

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 48 (1990)
Heft: 239

Artikel: Die Rolle der Balken in der Entwicklung der Galaxien = Le rôle des barres dans l'évolution des galaxies
Autor: Pfenniger, Daniel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898888>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Rolle der Balken in der Entwicklung der Galaxien

Daniel PFENNIGER

1. Artenvielfalt der Galaxien

Über kosmologische Entfernungen (cirka zehn Milliarden Lichtjahre) verteilt sich die Materie auf folgende, der Grösse nach sortierten Strukturen :

1) Haufen von Galaxienhaufen (cirka hundert Millionen Lichtjahre), 2) Galaxienhaufen (zehn Millionen Lichtjahre), 3) Galaxien (hundert Tausende Lichtjahre).

Je grösser diese Strukturen sind, desto ungenauer und diffuser ist ihre Form. Je kompakter sie dagegen sind, desto genauer sind sie gegen ihre Umgebung abgegrenzt und desto vergleichbarer sind sie untereinander. Auf kosmologischen Entfernungen ist die Materie also gleichmässiger im Raum verteilt, während auf kleinerem Maßstab die Galaxien eine relativ homogene Gruppe dichter Objekte mit vergleichbaren Eigenschaften bilden. Diese Ähnlichkeiten erlauben eine Klassifizierung der Galaxien in verschiedene Typen, wobei die drei Haupttypen die Scheibengalaxien (Typ S), die elliptischen Galaxien (Typ E) und die unregelmässigen Galaxien (Typ I) sind. Ausserdem unterscheidet man noch die elliptischen Zwerg- und Riesengalaxien (Typ dE und cD), die von besonderer Natur und vermutlich von den normalen elliptischen Galaxien zu unterscheiden sind.

Die Scheibengalaxien, die häufig auch Spiralgalaxien genannt werden, obwohl sie nicht immer Spiralarme enthalten, kommen am häufigsten vor, die unregelmässigen Galaxien sind am seltensten. Grundsätzlich verdanken die Scheibengalaxien ihre mehr oder weniger perfekte Rotationssymmetrie der grossen Rotationsgeschwindigkeit und ihre diskusförmige Abflachung der Energiedissipation. Die schnelle Rotation ist ein Zeichen, dass der Drehimpuls¹ der ursprünglich ausgedehnten protogalaktischen Wolke bei ihrer Kontraktion weitgehend erhalten blieb. Das heisst also, dass die für die Kontraktion des Urnebels nötige Energie-Dissipation alle vorhandenen Energien ausser der Rotationsenergie betreffen muss und dass die Rotationsenergie im Verhältnis zu den anderen immer überwiegender wird.

Man nimmt an, dass die Scheibengalaxien seit ihrer Entstehung so gut wie ungestört blieben. Im Gegensatz dazu gibt es immer mehr Anzeichen dafür, dass die elliptischen Galaxien das Ergebnis eines oder mehrerer heftiger Ereignisse sein müssen, wie zum Beispiel der Zusammenstoss oder die Verschmelzung von zwei Galaxien. Das Endergebnis ist immer eine ellipsoide, sich langsam drehende Menge von Sternen. Das Studium der Entstehung und Entwicklung der elliptischen Galaxien kann uns also nur über zufällige, verbindungslose Ereignisse Auskunft geben und uns ganz wenig

¹ Die Rotation eines Objektes kann man durch eine Grösse charakterisieren, die man Drehimpuls nennt. Das ist das Produkt aus dem Ausmass des Objektes und der Rotationsgeschwindigkeit. In einem System, auf das keine äusseren Kräfte einwirken, bleibt der Drehimpuls erhalten. Wenn also eine Schlittschuhläuferin ihre Ausmasse reduziert, indem sie ihre Arme oder Beine enger an den Körper anlegt, nimmt ihre Drehgeschwindigkeit zu, solange die Reibung vernachlässigbar bleibt.

Le rôle des barres dans l'évolution des galaxies

Daniel PFENNIGER

1. La diversité des galaxies

Sur les distances cosmologiques (des dizaines de milliards d'année-lumière), la matière est fragmentée de manière hiérarchique en structures de différentes tailles, des amas d'amas de galaxies (centaines de millions d'année-lumière), aux amas de galaxies (dizaines de millions d'année-lumière), aux galaxies (centaines de milliers d'année-lumière). Plus ces structures sont grandes, plus leur forme est disparate et diffuse, alors que plus elles sont compactes, plus elles se démarquent de leur environnement et plus leurs propriétés ont des points communs entre elles. Ainsi, aux distances cosmologiques la matière tend peu à peu à rendre l'Univers uniforme, alors qu'aux plus petites échelles, les plus petites de ces structures, les galaxies, forment une groupe relativement homogène d'objets denses partageant des propriétés similaires. Ces similarités permettent la classification des galaxies en différents types morphologiques, les trois principaux types étant les galaxies disques (type S), les galaxies elliptiques (type E) et les galaxies irrégulières (type I). Signalons aussi l'existence de galaxies elliptiques naines (dE) et géantes (cD), qui sont de nature particulière et probablement à distinguer des elliptiques normales.

Les galaxies disques, aussi appelées fréquemment galaxies spirales, bien que toutes ne possèdent pas de bras spiraux, sont les plus nombreuses, les galaxies irrégulières les plus rares. Fondamentalement, les galaxies disques doivent leur symétrie de révolution plus ou moins parfaite à une rotation rapide, leur aspect de galettes aplaties à la dissipation d'énergie. La rotation rapide reflète le fait que le moment cinétique¹ du nuage étendu initial de gaz a de la peine à être évacué au cours de son effondrement. Ainsi, la dissipation d'énergie, nécessaire au effondrement du nuage, va se dérouler de telle façon à préserver, parmi les différentes sortes d'énergie en présence, celle qui permet au moment cinétique de se conserver au mieux. Cette forme d'énergie est l'énergie cinétique de rotation. Au fur et à mesure que l'énergie se dissipe, "s'évapore", par divers processus compliqués, l'énergie associée à la rotation, au moment cinétique, devient prépondérante.

On pense que depuis leur formation, les galaxies disques n'ont pas été trop perturbées. Au contraire, de plus en plus de faits concordants montrent que les galaxies elliptiques résultent d'un ou plusieurs événements violents, tels que la collision et la fusion de deux ou plusieurs galaxies, le produit final de ces mélanges étant toujours une ensemble d'étoiles à peu près ellipsoïdal et tournant lentement. Ainsi, l'étude de la formation et de l'évolution des galaxies elliptiques nous

¹ Le moment cinétique exprime la quantité de rotation d'un corps. C'est le produit de la dimension du corps par sa vitesse de rotation. Pour un corps isolé, cette quantité se conserve. Ainsi, une patineuse qui contracte ses dimensions (en repliant bras et jambes) augmente sa vitesse de rotation aussi longtemps que la friction reste négligeable.

über die ursprünglichen Galaxien berichten. Ihre Vergangenheit ist für immer hinter dem aus jüngeren Ereignissen resultierenden Chaos versteckt. Weil hingegen die Entwicklung der Scheibengalaxien ruhiger verlaufen ist, verspricht das Studium ihrer Struktur, uns eher Auskünfte über die Ursprünge sämtlicher Galaxien zu geben. Zuerst ist es aber nötig, die spezifische Rolle der Sterne und des interstellaren Gases, der zwei Hauptkomponenten der Galaxien, im Laufe einer ruhigen, idealen, ungestörten Entwicklung einer galaktischen Scheibe zu verstehen.

Man kann die Scheibengalaxien in verschiedene Untergruppen (S0, Sa, Sc, Sd) aufteilen, wobei hauptsächlich bemerkt werden kann, dass die Galaxien mit weniger interstellarem Gas (S0, Sa) eine grössere kugelförmige, zentrale Verdichtung von Sternen aufweisen, die man "Bulge-Komponente" (Aufbauchung) bezeichnet. Der genaue Ursprung dieser Bulge-Komponente ist bis jetzt noch umstritten. Ein Grossteil der Scheibengalaxien weist ausserdem eine besondere Struktur auf, die eine längliche, zeitweise sogar erstaunlich geradlinige Form besitzt. Man nennt diese Struktur einen zentralen Balken und die

rengleiche sur des événements fortuits et disparates, mais très peu sur l'état des galaxies primordiales ; leur lointain passé est à jamais caché derrière le chaos engendré par les processus de fusion plus récents. Au contraire, puisque l'histoire des galaxies disques a été plus tranquille, la compréhension de leur structure est plus prometteuse de nous dévoiler des faits concernant l'origine première de toutes les galaxies. Mais auparavant, il est nécessaire de bien comprendre le rôle spécifique des étoiles et du gaz, les deux composantes principales des galaxies, au cours de l'évolution idéalement tranquille et non perturbée d'un disque.

On peut classifier les galaxies disques en sous-groupes (S0, Sa, Sb, Sc, Sd), qui traduisent essentiellement le fait que les galaxies contenant une fraction plus petite de gaz (S0, Sa) ont aussi une plus grande concentration centrale de forme sphéroïdale d'étoiles, appelée le bulbe. L'origine exacte de ces bulbes centraux est encore peu claire et sujette à discussion. D'autre part, une fraction importante des galaxies disques présente une caractéristique majeure, qui a semblé étrange pendant de nombreuses années, à savoir une structure allongée, parfois remarquablement rectiligne, appelée une barre.

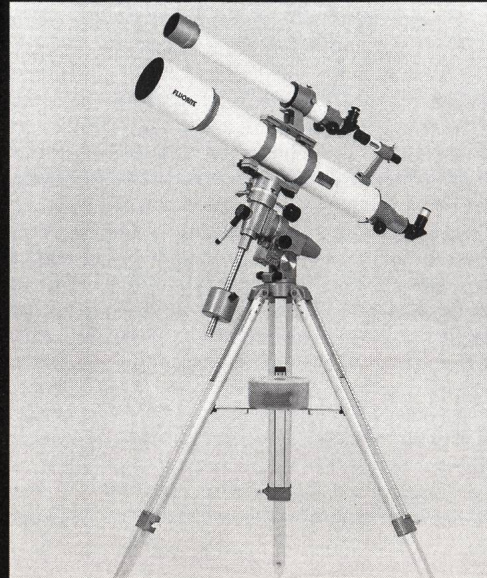
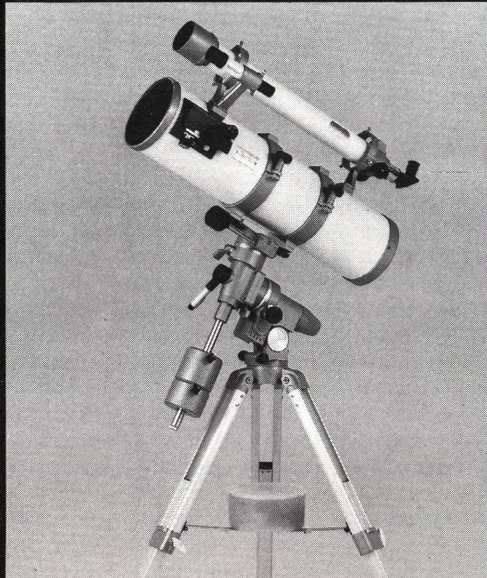
Fig. 1: Eine Galaxie (NGC 7479), die gerade einen Balken ausbildet. Der Balken ist der zentrale Teil zwischen den Spiralarmen. Er ist jung, denn einerseits rollen sich die Spiralarme innerhalb weniger galaktischen Rotationen ein, und andererseits evakuiert der Balken das Gas, dessen Anwesenheit man durch die dunklen Staub-Streifen erkennt (Abb.: NASA).

Fig.1: Une galaxie (NGC 7479) en train de former une barre. La barre est la partie centrale reliant les bras spiraux. La barre est récente, car d'une part les bras spiraux s'enroulent en quelques rotations galactiques, et d'autre part la barre évacue le gaz, dont on aperçoit la présence par des bandes obscures de poussières qui proviennent d'ondes de chocs dans le gaz (Photo NASA).



Vixen

**Refraktoren
Newton-Reflektoren
Feldstecher**



Newton-Reflektoren

VIXEN New Polaris	100/ 800	f = 8
	114/ 900	f = 7,9
VIXEN Super Polaris	100/1000	f = 10
	130/ 720	f = 5,5
	150/ 750	f = 5

Refraktoren

VIXEN Super Polaris	80/ 910	f = 11,4
	90/1300	f = 14,4
	102/1000	f = 10
Fluorit-Apochromate	80/ 640	f = 8
	90/ 810	f = 9
	102/ 900	f = 9

VIXEN Super Polaris: Vielseitige parallaktische Montierung, einfach in der Handhabung. Besticht durch ihre hohe Stabilität und Vibrationsfreiheit. Justage dauert weniger als 5 Minuten. Kann mit Nachführmotoren in Rektaszension und Deklination, sowie einem Computer zum auffinden der Objekte nachgerüstet werden.

Erhältliches Zubehör: Okulare, Digitale Teilkreise, Kamera-Adapter, Nachführmotoren, Super Polaris Mini-Reisemontierung (sehr leicht und kompakt), etc.

VIXEN Astro-Feldstecher

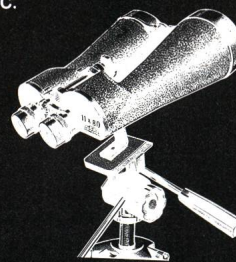
Ideal um sich am Himmel zu orientieren. Entdecken Sie leuchtende Gasnebel, Sternhaufen und Doppelsterne! Aussergewöhnliches Gesichtsfeld, licht- und leistungsstark.

8x56 / 10x70 / 11x80 / 14x80 / 20x80 / 30x80

14x100 / 20x100 / 25x100

25x125 / 25x125 45° Schrägeinblick

Ausführliche Unterlagen erhalten
Sie bei der Generalvertretung



proastro

P. WYSS PHOTO-VIDEO EN GROS

Dufourstr. 124 · 8034 Zurich · Tel. 01 383 01 08 · Fax 01 383 00 94

Balkengalaxien dementsprechend SB0, SBA usw. Der Balken unterbricht die Rotationssymmetrie im Zentrum der Scheibe. Heutzutage weiss man, dass ein Balken kein solides Objekt ist, sondern eine längliche Konzentration leuchtender Materie, hauptsächlich bestehend aus Sternen in Bewegung. Ein Balken erstreckt sich typischerweise über 20 bis 30'000 Lichtjahre und ist Teil einer galaktischen Scheibe grösseren Durchmessers. Er dreht sich schnell in der galaktischen Ebene, wobei die hohe Geschwindigkeit eine grosse Zentrifugal- und Corioliskraft² bewirkt. In den Balken sind diese beiden Kräfte vergleichbar mit der Gravitationskraft, die die ganze Galaxie zusammenhält. Bei der Untersuchung der Balken muss man also all diese Kräfte in Betracht ziehen.

Häufig sind die Balken eine so starke gravitationelle Störung für die galaktische Scheibe, dass sie an ihren beiden Extremitäten in einer Art Dichtewelle zwei typische, symmetrische Spiralarme hervorrufen (Fig. 1). Heute gilt es als sicher, dass die Spiralarme nur ein vorübergehendes Phänomen in der Entwicklungsgeschichte eines Balkens sind. Die Existenzdauer der Spiralarme liegt in der Grössenordnung von einigen hundert Millionen Jahren, ist also wesentlich kürzer als das mittlere Galaxienalter von etwa zehn Milliarden Jahren. Die Balken scheinen dagegen einige Milliarden Jahre lang zu existieren.

Neben ihrer starken dynamischen Wirkung sind die Balken noch wegen ihres häufigen Vorkommens in den Scheibengalaxien bemerkenswert. In mindestens zwei Dritteln kann man einen Balken oder eine ovale Form erkennen. Ausserdem enthält ein noch ungenau bekannter Teil des letzten Drittels auch Balken, deren sichtbares Licht durch Gas- oder Staubwolken absorbiert wird, und die im Laufe der letzten Jahre erst durch Messungen im roten und infraroten Bereich entdeckt wurden. Schliesslich gibt es auch noch weitere Balken, die wegen des Projektionswinkels der galaktischen Scheibe, die von der Seite gesehen wird, nicht auszumachen sind. Zum Beispiel berechtigen gewisse Zeichen die Annahme, dass unsere Galaxis, die Milchstrasse, ein seriöser Kandidat für den SB-Status ist. Leider macht unsere Situation in der Nähe der Symmetrieebene der Milchstrasse es so gut wie unmöglich, die genauen Ausmasse dieses Balkens festzustellen. Dementsprechend scheinen die beiden Magellan'schen Wolken, zwei Satelliten-Galaxien der Milchstrasse, auch mit Balken versehen zu sein.

Im Laufe ihrer Entwicklung haben also die Scheibengalaxien eine grosse Wahrscheinlichkeit, mindestens einmal eine Balkenstruktur aufzuweisen. Da stellen sich die Fragen, warum die Natur diesen unsymmetrischen Zustand anscheinend bevorzugt und wie ein Balken beständiger als ein perfekter Diskus sein kann. Eine genaue Antwort auf diese Fragen fehlt bis jetzt noch, wir werden aber im Folgenden versuchen, die im Laufe der letzten Jahre gewonnenen Erkenntnisse zu erläutern.

2. Sternbewegungen in den Balken

Die einzigen austauschbaren und somit für die Dynamik der Galaxien interessanten Energien sind die Gravitations- und die kinetische Energie der Sterne. Alle anderen Energieformen wie die Energie der kosmischen Strahlung und die der

On note ces galaxies SB0, SBA, etc. Ces barres ainsi brisent la symétrie de révolution des régions centrales des disques. On sait actuellement qu'une barre n'est pas un objet solide, comme le nom le suggère, mais est une distribution allongée de matière lumineuse, principalement composée d'étoiles en mouvement, et s'étendant typiquement sur 20 à 30'000 année-lumière, toujours plongée à l'intérieur d'un disque galactique plus vaste. Elle tourne dans le plan du disque à une grande vitesse, grand signifiant que les forces associées à la rotation, la force centrifuge et la force de Coriolis² ne peuvent être négligées. Dans une barre, ces deux forces sont comparables à la force d'attraction gravitationnelle retenant l'ensemble de la galaxie. Donc la compréhension des barres doit tenir compte de toutes ces forces.

Il arrive fréquemment que les barres soient des perturbations gravitationnelles des disques assez fortes pour induire deux bras spiraux typiques, parfois bien symétriques, partant à leurs extrémités (Fig.1). On reconnaît actuellement que les bras spiraux sont des phénomènes bien plus éphémères que les barres. La durée de vie des bras spiraux, sortes d'ondes de densité, est de l'ordre de quelques centaines de millions d'années, bien plus bref que l'âge des galaxies, typiquement de l'ordre de 10 milliards d'années, alors que les barres semblent durer plusieurs milliards d'années.

A part leur effet dynamique puissant, l'importance des barres tient aussi dans leurs fréquentes apparitions parmi les galaxies disques. Dans au moins deux tiers de celles-ci, on détecte directement une barre ou une déformation ovale. De plus, une partie encore mal établie du tiers restant contient des barres supplémentaires cachées en lumière ordinaire par de la poussière et du gaz, et qui ont été révélées ces dernières années particulièrement par des observations dans les lumières rouge et infrarouge. Enfin, certaines barres sont invisibles simplement à cause de l'angle de projection du disque, vu trop par la tranche. Par exemple, des indices laissent penser que notre propre Voie Lactée est un candidat sérieux au statut SB, mais notre situation dans le plan galactique rend l'importance exacte de cette barre très difficile à établir. De façon analogue, les deux nuages de Magellan, de petites galaxies satellites de la nôtre, seraient aussi barrés.

Au cours de leur évolution, les disques ont donc une grande probabilité d'être affectés au moins une fois par une barre. Pourquoi la nature préfère-t-elle si souvent un état apparemment moins symétrique que les disques, et comment les barres peuvent-elles être stables et plus robustes que les disques ? Des réponses complètes manquent encore, mais nous tenterons dans la suite de résumer les connaissances acquises sur les barres ces dernières années.

2. Le mouvement des étoiles dans les barres

Les sortes d'énergie susceptibles d'être échangées, de jouer un rôle dans la dynamique des galaxies consistent surtout d'énergie gravitationnelle et d'énergie cinétique des étoiles. Les autres formes d'énergies, telles que l'énergie des rayons cosmiques, les différentes sortes de radiations, la chaleur du gaz, etc., sont toutes en bien plus petite quantité par un bon ordre de grandeur. Ainsi, en première approximation, les galaxies peuvent être schématisées comme consistant purement

² In einem rotierenden System ist die Corioliskraft eine senkrecht zur Bewegung stehende Kraft. Sie steht z.B. auf der rotierenden Erde senkrecht zur Windrichtung und bewirkt so die grossen atmosphärischen Wirbel, die Zyklone.

² La force de Coriolis est une force transverse au mouvement qui se manifeste dans tout système tournant. Par exemple, la force de Coriolis due à la rotation de la Terre sur elle-même produit les grands tourbillons atmosphériques tels que les cyclones.

Fig. 2: Beispiele für die Bahntypen in den Balken. Von oben nach unten: periodische, quasi-periodische, chaotische Bahn.

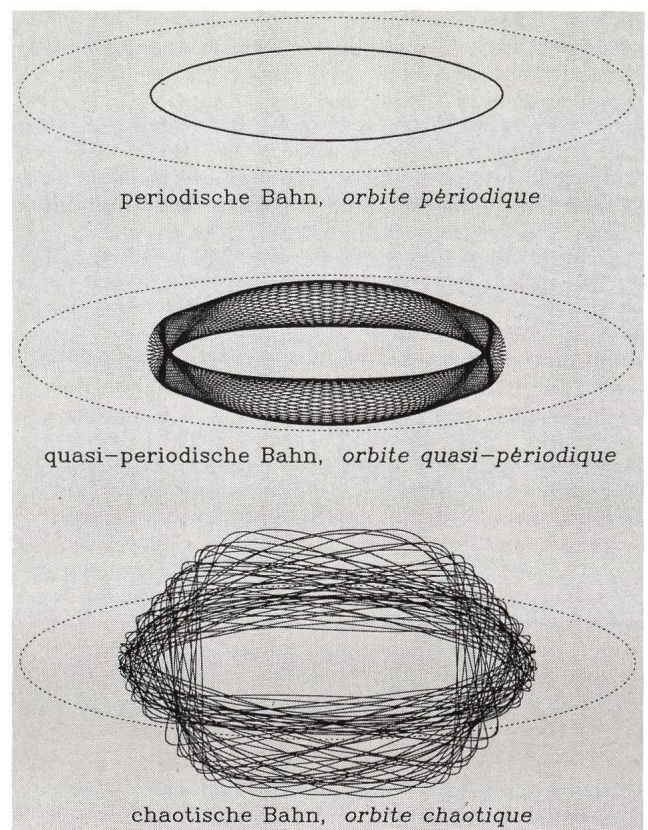
Fig. 2: Exemples des types d'orbites possibles dans les barres. De haut en bas, orbites périodique, quasi-périodique et chaotique.

verschiedenen Radiationen, die Temperatur des Gases usw. sind im Verhältnis dazu vernachlässigbar. In erster Approximation kann man also eine Galaxie als eine Ansammlung von Massenpunkten betrachten, die gemäss den Gesetzen der klassischen Mechanik und der Newton'schen Gravitation miteinander wechselwirken. Es handelt sich dabei um ein klassisches N-Körper-Problem, mit ungefähr $N=200$ Milliarden Körpern. In der Tat haben die modernsten, stärksten Computer schon Schwierigkeiten, das Problem genau zu berechnen, sobald die Zahl der Körper einige Tausend überschreitet. Es ist aber einleuchtend, dass genau wie bei den Molekülen eines Gases nicht die Bewegung aller einzelnen Körper in der Galaxie für das Verständnis der fundamentalen Gesamtstruktur nötig ist. Eine weitere Vereinfachung bietet sich also an.

Im Gegensatz zu den Molekülen sind die Radien der Sterne im Vergleich zu ihren gegenseitigen Abständen stets so klein, dass es während der Dauer einiger Galaxierotationen so gut wie zu keinen Stössen oder massgeblichen Einzelablenkungen kommt. Nebenbei gesagt, diese geringe Dichte an Sternen und der grosse leere Zwischenraum sind Bedingungen für eine ungestörte Entwicklung des Lebens im Sonnensystem; die Erdumlaufbahn, die mehr als 4 Milliarden Jahre lang beinahe kreisförmig geblieben ist, konnte nur so eine beständige Temperatur und Sonneneinstrahlung bieten. Ebenso können die meisten Sterne etliche Male um das Zentrum der Galaxie laufen, bevor die störenden Begegnungen mit anderen Sternen eine messbare Wirkung auf ihre Bahn haben. Die Bewegung des Einzelsterns wird eher durch das Gravitationsfeld beherrscht, das von der Gesamtheit aller Sterne der Galaxie ausgeht. Diese Art von "stossfreiem" und reibungslosem System bietet eine erhebliche Vereinfachung für das N-Körper-Problem. Anstatt die Bewegungen sämtlicher Körper gleichzeitig berechnen zu müssen, reicht es aus, die vorhandene Masse als gleichmässig in der Galaxie verteilt anzusehen und dementsprechend die möglichen Sternbewegungen zu berechnen. Diese Sternbahnen ähneln nicht den Planetenbahnen im Sonnensystem, die mehr oder weniger längliche Ellipsen sind, sondern ihre Form wird unmittelbar von der Form der Galaxie bestimmt.

Grundsätzlich unterscheidet man drei Haupt-Bahntypen: 1) *periodische* Bahnen, auf denen der Stern periodisch an seinen Ausgangspunkt zurückkommt; sie sind selten aber wichtig, weil sie den 2) *quasi-periodischen* Bahnen ihre Form geben. Letztere oszillieren um gewisse periodische Bahnen und können für die Form der Galaxie verantwortlich sein. 3) Die *chaotischen* Bahnen, ohne jede Regelmässigkeit, sind sehr instabil. Ihre Bewegung ist über einen längeren Zeitraum hinweg unvorhersehbar, weil die kleinste Ungenauigkeit oder vernachlässigte Störung schnell verstärkt wird. In einem Balken existieren alle drei Bahntypen nebeneinander, wie man dem Beispiel Fig. 2 entnehmen kann.

Für das Verständnis der internen Mechanik der Galaxien ist die Form der Bahnen also entscheidend. Eine beliebige Form der Galaxie ist nur möglich, wenn von allen potentiellen Bahnen mindestens einige mit ihr übereinstimmen. Genauer gesagt, die Überlagerung einiger Bahnen muss die Form der



d'un ensemble d'étoiles, interagissant par la seule force de gravitation newtonienne. C'est un problème classique de N corps, N étant de l'ordre de 100 milliards. Avec un tel nombre de corps, il est exclu d'entreprendre des calculs directement, même avec les plus gros ordinateurs. En fait, même les machines actuelles les plus puissantes ont déjà de la peine à calculer précisément ce problème dès que le nombre de corps excède quelques milliers. Mais on s'imagine bien que, telles les molécules dans un gaz, le nombre exact de corps constituant une galaxie n'est pas essentiel à la compréhension de sa structure fondamentale. Une simplification supplémentaire est opportune.

Contrairement aux molécules d'un gaz ordinaire, le rapport entre la taille des étoiles et leurs distances mutuelles est si grand, que des collisions, ou même des interactions ou rencontres proches entre étoiles déviant leur trajectoire de façon significative sont totalement négligeables sur les échelles de temps de plusieurs rotations galactiques. Entre parenthèses, cette faible densité des étoiles, le vide immense les séparant, sont des conditions nécessaires à un développement paisible de la vie dans le système solaire; l'orbite de la Terre, en restant presque circulaire pendant plus de 4 milliards d'années, a offert des conditions stables de température et d'ensoleillement. Ainsi, la grande majorité des étoiles peut décrire de nombreuses révolutions autour du centre de la galaxie avant que les rencontres perturbatrices avec d'autres étoiles n'aient un effet significatif. Les étoiles interagissent principalement avec la galaxie dans sa globalité. Chaque étoile se déplace à travers la galaxie comme si elle subissait l'attraction d'une distribution continue de matière qu'elle traverserait sans frottement. Ce genre de mouvement, dit sans collision,

Galaxie wiedergeben. Schon seit den zwanziger Jahren ist dies ein klassisches Problem der Astronomie, das ausser für sehr einfache Systeme (Diskus oder Sphäre) erst in den letzten Jahren für Balken- oder elliptische Galaxien mit Computern gelöst werden konnte. Als Beispiel für ein einfaches System, das man ohne Computer konstruieren kann, ist eine extrem abgeflachte Scheibe mit radial willkürlich wechselnder Dichte anzugeben, die allein aus einer Anzahl kreisrunder Bahnen besteht.

3. Entstehung der Balken

Damit ein Modell einer Galaxie realistisch ist, muss es auch "stabil" sein; das heisst, dass eine kleine Änderung des Modells sich nicht spontan verstärken soll, bis das Modell vollkommen abgeändert ist. Nun wurde man sich aber erst in den sechziger Jahren bewusst, dass eine Scheibe aus Sternen auf ausschliesslich kreisförmigen Bahnen instabil ist. Selbst im Gleichgewichtszustand, wenn auf jedem Radius der Scheibe die Anziehungskraft auf jeden Stern genau von der Zentrifugalkraft kompensiert wird, zerfällt diese Scheibe sofort bei der allerkleinsten Störung. Für die Stabilität einer solchen Scheibe dürfen die Sterne sich nicht auf genau kreisrunden Bahnen bewegen, sondern auf leicht abgeflachten Bahnen, die eine Rosette bilden. In diesen Bahnen kann man zwei Drehbewegungen erkennen: eine Kreisbewegung um das Zentrum der Galaxie und eine epizyklische Schwingung entlang der Kreisbahn. Da diese Bahnen nicht periodisch sind, füllen sie mit der Zeit einen Kranz aus. Solange die Breite dieser Kränze einen kritischen Wert überschreitet, bleibt die Galaxie stabil. Dabei drehen sich auf jedem beliebigen Radius der galaktischen Scheibe sämtliche Sterne in die gleiche Richtung, aber dazu hat jeder Stern noch eine radiale Geschwindigkeitskomponente. Die Sonne zum Beispiel dreht sich in etwa 250 Millionen Jahren einmal um die Milchstrasse; dabei schwingt ihre Entfernung zum galaktischen Zentrum zwischen 28'000 und 32'000 Lichtjahren mit einer Periode von 180 Millionen Jahren (Fig. 3). Diese nicht kreisförmige Bewegungskomponente der Sterne entspricht der Temperatur eines Gases und stellt die ungeordnete, unsystematische Bewegungsgrösse der Teilchen dar. Man sagt also, dass eine galaktische Scheibe stabil wird, wenn ihre Sternbahnen "heiss" genug sind.

Es wird im allgemeinen angenommen, dass die Galaxien durch die Kondensation einer ausgedehnten Gaswolke entstehen. Wenn dabei der Drehimpuls weitgehend erhalten bleibt, erhöht sich während der Kontraktion die Rotationsgeschwindigkeit. Demzufolge bewegt sich die Materie auf immer kreisförmigeren Umlaufbahnen, wobei die Scheibe immer abgeflachter und "kälter" wird. Man kann sich also vorstellen, dass die Scheibe ab einem bestimmten Stadium der Kontraktion instabil werden muss. Hingegen ist es schwieriger vorauszusagen, wie sich diese instabile Scheibe weiter entwickeln wird. Seit kurzem weiss man, dass wenn eine sich drehende, selbstgravitierende Scheibe ihren überschüssigen Drehimpuls durch mikroskopische Instabilitäten evakuieren kann, während die Rotations-symmetrie auf einer grösseren Ebene erhalten bleibt, die makroskopische Rotationsgeschwindigkeit allmählich konstant wird. Es handelt sich dabei um eine ganz natürliche und weit verbreitete Eigenschaft. Dieses Merkmal wird in den Scheibengalaxien tatsächlich allgemein beobachtet, besonders in ihrer Peripherie. Eine konstante lineare Geschwindigkeit bewirkt eine nach aussen abnehmende Winkelgeschwindigkeit; eine solche Rotation bezeichnet man als differentiell.

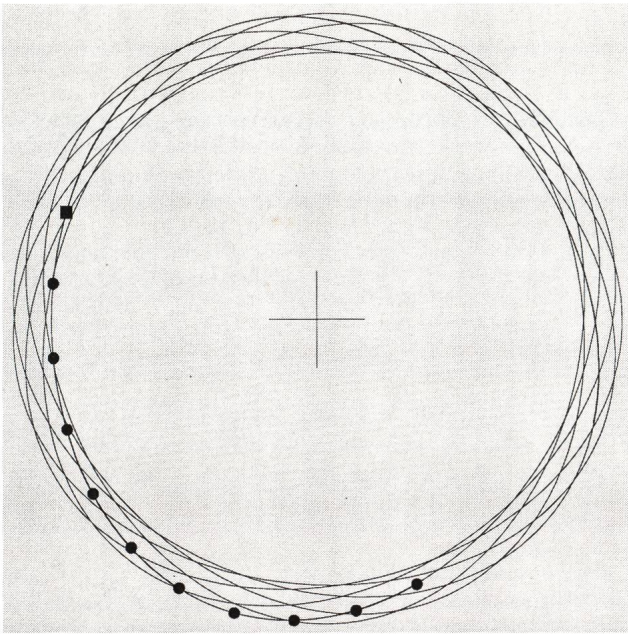
permet une simplification sérieuse du problème des N corps. Au lieu de devoir calculer le mouvement de tous les corps à la fois, le problème se réduit à calculer individuellement les sortes de trajectoires possibles dans la distribution continue de matière ressemblant à la galaxie choisie. Ces trajectoires sont bien différentes de celles des corps du système solaire, des ellipses plus ou moins allongées. Dans une galaxie, la forme des orbites est directement dépendante de la forme de la galaxie.

Il existe de façon générale trois types fondamentaux d'orbites: 1) les orbites *périodiques*, celles qui reviennent périodiquement à leur point de départ, elles sont exceptionnelles mais importantes, car elles donnent leur forme aux 2) orbites *quasi-périodiques*, qui oscillent autour de certaines orbites périodiques, et peuvent être responsables de la forme de la galaxie; 3) les orbites *chaotiques*, sans régularité; ces orbites sont très instables et leur mouvement est imprévisible à long terme, car la moindre erreur de départ ou perturbation négligée est rapidement amplifiée. Dans les barres, ces trois types d'orbites existent, comme montré pour un modèle particulier de barre sur la Fig. 2.

Pour comprendre la mécanique interne des galaxies, la forme des orbites est donc cruciale. Une forme quelconque de galaxie n'est possible que si, parmi toutes les orbites possibles, au moins certaines ont une forme compatible avec la forme même de la galaxie. Plus précisément, il faut que la superposition d'une partie des orbites puisse reproduire la forme de la galaxie. C'est un problème classique de l'astronomie depuis les années vingt, qui, à part pour des systèmes très simples (disques, sphères), n'a pu être résolu pour des galaxies barrées ou elliptiques que ces dernières années par ordinateur. Comme exemple de système simple qu'on peut construire sans ordinateur, citons les disques minces de densité variant radialement de façon arbitraire, qu'on peut entièrement remplir avec des orbites purement circulaires.

3. Formation des barres

Cependant, pour qu'un modèle de galaxie décrive une galaxie réelle, il doit être aussi stable, c'est-à-dire il faut qu'une petite modification du modèle ne s'amplifie pas spontanément jusqu'à le changer complètement. Or, dans les années soixante seulement, il a été compris qu'un disque infiniment mince, consistant d'étoiles en mouvement purement circulaire est instable. Même en équilibre, lorsque à chaque rayon du disque la force d'attraction sur chaque étoile est exactement compensée par la force centrifuge, un tel disque se détruit rapidement sous l'effet d'une perturbation infime. Afin de stabiliser un tel disque, il faut que les étoiles se meuvent non pas sur des orbites exactement circulaires, mais sur des orbites quelque peu allongées, des rosettes. Ces trajectoires peuvent être vues comme composées de deux mouvements tournants, le mouvement circulaire autour du centre de la galaxie, et un mouvement "épicyclique", une oscillation autour de l'orbite circulaire. Comme ces orbites ne sont pas périodiques en général, elles remplissent au cours du temps des couronnes. Un disque galactique devient stable si la largeur de ces couronnes dépasse une valeur critique. Ainsi, à n'importe quel rayon d'un disque galactique, les étoiles tournent de façon générale dans le même sens, mais chaque étoile a de plus une composante de vitesse qui la fait tantôt s'éloigner, tantôt se rapprocher du centre. Par exemple, le Soleil tourne autour du centre de la Voie Lactée en 250 millions d'années, le rayon de son orbite oscille entre 28'000 et 32'000 année-lumière en 180 millions d'années (Fig. 3). Le



Aber was geschieht, wenn eine Scheibe oder ein Teil davon den Drehimpuls nicht durch lokale Instabilitäten evakuieren kann? Seit den siebziger Jahren sind Computer-Simulationen des N-Körper-Problems, mit N gleich circa Zehn- bis Hunderttausend, möglich geworden, sofern man die ohnehin vernachlässigbaren Interaktionen naher Massenpunkte nicht berücksichtigt. Bei dieser Art von numerischen Experimenten sind die Massenpunkte so zahlreich, dass die statistischen Schwankungen nicht zu sehr stören, aber lange nicht zahlreich genug, um individuelle Sterne darzustellen. Indem man indessen N variiert, kann man nachprüfen, ob die Anzahl gross genug ist, um die grossräumigen Vorgänge in der galaktischen Scheibe darzustellen. Nun haben aber diese Simulationen von Anfang an gezeigt, dass die instabilen Scheiben eine innere Balkenstruktur entwickeln. Ein typisches Beispiel dafür, bestehend aus 200'000 Massenpunkten (Fig. 4), wurde in der Sternwarte Genf mit Hilfe des Lausanner Supercomputers Cray-2 berechnet. Im Laufe seiner Entwicklung expulsiert der Balken den zentralen Drehimpuls zur Peripherie der Scheibe, wobei zeitlich begrenzte Strukturen, wie etwa Spiralarme, hervorgerufen werden. Ausserhalb des rotierenden Balkens nimmt die Massenverteilung exponentiell ab. Die Länge dieses Balkens entspricht etwa dem Durchmesser auf dem die differentielle Rotation gering ist. Vor den siebziger Jahren war man davon überzeugt, dass der "normalste" und stabilste Zustand der Scheiben eine Rotationssymmetrie besitzen sollte und höchsten mit permanenten Spiralarmen ausgestattet sein könnte, so dass man das häufige Erscheinen der Balken in den Computersimulationen auf irgendwelche numerischen Unvollkommenheiten oder auf irgendeine fehlende physikalische Grösse zurückführte.

Es gibt im Wesentlichen drei Möglichkeiten um ein sich drehendes, scheibenförmiges System zu stabilisieren: 1) indem man es genügend "erhitzt", was in einem Energie verlierenden Milieu nicht über längere Zeit durchzuhalten ist; 2) indem man überall eine starke differentielle Rotation und also keine zentrale Region mit konstanter Winkelgeschwindigkeit annimmt, was eine unendlich grosse Massendichte im Zentrum voraussetzt; 3) indem man eine grosse dunkle Masse in

Fig. 3: In einer Scheibengalaxie füllt eine quasi-periodische Bahn im Laufe der Zeit einen Kranz aus. Hier ist die ungestörte Bahn der Sonne um das Milchstrassezentrum über 2 Milliarden Jahren dargestellt. Die runden Punkte zeigen die zukünftigen Sonnenpositionen mit je 10 Millionen Jahre Abstand; der quadratische Punkt entspricht der heutigen Sonnenposition.

Fig. 3: Une orbite quasi-périodique dans une galaxie disque, telle celle du Soleil, remplit une couronne au cours du temps. Ici est représenté l'orbite non-perturbée du Soleil autour du centre galactique sur 2 milliards d'années. Les points ronds représentent la position future du Soleil à intervalles de 10 millions d'années, le point carré étant la position actuelle du Soleil.

mouvement non-circulaire résiduel des étoiles joue un rôle analogue à la température d'un gaz, qui exprime la quantité de mouvement désordonné, non systématique, des particules. On dit alors qu'un disque devient stable s'il est suffisamment "chaud".

On pense que les galaxies se forment par la condensation d'un nuage étendu de gaz. Si le moment cinétique se conserve suffisamment bien, la contraction du nuage augmente simultanément sa vitesse de rotation. Par conséquent, la matière se meut de plus en plus de façon circulaire, et dans un disque de plus en plus aplati et "froid". On peut donc imaginer qu'à un certain stade de cette contraction, ce disque devienne instable. Ce qui n'est pas évident a priori est de prévoir ce qu'advient d'un disque instable.

Depuis peu l'on sait que si un disque auto-gravitant en rotation parvient à évacuer son excédant de moment cinétique par des instabilités à petite échelle, alors qu'à grande échelle il garde une symétrie de révolution, la vitesse linéaire de rotation de ce disque tend à devenir constante. C'est effectivement une caractéristique observée typique des galaxies disques, surtout dans leurs parties extérieures. Une vitesse linéaire constante avec la distance au centre entraîne une vitesse angulaire variable, une telle rotation est dite différentielle.

Mais qu'arrive-t-il si un disque, ou une région de celui-ci, ne parvient pas à évacuer le moment cinétique par des instabilités à petite échelle? Depuis les années septante, des simulations par ordinateur du problème des N corps, où N vaut plusieurs dizaines ou centaines de milliers sont possibles, pour autant que les interactions entre particules proches soient négligées. Dans ce genre d'expérience, les particules sont suffisamment nombreuses pour que les fluctuations statistiques ne soient pas trop gênantes, mais de loin pas assez nombreuses pour que chacune représente une étoile individuelle. Cependant, en variant N on vérifie que ce nombre est assez grand pour que les simulations reproduisent bien les phénomènes à grande échelle des disques galactiques. Or, dès le début, ces simulations ont montré que les disques instables, parce que trop froids, transforment la plupart du temps leurs parties internes en barres. Un exemple typique, mettant en jeu 200'000 particules et calculé à l'Observatoire de Genève à l'aide du superordinateur Cray-2 de Lausanne, est montré à la Fig. 4. Au cours de sa formation, la barre expulse du moment cinétique des régions internes aux parties externes du disque en induisant des structures temporaires, telles des bras spiraux. La structure asymptotique de ces disques a une distribution de matière exponentiellement décroissante, au milieu de laquelle tourne une barre. La longueur de la barre finale est déterminée par la longueur sur laquelle les étoiles tournent initialement à une vitesse angulaire à peu près constante.

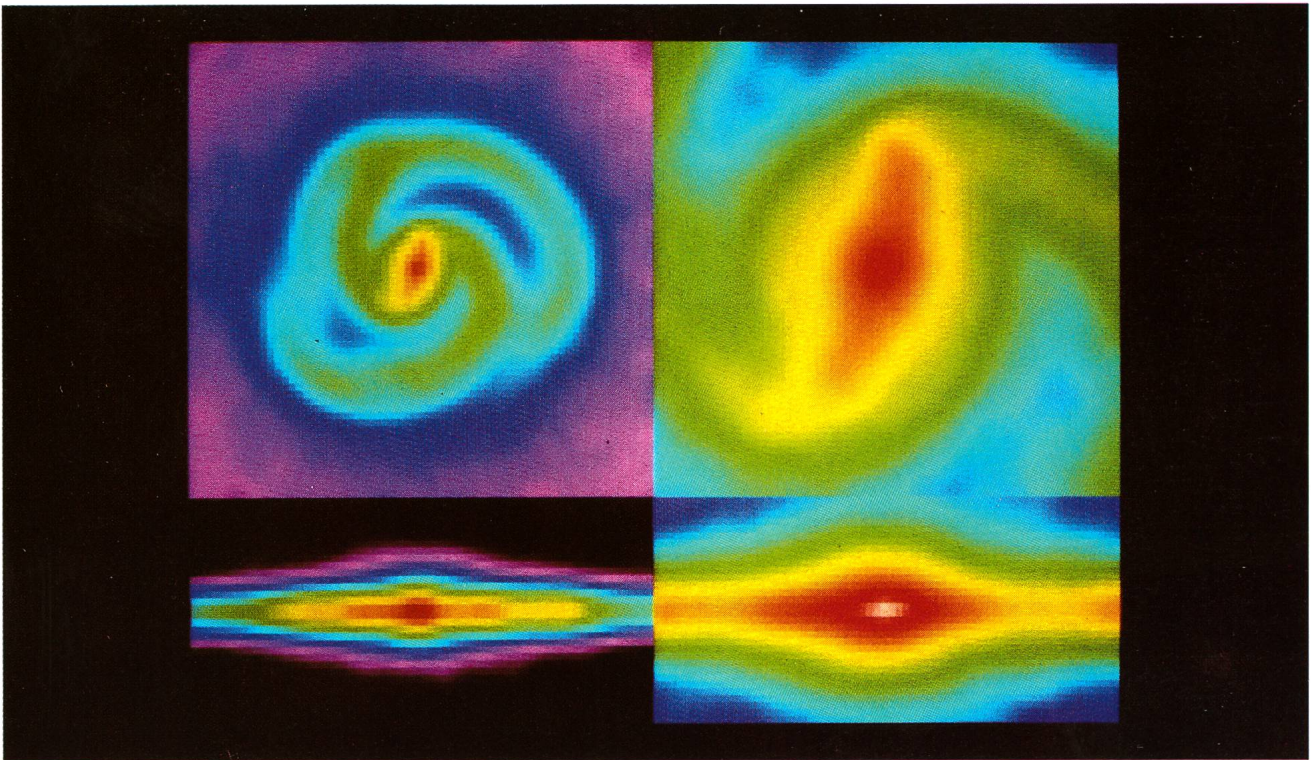


Fig. 4: Eine typische N-Körper-Simulation, eine halbe Milliarde Jahre nach ihrer Ausgangssituation, einer achsensymmetrischen Scheiben. Es entstehen vorübergehende Spiralarme und einen langlebiger Balken. Oben ist die Scheibe frontal, unten im Profil gesehen. Das rechte Photo ist eine vierfache Vergrößerung der zentralen Partie des linken Photos, um den sich bildenden Balken zu verdeutlichen.

Fig. 4: Une simulation N-corps typique, un demi-milliard d'années après l'état initial (un disque axisymétrique). La simulation produit des bras spiraux temporaires et une barre à longue durée de vie. En haut le disque est vu de face, en bas de profile. La partie droite est un agrandissement de quatre fois de la partie gauche, montrant avec plus de détails la barre centrale en voie de formation.

einem äusseren Halo situiert, was die Selbstgravitation verringern und die Instabilitäten verlangsamen (aber nicht anhalten) würde ; selbstverständlich sollte diese hypothetische dunkle Masse heiss genug und stossfrei sein, um selber stabil zu sein.

Zusammengefasst kann man den Beobachtungen und den Computersimulationen entnehmen, dass sich die Balken in Scheiben mit einer zu starken zirkulären Bewegungsgrösse spontan herausbilden. Die Scheiben mit einem zentralen Balken sind also "natürlicher" als jene mit einer perfekten Rotationssymmetrie. Ein guter Grund für die Existenz dieser Balken ist ihre Fähigkeit, überschüssigen Drehimpuls aus der Scheibe zu evakuieren und so den scheinbaren Widerspruch zwischen der Energiedissipation und der Erhaltung des Drehimpulses aufzuheben. Denn bei einer perfekten Rotationssymmetrie ist die Erhaltung des Drehimpulses strikt.

4. Ursachen der Balken

Da taucht unmittelbar die Frage auf, warum gerade die Balken und nicht irgenwelche anderen Strukturen so attraktiv sind. Bis heute findet man die beste Erklärung, indem man die Sternbahnen in den Balken untersucht.

Gehen wir einmal von einer Scheibe aus, auf der in jedem beliebigen Abstand vom Zentrum die Gravitation durch eine entsprechende Drehbewegung kompensiert wird. Wenn man auf dieses System eine kleine bi-symmetrische, statische Deformation ausübt, werden sich die kreisrunden Bahnen zu

Avant les années septante, les gens étaient si convaincus que l'état le plus normal et le plus stable des disques devait avoir une symétrie de révolution, éventuellement agrémenté de bras spiraux permanents, qu'ils pensèrent d'abord que l'apparition fréquente des barres dans les expériences par ordinateur provenait de quelque vice numérique, ou qu'un ingrédient physique supplémentaire agissant dans les galaxies devait être rajouté.

Il existe essentiellement trois façons de stabiliser un disque tournant : 1) le "chauffer" suffisamment, ce qui est difficile à maintenir longtemps dans un milieu dissipatif, 2) avoir partout une forte rotation différentielle, pas de région centrale avec une vitesse angulaire constante, ce qui implique une densité de matière infinie au centre, 3) avoir une grande quantité de matière sombre dans un halo extérieur, ce qui diminue l'auto-gravitation du disque et ralentit (mais ne stoppe pas) les instabilités ; évidemment la matière sombre hypothétique devrait être suffisamment chaude et sans collision afin d'être elle aussi stable.

En résumé, les observations et les ordinateurs nous disent que les barres apparaissent naturellement dans les disques contenant trop de mouvement circulaire. Les disques ayant une barre centrale sont ainsi plus "normaux" que les disques ayant une symétrie de révolution parfaite. Une bonne raison pour l'existence des barres est qu'elles permettent d'évacuer efficacement l'excès de moment cinétique du disque, et ainsi elles résolvent la contradiction qu'il y a entre la dissipation

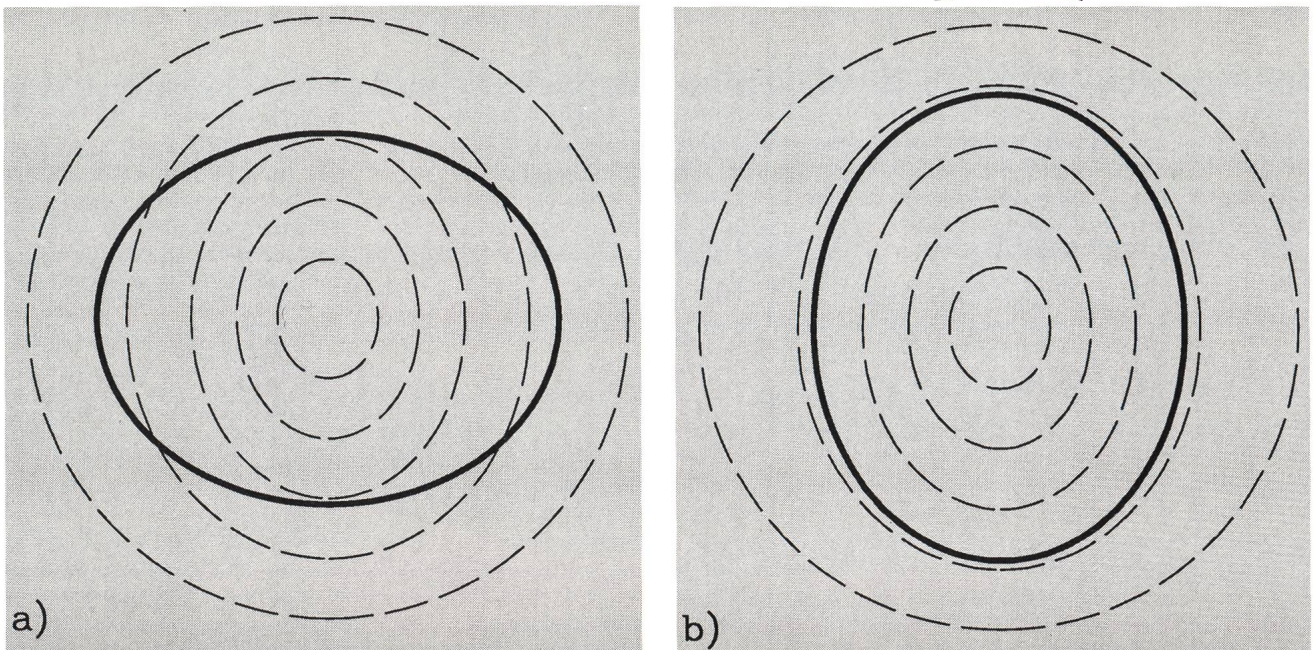


Fig. 5:

a) Eine statische, längliche Deformation der Materie (gestrichelt) verformt die runden Umlaufbahnen zu Ovalen (durchgehender Strich) senkrecht dazu.

a) une déformation barrée statique de la matière (ovales traitillés) déforme les orbites circulaires en des orbites ovales (ovale en trait gras) dans la direction perpendiculaire.

b) Eine längliche Deformation, die mit den Sternen rotiert, verformt die runden Umlaufbahnen zu Ovalen, die sich in die gleiche Richtung drehen.

b) une déformation barrée tournant avec les étoiles déforme les orbites circulaires en des orbites ovales dans le même sens.

Preise wie vor 10 Jahren !

Meade 8" Schmidt-Cassegrain komplett Fr. 2826.-

Meade Teleskope sind nicht "billiger" - sie kosten nur weniger ! (Weil nur bei mir erhältlich - keine Zwischenhändler)

8" Mod. Standard Ø 203mm F/10 in Gabel mit elektr. Antrieb, Sucher, Zenithprisma, Okular wie Bild unten, (ohne Stativ + Wiege) **Fr. 2059.-**
10" Mod. Standard Ø 254mm F/10 **Fr. 3995.-**

Drei-Bein-Stativ, ausziehbar Fr. 549.-
 Polhöhen-Wiege Fr. 218.- od. Fr. 339.-
 NEU ! SW = Super - Wiege Fr. 884.-
 Multi-Vergütung Fr.100.- bzw. Fr. 130.-
6" MTS-SN6 Ø 152mm F/5
 Schmidt-Newton Teleskop incl. 220 V / 50 Hz Motor, Deklinations - Feintrieb, 2" Okularstützen, Okular, Stativ, komplett wie Bild : **Fr. 2110.-**

Ø 203mm :
8" LX5 F/10 S.-Cass. **Fr. 3716.-**
8" LX6 F/6.3 S.-Cass. **Fr. 4249.-**
 Ø 254mm :
10" LX5 F/10 **Fr. 4878.-**
10" LX6 F/6.3 **Fr. 5562.-**

Meine Erfahrung hat gezeigt :
Wenn Sie meine Meade Teleskope gesehen haben, wollen Sie kein anderes mehr !

Meade Stativ mit meinem Aufsatz sind seit jeher die stabilsten auf dem Markt !
 Grosse 2" Zenitspiegel ermöglichen die Betrachtung eines grossen Bildfeldes - die grossen 9x60mm Sucher zeigen sonst unsichtbare Objekte - die Elektronik erlaubt Fein - und Schnellkorrekturen in allen 4 Richtungen - Anschlüsse für Deklinationsmotor, Fokussiermotor, Fadenkreuzbeleuchtung und Computer sind bereits vorhanden Dies sind nur einige Vorzüge !

Celestron Ausverkauf !
 stark reduzierte Vorführmodelle !



Modelle an Lager :
 150mm : MTS-SN6
 200mm : LX5, LX6, SN6, SP-C6, Classic ULTIMA 8
 250mm : LX5, LX6
 280mm : C11

Besichtigung nur nach Vereinbarung jederzeit zwischen 9-21 Uhr möglich ! Tel.: 01/841'05'40. Gratis-Katalog anfordern ! (Ausland 4 int. Antwortcoupons von der Post)
 Einzige autorisierte Direktimport-MEADE-Vertretung Schweiz: **Eugen Aepli, Astro-Optik, Loowiesenstr.60, 8106 ADLIKON**

senkrecht zu der Störung ausgerichteten Ellipsen verformen (Fig. 5a). Folglich kann ein statischer Balken nicht von einer progressiven Verformung der kreisförmigen Bahnen herrühren. Wenn man hingegen die Scheibe durch eine bi-symmetrische Deformation stört, die sich in die gleiche Richtung und mit etwa derselben Geschwindigkeit wie die Sterne dreht, dann verformen sich die kreisrunden Bahnen zu Ovalen, die die Deformation unterstützen (Fig. 5b).

Indessen entstehen bei kleinen Deformationen der Scheibe Bahnen, die länglicher als die Massenverteilung sind, während aus sehr exzentrischen Deformationen das Gegenteil resultiert und die Massenverteilung länglicher als die Bahnen ist. Man kann sich daraufhin vorstellen, dass es einen mittleren Wert für die Exzentrizität der Masse gibt, bei dem die Umlaufbahnen eine identische Exzentrizität besitzen (etwa wie in Fig. 2). Eine wesentliche Ursache für die Existenz der Balken liegt demzufolge darin, dass ihre besondere Form damit zu vereinbarende Umlaufbahnen hervorruft, was auf den ersten Blick nicht selbstverständlich ist.

Wie vorher in Bezug auf die Scheiben erwähnt, braucht ein selbstgravitierender Balken für seine Stabilität auch eine "hohe Temperatur", und es können nicht alle Sternbahnen periodisch und konzentrisch sein, sondern eine gewisse, senkrecht zu den ovalen Bahnen stehende Geschwindigkeits-

d'energie et la conservation du moment cinétique, qui doit être rigoureuse dans un disque ayant une symétrie de révolution parfaite.

4. Origine des barres

La question surgissant immédiatement est d'expliquer pourquoi les barres, et non pas d'autres structures, sont des formes si attractives. Jusqu'à présent la meilleure explication est fournie en examinant les orbites des étoiles dans les barres.

Imaginons un disque dont l'attraction gravitationnelle propre est exactement compensée à chaque rayon par une rotation circulaire appropriée. Si on applique à ce disque une petite déformation bi-symétrique statique, les orbites circulaires se déforment alors en orbites ovales qui ont un sens perpendiculaire à la déformation (Fig. 5a). Ainsi une barre statique ne peut pas provenir de la déformation progressive des orbites circulaires. Mais, si maintenant on perturbe le disque par une déformation bi-symétrique qui tourne à environ la même vitesse que les étoiles, dans le même sens, alors les orbites circulaires se déforment en orbites ovales supportant la déformation (Fig. 5b).

Pour les petites déformations d'un disque, les orbites allongées sont plus ovales que la matière, alors que pour des déformations très excentriques, c'est le contraire qui arrive, la

Fig. 6: Eine Ring-Balkengalaxie (NGC 2217). Der innere Ring berührt die Extremitäten des Balkens und beide erstrecken sich in die gleiche Richtung. Dagegen ist der äussere Ring senkrecht dazu leicht verformt (Abb.: NASA).

Fig. 6: Une galaxie barrée avec des anneaux (NGC 2217). L'anneau interne touche les extrémités de la barre et est allongé dans le même sens que celle-ci, alors que l'anneau externe est très légèrement allongé dans la direction perpendiculaire (Photo NASA).



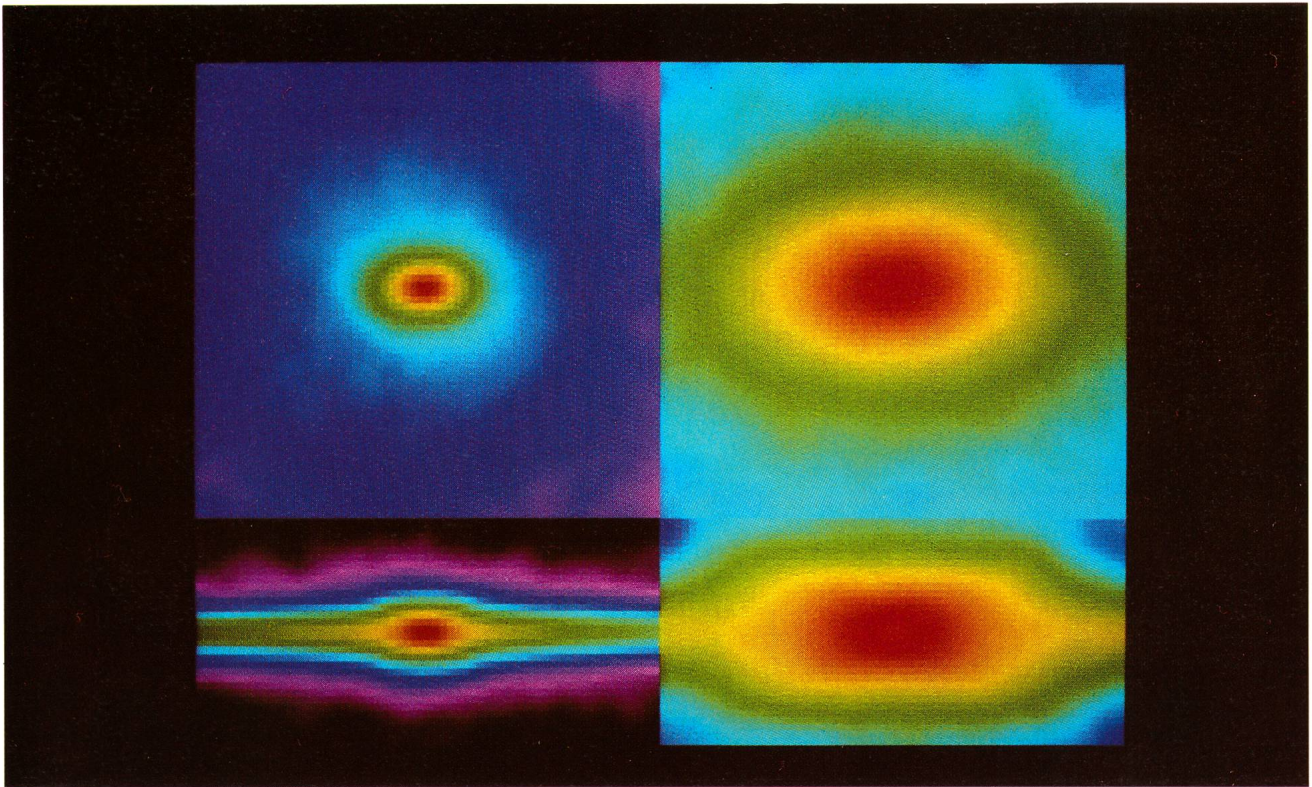


Fig. 7: Nach etwa 2 Milliarden Jahren zeigt das N-Körper-Modell aus Fig. 4 einen dauerhaften rechteckigen Aspekt im Profil ; hier ist es 5.8 Milliarden Jahre nach Beginn der Simulation gezeigt.

Fig. 7: Après environ 2 milliards d'années le modèle N-corps de la Fig. 4 présente un aspect stable de boîte, quand vu de profile ; ici il est montré à 5.8 milliards d'années après le début de la simulation.

komponente ist nötig. Infolgedessen besteht ein reeller Balken nicht aus rein ovalen Umlaufbahnen, sondern eher aus fetten, ovalen, quasi-periodischen Bahnen, wie etwa in der Mitte in Fig. 2. Die Überlagerung solcher Bahnen ist tatsächlich in der Lage, einen Balken wiederzugeben, wie in den numerischen Experimenten in der Sternwarte Genf bestätigt wurde. Die N-Körper-Simulationen zeigen, dass für eine begrenzte Reihe von Exzentrizitäten ein Balken ein möglicher, stabiler und robuster Zustand ist. Mehr oder weniger exzentrische Balken entstehen durch eine Modifikation der Temperatur, d.h. der radialen Bewegungskomponenten; dabei sind die heißen Balken dicker als die kalten.

Zusammenfassend kann man sagen, dass wir mit Hilfe der Computer erkennen konnten, dass die Balken ganz spezielle Strukturen sind, in denen die Verteilung der Materie Umlaufbahnen erlaubt, die die Balkenform wiedergeben. Ihre Stabilität wird durch die numerischen N-Körper-Verfahren geprüft. Im Verhältnis zum Alter des Universums haben sich die nicht dissipativen Balken als langlebig erwiesen.

5. Die Balken und die galaktische Entwicklung

Nachdem die Balken sich als bedeutende Erscheinung in der Entwicklung der galaktischen Scheibe erwiesen haben, heisst es, ihre langfristige Wirkung auf die zwei Hauptbestandteile der Galaxien, die Sterne und das Gas, zu bestimmen.

5.1. Das Gas

Im Gegensatz zu den Sternen, die sich an einem Ort in verschiedene Richtungen bewegen können, ohne zu kollidieren,

(Fortsetzung des Artikels auf Seite 151)

materie est plus allongée que les orbites. Donc, on peut s'imaginer qu'il existe une valeur intermédiaire de l'excentricité pour laquelle la matière et les orbites ont une excentricité identique (environ comme sur la Fig. 2). Ainsi, la raison fondamentale qui permet l'existence des barres est que cette forme particulière produit des orbites de formes compatibles, ce qui n'est pas évident a priori.

Comme mentionné auparavant pour les disques, pour être stable une barre auto-gravitante a aussi besoin de "chaleur", les orbites ne peuvent pas toutes être périodiques et concentriques, une certaine quantité de mouvement transverse aux orbites ovales est nécessaire. Ainsi, une barre réelle ne consiste pas d'orbites purement ovales, mais plutôt d'orbites ovales grasses, quasi-périodiques, telle celle du milieu de la Fig. 2. La superposition de telles orbites est en effet capable de reproduire une barre, comme confirmé par des calculs numériques à l'Observatoire de Genève. De leur côté, les simulations N corps montrent que pour une gamme restreinte d'excentricités, des barres sont en effet non seulement possibles, mais aussi stables et robustes. Des barres plus ou moins excentriques peuvent être fabriquées en changeant la quantité de chaleur due aux mouvements transverses ; les barres chaudes sont plus épaisses que les barres froides.

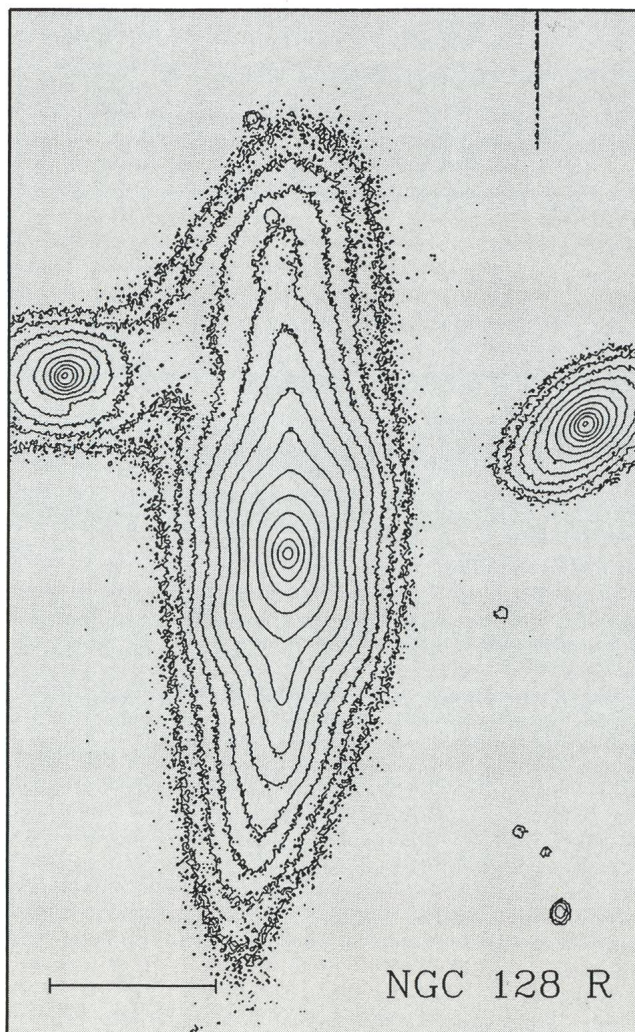
En résumé, les ordinateurs nous font découvrir que les barres sont des structures spéciales pour lesquelles des orbites permises par leur distribution de matière sont capables de les reproduire. Leur stabilité est testée par les techniques des N corps. Les barres non-dissipatives sont trouvées robustes pour des échelles de temps comparables à l'âge de l'Univers.

(Suite de l'article en page 151)

(Fortsetzung von Seite 138)

stossen die Teilchen des interstellaren Gases häufig zusammen und strömen wie eine Flüssigkeit. Doch unterscheidet sich das interstellare Gas von einer normalen Flüssigkeit durch seinen inhomogenen, klumpigen Aspekt und seine heftige Turbulenz. Das schäumende Wasser eines reissenden Bergbaches stellt ein zutreffendes Beispiel für solch eine inhomogene, turbulente Strömung dar. Das interstellare Gas ist auch in der Lage, sich wie in einer Art "chemischen" Reaktion zu Sternen zu kondensieren. Umgekehrt stossen die Sterne im Laufe ihrer Entwicklung Materie in das interstellare Medium aus³. Bei der gleichmässigen Art, sich fortzubewegen, benutzt das Gas einfache Bahnen ohne Überschneidungen. Andernfalls ergeben sich Stösse, die die Energiedissipation und die Sternbildung erheblich verstärken.

Die hauptsächliche Wirkung der Balken auf das Gas besteht darin, dass sie einen Grossteil des Gases über die Spiralarme expulsierten und einen anderen Teil im Inneren konzentrieren. Ein "alter" Balken enthält also nur noch wenig Gas, sofern nichts von Aussen hinzugefügt wurde, wie das etwa bei der Verschmelzung mit einer Zwerggalaxie der Fall wäre. Man kann also nach der verbleibenden Gasmenge das relative Alter eines Balkens bestimmen. Die Balken mit viel Gas sind jünger als diejenigen, die nur noch aus Sternen bestehen.



(Suite de la page 138)

5. Les barres et l'évolution galactique

Maintenant que les barres sont reconnues comme étant des phénomènes majeurs dans l'évolution des galaxies disques, il s'agit de déterminer les effets séculaires qu'elles induisent sur les deux composantes principales des galaxies, les étoiles et le gaz.

5.1. Gaz

Contrairement aux étoiles, qui peuvent bouger à un certain endroit dans des directions différentes sans pratiquement subir de collisions, les particules du gaz dans les galaxies ont des collisions fréquentes entre elles et se déplacent comme celles d'un fluide ordinaire, en un flot. Cependant, le gaz interstellaire diffère d'un gaz habituel en particulier par son aspect extrêmement floconneux, fragmenté, et sa turbulence violente. L'eau écumante d'un torrent de montagne offre un bon exemple d'un écoulement fragmenté et turbulent. Comme par une sorte de réaction chimique, le gaz interstellaire est aussi capable de se transformer par condensation en étoiles, et vice-versa, les étoiles au cours de leur évolution rejettent du gaz dans le milieu interstellaire³. Afin de se déplacer aussi tranquillement que possible, le gaz doit emprunter des orbites simples, sans intersections. Autrement, des chocs ont lieu,

Fig. 8: Isophotes von einem CCD-Bild einer "Box"-Galaxie (NGC 128) (Abb.: B. Jarvis).

Fig. 8: Isophotes d'une galaxie boîte (NGC 128) résultant d'une image CCD (Photo B. Jarvis).

Feriensternwarte CALINA CARONA



Calina verfügt über folgende Beobachtungsinstrumente:

- Newton-Teleskop ø30 cm
- Schmidt-Kamera ø30 cm
- Sonnen-Teleskop

Den Gästen stehen eine Anzahl Einzel- und Doppelzimmer mit Küchenanteil zur Verfügung. Daten der Einführungs-Astrofotokurse und Kolloquium werden frühzeitig bekanntgegeben. Technischer Leiter: Hr. E. Greuter, Herisau.

Neuer Besitzer: **Gemeinde Carona**
 Anmeldungen: **Feriensternwarte Calina**
 Auskunft: **Postfach 8, 6914 Carona**

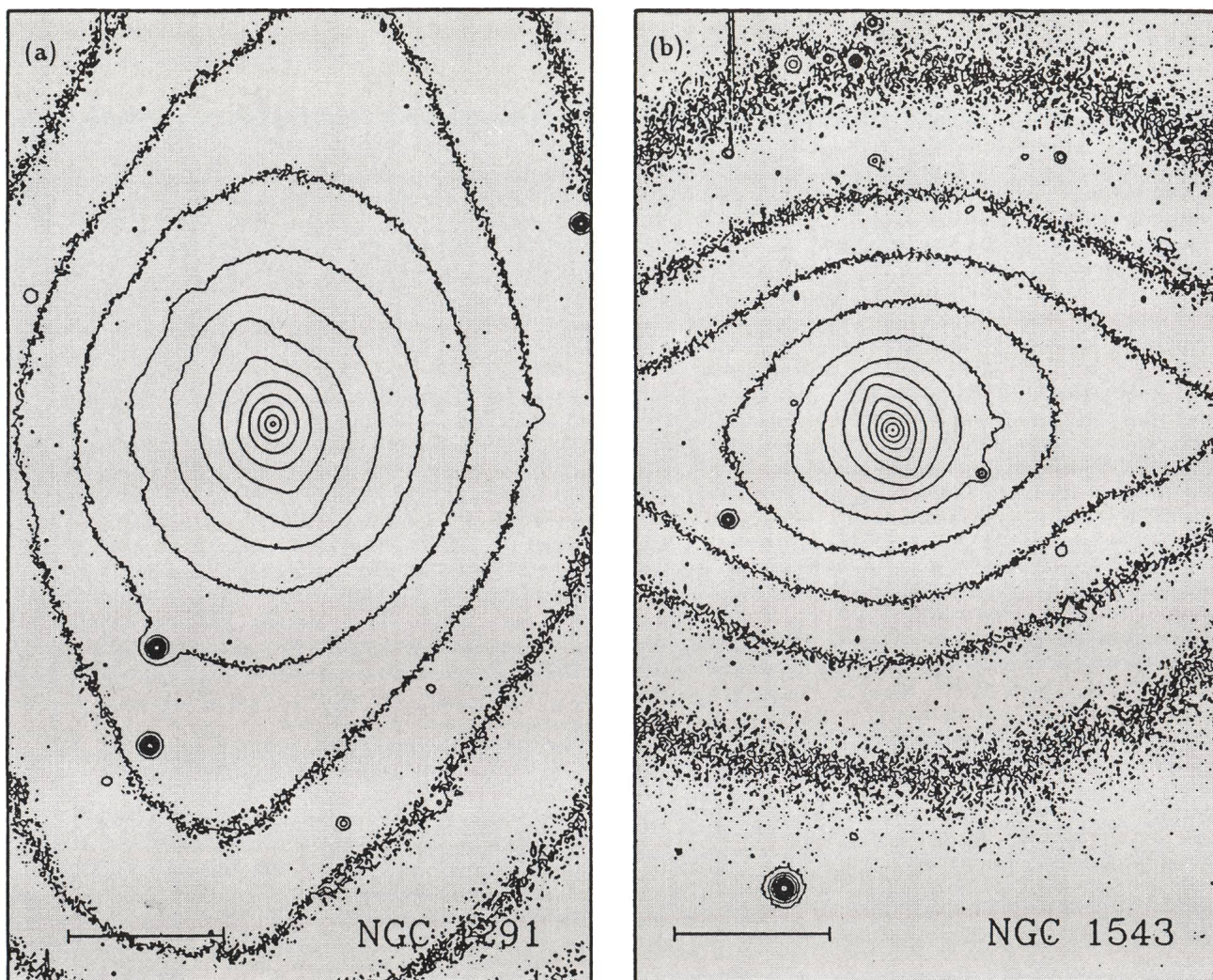


Fig. 9:
 Isophoten der zentralen Gebiete zweier Galaxien mit Doppelbalken (NGC 1291 und NGC 1543) (Abb.: Jarvis, Dubath, Martinet und Bacon).
 Isophotes des régions centrales de deux galaxies à double barres (NGC 1291 et NGC 1543) (Photo Jarvis, Dubath, Martinet et Bacon).

Hingegen reichen unsere Kenntnisse über das Verhalten des Gases noch nicht aus, um absolute Zeitintervallen angeben zu können.

5.2. Ringe und Resonanzen

Die länglichen, balkenbildenden Umlaufbahnen bilden nur eine Untergruppe unter allen möglichen Bahnen. Andere Untergruppen existieren zum Beispiel am Rand des Balkens. Sie resultieren aus "Resonanzen", d.h. aus auf die Rotationsfrequenz des Balkens abgestimmte Bahnfrequenzen. Mit ähnlichen Resonanzen beschleunigen Kinder ihre Schaukel.

Einer der bemerkenswertesten Effekte ist, dass in der Nähe von gewissen Resonanzen das Gas auf einem schmalen, leicht ovalen Streifen komprimiert wird und so den Eindruck eines Ringes gibt (Fig. 6). In der Tat enthält ein guter Teil der Ringgalaxien einen Balken. Die Kompression des Gases beschleunigt seine Kondensation zu Sternen.

³ Man schätzt, dass die Materie unseres Sonnensystemes den Kreislauf Gas-Stern-Gas ungefähr zehnmals durchlaufen hat.

accroissant considérablement la dissipation d'énergie et la formation d'étoiles.

Le principal effet global des barres sur le gaz est d'en expulser une fraction importante au dehors par des bras spiraux, et d'en concentrer une partie vers le centre. Il reste très peu de gaz dans une "vieille" barre, à moins qu'un apport externe, tel la chute d'une galaxie naine, ait lieu. Ainsi, d'après la quantité de gaz restant, un âge relatif peut être donné aux barres. Les barres contenant encore beaucoup de gaz sont plus jeunes que celles qui en sont dépourvues, et constituées purement d'étoiles. Cependant, nos connaissances sur le comportement du gaz sont encore trop incertaines pour donner des âges absolus.

5.2. Anneaux et résonances

Les orbites allongées supportant la barre ne forment qu'une famille d'orbites possibles, parmi plusieurs autres. Ces autres

³ Ainsi, on estime que la matière constituant le système solaire a effectué une dizaine de fois le cycle gaz-étoile-gaz.

Ausserdem sind die Balken stark genug, um selbst zur galaktischen Ebene senkrechte Bewegungen durch Resonanzen zu verstärken. Auf Grund der Projektion dieser Bewegungen ist es schwierig, diesen Effekt direkt zu beobachten. Er ist aber aus theoretischer Sicht unumgänglich. Indessen bewirken die Balken wahrscheinlich eine Aufwölbung der inneren Gebiete der Scheibe. Es ist also verlockend, die Balken mit der Bildung der zentralen Bulge-Komponente in Zusammenhang zu bringen. Jüngste Ergebnisse der N-Körper-Simulationen zeigen, dass von der Seite gesehen die Balken nach einige Umdrehungen zu einer rechtwinkligen Form werden, die man auf Englisch "Box" (Kasten) nennt (Fig. 7). Tatsächlich kann man diese seltsame Art von Galaxien auch beobachten (Fig. 8). Indessen könnten auch ganz andere Vorgänge, wie etwa die Verschmelzung mit einer Zwerggalaxie, zur Aufwölbung der Scheibe beitragen.

5.3. Die Versorgung der zentralen Maschine

Selbst wenn nur ein Bruchteil der Gesamtmasse in Richtung Galaxiezentrum fällt, kann bei einem gewissen Abstand die Dichte stark genug angestiegen sein, um die ursprüngliche lokale Dichte zu übersteigen. Dann wird die Dynamik im Zentrum zwangsläufig von dieser hinzukommenden Masse gravitationell beherrscht. Wenn diese Dichte lokal bedeutend genug ist, wird das Zentrum gravitationell vom Rest der Galaxie unabhängig. Diese Art von Phänomen kann sich typischerweise in einem Massstab von 100 Lichtjahren ereignen, d.h. etwa ein Tausendstel der typischen Ausmasse einer Galaxie. Die teilnehmenden Massen liegen in der Grösseordnung von 1 Million bis 1 Milliarde Sonnenmassen, das sind weniger als 1% der Gesamtmasse der Galaxie.

Das Newton'sche Gravitationsgesetz gilt nicht nur in einem begrenzten Massstab. Folglich können sämtliche oben besprochenen Phänomene sich auf ganz verschiedenen Ebenen abspielen. Sobald eine zentrale Masse einen gewissen Wert überschreitet, wird es möglich, dass sich eine kleine zentrale Unter-Scheibe innerhalb der Galaxie bildet und ihre eigene Balken-Instabilität entwickelt, wobei alle damit verbundenen Vorgänge schneller und auf kleinerem Raum ablaufen. Eine Serie solcher ineinander verschachtelten Balken könnte also die Materie immer näher zum galaktischen Zentrum bringen und gleichzeitig das Übermass an Drehimpuls hinausschleusen. In der Tat wurden schon Doppel-Balken beobachtet, bei denen sich ein kleiner Balken innerhalb eines grösseren dreht. Fig.9 zeigt einen solchen Fall, der bei Beobachtungen im Rahmen der ESO in Chile von Astronomen aus Genf untersucht wurde.

familien d'orbites existent par exemple à la transition entre la barre et le disque, et résultent de résonances, c'est-à-dire de fréquences orbitales commensurables avec la fréquence de rotation de la barre. Ces résonances sont de la même sorte que celle permettant aux enfants d'amplifier leur mouvement sur une balançoire.

Un des effets les plus remarquables est que près de certaines résonances, le gaz est comprimé sur des bandes étroites d'orbites légèrement ovales, produisant l'impression d'anneaux (Fig. 6). En effet, une bonne partie des galaxies à anneaux sont barrées. La compression du gaz facilite sa transformation rapide en étoiles.

Les barres sont aussi assez fortes pour amplifier par résonances des mouvements perpendiculaires au plan de la galaxie. A cause des effets de projection, cet effet est malaisé à observer directement, mais du point de vue théorique difficilement évitable. En conséquence, un effet probable des barres est d'épaissir les parties intérieures des disques. Il est alors tentant d'associer les barres avec la formation des bulbes. Un résultat récent des simulations N corps est que les barres tendent, après un certain nombre de tours, à adopter une forme rectangulaire, de boîte, quand vues par la tranche (Fig. 7). On observe en effet de telles galaxies bizarres (Fig. 8). Cependant, des processus complètement différents, tels que la chute de petites galaxies naines, pourraient aussi contribuer à l'épaississement du disque.

5.3. L'approvisionnement de la machine centrale

Même si une petite fraction de la masse totale plonge vers le centre de la galaxie, à une certaine distance sa densité peut être accrue suffisamment pour dépasser la densité locale initiale. La dynamique au centre est alors nécessairement dominée gravitationnellement par cet apport de masse. Si cette densité est localement assez grande, le centre se découple dynamiquement du reste de la galaxie. Ce genre de phénomène peut arriver typiquement sur des distances inférieures à 100 année-lumière, une réduction de taille par rapport celle de la galaxie d'un facteur environ 1000. Les masses en jeu sont de l'ordre de 1 million à 1 milliard de fois la masse du Soleil, moins de 1% de la masse totale de la galaxie.

La loi de gravitation newtonienne n'a pas d'échelle propre caractéristique. Ainsi, tous les phénomènes que nous avons discutés plus haut pourraient aussi bien se passer à des échelles très différentes. Dès qu'une masse centrale est suffisamment grande, il est possible qu'un petit disque central beaucoup plus petit que la galaxie puisse se former, et

ORION – Inserate

Um ein reibungsloses und promptes Erscheinen der ORION-Inserate zu gewährleisten, bitten wir Sie ab sofort sämtliche Inserate an folgende Adresse zuzustellen:

Robert Leuthold,
c/-Postfach, 9315 Neukirch-Egn.

Tel. Geschäft 071/66 25 70
FAX 071/66 25 48
Tel. Privat 071/66 26 16

Wir wären Ihnen dankbar, wenn Sie uns Ihre Unterlagen jeweils bis spätestens am Redaktionsschluss zustellen könnten.

Besten Dank.

Astro-Videokamera

Die neue DIMENSION in der AMATEURASTRONOMIE für hervorragende Beobachtung von Sonne, Mond und Planeten am MONITOR, sowie deren Aufzeichnung mit VIDEOREKORDER.

Lichtempfindlichkeit **0,01 lux** und somit empfindlicher als eine CCD-Kamera mit 0,02 lux.

Besonders empfehlenswert für Besitzer eines DAY-STAR Filters.

Komplet mit Netzteil – Anschlusskabel – Betriebsanleitung einschl. 6" S/W Monitor

Aktionspreis

DM 995,-

Forschung CCD-Astronomie:

Pempelforterstr. 8
4000 Düsseldorf 1
Tel. 0211-3613328

Mittelstr. 1
5400 Sessenbach
Tel. 02601-3383

Der Massenzuwachs im Zentrum ist nötig, um eventuell ein riesiges zentrales Schwarzes Loch oder irgendein anderes Phänomen zu unterhalten, das einen Materie-Strahl auf beinahe Lichtgeschwindigkeit beschleunigen könnte, wie man in manchen Galaxien mit aktivem Kern beobachtet hat. Durch eine Unterbrechung der Rotationssymmetrie bieten die Balken ein gutes Mittel, um den überschüssigen Drehimpuls mit Hilfe eines Teiles der Masse auszuschleusen und gleichzeitig dem Zentrum zu erlauben, die drehimпульsarme Materie zu absorbieren.

6. Schlussfolgerungen

Die Bildung eines Balkens ist eines der bedeutendsten Ereignisse in der Geschichte einer isolierten Scheibengalaxie. Sie beeinflusst stark die Sternbildungsrate, den Transport des Drehimpulses und die globale Form der Galaxie. Ihre Wirkung auf die zentralen Gebiete und die damit verbundene Aktivität ist auch massgeblich. Durch die Unterbrechung der Rotationssymmetrie können die Scheiben Zustände mit niedrigerem Energieniveau erreichen, auch erlaubt sie den schnellen Transport des Drehimpulses. Da ja das Gesetz der Schwerkraft keine charakteristische Grössenordnung enthält, können diese gewonnenen Erkenntnisse über selbstgravitierende Scheiben der Grösse einer Galaxie auch Anwendungen auf astrophysische Scheiben ganz anderer Dimensionen ermöglichen; wie zum Beispiel auf die massiven Scheiben um sich bildende Sterne, die sich nur etwa über 1 Lichtjahr erstrecken.

DANIEL PFENNIGER

Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny

Deutsche Übersetzung: Barbara PFENNIGER

entwickelt seine eigene Instabilität von Balken, wiederholt dies den Prozess zu den Abständen viel kleiner, und viel schneller. Eine Reihe von solchen Balken in einer Galaxie ist dann ein mögliches Mittel, um die Materie von innen nach aussen zu transportieren, wie man in manchen Galaxien mit aktivem Kern beobachtet hat. Durch eine Unterbrechung der Rotationssymmetrie bieten die Balken ein gutes Mittel, um den überschüssigen Drehimpuls mit Hilfe eines Teiles der Masse auszuschleusen und gleichzeitig dem Zentrum zu erlauben, die drehimпульsarme Materie zu absorbieren.

Die Bildung eines Balkens ist eines der bedeutendsten Ereignisse in der Geschichte einer isolierten Scheibengalaxie. Sie beeinflusst stark die Sternbildungsrate, den Transport des Drehimpulses und die globale Form der Galaxie. Ihre Wirkung auf die zentralen Gebiete und die damit verbundene Aktivität ist auch massgeblich. Durch die Unterbrechung der Rotationssymmetrie können die Scheiben Zustände mit niedrigerem Energieniveau erreichen, auch erlaubt sie den schnellen Transport des Drehimpulses. Da ja das Gesetz der Schwerkraft keine charakteristische Grössenordnung enthält, können diese gewonnenen Erkenntnisse über selbstgravitierende Scheiben der Grösse einer Galaxie auch Anwendungen auf astrophysische Scheiben ganz anderer Dimensionen ermöglichen; wie zum Beispiel auf die massiven Scheiben um sich bildende Sterne, die sich nur etwa über 1 Lichtjahr erstrecken.

6. Conclusions

La croissance d'une barre est l'un des événements les plus significatifs dans l'histoire d'une galaxie disque isolée. Elle influence fortement le taux de formation stellaire, le transport du moment cinétique, ainsi que la forme globale de la galaxie. Son impact sur les régions centrales et l'activité associée est aussi déterminante. En brisant la symétrie de révolution, les disques sont capables d'atteindre des états énergétiques plus bas; cette brisure de symétrie permet le transport rapide du moment cinétique. Puisque la loi de la gravitation seule ne contient pas d'échelle typique propre, la compréhension acquise sur les disques auto-gravitants à l'échelle des galaxies peut avoir des applications à d'autres disques astrophysiques de toutes autres dimensions; par exemple les disques massifs autour des étoiles en formation ont des dimensions de l'ordre de 1 année-lumière seulement.

An- und Verkauf / Achat et vente

Zu Verkaufen

Meade 2080 LX-3 (8") komplett, mit 4-fach Okularrevolver, alles in sehr gutem Zustand.
M. VETTER, Bachtelstrasse 36, 8200 Schaffhausen,
Tel. 053/25 63 23

Zu Verkaufen

Sternzeituhr Digital mit 12V/220V, DC, sehr genau. Fr. 180.–
HANS LÜTHI, Obere Zollgasse 5, 3072 Ostermündigen,
Tel. 031/51 26 01

Zu Verkaufen

Feldstecher 11x80:Fr.480.–/15x80:Fr.520.–/20x80:Fr.590.–
Auskunft: Tel. 031/91 07 30

Zu Verkaufen

"Sky and Telescope" – 8 vollständige Jahrgänge (1978-85) in Originalkassetten. Günstiger Abholpreis. Tel. 052/37 24 19

Zu Verkaufen

3 m Flab-Telemeter – 12x25 Vergrösserung. Sehr günstiger Preis auf Anfrage. Tel. 065/52 58 28

Zu Verkaufen

Celestron C 11 auf einer Saturnmontierung und Säule h=110 cm, inkl. Motor RA+DA, Taukappe, Telrad-Sucher, Transportkoffer, alles transportabel. Noch 1 Jahr Garantie. Neupreis Juli 1988 sFr. 11'000.–. Preis VB sFr. 7'500.–
Tel. Gesch. 056/70 13 00 oder privat 01/432 96 58 (Hr. Steinbrich)

Sky and Telescope

Vol. 41/1971 bis Vol. 74/1987 in Kassetten: **Fr. 340.–**

L'Astronomie

mit Ephémérides, 1979 bis 1986 komplet in Kassetten, 1956-1975 vereinzelt **Fr. 80.–**

Die Sterne

1938-1986 in Kassetten: **Fr. 150.– (Abholpreis)**

Tel 01/830 36 30