

# LA FÍSICA EN MÉXICO

Susana Lizano Soberón  
Francisco Ramos Gómez  
Jaime Urrutia Fucugauchi  
Editores



# La Física en México



# La Física en México

Susana Lizano Soberón  
Francisco Ramos Gómez  
Jaime Urrutia Fucugauchi  
Editores

*Diseño de portada*

José Refugio Dorantes Velázquez

*Formación electrónica*

Efraín Roberto Garrido Román

ISBN: 978-607-97455-0-9

Primera Edición 2016

Sociedad Mexicana de Física, A.C., 2° piso, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Ciudad universitaria, 04510, Ciudad de México. Apartado Postal: 70-348, Delegación Coyoacán, 04510 Ciudad de México. Tel: (+52 55) 5622 4946.

E-mail: [smf@ciencias.unam.mx](mailto:smf@ciencias.unam.mx), Página Web: <http://www.smf.mx>

Impreso en México

# Índice general

<b>1. Prólogo</b>	<b>11</b>
<b>2. La Astronomía en México en el Siglo XXI</b>	<b>13</b>
2.1. Introducción . . . . .	13
2.2. Discos y chorros en las estrellas jóvenes . . . . .	15
2.3. Gaia: Nuestra galaxia en 3D . . . . .	19
2.4. Midiendo el universo con radiotelescopios . . . . .	22
2.5. El telescopio del horizonte de eventos, un proyecto para estudiar el ambiente extremo del agujero negro en el centro de la galaxia . . . . .	26
2.6. Brotes estelares maximales en galaxias en formación . . . . .	29
2.7. Las galaxias como laboratorios de física fundamental y cosmología . . . . .	33
2.8. Ondas gravitacionales . . . . .	36
<b>3. La Óptica en México</b>	<b>49</b>
3.1. Introducción . . . . .	49
3.2. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) . . . . .	51
3.3. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) . . . . .	55
3.4. Centro de Investigaciones Científicas y Estudios Superiores de Ensenada, B.C. (CICESE) . . . . .	57
3.5. Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) . . . . .	59
3.6. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, BUAP . . . . .	61
3.7. Universidad de Sonora (UNISON) . . . . .	62
3.8. Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa, (UAMI) . . . . .	63
3.9. Universidad de Guadalajara . . . . .	64
3.10. Otras instituciones . . . . .	64
3.11. Conclusiones . . . . .	65
<b>4. La Física de Partículas y Campos en México</b>	<b>69</b>
4.1. Introducción . . . . .	69
4.2. Frontera de la alta energía . . . . .	70
4.3. Frontera del cosmos . . . . .	76
4.4. Frontera de la alta intensidad . . . . .	80
4.5. Frontera conceptual . . . . .	83
4.6. Conclusiones . . . . .	87

<b>5. La Física de Fluidos</b>	<b>91</b>
5.1. Introducción . . . . .	91
5.2. Física de fluidos . . . . .	94
5.3. La física de los fluidos en México . . . . .	96
<b>6. Panorama y Perspectivas de la Física Estadística en México</b>	<b>113</b>
6.1. Introducción . . . . .	113
6.2. ¿De qué trata la física estadística? . . . . .	114
6.3. Temas clásicos y temas novedosos . . . . .	115
6.4. Panorama geográfico e institucional . . . . .	118
6.5. Cotejo con las tendencias mundiales . . . . .	121
6.6. Conclusiones . . . . .	122
<b>7. Geofísica: Retos y Perspectivas</b>	<b>133</b>
7.1. Introducción . . . . .	133
7.2. Física del interior de la Tierra . . . . .	134
7.3. Sistema Tierra - Cambio climático y riesgos . . . . .	138
7.4. Evolución y extinciones . . . . .	141
7.5. Ciencias planetarias . . . . .	143
7.6. Perspectivas . . . . .	147
<b>8. Materia Condensada</b>	<b>155</b>
8.1. Espintrónica . . . . .	155
8.2. El grafeno: Algunas de sus propiedades . . . . .	160
8.3. Semiconductores para aplicaciones en celdas solares . . . . .	165
8.4. Propiedades físico-químicas de tierras raras . . . . .	168
8.5. El diodo emisor de luz azul (Blue LED); desarrollo y aplicaciones	172
<b>9. Antecedentes y Estado Actual de la Investigación en Física Médica en México</b>	<b>179</b>
9.1. Introducción . . . . .	179
9.2. Desarrollo reciente de la física médica en México . . . . .	180
9.3. Estado actual de la investigación en física médica en México .	183
9.4. Discusión y conclusión . . . . .	196
<b>10. La Física Nuclear y de Radiaciones</b>	<b>203</b>
10.1. Introducción . . . . .	203
10.2. Investigaciones teóricas . . . . .	205
10.3. Investigaciones experimentales . . . . .	212

10.4. Física de radiaciones . . . . .	223
10.5. Conclusiones . . . . .	240
<b>11. Panorama Actual de la Gravitación y su Penetración en México</b>	<b>255</b>
<b>12. Cambio Climático: Una Introducción a sus Causas y Consecuencias</b>	<b>279</b>
<b>13. La Física Atómica, Molecular y Óptica en México</b>	<b>293</b>
13.1. Átomos fríos en México . . . . .	302

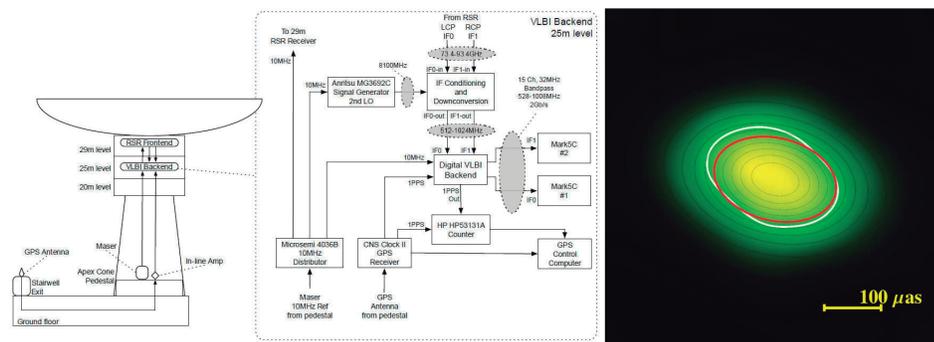


Figura 7: (a) Configuración de la instrumentación instalada en el GTM para observaciones VLBI a 3 mm durante la primavera de 2015. b) Imagen Sagittarius A\* a 3 mm obtenida con datos del GTM y 6 antenas del VLBA (Brewster, Fort Davis, Kitt Peak, Los Alamos, Owens Valley y Pie Town). El tamaño a potencia media de la distribución Gaussiana de la fuente está indicado por la curva roja. La curva blanca es una ajuste independiente realizado a las visibilidades. Crédito: Andrew Chael.

## 2.6. Brotes estelares maximales en galaxias en formación

Itziar Aretxaga<sup>a</sup>

Al menos la mitad de la energía radiada por astros en el Universo se emite en longitudes de onda milimétricas a infrarrojas. En efecto, la distribución espectral de energía del fondo extragaláctico [29] nos muestra que, dejando a un lado la radiación cósmica de microondas liberada a un corrimiento al rojo  $z \sim 1100$  tras la combinación de los electrones en los átomos cuando el Universo tenía  $\sim 370,000$  años de edad, la emisión de luz se produce preferentemente en dos componentes de aproximadamente igual importancia energética: la emitida en el rango de luz visible a ultravioleta, y la emitida en el rango de luz infrarroja lejana a milimétrica. Descubrir qué tipo de astros producen la mayor parte de esta emisión se ha convertido en uno de los incentivos para construir más y más poderosos observatorios.

<sup>a</sup>Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

Mientras que en las últimas tres décadas se han cartografiado grandes regiones del cielo para determinar que los principales emisores de la luz visible-ultravioleta son una amalgama de galaxias típicas, galaxias azules pequeñas en formación y cuásares, la composición de la luz milimétrica-infrarroja apenas se está determinando gracias a los censos de miles de fuentes (sub-)milimétricas levantados, y en curso, por telescopios como el espacial Herschel, el James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) de 15 metros en Hawái o el Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (GTM) en el estado de Puebla, y el seguimiento a mayor resolución angular de estas fuentes que ofrecen interferómetros como el Sub-Millimeter Array (SMA) en Hawái, o el Atacama Large Millimeter Array en Chile. Las observaciones realizadas con estos instrumentos, nos permiten afirmar que la emisión milimétrica-infrarroja del Universo está producida principalmente por formación estelar virulenta en galaxias masivas en formación que están fuertemente oscurecidas por el polvo cósmico (agregaciones de silicatos, carbono y otros elementos pesados en granos que van de unas pocas moléculas a aproximadamente 0.1 mm) de su medio interestelar. El modo de formación estelar oscurecida se perfila potencialmente como un modo predominante en la historia de construcción de las galaxias y, ciertamente, en el ensamble de las galaxias elípticas gigantes, las de mayor masa.

El esfuerzo por obtener estos censos (sub-)milimétricos está encabezado por equipos internacionales que van desde varias docenas hasta la centena de astrónomos, necesarios para obtener y analizar observaciones que, frecuentemente, se extienden por varios años. Parte de este esfuerzo ha sido realizado por el equipo del INAOE, en colaboración con colegas estadounidenses, japoneses y británicos, entre otros. Los mapas trazados con la cámara AzTEC del GTM acoplada al JCMT y Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) de 10 metros, entre 2005 y 2008, levantaron una muestra de miles de galaxias que aún seguimos analizando con otros telescopios, entre ellos el propio GTM (Fig. 8).

Además, en la actualidad, nos encontramos realizando los primeros censos con el GTM a mayor resolución angular ( $8''$  frente a  $30''$ ) y mayor profundidad (tres veces más) que los realizados en el pasado.

Las galaxias encontradas tienen propiedades extraordinarias por comparación con las que se encuentran en censos del visible al infrarrojo medio: tasas de formación estelar que rebasan las  $500 M_{\odot}$  /año, luminosidades integradas  $\gtrsim 10^{13} L_{\odot}$ , masas estelares asociadas  $\gtrsim 10^{11} M_{\odot}$ , y corrimientos al rojo  $z \gtrsim 1$ , donde  $M_{\odot}$  y  $L_{\odot}$  son la masa y la luminosidad del Sol, res-

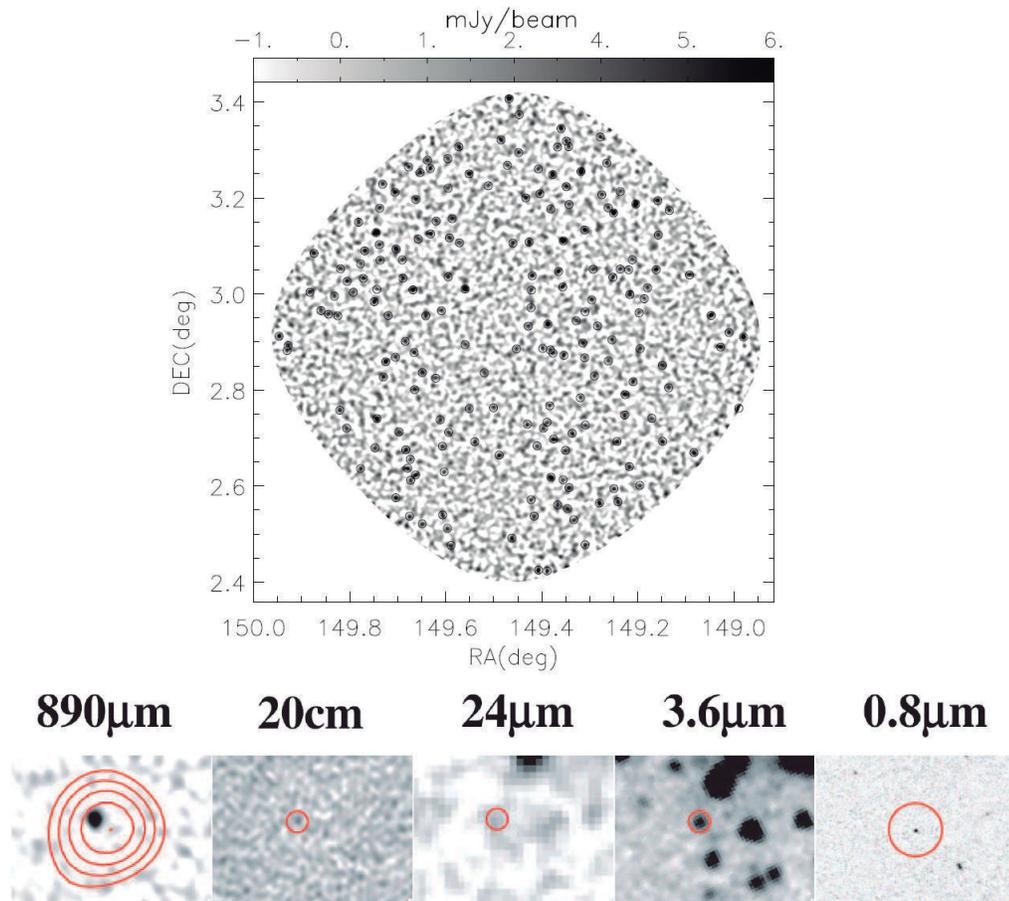


Figura 8: Arriba, mapa a 1.1 mm de 0.72 grados cuadrados de la región COSMOS trazado en 112.6 horas de integración con la cámara del AzTEC montada en ASTE [30]. Se marcan con círculos las 189 galaxias sub-milimétricas detectadas en el campo con señal a ruido,  $S/N \geq 3.5$ . Abajo, seguimiento [31] de la fuente AzTEC1 encontrada en COSMOS. Los contornos en el panel de la izquierda representan el haz de AzTEC, y el círculo en los cuatro paneles de la derecha, el haz del SMA. En las imágenes se muestran las observaciones interferométricas del SMA a  $890 \mu\text{m}$ , del VLA a 20 cm, y contrapartes encontradas por los telescopios espaciales Spitzer a 24 y  $3.6 \mu\text{m}$  y Hubble a  $0.8 \mu\text{m}$ . El corrimiento al rojo medido con el GTM [32], 10 años después del descubrimiento de la fuente, y tras múltiples intentos fallidos en otras instalaciones, es  $z = 4.342$ .

pectivamente, y por referencia, la Vía Láctea forma estrellas con una tasa de  $\sim 1 M_{\odot}$  /año. Estas y otras propiedades reafirman la sospecha de que estamos registrando etapas tempranas en la formación de galaxias masivas que se tornarán con el tiempo en galaxias elípticas, pero aún quedan detalles por demostrar, como la naturaleza de la multiplicidad de galaxias que se amalgaman para formar una sola fuente (sub-)milimétrica, o la distribución de corrimientos al rojo de estos sistemas.

AzTEC1 en COSMOS representa una de las fuentes más extremas (Fig. 8). La interferometría adquirida con el SMA nos ha permitido medir su tamaño  $\lesssim 1.3 \times 2.0$  kpc [30] y la espectroscopía del GTM, determinar su distancia, y con ella, deducir que sus  $\sim 1,300 M_{\odot}$ /año deben crear un sistema de retroalimentación positivo, que en vez de parar la formación estelar con violencia en la etapa de explosiones supernova, la acelere [33].

Espectroscopía como ésta no está siendo fácil de obtener en otros sistemas con los 32 m operativos del GTM, siendo necesaria su expansión programada a 50 m. Sin embargo, hemos podido realizar espectroscopía sistemática de fuentes amplificadas gravitacionalmente (Fig. 9), en la que se demuestra que una fuente brillante puede estar compuesta de varias galaxias a corrimientos al rojo muy dispares, en este caso [34], a  $z = 2.040$ ,  $3.252$  y  $4.681$ . Analizar la multiplicidad espectroscópica de fuentes milimétricas extragalácticas y trazar la distribución de distancias cósmicas es uno de los retos que atenderá el GTM en los próximos años.

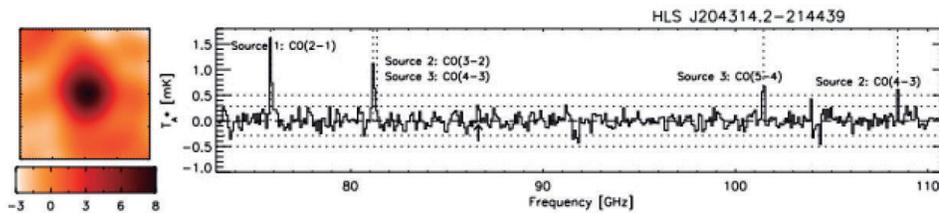


Figura 9: Imagen a 1.1 mm (izquierda) y espectroscopía a 3 mm (derecha) adquiridas con el GTM [34] de la fuente amplificada HLS J204314.2-214439, descubierta en censos del observatorio Herschel hacia cúmulos de galaxias que actúan como lentes gravitatorias. En el espectro del GTM se encuentran líneas de CO correspondientes a tres galaxias amplificadas a diferentes corrimientos al rojo:  $z = 2,040$ ,  $3.252$  y  $4.681$ .