

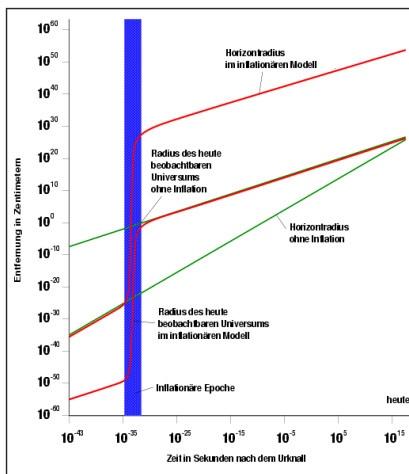
Das Inflationäre Universum

Das Standardmodell der Physiker, das die Entstehung und Entwicklung des Universums beschreibt, ist die **Urknall-Theorie** (big bang theory). Hierin ist das Universum vor circa 15 Milliarden Jahren aus einer Raum-Zeit-Singularität entstanden und expandiert seither. Mit der Urknall-Theorie lassen sich die meisten der heute beobachtbaren Strukturen und Erscheinungen des Universums, wie z.B. das Auseinanderdriften weit voneinander entfernter Galaxien (Expansion des Universums), die Entstehung und die Häufigkeit der ersten Elemente (Big Bang Nukleosynthese), die Existenz der kosmischen Hintergrundstrahlung, erfolgreich erklären.

Anfang der 80er Jahre wurde die Standard Urknall-Theorie um die kurze Phase der **Inflation**, d.h. eine Phase in der das Universum kurz nach dem Big Bang explosionsartig expandierte, erweitert, da das bisherige Modell den Ursprung mancher kosmologischer Beobachtungen nicht befriedigend klären konnte. Die alte "Standardtheorie" konnte die Ursachen für die folgenden Tatsachen nicht begründen:

- Die Homogenität des Universums auf sehr großen Skalen, die durch die kosmische Hintergrundstrahlung nachgewiesen ist (Horizontproblem).
- Die Flachheit des Universums, d.h. die Frage warum das beobachtbare Universum keine bzw. nur eine sehr kleine räumliche Krümmung aufweist, bzw. warum die Energiedichte des Universums gleich oder nahe der kritischen Energiedichte ist ?
- Das Nichtvorhandensein "urzeitlicher" Teilchen und Defekte im heutigen Universum, die von allen vereinheitlichten Teilchentheorien bei Temperaturen, wie sie kurz nach dem Urknall geherrscht haben, vorhergesagt werden (Monopolproblem).
- Die Inhomogenität des Universums auf kleinen Skalen, d.h. die Existenz von Galaxien und Galaxienhaufen.

Die Theorie des **inflationären Universums** ist in der Lage die Ursachen dieser Beobachtungen zu erklären. Während der inflationären Phase, ca. 10^{-34} Sekunden nach dem Urknall, dehnte sich das Universum explosionsartig in einer Zeit von nur 10^{-32} Sekunden um mehr als das 10^{25} -fache der ursprünglichen Größe aus. D.h. ein winziges ursprüngliches Universum mit einem Radius von nur 10^{-22} cm (1 Milliarde mal kleiner als ein Atomkern) blähte sich während der sehr kurzen Phase der Inflation zu einem Volumen auf, das einen heutigen Radius von 10^{26} cm hat. Durch diese immense Expansion des Universums läßt sich die Homogenität verstehen, da sich ein kleines Volumen, das sich vor der Inflation homogenisieren konnte, explosionsartig zum heute beobachtbaren Universum ausdehnte (siehe Diagramm – der Horizontradius entspricht der Distanz über die Homogenität durch physikalische Prozesse erreicht werden kann). Weiterhin wird jede Art von Teilchen, die vor der Inflation im heißen Universum entstehen konnte, durch die Expansion soweit "verdünnt", daß derartige Teilchen in unserem heutigen Universum so gut wie nicht vorhanden sind. Durch die beschleunigte Expansion des Universums während der Inflation wird das Universum "gezwungen" seine kritische Energiedichte anzunehmen, d.h. die Inflation sagt $\Omega = 1$ und somit ein räumlich flaches Universum voraus. Quantenfluktuationen wurden durch die Inflation zu makroskopischen, gravitierenden Dichtestörungen ausgedehnt; sie



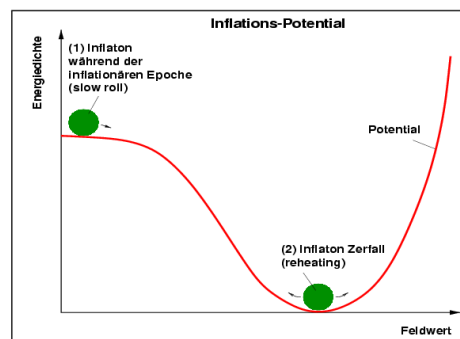
sind damit die Keimzellen für die Entstehung von Galaxien in unserem Kosmos. Sichtbar sind diese anfänglichen Inhomogenitäten heute durch Schwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Die **Grundidee** der Inflation beruht auf der Annahme, daß kurz nach dem Urknall die Vakuumenergie den größten Teil der Gesamtenergiedichte des Universums ausgemacht hatte. Eine solche Epoche hat die ungewöhnliche Eigenschaft, einen negativen Druck zu besitzen, mit dem ein Volumen bzw. das Universum aufgebläht und mit Energiedichte gefüllt werden kann.

Die meisten **theoretischen Modelle** der Inflation beinhalten ein bosonisches Feld, das aus noch unbekanntem Gründen eine hohe potentielle Vakuumenergie aufweist und dadurch die Inflation bewirkt. Eine Erklärung hierfür könnte z.B. eine Theorie mit sog. spontaner Symmetriebrechung geben. Hierbei handelt es sich um Systeme, deren ursprünglich hohe Symmetrie spontan beim Unterschreiten einer kritischen Temperatur gebrochen ist, so daß der heutige Grundzustand nicht mit dem Grundzustand im vollkommen symmetrischen Fall identisch ist; ähnlich dem Higgs-Mechanismus, der die Massen der Elementarteilchen erklärt. Während der Inflation ändert sich der Wert der potentiellen Energie kaum (siehe Graphik "Inflations-Potential"), d.h. das Feld "rollt" nur sehr langsam dem Potentialminimum entgegen (slow roll). Das Universum dehnt sich dann aufgrund des Einsteinschen Gravitationsgesetzes, das die Geometrie der Raum-Zeit mit der Energiedichte verknüpft, exponentiell aus.

Am **Ende der Inflation**, deren Dauer durch das Verhältnis der Potentialsteigung und der Potentialhöhe bestimmt ist, zerfällt das Inflationsfeld, auch Inflaton genannt, in gewöhnliche Materie. Während dieser Phase ist das Inflaton bereits in das Potentialminimum "gerollt" und oszilliert dort (siehe Graphik). Jetzt heizt sich das Universum, das durch die Inflation stark abgekühlt ist, wieder auf (reheating).

Die an die inflationäre Epoche anschließende Entwicklung des Universums (Nukleosynthese, Entkopplung von Materie und Strahlung, etc.) wird mit der Urknall-Theorie erfolgreich beschrieben. Ein eindeutiges Modell für das kosmologische Inflationszenario gibt es bisher noch nicht. Die Grundidee der hier beschriebenen inflationären Epoche wird aber als Standardtheorie des frühen Universums von den meisten Physikern anerkannt, da sie als einzig bisher bekannte Theorie in der Lage ist die oben erwähnten Probleme zu erklären.



Die Entwicklung des Universums

