

**PRÁCTICA EXPERIMENTAL EN FÍSICA MODERNA: DISEÑO PARA LA
COMPRENSIÓN DE LA INTERACCIÓN RADIACIÓN MATERIA A PARTIR DE LA
CARACTERIZACIÓN DE RAYOS X**

INGRID JOHANNA TOLE ARDILA

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA RELACIÓN
FÍSICA-MATEMÁTICA**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ D.C. 2019**

**PRÁCTICA EXPERIMENTAL EN FÍSICA MODERNA: DISEÑO PARA LA
COMPRENSIÓN DE LA INTERACCIÓN RADIACIÓN MATERIA A PARTIR DE LA
CARACTERIZACIÓN DE RAYOS X**

INGRID JOHANNA TOLE ARDILA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIADA EN FÍSICA

ASESOR: VICTOR HEREDIA

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA RELACIÓN
FÍSICA-MATEMÁTICA**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ D.C. 2019**

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a la memoria de mi amado padre Reynel Tole Godoy.

Que su espíritu, su bondad y su sentido del humor sigan tocando mi vida.

Mi padre se caracterizó por una vida llevada de manera plena: Con sabiduría, gracia, belleza

y elegancia. Me dejó un tesoro de ingeniosas anécdotas, fue modelo de una vida digna

tiene una hermosa familia donde dejó marcado el amor incondicional hacia su esposa, a sus

tres adorados hijos y su nieta María José.

Agradecimientos

De manera especial el apoyo incondicional que han manifestado mis padres, a mi hija maría José ya que sin la colaboración y cariño no se hubiese podido llevar a cabo el presente proyecto experimental.

Gracias a la labor realizada por el docente Víctor Heredia, cuyo esfuerzo y dedicación para con el trabajo experimental basado en la enseñanza de la física y la relación física - matemática empleando métodos prácticos, el cual ha podido dar respuesta al debido uso del equipo de rayos X para el laboratorio de física moderna.

Introducción

En la historia de la ciencia, desde los filósofos griegos hasta la física moderna, han existido alternativas para comprender y explicar la complejidad de los fenómenos naturales partiendo de cierto número de ideas y de relaciones simples y fundamentales. Este es el principio básico de toda la filosofía natural (Einstein, Infeld, & Grinfeld, 1986). Considerando la importancia de los aspectos fenomenológicos como motivación para elaborar modelos formales en la enseñanza de la física moderna, la actividad experimental se convierte en un recurso didáctico valioso en este proceso. De esta manera, en este trabajo se presenta una propuesta de diseño, orientada a la comprensión de la *dispersión Compton* a partir de los *rayos X*, permitiendo promover en los estudiantes el interés por la física mediante la observación de fenómenos, motivando la búsqueda de explicaciones a través de lo observado (Gomez & Marulanda, 2006).

Cuando se menciona el término “moderno” tiene una definición de reciente o de una nueva tendencia. Para el estudio de la física, este término se refiere específicamente a designar algunos campos específicos, los cuales tienen características comunes: se desarrollan a partir del año 1900 y las teorías para explicar estos fenómenos son completamente diferentes a las que existían antes de 1900 (Taquichiri, 2018).

De esta manera se pretende en el laboratorio de física moderna lograr una comprensión del fenómeno relacionado a la interacción radiación-materia fenómeno comprendido en el periodo después de 1900, mediante la caracterización de los *rayos X* construyendo así sobre lo discutido en clase, generando un impacto que contribuya a publicaciones en ciencia tecnología e innovación junto con perspectivas para el futuro del licenciado en física de la UPN¹ (Trumper, 2003, p3).

¹ UPN: Universidad Pedagógica Nacional

La actividad experimental como eje en la enseñanza de la física y como fundamental en la física moderna, hace notar la práctica como ente principal en el aprendizaje científico. Donde podemos dar cuenta que la mayoría de las teorías físicas se complementan con la actividad experimental, desde los descubrimientos de Galileo en adelante, lo que se hace evidente es que la base empírica de la física está formada por los resultados experimentales, ya que para la construcción de estas teorías fue necesario observar, además de experimentar


Aunque siempre se señala la desavenencia entre observar y experimentar, *“basta decir que son actividades diferentes, quedándonos al final con lo que todos entendemos mejor: que el científico es un gran observador y que la teoría se juega su destino en una buena observación realizada desde una teoría”*(Ferreirós & Ordóñez, 2002 p59). Sin embargo, solo con observar no podemos realizar una comprensión de los fenómenos estudiados, en particular los concernientes a la física moderna, por lo mismo es necesario complementarla con la experimentación teniendo como propósito obtener una mejor construcción del papel del laboratorio en el DFI².

Por lo tanto, la importancia de la actividad experimental en el LFM³, tiene como propósito favorecer actividades que promuevan la comprensión y el desarrollo conceptual en la interacción de la radiación con la materia. Se construye una propuesta de diseño experimental, mediante el uso de la máquina de rayos X. Permitiendo mediante este trabajo asociar experimento y teoría, en donde se pretende complementar las actividades experimentales al interior de la asignatura con el propósito de ampliar las opciones a la hora de utilizar los instrumentos del laboratorio contribuyendo a una mayor comprensión de fenómenos de la física.

² DFI: Departamento de Física

³ LFM: Laboratorio de física moderna

Resumen analítico en educación (RAE)

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>Escuela de Pedagogía</small>	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página VII de 111	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	PRÁCTICA EXPERIMENTAL EN FÍSICA MODERNA: DISEÑO PARA LA COMPRENSIÓN DE LA INTERACCIÓN RADIACIÓN MATERIA A PARTIR DE LA CARACTERIZACIÓN DE RAYOS X
Autor(es)	Tole Ardila, Ingrid Johanna.
Director	Heredia Heredia, Víctor Andrés.
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2019. 111 p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	FÍSICA MODERNA; PRÁCTICA EXPERIMENTAL; ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO; INTERACCIÓN RADIACIÓN-MATERIA; RAYOS X; EFECTO COMPTON.

2. Descripción
<p>Este trabajo resalta la importancia de la actividad experimental en el DFI, teniendo en cuenta las actividades de enseñanza-aprendizaje mediante una propuesta de diseño experimental, enmarcada en la comprensión de los fenómenos asociados a la interacción radiación-materia. A través de la caracterización de los <i>rayos X</i> mediante la máquina (Phywe) que se encuentra en el laboratorio</p>

El desarrollo histórico de las ciencias es importante para comprender los aportes que realizaron grandes físicos como William Roentgen, Max Planck y Arthur Compton en el surgimiento de la física moderna permitiendo dar explicaciones a fenómenos asociados a la luz.

Finalmente, en el diseño de la propuesta experimental se plantean dos fases de trabajo, mediante las cuales se plantean 3 actividades alrededor de la comprensión del espectro electromagnético, la caracterización de los *rayos X* y la comprensión del *efecto Compton* mediante el uso de la máquina (Phywe) del DFI.

3. Fuentes

- Astrofísica y Física: ¿Qué es el Espectro Electromagnético? (n.d.). Retrieved May 10, 2020, from <https://www.astrofisicayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html>
- Belletti, S., Besio, G., & Godino, M. E. (2016). *Ondas Electromagnéticas 2^o Año*. 0–17. Retrieved from [https://rehip.unr.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/2133/6625/7203-16 FISICA Ondas Electromagneticas.pdf](https://rehip.unr.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/2133/6625/7203-16_FISICA_Ondas_Electromagneticas.pdf)
- Beltrán, Y. J. C. (2018). *Estado del arte : tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016*. 147–166.
- Benavides, A. F. (1996). El descubrimiento. *Ocho Momentos de La Historia Universal*, 183–198. <https://doi.org/10.2307/j.ctvm7bbkx.14>
- Brown, T. L. (2009). *Chemistry: the central science*.
- Bushong, S. C. (1982). *Manual de radiología para técnicos física, biología y protección radiológica*.
- Carlos, J., Santos, M., & Sánchez, H. H. (n.d.). *El nacimiento*. 31–54.
- Cheston, W. B. (1954). Compton scattering. *Physical Review*, 95(1), 247–248. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.95.247>
- Colmenares, A. Mercedes. (2017). Investigación - acción participativa: una metodología integradora del conocimiento y la acción. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10485 LNCS(1), 37–47. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68548-9_4
- Compton, A., & Allison, S. K. (1965). *Arthur Holly Compton*.

- Concari, S. B. (2001). *LAS TEORÍAS Y MODELOS EN LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA : IMPLICANCIAS PARA LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS*. 85–94.
- Cowan, C. L., & Grah, J. S. J. (n.d.). *u Virgilio Acosta FISleA M00ERNA*.
- Deacon, C., & Hajek, A. (2011). Student perceptions of the value of physics laboratories. *International Journal of Science Education*, 33(7), 943–977.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2010.481682>
- Douki, T., Ravanat, J.-L., Markovitsi, D., & Sage, É. (2012). El ADN bajo el efecto del sol. *Investigación y Ciencia*, (431), 36–43. Retrieved from
<http://www.investigacionyciencia.es.bd.univalle.edu.co/revistas/investigacion-y-ciencia/numeros/2012/8/el-adn-bajo-el-efecto-del-sol-9355>
- Dwyer, J. R., Rayos, D., Compton, G., Fishman, G., Vuelos, C. De, Marshall, E., & Nasa, D. (2012). *Las tormentas provocan destellos de rayos X y gamma tan intensos que incluso emiten antimateria . La atmósfera se revela como un lugar más extraño de lo que jamás habíamos imaginado*. 38–43.
- Einstein, A., Infeld, L., & Grinfeld, R. (1986). La evolución de la física. In *Biblioteca científica*.
- Ferreira, J. & R. R. (2011). Efectividad de las actividades experimentales demostrativas como estrategia de enseñanza para la comprensión conceptual de la tercera ley de Newton en los estudiantes de fundamentos de Física del IPC Effectiveness of the experimental demonstration activit. *Revista de Investigación N° 73. Vol. 35. Mayo-Agosto 2011*, 35, 61–84.
- Ferreirós, J., & Ordóñez, J. (2002). Hacia una filosofía de la experimentación. *Critica-Revista Hispanoamericana de Filosofía*, 34(102), 47–86.
- Feynman, R. (1998). *Goals of the Introductory Physics Laboratory a) American Association of Physics Teachers Summary of Introductory Physics Laboratory Goals*. 66(June), 483–485.
- Filho, D. O. T. (1991). *Laboratório caseiro de física moderna*. 390–395.
- Filosof, L., Psicolog, L., & Experiencias, A. I. (2018). *Apunte de Cátedra*. 1–39.
- Gomez, L. A., & Marulanda, J. I. (2006). *Experimentos en el aula de clase para la enseñanza de la física*. (January).
- Goyes, Lina (2018) La relación contexto-ciencia: El caso de la teoría de la radiación térmica desde la perspectiva de Planck en el siglo XIX. (trabajo de pregrado), Universidad Pedagógica nacional, Bogotá.
- Hechavarría, Rodney; López, G. (2013). El firmamento en infrarrojo. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hernández-fernández, A. (2014). *El origen de la física moderna: el papel de fermi*. 1–10.

- Hodson, D. (1994). *Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio*. 15.
- Ibáñez, L. (1990). *Grandes físicos y grandes descubrimientos*. 1–5.
- Knoll. (1989). *Radiation detection and measurements*. New York, Springer Verlag, (1989), (1), 1–6.
- Kuhn. (1980). *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica*.
- Lombardi, O. I. (1997). *La pertinencia de la historia en la enseñanza de las ciencias: argumentos y contraargumentos*. 15(3), 343–349.
- Mauricio Garcia Castañeda, J. E. D. G. (2003). *Introducción a la física moderna - Universidad Nacional de Colombia*.
- Mayorga, A. (2002). *Planck, Einstein y el nacimiento de la teoría cuántica*. (100), 145–152.
- Mercedes, M., & Manrique, A. (2013). *LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL : CONSTRUCCIÓN DE FENOMENOLOGÍAS Y PROCESOS DE FORMALIZACIÓN The experimental activity : Construction of phenomenologies and formalization processes Francisco Malagón Sánchez Universidad Pedagógica Nacional THE EXPERIMENTAL ACTIV*. (36), 119–138.
- Molina, (2011). (2011). Un acercamiento a la investigación de diseño a través de los experimentos de enseñanza. 2011, 29(1), 75–88. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10481/23887>
- Molina, M. (2016). *Cambio climático*.
- Moreno, Cristian. (2017) Radiación termica: construyendo la identidad entre luz y calor. (trabajo de pregrado), Universidad Pedagógica nacional, Bogotá
- Nelida Ana Gonzales, Juan Carlos Muñoz, L. L. (2007). *Física 4*. 296–314.
- OMS. (1959). *Las Radiaciones Ionizantes y sus Efectos en la Población Las Radiaciones Ionizantes y sus Efectos en la Población*.
- Ondas electromagnéticas, conceptos básicos*. (n.d.). 73. Retrieved from http://www.uco.es/organiza/departamentos/ing-electrica/documentos/ONDAS_EM_CONCEPTOS_BASICOS.pdf
- Ordóñez, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Acta*, 1, 17–31. Retrieved from https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- Ossorio, D. R. P. A. (1973). *Isotopos radiactivos* (Alhambra, Vol. 3). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- PANEQUE, R. J. R. (1998). Metodología de la Investigación. In *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Radiología: Introducción a la Radiología. (n.d.). Retrieved May 3, 2020, from <http://programaderadiologia.blogspot.com/2012/07/la-radiologia-es-una-ramade-la->

medicina.html

- Raymond A. Serway y John W. Jewett, J. (2009). *SERWAY II*.
- Reyes, M. (1962). *RAYOS X y EFECTO COMPTON*. (1985).
- Robert N. Cherry, J. (1998). *Radiaciones ionizantes*.
- ROBERT RESNICK. (1976). *Conceptos de relatividad y teoría cuántica*.
- Robley. (1955). *THE ATOMIC NUCLEUS*.
- Rodrigo, I. L. (2004). *MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN DE ENFOQUE EXPERIMENTAL*.
- Sebastia, J. m. (1987). *¿ QUE SE PRETENDE EN LOS LABORATORIOS DE FISICA UNIVERSITARIA ?* 5(3).
- Sibum, H. O. (2017). *Conocimiento científico e inteligencia corporal*. 48–49.
- Taquichiri, M. (2018). *INTRODUCCION A LA FISICA MODERNA NOTAS DE CURSO Marco A. Taquichiri T. 2018*.
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). Para entender las Radiaciones. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Unesco-ICSU. (1999). *Declaración de Budapest*.
- UNSCEAR. (1993). *Sources and Effects of Ionising Radiation 1993 Report to the General Assembly, with annexes. 1993*.
- Valdés, C. E. A., Luis, J., & Sol, D. (2016). *La enseñanza de las ciencias en el nuevo milenio. retos y sugerencias*. 169–176.
- Valenzuela, W. (1991). *HIPOTESIS CORPUSCULAR Y TEORIA DEL CONOCIMIENTO EN LOCKE*.
- Velázquez, C. (1900). *Planck y el gran inicio de la sinfonía cuántica*. 1–13.
- Walteros, Luz Angelica, (2016), *Actividades experimentales para la construcción de explicaciones alrededor de los fundamentos básicos de la mecánica cuántica*. (trabajo de pregrado), Universidad Pedagógica nacional, Bogotá.

4. Contenidos

Para el desarrollo de la investigación se abordaron cinco capítulos. En el primer capítulo se presenta la problemática alrededor del uso de la máquina de rayos X, y se hace una reflexión acerca de la

importancia del experimento en la enseñanza de la física moderna. En el segundo capítulo se hace una contextualización histórica de la actividad experimental a través de los trabajos de Planck y Wilhem Roentgen, además, los fenómenos relacionados con el espectro electromagnético, los *rayos X* y la interacción radiación-materia. En el tercer capítulo se estudia el *efecto Compton*, su descubriendo, importancia y formulación matemática. En el cuarto capítulo se describe la máquina de *rayos X* (Phywe), su respectivo funcionamiento y precauciones de seguridad. Por último, se realiza una descripción detallada de la propuesta de diseño experimental, mediante tres actividades las cuales se harán en tres momentos. En un primer momento se caracterizará el espectro electromagnético, posteriormente se identificará la emisión y propagación de los *rayos X* y finalmente se hará uso de la máquina de *rayos X* para *dispersión Compton*.

5. Metodología

Para este trabajo la metodología estuvo orientada bajo el enfoque en la investigación de diseño o investigación basada en el diseño, esta es de orden cualitativo; tiene como objetivo analizar el contexto del aprendizaje mediante estrategias y herramientas de enseñanza, y además, aporta a la comprensión de las relaciones existentes entre teoría educativa, práctica e instrumentos (recursos didácticos o herramientas conceptuales)

Para ello se tendrán en cuenta las siguientes fases de trabajo donde se contará con dos partes para la elaboración del diseño de la propuesta, las cuales son: *“preparación del experimento y la experimentación para promover el aprendizaje”*

6. Conclusiones

- La importancia de la práctica experimental en la asignatura laboratorio de física moderna asociado a la comprensión de los fenómenos relacionados con la interacción de la radiación-materia y su desarrollo histórico, permiten a los estudiantes aproximarse a la comprensión

de la naturaleza de los *rayos X* por medio de la radiación electromagnética. Por lo que en este trabajo se reconoce la importancia de asociar el fundamento conceptual, el componente experimental y el desarrollo histórico a través de la propuesta de diseño experimental, para la enseñanza-aprendizaje de conceptos relacionados con la dispersión de *rayos X*.

- La enseñanza-aprendizaje del *efecto Compton* requiere articular conceptos relacionados con la caracterización de los *rayos X*, dispersión de la radiación electromagnética, radiación ionizante, la interacción radiación-materia, la naturaleza dual de la luz, los cuales pueden ser afianzados mediante la implementación de los recursos físicos disponibles en el laboratorio del DFI (máquina Phywe) en las actividades académicas de la asignatura laboratorio de física moderna.
- El diseño de estrategias para la enseñanza-aprendizaje en física debe relacionar coherentemente el desarrollo histórico, el fundamento conceptual y los recursos experimentales permite que los estudiantes del programa de Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional se aproximen al conocimiento como lo hacen los investigadores, lo cual promueve la comprensión de cómo se construyeron estos conceptos.
- El conocimiento y el uso de los equipos disponibles en el laboratorio del departamento de física de la UPN y su articulación con los contenidos en las asignaturas del programa del DFI pueden contribuir significativamente a la comprensión de fenómenos en física, específicamente la caracterización de los *rayos X*; es necesario resaltar la importancia que tiene para la enseñanza-aprendizaje el aprovechamiento de todos los recursos disponibles en el departamento de física para promover la formación integral de los futuros licenciados en física.

- Las estrategias de enseñanza-aprendizaje que articulen el desarrollo histórico, el fundamento conceptual y las actividades experimentales promueven nuevas alternativas para la enseñanza-aprendizaje en el DFI de la UPN, además, ofrecen la oportunidad de participar activamente en la enseñanza de la física como tema de investigación.
- Finalmente, se considera que proponer y aplicar estrategias coherentes para la comprensión de fenómenos en física pueden aportar a la formación integral de los docentes en formación y promueven la diversificación de estrategias para la enseñanza de un tema específico; estas estrategias son susceptibles de ser mejoradas en función de los recursos disponibles, el avance tecnológico, la experiencia del docente y los intereses del DFI.

Elaborado por:	Tole Ardila, Ingrid Johanna.
Revisado por:	Heredia Heredia, Víctor Andrés.

Fecha de elaboración del			
Resumen:	14	11	2019

Tabla de contenidos

Capítulo 1	1
Problemática	1
Justificación	4
Objetivos.....	6
General:.....	6
Específicos:	7
Antecedentes	7
Capítulo 2	9
2. La física moderna y la actividad experimental	9
2.1 Actividad experimental, aspectos históricos de la física moderna para la enseñanza de las ciencias.	9
2.2. Espectro electromagnético	13
2.3 <i>Rayos X</i> y sus características.....	16
2.4 La radiación y su interacción con la materia	18
2.5 Aspectos físicos de la radiación	19
Capítulo 3	21
3 El efecto Compton.....	21
3.1 Formulación matemática.....	24
Capítulo 4	27
4 Máquina de <i>rayos X</i>	27
4.1 Descripción y caracterización de la máquina de <i>rayos X</i> del departamento de física.....	27
4.2Funcionamiento de la máquina de <i>rayos X</i>	28
4.3 Parámetros de funcionamiento.....	28
4.3.1 Precauciones de seguridad	29
4.3.2 Equipo para operar la máquina de <i>rayos X</i>	30
Capítulo 5	32
5 El experimento alrededor de los <i>rayos X</i>	32
5.1 Experimentación en física moderna contexto actual e importancia en el departamento	32

5.2 Descripción de la población	33
5.3 Diseño de una propuesta experimental, para la caracterización de la emisión de <i>rayos X</i> a través de la <i>dispersión Compton</i>	34
5.3.1. Actividades para la comprensión del <i>efecto Compton</i> a través de los <i>rayos X</i> en el espectro electromagnético.	38
Actividad 1: El espectro electromagnético	38
Actividad 2: Caracterización de los <i>rayos X</i>	39
Actividad 3: Descripción longitud de onda Compton.....	41
Recomendaciones:.....	43
Resultados esperados.....	44
Conclusiones	45
Bibliografía.....	47
Anexos.....	49

TABLA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: El laboratorio de física de la Universidad Johns Hopkins, en Baltimore, hacia 1880. En los nuevos laboratorios universitarios de la segunda mitad del siglo XIX, el científico en ciernes aprendía a conjugar el conocimiento mental y el sensorial. (Sibum, 2017, p48).</i>	10
<i>Ilustración 2:Espectro electromagnético (Brown, 2009).</i>	14
<i>Ilustración 3: Representación de una onda electromagnética. fuente: (García, 2003).</i>	14
<i>Ilustración 4: Producción de rayos x los electrones son emitidos termodinámicamente del filamento calentado del cátodo son acelerados al ánodo por un potencial aplicado v. al chocar los electrones contra el ánodo se emiten rayos x. (Cherry, 1998, p48.14).</i>	16
<i>Ilustración 5: Proceso de Bremsstrahlung causante de la producción de rayos X en un espectro continuo tomado de ("Radiología: Introducción a la Radiología," 2012)</i>	17
<i>Ilustración 6: Distribución de la radiación y su interacción elaboración propia</i>	18
<i>Ilustración 7: Interacción de partículas con la materia. elaboración propia.</i>	19
<i>Ilustración 8 :Explicación de la radiación y su naturaleza dual. Elaboración propia.</i>	20
<i>Ilustración 9: Arreglo experimental de Compton, rayos x monocromáticos de longitud λ llegan a un dispersor de grafito adaptado de (RESNICK, 1976, p164).</i>	21
<i>Ilustración 10: Esquema del dispositivo experimental para observar el efecto Compton (García, 2003).</i>	22
<i>Ilustración 11: Corrimiento de Compton para diferentes ángulos de dispersión adaptado de (RESNICK, 1976, p 165).</i>	22
<i>Ilustración 12: Esquema de la colisión entre un fotón y un electrón (García,2003).</i>	23
<i>Ilustración 13: Un fotón de longitud de onda λ incide sobre un electrón libre en reposo. Adaptado de (RESNICK, 1976)</i>	26
<i>Ilustración 14: Maquina de rayos X del DFI de la UPN.</i>	27
<i>Ilustración 15: Estructura general de una investigación de diseño (Molina, 2011, p76).</i>	35

Capítulo 1

Problemática

La Licenciatura en Física (LF) de la Universidad Pedagógica Nacional (UPN) en su currículo cuenta con componentes en sus asignaturas fuertemente disciplinares en la Física, que requieren de la experimentación para su comprensión, una de ellas es el laboratorio de física moderna (LFM) donde se elaboran y afianzan conocimientos, los cuales son contextualizados históricamente, analizando la fenomenología mediante técnicas experimentales, validando de esta manera las características y resultados de algunos modelos corpusculares y ondulatorios.

En este sentido, la experimentación se hace importante en los procesos de enseñanza-aprendizaje porque *“un buen laboratorio es aquel que promueve un aprendizaje efectivo y cumple con los objetivos al tiempo que hace que la experiencia de laboratorio sea interesante y agradable”*(Deacon & Hajek, 2011 P945), considerando a la práctica experimental como la encargada de *“la construcción y comprensión de las fenomenologías en estudio, y con ello con la ampliación y organización de la experiencia de los sujetos, así como con la formalización de relaciones y con la concreción de supuestos conceptuales”* (Malagón, 2011, p.7).

Entonces, para comprender conceptos de la física moderna, donde se estudia los fenómenos relacionados a la interacción radiación materia, la actividad experimental es de gran importancia. No obstante, no se debe perder la rigurosidad de la formalización en la construcción del conocimiento, donde se crean relaciones entre los experimentos, los conceptos, y el formalismo matemático.

En ese sentido los experimentos que se proponen para la asignatura buscan encontrar relaciones que permiten dar cuenta de los fenómenos que llevaron a la construcción de una nueva teoría física basada en lo discreto, como lo son: la radiación de un cuerpo negro, la relación que hay entre la carga y la masa, los espectros atómicos, la difracción de electrones, entre muchos otros. Sin embargo, la realización de estos experimentos en algunas ocasiones se hace compleja debido a que las técnicas experimentales necesitan una calibración especial y un acompañamiento para entender el fenómeno que allí se encuentra, y así poder comprender las teorías inmersas en las explicaciones alrededor de estos (Sebastia, 1987).

Sin embargo, uno de los inconvenientes actuales en el departamento de física (DFI) en la UPN, es que algunos equipos son antiguos y presentan deterioro asociado al paso de los años y uso, lo que dificulta la toma de medidas alrededor de los diferentes experimentos abordados en el desarrollo de la asignatura; otros instrumentos del laboratorio no se utilizan como es el caso de la *máquina de rayos X* que permite abordar fenómenos de la física moderna como *el efecto Compton*, y, su uso se ve limitado al desconocimiento de su funcionamiento y de las aplicaciones para la enseñanza-aprendizaje de conceptos fundamentales para los futuros Licenciados en Física en asignaturas pertinentes como laboratorio de Física moderna principalmente.

De acuerdo con (Filho, 1991, p390) “*Un buen laboratorio de física moderna juega, en la enseñanza de Física, funciones muy importantes, entre las que podemos mencionar dos: ayuda para comprender los conceptos de las teorías de la física moderna, especialmente los relacionados con la estructura atómica y la naturaleza de la radiación, e introducir al alumno en técnicas experimentales más sofisticadas.*”

Se ha encontrado en el DFI, que algunos experimentos no se encuentran de manera completa, otros necesitan ser calibrados antes de realizar mediciones; también es importante el mantenimiento y conservación del material de laboratorio, mientras que el experimento del efecto fotoeléctrico no cuenta con un montaje experimental. La ausencia de las prácticas experimentales en *rayos X* evidencia que el estudiante debe revisar de manera teórica los conceptos y no practica dificultando así la comprensión de la fenomenología alrededor del mismo

Al utilizar la máquina de *rayos X* del DFI de la UPN, se podría profundizar en uno de los objetivos principales del Syllabus del LFM⁴ donde de una manera práctica, se adaptaría la actividad experimental hacia los fenómenos físicos asociados a la interacción radiación materia. Diversificando así las experiencias en la asignatura de modo tal que los conceptos alrededor de la teoría corpuscular de la radiación se abordarían de una manera más completa con el *efecto Compton*, permitiendo favorecer una reflexión colectiva previa acerca de la importancia alrededor del trabajo de laboratorio en el DFI.

En este sentido se debe abordar uno de los aportes en el principio de la teoría cuántica en el LFM, donde gracias al descubrimiento del *efecto Compton*, por medio de un experimento de *rayos X* se logró comprobar que la radiación electromagnética tiene propiedades tanto de onda como de partícula, permitiendo el estudio en el cambio de longitud de onda, y la comprensión de las propiedades corpusculares de la radiación con la materia, de esta manera se aporta a las explicaciones de la fenomenología en el LFM (Hernández, 2014).

Si bien los experimentos descritos anteriormente ayudan a la comprensión del fenómeno relacionado con la interacción radiación-materia, hay conceptos que mediante el *efecto Compton*,

⁴ LFM: Laboratorio de física moderna

permiten ampliar las alternativas de trabajo de laboratorio por medio de la emisión de *rayos X* ayudando a una comprensión más amplia del fenómeno, por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué características conceptuales y experimentales se deben tener en cuenta en el diseño de una propuesta experimental, para la comprensión de la interacción radiación-materia por medio del *efecto Compton* utilizando la máquina de *rayos X*, en el laboratorio de física moderna del DFI de la UPN?

Justificación

La ciencia debe convertirse en un bien compartido en el siglo XXI, para beneficio de la humanidad, esta constituye un poderoso instrumento para comprender “*los fenómenos naturales y sociales de las relaciones que existen entre la sociedad y el medio natural*” (Declaración de la Unesco, 1999) Uno de los aspectos fundamentales en las ciencias y por ende en la enseñanza de la física es establecer las relaciones entre la teoría y los fenómenos de estudio (Concari, 2001).

En este sentido Mercedes y Manrique afirman que "*Al abordar la cuestión del experimento en la enseñanza de las ciencias nos hemos visto obligados a acudir a una serie de reflexiones epistemológicas, en lo cual hemos afianzado nuestro compromiso con una perspectiva fenomenológica*". Teniendo en cuenta a la práctica experimental como la construcción y comprensión de las fenomenologías en estudio y con ello la ampliación y organización de la experiencia de los sujetos.

Al establecer la falta de comprensión de los conceptos alrededor de la física moderna, conlleva a que los estudiantes realicen procesos de memorización y repetición de conceptos sin dar paso a la reflexión. Haciendo difícil la resolución de problemas y la argumentación, presentando apatía por el nuevo conocimiento impartido. Es importante proponer estrategias teórico-experimentales

que lleven a una labor pedagógica más reflexiva, incentivando así en los estudiantes la investigación alrededor del fenómeno estudiado (Beltrán, 2018).

De esta manera es importante resaltar la comprensión de la fenomenología a través de sus pertinentes descripciones e interpretaciones, teniendo en cuenta la organización de experiencias y observaciones para generar representaciones detalladas del fenómeno, enmarcada en la actividad experimental requiriendo, la comprensión conceptual que acompañe la intervención y disposición de esta (Mercedes & Manrique, 2013, p122).

Por consiguiente, la actividad experimental en el LFM enfrenta al estudiante al fenómeno físico como estrategia, donde se plantea el porqué de ese fenómeno y la respuesta que obtenga será la motivación para la preparación al formalismo (Mercedes & Manrique, 2013). Por tanto, se afirma que: *“Es aquí donde la experimentación se convierte en un recurso didáctico valioso en el proceso de aprendizaje. Aunque existen numerosas propuestas en esta dirección, muchas de ellas requieren elementos y montajes de cierta complejidad”* (Ferreira, 2011).

Por esta razón, los montajes experimentales disponibles en el DFI deben tener en cuenta la contextualización de saberes alrededor de lo que se instruye en relación con la física moderna. De esta manera, los experimentos que se realizan en el LFM se desarrollan alrededor de fenómenos corpusculares, considero que las actividades experimentales actualmente planteadas en la asignatura no son suficientes, observando que es poco el material de laboratorio existente. Se pretende con el *efecto Compton* complementar la actividad experimental, proponiendo en este sentido utilizar la máquina de *rayos X*.

Asimismo, (Beltrán, 2018) ha encontrado que la formulación matemática no ayuda a la comprensión del fenómeno en física moderna, por el contrario, genera una apatía por parte del

estudiante, la falta de organización en la manera de desarrollar los currículos hace que muchos estudiantes presenten dificultad para diferenciar los fenómenos mecánicos de los cuánticos.

De esta manera, se pretende abordar conceptos relacionados en la interacción de la radiación con la materia planteando el diseño de actividades teórico-experimentales para la enseñanza-aprendizaje de conceptos relacionados con la dispersión de *rayos X* a partir del *efecto Compton*. Permitiendo así que el funcionamiento de la máquina de rayos X, aunque es un poco antigua, trabaje perfectamente, aportando al estudio de la fenomenología alrededor de los mismos.

Finalmente, uno de los aspectos fundamentales en las reflexiones abordadas de este proyecto es la importancia del experimento para la comprensión de los fenómenos corpusculares, utilizando la máquina de *rayos X*, pretendiendo así aportar a la fenomenología alrededor de la interacción de la radiación con la materia a partir del *efecto Compton*, realizando además una caracterización de cómo se concibe el experimento dentro de la enseñanza y las perspectivas a la hora de encontrar explicaciones en la física moderna, por ejemplo diseñando actividades a partir de la enseñanza-aprendizaje en la formación docente a través de las diferentes herramientas que tenemos en el laboratorio del DFI, es decir, no solo experimentalmente sino también de manera conceptual para la física moderna lo que nos lleva a plantear los siguientes objetivos.

Objetivos

General:

Diseñar una estrategia teórico-experimental alrededor de la dispersión de los *rayos X*, en la asignatura laboratorio de física moderna para el estudio de la interacción radiación-materia por medio del efecto Compton en el DFI de la UPN.

Específicos:

- I. Identificar los conceptos importantes de la física moderna, que están inmersos en el experimento de difracción de *rayos X* y en la caracterización de materiales por medio del *efecto Compton*.
- II. Determinar las condiciones de funcionamiento de la máquina de *rayos X* (Phywe), para el desarrollo de la estrategia teórico experimental propuesta.
- III. Proponer actividades teórico-experimentales que permitan comprender cómo a través de la dispersión de los *rayos X* (*efecto Compton*) se pueden obtener características físicas de algunos materiales.
- IV. Discutir los alcances que se pretenden con el diseño de la estrategia teórico-experimental para la enseñanza-aprendizaje de conceptos relacionados con la dispersión de *rayos X* en docentes en formación.

Antecedentes

Al relacionar proyectos elaborados a raíz de la interacción de la radiación con la materia y la *dispersión Compton* a partir de *rayos X* orientado al componente de física moderna, Bautista y Osorio (2013) efectuaron un gran aporte con la construcción de un equipo experimental para el estudio de la radiación asociada a un cuerpo negro, describiendo y explicando el análisis del fenómeno de radiación térmica por medio de actividades experimentales como herramientas de aula, logrando así aprovechar y complementar el desarrollo teórico en torno a la radiación de cuerpo negro.

Otro aspecto importante lo confiere Walteros (2016) al realizar actividades experimentales, para así sembrar en los estudiantes una imagen que elimine los típicos métodos de exposición mediante enunciados y ecuaciones. Gracias al desarrollo del diseño de estas actividades

experimentales, se genera un acercamiento donde se puede dialogar la noción de estado y el principio de superposición de la mecánica cuántica por medio de elementos de fácil acceso. Realizó la extrapolación de la simbología que realizó Feynmann todo esto relacionado con base al experimento que genero Stern-Gerlach, logrando descubrir algunos de los efectos de la descomposición de un haz, generando la explicación de acuerdo con la noción de estado y el principio de superposición todo esto contextualizado mediante la mecánica cuántica.

Teniendo en cuenta que es necesario conocer la historia que remite conceptos básicos para la ejecución y planeación de proyectos experimentales, Moreno (2017) se dirige a los trabajos prácticos de William Herschel donde por medio de la elaboración y diseño de actividades experimentales observo que existe un lugar por debajo del infrarrojo en el espectro visible que no es perceptible siendo apreciable por medio de la temperatura permitiendo dar una identidad entre luz y calor mediante las características de la refrangibilidad, reflexión, refracción y dispersión, ayudando a la evolución de los marcos explicativos para los estudiantes , y tomando valor los estudios realizados anteriormente.

Con relación al estudio mencionado anteriormente, yace la necesidad de mirar la ciencia para la construcción del conocimiento, Goyes (2018) establece a la teoría de la física moderna, siendo esta un campo de saberes que pueden ser ampliamente estudiados y abordados desde diferentes perspectivas realizando un estudio sobre el corte histórico donde se expone el caso de la teoría de radiación térmica teniendo en cuenta la idea de Max Planck, asegurando así que la historia forma parte de un gran recurso para la enseñanza de los estudiantes.

Capítulo 2

2. La física moderna y la actividad experimental

2.1 Actividad experimental, algunos aspectos históricos de la física moderna para la enseñanza de las ciencias.

Para hablar de aspectos históricos se debe considerar que la epistemología actual en el ámbito de las ciencias presenta argumentos que apoyan los relatos en orden cronológico o sesgado de acuerdo con la manera en cómo se percibe la historia que se quiere transmitir, pero también reconoce la imposibilidad de una objetividad absoluta en la historia.

De esta manera se debe tener en cuenta que la construcción de un relato histórico implica decisiones que dependen del narrador respecto de los factores relevantes para los acontecimientos que desea presentar. *“Tales decisiones se encuentran fuertemente condicionadas por la perspectiva específica del historiador”* (Lombardi, 1997, p346).

En este sentido, el presente capítulo se centra en el cambio de paradigma que se dio alrededor de las actividades experimentales en la historia de las ciencias en las acciones que realizaban los científicos a finales del siglo XIX, en ese entonces se pensaba que la física *“clásica”* explicaba la totalidad de los fenómenos naturales, pero más adelante aparecieron observaciones donde se evidencio que aún faltaban muchas cosas por descubrir y comprender, por ejemplo, los fenómenos relacionados con la luz.

Además, suelen citarse los comentarios de Lord Kelvin, quien por esos tiempos afirmaba que *“todo lo que restaba por hacer eran mediciones más precisas, que agregaran otros decimales a las constantes universales ya medidas, y disipar solo dos temas, que traían cierta oscuridad al conjunto armonioso de los conocimientos físicos”* (Gonzales & Muñoz, 2007, p296).

De manera que, se evidenciaba el trabajo de laboratorio en el siglo XIX se basaba en rectificar y perfeccionar medidas ya obtenidas, como se puede observar en la ilustración 1,” *La idea predominante entre los educadores de ciencias es que la experiencia práctica es la esencia del aprendizaje científico. Sin embargo, si tenemos en cuenta la importancia que se concede a la experiencia en el laboratorio, vemos que se han realizado pocos análisis sistemáticos de los logros que se pueden obtener en el laboratorio de ciencia*” (Hodson, 1994, p299).



Ilustración 1: El laboratorio de física de la Universidad Johns Hopkins, en Baltimore, hacia 1880. En los nuevos laboratorios universitarios de la segunda mitad del siglo XIX, el científico en ciernes aprendía a conjugar el conocimiento mental y el sensorial. (Sibum, 2017, p48).

Así pues, con los descubrimientos de algunos experimentos en la última década del siglo XIX fue necesario ir más allá de la física conocida en ese momento. Los *rayos X*, hacen parte de estos hallazgos, más tarde reconocidos como un tipo de radiación electromagnética, aunque con una longitud de onda menor (una frecuencia y poder de penetración mayor) que el espectro visible o la radiación ultravioleta, se descubrieron en 1895. Este descubrimiento tendrá más adelante, una importancia en el comienzo de una nueva ciencia (Benavides, 1996).

Por lo tanto, fue así como Röntgen, trabajando entonces solo lo habitual y realizando mediciones con los tubos de *rayos catódicos*, descubrió los *rayos X* fenómeno asociado con la radiación, permitiendo entonces abrir la puerta a algo nuevo, en los fenómenos relacionados a la interacción de la radiación con la materia, más adelante para lograr comprender este fenómeno

Max Planck realiza un descubrimiento que lo cambio todo y daría una nueva perspectiva de la física.

El físico Alemán Max Planck, cuando ingresó a la universidad a sus 17 años, expuso sus intenciones al estudiar física con el jefe del departamento, la respuesta que recibió no fue muy reconfortante "La Física es una rama del conocimiento que casi está completa", dijo el profesor. todos los descubrimientos importantes ya se han hecho, ya casi no vale la pena dedicarse a la Física.

Aun así, estas palabras no desmotivaron a Planck, él quería brillar y ser época en la ciencia, por eso, se dedica a estudiar termodinámica a leer publicaciones originales de dos profesores, Kirchhoff y Von Helmholtz, aunque era un físico arraigado a las ideas de la física clásica, su descubrimiento representó la pauta para el nacimiento de una nueva física (Velázquez, 1900).

Algo de historia para entender los hechos que llevaron a Planck a los resultados que revolucionaron la manera de concebir la física moderna, todo empezó en 1859 cuando Gustav Kirchhoff, físico alemán de la época presentó un trabajo que trataba de la emisión y absorción de calor y luz. Demostrando como consecuencia de sus investigaciones a la Academia de Berlín acerca de *"las propiedades de la luz que nos llega del sol, que, si los rayos de luz de frecuencia fija inciden sobre un cuerpo, éste absorbe parte del haz incidente. La fracción absorbida por el cuerpo se llama "poder de absorción"*" (Santos, & Sánchez, 2015).

Por otra parte, en 1865, John Tyndall llevó a cabo una serie de mediciones sobre la emisión total de un alambre de platino a distintas temperaturas al hacer pasar una corriente eléctrica. Donde en 1879 concluyó que la energía total de la radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta T (T^4).

Fue Ludwig Boltzmann quien presentó en 1884 una justificación teórica del resultado de quien fue su maestro el profesor Joseph Stefan. Para lo cual Ludwig Boltzmann hizo la demostración con ayuda solamente de razonamientos termodinámicos. A este resultado se le llama la Ley de Stefan-Boltzmann. La energía a la que se refiere esta ley es la energía total que emite el cuerpo

En junio de 1900 Lord Rayleigh presentó un trabajo, en el que aplicaba el teorema de equipartición de la energía de la teoría cinética a la radiación electromagnética. Argumentando lo siguiente: calculó el número de ondas que había en un intervalo muy pequeño de frecuencias y, de acuerdo con el teorema de la equipartición, a cada una de ellas le asignó la misma energía. Cuando se comparan los resultados experimentales, resulta que la ley de Rayleigh concuerda en la región de muy bajas frecuencias, pero la Ley de Wien falla. Y para altas frecuencias, la ley de Rayleigh es la que falla (Santos, & Sánchez, 2015).

Planck, para finalizar su investigación utilizó el teorema de H de Boltzmann, probando que la entropía es el estado más probable que puede explicar cómo se da la distribución de la energía en los sistemas. Para concluir la investigación Planck asume la energía no cómo continua sino discreta, permitiendo el desarrollo de la física moderna siendo esta, la rama de la física que estudia el comportamiento de las partículas teniendo en cuenta su *dualidad onda-corpúsculo*. Esta dualidad es el principio fundamental de la *teoría cuántica* (Kuhn, 1980).

Para concluir, tenemos que el trabajo de Max Planck consiste en describir detalladamente el comportamiento de la energía en un sistema, por medio de el caso de la radiación térmica. Sobresaliendo por la relación entre el segundo principio de la termodinámica y los procesos reversibles e irreversibles; Además, deja como resultado la cuantización de la energía, concepción fundamental en la teoría de la física moderna (Ibáñez, 1990).

En resumen, el físico alemán Max Planck fue quien estableció las bases de esta teoría al postular que la materia sólo puede emitir o absorber energía en pequeñas unidades discretas llamadas *cuantos*. En octubre de 1900, Planck propuso una fórmula de interpolación que concordaba con los datos experimentales, pero que según él carecía de sentido físico. En diciembre de 1900 Planck incluyó un nuevo elemento en el análisis del problema: la aplicación del principio de Boltzmann a la interacción entre energía y materia. Como resultado de esta incursión Planck derivó una fórmula en la que aparecía una nueva constante (h), la cual expresaba el carácter discontinuo de esa interacción (Mayorga, 2002).

2.2. Espectro electromagnético

En la actualidad es más frecuente relacionarnos con los fenómenos y los términos de radiación, por medio de los aparatos electrónicos que nos facilitan la vida diariamente, por ejemplo: televisor, radio, teléfonos celulares, computadores, estufas, bombillas, etc. Puesto que estos están relacionados con algunos fenómenos de radiación, como, térmica, electromagnética, lumínica entre otras, y tienen ciertas particularidades, estos fenómenos se rigen bajo los mismos principios físicos. A continuación, se selecciona el espectro electromagnético para describirlo y caracterizar la radiación que resulta pertinente para el presente trabajo.

El espectro está constituido por la radiación electromagnética que comprende las ondas de radio, microondas, luz visible, luz ultravioleta, *rayos X* y rayos gamma como se observa en la ilustración 2, estas ondas son esencialmente caracterizadas por su energía, la cual varía inversamente con su longitud de onda. Pueden interpretarse como paquetes de energía (quantum) denominados fotones los cuales van aumentando en energía desde las ondas de radio hasta llegar a los *rayos X* y *Gamma*, teniendo así la energía necesaria de expulsar un electrón de su órbita en un átomo (Ordóñez, 2012 p18).

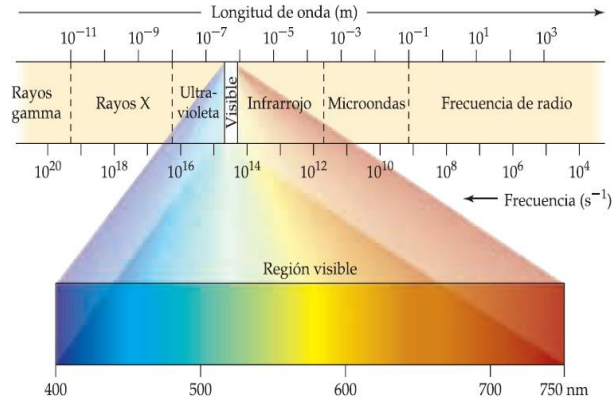


Ilustración 2: Espectro electromagnético (Brown, 2009).

Una manera de asemejar la estructura que conocemos en colores del espectro es observar el arco iris, es posible percibirlo gracias a un fenómeno óptico y meteorológico que consiste en la aparición en el cielo de un arco (en ocasiones, dos o más) de luz multicolor, originado por la descomposición de la luz solar en el espectro visible, la cual se produce por refracción, cuando los rayos del sol atraviesan pequeñas gotas de agua contenidas en la atmósfera terrestre (Belletti, Besio, & Godino, 2016). La imagen de una onda electromagnética como se observa en la ilustración 3, puede ser representada por las variaciones espaciales en las intensidades del campo eléctrico (\vec{E}) y el campo magnético (\vec{B}) (García, 2003).

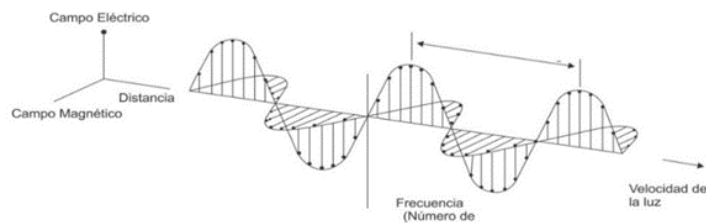


Ilustración 3: Representación de una onda electromagnética. fuente: (García, 2003).

La energía de las ondas electromagnéticas (OE), consiste en la distribución de las ondas, ordenadas en función de su energía. De mayor a menor energía (o de menor a mayor longitud de onda). En la *tabla 1* se observa la frecuencia, energía, medio de emisión y fuente de detección del espectro electromagnético, pero debemos tener en cuenta las siguientes características: los campos

\vec{E} y \vec{B} son perpendiculares entre sí y la dirección de propagación está dada por el vector $\vec{E} \times \vec{B}$. Se propagan en el vacío a una velocidad c , transportando energía y momento lineal. El momento lineal p por unidad de volumen de una onda electromagnética es el cociente entre la densidad de energía electromagnética y la velocidad c . Donde c es la cte. de velocidad en el vacío correspondiente a $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Una característica es su longitud de onda λ y frecuencia de oscilación ν , es el producto de su frecuencia por su longitud de onda es igual a su velocidad de propagación, es decir: $\lambda\nu = c$.

<i>Nombre</i>	<i>Rango de Longitud de onda (m)</i>	<i>Rango de Energías (J)</i>	<i>Fuente</i>	<i>Método de Detección</i>
<i>Rayos Gamma</i>	5×10^{-13}	4×10^{-13}	Radioisótopos	Contador Geiger, emulsiones fotográficas, contadores de cristal
<i>Rayos X</i>	1×10^{-11}	2×10^{-14}	Efecto Bremsstrahlung ⁵ , transiciones electrónicas para las capas atómicas cercanas al núcleo	Fotografía, cámara de ionización
<i>Ultravioleta</i>	5×10^{-9}	4×10^{-17}	Transiciones electrónicas	Fotografía, fluorescencia
<i>Visible</i>	4×10^{-7}	5×10^{-19}	Transiciones electrónicas en las capas atómicas exteriores	Ojo, fotografía, fotoceldas
<i>Infrarrojo</i>	7×10^{-7}	2.8×10^{-19}	Vibración y rotación de moléculas y átomos	Bolómetro, termopila, fotoconductor
<i>Hertzianas cortas, televisión, radar</i>	3.5×10^{-4}	5.7×10^{-22}	Circuito eléctrico oscilante	Resonancia eléctrica
<i>Radio</i>	4×10^{-1}	5×10^{-27}	Circuito eléctrico oscilante	Resonancia eléctrica

Tabla 1. Espectro electromagnético, mostrando el rango de longitud de onda, el rango de energía su respectiva fuente y método de detección, tomado y adaptado de (Cowan & Grah, 1975, p79).

⁵ Bremsstrahlung: Se traduce como radiación de desaceleración (del alemán Bremsung, desaceleración y Strahlung, radiación) (Cowan & Grah, 1975)

Para este trabajo se aborda en el espectro electromagnético, la sección correspondiente a los rayos X, los cuales están ubicados en el rango de alta energía y por medio de los cuales se generará la emisión de electrones mediante un ánodo de cobre (Cu) para realizar una aproximación a la comprensión de la interacción de la radiación con la materia y verificar los cambios de energía que ocurren en el sistema antes durante y después de la producción de rayos X y el posterior impacto con la diana.

2.3 Rayos X y sus características

Se encuentran contenidos en el espectro electromagnético de longitud de onda menor a 1.0 \AA . Estos muestran el comportamiento típico de ondas en cuanto a: polarización, interferencia y difracción que se encuentran en la luz y en el resto de la radiación electromagnética. Los rayos X se producen en el blanco de un tubo de rayos X, como se observa en la *ilustración 4*, cuando un haz de electrones energéticos acelerados a través de una diferencia de potencial de miles de volts es frenado al chocar con el blanco. De acuerdo con la física clásica, la desaceleración de los electrones, puestos en reposo en el material del blanco, resulta en la emisión de un espectro continuo de radiación electromagnética (RESNICK, 1976, p176).

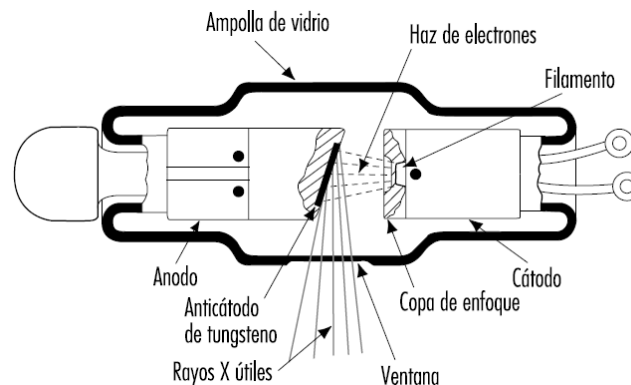


Ilustración 4: Producción de rayos x los electrones son emitidos termodinámicamente del filamento calentado del cátodo son acelerados al ánodo por un potencial aplicado v. al chocar los electrones contra el ánodo se emiten rayos x. (Cherry, 1998, p48.14).

Aunque la forma total del espectro continuo de distribución de *rayos X* depende del material del blanco, así como del potencial v de aceleración del electrón, el valor de λ_{min} depende únicamente de v , siendo el mismo para todos los materiales del blanco. Esto se puede explicar fácilmente considerando a los *rayos X* como fotones, como se muestra en la *ilustración 5* donde un electrón con una energía cinética inicial K se desacelera durante un encuentro con un núcleo del blanco, y la energía que pierde aparece en forma de radiación como un fotón de *rayos X* (Reyes, 1962).

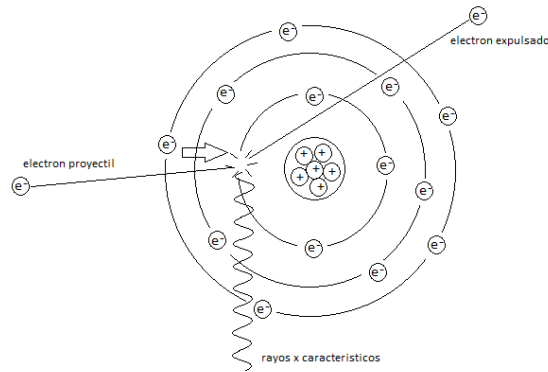


Ilustración 5: Proceso de Bremsstrahlung causante de la producción de rayos X en un espectro continuo tomado de ("Radiología: Introducción a la Radiología," 2012)

Cuando el electrón interactúa con el núcleo del blanco, transfiere cantidad de movimiento al núcleo. La desaceleración del electrón produce emisión fotónica. Obteniendo así el blanco del núcleo una energía que se adquiere durante esta colisión. Sabiendo que K' es la energía cinética del electrón después del encuentro y partiendo de la teoría de Albert Einstein en 1905 por medio del efecto fotoeléctrico propuso que la energía radiante existía en paquetes concentrados, más adelante denominados fotones. La energía E de un solo fotón está dada por:

$$E = h\nu \qquad \text{Ecuación (1)}$$

Donde ν es la frecuencia de la radiación, E la energía de un fotón y h la constante de Planck, el valor de esta constante en el sistema internacional es, aproximadamente 6.63×10^{-34} J·s,

permitiendo la relación entre la cantidad de energía y de frecuencia asociadas a un cuanto o a una partícula elemental.

2.4 La radiación y su interacción con la materia

Para exponer los principales fenómenos de interacción entre las radiaciones, tanto corpusculares como electromagnéticas en la materia, es pertinente hablar de las radiaciones emitidas por los núcleos atómicos que interactúan con otros núcleos o con el medio (Ossorio, 1973, p47), produciendo en ellos una serie de modificaciones como variación en la energía, o un eventual cambio en su dirección de desplazamiento. El término radiación se aplica a la emisión y propagación de la energía a través del espacio o de un medio material. También puede definirse como la propagación a través del espacio de energía ondulatoria o partículas (Cherry, 1998,.p2).

La interacción es el proceso en el cual los electrones o núcleos de un átomo colisionan con otro quedando así cargado o no después de la colisión, esta colisión puede ser elástica o inelástica, donde se transmite energía, quedando las partículas ionizadas o no ionizadas. A continuación, en *la ilustración 6* vemos la distribución de la radiación para las interacciones a nivel atómico y nuclear (Knoll, 1989).

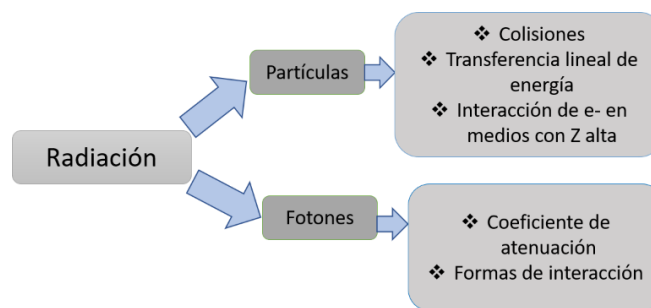


Ilustración 6: Distribución de la radiación y su interacción elaboración propia

En cada colisión, la radiación, por una parte, cede energía a la materia y, por otra parte, esta sufre modificaciones al absorber energía. Las colisiones pueden ocurrir con los núcleos atómicos, o con los electrones orbitales, siendo diferentes en ambos casos los fenómenos derivados de la interacción. La *ilustración 7* muestra cómo se produce la interacción de la radiación con la materia y dependiendo esta interacción de la energía de las radiaciones y de la naturaleza de la materia, así procedemos a revisar los aspectos físicos de la radiación ionizante.

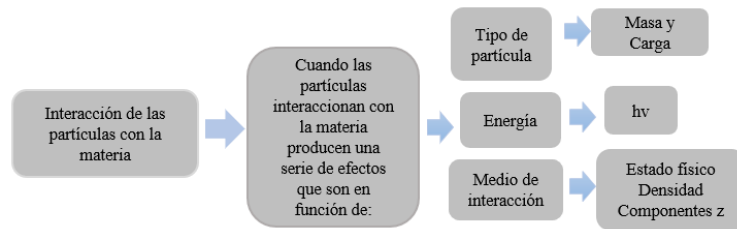


Ilustración 7: Interacción de partículas con la materia. elaboración propia.

2.5 Aspectos físicos de la radiación

Los fotones fueron mencionados por primera vez en la antigua Grecia, en la actualidad se conoce que estas partículas son las encargadas de transportar energía electromagnética (Bushong, 1982). Las diferencias entre un fotón de radiación X y un fotón de luz visible es que el primero posee una frecuencia muy superior y una longitud de onda más corta, demostrando así con estas diferencias el modo en que los fotones interactúan con la materia (Bushong, 1982).

Siempre que se habla de radiaciones debemos relacionarlas directamente con una energía que se transmite por el espacio. Esta energía interactúa con la materia modificándola respecto a su estado inicial, rompe o altera las estructuras originales (Tobergte & Curtis, 2013). En la *ilustración*

8 se aprecia la explicación de la radiación y su naturaleza dual, donde puede ser mediante radiación electromagnética o radiaciones corpusculares.

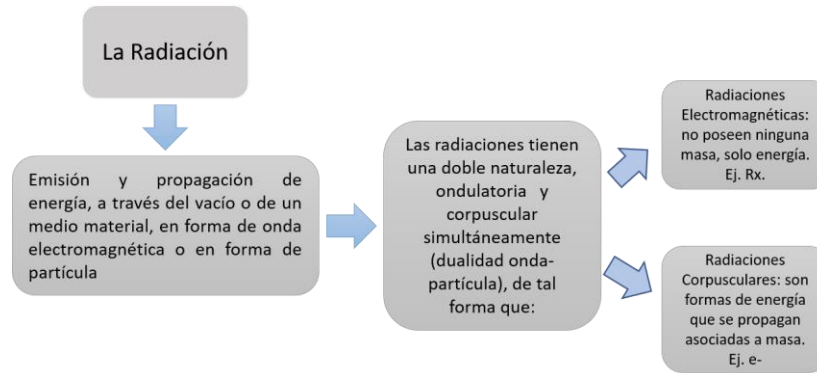


Ilustración 8 :Explicación de la radiación y su naturaleza dual. Elaboración propia.

De tal forma que, si la radiación transporta energía suficiente como para provocar ionización en el medio que atraviesa (extrayendo los electrones de sus estados ligados al átomo), se dice que es una radiación ionizante (Cherry, 1998 p4). Mientras que en caso contrario se hablaría de radiación no ionizante. El carácter ionizante o no ionizante de la radiación es independiente de su naturaleza corpuscular u ondulatoria.

El potencial de ionización o energía de ionización es la mínima energía que hay que suministrar a un átomo en su estado fundamental, para que ocurra la expulsión de un electrón de este átomo. Estas radiaciones al incidir sobre algún material pierden parte de la energía, separando electrones de los átomos sobre los que inciden transformándose en iones (OMS, 1959, p3). En este sentido, para comprender lo que ocurre de manera corpuscular entre esta interacción se presenta a continuación lo que ocurre con el *efecto Compton*.

Capítulo 3

3 El efecto Compton

En 1919 Albert Einstein llegó a la conclusión de que un fotón de energía E se desplaza en una misma dirección y tiene una cantidad de movimiento igual a $E/c = hf/c$. En 1923 Arthur Holly Compton (1892-1962) y Peter Debye (1884-1966), cada uno por su lado, desarrollaron aún más la idea de la cantidad de movimiento del fotón de Einstein (Serway & Jewett, 2009).

Para entender la naturaleza corpuscular de la radiación en 1923 A.H. Compton observó un nuevo fenómeno que vino a ser la confirmación experimental de la interacción radiación-materia, cuando hizo que un haz de *rayos X* de longitud de onda λ bien definida, incidiera sobre un blanco de grafito como se muestra en la *ilustración 9*, midió la intensidad de los *rayos X* para varios ángulos de dispersión (Robley, 1955, p11).

Se observa que, aunque el haz incidente consta esencialmente de una sola longitud de onda λ , los *rayos X* dispersos tienen su máxima intensidad para dos longitudes de onda λ , una de ellas es la misma que la longitud de onda incidente, la otra, λ' , es mayor por una cantidad $\Delta\lambda$. Este es llamado desplazamiento Compton $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$, que varía con el ángulo de los *rayos X* dispersos (RESNICK, 1976, p164).

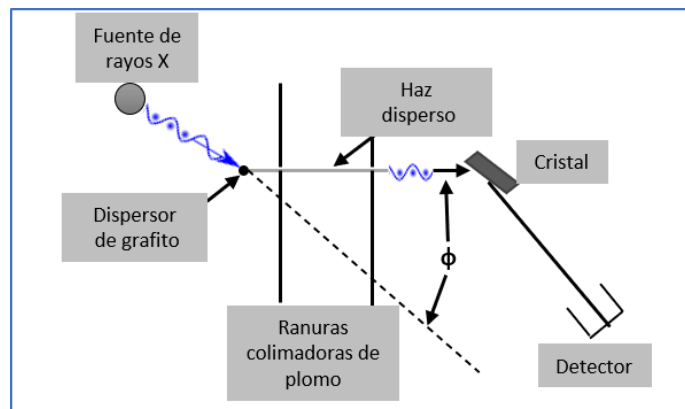


Ilustración 9: Arreglo experimental de Compton, rayos x monocromáticos de longitud λ llegan a un dispersor de grafito adaptado de (RESNICK, 1976, p164).

El esquema para ver el experimento realizado por *Compton* se encuentra en la *ilustración 10*, obtuvieron los siguientes resultados después de hacer incidir un haz de *rayos X* monocromáticos (radiación electromagnética de gran energía y una sola frecuencia) sobre un blanco de grafito era dispersado por él a diferentes ángulos con respecto a su dirección incidente.

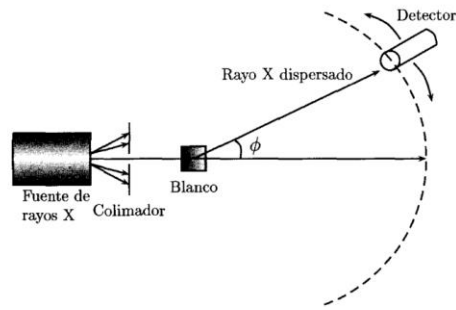


Ilustración 10: Esquema del dispositivo experimental para observar el efecto Compton (García, 2003).

Del experimento se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) A pesar de que el haz incidente era monocromático, el haz dispersado presenta dos longitudes de onda: la original (λ_0) y otra mayor (λ) en la cantidad $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, llamado *corrimiento Compton*.
- b) El valor del *corrimiento de Compton*, $\Delta\lambda$, crece hasta un máximo para luego disminuir a medida que el ángulo de dispersión aumenta; es decir, la longitud de onda de la onda dispersada depende del ángulo de dispersión. Este resultado se cumple para cualquier material dispersor. Esto es, la longitud de la onda dispersada depende del material utilizado como blanco. Los resultados se representan en la siguiente *ilustración 11* (Cheston, 1954).

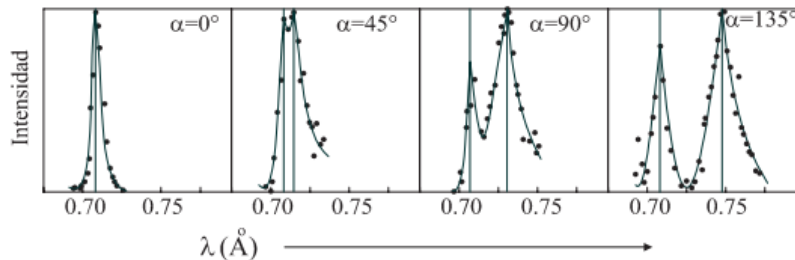


Ilustración 11: Corrimiento de Compton para diferentes ángulos de dispersión adaptado de (RESNICK, 1976, p 165).

Como la longitud de onda del fotón dispersado no depende del material utilizado como blanco, Compton supuso que la colisión tenía lugar entre un fotón y un solo electrón libre en reposo. Esta suposición es aceptable porque la energía de un fotón de *rayos X* es bastante mayor que la energía que mantiene unido un electrón al material.

Consideremos una colisión entre un fotón y un electrón libre inicialmente en reposo. Nuestro objetivo es obtener una expresión que permita calcular teóricamente el corrimiento de *Compton* y así comprobar si la hipótesis cuántica de la radiación electromagnética es correcta, al comparar lo que predice la teoría con los resultados experimentales, como se observó en la *ilustración 11*

Ahora bien, para entender el esquema de colisión en la *ilustración 12*, desde el punto de vista de la teoría corpuscular de la radiación electromagnética, los *rayos X* son fotones de energía $h\nu$ y cantidad de movimiento $h\nu / c$.(Garcia, 2003).

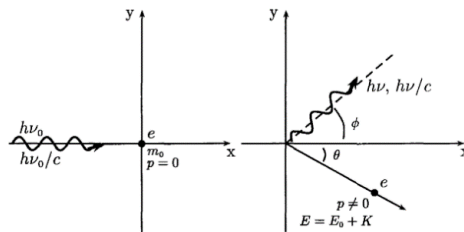


Ilustración 12: Esquema de la colisión entre un fotón y un electrón (Garcia,2003).

De esta manera, al incidir los fotones sobre el material blanco se realizan colisiones entre estos y los electrones. Como consecuencia el fotón cede parte de su energía y emerge con una energía menor, o sea, una longitud de onda mayor. Como la longitud de onda del fotón dispersado no depende del material utilizado como blanco, *Compton* supuso que la colisión tenía lugar entre un fotón y un solo electrón libre en reposo. Esta suposición es aceptable porque la energía de un fotón de *rayos X* es considerablemente mayor que la energía que mantiene unido un electrón al material, explicando así la colisión entre un Fotón y un electrón (Compton & Allison, 1965).

3.1 Formulación matemática

Analiquemos cuantitativamente, la colisión de un fotón contra un electrón. Para considerar la colisión de un electrón y un fotón, se supone que el electrón se encuentra al principio en reposo y es esencialmente libre como se observó anteriormente con la ilustración 14, donde se describió de manera detallada lo que sucede al colisionar. En este sentido aplicando las leyes de la conservación de masa-energía y la cantidad de movimiento lineal en esta colisión tenemos que:

Por la ley de la conservación de la masa-energía tenemos que:

$$hv = hv' + (m - m_0)c^2 \quad \text{Ecuación (2)}$$

donde hv es la energía del fotón incidente, hv' energía del fotón dispersado y $(m - m_0)c^2$ es la energía cinética adquirida por el electrón rechazado inicialmente en reposo.

Con

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Y

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad ; \quad v' = \frac{c}{\lambda'}$$

Tenemos:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right) \quad \text{Ecuación (3)}$$

Aplicando la ley de la conservación de la cantidad de movimiento lineal. La cantidad de movimiento lineal de un fotón está dada por:

$$p = \frac{E}{c}$$

Ahora usando

$$E = h\nu$$

obtenemos

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Donde ν es la frecuencia de la radiación, E la energía de un fotón y h la constante de Planck, de acuerdo con la *ilustración 13*, donde hay dos componentes de la cantidad de movimiento en el plano del fotón dispersado y el electrón rechazado. La conservación de la componente en x de la cantidad de movimiento lineal es:

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos\phi \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \cos\theta \right) \quad \text{Ecuación (4)}$$

La conservación de la componente en y es:

$$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin\phi \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \sin\theta \right) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Reduciendo las ecuaciones 3,4 y 5 tenemos:

$$\Delta\lambda (= \lambda' - \lambda) = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\phi) \quad \text{Ecuación (6)}$$

Finalmente se observa que $\Delta\lambda$, desplazamiento de Compton, depende únicamente del ángulo de dispersión ϕ y no de la longitud de onda inicial λ ⁶. El cambio en la longitud de onda es independiente de la longitud de onda incidente, la constante h/m_0c , llamada longitud de onda Compton, tiene el valor de 0.0243 \AA , la ecuación 6 predice los desplazamiento de Compton observados experimentalmente en la ilustración 12 (RESNICK, 1976, p166-167).

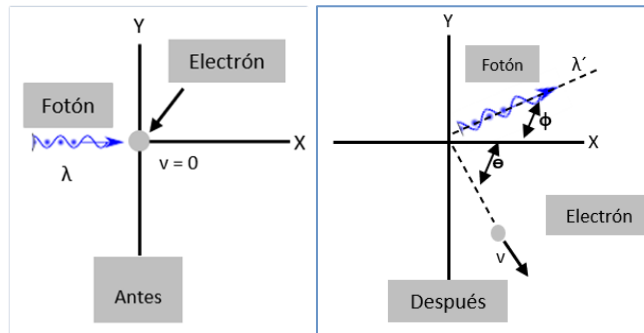


Ilustración 13: Un fotón de longitud de onda λ incide sobre un electrón libre en reposo. Adaptado de (RESNICK, 1976)

Por consiguiente, para comprender la fenomenología alrededor de la interacción de la radiación con la materia se propone el diseño de 3 actividades teórico-experimentales para abarcar el contenido que se consideró pertinente, para aproximar a los estudiantes del DFI a fenómenos asociados con la interacción radiación materia por medio de la caracterización de los rayos X a través del uso de la máquina que se encuentra en el laboratorio de física de la UPN, con la finalidad de dar respuesta a algunos interrogantes propuestos en cada una de las actividades propuestas en el diseño de la experiencia, rescatando y resaltando el funcionamiento de la máquina del DFI que estaba sin utilidad, a continuación, se procede a describirla y así proponer actividades alrededor de las opciones que el aparato nos brinda.

⁶ Para entender los pasos seguidos ver el desarrollo matemático en anexo 1 (SEMAT, 1957 p 543).

Capítulo 4

4 Máquina de rayos X de la UPN

4.1 Descripción y caracterización de la máquina de rayos X del departamento de física de la UPN



Ilustración 14: Máquina de rayos X del DFI de la UPN

El DFI cuenta con distintas máquinas para la reconstrucción de las experiencias alrededor de la física moderna, entre ellas la *máquina de rayos X* cuya deficiencia radica en el poco uso que se le ha dado, así como el desconocimiento en las experiencias que se pueden realizar con la misma. De este modo en este apartado se resaltarán las características de la *máquina de rayos X*, así como el funcionamiento y disposición para masificar las experiencias en el LFM.

La unidad de rayos X se controla remotamente con un PC a través de una salida serie RS232. Todos los pasos de esta práctica se realizarán usando el software de medida *measure* de Phywe. El manejo de este software es bastante intuitivo, pero se incluye un pequeño manual de instrucciones en el anexo 3 en la guía de trabajo.

La *máquina de rayos X*, serie 09058.99 pertenece a la casa Phywe empresa alemana encargada de crear material de laboratorio en áreas de la ciencia; lleva en el mercado más de 95 años

brindando la fabricación de equipos y software de operación para los diferentes productos que tienen en el mercado. El software *measure* versión 2.5 de la máquina de rayos X del DFI, puede realizar varias experiencias relacionadas con la interacción de la radiación con la materia como espectros, difracción, efecto fotoeléctrico, entre otros, recordando que para el presente trabajo se abordara la *dispersión Compton* a partir de *los rayos X*.

4.2 Funcionamiento de la máquina de rayos X

La unidad de *rayos X* ha sido específicamente diseñada para el desarrollo de actividades relacionadas con la interacción radiación materia como, por ejemplo: caracterización de cristales, verificar longitudes de onda dependiendo de la variación de la energía, entre otras. Además, se ha encontrado una importante aplicación en la práctica para la enseñanza-aprendizaje en las universidades. Además de su aplicación en la enseñanza de la Física, también, es excelente para su uso en tecnología médica y disciplinas técnicas relacionadas.

Adicionalmente la maquina cuenta en su estructura con un detector, un tubo de cobre donde se emiten los *rayos X* finalmente permite obtener los datos de las configuraciones iniciales por medio del software, los parámetros de operación y control pueden configurarse manualmente o con el programa *measure* 2.5. A continuación se describen los parámetros de funcionamiento.

4.3 Parámetros de funcionamiento

La máquina de *rayos X*, opera de manera manual o mediante el software *measure* 2.5, de estas dos maneras se realizan las actividades experimentales, a continuación, se especifican las precauciones de seguridad, las partes, y parámetros para tener en cuenta:

4.3.1 Precauciones de seguridad

La máquina de *rayos X*, produce radiación de alta energía que se considera peligrosa para la salud de quienes estén en contacto con ella y solo debe ser operada después de leer detalladamente las precauciones de seguridad. La unidad de *rayos X* debe estar protegida de tal forma que no sea manipulada por personas no autorizadas, no debe mantenerse en uso por más tiempo de lo necesario, además ningún estudiante debe permanecer más tiempo del necesario manipulando la máquina.

Se debe tener en cuenta que, el tubo de *Cu* al estar encendido emite radiación ionizante la cual, es altamente energética e imperceptible al ojo humano, puesto que solo puede ser percibida a través de un detector o contador de *Geiger Müller*. Por ende, una mala manipulación de la máquina puede causar una sobre exposición a los *rayos X*, es importante considerar que la exposición a este tipo de radiación produce efectos negativos en nuestro organismo, como quemaduras, enrojecimiento de la piel, daño a la retina, vomito y una exposición mayor a los 1Sv^7 podría producir cáncer e incluso la muerte. (UNSCEAR, 1993 p5)

La unidad de *rayos X* dispone de un protocolo de seguridad en el cual; la puerta de vidrio que es movable de izquierda a derecha tiene un botón *push turn*, cuando la ventana no tenga el seguro el tubo de *rayos X* no prendera, si durante la ejecución de la maquina se abre la ventana inmediatamente el tubo se apaga por seguridad para no quedar expuesto a los *rayos X*.

⁷ Sievert: El sievert (Sv) es la unidad que mide la dosis de radiación.

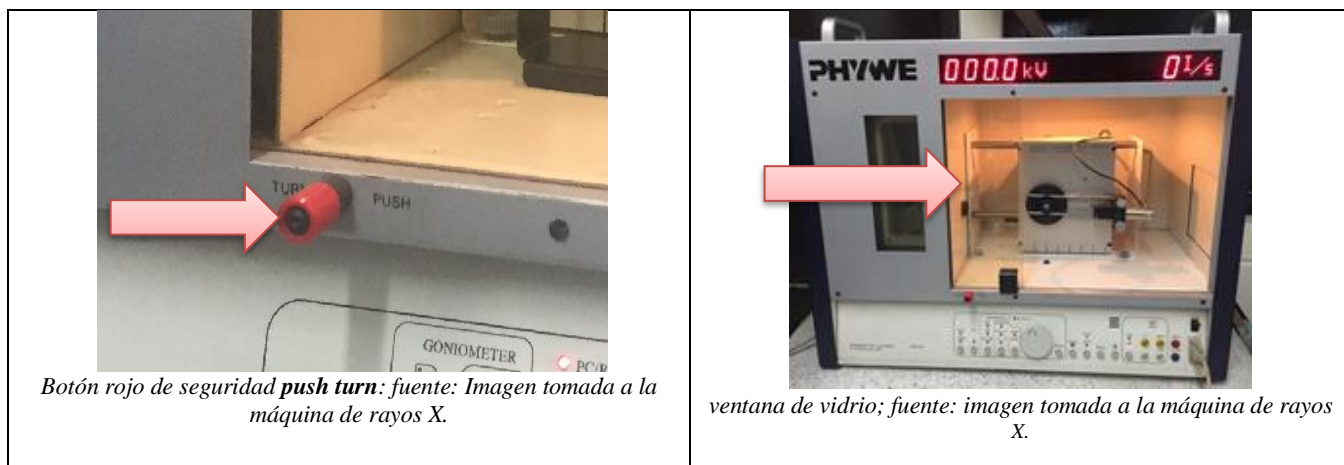


Tabla 2: ventana de vidrio máquina de rayos X

4.3.2 Equipo para operar la máquina de rayos X

La máquina de rayos X en su equipamiento está compuesta por: una unidad básica de rayos X, 35 kV, un Goniómetro⁸ para rayos X, una unidad 35 kV, 1 Tubo intercambiable de rayos X, de Cu, 1 Tubo contador tipo B, cristal de Fluoruro de Litio (LiF), Software para unidad de rayos X, 35-kV *measure* versión 2.5 funciona con Windows XP o superior, necesita un procesador Pentium de 21 GB de RAM. El computador que se usó en el presente trabajo es marca Dell con procesador Pentium 2 de 2 GB de memoria RAM. Adicional, la máquina de rayos X cuenta con cable de datos para PC, plug/socket de nueve polos, absorbedores de Al, Cu, Zn, Sn, Ni, una lámina de aluminio, cinco diafragmas de 1, 2 y 5 mm, lamina de PMMA⁹ para *efecto Compton* Tabla # 3.

⁸ Goniómetro: Escala ideada para medir el ángulo entre los rayos incidente y refractado en el análisis de difracción de rayos X

⁹ PMMA: Polimetilmetacrilato: es uno de los plásticos de ingeniería. La placa de acrílico se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y la presentación más frecuente que se encuentra en la industria del plástico es en gránulos o en placa.

Instrumentos que componen el equipo

 <p>absorbedores</p>	 <p>Lamina de Aluminio</p>	 <p>Cristal LiF</p>
 <p>Lamina de PMMA</p>	 <p>Goniómetro para rayos x</p>	 <p>Diafragmas</p>

Tabla 3: Equipamiento físico de la máquina.

Capítulo 5

5 El experimento alrededor de los rayos X

5.1 Experimentación en física moderna, contexto actual e importancia en el departamento

La teoría relacionada con la interacción de la radiación con la materia es un eje de la física moderna que puede ser abordada bajo el *efecto Compton*. Aunque en la literatura se encuentra poco material acerca de la descripción de la actividad experimental alrededor de estos fenómenos que dieron paso a una nueva ventana para la comprensión de la física moderna, “*de este modo es importante entender rol del laboratorio en la enseñanza de las ciencias*” (Rodrigo, 2004, p 7). “*Se dice que para sustentar una teoría primero se debe demostrar*” (PANEQUE, 1998, p15).

“Los que vivimos en pleno siglo XXI, necesitamos aprender cómo identificar y resolver problemas, cómo utilizar procesos de pensamiento del más alto orden, adaptarnos a los cambios vertiginosos de la ciencia, la cultura y la sociedad, donde el espacio destinado a la acumulación del conocimiento debe ser reemplazado por el pensamiento crítico, la conducta valorativa y la capacidad de planificar, ejecutar y controlar el propio conocimiento” (Valdés et al., 2016,p170).

En este sentido en el DFI se abordan los fenómenos asociados a la interacción radiación materia a la luz del efecto fotoeléctrico, la relación entre la carga y la masa del electrón, y en este caso en particular se propone se realice también a través de la *dispersión Compton*.

Teniendo como objetivo lo mencionado anteriormente debemos primero estudiar la fenomenología alrededor de esta interacción desde el *efecto Compton*, para poder pensar en la actividad experimental y verificar los datos teóricos que obtendremos con la máquina de rayos X. Para Feynman (1998 p2) “*el trabajo de laboratorio es esencial en el estudio de la física*”.

Ya que la fenomenología alrededor del *efecto Compton* permite a través de los *rayos X* dar cuenta de las propiedades corpusculares de la radiación electromagnética.

Los objetivos principales de los laboratorios introductorios de física moderna han evolucionado con el tiempo, gracias a la investigación sobre aprendizaje y tecnología para afianzar el conocimiento de los futuros docentes del DFI. Es por esto por lo que se realiza una propuesta de diseño de “actividades *basada en la enseñanza-aprendizaje de conceptos relacionados con la dispersión de rayos X*”.

5.2 Descripción de la población

La propuesta de este trabajo está enmarcada en la asignatura Laboratorio de Física Moderna (LFM) en el DFI, teniendo como objetivo principal la experimentación y formalización de conceptos mediante la fenomenología que está detrás de estos. Donde se abarcan los fenómenos relacionados con la física a finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX. Para estudiantes de quinto (5) semestre, en un promedio de edades entre los 19 a 26 años. Se sugiere que los estudiantes participantes tengan conocimientos alrededor de cálculo diferencial, integral, electromagnetismo, mecánica clásica, vectorial. Siendo importantes estas asignaturas como requisito previo para inscribir LFM; De la misma manera, al encontrarse en el ciclo de fundamentación del proyecto curricular en su componente físico tienen conocimientos en relación con la interpretación de fenómenos, permitiendo ser más descriptivos al momento de desarrollar actividades encaminadas a la enseñanza-aprendizaje en este caso en particular las actividades teórico-experimentales propuestas más adelante.

5.3 Diseño de una propuesta experimental, para la caracterización de la emisión de *rayos X* a través de la *dispersión Compton*.

Para este trabajo, la metodología estuvo orientada bajo el enfoque en la investigación de diseño o investigación basada en el diseño, esta es de orden cualitativo; tiene como objetivo analizar el contexto del aprendizaje mediante estrategias y herramientas de enseñanza, y además, aporta a la comprensión de las relaciones existentes entre teoría educativa, practica e instrumentos (recursos didácticos o herramientas conceptuales) creando así adaptaciones a nuevas circunstancias (Molina, 2011).

Esto es posible ya que, según Molina, *“este tipo de investigación tiene potencial para hacer progresar las teorías del aprendizaje y enseñanza en situaciones complejas, y conduce a conocimiento empíricamente fundamentado que es útil en la toma de decisiones instructivas dirigidas a promover y mejorar el aprendizaje”* en los estudiantes. Además, contribuye acerca del diseño instruccional, dando paso a la realización de otros diseños.

Por otro lado, en los estudios de diseño se persigue el desarrollo de una teoría, y adicionalmente algún otro producto del diseño, sin necesidad que respondan a una problemática existente. La finalidad y principal objetivo de este trabajo, es un producto particular ya sea teórico o de otra índole, así como información sobre el proceso de elaboración de la propuesta que aporte directrices para guiar futuros diseños en el área de enseñanza-aprendizaje por medio de la actividad teórico-experimental.

En cuanto al papel de los docentes e investigadores, en este caso los encargados de la investigación no son los agentes naturales de la situación en estudio sino agentes externos que realizan una inmersión en un contexto de aprendizaje-enseñanza; la participación de los docentes

es opcional, pudiendo ser nula, y son los investigadores los que toman la iniciativa en el proceso de investigación.

Donde, gran parte de experiencias para la comprensión requiere además de la teoría, el análisis de los acontecimientos encontrados en la experiencia, debido a que los experimentos en física moderna son medibles con instrumentos permitiendo corroborar resultados ya existentes, pero muchos de los fenómenos acá presentes no son observables a simple vista, necesitan de una *prueba de fe* para que se logre articular la teoría con la práctica (Valenzuela, 1991).

De esta manera, la ruta investigativa se orientó hacia la consolidación de una nueva visión al realizar el diseño de una propuesta experimental enmarcada en la enseñanza-aprendizaje bajo una perspectiva formadora (Colmenares, 2017).

Este tipo de investigación tiene potencial para hacer progresar las teorías del aprendizaje y enseñanza en situaciones complejas, y conduce al conocimiento empíricamente fundamentado que es útil en la toma de decisiones instructivas, dirigidas a promover y mejorar el aprendizaje de los estudiantes (Molina, 2011). En la *ilustración 14* se describe la estructura general de una investigación de diseño, donde se plantean los referentes teóricos, los diseños y modelos relativos a la investigación en estudio y finalmente se explica la manera en cómo mediante los ciclos iterativos la metodología de diseño permite replantear el hilo conductor de la investigación.

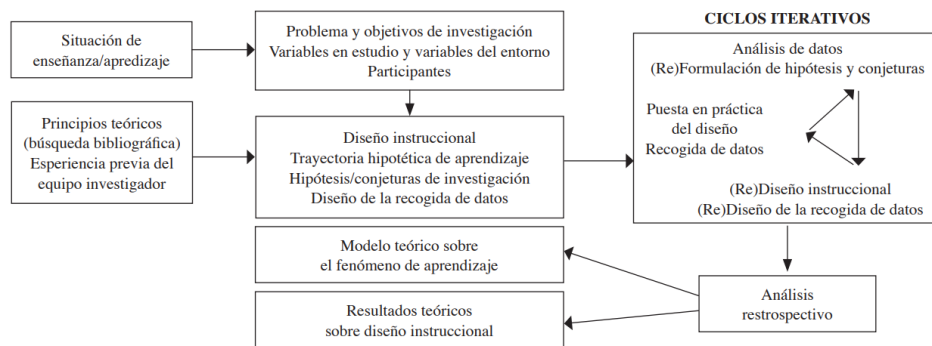


Ilustración 15: Estructura general de una investigación de diseño (Molina, 2011, p76).

Una de las principales particularidades de la metodología de diseño, es la caracterización de una situación de aprendizaje en toda su complejidad, de ahí que, la mayor parte no es conocida a priori, implicando así múltiples variables, de las cuales no pueden ser controladas, siendo necesario precisar cuáles de ellas serán objeto de estudio y cuáles se asumen como condiciones del entorno (Molina, 2011).

La multiplicidad de contextos en los que este tipo de estudios puede tener lugar junto con el tipo de personas involucradas son factores que ocasionan la existencia de diversos tipos de experimentos de diseño. Destacando en este caso en particular un experimento de enseñanza. Este, consiste en una secuencia de episodios en los que los participantes, es decir, los estudiantes del LFM son los investigadores encargados de observar mediante las actividades más adelante descritas en el diseño de la propuesta experimental.

Así mismo, el foco de atención de la investigación puede ser variado, en este caso, al realizar una propuesta de diseño para la comprensión de la interacción radiación materia, los investigadores son una parte importante para el desarrollo de esta, ya que con ellos se construye un conocimiento relacionado a la explicación alrededor del fenómeno en la caracterización y comportamiento de los *rayos X*, a través de las actividades propuestas y la ejecución de esta en el salón de clase. Esperando que el estudiante, el investigador-docente y los demás investigadores construyan conocimiento a través de las interacciones sobre las relaciones existentes entre estos mismos (Molina, 2011, p79).

Finalmente, el objetivo con este tipo de enfoque es realizar la elaboración de diseño de una propuesta experimental a través del aprendizaje, para los estudiantes del LFM en relación con la interacción radiación-materia mediante el uso de la máquina de *rayos X* a través del *efecto*

Compton, entendiendo esta aproximación a la caracterización de *rayos X* como un aprendizaje resultado de las actividades propuestas, en la ejecución del experimento de enseñanza.

Para ello se tendrán en cuenta las siguientes fases de trabajo donde se contará con tres partes para la elaboración del diseño de la propuesta, las cuales son: “*preparación del experimento, la experimentación para promover el aprendizaje y ejecución del análisis retrospectivo de los datos*” (Molina, 2011, p81). En este caso con las tres actividades planteadas, en un primer momento se realizan unas preguntas orientadoras e introductorias a los tres momentos que se pretenden con cada acción, seguido de esto el estudiante se interesara en la temática propuesta y así se promueve la ejecución de análisis de los conocimientos previos a la interacción finalmente con la máquina de rayos X.

La segunda tiene lugar en las intervenciones propuestas en el aula y las sucesivas interacciones de los estudiantes con la actividad teórico-experimental a través de los siguientes pasos: 1) diseño y formulación de hipótesis; 2) intervención en el aula y registro de datos; y 3) análisis de los datos, revisión y reformulación de hipótesis. Para el uso de la máquina de *rayos X*, estas formulaciones son importantes ya que se realiza un primer acercamiento al instrumento que sirve como herramienta para la comprensión de la caracterización de los *rayos X* y de la *dispersión Compton*.

Partiendo de la experiencia para la creación de esta metodología se desarrolló a manera de propuesta ya que no se cuenta con el tiempo y espacio para ejecutar una implementación pero la construcción de la esta se realiza en el marco de la investigación de diseño mediante un experimento de enseñanza, a continuación, se describen las diferentes acciones que se deben llevar a cabo para cada una de las fases, teniendo como soporte la consulta previa, y paralela, de literatura

relevante en relación con el problema de investigación, teniendo en cuenta lo anterior la propuesta se divide en objetivos de enseñanza, objetivos de aprendizaje actividades y resultados esperados.

5.3.1. Actividades para la comprensión del *efecto Compton* a través de los *rayos X* en el espectro electromagnético.

Se realiza el diseño de una propuesta experimental para la enseñanza-aprendizaje de conceptos relacionados con la dispersión de *rayos X*. A partir de la construcción de tres actividades donde empezaremos por estudiar el espectro electromagnético, seguido caracterizaremos los *rayos X*, para finalizar con la aproximación a la comprensión de la *dispersión Compton*.

Las actividades están pensadas en que se realicen una por sesión de trabajo, debido a que la complejidad de los temas hace que se deba ahondar un poco más en cada concepto tratado para el desarrollo de la estrategia.

Actividad 1: El espectro electromagnético

Para obtener conocimientos generales de la radiación electromagnética y describir el espectro de este, de acuerdo con el tipo de radiación al que pertenecen, se diseña una actividad donde se pretende identificar y categorizar el espectro electromagnético, la radiación y su clasificación según su longitud de onda, adicionalmente, inferir la relación entre electricidad, magnetismo y ondas electromagnéticas.

Objetivos de enseñanza	Actividad	Resultados esperados
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Caracterizar las ondas según su energía entendiéndola su relación con la longitud de onda. ➤ Identificar el espectro electromagnético de acuerdo con la radiación emitida en su propagación. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se formulan unas preguntas orientadoras, que den cuenta de los aspectos que conocen los estudiantes sobre las ondas electromagnéticas. Para tener un punto de partida hacia la caracterización, esto no tardará más de 10 min: <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cómo se clasifica el espectro electromagnético? • ¿Qué es la radiación? • ¿Dónde podemos encontrarla? • ¿Qué es el espectro electromagnético? 2. Socialización de algunas respuestas a las preguntas anteriormente mencionadas para encontrar puntos en común sobre lo que piensan los estudiantes del LFM, esta actividad tendrá una duración de 10 min. 3. De igual forma se presenta una serie de documentos¹⁰ donde se presentan algunos rangos del espectro electromagnético (ANEXO 2) los cuales posibilitan una ilustración más clara de los fenómenos relacionados con este, se organizará por grupos de trabajo para leerlos y ser socializados posteriormente, esta actividad tendrá un tiempo de 40 min. 4. Teniendo presente la secuencia de trabajo anterior se llevará a cabo un proceso de cierre el cual constará de: El estudiante de acuerdo con las preguntas y las lecturas relacionadas con el espectro electromagnético realizará un mapa mental donde se describan Las características del espectro electromagnético, la longitud de onda, la energía, donde se registren los alcances y la caracterización de acuerdo con su emisión y propagación de onda, esta actividad tendrá una duración de 30 min. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los estudiantes comprenderán que el espectro está organizado según la frecuencia de emisión. ✓ Los estudiantes reconocerán que el espectro visible es pequeño en comparación al espectro completo.

Tabla 4: Descripción de la actividad 1 espectro electromagnético.

Actividad 2: Caracterización de los rayos X

El diseño de esta actividad plantea caracterizar los rayos X, en el espectro electromagnético; para ello se utilizará el tubo de rayos catódicos y la máquina de rayos X del DFI, donde se revisan las partes que lo componen y su funcionamiento en la emisión y uso de rayos X, con esto se

¹⁰ Thierry Douki, Jean-Luc, Dimitra Markovitsi, (2012) ADN BAJO EL SOL, revista investigación y ciencia, Harm J, Habing y Gerry Neugebauer, (1900) el firmamento infrarrojo, revista investigación y ciencia. Dwyer, J. R., Rayos, D., Compton, G., Fishman, G., Vuelos, C. De, Marshall, E., & Nasa, D. (2012). *Las tormentas provocan destellos de rayos X y gamma tan intensos que incluso emiten antimateria. La atmósfera se revela como un lugar más extraño de lo que jamás habíamos imaginado.* 38-43.

pretende acercar a los estudiantes a caracterizar los *rayos X* y aproximarse a la comprensión de la emisión de propagación de alta energía en el espectro electromagnético.

Objetivos de enseñanza	Actividad	Resultados esperados
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Identificar cual es el proceso para generan <i>rayos X</i>. ➤ Caracterizar los <i>rayos X</i>, su emisión, cómo se producen y que efectos causan. ➤ Describir algunas aplicaciones que tienen los <i>rayos X</i>. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se formulan unas preguntas orientadoras que den cuenta de los aspectos que conocen los estudiantes sobre <i>los rayos X</i> para tener un punto de partida hacia la caracterización de estos, esta actividad tendrá un tiempo de 10 min: <ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué se necesita para generar <i>rayos X</i>? • ¿Explique cómo cree que funciona un tubo de rayos catódicos, para producir <i>rayos X</i>? • ¿Por qué no podemos ver los <i>rayos X</i>? 2. Seguido de esto se socializarán algunas respuestas a las preguntas anteriormente mencionadas por parte de los estudiantes del LFM, para encontrar puntos en común sobre los conceptos, esta actividad tendrá una duración de 10 min. 3. Luego se procederá a revisar e identificar las partes que componen el tubo de <i>rayos X</i> y cómo se produce la emisión de estos en la máquina y en el tubo de rayos catódicos. se organizarán por grupos de trabajo para caracterizar el montaje experimental, esta actividad tendrá un tiempo de 40 min. 4. Para terminar, se hará una revisión de los protocolos de seguridad y los riesgos de exposición en el manejo de las radiaciones ionizantes y los efectos en la salud al no darle un uso responsable; además de las aplicaciones que tiene los <i>rayos X</i> en la industria, en la medicina, en la ciencia y posteriormente realizar un mapa conceptual donde el estudiante ilustre lo comprendido. 5. Estos resultados se presentarán en un informe tipo artículo científico donde muestren los aspectos físicos de los <i>rayos X</i>, sus partes, su funcionamiento, sus características, aplicaciones y efectos en la salud. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los estudiantes reconocerán la estructura física y el funcionamiento del tubo emisor de <i>rayos X</i> por medio de la observación de la actividad 2 parte 3. ✓ Los estudiantes relacionarán las aplicaciones y usos que tienen los <i>rayos X</i>, mediante las lecturas propuestas y el mapa conceptual. ✓ Los estudiantes clasifican e identifican los usos que tienen los <i>rayos X</i>, después de socializar las preguntas y presentar los resultados esperados.

Tabla 5: Descripción de la actividad 2 caracterización de los rayos X.

Actividad 3: Descripción longitud de onda Compton

Se realizarán las actividades en dos momentos, el primero un reconocimiento de los fundamentos teóricos que se deben tener en cuenta para la experiencia, y el otro utilizando la máquina de rayos x, y con base en la guía (anexo 3) se hará el experimento de dispersión Compton.

Donde se pretende que el estudiante caracterice la interacción de la radiación con la materia, de igual forma analizando la relación que existe entre la teoría y los resultados obtenidos en la maquina acerca de la dispersión Compton, considerando así el cambio de energía y la relación con la disposición de los ángulos para entender el efecto observado a través del montaje.

Objetivos de enseñanza	Actividad	Resultados esperados
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Identificar el cambio de longitud de onda de la radiación electromagnética de alta energía, al ser difundida por los electrones. ➤ Describir la interacción de la radiación con la materia, mediante la <i>dispersión Compton</i>. 	<p>Primer momento: Conceptualización</p> <p>1. Se formulan una serie de preguntas para orientar el desarrollo de la actividad experimental con base en la máquina de rayos X.</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Por qué se utilizan rayos X para efecto Compton? • ¿A partir del efecto Compton que fenómenos podemos explicar? • ¿A qué se le denomina Longitud de onda Compton y cuál es su valor? • ¿Qué característica tiene el PMMA¹¹ y porque este material es el más conveniente para el funcionamiento óptimo de la <i>dispersión Compton</i>? • ¿Por qué la configuración para <i>dispersión Compton</i> se organiza en un ángulo específico? <p>2. Ahora se revisan los aspectos importantes del <i>efecto Compton</i> mediante una charla por parte del docente encargado, donde se presentan algunos referentes históricos que llevaron al desarrollo de esta teoría. Luego se realiza una explicación esquemática del comportamiento dual de la radiación y finalmente la explicación formal matemática donde se determina la longitud de onda</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los estudiantes identificarán mediante la emisión del espectro característico de Cu la propagación de onda de los rayos x, mediante la gráfica que genera el software de la máquina. ✓ Los estudiantes comprenderán la interacción de la radiación con la materia a través de la determinación de longitud de onda Compton, al compararla con el resultado teórico. Utilizando la ecuación de desplazamiento de Compton se comprobará los cambios de longitud de onda al variar el voltaje en la operación de la máquina.

¹¹ PMMA: Polimetilmetacrilato: es uno de los plásticos de ingeniería. La placa de acrílico se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y la presentación más frecuente que se encuentra en la industria del plástico es en gránulos o en placa.

	<p>Compton a partir de la conservación de la masa-energía.</p> <p>Segundo momento: Experimento Rayos X</p> <p>3. Se propone realizar la calibración de la maquina ver (Guía de trabajo¹²) para obtener los datos de impulsos por segundo y el ángulo de detección, con el fin de que el tubo de rayos X encienda y funcione adecuadamente para la práctica. Se dispondrá de la configuración de la <i>máquina de rayos x</i> para determinar el espectro característico del ánodo de cobre donde se genera una emisión de voltaje constante estudiando así el espectro característico. posteriormente se variará el voltaje donde se estudiará la radiación de frenado de los rayos X a través del espectro. También se debe disponer del PMMA. Teniendo presente que la idea fundamental es que los rayos X incidentes tienen una longitud de onda media, la cual puede ser estimada midiendo la absorción de esta al obtener los resultados de impulsos por segundo y ángulo de detección.</p> <p>Para esta actividad se deberá revisar la guía de trabajo (anexo 3) donde se especifica el procedimiento a seguir, para esta práctica experimental se cuenta con 2 horas.</p>	
--	--	--

Tabla 6: Explicación de la actividad 3 descripción de la longitud Compton.

¹² Ver guía de trabajo anexo 3

Recomendaciones:

- Se sugiere realizar el proceso de licencia de uso de equipos de *rayos X* para investigación ante el ministerio de salud, en cumplimiento de la ley 482 de 2018 para garantizar la seguridad y la protección radiológica en el uso de radiaciones ionizantes.
- Es necesario proponer estrategias que articulen las practicas experimentales y la fundamentación teórica con el fin de mejorar y afianzar los conocimientos requeridos para la formación de licenciados en física del DFI.
- Es relevante incrementar el uso de los equipos de laboratorio permitiendo que los estudiantes interactúen con los mismos y encuentren en estos la extensión de herramientas de aprendizaje mediante los recursos que se encuentran en el DFI.
- Promover el desarrollo de estrategias que aporten a los temas relacionados con el comportamiento dual de la radiación, ampliando las oportunidades para la enseñanza-aprendizaje que están inmersas alrededor del espectro electromagnético su emisión y propagación.
- Fomentar el uso de la máquina de *rayos X* para estudiar otros fenómenos relacionados al comportamiento dual de la radiación. Se sugiere desarrollar trabajos de grado relacionados con el uso de la máquina de *rayos X* y los fenómenos electromagnéticos de la luz.
- Se sugiere la actualización del material de laboratorio, tales como software, extensiones y partes adicionales de los montajes experimentales, contribuyendo así a que los resultados teórico-experimentales sean más precisos al momento de hacer uso de estos.

Resultados esperados

- Se espera con el desarrollo del diseño de la propuesta experimental se contribuya al proceso de enseñanza-aprendizaje de los conceptos de emisión de propagación de onda de los *rayos X* característicos mediante el *efecto Compton*.
- Al finalizar las actividades de la propuesta de diseño experimental se espera que los estudiantes identifiquen el fenómeno mediante el equipo de *rayos X*, su emisión y propagación en la radiación electromagnética.
- Fomentar el desarrollo de habilidades y destrezas en el manejo de equipos en el área de la física, contribuyendo a la aproximación de las teorías abordadas en el laboratorio de física moderna del DFI.
- Los conceptos teóricos desarrollados en clase se pueden contrastar experimentalmente por medio del uso de la máquina de *rayos X* permitiendo relacionar los datos experimentales con los datos teóricos.
- Aprovechar los recursos tecnológicos disponibles en el laboratorio de física del DFI de la UPN, para los procesos de enseñanza-aprendizaje, el afianzamiento de conceptos y el desarrollo de nuevos trabajos de grado y/o investigación relacionados con la interacción de la radiación electromagnética.
- Finalmente, se pretende que con el diseño de la propuesta experimental mediante el uso de la máquina de *rayos X*, los estudiantes de la licenciatura en física de la UPN, logren aproximarse a entender el *efecto Compton* y como este puede ayudar a comprender otros fenómenos relacionados con el espectro electromagnético y la emisión de *rayos X*.

Conclusiones

- La importancia de la práctica experimental en la asignatura laboratorio de física moderna asociado a la comprensión de los fenómenos relacionados con la interacción de la radiación-materia y su desarrollo histórico, permiten a los estudiantes aproximarse a la comprensión de la naturaleza de los *rayos X* por medio de la radiación electromagnética. Por lo que en este trabajo se reconoce la importancia de asociar el fundamento conceptual, el componente experimental y el desarrollo histórico a través de la propuesta de diseño experimental, para la enseñanza-aprendizaje de conceptos relacionados con la dispersión de *rayos X*.
- La enseñanza-aprendizaje del *efecto Compton* requiere articular conceptos relacionados con la caracterización de los *rayos X*, dispersión de la radiación electromagnética, radiación ionizante, la interacción radiación-materia, la naturaleza dual de la luz, los cuales pueden ser afianzados mediante la implementación de los recursos físicos disponibles en el laboratorio del DFI (máquina Phywe) en las actividades académicas de la asignatura laboratorio de física moderna.
- El diseño de estrategias para la enseñanza-aprendizaje en física debe relacionar coherentemente el desarrollo histórico, el fundamento conceptual y los recursos experimentales permite que los estudiantes del programa de Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional se aproximen al conocimiento como lo hacen los investigadores, lo cual promueve la comprensión de cómo se construyeron estos conceptos.
- El conocimiento y el uso de los equipos disponibles en el laboratorio del departamento de física de la UPN y su articulación con los contenidos en las asignaturas del programa del DFI pueden contribuir significativamente a la comprensión de fenómenos en física,

específicamente la caracterización de los *rayos X*; es necesario resaltar la importancia que tiene para la enseñanza-aprendizaje el aprovechamiento de todos los recursos disponibles en el departamento de física para promover la formación integral de los futuros licenciados en física

- Las estrategias de enseñanza-aprendizaje que articulen el desarrollo histórico, el fundamento conceptual y las actividades experimentales promueven nuevas alternativas para la enseñanza-aprendizaje en el DFI de la UPN, además, ofrecen la oportunidad de participar activamente en la enseñanza de la física como tema de investigación.
- Finalmente, se considera que proponer y aplicar estrategias coherentes para la comprensión de fenómenos en física pueden aportar a la formación integral de los docentes en formación y promueven la diversificación de estrategias para la enseñanza de un tema específico; estas estrategias son susceptibles de ser mejoradas en función de los recursos disponibles, el avance tecnológico, la experiencia del docente y los intereses del DFI.

Bibliografía

- Astrofísica y Física: ¿Qué es el Espectro Electromagnético? (n.d.). Retrieved May 10, 2020, from <https://www.astrofisicayfisica.com/2012/06/que-es-el-espectro-electromagnetico.html>
- Belletti, S., Besio, G., & Godino, M. E. (2016). *Ondas Electromagnéticas 2^o Año*. 0–17. Retrieved from https://rephip.unr.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/2133/6625/7203-16_FISICA_Ondas_Electromagneticas.pdf
- Beltrán, Y. J. C. (2018). *Estado del arte : tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016*. 147–166.
- Benavides, A. F. (1996). El descubrimiento. *Ocho Momentos de La Historia Universal*, 183–198. <https://doi.org/10.2307/j.ctvm7bbkx.14>
- Brown, T. L. (2009). *Chemistry: the central science*.
- Bushong, S. C. (1982). *Manual de radiología para técnicos física, biología y protección radiológica*.
- Carlos, J., Santos, M., & Sánchez, H. H. (n.d.). *El nacimiento*. 31–54.
- Cheston, W. B. (1954). Compton scattering. *Physical Review*, 95(1), 247–248. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.95.247>
- Colmenares, A. Mercedes. (2017). Investigación - acción participativa: una metodología integradora del conocimiento y la acción. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10485 LNCS(1), 37–47. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68548-9_4
- Compton, A., & Allison, S. K. (1965). *Arthur Holly Compton*.
- Concari, S. B. (2001). *LAS TEORÍAS Y MODELOS EN LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA : IMPLICANCIAS PARA LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS*. 85–94.
- Cowan, C. L., & Grah, J. S. J. (n.d.). *u Virgilio Acosta FISleA M00ERNA*.
- Deacon, C., & Hajek, A. (2011). Student perceptions of the value of physics laboratories. *International Journal of Science Education*, 33(7), 943–977. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.481682>
- Douki, T., Ravanat, J.-L., Markovitsi, D., & Sage, É. (2012). El ADN bajo el efecto del sol. *Investigación y Ciencia*, (431), 36–43. Retrieved from <http://www.investigacionyciencia.es.bd.univalle.edu.co/revistas/investigacion-y-ciencia/numeros/2012/8/el-adn-bajo-el-efecto-del-sol-9355>
- Dwyer, J. R., Rayos, D., Compton, G., Fishman, G., Vuelos, C. De, Marshall, E., & Nasa, D. (2012). *Las tormentas provocan destellos de rayos X y gamma tan intensos que incluso emiten antimateria . La atmósfera se revela como un lugar más extraño de lo que jamás*

habíamos imaginado. 38–43.

Einstein, A., Infeld, L., & Grinfeld, R. (1986). La evolución de la física. In *Biblioteca científica*.

Ferreira, J. & R. R. (2011). Efectividad de las actividades experimentales demostrativas como estrategia de enseñanza para la comprensión conceptual de la tercera ley de Newton en los estudiantes de fundamentos de Física del IPC Effectiveness of the experimental demonstration activit. *Revista de Investigación N° 73. Vol. 35. Mayo-Agosto 2011, 35, 61–84.*

Ferreirós, J., & Ordóñez, J. (2002). Hacia una filosofía de la experimentación. *Crítica-Revista Hispanoamericana de Filosofía, 34(102), 47–86.*

Feynman, R. (1998). *Goals of the Introductory Physics Laboratory a) American Association of Physics Teachers Summary of Introductory Physics Laboratory Goals. 66(June), 483–485.*

Filho, D. O. T. (1991). *Laboratório caseiro de física moderna.* 390–395.

Filosof, L., Psicolog, L., & Experiencias, A. I. (2018). *Apunte de Cátedra.* 1–39.

Gomez, L. A., & Marulanda, J. I. (2006). *Experimentos en el aula de clase para la enseñanza de la física.* (January).

Goyes, Lina (2018) La relación contexto-ciencia: El caso de la teoría de la radiación térmica desde la perspectiva de Planck en el siglo XIX. (trabajo de pregrado), Universidad Pedagógica nacional, Bogotá.

Hechavarría, Rodney; López, G. (2013). El firmamento en infrarrojo. *Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 1689–1699.*
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Hernández-fernández, A. (2014). *El origen de la física moderna: el papel de fermi.* 1–10.

Hodson, D. (1994). *Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio.* 15.

Ibáñez, L. (1990). *Grandes físicos y grandes descubrimientos.* 1–5.

Knoll. (1989). Radiation detection and measurements. *New York, Springer Verlag, (1989), (1), 1–6.*

Lombardi, O. I. (1997). *La pertinencia de la historia en la enseñanza de las ciencias: argumentos y contraargumentos.* 15(3), 343–349.

Mauricio Garcia Castañeda, J. E. D. G. (2003). *Introducción a la física moderna - Universidad Nacional de Colombia.*

Mayorga, A. (2002). *Planck, Einstein y el nacimiento de la teoría cuántica.* (100), 145–152.

Mercedes, M., & Manrique, A. (2013). *LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL : CONSTRUCCIÓN DE FENOMENOLOGÍAS Y PROCESOS DE FORMALIZACIÓN The experimental activity : Construction of phenomenologies and formalization processes Francisco Malagón*

- Sánchez Universidad Pedagógica Nacional *THE EXPERIMENTAL ACTIV.* (36), 119–138.
- Molina, (2011). (2011). Un acercamiento a la investigación de diseño a través de los experimentos de enseñanza. *2011*, 29(1), 75–88. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10481/23887>
- Molina, M. (2016). *Cambio climático*.
- Moreno, Cristian. (2017) Radiación termica: construyendo la identidad entre luz y calor. (trabajo de pregrado), Universidad Pedagógica nacional, Bogotá
- Nelida Ana Gonzales, Juan Carlos Muñoz, L. L. (2007). *Física 4*. 296–314.
- OMS. (1959). *Las Radiaciones Ionizantes y sus Efectos en la Población Las Radiaciones Ionizantes y sus Efectos en la Población*.
- Ondas electromagnéticas, conceptos básicos*. (n.d.). 73. Retrieved from http://www.uco.es/organiza/departamentos/ing-electrica/documentos/ONDAS_EM_CONCEPTOS_BASICOS.pdf
- Ordóñez, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Acta*, 1, 17–31. Retrieved from https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- Ossorio, D. R. P. A. (1973). *Isotopos radiactivos* (Alhambra, Vol. 3). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- PANEQUE, R. J. R. (1998). Metodología de la Investigación. In *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Radiologia: Introducción a la Radiología. (n.d.). Retrieved May 3, 2020, from <http://programaderadiologia.blogspot.com/2012/07/la-radiologia-es-una-ramade-la-medicina.html>
- Raymond A. Serway y John W. Jewett, J. (2009). *SERWAY II*.
- Reyes, M. (1962). *RAYOS X y EFECTO COMPTON*. (1985).
- Robert N. Cherry, J. (1998). *Radiaciones ionizantes*.
- ROBERT RESNICK. (1976). *Conceptos de relatividad y teoría cuántica*.
- Robley. (1955). *THE ATOMIC NUCLEUS*.
- Rodrigo, I. L. (2004). *MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN DE ENFOQUE EXPERIMENTAL*.
- Sebastia, J. m. (1987). ¿ *QUE SE PRETENDE EN LOS LABORATORIOS DE FISICA UNIVERSITARIA ?* 5(3).
- Sibum, H. O. (2017). *Conocimiento científico e inteligencia corporal*. 48–49.
- Taquichiri, M. (2018). *INTRODUCCION A LA FISICA MODERNA NOTAS DE CURSO Marco A. Taquichiri T. 2018*.

- Thomas S. Kuhn. (1980). *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica*.
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). Para entender las Radiaciones. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Unesco-ICSU. (1999). *Declaración de Budapest*.
- UNSCEAR. (1993). *Sources and Effects of Ionising Radiation 1993 Report to the General Assembly, with annexes. 1993*.
- Valdés, C. E. A., Luis, J., & Sol, D. (2016). *La enseñanza de las ciencias en el nuevo milenio. retos y sugerencias*. 169–176.
- Valenzuela, W. (1991). *HIPOTESIS CORPUSCULAR Y TEORIA DEL CONOCIMIENTO EN LOCKE*.
- Velázquez, C. (1900). *Planck y el gran inicio de la sinfonía cuántica*. 1–13.
- Walteros, Luz Angelica, (2016), *Actividades experimentales para la construcción de explicaciones alrededor de los fundamentos básicos de la mecánica cuántica*. (trabajo de pregrado), Universidad Pedagógica nacional, Bogotá.

Anexos

ANEXO 1:

Deducción de las ecuaciones del efecto Compton. (Tomado y adaptado de Física atómica y nuclear, Henrry Semat, 1957)

Tenemos tres ecuaciones

$$hv = hv' + m_0c^2 (K-1) \quad [1]$$

$$\frac{hv}{c} = \frac{hv'}{c} \cos \phi + Km_0v \cos \theta \quad [2]$$

$$0 = \frac{hv'}{c} \operatorname{sen} \phi - Km_0v \operatorname{sen} \theta \quad [3]$$

Donde

$$K = \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}}$$

Para resolver estas ecuaciones, hagamos

$$\alpha = \frac{hv}{m_0c^2} = \frac{h}{m_0c\lambda}$$

$$\alpha' = \frac{hv'}{m_0c^2} = \frac{h}{m_0c\lambda'}$$

$$b = \sqrt{K^2 - 1} = \frac{Kv}{c},$$

O sea

$$K = \sqrt{1 + b^2}$$

$$l_1 = \cos \phi$$

$$n_1 = \operatorname{sen} \phi$$

$$l_2 = \cos \theta$$

$$n_2 = \text{sen } \theta$$

Dividiendo la ecuación [1] por m_0c^2 , obtenemos:

$$\alpha = \alpha' + \sqrt{1 + b^2} - 1, \quad [4]$$

Y dividiendo las ecuaciones [2] y [3] por m_0c , resulta:

$$\alpha = \alpha'l_1 + bl_2 \quad [5]$$

Y

$$0 = \alpha'n_1 - bn_2. \quad [6]$$

De la ecuación [5] se deduce que

$$b^2l_2^2 = \alpha^2 - 2\alpha\alpha'l_1 + \alpha'^2l_1^2 \quad [7]$$

Y a partir de la ecuación [6],

$$b^2n_2^2 = \alpha'^2n_1^2. \quad [8]$$

Sumando las ecuaciones [7] y [8] obtenemos:

$$\begin{aligned} b^2(l_2^2 + n_2^2) &= \alpha^2 - 2\alpha\alpha'l_1 + \alpha'^2(l_1^2 + n_1^2) \\ b^2 &= \alpha^2 - 2\alpha\alpha'l_1 + \alpha'^2, \end{aligned} \quad [9]$$

Puesto que

$$l_2^2 + n_2^2 = 1 = l_1^2 + n_1^2.$$

De la ecuación [4] se deduce:

$$b^2 = \alpha^2 - 2\alpha\alpha' + \alpha'^2 + 2\alpha - 2\alpha'. \quad [10]$$

Restando la ecuación [10] de la [9] obtenemos:

$$0 = 2\alpha\alpha'(1 - l_1) - 2\alpha + 2\alpha',$$

De donde

$$0 = \alpha(1 - l_1) - \left(\frac{\alpha}{\alpha'} - 1\right)$$

O sea:

$$\frac{\alpha}{\alpha'} - 1 = \alpha(1 - l_1), \quad [11]$$

De donde

$$\frac{\lambda'}{\lambda} - 1 = \frac{h}{m_0 c \lambda} (1 - \cos\phi),$$

O sea:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\phi), \quad [12]$$

para obtener la expresión de la energía cinética del electrón de rechazo, despejemos α' de la ecuación [11] y obtendremos:

$$\alpha' = \frac{\alpha}{1 + \alpha(1 - l_1)} \quad [13]$$

Sustituyendo este valor en la ecuación [4] tenemos:

$$\sqrt{1+b^2} - 1 = \alpha - \frac{\alpha}{1+\alpha(1-l_1)} = \frac{\alpha^2(1-l_1)}{1+\alpha(1-l_1)}$$

Ahora bien: la energía cinética viene dada por

$$\varepsilon = m_0c^2(K - 1) = m_0c^2(\sqrt{1+b^2} - 1) = m_0c^2 \frac{\alpha^2(1-\cos\theta)}{1+\alpha(1-\cos\theta)}$$

Donde

$$m_0c^2 = \frac{h\nu}{\alpha};$$

Por consiguiente,

$$\varepsilon = h\nu \frac{\alpha(1-\cos\theta)}{1+\alpha(1-\cos\theta)} \quad [14]$$

La energía del electrón de rechazo puede ponerse también en función del ángulo θ , notando que las ecuaciones [5] y [6] se deduce:

$$\frac{l_2}{n_2} = \frac{\alpha - \alpha' l_1}{\alpha' n_1} = \frac{1}{n_1} \left(\frac{\alpha}{\alpha'} - l_1 \right), \quad [15]$$

Y eliminando α' con ayuda de la ecuación [11], obtenemos:

$$\frac{l_2}{n_2} = \frac{1}{n_1} (1 + \alpha)(1 - l_1). \quad [16]$$

Sustituyendo los valores de l_1, l_2, n_1 y n_2 , obtenemos :

$$\cot \theta = (1 + \alpha) \frac{1 - \cos \emptyset}{\text{sen} \emptyset}. \quad [17]$$

Ahora bien:

$$\frac{1 - \cos \emptyset}{\text{sen} \emptyset} = \text{tg} \frac{\emptyset}{2};$$

Por consiguiente,

$$\cot \theta = (1 + \alpha) \text{tg} \frac{\emptyset}{2}, \quad [18]$$

Y también

$$\text{tg} \theta = \frac{\cot \frac{\emptyset}{2}}{1 + \alpha}, \quad [19]$$

Dividiendo la ecuación [18] por la ecuación [19] obtenemos:

$$\frac{\cos^2 \theta}{\text{sen}^2 \theta} = \frac{\cos^2 \theta}{1 - \cos^2 \theta} = (1 + \alpha)^2 \text{tg}^2 \frac{\emptyset}{2}$$

Ahora bien:

$$\text{tg}^2 \frac{\emptyset}{2} = \frac{1 - \cos \emptyset}{1 + \cos \emptyset};$$

Por consiguiente,

$$\frac{\cos^2 \theta}{1 - \cos^2 \theta} = (1 + \alpha)^2 \frac{1 - \cos \emptyset}{1 + \cos \emptyset} \quad [20]$$

Despejando $\cos \emptyset$ de la ecuación [20] y calculando el valor de $(1 - \cos \emptyset)$, obtenemos:

$$1 - \cos \emptyset = \frac{2 \cos^2 \theta}{(1 + \alpha)^2 - 2 \alpha \cos^2 \theta - \alpha^2 \cos^2 \theta} \quad [21]$$

Sustituyendo este valor en la ecuación [14] conduce a

$$\varepsilon = h\nu \frac{2\alpha \cos^2 \theta}{(1+\alpha)^2 - \alpha^2 \cos^2 \theta}, \quad [22]$$

Thierry Douki es bioquímico del Comisariado de la Energía Atómica de Francia (CEA) y dirige el Laboratorio de Lesiones de los Ácidos Nucleicos en Grenoble, donde **Jean-Luc Ravanat** trabaja también como bioquímico del CEA. **Dimitra Markovitsi** es fotoquímica del CNRS y dirige el Laboratorio Francis Perrin en el CEA de Saclay. **Évelyne Sage** es bióloga del CNRS en el Laboratorio de Biología de las Radiaciones, en el Instituto Curie de Orsay.

BIOQUÍMICA

EL ADN bajo el efecto del sol

Los mecanismos fotoquímicos que alteran el ADN de las células cutáneas durante la exposición solar aumentan el riesgo de cáncer de piel

Thierry Douki, Jean-Luc Ravanat, Dimitra Markovitsi y Évelyne Sage

LA COSTUMBRE DE TOMAR EL SOL PARA ADQUIRIR UNA PIEL bronceada se practica en Europa desde principios del siglo xx. Hasta el siglo xix, la tez pálida constituía una prueba de pertenencia a la aristocracia; las clases obrera y campesina, que desempeñaban su actividad al aire libre, presentaban la tez bronceada. Más tarde, la revolución industrial conllevó la reclusión de los obreros en las fábricas, lejos del sol, mientras que las clases sociales acomodadas redescubrían el turismo de balneario. En 1936, con la aparición de las vacaciones pagadas, la piel bronceada se convirtió en un fenómeno de moda.

Se descubrieron entonces los efectos perniciosos de la exposición prolongada al sol y el peligro de las quemaduras solares. En efecto, los rayos ultravioleta del sol provocan cáncer de piel. Se cambió la formulación de las cremas solares (que surgieron en el decenio de 1920) para convertirlas en eficaces filtros contra los rayos ultravioleta B, ya que se creía que solo esta pequeña parte del espectro solar resultaba perjudicial para la piel. Pero ¿mediante qué mecanismos?

Desde el decenio de los sesenta del siglo xx se han venido estudiando los efectos de los rayos ultravioleta sobre el ADN (el portador de la información genética) de las células cutáneas. Se

EN SÍNTESIS

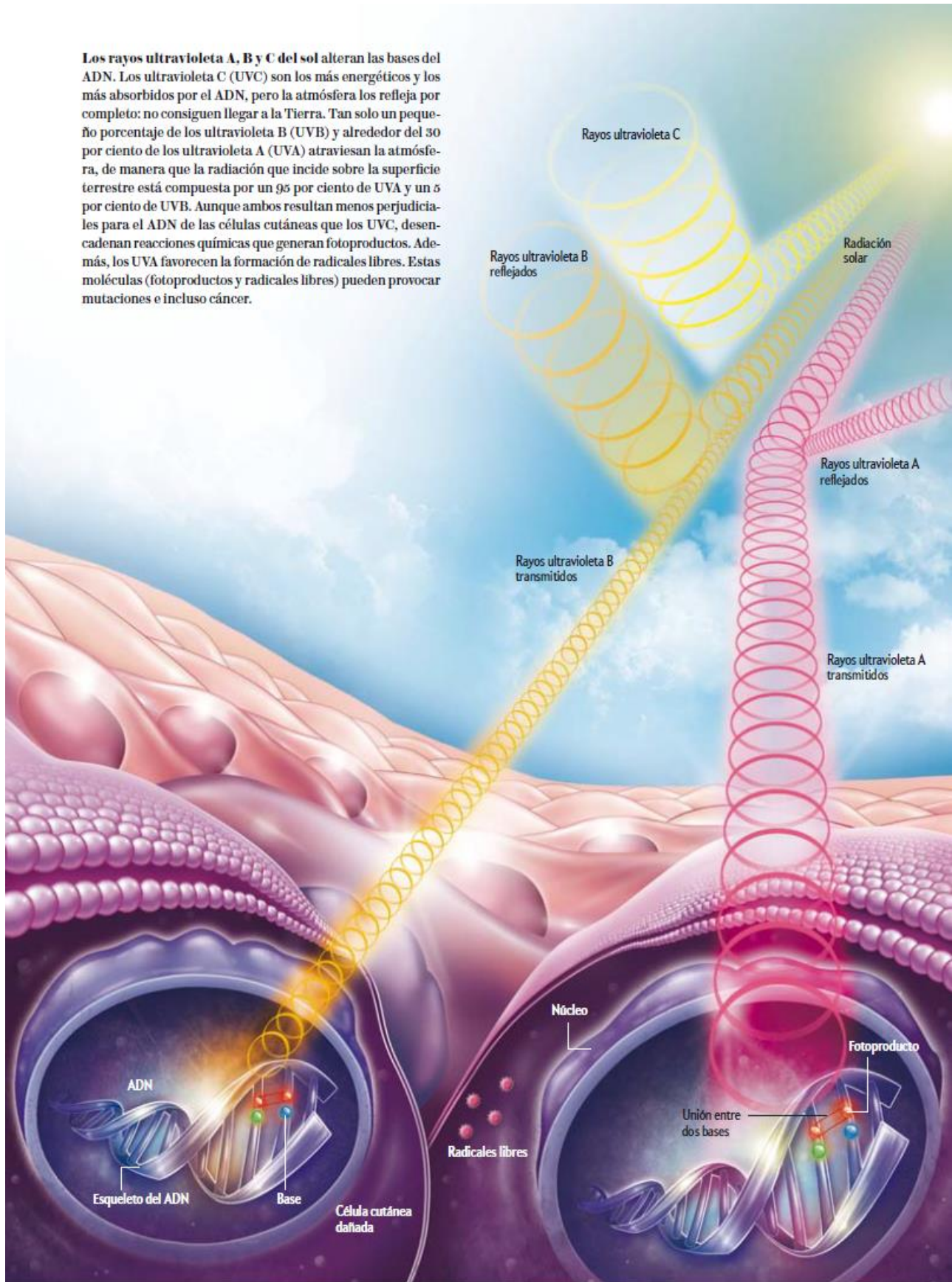
Las radiaciones ultravioleta del sol provocan lesiones en el ADN que pueden dar lugar a mutaciones genéticas.

Hasta ahora, se creía que los rayos ultravioleta B eran los más perjudiciales, al desencadenar reacciones químicas entre las bases del ADN.

Sin embargo, aunque son menos absorbidos por el ADN, los rayos ultravioleta A provocan lesiones similares.

La identificación de estos daños o fotoproductos en el ADN ayuda a comprender mejor la aparición de mutaciones y del cáncer de piel.

Los rayos ultravioleta A, B y C del sol alteran las bases del ADN. Los ultravioleta C (UVC) son los más energéticos y los más absorbidos por el ADN, pero la atmósfera los refleja por completo: no consiguen llegar a la Tierra. Tan solo un pequeño porcentaje de los ultravioleta B (UVB) y alrededor del 30 por ciento de los ultravioleta A (UVA) atraviesan la atmósfera, de manera que la radiación que incide sobre la superficie terrestre está compuesta por un 95 por ciento de UVA y un 5 por ciento de UVB. Aunque ambos resultan menos perjudiciales para el ADN de las células cutáneas que los UVC, desencadenan reacciones químicas que generan fotoproductos. Además, los UVA favorecen la formación de radicales libres. Estas moléculas (fotoproductos y radicales libres) pueden provocar mutaciones e incluso cáncer.



descubrió que los rayos ultravioleta B (UVB) creaban enlaces entre determinados átomos de la molécula de ADN, mientras que los ultravioleta A (UVA) actuaban de forma indirecta, al alterar diversos componentes celulares. El efecto de los últimos se asociaba sobre todo al envejecimiento de la piel. Por lo tanto, los UVB, aunque menos abundantes en la radiación solar que incide sobre la piel, parecían los más peligrosos.

No obstante, desde finales de la década de los noventa se reconoce también el impacto de los UVA: no solo representan una parte importante del espectro de la radiación solar que alcanza la piel sino que, además, se ha visto que pueden provocar tumores en animales de laboratorio. Asimismo, en fecha más reciente hemos demostrado que en el ADN generan el mismo tipo de enlaces químicos que los UVB, alteraciones que pueden dar lugar a mutaciones genéticas, e incluso cáncer.

LA POBLACIÓN EXPUESTA AL SOL

En 2008, un estudio sociológico de la Seguridad Social y del Instituto Nacional de la Salud y la Investigación Médica de Francia demostraba que, si bien la mayoría de la población reconocía los riesgos asociados a la exposición solar, su comportamiento en las playas no reflejaba tal creencia: menos de la tercera parte se protegía y la mayoría tomaba el sol durante las horas del día de mayor irradiación. No sorprende por tanto que, en Europa, el número de casos de cáncer de piel aumente entre un cinco y un siete por ciento anual y que, en Francia, se diagnostiquen al año 90.000 nuevos casos y fallezcan 1300 personas. ¿Cómo provocan cáncer las radiaciones ultravioleta?

El ADN posee una estructura química compleja que le permite replicarse fielmente y traducirse en proteínas. Está formado por bases nitrogenadas o nucleotídicas (adenina, citosina, guanina y timina) unidas a un «esqueleto» de azúcares y fosfatos. Y se compone de dos hebras enrolladas en forma de doble hélice. Sin embargo, numerosos agentes químicos o físicos pueden dañar las bases o el esqueleto. A veces, tales daños se traducen en mutaciones, es decir, en modificaciones de la información genética. Las células afectadas pueden empezar a multipli-

carse de forma incontrolada, la primera etapa de los mecanismos que dan lugar al cáncer.

La radiación ultravioleta tiene, por consiguiente, la capacidad de alterar el ADN. La presencia de esos rayos en la luz solar contribuye en gran medida a los problemas que esta ocasiona en la salud pública. Causan la mayoría de los tumores cutáneos: los carcinomas y los melanomas. Los segundos, los menos frecuentes (menos del diez por ciento de los tumores cutáneos), despiertan especial preocupación por dos motivos: por un lado, las células del melanoma se propagan fácilmente y forman metástasis; por otro, todavía no existe ningún tratamiento contra ellos.

Desde hace tiempo se estudian los daños de la radiación ultravioleta sobre el ADN; los primeros trabajos datan de finales de los años cincuenta. Se sabe que por efecto de la radiación, las bases del ADN reaccionan y forman fotoproductos, pero todavía no se conocen todas las etapas del proceso.

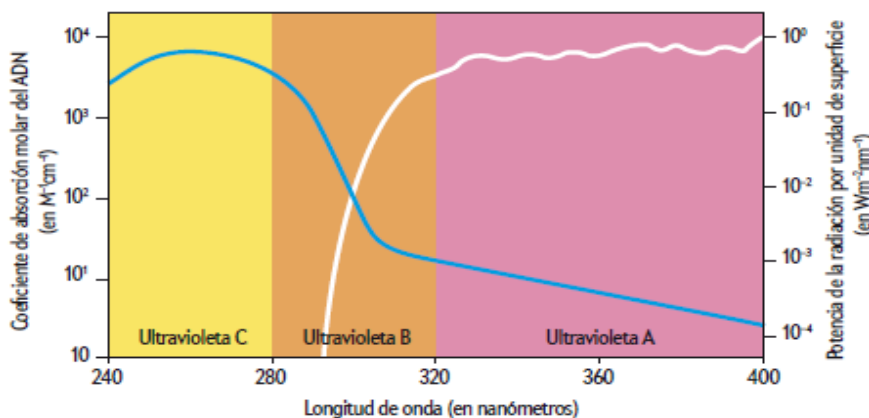
Los rayos ultravioleta del sol están constituidos por fotones con una amplia gama de energía. Los ultravioleta C (UVC), que presentan las menores longitudes de onda (entre 200 y 280 nanómetros), son los más energéticos y los que el ADN absorbe con mayor eficacia. Los UVB (entre 280 y 320 nanómetros) y los UVA (entre 320 y 400 nanómetros) poseen menos energía que los UVC. Pero la capa de ozono de la atmósfera impide el paso de los UVC emitidos por el sol, de una gran mayoría de los UVB y de dos terceras partes de los UVA. La luz solar que alcanza la superficie terrestre contiene, por tanto, un 95 por ciento de radiación UVA y un cinco por ciento de UVB, porcentajes que varían en función de la hora del día, la latitud y la altitud.

FOTONES QUE ALTERAN EL ADN

La longitud de onda de la radiación incidente determina la naturaleza de los daños causados en el ADN y, por tanto, las consecuencias biológicas. No todas las modificaciones del ADN resultan perjudiciales y no todas son eliminadas por los sistemas celulares de reparación del genoma con la misma eficacia.

Además, el ADN presenta un máximo de absorción en la región de los rayos UVC (a 257 nanómetros), absorción que disminuye en los UVB y que se vuelve aún más débil en los UVA. Los UVC son, pues, los más absorbidos, aunque también los más reflejados por la atmósfera hacia el espacio. Por el contrario, los UVA son los menos absorbidos, pero los que mejor atraviesan la atmósfera y, en consecuencia, los más abundantes. Ahora bien, al ser absorbidos por el ADN, los UVB desencadenan reacciones fotoquímicas entre las bases. Por su parte, los UVA provocan la oxidación del ADN por medio de mecanismos indirectos.

En 2003, nuestros equipos del Comisariado de la Energía Atómica (CEA) en Grenoble y del Instituto Curie demostraron que, además de dañar el ADN mediante mecanismos de oxidación, los UVA provocaban alteraciones semejantes a las de los UVB. Obtuvimos esos resultados en cultivos celulares.



La doble hebra de ADN absorbe, sobre todo, los rayos ultravioleta C. Esta absorción (azul) es menor en los ultravioleta B y muy débil en los ultravioleta A. Sin embargo, la luz solar que incide sobre la superficie de la Tierra, desprovista de ultravioleta C, contiene un 5 por ciento de ultravioleta B y un 95 por ciento de ultravioleta A (blanco). Por tanto, aunque estos últimos sean absorbidos en menor medida por el ADN, desencadenan ciertas reacciones químicas.

res y, en 2006, en colaboración con el Instituto de Investigación Pierre Fabre, los confirmamos en la piel humana.

Para comprender por qué las radiaciones ultravioleta causan mutaciones, los fotoquímicos estudian el modo en que la absorción de un fotón daña el ADN. Las bases de la molécula absorben los fotones ultravioleta, los cuales modifican la estructura electrónica de los átomos (la configuración de los electrones alrededor del núcleo). Como consecuencia, el ADN adquiere un estado excitado, con una energía superior a la de su estado habitual. Sus constituyentes pueden entonces reaccionar entre sí.

Mientras que los primeros trabajos realizados durante los años sesenta se centraron en las bases del ADN aisladas, hoy se estudian los estados excitados de la doble hebra de ADN. Tales avances han sido posibles gracias, por un lado, a la potencia de los ordenadores para realizar cálculos complejos y, por otro, a la espectroscopía con resolución temporal, una técnica que proporciona información sobre la vida media de las especies químicas intermedias que se forman antes de la aparición de un fotoproducto.

En primer lugar, hemos examinado el modo en que una doble hélice de ADN absorbe los rayos UVA. Hemos desarrollado en el laboratorio un modelo de ADN formado por 20 pares de bases adenina-timina: la molécula resultante presenta una absorción débil, pero relevante, de los UVA. Sin embargo, una mezcla de esas bases aisladas no absorbe tales longitudes de onda. Los resultados demuestran que, al contrario de lo que se pensaba, las reacciones fotoquímicas del ADN no solo son provocadas por los ultravioleta C y B, sino también por los A.

Gracias a la espectroscopía con resolución temporal, hemos demostrado después que los estados excitados originados por la absorción de los UVA difieren de los que generan los UVB y los UVC: se trata de estados «de transferencia de carga». En esa configuración electrónica, ciertas bases presentan carga positiva y otras negativa, de manera que pueden reaccionar entre sí.

¿Qué sucede con la energía de la radiación absorbida por el ADN? Una parte importante se disipa en forma de calor en el entorno del ADN. Otra se reparte entre las bases, que pasan de un estado excitado a otro. En el laboratorio, hemos demostrado que esa transferencia de energía comienza menos de 100 femtosegundos (100×10^{-15} segundos) después de la absorción. Una diminuta fracción del ADN excitado emite entonces una radiación de fluorescencia. Y otra fracción aún más pequeña experimenta reacciones químicas.

FUSIÓN DE BASES

En la actualidad, visualizar en tiempo real la aparición de un fotoproducto en una doble hélice de ADN sigue constituyendo un reto. La probabilidad de que el ADN reaccione es muy pequeña. Sin embargo, se están realizando progresos mediante el estudio de una hebra sencilla formada solo por timinas, que presenta una reactividad muy superior a la de una doble hélice. También hemos aprendido que el tiempo que transcurre entre

REACCIONES FOTOQUÍMICAS

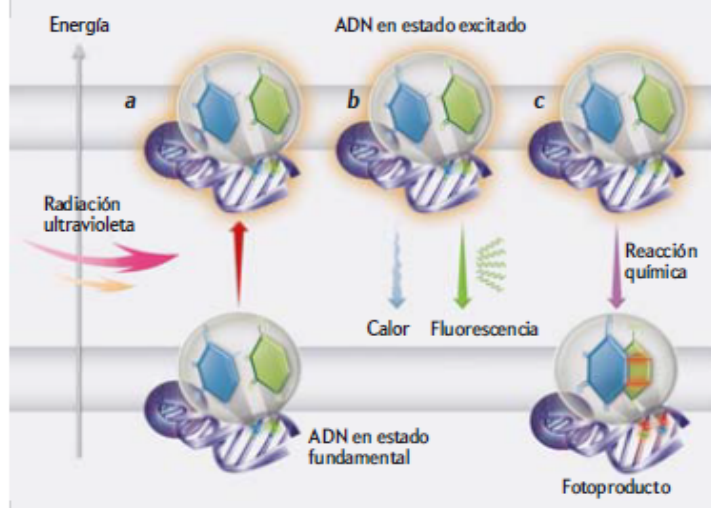
El ADN excitado y sus fotoproductos

La absorción de la radiación ultravioleta por el ADN desencadena una serie de mecanismos que preceden a la aparición de daños o fotoproductos. Para caracterizar estas etapas intermedias, que permiten comprender la formación de las lesiones, se utiliza la espectroscopía con resolución temporal.

Durante un período de tiempo muy corto se excita el ADN por medio de un láser ultravioleta (a). Una parte de la energía absorbida por el ADN se disipa en el entorno en forma de calor (b). Otra parte es transferida a las bases, que pasan de un estado excitado a otro. Una pequeña fracción de este ADN excitado emite luz fluorescente (b), mientras que otra fracción, todavía más pequeña, sufre una serie de reacciones químicas que dan lugar a fotoproductos (c).

Por tanto, durante períodos de tiempo muy breves, que pueden durar entre unos cien femtosegundos y algunos nanosegundos, se pueden detectar señales cuyas propiedades dependen de las especies químicas generadas por los rayos ultravioleta. La detección de fluorescencia nos proporciona información sobre la energía de los distintos estados excitados y sobre su vida media. Incluso es posible calcular el tiempo que dura la presencia de algunas especies intermedias que no emiten fotones.

Se ha determinado así que el tiempo que separa la absorción de un fotón de la aparición de un fotoproducto depende de la estructura química de este último.



la absorción de un fotón de radiación UVC y la formación de un fotoproducto depende en gran medida de la estructura química de este último. Los dímeros de timina (fotoproductos formados por la unión de dos timinas) del tipo del ciclobutano aparecen en menos de un picrosegundo (10^{-12} segundos), mientras que los fotoproductos del tipo (6-4) (denominación que procede de la posición de los átomos que reaccionan en la molécula), lo hacen en cuatro milisegundos, ya que en la reacción interviene un producto intermedio.

Entre 1960 y 1990, se estudió la estructura de los fotoproductos derivados de esos estados excitados. La mayor parte de los experimentos se llevaron a cabo con fragmentos cortos de ADN, fáciles de obtener en gran cantidad, que fueron expuestos a fuertes dosis de rayos UVB. También se demostró que solo

dos de las cuatro bases del ADN se ven afectadas: la timina y la citosina, pertenecientes a la familia de las pirimidinas. Cuando estas se hallan adyacentes en una hebra de ADN se generan entre ellas nuevos enlaces covalentes (uniones químicas fuertes), lo que da lugar a fotoproductos díméricos.

¿Por qué las pirimidinas son las únicas que reaccionan cuando se encuentran excitadas? Estas presentan un enlace doble entre dos átomos de carbono. En 1958, el equipo holandés de R. Beukers y W. Berends describió el primer producto resultante de la redistribución de los dobles enlaces de dos timinas. Una de esas estructuras, que contiene un anillo de cuatro átomos, es un dímero del tipo del ciclobutano. Tras ese descubrimiento se identificaron otros fotoproductos y se puso de manifiesto que entre dos citosinas, o entre una timina y una citosina, se producía el mismo tipo de reacciones.

En el ADN se generan, por tanto, un gran número de fotoproductos. Para detectarlos, se han desarrollado métodos bioquímicos, como la fabricación de anticuerpos de conejo que reconocen los fotoproductos, y de química analítica, que permite separar los fotoproductos del ADN mediante técnicas cromatográficas. Gracias a esos avances puede cuantificarse la formación de distintos fotoproductos.

Se ha observado que, bajo los efectos de los rayos ultravioleta, las secuencias timina-timina y timina-citosina reaccionan más que las parejas citosina-timina y citosina-citosina. Además de influir en la eficacia de la reacción, la secuencia afecta también a la proporción entre dímeros del tipo del ciclobutano y fotoproductos de tipo (6-4). Esta relación entre los distintos fotoproductos es igual en el ADN puro en disolución y en las células cutáneas aisladas: una vez que el fotón ha sido absorbido, el entorno modifica poco la fotoquímica del ADN. En cambio, el rendimiento de las reacciones en la piel resulta menor que en las células cutáneas aisladas debido a la pigmentación del tejido. En efecto, la melanina, un biopolímero que absorbe las radiaciones ultravioleta, ejerce un efecto protector: las pieles bronceadas, más ricas en melanina, resisten mejor los rayos del sol.

Además de la eficacia en la formación de fotoproductos, se han determinado otras características de los daños causados en el ADN. En primer lugar, se sabe que los fotoproductos de la citosina son bastante inestables: al reaccionar con una molécula de agua se convierten en derivados del uracilo, una base del ARN, el otro ácido nucleico presente en las células. En segundo lugar, que aparecen heterogeneidades en la localización de los fotoproductos a lo largo de un gen: ciertas regiones reaccionan más que otras y, por tanto, presentan mayor cantidad de fotoproductos. Sin duda, este tipo de variaciones se deben a efectos estructurales. Y hay otros factores que modifican la reactividad local, como la presencia de proteínas fijadas sobre el ADN.

DE LA LESIÓN A LA MUTACIÓN

¿Qué ocurre cuando el ADN es alterado y forma fotoproductos? Una cadena de acontecimientos, estudiada tanto en sistemas sencillos como en la piel humana, ha permitido explicar el efecto biológico de la radiación ultravioleta y muchas de las características de los tumores cutáneos.

Para empezar, se demostró que los fotoproductos podían desencadenar la apoptosis celular, una muerte programada que evita la división de las células que presentan alteraciones en el genoma.

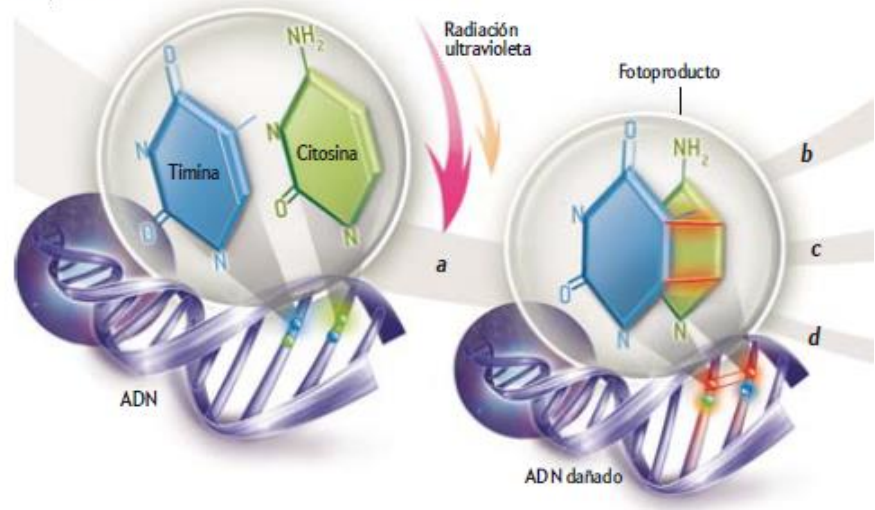
Por otro lado, desde el decenio de los setenta del siglo xx se ha venido comprobando, en estudios realizados en cultivos celulares, que las mutaciones del ADN provocadas por las radiaciones ultravioleta conllevan la formación de dímeros timina-citosina o citosina-citosina. A comienzos de la década de los noventa, Douglas Brash, de la Facultad de Medicina de Yale, y sus colaboradores descubrieron esas mismas mutaciones en el gen de la proteína p53, lo que reforzaba el interés por el efecto de los rayos ultravioleta, ya que en la mayoría de los tumores cutáneos se producen tales mutaciones.

Más tarde se determinó el modo en que la alteración del ADN daba lugar a la aparición de mutaciones. Mediante la síntesis de fragmentos de ADN que contenían lesiones conocidas, se demostró que las polimerasas, las enzimas que replican el ADN,

CONSECUENCIAS

¿Qué le ocurre al ADN dañado?

Bajo los efectos de la radiación ultravioleta, las bases de ADN sufren una serie de reacciones químicas. En una de ellas, la timina forma dos enlaces con la citosina y genera un producto del tipo del ciclobutano (a). En el interior de una célula, el ADN dañado de este modo puede seguir tres vías. A menudo, el fotoproducto desencadena la muerte de la célula y, en consecuencia, él mismo resulta eliminado junto con la célula (b). Con menor frecuencia, provoca una mutación (c): reacciona con una molécula de agua, de manera que el anillo de la citosina en el fotoproducto se convierte en un derivado del uracilo, una base de estructura similar a la de la timina. Si la célula se divide, este ADN es replicado por enzimas que no reconocen la citosina (porque se ha transformado en uracilo) y la toman por una timina: sintetizan, por tanto, una hebra mutada en la que una timina sustituye a la citosina original. Sin embargo, en las células existen sistemas de reparación (d). Una enzima reconoce el fotoproducto y otras separan las dos hebras del ADN: se elimina la región lesionada, de manera que otras enzimas puedan sintetizar una nueva hebra inalterada.



cometían errores cuando leían la información genética en los lugares donde se hallaban los fotoproductos.

Cada vez que se divide una célula, su ADN se replica. Normalmente, las enzimas de la replicación copian una hebra de ADN asociando a cada base de la cadena molde una base complementaria en la segunda cadena: a cada timina se le vincula una adenina, y a cada citosina, una guanina (y a la inversa). Ahora bien, las polimerasas pueden ser «engañadas» por las citosinas que se han convertido en uracilo en los fotoproductos. En efecto, el uracilo se parece mucho a la timina (pero no a la citosina), de manera que durante la síntesis las enzimas incorporan una adenina en la hebra complementaria, en lugar de una guanina.

Como consecuencia, se observan las siguientes mutaciones: cambios de las secuencias timina-citosina en timina-timina, y de las secuencias citosina-citosina en timina-timina. Raramente se encuentran mutaciones en las secuencias timina-timina ya que, en cualquier caso, las dos timinas de un dímero se hallan asociadas a dos adeninas, estén o no unidas entre sí. Además, si se crean células y ratones transgénicos en los que se pueden eliminar uno u otro tipo de fotoproductos, se ha demostrado que los responsables de tales mutaciones son, sobre todo, los dímeros del tipo del ciclobutano, no los fotoproductos de tipo (6-4).

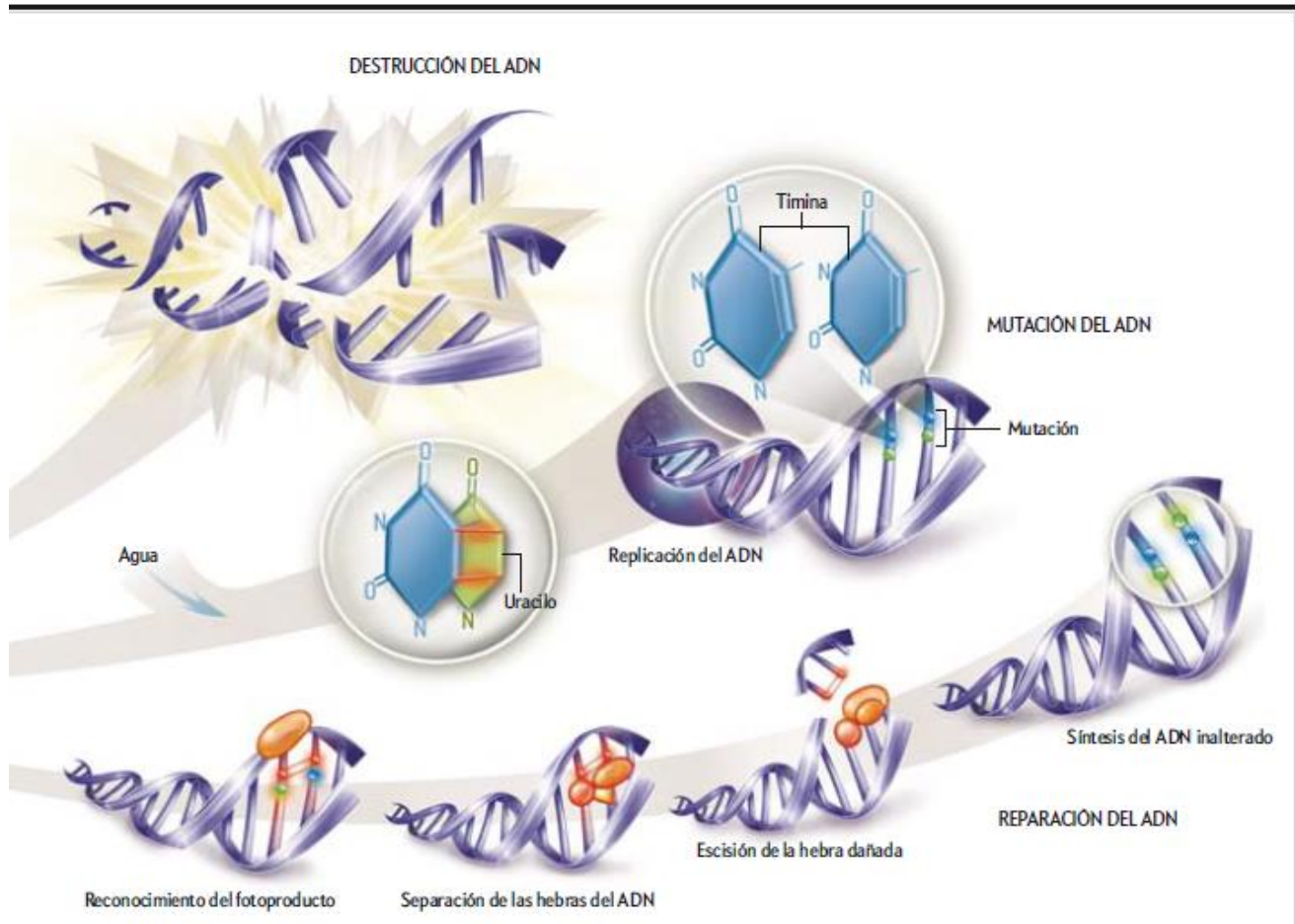
Los rayos UVB resultan por tanto perjudiciales para las células (en realidad, hasta ahora, la mayoría de los estudios realizados han tenido lugar con los UVB). Sin embargo, todos los seres vivos disponen de sistemas de reparación del ADN. Estos eliminan los fotoproductos y restablecen la secuencia original del ADN.

En los humanos, una serie de proteínas se encarga de reparar los dímeros en varias etapas. En primer lugar, se localiza el fotoproducto gracias a la deformación que provoca este en la estructura del ADN. A continuación, otras proteínas cortan la hebra de ADN dañada a ambos lados del fotoproducto y dejan en ella una brecha. Por fin, unas últimas proteínas reconstituyen la hebra al replicar la región de ADN que se sitúa enfrente. Los defectos genéticos que inactivan las proteínas de ese mecanismo de reparación hacen multiplicar por 1000 el riesgo de cáncer en los niños afectados por el síndrome xerodermia pigmentosa, en quienes la exposición solar resulta muy peligrosa. Lo que constituye una prueba más del papel de los fotoproductos diméricos en los tumores cutáneos.

OXIDACIÓN DEL ADN POR LOS UVA

A pesar de que los rayos UVA son absorbidos por el ADN en menor grado que los UVB, también pueden provocar daños en la molécula, e incluso mutaciones. Hace unos treinta años se pro-

JULIA FERRIO, POR LA SOTANA



puso una explicación para ello, la fotosensibilización, que supone la intervención de mecanismos indirectos.

En ese proceso los fotones no son absorbidos por el ADN, sino por otros constituyentes celulares, como vitaminas o cofactores enzimáticos. Al interactuar con un fotón, la molécula «fotosensibilizadora» pasa a un estado excitado; esta puede reaccionar con moléculas adyacentes y desencadenar procesos de oxidación, fenómeno conocido como estrés oxidativo. En las reacciones de oxidación intervienen derivados deletéreos del oxígeno. La molécula excitada suele transferir su energía al oxígeno molecular (O_2) que, a su vez, adquiere un estado excitado denominado «oxígeno singlete». Este reacciona fácilmente con compuestos ricos en electrones. Se ha observado que, en el ADN, el oxígeno singlete afecta sobre todo a la guanina. Y en 2004, demostramos que la reacción del oxígeno singlete con el ADN daba lugar a 8-oxo-7,8-dihidroguanina (8-xoGua).

Un segundo mecanismo de fotosensibilización se produce por la acción de los radicales libres, en especial del radical hidroxilo, que posee la capacidad de oxidar las cuatro bases y rompe la cadena de ADN al degradar los azúcares. Una última vía, menos frecuente, consiste en la oxidación directa del ADN, que tiene lugar cuando la molécula fotosensibilizadora le arranca un electrón; una vez más, ello afecta sobre todo a la guanina.

De nuevo, las técnicas cromatográficas y bioquímicas permiten visualizar los daños del ADN en las células expuestas a

los UVA. La oxidación de la guanina en 8-oxoGua representa el acontecimiento más frecuente. También se observan rupturas en la cadena, pero con una probabilidad dos o tres veces menor. Las otras tres bases resultan menos dañadas que la guanina. Además, se ha puesto de manifiesto que la formación transitoria del oxígeno singlete y la producción de 8-oxoGua suponen un 80 por ciento del estrés oxidativo provocado por una irradiación con UVA.

La presencia de 8-oxoGua en el ADN da lugar a la mutación de un par de bases guanina-citosina en timina-adenina. Sin embargo, existe una reparación eficaz de la 8-oxoGua. El arsenal enzimático que evita la acumulación de 8-oxoGua es distinto del que se encarga de reparar los dímeros. La clave reside en la ADN-glicosilasa, una enzima que corta los enlaces N-glicosídicos que unen un azúcar con una base. También elimina la base modificada del ADN, y otras enzimas terminan la reparación del ADN mediante la incorporación de una guanina inalterada.

FORMACIÓN DE FOTOPRODUCTOS

Pero el efecto de los rayos UVA no se limita al estrés oxidativo, como se había creído durante mucho tiempo. Uno de los fotoproductos diméricos asociados a los UVB, los dímeros del tipo del ciclobutano, forman parte de los daños causados por los UVA en el ADN. Un experimento realizado con bacterias y al-

EFFECTOS EN LA PIEL

Los tumores cutáneos

Con 90.000 nuevos casos cada año en Francia, los tumores de piel son los más frecuentes. Representan una tercera parte de todos los casos de cáncer y el doble de los de mama. Los rayos solares serían responsables de la mayoría de los casos. Tal asociación se puso de manifiesto al observar que los tumores se localizaban en las regiones del cuerpo más expuestas al sol. Por otro lado, los datos epidemiológicos demuestran un aumento de la frecuencia de este cáncer con la irradiación recibida por los individuos, especialmente aquellos que trabajan al aire libre. Esta tendencia resulta inquietante: desde hace 30 años se ha producido un ascenso del número de casos de cáncer de piel en los países industrializados. Ello se debe al aumento de la exposición al sol con fines recreativos.

De hecho, tras estos datos se esconden numerosas patologías. Los tumores cutáneos surgen a partir de las células de la capa superior de la piel, la epidermis, sobre las que incide la mayoría de la radiación. Los queratinocitos representan el 90 por ciento de las células epidérmicas. Sintetizan la queratina, una proteína fibrosa e insoluble en agua que protege e impermeabiliza la piel. Tales células se ven alteradas en la mayor parte de los tumores, como en los carcino-

más basocelulares, que afectan a los queratinocitos más profundos de la epidermis, en su capa basal. Los carcinomas basocelulares son los más frecuentes (más del 80 por ciento de los tumores cutáneos). Se localizan fácilmente, se extirpan mediante cirugía y no dan lugar a metástasis.



Carcinoma espinocelular



Melanoma

Menos frecuentes, los carcinomas espinocelulares (que se desarrollan en los queratinocitos de la capa espinosa, localizada por debajo de la capa basal de la epidermis) revisten mayor gravedad, ya que a veces originan metástasis. En los melanocitos, las células epidérmicas que sintetizan la melanina y contribuyen al bronceado de la piel, se origina un tipo de cáncer más infrecuente pero muy grave: el melanoma. Estos tumores producen numerosas metástasis en el organismo, incluso durante las primeras etapas de su desarrollo.

Además, hoy en día no existe ningún tratamiento eficaz contra los melanomas y la mortalidad causada por ellos es elevada. Sin embargo, en junio de 2011, el equipo de Corinne Bertolotto, del Instituto Nacional de la Salud y de la Investigación Médica (INSERM) de Niza, demostró por qué los melanomas suelen ser tan resistentes a la quimioterapia e identificó nuevos posibles medicamentos. Estas moléculas atacan determinadas formas mutadas de las proteínas responsables del crecimiento incontrolado de las células en los melanomas. Solo surtirían efecto en los pacientes que portan las mutaciones pero, en la mitad de los casos, dan lugar a una disminución importante y rápida del número de células tumorales.

BOBCHAK, D.C. (arriba); MONI, SARANYA, D.D.C. (abajo); WASHINGTON, FACULTAD DE MEDICINA DE LA UNIVERSIDAD DOWRY (arriba)

Visualizar las lesiones de ADN

Al absorber los rayos ultravioleta, el ADN puede romperse u oxidarse y sufrir daños: sus bases se fusionan y forman fotoproductos. Se han desarrollado numerosas estrategias para observar estas lesiones.

La más frecuente se basa en la utilización de anticuerpos (moléculas del sistema inmunitario) que reconocen los fotoproductos: se inyecta el ADN irradiado —y, por tanto, dañado— en conejos, de manera que su sistema inmunitario produce anticuerpos dirigidos contra las lesiones del ADN que no reconoce. A continuación, se extraen los anticuerpos de la sangre de los animales y se utilizan como marcadores que se fijan con mayor o menor intensidad sobre el ADN de las células, en función de la cantidad de fotoproductos. De esta forma se visualizan los daños en las quemaduras de la piel.

Otras técnicas permiten cuantificar las rupturas de las hebras del ADN, determinadas bases modificadas y dímeros. Primero, se trata el ADN para que pueda ser cortado en los lugares que contienen lesiones. A continuación, mediante cromatografía se visualizan los fragmentos separados en un gel. Acoplando esta estrategia con la técnica de PCR (reacción en cadena de la polimerasa), que replica los fragmentos de ADN un número muy elevado de veces, se determina la posición de los fotoproductos en un gen.

La última técnica permite cuantificar y caracterizar las lesiones después de haberlas separado del ADN. Para ello, se acopla un aparato de cromatografía líquida con un espectrómetro de masas (*fotografía*), de modo que cuantifican, en un solo paso, todos los dímeros y una decena de productos de oxidación.



gunos datos dispersos ya habían apuntado en ese sentido; pero nuestros equipos lo corroboraron a mediados del decenio de 2000 al demostrar que los UVA daban lugar a una mayor frecuencia de dímeros que de productos de oxidación.

Además, los trabajos de otros grupos han confirmado que los dímeros de pirimidina intervienen en la aparición de mutaciones en células humanas expuestas a rayos UVA. Nuestros equipos han demostrado también que la proporción de los diversos fotoproductos diméricos difiere de la obtenida con los UVB: no se observan fotoproductos de tipo (6-4) y se forman muy pocos dímeros de citosina; la gran mayoría corresponde a dímeros de timina, y los dímeros timina-citosina representan apenas el diez por ciento del total. Estas proporciones aparecen

en todos los tipos celulares. Además, al contrario de lo que sucede con los UVB, la piel protege poco contra la formación de dímeros asociada a los UVA, ya que la melanina absorbe menos estos rayos.

El ADN de las células expuestas a rayos UVA presenta por tanto una fotoquímica singular: la absorción de esos fotones por el ácido nucleico, aunque débil, genera numerosos fotoproductos. La distinta naturaleza de los daños causados por los UVA y los UVB se debería así a la diferencia entre los estados excitados iniciales del ADN.

LAS CREMAS SOLARES

Los resultados expuestos poseen una especial relevancia. Aunque la formación de dímeros por los UVA resulte menos eficiente que la derivada de los UVB, la predominancia de los primeros en la luz solar que nos alcanza hace pensar que una fracción nada despreciable de los fotoproductos mutagénicos proviene de esa región del espectro. Los datos subrayan también las propiedades genotóxicas de los UVA, que pueden originar mutaciones e incluso cáncer.

El riesgo cancerígeno de los UVA y su importante contribución al envejecimiento cutáneo han llevado a los legisladores a imponer en las cremas solares que se comercializan una fotoprotección contra esa región del espectro solar. La comprensión del poder cancerígeno de los UVA ha dado lugar a otro cambio: el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer ha incluido en la lista de agentes cancerígenos los equipos de bronceado artificial con UVA. El Instituto Nacional del Cáncer en Francia retomó esa clasificación y publicó en 2010 un informe sobre esa cuestión.

Los trabajos realizados en los últimos treinta años han arrojado una nueva luz sobre el papel de los daños del ADN en la aparición del cáncer de piel. Los resultados han permitido comprender mejor la reacción de las células ante los rayos ultravioleta y perfeccionar las estrategias de protección contra este agente mutagénico presente en la radiación solar.

Sin embargo, aún quedan abiertas numerosas cuestiones relacionadas con la formación de tales lesiones. Así, los fotoproductos funcionarían como «sensores» que desencadenarían el bronceado y conferirían mayor protección a la piel (aunque todavía no se sabe cómo). Su presencia también estaría relacionada con la modulación de las defensas inmunitarias y con la aparición de las quemaduras solares. Tras la primera descripción de los dímeros de timina, hace ya medio siglo, los daños causados en el ADN por las radiaciones ultravioleta todavía merecen la atención de científicos de todas las disciplinas.

© Pour la Science

PARA SABER MÁS

Singlet oxygen-mediated damage to cellular DNA determined by the comet assay associated with DNA repair enzymes. J.-L. Ravanat et al. en *Biological Chemistry*, vol. 385, págs. 17-20, 2004.

Cyclobutane pyrimidine dimers are predominant DNA lesions in whole human skin exposed to UVA radiation. S. Mouret et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 103, págs. 13.765-13.770, 2006.

UVA-induced cyclobutane pyrimidine dimers in DNA: a direct photochemical mechanism? S. Mouret et al. en *Organic & Biomolecular Chemistry*, vol. 8, págs. 1706-1711, 2010.

Base pairing enhances fluorescent and favors cyclobutane dimer formation induced upon absorption of UVA radiation by DNA. A. Banyasz et al. en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 133, págs. 5163-5165, 2011.

Lectura 2: El firmamento en infrarrojo



El firmamento en infrarrojo

Un telescopio en órbita, enfriado por helio líquido, ha tomado imágenes panorámicas en infrarrojo del cielo, registrando el resplandor de la materia fría del sistema solar, de la galaxia y del universo en general

Harm J. Habing y Gerry Neugebauer

Para los astrónomos, la región infrarroja del espectro electromagnético constituye una fuente de fascinación y frustración a un tiempo. Muchos objetos astronómicos —principalmente los integrados por materia fría y sólida— radian la mayor parte de su energía en longitudes de onda del infrarrojo. Además, ciertos sucesos de especial interés —tales como el nacimiento de estrellas y la condensación de sistemas planetarios— se contemplan de manera óptima a través del infrarrojo. Ahora bien, en la superficie de la Tierra, la atmósfera impide, casi por entero, el paso de la radiación infrarroja. Añádase que la construcción de un instrumento astronómico sensible a las longitudes de onda del infrarrojo supone un formidable desafío técnico. Ello explica que, mucho después de la exploración del cielo en las longitudes de onda de la luz visible y de las radioondas, e incluso tras rastrearlo en el ultravioleta, rayos X y rayos gamma, permaneciera una gran extensión del mismo sin cartografiarse en el infrarrojo. Solamente en las longitudes de onda más cortas del infrarrojo se había explorado el cielo con alta sensibilidad.

Con instrumentos a bordo del Satélite Astronómico Infrarrojo (*IRAS*, de *Infrared Astronomical Satellite*), se ha realizado ya una exploración del cielo exhaustiva, cubriendo un amplio dominio de longitudes de onda en el infra-

rojo. El satélite fue lanzado en un programa conjunto de la Agencia Holandesa de Programas Aeroespaciales (NIVR), la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) y el Consejo de Investigación en Ciencia e Ingeniería del Reino Unido (SERC). Operó durante la mayor parte del año 1983, registrando imágenes del 98 por ciento de la esfera celeste. La misión ha recogido una rica cosecha: con los datos enviados por el satélite, se han compilado mapas del brillo del cielo en cuatro bandas de longitudes de onda infrarrojas y se han catalogado unas 250.000 fuentes discretas de emisión infrarroja. La magnitud de esta cifra merece destacarse: en toda la historia de la astronomía anterior al *IRAS* se habían catalogado sólo unas 500.000 fuentes.

Como instrumento de exploración, el *IRAS* debía dar una visión de conjunto del cielo en el infrarrojo e identificar objetos que merecieran ulterior investigación. Ambas finalidades se han cumplido. Dentro del sistema solar, el satélite detectó nuevos cometas y un par de tenues bandas de polvo por encima y debajo del cinturón de asteroides. Halló una extensa banda de materia sólida en órbita alrededor de una estrella próxima, banda que quizá represente un estado primitivo de la formación de un sistema planetario. En otros lugares se observaron estrellas recién nacidas,

envueltas todavía en el velo de gas y polvo del que se habían condensado. El satélite proporcionó una visión clara y panorámica del núcleo de la Vía Láctea. De las galaxias detectadas por el *IRAS*, algunas brillan 50 veces más en longitudes de onda del infrarrojo que en la banda visible.

Las observaciones del *IRAS* no eran las primeras que se hacían del cielo infrarrojo. Desde el suelo se pueden acometer también, en estrechas “ventanas”, en el espectro donde las longitudes de onda de la radiación en el infrarrojo próximo, más cortas que las exploradas por el *IRAS*, penetran a través de la atmósfera. Para estudios en el infrarrojo lejano, se han transportado los telescopios fuera de la atmósfera en globos, cohetes y aviones de gran altitud; pero resulta difícil realizar con estas técnicas una exploración sensible del cielo entero en el infrarrojo. El valor de la exploración reside, sobre todo, en su imparcialidad; en un programa de observación circunscrito a determinados objetos, los resultados pueden estar sesgados por el proceso de selección. Un satélite observatorio es una plataforma ideal para una exploración.

La opacidad de la atmósfera no es el único problema con el que se ha de enfrentar el astrónomo de infrarrojo. La radiación infrarroja es emitida copiosamente por la materia a temperaturas terrestres ordinarias; por ejemplo, el tubo y los componentes ópticos del telescopio a la temperatura de la habitación resplandecen en el infrarrojo. El resplandor tiende a enmascarar la señal infrarroja de interés. En el vacío aislante del espacio, se resolvió este problema enfriando el telescopio con helio líquido. El *IRAS* tenía el mayor sistema criogénico, con mucho, de los colocados en órbita terrestre. La necesidad de conservar la provisión de helio resultó determinante en el diseño del telescopio y en el programa de observación. Y

1. VISTA DEL CIELO EN INFRARROJO: recoge una zona de 22 por 30 grados en las constelaciones de Tauro y Perseo. Se reconstruyó a partir de los datos recogidos por el *Satélite Astronómico Infrarrojo (IRAS)*, por sus iniciales en inglés. La imagen combina medidas del flujo de radiación en tres bandas de longitudes infrarrojas: las emisiones de 12 micrometros se representan en azul, las de 60 micrometros en verde y las de 100 micrometros en rojo. Así, los colores indican la temperatura aproximada de la materia emisora: las regiones azules son las más calientes y las rojas las más frías. La imagen registra el flujo total en “celdas” cuadradas de dos minutos de arco de lado. Las dos regiones resplandecientes mayores son las nebulosas NGC 1499 (en la parte superior de la imagen) e IC 348. Se trata de aglomeraciones de gas y polvo calentadas por estrellas inmersas en su interior. El objeto blanco, en forma de coma, situado bajo IC 348, es la emisión del polvo que rodea las Pléyades, agrupación de estrellas jóvenes y calientes. A la izquierda de las Pléyades, cerca del borde de la imagen, surge TMC 1, una región de formación de estrellas; en su interior se aprecia un conjunto semicircular de cuatro estrellas recién nacidas, envueltas en el polvo del que se condensaron. Alfa del Toro, la estrella más brillante de la región a las longitudes de onda del visible, aparece como un débil punto azul a unos nueve centímetros por debajo de TMC 1.

fue la evaporación del líquido refrigerante lo que acabó con la misión.

El proyecto del *IRAS* comenzó en 1974. En él trabajaban la NASA y la NIVR, cada uno por su lado. Se decidió aunar ambos programas; poco después se sumaba el SERC al esfuerzo común. El telescopio, los detectores principales de exploración y el sistema criogénico fueron construidos, en los Estados Unidos, por la NASA. El NIVR holandés se encargó de las restantes partes del vehículo espacial, entre ellas los paneles solares para la alimentación eléctrica, los ordenadores de a bordo y los sistemas de control y orientación del telescopio. El SERC habilitó una estación terrestre en el Rutherford Appleton Laboratory, en

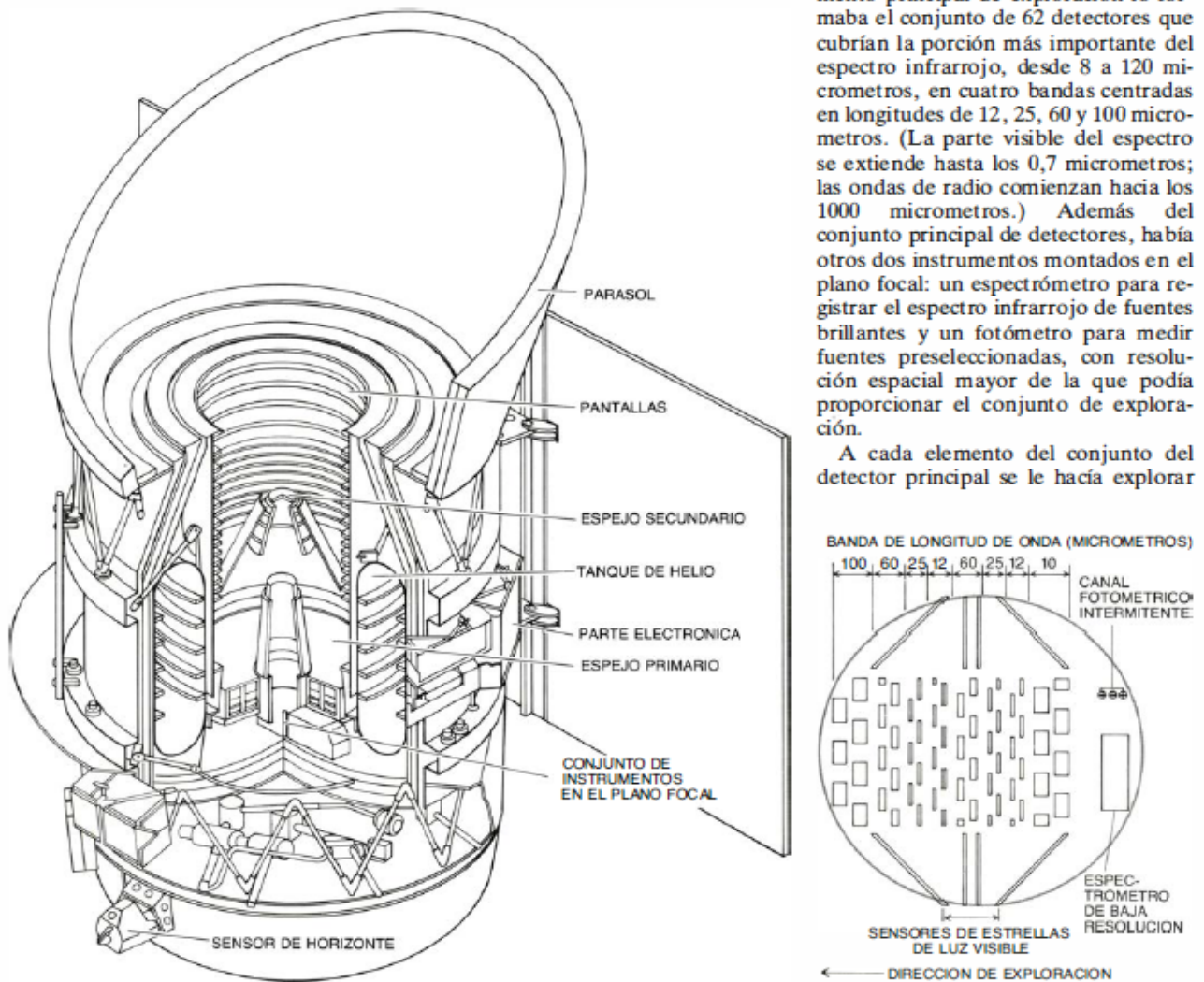
Chilton, Inglaterra, para gobernar el satélite. La dirección de las actividades del proyecto, en los Estados Unidos, estaba en el Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto de Tecnología de California, donde se está realizando el análisis final de la mayoría de los datos.

El telescopio tenía un camino óptico "doblado": la radiación incidía sobre un espejo primario de 57 centímetros, tras lo cual un pequeño espejo secundario la dirigía a través de una abertura en el centro del primario. En el plano focal, la radiación se focalizaba sobre tres instrumentos que incorporaban detectores de semiconductor sensibles a la radiación en longitudes de onda del infrarrojo. El telescopio estaba alojado en un recipiente aislado que en el mo-

mento del lanzamiento contenía 475 litros de helio líquido. El refrigerante mantenía el tubo del telescopio y sus espejos a unos 10 grados Kelvin (grados Celsius sobre el cero absoluto). Los detectores, por su parte, ni siquiera llegaban a los tres; estaban en torno a los dos grados Kelvin. El refrigerante se mantenía a esta temperatura, muy por debajo de su punto de ebullición, facilitando su evaporación.

Los detectores eran dispositivos fotoconductores provistos de filtros que respondieran a bandas específicas del infrarrojo. Gozaban de una extraordinaria sensibilidad: el telescopio detectaba un gránulo de polvo a dos o tres kilómetros de distancia. El instrumento principal de exploración lo formaba el conjunto de 62 detectores que cubrían la porción más importante del espectro infrarrojo, desde 8 a 120 micrometros, en cuatro bandas centradas en longitudes de 12, 25, 60 y 100 micrometros. (La parte visible del espectro se extiende hasta los 0,7 micrometros; las ondas de radio comienzan hacia los 1000 micrometros.) Además del conjunto principal de detectores, había otros dos instrumentos montados en el plano focal: un espectrómetro para registrar el espectro infrarrojo de fuentes brillantes y un fotómetro para medir fuentes preseleccionadas, con resolución espacial mayor de la que podía proporcionar el conjunto de exploración.

A cada elemento del conjunto del detector principal se le hacía explorar



2. EL SATELITE ASTRONOMICO INFRARROJO llevaba un telescopio con un espejo primario de 57 centímetros de diámetro y un conjunto de detectores electrónicos sensibles a la radiación infrarroja. Para eliminar la propia emisión infrarroja del instrumento, el telescopio permanecía enfriado con helio líquido, que mantenía el tubo y el sistema óptico a unos 10 grados Kelvin y los detectores a dos grados. Los principales detectores de exploración mon-

tados en el plano focal del telescopio eran dispositivos de silicio y germanio sensibles a cuatro bandas de longitudes de onda del infrarrojo. Los detectores se disponían en filas escalonadas de modo que, cuando el telescopio exploraba el cielo, la imagen de una fuente cruzase al menos dos detectores en cada banda. El canal fotométrico intermitente y el espectrómetro de baja resolución realizaban medidas adicionales. (Resumen esquemático de Ian Worpole.)

una banda de cielo de unos cinco minutos de arco de anchura; producía una señal proporcional al flujo total de radiación infrarroja que recibía en su banda. El tratamiento mediante ordenador, realizado en tierra, extraía fuentes discretas de la corriente continua de datos y combinaba las múltiples observaciones de una fuente única. Por la propia naturaleza del tratamiento, las fuentes discretas eran "puntuales"; dada la resolución angular de los sensores del *IRAS*, esto significa menor que algunos minutos de arco.

La órbita del satélite, a unos 900 kilómetros de altitud, era casi polar. El plano de la órbita giraba alrededor de un grado de arco por día, concordando con el movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol. De esta manera, el vehículo espacial se mantenía constantemente sobre el "terminador" terrestre, o límite entre el día y la noche; apuntaba, pues, a unos 90 grados de distancia angular del Sol.

La gran sensibilidad de los elementos del detector costó lo suyo: el polvo y los residuos cercanos al satélite, así como el paso de los rayos cósmicos y otras partículas de gran energía por el detector, generaban señales espurias. Las señales astronómicas se separaban de este ruido de fondo imponiendo la condición de que toda fuente reconocida tenía que confirmarse por observaciones repetidas en varias escalas de tiempo. De una fuente que había sido vista por dos elementos del detector con intervalo de algunos segundos, se decía que estaba confirmada en segundos. De una fuente observada en dos órbitas consecutivas se decía, entonces, que estaba confirmada en horas. Ulteriores reexploraciones de la misma zona del cielo posibilitaron confirmaciones en semanas o meses. Por estos medios, la exploración adquirió plena seguridad y exhaustividad. Salvo en regiones del cielo donde la densidad de fuentes produce confusión, los autores calcularon que el 99,8 por ciento de las fuentes catalogadas eran reales; no se pasarían por alto más del 2 por ciento de las fuentes reales de suficiente brillo para su detección.

El *IRAS* fue lanzado el 25 de enero de 1983, desde la Base Vandenberg de la Fuerza Aérea, en California. Tras algunos días de ensayos preliminares, se quitó la tapa de la abertura y comenzaron las observaciones. Dos veces al día se transmitían a la Tierra unos 700 millones de bits de datos de imágenes. Alrededor del 60 por ciento del tiempo de observación se dedicó a la exploración; el resto se empleó en observaciones

puntuales de blancos elegidos. En agosto se había obtenido una cobertura casi completa del cielo; comenzó otra ronda de exploraciones. El día 22 de noviembre, cuando se acabó la provisión de helio y se paró el telescopio, el *IRAS* había cubierto el 95 por ciento del cielo con al menos exploraciones confirmadas en dos horas.

Los descubrimientos de la misión *IRAS* inciden en todos los campos de interés astronómico: el sistema solar, las estrellas próximas y el espacio interestelar, otras regiones de la Vía Láctea, otras galaxias y por último, quasars y objetos similares extremadamente distantes. Los datos proporcionados por el satélite dan la primera panorámica completa del cielo en el infrarrojo lejano.

La apariencia del cielo depende en cierto grado del tamaño espacial o angular de lo que se mira y, por supuesto, de las longitudes de onda en que se realiza la observación. En las longitudes de onda más cortas del *IRAS*, los objetos brillantes y puntuales son estrellas calientes; se está contemplando la porción de onda larga del espectro continuo de las estrellas, que tiene su máximo en el visible. Una densa concentración de estrellas marca el disco de la galaxia de la Vía Láctea. A longitudes de onda más largas, las fuentes puntuales fuera del plano de la Vía Láctea son, esencialmente, todas las galaxias externas, cuyas emisiones incluyen una intensa componente con una temperatura efectiva de 20 a 60 grados Kelvin. Como podría esperarse, las galaxias detectadas se distribuyen por el espacio de un modo bastante uniforme. La distribución de estrellas y de galaxias se ofrece en la figura 4.

Las observaciones de estrellas del *IRAS* han proporcionado también una nueva manera de considerar la estructura y la forma general de nuestra galaxia. Extractando del catálogo de fuentes puntuales las que satisfacen criterios específicos de selección, podemos tomar muestras de diferentes constituyentes de la galaxia. En particular, se puede escoger una clase de brillantes fuentes infrarrojas que radian intensamente a 12 y 25 micrometros y mucho menos a otras longitudes de onda. Se trata, quizá, de estrellas calientes (con temperaturas de algunos miles de grados) rodeadas de materia más fría (a unos cientos de grados).

La distribución de esas fuentes se representa en la figura 5. Muestra una configuración nítida, en la que un núcleo galáctico se superpone a una del-

gada cuña, el disco de la galaxia seguramente. En otras galaxias se perciben abultamientos similares, pero ha sido imposible ver la forma global de la Vía Láctea desde nuestra posición dentro del disco.

Si en vez de atender a las fuentes puntuales, nos detenemos en la emisión de configuraciones extensas, se aprecia una representación distinta del cielo. A longitudes de onda cortas (12 y 25 micrometros), la principal contribución a la emisión infrarroja de fondo procede del polvo zodiacal, un componente del sistema solar. El polvo se concentra en el plano zodiacal o eclíptico (plano en que está la órbita del planeta) y, en las imágenes del *IRAS*, brilla intensamente. La estructura detallada de la emisión zodiacal reviste su interés. La emisión presenta su máxima densidad en el plano eclíptico, como era de esperar, pero hay también dos bandas fuera del mismo a unos nueve grados por encima y por debajo.

La materia que se encuentra en el plano eclíptico puede deberse al limado de los asteroides en sus colisiones múltiples; más difíciles de explicar son los dos halos que flanquean el plano. El hecho de que la materia, en los anillos, parezca describir órbitas alrededor de un punto bien por encima, o por debajo, de los polos solares es, ciertamente, una ilusión; las partículas se disponen en órbitas que cruzan la eclíptica a un ángulo de 9 grados; las partículas pasan parte de su tiempo en cada banda. Se ven dos anillos paralelos, y no un cilindro continuo, porque cada partícula gasta más tiempo fuera de la eclíptica que en su vecindad. La pregunta a resolver es: ¿qué puede haber originado una población definida de partículas de polvo con un ángulo de inclinación orbital tan grande? ¿Quizá la desintegración de un cometa al colisionar con un asteroide?

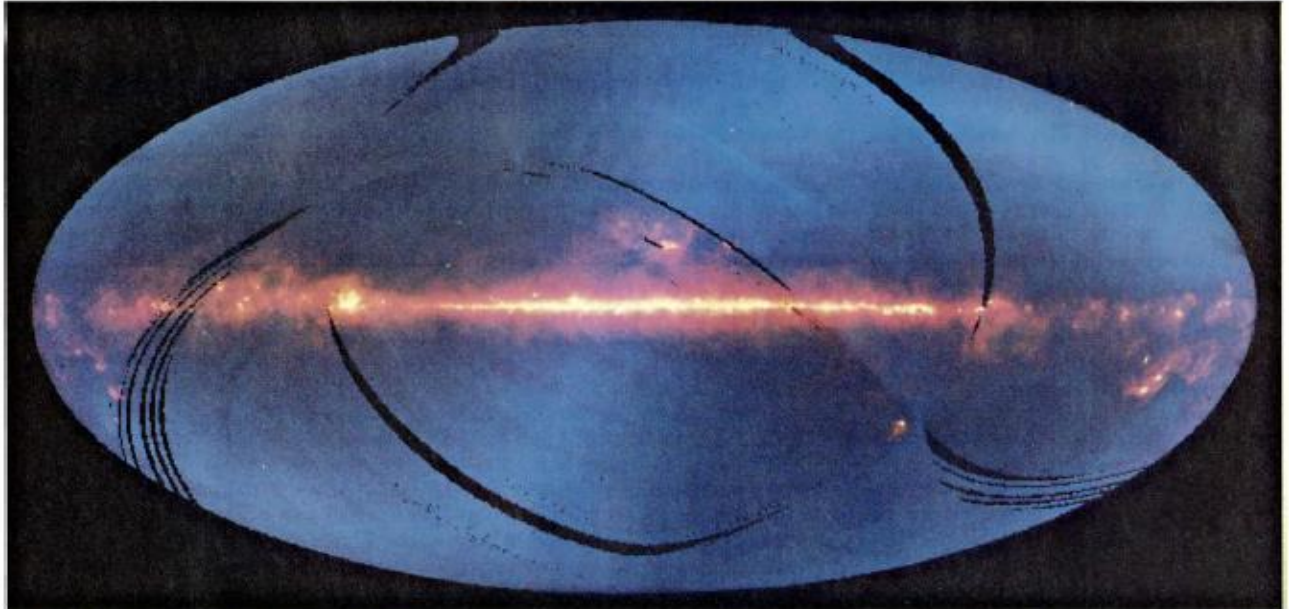
Un análisis de la emisión en las cuatro bandas de longitud de onda revela algunas características de las partículas de polvo. Poseerán cierto tamaño (de un diámetro, tal vez, de 30 micrometros) y serán oscuras (reflejando del 10 al 20 por ciento de la radiación que incide sobre las mismas). Considerando su proximidad al Sol, están relativamente frías, quizá a unos 275 grados Kelvin, una temperatura cercana a la del interior de los edificios. Este hecho sugiere, a su vez, que pudieran estar en gran parte constituidas por silicatos, que radian en longitudes de onda del infrarrojo de manera más eficaz que otras materias posibles, permanecien-

do, por tanto, más fríos. Los silicatos son el componente principal de la mayoría de los cuerpos rocosos del sistema solar.

En las bandas de longitud de onda más larga, la radiación infrarroja de fondo tiene otras componentes. Vale la pena destacar las configuraciones ob-

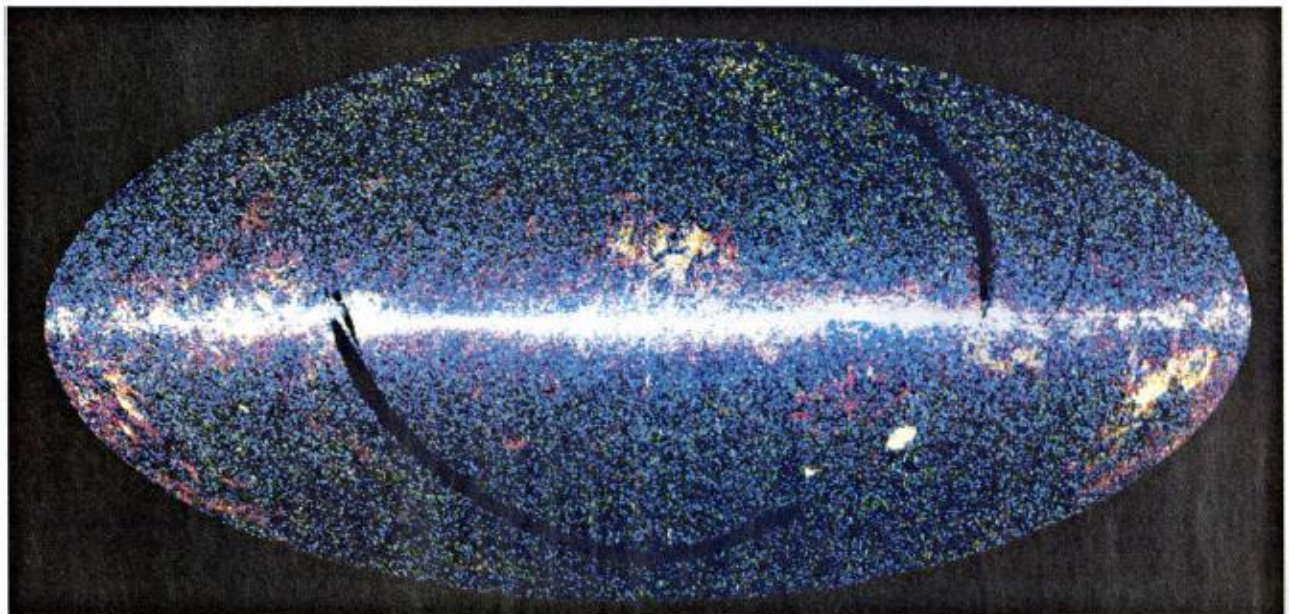
servadas en la radiación de fondo a 100 micrometros. Cuando los datos de esta banda se filtran espacialmente para poner de manifiesto características de tamaños comprendidos entre medio y 10 grados, se nos evidencia una esfera celeste cubierta de tenues nubes, los llamados cirros infrarrojos.

Queda mucho por saber de la naturaleza y situación de los cirros infrarrojos. Algunos de ellos quizá formen parte del sistema solar, pero la imposibilidad, en un análisis provisional, de detectar ningún efecto de triangulación, indica que las nubes distan al menos 1000 unidades astronómicas



3. EMISION INFRARROJA TOTAL en las bandas del IRAS, en celdas de dos minutos de arco; dicha emisión está dominada por la radiación procedente del plano galáctico de la Vía Láctea y del plano eclíptico del sistema solar. En esta imagen (y en las tres subsiguientes), el firmamento se ve en una

proyección que orienta el plano de la galaxia horizontalmente. El plano eclíptico es la banda azul, débil y sinuosa. Las emisiones en las bandas de 12, 60 y 100 micrometros se muestran en azul, verde y rojo, respectivamente. Las zonas sin detalles representan partes del cielo no cubiertas en la exploración.



4. ESTRELLAS Y GALAXIAS dominan en un mapa del cielo preparado con el catálogo de fuentes discretas del IRAS. La mayoría de las estrellas, que están muy calientes, se detectaron en la más corta de las longitudes de onda a las que el IRAS era sensible, es decir, a 12 micrometros. Se representan aquí

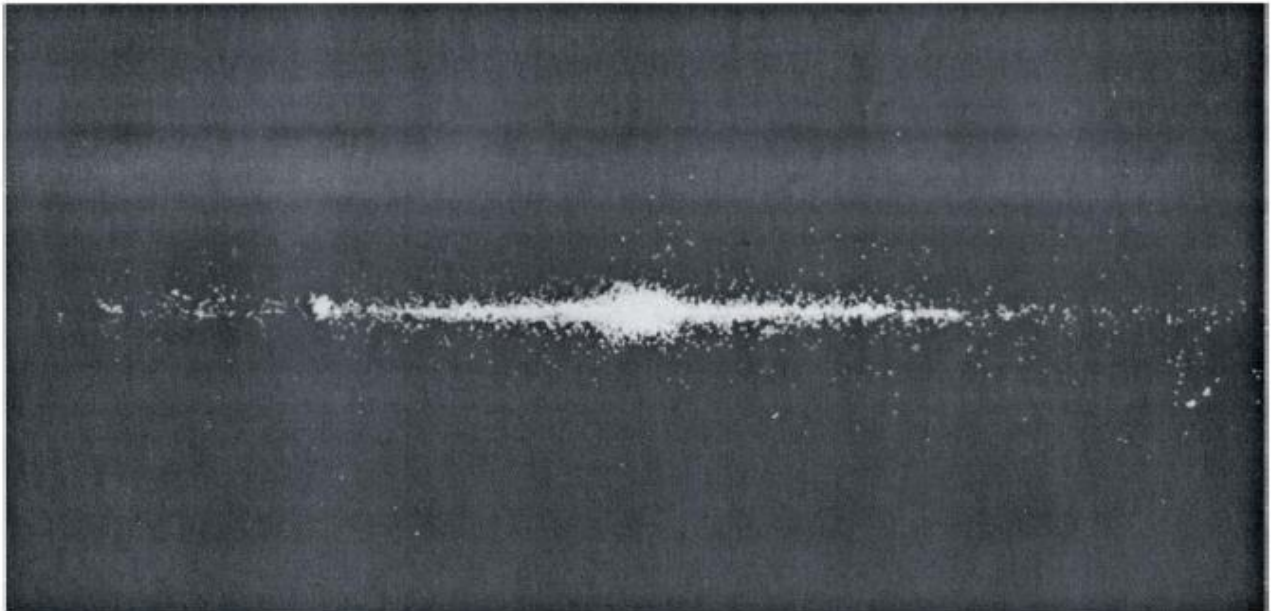
como puntos azules. Las galaxias externas suelen tener su señal más intensa a longitudes de onda mayores; aquí se han detectado por su emisión a 60 micrometros y se representan como puntos verdes. Lejos del plano galáctico, la distribución de galaxias en el cielo viene a mostrarse bastante uniforme.

(1000 veces la distancia de la Tierra al Sol, o sea, 25 veces el radio orbital de Plutón); debería ser posible extender el límite hasta 5000 unidades astronómicas. Las nubes podrían quedar a unas 50.000, o incluso 100.000, unidades astronómicas y permanecer todavía ligadas gravitatoriamente al Sol. A esa dis-

tancia, cabría asociarlas con la nube de Oort, un núcleo de materia que se supone constituye la fuente de la mayoría de los cometas.

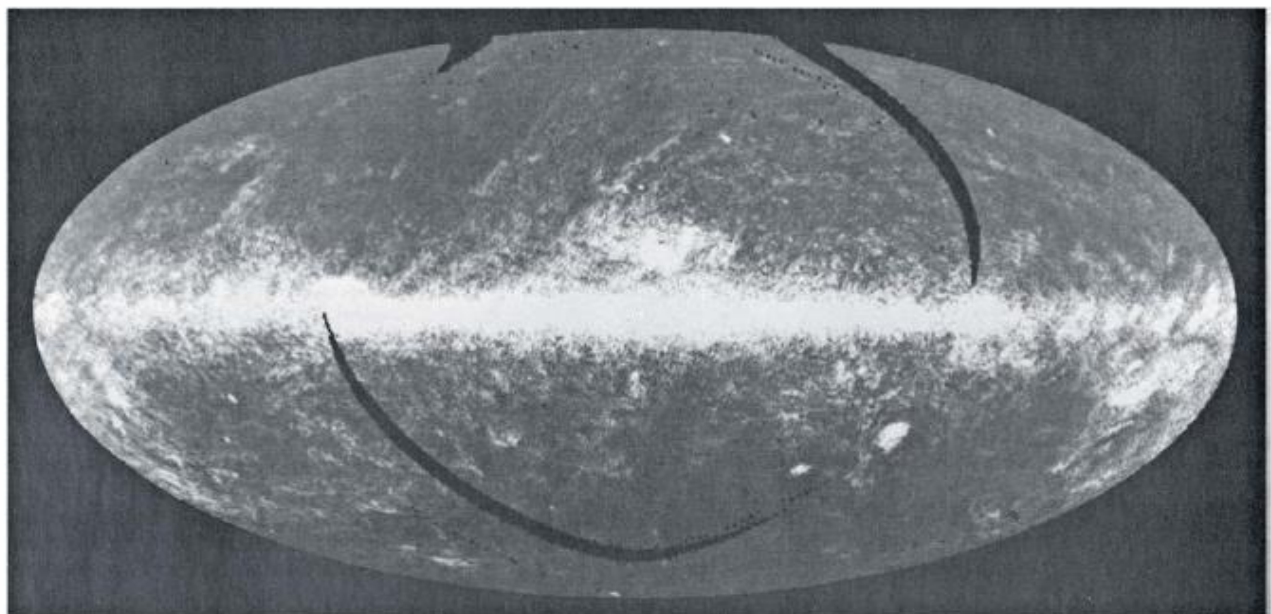
Los cirros infrarrojos, en su mayor parte, están probablemente en el medio interestelar, fuera del sistema solar aunque dentro de la inmediata ve-

cinidad del Sol. Algunas de las configuraciones de cirros coinciden con nubes de hidrógeno gaseoso observadas a longitudes de radioondas; se sabe que las nubes de hidrógeno son interestelares, distantes cientos de años-luz o más (equivalente a varios millones de unidades astronómicas).



5. FORMA GENERAL DE LA VIA LACTEA según se ofrece en este mapa del cielo, que muestra la distribución de una pequeña subpoblación de estrellas. El mapa se generó seleccionando sólo las fuentes discretas cuyas emisiones a 12 y 25 micrometros indican una temperatura de unos 400 grados Kel-

vin. En su mayor parte, se trata de estrellas envueltas en polvo que radian el grueso de su energía en el infrarrojo. El plano galáctico está definido por la distribución de las estrellas; hay también un abultamiento, cerca del centro de nuestra Vía Láctea, que no se distingue en las longitudes de onda del visible.



6. SE LLAMAN CIRROS INFRARROJOS los copos o briznas de polvo frío que, en las observaciones del satélite astronómico *IRAS*, aparecieron dispersos por todo el cielo. La imagen se ha construido a partir de datos recibidos en la banda de 100 micrometros, filtrados para realzar los distintos rasgos con

un tamaño angular de entre medio y 10 grados. Algunos cirros infrarrojos podrían ser parte del sistema solar externo, pero la mayoría yacen, probablemente, en el espacio interestelar cercano. Pueden ser escapes de galaxias; humo galáctico; se los supone constituidos de finas partículas de grafito.

Si la interpretación interestelar de las nubes es correcta, estarán constituidas por gas y polvo expulsados por estrellas moribundas y, probablemente, barridos por los residuos de una supernova en expansión. A partir de la emisión a 60 y 100 micrometros, se puede calcular la temperatura media de la nube: yace entre 25 y 50 grados. Se trata de un valor alto para una materia a tal distancia de cualquier estrella, lo que impone limitaciones sobre los posibles componentes de los granos de polvo. Es probable que una parte importante de componentes de las nubes sean partículas muy finas de carbono, en forma de grafito. Las partículas de grafito radian menos eficazmente que las de silicato del polvo y, por tanto, permanecen más calientes.

Las primeras observaciones sorprendentes obtenidas por el *IRAS* se referían a objetos que se mueven a gran

velocidad por el sistema solar: los cometas. Los datos procedentes del satélite se sometieron a un análisis preliminar de ordenador en el laboratorio Rutherford Appleton para detectar fuentes que se habían movido entre observaciones confirmadas de dos horas. Se impone una identificación rápida de tales cuerpos transitorios para que otros observatorios continúen siguiéndolo tras el descubrimiento.

El primer cometa localizado por el *IRAS* se apreció el 26 de abril; lo descubrieron también dos astrónomos aficionados, por lo que se designó cometa *IRAS-Araki-Alcock*. El 11 de mayo pasó a una distancia de tres millones de kilómetros de la Tierra, más cerca que ningún otro cometa en los últimos 200 años. La apariencia de la cabeza era muy similar en las longitudes de onda del visible y del infrarrojo, pero las imágenes de la cola revelaron diferencias notables. La cola visible era débil,

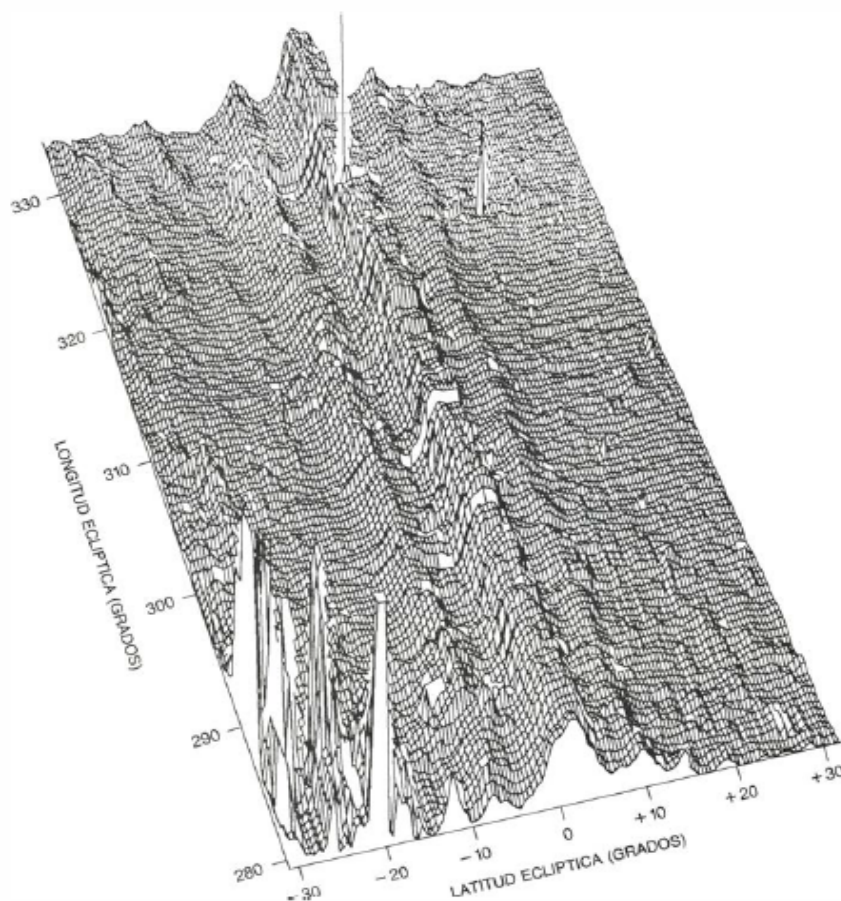
estrecha y bastante corta; las imágenes infrarrojas mostrarop, por contra, una cola amplia y brillante, que se extendía, al menos, hasta 200.000 kilómetros, si no llegaba a los 400.000.

Se cree que los cometas están constituidos por hielo mezclado con algo de polvo. Ahora bien, las partículas de las regiones más distantes de la cola no pueden ser de hielo, pues se habrían evaporado al trasladarse de la cabeza a la cola. De aquí que la materia de la cola larga deba ser polvo y entren, en su probable composición, los silicatos. Sale expulsada del cometa a un ritmo de unos 200 kilogramos por segundo, bastante más rápidamente de lo que sugerían estimaciones anteriores.

En su misión, el *IRAS* había descubierto cuatro cometas más y había realizado también observaciones de Tempel 2, un cometa conocido por sus 16 apariciones anteriores en el sistema solar interno. A longitudes de onda visibles, Tempel 2 parece sin cola; se suponía que todo el material volátil había sido eliminado durante anteriores acercamientos al Sol. La imagen del *IRAS* reveló un apéndice largo y estrecho, que se extendía a 30 millones de kilómetros del núcleo cometario.

Con un cuerpo de las características de los cometas, descubierto el día 11 de octubre, vino la solución de un pequeño misterio. Se le designó 1983 TB. Al principio se le tomó por un asteroide de la clase Apolo, objetos que siguen trayectorias que pasan al interior de la órbita terrestre. La trayectoria de 1983 TB lo lleva, en efecto, al interior de la órbita de Mercurio, hasta 20 millones de kilómetros de la superficie solar. Pronto se vio que la órbita de 1983 TB se correspondía muy estrechamente con las órbitas de los meteoritos Geminidos, que crean un chubasco meteorítico anual en diciembre. Otros chubascos meteoríticos se originaron a partir de restos de cometas, pero nunca se había identificado la fuente de los chubascos de los Geminidos. Como 1983 TB es, evidentemente, el cuerpo generador del chubasco de los Geminidos, se cree ahora que no es un asteroide, sino los restos de un cometa apagado.

Otro cuerpo del sistema solar que se está buscando en los datos del *IRAS* es un hipotético décimo planeta, más allá de la órbita de Plutón. Se ha propuesto muchas veces la existencia de tal planeta para explicar anomalías en la órbita de Neptuno; la emisión infrarroja es el signo que con más probabilidad delatará su presencia. En realidad, de existir un décimo planeta, la prueba podrá, casi con toda seguridad,



7. BANDAS DE POLVO DEL SISTEMA SOLAR constituidas por materia finamente dividida y en órbita a la misma distancia del Sol que el cinturón de asteroides (entre los planetas Marte y Júpiter). La gráfica muestra la intensidad de la radiación recibida en la banda de 60 micrometros en función de la latitud y longitud eclípticas. La cresta central revela un anillo de polvo dentro del plano eclíptico; puede haberse formado por erosión de los asteroides. Las dos bandas a uno y otro lado son más difíciles de explicar. Indican que hay cierta cantidad de polvo en órbitas inclinadas unos nueve grados con respecto a la eclíptica; cabe la posibilidad de que esta materia se formase por choque de un cometa con un asteroide.

encontrarse entre las fuentes puntuales del *IRAS* que no satisfacen los complicados criterios de confirmación. Hasta ahora no se ha descubierto.

Tal vez la mayor sorpresa de la misión *IRAS* llegó muy al principio, cuando los instrumentos se estaban calibrando mediante observaciones de estrellas próximas y brillantes. Una de esas "candelas patrón" era la joven y caliente estrella Vega, o Alfa de la Lira, a 26 años-luz del Sol, que, a longitudes de onda visibles, es la quinta estrella en brillo de la totalidad del firmamento. Vega tiene una masa de dos veces y media la del Sol y multiplica por 50 el brillo de éste. Se ha observado ampliamente a longitudes de onda que se extienden desde el ultravioleta hasta unos 20 micrometros; se presumía de conocer bien sus propiedades. En particular, los modelos teóricos habían tenido mucho éxito al explicar el espectro visible de la estrella. Las medidas del *IRAS* a 12 micrometros concordaban con los modelos, pero a longitudes de onda más largas había una importante discrepancia. La emisión, que tenía que caer bruscamente más allá de 25 micrometros, permanecía casi constante.

Ahora se puede ofrecer, con cierta confianza, una explicación del exceso de radiación infrarroja en Vega. La emisión en onda larga proviene de su copiosa abundancia de partículas pequeñas que forman un anillo alrededor de la estrella, a unas 85 unidades astronómicas de distancia. El razonamiento que llevó a tal conclusión ilustra la manera cómo se interpretan los datos del *IRAS*.

Hay muchos ejemplos de estrellas calientes rodeadas de materia más fría; se trata de gas y polvo expelidos por la propia estrella, sujetos por tanto a continua renovación. Pero Vega no está perdiendo materia; por consiguiente, las partículas que la rodean deben encontrarse en órbitas estables. La cadena de deducciones mediante la cual se caracterizó la materia comienza con una estimación de su temperatura; dadas ciertas hipótesis simplificadoras, la forma del espectro infrarrojo implica una temperatura de 85 grados Kelvin. El radio de la nube se determinó mediante observaciones especiales obtenidas con el menor de los detectores de 60 micrometros, a fin de alcanzar la máxima resolución espacial posible.

La estimación del tamaño de las partículas requiere hilar más fino. Si las partículas fueran del tamaño de los granos de polvo interestelar, que no suelen alcanzar el micrometro de diámetro, la presión de la radiación de Vega los ha-

bría expulsado hacia fuera. Las partículas mayores, sin llegar al milímetro de diámetro, habrían sucumbido a un efecto opuesto: cediendo momento angular a la radiación estelar, habrían descrito órbitas espirales hasta caer en la atmósfera de la estrella. Además, como las partículas radian eficazmente a 25 micrometros, no parecen ser inferiores a este diámetro. Estas consideraciones permiten establecer un límite inferior para el tamaño de las partículas. El límite superior viene dado por el flujo observado de radiación infrarroja: muchas partículas pequeñas, al tener mayor superficie, radian con mayor eficacia que unas pocas mayores. Si la materia se hubiera aglomerado en la banda para formar un planeta único, no se hubiera detectado.

Los gránulos semejantes a gravilla del anillo de Vega tienen una masa total aparente del 1 por ciento de la masa de la Tierra. Podría muy bien ocurrir que hubiese cuerpos mayores, no observados; si la distribución del tamaño de las partículas es la del cinturón de asteroides del sistema solar, la masa total de la materia en órbita podría multiplicar por 300 la masa terrestre. El anillo de Vega es el primer ejemplo convincente de la existencia de materia sólida en órbita alrededor de una estrella distinta del Sol; puede muy bien representar una fase primitiva en la condensación de un sistema planetario. Vega quizá no se remonte más allá de unos cientos de millones de años —comparada con los 4500 millones del Sol; el propio sistema solar pudo atravesar idéntica fase de evolución cuando el Sol tenía la misma edad.

Al hilo del descubrimiento del anillo de Vega, se hizo una exploración en otras estrellas próximas que pudieran tener materia en órbita. Se vio que 50 de ellas manifestaban un exceso de radiación infrarroja, difícil de explicar mediante otros mecanismos; mas sólo en un caso hay indicación de partículas de tamaño milimétrico en órbita alrededor de la estrella. El segundo candidato es Fomalhaut, una estrella del hemisferio Sur que tampoco llega a los mil millones de años de antigüedad.

Una tarea para la cual el *IRAS* iba particularmente bien dotado era la recogida de estadísticas de vida sobre el nacimiento y muerte de las estrellas. De acuerdo con la teoría dominante, las estrellas se forman por condensación de una región densa dentro de una nube de gas y polvo. La nube circundante oculta a la observación visual los primitivos estadios de la evolución estelar. De manera semejante, muchas

estrellas envejecidas expulsan grandes cantidades de gas y polvo y quedan envueltas en una nube de propia creación. Las observaciones infrarrojas son sensibles a las emisiones térmicas procedentes del propio polvo, con lo que ofrecen un medio efectivo de detectar y estudiar tales procesos.

En los últimos años, las regiones de formación de estrellas han sido objeto de atenta observación por parte de instrumentos con base en tierra y otros en vuelo. Se ha prestado máximo interés al nacimiento de estrellas grandes y calientes; las más pequeñas y más típicas de la población estelar (y también de masa más parecida al Sol) eran demasiado débiles para su observación. Uno de los mayores beneficios de la exploración del *IRAS* puede ser la de aportar una muestra más representativa de las estrellas más jóvenes.

En su búsqueda de nuevas estrellas, *IRAS* exploró una pequeña y oscura nube llamada Barnard 5, en la constelación de Perseo. Se detectaron cuatro fuentes discretas de emisión infrarroja. Parece que la más brillante está alimentada por una estrella nueva, de tamaño y masa solares, aunque diez veces más luminosa. Estas características están de acuerdo con modelos de evolución estelar que indican que los primeros 100.000 años en la vida de tal estrella constituyen un episodio de brillo excepcional. La estrella no se ha visto con los detectores; lo que se registra es la radiación del polvo que la estrella ha calentado entre 30 y 800 grados Kelvin.

En la nube llamada Camaleón 1, en el cielo meridional, se descubrió un gran nido de estrellas jóvenes. Se identificaron unas 70 fuentes, aunque algunas sean "estrellas de campo de visión", sin relación con la nube: caen simplemente a lo largo de la misma visual. Algunas de las otras fuentes de la nube se agrupan en tal densidad que impiden cualquier análisis individual. Entre los objetos restantes, hay 17 que se parecen a las estrellas recién nacidas de Barnard 5. Algunas de ellas están inmersas en la nube; otras se han separado, pero conservan todavía un velo de polvo. Veinticinco fuentes se han identificado como aglomeraciones frías de materia; algunas estarían a punto de condensarse para formar estrellas.

En el extremo opuesto de la escala de edad estelar, hay gigantes rojas frías que están acercándose al punto final de la evolución: se desintegrarán en una nebulosa planetaria o (más raramente) explotarán en una supernova. Tales estrellas expulsan grandes cantidades de gas y polvo, formando un espeso manto

que absorbe la radiación estelar y la reemite en el infrarrojo.

Al evolucionar la gigante roja, diríase que se acelera la velocidad de pérdida de masa. Al principio, la estrella expulsa cantidades de materia iguales a la masa solar cada 100.000 años; después, la misma cantidad de materia se pierde cada 10.000 años. Las estrellas de este segundo grupo no se distinguen en la luz visible, pero sí se detectan a longitudes de onda del infrarrojo intermedio. Algunas de ellas se conocían antes del lanzamiento del *IRAS* por estudios en infrarrojo con base en superficie y a partir de radioobservaciones de las emisiones de las moléculas hidroxilo (OH); se conocen como estrellas OH/IR. El *IRAS* ha descubierto muchas más, incluyendo ejemplos extremos.

La mayoría de las estrellas son variables en esta fase de su existencia, lo que denuncia quizá que se está acabando su provisión de combustible nuclear. Los resultados del *IRAS*, sin embargo, muestran que las fuentes infrarrojas más extremas no varían. Es posible que su combustible esté tan agotado que no llegue ni siquiera a alimentar pulsaciones. No se ha avanzado todavía ninguna interpretación convincente; sin embargo, de los misterios que rodean la fase moribunda de la evolución estelar algunos quizá los resuelva el análisis más detallado de los datos. Los espectros obtenidos con el espectrómetro del *IRAS* serán de gran importancia, pues revisten particular utilidad para clasificar objetos de esta clase.

Un blanco obvio para la investigación astronómica es la región central de la Vía Láctea, a unos 30.000 años-luz de la posición del sistema solar en uno de los brazos espirales de la galaxia. Densas concentraciones de polvo ocultan el núcleo de la galaxia a las longitudes de onda visibles; las observacio-

nes de radio y las del infrarrojo ofrecen, pues, la única vía de acceso. Las imágenes *IRAS* del núcleo no son, en manera alguna, las más detalladas de las realizadas hasta ahora—otros instrumentos han ofrecido resolución espacial más alta—, pero son capaces de mostrar fuentes mucho más débiles que las detectadas en imágenes infrarrojas anteriores y su campo de visión da un panorama sin precedentes.

Cierto número de estructuras cerca del núcleo galáctico, que aparecen en forma prominente en mapas obtenidos a longitudes de onda de radio, son también conspicuas en las imágenes del *IRAS*. Se pueden percibir configuraciones difusas demasiado grandes para encajar dentro del campo de visión de otros instrumentos. Tal vez las más notables sean las briznas de materia fría que se extienden desde el núcleo hacia arriba y hacia abajo del plano galáctico. En las fotografías aparecen como delicadas volutas de humo, pero su escala es enorme.

Fuera de la Vía Láctea, el *IRAS* detectó al menos 10.000 galaxias. En la mayoría de los casos, su luminosidad en el infrarrojo aumenta sin cesar con la longitud de onda; presentan, pues, su máximo brillo en la banda de 100 micrometros. En virtud de la interferencia de los cirros infrarrojos se detectan con mayor facilidad, sin embargo, a 60 micrometros.

El nivel de actividad infrarroja en las galaxias varía entre amplios límites. En algunos casos, la fracción de la emisión total que corresponde al infrarrojo viene a resultar despreciable; en otros, casi toda la radiación emergente de las galaxias es infrarroja. En general, la variación está correlacionada con la cantidad de polvo de la galaxia. Las elípticas están en gran parte libres de polvo y tienen escasa luminosidad infrarroja; el *IRAS* detectó pocas. Las galaxias espirales son mucho más pol-

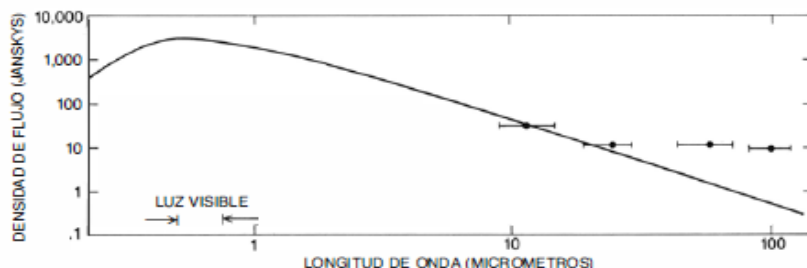
voriantas; casi todas las que brillan fueron detectadas en el infrarrojo, así como un considerable número que no se había encontrado en las exploraciones realizadas con luz visible.

Hay una galaxia espiral comparativamente cercana: la M31, o gran "nebulosa" de Andrómeda. El *IRAS* resolvió los rasgos infrarrojos de M31; mostró que la mayor parte de la radiación de onda larga proviene de dos regiones: el núcleo de la galaxia y un anillo coincidente con vías de polvo en los brazos espirales. Los detalles de la estructura del anillo concuerdan estrechamente con la distribución de las nubes de hidrógeno detectada por los radiotelescopios. Así, el anillo es una zona rica en materia interestelar y es, probablemente, sede de activa formación de estrellas. El grueso de la emisión infrarroja del anillo proviene seguramente de los granos de polvo calentados por estrellas recién formadas.

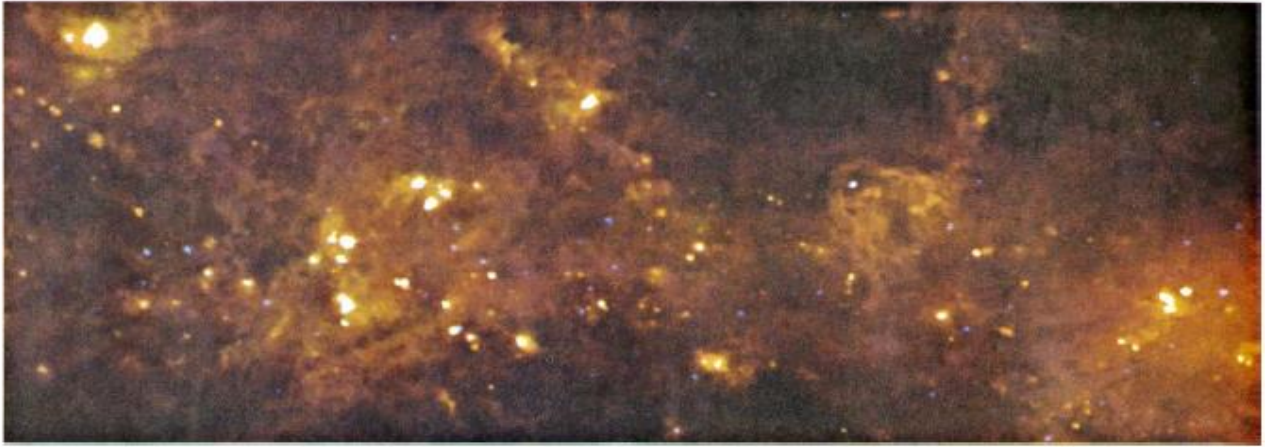
El *IRAS* no hubiera detectado la M31 de no caer tan próxima; intrínsecamente, es una galaxia muy débil en el infrarrojo. No se trata de ninguna zona de intensa formación de estrellas. El cociente de su radiación infrarroja a su emisión de luz azul es de sólo 0,03. La Vía Láctea, en comparación, emite aproximadamente iguales cantidades de radiación infrarroja y de luz azul. Otras galaxias brillan todavía más en el infrarrojo. En una exploración limitada a un 1 por ciento del cielo, *IRAS* detectó 86 galaxias cuyas relaciones de infrarrojo a azul variaban de 0,5 a 50; el cociente típico era de cinco.

Cuando se anunciaron, hace un año, los resultados de la exploración limitada, quedaban nueve fuentes infrarrojas que no se habían identificado con ningún objeto visible en las fotografías obtenidas con luz visible. Ya se ha encontrado explicación para esas nueve fuentes. Una resultó ser una aglomeración de materia en los cirros infrarrojos; las ocho restantes correspondían a galaxias distantes que emiten enormes cantidades de radiación infrarroja. Sus cocientes de infrarrojo a azul varían de 30 a 500, y su emisión en longitudes de onda del infrarrojo está entre 10 y 100 veces la luminosidad total (a todas las longitudes de onda) de una galaxia espiral normal.

El mecanismo responsable de la emisión de las galaxias brillantes en el infrarrojo parece ser el mismo que en las galaxias más corrientes, a saber, el calentamiento de granos de polvo por estrellas recién formadas. No podemos excluir, sin embargo, la posibilidad de que algunas de las galaxias tengan in-



8. ANILLO DE MATERIA SÓLIDA en órbita alrededor de Vega. Fue este un descubrimiento sorprendente registrado a principios de la misión *IRAS*. Se esperaba que el espectro de Vega siguiese la curva indicada por la línea continua, decreciendo a longitudes de onda más largas. No ocurrió tal. El espectro permanece horizontal entre 25 y 100 micrometros, lo que denuncia la presencia de materia sólida y fría. Al parecer, partículas del tamaño de gravilla describen órbitas en torno a Vega, a una distancia de 85 unidades astronómicas. Pueden representar una fase primitiva de la formación de un sistema planetario.



9. LUGARES DE FORMACION DE ESTRELLAS, identificados en una región polvorienta de uno de los brazos espirales de la Vía Láctea. Se representan aquí en una imagen en falso color que cubre una zona del cielo de 28 por 11 grados. La mayor parte del polvo está muy frío y radia, principalmente, en la banda de 100 micrometros, por cuya razón aparece en rojo. En los lugares

donde las estrellas están inmersas en la nube, calientan la materia circundante, que radia a su vez a longitudes de onda más cortas. Estudios desde el suelo a longitudes de onda de radio e infrarrojos sacaron antes a luz tres zonas brillantes cerca del centro de la imagen y las reconocieron como sedes de activa formación estelar. El *IRAS* proporcionó la primera vista de la zona.

tensas fuentes no térmicas, como las que alimentan los núcleos galácticos "activos" en los quasars y objetos similares. Las fuentes no térmicas podrían quedar oscurecidas por el polvo.

Si la formación de estrellas es la causa de las emisiones, la más brillante de las galaxias debe estar pasando por una intensa fase de producción de ellas. La materia interestelar se está concentrando en estrellas, a un ritmo que varía desde 40 a 400 masas solares por año; a esa velocidad, la masa entera de la materia contenida en una galaxia pasaría por el ciclo de formación de estrellas en unos mil millones de años, o quizá menos. Como el universo es mucho más antiguo (se estima en 15.000 millones de años), tamaño actividad de formación estelar debe ser un fenómeno de corta duración.

Algún interés debe encerrar que un desproporcionado número de las galaxias brillantes en el infrarrojo posean vecinas próximas o parezcan estar deformadas. Aproximadamente una cuarta parte de las 86 galaxias identificadas en la exploración limitada se ajustan a esta descripción, y lo hacen también siete de las ocho fuentes que se clasificaron inicialmente como no identificadas. Las interacciones gravitatorias, o incluso las colisiones entre galaxias, podrían desencadenar un brote de formación de estrellas.

La galaxia designada como Arp 220 nos proporciona un ejemplo bastante próximo de los procesos que alimentan los focos infrarrojos más distantes. Arp 220 se clasificó visualmente como una "galaxia con lazos adyacentes"; puede ser el producto de la fusión re-

ciente de dos galaxias. Tiene una relación de infrarrojo a azul de 80; emite el 99 por ciento de su radiación a longitudes de onda del infrarrojo. La alta proporción de radiación infrarroja no es el resultado de la debilidad en otras longitudes de onda; por el contrario, la galaxia tiene una luminosidad visible normal y constituye una fuente brillante de radioemisión. No hay deficiencia de emisión visible o de radio, sino un gran exceso de emisión infrarroja.

Los más luminosos de todos los objetos del universo son los quasars y objetos similares, como las galaxias de Seyfert y las radiogalaxias, distantes y extremadamente brillantes que se consideran galaxias con núcleos activos. Se cree que, en muchos casos, el núcleo aloja un agujero negro de enorme masa rodeado de un disco de acumulación de materia recogida de la galaxia. A medida que la materia del disco de acumulación describe espirales hacia el agujero negro, una fracción de su masa se convierte en energía. La energía aparece por último como radiación electromagnética a lo largo de un amplio dominio de longitudes de onda, desde las de radio hasta los rayos X.

Se ha supuesto que los quasars y otros núcleos galácticos activos emitirían importantes cantidades de energía en el infrarrojo; mas debido a la atenuación con la distancia, eran posibles pocas observaciones. El *IRAS* permitió detectar cierto número de esas fuentes; los datos correspondientes se han analizado ya para algunas de ellas.

La intensa radiofuente 3C 390,3 está asociada con una galaxia elíptica gigan-

te, situada a más de mil millones de años-luz de distancia. Sus emisiones se habían estudiado en longitudes de onda de radio, del visible y rayos X, pero el *IRAS* dio la primera perspectiva en el infrarrojo lejano. Se obtuvieron unos resultados inesperados. Se detectó la galaxia en las cuatro bandas; pero además se vio que emitía la mayor parte de su energía en el infrarrojo. La emisión máxima tiene lugar en la banda de los 25 micrometros, algo poco corriente. La mayor parte de las otras galaxias activas son más intensas a 60 micrometros. El mecanismo que produce la emisión de 25 micrometros es incierto. La circunstancia que parece más probable es la reemisión debida al polvo interestelar calentado por la radiación ultravioleta del núcleo. La emisión infrarroja podría, en sí, ser de origen no térmico, aunque la ausencia de cualquier variabilidad durante los meses en que el *IRAS* observó la galaxia pone en entredicho esta interpretación.

Los quasars se dividen en dos grupos: radiofuertes y radiodébiles. Los procesos físicos que subyacen a esta distinción desconciertan. A las longitudes de onda de radio, sus luminosidades difieren en un factor de 100.000 unidades o más, pero sus espectros en la banda del visible y ultravioleta se parecen notablemente. Los espectros deben diferir sensiblemente en la región entre el visible y la banda radio, es decir, en el infrarrojo; tales diferencias pueden ofrecer algún indicio del mecanismo de producción de la energía.

Las observaciones del *IRAS* se han analizado para tres quasars radiofuertes y para dos radiodébiles. No se en-



10. NUCLEO DE LA VIA LACTEA. Resplandece a través del denso velo de polvo que lo oculta en las fotografías con luz visible. Los pormenores del mismo se habían examinado en estudios anteriores, en bandas de radio e infrarrojos, pero el *IRAS* aportó la primera vista de gran campo de la región en longitudes de onda del infrarrojo extremo. La imagen muestra una región de

16 por 11 grados. La mayoría de los detalles brillantes son regiones conocidas de gas ionizado y polvo: las regiones HII; pero muchas estructuras extensas, así las briznas de polvo que aparecen encima y debajo del plano galáctico, cerca del núcleo, se nos ofrecen por primera vez. La imagen es una composición en falso color construida reuniendo los datos de tres bandas del *IRAS*.

contraron diferencias espectaculares en la distribución de la energía sobre las cuatro bandas, lo que revela que las diferencias entre los espectros se deben producir más allá de los 100 micrometros. Apareció, sin embargo, una discrepancia más sutil. Para las fuentes radiofuertes, las medidas en el infrarrojo se ajustan suavemente a un espectro continuo que cubre el hueco entre las bandas visible y de radio. Para los quasars radiodébiles, una línea semejante que conectase las dos porciones del espectro debería tener una pendiente mucho más destacada indicando que las emisiones infrarrojas caen más rápidamente a medida que crece la longitud de onda. Las medidas del *IRAS* de las fuentes radiodébiles no pueden ajustarse fácilmente a tal línea; hay un exceso de radiación a 100 micrometros.

Por el momento, cualquier explicación de estos resultados debe ser estrictamente provisional, pero hay una posibilidad de que el exceso de radiación a 100 micrometros tenga relación directa con la naturaleza de la fuente energética del quasar. Se cree que la mayor parte de la energía emitida por los quasars es radiación de sincrotrón, generada por electrones de alta energía en sus movimientos espirales en el campo magnético. Una fuente importante de tales electrones podría ser los chorros

de materia que salen del núcleo. La ausencia de discontinuidades en el espectro de los quasars radiofuertes sugiere que toda la radiación detectada proviene de esta fuente. El exceso de radiación infrarroja de los quasars radiodébiles podría tener un origen independiente, a saber, la emisión térmica del polvo de la galaxia circundante. Podemos inferir, por consiguiente, que los quasars radiodébiles son más polvorientos que los radiofuertes. Al interrumpir los chorros de electrones, el polvo podría, incluso, ser responsable de las diferencias en la luminosidad en radioondas.

Aunque la fase observacional de la misión *IRAS* acabó hace un año, el proyecto no está, en manera alguna, terminado. La publicación en el mes de noviembre de 1984 del catálogo de fuentes puntuales y de los atlas de emisiones extensas puso los datos a la amplia disposición de la comunidad de astrónomos. Los análisis e interpretaciones continuarán durante años. De hecho, la mayor parte de lo que el telescopio del *IRAS* "vio" permanece encerrado en los carretes de cinta magnética de registro digital que almacenan los datos, desconocidos incluso para los directamente involucrados en la misión. Las cintas se guardarán en archivo

para su consulta lo mismo que se hace con las placas fotográficas de una exploración visual del cielo.

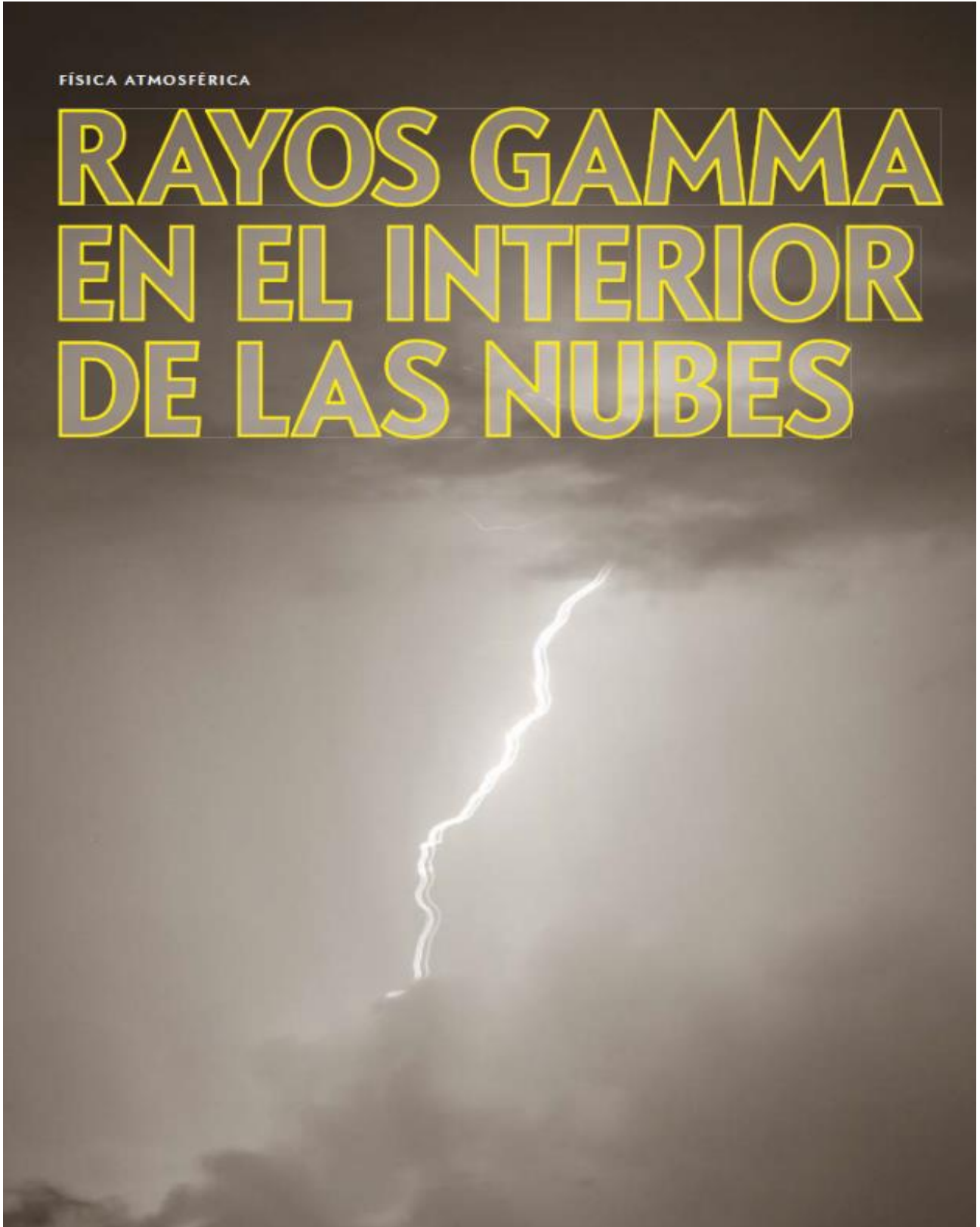
La principal misión de una exploración imparcial del cielo consiste en descubrir nuevos fenómenos físicos u objetos que merezcan examen más detenido, bien a la longitud de onda de la exploración, o en todo el espectro electromagnético. Gran parte del trabajo que seguirá a longitudes de onda fuera de la región infrarroja y algunas de las observaciones infrarrojas, se puede realizar desde el suelo o mediante instrumentos aerotransportados; algunos estudios están ya en curso. Para las fuentes más interesantes, sin embargo, habrá que acudir al infrarrojo lejano desde el espacio.

Con destino a tales observaciones, se están proyectando, para el decenio de los noventa, dos instrumentos orbitales. La Agencia Espacial Europea lanzará el Observatorio Espacial Infrarrojo. Por su parte, la NASA pondrá en el firmamento el Telescopio Infrarrojo Espacial desde el transbordador espacial. Ambos instrumentos tendrán una resolución espacial y espectral más fina que el *IRAS* y también mayor sensibilidad. Si consiguen el mismo éxito que el satélite explorador que abrió el camino, la astronomía infrarroja estará realmente bien servida.

Lectura 3: Rayos Gamma en el interior de las nubes

FÍSICA ATMOSFÉRICA

RAYOS GAMMA EN EL INTERIOR DE LAS NUBES



Las tormentas provocan destellos de rayos X y gamma tan intensos que incluso emiten antimateria. La atmósfera se revela como un lugar más extraño de lo que jamás habíamos imaginado

Joseph R. Dwyer y David M. Smith

EN 1991, POCO DESPUÉS DE QUE EL TRANSBORDADOR ESPACIAL *ATLANTIS* PUSIESE EN ÓRBITA EL Observatorio de Rayos Gamma Compton (CGRO), Gerald Fishman, del Centro de Vuelos Espaciales Marshall de la NASA, se percató de algo muy extraño. Aquel equipo, diseñado para detectar la radiación procedente de objetos astrofísicos remotos, como las estrellas de neutrones o los remanentes de supernova, había comenzado a registrar intensas ráfagas de rayos gamma de unos milisegundos de duración. Pero estas no procedían del espacio exterior, sino de la Tierra.

Por entonces ya se sabía que, en ciertos procesos astrofísicos (como las erupciones solares, la acreción de materia por parte de un agujero negro o las explosiones estelares), los electrones y otras partículas dotadas de carga eléctrica se aceleran a velocidades tan elevadas que acaban emitiendo rayos gamma: los fotones más energéticos del espectro electromagnético. En tales casos, sin embargo, las partículas se mueven en un medio casi vacío. ¿Cómo explicar tales emisiones en la atmósfera terrestre, un medio denso?

Aunque en un principio supusimos que aquellos destellos de rayos gamma se originaban a unos 60 kilómetros por encima de las nubes, hoy sabemos que se producen a una altitud mucho menor, provocados por las descargas eléctricas que tienen lugar en el interior de las nubes de tormenta ordinarias. Con todo, cada uno de los sucesivos modelos que se han venido proponiendo para explicar el fenómeno ha tenido que vérselas con nuevos desafíos observacionales: una y otra vez, se han detectado energías consideradas inalcanzables en los procesos atmosféricos. Para nuestra sorpresa, hemos llegado incluso a detectar la creación de antimateria.

Veintiún años más tarde, contamos con varias pistas prometedoras para entender el origen de los destellos de rayos gamma terrestres, pero las incertidumbres persisten. Un elemento que se suma a este fascinante enigma procede de sus posibles implicaciones para la salud humana: si un vuelo se aproximase demasiado a las zonas en las que se generan dichos destellos, la radiación podría suponer un riesgo para los pasajeros.

¿DOS PÁJAROS DE UN TIRO?

En un principio, los expertos se preguntaron si aquellos rayos gamma guardarían alguna relación con otra maravilla atmosférica. Pocos años antes se había descubierto que, muy por encima de las nubes de tormenta, a unos 80 kilómetros de altitud, se producían breves y brillantes fogonazos de luz roja, de varios kilómetros de anchura y cuyo aspecto recordaba al de una medusa gigante.

Esas impresionantes descargas eléctricas recibieron el caprichoso apodo de «duendes» (de la voz inglesa *sprite*, también llamados «espectros» o «espectros rojos»). Debido a que el fenómeno tenía lugar en el límite superior de la atmósfera, parecía plausible que pudiesen emitir rayos gamma detectables por una sonda espacial en órbita.

No tardaron en aparecer los primeros modelos que intentaron explicar la manera en que un duende podía generar rayos gamma dirigidos hacia el espacio. Se cree que los duendes se deben a un efecto secundario de los rayos ordinarios producidos en las nubes de tormenta, mucho más bajas. Un rayo es una vía conductora de electricidad que se abre temporalmente a través del aire; un medio que, en circunstancias normales, actúa como aislante. La descarga transporta electrones entre zonas de la atmósfera o entre esta y el suelo, y se produce cuando entre dichas regiones se crea un desequilibrio de carga electrostática. Ello induce diferencias de potencial que pueden superar los cien millones de voltios. Los intensos campos eléctricos asociados desencadenan la descarga.

Esa violenta ráfaga de electrones reestablece en parte el equilibrio electrostático. Sin embargo, de modo similar a lo que ocurre al pisar una arruga en una alfombra (que, a menudo, brota una nueva en otro lugar), una descarga en el interior de una nube puede crear un campo eléctrico en otra zona. En ocasiones se trata del suelo, desde donde más tarde podrá surgir un rayo ascendente. Otras ocurrirá en la parte inferior de la ionosfera, en cuyo caso quizá se genere un duende. En 1992, Alexander V. Gurévich, del Instituto de Física Lédnev de Moscú, y sus colaboradores calcularon que esos campos eléctricos secundarios próximos a la ionosfera podían producir avalanchas de electrones muy energéticos. Estos, al chocar contra los átomos, liberarían fotones de rayos X o incluso gamma, además del resplandor rojo tan característico de los duendes.

Dicho mecanismo se basaba en una idea que el premio Nobel Charles T. R. Wilson había propuesto en los años veinte del siglo pasado. A energías bajas, los electrones impulsados por un campo eléctrico proceden como marineros borrachos: rebotan de molécula en molécula y, en cada colisión, pierden energía. Sin embargo, cuando su velocidad supera cierto umbral, su trayectoria se torna más rectilínea y el campo eléctrico incrementa aún más su velocidad. Ello provoca que cada colisión resulte menos eficiente a la hora de perturbar la senda de los electrones, los cuales se ven inmersos en un proceso de ganancia energética que se refuerza a sí mismo. Nótese que ello choca con nuestra experiencia cotidiana, en la que —como corroborará cualquier ciclista— cuanto más rápido nos movemos, más resistencia aerodinámica experimentamos.

En principio, cabe esperar que esos electrones «fugitivos» alcancen velocidades próximas a las de la luz y avancen varios kilómetros antes de detenerse; en contraste con los escasos metros que, en circunstancias normales, recorrería un electrón a través del aire. El equipo de Gurévich razonó que cuando uno de esos electrones tan veloces chocase finalmente contra una molécula del aire, podría liberarse otro electrón muy energético que, a su vez, imitaría el comportamiento del primero. El resultado se asemejaría a una reacción en cadena: una avalancha de electrones de alta energía que crece de manera exponencial con la distancia recorrida y que puede extenderse a toda la zona en la que reine el campo eléctrico. Gurévich y sus colaboradores calcularon que ese efecto de avalancha podría aumentar en varios órdenes de magnitud la producción de rayos X y gamma. Su propuesta se antojaba muy atractiva, pues unificaba dos fenómenos atmosféricos en principio independientes: los duendes y los destellos de rayos gamma. Sin embargo, la realidad habría de mostrarse mucho más enrevesada.

LA INOCENCIA DEL DUENDE

A partir de 1996 se desarrollaron versiones cada vez más refinadas de la teoría que modelizaba los duendes como avalanchas de electrones fugitivos generadoras de rayos gamma. Un indicio en favor de este modelo provenía del espectro de energías de esos fotones. En el aire, los rayos gamma más energéticos re-

Joseph R. Dwyer es astrofísico e investigador en el Instituto de Tecnología de Florida.



Daniel M. Smith enseña física en la Universidad de California en Santa Cruz. Sus intereses incluyen la física de rayos, los cinturones terrestres de radiación y las erupciones solares.

corren distancias cada vez mayores, lo que aumenta la probabilidad de que lleguen al espacio. Al contar el número de fotones de rayos gamma que alcanzan una nave espacial por cada nivel de energía, puede determinarse la altitud de la fuente. Los primeros exámenes realizados por el CGRO apuntaban a un origen situado a gran altitud, un resultado compatible con el fenómeno de los duendes.

Pero aquella hipótesis experimentó un vuelco en 2003. En el curso de una investigación en Florida, consistente en medir la radiación X que llegaba al suelo desde un rayo provocado de manera artificial por un cohete, uno de nosotros (Dwyer) y sus colaboradores detectaron un destello muy intenso de rayos gamma procedente de la nube de tormenta situada justo sobre sus cabezas [véase «El rayo», por Joseph R. Dwyer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2005]. Aunque la ráfaga inundó el terreno de los alrededores, su energía y duración (unos 0,3 milisegundos) resultaron idénticas a las de los destellos de rayos gamma que, hasta entonces, se pensaba que solo se originaban a decenas de kilómetros más arriba. Por entonces, se suponía que tales destellos emanaban de alturas demasiado elevadas como para poder ser vistos desde el suelo. Aquella semejanza parecía sugerir que, tal vez, los rayos gamma que llegaban hasta el CGRO hubiesen sido generados por rayos de tormenta en el interior de las nubes. Al mismo tiempo, la idea se antojaba descabellada: para alcanzar el espacio a través de toda esa atmósfera, la intensidad de los destellos tendría que haber sido descomunal.

Otros acontecimientos acabaron con el pretendido vínculo entre duendes y rayos gamma. En 2002, la NASA había lanzado el Espectroscopio de Imágenes Solares de Alta Energía Reuven Ramaty (RHESSI) para estudiar los rayos X y gamma procedentes del Sol. Los grandes detectores de germanio del RHESSI resultaban perfectos para medir los rayos gamma atmosféricos, si bien estos debían penetrar en la nave atravesando su parte posterior mientras esta se encontraba de cara a la estrella. Uno de nosotros (Smith), por entonces a cargo del equipo de instrumentación del RHESSI, contrató a la estudiante de la Universidad de California en Berkeley Liliana López para que analizase el torrente de datos que el RHESSI había acumulado durante años y, entre ellos, buscase algún indicio de rayos gamma procedentes de altitudes inferiores. En esa época se pensaba que los destellos de rayos gamma terrestres eran extremadamente raros;

EN SÍNTESIS

Hace un tiempo, los observatorios espaciales descubrieron que las nubes de tormenta emiten destellos de rayos gamma muy intensos, de apenas unos milisegundos de duración.

Dichas ráfagas también pueden producir haces de electrones muy energéticos e incluso antimateria. En ocasiones, estas partículas llegan de un extremo a otro del planeta.

Las teorías que intentan explicar el fenómeno suponen la creación de campos eléctricos tan intensos que provocarían avalanchas de electrones en el interior de las nubes.

Sin embargo, ningún modelo ha logrado dar cuenta de todos los detalles del proceso. Se ignora si tales emisiones de radiación suponen algún riesgo para los vuelos comerciales.

sin embargo, López descubrió que el RHESSI había estado detectando uno cada pocos días, unas diez veces más que los observados por el CGRO.

El RHESSI medía la energía de los fotones de rayos gamma con una precisión mucho mayor que el CGRO. Su espectro guardaba grandes semejanzas con lo que cabía esperar a partir de la hipótesis de los electrones fugitivos. Pero, al compararlo con las simulaciones, dedujimos que los rayos gamma habían atravesado un largo camino a través de la atmósfera. Su origen se situaba a una altitud de entre 15 y los 22 kilómetros, correspondiente a la parte superior de las nubes de tormenta, pero muy por debajo de los casi 80 kilómetros a los que se producen los duendes.

Poco después aparecieron más indicios en favor de un origen a baja altitud. Steven Cummer, de la Universidad Duke, tomó mediciones de radio de algunos de los rayos de tormenta asociados a los sucesos de rayos gamma registrados por el RHESSI. Sus resultados mostraron que esos destellos de rayos gamma carecían de la intensidad necesaria para generar duendes. Por otro lado, la distribución mundial de destellos obtenida por RHESSI guardaba una llamativa semejanza con el mapa global de rayos de tormenta ordinarios, muy concentrados en los trópicos. Sin embargo, no se correlacionaba con el reparto de duendes, agrupados ocasionalmente en latitudes mayores.

Con todo, aún quedaba un argumento para adjudicar a los duendes el origen de los destellos de rayos gamma: el espectro de energías de los sucesos registrados por el CGRO parecía apuntar a una fuente situada a gran altitud, más compatible con los duendes que con las tormentas. Muchos comenzamos a creer en la existencia de destellos de rayos gamma de dos tipos, según la altitud de la fuente. Pero el golpe final a la asociación con los duendes cayó cuando nos apercebimos de que los destellos de rayos gamma terrestres eran mucho más intensos de lo que pensábamos. En 2008, junto con el estudiante de doctorado Brian Grefenstette, demostramos que su intensidad llegaba a tales extremos que cegaban parcialmente los instrumentos del CGRO (una saturación que también afectaba al RHESSI, aunque en menor medida). En 2010, otro equipo de la Universidad de Bergen volvió a analizar los datos tomando en consideración la sobrecarga del equipo. Sus resultados se mostraron compatibles con una fuente situada a cotas bajas.

Así pues, en menos de dos años, la altitud a la que se suponía que se originaban los destellos de rayos gamma terrestres se redujo en más de 50 kilómetros. En ciencia no suele verse muy a menudo un cambio de paradigma tan rápido. Ello no deja de resultar irónico: cuando comenzamos a trabajar en este campo, hace una década, los duendes constituían un brillante ejemplo de radiación muy energética cuyo origen podía situarse en la atmósfera; hoy, en cambio, se diría que casi cualquier fenómeno (nubes de tormenta, rayos de varias clases, chispas de laboratorio...) parece producir radiación detectable de alta energía, pero no así los duendes. En la actualidad se admite que, debido a la baja energía de su radiación, los duendes quedan descartados como fuente de los destellos de rayos gamma terrestres.

ANTIMATERIA EN LAS NUBES

Pero, si los duendes no son la causa de los destellos de rayos gamma, ¿qué los provoca? ¿Tienen algo que ver en el proceso las avalanchas de electrones? Por un lado, se ha demostrado que el modelo de avalancha propuesto por Gurévich y sus colaboradores predice energías demasiado elevadas como para que el fe-

Duendes y rayos gamma

En los años noventa del siglo pasado, los observatorios espaciales comenzaron a detectar destellos de rayos gamma procedentes de la atmósfera. En un principio se los relacionó con los duendes, descargas eléctricas registradas a gran altitud, pero más tarde se comprobó que se originaban en las nubes de tormenta, decenas de kilómetros más abajo. En el fenómeno se producen haces secundarios de partículas (antimateria incluida), las cuales pueden escapar hacia el espacio y circunnavegar el planeta a lo largo de las líneas de campo magnético.



nómeno guarde relación con los duendes. Por otro, su potencia no basta para explicar las grandes luminosidades detectadas por el RHESSI o el CGRO. Nuestros cálculos (Dwyer), no obstante, habían mostrado que una versión «supercargada» del mecanismo de avalancha de electrones sí podría liberar en el seno de las nubes una energía billones de veces mayor de lo que se pensaba. Dicho modelo, sin embargo, implicaba algo sorprendente: la producción de ingentes cantidades de antimateria.

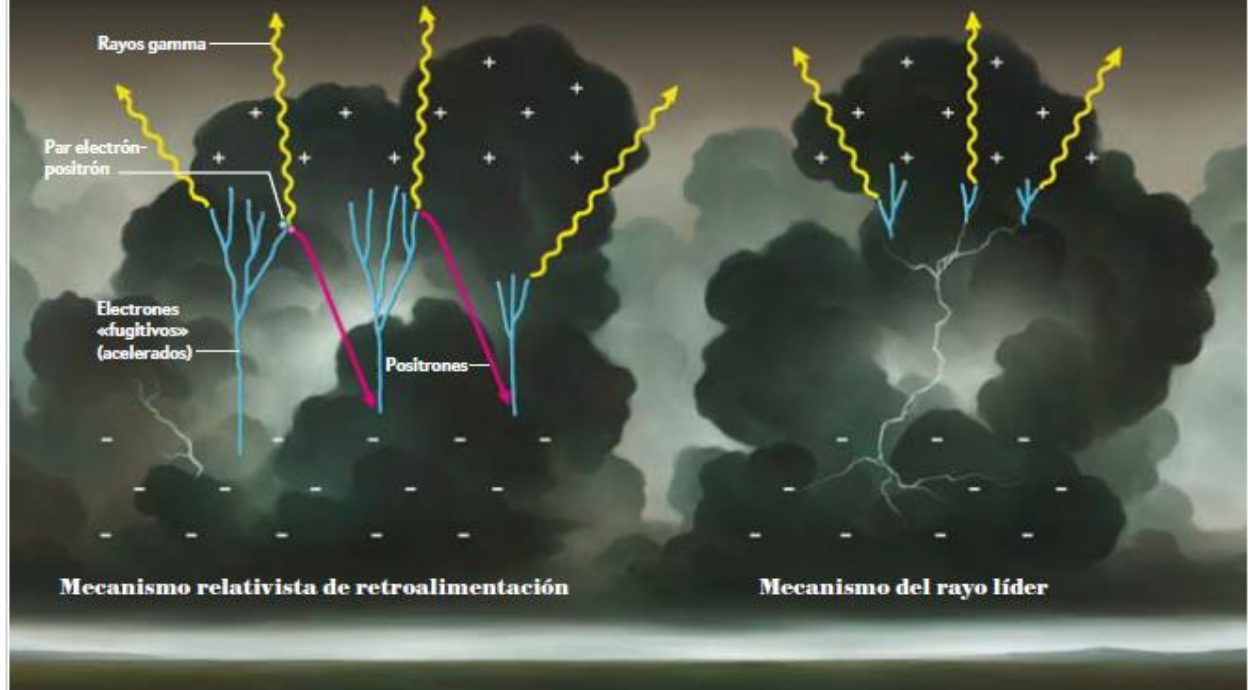
Si el campo eléctrico en el interior de una nube tormentosa fuera lo bastante intenso, los electrones fugitivos —suponiendo que se hayan originado de algún modo— deberían acelerarse hasta casi la velocidad de la luz y, al chocar con los núcleos atómicos de las moléculas del aire, emitirían rayos gamma. A su vez, esos fotones podrían interactuar con los núcleos atómicos y crear pares de partículas compuestas por un electrón y un positrón (el «gemelo» de antimateria del electrón). Estos últimos también experimentarían una fuerte aceleración en el campo eléctrico, pero, mientras que los electrones se dirigen hacia arriba, los positrones, de carga opuesta, lo harían hacia abajo. Al alcanzar el límite inferior de la región

¿Qué origina los destellos de rayos gamma?

Los expertos convienen en que los rayos gamma terrestres probablemente se deban a cascadas de electrones que, una vez liberados de sus átomos, se aceleran hasta casi la velocidad de la luz en los intensos campos eléctricos que se crean en el interior de las nubes de tormenta. Al chocar contra los núcleos atómicos de las moléculas del aire, emitirían rayos gamma. No obstante, algún mecanismo adicional debe tomar parte para dar cuenta de las elevadas energías de esos fotones, equiparables a las que se observan en las erupciones estelares.

Según el modelo relativista de retroalimentación (*izquierda*), algunos rayos gamma generarían más materia: pares de partículas formados por un electrón y un positrón, el «gemelo» de antimateria del electrón. En razón de su carga (opuesta a la de los electrones), los positrones serían acelerados hacia la parte inferior de la nube, donde producirían nuevas cascadas de electrones.

En la hipótesis del rayo líder (*derecha*), un relámpago de gran potencia liberaría nuevas cascadas de electrones en su camino desde la parte inferior de la nube hasta la cúspide.



en la que existe campo eléctrico, chocarían contra los átomos del aire y producirían más electrones, que de nuevo serían acelerados hacia arriba.

Así, los electrones ascendentes generarían positrones dirigidos hacia abajo, los cuales crearían nuevos electrones que se desplazarían hacia arriba, y así sucesivamente. Dado que una avalancha engendraría otras, las descargas se extenderían con rapidez sobre la nube hasta cubrir una anchura de varios kilómetros. Las cifras predichas por esta hipótesis, conocida como modelo relativista de descarga con retroalimentación, se correspondían a la perfección con la intensidad, duración y espectro de energía de los rayos gamma registrados por el CGRO y el RHESSI.

La retroalimentación positiva de los positrones resulta análoga al molesto chirrido que se produce al acercar un micrófono a un altavoz. Pero, por otro lado, para producir un estruendo basta también con gritar en el micrófono. Este razonamiento ilustra otra posible explicación del fenómeno, si bien sus detalles matemáticos aún no se conocen por completo: que los destellos de rayos gamma sean versiones «amplificadas»

de las ráfagas de rayos X que un rayo de tormenta emite al aproximarse al suelo.

Durante varios años, investigadores del Instituto de Tecnología de Florida, la Universidad de Florida y el Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México han estado midiendo esos rayos X, tanto los que proceden de rayos activados artificialmente por cohetes como los originados por rayos naturales. Las «películas» registradas en Florida con una cámara rápida de rayos X muestran que esas ráfagas emanan de la punta del canal del rayo cuando este se dirige desde la nube hacia el suelo. La mayoría de los científicos piensan que los rayos X son producidos por electrones fugitivos que se ven acelerados por el intenso campo eléctrico existente en la parte frontal del rayo. Por razones que aún debemos descifrar, puede que un rayo que avanza a través del campo eléctrico de la nube resulte más eficiente a la hora de producir electrones fugitivos. Si esta idea se revela correcta, los destellos vistos desde las naves espaciales que orbitan a cientos de kilómetros de distancia podrían no ser sino una versión —amplificada a través de algún mecanismo aún desconocido— de la misma radiación X generada por los

rayos y que, desde el suelo, detectan los instrumentos situados a unos metros de la descarga.

CIELOS DESPEJADOS

Con independencia del papel que desempeñasen en ello la antimateria o los rayos reforzados, hacia finales de 2005 nos hallábamos convencidos de que la mayoría de los destellos de rayos gamma terrestres se originaban en el interior de las nubes de tormenta o cerca de su borde superior. Sin embargo, antes de que pudiéramos acomodarnos a este nuevo modelo, algo pareció cuestionar una vez más nuestra comprensión de los hechos: el RHESSI captó un destello de rayos gamma en medio del desierto del Sáhara, en un día soleado y sin ninguna nube de tormenta a la vista.

Nuestro equipo debatió el fenómeno durante meses. Aquel día sí se habían formado nubes de tormenta, pero no en el área que la nave había estado observando, sino varios miles de kilómetros hacia el sur del horizonte del RHESSI. Aunque allí se hubieran generado rayos gamma, estos jamás podrían haber alcanzado la nave: como cualquier clase de luz, los rayos gamma viajan siempre en línea recta.

Las partículas dotadas de carga eléctrica, sin embargo, proceden en estrechas espirales enrolladas alrededor de las líneas del campo magnético terrestre, que sí son curvas. De hecho, las tormentas que se habían desatado aquel día lo habían hecho en el otro extremo de la línea de campo magnético que atravesaba la nave espacial. Si algunos electrones hubiesen alcanzado altitudes lo suficientemente elevadas, podrían haber circunnavegado el planeta hasta chocar con los detectores del RHESSI y, en el proceso, habrían emitido rayos gamma. Con todo, parecía imposible que los electrones liberados en el seno de una nube de tormenta pudiesen atravesar tantísimos kilómetros de atmósfera y llegar a una altitud que les permitiese embarcar en una trayectoria a lo largo de una de las líneas del campo magnético terrestre. Aquella nueva observación parecía exigir, una vez más, un origen a altitudes elevadas.

El año pasado, el Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi observó más haces circunnavegantes y realizó un descubrimiento sorprendente: una parte considerable de ellos se componía de positrones. Así, parece que los fenómenos atmosféricos pueden lanzar al espacio no solo electrones y rayos gamma, sino también partículas de antimateria. En retrospectiva, deberíamos haber esperado detectar esos positrones en razón de la elevada energía de los rayos gamma. Aun así, considerando lo inusual que resulta observar antimateria en la naturaleza, el hallazgo del telescopio Fermi causó una gran sorpresa.

Poco después, nuestro equipo mostró que la explicación al hallazgo del Sáhara no era que los rayos gamma proviniesen de altitudes muy elevadas: se producen en las nubes de tormenta, pero en cantidades mucho mayores de lo que nadie había creído posible. De tanto en tanto, algunos de los que salen en dirección al espacio chocan contra las moléculas del aire a más de 40 kilómetros de altitud y crean pares secundarios electrón-positrón. Después, estos cabalgan alrededor del globo sobre una de las líneas del campo magnético terrestre. La próxima vez que presencia una nube de tormenta, recuerde que tal vez esté lanzando hacia el espacio partículas de muy alta energía que podrán detectarse al otro lado del planeta.

MÁS SUCESOS EXTRAORDINARIOS

Pero la observación de positrones no fue lo último que cautivó nuestra atención. Algún tiempo después, en 2011, el observato-

rio AGILE, de la Agencia Espacial Italiana, descubrió que el espectro de energía de los destellos de rayos gamma terrestres alcanzaba los 100 megaelectronvoltios, algo insólito incluso para una erupción solar. De ser correctas, dichas observaciones arrojan dudas sobre nuestros modelos, ya que parece sumamente improbable que los electrones fugitivos puedan generar energías de tal calibre. De hecho, no queda claro qué podría acelerarlos a semejante velocidad en el interior de una nube. Llegados a este punto, se requieren más observaciones que guíen las propuestas teóricas. Por fortuna, varios equipos de EE.UU., Europa y Rusia ya han comenzado a lanzar las primeras misiones espaciales dedicadas a la detección de rayos gamma terrestres.

Mientras tanto, nuestros equipos han construido un instrumento que, instalado en un avión, mide los rayos gamma producidos en las tormentas. Debido a los peligros que conlleva exponerse a esta radiación, evitamos volar directamente hacia una tempestad. Sin embargo, en un primer vuelo de prueba en el que tomamos parte (Dwyer), el avión realizó un viraje equivocado. La sensación de terror fue pronto sustituida por la emoción, ya que los detectores se activaron de inmediato. Un análisis posterior mostró que en aquella zona se estaban acelerando electrones fugitivos de la misma clase que los que, suponemos, producen los destellos de rayos gamma. Por suerte, la emisión se mantuvo en un nivel bajo y no experimentó el crecimiento explosivo que caracteriza a los sucesos detectados desde el espacio. Gracias a estos vuelos hemos descubierto que, muy a menudo, las tormentas generan una emisión difusa, continua y relativamente inocua de rayos gamma.

Con todo, algunos cálculos preliminares muestran que, si un vuelo comercial fuese alcanzado directamente por electrones de alta energía y rayos gamma en el corazón de una tormenta, los pasajeros y los miembros de la tripulación podrían recibir en una fracción de segundo la dosis de radiación natural considerada admisible durante toda la vida; todo ello sin notar absolutamente nada. La buena noticia es que no necesitamos recomendar a los pilotos que se aparten de las tormentas, puesto que ya proceden así: se trata de un fenómeno lo bastante peligroso como para sumergirse en él, con o sin rayos gamma.

En cierto modo, el estudio de los destellos de rayos gamma terrestres completa el trabajo de Benjamin Franklin, quien supuestamente lanzó una cometa hacia una tormenta para determinar si era conductora de la electricidad y, de esta manera, demostrar que el rayo consistía en una descarga eléctrica. Por sorprendente que pueda parecer, dos siglos y medio después no solo ignoramos el mecanismo por el que las nubes de tormenta producen destellos de rayos gamma; desconocemos también cómo generan simples rayos. Hemos invertido gran parte de nuestras carreras profesionales en el estudio de lejanos y exóticos objetos ajenos al sistema solar, pero la Tierra ha reclamado de nuevo nuestro interés por el aliciente de estas investigaciones. Probablemente, Benjamin Franklin jamás llegó a sospechar lo interesante que podía resultar una tormenta.

PARA SABER MÁS

Discovery of intense gamma ray flashes of atmospheric origin. G. J. Fishman et al. en *Science*, vol. 264, págs. 1313-1316, 27 de mayo de 1994.

Runaway breakdown and the mysteries of lightning. Alexander V. Gurévich y Kirill P. Zybin en *Physics Today*, vol. 58, n.º 5, págs. 37-43, mayo de 2005.

Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes. J. R. Dwyer en *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, n.º D10103, 20 de mayo de 2008.

Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with Fermi GBM. Michael S. Briggs et al. en *Geophysical Research Letters*, vol. 38, n.º L02808, 20 de enero de 2011.

Anexo 3: Propuesta de diseño experimental, para la enseñanza-aprendizaje de conceptos relacionados con la dispersión de *rayos X*.

Propuesta de diseño experimental, para la enseñanza-aprendizaje de conceptos relacionados con la dispersión de *rayos X*.



Facultad de Ciencia y Tecnología
Departamento de Física
Asignatura: Laboratorio de Física
moderna

Rayos X: Caracterizando la interacción radiación-materia

La presente propuesta de diseño experimental, para la enseñanza- aprendizaje de conceptos relacionados con la dispersión de *rayos X* emerge en el marco de la importancia de la física moderna y el papel del laboratorio, mediante la revisión y reflexión histórica de los trabajos experimentales de Wilhelm Roentgen, Max Planck y Artur Compton, buscando principalmente comprender y profundizar los referentes teóricos alrededor de los aspectos que llevaron al estudio de la física moderna y los fenómenos relacionados, como por ejemplo el espectro electromagnético, la emisión de *rayos X* y la *dispersión Compton*.

Está diseñada con el objetivo de dar al estudiante un primer contacto a técnicas experimentales utilizadas a través del uso de la máquina de *rayos X* en el LFM de la UPN identificando así aspectos fundamentales para el desarrollo de la actividad científica. Sin embargo, las reflexiones y comprensiones de actividades de laboratorio se utilizan en la caracterización de propuestas experimentales en el área de la enseñanza de la física

Adicionalmente, el objetivo principal con la propuesta de diseño experimental es acercar al estudiante a la caracterización de fenómenos alrededor de la interacción radiaron- materia.

Por lo tanto, se diseñan las posteriores actividades en el marco experimental que permitan relacionar el espectro electromagnético y los *rayos X*. Esta propuesta sirve como herramienta para la construcción de conceptos entre los estudiantes y el docente, generando una relación y dialogo, entre las ideas previas de los estudiantes y las ideas del docente, de esta manera, el docente en su labor de enseñanza aporta en la construcción de su conocimiento y el de sus estudiantes.

Finalmente orientando las explicaciones a los fenómenos de interacción radiación-materia, surgen los objetivos de enseñanza-aprendizaje, es decir los objetivos que se espera que los estudiantes logren alcanzar.

Objetivos de enseñanza

- ✚ Construir y caracterizar por medio del espectro electromagnético algunos de los fenómenos relacionados con la emisión de *rayos X* a través del *efecto Compton*.

Objetivos de aprendizaje

- ✚ Reconocer las fuentes de emisión de radiación electromagnética de altas y bajas energías.
- ✚ Identificar la emisión de *rayos X* sus fuentes y los efectos en la salud
- ✚ Determinar la producción de *rayos X* a través de la máquina
- ✚ Comprender los fenómenos asociados a la interacción radiación materia a partir de la emisión de los *rayos X*.

Estos objetivos se establecieron de acuerdo con una propuesta enmarcada en el diseño experimental. Por lo tanto, cada objetivo se definió teniendo en cuenta los criterios de cada una de las actividades:

Marco teórico:

Espectro electromagnético:

Todos nos encontramos familiarizados con la radiación electromagnética (RE) en nuestra vida diaria hacemos uso de diversas tecnologías, muchas de ellas funcionan aprovechando la (RE¹³), la cual se representa en la combinación de ondas eléctricas y magnéticas, propagándose a través del espacio transportando consigo energía, como es el caso de la luz. La radiación electromagnética abarca un amplio rango, que está relacionado con la cantidad de energía transportada.

A todo este rango, se le denomina espectro electromagnético clasificado por su longitud de onda, encargadas en determinar la frecuencia y energía se caracterizan principalmente por su longitud. Definiéndose como la distancia entre dos crestas consecutivas, las cuales se muestran en la figura 1. a la longitud de onda, λ (lambda).

La frecuencia es la cantidad de ciclos que completa una onda en un segundo, se mide en Hertz [Hz]. A mayor frecuencia de onda, menor es su longitud de onda correspondiente. Por otro lado, a mayor frecuencia de onda mayor es su energía correspondiente. Así, una onda que vibra rápido tiene una longitud de onda menor y más energía que una onda que vibra lentamente.

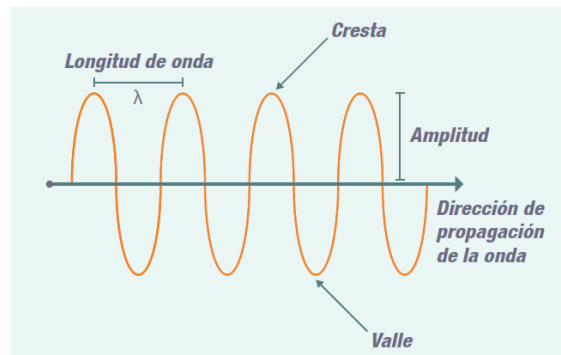


Figura 1. Representación gráfica de una onda. Tomado de (M. Molina, 2016)

Un ejemplo de lo anterior es que la luz azul tiene más energía que la luz roja, y que las frecuencias agudas tienen más energía que las graves. En la figura 2. se muestra un esquema del espectro electromagnético. En esta se muestra como la radiación que tiene menos energía son las ondas de radio, como las que emiten las estaciones de radio, y cuya longitud de onda es muy grande (desde aproximadamente un metro hasta decenas de kilómetros). Las microondas,

¹³ RE: Radiación electromagnética

que están involucradas en la telecomunicación celular y en los hornos de microondas, tienen longitudes de onda del orden de un milímetro hasta un metro. En seguida de las microondas, se encuentra la radiación infrarroja que utilizamos en los controles remotos de aparatos electrónicos o en la visión térmica y tienen longitudes que abarcan desde 700 nanómetros (nm) hasta un milímetro.

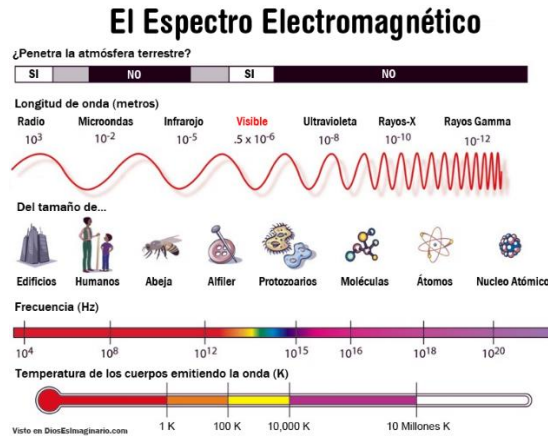


Figura 2. Esquema del espectro electromagnético. recuperado de (“Astrofísica y Física: ¿Qué es el Espectro Electromagnético?,” 2013.)

A continuación, en el espectro se aprecia el intervalo que corresponde a la luz visible, ya que es la única que perciben nuestros ojos, en la que se observan los colores de los arcoíris ordenados de mayor a menor longitud de onda: rojo (cuya longitud de onda es aproximadamente 700 nm), naranja (650 nm), amarillo (600 nm), verde (570 nm), azul (450 nm) y violeta (400 nm). La luz blanca es la combinación de todos estos colores superpuestos y se les puede observar al hacer pasar esta radiación por un prisma. Los rayos ultravioleta UV, dañinos para los seres vivos, tienen longitudes de onda del orden de 400 nm a 10 nm y poseen más energía que la luz visible, los utilizamos para esterilizar instrumentos y purificar agua.

La radiación electromagnética que sigue en el espectro son los os rayos X, principalmente se emplean para hacer radiografías y tienen longitudes de onda del orden de 10^{-10} m. Al final del espectro se encuentran los rayos gama, estos son la radiación con mayor energía y tienen la menor longitud de onda (del orden de 10^{-14} m).

Un dato importante es que toda la radiación electromagnética, independientemente de la frecuencia, longitud de onda o energía que contiene, viaja a la misma velocidad. Esto es, a la velocidad de la luz, que en el vacío es equivalente a 3×10^8 m/s. Tomado y adaptado de (M. Molina, 2016)

Actividad 1: El espectro electromagnético

En esta actividad se analizarán las características de la radiación electromagnética y se clasificara según su energía y longitud de onda.

Tiempo de realización:90 minutos

Forma de trabajo: Grupo de estudiantes 2 o 3

Que necesito: Cuaderno de notas

Actividad 1: Identificando el espectro electromagnético:

Preguntas orientadoras e introductorias:

- ¿Cómo se clasifica el espectro electromagnético?
- ¿Qué es la radiación?
- ¿Dónde podemos encontrarla?
- ¿Qué es el espectro electromagnético?

En primera instancia se pretende con esta actividad que los estudiantes logren clasificar algunas fuentes de radiación electromagnética. Para ello, se realiza la lectura de tres artículos¹⁴ de la revista investigación y ciencia el primero del año 2012 titulado *ADN bajo el efecto del sol*(Douki, Ravanat, Markovitsi, & Sage, 2012), el segundo *El firmamento en infrarrojo del año 2013*(Hechavarría, Rodney; López, 2013) y finalmente *Rayos Gamma en el interior de las nubes del año 2012*(Dwyer, 2012).esta serie de artículos fueron seleccionados identificando distintas fuentes de emisión del espectro electromagnético según su energía y longitud de onda, los artículos se encuentran en el (anexo 2) del documento.

Después de realizar las lecturas se le pedirá al estudiante que dentro de su grupo de trabajo describan y mencionen algunas características de las fuentes de emisión de radiación.

¹⁴ Thierry Douki, Jean-Luc, Dimitra Markovitsi,(2012) ADN BAJO EL SOL, revista investigación y ciencia, Harm J, Habing y Gerry Neugebauer, (1900)el firmamento infrarojo, revista investigación y ciencia. Dwyer, J. R., Rayos, D., Compton, G., Fishman, G., Vuelos, C. De, Marshall, E., & Nasa, D. (2012). *Las tormentas provocan destellos de rayos X y gamma tan intensos que incluso emiten antimateria. La atmósfera se revela como un lugar más extraño de lo que jamás habíamos imaginado.* 38-43.

Evaluación de los aprendizajes

El estudiante de acuerdo con las preguntas y las lecturas relacionadas con el espectro electromagnético realizará un mapa mental donde se describan Las características del espectro electromagnético, la longitud de onda, la energía, donde se registren los alcances y la caracterización de acuerdo con su emisión y propagación de onda, esta actividad se entregará al docente para ser socializada entre los grupos de trabajo del LFM.

Marco teórico:

Rayos X

Al hablar de radiaciones en general es necesario tener presente que vivimos en un mundo altamente radiactivo y que probablemente gracias a ello la vida sea tal y como la conocemos.

Puesto que, la mayor parte de la radiación recibida por la población mundial proviene de fuentes naturales y es inevitable exponerse a la mayoría de ellas. Pero, además, en los últimos cien años aproximadamente, desde el descubrimiento de los *rayos X*, hemos producido artificialmente elementos radioactivos y diferentes tipos de radiaciones, y hemos aprendido a utilizar la energía nuclear con diferentes propósitos: médicos, bélicos, industriales y para la generación de energía eléctrica.

Los *rayos X* se producen cuando electrones de alta energía chocan con un blanco determinado (generalmente un metal). El electrón, al penetrar en el metal, sufre una desaceleración y de acuerdo con la teoría electromagnética clásica emite radiación: un nuevo tipo extremadamente penetrante. En un tubo moderno de *rayos X* (Figura 3) los electrones al someterse a una temperatura elevada salen de un filamento metálico caliente, en un proceso llamado emisión termiónica o termoiónica (descubierto por Edison, al trabajar con sus focos luminosos). A continuación, esos electrones se aceleran a través de una diferencia de potencial que va desde 10^4 V a 10^6 V, en el vacío, y chocan en un ánodo metálico, desacelerándose e irradiando.

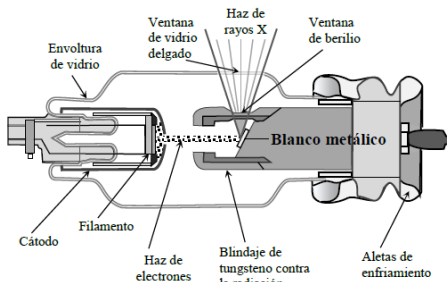


Figura 3: emisión de *rayos x*. Tomado de (Filosof, Psicolog, & Experiencias, 2018)

Casi inmediatamente después del descubriendo de los *rayos X* se extendió muchísimo el uso de las radiaciones en diversas áreas. Dentro del campo industrial, la medicina, la investigación y la generación de energía las aplicaciones son muy variadas y numerosas debido a las ventajas que presentan. Tomado y adaptado de (Filosof et al., 2018) (Tobergte & Curtis, 2013)

Actividad 2: Caracterización de los *rayos X*

En esta actividad se caracterizan los *rayos X*, en el espectro electromagnético; utilizando el tubo de rayos catódicos y la máquina del DFI.

Tiempo de realización: 60 minutos

Forma de trabajo: Grupo de estudiantes 2 o 3

Que necesito: Cuaderno de notas, máquina de *rayos X* Phywe

Actividad 2: caracterizando los *rayos X*.

Preguntas orientadoras e introductorias:

- ¿Qué se necesita para generar *rayos X*?
- ¿Explique cómo cree que funciona un tubo de rayos catódicos, para producir *rayos X*?
- ¿Por qué no podemos ver los *rayos X*?

Teniendo en cuenta que para esta actividad los estudiantes deberán utilizar la máquina de *rayos X* para caracterizar sus partes y como se emiten los mismos mediante una observación previa de los competentes físicos. Además, de manera teórica se revisará como se realiza la producción de *rayos X*. Y al contar con una sola máquina de *rayos X* para cada uno de los grupos, se dividirá el salón de clase en dos grupos de trabajo para realizar la observación de la maquina logrando así un primer acercamiento al fenómeno de emisión de *rayos X*. luego de finalizado cada uno de los trabajos de observación, los estudiantes harán una socialización de la observación y a las respuestas de las preguntas orientadoras.

De esta manera se procede a socializar las respuestas y lo que encontraron los estudiantes en la observación de la maquina y del tubo de *rayos X*. Luego se procederá a revisar e identificar las

partes que componen el tubo de *rayos X* y cómo se produce la emisión de estos en la máquina y en el tubo de rayos catódicos. se organizarán por grupos de trabajo para caracterizar el montaje experimental.

Evaluación de los aprendizajes

Para terminar, se hará una revisión de los efectos en la salud al no darle un uso responsable; además de las aplicaciones que tiene los *rayos X* en la industria, en la medicina, en la ciencia y posteriormente realizar un mapa conceptual donde el estudiante ilustre lo comprendido. Estos resultados se presentarán en un informe tipo artículo científico donde muestren los aspectos físicos de los *rayos X*, sus partes, su funcionamiento, sus características, aplicaciones y efectos en la salud.

Actividad 3: Descripción longitud de onda Compton

En esta actividad se describe la longitud de onda Compton mediante la Emisión de *rayos*; utilizando el tubo de rayos catódicos y la máquina del DFI.

Tiempo de realización: 3 horas

Forma de trabajo: Grupo de estudiantes 2 o 3

Que necesito: Cuaderno de notas, intervención del docente encargado y la máquina de *rayos X* Phywe

Actividad 3: caracterizando los *rayos X*.

Primer momento: Conceptualización

Preguntas orientadoras e introductorias:

- ¿Por qué se utilizan rayos x para efecto Compton?
- ¿A partir del efecto Compton que fenómenos podemos explicar?
- ¿A qué se le denomina Longitud de onda Compton y cuál es su valor?
- ¿Qué característica tiene el PMMA y porque este material es el más conveniente para el funcionamiento óptimo de la dispersión Compton?
- ¿Por qué la configuración para dispersión Compton se organiza en un ángulo específico?

Ahora se revisan los aspectos importantes del *efecto Compton* mediante una presentación por parte del docente encargado de LFM se presentan algunos aspectos históricos que llevaron al desarrollo de esta teoría. Luego se realiza una explicación esquemática del comportamiento dual de la radiación y finalmente la disposición matemática donde se determina la longitud de onda Compton a partir de la conservación de la masa-energía.

Segundo momento: Experimento *rayos X y dispersión Compton*

Se procede a realizar la calibración de la máquina para obtener los datos de impulsos por segundo y el ángulo de detección, con el fin de que el tubo de *rayos X* encienda y se realice un adecuado funcionamiento, Se dispondrá de la configuración de la máquina para determinar el espectro característico del ánodo de cobre donde se genera una emisión de voltaje constante estudiando así el espectro característico, posteriormente se variara el voltaje donde se estudiara la radiación de frenado de los *rayos X* a través del espectro.

También se debe disponer del ángulo del PMMA¹⁵. Teniendo presente que la idea fundamental es que los *rayos X* incidentes tienen una longitud de onda media, la cual puede ser estimada midiendo la absorción de esta al obtener los resultados de impulsos por segundo y ángulo de detección.

Interacción con la maquina:

Calibración de la máquina de rayos x

El montaje experimental que se muestra a continuación es una unidad compacta para la producción y realización de diversos experimentos con *rayos X*. La unidad apantalla perfectamente la emisión de *rayos X* al exterior y no hay riesgos de exposición para el estudiante. La cámara experimental se cierra mediante una puerta corrediza fabricada con un vidrio de óxido de plomo. Si esta puerta no está debidamente cerrada (cierre TURN/PUSH), no se produce la emisión de *rayos X*.

Los rayos X se producen en un tubo de ánodo de Cu. El voltaje (UA) se puede variar de 0.0 a 35.0 kV (pulsador HV). La intensidad de electrones incidentes (IA) se puede seleccionar hasta un

¹⁵ PMMA: Polimetilmetacrilato: es uno de los plásticos de ingeniería. La placa de acrílico se obtiene de la polimerización del metacrilato de metilo y la presentación más frecuente que se encuentra en la industria del plástico es en gránulos o en placa.

máximo de 1.00 mA (pulsador I). Para almacenar los valores de voltaje e intensidad hay que presionar el botón ENTER cada vez. La radiación se emite al pulsar HV-ON. Los rayos X emitidos entran en la sección experimental a través de una apertura en la parte izquierda en forma de un haz divergente tal que la pantalla fluorescente (parte derecha) está completamente iluminada. Podemos utilizar tres diafragmas con aperturas circulares de 1 mm, 2 mm y 5 mm para colimar el haz.

Inmediatamente a la derecha de la salida de los rayos X está la fijación para colocar la muestra, en nuestro caso usaremos un monocristal de LiF. La fijación del monocristal se puede rotar mediante un motor a pasos (paso mínimo de 0.1°). De esta manera manual se puede calibrar el equipo de rayos X para posteriormente poderlo utilizar con seguridad y obtener los resultados de los impulsos por segundo con el ángulo de dispersión para posteriormente graficar.

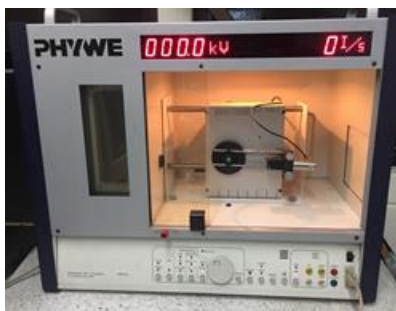


Imagen 4: Máquina de Rayos X marca Phywe.

En primer lugar, determinaremos el espectro de emisión característico del ánodo de Cu utilizando como analizador un monocristal de LiF. Los parámetros de medida son los siguientes: colimador de 1 mm, modo acoplado $\theta - 2\theta$, $U_A = 35$ kV, $I_A = 1$ mA, rango de ángulos de 3°–55° con un paso de 0.1°, tiempo de integración 2 s. El tiempo de integración es el tiempo en que el sistema está contando los fotones recibidos para moverse a la siguiente posición.

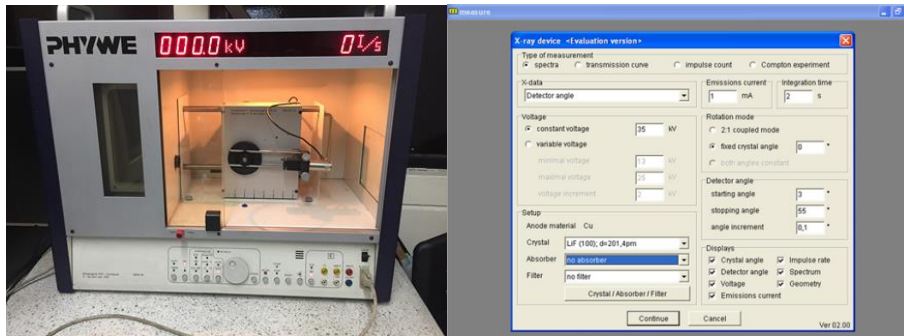


Imagen 5: disposición de la máquina para espectro electromagnético

A continuación, utilizando el mismo montaje que en el apartado anterior, determinaremos la parte del espectro debida a Bremsstrahlung para diversos valores del voltaje del ánodo UA . Se recomienda utilizar los siguientes parámetros: $13 \text{ kV} \leq UA \leq 25 \text{ kV}$ en pasos de 2 kV, $IA = 1 \text{ mA}$, rango de ángulos de 4° – 20° con un paso de 0.1° , tiempo de integración 2 s. A partir de estas medidas obtener la longitud de onda mínima para la producción de rayos X en función del voltaje del ánodo, $\lambda_{min}(UA)$.

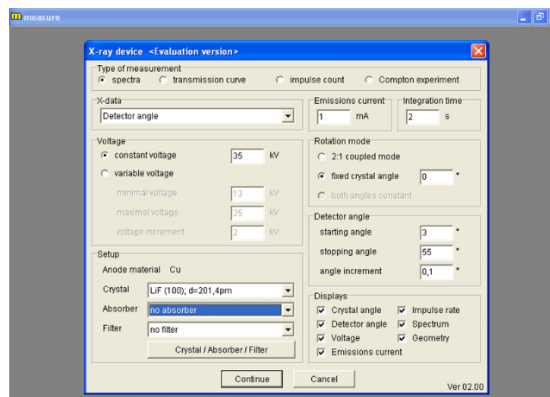


Imagen 6: Arreglo en Measure para espectro con variación de voltaje

Con la disposición de la imagen 4 realizaremos un experimento de absorción de rayos X por una lámina de Al en función de la longitud de onda del haz incidente con el monocristal de LiF como en la parte anterior; $UA = 35 \text{ kV}$, $IA = 1 \text{ mA}$, colimador de 2 mm). Realizaremos contajes

de 100 s. seguido de esto mediremos la intensidad del haz de *rayos X* en el intervalo $6. 5^\circ \leq \theta \leq 10.0^\circ$ en pasos de $\Delta \theta = 0.2^\circ$.

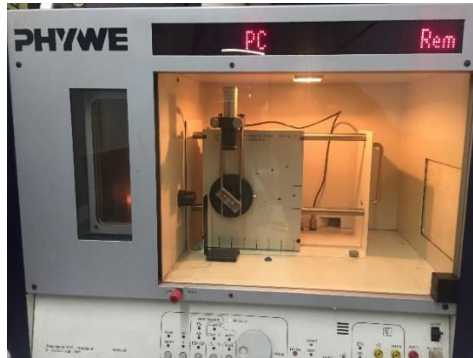


Imagen 7: arreglo de la máquina para efecto Compton

El montaje es el indicado en la imagen 7 para realizar el experimento de dispersión Compton a 90° . Hay que sustituir el monocristal de LiF por la pieza de PMMA y posicionarlo a 135° , sustituir el colimador de 2 mm por el de 5 mm y colocar el detector a 90° ($U_A = 35$ kV, $I_A = 1$ mA): Intensidad del haz con el material dispersor, Intensidad con la lámina de Al en posición 1, Intensidad con la lámina de Al en posición 2. Para este arreglo es necesario utilizar tiempos de contajes de 300s. cómo se observa en la imagen 8.

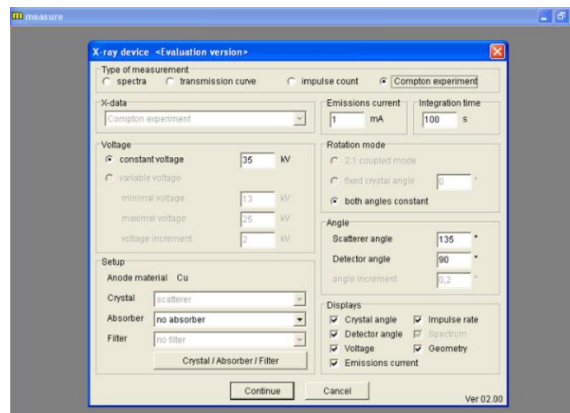


Imagen 8: disposición de la máquina para efecto Compton a 90°

Finalmente, para caracterizar los *rayos X* los estudiantes dispondrán de la información medida por el detector donde se pueden ver gráficas y datos de medición de impulsos por segundos

dependiendo del ángulo de emisión de los rayos y dependiendo del material que se esté caracterizando. Los datos se extraerán de la siguiente manera:

Evaluación de los aprendizajes

Para finalizar los estudiantes después de que la máquina de *rayos X* termine las mediciones a través del software *measure* entrara a la pestaña *measurement* en la opción *export data* y puede extraerlos del computador, adicional a esto el software emite una gráfica con los valores medidos anteriormente configurados con la misma.

Seguido de esto los estudiantes socializaran las preguntas orientadoras al principio de la actividad 3 y grafican los datos obtenidos en la maquina realizando una comparación de la actividad experimental con la teoría, finalmente realizaran una síntesis de las observaciones obtenidas a través de la disposición de la máquina y se entregara en un informe de laboratorio al docente encargado de la asignatura de LFM.