne Bauer |
| Seite 14 | ATLAS Experiment, © 2016 CERN |
| Seite 15 | Belle II Collaboration |
| Seite 17, 18 | Robert Wagner |
| Seite 19/20 | Niko Schmid-Burgk |
| Seite 22 | Astrid Eckert, MPP |
| Seite 23 | Barbara Wankerl, MPP |
| Seite 25 | Bild 1: MPP Bild 2: Mark Heisel, GERDA Collaboration Bild 3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) MPP |
| Seite 26 | Niko Schmid-Burgk |
| Seite 27–37 | Marco Melgrati |
| Seite 38/39 | NASA: Apollo 8 Crewmitglied Bill Anders |
| Seite 40 | Brechensbauer Weinhart + Partner Architekten |
| Seite 42 | |



mpp.mpg.de
© Max-Planck-Institut für Physik
Oktober 2017





MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



*Logo des Max-Planck-Instituts für Physik mit Heisenbergs Formel
der nach ihm benannten Unschärferelation*