

INFORME SOBRE EL VIII CONGRESO INTERNACIONAL DE
RADIACION COSMICA Y TEMPESTADES TERRESTRES*

ANILLOS DE RADIACION QUE RODEAN LA TIERRA

Ruth Gall

Instituto de Geofísica de la U.N.A.M.

INTRODUCCION

Desde fines de la Segunda Guerra Mundial, la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP) ha estado organizando cada dos años congresos internacionales de Radiación Cósmica.

El VIII Congreso se reunió en Kioto, Japón. Este último congreso que duró del 4 al 15 de Septiembre de 1961 tuvo por título: Congreso Internacional de la Radiación Cósmica y de Tempestades Terrestres. El simposio internacional so-

* La autora agradece a la Comisión Nacional de Energía Nuclear, al Instituto de Geofísica y a la Rectoría de la U.N.A.M., su ayuda que hizo posible su asistencia al VIII Congreso de Radiación Cósmica.

bre tempestades terrestres fue organizado por Unión Internacional de Geodesia y Geofísica y patrocinado por Unión Internacional de Radio Ciencia, Unión Astronómica Internacional y Unión Internacional de Física Pura y Aplicada.

La organización del congreso estuvo a cargo del Consejo Científico del Japón. Fueron invitados 33 países* y se presentaron alrededor de 350 trabajos.

La división de sesiones en ordinarias, mesas redondas y sesiones plenarias en las que se resumían los trabajos de la sesión ordinaria y se dictaban varias conferencias generales facilitaban a los asistentes una mayor comprensión del estado actual de la investigación en todas las ramas discutidas.

INTRODUCCION

Ráfagas Solares y sus efectos. Tempestades Atmosféricas.

Durante tiempos de actividad solar ocurren frecuentes ráfagas solares durante las cuales la cromosfera arroja al espacio interplanetario enormes nubes de plasma solar magnetizado. La llegada de este plasma a la tierra causa tempestades geomagnéticas, perturbaciones ionosféricas, cambios en los anillos de radiación capturada, auroras, emisiones de rayos X en regiones polares, etc. etc.. A las ráfagas van también asociadas emisiones de haces de protones, ondas de radio y en algunos casos emisiones de radiación cósmica solar. El paso del plasma solar magnetizado a través del espacio interplanetario modula la radiación cósmica galáctica observada en la tierra.

El paso del plasma a través del espacio interplanetario, la perturbación del campo interplanetario en las regiones del plasma, los cambios en las características de los anillos de radiación, etc. fueron detectados con aparatos a bordo de los satélites tanto rusos como americanos. Los informes sobre estas mediciones y las teorías basadas en ellas constituyeron una parte importante del programa del congreso de Kioto.

* De América Latina asistieron los científicos de Argentina, Brasil, Bolivia, Chile y México. Durante el Congreso se llevó a cabo una reunión de CLARC (Consejo Latinoamericano de Radiación Cósmica) que presidió el actual Secretario: el Dr. Ismaél Escobar de Bolivia. Se convino que el próximo simposio de CLARC tendrá lugar del 17 al 27 de Julio 1962 en La Paz, Bolivia.

A raíz de las tempestades atmosféricas se crean ondas electromagnéticas de audiofrecuencia conocidas como "silbidos" y ondas de muy baja frecuencia; estas ondas se propagan a lo largo de las líneas del campo geomagnético; su atenuación depende de la densidad de electrones en las regiones que la onda transita. Estas ondas que sirven para estudiar la densidad de electrones tanto en las capas ionosféricas como en los anillos de radiación fueron también objeto de discusión en el VIII^o Congreso.

Temas del Congreso.

El Temario fué dividido en tres partes:

La primera se refería a tempestades geomagnéticas, auroras y perturbaciones ionosféricas; la segunda a las emisiones corpusculares y electromagnéticas del sol, los anillos de radiación, el paso del plasma solar a través del espacio interplanetario y su efecto a la llegada a la tierra. La tercera fué dedicada a rayos cósmicos.

Primera Parte: Simposio Internacional Sobre las Tempestades Terrestres.

1. Morfología de tempestades geomagnéticas.
2. Perturbaciones en las regiones polares.
3. Teorías sobre las tempestades magnéticas y las auroras.
4. La aurora y resplandor atmosférico incluyendo los rayos X aurorales.
5. Las perturbaciones ionosféricas.
6. Resumen de las perturbaciones en las regiones ionosféricas.

Segunda Parte: Sesión Conjunta del Simposio Internacional Sobre Tempestades Terrestres y la Conferencia Internacional de Rayos Cósmicos.

1. Hidromagnetismo, rápidas variaciones geomagnéticas, silbidos y emisiones de ondas de muy baja frecuencia.
2. Anillos de Radiación.
3. Radiación solar.
 - a) Ondas electromagnéticas.
 - b) Partículas.

4. **Modulación:**
 - a) **Mundial y variación secular.**
 - b) **Efecto geomagnético, variación diurna y observaciones continuas.**
5. **Plasma Interplanetario.**
6. **Teoría sintética sobre tempestades terrestres.**

Tercera Parte: Conferencia Internacional de Radiación Cósmica.

1. **Composición.**
2. **Primaria.**
3. **Origen.**
4. **Chubascos atmosféricos.**
5. **Mesones.**
6. **Chorros.**
7. **Teoría de alta energía.**
8. **Futuros proyectos.**

Dentro de la tercera parte de la sesión se discutió también la astrofísica y la física de aceleradores.

La razón por la que en Kioto se organizó simultáneamente el VIII Congreso Internacional de Radiación Cósmica y el Simposio Internacional de Tempestades Geomagnéticas parece obvio si se toma en cuenta que el estudio de la radiación cósmica es auxiliar en el estudio de los fenómenos solaro-terrestres. En realidad para el observador terrestre la radiación cósmica constituyó una sonda del espacio tanto intergaláctico como interplanetario mucho antes del advenimiento de la era de los satélites.

A continuación se discutirán extensamente los trabajos presentados en Kioto sobre la radiación capturada en el campo geomagnético.

ANILLOS DE RADIACION

A fines de 1957 fueron descubiertos por aparatos a bordo de los satélites tanto rusos como americanos los anillos de radiación que rodean la tierra. (Fig. 1.) El descubrimiento fué anunciado en Mayo de 1958 en la reunión de la AGU por Van Allen¹ y unos días después por parte de los rusos por el Prof. Vernov². Desde esta fecha se han lanzado numerosos satélites y cohetes con el propósito de medir la intensidad y el espectro de la radiación capturada tanto en tiempos quietos como en tiempos perturbados.

Hoy se les asigna a los anillos el papel de intermediario en ciertos fenómenos solaro-terrestres. Los anillos de radiación han dado un nuevo impulso tanto al estudio de la captura de partículas cargadas en campos magnéticos en general y al estudio del campo geomagnético en particular. Se espera que todo planeta con campo magnético tenga su propio anillo de radiación capturada. En efecto por medio de estudios radio-astronómicos se ha descubierto y estudiado el anillo de radiación que rodea a Júpiter.³

El estudio de los anillos de radiación se puede dividir convenientemente en los siguientes subtemas:

1. Composición.
2. Fuentes.
3. Espectro.
4. Intensidad.
5. Mecanismo de inyección.
6. Mecanismo de captura
7. Mecanismo de pérdida.
8. Campo geomagnético.

Composición, Espectros y Fuentes

Los anillos se componen principalmente de electrones y protones geomagnéticamente capturados^{4,5}. La captura de núcleos más pesados⁶ no fue discutida en Kioto.

El espectro y los flujos de la radiación capturada fué medido a bordo de satélites y de cohetes. Las energías de los electrones capturados varía entre decenas de KeV y varios MeV y la de protones entre decenas de MeV y un GeV aproximadamente^{4,5,7-11}.

Al comparar los espectros de electrones capturados con los teóricamente predichos se encontraron discrepancias^{12,13} que indujeron a investigar diferentes fuentes de los anillos. (Fig.2).

Singer y Vernov^{14,15,2} sugirieron como fuente de protones y electrones capturados la del albedo de neutrones de radiación cósmica galáctica y solar. Aquellos neutrones liberados en desintegraciones nucleares inducidas por la radiación cósmica primaria y secundaria en los átomos del aire que tienen direcciones hacia fuera, atraviesan el campo magnético decaen en protones y electrones, a los que el campo captura.

La fuente de haces de protones solares fué discutida por Armstrong¹⁶, Naugle y Kniffen⁸. Durante ráfagas solares el sol emite haces de protones de energías que varían entre 40 y 400 MeV aproximadamente^{17,18}. Estos haces se observan en las regiones polares de la tierra. En las desintegraciones nucleares inducidas por estos protones se liberan neutrones que al igual que los neutrones del albedo de radiación cósmica decaen en protones y electrones que posteriormente se capturan.

También se habían estudiado las nubes de plasma solar como otra posible fuente de los anillos^{1,4}. La intensidad medida de las nubes solares es de varios órdenes de magnitud inferior a la de los anillos y las energías de las partículas de plasma son inferiores a las de la radiación capturada^{19,20}. Consecuentemente se supuso que durante tiempos de tempestades geomagnéticas o sea tiempos de fluctuación de campo magnético, operaba un mecanismo de aceleración^{4,10,19,21,22} sobre los electrones ambientales y posiblemente sobre los electrones del plasma so-

lar una vez capturado. A consecuencia del mecanismo de aceleración se elevarían las energías de las partículas capturadas a niveles mayores de la energía umbral de los detectores y se registraría así un aumento en la intensidad de la radiación capturada.

Los mecanismos de inyección están íntimamente ligados con las características de la fuente. Como ya se ha dicho los neutrones provenientes de las desintegraciones nucleares atraviesan el campo geomagnético y al descomponerse inyectan protones y electrones, que se capturan. En cambio, la inyección del plasma solar está asociada probablemente con algún mecanismo de aceleración, que permite penetrar la barrera del campo geomagnético.

Los problemas de las fuentes y de los espectros fueron ampliamente discutidos en Kioto; a continuación se mencionarán algunos trabajos presentados sobre estos temas.

Singer y Lencheck de la Universidad de Maryland recalcularon el espectro de protones provenientes del decaimiento de neutrones de albedo de radiación cósmica de energías entre 50 y 400 MeV tomando en cuenta la anisotropía de la fuente de neutrones en los puntos de emisión*. Los autores encuentran que el espectro es proporcional a ϵ^γ donde $\gamma = -1.8$ y γ efectivo es -2.9 .

Los resultados teóricos concuerdan satisfactoriamente con los resultados experimentales obtenidos con aparatos a bordo de los satélites (Fig. 3). Singer y Lencheck investigaron además la fuente de protones solares y encontraron que debi-

* Las partículas que abandonan el núcleo desintegrado por colisión con una partícula de muy alta energía forman un haz altamente colimado en la dirección de la partícula incidente. Así solo los neutrones provenientes de desintegraciones inducidas por partículas que inciden dentro de un cono de ángulo pequeño tangente al plano horizontal del punto de emisión constituyen la fuente de la radiación capturada. Los neutrones provenientes de desintegraciones dentro de conos de mayor ángulo se absorben en la atmósfera. Una partícula que parte de la región polar a lo largo de la línea 1.4 se perdería en la atmósfera del punto conjugado en el hemisferio opuesto.

do a que la fuente opera a latitudes mayores de 60° su efecto solo puede notarse a distancias mayores de 1.4 radios terrestres (r_T). (Fig. 4) El espectro de protones capturados provenientes de esta fuente está caracterizado por $\gamma = -5$. Los autores calcularon el cambio del espectro de los protones capturados provenientes de esta fuente con el tiempo y sugirieron experimentos que permitirían distinguir entre los protones atrapados de la fuente constante de neutrones de radiación cósmica y los de la fuente esporádica de protones solares. El efecto de los últimos se observaría después de la llegada de protones solares a las regiones polares a distancias mayores de $1.4r_T$, acusándose un rápido cambio del espectro de estos protones capturados.

Singer hizo notar que mientras que el tiempo de captura de protones en el primer anillo es del orden de 30 años, la fuente de protones solares opera con una duración de un día aproximadamente.

Los autores discutieron extensamente los mecanismos de pérdida, que afectan a los protones, tales como colisiones elásticas e inelásticas nucleares, colisiones coulombianas, colisiones nucleares catastróficas, intercambio de carga con hidrogeno neutro. Hicieron notar que en caso de protones, la pérdida de energía es mucho más importante que la dispersión. Discutieron además la pérdida de protones de la zona de captura por violación de las invariantes adiabáticas*.

Naugle y Kniffen; del Centro Goddard de estudios del Espacio, informaron sobre las mediciones efectuadas con emulsiones nucleares a bordo del cohete de la NASA lanzado el 19 de Septiembre de 1961. Este lanzamiento siguió a la ráfaga ocurrida el 3 de Septiembre. La trayectoria del cohete atraviesa tanto el borde interno como el externo del primer anillo. (Fig. 5). Los puntos de la trayectoria correspondiente al borde interno se encuentran sobre las líneas de fuerza que en el ecuador distan $1.5 r_T$ y los correspondientes al borde externo a $1.75 r_T$. Los autores analizar los protones capturados y encontraron que la intensidad del borde externo es 10 veces mayor que la del interno e hicieron notar que los espectros correspondientes a los bordes difieren entre sí; en el espectro del borde externo abundan protones de energías menores de 50 MeV y escasean los de energías menores de 100 MeV. El borde interno en cambio, muestra escasez de protones de baja energía y abundancia de partículas entre 50 y 150 MeV. (Fig. 6).

* Ver párrafo sobre adiabaticidad

Naugle hizo notar que las características observadas del primer anillo no se pueden explicar suponiendo sólo la fuente de neutrones de radiación cósmica y que la ocurrencia de la ráfaga justifica la suposición de que en el tiempo del vuelo del cohete se observaban los efectos de las fuentes de protones solares. El autor hizo notar que a distancia mayor $1.5 r_E$ la intensidad de protones capturados decrece fuertemente y, mencionó la violación de la adiabaticidad como un posible mecanismo de pérdida.

El Prof. Vernov de la Academia de Ciencias de la U.R.S.S. informó sobre las mediciones del espectro y de la intensidad efectuadas a bordo de las naves espaciales rusas números 2 y 3, que inspeccionaron los anillos en las regiones vecinas a las anomalías geomagnéticas. Estas regiones pueden actuar como resumidores de la radiación capturada por ser allí el campo magnético considerablemente menor que el campo del dipolo. Las naves cubrían las alturas entre 187 y 339 km en las regiones de las anomalías del Atlántico del Sur, y de la del Brasil.

El Prof. Vernov informó, que se registraron intensidades dos veces mayores a las correspondientes a regiones anómalas. Se han graficado curvas de isointensidad de radiación capturada a 230 y 320 km. (figs 7.y 8). La anomalía del Brasil está unida a un brazo del primer anillo y la de Capetown con el borde del segundo anillo; se encontró que la energía promedio de los electrones capturados en el segundo anillo es de 100 KeV y que el espectro medido no corresponde al espectro teórico de electrones provenientes del decaimiento de neutrones de albedo de radiación cósmica (Ver tabla 1). El Prof. Vernov hizo notar además que en puntos magnéticamente equivalentes se han encontrado intensidades diferentes y discutió las posibles razones de este hecho. El Prof. Vernov hizo notar también que en el hemisferio sur no existe la separación que se observa entre el primero y segundo anillo en el hemisferio norte.

Los trabajos anteriormente discutidos indican que para explicar las características de los protones capturados se necesita evocar tanto la fuente de neutrones de albedo de la radiación cósmica como la de protones solares. Falta, según el Dr. Singer, un número mayor de mediciones para poder deducir tanto la distribución espacial de protones capturados como la distribución de ángulos de paso y la variación de ambas distribuciones con el tiempo.

Los resultados de los investigadores rusos demuestran una vez más que la fuente de neutrones de albedo de radiación cósmica no es la única que opera en el segundo anillo.

INTENSIDAD

La intensidad de la radiación capturada en tiempos quietos, su distribución espacial y su variación en tiempos perturbados fué medida a bordo de los satélites tanto americanos como rusos. En 1959 Van Allen⁴ publicó las curvas de intensidad medida a bordo de los "Pioneer" III y IV y las curvas de isointensidad basadas en parte en las mediciones y en parte en una especulación teórica (Fig 1 y Fig. 9). Los investigadores rusos⁹ han publicado también las curvas de intensidad vs distancia en tiempos quietos (Fig. 10). El "Pioneer IV" registró variaciones de intensidad durante tiempos perturbados siendo el segundo anillo el más afectado (Fig. 11). Posteriormente los profesores Simpson y Meyer de Chicago⁵ publicaron un extenso análisis de las mediciones efectuadas con contadores tipo Geiger y de triple coincidencia, a bordo del "Explorer" VI. Este análisis demostró la estructura fina de los anillos (Fig. 12). El primer anillo se compone de protones y electrones. La intensidad de los protones decrece fuertemente pasando 1.5 radios terrestres y es casi nula a distancia mayor de $2 r_T^*$. El segundo anillo presenta dos picos llamados por los autores E_2 y E_3 cuyos máximos en tiempos quietos se encuentran a 17,000 y 23 000 Km respectivamente.** Las tempestades geomagnéticas afectan fuertemente la región E_3 , E_2 en cambio es afectado en menor grado y la influencia de las tempestades sobre las características del primer anillo es, en la mayor parte de los casos, despreciable.

La correlación que parece existir entre las tempestades geomagnéticas y los cambios en el E_3 hacen pensar que el estudio de esta región puede arrojar luz sobre la inyección del plasma solar y sobre el mecanismo de aceleración asociado a las perturbaciones geomagnéticas.

* La energía umbral del detector es de 75 MeV para protones.

** El espectro de partículas capturadas en la región E_3 no es función de latitud, en cambio lo es el de la región E_2 .

Tanto el grupo de Chicago como el de Nagoya ha reportado en Kioto sobre el comportamiento de E_3 durante tiempos de tempestades geomagnéticas.

Los Drs. Simpson y Meyer de la Universidad de Chicago han presentado un estudio muy detallado de las mediciones de la radiación capturada en la región del segundo anillo, desde el 7 de agosto hasta el 6 de octubre de 1959, efectuadas a bordo del "Explorer" VI. Durante ese período ocurrieron varias tempestades geomagnéticas. En la región de E_3 se observan cambios en la intensidad, espectro, distribución de ángulos de paso y en la distancia a la que se encuentra el máximo de E_3 en el ecuador.

Los autores tratan de determinar si los cambios en el segundo anillo en la región de E_3 asociados con las tempestades son reversibles e irreversibles. Los procesos reversibles sería aquellos que pudieran explicarse por medio de los cambios del campo magnético. Los autores señalan como procesos irreversibles a la inyección de partículas de plasma solar y a la dispersión de partículas capturadas por ondas magnetohidrodinámicas. Se realizó un estudio detallado de los cambios en el espectro, en la distribución de ángulos de paso a intensidad de partículas capturadas y en la posición del máximo de E_3 en el ecuador (R_0). Los autores hacen notar que tanto en tiempos quietos como en tiempos perturbados el lugar geométrico de los puntos donde la intensidad es máxima se encuentra sobre la línea de fuerza correspondiente a la de un dipolo central. Y así la intensidad máxima de E_3 sirve como un trazador de las líneas del campo.

El campo geomagnético estaba quieto una semana antes de iniciarse la primera tempestad. Las características de E_3 permanecían prácticamente constantes durante esta semana. Ocurrida la tempestad se observarán variaciones en E_3 . Los autores estudian la variabilidad de E_3 con el tiempo por medio de 4 parámetros: R_0 ; I_0 , intensidad máxima de E_3 en el ecuador; x , el parámetro que caracteriza la distribución de los ángulos de paso; z , el parámetro que define la variación del espectro con el tiempo. En tiempos quietos R_0 , es igual a 23 000 Km y el ángulo de paso promedio es de aproximadamente 35° .

Los autores encuentran que durante el principio repentino de la tempestad del 16 al 17 de agosto de 1961- ocurre una disminución de intensidad asociada a la disminución de la distancia R_0 ; durante la fase principal el espectro permanece el mismo, la intensidad se triplica (Fig. 13) los ángulos de paso aumentan, con el consecuente aumento de la concentración de las partículas cerca del ecuador. Dos días después de iniciado el aumento de intensidad se observa a 40 000 Km la llegada del plasma solar; una nueva tempestad se inicia el día 20 de agosto y causa que la intensidad aumente 6 veces ($6I_0$); la R_0 disminuye en 2 000 Km encontrándose el máximo de E_3 a la distancia de 21 000 Km; la función de distribución de ángulos de paso sigue cambiando concentrando las partículas más cerca del Ecuador. Pasando este aumento, la intensidad empieza a disminuir hasta el nivel normal que se establece aproximadamente el día 3 de septiembre. La distribución de ángulo de paso también llega lentamente a la distribución de tiempos quietos. Durante el período en el que la intensidad disminuye -en el tiempo preciso cuando la intensidad es igual a $4 I_0$ - se observa un cambio repentino de espectro en todas las latitudes que persiste mientras que la intensidad y la distribución de ángulo de paso regresan a su valor normal.

Al analizar estos resultados los autores concluyen que el plasma solar no constituye una fuente de los anillos. Lo argumentan señalando que el plasma llega a la tierra una vez iniciado el aumento de intensidad y que el flujo de plasma es menor que el del anillo E_3 . Varios procesos de cambio en las características de los anillos son irreversibles. Los autores sugieren que durante las tempestades en la región de E_3 opera el mecanismo de aceleración irreversible sobre las partículas ambientales; este mecanismo está asociado con el cambio del campo durante la última parte de la fase principal y en el tiempo de recuperación. No se sabe aún bien cual podría ser la fuente de los electrones ambientales.

Otro importante estudio sobre los cambios asociados a perturbaciones geomagnéticas fué presentado por la Dra. Sekiko Yoshida de la Universidad de Nagoya. El estudio consistió en un análisis extenso de las ráfagas solares, las tempestades geomagnéticas, las extinciones polares, las emisiones de radiación cósmica solar ocurridas entre agosto de 1958 y abril de 1960. El estudio tenía como

proposito establecer el carácter de los cambios en el segundo anillo en la región de E_3 .

Los autores encuentran que existen dos clases distintas de cambios: los reversibles y los irreversibles. En el de tipo reversible, la disminución y el aumento de la intensidad están correlacionados con el cambio del campo geomagnético durante la tempestad. Se observa una dependencia lineal entre el cambio de la intensidad y la componente D_{sr} del campo geomagnético perturbado. En los procesos reversibles al disminuir la componente horizontal, las líneas de campo tienden a expandirse ocupando un volumen mayor; la radiación congelada en las líneas de campo se expande, registrándose así una disminución de la intensidad. Los procesos irreversibles ocurren sólo si durante el período de disminución de la intensidad antes descrita, ocurre una ráfaga. Como consecuencia, se observa un incremento de intensidad capturada muy por encima de los niveles normales. Este aumento de la intensidad según la Dra. Yoshida se debe a la penetración del plasma solar a distancias mayores de varios radios terrestres. La fuerte perturbación del campo que ocurre a estas mayores distancias durante las tempestades facilita tal penetración. Resumiendo los autores no parecen estar de acuerdo si el plasma solar constituye o no una fuente de los anillos de radiación.

Algunos sugieren que en el segundo anillo operan en tiempos perturbados, un mecanismo de aceleración a consecuencia del cual los aparatos detectan un aumento de radiación capturada. Sin embargo no se conocen aún bien las características de este mecanismo. Tampoco se conoce bien la fuente de los electrones ambientales.

Finalmente en Kioto los investigadores japoneses han informado que las poco frecuentes auroras a bajas latitudes están asociadas con la descarga de protones del primer anillo de radiación.

El Mecanismo de Captura y la Violación de la Adiabaticidad

La teoría de la captura de partículas cargadas en el campo magnético se debe principalmente a Alfvén²³; en esta teoría, válida para partículas de energías

suficientemente bajas, las inhomogeneidades del campo se consideran como perturbaciones del campo homogéneo. El movimiento de las partículas capturadas en este tipo de campo es adiabático. Este movimiento se puede descomponer en el giro alrededor del centro llamado guía y el movimiento de este centro. Debido a las inhomogeneidades del campo geomagnético, el centro guía está sujeto a arrastres. La componente paralela del gradiente del campo causa su oscilación a lo largo de la línea del campo entre los puntos conjugados de reflexión magnética. La componente perpendicular del gradiente induce un arrastre longitudinal causando el movimiento del centro guía del este al oeste para partículas positivas y del oeste al este para las negativas. Así la órbita de la partícula es una espiral a lo largo de la línea de campo, la espiral que a su vez gira alrededor del eje geomagnético de la tierra con la velocidad del arrastre longitudinal del centro guía.

El período de giro entre los puntos llamados de reflexión magnética que se encuentran uno en el hemisferio sur y otro en el hemisferio norte es del orden de microsegundos y el de alrededor de la tierra del orden de horas.

El movimiento de una partícula capturada está caracterizado por tres invariantes adiabáticos²⁴: μ , el momento magnético de la partícula; J , la integral de línea entre los puntos de reflexión magnética y ϕ el invariante de flujo magnético. Dado el ángulo de paso en el ecuador, la constante μ define los puntos de reflexión magnética; J en cambio define la superficie invariante longitudinal sobre la que se mueve el centro guía. Para energías de partículas suficientemente altas se viola la adiabaticidad ϕ , μ y J dejan de ser invariantes.

En la teoría de Alfvén la captura está regida por la constancia del momento magnético μ . Para que μ sea constante se requiere que el radio de giro sea pequeño comparando con las inhomogeneidades del campo. Alfvén introduce el discriminante x , que compara ambas cantidades y establece que μ se conserva para $x \gg 1$.

$$x = \frac{|\rho \nabla \cdot \bar{B}|}{|\bar{B}|} \quad \text{ó} \quad x = T \frac{\left| \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \right|}{|\bar{B}|}$$

donde $\bar{\rho}$ y T son el radio y el período de giro de la partícula, respectivamente:

$\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}$ la perturbación magnética; $(\bar{\rho} \nabla) \bar{B}$ mide las inhomogeneidades espaciales del campo a lo largo del giro.

$\bar{\rho}$ es función del momento p de la partícula y del campo: $\rho = \frac{\bar{p} \times \bar{B}}{2B^2}$ donde q es la carga en emu.

Varios autores han discutido la violación de la adiabaticidad como un importante mecanismo de pérdida.^{25,29} Basándose sobre la constancia de μ se llegó al valor crítico x_c del discriminante de Alfvén. Singer²⁹ tomando en cuenta la ausencia de protones capturados* a distancias mayores de $2r_2$ obtiene el valor crítico de $x_c = 0.076$ y predice que la energía máxima que puede aún ser capturada varía inversamente con r^4 (fig 14). Aquí r es la distancia de la partícula capturada al centro de la tierra. En un trabajo presentado en Kioto, Gall considera el movimiento de partículas capturadas en el campo del dipolo. La partícula se mueve dentro de la zona interna permitida de Stormer caracterizada por la constante γ . Para altos valores de ($\gamma > \gamma$ crítico) el gradiente perpendicular es despreciable y las órbitas de las partículas presentan simetría respecto al ecuador y a la línea de campo. Se encuentra que el valor crítico de x_c correspondiente a γ_c es igual a 0.12. La energía máxima capturada es proporcional a r^{-2} .

Varios autores^{26,28} investigaron el mecanismo de pérdida de partículas capturadas debido a la dispersión por ondas magnetohidrodinámicas; y Dragt encuentra que la energía máxima capturada decae como r^{-11} (fig. 14).

Se hizo notar en Kioto que la constante μ es menos importante que la J . La μ sólo caracteriza el movimiento entre los puntos de reflexión magnética, en cambio J caracteriza todo el movimiento del centro guía.

En la discusión de la mesa redonda en la que se consideró el mecanismo de aceleración que opera durante tiempos de tempestad geomagnética, el Prof. Hayakawa de Nagoya hizo notar que las partículas pueden seguir siendo capturadas a pesar de que se aceleran. La aceleración, según Hayakawa, causa un arrastre radial de las partículas capturadas de las líneas de campo más alejadas a las más cercanas a la tierra.

* La energía umbral del aparato detector fué de 75 MeV.

Las colisiones con las partículas del aire pueden violar los invariantes adiabáticos y constituir así un mecanismo de pérdida. Los electrones capturados sufren colisiones con las partículas del aire que inducen un movimiento aleatorio de los puntos de reflexión magnética.

Hayakawa y Obayashi de Nagoya, presentaron en Kioto un informe sobre su investigación acerca de la violación de la invariancia debida a colisiones. Este estudio fué realizado con máquina de atrapamiento magnético. El aparato consiste principalmente en una cámara cilíndrica al vacío (10^{-6} mm de Hg); donde el campo magnético es generado por dos electroimanes separados; se inyecta un haz de electrones de energía del orden de 1.5 KeV bajo un ángulo de paso dado. Se observa el flujo de electrones -fuera de los puntos de reflexión magnética- que se debe a las colisiones de los electrones con las partículas del aire y a la violación de la invariancia de J . El aparato parece muy útil para el estudio de los mecanismo de pérdida en condiciones controladas.

Detección de Plasma y del Campo Magnético en el Espacio

En Kioto se informó sobre las mediciones en el espacio del plasma solar y del campo magnético efectuadas con aparatos a bordo del "Explorer" X. El "Explorer" X fué lanzado el 25 de marzo de 1961 llevando a bordo el detector de plasmas diseñado por el grupo de MIT y los magnetómetros a cargo del grupo de Goddard Space Research de la NASA. Durante las 55 horas del funcionamiento de las baterías el satélite llegó hasta su apogeo de $38.5 r_E$, o sea a la distancia de unos 250 000 Km. Los siete días anteriores al lanzamiento del Explorer X fueron días quietos; un día después del lanzamiento ocurrió una ráfaga solar y el 27 de marzo se inició la tempestad geomagnética.

El Prof. Rossi, del MIT, habló sobre las mediciones efectuadas por el detector de plasma a lo largo del recorrido del satélite y subrayó los siguientes hechos: entre 1.3 y $2.9 r_E$ se encontró plasma frío estacionario; entre 2.9 y $21.5 r_E$ se notó la ausencia de plasma; pasando $21.5 r_E$ el satélite penetra a una nube de plasma con energía media de partículas de unos 500 KeV, densidad de 6 a 20 partículas/cc. y con el flujo de 4×10^8 partículas/cm² seg. El hecho de que el plasma proviene del sol se comprueba experimentalmente al observar que el flujo

es máximo cuando el detector está orientado hacia el sol; el Prof. Rossi reportó además que fueron observadas dos nubes de plasma separadas por una distancia considerable y de características diferentes. Los flujos de plasma observados concuerdan con los reportados por los investigadores rusos, medidos a bordo del Lunik. En general en regiones sin plasma, el campo magnético es fuerte y dirigido hacia el sol, en cambio en regiones con plasma, el campo es débil y tanto su magnitud como su dirección fluctúan fuertemente.

El grupo de Goddard informó sobre las mediciones del campo magnético efectuadas a bordo del Explorer X con el magnetómetro de vapor de rubidio, dos magnetómetros de umbral de flujo y un magnetómetro de núcleo saturable.

Como se mencionó antes la primera parte del vuelo coincidió con tiempos quietos mientras que la segunda con tiempos perturbados. Las observaciones a lo largo del recorrido fueron las siguientes: de $1.8 r_s$ a $6.6 r_s$ se observa una considerable discrepancia entre el campo medido y el teórico*. Para explicar esta discrepancia los autores postulan una fuente de campo magnético entre 1.8 y $2.4 r_s$, o sea una fuente situada en la separación entre los dos anillos de radiación. De 5 a $6.6 r_s$ el campo medido coincide perfectamente con el campo teórico. De 6.6 a $20 r_s$ la magnitud del campo medido concuerda con el teórico pero su dirección difiere de él. Los autores sugieren que en esta región el campo es resultante de la superposición del campo terrestre y del campo interplanetario radial del Sol.

Durante las cinco horas que preceden a la ráfaga, el satélite cubre la distancia entre 20 y $27 r_s$, donde observa una fuerte fluctuación en la magnitud y la dirección del campo debida a la presencia del plasma. Al ocurrir la ráfaga, los aparatos no acusan ni fluctuaciones del campo ni presencia del plasma. El principio repentino observado a grandes latitudes sobre la tierra coincide con la llegada del satélite a $37 r_s$, donde los magnetómetros del Explorer X notan un aumento del campo. Finalmente antes del cese del funcionamiento de las baterías, siete minutos después de ocurrido el principio repentino, el campo cambia su dirección y apunta hacia el sol.

En la teoría de captura de partículas en el campo geomagnético se introduce algún modelo del campo. Para calcular las líneas del campo y los invariantes

* Calculado utilizando los coeficientes de 8 multipolos de Finch y Leaton para 1955³⁰.

invariantes adiabáticos se utilizó el modelo de 6 multipolos³¹. Este modelo se obtiene del desarrollo de Gauss calculando los coeficientes a base de los datos observatorios magnéticos terrestres, Para regiones de las anomalías del campo geomagnético se han empleado modelos hasta con 25 multipolos³².

La comparación del campo medido en el espacio con el teórico permite establecer la presencia tanto de fuentes nuevas de campo como perturbaciones del mismo. Fué en realidad por primera vez a bordo del Explorador X que en forma sistemática se detectó en el espacio la presencia del plasma solar y de los campos magnéticos asociados. Estos estudios constituyen un verdadero progreso en la investigación de las emisiones solares, las modulaciones que estas emisiones inducen en la radiación interplanetaria, las tempestades geomagnéticas y en los problemas de la penetración del plasma al campo terrestre.

Se hizo notar en Kioto que antes de poder correlacionar las observaciones de variación del campo magnético en la tierra y en el espacio se necesita conocer mejor la función de transferencia de la atmósfera superior.

El congreso de Kioto se distinguió por su excelente organización y una aportación de numerosos trabajos importantes en la rama tanto de la radiación cósmica como de las tempestades terrestres.

REFERENCIAS

1. Van Allen J.A., Reunion Conjunta de la National Academy of Sciences y de la American Physical Society., Washington Mayo 1958.
2. Vernov S.N., Conferencia Espacial de la 5a. Asamblea General de CSAGI. Moscú Julio 30 - Agosto 9, 1958.
3. Carr T.D. & A.G. Smith, Evidence for the Solar Corpuscular Origin of the Decimeter-Wavelength Radiation from Jupiter. *Physical Review Letters*, 5, p. 418-420, 1960.
4. Van Allen J.A. The Geomagnetically Trapped Corpuscular Radiation. *Journal of Geophysical Research*, 64, p. 1683-1689, 1959.
5. Fan C.Y., Meyer P. & J.A. Simpson, Trapped and Cosmic Radiation measurements from Explorer VI. *Proceedings of the first international Space-Science Symposium. Nice January 11-16. Space Research. Editado por H. Kallmann Bijl pp. 951-965, 1960, Amsterdam. North Holland - Publishing Company.*
6. Armstrong A.H. & H.H. Heckman, Flux and Spectrum of Charged Particles in the Lower Van Allen Belt. *Bulletin of the American Physical Society. Series II*, 6, p. 361, 1961.
Reunión Conjunta de la Sociedad Mexicana de Física y la American Physical Society. México, D.F. Junio 1961.
7. Frieden C.S. & R.S. White. Protons in the Earth's Magnetic Field, *Physical Review Letters*, 3, pp. 9-11, 1959.
8. Naugle J.E. & D.A. Kniffen, Flux and Energy Spectra of the Protons in the Inner, Van Allen Belt. *Physical Review Letters*, 7, pp. 3-6, 1961.
9. Vernov S.N. Chudakov A.E., Valculov P.V. & J.L. Lugachev, Study of the Cosmic Ray Soft Component by the 3rd Soviet Earth Satellite. *Planetary and Space Science* 1, pp. 86-93, 1959.
10. Arnoldy R.L., Hoffman R.A. & J.R. Wincker, Observations of the Van Allen Radiation Regions during August & September 1959, *Journal of Geophysical Research*, 65, pp. 1361-1376, 1960.

11. Walt M., Chase L.F. Jr. Cladis J.B., Imhof W.L. & D.J. Knecht, Proceedings of the First International Space Science Symposium. Nice January 11-16 pp. 910-920, Space Research. Editado por H. Kallman Bijl. Amsterdam. North Holland - Publishing Company. 1960.
12. Kellog P.J. Electrons of the Van Allen Radiation, Journal of Geophysical Research, 65, pp. 2705-2713, 1960.
13. Hess W.N. The Radiation Belt produced by Neutrons leaking out of the Atmosphere of the Earth. Journal of Geophysical Research 65, pp. 3107-3115, 1960.
14. Singer S.F. Radiation Belt & Trapped Cosmic Radiation Albedo. Physical Review Letters 1, pp. 171-173, 1958.
15. Singer S.F. Trapped Albedo Theory of the Radiation Belt. Physical Review Letters 1, pp. 181-183, 1958.
16. Armstrong A.H. Harrison F.B., Heckman H.H. & L. Rosen, Charged Particles in the Inner Van Allen Belt Radiation. Journal of Geophysical Research 66, pp. 351-355, 1961.
17. Winckler J.R. & P.D. Bhavsar. Low Energy Solar Cosmic Rays and the Geomagnetic Storm of May 12, 1959. Journal of Geophysical Research 65, pp. 2637-2656, 1960.
18. Ehmert A, Erbe H., Pfozner, G. Anger C.D. & R.R. Brown, Observations of Solar Flare Radiation and Modulation Effects at Balloon Altitudes, July 1959. Journal of Geophysical Research 65, pp. 2685-2694, 1960.
19. Arnoldy R.L., Hoffman R.A. & J.R. Winckler, Solar Cosmic Rays and Soft Radiation Observed at 5 000 000 Km From Earth, Journal of Geophysical Research 65, pp. 3004-3007, 1960.
20. Dessler A.J. & R. Karplus, Some Properties of the Van Allen Radiation Physical Review Letters 4, pp. 271-274, 1960.
21. Kellog P.J., Van Allen Radiation of Solar Origin, Nature 183, pp. 1295-1297, 1959.
22. Singer S.F. New Acceleration Mechanism for Auroral Particles, Bulletin American Physical Society 3, 40 A, 1958.

23. Alfvén H., *Cosmical Electrodynamics*, Oxford at the Clarendon Press, 1950.
24. Northrop T.G. & E. Teller, *Stability of Adiabatic Motion of Charged Particles in Earth's Field*. *The physical Review* 117, p. 215, 1960.
25. Welch J.A. & W.A. Whitaker, *Theory of Geomagnetically Trapped Electrons from an Artificial Source*. *Journal of Geophysical Research* 64, pp. 909-922, 1959.
26. Wentzel D.G., *Hydromagnetic Waves and the Trapped Radiation*, *Journal of Geophysical Research* 66, pp. 363-369, 1961.
27. Dragt A.J., *Effect of Hydromagnetic Waves on the Lifetime of Van Allen Radiation Protons*. *Journal of Geophysical Research* 66, pp. 1641-1649, 1961.
28. Pletnev D. *On a Possible Mechanism of Charged Particles Leakage from the Outer Geomagnetic Field*. *Izvestiya* p. 1114 1960.
29. Singer S.F., *On the Nature and Origin of the Earth's Radiation Belts*. *Space Research* pp. 797-820, 1960. Editado por H. Kallmann Bijl; Amsterdam (1960) North Holland - Publishing Company.
30. Finch H.F. & B.R. Leaton. *The Earth's Main Magnetic Field Epoch 1955*. *Royal Astronom. Society Monthly Notices. Geophysical Supplement* 7, pp. 314-317, 1957.
31. Vestine E.H. & W.L. Sibley, *The Geomagnetic Field in Space Ring Currents and Auroral Isochasms*. *Journal of Geophysical Research* 65, pp. 1967-1979, 1960.
32. Jensen D.C. Murray R.W. & Capt. J.A. Welch Jr. *Tables of Adiabatic Invariants for the Geomagnetic Field 1955*. Air Force Special Weapons Center AFSWC- TN 60-8, 1960.

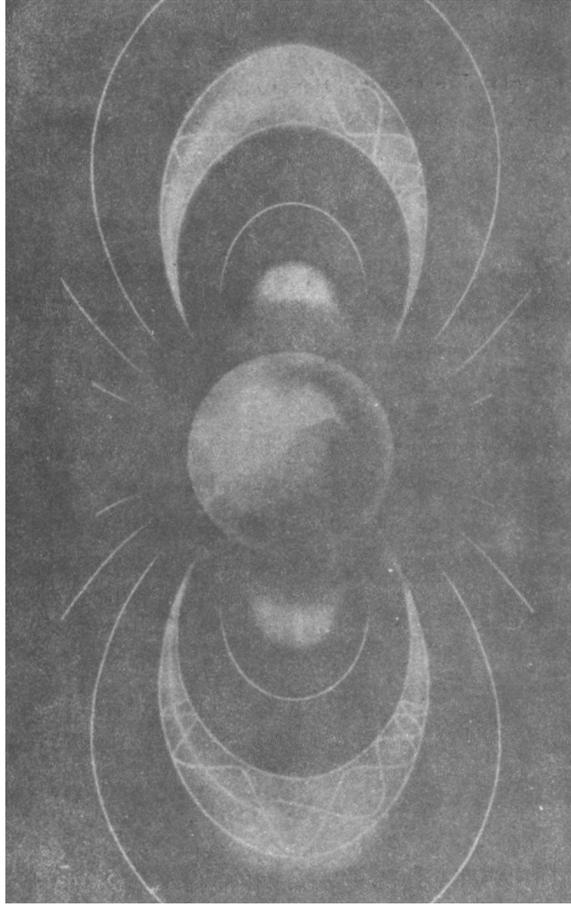


Fig. 1 LOS ANILLOS QUE RODEAN LA TIERRA
Dibujo esquemático de los anillos. Las órbitas graficadas dentro del anillo son de partículas cargadas capturadas por el campo magnético de la tierra. Tomado de H.E. Newell, *J.Geophys.Res.* **64**, p. 1708 (1959).

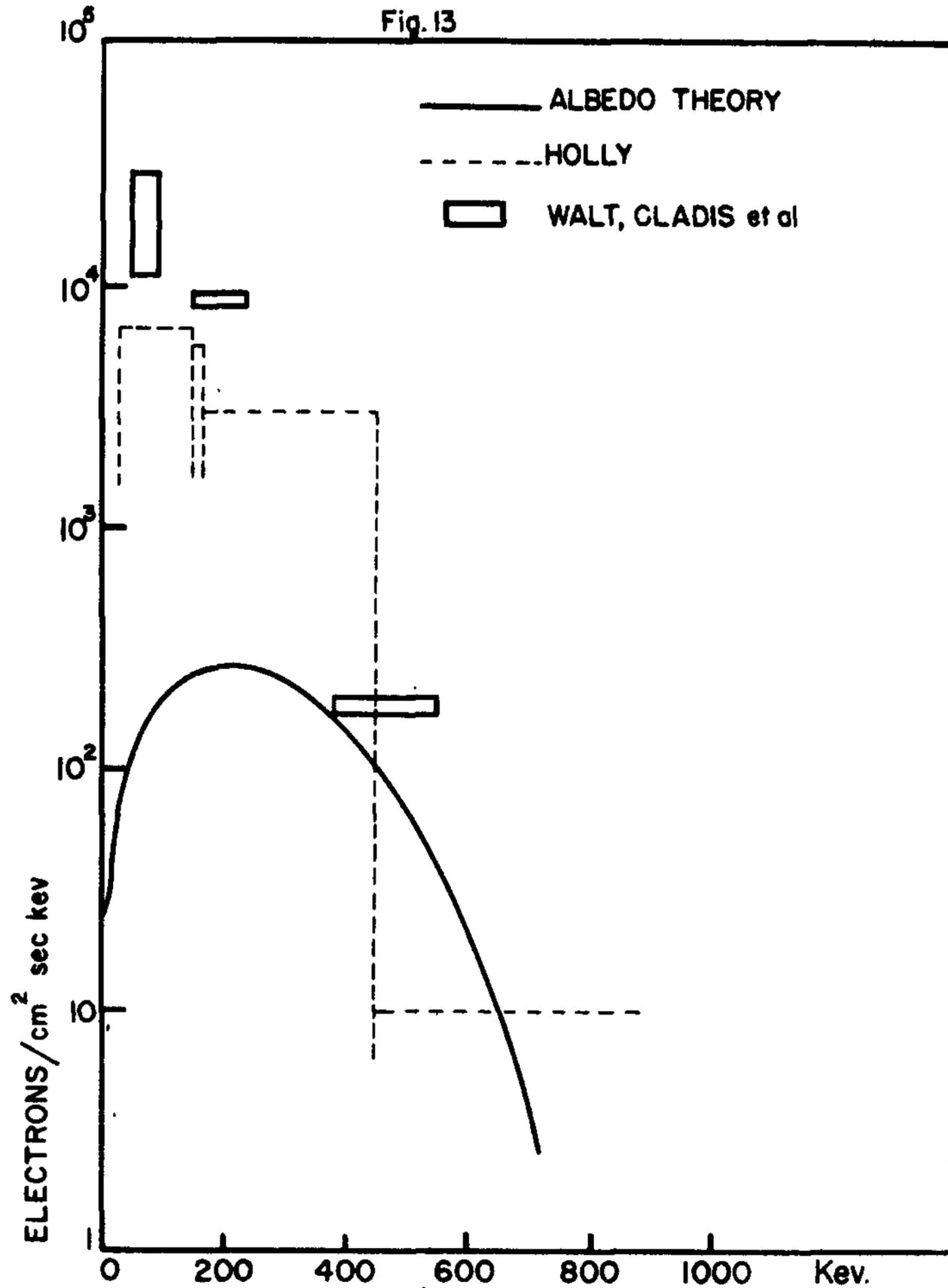


Fig. 2 DISCREPANCIA ENTRE EL ESPECTRO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL DE ELECTRONES CAPTURADOS

La curva sólida representa la intensidad diferencial omnidireccional calculada de electrones provenientes de albedo de neutrones. La curva punteada y los rectángulos corresponden a datos experimentales. Tomado de A.M. Lenchek, S.F. Singer y R.C. Wentworth. *J.Phys.Soc. of Japan* 17, suppl A-II, p. 192 (1962).

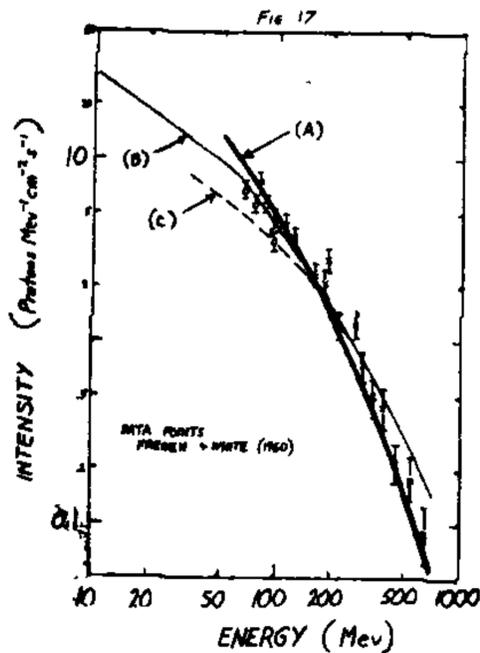


Fig. 3 LA INTENSIDAD DE PROTONES CAPTURADOS

La comparación de los resultados teóricos y experimentales. Los puntos corresponden a los datos experimentales de Frieden y White A,B,C, son curvas teóricas correspondientes a la fuente de albedo de neutrones. Tomado de A.M. Lenček y S.F. Singer J. Phys. Soc. of Japan 17, suppl A-II p. 190 (1962)

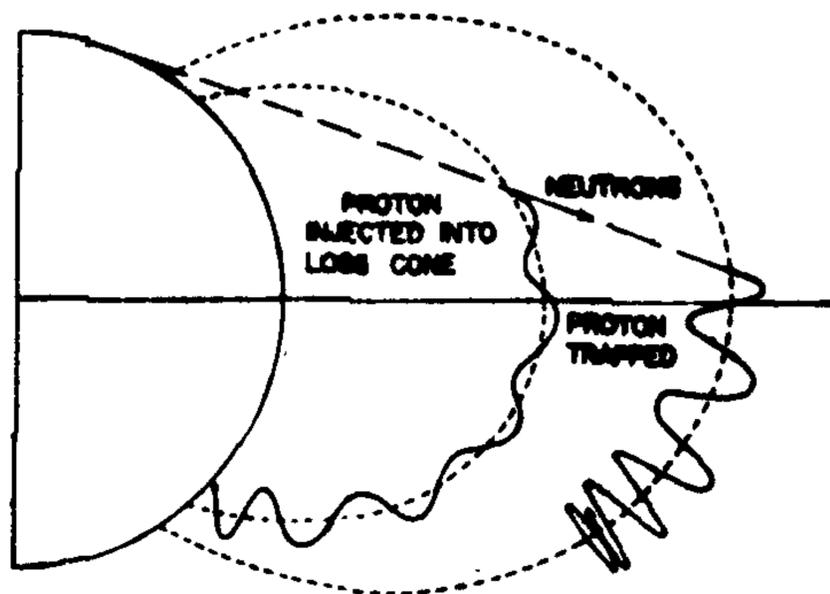


Fig. 4 LA FUENTE DE PROTONES SOLARES

Los protones solares al llegar al casquete polar causan desintegraciones con emisión de neutrones. El dibujo esquemático muestra el paso de estos neutrones a través del campo. La mayoría de los protones provenientes del decaimiento de neutrones, caen dentro del cono de pérdida y se absorben en el hemisferio opuesto; a otros, en cambio los captura el campo. Tomado de A.M. Lenček y S.F. Singer. J.Phys.Soc. of Japan 17, suppl. A-II p. 123 (1962)

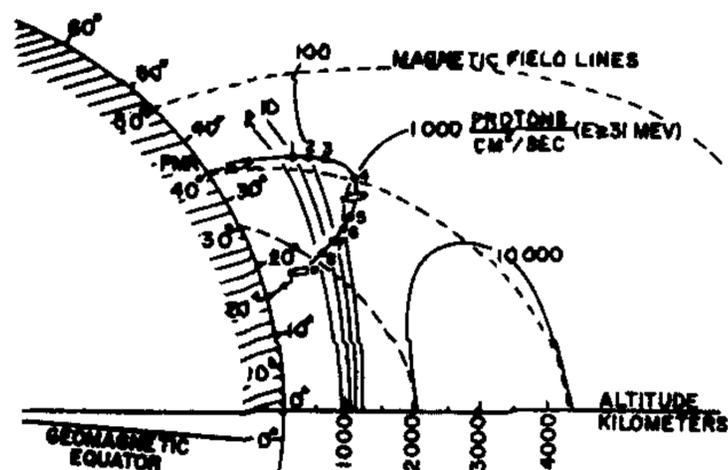


Fig. 5 LA TRAYECTORIA DEL COHETE DE INVESTIGACION
 La figura representa la proyección de la trayectoria sobre el plano meridiano. (Línea con 8 puntos de observación) las líneas punteadas son líneas del campo magnético; las sólidas representan curvas de iso-intensidad de protones capturados. Tomado de Naugle J.E. y D. A. Kniffen Phys.Rev.Letters, 7, p. 3 (1961)



Fig. 6 EL ESPECTRO DIFERENCIAL DE ENERGIA DE PROTONES CAPTURADOS

En esta gráfica se han representado superpuestos los espectros medidos en los puntos 3, 4, 5, y 6 de observación a lo largo de la trayectoria del cohete. Tomado de J.E. Naugle y D.A. Kniffen Phys.Rev.Letters 7, p. 3 (1961)

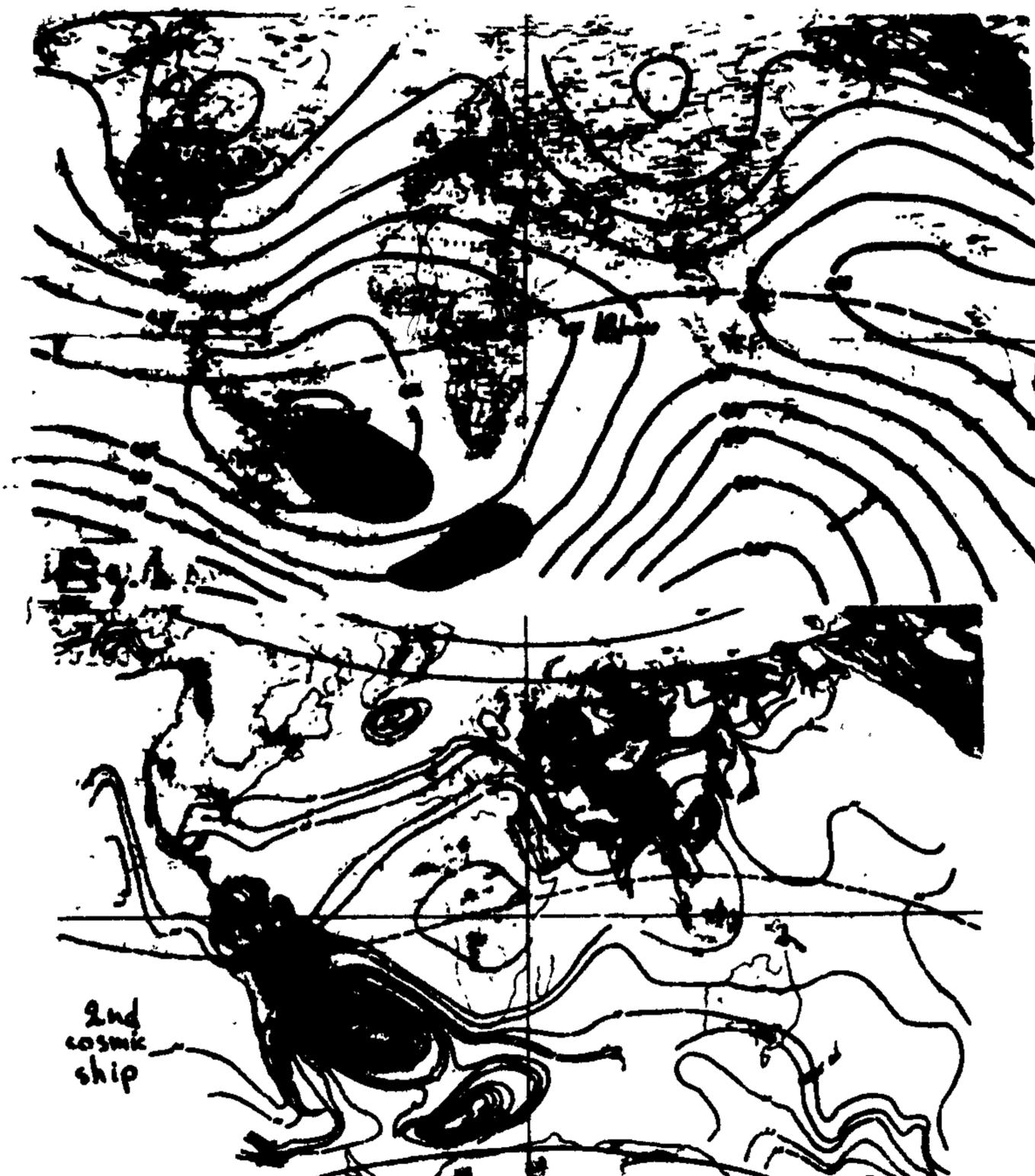


Fig. 7 LA ANOMALIA EN LA INTENSIDAD DE PARTICULAS CAPTURADAS Y LAS ANOMALIAS MAGNETICAS

Las líneas sólidas en la gráfica superior representan las curvas de igual intensidad de campo. La gráfica abajo contiene curvas de iso-intensidad de radiación capturada entre 190 y 260 Km. medidas a bordo de la nave espacial rusa núm. 2. Notense las anomalías en la región del Sur del Atlántico y la anomalía del Brasil. Tomado de V.L. Ginzburg, L.V. Kurnosova, V.I. Logacher, L.A. Razanerov y M.I. Fradkin, J.Phys.Soc. of Japan 17, Suppl A-II pp: 128 y 130



Fig. 8 ANOMALIAS EN LAS CURVAS DE ISOINTENSIDAD DE LA RADIACION CAPTURADA ENTRE 310 y 330 Km.

Mediciones efectuadas a bordo de la nave espacial rusa núm. 3.

Tomado de V.L. Ginzburg, L.V. Kurnosova, V.I. Logachev, L.A.

Razonerov y M.I. Fradkin, J.Phys.Soc. of Japan **17**, Suppl A-II

pp. 129

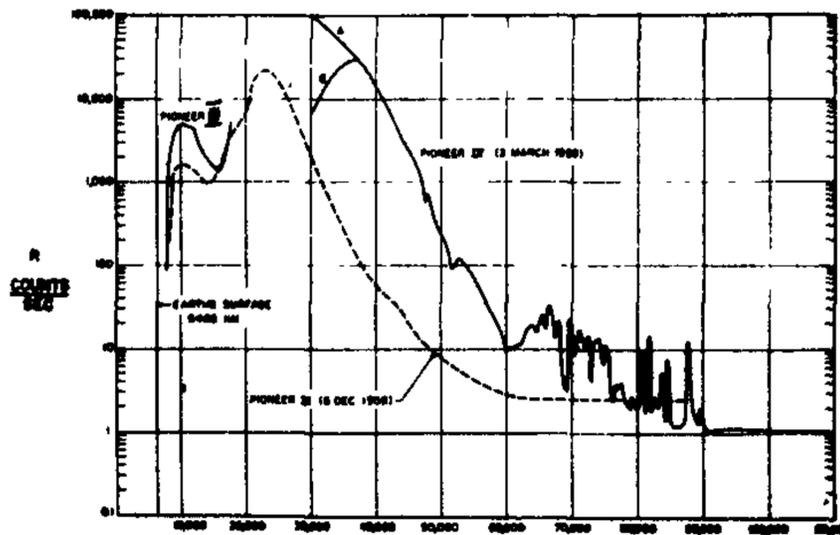


Fig. 9 INTENSIDAD DE RADIACION CAPTURADA

La intensidad de radiación capturada medida a bordo de los Pioneros III y IV vs. distancia del centro de la tierra en Km. El Pionero IV midió la intensidad en tiempos perturbados. Tomado de, J.A. Van Allen J. Geophys.Res. 64, p. 1685 (1959).

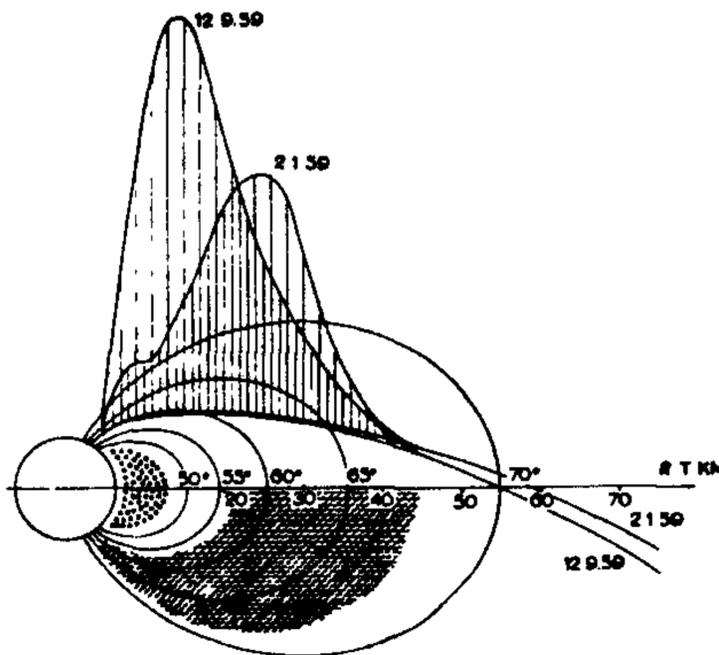


Fig. 10 LAS CURVAS DE INTENSIDAD DEL SEGUNDO ANILLO DE RADIACION

Las líneas verticales que caen sobre las trayectorias representan la intensidad de radiación en el punto dado de la trayectoria. Las diferencias en la intensidad de radiación capturada demuestran su variación con el tiempo. Las líneas dibujadas de campo del dipolo geomagnético intersectan la tierra a las latitudes entre 50° y 70°. Tomado de, S.N. Vernov. Space Research, editado por H. Kallman Bijl. p. 761 Amsterdam North Holland Publishing Co. (1960).

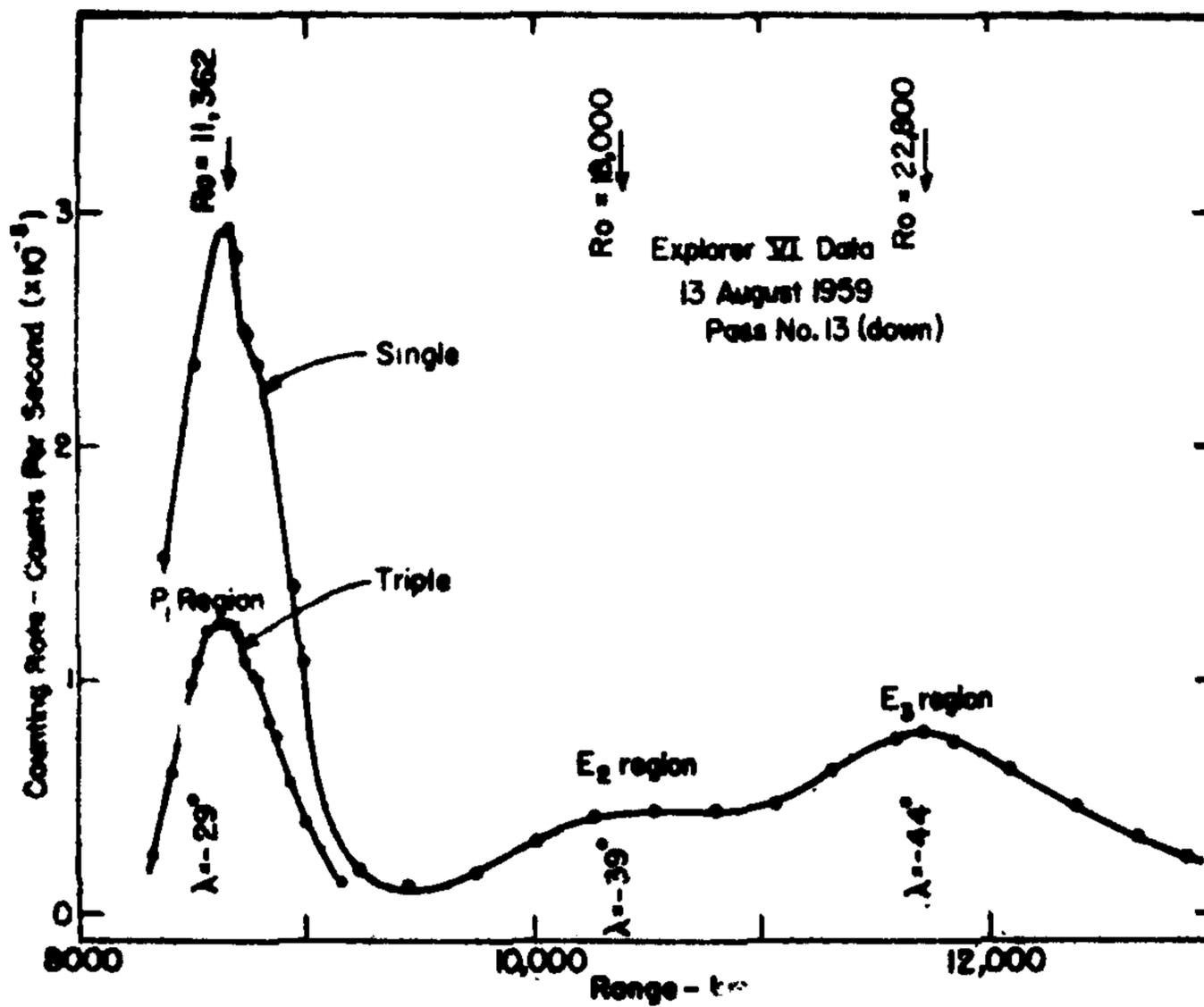


Fig. 11 LA INTENSIDAD DE RADIACION CAPTURADA MEDIDA A BORDO DEL EXPLORADOR VI.

Cuentas por segundo vs. distancia en Km. La curva superior corresponde al detector de bremsstrahlung y la inferior al detector de triple coincidencia. Tomado de, C.Y. Fan, P. Meyer y J.A. Simpson J. Geophys. Res. 66, p. 2612 (1961).

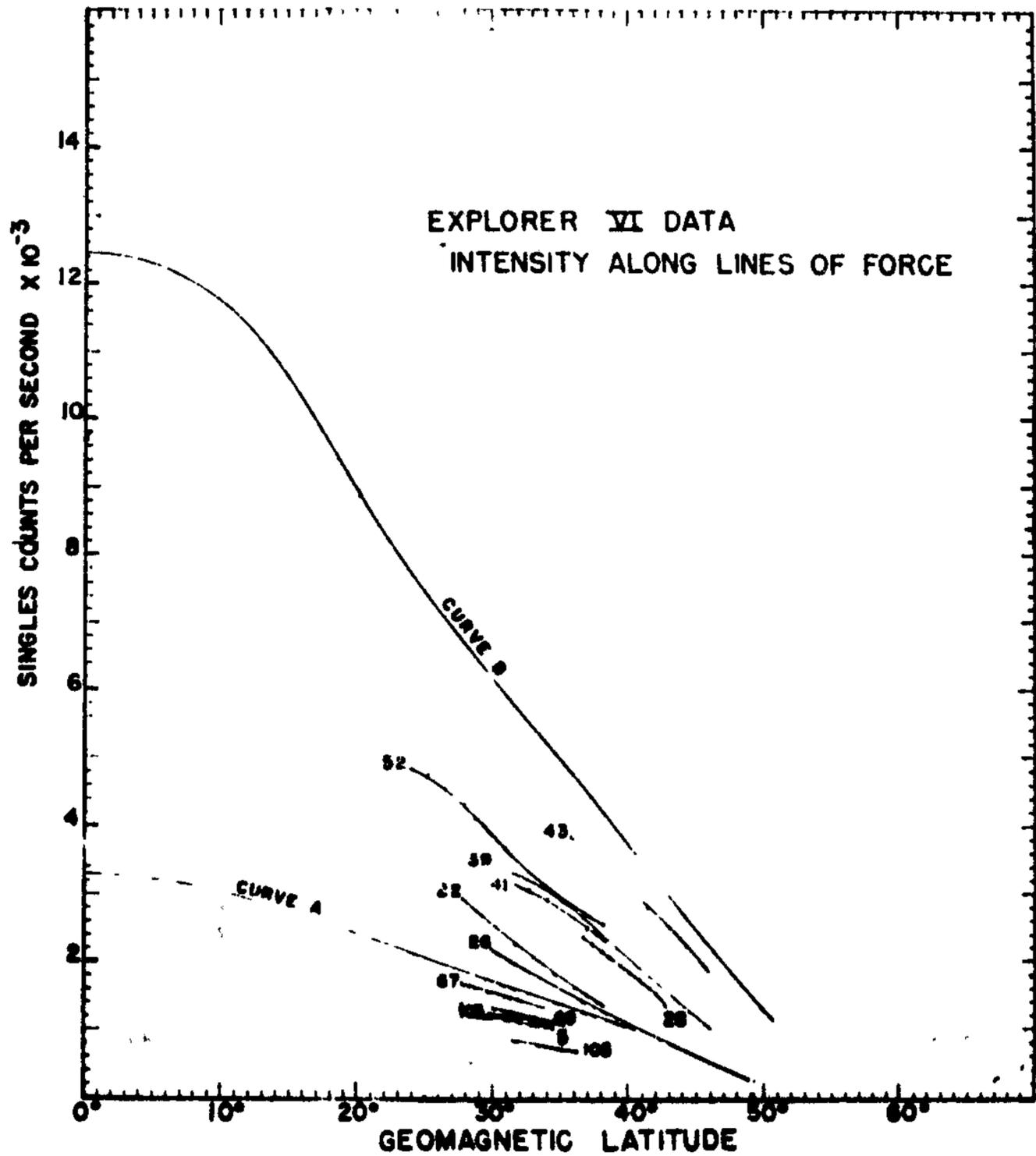


Fig. 12 EL CAMBIO DE LA POSICION Y DE LA INTENSIDAD DEL MAXIMO E_3

Las cuentas por segundo en la región de E_3 vs. latitud geomagnética. La intensidad está medida con el detector de bremsstrahlung a bordo del Explorador VI. Tomado de, C.Y.Fan, P. Meyer y J.A. Simpson. *J.Geophys.Res.* 66, p. 2622 (1961).

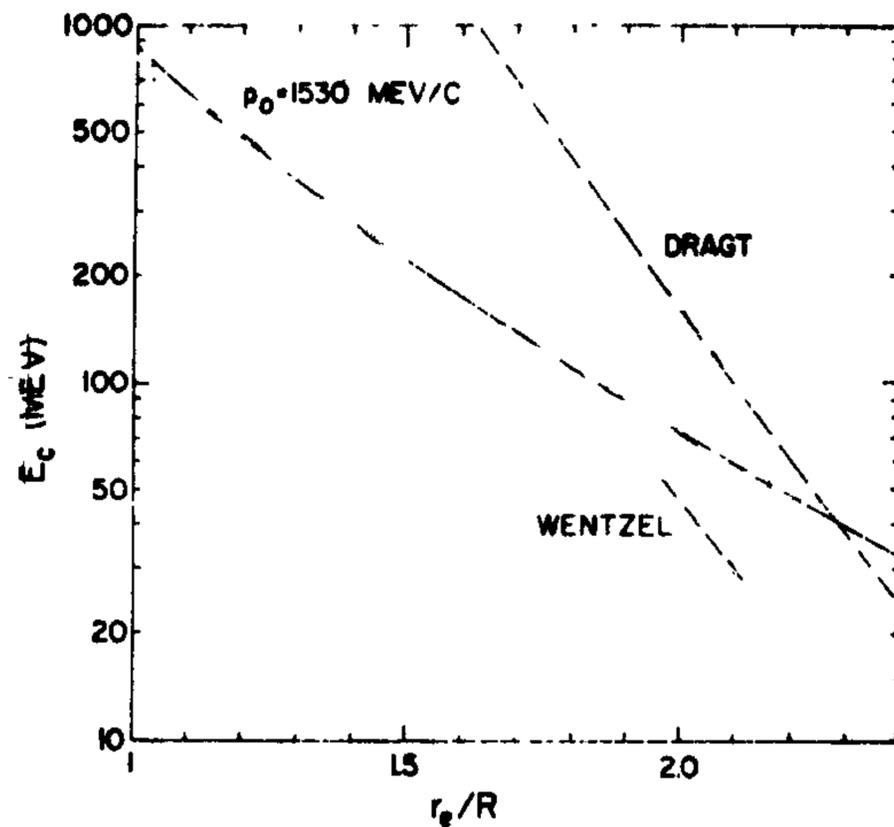


Fig. 13 LA ENERGIA MAXIMA DE PROTONES CAPTURADOS EN EL CAMPO GEOMAGNETICO

Energía máxima vs. distancia en radios terrestres. Las líneas interrumpidas corresponden a la energía máxima calculada tomando en cuenta la dispersión por ondas magnetohidrodinámicas. (Dragt y Wentzel) la línea continua, tomando en cuenta los efectos de no adiabaticidad. (Singer). Tomado de, A.M. Lenchek y S.F. Singer. J. Geophys.Res. 67, p. 1263 (1962).