

Este artículo aparecerá publicado en el Anuario Astronómico del Observatorio de Madrid para el año 2003.

ONDAS DE DENSIDAD Y EVOLUCION DE GALAXIAS

Santiago García Burillo

Observatorio Astronómico Nacional (OAN)

Instituto Geográfico Nacional (IGN)

Abstract

Spiral structure is present in a high percentage of disk galaxies. The existence and maintenance of spiral structure is best explained in terms of self-consistent density waves. The most frequent gravitational instabilities in disks are two-arm spirals and bars. These non-axisymmetric modes change during the galaxy life time and are the main drivers of the evolution of disks, through angular momentum transfer and mass accretion. The current understanding of disk galaxies pictures a density wave-driven evolution from late types towards early types along the Hubble sequence.

Resumen

La estructura espiral está presente en un porcentaje muy elevado de galaxias. La existencia y mantenimiento de la estructura espiral se interpreta satisfactoriamente en el marco de la teoría de las ondas de densidad. Las inestabilidades gravitatorias más frecuentes son las espirales de dos brazos y las barras. Estas perturbaciones no son ondas cuasi-estacionarias, sino que cambian a lo largo de la vida de una galaxia. Las ondas de densidad constituyen el principal motor de evolución de las galaxias, al modificar la distribución del momento angular y la masa de los discos. Actualmente se interpreta que las ondas de densidad determinan la transformación de las galaxias espirales desde los tipos tardíos hacia los tipos tempranos a lo largo de la secuencia de Hubble.

Introducción

La mayor parte de las galaxias con disco (ó *tipo disco*) presentan una estructura espiral. Este hecho revela que la distribución de la materia en los discos es aparentemente no axisimétrica. En algunos casos, la morfología espiral es sorprendentemente regular y se extiende en un amplio rango de radios. En conjunto, las galaxias espirales constituyen la mayoría de las galaxias del Universo ($\sim 2/3$ del total). Su existencia en un porcentaje tan elevado de galaxias implica que existe en ellas un mecanismo que la convierte en estable o al menos en fácilmente generable.

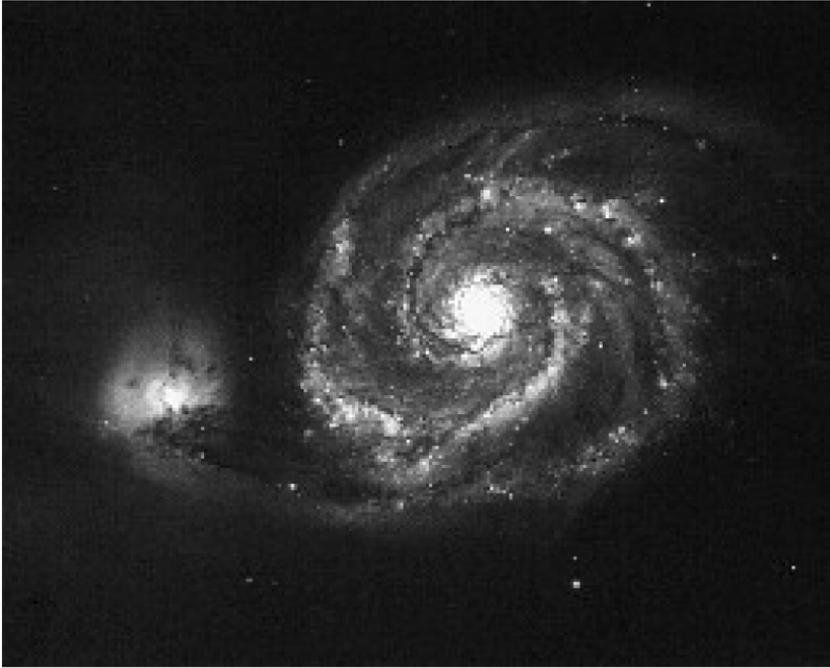


Figura 1: Imagen óptica de la galaxia M51: galaxia espiral gran diseño, donde la estructura espiral interna ha sido excitada por las fuerzas de marea debidas a la interacción con la galaxia compañera NGC5195.

La estructura espiral constituye un factor esencial para entender la formación y la evolución de las galaxias. La clara manifestación de esta estructura en las imágenes ópticas de estos objetos, se debe a que la mayor parte de las estrellas de una galaxia espiral se forman en los brazos espirales: es en éstos donde se concentran las estrellas más jóvenes y más masivas. Por otra parte, como veremos, la estructura espiral constituye un medio muy eficaz para transportar momento angular desde las partes internas de los discos al exterior. Este transporte permite redistribuir la masa en los discos, formándose concentraciones en los núcleos y alterando la naturaleza de las inestabilidades gravitatorias que determinan en parte la evolución de las galaxias.

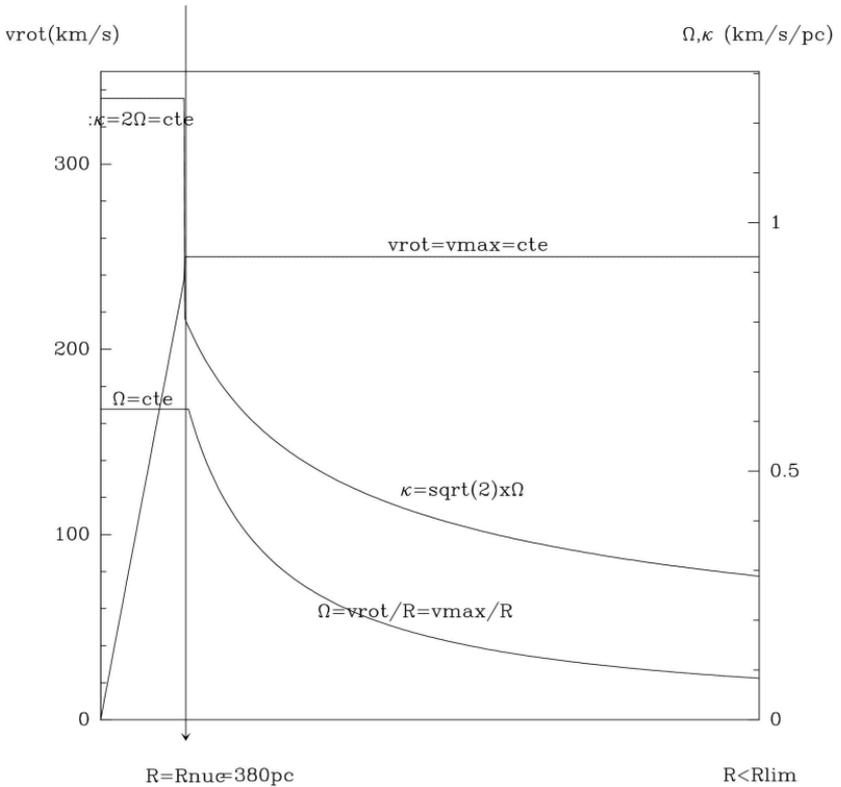


Figura 2: Esquema de la curva de rotación de una galaxia, expresada en términos de la velocidad lineal de rotación V_{rot} , la velocidad angular de rotación Ω y la frecuencia epicyclica κ .

La estructura espiral de las galaxias: la contrapartida observacional

La propia existencia de las galaxias espirales plantea un importante desafío teórico. La rotación observada en las galaxias tipo disco está caracterizada por una curva plana en un amplio rango de radios. En argot astronómico, se dice que las galaxias tipo disco presentan *rotación diferencial*. Grosso modo, la velocidad de rotación (v_{rot}), crece linealmente desde el centro hasta una distancia radial R_{nuc} donde alcanza un valor v_{max} . El valor de R_{nuc} es mucho menor que el tamaño óptico del disco de la galaxia (R_{lim}). Para radios comprendidos entre R_{nuc} y R_{lim} la velocidad de rotación permanece aproximadamente constante. Mas aún, en algunas galaxias la velocidad de rotación permanece constante para $R > R_{lim}$. Esto implica, entre otras cosas, que el periodo de rotación de la materia en una galaxia

típica es más de 10 veces menor en la región central que en la parte externa ó borde del disco. Equivalentemente, la velocidad angular de giro de la materia (Ω) decrece con el radio como $\sim 1/R$. Las consecuencias de este hecho observacional para explicar la estructura espiral son importantes: los brazos espirales no pueden explicarse como una estructura *material*, es decir, formada siempre por las mismas partículas (estrellas, gas). Si así fuera, el modo en que gira la materia en los discos de las galaxias haría disolver *rápidamente* los brazos. En efecto, debido a la diferencia entre periodos de rotación, toda estructura espiral, al tener dimensión radial no nula, acabaría enrollándose sobre sí misma en apenas $\sim 10^8$ años. Históricamente se conviene en llamar a este dilema, el del enrollamiento (ó *winding*) de la estructura espiral.

Previa a la elaboración de una teoría formalmente satisfactoria, existía el convencimiento en muchos astrónomos de que para resolver el dilema se debía postular que los brazos espirales giran solidariamente como un sólido rígido con la misma velocidad angular, es decir como un patrón fijo a $\Omega = \Omega_p$. De este modo la estructura giraría y se propagaría sin deformación y las “partículas” (estrellas y gas) entrarían y saldrían de los brazos como si éstos representaran una perturbación ondulatoria, al modo de las gotas de agua en una ola del mar. El mantenimiento de esta estructura se debería a la gravedad de las estrellas, que constituyen la mayor parte de la masa de las galaxias.

La interpretación de la estructura espiral como una onda tiene como objetivo fundamental explicar su estabilidad y por tanto su ubicuidad en el Universo. La teoría de ondas de densidad, elaborada en origen por Lin y Shu entre los años 1960-70 intenta encontrar una solución cuasi-estacionaria a las ondas espirales, en un entorno como el de una galaxia disco típica. Las observaciones de galaxias espirales subrayan la necesidad de encontrar una solución duradera: en efecto, la estructura espiral, aunque trazada de forma más espectacular por los objetos jóvenes en las imágenes ópticas (dominadas por la emisión del gas ionizado y de las estrellas masivas), también está presente en las estrellas viejas, como lo delatan las imágenes obtenidas en el infrarrojo cercano de gran número de objetos. Dado que la edad de las estrellas viejas es del orden de $\sim 10^9$ años, a priori éste sería el límite inferior a la estabilidad de las ondas, al menos en estos objetos.

Una conclusion relevante, extraída de las observaciones, es que no todas las galaxias espirales son *iguales*. Existen galaxias con estructura espiral de dos brazos, asombrosamente regular y bien definida, llamadas galaxias *gran diseño*. También existen galaxias regulares con más de dos brazos espirales (tres, cuatro,...), así como galaxias con estructura espiral poco definida, llamadas galaxias *floculentas*. Contrariamente a las galaxias *gran diseño*, en las galaxias *floculentas* las estrellas viejas no trazan la estructura espiral. El resultado del análisis fotométrico de estos objetos indica que

los brazos son filamentos no persistentes, trazados por la población joven del disco. La explicación a esta estructura efímera sería el resultado de la propagación de la formación de estrellas jóvenes en brazos meramente *materiales*. En cualquier caso, la amplia variedad de galaxias espirales sugiere desde el principio que la explicación a encontrar para la morfología espiral de las galaxias no será única, ó/y que ésta debe verse como una estructura cambiante o evolutiva.

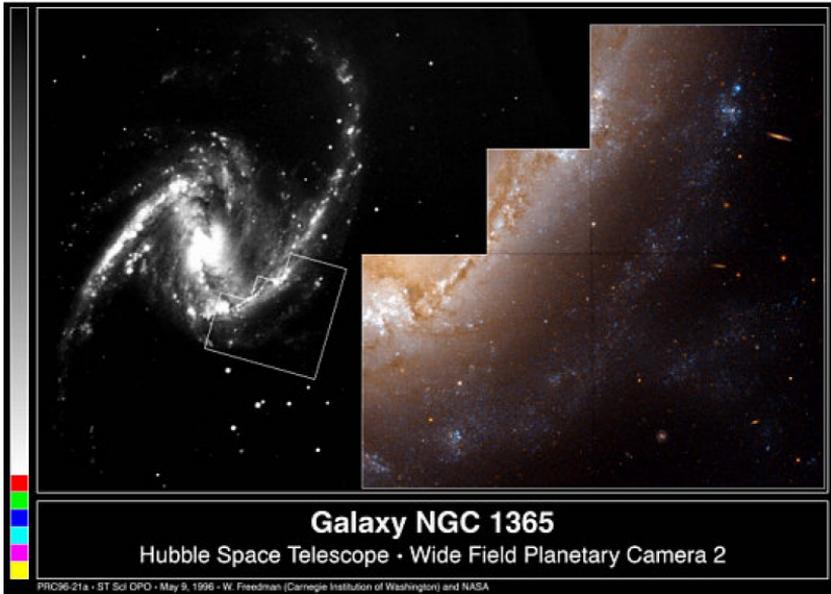


Figura 3: Imagen de la galaxia espiral barrada NGC1365, obtenida por el telescopio espacial Hubble. En este caso, la estructura espiral nace de los extremos de la barra central. Cortesía de NASA/STScI.

La cinemática observada del gas en las galaxias espirales añade evidencias de que los brazos espirales reflejan la respuesta a ondas de densidad en el disco. En mayor ó menor medida, el gas en los brazos espirales sufre desviaciones significativas respecto a la rotación circular. La existencia de movimientos no-circulares es una de las predicciones de la teoría de ondas de densidad.

Por último, hay que reseñar que de acuerdo con los estudios realizados en longitudes de onda del infrarrojo cercano, la mayor parte ($\sim 2/3$) de las galaxias espirales son, además, galaxias barradas. Las *barras* son estructuras biaxiales o triaxiales. Se pueden describir como elipsoides de dos o tres ejes y al igual que las espirales definidas, están trazadas por la población vieja del disco. Barras y espirales parecen íntimamente ligadas

y cualquier teoría plausible deberá dar cuenta de la persistencia simultánea de ambas en gran número de galaxias.

La estructura espiral: el punto de vista teórico

Ondas cinemáticas

El comportamiento colectivo del elevado número de estrellas que constituye el disco de una galaxia típica ($\sim 10^{10}$ - 10^{12}) se entiende mejor si analizamos las órbitas individuales de las estrellas, o más exactamente, si estudiamos la familia de órbitas *fundamentales* del disco.

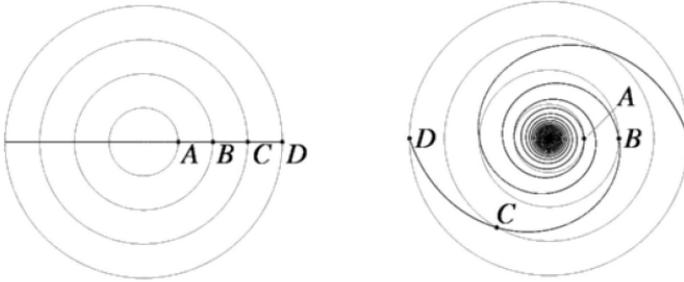


Figura 4: Figura que ilustra el efecto de la rotación diferencial, característico de las galaxias espirales, sobre la disolución de los brazos materiales. La figura formada por tres puntos, inicialmente alineados a lo largo de un radio (A,B,C,D), se disuelve formando espirales cada vez mas enrolladas en el tiempo de una ó dos rotaciones típicas.

La aproximación epicíclica estudia la descripción aproximada de las órbitas estelares en una galaxia tipo disco con rotación diferencial (velocidad aproximadamente constante, $v=v_o$). En primer orden (aproximación lineal), si perturbamos ligeramente la órbita de una estrella, la trayectoria puede verse como la composición de un movimiento de rotación pura, ejecutada con la frecuencia angular $\Omega= v_o/R$, y una oscilación epicíclica, ejecutada con una frecuencia κ que depende del radio R. El epiciclo es un movimiento retrógrado sobre una elipse, vista desde el referencial que gira a $\Omega= v_o/R$. Desde el observador en reposo, la órbita de la estrella es un ciclo o roseta que no se cierra después de dar una vuelta, a menos que la razón Ω/κ sea un número racional. De hecho, en la zona de rotación plana, que ocupa la mayor parte del disco, esta razón vale $\Omega/\kappa=1/\sqrt{2}$. Por tanto, desde el observador en reposo las órbitas estelares no serán cerradas. No obstante, y precisamente debido a que la rotación es diferencial, la frecuencia $f(R)= \Omega-\kappa/2$ sí es aproximadamente constante en un amplio rango de radios para la mayor parte de las galaxias.

Si describimos el movimiento de las estrellas desde un sistema de referencia que gira a la velocidad angular $\Omega_p = \Omega - \kappa/2$ (más ó menos constante), la velocidad angular relativa de las estrellas será $\Omega_{rel} = (\Omega_p) - (\Omega - \kappa/2) = \kappa/2$. Es decir, para el observador que gira con Ω_p , la razón de frecuencias angular y epicíclica $= \Omega_{rel}/\kappa$ sí es ahora un número racional, igual a 1/2. Como se indica en la figura esto implica que todas las órbitas estelares son cerradas para este observador: las estrellas describen rosetas de dos lóbulos que precesan a una velocidad angular (más ó menos) común ($= \Omega_p$). Cualquier figura formada por la envolvente de estas órbitas precesará (girará) solidariamente sin deformación.

La figura más simple formada por estas órbitas elípticas, para un observador que gira a Ω_p , es la de una barra. Basta con imponer un ligero desfase entre las órbitas elípticas para recrear fácilmente estructuras espirales de dos brazos. Estas figuras, llamadas ondas cinemáticas en la teoría epicíclica, sugieren que tanto espirales como barras son mantenidas sin deformación por un efecto colectivo de alineamiento de las órbitas de las estrellas en el disco. Estás entrarán y saldrán de las crestas de las ondas con una velocidad Ω muy distinta (en general) a la velocidad de precesión del patrón de ondas $\Omega_p = \Omega - \kappa/2$.

La descripción epicíclica explica intuitivamente por qué las galaxias que giran con rotación diferencial tienen tendencia a formar *fácilmente* patrones cinemáticos de tipo espiral o barrado por efecto colectivo de alineamiento de sus órbitas *fundamentales*. Sin embargo, la teoría de las *ondas cinemáticas* (elaborada por Lindblad y Kalnajs), no podía prever cuál sería la influencia que la gravedad de las propias estrellas tendrá en el posible mantenimiento (¿por cuánto tiempo?) de la perturbación espiral/barrada. Como se señaló antes, la frecuencia de precesión $\Omega - \kappa/2$ es constante sólo aproximadamente. La constancia exacta sólo se da en una determinada posición en el disco, denominada Resonancia Interna de Lindblad. Se llama interna, porque suele estar cerca del núcleo, a distancias del orden de 1 kpc¹. Análogamente existen otras resonancias en las que las frecuencias angulares relativas y la frecuencia epicíclica son conmensurables, es decir, su razón es un número racional. Las más importantes son la Corotación, donde $\Omega = \Omega_p$, y la Resonancia Externa de Lindblad, donde $\Omega_p = \Omega + \kappa/2$ (típicamente en la parte más externa del disco). En las resonancias, las estrellas oscilan en perfecta fase con la perturbación. Estas posiciones juegan un papel fundamental en el mantenimiento, e incluso en la propia destrucción de las ondas.

¹kpc es la abreviatura de kilopársec o mil pársecs, siendo el pársec una unidad de distancia o de tamaño que equivale a unos 3,26 años luz.

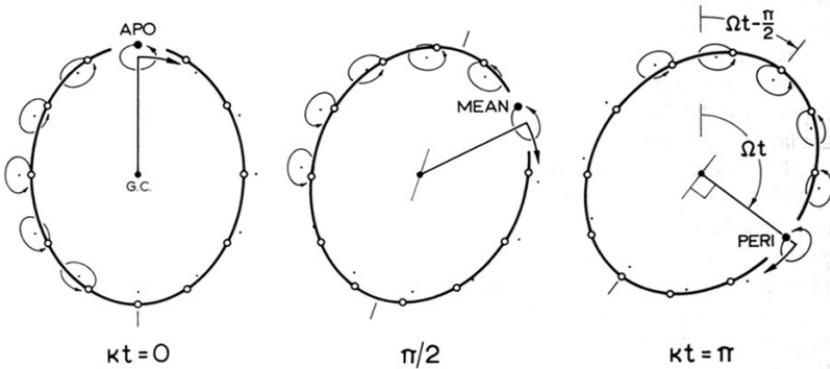


Figura 5: Descomposición de la órbita típica de una estrella en un potencial característico de galaxia tipo disco: el centro guía gira en sentido horario a velocidad angular Ω , mientras la estrella describe un epiciclo (en sentido antihorario) alrededor de éste (aproximación epicíclica) según Toomre. (Publicada con permiso de Annual Review of Astronomy and Astrophysics, volumen 15, © 1977 de Annual Reviews www.AnnualReviews.org)

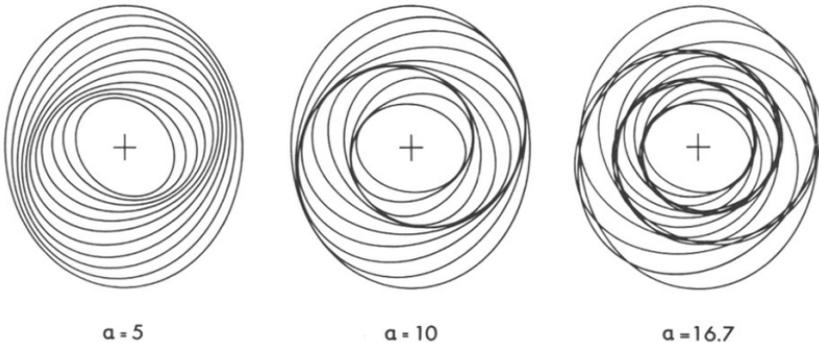


Figura 6: Diferentes ondas cinemáticas formadas por la envoltura de las órbitas fundamentales, que serán cerradas para un observador que gira a $\Omega = \Omega - \kappa/2$ según Toomre. (Publicada con permiso de Annual Review of Astronomy and Astrophysics, volumen 15, © 1977 de Annual Reviews www.AnnualReviews.org)

Ondas de densidad: espirales y barras

El tratamiento riguroso de la inclusión de la gravedad sólo fué hecho posteriormente por Lin y Shu, quienes elaboraron una teoría dinámica (autoconsistente) de las ondas de densidad espirales. Sin entrar en los muy laboriosos detalles de la teoría de ondas de densidad, diremos que ésta consigue encontrar una solución que ajusta exactamente en *casi* todo el disco una frecuencia de precesión para las órbitas de las estrellas; la frecuencia es ligeramente distinta a la sugerida en el marco de la aproximación epicíclica. El gran éxito de este modelo es lograr el ajuste, gracias a la gravedad, no sólo en las resonancias. En la práctica, el ajuste se hace posible haciendo depender la frecuencia de la longitud de onda, es decir, a través de una relación de dispersión. Análogamente a lo que ocurre en otros sistemas físicos, los discos de las galaxias no pueden mantener *cualquier tipo* de onda espiral. Esta limitación queda plasmada en la referida relación de dispersión.

En un principio, la explicación de la estructura espiral/barrada sólo consideró el papel de las estrellas. El gas presente en los discos representa un porcentaje pequeño de la masa total de éstos (5–10%) y su influencia en el mantenimiento de las ondas fue por esta razón ignorado a priori. El gas era más bien un sujeto pasivo, que sufría (violentamente) las perturbaciones ondulatorias generadas por las estrellas. Como veremos, sin embargo, el papel del gas es decisivo para explicar la evolución de las ondas en el disco.

Las estrellas colaboran en el mantenimiento de la espiral si sus movimientos desordenados (dispersión de velocidades) son suficientemente pequeños, de modo que éstos no les *saquen* de los pozos de potencial de la onda espiral. Más exactamente, el mantenimiento de ondas espirales en los discos sólo se produce si la razón de la dispersión de velocidades de las estrellas a la densidad superficial de masa es inferior a un valor crítico. El anterior criterio de estabilidad se conoce con el nombre de criterio de Toomre; fue inicialmente aplicado a inestabilidades axisimétricas en discos. Los discos demasiado *calientes*, i.e. con valores muy altos de la dispersión de velocidad en las estrellas, no pueden mantener ondas espirales. Esta limitación estaba también implícita en la relación de dispersión de las ondas.

Inicialmente, la solución propuesta por Lin y Shu era cuasi-estacionaria, es decir, destinada a durar más que los brazos materiales que, como vimos, acaban disolviéndose incómodamente debido a la rotación diferencial que caracteriza al disco. Sin embargo, al igual que ocurre con ondas de otro tipo, las espirales también se amortiguan. El proceso de amortiguamiento implica que las ondas viajan radialmente en el disco y depositan (devuelven) parte de su energía a las estrellas, que la toman en forma de movimientos desordenados, en definitiva, *calentando* al disco. El intercambio se produce sobre todo en las resonancias, concretamente en la Resonancia Interna

de Lindblad a donde las ondas viajan y se disipan. Análogamente, las olas del mar viajan y disipan su energía cuando llegan a la playa. Las espirales deben verse como paquetes de onda (no son ondas monocromáticas) que viajan con velocidad de grupo (en dirección radial dentro del disco) no nula.

Los teóricos encontraron soluciones que impedían el amortiguamiento rápido de las ondas al llegar a la Resonancia Interna de Lindblad. En determinadas circunstancias, las ondas se reflejan antes de llegar a ésta. El proceso implica reflexiones sucesivas de ondas en el disco entre la Resonancia Interna y la Resonancia Externa (como si fueran ondas *rebotando* en una cavidad). Lo atractivo de esta solución es que las ondas espirales cambiaban de aspecto (cambiaba el sentido de enrollamiento de la espiral), y sobre todo, las reflexiones hacían que las ondas se amplificasen considerablemente durante algunas fases del proceso. No obstante, cuando no se dan las circunstancias para que la amplificación de las ondas espirales sea eficaz, el disco de estrellas se calienta y los brazos espirales desaparecen. El desarrollo de simulaciones numéricas que siguen la evolución de los discos estelares en tiempo real, ilustra cómo las ondas espirales aparecen, pueden amplificarse en algunos casos, pero normalmente acaban disolviéndose. Un resultado fundamental de estos estudios era que en la mayoría de los discos de estrellas la desaparición espontánea de las ondas espirales no produce un disco amorfo, sin estructura, sino que da paso a la aparición de barras. Las barras, al igual que las espirales, son también ondas de densidad mantenidas por las estrellas, pero son mucho más estables que éstas.

El predominio de las barras como ondas estables explica de forma satisfactoria por qué la mayoría de las galaxias espirales son, además, barradas. En efecto, cuando se estudia la respuesta del gas a una onda estelar barrada, lo que se obtiene es una onda espiral. Los discos de estrellas forman espirales, éstas evolucionan, pueden amplificarse, pero normalmente se disuelven dando lugar a ondas barradas. A su vez, el gas responde a la onda barrada dando lugar a una espiral que acompañará a la barra. Las barras vuelven a generar espirales en el gas. El gas forma estrellas y la inestabilidad espiral se regenera en parte.

En conclusión, el incómodo problema de la desaparición de las ondas espirales no hace más que subrayar que debemos renunciar a ver éstas como ondas cuasi-permanentes, es decir durables sin cambios significativos a lo largo de la vida de una galaxia típica (10^9 – 10^{10} años, es decir unas decenas de periodos de rotación). Si las espirales no duran por sí mismas, agentes *externos* o *internos* pueden renovarlas periódicamente. Como ya hemos mencionado, la evolución de las espirales conduce necesariamente a la formación de barras, y éstas a su vez vuelven a formar espirales, gracias a la intervención del gas. Las barras serían agentes *internos*. Las interacciones entre galaxias, por intermedio de las fuerzas de marea,

también pueden excitar ondas en los discos. Las mareas intergalácticas, similares conceptualmente a las mareas terrestres, actúan deformando la parte externa de los discos de las galaxias interactuantes. Esta deformación bisimétrica desencadena una onda espiral interna. Las interacciones serían agentes *externos*. De hecho, la mayoría de las galaxias *gran diseño*, con estructura espiral muy definida, son claros ejemplos de galaxias interactuantes.

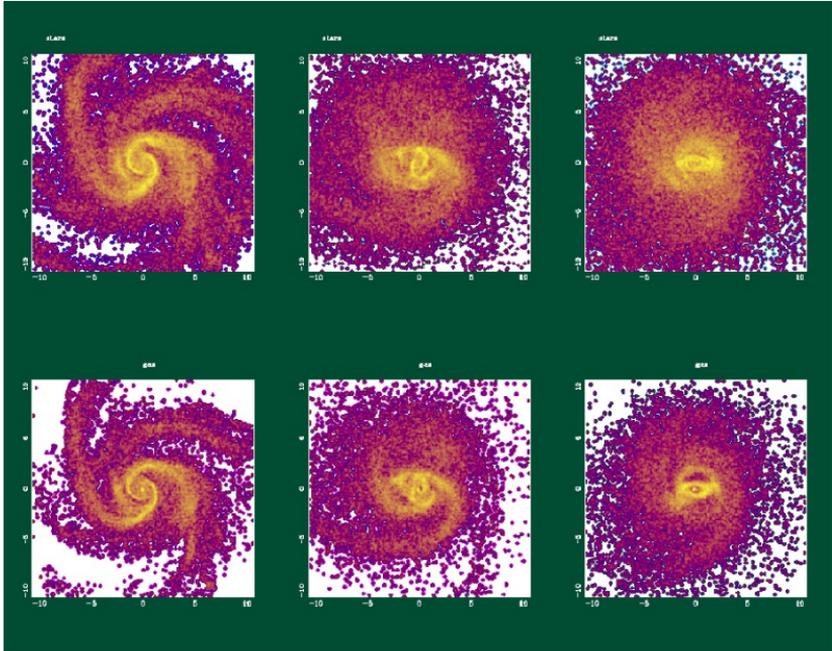


Figura 7: Simulaciones numéricas de la evolución de un disco de estrellas y gas, representativo de una galaxia espiral con rotación diferencial. La evolución se sigue para las estrellas (paneles superiores) y el gas (paneles inferiores) en intervalos de 2×10^8 años. El estado axisimétrico inicial da paso a la formación de una estructura espiral en el disco de estrellas que empieza a disolverse al cabo de 3-4 rotaciones (ver fig. 8 para continuación). Cortesía de F.Combes.

Las ondas de densidad como motor de evolución

En la sección anterior hemos visto que las ondas cambian a lo largo de la vida de una galaxia. Esos cambios, no son sólo sufridos pasivamente por los discos, sino que generan a su vez cambios más importantes. Las ondas

de densidad (espirales, barras y otro tipo de inestabilidades gravitatorias) constituyen el principal motor de la evolución de los galaxias.

Si el disco de estrellas es suficientemente *frío*, es decir si satisface el criterio de Toomre, genera una estructura espiral y ésta a su vez genera una barra. El gas se encarga de regenerar la estructura espiral como respuesta. Más precisamente, el gas permite enfriar el sistema de modo eficaz. Todas las ondas ó inestabilidades acaban *calentando* el disco de estrellas: sencillamente las ondas, al amortiguarse, ceden energía a las estrellas en forma de movimiento desordenado. Si el disco está demasiado *caliente*, desaparecen las inestabilidades. Incluso las barras, más estables, pueden desaparecer si el disco está formado exclusivamente por estrellas. Las estrellas no pueden ceder el exceso de energía cedido por la onda facilmente, pero el gas sí. Eso es debido a que las nubes de gas colisionan y disipan energía por radiación. Sin embargo, la probabilidad de colisión entre las estrellas es muy baja. Podemos decir que aunque las ondas calientan (aumentan la dispersion de velocidades) tanto al disco de estrellas como al disco de gas, sólo el gas es capaz de disipar la energía. Si el gas se enfría, éste a su vez, acoplado dinámicamente a las estrellas, acabará enfriando al conjunto del disco. Cuando este baje su *temperatura* equivalente otra vez, las inestabilidades aparecen de nuevo, y así se empieza un nuevo ciclo. En cierto modo, el disco de gas y estrellas actúa autoregulándose. Las ondas son un termostato para el sistema. Aunque el gas supone un pequeño porcentaje de la masa total de una galaxia espiral típica, es esencial para el mantenimiento y la evolución de las inestabilidades gravitatorias.

Hasta ahora hemos mencionado el intercambio de energía entre las ondas y las partículas del disco (estrellas ó/y gas). También las ondas intercambian (ceden o quitan) momento angular a la materia. El gas, por su naturaleza disipativa, es más sensible al intercambio de momento angular con la onda. Tanto las barras como las espirales tienen como efecto fundamental quitar momento angular al gas que se encuentra entre la Resonancia Interna de Lindblad y la Corotación. Al ceder momento angular, el gas tiende a acumularse en los núcleos. Las ondas redistribuyen eficazmente la materia de los discos. Pero esta redistribución no resulta inocua para la evolución de las propias ondas: cambiar la distribución de masa conlleva alterar las condiciones que permiten el desarrollo de las ondas. Por ejemplo, las barras, al inducir la caída de gas hacia el núcleo, pueden acabar autodestruyéndose: el disco nuclear compacto, formado por la caída de gas se puede desacoplar de la barra madre y se *independiza*, formando una barra mas pequeña. Otro tipo de ondas de densidad nucleares se han descrito: espirales internas, inestabilidades asimétricas, etc.... Algunas de estas inestabilidades nucleares están directamente relacionadas con la alimentación de los agujeros negros masivos, que se encuentran en los núcleos de la mayoría de las galaxias espirales. La caída del gas hacia el agujero

negro produce emisión de una gran cantidad de energía. Durante esta fase, la galaxia se denomina *galaxia con núcleo activo*.

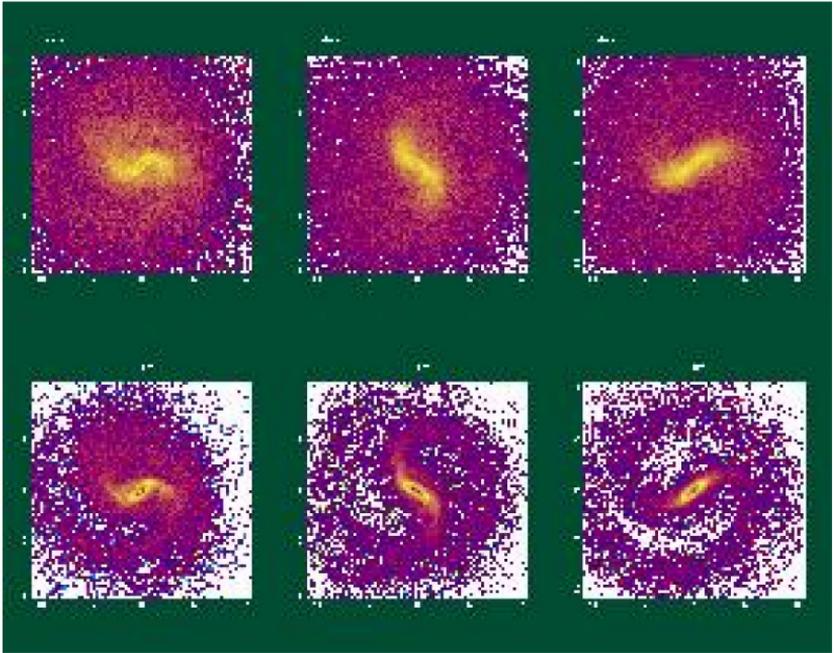


Figura 8: La estructura espiral se disuelve, formando una barra al cabo de 4 o 5 rotaciones. La respuesta del gas a ésta es una espiral a la que acompaña la formación de un anillo nuclear. Cortesía de F.Combes.

El proceso secular de caída del gas al núcleo, por intermedio de las ondas, cambia la estructura del disco. La acumulación de materia cambia además la relación de masas entre el bulbo (componente central de la galaxia) y el disco. En la actualidad se piensa que las ondas de densidad hacen evolucionar las galaxias espirales desde los tipos tardíos (con relación bulbo/disco baja) a los tipos tempranos (con relación bulbo/disco grande), es decir, en sentido contrario a como postuló originalmente Edwin Hubble.

Pero el gas puede llegar a acabarse: en definitiva, el gas formará estrellas en su viaje hacia el núcleo. Esto no supone que la evolución del disco haya terminado, sin embargo. Las galaxias no se encuentran aisladas en el Universo, sino que interactúan. Una interacción *suave* entre dos galaxias suele implicar la acreción por una de ellas de parte del gas de la compañera.

Una vez que el gas se ha acregado, la evolución del disco puede iniciarse nuevamente.

Bibliografía

A.Toomre, *Theories of Spiral Srtructure*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1977, vol. 15, págs. 437-478

J.Binney and S.Tremaine, *Galactic Dynamics*, Princenton Series in Astrophysics, 1987

F.Combes, P.Boissé, A.Mazure and A.Blanchard, *Galaxies et Cosmologie*, Savoir Actuels, Editions du CNRS, 1991

J.Binney and M.Merrifield, *Galactic Astronomy*, Princenton Series in Astrophysics, 1998

L.S.Sparke and J.S.Gallagher, *Galaxies in the Universe*, Cambridge University Press, 2000