

Propuesta de la
Transformación del

**Centro de Radioastronomía
y Astrofísica**

en el

**Instituto de Radioastronomía
y Astrofísica**

Enero 2015

ÍNDICE

RESUMEN	3
TRANSFORMACIÓN EN EL INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA (IRAf)	8
BENEFICIOS DEL INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA	10
ANTECEDENTES	12
INFRAESTRUCTURA ACTUAL	14
CRyA: INVESTIGACIÓN, DOCENCIA Y DIFUSIÓN	16
Planta Académica	16
Investigación	20
Premios y Distinciones	25
Líneas principales de investigación y especialidad de los técnicos	27
Actividades docentes	29
Actividades de divulgación	32
Congresos organizados	36
Aportaciones del CRyA en el Campus Morelia, en el estado y el país	37
LOGROS DE INVESTIGACIÓN	39
LOGROS HISTÓRICOS DEL CRYA	48
COMPARACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CRyA CON OTRAS INSTITUCIONES	49
Tamaño de la planta de investigadores	50
Productividad científica	50
COLABORACIONES DEL IRAf	51
IRAf en la UNAM y en México	51
IRAf e instituciones internacionales	52
PLAN DE DESARROLLO DEL IRAf	56
Desarrollo a corto plazo	56
Desarrollo a mediano plazo	57
Desarrollo a largo plazo	60
ORGANIGRAMA DEL INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA	62
ACTA DE CONSEJO INTERNO DEL CRyA	64
APÉNDICES (archivo electrónico)	
Apéndice A: Artículos Arbitrados publicados	
Apéndice B: Proyectos de investigación	
Apéndice C: Premios y distinciones del CRyA	
Apéndice D: Estudiantes graduados	
Apéndice E: Becarios posdoctorales	
Apéndice F: Productividad de otras instituciones	
Apéndice G. Referencias	

RESUMEN

El Centro de Radioastronomía y Astrofísica (CRyA) de la UNAM, campus Morelia, propone su transformación en el Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (IRAf), con base en su consolidación académica como la institución mexicana más fuerte en el área de radioastronomía, su reconocimiento nacional e internacional, su fuerte desarrollo del posgrado en astrofísica, y su impacto en el occidente de México y en el país, a través de la formación de recursos humanos y la divulgación de la ciencia.

La investigación astronómica en longitudes de onda del visible, se practica desde épocas milenarias. La segunda ventana que se abrió al Universo fue la radioastronomía, en los países del primer mundo a mediados del siglo pasado, y en México en las últimas décadas del siglo XX y la primera del siglo XXI con la creación del CRyA en la UNAM. Este centro ha logrado que México aparezca en el mapa de la astronomía mundial, no sólo en la astronomía visible e infrarroja, sino también en la radioastronomía debido a aportaciones fundamentales al conocimiento universal que han hecho los investigadores del centro. La transformación en instituto ampliará esta presencia internacional y permitirá que México tenga un mayor impacto en las otras ventanas de espectro electromagnético, las cuales se observan tanto desde tierra como desde el espacio exterior.

El grupo de investigadores del CRyA cuenta con una madurez y una calidad académicas excelentes, con una infraestructura adecuada y con participación en proyectos nacionales e internacionales de gran envergadura, lo cual justifica su transformación en un nuevo instituto. El CRyA ya es un líder no solamente a nivel nacional, sino también a nivel internacional. El nuevo Instituto de Radioastronomía y Astrofísica promoverá la radioastronomía en todo el país, alentando proyectos de investigación en conjunto con centros pequeños en universidades estatales como Guanajuato, Guadalajara y Monterrey, en donde se cultiva esta disciplina. Varios de estos grupos tienen ya acceso al Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño para procesar observaciones de interferómetros de radio como ALMA, VLA, SMA y VLBA. Un interferómetro es un radiotelescopio que utiliza simultáneamente un conjunto de antenas separadas físicamente cuyas señales individuales se combinan entre sí para que actúe como si fuera una sola antena grande, lo cual permite obtener una gran resolución angular o nitidez en las observaciones

astronómicas. El procesamiento de estas observaciones requiere de cómputo especializado que permita el manejo de TB de datos con alta velocidad de lectura y escritura. El Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño del CRyA alberga este tipo de equipo que es muy costoso.

La transformación de centro en instituto permitirá a la comunidad académica del CRyA una mayor participación en la vida académica de la UNAM, y se asumirán con responsabilidad todas las comisiones académicas inherentes a ella. También, como instituto esta comunidad tendrá una mayor presencia y capacidad de gestión ante las autoridades e instituciones académicas del Estado de Michoacán. A su vez, esta transformación fortalecerá al campus de la UNAM en Morelia. Este campus cuenta con el Centro de Investigación en Ecosistemas (CIEco), el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) y el Centro de Ciencias Matemáticas (CCM). Así mismo, están las Unidades académicas de los Institutos de Geofísica y de Investigación en Materiales, y pronto llegará un grupo del Instituto de Ingeniería. Estos grupos académicos están en distintas etapas de desarrollo, en particular, el CIEco se encuentra ya en proceso de transformación en instituto. Además, en el 2012 inició actividades la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Morelia, fortaleciendo la presencia de la UNAM en Michoacán también a nivel de licenciatura.

El trabajo de investigación del grupo cubre de manera profunda y con alto impacto varias áreas de la astrofísica moderna. En particular, existen proyectos de formación y evolución de estrellas, medio interestelar, altas energías, estructura galáctica, astronomía extragaláctica y cosmología. El CRyA se distingue de otras instituciones nacionales en que sus investigadores dan gran énfasis a las observaciones multifrecuencias, incluyendo longitudes de onda de radio, infrarroja, óptica, ultravioleta, y de rayos X. También desarrollan estudios teóricos y simulaciones numéricas de frontera en estas áreas. Los investigadores del CRyA colaboran con colegas de las mejores instituciones astronómicas de México y del mundo.

La transformación de centro en instituto es un proceso natural dadas la madurez de su planta académica y la establecida presencia del centro en la zona occidente del país, a través de la investigación astronómica, la formación de nuevos recursos humanos a nivel

de licenciatura y posgrado, y la extensión de la cultura hacia el público en general.

La planta académica actual del CRyA consta de 24 investigadores y 4 técnicos académicos. El 46% de los investigadores son titulares B o C y el 50% tienen niveles II y III del SNI, incluido un emérito. En los últimos 3 años los investigadores mantienen una tasa promedio de publicación de 4.1 artículos por investigador por año, con una mediana de 2 artículos por investigador por año. Existe, además, un alto grado de colaboración entre los miembros del CRyA; en promedio, 30% de los artículos tienen más de un autor del CRyA. Esta importante interacción es una gran fortaleza del grupo académico. Finalmente, en el periodo 2003-2014 el CRyA tiene un índice de Gini de su producción de artículos arbitrados de 0.4. Este índice mide la contribución individual de los investigadores a la producción total de artículos. El valor de 0 es la igualdad total y el valor de 1 corresponde a la desigualdad total, donde un investigador produce todos los artículos. Este índice se usa para medir la distribución de la riqueza en los países, y el valor de 0.4 es equivalente a la distribución de la riqueza, por ejemplo, en EUA.

La labor de los investigadores del CRyA es de excelencia académica y cuenta con un amplio reconocimiento nacional e internacional. Los investigadores han recibido más de 47,000 citas en la literatura especializada en el periodo 2003-2014. El índice de Hirsch del centro es $h=101$, esto significa que 101 artículos producidos por sus investigadores, han recibido al menos 101 citas. Este valor es el más alto de las entidades del Subsistema de la Investigación Científica de la UNAM y es equiparable al de instituciones de astronomía de gran prestigio en EUA. Si se consideran solamente los 562 artículos arbitrados publicados en el CRyA en el periodo 2003-2014, estas publicaciones recibieron 14,761 citas y tienen un índice de Hirsch $h=62$.

El CRyA participa en el Posgrado en Ciencia (Astrofísica) de la UNAM, cuenta con 30% de los estudiantes de este posgrado y tiene un vigoroso cuerpo docente. En el centro se han graduado 32 doctores y 57 maestros, y se han dirigido 55 tesis de licenciatura. Es importante señalar que los estudiantes de licenciatura y posgrado del CRyA provienen de casi todos los estados de la República Mexicana, así como de Centroamérica, Sudamérica y España. Actualmente los egresados de doctorado trabajan en instituciones de investigación y docencia en México y el extranjero.

En las actividades de divulgación de la astronomía se tiene un gran impacto a nivel estatal. Al año se realizan más de 120 eventos, muchos de ellos en colaboración con la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), el Planetario de Morelia, el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología y con los Institutos Tecnológicos del estado. Esta actividad se intensificó durante el 2009, Año Internacional de la Astronomía, cuando se realizaron más de 400 eventos y se llegó a 100,000 personas. Esta actividad ha mantenido un ritmo intenso, por ejemplo, en el 2014 se llegó a un público de más de 32,000 personas.

Los radioastrónomos del CRyA participan en dos de los más grandes interferómetros del mundo: el VLA (Karl Jansky Very Large Array) en Nuevo México, Estados Unidos de América (EUA), y el VLBA (Very Long Baseline Array) en EUA continental, en Hawaii, y en las Islas Vírgenes, y han colaborado para mejorar las capacidades de estos instrumentos. A través de esta colaboración, los radioastrónomos mexicanos tienen acceso a ALMA (Atacama Large Millimeter Array) en el Desierto de Atacama, Chile, el interferómetro más importante del siglo XXI. Los radioastrónomos del CRyA han publicado ya artículos arbitrados con observaciones de ALMA. Dado que el CRyA es claramente el centro más importante en el país en interferometría radioastronómica (que utiliza interferómetros de radio para estudiar el Universo), su transformación en instituto impulsará la participación de México, y en particular de la UNAM, en la nueva generación de instrumentos de este tipo. La interferometría de radio está iniciando una edad de oro, con los nuevos interferómetros del VLA y ALMA, y con la preparación del proyecto que en una década dará lugar al interferómetro de bajas frecuencias Square Kilometer Array (SKA). Este último interferómetro podrá, en particular, realizar estudios del hidrógeno atómico del Universo con una alta resolución espacial sin precedentes. Estos nuevos y poderosos arreglos revolucionarán nuestro conocimiento del cosmos, y la transformación del CRyA en un instituto impulsará la presencia de la UNAM en esta era que se avecina.

Por su tamaño, el CRyA es el tercer grupo de astronomía a nivel nacional, y es equiparable a grupos astronómicos reconocidos de tamaño mediano en otras partes del mundo. En las universidades de prestigio en EUA los grupos de astronomía varían entre 15 y 30 investigadores. Más aun, se tiene la intención de crecer lentamente, cuidando la calidad académica y buscando cumplir las metas de excelencia y de continua superación en la calidad del posgrado.

El CRyA es ya reconocido a nivel mundial por sus contribuciones al estudio de la formación estelar Galáctica con observaciones radioastronómicas, teoría y simulaciones numéricas. Además, con la nueva área recién fortalecida de astronomía extragaláctica y la contratación de expertos en observaciones en rayos X e infrarrojo a estas grandes escalas, se ha abierto un nuevo nicho de estudios pioneros en la formación de estrellas en otras galaxias y en múltiples bandas de frecuencia. Se atacarán problemas fundamentales como la formación de las primeras generaciones de estrellas, la época de reionización del Universo y la formación de las galaxias. Los teóricos del CRyA contribuirán en estas nuevas líneas de investigación con el modelaje e interpretación de las observaciones, creando una sinergia en esta área como ha ocurrido en el caso de la formación estelar Galáctica, de manera que el IRaF se convertirá en un líder a nivel mundial en el tema de formación estelar en todo el Universo con técnicas multifrecuencia. Además, con la construcción del Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño, el IRaF se convertirá en un Nodo del Interferómetro ALMA para el país y Centroamérica, e incluso países como Venezuela y Colombia. Los radioastrónomos mexicanos y centroamericanos harán estancias prolongadas en el IRaF para reducir e interpretar sus datos interferométricos y realizar proyectos académicos conjuntos, enriqueciendo el ambiente de investigación y docencia.

En el aspecto tecnológico, el IRaF será promotor del cómputo, las telecomunicaciones y la electrónica en el país, tanto por la necesidad de las altas tasas de transferencia de datos como por la relación de la radioastronomía con estas áreas. El IRaF participará en la formación de recursos humanos especializados en colaboración con otras instituciones. En particular, en el Laboratorio de Interferometría de Radioastronomía se entrenarán estudiantes en las áreas de ingeniería electrónica, mecánica y de telecomunicaciones para el desarrollo de prototipos para interferómetros de radio.

El IRaF será no sólo una sede pujante del posgrado en Astrofísica de la UNAM, sino que participará en la Licenciatura en Física Computacional en colaboración con la Facultad de Ciencias y la ENES. Esta licenciatura novedosa, diseñada por el CRyA, formará físicos profesionales con amplios conocimientos de cómputo y estadística, capaces tanto de continuar con un posgrado, como de insertarse en el sistema productivo nacional. Con los laboratorios de Cómputo de Alto Desempeño y de Interferometría de Radioastronomía se

realizarán proyectos de computación, electrónica y telecomunicaciones que enriquecerán los estudios de las licenciaturas de la ENES.

El IRAf desarrollará con excelencia sus actividades de investigación, docencia y divulgación y recibirá estudiantes y posdoctorados de nacionales e internacionales. A largo plazo, el IRAf tendrá la capacidad de generar desarrollos tecnológicos en áreas relacionadas con la radioastronomía, en colaboración con instituciones nacionales y del extranjero.

Por todo lo anterior, consideramos que el Centro de Radioastronomía y Astrofísica está maduro para convertirse en el Instituto de Radioastronomía y Astrofísica. El IRAf se convertirá en líder internacional en la formación estelar a través del tiempo en todo el Universo, con observaciones multifrecuencia y estudios teóricos, atacando problemas fundamentales de la formación y evolución de las galaxias en el Universo. Con su gran calidad y solidez académica contribuirá a que el Campus Morelia de la UNAM destaque cada vez más como un polo de investigación y desarrollo tecnológico en el occidente del país y promoverá el desarrollo de la radioastronomía en México y Centroamérica.

TRANSFORMACIÓN EN EL INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

Con base en la madurez y la calidad académica de los integrantes del CRyA, así como en la adecuada infraestructura ya existente, se plantea la transformación del CRyA en el nuevo Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (IRAf).

La misión de este nuevo instituto será la de impulsar el desarrollo de la radioastronomía en México y Centroamérica. Para esto será un instituto de excelencia académica a nivel nacional e internacional que produzca conocimiento astronómico de frontera.

El CRyA agrupa de manera importante a los expertos de la UNAM en radioastronomía, y su transformación en instituto promoverá la radioastronomía en todo el país, alentando proyectos de investigación en conjunto con centros pequeños en universidades estatales como Guanajuato, Guadalajara y Monterrey, en donde se cultiva esta disciplina. El IRAf se convertirá en un Nodo de ALMA para concentrar los datos localmente. Los radioastrónomos

mexicanos tendrán acceso a la reducción de datos de los nuevos interferómetros como ALMA, VLA, SMA y VLBA en el Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño que ha sido construido con este propósito

De manera vigorosa, se realizará en este instituto investigación en astronomía con estándares internacionales; se impulsará la captación y formación de recursos humanos de alta calidad a nivel de educación superior, y se promoverá un estrecho contacto con la sociedad en general a través de la divulgación de la astronomía, para hacer conciencia en el público de la importancia de la ciencia y motivar a la niñez y la juventud mexicanas para el estudio de las ciencias exactas.

Con una mayor presencia académica y una incrementada capacidad de gestión, el IRAf incrementará su impacto académico en todo el país. Como instituto tendrá una mayor influencia en el polo científico del campus de la UNAM en Morelia, lo cual será muy importante para el desarrollo y recomposición social del Estado de Michoacán. El nuevo IRAf impulsará al campus Morelia, junto con los grupos de ecología, matemáticas, geofísica, geografía, física de materiales e ingeniería, así como con otros grupos que se integren posteriormente, de tal forma que impacte de manera importante la región en términos de desarrollo científico de excelencia, de formación de recursos humanos a nivel superior y de divulgación de la ciencia.

El grupo de investigadores que conformará este instituto tiene una alta productividad científica. Todos los miembros, incluso los más jóvenes, tienen reconocimiento de su trabajo a nivel internacional, como lo demuestran premios nacionales e internacionales, citas a sus trabajos e invitaciones a congresos internacionales. Además, este grupo de investigadores ha mostrado su serio compromiso con la formación de recursos humanos, a través de cursos y dirección de tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Finalmente, los investigadores participan activa y continuamente en ciclos de divulgación de la astronomía y han logrado un gran impacto social en el estado.

El IRAf en Morelia contribuirá al desarrollo de la astronomía en México en colaboración con el IAUNAM, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), en Puebla, y los departamentos astronómicos en Guanajuato, Guadalajara, Monterrey, el

Instituto Politécnico Nacional y en la Universidad de Sonora. Se tendrá siempre una estrecha colaboración con las universidades y los tecnológicos locales.

Así como el CRyA tiene un amplio reconocimiento en el campo de la formación estelar Galáctica, el nicho científico del IRAf será la formación de estrellas en la escala del Universo, a través del tiempo y en múltiples frecuencias. A través de una sinergia entre observadores y teóricos, se convertirá en un líder en esta área a nivel mundial. Finalmente el nuevo IRAf promoverá el desarrollo de la radioastronomía en todo el país.

BENEFICIOS DEL INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

La creación del Instituto de Radioastronomía y Astrofísica en Morelia permitirá apoyar decididamente el desarrollo de los grupos de radioastronomía y astrofísica teórica en las distintas áreas de la astronomía moderna. Este desarrollo es fundamental para impulsar la contribución de la UNAM y de México a la ciencia con los grandes interferómetros de radio del mundo.

La investigación astronómica en longitudes de onda del visible, se practica desde épocas milenarias. La segunda ventana que se abrió al Universo fue la radioastronomía, en los países del primer mundo a mediados del siglo pasado, y en México en las últimas décadas del siglo XX y la primera del siglo XXI con la creación del CRyA en la UNAM. Este centro ha logrado que México aparezca en el mapa mundial, no sólo en la astronomía visible e infrarroja, sino también en la radioastronomía debido a aportaciones fundamentales al conocimiento universal que han hecho los investigadores del centro. La transformación en instituto permitirá ampliar esta presencia internacional y preparará el camino para que México vaya entrando a las otras ventanas del espectro electromagnético como los rayos X y los rayos gamma, las cuales se realizan ya desde el espacio exterior.

Los radioastrónomos del CRyA participan ya en el VLA y en el VLBA. A través de esta última colaboración, los radioastrónomos mexicanos tienen acceso al nuevo interferómetro ALMA en Chile, que es el interferómetro para ondas milimétricas más importante del siglo XXI.

De hecho, los astrónomos del CRyA han realizado ya las primeras publicaciones mexicanas con datos de ALMA. También, los radioastrónomos del CRyA y sus estudiantes participarán en los proyectos científicos del Gran Telescopio Milimétrico (GTM), que está iniciando su operación en México como un proyecto del INAOE. Los investigadores teóricos del centro han hecho también aportaciones fundamentales en el campo de formación estelar en la Galaxia, y se ha creado una sinergia con los el grupo de radioastronomía. En conjunto, en el nuevo IRAf, ambos grupos fortalecerán y extenderán el liderazgo académico al área de formación estelar en todo el Universo.

Como instituto, gestionará de manera eficiente colaboraciones académicas con las entidades locales. Debido al relativo aislamiento de Morelia, es importante apoyar estancias de estudiantes, tanto nacionales como extranjeros. Para esto, fomentará convenios de colaboración para la formación de recursos humanos con las universidades tecnológicas michoacanas, en donde frecuentemente se imparten pláticas de divulgación. De igual manera, a través de reuniones regionales como las que ya se realizan con los grupos de astronomía de Guanajuato y Guadalajara, se alentarán proyectos de investigación conjuntos con otras universidades estatales.

El nuevo Instituto de Radioastronomía y Astrofísica promoverá la radioastronomía en todo el país, alentando proyectos de investigación en conjunto con centros pequeños ya existentes en universidades estatales como Guanajuato, Guadalajara y Monterrey, en donde se cultiva esta disciplina. Estos grupos tendrán acceso a la reducción de datos de los nuevos interferómetros como ALMA, VLA, SMA y VLBA en el nuevo Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño que ha iniciado su operación con este propósito. Además, hay que recordar que la radioastronomía está estrechamente vinculada con el desarrollo tecnológico en las áreas de cómputo, electrónica y telecomunicaciones, por lo que el IRAf contribuirá a fomentar estas disciplinas en el país, alentando la formación de estudiantes, tanto astrónomos como ingenieros. Con este propósito se ha construido también un Laboratorio de Interferometría de Radioastronomía que atiende ya a estudiantes de los tecnológicos del estado.

A través de la investigación, formación de recursos humanos y divulgación de la ciencia, el IRAf contribuirá a la recomposición del tejido social del estado y del país.

ANTECEDENTES

La UNAM, por su carácter nacional y por su reconocida calidad académica, es uno de los agentes más importantes para la extensión de las actividades de investigación científica y la formación de recursos humanos de alto nivel en todo el país.

Con este objetivo, en la última década, la UNAM apoyó la creación de centros de investigación en los campus de Morelia y Querétaro a partir de sólidos grupos académicos, lo que ha permitido un gran impacto regional. En combinación con los polos de mayor antigüedad de Cuernavaca y Ensenada, así como los nuevos polos como Sisal, la UNAM tiene ya una importante presencia nacional.

El CRyA está ubicado en el Campus Morelia de la UNAM. Este campus se localiza en el suroeste de la ciudad de Morelia, y cuenta con casi 26 hectáreas de terreno. De estas 10.3 hectáreas fueron donadas por el gobierno del Estado de Michoacán en 1994 y el resto fueron cedidas por el gobierno estatal en comodato por tiempo indefinido en 2005 y 2013. En el campus se encuentran, además, otros grupos de investigación establecidos: el Centro de Investigación en Ecosistemas (CIEco), el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) y el Centro de Ciencias Matemáticas (CCM). Así mismo, están las Unidades académicas de los Institutos de Geofísica y de Investigación en Materiales, y pronto llegará un grupo del Instituto de Ingeniería. Con estos grupos académicos se ha consolidado la presencia de la UNAM en investigación y docencia en posgrado en esta región del país. Además, en el 2012 inició actividades la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Morelia, la cual está localizada en el predio en comodato. La ENES Morelia cuenta ya con 10 novedosas licenciaturas y está creciendo rápidamente, fortaleciendo la presencia de la UNAM en Michoacán también a este nivel educativo.

El CRyA inició su actividad en agosto de 1995, como una Unidad Académica del Instituto de Astronomía. Morelia resultó un sitio atractivo para el grupo pionero de astrónomos porque la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) cuenta con una carrera de Física y porque el Instituto de Física y Matemáticas de la UMSNH invitó a los astrónomos a integrarse a su recién iniciado posgrado en Física. Durante el primer año, el

Instituto de Física apoyó con sus instalaciones de cómputo e internet a miembros de la unidad.

De 1996 a 1999 se rentó una casa en J.J. Tablada 1006, Col. Santa María, Morelia. En marzo de 2000, la Unidad se trasladó al Campus Morelia, a un edificio compartido con la Unidad del Instituto de Matemáticas (IMUNAM). Finalmente, el 20 de marzo de 2003, la Unidad Morelia del IAUNAM se transformó en el CRyA con los siguientes objetivos, definitorios de un centro de investigación en ciencia básica:

Realizar investigación astronómica de alto nivel en la zona occidente del país.
Participar en la formación de nuevo personal a nivel de licenciatura y posgrado.
Realizar labores de divulgación de la astronomía hacia el público en general.

En el cumplimiento de estos objetivos, el CRyA ha tenido mucho éxito en los casi 12 años transcurridos desde su creación. A la fecha, el CRyA ha tenido 2 directores, que son:

- Dr. Luis Felipe Rodríguez Jorge 27/05/2003 -20/05/2007.
- Dra. Estela Susana Lizano Soberón 21/05/2007 -20/05/2011; 21/05/2011 - 20/05/2015 (2do periodo).

El grupo que conforma al CRyA se ha modificado desde su creación con la contratación de nuevos investigadores, y con la transferencia de dos investigadores a otras entidades de la UNAM por así convenir a sus intereses académicos. Desafortunadamente, también hemos perdido a 2 investigadoras muy destacadas. En febrero de 2012 falleció la Dra. Yolanda Gómez, quien fue una de las pioneras de la Unidad Morelia y tuvo un papel fundamental en el establecimiento y la consolidación del CRyA. En noviembre de 2013 falleció la Dra. Paola D'Alessio Vessuri, reconocida a nivel internacional por el desarrollo de los modelos de discos protoplanetarios que han permitido interpretar las observaciones de estos discos y determinar sus propiedades físicas. En total, en el periodo, se han contratado 6 investigadores jóvenes muy productivos en diversas áreas de investigación, los cuales fortalecen al grupo académico.

La administración de los servicios del campus se concentra en la Coordinación de Servicios Administrativos (CSAM). La UNAM ha hecho un gran esfuerzo de descentralización en el caso del Campus Morelia, por lo que se cuenta con una Unidad de Procesos Administrativos y muchos trámites ya se realizan localmente.

INFRAESTRUCTURA ACTUAL

El CRyA comparte un edificio con el CCM. En junio del 2010 se construyó un ala adicional al edificio original, a la cual se trasladaron varios miembros del grupo de matemáticas. Actualmente, el CRyA cuenta con 33 oficinas, 4 aulas, 1 área para el acervo de libros y revistas, 1 sala de cómputo, 3 salas de videoconferencias, un auditorio para 66 personas compartido con los matemáticos, y 1 zona administrativa. Además, recientemente se construyeron y equiparon el Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño y el Laboratorio de Interferometría de Radioastronomía.

La investigación en el CRyA se lleva a cabo con observaciones en telescopios a diferentes frecuencias que deben ser procesadas (reducidas) e interpretadas. Para su interpretación, se utilizan la comparación con modelos teóricos y simulaciones numéricas. Los tres procesos (reducción de datos, modelaje y simulaciones) requieren de computadoras de alto desempeño. La adquisición y actualización del cómputo es una de las prioridades del centro. Por esto, el nuevo Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño es un instrumento fundamental del centro que se construyó para proteger y administrar las computadoras más poderosas con las que se cuenta para realizar el trabajo astronómico. La operación del Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño inició en 2012. Para la construcción y equipamiento de este laboratorio se ha realizado una inversión de 10 millones de pesos, con el 50% en cada rubro. Esta inversión ha sido posible gracias al apoyo de la UNAM, de la Coordinación de la Investigación Científica y de proyectos de DGAPA y CONACyT. Este laboratorio alberga las máquinas de cómputo de alto rendimiento en condiciones óptimas, con control de humedad, temperatura de precisión y suministro ininterrumpido de energía. La construcción y el equipamiento del laboratorio se realizaron de acuerdo con la norma TIA/EIA-942 que rige la construcción de datacenters. El laboratorio cuenta con monitoreo de seguridad y control de acceso. Además, tiene 2 aulas para talleres de cómputo y

docencia. Actualmente el laboratorio alberga 2 clusters: el primer equipo tiene 368 cores, 736 GB de RAM, con conexiones infiniband de 40 Gbps entre nodos y 45 TB de almacenamiento y se utiliza para la realización de simulaciones numéricas de turbulencia y formación de nubes y estrellas en el medio interestelar. El segundo equipo tiene como principal característica el sistema de archivos distribuido LUSTRE, que permite lectura y escritura muy rápidas, lo cual es fundamental para la reducción de datos interferométricos de radio; cuenta con 128 cores, 448 GB de RAM y 180 TB efectivos de almacenamiento. Este último equipo es ya utilizado por la comunidad de radioastrónomos de varios centros en México para reducir datos de los interferómetros ALMA y VLA. Además, el laboratorio alberga 28 máquinas de alto desempeño, la mayoría con varios procesadores y arreglos de discos duros para servidores, para modelaje teórico y procesamiento de datos en otras frecuencias. Este equipo de cómputo, indispensable para el trabajo astronómico, se renueva continuamente a través de recursos combinados de proyectos de investigación de CONACyT y PAPIIT, así como con recursos directos de la UNAM.

El edificio cuenta con un sistema de telecomunicaciones (telefonía, internet por fibra óptica y sistema de videoconferencias). En el 2010 se realizó una mejora de este sistema que aumentó su velocidad de transmisión interna a 1Gb/s, necesaria para el trabajo astronómico hoy en día, que requiere de la transferencia cotidiana de una gran cantidad de datos. Se cuenta con un acervo mediano de libros de apoyo al posgrado y se tiene acceso electrónico a la mayor parte de las revistas profesionales de astronomía.

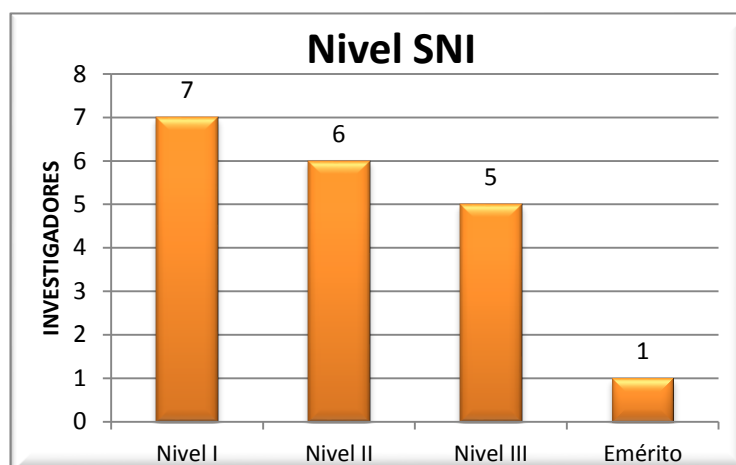
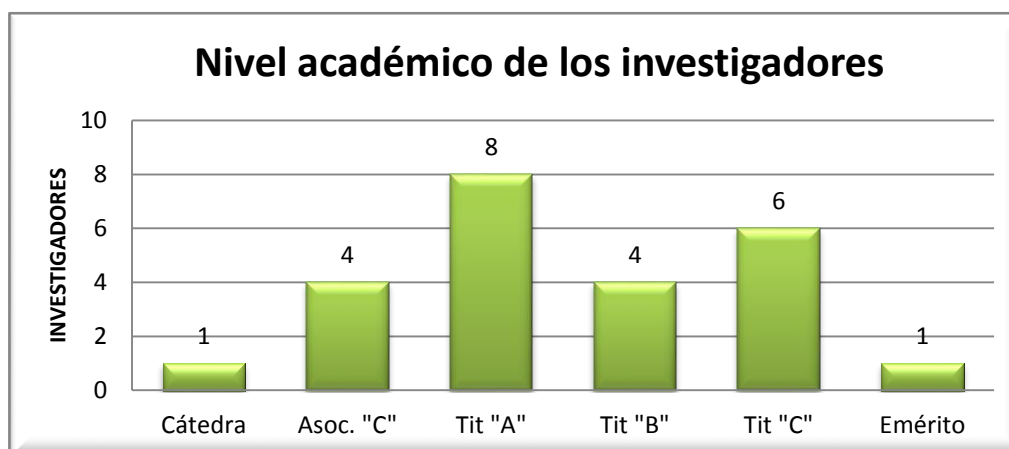
En 2014 inició la operación de las nuevas instalaciones del Laboratorio de Interferometría de Radioastronomía para investigación y docencia en licenciatura y posgrado. Este laboratorio tenía más de 6 años de funcionar en un espacio que le quedó pequeño. La construcción costó 1.5 millones de pesos. El nuevo laboratorio fue equipado con apoyo de la Coordinación de la Investigación Científica, con un proyecto de infraestructura de CONACyT, y con proyectos de Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) y de Fondos Mixtos CONACyT -Estado de Michoacán, con una inversión de casi 4 millones de pesos. En este laboratorio se desarrollan proyectos de instrumentación de radio para la formación de recursos humanos a niveles desde preparatoria hasta posgrado. El laboratorio cuenta con equipos de laboratorio para telecomunicaciones y radio instrumentación de los más sofisticados del

estado de Michoacán, y ha puesto sus servicios a la disposición de la comunidad académica de la región. Cuenta, además, con una granja de antenas adyacente al edificio en donde los estudiantes hacen experimentos para sus tesis de licenciatura y de posgrado. Este laboratorio también apoya a la Red Mexicana de Radiotelescopios, que desarrolla una red de antenas en varias preparatorias de la UNAM y tecnológicos del Estado de Michoacán para monitorear al Sol y otros cuerpos del Sistema Solar en tiempo real. Se han llevado a cabo ya 3 talleres para estudiantes de las Escuelas preparatorias y Colegios de Ciencias y Humanidades (CCHs) de la UNAM, así como 5 talleres para profesores de las mismas entidades. También se han realizado 2 talleres para profesores de los tecnológicos del Estado de Michoacán. El laboratorio también da servicio para las Escuelas de Verano en Astrofísica, que se celebran en el CRyA cada 2 años, y los Talleres de Ciencia para Jóvenes que tienen lugar cada 2 años en el campus. Con datos de este laboratorio se han concluido 4 tesis de licenciatura y se encuentran en proceso 4 de licenciatura y 2 de maestría. En resumen, este laboratorio es muy importante para la formación de estudiantes, tanto de astronomía como en áreas de ingeniería como la electrónica, telecomunicaciones y computación.

CRyA: INVESTIGACIÓN, DOCENCIA Y DIFUSIÓN

Planta académica:

La planta académica del CRyA es un grupo de excelencia consolidado. Actualmente cuenta con 24 investigadores, de los cuales el 46% son titulares B o C y el 50% tienen niveles II o III del SNI. En las dos gráficas de abajo se muestran los niveles académicos y del SNI de los investigadores. Actualmente 80% de los investigadores pertenecen al SNI. Sin embargo, este 2015 ingresarán al SNI 4 investigadores recién contratados el 2014, quienes cuentan ampliamente con los méritos académicos. Es decir, para este 2015 se tendrá al 96% de los investigadores en el SNI. El promedio de miembros del SNI en las entidades del área de físico-matemáticas es del 93% y el promedio del Subsistema de la Investigación Científica es de 91%.



Los investigadores en orden de nivel académico son:

- Dr. Luis Felipe Rodríguez Jorge, Emérito, Pride D, SNI emérito.
- Dr. Gustavo Ramón Bruzual Alfonzo, Titular C, Pride C, SNI III.
- Dr. William John Henney, Titular C, Pride C, SNI II.
- Dr. Stanley Eugene Kurtz Smith, Titular C, Pride D, SNI III.
- Dra. Estela Susana Lizano Soberón, Titular C, Pride D, SNI III.
- Dr. Laurent Raymond Loinard Corvaisier, Titular C, Pride D, SNI III.
- Dr. Enrique Cristián Vázquez Semadeni, Titular C, Pride C, SNI III.
- Dra. Sarah Jane Arthur, Titular B, Pride C, SNI II.
- Dr. Javier Ballesteros Paredes, Titular B, Pride C, SNI II.
- Dr. Jacopo Fritz, Titular B, Pride B.*

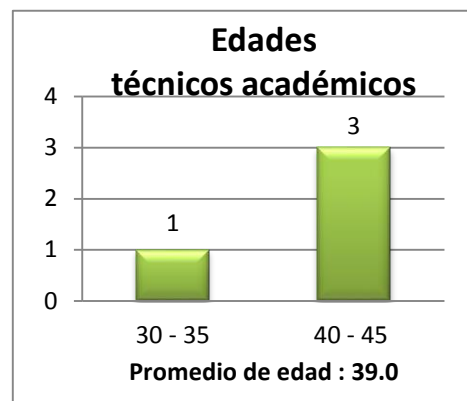
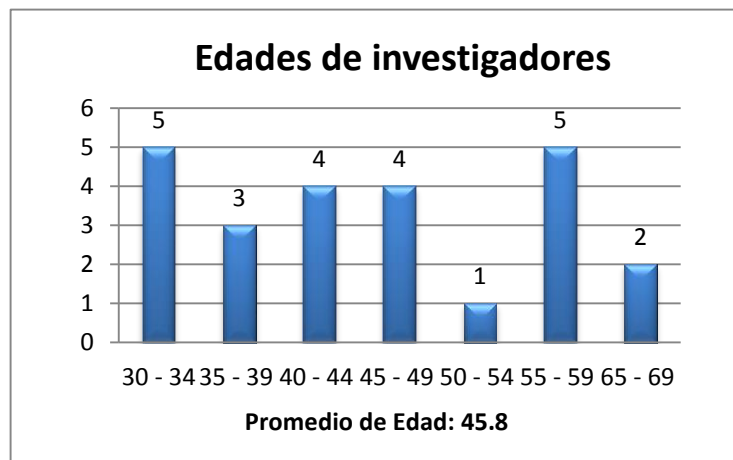
- Dra. Rosa Amelia González López Lira, Titular B, Pride C, SNI II.
- Dr. Pedro Colín Almazán, Titular A, Pride C, SNI I.
- Dr. Vladimir Escalante Ramírez, Titular A, Pride A.
- Dra. Omaira González Martín, Titular A, Pride B.*
- Dra. Adriana Gazol Patiño, Titular A, Pride C, SNI I.
- Dr. Gilberto Carlos Gómez Reyes, Titular A, Pride C, SNI II.
- Dr. Ricardo Francisco González Domínguez, Titular A, Pride C, SNI II.
- Dra. Aina Palau Puigvert, Titular A, Pride B.*
- Dr. Luis Alberto Zapata González, Titular A, Pride C, SNI I.
- Dr. Carlos Eugenio Carrasco González, Asociado C, PRIDE B, SNI I.
- Dr. Roberto Galván Madrid, Asociado C, SNI I.
- Dr. Daniel Tafoya Martinez, Asociado C, PAIPA B, SNI I.
- Dr. Bernardo Cervantes Sodi, Asociado C, PRIDE B, SNI I.
- Dr. Héctor Oti Floranes, Cátedra CONACyT, para jóvenes investigadores.*

* Estos 4 investigadores que fueron contratados en 2014 y están en el proceso para incorporarse al SNI en 2015 en donde alcanzarán niveles I y II. Con ello, el 96% de los investigadores pertenecerán al SNI.

Técnicos Académico en orden de nivel académico son:

- M.T.I. Gilberto Zavala Pérez, Técnico Académico Titular B, Pride C (cómputo).
- M.T.I. Miguel Espejel Cruz, Técnico Académico Titular A, Pride C (telecomunicaciones).
- M.T.I. Alfonso Ginori González, Técnico Académico Titular A, Pride C (cómputo).
- Ing. en Sistemas Leonardo Arroyo Lira, Técnico Académico Asociado C, Pride B (información científica).

Las siguientes gráficas muestran la distribución de edad de los investigadores y los técnicos académicos en intervalos de 5 años. El promedio de edad de los investigadores es de 45.8 años; 33% tienen menos de 40 años y el 25% son mujeres. El promedio de edad de los técnicos académicos es 39.0 años; 25% son menores de 40 años y el 100% son hombres.



El CRyA cuenta con investigadores posdoctorales que tienen becas de DGAPA, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), de la Sociedad Mexicana de Física y de la The World Academy of Sciences (TWAS). Es importante enfatizar que estos doctores jóvenes provienen de Europa, México y Latinoamérica, el Caribe, y de la India, lo que refleja que el CRyA tiene una proyección internacional. El número de posdocs se ha ido incrementando considerablemente. Desde el 2005 el CRyA ha recibido a 19 becarios posdoctorales (ver Apéndice E). Actualmente trabajan 7 posdoctorados en el CRyA con estas becas, número que equivale al 30% de la planta de investigadores, lo cual contribuye de manera importante a intensificar la actividad académica y docente del centro.

En su estado actual, el CRyA es equiparable a grupos astronómicos reconocidos en otras partes del mundo. Los grupos de investigación grandes a nivel mundial en general tienen más de 20 profesores. Este número se puede incrementar cuando el grupo está encargado de un observatorio o de hacer desarrollo instrumental. También en las universidades de prestigio en EUA los grupos de astronomía varían entre 15 y 35 investigadores. La tabla siguiente muestra el número de astrónomos en diferentes instituciones de astronomía en EUA. Los grupos grandes cuentan con más de 20 investigadores. Hay que mencionar que muchos de los investigadores que se declaran en estos grupos no son plazas reales, sino plazas que tienen categorías de asociados. Por ejemplo, Berkeley cuenta con tan sólo 12 plazas de profesor y el resto son asociados. De hecho, con la planta académica actual, el IRAf podrá asumir con responsabilidad todas las actividades y comisiones académicas inherentes a su estatus como instituto.

Académicos en instituciones de astronomía en EUA

Institución	Académicos
<i>Grupos grandes:</i>	
Caltech	34
Harvard University	21
University of California at Berkeley	31
University of Texas at Austin	27
Yale University	23
<i>Grupos medianos:</i>	
New Mexico State University	16
University of Florida	20
University of Michigan at Ann Arbor	16

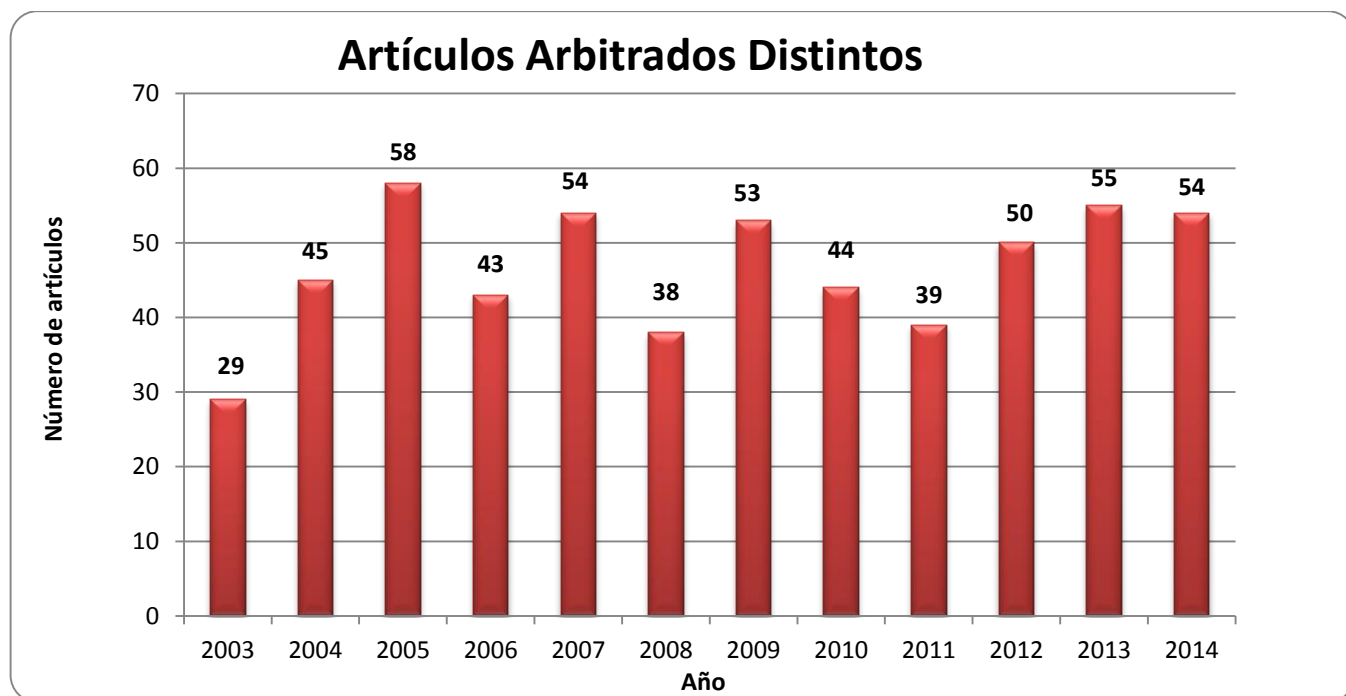
Investigación

El CRyA se distingue por concentrar al grupo de radioastronomía más grande del país, que realiza el 70% de la investigación nacional en esta área. Los astrofísicos teóricos del centro también están fuertemente involucrados en la radioastronomía, haciendo predicciones de fenómenos e interpretando observaciones hechas en estas longitudes de onda. Esta sinergia ha propiciado un desarrollo exitoso del área de formación estelar Galáctica en el centro.

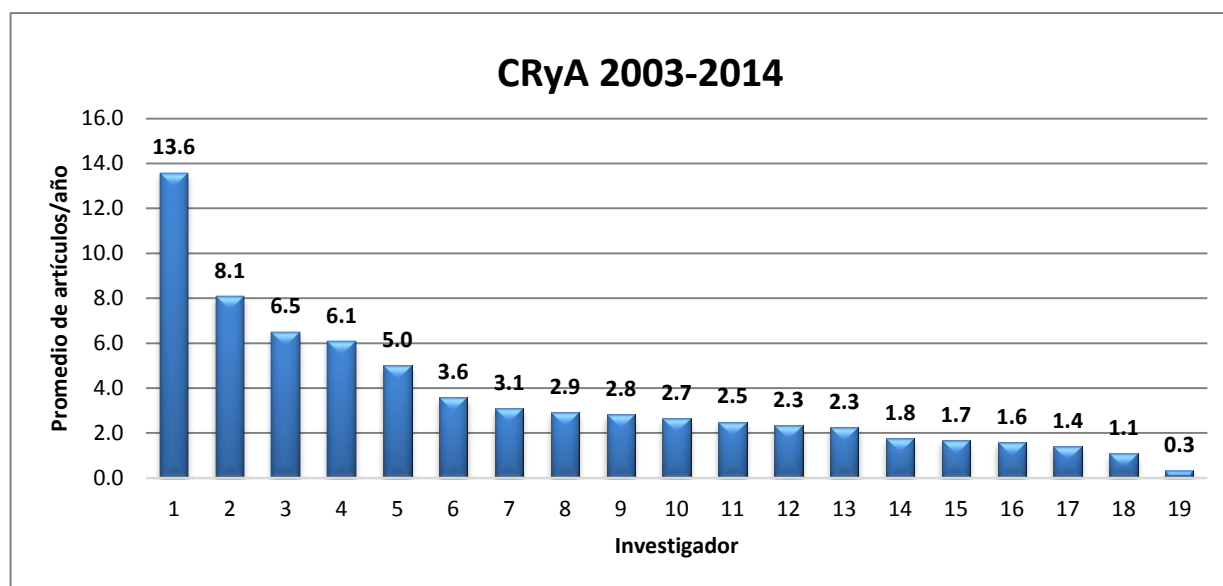
La investigación del CRyA también cubre aspectos observacionales y teóricos en las áreas de formación y evolución estelares, medio interestelar, altas energías, estructura galáctica, astronomía extragaláctica y cosmología. Los investigadores del CRyA realizan observaciones multifrecuencias, incluyendo longitudes de onda de radio, infrarroja, óptica, ultravioleta y de rayos X. Para estas observaciones utilizan telescopios nacionales e internacionales como los arreglos interferométricos de radio VLA, VLBA y ALMA, los telescopios espaciales Hubble Space Telescope (HST), X-ray Multi-Mirror Mission - Newton (XMM-Newton), el Chandra X-ray Observatory, Radio Astron y el Herschel Space Observatory, y los telescopios nacionales como el 2 m en San Pedro Mártir y recientemente el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) en Puebla. Además, se planea colaborar con el observatorio de rayos gama HAWC en México y el observatorio de rayos cósmicos Pierre

Auger en Argentina. También desarrollan estudios teóricos y simulaciones numéricas en las áreas de dinámica de gases, dinámica estelar, transporte radiativo, y física atómica y molecular.

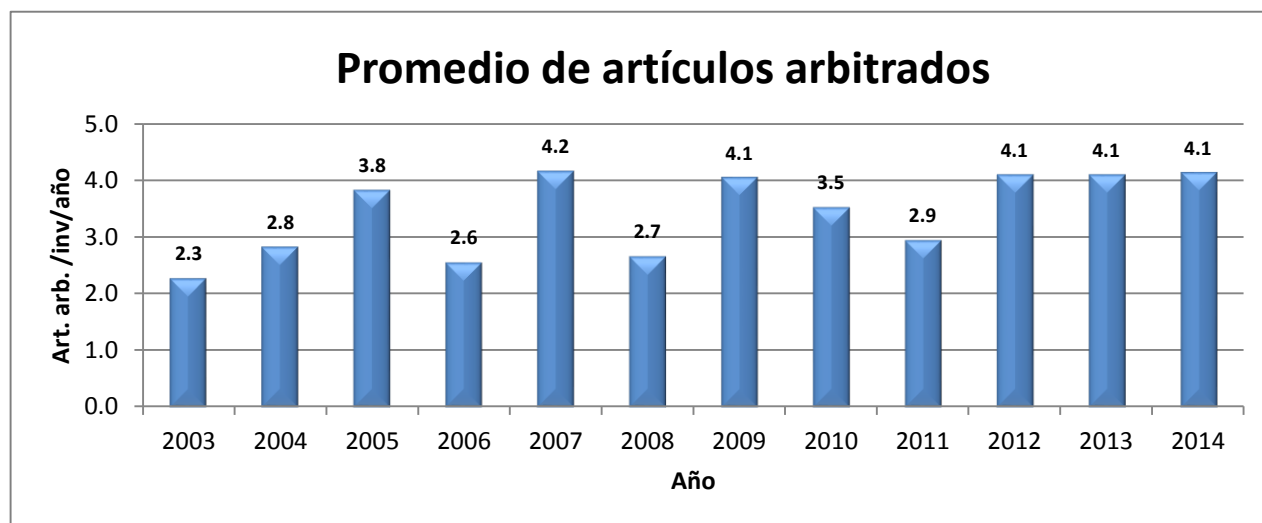
Del 2003 al 2014 los investigadores del CRyA produjeron 562 artículos distintos en revistas internacionales con arbitraje. En el Apéndice A se anexa lista de los artículos arbitrados *distintos* producidos en el CRyA. En promedio se produjeron 2.6 artículos arbitrados distintos por investigador por año, que es igual al promedio del área de fisico-matemáticas del Subsistema de la Investigación Científica de la UNAM y un poco más alto que el promedio general de este subsistema (2.4). Es importante mencionar que la tasa de colaboración del centro es muy alta, más del 30% de los artículos tienen dos o más autores del centro. Esta interacción le da una gran solidez académica al grupo.



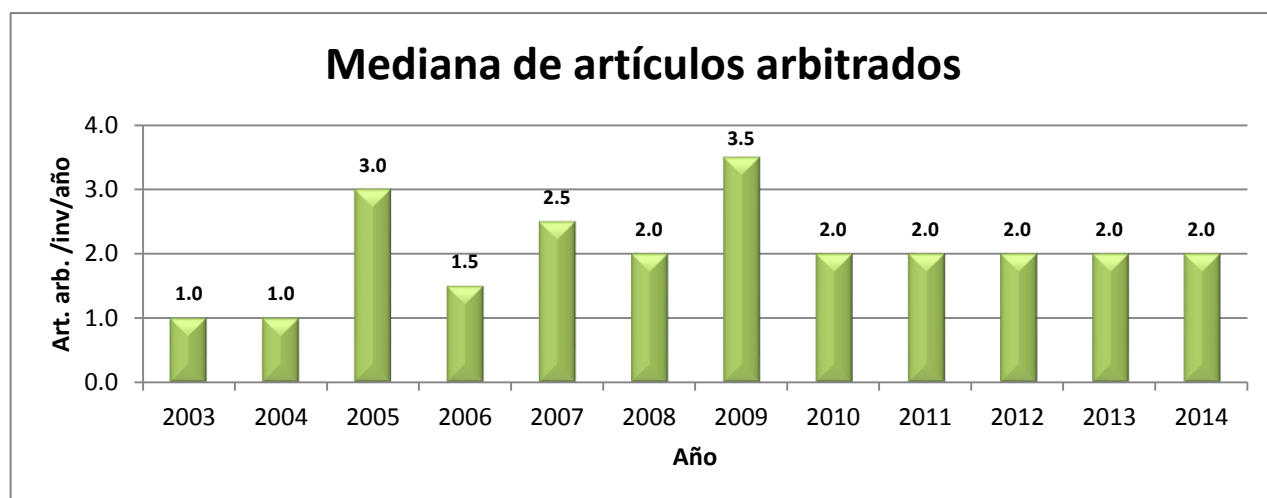
La siguiente gráfica muestra el promedio de artículos arbitrados de cada uno de los investigadores del CRyA durante el periodo 2003-2014, excluyendo a los jóvenes contratados en 2014 porque no tienen producción en todo el periodo. Esta gráfica muestra que el promedio de la productividad durante todo el periodo es de 3.6 artículos arbitrados por investigador por año.



La siguiente gráfica muestra el promedio de artículos arbitrados por investigador en cada año. Se puede ver que, en los últimos 3 años, los investigadores mantienen una tasa promedio de publicación de 4.1 artículos arbitrados por investigador por año.



La siguiente gráfica muestra la mediana de artículos arbitrados por investigador por año. En los últimos 3 años, el CRyA ha mantenido una mediana de 2 artículos arbitrados por investigador por año. Es decir que la mitad de los investigadores producen más de 2 artículos y la otra mitad produce menos de 2 artículos arbitrados por año.



Además, en el periodo el CRyA tiene un índice de Gini de artículos arbitrados de 0.4. Este índice mide la contribución individual de los investigadores a la producción total de artículos. El valor de 0 es la igualdad total y el valor de 1 corresponde a la desigualdad total, donde un investigador produce todos los artículos. Este índice se usa para medir la distribución de la riqueza en los países, y el valor de 0.4 es equivalente a la distribución de la riqueza, por ejemplo, en EUA.

Los investigadores del CRyA colaboran con colegas en las principales instituciones de astronomía de México y el mundo. Por ejemplo, en los 54 artículos publicados durante el 2014, colaboran 263 investigadores externos de 258 instituciones en 26 países.

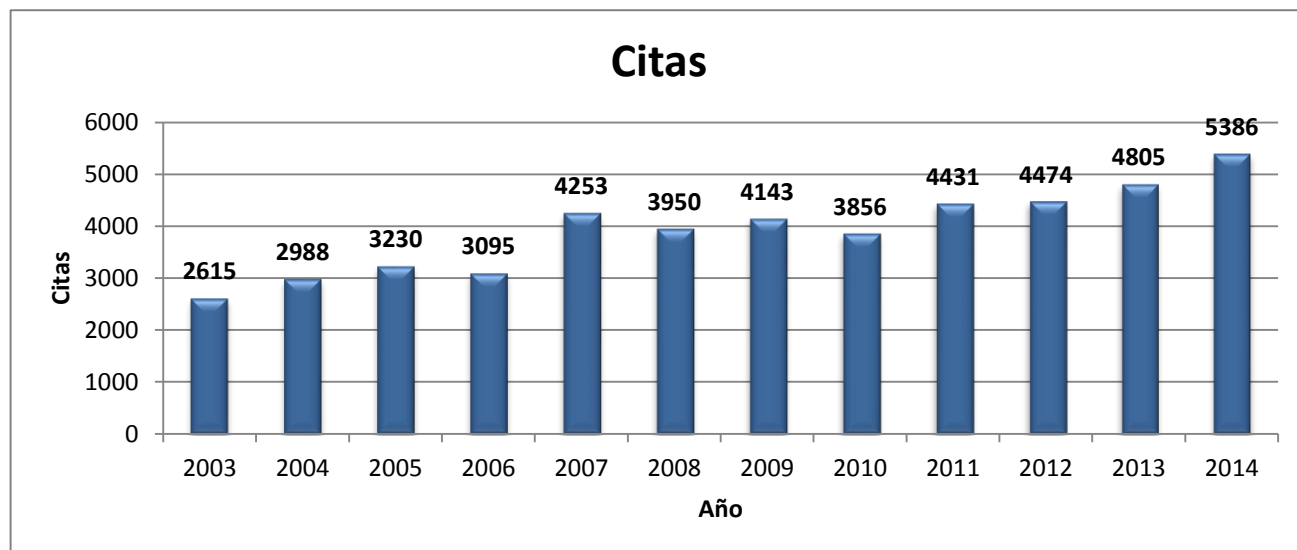
Los investigadores del CRyA publican en las principales revistas de astronomía del mundo que tienen un alto índice de impacto, con valores típicos mayores que **4 - 5**. La siguiente tabla muestra estas revistas con el índice de impacto en el 2012 y el índice de impacto promedio en el periodo 2003-2012 de acuerdo con la fuente "ISI Web of Knowledge - Journal Citation Reports" de Thompson Reuters:

<http://adminapps.webofknowledge.com/JCR/JCR?PointOfEntry=Home&SID=4FKKV2Fhhhs3HQypnki>

REVISTA	PROMEDIO	
	2012	2003-2012
ASTROPHYSICAL JOURNAL	6.733	6.419
ASTRONOMY & ASTROPHYSICS	5.084	4.242
MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY	5.210	5.118
REVISTA MEXICANA DE ASTRONOMIA Y ASTROFISICA	1.197	2.161
ASTRONOMICAL JOURNAL	4.965	4.954
ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES	16.238	11.609
SCIENCE	31.027	30.042
NATURE	38.597	32.482
PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC	3.690	3.540

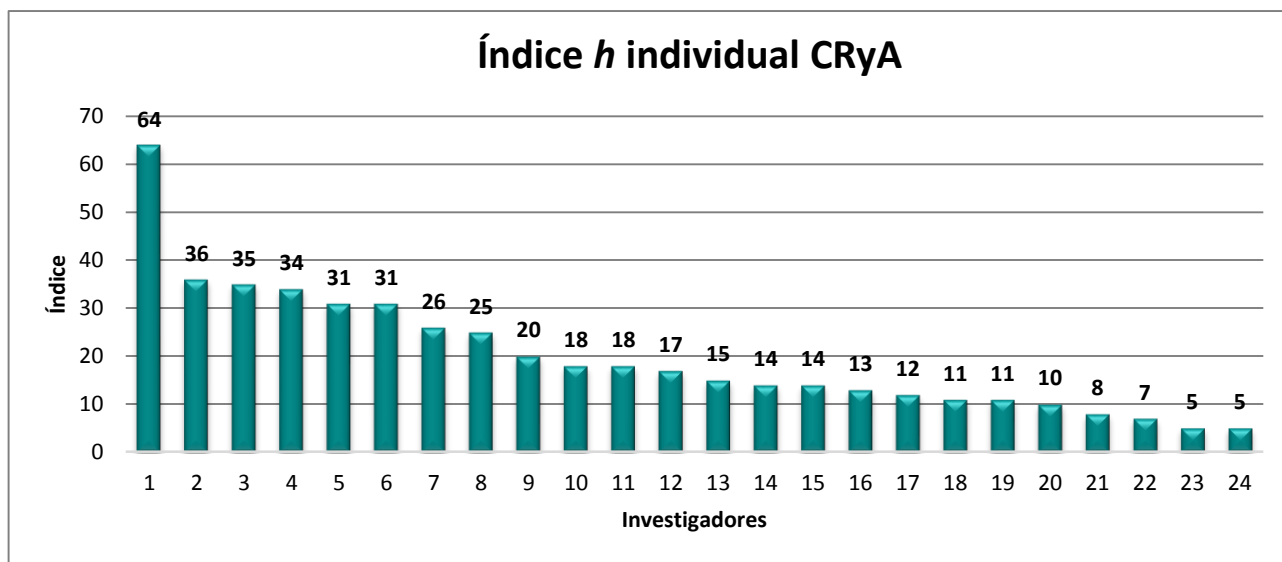
El trabajo de los investigadores del CRyA ha recibido un amplio reconocimiento nacional e internacional. Los investigadores han recibido 47,226 citas en la literatura internacional en el periodo 2003 – 2014, en la base de datos **SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS)** (http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html) que utiliza la comunidad astronómica en el mundo. Es importante mencionar que en otros buscadores como Google Académico, dan más del 20% de citas adicionales.

La siguiente gráfica muestra las citas de los investigadores por año en el periodo 2003-2014 del ADS.



Por otro lado, si se consideran solamente los 562 artículos arbitrados publicados en el CRyA en el periodo 2003-2014, estas publicaciones recibieron 14,761.

La siguiente gráfica muestra el índice Hirsch individual de la planta actual de los investigadores del CRyA. Este índice, que se denomina como h , indica cuantos artículos arbitrados han recibido al menos h citas en la literatura, y es una medida del impacto del trabajo de los investigadores del centro.



El índice Hirsch institucional del CRyA es **$h=101$** , esto significa que 101 artículos producidos por los investigadores del centro, han recibido al menos 101 citas. Este valor es el más alto de las entidades del subsistema de la Investigación Científica de la UNAM y es equiparable al de instituciones de astronomía de gran prestigio en Estados Unidos. Finalmente, solamente los 562 artículos arbitrados publicados en el CRyA en el periodo 2003-2014, tienen un índice de Hirsch $h=62$.

Premios y distinciones

Por otro lado, 8 investigadores del CRyA han recibido distinciones nacionales e internacionales. Esto corresponde al 30% de la planta actual. Los premios y distinciones son:

Nacionales

- 1 investigador es miembro del Colegio Nacional; Premio Universidad Nacional; Doctor Honoris Causa de la UNAM; e Investigador Emérito de la UNAM. Es también el único astrónomo iberoamericano que ha ocupado la Presidencia de la División de Radioastronomía de la Unión Astronómica Internacional.
- 2 investigadores han recibido el Premio Nacional de Ciencias y Artes.
- 2 investigadores han recibido el Premio de Investigación Científica de la AMC.
- 3 investigadores han recibido la Distinción UNAM para Jóvenes Académicos.
- 3 investigadores han recibido el Premio Estatal de Investigación Científica y Humanística del COECyT, Michoacán.
- 2 investigadores han recibido el Premio Estatal de Divulgación del COECyT, Michoacán.
- 1 investigador recibió el Premio de la Investigación Científica de la Sociedad Mexicana de Física y la Medalla Marcos Moshinsky.
- 1 investigador recibió el Premio Jorge Lomnitz Adler.
- 1 investigador recibió una Cátedra Marcos Moshinsky.

Internacionales

- 1 investigador obtuvo el Premio en Física de la Third World Academy of Sciences TWAS; es miembro de la National Academy of Sciences en EUA; y obtuvo el Premio Bruno Rossi de la American Astronomical Society, una de las distinciones más importantes en el campo de la astrofísica de altas energías.
- 3 investigadores han recibido la Beca John Simon Guggenheim.
- 1 investigador obtuvo el Premio Friedrich Wilhelm Bessel de la Fundación von Humboldt de Alemania.
- 2 investigadores han recibido el Premio SCOPUS y el Premio Thompson Reuters por el alto número de citas a sus trabajos.
- 2 jóvenes investigadores son miembros asociados de la TWAS.
- 1 investigador obtuvo la Cátedra de la Fundación Iberdrola
- 1 investigador obtuvo la Cátedra Severo Ochoa, España.

El Apéndice C muestra en detalle los premios y distinciones recibidos por los investigadores del CRyA desde la creación del centro en 2003.

Líneas principales de los investigadores y especialidad de los técnicos académicos

Enseguida se describen brevemente las áreas principales del trabajo de los investigadores.

- La Dra. S. Jane Arthur trabaja en evolución de estrellas y dinámica del medio interestelar.
- El Dr. Javier Ballesteros trabaja en simulaciones numéricas de nubes moleculares.
- El Dr. Gustavo Bruzual trabaja en modelos de síntesis de poblaciones estelares.
- El Dr. Bernardo Cervantes estudia la estructura y evolución de galaxias.
- El Dr. Carlos Carrasco es radioastrónomo y estudia regiones de formación estelar.
- El Dr. Pedro Colín realiza investigación en el campo de la cosmología computacional.
- El Dr. Vladimir Escalante trabaja en la teoría de regiones ionizadas y fotodisociadas
- El Dr. Jacopo Fritz trabaja en modelos y observaciones infrarrojas de núcleos de galaxias activas.
- La Dra. Adriana Gazol trabaja en magnetohidrodinámica del medio interestelar.
- El Dr. Roberto Galván es radioastrónomo y trabaja en la formación de estrellas masivas en la Galaxia.
- El Dr. Gilberto Gómez trabaja en simulaciones numéricas de nubes y gas en el disco Galáctico.
- El Dr. Ricardo González trabaja en modelos de vientos estelares.
- La Dra. Rosa Amelia González estudia poblaciones estelares en cúmulos globulares y galaxias cercanas.
- La Dra. Omaira González trabaja en emisión de rayos X de núcleos de galaxias activas.
- El Dr. William Henney trabaja en la teoría de regiones fotoionizadas.
- El Dr. Stanley Kurtz es radioastrónomo y trabaja en la formación de estrellas masivas.
- La Dra. Susana Lizano trabaja en la teoría de la formación de estrellas en nuestra Galaxia.

- El Dr. Laurent Loinard es radioastrónomo y trabaja en astrometría de radio de regiones de formación estelar.
- El Dr. Hector Oti estudia la formación estelar y la actividad nuclear en galaxias.
- La Dra. Aina Palau radioastrónoma y estudia la formación estelar en cúmulos jóvenes.
- El Dr. Luis F. Rodríguez es radioastrónomo y estudia la formación estelar y los sistemas binarios de rayos-X.
- El Dr. Daniel Tafoya es radioastrónomo y estudia estrellas evolucionadas.
- El Dr. Enrique Vázquez trabaja en simulaciones numéricas de turbulencia en el medio interestelar y formación estelar.
- El Dr. Luis Zapata es radioastrónomo y estudia regiones de formación estelar.

Las áreas de investigación esbozadas arriba se complementan de forma idónea para la colaboración entre los investigadores, como lo muestra el hecho ya mencionado de que 30% de los artículos publicados son colaboraciones entre dos o más miembros del CRyA. En el Apéndice B se describen brevemente proyectos vigentes de la investigación astronómica que se realiza en el CRyA. Todos estos proyectos corresponden a investigación de frontera en su área.

Por su parte, 4 técnicos académicos altamente calificados dan soporte en diferentes áreas de cómputo e información científica indispensables para la investigación.

- M.T.I. Gilberto Zavala Pérez, Encargado de la instalación y configuración de nuevos equipos y programas, del Firewall, correo electrónico y administración de la red.
- M.T.I. Miguel Espejel Cruz, Encargado de telecomunicaciones del CRyA y del Campus.
- M.T.I. Alfonso Ginori González, Encargado de los Clusters de reducción de datos y simulaciones numéricas, y lo relacionado con supercómputo.
- Ing*. en Sistemas Leonardo Arroyo Lira, Encargado de información científica que incluye revistas electrónicas, búsquedas automatizadas y estudios paramétricos del CRyA y otras instituciones (* en proceso de titulación de maestría).

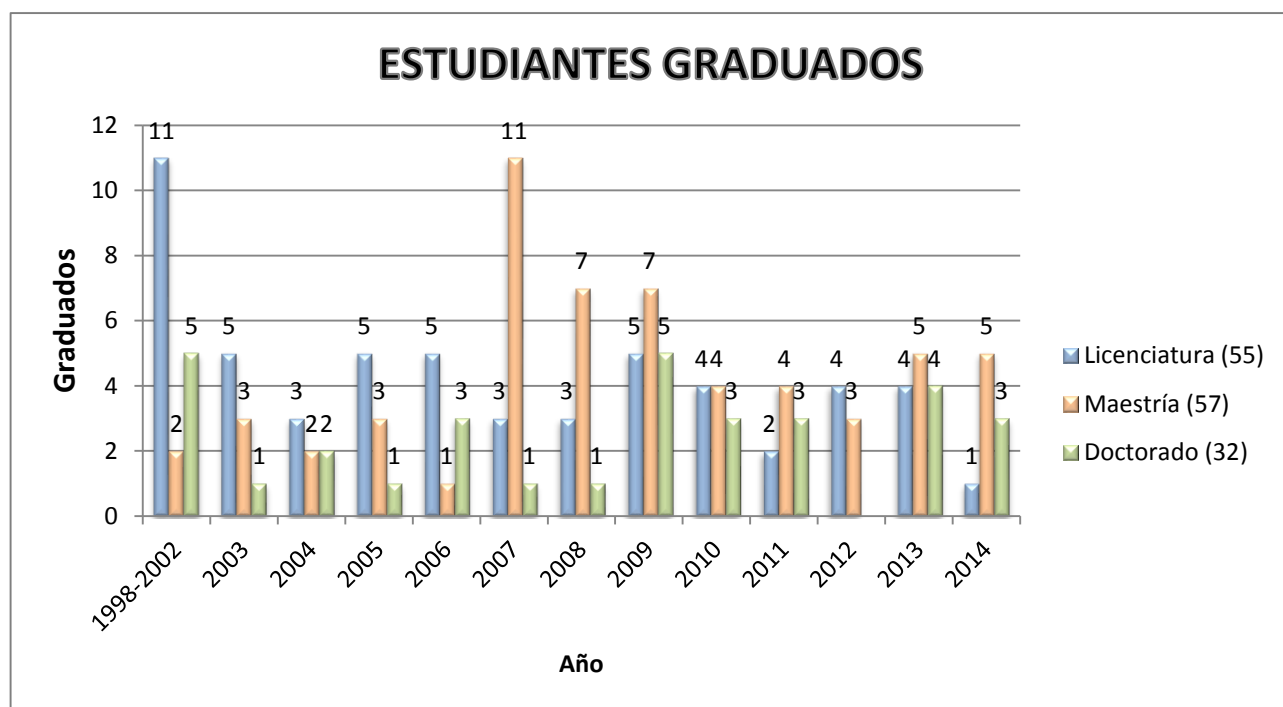
Actividades docentes

El CRyA participa en el Posgrado en Ciencias (Astrofísica) de la UNAM y tiene un vigoroso cuerpo docente. Este posgrado está catalogado como de calidad internacional por el CONACyT. Se ha hecho un gran esfuerzo para captar estudiantes de posgrado que vienen de casi todos los estados de la República Mexicana. Para atraer estudiantes de todos los niveles, el CRyA realiza una Escuela de Verano en Astrofísica en Morelia cada 2 años desde 1999. Estas escuelas están dirigidas a estudiantes de licenciatura de Física y áreas afines, del quinto semestre en adelante. Actualmente en el CRyA están inscritos 27 estudiantes de posgrado, lo cual corresponde al 30% de la matrícula del posgrado en Astrofísica.

Estos estudiantes vienen del DF y de 21 estados de la República Mexicana coloreados en la gráfica, así como de otros países como Puerto Rico, Colombia, Venezuela y España.



En el centro se han graduado 32 doctores y 57 maestros, y se han dirigido 55 tesis de licenciatura, como se muestra en la figura abajo. En el Apéndice D está la lista de las tesis dirigidas en el CRyA.



De acuerdo con esta gráfica, durante el periodo las tasas de estudiantes graduados fueron:

- 0.6 estudiantes/investigador/año;
- 0.12 doctorados/investigador/año.

Estos promedios son iguales a los de las entidades del área de Físico-Matemáticas en el Subsistema de la Investigación Científica. Sin embargo, es necesario mejorar estos indicadores. Para enfrentar los retos e incrementar el número de estudiantes se está realizando una serie de visitas a universidades estatales con la carrera de Física, incluyendo la UMSNH, para atraer estudiantes. También se hace un esfuerzo para que investigadores y estudiantes participen en el Congreso Nacional de Física que proporciona una oportunidad muy valiosa de presentar el posgrado de Astrofísica a estudiantes de licenciatura. Finalmente una opción importante es aumentar la matrícula en la Escuela de Verano de Astrofísica que se realiza de forma bianual en Morelia y otra opción es aprovechar aún más el programa de Verano de la Investigación Científica de la AMC.

La siguiente tabla muestra el promedio de graduados en licenciatura, maestría y doctorado. La tabla muestra también el tiempo promedio para la obtención de cada grado; en el caso de la licenciatura, se refiere al tiempo para realizar la tesis.

	Licenciatura	Maestria	Doctorado
Graduados por año	3.9	4.5	2.3
Tiempo de obtención de grado (años)	1	2.5	4.9
Edad Promedio	24	27	31
Porcentaje de estudiantes foráneos	60	83	85

Los estudiantes de posgrado cuentan con una beca de CONACyT. Además, tienen apoyo de la UNAM (PAEP) y del CRyA para realizar viajes de observación y hacer estancias de investigación. En la tabla anexa se desglosan los montos y se muestra el costo total por alumno.

Apoyos	Maestria 2 años	Doctorado 4 años
Beca CONACyT	\$218,016	\$580,800
PAEP	\$20,000	\$45,000
CRyA	\$10,000	\$10,000
<u>Total costo alumno</u>	\$248,016	\$635,800

Dada la especialización del CRyA en la radioastronomía, una fracción importante de las tesis dirigidas pertenece a esta área. En particular, 21 estudiantes del posgrado en el CRyA se han entrenado en el uso de los interferómetros de radio más importantes del mundo. El CRyA ha podido absorber a algunos de los más brillantes y destacados egresados, entre ellos, contrató a los Dres. Luis Zapata, Roberto Galván y Daniel Tafoya. Los Dres. Zapata, Galván y Tafoya realizaron estancias posdoctorales en instituciones extranjera de gran prestigio, como lo son el Center for Astrophysics en Harvard, EUA; el Max Planck Institut

für Radioastronomie, en Bonn, Alemania; en la Universidad de Kagoshima, Japón y en el Observatorio Espacial de Onsala, en Suecia. Actualmente, otros 7 estudiantes e investigadores posdoctorales están adquiriendo experiencia en interferometría de radio en distintas partes del mundo.

Finalmente, cabe señalar que, desde su llegada a Morelia, investigadores del CRyA han impartido cursos en la UMSNH, tanto en el Posgrado en Física del Instituto de Física y Matemáticas, como en la Licenciatura de Física de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas.

Actividades de divulgación

La actividad de divulgación de la Astronomía en el CRyA es muy intensa y tiene un gran impacto a nivel estatal. Al año se realizan más de 120 eventos, muchos de ellos en colaboración con la UMSNH y con los Institutos Tecnológicos del estado. Esta actividad se intensificó a partir del año 2009, Año Internacional de la Astronomía, cuando se realizaron más de 400 eventos. Las actividades de divulgación incluyen pláticas, sesiones de observación con telescopios, talleres, y visitas guiadas de escuelas, entre otras. En particular, durante el 2012, 2013 y 2014 las actividades de divulgación del CRyA mantenido un ritmo intenso y han llegado más de 14,000, 27,000 y 32,000 personas, respectivamente. Además, el CRyA ha elaborado una serie de juegos didácticos que se llevan a eventos y escuelas y registró la marca “Mi Universo UNAM” para estos juegos en 2009.

En la siguiente Tabla se muestra un ejemplo de las actividades realizadas durante el año 2009, Año Internacional de la Astronomía, en el cual se hizo una labor intensa de divulgación y se atendió a más de 100,000 personas.

Los eventos de divulgación se difunden a la sociedad michoacana por medio de comunicados de prensa, y programas de radio y de televisión en los días previos a la actividad.

EVENTOS ACADÉMICOS DE ENSEÑANZA				
EVENTO	FECHA	UBICACIÓN	ACTIVIDADES	PÚBLICO
VI Escuela de Verano	22 Junio-3 Julio 2009	Morelia, Michoacán	- Cursos - Charlas - Talleres	37 alumnos
Taller de Verano Construcción de Telescopios	20 Julio-30 Agosto 2009	Morelia, Michoacán	Taller	10 alumnos
1er Taller de Radioastronomía	27-29 Noviembre 2009	Morelia, Michoacán	Teoría y prácticas	20 profesores

EVENTOS DE ACTIVIDADES MÚLTIPLES					
EVENTO	FECHA	ORGANIZADOR	UBICACIÓN	ACTIVIDADES	PÚBLICO
Noche de Estrellas	31 Enero 2009	Comité Organizador	Tzintzuntzan	- Talleres astronómicos - Conferencias - Observación por telescopios	8000 personas
Celebración del Año Nuevo Purépecha	1 Febrero 2009	Comité Organizador Año Nuevo Purépecha	Chilchota	Observación por telescopios	5000 personas
Inauguración Estatal AIA	18 Febrero 2009	CRyA, Unidad de Vinculación UNAM Campus Morelia	"Teatro Melchor Ocampo" Morelia	- Conferencia - Pláticas magistrales - Exposición instrumentos astronómicos	700 personas
Tianguis de la Ciencia	27 Abril 2009	Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)	Morelia, Michoacán	- Talleres astronómicos - Conferencias	3000 personas
Cinedebate	30 Mayo-27 Junio 2009	CRyA, Unidad de Vinculación UNAM Campus Morelia, Cinépolis	Morelia, Michoacán	Proyección de películas y debate por comentaristas especializados en el tema	2000 personas en 5 sesiones
Donación de telescopios a escuelas del estado	25 Septiembre 2009 7 Diciembre 2009	CRyA, Unidad de Vinculación UNAM Campus Morelia y Secretaría de Educación en el Estado	Morelia, Michoacán	- Conferencia - Taller de entrenamiento - Observación por telescopios	60 escuelas 50 escuelas
Feria de la Astronomía	20-29 Noviembre 2009	Instituto de Astronomía	México, Distrito Federal	- Stand informativo - Conferencias - Talleres	4000 personas
Viaje al espacio: Orgullo para Michoacán	5 Septiembre 2009	CRyA, COECyT	Morelia, Michoacán	Talleres	2000 personas
Reto México	24 Septiembre 2009	Comité Organizador Nacional y Comités Locales	Uruapan, Morelia y Celaya	- Conferencias - Talleres	1000 personas en 3 sedes
Clausura Estatal Actividades AIA	5 Diciembre 2009	CRyA	Morelia, Michoacán	- Conferencia - Exposición "El Universo para que lo descubras" - Talleres astronómicos - Observación por telescopios	150 personas

Astronomía para Todos	25 febrero-11 marzo	CRyA, Unidad de Vinculación UNAM Campus Morelia	Centro Cultural Universitario	800 personas en 4 charlas
Ciclo Astronomía Universidad Autónoma de San Luis Potosí	9 octubre 13 noviembre	Universidad Autónoma de San Luis Potosí	San Luis Potosí	500 personas en 2 sesiones
Ciclo Astronomía Universidad Autónoma del Estado de México	30 noviembre 1 diciembre 2 diciembre 3 diciembre 4 diciembre	Facultad de Ciencias Universidad Autónoma del Estado de México	Toluca, Estado de México	800 personas en 5 sesiones
Pláticas de Astronomía en Museo de la Luz	24 septiembre 8 octubre 29 octubre 12 noviembre 26 noviembre	Museo de la Luz	México, Distrito Federal	200 personas en 5 sesiones
XVIII Festival Internacional Quimera	21 octubre 23 octubre	Comité Organizador	Metepec, Estado de México	1,000 personas en 2 charlas
16ª. Semana Nacional de Ciencia y Tecnología	26-30 octubre	CONACYT-COECyT	Institutos Tecnológicos del Estado	1,000 personas en 5 charlas
100 pláticas a escuelas en el Estado de Michoacán	Durante el 2009	CRyA		8,000 personas en 100 pláticas
150 pláticas en diversos estados de la República Mexicana	Durante el 2009			48,000 personas en 150 pláticas

EXPOSICIONES					
EVENTO	FECHA	ORGANIZADOR	UBICACIÓN	ACTIVIDADES	PÚBLICO
Exposición Instrumentos Astronómicos	25 Febrero-25 Marzo 2009	CRyA, Unidad de Vinculación UNAM Campus Morelia	Centro Cultural Universitario	• Conferencia • Exposición	2000 personas
Exposición Ella es una Astrónoma	31 Agosto-04 Septiembre 2009	CRyA, Universidad Latina de América	Universidad Latina de América	• Conferencia • Exposición	1000 personas
Exposición El Cielo desde México	06 Octubre-30 Noviembre 2009	CRyA, Unidad de Vinculación UNAM Campus Morelia	Museo de Historia Natural	• Exposición	3000 personas
Exposición El Universo para que lo Descubras	05 Diciembre-17 Enero 2010	CRyA, Unidad de Vinculación UNAM Campus Morelia, Zoológico de Morelia	Explanada del CRyA y Zoológico de Morelia	• Exposición	5000 personas
IMPACTO TOTAL DIVULGACIÓN 2009					100,627 personas

ASIGNACIÓN DE NOMBRES DE ASTRÓNOMOS A ESCUELAS DEL ESTADO DE MICHOACÁN				
	NOMBRE ASIGNADO	CLAVE	DOMICILIO	FECHA DE CEREMONIA
1	ESCUELA SECUNDARIA FEDERAL NO. 13 "ASTRÓNOMO LUIS FELIPE RODRÍGUEZ JORGE"	16DES0214S	Morelia, Mich.	12-mar-09
2	ESCUELA TELESECUNDARIA "ASTRONÓMO GUILLERMO HARO BARRAZA"	16ETV0399T	Las Yeguas, Paracuaro, Mich.	01-abr-09
3	CENDI No. 1 "ASTRÓNOMA JULIETA FIERRO GOSSMAN"	16DDI0001K	Morelia, Mich.	25-may-09
4	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO RICCARDO GIACCONI"	16DJN2340T	Estanzuela, Tlalpujahua, Mich.	23-sep-09
5	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO WILLIAM HERSCHEL"	16DJN2395W	Santo Niño, Tlalpujahua, Mich.	23-sep-09
6	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRONOMO FELIPE RIVERA CASTRO"	16DJN2385P	San Isidro, Tlalpujahua, Mich.	23-sep-09
7	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO GUILLERMO HARO BARRAZA"	16DJN2386O	Barrio del Alfarero, Tlalpujahua, Mich.	23-sep-09
8	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO WALTER ADAMS"	16DJN2884L	Cuartel III de Santa Maria, Tlalpujahua, Mich.	23-sep-09
9	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO GUILLERMO HARO BARRAZA"	16DJN2336G	La Loma, Senguio, Mich.	24-sep-09
10	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO CLAUDIO PTOLOMEO"	16DJN2442Q	Conocido, San Nicolás Tarimoro, Senguio.	24-sep-09
11	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO LUIS ENRIQUE ERRO"	16DJN2443P	Conocido, Pichardo Peña Blanca, Senguio.	24-sep-09
12	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO CARL SAGAN"	16DJN2444O	Conocido, El Tejocote, Senguio.	24-sep-09
13	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMA JULIETA FIERRO GOSSMAN"	16DJN2389L	Cuartel IV.	09-oct-09
14	JARDIN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO GUILLERMO HARO BARRAZA"	16DJN2660D	Palomillas, Maravatío, Mich.	16-oct-09
15	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO FELIPE RIVERA CASTRO"	16DJN2388M	Toluquilla, Maravatío.	13-nov-09
16	JARDÍN DE NIÑOS "ASTRÓNOMO JORGE CANTÓ ILLA"	16DJN2615R	Epitacio Huerta, Mich.	30-nov-09
17	ESCUELA TELESECUNDARIA "ASTRÓNOMA SILVIA TORRES CASTILLEJA"	16ETV0336H	Quinceo, Morelia.	07-dic-09
18	ESCUELA TELESECUNDARIA "ASTRÓNOMO MANUEL PEIMBERT SIERRA"	16ETV0183U	San Juanito Itzicuaró, Mich.	09-dic-09

Congresos organizados

Internacionales

Se han realizado cinco reuniones internacionales en el CRyA:

- Taller "The Infancy of Massive Stars", enero de 2009, a la que asistieron 30 investigadores reconocidos de EUA, Europa y Australia.
- Primera Reunión México-Chile, abril de 2010, con miras a iniciar la elaboración de propuestas de observación para el interferómetro ALMA y sus pathfinders. Asistieron 15 radioastrónomos de ambos países.
- XIII Reunión Regional Latinoamericana de la Unión Astronómica Internacional, noviembre del 2010, auspiciada por la Unión Astronómica Internacional, la UNAM y el CONACyT, a la que asistieron 320 astrónomos de Latinoamérica.
- Segundo Taller México-Chile, marzo de 2012, el cual se llevó a cabo en el CRyA, enfocado hacia propuestas para ALMA. Participaron 15 radioastrónomos de ambos países.
- Frontiers in Contemporary Astrophysics, marzo de 2013, reunión conmemorativa del décimo aniversario de la creación del CRyA, con la pláticas de distinguidos astrónomos colaboradores del CRyA, con 80 participantes de instituciones nacionales e internacionales.
- Taller internacional "Revealing the Structure of Protoplanetary Disks" en honor de la Dra. Paola D'Alessio, enero 2015, con 65 participantes de instituciones nacionales e internacionales.

Nacionales

Se han realizado cuatro reuniones nacionales en el CRyA:

- XIV Congreso Nacional de Astronomía, en octubre de 2000.
- XX Congreso Nacional de Astronomía, en marzo de 2006.
- VII Reunión Regional de Occidente, en noviembre de 2003
- XII Reunión Regional de Occidente, en noviembre de 2008.

En los congresos nacionales de astronomía participan todas las entidades que realizan investigación astronómica en el país. Las reuniones regionales se realizan para fomentar la colaboración entre las sedes del CRyA, Guanajuato y Guadalajara.

Aportaciones del CRyA al Campus Morelia, el estado y el país

El CRyA ha tenido una estrecha colaboración con el Instituto de Física de la UMSNH. De hecho, establecieron su Posgrado en Física con la ayuda inicial de los investigadores del centro, quienes participaron por los primeros años hasta que el Instituto de Física contrató a suficientes investigadores. Actualmente se tienen proyectos de investigación en colaboración como el de la búsqueda de las fuentes de rayos cósmicos ultra energéticos, observados en el observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger. Otra área de colaboración con los relativistas de la UMSNH es el proyecto de Event Horizon Telescope que pretende medir el tamaño del hoyo negro en el centro de la galaxia. Estos dos proyectos se describen en la sección de colaboraciones internacionales del IRAf.

A pesar de que Michoacán tiene problemas muy serios en la educación, en estudios del CONACyT aparece como el tercer estado (abajo del DF y Morelos) con mayor parámetro de impacto de sus investigadores, como se ve en la siguiente tabla. Este aspecto tan positivo y alentador en buena parte se debe al campus de la UNAM y, en particular, al CRyA.

III.15 PRODUCCIÓN E IMPACTO SEGÚN ESTADO 2002-2011			
Estado	Artículos	Citas	Impacto
Aguascalientes	833	1,727	2.1
Baja California	7,079	28,608	4.0
Baja California S	3,261	16,471	5.1
Campeche	698	2,189	3.1
Chiapas	1,488	7,319	4.9
Chihuahua	2,515	7,850	3.1
Coahuila	2,758	8,024	2.9
Colima	1,304	4,902	3.8
Distrito Federal	109,285	613,737	5.6
Durango	969	3,928	4.1
Guanajuato	7,501	34,051	4.5
Guerrero	282	779	2.8
Hidalgo	1,529	4,432	2.9
Jalisco	8,956	29,701	3.3
México	8,229	22,708	2.8
Michoacán	5,742	31,652	5.5
Morelos	13,977	97,126	6.9
Nayarit	301	601	2.0
Nuevo León	6,653	21,131	3.2
Oaxaca	757	1,359	1.8
Puebla	9,516	43,729	4.6
Querétaro	5,440	23,171	4.3
Quintana Roo	1,180	4,722	4.1
San Luis Potosí	4,697	23,455	5.0
Sinaloa	2,188	7,023	3.2
Sonora	4,218	18,165	4.3
Tabasco	644	1,169	1.8
Tamaulipas	1,273	3,612	2.8
Tlaxcala	566	2,041	3.6
Veracruz	4,369	18,456	4.2
Yucatán	4,305	20,319	4.7
Zacatecas	1,045	3,675	3.5

Fuente: CONACyT

El CRyA ha sentado una pauta en la divulgación de la ciencia a nivel estatal con eventos como los que se enlistan en la sección de divulgación. Muchas de estas actividades se realizan en colaboración con la UMSNH, el Planetario de Morelia, la Sociedad Astronómica de Michoacán y los Tecnológicos del Estado. En el campus Morelia, el CRyA inició el espacio llamado “Paseo de la Ciencias Yolanda Gómez Castellanos”, nombrado en memoria de la Dra. Gómez, incansable divulgadora y excelente académica del CRyA. Este es un espacio con exhibiciones didácticas al aire libre al cual se han unido las demás entidades del campus. El CRyA inició la serie anual “La ciencia en el cine” a la que invita a participar a las demás entidades del campus y a la UMSNH. Este evento realizado con apoyo de Cinépolis, tiene una gran aceptación del público y los boletos se acaban inmediatamente. El CRyA inició también el Taller de Ciencia para Jóvenes y ha coordinado la participación de las demás entidades del campus en los últimos años.

Como se describió en la sección de actividades docentes, el CRyA recibe estudiantes de la UMSNH y de todo el país para el posgrado de Astrofísica. Organiza además, la Escuela de Verano en Astrofísica para estudiantes cada dos años. Así mismo, recibe estudiantes de servicio social y tesis en las áreas de cómputo, telecomunicaciones y electrónica de los Institutos Tecnológicos del Estado de Michoacán.

El Dr. Stan Kurtz, miembro del CRyA, coordina el proyecto de *La Red Mexicana de Radiotelescopios*. Esta es una organización informal de profesores y estudiantes pertenecientes a una amplia gama de instituciones académicas. Su propósito es el desarrollo de la radioastronomía como una actividad pedagógica. La práctica principal es la construcción, instalación y operación de un radiotelescopio de bajo costo, todo llevado a cabo por los estudiantes bajo la dirección de sus profesores. Tales telescopios sirven para observar tormentas solares y jovianas y presentan una plétora de oportunidades para prácticas de laboratorio con aplicaciones en la matemática, la astronomía, la física y la geofísica, así como las técnicas de la ciencia en general. Profesores, tanto como estudiantes, están capacitados con una serie de talleres ofrecida por investigadores del CRyA y, recientemente, con apoyo del personal de Universum. La *Red* cuenta con más de 20 planteles que incluyen escuelas preparatorias de la UNAM y CCHS, y también escuelas secundarias, institutos tecnológicos. Participan además del CRyA, el Instituto de Geofísica, Universum, el Museo ZigZag (Zacatecas) y las Universidades Autónomas de Hidalgo y Nuevo León. Aunque la mayoría de los planteles están en el Distrito Federal, también hay

varios telescopios funcionando en el Estado de México y en Michoacán. Asimismo Oaxaca, Hidalgo, Zacatecas y Nuevo León cuentan con su telescopio. La *Red* cuenta con una presencia electrónica internacional por medio de su página web (<http://www.crya.unam.mx/redmexicana>) así como su cuenta de Facebook (<https://www.facebook.com/RedMexicanadeRadiotelescopios>). Además, el CRyA realiza talleres para estudiantes y profesores de esta red con el apoyo de la Secretaría General y la Coordinación de la Investigación Científica.

El Dr. Kurtz también ha colaborado estrechamente con investigadores y técnicos del Instituto de Geofísica en su proyecto de centelleo interplanetario en el radio observatorio MEXART en Coeneo, Michoacán. Participó en el *commissioning* del telescopio y su cooperación fue pieza clave para el desarrollo de nuevos radio receptores para MEXART. Asesora regularmente a los técnicos del telescopio en varios aspectos de su calibración y operación. Es co-autor de ocho ponencias en congresos con resultados del proyecto y ha dirigido dos tesis de licenciatura relacionadas al MEXART. Actualmente está realizando un estudio para determinar la capacidad del MEXART para observar pulsares, proyecto que resultará en otra tesis, y potencialmente podría abrir una nueva línea de investigación para el radiotelescopio.

LOGROS DE INVESTIGACIÓN

Dentro de las áreas de investigación que se realizan en el CRyA sus investigadores han hecho aportaciones fundamentales. Enseguida se explican varias de estas aportaciones cuya bibliografía aparece en el Apéndice F.

Formación Estelar

- *Descubrimiento de chorros de gas molecular expulsados a gran velocidad por protoestrellas.* Este resultado ha llevado a una mejor comprensión de la formación de las estrellas. Dos grupos descubrieron de manera independiente este fenómeno de los flujos moleculares bipolares, descubrimiento que establece la existencia de pérdida de masa con geometría bipolar durante las primeras etapas de la formación estelar [R1].

- *Detección de la fuente excitadora del sistema Herbig-Haro 1-2, prototipo de su clase.* Este descubrimiento permitió establecer el mecanismo de formación de los objetos Herbig-Haro mediante chorros altamente colimados provenientes de estrellas jóvenes [R2].
- *Primeras imágenes de discos protoplanetarios.* Estos discos se detectaron tanto alrededor de estrellas aisladas de baja masa [R3] como de sistemas binarios [R4]. Recientemente con el interferómetro ALMA se detectó evidencia de que estos discos también están presentes en protoestrellas de alta masa [R5].
- *Descubrimiento de los vientos protoestelares.* Los vientos protoestelares fueron detectados por primera vez a 21 cm utilizando la antena de Arecibo [Li1], y se propuso un mecanismo magnetocentrífugo capaz de eyectar las grandes tasas de pérdida de masa observadas [Li2]. Estos poderosos vientos estelares revierten la acreción de masa a la protoestrella central y destruyen las nubes.
- *Estructura y calentamiento de Núcleos Calientes.* La formación de estrellas masivas ocurre en el interior de núcleos de gas caliente que contienen moléculas como amoníaco, monóxido de carbono y cianuro de metilo. A través de la emisión térmica de amoníaco y cianuro de metilo que traza la dinámica del gas y los flujos moleculares en estas regiones, se demostró que la mayoría de tales núcleos cuentan con una fuente de calentamiento interno y tienen una estructura interna que corresponde a una ley de potencias [K1, K2, K3].
- *Descubrimiento y caracterización de las regiones HII hipercompactas.* Estas regiones permiten estudiar los procesos involucrados en la formación de estrellas masivas individuales. A diferencia de las mejor conocidas regiones HII ultracompactas donde se forman cúmulos de estrellas masivas, las regiones hipercompactas contienen una sola estrella o, posiblemente, un sistema binario [K4].
- *Descubrimiento de máseres de metanol en regiones de formación estelar de baja masa.* Este descubrimiento extiende la poderosa herramienta de máseres de metanol a regiones que están activamente formando estrellas de baja masa como es el Sol. Anteriormente, esta clase de máser solo se conocía en regiones de formación de estrellas masivas [K5]. También se descubrieron brotes irregulares o cuasi-periódicos de emisión

máser de las moléculas de formaldehído e hidroxilo en regiones de formación estelar que pueden ser debidas a acreción periódica en un joven sistema binario [K6]

- *Descubrimiento de una burbuja de gas molecular asociada a la desintegración de un sistema múltiple de estrellas jóvenes y del núcleo caliente asociado.* En este trabajo se encontraron pruebas de un mecanismo muy violento, para formar estrellas más masivas a través de la fusión de estrellas muy jóvenes. Este mecanismo poco común, podría ser la manera por la cual se forma las estrellas más masivas en nuestra Galaxia [Z1].
- *Descubrimiento de emisión sincrotrón en jets protoestelares.* Esta detección reveló por primera vez que los jets de estrellas en formación son capaces de acelerar partículas a velocidades relativistas [Ca1]. Este descubrimiento abre una nueva línea de investigación en el campo de la formación estelar sobre el estudio de los campos magnéticos y la aceleración de partículas en estos jets.
- *Primeros estudios de la fragmentación de nubes moleculares.* Estos estudios establecen las condiciones de las fases más tempranas en la formación de los cúmulos estelares. Se estudiaron 20 núcleos densos masivos y su nivel de fragmentación a escalas espaciales de 1000 AU. Se encontró que la fragmentación está dominada por la gravedad. [Pa1, Pa2]. Estos estudios constituyen una base observacional esencial para los modelos teóricos y simulaciones numéricas de la formación de cúmulos estelares.
- *Formación de las enanas marrones.* Se encontró que las enanas marrones parecen seguir los mismos procesos de formación que las estrellas como el Sol con evidencia de material molecular de alta velocidad eyectado por los polos y la presencia de un disco de acreción. [Pa3, Pa4].
- *Teoría de la formación de las estrellas de baja masa.* En este trabajo se propuso el actual paradigma de la formación de estrellas de baja masa como el Sol [Li3]. Este proceso incluye la formación dentro de nubes moleculares de núcleos densos que sufren un colapso gravitacional y forman estrellas con discos protoplanetarios a su alrededor. Las estrellas además producen vientos muy poderosos que destruyen la nube materna.

- *Núcleos densos magnetizados y la formación de discos protoplanetarios.* Se encontró que los núcleos densos, cunas de las estrellas de baja masa como el Sol, se condensan en las nubes moleculares magnetizadas, a medida que se pierde el soporte magnético y turbulento en escala de tiempo de unos cuantos millones de años [Li4]. Se demostró que es necesaria la disipación del campo magnético durante la fase de colapso gravitacional para evitar un frenado magnético catastrófico y formar discos protoplanetarios [Li5]. Se desarrollaron los primeros modelos de la estructura radial de discos magnetizados que arrastran el flujo magnético de la nube materna durante la fase de colapso gravitacional. Estos modelos toman en cuenta el efecto del soporte magnético en la dinámica del gas, lo cual produce rotación subkepleriana. Se encontró que estos discos magnetizados son más estables y pueden ser más masivos que los discos sin campo magnético [Li6].
- *Modelos físicos de la estructura y la emisión de discos protoplanetarios que rodean estrellas jóvenes.* Estos modelos son utilizados por la comunidad internacional para explicar las imágenes de discos observados con interferómetros en longitudes de onda milimétricas y para interpretar espectros infrarrojos del Telescopio Espacial Spitzer. Con estos modelos se pudo mostrar que el polvo en los discos ha crecido y se ha asentado en el plano medio del disco, lo cual antecede a la formación de planetas [D1-D4].
- *Observaciones y modelos de fotoevaporación de discos protoplanetarios en la Nebulosa de Orión.* Junto con observaciones espectroscópicas de alta resolución, estos modelos se han usado para determinar la tasa con la cual la radiación ultravioleta de estrellas masivas calientes evapora masa de los discos protoplanetarios en torno a estrellas de baja masa. Estos resultados proporcionan restricciones importantes sobre el tiempo de vida de los discos fotoevaporados y sobre las posibilidades de formación de planetas en la vecindad de estrellas masivas [H1-H4].
- *Modelos teóricos de la formación y la expansión, en medios no homogéneos, de regiones fotoionizadas producidas por estrellas masivas jóvenes.* Estos trabajos incluyen simulaciones radiativo-hidrodinámicas en tres dimensiones que muestran que las estructuras que se forman en las orillas de las regiones fotoionizadas se deben principalmente a inhomogeneidades en la densidad del medio en torno a la estrella. Se

encontró, además, que la expansión de la región fotoionizada introduce orden a gran escala en el campo magnético del gas neutro que está alrededor del gas ionizado en expansión [A1, A2].

- *El mecanismo de formación de las nubes interestelares y el origen de su turbulencia interna.* Se propuso que las nubes densas y frías en el medio interestelar se forman por grandes corrientes en el gas difuso y tibio, que se enfría a través de la inestabilidad térmica [V1]. Se mostró que este mecanismo de ensamblaje de las nubes este proceso conlleva la generación de la turbulencia que permea las nubes.
- *El colapso gravitacional global de las nubes moleculares.* Se propuso que las nubes moleculares están en colapso gravitacional y no se encuentran en equilibrio entre la presión ejercida por su turbulencia interna y su propia fuerza de gravedad como se ha supuesto hasta ahora [V2]. Este colapso implica que la tasa de formación estelar evoluciona en el tiempo, explicando varias observaciones sobre la distribución de edades de las estrellas recién formadas en las nubes, y del tipo de estrellas que contienen nubes en diferentes estados evolutivos [V3].
- *Estructura filamentaria en nubes moleculares.* Se mostró que el colapso gravitacional no isotrópico dentro de las nubes produce estructuras gaseosas filamentosas. Esto explica cualitativamente la ubicuidad y la estructura en densidad y velocidad de los filamentos reportados recientemente en observaciones de nubes moleculares con el observatorio espacial infrarrojo Herschel [V4].

Medio Interestelar

- *Estadística de la densidad en flujos turbulentos.* Se demostró que las fluctuaciones de densidad en un gas turbulento, supersónico e isotérmico tienen una distribución estadística de forma "lognormal" [V5]. Esta distribución constituye el punto de partida de varias teorías para la distribución estadística de las masas de las estrellas y para la rapidez de formación estelar en el gas Galáctico.
- *Modelos del gas atómico interestelar.* A través de experimentos numéricos estudió la segregación del gas interestelar atómico. Estas simulaciones muestran la presencia de gas en el régimen de temperatura correspondiente a la inestabilidad térmica que se reporta en las observaciones. También se caracterizaron algunas de las propiedades

observables de la turbulencia en el gas atómico como son el espectro de potencia de la densidad, el espectro de energía y la función de densidad de probabilidad de la densidad, la densidad de columna, y la presión térmica [V6; Ga1].

- *Formación de líneas espectrales en nebulosas ionizadas.* Se hicieron modelos detallados de nebulosas ionizadas para explicar la formación de líneas espectrales y determinar la abundancia de elementos químicos. Los resultados indican que estas líneas se pueden explicar por la teoría de la recombinación de iones con electrones y la fluorescencia debida a la absorción de luz estelar en algunos casos [E1]. Este trabajo permite estimaciones más precisas de la densidad, la temperatura y las abundancias del gas ionizado en estas fuentes.

Estrellas Evolucionadas

- *Descubrimiento de hidrógeno atómico neutro en nebulosas planetarias.* Estas observaciones demostraron que las masas de algunos de estos objetos, en los cuales anteriormente solo se había detectado componentes ionizadas y moleculares, estaban seriamente subestimadas [R5].
- *Descubrimiento de agua en nebulosas planetarias jóvenes.* Con observaciones de radio se detectó por primera vez agua en algunas nebulosas planetarias, lo cual implica que se encuentran en una fase muy joven de su evolución [Y1].
- *Medición de la distancia a estrellas evolucionadas.* Por medio del método de la paralaje trigonométrica usando observaciones de radio con una línea de base muy larga, se logró la primera determinación precisa de la distancia a una nebulosa planetaria. Esto permitió por primera vez restringir sus parámetros físicos como son el tamaño, masa, y edad [T1].
- *Modelos numéricos de la nebulosa bipolar en torno a eta Carinae.* Estos modelos reproducen la dinámica y morfología de la nebulosa producida por la interacción de las erupciones de los años 1840s y 1890s sufridas por la estrella masiva evolucionada eta Carinae [GD1].

Astrometría de Radio

- *Distancias ultraprecisas a regiones de formación estelar cercanas.* Con la técnica de interferometría de línea de base muy larga, radioastrónomos del CRyA lograron determinar la distancia a estrellas jóvenes con una precisión mejor que 1% [L1, L2]. Esto representa una mejoría de un factor de 10 a 100 sobre las mejores medidas anteriores. Actualmente, investigadores y estudiantes del CRyA están participando en el censo de distancias en el cinturón de Gould, usando las mismas técnicas [L3]. El conocimiento de la distancia a las estrellas es fundamental, ya que permite establecer sus propiedades físicas, como son su luminosidad, su masa y su edad. Esto tendrá repercusiones para el estudio de la formación estelar en general, así como para el estudio de la estructura local de la Galaxia.

Dinámica Galáctica

- *Modelos numéricos de discos galácticos.* Mediante el estudio numérico de la dinámica del gas asociado a los brazos espirales de una galaxia, se mostró que velocidad de la curva de rotación que mediría un observador es mayor que la que corresponde a la distribución real de masa en el disco. Esta discrepancia afecta las estimaciones de masa de las galaxias, así como de las distancias a objetos en discos galácticos derivadas a partir de curvas de rotación [GR1].

Astronomía Extragaláctica

- *Descubrimiento de gradientes de color y edad azimutales en las poblaciones estelares, a través de los brazos de una muestra significativa de galaxias espirales con y sin barra central.* La detección de estos gradientes apoya la teoría de ondas de densidad en los discos galácticos e indica un vínculo entre la dinámica de los discos y la formación estelar a gran escala en estas galaxias [GL1, GL2].
- *Método para medir opacidad, tanto Galáctica como en otras galaxias de disco, mediante los colores y números de galaxias de campo.* El desarrollo y la aplicación de este método a 31 galaxias espirales [GL3, GL4] mostró que en la región interbrazo la extinción y el enrojecimiento pueden explicarse mediante una componente difusa independiente del radio; en los brazos espirales, la misma componente difusa y ópticamente delgada parece coexistir con regiones de mucho mayor opacidad distribuidas de manera

inhomogénea pero con dependencia radial.

- *Fluctuaciones de brillo superficial (FBS) de cúmulos estelares para calibrar modelos e investigar poblaciones estelares no resueltas, especialmente en el infrarrojo.* Usando este método por primera vez pudo comprobarse observacionalmente que las FBS dependen fuertemente de la edad y la metalicidad de las poblaciones estelares [GL5]. Además se predijo que las FBS en el mediano infrarrojo son sensibles a cambios globales en la tasa de pérdida de masa de una población estelar y son capaces de determinar si, en efecto, existe una relación entre metalicidad y pérdida de masa [GL6].
- *Síntesis evolutiva de poblaciones estelares.* Estos modelos estudian la luz que se recibe de las galaxias distantes. Esta luz es una combinación de la luz emitida por sus estrellas individuales, las cuales pueden tener diferentes masas y composiciones químicas y encontrarse en diferentes fases de sus vidas. Se pueden combinar modelos teóricos de la evolución estelar con modelos de la distribución espectral de la luz emitida por las estrellas para reconstruir el espectro compuesto emitido por una galaxia y su variación en el tiempo [Br1, Br2]. Gracias a los modelos de síntesis de poblaciones estelares sabemos hoy en día que, típicamente, las estrellas que vemos en galaxias lejanas son más jóvenes, más masivas, más calientes y menos ricas en elementos más pesados que el helio (metales), que las que observamos en el universo cercano [Br3, Br4]. También se han utilizado este tipo de modelos de síntesis de poblaciones estelares para calcular una calibración consistente entre los trazadores de la tasa de formación estelar en diferentes rangos de energías, desde luminosidades en radio hasta rayos X. Esta herramienta permite derivar la historia de formación estelar en diferentes ambientes extragalácticos [O1].
- *Los núcleos activos de baja luminosidad son confirmados por primera vez como activos mediante su emisión en rayos X.* Durante décadas se discutió si estos núcleos, que se encuentran en el Universo cercano, son realmente activos. Este trabajo encontró que más de la mitad de ellos efectivamente tienen un núcleo activo. Otro 40% de la muestra podría también tener un núcleo activo, aunque se encuentran muy oscurecidos [GM1, GM2, GM3].

- *Estado evolutivo de los núcleos activos.* Las estrellas binarias de rayos X pasan por estados alternantes donde domina un disco o una corona. Los núcleos activos de las galaxias tienen agujeros negros millones de veces más masivos que los sistemas binarios. Se encontró que los núcleos activos son parecidos a las binarias en el estado donde el disco domina la emisión [GM4].
- *La formación estelar en galaxias.* Se han utilizado observaciones en el lejano infrarrojo realizadas con el observatorio espacial *Herschel*, junto con modelos de transferencia radiativa, para caracterizar la emisión del polvo en galaxias externas [F1]. Esto ha permitido determinar que las estrellas viejas son importantes para calentar el polvo en galaxias como Andrómeda, con lo que se han podido mejorar las estimaciones de la tasa de formación estelar en estos objetos.

Altas Energías

- *Descubrimiento de chorros de gas expulsados a gran velocidad por hoyos negros de masa estelar en sistemas binarios.* Se descubrió la primera fuente super lumínica en la Galaxia, con velocidades que parecen exceder la de la luz debido a una ilusión relativista. Este resultado ha llevado a una mejor comprensión de dichos objetos y al avance en la búsqueda de una visión unificada del origen de los chorros eyectados desde protoestrellas hasta hoyos negros [R7].

Cosmología

- *Formación de estructuras cósmicas en un escenario con materia oscura tibia (MOT).* Se revivió este escenario para la formación de la estructura en el universo al proponerlo como una posible solución al problema de la subestructura, a saber, que el paradigma estándar de la materia oscura fría predice la existencia de cientos de subhalos en el Grupo Local, mientras que sólo se observan algunas decenas de galaxias satélites [Co1]. Actualmente, la MOT sigue siendo un modelo viable.

LOGROS HISTÓRICOS DEL CRyA

- Marzo 2003: Creación del Centro de Radioastronomía y Astrofísica
- Septiembre 2006: Se formalizó la participación de México en los interferómetros internacionales VLA (EUA) y ALMA (Chile), a través del proyecto CONACyT Interferometría Radioastronómica (ER018). Se abrió la ventana de observación de 7mm del VLA.
- 2009 Año Internacional de la Astronomía: La actividad de divulgación del CRyA tuvo un máximo histórico de 400 eventos y llegó a más de 100,000 personas en el estado y el país.
- Marzo 2009: Se formalizó la participación de radioastrónomos mexicanos en el interferómetro intercontinental VLBA, a través del proyecto CONACyT Expansión del Very Long Baseline Array (I0110/350), para uso de la comunidad radioastronómica mexicana. Se aumentó la sensibilidad del VLBA por un factor de 16.
- Enero 2010: El grupo de radioastrónomos del CRyA, en competencia internacional abierta, obtuvo casi 3000 horas para estudios de astrometría de radio con el interferómetro VLBA. Este es uno de los 2 proyectos mundiales que más tiempo de observación han recibido en la historia del VLBA.
- Noviembre 2010: El CRyA realiza la XIII Reunión Regional Latinoamericana de Astronomía de la Unión Astronómica Internacional, el congreso más importante en su género.
- Diciembre 2010: El CRyA contó con su primer investigador emérito, el Dr. Luis Felipe Rodríguez Jorge.
- Septiembre 2011 La revista Astrophysical Journal Letters publica un volumen especial dedicado a "Early Science with the Expanded Very Large Array", con varias contribuciones de los investigadores del CRyA.
- Noviembre 2012: Investigadores del CRyA publicaron los primeros artículos mexicanos con datos del nuevo interferómetro ALMA.
- Diciembre 2012: Se concluyó la construcción del Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño que está a la vanguardia en este tipo de data centers. Este laboratorio alberga en condiciones óptimas de temperatura, humedad y electricidad a los clusters y máquinas de alto desempeño indispensables para la investigación del centro.

- Marzo 2013: Se celebró el décimo aniversario de la creación del CRyA con la reunión internacional de alto nivel “Frontiers in Contemporary Astrophysics” del 18 al 20 de marzo.
- Marzo 2014: Se concluyó la construcción del nuevo espacio del Laboratorio de Interferometría de Radioastronomía. Este laboratorio apoya al posgrado y en el futuro permitirá participar en la construcción de prototipos para interferómetros de baja frecuencia como SKA.
- Diciembre 2014: Los investigadores del CRyA rebasaron las 45,000 citas a sus trabajos de investigación.

COMPARACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD DEL CRyA CON OTRAS INSTITUCIONES

En el contexto nacional, el IAUNAM es el grupo astronómico de mayor antigüedad y el más grande en el país; cuenta con 74 investigadores en sus sedes en Ciudad Universitaria y Ensenada. Posteriormente se fundó el INAOE, que cuenta con 34 astrónomos y que es el segundo grupo en tamaño. El CRyA, originado del IAUNAM, es el tercer grupo astronómico por su tamaño, con 24 investigadores. Existen otros dos grupos más pequeños: el Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato, con 13 miembros, y el Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara con 5 integrantes. Además, hay astrónomos en diversas universidades del país: la Universidad de Sonora, la Universidad Iberoamericana, el Instituto Politécnico Nacional, la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Universidad Autónoma de Yucatán y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

En esta sección se hace una comparación de la tamaño actual y de la productividad primaria durante el periodo 2003 – 20014 de instituciones de astronomía nacionales, de Latinoamérica y EUA. Se entiende como producción primaria el número de artículos arbitrados en revistas internacionales.

Tamaño de la planta de investigadores

En la siguiente tabla se muestra el número de investigadores de instituciones de astronomía, tanto en México como en EUA y Sudamérica. Se muestran las tres instituciones de astronomía más importantes del país (IA, INAOE y CRyA); dos instituciones muy buenas latinoamericanas (universidades de Chile y Sao Paulo); y dos instituciones muy buenas en EUA (universidades de Michigan y Berkeley). Como se puede observar, el CRyA es una institución comparable en tamaño a estas instituciones de gran prestigio académico en Sudamérica y EUA.

Institución	Investigadores
IAUNAM	74
INAOE	34
CRyA	24
Universidad de Sao Paulo	29
Universidad de Chile	17
Michigan University	16
UC Berkeley	31

Productividad científica

En la sección de actividades de investigación del CRyA, se discutió en detalle la productividad de artículos arbitrados de los investigadores del centro. En el Apéndice G se muestran gráficas de la productividad promedio de las instituciones de México, Sudamérica y Estados Unidos mencionadas arriba. La productividad promedio y el índice de Gini durante el periodo 2003-2014 de los investigadores en estas instituciones se sintetiza en la siguiente tabla.

Institución	Art.arb/inv/año	Índice de Gini
Universidad de Sao Paulo	2.3	0.38
IAUNAM	2.4	0.30
INAOE	2.4	0.37
CRyA	3.6	0.40
Universidad de Chile	3.7	0.40
UC Berkeley	7.1	0.43
Michigan University	7.7	0.31

Esta tabla muestra que el CRyA es la institución de astronomía mexicana más productiva, con una productividad mayor que la Universidad de Sao Paulo y comparable con la Universidad de Chile. Por otro lado, la tasa promedio de producción del CRyA es la mitad de las que tienen las instituciones norteamericanas de astronomía de gran prestigio.

COLABORACIONES DEL INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

IRAf en la UNAM y en México

Desde su inicio como la Unidad Morelia del IAUNAM, han trabajado en el CRyA radioastrónomos y teóricos especialistas en el área de formación estelar. Ésta es un área con tradición en el IAUNAM, desde los trabajos pioneros de Guillermo Haro y Arcadio Poveda en las décadas de 1950-1960. Los astrónomos del CRyA han colaborado internamente de manera fructífera. Esto ha dado como resultado una sinergia en esta área de formación estelar en la que el CRyA ha obtenido un gran reconocimiento nacional e internacional. Además, se han mantenido siempre colaboraciones con el IAUNAM y el Instituto de Ciencias Nucleares (ICNUNAM) en esta área. También existen amplias colaboraciones CRyA-IAUNAM en dinámica estelar y cosmología.

El IRAf en Morelia promoverá una estrecha colaboración con el IAUNAM y el ICNUNAM, en cuanto a proyectos de investigación, así como en el sostenimiento del Posgrado en Ciencias (Astrofísica) y de la *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (RMAA)*. El CRyA es una sede participante del Posgrado en Ciencias (Astrofísica), cuyas otras entidades participantes son el IAUNAM, la Facultad de Ciencias de la UNAM y el ICNUNAM. Actualmente el Dr. William Henney es editor asociado de la RMAA, y el Dr. Luis F. Rodríguez es parte del Comité Editorial (ambos miembros del CRyA). Además, investigadores y estudiantes del CRyA realizan investigación de frontera con los telescopios que se encuentran en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir. Se ha consolidado un sistema de video conferencias que actualmente enlaza al CRyA con el resto de la UNAM. Este sistema es muy importante para realizar exámenes y transmitir conferencias y cursos de posgrado impartidos por especialistas en las distintas sedes.

Aunque los estudios detallados de formación estelar que realizará el IRAf requieren de una muy alta resolución espacial, se tienen colaboraciones con el INAOE para utilizar el Gran Telescopio Milimétrico en grandes censos para la primera detección de los objetos celestes que posteriormente se podrán estudiar con alta resolución angular. En particular, se tienen proyectos de investigación entre investigadores del CRyA y del INAOE para estudiar discos protoplanetarios y las primeras galaxias submilimétricas.

IRAf e instituciones internacionales

Existe una fructífera colaboración con el NRAO que gestiona los interferómetros VLA y VLBA. Además, a través del NRAO los radioastrónomos del CRyA acceso competitivo al interferómetro milimétrico internacional ALMA. Gracias a la colaboración con NRAO pueden competir por tiempo de observación todos los astrónomos mexicanos que así lo deseen.

Los radioastrónomos del CRyA cuentan con más de 500 publicaciones arbitradas realizadas con los telescopios del NRAO en EUA. El CRyA ha enviado ya a 21 estudiantes de posgrado a entrenarse en la sedes del VLA, en Socorro, Nuevo México; del Submillimeter Array (SMA) en Mauna Kea, Hawaii, y de ALMA, en Chile. En los últimos años, este trabajo se ha extendido al interferómetro VLBA, en el cual al grupo del CRyA se le ha aprobado un

gran proyecto de 3,000 horas de observación para hacer astrometría ultraprecisa de regiones de formación estelar en la Galaxia. Esta cantidad de tiempo de observación es un reconocimiento a la calidad del trabajo de los radioastrónomos del CRyA; sólo otro proyecto a nivel mundial tiene asignada una cantidad de tiempo comparable.

El CRyA se ha consolidado como el polo nacional de la interferometría de radio, dada la gran experiencia de su personal en el estudio de problemas astronómicos con esta técnica. Se planea que el nuevo instituto participe como un nodo de procesamiento de datos para el VLA y ALMA. Para esto, se instaló la computadora de alto desempeño con sistema LUSTRE en el nuevo Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño, la cual tiene la capacidad de procesar el gran volumen de datos que produce esta nueva generación de interferómetros. Este nodo dará servicio a la comunidad radioastronómica de todo el país. Paralelamente, con el apoyo de la UNAM se está ampliando el ancho de banda disponible para el Campus UNAM, lo que permitirá la transmisión de estos datos, cuyo volumen excede por más de un factor de 100 al de la anterior generación de interferómetros. La siguiente tabla indica los tiempos de transferencia de archivos de datos típicos de acuerdo al ancho de banda. Queda claro que es necesario un ancho de banda de 1 Gb/s (velocidad de bajada) para lograr la transferencia de datos de los observatorios internacionales en menos de un día, lo cual es necesario para ser independientes de inestabilidades en la red.


National Radio Astronomy Observatory

NRAO Archive - Data Delivery Options

There are now two ways to deliver your archival NRAO data :

- by direct ftp as in the past
- or if your data set is very large, it may be shipped to you on a hard disk

You have selected (checked) these file sets for retrieval :

Archive File	Status	File Type	File Size
SD0630.sb12578287.eb12645207.56203.55555833333	public	SDM	127.58GB
SD0630.sb12580614.eb12683532.56204.45015078704	public	SDM	221.91GB
SD0630.sb12582902.eb12711797.56205.349994097225	public	SDM	329.67GB

Total file set size selected = 679.16 GBytes

Estimated Download Time	Network Transfer Rate
26950.8 hours	Transfer rate 56Kb/sec - Dial up modem
1509.2 hours	Transfer rate 1Mb/sec - low to mid-level broadband
150.9 hours	Transfer rate 10Mb/sec - high-level broadband
15.1 hours	Transfer rate 100Mb/sec - very high-level broadband

You have selected public domain data for downloading. Public domain data is eligible for hard disk shipping, but you must pay for the hard disk and the shipping costs.

If you choose to download your data to the archive ftp area or a local destination in the DSOC (AOC), hit this button. This is the same data retrieval option that has been used in the past. You may then download your data directly over the internet.

Retrieve over internet

También se planea participar en la investigación y el desarrollo de pathfinders para el interferómetro de radio SKA, en particular, la parte de bajas frecuencias que se construirá en Australia, mediante la construcción de receptores y antenas en el Laboratorio de Interferometría de Radioastronomía del CRyA. Además, miembros del CRyA participarán en la colaboración internacional de Astronomía Galáctica (GASKAP) que interpretará observaciones del SKA del medio atómico de la Galaxia utilizando modelos teóricos del medio interestelar.

Otra reciente colaboración internacional involucra la participación del GTM en el Event Horizon Telescope, proyecto que liderean radioastrónomos del CRyA. Este proyecto utiliza la interferometría de base muy larga (VLBI por sus siglas en inglés). El proyecto tiene como objeto estudiar el agujero negro Sagitario A* que reside en el centro de nuestra galaxia y que tiene cuatro millones de masas solares. Observaciones VLBI milimétricas tienen el potencial de observar el agujero negro a una escala espacial comparable con su radio de Schwarzschild. Según la teoría de la relatividad general, el efecto gravitacional del agujero negro sobre la radiación en su entorno se traducirá en una estructura en forma de “dona” con una sombra en la región donde se encuentra el agujero negro mismo, y una estructura brillante y asimétrica en su alrededor, con un tamaño del orden de 40 microsegundos de arco. Un consorcio internacional, llamado EHT (Event Horizon Telescope) se ha establecido para realizar estas observaciones. Varios astrónomos y estudiantes del CRyA ya forman parte del consorcio EHT y han participado en observaciones y actividades relacionadas. De manera muy prominente, han impulsado que el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) en la Sierra Negra de Puebla se incorpore al EHT. Se hicieron pruebas exitosas a una longitud de onda de 3 milímetros en mayo de 2014 y el GTM participará en las observaciones EHT a 1 milímetro de la primavera de 2015. Cabe enfatizar que el EHT es uno de los proyectos más ambiciosos y emocionantes actuales, ya que pondrá a prueba la relatividad general en el régimen de campos fuertes, que no se ha podido examinar antes. Finalmente, es importante recalcar que hay diversos grupos de físicos teóricos en México que se dedican a relatividad en campos fuertes (en especial en la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo en Morelia y en el Instituto de Ciencias Nucleares en CU, DF), y con quienes se planea colaborar como parte del EHT.

Actualmente se tienen proyectos de investigación en colaboración entre miembros del CRyA y de la UMSNH como el de la búsqueda de las fuentes astronómicas de rayos cósmicos ultra energéticos observados con el Observatorio Pierre Auger en Argentina. Estas fuentes se buscarán con observaciones en radio y en óptico. Se planea extender también este tipo de búsquedas en colaboración con el observatorio de rayos gama HAWC en la Sierra de la Negra, Puebla.

Finalmente, radioastrónomos del CRyA mantienen una colaboración activa con astrónomos del Centro Astroespacial, del Instituto Lebedev de Física en Moscú. Este instituto opera *Radio Astron*, un radio telescopio en órbita alrededor de la Tierra. Funcionando en conjunto con telescopios terrestres, esta antena brinda el servicio de la *VLBI Espacial*. Esta técnica aporta resoluciones angulares hasta 30 veces mayor que las de la VLBI terrestre. Los interferómetros terrestres pueden brindar una resolución angular del orden de décimos de milisegundos de arco, valor que se alcanza con telescopios intercontinentales como el interferómetro VLBA, cuya separación es del orden del diámetro de la Tierra. Para superar este límite, sólo existe la posibilidad de lanzar uno de los radio telescopios como satélite, para que éste funcione en conjunto con los demás telescopios terrestres. De esta manera, se puede extender la separación entre antenas hasta más de 30 veces el diámetro de la Tierra y, por lo tanto, alcanzar resoluciones angulares 30 veces mayor, llegando a valores de microsegundos de arco. Esta técnica, nombrada *VLBI Espacial*, presenta retos tecnológicos importantes, comparado con su contraparte terrestre. Sólo en dos ocasiones se han realizado este tipo de experimentos: hace dos décadas por los japoneses, y actualmente por los rusos. El último experimento, llamado Radio Astron, es una antena de 10 metros de diámetro, puesta en órbita en 2011. Este proyecto de *VLBI Espacial* es liderado por Rusia, con participación de USA (NRAO), Finlandia (Tecnológico de Helsinki), Europa (ESA), India (Instituto Tata) y Australia (CSIRO). El CRyA cuenta con participación en este proyecto al haber obtenido tiempo de observación con Radio Astron en su programa de tiempo abierto. En conjunto con colegas rusos y utilizando las técnicas más avanzadas de la interferometría, investigadores del CRyA estudian máseres de agua en regiones de formación de estrellas masivas con la mayor resolución angular jamás alcanzada.

PLAN DE DESARROLLO DEL IRAf

El Instituto de Radioastronomía y Astrofísica crecerá en sus áreas de especialidad y en áreas afines. Se incorporarán astrónomos capaces de abrir áreas nuevas de la astrofísica moderna. Se incorporará un investigador cada 2 años, hasta llegar a 35 investigadores a mediano plazo. Este crecimiento dependerá de las condiciones de la UNAM y del país. Los investigadores serán apoyados por 8 técnicos académicos en las áreas de cómputo, información científica, telecomunicaciones y divulgación.

Desarrollo a corto plazo

La transferencia de datos de los observatorios internacionales y de las simulaciones numéricas, requiere la conexión de alta velocidad (1Gb/s) para la transferencia de datos, por lo que conseguir esta conexión para el campus Morelia será una de las prioridades del instituto.

Se incrementará el grupo de becarios posdoctorales, quienes enriquecerán las áreas de trabajo del instituto. Así mismo, se incrementarán las actividades de promoción del posgrado para incrementar la población anual promedio de estudiantes y de tesis de licenciatura. Además de realizar las Escuelas de Verano en Astrofísica en Morelia, se realizarán escuelas internacionales para estudiantes graduados, para que conozcan el trabajo que se realiza en el IRAf y promover así la dirección de tesis de doctorado y las estancias posdoctorales en el instituto.

Se buscará un técnico académico doctorado en astronomía que apoye, organice y promueva la actividad de divulgación, la cual ha crecido considerablemente en los últimos años y que siempre será muy importante para vincular al IRAf con la sociedad michoacana. Este técnico también se encargará de difundir los resultados de investigación del CRyA en medios escritos y digitales.

Aunque austeramente, se fortalecerá la administración del IRAf. Actualmente el centro tiene 6 administrativos de confianza: un delegado administrativo, un administrador de proyectos, un asistente de director, un asistente de la secretaría académica, un asistente

del posgrado y un ayudante de director. Debido al crecimiento de la planta académica se requiere una plaza de Bienes y Suministros. También se requiere que el delegado administrativo se convierta en secretario administrativo, a fin de tener una mayor capacidad de gestión. En esta área administrativa se tendrá siempre un crecimiento muy austero y un funcionamiento eficiente, como se ha hecho hasta ahora.

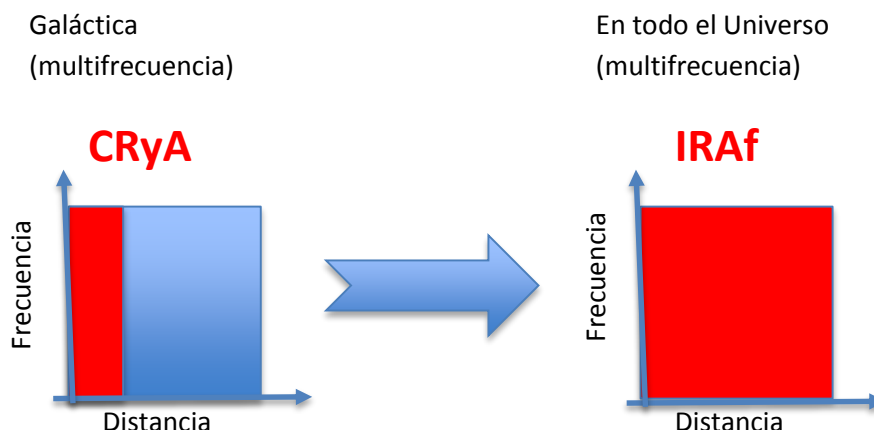
El personal administrativo de base está adscrito a la CSAM, lo cual ha resultado en una gestión muy eficiente del campus Morelia. Por este motivo se prevé que continúe este modelo administrativo en el campus.

Desarrollo a mediano plazo

El CRyA es reconocido a nivel mundial por sus contribuciones al estudio de la formación estelar Galáctica con observaciones en múltiples frecuencias con especial énfasis en radioastronomía, con modelos teóricos y simulaciones numéricas. Con la nueva área recién fortalecida de astronomía extragaláctica y la contratación de expertos en observaciones en rayos X e infrarrojo a escala extragaláctica, se abrió un nuevo nicho de estudios pioneros de la formación de estrellas en otras galaxias. Esta nueva potencialidad permitirá atacar problemas fundamentales a la escala del Universo como la formación de las primeras generaciones de estrellas, la época de reionización del Universo y la formación de las galaxias.

Los radioastrónomos del CRyA realizarán nuevas observaciones a escala extragaláctica enriqueciendo este tipo de estudios. Los teóricos del CRyA contribuirán a estas nuevas líneas de investigación con el modelaje e interpretación de las observaciones, creando una sinergia con los estudios observacionales de formación estelar extragaláctica, como ha ocurrido en el caso de la formación estelar Galáctica. De esta manera, a mediano plazo, el IRAf se convertirá en un líder a nivel mundial en el área de la formación estelar en la escala de todo el Universo con técnicas multifrecuencia.

Formación Estelar



En esta gráfica artística se muestra en rojo el nicho de excelencia ocupado actualmente por el CRyA y el nicho que alcanzará el IRAf a mediano plazo. En el eje horizontal, está la distancia a la región observada. En el CRyA se observa a escala Galáctica y el IRAf observará todo el Universo, y por lo tanto, a través del tiempo. El eje vertical muestra la frecuencia de las ondas electromagnéticas. Actualmente, el CRyA trabaja con observaciones en múltiples frecuencias, con énfasis en frecuencias de radio. El IRAf, también abarcará todo el espectro electromagnético y, en particular, enriquecerá los estudios extragalácticos con estudios pioneros en radiofrecuencias.

A mediano plazo el IRAf será el sitio más importante en México y Centroamérica en el área de interferometría centimétrica y milimétrica, y estará a la par de Chile en Sudamérica. Con el auge de los interferómetros internacionales como el VLA, el SMA y el VLBA, así como el reciente inicio de operación del interferómetro ALMA, en el IRAf se entrenarán jóvenes astrónomos en las técnicas de radioastronomía milimétrica.

El nuevo IRAf impulsará la radioastronomía en los centros de investigación astronómica en el país. Con el nuevo Laboratorio de Cómputo de Alto Desempeño, el IRAf se convertirá en un Nodo del interferómetro ALMA para el país y Centroamérica, e incluso países como Venezuela y Colombia.

Con este Nodo de ALMA en el IRAf, los radioastrónomos mexicanos y centroamericanos harán estancias prolongadas en el instituto para reducir e interpretar sus datos, con el

consiguiente enriquecimiento mutuo por esta interacción. El IRAf mantendrá actualizado el equipo de cómputo necesario para el nodo a través de proyectos de investigación nacionales e internacionales y con los avances de última tecnología de telecomunicaciones incorporada en el laboratorio.

El IRAf participará en los nuevos proyectos de interferómetros del siglo XXI que incluyen el Square Kilometer Array en Australia y Sudáfrica y el Next Generation Very Large Array del NRAO. Se buscarán apoyos nacionales e internacionales para lograr esta participación, como ya se hizo con el NRAO. El IRAf impulsará que algunas de las antenas de este último interferómetro se coloquen en México. Además, en el Laboratorio de Interferometría de Radioastronomía se entrenará a estudiantes en las áreas de ingeniería electrónica, mecánica y de telecomunicaciones para el desarrollo de prototipos para estos interferómetros de radio. En estas áreas se colaborará cercanamente con los grupos académicos de los Institutos de Ingeniería, Geofísica y Materiales y el Centro de Ciencias Matemáticas en el campus Morelia.

Así, en el tecnológico, el IRAf será promotor del cómputo, las telecomunicaciones y la electrónica en el país, tanto por la necesidad de las altas tasas de transferencia de datos como por la relación de la radioastronomía con estas áreas. El IRAf también participará en la formación de recursos humanos especializados en colaboración con otras instituciones. En particular, mantendremos una colaboración estrecha con los Institutos Tecnológicos del Estado de Michoacán en la formación de estudiantes de licenciatura y posgrado en estas áreas.

El IRAf tendrá siempre una estrecha colaboración con el IAUNAM tanto en proyectos científicos individuales como con el Observatorio de San Pedro Mártir. El IRAf participará en proyectos ópticos como el censo de galaxias SLOAN Digital Sky Survey y en estudios con el Gran Tecán en las Islas Canarias, de los cuales es socio la UNAM; en los censos de distancia y movimientos propios con el satélite GAIA; en el proyecto TAOS en SPM de búsqueda de objetos transneptunianos y el estudio del universo transiente.

De igual manera, con la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el IRAf fomentará las colaboraciones científicas como las que se ya mencionaron en relación al Event Horizon Telescope, discutido en la sección IRAf e instituciones internacionales.

El IRAf será no solo una sede pujante del posgrado en Astrofísica de la UNAM, sino que participará en la Licenciatura en Física Computacional en colaboración con la Facultad de Ciencias y la ENES. Esta licenciatura novedosa, diseñada por el CRyA, formará físicos profesionales con amplios conocimientos de cómputo y estadística, capaces tanto de continuar con un posgrado, como de insertarse en el sistema productivo nacional. En particular, con la ENES se tendrá una intensa colaboración en proyectos de investigación con estudiantes y profesores, para coadyuvar a mantener un equilibrio entre docencia e investigación. Con los laboratorios de Cómputo de Alto Desempeño y Radioastronomía se tendrán proyectos de computación, electrónica y telecomunicaciones que complementarán los estudios de las licenciaturas de la ENES. Además, se establecerán convenios de colaboración con las universidades de la región para dar cursos de astronomía y captar estudiantes de posgrado.

Finalmente, en la divulgación de la ciencia, el IRAf concretará junto con la UMSNH y las autoridades estatales, los proyectos de un Museo Interactivo de Ciencias y la actualización del Planetario en Morelia. Ambas facilidades darán una dimensión mayor a la divulgación de la astronomía, contribuyendo a la educación y la recomposición social en el estado. En este ámbito de divulgación y docencia, se incrementarán notablemente las acciones conjuntas para potenciar el impacto de la ciencia en el estado. En particular, se utilizarán medios masivos como la T.V., redes sociales y la Web para llegar a un público más amplio. El impacto actual es significativo pero se incrementará de manera importante con la mayor capacidad de gestión del IRAf en el estado.

Desarrollo a largo plazo

Como referente de investigación, docencia y divulgación a nivel nacional y mundial, el IRAf contribuirá al desarrollo del Campus Morelia de la UNAM, del Estado de Michoacán y del país. El IRAf será parte de un campus muy fuerte y desarrollado, ya que se espera que otros grupos académicos se hayan incorporado y transformado en institutos, multiplicando el impacto de este polo de desarrollo científico de la UNAM.

El IRAf tendrá una planta de 35 investigadores y un número similar de posdoctorados, siguiendo el modelo de instituciones mundiales de gran prestigio. El IRAf tendrá una productividad y calidad equiparable a los mejores centros de astronomía del mundo, duplicando su productividad de artículos de investigación arbitrados, al nivel de

instituciones de reconocido prestigio en EUA. Tendrá además un posgrado vigoroso, con estudiantes no sólo de Latinoamérica y el Caribe, sino también de los países del primer mundo. El IRAf será un polo de atracción para visitas de académicos de México y otros países, reforzando el ambiente académico, de investigación y docencia.

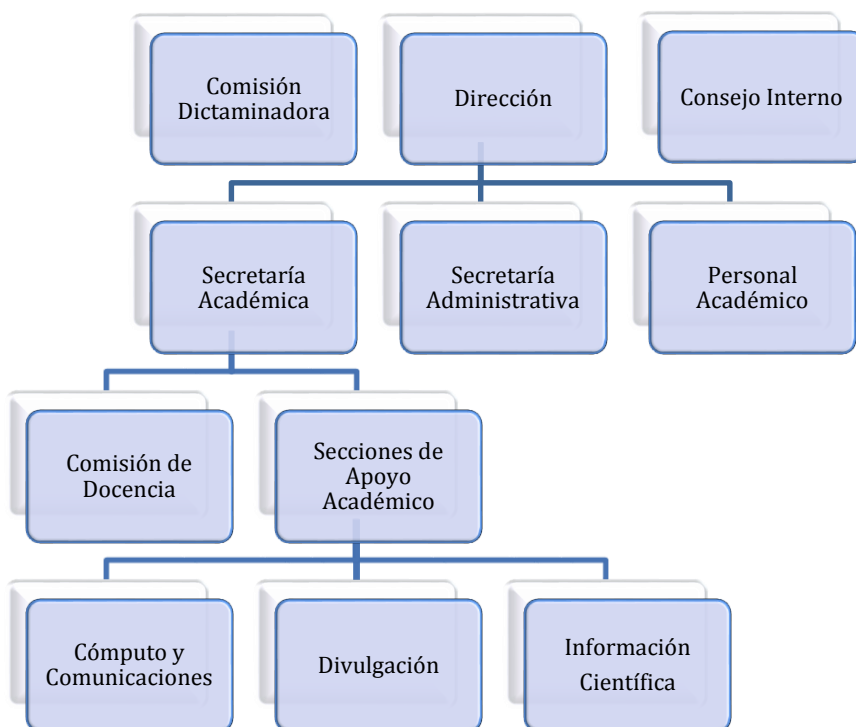
Con el desarrollo de la radioastronomía en México y la participación del IRAf en proyectos internacionales de interferómetros como el Next Generation Very Large Array en EUA y México y el SKA en Australia y el continente africano, el IRAf podrá generar una derrama tecnológica en telecomunicaciones, electrónica y cómputo. Esto se logrará mediante el desarrollo de un laboratorio pequeño pero de muy alto nivel que participe en el diseño y construcción de prototipos. Recibirá también estudiantes de posgrado y licenciaturas en estas y otras áreas de Física de instituciones en México y Latinoamérica. Además, el IRAf contará con un área para el desarrollo de material didáctico y audiovisual para enseñanza y divulgación que se distribuirá en el país a todos los niveles educativos. El personal del IRAf jugará un papel muy importante en el aprovechamiento del Gran Telescopio Milimétrico, el proyecto científico más costoso en el que se ha comprometido México. Si bien el GTM es propiedad del INAOE, toda la comunidad nacional tendrá acceso a él y el IRAf será el instituto clave para la utilización de este radiotelescopio en grandes censos de objetos celestes, en particular, como un elemento en el interferómetro EHT, como se explicó en la sección de proyectos internacionales.

En resumen, a largo plazo, el IRAf desarrollará con excelencia sus actividades de investigación, docencia y divulgación. Recibirá estudiantes y posdoctorados de nacionales e internacionales. Además, podrá generar desarrollos tecnológicos en áreas relacionadas con la radioastronomía, en colaboración con instituciones nacionales y del extranjero.

ORGANIGRAMA DEL INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

El organigrama que se adjunta presenta la propuesta para el funcionamiento académico del nuevo Instituto de Radioastronomía y Astrofísica.

Organigrama IRAf



La actual planta de investigadores no tiene una estructura departamental ya que, como se discutió anteriormente, el grupo de investigadores de Morelia cultiva áreas de investigación que se complementan entre sí. Esto es importante ya que la investigación astronómica moderna requiere de estudios multifrecuencia, en los que se conjuntan el trabajo observacional y el teórico. Por este motivo, no es conveniente una departamentalización del instituto. Además, los departamento de cómputo e información científica, conformados por los técnicos académicos altamente calificados darán servicio a los usuarios. Esta estructura se refleja en el organigrama del IRAf. A largo plazo, cuando crezca la planta de

investigadores, se puede plantear la conveniencia de una departamentalización, por ejemplo, en las áreas de radioastronomía y de astrofísica.

Para reflejar el crecimiento de la planta de investigadores, se ampliará la composición del Consejo Interno de manera que incluirán al director, el secretario académico, el representante ante el CTIC y 4 académicos electos por el personal académico. Esto incrementa en 2 persona la composición actual y refleja el crecimiento de la planta académica de un 20% respecto a la época en que se aprobó el reglamento del centro. Es importante notar que con esta composición el 70% del Consejo Interno será electo por el personal académico, lo cual permitirá recibir y atender de manera directa las necesidades del personal académico del IRAf.

ACTA CONSEJO INTERNO CRyA



Centro de Radioastronomía y Astrofísica UNAM

Apdo. Postal 3-72, 58089 Morelia, Michoacán, México
Tel: (01 443)322-27-95 Fax: (01 443)322-27-93
ci@crya.unam.mx



DR. CARLOS ARAMBURU DE LA HOZ
COORDINADOR
COORDINACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA UNAM
Presente.-

Estimado Dr. Arámburo

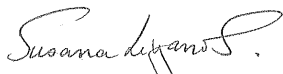
En reunión del 8 de diciembre de 2014, en donde estuvo presente el 74% de los investigadores y técnicos académicos del CRyA, el personal académico reiteró con entusiasmo su interés y compromiso para trabajar en la transformación al Instituto de Radioastronomía y Astrofísica IRAf. Esta transformación permitirá una mayor proyección de la investigación, docencia y divulgación del grupo académico a nivel nacional e internacional. Se recordó que en el CRyA el proceso de reflexión y generación del documento de transformación inició desde febrero de 2011. Este proceso ha durado casi 4 años, durante los cuales el CRyA ha crecido y ha aumentado el reconocimiento e impacto de su investigación a nivel mundial.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Mich., 08 de diciembre de 2014.

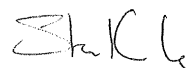
EL CONSEJO INTERNO DEL CENTRO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA



Dra. Sarah Jane Arthur



Dra. Estela Susana Lizano Soberón



Dr. Stanley Eugene Kurtz Smith



Dr. Laurent Raymond Loinard



Dr. Luis Felipe Rodríguez Jorge