



*Victor F. Hess a punto de realizar un viaje en globo.*

«Nuestro universo conserva las huellas de su juventud y tenemos la esperanza de reconstruir su historia. Los documentos de los que disponemos no están enterrados entre montones de ladrillos babilonios; nuestra biblioteca no corre el riesgo de ser destruida en algún incendio. Es en el espacio vacío donde se conserva [. . .] la radiación ultra-penetrante: los rayos cósmicos. ¿Podemos datarlos? ¿Podemos leerlos? ».

Eduardo Riaza

## Mensajeros de las estrellas

«The results of my observations are best explained by the assumption that a radiation of very great penetrating power enter our atmosphere from above.»[1]

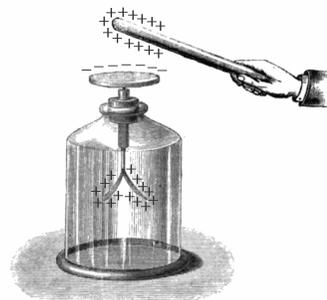
El 7 de Agosto de 1912, el físico austriaco Victor Francis Hess emprendió un vuelo en globo. Su objetivo, estudiar el comportamiento de la electricidad atmosférica. El experimento era sencillo, con ayuda de un navegante y un meteorólogo, tomó consigo tres electros copios y juntos realizaron una serie de viajes para determinar la naturaleza de la electricidad en el aire. Mientras sus ayudantes medían la temperatura y la altura, Hess registraba lo que observaba en los electros copios. Durante varias horas realizaron mediciones a diferentes alturas, sin imaginarse, que los resultados de sus observaciones serían el comienzo de un nuevo paradigma en la ciencia: «... una nueva perspectiva científica cuyos efectos se han hecho sentir en el pensamiento y la vida de la humanidad »[2]. Tres meses después, Hess presentaría su trabajo ante la comunidad científica y veinticuatro años más tarde, recibiría el premio Nobel de Física por su hallazgo: el descubrimiento de los rayos cósmicos. Pero, ¿cuál fue la motivación que llevo a Hess a realizar dicho experimento?.

Desde mucho tiempo atrás los físicos notaron que un cuerpo cargado, expuesto a la intemperie, no mantiene su carga de forma indefinida. No obstante, las causas que provocan el fenómeno eran desconocidas y atrajeron a muchos a buscar una explicación. Entre estos, Charles du Fay fué el primero en descubrir que el aire era capaz de conducir la electricidad, lo cual implicaba la existencia de partículas eléctricas libres en el gas.

Para fines del siglo XIX se conocía lo suficiente acerca de la estructura de la materia como para hacer las primeras hipótesis. Se sabía que la materia estaba

compuesta por átomos y que estos tenían carga neutra. También se sabía que la carga eléctrica era de naturaleza cuantizable. Finalmente esto llevó a algunos físicos como Franz Exner a utilizar electroscopios para estudiar la electricidad atmosférica. Los experimentos consistían en observar la descarga del electroscopio al interactuar con el medio ambiente.

La descarga del electroscopio se debe a la ionización del gas alrededor de sus láminas. Si las láminas del electroscopio están cargadas de forma positiva, y existen moléculas de gas ionizadas alrededor de ellas, la interacción de los iones negativos del gas y las láminas eventualmente neutraliza la carga del electroscopio (Fig. 1.1). Sin embargo, aunque esto explica la descarga del electroscopio, surge la pregunta ¿A qué se debe la ionización del gas?.



**Figura 1.1:** Diagrama del funcionamiento de un electroscopio

En 1895 Wilhem Conrad Röntgen descubrió los rayos X y pudo observar que un electroscopio, expuesto a este tipo de radiación, se descarga inmediatamente. Años más tarde, científicos como, Henri Becquerel, Pierre Curie y Marie Curie, realizaron los primeros experimentos con materiales radioactivos. Sus resultados sentaron las bases necesarias para explicar el fenómeno de la descarga del electroscopio[3].

En vista de estos descubrimientos, muchos científicos de la época se inclinaron por la idea de que la ionización del aire se debía a la acción de algún tipo de radiación débil. Se creía que dicha radiación provenía de algunos elementos de la corteza terrestre y/o impurezas en los materiales con los que se construían los electroscopios. Aunque la segunda hipótesis resultó ser cierta, con el tiempo se lograron fabricar electroscopios de mejores materiales y con un mayor grado de pureza. La contaminación radioactiva del instrumento, no podía ser completamente responsable del efecto.

En conclusión: «Si la radiación responsable de la descarga de los electroscopios provenía del suelo, ésta debería ser más fuerte cerca de la superficie y progresivamente más débil a medida que se incrementara en altitud »[2]. Esta fue la motivación que llevó a Hess a realizar sus experimentos el 7 de agosto de 1912. Él observó que a los 500m de altura la ionización era dos veces menor con respecto a la superficie, a los 1500m la ionización era igual, a los 1800m existía un incremento y a los 5000m llegaba a ser dieciséis veces mayor. Hess aseguró que la explicación a esto era una radiación penetrante de origen extraterrestre.

No conforme, Robert Andrews Millikan emprendió una serie de nuevos experimentos para comprobar si los resultados de Hess eran ciertos. Finalmente,

los experimentos en los lagos Muir y Arrowhead, convencieron a Millikan y a la comunidad cient3fica del origen extraterrestre de la hasta entonces llamada *Ultragammastrahlung*. Ser3a Millikan el que usar3a por primera vez el t3rmino **Rayos C3smicos**.

## 1.1. Los Rayos C3smicos

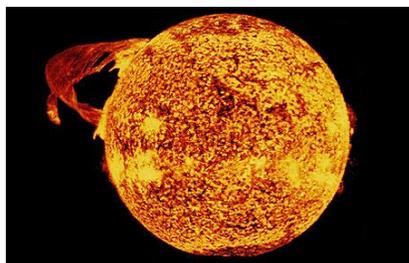
Los rayos c3smicos son part3culas subat3micas que provienen del espacio exterior y llegan a la tierra de todas direcciones. Se componen principalmente de *protones* y aunque no se sabe con exactitud el origen de estas part3culas, se han identificado algunas posibles fuentes.

El Sol, como otras estrellas, sintetiza n3cleos de elementos pesados a partir de elementos m3s ligeros, como el Hidr3geno. El 90% de la composici3n del Sol es Hidr3geno y a partir de 3ste se produce Helio mediante fusi3n nuclear. Las reacciones nucleares en el Sol liberan una gran cantidad de energ3a, que es responsable de las altas temperaturas en la atm3sfera solar.

En la *atm3sfera solar* —capas externas del Sol cuya radiaci3n es observable— se presenta una serie de perturbaciones, a las que se les nombra regiones activas, las cuales estan estrechamente relacionadas con el *ciclo solar* —fluctuaciones en la cantidad de energ3a emitida por el Sol. Tiene efectos visibles como las manchas solares.

El ciclo solar dura aproximadamente once a3os y durante este periodo la actividad solar se manifiesta a diferentes amplitudes, es decir, se incrementa r3pidamente al iniciar el periodo hasta llegar a un m3ximo y decae lentamente hasta concluir el ciclo solar. Adem3s los ciclos entre s3 son diferentes.

Las r3fagas son explosiones de *gas cromosf3rico* —capa delgada de la atm3sfera solar por encima de la fotosfera y por debajo de la corona. Se compone principalmente del Hidr3geno y Helio—, es quiz3s el fen3meno mas sorprendente que se presenta durante la actividad solar (Fig. 1.2). Pueden tener una duraci3n de m3s de una hora y la cantidad de energ3a emitida en ese lapso de tiempo es incre3blemente grande.



**Figura 1.2:** R3faga solar

Los rayos c3smicos solares son part3culas de alta energ3a emitidas durante una r3faga. Se componen principalmente de *protones* y part3culas alfa —n3cleos de Helio—; tienen energ3as superiores a los *MeV* —energ3a que toma un *electr3n* cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1V—, y son clasificados

dentro de los rayos c3smicos locales por ser originados dentro de nuestro Sistema Solar.

La radiaci3n c3smica que se genera m3s all3 de nuestro Sistema Solar recibe el nombre de radiaci3n c3smica gal3ctica. Una fuente viable de este tipo de radiaci3n son las supernovas —explosi3n estelar muy energ3tica que es extremadamente luminosa y produce radiaci3n.



**Figura 1.3:** Los restos de la supernova *Siemis 147*, a unos 3000 a3os-luz de distancia. La explosi3n de la extinta estrella sucedi3 hace unos 100,000 a3os.

El *remanente de supernova* —estructura nebulosa que resulta de la gigantesca explosi3n de una estrella— acelera n3cleos de 3tomos a energ3as muy grandes (Fig. 1.3).

En casi todos los remanentes de supernova, los astr3nomos han detectado radiaci3n emitida por *electrones* energ3ticos atrapados por un campo magn3tico[4].

El material lanzado, a altas velocidades por la explosi3n estelar, contiene *electrones* que ya sea de forma directa o indirecta contribuyen a la radiaci3n c3smica gal3ctica.

### 1.1.1. Radiaci3n c3smica primaria y secundaria

Se le denomina radiaci3n c3smica primaria —RC primaria— al conjunto de part3culas que llegan al tope de la atm3sfera terrestre. Despu3s del Hidr3geno, el Helio es el elemento m3s abundante en la RC primaria. Los n3cleos de Helio son aproximadamente diez veces menos abundantes que los de Hidr3geno. La RC primaria tambi3n contiene un peque3o porcentaje de *electrones* y otras part3culas neutras como: *rayos  $\gamma$* , *neutrones* y *neutrinos*[4].

Al estar compuesta en su mayor3a por part3culas cargadas, la intensidad de la RC primaria se ve afectada por la interacci3n con el medio interplanetario. Durante su camino hacia la Tierra, los rayos c3smicos cruzan diversos campos magn3ticos que pueden acelerarlos o desviarlos de su trayectoria.

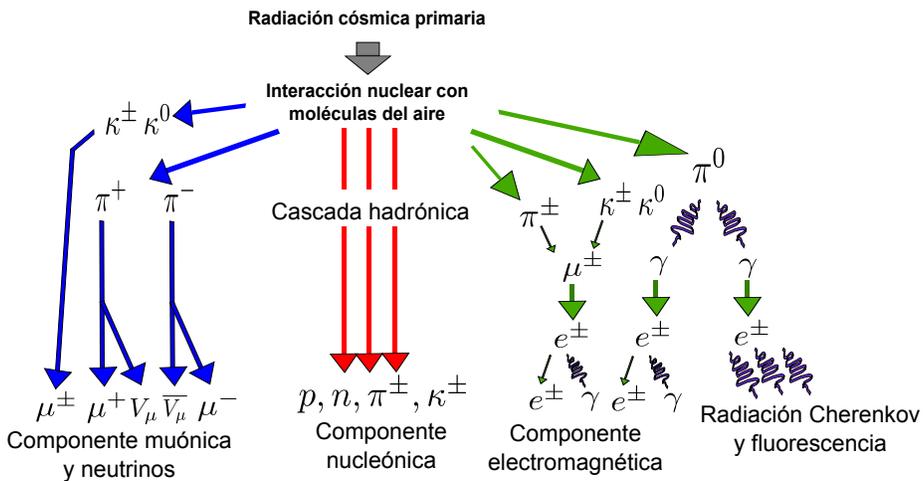
La interacci3n entre los campos magn3ticos de los planetas y la heliosfera, regi3n espacial que se encuentra bajo la influencia del viento solar, producen variaciones en la intensidad de la radiaci3n c3smica. El viento solar es un plasma que ocupa el medio interplanetario, el cual proviene de la expansi3n de la atm3sfera solar y arrastra consigo el campo magn3tico del Sol. Este plasma consiste principalmente de *protones* y *electrones* libres, que le dan la propiedad de conductividad el3ctrica.

En conclusi3n: «El espacio interplanetario no es un espacio vaci3o por el cual las part3culas de rayos c3smicos puede propagarse libremente, el viento solar empuja a estas part3culas hacia afuera del Sistema Solar, mientras la presencia del campo magn3tico las gua hacia adentro »[2].

La radiaci3n c3smica secundaria se produce cuando la RC primaria penetra en la atm3sfera terrestre y choca con las m3lculas de aire, ya sea con la estructura electr3nica del 3tomo, o con el mismo n3cleo. En el proceso de colisi3n la RC primaria cede su energ3a para producir nuevas part3culas que se clasifican en tres componentes: componente nucle3nica, componente mu3nica y componente electromagn3tica (Fig. 1.4).

La componente nucle3nica se origina a partir de part3culas primarias de baja energ3a que producen *neutrones* y *protones* al desintegrar 3tomos atm3sfericos.

En el caso de las part3culas de mayor energ3a al colisionar con la atm3sfera, adem3s de producir nucleones, ocupan su energ3a para generar nuevas part3culas y proveerles de energ3a cin3tica. Son estas nuevas part3culas, los *piones*( $\pi$ ) y los *kaones*( $\kappa$ ).



**Figura 1.4:** Part3culas secundarias generadas a trav3s de colisiones en la atm3sfera. Componente mu3nica, nucle3nica y electromagn3tica.

Los *piones*, al ser part3culas inestables, decaen en *muones*( $\mu$ ) que forman la componente mu3nica dura de la RC secundaria. Al igual que los *piones*, los *muones* son inestables y no tienen interacci3n nuclear fuerte, por lo que los *muones* decaen en *positrones* ( $e^+$ ), *electrones* ( $e^-$ ) y  $\mu^-$  *neutrino* ( $\nu_\mu$ ).

Los *muones* producto de part3culas de muy alta energ3a son capaces de llegar a la superficie de la Tierra, gracias a que su velocidad es muy cercana a la de la luz. Por efecto de la velocidad relativista de estas part3culas, el tiempo que

transcurre en la superficie Terrestre es mucho mayor a su vida media. Este fen3meno se describe por medio de la transformaci3n de Lorentz y es lo que permite detectar estas part3culas en la superficie Terrestre.

### 1.1.2. Efectos atmosf3ricos sobre la RC secundaria

Las tres componentes de la RC secundaria se ven afectadas por las condiciones atmosf3ricas. En el presente trabajo s3lo consideraremos los efectos debidos a variaciones de la presi3n atmosf3rica y la temperatura. Sin embargo, existen otros efectos que la alteran, como son: el efecto altitudinal, la humedad, el viento y la gravedad.

Los efectos de la presi3n atmosf3rica y la temperatura sobre la RC secundaria son negativos y estan estrechamente relacionados[5]. Ambos efectos se presentan de forma periodica durante el d3a.

La intensidad de la radiaci3n c3smica secundaria es directamente proporcional a la cantidad de masa de aire atravesada por la RC secundaria. Al incrementarse la presi3n atmosf3rica, la densidad del aire aumenta, provocando que un mayor n3mero de part3culas sean absorbidas en la atm3sfera. Otro efecto secundario es el decaimiento a mayor altitud de *piones* y *muones*[5].

Al igual que los cambios en la presi3n atmosf3rica, los cambios en la temperatura provocan la expansi3n o compresi3n del aire. Si la temperatura aumenta las part3culas secundarias seran generadas a mayor altura, ocasionando una disminuci3n en la intensidad de la radiaci3n.

## Referencias

- [1] Victor Francis Hess. Über beobachtungen der durchdringenden strahlung bei sieben freiballonfarhrt. *Physikalische Zeitschrift*, 13:1084–1091, 1912.
- [2] Javier A. Otaola y José F. Valdés-Galicia. *Rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. Fondo de cultura económica, México, 1992.
- [3] Bruno B. Rossi. *Cosmic Rays*. McGraw Hill, Nueva York, EU, 1964.
- [4] Michael W. Friedlander. *Cosmic Rays*. Harvard University Press, Boston, EU, 1989.
- [5] Jesús Alvarez Castillo. Efectos de las tormentas eléctricas en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre. Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica UNAM, 2008.