

# 3. Jan 10.10.28 RES210\_Die\_Lagrange-Formel

Willkommen zum Forschungspodcast der Helmholtz-Gemeinschaft. Ich bin Holger Klein.

Resonator Das ZERN, diese riesige Weltuntergangsmaschine in Genf, die feiert 2024 ihren 70. Geburtstag.

Da gibt es Feierlichkeiten. Zu den Feierlichkeiten gibt es eine Oper und in der letzten Sendung hatte mir deren Komponistin Gloria Bruni schon gesagt, dass sie dazu die Lagrange-Formel vertont hat. Jetzt wüsste ich auch noch ganz gerne, was diese Lagrange-Formel denn überhaupt ist. Und da frage ich doch einfach mal im Deutschen Elektronen-Synchrotron nach. Das sind die mit den kleineren Weltuntergangsmaschinen in Hamburg. Und am DESY, da arbeitet Isabel Melzer-Pellmann und ist dort Gruppenleiterin des CMS, des Compact Muon Solenoid Experiments, das seinerseits am ZERN beheimatet ist. Hallo Frau Melzer-Pellmann.

Ja, guten Tag.

Was ist die Lagrange-Formel?

Also Lagrange-Formel ist erstmal ein genereller Begriff, aber die Formel, über die wir uns unterhalten, ist die, die die Kräfte, die die kleinen Teilchen zusammenhält und deren Wechselwirkungen beschreibt, enthält. Die kann man möglichst kompliziert aufschreiben, die kann man relativ runtergebrochen aufschreiben, also relativ kompakt aufschreiben und die beschreibt eben die unterschiedlichen Kräfte, die es gibt im Universum.

Welche kleinen Teilchen sind das, über die wir reden?

Das sind die Elementarteilchen, also wirklich die kleinsten Teilchen, die wir kennen.

So Typen wie ich verstehen unter Elementarteilchen Atome, aber da sind sie weit darüber hinaus.

Genau, das ist das, was im Atom drin ist oder was um den Atomkern rumfliegt.

Was ist das? Wie heißen die?

Also wir haben den Atomkern, der besteht, wenn im einfachsten Fall, das ist das Wasserstoffatom, da besteht er aus einem Proton und dem, das Proton als der Atomkern, da fliegt ein Elektron drum herum.

Das Proton, das ist aber auch noch nicht alles.

Das Proton ist noch nicht alles, genau, das ist noch nicht das kleinste Teilchen.

Das Proton besteht aus Quarks und Gluon, die die Quarks quasi zusammenhalten, wie eine Art Klebe, da kommt der Name auch her, Gluon, wie Glue englisch Klebe.

Und man hat quasi drei Arte feste Teilchen, die man identifizieren kann, das sind die Quarks, zwei Up-Quarks und ein Down-Quark und die werden quasi durch dieses Gluon zusammengehalten.

Warum heißen die Up und Down?

Die haben unterschiedliche Ladungen, die sie unterscheidet.

Das Up-Quark hat positive Ladung von zwei Drittel und das Down-Quark eine negative Ladung von minus zwei Drittel und das hat man sich damals, glaube ich, einfach so überlegt.

Ich weiß tatsächlich keinen Hintergrund dazu, wer den Namen damals gegeben hat.

Und weil mehr Up- als Down-Quarks drin sind, ist das Proton positiv?

Genau, das geht sich genau so aus, dass dann die Ladung plus eins ist und das Elektron hat die Ladung minus eins, das drum herum fliegt, um den Wasserstoffkern.

Woraus bestehen die Quarks?

Die Quarks haben keine so uns bekannte innere Struktur.

Bis jetzt scheinen die wirklich die elementaren Teilchen zu sein.

Man weiß natürlich nicht, wenn man noch mit einem viel größeren Mikroskop gucken würde, ob man nicht da auch noch eine Struktur finden würde.

Aber unser momentaner Kenntnisstand ist, dass das wirklich Elementarteilchen sind.

Und die Gluonen, woraus bestehen die?

Die sind auch Elementarteilchen, aber hier wird es schon kompliziert.

Aber hier wird es auch spannend, denn die Gluonen sind die Träger der starken Kraft.

Wir kennen aus dem normalen Leben eigentlich eher die elektromagnetische Kraft mit elektromagnetischen Schwingungen, mit Lichtteilchen, die von der Sonne kommen, zum Beispiel Photon.

Also von der Sonne kommen, sind das sichtbare Licht, das wir kennen.

Die starke Kraft hat eine ganz interessante Eigenschaft.

Und zwar, wenn man die Teilchen, die von der starken Kraft zusammengehalten werden, diese drei Quarks, wenn man die versucht auseinanderzuziehen, dann wird die Kraft nicht schwächer, wie man das so kennt, wenn man zwei Magneten hat, die zusammen sind, man zieht die auseinander, irgendwann ist die Kraft quasi so, dass es immer leichter wird, die auseinanderzuziehen.

Bei den Quarks ist das genau anders, da wird die Kraft immer stärker.

Deswegen zeichnet man die Gluonen, die die Quarks zusammenhalten, auch gerne als so eine Art Spirale.

Denn so kann man sich das vorstellen.

Die Gluonen halten die beiden Quarks dicht zusammen, obwohl die tatsächlich die gleiche Ladung haben.

Und normalerweise stoßen sich Teilchen mit der gleichen Ladung ab.

Aber die starke Kraft ist in dem Moment so stark, dass diese Abstoßung gar nicht mehr zum Tragen kommt, sondern dass sie aneinander festgehalten werden.

Wenn die dicht zusammen sind, ist die Spirale ganz locker und die können sich

so ein bisschen hin und her bewegen.

So kann man sich das vorstellen.

Und wenn man die Spirale immer stärker auseinanderzieht, dann muss man sehr, sehr, sehr viel Energie benötigen und irgendwann bricht die Spirale.

Und aus der ganzen Energie, die man reinsteckt, entstehen dann wieder neue Teilchen.

Ach ja, stimmt, ich muss ja Energie aufwenden, um das Ding auseinanderzuziehen.

Welche Teilchen entstehen denn dann, wenn ich die... Dann entstehen wieder neue Quarks, die dann über neue Spiralen von Gluonen erzeugt werden.

Heißt das, Quarks bestehen aus Energie?

Weil ich tu ja Energie da rein und dann macht es irgendwann "paf", dann sind die einen Quarks getrennt, aber dafür habe ich ganz viele andere Quarks.

Das ist wie gleich in  $E=mc^2$ , da kommt der Einstein.

Aus der Energie kann man Materie machen und das passiert eben auf diesem Niveau genau.

Warum verhält die starke Kraft sich so?

Das wissen wir auch gerne.

Deshalb untersuchen wir sie ja so gerne am Lachatron Collider.

Okay, und die Lagrange-Formel, die schafft jetzt einfach nur schriftlich einen Zusammenhang zwischen all diesen Dingen, über die wir jetzt gerade gesprochen haben?

Genau, also die Lagrange-Formel beschreibt die starke Kraft, die ich gerade versucht habe zu erklären.

Die beschreibt auch die elektromagnetische Kraft, die wir jetzt nur so am Rande besprochen haben und die enthält insbesondere auch noch die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld.

Das wurde ja schon sehr lange in den 60er Jahren von Peter Higgs und Kollegen von Gleyre und so weiter vorhergesagt.

Die haben damals vorhergesagt, es gibt ein Higgs-Feld, das den... Jetzt muss ich eigentlich noch mal weiter ausruhen.

Wie gesagt, ich habe Zeit.

Ich hole nochmal weiter aus.

Ja, holen Sie weiter aus.

Also warum brauchen wir das Higgs-Feld überhaupt?

Was ist es überhaupt?

Aber wahrscheinlich ist das die Antwort auf die Frage... Genau, so ein bisschen ist die Frage schon die Antwort.

Oder die Frage ist eigentlich eher, wie beschreibt man eigentlich die Elementarteilchen?

Die haben nämlich eine Ladung... Also die Quarks und die Elektronen.

Die Quarks und die Elektronen.

Die haben diese Ladung.

Die Ladung haben wir schon besprochen.

Die haben aber auch eine Masse.

Und jetzt haben wir das dumme Problem in der Teilchenphysik gehabt in den 60ern.

Wir hatten eine tolle Theorie.

Die Theorie hat aber vorhergesagt, alle Teilchen müssen masselos sein.

Und da haben die Theoretiker sich damals überlegt, wie kann ein Teilchen Masse haben?

Zum Beispiel, indem sie, wenn sie durch ein Feld fliegen, mit diesem Feld wechselwirken.

Und dieses Feld ist definiert worden als das jetzt bekannte Higgs-Feld.

Und je stärker die Teilchen mit dem Higgs-Feld wechselwirken, desto stärker wird diese Wechselwirkung und dadurch entsteht so eine Art, vielleicht kann man sich das so vorstellen, so eine Art Reibung.

Und je stärker die Wechselwirkung, desto stärker die Reibung.

Und wir nehmen das als Masse wahr.

Es ist aber keine Masse?

Das ist das, was wir sehen letzten Endes.

Wir sehen bei den Teilchen eine Masse, aber die Theoretiker sagen, da ist gar keine.

Das ist quasi die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld, könnte man auch sagen.

Okay, das heißt, das Higgs-Feld ist sozusagen eine Krücke, um die Theorie mit dem Experiment zu verbinden.

Ich würde es jetzt nicht als Krücke bezeichnen.

Aber ich könnte noch ein anderes Beispiel geben, das ich eigentlich immer sehr gerne nehme.

Man stelle sich vor eine Party.

Viele Leute stehen da, alle stehen zusammen, unterhalten sich und jemand will von A nach B gehen.

Will jemand, eine unbekannte Person.

Das ist die Party, lauter Physiker sehen eine unbekannte Person, uninteressant.



Die Person kann relativ unbemerkt von dem einen Ausgang einmal quer durch die Party zum anderen Ausgang gehen oder zu den Getränken oder was auch immer.

Das ist ein leichtes Teilchen, so was wie ein Elektron.

Wenn jetzt aber ein bekannter Physiker kommt, man stelle sich vor... Es kommt Neil deGrasse Tyson kommt rein.

Ja, oder Albert Einstein kommt rein.

Alle Physiker stürzen sich auf Albert Einstein.

Der möchte aber eigentlich auch nur zur anderen Seite.

Kann er aber nicht so schnell, weil alle um ihn rumstehen.

Die machen ihn quasi schwer.

Ja, die machen es ihm schwer.

Die machen es ihm schwer, die machen ihm schwer.

Während Einstein selbst sich ja überhaupt nicht verändert hat.

Ne, genau, aber diese Wechselwirkung mit der Masse oder mit der Menge an Leuten, die da vorher gleich verteilt im Raum waren, jetzt klastern die um ihn rum und machen ihn quasi schwerer.

Es verklumpt sich bei Einstein.

Was passiert denn mit dem Rest des Raumes?

In meinem Bild ist das natürlich so, dass dann da weniger sind.

Ich glaube, in der Realität kann man das so direkt nicht sagen.

Da ist vielleicht auch mein Bild nicht ganz perfekt.

Hat das Higgs-Feld eine, also ich versuche es jetzt mit meinen Alltagsbegriffen zu fassen, hat das Higgs-Feld eine feste Dichte?

Ich stelle mir das so vor, da ist jetzt so ein Higgs-Feld, da will ein Quark durch und das Higgs-Feld bremst dieses Quark ab.

Dadurch erhält das Quark eine Quasimasse.

Aber da, wo es am Quark klumpt, da drum rum, müsste dann ja weniger Higgs sozusagen sein.

Oder füllt sich dieser Raum dann von irgendwoher?

Eigentlich verstehen wir das so, dass das Higgs-Feld sich im ganzen Raum befindet.

Dafür bin ich vielleicht nicht genug Theoretiker, um diese Frage genau zu beantworten.

Ich komme mir ein bisschen vor wie bei der Prüfung.

Dass ich das noch erleben darf.

Das Higgs-Feld ist beschrieben worden, aber es hat doch ewig gedauert, bis das

belegt wurde, oder?

Am Zern, diesen Durchbruch, das Higgs-Boson sei gefunden.

Was ist jetzt schon wieder ein Boson?

Das ist jetzt die zweite Stufe.

Also Peter Higgs, ich weiß, Peter Higgs hat damals 1964 das erste Papier eingereicht und da hatte er nur das Feld.

Dann ist es aber so, dass eigentlich in der Physik zu jedem Feld, das man hat, gehören normalerweise auch über kompliziertere Formeln, die wir jetzt nicht besprechen wollen, irgendwelche Teilchen dazu.

Und quasi zu jeder Kraft gibt es auch Kraftteilchen.

Und bei dem Higgs-Feld hat Peter Higgs, nachdem das Journal das beim ersten Einreichen gesagt hat, das gefällt uns noch nicht so, hat er gesagt, ich schreibe da noch meine Teilchen dazu.

Also so wie bei den anderen.

Das darf man einfach so.

Da hat er natürlich innerhalb der Mathematik und der Physik, macht das schon Sinn, das genau so hinzuschreiben und zu sagen, es entstehen eben einfach, es kommt aus den Formeln heraus, dass da noch extra Teilchen erwartet werden.

Das heißt, ich sage nicht nur voraus, hat Peter Higgs damals gesagt, dass es eben ein Higgs-Feld gibt, sondern dazu passend muss es auch noch ein Teilchen

geben.

Und ich kann ziemlich viel zu dem Teilchen sagen.

Ich kann nur nicht sagen, wie schwer das ist.

Und deshalb haben seit den 60er Jahren immer mal wieder Experimente versucht, das Higgs-Teilchen zu finden.

Also das Vorgängerexperiment oder der Vorgängerbeschleuniger von dem LHC, das Lab, hat versucht, das zu finden.

Das Lab kam aber nur zu einer Energie, die knapp unterhalb der tatsächlichen Higgs-Masse war und konnte das deshalb nicht erzeugen.

Dann gab es das Tefatron in Amerika.

Das hat es auch versucht zu finden, hat es auch nicht geschafft.

Und dann letzten Endes am LHC wurden dann die ersten Higgs-Bosonen erzeugt und dann sind die zerfallen und die Zerfallsprodukte wurden dann gefunden und in verschiedenen Kanälen, so wie genau vorhergesagt und dann eben mit einer Masse, die man nicht vorhersagen konnte.

Und jetzt wissen wir die Masse.

Jetzt wissen wir die Masse.

125 GeV.

Ich wollte gerade fragen, 125 was?

Giga-Elektronenvolt.

Das ist die typische Einheit, in der wir die Massen messen.

Was genau macht denn das Boson da im Higgs-Feld?

Also das Higgs-Feld besteht aus diesen Bosonen?

Ne, das wird auch erzeugt bei genug Energie und das zerfällt dann wieder in andere Teilchen.

Das verstehe ich nicht.

Also ich habe das Higgs-Feld, das ist hier so überall.

Das Higgs-Feld, das gibt allen Teilchen Masse.

Das Higgs-Feld gibt allen Teilchen Masse?

Allen Teilchen, ja.

Also auch mir letztlich in mehreren Iterationen?

Letzten Endes auch, ja.

Letzten Endes auch, ja.

Okay.

Weil ja, wir uns aus Elementarteilchen zusammensetzen.

Ich dachte, das hat mit Schwerkraft zu tun.

Was hat denn das Higgs-Feld mit Schwerkraft zu tun?

Naja, die Schwerkraft wird erzeugt durch die Elementarteilchen, die dann zu größeren Atomen und dann zur Erde und zur Sonne und so weiter werden.

Aber ursprünglich haben sie diese Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld und die sorgt ursprünglich zu der entsprechenden Masse, die das entsprechende Elementarteilchen hat und dann klumpen die ja zusammen und dann hat man größere Klumpen mit mehr Masse.

Das Higgs-Feld wirkt aber dann nur auf Ebene der Elementarteilchen.

Also ich interagiere jetzt nicht mehr mit dem Higgs-Feld, sondern ich interagiere mit dem nächstgelegenen Planeten oder was da so was.

Genau, über die Gravitation.

Okay, die Gravitation ist wieder was anderes.

Die ist wieder was anderes.

Das ist die vierte Kraft und da haben wir auch noch ein Problem mit in der Teilchenphysik denn die können wir nicht so richtig in unsere Theorie mit aufnehmen.

Das heißt, die Gravitation ist in der Lagrange-Formel auch gar nicht enthalten.

Das heißt, die Lagrange-Formel ist unvollständig?

Genau, die, die wir jetzt quasi haben als Modell für die Teilchenphysik, die ist noch unvollständig.

Genau, wir haben noch viele Rätsel vor uns.

Das mit dem Boson habe ich immer noch leider noch nicht so richtig verstanden.

Also ich habe das Higgs-Feld, da wandert jetzt mein Quark durch und weil es da durchwandert und abgebremst wird, bekommt es eine Masse.

Was macht jetzt das Boson?

Das macht in dem Fall erstmal nichts.

Wofür brauche ich es dann?

Das wird erzeugt, wenn man sehr viel Energie hat.

Also wenn das Quark besonders schnell durch will?

Oder wie?

Nee, wenn man einfach besonders viel Energie an einem Ort quasi konzentriert, dann hat man genug Energie, um schwerere Teilchen zu erzeugen, die jetzt nicht stabil sind.

Und das Higgs-Boson ist auch nicht stabil.

Es zerfällt dann wiederum in weitere Teilchen, bis dann irgendwann stabile

Teilchen entstanden sind.

Aber wozu brauchen Sie das Boson denn dann?

Also es ist nicht nur das Higgs-Boson, das ist die größte Menge aller Elementarteilchen.

Da fragt man sich, wozu braucht man das?

Das ist jetzt keine Antwort, aber ich glaube...

Nee, ich bin verblüfft.

Also es gibt hier, ich hatte ja erwähnt, es gibt das Proton, das besteht aus den Quarks, Ab- und Down-Quark und dann gibt es das Elektron.

Aber zu diesen Ab- und Down-Quarks und zu dem einen Elektron gibt es schwerere Geschwisterteilchen.

Die sind auch instabil.

Die werden auch nur erzeugt, wenn mehr Energie an einem Haufen zusammenkommt, um überhaupt diese Teilchen zu erzeugen.

Und das Higgs-Boson, das kann man auch erzeugen, wenn man eben sehr viel Energie hat.

Werden diese Geschwisterteilchen oder das Higgs-Boson, werden die im Alltag erzeugt oder tatsächlich nur im Experiment?

Im Alltag, wenn Teilchen aus dem Universum auf unsere Erdatmosphäre treffen,



dann können schon sehr, also wenn es hochenergetische Teilchen sind, es gibt nicht, also es passiert nicht alle, also ich glaube, es passiert eher selten, dass wirklich hochenergetische Teilchen auf die Erdatmosphäre treffen, aber schon, es passiert schon, eben nur viel seltener als niedere, niederenergetische Teilchen.

Also dann können auch Higgs-Bosonen erzeugt werden.

Und die machen dann aber nichts, die machen dann "Huii" und dann zerfallen die wieder.

Die zerfallen und dann landen Zerfallsprodukte auf der Erde.

Welche Zerfallsprodukte wären das?

Also typischerweise unten ankommen, ist das schwerere Geschwisterteilchen vom Elektron, das Myon.

Ah, Melodien für Myonen, haben wir auch schon mal gehabt, eine Sendung.

Ah ja, dann, ja genau.

Jetzt sagten Sie, mit der Schwerkraft haben Sie so ein Problem, darum ist ja auch gar nicht in der Lagrange-Formel drin.

Was ist denn Ihr Problem mit der Schwerkraft?

Die passt in die Theorie nicht so rein, würde ich sagen.

Sie ist auch nicht so entscheidend, weil die Schwerkraft sehr... Wenn ich mich auf die Waage stelle, dann finde ich die Schwerkraft durchaus entscheidend.

Auf unserer Skala ist die wichtig, aber auf Skala der Elementarteilchen haben wir so kleine Massen, dass die Schwerkraft quasi keine Rolle spielt.

Und es ist eher ein Theorie-Problem, würde ich sagen.

Also, das kann ich schwer erklären, ohne zu mathematisch zu werden.

Versuchen Sie es, im Zweifelsfall jammer ich rum.

Also die Theorie müsste gewisse Eigenschaften haben, die müsste lokal transformierbar sein.

Und das Lokale, das funktioniert irgendwie nicht, also in unserer Theorie.

Ich kann es leider nicht besonders gut beschreiben.

Jemandem, der es besser verstünde, wahrscheinlich schon, aber ich will mal nicht so sein.

Spielt die Schwerkraft auf Elementarteilchen-Ebene überhaupt keine Rolle?

Ich würde fast so weit gehen, zu sagen, ja.

Also nein, es spielt keine Rolle.

Weil die anderen Kräfte eben um so viele Größenordnungen größer sind.

Wir sprechen von 30 Größenordnungen oder noch mehr.

Also sie sind so viel stärker.

Die Nuonen sind so viel stärker als jede Schwerkraft, die sie auch nur aufbringen könnten.

Und auch die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen den Teilchen, wenn sie jetzt ein bisschen weiter auseinander sind, die ist auch stärker als die Gravitation.

Die Gravitation kommt erst ins Spiel, wenn man so große Himmelskörper hat und man selber auf dem Himmelskörper festgehalten wird aufgrund der Masse.

Aber irgendwas muss doch da, ich kann mir nicht vorstellen, dass da nichts interagiert.

Auf ein ganz geringes bisschen wahrscheinlich reagiert das schon, aber man kann es nicht messen.

Also es ist unmessbar klein.

Und mit dem Higgs-Feld? Interagiert die Schwerkraft mit dem Higgs-Feld?

Das ist in der Formel nicht vorgesehen.

Schöne Antwort. Dunkelheit als Industriestandard.

So, das Boson entsteht und zerfällt und wir wissen nicht, was wir mit dem Ding anfangen sollen.

Also das ist ja wichtig gewesen, um die Theorie, also die Theorie hat vorher gesagt, dass es das Boson gibt und dass wir das erzeugen können müssten.

Und zwar aus vielen anderen Messungen, die wir gemacht haben, konnten wir auch sagen, es gibt eine untere Grenze dafür, wie schwer das ist, und es gibt eine obere Grenze, wie schwer das ist.

Und wenn es dazwischen nicht gefunden wird, dann muss die Theorie falsch sein.

Und wenn es dazwischen gefunden wird, dann ist die Idee vom Higgs-Feld korrekt.

Ja, genau.

Also dann gibt es natürlich noch mehrere Vorhersagen, welches Teilchen eben, man hat ja das Gewicht von den, also die Masse von dem Elektron, von den Myonen, von den schwereren Teilchen, die hat man schon alle gemessen.

Vielleicht nicht auf so einer Standardwaage, auf der wir jetzt unser Gewicht messen, aber man hat es schon gemessen.

Und dementsprechend würde man vorhersagen, wie die Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld ist.

Und genau das hat man eben am LHC auch gemessen.

Und es verhält sich genauso, wie es vorher gesagt war.

Wie sehen solche Wagen aus?

Das sind ja keine Apparaturen, wo Sie dann so einen Gluron drauflegen.

Was wir im Prinzip machen, ist die Zerfallsprodukte messen und die

Geschwindigkeit des Teilchens messen.

Man hat zum Beispiel Kalorimeter.

Und was übrig bleibt, ist das Gewicht.

Genau, also man misst quasi die Energie, die beim Zerfall der Teilchen freigesetzt wird.

Und die kann man ziemlich genau messen.

Da gibt es verschiedene Arten und Weisen.

Also es gibt geladene Teilchen, die hinterlassen Spuren in Silizium, das so ähnlich ist wie das Silizium, was wir in unserer Handykamera haben.

Und man verfolgt die Spur im Magnetfeld und da kann man die Krümmung daraus rekonstruieren.

Wenn es stärker gekrümmt ist, war es nicht so schnell und nicht so schwer.

Wenn es weniger gekrümmt ist, dann hat es quasi viel Energie.

Und da kann man genau daraus rekonstruieren, wie schwer das Teilchen ist.

Und es gibt andere Detektoren, die zum Beispiel, wenn ein Teilchen reinfliegt, dann stoppen die das.

Man hat sehr viel Material, aber das Material ist zum Beispiel durchsichtig, so ein schweres Glas.

Und wenn das Teilchen gestoppt wird, entsteht durch die Wechselwirkung der Zerfallsprodukte Licht.

Und das Licht wird wiederum gemessen und die Lichtstärke gibt dann wieder Rückschluss darauf, wie schwer das Teilchen war, das ursprünglich drin gelandet ist.

Also sind es im Grunde immer nur indirekte Messungen?

Ja, es ist so ähnlich wie auf der Waage, da wird es ja dann auch nur in Zahlen angezeigt.

Wir haben dann eine Lichtstärke oder beziehungsweise einen elektrischen Strom, das wird umgewandelt.

Das muss vorher kalibriert werden, damit man weiß, wie viel Licht entspricht wie viel Energie.

Können Sie die Lagrange-Formel auswendig?

Nö.

(lacht)

Schade, dass wir kein Video machen, der Gesichtsausdruck war toll.

Also ich konnte sie bis vor zwei Wochen noch singen.

Ja, und mitgesungen.

Ja, ich habe auch mitgesungen, genau.

Also gesprochen, das war ja eher so ein Sprechchor.

Ja, genau.

So, jetzt das Compact Muon Solenoid Experiment.

Was ist das?

Es klingt dramatisch, ist es dramatisch?

Es ist eins der beiden sehr großen Experimente, die sehr viele verschiedene Messungen machen können am Large Hadron Collider.

Es gibt noch weitere Experimente, die mehr spezialisiert sind auf bestimmte Messungen.

Und das CMS-Experiment ist eben eins der beiden großen, das andere ist ATLAS.

Was heißt groß?

Groß, ah, das ist schwerer als der Eiffelturm.

Obwohl der Eiffelturm ist noch größer.

Moment, also da ist dieser riesige Beschleuniger.

Ja, der ist 27 Kilometer lang.

Das ist groß.

Das ist groß.

Also für Leute wie mich ist das groß.

Und jetzt sagen Sie, ja, da gibt es was Großes, das ist schwerer als der Eiffelturm.

Haben Sie da einen Detektor dranhängen?

Genau, also wir haben quasi, also wir fangen vielleicht bei dem Beschleuniger an.

In dem Beschleuniger werden Protonen beschleunigt und die werden aufeinander geschossen an einer bestimmten Stelle.

Und um diese Stelle rum bauen wir jetzt zwiebelschalenförmig einen Detektor auf, der aus verschiedenen Unterdetektoren besteht, die alle ihre verschiedenen Funktionen haben.

Also der eine misst Quarks, der andere Gluonen.

Der eine misst geladene Teilchen, der andere misst neutrale Teilchen.

Die hinterlassen nämlich in manchen Detektoren keine Spuren, die muss man dann abbremsen.

Ich wollte gerade sagen, die heißen ja nicht umsonst neutral.

Genau, die sind so neutral, die fliegen durch manche Detektorteile durch.

Und andere, ganz außen zum Beispiel, können wir mit Myon-Kammern die Myon messen, die durch alles durchfliegen.



Und weil wir so schöne Myon-Kammern in einem Magnetfeld haben, heißt unser Detektor Myon-Solenoid.

Und Solenoid ist Solenoid, das ist ein Magnet, der schöne gerade Magnetfeldlinien hat im Inneren.

Warum ist das so groß?

Das ist so groß.

Also jetzt muss ich erst mal erzählen, wie groß ist das denn überhaupt?

Das ist 20 Meter lang, 16 Meter hoch und wiegt ja so um die 14.000 Tonnen.

Der Eiffelturm wiegt um die 10.000 Tonnen.

Woraus besteht das Ding?

Ist das aus Plutonium?

Es besteht teilweise aus Material, das sehr leicht ist und dann tatsächlich aus sehr schwerem Material, um die Teilchen zu stoppen, die eben sonst nicht gestoppt werden.

Tatsächlich ist es, haben wir zum Beispiel Wolfram-Glas.

Wolfram ist ein sehr schweres Element und damit werden dann Glasstücke gemacht, die sind wirklich sehr schwer.

Wir haben hier an Desi auch ein Glas, das ein schweres Element enthält.

Ich weiß jetzt nicht mehr genau auswendig welches.

Aber wenn man so einen Block hat, weiß ich nicht, so 10 x 10 x 30 Zentimeter, den kriegt man erst mal im ersten Moment gar nicht hochgehoben, weil man nicht damit rechnet, dass Glas so schwer sein kann.

Wo kriegen Sie sowas her?

Das wird alles hergestellt für uns.

Die meisten Sachen werden alle speziell hergestellt, weil wir immer am Rand der Technik sind, um eben die Sachen zu messen.

Aber ich laufe ja jetzt nicht mal zu irgendeinem Autoscheibenhersteller und sage, hier mach mir mal einen Klotz Wolfram-Glas.

Das können die ja gar nicht.

Da hat man spezielle Hersteller.

Das Glas weiß ich tatsächlich nicht, aber ich weiß zum Beispiel, das Glas ist zuständig für den ersten Teil der neutralen Teilchen.

Das sind meistens die Lichtteilchen.

Die sind nicht nur im sichtbaren Bereich, sondern auch im Röntgenstrahlungsbereich und so weiter.

Die werden in diesem Glas gestoppt, die schauen dann auf und dann entsteht tatsächlich auch am Ende Licht.

Dann gibt es aber noch andere Teilchen, die sind auch neutral oder auch geladen.

Die fliegen dann noch durch.

Die müssen durch was Schwereres weiter hinten gestoppt werden.

Da haben wir eine andere Technologie.

Da haben wir Messing, dann haben wir eine relativ breite Lage Messing, so ein Zentimeter oder so.

Dann haben wir eine Lage aktiven Detektor, der misst wiederum Licht.

Dann haben wir wieder eine Lage Messing, wieder den aktiven Detektor und dann haben wir ganz viele Lagen davon.

Das sind tatsächlich Messingteile.

Das sind eingeschmolzene Patronenhülsen aus dem ersten Weltkrieg aus Russland.

Schwerter zu Pflugscharen.

Ja, genau, so ist es.

Russland hatte eben sehr viel von dieser Munition übrig.

Das war ein schönes Messing, das konnten wir da genau sehr gut für gebrauchen.

Die haben dann quasi so eine in-kind contribution gegeben, indem sie eben dieses teure Messing wiederverwendet haben, um unseren Detektor zu bauen.

Jetzt heißt Ihr Experiment "Kompaktmyonen".

Also Sie gucken nach Myonen.

Was genau wollen Sie da sehen oder was genau hoffen Sie da zu sehen?

Es gibt Zerfälle von dem Higgs-Teilchen, die vorhergesagt wurden.

Als wir das Experiment konzeptioniert haben, war die Idee, wir müssen das Higgs-Boson messen können.

Und das Higgs-Boson, das kann in vier Myonen zerfallen.

Über ein weiteres Teilchen, das sogenannte Z-Boson, da haben wir noch ein weiteres.

Oh, das habe ich auch schon mal gelesen irgendwo, ja.

Und diese Zs, die zerfallen sehr gerne mal in Myonen oder Elektronen.

Und Myonen kann man besonders gut messen.

Also erst mal sind das die einzigen Teilchen, eigentlich bis auf eine andere Sorte Teilchen, die man aber nicht nachweist, die tatsächlich aus dem Detektor rausfliegen und die auf der anderen Seite quasi von diesen ganzen, was ich gerade erklärt habe, ganzen Detektoren noch ankommen.

Und der Detektor ist so konzeptioniert worden, dass er eine sehr gute Auflösung von dem Impuls der Myonen messen kann.

Und nur wenn man eine gute Auflösung hat, kann man die Masse genau bestimmen.

Und das wollten wir ja.

Und das ist Ihnen gelungen?

Das ist uns gelungen, genau.

Das ist einer der Kanäle, in denen das Higgs-Boson zerfällt, der 2012, als wir die Messung bekannt gegeben haben, genutzt wurde.

Das ist jetzt so grundlegende Grundlagenforschung, dass die Frage, was machen Sie mit diesem Wissen, wahrscheinlich völlig deplatziert ist, oder?

Also ich glaube, es ist nicht bei der Grundlagenforschung ist einerseits natürlich, dass man verstehen möchte, woraus das Universum besteht.

Andererseits forschen wir eben, also wir versuchen, Sachen zu messen, die vorher noch nicht gemessen wurden und sind immer am Rand des Möglichen und versuchen dann für unsere Zwecke, Sachen neu zu entwickeln.

Und was dabei herauskommt, das kann ja dann auch für die Allgemeinheit von Nutzen sein.

Und wenn es in 100 Jahren ist, das ist ja erstmal... Ja, also es ging ja los mit dem World Wide Web.

Also wir schicken ja auch unsere Daten immer durch die ganze Welt.

Ja, hätte Berners-Lee nicht da gearbeitet, wäre das Ganze vielleicht ganz anders gekommen.

Wäre das vielleicht ganz anders gekommen, genau.

Manchmal muss man nach Indien fahren, um die USA zu finden.

Und naja, unsere Detektoren sehen ja im Prinzip aus wie so eine... Also man kann Positronen-Emissionstomographie machen oder Computertomographie.

Und wenn man so einen Computertomografen... Die sind ja immer so schön weiß, da ist so eine weiße Abdeckhaube drauf.

Wenn man die abnimmt, sieht das eigentlich aus wie unser Titan-Disk Experiment.

Wie eine Höllenmaschine.

Da sind dann auch ganz viele Detektoren drin.

Und je genauer wir unsere Detektoren bauen, das kann dann wieder in diese Computertomografen zum Beispiel eingehen.

Dann braucht man weniger Strahlung, um den Menschen zu durchstrahlen.

Zum Beispiel.

Jetzt hat, sagt sie gerade, also Sie haben CMS gebaut, Sie haben die Masse des Bosons gemessen.

2012 war das.

Was haben Sie danach mit dem Ding gemacht?

Haben Sie es dann einfach wieder abgebaut?

Nee.

Nein, das läuft noch.

Das läuft noch.

Warum?

Sie haben doch die Masse schon gemessen.

Wir wollen ja noch viel mehr verstehen.

Sie hatten ja am Anfang gefragt, warum ist denn die starke Wechselwirkung so, wie sie ist.

Also auch das wollen wir genauer messen und dann mit der Theorie vergleichen.

Und dazu brauchen wir Präzisionsmessungen.

Und für Präzisionsmessungen brauchen wir sehr, sehr, sehr viele Daten.

Wir brauchen einen sehr, sehr gut kalibrierten Detektor, um eben diese Daten auch möglichst genau analysieren zu können.

Das kann schon mal Jahre dauern.

Also es werden Protonen aufeinander geschossen.

Ja, genau.

Und Sie wollen wissen, warum verhält sich die starke Kraft, wie sie sich verhält?

Wie lautet die Frage an die Explosion, die dann da passiert, wenn die Protonen zusammenstoßen?

Also man kann ausrechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit welche neuen Teilchen entstehen.

Und man kann ausrechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit welche Teilchen im Proton überhaupt aufeinandertreffen und was für neue Teilchen dabei entstehen.

Und das kann man in der Theorie auch nicht direkt exakt alles vorhersagen, sondern man macht eine Vorhersage und dann macht man eine Korrektur.

Also man sagt ja "leading order", also in erster Ordnung.

Dann macht man eine Korrektur der höheren Ordnung.

Dann gibt es nochmal Korrekturen der zweithöheren und mitthöheren Ordnung.

Korrektur heißt jedes Mal einmal Beschleuniger gefeuert?

Ne, das heißt in der Theorie Dinge gerechnet.



Und das muss man dann vergleichen mit dem, was man tatsächlich misst.

Und je höher die Korrekturen sind in der Theorie, desto besser versteht man die Theorie.

Aber man kann auch nur diese Korrektur überhaupt im Experiment sehen, wenn das Experiment genau genug ist.

Also man versucht zum Beispiel auch die Masse von anderen Elementarteilchen genauer zu messen.

Wir haben zum Beispiel gerade die Masse vom W-Boson.

Das ist noch ein Boson.

Was macht das?

Gemessen, das ist das Überträger der schwachen Kraft.

Die haben wir auch noch gar nicht besprochen.

Also das Higgs zerfällt ins Z, das Z zerfällt in Mionen und Elektronen.

Genau, das ist eine der Möglichkeiten.

Das Higgs könnte aber auch in zwei Lichtteilchen zerfallen.

Och ne.

Das kann auch in zwei Quarks zerfallen, sehr gerne.

Und zwar gerade in die schweren Quarks, weil das ja an die Masse koppelt.

Also die Kopplung über das Higgs-Teilchen funktioniert ja mit der Masse und deswegen zerfällt das Higgs auch so gerne ins Z, weil das Z auch schwer ist.

Und die schwerste Generation der Quarks, das sind die B-Quarks, das ist die dritte Generation, da zerfällt das Higgs-Teilchen auch sehr gerne rein.

Das ist aber ein bisschen ein erratisches Teilchen, oder?

Das hat eben eine Wahrscheinlichkeit.

Die Wahrscheinlichkeit, dass es zerfällt in Quarks, ist am höchsten.

Also die Wahrscheinlichkeit mit Quarks weiß ich tatsächlich auswendig nicht, aber ist um die 60 Prozent.

Während die Zerfallswahrscheinlichkeit in zwei Lichtteilchen ist nur in Größenordnung 1 Prozent.

Und tatsächlich haben wir das mit den B-Quarks, obwohl das so häufig passiert, nicht so einfach nachweisen können, weil es da andere Prozesse gibt, wo die auch so zerfallen.

Das ist viel schwieriger zu finden.

B-Quarks?

Ich bin noch bei Up- und Down-Quarks.

Ja, dann gibt es die zweite Generation, das ist Charm und Strange.

Und dann gibt es die dritte Generation, Top und Bottom.

Also es gibt tatsächlich drei Generationen von Quarks.

Generationen im Sinne von die Zerfallenden ineinander?

Genau, die Zerfallenden.

Also die B-Quarks zerfallen dann wiederum in die zweite und dann die erste Generation.

Und das W-Boson?

Das W-Boson, das kann auch in zwei Quarks zerfallen oder das zerfällt auch in ein Elektron, Myon oder dann gibt es ja noch die dritte Generation von dem Elektron und Myon, das ist das Tau.

Und dann, da das W aber geladen ist, kann es nicht in zwei Elektronen oder Myonen zerfallen.

Das zerfällt dann in das andere Teilchen, das es auch noch gibt, das Neutrino.

Ah, von dem haben wir ja schon häufiger gehört, weil es so schwer zu detektieren ist.

Genau.

Das ist für uns auch nicht so zu detektieren.

Das detektieren wir dadurch, dass wir es nicht sehen.

Also wir rechnen quasi aus, wie viel Energie wir erwarten würden und sehen, es fehlt Energie.

Ah, ok, und die fehlt, muss das... Genau, das müsste das Neutrino sein, das es weggetragen hat.

Oder es ist ein ganz anderes Teilchen dann vielleicht noch entstanden, so ein dunkler Materieteilchen.

Das ist eigentlich mein Lieblingsgebiet, danach suche ich immer.

Sie suchen nach dunkler Materie?

Mhm.

Aber die wurde bisher nur im Weltraum gemessen und wir würden die gerne im Labor entdecken.

Und das würde ich gerne erzeugen, eben bei hohen Energien.

Wie würden Sie das tun?

Also welche Vorstellung haben Sie davon?

Also das würde ich genauso erzeugen wollen, wie alle anderen Elementarteilchen.

Ich schieße die Protonen aufeinander, dabei entsteht viel Energie an einem ganz kleinen Punkt und da kann ich eben das Higgs-Teilchen erzeugen, könnte aber

vielleicht auch Teilchen erzeugen, die ich noch gar nicht kenne.

Weitere neue Teilchen.

Das ist auch ein Teil des Forschungsprogramms, das wir am LHC haben.

Aber Sie haben ja jetzt ein Problem.

Sie wissen, wie viel Energie Sie reingeben, Sie wissen, wie viele Protonen da unterwegs sind.

Sie kennen ja alle Randbedingungen.

Dann macht es bumm, es kommt nicht alle Energie wieder raus, die Sie reingesteckt haben und das muss das Neutrino sein oder ein noch zu benennendes Dark Matter Teilchen.

Aber woher wissen Sie den Unterschied?

Ich kann ja ausrechnen von den Teilchen, die ich alle kenne, also zum Beispiel von dem W-Boson oder von dem Z-Boson, wie viel davon entstehen und ich weiß auch, mit welcher Wahrscheinlichkeit die dann wiederum in Zerfälle zerfallen, wo dann Neutrinos bei entstehen.

Wenn wir jetzt mehr davon sehen würden oder ich kann vorhersagen, eine gewisse Menge Energie fehlt typischerweise, wenn in diesen normalen Prozessen, die wir kennen, die wir Standardmodellprozesse nennen, wenn da Neutrinos erzeugt werden, dann fehlt eben eine bestimmte Menge Energie typischerweise.

Ah, okay.

Und falls da ein bisschen mehr fehlt?

Genau, wenn da mehr fehlt oder in mehr Ereignissen, also wir schießen die Teilchen immer aufeinander, dann ist es, immer wenn wir die aufeinander schießen und das nehmen wir auf, das nennen wir ein Ereignis.

Es kann auch sein, dass es einfach mehr Ereignisse gibt, wo Energie fehlt, als wir eigentlich vorher gesagt haben.

Deswegen müssen wir so viele Messungen machen und so lange messen und nicht nur einmal den Knopf drücken, dann haben wir die Messung und dann sind wir fertig, sondern wir messen jahrelang.

Wie lange dauert eigentlich so eine Messung?

Also einmal feuern und dann Daten nehmen?

Also es ist ein Unterschied zwischen einmal feuern und Daten nehmen und die Daten dann analysieren.

Ja.

Also erst einmal geht es los, dass der LHC befüllt wird mit den Protonen.

Das dauert ungefähr eine dreiviertel Stunde, bis dann die Energie auch erreicht ist.

Also es fängt mit, man fängt mit niedriger Energie an, dann schiebt man denen immer mehr Energie.

Also jedes Mal, wenn das Proton im Kreis fliegt, gibt es eine Stelle, wo es Schwung kriegt und wenn es dann die höchste Energie erreicht hat, das ist ungefähr so nach einer dreiviertel Stunde der Fall.

Und dann werden die alle 25 Nanosekunden, also 40 Megahertz, ich weiß nicht, ob man das sich so gut vorstellen kann, aber alle 25 Nanosekunden werden die aufeinander geschossen.

Und alle 25 Nanosekunden sind wir bereit, die Daten zu nehmen.

Wir gucken aber, nicht jedes Ereignis ist interessant, nur jedes millionste Ereignis überhaupt ist interessant.

Also die Higgs-Bosonen, die sind doch viel seltener als die Standardprozesse, die normalerweise passieren, wenn wir Protonen aufeinanderschießen.

Also wir müssen schon sehr viele Protonen aufeinanderschießen, um überhaupt ein paar Higgs-Bosonen zu haben.

Und wie viele Monate sitzen Sie danach an den Daten?

Genau, das ist eine gute Frage.

Also die Daten, die wir genommen haben, um das erste Mal überhaupt das Higgs zu sehen, da haben wir 2010 angefangen und 2012 haben wir das publiziert.

Das war noch schnell.

Wenn wir richtig in Präzisionsmessungen gehen, also wir haben einmal Daten genommen, die die Datennahme-Periode war von 2010 bis 2012.

Dann haben manche Detektoren ein Upgrade bekommen.

Dann haben wir 2015 bis 2018 gemessen und wir publizieren immer noch Daten, die in diesem Bereich genommen wurden.

Und eine Messung war eben eine ganz genaue Messung der W-Masse, die auch eine ganz wichtige Messung ist, weil es da vorherige Messungen gab, die sich widersprochen haben.

Die hatten einen Fehler auf die Masse und zwei Messungen haben einmal zwei unterschiedliche Werte ergeben, die nicht richtig kompatibel waren.

Und da war das schon wichtig, dass wir jetzt noch mal eine weitere Messung mit einem unabhängigen Experiment machen.

Und diese Messung haben wir dieses Jahr veröffentlicht und es ist eben von den Daten, die 2016 genommen wurden.

Und die wurden so lange bearbeitet und kalibriert und da mussten die Detektoren genau verstanden werden und das dauert einfach sehr lange.

Ich dachte, Sie verstehen die Detektoren, wenn Sie die bauen.

Die verstehen aber die Energie, die genau rauskommt, wenn man ein bestimmtes Zeichen reinschießt.

Da kann man schon sehr viel Zeit mit verbringen, den Fehler darauf sehr klein zu bekommen.

Wie stelle ich mir das vor?



Es macht Peng und in dem Moment schreiben sich Terabyte um Terabyte Daten auf eine Festplatte?

Ja, so ungefähr kann man sich das schon vorstellen.

Es ist nicht ganz so, es wird erst gefiltert.

Es gibt Filter.

Es gibt den ersten Level, der ist mehr so auf Hardware basierend.

Lässt nur eine bestimmte Stromstärke durch.

Genau, man muss quasi in einem Detektorteil an mehreren Stellen quasi in so einer Art Cluster interessanter Energie haben über einer gewissen Schwelle und dann lesen wir das ganze Ding aus.

Ansonsten lassen wir das.

Weil das Auslesen kann man auch nicht in einer Geschwindigkeit von 25 Nanosekunden.

Das dauert ein bisschen länger, bis die Daten komplett ausgelesen sind.

Und dann gibt es eine Computer-Farm, die hat dann einen zweiten Filter und wenn der Filter sagt, das ist ein interessantes Ereignis, dann werden die Daten weggeschrieben.

Das hat auch was Frustrierendes, oder?

Dazu sitzen wir jetzt wertendlich fertig.

Naja, man hat schon viel zu tun.

Und man macht das auch nicht alleine, sondern man hat eben Gruppen, für jeden Detektor ist eine Gruppe zuständig, die guckt, ob der Detektor auch gut funktioniert hat oder ob es irgendwo ein Problem gab.

Dann muss man die Daten wegschmeißen.

Das passiert Gott sei Dank nicht so häufig.

Dann muss man eben sehen, zum Beispiel man kennt die Masse vom Z-Boson sehr gut.

Dann nimmt man die Masse vom Z-Boson und guckt, ob die immer gleich ist über das ganze Jahr, das man Daten nimmt.

Dann stellt man fest, die ist mal ein bisschen höher, mal ein bisschen niedriger.

Das heißt, die Masse hat sich aber nicht verändert, sondern unser Detektor hat Performance, die zeigt manchmal zu viel und manchmal zu wenig an und dann muss man das nachziehen.

Die Waage ist falsch kalibriert.

Genau, das denke ich mir auch jedes Mal, wenn ich morgens auf die Waage gehe.

Heute ist schon wieder irgendwas schief gelaufen, die zeigt schon wieder zu viel an.

Und so ähnlich ist es da auch.

Dann wird das quasi zurückgefüttert und dann wird das nochmal alles rekonstruiert und es wird geguckt und man sieht, es wird besser.

Und das kann man dann mehrfach machen und man kann verschiedene Detektoren nochmal verbessern, damit es die finale Messung dann gut wird.

Und dann ist es relativ schnell, dass man im Prinzip sagt, ich selektiere jetzt nur Ereignisse, wo so ein Z-Boson drin ist oder ich selektiere nur Ereignisse, wo ein Higgs-Boson drin ist.

Dann muss man sich aber überlegen, was ist denn der Fehler, den ich da habe.

Natürlich habe ich einerseits die Anzahl der Ereignisse, das ist einfach ein statistischer Fehler, aber dann haben wir noch systematische Fehler und die muss man sich genau überlegen und studieren.

Und da gibt es viele verschiedene Möglichkeiten, das genau zu untersuchen und das kann gerne mal ein Jahr dauern.

Das ist auch typischerweise was in der Doktorarbeit, wo man in der Doktorarbeit mindestens ein Jahr dran sitzt, diesen systematischen Fehler zu verstehen.

Was könnte so ein systematischer Fehler sein?

Also es gibt natürlich viele verschiedene Möglichkeiten.

Insbesondere ist die Energieskala, also quasi genau mit der man dann übersetzt, die Masse des Teilchens entspricht dieser Energie, die ich im Detektor gemessen habe.

Da gibt es verschiedene Möglichkeiten, je nachdem welches Teilchen durch den Detektor geflogen ist, reagiert der vielleicht ein bisschen anders.

Je nachdem, an welcher Stelle im Detektor man ist, hat man einen anderen Lichtoutput.

Das muss man alles genau untersuchen.

Also Sie müssen im Grunde, idealerweise würden Sie jedes Atom des Detektors genau kennen.

Ja genau, dann könnte ich das simulieren.

Wie so ein Pixelfehler in der Digitalkamera sozusagen.

Ja, wenn man so einen Pixelfehler hat, dann müsste man schon genau diesen Pixel auch rausrechnen.

Und den würde man am liebsten, also da würde man dann, dann haben wir natürlich eine Simulation, die alles simuliert.

Die, also wie sagt man heutzutage immer so schön, Digital Twin.

Wenn ich dann Digital Twin baue, da denke ich ja, das machen wir ja schon seit 20 Jahren, Digital Twins bauen.

Wir haben es nur nicht Digital Twin genannt.

Also wir haben dann eben ein Programm.

Hätten Sie es sich mal patentieren lassen.

Wir haben dann ein Programm, wo wir für jeden Teil des Detektors dann genau drinstehen haben, welches Material, welche Form hat das.

Und dann wird simuliert, dass da ein Teilchen durchfliegt und wie sich das dann in diesem Material verhält.

Wie oft das dann aneinander stößt, wann es wieder in weitere Teilchen zerfällt.

Das ist ziemlich genau, aber natürlich nicht perfekt, weil die Detektoren, die haben dann auch Kabel.

Die Kabel werden irgendwie gezogen.

Die sind ja vielleicht nicht genau an der Stelle, wo man das in der Simulation hat.

Können Sie im Digital Twin auch ein Experiment simulieren?

Ja, ja, das machen wir.

Also das ist genau das, was wir letzten Endes machen.

Aber da haben wir natürlich unsere Annahmen drin.

Ja, also wir haben.

Also immer das perfekte Experiment, was da rausfällt.

Ja, ja, genau.

Also wenn wir quasi, wir simulieren das, was wir erwarten.

Und wenn wir dann zum Beispiel was anderes sehen würden, dann könnte das zum Beispiel die dunkle Materie sein.

Haben Sie denn überhaupt schon mal dunkle Materie?

Ich finde ja, dunkle Materie, das ist ja eigentlich eine Kategorie.

Das ist ja gar kein Ding.

Eigentlich ist es ja ein bisschen Wohlfall, von dunkler Materie zu reden.

Wäre es nicht irgendwie, will man nicht wissen, woraus die besteht?

Ja, das wissen wir ja nicht.

Das ist das Problem.

Darum ist sie dunkel.

Also die ist deshalb dunkel, weil sie im Universum gefunden wurde und quasi nicht leuchtet.

Anhand der Leuchtkraft haben wir immer gemessen, wie schwer sind die Sterne.

Aber irgendwie ist da mehr Energie.

Also da ist mehr Masse, aber die leuchtet nicht.

Deswegen haben wir sie einfach dunkle Materie genannt.

Haben Sie denn schon dunkle Materie "gesehen"?

Nee, natürlich nicht.

Das hätte ja sein können.

Das war das Higgs, das möglicherweise in dunkle Materie zerfallen ist.

Genau, das könnte auch sein.

Aber die Wahrscheinlichkeit wird immer geringer, mit immer mehr, was wir über das Higgs wissen.

Es gibt eine gewisse Wahrscheinlichkeit.

Wir gucken uns ja die möglichen Zerfälle von dem Higgs-Boson an.

Wir haben in der Theorie ausgerechnet, zu so und so viel Prozent zerfällt es in das, zu so und so viel Prozent in das.

Und wenn wir das dann alles gemessen haben, dann haben wir irgendwann die 100 Prozent voll.

Dann bleibt nichts mehr übrig für die dunkle Materie.

Genau, sie messen, desto weniger.

Genau, ja, verstehe.

Und jetzt aber ein paar Prozent sind im Moment noch über, in denen das passieren könnte.

Aber da müssen noch mehr Daten genommen werden.

Wenn das jetzt nicht die dunkle Materie ergeben sollte, wo würden Sie dann als nächstes nach dunkler Materie gucken?

Oh, ich würde am liebsten einen neuen Beschleuniger bauen.

Geld spielt ja keine Rolle.

Das stimmt, das hatte ich eben gesagt.

Also 100 TeV wäre schon nicht schlecht.

100 TeV?

Im Moment sind wir bei 13,6, also so ein Faktor 10.

Dann hätten wir schon mal eine Chance da vielleicht noch.

Also der der Energiemenge, die Sie da reinstecken könnten.

Und das ist ja, also die Energiemenge, die man in einen Beschleuniger steckt, ist ja im Grunde seine Länge.

Also man kann im Prinzip mehr Energie reinstecken.

Man könnte auch mehr Energie in den LHC stecken.



Das Problem ist, dass der Magnet muss das Proton auf Kurs bringen.

Und das ist wie wenn man im Rennauto fährt.

Je schneller man fährt, desto schlechter kommt man um die Kurve.

Das heißt, Sie bräuchten doch einen größeren Ring?

Ich bräuchte einen größeren Ring.

Einen Magneten?

Einen stärkeren Magneten.

Daran forscht das CERN schon sehr lange.

Man kann Magneten nicht beliebig stark machen?

Nee.

Also man muss daran forschen?

Ich hätte gedacht, man gibt da einfach mehr Strom drauf.

Nee, die sind ja supraleitend und da ist irgendwo eine Grenze.

Also das gibt dann andere supraleitende Materialien.

Und es gibt eben viel Forschung dazu, welches Material besser ist.

Und es gibt schon ein Material, wo man eine stärkere Feldstärke erzeugen kann.

Aber das würde nicht reichen für die 100 TV, die ich gerne hätte.

100 TV?

Was ist das?

Das ist Terraelektronenvolt.

Terraelektronenvolt?

Ach, das hatten wir ganz am Anfang.

Genau.

Also im Prinzip beschleunigt man Elektronen auf einen Meter mit einem Volt.

Das ist dann ein Elektronenvolt.

Und wenn ich das jetzt mit Terraelektronenvolt mache, dann ist es eben deutlich mehr als ein.

Ein paar tausend mal ein paar tausend.

Genau.

Ja.

Und wenn Sie den nicht kriegen?

Ja, dann, also.

Dann war es was mit der dunklen Materie.

Dann wird das schwierig.

Also wenn wir keinen stärkeren Beschleuniger haben, wird es schon schwierig, nach der dunklen Materie auf der Erde zu suchen.

Es könnte sein, dass die natürlich im Universum sowieso unterwegs ist.

Da gibt es andere Detektoren, die suchen quasi nach dem Zusammenstoß.

Also die Vermutung ist, dass auch hier bei uns auf der Erde oder um die Erde herum im Weltraum es dunkle Materie gibt anhand der Bewegung der Sterne.

Und dann müsste ja diese dunkle Materie auch mal irgendwo bei uns durchs Labor fliegen.

Und dann haben wir da Detektoren stehen.

Also da arbeite ich jetzt nicht dran, aber Kollegen von mir arbeiten da dran.

Das sind Detektoren.

Wenn die dunkle Materie da durchfliegt und zufällig auf einen Atomkern stößt, dann würde der ja angestoßen werden.

Dann würde der wiederum Strahlung abgeben, nachdem er angestoßen wurde.

Hat er aber noch nicht gemacht.

Das ist genau das Problem.

Also bisher ist das alles kompatibel.

Damit ist keine dunkle Materie gefunden worden.

Aber da werden immer größere Detektoren gebaut, damit man immer sensitiver ist.

Weil man ist natürlich, wenn man nur so ein kleines Ding baut, ist die Wahrscheinlichkeit, dass da mal eine dunkle Materie durchfliegt, die dann auch noch gerade so einen Atomkern trifft, der nicht so groß.

Haben wir fürs Neutrino ja auch lang genug gedacht.

Das kriegen wir nicht erwischt.

Und dann haben wir es dann doch erwischt.

Genau.

Eine Handvoll mal.

Genau.

Eins hatten wir noch, was ich auch nicht wirklich verstehe.

Die schwache Kraft haben Sie eben noch erwähnt.

Und zwar, ich gucke auf meine Notizen im Zusammenhang mit dem Weboson.

Genau.

Das ist das Überträgerteilchen.

Die schwache Kraft ist dann wichtig, wenn wir radioaktiven Zerfall haben.

Also wenn man zum Beispiel ein Neutron hat, das in Protonen zerfällt.

Das ist das Einfachste, was wir an radioaktivem Zerfall haben.

Dann entsteht tatsächlich, also dann wandelt sich das eine Down-Quark um in ein Up-Quark und strahlt dabei ein Weboson ab.

Das ist das, was auf mikroskopischer Ebene passiert beim radioaktiven Zerfall.

Und da brauchen wir die schwache Kraft zu, sonst wird es nicht funktionieren.

Strahlt ein Weboson ab?

Wohin?

In die Umgebung und dann ist es weg?

Nein, das Weboson zerfällt dann wiederum in ein zum Beispiel Elektron und ein Neutrino.

Und das können wir dann wieder messen.

Das ist dann quasi dieser radioaktive Zerfall, das ist dann so ein Beta-Zerfall, was man vielleicht schon mal gehört hat in der Schule.

Das Beta-Teilchen, das ist dann Elektron.

Heißt das Beta, weil es der zweite Schritt im Zerfall ist?

Ich weiß gar nicht, warum man das damals Beta genannt hat.

Doch, wahrscheinlich, weil es gibt hier Alpha-Teilchen, das sind die Heliumkerne des anderen radioaktiven Zerfalls.

Dann gibt es Beta und dann gibt es Gamma, das sind die Röntgenstrahlen.

Genau, deshalb heißt es.

Wahrscheinlich ist es als zweites gefunden worden, dass man das dann Beta genannt hat.

Kann natürlich auch sein, ja.

Das alles, was wir jetzt besprochen haben, mit Ausnahme der Gravitation und der dunklen Materie, finde ich das alles in der Lagrange-Formel wieder, die Sie da gesungen bzw. rezitiert haben?

Ja, genau.

Die bringt quasi, das haben wir in der Musik, haben wir uns das so überlegt, die bringt quasi die Ordnung in das Universum.

Also die Lagrange-Formel enthält die Kräfte und die Kräfte sorgen dafür, dass sich alles auf der Welt so verhält, wie wir das kennen.

Dass alles in gewisser Ordnung passiert.

Außer, dass mehr Masse da zu sein scheint.

Genau, genau.

Ja, und in dem Konzert ist es so, dass die Musik eher so ein bisschen ungeordnet ist und dann kommen die Physiker, rezitieren die Formel und dann... Ist die Welt wieder in Ordnung.

Genau.

Isabel Melzer-Pellmann, vielen Dank.

Vielen Dank auch.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

Vielen Dank.

[Musik]

[Ende]