



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS “FÍSICO-MATEMÁTICAS”

“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN TELESCOPIO SEGMENTADO
PARA DETECCIÓN DE RAYOS CÓSMICOS”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN FÍSICA

PRESENTA:

MARTÍN ISAÍAS RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

ASESOR(ES):

DR. CARLOS IGNACIO ROBLEDO SÁNCHEZ

AGRADECIMIENTOS

AGRADEZCO A LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA (BUAP) POR LA FORMACIÓN ACADÉMICA BRINDADA.

QUIERO AGRADECER AL DR. CARLOS IGNACIO ROBLEDOS SÁNCHEZ, POR SU ASESORÍA Y TIEMPO DESTINADO A DIRIGIR MI TRABAJO DE TESIS DE LICENCIATURA.

AGRADEZCO TAMBIÉN AL CONJUNTO DE SINODALES, POR SUS OBSERVACIONES Y COMENTARIOS, LOS CUALES AYUDARON A MEJORAR LA PRESENTACIÓN DE ESTA TESIS.

DR. ALBERTO JARAMILLO NÚÑEZ

DR. CRUZ MENESES FABIÁN

DR. WUIYEBALDO FERMÍN GUERRERO SÁNCHEZ

TAMBIÉN QUIERO AGRADECER A LOS AMIGOS Y COMPAÑEROS QUE DE ALGUNA MANERA ME AUXILIARON EN ESTE PROCESO DE FORMACIÓN ACADÉMICA.

FINALMENTE, QUIERO AGRADECER A MI FAMILIA POR SU APOYO, ÁNIMOS Y CONVIVENCIA QUE SIEMPRE ME HAN BRINDADO.

CON MUCHO CARÍÑO PARA:

MI PADRE: SR. GREGORIO RODRÍGUEZ CORTÉS

MI MADRE: SRA. FLOR DE MARÍA RODRÍGUEZ GONZALEZ

MI HERMANO: ELÍAS ARCENIO RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

INDICE

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN GENEREAL.....	1
CAPITULO 2 DISEÑOS ÓPTICOS CONSTRUIDOS PARA LA DETECCIÓN DE LOS RAYOS CÓSMICOS.....	4
2.1 BREVE HISTORIA SOBRE LOS RAYOS CÓSMICO.....	4
2.2 RAYOS CÓSMICOS Y SU DIRECCIÓN DE LLEGADA.....	7
2.3 BASES FÍSICAS HACIA EL PROYECTO PIERRE AUGER.....	8
2.3 TELESCOPIOS DETECTORES DE FLUORESCENCIA.....	9
2.4.1 Primeros Diseños de Telescopios Detectores de Fluorescencia.....	9
2.4.2 Arreglos de Telescopios Perfilados hacia el Proyecto Pierre Auger.....	11
2.4.3 Propuesta Mejorada, Telescopio Schmidt.....	12
2.4.4 Espejos de Fresnel de Baja Frecuencia con Perfil Circular y Poligonal.....	13
2.4.5 Espejos Multihexagonales.....	13
CAPITULO 3 ESPEJO SEGMENTADO.....	15
3.1 NUEVO DISEÑO DE ESPEJO MULTI-HEXAGONAL.....	15
3.1.1 Desempeño de los fotodetectores.....	16

3.2	DEFINICIÓN EXPLÍCITA DE CONCEPTOS QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO.....	17
3.2.1	Tamaño de Mancha.....	17
3.2.2	Aberraciones en la formación de la imagen.....	18
3.2.3	Círculo de Mínima Confusión.....	19
3.3	TRAZO EXACTO DE RAYOS.....	19
3.3.1	Deducción de Sagita.....	19
3.3.2	Trazo de Rayos.....	21
3.3.3	Ecuación de Reflexión Vectorial.....	23
CAPITULO 4	DISEÑO DE TELESCOPIO DE 37 SEGMENTOS EXAGONALES.....	25
4.1	ANÁLISIS HECHO MEDIANTE EL PROGRAMA DE COMPUTACIÓN.....	25
4.2	INTRODUCCIÓN DE DIAFRAGMA.....	26
4.2.1	Análisis de Diafragma.....	27
4.3	TAMAÑOS DE DIAFRAGMA.....	28
4.3.1	Radio de Diafragma de 80 cm.....	28
4.3.2	Radio de Diafragma de 70 cm.....	31
CAPITULO 5	CONCLUSIONES.....	38
CAPITULO 6	REFERENCIAS.....	39
	TRABAJOS PRESENTADOS EN CONGRESOS.....	40

Resumen

En esta tesis se presenta la propuesta de un diseño de Telescopio compuesto por 37 segmentos esféricos hexagonales; colocados en forma escalonada, para detectar fluorescencia producida por los rayos cósmicos a su paso por la atmósfera terrestre. Dicho diseño es un arreglo similar al de espejos multi-hexagonales, los cuales quedaban definidos como una combinación de espejo monolítico y espejo de Fresnel de baja frecuencia. Sin embargo, en este caso se tiene la finalidad de obtener resultados aceptables que difieran de cálculos obtenidos previamente. Los parámetros de diseño fueron encomendados por el proyecto ***KLIPVE-TUS*** interesado en este tipo de telescopios. La intención es construir un dispositivo ligero que produzca tamaños de mancha de 1.5 cm de diámetro debido a las dimensiones de los fotodetectores en el plano imagen.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los primeros indicios¹ sobre la existencia de los rayos cósmicos surgieron en 1911²⁻¹², cuando el Austriaco Víctor F. Hess^{4, 5}, realizó una serie de mediciones durante ascensiones en globo; que mostraron que después de una disminución inicial, la radiación ionizante aumentaba espectacularmente su intensidad, con respecto de la distancia a la superficie de la Tierra. La conclusión fue clara, es decir, la radiación ionizante proviene del cielo y no de la Tierra. Con lo cual, en 1936, Víctor F. Hess^{4, 5}, recibió el Premio Nobel de Física por el descubrimiento de lo que hoy conocemos como rayos cósmicos²⁻¹².

Hoy en día, se sabe que los rayos cósmicos²⁻¹²; son partículas subatómicas que proceden del espacio exterior y que tienen una energía muy elevada debido a su gran velocidad, cercana a la velocidad de la luz. Esto se conoce, debido a que durante las décadas de 1930 y 1940, las tecnologías desarrolladas en ese momento, publicaron notables avances en el conocimiento experimental de dichas partículas energéticas²⁻¹².

El descubrimiento de los rayos cósmicos²⁻¹² dio origen a un campo de trabajo muy novedoso, para áreas como la Astrofísica, la física nuclear, la física de partículas elementales y la instrumentación óptica, de tal suerte que aun en nuestros días, los rayos cósmicos²⁻⁶ siguen siendo una fuente de estudio muy importante. Es por esta razón, que la comunidad científica sigue proponiendo desarrollar instrumentos ópticos para investigar el origen, propagación y composición química de estas partículas de muy alta energía que constantemente bombardean nuestro planeta. Por lo cual, surgen los diseños de telescopios detectores de fluorescencia^{6-7,14-16}, mediante los cuales, se puede obtener la información requerida para los centros de investigación. Tal como lo hace el observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger^{2, 13-14}, el cual recibe este nombre en honor a este científico pionero del área, del cual se hablará más adelante.

Ahora bien, las características generales de los telescopios detectores de fluorescencia²⁻¹², varían en cuanto a tamaño y forma. Es decir, no existe un prototipo de telescopio particular, para detectar esta radiación. Es por esta razón, que surge nuestro interés sobre el planteamiento del presente trabajo de tesis, no sin antes mencionar que en este trabajo; solo se describen las características ópticas de los telescopios detectores de fluorescencia, considerando a los rayos cósmicos como partículas elementales a detectar. Es decir, las propiedades teóricas de la física de partículas elementales y altas energías (como el modelo estándar), quedan fuera del alcance de este trabajo.

Por lo tanto, el objetivo general en este trabajo de tesis; es diseñar un telescopio de 37 segmentos exagonales colocados en forma escalonada, capaz de detectar la fluorescencia producida por los rayos cósmicos, en su paso por la atmósfera terrestre. Los parámetros de diseño fueron encomendados por el proyecto **KLIPVE-TUS** interesado en dicho telescopio. La intención es construir un dispositivo ligero que produzca tamaños de mancha de 1.5 cm de diámetro, debido a las dimensión de los fotodetectores en el plano imagen.

Para poder describir nuestro diseño y nuestros resultados correctamente, esta tesis se estructuro de la siguiente manera.

En el capítulo dos, describiremos una breve historia sobre el origen de los rayos cósmicos²⁻⁵. Adicionalmente, abordaremos los primeros diseños de telescopios detectores de fluorescencia^{6-7, 14-16}. Describiendo de manera general, las características ópticas que estos presentan.

En el capítulo tres, se presenta la propuesta de diseño de un Telescopio compuesto por 37 segmentos esféricos hexagonales, colocados en forma escalonada; para detectar la fluorescencia producida por rayos cósmicos a su paso por la atmósfera terrestre. Dicho diseño es un arreglo similar al de espejos multi-hexagonales, los cuales quedaban definidos como una combinación de espejo monolítico y espejo de Fresnel de baja frecuencia. Sin embargo, en este caso se tiene la finalidad de obtener resultados aceptables que difieran de cálculos obtenidos previamente.

En el capítulo cuatro se presenta un trazo exacto de rayos, para simular los rayos cósmicos provenientes del espacio exterior, para esto, se concidera un espejo multi-hexagonal como superficie reflectora. El objetivo de probar la eficiencia de un diseño de este tipo, y contar con un elemento reflector capaz de dar buen estudio a los rayos cósmicos de alta energía. El programa numérico se basa en el trazo exacto de rayos, que parten de una fuente puntual localizada en el punto (α, β, γ) , posteriormente se reflejan sobre la superficie óptica en el punto (x, y, z) y finalmente se concentran en el punto (x_0, y_0, z_0) en el plano imagen. Se muestran resultados cuantitativos de diferentes tamaños de mancha, que se producen en el plano imagen del sistema de detección. Aclarando que en este caso, se propone construir un sistema concentrador de energía y no un sistema formador de imagen, que produzca un tamaño de mancha de 1.5 centímetros de diámetro, con el objetivo de obtener un diseño que presente resultados aceptables.

Finalmente, se concluye en el capítulo cinco, con unas consideraciones generales derivadas del análisis y de los resultados obtenidos de este trabajo.

CAPITULO 2

DISEÑOS ÓPTICOS COSNTRUIDOS PARA LA DETECCIÓN DE LOS RAYOS CÓSMICOS

Bajo la necesidad de explicar lo que en sus inicios fue la llamada corriente oscura¹ (1785), la evolución científica propone con el fechado descubrimiento de los rayos cósmicos²⁻¹² (1912), tener medios para investigar el origen, propagación y composición química de dichas partículas ultra energéticas. Pese a lo anterior surgen diseños de instrumentos ópticos como los telescopios detectores de fluorescencia con el afán de proporcionar información requerida. En las siguientes líneas se describe una breve historia de los rayos cósmicos, mencionando también el origen del proyecto Pierre Auger^{2, 13-14}. Finalmente, en las últimas secciones de este capítulo se hace una revisión bibliográfica de los telescopios detectores de fluorescencia.

2.1 BREVE HISTORIA SOBRE LOS RAYOS CÓSMICOS

Desde hace varios siglos los investigadores habían notado que los cuerpos que se cargaban eléctricamente, terminaban siempre descargándose, incluso los electros copios que se usan para estas mediciones siempre se descargaban completamente; de modo que algo debería producir iones en el aire. Una posible explicación era que los materiales radiactivos que se encontraban en la tierra provocaban ionización de las moléculas del aire entre las placas de los electros copios.

De acuerdo con Rossi⁵⁻⁶, en 1911 el Austriaco Víctor F. Hess⁴⁻⁵, intrigado por estos descubrimientos y pensando que tal radiación debería disminuir con la altura; ya que, si se alejaba de los materiales radiactivos del suelo esta debería disminuir. Realizó una serie de ascensos en globo y encontró que efectivamente esta radiación disminuía gradualmente hasta una altura de 500 metros (*m*), pero posteriormente conforme subía, la radiación aumentaba llegando a ser 16 veces mayor a 5000 *m* de altura. Para interpretar sus resultados propuso una novedosa hipótesis para su tiempo; la radiación proviene del espacio exterior al percatarse que este efecto era igual de día y de noche por lo que no podía ser de origen solar.

Mas tarde; W. Kohlhorster⁷ en Alemania, confirmó la hipótesis de Hess hasta alturas de 9300 *m*. A pesar de la limitada exactitud de los instrumentos de aquella época, se podía decir que la radiación era uniforme. Sin embargo, su

origen extraterrestre y el poder de enorme penetración no fueron aceptados inmediatamente.

En 1925, Millican emprendió una serie de nuevos experimentos y le dio el nombre de Rayos Cósmicos a esta radiación^{5, 8}. En 1928 en colaboración con G.H. Cameron, hizo importantes estudios formados por nieve derretida de las montañas⁹ (en los cuales había agua libre de radiación). Si los rayos se creaban en el aire entonces entre más aire, mas radiación debía originar, por lo tanto se debía originar más radiación en el lago que se encontraba a una altura menor sobre el nivel del mar (debido a que la capa de aire sería mayor encima de tal lago). Con la precisión que le permitían sus instrumentos, Millican obtuvo resultados que le permitieron concluir que en la capa de aire no se producían los rayos cósmicos, por lo tanto venían de arriba y su origen era externo a la capa atmosférica.

En México la física de rayos cósmicos se inició con el trabajo de Manuel Sandoval Vallarta^{3, 10}. Estando en México en 1931, Manuel Sandoval recibe la visita de Arthur H. Compton, quién venía de un largo viaje por el pacífico hecho con el propósito de medir la intensidad de la radiación cósmica en muchos lugares a diferente latitud. Había salido de California a Hawai, a Nueva Zelanda y había vuelto por la costa de Perú y Panamá hasta México. Había observado que la intensidad de la radiación cósmica cambia con la latitud geomagnética siendo mínima cerca del ecuador geomagnético. Acompañado por Sandoval Vallarta hizo nuevas mediciones en nuestro país: en Orizaba, Veracruz, en la ciudad de México y finalmente en el nevado de Toluca¹⁰. De este modo se entero Manuel Sandoval Vallarta del descubrimiento de A. H. Compton. La observación del efecto de la latitud indicaba que la radiación cósmica esta constituida por partículas cargadas de electricidad que llegan a la tierra desde el espacio exterior moviéndose a gran velocidad. Siendo profesor del instituto de Massachussets Sandoval Vallarta propuso que midiendo el flujo de partículas cargadas que viene del cosmos es posible determinar el signo de su carga¹¹.

Hoy en día se sabe; que cuando un rayo cósmico choca con los núcleos de los átomos del aire, estos se rompen. Los productos de estos rompimientos, producen otros rompimientos a su vez al chocar con otros átomos, formando así una lluvia de partículas conocida como “chubasco atmosférico”¹², como se muestra en la figura 2.1, al llegar los rayos cósmicos a la atmósfera, tienen colisiones con los átomos que la componen y así producen: una cascada de rayos gama, comúnmente llamada cascada electromagnética, una cascada de mesones π y μ , llamada cascada mesónica y una cascada de protones y núcleos conocida como cascada nucleónica. Cuanto mayor es la energía del rayo cósmico primario, mayor es el área que abarcan dichas cascadas al llegar a la superficie terrestre.



Figura 2.1 Efecto que produce un rayo cósmico al chocar con la atmósfera terrestre¹².

Dados estos descubrimientos fue en 1938 cuando el Francés Pierre Auger^{2, 13-14}, detectó por primera vez chubascos atmosféricos extendidos, producidos por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera de la tierra.

En los siguientes años, incluso durante la segunda guerra mundial se siguieron estudiando los rayos cósmicos de lo cual se derivó no solo un nuevo campo de la Astrofísica, sino también aspectos muy trascendentes para la física nuclear y la física de partículas elementales. En nuestros días los rayos cósmicos siguen siendo una fuente de estudio muy importante. Así el afán humano de desentrañar los misterios de partículas de muy alta energía que constantemente bombardean nuestro planeta, ha llevado a la formación de una colaboración a nivel mundial para diseñar y construir dos grandes detectores llamado, observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger^{2, 13}, en honor a este científico pionero en el área, figura 2.2.



Figura 2.2 Científico que inicia el estudio de los rayos cósmicos².

2.2 RAYOS CÓSMICOS Y SU DIRECCIÓN DE LLEGADA.

Nuestro planeta recibe constantemente una lluvia de partículas cargadas, en promedio un flujo de 1000 partículas por metro cuadrado que arriban a la atmósfera terrestre. Este flujo de partículas (llamado rayos cósmicos) provienen en su mayoría de nuestra galaxia y de fuentes como son las supernovas y consisten en un 90% de protones, 9% de partículas alfa y el resto son partículas mas pesadas que el hidrógeno, pero las partículas de mayor energía en los rayos cósmicos se originan en otras galaxias de fuentes como los agujeros negros, las estrellas pulsares y los núcleos galácticos activos.

Los rayos cósmicos provenientes del espacio (primarios) que golpean las capas más externas de la atmósfera, sufren colisiones con los núcleos que allí se encuentran. De estas colisiones resultan lluvias de nuevas partículas elementales de todo tipo (como electrones, positrones, mesones, muones, etc.), las cuales chocan a su vez con otros núcleos formando nuevas partículas y así sucesivamente, formando el chubasco atmosférico, que eventualmente llega a la superficie. Estos chubascos de rayos cósmicos secundarios pueden alcanzar una extensión de varios kilómetros cuadrados, existiendo básicamente isotropía en la dirección de llegada. Esto es que los rayos cósmicos nos llegan con igual probabilidad desde todas las direcciones del espacio lo que puede explicarse teniendo en cuenta que son partículas cargadas y por tanto al moverse en el seno de los diversos campos magnéticos cósmicos, están sometidos constantemente a fuerzas que los desvían de su trayectoria. La estructura de estos campos es altamente irregular y como consecuencia se pierde toda la información acerca de la dirección de las fuentes cósmicas que los emitieron, como se muestra en la figura 2.3.

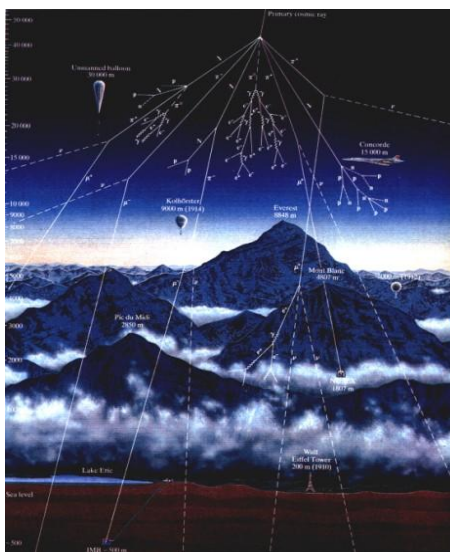


Figura 2.3 Ramificación de rayos cósmicos debido a colisiones con la atmósfera.

Por otro lado existen ciertas anomalías que afectan solo a los rayos cósmicos de baja energía y pueden ser explicadas como un efecto del campo magnético terrestre. Estos campos magnéticos pueden mantener confinados a los rayos cósmicos, de forma que para un campo y una región del espacio dado existe un rango de energías por debajo del cual ningún núcleo puede escapar. Este límite es mas alto cuanto mayor sea la intensidad del campo magnético y mayor el volumen ocupado. En realidad no se trata de un límite estricto de energía si no que la probabilidad de escapar es tanto mayor cuanto mayor sea la energía del núcleo. Esta propiedad permite explicar que el flujo de rayos cósmicos sea fuertemente decreciente con la energía.

2.3 BASES FÍSICAS HACIA EL PROYECTO PIERRE AUGER

El Proyecto Pierre Auger¹³ (PPA) tiene su concepción en una serie de congresos: Paris (1912), Adelaida (1913), Tokio (1993), y finalmente Fermilab (1995). Fue en este ultimo donde un grupo de mas de 100 científicos de diferentes países dan origen al reporte de diseño (Desing Report), impreso en noviembre de 1995, el cual, contiene un diseño base y un costo aproximado para el observatorio propuesto. El resultado de los arreglos de detectores de superficie y fluorescencia del pasado y del presente dan como origen al PPA.

Por su parte, México presenta un grupo constituido por más de 20 investigadores de diferentes institutos como: UNAM, CINVESTAV, Universidad de Michoacán y la BUAP, los cuales forman parte del Proyecto Auger¹⁴⁻¹⁵. Este grupo de trabajo lleva por nombre “Manuel Sandoval Vallarta”, en honor al destacado investigador Mexicano quien realizó importantes aportaciones sobre el estudio de los rayos cósmicos. De la misma forma dicho equipo de trabajo ha realizado varias aportaciones al Proyecto Pierre Auger tanto en los detectores de superficie como en los detectores de fluorescencia.

El Proyecto Pierre Auger (PPA), en un amplio esfuerzo internacional para realizar el detallado estudio de los rayos cósmicos de las más altas energías. Propone la utilización de un nuevo diseño de telescopio segmentado de arreglo multi-hexagonal para detectar cascadas de partículas cósmicas las cuales son la base de este proyecto, un diseño de detectores de superficie acoplado con un detector de fluorescencia forman un poderoso instrumento para los propósitos de investigación: medir la dirección de arribo, energía y composición de la masa de los rayos cósmicos con energías del orden de 10 a la 20 eV.

2.4 TELESCOPIOS DETECTORES DE FLUORESCENCIA

Como una forma de recopilación de instrumentos ópticos para registrar las extensas cascadas provocadas por los rayos cósmicos^{5, 8,12} en el aire, haremos mención de diseños de telescopios que han sido utilizados para la detección de fluorescencia, especificando las diferencias que estos presentan así como la manera en que han venido evolucionando.

Sabemos que la energía de radiación que producen los rayos cósmicos varía en muchos ordenes de magnitud (10^7 - 10^{20} eV.) por lo tanto, es necesario emplear diversos diseños de detectores para caracterizarla, dependiendo del intervalo de energía de estudio. Como se muestran en la siguiente figura 2.4.

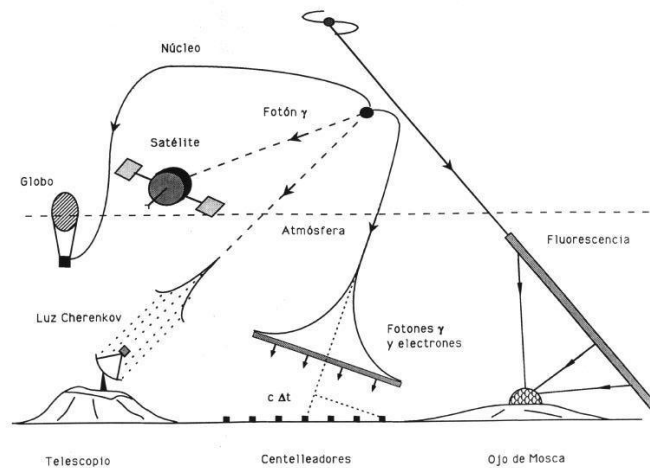


Figura 2.4 Formas directas de detección de rayos cósmicos primarios¹³; mediante globos y satélites o de manera indirecta con dispositivos en el suelo que registran la cascada de partículas.

2.4.1 Primeros Diseños de Telescopios Detectores de Fluorescencia

Son los telescopios detectores de fluorescencia de Vulcano Ranch y Fly's Eye¹⁶ (figuras 2.5 y 2.6) para los cuales se usan espejos monolíticos con diafragma en el espejo. Se llaman espejos monolíticos a aquellos que están formados por una sola pieza, la conicidad que estos presentan es de tipo cóncava, pues tienen la singularidad de concentrar rayos de luz en una zona pequeña.

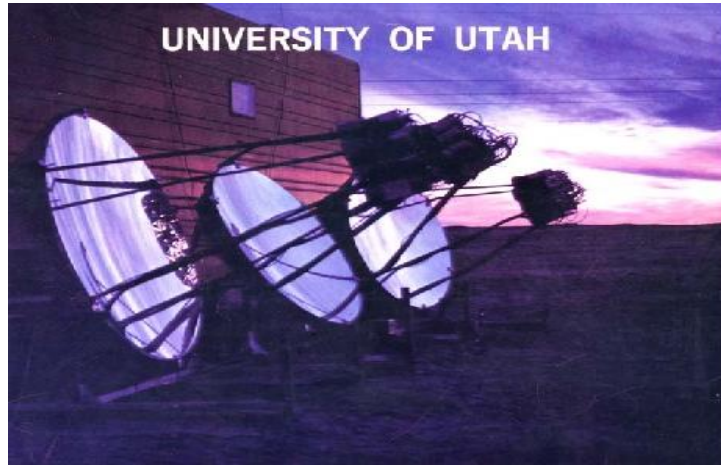


Figura 2.5 Arreglo de espejos monolíticos¹⁶.

En particular el conjunto de telescopios llamado ojos de mosca¹⁶, figura 2.6, apuntando a una zona del cielo, consta de dos detectores de los cuales proviene el nombre y permite detectar la llegada de rayos cósmicos de muy alta energía (10^{17} eV.). Mediante la observación de toda la cascada su eficiencia es muy alta ya que puede cubrir un volumen de la atmósfera de muchos kilómetros cúbicos.



Figura 2.6 Arreglo ojos de mosca¹⁶.

Se pudiera pensar que este tipo de detectores es totalmente eficiente, pues si bien es cierto que fue el primero en proyectar el desarrollo longitudinal de eventos de cascadas individuales, es preciso mencionar que la presencia de un diafragma cercano al espejo lleva a la aparición de coma, la cual es una aberración que empeora la detección de la cascada.

2.4.2 Arreglos de Telescopios Perfilados hacia el Proyecto Pierre Auger

Es el telescopio Array propuesto por la Universidad de Tokio y la Universidad de Utah, un detector de fluorescencia que esta en la etapa de prototipo. El cual emplea un espejo parabólico con un arreglo de detectores en su plano focal. El arreglo esta diseñado para ser sensible también a rayos gamma de baja energía, arriba de 100 GeV, mediante la detección de luz Cherenkov que es producida por una partícula cargada en movimiento a través de un medio transparente, vista básicamente en detectores de agua.

Este tipo de telescopio no es adecuado para detectar fluorescencia producida en el cielo por los rayos cósmicos, pues el uso de espejos parabólicos presenta una considerable aberración de coma, además que cada uno de ellos cubrirá un campo de visión pequeño.

Antes de mencionar la razón quizás mas fuerte del por que este diseño no resulta ser adecuado a las necesidades requeridas para la evaluación de la calidad de la imagen, debemos mencionar que una cascada de rayos cósmicos aparece como una mancha de luz ultra violeta (UV) en rápido movimiento describiendo un gran camino circular a través de la oscuridad del cielo, luego, el tamaño angular de la mancha depende tanto de la distancia como de la orientación del eje de la cascada.

Regresando al Arreglo de Telescopio. Al graficar el diagrama de manchas en el plano imagen colocado en varios puntos, se observa claramente que en eje la imagen es perfecta pero al incrementar el campo de visión a 15 grados la mancha crece considerablemente, la mancha crece aun mas, por ejemplo para un campo de visión de 30 grados el tamaño es de 120 mm, con lo que podemos concluir que no es adecuado para las necesidades requeridas.

Por su parte Hi-Res⁶⁻⁷, el observatorio de rayos cósmicos de alta resolución, muestra en su análisis de detectores de fluorescencia; un espejo esférico segmentado con un arreglo de fotodetectores, 14 espejos esféricos $f/1.16$, con un diámetro de dos metros para coleccionar la luz en una porción de 0.95 sr del cielo. El plano imagen de cada espejo presenta un arreglo de 256 fotodetectores de una pulgada de diámetro los fotomultiplicadores dan una segmentación angular de 1 grado de resolución.

Nuevamente este diseño es afectado por aberraciones, en este caso esférica y coma. Se tiene relación de la intersección de los puntos de varios rayos sobre el mejor plano imagen, obteniendo que en eje óptico las imágenes son de

un grado, pero si se incrementa el campo de visión a 30x30 grados, como el caso anterior la mancha crece considerablemente esto es hasta 7 u 8 veces con respecto al tamaño de mancha sobre eje. Por lo consiguiente este diseño tampoco es el más apto para los fines propuestos.

2.4.3 Propuesta Mejorada, Telescopio Schmidt

Básicamente, pudiéramos decir que utiliza la técnica pionera de Fly's Eye¹⁶ de la Universidad de Utah, pero a diferencia, el Telescopio Schmidt¹⁴ propuesto elimina la aberración de coma al poner el diafragma en el centro de curvatura del espejo dando origen a lo que se conoce como cámara Schmidt sin placa correctora. Un espejo esférico con un diafragma en el plano del centro de curvatura proporciona imágenes que serán afectadas por aberración esférica y curvatura de campo, las cuales pueden ser corregidas al introducir dentro del diafragma una placa delgada de vidrio llamada (placa correctora, en el caso de aberración esférica). Pero en la Cámara Schmidt la calidad de la imagen es uniforme sobre todo el campo de visión y para un ángulo de oblicuidad la superficie imagen está centrada sobre el centro de curvatura a fin de corregir la curvatura de campo, por lo que el diseño propone mantener la superficie imagen esférica para corregir la curvatura de campo eliminando así la placa correctora y a cambio se incrementa el foco mediante al radio de curvatura logrando un valor aceptable de la aberración esférica, y de esta razón se desprende el nombre de Cámara Schmidt sin placa correctora, mostrado en la siguiente figura 2.7.

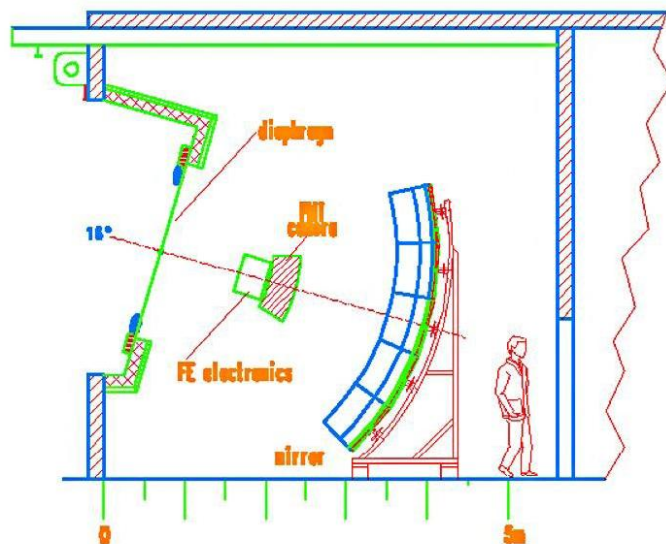


Figura 2.7 Esquema del telescopio Schmidt para el proyecto Pierre Auger¹⁴.

Tomando como fundamento lo anterior podemos mencionar que este prototipo de telescopio funciona exitosamente, que no solo mejora la imagen en el campo de 15X15 grados, sino que además mantiene la calidad sobre eje óptico como dentro de un campo de visión de 30X30 grados. Esto es, la distribución de energía (tamaño de mancha) es uniforme sobre todo el campo de visión. Es por esta razón que la propuesta de este diseño es la más aceptable y por tanto destinada al Proyecto Pierre Auger (PPA).

Es preciso mencionar que para el diseño óptico del detector de fluorescencia del PPA, hay tres parámetros que se deben mantener fijos, especificados en la (figura 1.7), el diámetro de diafragma, (1470 milímetros), el campo de visión (30 grados) y un tamaño de imagen de un grado.

2.4.4 Espejos de Fresnel de Baja Frecuencia con Perfil Circular y Poligonal

A diferencia de los Espejos Monolíticos los Espejos de Fresnel de Baja Frecuencia¹⁷ (EFBF), están constituidos por secciones anulares de dos o más espejos cónicos de tal manera que el volumen que ocupan es menor que el que ocuparía un espejo monolítico y se dicen de baja frecuencia cuando los efectos difractivos debido a los anillos son despreciables. Por esta razón necesitan una configuración diferente para mostrar eficiencia en cuanto a los tamaños de mancha, para esto se llevan a cabo modificaciones en la posición del diafragma situándolo no en el centro de curvatura del espejo central pues por falta de simetría de rotación de rayos alrededor del centro de curvatura no es eliminada la aberración de coma, entonces se propone posicionar el diafragma cercano al foco corrigiendo así la aberración de coma y quedando esta como función de la aberración esférica, ligada por la ecuación de Kingslake. (Referencia)

En lo que se refiere a la propuesta de cambiar el perfil circular por un poligonal, se hace pensando en minimizar el desperdicio de material, pues al construir un perfil poligonal solo se requieren cortes rectos, por lo que el uso de barrenos especiales es descartado, así mismo se disminuye radicalmente la probabilidad de fisuras de vidrios. Esto quiere decir que el cambio es factible pues los tamaños de mancha son similares al perfil circular, comprobándolo mediante la simulación numérica de diafragma cercano al foco y perfil poligonal.

2.4.5 Espejos Multihexagonales

Como una combinación de los espejos monolíticos y de los EFBF, surgen los Telescopios de Espejos Multi-hexagonales (EMH), compuestos de espejos esféricos con borde hexagonal con vértices colocados sobre un plano. La

orientación de cada espejo es de tal manera que todos los centros de curvatura de los segmentos están sobre el eje óptico.

Al igual que en los EFBF el acotar los tamaños de mancha radicaba en la posición del diafragma para los EMH la ubicación del diafragma será también cercana al foco, pero además en este diseño se propuso un aumento en el radio de curvatura disminuyendo aun mas los tamaños de mancha; sin embargo, el aumento del radio de curvatura de los espejos individuales aumenta el volumen del telescopio. Otra diferencia es que los espejos hexagonales que conforman a los EMH son todos iguales y se hacen de manera independiente, estos EMH tienen dos ejes principales (en la dirección de 0, y en la dirección de 30 grados) sobre los cuales el comportamiento de los espejos es distinto.

A diferencia del trabajo realizado en la tesis de maestría de Jordán Lima, proponemos trabajar sobre un tipo de diseño multi-hexagonal, compuesto por 37 segmentos esféricos hexagonales que forman el contorno de un Telescopio Detector de Fluorescencia. Para ello, desarrollamos un programa de trazo exacto de rayos para 37 segmentos hexagonales dispuestos en forma escalonada, bajo la siguiente idea. Un rayo que parte de una fuente puntual localizada en el punto (α, β, γ) , se refleja en la superficie óptica en el punto (x, y, z) , para posteriormente concentrarse en el punto (x_0, y_0, z_0) sobre el plano imagen.

Realizando un análisis de los telescopios detectores de fluorescencia, vemos que hasta el momento; los sistemas ópticos empleados a excepción de la Cámara Schmidt sin placa correctora, tienen deficiencias. Es bien sabido que los telescopios emplean diseños de espejos esféricos o parabólicos para mejorar la calidad de la imagen, teniendo como resultado que solo con la propuesta de la Cámara Schmidt la imagen es mejorada.

Se hace mención y se propone extender en siguientes capítulos un diseño de espejos multi-hexagonales, con el objetivo de construir un sistema concentrador de energía y no un sistema formador de imagen que produzca un tamaño de mancha de 1.5 centímetros de diámetro mediante el desarrollo de un programa de trazo exacto de rayos, con el objetivo de obtener un diseño que presente resultados aceptables.

CAPÍTULO 3

ESPEJO SEGMENTADO.

Este capítulo esta destinado para presentar la propuesta de diseño de un Telescopio compuesto por 37 segmentos esféricos hexagonales, dispuesto para detectar fluorescencia producida por rayos cósmicos a su paso por la atmósfera terrestre.

Retomando parte del trabajo hecho por Jordán Lima sobre espejos multi-hexagonales los cuales quedaban definidos como una combinación de espejo monolítico y espejo de Fresnel de baja frecuencia, procedemos a trabajar con un tipo de diseño análogo, con el objetivo de obtener resultados novedosos, pero mas aun, eficientes y que difieran de cálculos previamente obtenidos.

3.1 NUEVO DISEÑO DE ESPEJO MULTI-HEXAGONAL

En esta sección se reporta el desempeño y construcción de un telescopio para detectar fluorescencia, (figura 2.1) el diseño del telescopio se hace usando segmentos hexagonales dispuestos en forma escalonada a diferencia de diseños anteriores¹³⁻¹⁷ donde la superficie reflectora es esférica. Este nuevo diseño presenta algunas ventajas; como son la reducción de volumen del telescopio y una estructura de soporte más simple. Cada segmento hexagonal tiene 20 centímetros de arista. El área colectora de energía será equivalente a un área circular de 140 centímetros de diámetro. El diseño del telescopio se realizara para un campo de visión de 20 grados. El tamaño del detector consistirá en un arreglo de 16X16 fotodetectores de 1.5 centímetros de diámetro, cada detector captara radiación para campos de visión de 1.18 grados. El ensamble de los segmentos permite aumentar la superficie óptica para obtener una mayor concentración de luz, en este procedimiento se debe cuidar disminuir aquellos efectos que deterioran la calidad de la imagen. El objetivo de este diseño es construir un sistema concentrador de energía y no un sistema formador de imagen que produzca un tamaño de mancha de 1.5 centímetros de diámetro.

La orientación de cada espejo es de tal manera que todos los centros de curvatura de los segmentos están sobre el eje óptico pero recorridos dependiendo de su posición en la estructura de soporte.

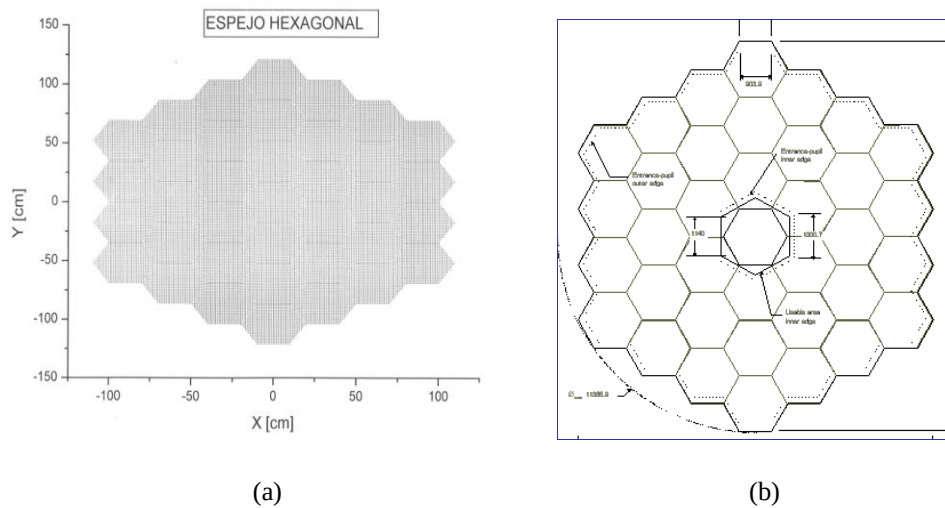


Figura 3.1 Imagen Esquemática de un Espejo de 37 Segmentos Esféricos Hexagonales dispuestos en forma escalonada, para detectar la fluorescencia producida por los Rayos Cósmicos

3.1.1 Desempeño de los fotodetectores

El centelleo ultravioleta de fotones es producido por moléculas de nitrógeno excitadas por el paso de partículas cargadas producidas en el chubasco electromagnético²⁻⁵. Los fotones *UV* se propagan en la atmósfera en dirección de los detectores. Los fotones *UV* son recolectados por medio de un espejo y enfocados a un arreglo de tubos foto multiplicadores (PMT), los cuales miden el flujo de fotones contando fotoelectrones leídos por un sistema digitalizador.

La función del detector es la medición del flujo de fotones incidentes en el espejo. Para ello se debe hacer la calibración de la respuesta de los detectores tomando en cuenta lo que sigue:

- Reflectividad del Espejo.
- Alineación del Telescopio y área Efectiva.
- Propiedades ópticas del Espejo, tamaño de mancha y aberraciones.
- Trasmisión de líneas ultravioleta a través del filtro.
- Sensibilidad absoluta que nos dará la eficiencia cuántica y ganancia de foto tubos.

Lo anteriormente explicado complementa la electrónica del instrumento detector de fluorescencia, que es parte fundamental para detectar partículas

ultra energéticas y con ello tener estudio de las mismas y finalmente obtener información de las fuentes que las producen. Por otro lado, en este diseño se analizan los conceptos ópticos, por lo que las cuestiones electrónicas; quedan fuera del alcance de este trabajo.

La caja de detectores presenta las siguientes medidas. El diámetro del detector será de 1.5 centímetros y para un arreglo de 16X16 fotodetectores se tiene un área de 576 cm^2 . Del centro hacia cada uno de los cuatro lados se posicionan 8 detectores de 1.5 cm. de diámetro, con lo cual resulta un tamaño de 12 centímetros hacia cualquier extremo de la caja (figura 3.2).

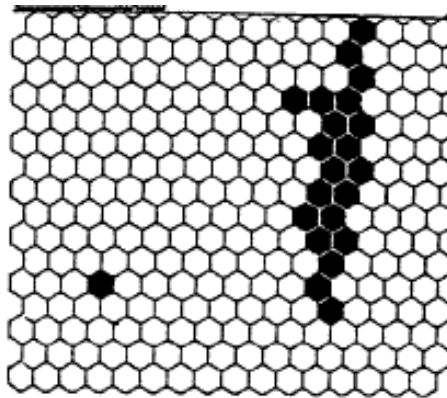


Figura 3.2 Pantalla de 16X16 fotodetectores.

3.2 DEFINICIÓN EXPLICITA DE CONCEPTOS QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO

Obviamente, será necesario referirnos a conceptos que están involucrados en la propuesta de diseño, así como los parámetros que intervienen en la obtención de resultados, para finalmente hacer una comparación de nuestro trabajo, con propuestas de otros autores.

3.2.1 Tamaño de Mancha

Una cascada de rayos cósmicos aparece como una mancha de luz ultravioleta (UV), en rápido movimiento a través del cielo, luego el tamaño de la mancha depende tanto de la distribución como de la orientación del eje de la cascada.

El tamaño de manchas obtenido con un trazo exacto de rayos nos da información sobre la distribución de energía. Si a cada rayo se le asocia la misma fracción de energía del total que pasa por el diafragma, la densidad de puntos de la mancha representa una medida de la potencia de energía (irradiancia) en la imagen.

Como se mencionó anteriormente los diagramas de mancha son estudiados estadísticamente asociándoles desviaciones estándar medias (RMS) que acotan el radio (RMS radial) de la campana gaussiana que encierra un 68% de la energía total.

El trazo de rayos y el tamaño de mancha, son conceptos que son parte fundamental para obtener resultados por simulación; Además, con esta metodología se está incluyendo los efectos de la presencia de las aberraciones.

3.2.2 Aberraciones en la formación de la imagen

El trazo exacto de rayos o cualquier otro tipo de mediciones que puedan ser efectuadas sobre un sistema prototipo; ciertamente mostrará algunas inconsistencias con la descripción debida de la teoría paraxial. Tales diferencias respecto a las condiciones ideales de la óptica Gaussiana son conocidas como aberraciones. Tradicionalmente se habla de la aberración esférica, coma y astigmatismo. Otras que deforman también la imagen son la curvatura de campo y la distorsión.

Sabemos que las superficies esféricas dan imágenes perfectas únicamente en la región paraxial. Para nuestro tipo de diseño, nos interesa la corrección de la aberración de coma, la cual es la que pudiera tener mayor efecto en la formación de la imagen. Se sabe que cuando un haz de luz incide oblicuamente al eje óptico aparece la aberración de coma. La falta de simetría en la imagen de la coma la hace la peor de las aberraciones, pues cuando en principio se debiera tener un pequeño punto redondo de luz, se obtiene como una mancha en forma de cometa con una fuerte concentración de luz cerca del rayo principal y un desvanecimiento gradual a lo largo de la cola de la mancha.

3.2.3 Círculo de Mínima Confusión

Este es un concepto importante relacionado con la posición del mejor plano imagen. El círculo de mínima confusión es la zona más pequeña, en la que los rayos cruzan de manera perpendicular al eje óptico. En otras palabras es el lugar donde se tiene la máxima concentración de los rayos de luz, y por tanto de energía.

En el capítulo 4, tendremos que referirnos a este círculo de mínima confusión cuando establezcamos una posición adecuada para la pantalla de observación.

3.3 TRAZO EXACTO DE RAYOS

Se hace un programa de trazo exacto de rayos, para obtener el desempeño de un telescopio multi-hexagonal (**TMH**), para detectar fluorescencia. El telescopio está compuesto por 37 segmentos hexagonales con defasamientos entre ellos. Con el programa de trazo exacto de rayos se obtiene información de los tamaños de mancha.

3.3.1 Deducción de Sagita

La bien conocida ecuación para la sección transversal circular de una esfera con centro en $z=R$ es

$$s^2 + (z - R)^2 = R^2, \quad (3.1)$$

donde

$$s^2 = x^2 + y^2. \quad (3.2)$$

Aquí a z se le llama sagita y es la distancia desde el plano x, y ; a un punto sobre la superficie.

Al despejar la sagita se obtiene que:

$$z = R \pm \sqrt{R^2 - s^2}. \quad (3.3)$$

La sagita de la Ec. 3.3 falla para superficies planas. Para eliminar este problema se toma otra expresión alternativa. La Ec. 3.1 puede desarrollarse para obtener. :

$$s^2 + z^2 - 2zR = 0, \quad (3.4)$$

con lo cual se obtiene

$$z(z - 2R) = -s^2, \quad (3.5)$$

que es fácilmente arreglada en la forma

$$z = -\frac{s^2}{z - 2R}. \quad (3.6)$$

Si en esta Ec. (3.6) se sustituye $z = R - \sqrt{R^2 - s^2}$, la expresión anterior toma la forma

$$z = \frac{s^2}{R - \sqrt{R^2 - s^2} - 2R}, \quad (3.7)$$

$$z = \frac{s^2}{-R - \sqrt{R^2 - s^2}}, \quad (3.8)$$

$$z = \frac{s^2/R}{1 + \sqrt{1 - s^2/R^2}}, \quad (3.9)$$

Utilizando la curvatura $c = 1/R$ la Ec. 3.9 se convierte en

$$z = \frac{s^2 c}{1 + \sqrt{1 - s^2 c^2}}. \quad (3.10)$$

Ecuación que utilizaremos para describir la sagita de superficies esféricas o planas. La Ec 3.10 no presenta el problema de indefinición como lo tiene la Ec. 3.3.

Una cónica es una superficie de revolución definida por la ecuación

$$s^2 - 2zR + (K+1)z^2 = 0, \quad (3.11)$$

Donde K es la constante de conicidad. La sagita para estas cónicas de revolución es

$$z = \frac{1}{K+1} (R - \sqrt{R^2 - (K+1)s^2}), \quad (3.12)$$

viendo que la expresión falla para el paraboloide ($K = -1$) y para esferas $K = 0$

Una mejor representación es.

$$z = \frac{s^2 c}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2 s^2}}. \quad (3.13)$$

la cual es válida para cualquier tipo de cónica.

3.3.2 Trazo de Rayos

El trazo de rayos considera una fuente puntual de luz en un punto $P(\alpha, \beta, \gamma)$. Dicha fuente emite un frente de onda esférico trasladándose del punto $P(\alpha, \beta, \gamma)$, a un punto $P(x, y, z)$ sobre la superficie reflectora, para posteriormente reflejarse a un punto imagen $P(x_0, y_0, z_0)$.

La dirección de la trayectoria del rayo incidente a la superficie reflectora esta denotada por el vector $\hat{s}_i$ el cual es igual a

$$\hat{s}_i = \frac{(x - \alpha, y - \beta, z - \gamma)}{M}, \quad (3.14 \text{ a))}$$

M es la magnitud del vector definida como

$$M = \sqrt{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z - \gamma)^2} \quad (3.14 \text{ b))}$$

El rayo reflejado se representa por el vector igual a

$$\hat{s}_2 = \hat{s}_1 - 2(\hat{s}_1 \cdot \hat{N})\hat{N}, \quad (3.15)$$

obtenida de la Ec. vectorial para la reflexión.

Usando $\hat{s}_1$ y sustituyendo en $\hat{s}_2$ resulta

$$\hat{s}_2 = \frac{(x - \alpha, y - \beta, z - \gamma)}{\hat{N}} - 2 \frac{(x - \alpha, y - \beta, z - \gamma)}{\hat{N}} \left(\frac{z_x, z_y, -1}{O} \right) \left(\frac{z_x, z_y, -1}{O} \right), \quad (3.16)$$

Donde $\hat{N}$ es el vector normal obtenido como el gradiente y está dado de la siguiente manera

$$\hat{N} = \frac{z_x, z_y, -1}{O}, \quad (3.17)$$

donde

$$z_x = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{R^2 - (K+1)s^2}}, \quad (3.18)$$

$$z_y = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{R^2 - (K+1)s^2}}, \quad (3.19)$$

$$z_z = \frac{\partial(-z)}{\partial z} = -1, \quad (3.20)$$

y O es la magnitud del vector definida como

$$O = \sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2}. \quad (3.21)$$

3.3.3 Ecuación de Reflexión Vectorial

El vector de reflexión $\hat{S}_2$, tiene dependencia en las tres coordenadas.

$$\hat{S}_2 \equiv (\hat{s}_{2x}, \hat{s}_{2y}, \hat{s}_{2z}) \quad (3.22)$$

entonces de la expresión dada en la ecuación (3.16) cada una de estas quedará definida de la siguiente manera:

$$\hat{s}_{2x} = \frac{1}{\hat{N}O^2} \left\{ (x-\alpha)O^2 - 2z_x \left[(x-\alpha)z_x + (y-\beta)z_y - (z-\gamma) \right] \right\}, \quad (3.23)$$

$$\hat{s}_{2y} = \frac{1}{\hat{N}O^2} \left\{ (y-\beta)O^2 - 2z_y \left[(x-\alpha)z_x + (y-\beta)z_y - (z-\gamma) \right] \right\}, \quad (3.24)$$

$$\hat{s}_{2z} = \frac{1}{\hat{N}O^2} \left\{ (z-\gamma)O^2 - 2 \left[(x-\alpha)z_x + (y-\beta)z_y - (z-\gamma) \right] \right\}, \quad (3.25)$$

Luego, a partir de los cosenos directores y considerando solo de la cónica al punto de observación tenemos la siguiente relación.

$$\frac{x_0 - x}{s_{2x}} = \frac{y_0 - y}{s_{2y}} = \frac{z_0 - z}{s_{2z}}, \quad (3.26)$$

donde

$$x_0 - x = (z_0 - z) \frac{s_{2x}}{s_{2z}}, \quad (3.27)$$

y

$$y_0 - y = (z_0 - z) \frac{s_{2y}}{s_{2z}}, \quad (3.28)$$

con lo que resulta

$$x_0 - x = (z_0 - z) \frac{(x - \alpha)O^2 - 2z_x[(x - \alpha)z_x + (y - \beta)z_y - (z - \gamma)]}{(z - \gamma)O^2 + 2[(x - \alpha)z_x + (y - \beta)z_y - (z - \gamma)]}, \quad (3.29)$$

$$y_0 - y = (z_0 - z) \frac{(y - \beta)O^2 - 2z_y[(x - \alpha)z_x + (y - \beta)z_y - (z - \gamma)]}{(z - \gamma)O^2 + 2[(x - \alpha)z_x + (y - \beta)z_y - (z - \gamma)]}, \quad (3.30)$$

En estas expresiones; x_0 y y_0 son las coordenadas, en el plano imagen, z_0 es la posición del plano imagen.

Hemos dado explicación de conceptos que intervendrán en la realización de nuestro programa, así como de la teoría de trazo exacto de rayos, misma que al involucrarla con métodos numéricos nos ayudara a predecir aberraciones y obtener diagramas de mancha aceptables. En el siguiente capítulo se dará explicación del funcionamiento del programa y se presentarán los resultados obtenidos en las simulaciones.

CAPÍTULO 4

DESEMPEÑO DE TELESCOPIO DE 37 SEGMENTOS ESFÉRICOS HEXAGONALES

Desarrollamos un programa de trazo exacto de rayos; para un espejo multi-hexagonal, con pequeños corrimientos entre cada uno de los segmentos. Con el objeto de probar la eficiencia de un diseño de este tipo, además de contar con un elemento reflector capaz de dar buen estudio a los rayos cósmicos de alta energía.

El programa se basa en el trazo exacto de rayos (Figura 4.1) que parten de una fuente puntual localizada en el punto (α, β, γ) , posteriormente se reflejan sobre la superficie óptica en el punto (x, y, z) y finalmente se concentran en el punto (x_0, y_0, z_0) en el plano imagen.

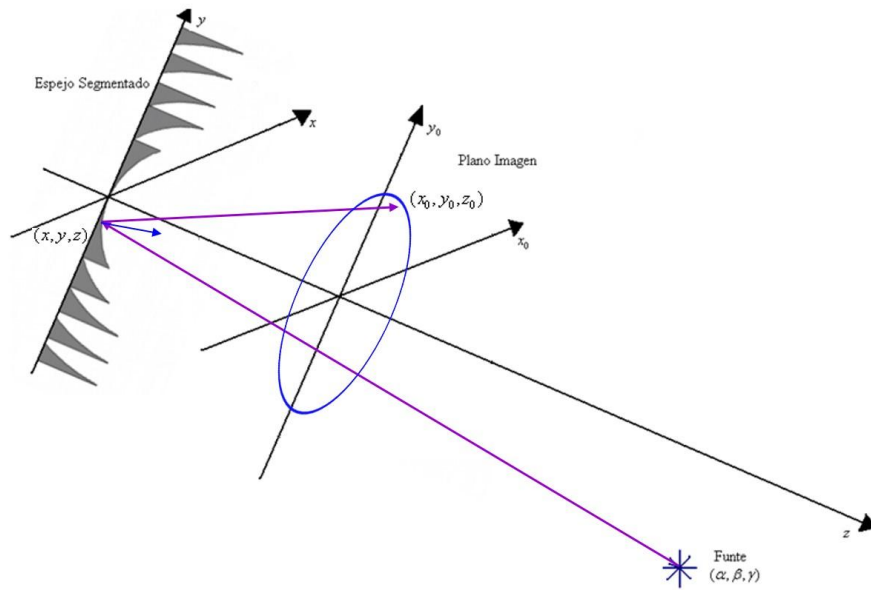


Figura 4.1 Trazo exacto de rayos que parten de una fuente puntual

4.1 ANÁLISIS HECHO MEDIANTE EL PROGRAMA DE COMPUTACIÓN

En la actualidad existen programas de computación muy elaborados para que el análisis se realice automáticamente. Hablando en forma general le damos a la computadora un factor de calidad para lograr un objetivo determinado, es decir esencialmente se le esta preguntando a la computadora cuanto esta dispuesto a

tolerar nuestro diseño real, luego damos el diseño aproximado de algún sistema, mencionando los parámetros que pueden permanecer constantes, como el radio de curvatura, entre otros, finalmente la computadora trazara varios rayos a través del sistema y evalúa los errores de la imagen.

El programa, está diseñado para hacer variar los parámetros de forma conveniente, según los requerimientos en la obtención de resultados.

4.2 INTRODUCCIÓN DE DIAFRAGMA

La presencia de aberraciones en la formación de la imagen, pueden corregirse cambiando ligeramente la forma de alguna lente o delimitando el número de rayos mediante la introducción de un diafragma.

Para el caso de nuestro diseño de espejo multihexagonal sugerimos el uso de un diafragma que estará situado a su distancia focal, es decir a 150 centímetros, ya que la superficie presenta un radio de curvatura de 300 centímetros para cada uno de lo 37 segmentos hexagonales. En esta posición podemos corregir aberraciones que deterioran la calidad de la imagen, en particular la aberración de coma, la cual aparece al incrementar el campo de visión y movernos fuera de eje.

El radio de diafragma puede ser elegido de manera conveniente, especificando el comportamiento de los rayos que pasan a través de dicho diafragma, como se muestra en la figura 4.2. Por otro lado, debemos cuidar el tamaño de la apertura del diafragma, para obtener resultados que mejoren los tamaños de mancha y no hacer reducida el área colectora y a su vez el campo de visión.

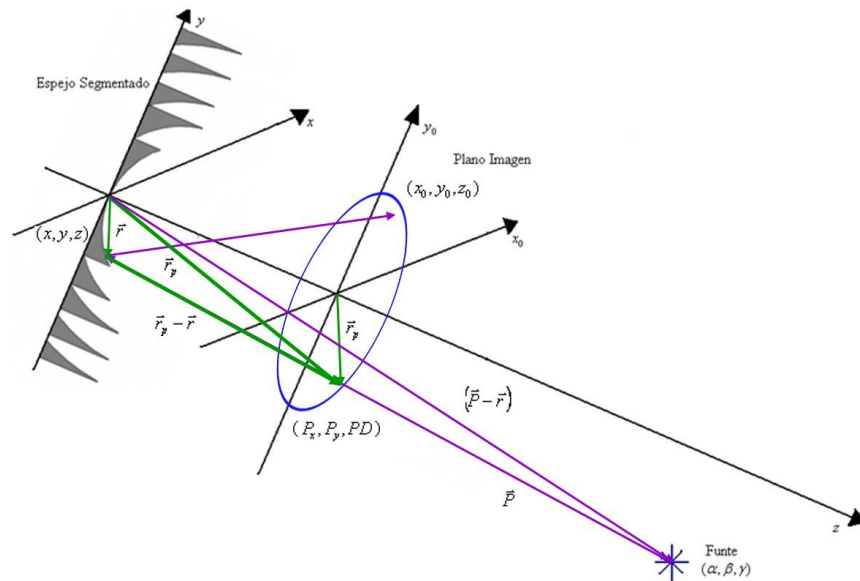


Figura 4.2 Análisis de los rayos que pasan por el diafragma.

4.2.1 Análisis del Diafragma

Definimos el vector de posición $\mathbf{r}_p$ como:

$$\vec{r}_p = P_x, P_y, PD \quad (4.1)$$

Donde P_x, P_y, PD son las coordenadas de un punto *del vector* $\mathbf{r}_p$ en el plano del diafragma, el cual coincide con el plano imagen. Por otro lado, definimos a $\mathbf{P}$ como el vector que representa el rayo medido desde la fuente (α, β, γ) hasta el plano (x, y) del espejo. De igual manera definimos a $\mathbf{r}$ como el vector medido desde el plano (x, y) del espejo hasta el punto (x, y, z) que proviene del rayo $\mathbf{P}$.

Si hacemos una proyección del vector $\mathbf{r}_p$ desde el plano del espejo, este vector tendrá una representación que será medida desde el plano (x, y) como se indica en la figura 4.2. De esta manera podemos obtener la diferencia entre los vectores $\mathbf{r}_p - \mathbf{r}$, la cual esta representada como el vector que une el punto (x, y, z) con el punto (P_x, P_y, PD) .

Una vez especificados cada una de los parámetros involucrados en el trazo de rayos, podemos definir las siguientes expresiones:

$$\vec{r}_p - \vec{r} = t(\vec{P} - \vec{r}) \quad (4.2)$$

De esta manera, podemos obtener la diferencia entre estos vectores, es decir $\mathbf{P} - \mathbf{r}$ los cuales representan el vector medido desde el plano (x, y) hasta el punto (α, β, γ) de la fuente.

$\Rightarrow$

$$\mathbf{r}_p = \mathbf{r} + t(\mathbf{P} - \mathbf{r}) \quad (4.3)$$

Donde t esta definido de la siguiente manera

$$t = \frac{PD - z}{\gamma - z} \quad (4.4)$$

Finalmente podemos obtener la posición para cada una de las coordenadas, expresadas de la siguiente manera:

$$P_x = x + \frac{(PD - z)(\alpha - x)}{\gamma - z} \quad (4.5)$$

$$P_y = y + \frac{(PD - z)(\beta - y)}{\gamma - z} \quad (4.6)$$

$$PD = z + \frac{(PD - z)(\gamma - z)}{\gamma - z} \quad (4.7)$$

De acuerdo a la deducción de la posición de cada una de las coordenadas podemos concluir lo siguiente; un rayo golpea al espejo multihexagonal cuando incide por la pupila de entrada, de tal forma que no sobrepasa la distancia RD (Radio de Diafragma), es decir, dicho rayo o rayos deberán estar forzosamente contenidos en las dimensiones del diafragma de apertura. Luego entonces, los rayos que estarán contenidos en el diafragma de apertura serán todos aquellos que cumplan la siguiente relación.

$$RD \leq \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (4.8)$$

De esta forma, podemos tener control del número de rayos efectivos que llegan a la superficie reflectora, lo cual dependerá directamente del tamaño de diafragma utilizado.

4.3 TAMAÑOS DE DIAFRAGMA

Se propone trabajar con dos distintos tamaños de diafragma, los cuales serán tratados de manera independiente para determinar que tamaño de diafragma es conveniente usar en el diseño final de nuestra superficie reflectora. Dependiendo de los tamaños de mancha obtenidos.

4.3.1 Radio de diafragma 80 cm

El primer radio de diafragma propuesto fue de 80 centímetros, con este tamaño de diafragma, el mejor plano imagen está situado a 142.5 centímetros de la superficie reflectora, esto lo sabemos haciendo un barrido en eje hasta encontrar el tamaño mínimo de mancha. Posteriormente nos movemos fuera de eje y calculamos los tamaños de mancha correspondientes a un semicampo de visión de 0 a 10 grados, así como su tamaño transversal y el número de rayos efectivos que pasan por el diafragma.

Campo de Visión (Grados)	Tamaño de Mancha (Grados)	No. De Rayos Efectivo	Tamaño Transversal (centímetros)
0	0.5531	21108	1.3756
1	0.5524	21120	1.3739
2	0.5467	21102	1.3597
3	0.5497	21126	1.3654
4	0.561	21138	1.3953
5	0.5656	21102	1.4067
6	0.5701	21112	1.4179
7	0.5723	21118	1.4234
8	0.5704	21050	1.4186
9	0.5687	21012	1.4144
10	0.5663	20996	1.4109

Tabla 4.2 Resultados obtenidos para el diseño de espejo multihexagonal, usando un diafragma de 80 cm y pantalla de observación ubicada a 142.5 cm.

Podemos observar que los tamaños de mancha se incrementan ligeramente, por lo cual, su comportamiento puede considerarse casi constante. Por otro lado, el tamaño transversal es aceptable hasta un campo de visión de 10 grados, sin embargo, el arreglo del sistema de fotodetectores solo detectara hasta un semicampo de visión de 4 grados, como se explica en el capítulo 2.

Es necesaria una comparación de resultados, para ello se modificaran algunos parámetros en el código del programa (Apéndice B), cambiando el diseño de espejos multihexagonal por el diseño de cámara Schmidt. Para este diseño definimos cada corrimiento en la posición cero, posteriormente, cambiamos la posición del diafragma manteniendo el mismo radio (80 cm), pero a hora ubicado a 300 centímetros de la superficie reflectora, es decir en el radio de curvatura del espejo. Por lo tanto, también cambiara la posición de la pantalla de observación, la cual obtiene un mejor tamaño de mancha en eje a 146.5 centímetros de la superficie reflectora. Moviéndonos fuera de eje obtenemos los siguientes tamaños de mancha para un semicampo de visión de 0 a 10 grados.

Campo de Visión (Grados)	Tamaño de Mancha (Grados)	No. De Rayos Efectivo
0	0.2158	21124
1	0.2152	21108
2	0.2147	21122
3	0.2126	21092
4	0.214	21044
5	0.22	20962
6	0.2355	20786
7	0.2632	20364
8	0.3056	19762
9	0.3605	19044
10	0.4214	18258

Tabla 4.3 Resultados obtenidos para el diseño cámara Schmidt, usando un diafragma de 80 cm y pantalla de observación ubicada a 146.5 cm.

Con este tipo de diseño podemos esperar tamaños de mancha menores a los que arroja el diseño de espejo multihexagonal, pero al incrementar el campo de visión los tamaños de mancha se comportan de manera ascendente, como se muestra en la siguiente gráfica.

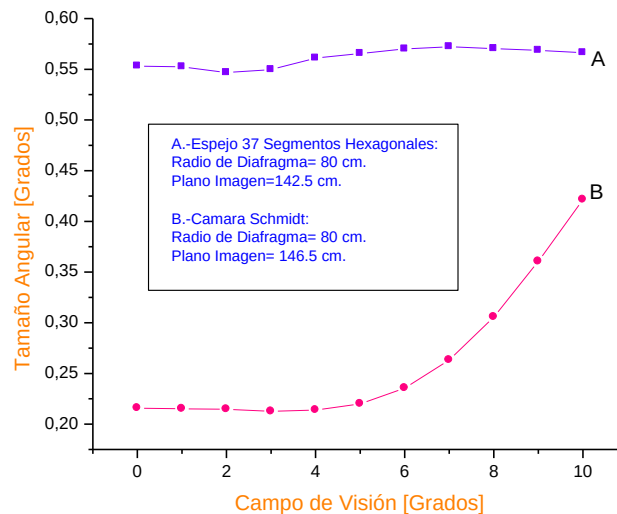


Figura 4.4. Comparación de tamaños de mancha entre el diseño de Espejo de 37 Segmentos Hexagonales y el modelo alternativo de Cámara Schmidt. Tamaño de diafragma 80 cm.

Si analizamos el comportamiento que toman los dos diseños; miramos que el modelo **Cámara Schmidt**, evoluciona con tendencia ascendente, esto es, conforme aumenta el campo de visión, aumentan los tamaños de mancha.

En principio pudiera parecernos extraño dicho comportamiento, puesto que el modelo **Cámara Schmidt**, tiene un comportamiento lineal. Es decir una trayectoria la cual no debiera incrementarse. Sin embargo aumenta, esto pasa por que la imagen se forma en un plano antepuesto, es decir, la imagen será tomada antes de su convergencia focal, por la pantalla de observación (Figura 4.5). Entonces los rayos interceptados no generan una superficie circular. Más bien las manchas se incrementaran conforme nos salimos del eje óptico no existiendo simetría de rotación.

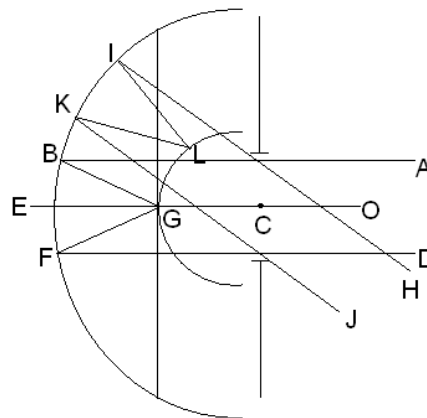


Figura 4.5. Esquema del Telescopio Cámara Schmidt.

Por otro lado, los tamaños de mancha del diseño cámara Schmidt se incrementan rápidamente, pero aun así, en un semicampo de visión de 10 grados son mejores que los tamaños de mancha que presenta el diseño de espejo melihexagonal. Por esta razón cambiaremos las dimensiones del radio de diafragma, intentando con esto reducir los tamaños de mancha para el mismo campo de visión.

4.3.2 Radio de diafragma 70 cm

Para este radio de diafragma la pantalla de observación se ubica a 144.5 centímetros de la superficie reflectora, puesto que a esta distancia tenemos el mejor tamaño de mancha en eje. Nuevamente captaremos radiación para un semicampo de visión de 0 a 10 grados y obtendremos resultados de la evolución del tamaño de mancha, tamaño transversal y el número de rayos efectivos.

Campo de Visión (Grados)	Tamaño de Mancha (Grados)	No. De Rayos Efectivo	Tamaño Transversal (centímetros)
0	0.3219	16052	0.8118
1	0.3218	16058	0.8115
2	0.3278	16038	0.8267
3	0.342	16040	0.8625
4	0.3583	16036	0.9036
5	0.3705	16026	0.9344
6	0.3773	15998	0.9515
7	0.385	16024	0.9709
8	0.3935	16000	0.9924
9	0.3961	15994	0.9989
10	0.3935	15974	0.9924

Tabla 4.6 Resultados obtenidos para el diseño de espejo multihexagonal, usando un diafragma de 70 cm y pantalla de observación ubicada a 144.5 cm.

Usando un radio de diafragma de 70 centímetros reducimos los tamaños de mancha, además, podemos controlarlos en el semicampo de visión de 0 a 10 grados puesto que no se incrementan abruptamente, de la misma forma, el tamaño transversal es aceptable en dicho campo de visión. El número de rayos efectivos disminuyó como era de esperarse por reducir el tamaño de la pupila de entrada.

Nuevamente, necesitamos hacer una comparación de resultados con el diseño de Telescopio Cámara Schmidt. Para el cual, el mejor plano imagen esta a 147 centímetros de la superficie reflectora y al aumentar el semicampo de visión de 0 a 10 grados tenemos los siguientes valores del tamaño de mancha.

Campo de Visión (Grados)	Tamaño de Mancha (Grados)	No. De Rayos Efectivo
0	0.141	16060
1	0.1413	16046
2	0.1435	16020
3	0.1491	15996
4	0.1594	15968
5	0.1748	15934
6	0.1991	15894
7	0.2326	15810
8	0.2762	15726
9	0.3291	15380
10	0.3884	14844

Tabla 4.7 Resultados obtenidos para el diseño cámara Schmidt, usando un diafragma de 70 cm y pantalla de observación ubicada a 147 cm.

Los tamaños de mancha comienzan por abajo de los resultados que obtenemos con el diseño de espejo multihexagonal, pero estos crecen rápidamente y mas aun, para un semicampo de visión de 10 grados los tamaños de mancha coinciden con los del diseño de espejo multihexagonal, como se muestra en a siguiente gráfica.

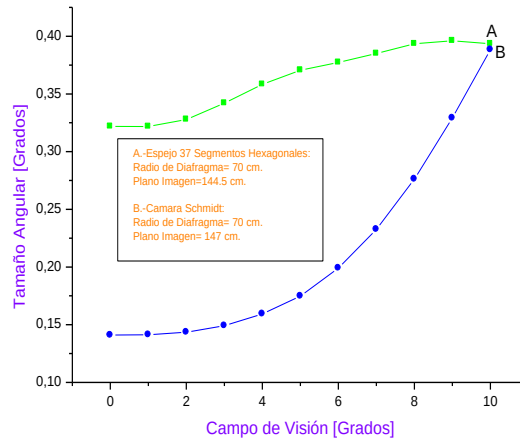


Figura 4.8. Comparación de tamaños de mancha entre el diseño de Espejo de 37 Segmentos Hexagonales y el modelo alternativo de Cámara Schmidt. Tamaño de diafragma 70 cm.

Al hacer la comparación entre ambos diseños, podemos observar que al aumentar el campo de visión; los tamaños de mancha del diseño de telescopio multihexagonal se incrementan en menor orden, además, para un campo de visión de 10 grados; el tamaño de mancha es igual al que se obtiene con el diseño cámara Schmidt. Por esta razón proponemos que dicho tamaño de diafragma es el adecuado para nuestro diseño de espejo multihexagonal.

A hora veamos hasta que campo de visión tenemos un número de rayos efectivos que puedan estar contenidos en nuestra superficie reflectora.

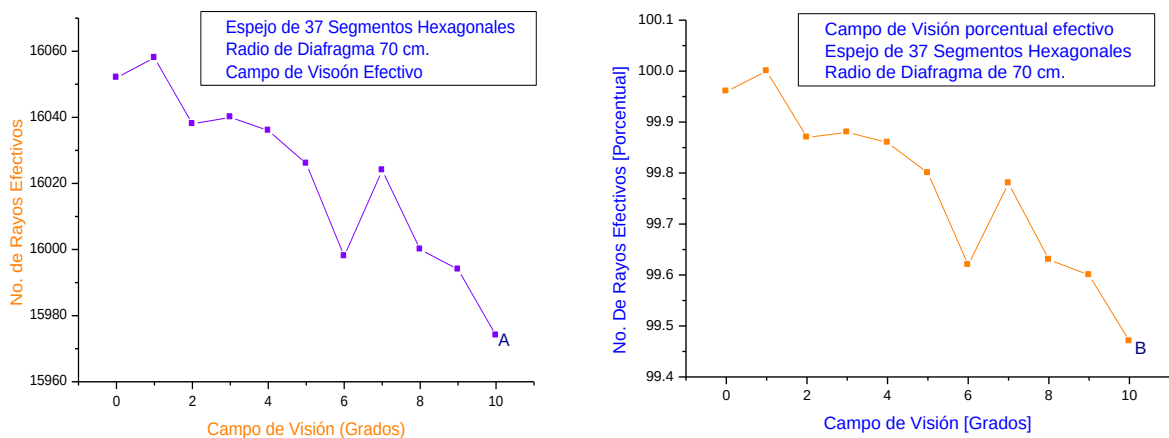


Figura 4.9. Línea A. No. De Rayos Efectivos para un determinado campo de visión, Línea B. Porcentaje Efectivo para dicho campo de visión.

El número de rayos efectivos que pasan a trabes de este diámetro de diafragma; en el diseño de 37 Segmentos Hexagonales, puede ser normalizado para tener una idea del margen porcentual en un determinado campo de visión que alcanza a detectar la superficie óptica. Las siguientes graficas dan referencia de dicha normalización y muestran además el número de rayos efectivos hasta un determinado campo de visión.

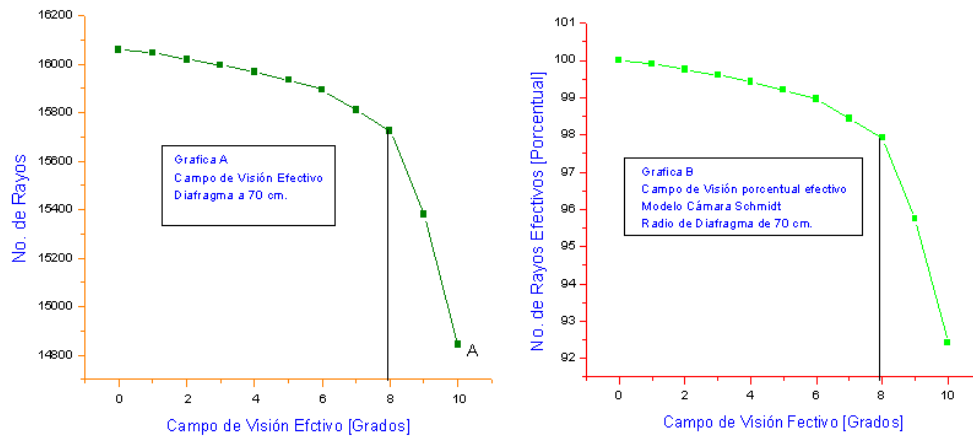


Figura 4.10. Línea A. No. De Rayos Efectivos para un determinado campo de visión, Línea B. Porcentaje Efectivo para dicho campo de visión.

Como se dijo anteriormente, el instrumento óptico diseñado puede ser capaz de detectar la fluorescencia que producen los rayos cósmicos hasta un semicampo de visión de 7 grados, según el número de rayos efectivos que permite pasar el diafragma. Sin embargo, las dimensiones del sistema de fotodetectores limita este campo de visión a 4 grados. Observemos las siguientes gráficas que dan referencia del desplazamiento de la mancha fuera de eje (Figura 4.10).

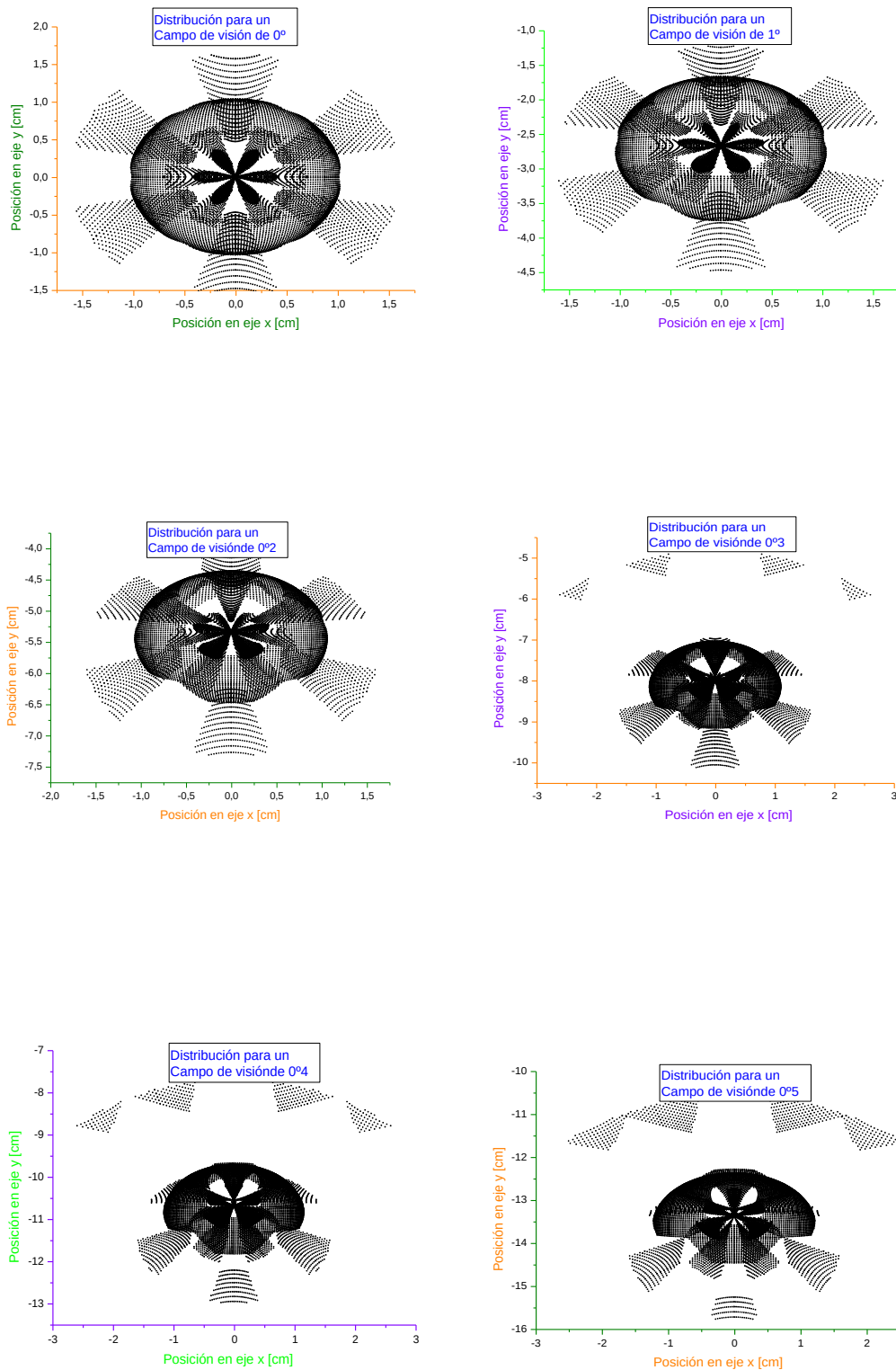


Figura 4.10. Diagrama de Manchas para el Diseño de 37 Segmentos Hexagonales, con pantalla plana y diafragma en foco. Para un semicampo de visión de 0 a 5 grados

Los tamaños de mancha son controlados al colocar el diafragma cercano al foco. A hora pudiéramos aumentar los radios de curvatura para cada uno de los 37 segmentos hexagonales con el objeto de tener un semicampo de visión más amplio, pero esto implicaría un rediseño a la superficie óptica.

A continuación se muestran las gráficas del tamaño transversal de mancha obtenido por la configuración del telescopio de 37 segmentos hexagonales con diafragma cercano al foco para tres distintos radios de diafragma estudiados. En cada una de ellas aseguramos que no sobrepase un tamaño transversal mientras se aumenta el campo de visión, mayor a las dimensiones de los fotodetectores, que es precisamente de 1.5 cm. de diámetro.(Figura 4.7).

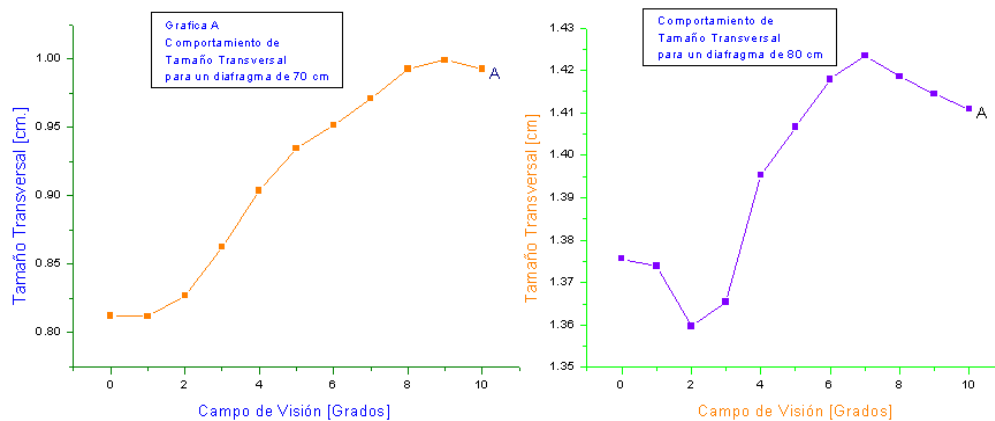


Figura 3.12. Tamaño Transversal obtenido para tres distintos radios de diafragma

Como podemos observar, ninguna de las gráficas sobrepasa un tamaño transversal de 1.5 centímetros. Solo que con un diafragma de 70 centímetros tenemos resultados que terminan del orden del modelo Cámara Schmidt, esto lo sabemos porque el tamaño transversal está dado en términos del tamaño angular de mancha y la distancia a la que se encuentra la pantalla de observación. Por esta razón se ha seleccionado para el diseño de 37 segmentos hexagonales.

La construcción de grandes espejos primarios monolíticos está limitada por la tecnología de su fabricación así como su costo. Por lo que los telescopios contruidos con pequeños segmentos permiten mejores ventajas respecto a los monolíticos. Un espejo segmentado está hecho por piezas que se arreglan para formar una superficie de mayor área, con pequeñas separaciones entre casa uno de los segmentos; que llamaremos corrimientos, los cuales están especificados en el código del programa que hará la simulación del trazo exacto de rayos.

Los resultados que se han obtenido; son mejores en comparación de diseños anteriores, lo cual se comprueba en la evaluación grafica de los datos, donde se hizo un análisis mas fino de cada representación. Finalmente, aseguramos la eficiencia en un campo de visión aceptable y nos aproximamos con tamaños de mancha que terminan en el orden del telescopio Cámara Schmidt, que fue nuestro modelo de referencia y comparación.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Se presentaron los resultados numéricos; del diseño de un Telescopio de 37 segmentos esféricos hexagonales, destinado para detectar la fluorescencia que producen los rayos cósmicos a su paso por la atmosfera terrestre. Nuestro principal interés sobre el planteamiento de este trabajo de tesis, fue diseñar un arreglo de telescopio segmentado, capas de proporcionar información requerida a los centros de investigación, como el observatorio de rayos cósmicos Pierre Auger^{2,13-14}.

Las características de los primeros diseños de telescopios detectores de fluorescencia^{6-7,14,16}, fueron explicadas de manera muy general. Es decir, este trabajo estuvo dedicado a presentar la propuesta de un diseño de Telescopio particular, el cual está compuesto por 37 segmentos esféricos hexagonales, dispuestos en forma escalonada. Con el objetivo de construir un sistema concentrador de energía y no un sistema formador de imagen, que produzca un tamaño de mancha de 1.5 centímetros de diámetro,

Sabemos que en la actualidad existen programas de cómputo muy elaborados para realizar un análisis automatizado. Hablando en forma general le damos a la computadora un factor de calidad para lograr un objetivo determinado. En nuestro caso en particular, los resultados y las simulaciones numéricas fueron obtenidos mediante el desarrollo de un programa de trazo exacto de rayos, que parten de una fuente puntual localizada en el punto (α, β, γ) , posteriormente se reflejan sobre la superficie óptica en el punto (x, y, z) y finalmente se concentran en el punto (x_0, y_0, z_0) en el plano imagen. Obteniendo un diseño que presenta resultados preliminares y aceptables, a difieren de cálculos obtenidos previamente.

Posteriormente, se dio explicación de los conceptos que intervienen en la realización de nuestro programa, como la teoría de trazo exacto de rayos, misma que al involucrarla con métodos numéricos, nos ayuda a predecir las aberraciones y obtener diagramas de mancha aceptables.

Finalmente, en el Capítulo 4 se presentan los resultados de la simulación numérica del diseño del Telescopio de 37 segmentos esféricos hexagonales, dispuestos en forma escalonada, y se comprueba la eficiencia de un arreglo de este tipo, en un campo de visión aceptable. Puesto que nos aproximamos con tamaños de mancha que terminan en el orden del Telescopio Cámara Schmidt, que es nuestro modelo de referencia y comparación.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS

- [1]. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/108/htm/sc_5.htm.
- [2].- <http://www.fisica.unlp.edu.ar/strings/adscft/talks/harari-public.pdf>.
- [3].- http://www.ifm.umich.mx/Eventos/platicas_2009/Pionero_Mich.pdf.
- [4].- http://www.liceopaula.com.ar/Club_Ciencias/ASIMOV/tema062.pdf
- [5].- <http://www.agrupacionastronomicapalentina.org/articulos/pley53-c.pdf>.
- [6].- Brunu Rossi, *Cosmic rays*, New York, Mc-Grawhill, 1964.
- [7].- W. Bothe and W. Kohlhooster, *Zeits Phys.*,56(1929), reprint(translate and abridged) in *Cosmic Rays* by A. M. Hills, Pergamon Ress, (1927), pp. 148-167.
- [8].- John Linsky, *Search for then end of the cosmic ray energy spectrum*, in Workshop on Observing Giant Cosmic Ray Airshowers > 10^{20} eV Particles From Space, ed. American Institute of Physics Woodbury, New York, 1997, pp. 1-21.
- [9].- J. A. Otaola, J.F: Valdés, *Los rayos cósmicos mensajeros de las estrellas*, FCE, La ciencia desde México, No. 108, México D.F. 1992.
- [10].- Alfonso Mondragón, *Manuel Sandoval Vallarta: iniciador de la física teórica impulsor de la ciencia en México*, Boletín de la Sociedad Mexicana de Física, Vol. **13**, Num. 3, 1999.
- [11].- G. Lemaitre and M. S. Vallarta, *Phys. Rev.* **43**,87 (1933).
- [12].- K. Greisen, *Cosmic Ray Showers*, *Ann. Rev. Of Nuclear Science* **10**, 63-108 (1960).
- [13].- The Auger Collaboration, “The Pierre Auger Proyect, Desing Report”, Second Edition, Nobember, 1996, Revised March 14, 1997. Also In <http://www.td-auger.fnal.gov:82/>.
- [14].- J Castro-Ramos and A. Cordero Davila, “ Desing of Maksutov-Bouwers Camera for the florescence Detector”, Pierre Auger Project Thecnical Note GAP-99-011,1999.
- [15].- Arturo Fernández, Enrique García, Humberto Salazar, José Valdés, Luis Villaseñor y Arnulfo Zepeda, *El observatorio Pierre Auger de rayos cósmicos*, Boletín de la Rev. Mex. de Física, Vol. **10**, Num.4 Oct-Dec.,1997.
- [16].- R. Baltrusaitis et al “*The Utah Fly’s eye detector*” , *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **A, 240** (1997),268.
- [17].- J. Diaz-Anzures, A. Cordero-Davila, J. Gonzalez-Garcia, O. Martinez-Bravo, C. Robledo-Sanchez, B. A. Khrenov, G. K. Garipov. “Low-frecuency Fresnel mirrors for fluorecence detector”*Astroparticle Physics*, Vol **21** Issue 4, July 2004, pages 407-413.

TRABAJOS PRESENTADOS EN CONGRESOS

- 1.- Congreso de la Sociedad Mexicana de Física, (2008).
- 2.-Congreso de la Sociedad Mexicana de Física, (2009).
- 3.- Rodríguez-Rodríguez, M. I., Robledo Sánchez C. I., Jaramillo Núñez A., “Design of a Telescope of 37 Hexagonal Segments to Detect the Fluorescence Produced by Cosmic Rays”. ICIAS CANCUN, QUINTANA ROO, MEXICO FROM OCTOBER 26 THROUGH OCTOBER 29, 2010.