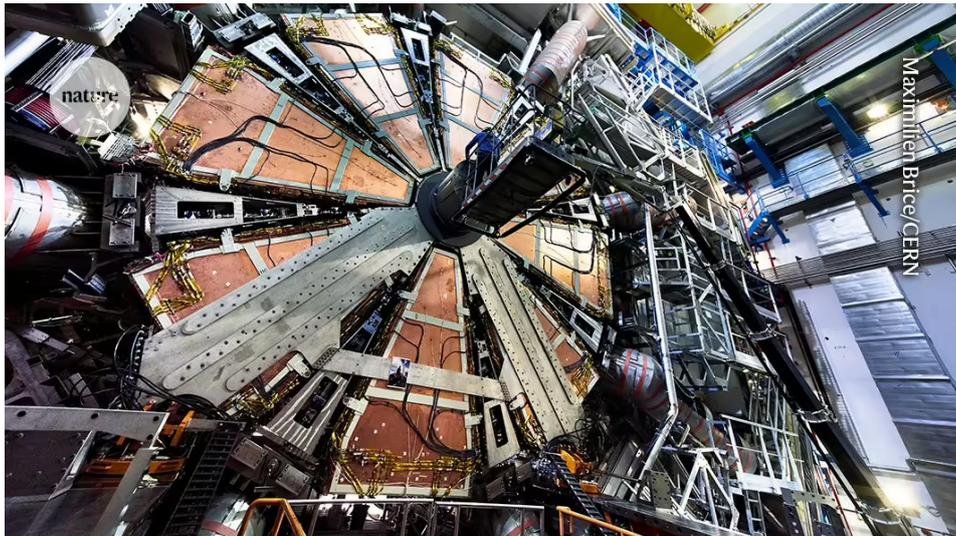


## Quantensprung: Physiker beobachten erstmals verschränkte Quarks

Physiker haben erstmals Quark-Verschränkung am LHC bei CERN beobachtet, was neue Einblicke in Quantendynamik eröffnet.



Wissenschaftler haben erstmals **Quantenverschränkung** beobachtet — einen Zustand, in dem Partikel miteinander verschmelzen und ihre Individualität verlieren, sodass sie nicht mehr separat beschrieben werden können — zwischen Quarks. Dieses bemerkenswerte Ereignis, das am CERN, dem europäischen Teilchenphysiklabor in der Nähe von Genf, Schweiz, erreicht wurde, könnte den Weg für weitere Untersuchungen über Quanteninformationen in Teilchen bei hohen Energien ebnen.

Die Verschränkung wurde in Partikeln wie Elektronen und Photonen seit Jahrzehnten gemessen, aber sie ist ein empfindliches Phänomen und am einfachsten in Niedrigenergie-

oder „ruhigen“ Umgebungen zu messen, wie zum Beispiel in den ultrakalten Kühlschränken, die **Quantencomputer** beherbergen. Teilchenkollisionen, wie die zwischen Protonen am **Large Hadron Collider** des CERN, sind vergleichsweise laut und energiereich, was es viel schwieriger macht, Verschränkung aus den Trümmern zu messen — vergleichbar damit, bei einem Rockkonzert nach einem Flüstern zu lauschen.

Um die Verschränkung am LHC zu beobachten, analysierten Physiker, die am ATLAS-Detektor arbeiteten, etwa eine Million Paare von Top- und Antitop-Quarks — die schwersten von allen bekannten Elementarteilchen und ihre Antimaterie-Gegenspieler. Sie fanden statistisch überwältigende Beweise für die Verschränkung, die sie im September des letzten Jahres ankündigten und heute im Journal *Nature*<sup>1</sup> detailliert beschreiben. Physiker, die am anderen Hauptdetektor des LHC, CMS, arbeiteten, bestätigten ebenfalls die Beobachtung der Verschränkung in einem Bericht, der im Juni auf dem Preprint-Server arXiv veröffentlicht wurde<sup>2</sup>.

„Es ist wirklich interessant, weil es das erste Mal ist, dass man Verschränkung bei den höchsten möglichen Energien studieren kann, die mit dem LHC erreicht werden“, sagt Giulia Negro, Teilchenphysikerin an der Purdue University in West Lafayette, Indiana, die an der CMS-Analyse beteiligt war.

Wissenschaftler hatten keinen Zweifel daran, dass Top-Quark-Paare verschränkt sein können. Das **Standardmodell der Teilchenphysik** — die derzeit beste Theorie über Elementarteilchen und die Kräfte, durch die sie interagieren — basiert auf der Quantenmechanik, die die Verschränkung beschreibt. Dennoch sagen Forscher, dass die neueste Messung von Wert ist.

„Man erwartet wirklich nicht, dass man die Quantenmechanik brechen kann, oder?“, sagt Juan Aguilar-Saavedra, theoretischer Physiker am Institut für Theoretische Physik in Madrid. „Ein erwartetes Ergebnis sollte dich nicht daran hindern, wichtige

Dinge zu messen.“

## Transiente Tops

Während einer Kaffeepause vor Jahren fragten sich Yoav Afik, ein experimenteller Physiker, der jetzt an der University of Chicago in Illinois arbeitet, und Juan Muñoz de Nova, ein Physiker der festen Materie, der jetzt an der Complutense Universität Madrid tätig ist, ob es möglich sei, Verschränkung an einem Kollisionsbeschleuniger zu beobachten. Ihr Gespräch verwandelte sich in ein Paper<sup>3</sup>, das einen Weg aufzeigte, die Verschränkung mithilfe von Top-Quarks zu messen.

Paare von Top- und Antitop-Quarks, die nach einer Protonenkollision erzeugt werden, leben unvorstellbar kurze Leben — gerade  $10^{-25}$  Sekunden. Dann zerfallen sie in langlebigere Teilchen.

Frühere Studien<sup>4</sup> hatten ergeben, dass Top-Quarks während ihrer kurzen Lebensdauer korrelierte „Spin“-Zustände haben können, eine Quanten-Eigenschaft, die der Drehimpuls ist. Afik und Muñoz de Novas Erkenntnis war, dass diese Messung so erweitert werden könnte, dass sie zeigt, dass die Spin-Zustände von Top-Quarks nicht nur korreliert sind, sondern tatsächlich verschränkt. Sie definierten einen Parameter,  $D$ , um das Maß der Korrelation zu beschreiben. Wenn  $D$  kleiner als  $-\frac{1}{3}$  ist, sind die Top-Quarks verschränkt.

Ein Teil dessen, was schließlich Afik und Muñoz de Novas Vorschlag erfolgreich machte, ist die kurze Lebensdauer der Top-Quarks. „Man könnte das niemals mit leichteren Quarks machen“, sagt James Howarth, ein experimenteller Physiker an der University of Glasgow, UK, der zusammen mit Afik und Muñoz de Nova Teil der ATLAS-Analyse war. Quarks trennen sich nicht gerne, sodass sie nach gerade einmal  $10^{-24}$  Sekunden beginnen, sich zu vermischen, um Hadronen wie Protonen und Neutronen zu bilden. Aber ein Top-Quark zerfällt schnell genug, sodass es nicht die Zeit hat, „hadronisiert“ zu werden und seine

Spin-Informationen durch Vermischung zu verlieren, erklärt Howarth. Stattdessen „wird all diese Information an seine Zerfallsprodukte übertragen“, fügt er hinzu. Dies bedeutete, dass die Forscher die Eigenschaften der Zerfallsprodukte messen konnten, um rückwärts zu arbeiten und die Eigenschaften, einschließlich des Spins, der elterlichen Top-Quarks abzuleiten.

Nachdem sie eine experimentelle Messung der Spins der Top-Quarks durchgeführt hatten, verglichen die Teams ihre Ergebnisse mit theoretischen Vorhersagen. Doch die Modelle der Produktion und Zerfälle von Top-Quarks stimmten nicht mit den Messungen des Detektors überein.

Forscher bei ATLAS und CMS hatten auf unterschiedliche Weise mit den Unsicherheiten zu kämpfen. Das CMS-Team stellte beispielsweise fest, dass die Hinzufügung von „Toponium“ — einem hypothetischen Zustand, in dem ein Top- und ein Antitop-Quark miteinander verbunden sind — zu ihren Analysen dazu beitrug, Theorie und Experiment besser in Einklang zu bringen.

Am Ende erreichten beide Experimente mühelos die  $-\frac{1}{3}$ -Verschränkungsgrenze, wobei ATLAS  $D$  mit  $-0.537$  und CMS mit  $-0.480$  maß.

## Kronenaufsetzen

Der Erfolg bei der Beobachtung der Verschränkung in Top-Quarks könnte das Verständnis der Physik der Top-Quarks der Forscher verbessern und den Weg für zukünftige Hochenergie-Tests der Verschränkung ebnen. Andere Partikel, wie **das Higgs-Boson**, könnten sogar verwendet werden, um einen Bell-Test durchzuführen, eine noch rigorosere Untersuchung der Verschränkung.

Das Experiment zu Top-Quarks könnte das Denken unter den Physikern verändern, sagt Afik. „Am Anfang war es ein bisschen schwierig, die Gemeinschaft zu überzeugen“, dass die Studie die

Zeit wert sei, sagt er. Schließlich ist die Verschränkung ein Grundstein der Quantenmechanik und wurde immer wieder verifiziert.

Doch die Tatsache, dass die Verschränkung nicht gründlich in Hochenergiebereichen erkundet wurde, ist für Afik und die anderen Anhänger dieses Phänomens Grund genug. „Die Leute haben festgestellt, dass man jetzt damit beginnen kann, Hadronenkollisionsbeschleuniger und andere Arten von Beschleunigern für diese Tests zu nutzen“, sagt Howarth.

1. Die ATLAS-Kollaboration. *Nature*  
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07824-z> (2024).

**Artikel**  
**Google Scholar**

2. Die CMS-Kollaboration. Preprint bei arXiv  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.03976> (2024).

3. Afik, Y. & de Nova, J. R. M. *Eur. Phys. J. Plus* **136**, 907 (2021).

**Artikel**  
**Google Scholar**

4. G. Aad *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **114**, 142001 (2015).

**Artikel**  
**Google Scholar**

**Referenzen herunterladen**

**Besuchen Sie uns auf: [natur.wiki](http://natur.wiki)**