

1. Einleitung

Die Expansion des Kosmos ist gesichertes Erkenntnis, in welche Richtung man auch beobachtet. Expansion bedeutet formal, der Abstand entfernter Sterne zu einem Beobachter wird mit der Zeit größer. Darüber hinaus gilt, je weiter entfernt ein Stern ist, desto schneller erhöht sich sein Abstand. Da die Erde keine Vorzugsstellung im Kosmos innehat, muss diese Beobachtung unabhängig davon sein auf welchem Stern sich der Beobachter befindet.

Im Standardmodell der Kosmologie⁽¹⁾ wird diese Eigenschaft des Kosmos mit der Ausdehnung des Raumes erklärt, die besagt der betreffende Stern bewegt sich vom Beobachter nicht weg, sondern der Raum dazwischen dehnt sich aus. Diese Erklärung ist mathematisch darstellbar und kann überdies wichtige Eigenschaften des Kosmos gut erklären. Wie schon bei der experimentell nachgewiesenen richtigen Beschreibung von Naturvorgängen durch die Quanten- und Relativitätstheorie haben die Physiker sich an mathematische Beschreibungen der Natur gewöhnt, die dem menschlichen Verstand nicht zugänglich sind. Für die allermeisten Kosmologen ist so die Ausdehnung des leeren Raumes lediglich ein weiteres erfolgreiches Beispiel für die mathematische Beschreibung der Natur.

Im Unterschied zu den eben genannten Theorien ist die Ausdehnung des Raumes experimentell nicht nachgewiesen, weder durch Beobachtungen auf der Erde noch im nahen Kosmos, z.B. der Milchstraße. Aber selbst vehement ätzende Kritiker⁽²⁾ konnten keine physikalisch belastbare Alternative aufzeigen. Ist die Ausdehnung des Raumes also tatsächlich alternativlos?

In dieser Arbeit werden in einem Gedankenexperiment einige bekannte Eigenschaften des Kosmos simuliert. Es wird versucht, diese Eigenschaften physikalisch zu erklären ohne auf die Annahme der Ausdehnung des Raumes zurückzugreifen und ohne neue Parameter einzuführen. Diese Erklärungen führen erstaunlicherweise zu einem Modell des Kosmos, das Aussagen/Vorhersagen beinhaltet, die ausgezeichnet mit gemessenen Daten im Kosmos übereinstimmen.

2. Vom Gedankenexperiment zum Modell des Kosmos

2.1 Experimentelle Anordnung. Definition des Ausgangsraumes der Expansion

Das zu definierende Gedankenexperiment soll sämtliche gesicherte Fakten über den Kosmos berücksichtigen, insbesondere Urknall, zunehmende Entfernung der Sterne vom Beobachter, die seit dem Urknall verstrichene Zeit, ungefähre Gesamtmasse des Kosmos, Existenz der Dunklen Materie, kopernikanisches Prinzip. Jedoch sollen anstelle der Ausdehnung des Raumes nur experimentell nachgewiesene physikalische Gesetzmäßigkeiten und Prinzipien als Erklärung in Frage kommen.

Im Gedankenexperiment wird, angelehnt an kosmische Daten, zu einem beliebigen Zeitpunkt ein kugelförmiges Volumen betrachtet, das innerhalb eines sehr großen Radius etwa 10^{54} kg „normale“ (bzw. baryonische) Materie und Dunkle Materie enthalten möge, und in dessen Zentrum U sich ein fiktiver Beobachter befinde. Entsprechend der Situation im Kosmos möge sich alle normale und Dunkle Materie , entgegen der gravitativen Anziehung, radial von ihm entfernen, je weiter entfernt mit umso größerer Geschwindigkeit. Der mit allen erforderlichen physikalischen Geräten ausgestatteten Beobachter habe die Aufgabe für diese scheinbar rätselhaften Expansion der Materie einen Erklärungsansatz zu erarbeiten. Er wird folgende Beobachtungen und daraus abgeleitete Folgerungen feststellen.

- Der Radius des mit Materie ausgefüllten Volumens wird größer.
- Eine thermodynamische Ausdehnung als Ursache scheidet aus, da dieses Volumen - genauso wie der Kosmos - kalt sein möge. Außerdem müsste die Expansions-Geschwindigkeit mit der Zeit wegen der Gravitation abnehmen, entgegen der Beobachtung.
- In Kenntnis nachgewiesener physikalischer Prinzipien wird die zunehmende Entfernung der Materie voneinander entgegen ihrer Gravitations-Anziehung auf eine Kraft zurückführt, die auf die Materie wirkt.
- Da diese Kraft auf Materie wirkt, kann geschlossen werden, dass sie auch von Materie ausgeht, so wie jede andere bekannte Wechselwirkung, sei es Gravitation, Elektromagnetismus, die schwache oder starke Kernkraft
- Die Materie, von der diese Kraft ausgeht ist unbekannt und werde willkürlich als m(-) bezeichnet. Die normale und Dunkle Materie werde im Gegensatz dazu wegen ihrer gemeinsamen Expansion und ihrer gegenseitigen Anziehung willkürlich als m(+) bezeichnet.
- Bei Annahme obiger Schlussfolgerungen muss die von m(-) auf m(+) wirkende Kraft abstoßend , langreichweitig (also wie alle bekannten Kräfte langer Reichweite und Energieübertragungen durch Wellen mit $1/r^2$ abnehmen) und kumulativ sein (d.h. die von mehreren Teilchen ausgehenden Kräfte addieren sich). Andernfalls wäre die Expansion der m(+)-Materie entgegen der Gravitation von vornherein unmöglich. Damit fallen die Kräfte, die nur auf ihre nächste Umgebung wirken, also die schwache und starke Kernkraft als Erklärung aus. Auch elektromagnetische Kräfte entfallen als Erklärung. Die elektrischen Ladungen sind unsortiert, wegen der Anziehung entgegengesetzter elektrischen Ladungen sowie der Abstoßung gleicher Ladungen heben sich die elektrisch wirkenden Kräfte gegenseitig auf. Die Träger der Ladungen unterliegen lediglich den Kräften, die auf ihre Massen wirken .

- ferner muss die $m(-)$ -Materie zu sich selbst anziehend sein, da sonst sie selbst und nicht $m(+)$ expandieren würde. Dies ergibt sich daraus, da im anderen Fall auf ein $m(-)$ Teilchen mehr abstoßende Kräfte wirkten als auf ein $m(+)$ Teilchen. Die $m(-)$ -Materie würde expandieren und $m(+)$ kontrahieren.
- Da die abstoßende Kraft dem $1/r^2$ -Gesetz der langreichweitigen Kräfte folgen soll, kann die Abstoßungskonstante mit $-G$, also der negativen Gravitationskonstante, definiert und damit die Masse der $m(-)$ -Materie derart normiert werden, dass der Beobachter derjenigen Menge der $m(-)$ -Materie – was auch immer sie ist – die Masse 1kg zuordnet, wenn diese Menge zu einem Kilogramm normaler Materie in einem Meter Abstand eine abstoßende Kraft von G Newton ausübt.
- Die gesamte so normierte Masse der $m(-)$ -Materie muss in dem betrachteten Volumen mindestens gleich groß wie die gesamte darin enthaltene Masse der $m(+)$ -Materie sein, denn sonst würde die gravitative Anziehung der $m(+)$ -Materie überwiegen und die $m(+)$ -Materie würde kontrahieren statt expandieren. Ferner muss aus eben diesem Grund die Anziehung der $m(-)$ -Materie zu sich selbst mindestens mit der Gravitationskonstanten G erfolgen.

Die Existenz einer hinreichenden Menge von $m(-)$ -Materie in diesem Volumen könnte damit bereits die Expansion der $m(+)$ -Materie erklären. Weitere Folgerungen kommen hinzu, wenn der Beobachter die zeitliche Änderung der Anordnung hinsichtlich Radius und Materieverteilung in Betracht zieht. Die $m(-)$ -Materie muss sich, wegen der Anziehung zu sich selbst und der andauernden Expansion der $m(+)$ -Materie, zunehmend um das Zentrum U kontrahieren, bis es dort schließlich zu einem $M(-)$ -Kern kommt. Die expandierende $m(+)$ -Materie befindet sich außerhalb dieses Kerns. Bei zeitlicher Konstanz der Naturgesetze haben die oben hergeleiteten Kräfteverhältnisse schon in der Vergangenheit bestanden und zum betrachteten Zeitpunkt liege die Kontraktion zu einem $M(-)$ -Kern bereits vor. Gedanklich werde nun das System mit einem $M(-)$ -Kern und der davon expandierenden $m(+)$ -Materie zeitlich immer weiter zeitlich zurückverfolgt. Das betrachtete Volumen wird dann immer kleiner, beide Materiesorten kommen sich immer näher oder überlappen sich möglicherweise. Außer einem - wie auch immer zu definierenden - Ereignis („Urknall“), bei dem diese Kräfteverhältnisse einsetzten, ist kein zeitlicher oder räumlicher Anfang erkennbar.

Als Erklärungsansatz für die expandierende Materie wird hiermit ein aus einem „Urknall“ hervorgegangener Ausgangszustand postuliert, der aus einem $M(-)$ -Kern und der radial kugelsymmetrisch von ihm innerhalb eines Radius b expandierenden $m(+)$ -Materie besteht, mit gleich großen Gesamtmassen $M(-)$ und $M(+)$ von je 10^{54} kg. Der Radius b definiere den räumlichen Bereich, bei dem die hergeleiteten Kräfteverhältnisse so kurz vorher einsetzten, dass es gerade zur Bildung des $M(-)$ -Kerns gekommen war und werde willkürlich zwischen

0 und einem Lichtjahr angesetzt. Nach allgemeinem kosmologischen Verständnis vermutet man den Urknall eher bei einer Raumgröße nahe „Null“ als einer Raumgröße von einem Lichtjahr.

Die Sinnhaftigkeit und der Erklärungsgehalt dieses postulierten Ausgangszustandes bzw. Ausgangsanordnung als Modell für den Kosmos kann nur durch die daraus stringent hergeleiteten Folgerungen bzw. Vorhersagen und deren Vergleich mit den Beobachtungen beurteilt werden.

Es wird betont, dass es sich nicht um den Anfangszustand des Kosmos handelt, sondern nur um den Ausgangszustand für den Fortgang des Gedankenexperimentes. Hinsichtlich des möglichen Anfangszustandes wird auf die Überlegungen in Anhang 1 verwiesen, die aber für die weiteren Folgerungen dieser Arbeit ohne Relevanz sind.

Das Gravitationspotential $P(b)$ der kugelsymmetrischen Ausgangsanordnung berechnet sich näherungsweise zu (da wegen der hohen Beschleunigungen die $m(+)$ -Materie sehr bald Lichtgeschwindigkeit erreicht und näherungsweise in einer Kugelschale mit dem Radius b enthalten ist)

$$P(b) = \frac{G}{b} \cdot M(-) \cdot M(+) - \frac{G}{2b} \cdot M^2(+) \quad (1)$$

Man könnte diesen Ausgangszustand auch so interpretieren: Der $M(-)$ -Kern ist ein antigravitatives Schwarzes Loch mit der zu $M(+)$ gleichen Masse M , das die normale und Dunkle Materie mit der Gravitations-Konstanten $-G$ abstößt.

2.2 Wahrnehmung des Beobachters im Zentrum des Ausgangsraumes

Das Gedankenexperiment werde nun fortgesetzt. Das riesige Potential der Ausgangsanordnung (1) möge sich entladen und in kinetische Energie der expandierenden $m(+)$ -Materie umgesetzt werden. Wegen der $1/r$ -Abnahme des Potentials ist schon bei etwa der tausendfachen Ausdehnung in guter Näherung die gesamte anfängliche potentielle Energie in kinetische Energie der $m(+)$ -Materie umgewandelt und damit die mittlere Geschwindigkeit der expandierenden Materie konstant.

Diese Schlussfolgerung ist mathematisch in Anhang 2 beschrieben zusammen mit den für diese Phase des Gedankenexperimentes wesentlichen Ergebnissen :

Die $m(+)$ Materie breitet sich vom Ausgangszustand nach einer gegenüber der bis heute seit dem Urknall vergangenen, vernachlässigbar kurzen Zeit T^* mit einer konstanten, mittleren radialen Fliehgeschwindigkeit \bar{u}' aus

$$\bar{u}' = c - \bar{\epsilon}' = c - 10^{-A} \text{ (m/s)} \quad \text{mit} \quad 8 < A < B$$

wobei $\bar{\epsilon}'$ eine extrem kleine Abweichung von der Lichtgeschwindigkeit ist. Dabei kann B eine beliebige Zahl größer als 8 sein. Die Geschwindigkeit u'_i eines beliebigen

Massepunktes ist nach der Zeit T^* ebenfalls konstant und kann vom Mittelwert \bar{u}' wie folgt abweichen

$$u_i' = (c - \varepsilon_i') = (c - 10^{-A+a_i}) \quad (\text{m/s})$$

mit der willkürlichen Annahme $|a_i| < 3$, die aber keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Denn ohne Einschränkung der Allgemeinheit kann angenommen werden, dass die mittlere Geschwindigkeit auch die wahrscheinlichste Geschwindigkeit der Massepunkte ist. Schon bei $a_i \leq 2$ würde die kinetische Energie solcher Massepunkte bis zu einem Faktor 10 von der mittleren Energie der Massepunkte abweichen, und damit den größten Teil der Materie umfassen.

Nach der Zeit T^* ist auch die Relativgeschwindigkeit ($\bar{u}_1' - \bar{u}_2'$) zwischen zwei beliebigen Punkten S_1 und S_2 wegen

$$\bar{u}_1' = c - \bar{\varepsilon}_1' = \text{const} \quad \text{und} \quad \bar{u}_2' = c - \bar{\varepsilon}_2' = \text{const.}$$

konstant und ihr gegenseitiger Abstand nimmt linear mit der Zeit zu

Die gesamte mit nahe Lichtgeschwindigkeit expandierende $m(+)$ Materie befindet sich in einer dünnen Kugelschale, deren Dicke s' von der minimal und maximal möglichen radialen Fliehgeschwindigkeit definiert wird $s' = (\varepsilon'_{max} - \varepsilon'_{min}) \cdot R_0'$, also extrem gering im Vergleich zur Expansion R_0' zum Zeitpunkt T_0 . Die Verteilung der Materie in dieser Schale wird neben der Geschwindigkeit auch noch von ihrer räumlichen Verteilung zu Beginn des Expansionsvorganges abhängen. Für die weiteren Schlussfolgerungen dieser Arbeit kommt es allein auf die Konstanz der Geschwindigkeiten der in dieser „Schale“ befindlichen Massepunkte an.

Die Anwendbarkeit auf den Kosmos erscheint hier auf den ersten Blick nicht vielversprechend, denn für einen Beobachter auf der Erde stellt sich der Kosmos völlig anders dar, insbesondere nicht in Form einer Kugelschale. Hier muss man sich aber klar machen, dass sich dieses Ergebnis lediglich für den fiktiven Beobachter im Zentrum des Ausgangsraumes so darstellt. Die Erde ist dagegen ein „Punkt“ in der expandierenden Materie der „dünnen“ Kugelschale.

2.3 Definition des alternativen Modells des Kosmos

Die Lösung dieses scheinbaren Widerspruches erfolgt in der nun folgenden Phase 3 des Gedankenexperimentes. In dieser Phase werden die Geschwindigkeiten im bisher betrachteten System des fiktiven Beobachters („U-System“) auf das Bezugssystem eines Beobachters auf der Erde („E-System“), einem beliebigen Punkt in der expandierenden Materieschale transformiert. Da nach Anhang 2 die Relativ-Geschwindigkeit der beiden Systeme konstant ist, kann für diese Transformation die Spezielle Relativitätstheorie

angewendet werden. Danach geht jede lineare Beziehung zwischen x', y', z' und t' des U-Systems in eine lineare Beziehung zwischen x, y, z und t des E-Systems über; folglich ist jede geradlinige Bewegung in einem Bezugssystem eine ebensolche im anderen und es werden in einem gleiche Strecken in gleichen Zeiten zurückgelegt, sofern dies im anderen der Fall ist⁴⁾. Ferner, ist in einem System die Geschwindigkeit unabhängig von der Zeit ist dies im anderen auch der Fall. Die Transformation der Geschwindigkeiten vom U-System in das Bezugssystem des Punktes E ist in Anhang 3 beschrieben und führt zum vom Punkt E aus beobachtbaren Kosmos

Der weiter oben postulierte Ausgangszustand, die daraus resultierende Expansion der Massepunkte mit konstanter Geschwindigkeit im U-System sowie die nachfolgende Transformation in das E-System mit ebenfalls konstanter Geschwindigkeit der Massepunkte stellen das aus dem Gedankenexperiment entwickelte alternative Modell des Kosmos dar. Die Ergebnisse bzw. Vorhersagen dieses Modells basieren allein auf diesen Schritten und enthalten insbesondere keine Parameter um Modelldaten an die Beobachtungen anzupassen.

In einer früheren Veröffentlichung³⁾ wurde dieses alternative Modell des Kosmos als „Duales Modell des Kosmos“ bezeichnet, aufgrund seiner unterschiedlichen Darstellung einmal im U-System und zum anderen im E-System. Die Darstellung im E-System ist der von der Erde aus beobachtbare Kosmos. Die Darstellung im U-System entspräche der Sicht eines fiktiven Beobachters am Ort des Urknalls.

Im Standardmodell der Kosmologie verschmelzen diese beiden Bezugssysteme zu einem einzigen, da es dort zwischen den „Punkten“ U und E keine (vom Urknall herrührende) Geschwindigkeit gibt.

2.4 Wahrnehmung eines Beobachters auf der Erde

Im folgenden werden die aus dieser Transformation resultierenden Eigenschaften / Daten hergeleitet und mit den veröffentlichten Eigenschaften/Daten des Kosmos verglichen. Wegen der (nach der Zeit T^*) Konstanz der Geschwindigkeit u' eines Massepunktes zwischen der Erde E und einem beliebigen Stern S im U-System ist die Geschwindigkeit u zwischen diesen Punkten nach der Transformation auf das Bezugssystem der Erde ebenfalls konstant. Durch Multiplikation mit der bis heute seit dem Urknall vergangenen Zeit T_0 ($T^* \ll T_0$) ergibt sich direkt die heutige Entfernungen D zur Erde

$$D = u (T_0 - T^*) + \tilde{u} \cdot T^* \quad \text{und wegen } T^* \ll T_0$$

$$D = u \cdot T_0 \quad (2)$$

Gleichung (2) ist die Fundamentalbeziehung dieses aus dem Gedankenexperiment entwickelten Modells und kann erklären, dass die Fliehgeschwindigkeit eines Sterns zur Erde umso größer, je weiter der Stern entfernt ist.

Das Ergebnis einer solchen Transformation ist für ein Beispiel in Abb.1 dargestellt und zeigt das von einem Beobachter auf der Erde beobachtbare Universum. Der in der Abbildung blau gefärbte, beobachtbare Bereich erstreckt sich, ausgehend vom Punkt E nach allen Richtungen von der Fliehgeschwindigkeit $u = 0$ bis nahe Lichtgeschwindigkeit, als auch wegen $D = u \cdot T_0$ von der heutigen Entfernung $D=0$ bis nahe T_0 Lichtjahre. Die x-Achse ist Symmetrieachse. Die Größe des beobachtbaren Bereiches hängt vor allem von der Variationsbreite a (siehe Anhang 2) des Geschwindigkeitsspektrums um den Mittelwert \bar{u}' ab. Das Beispiel wurde mit $|a| = 1$ gerechnet. Je größer a desto weiter ist der beobachtbare Bereich bis hin zur roten Kreisschale, der den maximal beobachtbaren Bereich mit dem Radius von T_0 Lichtjahren definiert.

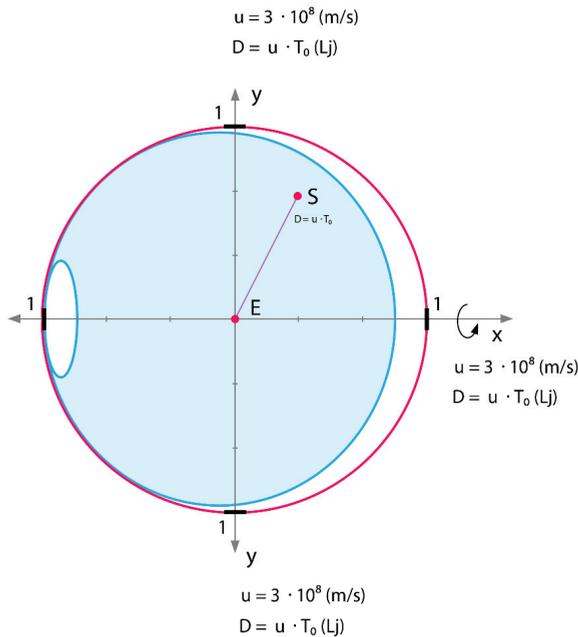


Abb. 1 Schematische Darstellung des beobachtbaren Kosmos

Die Erde E ist der Mittelpunkt des von der Erde aus beobachtbaren Kosmos. Alle Sterne im beobachtbaren (blau gefärbten) Bereich bewegen sich von der Erde mit der Fliehgeschwindigkeit u weg, welche proportional zum heutigen Abstand D von der Erde ist. Proportionalitätsfaktor ist die seit dem Urknall vergangenen Zeit T_0 .

Folgende Eigenschaften des Kosmos können durch das Modell erklärt oder vorhergesagt werden:

- Alle Sterne entfernen sich vom Beobachter auf der Erde
- die Entfernung eines Sterns vom Beobachter ist proportional zu dessen Fliehgeschwindigkeit, d.h. je weiter entfernt ein Stern ist, desto schneller seine Fliehgeschwindigkeit.
- Proportionalitätsfaktor ist die seit dem Urknall vergangene Zeit T_0 . Die Entfernung eines Sterns zur Erde kann daher sofort in dessen Flieh-Geschwindigkeit umgerechnet werden und umgekehrt
- Die Verteilung der Materie ist nicht kugelsymmetrisch. Es liegt Symmetrie um die x-Achse vor (d.h. um die Gerade vom Zentrum U des Ausgangsraumes zu Punkt E des Beobachters). Die y-Achse ist senkrecht dazu und unabhängig vom Drehwinkel um die x-Achse. Diese Rotationssymmetrie kann durch spätere Wechselwirkungen der $m(+)$ Materie jedoch wieder verloren werden. In sehr großen Entfernungen vermutlich etwa ab 100 Mpc sollte diese rotationssymmetrische Verteilung der Materie aber erhalten bleiben.
- Im U-System entspricht die x-Achse der radialen Geraden senkrecht durch die dünne Materieschale mit rasch zu- und abnehmender Materieverteilung längs dieser Richtung, während man in tangentialer Richtung (also der y-Achse) noch in oder nahe der maximalen Dichte der Materieschale bleibt. Gemäß Anhang 3 wird bei der Transformation die x- und y-Achse auch im E-System erhalten. Daraus folgt:
 - Es wird (abhängig von der Position der Geschwindigkeit des Punktes E in der radialen Geschwindigkeitsverteilung im U-System) nach der Transformation in das E-System in der Umgebung des Punktes E eine eher scheibenförmige Materieverteilung vorliegen. Insgesamt würde dadurch offensichtlich die Bildung scheibenförmiger Galaxien begünstigt.
 - Die x-Achse könnte bestimmt werden als die Beobachtungsrichtung mit der stärksten Abnahme der Materiedichte mit zunehmender Entfernung. Dies gilt sowohl für die positive als auch die negative Richtung dieser Achse, obwohl in beiden Richtungen unterschiedliche Materiedichten vorliegen.
 - Je größer der Winkel zwischen der zu bestimmenden x-Achse und der Beobachtungsrichtung, desto geringer sollte die Abnahme der Materiedichte in Beobachtungsrichtung mit der Entfernung sein.

Dichteschwankungen könnten aufgrund ihrer unterschiedlichen Position in der expandierenden $m(+)$ -Materieschale des U-Systems sehr unterschiedliche Entstehungsformation von Galaxien bewirkt haben.

Da im Kosmosmodell dieses Gedankenexperimentes die Erde ein beliebiger Punkt im Kosmos ist, ergeben sich diese Phänomene auch für einen Beobachter auf jedem anderen Stern im Kosmos, in Übereinstimmung mit dem kopernikanischen Prinzip.

3. Vorhersagen zu Geschwindigkeiten und Entfernungen

Da in dieser Arbeit zur Erklärung des Kosmos die naheliegende Hypothese der Ausdehnung des Raumes ausgeschlagen wird, gilt dies auch für die damit untrennbar verbundene „kosmischen Rotverschiebung“. Als physikalisch sich anbietender Erklärungsansatz für die im Kosmos beobachtete Rotverschiebung des Lichts ferner Himmelskörper kommt dann nur der wohlbekannte Dopplereffekt in Frage. Für das von einem Stern S mit der Fliehgeschwindigkeit u zur Erde ausgesandte und von einem Beobachter auf der Erde empfangene Licht kommt es aufgrund des relativistischen Dopplereffektes ⁴⁾ zu folgender Rotverschiebung z

$$z = \Delta\lambda/\lambda' = \frac{\sqrt{c+u}}{\sqrt{c-u}} - 1 \quad \text{bzw.}$$

$$z + 1 = \lambda/\lambda' = \frac{\sqrt{c+u}}{\sqrt{c-u}} \quad (3a)$$

Dabei ist λ die beobachtete Wellenlänge und $\Delta\lambda = \lambda - \lambda'$ die Abweichung von der bekannten Spektral-Wellenlänge λ' (des Senders). Die gemessene Wellenlänge λ ist größer als λ' , wenn u positiv ist, also Sender und Beobachter sich einander entfernen.

Aus Gl. (3a) ergibt sich direkt die Fliehgeschwindigkeit u des signalgebenden Sterns und mit Hilfe der Fundamentalbeziehung (2) der heutige Abstand D zu diesem bei Empfang des Signals

$$u = c \cdot \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \quad (3b)$$

$$D = T_0 \cdot c \cdot \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1} \quad (3c)$$

Für den Abstand d zwischen Erde und Stern zum Zeitpunkt der Aussendung des Signals gilt

$$d = D \cdot \frac{c}{c+u} \quad (4)$$

denn das Licht braucht zum Zurücklegen der Strecke d die gleiche Zeit wie der Stern zum Zurücklegen der Strecke $(D-d)$.

Die tatsächlich gemessenen Entfernungen im Kosmos werden aus astronomischen Beobachtungen bestimmt, insbesondere aus Helligkeitsmessungen von sogenannten kosmischen Standardkerzen. Aus einfacher Physik ist die Wurzel aus der Leuchtkraft F (bei großen Entfernungen) umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung. Im Kosmos stellen Supernova Ia solche Standardkerzen dar, da sie am Ende ihrer Lebenszeit stets mit einem gleich großen Lichtausstoß verglühn.

Das Ergebnis einer Vielzahl solcher Abstandsmessungen war, dass die Leuchtkraft von Supernovae Ia stärker als mit dem Quadrat der (Lichtlaufzeit-)Entfernung abnimmt. Dieses Ergebnis kann durch die im Standardmodell enthaltene Ausdehnung des Raumes erklärt und als Beweis für die Richtigkeit dieses Modells betrachtet werden. Denn während das Licht unterwegs ist, dehnt sich zum einen der Raum und zum anderen die Wellenlänge von Licht aus. Beide Effekte führen bei Ankunft zu einer Abnahme der Strahlungsenergie und damit der Leuchtkraft und lassen auf eine entsprechend große Entfernung schließen. Doch ist wirklich keine andere Erklärung für die Leuchtkraft-Abnahme als Raumexpansion möglich?

Tatsächlich kann die zum Quadrat der Entfernung überproportionale Abnahme der Leuchtkraft auch in diesem aus dem Gedankenexperiment hervorgegangenen Modell erklärt werden. Im Bezugssystem der Erde ist die beobachtete Leuchtkraft umso kleiner je höher die Geschwindigkeit u ist, mit der sich ein Stern von der Erde entfernt. Einmal wegen der geringeren Strahlungsenergie des ankommenden Lichts durch den Faktor λ'/λ (aufgrund der Doppler-Rotverschiebung), und zum anderen durch die relativistische Zeitdilatation

$$\Delta t = \Delta t' / \sqrt{1 - u^2/c^2}$$

bei dem sich mit der Geschwindigkeit u entfernenden Stern. Hierbei beruht die auf der Erde pro Zeiteinheit empfangene Strahlung auf einer um den Faktor $\sqrt{1 - u^2/c^2}$ verkürzten Ausstrahlungszeit, bei entsprechender Reduktion der empfangenen Strahlungsenergie.

Wenn F' die tatsächliche Leuchtkraft des Stern ist, gilt für seine reduzierte Leuchtkraft F'_d im Bezugssystem der Erde bei Aussendung des Signals (also der Entfernung d) unter Berücksichtigung der Gleichungen (3)

$$F'_d = \frac{\lambda'}{\lambda} \cdot \frac{\Delta t'}{\Delta t} \cdot F' = \frac{1}{z+1} \cdot \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \cdot F' = \frac{c-u}{c} \cdot F' = \frac{2}{(z+1)^2+1} \cdot F'$$

Diese Leuchtkraftreduktion hängt nur von der für einen Himmelskörper konstanten Entfernungsgeschwindigkeit u zur Erde ab.

Für die Wahrnehmung auf der Erde bei einer Entfernung D ist jedoch noch eine zusätzliche Änderung der Leuchtkraft entsprechend dem Quadrat der Entfernungen zu berücksichtigen

$$F'_D = \frac{d^2}{D^2} \cdot F'_d$$

Bezüglich der heutigen Entfernung D des Senders ergibt sich hierfür die reduzierte Leuchtkraft F'_D bei Berücksichtigung von Gl. (4) zu

$$F'_D = \frac{d^2}{D^2} \cdot F'_d = \frac{c-u}{c} \cdot \frac{d^2}{D^2} \cdot F' = \frac{(z+1)^2+1}{2 \cdot (z+1)^4} \cdot F' \quad (5)$$