

19 Ein Elementarteilchenmodell

Thema

Man lernt durch Analogien. Wenn man von einer neu einzuführenden Erscheinung sieht: es ist so wie etwas, das ich schon kenne – so hat man einen wichtigen Schritt zum Verständnis getan. Dieser Art, Verständnis zu erzeugen dient jedes Modellexperiment.

Wir stellen hier ein Experiment vor, das einige Eigenschaften von Elementarteilchen simuliert, siehe auch [1].

Das Gerät

Es besteht aus einer circa 2 m langen Kette von etwa 50 Pendeln, die durch einen Gummifaden aneinander gekoppelt sind, Abb. 1. Die Pendel können sich nur in der Ebene quer zur Kette bewegen.

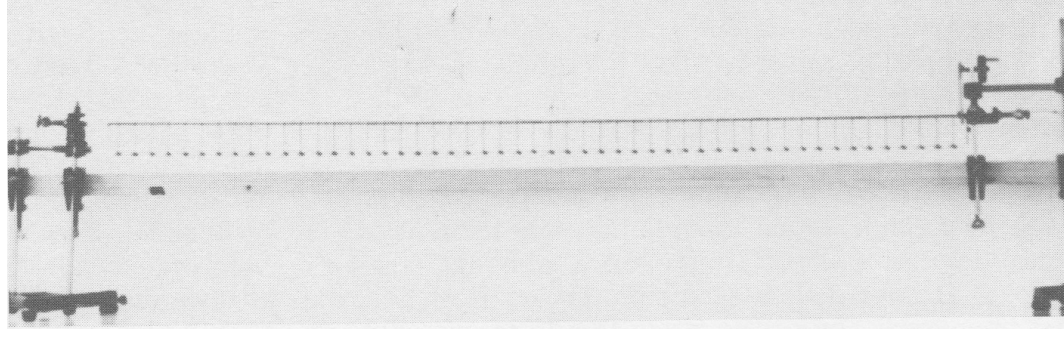
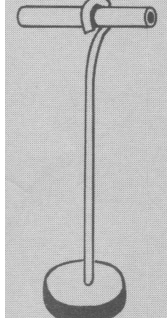


Abb. 1. Kette von 51 gekoppelten Pendeln



Jedes Pendel besteht aus einem 4 cm langen Röhrchen mit einem Innendurchmesser von 1,2 mm, einem 7,5 cm langen Draht, der an das Röhrchen angelötet ist und einem kleinen Messingzylinder von etwa 10 g, der am anderen Ende des Drahtes befestigt ist, Abb. 2. Die Pendel werden mit ihren Röhrchen auf einen 1,1 mm dicken Stahldraht aufgefädelt.

Abb. 2. Aufbau eines einzelnen Pendels

Der Stahldraht wird zwischen 2 Halterungen aus Stativmaterial eingespannt. Die unteren Enden der Pendel werden mit einem ca. 1 mm starken Gummifaden miteinander verbunden. Der Gummifaden hängt nicht durch, ist aber auch nicht gespannt. Aus Teilen eines Metallbaukastens wird am einen Ende der Pendelkette eine Vorrichtung aufgebaut, die es gestattet, das 1. Pendel auf bequeme Art zu verdrehen.

Der Versuch

Ein Teilchen entspricht bei diesem Modell einer Verdrillung der Pendelkette, die man durch Verdrehen eines der Endpendel um 2π erzeugt, Abb. 3. Diese Verdrillung kann in Bewegung gesetzt werden, sodass sie, ohne ihre Form zu ändern, durch die Pendelkette hindurchläuft. Ein Antiteilchen entspricht einer Verdrillung, die man durch Verdrehen um -2π erzeugt.

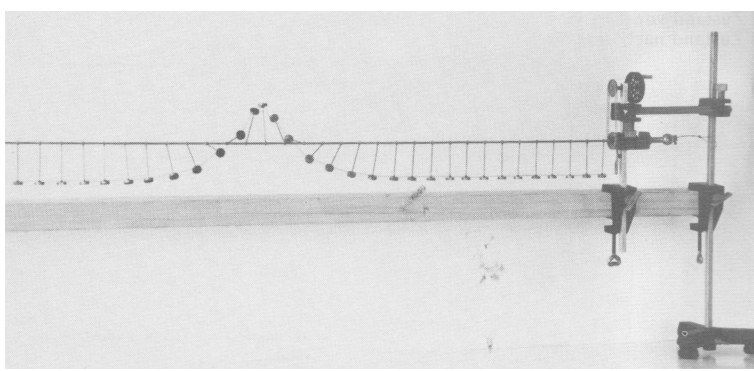


Abb. 3. Eine Verdrillung um 2π stellt ein Teilchen dar.

Die mathematischen Lösungen der Differentialgleichung der Pendelkette, denen diese Verdrillungen entsprechen, nennt man Solitonlösungen. Wir wollen daher im Folgenden unsere Verdrillungen Solitonen, bzw. Antisolitonen nennen.

Wie ein Elementarteilchen hat ein Soliton Energie. Falls es sich nicht bewegt, hat es nur „Ruhenergie“. Diese setzt sich zusammen aus der potentiellen Energie der ausgelenkten Pendel und der im gespannten Gummifaden gespeicherten Energie. Bewegt sich das Soliton, so hat es, genauso wie ein bewegtes Teilchen, auch kinetische Energie. Während die kinetische Energie beliebige Werte annehmen kann, ist die Ruhenergie eines Solitons eindeutig festgelegt, und zwar durch ein Energieminimum des Systems Pendelkette-Gravitationsfeld. Dies wird auch anschaulich klar, wenn man beobachtet, dass ein zwangsweise verzerrtes Soliton von allein wieder seine ursprüngliche Form annimmt.

Elementarteilchen kann man keine Identität zuordnen, sie sind „ununterscheidbar“. Dasselbe gilt auch für die Solitonen unserer Pendelkette. Es gibt kein Mittel, ein Soliton zu markieren.

Lässt man ein Soliton gegen ein zweites ruhendes oder sich langsamer bewegendes stoßen, so läuft nach dem Stoß ein Soliton vom Ort des Stoßes weg, und ein ruhendes Soliton bleibt zurück, ähnlich wie wenn eine Kugel gegen eine zweite ruhende Kugel stößt, Abb. 4. Im Gegensatz zu den Kugeln kann man aber bei den Solitonen prinzipiell nicht entscheiden, ob das eine einfach durch das andere hindurchgelaufen ist, oder ob es das andere weggestoßen hat.

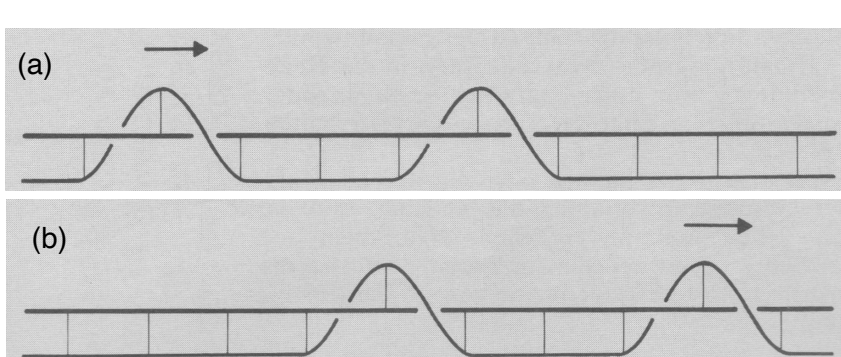


Abb. 4. Stoß eines Solitons gegen ein anderes, ruhendes Soliton (a) Zustand vor dem Stoß; (b) Zustand nach dem Stoß

Das wird besonders deutlich, wenn man die Streuung eines Teilchens an einem Antiteilchen simuliert, indem man ein Soliton und ein Antisoliton mit möglichst hoher Geschwindigkeit aufeinander zu laufen lässt. Nach dem Stoß laufen beide Solitonen ungestört weiter, Abb. 5. Während des Stoßes aber ist die Kette durch einen Zustand gelaufen, in dem gar kein Soliton da ist.

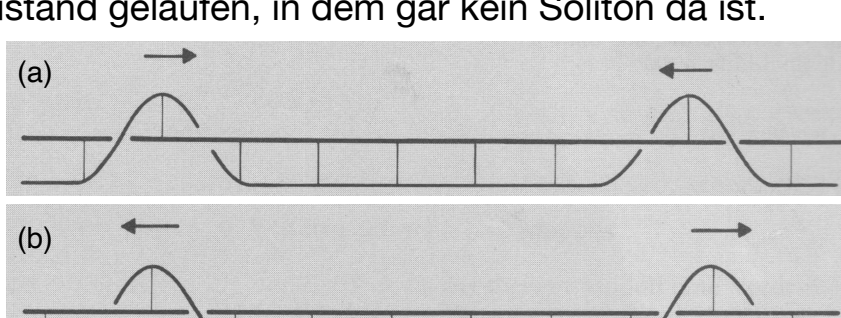


Abb. 5. Stoß eines Solitons gegen ein Antisoliton (a) Zustand vor dem Stoß; (b) Zustand nach dem Stoß

Man kann mit der Kette auch die Zerstrahlung eines Teilchen-Antiteilchen-Paares simulieren, indem man ein Soliton und ein Antisoliton mit hoher Geschwindigkeit aufeinander zu laufen lässt. Das Resultat dieser Reaktion sind gewöhnliche Schwingungen der Pendelkette.

Außer der Größe Energie, über die wir bereits gesprochen haben, werden die Solitonen noch durch andere physikalische Größen charakterisiert, die ihre Entsprechung bei echten Elementarteilchen haben. Der Winkel, den man durchläuft, wenn man dem Gummifaden folgt, beträgt für eine Verdrillung $+2\pi$ oder -2π . Er hat bei echten Elementarteilchen sein Analogon etwa in der elektrischen Ladung oder auch in der Baryonenzahl. Für eine Pendelkette, deren Enden man fixiert, nachdem man eine beliebige Zahl von Solitonen hineingedreht hat, ist der Gesamtwinkel eine beliebige Erhaltungsgröße, denn man kann in der Kette Solitonen nur noch paarweise erzeugen oder vernichten, wobei aber der Gesamtwinkel erhalten bleibt, Abb. 6.

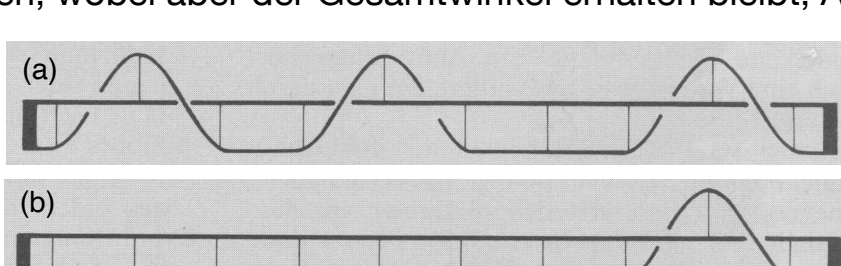


Abb. 6. Beim Übergang von dem in Bild (a) in den in Bild (b) dargestellten Zustand wurde ein Soliton und ein Antisoliton vernichtet

Wie die elektrische Ladung oder die Baryonenzahl ist dieser Winkel quantisiert. Er beträgt für eine abgeschlossene Kette stets ein ganzzahliges Vielfaches des „Elementarwinkels“ 2π .

Schließlich zeigt die Kette noch die gewöhnlich als trivial empfundene Quantisierung der Stoffmengen- oder Teilchenzahlvariablen der Teilchen und der Antiteilchen. Wie die Teilchenzahlvariablen von Teilchen und Antiteilchen, genügen auch die der Solitonen und Antisolitonen keinem Erhaltungssatz.

Was man daraus lernen kann

Das Modell vermittelt eine Analogievorstellung von Teilchen und Antiteilchen, sowie von der Vernichtung von Teilchen und Antiteilchen. Vor allem zeigt es, was die Aussage bedeutet, Teilchen seien ununterscheidbar.

Literatur

[1] A. C. Scott: A Nonlinear Klein-Gordon Equation; Am. J. Phys. 37 (1969), S. 52-61.