



NETZWERK
TEILCHENWELT



TEILCHENPHYSIK

FORSCHUNG UND ANWENDUNGEN

Dieses Dokument enthält Informationen und Anregungen rund um aktuelle Forschungsthemen, Methoden und Anwendungen der Teilchenphysik.

IMPRESSUM Herausgeber: Michael Kobel, Thomas Trefzger **Autoren:** Michael Kobel (verantwortlich), Manuela Kuhar, Philipp Lindenau **Redaktion:** Uta Bilow, Caroline Förster **Layout und Grafiken:** büro quer, www.buero-quer.de, **Projektleitung:** Michael Kobel, Uta Bilow | Netzwerk Teilchenwelt | TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik | www.teilchenwelt.de, mail@teilchenwelt.de, Thomas Trefzger | Julius-Maximilians-Universität Würzburg | Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik **Redaktionsschluss:** Januar 2017 **Lizenz und Nutzung:** Creative Commons 2.0-by-nc-nd | Vervielfältigung und Weiterverbreitung des Inhalts ist bei Nennung der Quelle für Lehrzwecke ohne Rückfragen gestattet, sofern keine Veränderungen vorgenommen werden. Kommerzielle Nutzung, z.B. zu werblichen Zwecken oder in Lehrbüchern, ist ohne Rücksprache nicht gestattet.. Es gilt das Impressum unter www.teilchenwelt.de/service/impressum.

PROJEKITLEITUNG

TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

PARTNER



KOOPERATION



SCHIRMHERRSCHAFT



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



TEILCHENPHYSIK

FORSCHUNG UND ANWENDUNGEN

INHALT

Hinweise und methodische Anregungen	11-12
CERN und LHC	
• Der Teilchenbeschleuniger LHC	13
• Sicherheit am CERN	14
Teilchenphysik und Kosmologie	
• Die Geschichte des Universums	15
• Dunkle Materie	16
• Neutrinos	17
Anti-Materie	18
Das Higgs-Teilchen	19-20
Grundlagenforschung: Sinn und Nutzen	21
Anwendungen der Teilchenphysik	22
Methoden der Teilchenphysik	
• Teil 1: Teilchenkollisionen	23
• Teil 2: Die Suche nach neuen Teilchen	24



FORSCHUNG UND ANWENDUNGEN

HINWEISE UND METHODISCHE ANREGUNGEN

Kurzbeschreibung

Dieses Materialpaket bietet einen Überblick über aktuelle Themen und Methoden der teilchenphysikalischen Forschung. Jede der **zwölf Themenseiten** enthält einen **Informationstext**, eine Grafik, weiterführende **Diskussions- und Rechercheanregungen** sowie dazu **passende Internetlinks**. Zum Material gehört außerdem eine Präsentation mit passenden Grafiken und weiterführenden Informationen.



Präsentation: <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/teilchenphysik-forschung-und-anwendungen/>

Die Materialien eignen sich insbesondere zur Vor- und Nachbereitung von Masterclasses, können aber auch unabhängig davon verwendet werden. Beispielsweise können die Themenseiten „CERN und LHC“ und „Kosmologie“ als Einstieg bzw. zur Motivation einer Unterrichtseinheit zur Astroteilchen- oder Teilchenphysik dienen. Die Informationsblätter können auch die Grundlage für Referate sein. Beispiele für geeignete Themen sind:

- Das Urknallmodell
- Beobachtungen, welche das Urknallmodell unterstützen
- Kosmische Hintergrundstrahlung: Entdeckung, Messungen, Folgerungen
- Dunkle Materie: Beobachtungen, die auf ihre Existenz hinweisen
- Dunkle Materie: Kandidaten und Experimente
- Anwendungen der Teilchenphysik
- Anti-Materie: Fakt und Fiktion

Vorkenntnisse

- ▶ Zum Verständnis der meisten Themenseiten sollten grundlegende Begriffe aus der Kern- und Teilchenphysik bekannt sein: Atomkern, Protonen, Neutronen, Quarks, Elektronen, Photonen, elektrische Ladung, Elektronenvolt, Masse¹.
- ▶ Die meisten Themenseiten bauen inhaltlich nicht aufeinander auf. Ausnahmen sind die Themenseiten über Forschungsmethoden: In diesem Fall sollte Teil 1 vor Teil 2 behandelt werden, und sie sind am besten verständlich, wenn die Inhalte von den Infoblättern „Der Teilchenbeschleuniger LHC“ und „Das Higgs-Teilchen“ bekannt sind.

Anregungen zu einzelnen Themen

► CERN und LHC:

- Die unten zuerst angegebene Internetseite wurde von einem spanischen Lehrer in Zusammenarbeit mit dem CERN erstellt. Sie bietet eine sehr gut strukturierte Einführung in die Physik und Technik des LHC. Rechenaufgaben mit vorgerechneten Schritten bieten Anregungen für Arbeitsaufträge.
- Es gibt immer wieder Medienberichte, welche die Sicherheit des CERN oder des LHC in Frage stellen. Auf S. 14 finden Sie Hinweise, um die verwendeten Argumente zu diskutieren und zu entkräften.
- Das LHC-Spiel (Link siehe unten) bietet einen anschaulichen Einblick in die Funktionsweise des LHC.

► Kosmologie:

- In der Präsentation finden Sie eine Grafik, welche die Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute veranschaulicht.
- Das unten angegebene Video zeigt, wie sich das Universum entwickelt hätte, wenn eine bestimmte Elementarteilchensorte eine andere Masse hätte. Es kann beispielsweise zur Motivation des Themas Teilchenphysik dienen und vielerlei Diskussionen anstoßen. Das Video zeigt vier alternative Entwicklungswege des Universums:
 - Tatsächliche Entwicklung (0:00-1:24)
 - Entwicklung mit leichterem W-Teilchen (1:25-2:42): Die Sonne verbrennt, bevor höheres Leben entsteht.
 - Entwicklung mit leichterem Down-Quark (2:43-3:30): Alles besteht aus Neutronensternen.
 - Entwicklung mit leichterem Elektron (3:31-5:00): Exotisches Leben ist möglich.



CERN UND LHC

Gut strukturierte Einführung in die Physik und Technik des LHC: <http://lhc-closer.es> (auf englisch)

LHC-Spiel: <http://www.cernland.net> (› All the games › LHC game)

Video zur Funktionsweise des LHC: <http://www.youtube.com/watch?v=b6CqmHREE1I>

KOSMOLOGIE

Video „Was wäre, wenn...“: <http://www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn>

¹ In den vorliegenden Materialien steht der Begriff „Masse“ stets für die Ruhemasse eines Teilchens. Die einzige Ausnahme ist die Formel **E = mc²**. Hier steht das Kürzel „m“ für die relativistische Masse.



FORSCHUNG UND ANWENDUNGEN

HINWEISE UND METHODISCHE ANREGUNGEN

► Dunkle Materie:

- Unten finden Sie einen Link zu Unterrichtsmaterialien rund um Dunkle Materie. Ein populärwissenschaftlicher Artikel dient als Einführung ins Thema.
- Eine spezielle Software (Link siehe unten) bietet die Möglichkeit, die Rotationsgeschwindigkeiten von Sternen in der Galaxie NGC3198 zu berechnen und daraus die Materieverteilung in der Galaxie abzuschätzen. Anhand dieses Themas können Gravitationskraft, Zentripetalkraft und Dopplerverschiebung von Spektrallinien behandelt werden.

► Neutrinos:

- Der erste unten angegebene Link bietet eine gute Zusammenfassung der Neutrino-Physik und Ideen für Arbeitsaufträge. Unter dem zweiten Link finden Sie Aufgaben und Lösungen zu Sonnenneutrinos (Kernfusion, Wirkungsquerschnitt mit Materie etc.).

► Anti-Materie:

- Auf S. 18 ist eine Nebelkammeraufnahme eines Positrons abgebildet. Anhand der Aufnahme können Jugendliche nachvollziehen, wie Carl Anderson im Jahr 1932 die Existenz von Anti-Materie nachwies. Hinweise dazu finden Sie unter dem ersten unten angegebenen Link.
- Wenn die Jugendlichen den Film „Illuminati“ nach dem Roman „Angels and Demons“ von Dan Brown kennen, können Sie den physikalischen Inhalt des Films analysieren. Links zu einer relevanten Filmsequenz (auf englisch) und Erklärungen dazu finden Sie unten.

► Higgs-Teilchen:

- Spielen Sie mit einer Klasse die Wirkung des Higgs-Feldes und die Entstehung von Higgs-Teilchen nach. Wie das aussehen kann, ist auf S. 19 abgebildet.

► Forschungsmethoden:

- Bei Teilchenphysik-Masterclasses können Jugendliche selbst Daten vom CERN auswerten und die im Infotext beschriebenen Methoden aus der Teilchenphysik anwenden.
- Die im Text auf S. 24 angedeuteten Methoden können in den Kontext einer Unterrichtsreihe über Statistik in der Oberstufe passen (Standardabweichung, Hypothesentest). Ausführlichere Informationen zur Datenauswertung in der Teilchenphysik finden Sie in der Präsentation (s. S.11).



DUNKLE MATERIE

Einführung ins Thema und Unterrichtsmaterial:

<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/rotationskurve-einer-spiralgalaxie/1051349>

Software zur Untersuchung der Galaxie NGC 3198: http://www.mabo-physik.de/dunkle_materie.html

NEUTRINOS

Informationen und didaktische Hinweise zur Neutrino-Physik:

<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/astroteilchenphysik-entdeckung-und-entraetselung-der-neutrinoteilchen/1051362>

Aufgaben und Lösungen zu Sonnenneutrinos, Informationen zum Neutrino-Teleskop IceCube:

<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/neutrinos-in-aufgaben/1051534>

ANTI-MATERIE

Die Entdeckung des Positrons: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/vfHess.pdf> (Kapitel 7.2 und 8.7)

Filmsequenz von „Angels und Demons“ zum Thema Anti-Materie und Erklärungen zur Filmsequenz:

<http://www.weltderphysik.de/thema/physik-im-spielfilm/illuminati/filmszene-im-detail>

HIGGS-TEILCHEN

Artikel und Nachrichten rund um das Higgs-Teilchen: <http://www.weltderphysik.de/thema/higgs>

Animation zur Veranschaulichung des Higgs-Mechanismus: <http://www.youtube.com/watch?v=XGxvRtuTbY>

METHODEN

International Masterclasses: <http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/index.htm>

Weitere Unterrichtsmaterialien zur Teilchenidenifikation mit Detektoren: <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/weitere-unterrichtsmaterialien/>



DER TEILCHENBESCHLEUNIGER LHC

Das internationale Forschungszentrum CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) ist das weltweit größte Forschungsinstitut auf dem Gebiet der Teilchenphysik. Das Herzstück des CERN ist der Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider), der sich etwa 100 Meter unter der Erdoberfläche in einem Tunnel mit 27 Kilometern Umfang befindet. Im LHC kreisen Protonen oder Blei-Ionen mit sehr hohen Energien. Wenn die Teilchen aufeinanderprallen, kann eine Energie-dichte erreicht werden, wie sie kurz nach dem Urknall herrschte. Bei den Kollisionen entsteht eine Vielzahl neuer Teilchen, welche mithilfe von Detektoren nachgewiesen werden. So untersuchen Forscher aus aller Welt beispielsweise, wie Elementarteilchen ihre Masse erhalten oder woraus Dunkle Materie besteht.

Wie funktioniert der LHC?

Die Protonen bzw. Blei-Ionen werden zunächst mithilfe einer elektrischen Wechselspannung beschleunigt. Sie durchlaufen mehrere Vorbeschleuniger, bis ihre Energie ausreicht, um sie in den LHC zu leiten. Dieser bringt sie auf ihre Endenergie.

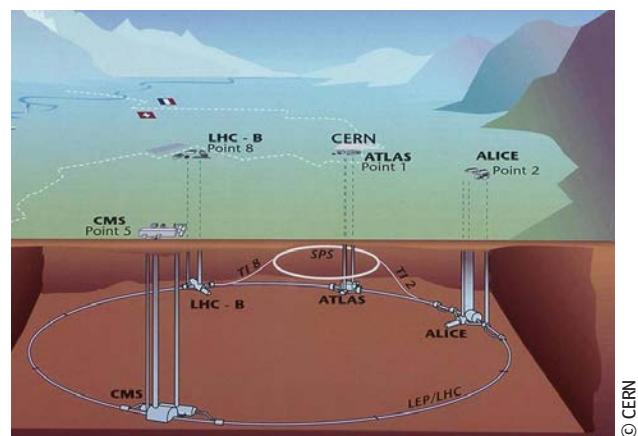
Im LHC kreisen die Protonen schließlich mit einer Energie von jeweils 6,5 Teraelektronenvolt (TeV). Das entspricht etwa der Bewegungsenergie einer fliegenden Mücke. Der LHC konzentriert diese Energie jedoch auf ein winziges Volumen; ein Proton erreicht mit dieser Energie 99,999997% der Lichtgeschwindigkeit.

Um die Protonen auf ihre ringförmige Bahn zu lenken, verwendet man starke Magnete. Die Spulen der Elektromagnete bestehen aus supraleitendem Material (Niob-Titan), durch das der Strom ohne Energieverlust fließt. Dafür werden die Magnete mithilfe von flüssigem Helium auf etwa -271°C gekühlt – das ist kälter als im Weltall!

Im LHC kreisen die Protonen in zwei getrennten Strahlrohren in gegenüberliegenden Richtungen. Sie werden in etwa 2800 Pakete (Bunches) mit jeweils rund 100 Milliarden Protonen aufgeteilt. Die Teilchenpakete werden mithilfe von speziellen Magnet-Anordnungen (Quadrupole) auf einen wenige Tausendstel Millimeter dünnen Strahl fokussiert.

Die Teilchenpakete kollidieren an vier Stellen des Beschleunigerrings, genau dort, wo sich die Detektoren befinden. Wenn sich zwei Teilchenpakete durchdringen, rechnet man mit jeweils etwa 30 Kollisionen – und das 20 Millionen mal pro Sekunde! Dabei entstehen aus der Energie der Protonen viele neue Teilchen, deren Eigenschaften in Detektoren vermessen werden.

Würde man alle Messdaten aufzeichnen, wären die Datens Mengen gigantisch. Daher werden uninteressante Daten nach bestimmten Kriterien aussortiert. Übrig bleiben immer noch rund 15 Millionen Gigabyte pro Jahr! Die Messdaten werden über das sogenannte LHC-Grid auf mehr als 200 000 Computer weltweit verteilt. Mehr als 10 000 Teilchenphysiker aus über 100 Ländern beteiligen sich an der Auswertung der Messungen.



► Das CERN liegt in der Nähe von Genf im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich. Bei Teilchenkollisionen im Beschleuniger LHC entstehen neue Teilchen, die mit vier Detektoren (ATLAS, ALICE, CMS und LHCb) nachgewiesen werden.

Warum ist der LHC so groß?

Um die energiereichen Protonen im LHC auf ihre Kreisbahn zu lenken, verwendet man die stärksten Beschleunigermagnete, die je gebaut wurden. Wollte man den LHC-Ring kleiner bauen, bräuchte man noch stärkere Magnete!

Es gibt noch einen ganz praktischen Grund für die Größe des LHC: Der Tunnel, in dem der LHC-Beschleuniger gebaut wurde, existierte bereits. Bis zum Ende des Jahres 2000 befand sich darin der LEP-Beschleuniger, in dem Elektronen und Positronen miteinander kollidierten. Somit war es günstig, den alten Tunnel wieder zu verwenden.

- Welche Forschungsziele werden mit dem LHC verfolgt?
- Warum liegt der LHC unterirdisch?
- Wie wird das CERN finanziert? Was hat der LHC gekostet?
- Warum muss im Strahlrohr des LHC ein sehr gutes Vakuum herrschen?



Broschüre mit Informationen rund um den LHC: <http://cdsweb.cern.ch/record/1214401>

Fragen und Antworten zum LHC: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/lhc-faq>

Kurze Geschichte des LHC: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/meilensteine>





SICHERHEIT AM CERN

Sind das CERN und der LHC sicher?

Immer wieder kursieren Behauptungen wie diejenige, dass am CERN durch Teilchenkollisionen kleine Schwarze Löcher oder „seltsame Materie“ entstehen könnten, die eine Gefahr für die Menschheit darstellen würden.

Allerdings geschehen Teilchenkollisionen wie diejenigen am CERN ständig überall im Universum – auch auf der Erde: Kosmische Teilchen erreichen aus dem Weltall die Erde und stoßen mit Atomkernen der Luft zusammen. Einige kosmische Teilchen besitzen eine vielfach höhere Energie als diejenige, die man mit Beschleunigern erreicht. Trotz der natürlichen Teilchenkollisionen existiert die Erde schon seit über vier Milliarden Jahren. Andere Himmelskörper wie Sterne und Galaxien existieren schon sehr viel länger. Wenn Teilchenkollisionen eine Katastrophe auslösen könnten, wäre diese schon längst eingetreten.

Manchmal wird behauptet, am CERN würde Kernenergie erforscht oder es würden gar Kernwaffen entwickelt. Die dort verwendeten Teilchenbeschleuniger und Messgeräte eignen sich dafür allerdings nicht. Das Missverständnis geht auf den Namen des CERN zurück: „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“ (d.h. Europäischer Rat für Kernforschung). Als das CERN 1954 gegründet wurde, war eines seiner Forschungsziele, das Innere von Atomkernen zu untersuchen – daher das Wort „Kernforschung“. Heute beschäftigt man sich am CERN hauptsächlich mit Elementarteilchen. Dabei handelt es sich um Grundlagenforschung, die auf reinen Erkenntnisgewinn und nur indirekt auf wirtschaftlichen Nutzen abzielt.

Manchmal ist in den Medien von einer „nie zuvor erreichten Energie“ oder vom „Urknall im Labor“ die Rede. Genauer gesagt wird für kurze Zeit eine sehr hohe Energiedichte erreicht (Energie pro Volumen), wenn die im LHC kreisenden Protonen kollidieren. In einem winzigen Volumen entstehen dabei für kurze Zeit Bedingungen, wie sie kurz nach dem Urknall herrschten – so versuchen Forscher, die damaligen Ereignisse nachzuvollziehen.



© CERN

- Das CERN liegt auf der Grenze zwischen der Schweiz und Frankreich. Der rote Kreis deutet an, wo der Beschleuniger-tunnel des LHC unterirdisch verläuft.

Das Gefährlichste, was der Protonenstrahl anrichten könnte, wäre, die Experimente und das Beschleunigerrohr zu beschädigen. Auch wenn dies geschehen würde, wären Menschen nicht in Gefahr, da der Tunnel etwa 100 Meter unter der Erdoberfläche liegt und während des Betriebs gesperrt ist. Um Schäden an den Experimenten vorzubeugen, kontrollieren Computer ständig die Flugbahn der Protonen. Schon bei kleinsten Abweichungen wird der Protonenstrahl automatisch innerhalb einer Tausendstelsekunde in einen Graphitblock geleitet und darin vollständig abgebremst.

Der Beschleunigerring, in dem sich der LHC befindet, wurde aus mehreren Gründen unterirdisch gebaut. Einerseits war es billiger und rechtlich unkomplizierter, den Tunnel unterirdisch zu bauen. Ein anderer Grund ist der Strahlenschutz. Viele Sicherheitsmaßnahmen stellen sicher, dass nur ein winziger Bruchteil der Strahlung, die beim Betrieb des LHC entsteht, an die Oberfläche gelangt. Beispielsweise wird die Luft gefiltert, die aus dem Beschleunertunnel gepumpt wird. So verursacht das CERN für die Anwohner nur eine zusätzliche Dosis von weniger als 10 Mikrosievert pro Jahr. Zum Vergleich: In der Schweiz beträgt die durchschnittliche Strahlendosis aus natürlichen und medizinischen Quellen etwa 4000 Mikrosievert pro Jahr.

-
- Wie viel Strom verbraucht das CERN? Wofür wird der größte Teil der elektrischen Energie benötigt?
 - Warum muss der LHC mit Helium gekühlt werden?
 - Wie lange dauerten die Planung und der Bau des LHC?



Sicherheit am CERN und am LHC: http://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/lhc/sicherheit_am_lhc

Fragen und Antworten zum LHC: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/lhc-faq>

Kurze Geschichte des LHC: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/meilensteine>

Science Slam: Schwarze Löcher im LHC? www.youtube.com/watch?v=M4frlnOLKdY



TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

DIE GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

Beobachtungen weisen darauf hin, dass sich unser Universum immer weiter ausdehnt und abkühlt. Diese Ausdehnung muss irgendwann einen Anfang gehabt haben; diesen stellt man sich als einen extrem dichten und heißen Zustand vor. Der Moment der Entstehung des Universums wird „Urkall“ genannt. Im Teilchenbeschleuniger LHC lassen sich Bedingungen erzeugen, wie sie kurz nach dem Urkall herrschten.

Wie entwickelte sich das Universum?

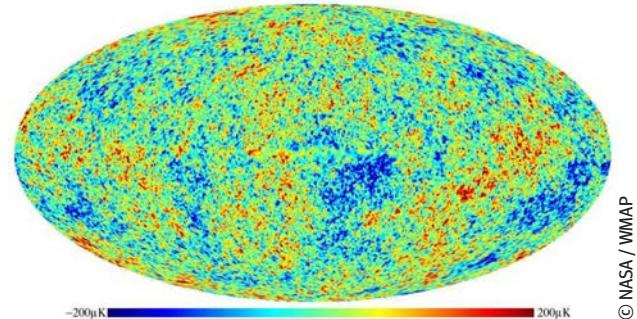
Viele Messungen deuten darauf hin, dass das Universum vor etwa 14 Milliarden Jahren in einem unvorstellbar dichten und heißen Zustand begann: In diesem „Urkall“ entstanden Raum und Zeit. Was in den ersten Momenten danach geschah, lässt sich mithilfe von Modellrechnungen rekonstruieren, denen das Standardmodell der Teilchenphysik zugrundeliegt.

Man geht davon aus, dass zu Anfang des Universums Materie- und Anti-Materieteilchen in gleichen Mengen entstanden. Diese konnten sich noch nicht zu Nukleonen oder Atomen zusammenschließen, da die Temperatur noch zu hoch war. Um bestimmte Beobachtungen zu erklären, nimmt man an, dass sich das junge Universum unmittelbar nach dem Urkall (10^{-35} s) für kurze Zeit rasant ausdehnte (inflationäre Expansion). Kurz danach (10^{10} s) hatten die elektromagnetische, starke und schwache Wechselwirkung ihre heutige Form angenommen.

Was dann geschah, lässt sich mithilfe von Experimenten und Beobachtungen nachvollziehen. Nach etwa einer Millionst Sekunde schlossen sich Quarks zu Protonen und Neutronen zusammen. Materie- und Anti-Materieteilchen hatten sich nach einer Sekunde größtenteils gegenseitig vernichtet. Übrig blieben Photonen (elektromagnetische Strahlung) – und der Rest an Materie, aus dem wir heute bestehen. Drei Minuten nach dem Urkall hatte sich das Universum genügend abgekühlt, damit leichte Atomkerne entstehen konnten. Atome konnten sich noch nicht bilden, weil sie von der energiereichen Strahlung sofort ionisiert wurden. Das heiße Plasma im frühen Universum war undurchsichtig, da Licht an den frei umherfliegenden Atomkernen und Elektronen gestreut wurde.

Erst nach etwa 380 000 Jahren war die Temperatur im Universum niedrig genug, damit Atomkerne dauerhaft Elektronen festhalten konnten: Stabile Atome entstanden. Erst dann konnte sich elektromagnetische Strahlung frei ausbreiten, und das Weltall wurde durchsichtig. Die damals freigewordene Strahlung erfüllt heute noch das Universum: Die „**kosmische Hintergrundstrahlung**“ wurde 1964 experimentell nachgewiesen – eines von vielen überzeugenden Argumenten dafür, dass das Urkallmodell stimmt.

Eine Milliarde Jahre nach dem Urkall bildeten sich erste Sterne und Galaxien. Unser Sonnensystem entstand nach etwa 9 Milliarden Jahren.



© NASA / WMAP

► Ein Abbild der Frühzeit des Universums: Diese Grafik wurde aus Messdaten der NASA-Raumsonde WMAP erstellt. Die Farben zeigen winzige Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, die 380 000 Jahre nach dem Urkall frei wurde. Die Temperaturunterschiede entsprechen Dichteschwankungen der Materie im frühen Universum. Daraus entwickelten sich mit der Zeit die Galaxienhaufen und Leerräume, die wir heute beobachten.

Wie erforscht man die Geschichte des Universums?

Astrophysiker vermessen weit entfernte Galaxien und Supernovae, um die Frühphasen des Kosmos zu erforschen. Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung ermöglichen es, in eine Zeit zurückzublicken, als es noch keine Sterne und Galaxien gab.

Mit Methoden der Teilchenphysik lassen sich sogar Materiezustände rekonstruieren, die kurz nach dem Urkall herrschten. Der Teilchenbeschleuniger LHC beschleunigt Protonen und Blei-Ionen. Wenn letztere kollidieren, entsteht in einem winzigen Volumen eine so hohe Energiedichte wie nur wenige Millionst Sekunden nach dem Urkall. Dabei kann für kurze Zeit ein sogenanntes Quark-Gluon-Plasma entstehen. Darin sind Quarks und Gluonen nicht zu Hadronen gebunden, sondern bewegen sich frei. Diesen Materiezustand untersucht man mithilfe von speziellen Detektoren wie insbesondere ALICE. Forscher gehen auch der Frage nach, warum wir überhaupt existieren: Eigentlich hätten sich Materie- und Anti-Materieteilchen nach dem Urkall restlos gegenseitig vernichtet müssen. Doch offensichtlich blieb genug Materie übrig, aus der wir heute bestehen. Also muss es einen grundsätzlichen Unterschied zwischen Materie und Anti-Materie geben. Welcher das ist, versuchen Forscher am CERN und anderen Instituten zu ergründen.

- Welche Eigenschaften hat die kosmische Hintergrundstrahlung? Was verraten Messungen der Hintergrundstrahlung über das frühe Universum?
- Wie hätte sich das Universum entwickelt, wenn ein Elementarteilchen (z.B. Elektron oder Down-Quark) leichter wäre?



Kosmische Hintergrundstrahlung: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmologie/die-kosmische-hintergrundstrahlung>
Video – Entwicklung des Universums mit verschiedenen Teilchenmassen: <http://www.tricklabor.com/de/portfolio/was-waere-wenn>
Die Geschichte des Universums: <http://abenteuer-universum.de/kosmos/urkall1.html>



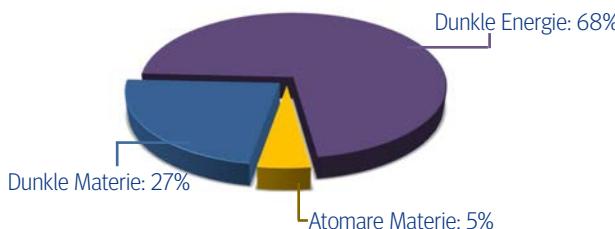
TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

DUNKLE MATERIE

Die Materie, aus der Sterne, Planeten und Lebewesen bestehen, macht nur einen kleinen Teil des Universums aus. Offenbar besteht ein weitaus größerer Teil des Universums aus Dunkler Materie und Dunkler Energie.

Woraus besteht das Universum?

Es mag unglaublich klingen: Der Stoff, aus dem wir selbst und unsere Umgebung bestehen, ist im Universum offenbar eher die Ausnahme als die Regel. Materie aus Atomen macht weniger als fünf Prozent der Gesamtenergie des Universums aus. Etwa 68 Prozent ist Dunkle Energie, eine unbekannte Energieform, welche die Ausdehnung des Universums vorantreibt. Die restlichen 27 Prozent bestehen aus Dunkler Materie.



Woher weiß man, dass es Dunkle Materie gibt?

Schon im Jahr 1933 beobachtete der Astronom Fritz Zwicky den Coma-Haufen, eine Ansammlung von mehr als 1000 Galaxien. Diese bewegten sich viel zu schnell, als dass die sichtbare Materie sie mit ihrer Gravitation zusammenhalten konnte; dazu war etwa zehnmal mehr Masse notwendig. Daraus schloss er, dass es deutlich mehr Materie im Universum geben muss, als man bis dahin annahm.

Beobachtungen von Spiralgalaxien bestätigen dies: Sterne rotieren zu schnell um deren Zentren. Gäbe es nur die uns bekannte atomare Materie, würden diese Galaxien auseinander fliegen. Planeten, Asteroiden, Staubwolken und andere nicht-leuchtende Himmelskörper sind dabei schon berücksichtigt. Selbst wenn man die Masse solcher Objekte sehr großzügig schätzt, wäre ihr Beitrag immer noch viel zu gering.

Viele unterschiedliche Messungen zeigen, dass es im Universum etwa fünfmal mehr Dunkle Materie als atomare Materie geben muss. Beispielsweise beobachtet man überall im Weltall großräumige netzartige Ansammlungen von Galaxien. Wenn es nur atomare Materie gäbe, wären diese Strukturen viel kleiner, da sie sich erst relativ spät nach dem Urknall gebildet hätten. Um die Strukturen zu erzeugen, die man heute beobachtet, muss die Gravitation von Dunkler Materie ihre Entstehung beschleunigt haben.

Woraus besteht Dunkle Materie?

Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen, dass Dunkle Materie aus Teilchen bestehen muss, die mit ihrer Umgebung keine Photonen austauschen, also elektrisch neutral sind. Dunkle Materie kann auch nicht der starken Wechselwirkung unterliegen, die zwischen Quarks und Nukleonen wirkt, da sich die Teilchen sonst zu Atomkernen zusammenschließen würden. Sie machen sich also nur durch ihre Gravitation und möglicherweise durch die schwache Wechselwirkung bemerkbar.

Diese Beschreibung trifft auf den ersten Blick auf **Neutrinos** zu. Doch diese Teilchen besitzen eine zu kleine Masse, um die vorher erwähnten Beobachtungen zu erklären, und machen nur 0,1–3 Prozent der Gesamtmasse des Universums aus.

Also suchen Forscher nach bisher unbekannten Teilchen, die deutlich massereicher als Neutrinos sein sollten und nur schwach wechselwirken. Solche Teilchen bezeichnet man als **WIMPs** (**Weakly Interacting Massive Particles**). Einige Theorien sagen die Existenz vom WIMPs voraus, jedoch haben Forscher sie bisher nicht experimentell beobachtet.

Wie suchen Forscher nach Dunkler Materie?

Teilchenphysiker versuchen mit vielen Methoden, der Dunklen Materie auf die Schliche zu kommen.

- ▶ Sehr empfindliche Detektoren wie CRESST in Italien sollen die seltenen Stöße von WIMPs mit einem Atomkern des Detektormediums nachweisen. Sie befinden sich tief unter der Erde, um andere kosmische Teilchen abzuschirmen.
- ▶ Das Spektrometer AMS an Bord der internationalen Raumstation ISS sucht im Weltall unter anderem nach energiereichen Photonen und Neutrinos. Diese könnten entstehen, wenn WIMPs paarweise zerstrahlen.
- ▶ Im Teilchenbeschleuniger LHC versuchen Forscher, WIMPs künstlich herzustellen: Bei Teilchenkollisionen wird eine so große Energiedichte erzeugt, wie sie kurz nach dem Urknall herrschte. Dabei könnten auch bisher unbekannte Teilchen entstehen.
- ▶ Experimente wie CAST und OSQAR am CERN oder auch ALPS am DESY in Hamburg suchen nach sogenannten **Axionen**. Wenn diese Teilchen existieren, könnten sie einen Teil der Dunklen Materie ausmachen.



- Wie messen Forscher die Geschwindigkeiten von Sternen in Galaxien?
- Untersuche die Geschwindigkeiten von Sternen in der Galaxie NGC3198. Wie muss die Materie in dieser Galaxie verteilt sein, um solche Bewegungen zu ermöglichen?
- Wie soll das Experiment CRESST Teilchen der Dunklen Materie nachweisen?



Übersichtsartikel in „Sterne und Weltraum“: http://www.wissenschaft-online.de/artikel/1038777&_wis=1

Software zur Untersuchung der Galaxie NGC3198: http://www.mabo-physik.de/dunkle_materie.html

CRESST und andere Experimente zu Dunkler Materie: <http://www.weltdphysik.de/gebiet/astro/dunkle-materie-und-dunkle-energie>



TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

NEUTRINOS

Unzählige Neutrinos erreichen uns ständig aus Sternen, Supernovae und Galaxien. Allerdings treten sie mit dem Rest des Universums sehr selten in Kontakt. Entsprechend schwierig ist es, Neutrinos experimentell nachzuweisen. Doch der Aufwand lohnt sich: Da Neutrinos fast immer ungehindert durch Materie hindurchfliegen, ermöglichen sie spannende Erkenntnisse über die Prozesse im Inneren von Sternen und Galaxien.

Was sind Neutrinos?

Neutrinos sind Elementarteilchen, die eine extrem geringe Masse besitzen – mehr als hunderttausendfach geringer als die des Elektrons. Sie treten nur über die schwache Wechselwirkung mit anderen Teilchen in Kontakt. Diese Wechselwirkung ermöglicht unter anderem Teilchen-Umwandlungen und die Kernfusion, die Energiequelle der Sonne.

Schwache Wechselwirkungen geschehen bei niedrigen Energien äußerst selten. Deswegen können Neutrinos ungestört durch Materie hindurchfliegen, sogar durch ganze Planeten und Sterne. Nur eines von etwa 1 000 000 000 Neutrinos aus der Sonne wechselwirkt überhaupt mit einem Teilchen der Erde. Das macht es enorm schwierig, Neutrinos experimentell nachzuweisen.

Wie kann man Neutrinos nachweisen?

Je größer der Detektor, desto besser – denn umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutrino mit einem Teilchen im Detektor wechselwirkt, so dass es nachgewiesen werden kann. Einige Neutrino-Detektoren verwenden das Wasser eines Sees oder auch das Eis der Antarktis als Detektormaterial (siehe Abbildung). Darin werden empfindliche Lichtsensoren versenkt. Wenn ein Neutrino mit einem Atomkern kollidiert, wandelt es sich oft in ein energiereiches elektrisch geladenes Teilchen um, zum Beispiel in ein Myon. Dieses bewegt sich schneller als mit der Lichtgeschwindigkeit in Eis. Dadurch entsteht in einer Art „Überlichtknall“ ein bläuliches Leuchten – das sogenannte Cherenkov-Licht. Aus diesen Signalen lässt sich die Energie des ursprünglichen Neutrinos bestimmen sowie die Richtung, aus der es kam.

Die nächstgelegene kosmische Neutrinoquelle ist die Sonne. Diese Teilchen bieten die einzigartige Möglichkeit, die Kernfusionsprozesse in ihrem Inneren zu studieren. Denn die Neutrinos, die dabei entstehen, verlassen die Sonne auf direktem Weg – im Gegensatz zu Photonen, welche erst einige Millionen Jahre nach ihrer Erzeugung aus der Sonne entweichen.

Bei der Untersuchung von Sonnenneutrinos fiel Forschern auf, dass viel weniger Neutrinos die Erde erreichen als erwartet. Später stellte sich der Grund dafür heraus. Es gibt drei Neutrinoarten: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos. Bei der Kernfusion in der Sonne entstehen nur Elektron-Neutrinos. Auf dem Weg zur Erde wandeln sich diese zum Teil in die anderen Neutrinoarten um – das wiesen Forscher erst 2002 mit dem Detektor SNO in Kanada nach.

Solche Umwandlungen (Oszillationen) sind nur möglich, wenn Neutrinos eine Masse besitzen. Wie diese zustande kommt und warum sie so klein ist, wird derzeit erforscht.

Da Neutrinos weitgehend unbeeinflusst durch Magnet- und Gravitationsfelder sowie durch Materie fliegen, lässt sich die Richtung ihrer Herkunft genauer bestimmen als diejenige von anderen kosmischen Teilchen wie beispielsweise Protonen. Durch den Nachweis von Neutrinoquellen im fernen Weltall könnten Forscher also auch die Ursprungsorte von anderen kosmischen Teilchen aufspüren. Damit ließe sich auch aufklären, wie diese ihre teils extrem hohen Energien erreichen. Forscher nutzen Neutrino-Teleskope außerdem, um nach der geheimnisvollen Dunklen Materie zu suchen. Wenn Teilchen der Dunklen Materie paarweise zerstrahlen, sollten energiereiche Photonen oder Neutrinos entstehen. Diese sollten die Erde aus Richtungen erreichen, wo sich Dunkle Materie zusammenballt.

Warum sind Neutrinos interessant für die Forschung?

- Aus dem Weltall erreichen uns ständig kosmische Teilchen wie beispielsweise Protonen. Von welchen Himmelskörpern stammen diese wahrscheinlich?
- Welchen Fragen gehen Forscher mit dem neuen Neutrino-detektor SNO+ in Kanada nach?

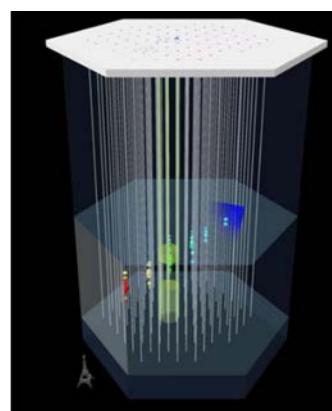
Kosmische Teilchen, Neutrino-Teleskop IceCube: <http://www.spektrum.de/alias/neutrinoastronomie/icecube-neutrinojagd-am-suedpol/893101>

Neutrino-Experimente:

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/neutrinos>
<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/kosmische-neutrinos>

Der Neutrino-Detektor SNO+:

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/neutrinos/experimente/sno/sno-teil-2>



© IceCube Neutrino Observatory

- Mit dem IceCube-Experiment in der Antarktis suchen Forscher nach Neutrinoquellen im Weltall. Der Detektor ist mehr als einen Kubik-kilometer groß und befindet sich tief unter der antarktischen Eisschicht. Zum Vergleich ist unten links der Eiffelturm eingezeichnet.



ANTI-MATERIE

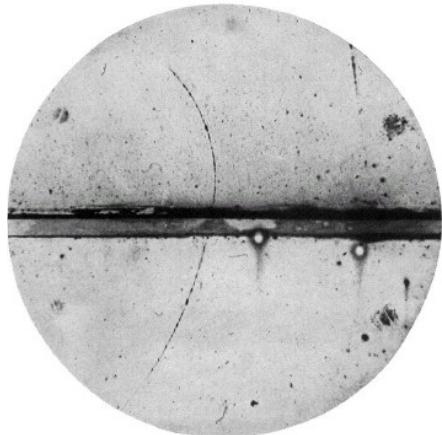
Was ist Anti-Materie?

Anti-Materie kann man sich als „Spiegelbild“ der normalen Materie vorstellen. Zur jedem Materienteilchen gehört ein Anti-Teilchen mit derselben Masse, derselben mittleren Lebensdauer und demselben Spin, das jedoch entgegengesetzte Ladungen besitzt. Beispielsweise ist das Elektron elektrisch negativ geladen, während sein Anti-Teilchen, das sogenannte Positron, eine positive elektrische Ladung besitzt. Ebenso gibt es Anti-Quarks und Anti-Neutrinos.

Gibt es Anti-Materie in der Natur?

Anti-Materieteilchen kommen durchaus in der Natur vor, Anti-Atome oder größere Objekte aus Anti-Materie dagegen nicht. Positronen entstehen beispielsweise, wenn kosmische Strahlung auf die Erdatmosphäre trifft, oder wenn sich bestimmte radioaktive Atomkerne umwandeln. Man spricht von der „Beta-Plus-Umwandlung“: Hierbei verwandelt sich ein Proton in ein Neutron, wobei ein Positron und ein Neutrino neu entstehen.

Wenn ein Anti-Teilchen seinem entsprechenden Materienteilchen begegnet, „annihilieren“ sie – das bedeutet, die vorhandene Energie wandelt sich in Botenteilchen um. Wenn sich beispielsweise Positronen und Elektronen begegnen, annihilieren sie meistens in zwei Photonen. Dies wird beispielsweise bei einer medizinischen Diagnosemethode ausgenutzt, der Positronen-Emissions-Tomographie (PET).



Aus: Physical Review, Vol.43, p.491

- Die Existenz von Anti-Materie wurde 1928 von Paul Dirac theoretisch vorhergesagt. Schon 1932 entdeckte Carl D. Anderson das Positron – das Anti-Teilchen des Elektrons. Das Bild zeigt die Spur eines Positrons in einer Nebelkammer.

- Was genau ist auf der Abbildung zu sehen? Wie konnte Carl D. Anderson darauf kommen, dass das beobachtete Teilchen ein Positron war?
- Was wird am LHCb-Experiment am CERN erforscht?
- Wie funktioniert die Positronen-Emissions-Tomographie? Was bekommen Patienten dabei verabreicht und warum?



Artikel und Nachrichten rund um Anti-Materie: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/antimaterie/>

Die Entdeckung des Positrons: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/vfHess.pdf> (Kapitel 7.2)

Das Experiment LHCb: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/lhc-experimente/lhc>

Positronen-Emissions-Tomographie: <http://www.krebsinformationsdienst.de/untersuchung/pet-technik.php>

Anti-Materie im Spielfilm „Illuminati“: <http://www.weltderphysik.de/thema/physik-im-spielfilm/illuminati>



DAS HIGGS-TEILCHEN

WIE ERHALTEN TEILCHEN IHRE MASSE? EINE ANALOGIE

Elementarteilchen dürften eigentlich keine Masse besitzen – das besagt zumindest das Standardmodell der Teilchenphysik. Wie sie trotzdem Masse erhalten, kann das sogenannte Brout-Englert-Higgs-Feld erklären, das das ganze Universum durchzieht. Hindurchfliegende Elementarteilchen wechselwirken mit dem BEH-Feld und erhalten so Masse. Selten können dabei sogenannte Higgs-Teilchen entstehen. Wie man sich das vorstellen kann, veranschaulicht die folgende Analogie.



© G. Boixader / CERN

- 1. Man kann sich das Brout-Englert-Higgs-Feld wie eine große Partygesellschaft vorstellen.



- 2. Nun kommt ein berühmter Gast auf die Party und möchte den Raum durchqueren. Wären die Partygäste nicht da, so könnte er sich ungehindert bewegen.

In dieser Analogie entspricht der berühmte Gast einem Elementarteilchen, das sich durch den Raum bewegt. Wäre das BEH-Feld nicht da, könnte es sich ungehindert mit Lichtgeschwindigkeit bewegen – es hätte keine Masse.



- 3. Die Partygäste sammeln sich um den berühmten Gast, so dass er nur noch langsam vorwärts kommt. Analog dazu wechselwirken die meisten Sorten von Elementarteilchen mit dem BEH-Feld und bewegen sich deswegen langsamer: Sie erhalten Masse. Wäre der Gast nicht berühmt, so könnte er sich ungestört durch die Menschenmenge bewegen. Analog dazu wechselwirken manche Elementarteilchen (wie das Photon) nicht mit dem BEH-Feld, erhalten also keine Masse und bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit.



- 4. Das Higgs-Teilchen kann kurzfristig erzeugt werden, wenn man dem BEH-Feld viel Energie zuführt. Das ist so, als ob jemand ein skandalöses Gerücht in den Partyraum ruft...



- 5. ...Dann stecken einige Gäste die Köpfe zusammen, um das Gerücht zu diskutieren. Analog dazu ist das Higgs-Teilchen eine kurzfristige „Anregung“ oder Schwingung des BEH-Feldes. Das Higgs-Teilchen sollte sich als elektrisch neutrales, massereiches Elementarteilchen nachweisen lassen, das sich schnell in leichtere Teilchen umwandelt. Im Jahr 2012 wurde am CERN ein Elementarteilchen entdeckt, das dieser Beschreibung entspricht.

- Wie erzeugen Forscher am CERN das Higgs-Teilchen und andere massereiche Elementarteilchen?



Das Wichtigste über das Higgs-Teilchen – Infos, Bilder, Links: <http://www.weltmaschine.de/physik/higgs>

Mehr über das Higgs-Teilchen: <http://www.weltderphysik.de/thema/higgs>

International Masterclasses: http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_higgs.htm



DAS HIGGS-TEILCHEN

Wie erhalten Teilchen ihre Masse?

Fast 50 Jahren suchten Forscher nach dem Higgs-Teilchen – dem letzten fehlenden Baustein im Standardmodell der Teilchenphysik. Im Juli 2012 wurde am CERN ein bis dahin unbekanntes Elementarteilchen nachgewiesen, bei dem es sich um ein Higgs-Teilchen handelt. Es besitzt - nach jetzigem Kenntnisstand - die vom Standardmodell vorhergesagten Eigenschaften und ist damit ein weiteres überzeugendes Argument für dessen Richtigkeit. Außerdem ist es der Beleg für eine Erklärung, wie Elementarteilchen ihre Masse erhalten.

Das theoretische Gebäude des Standardmodells funktioniert nämlich nur dann, wenn Elementarteilchen beim Urknall masselos entstanden sind. Doch das blieb offensichtlich nicht so. Masselose Teilchen hätten keine festen Strukturen bilden können, weil sie stets mit Lichtgeschwindigkeit fliegen.

Wie erhalten Teilchen also nachträglich ihre Masse?

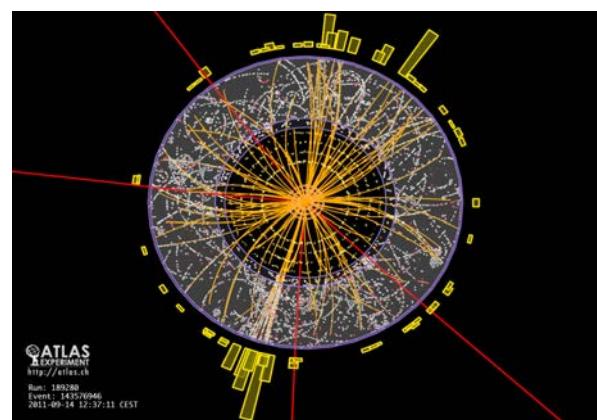
Eine mögliche Erklärung haben Peter Higgs und andere Physiker 1964 vorgeschlagen: Ihre Theorie besagt, dass kurz nach dem Urknall durch die Abkühlung im ganzen Universum das sogenannte Brout-Englert-Higgs-Feld kondensierte. Manche Teilchen, wie beispielsweise Photonen, fliegen ungehindert durch das Feld und bewegen sich daher mit Lichtgeschwindigkeit; andere Teilchen wechselwirken mit dem BEH-Feld und bewegen sich langsamer – sie verhalten sich, als hätten sie Masse.¹

Warum verschiedene Teilchensorten allerdings jeweils eine bestimmte Masse besitzen und nicht irgendeine andere, erklärt das Modell nicht.

Wir spüren das BEH-Feld nicht, weil es strukturlos und homogen ist und überall im Universum existiert – so ähnlich, wie man Luft nicht bemerkt, wenn es windstill ist. Erst wenn man in der Luft Druckwellen erzeugt, spürt man diese als Geräusch oder Wind.

Analog dazu sollte das BEH-Feld „schwingen“, wenn energiereiche Teilchen hindurchfliegen. Diese Schwingungen heißen Higgs-Teilchen; sie sollten sich als kurzlebige Elementarteilchen erzeugen und nachweisen lassen. Der Teilchenbeschleuniger LHC wurde insbesondere zu diesem Zweck gebaut.

Das Teilchen, das 2012 am CERN nachgewiesen wurde, hat die Eigenschaften, die das Standardmodell für das Higgs-Teilchen mit einer Masse von $126 \text{ GeV}/c^2$ vorhersagt: Es ist elektrisch neutral, wandelt sich in Paare von W-Teilchen, von Z-Teilchen oder Photonen um, und die Messergebnisse sind mit einem Spin von 0 verträglich. Doch stimmen die Umwandlungswahrscheinlichkeiten mit den Vorhersagen des Standardmodells überein? Und gibt es vielleicht nicht nur eine Art von Higgs-Teilchen, sondern gleich mehrere? Um solche Fragen zu klären, werden Forscher noch einige Jahre brauchen. Es bleibt also spannend!



© CERN

- ▶ Ein ATLAS-Ereignis, bei dem ein Higgs-Boson-Kandidat sich zunächst in zwei Z-Teilchen und dann in vier Myonen umwandelt. Das Ereignis ist in der Detektorebene transversal zur LHC-Strahlachse dargestellt.



- Welche vier Experimente gibt es am LHC? Welche Forschungsschwerpunkte haben sie?
- Kommt das Higgs-Teilchen als Kandidat für Dunkle Materie in Frage? Warum oder warum nicht?



Das Wichtigste über das Higgs-Teilchen – Infos, Bilder, Links: <http://www.weltmaschine.de/physik/higgs>

Mehr über das Higgs-Teilchen: <http://www.weltderphysik.de/thema/higgs>

Umwandlungen des Higgs-Teilchens: http://vmsstreamer1.fnal.gov/VMS/111208_HowHiggs/HiggsInteractive.htm

Experimente am LHC: <https://www.weltmaschine.de/experimente>

¹ Mehrere Forscher hatten gleichzeitig die Idee für diese Erklärung: Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs und Kibble. Daher gibt es verschiedene Bezeichnungen für das Feld, z.B. Brout-Englert-Higgs-Feld. Peter Higgs brachte aber die Idee in Umlauf, dass zu dem Feld auch ein neues Elementarteilchen gehören müsste – deshalb trägt das Higgs-Teilchen seinen Namen.



GRUNDLAGENFORSCHUNG: SINN UND NUTZEN

Der Teilchenbeschleuniger LHC dient zur Grundlagenforschung. Sind die Investitionen für seinen Bau gerechtfertigt?

Der Bau des LHC hat 14 Jahre gedauert und hat mehr als drei Milliarden Euro gekostet. Ein etwas kleinerer Betrag kam noch für die vier Experimente ATLAS, ALICE, CMS und LHCb hinzu. Die Investitionen in den LHC wurden größtenteils aus dem jährlichen Budget des CERN bezahlt sowie mithilfe von zusätzlichen Zuwendungen von Japan, den USA und anderen Staaten. Die Kosten der Detektoren trugen mehr als 400 Forschungsinstitute aus über 50 Ländern.

Derzeit tragen 22 Mitgliedsstaaten zum CERN-Budget bei, das jährlich etwa eine Milliarde Euro beträgt. Der größte Beitragszahler ist Deutschland.

Der Nutzen des LHC ist dagegen nicht in Zahlen zu messen. Mit dem LHC und anderen Teilchenbeschleunigern wird reine Grundlagenforschung betrieben. Dabei ist kein direkter wirtschaftlicher Nutzen beabsichtigt, wohl aber ein nachhaltiger gesellschaftlicher Nutzen. Es geht in erster Linie um Erkenntnisgewinn: Woraus bestehen wir? Wie hat sich das Universum entwickelt? Was wird in Zukunft mit dem Universum geschehen? Teilchenforscher suchen Antworten auf Fragen, die wohl jeden Menschen berühren.

Nebenbei haben sich aus der Grundlagenforschung in der Vergangenheit auch wichtige Erfindungen ergeben: Das World Wide Web wurde am CERN entwickelt, um Messdaten zwischen Wissenschaftlern auszutauschen (s. Abb. 1). Das CERN ist Vorreiter beim Grid-Computing zur Bewältigung der riesigen Datenmengen. Außerdem hat die Entwicklung der Detektoren am CERN die Halbleitertechnologie vorangetrieben.



© CERN

► Abb. 1: Im Jahr 1990 bestand das World Wide Web nur aus diesem Server am CERN.



- Sollten Regierungen Geld in Grundlagenforschung investieren? Oder sollte Grundlagenforschung lieber privat oder durch Unternehmen finanziert werden?
- Ein Budget von einer Milliarde Euro pro Jahr, etwa sechs Milliarden Euro für den Bau des LHC und die Experimente: Ist das viel für ein Forschungszentrum mit mehr als 10 000 Mitarbeitern weltweit? Recherchiere die jährlichen Budgets von Unternehmen vergleichbarer Größe. Was kosten Autobahnen, Sportereignisse (Fußball, Olympiade), große Bauvorhaben etc.?

Methoden aus der Kern- und Teilchenphysik kommen auch in anderen wissenschaftlichen Gebieten zum Einsatz. Ionen- und Neutronenstrahlen beispielsweise werden in der Materialforschung, bei der Bearbeitung von Oberflächen und der Herstellung neuer Werkstoffe verwendet.

In der Medizin werden bei verschiedenen Diagnosemethoden Detektorsysteme und Ausleseelektronik eingesetzt, wie sie ursprünglich für die Grundlagenforschung in der Kern- und Teilchenphysik entwickelt wurden: bei der Computergestützten Tomographie (CT, s. Abb. 2), bei der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und bei der Magnetresonanztomographie (MRT). Schon bald nach der Entwicklung der ersten Beschleuniger wurden Gammastrahlen und Elektronen für die Krebstherapie eingesetzt. Heute verwendet man weiterhin Protonen und schwere Ionen für die Behandlung von Tumoren.

Auch andere Bereiche der Grundlagenforschung haben Nutzen gebracht, obwohl dieser von der wissenschaftlichen Fragestellung her nicht absehbar war. Ohne ein Verständnis der Relativitätstheorie würde GPS-Navigation nicht funktionieren. Computer, Solarzellen, Mobiltelefone und vieles mehr würde es ohne Grundlagenforschung nicht geben.



© Wikipedia/Hg6996

► Abb. 2: Computertomographie-Abbildungen der Lunge



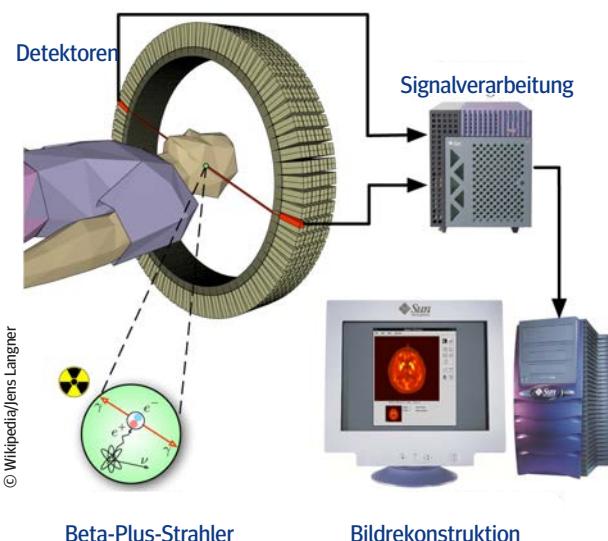
Sinn von Grundlagenforschung: <http://www.weltderphysik.de/thema/bmbf>
Anwendungen der Teilchenphysik: <http://www.weltmaschine.de/technologietransfer>



ANWENDUNGEN DER TEILCHENPHYSIK MEDIZIN

Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Die PET ist eine Diagnosemethode, mit der sich unter anderem Tumore sichtbar machen lassen. Hierfür wird dem Patienten eine Flüssigkeit gespritzt, die Positronen aussendet (ein Beta-Plus-Strahler). Dabei handelt es sich meist um eine spezielle Zuckerlösung, in der Fluor-Atome durch das radioaktive Isotop ^{18}F ersetzt wurden (Fluor-Desoxyglucose). Da Tumorzellen mehr Zucker verbrauchen als gesunde Zellen, sammelt er sich insbesondere in Tumorgewebe.



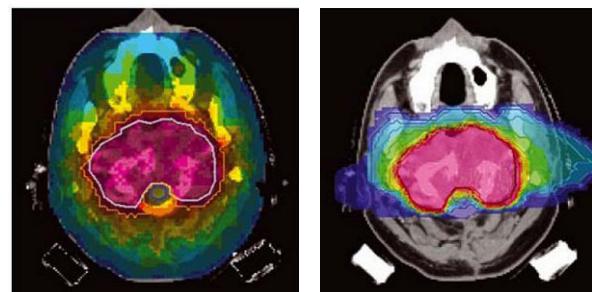
► Abb. 1: Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Die Positronen aus den Umwandlungen der radioaktiven Isotope legen im Körper nur eine sehr kurze Strecke zurück. Sobald ein Positron auf ein Elektron trifft, „annihilieren“ sie, d.h. die gesamte Masse der ursprünglichen Teilchen wandelt sich in zwei Photonen um. Diese bewegen sich mit gleicher Energie in genau entgegengesetzte Richtungen, und sie haben stets die gleiche Energie, die gemäß $E=mc^2$ der Masse des annihilierenden Elektron-Positron-Paars entspricht. Rund um den Patienten sind Detektoren angebracht, welche die Photonen nachweisen. Wenn zwei Photonen mit der richtigen Energie gleichzeitig an gegenüberliegenden Orten ankommen, muss ihr Ursprungsort auf der Verbindungslinie dazwischen liegen. Aus den Daten vieler Detektoren setzt ein Computer ein Bild des Körperräumes zusammen.

Tumortherapie mit Hadronen

Heute werden hauptsächlich drei Methoden verwendet, um Krebs zu behandeln: Operation, Chemotherapie und Strahlentherapie. Bei der herkömmlichen Strahlentherapie werden Tumore mit hochenergetischen Photonen oder Elektronen bestrahlt. Diese ionisieren auf ihrem Weg durch den Körper Moleküle in den Zellen, was wiederum chemische Reaktionen auslöst, welche die Zellen abtöten oder sie an der Teilung hindern. Obwohl die Strahlung möglichst stark auf den Tumor fokussiert wird, schädigt die Behandlung auch gesunde Zellen – insbesondere, wenn der Tumor tief unter der Haut liegt.

Eine neuartige Form der Strahlentherapie, die am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH in Darmstadt entwickelt wurde, verwendet Hadronen (Protonen oder andere Ionen). Hierbei lässt sich gezielt einstellen, wie tief die Teilchen ins Gewebe eindringen sollen, bevor sie den Großteil ihrer Energie abgeben. So kann gesundes Gewebe geschont werden.



► Abb. 2: Links: Bei der herkömmlichen Strahlentherapie mit Photonen wird ein großer Teil des umliegenden Gewebes in Mitleidenschaft gezogen.
Rechts: Bei der Bestrahlung mit Kohlenstoff-Ionen lässt sich die Dosis auf einen kleineren Bereich beschränken.



- Welche Vor- und Nachteile hat die Tumortherapie mit Hadronen? Für welche Tumorarten ist sie besonders geeignet?
- Es gibt noch weitere medizinische Verfahren, bei denen Technologien und Prinzipien aus der Kern- und Teilchenphysik zum Einsatz kommen. Welche?
- Welche Energie haben die Photonen, die bei der Annihilation eines Positrons mit einem Elektron entstehen?



Grundlagenwissen über die PET: <http://www.krebsinformationsdienst.de/untersuchung/pet-technik.php>

Tumortherapie mit Hadronen: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/physik-medizin-und-gesundheit/tumortherapie>



METHODEN DER TEILCHENPHYSIK – 1

TEILCHENKOLLISIONEN

Was geschieht, wenn zwei Protonen zusammenstoßen?

Man kann sich ein Proton als eine „Wolke“ aus vielen kleineren Einzelteilen vorstellen: drei Quarks (zwei Up-Quarks und ein Down-Quark) sowie Gluonen, die für den Zusammenhalt der Quarks sorgen.

Wenn sich Protonen nun wie Autos verhielten, die bei einem Unfall Splitter in die Umgebung verstreuen, müssten bei Protonen-Zusammenstößen immer Quarks und Gluonen herauskommen. Aber in Wirklichkeit entstehen auch völlig neue Teilchen: Elektronen, Neutrinos, und sogar Teilchen, die um ein Vielfaches schwerer sind als die ursprünglichen Protonen zusammen!

Wie ist das möglich? Dafür ist es wichtig zu verstehen, was Einstein mit der Formel $E=mc^2$ ausdrückte: Masse ist eine Form von Energie, genau wie Bewegungsenergie, thermische Energie oder elektrische Energie. Diese Tatsache wird beispielsweise in Kernkraftwerken genutzt. Dort werden Uran- und Plutonium-Atomkerne gespalten, wobei sich ein geringer Teil ihrer Masse in thermische Energie verwandelt; diese wird im Kraftwerksprozess letztendlich in elektrische Energie umgewandelt. Bei Teilchenkollisionen geschieht das Gegenteil: Ein Teil der Bewegungsenergie der Teilchen verwandelt sich in Masse. Je höher die Energie der ursprünglichen Teilchen war, desto massereicher können die entstehenden Teilchen sein.

Die Bewegungsenergie zweier kollidierender Protonen im Teilchenbeschleuniger LHC am internationalen Forschungszentrum CERN beträgt zusammen 13 Tera-Elektronenvolt. Wenn sich diese Energie vollständig in Masse umwandeln würde, entspräche das mehr als 13800 Protonen! In Wirklichkeit wandelt sich nur ein Bruchteil der Bewegungsenergie in Masse um. Doch das genügt, um eine Vielzahl neuer Teilchen entstehen zu lassen.



- Wie kommen die Protonen in den LHC?
- Wie werden die Protonen im LHC beschleunigt und auf eine Kreisbahn gelenkt?
- Was versteht man unter der Luminosität eines Teilchenbeschleunigers? Warum ist sie wichtig, und wie kann man sie erhöhen?



Webseite des LHC: <http://www.weltmaschine.de>

Fragen und Antworten rund um den LHC:

<http://www.welterphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/lhc-faq/>

Die Masse-Energie-Äquivalenz ($E=mc^2$):

<http://www.drillingsraum.de/room-emc2/emc2.html>

Artikel rund um das Higgs-Teilchen:

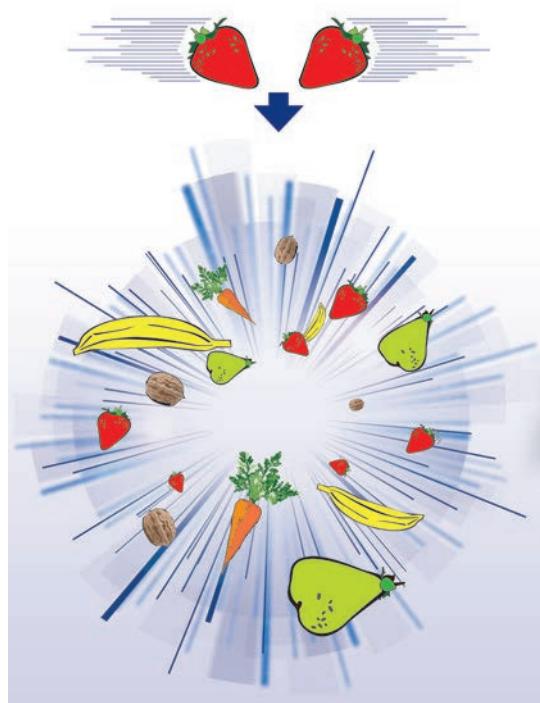
<http://www.welterphysik.de/thema/higgs>

Warum lassen Forscher Teilchen kollidieren?

Wenn Protonen, Atomkerne oder auch Elektronen und Positronen mit hohen Bewegungsenergien zusammenstoßen, können bisher unbekannte Teilchen erzeugt werden. Die Spuren der entstandenen Teilchen oder ihrer Umwandlungsprodukte werden durch Messinstrumente aufgezeichnet. Auf diese Weise suchen Forscher beispielsweise nach „supersymmetrischen“ Partnerteilchen der normalen Materie oder nach Teilchen, aus denen die geheimnisvolle Dunkle Materie bestehen könnte.

Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen, ist vom Zufall bestimmt. Man kann lediglich Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Teilchenkombinationen berechnen. Bei den allermeisten Kollisionen entstehen nur bekannte Teilchen. Die meisten davon sind vergleichsweise leicht; massereiche Teilchen wie beispielsweise Top-Quarks oder W- und Z-Teilchen entstehen seltener. Wirklich exotische Teilchen entstehen nur etwa einmal pro einer Billion Kollisionen oder noch seltener. Deswegen finden in modernen Teilchenbeschleunigern viele Millionen Teilchenkollisionen pro Sekunde statt.

Auf diese Weise haben Forscher am CERN 2012 ein bis dahin unbekanntes Elementarteilchen nachgewiesen, bei dem es sich um ein Higgs-Teilchen handelt.



- Bei Zusammenstößen von Teilchen hoher Energie (symbolisiert durch Erdbeeren) im LHC können ein oder mehrere vollkommen neue Teilchen entstehen.



METHODEN DER TEILCHENPHYSIK – 2

DIE SUCHE NACH NEUEN TEILCHEN

Wie erzeugt man exotische Teilchen?

Am CERN suchen Forscher beispielsweise nach dem Higgs-Teilchen oder Kandidaten für Dunkle Materie. Diese Teilchen existieren nicht ständig in unserer Umgebung, sondern entstehen nur selten und für kurze Zeit – beispielsweise bei Kollisionen von kosmischen Teilchen mit Atomkernen in der Erdatmosphäre. Um solche exotischen Teilchen zu erforschen, muss man sie also gezielt erzeugen. Dazu beschleunigt man Teilchen (z.B. Protonen oder Elektronen) auf sehr hohe Energien und bringt sie zur Kollision. Beim Zusammenstoß entstehen völlig neue Teilchen – mit viel Glück ist auch einmal ein echter Exot dabei.

Wie weist man neue Teilchen nach?

Die meisten gesuchten Teilchen sind sehr kurzlebig – das Higgs-Teilchen beispielsweise existiert im Mittel nur 10^{-22} Sekunden. In einer derart winzigen Zeitspanne gelangen Teilchen nicht einmal aus dem Beschleuniger hinaus in den Detektor. Bis dahin haben sie sich schon in leichtere Teilchen umgewandelt.

Man kann exotische Teilchen also nicht direkt in Detektoren nachweisen. Doch sie hinterlassen trotzdem Spuren. Eine Teilchensorte kann sich nur in ganz bestimmte Kombinationen von Teilchen umwandeln – welche, bestimmt insbesondere die **Ladungserhaltung**: Die elektrische Ladung des Teilchens vor der Umwandlung muss gleich der Summe der elektrischen Ladungen danach sein. Dasselbe gilt für die starke Ladung und für die schwache Ladung. Ein Higgs-Teilchen kann sich beispielsweise in folgende Teilchenkombinationen umwandeln:

- ▶ zwei Photonen
- ▶ zwei Z-Teilchen (siehe Abbildung)
- ▶ ein W^+ - und ein W^- -Teilchen
- ▶ ein Bottom-Quark und ein Anti-Bottom-Quark

Physiker suchen also nach entsprechenden Teilchenkombinationen, sogenannten „**Signalereignissen**“, die darauf hinweisen, dass sich ein unbekanntes Teilchen umgewandelt hat.



- Wieviele Daten produziert der LHC pro Jahr? Wie werden die Daten an Forscher weltweit verteilt?
- Welche Eigenschaften haben W-Teilchen? In welche Teilchen können sie sich umwandeln?



Das LHC-Grid:

http://www.weltmaschine.de/experimente/lhc_computing_grid

Homepage der International Masterclasses

(Identifikation von W-Teilchen):

http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_ereignis.htm

Geschichte der Teilchenphysik:

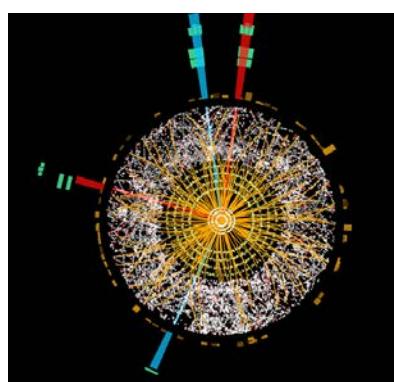
<http://kworkquark.desy.de/zeitleiste/uebersicht/1/index.html>

Woher weiß man, ob es sich wirklich um ein neues Teilchen handelt?

Wenn interessante Teilchenkombinationen (Signalereignisse) auftauchen, die auf exotische Teilchen hindeuten, fängt die Datenauswertung erst richtig an. Stammen die Signalereignisse – oder zumindest ein Teil davon – wirklich von einem bisher unbekannten Teilchen oder doch nur von längst bekannten Prozessen? Wenn man Signalereignisse einzeln betrachtet, kann man das unmöglich feststellen. Also sind zur Auswertung der Messdaten andere Methoden notwendig.

Physiker gehen dabei so ähnlich vor, als ob man herausfinden wollte, ob ein Würfel manipuliert ist. Dazu würde man sehr oft würfeln und notieren, wie oft welche Augenzahl vorkommt. Bei einem normalen Würfel wäre zu erwarten, dass jede Zahl etwa gleich oft auftaucht. Bei einem manipulierten Würfel dagegen werden die Häufigkeiten der verschiedenen Zahlen von der Erwartung abweichen. Je öfter man würfelt, desto sicherer kann man sagen, ob der Würfel manipuliert ist oder nicht.

In der Teilchenphysik funktioniert es analog: Anstatt zu würfeln, lassen Forscher bei Kollisionen verschiedene Teilchenkombinationen entstehen. Sie zählen, wie häufig die gesuchten Signalereignisse vorkommen, und tragen die Ergebnisse als Histogramme auf. Um diese auswerten zu können, berechnen Physiker zunächst, was man für verschiedene Fälle erwarten würde: Für den Fall, dass es kein neues Teilchen außer den schon bekannten gibt, und für den Fall, dass ein neues Teilchen existiert, wie beispielsweise das Higgs-Teilchen. Man vergleicht die gemessenen Häufigkeiten der Signalereignisse mit den Erwartungen, die sich aus dem Standardmodell oder anderen Theorien ergeben (Supersymmetrie etc.). Je mehr Messungen durchgeführt werden, desto sicherer kann man sagen, ob es etwas Neues zu entdecken gibt.



© ATLAS Collaboration

- ▶ Die Grafik stellt einen Querschnitt des ATLAS-Detektors dar. Darin sind Spuren bzw. von Teilchen erzeugte Signale zu sehen, die bei einer Protonen-Kollision entstanden. Farbig hervorgehoben sind die **Umwandlungsprodukte eines Higgs-Teilchens**: zwei Elektronen und zwei Positronen. Das Higgs-Teilchen wandelte sich zunächst in zwei Z-Teilchen um, die sich dann jeweils in ein Elektron und ein Positron umwandelten.