



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Measuring gold molecular gas across cosmic time

Frias Castillo, M.

Citation

Frias Castillo, M. (2024, June 20). *Measuring gold molecular gas across cosmic time*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3764659>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3764659>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

RESUMEN

Si miramos hacia arriba en una noche clara, veremos una banda blanca de estrellas cruzando el cielo. Esa es la Vía Láctea, nuestra galaxia. Contiene alrededor de cien mil millones de estrellas, junto con otros componentes como gas, polvo y materia oscura. Nuestro Universo contiene miles de millones de galaxias como la Vía Láctea. El hecho de que existen galaxias más allá de nuestra Vía Láctea es un descubrimiento relativamente reciente, que vino hace poco más de un siglo de la mano de Edwin Hubble. Él demostró que las tenues ‘nebulosas’ que se observaban en el cielo en realidad eran galaxias distantes, a millones de años luz de distancia. Las galaxias contienen dos tipos de materia: materia oscura y materia luminosa. La primera constituye la mayor parte de la materia en una galaxia, aproximadamente el 85 %. Sin embargo, todavía hay un gran debate sobre qué es exactamente esta materia oscura, ya que no interactúa con los fotones y, por lo tanto, no podemos observarla directamente a través de nuestros telescopios. Por el contrario, la materia luminosa, aunque menos prevalente, forma los miles de millones de estrellas, planetas, gas y polvo dentro de las galaxias. El gas y el polvo dispersos entre las estrellas forman el medio interestelar (ISM) de una galaxia.

Las galaxias se dividen en dos categorías: galaxias formadoras de estrellas, que están formando estrellas muy rápidamente y tienen grandes cantidades de gas; y galaxias inactivas, que tienen una baja tasa de formación estelar y normalmente casi no tienen gas. El gas que se encuentra en las galaxias está compuesto principalmente de hidrógeno, helio y trazas de otros elementos más pesados. A las temperaturas más bajas (alrededor de -220 grados Celsius), dos átomos de hidrógeno se combinan para formar hidrógeno molecular (H_2), que colapsa bajo el efecto de la gravedad para formar nuevas estrellas. Así, el gas molecular frío sirve de combustible principal para la formación de estrellas en las galaxias, y desempeña un papel fundamental en nuestra comprensión de la formación y evolución galáctica.

La evolución de las galaxias es un proceso complejo que abarca miles de millones de años, en escalas espaciales que van desde unos pocos hasta cientos de miles de años luz. Por lo tanto, no es posible estudiar los cambios en una galaxia durante el transcurso de una vida humana. En cambio, aprovechamos la velocidad finita de la luz para observar las galaxias tal como aparecían en el pasado. La luz emitida por galaxias distantes necesita tiempo para viajar hasta nuestros telescopios, permitiéndonos estudiar estas galaxias tal como existían cuando la luz comenzó su viaje. A medida que el universo se expande continuamente, la luz que viaja desde galaxias distantes experimenta un fenómeno conocido como corrimiento al rojo,

lo que causa que su longitud de onda se alargue y se desplace hacia el extremo ‘más rojo’ del espectro. Este corrimiento al rojo (z) puede medirse con precisión para determinar la distancia de una galaxia, revelando así el tiempo transcurrido desde la emisión de la luz. Al observar grandes muestras de galaxias a diferentes corrimientos al rojo (es decir, en diferentes épocas cósmicas), podemos explorar distintas fases evolutivas, desvelando los caminos que dieron forma a las galaxias observadas en nuestro Universo local hoy en día.

Uno de los principales procesos que provocan cambios en las galaxias es la formación estelar. Una multitud de estudios realizados con telescopios como el Telescopio Espacial Hubble, el Telescopio Espacial *Herschel* y GALEX han proporcionado valiosos conocimientos sobre la evolución de la tasa de formación estelar del Universo, particularmente hasta $z \sim 4$, cuando el Universo tenía aproximadamente 1.600 millones de años. En los últimos años se ha llevado a cabo un esfuerzo paralelo para establecer cómo cambia el contenido de gas en las galaxias con el tiempo. Estos estudios respaldan una estrecha conexión entre el gas molecular disponible en las galaxias y la cantidad de estrellas que se están formando en una época cósmica dada. Sin embargo, medir la cantidad de gas frío es una tarea complicada, sobre todo en galaxias distantes. Las moléculas de H_2 necesitan condiciones específicas, como altas temperaturas o fuentes energéticas cercanas, para emitir luz, y estas condiciones no siempre se dan donde se encuentra la mayor parte del gas molecular frío en una galaxia. Para solucionar esto, podemos inferir la cantidad de H_2 en una galaxia en el Universo local observando la emisión proveniente del primer estado excitado de la molécula de monóxido de carbono, CO(1-0). Sin embargo, a mayores corrimientos al rojo, esta emisión se vuelve demasiado débil, lo que a menudo ha requerido el uso de métodos alternativos para medir la cantidad de gas. No obstante, estas alternativas a menudo introducen sesgos en la interpretación de los datos, lo que puede afectar potencialmente nuestra comprensión de los modelos de evolución de las galaxias.

Radiointerferómetros

Los átomos y moléculas que constituyen el gas en las galaxias emiten radiación en longitudes de onda submilimétricas. Para observarlas, es necesario utilizar radiointerferómetros. Estos son conjuntos de antenas distribuidas en una gran área que funcionan colectivamente como un solo telescopio cuando sus señales se combinan. Los radiointerferómetros generalmente se sitúan a grandes altitudes para mitigar las perturbaciones atmosféricas. En esta tesis, utilizamos el *Karl J. Jansky* Very Large Array (JVLA) en Nuevo México, el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) en el Desierto de Atacama, Chile, y el Northern Extended Millimeter Array (NOEMA) en los Alpes franceses. Estos instrumentos son capaces de detectar las débiles señales de gas frío en galaxias distantes, operando en longitudes de onda ligeramente inferiores a un milímetro.

Los objetivos más obvios para detectar la débil emisión de CO(1-0) son las galaxias submilimétricas (SMGs, por sus siglas en inglés), que contienen grandes cantidades de polvo y están formando estrellas a gran velocidad, conocidas así debido a la longitud de onda en la que fueron descubiertas por primera vez. Sin

embargo, para observar el gas frío en una galaxia, es necesario conocer su distancia o corrimiento al rojo. Hay dos formas de determinar el corrimiento al rojo: fotométrico y espectroscópico. Los corrimientos al rojo fotométricos se derivan calculando la media del brillo de una galaxia en un rango de longitudes de onda dado y ajustando un modelo de emisión para determinar su corrimiento al rojo. Esto significa que los corrimientos al rojo fotométricos son más fáciles de obtener para grandes muestras de galaxias, aunque son muy inciertos. Los corrimientos al rojo espectroscópicos, por el contrario, requieren observar la emisión proveniente de una galaxia en un rango continuo de frecuencias hasta que una o más líneas de emisión son detectadas e identificadas, y son más fiables que los fotométricos. Esto requiere más tiempo de observación, lo que ha llevado a que en la actualidad un número limitado de SMGs tenga corrimientos al rojo espectroscópicos confirmados. Estudios recientes con ALMA y NOEMA han investigado unos pocos cientos de SMGs en regiones del cielo extensamente estudiadas, expandiendo la muestra de SMGs donde ahora podemos observar la emisión de CO(1-0).

Esta Tesis

En esta tesis, utilizamos la gran sensibilidad de los radiointerferómetros más avanzados para detectar y medir gas molecular usando el trazador de gas más ampliamente utilizado: la transición del estado fundamental del monóxido de carbono.

El **Capítulo Uno** introduce el estado actual del campo, además de proporcionar la información de fondo necesaria para los capítulos siguientes.

El **Capítulo Dos** presenta algunas de las observaciones más sensibles de CO(1-0) en una galaxia formando estrellas a $z = 3,4$, cuando el Universo tenía solo 1.8 mil millones de años. La distribución del gas está bastante perturbada y se concentra en dos regiones separadas por aproximadamente 11 kpc, lo que sugiere la presencia de dos galaxias que están en proceso de fusionarse. La galaxia está formando estrellas muy rápidamente y pronto agotará su reserva de gas, volviéndose inactiva. Proponemos que estamos observando las últimas etapas del proceso de fusión, lo que está impulsando cambios rápidos en las propiedades físicas de la galaxia.

En el **Capítulo Tres** investigamos la presencia de gas molecular frío en quásares, un tipo de galaxia con un agujero negro activo en su centro. Aunque se ha propuesto que la energía del agujero negro expulsaría el gas de la galaxia, encontramos que el 70% de las galaxias observadas aún tienen grandes cantidades de gas molecular. Sin embargo, también están formando estrellas muy rápidamente, lo que significa que pronto agotarán todo el gas y se convertirán en galaxias pasivas. Mostramos como las simulaciones cosmológicas de la evolución de las galaxias aún no son capaces de reproducir tasas de formación estelar tan altas.

El **Capítulo Cuatro** presenta los resultados iniciales de un proyecto que busca detectar y medir el gas molecular frío en 30 galaxias polvorientas y formadoras de estrellas con el JVLA durante un período conocido como ‘Mediodía Cósmico’ (2-4 mil millones de años después del Big Bang). Encontramos que el gas muestra una amplia gama de condiciones de excitación, aunque estas no parecen depender de ninguna propiedad física de las galaxias que estudiamos, como el corrimiento al rojo

o la tasa de formación estelar. Mostramos que las simulaciones por computadora de galaxias han avanzado mucho en su capacidad de modelar y predecir la cantidad de gas presente en estas galaxias masivas y polvorientas.

El **Capítulo Cinco** presenta observaciones de carbono atómico ([C I]) y emisión de polvo en un subconjunto de las 30 galaxias del estudio del JVLA. Combinándolas con las observaciones de CO(1-0), que es el trazador estándar de gas molecular frío, podemos establecer mejor los factores de conversión necesarios para usar también [C I] y polvo como trazadores de gas. Derivamos masas de gas que concuerdan bien entre sí usando los tres trazadores, apoyando el uso de [C I] para medir masas de gas en galaxias lejanas. No obstante, destacamos la importancia de hacer suposiciones consistentes para derivar masas finales para los tres trazadores. Finalmente, investigamos cómo la radiación más cálida del Fondo Cósmico de Microondas en la época en que se observan las galaxias impacta nuestra capacidad para medir el flujo total emitido por la galaxia. Si bien este efecto es más pronunciado cuando las temperaturas del gas son más frías, su detección sigue siendo un desafío con los datos de los que disponemos actualmente.