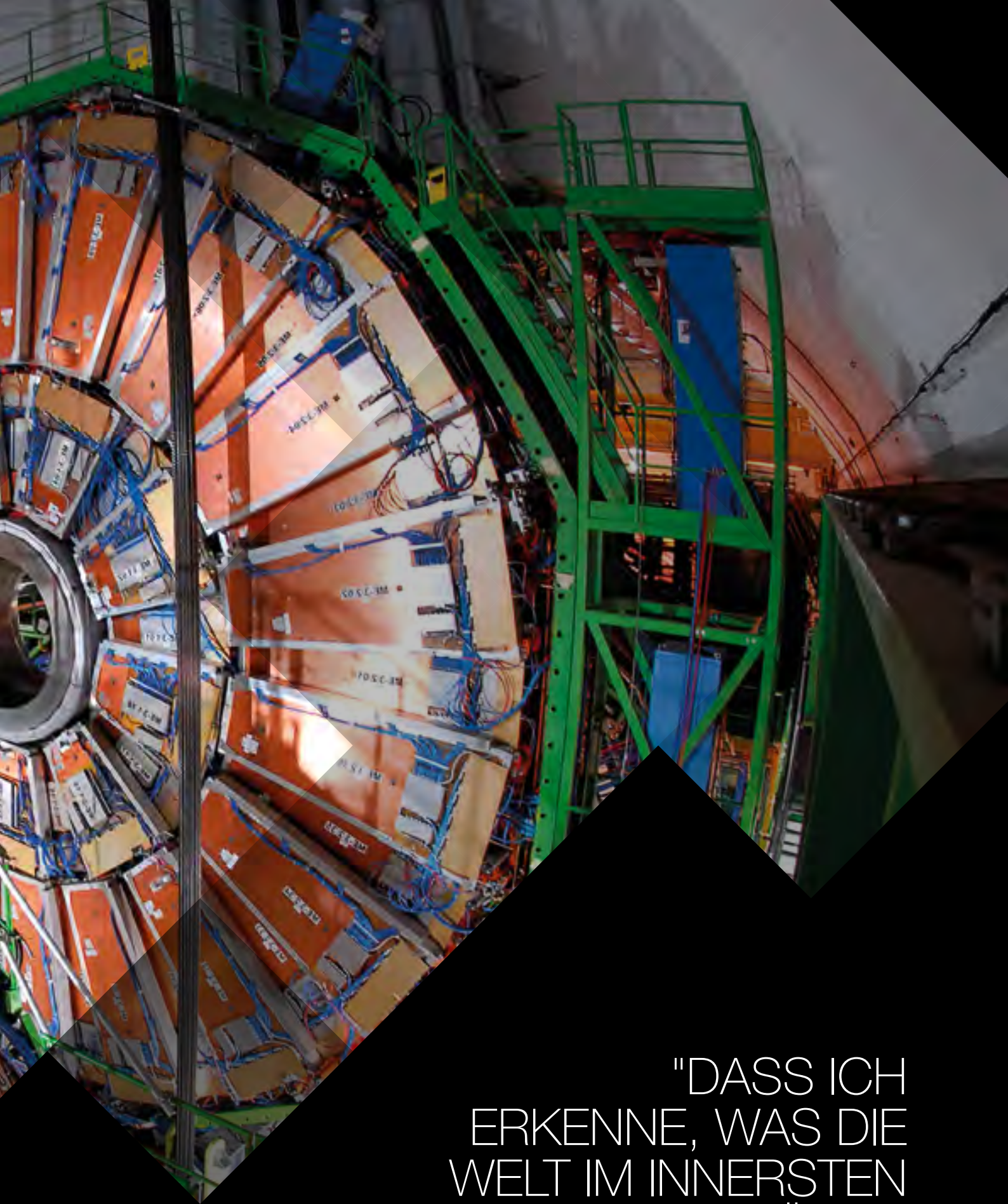


SPURENSUCHE

DIE BAUSTEINE DES UNIVERSUMS







"DASS ICH
ERKENNE, WAS DIE
WELT IM INNERSTEN
ZUSAMMENHÄLT..."

Johann Wolfgang von Goethe, Faust. Der Tragödie erster Teil

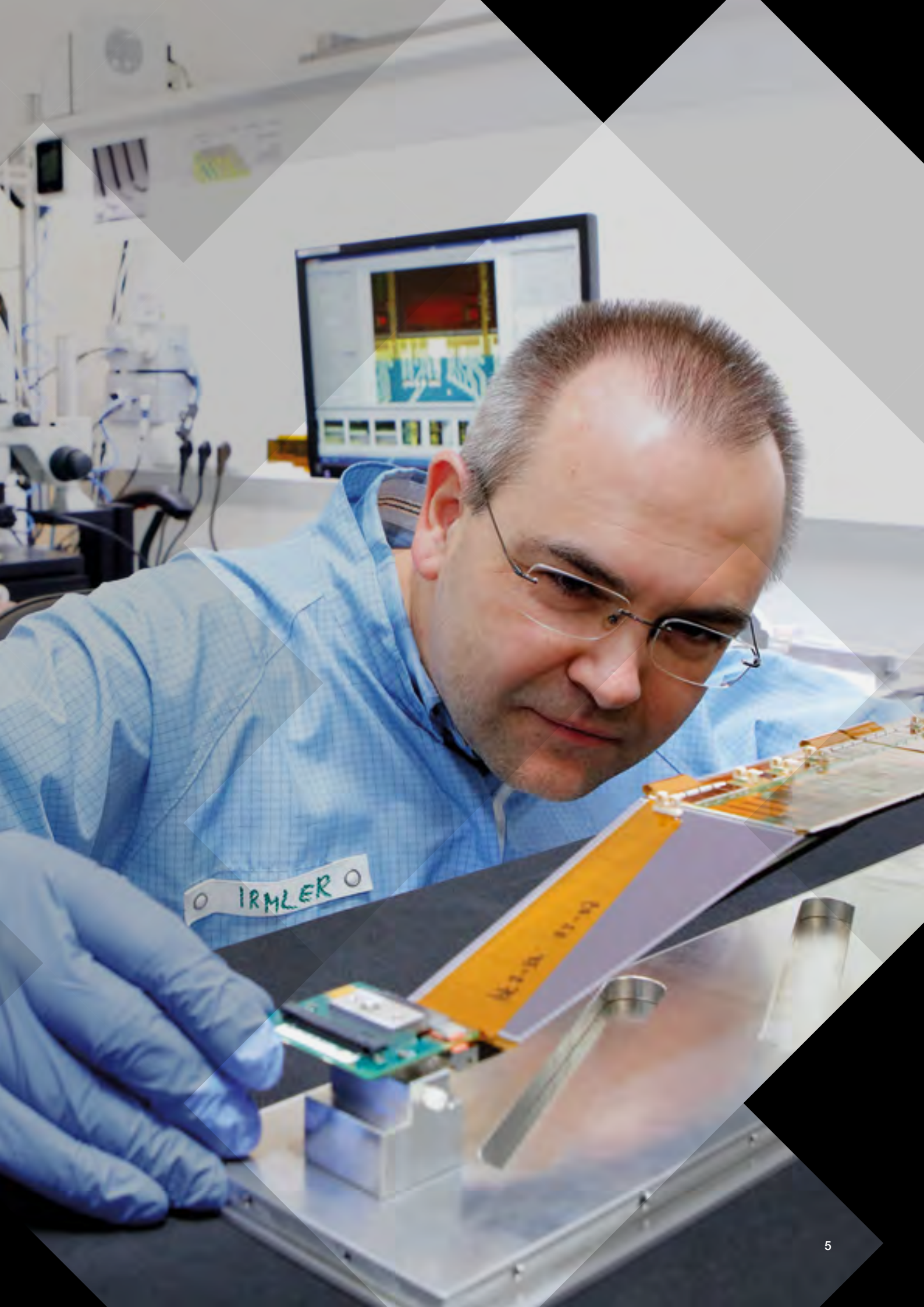
VORWORT

Woraus besteht unser Universum? Wie fing alles an? Was ist Zeit? Gibt es einen Anfang und ein Ende unseres Universums? Was sind Teilchen? Es gibt viele Fragen, die die Menschheit seit Jahrhunderten beschäftigen und die die Wissenschaft und Forschung antreiben. Den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vom Wiener Institut für Hochenergiephysik (HEPHY) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften ist es ein großes Anliegen, ihre Begeisterung zu teilen, die neuesten Erkenntnisse der aktuellen Forschung zu präsentieren und junge Talente zu fördern.

Das Institut für Hochenergiephysik betreibt Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik und ist Österreichs größtes Zentrum für experimentelle und theoretische Teilchenphysik. Die Schwerpunkte des Wiener Instituts liegen in der Teilnahme an internationalen Großexperimenten wie an den Forschungszentren CERN (nahe Genf), KEK (Japan) und Gran Sasso (Italien).

Das HEPHY beschäftigt sich mit der Erforschung der kleinsten Bausteine der Materie und der zwischen ihnen wirkenden Kräfte (Wechselwirkungen). Die Schaffung eines konsistenten physikalischen Bildes vom Mikrokosmos stellt die Voraussetzung für ein grundlegendes Verständnis aller Naturvorgänge dar. Neben der teilchenphysikalischen Forschung entwickeln die Forscherinnen und Forscher am HEPHY Teilchendetektoren, wissenschaftliche Elektronik und Software.

Die Wiener Forschungseinrichtung steht jedoch nicht nur für internationale Spitzenforschung, es wird auch die kommende Generation an Physikerinnen und Physikern ausgebildet. Zu den Aufgaben des Institutes für Hochenergiephysik zählt auch die allgemeine Bildungsarbeit und die lebhaft und verständliche Darstellung dieses durchaus komplexen Forschungsgebiets für Interessierte jeden Alters. Ein Anliegen der Forscherinnen und Forscher ist es, die Neugier für Physik, im speziellen für Teilchenphysik, zu wecken und zu zeigen, wie faszinierend Forschung ist.



DIE REISE ZU DEN KLEINSTEN TEILCHEN

WIR BEGEBEN UNS AUF DIE SUCHE NACH DEN BISHER KLEINSTEN BEKANNTEN BAUSTEINEN DES UNIVERSUMS – DEN ELEMENTARTEILCHEN. DAZU BENÖTIGEN WIR VERSCHIEDENE HILFSMITTEL, UM IN IMMER KLEINERE DIMENSIONEN VORDRINGEN ZU KÖNNEN.

DER MENSCH

UNSERE REISE BEGINNT IN DER FÜR UNS SICHTBAREN WELT.

Um unsere Umwelt visuell beobachten zu können, benötigen wir unser Sinnesorgan – das Auge. Die lichtempfindlichen Sinneszellen (Fotorezeptoren) im Inneren des Auges reagieren auf die unterschiedlichen Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung aus dem sichtbaren Spektrum. Dieses umfasst die Wellenlängen von etwa 380 - 780 nm (1 Nanometer = ein milliardstel Meter).

Das menschliche Auge kann auf einer Meter Entfernung Linien mit einem Abstand von einem halben Millimeter noch unterscheiden.



10⁰
= 1 METER

DIE ZELLE

WIR SIND NUN AN DER KLEINSTEN LEBENDEN EINHEIT ALLER ORGANISMEN ANGEKAMMT.

Um eine menschliche Zelle beobachten zu können, benötigen wir ein Lichtmikroskop, welches das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges durch die Nutzung optischer Linsen erweitert.

Im Lichtmikroskop lassen sich Strukturen und Objekte voneinander unterscheiden, die 1 µm (1 Mikrometer = ein millionstel Meter) voneinander entfernt sind.



10⁻⁴
= 0,000 1 METER

DIE DNA

WILLKOMMEN IN DER WELT DER MAKROMOLEKÜLE.

Um die Reise in noch kleinere Dimensionen – wie die des menschlichen Erbguts (DNA) – anzutreten, benötigen wir ein Elektronenmikroskop, das die Oberfläche eines Objekts mittels Elektronen abbildet. Da Elektronen eine sehr viel kleinere Wellenlänge als sichtbares Licht haben, kann eine deutlich höhere Auflösung als bei einem Lichtmikroskop erreicht werden.

Mit dem Elektronenmikroskop lassen sich Objekte voneinander unterscheiden, die ca. 0,1 nm (ein Zehntel eines milliardstel Meter) voneinander entfernt sind.



10^{-8}

= 0,000 000 01 METER

DAS ATOM

WIR BEFINDEN UNS NUN BEI DEN KLEINSTEN EINHEITEN ALLER BEKANNTEN ARTEN VON FESTEN, FLÜSSIGEN ODER GASFÖRMIGEN STOFFEN.

Um Einblicke in die Welt der Atome – die in etwa zehnmals kleiner sind als einzelne Moleküle – zu bekommen, bedienen wir uns eines Rastertunnelmikroskops. Im Rastertunnelmikroskop tastet eine elektrisch leitende Spitze eine Oberfläche im Abstand von wenigen Atomdurchmessern ab. Bei angelegter Spannung zwischen Spitze und Oberfläche führt der wechselwirkende Prozess des quantenmechanischen Tunneleffekts zu einem messbaren Tunnelstrom. Die Ortsabhängigkeit des Tunnelstroms bildet dabei verschiedene physikalische Eigenschaften der Oberfläche ab.

Mit dem Rastertunnelmikroskop können vergleichsweise einfach atomare Prozesse mit einer Auflösung von 0,01 nm (ein Zehntel eines milliardstel Meters) sichtbar gemacht werden.



10^{-10}

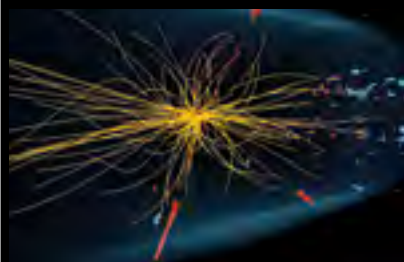
= 0,000 000 000 1 METER

DIE ELEMENTARTEILCHEN

DIE REISE IST AM ENDE ANGEKOMMEN. WIR BEFINDEN UNS IN DER WELT DER KLEINSTEN BEKANNTEN BAUSTEINE DES UNIVERSUMS, DER ELEMENTARTEILCHEN.

Viele Elementarteilchen müssen erst in einem Teilchenbeschleuniger, wie zum Beispiel dem LHC am CERN, erzeugt werden. Dann können sie in hochpräzisen Detektoren wie dem CMS nachgewiesen werden.

Mit einer Rekordgenauigkeit von 0,1 am (Attometer = ein trillionstel Meter oder ein Milliardstel eines milliardstel Meters) untersuchen die Physikerinnen und Physiker am LHC den Mikrokosmos. Die größte Maschine der Welt ist auf der Suche nach den kleinsten Teilchen des Universums.



10^{-15}

= 0,000 000 000 000 001 METER

HIGH-SPEED-KARUSSELL MIT KNALLEFFEKT

EIN TEILCHENBESCHLEUNIGER IST EINE MASCHINE, DIE TEILCHEN AUF EXTREM HOHE BEWEGUNGSENERGIEN BESCHLEUNIGT.

WAS IST EIN TEILCHENBESCHLEUNIGER?

Für Experimente in der Teilchenphysik werden meist Kollisionsmaschinen verwendet. Dabei werden Teilchen in entgegengesetzter Richtung beschleunigt und an bestimmten Punkten zur Kollision gebracht. Durch diesen Zusammenstoß erhält man Informationen über die Eigenschaften der Teilchen und aus der Kollisionsenergie entstehen sogar neue, zuvor nicht vorhandene Teilchen.

Im größten und leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger der Welt, am CERN, können Protonen auf 99,9999991 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Umgerechnet sind das 1 079 252 839 km/h. Die Apollo-Raumschiffe erreichten auf ihrem Flug zum Mond nur ca. 40 000 km/h.

WARUM ENTSTEHEN NEUE TEILCHEN?

Die in der Bewegung gespeicherte Energie kann durch einen Zusammenstoß in Masse umgewandelt werden. Denn laut Einsteins berühmter Formel $E=mc^2$ sind Energie und Masse zwei Seiten einer Medaille.

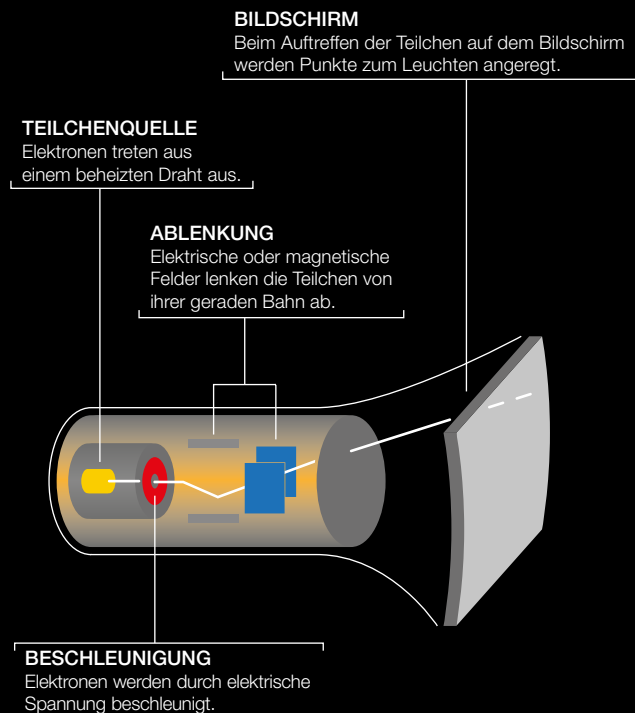
$$E = mc^2$$

LICHTGESCHWINDIGKEIT (M/S)
ENERGIE (J)
MASSE (KG)

Die Formel beschreibt die Gleichheit von Masse und Energie. Das bedeutet, dass jede Masse Energie ist und umgekehrt. Multipliziert man die Masse mit der Lichtgeschwindigkeit (= 299 792 458 m/s) zum Quadrat, erfährt man, wie viel Energie in der Masse steckt.

EIN TEILCHENBESCHLEUNIGER IM WOHNZIMMER

Ein alter Röhrenfernseher ist eigentlich ein kleiner, nicht kreisförmiger Teilchenbeschleuniger! Es werden Teilchen – in diesem Fall Elektronen – elektrisch oder magnetisch abgelenkt. Die Kollision mit dem Bildschirm erzeugt Photonen, die wir sehen können.

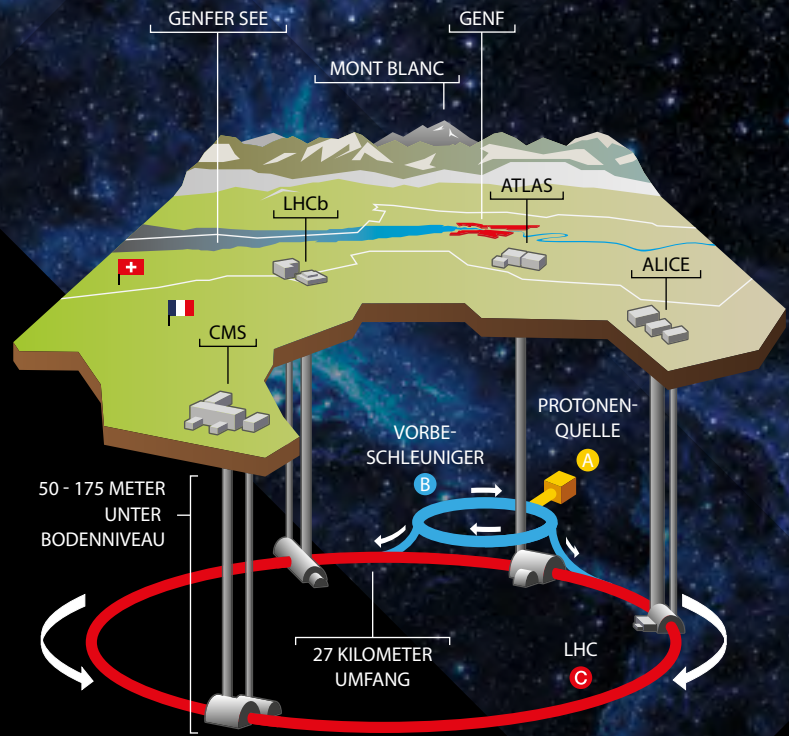


DER LHC AM CERN

Der derzeit größte und leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger der Welt heißt „Large Hadron Collider“ (LHC). Sein Name ist auf seine wichtigsten Eigenschaften zurückzuführen:

- › Large (engl. groß): Er hat einen Umfang von 27 km.
- › Hadron (eine Teilchenart): Er beschleunigt Protonen, die man zur Gruppe der Hadronen zählt.
- › Collider (engl. Kollisionsmaschine): Er lässt Teilchenstrahlen gegeneinander kollidieren.

Der LHC ist ein Kreisbeschleuniger, in dem die Teilchen entlang einer annähernd kreisförmigen Bahn auf immer höhere Energie – fast bis auf Lichtgeschwindigkeit – beschleunigt werden.



STECKBRIEF LARGE HADRON COLLIDER (LHC)

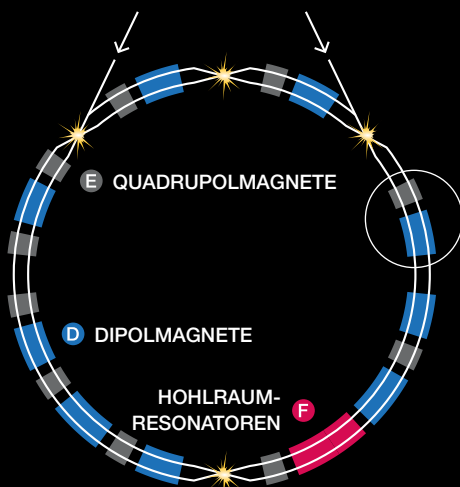
- › Betriebstemperatur der Magnete: $-271,25\text{ }^{\circ}\text{C}$
- › Maximale Energie der Teilchenkollisionen: 14 TeV (Teraelektronenvolt)
- › Maximales Magnetfeld der Dipolmagnete: 8,3 Tesla
- › 1232 Dipolmagnete
- › 392 Quadrupolmagnete
- › 40 Millionen Kollisionen pro Sekunde
- › 11245 Umrundungen pro Sekunde

WIE FUNKTIONIERT EIN TEILCHENBESCHLEUNIGER?

In der Quelle **A** werden Protonen aus Wasserstoffgas erzeugt. Diese werden über mehrere Vorbeschleuniger **B** auf eine Energie von etwa einem halben TeV (Teraelektronenvolt) beschleunigt. Anschließend werden sie im und gegen den Uhrzeigersinn in den LHC **C** geleitet und auf die maximale Energie beschleunigt. An den Orten der vier riesigen Experimente (ATLAS, CMS, LHCb und ALICE) werden die Teilchenstrahlen zur Kollision gebracht.

DIE KOMPONENTEN

Zu den wichtigsten Komponenten des LHC zählen Magnete. Um die Teilchen auf einer Kreisbahn zu halten, werden sogenannte Dipolmagnete **D** eingesetzt. Zum Fokussieren der Strahlen sind Quadrupolmagnete **E** eingebaut. Die Beschleunigung der Teilchen passiert nur auf einem kurzen Teilstück mittels elektromagnetischer Wellen in sogenannten Hohlraum-Resonatoren. **F**



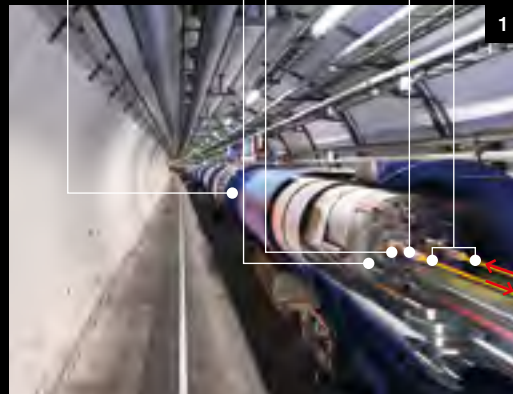
SUPRALEITENDE SPULE MIT 2 POLWICKLUNGEN

VAKUUMTANK

EISENJOCH

2 PROTONENSTRAHLEN IM UND GEGEN DEN UHRZEIGERSINN

STRAHLROHR



- 1 Aufbau eines LHC-Dipolmagnets
- 2 Modell eines Quadrupolmagnets mit 4 Polwicklungen an jedem Strahlrohr
- 3 Hohlraum-Resonatoren, die die beiden Teilchenstrahlen beschleunigen

FEINFÜHLIGE GIGANTEN

EIN TEILCHENDETEKTOR IST EIN MESSGERÄT ZUM NACHWEIS VON TEILCHEN.

WIE FUNKTIONERT EIN TEILCHENDETEKTOR?

Die Aufgabe eines Detektors ist es, die Teilchen, die bei der Kollision zweier Teilchenstrahlen entstanden sind, präzise zu vermessen. Einige dieser entstandenen Teilchen sind sehr kurzlebig. Noch bevor sie den Detektor erreichen, zerfallen sie in langlebigere Teilchen. Aus der Vermessung dieser langlebigen Teilchen lassen sich Rückschlüsse auf die Eigenschaften der ursprünglich bei der Kollision entstandenen Teilchen ziehen.

DER AUFBAU EIN TEILCHENDETEKTORS AM BEISPIEL DES CMS-EXPERIMENTS AM LARGE HADRON COLLIDER

Das Compact Muon Solenoid (CMS) ist eines der vier großen Experimente am Large Hadron Collider (LHC). Der CMS-Detektor wurde konstruiert, um neue, zuvor unbekannte Teilchen, wie das 2012 entdeckte Higgs-Boson, nachweisen zu können. Wie die meisten modernen Teilchendetektoren besteht er aus mehreren Komponenten, die wie die Schalen einer Zwiebel angeordnet sind.



STECKBRIEF COMPACT MUON SOLENOID (CMS)

- › Länge: 21 Meter
- › Höhe: 15 Meter
- › Masse: 14 000 Tonnen – fast doppelt so schwer wie der Eiffelturm
- › 3000 beteiligte Forscherinnen und Forscher
- › Über 40 beteiligte Nationen

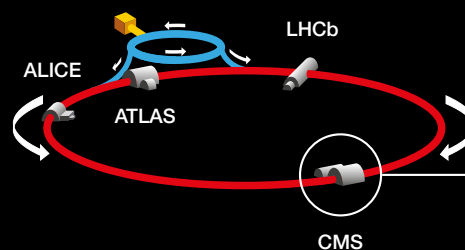
ELEKTRO-MAGNETISCHES KALORIMETER

Etwa 80 000 Kristalle aus Blei-Wolframat messen die Energien von Elektronen und Photonen, die nur der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen.



SPURDETEKTOR

Sensoren aus reinstem Silizium ermöglichen das Vermessen der durch ein Magnetfeld gekrümmten Bahnen elektrisch geladener Teilchen mit einer Präzision von einem Zehntel der Breite eines menschlichen Haares. Der Detektor funktioniert ähnlich einer Digitalkamera mit ca. 75 Millionen Pixel auf einem 200 m² großen Sensor. CMS erzeugt jedoch 40 Millionen 3-dimensionale Bilder pro Sekunde!



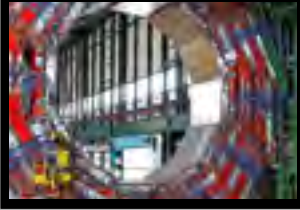
ZENTRUM

Teilchen der gegenläufigen Strahlen kollidieren. Daraus können neue Teilchen entstehen, die sich in alle Richtungen weg bewegen.



MYONENDETEKTOR

Drei unterschiedliche Typen von gasgefüllten Kammern vermessen die Spuren der Myonen, um einfache Hinweise auf die in der Kollision entstandenen Teilchen zu bekommen. Die geladenen Teilchen ionisieren das Gas in diesen Detektoren und lösen so ein elektrisches Signal aus.



SUPRALEITENDE SPULE

Der weltgrößte supraleitende Solenoid-Magnet hat eine Länge von 13 m und einen Durchmesser von 6 m.

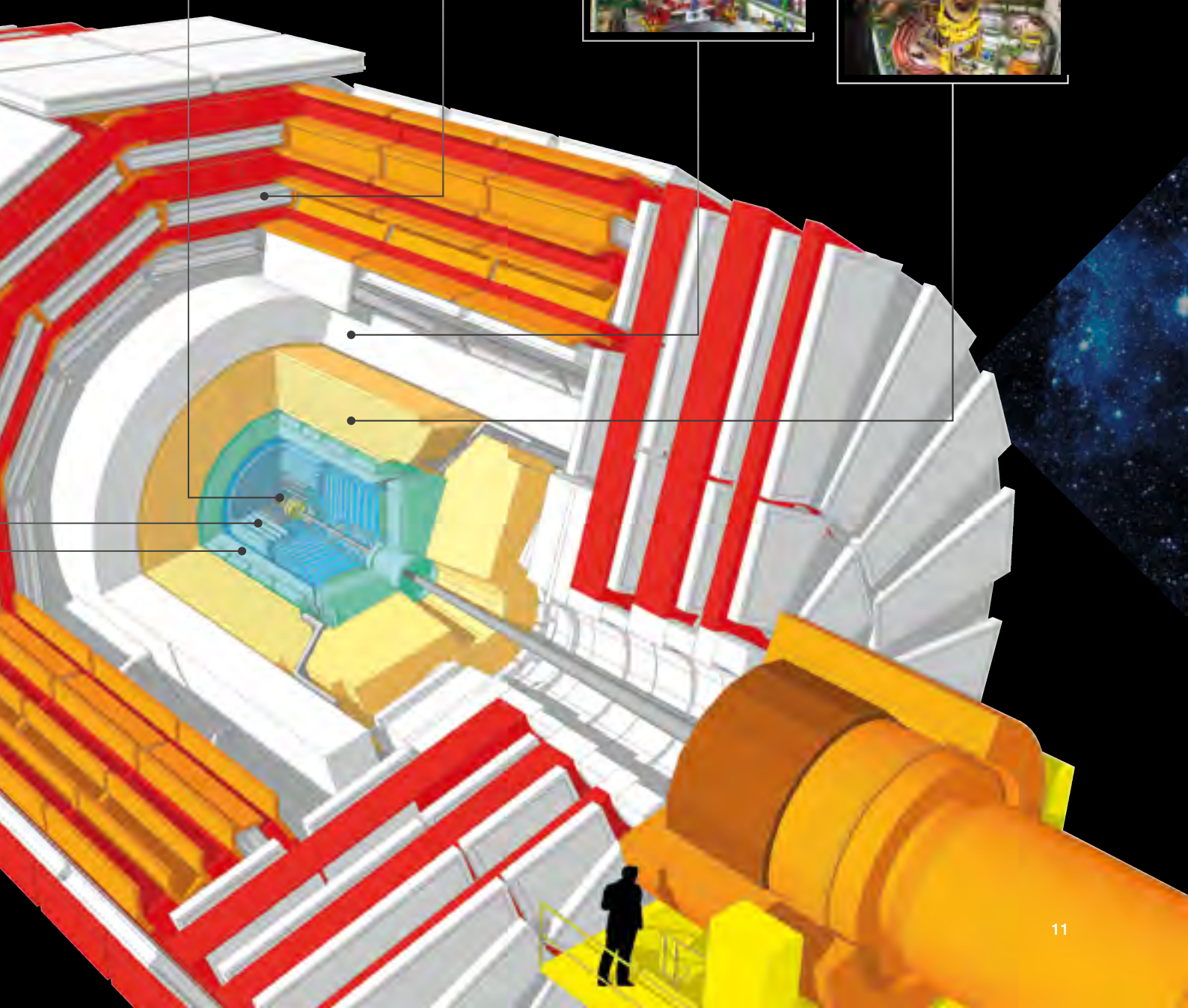
Er ist in seinem Inneren auf -270 °C gekühlt und erzeugt ein Magnetfeld von 4 Tesla (etwa 100 000mal stärker als das Erdmagnetfeld).

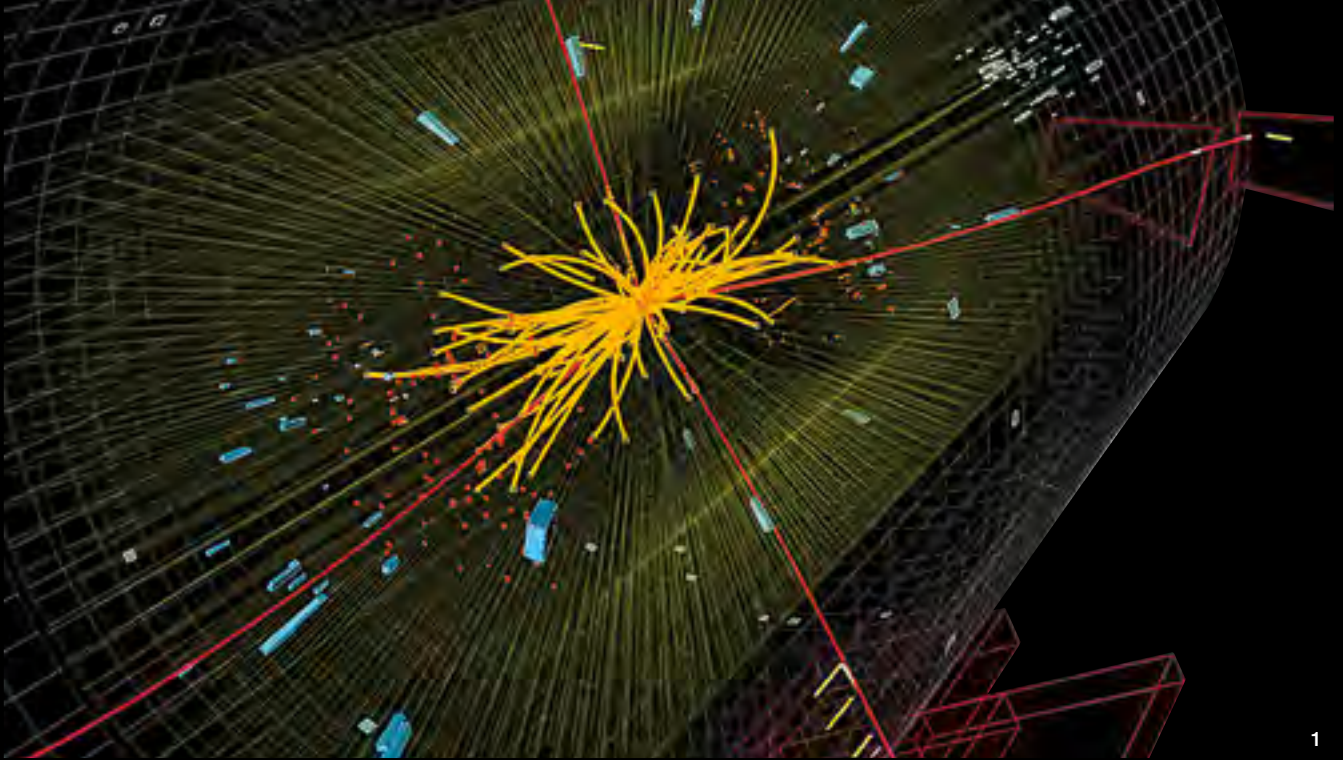
Aufgabe der Spule ist es, die Flugbahn der Teilchen entsprechend ihrer elektrischen Ladung und ihrem Impuls zu krümmen. Um die Magnetspule herum, mit dem Myonendetektor verbunden, befindet sich das rote Magnetjoch. Dieses Joch besteht aus etwa derselben Menge Stahl wie der Eiffelturm.



HADRONISCHES KALORIMETER

Aufgebaut aus abwechselnden Lagen aus Material mit hoher Dichte, das die Teilchen bremst, und sogenannten Szintillatoren, die die Bewegungsenergie der Teilchen in Photonen umwandeln. Bestimmt wird die Energie von Teilchen, die aus Quarks bestehen und der starken Wechselwirkung unterliegen.





1

1. DIE SPURENSUCHE

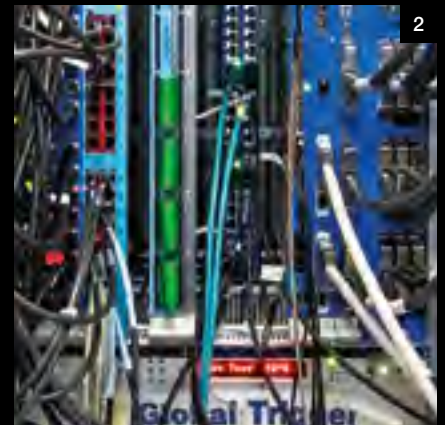
Die Teilchen, die in der Kollision entstanden sind, hinterlassen in den einzelnen Detektorschichten charakteristische Muster. Dadurch können sie identifiziert werden.

2. DIE SELEKTION

Die Muster aller Kollisionen würden einen Datenstrom von mehr als 1 TByte/s erzeugen, was unmöglich zu speichern ist (rund 1000 vollgeschriebene Festplatten pro Stunde). Es entstehen jedoch nur in wenigen Kollisionen interessante Teilchen und nur diese sollen abgespeichert werden. Zuständig für diese Auswahl ist das sogenannte Triggersystem, welches jede Sekunde aus 40 Millionen Kollisionen die physikalisch interessanten Ereignisse identifiziert.

3. DAS ERGEBNIS

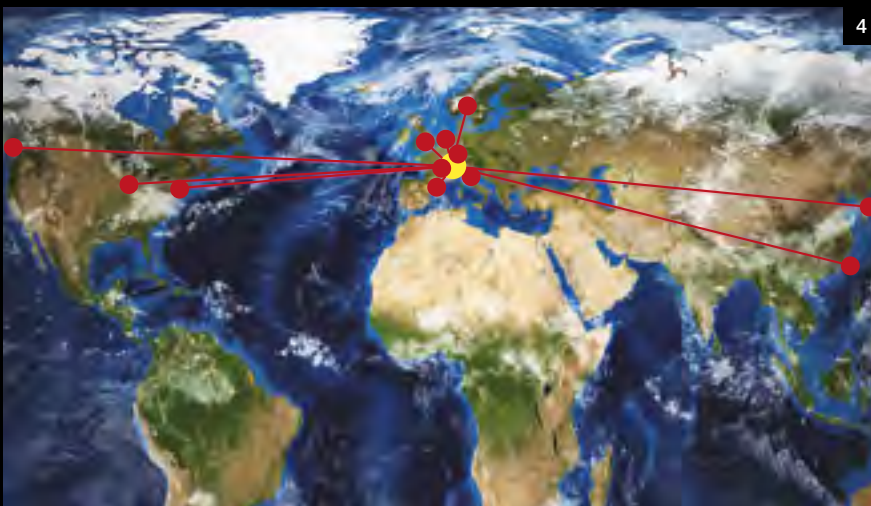
Jährlich wird eine Datenmenge von 15 Millionen Gigabytes erzeugt. Das entspricht einem 20 km hohen Stapel an CDs. Um diese enorme Menge an Daten auszuwerten, wurde das LHC-Computing-Grid entwickelt. Auf die dort gespeicherten Daten greifen Physikerinnen und Physiker aus der ganzen Welt zu und durchforsten Millionen von LHC-Kollisionen nach Mustern, die auf ein neues Teilchen oder ein neues Phänomen hinweisen könnten.



2



3



4

- 1 Resultat einer Proton-Proton-Kollision im CMS-Detektor. Ein Higgs-Boson ist kurzzeitig bei einer Kollision entstanden und anschließend in 4 Myonen zerfallen. Die vier roten Linien sind die Spuren der Myonen. Die zahlreichen gelben Linien sind Spuren von Teilchen aus anderen Kollisionen, deren Energie im elektromagnetischen (rote Punkte) und im hadronischen Kalorimeter (blaue Rechtecke) gemessen wird.
- 2 Elektronik des Triggersystems
- 3 Computerfarm am CERN zur Analyse und Speicherung von Daten der LHC-Experimente
- 4 Lage des Hauptrechenzentrums am CERN, sowie der 12 großen Rechenzentren des LHC-Computing-GRIDs. Innerhalb dieses Verbundes werden die Daten aller LHC-Experimente ausgetauscht, gespeichert und analysiert.

ÖSTERREICHISCHE BEITRÄGE

Das Institut für Hochenergiephysik (HEPHY) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften ist maßgeblich an zwei internationalen Großexperimenten beteiligt: Am Compact Muon Solenoid CMS-Experiment am CERN (Schweiz) und am Belle- und Belle II-Experiment am KEK (Japan).

DAS CMS-EXPERIMENT

Das CMS-Experiment wurde mit besonderem Augenmerk auf die genaue Vermessung und Identifizierung von Myonen, Elektronen und Photonen gebaut, um Antworten auf grundlegende Fragen, die das Standardmodell aufwirft, zu beantworten.

- › Qualitätstest von Silizium-Streifensensoren
- › Bau und Test von Streifendetektor-Modulen
- › Ausleseelektronik für Pixel- und Streifendetektoren
- › Bau und Betrieb des Spurdetektors
- › Elektronik für das Myon-Messsystem und Triggersystem
- › Computerzentrum am HEPHY im Rahmen des LHC-Computing-Grid
- › Programme für die Erkennung und Rekonstruktion von Teilchenspuren
- › Analyseprogramme zur Gewinnung von Physikresultaten

DAS BELLE-EXPERIMENT

Die Experimente Belle und Belle II wurden bzw. werden unter anderem für die Klärung der Frage, weshalb es deutlich mehr Materie als Antimaterie in unserem Universum gibt, gebaut.

BELLE I:

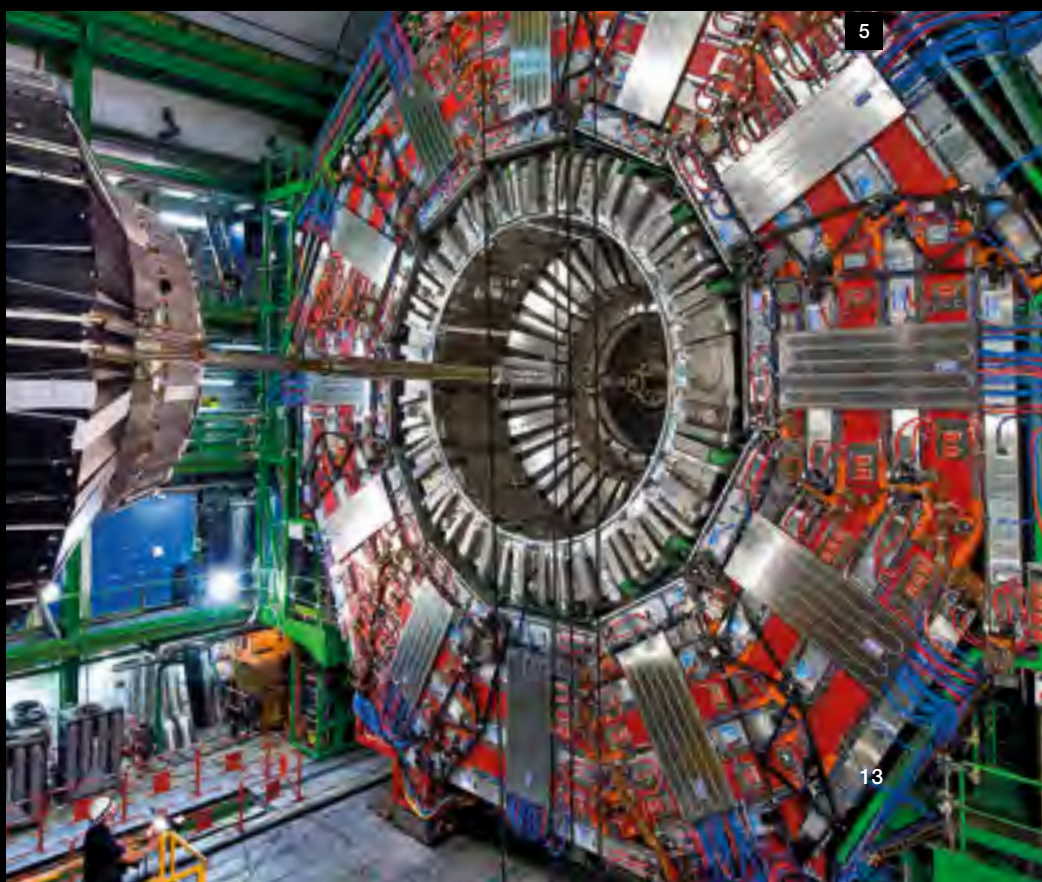
- › Bau der Ausleseelektronik für den Silizium-Vertexdetektor (SVD)
- › Datenanalyse zur Gewinnung von Physikresultaten

BELLE II:

- › Gesamtverantwortung für die Entwicklung und den Bau des neuen Vertexdetektors mittels Streifensensoren
- › Design und Bereitstellung von Silizium-Streifensensoren
- › Konstruktion von Detektor-Modulen
- › Entwurf und Bau der Ausleseelektronik
- › Design von Mechanik und Kühlung



- 1 Zusammenbau eines Detektor-Moduls
- 2 Elektronik-Baugruppen für Belle II
- 3 Detail des CMS-Spurdetektors
- 4 Verkabelung an der CMS-Trigger-Elektronik
- 5 der CMS-Detektor im geöffneten Zustand

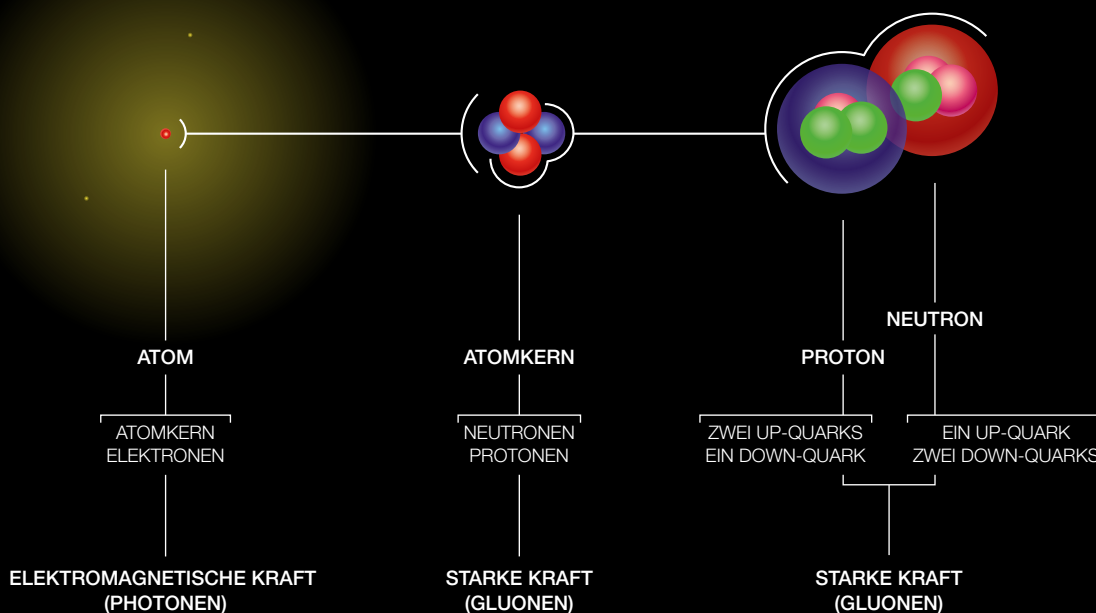


LEPTONEN, QUARKS UND BOSONEN

IN JAHRZEHNTELANGER FORSCHUNGSARBEIT WURDE EINE ART BAUKASTEN FÜR DAS UNIVERSUM ZUSAMMENGESTELLT. ER TRÄGT DEN NAMEN STANDARDMODELL UND UMFASST UNSER GESAMTES VERSTÄNDNIS VON TEILCHEN UND WECHSELWIRKUNGEN.

WORAUS BESTEHT DAS UNIVERSUM?

Bereits die alten Griechen vermuteten, dass die Welt aus kleinen unteilbaren Partikeln besteht – daher der Begriff Atom (von griechisch átomos, „das Unteilbare“). Bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts galt ein Atom als unteilbar, bis entdeckt wurde, dass auch die Atome aus noch kleineren Teilchen bestehen, welche als Atomkern und die darum befindlichen Elektronen bezeichnet wurden. Mittlerweile wissen wir, dass sich der Atomkern aus Neutronen und Protonen zusammensetzt, die selbst wiederum aus den sogenannten Quarks bestehen.



DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

MATERIETEILCHEN

Materie besteht aus 6 Quarks und 6 Leptonen. Man teilt sie in jeweils 3 Generationen mit je einem Teilchenpaar ein. Wenn man sich jedoch auf stabile Materie bezieht – also Materie, wie wir sie kennen – dann bestehen sie nur aus den Vertretern der leichtesten Generation, also der 1. Generation: Up- und Down-Quark sowie Elektron.

QUARKS

1. GENERATION Bausteine stabiler Materie, leichteste Vertreter der Quarks	UP Hat die elektrische Ladung von +2/3; Protonen enthalten zwei Up-Quarks und Neutronen eines.	DOWN Hat eine elektrische Ladung von -1/3; Protonen enthalten ein und Neutronen zwei Down-Quarks.
2. GENERATION Materieteilchen, mittelschwere Vertreter der Quarks	CHARM Ein schwerer Verwandter des Up-Quarks, der 1974 entdeckt wurde.	STRANGE Ein schwererer Verwandter des Down-Quarks. Strange wurde zusammen mit Up und Down 1969 entdeckt.
3. GENERATION Materieteilchen, schwerste Vertreter der Quarks	TOP Noch schwerer als Charm. Top wurde 1995 entdeckt.	BOTTOM Noch schwerer als Strange. Bottom wurde 1977 entdeckt.

LEPTONEN

1. GENERATION Bausteine stabiler Materie, leichteste Vertreter der Leptonen	ELEKTRON Das Elektron bildet zusammen mit dem Atomkern das Atom. Es wurde 1897 entdeckt.	ELEKTRON-NEUTRINO Partikel ohne elektrische Ladung und mit sehr kleiner Masse. Der Nachweis gelang 1956.
2. GENERATION Materieteilchen, mittelschwere Vertreter der Leptonen	MYON Ein schwerer Verwandter des Elektrons, der nur zwei millionstel Sekunden lang existiert. Im Jahr 1947 identifizierte man das Myon.	MYON-NEUTRINO Entsteht gemeinsam mit den Myonen beim Zerfall einiger Teilchen. Das Myon-Neutrino wurde 1962 entdeckt.
3. GENERATION Materieteilchen, schwerste Vertreter der Leptonen	TAUON Noch schwerer und extrem instabil. Das Tauon wurde 1975 entdeckt.	TAUON-NEUTRINO Der Nachweis für das Tauon-Neutrino gelang im Jahr 2000.

KRÄFTETEILCHEN

Um Materie in jener Form zusammenzuhalten, wie wir sie kennen, benötigt es Wechselwirkungen zwischen den Teilchen, die wir oft auch als Kräfte bezeichnen. Diese Wechselwirkungen werden von Botenteilchen, welche wir Bosonen nennen, vermittelt. Das Standardmodell kennt drei fundamentale Wechselwirkungen.

STARKE WECHSELWIRKUNG

GLUONEN
 Gluonen halten die Quarks im Neutron und Proton zusammen und sind indirekt für die Anziehung von Proton und Neutron im Atomkern verantwortlich. Die starke Kraft überwindet die enorme elektrische Abstoßung zwischen den Protonen.

ELEKTROMAGNETISCHE WECHSELWIRKUNG

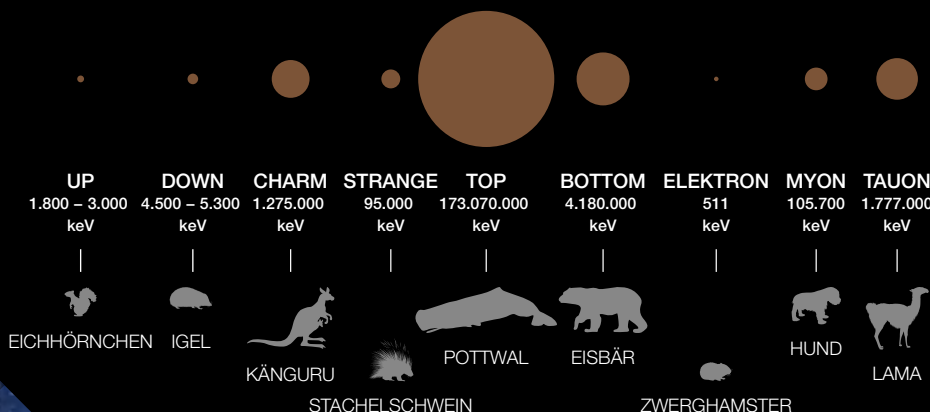
PHOTONEN
 Die elektronische Wechselwirkung bindet Elektronen an den Atomkern und sorgt auch für die Bindung der Atome in Molekülen. Aus der elektromagnetischen Wechselwirkung resultieren Elektrizität, Magnetismus und chemische Verbindungen.

SCHWACHE WECHSELWIRKUNG

W- UND Z-BOSONEN
 Die schwache Wechselwirkung ist die Ursache der natürlichen Radioaktivität und verantwortlich für die Kernreaktion im Inneren von Sternen wie unserer Sonne.

HIGGS-BOSON
 Das Higgs-Teilchen gehört zum Brout-Englert-Higgs-(BEH) Mechanismus, der umgangssprachlich oft zu Higgs-Mechanismus abgekürzt wird.

Alle Elementarteilchen erhalten demzufolge ihre Masse erst durch die Wechselwirkung mit dem allgegenwärtigen Higgs-Feld.



DIE MASSENVERHÄLTNISSE DER TEILCHEN IM VERGLEICH
 keV = Kiloelektronenvolt (physikalische Einheit von Masse und Energie)

DIE SUCHE NACH DEM HIGGS-TEILCHEN

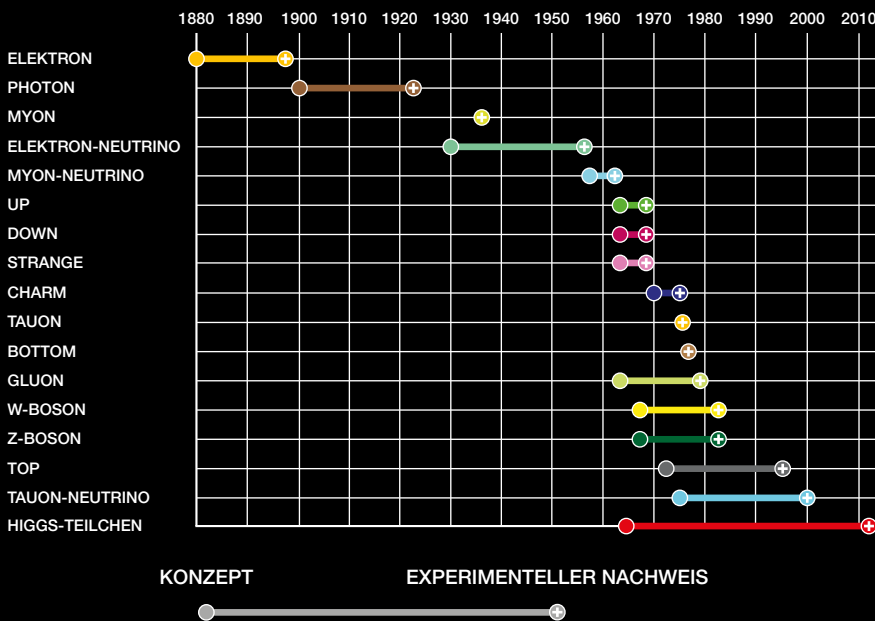
WIE DIE TEILCHENPHYSIK MIT DER ENTDECKUNG DES HIGGS-TEILCHENS UNSER WELTBILD REVOLUTIONIERT.

VOM KONZEPT BIS ZUR ENTDECKUNG

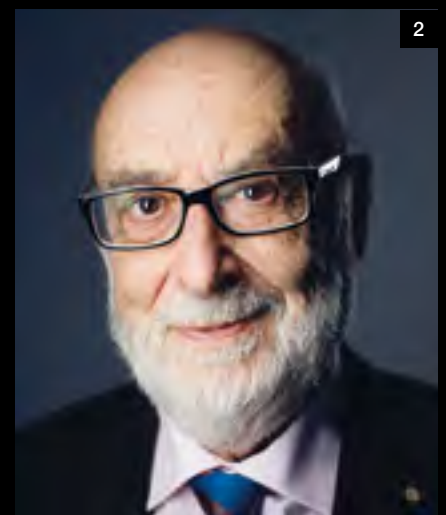
Die Teilchenphysik ist ein Wechselspiel von Theorie und Experiment. Werden im Rahmen einer Theorie neue Teilchen vorhergesagt, dann versuchen die Experimente diese nachzuweisen. Dass dieser Nachweis oft auch mehrere Jahrzehnte dauern kann, zeigt das Beispiel des Higgs-Teilchens recht deutlich. Das Higgs-Feld wurde schon in den 1960er Jahren von einigen Physikern beschrieben. Der Nachweis gelang aber erst 2012 mit den LHC-Experimenten CMS und ATLAS am CERN.

PETER HIGGS UND FRANÇOIS ENGLERT

Die beiden Teilchenphysiker erhielten 2013 den Physiknobelpreis für die theoretische Beschreibung des Brout-Englert-Higgs-(BEH) Mechanismus. Robert Brout ist 2011 leider verstorben und wurde daher bei der Verleihung des Nobelpreises nicht berücksichtigt. Umgangssprachlich wird meistens nur die Bezeichnung Higgs-Mechanismus verwendet.



1



2

1 Peter Higgs
(Vereinigtes Königreich)
2 François Englert
(Belgien)

ENERGIE UND MASSE

Energie und Masse sind zwei Aspekte derselben Eigenschaft. Masse kann sich gemäß Einsteins berühmter Formel $E=mc^2$ in Energie verwandeln und umgekehrt. Diese Umwandlung kann zum Beispiel bei den Proton-Proton-Kollisionen am LHC-Teilchenbeschleuniger des CERN stattfinden. Die Bewegungsenergie der Teilchen war am LHC erstmals groß genug, um Higgs-Teilchen zu erzeugen.

DER URSPRUNG DER MASSE

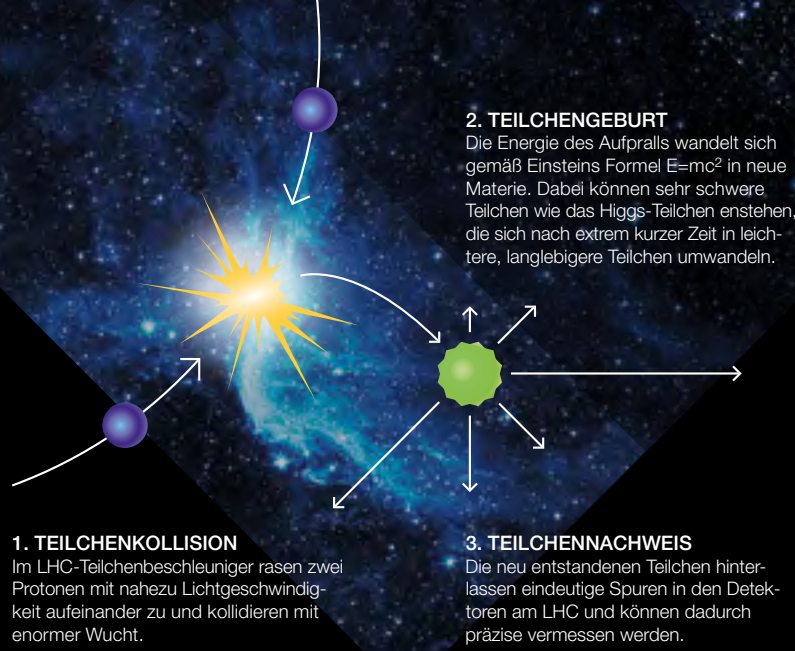
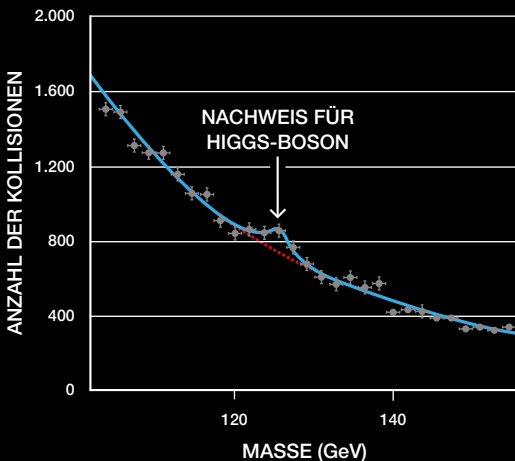
Dem Brout-Englert-Higgs- (BEH) Mechanismus zufolge ist das gesamte Universum vom sogenannten Higgs-Feld durchdrungen, mit dem die meisten Teilchen interagieren und dadurch Masse erlangen.

Teilchen, die sehr stark mit dem Higgs-Feld wechselwirken sind träger (= besitzen eine höhere Masse) als Teilchen, die nur schwach mit dem Higgs-Feld wechselwirken. Teilchen, die wiederum gar nicht mit dem Higgs-Feld interagieren, haben demnach keine Masse und bewegen sich, wie Photonen, mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum.

DER NACHWEIS DES HIGGS-TEILCHENS

Die Grafik zeigt die Anzahl der Kollisionen (vertikale Achse), in denen die Gesamtenergie der gemessenen Photonenpaare einem bestimmten Wert entspricht (horizontale Achse).

In einer Welt ohne Higgs-Teilchen würden die gemessenen Punkte der roten Linie folgen. Die Messungen vom CMS-Detektor ergeben jedoch den blauen Verlauf der Kurve. Dies ist der eindeutige Nachweis für die Existenz eines neuen Teilchens mit einer Masse von ca. 125 GeV (Gigaelektronenvolt), das in zwei Photonen zerfällt.



EINE PARTY IM UNIVERSUM

Die Funktionsweise des Brout-Englert-Higgs- (BEH) Mechanismus lässt sich mit folgendem Vergleich erklären:



Stellen wir uns das ganze Universum als eine Party vor. Am Anfang sind die Partygäste gleichmäßig im Raum verteilt. Ein unbekannter Physikstudent kann sich durch die Partygäste leicht einen Weg zum Buffet bahnen und wird von den Gästen kaum aufgehalten.



Doch dann betritt die Berühmtheit **Albert Einstein** den Raum. Die Partygäste in Einsteins Umgebung rücken sofort näher an ihn heran, um mit ihm anzustoßen und zu plaudern. Will sich nun Einstein auf den Weg zum Buffet machen, kommt er nur langsam durch die Menschentraube voran. So kann Einstein eine große und dem unbekanntem Studenten eine kleine Masse zugeordnet werden. Auf ähnliche Weise verleiht das Higgs-Feld den Teilchen eine Masse.



Nun flüstert jemand ein **Gerücht** in den Raum: „Peter Higgs kommt gleich!“ Die Gäste rücken zusammen, um zu tuscheln und verbreiten so das Gerücht weiter durch den Raum. Das wandernde Gerücht entspricht einem Higgs-Teilchen.

UNBEKANNTER
PHYSIKSTUDENT
–
LEICHTES
MATERIETEILCHEN



GERINGE INTERAKTION



PARTYGÄSTE
–
HIGGS-FELD



STARKE INTERAKTION



EINSTEIN
–
SCHWERES
MATERIETEILCHEN



SPURENSUCHER

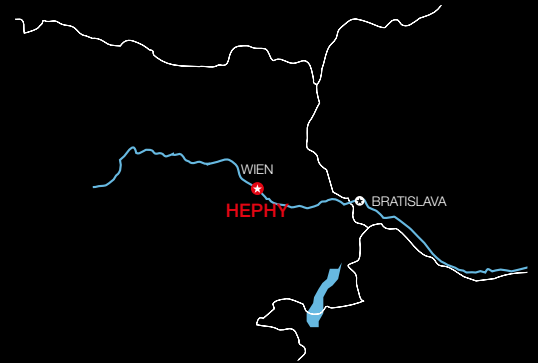
DIE WISSENSCHAFT IST GEPRÄGT VON IHREN FORSCHUNGSINSTITUTIONEN, DEREN WICHTIGSTE KOMPONENTE NEUGIERIGE MENSCHEN SIND, DIE FORSCHEN.

DAS INSTITUT FÜR HOCHENERGIEPHYSIK



Das HEPHY, gegründet 1966, ist ein Institut der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und betreibt Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Teilchenphysik. Schwerpunkt ist die Teilnahme an internationalen Großexperimenten. Das HEPHY hat seit seiner Gründung entscheidende Beiträge zu experimentellen Ergebnissen geliefert, die unter anderem zu der Vergabe von Physik-Nobelpreisen geführt haben.

- › Verleihung des Nobelpreises für Physik 1984 an Carlo Rubbia und Simon van der Meer für die Entdeckung der W- und Z-Bosonen am UA1-Experiment am CERN.
- › Verleihung des Nobelpreises für Physik 2008 an Makoto Kobayashi und Toshihide Maskawa für die Entdeckung der Brechung einer Symmetrie, welche die Existenz von mindestens drei Familien von Quarks voraussetzt. Diese gebrochene Symmetrie wurde am Belle-Experiment (KEK, Japan) und am BaBar-Experiment (SLAC, USA) nachgewiesen.
- › Verleihung des Nobelpreises für Physik 2013 an Peter Higgs und François Englert für die Entwicklung des theoretischen Mechanismus, der zum Verständnis des Ursprungs der Masse von Bausteinen der Materie beiträgt. Dieser Mechanismus wurde an den Experimenten ATLAS und CMS am CERN nachgewiesen.



AUSBILDUNG

Studierenden steht ein reichhaltiges Ausbildungsangebot in einem internationalen Umfeld offen. Diese Ausbildung ist eine ideale Vorbereitung für eine internationale Karriere in Wissenschaft oder Industrie.

INTERNATIONALE VERANSTALTUNGEN

Das Institut organisiert und veranstaltet viele renommierte internationale Konferenzen, Workshops und Tagungen in Wien. Unter anderem die vom HEPHY 1978 ins Leben gerufene Konferenz über Teilchendetektoren.

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Nicht nur Spitzenforschung, sondern auch eine lebhafte und verständliche Darstellung dieses durchaus komplexen Forschungsgebietes, sind dem Institut ein wichtiges Anliegen. Daher bietet das Institut Weiterbildungsangebote für alle Altersgruppen, nimmt an unterschiedlichen Wissensveranstaltungen teil und organisiert eigene Events.



STECKBRIEF HEPHY

- › 80 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Wien
- › 4 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am CERN

BETEILIGUNGEN AN FORSCHUNGSPROJEKTEN:

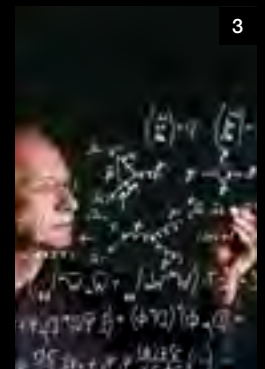
- › Belle und Belle II am KEK (Japan)
- › CMS am CERN (Schweiz)
- › CRESST im LNGS - Laboratori Nazionale del Gran Sasso (Italien)

THEORIE-SCHWERPUNKTE:

- › Dunkle Materie
- › Supersymmetrie (SUSY)
- › Quantenchromodynamik (QCD)



1



3



2

- 1 Entwicklung neuer Sensoren im HEPHY-Reinraum
- 2 Bau des Belle-Silizium-Detektors am HEPHY
- 3 Das HEPHY widmet sich der Ausbildung der nächsten Generation

DAS JAPANISCHE ZENTRUM FÜR TEILCHENPHYSIK

Das Institut für Hochenergiephysik ist sowohl am Belle-Experiment als auch an seinem Nachfolgeexperiment Belle II am nationalen Forschungszentrum KEK (kō-enerugi kasokuki kenkyū kikō, etwa: „Hochenergie-Beschleuniger-Forschungsorganisation“) in Japan beteiligt. Die etwa 60 Kilometer nordöstlich von Tokyo gelegene Forschungseinrichtung betreibt unter anderem die Beschleunigeranlage SuperKEK-B und eine Synchrotronstrahlungsquelle namens Photon Factory.

Die beiden SuperKEK-B-Speicherringe haben einen Umfang von etwa 3 Kilometern. Diese Maschine bringt Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, bei jener Energie zur Kollision, die für die Produktion von Bottom-Quarks optimiert ist.



STECKBRIEF KEK

- › Gründung: 1971
- › 720 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

DAS BELLE-EXPERIMENT

Belle und sein Nachfolger Belle II sind Teilchendetektoren. Mit Präzisionsmessungen wird hier nach Abweichungen zu theoretischen Vorhersagen gesucht. Eine derartige Differenz könnte ein Hinweis für bisher unbekannte Teilchen oder Prozesse sein.

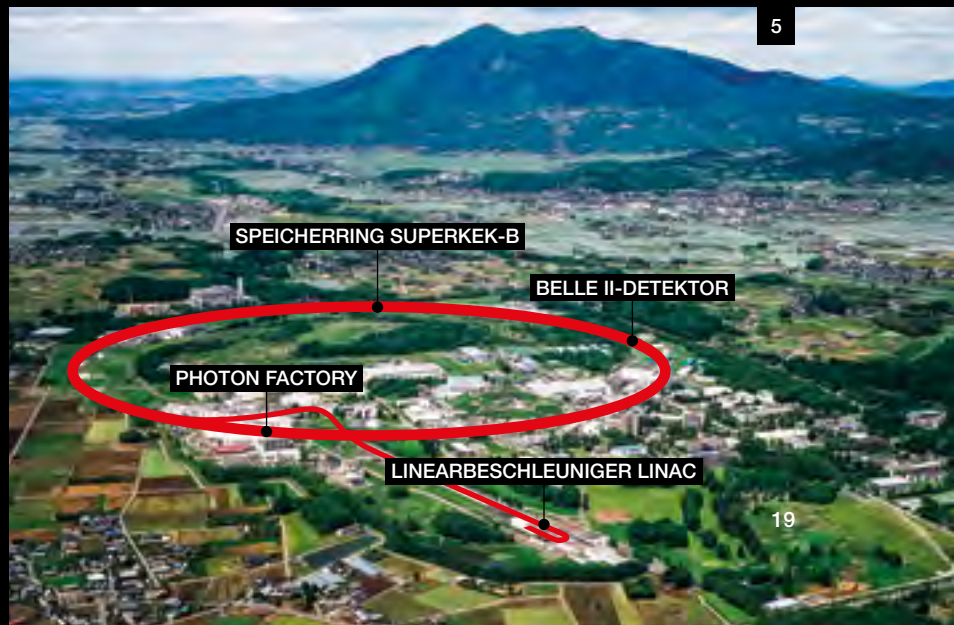


STECKBRIEF BELLE II

- › 800 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 25 Ländern
- › Österreichische Beteiligung: seit 2001 bei Belle, seit 2008 (Beginn) bei Belle II



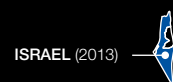
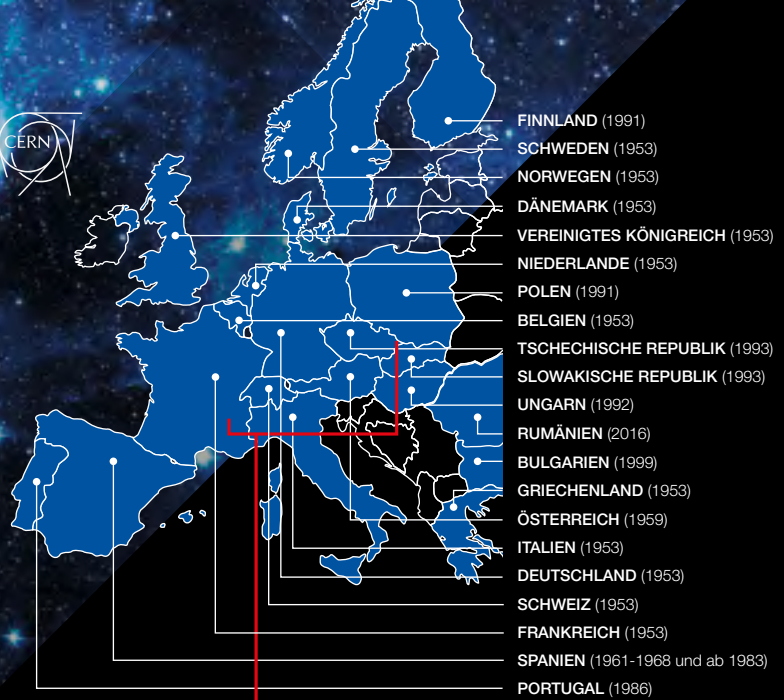
- 1 Zentraler Teil des Belle-Experiments
- 2 Teststand für neue Beschleuniger-Konzepte
- 3 CAD-Zeichnung des Belle II-Experiments
- 4 Bau des Silizium-Detektors für Belle II am HEPHY in Wien
- 5 KEK-Luftbild mit dem Beschleuniger-Komplex



CERN – FORSCHUNG ALS VÖLKERVERBINDENDES ZUKUNFTSPROJEKT

CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) ist das weltgrößte und renommierteste Zentrum für Grundlagenforschung im Bereich der Teilchenphysik. Das Forschungszentrum liegt an der Grenze zwischen Frankreich und der Schweiz nahe der Stadt Genf. Aufgabe ist die Erforschung der grundlegenden Gesetze des Universums. Das CERN entwickelt und baut komplexe Forschungsinfrastruktur wie den LHC-Beschleuniger und stellt diese für wissenschaftliche Experimente zur Verfügung.

CERN bietet Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftern jeder Altersgruppe und Nationalität die Gelegenheit, hautnah bei der Gewinnung neuer Erkenntnisse mitzuwirken und sich über all das mit Gleichgesinnten auszutauschen. Es sind jedoch nicht nur die Entdeckungen und der Erkenntnisgewinn, die das Großforschungszentrum so außergewöhnlich machen, es wurden und werden auch neueste Technologien am CERN entwickelt: Vom World Wide Web und GRID-Computing bis hin zu neuen Techniken für Medizindiagnostik und Krebstherapie. CERN, als eines der ersten Projekte eines gemeinsamen Europas nach dem Zweiten Weltkrieg, ist auch ein Ort der Völkerverständigung. Am CERN sprechen alle Menschen eine gemeinsame Sprache und tragen eine gemeinsame Kultur: die der Wissenschaft!



ISRAEL (2013)

DIE 22 MITGLIEDSLÄNDER DES CERN
(Datum des Beitritts)



STECKBRIEF CERN

- › Gründung: 1954
- › Beitritt Österreichs: 1959
- › Derzeit 22 Mitgliedsländer
- › Etwa 3400 CERN-Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter
- › Derzeit sind 9 Teilchenbeschleuniger und 100 Experimente in Betrieb
- › Am CERN forschen mehr als 14 000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 560 Institutionen und Universitäten aus über 100 Nationen

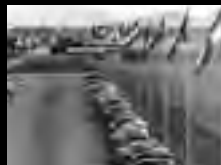
1976

Das 7 km lange Super-Protonensynchrotron (SPS) geht in Betrieb. Dieses ist heute noch ein wichtiges „Arbeitstier“ und dient als Vorbeschleuniger des LHC.



1959

Österreich tritt dem CERN bei und ist seither ein Teil der dort stattfindenden Forschung.



1959

Die erste große Maschine des CERN, das Protonensynchrotron (PS), wird in Betrieb genommen. Noch heute ist das PS das Herz des Beschleunigerkomplexes am CERN.



1968

Georges Charpak entwickelt die Vieldraht-Proportionalkammer. Sie misst die Spuren von Teilchen und revolutionierte die Teilchenphysik, fand aber auch zahlreiche weitere Anwendungen. Charpak wurde dafür 1992 der Nobelpreis verliehen.



1984

Experimente am CERN entdecken 1983 die W- und Z-Teilchen der schwachen Wechselwirkung. Diese Entdeckung führte 1984 zur Verleihung des Nobelpreises an Carlo Rubbia und Simon van der Meer.



1954:

ALLER ANFANG

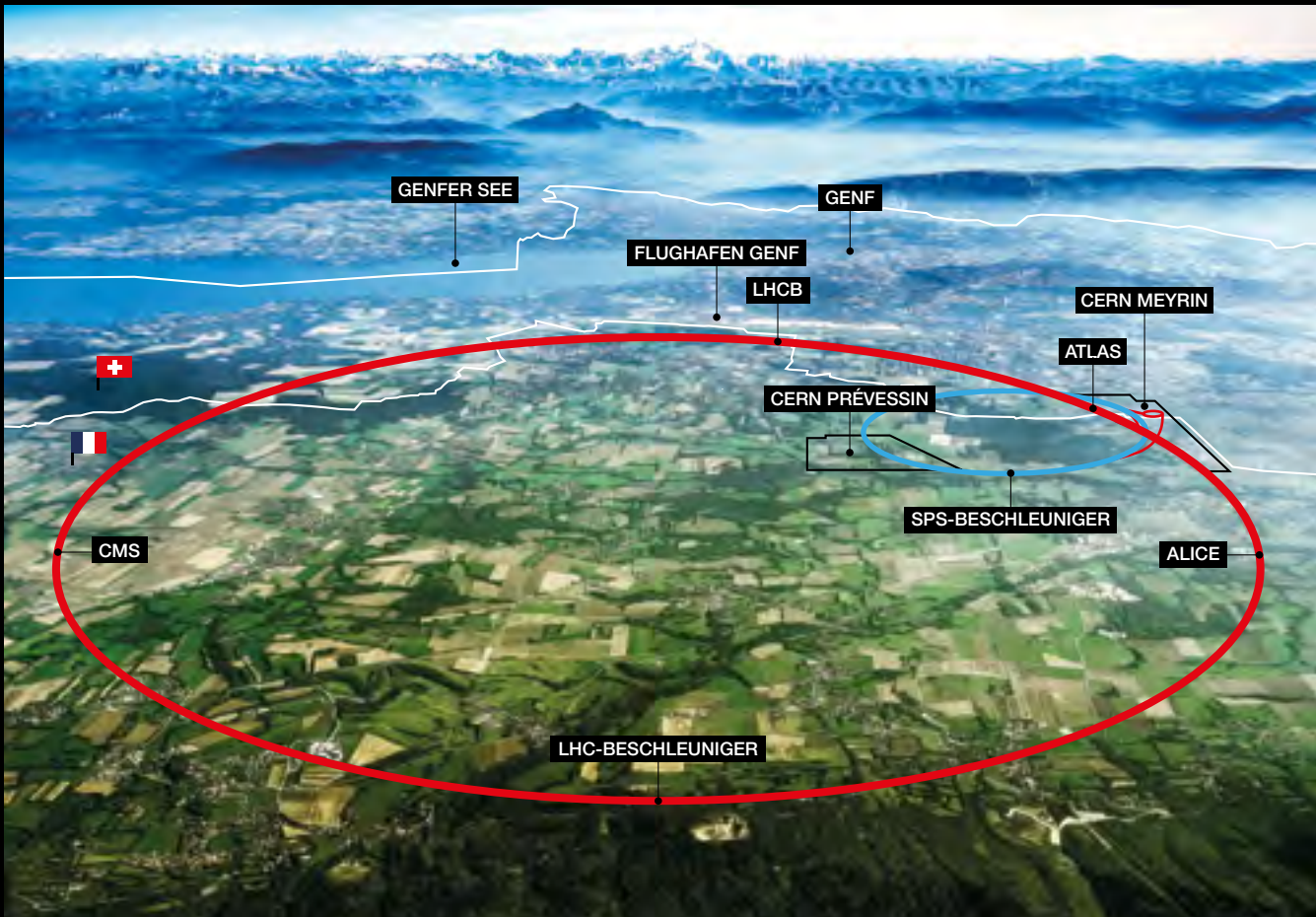
CERN wird am 29. September 1954 durch die Ratifizierung des entsprechenden Staatsvertrags von zwölf europäischen Mitgliedsländern gegründet.



1957

Der erste Beschleuniger des CERN, das Synchrozyklotron, geht in Betrieb.





1989

Tim Berners-Lee präsentiert sein Konzept für das World Wide Web. Der erste Webserver ist Ende 1990 fertig. Drei Jahre später bietet CERN die entwickelte Software zur freien Verwendung an.



1989

Der Large-Electron-Positron Collider (LEP) geht in Betrieb. Er ist der Vorgänger des LHC-Beschleunigers, der im selben 27 km langen Tunnel installiert ist wie der LEP.



1999

Der Bau des LHC-Beschleunigers beginnt. Das komplexeste wissenschaftliche Instrument wird im 27 km langen Tunnel des LHC-Beschleunigers installiert, der im Jahr 2000 abgeschaltet und abgebaut wird.



1995

Zum ersten Mal wird ein Antiwasserstoff-Atom im PS210-Experiment erzeugt. Dazu wird der Low Energy Antiproton Ring (LEAR) des CERN verwendet.



2008

Am 10. September 2008 zirkulieren zum ersten Mal Protonen durch den LHC-Beschleuniger.



2012

Am 4. Juli 2012 präsentieren die CMS- und ATLAS-Kollaborationen zum ersten Mal ihre Daten, die auf die Existenz des Higgs-Teilchens hinweisen.

Nach weiterer sorgfältiger Überprüfung der Ergebnisse ist die Entdeckung des Higgs-Teilchens eindeutig nachgewiesen. 2013 wird Peter Higgs und François Englert der Nobelpreis für die theoretische Beschreibung des Higgs-Mechanismus verliehen.



WAS NUN?

Auf dem Weg zu einer umfassenden physikalischen Erklärung des Universums als Ganzes ist man auch mit der Entdeckung des Higgs-Teilchens nur einen Schritt weiter. Es gibt noch viele große Herausforderungen für die Teilchenphysik.



DAS CRESST-EXPERIMENT

In einem der größten Untergrundlaboratorien der Welt, dem LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso), befindet sich das CRESST-Experiment (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers), das versucht, die Existenz von Dunkler Materie zu bestätigen.

Die derzeit favorisierte Erklärung der Dunklen Materie ist die Existenz bisher unentdeckter Elementarteilchen. Das CRESST-Experiment soll diese Teilchen durch ihre Wechselwirkungen mit dem Detektor nachweisen. Dieser extrem empfindliche Detektor ist im Untergrundlabor in 1400 Metern Tiefe aufgebaut, um ihn gegen störende kosmische Höhenstrahlung und natürliche Radioaktivität abzuschirmen.

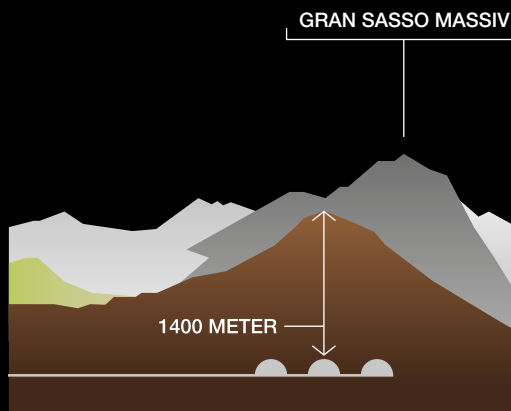
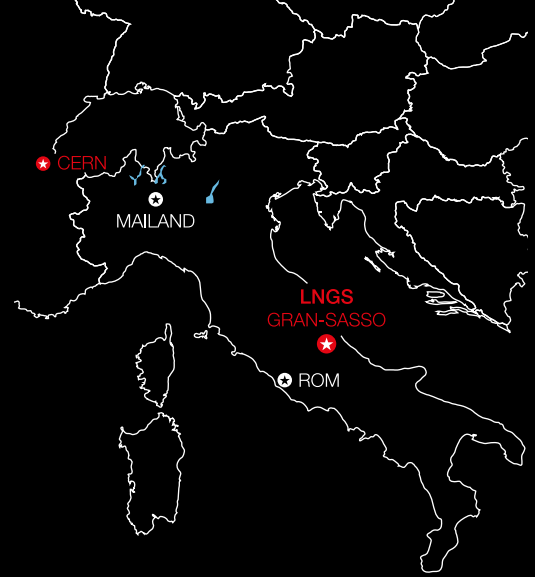
Kern des Experiments sind Kristalle aus Kalzium-Wolframat. Diese werden bei einer Temperatur knapp über dem absoluten Nullpunkt (-273,15 °C) betrieben. Diese tiefen Temperaturen sind nötig, um die minimale Temperaturänderung, die durch die Wechselwirkung der Teilchen mit dem Detektormaterial entsteht, messen zu können. Wenn ein Teilchen mit dem Kristall wechselwirkt und damit in dem Kristall Energie deponiert, wird diese Energie in Wärme umgewandelt und nachgewiesen. Gleichzeitig erzeugt die Wechselwirkung im Kristall auch Licht. Die Menge des erzeugten Lichts erlaubt es, zwischen den verschiedenen Teilchenarten zu unterscheiden.

Sollte die Suche nach Dunkler Materie erfolgreich verlaufen, würden einander Astronomie und Teilchenphysik, die beiden Disziplinen der Physik, die sich mit dem ganz Großen und dem ganz Kleinen befassen, ergänzen und uns eine neue Sicht auf die Beschaffenheit des Universums ermöglichen.



STECKBRIEF CRESST

- › Seit 1996 in Betrieb
- › Etwa 45 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus 6 Instituten
- › Österreichische Beteiligung: seit 2013



3 grosse Forschungshallen, jeweils 100 Meter lang, 20 Meter breit und 18 Meter hoch; die Experimentierhallen befinden sich entlang des Autobahntunnels unter dem Gran Sasso Massiv



- 1 Blick in die Halle A des Laboratori Nazionali del Gran Sasso
- 2 Offenes CRESST II-Detektormodul
- 3 Einbau der Kalzium-Wolframat-Kristalle in das CRESST-Experiment im Gran Sasso Untergrundlabor. Das CRESST-Detektor-Karussell hat Platz für 33 Detektormodule. Seit Juli 2016 werden 13 Detektormodule betrieben.



DER WEG ZU BAHNBRECHENDEN ENTDECKUNGEN

DAS HIGGS-TEILCHEN IST ENTDECKT – WAS NUN?

Nach der Entdeckung des Higgs-Teilchen 2012 am Large Hadron Collider (LHC) sind weitere Großinstrumente, die auf dem Erfolg des LHC aufbauen, geplant. Einerseits sollen bereits bekannte Teilchen in hoher Genauigkeit vermessen werden, aber auch neue unbekannte Teilchen entdeckt werden. Weltweit werden Pläne für eine neue Generation von Teilchenbeschleunigern geschmiedet. Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker rechnen damit, dass man durch Präzisionsmessungen, die derzeit am LHC nahe Genf und am SuperKEKB in Japan stattfinden, auf Phänomene jenseits des Standardmodells stößt.

2018
Erste Teilchenkollisionen im Super-KEKB-Beschleuniger

2008
Der größte Teilchenbeschleuniger, der Large Hadron Collider am CERN, geht in Betrieb.

1989
Der Beschleuniger SLC, der Stanford Linear Collider, geht am Forschungszentrum SLAC in Betrieb.

1989
Am CERN nimmt der Beschleuniger LEP (Large Electron-Positron Collider) den Forschungsbetrieb auf.

1983
Der erste Siliciumdetektor wird am NA11-Experiment am CERN installiert.

1987
Das Tevatron am Fermilab, der zu dem Zeitpunkt energiereichste Beschleuniger der Welt, geht in Betrieb.

1957
Der erste Beschleuniger des CERN, das Synchrozyklotron, geht in Betrieb.

1968
Entwicklung der Vieldraht-Proportionalkammer durch Georges Charpak. Dieser Teilchendetektor ermöglicht eine schnelle elektronische Auswertbarkeit der Daten.

1947
Entwicklung des Szintillationszählers durch Hartmut Kallmann und Immanuel Broser

1952
Erfindung des Prinzips der Blasenkammer durch Donald Arthur Glaser

1928
Erfindung des Geigerzählers, eines mit Gas gefüllten Teilchendetektors, durch Hans W. Geiger und Walter Müller

1930
Erfindung des Zyklotrons durch Ernest O. Lawrence und Niels E. Edlefsen


1909
Ernest Rutherford, Hans W. Geiger und Ernest Marsden zeigen im Rutherford'schen Streuversuch, dass positive Ladung und ein Großteil der Masse eines Atoms in seinem kleinen Kern vereinigt sind. Als Teilchendetektor dient eine Zinksulfid-Fotoplatte.

WAS HABE ICH DAVON?

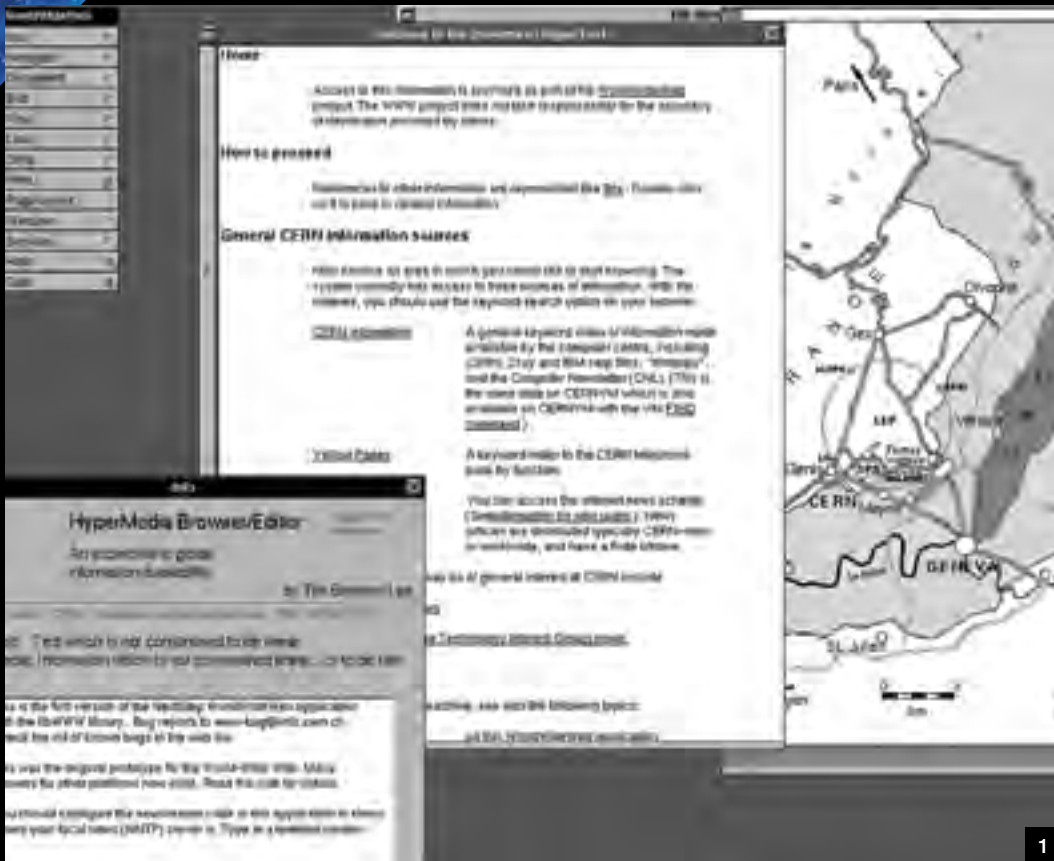
DIE ERFORSCHUNG GRUNDLEGENDER ZUSAMMENHÄNGE DER NATUR IST EINE INVESTITION IN DIE ZUKUNFT.

MEHRWERT FÜR ALLE

Ein Beispiel: Einsteins Relativitätstheorie war Anfang des 20. Jahrhunderts eine Revolution, aber damals ohne Relevanz für das alltägliche Leben. Heutzutage ist sie notwendig für die Funktion des GPS-Systems, das als Teil der meisten Smartphones in vielen Taschen steckt. Speziell bei der Durchführung von innovativen Großforschungs-Projekten ist die Entwicklung von neuen Technologien unumgänglich. Diese Innovationen können helfen, das Leben aller Menschen besser zu machen.

A satellite in space, viewed from a high angle. The satellite is yellow and white, with two large blue solar panels extending outwards. It has several antennas and sensors. The background is the Earth's surface, showing clouds and the horizon.

Darstellung eines Satelliten des Global-Positioning-System (GPS). Die hohe Genauigkeit der Positionsbestimmung von GPS kann nur erreicht werden, wenn man Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie in die Berechnung einbezieht.



1

- 1 Screenshot vom Beginn des WWW
- 2 Tim Berners-Lee mit dem Original-Dokument über das WWW vor dem ersten Webserver
- 3 Ein Patient wird für eine Untersuchung im PET-Scanner vorbereitet.

DIE GEBURTSTÄTTE DES WORLD WIDE WEB

Den Grundstein für das World Wide Web legte 1989 Sir Tim Berners-Lee, um den weltweiten Informationsaustausch zwischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftern, die an Experimenten am CERN arbeiten, zu erleichtern.

Eine effiziente Kommunikation ist die Basis für die auf der ganzen Welt verteilten Forscherinnen und Forscher, die gemeinsam an einem Projekt arbeiten. So entstand ein einfach zu handhabendes Informationssystem, das die weltweite Kommunikation revolutionierte.

DIE POSITRONEN-EMISSIONSTOMOGRAPHIE (PET)

Die PET ist ein bildgebendes Verfahren in der Medizin, das Schnittbilder von lebenden Organismen erzeugt. Dabei wird ein Betastrahler in den Körper injiziert, der Positronen abstrahlt. Diese erzeugen im Gewebe zwei Photonen, die vom PET-Scanner registriert und anschließend im Computer zu einem Bild zusammengesetzt werden.

Die Entwicklung dieses Gerätes wurde erst durch die Detektorentwicklungen in der Teilchenphysik möglich. So hat z.B. die „Crystal Clear“-Kollaboration am CERN Szintillationskristalle entwickelt, die PET mit einer Ortsauflösung von unter 1,6 Millimetern ermöglichen.



2



3

PHYSIK TRIFFT MEDIZIN

MEDAUSTRON – DAS ZENTRUM FÜR IONENTHERAPIE UND FORSCHUNG IN WIENER NEUSTADT (NÖ)



DER TEILCHEN-BESCHLEUNIGER

Das Herzstück des Zentrums ist die Beschleunigeranlage. Damit werden die Ionen auf bis zu zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und danach in einen der vier Bestrahlungsräume geführt.

WESENTLICHE BESTANDTEILE DER BESCHLEUNIGERANLAGE

- › Injektor – Ionenquellen und Linearbeschleuniger
- › Synchrotron – Kreisbeschleuniger
- › Hochenergie-Strahltransport – Extraktionslinie und Strahlzuführungen in die Bestrahlungsräume

Das Synchrotron als Hauptbeschleuniger weist einen Umfang von 78 Metern auf. Dabei dienen 16 Dipolmagnete zur Ablenkung und insgesamt 24 Quadrupolmagnete zur Fokussierung bzw. Defokussierung des Teilchenstrahls.



MedAustron

Teilchenarten	Protonen	Kohlenstoffionen
Energie	60 – 800 MeV/A	120 – 400 MeV/A
Intensität	$\leq 1 \cdot 10^{10}/\text{spill}$	$\leq 4 \cdot 10^9/\text{spill}$
Extraktionszeit	0,1 – 10 s	0,1 – 10 s

Bei MedAustron werden entweder Protonen oder Kohlenstoffionen beschleunigt. Die Teilchenenergie bestimmt die maximale Eindringtiefe in das Gewebe. Die Intensität beschreibt die maximale Teilchenanzahl pro Beschleunigungszyklus. Die Extraktionszeit ist jene Zeit, in der sämtliche Teilchen eines Beschleunigungszyklus in den Bestrahlungsraum geleitet werden.



STECKBRIEF MEDAUSTRON

- › Krebsbehandlung mittels Ionentherapie
- › Behandlung von bis zu 1200 Patienten jährlich
- › Klinische und nichtklinische Forschung
- › Wiener Neustadt, Niederösterreich
- › www.medastron.at

SYNCHROTRON

Das Synchrotron (Kreisbeschleuniger) als Hauptbeschleuniger erhöht die Energie der Teilchen bei jedem Umlauf, diese erreichen dabei eine Endgeschwindigkeit von bis zu 2/3 der Lichtgeschwindigkeit.



BESTRAHLUNGS-RÄUME

In den vier Bestrahlungsräumen (drei klinische und ein nichtklinischer) werden die Strahleigenschaften nochmals verifiziert, bevor der Strahl die Vakuumröhre verlässt und dann gezielt auf den Tumor oder ein Experiment gelenkt wird.



HOCHENERGIE-STRAHLFÜHRUNG

Nach der Beschleunigung werden die Teilchen aus dem Synchrotron extrahiert und in einen der vier Bestrahlungsräume geleitet.



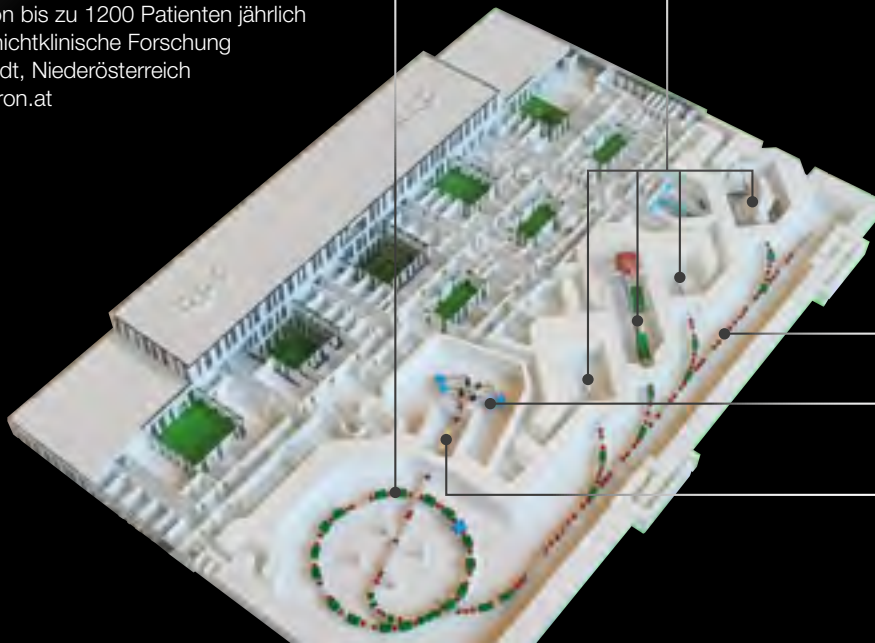
IONENQUELLE

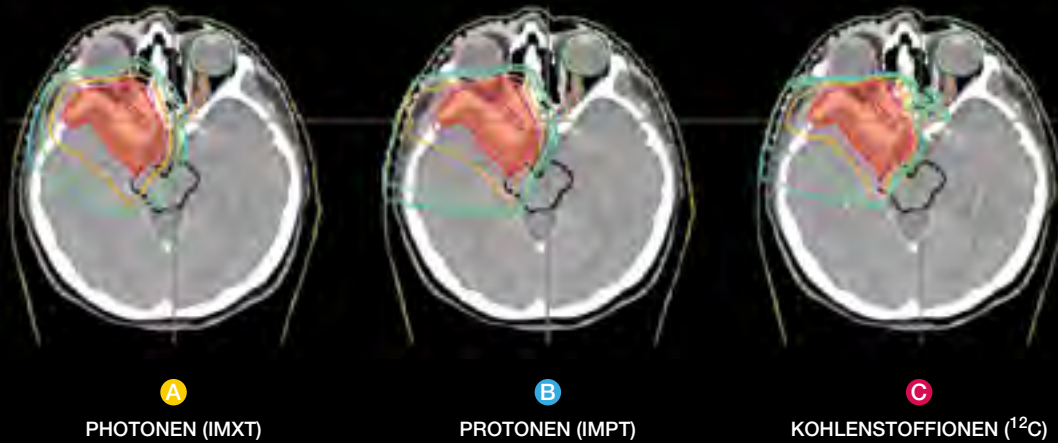
Die Ionenquellen generieren die für die Bestrahlung notwendigen Teilchen, Protonen oder Kohlenstoffionen.



LINEAR-BESCHLEUNIGER

Die beiden Linearbeschleuniger sorgen mit Hilfe von elektromagnetischen Wechselfeldern für eine Vorbeschleunigung der geladenen Teilchen.





MEDIZINISCHE ANWENDUNG

Die Ionenstrahlentherapie unter Verwendung von Protonen und Kohlenstoffionen ist eine innovative Form der Strahlentherapie zur Behandlung von Krebspatienten.

VORTEILE GEGENÜBER DER HERKÖMMLICHEN STRAHLENTHERAPIE

- › Die Strahlenbelastung des gesunden Gewebes vor dem Tumor kann gesenkt werden.
- › Strahlensensible Organe, die hinter dem Tumor liegen, bleiben geschont.
- › Nebenwirkungen und Spätfolgen wie Sekundär malignome können reduziert werden.

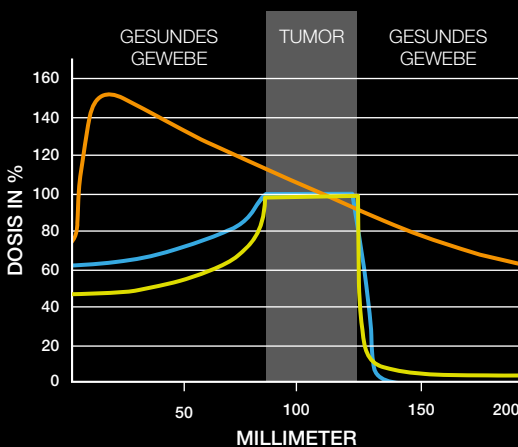
NICHTKLINISCHE FORSCHUNG

Für die nichtklinische Forschung sind im Wesentlichen drei Forschungsschwerpunkte vorgesehen:

- › **STRAHLENBIOLOGIE**
 - › Bioimaging, Biomarker
- › **MEDIZINISCHE STRAHLENPHYSIK**
 - › Dosimetrie
 - › Bestrahlungsplanung
- › **EXPERIMENTALPHYSIK**
 - › Detektorentwicklung, Detektortests
 - › Protonen-Computertomographie

VERGLEICHENDE BESTRAHLUNGS-PLANUNG

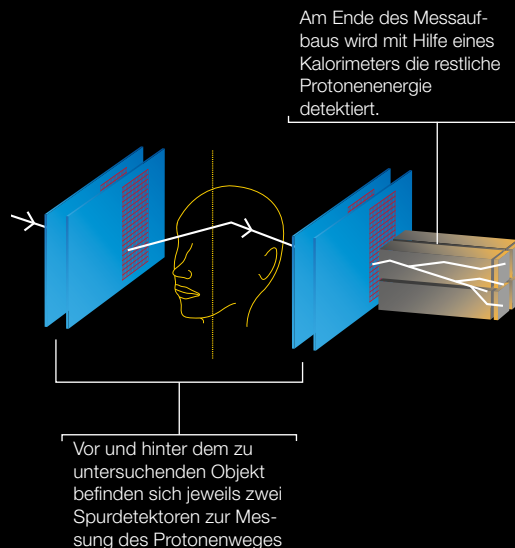
Die Bilder zeigen anhand der farbigen begrenzten Flächen die Dosis-Verteilung für einen Hirntumor bei einer Behandlung mit (A) Photonen (IMXT), (B) Protonen (IMPT) und (C) Kohlenstoffionen (^{12}C). Man sieht deutlich, dass Risikoorgane wie z.B. das Auge oder der Hirnstamm bei der Ionenstrahlentherapie (Protonen und Kohlenstoffionen) besser geschont werden können.



- PHOTONEN
- PROTONEN
- KOHLENSTOFFIONEN

VERGLEICH DER TIEFENDOSISVERTEILUNG

Die Energieabgabe der Photonen, die in der konventionellen Strahlentherapie zum Einsatz kommen, erreicht kurz nach dem Eindringen in das Gewebe ihr Maximum und fällt danach exponentiell ab. Ionen hingegen geben beim Eintreten ins Gewebe zunächst nur sehr wenig Energie ab, sobald sie aber eine kritische Geschwindigkeit unterschreiten, steigt die Energieabgabe sehr stark an, um danach auf nahezu null zu sinken.



Dreidimensionales Wasserphantom zur Untersuchung von Tiefendosisverläufen und Querprofilen. Entsprechende Dosimeter können mittels drei ansteuerbaren Achsen den gesamten Bereich abfahren und jeweils eine Dosismessung durchführen. Die gesammelten Messungen werden dann grafisch in Tiefendosis- und Querprofilen aufgetragen.

BILDGEBENDES VERFAHREN PROTONEN-RÖNTGEN

DER URSPRUNG DES UNIVERSUMS

DIE TEILCHENPHYSIK IST DER SCHLÜSSEL
ZUM VERSTÄNDNIS DER ALLERERSTEN
AUGENBLICKE SEINER EXISTENZ.

ZURÜCK ZUM ANBEGINN DER WELT

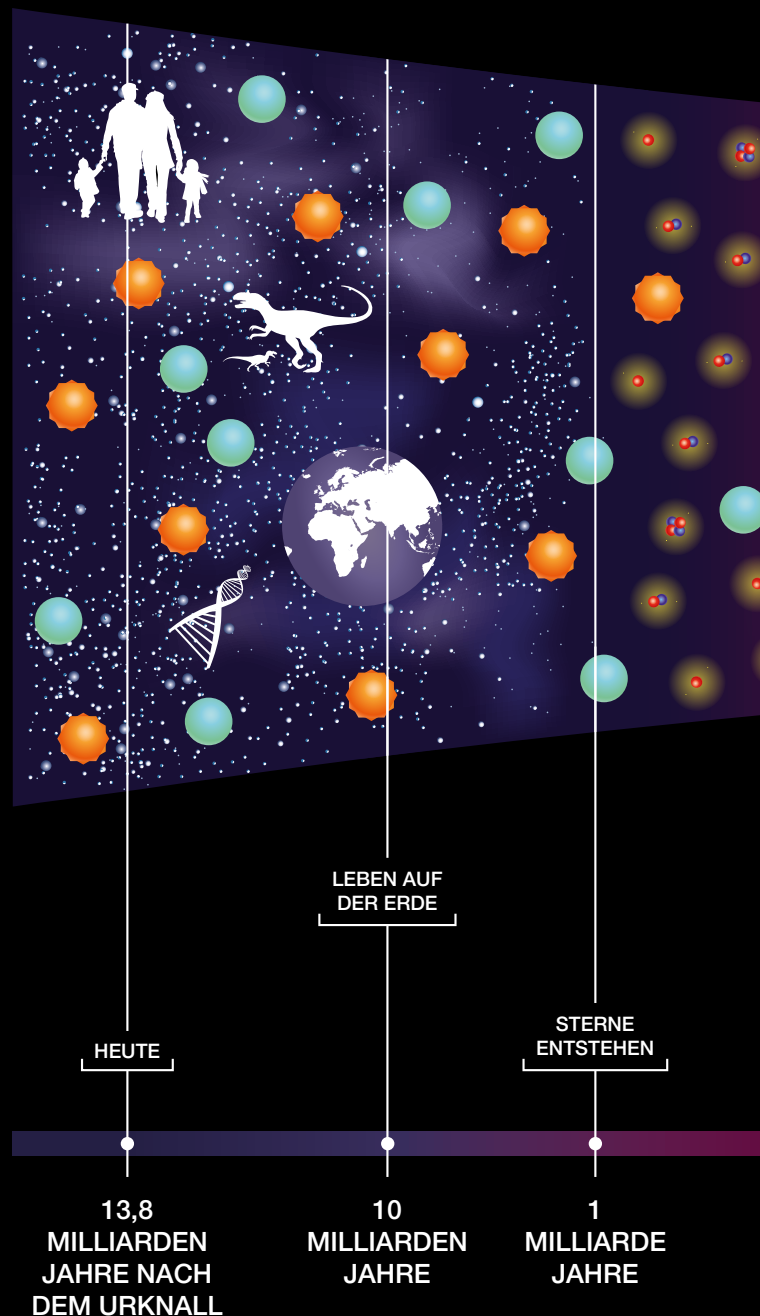
Ausgehend von unserem Sonnensystem haben wir die Welt der Galaxien bis an den Rand des sichtbaren Universums erforscht. Die Grenze des beobachtbaren Universums ist die 380 000 Jahre nach dem Urknall entstandene kosmische Hintergrundstrahlung. Davor verbirgt sich das Zeitalter der Elementarteilchen.

Experimente der Teilchenphysik haben das Ziel, die Prozesse kurz nach dem Urknall zu erforschen. Zu dieser Zeit hatten alle Materieteilchen hohe Bewegungsenergie und kollidierten Dank der hohen Dichte ständig miteinander. Ähnliches passiert in den Kollisionen im LHC-Beschleuniger jedoch mit weniger Teilchen, auf kleinem Raum und nur für kurze Zeit. So hilft die Teilchenphysik die Geburt unseres Universums besser zu verstehen, und liefert Antworten auf grundlegende Fragen, die vielleicht zu einer gänzlich neuen Beschreibung der Natur führen werden.

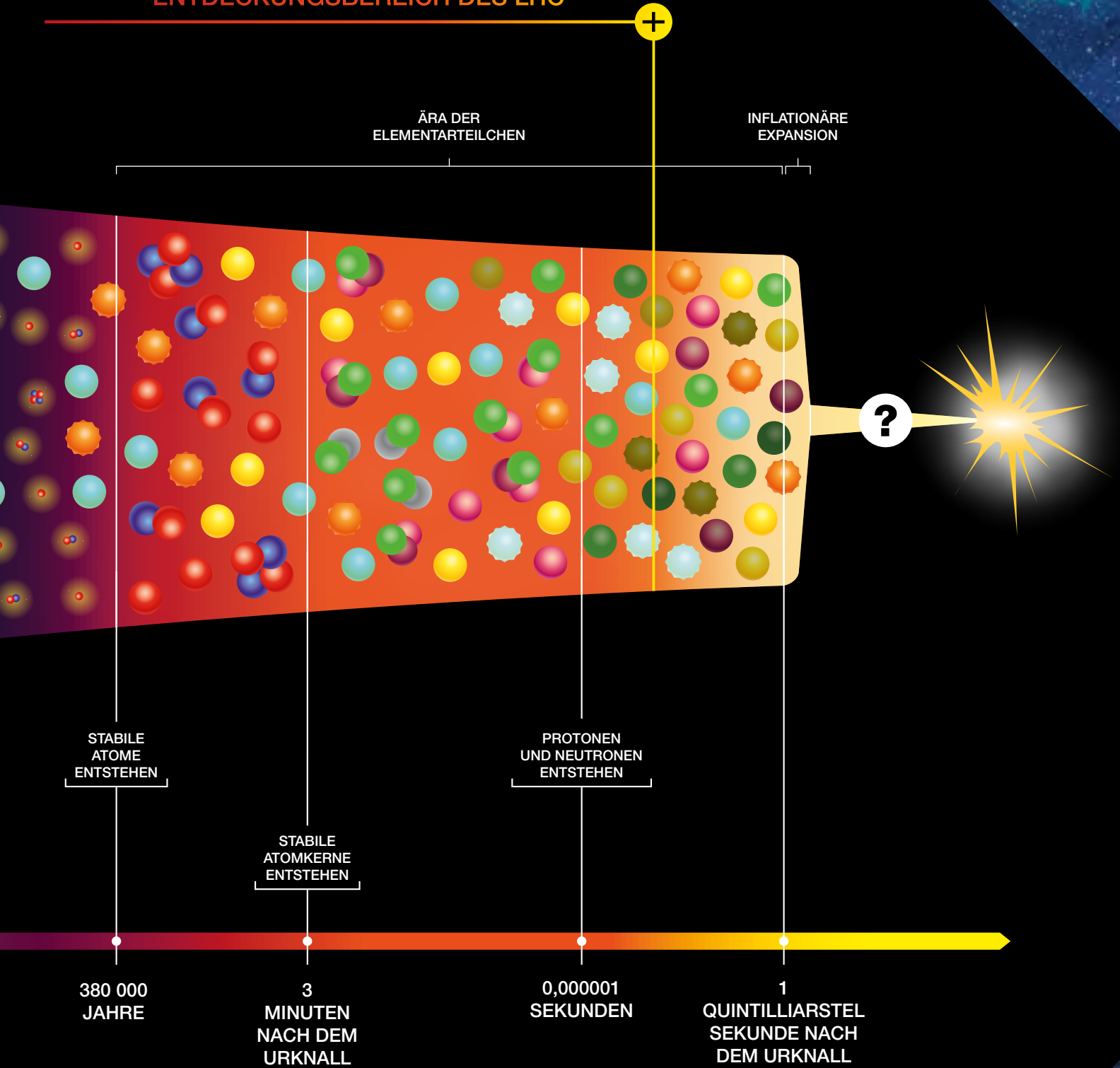


ELEMENTARTEILCHEN DES UNIVERSUMS

- | | |
|-------------|----------|
| QUARK | NEUTRINO |
| ELEKTRON | MESON |
| MYON, TAUON | BARYON |
| GLUON | ATOMKERN |
| W-, Z-BOSON | ATOM |
| PHOTON | |



ENTDECKUNGSBEREICH DES LHC



UNENDLICHES WELTALL?

Seit jeher beschäftigen sich die Menschen mit der Frage nach der Entstehung unseres Universums. Was ist der Ursprung des Universums? Hat das Universum einen Anfang und ein Ende? Wie groß ist das Universum? Jahrtausendlang konnte der Himmel nur mit bloßem Auge betrachtet werden. Seit den letzten Jahrhunderten jedoch konnte durch immer leistungsfähigere Teleskope die Grenze des beobachtbaren Universums immer mehr hinausgeschoben werden. Gleichzeitig haben neue physikalische Theorien zu einem besseren Verständnis der komplexen Abläufe im Kosmos geführt.

HEIMAT IM ALL

Erst seit wenigen Jahrzehnten können wir unsere Erde in ihrer Schönheit, aber auch Einsamkeit aus der Ferne betrachten. 134 Kilometer über der Mondoberfläche kreisend, hält die Mondsonde Lunar Reconnaissance Orbiter einen „Erduntergang“ fest. Bestimmt durch die Entwicklung unserer Sonne, gibt es irdisches Leben seit gut 3 Milliarden Jahren. Eine weitere Milliarde Jahre wird vergehen, bis die ansteigende Leuchtkraft der Sonne diesem ein feuriges Ende bereiten wird. Unser kleiner, durchschnittlicher „Stern“ hat dem Leben auf der Erde damit eine gute, relativ lange Chance gegeben.



HEUTE
13,8 MILLIARDEN
JAHRE NACH DEM
URKNALL

DER STERNHAUFEN M7

Sterne werden nicht einzeln, sondern zu Tausenden aus Gas- und Staubwolken geboren. Obwohl die „Sternengeschwister“ gleichzeitig entstanden, unterscheiden sie sich sehr stark in ihrer Masse. Schwere, kurzlebige Sterne teilen sich den Geburtsort mit kleinen, langlebigen Sternen wie unserer Sonne. Der ca. 200 Millionen Jahre alte Sternhaufen M7 hat schon einen Milchstraßenumlauf hinter sich. Nach kosmischen Maßstäben wird er nicht mehr lang existieren, sondern die Sterne bald einzeln auf ihren Lebensweg entlassen. Auch unsere Sonne war vor 4,6 Milliarden Jahren Teil eines solchen Sternhaufens und zieht nun einsam ihre Bahn.



9,25 MILLIARDEN JAHRE

STERNENTSTEHUNG IM ADLERNEBEL

Sterne entstehen aus riesigen Gas- und Staubwolken, die sich durch ihre Schwerkraft zusammenziehen und in kleinere Fragmente aufteilen. In den dichtesten Regionen kollabieren Protosterne und erhitzen sich dabei. Schließlich wird die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium gezündet. Diese Fusion ist die wesentliche Energiequelle der Sterne. Sternengeburten finden meist im Verborgenen von dichten Staubwolken statt, zum Beispiel in den dunklen „Säulen der Schöpfung“ im Adlernebel. Auch unsere Sonne und ihre „Sternengeschwister“ haben sich einst aus ihren Gas- und Staubwolken lösen müssen.



9,1 MILLIARDEN JAHRE

DER PLANETARISCHE NEBEL MESSIER 57

Nichts währt ewig, auch Sterne nicht. Geht der Fusionstreibstoff Wasserstoff im Inneren zu Ende, kann die Bildung von schwereren chemischen Elementen das Sternenleben noch verlängern. Letztlich wird der Stern instabil, bläht sich riesenhaft auf, beginnt zu pulsieren und gibt einen Großteil seiner Masse an die Umgebung ab. Ein wunderschöner Planetarischer Nebel wie hier Messier 57 leuchtet für kurze Zeit auf. Übrig bleibt ein langsam auskühlender Weißer Zwerg. Die in den letzten Lebensphasen erzeugten und verteilten, schwereren chemischen Elemente sind Grundlage für die Entstehung von Planeten oder vielleicht sogar von Leben in Sternensystemen der nächsten Generation. Auch unser Sonnensystem profitierte am Anfang so von früheren Sternengenerationen.



8,5 MILLIARDEN JAHRE

SUPERNOVA EXPLOSIONS- WOLKE MESSIER 1

Die spektakulärste Form des Sterbentodes ist die Explosion als Supernova. Im Jahr 1054 leuchtete eine Supernova für Wochen so hell wie alle Sterne unserer Milchstraße zusammen. Die Explosionswolke Messier 1 zeugt noch heute von diesem gewaltigen Ereignis. Nur manche Doppelsternsysteme und Sterne, die viel schwerer sind als unsere Sonne, enden als Supernova. Von ihnen bleibt letztlich nur ein ultradichter Neutronenstern oder gar ein Schwarzes Loch übrig. Supernova-Explosionen verdichten Gaswolken in ihrer Umgebung und bereichern sie mit schweren chemischen Elementen an. So entstand vermutlich auch unser Sonnensystem.



8 MILLIARDEN JAHRE

EIN ZWILLING UNSERER MILCHSTRASSE

Galaxien sind die mittelgroßen Bausteine unseres Universums. Sie bestehen oft aus vielen hundert Milliarden von Sternen und weisen eine Vielzahl an Erscheinungsformen auf. Die Milchstraße ist wie Messier 83 eine Balkenspiralgalaxie und bildete sich vor fast 9 Milliarden Jahren in einem Galaxienhaufen. Fotografien zeigen nur leuchtende Materie wie Sterne, Gas- und Staubbenebel. Ein großer Teil der Galaxienmasse bleibt darauf unsichtbar – die sogenannte „Dunkle Materie“.



5 MILLIARDEN JAHRE

GALAXIENHAUFEN ALS VERGRÖßERUNGSGLAS

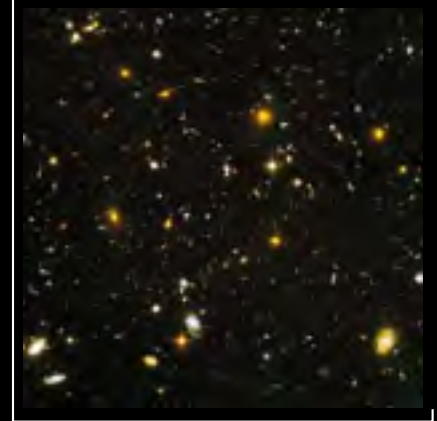
Die größten Bausteine des Universums sind Galaxienhaufen. Ihre Verteilung im Universum hängt eng mit der Verteilung der Materie kurz nach dem Urknall zusammen. Schwere Massen können Licht ablenken. Massereiche Galaxienhaufen wie MACSJ0717 können Lichtstrahlen von Objekten, die hinter ihnen liegen, bündeln und wirken für uns somit wie ein Vergrößerungsglas. Diese sogenannten Gravitationslinsen lassen uns auf noch viel weiter entfernte Galaxien blicken, deren Licht bereits 12 Milliarden Jahre lang zu uns unterwegs ist. Die länglichen Bögen und Striche im Teleskopbild sind die stark vergrößerten und verzerrten Bilder solcher Galaxien.



1,8 MILLIARDEN JAHRE

TIEFER BLICK ZURÜCK IN DIE VERGANGENHEIT

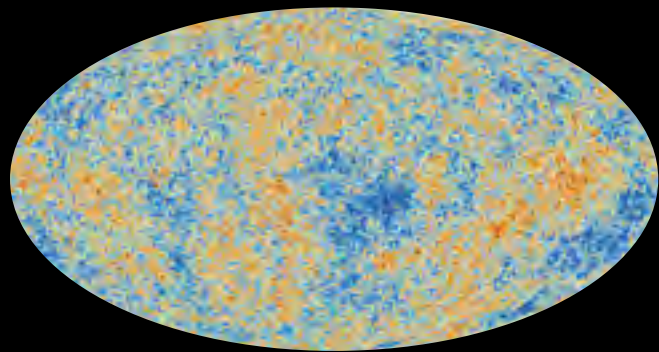
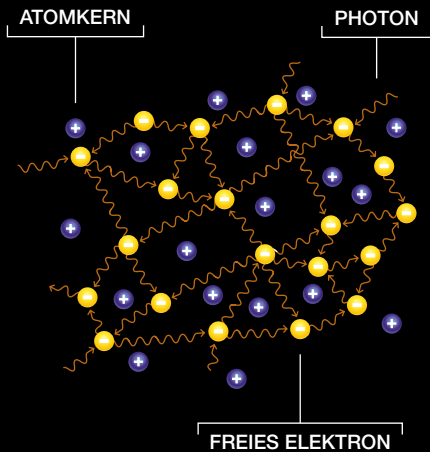
Einer der tiefsten Blicke hinaus ins Weltall und damit zurück in der Zeit ist das Hubble Ultra Deep Field – eine Himmelsregion, aufgenommen vom Hubble-Teleskop. Die kleinen roten Pünktchen sind einige der am weitesten entfernten Galaxien. Sie sind bereits 800 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden; ihr Licht ist seit etwa 13 Milliarden Jahren zu uns unterwegs. Die ältesten beobachteten „roten Pünktchen“ und somit Galaxien unseres Universums sind etwa 13,4 Milliarden Jahre alt. Vor der Entstehung dieser ersten Sterne und Galaxien herrschte hunderte Millionen Jahre lang Finsternis.



800 MILLIONEN JAHRE

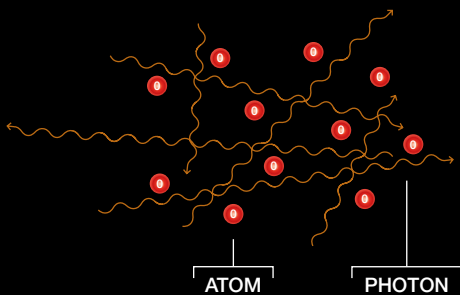
DAS "NACHGLÜHEN" DES URKNALLS UND DIE ENTSTEHUNG DER ERSTEN NEUTRALEN ATOME

DAS UNIVERSUM WIRD DURCHSICHTIG



Das frühe Universum konnte von den Photonen nicht ungehindert durchquert werden. Ständig stießen sie mit elektrisch geladenen Teilchen (freie Elektronen und Atomkerne) zusammen. Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall war das Universum dann so stark abgekühlt, dass sich stabile Atome (etwa das Wasserstoffatom) bilden konnten.

Diese von der Planck-Raumsonde vermessene Himmelskarte zeigt geringfügige Schwankungen der Hintergrundstrahlung im Bereich von ± 50 Millionstel um den Mittelwert.



DIE KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG

Die kosmische Hintergrundstrahlung ist die älteste Strahlung unseres Universums. Sie entstand 380 000 Jahre nach dem Urknall und ist seit 13,8 Milliarden Jahren zur Erde unterwegs. Sie stammt aus der Zeit, als das Universum fast perfekt homogen war – ähnlich der Oberfläche eines Sees bei Windstille. Die hellen und dunklen Bereiche zeigen geringfügige Schwankungen. Aus diesen Schwankungen entstanden daraus die heutigen Sterne und Galaxien. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist der direkte Nachweis für die Richtigkeit der Urknalltheorie.

Die stabilen Atome bildeten kein Hindernis mehr für die Photonen, die seitdem durch das Universum reisen. Aus ihnen besteht die kosmische Hintergrundstrahlung. Sie entstand an jedem Punkt des Universums und hat sich in alle Richtungen gleichförmig ausgebreitet. Das Universum wurde elektrisch neutral und damit durchsichtig.

380 000 JAHRE
NACH DEM URKNALL

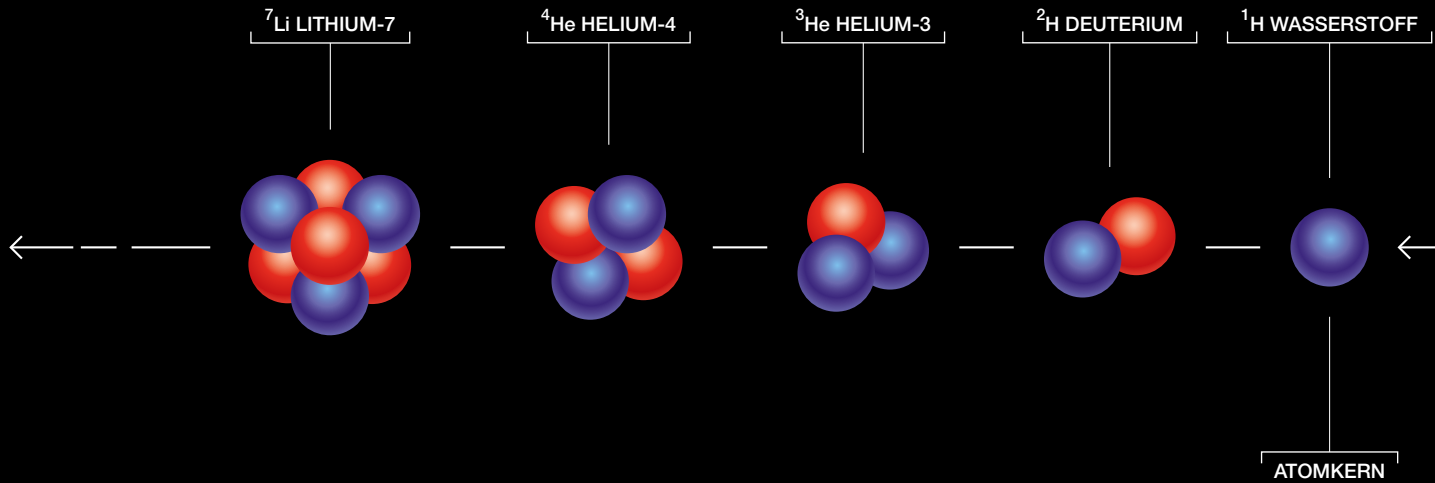
**DIE GEBURTS-
STUNDE DER CHEMIE**

**PROTONEN UND NEUTRONEN
VERBINDEN SICH ZU ATOMKERNEN**

Während sich Atomkerne im Labor nur unter größtem technischen Aufwand vereinen lassen, herrschten Sekunden nach dem Urknall im gesamten Universum Temperaturen von mehreren Milliarden Grad. Unter diesen extremen Bedingungen fusionierten Protonen und Neutronen zu den ersten stabilen Atomkernen. Und zwar zu den leichtesten Elementen im Periodensystem: Wasserstoff, Helium und Spuren von Lithium.



Fusion von Wasserstoffisotopen im Labor; Lawrence Livermore National Laboratory, USA

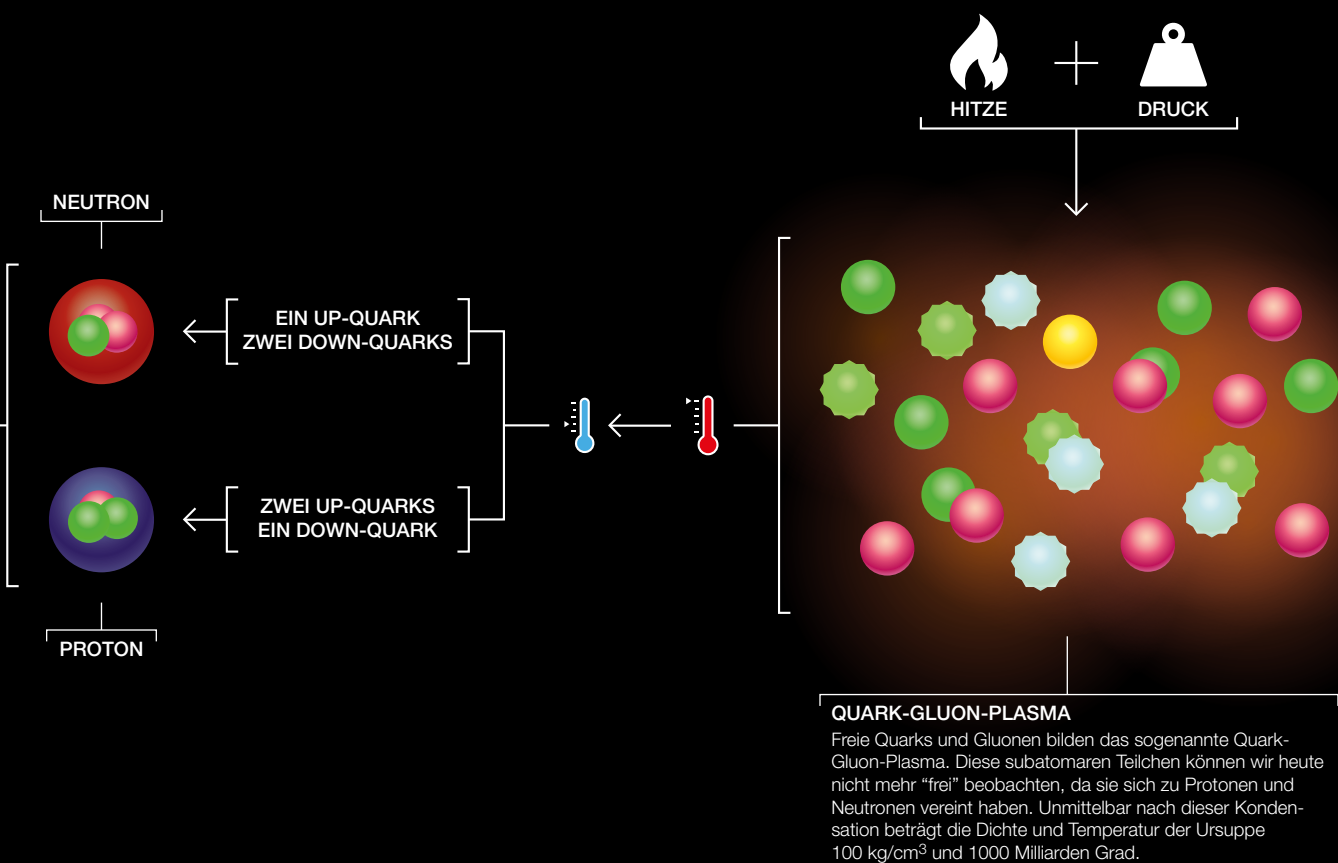


3 MINUTEN
NACH DEM URKNALL

DIE BAUSTEINE DER ATOMKERNE

PROTONEN UND NEUTRONEN ENTSTEHEN

Wie die Perlen von Wasser auf einer kalten Oberfläche, kondensieren mit fallender Temperatur freie Quarks und Gluonen zu Protonen und Neutronen sowie deren Antiteilchen. Die Natur der Teilchen ändert sich schlagartig. Nach der Kondensation annihilieren sich die zahlreich vorhandenen Teilchen-Antiteilchen-Paare gegenseitig. Übrig bleibt ein kleiner Überschuss an Protonen und Neutronen, den Bausteinen, aus denen Sekunden später die ersten Elemente entstehen werden.



0,000001 SEKUNDEN
NACH DEM URKNALL

DIE BÜHNE FÜR DAS KOMMENDE ZEITALTER DER ELEMENTARTEILCHEN

DER URKNALL

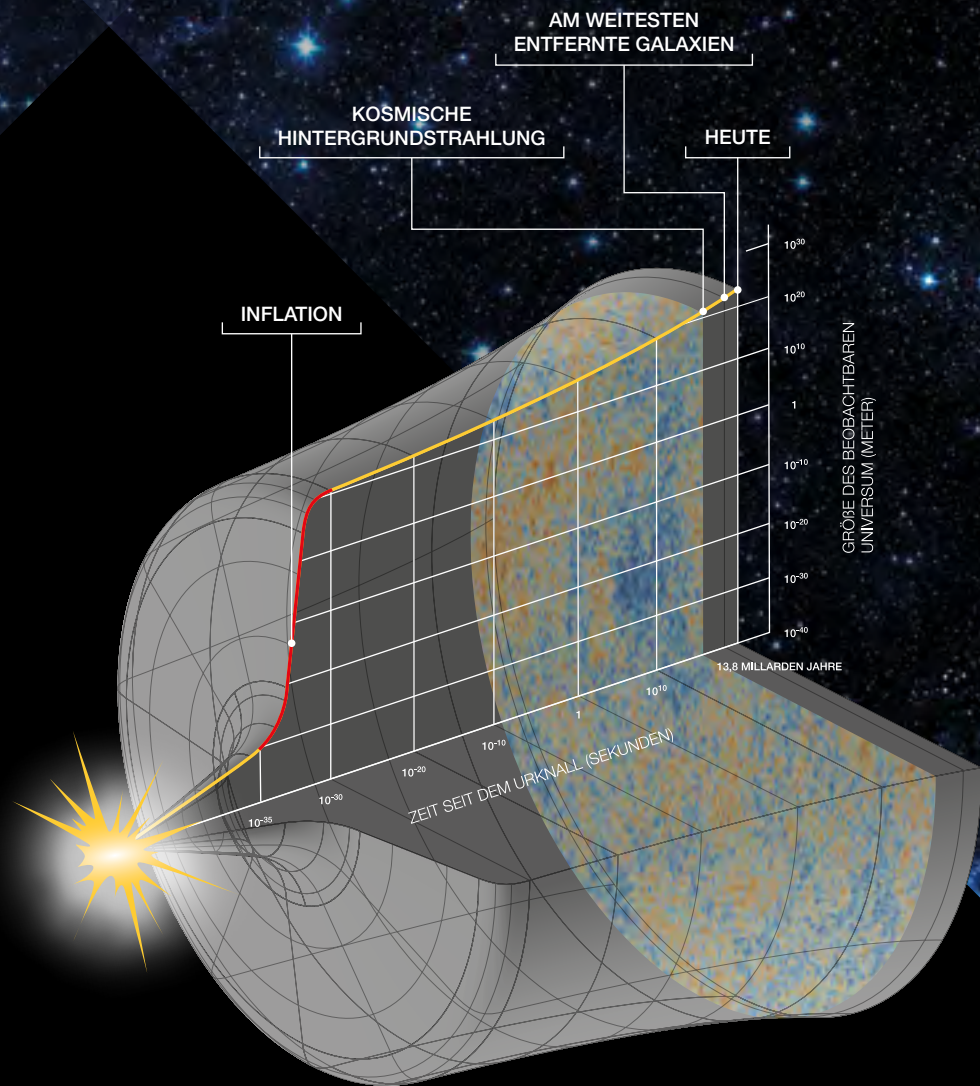
Der Urknall, früher eine philosophische Hypothese, ist heute eine unbestrittene Tatsache in der Wissenschaft. Selbst wenn es noch keine gesicherte Theorie zum „Wie“ des Ursprungs gibt, wissen wir, dass sich das Universum einst in einem Zustand extremer Dichte und Temperatur befand.

Astronomische Beobachtungen von entfernten Galaxien zeigen, dass sich das Universum immer weiter ausdehnt: Objekte im Universum entfernen sich umso schneller voneinander, je größer ihre Abstände sind. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass das Universum früher kleiner war und vor endlicher Zeit entstand, nach unseren Berechnungen vor 13,8 Milliarden Jahren.

Mit speziellen Teleskopen suchen Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen in der kosmischen Hintergrundstrahlung nach den Spuren einer inflationären Phase.



1 QUINTILLIARDSTEL SEKUNDE
NACH DEM URKNALL



INFLATION – EIN MÖGLICHER START DES UNIVERSUMS

Die hochgradige Homogenität der Galaxienverteilung und die Gleichmäßigkeit der kosmischen Hintergrundstrahlung sind durch eine Standard-Expansion des Universums nicht zu erklären. Man nimmt an, dass das allerfrüheste Universum eine Phase räumlicher exponentieller Expansion durchlaufen hat. Alle Bereiche des heute sichtbaren Kosmos standen vor dieser Inflation bereits vorübergehend in Wechselwirkung. Hinweis auf eine inflationäre Phase liefert außerdem die Tatsache, dass es keine feststellbare Krümmung des Raumes gibt – das Universum ist "flach".

In unserer Alltagserfahrung wirkt Gravitation immer anziehend. Auf kosmischen Skalen kann als Lösung der Einsteinschen Theorie auch der umgekehrte Effekt eintreten: das Universum expandiert und zwar beschleunigt. Forscherinnen und Forscher

vermuten, dass dies der Startschuss unseres Universums war. Einen ähnlichen Effekt beobachten wir übrigens gerade jetzt: 13,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall dehnt sich das Universum wieder beschleunigt aus (Nobelpreis 2011 an Adam Riess, Brian P. Schmidt und Saul Perlmutter).

Ursache der frühen Inflation kann die potentielle Energie eines hypothetischen neuen Quantenfeldes gewesen sein. Nach der Inflation ist das Universum – bis auf das Quantenfeld – komplett ausgedünnt und leer. Die durch den Teilchenzerfall freiwerdende Energie bewirkt, dass sich das Universum von selbst mit allen Teilchensorten füllt. Es beginnt das strahlungsdominierte Universum und damit die Standardgeschichte der Kosmologie.

KLEINSTE TEILCHEN GROSSE FRAGEN

DAS HIGGS-TEILCHEN IST ENTDECKT – SIND JETZT ALLE FRAGEN GEKLÄRT? NEIN, ES GIBT NOCH UNZÄHLIGES ÜBER DIE BAUSTEINE DES UNIVERSUMS ZU ENTDECKEN.

(K)EIN GROSSES NICHTS

Warum gibt es etwas und nicht nichts? Darüber zerbrechen sich bis heute Physikerinnen und Physiker den Kopf und versuchen eines der größten Rätsel des Universums zu entschlüsseln.

Beim Urknall entstanden Materie und Antimaterie in gleicher Menge. Mit der Abkühlung des Universums begann ein Vernichtungsprozess. Teilchen und Antiteilchen wandelten sich beim Zusammenstoß in Strahlung um. Ein kleiner Teil an Materie blieb jedoch bestehen, weil es geringfügige Unterschiede in den Eigenschaften von Materie- und Antimaterie-Teilchen gibt. Dieser winzige Materieüberschuss ist heute in der kosmischen Hintergrundstrahlung messbar. Aus diesem Überschuss entstanden die Galaxien, Sterne und Planeten und letztendlich das Leben.

In Teilchenphysik-Experimenten wie dem Belle-Experiment (KEK, Japan) untersucht man die winzigen Unterschiede zwischen Materie- und Antimaterie-Teilchen und versucht so, der sogenannten Materie-Antimaterie-Asymmetrie des Universums auf die Spur zu kommen.

MATERIE

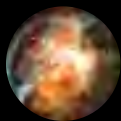


ANTIMATERIE

MATERIE UND ANTIMATERIE

Jedes Elementarteilchen wird durch grundlegende, unveränderliche Eigenschaften charakterisiert: Masse, Spin und Größen wie elektrische Ladung. Zu fast jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit gleicher Masse und gleichem Spin, aber entgegengesetzten ladungsartigen Größen. So ist beispielsweise das Positron das Antiteilchen des negativ geladenen Elektrons.

MATERIE



ANTIMATERIE



AM BEGINN
DES UNIVERSUMS

ANTIMATERIE

MATERIE



UNIVERSUM
HEUTE

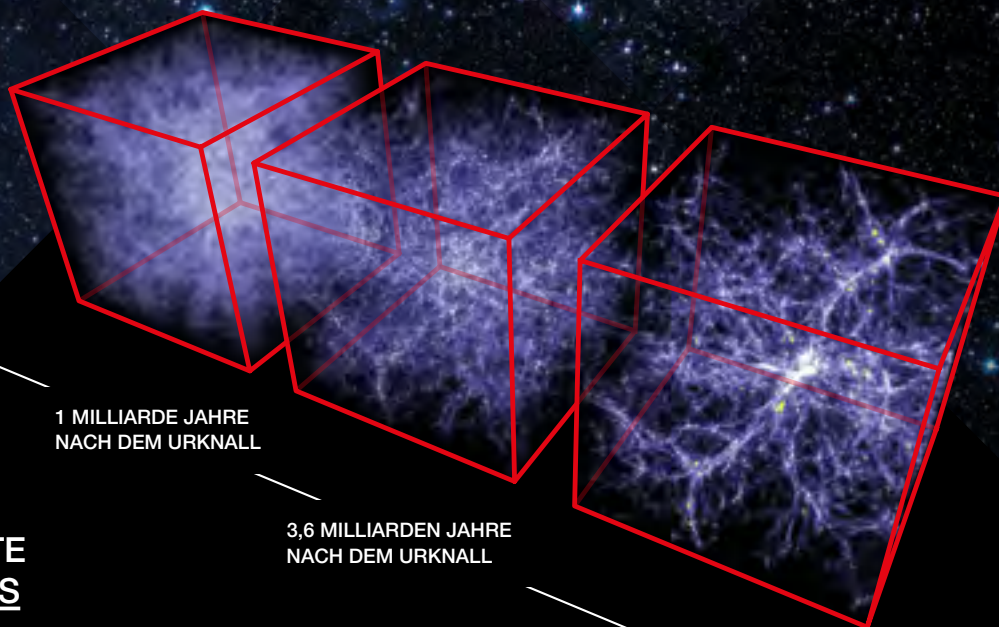
DIE DUNKLE SEITE DES UNIVERSUMS

Nur etwa 5% unseres Universums besteht aus der uns bekannten Materie, wie sie im Standardmodell beschrieben ist. Der Rest ist Dunkle Materie und Dunkle Energie.

Die Materie unseres Universums wird dominiert von der sogenannten "Dunklen Materie", die man nur aus indirekten Beobachtungen kennt. Die Existenz der Dunklen Materie ist heute eindeutig belegt. Dunkle Materie kann in Gegensatz zur sichtbaren Materie weder Licht ausstrahlen noch absorbieren und ist daher für uns nicht sichtbar. Man kann sie jedoch durch ihre Gravitationswirkung auf die sichtbare Materie indirekt nachweisen. Man nimmt an, dass Dunkle Materie aus noch unentdeckten Teilchenarten besteht.

Forscherinnen und Forscher vermuten, dass diese Teilchen nicht immer "unsichtbar" waren. Bruchteile einer Sekunde nach dem Urknall traten sie mit der uns bekannten Materie in rege Wechselwirkung. Dabei entstand bei Zusammenstößen von Teilchen der uns bekannten Materie Dunkle Materie. Nach Abkühlung des Universums blieb ein Rest davon bestehen.

Mit einer ganzen Reihe von Experimenten wird derzeit versucht, Dunkle Materie aus unserer Galaxis in Form von Rückstoßstreuereprozessen an Atomkernen auch direkt zu beobachten. Eines dieser Experimente ist das CRESST-Experiment in einem der größten Untergrundlaboratorien der Welt, dem LNGS (Laboratori Nazionali dell Gran Sasso) in Italien. Außerdem erhoffen sich die Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker in Teilchenbeschleunigern wie dem LHC am CERN Dunkle Materie im Labor zu produzieren und die Teilchenatur der Dunklen Materie dabei zu entschlüsseln.

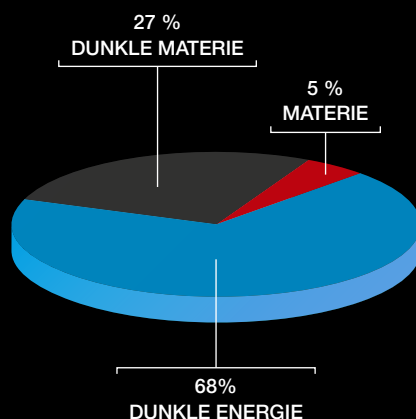


1 MILLIARDE JAHRE NACH DEM URKNALL

3,6 MILLIARDEN JAHRE NACH DEM URKNALL

13,8 MILLIARDEN JAHRE NACH DEM URKNALL

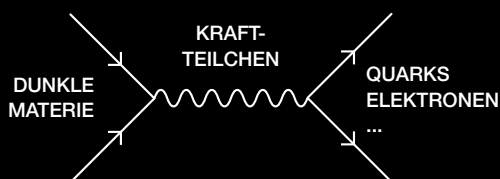
Die heutige Anordnung der Galaxien spiegelt die Verteilung der Dunklen Materie wieder.



ZUSAMMENSETZUNG UNSERES HEUTIGEN UNIVERSUMS

RÄTSELHAFTE DUNKLE ENERGIE

In unserer Alltagserfahrung wirkt Gravitation immer anziehend. Auf kosmischen Skalen kann als Lösung der Einsteinschen Theorie auch der umgekehrte Effekt eintreten: das Universum expandiert, und zwar beschleunigt. Tatsächlich beobachten wir diesen Effekt in der Entwicklung des Universums der letzten 7 Milliarden Jahren. Die dazu notwendige Energie nennen wir "Dunkle Energie". Sie ist noch geheimnisvoller als die Dunkle Materie. Sie dominiert das heutige Universum und wirkt der Schwerkraft entgegen. Dadurch wird die Ausdehnung des Universums beschleunigt.



TEILCHEN

QUARKS		
UP	DOWN	GLUON
CHARM	STRANGE	PHOTON
TOP	BOTTOM	W-BOSON
LEPTONEN		Z-BOSON
ELEKTRON	ELEKTRON-NEUTRINO	HIGGS-BOSON
MYON	MYON-NEUTRINO	
TAUON	TAUON-NEUTRINO	

IST DIE WELT SUPERSYMMETRISCH?

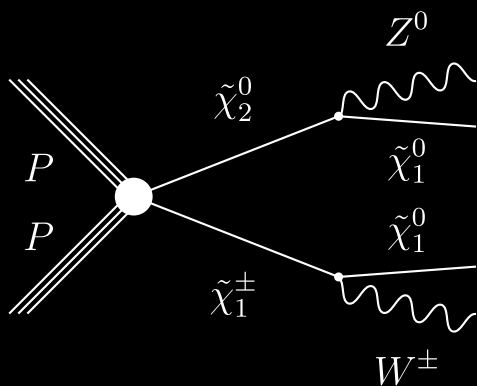
Symmetrien spielen in der Physik – wie auch in der Kunst – eine zentrale Rolle, da sich in ihnen die Grundprinzipien der Natur manifestieren.

In der Teilchenphysik ist die größtmögliche Symmetrie die sogenannte Supersymmetrie. Sie ist eine Symmetrie zwischen Materieteilchen und Kräften und bietet die Möglichkeit einer eleganten Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik. Nach der supersymmetrischen Theorie hat jedes bekannte Teilchen ein supersymmetrisches Partnerteilchen: jedes Elektron ein Selektron und jedes Photon (Lichtteilchen) ein Photino. Vereinfacht gesagt sind somit Kräfte und Materie nur zwei Aspekte der gleichen Sache, wie die Vorder- und Rückseite einer Münze.

Bisher ist die Supersymmetrie nur eine Theorie. Bei Experimenten am Teilchenbeschleuniger LHC am CERN wird derzeit fieberhaft nach diesen supersymmetrischen Partnerteilchen gesucht.

SQUARKS		
SUP	SDOWN	GLUINO
SCHARM	SSTRANGE	PHOTINO
STOP	SBOTTOM	WINO
SLEPTONEN		ZINO
SELEKTRON	ELEKTRON-SNEUTRINO	HIGGSINO
SMYON	MYON-SNEUTRINO	
STAUON	TAUON-SNEUTRINO	

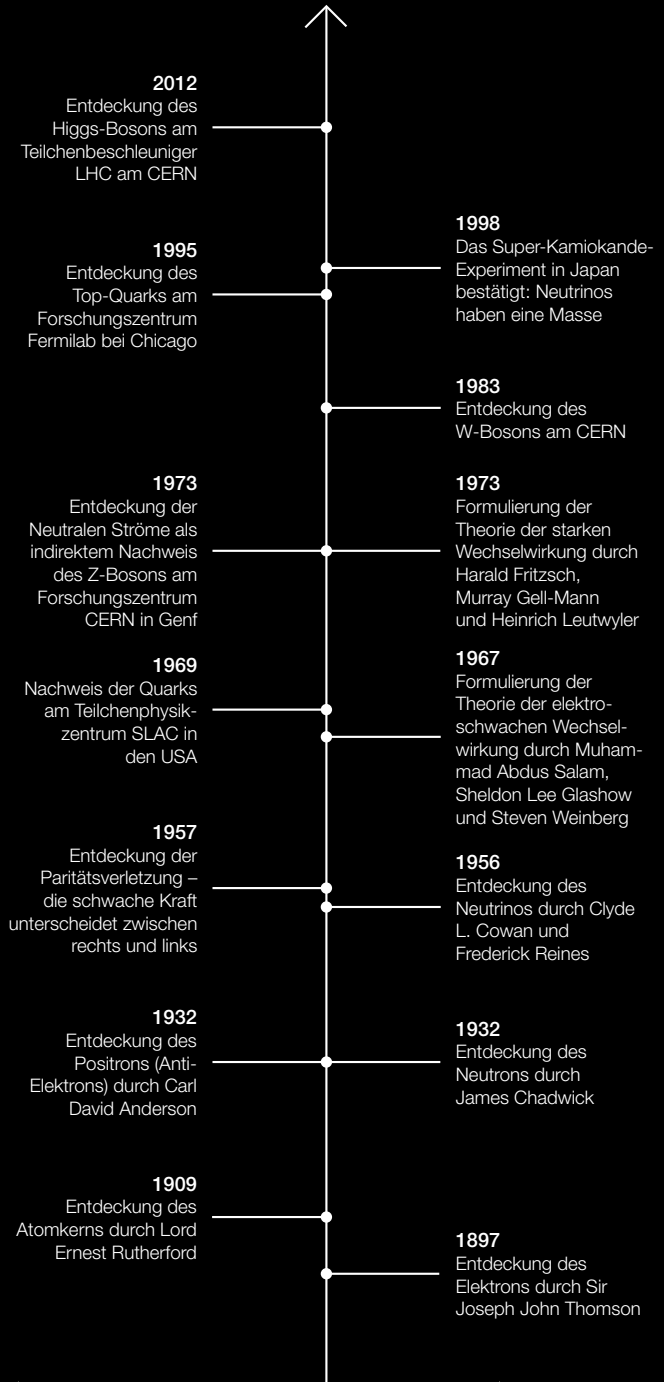
SUPERSYMMETRISCHE PARTNERTEILCHEN



WICHTIGSTE ENTDECKUNGEN DER TEILCHENPHYSIK

DAS STANDARDMODELL – UMFASSEND ABER NICHT GENUG

Mit der Entdeckung des Higgs-Teilchen wäre das sogenannte Standardmodell der Teilchenphysik komplett. Das Standardmodell führt die sichtbare Materie des gesamten Universums auf zwölf Materieteilchen zurück. Es beschreibt auch die drei fundamentalen Wechselwirkungen. Alle Materieteilchen des Standardmodells und alle Wechselwirkungen wurden im Lauf der vergangenen Jahrzehnte präzise beschrieben. Es gibt jedoch Hinweise, dass das Standardmodell nicht alle Fragen der Teilchenphysik beantworten kann. Physikerinnen und Physiker haben bereits Theorien und Konzepte für die Zukunft parat. Es bleibt also weiter spannend.



DIE ZUKUNFT DER TEILCHENPHYSIK

PHYSIK JENSEITS DES STANDARDMODELLS

Nur etwa 5% unseres Universums bestehen aus der uns bekannten Materie, wie sie im Standardmodell beschrieben ist. Der Rest, so wird vermutet, ist Dunkle Materie und Dunkle Energie. Auch die Frage, ob die Welt supersymmetrisch ist, muss noch geklärt werden. Und warum gibt es etwas und nicht nichts? Dieses Rätsel der Materie-Antimaterie-Asymmetrie versuchen die Forscherinnen und Forscher noch zu entschlüsseln. Die Erkenntnisse und Entdeckungen der Teilchenphysik, Astronomie und Kosmologie der letzten Jahrzehnte haben unser Verständnis vom Ursprung und der Beschaffenheit unseres Universums verändert und erweitert, es gibt jedoch noch sehr viel zu erforschen und entdecken.





**HEPHY - INSTITUT FÜR HOCHENERGIEPHYSIK DER
ÖSTERREICHISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN**

1050 Wien, Nikolsdorfer Gasse 18
Tel.: +43 (1) 544 73 28-0
Mail: outreach@hephy.at
Web: www.hephy.at

ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN:

Weiteres Informationsmaterial und Veranstaltungstermine
finden Sie unter: www.teilchenphysik.at



FÜR DEN INHALT VERANTWORTLICH:

HEPHY – Institut für Hochenergiephysik: Brigitte De Monte, Marko Dragicevic,
Helmut Eberl, Josef Pradler

KOOPERATIONSPARTNER:

Franz Kerschbaum, Universität Wien – Institut für Astrophysik

GESTALTUNG, ILLUSTRATIONEN, INFOGRAFIKEN:

grafische kooperative: Thomas Reibnegger, Christian Deschka

BILDQUELLEN:

Shutterstock, CERN, Nobel Foundation 2013 – Alexander Mahmoud, HEPHY,
KEK, T. Omori, NASA, ESA and R. Massey (California Institute of Technology),
NASA / WMAP Science Team, NASA/GSFC/Arizona State University, ESO,
NASA/ESA, Damien P. George, Damien Jemison/Lawrence Livermore National
Laboratory, Cifa/Havard, Max-Planck-Institut für Physik, Phillips/Frank van Beek,
Franz Baldauf, Thomas Kästenbauer, Johann Ployer, MedAustron, TU Wien,
Ruhr-Universität Bochum, NEXEON, Markus Tordik, Florian Ritter, MPP,
Klaus Pichler, MPA Garching, Kästenbauer/Ettl, Gregor Schweinester

DRUCK:

gugler, Melk



Gedruckt nach der Richtlinie „Druckerzeugnisse“ des Österreichischen
Umweltzeichens. gugler* print, Melk, UWZ-Nr. 609, www.gugler.at

greenprint*
klimapositiv gedruckt