

Expansion als senkrechter Wurf – ein analoges Modell

Der Urknall ist ein energetischer Prozess. Das spiegelt sich in der friedmannschen Expansionsgleichung wieder. Kraftüberlegungen sind allgemein leichter eingängig als Energiebetrachtungen. Eine der beiden Friedmangleichungen rechnet Beschleunigungen aus. Die Gravitationskraft hemmt die Expansion, die kosmologische Konstante beschleunigt sie. Wie hängt die mit der Expansionsgleichung zusammen, die im Prinzip Energien betrachtet?

Dies lässt sich gut mit einem Analogon aus der Newtonschen Physik erklären, dem senkrechten Wurf. Die kinetische Energie ergibt sich zu jedem Zeitpunkt aus der Anfangsenergie minus der potentiellen Energie.

$$E_{\text{kin}} = E_0 - E_{\text{pot}}$$

Am Anfang ist $E_{\text{pot}} = 0$. E_{kin} entspricht E_0 . Im Steigen wird die potentielle Energie immer größer, Sie wächst auf Kosten der kinetischen Energie. Ist alle Anfangsenergie in potentielle Energie umgewandelt, hat die Masse ihren höchsten Punkt erreicht und sie kehrt um. Entspricht E_0 gerade der Fluchtgeschwindigkeit, so kommt die Bewegung erst im Unendlichen zum Stillstand. Während des Aufstiegs ist die Differenz aus Anfangsenergie und potentieller Energie stets größer Null. Aber diese Differenz nimmt ständig ab. Wichtig ist, dass diese Abnahme aus dem Anwachsen der potentiellen Energie resultiert. Der negative Gradient dieser Gesamtenergie führt zur Abbremsung.

In der Gleichung der Friedmann Expansion steht ebenfalls eine Art kinetische Energie links. Auf der rechten Seite kommt als erstes die Energiedichte der Materie (vergessen wir mal die gravitative Wirkung der Strahlung, die ein relativistischer Effekt ist). Das Minuszeichen, das man beim senkrechten Wurf auf den ersten Blick erkennt, sucht man in der Friedmangleichung vergebens. Die beiden Terme, die in der Gleichung des senkrechten Wurfs getrennt vorkommen, sind in der Friedmangleichung in einem positiven Term vereinigt. Aber diese Energiedichte nimmt mit zunehmender Expansion ab, hat also einen negativen Gradienten. Die entspricht einer negativen, der Ausdehnungsrichtung entgegengesetzten Kraft. Gravitation!

Nun gibt es bei Friedmann rechts noch die Krümmung. Die verschwindet bei einem flachen Universum. Aber es tritt wegen Flachheit und beschleunigter Expansion auch noch ein Energieterm mit der kosmologischen Konstanten auf. Diese Energie vergrößert sich mit der Expansion ständig, hat also einen positiven Gradienten. Deswegen entspricht sie auch einer positiven Kraft, die die Expansion antreibt.

Fazit: Negativer Energiegradient (Energiedichtegradient) gleich negativer Kraft (Abbremsung), positiver Energiegradient (Energiedichtegradient) gleich positiver Kraft (Beschleunigung).

Anmerkung: Dies alles hat mit dem Negativen Druck, den man der Dunklen Energie (Energiedichte des Vakuums = kosmologischer Term) zuschreibt noch gar nichts zu tun. Dazu habe ich eine größere Ausarbeitung in Vorbereitung.