
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

<http://www.mpe.mpg.de/~amueller>

April 2007

Abbildungsverzeichnis

10.1 Potentialverlauf bei neuer Inflation.	4
--	---

10 Lexikon I

10.1 IC

Eine gebräuchliche Abkürzung im Jargon der Astrophysiker. Dahinter verbirgt sich der Terminus *Inverse Compton-Streuung*, also ein Vorgang der umgekehrt abläuft als die Compton-Streuung. Bei der normalen Compton-Streuung verliert ein Photon, das an einer elektrischen Ladung (häufig ein Elektron) gestreut wird Energie. Beim **Compton-Effekt** ist die gestreute Strahlung also langwelliger.

10.1.1 umgekehrte Compton-Streuung

Umgekehrt ist es bei der IC: Hier gewinnt das Photon im Streuakt Energie, die es von der Ladungen erhält. Anschaulich gesprochen **kühlt** sich das Elektronengas ab, während die Photonen **Comptonisiert** werden. 'Comptonisieren' meint hier, dass die Photonen Energie gewinnen. Hier werden vor allem mehrmalige Streuprozesse wichtig, die durch den so genannten *Compton-Y-Parameter* parametrisiert werden.

Bei diesem Streuprozess ist es wichtig, wie die Teilchen aufeinander treffen, d. h. unter welchem Winkel, dem so genannten **Streuwinkel**. Er ist gerade die Abweichung im Winkelmaß von ein- zu auslaufendem Photon. Wie sich leicht aus geometrischen Überlegungen beim klassischen Streuakt ablesen lässt, findet ein *maximaler Energieübertrag* bei einem Streuwinkel von 180 Grad statt. Dann tritt **Rückstreuung** ein, und das Photon wird sozusagen am Elektron reflektiert.

10.1.2 quantenmechanische Behandlung

Eine korrekte quantenmechanische Erweiterung hat dieser Streuvorgang in der **Klein-Nishina-Formel** gefunden. Hier wird der Compton-Effekt auf der Basis der Quantenelektrodynamik beschrieben (*Heitler* 1954).

10.1.3 mal Welle, mal Teilchen

Dieser Compton-Streuprozess ist zusammen mit dem Photo-Effekt ein starkes Indiz für den **korpuskularen Charakter** des Photons. Zusammen mit Experimenten (Doppelspalt etc.), die nur durch den **Wellencharakter** erklärbar sind, ergibt sich der fundamentale **Welle-Teilchen-Dualismus**.

10.1.4 Anwendung in der Astrophysik

In der Astronomie ist die Comptonisierung wichtig bei der Strahlungsphysik von Akkretionsflüssen, insbesondere im Innern heißer Gebiete, so genannten Koronen. Außerdem findet IC im Plasma von Jets statt. Ein typisches Szenario ist hier, dass im leptoneschen

Jetplasma die kosmische Hintergrundstrahlung gestreut wird und so Energien erreicht, die im Bereich der Röntgenstrahlung liegen.

10.2 Inertialsystem

Ein Inertialsystem (lat. *inert*: 'träge, untätig') ist ein besonderes Bezugssystem, in dem sich eine kräftefreie Masse gleichförmig geradlinig, also mit konstanter Geschwindigkeit, bewegt. Ein besonderes Inertialsystem ist das **Ruhesystem** (engl. *rest frame*), in dem sich die Masse relativ zum Beobachter in Ruhe befindet. Man nennt es manchmal auch *mitbewegtes System* (engl. *comoving frame*).

10.2.1 Beispiele und Gegenbeispiele

Ein einfaches Beispiel für ein Inertialsystem ist ein Zug, der mit konstanter Geschwindigkeit auf geraden Gleisen fährt. Gegenbeispiele, also **Nicht-Inertialsysteme**, sind alle rotierenden Systeme, wie ein Karussell, die Erde etc. In diesen Nicht-Inertialsystemen treten Trägheitskräfte auf, die für einen inertialen Beobachter die Geradlinigkeit der Bewegung gewährleisten. Der nicht-inertiale Beobachter hingegen, der mit dem Nicht-Inertialsystem rotiert, ist völlig den Trägheitskräften (wie Zentrifugal- oder Corioliskraft) ausgeliefert.

10.2.2 Galilei & Newton

Der Begriff des Inertialsystems ist bereits eine wichtige Zutat in der Newtonschen Physik. Die Newtonschen Gleichungen sind **galilei-invariant**, d. h. verschiedene Inertialsysteme können mittels einer Galilei-Transformation ineinander überführt werden. Die entsprechende Symmetriegruppe heißt **Galilei-Gruppe**. Der Galilei-Transformation liegt eine **absolute Zeit** zugrunde, weil sich diese identisch von einem in das andere System transformiert ($t = t'$).

10.2.3 Lorentz, Relativitätstheorie

Hingegen fußen Relativitätstheorie und auch schon klassische Elektrodynamik auf der Lorentzgruppe. Die damit assoziierte Lorentz-Transformation transformiert die Zeit anders und führt auf Effekte wie Zeitdilatation und Längenkontraktion. Der Zeitbegriff wird relativ. Die Ursache für diese neuen Gesetzmäßigkeiten ist die **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** in allen Inertialsystemen. Das bestätigte in praxi das Michelson-Morley-Experiment (1881/87).

Gemäß des Relativitätsprinzips der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) sind alle gleichförmig geradlinig bewegten Systeme oder Beobachter inertial. Im Äquivalenzprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) wurde diese Aussage auf beschleunigte Systeme erweitert. In der ART kann man nur noch lokal ein Inertialsystem finden. Hier gilt nur noch die **lokale Lorentzinvarianz**.

10.3 Inflation

Inflation, *Inflationäre Phase*, *Inflationäres Szenario* oder *Inflationäres Universum* bezeichnet ein Modell in der Kosmologie, das das klassische Urknall-Modell (engl. **Big Bang**)

ergänzt. Verkürzt gesagt, ist Inflation **eine Phase extrem schneller und großskaliger Ausdehnung des Kosmos** (lat. *inflationis*: Anschwellen, Aufblasen).

10.3.1 Was motiviert Inflation?

Die Inflation wurde erfunden, um spezielle Probleme in der Kosmologie zu lösen. Diese Probleme kursieren unter den Bezeichnungen Homogenitätsproblem, Flachheitsproblem, Horizontproblem und Fehlen magnetischer Monopole - sie werden im Weiteren erläutert. Die Idee zur Inflation geht in ihren Grundzügen auf den US-amerikanischen Physiker *Alan H. Guth* zurück (1981) und wurde später von *Andrei D. Linde* modifiziert (1982). In der Folgezeit wurden Inflationäre Modelle weiter ausgearbeitet (z. B. auch von *A.A. Starobinsky*, *S.W. Hawking*, *A. Vilenkin*, *P.J. Steinhardt*, *L. Randall*, *R. Brandenberger* und anderen). Nach wie vor sind Inflationäre Modelle Gegenstand aktueller Forschung.

10.3.2 Das ursprüngliche Inflationsmodell nach Guth

In der ersten Version der Inflation ist ein **falsches Vakuum** die wesentliche Zutat im Modell. Guth nahm an, dass die temperaturabhängige Energiedichte im Universum eine Parabelform hat, $\rho \propto T^4$. Allerdings forderte er, dass im Grenzfall $T \rightarrow 0$ (Abkühlung) die Energiedichte *nicht* verschwindet, sondern einen konstanten Wert ρ_0 annimmt. Das ist nichts anderes als ein Phasenübergang. Der Zustand mit der Energiedichte ρ_0 ist gerade das falsche Vakuum. Im Prinzip ist so ein Übergang verwandt mit der Abkühlung von flüssigem Wasser, das zu festem Wassereis wird - jedoch mit dem Unterschied, dass das falsche Vakuum ein *metastabiler Zustand* ist.

Guth benutzte die Friedmann-Gleichung und formulierte sie so um, dass sie von Temperaturen und deren Zeitableitungen abhing. Die Lösungen für die Temperaturentwicklung lassen sich auf den Skalenparameter $a(t)$ der Kosmologie umrechnen. Bei der Abkühlung geschieht nun Folgendes: Irgendwann dominiert die Energiedichte des falschen Vakuums. Der Druck des falschen Vakuums ist *negativ* ($p = -\rho_0$), so dass es **antigravitativ** wirkt. Daher treibt das falsche Vakuum im stark unterkühlten Universum eine **exponentielle Expansion** - die Inflation. Diese Expansion kann **sogar schneller als das Licht** sein (*Superluminal expansion*), ohne die Prinzipien der Relativitätstheorie zu verletzen. Denn es werden keine Informationen/Signale mit Überlichtgeschwindigkeit ausgetauscht oder anders gesagt: es herrscht kein kausaler Kontakt zwischen den superluminal expandierenden Bereichen. Nur die Raumzeit selbst expandiert superluminal. Die Gleichung für exponentielles Wachstum des Universums lautet:

$$a(t) \propto e^{\chi t} \text{ mit } \chi^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_0,$$

mit

$$\rho_0 \simeq (2 \times 10^{16} \text{ GeV})^4 \rightarrow \chi^{-1} \simeq 10^{-38} \text{ s}.$$

Die konstante Energiedichte ρ_0 ist ein freier Parameter im Modell. In der zweiten Zeile wurde für diese Energiedichte des falschen Vakuums die GUT-Energieskala von $\sim 2 \times 10^{16}$ GeV eingesetzt. Daraus folgt die atemberaubende Zeitkonstante von $1/\chi = 10^{-38}$ Sekunden. Anders gesagt: Die Expansion vollzieht sich in rasantem Tempo und in den ersten Sekundenbruchteilen des frühen Universums.

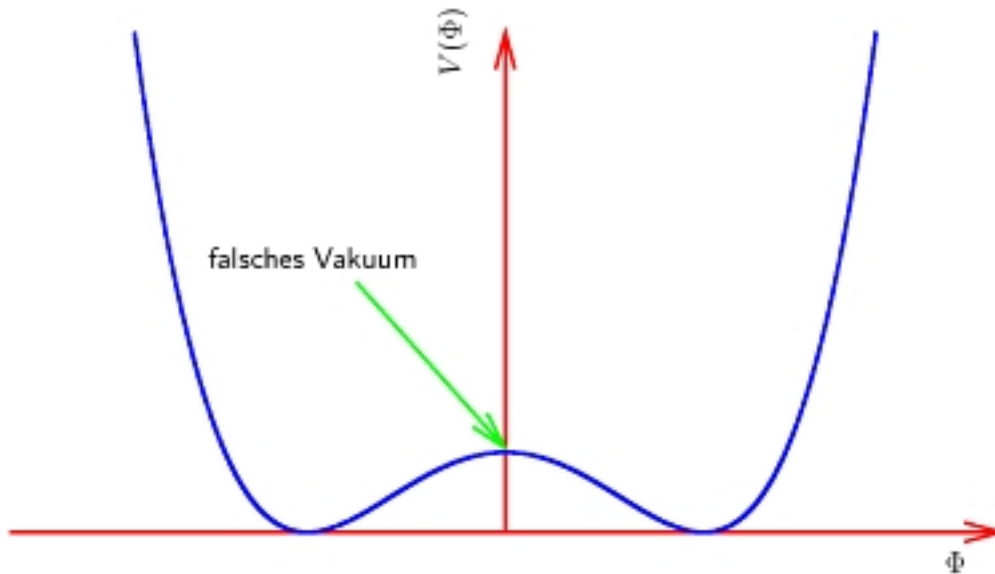


Abbildung 10.1: Potentialverlauf bei neuer Inflation.

Bereits in der ersten Veröffentlichung zum Inflationsmodell zeigte Guth Probleme seines Vorschlags auf: die Inflation war in diesem ersten Ansatz noch nicht effektiv genug - viele dieser schnell expandierenden Vakuumbblasen mussten erst miteinander verschmelzen. Außerdem produzierte dieses Modell zu große Inhomogenitäten, die sich nicht mit den astronomischen Beobachtungen vereinbaren ließen.

10.3.3 Linde lindert Probleme

Linde und auch Albrecht sowie Steinhardt konnten in der so genannten **neuen Inflation** mit einem neuen Ansatz die Unzulänglichkeiten des Guth-Modells bereinigen. Das falsche Vakuum kann mit einem *Skalarfeld* assoziiert werden. In Inflationsmodellen heißt es **Inflaton**. Skalarfelder haben eine potentielle Energie $V(\Phi)$. Im neuen Ansatz wurde eine andere Potentialform verwendet, die nicht mehr Parabelform hat, sondern die Gestalt des Buchstaben W, die in Diagramm 10.1 dargestellt ist. Bei Abkühlung driftet der Vakuumzustand wieder in das falsche Vakuum. Dieser *metastabile* Zustand verhält sich wie ein Niveau niedrigster Energiedichte, hat aber tatsächlich eine Energiedichte, die größer ist, als diejenige des echten Vakuumzustandes. Das echte Vakuum befindet sich in den beiden Mulden des W-förmigen Potentials. Das lokale Maximum des W-Potentialverlaufs entspricht gerade dem falschen Vakuum.

Das falsche Vakuum zerfällt nun, d. h. seine potentielle Energie wird abgebaut. Anschaulich 'rollt' das Inflatonfeld vom lokalen Minimum des falschen Vakuums hinunter in das echte Vakuum, also in die linke oder rechte Mulde. Damit endet die inflationäre Phase. Die im Inflaton gespeicherte Energie wird freigesetzt. Physiker nennen das *Thermalisierung*. Da das Inflaton im Allgemeinen an andere Felder koppelt, entstehen im Zerfall des Inflatons neue Teilchen. **In diesem Stadium treffen sich Inflationsmodell und**

Standard-Urknallmodell. Dabei erklärt Inflation sehr elegant den Ursprung der 'heißen Teilchensuppe'.

10.3.4 Woher stammt die Energie für die Inflation?

Die Energie für die inflationäre Ausdehnung stammt von der Gravitation! Das funktioniert, weil die Gesamtenergie des Gravitationsfeldes *nicht definiert* ist. Sie kann z. B. beliebig groß und negativ sein und daher als 'Energiespender' fungieren.

10.3.5 Chaotische Inflation

Linde publizierte bereits 1983 ein weiteres Inflationsmodell, das einen anderen Potentialverlauf involviert. Das Potential $V(\Phi)$ hat hier eine wieder eine Parabelform. Es gibt in dieser so genannten chaotischen Inflation *kein* falsches Vakuum, sondern das Inflaton startet bei einem Zustand definierter potentieller Energie (die groß genug sein muss) 'auf der Parabel'. Wie beim W-Potential beginnt die Inflation, wenn das Inflaton 'in die Mulde hinabrollt'.

Der Begriff *chaotische Inflation* ist nicht sehr treffend - gemeint ist, dass diese Form der Inflation frei ist von speziellen Anfangsbedingungen. Denn während beim W-Potential das lokale Minimum eine ausgezeichnete Startbedingung ist, ist beim U-Potential nur eine Startbedingung abseits des Minimums notwendig.

10.3.6 weitere Inflationsmodelle

Guths ursprüngliche Inflation, Lindes neue Inflation und auch die chaotische Inflation sind Modelle mit *einem* Inflaton-Skalarfeld. Alle involvieren eine *Super-Planck-Physik* (siehe Planck-Skala), weil die Energiedichte des Feldes die Planck-Masse übersteigt. Die so genannte **Hybrid-Inflation** (engl. *hybrid inflation*) hat nicht diesen Nachteil, dafür sind jedoch mehrere Inflatonfelder notwendig (Linde 1993). Bisweilen heißen diese Modelle auch 'Wasserfall-Modelle' (engl. *waterfall models*), weil sie im Gegensatz zu Modellen mit 'langsamem Rollen' (engl. *slow rolling*) stehen.

Eine andere Variante ist die **übernatürliche Inflation** (engl. *supernatural inflation*), die ebenfalls zwei Inflatonfelder erfordert (Randall, Soljacic & Guth 1995). Übernatürliche Inflation wird durch die Supersymmetrie motiviert. Der Vorteil dieser Variante ist, dass sie *ohne kleine Parameter* auskommt - herkömmliche Inflationsmodelle benötigen kleine Parameter, die dafür sorgen, dass der Potentialverlauf flach genug ist, um Inflation zu treiben.

10.3.7 Blick in eine der ersten Epochen des Universums

Die Inflation wird in der modernen Kosmologie in der GUT-Ära, also im sehr frühen Universum, angesiedelt. Zeitlich gesehen ereignete sie sich nur 10^{-36} bis 10^{-33} Sekunden nach dem Urknall. Zu dieser Zeit war das Universum sehr klein, heiß (etwa 10^{30} K) und hatte den riesigen Energieinhalt von 10^{16} GeV. Bei diesen hohen Energien unterscheiden sich die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung nicht voneinander: Sie sind zur **X-Kraft** der Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) vereinigt geworden. Neben der X-Kraft herrschte nur die Gravitation, so dass es in der Inflationsära nur zwei fundamentale Kräfte gab.

Doch 10^{-36} Sekunden nach dem Urknall war das Universum auf 10^{27} K soweit abgekühlt, dass es zur Symmetriebrechung kam und die X-Kraft in die elektromagnetische, schwache

und starke Kraft aufbrach. Das Higgs-Feld war für diese Symmetriebrechung verantwortlich, weil plötzlich sein Erwartungswert von null auf einen endlichen Wert anwuchs. Solche Symmetriebrechungen sind denen der Festkörperphysik phänomenologisch sehr ähnlich. Dort kennt man beispielsweise eine *spontane Magnetisierung* unterhalb der Curie-Temperatur; es findet hier ein plötzlicher Übergang zum Ferromagneten statt.

Mit spontanen Symmetriebrechungen gehen *immer* topologische Defekte einher, die beim Übergang von X-Kraft und Gravitation in die aktuell verifizierbare Tetralogie (Vierteilung) der Kräfte auch für die heute beobachtbare großräumige Struktur des Universums verantwortlich sein könnten.

Die geeignete Symmetriegruppe der GUT, die $SU(5)$, wird daher auf die Untergruppen $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ gebrochen, wobei die Untergruppen jeweils mit den uns vertrauten Wechselwirkungen ($SU(3)$ - stark, $SU(2)$ - schwach, $U(1)$ - elektromagnetisch) assoziiert sind. Quarks und Leptonen 'frieren' als Folge dieser Symmetriebrechung aus (*Leptogenesis* oder auch Leptonen-Ära). Dieser Vorgang ebnete den Weg für die Bildung der gewöhnlichen, baryonischen Materie, aus der wir bestehen (*Barogenesis* oder Baryogenese).

10.3.8 Leistungen des Inflationsmodells

Im Folgenden sollen die eingangs erwähnten Probleme der Kosmologie angesprochen werden, die durch die Inflation gelöst werden. Damit wird die Inflation durch folgende Beobachtungen der experimentellen Kosmologie gestützt:

1) Inflation erklärt Größe des Universums

Wir leben in einem riesigen Universum, dessen sichtbarer Teil allein aus etwa 10^{90} Teilchen besteht. Ohne Inflation ist es kaum zu erklären, wie ein solch großer Kosmos entstehen konnte. Die enorme Expansion, die die Inflation leistet, verbunden mit der hohen Teilchenproduktion durch den Zerfall des Inflatons erklären diese Beobachtung recht gut.

2) Inflation & Hubble-Expansion

Inflation bietet eine Erklärung an, wie der beobachtete Hubble-Effekt begann. Eine repulsive Gravitation (Antigravitation) getrieben durch ein falsches Vakuum 'zündete die Expansion'.

3) Homogenität & Isotropie

Die Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung am Himmel ist extrem gleichförmig und isotrop. Die Uniformität wurde bereits auf der mikroskopischen Skala durch einfache, thermische Gleichgewichtsprozesse erzeugt. Die Inflation blähte diese Uniformität auf makroskopische Skalen auf, wie wir es heute astronomisch beobachten. Inflation löst das **Homogenitätsproblem** und das **Horizontproblem**.

4) Lösung des Flachheitsproblems

Lindes Inflationsmodell liefert einen **Expansionsfaktor** von $A = \exp(100) \sim 10^{50}$! Eine einzelne Vakuumblase kann sich somit von Quantenskalen auf astronomisch relevante, makroskopische Skalen über den Apparat der Inflation ausdehnen. Der enorme Expansionsfaktor unterdrückt dabei den Krümmungsterm in den Friedmann-Gleichungen, so

dass das **Flachheitsproblem** gelöst ist: alle gekrümmten Modell-Universen werden durch Inflation geglättet, also flach. Ohne Inflation bliebe dies unverständlich. Die Beobachtung belegt, dass das heutige Universum flach ist, was die Inflation bewirkt zu haben scheint.

5) Fehlen magnetischer Monopole

Magnetische Monopole sind sehr massereiche Teilchen (etwa 10^{15} GeV Masse!), die eine magnetische Ladung tragen. Sie wurden von dem Quantenphysiker *Paul Dirac* schon 1931 mit dem Ziel eingeführt, eine Symmetrie zwischen elektrischen und magnetischen Ladungen herzustellen. GUT sagt die Existenz vieler solcher magnetischer Monopole im frühen Kosmos voraus (*Preskill* 1979). Sie wurden jedoch nie beobachtet bzw. würden die vielen schweren, magnetischen Monopole das Alter des Universum auf sagenhafte 30000 Jahre verkürzen, was selbstverständlich nicht mit unseren Beobachtungen vereinbar ist. Wie verschwanden die Monopole, die es laut GUT geben sollte? Die Inflation löst diese Problematik sehr elegant: während der Erzeugungsphase magnetischer Monopole oder danach blähte die Inflationsepoche die Raumzeit so sehr auf, dass die Monopoldichte extrem (exponentiell) ausgedünnt wurde. Als Konsequenz verschwanden die Monopole.

6) Anisotropie der Hintergrundstrahlung

Wie oben ausgeführt ist die Verteilung der Hintergrundstrahlung sehr isotrop - dennoch gibt es extrem kleine Variationen in den unterschiedlichen Richtungen. Diese Anisotropien liegen ausgedrückt in Temperaturen auf der Mikrokelvinskala. Der Bezug zur Inflation sei, dass diese Unregelmäßigkeiten im Muster der Hintergrundstrahlung ihren Ursprung in Quantenfluktuationen des Inflavons haben: Als die Inflation endete, prägten sich die Feldfluktuationen ein, die noch heute als Anisotropien sichtbar seien.

10.3.9 ewige Inflation

Der Begriff **ewige Inflation** (engl. *eternal inflation*) kam bereits 1983 auf, als klar wurde, dass der Zerfall des falschen Vakuums ein Zufallsprozess wie der radioaktive Zerfall ist. Der entscheidende Unterschied zur Radioaktivität ist jedoch, dass das falsche Vakuum dabei gleichzeitig expandiert. Tatsächlich ist seine exponentielle Expansion schneller als sein exponentieller Zerfall. Die logische Konsequenz: das falsche Vakuum verschwindet eigentlich nie; es ist in diesem Sinne *ewig*, und es gibt eine **unendliche Zahl inflationärer Universen**. Dieses Multiversum hat eine **fraktale Struktur**. Leider wird die fraktale Struktur auf so großen Längenskalen vorhergesagt, dass das nicht beobachtbar sein kann.

Ewige Inflation hat entscheidende Folgen. Erstens: Salopp gesprochen 'verliert das Universum jede Erinnerung' an seinen Anfangszustand. Das soll heißen, dass sich die späten Zustände (und damit auch die Beobachtungen) völlig von den Anfangsbedingungen entkoppeln. Zweitens: Die Wahrscheinlichkeit für Inflation wird bedeutungslos. Ist die Wahrscheinlichkeit nur geringfügig verschieden von null, so setzt Inflation auf jeden Fall ein.

10.3.10 Problem beim Inflationsmodell

Das Inflationsmodell versagt jedoch bei der Erklärung des heutigen Werts der kosmologischen Konstante Λ : Zwischen dem Wert während der Inflationsära und heutigem Wert liegen etwa **120 Größenordnungen!** Ausweg aus diesem **Problem der kosmologischen Konstante**

verspricht die Annahme einer zeitlichen Variabilität für ihren Wert. Einsteins Λ wäre demnach nicht konstant. Kosmologen nennen das Quintessenz-Modelle, die eine Form von Dunkler Energie darstellen.

10.3.11 Alternative 1: Inflation mit anderem Feld

Das Zyklische Universum von *Paul Steinhardt* und *Neil Turok* ist eine konkurrierende Theorie zur Inflation. Hier liegt ein anderes Skalarfeld vor. Eine Entscheidung darüber, welches der Modelle die Natur richtig beschreibt, erhoffen sich die Kosmologen von der Detektion von Gravitationswellen oder Neutrinos, die noch weit **vor** der Epoche der Rekombination ausgesandt wurden. Denn im Ekpyrotischen Szenario erwartet man keine Gravitationswellensignatur.

10.3.12 Alternative 2: Inflation ohne Inflaton, aber mit Quantengravitation

Ein viel versprechender, neuer Zugang wurde mit der Loop-Quantengravitation (*Quantengeometrie*) eröffnet, der **kein zusätzliches Skalarfeld** erfordert (*Bojowald 2002*). Die Inflation ist in diesem Modell eine zwingende Folge der quantisierten Raumzeit! Im Prinzip hat diese 2002 erschienene Publikation eine Hoffnung erfüllt, die Guth in seinem Reviewpapier 2000 formuliert hat, nämlich dass die Kosmologen sich einer Quantengravitation stellen müssen, um die Inflationphysik zu verstehen.

10.3.13 wissenschaftliche Arbeiten

- ◇ *Alan H. Guth*: Inflationary Universe, a possible solution to the horizon and flatness problems, Phys. Rev. D23, 347, 1981
- ◇ *Andrei D. Linde*: A new inflationary Universe, Phys. Lett. B108, 389, 1982
- ◇ *Andrei D. Linde*: Hybrid Inflation, Phys. Rev. D49, 748, 1994; Preprint: astro-ph/9307002
- ◇ *Randall, Soljatic & Guth*: Supernatural Inflation: Inflation from Supersymmetry with No (Very) Small Parameters, Nucl. Phys. B472, 377, 1996; Preprint: hep-ph/9512439
- ◇ *Alan H. Guth*: Inflation and eternal inflation, Phys. Rep. 333, 555, 2000
- ◇ *Martin Bojowald*: Inflation from Quantum Geometry, Phys. Rev. Lett. 89, 261301, 2002; Preprint: gr-qc/0206054

10.4 Inflaton

In Kosmologie bezeichnet das Inflaton ein Skalarfeld oder Teilchen, das mit der **Inflation** zusammenhängt und sie letztendlich hervorruft.

10.4.1 Wie geht das genau?

Das Inflaton ist ein skalares Boson. Bei einer kritischen Temperatur in der Frühphase unseres Universums findet eine spontane Symmetriebrechung statt. Dabei ändert sich der Vakuumerwartungswert des Inflatons, denn er springt auf einen endlichen Wert springt. Dies steht in Analogie zum Higgs-Mechanismus. Dieser Vorgang im frühen Universum treibt ein **exponentielles Wachstum** des Universums an, das sogar superluminal (d. h. überlichtschnell) gewesen sein muss: die Inflation.

10.4.2 Keine Probleme mit Einstein

Die überlichtschnelle Expansion steht nicht im Widerspruch zur Relativitätstheorie, weil es der Raum selbst war, der so rasant expandierte und keine Information superluminal übertragen wurde.

10.4.3 Geht es auch ohne Inflaton?

Die Loop-Quantengravitation, eine Theorie der Quantengravitation, kann auf das Inflaton verzichten. Die Inflation ist in diesem Szenario eine zwingende Folge quantisierter Raumzeit! Das ist eine reizvolle Eigenschaft dieser Theorie, deren Überzeugungskraft an der Natur getestet werden muss. Zurzeit wird erforscht, welche Theorie die Verhältnisse und Beobachtungen am besten erklärt. Sicher sind dazu weitere und anspruchsvollere astronomische Beobachtungen erforderlich.

10.4.4 Weiter mit...

...dem Eintrag Inflation, der viele Einzelheiten zum Inflatonfeld vorstellt.

10.5 intergalaktisch

Eine Bezeichnung in der Astronomie, die wörtlich '*zwischen den Galaxien befindlich*' meint. Es handelt sich um eine Orts- bzw. Skalenangabe, die auf den Bereich zwischen Galaxien beschränkt ist. So kennt man beispielsweise das **intergalaktische Medium (IGM)**. Es handelt sich um ein dünnes Gas, das sich zwischen den Sternsystemen auf der Kilo- und Megaparsec-Skala befindet. In Galaxienhaufen (*Galaxienclustern*), also Ansammlungen vieler Galaxien, wie der Lokalen Gruppe oder dem Virgo-Cluster, ist dieses Gas dichter und heißt *Clustergas*. Das IGM wird von den Jets der Aktiven Galaktischen Kerne (AGN) gespeist, deformiert, aufgeheizt und zur elektromagnetischen Emission angeregt.

10.6 intermediate-mass black hole

In der Fachsprache ist der Begriff *intermediate-mass black hole* (IMBH), was übersetzt soviel heißt wie 'Schwarzes Loch mittlerer Masse' sehr gebräuchlich. Für den deutschsprachigen Raum hat sich die Bezeichnung **mittelschwere Schwarze Löcher** bewährt.

10.7 interplanetar

Eine Bezeichnung in der Astronomie, die wörtlich '*zwischen den Planeten befindlich*' meint. Es handelt sich um eine Orts- bzw. Skalenangabe, die auf den Bereich des Sonnensystems beschränkt ist. So kennt man beispielsweise **interplanetares Gas**, das in der Ekliptik (Hauptebene im Sonnensystem, in der nahezu alle Planeten um die Sonne kreisen) verteilt ist und durch Streuprozesse das so genannte Zodiakallicht erzeugt. Das Zodiakallicht ist vor allem in den Tropen als dreieckförmige Aufhellung beobachtbar, entweder kurz vor Sonnenaufgang oder kurz nach Sonnenuntergang.

10.8 interstellar

Eine Bezeichnung in der Astronomie, die wörtlich '*zwischen den Sternen befindlich*' meint (stēlla, lat.: Stern). Es handelt sich um eine Orts- bzw. Skalenangabe, die auf den Bereich zwischen Sternen oder innerhalb einer Galaxie beschränkt ist. So kennt man beispielsweise das **interstellare Medium (ISM)**. Es handelt sich um dünnes, verteiltes Gas, das sich zwischen den Sternen auf der parsec-Skala befindet. Stellare Prozesse wie Supernovae oder Sternwinde (siehe Roter Riese, Wolf-Rayet-Stern) reichern das ISM mit 'Metallen' (in der Astronomie: Elemente schwerer als Helium!) an und erhöhen dessen Metallizität.

Das ISM rotiert auch mit der jeweiligen Galaxie und kann als Indikator dienen, um *Geschwindigkeitsdispersionen* (also die Verteilungen von Geschwindigkeiten der Gasteilchen) zu messen. Solche Messungen eignen sich zur Bestimmung der Zentralmassen (typischerweise im *Bulge*) von Galaxien.

10.9 Isometrien

Das Studium von Symmetrien physikalischer Systeme ist ein sehr wichtiger und weitreichender Aspekt in der theoretischen Physik.

10.9.1 Symmetrie - Erhaltungsgröße

Nach dem **Noether-Theorem** ist mit jeder Symmetrie eine physikalische Erhaltungsgröße assoziiert. An diesen ist man besonders interessiert, weil sie das physikalische Problem stark vereinfachen und auch den analytischen Zugang erleichtern.

10.9.2 Beispiele

Beispiele gibt es unzählige in der Physik: schon mit den Mitteln der klassischen Mechanik kann gezeigt werden, dass axialsymmetrische Systeme eine Erhaltung des Drehimpulses zeigen; moderne Theorien der Elementarteilchenphysik fordern eine Supersymmetrie der Teilchen, die eine Klassifikation des 'Teilchenzoos' ermöglicht, aber auch um viele neue bisher nicht entdeckte Teilchen erweitert.

10.9.3 Symmetrien in Einsteins Theorie

Das Studium der Symmetrien von Raumzeiten im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ist ebenso ratsam wie erfolgreich. Es gilt dabei, alle

Koordinatentransformationen zu untersuchen, die die Metrik **(form)invariant** lassen. Das heißt, dass sich die Metrik vor der Transformation von der nach der Transformation nicht unterscheidet. Koordinatentransformationen, die diese Eigenschaft haben, heißen **Isometrien** (*iso*, grch. 'gleich'; *metros*, grch. 'Maß'). Infinitesimale Koordinatentransformationen mit einem additiven Zusatzterm in Form eines Vektorfelds führen dabei auf die so genannte **Lie-Ableitung**. Verschwindet die Lie-Ableitung des metrischen Tensors, so liegt eine Isometriebedingung vor. Diese Gleichung heißt **Killing-Gleichung** und deren Lösungen Killing-Vektorfelder. Die Kenntnis **aller** Killing-Felder beschreibt also sämtliche raumzeitlichen Symmetrieeigenschaften der Metrik. Als Beispiel möge die Kerr-Metrik dienen: *Stationarität* ist eine Symmetrie, die die **Erhaltung der Energie** nach sich zieht; *Axialsymmetrie* bewirkt die **Erhaltung des Drehimpulses**. Es existieren demnach in diesem Fall zwei Killing-Vektorfelder.

Noch höher ist die Symmetrie der Minkowski-Metrik, die die flache, materiefreie Raumzeit beschreibt: Sie besitzt sogar zehn Killing-Vektorfelder!

10.10 Isospin

Der Isospin ist eine wichtige Eigenschaft von Teilchen in der Kern- und Teilchenphysik, der zu ihrer Klassifizierung dient. Mathematisch gesehen handelt es sich um einen *Drehimpuls*; das ist so zu verstehen, dass der Isospin ein wohl definiertes **Drehimpulsalgebra** und Gruppe gehorcht. Die Quantentheorie stellt für Drehimpulse einen ganzen mathematischen Apparat zur Verfügung (*Kommutatorrelationen*), der gezielt verwendet werden kann. Das gilt für den Spin, ebenso wie für den Isospin. Beides sind Eigenschaften von Teilchen, die in der Teilchenphysik als Quantenzahlen bezeichnet werden.

10.10.1 Heisenbergs Idee

Der deutsche Quantenphysiker Werner Heisenberg hat den Isospin vorgeschlagen, um Proton und Neutron einheitlich zu beschreiben. Beide Nukleonen mögen den Gesamtisospin $1/2$ haben, sich aber in der dritten Komponente des Isospins, der so genannten *Isospinprojektion*, unterscheiden: Ist die dritte Komponente dieses Nukleons $-1/2$, so spricht man vom Neutron; ist er $+1/2$, so handelt es sich um das Proton (Vorzeichen können je nach Konvention auch umgekehrt zugeordnet werden).

Zu einem Isospin I gehören $2I+1$ Isospinzustände. Ein Gesamtisospin $I=1/2$ ermöglicht entsprechend $2 \times 1/2 + 1 = 2$ Zustände, nämlich $+1/2$ (*isospin up*) oder $-1/2$ (*isospin down*). In der Sprache der Teilchenphysik kennzeichnet das gerade ein **Isospindublett**.

10.10.2 Proton = Neutron?

Der Witz ist, dass in Abwesenheit von elektromagnetischen Kräften zwischen Proton und Elektron an sich kein Unterschied besteht. Der Massenunterschied, die so genannte *Massenentartung*, entsteht erst durch die Symmetriebrechung, das eine elektrische Ladung zugeordnet wird. Ohne Elektromagnetismus sind Proton und Neutron im Rahmen der Vereinheitlichung als Nukleon zu beschreiben.

10.10.3 Isospin anderer Teilchen

Die Kaonen haben die gleiche Isospinsymmetrie wie die Nukleonen (Isospindublett), aber dagegen einen Spin null (skalare Teilchen). Der Gesamtisospin der Pionen ist 1; es handelt sich in der Terminologie daher um ein **Isospintriplett** ($2 \times 1 + 1 = 3$). Analog kann der Isospin für weitere Teilchen verallgemeinert werden.

10.11 Isotop

Ein Atom besteht aus einer Atomhülle und einem Atomkern. In der Atomhülle befinden sich elektrisch negativ geladene Elektronen, die zur Familie der Leptonen gehören. Im Atomkern gibt es elektrisch positiv geladene Protonen und elektrisch neutrale Neutronen; beide Teilchensorten werden als Nukleonen (*Kernteilchen*) zusammengefasst.

Die Atome können zu unterschiedlichen chemischen Elementen gehören, die alle im **Periodensystem der Elemente (PSE)** aufgelistet sind. In der Kernphysik charakterisiert man *eindeutig* den Atomkern, der ja nur aus Nukleonen besteht, durch die Angabe der Protonenanzahl und der Neutronenzahl. Um sofort die Elementinformation zu haben, geben die Kernphysiker folgende Zahlen an:

- ◇ Protonenanzahl oder **Kernladungszahl** Z ,
- ◇ **Atommasse** A ,
- ◇ und **Elementsymbol** X .

Diese drei Angaben werden in der Form A_ZX notiert; da eigentlich eine Zahl überflüssig ist, liest man auch häufig nur $X-A$.

10.11.1 Zur Atommasse

Die Atommasse A ergibt sich gerade als Summe der Protonenzahl und Neutronenzahl. Sie wird in *atomaren Masseneinheiten* u angegeben. Eine atomare Masseneinheit ist definiert als der zwölfte Teil der Masse eines Kohlenstoffatoms mit der Bezeichnung C-12. Möchte man die Atommasse in die Si-Einheit Kilogramm oder in die Energieeinheit Elektronenvolt umrechnen, so gilt:

$$1 u = 1.6605402 \times 10^{-27} \text{ kg} \sim 931.4943 \text{ MeV} \quad (10.1)$$

10.11.2 Beispiele

Nehmen wir an, es handelt sich um Kohlenstoff, der sechs Protonen und sechs Neutronen, also 12 Nukleonen hat. Die erste Schreibweise ist 12_6C und die zweite C-12. Ein Beispiel eines besonders schweren Elements ist Uran mit 92 Protonen und 146 Neutronen, also 238 Nukleonen. Hier schreibt man ${}^{238}_{92}U$ bzw. U-238.

10.11.3 Was sind nun Isotope?

Das Isotop eines Elements hat nun die **gleiche Anzahl an Protonen im Atomkern** (also die gleiche Kernladungszahl Z) wie das betreffende Element, aber eine **unterschiedliche Anzahl an Neutronen** (also eine andere Atommasse A).

Bezogen auf das obige Beispiel Kohlenstoff gibt es beispielsweise die Kohlenstoffisotope C-12 und C-14. C-14 hat zwei Neutronen mehr im Atomkern als C-12 und ist entsprechend schwerer, hat also eine größere Atommasse A . Bei Wasserstoff, Elementsymbol H, gibt es drei Isotope: einfacher Wasserstoff H-1 mit nur einem Proton, schwerer Wasserstoff H-2 mit einem Proton plus einem Neutron (**Deuterium**) und überschwerer Wasserstoff H-3 mit einem Proton und zwei Neutronen (**Tritium**).

10.11.4 Etymologie

Das Wort Isotop kommt aus dem Griechischen und bedeutet *iso*: 'gleich' und *topos*: 'Ort' - gemeint ist der **gleiche Ort im Periodensystem der Elemente**, denn Isotope verhalten sich **chemisch gleich**, weil sie alle dieselbe Protonenzahl haben. Sie unterscheiden sich nur in ihrem Gewicht und ihrem kernphysikalischen Verhalten.

10.11.5 Isotope in der Astrophysik

Die genaue Kenntnis des Isotops ist natürlich wichtig in der Kernphysik. Ein einfaches Beispiel ist die Bilanz in der **Radioaktivität**, wie α -Zerfall, β -Zerfall und γ -Zerfall.

In der Astronomie spielen Isotope eine wichtige Rolle in der **Stellarphysik**, nämlich bei der thermonuklearen Fusion im Innern von Sternen (stellare Nukleosynthese), in den Winden von Roten Riesen bzw. AGB-Sternen und bei kernphysikalischen Prozessen in Sternexplosionen wie den Supernovae. In der Kosmologie gab es eine frühe Epoche der kernphysikalischen Elementherstellung in der **primordialen Nukleosynthese**.

10.12 ITER

Seit Jahrzehnten plant ein internationales Konsortium ein ehrgeiziges und teures Projekt: den Bau und die Inbetriebnahme von **Fusionskraftwerken**. In solchen Kraftwerken soll das Prinzip der Energieumwandlung genutzt werden, wie es auf der Sonne seit Jahrmilliarden abläuft: die thermonukleare Fusion.

10.12.1 ITER auf dem Weg

Die Planungsphase ist nun endlich in den Beginn der Bauphase übergetreten: Im Juli 2005 wurde beschlossen die internationale Fusionstestanlage **ITER** (lat. für 'Weg' oder 'Reise') in *Cadarache* (Südfrankreich) zu bauen. Man darf den Projektnamen wohl so verstehen, dass die internationale Kollaboration die wirtschaftliche Nutzung von Fusionsenergie *auf den Weg bringen will*. Das internationale Projekt steht zurzeit unter der Beteiligung der EU, der USA, Russland, Japan, China und Südkorea. Sie teilen sich die Baukosten von 4.6 Mrd. Euro für die Umsetzung des Projekts. Die Betriebskosten des Fusionskraftwerks werden sich jährlich wahrscheinlich auf 265 Mio. Euro belaufen.

10.12.2 Ziel: Machbarkeitsstudie der Fusionsenergie

Erklärtes Projektziel ist es, die Machbarkeit (den *proof of concept*) eines Fusionskraftwerks zu beweisen. Vor allem soll demonstriert werden, dass die kontrollierte Fusion Energie liefert, die wirtschaftlich genutzt werden kann. Ziel ist insbesondere ein **Energiegewinnungsfaktor**

von **mindestens 10**, d. h. das Zehnfache der zur Plasmaheizung benötigten Energie soll wieder als Fusionsenergie frei werden. Nur dann sind Fusionskraftwerke wirtschaftlich lukrativ.

10.12.3 Prinzip des Fusionskraftwerkes

Das Prinzip des Fusionskraftwerkes ist es, das leichteste und häufigste Atom - Wasserstoff - zu Helium zu verschmelzen. Es handelt sich demnach um das oben beschriebene Wasserstoffbrennen, das nach dem Motto *'Pack die Sonne in den Tank'* dauerhaft auf die Erde geholt werden soll. Das Brennstoffgemisch besteht aus den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium, die aus einem Proton und einem Neutron bzw. einem Proton und zwei Neutronen bestehen. Auf der Erde müssen allerdings **deutlich höhere Zündtemperaturen als im Sonneninnern** ermöglicht werden, weil das irdische Plasma eine viel kleinere Dichte (10^{14} Teilchen/cm³) aufweist: **100 Millionen Grad** sind nötig!

10.12.4 Herausforderung: Plasma soll extrem heiß bleiben

Um ein Abkühlen des Plasmas zu vermeiden, darf es auf keinen Fall die Wände des Reaktors berühren. Genau das ist ein gravierendes, technisches Problem. Das extrem erhitzte Plasma wird in einem schlauchförmigen Gebilde (Torus) mithilfe von starken Magnetfeldern eingeschlossen. Die Kunst besteht darin, die richtige Konfiguration der Magnetfelder zu ermitteln.

Im ITER-Projekt wurden folgende Eckdaten niedergelegt: In einem Plasmavolumen von 840 m³ soll für die Dauer von etwa fünf Minuten eine Fusionsleistung von 500 Megawatt produziert werden. **Die aktuellen Energieprobleme wären mit Fusionskraftwerken gelöst:** Nur ein Gramm des Brennstoffs könnte 90 Megawattstunden Energie freisetzen; das entspricht der Verbrennungswärme von elf Tonnen Kohle! Einziger Wermutstropfen ist, dass die Reaktorwände radioaktiv werden und sie ebenso wie der radioaktive Abfall der herkömmlichen Kernkraftwerke (Fissionskraftwerke) zwischengelagert werden müssen. Zum Glück ist die Halbwertszeit recht kurz.

10.12.5 Projektstatus & Ausblick

Nach dem nun beschlossenen Standort von ITER, wird es weitere zehn Jahre dauern bis der Bau abgeschlossen ist. Dann werden etwa 600 Mitarbeiter zwanzig Jahre lang am Projekt arbeiten. Wirtschaftlich nutzbar wird die Energie aus Fusion auf der Erde vermutlich **erst in etwa 50 Jahren!** Es ist sowohl zeitlich, als auch finanziell ein Mammutvorhaben, das jedoch hoffentlich eine 'astronomische Rendite' haben wird.

Energiewirtschaftlich gibt es langfristig kaum Alternativen, da fossile Brennstoffe wie Erdöl und Kohle, aber auch spaltbares Uran (U-235) begrenzt sind. Regenerative Energieressourcen wie die Solartechnik, Wind- und Gezeitenkraftwerke sind langfristig nach der aktuellen Einschätzung nur ein Additiv in der Energiewirtschaft, die den steigenden Energiebedarf einer modernen Zivilisation kaum decken wird.

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching begann schon seit den 1960er Jahren mit der Fusionsforschung und ist maßgeblich an ITER beteiligt. Die Pressemitteilung vom 01. Juli 2005 diente auch hier als Informationsquelle.

Kontakt

Dr. Andreas Müller

Technische Universität München (TUM)
Exzellenzcluster Universe
Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching
Germany

<http://www.universe-cluster.de>

andreas.mueller@universe-cluster.de

+49 (0)89 - 35831 - 71 - 04