

Das Rätsel der dunklen Materie und seine Lösung



1. Das Problem

In Spiralgalaxien und Galaxienhaufen scheint Materie zu fehlen, um jene Gravitationskräfte aufzubringen, die zum Zusammenhalt der großräumigen Strukturen erforderlich sind. Seit Bekanntwerden des Phänomens anfangs der dreißiger Jahre des vorigen Jahrhunderts durch Jan Oort und Fritz Zwicky ist man auf der Suche nach dieser mysteriösen nichtleuchtenden Materie – ohne nennenswerten Erfolg. Die Lösung des Rätsels hat weitreichende Konsequenzen für das Verständnis von der Entwicklung und Struktur unseres Universums.

Niemand hat bisher die gesuchte „dunkle Materie“ nachweisen können, doch sie ist in den kosmologischen Berechnungen und Modellen längst eine feste Größe geworden. Kaum einer zweifelt noch ernsthaft an deren Existenz, und so diskutiert man auf den großen Kongressen nicht mehr um das „Ob“, sondern um das „Wie“ ihrer Nachweisbarkeit. In den Spiralgalaxien rechnet man mit etwa 50% Anteil an deren Gesamtmasse, in Galaxienhaufen sollen es

90% sein, und das gesamte Weltall könnte nach neuesten Rechnungen sogar bis zu 97% dieses rätselhaften Stoffes enthalten.

Als Fritz Zwicky 1933 Galaxienhaufen analysierte, fiel ihm die für den gravitativen Zusammenhalt zu geringe Gesamtmasse auf und wies damit auf dieses Problem der fehlenden Masse hin. Es lag die Vermutung nahe, hier müsse noch unentdeckte, nichtleuchtende und damit nicht registrierbare Masse im Spiel sein, die mit verfeinerten Messinstrumenten früher oder später entdeckt würde. Diese Suche blieb bis heute - trotz raffiniertester Suchmethoden - letztlich erfolglos. Dennoch funktionieren die meisten modernen kosmologischen Szenarien nur, wenn auf die dunkle Materie zurückgegriffen werden kann. Deshalb wird mit erheblichem Aufwand weiter danach geforscht.

Und wenn es diese mysteriöse dunkle Materie gar nicht gibt? Wenn sie deshalb nicht existieren muss, weil ganz andere Kräfte - zusätzlich zur Gravitationskraft - für das beobachtete Phänomen verantwortlich sind?

Sollte es einen überzeugenden Nachweis für die *Nichtexistenz* der nichtleuchtenden Materie geben, hätte das gravierende Folgen für viele kosmologische Theorien und die darauf aufgebauten weltanschaulichen Folgerungen. Es käme einer Art Tabubruch gleich, und so bleibt die dunkle Hoffnung, der folgende Gedankengang sei *nicht* überzeugend...

2. Die Lösung des Problems der dunklen Materie

These 1:

Das Problem der dunklen Materie existiert nur, wenn man eine Spiralgalaxie bzw. einen Galaxienhaufen als punktförmigen, im Inertialsystem ruhenden Körper auffasst, der in verschiedenen Abständen von anderen punktförmigen Körpern umlaufen wird. (Anders ausgedrückt: Dunkle Materie muss eingeführt werden, wenn die Keplerrotation unseres Planetensystems auch für Galaxien und Galaxienhaufen erwartet wird.)

Die Himmelsmechanik wurde hinsichtlich unseres Sonnensystems entwickelt, verfeinert und zu hoher Voraussagekraft gebracht. Die raffiniertesten Weltraumunternehmungen gelingen auf Grund dieser ausgefeilten Theorie. Diese Himmelsmechanik sollte überall im Kosmos gelten, und so wandte man sie natürlich auch auf Massenbewegungen in Spiralgalaxien bzw. Galaxienhaufen an. In Abbildung 1 umkreist zum Beispiel die Sonne mit der Masse m im Abstand r das Galaxienzentrum mit der Geschwindigkeit v und bewirkt die nach außen wirkende Zentrifugalkraft F_z . Die Umlaufbahn umschließt die Galaxienmasse M , die mit der Gravitationskraft F_g als Radialkraft in Richtung Zentrum wirkt. Bei Kräftegleichheit sollte eine stabile Kreisbahn beobachtet werden. In fast allen Veröffentlichungen geht man seit 1933 davon aus, dass die newtonsche Bewegungsgleichung in der folgenden Form hinreichend genau die Bewegung der umlaufenden Masse beschreibt:

$$\begin{aligned}
 0 &= F_R + F_Z \\
 -F_R &= F_Z \\
 -\frac{GmM}{r^2} &= \frac{mv^2}{r}
 \end{aligned}$$

Das Problem: Die Galaxienmasse M ist etwa um die Hälfte zu gering, um die Zentrifugalkraft auszugleichen.

Die einzige Lösung des Problems wurde seit 1933 in der Existenz noch unentdeckter Materie gesehen, doch die Lösung scheint in einer ganz anderen Richtung zu liegen.

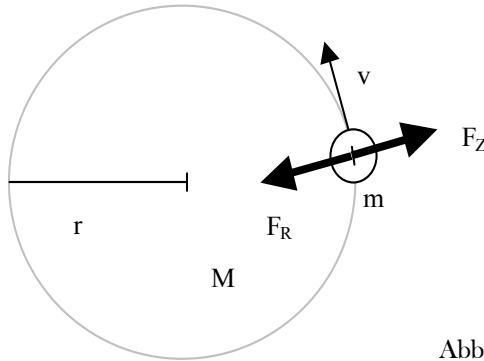


Abb. 1

These 2:

Das Problem der dunklen Materie verschwindet sofort, wenn eine Spiralgalaxie bzw. ein Galaxienhaufen infolge der Rotation als ein System von gegeneinander bewegten Einzelmassen unterschiedlicher Winkelgeschwindigkeiten (in Abhängigkeit vom Radius) aufgefasst wird. Großräumige massereiche Strukturen verhalten sich weder wie starr Körper mit starrer Rotation (z.B. Erde, Mond), noch wie Systeme von kaum wechselwirkenden Punktmassen, die einer Keplerrotation unterliegen (z.B. Planetensystem). Es handelt sich vielmehr um eine eigene Klasse von differentiell rotierenden Objekten, für die ein komplexeres Bewegungsgesetz gilt.

Während die in Abbildung 1 dargestellte Sonnenmasse m eine als starr und ruhend aufgefasste Gravitation ausübende Galaxienmasse M umkreist, (die letztlich ausdehnungslos im Zentrum konzentriert sein könnte bzw. von daher zu wirken scheint), wird jetzt deren räumliche Ausdehnung und Geschwindigkeitsverteilung berücksichtigt. Da sich in einer Spiralgalaxie ab einem bestimmten Abstand vom Zentrum alle Massen mit ziemlich konstanter Bahn-

geschwindigkeit v bewegen, haben sie notwendig in verschiedenen Abständen vom Zentrum auch unterschiedliche Winkelgeschwindigkeiten $\omega > \omega_0$. Zueinander haben die Massen also auch unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten v' .

Da alle Massen rotieren, also beschleunigte Bewegungen ausführen, erscheint einem äußeren Beobachter im Inertialsystem das Geschehen in der Galaxis anders als einem mitrotierenden im Nichtinertialsystem. Abb. 1 fasst die Beobachtungen des ruhenden Beobachters im Inertialsystem zusammen, wobei unerklärlich bleibt, weshalb eine halbe Gravitationsmasse ausreichend ist, um die Zentrifugalkraft auszugleichen. Beim Übergang ins Nichtinertialsystem, zum Beispiel auf einen rotierenden Stern S innerhalb der Sonnenbahn, stellt sich der Sachverhalt anders dar. (Der Übersichtlichkeit wegen fassen wir alle Bewegungen innerhalb der Sonnenbahn zu einer einzigen mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega > \omega_0$ zusammen.) Obwohl die Scheibe mit dem Stern S mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotiert, ruht die Scheibe für den mitbewegten Beobachter (Abb. 2). Er sieht lediglich die Sonne vorüberziehen, und zwar mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega_0' = \omega - \omega_0$. Für diese verändert wahrgenommene Winkelgeschwindigkeit ist aber auch eine veränderte Radialkraft erforderlich, um die entsprechend veränderte Zentrifugalkraft auszugleichen. Der mitrotierende Beobachter macht also andere Beobachtungen bezüglich der Kräfte als der Beobachter im Inertialsystem.

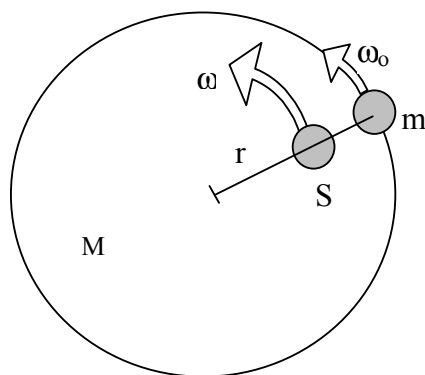


Abb. 2:
Anschauliche Darstellung der Winkelgeschwindigkeiten. (Eigentlich handelt es sich um Vektoren, die senkrecht auf der Scheibe im Rotationszentrum stehen.)

Denn in Nichtinertialsystemen spielen Trägheitskräfte zusätzlich eine Rolle, die in Inertialsystemen unbekannt sind. Diese Trägheitskräfte sind Scheinkräfte, die von keinem realen Körper ausgehen und auch keine Gegenkräfte hervorrufen, dennoch aber reale Wirkungen verursachen. Bei den hier untersuchten zusätzlichen Trägheitskräften, die offensichtlich radial zum Zentrum hin wirken und einen Teil der Zentrifugalkraft kompensieren, handelt es sich

zum einen um Corioliskräfte. Ihre Größe hängt ab von der Masse m , der Winkelgeschwindigkeit ω der Masse M und der Relativgeschwindigkeit $v' = \omega_0' \cdot r$ mit $\omega_0' = \mp \omega \pm \omega$. (Untere Vorzeichen gelten für $\omega_0 < \omega$ also für den Fall, wie er in Spiralgalaxien vorliegt.)

Corioliskräfte sind experimentell gut untersucht und deren Wirkungen auf bewegte Körper z. B. auf der rotierenden Erdkugel bekannt. Strömende Luftmassen werden durch Corioliskräfte abgelenkt, so dass Wirbelstürme entstehen können. Beim Foucaultschen Pendelversuch bewirken Corioliskräfte die seitliche Ablenkung der Pendelmasse: Die Schwingungsebene dreht sich. Im Versuch von Eötvös kann sogar gezeigt werden, dass eine nach Westen laufende Masse (gegen die Erddrehung) eine größere Gewichtskraft ausübt als eine nach Osten laufende. Die Unterschiede werden durch Corioliskräfte bewirkt. [1]

Die Corioliskraft berechnet sich für den Fall eines in einer Ebene rotierenden Systems (also für den Fall, wie er in Spiralgalaxien angenähert vorliegt) nach der Gleichung

$$\begin{aligned}
 F_C &= 2 \cdot m \cdot \omega \cdot v' \\
 F_C &= 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \omega_0' \cdot r \\
 F_C &= 2 \cdot m \cdot \omega \cdot (\omega - \omega_0) \cdot r. \tag{1}
 \end{aligned}$$

Damit ist die radial auf die Masse m wirkende Corioliskraft nur abhängig von der Relativgeschwindigkeit v' der gegeneinander bewegten Massen m bzw. M , der Winkelgeschwindigkeit ω des rotierenden Systems und der Masse m . Sie ist nicht abhängig von der Größe der Masse M des bewegten Systems.

Führen wir das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten ein mit

$$k = \frac{\omega_0}{\omega},$$

so ergibt sich

$$\omega_0 = k \omega$$

und damit die Corioliskraft mit

$$\begin{aligned}
 F_C &= 2 \cdot m \cdot \omega \cdot (\omega - k \omega) \cdot r \\
 F_C &= 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot (1 - k) \cdot r
 \end{aligned}$$

$$F_C = 2(1 - k) \cdot m \cdot \omega^2 \cdot r.$$

Dieser Betrag der Corioliskraft erhält folgende Vorzeichen:

Für $k = 1$, also gleiche Winkelgeschwindigkeiten, und für $\omega = 0$ verschwindet die Corioliskraft. Für eine nichtrotierende Spiralgalaxie, die von einem Stern umlaufen wird, fehlte tatsächlich Gravitationskraft zur Aufrechterhaltung einer stabilen Bahn.

Ist $k > 1$, läuft der Stern also mit höherer Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Galaxienscheibe voraus, so erhält die Corioliskraft ein positives Vorzeichen: Sie ist radial nach außen gerichtet und würde zusätzlich zur Zentrifugalkraft wirken.

Ist $k < 1$, läuft der Stern also dem sich drehenden Koordinatensystem hinterher, so ist die Corioliskraft negativ: Sie ist radial nach innen gerichtet und muss zur ebenfalls negativ gerechneten Radialkraft hinzuaddiert werden.

Genau dieser Fall $k < 1$ liegt in Spiralgalaxien vor: Mit zunehmendem Radius bleiben zwar die Bahngeschwindigkeiten konstant, nicht aber die Winkelgeschwindigkeiten; sie nehmen nach außen hin ab, so dass äußere Sterne der weiter innen liegenden Materie hinterher laufen.

Wenn also nach herkömmlicher Betrachtung in einer Spiralgalaxie etwa die Hälfte an Radialkraft (in Form von durch Massen verursachter Gravitationskraft) fehlt, so sollte nach obiger Überlegung die fehlende Hälfte als Corioliskraft wirken. Unter welchen Bedingungen geschieht das?

Wenn die aufzubringende Zentrifugalkraft $1 F_Z$ betragen soll, so muss als Kreisbahnbedingung gelten:

$$1 F_Z - 0,5 F_R - 0,5 F_C = 0 \quad (4)$$

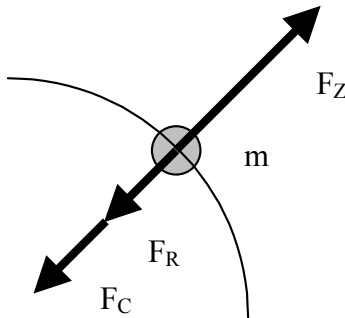


Abb. 3

Die Corioliskraft führt auf den Wert $0,5 F_C$, wenn für $k = \frac{3}{4}$ gilt, das heißt die Winkelgeschwindigkeiten von umlaufendem Stern (z.B. Sonne) und Galaxienscheibe verhalten sich wie 3 zu 4.

$$F_C = 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot (1 - k) \cdot r$$

$$F_C = 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot (1 - 0,75) \cdot r$$

$$F_C = 0,5 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot r$$

Dieser theoretisch gefundene Wert für das Verhältnis der Winkelgeschwindigkeiten $k = \frac{3}{4}$ soll durch eine Abschätzung der tatsächlichen Verhältnisse in einer Galaxis überprüft werden.

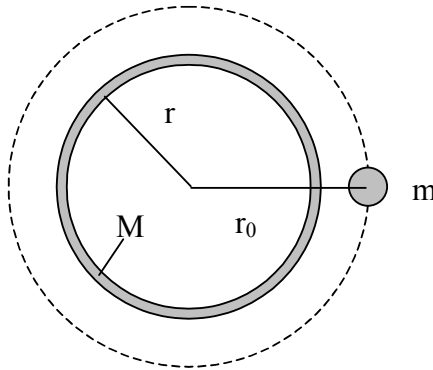


Abb.4

Die Masse M der Galaxienscheibe kann man sich in einem Hohlzylinder mit dem Radius r konzentriert denken, der mit der mittleren Winkelgeschwindigkeit ω aller Massen des Systems rotiert. In diesem Hohlzylinder ist jetzt alle Rotationsenergie der Galaxis enthalten, die eigentlich in der Scheibe verteilt ist. Die Sonnenmasse m rotiert dann im Abstand r_0 mit geringerer Winkelgeschwindigkeit ω_0 um die Galaxis (Abb. 4).

Soll der Hohlzylinder seine Masse je zur Hälfte von außerhalb bzw. innerhalb der durch den Radius r bestimmten Linie erhalten, so verhalten sich die Kreisflächen der durch r_0 bzw. r bestimmten Gebiete wie 2 : 1.

Wenn $2\pi \cdot r^2 = \pi \cdot r_0^2$, so gilt $r = \sqrt{\frac{1}{2}}r_0$ bzw. $r = 0,707 \cdot r_0$.

Da sich bei gleicher Bahngeschwindigkeit die Radien umgekehrt proportional zu den Winkelgeschwindigkeiten verhalten, gilt $k = \frac{\omega_0}{\omega} = \sqrt{\frac{1}{2}} = 0,707$.

Der Wert weicht etwas ab von $k = \frac{3}{4}$, so dass auch die Kräfte in Gleichung (4) präzisiert werden müssen. Setzen wir in Gleichung (2) zur Berechnung der Corioliskraft $k = 0,7$ ein so erhalten wir

$$\begin{aligned}
 F_C &= 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot (1 - k) \cdot r \\
 F_C &= 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot (1 - 0,7) \cdot r \\
 F_C &= 0,6 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot r.
 \end{aligned}$$

Mit der Vergrößerung der Corioliskraft verringert sich die Radialkraft:

$$1 F_Z - 0,4 F_R - 0,6 F_C = 0$$

Es darf nach dieser groben Abschätzung also tatsächlich weniger als die Hälfte sichtbarer Masse in den Spiralgalaxien „fehlen“, da die Corioliskraft diesen scheinbaren Fehlbetrag ausgleicht. Ungenauigkeiten ergeben sich durch nicht homogene Massenverteilung und nicht konstante Bahngeschwindigkeiten insbesondere im Kerngebiet, wo die Masse wie eine starre Scheibe mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotiert bzw. nach neueren Forschungen sogar in zwei gegenläufig rotierende Scheiben gespalten ist.

Entsprechende Überlegungen lassen sich auch auf andere rotierende Systeme des Universums anwenden.

Wenn in einem Galaxienhaufen etwa 90% der für den Zusammenhalt erforderlichen Masse scheinbar „fehlen“, so sollte nach obigen Überlegungen das Wirken der Corioliskraft in Betracht gezogen werden. Die Kräftebilanz für eine stabil umlaufende Masse wäre dann:

$$1 F_Z - 0,1 F_R - 0,9 F_C = 0$$

Allgemein:

$$1 F_Z - a F_R - b F_C = 0 \quad \text{mit } a + b = 1 \quad (5)$$

Unter welchen Bedingungen käme eine solche bereits neunmal stärkere Kraft als die durch Gravitation verursachte Radialkraft der tatsächlich vorhandenen Massen zustande?

$$\begin{aligned} F_C &= 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot (1 - k) \cdot r \\ b &= 2 (1 - k) \\ 0,9 &= 2 (1 - k) \\ k &= 0,55 \end{aligned}$$

$k = \frac{\omega_0}{\omega} = 0,55 = \frac{55}{100}$ bedeutet eine wesentlich größere Relativgeschwindigkeit

zwischen umlaufender Galaxie und restlicher (innerer) rotierender Haufenmasse als bei Spiralgalaxien mit $k = 0,7$. Die Haufenmasse muss man sich wieder in einem Gebiet mit dem Radius r konzentriert denken mit $r = 0,55 r_0$.

Gleichung (5) schließt die theoretische Möglichkeit ein, dass überhaupt keine Gravitationskraft als Radialkraft wirken muss und die Corioliskraft als alleiniger Gegenspieler zur Zentrifugalkraft das System stabilisiert. Für diesen Fall gilt

$$\begin{aligned} 1 F_Z - 0 F_R - 1 F_C &= 0. \\ b = 1 &= 2 (1 - k) \\ k &= 0,5 \end{aligned}$$

Dieser Grenzfall wäre z. B. erreicht, wenn eine Masse m im doppelten Radius bezüglich einer ringförmigen Masse M mit halber Winkelgeschwindigkeit rotieren würde. Dennoch muss die das Gravitationsfeld erzeugende Masse M groß genug sein, damit der mit ω_0 rotierende Körper mit der Masse

m (Stern, Galaxis) überhaupt eine Corioliskraft erfährt. Die Corioliskraft wirkt nur an solchen Massen, die sich relativ zum drehenden System (d.h. hier zum drehenden Gravitationsfeld einer Masse M) bewegen.

Wird k kleiner als 0,5, das heißt wird die Relativgeschwindigkeit zwischen äußerer umlaufender Masse m und Masse M des Systems größer, so wird die zum Zentrum hin gerichtete Corioliskraft größer als die Zentrifugalkraft: Die Masse m wird unaufhaltsam auf einer Spiralbahn zur rotierenden Masse M hin gezogen. Für den Grenzfall, dass die Masse m im Inertialsystem ruht ($\omega_0 = 0$ und k geht gegen Null), so erhöht sich der Betrag der Corioliskraft bis auf das Zweifache der Zentrifugalkraft: Die Massen M rotieren dabei schnell gegenüber m , ohne dass für den Zusammenhalt des Systems riesige Gravitationskräfte erforderlich wären, wie dies in herkömmlichen Theorien immer wieder gefordert wird („dunkle Materie“). Überwiegend die Zentrifugal- und Corioliskräfte bestimmen jetzt das Geschehen. (Trotz des Ruhens von m im Inertialsystem existiert eine Relativgeschwindigkeit zwischen m und M .)

Wird k kleiner als Null, d.h. nimmt k negative Werte an, weil die Winkelgeschwindigkeiten der rotierenden Massen entgegengesetzt gerichtet sind und damit $k = \frac{-\omega_0}{\omega}$ ist, so sind sehr große Corioliskräfte möglich. Für $k = -1$ bei betragsmäßig gleichen Winkelgeschwindigkeiten beträgt

$$F_C = 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot (1 - k) \cdot r$$

$$F_C = 2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot (1 - (-1)) \cdot r$$

$$F_C = 4 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot r,$$

d.h. die zum Zentrum hin gerichtete Corioliskraft ist bereits viermal größer als die nach außen gerichtete Zentrifugalkraft. Ein Beobachter im Inertialsystem kann den Eindruck gewinnen, als seien hier enorme Gravitationsmassen im Zentrum konzentriert, die das Phänomen verursachen. Mit solch enormen Kräften werden möglicherweise kosmische Prozesse erklärbar, die bislang nur mit hoch spekulativen Annahmen plausibel gemacht werden konnten. Das Phänomen der gegenläufigen Rotation wird vor allem in Galaxienkernen beobachtet.

Die oben angestellten Betrachtungen für die Einzelmasse m (z. B. Sonnenumlauf in unserer Galaxis) lassen sich auf ganze Systeme von Massen übertragen. Eine Spiralgalaxie kann in Bereiche gleicher Winkelgeschwindigkeiten eingeteilt werden (Abb. 5). Bei konstanter Bahngeschwindigkeit für alle Massen muss die Winkelgeschwindigkeit von innen nach außen umgekehrt proportional zum Radius abnehmen. Die im äußersten Ring rotierenden Massen

laufen langsamer als die benachbarten, so dass eine radial zum Zentrum hin gerichtete Corioliskraft wirksam wird. Da das von außen nach innen für alle Bereiche gleichermaßen zutrifft, wird weniger Gravitationskraft zum Ausgleich der Zentrifugalkräfte benötigt als nach dem Gravitationsgesetz erwartet.

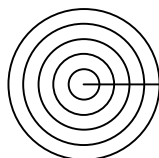


Abb. 5

3. Die vollständige Bewegungsgleichung

Zur Beschreibung der Bewegung einer Masse im rotierenden System ist die newtonsche Bewegungsgleichung in der bislang verwendeten Form

$$0 = F_R + F_Z$$

offensichtlich unzureichend. Das führte zu theoretischen Konstruktionen, die keinerlei Bezug mehr zu experimentell gesicherten Daten haben: Die postulierte dunkle Materie lässt sich einfach nicht nachweisen.

Die vollständige Bewegungsgleichung, die dunkle Materie überflüssig werden lässt, lautet allgemein:

$$0 = F_R + F_Z + F_C + F_B$$

Hierin sind die Richtungen der Kräfte, d. h. ihre Vorzeichen zu beachten:

Zählen wir die nach innen gerichtete Radialkraft F_R (Gravitationskraft) negativ, so ist die entgegen gerichtete Zentrifugalkraft F_Z positiv zu rechnen. Die Corioliskraft F_C ist nur für den Fall negativ und verstärkt scheinbar die Gravitationswirkung, wenn die Winkelgeschwindigkeit des umlaufenden Körpers geringer ist als die mittlere Rotationsgeschwindigkeit ω der Scheibenmasse.

Bislang unberücksichtigt blieb eine Kraft F_B , die immer dann als Trägheitskraft wirkt, wenn die Masse m ihre Winkelgeschwindigkeit zeitlich ändert. Eine positive Beschleunigung hat eine nach außen gerichtete Kraft zur Folge und ist deshalb positiv zu rechnen. Eine negative Beschleunigung aber, die ja einem Bremsvorgang entspricht, führt zu einer negativ zu rechnenden Kraft, die zum Zentrum der Rotation hin wirkt. (Testteilchen in einer rotierenden Flüssigkeit werden bei Verlangsamung der Rotation auf einer Spiralbahn zum Zentrum gezogen, ohne dass dort eine Gravitationsmasse oder gar dunkle Materie die Wirkung verursacht.) Um ein Galaxienzentrum rotierende Objekte verlieren einerseits Energie durch Reibung, verringern ihre Winkelge-

schwindigkeit und werden damit zusätzlich zur Gravitations- und Corioliskraft mit der Kraft F_B zum Zentrum hin beschleunigt. Dabei erhöht sich die Winkelgeschwindigkeit wieder und eine positive Beschleunigung bewirkt eine nach außen wirkende Kraft F_B , so dass sich das System zu stabilisieren vermag.

Unter Berücksichtigung der Vorzeichen und der tatsächlich beobachteten Verhältnisse in Spiralgalaxien bzw. in Galaxienhaufen gilt die Bewegungsgleichung:

$$0 = -F_R + F_Z - F_C - F_B$$

Man beachte, dass der nach außen wirkenden Zentrifugalkraft F_Z gleich drei entgegengesetzt zum Zentrum hin wirkende Kräfte entgegenwirken können, und es bleibt künftiger Forschung vorbehalten, deren Zusammenspiel im einzelnen zu untersuchen.

4. Schlussfolgerungen

Ohne detaillierter Forschung vorgreifen zu wollen, bieten sich folgende Schlussfolgerungen an:

1. Das Problem der dunklen Materie entsteht beim Übergang von einem Inertialsystem in ein Nichtinertialsystem, wenn die Corioliskraft F_C bzw. die Kraft F_B (infolge zeitlicher Änderung der Winkelgeschwindigkeiten) als Trägheits- bzw. Scheinkräfte nicht berücksichtigt werden. Die Vorstellung, es existiere dunkle Materie als Gravitation ausübende Masse, erübrigt sich damit und kann nicht aufrecht erhalten werden.
2. Die Gravitationskraft als einzige wesentliche Kraft zur Erklärung des Zusammenhalts kosmischer Strukturen reicht nicht aus. Die Berücksichtigung der Trägheitskräfte, insbesondere der Corioliskraft, ist nicht einfach eine Ergänzung bzw. Korrektur bisheriger Rechnungen, sondern es tritt ein neues Prinzip neben das bereits bekannte. Die Corioliskraft und die Kraft F_B können ein breites Spektrum an Wirkungsmöglichkeiten entfalten und sind an zeitlich bestimmte Bewegungsabläufe gebunden. Sie sind in erster Linie mit Rotationsenergie verknüpft, während Gravitation vor allem an Massen gebunden ist.
3. Herkömmliche Kosmologien modellieren den Kosmos als eine Art ideales Gas mit endlichem Volumen, dessen Dynamik hauptsächlich durch (hypothetische) Expansionsprozesse bestimmt wird. Die Beobachtungen zeigen aber, dass auf fast allen Skalen Rotation stattfindet, so dass auf bewegte Massen in solch rotierenden Systemen notwendig Trägheitskräfte wirken müssen. Neben der Zentrifugalkraft ist das die bislang kaum berücksichtigte Corioliskraft und eine auf zeitlicher Änderung der Winkelgeschwindigkeit basierende Kraft F_B , für die es noch

nicht einmal einen gebräuchlichen Namen gibt. Das hat Konsequenzen für jene Weltmodelle, die bereits mit bis zu 97% dunkler Materie bzw. Energie rechnen. Der Kosmos ist nicht statisch, aber er ist nicht (ausschließlich) dynamisch im Sinne von Expansion, sondern von Rotation bzw. jeder denkbaren krummlinigen (also beschleunigten) Bewegung. Der Kosmos kommt mit sehr viel geringeren Massen als den postulierten aus, weil neben der Gravitation auch Trägheitskräfte für die Stabilität der Strukturen wirksam sind.

4. Es eröffnet sich die Möglichkeit, auch andere bislang rätselhafte Phänomene daraufhin zu untersuchen, inwiefern Corioliskräfte bzw. F_B eine Erklärung liefern können. Insbesondere jene gigantischen „Massemonster“ mit millionen- oder gar milliardenfacher Sonnenmasse – die schwarzen Löcher – könnten sich als wesentlich harmloser erweisen als bisher angenommen. Aus den Bewegungen umlaufender Sterne um das Zentrum unserer Galaxis schließt man auf etwa drei Millionen Sonnenmassen in einem Gebiet mit dem zehnfachen Sonnenradius. Da aber dieser Galaxienkern von zwei gegenläufig rotierenden Materiescheiben geprägt ist, wirken auch hier mit Sicherheit Corioliskräfte auf die Einzelmassen in diesem Gebiet. Die Gegenläufigkeit der rotierenden Massen erhöht deren Relativgeschwindigkeit zueinander, so dass mit einer großen Corioliskraft zu rechnen ist. Erste grobe Abschätzungen lassen vermuten, dass die Gravitationskraft der beobachteten eine Million Sonnenmassen im Galaxienkern plus die Corioliskraft ausreichen, um die Phänomene zu erklären, die bislang der Wirkung eines schwarzen Loches zugeschrieben wurden. (Angenommen die beiden gegenläufigen Winkelgeschwindigkeiten seien betragsmäßig gleich und unterscheiden sich also nur im Vorzeichen, so wäre ihr Verhältnis $k = -1$. In (2) eingesetzt ergäbe sich eine in Richtung Zentrum wirkende Corioliskraft, die dem Vierfachen der nach außen gerichteten Zentrifugalkraft entspräche, d.h. die eine Million Sonnenmassen reichen als Gravitationskraft aus. Die „fehlenden“ drei Millionen Sonnenmassen werden durch die Corioliskraft mehr als ausgeglichen, es blieben sogar noch Kräfte übrig, die zur Kompression des Materials und damit zur Sternbildung im Kernbereich beitragen könnten.)
5. Die Strukturbildung im Kosmos geht bisher von Gravitationsinstabilitäten aus, also vom Kollaps etwas dichter Gebiete gegenüber der Umgebung. Für diese Hypothese sind zwei spekulative Grundannahmen notwendig:
 1. Der Kosmos entstand in einem Urknall, wobei das kosmische Urgas bereits geringste Dichteschwankungen aufwies.
 2. Das Universum besteht überwiegend aus dunkler Materie, da sonst die Gravitation nicht ausreichen würde, um den Kollaps auszulösen. Betrachten wir dagegen den Kosmos als unendlich ausgedehnte Regi-

on, in der sich die Materie auf allen Skalen in Rotation (bzw. in turbulenter Bewegung) befindet, so lässt sich Strukturbildung wie folgt beschreiben:

Sobald Materie auf niedriger Organisationsstufe (z.B. eine Gaswolke) rotiert, bilden sich in ausgedehnten Gebieten immer Unterschiede in den Winkelgeschwindigkeiten heraus. Damit ist die Voraussetzung zum Wirken von Trägheitskräften in Form der Corioliskraft bzw. F_n gegeben. Ihre Wirkungen hin zum Zentrum kann einen Materietransport in Gang setzen, der zu Verdichtungsprozessen führt. Dabei wächst die Dichte auf den Transportwegen (Spiralarmen) und im Kerngebiet. Damit ist eine wichtige Voraussetzung für Strukturbildung gegeben.

5. Ausblick

„Die Grundannahme jeder Kosmologie ist die folgende: *Die Bewegung der Materie wird im wesentlichen durch das Gravitationsfeld bestimmt.* Man erwartet also zu jeder Gravitationstheorie eine entsprechende Kosmologie. Die auf der Newtonschen Gravitationstheorie basierende Kosmologie enthält ernste Widersprüche. Ein wirklicher Fortschritt beim Aufbau einer wissenschaftlichen Kosmologie gelang erst nach Schaffung der allgemein-relativistischen Gravitationstheorie.“ [4]

Diese so oder ähnlich in der einschlägigen Literatur anzutreffende Formulierung einer etablierten Grundüberzeugung macht die Grenzen aller bisherigen Kosmologien deutlich: Man ist noch immer im Wesentlichen bei Newton stehen geblieben, obwohl dieser nicht einmal Galaxien bzw. Galaxienhaufen als differentiell rotierende Massen gekannt, geschweige denn untersucht hatte.

Doch auch die allgemein-relativistische Gravitationstheorie Einsteins blieb bei der Voraussetzung, die Gravitation sei der alleinige Schlüssel zur Erklärung des Universums. Wenn man als „wirklichen Fortschritt“ die Erklärung der Periheldrehung der Planeten, die Lichtablenkung an Massen und anderer eher kleineren Effekte bejubelt, so sollte man auch immer die höchst spekulativen Zusatzannahmen dagegen halten, die für den „Erfolg“ der Theorie erfunden werden mussten und die sich jeder empirischen Nachweisbarkeit bislang entzogen haben.

Solange allein die Gravitation als wesentliche kosmische Kraft in die Modelle eingeht (gegen jede heutige, über Newton hinausgehende Erfahrung), muss man dunkle Materie, dunkle Energie und andere dunkle Parameter einführen, damit die Alleinherrschaft der Gravitation gesichert bleibt. Sobald man aber sämtliche in einem rotierenden System wirkenden Trägheitskräfte berücksichtigt, sobald man also die Gravitationstheorien um eben jene Trägheitskräfte ergänzt, werden all die dunklen Spekulationen gegenstandslos.

Literatur (Anhang):

- [1] Recknagel, Physik Mechanik, Berlin 1958
- [2] H.-J. Kull, Theoretische Physik: Mechanik WS 02/03
- [3] Klein, Józsa, Kenn, Oosterloo, Galaxien und Dunkle Materie:
neue Sichtweisen, in: Sterne und Weltraum, September 2005
- [4] Physik, Brockhaus Leipzig 1988
- [5] Harrison, Kosmologie, Darmstädter Blätter 1990
- [6] Lawrence M. Krauss, Schwarze Materie, Insel Verlag 1995

