FÍSICA CUBANA EN EL COSMOS: A 40 AÑOS DEL VUELO ESPACIAL CONJUNTO

CUBAN PHYSICS IN THE COSMOS: 40 YEARS AFTER THE JOINT SPATIAL FLIGHT

V. Márquez Álvarez[†]

Facultad de Física, Universidad de La Habana, San Lázaro y L, CP 10400, Habana Cuba; victor.marquez@estudiantes.fisica.uh.cu † autor para la correspondencia

Recibido 20/5/2020; Aceptado 15/6/2020

Durante el vuelo espacial conjunto soviético-cubano en septiembre de 1980, se llevaron a cabo varios experimentos diseñados en conjunto por científicos cubanos y soviéticos. En el presente trabajo se aborda el contexto histórico alrededor de dicho vuelo y se brinda una descripción de los experimentos en él realizados. Como algunos de estos experimentos se encuentran en el terreno de la Física, e incluso fueron realizados por físicos cubanos aún en activo, aquí se ofrece una descripción más detallada de los mismos.

Several experiments jointly designed by Cuban and Soviet scientists were performed during the Soviet-Cuban space flight that took place on September, 1980. Here, the historical context surrounding the flight is presented, and a description of the experiments performed during the flight is provided. Some of them belonged to the field of Physics, and were designed by Cuban physicists that are still active; those experiments will be described here in more detail.

PACS: Instruments, spaceborne and space research (instrumentos, en el espacio e investigación espacial), 07.87.+v; Microgravity environments for crystal growth (ambientes de microgravedad para el crecimiento de cristales), 81.10.Mx

I. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

El 4 de octubre de 1957 la Unión Soviética puso en órbita el primer satélite artificial de la Tierra *Sputnik I*. Con esta hazaña de la ciencia y la técnica soviéticas, se proclamó al mundo el inicio a la era cósmica. Apenas 4 años más tarde, el 12 de abril de 1961, el piloto soviético Yuri Gagarin volaba al cosmos y daba una vuelta al globo terráqueo en una hora y cuarenta y ocho minutos [1]. De esta forma, el ser humano daba su primer paso en la exploración del espacio cósmico.

Desde los comienzos de los vuelos espaciales tripulados los cosmonautas han realizado investigaciones y experimentos durante su permanencia en el cosmos. La Unión Soviética, precursora en esta esfera, se trazó como objetivo ampliar el potencial de sus investigaciones creando un programa de colaboración conjunta entre los países integrantes del entonces campo socialista. En abril de 1967, estos esfuerzos se concretaron en un complejo programa de investigaciones en el campo de la exploración y uso del espacio cósmico con fines pacíficos, que posteriormente pasó a nombrarse Programa Intercosmos [1].

El Programa Intercosmos comprendía varios grupos de trabajo, integrados por científicos de los países participantes, que se dedicaban al estudio de la física, la meteorología, las comunicaciones, la biología y la medicina cósmicas, así como la teledetección por medios aerocósmicos. En nuestro país se creó en 1966 el órgano nacional de coordinación, inicialmente adscrito al Ministerio de Comunicaciones y posteriormente, en 1974, a la Academia de Ciencias de Cuba, que años después pasó a llamarse Comisión Intercosmos.

En 1976, la URSS propuso la participación de ciudadanos de los países integrantes del Programa en los vuelos pilotados

utilizando naves y estaciones cósmicas soviéticas. Cuba suscribió el protocolo de los acuerdos para el vuelo conjunto y creó los mecanismos para la organización del vuelo donde habría de participar un cosmonauta cubano.



Figura 1. A la izquierda, el logotipo del Programa Intercosmos. A la derecha, el logotipo cubano de Intercosmos (Imagen tomada de [1]).

En este sentido, luego de un proceso de selección, fueron escogidos como aspirantes a cosmonautas para realizar el vuelo conjunto los pilotos José Armando López Falcón y Arnaldo Tamayo Méndez. El entrenamiento, con una duración de dos años, tuvo lugar en el Centro de Preparación de Cosmonautas "Yuri Gagarin", dentro de la llamada Ciudad Estelar, ubicada en las afueras de la ciudad de Moscú.

El 18 de septiembre de 1980 Cuba se convirtió en el 9no país del mundo en enviar un hijo suyo al cosmos. Este día, a las 22:11, hora de Moscú, la nave *Soyuz 38* era lanzada al espacio, tripulada por el comandante soviético Yuri Romanenko y por el cosmonauta investigador Arnaldo Tamayo Méndez,

ciudadano de la República de Cuba [1].





Figura 2. Los pilotos cubanos seleccionados como aspirantes a cosmonautas: Arnaldo Tamayo Méndez (izquierda) y José Armando López Falcón (derecha) (Imágenes tomadas de [1]).

El día 19 se produjo el acoplamiento de la nave *Soyuz 38* con el complejo orbital *Saliut 6-Soyuz 37*, donde les dieron la bienvenida los colegas Leonid Popov y Valeri Riumin, quienes se encontraban en el complejo orbital desde el 9 de abril de 1980.



Figura 3. Encuentro en el cosmos. De izquierda a derecha: Valeri Riumin, Arnaldo Tamayo, Yuri Romanenko y Leonid Popov en la estación orbital *Saliut 6-Soyuz 37-Soyuz 38* (Imagen tomada de [1]).

Durante una semana, se cumplió exitosamente el programa de trabajo previsto para el vuelo, dentro del cual una parte esencial constituyó la realización de varios experimentos diseñados por científicos cubanos. El día 26 de septiembre de 1980 la tripulación de la nave *Soyuz 38* regresó a Tierra luego de una misión exitosa.

Luego de su regreso a Moscú, el cosmonauta cubano Arnaldo Tamayo fue condecorado con la Orden Lenin, el título de Héroe de la Unión Soviética y la medalla Estrella de Oro. De regreso a Cuba, Tamayo y Romanenko fueron recibidos cálidamente por el pueblo cubano, y recibieron ambos el título de Héroe de la República de Cuba [1].

II. LOS EXPERIMENTOS

Uno de los objetivos principales que se persigue en la realización de vuelos espaciales es efectuar investigaciones

en el espacio ultraterrestre. Son numerosas las áreas del conocimiento humano en las que los desarrollos tecnológicos de la ciencia espacial han sido utilizados. Por solo nombrar algunas, podemos mencionar el estudio de procesos físicos y químicos fundamentales, la biología y la medicina, las investigaciones del entorno de la Tierra y la astronomía atmosférica [2]. En este trabajo haremos énfasis en la primera de las categorías mencionadas.

Las condiciones de microgravedad existentes dentro de las estaciones espaciales permiten el estudio de procesos físicos y químicos sin la presencia de fenómenos que en la Tierra tienden a enmascararlos. Por ejemplo, en el caso del comportamiento de los fluidos se muestran como dominantes fenómenos que en las condiciones terrestres no lo son, tales como la adhesión y la cohesión, y se manifiestan con fuerza efectos causados por la difusión y la tensión superficial. A su vez, en su interior la presión hidrostática es prácticamente constante, lo que provoca que el empuje de Arquímedes y la convección térmica desaparezcan casi completamente. La ausencia de turbulencia por convección ha permitido la obtención de monocristales sumamente uniformes en el espacio. Luego de años de investigación y estudios de factibilidad, actualmente se encuentra en etapa de desarrollo una planta destinada a la fabricación industrial de materiales monocristalinos en la Estación Espacial Internacional [3].

Para preparar los experimentos que se realizaron durante el vuelo conjunto soviético-cubano, la Comisión Intercosmos convocó a cerca de doscientos especialistas e investigadores pertenecientes a la Academia de Ciencias de Cuba, los ministerios de Educación Superior, Salud Pública, de las Fuerzas Armadas, del Azúcar y el INDER [1].

Es de destacar el logro que significó para la comunidad científica cubana el encargarse, junto a los colaboradores soviéticos, del diseño y montaje de los experimentos que fueron realizados en el vuelo conjunto. En palabras de José Altshuler, presidente de la Comisión cubana de Intercosmos en la época del vuelo: "En ese momento, Cuba recogía los primeros frutos de la extraordinaria reforma educacional y el tremendo esfuerzo desplegado en la formación de especialistas altamente calificados en diferentes ramas de la ciencia, los cuales a pesar de no tener ninguna experiencia previa en el tema del cosmos, fueron capaces de preparar en breve plazo un conjunto de investigaciones, caracterizadas por su originalidad y elevado rigor científico" [4].

Como es de suponer, son los cosmonautas los encargados de garantizar la correcta ejecución de los experimentos que se realizan durante las misiones espaciales tripuladas. Como parte de su entrenamiento, los cosmonautas estudian teórica y prácticamente los experimentos previstos a realizarse durante el vuelo. El cosmonauta investigador debe conocer cada experimento, sus principios e interrelaciones, qué es lo que espera obtener cada científico y cuáles son los fenómenos que más le interesan.



Figura 4. Los candidatos cubanos a cosmonauta visitan el Instituto de Investigación Técnica Fundamental, adscrito a la Academia de Ciencias de Cuba, el 16 de marzo de 1978, para familiarizarse con algunos de los experimentos que habían comenzado a prepararse para ser ejecutados en el espacio (Fotografía cortesía de José Altshuler).



Figura 5. Trabajadores y dirigentes científicos a cargo de los experimentos propuestos por Cuba para el vuelo espacial del cosmonauta cubano, a la entrada del aeropuerto "José Martí", el 25 de marzo de 1979. En el momento de tomar la foto, varios de ellos estaban a punto de partir hacia la URSS para establecer las coordinaciones necesarias con la parte soviética (Fotografía cortesía de José Altshuler).

Los experimentos realizados durante el vuelo conjunto soviético-cubano pueden clasificarse en 4 categorías: médico-biológicos, psicométricos, referentes a la exploración terrestre y físico-técnicos [5]. A continuación se brindará una pequeña descripción de los que se encuentran en las 3 primeras categorías. En la siguiente sección, se brindará una descripción detallada de aquellos que se encuentran en la última de las categorías mencionadas.

II.1. Médico-Biológicos

Córtex: Investigación electrofisiológica del estado funcional del sistema nervioso central, bajo la influencia de las condiciones existentes en un vuelo cósmico.

Soporte: Estudio de los cambios en la morfología y la estructura de la función de apoyo del hombre, causados por la ingravidez. Determinación de las posibilidades

de evitar las alteraciones de la función de apoyo del cosmonauta, con ayuda de soportes especiales.

Circulación sanguínea: Estudio del estado funcional del sistema cardiovascular, bajo la influencia de las condiciones existentes en un vuelo cósmico.

Antropometría: Estudio de la influencia de las condiciones existentes en un vuelo cósmico sobre algunos indicadores antropométricos.

Hatuey: Estudio de la influencia de la ingravidez sobre el carácter y la velocidad de la división mitótica y meiótica de las células de levadura, y determinación de la frecuencia en que se originan las recombinaciones genéticas en dichas células.

Multiplicador: Investigación de la influencia de la ingravidez sobre la dinámica de crecimiento de levaduras.

Balance: Influencia del vuelo cósmico sobre el balance hidromineral en el hombre de las regiones tropicales.

Inmunidad: Estudio del estado del sistema inmunitario y de los cambios en el metabolismo mineral del organismo en las condiciones de un vuelo cósmico.

Stress: Estudio de las características de los mecanismos hormonales y metabólicos de adaptación a las acciones de tensión causadas por el vuelo cósmico.

Visión: Estudio de la influencia de las condiciones de un vuelo cósmico sobre el analizador visual.

II.2. Psicométricos

Percepción: Investigación de la dinámica de la sensopercepción en el proceso de adaptación del hombre a las condiciones de ingravidez.

Coordinación: Investigación de la influencia de la ingravidez sobre los movimientos coordinados del hombre.

Cuestionario: Estudio de la influencia de las condiciones de vida sobre la efectividad del trabajo del cosmonauta y su estado psíquico.

Descanso: Organización de los descansos y utilización del tiempo libre a bordo de la nave cósmica, con el objetivo de brindar ayuda a los tripulantes.

II.3. Referentes a la exploración en la Tierra

Trópico III: Levantamiento topográfico del territorio de la República de Cuba, su plataforma y el océano mundial, desde la estación cósmica *Saliut 6* con la cámara MKF-6, para el estudio de los recursos naturales desde el cosmos.

Biosfera-C: Investigación instrumental y visual del medio desde la estación orbital, y otros experimentos referentes al estudio de las propiedades espectrales de reflexión de objetos naturales y económicos de Cuba, de regiones de su plataforma y del océano mundial, así como sus variaciones temporales y espaciales. [1]

En el Anexo 1 pueden observarse imágenes de los equipos utilizados para algunos de estos experimentos.

III. EXPERIMENTOS FÍSICO-TÉCNICOS

Estos experimentos tienen un significado especial para la Física cubana, especialmente aquella vinculada a la Universidad de La Habana. Varios de los autores de estos experimentos son actualmente profesores de su claustro.

Para cada uno de los experimentos, se presentarán los objetivos que se perseguían, se realizará una descripción del montaje y el proceso experimental y se presentarán las conclusiones que se derivaron de cada uno de ellos.

III.1. Experimento Caribe

Diseñado por los investigadores del Laboratorio de Electrónica del Estado Sólido de la entonces Facultad de Física-Matemática de La Universidad de La Habana, junto a colaboradores soviéticos, este experimento fue concebido como continuación de los experimentos de obtención de cristales y aleaciones bajo condiciones de microgravedad realizados previamente en el laboratorio espacial *Skylab* y en el complejo orbital *Soyuz-Apollo* [5]. Comprendió dos subexperimentos independientes, el Caribe K-1 y el Caribe C-1 o SK-1, que pueden ser caracterizados de la siguiente forma:

III.1.1. Caribe K-1: Crecimiento de una aleación de Ge-In.

Previo a la fecha del vuelo, ya se habían realizado experimentos con el objetivo de estudiar la cristalización de aleaciones semiconductoras sin los efectos derivados de la gravedad —la convección, por ejemplo—. Con los resultados obtenidos se daban recomendaciones a la industria electrónica para perfeccionar los mecanismos de producción de semiconductores [6].

Este experimento tenía como objetivos estudiar el grado de perfección de un cristal de Ge-In crecido en el espacio, compararlo con un cristal obtenido por un procedimiento análogo en Tierra y analizar cómo la microgravedad afecta la distribución de impurezas durante la recristalización [5].

La técnica experimental utilizada fue la recristalización, donde una porción de un lingote preelaborado de Ge-In es fundida y luego recristalizada. La porción restante, llamada semilla, se mantiene en estado sólido para servir de guía en la estructura de la red atómica que la parte líquida asumirá cuando recristalice.

Con este objetivo, inicialmente se prepararon dos lingotes de germanio dopado con indio, agregándolo con una concentración de 10^{20} átomos/cm³. Los extremos de cada lingote fueron fijados con una técnica innovadora para la época, donde se utilizaron piezas especiales de grafito y un resorte de cuarzo para encerrar toda la muestra en una ampolleta de este último material sellada a un vacío de 10^{-5}

torr. Cada ampolleta a su vez se introdujo en una cápsula de acero inoxidable para garantizar su protección.

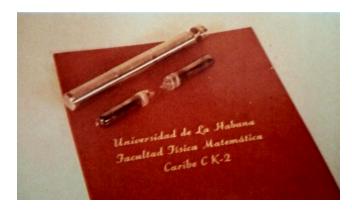


Figura 6. Fotografía de las ampolletas del experimento *Caribe K-1* (Imagen tomada de [1]).

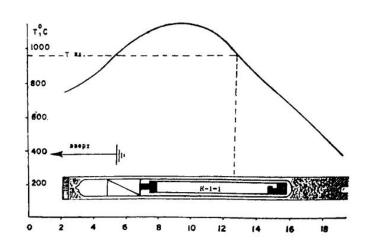


Figura 7. Perfil de temperatura del horno *Kristal* y esquema de la ampolleta colocada en el mismo, durante la tercera hora del experimento. El eje de las abscisas denota Posición expresada en *cm*. La flecha muestra la dirección del desplazamiento inicial de la ampolleta respecto al perfil del horno. La intersección de la línea discontinua con el eje de la Posición y la Temperatura muestran la porción del cristal que resultaría fundida y la temperatura de fusión de la muestra, respectivamente (Imagen tomada de [6]).

Para el experimento fue utilizado el horno *Kristal*, que formaba parte del equipamiento permanente del complejo orbital. Al comienzo, la ampolleta se coloca dentro de este y comienza el calientamiento partiendo de la temperatura ambiente con una velocidad de 9°C/min. A su vez, con la ayuda de un motor de paso, la muestra se desplaza respecto al horno con una velocidad de 0,188 mm/min. Al cabo de las 2 horas se alcanza una temperatura máxima de 1100°C. El perfil de temperatura y su posición respecto a la ampolleta en este instante se muestran en la Figura 7. Durante una hora se mantienen la temperatura constante y la ampolleta inmóvil para garantizar la homogenización del fundido; y una vez concluida, durante las próximas 6 horas, la muestra se desplaza en el sentido contrario al inicial con la velocidad ya señalada y la temperatura decrece a una tasa de 3,6°C/min [6].

Como se observa en la Figura 7, los 14 mm del lingote que se encuentran en su extrema derecha permanecen en estado sólido. Esta es la porción que actúa como semilla en el experimento.

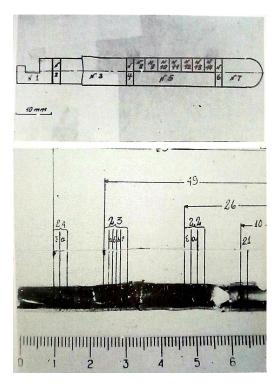


Figura 8. Esquema de corte de las muestras crecidas en el espacio cósmico (arriba) y de las crecidas en Tierra (abajo) (Imagen tomada de [6]).



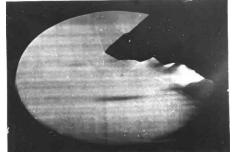


Figura 9. Topografías por Rayos X de la oblea 22 del cristal crecido en Tierra (arriba) y de la oblea 4 del cristal crecido en órbita (abajo) donde se observa que la perfección de la región monocristalina de la muestra crecida en el espacio es mayor que la de la crecida en Tierra (Imagen tomada de [6]).

Fueron realizados dos experimentos análogos: uno en el cosmos y otro en la Tierra. Las muestras que se obtuvieron fueron cortadas como se ilustra en la Figura 8. En la Figura 9 se muestran los topogramas de la oblea 4 del cristal crecido en

órbita y de la oblea 22, su equivalente en el crecido en Tierra. Mediante difracción se obtuvo que la primera de ellas poseía una variación de la monocristalinidad no mayor de 6", sin embargo en la zona monocristalina la perfección se mantenía en un alto grado, contrastando con la segunda donde se puede observar que la perfección cristalina era muy inferior a la de aquella. A pesar de esto, ya en la oblea 6 del cristal cósmico se observaba una destrucción de la monocristalinidad casi absoluta [6].

De la literatura de la época era conocido que la sustitución de germanio por indio provoca un aumento en el parámetro de la red. Midiendo este aumento respecto a un cristal de germanio puro se pudo determinar la concentración de indio en la región recristalizada del cristal cósmico.

De este trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- 1. El cristal crecido en Tierra es menos perfecto, cristalinamente, que el crecido en el espacio.
- 2. Se observa que el cristal cósmico durante su crecimiento se divide en bloques llegando a tener una desorientación de 6"entre los mismos en regiones a pequeña distancia de la semilla. Esta desorientación aumenta con dicha distancia, hasta quedar la estructura cristalina dividida completamente en pequeños bloques.
- 3. La medición de la variación del parámetro de la red permitió concluir que la concentración de indio era muy pequeña en la semilla, y que aumentaba rápidamente con la distancia a esta en la muestra crecida en órbita, pues los valores de variación obtenidos eran muy superiores a los reportados en la literatura de la época. [6]

III.1.2. Caribe C-1 o SK-1: Crecimiento de homoestructuras epitaxiales de GaAs y heteroestructuras de GaAlAs-GaAs.

Este experimento se realizó con el propósito de obtener homoestructuras epitaxiales de GaAs y heteroestructuras de GaAlAs-GaAs en condiciones de microgravidez, así como tratar de comprobar, por primera vez, la efectividad en tales condiciones de la técnica de la epitaxia líquida a partir de solución de galio a pequeña altura [7].

El experimento se realizó en el horno *Splav* a bordo de la estación orbital *Saliut 6*. En las Figuras 10 y 11 se presentan una fotografía y un esquema, respectivamente, de la ampolleta diseñada. En cada una de las zonas 1,2,4 y 5 se encuentra un contenedor de grafito. En cada contenedor hay cuatro láminas circulares de GaAs-Te, el sustrato utilizado, formando dos *sandwiches* separados por un pequeño anillo de grafito. En las regiones intermedias de las zonas 1 y 4 se colocó una solución de Ga-Al-Zn, mientras que en las zonas 2 y 5, la solución era de Ga-Zn. De esta forma se lograría el crecimiento de 16 capas en cuatro regímenes de temperatura diferentes. Los contenedores con las muestras se colocaron en una ampolleta de cuarzo sellada a un vacío inferior a 10^{-4} torr. Por último, esta se introdujo en un protector metálico de acero inoxidable [8].

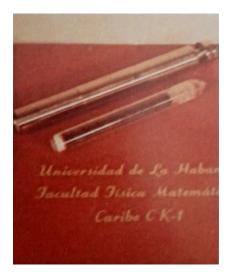


Figura 10. Fotografía de la ampolleta del experimento *Caribe SK-1* (Imagen tomada de [1]).

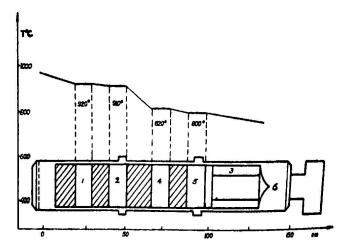


Figura 11. Cápsula diseñada para la homo y heteroepitexia de GaAlAs-GaAs en condiciones de microgravidez. Zonas 1,2,4 y 5: contenedores de grafito con muestras de GaAs y soluciones de Ga. Zona 3: ampolleta de cuarzo. Zona 6: cilindro metálico. Obsérvese la distribución de temperatura al inicio del crecimiento (Imagen tomada de [7]).

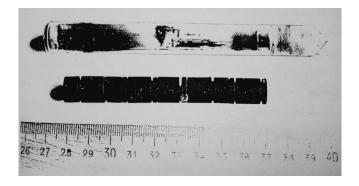


Figura 12. Ámpula de cuarzo, contenedores y separadores de grafito después de realizado el experimento (Imagen tomada de [8]).

El perfil de temperatura mostrado en la Figura 11 corresponde al inicio del experimento. Para lograr la formación de las capas

epitaxiales se realiza un enfriamiento regulado de la ampolleta a 0,75 °C/min por espacio de 200°C, seguido por enfriamiento pasivo hasta la temperatura ambiente. Durante este tiempo también ocurre la difusión de Zn en el sustrato n-GaAs. En la Figura 12 se muestra la cápsula después de realizado el experimento.

De este trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La comparación de la morfología entre las capas crecidas en condiciones de microgravedad y en Tierra mostró una incompleta homogenización de la solución crecida en órbita debido a la ausencia de convección y a la relativamente mayor influencia de la tensión superficial durante el crecimiento.
- 2. El microanálisis de rayos X realizado a la capa de AlGaAs para determinar la distribución de AlAs a lo largo de la capa epitaxial arrojó que la incorporación de aluminio en la interface sustrato-capa variaba en cada punto. Esto confirma la no homogeneidad del fundido. Igualmente, se concluyó que el valor del coeficiente de difusión del aluminio en el galio debe ser menor a 5 ⋅ 10⁻⁵cm²/s.
- 3. El análisis por fotoluminiscencia mostró que la concentración de impurezas de Zn en las muestras crecidas bajo condiciones de microgravedad aumenta monótonamente desde las muestras de la zona 1 hasta las de la zona 5. Se propuso que esto estaba relacionado con la diferencia de temperaturas iniciales de crecimiento. Además, las muestras de la zona 2 presentaron una concentración de Zn mayor, en casi un orden, respecto a las muestras de la zona correspondiente crecidas en Tierra.
- 4. A partir de las muestras obtenidas se construyeron diodos. Mediante el estudio de su curva I-V se pudo confirmar la presencia de juntura p-n en las capas crecidas en las zonas 1 y 4. [5,7,8]

III.2. Experimento Azúcar

Como se mostró en los experimentos anteriores, era usual en los vuelos espaciales el estudio del crecimiento de monocristales, principalmente de materiales utilizados en la industria de los semiconductores. El experimento *Azúcar* constituyó la primera experiencia de cristalización de materiales orgánicos en condiciones de ingravidez [5]. Para un país como era Cuba en 1980, con una industria eminentemente azucarera, realizar una investigación de este tipo creaba la oportunidad de perfeccionar los procesos industriales e impulsar la economía del país. Este experimento fue desarrollado por un grupo de especialistas del Instituto Cubano de Investigaciones Azucareras (ICINAZ), en estrecha colaboración con técnicos soviéticos del Instituto de Investigaciones Cósmicas de la URSS (IKI, por sus siglas en ruso) [9].

Esta investigación tenía como propósito determinar los efectos macrocópicos de la microgravedad en la cristalización de sacarosa a partir de su solución acuosa [5].

El equipamiento utilizado consta de un banco óptico con una base fija y otra móvil, un cristalizador, inyectores y extractores, diseñados por los técnicos del IKI; monocristales y contenedores de solución acuosa, preparados por los especialistas del ICINAZ; y una cámara fotográfica y un *flash*, que forman parte del equipamiento permanente de la estación espacial. En la base fija se colocan el cristalizador y el *flash*, y en la base móvil, la cámara fotográfica de la estación orbital, como se muestra en la Figura 13. El cristalizador está formado por dos compartimentos, en cada uno de ellos se colocan dos pequeños monocristales previamente crecidos en Tierra e insertados en agujas para su sujeción. Cada compartimento se rellena con una solución de sacarosa y agua pura [9].

El experimento se desarrolló ininterrumpidamente durante 72 horas y se tomaron fotos de cada uno de los cristales cada 8 horas.



Figura 13. Cristalizador, *flash* y cámara fotográfica Praktica EE-2 montados sobre el banco óptico. En el suelo se observan los contenedores de la solución acuosa y la caja donde se guardan los cristales preelaborados (Imagen tomada de [1]).

Como resultado se obtuvo que la tasa de crecimiento de monocristales de sacarosa en el espacio es ocho veces mayor que aquellos crecidos por métodos similares en la Tierra. La explicación de este fenómeno se supuso que estaba relacionada con el mecanismo de incorporación de moléculas de sacarosa a la red cristalina. [5,9]

III.3. Experimento Zona

Este experimento fue propuesto y diseñado igualmente por especialistas del ICINAZ y el IKI. Estaba dirigido a determinar el efecto de la microgravedad en la microtopografía de la superficie de un cristal y en la cinética molecular durante el proceso de cristalización, utilizando la técnica conocida como Fusión Zonal con Gradiente de Temperatura (FZGT) [5].

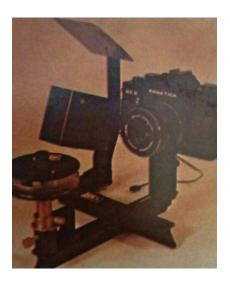


Figura 14. Cámara fotográfica y cámara de fusión zonal múltiple utilizadas en el experimento *Zona* (Imagen tomada de [1]).

La FZGT consiste en la traslación de una inclusión líquida a través de un monocristal debido a la acción de cierta diferencia de temperatura aplicada al mismo. Se seleccionó esta técnica porque su descripción matemática se encontraba bien desarrollada en la época, lo que permitía una fácil comparación de experimentos similares realizados en presencia y ausencia de gravedad. Por su parte, la sacarosa fue escogida como sustancia para el experimento porque permitía efectuarlo a bajas temperaturas, poseía velocidades de traslación de la zona líquida relativamente altas lo que permitía el registro fotográfico del proceso y favorecía la aplicación de los resultados al análisis del experimento *Azúcar* [10].

Con el objetivo de realizar el registro fotográfico del proceso, se creó un equipo que recibió el nombre de *Cámara FZ*. Esta consiste en un cilindro de vidrio orgánico con tapas metálicas en cuyo interior se encuentran tres cubetas colocadas entre un calentador de resistencia eléctrica y una superficie de enfriamiento, los cuales proporcionan un gradiente de temperatura de 27±5 °C/cm. Cada cubeta contiene una muestra o *sandwich* formado por dos pastillas monocristalinas de sacarosa entre las cuales se vierte la solución saturada de agua y sacarosa. La *Cámara FZ* es acoplada a un banco óptico junto a una cámara fotográfica y un sistema de iluminación, como se muestra en la Figura 14. Este montaje permite la toma de fotografías de las tres muestras bajo estudio.

Como resultado de este trabajo se obtuvo que la velocidad de cristalización de las capas crecidas en órbita son aproximadamente iguales a las obtenidas en condiciones experimentales análogas en Tierra, lo que muestra la no influencia de los flujos convectivos sobre dicha velocidad en experimentos de FZGT realizados en presencia de gravedad. Por su parte, la caracterización cristalográfica de las muestras crecidas en condiciones análogas reveló que aquellas crecidas bajo microgravedad poseen una mayor perfección cristalina, siendo esto una consecuencia de la ausencia de convección [10]. A partir de este experimento los autores sugirieron que sería posible simular en Tierra el proceso de cristalización en

microgravedad haciendo que la velocidad de cristalización IV. CONCLUSIONES fuese antiparalela a la fuerza de gravedad [5]. Con esta investigación se introdujo en el cosmos la aplicación del método de FZGT en monocristales de sacarosa [1].

III.4. Experimento Holograma

La idea original de este experimento provino de especialistas del Instituto de Investigación Técnica Fundamental (ININTEF), perteneciente a la Academia de Ciencias de Cuba. Posteriormente fue elaborado y equipado por científicos e ingenieros pertenecientes al ININTEF, al Instituto Técnico Militar Cubano (ITM) y al Instituto Físico-Técnico "Ioffe" de la Academia de Ciencias de la URSS.

Estaba compuesto por dos subexperimentos. El primero de ellos, Holograma-1, estaba destinado a evaluar el grado de inmunidad al ruido eléctrico de un holograma al ser transmitido a través de imágenes bidimensionales de televisión entre el espacio y la Tierra. El segundo de ellos, Holograma-2, tenía como objetivo determinar si era factible que especialistas en Tierra pudieran obtener mediante hologramas imágenes tridimensionales completas para estudiar la evolución de ciertos fenómenos producidos en el espacio.

Aunque Holograma se había preparado originalmente como uno de los experimentos que serían realizados durante el vuelo espacial del cosmonauta cubano, tuvo que ser pospuesto por problemas logísticos de transportación. Aún así, el experimento se llevó a cabo en marzo de 1981, durante el próximo vuelo conjunto de Intercosmos, realizado junto al cosmonauta de la República Popular de Mongolia.

Holograma-1 fue un experimento relativamente sencillo que consistió, en primer lugar, en utilizar las cámaras de televisión estándar de la nave para tomar imágenes de hologramas confeccionados previamente y transmitirlos a Tierra donde después de la recepción se comparaban con un duplicado exacto de los hologramas en el espacio. Luego, desde el Centro de Control de Vuelo se transmitía a la nave un holograma formado por luz coherente utilizando el canal de televisión convencional. La imagen recibida en el televisor de la nave era fotografiada para una comparación posterior. Las imágenes transmitidas incluyeron el logotipo cubano de Intercosmos y logotipo soviético URSS-Cuba.

Para llevar a cabo el Holograma-2, fue grabada en órbita la disolución de una sal en un líquido utilizando un instrumento holográfico especialmente diseñado para su uso en el espacio. Se tomaron varias series de fotografías sucesivas que hicieron fácil seguir cada detalle del proceso de disolución –que en condiciones de microgravedad ocurrió unas 20 veces más lento que en la Tierra—. Con esto se demostró que la holografía se puede usar para el control y prueba de experimentos en el espacio y, eventualmente, mostrar su utilidad en los procesos de fabricación espacial. [5]

Los experimentos Azúcar, Zona y Holograma marcaron un hito en la historia de la ciencia espacial, al ser los primeros de su tipo realizados en un laboratorio orbital.

El resultado satisfactorio de la casi totalidad de los experimentos cubanos que se realizaron durante el vuelo, así como la trascendencia que tuvieron en posteriores investigaciones, demostraron la competencia y creatividad de los investigadores cubanos y que su participación en el diseño y montaje de los experimentos, lejos de constituir un acto simbólico, devino en colaboración beneficiosa para todos los participantes y para la ciencia en general.

Es una razón de orgullo para la Física cubana que varios de los físicos y físicas cubanos, aún en activo, fueran autores de dos de los experimentos, Caribe K-1 y SK-1, realizados durante el vuelo espacial conjunto soviético-cubano.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a José Altshuler por haber facilitado la bibliografía principal utilizada en la confección de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Vuelo Espacial Conjunto URSS-Cuba. Editorial de Ciencias Sociales. (1981)
- [2] J. Altshuler y K. Serafímov, La Hora del Espacio, 1ra Ed. (Editorial Científico-Técnica, La Habana, 1991)
- [3] Satnews Daily. Made In Space to Manufacture Multi-Use Optical Crystals in Microgravity. (1, consultado en mayo de 2020).
- [4] Orfilio Peláez. Legado de un histórico vuelo. (http://www.granma.cu/granmad/secciones/cienciaytec/cuba/c consultado en mayo de 2020).
- [5] A. Baracca, J. Renn y H. Wendt, The History of Physics in Cuba, 1ra Ed. (Springer, 2014), pp. 295-300
- [6] O. Calzadilla, J. Fuentes, J. Vidal, P. Díaz, R. Romero, C. Arencibia, E. Hernández, L. M. Sorokin, I. I. Shulpina y A. S. Trebugova, Ciencias Técnicas, Físicas y Matemáticas **4** 18 (1984)
- [7] P. Díaz, E. Vigil, R. Romero, E. Purón, S. de Roux, F. Sánchez, V. M. Andreev, S. G. Konnikov y T. B. Papova, Ciencias Técnicas, Físicas y Matemáticas 4 23 (1984)
- [8] E. Vigil, "Estudio y Aplicación del GaAs y sus Soluciones Sólidas con GaP y AlAs para la confección de Diodos Emisores de Luz". Tesis de doctorado, Universidad de La Habana, 1983
- [9] R. Morera, J. Lodos y E. Casanova, Ciencias Técnicas, Físicas y Matemáticas 4 3 (1984)
- [10] F. L. Falcón, P. V. Pérez, G. F. Zhukov, Ciencias Técnicas, Físicas y Matemáticas 4 11 (1984)

ANEXO



Figura A1. Casco y fonofoto estimulador del equipo empleado en el experimento *Córtex* (Imagen tomada de [1]).



Figura A2. Coordinógrafo del experimento *Coordinación* (Imagen tomada de [1]).



Figura A3. Dispositivo del experimento *Soporte*: Sandalia "Cúpula Sand 501" (Imagen tomada de [1]).



Figura A4. Calibrómetro especial "Cosmos 726ütilizado en el experimento *Antropometría* (Imagen tomada de [1]).



Figura A5. Conjunto de instrumentos del experimento Percepci'on (Imagen tomada de [1]).