

Hemos encontrado que la estructura morfológica del gas ionizado en estos sistemas es similar, aunque con diferencias, a la de la componente estelar. Estas diferencias pueden atribuirse al efecto combinado de la extinción diferencial y las características de las poblaciones estelares presentes.

Por otra parte, estos sistemas presentan una cinemática no regular, que no puede asociarse a rotación simple de un disco, y que está dominada por el proceso de fusión. Además, existen indicios de supervientos en las zonas centrales de las tres galaxias, por lo que éste podría ser un fenómeno muy habitual en las ULIRGs.

En lo que a la extinción se refiere, su estructura en estas galaxias es claramente no uniforme y mayor hacia las zonas centrales. El no considerar los efectos de la extinción diferencial puede provocar una sobreestimación de la masa $\lesssim 15\%$.

Fuera de las regiones nucleares, se ha encontrado una correlación entre el estado de ionización de una determinada zona del sistema y la dispersión de velocidades que resulta compatible con la existencia de espectros de tipo LINER asociados a choques provocados por el proceso de fusión.

En relación a la fuente capaz de explicar la enorme

luminosidad de estos sistemas, los brotes de formación estelar detectados en el óptico e infrarrojo pueden dar cuenta de únicamente $\lesssim 20\%$ de la luminosidad total de estos sistemas, estando la fuente responsable del resto de la luminosidad oculta a estas longitudes de onda. Argumentos dinámicos y observaciones en otros rangos del espectro parecen indicar que el resto de la luminosidad se puede explicar mejor por brotes de formación estelar que por un agujero negro similar al que se encuentra en los cuásares ópticos.

Estas galaxias muestran gran cantidad de formación estelar fuera del núcleo que parece seguir una evolución paralela al proceso de fusión. En los tres sistemas se han encontrado regiones de formación estelar extranucleares con propiedades que las convierten en buenas candidatas a Galaxias Enanas de Marea.

Por último, la observación de sistemas similares a las ULIRGs pero a mayor desplazamiento al rojo es complicada. En caso de utilizar rendija larga, se perderían los detalles de su compleja estructura, mientras que con ECI, resultaría complicado conseguir una S/R suficiente para realizar un estudio similar al desarrollado en la presente tesis.

FAST MAGNETOHYDRODYNAMIC WAVES IN LINE-TIED SOLAR CORONAL FLUX TUBES

Antonio Jesús Díaz Medina

toni.diaz@uib.es

Tesis doctoral dirigida por Jose Luís Ballester Mortes y Ramón Oliver Herrero

Centro: Universitat de les Illes Balears

Fecha de lectura: 25 de junio de 2004

El objetivo de esta tesis es estudiar los modos magnetohidrodinámicos (MHD) rápidos que soportan estructuras coronales ancladas en la fotosfera. En particular, se han estudiado de forma teórica las ondas MHD en distintos tipos de estructuras coronales sujetas a la condición de *line-tying*, concentrándonos en modos de oscilación estacionarios, sobretudo en sus frecuencias y la distribución espacial de la amplitud de dichos modos. Hemos caracterizado los modos propios de oscilación de dos tipos de estructuras presentes en la corona: bucles coronales (*coronal loops*), tubos anclados en la fotosfera llenos de material caliente, y fibrillas de protuberancias solares (*prominence fibrils*), que

son la estructura fina de nubes densas y frías en la corona (protuberancias). Para su estudio hemos incluido algunas simplificaciones: hemos alineado las estructuras con el eje z cartesiano y hemos supuesto que el plasma en cada región es uniforme.

Para hallar las soluciones, linealizando las ecuaciones de la MHD hemos deducido un par de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales para la perturbación de la presión magnética y de la velocidad. Considerando el valor de la β del plasma muy pequeño (es decir, despreciamos los efectos de la presión hidrodinámica en la ecuación del movimiento) se obtiene la ecuación de Laplace para la perturbación de la presión magnética. Sin em-

bargo, es necesaria una segunda ecuación para la perturbación de velocidad, ya que interviene en las condiciones que rigen la perturbación en las superficies de contacto entre plasmas con distintas propiedades.

Partiendo de estas ecuaciones diferenciales, hemos aplicado separación de variables para su resolución. Debido a la condición de *line-tying* se obtiene un problema de Sturm-Liouville, que hemos resuelto analíticamente en los casos sencillos y numéricamente en casos más realistas. La solución analítica incluye el uso de todas las autofunciones del problema, por lo que obtenemos un sistema de ecuaciones para los coeficientes de cada autofunción. De la condición para obtener soluciones no triviales obtenemos las relaciones de dispersión que gobiernan los modos.

Una vez obtenidas las relaciones de dispersión, podemos aplicar los resultados a modelos de las estructuras coronales que queremos estudiar. En primer lugar hemos tratado los *bucles coronales*, modelándolos como tubos cilíndricos de plasma más denso que el material coronal que los rodea. En el caso de un tubo homogéneo (alejado de la realidad, pero útil como primer ejemplo), comprobamos que la condición de *line-tying* motiva la aparición de más familias de modos confinados respecto a los resultados clásicos de un tubo infinito. Sin embargo, si se añade algún tipo de estructura en el eje z (es decir, en dirección longitudinal), tal como una capa densa en los pies simulando la cromosfera, estas nuevas familias desaparecen, quedando sólo superposiciones de ellas, aunque las frecuencias son similares a las de los modos del tubo homogéneo dominantes.

Además, hemos estudiando los cambios al introducir perfiles de densidad en el eje z . Para ello, hemos asumido distintos perfiles de calentamiento coronal con sus correspondientes equilibrios y hemos hallado los modos de oscilación del bucle. En los modelos que hemos utilizado la densidad es relativamente uniforme cerca del ápex y crece al acercarse a los pies, pero como éstos están anclados en la fotosfera, la amplitud de la oscilación es muy pequeña en la región de más densidad y

los modos tienen una frecuencia similar a la de un tubo homogéneo con la densidad del ápex, pero con algo más de amplitud cerca de la fotosfera. Además, las diferencias entre los distintos tipos de calentamiento son muy pequeñas, por lo que no nos permite distinguir en qué parte actúa éste, sólo con las observaciones.

En lo referente a *fibrillas de protuberancias*, en primer lugar hemos estudiado los modos de oscilación de una única fibrilla, comenzando con un modelo cartesiano ilimitado en una dirección (llamada y) sin propagación a lo largo de la misma. El resultado más importante es que pocos modos quedan atrapados en la fibrilla, mientras que el resto son evanescentes y se propagan por la corona. Además, en los modos supervivientes todo el entorno coronal vibra con la fibrilla (la amplitud no decae hasta unas 1000 veces la anchura de la estructura). Sin embargo, estos resultados son modificados si se permite propagación en el eje y , permitiendo más modos no evanescentes con mejor confinamiento de la energía de la oscilación cerca de la fibrilla.

Por otra parte, también hemos estudiado el caso de más de una fibrilla cartesiana. Como resultado, aparecen modos en fase y en oposición de fase, pero lo más importante es que, para valores de los parámetros similares a los esperados en la corona, el único modo atrapado es aquel en que todas las fibrillas vibran en fase y el medio coronal vibra con ellas con casi la misma amplitud (de manera similar a toda la protuberancia oscilando como un bloque homogéneo), pero con una frecuencia distinta a la de una única fibrilla.

En último lugar, hemos hallado los modos de una fibrilla cilíndrica. Sigue habiendo muy pocos modos confinados, pero éstos ya no hacen vibrar todo el entorno, por lo que la energía de la oscilación queda casi toda en la fibrilla. Además, los periodos resultantes dependen de las características del plasma, por lo que podemos hacer *sismología coronal*: determinar parámetros del plasma a partir de las observaciones. Por ejemplo, aplicado a las observaciones de oscilaciones en fibrillas estimamos un campo magnético del orden de 10 Gauss, coherente con otras determinaciones.