

3. Jan 21.35.25

RES166_Beate_Heinemann_und_das_Vaku

Willkommen zum Forschungspodcast der Helmholtz-Gemeinschaft.

Ich bin Holger Klein.

Resonator Beate Heinemann ist leitende Wissenschaftlerin beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY, kennbar in Hamburg, und Professorin für experimentelle Teilchenphysik an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg.

Hallo Frau Heinemann.

Hallo.

Ich habe auf Ihrer Webseite am DESY gelesen, Sie forschen an den fundamentalen Teilchen im Universum und deren Wechselwirkung, dabei insbesondere an der schwachen Wechselwirkung und am Higgs-Teilchen.

Und außerdem suchen Sie nach dunkler Materie am Large Hadron Collider in Genf und nebenbei konstruieren Sie auch noch Spurdetektoren, aber für das nächste Jahrzehnt.

Habe ich irgendwas vergessen?

Ja, eigentlich schon.

Also, ja, ich habe, ja, also ich arbeite jetzt seit Neuestem auch noch an einem neuen Experiment.

Also, was Sie gerade eben aufgezählt haben, das klingt nach sehr viel, aber letztlich geht das alles sehr Hand in Hand und passiert alles am Large Hadron Collider am CERN.

Aber ich habe seit Kurzem auch noch ein, arbeite an einem neuen Experiment oder an einem Design eines neuen Experiments direkt am DESY.

Aber, ja.

Und was ist das dann?

Oder wie heißt das dann?

Das heißt LAX-I.

Da versuchen wir, da wollen wir versuchen, das Vakuum besser zu verstehen.

Also es ist ja, ja, also das, wobei die Higgs-Forschung zielt auch darauf ab, das Vakuum besser zu verstehen.

Ja, also man denkt ja als Laie letztlich, dass das Vakuum nichts ist, ja, dass das Vakuum leer ist, dass da überhaupt nichts drin ist.

Bin ich die ganze Zeit von ausgegangen, obwohl ein Kollege von Ihnen schon mal gesagt hat, dass ein Vakuum was faul wäre.

Okay, ja, genau.

Aber das erste Mal ist nicht so, also das klassische Vakuum ist tatsächlich nichts, dass es total leer ist.

Aber in der Quantenphysik haben wir schon seit 100 Jahren letztlich verstanden, dass Vakuum eben nicht leer ist, sondern es kann die ganze Zeit, also es ist eigentlich hochdynamisch und zwar kann es die ganze Zeit passieren, dass kleine Paare von Teilchen und Antiteilchen, also Materie und Antiteilchen, werden die ganze Zeit im Vakuum erzeugt, aber vernichten sich auch sofort wieder.

So das Netto ist tatsächlich nichts.

Aber wenn, wenn ich das Universum jetzt zu einer ganz, ganz, von einem ganz, ganz kleinen Bruchteil der Sekunde einfrieren könnte, dann wäre da Netto nicht nichts.

Aber wenn man, wenn ich jetzt ermittle über eine längere Zeit, dann ist im

Durchschnitt nichts.

Aber zu jedem Zeitpunkt passiert eigentlich sehr, sehr viel.

Das Vakuum ist im Durchschnitt nicht leer.

So, nee, das Vakuum ist nur im Durchschnitt leer.

Ist nur im Durchschnitt leer, genau.

Wissen Sie das oder vermuten Sie das?

Also das ist, also in unseren gleichen Jungen passiert das so, ja.

Das ist, also insofern wissen wir es schon.

Das ist immer ein bisschen eine Frage, was man sagt, was Wissen ist oder nicht.

Also sagen wir mal so.

Aber das ist unser Kenntnisstand der Forschung.

Also wir haben, wir haben ja Formeln sozusagen, oder wir haben ja Formeln, die die Welt beschreiben, so gut wir können.

Und dann haben wir eben Experimente und solange diese Experimente dann mit den Formeln übereinstimmen, dann sagen wir, so ist unser Verständnis, ja.

Und es gibt tatsächlich Experimente, die das gezeigt haben, dass wenn man nun das Vakuum, das ist auch ähnlich zu dem Experiment, das ich jetzt hier vorhabe und auch was am LHC eigentlich passiert.

Also man kann eben das Vakuum zum Beispiel in ein sehr starkes Feld stecken sozusagen und dann passiert ist, dass diese Teilchen nicht sich gleich wieder vernichten, sondern es kann passieren, dass die dann tatsächlich reell werden.

Also wir reden von virtuellen Teilchen, wenn sie sich sofort wieder vernichten, dass man, aber wenn sie dann reell werden, das heißt, dass sie wirklich massiv

aufzutreten, das wurde schon beobachtet.

Also ja, ja, das wissen wir eigentlich.

Ich komme nochmal, ich gehe ein bisschen früher.

Warum überhaupt betreiben wir Teilchenphysik?

Ja, genau, gute Frage.

Letztlich geht es nämlich nicht darum, unbedingt neue Teilchen zu finden.

Was wir ja verstehen wollen, ist wie die Welt, also Goethe hätte gesagt, was die Welt im Innersten zusammenhält.

Was sind die Naturgesetze, die agieren so, dass die Welt so ist, wie sie nun mal ist?

Ich dachte, das wissen wir längst.

Das ist für mich, nicht wirklich.

Also das ist meiner Meinung nach, die interessante, weil wir können die Welt beschreiben, also zum Beispiel können wir beschreiben die Schwerkraft, wir können beschreiben, dass der Apfel vom Baum fällt.

Wir können beschreiben, dass die Planeten um die Sonne kreisen zum Beispiel.

Wir verstehen aber nicht zum Beispiel, warum hat die Schwerkraft die Kraft, die sie hat.

Also zum Beispiel eine Schwerkraft, die ist eine Naturkonstante, die auftritt G , Groß G , also gut, die hat einen Wert, ja.

Und wir wissen ja nicht, warum die diesen Wert hat.

Und es reicht Ihnen nicht zu sagen, ja, ist halt so.

Das hat der liebe Gott so eingerichtet.

Ja, genau, das ist die Sache.

Dann muss man, also meiner Meinung nach, das ist eine wahnsinnig spannende Frage, warum sind die Naturkonstanten so, wie sie sind?

Wenn sie anders wären, also gut, bei der Gravitation habe ich jetzt kein gutes Beispiel, aber eine andere, andere Kräfte zum Beispiel, also wissen wir, das Proton und das Neutron, das Proton ist minimal leichter als das Neutron, ja.

Wenn das andersrum wäre, hätte es nie Atome gegeben, könnte es keine stabilen Atome geben.

Oder wenn die, das Elektron, die Masse 100 mal schwerer wäre, dann könnte es auch keine stabilen Atome geben.

Dann wäre eben einfach alles anders und unsere Welt würde so nicht existieren, wie sie existieren.

Und es gäbe es dann auch nicht.

Oder es gibt dann vielleicht was anderes, was wir nicht wir sind, sondern aber was anderes.

Und die Frage ist ja, wenn man jetzt sagt, diese ganzen Zahlen sind zufällig irgendwie entstanden von einem Schöpfer oder was weiß ich, was man da für ein Modell hat, dann impliziert man ja letztlich, dass die Wahrscheinlichkeit wahnsinnig gering ist.

Also wenn man sagt, okay, ich würfel jetzt mal ein Universum und jetzt habe ich da irgendwie 100 Konstanten, die verstehe ich alle nicht, die können allen Wert haben zwischen 0 und n -endlich, dann die Wahrscheinlichkeit, dass dann das rauskommt, was man wirklich im Universum hat, ist dann ja, sag ich mal, unendlich klein.

Verstehen Sie, was ich meine?

Und was ja wesentlich befriedigender wäre, ist, wenn man tatsächlich Modelle hat oder Theorien, warum diese Zahlen die Werte haben, die sie haben.

Wenn man zeigen kann, dass es mathematisch oder es Gründe gibt, also dass es zum Beispiel Beziehungen gibt zwischen verschiedenen Naturkonstanten, ja, dass die eine immer dreimal größer ist als die andere oder so.

Also wenn man da grundlegende mathematische Theorien hat, die Beziehungen erklären, dann fällt es einem ja viel leichter, die Natur so zu akzeptieren sozusagen.

Also dass die, ich weiß nicht, sie ist halt viel schöner, also finde ich viel schöner.

Eleganter meinen Sie?

Ja, gut, man denkt ja nicht, also es geht ja, man denkt sich ja, dass, also ich denke zumindest, es ist ja, also letztlich nehmen wir an, dass die Natur irgendwelchen Naturgesetzen folgt und diese Naturgesetze, man erhofft sich dazu, zumindest, oder ich würde erhoffen und auch viele meiner Kolleginnen und Kollegen, dass die so simpel wie möglich sind.

Also genau.

Und danach, und das heißt, dass man irgendwie ein Phänomen mit möglichst wenig Parametern erklären kann.

Der Apfel fällt in der Geschwindigkeit weil $a = b \cdot c$ und aus keinem anderen Grund.

Genau, also wenn man da eine Formel hat, die einen freien Term hat, dann ist das ja viel eleganter, als wenn ich da 17 Terme habe mit 23 freien Parametern sozusagen.

Genau, das ist letztlich das Ziel, also eine, also letztlich ist das Ziel, eine in Anführungszeichen Weltformel zu finden, dass man wirklich von einer relativ einfachen Formel alles weitere ableiten kann.

Aber ist der Umstand, dass wir an einem Punkt sind, von dem aus wir zurückblicken sozusagen auf diese Naturgesetze oder Naturkonstanten, ist der

Umstand, dass wir an diesem Punkt sind, nicht eigentlich die Antwort darauf, warum wir darauf zurückblicken können?

Also warum es so ist?

Ich weiß es nicht Physik, was ich jetzt gerade mache.

Ja, das ist eine Frage tatsächlich, und das ist auch eine sehr heiß diskutierte Frage, weil in der Tat kann man das natürlich immer sagen.

Also wenn ich sage, oh Gott, warum hat diese Konstante hier so einen wahnsinnig kleinen Wert?

Das ist ja absurd.

Warum sollte sie so einen Wert haben?

Dann kann man immer sagen im Prinzip, ja, hätte sie den aber nicht, hätte es uns ja nicht gegeben.

Genau wie ich gesagt habe mit der Proton und Neutron.

Hätte es ja nicht gegeben.

Das ist tatsächlich ein Totschlagargument natürlich.

Das anthropische Prinzip als Totschlag.

Ja, weil man dadurch letztlich alles erklären kann.

Es ist, wie es ist.

Genau, und das kann auch jeder beschließen.

Das kann man natürlich sich so denken.

Das kann man immer sagen.

Ich kann auch immer sagen, ja, der Apfel fällt vom Baum, weil da jetzt eine Elfe, unsichtbare Elfe, hingeflogen ist, und die hat den sich abgepflückt und heruntergetragen.

Ja, und man findet bestimmt jemanden, der diese Elfe auch gesehen hat.

Genau, und das ist eben das Problem auch an anthropischem Prinzip, dass es nicht falsifizierbar ist.

Wie betreiben Sie denn eigentlich Ihre Teilchenphysik?

Also Sie sind ja eine, das Gegenteil, sind Sie, heißt das praktische Physikerin eigentlich?

Ja, experimental.

Ja, ja, nee, das ist genau, also was, gut, der Weg jetzt dahin, diese Naturgesetze zu verstehen, ist, also letztlich hat das Universum, also in unserem Modell, wie wir uns die Welt vorstellen, hat das Universum angefangen zu einem Urknall, bei einem Urknall, und seitdem hat es expandiert.

Und ganz am Anfang gab es dann, ja, also sozusagen eine Urkraft oder so, also es gab dann...

Das Ding, was die Zündung gemacht hat, meinen Sie?

Also das Ding, was...

Ja, genau, also, ja, genau, also da ist irgend...

Ja, also ganz am Anfang ist wahnsinnig schwierig, ja, also man weiß wahnsinnig wenig über ganz am Anfang, muss ich zugeben, aber...

Was heißt in Ihrem Zeithorizont "ganz am Anfang"?

Genau, also worüber die Phase...

Die erste Sekunde oder die erste Stunde?

Nee, nee, nee, nee, weniger als ein Billionstel einer Sekunde, da weiß man sehr wenig.

Worüber man dann aber recht gut Bescheid weiß, also das ist die Phase, mit der ich mich zum Beispiel beschäftige, ist die Phase, die schon ein Milliardenstel Sekunde nach dem Urknall anfängt.

Und das ist eine Phase, in der schon verschiedene Kräfte wirkten, also wir hatten, also die schwache Kraft zum Beispiel, die Sie da auch am Anfang angesprochen hatten, und die starke Kraft und die elektromagnetische Kraft.

Und das ist eine Phase des Universums, die wir tatsächlich jetzt momentan bei diesen Teilchenbeschleuniger wie zum Beispiel dem Large Hadron Collider oder insbesondere dem Large Hadron Collider untersuchen.

Was machen die eigentlich, diese Kräfte?

Also wir haben...

Schwerkraft hatten wir schon, davon fällt der Apfel.

Genau.

Also die studieren wir nun nicht, weil das ist zwar für uns im Leben scheint die irgendwie sehr dominant zu sein, weil wir uns da täglich auseinandersetzen, aber eigentlich ist die viel, viel schwächer als die anderen Kräfte.

Ach.

Und die, ja, ja, also das sieht man auch zum Beispiel, also die Atome sind ja viel stärker, werden die von der elektromagnetischen Kraft zusammengehalten, als dass sie jetzt runterfallen, sonst würde ich ja...

Also...

Ja.

Also ihre Hand löst sich ja nicht in Bestandteile auf, die dann jetzt alle runterfallen auf die Erde, sondern wird irgendwie zusammengehalten von den anderen Kräften sozusagen.

Das ist ein gutes Argument, ja.

Das ist einem normal nicht so bewusst.

Ja, stimmt.

Oder so ein kleiner Magnet kann ja auch die Schwerkraft überwinden.

Mit der beschäftigt sie die Teilchenphysik am wenigsten oder die Experimentalphysik also fast gar nicht und ich auch eigentlich überhaupt nicht, sondern die Beschäftigung ist mit den anderen drei Kräften und dann ist einerseits die elektromagnetische Kraft, das ist die Kraft, ja, die kennt man ja, Elektrizität, Magnetismus, ja.

Die...

Ja, das wurde schon Ende des 19.

Jahrhunderts erkannt, dass das eigentlich Elektrizität und Magnetismus, dass das letztlich von einer Kraft her rührt, die elektromagnetische Kraft.

Dann gibt es die...

Und die ist eben auch dafür zuständig, dass die Elektronen, also dass das Atom zusammengehalten wird, dass die Elektronen eben um den Atomkern rumkreisen, ja.

Dann gibt es die starke Kraft, die ist auch sehr wichtig im Atom und zwar hält die den Kern zusammen.

Also im Atomkern, der besteht aus Protonen und Neutronen und...

Also Protonen sind positiv geladen und wenn jetzt keine starke Kraft gäbe, dann würden ja die Protonen nicht zusammenhalten, weil die würden sich ja abstoßen,

weil die ja alle die gleiche Ladung haben, also würden die sich ja von der elektromagnetischen Kraft abstoßen.

Aber nun ist es so, dass die starke Kraft stärker ist als die elektromagnetische Kraft und sie dann noch zusammenhält.

Und die Neutronen hält sie auch zusammen.

Und dann ist noch die schwache Kraft.

Also das ist die Kraft, die für Radioaktivität zuständig ist.

Und zum Beispiel in der Sonne, also wenn die Sonne...

In der Sonne passierte die ganze Zeit ein Prozess der Kernschmelze letztlich und dabei wirkt die ganze Zeit die schwache Kraft.

Die ist schwächer als die starke Kraft.

Aber stärker als die elektromagnetische.

Also liegt die dann zwischen der elektromagnetischen und der starken?

Die ist ungefähr ähnlich.

Also das Ganze hängt sehr auch von den Energien ab, bei denen man sich die anguckt, aber ähnlich wie die elektromagnetische, also in dem Energiebereich, in dem ich forsche.

Und der Unterschied, aber sowohl die starke als auch die schwache Kraft, deswegen sehen wir die auch im täglichen Leben nicht, sind sehr kurzreichweitig.

Das heißt, die wirklich agieren nur auf Skalen, die sind eben kleiner als ein Atom.

Und deswegen treten die jetzt im täglichen Leben nicht auf.

Warum?

Wissen Sie da schon eine Antwort drauf, warum die so eine kurze Reichweite nur haben?

Ja, das hat bei beiden unterschiedliche Gründe, interessanterweise.

Also bei der schwachen Geflächsführung, das ist vielleicht, ja, vielleicht ist das das Interessantere zu erzählen, weil das dann auch wieder mit dem Higgs-Boson zu tun hat.

Da ist es so, dass also gut, Kräfte werden vermittelt durch den Austausch von Quanten, sagt man so, oder Teilchen.

Quanten ist, also sie sind Teilchen.

Quanten, das ist mehr oder weniger das Gleiche.

Also von Teilchen.

Und bei der elektromagnetischen ist das Teilchen, also das Lichtquant, wir nennen das auch Photon.

Und das hat keine Masse.

Das ist, also es hat keine Masse, ja, also ist sehr leicht.

Und dadurch hat es eine unendliche Reichweite.

Das Graviton übrigens bei der Schwerkraft, da heißt das Graviton, die hat auch eine unendliche Reichweite und das hat auch keine Masse.

Okay.

Nun ist es aber bei der schwachen Kraft, da haben diese Teilchen eine Masse und zwar sind die vergleichsweise schwer und dadurch gibt es dann eine kürzere Reichweite.

Das wirkt wie eine Abschirmung davon.

Also ja.

Aber wie messen sie etwas, das keine Masse hat?

Wir messen die Masse davon nicht.

Also wir messen dann, naja, also Photon oder Lichtteilchen, die kennen vielleicht viele auch aus der Schule, die misst man zum Beispiel über Interferenzmuster in so einem Doppelspaltexperiment oder Spaltexperiment, das haben vielleicht manche schon gesehen.

Oder das sieht man ja auch, also in einem Teleskop, ja, oder also.

Die Masse ist nicht das Einzige, was man messen kann über, also man misst dann, was die, ja, okay, das ist letztlich eigentlich eine Spezialität von mir.

Also wie man überhaupt Teilchen misst, ist generell eine gute Frage.

Ja, die hätte ich jetzt angeschlossen.

Genau, also die misst man dadurch, dass man beobachtet, also wir wissen, dass zum Beispiel Photon, also Lichtteilchen, wenn die auf etwas treffen, dann können die verschiedene Effekte auslösen, sogenannten Photoeffekt oder Compton-Effekt oder Paarbildung von Elektronen und Positronen.

Das heißt, immer wenn die auf Material treffe, werden, in dem Fall werden geladene Teilchen erzeugt.

Ja.

Und diese geladenen Teilchen, nun wiederum ist es so, dass geladene Teilchen, wenn die zum... Die kann man zählen dann, ne?

Die kann man zählen, aber da ist es auch so, dass, genau, da kann man dann einen Strom messen, wenn geladene Teilchen da rumfliegen.

Ja, genau.

Und dann, genau, dadurch, so messe ich das indirekt.

Wie machen Sie das denn?

Also wie messen Sie die?

Naja, wir haben sehr viele unterschiedliche Methoden da.

Also zum Beispiel diese Experimente am Large Hadron Collider, die benutzen unterschiedliche Technologien, um unterschiedliche Teilchen nachzuweisen.

Zum Beispiel ein relativ moderner Detektor sind Siliziumdetektoren.

Die werden zum Beispiel auch in der medizinischen Physik verwendet.

Und da ist es so, dass, ja, also wenn ein geladenes Teilchen da durchfliegt durch ein Halbleiterdetektor, Siliziumdetektor, dann passiert... man legt da einen Strom an.

Wenn das geladene Teilchen durchfliegt durch das Medium oder auch durch ein Gas, dann werden dabei die Atome angeregt.

Dadurch werden Elektronen frei und die driften dann, also wenn man eine Spannung anlegt, dann driften die dann zu der positiven Spannung hin, die Elektronen, weil sie ja negativ geladen sind, dann driften sie zu der positiv angelegten Spannung.

Und an der misst man dann einen Strom und dann weiß ich, ah, da war ein Teilchen.

Also eigentlich ein total simples Prinzip, ne?

Das ist total simpel, das Prinzip im Prinzip, genau.

Aber warum müssen wir so wahnsinnige Ressourcen aufwenden, um es dann tatsächlich herzustellen?

Also tatsächlich... Ja, da gibt's... das ist... genau.

Also eine Sache ist, dass man möglichst... also ich will meistens nicht nur wissen, dass das ein Teilchen da war, sondern zum Beispiel im LHC, da werden typischerweise 1000 Teilchen produziert bei so einem Ereignis, wie wir das nennen, also eine Kollision, ja?

Und es gibt 40 Millionen solche Ereignisse pro Sekunde.

Für jedes Ereignis möchte ich jetzt das auflösen, also ich möchte wissen, wie viele Teilchen waren da, zum Beispiel, also 1000, waren da 1000 oder 1100 und so weiter.

Und dann möchte ich für alle Teilchen wissen, was es genau... was auch deren Energie ist.

Und dafür stecke ich dann wiederum das ganze Experiment in ein Magnetfeld, so dass geladene Teilchen, das kennt man vielleicht auch noch aus der Schule, von der Lorentzkraft abgelenkt werden.

Und dadurch fliegen die dann nicht gerade aus, sondern kurvenförmig, ja?

Und wie stark die gekrümmt werden, das gibt mir dann wiederum den Impuls beziehungsweise die Energie dieses Teilchens zurück, so dass ich das dann ausrechnen kann.

Und dann muss ich... dafür kann ich das Teilchen aber auch nicht nur an einem Punkt messen, sondern wenn ich die Krümmung, also wenn ich das... ich will letztlich eine ganze Spur von diesem Teilchen messen.

Und je größer... ja, je mehr Messpunkte ich habe, umso genauer kann ich das messen, ja?

Und auch je weiter... also wenn ich das in einem Meter oder zehn Meter, dann kann ich es halt auch genauer messen.

Je größer es ist, desto genauer kann ich es letztlich auch messen.

Also das ist zum Beispiel... ein Grund, ich muss das schon ziemlich genau

wissen.

Also wir versuchen typischerweise die Sache auf einem Level von einem Prozent oder besser zu messen.

Wie sieht denn Ihr Detektor dann genau aus?

Also es ist ja dann nicht... wenn ich so Detektor höre, dann habe ich immer so als Laie das Bild von so einem Chip in einer digitalen Kamera vor mir, was ja eigentlich auch ein Detektor ist.

Genau.

Aber sowas haben Sie da ja nicht, oder?

Ja, letztlich ein bisschen schon, aber die... also das Ganze ist so... hat so eine zylindrische Geometrie, weil... also man kann sich das vorstellen, dass Strahlen von Protonen kommen von links und rechts, sag ich mal, und die treffen sich dann in der Mitte.

Und dann baue ich meinen Detektor idealerweise konzentrisch darum herum, in Lagen, also wie eine Zwiebel sozusagen, ja?

Das heißt, die... dann werden Teilchen in dem Zentrum produziert und... ja, und isotropisch, also dann breiten die sich eben... dann fliegen die in alle Richtungen, sag ich mal.

Und dann will ich das möglichst hermetisch, alle Teilchen entdecken, ja?

Also ich will dann möglichst überall sehen, welche Teilchen wo produziert werden.

Und deswegen muss ich das, genau, möglichst gut umschließen, den Wechselwirkungs-Problem.

Ich muss noch Löcher haben, links und rechts, weil ja die Protonier... also nicht alle Protonen wechselwirken.

Also manche fliegen weiter und dann... das hat eine sehr hohe Energie.

Also wenn die gegen meinen Detektor fliegen, dann würde der kaputt gehen, ja?

Also da muss ich noch so Löcher vorne, links und rechts.

Deswegen hat es letztlich eine zylindrische Geometrie.

Das heißt, Ihr Detektor sitzt mitten in diesem Beschleunigerring?

Nee.

Drumrum.

Drumrum, ne?

Okay, okay.

Also da ist das Strahlrohr, das hat so ungefähr Durchmesser von so zwei, drei Zentimetern.

Und darum herum kommen dann Lagen von Detektoren.

Moment, das eigentliche Strahlrohr ist so dünn?

Also hat so einen kleinen Durchmesser nur?

Ja, ja, ja.

Was ist denn an der ganzen... diese riesigen Rohre, die da drumrum sind, ist das Kühlung, Magnete oder so?

Ja, genau.

Um das Strahlrohr rum, also genau diese NHC-Magnete insgesamt.

Der Durchmesser ist, weiß ich, 80 Zentimeter vielleicht ungefähr oder einen Meter.

Genau, ja.

Drumrum ist erstmal ein Magnet.

Also diese blauen großen Magnete, das sind Dipolmagnete.

Das sind Magnete, die letztlich das Teilchen auf eine Kurve zwingen, weil das Ganze, der Large Hadron Collider ist ja ein ringförmiger Beschleuniger.

Also wenn man da keine Magnete hat, dann würden die einfach immer geradeaus fliegen.

Aber man muss sie auf einen Ring zwingen und das machen diese Magneten.

Und die sind dann sehr stark gekühlt.

Also die sind gekühlt fast bis auf absolut Null, das heißt auf minus 274 Grad Celsius ungefähr oder 273.

Und das eigentliche Strahlrohr ist viel kleiner.

Ach, hab ich auch noch nicht gewusst.

Da hab ich so oft schon über Beschleuniger geredet, aber dass sie so dünn sind, wusste ich gar nicht.

Und dann ist es so, dass wenn die ins Experiment reinkommen, dann ist nur noch das Strahlrohr.

Also weil dann, wenn die vorher sind ja schon dahin gelenkt worden, dann werden sie noch vorher fokussiert, sodass sie möglichst kleinen, der Strahl möglichst kleinen Durchmesser haben, wenn die sich treffen sollen.

Und dann ist da eigentlich nur noch das Strahlrohr und dann drum rum baut man den Detektor.

Wie lösen sie denn eigentlich, also es sind ja aberwitzige Energien, die da in

diesem Strahlrohr auch unterwegs sind.

Und in dem Moment, wo die auf ihren Detektor treffen, sind die ja nicht weg.

Also ich stelle mir jetzt so vor, als würde jetzt irgendwie das Raumschiff Enterprise mit seinen Photonkanonen auf eine Digitalkamera feuern.

Ne, genau, das wäre höchst gefährlich.

Das muss man unbedingt verhindern.

Also das ist auch wichtig.

Und da gibt es auch sehr viel Schutzmechanismen, um das zu verhindern, dass der Strahl direkt irgendwas trifft, außer dem Beamdump.

Also es gibt eine Region, die heißt Beamdump, da soll er dann letztlich rein.

Der kann das ab, aber der Detektor kann das nicht ab.

Aber es ist so, dass in so einem, wir nennen das Bunch.

Also wir haben, wenn so eine Kollision passiert, dann eigentlich kollidieren wir 100 Milliarden Protonen von einem Protonbunch mit 100 Milliarden Protonen von einem anderen Protonbunch, der in die entgegengesetzte Richtung fliegt.

Und von diesen 100 Milliarden Protonen interagieren nur so 10 bis 50, wenn überhaupt.

Die anderen fliegen alle weiter.

Und die fliegen dann weiter im Kreis.

Also die machen dann wieder, die machen dann ganze Umdrehungen und vielleicht, also die kommen dann ja relativ schnell wieder, weil die fliegen ja alle fast bei Lichtgeschwindigkeit.

Also die kommen dann ja dann wieder rum, kurz danach.

Und dann haben sie wieder eine Chance zu interagieren.

Ja, aber es ist immer nur so, sind immer nur so genau ungefähr 50 pro 100 Milliarden Teilchen, die zu einem gewissen Zeitpunkt im Wechsel wirken.

Das heißt, sie können ja 50 Kollisionen machen und danach sind da zwar noch Protonen unterwegs, aber die interagieren nicht mehr.

Also die fliegen einfach durcheinander durch.

Genau, die fliegen einfach durcheinander durch und dann genau.

Füllen sie dann im laufenden Betrieb nach oder müssen sie den ganzen Laden runterfahren, alles frisch Protonen rein, wieder hochfahren?

Genau, wir machen das Letztere.

Also die Sache ist, dass normalerweise können wir aber da, dass immer nur so ein kleiner Bruchteil ist, können wir gut und gerne 10 Stunden oder so Daten nehmen, ohne nachfüllen zu müssen.

Da ist immer noch relativ viel, viel Strahl übrig.

Ja, also und dann nach 10 bis 20 Stunden irgendwann, dann tatsächlich, dann schmeißen wir die Protonen, die noch übrig sind, weg und füllen neu.

Wie sieht das aus, wenn Sie Protonen wegschmeißen?

Ja, dann schmeißen wir die in so einen Dump.

Also der ist extra dafür designed, dass der das aushält.

Ja, also das sind spezielle Materialien, die besonders hart gegen Strahlung sind.

Also Sie feuern dann mit der Todesstrahlenlaserkanone in irgendetwas, dass das abkann sozusagen.

Ja, genau.

Also das ist extra dafür da und das baut man dann auch nicht aus.

Ja, sowas hält dann auch jahrelang.

Also das ist natürlich wahnsinnig wichtig.

Und das ist auch von der Strahlensicherheit sehr, sehr wichtig, das richtig zu machen.

Aber da gibt es Experten.

Also da bin ich ja.

Warum bauen wir die Dinge eigentlich immer größer?

Wir wollen ja eben letztlich diese die Kräfte und die Teilchen studieren, die in dieser Frühphase des Universums existierten.

Also die Idee ist ja, dass das Universum, wenn ich es früh verstehe und dann verstehe ich die Naturgesetze, denen es folgt, was passiert, während sich das Universum expandiert, ist, dass es sich abkühlt.

Und wenn es sich abkühlt und die Energie wird dann immer geringer, die Energiedichte wird immer geringer.

Und wenn ich wirklich das verstanden habe, was im frühen Universum ist, dann kann ich letztlich den ganzen Rest ableiten.

Was danach passiert.

Sie können das heute ausrechnen, wenn Sie genug Daten aus der Frühphase haben.

Genau, genau.

Wobei die dann auch noch zu den Naturgesetzen passen müssen, weil wer weiß,

ob es nicht noch eins gibt.

Genau.

Und dann gibt es natürlich, also von der reinen Physik ist das theoretisch so, aber es gibt natürlich auch viel Komplexität in unserer Welt.

Also man kann natürlich dann nicht.

Also wir können da nicht erklären, warum jetzt hier ein Vogel zum Beispiel aus der Evolution rausgekommen ist.

Intelligent Design.

Also es hat dann natürlich seine Grenzen.

Und es gibt natürlich dann auch viele Zufälle, die dann viele komplexe Phänomene, die dann von diesen reinen physikalischen Gleichungen sich nicht herlassen.

Aber selbst Zufälle finden ja in Grenzen statt.

Genau, also sie dürfen zumindest die physikalischen Gesetze schon mal nicht verletzen.

Der Spaß, den ich da gerade gemacht habe.

Vielleicht gibt es ja noch ein Naturgesetz, das noch keiner gesehen hat.

Kann das passieren?

Ja, ja, ja, ja, also ja, es kann eben sehr gut sein, dass es ja, also es gibt einige Phänomene.

Also warum wir das Ganze ja weitermachen vor allem ist, weil wir auch wissen, dass unsere momentane Theorie eben nicht alles erklärt.

Erstens kann es eben viele Konstante, es kann keine Beziehung zwischen

verschiedenen Naturkonstanten vorher sagen.

Gut, das kann man sagen, ist mir jetzt egal.

Gut, die sind vielleicht gewürfelt worden, die nimmt man mal so hin.

Das ist vielleicht nicht so schlimm.

Es gibt viel schlimmere Sachen.

Was schlimmer ist, das ist, dass zum Beispiel unsere Theorie nicht erklären kann, warum wir überhaupt noch existieren.

Und zwar sagen unsere Gleichungen, also eigentlich unser Hauptmodell vom Urknall ist, der Urknall ist aus einer Singularität entstanden, aus einem mini kleinen, mini kleinen Punkt.

Und zwar sind aber dann in gleichem Maße Materie und Antimaterie entstanden.

Und wer das aber, also wer das aber so gewesen ist, dann sagen unsere, unsere Gleichungen würden eigentlich sagen, ja, dann haben die sich alle vernichtet.

Weil was passiert, wenn Materie und Antimaterie aufeinandertreffen, ist, dass sie sich immer vernichten.

Und wenn natürlich im Anfang gleich viel Materie und Antimaterie erzeugt wurde und sie sich irgendwann dann alle vernichtet haben, dann bleibt ja nichts übrig.

Und das ist ja im Widerspruch zu unserer Beobachtung, dass zumindest wir noch übrig sind und der Rest des Universums.

Also das ist zum Beispiel eine eine große Frage.

Und da ist es also die Hypothese, wir denken, dass es da etwas gegeben haben muss, im frühen Universum, dass eine Asymmetrie, also dass irgendwie dann doch Materie und Antimaterie nochmal unterschiedlich behandelt, so dass irgendwie die Materie einen Vorteil gegenüber der Antimaterie hat.

Sie haben vorhin irgendwann gesagt, wenn man da ein hinreichend starkes Feld anlegt, dann ist im Vakuum doch noch was los.

Haben Sie schon mal versucht, in Ihren Gleichungen ein hinreichend starkes Feld an das frühe Universum anzulegen?

Ja, ja.

Und?

Hat nicht geklappt.

Ich dachte, ich hätte die Weltformel gefunden.

Also Materie und Antimaterie wird sich dann immer irgendwie vernichten.

Man muss es irgendwie schaffen, da ein Gesetz zu haben, dass das irgendwie verhindert.

Und da gibt es auch Ansätze, also da gibt es auch Ideen und das hat auch eventuell zum Beispiel mit dem Higgs-Boson zu tun.

Also es gibt da durchaus Ansätze, was hätte passieren können.

Aber bisher haben wir da noch keine experimentellen Anhaltspunkte, dass ein bestimmter Ansatz korrekt ist.

Also es kann auch sein, dass keiner der Ansätze, die es gibt, korrekt sind.

Es kann auch sein, dass einer der Ansätze, die es gibt, korrekt sind.

Bisher wissen wir das noch nicht.

Und das ist zum Beispiel natürlich sehr spannend herauszufinden.

So, und dafür brauchen wir was, was größer, was immer größer wird.

Also ein Beschleuniger, der immer größer wird.

Ja, weil um diese sehr hohen Energien, also die entsprechen dieser Frühphase des Universums, um sehr hohe Energien zu erzeugen, braucht man sehr hochenergetische Teilchen.

Und diese hochenergetischen Teilchen, die muss man also in diesen Kreisbeschleuniger, wie ich ja vom LHC gesagt habe, da muss man die auf eine Kreisbahn zwingen.

Und das ist nicht so einfach, wenn die so sehr schnell fliegen bei Protonen und bei Elektronen ist es aus anderen Gründen auch sehr schwierig.

Und weil Magnete, da ist man limitiert von der Technologie, also die stärksten Magnete, die man überhaupt im Moment bauen kann, die reichen gerade mal aus, dass es so beim LHC klappt.

Also man versucht jetzt, überlegt jetzt eine neue Generation von Beschleunigern, da hätte man dann hoffentlich doppelt so starke Magnete und dann könnte man im gleichen Ring doppelt so hohe Energien machen.

Wenn man aber in größeren, also eine höhere Energie möchte, dann braucht man wieder einen größeren Ring.

Also mit den alten Magneten müssen Sie mehr Strecke machen sozusagen, um eine höhere Energie reinzukriegen.

Genau, genau, genau, genau.

Wie weit sind wir denn von diesen neuen Magneten entfernt?

Weil das klingt mir irgendwie wesentlich, als eine wesentlich elegantere Lösung, weil ZERN, also der LHC, der steht ja schon da, da brauchen wir nur schnell die Magnete auszutauschen.

Wenn wir jetzt einen Ring bauen, der doppelt so groß ist oder was auch immer, dann müssen wir erst mal wieder noch ein fieses Loch buddeln.

Ja, ja, ja, ja, ja, ja, ja, ja, ja, ja, aber diese Magnete, das ist nicht einfach.

Also das ist schon die Technologie, die wir haben, die ist letztlich ausgereizt.

Man braucht dann eine neue Technologie und wir denken, dass das sicherlich also für Forschung und Entwicklung mindestens zehn Jahre braucht und dann noch industrialisiert werden muss, weil man eben auch die dann braucht.

Also im LHC alleine sind über 1200 solche Magnete, also sowas von der Größenordnung und das macht dann natürlich, ist industriell, das kann man nicht so mit ein paar Doktoranden machen.

Also das ist schon ein schwieriges Unterfangen.

Also es gibt auch andere Ideen, ja, also die sind aber auch in der Forschung und Entwicklung, aber zum Beispiel wird auch hier am DESY geforscht nach sogenannten Plasma Wakefield Beschleunigern, wo man die gar nicht erst auf eine Kreisbahn lenkt, die Teilchen.

Man kann ja sagen, okay, wenn ich die auf eine Kreisbahn lenken muss und dafür so starke Magnete brauche, die ich nicht habe, dann wäre es ja vielleicht besser, dass ich das einfach geradeaus, dass sie geradeaus fliegen und dann einander treffe.

Ja, ich bin gerade irritiert.

Ich denke gerade, wie lang soll denn der Linearbeschleuniger dann werden?

Ja, genau, das kommt darauf an, wie, also wenn ich eine, das kommt darauf an vom Gradienten, also wie viel Strecke brauche ich, um es auf eine bestimmte Energie zu beschleunigen.

Und bei den momentanen Technologien, die im Moment, also die man jetzt bauen könnte, die sozusagen fertig wären, um da einen Beschleuniger zu bauen, der jetzt interessant wäre für die Hochenergiephysik, zum Beispiel um das Higgs-Boson.

Dafür wäre es sehr interessant, so einen Beschleuniger zu haben für Elektronen.

Für das Higgs-Boson, da bräuchte man schon eine Länge von so 15 Kilometern oder so.

Okay, aber das geht ja noch.

Wie beschleunigen Sie denn dann da?

Also warum, ich frage mich gerade, warum bauen wir denn bitteschön ein LHC, wenn wir das auch so hätten machen können?

Weil eine 15 Kilometer Röhre gerade aus ist, glaube ich, ein bisschen einfacher als so ein Ring, oder?

Naja, gut, das sind, also es ist, das ist, es ist nicht ganz, also man kriegt nicht die gleiche Energie leider dann doch hin.

Also es ist, zu der Zeit gab es die Technologie noch nicht, aber es ist, aber zudem ist es so, dass diese Linearbeschleuniger, das kann man nur mit Elektronen machen und nicht mit Protonen.

Also die Energie, die man damit hinbekommt, ist dann doch wesentlich geringer als beim LHC.

Es ist interessant, jetzt wo wir wissen, dass da ein Higgs-Boson existiert, es ist sehr interessant, das bei einer Energie zu machen, die der Higgs-Boson-Masse entspricht ungefähr, so dass man es Higgs-Boson produzieren kann und dann sehr präzise vermessen kann.

Aber der LHC ist viel breiter aufgestellt vom Physikprogramm.

Also, ja, genau.

Also das ist letztlich ein bisschen komplementär, die beiden, die beiden Technologien.

Einerseits Kreisbeschleuniger für Protonen, mit denen kann man die höchsten Energien erreichen und andererseits, ja, Linearbeschleuniger oder auch

Kreisbeschleuniger für Elektronen geht auch.

Aber da erreicht man dann weniger hohe Energien, dafür erreicht man aber höhere Präzision.

Was macht das eigentlich, dieses Higgs-Boson?

Das Entscheidende, was das Higgs-Boson macht, was für unsere Welt relevant ist, ist, dass es allen Teilchen Masse gibt.

Da kommen wir wieder letztlich darauf zurück, wie es am Anfang des Universums war.

Also bevor, also das kann man auch sagen, es gab dann eben eine Phase des Universums, da war das Universum total symmetrisch.

Das war am Anfang, da war es symmetrisch in jeder Beziehung.

Aber dann hat sich durch das Higgs-Feld eine Asymmetrie herausgebildet und in dieser Phase, also vorher hatten alle Teilchen keine Masse und durch diese Asymmetrie haben sie dann eine Masse bekommen, durch dieses Higgs-Feld.

Das Relevante für unsere Welt, was das Higgs-Boson macht, ist die Schwerkraft, die Masse den Teilchen gegeben zu haben.

Aber was ist denn bitte dann das Irrelevante, also macht es noch was Irrelevantes?

Nö, nö, es macht nichts Irrelevantes.

Ich dachte schon, es hätte irgendwie noch so ein Verhalten, was sich keiner erklären kann.

Nee, nee, nee, nee, nee, nee, nee, es ist nur so, weil ohne das Higgs-Boson wäre halt auch unsere Welt wieder wahnsinnig langweilig.

Also dann gäbe es überhaupt nicht diese ganzen unterschiedlichen Teilchen, die wir haben.

Also es gäbe dann auch wiederum, also unsere Welt wäre mit der Welt, die wir jetzt sehen, überhaupt nichts zu tun.

Und die Frage ist letztlich, also für das Feld, das Feld wird immer durch ein Potenzial beschrieben.

Und das Higgs-Potenzial hat eine ganz spezielle Form.

Und zwar, also das kennt man vielleicht als Gravitationspotenzial, das ist einfach so eine Parabel, die nach unten zeigt, die hat unten ein Minimum und geht dann so an beiden Seiten hoch, so eine Parabel.

Und die ist symmetrisch um Null herum.

Also der Nullpunkt ist bei Null und dann, genau.

Und beim Higgs-Feld ist es eben, zwar fing das auch so an, das Potenzial sah so ganz am Anfang des Universums, aber dann hat es sich eben geändert, als sich das Universum abgekühlt hat.

Und dann sieht es aus, dann hat es so einen Huppel in der Mitte.

Wir vergleichen das häufig mit einem mexikanischen Hut, wo, ja genau, bei Null ist sozusagen die Spitze des Hutes und dann hat es das Minimum, wenn man sich so an diese Kurvendiskussion oder so erinnert aus der Schule, also das Minimum ist eben nicht bei Null, sondern links und rechts.

Genau.

Und das hat den Effekt, dass die elektroschwache Symmetrie gebrochen ist und dadurch kriegen diese ganzen Teilchen Masse.

Also ja.

Also der Sombrero, die Krempe des Sombreros ist an einer Seite ein bisschen länger.

Genau, ja, genau, genau, genau.

Lost in metaphors.

Und dann ist es aber, genau, aber wie jetzt genau dieses Potenzial aussieht, also was ich jetzt beschrieben habe, ist unser Verständnis von der Theorie wieder, also von unserer einfachsten Theorie, wie das Potenzial aussieht.

Aber das haben wir noch nicht gemessen.

Und das ist zum Beispiel auch eins der ganz großen Ziele jetzt am LHC in den nächsten 20 Jahren noch oder dann eben auch an einem Zukunftsbeschleuniger erste Messungen zu machen von dem Potenzial an sich.

Also das ist eben das Higgs-Boson, haben wir schon gemessen.

Aber um wirklich das Feld richtig zu verstehen, müssen wir eigentlich das Potenzial messen.

Und das, dafür brauchen wir eben noch wesentlich mehr Daten jetzt, als wir bisher haben.

Warum dauert es 20 Jahre, das zu messen?

Ja, man braucht da sehr viele Daten.

Also wir haben bisher, jetzt läuft der LHC seit zehn Jahren ungefähr, aber hat erst, also wir haben jetzt erst...

Hat auch nicht mal das schwarze Loch erzeugt, das uns versprochen wurde damals.

Das ist es nicht, aber es hat auch, also wir haben erst 5 Prozent der gesamten Datenmenge, die wir nehmen wollen, genommen.

Also um eine hohe Datenmenge, also das Problem ist, dass die Wahrscheinlichkeit, dass überhaupt irgendwas passiert, wenn man zwei Protonen bei diesen Energien aufeinander feuert, ist ja sehr gering.

Hatte ich ja schon gesagt, es ist nur 50 von 100 Milliarden machen überhaupt irgendwas.

Und von diesen 50 machen die meisten was total langweiliges, was wir schon irgendwie seit 60 Jahren wissen.

Es werden zwar ein paar Teilchen produziert, aber die kennen wir auch schon seit 60 Jahren.

Also das interessiert uns nicht wirklich.

Es ist ganz, ganz unwahrscheinlich, dass dabei ein Higgs-Boson überhaupt produziert wird.

Also in typischer Weise in einem Jahr werden ein paar hundert Higgs-Bosonen, die wir auch noch entdecken können, die wir messen können, produziert.

Obwohl wir also Trillionen von Kollisionen haben.

Ja, das sind nur ein paar hundert.

Und was wir, um das Higgs-Potenzial zu messen, müssen wir aber nicht nur ein Higgs-Boson produzieren, sondern zwei gleichzeitig.

Also das geht auch, aber die Wahrscheinlichkeit dafür ist noch mal viel geringer.

Und einfangen können sie nicht, ne?

Ja, also gut, wir fangen ja letztlich dann ein.

Also wir müssen sie dann eben, müssen eben sehr viele Daten produzieren und die dann rausfiltern aus dem.

Und da haben wir verschiedene Möglichkeiten.

Also wir versuchen, wir können die, wir produzieren so viele Daten, die können wir gar nicht alle zur Disk schreiben, sozusagen.

Sondern wir haben da schon mal sehr, sehr schnelle Filtermechanismen, dass wir von den 40 Milliarden pro Sekunde schreiben wir überhaupt erst mal nur 1000 sowieso überhaupt erst mal auf eine Disk.

Ja, also und genau.

Und dann, aber das sind immer noch sehr viele tausend pro Sekunde und es gibt ja viele Sekunden im Jahr, sag ich mal.

Dann muss man die, und da haben wir dann Algorithmen, da benutzen wir dann auch zum Teil künstliche Intelligenz oder so, um wirklich die teilweise sehr raren Prozesse, wie zum Beispiel die Produktion von zwei Higgs-Boson aus diesen Unmengen von Daten raus, raus zu filtern.

Wie oft passiert das, dass zwei erzeugt werden?

Ja, das passiert also im Moment, glaube ich, nur so ungefähr einmal pro Jahr oder so.

Okay, dann kann ich verstehen, dass das 20 Jahre dauert.

Ja, aber nie.

Aber deswegen, was wir jetzt machen, was also deswegen, da arbeite ich auch an, zum Beispiel arbeiten wir eben auch an der, am Bau von neuen Detektoren.

Also wir, das würde tatsächlich jetzt mit der momentanen Konfiguration vom LHC sehr, sehr lange dauern.

Zu lange, ja.

Da würde es eigentlich 100 Jahre dauern, bis wir da genug Daten hätten.

Und deswegen verbessern wir jetzt, verändern wir jetzt die Konfiguration.

Also wir verbessern dann das, dass wir, dass wir noch wesentlich, die Protonstrahlen noch viel besser fokussieren, sodass statt, dass wir so was wie im

Durchschnitt 30 bis 50 Kollisionen pro, wenn die zwei Protonbandschellen aufeinandertreffen, dass wir stattdessen so 200 im Durchschnitt haben.

Weil die Protonen alle dichter beieinander sitzen und nicht mehr so durcheinander durchfliegen können.

Genau, genau.

Wie fokussieren Sie da auch wieder mit Magnetfeldern?

Ja, mit, mit, das sind Quadrupolmagnete.

Also die, anstatt die einfach in eine Richtung, die sind so angeordnet, dass, ja, die sind eher, dass, dass die sozusagen, die funktionieren wie eine Linse, wie eine optische Linse.

Genau.

Müssen die rund um den Ring dann platziert werden oder reichen die alten Magneten, um das zu beschleunigen und kurz vor der Kollision fokussieren Sie erst?

Genau, genau.

Nee, das, genau.

Wir müssen sie nur kurz vor der Kollision fokussieren.

Also die alten Magneten benutzen wir weiter.

Das wäre auch sonst finanziell auch zu teuer.

Also, ja.

Wie lange dauert das, so eine Linse dann zu entwerfen und zu bauen?

Ich würde mir vorstellen, man stellt das da hin und spielt dann zu einem Regler rum und sagt, ah ja, ja, jetzt passt's.

Aber so ist das ja nicht, ne?

Also, weil man sieht's ja nicht.

Ja, diese Linsen, diese Quadrupolmagnete, das ist nun auch so, dass die eine neue Technologie benutzen müssen.

Die müssen ja auch stärker sein, als die, die wir bisher hatten.

Und die benutzen auch schon eine neue Technologie.

Deswegen hat das jetzt, also ich glaube, das Design von denen, die wir jetzt benutzen wollen, läuft sicherlich schon seit 15 Jahren.

Die Sache ist, dass es bei uns fast nie etwas gibt, was die Industrie sowieso schon mal im Petto hat.

Also diese Magnete, das ist immer wirklich neue Forschung.

Und deswegen, dann dauert das eben auch.

Also, weil natürlich bei Forschung dann auch immer viele Irrwege sind und dann, bis was funktioniert, das dauert.

Das ist auch viel, ja, also, dann klappt was nicht, dann muss man nochmal neu anfangen und so weiter, ja.

Und dann muss das Ganze ja auch noch mit sehr hoher Sicherheit funktionieren.

Das ist, weil wenn tatsächlich, dieser Strahl ist schon sehr gefährlich, wenn diese Magneten dann nicht tun, was sie machen sollen und der Strahl sonst wo hingeht.

Dann haben wir das schwarze Loch vorzunehmen.

Genau, genau, dann haben wir den Salat.

Also dann, genau, das ist nicht gut, ja.

Deswegen müssen die auch sehr hohe Sicherheit.

Ich meine, das Schöne daran ist, dass natürlich dann dadurch, dass man eben neue Technologien entwickelt, das kann auch immer wichtig sein für andere Felder.

Also zum Beispiel supraleitende Magnete wurden tatsächlich für Beschleunigerphysik erstmals gebaut, werden aber inzwischen für MRTs eingesetzt, ja.

Oder, gut, und Beschleuniger an sich auch, die wurden letztlich entwickelt, um neue Teilchen zu finden, das Universum zu verstehen.

Aber heutzutage, genau, heutzutage werden die fast alle für Medizin benutzt, genau, für Bestrahlung von Tumoren und so.

Ich habe gelesen, Sie hätten am Strategiekonzept der europäischen Teilchenphysiker mitgearbeitet.

Ist das so etwas wie eine Teilchenphysiker-Wunschliste?

Ja, also Wunschliste würde ich, würde ich sagen, also es ist eben eine Strategie.

Es ist aber tatsächlich, also eine Wunschliste kann ja sehr lang sein oder kann ja alles drauf sein und dann ist unklar, ob da eine Priorisierung drin ist oder nicht.

Was steht denn alles drauf, sagen wir mal so?

Also eine Strategie ist ein bisschen, ist eine priorisierte Wunschliste, die aber eben dann, die von allen unterstützt wird.

Es ist ja so, dass, genau, wie wenn man sich mit über 10.000 Leuten auf was einigen soll, es ist ja klar, dass verschiedene Leute da unterschiedliche Präferenzen haben.

Aber die und dann sowas eben sehr gut ist, denke ich, dass das ist eben, dass

man einen Kompromiss gefunden hat, was jetzt die wichtigsten Sachen sind für die nächsten sieben Jahre oder und ja, was steht da drauf?

Also da steht drauf eben auf jeden Fall ein neuer Beschleuniger an einer und zwar entweder eigentlich beides theoretisch einen Elektron- und Positron-Beschleuniger.

Das ist eine sogenannte Higgs-Factory, dass man eben das Higgs-Boson sehr präzise messen kann.

Das ist das, was sie eben beschrieben haben mit der Linz?

Das ist schon wieder was Neues?

Ne, das hatte ich beschrieben.

Also da gibt es einerseits den Ansatz, dass man da einen Linearbeschleuniger baut.

Diesen Plasma Wakefield?

Ja, also beziehungsweise erst mal mit konventioneller Technologie kann man den bauen.

Das wäre da, es gibt ein Projekt in Japan, das schon im Design sehr weit fortgeschritten ist und das könnte man auch relativ bald, also wenn man sich da einigen würde und das Geld finden würde, könnte man da relativ bald mit anfangen, also in den nächsten paar Jahren, um das mit einer Plasma Wakefield-Technologie zu machen.

Das sind noch Jahrzehnte.

Ja, also das wäre sehr attraktiv, weil der sehr viel kürzer sein könnte, also statt 50 Kilometer reden wir dann davon mehreren Dutzenden Metern, ja, oder 100 Metern, aber die Technologie ist noch nicht so weit.

Sie ist aber sehr, sehr spannend und da wird auch sehr viel daran geforscht und das sagt auch zum Beispiel die Strategie, dass die Forschung an neuen

Beschleuniger-Konzepten extrem hohe Priorität haben muss in den nächsten Jahren.

Das ist fast die Haupt-, ja, also eine der Hauptaussagen der Strategie auch.

Auch an diesen Magneten, an diesen sehr starken Magneten, über die wir auch schon geredet haben, das ist auch eine sehr hohe Priorität.

Aber es ist auch eine andere Priorität, also zum Beispiel eine der Sachen, über die wir noch nicht geredet haben, die aber auch wahnsinnig interessant ist, ist dunkle Materie.

Habe ich hier auch noch stehen.

Ah, okay, sehr gut.

Können auch Spender noch machen.

Ja, ich habe, also angenommen, die Wünsche werden alle erfüllt, die auf der Wunschliste stehen, also auf dem Strategiekonzept stehen.

Wonach genau suchen wir dann damit?

Weil der LHC ist für Higgs.

Nein, also letztlich ist der LHC nicht für Higgs.

Also letztlich ist es wirklich, also man sucht auch nach dem Unerwarteten oder man sucht einfach, versucht einfach zu verstehen, wenn ich zu einer dieser höheren Energieskala gehe, also wenn ich, je höher ich in der Energie gehe, desto früher ist das sozusagen im Universum und es ist, in der Natur gibt es sehr charakteristische Energieskalen.

Also zum Beispiel, man kann sich das vorstellen, zum Beispiel die Kernphysik, ja, also Ende des 19.

Jahrhunderts hatte ich ja keine Ahnung, dass es Kernphysik gibt.

Also da war ja irgendwie, da gab es, ja, da gab es irgendwie Elemente im Periodensystem, die nicht, und niemand hat verstanden, was das jetzt damit genau auf sich hat.

Die starke Kraft kannte man nicht.

Man kannte die starke Kraft nicht, genau.

Aber man kannte auch nicht, man wusste auch, man kannte auch das Atom nicht.

Man hatte ja als, das war ja erst durch Rutherford dann, der das Atom dann verstanden hat.

Man hatte ja, man dachte ja, dass das Atom so eine Art Rosinenbrot ist, in dem, also das Atom ist so ein Teig und die Elektronen sind sozusagen die Rosinen und die sind da irgendwie so drin.

Ja, schon die ersten.

Ja, so dachte man, ist das Atom.

Und man dachte aber irgendwie auch, dass das unteilbar ist.

Ah.

Ja, das Wort Atom kommt ja daher.

Also man hatte ja irgendwie kein Verständnis davon.

Und dann, Rutherford hat eben herausgefunden, dass das Atom eigentlich fast vollkommen leer ist, außer dass in der Mitte ein sehr kleiner Kern ist und dass die Elektronen in einer Hülle drumherum schwirren.

Und dann eben später hat man herausgefunden, dass man dieses Atom aufbrechen kann, dass man sich den Atomkern angucken kann und so weiter.

Und dass man auch sehr viele instabile Elemente erzeugen kann und das ist, also, und die Kanonphysik hat man gefunden und so weiter.

Also man hat dann wahnsinnig viel gefunden und das kann eben passieren.

Und der einzige Grund, warum man das gefunden hat, weil man in diese Energien, auf so hohe Energien gestoßen ist, dass man den Atomkern auseinanderbrechen konnte.

Und sowas kann natürlich wieder passieren.

Also wenn ich, es kann eben gut sein, dass man direkt unter einer Energieskala ist, auf der dann ein Durchbruch erzielt wird.

Also zum Beispiel, ja.

Haben Sie da irgendwie so eine, weiß ich nicht, eine Vorstellung davon, wie so ein Durchbruch aussehen könnte?

Also was das noch sein könnte?

Oder ist das zu überraschend?

Ja, ja, ja, also, nee, also es gibt einen Ansatz.

Man denkt, also, dass es sogenannte Supersymmetrie zum Beispiel gibt.

Dass es dann tatsächlich Teilchen gibt, die eben schwerer sind als alle Teilchen, die wir bisher gefunden sind, aber dass wir die am LHC zum Beispiel erzeugen könnten.

Also es gab, gibt auch immer noch Hoffnung, dass man supersymmetrische Teilchen findet oder andere Teilchen.

Es kann, es gibt eigentlich keinen Grund zu erwarten, warum es jetzt nicht Teilchen geben sollte, ich sag mal, die zehnmal schwerer sind als die Teilchen, die wir sowieso schon gefunden haben.

Zum Beispiel das Higgs-Boson.

Also es gibt viele Ansätze, dass das Higgs-Boson auch nicht einzigartig ist, sondern dass es mehrere Higgs-Bosonen gibt und dann könnte es zum Beispiel eins geben, das ist noch zehnmal schwerer als das, das wir gefunden haben und so weiter.

Und danach wird sehr aktiv gesucht am LHC.

Also danach suchen wir die ganze Zeit, dass da eventuell neue Teilchen sind, die auf, ja, die, und die würden dann alle möglichen, also die können dann relativ spektakuläre Signaturen haben und die könnten auch, würden auch einen Einfluss nehmen auf die Entwicklung des Universums in diesem frühen Stadium.

Was machen denn diese supersymmetrischen Teilchen?

Also die sind zehnmal schwerer, was hat das, hat das Auswirkungen auf mein Leben, sagen wir mal so, oder bleibt das auch wieder im Atomkern?

Ja, also die, ja, die sind nicht unbedingt, also die können auch hundertmal schwerer sein oder, also, hätten theoretisch auch genauso schwer sein können, wie die, die wir kennen, aber dann hätten wir sie schon gefunden.

Deswegen wissen wir nur, dass sie, wenn sie existieren, schwerer sind, aber wie viel schwerer wissen wir nicht.

Was die machen ist, die, die sind instabil, die, also deswegen, wenn die im normalen Leben treten, die dann wiederum nicht auf und die würden tatsächlich jetzt, also ja, bei normalen Reaktionen heutzutage keine Rolle mehr spielen.

Die würden eben nur bei sehr, sehr hohen Energien, weil die Sache ist, solche schwere Teilchen spielen nur eine Rolle, wenn die Energien vergleichbar sind mit den Massen von den Teilchen, die man sich anguckt.

Also wenn ich eine sehr, sehr geringe Energie habe, dann kann ich nicht Massen studieren, die einer viel höheren Energie entsprechen, also $E=mc^2$.

Also wenn, ja, das muss, also, ja, also das ist, da sieht man das einfach nicht, ja, dann hat man keine Sensitivität darauf.

Also, was ein bisschen, das ist ein bisschen unintuitiv, weil eigentlich würde ich ja nicht erwarten, dass ich mehr Energie aufwende, um was schwereres zu sehen, sondern eigentlich mehr Energie aufwende, um was kleineres zu sehen.

Oder?

Also, naja, aber wenn ich jetzt...

Ich nehme ein Lichtmikroskop und sehe damit bestimmte Größen.

Und wenn ich dann, ja, mehr Energie reinpumpe, dass ich dann irgendwie ein Laser mir nehme, also hochenergetisches Licht, um was anzugucken, sehe ich kleinere Strukturen.

Ja.

Aber wie komme ich von da auf die Masse?

Naja, die Masse ist einfach, ich brauche ja erstmal eine Energie, um dieses Teilchen überhaupt zu erzeugen.

Also es ist ja erstmal...

Ja, ja, okay, jetzt habe ich es, okay.

Ja, okay.

Aber das ist also der Grund, warum wir annehmen, dass diese supersymmetrischen Teilchen hätten dann zum Beispiel im frühen Universum zum Beispiel, also was eine Konsequenz sein könnte, wenn die existieren, ist, wir glauben, dass die zum Beispiel dunkle Materie, also dass dunkle Materie zum Beispiel ein supersymmetrisches Teilchen ist.

Und das wäre zum Beispiel, dass es das Einzige dann, das stabil ist von allen normalen supersymmetrischen Teilchen, die zerfallen, also die sind instabil und zerfallen in normale Teilchen plus dieses eine Teilchen, dieses eine supersymmetrische stabile Teilchen, das übrig bleibt.

Und das könnte dann die dunkle Materie sein.

Okay, Materie.

Und das wäre wahnsinnig interessant, weil die dunkle Materie, ja, also die dunkle Materie, es gibt ja sehr viel dunkle Materie im Universum, also fünfmal mehr als normale Materie.

Und wenn man jetzt annimmt, dass diese dunkle Materie im Universum ein Teilchen ist, muss es nicht, aber ist eine sehr gute Möglichkeit, dann braucht man jetzt ein Teilchen, dass das sein könnte.

Und davon passt eigentlich, die, die wir schon kennen, passen da eigentlich alle nicht.

Und da bräuchte man eigentlich ein neues und so ein supersymmetrisches Teilchen, das nennen wir das WIMP, Weekly Interacting Massive Particle, ist einer der sehr guten Kandidaten dafür.

Und insofern wäre eine Entdeckung von Supersymmetrie schon sehr spektakulär.

Ja, also das würde eventuell dann mit einer Entdeckung von dunkler Materie einhergehen.

Nicht unbedingt, aber könnte es, genau.

Dunkle Materie kann, kann auch kein oder muss kein Teilchen sein.

Ich hatte gedacht, Materie ist immer ein Teilchen.

Was ist denn dann eigentlich Materie?

Ach so, ja, ja, das ist auf jeden Fall ein Teilchen.

Die Frage ist nur, ist es ein neues Teilchen oder ein bekanntes Teilchen?

Ach, Entschuldigung, Entschuldigung.

Nee, nee, nee, Entschuldigung, Entschuldigung, das habe ich nicht.

Nee, nee, nee, Entschuldigung.

Also die Frage ist, genau, die Frage ist, ob es aus bekannten Teilchen besteht oder aus neuen Teilchen.

Dunkle Energie ist aber wieder was völlig anderes.

Ja, ja, dunkle Energie ist wieder was völlig anderes.

Also da weiß man noch weniger darüber als über dunkle Materie.

Also da weiß man nur, also was dunkle Materie letztlich macht im Universum.

Einerseits beeinflusst es, wie sich Sterne um Galaxien rumbewegen.

Da hat man es auch erst gesehen, dass sich die Sterne nicht um Galaxien rumbewegen mit der Geschwindigkeit, die man erwarten würde, wenn, wenn die gesamte Energie, die gesamte Masse sozusagen in Sternen wäre.

Aber die andere Sache, die es macht, das Universum durch dunkle Materie breitet sich das Universum langsamer aus, als man es sonst erwarten würde, weil die Schwerkraft ist ja eine anziehende Kraft.

Das heißt, wenn je mehr Masse im Universum ist, desto langsamer breitet sich das Universum aus, weil es eben sich zusammenzieht durch die Materie.

Also je mehr dunkle Materie es gibt oder je mehr Materie überhaupt, desto langsamer breitet es sich aus.

Und die dunkle Energie, die stößt es auseinander.

Also die wirkt entgegengesetzt zur dunklen Materie sozusagen, sondern die beschleunigt das Auseinanderstoben der Galaxien sozusagen.

>> O.

K.

Das heißt, wenn Sie die dunkle Materie gefunden haben, dann erst können Sie auch sagen, welche Energie eigentlich gegen diese Materie wirkt?

>> E.

V.

E.

Nicht wirklich, weil das ist ja dann die Frage, die andere Frage ist, wie man das überhaupt auseinanderhalten kann.

Es ist nicht so, dass beide exakt den gleichen Effekt zu allen Zeiten haben.

Also jetzt im Moment sind beide ungefähr gleich stark.

Das heißt, die Anziehungskraft der Materie und die Abstoßungskraft der Energie jetzt im Moment sind die ungefähr gleich stark.

Am Anfang des Universums war aber, die dunkle Materie hat bei weitem überwiegt und die dunkle Energie hat noch keine Rolle gespielt.

Das heißt, in der Evolution des Universums, also man kann die schon auseinanderhalten.

Also, ich würde nicht sagen, dass man jetzt erst verstehen muss, was dunkle Materie ist, um dunkle Energie zu verstehen.

Also, das Problem bei dunkler Energie ist, dass man da viel weniger Ansätze hat, was es überhaupt sein könnte.

Also, das Higgs-Feld ist letztlich eine Art dunkle Energie, aber quantitativ, also qualitativ kommt das hin, weil es eben ein Hintergrundfeld ist, das diesen Effekt hat, aber quantitativ passt es überhaupt nicht.

Also, es ist viel, viel, viel zu groß.

Der Druck sozusagen, den das Higgs-Feld entwickelt, ist viel, viel, viel, viel größer als die dunkle Energie, die man misst.

Also, das kann man überhaupt nicht in Einklang bringen.

Was ist ein Hintergrundfeld?

Oder was ist das Gegenteil, ein Vordergrundfeld?

Ne, es ist ein Feld.

Wegbügel.

Ein Feld, ein Feld, ein Feld.

Wir haben jetzt die ganze Zeit, denke ich, haben wir über praktische Physik geredet.

Brauchen Sie eigentlich die Theoretiker*innen für Ihre Arbeit?

Oder sagen Sie, ne, macht ihr mal eure theoretische Physik?

Wir haben für die nächsten 150 Jahre genug mit Magneten und Strahlen zu tun.

Ne, wir brauchen die Theoretiker*innen sehr, sehr stark.

Also, vor allem, also praktisch brauche ich die als Experimentalphysiker*innen hauptsächlich dafür, dass sie auch neue Ideen entwickeln, was für Teilchen es zum Beispiel geben könnte, die wir am LHC finden könnten.

Also, es ist eben so, dass wir am LHC eben sehr, sehr, sehr viele Ereignisse, die wir, also auch supersymmetrische Teilchen oder irgendwelche anderen neuen Teilchen, die werden auf jeden Fall in einer sehr geringen Rate produziert.

Und die sehen auch teilweise nicht sehr viel anders aus als andere Prozesse, die ständig passieren.

Das heißt, wir sind teilweise, gucken wir nach sehr subtilen Unterschieden zwischen den Prozessen, die wir sowieso die ganze Zeit produzieren und die wir schon kennen und auch ausrechnen können und neuartigen Prozessen.

Und um optimieren zu können, wie wir jetzt danach gucken, da brauchen wir, und auch um Ideen zu bekommen, wonach wir jetzt am besten gucken, also es kann da zum Beispiel, das ist eine Sache, wo wir Theoretiker*innen brauchen.

Eine andere Sache ist natürlich überhaupt auszurechnen.

Also, wir machen sehr detaillierte Simulationen unserer Ereignisse am LHC.

Also, es ist sehr, sehr schwierig, diese Daten zu analysieren, quantitativ zu analysieren, ohne sehr detaillierte Simulationen.

Und diese Simulationen simulieren einerseits die Physik, das heißt, das sind wirklich, die simulieren wirklich, wie häufig jetzt der und der Prozess passiert und was genau da für Teilchen bei produziert werden und wie das dann, und dann werden da diese 1000 individuellen Teilchen zum Beispiel produziert, die einer LHC-Kollision zu einer entsprechen, ja, einer LHC-Kollision entsprechen.

Und dann simulieren wir dann auch noch, wie nun diese Teilchen genau mit dem Detektor interagieren, so dass ich dann ein Signal bekomme, dass ich dann prozessiere über Algorithmen, um dann wirklich zu rekonstruieren, was eigentlich passiert ist.

Und um diese Physikprozesse überhaupt zu simulieren, das ist auch, wo wir die Theoretiker*innen sehr stark brauchen.

Also, die brauchen wir sehr.

Und warum sind Sie Praktikerin geworden?

Ja, weil, also, ja, das ist... Jetzt wird es persönlich hier.

Also, ich glaube, das kann ich besser, ehrlich gesagt.

Also, Theorie, ja, also letztlich, man sagt immer, also eigentlich sind die

eigentlich, die kriegen natürlich auch letztlich meistens die Nobelpreise, die Theoretiker*innen, ja, aber da muss man auch schon sehr gute Ideen haben und auch sehr mathematisch sehr basiert sein und so.

Also, ja, weiß ich nicht.

Das heißt, Sie können keine Mathe, wollten aber Physik machen, sind darum Teilchenphysiker*innen geworden?

Das nun auch wieder nicht, das nun auch wieder nicht, aber das ist, ja, wie man, es entwickelt sich irgendwie so.

Ich habe dann, ja, also, ich hatte dann auch Spaß.

Man schreibt ja, also, als experimentelle Teilchenphysiker*in, man schreibt ja sehr viel Computerprogramme und man hat auch mit richtigen Daten zu tun.

Das hat mir auch Spaß gemacht.

Also, ja.

Weiß ich nicht mehr genau.

Warum sind Sie denn überhaupt in die Physik?

Also, andersrum gefragt, was wäre aus Ihnen geworden, wenn Sie nicht Teilchenphysiker*in geworden wären?

Ja, gut, ja, gut, ich meine, ich war schon in der Schule, hatte ich viel Spaß an Mathe, vor allem.

Also, Mathematik hat mir immer großen Spaß gemacht und ich hatte dann auch Physik, Leistungskurs hatte man damals, genau.

Und ja, ich hatte dann auch gedacht, also, man kann sich natürlich als Schüler oder Schülerin schlecht vorstellen, was eigentlich ein Physiker macht.

Also, ich hatte auch keine Physiker*innen in der Verwandtschaft oder, also, privat

kannte ich niemanden.

Und dann dachte ich auch, vielleicht mache ich Elektrotechnik oder irgendwie sowas.

Aber ich hatte dann mal so ein Praktikum gemacht und das hat mir dann doch nicht gefallen.

Und ja, dann dachte ich, okay, ich probiere das mal mit Physik, weil ich es einfach gern gemacht habe.

Und Mathematik war mir dann doch etwas zu abstrakt.

Also, genau, und Physik war eben dann doch realitätsnäher und es schien mir dann auch, dass man damit wahrscheinlich dann doch eine Menge machen kann.

Und in der Physik selber, also, ehrlich gesagt, was mich fast am meisten an der Physik vielleicht angezogen hat, auch im Vergleich zur Biologie oder Chemie ist, schien mir am einfachsten, weil, und das finde ich auch heute noch, also, wenn ich jetzt auch, jetzt mich, also, nicht wirklich professionell, aber wir sind ja alle so Laienvirologen oder so, also, man versucht ja dann auch als Wissenschaftlerin, das zu versuchen zu verstehen, wie dieses Virus dann und Spike-Protein und was weiß ich.

Aber das sind natürlich unglaublich komplexe Prozesse, die man nicht wirklich von ersten Prinzipien ausrechnen kann.

Ja, und das ist ja bei der Chemie auch so, dass es wirklich, und auch bei Physik, in vielen, in vielen Gebieten der Physik ist es auch so, also, oder wenn ich mir die Klimaforschung angucke, ja, das sind unglaublich komplexe Vielkörperprozesse, die, die nicht leicht, also, die man nicht analytisch gut ausrechnen kann.

Also, das sind immer wahnsinnig komplexe Modelle.

Und das empfand ich immer als Vorteil der Physik, dass man im Prinzip alles ausrechnen kann.

Bei Mathematik natürlich noch mehr.

Da ist immer die Frage nur, was will man eigentlich ausrechnen?

Also, bei Physik sozusagen war es für mich, glaube ich, die beste aller Welten, weil einerseits ist es eben sehr rigoros und man kann tatsächlich Sachen von ersten Prinzipien ableiten und ausrechnen und andererseits hat man aber auch ein klares Ziel, was man ausrechnen will, weil man will ja versuchen, wie die, also, rauszurechnen, wie die Natur funktioniert oder der schiefe Wurf oder was auch immer man da gerade als Problem hat.

Also, man hat irgendwie handfeste Probleme, die man, auf die man dann Mathematik anwendet und die, genau, und, und das, ja.

Werden wir eigentlich irgendwann da hinkommen, sagen zu können, so, das ist es, das ist jetzt Materie?

Ich würde sagen, dass wir im Prinzip, also, okay, dunkle Materie wissen wir noch nicht, aber, also, ich meine, die Frage, was die Welt im Innersten zusammenhält, laut Goethe oder so, also, die Materie auf unserer Welt, das haben wir ja inzwischen beantwortet.

Ich meine, das muss man sich auch mal meiner Mama vergegenwärtigen.

Vor 100 Jahren hatten wir noch, gut, sagen wir, vor 120 Jahren hatten wir noch überhaupt gar keine Ahnung davon, was das ist, ja.

Und vor 100 Jahren schon besser, aber, also, das ist, ja, ob wir nun alles wissen, ich meine, das würde mich natürlich schon interessieren, ob man jetzt dunkle Materie, ob man, also, ja, das ist vielleicht das von, was jetzt fast das dringendste Problem ist in der Teilchenphysik und Astro-Teilchenphysik rauszufinden in den nächsten Jahrzehnten, was eigentlich dunkle Materie ist.

Aber ob wir es je wissen, ich weiß nicht, man braucht schon einen langen Atem in dem Geschäft, also, ja.

Und angenommen, Sie hätten dann die dunkle Materie irgendwann gefunden, könnte es Ihnen passieren, dass sich dann die Frage stellt, woraus die denn dann eigentlich besteht im Einzelnen?

Oder ist, wenn Sie die dunkle Materie finden, also, wenn Sie ein Teilchen finden, das die dunkle Materie ist, ist das dann die dunkle Materie oder gibt es da dann noch kleinere Teilchen drin?

Das weiß man nicht, das weiß man nicht.

Das ist letztlich, ja, das ist, also, wir werden nie den, nie experimentell wirklich das alles rausfinden, weil es, also, zumindest nicht in irgendeiner Zeitspanne, die jetzt irgendeiner Zeitspanne eines normalen Lebens korrespondiert.

Also, es ist sehr, sehr schwierig.

Letztlich die Skala, die Energieskala, die wirklich dann ultimativ interessant ist, ist ja, ist die Skala, wo dann auch wiederum die Schwerkraft und die anderen Kräfte gleich stark sind.

Und von der sind wir wahnsinnig weit entfernt.

Also, das, das kann sehr gut sein, dass da noch dann kleinere Teilchen sind bei irgendwelchen hohen Energieskalen, die aber so weit jenseits der Möglichkeiten sind, die man sich im Moment vorstellen kann, dass, also, man soll nie, nie sagen, aber es ist schon sehr, sehr schwierig, sehr, sehr schwer, sich das vorzustellen, dass man, dass man diese Energieskalen jemals testen wird.

Man muss Etappenziele im Auge behalten.

Wenn man diese Skalen nicht testen kann, kann man sie dann rechnen.

Also, ja, ja, ja, ja, ja, ja, die Stringtheorie zum Beispiel.

Also, die ist ja auch genau, kennen ja auch, kennt man ja vielleicht, weiß ich nicht, also die Stringtheorie beschäftigt sich genau damit, mit den, bei diesen sehr hohen Energien, das nennen wir die Planck-Skala, wo eben die Schwerkraft und die anderen Kräfte gleich stark sind.

Das Problem ist eben, eins der grundlegendsten Probleme der modernen Physik ist auch, dass man die Gravitation und die anderen, also die Gravitation und die

Quantenphysik nicht in Einklang bringen kann.

Das hat schon Einstein nicht gefallen.

Und die Stringtheorie ist ein Ansatz, um das zu lösen.

Aber wie das jetzt konkret, also, ja, also da wird immer noch sehr dran geforscht.

Es ist ein Ansatz, der ist auch sehr vielversprechend, aber wie jetzt konkret das in unserer Welt genau funktionieren kann und dass man da wirklich konkrete Vorhersagen, wie jetzt, die auf unser Universum sich anwenden lassen, das ist bisher, ja, also daran wird noch gearbeitet.

Das ist noch nicht klar.

Aber ja, ja, da wird gerechnet auf jeden Fall.

Das heißt aber auch gleichzeitig, dass wir in die Richtung, in die Sie Fragen stellen, nie aufhören können zu fragen, weil wir die Energien, die wir bräuchten, um die letzten Antworten zu finden, nicht erzeugen können.

Ja.

Das ist halt was Romantisches.

Ja, ja, ja, das ist, das ist, nun ist es so, genau.

Und natürlich hat jede Generation dann die Fragen.

Ja, man hat also, ja, also man muss sich, ich denke, man muss sich da einfach weiterhangeln in der Forschung.

Das ist ja, es ist ja auch klar, dass Aristoteles sich nie gefragt hat, gibt es ein Higgs-Boson?

Ja, also Fragen tauchen dann auch wieder neu auf.

Je mehr man lernt, also immer, wenn man was lernt, dann kommen, dann

entstehen neue Fragen.

Es ist, glaube ich, nicht nur bei uns so.

Ich glaube, das ist ganz generell, ganz generell so.

Also, dass, dass, dass, dass, dass man dadurch, dass man irgendwas gelernt hat, kann man dann eigentlich noch bessere Fragen stellen.

Gibt es irgendwie so das eine Ding, von dem Sie noch nichts wussten oder von dem wir als, als Menschheit noch nichts wussten oder geahnt haben, als Sie angefangen haben mit der Physik und das wir jetzt wissen?

Naja, die dunkle Energie, also das war wirklich eine enorme Überraschung.

Also das wurde 1998 entdeckt von Physikern in Berkeley.

Ich habe da lange gearbeitet und ich kenne die auch persönlich, also den einen, der dann auch einen Nobelpreis bekommen hat.

Also das wusste man einfach nicht.

Also das war auch total unerwartet.

Also das ist ein Beispiel, ja.

Ein anderes Beispiel ist aber auch Neutrinos.

Also Neutrinos, man wusste schon, dass die existieren, aber man hat dann herausgefunden, dass Neutrinosorten sich ineinander umwandeln können.

Also das ist sehr ungewöhnlich und das ist auch zwar mathematisch verstanden, wie das passieren kann, aber es ist noch nicht wirklich durch die Theorie, also da sind noch Lücken im theoretischen Verständnis, sagen wir mal so.

Wer sind denn die Neutrinos jetzt in unserer... Ah ja, Entschuldigung.

Was meint die denn schon wieder?

Ja genau, also wir hatten ja, wir hatten ja Quarks, glaube ich, darüber geredet.

Ne, haben wir noch nicht.

Es sei denn, die heißen irgendwie anders und wir haben darüber... Aber dann noch ein Stichwort.

Genau, wir haben, okay, wir haben jetzt eigentlich über fundamentale Teilchen geredet, ohne sie je zu benennen.

Und zwar, genau, also die fundamentalen Teilchen, aus denen die Welt jetzt aufgebaut ist, wie wir sie kennen, sind einerseits Quarks, das sind die Bestandteile des Protons und Neutrons.

Also Proton und Neutron sind keine fundamentalen Teilchen, sondern sind jeweils aus drei Quarks aufgebaut und unterschiedlich.

Also nicht drei Quarks, sondern Quarks Meyer, Quarks Müller und Quarks... Ja, also die heißen genau, in dem Fall heißen die Quarks Up und Down und das Proton zum Beispiel besteht aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark und das Neutron aus zwei Down-Quarks und einem Up-Quark.

Aber es gibt ja noch weitere Quarks, die heißen Strange, Charm, Bottom und Top.

Genau, die werden alle am LHC zum Beispiel erzeugt, die kommen aber alle in der normalen Welt nicht wirklich vor, weil die instabil sind.

Also Up und Down sind eben im Proton und Neutron und wir sind alle aus Up- und Down-Quarks letztlich, aber die ganzen anderen, die existieren nur eine sehr, sehr kurze Zeit lang und dann sehr flüchtig und zerfallen, sodass die im normalen Leben eigentlich nicht vorkommen.

Aber was machen die dann?

Die Dinger, die sind ja nicht nur einfach, die müssen ja auch eine Funktion haben.

Ja, das wäre, das ist genau, das ist eine sehr gute Frage und das ist eigentlich

ehrlich gesagt die Frage, die mich am allermeisten interessiert.

Warum gibt es die überhaupt, sagen wir mal so.

Ja, und genau, also wir sagen, es gibt sogenannte drei Generationen von Quarks.

Up und Down ist eine, Strange und Charm ist andere, Bottom und Top ist die dritte Generation und wir haben überhaupt keine Ahnung, warum es drei Generationen gibt.

Und interessanterweise gibt es dann, also außer den Quarks, die anderen fundamentalen Teilchen, die wir kennen, sind sogenannte Leptonen.

Das Elektron ist das bekannteste und diese kommen aber auch in Paaren.

Also Up und Down ist sozusagen ein Paar, das ist ein Paar von Quarks und vom Elektron, das Partnerteilchen ist das Elektron Neutrino.

Also da kommt das Neutrino.

Das ist nicht geladen, das ist neutral.

Also das Neutrino heißt auf italienisch kleines Neutron.

Das hat ein italienischer Physiker deswegen so genannt, weil es eben elektrisch neutral ist, wie das Neutron und da heißt Neutrino genannt.

Das wird zum Beispiel in rauen Mengen in der Sonne produziert.

Das ist aber elektrisch neutral und interagiert fast überhaupt nicht mit unser Eins.

Aber die ganze Zeit fliegen durch uns tausende von Neutrinos durch, aber wir merken das gar nicht, weil man die nicht sehen kann und die tun dann auch nichts.

Aber in der Radioaktivität in Reaktoren zum Beispiel werden sehr viele Neutrinos auch, also in Kernreaktoren zum Beispiel oder bei Atombomben abwerfen werden auch welche überzeugt.

Interagiert fast überhaupt nicht.

Dieses fast interessiert mich noch.

Wann oder inwiefern interagiert das denn dann doch, obwohl es neutral ist?

Genau.

Das sollte es doch eigentlich gar nicht, oder?

Es kann aber doch und es interagiert nur über die sogenannte diese schwache Wechselwirkung, bei der wir ganz am Anfang gesprochen haben.

Es kann eben nicht über die elektromagnetische Wechselwirkung, weil es keine Ladung hat, keine elektrische Ladung und über die starke Kraft wechselt es auch nicht, sondern nur über die schwache Kraft.

Und die ist eben wesentlich schwächer als die anderen beiden Kräfte bei niedrigen Energien insbesondere.

Also was tatsächlich aber nachgewiesen wurde und das ist auch eine ganz tolle und spannende Geschichte eigentlich, ist, dass schon in den 60er Jahren gab es ein Experiment, das hat ein amerikanischer Physiker Ray Davis in einer Mine in der Homestake Mines in South Dakota aufgebaut. 4000, also sehr tiefe Mine, da wurde Gold abgebaut.

Da bin ich mal gewesen auch.

Das war sehr spannend.

Da fährt man zehn Minuten mit dem Fahrstuhl runter in diese Mine rein und dann hat er versucht da Neutrinos aus der Sonne zu entdecken.

Er hatte da ein Experiment, das hatte eine Größe von einem Kubikmeter, glaube ich, ungefähr und hat dann pro Jahr zwei, drei Ereignisse gefunden.

Und das hat er über 20 Jahre, glaube ich, gemacht.

Also wirklich über einen langen Zeitraum und niemand hat ihm und er hat gesagt, er misst weniger als er erwartet.

Ja, also und alle haben gesagt, ja, aber du hast bestimmt falsch gemessen.

Ja, genau, weil das so wenig und dann über Jahre oder es ist natürlich wahnsinnig.

Aber er hat bis dabei geblieben.

Er hat natürlich dann immer geguckt und sichergestellt, ist alles in Ordnung und so.

Und dann gab es dann irgendwann haben auch andere angefangen zu messen und so.

Und das hat sich tatsächlich herausgestellt, dass das richtig war.

Und dann haben natürlich einige einige gesagt, auch das Modell von der Sonne ist wahrscheinlich falsch.

Also es kann ja sein, dass also die wahrscheinlich produziert die Sonne nur halb so viele Neutrinos wie die, wie die Leute sagen, ja, also wie die ausgerechnet haben.

Aber es war sowohl die Vorhersage als auch die Messungen waren korrekt.

Der die Sache ist, was Neutrinos machen, ist, dass die sich umwandeln können.

Also der Detektor von Ray Davis, der konnte nur Elektron Neutrinos nachweisen und nicht andere Arten von Neutrinos, auf die ich gleich komme.

Und die können sich aber auf dem Weg von der Sonne zum Detektor umwandeln in andere Arten von Neutrinos.

Und dann ist er sozusagen blind und konnte das nicht sehen.

Ja, und der hat aber also aber letztlich hat man dann und das passierte 98.

Das weiß ich doch.

Da hat man dann wirklich zeigen können, mit dem Super Kamiokande Experiment in Japan, dass sich Neutrinos wirklich umwandeln, dass sie ja also aber in was?

In andere Neutrinos, die wenden sich einfach nur in andere um.

Also es ist genau.

Es gibt das Elektron, das ist die erste Generation.

Also bei den Korks hatten wir ja diese drei Generationen, von denen ich gesagt habe, wissen wir auch nicht, warum es davon drei gibt.

Bei den Leptonen haben wir das auch.

Die erste sind Elektronen.

Zweite heißt Myon und die dritte heißt Tau.

Und da ist das genauso, dass wir nicht wissen, warum es die zweite und dritte Generation gibt.

Aber wir wissen dann, dass sich das Elektron Neutrino zum Beispiel an Myon Neutrino umwandeln kann.

Und dann, wenn mich ein Detektor hat, der sieht nur Elektron Neutrino, so nicht Myon Neutrino, dann sieht es aus, als sei mein Elektron Neutrino verschwunden.

Aber wie sieht der die denn überhaupt?

Das heißt, dass Myon eine andere Störung in der schwachen Kraft macht, als das Neutrino eine Störung macht?

Also das Elektron Neutrino, wenn das jetzt auf diesen Detektor trifft, dann trifft es plötzlich auf einen Proton und dabei wird ein Elektron produziert.

Und das weise ich dann zum Beispiel nach.

Wenn ein Myon Neutrino auf einen Proton trifft, dann wird ein Myon produziert.

Und wenn ich das... Okay, okay, ja.

Ich dachte, das Myon wäre das Neutrino.

Nee, nee, nee.

Das Myon ist sozusagen der schwere Bruder vom Elektron.

Der schwere Bruder vom Elektron, sehr schön.

Ja, und als das Myon gefunden wurde, da hat auch ein berühmter Physiker, das ist immer ein schönes Zitat, der hat dann damals gefragt, "Who ordered that?"

Wer hat denn das bestellt?

Und das drückt eben schon aus, dass man auch damals schon sehr verwirrt war, warum das denn... Also das pass... Man war eigentlich ja schon ganz glücklich mit einem Elektron.

Aber warum gibt es dann jetzt noch einen, also ja, schweren Bruder sozusagen?

Es ist echt... Es ist alles exakt gleich, das Myon, alles ist exakt gleich, außer die Masse.

Es ist einfach schwerer.

Und dann gibt es auch noch das Tau und da ist es auch so, ja, das ist genau gleich, aber die Masse ist schwerer.

Und das ist, ja, das ist nicht verstanden.

Also das weiß man überhaupt nicht, warum es da diese drei Generationen gibt.

Und da, ja, also das ist, finde ich, eine sehr interessante Frage.

Also da würde man eben als Physiker hoffen, dass es da einen Grund gibt und nicht irgendwie jemand dann einfach gesagt, "Ach ja, wir machen mal drei Teilchen, weil es ja spannend ist."

Ja, um die Deppen was zu forschen.

Und dann ist ja auch die Frage, warum zum Beispiel die Massen... Also dann, ich weiß noch genau, in einem Studium, als wir das durchgelernt haben mit den Quarks und dann kriegt man so eine Tabelle, wo die ganzen Massen tabuliert sind von diesen ganzen Quarks und diesen ganzen Leptonen, Elektron, Myon, Tau, Upquark, Topquark, bla bla bla.

Und dann sieht es komplett durcheinander gewürfelt aus.

Also dann habe ich stundenlang versucht, da irgendwie arithmetische Formeln zu finden.

Ein Muster.

Ja, das versucht man.

Da muss es doch, da denkt man doch, da muss es ein Muster geben, dass sie irgendwie in einer mathematischen Beziehung zueinander stehen, die man durch eine Formel, die relativ, also, ja, weiß ich nicht, quadratisch oder so ist.

Das gibt es auch bestimmt, aber die haben sie noch nicht gefunden.

Genau.

Also ich habe die auf jeden Fall nicht gefunden, aber sonst auch niemand.

Gibt es denn Mutmaßungen, wozu die Dinge gut sind?

Also irgendwie Arbeitshypothesen oder stochern sie tatsächlich völlig im Nebel?

Also, also ich würde sagen, da stochern wir ziemlich im Nebel.

Es gibt, also es gibt schon sehr, sehr viele theoretische Physiker und dadurch gibt es auch sehr viele theoretische Modelle, die Ansätze haben.

Teilweise, warum die Zahl 3 in einer Form speziell ist und so weiter.

Aber die sind wirklich, also ja, also das ist aber eher spekulativ, würde ich sagen.

Also das kann man nicht sagen, dass das jetzt, also ja, also dass das jetzt, also das stochern wir ziemlich im Nebel rum, denke ich.

Also die liefern keine wirkliche Erklärung.

Also es ist nicht, es ist nicht unplausibel.

Es gibt auch jetzt aber auch nicht, dass alle denken, es müsste aber 4 geben oder 2 oder es müsste einen geben.

Also das ist einfach eine Dimension, wo wir nicht viel darüber wissen überhaupt.

Und es ist auch nicht klar, ob wir da demnächst viel lernen werden.

Also es gibt noch andere, das Ganze nennt sich Flavor, ja.

Also wir nennen dieses wie Eiscreme Flavor oder so.

Also diese, diese verschiedenen Arten von Quarks nennen wir Flavor.

Also Up ist ein anderer Flavor als Top und so weiter.

Und das ist das ganze Flavor Problem, warum die Massen die Werte haben, die sie haben, das hat wiederum dann auch mit dem Higgs Boson zu tun.

Also weil das Higgs, ja, aber das Higgs Boson gibt ja denen die Masse.

Ach ja, klar.

Genau.

Also je stärker das Higgs Boson ein Teilchen koppelt, desto höher ist die Masse.

Und deswegen kann man das Problem eigentlich umschreiben und nicht sagen, warum sie die Masse, wie sie sind, sondern kann ich fragen, warum sie die Koppelung, wie sie sind.

Wie koppelt das denn überhaupt?

Ja, das, also wenn, also wenn, wenn ein Teilchen eben durch das Higgs Feld fliegt, dann, dann, dann, dann, ja, das kann man sich vorstellen wie so eine Molasse oder so, ja, oder ein, ja, also und dann, dann unterschiedliche Teilchen, da ist die Molasse, die bleiben halt unterschiedlich stark in der Molasse hängen sozusagen.

Also dann, dann, dann das, das, also zum Beispiel das Photon überhaupt nicht koppelt, überhaupt nicht, dann fliegt es mit Lichtgeschwindigkeit, weil es masselos ist.

Andere Teilchen, die massiv sind, die fliegen dann eben nicht mit Lichtgeschwindigkeit, sondern etwas geringer, weil, weil sie eine Masse haben.

Genau.

Und dann je höher, je stärker es koppelt oder dann desto langsamer fliegt es sozusagen und desto höher ist die Masse.

Also das Topquark ist zum Beispiel das schwerste Teilchen, das wir kennen.

Und warum koppeln die?

Naja, so ist es halt in der Natur.

Jetzt hab ich sie!

Ja, also da, also das tun die halt, also ja, also das, alle, alle, ja, soweit wir wissen, alle, alle, alle diese Materieteilchen koppeln ans Higgs-Feld und dadurch dann bekommen, dann Masse.

Aber das ist ja, das ist, warum sie dann, ja.

Das müssen andere beantworten.

Naja, beziehungsweise, das ist letztlich irgendwie, da beißt sich dann der Hund auch in den Schwanz, ja, oder?

Ich meine, ich kann nicht einerseits sagen, das Higgs-Teilchen koppelt an alle Teilchen und andererseits fragen, warum koppeln die Teilchen an das Higgs, weil, das ist ja das Gleiche.

Also, das ist halt, was wir rausgefunden haben und das haben wir auch gemessen.

Wir haben jetzt auch gemessen, wie stark das Higgs-Boson an die unterschiedlichen Teilchen koppelt.

Also wir haben gemessen, wie stark es ans Topquark koppelt, wir haben gemessen, wie stark es ans Bottomquark koppelt, wir haben noch nicht gemessen, zum Beispiel, wie stark es ans Charmquark koppelt, weil es da wesentlich geringer, wesentlich weniger stark koppelt und das haben wir jetzt noch nicht gemessen.

Dafür brauchen wir noch wesentlich mehr Daten oder sogar eigentlich einen neuen Beschleuniger, eine Higgs-Fabrik, um das herauszufinden.

Bauen wir den eigentlich gerade schon, den neuen Beschleuniger?

Da gab es doch irgendwie Pläne, den LHC zu vergrößern, ne?

Ja, den, das machen wir, also den nicht vergrößern.

Also einen neuen riesigen Ring unterm See drunter durch und so.

Achso, ja, okay.

Also den LHC, den machen wir ja jetzt erstmal sozusagen stärker, dadurch, dass

er dann mehr Kollisionen liefert pro Zeiteinheit.

Es gibt auch tatsächlich Pläne, genau, einen großen neuen Ring, der ist so knapp 100 Kilometer lang, in der Genfer Region zu bauen, aber das ist im Moment noch in der Forschungsphase, also da ist Forschung und Ingenieursphase.

Also das wird jetzt ausgearbeitet, ob das geht, ja, und wie das geht und was es dann auch kostet und so weiter.

Das wird jetzt im Moment alles ausgearbeitet.

Also man hofft dann 2026, da einen konkreten Plan vorlegen zu können.

Also 2026 wäre dann sozusagen das Planfeststellungsverfahren und bis das Ding gebaut ist, vergehen dann nochmal 20 Jahre.

Also genau, genau.

Also ich weiß jetzt nicht genau, ob das Plan... ja genau.

Also es ist natürlich ein bisschen komplizierter, weil... also nicht, dass ein Planfeststellungsverfahren nicht schon kompliziert genug wäre, aber...

Ein Planfeststellungsverfahren für einen 100 Kilometer großen Ring unterhalb der Schweiz ist nochmal ein anderer Schnack dran.

Genau, und nicht nur Schweiz, sondern auch Frankreich.

Auch noch, okay.

Und das ist eine europäische Forschungsgemeinschaft, also die das beschließen muss.

Das ist ja nicht nur ein Land sozusagen, wo man ja... da muss man dann trotzdem mit den anderen Parteien verhandeln und so weiter.

Aber da hier muss man ja... also das ist ja eine wirklich europäische Infrastruktur, wo über 20 Länder, 21 Länder direkt als Mitgliedsstaaten beteiligt sind und die da

das zusammen beschlossen müssen.

Und außerdem sind die finanziellen Mittel, die benötigt werden, so hoch, dass das auch aus dem normalen Budget nicht zu finanzieren ist, sondern man braucht da noch extra Geld für den Tunnel oder so.

Ja, also da braucht man schon dann auch einen starken politischen Willen.

Und außerdem will man auch... also auch am CERN ist es ja so jetzt schon, obwohl das eigentlich eine europäische Forschungseinrichtung ist.

Forschung ist ja wahnsinnig global und die Amerikaner, Japaner, Australier, Kanadier, auch Südamerikaner, also forschen da ja auch jetzt schon mit und wollen das auch in der Zukunft dann bei einem zukünftigen Beschleuniger machen, was natürlich dann auch finanzielle Vorteile hat, wenn die sich auch beteiligen.

Also ja, aber das muss natürlich alles koordiniert werden.

Aber gut, aber die Hoffnung wäre, dass man in den 2040er Jahren dann einen neuen Beschleuniger hätte.

Bis dahin warten wir ab und kaprizieren uns lieber darauf, die Dinger zu verbessern, die wir haben.

Ja, und es ist natürlich... es ist auch so, dass die Beschleuniger, also die großen Beschleuniger sind eine sehr, sehr wichtige Art, Neues über das Universum, die Anfänge zu lernen.

Aber es gibt auch andere Methoden.

Also es gibt auch indirektere Methoden oder zum Beispiel Dunkle Materie.

Da gibt es auch sehr spannende Experimente, ähnlich wie das, was ich von den Neutrinos erzählt habe, wo man in dieser Mine noch Neutrinos gesucht hat.

Man kann auch in solchen Minen nach Dunkler Materie suchen.

Also letztlich, wenn Dunkle Materie, wir nehmen ja an, dass diese Dunkle Materie dann am Anfang im Urknall, also kurz am Urknall entstanden ist und auch jetzt noch übrig ist und die fliegt auch die ganze Zeit um uns herum.

Ja, und dieses auch in unserer Galaxie, also in der Milchstraße und wir können dann auch die versuchen zu entdecken durch, ja, durch entsprechende Experimente.

Also da sucht man danach, dass dieses Dunkle Materie, da baut man einen Tank von Edelgasen zum Beispiel, also da nimmt man gerne Xenon zum Beispiel.

Da gibt es ein Experiment in Italien, das heißt, das heißt auch Xenon und das ist, ja, das ist ein Tank, der mit Xenon gefüllt ist und die Idee ist, dass so ein Dunkle Materie Teilchen dann ein Xenonatom trifft und man den Rückstoß oder dabei stehen auch ganz kleine Lichtblitze, dadurch dass ein bisschen Energie dadurch frei wird und die kann man dann sehen in den Detektoren und das, das, ja, das auch, das wäre auch ein sehr interessanter Hinweis auf Dunkle Materie.

Also das ist, letztlich braucht man meiner Meinung nach im Dunkle Materie wirklich zu verstehen, bräuchte man beides, weil so würde man lernen, da misst man ja tatsächlich die Dunkle Materie, die ganz, ganz, also vor Milliarden von Jahren produziert wurde im, im Universum.

Das ist natürlich, ja, wahnsinnig toll und dadurch misst man dann, kann man dann auch direkt Rückschluss ziehen, wie viel Dunkle Materie im Universum jetzt noch ist, ja, weil man ja misst, man misst dann die Rate, also erstmal entdeckt man es natürlich, aber dann misst man die Rate von dieser Dunkle Materie und dann kann man das ja ausrechnen, wie viele jetzt noch ist und dann kann man zurückrechnen, wie viel dann damals wohl da war und gucken, ob das alles Sinn macht.

Andererseits am LHC könnte man die eben auch produzieren, aber da würde man die Produktion sehen.

Man wüsste aber nicht, ob die jetzt noch da ist oder nicht, ja, also man produziert die ja und dann, aber man ja in Einzelportionen sozusagen, da lernt man nichts über den Urknall per se, also oder über was im frühen Universum war.

Also letztlich sind das einfach sehr unterschiedliche Aspekte der Dunklen Materie, die man auf diese unterschiedlichen experimentellen Arten beleuchten kann.

Hat Xenon denn schon irgendwelche Ergebnisse geliefert oder ist das?

Ja, ja, die laufen schon seit mehreren Jahren und die vergrößern letztlich dann, verbessern ihre Technik und vergrößern ihren Tank laufend und die haben tatsächlich, also die haben jetzt tatsächlich im letzten Jahr ein relativ interessantes Ergebnis gezeigt.

Also was sie bisher eigentlich immer gesehen haben, sie wissen, wie sensitiv sie sind, sie haben aber bisher dann keine guten Kandidaten für Dunkle Materie, sie haben ja dann immer nichts gesehen letztlich, ja.

Das ist aber auch nicht so einfach, also experimentell nicht ganz einfach, nichts zu sehen, obwohl das immer so klingt, weil man muss ja erst mal auch sehen, dass man keinen Untergrund hat, weil normalerweise hat man erstmal jede Menge Untergrund.

Ja, stimmt.

Genau, genau, also und das ist sehr viel harte Arbeit, um da den Untergrund sehr stark zu unterdrücken, beziehungsweise ihn, genau, also durch Analysetechniken und experimentelle Techniken, um ihn da zu unterdrücken.

Aber die haben tatsächlich letztes Jahr was gesehen und zwar in einem niederenergetischen Bereich, also es ist jetzt noch nicht klar, was das ist, es ist auch nicht sehr signifikant, das ist bisher eine sehr recht geringe Signifikanz und da wissen wir jetzt noch nicht.

Die nehmen jetzt weitere Daten und da muss man mal schauen und es gibt dann auch noch ein Konkurrenzexperiment in den USA, das ist in dieser Homestake-Main, von der ich eben schon geredet hatte in South Dakota, das heißt LC, also wie Led Zeppelin, hat aber damit nichts zu tun.

Genau, und die nehmen, das ist sehr ähnlich, die haben auch eine ähnliche Sensitivität, also wenn das Signal, also das Signal, was jetzt Sinon-Experiment

gesehen hat, wenn das von LC dann auch bestätigt werden würde, wäre das natürlich schon sehr, sehr interessant.

Da muss man mal abwarten, also so bleibt es immer spannend.

Wir haben übrigens einige so Effekte, auch momentan bei Experimenten, die sind jetzt noch nicht kristallklar, was das ist.

Also was wir normalerweise verlangen, um wirklich sicher zu sein, dass wir was richtig Neues gefunden haben, verlangen wir sogenannte 5 Sigma, also das heißt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass das aus Versehen mal passiert ist, ist kleiner als eine in zehn Millionen ungefähr.

Also im Vergleich, also die meisten medizinischen Studien, ich will das überhaupt nicht kritisieren, aus guten Gründen verleiten die meisten medizinischen Studien nur so was wie 5 Prozent.

Also da sind zwei sogenannte 2 Sigma P-Value von 5 Prozent, also wir verlangen normalerweise P-Value von 10^{-7} .

Gut, die Medizin arbeitet aber auch mit größeren Teilchen.

Das Problem ist, die können ja, also das ist einfach, liegt in der Natur der Sache, weil man dann eben 200 Patienten hat und dann kann man ja, man kann ja nicht irgendwie zehn Millionen Patienten jetzt benutzen.

Also das ist klar, das liegt in der Natur der Sache.

Ich sage nur, aber das ist, man braucht dann schon eine sehr, sehr hohe Statistik und wir haben aber häufiger mal Effekte, die auf dem 2-3 Sigma Level sind, die dann, und da wissen wir jetzt noch nicht, ob die jetzt eine große Bedeutung haben oder nicht.

Das kann eben sein, dass das eine statistische Fluktuation ist oder es kann eben was sehr Wichtiges sein.

Also zum Beispiel gibt es ein Experiment am LHC, an dem ich nicht arbeite, das heißt LHC-B, aber an dem auch zum Beispiel in Karlsruhe Gruppen arbeiten und

auch in Heidelberg, also auch viele deutsche Gruppen beteiligt sind, und die sehen jetzt tatsächlich einen leichten Unterschied zwischen, in bestimmten Prozessen, die Elektronen und Myonen involvieren, den man so nicht erwartet.

Man erwartet, dass die eigentlich gleich sich verhalten, dieser eine Prozess für Elektronen und Myonen, die sehen einen Unterschied.

Und ob das jetzt, also es könnte ein Hinweis sein auf neue, schwere Teilchen, die sowas auslösen können, aber es könnte auch sein, dass das eine statistische Fluktuation ist, sagen wir, oder ein leichter Messfehler oder was weiß ich.

Also das ist, ja, dann würde es einfach weggehen mit der Zeit und da werden natürlich jetzt auch mehr, noch weitere Crosschecks gemacht und so weiter, um das zu gucken, was das jetzt ist.

Aber das ist jetzt nichts, wo dann irgendwann das Telefon klingelt und irgendjemand sagt "Berte, wir haben es!", sondern da wird sich langsam ran getastet, oder?

Naja, also, ähm, also das ist dann schon, es gibt dann schon diese Heureka-Momente.

Die gibt's noch.

Die gibt's total, weil heutzutage, wie wir Analysen machen, wir machen die blind.

Das klingt jetzt so, wir würden dann gar nichts sehen, aber das ist ein bisschen wie in der Medizin, gibt's ja auch diese Double-Blind-Studien, ja, dass weder die Patienten noch die Ärzte wissen, wer jetzt was bekommen hat, den Impfstoff oder das Placebo, genau.

Und aus gutem Grund, um eben menschlichen Bias so gut wie möglich zu eliminieren.

Na klar, sie wollen es ja finden, sie wollen aus dem Rauschen ein Signal finden.

Genau, genau, genau.

Das ist zwar bei uns, wir müssen nicht doppelt blind, wir können nur einfach blind machen, wir müssen nur den Physiker blind machen, weil die Natur an sich bleibt ja blind, also die Quarks, die wissen, die können ja nichts, also die machen ja keine komischen psychischen Effekte, haben die ja nicht, dass sie jetzt denken, oh, ich hab einen Impfstoff gekriegt, jetzt mach ich mal was anderes.

Nee, also genau.

Und deswegen machen wir auch blinde Analysen, das heißt, wir designen die Analyse letztlich komplett durch, ohne uns den entscheidenden Aspekt der Daten anzugucken.

Also wir gucken uns, ich sag mal, Nachbarregionen an, wo Daten sind, aber die, wo eben auch viel Untergrund ist, wo wir nicht wirklich sensitiv sind, zum Beispiel auf dunkle Materie oder was auch immer wir da gerade suchen, ja, oder auch wenn es so ist, wir suchen uns da Kontrollregionen, nennen wir das, auch da gucken wir uns die Daten an, sehen, dass das alles so stimmt, wie wir uns das, wir auch verstehen, haben wir den Untergrund da gut abgeschätzt und so weiter.

Aber wir gucken uns nicht wirklich den Aspekt der Daten an, der am spannendsten ist.

Und erst wenn wir das alles andere abgesehnet haben, dann haben wir verschiedene Leute, die begutachten das auch innerhalb der Kollaboration, gucken sich das zusammen an und wenn dann alle glücklich sind, ja, ja, das ist alles fein, wir haben den Untergrund gut abgeschätzt und so weiter, erst dann gibt es das sogenannte Unblinding, dass wir wirklich, oder wir sagen Open the Box, dass wir wirklich gucken, ist da jetzt, was ist da jetzt drin, ja, und da, genau, und insofern gibt es dann diesen Heureka moment, also der ist natürlich schon aufregend.

Nun ist es natürlich so, wenn jetzt da nicht drin ist, also wenn da jetzt drin ist, was man erwartet, dann, dann, okay, naja, schade, das ist natürlich meistens der Fall, ja, also wir machen sehr viele Suchen, sehr viele Analysen und da ist meistens natürlich, findet man, was man erwartet.

Falls nun passiert, dass man was findet, was man nicht erwartet, ein unerwartetes Signal, also es war ja zum Beispiel beim Higgs-Boson so, na gut,

das Higgs war nicht komplett unerwartet, aber man wusste nicht, wo es auftaucht und wann und so weiter, dann fängt man natürlich noch an, sehr viele Studien zu machen, um sicherzustellen, dass man nicht aus Versehen einen Fehler gemacht hat, ja, also das ist, genau, aber, aber ich weiß noch ganz genau, als ich das erste Mal das Higgs sozusagen gesehen habe und dachte, oh, da ist es, also ich war nicht die Erste auf der Welt, die das so gesehen hat, aber ich erinnere noch genau den Moment, als ich das erste Mal, ja, das eine Histogramm gesehen habe, wo ich dachte, oh, das sieht, das sieht jetzt gut aus, also, ja.

Kann Ihnen das noch passieren, zu Lebzeiten, dass ein solcher Heureka Moment bei der Dunklen Materie auftritt?

Ja, ja, ja, ja, ja, ja, ja, ja, ja, ja.

Also es ist nicht ausgeschlossen, das heißt, sie vorstellt es nicht vor sich hin für die nächste Generation, sondern kann gut sein.

Also ich hoffe das, also ich meine, also ich denke mal, ich bin auch Optimistin, also ich, ich bin immer wahnsinnig aufgeregt, wenn einer ein Unblinding macht, das stimmt tatsächlich, dass manchmal die Leute dann dadurch, na ja, dass meistens eben nichts gefunden wird, rechnet man dann nicht unbedingt damit, dass da jetzt was Spannendes gefunden wird, aber ja, nee, nee, also ich denke schon, das kann jederzeit passieren, also es kann jederzeit was Interessantes passieren, also ich habe mehrere Doktoranden, da bin ich immer gespannt, also und wir versuchen ja auch immer, versuchen die Analysen immer zu verbessern, die Sensitivität zu verbessern und man sucht ja, man guckt ja immer in unerschlossenem Terrain, ja, man guckt immer in einer neuen Region, wo noch nie jemand vorher geguckt hat oder es ist immer möglich, ja, also, also ja und es kann auch sein, also ich denke mal, da kann, es kann auch sein, dass es so ist wie bei Columbus, der fährt ewig über den Atlantik und dann irgendwann findet er ein Land und dann ist das Ganze, sind da ganz viele Länder, ja, also das ist dann ganz wichtig.

Manchmal muss man nach Indien fahren, um Amerika zu entdecken.

Genau, also das ist sehr, sehr.

Heißt das, Sie haben die Flasche Shampoos immer kalt stehen für den Fall?

Nö, man kann ja schnell mal shoppen gehen.

Und außerdem muss man, außerdem ist der Moment dann, natürlich ist der, gibt es diesen vielleicht kurzen Moment, dass man denkt, oh, da könnte was sein, aber, also, aber dann, es folgen dann natürlich schon typischerweise Wochen, wenn nicht Monate von Crosschecks, um sicherzustellen, dass es jetzt nicht irgendwie ein Fehler ist, sondern dass das jetzt, dass das jetzt wirklich was Neues ist, ja, also, das, insofern dauert das dann, da gibt es genug Zeit, um shoppen zu gehen, sag ich mal, für Champagner, das ist das Problem.

Beate Heinemann, vielen Dank.

Okay, gerne, danke auch.

Am 6.

April hatte ich mit Beate Heinemann gesprochen und hatte unter anderem gefragt, gibt es eigentlich so Heureka-Effekte und was?

Und, ja, die Antwort habt ihr gerade gehört.

Am 8.

April dann kriege ich eine Nachricht von Frau Heinemann.

Gerade haben wir noch darüber gesprochen, jetzt haben wir diesen Heureka-Effekt oder Heureka-Moment und dazu einen Link zu einer Pressekonferenz vom Fermilab.

Da habe ich gedacht, nee, da muss ich nochmal mit Frau Heinemann darüber reden, das verstehe ich ja sowieso nicht von allein.

Was ist passiert?

Am 7.

April gab es ein Seminar von Kolleginnen und Kollegen vom Fermilab, also da

habe ich auch lange gearbeitet, das ist eines der größten Laboratorien für Teilchenphysik weltweit, also nach dem CERN eins der größten.

Und die haben eine Messung durchgeführt und zwar geht es darum, vom Myon, also darüber hatten wir gesprochen, das Myon ist, ich hatte gesagt, glaube ich, dass der große Bruder vom Elektron ist.

Der dicke Bruder vom Elektron ist.

Oder der dicke, ja, weil er schwerer ist, genau, also der dicke Zwillingbruder.

Aber insofern tatsächlich Zwillingbruder trifft es, glaube ich, sehr gut, weil das Myon eigentlich in jeder Beziehung ist es genau wie das Elektron, es ist ein geladenes Teilchen und wir verstehen letztlich nicht, warum es es überhaupt gibt.

Es ist allerdings nicht stabil im Gegensatz zum Elektron, weil es zerfällt dann in ein Elektron, genau, und es ist schwerer.

Was heißt, der einzige Unterschied zwischen Myon und Elektron ist die Masse?

Genau.

Okay.

Zumindest nach unserem Wissensstand, ja.

Und das wollen wir jetzt, das wollen wir prüfen.

Und ich hatte auch, glaube ich, darüber geredet, dass zum Beispiel das LACB-Experiment tatsächlich sieht, dass manche Teilchen, dass es doch eventuell einen kleinen Unterschied gibt, wie häufig Myon oder Elektronen auftreten in Zerfällen von schwereren Teilchen.

Genau.

Und jetzt hat das Ziel dieses Experiments am Fermilab, also das war übrigens ursprünglich...

LACB war Beauty, ne?

Genau, das war Beauty, genau, genau.

Und da bestimmte Zerfälle von Beauty-Mesonen, da treten Myon und Elektron in unterschiedlicher Rate auf, was auch etwas unerwartet ist.

Also auf dem Level von 3 Sigma, das heißt ungefähr, ja, was ist das?

Ich habe irgendwo gelesen in einem Artikel, 3 Sigma bezeichnen Leute wie Sie als Indiz und 5 Sigma als Entdeckung.

Das heißt, bei 3 Sigma, was ja eine statistische Wahrscheinlichkeit aussagt, wenn ich das richtig verstehe.

Genau, 3 Sigma ist so eine Wahrscheinlichkeit, meine ich, von ungefähr 0,1 Prozent, wenn ich mich richtig erinnere.

Und das heißt, da lohnt es sich hinzugucken bei 3 Sigma.

Ja, wir nennen das, genau, oder Evidenz, wenn wir jetzt was sehen.

Das ist Evidenz.

Genau.

Aber man muss sich da eben bewusst machen, dass wenn man 1000 Experimente macht, dann bekommt man ein 3 Sigma-Effekt.

Genau.

Und bei 5 Sigma, da muss man schon 10 Millionen Experimente machen, damit es so ein Resultat gibt.

Das ist dann schon sehr unwahrscheinlich.

Ja, genau.

Und jetzt ist es so, die, also am Fermilab hat man das Myon untersucht und zwar einen bestimmten Aspekt des Myons und zwar heißt das das magnetische Dipolmoment.

Und das tritt auf, wenn man ein elektrisches Teilchen an ein magnetisches Feld steckt.

Das heißt, wie richtet sich dieses Teilchen aus?

Wäre das einigermaßen eine Entsprechung unserer Dicke Brüder?

Ja, genau.

Also die Sache ist, dass diese Teilchen auch einen Spin haben.

Das muss man sich vorstellen wie bei so einem Kreisel, so einem Drehimpuls.

Aber dann müsste das ja auch ein Kreisel sein.

Ist das überhaupt ein Kreisel?

Nee, das ist punktförmig.

Eben eigentlich sind Teilchen ja noch nicht mal Teilchen.

Genau, deswegen ist auch dicker Bruder auch wieder irgendwie schwierig, weil die keine Ausdehnung haben.

Also insofern sind diese Analogien, die sind immer nicht hundertprozentig perfekt.

Wir nehmen einfach die Analogien, sonst verstehe ich Depp das wahrscheinlich gar nicht mehr.

Also das Teilchen ist so eine Kugel und die dreht sich und das ist der Spin.

Genau, also ganz ehrlich gesagt, ja, also das ist eben sich Quantenphysik richtig

vorzustellen, das gelingt eigentlich niemandem.

Also man muss sich Analogien bilden, auch wenn man, man muss sich nur bewusst sein, dass sie hinken.

Ja, also aber ohne Analogien, da kommen auch wir Physiker nicht, also das hat nichts mit Dummheit zu tun oder so.

Das ist einfach so.

Also auch ich stelle mir ein Atom, ehrlich gesagt, vor wie so eine Kugel und da fliegen dann die Elektronen drum rum.

Auch wenn ich weiß, dass das kein korrektes Bild ist, aber trotzdem ist das in meinem Gehirn so drin.

Das heißt der Erregungszustand des Quantenfeldes ist auch nicht was, womit sie sich einfach so abfinden können.

Nee, genau.

Ich dachte, das ging nur mir so.

Nee, also wenn man dann die Gleichung hat und damit rechnet, dann kann man das richtig behandeln.

Aber wenn man das irgendwie in der Vorstellung, gut, ich weiß nicht, wie es vielleicht an Einstein gegangen ist oder so, aber mir geht das auch so, dass ich da Bilder habe, die letztlich zwei- oder dreidimensional sind und ähnlich wie die richtige Welt.

Ja, okay.

Also was hatten wir?

Ein magnetisches Dipol?

Im Moment, genau.

Also ja, und die Sache ist, dass ich, weil das ist auch ein bisschen schwierig zu erklären, was das genau ist, aber man kann, also man hat, dass das ist überhaupt die allerpräzisest gemessene Größe für Elektronen.

Ja, es gibt da eine Theorie, der also man kennt ja Elektromagnetismus und vielleicht die Max-Vergleichung.

Die Quantentheorie davon heißt Quantenelektrodynamik und das ist überhaupt die am genauesten bekannte Theorie, die es auf der Welt gibt.

Die Präzision, mit der wir diese Theorie geprüft haben, ist besser als eins in einer Milliarde.

Ja, so genau haben wir die überprüft.

Und wie wir die überprüft haben fürs Elektron ist genau die Messung dieses, das heißt der G-Faktor, also G , man erwartet, dass das dann zwei ist in erster Größenordnung und das misst man so genau.

Nun, jetzt gibt es eine leichte Komplikation, die allerdings auch auf unser Gespräch letztens damit gut sich verbinden lässt und zwar, also wenn jetzt das ganz alleine wäre, das Elektron oder Myon, dann würde man genau zwei erwarten.

Nun ist es aber, also ganz allein in einem leeren Vakuum.

Und da haben wir gelernt, dass das Vakuum nicht leer ist.

Genau, das Vakuum ist ja nicht leer.

Und so ist es, dass jedes geladene Teilchen letztlich eine Wolke von geladenen Teilchen um sich herum zieht.

Und dadurch gibt es eine leichte Abweichung von circa einem Promille von zwei, wird vorhergesagt.

Wenn man das jetzt richtig behandelt in der Quantenelektrodynamik, bekommt

man raus, dass statt genau zwei erwartet man einen Wert, der um ein Promille von zwei abweicht.

Und das hat man auch tatsächlich gemessen.

Und wie gesagt, fürs Elektron, da hat man das sehr genau gemessen und man kriegt auch genau den gleichen Wert raus für die Theorie.

Also wirklich, das sind sehr, sehr komplizierte theoretische Rechnungen und das Experiment, die stimmen sehr gut überein.

Gut, und jetzt kann man sich ja fragen, okay, ist das Myon dann genauso wie das Elektron?

Ja, muss ja, ist ja Zwilling.

Genau, bis auf die Masse, aber das ist ein bekannter Effekt und den kann ich in meinen Rechnungen berücksichtigen, kann ich jetzt genau diese gleiche Größe, also gucke ich, jetzt ist das bei Myon dann auch so.

Und da hat man tatsächlich schon 2003 so ein Experiment durchgeführt in Brookhaven in New York, wo man das mit Myon gemacht hat und da fand man schon eine Abweichung, die damals drei Sigma war, also diese 0,1 Prozent.

Das fanden schon alle ganz interessant, also genau, es ist ein Indiz oder Evidenz, aber das kann halt immer sein, dass das noch irgendwie Zufall ist.

Außerdem gab es da auch noch Zweifel an den Rechnungen, die wurden aber inzwischen sehr verbessert.

Naja, und jetzt sind knapp 20 Jahre später.

Das Experiment wurde übrigens dann von New York nach Chicago irgendwie gebracht und das ist ziemlich groß, das ist so 15 Meter Durchmesser, also kann man auch nicht auf jedem, jeder Autobahn sozusagen das entlangfahren.

Es wurde teilweise auf dem Mississippi lang, auf dem Schiff dann transportiert, weil das praktischer war, wobei der Mississippi eigentlich nicht zwischen New

York und Chicago natürlich lang geht.

Ja, auf jeden Fall ein komplizierter Weg.

Naja, wie auch immer und jetzt wurde das wiederholt und jetzt wurde dann am 25.

Februar hat die Kollaboration jetzt nach der ganzen Datennahme das erste Mal sich die Daten angeschaut und die haben das auch so eine Blinding Procedure gehabt, wie ich das besprochen hatte, also dass die, die hatten da so eine Zufallszahl, die Zahl einfach eine Zufallszahl dran addiert und niemand wusste, was die Zufallszahl war.

Also die bekamen irgendeine Zahl, aber die hatten keine Ahnung, was die war.

Und dann haben die tatsächlich so ein Zoom-Meeting gemacht, also wie es ja viele vielleicht jetzt kennen, also online mit der ganzen Kollaboration und dann haben sie sich angeguckt, was jetzt der Wert ist und einer hatte dann so einen Umschlag, in dem stand dann drin, was dieser Offset war, der eben künstlich eingeführt wurde.

Dann haben sie den da weg subtrahiert und dann sahen sie das Ergebnis, also wirklich live und dann ja, dann war der Heureka-Moment enorm.

Also ich habe schon fast Gänsehaut, wenn ich darüber rede, weil sie dann eben gesehen hatten, dass das Ergebnis, das sie haben, stimmt mit dem von Brookhaven überein.

Ja, also es ist fast der gleiche Wert, ganz leicht anders und wenn sie die beiden, das sind die beiden sind statistisch unabhängig, die Datensätze, also können sie die kombinieren, wenn sie die kombinieren, bekommen sie jetzt 4,20.

Ah, so ist man auf die 4, okay.

Ja, und das entspricht einer Chance von 1 zu 40.000, dass das Zufall ist.

Also das, dass das tatsächlich der, ja, also genau.

Und das ist halt wahnsinnig spannend, ja, also das ist halt wahnsinnig spannend, meiner Meinung nach, weil gut, erstens ist es, also eine gute Nachricht ist noch, dass sie sich, dass sie noch planen, weiter Daten zu nehmen.

Also bisher haben wir erst 6% der Daten genommen, die sie noch in den nächsten kommen, also die haben schon, die Daten, die sie jetzt gezeigt haben, sind glaube ich schon anderthalb Jahre alt, das heißt, sie haben seitdem schon wesentlich mehr Daten genommen und planen auch noch weitere Daten in der Zukunft zu nehmen, so, so dass die Statistik noch weiter verbessert werden kann und man dann sicherlich, wenn sich das Ergebnis bei dem Wert, also bei dem zentralen Wert bleibt und der Fehler einfach verringert, kann man da auf jeden Fall über 5 Sigma kommen oder auch nicht, das muss man sehen, ja.

Das heißt, die Messungen, die jetzt vorgenommen werden, dienen eigentlich nur dazu, die Statistik zu präzisieren.

Also das Ergebnis steht im Grunde schon fest.

Also man sagt...

Nee, nee, nee, nee, nee, nee, nee, nee, nee, das weiß man ja nicht.

Also das kann sich beides ändern.

Also zum, was könnte, was sich jetzt, also zum Beispiel, was jetzt hätte passieren, also ja, wenn man immer einen neuen Datensatz hat, kann es sein, dass sich auch, dass der Zentralwert woanders ist.

Und ja, genau, also das, das weiß man nicht.

Also ich dachte, die Abweichung, die stünde jetzt fest und man würde jetzt nur gucken, wie sicher ist es denn, dass es diese Abweichung ist.

Okay.

Nee, nee, nee, nee, nee, das kann schon, der Zentralwert kann sich auch ändern, aber er kann auch da bleiben, ja.

Also, und ja, also nee, nee, das weiß man nicht.

Der Zentralwert, also ja.

Aber halten Sie das für wahrscheinlich, dass der Zentralwert sich noch ändert?

Und zwar so signifikant wiederum, dass Sie im Grunde die ganze Forschung wegtun können?

Naja, also die, also das ist eben diese 1 zu 40.000.

Wie wahrscheinlich ist, also statistisch ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering.

Nun ist die andere Frage dann immer, was eben auch in der Experimentalphysik fast, fast die gesamte Arbeit, also erstmal muss man ein Experiment bauen, dann muss man die Daten nehmen, so nimmt man die Statistik.

Das ist natürlich auch eine Heidenarbeit, aber dann ist eine Wahnsinnsarbeit, systematisch die systematischen Fehler zu bestimmen.

Was ich damit meine, ist, gibt es irgendwelche Probleme in der Prozedur der Messung, die die, die, die das bewirken könnten, dass, dass man etwas etwas falsch misst, ja.

Also um 1% falsch misst oder 3% oder was auch immer.

Und die muss man abschätzen, ja.

Also zum Beispiel, wenn man den Detektor nicht richtig kalibriert hat oder zum Beispiel das Magnetfeld.

Eine wahnsinnig, also hier für dieses Resultat, was unglaublich wichtig ist, ist, dass das Magnetfeld, was der Wert des Magnetfeldes ist und wie gleichförmig das ist, innerhalb dieses 15 Meter großen Magneten, das ist ja ein riesiger Magnet und das muss sehr gleichförmig sein.

Da haben die aber Prozeduren, um das genau zu messen an allen möglichen Punkten und, und die, sie meinen, dass die experimentelle Systematik, dass die

sehr gering ist, also viel kleiner als das, die Statistik, das sagt die Kollaboration.

Also ich habe auch keinerlei Gründe, das anzuzweifeln, aber ich gucke mir das natürlich noch an.

Also theoretisch ist da eine Möglichkeit, dass dann was gefunden wird.

Also es gab zum Beispiel mal bei dem, weiß nicht, ob es, also es gab mal ein Nachrichten, dass die Neutrinos vielleicht doch nicht mit Lichtgeschwindigkeit fliegen, sondern mit was?

Mit unter, naja, langsamer, langsamer, okay, genau.

Und das, das war dann tatsächlich ein experimenteller Fehler, der dann später aufgetaucht ist.

Also das kann man nie komplett ausschließen.

Auch da hilft es, mehr Daten zu nehmen.

Je mehr Leute sich das angucken, man weiß es nie.

Also das, was heißt, also man liest das natürlich nach bestem Wissen und Gewissen aus und nimmt da große Anstrengungen, aber das kann immer sein.

Und die andere Möglichkeit ist, dass in der Theorie was falsch gerechnet wurde.

Das kann man auch nicht ausschließen oder was vergessen wurde.

Da muss man allerdings sagen, dass in den 20, letzten 20 Jahren, da eben schon vorher seit 2003 es schon auf dem Tisch liegt letztlich, dass es ein sehr interessantes Ergebnis da gibt, ein sehr interessantes experimentelles Ergebnis, ist da schon sehr, sehr viel Mühe hereingesteckt worden, dass diese, diese Rechnung zu überprüfen ist, auch von unabhängig von verschiedenen Theoretikern in der Welt gemacht worden.

Auch in dem Rahmen des Seminars wurde das nochmal präsentiert, wie genau man jetzt die Theorie eigentlich versteht.

Also, dass ich da eigentlich das auch nicht glaube.

Also, was ich halt hoffe, also ich meine, okay, ich meine, was ich halt hoffe, ist, also ich meine, ich denke schon dieses, also wir sind halt, wir haben halt wirklich keine Ahnung, warum überhaupt diese drei Generationen da sind.

Elektron, Myon und Tau.

Genau, genau.

Und insofern finde ich das so wahnsinnig spannend, weil jetzt etwas zu sehen, dass vielleicht ein kleiner Riss in dieser Theorie, ja, dass das Myon nicht genauso ist, wie das Elektron, sondern dass das, ja, dass das, dass das einen Anhaltspunkt uns geben wird.

Der Traum wäre natürlich, also was jetzt passiert, kann ich schon sagen, oder das machen wir sowieso.

Also, jetzt gibt es dann große, viele Ideen, gab es auch vorher schon, Ideen, wie könnte denn das zustande kommen, was könnte denn jetzt sein, welche Teilchen könnten denn zum Beispiel existieren, oder welche Art Kräften könnten denn existieren, die jetzt das Myon minimal anders machen, als das Elektron.

Ist ja nicht total anders, es ist ja nur minimal anders.

Und da gibt es zum Beispiel die Möglichkeit, dass sehr schwere Teilchen das Myon mehr beeinflussen, als das Elektron in gewissen, ja, also es ist vielleicht jetzt ein bisschen schwierig zu erklären, aber, also dass es ja schwere Teilchen gibt, die einen Einfluss darauf haben.

Zum Beispiel supersymmetrische Teilchen, das wurde schon vor langer Zeit vorgeschlagen und nachdem, zum Beispiel hat einer meiner Doktoranden, gerade letztens am LHC hat er genau, also ich lese gerade seine, die letzten Drafts oder die letzten, ja, Entwürfe seiner Doktorarbeit, wo er danach dann geguckt hat, das sind sogenannte Smyonen, das sind supersymmetrische Myonen und dann können wir eben gucken, wenn die existieren würden und die wären zum Beispiel leichter als supersymmetrische Elektronen, Selektoren,

dann könnte so was dadurch erklärt werden.

Aber die haben wir jetzt nicht gefunden, ja, also die sind am LHC nicht gefunden worden.

Ist denn danach geguckt worden überhaupt?

Ja, ja, ist geguckt worden, ja, ja, genau.

Gerade kürzlich, also hat mein Student danach geguckt und, aber er ist nicht der Einzige, ja, auch andere Leute gucken danach, es sind ja große Kollaborationen.

Aber wonach guckt man da, wenn man danach guckt, man weiß ja nicht, wie es aussieht.

Doch, doch, man, also gut, man, das stimmt, man weiß es nicht 100%, man guckt da in verschiedenen, auf verschiedene Methoden, also man kann da schon gute Hypothesen aufstellen, es könnte so aussehen oder so aussehen oder so aussehen und dann, also letztlich, so ein Myon, das würde eigentlich zerfallen in ein Myon und ein sogenanntes Neutralino, was letztlich, da übrigens der Kandidat für dunkle Materie ist, den die Supersymmetrie hat.

Und dann guckt man und normalerweise erwartet man, dass zwei davon produziert werden und dann guckt man nach zwei Myonen und etwas, was verschwindet, das kann man auch gucken, also da hat man erst die Energiebilanz beziehungsweise Impulsbalance nicht stimmt.

Genau, also da kann man schon nachgucken.

Das heißt, es muss was übrig bleiben und das würden wir dann als Myon bezeichnen und genau das ist nicht übrig geblieben.

Also das Myon sehen wir, aber das Neutralino sehen wir nicht.

Und dann, die Tatsache, dass das Neutralino weggeflogen ist, das ist eigentlich das Hauptcharakteristikum und das zwei Myonen.

Also letztlich sehen wir, dass irgendwas weggeflogen ist und zwei Myonen und

das könnte dann darauf hindeuten.

Aber wie gesagt, wir sehen ja im Moment nichts.

Also es gibt, und das wird auch, also so ein Charakteristikum gibt es auch, kann auch durch andere Prozesse gemacht werden.

Das ist dann schon noch sehr mühsam dann zu sehen, ob, also selbst wenn wir da mehr Ereignisse sehen würden, als wir erwarten, ob das wirklich ist, ist dann ein weiter Weg oder das bedarf dann sehr vieler Studien.

Aber das ist natürlich, das wäre halt super interessant.

Also das ist so ein bisschen eine Wahnsinnsmotivation, dass jetzt eben dieses G, also dieses magnetische Momentresultat ist.

Es gibt dann noch andere Programme.

Zum Beispiel gibt es am PSI ein Experiment, das sucht auch nach Anomalien im Myonzerfall.

Auch ein weiteres Experiment, das sich Myon untersucht am Fermilab.

Also leider war ich bei denen gerade nicht mit.

Sollte ich vielleicht ändern.

Also da sind wir von Helmholtz gerade nicht beteiligt, muss ich sagen.

Aber, also gut, aber ich kenne Kollegen von mir, die daran arbeiten bei anderen Instituten.

Das ist ein sehr spannendes Feld.

Und wie gesagt, LHCb sucht auch nach Anomalien im Vergleich zu Elektronen und auch bei den LHC-Experimenten, ATLAS und CMS.

Das wird sicherlich jetzt inspirieren, dass man nochmal guckt, was gäbe es für

Modelle, die sowas erklären könnten?

Und gibt es da noch Sachen, nach denen wir gucken sollten, auch die vielleicht damit zusammenhängen?

So, jetzt steht in allen Zeitungen, wir haben eine neue Physik.

Was, haben wir jetzt eine neue Physik?

Nee, ist das Standardmodell jetzt schon erweitert?

Nee, ne?

[Klepper] Nee, nee.

Also nee, nee.

Vor allem weiß man da noch nicht, was es ist.

Und es ist ja auch immer so.

Also, das ist halt, dadurch wird das Standardmodell nicht falsch.

Das ist, naja, also das ist genauso wie durch Einstein's allgemeine Relativitätstheorie ist auch nicht Newton wirklich falsch gewesen.

[H] Die Schwerkraft ist noch nicht weg, also jedenfalls nicht in meinem Alltag.

Genau.

Und es gibt eben Energiebereiche, beziehungsweise bei Newton dann eben Massenbereiche.

Da funktioniert das wunderbar mit Newton.

Da braucht man keine allgemeine Relativitätstheorie.

Ja, und so ist das beim Standardmodell auch.

Also, das ist auf jeden Fall immer noch eine hervorragende Theorie.

Die Frage ist nur, ob... Und es ist aber auch klar, dass sie nicht ausreichend ist.

Sie ist letztlich hinreichend für die Großzahl von Phänomenen, die wir auf der Welt beobachten.

Aber sie ist eben nicht ausreichend, zum Beispiel für die dunkle Materie.

Das wissen wir ja schon.

Sie reicht auch nicht aus, um einige Aspekte von Neutrinos zu erklären.

Und das Standardmodell reicht eben auch nicht aus, um dies zu erklären.

Aber wir haben jetzt noch keine bekannte Alternative.

Also, wir haben Alternativen, aber die sind... Also, es gibt sozusagen dann eine Reihe von Alternativen, aber wir können nicht sagen, welche davon richtig ist, wenn überhaupt eine.

Ja, also, es gibt immer viele Theorien, Ideen.

Für Theorien gibt es immer genug von Theoretikern, die dann zum Beispiel ein einzelnes Phänomen erklären könnten.

Aber die setzen dann zum Beispiel voraus, dass es bestimmte Teilchen gibt bei einer höheren Energieskala.

Um jetzt wirklich sicher zu sein, dass diese Theorie richtig ist, müsste man jetzt diese Teilchen erstmal finden.

Und dazu erstmal ein Experiment bauen.

Das heißt, eigentlich müsste zu jeder, zu jeder, ich sag mal, hinreichend plausiblen Theorie ein eigenes Experiment gebaut werden.

Nicht unbedingt.

Also, das kann eben sein, das ist jetzt das, was überlegt wird.

Was man natürlich machen kann, ist diese Theorie entwerfen.

Dann sagen wir, okay, dann würde ich jetzt diese und diese Teilchen haben.

Aber was gibt es sonst für Sachen, die ich vielleicht bei laufenden Experimenten schon mal sehen könnte?

Zum Beispiel könnte ich solche Teilchen am LHC sehen?

Könnte ich sie da produzieren?

Könnten diese Teilchen andere Einfluss nehmen auf andere Experimente, die schon laufen?

Zum Beispiel, zum Beispiel in Deutschland hier irgendwo oder am PSI in der Schweiz oder was weiß ich.

Ja, also und das ist, das ist tatsächlich eine sehr, sehr wichtige.

Oder auch in kosmischer Strahlung gibt es irgendwelche Astrophysik-Experimente, irgendwas, was man beobachten könnte, was eine Konsequenz meiner Theorie wäre.

Und das ist insofern wahnsinnig wichtig.

Natürlich.

Und die können natürlich auch neue Experimente vorschlagen und sagen, ja gut, man kann zwar dies und das gucken, aber das richtig super tolle Experiment, um das wirklich zu testen, wäre dies und das.

Und... >> DOREEN SIEGFRIED: Da muss sich jemand finden, der es bezahlt.

Ja, genau.

Da muss man erstmal Experimentalphysiker vielleicht finden, die das erstmal designen und sich genau überlegen, wie würde man das denn bauen und so weiter.

Und dann eben natürlich auch, wie viel das kosten würde.

Und genau.

Das sind riesige Zeithorizonte, über die wir gerade reden, oder?

Das ist nicht eine Sache, die selbst im besten Fall in zwei Jahren gemacht werden könnte, oder?

Naja, also einiges schon.

Also neues Experiment sich überlegen und bauen nicht.

Aber jetzt, wenn zum Beispiel jetzt eine Theoretikerin oder Theoretiker eine Idee hat, oh, ich habe eine Idee, wie das jetzt passieren könnte, dann würde die Person letztlich ein Paper schreiben oder Vorträge halten und sagen, ja, so und so denke ich.

Und würde dann auch Vorschläge machen, wie man vielleicht in den schon existierenden LHC-Daten danach gucken kann.

Okay, klar.

Und dann würde jetzt irgendein Doktorand oder irgendein Professor oder wer auch immer dann sagen, oh, das ist ja spannend.

Ja, das machen wir doch mal.

Also das kann man schon.

Und das passiert übrigens auch häufig, dass Modelle entwickelt werden und dass man dann die schon genommenen Daten beim LHC zum Beispiel nimmt und guckt, ja, ist das jetzt, haben wir da irgendwas, was da schon in den Daten,

die wir genommen haben, das wir analysieren können?

Weil die sind alle ja noch auf Tape, die kann man einfach benutzen.

Also nicht nur auf Tape, auf Disk sind die also.

Die waren früher auf Tape, aber die sind heutzutage auf Disk oder in der Cloud.

Mit diesen 4,2 Fermilab Sigma, die wir da jetzt haben, was machen wir jetzt damit?

Abwarten, bis die nächsten Daten durch sind?

Ja, also ich persönlich müsste jetzt erst mal abwarten.

Also ich müsste erstens abwarten und zweitens überlegen, ob es irgendwelche Daten gibt zum Beispiel am LHC, die ich analysieren könnte, um da irgendwie was Interessantes zu machen.

Also man kann sich davon inspirieren lassen.

Ich glaube, als Journalist oder so allgemeine Öffentlichkeit muss man einfach abwarten.

Da kann man noch weniger machen.

Als Theoretiker kann man sich halt überlegen, auch noch überlegen, was könnte das sein?

Woher könnte das kommen?

Ja, wenn es neue Physik ist, was könnte der Mechanismus sein?

Und gut, die Leute, die das Experiment machen, die haben natürlich ihre Hände voll zu tun, dann die neuen Daten zu analysieren, so schnell wie möglich.

Und die haben auch schon gesagt, dass sie denken, dass sie im kommenden Sommer, das heißt so in 15 Monaten oder so, die Daten, also neue Resultate

präsentieren wollen.

Mit eben neuen Datensätzen auch.

Aber das sind dann auch nicht die Daten, die dieses Jahr genommen werden.

Das heißt, nach nochmal 15 Monaten gibt es dann nochmal frische Daten.

Ja, ja, genau.

Also es gibt da ungefähr jedes Jahr, würde es da alle ein, zwei Jahre, würde es da jetzt ein Update geben, weil die jetzt Daten nehmen.

Und dann wartet man halt nicht bis zum Ende, sondern immer, wenn man ordentlichen Batzen hat, sozusagen, so ungefähr verdoppelt hat, dann kann man gut, dann hat man ja ein unabhängiges, interessanteren Datensatz und das kann man dann immer publizieren und der Öffentlichkeit mitteilen, was ja auch super ist.

Also insofern kann man, jedes Jahr können wir da irgendwie erwarten, ein neues Update zu bekommen.

Dann sprechen wir uns doch einfach nächstes Jahr wieder.

Oder wenn es 50 Mal dann.

Oder so.

Beate Heinemann, nochmal vielen Dank.

Gerne.

Danke sehr.

[Musik]