

# Modificaciones en Nanotubos de Carbono de las Naves Espaciales y Satélites Inducidas por Radiaciones Cósmicas de Alta Energía

## Modifications in Carbon Nanotubes of Spacecraft and Satellites Induced by High Energy Cosmic Radiation

Haydn Barros, *USB*, Joaquin Lira Olivares, *USB*, S. Agustín Martínez-Ovalle, *UPTC(Colombia)* y Laszlo Sajo-Bohus, *USB*

**Resumen**— Se presentan los principales aspectos fenomenológicos de las reacciones nucleares inducidas por radiaciones cósmicas de alta energía en compuestos de C. Se muestran los resultados de medidas realizadas con detectores de poli-carbonato en la Estación Espacial Internacional y se discuten los principales mecanismos de daño a este tipo de materiales.

**Palabras clave**— Carbono, detectores pasivos CR-39, nanotubos, radiaciones cósmicas.

**Abstract**— The main phenomenological aspects of the nuclear reactions induced by high-energy cosmic radiations in C compounds are presented. The results of measurements made with polycarbonate detectors in the International Space Station are shown and the main mechanisms of damage to this type of materials are discussed.

**Index terms**— Carbon, cosmic radiations, nanotubes, passive detectors CR-39.

### I. INTRODUCCIÓN

Las radiaciones que interactúan con los materiales empleados en las naves espaciales y satélites en órbitas geoestacionarias o en misiones interplanetarias, son de origen solar, galáctica y extra-galáctica [1]. Las de mayor importancia para este estudio son las radiaciones gamma, protones, neutrones de alta energía y las partículas energéticas (HE) de elevado número atómico (Z) indicadas como HZE, [2], estas se originan principalmente en las estrellas y cataclismos galácticos, además de las relacionadas a las reacciones nucleares en los materiales de las naves y satélites espaciales. Por lo general los vectores espaciales empleados en la exploración cósmica requieren entonces de materiales de alta radio-resistencia y no solamente mecánica. La estructura atómica del material sujetos a radiación durante la permanencia en el espacio extraterrestre o interplanetaria, recibe de manera continua una alta energía de radiación (Transferencia Lineal de Energía o LET) de modo que la red sufre modificaciones por

desplazamiento (dispersión elástica o dpa) y transformación nuclear (reacciones nucleares). En esta instancia se orienta el estudio de estos dos fenómenos a la estructura de nanotubos de carbono. Este material supera en gran medida las propiedades de otros materiales empleados por ejemplo en el ensamblaje de la Estación Espacial Internacional (ISS) y se espera que sea empleado con mayor frecuencia en el futuro en la construcción de satélites y en la colonización del planeta Marte. De hecho, los nanomateriales son ideales por disponer de una fuerza tensora 100 veces mayor del acero y un sexto de su peso, son excelentes conductores de electricidad y de calor, son conductores o semiconductores dependiendo de la estructura atómica, ([http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2005/27jul\\_nanotech](http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2005/27jul_nanotech)). El estudio que se presenta en esta instancia se relaciona a los detectores nucleares del tipo pasivos basado en el carbonato polialil-diglicol indicado brevemente con la sigla PADC bajo el nombre comercial CR-39TM. Un conjunto de estos detectores fue expuesto durante varias misiones en la Estación Espacial Internacional ISS utilizando el módulo de servicio "Zvezda" (Федеральное космическое агентство России - Agencia Espacial Federal Rusa [3], [4], [5]. La Universidad Simón Bolívar ha participado en el proyecto relativo en colaboración con la Agencia Espacial de Hungría y el Instituto AEKI de Budapest, Hungría) realizando el análisis de los detectores [6], [7]. Los resultados han suministrado los valores del equivalente de dosis ambiental H\*(10) (reacciones nucleares binarias y ternarias) recibidas por los astronautas. Se han realizado una serie de irradiaciones con radiación gamma y neutrones con un acelerador lineal empleado en radioterapia. Utilizando los resultados es posible aplicarlos para determinar también la dosis o la tasa de átomos (en nanotubos de carbono) desplazados por los neutrones. Se justifica la utilización de detectores de estado sólido (PADC) por la evidencia experimental del desempeño como dosímetros pasivos en un ambiente dominado por las radiaciones cósmicas. Existe además la posibilidad de emplearlos en la evaluación no

Este trabajo fue enviado al II Congreso Venezolano de Tecnología Espacial en el mes de julio de 2017.

L. Sajo-Bohus, Universidad Simón Bolívar Baruta Apdo 89000, Caracas, Venezuela 1080A. (Correo electrónico: lsajo@usb.ve).

J. Lira, Universidad Simón Bolívar Baruta Apdo 89000, Caracas, Venezuela 1080A. (Correo electrónico: joaquinliraolivares@gmail.com).

H. Barros, Universidad Simón Bolívar Baruta Apdo 89000, Caracas, Venezuela 1080A. (Correo electrónico: hbarros@usb.ve).

S. Agustín Martínez-Ovall, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja-Boyacá, Colombia (s.agustin.martinez@uptc.edu.co).

solamente del daño estructural sino también en establecer las consecuencias previsibles en los dispositivos electrónicos. Es bien conocido que existe una probabilidad no despreciable en que la electrónica experimente fallas que puedan comprometer el éxito de las misiones de larga duración temporal especialmente durante la travesía de la zona llamada Anomalía Atlántica. Se han programado misiones espaciales al planeta Marte de por lo menos nueve meses de travesía espacial y no menos de otros cuatro de espera para poder acceder a la ventana oportuna para utilizar la trayectoria más conveniente de regreso a la tierra. Cabe mencionar que se estima (en base la tecnología actualmente disponible), para una nave espacial con tripulación de seis astronautas, 1400 toneladas de material vario (combustible, insumos, blindaje radiológico, construcción de edificaciones y maquinarias de apoyo entre otros más); con los vectores de transporte con la capacidad disponible se requiere 90 lanzamientos y por las limitaciones existentes la expedición se realizaría en seis años. No obstante, estas y otras limitaciones que se mencionan más adelante, la colonización del Planeta Rojo ya forma parte de la agenda espacial en la cual el interés se extiende tanto en la exploración como a la colonización del sistema solar y del más allá.

## II. ASPECTOS FENOMENOLÓGICOS DEL MTN

El método de las trazas nucleares (MTN) se relaciona a estudios realizados con detectores pasivos (PADC) han puesto en evidencia la fisión ternaria de elementos livianos como la reacción  $n(12C,3\alpha)n$  en la cual se producen tres partículas alfas [6]. Dependiendo de la energía de los neutrones cósmicos otras reacciones nucleares también tienen probabilidad de darse a saber:  $12C(n,T)10B$ ;  $12C(n,D)11B$ ;  $12C(n,p)12B$ . Cabe mencionar que, en el cuerpo humano, la reacción de mayor importancia en dosimetría astronáutica, es  $16O(n,\alpha)13C$  con un valor de umbral a 10 MeV y una sección eficaz transversal de reacción del orden de los 1000 mb. Los neutrones energéticos  $>15$  MeV después de interactuar con los núcleos bien sea de  $16O$  o  $12C$ , inducen la formación de partículas cargadas ( $p, D, T, \alpha$ ) que dejan un daño de bajo volumen y elevada densidad de iones en el material que las absorbe (por ejemplo, en los nanotubos de carbono) debido a un desplazamiento masivo de los átomos a consecuencia de la explosión de Coulomb (campo electrostático de alta intensidad). Un fenómeno similar ocurre con los fragmentos de la reacción nuclear que generalmente por disponer de un valor elevado de LET (Linear Energía Transferencia o stopping power in  $keV/\mu m$ ) inducen daños en la estructura molecular, con una intensidad no despreciable (por la acción del campo de Coulomb) [8]; la consecuencia es la formación de daño dentro de tubo de 1000 nm de largo con diámetro de 50–100 nm, en la cual los átomos departen de su posición original modificando las propiedades mecánicas de los materiales (en los plásticos detectores pasivos forma el llamado traza nuclear latente). La selección, de los detectores a base carbonatos de polialil-diglicol (PADC frecuentemente reportados en la literatura como Columbia Resin número 39 o simplemente CR-39TM) es particularmente adecuado, por su composición química  $(C_{12}H_{18}O_7)_n$ , que contiene H con un 6.6% en peso, C (52.6%) y O (40.8%) es decir los elementos de mayor interés en este estudio. En definitiva por medio de trazas nucleares

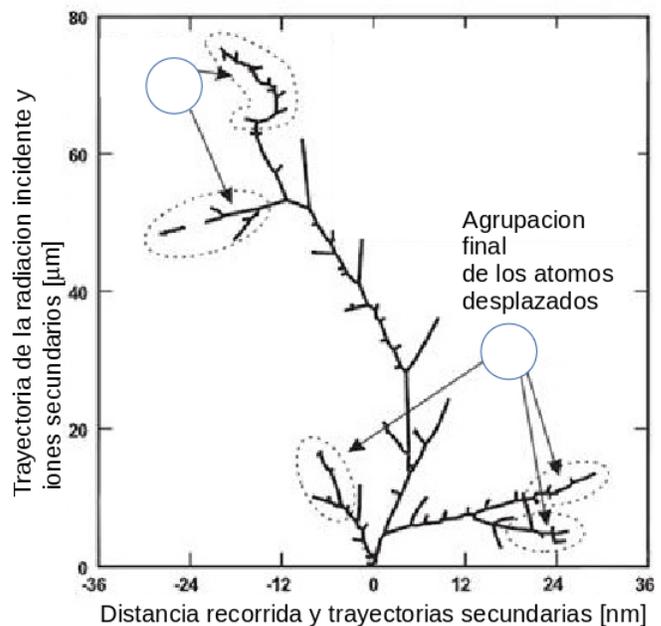


Fig. 1 esquema del proceso dinámico de la formación de una traza latente; a) la radiación incide induciendo ionización; b) la elevada densidad de pares de iones, desplaza los átomos de su posición; c) los iones se recombinan y los átomos ocupan nuevas posiciones. El proceso final o dpa se esquematiza para neutrones que interactúan con núcleos de H, C, O; [9].

química tratadas se determinan: i.- los átomos desplazados (dpa), ii.- los productos de las reacciones nucleares bien sea por activación ( $n,\alpha$ ) o transformación de los núcleos ( $n,x$ ); ( $n,fis$ ); el principio físico que domina en la dinámica (explosión de Coulomb) de la formación del daño por radiación en el material se esquematiza en la Fig. 1.

## III. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE LA METODOLOGÍA DE LAS TRAZAS NUCLEARES

La detección de partículas en el espacio extraterrestre utilizando la metodología de las trazas nucleares (MTN), se relaciona al conocimiento de la cinética de la formación de la traza. Este es un fenómeno complejo, requiere información sobre las interacciones nucleares con la materia, tasa de deposición específica de energía y las propiedades químico-físicas del material absorbedor. Las primeras teorías fueron desarrolladas a principios de los años 70, [7]. Posteriormente, se realizaron estudios detallados mediante la simulación por Chambaudet y Fromm (de la Universidad de Besançon, Francia), Dörschel y Hemsdorf, (Universidad Técnica de Dresde, Alemania) y Nikezić y Yu, (Universidad De Hong Kong). Los estudios que dominan el sistema de detección, se basan en la conocida teoría de Bragg (propuesta en 1903), que describe la deposición específica de energía de una partícula cargada al penetrar en la materia. La única teoría de la formación de las trazas latentes a partir de primeros principios es reportada en la [10]. Los estudios se basan en funciones o curvas de deposición y por conveniencia son calculadas mediante el código SRIM-2013 [11], por medio del cual se determina la tasa de Transferencia Lineal de Energía (LET) por unidad de longitud y la longitud de la trayectoria. En la Fig. 2.a se presenta una fotografía real del daño latente inducido por la radiación HZE (foto del autor con AFM en la Universidad

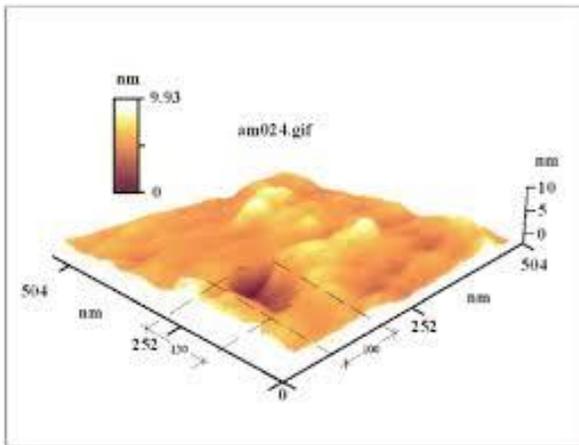


Fig. 2.a. Daño en un PADC por partículas  $\alpha$  incidentes, observado en un microscopio de fuerza atómica (AFM)

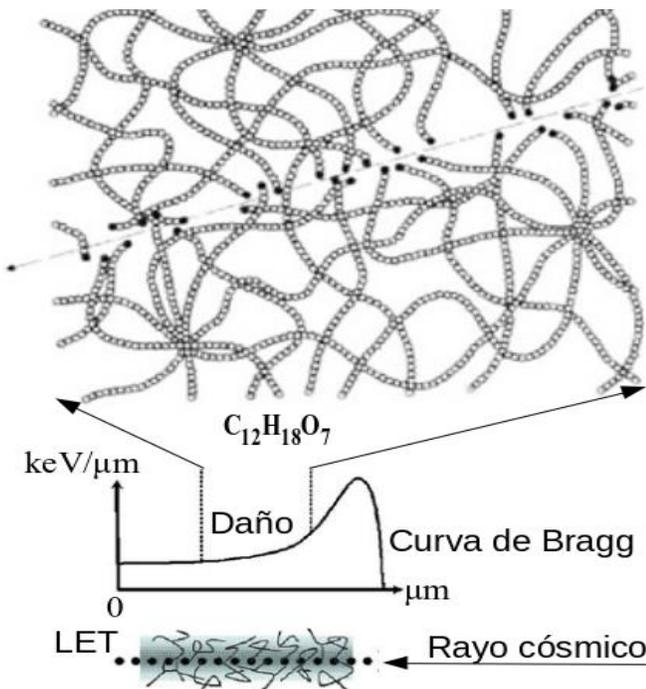


Fig. 2.b. Representación de la ruptura de los enlaces químicos por absorción de la energía cinética de la partícula incidente.

ELTE, Budapest, Hungría) que se complementa con una ilustración artística del fenómeno de formación de trazas nucleares en PADC (Fig. 2.b).

Como se puede observar de la Fig. 2.a las dimensiones de la traza latente son en el rango de los 100 nm; por lo tanto, su visualización (de un factor 100) se debe realizar por medio de un oportuno tratamiento químico. Esto se logra por ejemplo tratando el plástico con una solución NaOH, 6N a temperatura de 70 °C; la acción química que se aplica es entre 4 y 10 horas o más, dependiendo del tipo de radiación bajo estudio, lo que permite analizar las trazas ampliadas por su forma geométrica, tamaño y frecuencia. La evolución de la traza depende de varios parámetros y por lo tanto ha sido estudiada también en términos de la dinámica de condensación capilar [10] con el objeto de describir el fenómeno en sus detalles.

A manera de ejemplo se presenta en un esquema (Fig.3) la cinética relativa a la evolución de la traza y la foto digital de fisiones ternarias reales. En esa figura se reporta la imagen

digital del daño inducido por un fragmento de fisión ternaria con una energía cinética entre 80 y 120 MeV; el PADC ha sido estudiado en un campo neutrónico en una sala de radioterapia [12], [13] y tratado con la solución antes mencionada. Las trazas tienen direcciones que son determinadas por la conservación del momento angular y sus diámetros se relacionan a la masa, mientras la profundidad indica la energía cinética. Existe la técnica de deconvolución para determinar los parámetros de

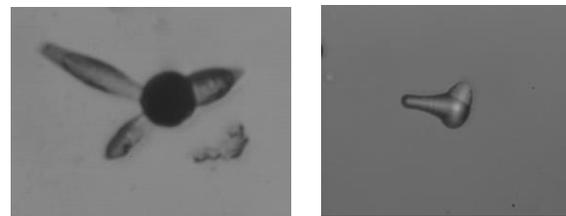
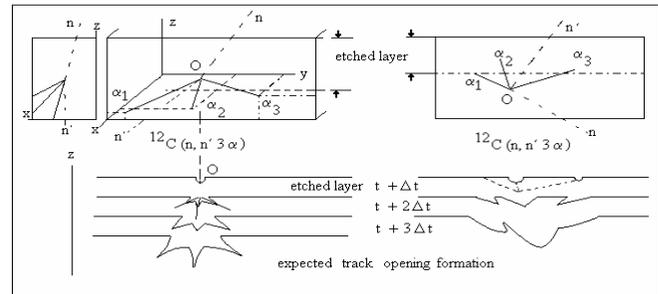


Fig.3. Cinética de la formación de la traza bajo tratamiento químico e imágenes digitalizadas de trazas nucleares de fisión producto de la reacción  $n(12C,3\alpha)n'$ .

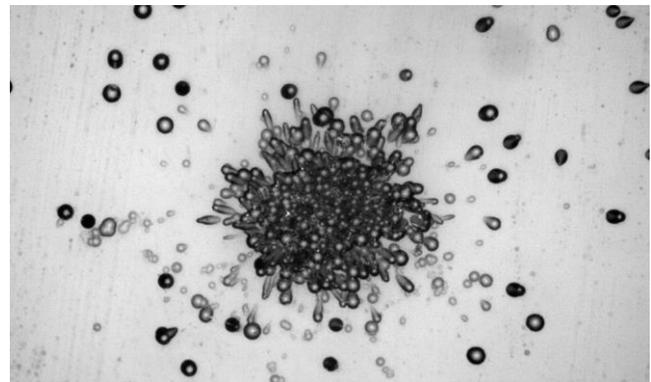


Fig.4. Imagen digital de las trazas nucleares inducidas en PADC por un fragmento de fisión de HZE con una energía cinética entre 80 y 120 MeV, (foto del autor utilizando un microscopio de transmisión de luz de la Universidad PUCP de Lima, Perú).

identificación de los productos de la reacción [14].

Los detectores PADC al ser impactados, por los neutrones de alta energía penetran en el detector una profundidad variable e inducen en el núcleo del carbono una fisión ternaria. En este proceso nuclear se emiten partículas alfa con energía mayor del valor de umbral (200 keV) para formar la traza latente. En la figura 3 (arriba) se esquematizan dos casos particulares dependiendo de la dirección de incidencia del neutrón. Los estratos indicados (con  $\square t$ ) son los que se remueven mediante el tratamiento con la solución química con una tasa de 1.35 micrómetros por hora en la condición indicada anteriormente. Estos daños son visibles bajo microscopio óptico de transmisión con amplificación de 20x100 y se contabilizan

utilizando un analizador de imagen digitalizada. En este caso los PADC expuestos en la ISS fueron analizados con el programa de análisis de trazas tratadas MORFOL; el código fue elaborado por la AEKI, Budapest, Hungría [15], [16].

#### IV. TASA DE ÁTOMOS DESPLAZADOS POR DISPERSIÓN ELÁSTICA DPA Y REACCIONES NUCLEARES

Los neutrones cósmicos (dependiendo de la energía y sección eficaz de interacción) pueden modificar la estructura reticular del material que las absorbe (blanco) e inducir defectos o imperfecciones tales como vacantes, auto intersticiales, ionización, excitación, transmutación nuclear entre otros fenómenos físicos conocidos y con una frecuencia de observación variable. Estos daños o modificaciones estructurales a nivel atómico molecular de volumen microscópico son defectos que alteran a su vez las propiedades microscópicas de los materiales conocida como *enfermedad de Wigner (EW)*. Este término abarca todos los cambios que podrían desmejorar las propiedades mecánicas o físico-químicas del material. La *EW* inducidos por neutrones o fragmentos de reacciones nucleares entre otros, se evalúan por medio del dpa y transmutaciones nucleares, (que se interpreta como una dosis es decir energía por unidad de masa); por lo general en el formalismo matemático se aplica el modelo aproximado de Kinchin y Pease (disponible en: <http://www4.ncsu.edu/~mmurty/NE509/NOTES/Ch3-RadiationDamage.pdf>).

Para la descripción de las ecuaciones se utilizan mecanismos de transferencia de energía cinética (colisión elástica e inelástica) entre la partícula cósmica incidente (neutrón) y el átomo (carbono) dominantes en la estructura de nanomateriales. Como se mencionó, los siguientes fenómenos son relevantes: producción de vacantes (inducción de estrés), espacios intersticiales (que favorece la retención de los gases H<sub>2</sub> y He), átomos considerados de impureza por la producción del mecanismo de transmutación nuclear (X → Y), regiones con átomos en estados de alta energía consecuencia de la dispersión primaria y secundaria (X\*), entre otros más a nivel atómico y las que interactúan directamente con el núcleo atómico (dispersión de energía por retrodispersión). El fenómeno de mayor importancia a nivel atómico es la formación de cavidades o vacíos que puedan aglomerar gas-He y a nivel nuclear de las reacciones como X<sub>i</sub>(n,α)Y<sub>j</sub> que involucran núcleos de carbono X<sub>i</sub>=C, aluminio X<sub>i</sub>=Al y los componentes elementales del acero X<sub>i</sub>=acero(reacciones n,α). Valor de dpa para la irradiación con rayos cósmicos se determinan por medio de la simulación con el código SRIM ampliamente utilizado en el estudio de los daños inducidos por radiaciones ionizantes. En cuanto a los cálculos se refiere es posible utilizar las ecuaciones que describen la fenomenología de la dispersión por choque elástico de los átomos. Presentamos brevemente las ecuaciones relacionadas con la fenomenología de la modificación estructural de los nanomateriales. La tasa de desplazamiento Rd formulada por Orlander [17] es:

$$R_d = N \cdot \sigma_d(E_n) \phi(E_n) \quad (1)$$

en la cual el producto del número de átomos por cm<sup>3</sup> es N, la sección eficaz transversal de reacción. y el flujo de partículas

involucrado  $\phi(E_n)$ , que depende de la energía incidente. En del neutrón. Mientras que el valor del parámetro dpa se determina a partir de la ecuación anterior por medio de:

$$\therefore dpa = \frac{R_d t}{N} = t \int_E^\infty \Lambda \sigma_d(E_n) \phi(E_n) dE_n \quad (2)$$

Utilizando las ecuaciones:

$$\therefore dpa = \frac{R_d t}{N} = t \int_E^\infty \Lambda \sigma_d(E_n) \phi(E_n) dE_n \quad (3)$$

y

$$R_d = \frac{N \Lambda \sigma^{el} E_n}{4 E_d} \int_0^\infty \phi(E_n) dE_n \quad (4)$$

la ecuación (2) asume la expresión:

$$\therefore dpa = \frac{R_d t}{N} = t \frac{\Lambda \sigma^{el} E_n}{4 E_d} \int_0^\infty \phi(E_n) dE_n \quad (5)$$

en la cual:

$$E_n = \frac{\int_0^\infty E_n \phi(E_n) dE_n}{\int_0^\infty \phi(E_n) dE_n} \quad (6)$$

puesto que la masa reducida es:

$$\therefore A = \frac{4A}{(1+A)^2} \quad (7)$$

la expresión final asume la siguiente forma compacta:

$$dpa = \frac{\Lambda E_n}{4 E_d} \quad (8)$$

y la tasa de dosis es la ecuación (2) multiplicado por el tiempo de exposición.

Para el caso de los nanomateriales de carbono se emplean los siguientes valores:  $\Lambda=0.284$ ;  $E_n=15\text{MeV}$ ;  $E_d=24\text{ eV}$ ; asumiendo una sección de dispersión elástica de 3 [b], flujo de  $105\text{ n. cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  y  $N=N_{av}/2$  [18]. Para una misión al planeta Marte con una carga solamente de 10% de carbón elemental del material requerido, el número de desplazamiento esperado es del orden del 17%. El número no es despreciable; sin embargo, por la presencia del efecto de relajación el material sufre un daño relativamente pequeño. Sin embargo, los cálculos indican para flujos mayores (caso de explosiones solares o las manchas negras observadas por Galileo en 1640) el dpa es alrededor de 0.02 un valor tal que el material pierde sus propiedades intrínsecas. El caso podría ser más dramático, cuando se consideran las reacciones nucleares. En línea de principio las

ecuaciones son similares a las presentadas anteriormente en la aproximación de utilizar las secciones eficaces de reacción nuclear de fisión ternaria. El espectro de neutrones cósmicos, contiene en primera aproximación tres grupos de energías (región térmica 0.025 eV, región de Fermi con neutrones epidérmicos, región de evaporación ~MeV y región de alta energía o ultra rápida ~100MeV) como reportado en la figura 5.

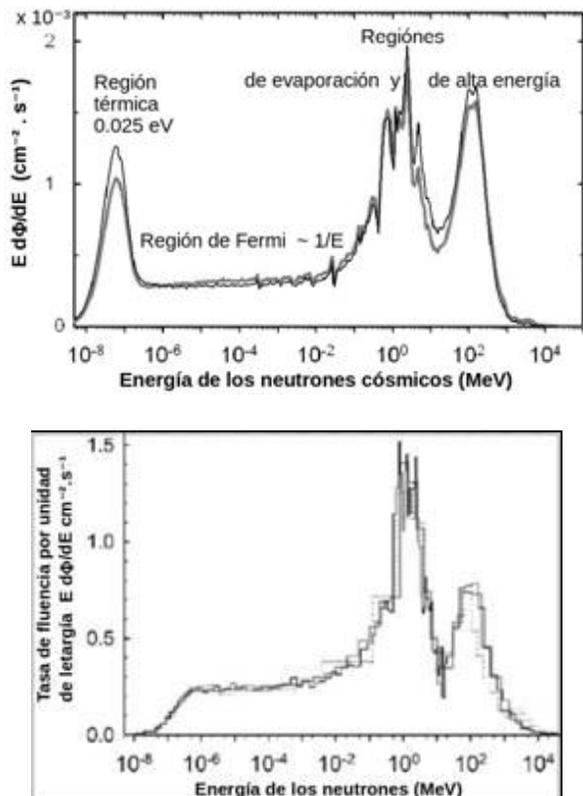


Fig. 5. Tasa de fluencia (cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) en función de la energía de los neutrones atmosféricos (izquierda) en comparación con la tasa extraterrestre (derecha) a la cual se exponen los materiales durante la misión al Planeta Rojo. Se reconocen los principales grupos de energía. El vector espacial durante el tránsito en la atmósfera terrestre se sumerge en un campo neutrónico mayor. [19].

Para obtener los valores de la tasa de reacciones se utilizan los grupos mencionados: En<sub>i</sub> (i=0.025 eV; 2 MeV y 200 MeV) que son los que contribuyen a la dosis efectiva de manera considerable (~70%). La dosis neutrónica durante la misión espacial, depende del espectro en la región de energía >1 MeV.

Para la misión al planeta Marte, la dosis debida a neutrones solares y cósmicos están por encima de los valores permisibles y oscilan entre el valor medido en la ISS [5], [6] y valores estimados por simulación.

## V. DOSIS NEUTRÓNICA EN ASTRONÁUTICA

Existe la preocupación por tener mejor comprensión acerca de los procesos radiobiológicos que se generan a partir de la transferencia de energía de los neutrones a los medios materiales en este caso al cuerpo humano, lo que es considerado genera los inaceptables efectos secundarios. Las dosis debidas a neutrones que son recibidas por los astronautas constituyen uno de los efectos secundarios que presentan especial interés debido al riesgo que presentar neoplasias secundarias a largo plazo [20], [21], [22], [23].

Debido a que la cantidad de radiación ionizante recibida a consecuencia de los neutrones absorbidos puede causar efectos biológicos muy diferentes, por la dependencia del tipo de partícula o HZE-agente. El valor de la dosis absorbida D se suele multiplicar por los factores de calidad asociados a la radiación de neutrones y entonces hallar la equivalencia en energía absorbida debida al particular HZE. La cantidad resultante se denomina equivalente de dosis H, esta es la cantidad que realmente determina el daño biológico al tejido, de acuerdo con Kry et al., [23].

$$H = \sum_E D(E) Q_n(E), \quad (9)$$

Donde  $D(E)$  es la dosis absorbida en tejido, debida a neutrones y  $Q_n(E)$  es el factor de calidad para neutrones de energía  $E$ .

Igualmente puede calcularse  $H$  a partir del espectro de fluencia de neutrones como en este caso particular en que se tiene el espectro de neutrones reportado (ver figura 5), en este caso,

$$H = \sum_E \phi(E) k(E) Q_n(E), \quad (10)$$

donde  $\phi(E)$  es el espectro de fluencia de neutrones,  $k(E)$  es el factor kerma para neutrones de energía  $E$  en tejido y neutrones y  $Q_n(E)$  es el factor de calidad para neutrones de energía  $E$ . El producto  $\phi(E) k(E)$  es la dosis absorbida debida a neutrones  $D(E)$  (Martínez-Ovalle et al., 2012).

## VI. RESULTADOS

En relación los dpa por neutrones y las reacciones nucleares inducidas incluyendo los rayos cósmicos los resultados se reportan en la Tabla 1.

Para Determinar daños localizados en la estructura del nanomaterial de carbono se emplea el programa de simulaciones SRIM como ya se mencionó (está disponible libremente en internet). Los detalles de los valores de los parámetros están descritos en la hoja de tutoriales. Aquí reportamos los resultados más importantes del programa el cual simula los efectos inducidos por partículas alfas con el blanco. En la Fig.6 se reporta una típica grafica de simulación para una interacción (alfa, núcleo atómico) en la cual el núcleo de helio completamente ionizado penetra en la nanoestructura desplazando los núcleos de carbono con una densidad por

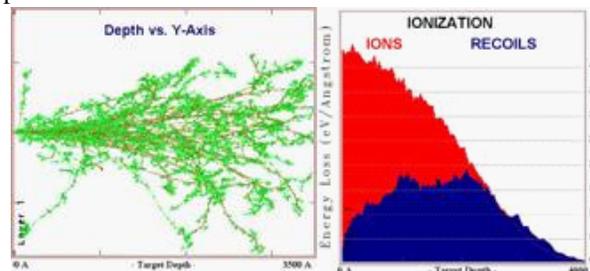


Fig. 6. Resultado de la simulación por SRIM en base al mecanismo de interacción entre una partícula energética alfa con el núcleo de Carbono (blanco) a la izquierda. A la derecha, se reporta la pérdida de energía del haz incidente; la contribución debida a la colisión elástica es del ~50% en comparación con la correspondiente pérdida de energía por ionización [24].

TABLA I.

VALORES CALCULADOS PARA EL DPA Y TRANSFORMACIONES NUCLEARES CON NEUTRONES INCLUYENDO RADIACIONES GAMMA CON ENERGÍA &gt; 15 MeV

Tipo de Interacción Elástica neutrones	dpa/s	Energía de deslocación de umbral en eV	Tasa de transformación por flujo neutrónico evets/cm <sup>3</sup> -s	Nota
Carbón (C <sub>nat</sub> )	1,4 x 10 <sup>-15</sup>	23,6	2 x 10 <sup>-4</sup>	Nanotubos
Oxígeno (O <sub>nat</sub> )	6,9 x 10 <sup>-17</sup>	32,2	2 x 10 <sup>-1</sup>	Cuerpo humano
Aluminio (Al <sub>nat</sub> )	6,0 x 10 <sup>-15</sup>	16,0	2 x 10 <sup>-1</sup>	Estructura metálica
Hierro (Fe <sub>nat</sub> )	10 x 10 <sup>-15</sup>	24,0	2,5 x 10 <sup>-3</sup>	Estructura metálica
N( <sup>12</sup> C,3α)n'			10 <sup>-1</sup>	Se produce gas helio
<sup>12</sup> C(n,T) <sup>10</sup> B			3 x 10 <sup>-2</sup>	Se produce <sup>3</sup> H
<sup>12</sup> C(n,D) <sup>11</sup> B			7 x 10 <sup>-3</sup>	Se produce gas hidrógeno pesado
<sup>12</sup> C(n,p) <sup>12</sup> B			2 x 10 <sup>-3</sup>	Se produce gas hidrógeno
<sup>16</sup> O(n,α) <sup>13</sup> C			10 <sup>-1</sup>	Se produce gas helio
<sup>16</sup> O(γ,n) <sup>15</sup> C			10 <sup>-3</sup>	Producción de fotoneutrones E <sub>fotón</sub> (20-25 MeV)
<sup>12</sup> C(n,n'x)			2,4 x 10 <sup>-6</sup>	Tasa de reacciones de retroceso de núcleo <sup>12</sup> C
<sup>16</sup> O(n,n'x)			2,4 x 10 <sup>-6</sup>	Tasa de reacciones de retroceso de núcleo <sup>16</sup> O

\*no se considera el efecto sobre el frenado por canalización o ion channeling

unidad de camino dado por la curva de Bragg.

## VII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El fenómeno de dislocación atómica se relaciona con la sección transversal elástica y la energía incidente. La tasa de los eventos dpa estimados para el carbón y otros elementos depende de la sección eficaz trasversal elástica y la energía incidente de los neutrones. De la comparación de los resultados se observa que el impacto sobre nanotubos de carbono es despreciable (una milésima parte en comparación con el Al); sin embargo, si se incluyen los factores de masa de material y el tiempo de exposición observamos que utilizando 1 m<sup>3</sup> de material en una misión al planeta Marte y asumiendo dos grupos neutrónicos espaciales de 1 y 100 MeV, el número de átomos dislocados es comparable con el número de Avogadro. Por un efecto termodinámico (annealing) los átomos dislocados por los neutrones, estadísticamente ocupan posiciones que han ocupado anteriormente. De esto se concluye que los nanotubos no ofrecen mayores ventajas técnicas en comparación con otros materiales (por ejemplo, Al, Fe) en aplicaciones espaciales. La situación es diametralmente opuesta para las reacciones nucleares en cuanto a que un núcleo inicial físicamente se transforma en núcleos diferentes de los iniciales. Los neutrones del espectro con energía de los grupos mencionados, inducen fisión ternaria en el grafito además de las reacciones con la generación de hidrogeno y sus isotopos además del helio. Estos gases ocupan espacios intersticiales modificando así las propiedades del material. La más frecuente y de mayor daño inducido ocurre con la reacción n(<sup>12</sup>C,3α)n' y es de tal magnitud que es el mayor responsable de la disminución del material en términos de las propiedades mecánicas en particular resistencia a la tracción que empeora del 12,5% por año de permanencia en el espacio interplanetario. El experimento que ofreció este resultado se relaciona al hilo de nanotubos de carbono y se realizó a bordo de la Estación Espacial Internacional según la información reportada por Winkless [11]. En conclusión el daño por radiaciones cósmicas en nanotubos de carbono están contenidos en valores que indican que es posible emplearlos como material estructural en la naves, observación que concuerda con la referencia [25] y varios vectores espaciales con la limitación de que la resistencia a la tracción se reduce del 40% de su valor inicial (en la aproximación de un flujo neutrónico cósmico de 10<sup>5</sup> n/s) el

número de átomos desplazados es 17% del total mientras que para flujos excepcionalmente grandes (de 10<sup>15</sup> n/s) el dpa es 0.02 datos que corresponden al caso de permanecer en el espacio cósmico por tres años, un periodo de tiempo típico para realizar una misión espacial al planeta Marte asumiendo que acurran eventos solares (imprevisibles a priori) de gran magnitud.

## VIII. RECONOCIMIENTOS

Se agradece la donación de los detectores PADC a la TASL, Track Analysis System Ltd, Napier House, Meadow Grove, Bristol BS11 9PJ, UK., las irradiaciones realizadas en el LINAC por el Dr. J. E. Dávila y el Lic. E. Salcedo y la colaboración prestada por GURVE-Radiotherapy Clinic, Centro Médico Docente La Trinidad, Caracas, Venezuela.

## REFERENCIAS

- [1] Cosmic Gamma Ray spectrum: <http://www.messenger-education.org/instruments/gms.php>.
- [2] Helder, E.A. et al., (2012). Observational signatures of particle acceleration in supernova remnants - Space Sci.Rev. 173 369-431 arXiv: 1206.1593 [astro-ph.HE.]
- [3] Pálfalvi, J.K., Akatov, Yu., Sajó-Bohus, L., Szabó, J., Eördögh, I., (2003). Cosmic particle induced reaction detection with SSNTD stack exposed on-board of the international space station. in: Gadioli, E. (Ed.), Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms, Varenna, Italy, June 9–12, 2003. Ricerca Scientifica Educ. Permanente, 122 (Suppl), 655–660.
- [4] Pálfalvi, J.K., Akatov, Yu., Szabó, J., Sajó-Bohus, L., Eördögh, I., (2004). Evaluation of SSNTD stacks exposed on the ISS. Rad. Prot. Dos. 110, 393–397.
- [5] Pálfalvi, J.K., Akatov, Yu., Szabó, J., Sajó-Bohus, L., Eördögh, I., (2005). Detection of primary and secondary cosmic ray particles aboard the ISS using SSNTD stacks. Radiat Prot Dosimetry (2006) 120 (1-4): 427-432. DOI:<https://doi.org/10.1093/rpd/nci673>.
- [6] Pálfalvi, J.K., Szabó, J., Akatov, Yu., Sajó-Bohus, L., Eördögh, I., (2005). Cosmic ray studies on the ISS using SSNTD, BRADOS projects, 2001–2003. Radiation Measurements 40, 428–432.
- [7] Pálfalvi J. and Sajó-Bohus L., (2015) Cosmic Radiation Detection by Solid State Nuclear Track Detector Technique. Solid State Phenomena, 238, 16-54. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.238.16.
- [8] Rozlosnik N., Sajó Bohus, L., Birattari, C., Gadioli, E. Biró LP. and Havancsák K. (1997). Direct observation of latent nuclear tracks in organic material by atomic force microscopy. Nanotechnology 8, 32–34.

- [9] Meroli, S. Disponible en internet: [http://meroli.web.cern.ch/meroli/lecture\\_radiation\\_damage\\_silicon\\_detector.htm](http://meroli.web.cern.ch/meroli/lecture_radiation_damage_silicon_detector.htm).
- [10] Martín-Landrove R., y Sajo-Bohus L. and Palacios D., (2013) Nuclear track evolution by capillary condensation during etching in SSNT detectors. *Radiation Measurements*, 241–245.
- [11] Winkless L., (2016). Carbon nanotubes in space. Disponible en: [http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/news/carbon-nanotubes-in-space/12 July 2016](http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/news/carbon-nanotubes-in-space/12%20July%202016).
- [12] Díaz Cruz E., Dávila Jesus, Sajo-Bohus Laszlo, Spencer Lilian, Barros Haydn, Palacios Daniel, Figuera Henderson, Barrera María, Castillo Rita y Garcia Vanessa. Estudio Del Campo Neutronico Inducido Por Acelerador Lineal De 10-20 Mv En La Sala De Radioterapia. Disponible en: <http://www.sbpr.org.br/irpa13/AnaisdoIRPA2013/EstudiodelcampoNeutronicoInducidoPorAceleradorLinealde1020MvEnLaSalaDeRadioterapia/3133.pdf>.
- [13] Diaz, C., (2012) Evaluación Del Campo De Neutrones Térmicos Y Epitérmicos Producido En Un Acelerador Lineal De 15-20 MV de Radioterapia Empleando Detectores Pasivos Poly-Allyl-Diglycol-Carbonate Padc. Proyecto de Trabajo De Grado de Maestría, Universidad Central De Venezuela Facultad de Ciencias Postgrado En Física Médica.
- [14] Sajó-Bohus, L., Pálfalvi, J. K. Arevalo, O. Greaves, E. D.Németh, P. Palacios, D., Szabo J. and Eördögh I.(2005). Neutron Induced Complex Reaction Analysis with 3D Nuclear Track Simulation *Radiation Measur.* 40 , 442-447.
- [15] Pálfalvi, J., Eördögh, I., Szász, K., Sajó-Bohus, L., (1997). New generation image analyser for evaluating SSNTDs. *Radiat. Meas.* 28, 849–852.
- [16] Pálfalvi, J., Sajó-Bohus, L., Eördögh, I., (1999). First international intercomparison of image analysers. *Radiat. Meas.* 31, 157–166.
- [17] Orlander DR (1975) Radiation Damage. Ref. Ch.17. D.R. Olander, *Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Elements*, disponible en la web. [www4.ncsu.edu/~murty/NE509/NOTES/Ch3-RadiationDamage.pdf](http://www4.ncsu.edu/~murty/NE509/NOTES/Ch3-RadiationDamage.pdf).
- [18] R Alvarado, R., Palacios, D., Sajo-Bohus, L., Greaves, E., Goncalves I., Barros, H., Nemeth, P. Neutron flux characterization using LR-115 NTD and binary glass metal as converter. *Revista Mexicana de Física “S”*.56,1, 5-8, 2010.
- [19] Goldhagen P., M. Reginatto, T. Kniss, J.W. Wilson, R.C. Singleterry, I.W. Jones, W. Van Steveninck., (2002). Measurement of the energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons aboard an ER-2 high-altitude airplane. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A.* 476(1-2):42-51. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01386-9.
- [20] Barquero, R., Edwards, T. M., Iñiguez, M. P., & Vega-Carrillo, H. R. (2005). Monte Carlo simulation estimates of neutrón doses to critical organs of a patient undergoing 18MV x-ray LINAC-based radiotherapy. *Medical Physics*, 32(12), 3579-3588.
- [21] Harrison, R. M. (2007). The estimation of second cancer risk following radiotherapy: a discussion of two models. *Biomedical Imaging and Intervention Journal*, 3(2).
- [22] Kry, S. F., Howell, R. M., Salehpour, M., & Followill, D. S. (2009). Neutron spectra and dose equivalents calculated in tissue for high-energy radiation therapy. *Medical physics*, 36(4), 1244-1250.
- [23] Martínez-Ovalle, S. A., Barquero, R., Gómez-Ros, J. M., & Lallena, A. M. (2012). Neutron dosimetry in organs of an adult human phantom using linacs with multileaf collimator in radiotherapy treatments. *Medical physics*, 39(5), 2854-2866.
- [24] SRIM-2013 Disponible en internet, programa de simulación de libre acceso.
- [25] Hopkins, AR, Labatete-Goeppinger AC, Kim, H and Katzman, H.A. (2016). Space survivability of carbón nanotube yarn material in low Earth orbit, *Carbon* 107 (2016) 77-8. DOI: 10.1016/j.carbon.2016.05.040.