

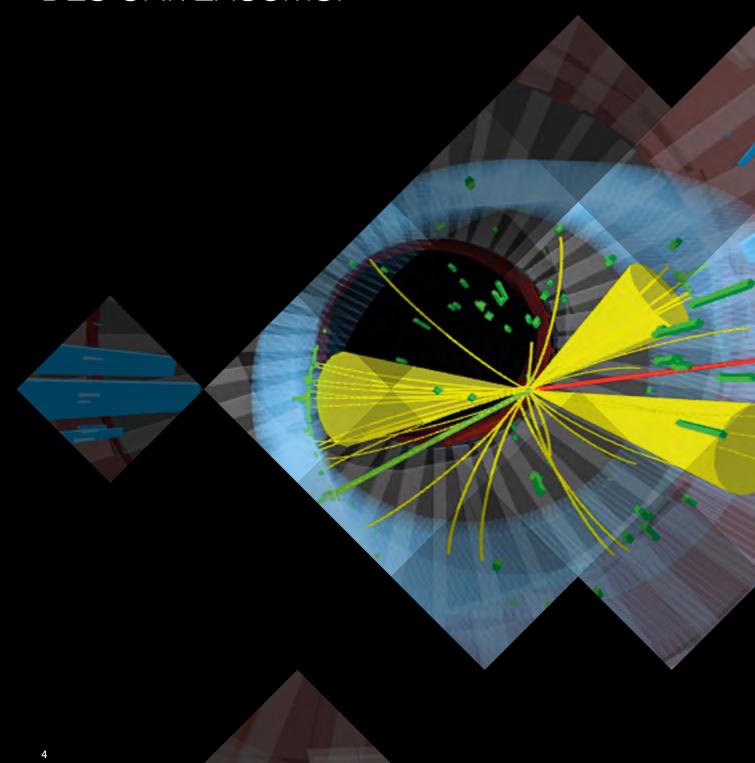
$$Z(s) = \frac{1}{2} \partial^{2} S \partial_{\mu} S - \frac{1}{4} \lambda_{s} S^{4} - \frac{1}{2} M_{s}^{2} S^{2} - \frac{1}{4} \lambda_{s} S^{4} - \frac{1}{2} M_{s}^{2} S^{4} - \frac{1$$

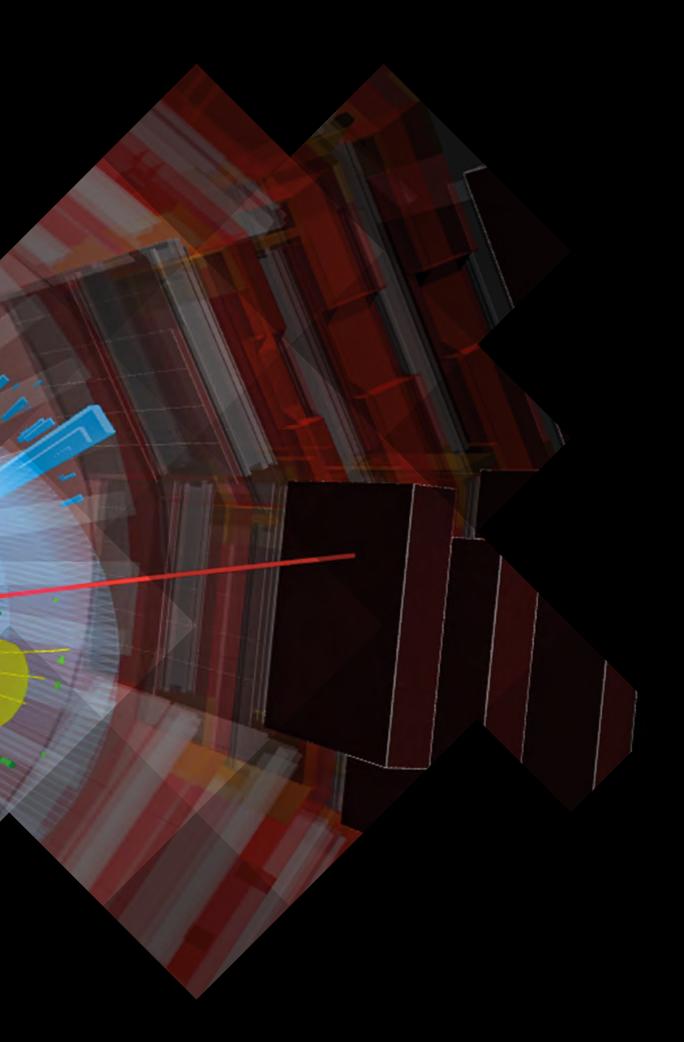
matrix element with nucleus

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

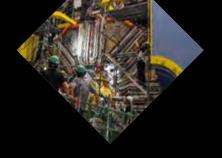
Johann Wolfgang von Goethe, Faust. Der Tragödie erster Teil

"DIE TEILCHENPHYSIK IST DER SCHLÜSSEL ZUM VERSTÄNDNIS DER ALLERERSTEN AUGENBLICKE DES UNIVERSUMS."





<u>**8**</u> Vorwort





10
Die Reise zu den kleinsten Teilchen

<u>12</u>

High-Speed-Karussell mit Knalleffekt





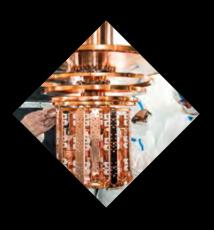
14 Feinfühlige Giganten

18 Leptonen, Quarks

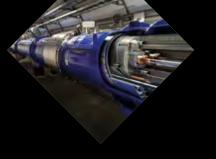
und Bosonen



20
Die Suche nach dem Higgs-Teilchen







32
Kleinste Teilchen große Fragen

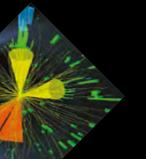


36
Gravitationswellen

40 Spurensucher



58
Was habe ich davon?



60 Physik trifft Medizin



Die Zukunft der Teilchenphysik



Welche Aufgabe hat das Higgs-Teilchen?

Was war vor dem Urknall?

Was ist hinter dem Universum?



Warum hält ein Atomkern?

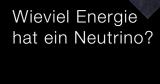
Was sind Geisterteilchen?

Was schwingt bei einer Gravitationswelle?

Welche Temperatur hat die Hintergrundstrahlung?

Wieso gibt es Dunkle Materie?

Was macht ein Gluon?



Warum gibt es etwas und nicht nichts?

Wie endet das Universum?

Wieso gab es einen Urknall?

Warum ist eigentlich ein Teilchenbeschleuniger so groß?

Ist Dunkle Materie schneller als Licht?

Ist das Universum überall gleich alt?

Was ist das kleinste Teilchen des Universums?

Woraus besteht das Universum?

Wie erreicht ein Myon die Erde?

Was hält die Quarks zusammen?







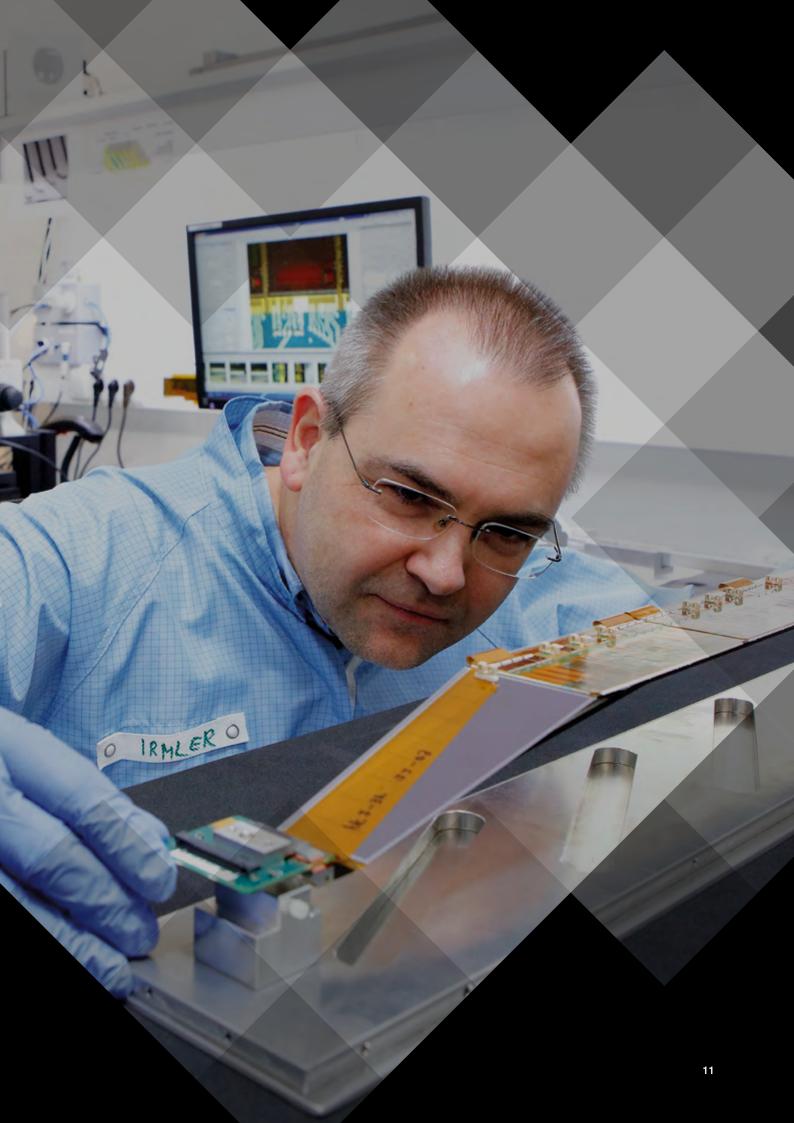
VORWORT

Woraus besteht unser Universum? Wie fing alles an? Gibt es einen Anfang und ein Ende unseres Universums? Was sind Teilchen? Warum gibt es Dunkle Materie? Wieso gab es einen Urknall? Es gibt viele Fragen, die die Menschheit seit Jahrhunderten beschäftigen und die die Wissenschaft und Forschung antreiben. Den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern vom Wiener Institut für Hochenergiephysik (HEPHY) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) 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 Experimenten 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 für zukünftige Experimente der Teilchenphysik und für Anwendungen in der medizinischen Bildgebung, 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 lebhafte 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 ELEMENTAR-TEILCHEN. 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 einen Meter Entfernung Linien mit einem Abstand von einem halben Millimeter noch unterscheiden.

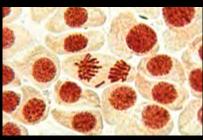


DIE ZELLE

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

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.





10⁰

10⁻⁴ = 0,000 1 METER

ELEMENTARTEILCHEN DIE REISE IST AM ENDE ANGE-DAS ATOM LANGT. WIR BEFINDEN UNS IN DER WELT DER KLEINSTEN BEKANNTEN WIR BEFINDEN UNS NUN BEI DEN BAUSTEINE DES UNIVERSUMS, KLEINSTEN EINHEITEN ALLER DER ELEMENTARTEILCHEN. BEKANNTEN ARTEN VON FESTEN, FLÜSSIGEN ODER GASFÖRMIGEN Viele Elementarteilchen müssen erst in STOFFEN. einem Teilchenbeschleuniger, wie zum Beispiel dem LHC am CERN, erzeugt Um Einblicke in die Welt der Atome werden. Dann können sie in hochdie in etwa zehnmal kleiner sind als präzisen Detektoren wie dem CMS **DIE DNA** einzelne Moleküle - zu bekommen, nachgewiesen werden. bedienen wir uns eines Rastertunnel-WILLKOMMEN IN DER WELT mikroskops. Im Rastertunnelmikroskop Mit einer Rekordgenauigkeit von 0,1 am DER MAKROMOLEKÜLE. tastet eine elektrisch leitende Spitze eine (Attometer = ein trillionstel Meter oder Oberfläche im Abstand von wenigen ein Milliardstel eines milliardstel Meters) Um die Reise in noch kleinere Dimen-Atomdurchmessern ab. Bei angelegter untersuchen die Physikerinnen und sionen – wie die des menschlichen Spannung zwischen Spitze und Ober-Physiker am LHC den Mikrokosmos. Erbguts (DNA) – anzutreten, benötigen fläche führt der wechselwirkende Die größte Maschine der Welt ist auf wir ein Elektronenmikroskop, das die Prozess des quantenmechanischen der Suche nach den kleinsten Teilchen Oberfläche eines Objekts mittels Elek-Tunneleffekts zu einem messbaren des Univerums. tronen abbildet. Da Elektronen eine sehr Tunnelstrom. Die Ortsabhängigkeit des viel kleinere Wellenlänge als sichtbares Tunnelstroms bildet dabei verschiedene Licht haben, kann eine deutlich höhere physikalische Eigenschaften der Ober-Auflösung als bei einem Lichtmikroskop fläche ab. erreicht werden. Mit dem Rastertunnelmikroskop können Mit dem Elektronenmikroskop lassen vergleichsweise einfach atomare Prosich Objekte voneinander unterscheiden, zesse mit einer Auflösung von 0,01 nm die ca. 0,1 nm (ein Zehntel eines milliard-(ein Zehntel eines milliardstel Meters) stel Meter) voneinander entfernt sind. sichtbar gemacht werden. 10⁻¹⁵ **10**⁻¹⁰ 10⁻⁸ = 0,000 000 01 METER = 0,000 000 000 1 METER = 0,000 000 000 000 001 METER

HIGH-SPEED-KARUSSELL MIT KNALLEFFEKT

EIN TEILCHENBESCHLEUNIGER IST EINE MASCHINE, DIE TEILCHEN AUF EXTREM HOHE BEWEGUNGS-ENERGIEN BESCHLEUNIGT.

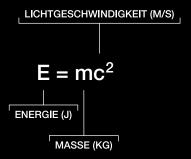
WAS IST EIN TEILCHENBESCHLEUNIGER?

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.



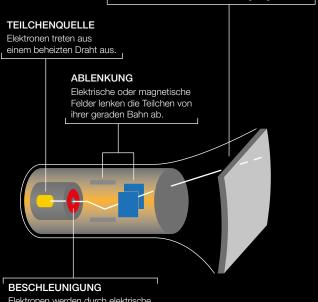
Die Formel beschreibt die Gleichheit von Masse und Energie. Das bedeutet, dass jede Masse Energie ist und umgekehrt. Multipliziert man die Masse mit der Lichtgeschwindigkeit (= 299 792 458 m/s) zum Quadrat, erfährt man, wie viel Energie in der Masse steckt.

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.

BILDSCHIRM

Beim Auftreffen der Teilchen auf dem Bildschirm werden Punkte zum Leuchten angeregt.



Elektronen werden durch elektrische Spannung beschleunigt.



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 z\u00e4hlt.
- 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.

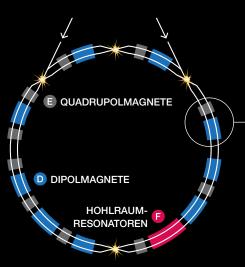


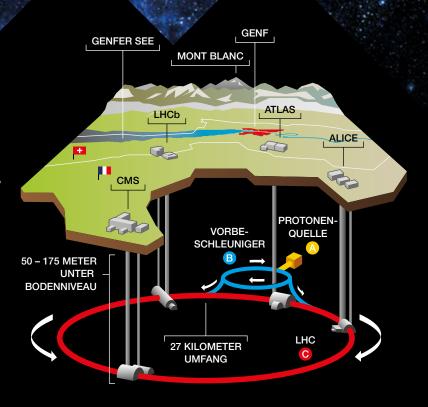
STECKBRIEF LARGE HADRON COLLIDER (LHC)

- > Betriebstemperatur der Magnete: -271,25 °C
- Maximale Energie der Teilchenkollisionen:
 14 TeV (Teraelektronenvolt)
- Maximales Magnetfeld der Dipolmagnete: 8,3 Tesla
- > 1 232 Dipolmagnete
- > 392 Quadrupolmagnete
- > 40 Millionen Kollisionen pro Sekunde
- > 11 245 Umrundungen pro Sekunde

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.





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 (G) 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.

SUPRALEITENDE SPULE MIT 2 POLWICKLUNGEN







- 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.

AUFBAU DES CMS-TEILCHENDETEKTORS 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.

(1)

STECKBRIEF COMPACT MUON SOLENOID (CMS)

- Länge: 21 Meter
- › Höhe: 15 Meter
- Masse: 14 000 Tonnen fast doppelt so schwer wie der Eiffelturm
- > 3 000 beteiligte Forscherinnen und Forscher
- > Über 40 beteiligte Nationen

KALORIMETER

ELEKTRO-MAGNETISCHES

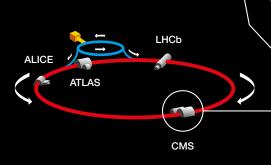
Etwa 80 000 Kristalle aus Blei-Wolframat messen die Energien von Elektronen und Photonen, die nur der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen.

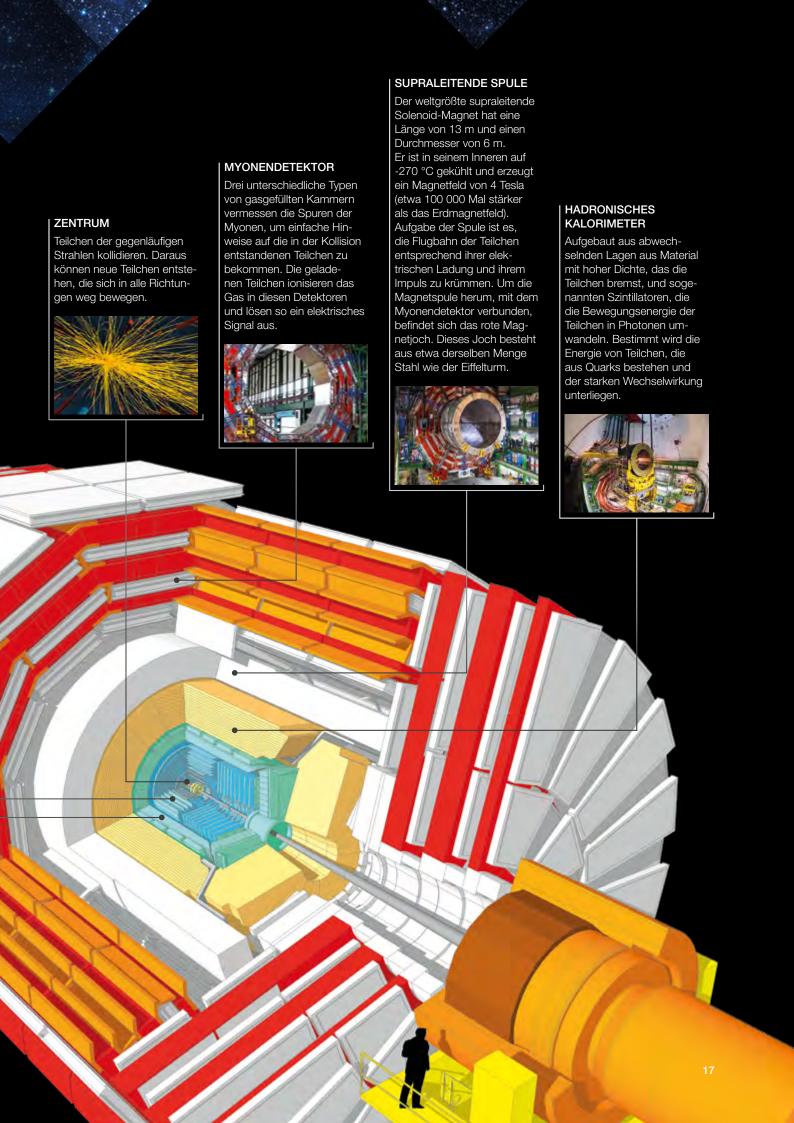


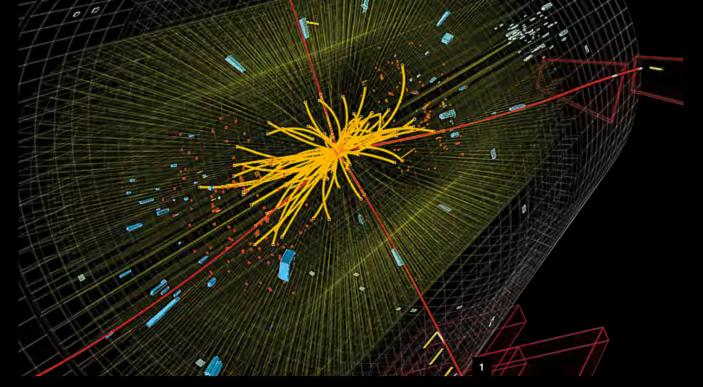
SPURDETEKTOR

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!









1. DIE SPURENSUCHE

Die Teilchen, die in der Kollision entstanden sind, hinterlassen in den einzelnen Detektorlagen 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.







- 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 Computerzentrum am CERN
- 4 Die Aufgabe des Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) besteht darin, globale Rechenressourcen für die Speicherung, Verteilung und Analyse der vom LHC erzeugten Daten bereitzustellen.

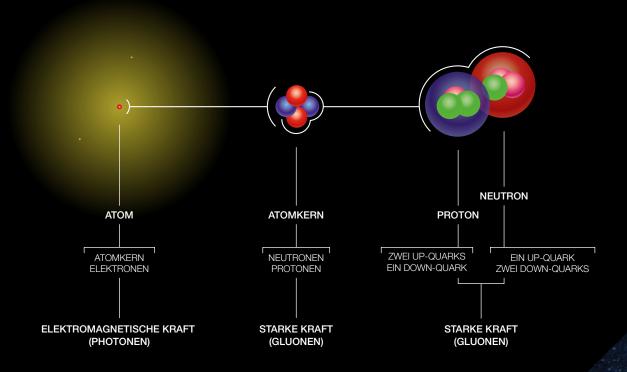


LEPTONEN, QUARKS UND BOSONEN

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.

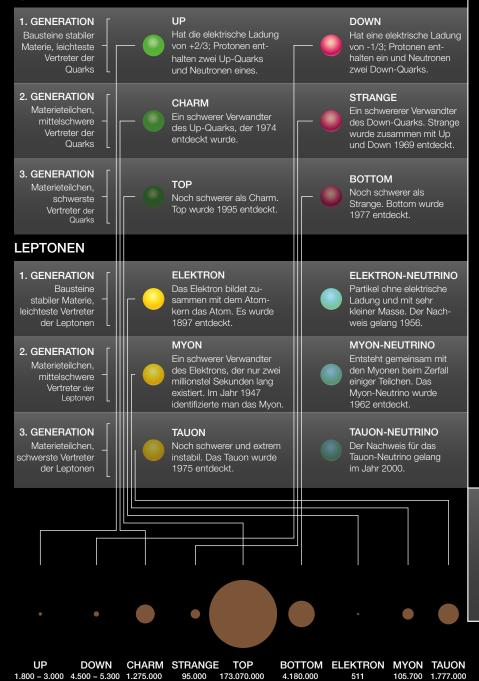


DAS STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

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



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)

DER TE keV = Kil (physikal

POTTWAL

keV

keV

KÄNGURU

EICHHÖRNCHEN IGEL

HUND

LAMA

keV

EISBÄR

DIE SUCHE NACH DEM HIGGS-TEILCHEN

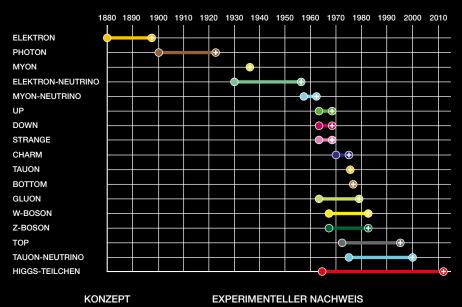
WIE DIE TEILCHENPHYSIK MIT DER ENTDECKUNG DES HIGGS-TEILCHENS UNSER WELTBILD REVOLUTIONIERT.

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.





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





ENERGIE UND MASSE

Energie und Masse sind zwei Aspekte derselben Eigenschaft. Masse kann sich gemäß Einsteins berühmter Formel E=mc² 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

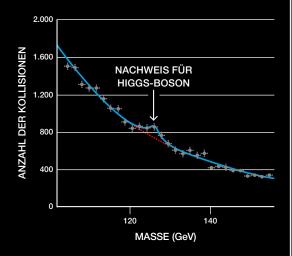
Dem Brout-Englert-Higgs- (BEH) Mechanismus zufolge ist das gesamte Universum vom sogenannten Higgs-Feld durchdrungen, mit dem die meisten Teilchen interagieren und dadurch Masse erlangen.

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.



1. TEILCHENKOLLISION

Im LHC-Teilchenbeschleuniger rasen zwei Protonen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinander zu und kollidieren mit enormer Wucht.

3. TEILCHENNACHWEIS

2. TEILCHENGEBURT

wandeln

Die Energie des Aufpralls wandelt sich gemäß Einsteins Formel E=mc² in neue Materie. Dabei können sehr schwere Teilchen wie das Higgs-Teilchen entste-

hen, die sich nach extrem kurzer Zeit in leichtere, langlebigere Teilchen um-

Die neu entstandenen Teilchen hinterlassen eindeutige Spuren in den Detektoren am LHC und können dadurch präzise vermessen werden.

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 unbekannten 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.



DER URSPRUNG DES UNIVERSUMS

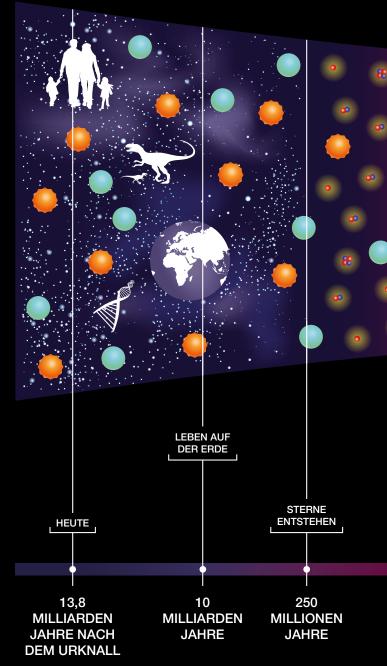
DIE TEILCHENPHYSIK IST DER SCHLÜSSEL ZUM VERSTÄNDNIS DER ALLERERSTEN AUGENBLICKE SEINER EXISTENZ.

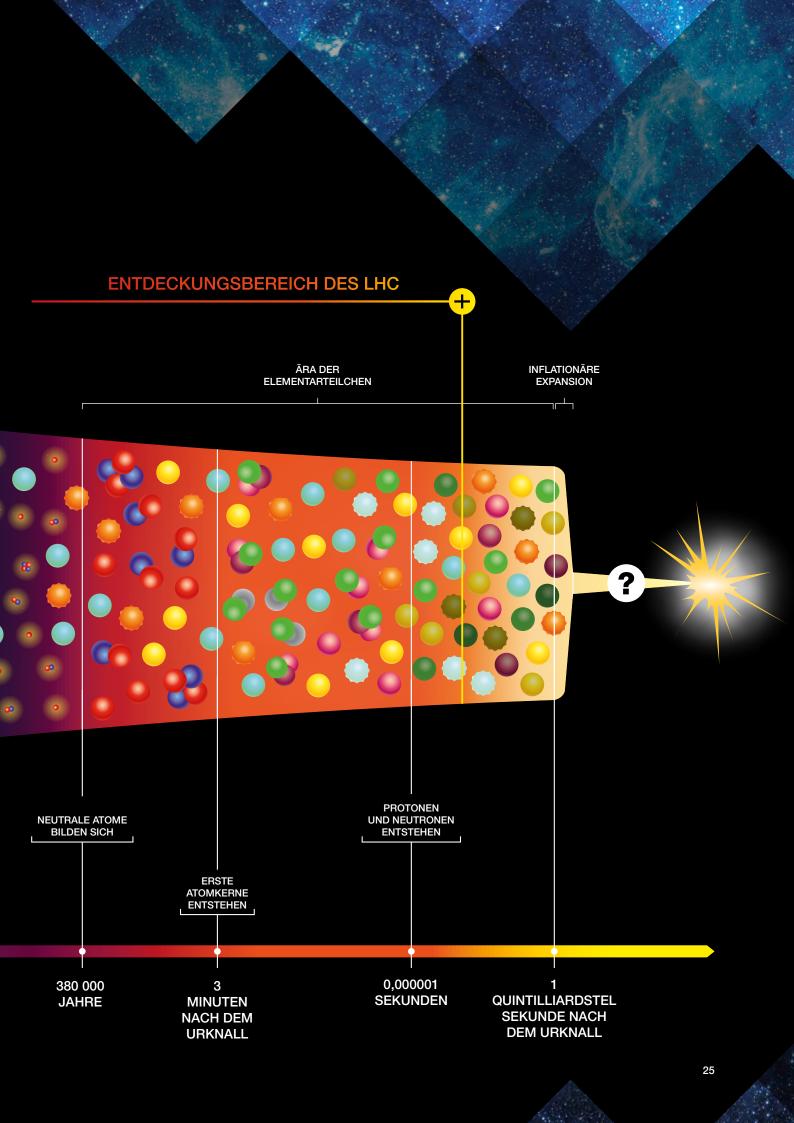
ZURÜCK ZUM ANBEGINN DER WELT

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.







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? Jahrtausendelang 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.



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.



HEUTE 13,8 MILLIARDEN JAHRE NACH DEM URKNALL 9,25 MILLIARDEN JAHRE

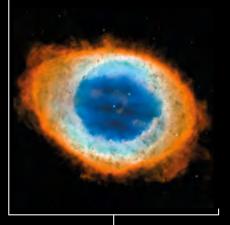
STERNENTSTEHUNG IM ADLERNEBEL

Sterne entstehen aus riesigen Gasund 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. Sterngeburten 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.



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 Sternsystemen der nächsten Generation. Auch unser Sonnensystem profitierte am Anfang so von früheren Sterngenerationen.



SUPERNOVA EXPLOSIONS-WOLKE MESSIER 1

Die spektakulärste Form des Sternentodes 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 reichern sie mit schweren chemischen Elementen an. So entstand vermutlich auch unser Sonnensystem.



9,1 MILLIARDEN JAHRE

8,5 MILLIARDEN JAHRE

8 MILLIARDEN JAHRE

EIN ZWILLING

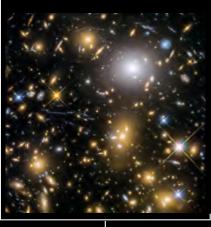
UNSERER MILCHSTRASSE

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 Staubnebel. Ein großer Teil der Galaxienmassen bleiben darauf unsichtbar – die sogenannte "Dunkle Materie".



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.



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.



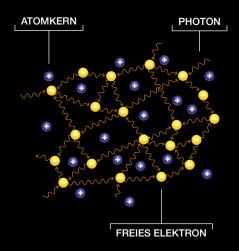
5 MILLIARDEN JAHRE

1,8 MILLIARDEN JAHRE

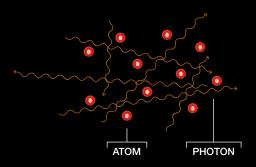
800 MILLIONEN JAHRE

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

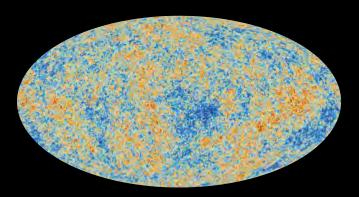
DAS UNIVERSUM WIRD DURCHSICHTIG



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.



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.



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

DIE KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG

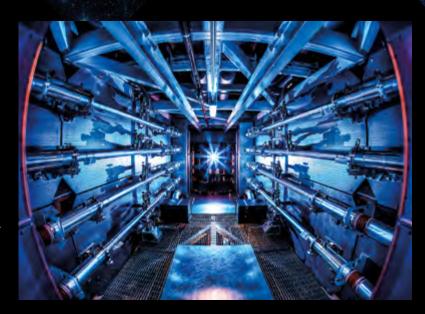
Die kosmische Hintergrundstrahlung ist die älteste Strahlung unseres Universums. Sie entstand 380 000 Jahre nach dem Urknall und ist seit 13,8 Milliarden Jahren zur Erde unterwegs. Sie stammt aus der Zeit, als das Universum fast perfekt homogen war – ähnlich der Oberfläche eines Sees bei Windstille. 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.

380 000 JAHRE NACH DEM URKNALL

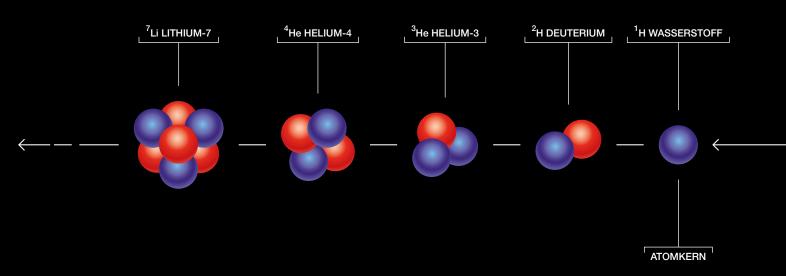
DIE GEBURTS-STUNDE DER CHEMIE

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

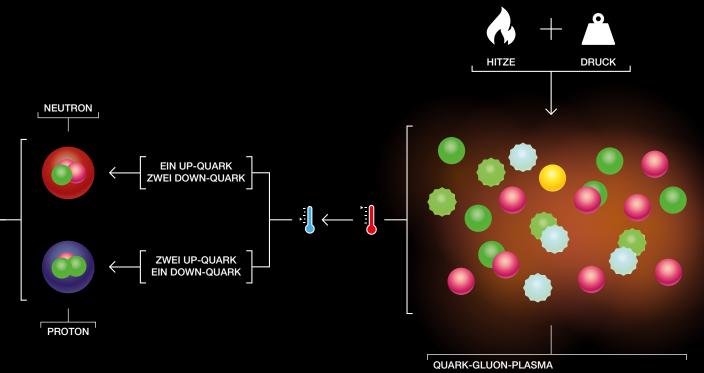


3 MINUTEN
NACH DEM URKNALL

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.



Freie Quarks und Gluonen bilden das sogenannte Quark-Gluon-Plasma. Diese subatomaren Teilchen können wir heute nicht mehr "frei" beobachten, da sie sich zu Protonen und Neutronen vereint haben. Unmittelbar nach dieser Kondensation beträgt die Dichte und Temperatur der Ursuppe 100 kg/cm³ und 1000 Milliarden Grad.

0,000001 SEKUNDEN NACH DEM URKNALL

DIE BÜHNE FÜR DAS KOMMENDE ZEITALTER DER ELEMENTARTEILCHEN

DER URKNALL

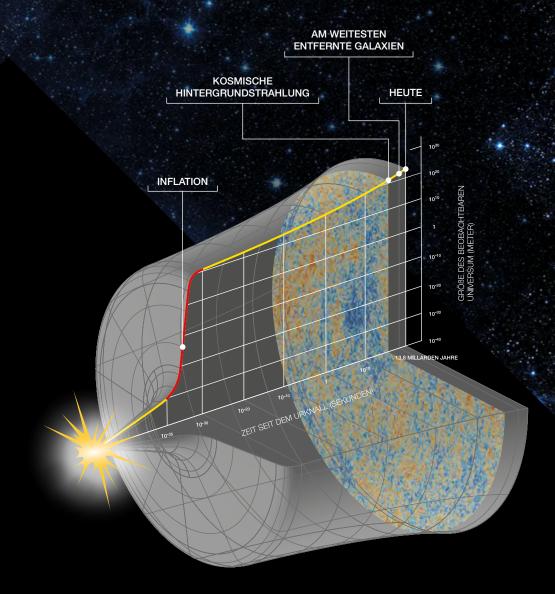
Der Urknall, früher eine philosophische Hypothese, ist heute eine unbestrittene Tatsache in der Wissenschaft. Selbst wenn es noch keine gesicherte Theorie zum "Wie" des Ursprungs gibt, wissen wir, dass sich das Universum einst in einem Zustand extremer Dichte und Temperatur befand.

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.

URKNALL

KLEINSTE TEILCHEN GROSSE FRAGEN

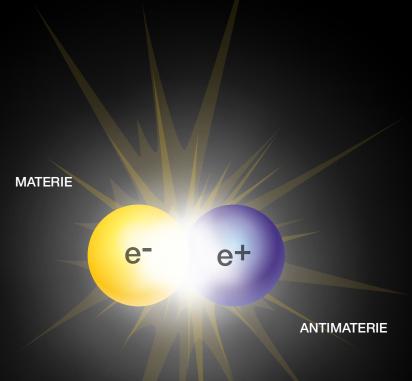
DAS HIGGS-TEILCHEN IST ENTDECKT – SIND JETZT ALLE FRAGEN GEKLÄRT? NEIN, ES GIBT NOCH UNZÄHLIGES ÜBER DIE BAUSTEINE DES UNIVERSUMS ZU ENTDECKEN.

(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.

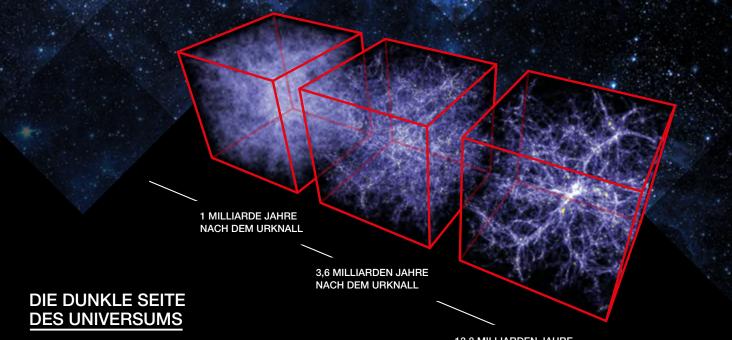


MATERIE ANTIMATERIE AM BEGINN DES UNIVERSUMS ANTIMATERIE



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.

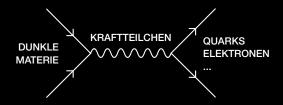


Nur etwa 5% unseres Universums besteht aus der uns bekannten Materie, wie sie im Standardmodell beschrieben ist. Der Rest ist Dunkle Materie und Dunkle Energie.

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 im 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.

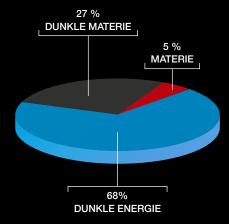
Forscherinnen und Forscher vermuten, dass diese Teilchen nicht immer "unsichtbar" waren. Bruchteile einer Sekunde nach dem Urknall traten sie mit der uns bekannten Materie in rege Wechselwirkung. Dabei entstand bei Zusammenstößen von Teilchen der uns bekannten Materie Dunkle Materie. Nach Abkühlung des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

Mit einer ganzen Reihe von Experimenten wird derzeit versucht, Dunkle Materie aus unserer Galaxis in Form von Rückstoßstreuprozessen 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 Teilchennatur der Dunklen Materie dabei zu entschlüsseln.



13,8 MILLIARDEN JAHRE NACH DEM URKNALL

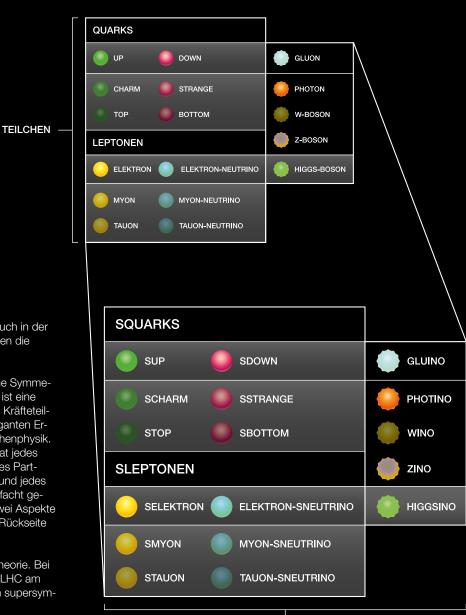
Die heutige Anordnung der Galaxien spiegelt die Verteilung der Dunklen Materie wieder.



ZUSAMMENSETZUNG UNSERES HEUTIGEN UNIVERSUMS

RÄTSELHAFTE DUNKLE ENERGIE

In unserer Alltagserfahrung wirkt Gravitation 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 Millarden 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.



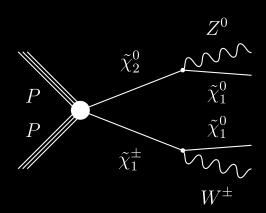
SUPERSYMMETRISCHE PARTNERTEILCHEN

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 Kräfteteilchen 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.



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Die Einsteinschen Feldgleichungen beschreiben den Zusammenhang zwischen der Geometrie des Raumes (linke Seite) und deren Materie-/Energieinhalt (rechte Seite).

"IM UNIVERSUM GIBT ES KEINEN MITTELPUNKT UND KEINE PERIPHERIE."

Giordano Bruno (1548-1600), Philosoph, Astronom



GRAVITATIONSWELLEN

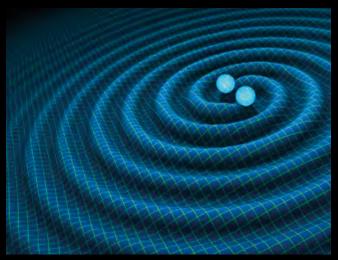
DAS UNIVERSUM DEHNT SICH NICHT NUR AUS, DER RAUM SELBST SCHWINGT DABEI.

> Gravitationswellen, die von zwei sich umkreisenden Schwarzen Löchern ausgelöst wurden, werden in dieser Computersimulation dargestellt.

SIGNALE AUS DER VERGANGENHEIT DES UNIVERSUMS

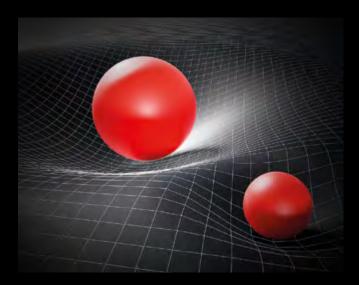
Vor 100 Jahren sagte Albert Einstein vorher, daß beschleunigte Massen Wellen auslösen. Er nannte dieses Phänomen Gravitationswellen. Diese Wellen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit durch das Universum und stauchen und strecken den Raum. Im Jahr 2016 gelang es nach über 50 Jahren Forschung, Gravitationswellen mit Detektoren direkt nachzuweisen. Die aufgezeichneten Wellen stammten aus der Kollision zweier Schwarzer Löcher, die eine Milliarde Jahre zurückliegt. Beobachtet wurde die Verzerrung des Raumes mithilfe des ultrapräzisen LIGO-Experiments.

Gravitationswellen haben andere Eigenschaften als z.B. Schallwellen. Sie breiten sich auch im Vakuum aus, gehen durch Sterne hindurch und verzerren die Geometrie des Raumes.



DIE REVOLUTIONÄRE IDEE VON EINSTEIN

Nach Einstein ist die Gravitation nicht eine Kraft wie in der klassischen Physik beschrieben (Newton'sches Gravitationsgesetz), die auf Körper einwirkt, sondern eine Konsequenz der Krümmung des Raumes. Daraus ergibt sich, wie in der allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben, dass jede Masse den Raum krümmt und damit den Bahnverlauf anderer Körper verändert.



Zur Verdeutlichung als Grafik eine zweidimensionale reduzierte Gitterstruktur: Unterschiedlich schwere Bälle verursachen unterschiedlich tiefe Vertiefungen im Gitter.

DER GRAVITATIONS-WELLENDETEKTOR

Ein Gravitationswellendetektor (auch Gravitationswellen-Observatorium) ist ein experimenteller Aufbau, mit dem geringe Störungen der Raumzeit (Gravitationswellen) gemessen werden, welche von Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagt wurden.

Der erste Nachweis eines Gravitationswellenereignisses registrierte das derzeit größte Gravitationswellen-Observatorium LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) in Louisiana und Washington, USA. Kurze Zeit darauf registrierte auch der europäische VIRGO-Detektor in Italien ein durch das Verschmelzen zweier schwarzer Löcher ausgelöstes Ereignis.

Ein weiteres Experiment für die Detektion von Gravitationswellen ist KAGRA (Kamioka Gravitationswellendetektor) in Japan. Dieses Experiment ist einzigartig, da es unterirdisch liegt, um den durch seismischen Aktivitäten verursachten Lärm zu reduzieren und es verwendet kryogenisch gekühlte Spiegel, um die Empfindlichkeit zu erhöhen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Österreich prüfen eine mögliche Beteiligung an Gravitationswellendetektoren.



- 1 Luftaufnahme des LIGO-Geländes in Livingston, Louisiana, USA
- 2 Luftaufnahme des Geländes des Europäischen Gravitationswellen-Observatoriums (EGO) in Santo Stefano a Marcerata, Italien
- 3 Blick in den KAGRAS Armtunnel (X-Arm). Das Vakuumrohr hat einen Durchmesser von 80 cm und eine Länge von 3 km.





PHYSIK-NOBELPREIS

Die drei US-Amerikaner Rainer Weiss, Barry Barish und Kip Thorne wurden für ihre entscheidenden Beiträge zum LIGO-Detektor und der Beobachtung von Gravitationswellen 2017 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Die drei Wissenschaftler waren maßgeblich an dem Aufbau des LIGO-Experiments beteiligt. Der direkte Nachweis von Gravitationswellen öffnet einen neuen Blick ins Universum – möglicherweise bis zum Urknall.



STECKBRIEFE

LIGO

- über 1 300 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler
- › aus 108 Institutionen von 18 Nationen

VIRGO

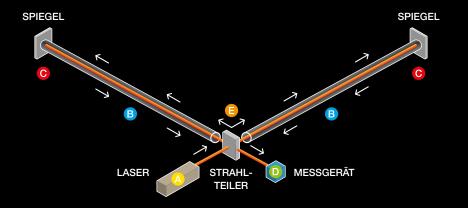
- etwa 350 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler
- aus 27 Europäischen Institutionen von 8 Nationen

KAGRA

- etwa 400 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler
- aus 110 Institutionen von 15 Nationen

DAS MESSPRINZIP

- Der Laserstrahl wird an einem Strahlteiler in jeweils zwei Strahlen aufgeteilt.
- Die zwei geteilten Strahlen laufen in zwei Tunnel, die im rechten Winkel zueinanderstehen.
- Am Ende des Tunnels werden die Strahlen reflektiert und zurückgeschickt.
- Am Strahlteiler überlagern sich die zurückgeschickten Strahlen und treffen als Signal auf einen Lichtsensor.
- Das Spiegelsystem wirft den Strahl hin und her. Wenn sich die Wegstrecke kurzzeitig auch nur um den Bruchteil eines Wasserstoffatoms ändert, lässt sich das im Überlagerungsmuster erkennen.

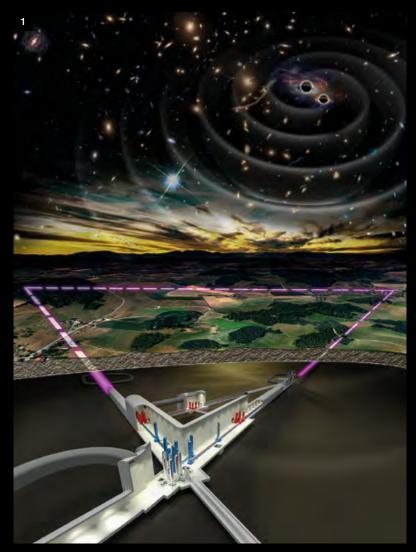


DAS EINSTEIN-TELESKOP

Das Einstein-Teleskop soll einen bedeutenden Fortschritt im Bereich der Astrophysik und der Gravitationswellendetektion darstellen. Es repräsentiert einen Gravitationswellendetektor der dritten Generation und soll im nächsten Jahrzehnt in Betrieb genommen werden. Die Wahl seines Standorts ist noch im Auswahlprozess, wobei zwei Hauptkandidaten zur Auswahl stehen: die Sos Enattos-Mine in Sardinien, Italien, und die Euregio Maas-Rhein- Zone, die sich an der Grenze zwischen den Niederlanden, Belgien und Deutschland befindet.

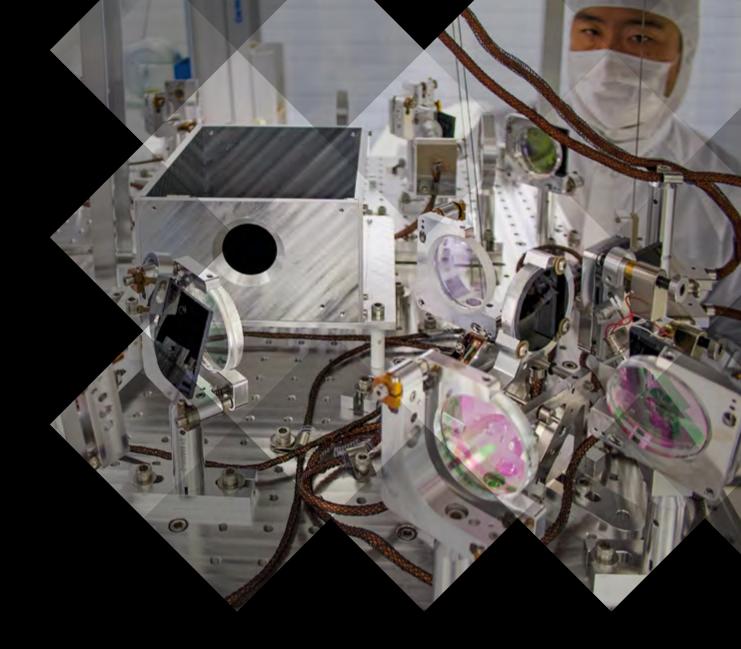
Eine der bemerkenswertesten Verbesserungen ist seine Empfindlichkeit, die voraussichtlich um mehr als eine Größenordnung besser sein wird als die seiner Vorgänger. Diese erhöhte Empfindlichkeit wird entscheidend sein, um sowohl niedrige als auch hohe Frequenzbereiche zu erforschen.

Das Hauptziel des Einstein-Teleskops ist es, die Detektion und Untersuchung von Gravitationswellen aus einer Vielzahl von kosmischen Ereignissen zu ermöglichen. Mit seinem fortschrittlichen Design wird es in der Lage sein, tiefer in das Universum vorzudringen und Forscherinnen und Forschern erlauben, "massive" Ereignisse in viel größeren Entfernungen zu beobachten und zu analysieren. Dies könnte neue Wege für das Verständnis des Kosmos eröffnen und Einblicke in Phänomene wie Kollisionen Schwarzer Löcher, Verschmelzungen von Neutronensternen und möglicherweise sogar die Entdeckung neuer, unbekannter Arten von astrophysikalischen Ereignissen bieten.





- 1 Künstlerische Visualierung des unterirdisch angelegten Einstein-Teleskops, ein geplanter Gravitationswellendetektor der dritten Generation
- 2 Blick in das Innere des zukünftigen Einstein-Teleskops



"GRAVITATIONSWELLE – EINE WELLE IN DER RAUMZEIT, DURCH EINE BESCHLEUNIGTE MASSE AUSGELÖST"

Quelle Wikipedia

$$\Box h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi}{c^4} G T_{\mu\nu}$$

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 Vienna Conference on Instrumentation. Diese Veranstaltung findet alle 3 Jahre statt und hat sich als eine der Hauptdetektorkonferenzen der Welt etabliert.

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

- > Etwa 85 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Wien
- > Wenige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am CERN für den Betrieb des Experiments

BETEILIGUNGEN AN FORSCHUNGSPROJEKTEN

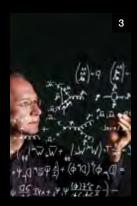
- Belle II am KEK (Japan)
- > CMS am CERN (Schweiz)
- > CRESST und COSINUS im LNGS Laboratori Nazionale del Gran Sasso (Italien)
- > NUCLEUS am CHOOZ (Frankreich)

THEORIE-SCHWERPUNKTE

> Neue Physik und Kosmologie







- 1 Produktion von Teilchendetektoren im HEPHY Reinraum
- 2 Teilchensensoren einer neuen Generation
- 3 Das HEPHY widmet sich der Ausbildung der nächsten Generation

"DER LHC BESCHLEUNIGT DIE PROTONEN UND DAS BLEI – UND DIE DINGE, DIE ER ENTDECKT, VERDREHEN EINEM DEN KOPF."

Die amerikanische Wissenschaftsjournalistin Katherine Mc Alpine, in ihrem LHC Rap-Song "Large Hadron Rap"



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 II-Experiment am KEK (Japan).

CMS-EXPERIMENT AM CERN

Das CMS-Experiment wurde so konstruiert, dass er neue physikalische Phänomene in Teilchenkollisionen entdecken kann. Dazu erzeugt der Detektor bis zu 40 Millionen mal pro Sekunde ein präzises 3D Bild aller entstandenen Teilchen.

UNSERE BEITRÄGE

- Führende Beiträge zur Gewinnung von Physikresultaten
- Entwicklung, Bau und Betrieb essentieller Teile des Triggersystems
- Entwicklung und Design von Siliziumsensoren
- Qualitätssicherung der Produktion der Siliziumsensoren
- Bau und Test von Streifendetektor-Modulen
- Ausleseelektronik für Pixel- und Streifendetektoren
- Rechenzentrum zur Speicherung und Analyse von Daten
- Programme zur Erkennung und Rekonstruktion von Teilchenspuren

BELLE II-EXPERIMENT

Das Experiment Belle II wurde unter anderem für die Klärung der Frage, weshalb es deutlich mehr Materie als Antimaterie in unserem Universum gibt, gebaut.

UNSERE BEITRÄGE

- Entwicklung und Gesamtverantwortung für den Bau des Silizium-Streifendetektors SVD
- Bau von Detektormodulen im hauseigenen Reinraum
- Entwicklung und Bau der SVD Ausleseelektronik
- Führende Beiträge zur physikalischen Belle II-Datenanalyse (Suche nach Produktion von Dunkler Materie, Überprüfung des Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Mechanismus, Seltene B Meson-Zerfälle)

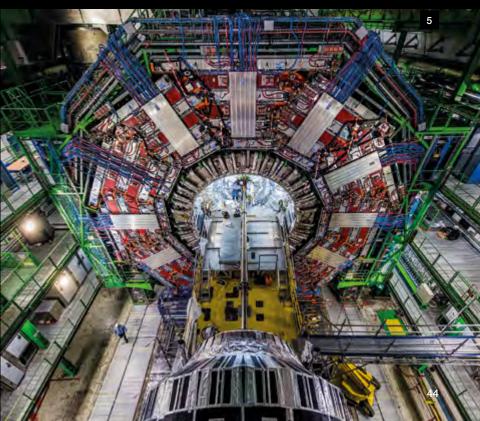








- 1 Ein Wissenschaftler am HEPHY bereitet die elektrische Charakterisierung eines Siliziumsensors vor.
- 2 Überprüfung der Produktionsqualität von Halbleitersensoren mittels Teststrukturen in einer vom HEPHY gebauten halbautomatischen Testanlage
- 3 Belle II Siliziumvertex-Detektor
- 4 Test von neuartigen Teilchensensoren
- 5 CMS Detektor am CERN



RARE EVENT SEARCHES-EXPERIMENTE

Die Experimente zur Suche nach seltenen Ereignissen spielen eine wichtige Rolle bei der Suche nach neuer Physik, von der Dunklen Materie bis zur Neutrinophysik.

Bei Experimenten zur direkten Suche nach Dunkler Materie wird nach Wechselwirkungen von Teilchen der Dunklen Materie mit dem Detektormaterial gesucht. Die meisten dieser Experimente suchen nach elastischer Streuung von Dunkle-Materie-Teilchen an Atomkernen und befinden sich in tiefen Untergrundlaboren, um sie gegen die kosmische Strahlung abzuschirmen.

Für Präzisionsstudien von Neutrinoeigenschaften und für neue Physik jenseits des Standardmodells wird ebenfalls die elastische Streuung an Atomkernen vermessen, allerdings nicht von Teilchen der Dunklen Materie, sondern von Neutrinos.

Für die direkte Suche nach Dunkler Materie werden auch Silizium-Halbleiter verwendet. In diesen wird nach Wechselwirkungen mit den Elektronen gesucht. Dies erlaubt, sehr leichte Teilchen der Dunklen Materie zu erforschen.

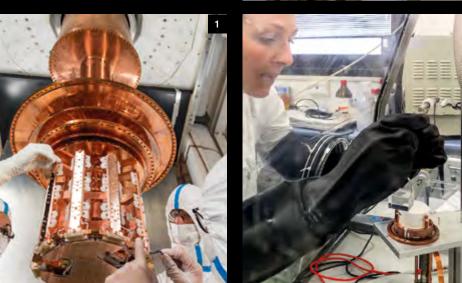


STECKBRIEF EXPERIMENTE

- > CRESST: Bau 1996; Upgrade 2024/25
- > COSINUS: Bau 2021 2024
- NUCLEUS: Bau 2021 2024
- > DANAE: Prototypenentwicklung



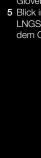






- 1 Montage der CRESST-Detektoren in das Detektorkarussell
- 2 Nucleus Collaboration vor dem Atomkraftwerk Chooz
- 3 Offenes Detektormodul des COSINUS-Experiments
- 4 Montage eines COSINUS Detektormoduls in einer Glovebox
- 5 Blick in die Halle A am LNGS, Container mit dem CRESST-Experiment





DAS UNSICHTBARE SICHTBAR MACHEN

DIE TECHNIK FÜR ZUKÜNFTIGE EXPERIMENTE

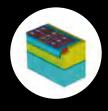
Am HEPHY konzentrieren wir uns auf Teilchendetektoren auf Basis von sogenannten Halbleitern, die ähnlich zu elektronischen Bauteilen bzw. Mikrochips sind. Diese Detektoren simulieren wir in Computern, um das optimale Design zu ermitteln, aus welchem von speziellen Firmen oder Instituten die eigentlichen Detektoren gefertigt werden. So haben wir fast ein Jahrzehnt mit dem Europäischen Halbleiterhersteller Infineon zusammengearbeitet, um Silizium-Detektoren für LHC-Experimente zu entwickeln.

Die produzierten Detektoren werden dann in den Reinräumen und Werkstätten des HEPHY getestet, charakterisiert, bzw. zu größeren Systemen integriert. Dies geschieht für Prototypen für zukünftige Experimente genauso wie für tausende Komponenten der Experimente, an denen wir beteiligt sind (CMS, Belle-II). Im ersten Fall wird die Performance der Detektoren und ihre Alterung unter ständigem Teilchenbeschuss studiert, um Verbesserungen in zukünftige Versionen zu implementieren. Bei der Serienproduktion für HEP-Experimente müssen wir sicherstellen, dass nur perfekt funktionierende Detektoren in die Experimente verbaut werden, um für zehnjährigen Betrieb hochwertige Daten liefern zu können. Detektoren für HEP-Experimente eignen sich auch sehr gut für die Vermessung von Teilchenstrahlen außerhalb der Hochenergiephysik. Daher arbeiten wir mit MedAustron zusammen, um deren Teilchenstrahl in allen Anwendungsfällen präzise detektieren zu können. Dies reicht von einzelnen Teilchen bis zu höchsten Raten, welche bei der sogenannten FLASH-Therapie zum Einsatz kommen wird.



Blick in den HEPHY-Reinraum mit verschiedenen Messapparaturen zur elektrischen Charakterisierung von Siliziumdetektoren.

ENTWICKLUNGSSCHRITTE





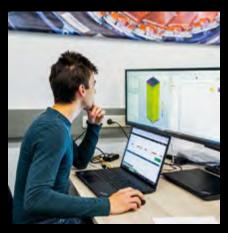


STRATEGISCHE WEITERENTWICKLUNG



EINSATZ IN EXPERIMENTEN

- Idee: Wie kann ich einen physikalischen Effekt zum Detektieren von Teilchen verwenden?
 - Konzeptentwicklung mittels Computersimulation
- Technologieentwicklung
- Demonstration der Technologie in einem größeren Rahmen
- > Bau eines großen Sytems (Tausende bis Millionen Detektorkanäle)
 - Nutzung des Systems in einem realistischen Einsatzumfeld



COMPUTERSIMULATION SENSOR



BAU PROTOTYPEN



CMS-TRACKER

HALBLEITERDETEKTOREN

Ein Halbleiterdetektor ist ein Strahlungs- oder Teilchendetektor, bei dem spezielle elektrische Eigenschaften von Halbleitern ausgenutzt werden, um ionisierende Strahlung nachzuweisen. Halbleiterdetektoren werden meistens im Zentrum von Beschleunigerexperimenten als Vertex- und Spurdetektor verbaut, um die Position der Teilchenkollisionen sowie die Bahn der durch die Kollision produzierten Sekundärteilchen zu vermessen. Diese Teilchen erzeugen im Halbleiter freie Ladungsträger, die zu Elektroden aus Metall driften. Dieses Stromsignal wird durch sogenannte Front-End-Elektronik verstärkt und ausgewertet, welche direkt neben oder über dem Detektor platziert ist. Dabei wird aber auch jedes den Detektor durchquerende Teilchen selbst verändert: durch eine Änderung seiner Flugbahn, bzw. einem gewissen Verlust seiner Bewegungsenergie. Dieser unerwünschte Effekt kann reduziert werden, indem die Detektoren so dünn und leicht wie möglich gebaut werden.

MONOLITHISCHE SENSOREN

Sogenannte "Depleted Monolithic Active Pixel Sensoren" (DMAPS) vereinen den eigentlichen Detektor und CMOS-basierte Front-End-Elektronik zur Signalverstärkung, Digitalisierung und Weiterverarbeitung auf einem Siliziumchip, was mehrere Vorteile mit sich bringt. So ist dadurch keine Verbindungstechnologie zwischen Sensor und Elektronik notwendig, was speziell bei Pixeldetektoren zu einer Vermeidung der teuren und fehleranfälligen Flip-Chip oder Bump-Bonding-Technologie führt. Weiters können Detektorsysteme damit leichter und dünner gebaut werden, was zu weniger unerwünschter Wechselwirkung mit den zu messenden Teilchen selbst führt. Damit erhöht sich die Genauigkeit der Spurvermessung.

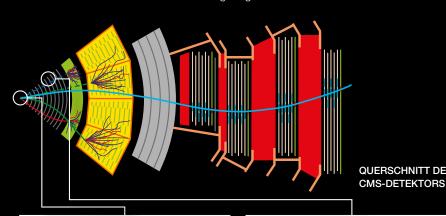


FOTO EINES MONOLITHISCHEN SENSORS

Dieser Prototyp wurde am HEPHY entwickelt und nach der Produktion in einer Chipfabrik am Institut nun ersten Tests unterzogen. Man erkennt die mikroskopisch dünnen Verbindungsdrähte zur darunterliegenden Platine (grün).



Die innerste Komponente des CMS Experiments

Digitalkamera werden die Positionen der Teilchen-

kollisionen vermessen. Er besteht aus hybriden

ist der sogenannte Pixel Detektor. Wie in einer

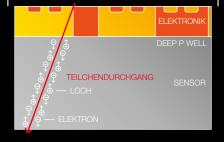
CMS PIXEL DETEKTOR

Sensoren.

QUERSCHNITT DES

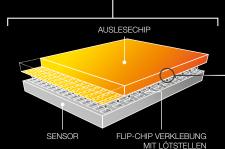
CMS SPURDETEKTOR

Die Verfolgung der Flugbahn von Teilchen und dessen Biegung in einem Magnetfeld geschieht durch 30.000 einzelne Silizium-Streifensensoren, jeder ca. 10x10cm² groß, und in bis zu zehn Lagen in konzentrischen Zylindern angeordnet.



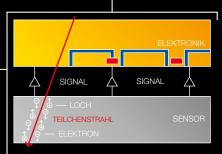
QUERSCHNITT MONOLITHISCHER SENSOR

Der Vorteil eines monolithischen Sensors liegt darin, dass der Sensor und die Elektronik (gelb) in einem Siliziumstück vereint wurden. Daher entfällt der fehlerträchtige Verbindungsteil, und der Detektor wird insgesamt leichter, schneller und einfacher.



AUFBAU HYBRIDE PIXELSENSOREN

Hybride Sensoren bestehen aus dem eigentlichen Sensor und einem gleich großen Auslese chip. Jeder Pixel wird mittels eines aufwändigen Verfahrens namens "flip chip" oder "bump bonding" mit dem Auslesechip verbunden.



SIGNAL HALBLEITERDETEKTOR

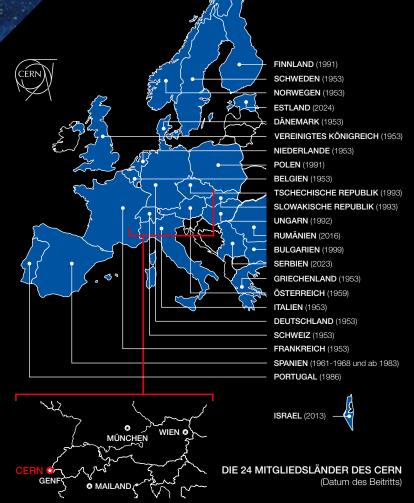
In Siliziumsensoren entsteht ein Stromimpuls, welcher der Ladung von 20.000 Elektronen und positiv wirkenden "Löchern" entspricht. Dieses kleine Signal muss in Elektronik geleitet werden, wo es verstärkt und weiterverarbeitet wird.

CERN – FORSCHUNG ALS VÖLKERVERBINDENDES ZUKUNFTSPROJEKT

CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) ist das weltweit größte 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 Wissenschafterinnen 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!





STECKBRIEF CERN

- Gründung: 1954
- > Beitritt Österreichs: 1959
- › Derzeit 24 Mitgliedsländer
- Etwa 2 500 CERN-Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter
- Derzeit sind 9 Teilchenbeschleuniger und über 100 Experimente in Betrieb
- Am CERN forschen mehr als 17 500 Wissenschafterinnen und Wissenschafter aus über 560 Instituten und Universitäten aus 70 Nationen

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.



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

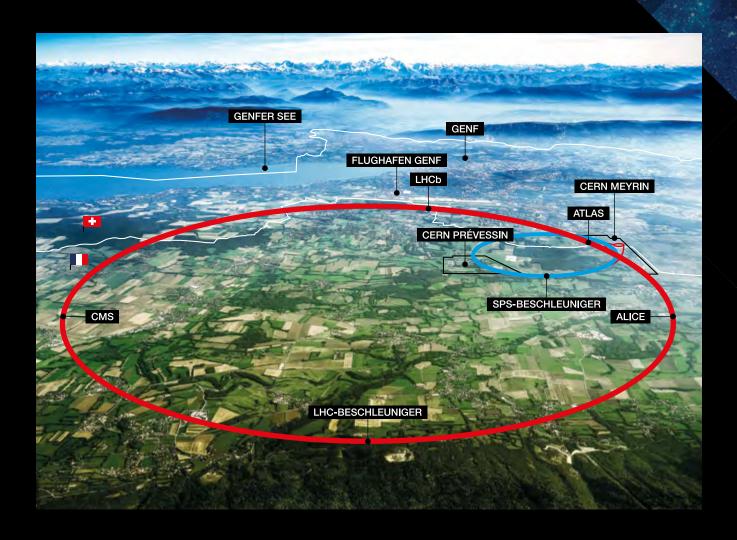
Georges Charpak entwickelt die Vieldraht-Proportionalkammer. Sie misst die Spuren von Teilchen und revolutionierte die Teilchenphysik, fand aber auch zahlreiche weitere Verwendungen. Charpak wurde dafür 1992 der Nobelpreis verliehen.



1976

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





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.



1984

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



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.



1995

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



1999

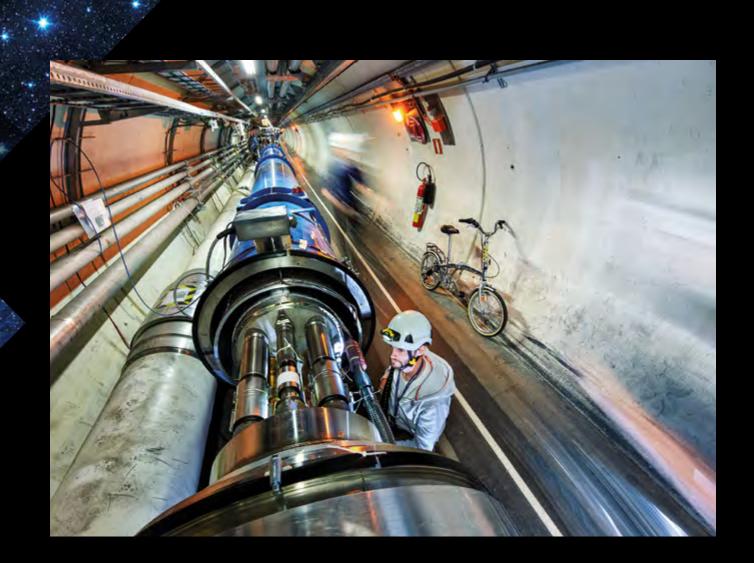
Der Bau des LHC-Beschleunigers beginnt. Das komplexeste wissenschaftliche Instrument wird im 27 km langen Tunnel des LHC-Beschleunigers installiert, der im Jahr 2000 abgeschaltet und abge-



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.



2018

Die Bauarbeiten beginnen für die Erweiterung des LHC zum High-Luminosity LHC (HL-LHC).



2026-2028

Abschaltphase des LHC, um ihn zum HL-LHC umzurüsten. Die Experimente wie CMS müssen ebenso erneuert und mit neuen, noch leistungsfähigeren Detektoren ausgestattet werden.



2029

Start des HL-LHC, der es ermöglichen wird, die grundlegenden Bestandteile der Materie noch detaillierter zu untersuchen.



DIE ZUKUNFT

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



FUTURE CIRCLE COLLIDER

ZUKÜNFTIGER TEILCHEN-BESCHLEUNIGER AM CERN

Auf der Suche nach neuen Erkenntnissen über die grundlegende Natur unseres Universums werden derzeit neue Generationen von Teilchenbeschleunigern entwickelt, in denen Teilchenstrahlen immer präziser und mit immer höheren Energien zusammenstoßen.

Eine internationale Zusammenarbeit von mehr als 150 Universitäten, Forschungsinstituten und Industriepartnern aus der ganzen Welt entwickelt Entwürfe für einen neuen Kreisbeschleuniger, den Future Circle Collider (FCC), neue Detektoren und die dazugehörige Infrastruktur, der am CERN nahe Genf gebaut werden soll.

Ziel des FCC ist es, die Energie-, Intensitäts- und Präzisionsgrenzen zu erweitern, um unter anderem Physik jenseits des Standardmodells zu untersuchen. Der LHC (Large Hardon Collider) am CERN hat mit der Entdeckung des Higgs-Boson das Standardmodell vervollständigt. Der Future Circle Collider soll nun mit höherer Energie und höheren Kollisionsraten Messungen durchführen, um unser Verständnis der Prozesse des Standardmodells zu vertiefen und noch ungeklärte Phänomene wie Dunkle Materie, das Ungleichgewicht Materie Antimaterie und die Neutrino Massen zu klären.

Für das FCC Projekt müssen neue Konzepte, Innovationen und wegweisende Technologien entwickelt werden, die auch anderen Forschungsdisziplinen zu Gute kommen. Dieser Teilchenbeschleuniger bietet sowohl der Industrie einzigartige Möglichkeiten, das Know-how zu erweitern als auch eine hervorragende Gelegenheit zur Ausbildung zukünftiger Forscherinnen und Forscher und Technikerinnen und Techniker.



STECKBRIEF FUTURE CIRCLE COLLIDER

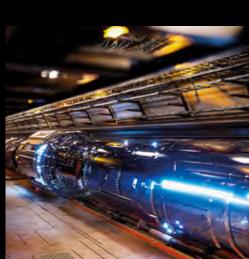
- FCC Kollaboration mit 1 300 Forscherinnen und Forscher aus 150 Universitäten und Instituten
- etwa 90 km langer supraleitender Hadronen-Beschleunigerring
- eine Kollisionsenergie von 100 TeV soll erreicht werden



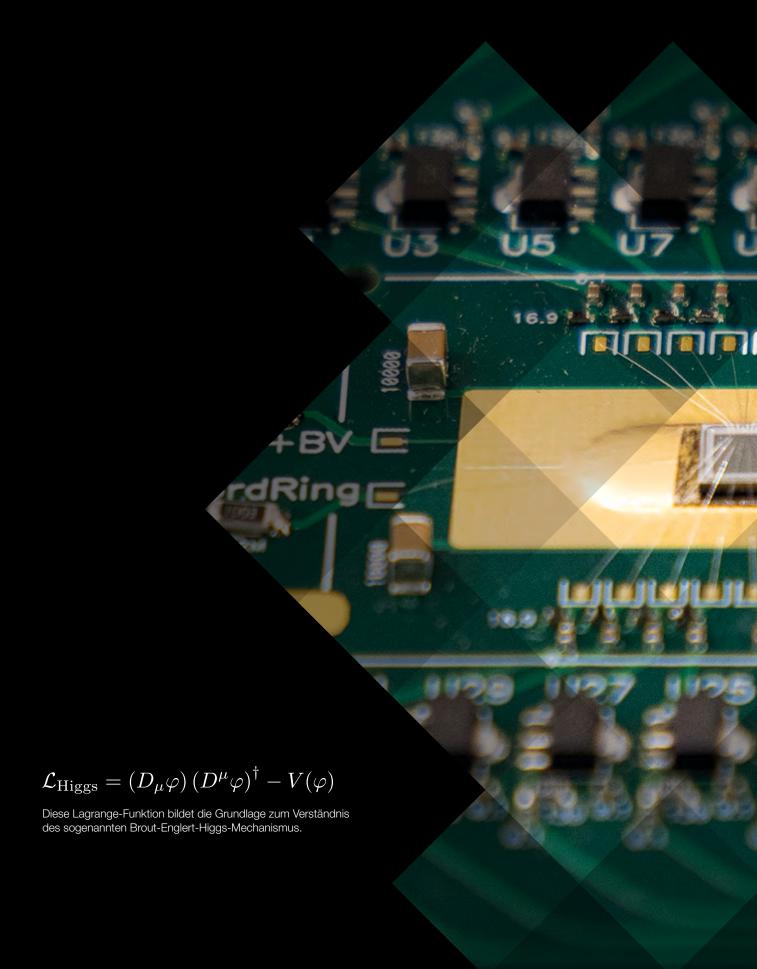


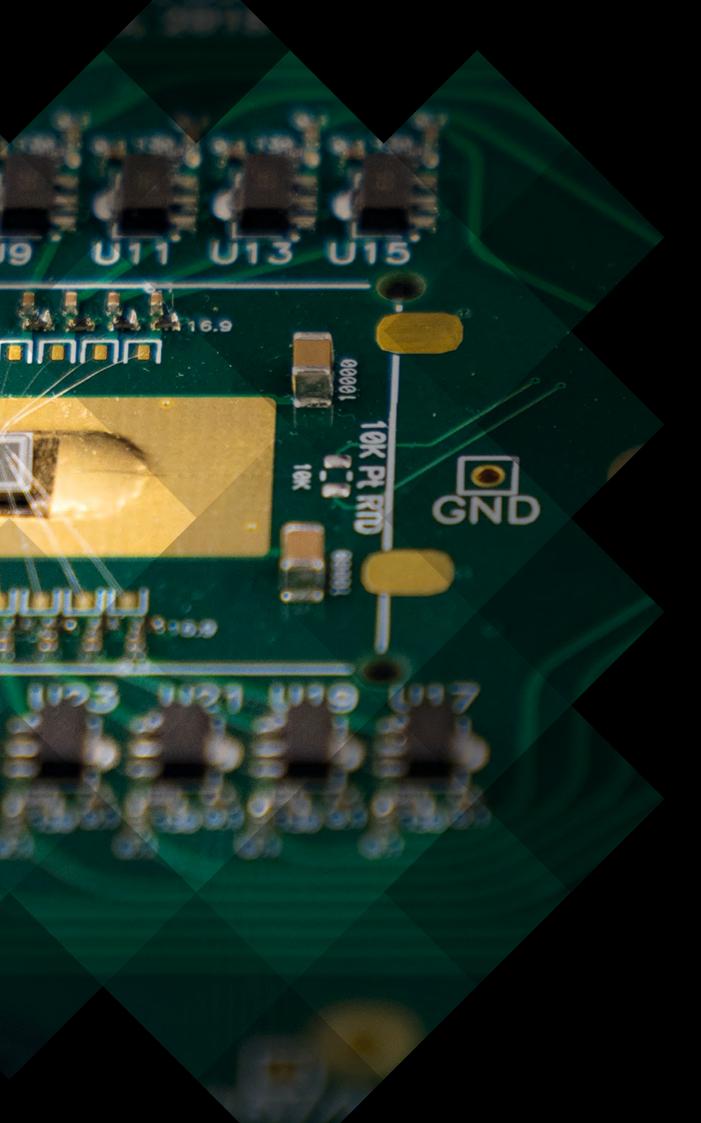






- Konzept eines zukünftigen Detektors am Future Circle Collider
- 2 Demonstration eines Magneten für das FCC Projekt
- 3 Skizze des zukünftigen FCC Tunnel







DAS JAPANISCHE ZENTRUM FÜR TEILCHENPHYSIK

Das Institut für Hochenergiephysik ist am Experiment Belle II am nationalen Forschungszentrum KEK (ko-enerugi kasokuki kenkyu kiko, 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.

DAS BELLE II-EXPERIMENT

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



STECKBRIEF KEK

- Gründung: 1971
- > 720 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

STECKBRIEF BELLE II

- 1100 Wissenschafterinnen und Wissenschafter aus 28 Ländern/Regionen
- Österreichische Beteiligung am KEK: seit 2001 beim Belle-Experiment

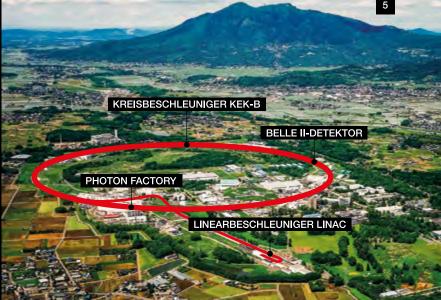


- 1 Belle II Detektor am KEK2 bis 4 Belle II Silizium-
- 2 bis 4 Belle II Siliziumvertex-Detektor
- 5 Luftbild vom KEK Tsukuba-Campus









DAS CRESST-EXPERIMENT

DAS UNTERGRUNDLABOR LNGS

In einem der größten Untergrundlaboratorien der Welt, dem LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso) in den italienischen Abruzzen, 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 will diese Teilchen durch ihre Wechselwirkungen mit Detektoren nachweisen, welche im Untergrundlabor in 1400 Metern Tiefe aufgebaut sind, um sie gegen störende kosmische Höhenstrahlung und natürliche Radioaktivität abzuschirmen.

MESSUNGEN BEI TIEFSTEN TEMPERATUREN

TIEFSTEN TEMPERATUREN
Kern der Detektoren sind Kristalle aus Calciumwolframat, Lithiumaluminat und anderen Materialien. 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.

U

STECKBRIEF CRESST-EXPERIMENT

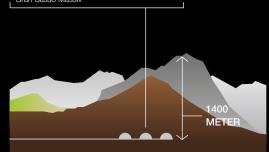
- › Seit 1996 in Betrieb
- Etwa 60 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 9 Instituten aus 5 Nationen
- Österreichische Beteiligung: seit 2013
- > www.cresst-experiment.org



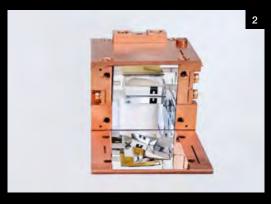


3 GROSSE FORSCHUNGSHALLEN

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



- Blick in die Halle A des LNGS; die Container im Vordergrund beherbergen das CRESST-Experiment
- 2 Offenes CRESST-III-Detektormodul
- 3 Einbau von CRESST-III-Detektormodulen mit unterschiedlichen Kristallen in den CRESST-Aufbau im LNGS.
- 4 Regelmäßiges Nachfüllen des Kryostaten mit Helium und Stickstoff, um bei der Datenerfassung eine Temperatur der Detektoren von 15mK gewährleisten zu können.









DAS COSINUS-EXPERIMENT

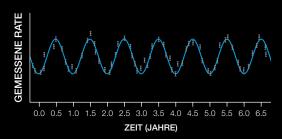
EISIGE TEMPERATUREN IM UNTERGRUND

Zwar weiß man aufgrund astronomischer Beobachtungen über die Existenz der Dunklen Materie (DM) Bescheid, ein direkter Nachweis steht allerdings noch aus. Um ihrem Verständnis ein Stück näher zu kommen, bauen die Forscherinnen und Forscher von COSINUS einen Teilchendetektor, der mithilfe eines Kryostaten (ein "Kühlschrank" für extrem tiefe Temperaturen) bis auf wenige hundertstel Grad über absolut Null (-273,15°C) gekühlt und im größten Untergrundlabor der Welt betrieben wird, dem Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) in Italien.

Zusätzlich zu den rund 1400 Metern an Gestein, die das LNGS an Abschirmung bietet, wird um den Kryostaten herum noch ein Wassertank mit 7 Metern Durchmesser und Höhe gebaut. Dieser Aufbau ist extrem wichtig, denn der Detektor ist hoch sensibel und jegliche kosmische Strahlung (z.B. Myonen oder Gamma-Strahlen) wäre sehr störend.

DM ODER KEINE DM?

Konkreter geht COSINUS einer jahrzehntelangen Frage nach: Ein Experiment namens DAMA/LIBRA misst nämlich seit vielen Jahren ein Signal, das in etwa so aussieht:



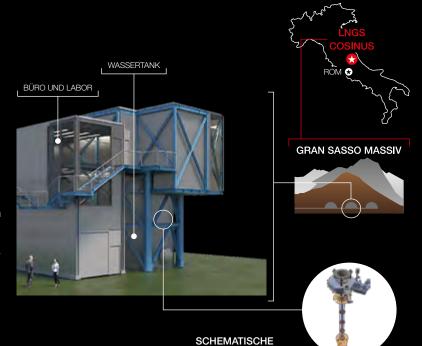
Dieses Signal könnte tatsächlich mithilfe von DM erklärt werden, denn wegen des Umlaufs der Erde um die Sonne erwartet man, dass wir Phasen von DM "Gegenwind" und "Rückenwind" durchlaufen. Man würde also ein Signal erwarten, das im Jahresverlauf schwankt. Das einzige Problem daran ist, dass das Signal sonst niemand misst. Weil experimentelle Ergebnisse aber nur vergleichbar sind, wenn auch dieselben Detektormaterialien verwendet werden, baut COSINUS nun (ebenso wie DAMA/LIBRA) einen Natrium lodid (Nal) Detektor, um diese Frage ein für alle Mal zu klären.

1

STECKBRIEF COSINUS-EXPERIMENT

- > Ab 2024 in Betrieb
- Etwa 45 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus 5 Instituten
- › Österreichische Beteiligung: seit 2016
- > www.cosinus.it bzw. @COSINUSdm

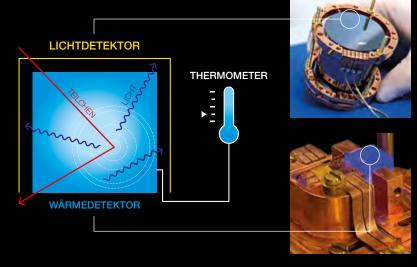




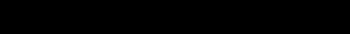
DARSTELLUNG DES KRYOSTATEN

DETEKTIONSPRINZIP

Wenn der Detektor von einem Teilchen getroffen wird, erwärmt er sich um ca. ein millionstel Grad, was man mit einem sehr empfindlichen Thermometer messen kann. Zusätzlich zu Wärme entsteht auch (blaues) Licht, welches mit einem becherförmigen Lichtdetektor gemessen wird, der den Wärmedetektor umgibt. Aus dem Wärme- und Lichtsignal kann man dann rückschließen, um welche Art von Teilchen es sich gehandelt hat: Die Lichtausbeute beim Eintreffen eines Photons wäre z.B. viel größer als bei einem DM-Teilchen. Die Möglichkeit der Teilchenunterscheidung zeichnet COSINUS gegenüber anderen Experimenten mit Nal-Detektor, insbesondere auch DAMA/LIBRA, aus.





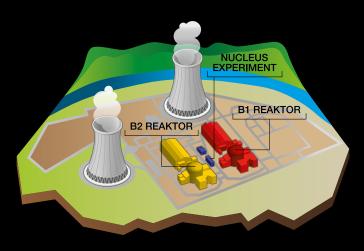


DAS NEUTRINO -**EIN SCHEUES TEILCHEN**

Am französischen Kernkraftwerk Chooz wird das NUCLEUS-Experiment aufgebaut, welches mit Neutrinos das Standardmodell der Teilchenphysik präzise vermessen wird. Auch wenn das Standardmodell eine der genauesten physikalischen Theorien ist die wir kennen, wissen wir, dass es nicht komplett ist: es beschreibt zum Beispiel nicht die "Dunkle Materie" oder die Masse der Neutrinos. Es muss also ein umfangreicheres Modell existieren, das auch diese Erscheinungen jenseits des Standardmodells beinhaltet. Auch an der spannenden Suche nach dieser sogenannten "Neuen Physik" beteiligt sich NUCLEUS.

DAS NUCLEUS-EXPERIMENT

Neutrinos sind eine sehr "scheue" Art von Elementarteilchen: sie wiegen fast nichts, höchstens ein Hunderttausendstel eines Elektrons, und wechselwirken so gut wie nie mit anderer Materie. Um dennoch diese seltene Wechselwirkung messen zu können, braucht NUCLEUS eine sehr intensive Neutrinoquelle - die beiden Kernreaktoren B1 und B2 des Kernkraftwerks Chooz, denn Neutrinos werden in großer Anzahl bei der Kernspaltung produziert. NUCLEUS wird zwischen beiden Reaktoren aufgestellt, außerhalb der Reaktorsicherheitsbehälter, welche die bei der Kernspaltung entstehende Radioaktivität zurückhalten, aber von den harmlosen Neutrinos nahezu ungehindert durchquert werden.



nu)cleus

DIE NUCLEUS DETEKTOREN - KLEIN ABER FEIN

Um diese Neutrinos nachzuweisen, nutzt NUCLEUS die gleiche Methode wie CRESST: Kristallwürfelchen von 5 mm Kantenlänge, z.B. aus Saphir, die bis fast zum absoluten Nullpunkt abgekühlt werden. Stößt ein Neutrino an einen Atomkern im Kristall, erwärmt sich der Kristall um einige Millionstel Grad und liefert damit einen Hinweis auf eine Wechselwirkung eines Neutrinos mit dem NUCLEUS-Detektor. Sollte es NUCLEUS gelingen, einige Hundert dieser Wechselwirkungen nachzuweisen, können Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Vielzahl an neuen Erkenntnissen daraus ableiten: sowohl über das Standardmodell, z.B. wie sich die schwache Kernkraft, die zu Atomzerfällen führt, bei niedrigsten Energien verhält, als auch über neue Physik, oder ob Neutrinos auch überhaupt mit bis jetzt unbekannten Teilchen interagieren. Solche unbekannten Teilchen wären auch interessant für die zukünftige Suche nach der Dunklen Materie.



STECKBRIEF NUCLEUS-EXPERIMENT

- > Zurzeit im Aufbau, Beginn der Entwicklung 2017
- > Etwa 60 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 7 Instituten in 4 Ländern
- › Österreichische Beteiligung: seit 2017
- > www.nucleus-experiment.org



- 1 Prototyp eines Halters für 3 NUCLEUS-Detektoren
- 2 Ein Saphirwürfel als NUCLEUS-Detektor. Die
- schwarze Struktur ist das eigens entwickelte Thermometer, welches in der Lage ist, die extrem kleinen Temperaturanstiege von einem Millionstel Grad zu messen.
- 3 Der zukünftige Standort von NUCLEUS: das Kernkraftwerk Chooz in Frankreich
- 4 NUCLEUS im Comic erklärt







DAS DANAE-EXPERIMENT

DAS EXPERIMENT

Im DANAE-Experiment werden spezielle Siliziumdetektoren für die Suche nach einer besonders leichten Form der Dunklen Materie eingesetzt. Die Detektoren werden am Halbleiterlabor der Max-Planck-Gesellschaft entwickelt und müssen in der Lage sein, einzelne Elektronen zu messen und zu unterscheiden. Das Experiment befindet sich in der Technologieentwicklung und wird in Wien am Institut für Hochenergiephysik der ÖAW betriehen.

DIE SIGNALE

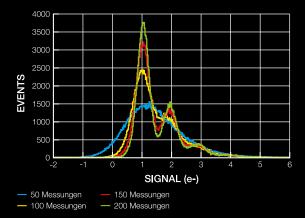
Derzeit werden unentdeckte Elementarteilchen als Erklärung für Dunkle Materie favorisiert. Diese wurden in einem schweren Massebereich vermutet, motiviert durch Modelle der theoretischen Physik. Als Folge daraus widmen sich große, existierende Experimente vorwiegend diesem Massebereich, indem der Zusammenstoß eines möglichen Dunkle Materie Teilchens mit einem Atomkern untersucht wird.

Aufgrund von zahlreichen experimentellen Indizien und neuesten Modellrechnungen begeben sich aktuelle Experimente vermehrt auf die Suche nach leichten Dunkle Materie-Teilchen. Da diese Teilchen nicht mehr schwer genug wären, um ein messbares Signal bei dem Zusammenprall mit massiven Atomkernen zu erzeugen, wird nun die Wechselwirkung mit Elektronen untersucht. Da dabei Signale von nur wenigen Elektronen erwartet werden, müssen Detektoren mit sehr geringem Rauschen eingesetzt werden, so dass einzelne Elektronen unterschieden werden können.



STECKBRIEF DANAE-EXPERIMENT

- › noch in der Technologieentwicklung
- seit 2018, gegründet durch das HEPHY, gemeinsam mit dem Halbleiter-Labor der Max-Planck-Gesellschaft
- 5 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus 4 Instituten



MESSUNG EINZELNER ELEKTRONEN

Durch das mehrfache Auslesen und Mitteln des Signals können einzelne Elektronen unterschieden werden. Wird der Sensor schwach beleuchtet und das Signal 50 mal gemittelt (blaues Spektrum), können die einzelnen Elektronen nicht unterschieden werden. Nach 200 Mittelungen können die Anteile von ein, zwei oder drei Elektronen deutlich unterschieden werden.





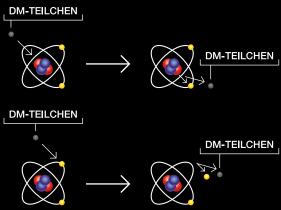
DIE TECHNOLOGIE

Dank einer speziell entwickelten Mehrfachauslese mit anschließender Mittelung können RNDR-DEPFET (depleted p-channel field effect transistor) Detektor-Verstärker-Strukturen, die bei dem DANAE-Experiment eingesetzt werden, das durchschnittliche Rauschen auf den Bruchteil eines Elektrons reduzieren. Dabei werden die Signalelektronen gesammelt und bis zu 1.000 Mal zwischen zwei Auslesekonten verschoben und gemessen. Die dadurch erhöhte Empfindlichkeit ermöglicht es, dass mit wenigen kg sensitiven Materials unbekannte Masseregionen für die Suche nach Dunkler Materie erschlossen werden.



DER DANAE PROTOTYP-DETEKTOR

Der empfindliche Siliziumsensor ist durch flexible Leitungen mit der Ausleseelektronik verbunden. Dadurch kann der Sensor in einer massiven Metallschirmung untergebracht werden, um von unerwünschten äußeren Einflüssen geschützt zu sein.



SIGNALE VON LEICHTER DUNKLER MATERIE

Schwere Dunkle Materie (ca. 2 GeV/c² bis 120 TeV/c²) wurde vorwiegend mittels der Wechselwirkung zwischen möglichen Dunkle Materie-Teilchen und Atomkernen gesucht (oben). Um zukünftig für leichte Dunkle Materie (ca. 100 keV/c² bis 2 GeV/c²) empfindlich zu sein, muss die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Dunkle Materie Teilchen untersucht werden (unten).

"MESSEN, WAS MESSBAR IST – MESSBAR MACHEN, WAS NICHT MESSBAR IST"

Galileo Galilei, italienischer Mathematiker, Philosoph und Physiker, 1564 – 1642



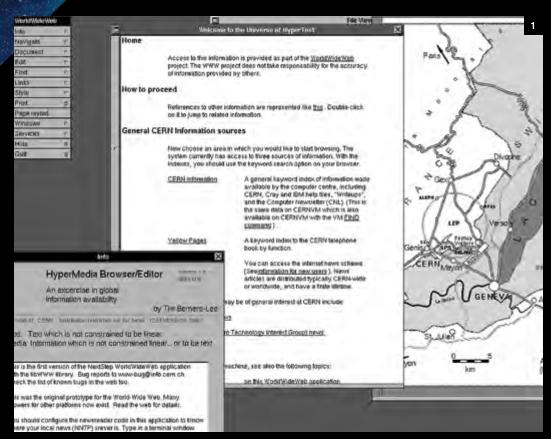
WAS HABE <u>ICH</u> DAVON?

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.





- 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 GEBURTSSTÄTTE DES WORLD WIDE WEB

Den Grundstein für das World Wide Web legte 1989 Sir Tim Berners-Lee, um den weltweiten Informationsaustausch zwischen Wissenschafterinnen 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-EMISSIONS-TOMOGRAPHIE (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.





PHYSIK TRIFFT MEDIZIN

DAS FORSCHUNGS- UND THERAPIE-ZENTRUM MEDAUSTRON

₩IEN WIENER NEUSTADT

MedAustron**™**

BESCHLEUNIGTE TEILCHEN GEGEN KREBS

Mit der Inbetriebnahme des Therapiezentrums MedAustron ist die Ionentherapie nun auch in Österreich verfügbar. Dabei werden lonen von einem Teilchenbeschleuniger auf bis zu zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und danach in einen der vier verfügbaren Bestrahlungsräume geführt. Dort werden sie entweder zur Behandlung bösartiger Tumorerkrankungen oder für Forschung verwendet.

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



STECKBRIEF MEDAUSTRON

TEILCHENARTEN

- > Protonen bis zu 800 MeV
- > Helium- & Kohlenstoffionen bis zu 400 MeV / Nukleon

ELEMENTE DER BESCHLEUNIGERANLAGE

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

FORSCHUNG

- in einem dedizierten Bestrahlungsraum, mit denselben Möglichkeiten wie in klinischen Räumen
- › regelmäßiger Zugang zum Teilchenstrahl an Wochenenden



A IONENQUELLE

Die lonenquellen generieren die für die Bestrahlung notwendigen Teilchen, Protonen oder Kohlenstoffionen

MedAustron





Die beiden Linearbeschleuniger sorgen mit Hilfe von elektromagnetischen Wechselfeldern für eine Vorbeschleuni-



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.



HOCHENERGIE-STRAHLFÜHRUNG

Nach der Beschleunigung werden die Teilchen aus dem Synchrotron extrahiert und in einen der vier Bestrahlungs-



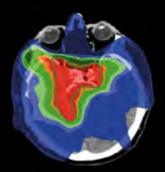


BESTRAHLUNGSRÄUME

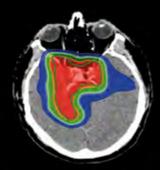
In den vier Bestrahlungsräumen (drei klinische und ein nichtklinischer) werden die Strahleigenschaften nochmals verifiziert, bevor der Strahl die Vakuumröhre verlässt und dann gezielt auf den Tumor oder ein Experiment gelenkt



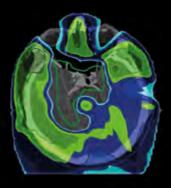




DOSISABGABE MIT PHOTONEN



DOSISABGABE MIT PROTONEN



DOSIS-DIFFERENZ

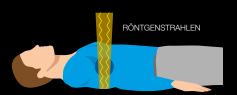
VERGLEICH DER DOSISVERTEILUNG

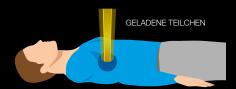
Bei Photonenstrahlen wird ein größerer Teil des gesunden Gewebes außerhalb des Tumors (rote Kontur) einer hohen, mittleren und niedrigen Strahlendosis ausgesetzt. Mit Partikelstrahlen, die mehr Strahlung im Tumor als im gesunden Gewebe deponieren, kann diese Exposition deutlich reduziert werden. Die Farben stellen die Dosis von hoch (57 Gy) bis niedrig (13 Gy) dar.

MEDIZINISCHE ANWENDUNG

Neben der Chemotherapie und chirurgischen Eingriffen stellt die Strahlentherapie eine wichtige Säule der Behandlung bösartiger Tumorerkrankungen dar. Die Bestrahlung kann entweder mit Photonen, Elektronen oder Ionen durchgeführt werden. Dank der speziellen Eigenschaften konnte sich die Bestrahlung mit Ionen für spezielle Tumorarten in den letzten Jahren etablieren.

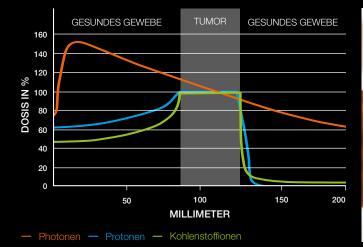
In der Ionentherapie kommt es zu einem steilen Anstieg der Energiedeposition am Ende der Teilchenbahn im sogenannten Bragg-Peak. Stimmt die Position des Bragg-Peaks mit der Position des Tumors überein, erreicht man eine selektive und effiziente Bestrahlung des Tumors, während gesundes Gewebe in seiner Umgebung geschont werden kann – ein klarer Vorteil der Ionentherapie.





RÖNTGENSTRAHLEN VS. GELADENE TEILCHEN

Röntgenstrahlen, die bei einer Strahlentherapie verwendet werden, durchdringen den Körper und schädigen gesundes Gewebe, sowohl beim Ein- als auch beim Austritt. Die Protonen und lonen geben fast ihre gesamte Energie an der Stelle ab, an der sie im Tumor stoppen, und schonen so gesundes Gewebe.



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.



BEHANDLUNG IM BESTRAHLUNGSRAUM

Patientenpositionierung im Bestrahlungsraum des MedAustron mittels Laser und Fixierung des Kopfes mit einer speziell angepassten, thermoplastischen Netzmaske.

FORSCHUNG

Die Verfügbarkeit eines dedizierten Bestrahlungsraums für Forschung am MedAustron eröffnet Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen vom Institut für Hochenergiephysik hervorragende Möglichkeiten, ihre Expertise aus der Teilchenphysik in den medizinischen Bereich einzubringen und neuartige Detektoren für die Teilchenphysik ausgiebig zu testen. In enger Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen der TU Wien wird mit Methoden aus der Grundlagenforschung an Themen gearbeitet, die die Ionentherapie verbessern und den Therapieerfolg steigern sollen. Die Forschungsprojekte erstrecken sich vom Einsatz moderner Detektoren in der Mikrodosimetrie und in der Beschleunigerdiagnostik, bis hin zur Verbesserung der Bestrahlungsplanung mittels Ionentomografie.

BESCHLEUNIGERDIAGNOSTIK

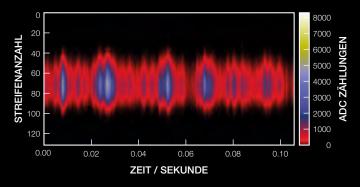
Der Teilchenstrahl innerhalb des Beschleunigers muss regelmäßig vermessen werden, um eine sichere Patiententherapie zu gewährleisten. Dafür werden verschiedene Detektorsysteme verwendet, die durch ihren Einsatz in hochintensiven Teilchenstrahlen mit der Zeit an Effizienz verlieren und ersetzt werden müssen. Das HEPHY ist an der Entwicklung eines neuen strahlungsharten Detektorsystems zur Messung von Teilchenstrahlprofilen und Positionen in einem breiten Intensitätsbereich beteiligt.

IONENTOMOGRAFIE

Vor jeder Ionentherapie muss eine Bestrahlungsplanung, in der die Zusammensetzung des Gewebes am Weg zum Tumor bestimmt wird, erfolgen. Derzeit basiert diese Planung in der Ionentherapie auf herkömmlicher Computertomografie mittels Röntgenstrahlen und verursacht Unsicherheiten in der Vorhersage der Position des Bragg-Peaks für Ionen, da diese fundamental anderen Wechselwirkungsprozessen unterliegen als Photonen. Führt man eine Tomografie mit Ionen durch, wird dieselbe Teilchenspezies für die Bildgebung verwendet wie für die Therapie. Dies erlaubt eine exaktere Therapieplanung und somit eine Steigerung der Genauigkeit der Bestrahlung und trägt letztendlich zur Verbesserung des Therapieergebnisses bei.

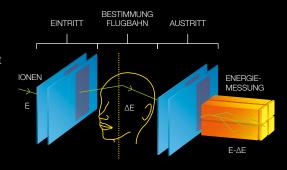
MIKRODOSIMETRIE

Das Ziel in der Strahlentherapie ist es, Tumorzellen mit einer hohen Dosis ionisierender Strahlung (Energieverlust in Materie) abzutöten. Derzeit wird die applizierte Strahlendosis als homogen verteilt über das Zielvolumen angenommen. Diese Annahme ist für die Therapie mittels Photonen ausreichend, für Ionen allerdings nicht mehr. Zum einen vernachlässigt das die stark lokalisierte Energiedeposition, zum anderen die stochastische Natur des Energieverlusts in Materie. Die gleiche makroskopische Dosis kann mit unterschiedlichen Strahlungsqualitäten erreicht werden. Gemittelte (makroskopische) Dosisgrößen wie J / kg können diesem Umstand nicht Rechnung tragen und sollten mit mikroskopischen Größen in keV / µm ersetzt werden.



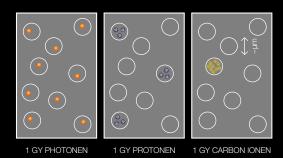
DETEKTORTECHNIK AUS GRUNDLAGENFORSCHUNG

Genaue Vermessung des Teilchenstrahls am MedAustron mittels moderner Detektortechnologie entwickelt am HEPHY. Gut sichtbar sind Intensitätsvariationen innerhalb des extrahierten Strahls. Ein derartiges Detektorsystem soll in Zukunft die derzeitige Strahldiagnostik bei MedAustron ersetzen.



BILDER DURCH TEILCHEN

lonen mit einer definierten Energie (E) durchqueren ein Objekt und verlieren dort einen Teil ihrer Energie (Δ E). In einem speziellen Detektor werden diese gestoppt und ihre Restenergie (E- Δ E) gemessen. Daraus kann ein 3D Bild der Gewebeeigenschaften des Objekts berechnet werden.

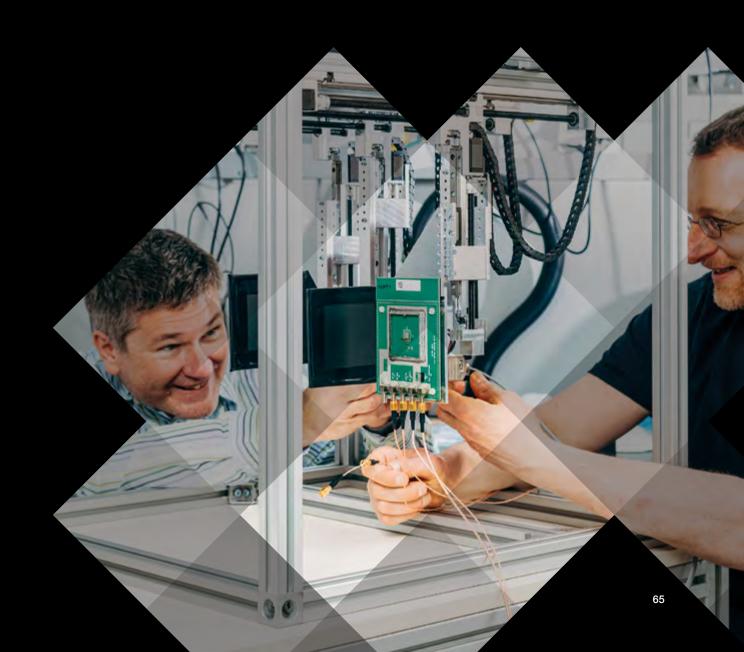


MIKROSKOPISCHE DOSIS

Die geplante Dosis von 1 Gy ist bei Photonen homogen über viele Zellen verteilt. Bei Ionen kann dies bereits mit wenigen Interaktionen in einigen wenigen Zellen erreicht werden, während eine Mehrheit der Zellen verschont bliebe. Dieser Umstand wird in der Mikrodosimetrie mittels kleiner und sehr dünner (einige µm) Detektoren untersucht.

"DAS SCHÖNSTE, WAS WIR ERLEBEN KÖNNEN, IST DAS GEHEIMNISVOLLE."

Albert Einstein, Physiker, 1879-1955





PHYSIK JENSEITS DES STANDARDMODELLS

Es ist den Forscherinnen und Forschern gelungen, das Standardmodell zu vervollständigen, allerdings wissen sie, dass es nicht der
Weisheit letzter Schluss sein kann. Daher wollen Teilchenphysikerinnen und Teilchenphysiker das Standardmodell erweitern oder
durch eine neue, umfassendere Theorie ersetzen. Neue Physik
jenseits des Standardmodells ist daher eine Notwendigkeit. Die experimentelle Suche danach, sowie das Ausloten der theoretischen
Möglichkeiten dazu, sind daher zentrale Aktivitäten des Instituts für
Hochenergiephysik.

1)/S(0)] $\frac{dR}{dE_R} = N_T \frac{90}{M_{\pi}} \int d^3 \vec{v} \, \vec{v} \, \vec{J}(\vec{v}, \vec{v}_e(t)) \frac{d6}{dE_R}$ Local dark

muHer density





HEPHY - INSTITUT FÜR HOCHENERGIEPHYSIK DER ÖSTERREICHISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

1050 Wien, Nikolsdorfer Gasse 18 1010 Wien, Georg-Coch-Platz 2

Tel: +43 (1) 51 581-2800

Mail: hephy-outreach@oeaw.ac.at

Web: www.hephy.at

ZUSÄTZLICHE INFORMATIONEN:

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



FÜR DEN INHALT VERANTWORTLICH:

HEPHY - Institut für Hochenergiephysik: Brigitte De Monte, Thomas Bergauer, Marko Dragicevic, Helmut Eberl, Gianluca Inguglia, Holger Kluck, Valentyna Mokina, Josef Pradler, Florian Reindl,

KOOPERATIONSPARTNER:

Franz Kerschbaum / Universität Wien – Institut für Astrophysik, Albert Hirtl / Technische Universität Wien

GESTALTUNG, ILLUSTRATIONEN, INFOGRAFIKEN:

grafische kooperative: Thomas Reibnegger, Christian Deschka

BILDQUELLEN:

Shutterstock; Shutterstock / vchal; Shutterstock / Lio putra; ÖAW / Klaus Pichler; ÖAW / Elia Zilberberg; ÖAW / Daniel Hinterramskogler; Gregor Schweinester; Markus Tordik; CERN; CERN / Maximilien Brice; CERN / Maximilien Brice / Claudia Marcelloni; CERN / Robert Hradil; CERN / Samuel Joseph Hertzog; CMS Collaboration; HEPHY; CRESST Collaboration; Belle-II Collaboration; KEK; Max Planck Institut für Physik / Astrid Eckert; Max Planck Institut für Physik / Karoline Schäffner; 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; CfA / Havard; Phillips / Frank van Beek; Franz Baldauf; Thomas Kästenbauer; Johann Ployer; MedAustron; TU Wien; Ruhr-Universität Bochum; NEXEON; Markus Tordik; Florian Ritter; MPP; MPA Garching; Kästenbauer / Ettl; Thomas Bergauer; Studio Baldauf; Albert Hirtl; Thomas Reibnegger; Klaus Pichler; R. Hurt / Caltech-IPAC; The Virgo collaboration; Caltech / MIT / LIGO Lab; KAGRA; Observatory / ICRR / The University of Tokyo; Marco Kraan / Nikhef; Alexander Wez; DMAPS; Andrew Richard Hara; Daniel Dominguez; Monika Majer / ProStudio22.ch; Michele Mancuso / MPI; Nicole Schermer / TUM; Chloé Goupy / CEA; Raimond Spekking / CC BY-SA 4.0 (via Wikimedia Commons); Alexander Wez; L. Giaffoni / U. di Sabatini / R. Stadler; cryoconcept; Mukund Bharadwaj; Valentyna Mokina; Shota Takahashi; ProStudio22.ch / Robert Hradil / Monika Majer; NASA / ESA / CSA / STScl / Adam G. Riess (JHU, STScl)

DRUCK:

gugler, Melk







