

Large Hadron Collider

Während das Proton Synchrotron und das Super Proton Synchrotron am CERN Kreisbeschleuniger konventioneller Bauart sind, hat der Large Hadron Collider, LHC, in dem die Protonen weiter auf 7 Teraelektronenvolt beschleunigt werden, einige Besonderheiten: [Video flythrough] Der LHC ist mit 27 Kilometern Länge nicht nur der größte und stärkste Teilchenbeschleuniger der Welt, auch die Technik setzt neue Maßstäbe, wie wir noch sehen werden. Eigentlich ist der Large Hadron Collider ein Synchrotron, genau wie seine Vorbeschleuniger Proton Synchrotron und Super Proton Synchrotron. Im Gegensatz zu diesen werden die Protonen im LHC allerdings in zwei getrennten Strahlrohren beschleunigt, und zwar in entgegengesetzten Richtungen. [Animation ATLAS] Dadurch wird es möglich, gegenläufige Teilchen kollidieren zu lassen. Dies hat den Vorteil, dass eine viel größere Energie frei wird, als wenn man die Protonen auf ein ruhendes Objekt schießen würde.

Einschleusung

An vier Stellen kreuzen sich die beiden Strahlrohre, dort finden die Kollisionen statt. Die dabei entstehenden neuen Teilchen werden von den Teilchendetektoren ATLAS, CMS, LHCb und ALICE registriert. Am Beispiel des Large Hadron Colliders möchten wir uns jetzt den Aufbau eines Synchrotrons näher ansehen - und natürlich auf die Besonderheiten des LHC eingehen. Zuerst müssen die Teilchen aus der Protonenquelle in die Kreisbeschleuniger eingeschleust werden. Dies geschieht mit sogenannten „Kickermagneten“. Die Kickermagnete erzeugen für extrem kurze Zeiträume von 10^{-7} Sekunden ein Ablenkkfeld, das die Teilchenpakete einzeln auf die Bahn im LHC lenkt.

Dipolmagnete

Herzstück des LHC sind die Ablenkmagnete oder Dipole, denn wie ein normaler Stabmagnet auch wird hier ein Magnetfeld mit zwei Polen erzeugt. Die Ablenkmagnete sind das, was beim Fadenstrahlrohr die Helmholtz-Spulen waren, [Video Kreisbahn1] sie erzeugen das Magnetfeld, das die Teilchen auf der Kreisbahn hält. [Video Travelling in LHC] Die Dipolmagnete machen den größten Teil des Large Hadron Colliders aus. Insgesamt gibt es beim LHC 1232 dieser blauen Dipol-Ablenkmagnete, von denen jeder 14 Meter lang und 35 Tonnen schwer ist und 500.000 Schweizer Franken gekostet hat.

Der hohe Preis liegt vor allem daran, dass im LHC keine gewöhnlichen Spulen verwendet werden. Um die hohe Energie von 7 Teraelektronenvolt zu erreichen, wird ein Magnetfeld von 4 Tesla benötigt – mit normalen Spulen lässt sich eine so hohe Feldstärke nicht erreichen. Es werden deshalb supraleitende Spulen verwendet: mit supraflüssigem Helium werden die Spulen auf eine Temperatur von 2 Kelvin heruntergekühlt, so dass das Material supraleitend wird, das heißt der elektrische Widerstand sinkt auf Null. Dadurch kann ein sehr starker Strom fließen und ein Magnetfeld von 4 Tesla erreicht werden. Dies alles auf einer Länge von 27 Kilometern – der LHC ist damit eindeutig der größte Kühltank der Welt.

Beschleunigungsstrecken

Doch Dipolmagnete allein reichen nicht aus! Die Protonen sollen ja nicht nur im Kreis herumfliegen, sondern auch beschleunigt werden. Die Beschleunigung erfolgt in mehreren Beschleunigungsstrecken. Diese bestehen aus Modulen mit vier sogenannten Hohlraumresonatoren, in denen die Teilchen beschleunigt werden. Eine elektromagnetische Welle hoher Frequenz wird in einen ca. 1 Meter langen metallischen, gut leitenden Hohlraum eingespeist. Diese Welle breitet sich im Rohr longitudinal mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die Protonen, die beschleunigt werden sollen, bewegen sich allerdings etwas langsamer, weshalb die Welle abgebremst werden muss, was mit einem Lochblendensystem im Rohr realisiert wird.

Wie ein Surfer auf einer Wasserwelle „reitet“, wird das Teilchen auf der Flanke der elektromagnetischen Welle beschleunigt. Ein positiver Berg der Senderwelle stößt die Protonen ab und treibt diese voran.

Vakuum

[Video] Bei verschiedenen Versuchen in der Schule wird ebenfalls ein Teilchenstrahl erzeugt: in der Braun'schen Röhre werden Elektronen beschleunigt, die auf dem Leuchtschirm einen Leuchtpunkt hinterlassen, und in der Elektronenbeugungsröhre werden schnelle Elektronen auf eine Graphitfolie geschossen, um die Struktur des Graphits zu untersuchen. Wieso befinden sich Versuche dieser Art allesamt in einem evakuierten Glaskolben?

Der Elektronenstrahl wird bei all diesen Versuchen deshalb in einer Vakuumröhre erzeugt, damit möglichst wenige Elektronen mit Gasatomen der Luft zusammenstoßen und gestreut werden – schließlich sollen am Schirm möglichst viele Elektronen ankommen, um ein helles Bild zu erzeugen.

gen. In Beschleunigern ist es ebenfalls sehr ungünstig, wenn die Teilchen mit Gasatomen zusammenstoßen, gestreut werden und durch Kollision mit der Strahlrohrwand verloren gehen.

Die Lösung ist auch hier die Erzeugung eines möglichst hohen Vakuums, um die freie Weglänge (die freie Weglänge ist die Wegstrecke, die ein Teilchen im Mittel zurücklegen kann, bis es zum Stoß mit einem Gasatom kommt) zu vergrößern. Im LHC wird ein Volumen von 9000 m³, das entspricht dem einer großen Kathedrale, leer gepumpt und ein Ultrahochvakuum von 10⁻¹² bar erzeugt. [Statt 10¹⁹ Molekülen pro cm³ sind den Protonen dann nur noch 3 Millionen Moleküle pro cm³ „im Weg“]!

Starke Fokussierung mit Quadrupol-Magneten

Trotz Ultrahochvakuum sind im Strahlrohr eines Teilchenbeschleunigers immer noch Gasatome vorhanden, an denen die Teilchen gestreut werden können. Auch Fehler der Ablenkmagnete führen dazu, dass Teilchen von ihrer Bahn abkommen. Es ist daher erforderlich, den auseinanderlaufenden Strahl zu fokussieren.

In einem Teilchenbeschleuniger sind daher hin und wieder spezielle Magnete angebracht, die die Teilchen wieder auf die rechte Bahn bringen: die Fokussiermagnete. Dazu verwendet man Quadrupol-Magnete, also Magnete mit vier Polen. Was passiert nun z.B. mit einem auf den Beobachter zufliegenden Elektron, das ins Feld eines Quadrupol-Magneten eintritt?

- Weicht das Elektron nach rechts oder links vom Zentrum ab, so erfährt es eine zur Mitte gerichtete Lorentzkraft, was sich leicht mit der „Linken-Hand-Regel“ anhand der Magnetfeldlinien verifizieren lässt. Das Teilchen wird also horizontal fokussiert.
- Weicht das Elektron nach oben oder unten vom Zentrum ab, so zeigt die Lorentzkraft dahingegen nach außen. In dieser Richtung wirkt der Quadrupol-Magnet also defokussierend!

[Video] Jetzt wollen wir dies im Experiment ausprobieren. Aus vier Spulen haben wir einen Quadrupol-Magneten gebaut. Mit einer Wechselspannung an den Ablenkplatten einer Braun'schen Röhre erzeugen wir einen breiten Elektronenstrahl. Dieser soll für einen auseinanderlaufenden Strahl im Teilchenbeschleuniger stehen, der vom Quadrupol fokussiert werden soll. Geben wir Strom auf die vier Spulen unseres Quadrupols, so sehen wir tatsächlich eine Fokussierung: der breite Strahl wird schmaler.

Ändert man die Polung an den Quadrupol-Magneten, so ergibt sich ein um 90° gedrehtes Magnetfeld. In dieser zweiten Richtung wird, wie wir sehen, der Strahl nicht fokussiert, sondern aufgeweitet. Dies ist die Defokussierung in der zweiten Richtung.

Was nützt aber die starke Fokussierung in horizontaler Richtung, wenn gleichzeitig eine ebenso starke vertikale Defokussierung auftritt? Die Idee ist, zwei solche Quadrupol-Linsen (die Quadrupol-Magnete wirken letztendlich wie Linsen, da sie wie ihre optischen „Verwandten“ bündeln oder zerstreuen) hintereinander anzuordnen, wobei die zweite gegenüber der ersten um 90° gedreht ist. In der horizontalen Ebene folgt damit auf eine fokussierende Linse eine defokussierende, in der vertikalen Ebene umgekehrt. Insgesamt werden die Teilchen so auf der Bahn gehalten.

Beim Large Hadron Collider fokussieren 500 dieser 3 m langen Quadrupol-Magnete den Strahl. Auch die Spulen der Quadrupol-Magnete sind wie die Dipol-Ablenkmagnete supraleitend.

Damit haben wir die wichtigsten Komponenten des Large Hadron Colliders kennen gelernt. Schnelle Kickermagnete schleusen den Strahl ein. Damit sich die Teilchen auf einer Kreisbahn bewegen, werden sie von starken Dipolmagneten abgelenkt. Quadrupol-Magnete fokussieren den Strahl und verhindern so den Teilchenverlust. Beschleunigt werden die Protonen mit Hohlraumresonatoren, so dass sie mit maximaler Energie in den Detektoren aufeinanderprallen und in neue Teilchen zerfallen.