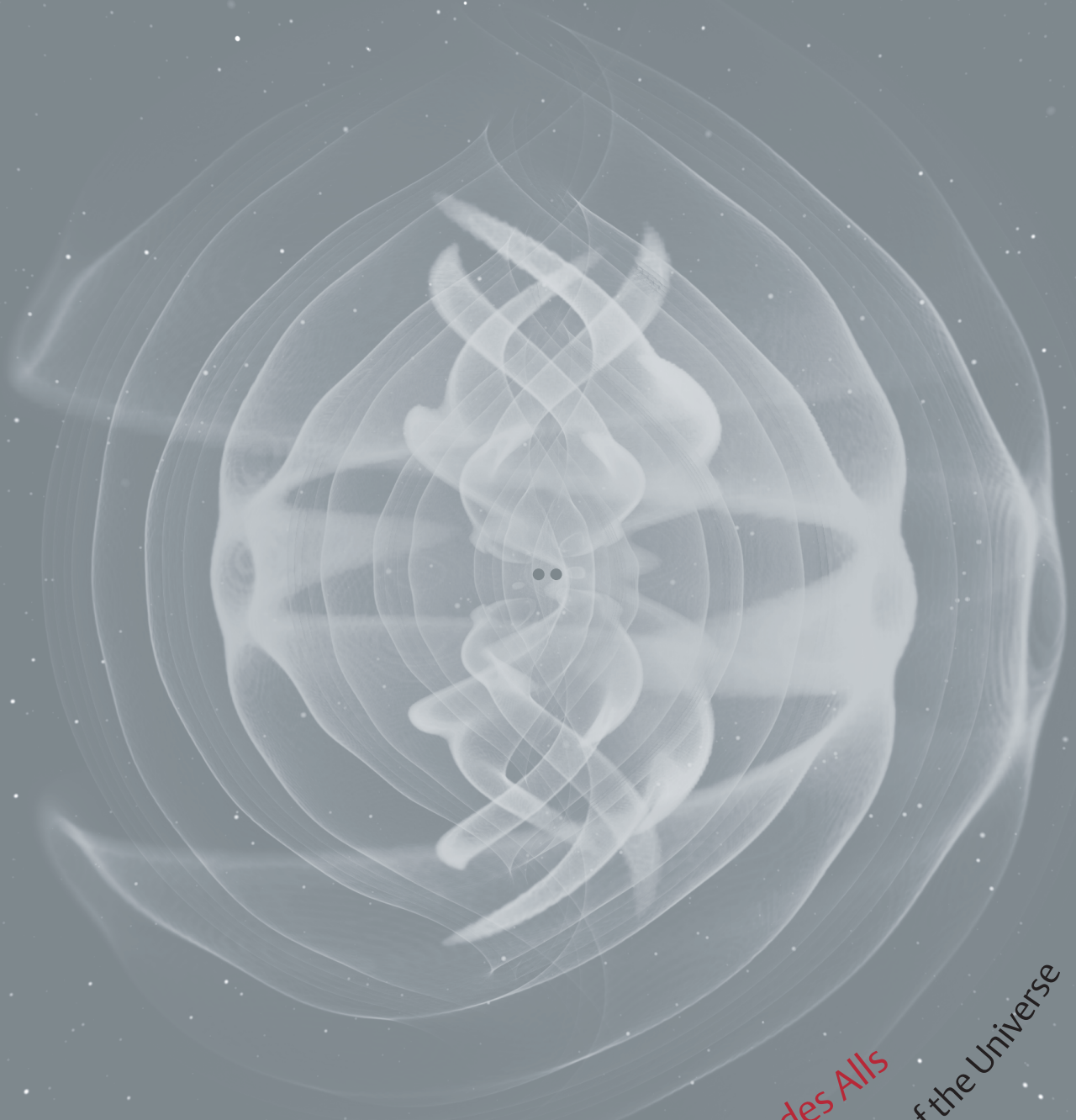
Körber Stiftung

2017

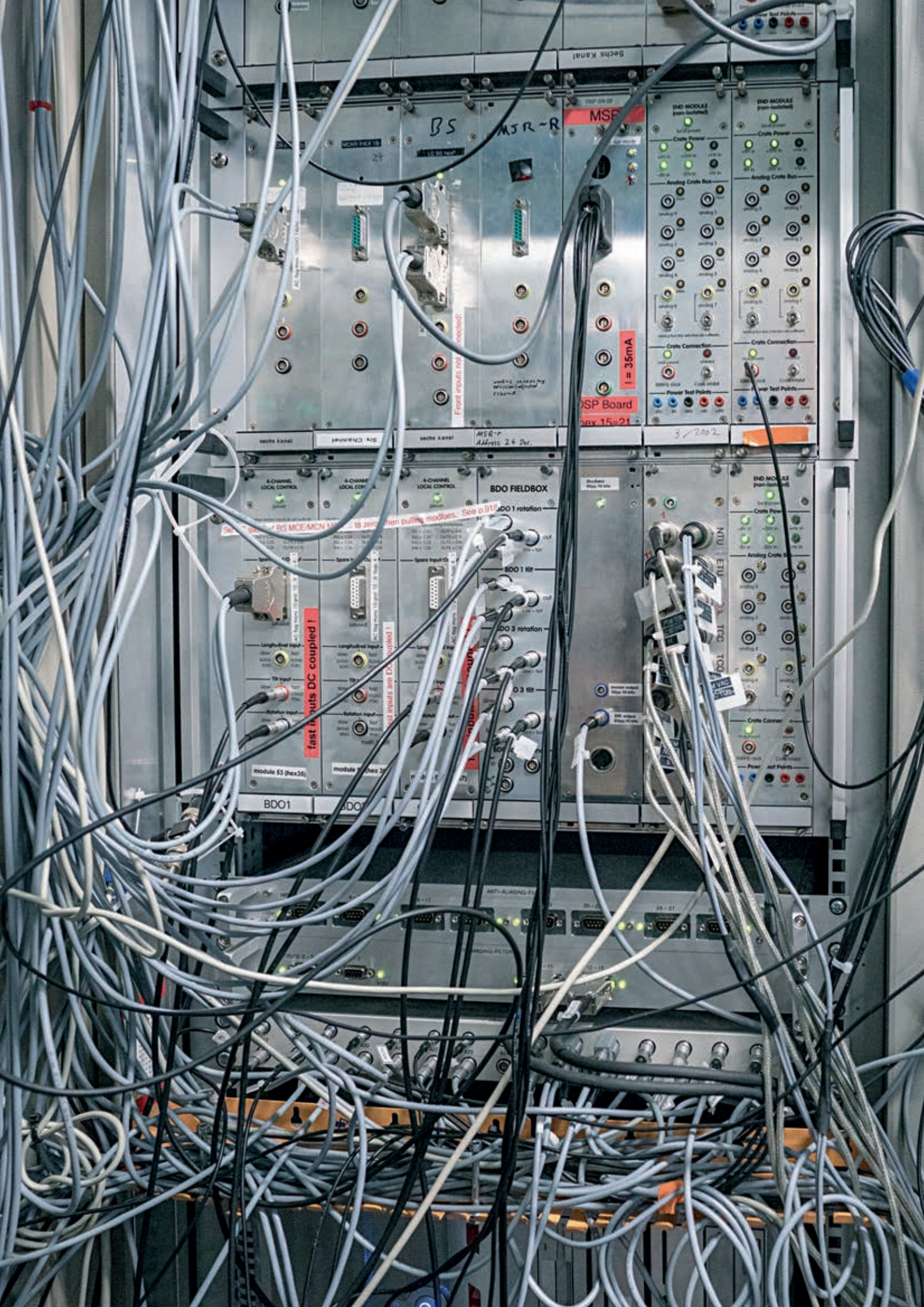
KÖRBER-PREIS FÜR DIE EUROPÄISCHE WISSENSCHAFT

KÖRBER EUROPEAN SCIENCE PRIZE



Schwerkraftsignale aus den Tiefen des Alls

Gravity Signals from the Depths of the Universe


BS
MSR-R
MSR
I = 35mA
DSP Board
Front inputs not mounted!
BDO FIELDBOX
BDO 1 rotation
BDO 1 tilt
BDO 3 rotation
fast inputs DC coupled !
BDO1
END MODULE
Crate Power
Analog Crate Bus
Crate Connection
Power Test Points
4-CHANNEL LOCAL CONTROL
NTU
ETU
TCC

Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft 2017

Körber European Science Prize 2017

04 Vorwort
Preface

12 Das Projekt
The Project

36 Der Preisträger
The Prize Winner

38 Die Gremien
The Committees

40 Körber-Preise seit 1985
Körber Prizes Since 1985

Welterschließende Präzision

Precision that Is Opening Up the World

Echte Durchbrüche verlangen in aller Regel gleich doppelte Präzision – die Genauigkeit des Denkens und die Genauigkeit des Machens. Sprich, selbst wenn eine Sache theoretisch sauber hergeleitet und mathematisch fehlerfrei durchgerechnet ist, ist sie noch lange nicht experimentell in der Praxis bewiesen. Im Gegenteil kann das eine durch einen vermeintlich unüberwindlichen Graben vom anderen getrennt sein.

Albert Einstein zumindest war dieser Meinung. Als er 1915 als eine Konsequenz seiner allgemeinen Relativitätstheorie die Existenz von Gravitationswellen postulierte, war er gleichzeitig davon überzeugt, diese seien so schwach, dass man sie niemals würde nachweisen können. Karsten Danzmann war anderer Meinung. Er vertraute darauf, dass er der Präzision der Einstein'schen Vorhersage die Präzision eines Experimentes an die Seite würde stellen können. Ende 2015 war es dann so weit: Einsteins Vorhersage wurde belegt, seine Skepsis widerlegt. Es liegt nahe, bei Karsten Danzmann mindestens zwei Eigenschaften zu vermuten, die ihm diesen Erfolg möglich gemacht haben: eine starke innere Überzeugung, die Sache müsse prinzipiell möglich sein, verbunden mit dem Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten, sie meistern zu können, und vor allem aber maximales Durchhaltevermögen. Neben den eigentlichen technischen Durchbrüchen in der Laser- und Messtechnologie ist der Weg zum Erfolg in diesem Fall nämlich eine schier endlose Folge von Fehlerbeseitigungen und Optimierungen, oder wie Karsten Danzmann es anlässlich einer Präsentation einmal sagte: »Das Leben des Gravitationswellenphysikers ist ein ewiger Kampf gegen das Rauschen!«

Grob vereinfacht gesagt verursachen Gravitationswellen Längenveränderungen, indem sie den Raum selbst strecken und stauchen. Hervorgebracht werden sie von sich bewegenden Massen. Ihr Effekt ist allerdings so schwach, dass selbst ein so gewaltiges Ereignis wie die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit dem jeweils Vielfachen der Masse unserer Sonne nur ein kaum merkliches Zittern des Raumes hervorruft. Um dieses zu messen, braucht man ein wahrhaft unvorstellbar präzises »Metermaß«, eines nämlich, das den Abstand der Erde zur Sonne auf den Bruchteil eines Atomkerndurchmessers genau bestimmen kann. Diese Herausforderung macht deutlich, wie sehr absolute Grundlagenforschung, der Aufbruch ins Neuland, ins Unbekannte, verbunden ist mit ganz praktischer Technologieentwicklung. Ohne die subtilen technisch-handwerklichen Fähigkeiten des Experimentalphysikers blieben die Begriffe der Theoretiker unüberprüft oder, kantisch gesprochen, leer.

Präzision im Denken und Präzision im Machen waren die Garanten des Erfolgs von Karsten Danzmann. Er hat der

Genuine breakthroughs, as a rule, demand true double precision: precision in thinking and precision in doing. In other words, even if something can be cleanly derived in theory and calculated flawlessly mathematically, this by no means signifies that it has been proven in practice experimentally. On the contrary, the one can be separated from the other by a seemingly insurmountable chasm.

This was at least Albert Einstein's opinion. As he postulated the existence of gravitational waves as a consequence of his general theory of relativity in 1915, he was at the same time convinced that these waves are so weak that we would never be able to detect them. Karsten Danzmann had a different opinion. He was confident that he could create an experiment precise enough to match the precision of Einstein's predictions. At the end of 2015 his time had come. Einstein's predictions were verified, and his skepticism refuted. It stands to reason that Karsten Danzmann possesses at least two qualities that made it possible for him to achieve this success: a strong inner conviction that it must in principle be possible to do it, linked with his confidence in his own capacity to be able to master it, yet above all his maximum perseverance. In addition to the genuine technical breakthroughs in laser and measuring technology, the route to success in this case is namely a well-nigh endless sequence of error corrections and optimizations, or as Karsten Danzmann once said during a presentation, »The life of a gravitational wave physicist is an eternal struggle against noise!«

Grossly simplified, gravitational waves cause changes in length by stretching and compressing space itself. They are generated by moving masses. Yet the effect of these masses is so weak that even an event as violent as the fusion of two black holes – each of them having a multiple of the mass of our sun – only produces a hardly detectable vibration of space. In order to measure this vibration a truly unimaginably precise yard stick is needed, one namely that can precisely measure the distance of the Earth to sun to a fraction of the diameter of an atom's nucleus. This challenge illustrates the extent to which purely fundamental research, the departure into uncharted territory and into the unknown, is linked with the entirely practical development of technology. Without the nuanced technical and manual skills of the experimental physicist, the theorist's concepts would remain unverified or, in Kantian terms, empty.

Precision in thinking and precision in doing were the guarantees of Karsten Danzmann's success. He opened astronomy a new world by pushing open a new window onto the universe. By using the signals of gravity, gravitational

Astronomie eine neue Welt erschlossen, indem er ein neues Fenster ins Universum aufgestoßen hat: Die Gravitationswellen-Astronomie erlaubt, mittels Schwerkraftsignalen die bislang dunkle Seite des Kosmos zu ergründen, die immerhin 99 Prozent des Universums ausmacht. Damit liefert er ein grandioses Beispiel dafür, wie sich Grundlagenforschung und High-End-Technologie gegenseitig bedingen, wie das eine ohne das andere jedenfalls nicht zu haben ist und wie zu guter Letzt daraus handfeste Anwendungen erwachsen, die zunächst gar nicht im Fokus des Forschers waren. So finden die von Danzmann entwickelten Laser aktuell schon in zahlreichen Erdvermessungssatelliten Verwendung.

Der Forscher träumt aber längst schon von noch besseren Metermaßen: Ab 2034 will die Europäische Weltraumorganisation ein Interferometer im All stationieren. Die drei Satelliten sollen dann Messarme von 2,5 Millionen Kilometern Länge aufspannen. Damit hofft Danzmann dann sogar, den Urknall selbst hören zu können. Karsten Danzmann ist kein Ingenieur, aber ein Ingenieur-Gen muss er ganz offenkundig haben, denn sonst hätte ihm nicht gelingen können, was eigentlich niemand so richtig für möglich hielt. Den Ingenieur Kurt Körber hätte die Wahl dieses Preisträgers vermutlich mehr als gefreut.

Innovative und zukunftsträchtige Forschungsprojekte zu identifizieren und damit zugleich Forscherpersönlichkeiten auszuzeichnen, die neue Wege des Denkens eröffnen, ist auch das Anliegen des Körber-Preises von Beginn an – und jedes Jahr eine neue Herausforderung. Dass dies immer wieder gelingt, ist vor allem ein Ergebnis der hervorragenden Arbeit in den Search Committees und dem Kuratorium des Preises. Die dort versammelte europäische Expertise bürgt für Qualität der Preisentscheidungen und trägt entscheidend zum internationalen Renommee des Preises bei. Wir bedanken uns daher sehr herzlich bei allen Gremienmitgliedern unter dem Vorsitz von Professor Martin Stratmann, dem Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft, und gratulieren unserem Preisträger Karsten Danzmann!

wave astronomy permits astronomers to sound out what until now has been the dark side of the cosmos, which after all accounts for 99 percent of the universe. Danzmann thus provides a grandiose example of how basic research and high-end technology are mutually dependent on one another, of how you cannot have the one without the other, and of how on this basis genuine applications ultimately develop that initially were not even in the focus of the researcher. The lasers developed by Danzmann can currently, for example, be found in numerous satellites that survey the Earth.

Yet this scientist had already begun to dream of even better yardsticks. Starting in 2034, the European Space Agency wants to station an interferometer in space. These three satellites are then supposed to have measuring arms spanning a length of 2.5 million kilometers. With them, Danzmann hopes to even be able to hear the big bang itself. Karsten Danzmann is not an engineer but he apparently must have an engineer's gene because he would otherwise not have been able to succeed at what nobody actually thought possible. The engineer Kurt Körber would presumably have been more than pleased by the choice of this Prize winner.

Identifying innovative and promising research projects and at the same time honoring the personalities from science who open these new ways of thinking have also been the ambition of the Körber European Science Prize since its inception. And each year this poses a new challenge. That this succeeds over and over again is above all the outcome of the excellent work in the Search Committees and the Trustee Committee of the Körber Prize. The European expertise gathered there vouches for the quality of the Prize winner who is selected and constitutes a decisive contribution to the Prize's international renown. We would therefore like to express our heartfelt thanks to all the members of these committees under the chairmanship of Professor Martin Stratmann, the President of the Max Planck Society, and extend our congratulations to the Prize winner, Karsten Danzmann.

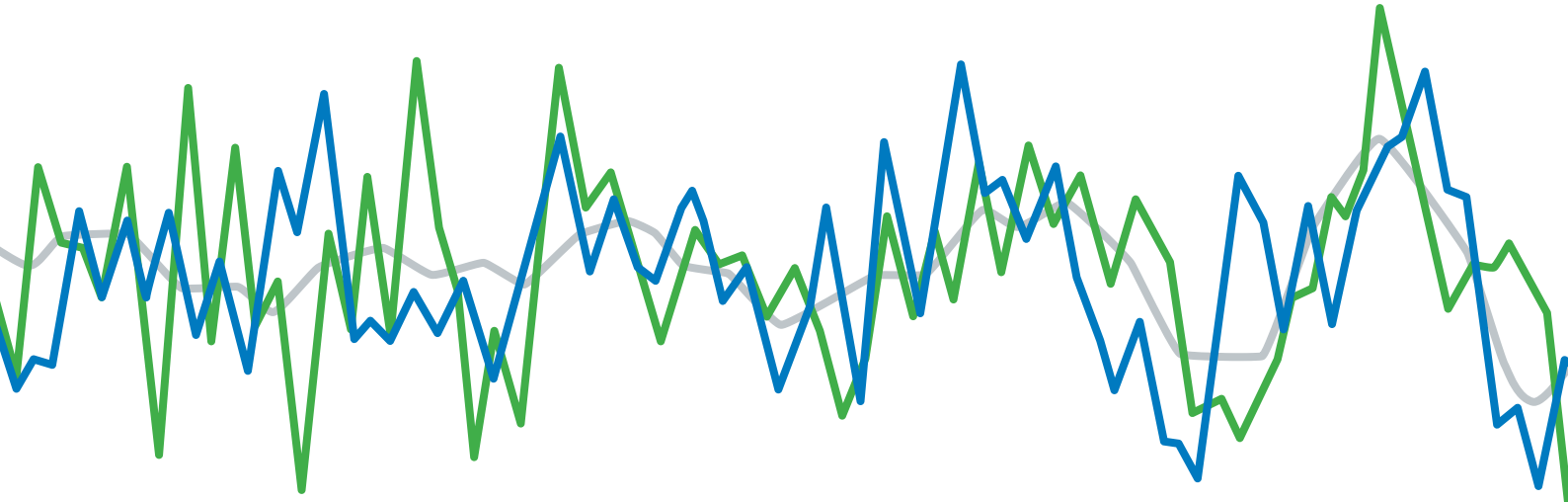
Matthias Mayer

Leiter Bereich Wissenschaft der Körber-Stiftung | *Head of Department Science of the Körber-Stiftung*

25.11.1915

Albert Einstein veröffentlicht seine allgemeine Relativitätstheorie und liefert gleich den Beweis ihrer Richtigkeit: Der sonnennächste Planet Merkur umläuft unser Zentralgestirn auf einer stark elliptischen Bahn. Der Punkt der größten Annäherung ist das Perihel. Astronomen stellten bei Messungen fest, dass das Perihel des Merkur wandert – pro Jahrhundert um 10 000 km oder 43 Bogensekunden. Grund: Die Schwerkraft anderer Planeten beeinflusst den relativ kleinen Merkur. Berechnet man die Bahnstörungen mit den Newton'schen Gravitationsgesetzen (1687), kommt man auf eine viel größere Verschiebung von 531 Bogensekunden. 1915 nimmt Einstein die Formeln seiner Relativitätstheorie, die Gravitation als Krümmung der Raumzeit darstellt, und ist begeistert. Denn damit errechnet er exakt die zuvor gemessenen 43 Bogensekunden. Dies bringt Einstein weltweiten Ruhm.

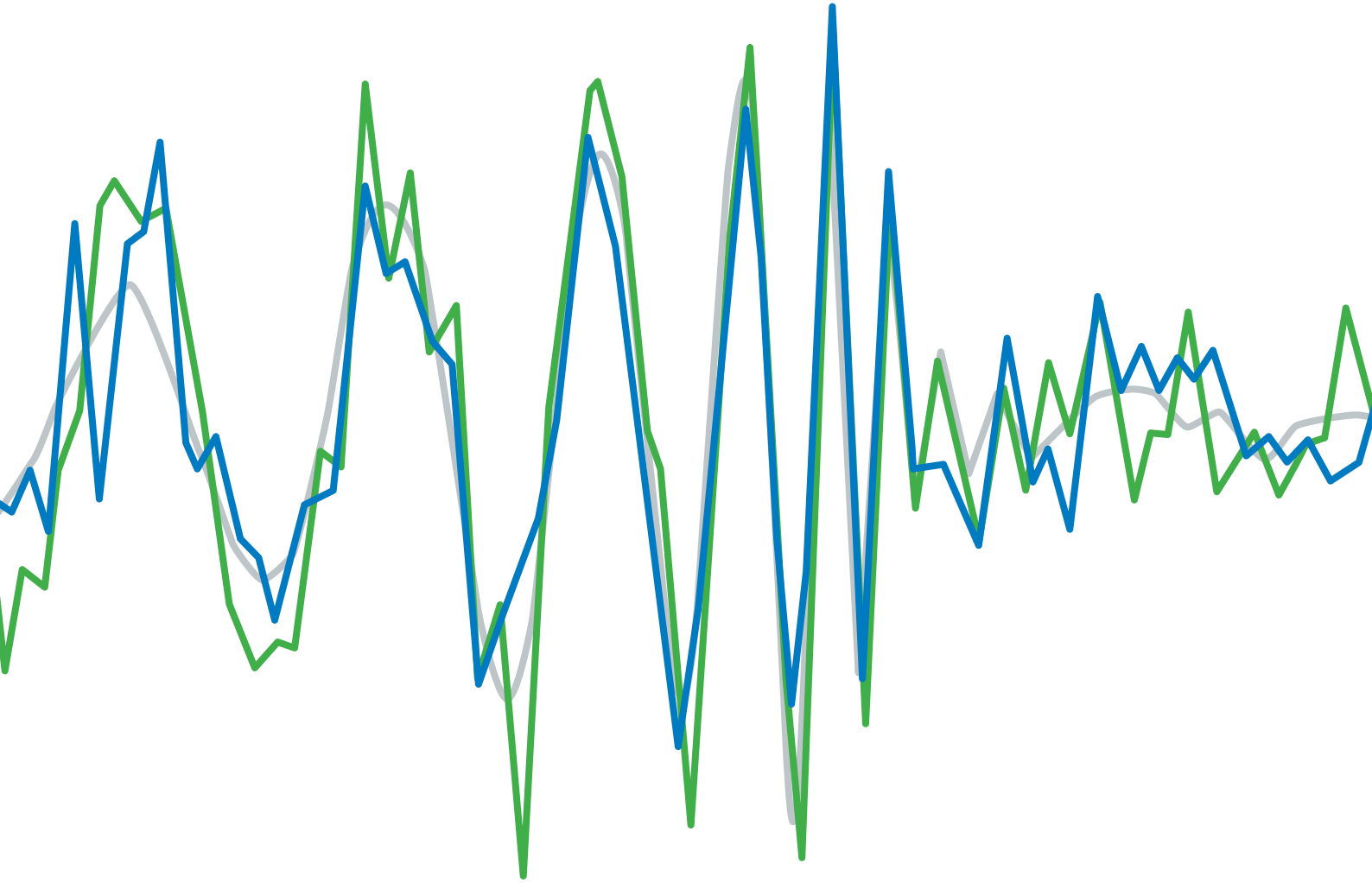
November 25, 1915 – *Albert Einstein publishes his general theory of relativity, providing at the same time proof of its validity. Mercury, the planet closest to the sun, orbits our central star in a strongly elliptical orbit. The point at which it is closest to the sun is the perihelion. In measurements, astronomers determined that Mercury's perihelion moves, namely 10,000 km or 43 arc seconds per century. The reason is that the gravity of other planets exerts an influence on relatively small Mercury. If the orbital perturbations are calculated using Newton's laws of gravity (1687), there is a much larger displacement of 531 arc seconds. In 1915 Einstein uses the equations in his theory of relativity and is enthusiastic since he thus calculates exactly the 43 arc seconds that had been previously measured. This makes Einstein famous around the world.*



14. 09. 2015

Dies ist das erste Signal einer Gravitationswelle, das Menschen je zu Gesicht bekamen. Die blaue Wellenlinie stammt vom LIGO-Detektor im US-Staat Louisiana, die grüne vom baugleichen LIGO-Detektor im US-Staat Washington. Die graue Welle ist ein vom Computer des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik in Potsdam modelliertes Vergleichsmuster.

September 14, 2015 – *This is the first signal from a gravitational wave that a human has ever seen. The blue wave comes from the LIGO detector in the US state of Louisiana, and the green one from the identical LIGO detector in the US state of Washington. The grey wave is a computer-modeled reference pattern from the Max Planck Institute of Gravitational Physics in Potsdam.*



LIGO-Messung der ersten Gravitationswelle in Livingston/Louisiana
LIGO measurement of the first gravitational wave in Livingston, Louisiana

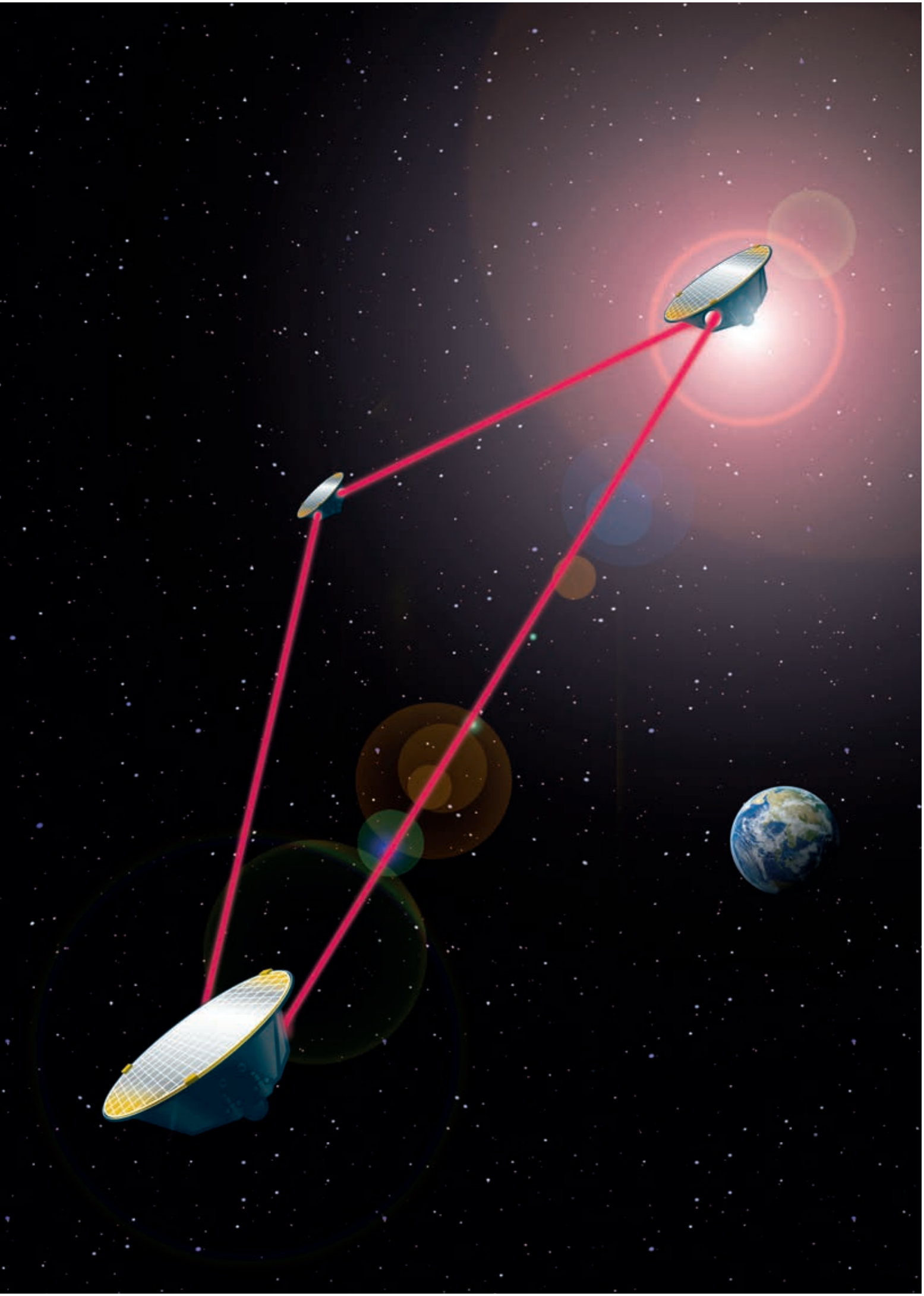
LIGO-Messung der ersten Gravitationswelle in Hanford/Washington
LIGO measurement of the first gravitational wave in Hanford, Washington

Die bestpassende von 250 000 im Computer modellierten »Vergleichswellen«
The best fitting of the 250,000 computer models of a reference wave

2034

In diesem Jahr wird die Europäische Weltraumorganisation ESA drei vom Danzmann-Team konzipierte LISA-Satelliten (Laser Interferometer Space Antenna) in den Weltraum schießen. Sie arbeiten ähnlich wie Gravitationswellen-Detektoren auf der Erde, ihre Laser-Messstrahlen bewegen sich jedoch frei durchs All. Da die Strahlen 2,5 Millionen Kilometer lang sind, können sie auch extrem tieffrequente Gravitationswellen registrieren, die etwa bei der Verschmelzung ultramassiver Schwarzer Löcher ausgesandt werden.

2034 – *This is the year that the European Space Agency (ESA) will launch into space three LISA satellites (Laser Interferometer Space Antenna) conceived by Danzmann's team. They function similarly to the gravitational wave detectors on the Earth but the measurement beams of their lasers move freely through space. Since the beams are 2.5 million kilometers long, they can also register extremely low-frequency gravitational waves, such as those emitted by the merger of ultramassive black holes.*



Prof. Dr. Karsten Danzmann

Schwerkraftsignale aus den Tiefen des Alls

Signals of Gravity from the Depths of Space

Der deutsche Physiker Karsten Danzmann und sein deutsch-britisches Kollegen-Team haben die Schlüsseltechnologien entwickelt, mit denen die amerikanischen LIGO-Detektoren am 14. September 2015 erstmals direkt Gravitationswellen nachweisen konnten. Ein solches »Zittern der Raumzeit«, ausgelöst durch massive Kollisionen oder Explosionen im All, hatte Albert Einstein bereits ein Jahrhundert zuvor theoretisch vorhergesagt. Mit ihrem Sensationsfund stoßen die Forscher zugleich ein neues Fenster zum All auf: Die Gravitationswellen-Astronomie erlaubt mittels Schwerkraftsignalen die dunkle Seite des Kosmos zu erkunden.

The German physicist Karsten Danzmann and his German-British team developed the key technologies used by the LIGO detectors in America to detect gravitational waves directly for the first time on September 14, 2015. Such a »vibration of space-time,« as triggered by massive collisions or explosions in space, had been predicted theoretically by Albert Einstein a century earlier. This sensational discovery signifies that researchers had opened a new window onto space. Gravitational wave astronomy makes it possible for them to use these signals of gravity to study the dark side of the cosmos.

Karsten Danzmann im Laserlabor. Die weißen Fäden links sind elektrische Kabel. Der Vorhang hält Staub vom Lasertisch fern.

Karsten Danzmann in the laser lab. The white strings at the left are electrical wires. The curtain keeps dust away from the laser's table.

TEXT: CLAUS-PETER SESÍN
FOTOS: FRIEDRUN REINHOLD

Der erste Mensch, der je das Signal einer Gravitationswelle zu Gesicht bekam, ist Marco Drago. Am 14. September 2015 saß der italienische Postdoc vor seinem Computer am Max-Planck-Institut (MPI) für Gravitationsphysik in Hannover und wertete Datenströme aus, die von den amerikanischen LIGO-Detektoren (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) hereinkamen. Die beiden baugleichen Stationen sind auf die Messung von Gravitationswellen spezialisiert. Um 11.50 Uhr mitteleuropäischer Zeit meldeten die LIGO-Sensoren, dass sie in den Rohdaten ein Signal gefunden hatten. Die amerikanischen Forscherkollegen konnten das Signal gar nicht bemerken, denn dort war es Nacht, und sie schliefen.

Drago informierte sofort seine MPI-Kollegen. Das Signal war überraschenderweise so stark und klar, dass es in den Rohdaten mit bloßem Auge zu erkennen war. Es schien sogar fast zu schön, um wahr zu sein. Hatten vielleicht Kollegen in den USA ein Testsignal in die Anlagen eingespeist und vergessen, die Community zu benachrichtigen? Hinzu kam, dass sich die beiden LIGO-Detektoren zu der Zeit noch in einem Probelauf befanden und niemand mit einer erfolgreichen Messung gerechnet hatte.

Doch nach drei Monaten intensiver Auswertung konnte die LIGO Scientific Collaboration (LSC) – ein Team von über tausend Forschern aus 18 Nationen – die Zweifel ausräumen: 1,3 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt, in der südlichen Hemisphäre, sind zwei riesige, sich zuvor als Paar umkreisende Schwarze Löcher ineinandergestürzt. Das eine hatte die 29-fache Masse unserer Sonne, das zweite die 36-fache. Beim Verschmelzen entstand ein noch schwereres Schwarzes Loch mit 62 Sonnenmassen. Die Differenz von drei Sonnenmassen wurde bei diesem kosmischen Mega-Event in Form von Gravitationswellen abgestrahlt – mit einer Energie, die in der letzten Zehntelsekunde der Verschmelzung 50-mal stärker war als die Lichtenergie, die sämtliche Sterne des Universums in dieser Zeit erzeugten.

Bereits am 26. Dezember 2015 spürten die LIGO-Detektoren die nächste Verschmelzung auf. Diesmal fusionierten im Abstand von 1,4 Milliarden Lichtjahren zwei kleinere Schwarze Löcher von 8 und 14 Sonnenmassen, was einen neuen Giganten von 21 Sonnenmassen gebar. Das Team jubelte, denn nun waren letzte Zweifel beseitigt, dass es sich bei der ersten Messung um ein Artefakt gehandelt haben könnte.

The first human to have ever seen the signal of a gravitational wave is Marco Drago, an Italian postdoc. On September 14, 2015, he was sitting in front of his computer at the Max Planck Institute (MPI) for Gravitational Physics in Hannover and analyzing the streams of data being received from the LIGO detectors (at the Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) in America. The two identical stations there are specialized for measuring gravitational waves. At 11:50 a.m. the LIGO sensors reported that they had detected a signal in the raw data. The American colleagues were not in a position to notice the signal since it was night there and they were asleep.

Drago immediately informed his MPI colleagues. The signal was surprisingly so strong and clear that it was visible in the raw data with an unaided eye. It appeared almost too good to be true. Had the colleagues in the USA perhaps fed a test signal to the stations and forgotten to inform the community? Moreover, at the time both of the LIGO detectors were still in the test phase and nobody had anticipated a successful measurement.

Yet after three months of intensive evaluation, the LIGO Scientific Collaboration (LSC) – a team of over a thousand researchers from 18 countries – was able to eliminate any doubts. In the southern hemisphere, 1.3 billion light years from the Earth, a pair of giant black holes that had been orbiting one another collapsed together. The mass of one of them was 29 times that of the sun, and that of the other was 36 times the size. Upon their merger, an even heavier black hole weighing 62 solar masses was created. The difference of three solar masses was the energy emitted during this cosmic mega event in the form of gravitational waves. In the final tenth of a second of the fusion, this energy was fifty times stronger than the light energy produced by all of the stars in the universe during the same time.

Already on December 26, 2015, the LIGO detectors recorded the next merger. This time two smaller black holes merged that were 1.4 billion light years away. The solar masses of these two black holes were 8 and 14; they created a new giant of 21 solar masses. The team cheered since this removed any remaining doubts that the first measurement might have been an artifact.

Der GEO600-Gravitationswellendetektor nahe dem Dorf Ruthe bei Hannover. Die Forscher arbeiten in den Containern. Die Laser-Messstrahlen durchlaufen zwei 600 Meter lange Vakuumrohre. GEO600 ist besonders empfindlich für Wellen aus Supernova-Explosionen und Neutronenstern-Verschmelzungen.

Am 4. Januar 2016 schließlich folgte die dritte (und vorerst letzte) Bestätigung. Diesmal belauschten die LIGO-Detektoren den »Todestanz« zweier Schwarzer Löcher von 19 und 31 Sonnenmassen in 2,9 Milliarden Lichtjahren Abstand.

All diese Präzisionsmessungen wären nicht möglich gewesen ohne die Vorarbeit des Forscherteams um Karsten Danzmann. Es hat viele der in den LIGO-Detektoren verwendeten Schlüsseltechnologien entwickelt, darunter die hochpräzisen und -stabilen Lasersysteme sowie die aufwendig vor Störeinflüssen geschützten optischen Systeme.

Karsten Danzmann, 62, ist einer der weltweit führenden Experten auf dem Gebiet der Gravitationsphysik. Nach Physikstudium und Promotion in Hannover ging er 1986 an die amerikanische Stanford University, wo er bis 1989 als Professor für Physik tätig war. Von 1993 bis 2001 leitete er die Außenstelle Hannover des MPI für Quantenoptik. Seit 2002 ist Danzmann Direktor am MPI für Gravitationsphysik. Parallel dazu lehrt er seit 1993 als Professor an der Leibniz Universität Hannover und leitet dort das Institut für Gravitationsphysik.

Dass Gravitationswellen nun genau gemessen werden können, freut vor allem Astronomen. »Es ist so, als hätte die Menschheit ein neues Sinnesorgan erhalten«, kommentiert die Frankfurter Physikerin Sabine Hossenfelder. Mit

The third (and so far last) confirmation took place on January 4, 2016. This time the LIGO detectors overheard the »death dances« of two black holes of 19 and 31 solar masses at a distance of 2.9 billion light years.

All of these precision measurements would not have been possible without the groundwork done by the team of researchers working with Karsten Danzmann. It developed many of the key technologies employed in the LIGO detectors, including the highly precise and stable laser systems as well as the optical systems that have sophisticated mechanisms protecting them against interference.

Karsten Danzmann (62) is one the world's leading experts in the field of gravitational physics. After studying physics and receiving his doctorate in Hannover, he went to Stanford University in the USA, where he served as a professor of physics until 1989. From 1993 until 2001 he headed the Hannover branch of the MPI of Quantum Optics. Danzmann has been Director of the MPI for Gravitational Physics since 2002. Parallel to this, he has also been a professor of physics at the Leibniz Universität Hannover since 1993, where he also heads the Institute for Gravitational Physics.

Astronomers, in particular, are pleased that gravitational waves can now be precisely measured. »It is as if human-

The GEO600 gravitational wave detector near the village of Ruthe close to Hannover. The researchers work in the containers. The laser's measurement beams pass through two 600 meter long vacuum tubes. GEO600 is particularly sensitive for waves from the explosions of supernovae and the mergers of neutron stars.

der Gravitationswellen-Astronomie stoßen die Forscher buchstäblich ein neues Fenster zum Kosmos auf. Bislang konnten sie das Weltall nur mit Hilfe elektromagnetischer Wellen erforschen – Licht, Radio-, Röntgen- oder Gammastrahlung. »Nun hat uns die Schwerkraft gleichsam ihren eigenen Boten geschickt«, sagt Danzmann. »Die Gravitationswellen-Forschung verspricht schon allein deshalb viele grundlegend neue Erkenntnisse, weil 99 Prozent des Universums dunkel sind und bislang kaum untersucht werden konnten.«

Dass Gravitationswellen existieren, hatte Albert Einstein bereits 1916 nachgewiesen – rein mathematisch als Ableitung aus seiner 1915 formulierten allgemeinen Relativitätstheorie. Mit seiner allgemeinen und der bereits 1905 veröffentlichten speziellen Relativitätstheorie stellte Einstein die Welt der Physik auf den Kopf – insbesondere Isaac Newtons »klassische Mechanik«. Newton hielt die Masse eines Körpers für eine Konstante. Einstein jedoch wies nach, dass die Masse eines Körpers stark zunimmt, wenn dieser auf ein Tempo nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wird. Die Lichtgeschwindigkeit

»Die Gravitationswellen-Forschung verspricht schon allein deshalb viele grundlegend neue Erkenntnisse, weil 99 Prozent des Universums dunkel sind und bislang kaum untersucht werden konnten.«

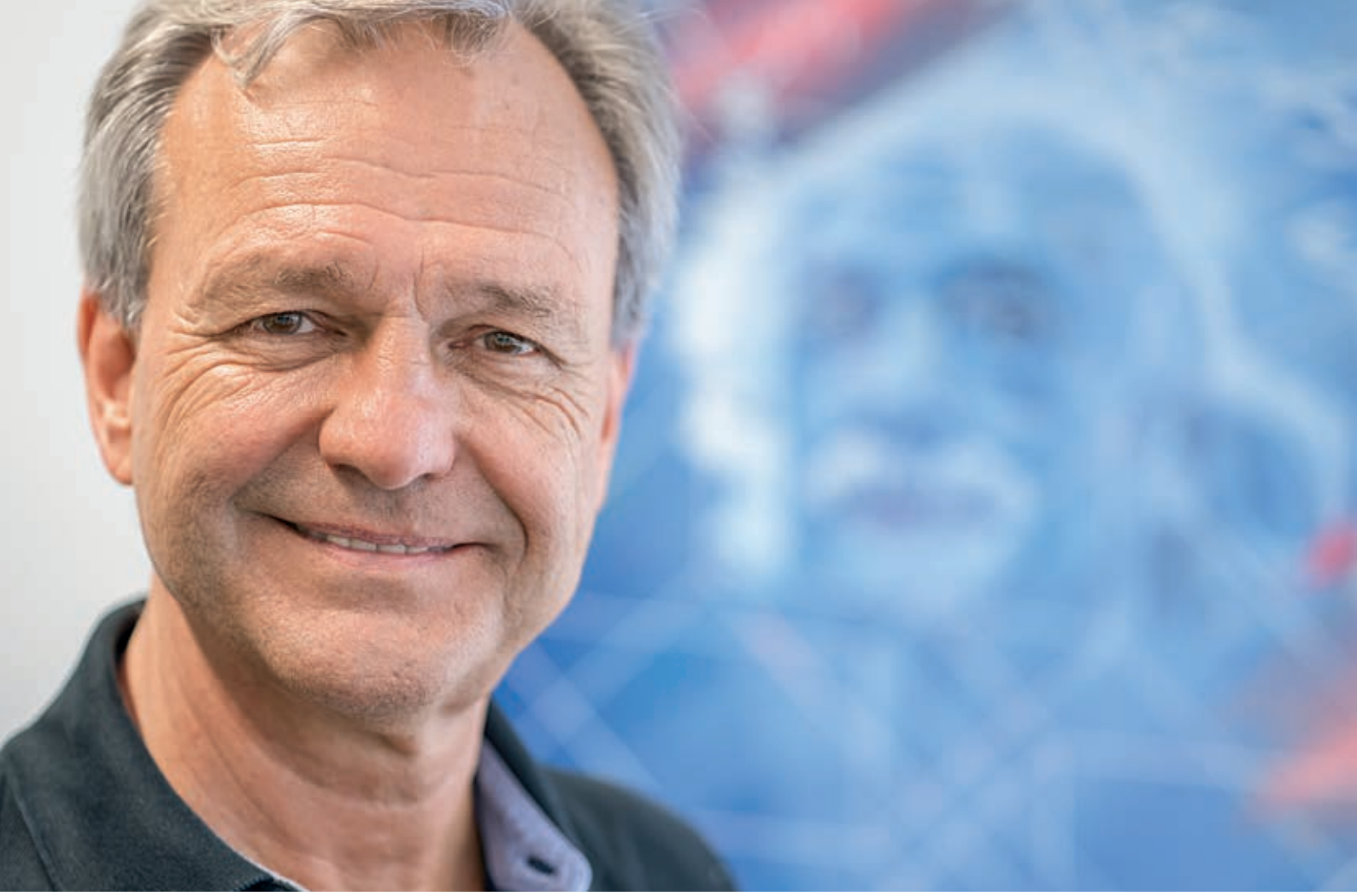
»For that reason alone, gravitational wave research holds the promise of many fundamentally new discoveries because 99 percent of the universe is dark and we have hardly been able to study it.«

ity had been given a new sensory organ,« comments Sabine Hossenfelder, a physicist in Frankfurt. In gravitational wave astronomy, the researchers have literally opened a new window on the cosmos. Until now, they could only study space with the aid of electromagnetic waves, such as light, radio waves, and x-ray or gamma radiation. »Now gravity has sent us its own messenger, as it were,« Danzmann says. »For that reason alone, gravitational wave research holds the promise of many fundamentally new discoveries because 99 percent of the universe is dark and we have hardly been able to study it.«

Albert Einstein proved the existence of gravitational waves already in 1916, deriving it mathematically from the general theory of relativity that he formulated in 1915. By publishing his general and special theories of relativity – the latter already in 1905 – Einstein turned the world of physics up-side down, particularly Isaac Newton's classical mechanics. Newton considered the mass of a body to be a constant. Einstein, however, demonstrated that the mass of a body increases greatly if it is accelerated

Computermonitore im Zentralgebäude von GEO600 zeigen die Laserstrahl-Positionen und eine Reihe diagnostischer Signale. Der schwarze Kasten rechts unten ist ein Bandlaufwerk zur Datenaufzeichnung.

Computer monitors in the central building of GEO600 display the positions of the laser beams and a series of diagnostic signals. The black box at the bottom right is a tape drive for recording data.



ist daher ein natürliches Tempolimit im gesamten Universum – auch für die Ausbreitung von Krafteinflüssen und Information.

Gemäß der Relativitätstheorie entsteht Schwerkraft dadurch, dass eine Masse die von Einstein postulierte vierdimensionale Raumzeit krümmt. Diese kann man sich vereinfacht als straff gespannte Gummimatte vorstellen. Legt man eine schwere Kugel auf die Matte, beult diese nach unten aus – die Raumzeit krümmt sich. Rollt danach in der Nähe eine kleinere Kugel vorbei, so wird deren Bahn durch die Delle der schweren Kugel abgelenkt. Diese Bahnabweichung ist die Wirkung der Schwerkraft in der Raumzeit.

Wirft man mit voller Wucht eine besonders schwere Kugel auf die Matte, erzittert deren gesamte Fläche. Diese Erschütterungen entsprechen Einsteins Gravitationswellen, die sich als kosmisches Beben durch die Raumzeit fortpflanzen. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Dies widerlegt zugleich Newtons These, dass die Schwerkraft sofort ohne zeitlichen Verzug im gesamten Weltall wirke.

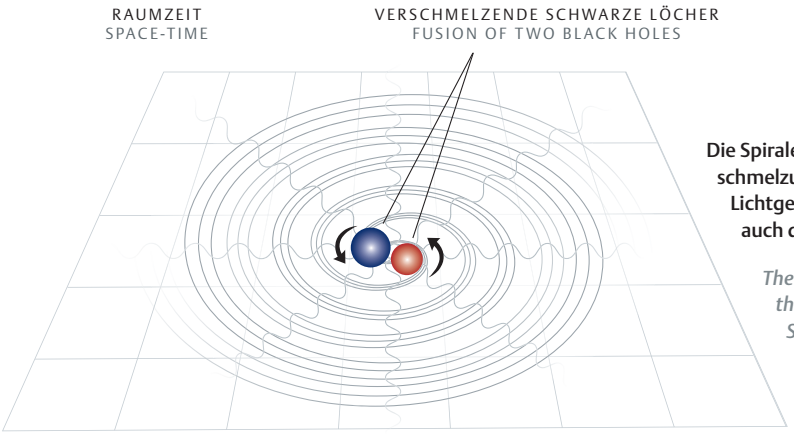
Da Gravitationswellen die Raumzeit nur minimal krümmen, glaubte Einstein, sie könnten niemals nachgewiesen werden. Typische Auslöser sind kosmische Katastrophen wie Supernova-Explosionen oder das Verschmelzen zweier sich umkreisender Schwarzer Löcher. Gravitationswellen durchdringen sämtliche Materie. Laufen sie durch einen Gymnastikball, so würde dieser sich zuerst zu einem auf

to a speed close to that of light. The speed of light is thus a natural speed limit throughout the entire universe, even for the spread of energy and information.

According to the theory of relativity, gravity originates by the fact that a mass bends the four-dimensional space-time that Einstein postulated. Simplified, this can be envisaged as a tightly stretched rubber mat. If a heavy ball is placed on it, the mat buckles downwards – space-time bends. If a smaller ball then passes nearby, its path is deflected by the dent made by the heavy ball. This path deviation is the consequence of gravity in space-time.

If a particularly heavy ball is thrown very forcefully at the mat, the entire surface of the mat shakes. These vibrations correspond to Einstein's gravitational waves, which spread as cosmic quakes through space-time at the speed of light. This disproves Newton's thesis that the effect of gravity is immediate throughout all of space without any delay.

Since gravitational waves only bend space-time a minimal amount, Einstein believed they could never be detected. These waves are typically triggered by cosmic catastrophes such as the explosion of a supernova or the fusion of two black holes orbiting each other. Gravitational waves pass through all matter. If they were to pass through an exercise ball, it would first become egg-shaped and stand on



Die Spirale zeigt die Dellen in der Raumkrümmung, die bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher erzeugt werden und sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Kurz vor der Fusion bewegen sich auch die beiden Schwarzen Löcher fast mit Lichtgeschwindigkeit.

The spiral shows the dents in the curvature of space that result from the fusion of two black holes and that spread at the speed of light. Shortly before the fusion, the two black holes are also moving at almost the speed of light.

der Spitze stehenden Ei und dann zu einem abgeflachten Kürbis verformen – freilich unmerklich geringfügig.

Direkt nachweisen lassen sich Gravitationswellen mit Michelson-Interferometern, zu denen auch die beiden LIGO-Detektoren zählen. Michelson-Interferometer verfügen über zwei sehr lange, rechtwinklig zueinander verlaufende Messarme. Das Grundprinzip ist einfach: Läuft eine Gravitationswelle durch den Detektor, wird einer der Arme gestaucht, der andere gedehnt. Diese Längenveränderungen werden mit Lasern vermessen. Hochkompliziert ist die Messtechnik, da diese extrem präzise sein muss: Die vier Kilometer langen Messarme der LIGO-Detektoren schwanken in ihrer Länge lediglich um einige Tausendstel des Durchmessers eines Wasserstoff-Atomkerns.

Die enorme Messpräzision der LIGO-Laserinterferometrie ist das Hauptverdienst des deutsch-britischen Danzmann-Teams. Über 100 Wissenschaftler sind an dieser »GEO-Kollaboration« beteiligt. 20 Kilometer südlich von Hannover, nahe dem Dorf Ruthe, betreiben die Forscher einen eigenen Detektor namens GEO600. Dessen Arme sind nur 600 Meter lang. In GEO600 und kleineren Vorläufern hat das Team die Laser und sonstigen Messapparaturen in jahrzehntelanger Kleinarbeit auf höchste Präzision getrimmt. So sind etwa die optischen Systeme als Pendel an hochstabilen Quarzfasern aufgehängt, um Erschütterungen – etwa durch Erdbeben oder Autos – abzufangen. Hunderte winzige Kraftsensoren (Aktuatoren) mindern den Einfluss externer Stöße zusätzlich. In den 600 Meter langen Röhren der Messarme herrscht ein Hochvakuum, damit keine Luftmoleküle den Laserstrahl stören. Zur Verstärkung des optischen Signals werden sowohl der Laserstrahl als auch gemessene Signale im System recycelt. Dies hat die Messempfindlichkeit nochmals verzehnfacht. All diese Errungenschaften flossen in die beiden amerikanischen LIGO-Detektoren ein. Deren Lasersysteme haben die GEO600-Forscher in Hannover konzipiert, konstruiert und sogar in den USA eingebaut.

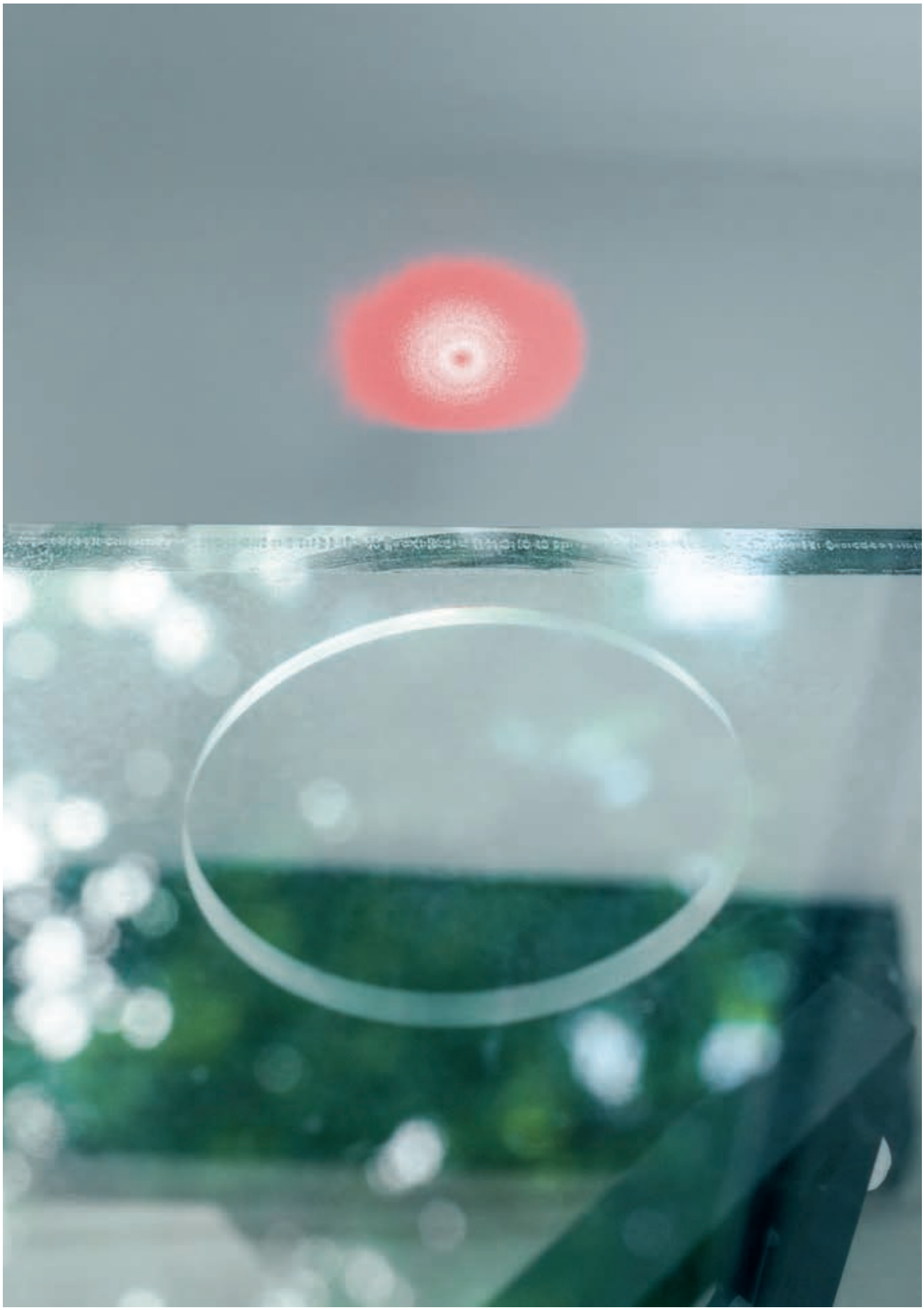
Die enorme Messpräzision der LIGO-Laserinterferometrie ist das Hauptverdienst des deutsch-britischen Danzmann-Teams.

The enormous measurement precision of the LIGO laser interferometer is the main achievement of Danzmann's German-British team.

its tapered end, only to change to a flattened pumpkin – of course, imperceptibly minimal changes.

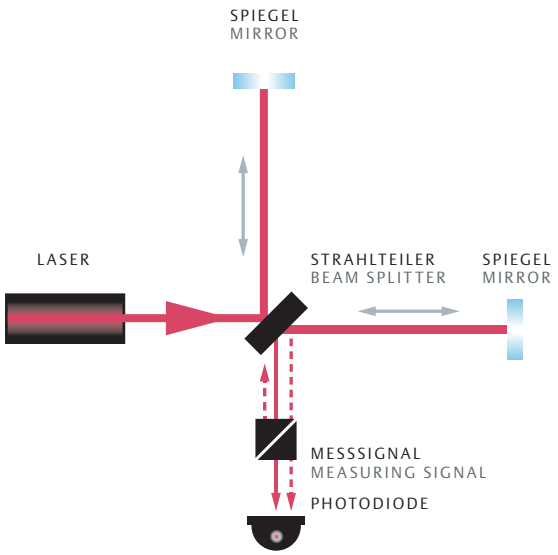
Gravitational waves can be detected directly using Michelson interferometers, such as the two LIGO detectors. These interferometers are equipped with two very long measuring arms extending at right angles to each other. The basic principle is simple. If a gravitational wave passes through the detector, one of the arms is compressed and the other is stretched. These changes in length are measured using lasers. The measuring technique is highly complicated since it must be extremely precise. The four kilometer long measuring arms of the LIGO detectors change in length by only a few thousandths of the diameter of the nucleus of a hydrogen atom.

The enormous measurement precision of the LIGO laser interferometer is the main achievement of Danzmann's German-British team. Over one hundred scientists take part in the GEO Collaboration. These scientists operate their own detector, called GEO600, located near the village of Ruthe about 20 kilometers south of Hannover. The arms of this detector are only 600 meters long. In decades of detail work in GEO600 and smaller forerunner projects, the team has optimized the lasers and other measuring instruments in the detector to the highest degree of precision. For example, the optical systems are suspended as pendulums using highly stable silica fibers in order to absorb vibrations such as from an earthquake or automobiles. Hundreds of tiny actuators additionally diminish the impact of external vibrations. There is a high vacuum in the 600 meter long tubes of the measuring arms so that air molecules do not disturb the laser beam. To amplify the optical signals, both the laser beam and the measured signals are recycled in the system. This has further increased the measuring sensitivity tenfold. All of these achievements have been incorporated in the two American LIGO detectors. The



Der Laserstrahl des GEO600-Interferometers; unten eine Beobachtungsöffnung in der Staubschutzabdeckung.

The laser beam of the GEO600 interferometer. At the bottom is an observation port in the dust cover.



Der Strahlteiler des Gravitationswellendetektors spaltet den Laserstrahl in zwei Teilstrahlen auf. Sie durchlaufen die beiden rechtwinklig zueinander angeordneten Messarme. Spiegel an den Enden der Messarme reflektieren die Teilstrahlen und schicken sie zurück. Dort überlagern sie sich zum Signalstrahl, den eine als Sensor dienende Photodiode registriert. Die gemessenen Helligkeitsänderungen sind ein Maß für Längenänderungen der Messarme, die entstehen, wenn diese von einer Gravitationswelle durchlaufen werden.

The beam splitter in the gravitational wave detector divides the laser beam into two parts. They pass through the pair of measuring arms that are perpendicular to one another. Mirrors at the ends of the measuring arms reflect each of the split beams and send them back. There they are superimposed to a signal beam that is registered by a photodiode serving as a sensor. The changes in brightness are a measure for the changes in length of the measuring arms that result when a gravitational wave passes through them.

Das Messprinzip eines Michelson-Interferometers basiert auf Interferenz. Werden zwei Wellen gleicher oder ähnlicher Frequenz (Schwingungsdauer) überlagert, so können sie sich je nach Phasenlage entweder gegenseitig verstärken oder auslöschen: Fallen zwei Wellenberge aufeinander, addieren sie sich zu einem starken Signal. Fällt ein Wellenberg der einen Welle auf ein Tal der anderen, so löschen sich die beiden Wellen komplett aus.

Im Michelson-Interferometer wird der Strahl eines leistungsstarken Infrarotlasers durch einen optischen Strahlteiler geschickt und dadurch in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Der eine Teilstrahl durchläuft den ersten Messarm und wird an dessen Ende von einem Spiegel reflektiert. Der zweite durchläuft den zweiten Arm und wird ebenfalls von einem Spiegel am Ende reflektiert. Die beiden reflektierten Teilstrahlen treffen sich erneut am Strahlteiler und werden von diesem auf einen Messsensor umgelenkt.

Die beiden Teilstrahlen sind so eingestellt, dass sie sich im Normalfall durch Interferenz auslöschen. Dann fällt kein Licht auf den Messsensor. Dies ändert sich, sobald eine Gravitationswelle durch die Arme läuft. Diese staucht und dehnt deren Armlänge. Dadurch muss auch der Laserstrahl mal eine längere und mal ein kürzere Wegstrecke zurücklegen. Folge: Die beiden reflektierten Teilstrahlen löschen sich am Strahlteiler nun nicht mehr durch Interferenz aus, und der Messsensor empfängt Laserlicht, das gleichsam im Takt der Gravitationswelle schwankt.

Gravitationswellen entstehen immer dann, wenn Massen beschleunigt werden. Selbst wenn wir unsere Hand heben oder ein Sprinter startet, entsteht eine winzige, praktisch nicht nachweisbare Gravitationswelle. Auch Kreisbewegungen sind beschleunigte Bewegungen. So sendet etwa die Erde bei ihrem Umlauf um die Sonne ständig Gravitationswellen aus – allerdings nur in einer Stärke entsprechend 200 Watt – kaum genug, um eine Toastscheibe zu rösten.

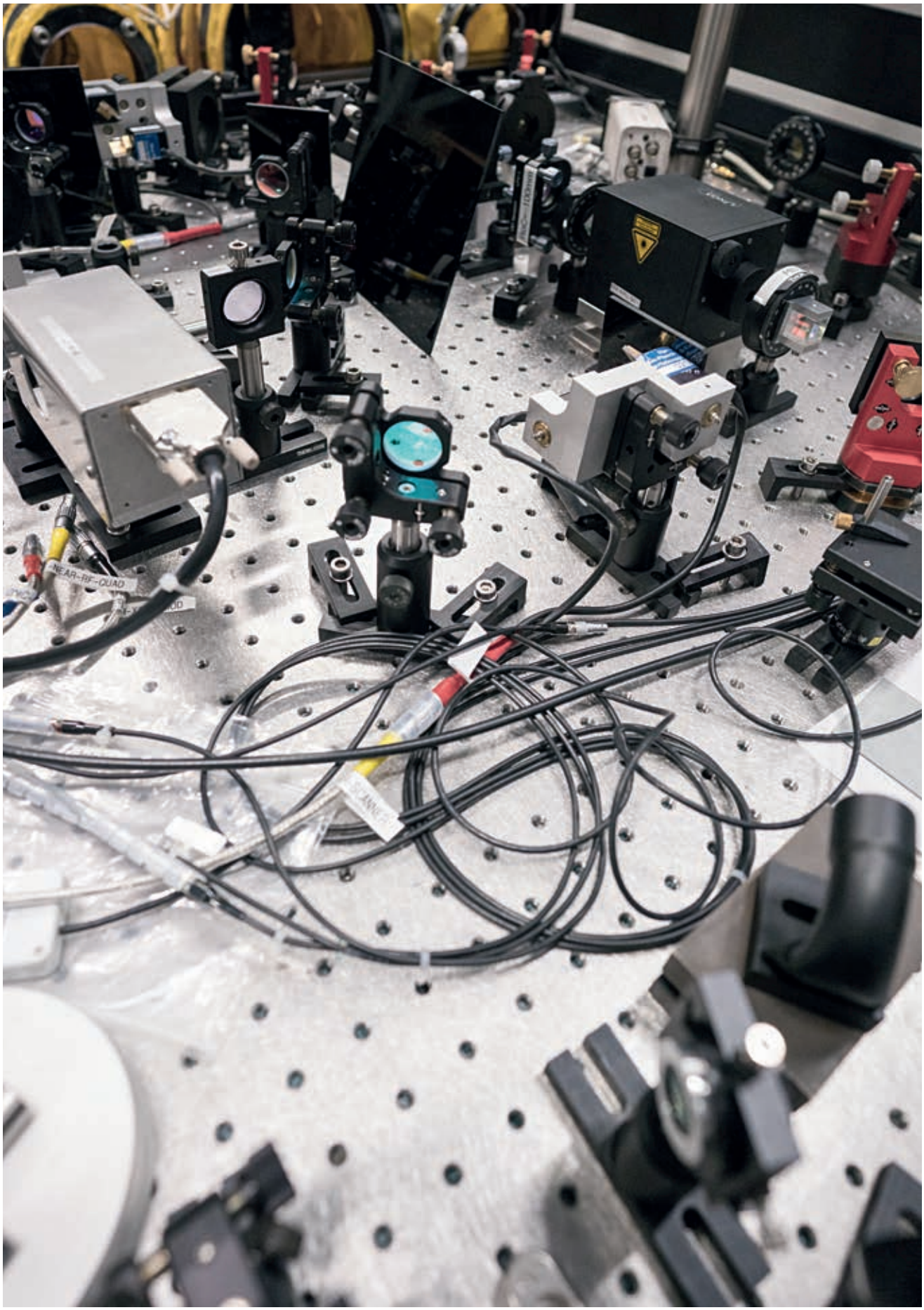
laser systems of those detectors were designed, constructed, and even installed by the GEO600 scientists.

The principle behind a Michelson interferometer is based on interference. If two waves of the same or similar frequency (period of oscillation) are superimposed, they can either amplify or cancel one another depending on their phase. If two wave crests coincide, they combine to form a strong signal. If the wave crest of one wave is superimposed on the trough of another, then the two waves can cancel each other completely.

In a Michelson interferometer the beam of a powerful infrared laser is sent through a beam splitter and divided into two parts. The first goes through the first measuring arm and is reflected by a mirror at its end, while the second goes through the second arm and is also reflected by a mirror at the end. The two reflected parts meet again at a beam splitter and are redirected by it to a sensor.

The two parts of the beam are set so that they normally cancel one another through interference. In this case, no light reaches the sensor. This changes as soon as a gravitational wave passes through the arms. The wave compresses and stretches the arms' lengths, meaning that one laser beam must pass through a longer path and the other a shorter one. As a consequence, the two reflected beams do not cancel each other at the beam splitter as a result of interference. The sensor then registers laser light that vibrates in the same tact, as it were, as the gravitational wave.

Gravitational waves always arise when masses are accelerated. Even when we raise our hand or a sprinter starts running, a tiny gravitational wave is created, which in practice, though, cannot be verified. Circular movements are also accelerated movements. For example, the Earth is constantly sending gravitational waves while it is orbiting



Detektionstisch von GEO600 mit diversen optischen Komponenten – darunter Scanner und Faraday-Isolatoren.

A detection table at GEO600 with diverse optical components, including scanners and Faraday isolators.

Die vier Kilometer langen Messarme der beiden LIGO-Detektoren sind maßgeschneidert für das Belauschen von Fusionen mittelschwerer Schwarzer Löcher.

The four kilometer long measuring arms of the two LIGO detectors are custom made to eavesdrop on the fusion of medium-sized black holes.

Wirklich starke Gravitationswellen erzeugen nur kosmische Gewaltakte wie etwa Stern-Explosionen. Größere Sterne von mindestens acht Sonnenmassen brechen am Ende ihrer Lebenszeit unter ihrer enormen Schwerkraft zusammen. Von außen ist das als Supernova-Explosion wahrnehmbar. Supernovae können kurze Zeit so hell leuchten wie eine Milliarde Sonnen, so dass sie auch tagsüber mit bloßem Auge zu erkennen sind. Einen solchen plötzlich am Himmel aufflammenden Lichtpunkt hatten im Jahr 1054 chinesische Gelehrte gesichtet.

Eine Supernova schleudert bei der Explosion ihre Hülle ins All, und aus den Bruchstücken werden in der starken Strahlung seltenere und schwerere chemische Elemente wie etwa Gold »gebacken«. Das Zentrum der Supernova hingegen stürzt in sich zusammen, da nichts die Schwerkraft mehr aufhalten kann. Die Wucht dieser Implosion ist so stark, dass die frisch gebackenen Atome im Zentrum in ihre Bestandteile zerlegt werden. Folge: Innerhalb eines Sekundenbruchteils kollabiert das Zentrum zu einer Kugel von wenigen zehn Kilometern Durchmesser: Ein neuer Neutronenstern ist geboren. Diese relativ kleine Kugel entsprechend dem Großraum Hamburg kann dennoch ein Mehrfaches der Sonnenmasse haben, denn sie besteht aus dicht an dicht gepackten Neutronen, so als wäre sie ein riesiges Mega-Neutron.

Bei der finalen Explosion extrem großer Sterne mit über 40 Sonnenmassen entsteht im Innern ein Schwarzes Loch. Es hat eine derart hohe Gravitation, dass nicht einmal mehr Lichtteilchen seinem Schwerefeld entkommen können (daher der Name). Auch Neutronensterne können sich nachträglich in Schwarze Löcher umwandeln, wenn sie genügend weitere Materie in sich hineinsaugen oder wenn zwei von ihnen ineinanderstürzen.

Die Gravitationswellen, die all diese kosmischen Mega-Events aussenden, wollen Danzmann und Kollegen mit jeweils unterschiedlichen Michelson-Interferometern einfangen. Die Frequenzen dieser Raumzeit-Vibrationen sind breit gefächert: Sie liegen zwischen 0,0001 und 1000 Hertz. »Grundsätzlich gilt: Je schwerer die verschmelzenden Massen sind, desto stärker und niederfrequenter sind die ausgesandten Gravitationswellen«, erklärt Danzmann. Bei den Michelson-Detektoren bestimmt die Armlänge, für welche Frequenzbereiche sie besonders empfindlich sind – ähnlich wie bei früheren Kofferradios die Antennenlänge optimal auf das zu empfangende Radiosignal zugeschnitten war.

the sun – although only in a strength corresponding to 200 watts, hardly enough to toast a slice of bread.

Really strong gravitational waves only result from violent cosmic events such as the explosion of a star. Larger stars, i.e., those of at least eight solar masses, collapse at the end of their lifetime under their own gravity. From a distance, this appears as the explosion of a supernova. For a brief time, supernovae can shine as brightly as a billion stars, making it possible for us to see them unaided during the day. Chinese scholars sighted one such blazing point of light that suddenly appeared in the sky in 1054.

In such an explosion, a supernova hurls its outer layer into space, out of the fragments of which strong radiation creates rare and heavy chemical elements such as gold. The core of the supernova, in contrast, collapses since there is nothing to withstand the gravity. The force of this implosion is so strong that the freshly baked atoms in the core are broken into their components. The consequence is that within a fraction of a second the core collapses to a sphere a few tens of kilometers in diameter. A neutron star is born. This relatively small sphere corresponding to the size of the Hamburg metropolitan area can nonetheless have a mass of multiple solar masses since it consists of densely packed neutrons as if it were a giant mega-neutron.

The product of the final explosion of an extremely massive star of more than 40 solar masses is a black hole. Its gravitation is so strong that not even particles of light can escape its field of gravity (thus its name). Even neutron stars can subsequently be transformed into black holes if they take up sufficient additional matter or if two of them collapse onto one another.

Danzmann and his colleagues want to use different types of Michelson interferometers in order to capture the gravitational waves that all of these cosmic mega events emit. The frequencies of these vibrations of space-time vary widely. They range from 0.0001 to 1000 hertz. »As a basic principle, the heavier the merging masses, the stronger the gravitational waves they emit and the lower their frequency,« according to Danzmann. The arm length of the Michelson detectors determines the frequency range that they are particularly sensitive for, similar to how in earlier portable radios the antenna length was designed to be optimal for the radio signal to be received.

THOFEHRN
500kg

Die GEO600-Forscher müssen im Reinraumbereich Schutzanzüge tragen, damit die optischen Komponenten sauber bleiben.

The GEO600 scientists have to wear protective suits in the clean room area so that the optical components can stay clean.

Die beiden LIGO-Detektoren sind mit ihren je vier Kilometer langen Armen gleichsam maßgeschneidert zum Belauschen von Gravitationswellen, die beim Verschmelzen mittelgroßer Schwarzer Löcher entstehen, wie dem ersten jemals gemessenen Event am 14. 9. 2015. Entsprechend stark und aus Forschersicht schön fiel das gelieferte Messsignal aus.

»Das Ausbreitungsverhalten von Gravitationswellen entspricht in etwa dem von Schall«, sagt Danzmann. »Der Schall quetscht und dehnt die Luft und eine Gravitationswelle eben den Raum.« Zur Veranschaulichung kann man Gravitationswellen auch anhand von Schallwellen entsprechender Frequenz hörbar machen.

Das Signal von GW150914 war typisch: In der letzten Sekunde vor der Vereinigung, als sich die beiden kosmischen Vielfraße immer näher kamen, ähnelte es einer Sinuskurve, deren Nulldurchgänge immer enger zusammenrückten, während die Amplitude anstieg. Die Frequenz der Gravitationswellen stieg währenddessen von 35 Hertz (in Schallwellen ein tiefer Basston) bis auf 250 Hertz (ein hoher Basston) an. Deutlich höher sind die Töne bei der Vereinigung zweier kleinerer Schwarzer Löcher oder zweier Neutronensterne. »Das kann sich dann ähnlich wie ein Grillenzirpen anhören«, sagt Danzmann. »Englischsprachige Forscher bezeichnen das Geräusch daher auch als Chirp.«

Der GEO600-Detektor bei Hannover ist mit einer Armlänge von 600 Metern gleichsam für die »Sopran«-Region des Gravitationswellen-Spektrums ausgelegt. Seine maximale Empfindlichkeit liegt im Bereich um 1000 Hertz. Das entspricht, in Schallwellen, einem mittelhohen Piepton. 1000-Hertz-Gravitationswellen senden unter anderem explodierende Supernovae oder zwei kleinere ineinanderstürzende Neutronensterne aus. Zum Abhören der basslastigen GW150914-Töne fehlten GEO600 somit die passenden Ohren: Den Bereich von 35 bis 250 Hertz, der am 14. 9. 2015 durch die Erde wallte, konnte GEO600 schon rein messtechnisch kaum registrieren.

Besonders langsame und energiereiche Raumzeit-Schwingungen erzeugt die Kollision von zwei ultramassiven Schwarzen Löchern mit jeweils über einer Million Sonnenmassen, wie sie in den Zentren von Galaxien sitzen. Eine solche Monster-Vibration schwingt mit nur 0,001 bis 0,0001 Hertz.

»Das Ausbreitungsverhalten von Gravitationswellen entspricht in etwa dem von Schall«, sagt Danzmann. »Der Schall quetscht und dehnt die Luft und eine Gravitationswelle eben den Raum.«

»The propagation of gravitational waves corresponds approximately to that of sound,« according to Danzmann. »Sound compresses and stretches air, and gravitational waves do the same with space.«

The four kilometer long arms of each of the LIGO detectors are custom made, as it were, to eavesdrop on the gravitational waves that result from the merging of medium-sized black holes, such as the event first detected on September 14, 2015. The measuring signal that was recorded was therefore strong and, from a scientist's point of view, beautiful.

»The propagation of gravitational waves corresponds approximately to that of sound,« according to Danzmann. »Sound compresses and stretches air, and gravitational waves do the same with space.« To illustrate this you can make gravitational waves audible by using sound waves of the corresponding frequency.

The signal from GW150914 was typical. In the last second before the merger, as the two cosmic gluttons moved closer together, it resembled a sine curve whose zero crossings were pushed closer and closer together while the amplitude increased. At the same time, the frequency of the gravitational waves increased from 35 hertz (in sound waves, a deep bass tone) to 250 hertz (a high bass tone). The respective sounds for the merger of two smaller black holes or two neutron stars are much higher. Danzmann notes, »That can sound like a cricket. English-speaking scientists therefore also refer to the noise as a chirp.«

The arm length of the GEO600 detector located near Hannover is 600 meters, suitable for the »soprano« region of the gravitational wave spectrum. The maximum sensitivity of this detector is in the region of 1000 hertz. This corresponds, in sound waves, to a medium-high bleep. Two sources of gravitational waves in the 1000 hertz region are exploding supernovae and the merging of two smaller neutron stars. Thus GEO600 lacks the ears suitable for listening to the bass-heavy sounds of GW150914. In a purely metrological sense, GEO600 can hardly register signals in the region from 35 to 250 hertz such as those that flowed through the Earth on September 14, 2015.

Particularly slow and powerful vibrations of space-time are produced by the collision of two ultramassive black holes of over a million solar masses apiece, such as those that sit at the center of galaxies. Such a monster vibration oscillates at only 0.001 to 0.0001 hertz. This means that the gravitational wave needs be-

Komponenten für den Vakuumbereich von GEO600 werden aus Sauberkeitsgründen während der Lagerung in Alufolie eingewickelt.

For reasons of cleanliness, components destined for the vacuum area of GEO600 are packed in aluminum foil when being stored.

Das bedeutet: Die Gravitationswelle benötigt für die Vollendung einer einzigen Schwingung zwischen 17 Minuten und knapp drei Stunden. Hörbar machen lassen sich solche Zeitlupen-Schwingungen nicht. Der Mensch kann nur Töne zwischen 20 und 20.000 Hertz wahrnehmen.

Um auch die ganz langsam schwingenden Gravitationswellen erfassen zu können, müssen die Astrophysiker ins All hinaus: Im Jahr 2034 soll in Kooperation mit der Europäischen Weltraumorganisation ESA ein Michelson-Interferometer namens LISA (Laser Interferometer Space Antenna) im Weltraum stationiert werden. Das LISA-Grundkonzept stammt ebenfalls vom Danzmann-Team: Drei Satelliten spannen Messarme mit einer Länge von 2,5 Millionen Kilometern auf, ideal für die extrem tiefen Töne, die bei der Fusion ultramassiver Schwarzer Löcher ausgesandt werden. Über derart lange Messstrecken weitet sich der Laserstrahl auf mehrere Dutzend Kilometer auf, so dass er nicht mehr direkt reflektiert werden kann (wie von den Spiegeln am Ende der irdischen Messarme). Stattdessen sendet der Empfänger-Satellit eigene Lasersignale aus, die er mit den bei ihm eintreffenden synchronisiert, »eine Art simulierter Spiegel«, erklärt Danzmann.

Das LISA-Grundkonzept stammt ebenfalls vom Danzmann-Team: Drei Satelliten spannen Messarme mit einer Länge von 2,5 Millionen Kilometern auf, ideal für die extrem tiefen Töne, die bei der Fusion ultramassiver Schwarzer Löcher ausgesandt werden.

The fundamental conception for LISA also comes from Danzmann's team. Three satellites will span measuring arms 2.5 million kilometers long, making it ideal for the extremely deep tones that are emitted when two ultramassive black holes fuse.

tween 17 minutes and almost three hours to complete a single oscillation. Such slow-motion vibrations cannot be made audible. Humans can only perceive tones between 20 and 20,000 hertz.

In order to be able to register very slowly oscillating gravitational waves, astrophysicists have to go out into space. In cooperation with the European Space Agency (ESA), a Michelson interferometer named LISA (for Laser Interferometer Space Antenna) is supposed to be stationed in space in 2034. The fundamental conception for LISA also comes from Danzmann's team. Three satellites will span measuring arms 2.5 million kilometers long, making it ideal for the extremely deep tones that are emitted when two ultramassive black holes fuse. Over such long distances, a laser beam spreads out to several dozen kilometers, making it impossible for it to be reflected directly (such as by the mirrors at the ends of the measuring arms on the Earth). The receiving satellite will instead send out its own laser signals, which it will synchronize with those it receives. Danzmann explains that this is »a kind of simulated mirror.«

That slowly oscillating gravitational waves are

In erdgestützten Detektoren sind langsam schwingende Gravitationswellen nicht nur mangels ausreichender Armlänge schwer zu messen. Hinzu kommt, dass Aufzeichnungen im tieferen Frequenzbereich besonders stark von Erdbeben sowie von Erschütterungen durch Meeresbrandung oder Verkehr gestört werden. Aus diesem Grund wurden die beiden LIGO-Detektoren als identisches Paar im Abstand von 3000 Kilometern aufgestellt. Ereignete sich in der Nähe des LIGO-Detektors im US-Staat Washington ein Erdbeben, so würden dessen Erdbebenwellen, die sich mit maximal 7 Kilometern pro Sekunde ausbreiten, frühestens gut 7 Minuten später am zweiten LIGO-Detektor in Louisiana eintreffen. Hingegen gäbe es bei einer direkt von oben kommenden Gravitationswelle überhaupt keine Messverzögerung. Und eine von der Seite kommende bräuchte für die 3000 Kilometer lediglich eine Hundertstelsekunde, da Gravitationswellen sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Das bedeutet: Wenn einer der LIGO-Detektoren etwas misst, was nicht spätestens 10 Millisekunden danach auch der zweite LIGO-Detektor registriert, handelt es sich höchstwahrscheinlich um ein seismisches oder sonstiges Fehlsignal.

Aber auch bei höheren Frequenzen, die weniger von irdischen Störungen beeinflusst werden, ist die Auswertung der Messdaten oft schwierig: Bei der Fusion kleinerer Objekte oder Events, die sich in großem Abstand von der Erde abspielen, können die Messdaten so schwach ausfallen, dass sie im Eigenrauschen des Laser-Messsystems untergehen. Grund: Der Laser sendet diskrete Lichtteilchen (Photonen) aus, deren Strom wegen statistischer Schwankungen mal stärker und mal schwächer ist. Zwar hat das Danzmann-Team dieses Eigenrauschen bereits mit raffinierten Methoden (gequetschtes Laserlicht) auf ein Minimum reduziert. Ganz ausschalten lässt es sich jedoch nicht.

Anschaulich kann man sich das Rausch-Problem so vorstellen: Sitzt man im Wohnzimmer vor einem rauschenden Radio, würde man das Geräusch eines tropfenden Wasserhahns im Badezimmer höchstwahrscheinlich überhören. Hingegen wäre das Geräusch einer defekten, ständig laufenden WC-Spülung laut genug, um sich gegen das Rauschen des Radios akustisch durchzusetzen.

Bei GW150914 hatten die Forscher Glück, dass das Signal sehr stark ausfiel und daher mit bloßem Auge in den Mess-

Bei GW150914 hatten die Forscher Glück, dass das Signal sehr stark ausfiel und daher mit bloßem Auge in den Messdaten erkennbar war. Solch intensive Signale sind aber eher selten.

With GW150914 the researchers were fortunate that the signal was very strong and thus visible to the unaided eye among the measuring data. Such intensive signals are, however, rather rare.

difficult to measure in Earth-based detectors is not only because of inadequate arm length. In addition to that issue, it is difficult to register signals in the lower frequency region because they are particularly impaired by earthquakes, waves breaking on the coast, and traffic. For this reason, the two LIGO detectors – an identical pair – were set up 3000 kilometers apart. If an earthquake took place in the proximity of the LIGO detector in the US state of Washington, the waves from it – which propagate at a maximum speed of 7 kilometers per second – would take at least a good 7 minutes to reach the second LIGO detector in Louisiana. In contrast, for gravitational waves coming straight from above there would not be any delay in the detection. And one that came from the side would only need a hundredth of a second for the 3000 kilometers since gravitational waves propagate at the speed of light. This means that if one of the LIGO detectors registers something that is not registered by the second LIGO detector at the latest 10 milliseconds later, then it is most probably a seismic signal or some other artifact.

Yet even at higher frequencies, which are less susceptible to earthly disturbances, it is often difficult to evaluate the measured data. For waves from a fusion of smaller objects or from events that take place at a great distance from the Earth, the measurement data can turn out to be so weak that they are lost in the inherent noise of the laser measurement system. The reason is that the laser emits discrete particles of light (photons) whose stream can be stronger or weaker as a result of statistical fluctuation. Although Danzmann's team has already come up with ingenious methods (squeezed laser light) to reduce this inherent noise to a minimum, the noise cannot be eliminated entirely.

The following illustration may help one imagine the problem posed by noise. If you are sitting in your living room in front of a noisy radio, you would very probably fail to hear the noise of a dripping tap. On the other hand, the noise of toilette that was constantly flushing would be loud enough to make itself heard despite the noisy radio.

With GW150914 the researchers were fortunate that the signal was very strong and thus visible to the unaided eye among the measuring data. Such intensive signals are,

daten erkennbar war. Solch intensive Signale sind aber eher selten. Um auch die vielen schwächeren kosmischen Botschaften aus dem Datenwust der Detektoren herausfischen zu können, nutzen die GEO600-Forscher eine Art Rasterfahndung. Dazu hat die auf theoretische Physik spezialisierte Gruppe am MPI für Gravitationsphysik in Potsdam Verschmelzungen unterschiedlich schwerer Objekte – von Neutronensternen bis zu Schwarzen Löchern – im Computer simuliert. Diese Datenbank aus 250 000 Fingerabdrücken liefert Vergleichsmuster, mit denen tatsächliche Kollisionen im Datenstrom der beiden LIGO-Detektoren leichter aufgefunden werden können. Ohne diese Vergleichsvorlagen wären die weniger intensiven Verschmelzungen im Systemrauschen der Detektoren untergegangen.

Die drei bisherigen LIGO-Messungen konnten zweifelsfrei bestätigen, dass aus Supernovae entstandene Schwarze Löcher mit mehr als 20 Sonnenmassen tatsächlich existieren. Weiterhin lieferten sie den Beweis, dass Einsteins Relativitätstheorie auch in Extremsituationen – zwei sich umkreisende Schwarze Löcher erreichen kurz vor ihrer Verschmelzung ein Tempo bis knapp unter der Lichtgeschwindigkeit – noch korrekte Ergebnisse liefert.

Auch für nichtastronomische Anwendungen eignen sich die Präzisionslaser des Danzmann-Teams. Sie können beispielsweise in der Geodäsie (Erdvermessung) und Gravimetrie (Schwerefeldmessung) eingesetzt werden. Bereits seit 2002 befinden sich zwei GRACE-Satelliten (Gravity Recovery and Climate Experiment) in einer polaren Umlaufbahn. Sie umkreisen die Erde in konstantem Abstand zueinander, der mit Mikrowellen laufend gemessen wird. Mit der GRACE-

however, rather rare. In order to be able to fish out the numerous weaker cosmic messages from the jumble of data in the detectors, the GEO600 scientists employ a type of dragnet. For this purpose a group at the MPI for Gravitational Physics in Potsdam that is specialized in theoretical physics has done computer simulations of the mergers of objects of different masses – from neutron stars to black holes. The database containing these 250,000 fingerprints provides reference samples for comparison, with which it is easier to detect actual collisions in the data streams of the two LIGO detectors. Without these reference samples the less intensive mergers would get lost in the system noise of the detectors.

The three previous LIGO detections confirmed beyond a doubt that there actually are black holes of more than 20 solar masses that originated from supernovae. They also provided the proof that Einstein's theory of relativity continues to provide correct results, even in extreme situations, such as that of a pair of revolving black holes that just prior to their merger reach a speed just shy of the speed of light.

The precision lasers from Danzmann's team are also suitable for nonastronomical uses. They can, for example, be employed in geodesy (surveys of the Earth) and gravimetry (measurement of gravitational fields). Two GRACE satellites (Gravity Recovery and Climate Experiment) have already been in polar orbit since 2002. They orbit the Earth at a constant distance from one another, which is continuously checked using microwaves. Scientists use the GRACE mission to monitor, among other objects, global climate

Einer der GEO600-Vakuumtanks wird hier als Behälter für eine optische Testeinrichtung genutzt.

One of the vacuum tanks is being used here as a container for an optical test installation.

Der nördliche Teil von Danzmanns Bürogebäude. Der Buchstabe »E« ist noch vom Einsteinjahr übriggeblieben.

The northern part of Danzmann's office building. The letter »E« is left over from the Einstein year.

Mission überwachen die Forscher unter anderem den globalen Klimawandel: Änderungen des großräumigen Grundwasserhaushalts der Erde sowie abschmelzende Eismassen, unter anderem an den Polen und in Gletschern, führen zu kleinen Änderungen des Erdschwerefelds, die die beiden Satelliten registrieren. Anfang 2018 sollen zwei Nachfolge-Satelliten (Projekt GRACE Follow-on) gestartet werden, die ihren Abstand zusätzlich mit einem Präzisionslaser ähnlich dem im LISA-System messen. Dies steigert die Genauigkeit um den Faktor 25.

Die Mittel des Körber-Preises will Danzmann unter anderem dazu verwenden, die Messtechnik noch weiter zu verbessern – unter anderem durch vermehrten Einsatz quantenmechanisch verschränkter Photonen: »Je feiner die Wahrnehmung unserer Detektoren, desto tiefer reicht unser Blick ins All. Ich erwarte, dass wir bald im Wochentakt neue Verschmelzungen Schwarzer Löcher registrieren können, und mit zukünftigen Detektoren sogar im Stundentakt. Dann können wir endlich die Geheimnisse der dunklen Seite des Universums entschlüsseln, die 99 Prozent seiner Gesamtenergie ausmacht. Und irgendwann werden wir mit Gravitationswellen sogar den Nachhall des Urknalls hören können.«

change. Changes in the Earth's large-scale groundwater balance and in melting masses of ice, including at the poles and in glaciers, lead to small fluctuations in the Earth's gravitational field, which are registered by the two satellites. At the beginning of 2018 two new satellites will be launched to take their place (the project GRACE Follow-on). They will measure the distance to one another using a precision laser similar to that in the LISA system, which will improve the precision by a factor of 25.

One of the goals for which Danzmann will utilize the funds accompanying the Körber Prize is to improve the measurement technology even further, such as by increasingly employing quantum entangled photons. »The more precise the perception of our detectors is, the deeper our view into space. I expect that we will soon be able to register new mergers of black holes on a weekly basis and, using future detectors, by the hour. Then we will finally be able to decode the secrets of the dark side of the universe, which accounts for 99 percent of all of its energy. And sometime the gravitational waves will even enable us to hear the echo of the big bang.«

Innenleben eines der Vakuumtanks des Interferometer-Prototyps mit 10 Metern Armlänge.

The inner workings of one of the vacuum tanks from a prototype interferometer with ten meter long arms.

Professor Dr. Karsten Danzmann

Karsten Danzmann, 62, wurde in Rotenburg an der Wümme geboren und wuchs in Bremerhaven auf. Seine Mutter war Lehrerin, der Vater Ingenieur.

Lokomotivführer wie andere Kinder wollte der Preisträger nie werden, dafür aber Astronaut. »Ich gehöre zu der Generation, die durch die beginnende Weltraumfahrt entscheidend geprägt wurde. Von den meisten Kindern sind ja frühe Zeichnungen erhalten, auf denen oft Blumen oder Tiere oder Menschen dargestellt sind. Auf meinen Bildern waren immer Raketen und Raumschiffe.« Als Jugendlicher besaß Danzmann zwei Teleskope: »Ich habe viele Nächte mit klammen Fingern draußen in der Kälte verbracht, um die klaren Winternächte für Beobachtungen zu nutzen.«

An der Universität machte Danzmann seine Kindheitsträume zum Beruf. Er studierte in Clausthal-Zellerfeld und Hannover Physik und promovierte 1980. Nach mehrjähriger Forschungstätigkeit in Deutschland ging Danzmann 1986 an die amerikanische Stanford University, wo er bis 1989 als Physikprofessor wirkte. Ab 1990 war er drei Jahre lang Gruppenleiter am Max-Planck-Institut (MPI) für Quantenoptik in Garching. Von 1993 bis 2001 leitete Danzmann die Außenstelle Hannover des MPI für Quantenoptik. Seit 2002 ist er Direktor am MPI für Gravitationsphysik in Hannover (Albert Einstein Institut). Parallel dazu lehrt er seit 1993 als Professor an der Leibniz Universität Hannover und leitet dort das Institut für Gravitationsphysik.

Insbesondere die Zeit in Stanford prägte Danzmanns weitere Entwicklung: »… nicht nur weil der Campus einer der schönsten in der Welt ist, sondern auch weil ich dort gelernt habe, dass auch die amerikanischen Kollegen nur mit Wasser kochen und keine Götter sind. Dafür halten sie grundsätzlich alles für möglich und gehen es dann auch an.«

Heute ist Danzmann einer der weltweit führenden Experten auf dem Gebiet der Gravitationsphysik. Aber auch die musischen Seiten des Lebens blieben dem Preisträger nicht verschlossen. Bereits in frühester Jugend lernte er das Klavierspiel und spielt immer noch gern Chopin, Debussy sowie modernere Stücke, etwa aus Musicals. Weiterhin war er im Turnier-Tanzsport aktiv: »Zweimal habe ich es zur deutschen Vizemeisterschaft in der Altersgruppe bis 21 geschafft.«

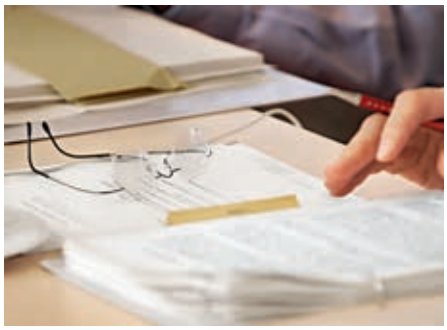
Karsten Danzmann (62) was born in Rotenburg on the river Wümme in Germany and grew up in Bremerhaven. His mother was a teacher, and his father an engineer.

Unlike other children, the Prize winner never wanted to drive a train but rather to become an astronaut. »I belong to the generation that was decisively molded by the early years of space travel. The early drawings of most children often show flowers or animals or people. On mine there were always rockets and space ships.« As an adolescent, Danzmann had two telescopes: »I spent many nights outdoors in the cold getting numb fingers making observations during the clear winter nights.«

At university, Danzmann turned his childhood dreams into his profession. He studied physics in Clausthal-Zellerfeld and Hannover, where he was awarded his doctorate in 1980. After doing research for several years in Germany, Danzmann left for Stanford University in 1986, where he served as professor of physics until 1989. Starting in 1990, he was a team leader at the Max Planck Institute (MPI) for Quantum Optics in Garching for three years. From 1993 to 2001 Danzmann headed the Hannover branch of the MPI of Quantum Optics. Since 2002, he has been the director of the MPI for Gravitational Physics in Hannover (the Albert Einstein Institute). Parallel to this, he has served as professor at the Leibniz Universität Hannover, where he has headed the Institute of Gravitational Physics.

It was in particular the period in Stanford that influenced Danzmann's further development: »not only because the campus is one of the most beautiful in the world, but also because it was there that I learned that our American colleagues were also only mortals and couldn't walk on water. On the other hand, they think everything is fundamentally possible and try to do it.«

Today, Danzmann is one of the world's leading experts in the field of gravitational physics. Yet the artistic sides of life are not closed to the Prize winner. In early childhood he learned to play the piano, and he still enjoys playing Chopin and Debussy as well as more modern pieces, such as from musicals. He has also been active in competitive dancing: »Twice I succeeded in winning the second place in the German championship in the under 21 age group.«



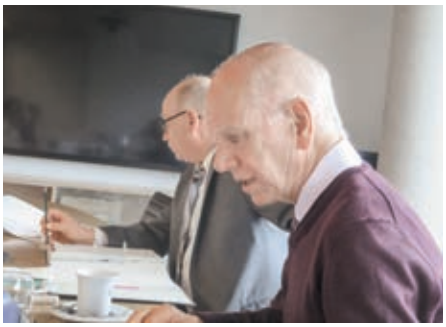
Auswahl und Entscheidung

Selection and Decision

Der Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft zeichnet jährlich herausragende und in Europa tätige einzelne Wissenschaftler aus. Prämiert werden exzellente und innovative Forschungsansätze mit hohem Anwendungspotenzial auf dem Weg zur Weltgeltung. Eine Bewerbung ist nicht möglich. Wie aber werden jedes Jahr die in Europa richtungweisenden Köpfe identifiziert? *The Körber European Science Prize is presented annually, honoring outstanding single scientists working in Europe. The Prize is awarded to excellent and innovative research projects that show great potential for possible application and international impact. A personal application is not allowed. But how are the most pioneering minds of Europe identified each year?*

Zunächst wählen renommierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus ganz Europa, zusammengefasst in zwei Search Committees, vielversprechende Kandidaten aus. Gesucht werden im jährlichen Wechsel geeignete Personen aus den Life oder Physical Sciences. Wer in die engere Wahl kommt, wird aufgefordert, einen detaillierten Vorschlag zu einem Forschungsprojekt einzureichen, das dann in zwei Bewertungsrunden vom Search Committee beurteilt wird. Unterstützt wird die Arbeit der Search Committees durch internationale Gutachter, die unabhängige Urteile über die Kandidaten und deren Projekte abgeben. Bis zu fünf Kandidaten werden abschließend dem Kuratorium vorgelegt, das in einer Gesamtschau von gutachterlicher Bewertung, bisher erbrachter Publikationsleistung und wissenschaftlichem Werdegang über die neue Preisträgerin oder den neuen Preisträger entscheidet.

To begin with, renowned scientists from all over Europe, grouped into two Search Committees, select promising candidates. In alternate years, suitable individuals are sought from the field of life sciences and physical sciences respectively. Those who are shortlisted are then asked to submit a detailed proposal for a research project which is then judged in two rounds of assessment by the Search Committee. The work of the Search Committee is supported by international experts who give their independent opinions on the candidates and their projects. A maximum of five candidates are subsequently recommended to the Trustee Committee which, based on a summary of expert assessments, previous publications and scientific career history, decides on the new prize winner.



Das Search Committee Physical Sciences |
The Search Committee Physical Sciences

Prof. Dr. Sir John O'Reilly, Vorsitz, Chairman
University College London, United Kingdom

Prof. Dr. Claudia Felser
Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Dresden
Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids, Dresden, Germany

Prof. Dr. Martin Wegener
KIT Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
KIT Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

Prof. Dr. Alexander Wokaun
PSI Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland

Das Kuratorium |
The Trustee Committee

Prof. Dr. Martin Stratmann, Chairman
Max Planck Society, Munich, Germany

Prof. Dr. Bertil Andersson
Nanyang Technological University, Singapore

Prof. Dr. Anthony K. Cheetham
University of Cambridge, United Kingdom

Prof. Dr. Jörg Hacker
German Academy of Sciences Leopoldina, Halle (Saale), Germany

Prof. Dr. Urban Lendahl
Karolinska Institute, Stockholm, Sweden

Prof. Dr. Felicitas Pauss
Institute for Particle Physics, ETH Zurich, Switzerland

Preisträger und Forschungsprojekte seit 1985

Prize Winners and Research Projects since 1985

1985 Stoßwellen-Anwendungen in der Medizin
Applications of Shock Waves in Medicine
Walter Brendel, Michael Delius, Georg Enders, Joseph Holl, Gustav Paumgartner, Tilman Sauerbruch

1985 Gegendruck-Gieß-Technologie
Back Pressure Casting Technology
Teodor Balevski, Rumen Batschvarov, Emil Momtschilov, Dragan Nenov, Rangel Zvetkov

1986 Retrovirus-Forschung (AIDS)
Retrovirus Research (AIDS)
Jean-Claude Gluckman, Sven Haahr, George Janossy, David Klatzmann, Luc Montagnier (Nobelpreis 2008), Paul Rácz

1987 Weiterentwicklung der Elektronenholographie
Further Development of Electron Holography
Karl-Heinz Herrmann, Friedrich Lenz, Hannes Lichte, Gottfried Möllenstedt

1987 Erzeugung von Ultratieftemperaturen
Creating Ultralow Temperatures
Riitta Hari, Matti Krusius, Olli V. Lounasmaa, Martti Salomaa

1988 Erweiterung des Hamburger Pyrolyseverfahrens zur Vernichtung auch toxischer Abfallstoffe
Extending the Hamburg Pyrolytic Technique to Destroy Toxic Wastes
Alfons Buekens, Vasilij Dragalov, Walter Kaminsky, Hansjörg Sinn

1989 Wirkstoffe pflanzlicher Zellkulturen
Active Substances from Plant Cell Cultures
Christian Brunold, Yury Y. Gleba, Lutz Nover, J. David Phillipson, Elmar W. Weiler, Meinhart H. Zenk

1990 Vorhersage kurzfristiger Klimaveränderungen
Forecasting Short-Term Changes in Climate
Lennart Bengtsson, Bert Bolin, Klaus Hasselmann

1991 Erkennung und Verhütung von Krebserkrankungen durch Umweltchemikalien
Recognizing and Preventing Cancer Caused by Environmental Chemicals
Lars Ehrenberg, Dietrich Henschler, Werner Lutz, Hans-Günter Neumann

1992 Ausbreitung und Wandlung von Verunreinigungen im Grundwasser
The Spread and Transformation of Contaminants in Ground Water
Philippe Behra, Wolfgang Kinzelbach, Ludwig Luckner, René P. Schwarzenbach, Laura Sigg

1993 Bionik des Laufens – Technische Umsetzung biologischen Wissens
Bionics of Walking: The Technical Application of Biological Knowledge
Felix Chernousko, François Clarac, Holk Cruse, Friedrich Pfeiffer

1994 Moderne Pflanzenzüchtung – Von der Zelle zur Pflanze
Modern Plant Breeding: From the Cell to the Plant
Dénes Dudits, Dirk Inzé, Anne Marie Lambert, Horst Lörz

1995 Gensonden in Umweltforschung und Medizin
Genetic Probes in Environmental Research and Medicine
Rudolf Amann, Erik C. Böttger, Ulf B. Göbel, Bo Barker Jørgensen, Niels Peter Revsbech, Karl-Heinz Schleifer, Jiri Wanner

1996 Lebensraum tropische Baumkronen
The Habitat of Treetops in the Tropics
Pierre Charles-Dominique, Antoine Cleef, Gerhard Gottsberger, Bert Hölldobler, Karl E. Linsenmair, Ulrich Lüttge

1996 Computergesteuerte Gestaltung von Werkstoffen
Computer-Assisted Design of Materials
Michael Ashby, Yves Bréchet, Michel Rappaz

1997 Mausmutanten als Modelle für die klinische Forschung
Mutant Mouse Models in Clinical Research
Pawel Kisielow, Klaus Rajewsky, Harald von Boehmer

1998 Kernspintomographie mit Helium-3 – Neue Wege in der Lungendiagnostik
Magnetic Resonance Tomography with Helium-3
Werner Heil, Michèle Leduc, Ernst W. Otten, Manfred Thelen

1998 Elektronische Mikronasen für mehr Sicherheit am Arbeitsplatz
Electronic Micronoses to Enhance Safety at the Workplace
Henry Baltes, Wolfgang Göpel, Massimo Rudan

1999 Hoch fliegende Plattformen für Telekommunikation
High-Altitude Platforms for Telecommunications
Bernd Kröplin, Per Lindstrand, John Adrian Pyle, Michael André Rehmet

2000 Gestaltwahrnehmung in der Technik mit Erkenntnissen aus der Natur
Perception of Shape in Technology with Insights from Nature
Rodney Douglas, Amiram Grinvald, Randolf Menzel, Wolf Singer, Christoph von der Malsburg

2001 Optimierte Nutzpflanzen dank Gentechnik
Optimised Crops through Genetic Engineering
Wolf-Bernd Frommer, Rainer Hedrich, Enrico Martinoia, Dale Sanders, Norbert Sauer

2002 Narbenlose Wundheilung durch Tissue Engineering
Scarfree Wound Healing Using Tissue Engineering
Mark W. J. Ferguson, Jeffrey A. Hubbell, Cay M. Kielty, G. Björn Stark, Michael G. Walker

2003 Ein mit Licht betriebener molekülgroßer Motor
Light-driven molecular walkers
Ben L. Feringa (Nobelpreis 2016), Martin Möller, Justin E. Molloy, Niek F. van Hulst

2004 Therapien für eine neue Gruppe von Erbleiden
Therapies for a New Group of Hereditary Diseases
Markus Aebi, Thierry Hennet, Jaak Jaeken, Ludwig Lehle, Gert Matthijs, Kurt von Figura

2005 Mit Licht auf neuen Wegen
Taking Light onto New Paths
Philip St. John Russell

2006 Chaperone der Proteinfaltung in Biotechnologie und Medizin
Chaperones of the Protein Folding in Biotechnology and Medicine
F. Ulrich Hartl

2007 Automatische Synthese von Kohlenhydratimpfstoffen gegen Tropenkrankheiten
Automated Synthesis of Carbohydrate Vaccinations against Tropical Diseases
Peter H. Seeberger

2008 Medikamente gegen Krebs und das Altern
Drugs to Fight Cancer and Aging
Maria Blasco

2009 Graphen, das dünnste Material im Universum
Graphene, the Thinnest Material in the Universe
Andre K. Geim (Nobelpreis 2010)

2010 Auxin – Einsicht ins Pflanzenwachstum
Auxin – Understanding Plant Growth
Jiří Friml

2011 Lichtblicke in die Nano-Welt
Bright Spots in the Nano World
Stefan W. Hell (Nobelpreis 2014)

2012 Rasterfahndung nach Proteinen
Dragnet Investigation of Protein
Matthias Mann

2013 Quantengas im Laserkäfig
Quantum Gas in the Laser Cage
Immanuel F. Bloch

2014 Das Navigationssystem des Gehirns
The Brain's Navigation System
May-Britt Moser und Edvard I. Moser (Nobelpreis 2014)

2015 Aufbruch ins Oxid-Zeitalter
The Dawn of the Oxide Age
Nicola Spaldin

2016 Ersatzorgane aus der Petrischale
Replacement Organs from a Petri Dish
Hans Clevers

Gesellschaftliche Entwicklung braucht Dialog und Verständigung. Die Körber-Stiftung stellt sich mit ihren operativen Projekten, in ihren Netzwerken und mit Kooperationspartnern aktuellen Herausforderungen in den Handlungsfeldern Demografischer Wandel, Innovation und Internationale Verständigung. Die drei Themen »Neue Lebensarbeitszeit«, »Digitale Mündigkeit« und »Russland in Europa« stehen derzeit im Fokus ihrer Arbeit.

1959 von dem Unternehmer Kurt A. Körber ins Leben gerufen, ist die Stiftung heute mit eigenen Projekten und Veranstaltungen national und international aktiv. Ihrem Heimatsitz Hamburg fühlt sie sich dabei besonders verbunden; außerdem unterhält sie einen Standort in Berlin.

www.koerber-stiftung.de

Social development needs dialogue and understanding. Through its operational projects, in its networks and in conjunction with cooperation partners, the Körber Foundation takes on current social challenges in areas of action comprising international dialogue, demographic change and innovation. At present its work focuses on three topics: »Russia in Europe«, »New Working Lifetime« and »Digital Literacy«.

Inaugurated in 1959 by the entrepreneur Kurt A. Körber, the foundation is now actively involved in its own national and international projects and events. In particular, the foundation feels a special bond to the city of Hamburg. Furthermore, the Foundation holds a site in the capital of Germany, Berlin.

www.koerber-stiftung.de

Der Körber-Preis für die Europäische Wissenschaft zeichnet jährlich herausragende und in Europa tätige Wissenschaftler für deren zukunftsträchtige Forschungsarbeiten aus. Prämiert werden exzellente und innovative Forschungsansätze mit hohem Anwendungspotenzial auf dem Weg zur Weltgeltung. Mit Spitzenwissenschaftlern aus ganz Europa besetzte Auswahlgremien suchen nach geeigneten Preisträgerkandidaten, über die ein Kuratorium entscheidet. Über die Verwendung des Preisgeldes in Höhe von 750 000 Euro bestimmen die Preisträger eigenverantwortlich.

www.koerber-preis.de

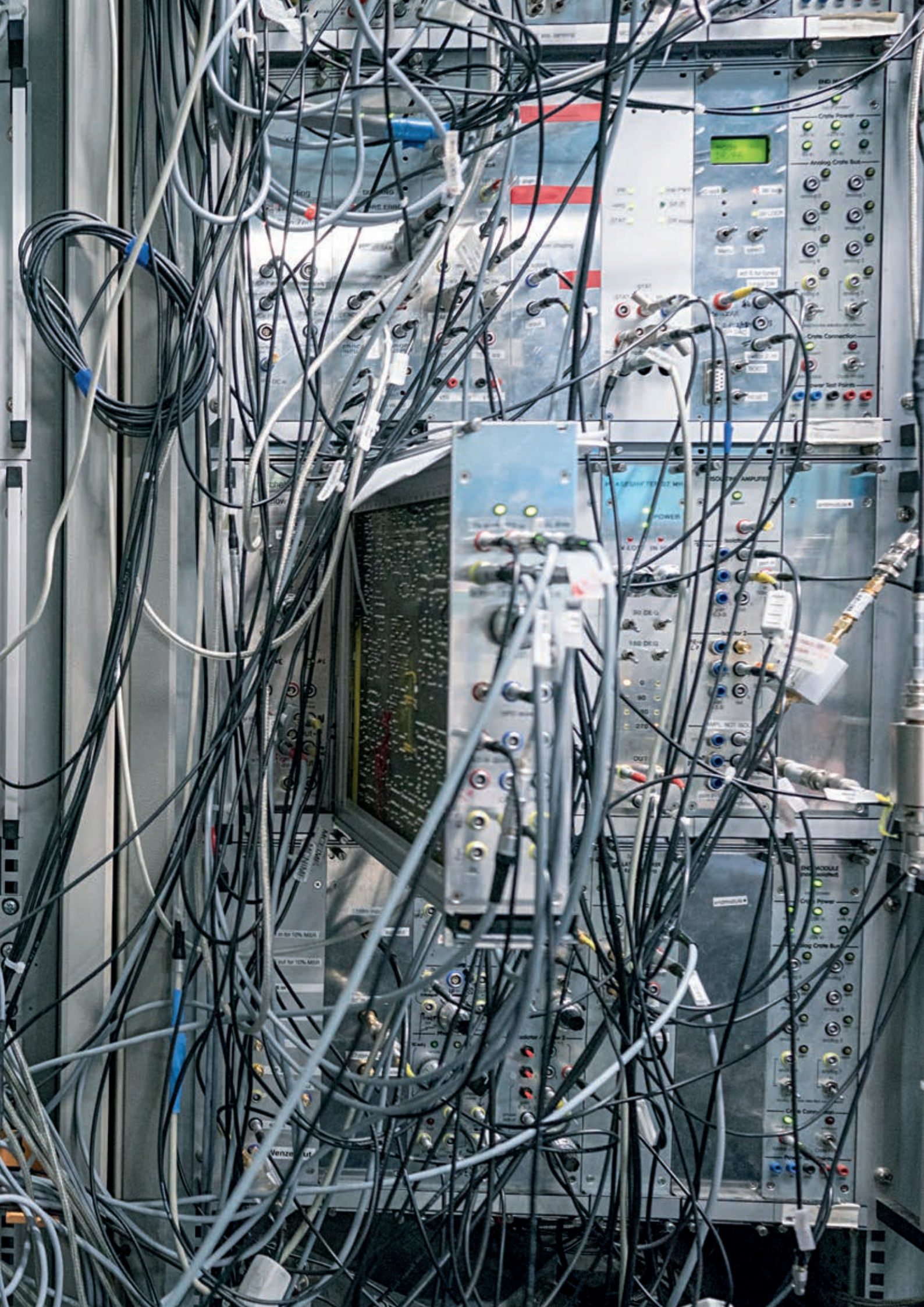
The Körber European Science Prize is presented annually, honoring outstanding scientists working in Europe for their promising research projects. The Prize is awarded to excellent and innovative research projects that show great potential for possible application and international impact. Search committees with top scientists from all over Europe identify qualified candidates. The selection is then made by a Trustee Committee. The prize winners have the freedom and responsibility to determine how to use the 750,000 euro prize money.

www.koerber-prize.org

Körber-Stiftung
Kehrwieder 12
20457 Hamburg

Matthias Mayer
Bereich Wissenschaft | Science
Leiter | Head of Department
Telefon +49 · 40 · 80 81 92-142
Telefax +49 · 40 · 80 81 92-305
E-Mail mayer@koerber-stiftung.de
Twitter @KoerberScience

IMPRESSUM
Herausgeber: Körber-Stiftung
Verantwortlich im Sinne des Presserechts: Dr. Lothar Dittmer, Körber-Stiftung, Kehrwieder 12, 20457 Hamburg
Redaktion: Matthias Mayer, Sabine Bornemann-Koch
Autor: Claus-Peter Sesín
Übersetzungen: Dr. Michael Wilson
Fotos: Friedrun Reinhold, S. 5 Claudia Höhne, S. 7 picture alliance/akg-images
Wissenschaftliche Abbildungen: S. 11, 21, 23 Klötzner Company Werbeagentur GmbH
Titel: S. Ossokine, A. Buonanno (Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik), Simulating eXtreme Spacetimes Projekt, W. Benger (Airborne Hydro Mapping GmbH)
Konzeption und Gestaltung: Klötzner Company Werbeagentur GmbH
Litho: AlsterWerk MedienService GmbH
Druck: MPW Media-Print Witt GmbH



www.koerber-preis.de

www.koerber-prize.org