

**DETERMINACION DE LA COMPOSICION  
SUPERFICIAL DE LA LUNA DESDE  
UN SATELITE LUNAR**

D. B. WITTRY, \* G. ARRHENIUS \*\* \* \* \*  
y L. H. COHEN \* \* \*

**RESUMEN**

Al discutir las ventajas científicas perdurables en la determinación de las variaciones en composición química de la superficie de la Luna, se revisan los posibles métodos para obtener medidas continuas de concentraciones atómicas en la superficie lunar desde un satélite en órbita alrededor de la Luna. Se concluye que los rayos X característicos de la superficie lunar, excitados por la radiación corpuscular proveniente del Sol durante períodos de actividad, proporcionan la fuente más prometedora de información sobre la variación en concentración de los elementos importantes. Ya que se espera que por lo menos una de las sondas lunares lleve un espectrógrafo de rayos gamma, el examen de rayos X de la superficie de la Luna ampliará la aplicación del equipo a bordo del satélite.

Se computan los rendimientos de la radiación K en blancos gruesos para el rango de los respectivos elementos según diferentes flujos de protones. Se investigan en términos de error standard relativo el conteo y la resolución espacial obtenida por medio de los instrumentos en órbita a diversas alturas. Haciendo un cálculo conservador y sin tomar en cuenta el fondo, se estima una resolución de 95 Km (diámetro del cráter de Copérnico) a una altura de 400 Km con certidumbre de 90 por ciento en la estadística de conteo para un flujo de  $10^4$  protones/seg. Para alturas menores o para flujos de protones más altos, mejoraría considerablemente la resolución.

Se indica la importancia crítica de los problemas del fondo, esbozándose algunos intentos de solución.

En el programa de exploración lunar se ha considerado un número de experimentos para determinar la composición de la Luna por medio de espectroscopía de la emisión y difracción de rayos X, la espectroscopía de masa, la espec-

**DETERMINATION OF SURFACE COMPOSITION  
OF THE MOON FROM A LUNAR  
SATELLITE**

D. B. WITTRY, \* G. ARRHENIUS \*\*, \* \* \*  
and L. H. COHEN \* \* \*

**ABSTRACT**

The long-range scientific merits of determining the variations in chemical composition over the surface of the Moon are discussed. Possible methods are reviewed for obtaining continuous measurements of atomic concentrations in the lunar surface from a satellite in orbit around the Moon. It is concluded that the characteristic X-radiation of the lunar surface, excited by corpuscular radiation from the Sun during active periods, offers the most promising source of information on variation in concentration of the major elements. Since it is expected that at least one of the lunar probes will carry an a gamma-ray spectrograph, examination of X-radiation from the Moon's surface will make further use of equipment already existing in the satellite.

Thick target yields of X-radiation are computed for the range of elements concerned and at different proton fluxes. The counting rate and spatial resolution obtainable from instrumentation in orbit at different altitudes are investigated in terms of relative standard error. Making a conservative calculation but neglecting background, a resolution of 95 Km (diameter of Copernicus' Crater) is estimated at an altitude of 400 Km with 90 per cent confidence of the counting statistics at a flux of  $10^4$  protons/sec. At lower altitudes or higher proton flux, the resolution will be considerably improved.

The critical importance of background problems is indicated and possible approaches to solution outlined.

In the lunar exploration program, a number of experiments have been considered to determine the composition of the Moon by X-ray emission spectroscopy, X-ray diffraction, mass spectroscopy, optical emission spectroscopy,

\* *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad del Sur de California, Los Angeles, California.*

\*\* *Instituto de Geofísica y Física Planetaria, Universidad de California, La Jolla, California.*

\*\*\* *Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de California, La Jolla, California.*

\* *Department of Electrical Engineering, University of Southern California, Los Angeles, California.*

\*\* *Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, La Jolla, California.*

\*\*\* *Department of Earth Sciences, University of California, La Jolla, California.*

troscopía de emisión óptica, la espectroscopía de rayos gamma y la cromatografía de gases. Para la mayoría de estos experimentos el instrumental analítico deberá colocarse sobre la Luna por un vehículo con descenso suave y la información adquirida se referirá solamente a la composición de un área limitada de la superficie lunar. Independientemente del éxito de tales métodos de análisis directo de muestras locales representativas de la Luna, sería de interés establecer la composición media de la superficie lunar así como de las variaciones regionales en la abundancia relativa de elementos. Tal clase de información resultaría valiosa al discutir el origen de la Luna, su posible diferenciación y los procesos que modifican la superficie lunar. La ausencia de una atmósfera lunar absorbente hace tentadora la exploración de las posibilidades de realizar tales mediciones desde un satélite colocado en órbita alrededor de la Luna.

Entre los métodos analíticos propuestos para dar información sobre la composición lunar, solamente las técnicas espectrográficas parecen capaces de proporcionar datos útiles desde una distancia de varios cientos de kilómetros. A tales distancias, los métodos espectrográficos que son posibles están limitados a aquellos en que puede obtenerse excitación por fenómenos naturales, ya que sería poco probable producir una excitación adecuada en la superficie lunar por una fuente localizada en el satélite.

Algunas potenciales fuentes de radiación para análisis espectrográficos de la superficie lunar por instrumentos colocados en un satélite en órbita son: a) rayos gamma de elementos naturalmente radioactivos; b) rayos gamma inducidos por rayos cósmicos; c) rayos gamma debidos a la excitación de Coulomb del núcleo por rayos cósmicos solares; d) rayos X debidos a la excitación por rayos X suaves del Sol, y e) rayos X debidos a la excitación por electrones, protones o partículas más pesadas del Sol.

Los dos primeros métodos han sido considerados en detalle por Arnold (1958) y parecen capaces de proporcionar información útil durante la quietud solar. Sin embargo, estos métodos sólo son adecuados para un número limitado de elementos —específicamente aquellos que se caracterizan por radioactividad natural o fácilmente inducida y que decaen por emisiones gamma.

En cambio, los métodos d y e) que están basados sobre la interacción con las capas internas electrónicas más bien que con el núcleo, se aplican en el análisis de una gran variedad de especies atómicas. Los métodos d) y e) dependen de la radiación excitante durante la actividad solar mientras que a) y b) pueden aplicarse solamente en períodos de quietud solar. Así, ambos grupos de métodos pueden compartir los componentes esenciales de un sistema de discriminación de pulso simple y los correspondientes canales de comunicación. En este trabajo no se discutirá la excitación de Coulomb debido principalmente a la dificultad de interpretar el espectro complejo que se obtiene.

gamma ray spectroscopy, and gas chromatography. In most of these experiments the instrumentation for the analysis must be placed on the Moon by a softlanding vehicle, and the information acquired is indicative of the composition of only a limited area of the Moon's surface. Independent of the success of these methods of direct analysis of representative local samples from the Moon, it would be of interest to establish the average composition of the lunar surface as well as regional variations in the relative abundance of elements. Information of this kind would be valuable in discussing the origin of the Moon, its possible differentiation, and the processes modifying the lunar surface. The absence of an absorbing lunar atmosphere makes it tempting to explore the possibilities for carrying out such measurements from a satellite placed in orbit around the Moon.

Of the suggested analytical methods which could yield information on the lunar composition, only spectrographic techniques appear to be capable of furnishing useful data from a distance of several hundred kilometers. At such distances the spectrographic methods which are feasible are limited to those in which excitation can be obtained by natural phenomena, since it is unlikely that adequate excitation of the Moon's surface could be produced by a source located in the satellite.

Some of the possible radiation sources for spectrographic analysis of the lunar surface from instrumentation placed in an orbiting satellite are a) gamma rays from naturally radioactive elements; b) gamma rays due to activation by cosmic rays; c) gamma rays due to Coulomb excitation of the nucleus by solar cosmic rays; d) X-rays due to excitation by soft X-rays from the Sun; and e) X-rays due to excitation by electrons, protons, or heavier particles from the Sun.

The first two of these methods have been considered in detail by Arnold (1958) and appear to be capable of providing useful information during solar quiescence. These methods, however, are suitable only for a limited number of elements — specifically those characterized by natural or easily induced radioactivity and which decay by gamma emission.

Conversely, methods like d) and e), which are based on interactions with the inner electron shells rather than with the nucleus, are applicable for the analysis of a wide range of atomic species. Methods d) and e) depend on solar activity for exciting radiation, while a) and b) can be applied only during periods of solar quiescence. Hence both a single pulse discrimination system and the corresponding communication channels. Coulomb excitation will not be discussed in this paper, primarily because of the difficulty of interpreting the complex spectra obtained.

## EXCITACION DE RAYOS X POR RAYOS X SOLARES

Existen datos escasos sobre el flujo de rayos X cuyas longitudes de onda sean menores de 20 Ångström (Kreplin, 1961) en el espacio libre. El flujo medio de rayos X con longitudes de onda menores de 100 Å incidentes en la atmósfera superior de la Tierra se estima cercano a  $10^8$  quanta/cm<sup>2</sup>.seg aproximadamente (Chubb *et al.*, 1960, Elwert, 1961). Entre las mediciones tomadas durante diversos períodos de actividad solar se encuentran variaciones de muchos órdenes de magnitud. Mientras la mayoría de rayos X incidentes en la Tierra provienen de la corona solar, las ráfagas solares aumentan la componente de longitud de onda corta.

En principio sería posible usar los rayos X característicos de la Luna que resultan de la fluorescencia excitada por los rayos X solares. Sin embargo, sólo una pequeña porción del flujo total de rayos X es suficientemente energética para producir la excitación de capa K en los elementos más pesados que el sodio. Además, los fotones incidentes que tienen energías considerablemente mayores que la energía de excitación crítica producen un bajo rendimiento en blancos gruesos, puesto que la sección de ionización en las capas internas decrece al aumentar la energía por encima de esta energía crítica. Así, la profundidad a que se produce la radiación secundaria se hace mayor conforme aumenta la energía de la radiación primaria y el rendimiento en blancos gruesos observado queda limitado por su propia absorción.

## EXCITACION DE RAYOS X POR ELECTRONES Y PROTONES SOLARES

Según el resumen de la literatura por Jaffe y Rittenhouse (1961), las ráfagas solares ocurren aproximadamente una vez al mes durante el máximo del período solar de 11 años. El típico flujo de protones asociado a las grandes ráfagas cerca de la Tierra es de  $10^4$  protones/cm<sup>2</sup>.seg, número que se aplica a las partículas de energía mayor de 20 Mev. El máximo número de protones ocurre en el intervalo de 20-100 Mev para tales mediciones y ocasionalmente algunas ráfagas tienen flujos de protones diez veces mayores. El flujo de protones de baja energía (1/2-20 Kev) durante las ráfagas no se conoce bien, pero puede elevarse hasta  $10^{12}$  protones/cm<sup>2</sup>.seg. Tampoco se conoce bien el flujo de electrones durante los períodos de ráfagas, pero las mediciones de Arnoldy *et al.* (1960) indicaron  $10^6$  a  $10^7$  electrones/cm<sup>2</sup>.seg con energía aproximada de 50 Kev.

Una medición de Davis *et al.* (1961) durante una ráfaga en Septiembre de 1960 mostró más de  $10^5$  protones/cm<sup>2</sup>.seg con energía mayor de 13 Mev. Los datos de Davis *et al.* también indican que el número máximo de partículas está en el rango de energía menor de 100 Mev.

Pueden usarse tanto protones como electrones para excitar los rayos X característicos. La sección de ionización de la capa interna es comparable para electrones y protones

## X-RAY EXCITATION BY SOLAR X-RAYS

Limited data on the flux of X-rays in free space with wavelengths less than 20 Ångström are available (Kreplin, 1961). The average flux of X-rays with wavelengths less than 100 Å incident on the Earth's upper atmosphere is estimated to be about  $10^8$  quanta/cm<sup>2</sup>.sec (Chubb *et al.*, 1960; Elwert, 1961). Variations of several orders of magnitude are found between measurements taken during different periods of solar activity. While the bulk of the X-radiation incident on the Earth comes from the solar corona, solar flares enhance the short wavelength component.

In principle it would be possible to use characteristic X-radiation from the Moon resulting from fluorescence excited by solar X-rays; however, only a small portion of K-shell excitation of elements heavier than sodium. Moreover, incident photons which have energies considerably greater than the critical excitation energy give a low thick target yield, since the cross section for inner shell ionization decreases with increasing energy above this critical energy. Thus the depth at which the secondary radiation is produced becomes larger as the energy of the primary radiation increases, and the observed thick target yield becomes limited by self absorption.

## X-RAY EXCITATION BY SOLAR ELECTRONS AND PROTONS

According to Jaffe and Rittenhouse's (1961) literature summary, solar flares occur about once a month during the maximum of the 11-year solar period. The proton flux near the Earth associated with a major flare is typically  $10^4$  proton/cm<sup>2</sup>.sec, this number applying to particles of energy greater than 20 Mev. The maximum number of protons occur in the 20 — 100 Mev range for these measurements, and occasional flares have proton fluxes ten times as great. The flux of low-energy (1/2-20 Kev) protons during flares is not well known but might extend as high as  $10^{12}$  proton/cm<sup>2</sup>.sec. The electron flux during flare periods is also poorly known, but a measurement by Arnoldy *et al.* (1960) showed  $10^6$  to  $10^7$  electrons/cm<sup>2</sup>.sec of approximately 50 Kev energy.

A measurement by Davis *et al.* (1961) during a September, 1960 flare showed more than  $10^5$  protons/cm<sup>2</sup>.sec of energy greater than 13 Mev. Davis' data also show the maximum number of particles to be in the energy range below 100 Mev.

Both protons and electrons can be used to excite characteristic X-rays. The cross section for inner shell ionization is comparable for electrons and protons of similar velocity,

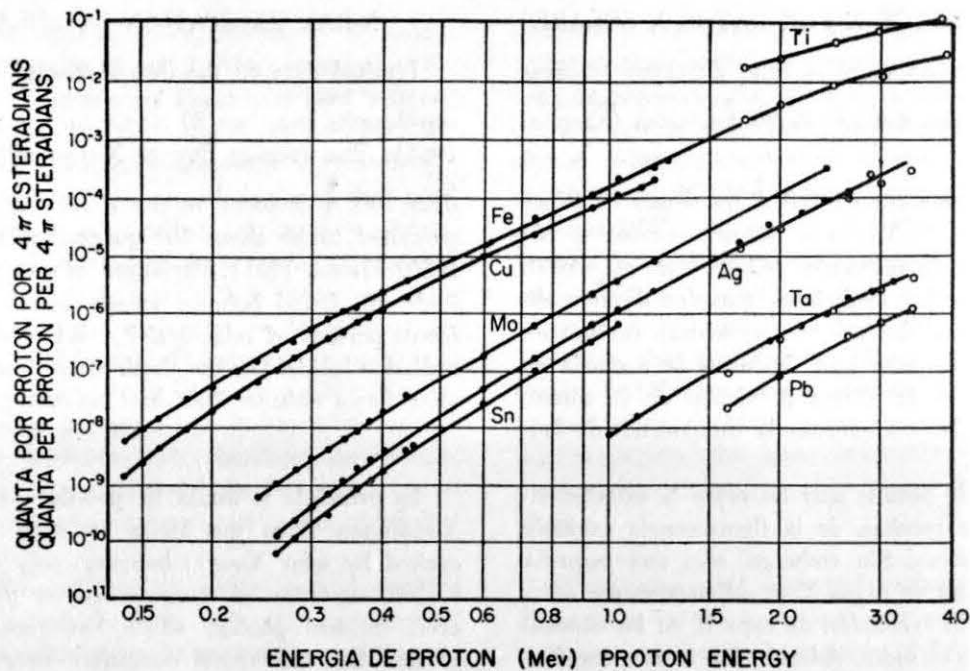


Figura 1. Rendimientos experimentales en blancos gruesos en función de la energía de protones incidentes para diferentes elementos de los blancos. Círculos llenos: datos de Messelt (1958). Círculos huecos: datos de Merzbacher y Lewis (1958).

Figure 1. Experimental thick target yields of K-radiation as a function of incident proton energy and for different target elements. Filled circles: data from Messelt (1958). Open circles: data from Merzbacher and Lewis (1958).

de las mismas velocidades, siempre que la velocidad sea mayor de  $\sqrt{2E_K/m}$ , donde  $E_K$  es la energía crítica de excitación para la capa de electrones en cuestión y  $m$  la masa de la partícula de bombardeo. Sin embargo un rayo polienergético de protones dará rendimientos mayores en blancos gruesos que el mismo flujo de electrones con idéntica distribución de velocidad, ya que los protones de velocidad inferior a  $\sqrt{2E_K/m}$  todavía tienen una probabilidad finita de producir ionización y también, porque el rango de protones es menor que el rango de electrones de energía similar. Así, suponiendo que el número de electrones sea del mismo orden de magnitud que el número de protones con la misma velocidad, la intensidad de la radiación característica producida por los electrones será pequeña comparada con la producida por los protones. En todo caso, puede obtenerse un límite inferior en la producción de los rayos X característicos por protones y electrones suponiendo que sólo estaban presentes los protones. Nuestras estimaciones del monto de emisión de rayos X producidos será, pues, muy conservadora ya que despreciamos la excitación (1) por protones de baja energía, (2) por electrones solares y (3) por partículas  $\alpha$  solares.

#### EXCITACION DE LOS RAYOS X CARACTERISTICOS POR PROTONES SOLARES

Como se indicó en la sección precedente, puede obtenerse un límite inferior de la excitación de los rayos X caracte-

provided the velocity is greater than  $\sqrt{2E_K/m}$ , where  $E_K$  is the critical excitation energy for the electron shell in question and  $m$  is the mass of the bombarding particle. A polyenergetic beam of protons will give considerably larger thick target yields than the same flux of electrons with identical velocity distribution, however, because protons of velocity less than  $\sqrt{2E_K/m}$  still have a finite probability of producing ionization and because the range of protons is less than the range of electrons of similar energy. Thus, if one assumes that the number of electrons are of the same order of magnitude as the number of protons having the same velocity, the intensity of characteristic radiation produced by the electrons will be small compared to that produced by the protons. In any case, a lower limit of the characteristic X-ray production by protons and electrons can be obtained by assuming that only protons are present. Our estimates of the amount of X-radiation produced will thus be quite conservative since we neglect (1) excitation by low-energy protons; (2) excitation by solar electrons and (3) by solar  $\alpha$ -particles.

#### EXCITATION OF CHARACTERISTIC X-RAYS BY SOLAR PROTONS.

As indicated in the preceding section, a lower limit on the excitation of characteristic X-radiation during solar acti-

rísticos durante la actividad solar considerando únicamente la excitación debida a protones. La medición del rendimiento en blancos gruesos de los rayos X característicos se ha hecho para protones de energía menor de 3 ó 4 Mev y para elementos con número atómico mayor de 22 (Ti) (Fig. 1). Tomando tales mediciones de la literatura, los experimentadores calcularon las secciones y compararon los resultados con la predicción de la aproximación de Born. Las secciones resultantes no están en completo acuerdo con las predicciones teóricas debido a tres factores: (1) las inexactitudes al obtener las secciones transversales del rendimiento en blancos gruesos; (2) la aproximación de Born es estrictamente aplicable sólo para energías de protones considerablemente mayores que las energías usadas y (3) la constante de filtración en la aproximación de Born no puede determinarse con precisión.

Para determinar si es adecuado usar la emisión característica de rayos X de la Luna para propósitos analíticos, deben usarse los rendimientos en blancos gruesos. Como faltan datos experimentales sobre el rango de energías en que se sabe que hay grandes flujos de protones y para elementos de valor atómico bajo (cuya abundancia cósmica es más alta), es necesario calcular el rendimiento en blancos gruesos. Esto se hizo suponiendo que (1) la aproximación de Born (véase, por ejemplo, Merzbacher y Lewis, 1958) puede usarse para derivar la sección, (2) la sección en bajas energías sea la calculada por Merzbacher y Lewis, (3) la

sección a energías más altas varía como  $\frac{1}{E}$  en  $(\alpha E)^1$  (4)

variación de energía de protones con la profundidad puede obtenerse de las relaciones experimentales del rango promedio de energía (Whaling, 1958) y 5) los coeficientes de absorción de masa por arayer X son aquellos para el blanco que tiene la composición promedio de los meteoritos pétreos, como lo indican Urey y Craig (1953).

Para verificar la validez de este procedimiento de estimación de los rendimientos en blancos gruesos, el rendimiento de la radiación K para el hierro debido a protones fue calculado y comparado con valores experimentales dados por Merzbacher y Lewis (1958). El rendimiento de fluorescencia para el hierro se estimó en 0.305. Los rendimientos computados concuerdan dentro de un factor de dos con los valores experimentales para energías de 2 a 4 Mev (véase Fig. 2). Esta concordancia parece razonable en vista de desprejarse las variaciones erráticas de rango de los protones y las otras comparaciones hechas.

El cálculo de rendimientos de la radiación característica para otros elementos de interés lunoquímico fue realizado usando las composiciones y los coeficientes de absorción de masa dados en la Tabla 1.

<sup>1</sup> En la aproximación de Born dada por H. Bethe (*Ann. der Physik*, 5:325-400, 1930) para la excitación de protones de la capa K,  $\alpha$  sería  $4 m E_K$ , donde  $B_q$  es del orden de la energía K de ionización  $E_K$ .

vity can be obtained by considering only the excitation which is due to protons. Measurements of the thick-target yield of characteristic X-radiation have been made for protons of energy less than 3 or 4 Mev and for elements with atomic number greater than 22 (Ti) (Fig. 1). From these measurements in the literature, the experimenters calculated the cross sections and compared the results with prediction from the Born approximation. The resulting cross sections are not in complete agreement with the theoretical predictions because of three factors: (1) the inaccuracies in obtaining the cross sections from the thick target yield; (2) the Born approximation is strictly applicable only for proton energies considerably larger than the energies used; and (3) the creening constant in the Born approximation cannot be precisely determined.

For determining the feasibility of using characteristic X-radiation from the Moon for analytical purposes, the thick target yields must be used. Since experimental data are lacking for the range of energies in which there is known to be a large proton flux and for elements of low atomic number (which have the highest cosmic abundance), it is necessary to estimate the thick target yield. This was done by assuming that (1) the Born approximation (see e.g. Merzbacher and Lewis, 1958) can be used to derive the cross section; (2) the cross section at low energies is that given by Merzbacher and Lewis; (3) the cross section

at higher energies varies as  $\frac{1}{E}$  in  $(\alpha E)^1$  (4) the variation

of proton energy with depth can be obtained from the experimental mean range-energy relations (Whaling, 1958); and (5) the mass absorption coefficients for the X-rays are those for a target having the average composition of stone meteorites, as indicated by Urey and Craig (1953).

In order to check the validity of this procedure for estimating the thick target yields, the yield for iron K-radiation due to protons was calculated and compared with experimental values given by Merzbacher and Lewis (1958). The fluorescence yield of iron was taken to be 0.305. The computed yields agree within a factor of two with the experimental values for energies of 2 to 4 Mev (see Fig. 2). This agreement is thought to be reasonable in view of the neglect of range straggling of the protons and the other approximations made.

The calculation of yields of characteristic radiation from other elements of lunochemical interest was made by using the composition and mass absorption coefficients given in Table 1.

<sup>1</sup> In the Born approximation given by H. Bethe (*Ann. der Physik*, 5:325-400, 1930) for proton excitation of the K shell,  $\alpha$  would be  $4 m E_K$ , where  $B_q$  is of the order of the K ionization energy  $E_K$ .

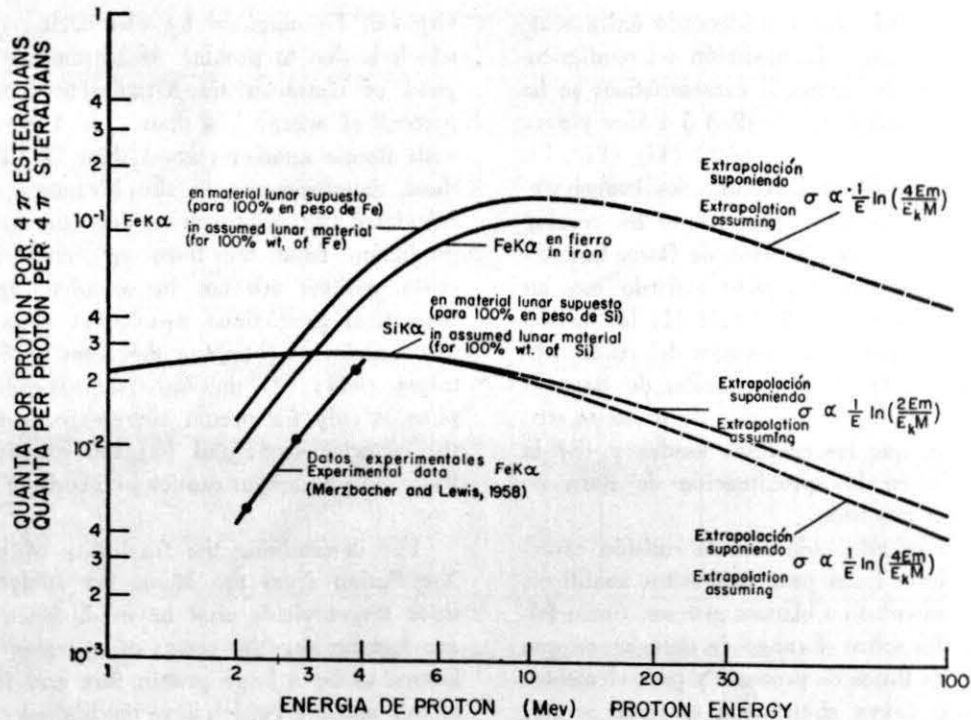


Figura 2. Rendimientos calculados de rayos X en blancos gruesos para hierro y silíce en materiales hipotéticos con coeficientes de absorción de masa del promedio de meteoritos pétreos, pero compuestos respectivamente de hierro o silíce puros. Esta representación permite el escalamiento lineal de rendimientos para diversas concentraciones de los elementos en cuestión. Para comparación, se graficaron las funciones de rendimientos calculados y observados para hierro metálico. También se representaron las extrapolaciones del rendimiento usando dos valores para el coeficiente  $\alpha$  de la aproximación de Born.

Figure 2. Calculated thick target x-ray yields for iron and silicon in hypothetical materials having the mass absorption coefficients of average stone meteorites but consisting of pure iron and silicon respectively. This representation permits linear scaling of yields for varying concentrations of the elements in question. For comparison, the calculated and observed yields functions for metallic iron are also shown in the graph. We have also plotted extrapolation of the yield using two values for the Born approximation coefficient  $\alpha$ .

Se notará que el coeficiente de absorción de masa para la radiación K del hierro es bajo comparado con los coeficientes de absorción de masa de la radiación K del silíce, del aluminio y del magnesio. Por otra parte, la sección de órdenes de magnitud más alta que para el hierro. La gran autoabsorción y los bajos rendimientos de fluorescencia de los elementos ligeros están así ampliamente compensados por sus altas secciones de ionización. Con el propósito de obtener una estimación del rendimiento en blancos gruesos de los rayos X con elementos de bajo número atómico, basta realizar los cálculos para un elemento, pues los rendimientos de la radiación K para el azufre, el aluminio y el magnesio serán iguales al rendimiento de radiación K para el silíce dentro de un factor de dos o tres.

Al estimar el rendimiento de la radiación para el hierro y el silíce quedó supuesto que podrían usarse los valores experimentales de rango medio vs energía para protones sobre aluminio (Whaling, 1958). Así no se introduce un gran error, ya que el aluminio es similar en su densidad y número atómico al supuesto promedio del material lunar. En todos los casos, la longitud de la trayectoria de rayos X fue considerada igual a la distancia atravesada por los pro-

It will be noted that the mass absorption coefficient for iron K radiation is low compared to the mass absorption coefficients for silicon, aluminum, and magnesium K radiation. On the other hand, the ionization cross section for K radiation from the light elements is almost two orders of magnitude higher than iron's and this tends to compensate in part for the large self-absorption and the low fluorescence yields of the light elements. For the purpose of obtaining an estimate of the thick target X-ray yield from the low atomic number elements, it is sufficient to perform the calculations for one element, since the yields for sulfur, aluminum, and magnesium K radiation will be equal to the yield for silicon K radiation within a factor of two or three.

In estimating the yield for iron and silicon radiation, it was assumed that the experimental values of the mean range is energy for protons on aluminum (Whaling, 1958) could be used. This does not introduce a large error since aluminum is similar in density and atomic number to the assumed average lunar material. In all cases, the X-ray path length was taken to be equal to the distance travelled by the protons inside the target. The fluorescence yield

TABLA 1

TABLE 1

Elemento Element	Concentración Concentration wt%	Coeficientes de absorción de masas Mass absorption coefficients					
		FeK $\alpha$	CaK $\alpha$	SK $\alpha$	Si K $\alpha$	Al K $\alpha$	Mg K $\alpha$
Oxígeno Oxygen	37.9	22 <sup>1</sup>	108 <sup>3</sup>	476 <sup>2</sup>	967 <sup>3</sup>	1,585 <sup>2</sup>	2,540 <sup>2</sup>
Sílice Silicon	19.4	111 <sup>1</sup>	610 <sup>3</sup>	2,100 <sup>3</sup>	280 <sup>3</sup>	446 <sup>3</sup>	710 <sup>3</sup>
Magnesio Magnesium	15.7	77.2 <sup>1</sup>	388 <sup>3</sup>	1,350 <sup>3</sup>	2,800 <sup>3</sup>	4,360 <sup>3</sup>	330 <sup>3</sup>
Fierro Iron	24.7	71.2 <sup>1</sup>	312 <sup>2</sup>	1,090 <sup>3</sup>	2,140 <sup>3</sup>	3,120 <sup>3</sup>	4,500 <sup>3</sup>
Azufre Sulfur	2.21	173 <sup>1</sup>	780 <sup>2</sup>	249 <sup>2</sup>	520 <sup>3</sup>	794 <sup>1</sup>	1,320 <sup>1,2</sup>
Coeficientes de absorción de masas totales calculados Calculated total mass absorption coefficients		61.5	306	1,100	1,466	2,153	2,281

1. Compton and Allison (1935)

2. *Handbook of Chemistry and Physics* (1948)

3. Liebhafsky *et al.* (1960) (interpolado suponiendo  $\frac{\mu}{\rho} \propto \lambda^3$ ),  
(interpolated assuming  $\frac{\mu}{\rho} \propto \lambda^3$ ).

tones dentro del blanco. El rendimiento en fluorescencia se consideró de 0.05 para el sílice (Compton y Allison, 1935). Los valores resultantes para los rendimientos en blancos gruesos (escalados para 100 por ciento de masa de los elementos) se expresan en la Figura 2. Estos rendimientos estimados son suficientemente alentadores para justificar una mayor consideración del proyecto. Medidas experimentales adicionales de rendimientos en blancos gruesos para los elementos en cuestión, dentro del rango de 3-100 Mev, serían interesantes a este respecto y también tendrían importancia fundamental para comprobar la validez de la aproximación de Born.

#### INTENSIDADES RECIBIDAS POR UN DETECTOR EN ORBITA

Para una geometría dada del detector relativa a la Luna, es posible usar las estimaciones de los rendimientos en blancos gruesos para determinar el número de conteos de los rayos X característicos recibidos por segundo para un flujo dado de protones. Para hacerlo con exactitud sería necesario conocer la distribución de energía de los protones ya que los rendimientos varían considerablemente con

was taken to be 0.05 for silicon (Compton and Allison, 1935). The resulting values for the thick target yield (scaled for 100 mass per cent of the elements) are given in Figure 2. These estimated yields are sufficiently encouraging to justify further consideration of the project. Additional experimental measurements of thick target yields for the elements in question and in the range of 3-100 Mev would be of interest in this connection and would also be of fundamental importance in verifying the validity of the Born approximation.

#### INTENSITIES RECEIVED BY AN ORBITING DETECTOR

For a given geometry of detector relative to the Moon, it is possible to use the estimates of the thick target yields to determine the number of counts of characteristic X-radiation received per second for a given proton flux. In order to do this with accuracy, it would be necessary to know the energy distribution of the protons, since the yield varies considerably with energy. This will be a significant

la energía. Eso será un factor significativo en el problema práctico de relacionar las intensidades de rayos X con la composición lunar. Por ejemplo, si la distribución de energía de los protones cambia, las intensidades relativas de las diferentes líneas de los rayos X característicos cambiarán aunque la composición permanezca fija. Así, en el uso cuantitativo de este método de análisis será necesario proporcionar detectores adicionales para determinar el espectro de energía de los protones. Sin embargo, si el espectro de los protones permanece constante para tiempos del orden del período del satélite podrían deducirse cambios relativos de área en la concentración aún sin conocimiento de la distribución precisa de energía de los protones. El hecho de que la órbita de un satélite lunar no fuese circular afectaría las intensidades absolutas medidas y la resolución lunodésica obtenida, pero no las intensidades relativas de los diferentes elementos.

factor in the practical problem of relating the X-ray intensities to the lunar composition. For example, if the energy distribution of the protons changes, the relative intensities of the different characteristic X-ray lines will change even if the composition remains fixed. Thus in the quantitative use of this method of analysis, it would be necessary to provide additional detectors to determine the energy spectrum of the protons. If the spectrum of the protons remains constant for times of the order of the satellite period, however, relative areal changes in concentration can be deduced without knowledge of the precise energy distribution of the protons. The fact that the orbit of a lunar satellite would not be circular would influence the absolute intensities measured and the lunodetic resolution obtained but not the relative intensities from different elements.

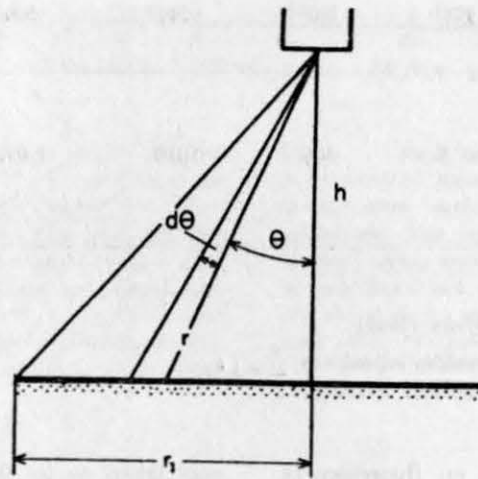


Figura 3. Geometría del contador lunar;  $r_1$  es el radio del área lunar, visto por el contador.

Figure 3. Counter-moon geometry;  $r_1$  is the radius of the lunar area viewed by the counter.

Ahora, calcularemos la magnitud de las intensidades de rayos X esperadas para diversas alturas suponiendo que el ángulo sólido subtendido por el detector sea fijo. La Figura 3 muestra la geometría del sistema detector-Luna, al asumirse que la altura del detector es suficientemente pequeña en comparación con el diámetro de la Luna para que la superficie pueda considerarse plana. Sean  $A$  el área del detector e  $Y$  el rendimiento (escalado a 100 por ciento de masa de un elemento dado) promediado sobre protones de todas las energías. Si el número total de protones por unidad de tiempo y unidad de área es  $F$  y la concentración del elemento buscado  $c$ , el número de conteos recibidos por el detector en la unidad de tiempo será

We will now estimate the magnitude of the X-ray intensities to be expected for various altitudes, assuming the solid angle subtended at the detector is fixed. Figure 3 shows the geometry of the detector-Moon system. It is assumed that the altitude of the detector is sufficiently small compared to the Moon's diameter that the surface can be considered to be a plane. Let the area of the detector be  $A$ , and let the yield (scaled to 100 mass per cent of a given element) averaged over protons of all energies be  $Y$ . If the total number of protons per unit time and unit area is  $F$ , and the concentration of the element sought is  $c$ , the number of counts received by the detector per unit time will be

$$n = YFc \int \frac{A \cos \theta}{4 \pi r^2} 2\pi r_1 dr_1$$



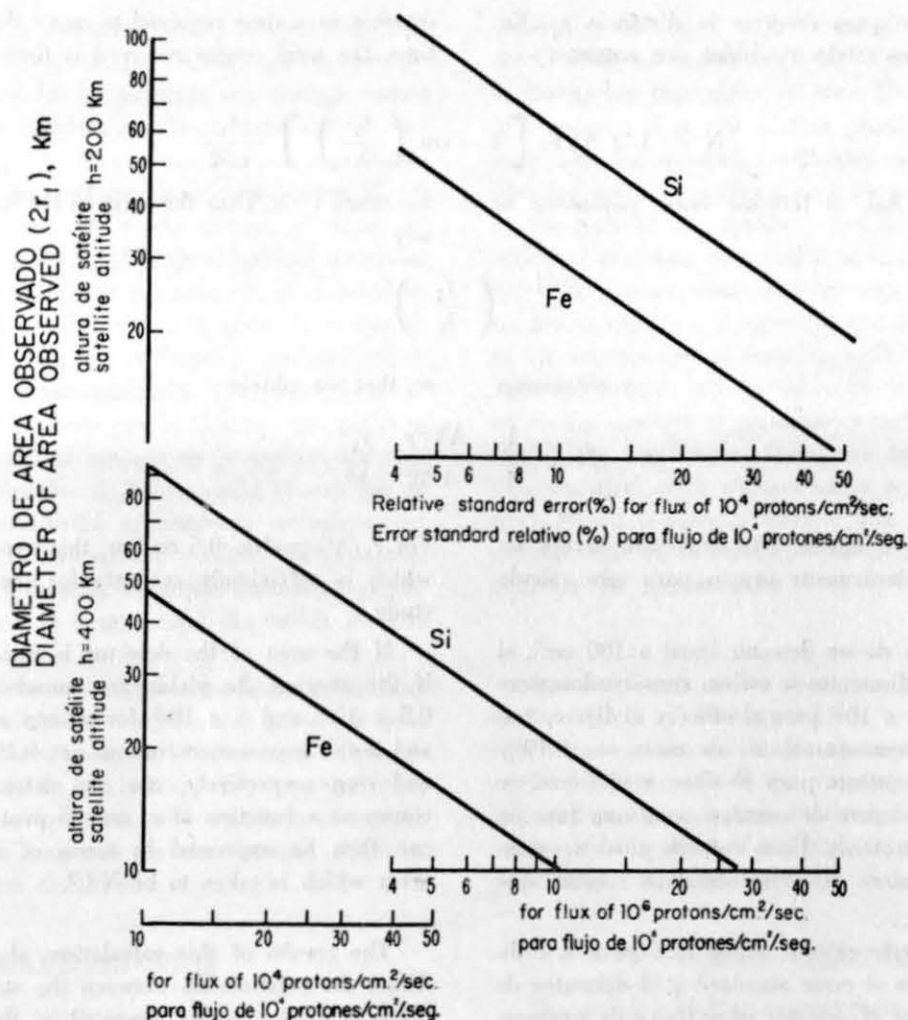


Figura 4. Resolución areal de la superficie de la Luna que puede obtenerse como una función de errores estadísticos dados en el conteo de los quanta de los rayos X característicos. Se muestra la relación para dos altitudes orbitales, dos flujos de protones solares y dos elementos típicos —uno ligero y otro pesado. En cada caso, se supone que la concentración media equivale a los meteoritos pétreos y que el error estadístico se refiere al error relativo en la determinación de los quanta de rayos X recibidos en el tiempo de medición de  $\frac{r_1}{1.52}$  segundos.

Figure 4. Areal resolution of the Moon's surface obtainable as a function of given statistical errors in the count of characteristic x-ray quanta. The relation is shown for two orbital altitudes, two fluxes of solar protons, and for two typical elements—one light and one heavy. In each case the average concentration is assumed to be that of stone meteorites, and the statistical error refers to relative error in determining the x-ray quanta received in a measurement

$$\text{time of } \frac{r_1}{1.52} \text{ seconds.}$$

o or

$$n = 1/2 AYFc \int_0^{\tan^{-1} \frac{r_1}{h}} \sin \theta d \theta$$

donde r es el vector para el área circular vista desde el detector, h la altura y r<sub>1</sub> el radio del área vista desde el contador. La velocidad de un satélite lunar es casi independiente de la altura a pequeñas alturas, siendo de 1.52 Km/seg para una altura de 200-400 kilómetros (Buchheim, 1959). Podemos considerar como indicador de la composición local el número de conteos recibidos por el detector

where r is the vector to the circular area viewed by the detector, h is the altitude, and r<sub>1</sub> is the radius of the area seen by the counter. The velocity of a lunar satellite is almost independent of altitude for small altitudes and is 1.52 Km/sec for an altitude of 200-400 Kilometers (Buchheim, 1959). We may consider as an indication of the local composition the number of counts received by the

en el tiempo requerido para recorrer la distancia  $r_1$ . En dicho tiempo, los conteos totales recibidos, son entonces

$$N = 1/2 AYFc \left[ 1 - \cos \left( \frac{r_1}{h} \right) \right] \frac{r_1}{1.52}$$

para pequeños  $r_1/h$ . Así, el término entre paréntesis es aproximadamente

$$\frac{1}{2} \left( \frac{r_1}{h} \right)^2$$

y obtenemos

$$N = \frac{1}{4} \frac{AYFc}{1.52} \frac{r_1^3}{h^2}$$

Para  $r_1/h$  igual a 0.5 o menos, esta expresión arroja un resultado que es suficientemente exacto para este cálculo preliminar.

Suponiendo el área de un detector igual a 100 cm<sup>2</sup>, si el promedio  $2\pi$  de rendimientos se estima conservadoramente entre  $0.5 \times 10^{-2}$  y  $3 \times 10^{-2}$  para el sílice y el hierro, respectivamente y si las concentraciones de masa son 0.19 y 0.25 también respectivamente para el sílice y el hierro, se puede determinar el número de conteos como una función de  $r_1$  y del flujo de protones. Estos conteos pueden entonces expresarse en términos del error standard relativo que se toma como  $N^{-1/2}$ .

Los resultados de este cálculo, según la Figura 4, indican las relaciones entre el error standard y el diámetro de la región observada por el detector para flujos de protones de  $10^4$  y  $10^6$ /cm<sup>2</sup>.seg. Así puede determinarse de estas curvas la posibilidad de distinguir entre los diferentes tipos de rocas desde una altura dada y con un flujo particular de protones, suponiendo que el tipo de roca en cuestión ocupe esa área específica de la Luna.

#### CONSIDERACIONES SOBRE EL FONDO

Una de las principales limitaciones en la exactitud de la determinación de composición desde un satélite lunar en órbita será el alto fondo en que serán hechas las mediciones. En lo anterior se asumió que sería posible eliminar la contribución del fondo sin afectar la exactitud estadística de la medición. Sin embargo, puede verse fácilmente que no sucede así, ya que el flujo primario de actividad solar será incidente sobre el satélite y también producirá radiación secundaria en la masa que rodea el detector.

Es evidente en la Figura 4 que un flujo primario de  $10^4$  protones/cm<sup>2</sup>.seg o mayor será necesario para una excitación adecuada de emisión de los rayos X característicos de los elementos de interés. Para ese alto flujo de protones no bastan las simples técnicas de anticoincidencia si se usa un contador proporcional como detector, ya que a lo más ese contador puede manejar conteos cercanos a  $10^5$ /seg.

detector in a time required to move the distance  $r_1$ . In this time, the total counts received is then

for small  $r_1/h$ . Thus the term in the brackets is approximately

so that we obtain

For  $r_1/h$  equal to 0.5 or less, this expression gives a result which is sufficiently accurate for the present preliminary study.

If the area of the detector is assumed to be 100 cm<sup>2</sup>, if the average  $2\pi$  yields are conservatively judged to be  $0.5 \times 10^{-2}$  and  $3 \times 10^{-2}$  for silicon and iron respectively, and if the mass concentrations are 0.19 and 0.25 for silicon and iron respectively, one can determine the number of counts as a function of  $r_1$  and of proton flux. These counts can then be expressed in terms of the relative standard error which is taken to be  $N^{-1/2}$ .

The results of this calculation, shown in Figure 4, indicate the relationship between the standard error and the diameter of the region observed by the detector for proton fluxes of  $10^4$  and  $10^6$ /cm<sup>2</sup>. From these curves one can determine the possibility of distinguishing between different types of rock from a given altitude and at a particular proton flux, assuming that the rock type in question occupies the specified area of the Moon.

#### BACKGROUND CONSIDERATIONS

One of the principal limitations on the accuracy of composition determination by an orbiting lunar satellite will be the high background in which the measurements must be made. In the foregoing, it has been assumed that it would be possible to eliminate the contribution from the background without affecting the statistical accuracy of the measurement. It can easily be seen that this is not the case, however, for the primary flux from solar activity will be incident on the satellite and will also produce secondary radiation in the mass surrounding the detector.

It is evident from Figure 4 that a primary flux of  $10^4$  protons/cm<sup>2</sup>.sec or greater would be needed for adequate excitation of characteristic X-radiation of the elements of interest. In such a high flux of protons simple anticoincidence techniques are not sufficient if a proportional counter is used as a detector, since the maximum counts which such a counter can handle is about  $10^5$ /sec. However, only

Sin embargo, sólo será necesario contar los protones más energéticos por anticoincidencia; un blindaje que apenas pesara 5 Kg eliminaría todos los protones con energía menor de unos 50 Mev. Este blindaje podría consistir en un plástico cintilante para que la información relativa a la distribución espectral de los protones pueda obtenerse al ser detenidos en esta barrera. De modo alterno, la masa del satélite podría usarse como un blindaje si hubiera un medio para orientar el satélite en un segundo eje. Los protones que pasan a través de la barrera y también la radiación secundaria que se produce en el blindaje podrían eliminarse por técnicas de anticoincidencia. Si el número de secundarias y de protones visto por el detector principal es pequeño en comparación al número de primarias detenido por el blindaje, las pérdidas de coincidencia se reducen en esa barrera. El error estadístico no cambiará seriamente durante el tiempo de inactividad del contador proporcional debido a eventos en el detector de fondo cuando es pequeño en comparación con el tiempo total disponible para la medición.

Otro factor que debe considerarse respecto a los efectos del fondo es la posible interferencia que pueden causar en los componentes electrónicos en el satélite. Ya que en gran parte los circuitos de los instrumentos que operarían en el espacio son transistorizados, será necesario investigar el efecto del flujo de protones de alta energía sobre el funcionamiento de tales circuitos.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud al Dr. John Winckler por su estímulo para el presente estudio. El descubrimiento por Winckler y sus colaboradores de inesperados flujos altos de protones durante erupciones solares (Winckler y Bhavsar, 1960; Winckler *et al.*, 1960; Winckler *et al.*, 1961) creó la base para el proyecto de análisis de fluorescencia luna aquí sugerido. Los importantes estudios realizados por el Dr. J. R. Arnold en la medición de la radiación nuclear de la Luna han proporcionado más estímulo.

Los autores también deben valiosa ayuda y discusiones a los Dres. D. Jovanovic, W. Kohn, M. Meyer y O. Piccioni.

La Administración Aeronáutica y del Espacio proporcionó ayuda para el estudio (contrato Núm. UCLJ 847), lo cual se reconoce agradecidamente.

protons would need to be counted by anticoincidence, a shield weighing as little as 5 Kg would eliminate all protons of energy less than about 50 Mev. This shield could conceivably consist of a scintillating plastic so that information regarding the spectral distribution of the protons could be obtained by the stopping of protons in this yield. Alternatively, the bulk of the satellite could be used as a shield if a means of orienting the satellite about a second axis is available. The protons which pass through the shield and also the secondary radiation produced in the shield could be eliminated by anticoincidence techniques. If the number of secondaries and protons seen by the main detector is small compared to the number of primaries which are removed by the shield, the coincidence losses are reduced by the shield. The statistical error will not suffer seriously if the time the proportional counter is inactive due to events in the background detector is small compared to the total time available for the measurement.

Another factor which must be considered with regard to the effects of background in the possible interference which may be caused in the electronic components in the satellite. Since much of the circuitry for instruments to be operated in space is transistorized, it will be necessary to investigate the effect of the high energy proton flux on the performance of these circuits.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to express their gratitude to Dr. John Winckler for his stimulus to the present study. Winckler's and his collaborators' discovery of the unexpectedly high proton fluxes from solar eruptions (Winckler and Bhavsar, 1960; Winckler *et al.*, 1960; Winckler *et al.*, 1961) form the basis for the project of lunar fluorescence analysis suggested here. The important developments by Dr. J. R. Arnold for measurement of nuclear radiation from the moon have provided further encouragement.

For valuable help and discussion the authors are further indebted to Drs. D. Jovanović, W. Kohn, M. Mayer and O. Piccioni.

The National Aeronautics and Space Administration provided support for the study (contract No. UCLJ 847) which is gratefully acknowledged.

#### BIBLIOGRAFIA

- ARNOLD, J. R. 1958.  $\gamma$ -Ray Spectroscopy of the Moon's Surface. *Proc. Lunar and Planetary Explor. Colloquium*. (Aero-Space Laboratories, North American Aviation, Inc.), Vol. 1, No. 3.
- ARNOLDY, R. L., R. A. HOFFMAN and J. R. WINCKLER. 1960. Solar Cosmic Rays and Soft Radiation Observed at 5,000,000 Kilometers from Earth. *Jour. Geophys. Res.*, 65:3004-3007.

#### BIBLIOGRAPHY

- BUCHHEIM, R. W. 1959. Lunar Flight Trajectories. In *Space Technology*. (Ed. H. S. Seifert) New York, 1 vol., il.
- CHUBB, T. A., H. FRIEDMAN and R. W. KREPLIN. 1960. Measurements Made of High-energy X-rays Accompanying Three Class 2+ Solar Flares. *Jour. Geophys. Res.*, 65:1831-32.
- COMPTON, A. H. and S. K. ALLISON. 1935. *X-rays in Theory and Experiment* (2nd. ed.). New York, 1 vol. il.
- DAVIS, L. R., C. E. FUCHTEL, D. E. GUISS and K. W. OGILVIE. 1961. Rocket Observations of Solar Protons on September 3, 1960. *Phys. Rev. Letters*, 6:492-494.
- ELWERT, G. 1960. Theory of X-Ray Emission of the Sun. *Jour. Geophys. Res.*, 66: 391-401.
- HODGMAN, C. D., Ed. 1948. *Handbook of Chemistry and Physics*, Cleveland, Ohio, 1 vol., il.
- JAFFE, L. D. and J. B. RITTENHOUSE. 1961. Behavior of Materials in Space Environments. *Jet Propulsion Laboratory Technical Report*, 32-150 (unpublished).
- KREPLIN, R. W. 1961. Solar X-Rays. *Ann. de Géophysique*, 17:151-161.
- LEWIS, H. B., B. E. SIMMONS and E. MERZBACHER. 1953. Production of Characteristic X-rays by Protons of 1.7 to 3-Mev Energy. *Phys. Rev.*, 91:943-946.
- LIEBHAFSKY, H. A., H. G. PFEIFFER, E. H. WINSLOW and P. D. ZEMANY. 1960. *X-Ray Absorption and Emission in Analytical Chemistry*. New York, 1 vol., il.
- MERZBACHER, E. and H. W. LEWIS. 1958. X-ray Production by Heavy Charged Particles. *Handb. der Physik*, 34:166-192.
- MESSELT, S. 1958. K-shell Ionization by Protons. *Nucl. Phys.*, 5:435-446.
- UREY, H. C. and H. CRAIG. 1953. The Composition of the Stone Meteorites and the Origin of the Meteorites. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 4:36-82.
- WHALING, W. 1958. The Energy Loss of Charged Particles in Matter. *Handb. der Physik*, 34:193-217.
- WINCKLER, J. R. and P. D. BHAVSAR. 1960. Low-Energy Solar Cosmic Rays and the Geomagnetic Storm of May 12, 1959. *Jour. Geophys. Res.*, 65:2637-2655.
- WINCKLER, J. R., P. D. BHAVSAR and L. PETERSON. 1960. The Time Variations of Solar Cosmic Rays During July, 1959 at Minneapolis. *Univ. Minnesota Tech. Report CR-31* (Unpublished).
- WINCKLER, J. R., P. D. BHAVSAR, A. J. MASLEY and T. C. MAY. 1961. Delayed Propagation of Solar Cosmic Rays on September 3, 1960. *Phys. Rev. Letters*, 6:488-491.