

Die Leere des Raums ermöglicht die Bewegung der Körper

Die Gesamtenergie
bleibt erhalten



Die Bewegung ändert sich
durch Wechselwirkung

Die Wechselwirkung wird durch Felder vermittelt

WIEVIEL WIEGT DAS

Gleichzeitigkeit
ist relativ



Felder müssen selbst
Energie tragen

VAKUUM

Energie wird in
Quanten ausgetauscht



Ein Feld ist Summe von
Quanten = Teilchen

Vakuum: Felder ohne Quanten, aber immer noch mit Energie

$E = mc^2$: Vakuum wiegt



Supernova 1994 D
in der Galaxie NGC 4526

**Das Universum expandiert:
Alle Teilchen zusammen
wiegen heute nicht
einmal mehr die Hälfte
des Vakuums auf !**

Wie schwer ist das Vakuum?

Eine absurde Frage, so scheint es. Wenn man aber den Erkenntnissen der Physik des 20. Jahrhunderts folgt, so wird es unvermeidlich, Vakuum als pure Abwesenheit präparierbarer und identifizierbarer Objekte, Moleküle, Atome, Teilchen, Quanten zu verstehen, nicht aber als Abwesenheit von Energie. Energie aber trägt Masse (wir kennen das in der Formel $E = mc^2$), und diese sollte zur Schwerkraft beitragen. Wieviel trägt sie bei?

Die Antwort ist ein Schluss, der mit der Feststellung beginnt, dass Bewegung im leeren Raum stattfindet. Ist der Raum mit etwas erfüllt, wie unsere Umgebung mit der Luft, dann muss diese zur Seite weichen, wenn sich ein Körper hindurchbewegen will. Wir sehen das unter anderem am Luftwiderstand. Im leeren Raum ändert sich die Bewegung zunächst nicht, sie ist geradlinig und gleichförmig. Änderung dieser Bewegung erfordert Wechselwirkung mit anderen Körpern, die nun paradoxerweise den leeren Raum zu überbrücken scheint und den Austausch von Energie, Impuls und anderen bilanzierbaren Größen möglich macht. Wir sprechen von Kraftfeldern, wenn wir dies meinen.

Raum und Zeit haben aber eine merkwürdige Geometrie, die in der Relativitätstheorie untersucht wird. Wir müssen hier nur wissen, dass Gleichzeitigkeit über den gesamten Raum nicht gut bestimmbar ist, und bei wechselwirkenden Körpern die Bilanz ihrer Impulse und Energien nur aufgeht, wenn wir auch den Feldern selbst Energie und Impuls zuschreiben. So trägt das elektromagnetische Feld Energie, was wir an der Wärmestrahlung spüren, und sein Impuls ist im Lichtdruck elementar nachweisbar.

Nun haben wir bei der Untersuchung atomarer Systeme gelernt, dass Energie nur in kleinen Quanten von einem Objekt zum anderen übergeben werden kann. Diese Quanten sind nach den Maßstäben des täglichen Lebens so klein, dass wir sie nicht einzeln wahrnehmen, aber beim Energieaustausch atomarer Systeme sind sie wesentlich. Es zeigt sich nun, dass wir die Felder als Summe von solchen Quanten auffassen können, die sich ihrerseits wie Teilchen benehmen. Umgekehrt muss man die elementaren Teilchen als Quanten entsprechender Felder darstellen. Das ist keine Spinnerei, sondern hat zu bedeutenden Entdeckungen geführt, etwa die der Antiteilchen.

Im Kleinen ist die Welt also erfüllt mit Feldern, deren Quanten sich wie Teilchen bewegen und miteinander wechselwirken. Vakuum ist die Abwesenheit all dieser Teilchen, die Abwesenheit von Energie, die als Quanten absorbierbar ist.

Allerdings ist ein atomares System auch dann nicht in Ruhe, wenn das Konto der abhebbaren Energie leer ist. Ein Rest Bewegung, die sogenannten Nullpunktschwankungen bleiben und ihre Energie im Ganzen zu berechnen, für alle wesentlichen Felder, ist kein einfaches und auch kein endgültig gelöstes Problem. Wir wissen nur, dass das Vakuum, so seine Energiedichte von Null verschieden ist, diese nicht dadurch ändern kann, dass das von ihm eingenommene Volumen verändert wird. Der Druck des Vakuums muss negativ sein, und so groß wie die Energiedichte selbst.

Wo können wir die vermutete Schwere des Vakuums beobachten? Sicher nicht an isolierbaren Objekten, denn das Vakuum ist ja gerade auch in deren Umgebung. Wir spüren das Gewicht des Vakuums am Verlauf der Expansion des Universums, die ja von der Schwere aller seiner Komponenten bestimmt wird. Wir messen diesen Verlauf mit den Methoden der Astronomie, und wir sehen heute, dass das Vakuum eine konstante Dichte hat und diese die (sich im expandierenden Universum ständig verdünnende) Dichte der Teilchen bereits weit überwiegt (Vakuum zu Teilchen etwa wie 7:3).