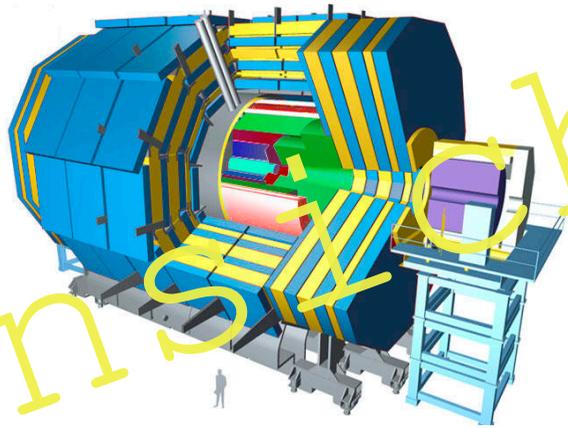


UNTERRICHTS MATERIALIEN

Physik Sek. II



Oransychn

CERN – eine große Suche

Die fundamentalen Gesetze des Universums

CERN – die Suche nach den fundamentalen Gesetzen des Universums

Aus zahlreichen Experimenten und theoretischen Modellen ist in den Jahren von 1961 bis 1973 das Standardmodell der Teilchenphysik entstanden, mit dem die grundlegenden Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen beschrieben werden.

Allerdings lässt das Standardmodell noch viele Fragen offen, die am CERN, dem Europäischen Kernforschungszentrum in Meyrin/Kanton Genf (Schweiz), mithilfe des Large Hadron Colliders LHC und den Detektoren ALICE, ATLAS, CMS und LHCb erforscht werden sollen.

Literaturtipps

Als Startpunkte für die Internetrecherche sind folgende Seiten zu empfehlen.

Alice

<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=alice>

Atlas

<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=atlas>

CMS

<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=cms>

LHCb

<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=lhcb>

Singularität

http://www.einstein-online.info/vertiefung/DoppelterUrknall@set_language=de.html

Quark-Gluon-Plasma

<https://www.youtube.com/watch?v=p77hE4wY8uU>

ALICE und der Urknall

ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) ist einer von vier Großdetektoren innerhalb des LHC-Beschleunigerringes, mit dem neben anderen Experimenten vor allem versucht wird, den Zustand der Materie unmittelbar nach dem Urknall nachzubilden und auszuwerten (Abb. 1).

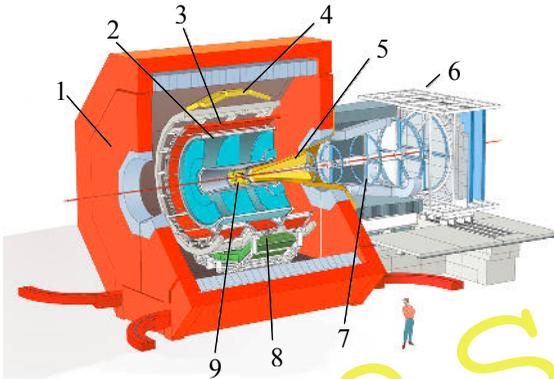


Abb. 1: Der ALICE-Detektor und seine Bestandteile

Die einzelnen Bestandteile sind:

- 1: L3 Magnet
- 2: Zeit-Projektionskammer (TPC)
- 3: Übergangsstrahlungs-Detektor (TRD)
- 4: Flugzeit-Detektor (TOF)
- 5: Hochenergie-Teilchen-Identifikations-Detektor (HMPID)
- 6: Absorber
- 7: Myonen-Spektrometer
- 8: Photon-Spektrometer
- 9: Inner Tracking System

1. Mit den Begriffen „Urknall“ oder „Big Bang“ wird in der Kosmologie die heute am wahrscheinlichsten erachtete Theorie zum Beginn des Universums vor 13,8 Milliarden Jahren bezeichnet. Mit dem „Urknall“ eng verknüpft sind Begriffe wie **Singularität**, **Planck-Ära** oder **Quark-Gluonen-Plasma**.

- a) Erläutern Sie unter Verwendung der angeführten Begriffe, wie man sich den Zeitraum von $t = 0$ bis $t = 10^{-10}$ s nach dem Urknall gemäß der gängigen Theorie vorstellt.

Tipp: Recherchieren Sie dazu – auch bei kommenden Fragestellungen – im Internet und/oder entsprechenden Lehrbüchern.

- b) Zeigen Sie durch Rechnung unter der extrem vereinfachenden Annahme, dass die kinetische Energie vollkommen in Wärme umgewandelt wird, dass die im LHC mögliche Energie von 2,76 TeV pro ^{208}Pb -Nukleon ausreicht, um bei einem Zusammenstoß von zwei Nukleonen die für das Quark-Gluon-Plasma notwendige Temperatur von ungefähr 1 Terra Kelvin (Terra $\hat{=}$ 10^{12})¹ zu erreichen.

Tipp: Benutzen Sie für die Berechnung folgende Gleichung:

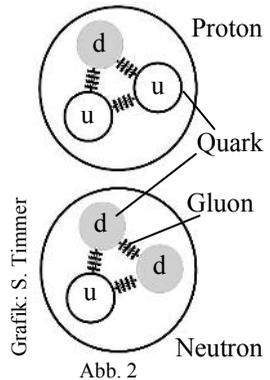
$$\overline{E_{\text{kin}}} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \quad \text{mit } k = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (\text{Boltzmann-Konstante})$$

- c) Erklären Sie kurz, warum das in Teilaufgabe b) erhaltene Ergebnis nur eine grobe Annäherung an die richtigen Ergebnisse sein kann.

2. Beim ALICE-Experiment werden Blei-Atomkerne (^{208}Pb) fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und dann zur Kollision gebracht. Aus den Bestandteilen der Atomkerne und den vielen weiteren Teilchen, die durch die Wucht des Aufpralls beim Zusammenstoß erzeugt werden, entsteht ein Materiezustand, wie er etwa 10^{-10} s nach dem Urknall geherrscht haben muss. Bei der dabei entstehenden Temperatur von etwa 10 Billionen Kelvin werden Protonen und Neutronen aufgeschmolzen, sodass sich ihre elementaren Bestandteile – Quarks und Gluonen – völlig ungeordnet durcheinander bewegen.

- a) Abb. 2 zeigt den Aufbau von Proton und Neutron aus Quarks und Gluonen in einem Atomkern im gebundenen Zustand.

Beschreiben Sie allgemein, was man unter Quarks und Gluonen versteht und erläutern Sie die Unterschiede zwischen Protonen und Neutronen.



¹ www.spektrum.de/lexikon/astronomie/quark-gluonen-plasma/379

- b) Der Zustand eines Quark-Gluon-Plasma, ausgehend von Protonen und Neutronen zeigt Abb. 3.

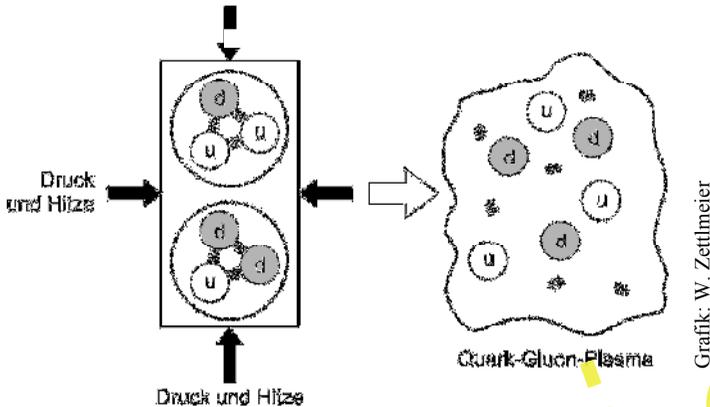


Abb. 3: Entstehung des Quark-Gluon-Plasmas aus dem „Confinement“

Erklären Sie unter Anwendung des Begriffes „Confinement“, was beim Zusammenstoß passiert und warum das Quark-Gluon-Plasma nur für Sekundenbruchteile aufrechterhalten werden kann.

3. Die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung sind die Gluonen, die eine Reichweite von $d = 10^{-15}$ m haben. Schätzen Sie aufgrund der Reichweite die Größenordnung der Ruheenergie und der Ruhemasse des Gluons ab.

Tipp: Gehen Sie davon aus, dass sich die Gluonen in etwa mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Benutzen Sie für die Berechnung die Energie-Zeit-Unschärferelation:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad \text{mit} \quad \hbar = \frac{h}{2 \cdot \pi}$$

Für das Wirkungsquantum gilt:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Für die Lichtgeschwindigkeit gilt:

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ATLAS/CMS und die Suche nach dem Higgs-Boson

Die beiden Experimente ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) und CMS (*Compact Muon Solenoid*) haben zum Ziel, möglichst viele Schlüsselfragen der heutigen Teilchenphysik zu beantworten.

Am ATLAS-Detektor (Abb. 4) sollen die kleinsten Bausteine der Materie – Leptonen und Quarks – auf eine eventuelle Substruktur hin untersucht werden, während der CMS-Detektor (Abb. 5) nach Hinweisen auf eine Supersymmetrie von Teilchen oder weitere noch unbekannte Teilchen suchen soll.

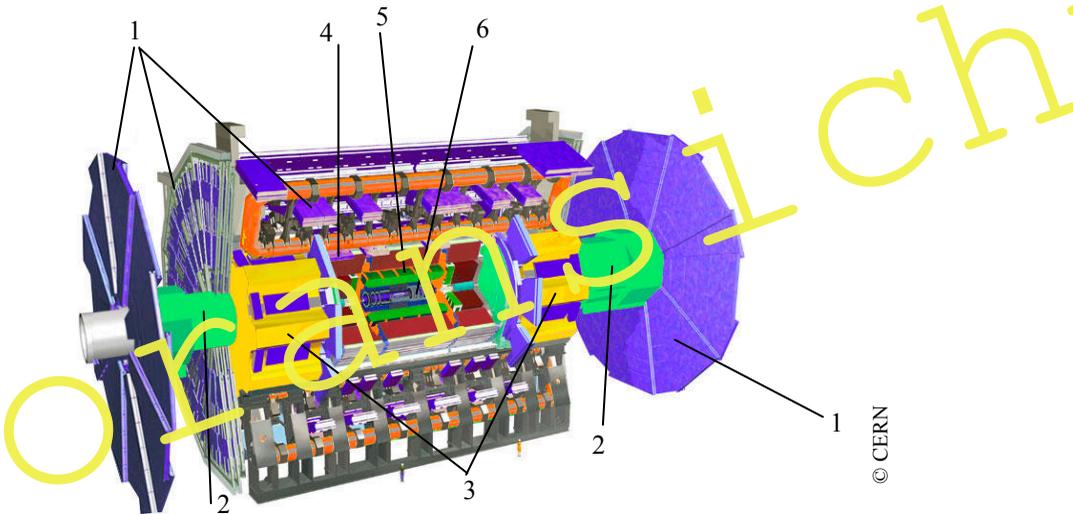


Abb. 4: Der ATLAS-Detektor und seine Bestandteile

Die einzelnen Bestandteile sind:

- 1: Myonen-Spektrometer
- 2: Absorber
- 3: Torodiales Luftspulensystem
- 4: Hadronisches Kalorimeter HCAL
- 5: Elektromagnetisches Kalorimeter ECAL
- 6: Innerer Detektor

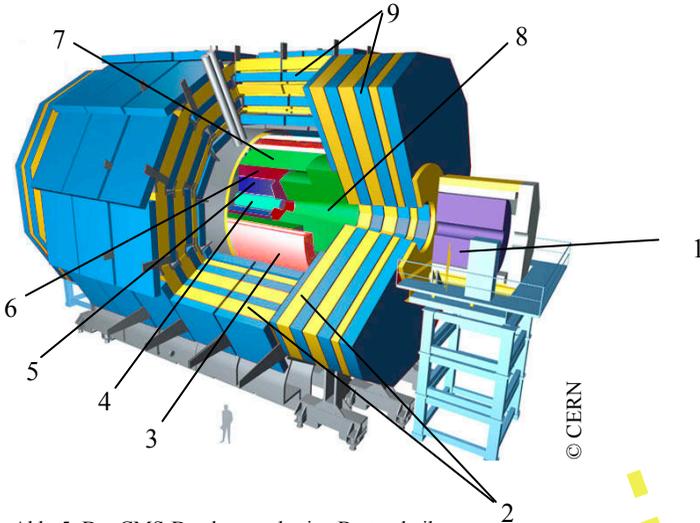


Abb. 5: Der CMS-Detektor und seine Bestandteile

Die einzelnen Bestandteile sind:

- 1: Vorwärts-Kalorimeter
- 2: Eisenjoch
- 3: Supraleitende Spule
- 4: Pixel-Detektor
- 5: Streifen-Detektor
- 6: Elektromagnetisches Kalorimeter
- 7: Hadronisches Kalorimeter
- 8: Inner-Tracking System
- 9: Myonen-Spektrometer

Gemeinsam wird an beiden Detektoren mit Hochdruck am exakten Mechanismus geforscht, der den Elementarteilchen ihre Masse verleiht. Das dafür vom Standardmodell der Teilchenphysik postulierte Elementarteilchen mit dem Namen **Higgs-Boson** wurde erstmals im Juli 2012 von Wissenschaftlern am CERN mit $m = 125 \text{ GeV}/c^2$ ($G \hat{=} 10^9$) als nachgewiesen bekanntgegeben. Intensive Analysen vieler Daten bekräftigten die experimentellen Ergebnisse, sodass die Physiker Francois Englert und Peter Higgs für die Entwicklung des so bezeichneten Higgs-Mechanismus im Jahr 2013 den Nobelpreis für Physik erhielten.

$$\begin{aligned}
 m_{\text{H}} \cdot c^2 &= 2,23 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \cdot (2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \approx 20,043 \cdot 10^{-9} \text{ J} \\
 &= 20,043 \cdot 10^{-9} \cdot 6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV} = 1,25 \cdot 10^{11} \text{ eV}
 \end{aligned}$$

LHCb und der Unterschied zwischen Materie und Antimaterie

Die Experimente am LHCb (Large Hadron Collider beauty) gehen der grundsätzlichen Frage nach, warum unser Universum in erster Linie aus Materie und nicht aus Antimaterie besteht. Der LHCb-Detektor (Abb. 7) sucht nach einem Teilchen, das nicht direkt bei einer Kollision entsteht, sondern nur indirekt nachgewiesen werden kann – wie das B-Quark, das auch als Beauty-Quark bezeichnet wird und dem Detektor seinen Namen gibt. Mit dieser indirekten Suche ergänzt das LHCb-Experiment die direkte Suche an den beiden Universaldetektoren ATLAS und CMS.

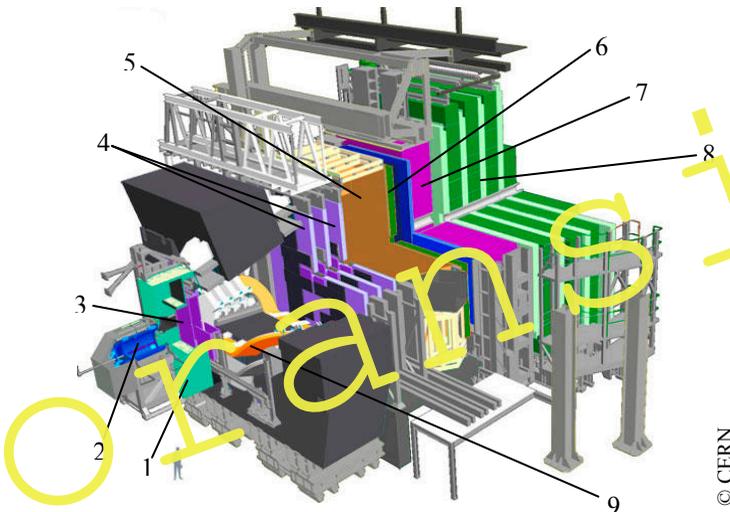


Abb. 7: Der LHCb-Detektor und seine Bestandteile

Die einzelnen Bestandteile sind:

- 1: Rich 1-Detektor
- 2: Vertex Locator
- 3: Trigger Tracker
- 4: Spurrkammern
- 5: Rich 2-Detektor
- 6: Elektromagnetisches Kalorimeter ECAL
- 7: Hadronisches Kalorimeter HCAL
- 8: Myonenspektrometer
- 9: Magnetsystem

6. Etwa 10^{-5} s nach dem Urknall besteht das Universum aus einer zwei Billionen Grad heißen, völlig undurchsichtigen Teilchensuppe, als sich ein Prozess in Gang setzt, der zur Vernichtung nahezu der gesamten Masse führen wird.

Beschreiben Sie diese Phase der Geburt des Universums. Legen Sie dabei besonderen Wert auf den Zerstörungsprozess von Teilchen und Antiteilchen.

7. In einem der LHCb-Experimente wird das B-Meson untersucht, das unter anderem ein Elementarteilchen (bzw. sein Antiteilchen) mit dem Namen Bottom- oder Beauty-Quark enthält. Abb. 8 zeigt eine schematische Darstellung eines Mesons im Vergleich zu einem Proton.

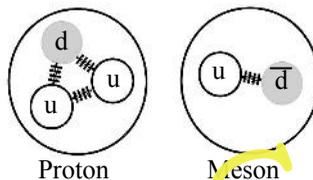


Abb. 8

- a) Beschreiben Sie
- was man ganz allgemein unter Mesonen und B-Mesonen im Speziellen versteht,
 - welcher Unterschied zu einem Proton besteht,
 - wie Mesonen entstehen und welches Verhalten sie zeigen.
- b) Versuchen Sie zu erläutern,
- welche Bedeutung die Zerfälle von B-Mesonen für die Entstehung der Asymmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen haben und
 - welche besondere Bedeutung dem Beauty-Quark zukommt.

Kompetenzprofil

- Niveau: Oberstufe, weiterführend
- Fachlicher Bezug: –
- Kommunikation: Physikalische Texte erfassen, argumentieren, Vermutungen äußern
- Problemlösen: Probleme formulieren, Darstellungen verwenden, Ergebnisse angeben
- Modellierung: –
- Medien: Lehrbücher, Internet
- Methode: Einzel- oder Gruppenarbeit
- Inhalt in Stichworten: ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, Urknall, Quarks, Gluonen, Quark-Gluon-Plasma, Higgs-Teilchen, B-Mesonen, Beauty-Quark

Autor: Wolfgang Vogg, Eurasburg

Lösung

1. a) Das Urknallmodell hat wissenschaftlich betrachtet eine solide Basis:

Bereits in den 1920er Jahren konnte der amerikanische Astronom **Edwin Hubble** (1889–1953) nachweisen, dass sich die Galaxien von uns weg bewegen. Das Auseinanderdriften der Galaxien bedeutet aber, dass sie davor dichter zusammengedrängt gewesen sein müssen. Daraus entstand im Jahr 1931 die These, dass das Universum aus einem winzigen Punkt, viel kleiner als ein Atom, entstanden sein müsste. Man sprach vom „Uratom“, wovon später der Begriff der „**Singularität**“ gebildet wurde. Damit war ein mathematisch abgeleitetes, punktförmiges und unendlich kleines Etwas gemeint, in dem unvorstellbar viel Energie enthalten sein sollte. Der Vorgang, bei dem Materie, Raum und Zeit gemeinsam entstehen, um dann zu einem expandierenden Universum zu werden, setzt diesen Anfangszustand voraus.

Obwohl die Wissenschaftler bis heute anhand von theoretischen Modellen und den zugehörigen plausiblen Erklärungen sehr viel über den Ablauf des Urknalls und die Entwicklung des Universums herausgefunden haben, fehlt nach wie vor eine fundamentale Erklärung dafür, was im allerersten Moment geschah. Eine Annäherung an den Urknall ist bis auf die unvorstellbare Zeitspanne von 10^{-43} Sekunden theoretisch möglich – doch ver sagen sämtliche Modelle und mathematische Formeln, sobald man den