



Universiteit
Leiden
The Netherlands

The colours of the extreme universe

Calistro Rivera, G.

Citation

Calistro Rivera, G. (2019, January 10). *The colours of the extreme universe*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/68466>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/68466>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/68466> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Calistro, Rivera G.

Title: The colours of the extreme universe

Issue Date: 2019-01-10

Resumen en español

El Universo observable

Usted está leyendo estas líneas desde algún rincón de la Tierra, uno de los ocho planetas que orbitan nuestra estrella más cercana, el Sol. El Sol es, a su vez, solo un elemento dentro de una estructura compuesta de cientos de billones de estrellas que, unidas por la gravedad, definen a una galaxia, nuestra galaxia, la Vía Láctea. Como la Vía Láctea, trillones de galaxias, de diferentes formas, tamaños, y masas, forman las piezas que constituyen nuestro vasto Universo observable.

La exploración del Universo observable es una actividad inherente a la naturaleza humana, y por ello desde tiempos ancestrales, civilizaciones humanas, desde los babiloneos a los Incas, han enfocado su destreza e imaginación en observar y mapear los cielos. Sin embargo, el estudio científico del Universo observable se ha desarrollado de manera sin precedente a consecuencia de que el telescopio construido por Galileo Galilei evolucionó, mano a mano con la tecnología, en magníficos instrumentos de exploración. Estos instrumentos no sólo nos permiten una visión más profunda del Universo lejano, sino también amplía nuestro espectro observado, permitiéndonos ver y entender el Universo por medio de colores biológicamente invisibles para el ser humano.

La luz que viaja desde el espacio hacia nosotros, los observadores, es la fuente principal de información que tenemos sobre la física del Universo. La velocidad constante de la luz a $\sim 3 \times 10^8$ m/s, es de gran valor para la astronomía, pues nos permite mirar hacia el pasado. La luz producida en posiciones lejanas del espacio-tiempo, por ejemplo cerca al origen del Universo, tarda en llegar hasta el observador a causa de esta velocidad limitada, permitiéndonos presenciar eventos pasados al observar el espacio más profundo. Esta velocidad es también la que define los límites del Universo observable desde nuestra posición en el espacio-tiempo. Adicionalmente, las ondas de luz que viajan hacia nosotros son además ‘expandidas’ a longitudes de onda más largas a consecuencia de la expansión del Universo. Este efecto sobre las ondas de luz es denominado ‘corrimiento al rojo’. Como la expansión del Universo es además acelerada, esto produce un corrimiento al rojo que es siempre mayor en épocas más remotas, sirviendo de este modo como una etiqueta que marca la época en la cual este evento ha ocurrido. Observar con un telescopio es, por consiguiente, similar a viajar con una máquina del tiempo. Y cuando conocemos el corrimiento al rojo de la luz detectada, podemos además saber la época exacta hacia la que estamos regresando. Este fenómeno es de gran utilidad para la astronomía extragaláctica, ya que permite el estudio de la historia cósmica y la formación y evolución de las galaxias, desde los inicios del Universo hasta el tiempo presente.

Mucha información importante – tal como el corrimiento al rojo o el origen físico de la emisión observada – se encuentra codificada dentro de los colores característicos de la luz. Estos colores se originan en las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético que compone la luz. Mientras que el ojo humano puede percibir solamente una parte del espectro – la longitud de onda óptica –, longitudes de onda ‘invisibles’ no solo contienen una gran cantidad de información sobre la física que origina la emisión, sino son fundamentales para tener una visión completa de ésta. Fenómenos físicos de poca energía producen emisión en longitudes de onda radio, microondas e infrarojas, mientras aquellos de alta energía emiten luz ultra-violeta, rayos-x y rayos-gama. En esta tesis, hemos hecho uso paralelo de diferentes telescopios que detectan la emisión de galaxias a través de todo el espectro electromagnético, para de esta forma retratar el Universo temprano en sus diferentes colores. En esta tesis

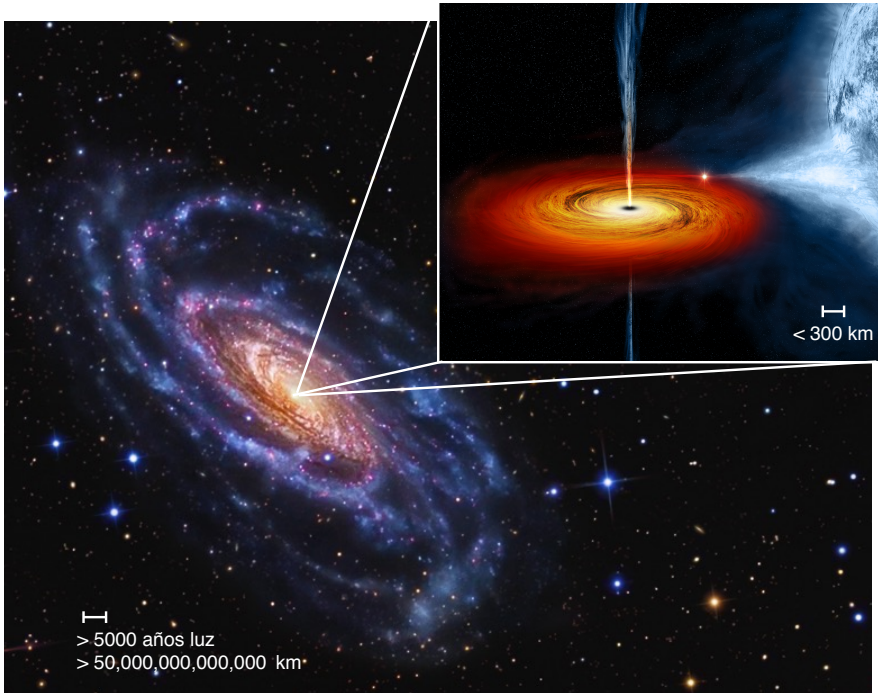


Figure S.12: La escala correspondiente a una galaxia en comparación a la escala del *horizonte de sucesos* de un agujero negro. La *figura principal* es la fotografía de la emisión optical de la galaxia cercana NGC 5033, conocida por albergar dos agujeros negros masivos en su centro. NGC 5033 es una galaxia popular entre astrónomos aficionados pues su tamaño característico y luminosidad permite que sea observada y fotografiada fácilmente. La *figura ampliada* presenta una representación artística de la primera fuente que fue aceptada como un agujero negro (Cygnus X-1). (Crédito por la imagen de NGC 5033: R. Jay GaBany, Cosmotography, y crédito por la representación del agujero negro: NASA/CXC/M.Weiss)

hemos ampliado los límites de la astronomía multi-onda extragaláctica y hemos demostrado cómo estos métodos nos proveen de un entendimiento más completo del Universo distante y extremo.

Los colores de las galaxias y agujeros negros

La física de las galaxias y los agujeros negros es uno de los ejemplos más notables de fenómenos multi-onda en el Universo, pues estos objetos producen una emisión luminosa y característica a través de todo el espectro electromagnético. En efecto, la física de objetos compactos, tal como los agujeros negros, ha demostrado recientemente que van incluso más allá, no solo produciendo ondas electromagnéticas sino también ondas gravitacionales, inaugurando de esta forma la era de la astronomía multi-mensajera.

Aunque las galaxias se forman dentro de halos de materia oscura (un material enigmático) sostenido por la gravedad, este componente no se somete a ninguna otra interacción física más que la gravedad, y por esta razón, tal como sugiere su nombre, no produce ninguna señal electromagnética. La emisión multi-onda en las galaxias se origina en sus diferentes componentes bariónicos (átomos de diferentes tipos). Los componentes bariónicos de las galaxias están

usualmente distribuidos en estructuras en forma de bultos y discos, compuestas principalmente de un medio interestelar y de estrellas. El medio interestelar es un conglomerado de gas atómico y molecular, y de partículas de polvo, que producen emisión radio, sub-milimétrica e infraroja. La fracción de gas del medio interestelar que está ionizada puede producir también emisión óptica o ultra-violeta. Se cree que la fase molecular del medio interestelar es la materia prima principal para el crecimiento y desarrollo de las galaxias, pues este gas alimenta la producción de nuevas estrellas. Finalmente, las poblaciones de estrellas en las galaxias, además de ser los hornos en los que se forman los elementos complejos que forman entre otras estructuras, la vida, son la fuente más común de luz óptica y ultravioleta en el Universo, como podemos apreciar observando a simple vista el cielo en una noche clara.

Uno de los descubrimientos principales en la astrofísica extragaláctica ha sido que la mayor parte de las galaxias (si no todas) hospedan agujeros negros masivos en sus núcleos. En efecto, nuestra propio Vía Láctea hospeda un agujero negro en su centro, llamado Sagitario A*, el cuál es 4 millones de veces más masivo que el Sol, según cálculos basados en el efecto gravitacional que este causa sobre objetos a su alrededor. Los agujeros negros son objetos compactos extremadamente masivos, que exhiben un potencial gravitacional tan elevado, que ninguna materia o luz que traspase *el horizonte de sucesos* del agujero negro, puede escapar de este, haciéndolo por lo tanto invisible. Nótese la escala correspondiente a una galaxia en comparación a la escala del horizonte de eventos de un agujero negro en la Figura S.12. Sin embargo, cuando este agujero negro es activo y absorbe grandes cantidades de materia, justo antes de que la materia atraviese este horizonte la gravedad crea un disco de acreción de esta materia. La inmensa energía cinética de este disco de acreción puede producir el evento más luminoso y energético de emisión constante en el universo, llamado núcleo galáctico activo (en comparación con la supernova, que es el evento más luminoso pero de corta duración). Estos núcleos galácticos son por sí mismos fenómenos multi-onda y producen emisión a través de todo el espectro electromagnético. La emisión originada directamente en la acreción, y por lo tanto más energética, se exhibe como emisión ultravioleta y rayos-x, mientras que la emisión secundaria, es emitida en longitudes de onda infrarojas y ondas de radio.

Un nuevo método para caracterizar la emisión multi-onda de galaxias y agujeros negros

Uno de los métodos más eficientes para extraer información sobre las propiedades físicas de las galaxias y agujeros negros es mediante el modelado de la emisión multionda, sintetizada como su distribución de energía espectral (SEDs, por las siglas en inglés, spectral energy distributions). En el capítulo 2 de esta tesis, hemos desarrollado un software llamado AGNFITTER, para modelar consistentemente la emisión multi-onda de galaxias y agujeros negros. AGNFITTER aplica estadística Bayesiana para ajustar los SEDs observados, construidos con observaciones desde ultravioletas hasta el submilimétrico, usando modelos teóricos y semi-empíricos de diferentes componentes físicos. El método que presentamos es innovativo pues recupera la funciones de densidad de probabilidad de parámetros físicos fundamentales de galaxias y AGN, tal como las masas totales de las poblaciones de estrellas, las tasas de formación estelar, las luminosidades totales de los núcleos galácticos activos, correlacionados con las masas de los agujeros negros y oscurecimiento por polvo, tratando de manera confiable los márgenes de error y la distribución inhomogénea de las observaciones multi-onda. AGNFITTER es un algoritmo escrito en el lenguaje Python, es modular y público, y en los dos últimos años ha brindado importantes aportes a al menos 25 proyectos diferentes de grupos de investigación de galaxias y AGN alrededor del mundo. En el capítulo 2 hemos también

evaluado y validado este método contruyendo los SED multi-onda de un conjunto de ~ 2000 núcleos galácticos activos, seleccionados por su emisión en rayos-x, cuya emisión se origina en la época en la que el Universo tenía un quinto de su edad actual, es decir 3 giga-años después del Big Bang. Nuestra investigación revela que el modelado de las distribuciones de energía espectral, usando observaciones desde el infrarrojo lejano al ultravioleta de estos objetos, puede recuperar paralelamente los parámetros que gobiernan la emisión de galaxias y AGN, a pesar de la gran diferencia en las escalas que estos representan (al rededor de 10 ordenes de magnitud, Figura S.11).

Una nueva ventana hacia la física de las galaxias y agujeros negros

Gracias a la combinación única del campo de visión, resolución y sensibilidad del telescopio radio LOFAR (Low Frequency ARray), en la colaboración LOFAR Surveys estamos dando un paso importante hacia el uso de la emisión de radio de baja frecuencia para decifrar la propiedades del crecimiento de galaxias, tal como la tasa de formación estelar en el Universo temprano. En el Capitulo 3 hemos conducido el primer estudio de la evolución de galaxias y AGN desde la perspectiva radio de baja frecuencia. Hemos caracterizado las propiedades físicas de galaxias de alta formación estelar y de AGNs seleccionados por su emisión radio, que habitan épocas de Universo equivalentes a corrimientos al rojo de 2.5, aproximadamente cuando el Universo tenía un quinto de la edad actual. Hemos construido la librería más profunda de espectros de radio, aplicando una técnica cuidadosa de extracción de fuentes, y técnicas de calibración de flujo para observaciones de diversos telescopios radio, incluyendo LOFAR (Países Bajos), VLA (USA), WSRT (Países Bajos) and GMRT (India). Enfocándonos en galaxias de alta formación estelar y con contribución negligible de acreción de agujeros negros, es decir cuya emisión radio está dominada por la emisión de estrellas jóvenes masivas, hemos investigado una propiedad característica de estas galaxias, la correlación entre el infrarrojo y el radio continuo. Los resultados presentados en el capítulo 3 revelaron que la correlación infrarrojo-radio, tanto a alta como a baja frecuencia radio, no es constante, como lo sugiere la literatura, sino evoluciona en función del tiempo cósmico. Más importante, hemos encontrado una conexión entre la emisión de radio a baja frecuencia (150 MHz) de las galaxias y su formación estelar y hemos proporcionado la primera calibración de la emisión de radio a 150 MHz como diagnóstico de formación estelar.

Una nueva perspectiva a alta resolución del medio interestelar

El medio interestelar de galaxias alimenta tanto a la formación de estrellas como al crecimiento de agujeros negros en sus núcleos, y es por lo tanto un ingrediente fundamental en la formación y evolución de las galaxias en el Universo. Con la introducción del telescopio sub-milimétrico más grande del mundo, el Ataca Large (sub/)Millimeter Array (ALMA, Chile), podemos ahora investigar el medio interestelar en el Universo lejano en exquisito detalle. Comunmente, estudios del medio interestelar en el Universo temprano son conducidos observando las líneas de emisión de algunas de las partículas que lo componen. En particular, se observan la emisión de las transiciones rotacionales de la molécula de monóxido de carbono (CO), la línea de estructura fina [CII], y la emisión del continuo emitido por las partículas de polvo. Sin embargo, el uso de estas líneas implica someterse a suposiciones sobre las condi-

ciones físicas del gas y el polvo, tales como la profundidad óptica, la temperatura y la densidad del gas, y la razón entre las cantidades de gas y polvo. Estas suposiciones pueden introducir grandes incertidumbres y llevarnos a conclusiones erróneas sobre las propiedades del medio interestelar. En los capítulos 4 y 5, hemos usado el telescopio ALMA para acercarnos a la solución de este problema, caracterizando la emisión de la tercera transición del monóxido de carbono CO(3-2), y la emisión de [CII] a alta resolución para un grupo de galaxias a alto corrimiento al rojo, seleccionadas por su emisión en el submilimétrico. Estas galaxias se denominan SMGs por sus siglas en inglés (submillimeter galaxies). Para caracterizar los campos de velocidad que modelan esta galaxia, hemos ajustado modelos cinemáticos y dinámicos a los datos. Encontramos que la emisión de CO en nuestras galaxias SMGs son consistentes con un disco de rotación ordenado, a pesar de presentar una morfología perturbada en las imágenes ópticas, que por el contrario sugerirían que la galaxia acaba de coaliscionar o fusionarse con otra galaxia. Esta observación sugiere que los discos de gas molecular se pueden reformar rápidamente después de un evento de fusión galáctica. Finalmente, nuestro estudio paralelo de [CII] y el infrarrojo lejano (emisión continua del polvo) en el capítulo 5 demostró que las galaxias SMG que estudiamos presentan un gran déficit en la razón entre las emisiones de [CII] y el infrarrojo, en comparación con los valores que se espera en base a predicciones teóricas. Comparaciones entre nuestras observaciones con modelos de regiones fotolíticas⁹ demuestran que este déficit es originado probablemente por la saturación térmica de niveles de [CII], y/o por una reducción significativa del calentamiento del gas por medio del efecto fotoeléctrico.

Una nueva perspectiva en alta resolución de la emisión multi-onda de galaxias

Una caracterización objetiva de la física de galaxias requiere estudios multi-onda, y esto se aplica también a estudios a alta resolución. Sin embargo, considerando que solo pocos telescopios pueden observar en las altas resoluciones requeridas para estudios del Universo lejano (correspondientes a elementos de resolución menores a un arcosegundo), el estudio a alta resolución del Universo temprano es muy difícil. En los capítulos 4 y 5, hemos combinado nuestras observaciones con el telescopio ALMA con observaciones a alta resolución del telescopio espacial *Hubble* para estudiar la emisión de las poblaciones de estrellas, de la distribución de polvo, del gas molecular de monóxido de carbono, y finalmente de la línea de estructura fina de carbono [CII]. Estas observaciones se han enfocado en las galaxias SMG que habitan el Universo temprano presentadas previamente. Luego de aplicar correcciones astrométricas fidedignas basadas en observaciones con el telescopio espacial *GAIA* (especializado en mediciones precisas de distancias), nuestro trabajo reveló que las distribuciones de la emisión de polvo y gas molecular pueden estar completamente desalineadas de la emisión de las estrellas en estas galaxias. Esta observación pone a prueba suposiciones usadas comúnmente sobre el balance energético entre la emisión estelar y de polvo. Esta observación, a su vez, subraya el gran potencial del uso en paralelo de los telescopios *Hubble* y ALMA para ampliar nuestro conocimiento sobre la física de las galaxias a alto corrimiento al rojo. Finalmente, hemos conducido un análisis estadístico basado en la técnica de 'stacking'.¹⁰ Hemos combinado las observaciones de diferentes galaxias para obtener los tamaños promedio de la emisión de polvo, gas molecular y estrellas. Nuestro trabajo revela que tanto la emisión de gas molecular como

⁹regiones fotolíticas (PDR, por sus siglas en inglés, photodissociation regions) son regiones en las que los enlaces químicos en el medio interestelar se rompen por causa de radiación

¹⁰Stacking (apilar) es una técnica observacional basada en sumar o promediar diferentes observaciones para de esta forma conseguir una señal/propiedad promedio.

la emisión estelar en estas galaxias, son en promedio claramente más extensas que la emisión del polvo o [CII] por un factor de > 2 . Para entender el significado de esta observación, y si las diferencias de tamaño reflejan diferencias físicas y no aparentes, hemos aplicado un modelado de transporte radiativo a los perfiles radiales observados en nuestras galaxias. Nuestro trabajo revela que esta aparente diferencia entre los tamaños de las distribuciones de gas y polvo puede estar originada en cambios de temperatura y profundidad óptica a través de la galaxia, y que esta observación no implica necesariamente una diferencia física entre la distribución de estos materiales.