

Spurdetektoren

Von den vielen neuen Teilchen, die bei der Kollisionen der Protonen in der Mitte des Detektors entstehen, interessieren uns folgende Eigenschaften:

- die Energie
- der Impuls, bildlich gesprochen der Schwung der Teilchen, der mit der Geschwindigkeit eng zusammen hängt
- die Ladung, also ob die Teilchen elektrisch positiv oder negativ geladen sind
- die Masse, also wie schwer die neuen Teilchen sind
- und die Lebenszeit, wie lange es dauert, bis die neu erzeugten Teilchen zerfallen.

Die Energie wird mit den Kalorimetern gemessen, auf die wir später eingehen wollen. Die Masse lässt sich aus Energie und Impuls berechnen, muss also ebenfalls nicht direkt gemessen werden. Die Lebenszeit lässt sich aus der Teilchenspur, die von den Spurdetektoren ganz in der Mitte des Detektors aufgezeichnet wird, rekonstruieren. Zur Lebenszeitbestimmung beobachtet man einfach die Bahn des Teilchens und misst die Wegstrecke zwischen Entstehungs- und Zerfallsort. Über die Geschwindigkeit lässt sich dann auf die Lebensdauer zurückrechnen.

Spurdetektoren und Magnetspule gemeinsam ermöglichen die Bestimmung von Ladung und Impuls. Die Spurdetektoren zeichnen die Bahn der Teilchen auf, die vom Magnetfeld der Spule gekrümmt wurde. Die Bestimmung der Ladung ist denkbar einfach: [Video] beobachten wir den Elektronenstrahl in einer Braun'schen Röhre. Im Magnetfeld werden die Elektronen, die ja negativ geladen sind, nach unten abgelenkt.

[live] Positiv geladene Teilchen wie Protonen würden dagegen in die andere Richtung, nach oben abgelenkt. Je nach Ladung ist die Bahn der Teilchen im Magnetfeld also nach rechts oder links gekrümmt. Ein kurzer Blick auf die Spur im Magnetfeld genügt also, um zu entscheiden, ob das Teilchen positiv oder negativ geladen war. Ungeladene Teilchen bewegen sich im Magnetfeld natürlich geradeaus.

Der Impuls wird ebenfalls über die Krümmung der Teilchenbahn im Magnetfeld der Spule bestimmt. Das lässt sich sehr schön mit einer Fadenstrahlröhre nachvollziehen. [Video] Dort erzeugen die Helmholtz-Spulen ein Magnetfeld, durch das die Bahn der Elektronen gekrümmt wird. Auf der Kreisbahn sind Lorentzkraft und Zentripetalkraft gleich groß. Dann können wir auflösen:

Lorentzkraft, Ladung mal Geschwindigkeit mal Masse ist Zentripetalkraft, Masse mal Geschwindigkeit zum Quadrat geteilt durch den Radius der Kreisbahn. Kürzt man einmal die Geschwindigkeit v und bringt man den Radius r auf die andere Seite, so erhält man als Ergebnis: Ladung mal Magnetfeldstärke mal Radius ist gleich Masse mal Geschwindigkeit, bekanntermaßen die Formel für den Impuls p . Da man die Ladung q der Teilchen und die Stärke des Magnetfeldes B kennt, kann man aus dem Radius der Bahn den Impuls der Teilchen berechnen.

[live] Auch wenn das Prinzip vergleichbar ist, sind die Dimensionen beim CMS-Detektor ganz anderer Art. Werden die Elektronen in der Fadenstrahlröhre mit einem Magnetfeld von wenigen Millitesla abgelenkt, so wird die Bahn der Teilchen im CMS-Detektor von einer 13 Meter langen, zylinderförmigen Spule mit einem Durchmesser von 6 Metern gekrümmt. [Video4] Dank supraleitender Magnete erreicht die Spule, der sogenannte Solenoid, ein Magnetfeld von 4 Tesla, muss aber dauerhaft auf -270°C heruntergekühlt werden. Der Strom in der Spule beträgt dann unvorstellbare 20.000 Ampere.

Doch die Spule allein reicht natürlich nicht aus, irgendwie muss die vom Magnetfeld gekrümmte Teilchenbahn ja auch beobachtet werden. In der Fadenstrahlröhre ist das recht einfach: [Video Fadenstrahlröhre6] im Glaskolben befindet sich ein Gas, das von vorbeifliegenden Elektronen zum Leuchten angeregt wird. Der Spurendetektor von CMS, der die Teilchenbahn vermisst, arbeitet auf eine andere Weise: er besteht aus kleinen Streifen oder quadratischen Pixeln Silizium, einem Halbleiter. Im Ausgangszustand ist Silizium nicht leitend. Fliegt nun ein geladenes Teilchen durch den Halbleiter, so wird ein Elektron in den leitenden Bereich angehoben, der Halbleiter wird leitfähig. Diese Ladungsverschiebung ist als elektrischer Strom messbar, das Teilchen löst somit ein elektrisches Signal aus. Ordnet man viele solcher Halbleiterelemente in Streifen oder Pixeln nebeneinander an, lässt sich die Bahnkurve sehr genau bestimmen.