

LOS CONOS SENCILLOS DEL ALBEDO DE LA RADIACION
COSMICA *

por
Ruth Gall
y
Jaime Lifshitz

RESUMEN

Simple albedo cones for 5 points of incidence were evaluated for different proton energies. The latitude, longitude and energy effects are discussed. Some results are compared with those of Schremp. The altitude, above which the interaction with the atmosphere does not invalidate the results, is given. The validity of albedo model for different altitudes is discussed. The points of emission were studied.

* Este trabajo fue presentado en el 6o. Congreso Internacional de Rayos C6smicos en Varenna, Italia, junio 1957 y publicado por primera vez en ingl6s en Il Nuovo Cimento Serie X, Vol. 7, pag. 601-606 (1958).

I. INTRODUCCION

La determinación de los conos del albedo de la radiación cósmica se basó sobre el cálculo de mil trayectorias aproximadamente de los protones secundarias en el campo magnético de la tierra^{1,2}. Las órbitas fueron calculadas por integración numérica, usando el método sugerido por Milne³.

Eligiendo velocidad unitaria y por unidad de longitud el diámetro de la tierra, la ecuación diferencial de movimiento es:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = C \frac{d\vec{r}}{dt} \times \left[\nabla \left(\frac{z}{r^3} \right) + \alpha \nabla \left(\frac{xy}{r^5} \right) \right] \quad (1)$$

donde C es inversamente proporcional a la rigidez magnética de la partícula: $C = -m_1 a q / 4pc$; donde a es el radio terrestre, igual a 6.371×10^8 cm, q es la carga del protón, c la velocidad de la luz, p la cantidad de movimiento relativista de la partícula, $\alpha = 3m_2 / 4m_1$ una constante; aquí $m_1 = M_d / a^3 = 0.3097$ Gauss, $m_2 = M_c / a^4 = 0.0224$ Gauss, y M_d , M_c son los momentos del dipolo y del cuadrupolo respectivamente.

El modelo del campo magnético es el de Schmidt y Chargoy^{4,5}. En éste modelo el campo está engendrado por un dipolo y un cuadrupolo, ambos ex-céntricos, cuyos ejes forman un sistema ortogonal. El origen de este sistema reside en el punto (-344,150,96) en Km referido al sistema geográfico terrestre⁶. Se utilizó este sistema geomagnético como el sistema de referencia.

Se eligieron cinco puntos de incidencia sobre la superficie terrestre (véase la tabla 1).

Tabla 1

Punto	1	2	3	4	5
λ	0°	0°	0°	30° N	70° N
φ	0°	45° E	135° E	22.5° E	0°
r	.49581	.52027	.52161	.50686	.49581
$H_c / H_d \%$	10.9	15.6	15.6	8.6	2.0

Coordenadas Geomagnéticas de los Puntos de Incidencia

λ es la latitud geomagnética, φ la longitud geomagnética, r la distancia del centro geomagnético, H_d , H_c los campos del dipolo y del cuadrupolo respectivamente.

Las órbitas fueron calculadas para protones de energías: .172, .5, y 2,0 Gev. Se eligió la energía de .172 Gev con el fin de comparar el cono del albedo con el cono sencillo de sombra para la latitud de $70^\circ N^7$.

En la integración numérica, se calcularon los valores de la posición, del campo geomagnético, de la velocidad y de la aceleración para cada punto de recorrido a lo largo de la órbita.

Los intervalos para estos puntos equidistantes fueron de 30,578 Km para más altas energías y de 15,289 Km para la energía más baja. Se calcularon dos aproximaciones de la velocidad y dos de la aceleración para cada punto de recorrido.

II. LOS CONOS DEL ALBEDO

Se define el primer cono del albedo como el ángulo sólido de direcciones a lo largo de las cuales las partículas de energía dada llegan al punto de incidencia procedentes de otro punto sobre la tierra, sin tener ningún mínimo local intermedio. Las direcciones límite tienen un mínimo local intermedio tangente a la superficie de la tierra. Se definen también los conos del albedo de grado superior, el segundo, el tercer cono, etc. al ángulo sólido de direcciones a lo largo de las cuales las partículas procedentes de otros puntos de la tierra llegan con uno, dos, etc. mínimos locales intermedios.

Las direcciones límite se obtienen por interpolación de las órbitas que tienen el mismo ángulo azimutal.

La figura 1* muestra los primeros conos del albedo enteramente abiertos para tres diferentes energías de protones; para el punto 1 de incidencia (véase la Tabla 1).

En la figura 2, se ven dos primeros conos del albedo para las energías:

* en las figuras los ángulos azimutal A y cenital Z son geográficos.

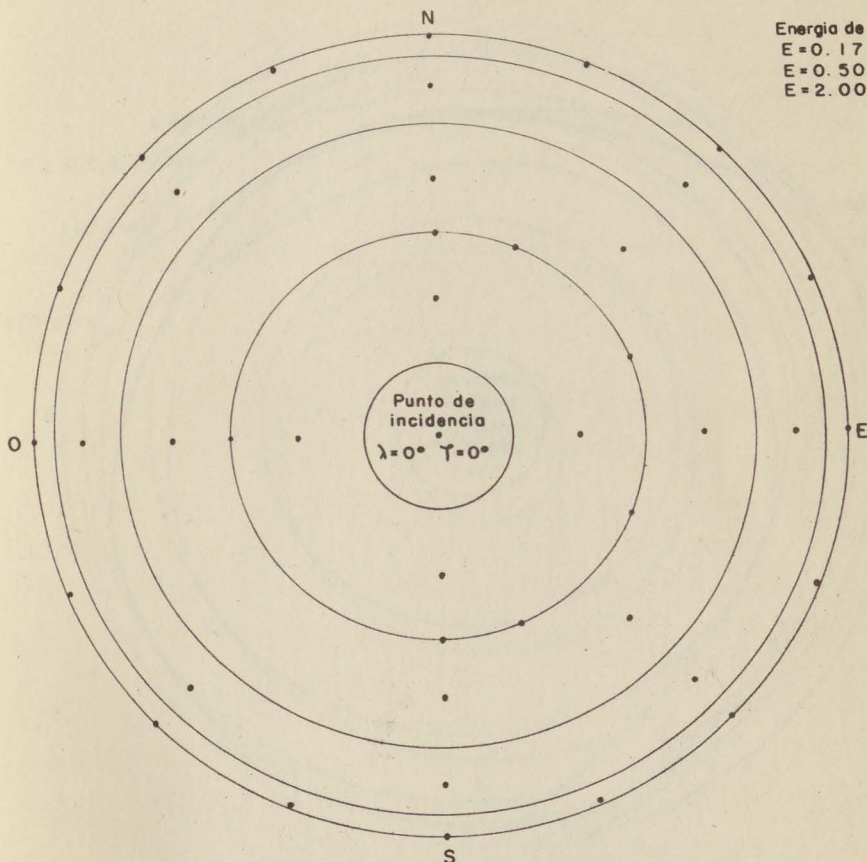
de 0,5 y 2,0 Gev para el punto 4 de incidencia. Dentro de los conos predominan las direcciones noreste. Las direcciones fuera de los conos tienen que pertenecer a los conos del albedo de orden más alto, ya que para las energías consideradas ninguna dirección puede provenir del infinito. Para este último punto, menor es la energía mayor es el cono.

Para el punto 5 de incidencia, la línea llena (véase la figura 3) representa los primeros conos del albedo para protones secundarios de las tres energías estudiadas. Se puede notar que los conos, excepto para algunas direcciones de grandes ángulos cenitales, están casi completamente cerrados. Las direcciones fuera de los conos se extienden al infinito o pertenecen a los conos de orden más alto.

Las líneas punteadas representan los conos sencillos de sombra calculados por Schremp⁷. Existe una notable diferencia entre el primer cono del albedo y los conos sencillos de sombra. Esta diferencia se investigará en estudios futuros.

El efecto de longitud es causado tanto por la excentricidad del centro geomagnético como por el campo del cuadripolo.

En la figura 4, se pueden estudiar los dos efectos para los puntos sobre el ecuador geomagnético. El dibujo insertado dentro de la gráfica muestra las direcciones del campo magnético en tres puntos. El dipolo es más grande en el punto 1 ya que éste punto es el más cercano al centro geomagnético. Las magnitudes relativas de los campos del cuadripolo y dipolo para éstos tres puntos están dadas en la tabla 1. Los puntos 2 y 3 son equidistantes del centro geomagnético, y por consiguiente, la diferencia entre sus respectivos conos se debe al efecto del cuadripolo. El efecto de excentricidad se observa al comparar los conos del punto 1 con los conos del punto 2 o 3. Los conos del punto 1 están completamente abiertos mientras que para el punto 2 (curvas a y b) o para el punto 3 (curvas c y d), algunas direcciones están fuera del cono. El efecto de excentricidad consiste en abrir el cono a medida que el punto de incidencia está situado más cerca del centro geomagnético. El efecto del cuadripolo en cambio, desplaza los conos de las direcciones noroeste a las del suroeste.



Energia de Protones
 E=0.172 Gev
 E=0.500 Gev
 E=2.000 Gev

Fig.1 PRIMEROS CONOS DE ALBEDO COMPLETAMENTE ABIERTOS

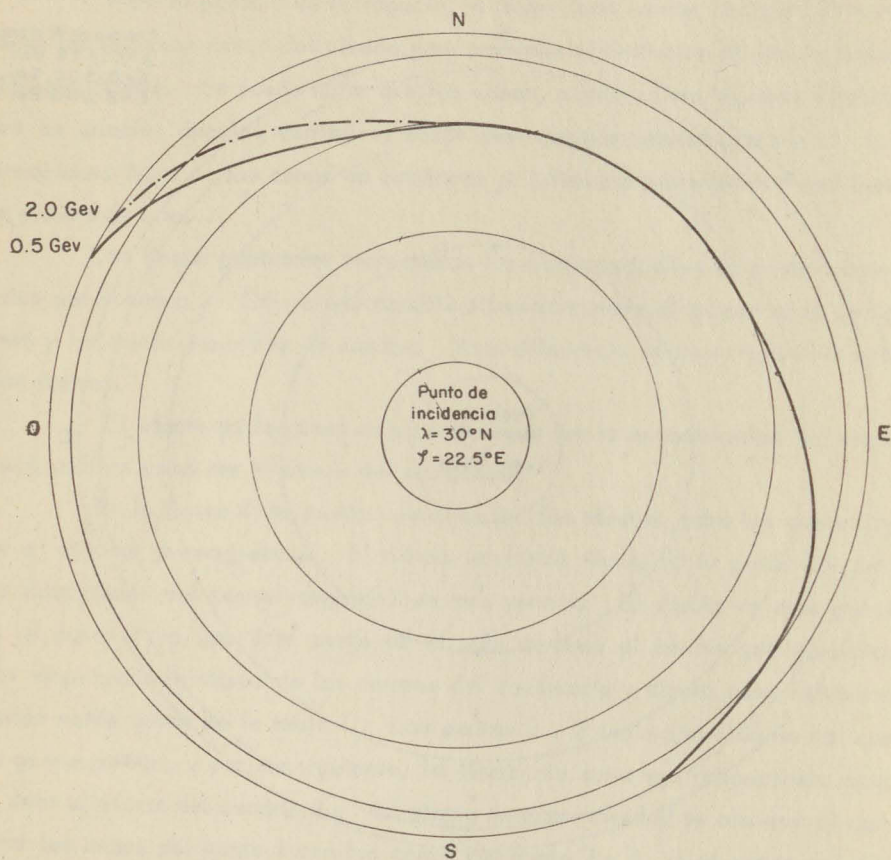


Fig. 2 PRIMEROS CONOS DE ALBEDO

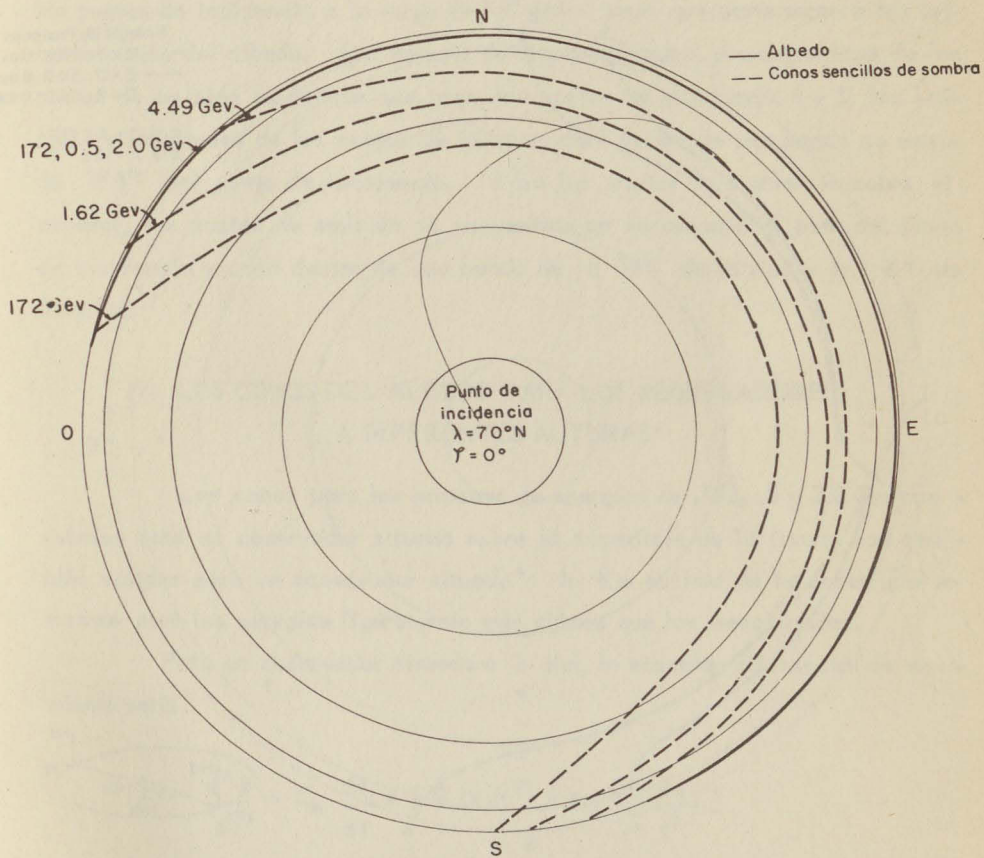


Fig. 3 PRIMEROS CONOS DE ALBEDO

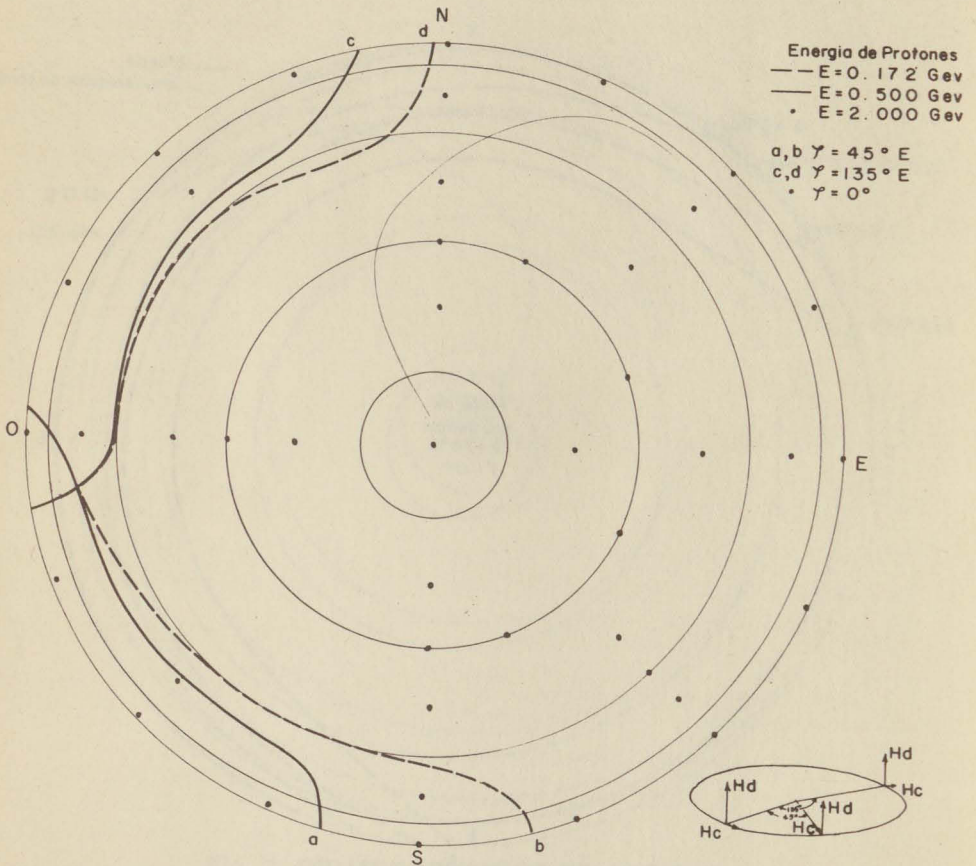


Fig. 4 EFECTO DE LONGITUD
 Puntos de incidencia sobre el Ecuador Geomagnético

III. LOS PUNTOS DE EMISION

Se han estudiado los puntos de emisión que mandan las órbitas hacia los puntos de incidencia a lo largo de las direcciones que pertenecen a los primeros conos del albedo. Del estudio de las coordenadas geomagnéticas de los puntos de emisión se deduce que, para los puntos de incidencia 4 y 5, las latitudes y longitudes de los puntos de emisión caen dentro de una banda no mayor de $\pm 5^\circ$ del punto de incidencia. Para los puntos de incidencia sobre el ecuador, los puntos de emisión se encuentran en su mayoría al este del punto de incidencia y caen dentro de una banda de $\pm 14^\circ$ de latitud y de 6° de longitud.

IV. LOS CONOS DEL ALBEDO PARA LOS OBSERVADORES A DIFERENTES ALTURAS

Los conos para los protones de energías de .172, .5 y 2.0 Gev calculados para un observador situado sobre la superficie de la tierra, son también válidos para un observador situado a h Km encima de la superficie terrestre para las energías ligeramente más chicas que las mencionadas.

Para un observador situado a h Km, la ecuación diferencial de movimiento será:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = C_h \frac{d\vec{r}}{dt} \times \left[\nabla \left(\frac{z}{r^3} \right) + \alpha_h \nabla \left(\frac{xy}{r^5} \right) \right]$$

donde

$$C_h = \frac{m_1 \alpha q}{4} \frac{1}{(cp)_h (1 + h/a)^2}$$

$$\alpha_h = \alpha (1 + h/a)^{-1}$$

Se elige como unidad de longitud $2(a + h)$ Km donde a es el radio de la tierra; $(cp)_h$ está expresado en términos de ésta unidad de longitud. Al elegir la energía tal que $(cp)_h = (cp) (1 + h/a)^2$, se obtiene $C_h = C$.

Con estos valores, la ecuación para un observador "h" difiere sólo ligeramente de la ecuación para el observador terrestre. La diferencia reside en el término del campo de cuadrupolo y no es mayor de 0.73 % para la altura tan grande como la de 319 Km. Esta diferencia no afecta a los conos del albedo.

Tabla 2

h Km	x q/cm ²	h/a	(cp) _h Gev	E _h Gev	Puntos				
					1	2	3	4	5
0	1033.3	0	0.594	0.172	0	0	0	0	0
			1.090	0.500					
			2.784	2.000					
107.00	3 × 10 ⁴	0.017	0.574	0.161	0.18	0.25	0.25	0.14	0.03
			1.054	0.473					
			2.693	1.913					
318.56	2 × 10 ⁻⁸	0.050	0.538	0.144	0.51	0.73	0.73	0.39	0.09
			0.989	0.425					
			2.525	1.756					

Datos Para Observadores a Diferentes Alturas

Aquí h es la altura del observador; x , la profundidad atmosférica; E_h las energías correspondientes a los mismos conos para observadores de diferentes alturas; H_h, H son los campos en las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, donde las unidades de longitud son diferentes; d_h % indica la diferencia

relativa entre estos dos campos.

Se entiende que tanto el punto de emisión como los puntos de incidencia están situados a la altura de h Km.

V. LA INTERACCION CON LA ATMOSFERA

Al evaluar las órbitas del albedo, no se ha tomado en cuenta la interacción de las partículas secundarias con la atmósfera. El modelo del albedo describe con suficiente aproximación las trayectorias de los protones secundarios que interaccionan con la atmósfera, a condición que se sitúen, tanto los puntos de emisión como los puntos de incidencia, a las alturas mayores de 107 Km. Este resultado se basó sobre la comparación de la imprecisión debida a la integración numérica con la magnitud de perturbación debida a la interacción de la atmósfera.

La discusión sobre la validez del modelo del albedo para la descripción de las trayectorias de los protones que se mueven en la atmósfera, tendrá que posponerse hasta que se conozca mejor el campo magnético en la atmósfera terrestre.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Dr. Manuel Sandoval Vallarta por la valiosa orientación que nos proporcionó durante el desarrollo de éste trabajo. Agradecen también a las señoras M. Garín de Alvarez, L. Sánchez de Camacho y G. Salcedo de Oyarzabal por su excelente ayuda en el cálculo de las trayectorias. Así como al Sr. Alberto García por su eficaz colaboración en la operación de las máquinas calculadoras IBM. También dan las gracias a la señorita A. Hernández Terán por la minuciosa revisión del manuscrito.

REFERENCIAS

1. R. Gall y J. Lifshitz, Memoria del V Congreso Internacional de Radiación Cómica, Instituto Nacional de la Investigación Científica, México 1958, pp. 66-77
2. R. Gall y J. Lifshitz, *Phys.Rev.*, **101**, 1821 (1956)
3. W. E. Milne, *Numerical Calculus* (Princeton University Press, Princeton, 1949) p. 135
4. S. Chapman y J. Bartels, *Geomagnetism II*, (Clarendon Press, Oxford, 1940) p. 651
5. A. C iargoy, *Revista Mexicana de Física*, **2**, 1, (1953)
6. Baso lo sobre el mapa del campo geomagnético de 1945
7. E. J. Schremp, *Phys.Rev.*, **54**, 158, (1938)