

OBSERVATORIO ASTRONOMICO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Director: Ing. PASTOR J. SIERRA

Serie especial N° 25

Laboratorio de. Optica

**TOLERANCIAS EN EL MONTAJE
DE TELESCOPIOS DE DOS ESPEJOS**

por

ENRIQUE J. CAMPITELLI



LA PLATA

República Argentina

1979



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Rector

Dr. Guillermo G. Gallo

Rector Sustituto

Dr. José H. Fernández de Liger

Secretario General

Odont. Tomás C. Fucini

Secretario de Asuntos Académicos

Dr. Jorge Alfredo Bolzan

Secretario de Supervisión Administrativa

Cr. Juan Carlos Arévalo

Secretario de Extensión Cultural y Difusión

Arq. José María Marquínez

Guardasellos

Dr. Federico Enrique Christmann

INSTITUTO SUPERIOR DEL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO

Director:

ING. PASTOR J. SIERRA

Director Sustituto:

GEOF. GRACIELA FONT DE AFFOLTER

Secretario de Asuntos Académicos:

SR. CARLOS E. M. ROGATI

OBSERVATORIO ASTRONOMICO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Director: Ing. PASTOR J. SIERRA

Serie especial N° 25

Laboratorio de Optica

**TOLERANCIAS EN EL MONTAJE
DE TELESCOPIOS DE DOS ESPEJOS**

por

ENRIQUE J. CAMPITELLI (*)



LA PLATA

República Argentina

1979

(*) Miembro de la carrera del personal de apoyo a la investigación y desarrollo del CONICET y del Centro de Investigaciones Opticas (CONICET - UNLP - LEMIT).

TOLERANCIAS EN EL MONTAJE DE TELESCOPIOS RITCHEY—CHRETIEN

RESUMEN

- Se analiza la imagen dada por un telescopio Ritchey—Chretien bajo los aspectos:
- Comparación con la dada por un Cassegrain de igual dimensión.
 - Influencia de los errores de montaje.
 - Definición de la superficie focal más adecuada.

Para el estudio se tomó como ejemplo el telescopio de 2,15 m de diámetro de El Leoncito.

1 — INTRODUCCION

La nueva generación de grandes telescopios está formada principalmente por sistemas Ritchey—Chretien, con los que se obtiene una imagen de calidad superior a la que proporcionan los Cassegrain, conocidos de más antiguo

Para que esta potencialidad se manifieste en la práctica, es necesario que las componentes estén ejecutadas y montadas con tolerancias más estrictas que los sistemas Cassegrain.

Esto se debe a dos causas. La principal es que, siendo la imagen mejor, deterioros producidos por errores de ajuste y/o ejecución, no pasan desapercibidos entre las aberraciones inherentes al diseño. También resulta que la sensibilidad del diseño a los desajustes es mayor en la configuración Ritchey—Chretien.

La imagen se puede examinar con fórmulas analíticas (análisis de Seidel) o con un diagrama de intersecciones de rayos ("Spot diagram"). El diagrama es mucho más explícito y pictórico, pero las fórmulas son más rápidas de evaluar, y en ciertos aspectos dan una información más general.

Los dos métodos pueden complementarse si se analizan casos específicos con diagramas. Cuando varias aberraciones aparecen mezcladas en proporciones diversas, la correspondencia entre uno y otro no es inmediata, como se verá.

Por razones prácticas se tomó como caso particular el telescopio de 2,15 m de diámetro de El Leoncito.

En este trabajo, los diagramas son salidas de un programa general de evaluación de imágenes escrito en FORTRAN IV y procesado en una máquina IBM/360 de la Universidad Nacional de La Plata (CESPI).

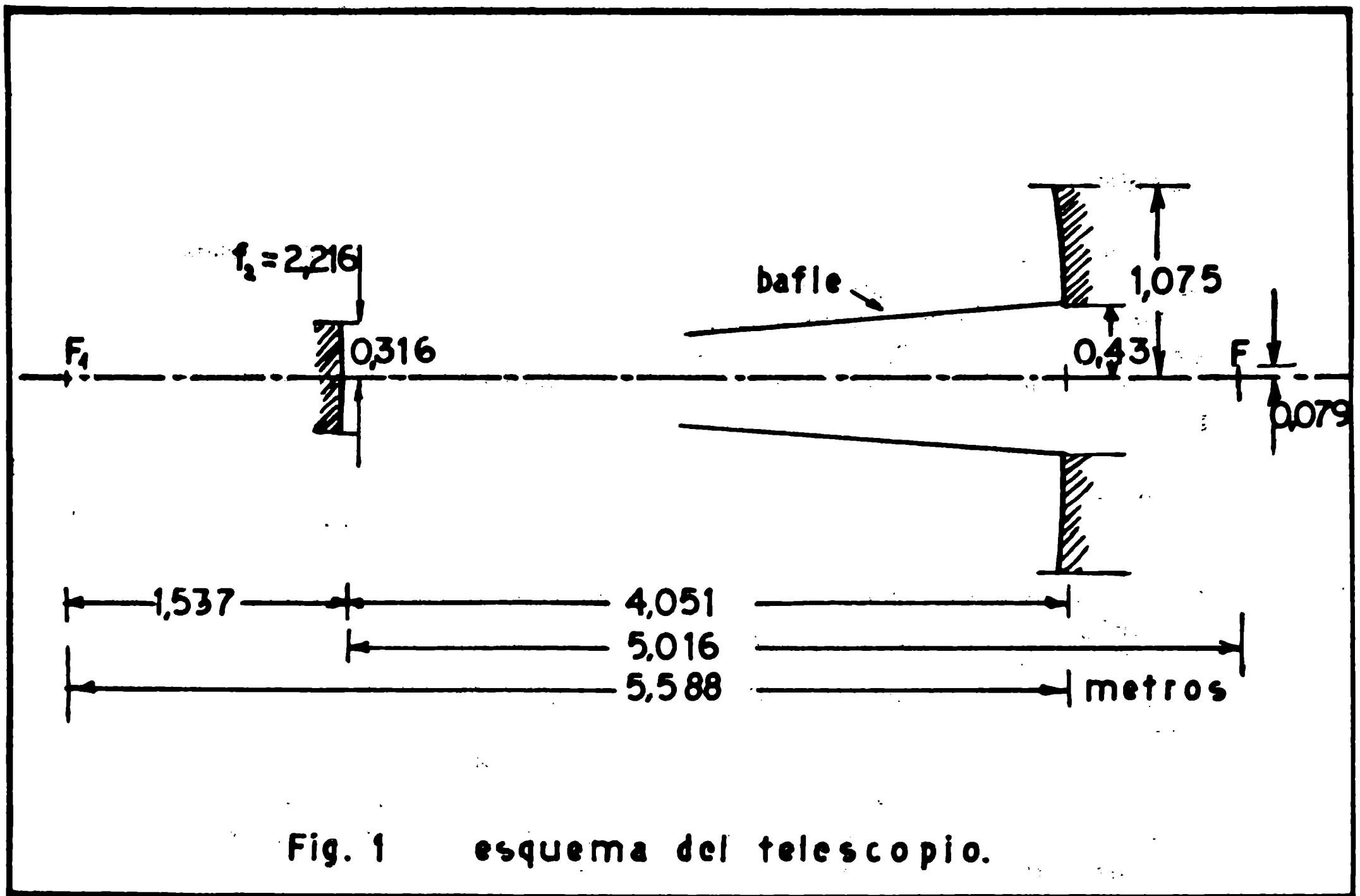
La evaluación analítica de las aberraciones separadas se hizo con un pequeño programa para calculadora tipo Texas, con fórmulas especialmente adaptadas para sistemas de dos espejos.

En el apéndice se dan detalles de esto último.

2 — COMPARACION: CASSEGRAIN VS. RITCHEY—CHRETIEN

Los diagramas 1 a 12 son las imágenes producidas en el borde de un semicampo de 15 arcmin. Los parámetros constructivos del telescopio se tomaron de la documentación provista por la empresa constructora del Ritchey—Chretien.

El Cassegrain es un hipotético telescopio indistinguible a simple vista del Ritchey—Chretien real, que sólo tiene una ligera diferencia en el perfil de los espejos.



La diferencia se refiere a la constante cónica asociada a cada espejo. Este parámetro se da en la tabla más abajo, y responde a la siguiente nomenclatura:

Tipo:	hiperboloide	paraboloide	elipsoide largo	esfera	elipsoide chato
Valor de b:	< -1	-1	$(0, -1)$	0	> 0
Ritchey-Chretien		Cassegrain			
-1,0712		-1			Espejo principal
-4,3243		-3,5479			Espejo secundario

Tabla: constantes cónicas

La imagen se examinó barriendo la zona del foco en el sentido contrario a la luz, con 12 planos separados por 280 μ m entre uno y otro. El N° 1 corresponde al plano focal paraxial.

En cada plano se produce la imagen del Ritchey-Chretien (RC) y la del Cassegrain (CA).

En la salida de máquina los diagramas están hechos de modo que tengan la mayor dimensión posible, para no perder detalles en la impresión; pero en el texto fueron normalizados a escala uniforme, salvo en un caso que se indica.

El eje óptico queda sobre la prolongación de la diagonal del cuadrado, hacia arriba y a la izquierda.

En el primer gráfico aparecen la escala en μ m sobre la placa y en arc seg sobre el campo, y un círculo indica el tamaño del disco de difracción.

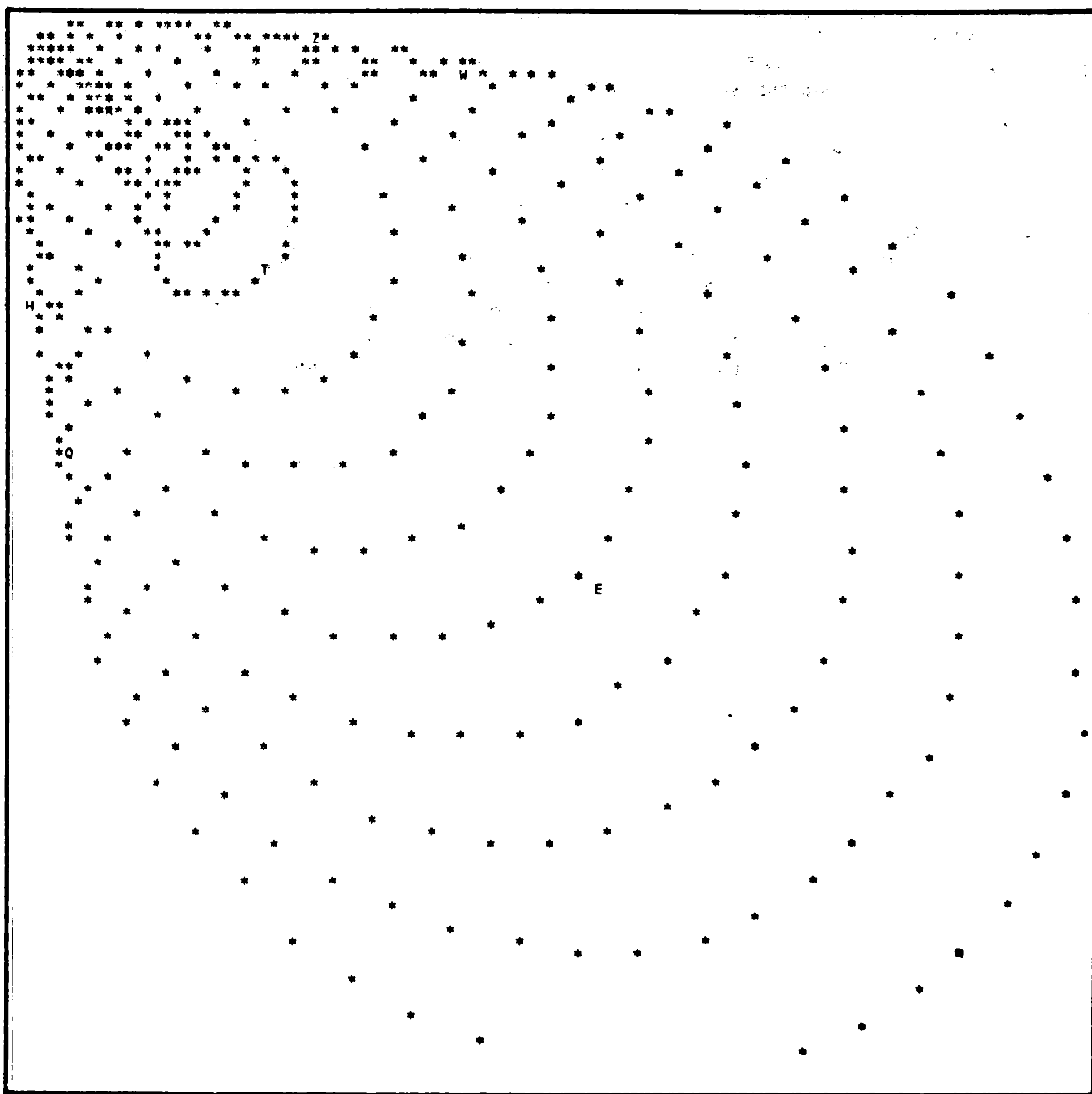
Los rayos incidentes están distribuidos sobre la pupila en 13 círculos equiespaciados, más el centro.

En cada círculo de diámetro creciente hay 6 rayos más que en el anterior. En total, son 547 rayos, pero en este caso aparecen 457 debido a la obstrucción central.

Se aprecian nítidamente las imágenes astigmáticas en los gráficos RC 10 y RC 6. Los más importantes son los RC 8 y CA 8, que corresponden al mejor enfoque. En el Cassegrain la dispersión de la imagen por efecto de la coma es unas tres veces mayor.

La dispersión de la imagen en el Ritchey—Chretien, a 15 arc min del eje, es 0,75 arcseg; del orden de magnitud de la que puede provocar una atmósfera muy calma.

Los diagramas están en buena coincidencia con los obtenidos en un estudio (D. H. Schulte, 1963) hecho para el telescopio de Kitt Peak, EE.UU., que es muy similar a éste.

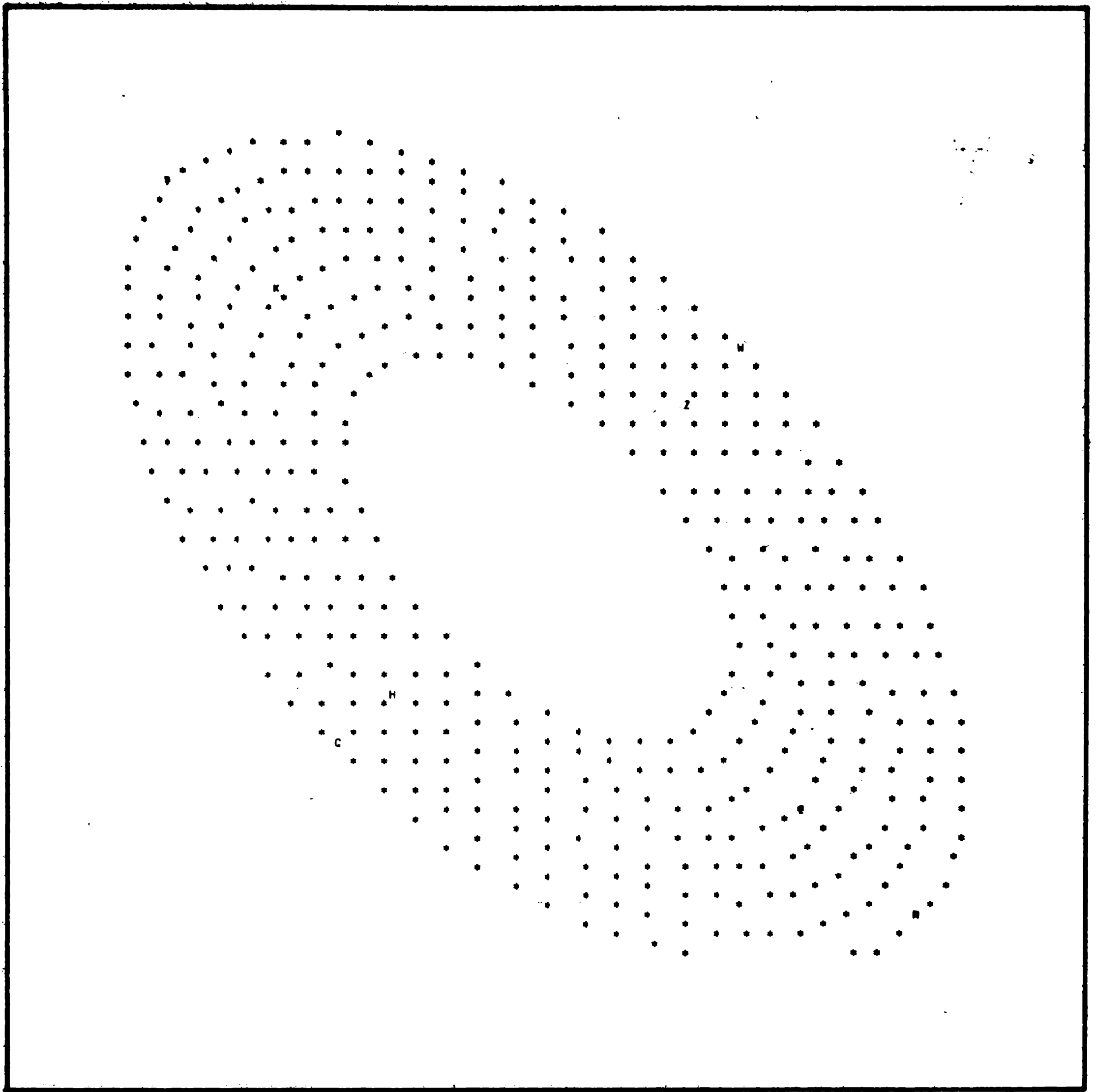


CA 1

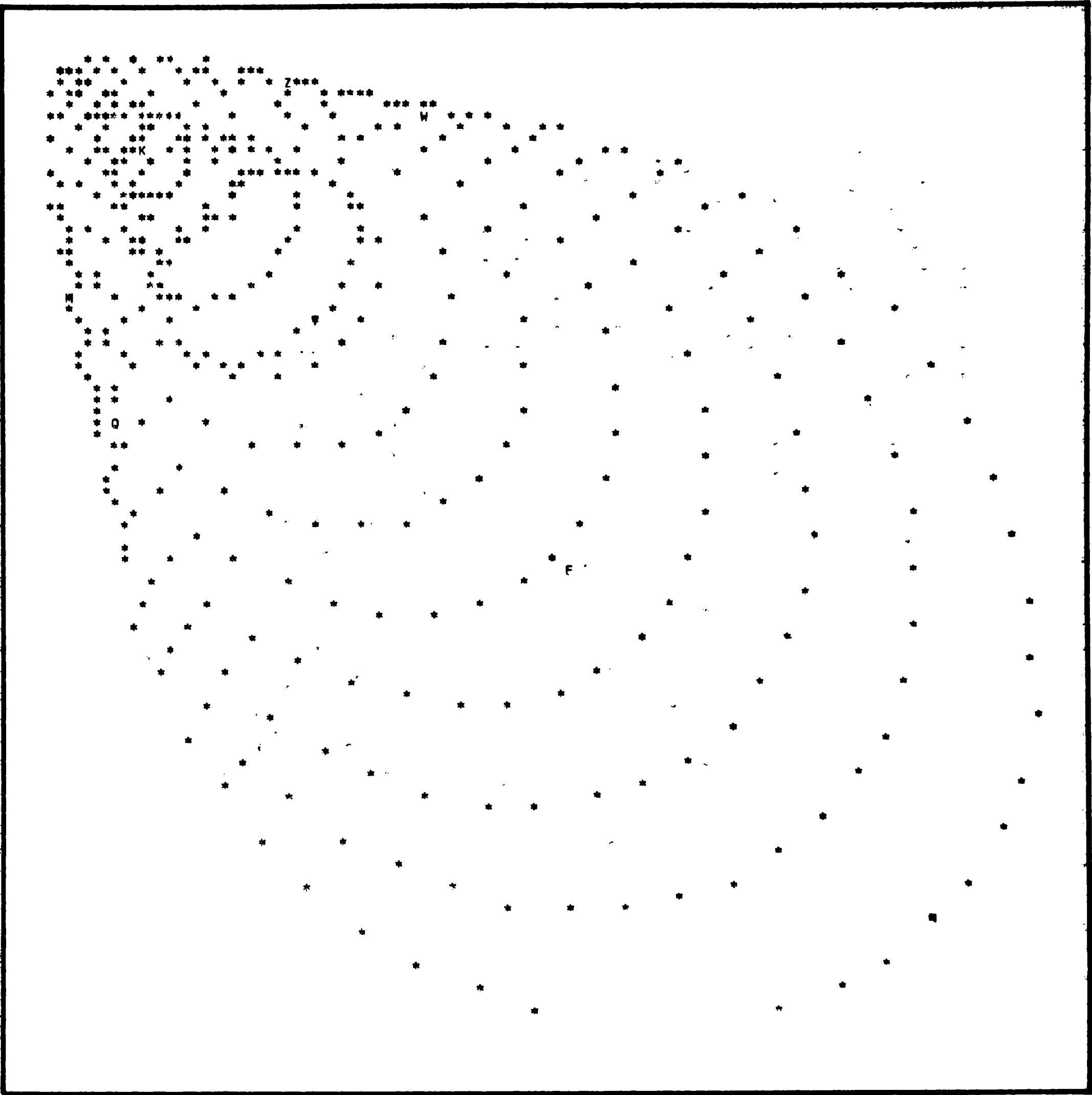
100 μm

1 arc seg

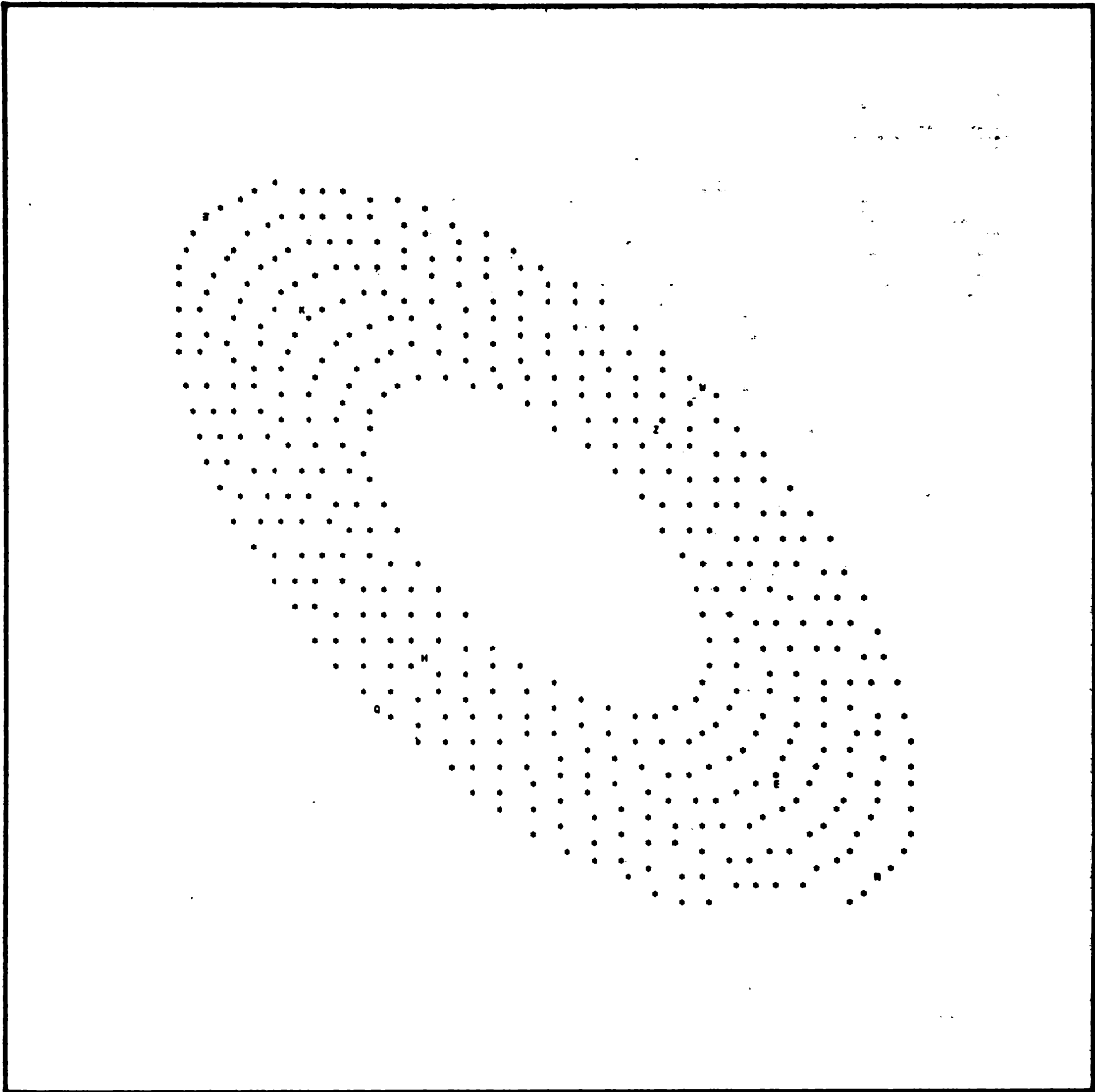
○ disco de difracción



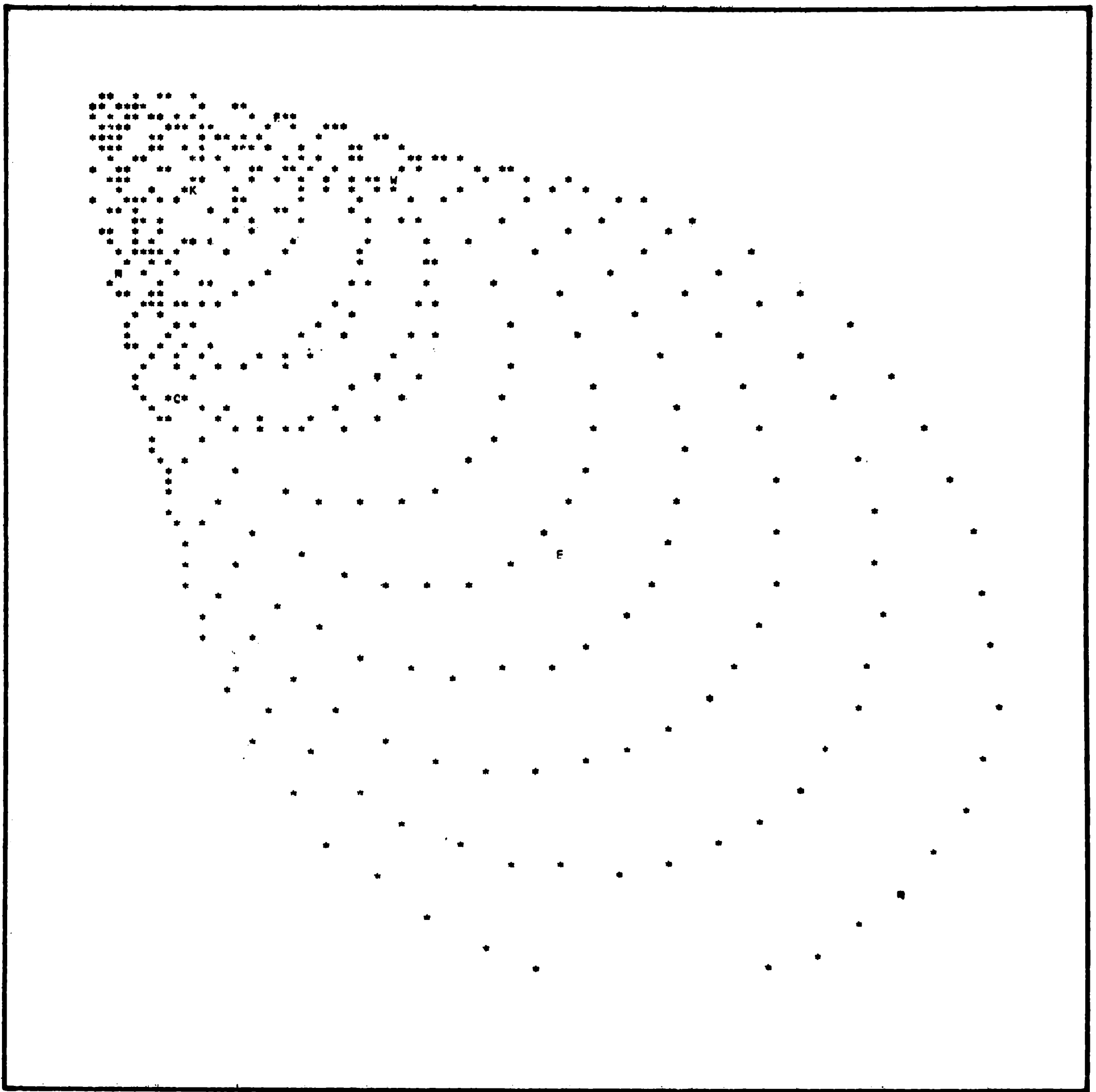
RC 1



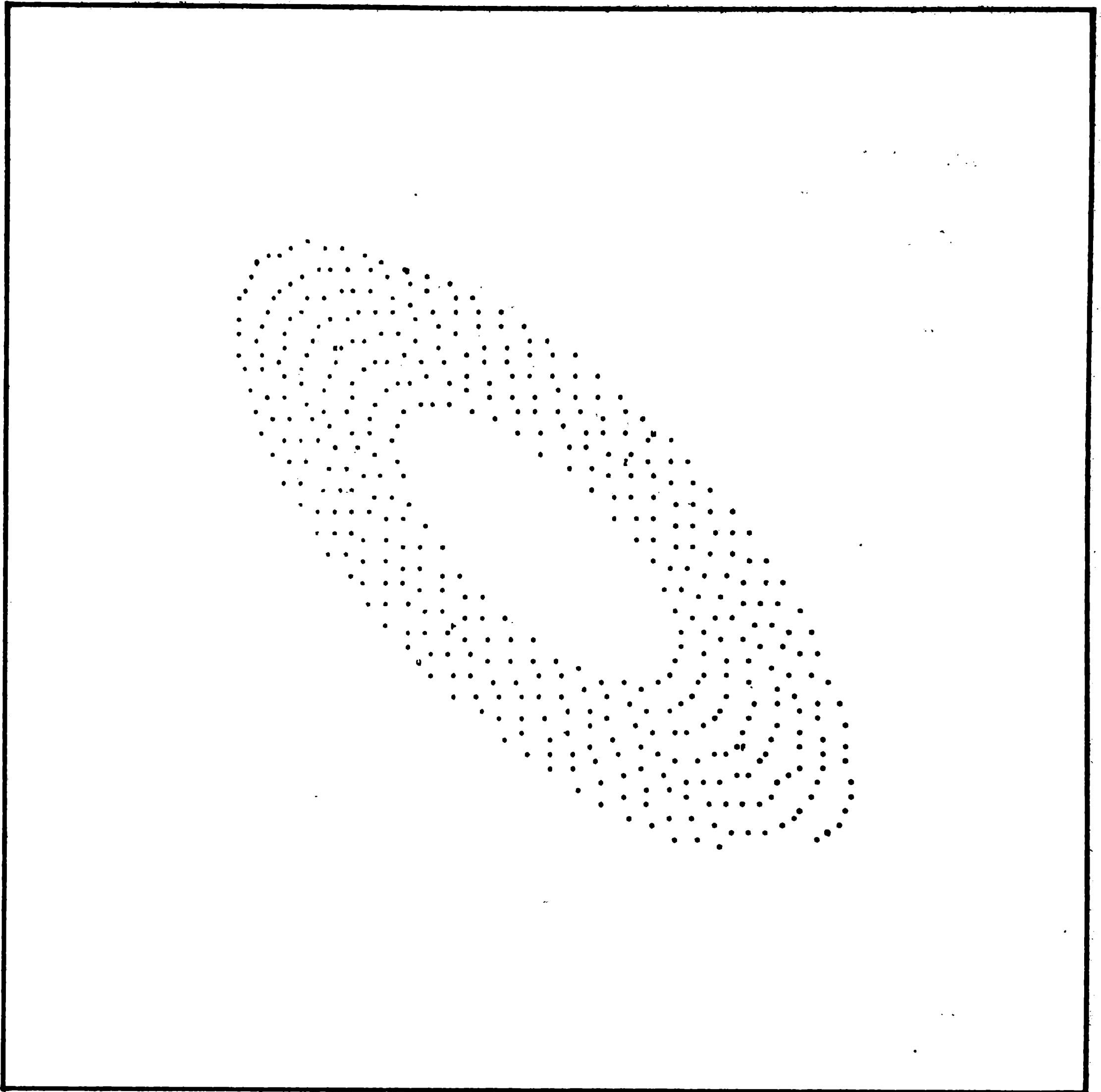
CA 2



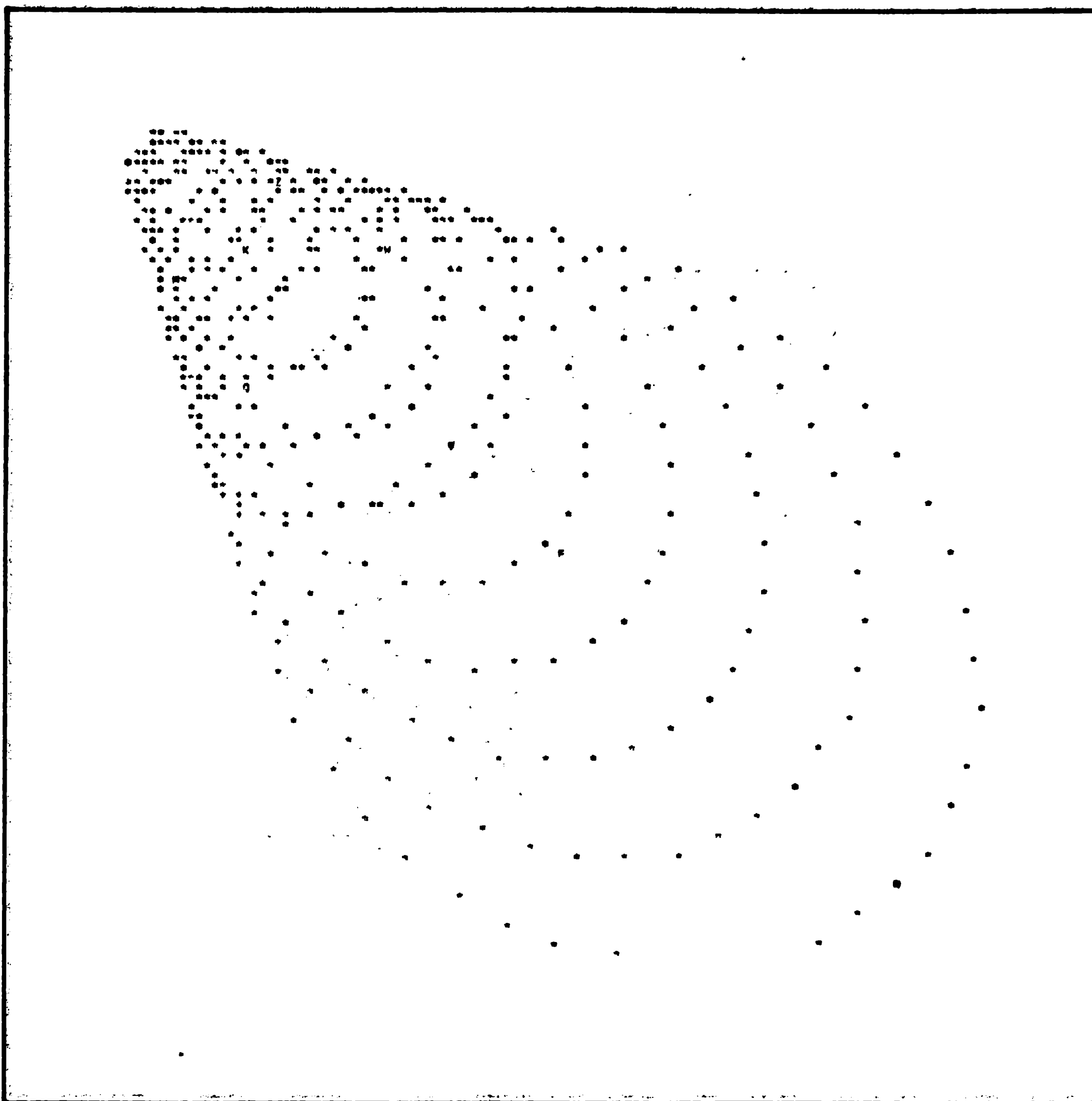
RC 2



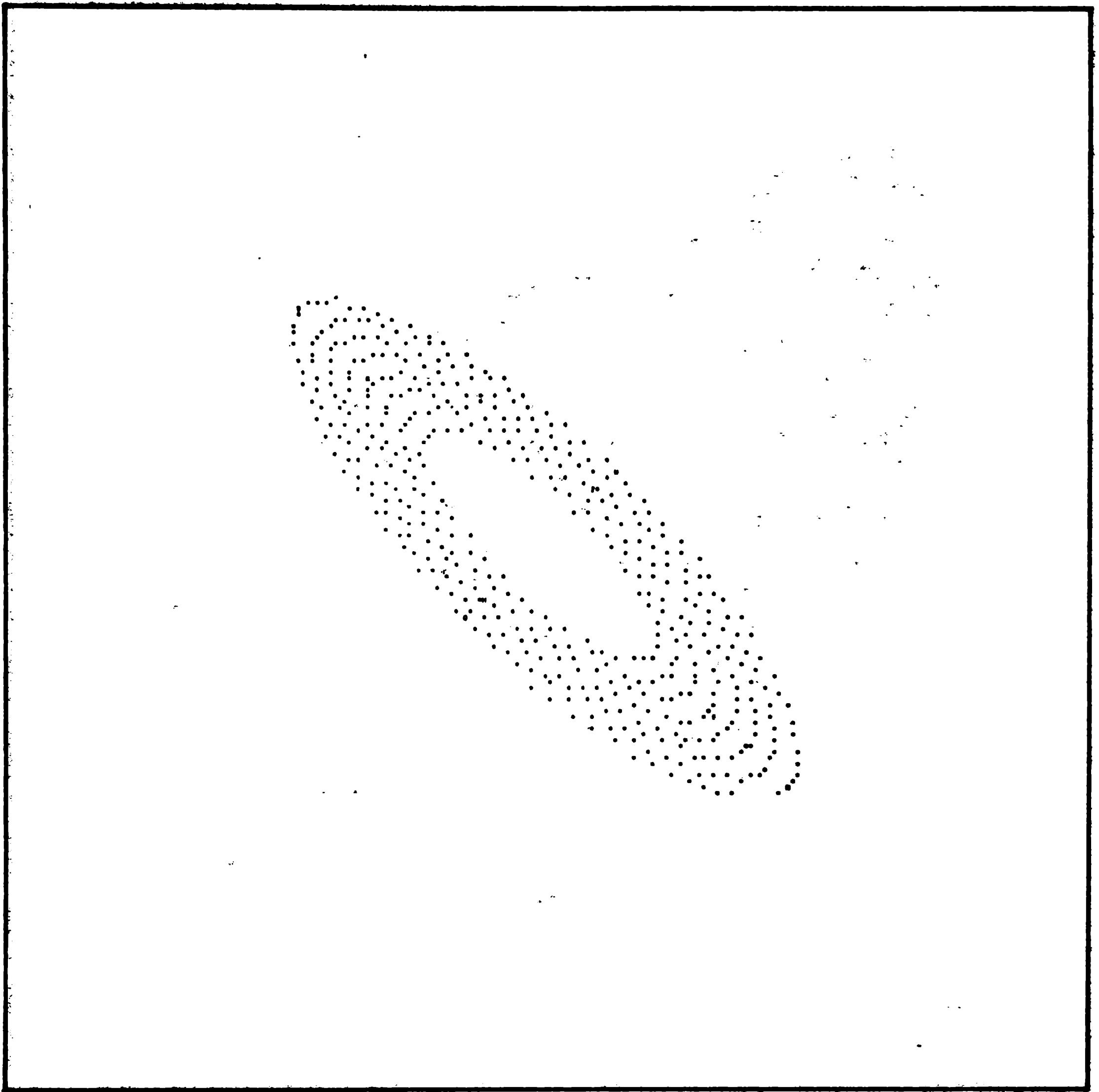
CA 3



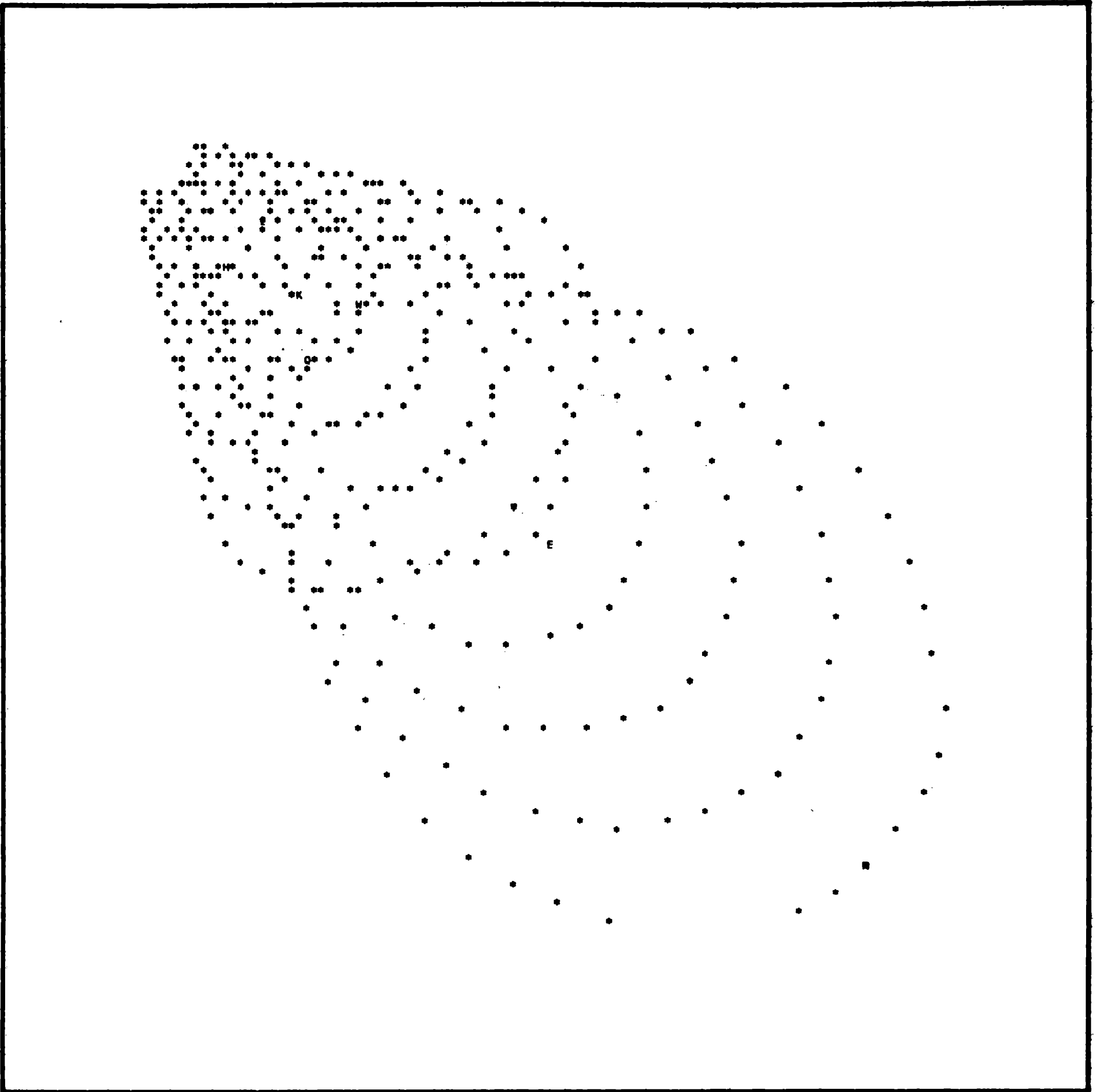
RC 3



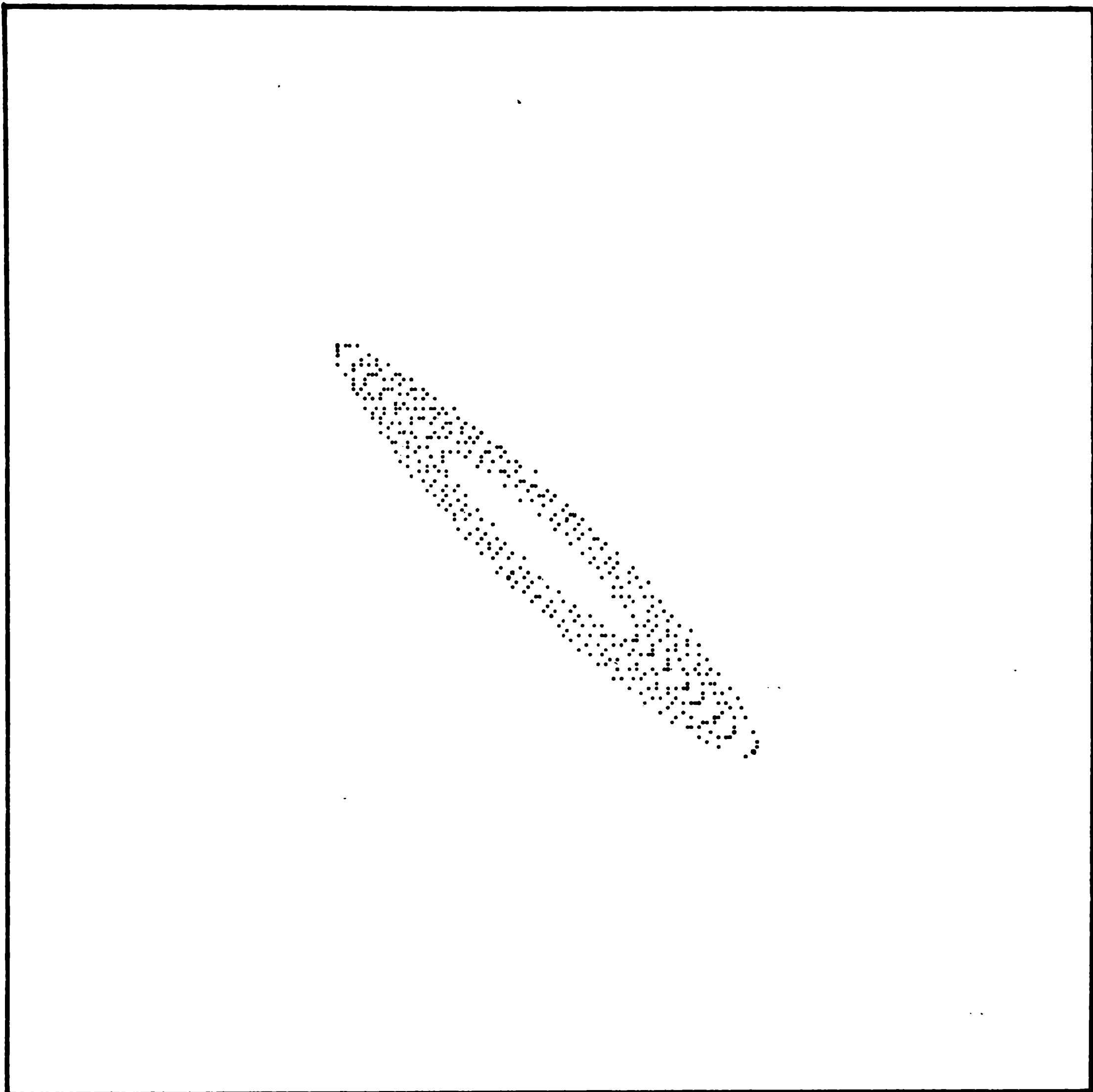
CA 4



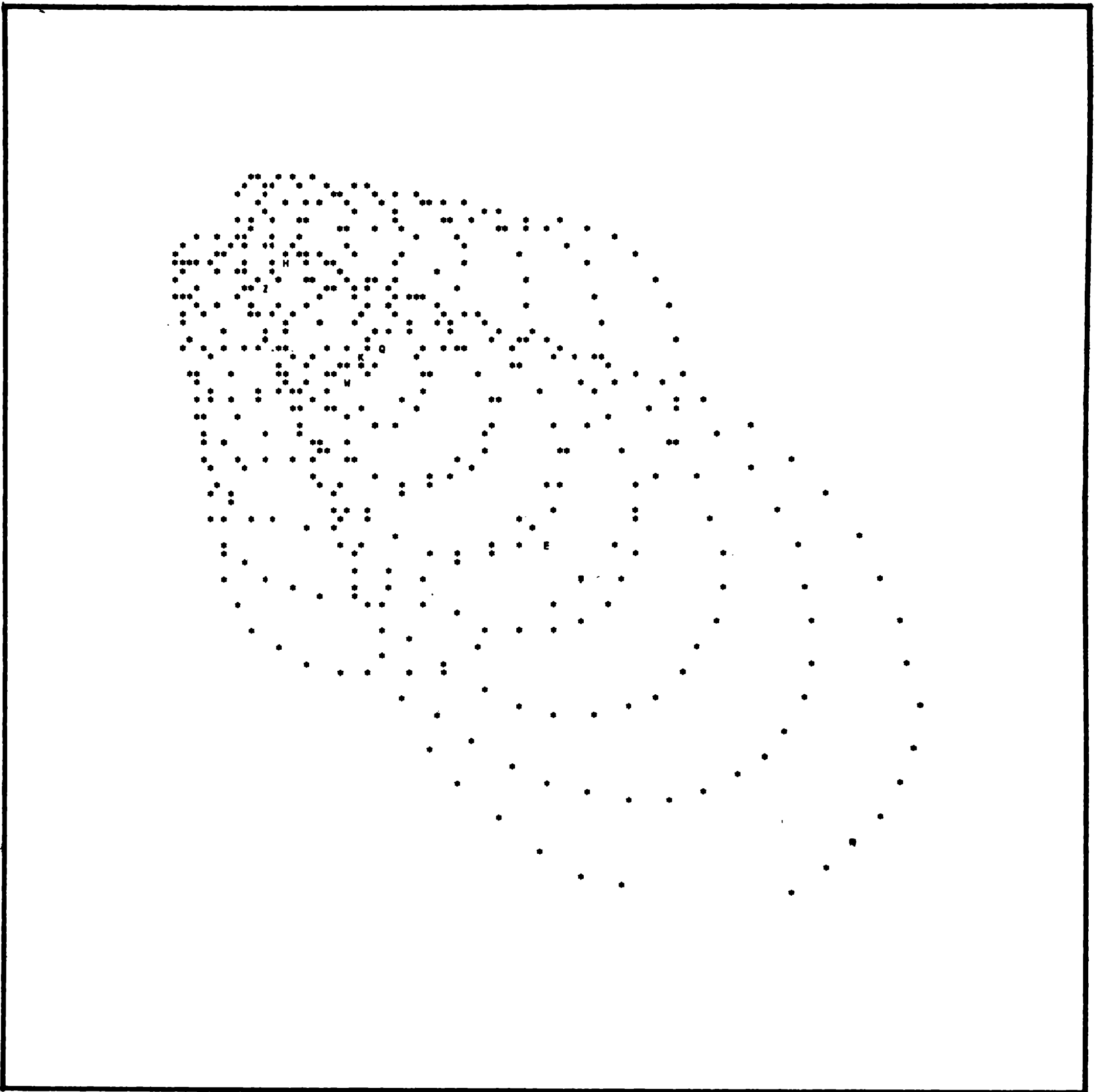
RC4



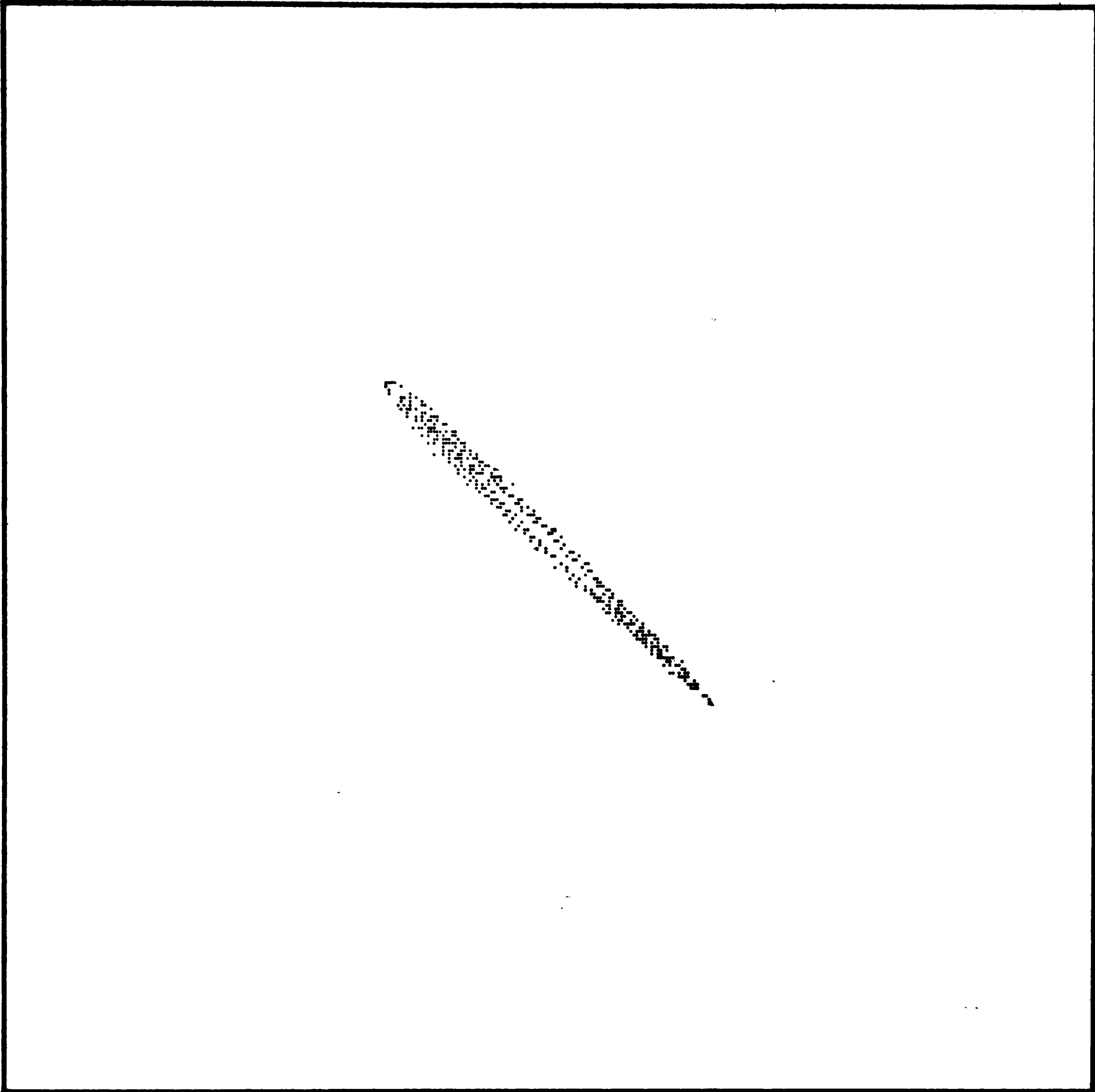
CA 5



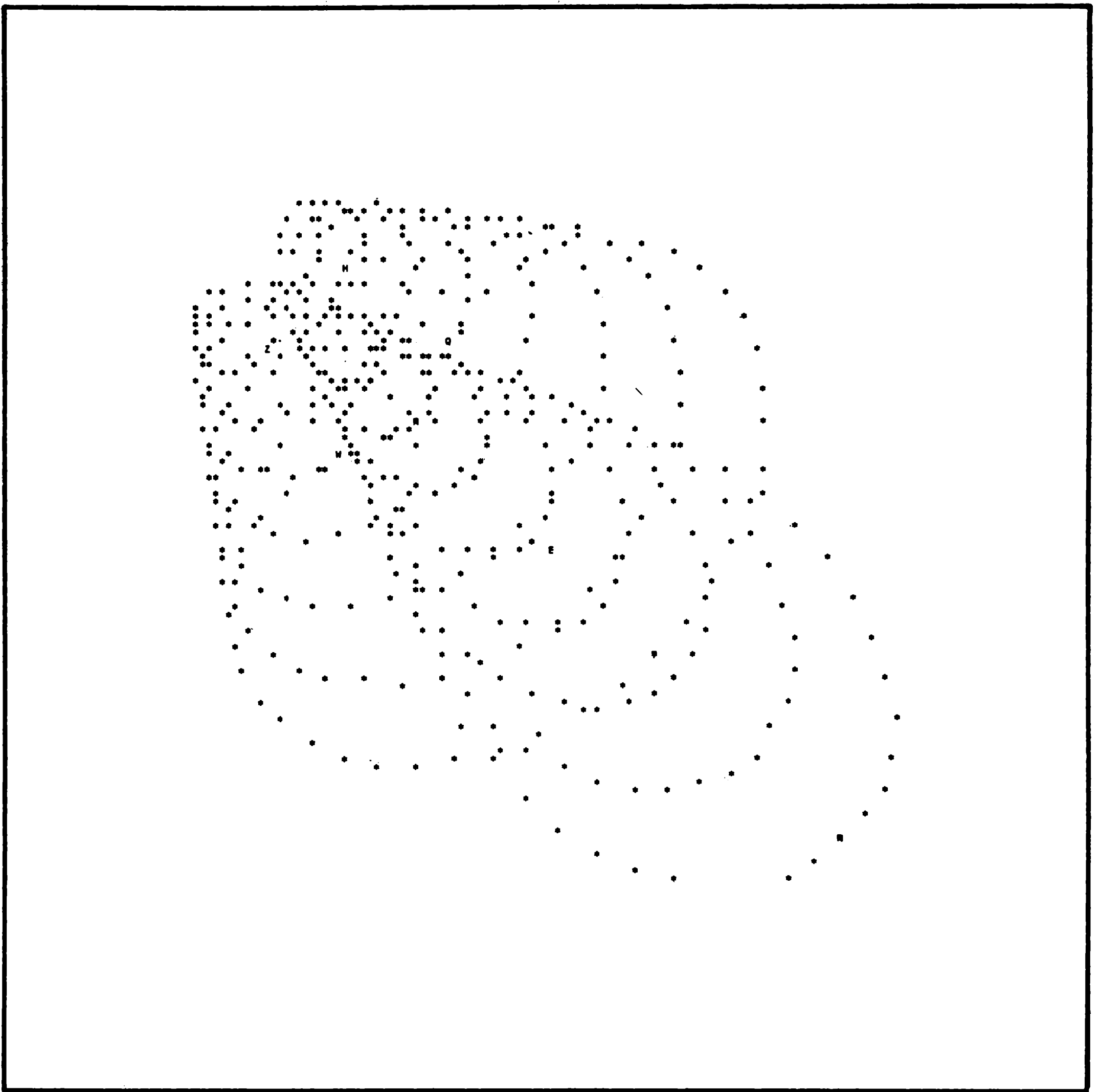
RC 5



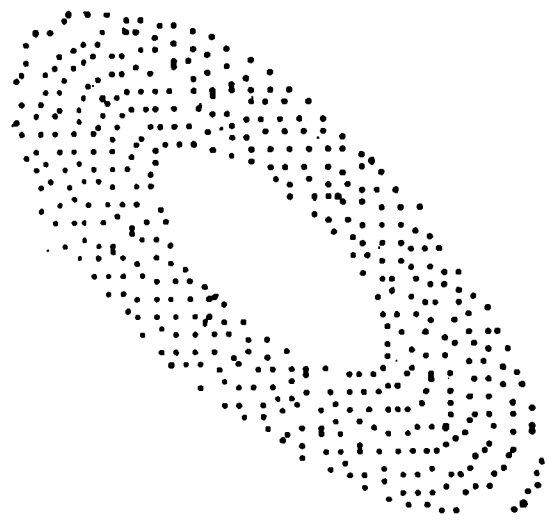
CA 6



RC 6



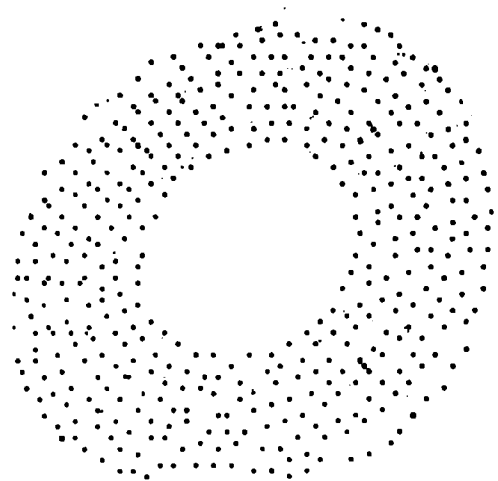
CA 7



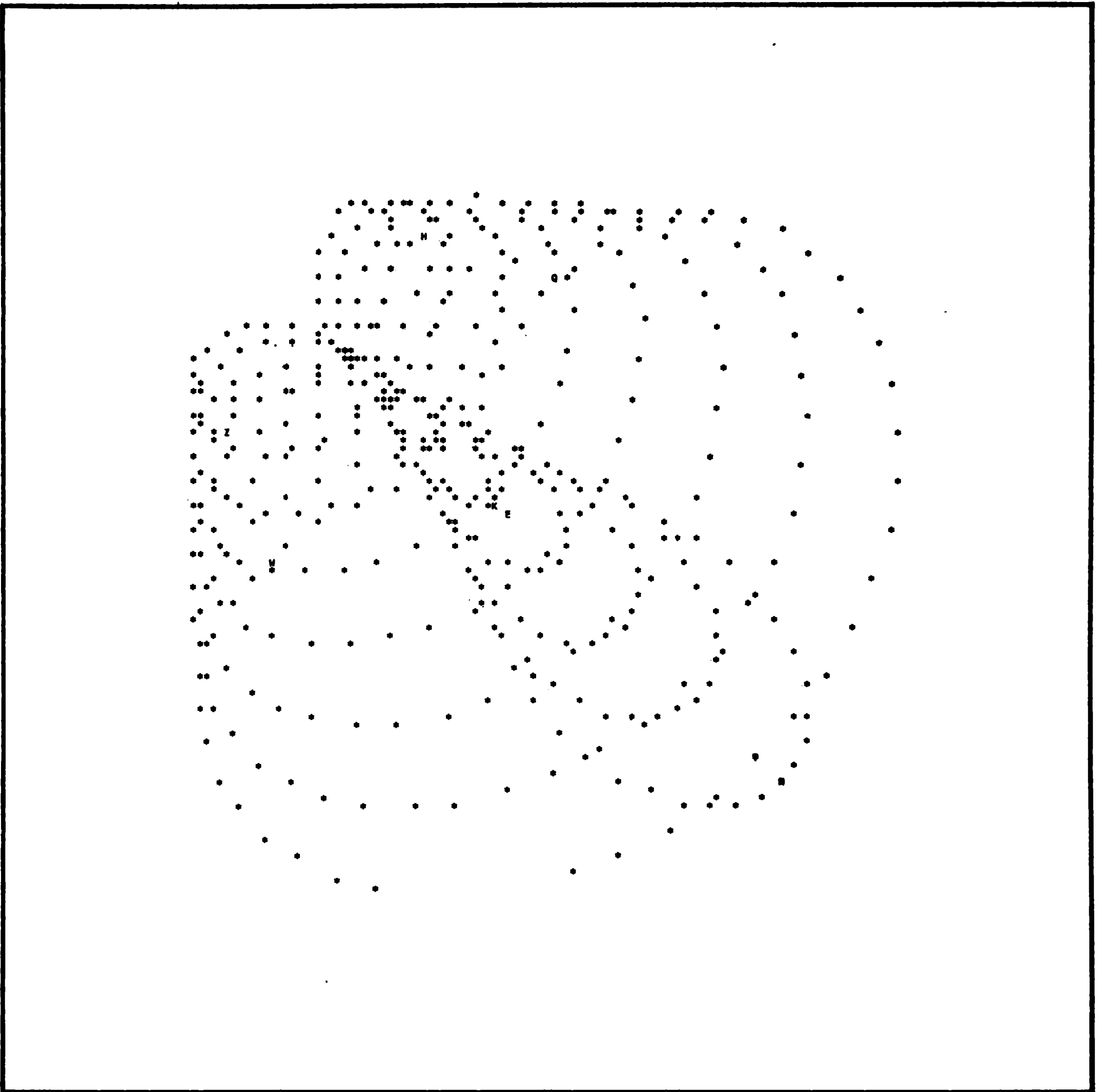
RC 7



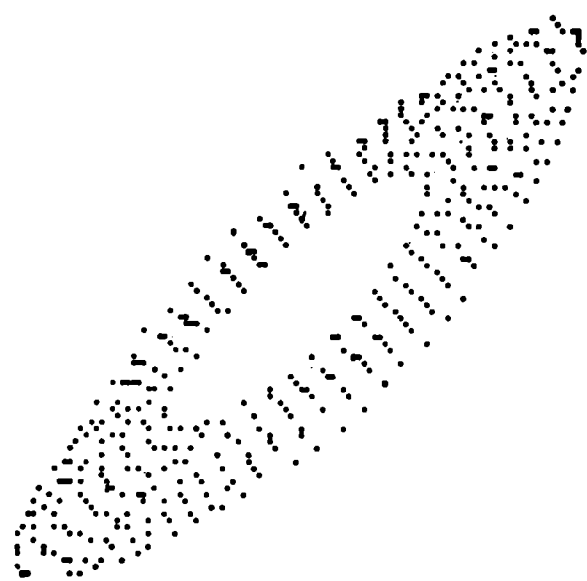
CA 8



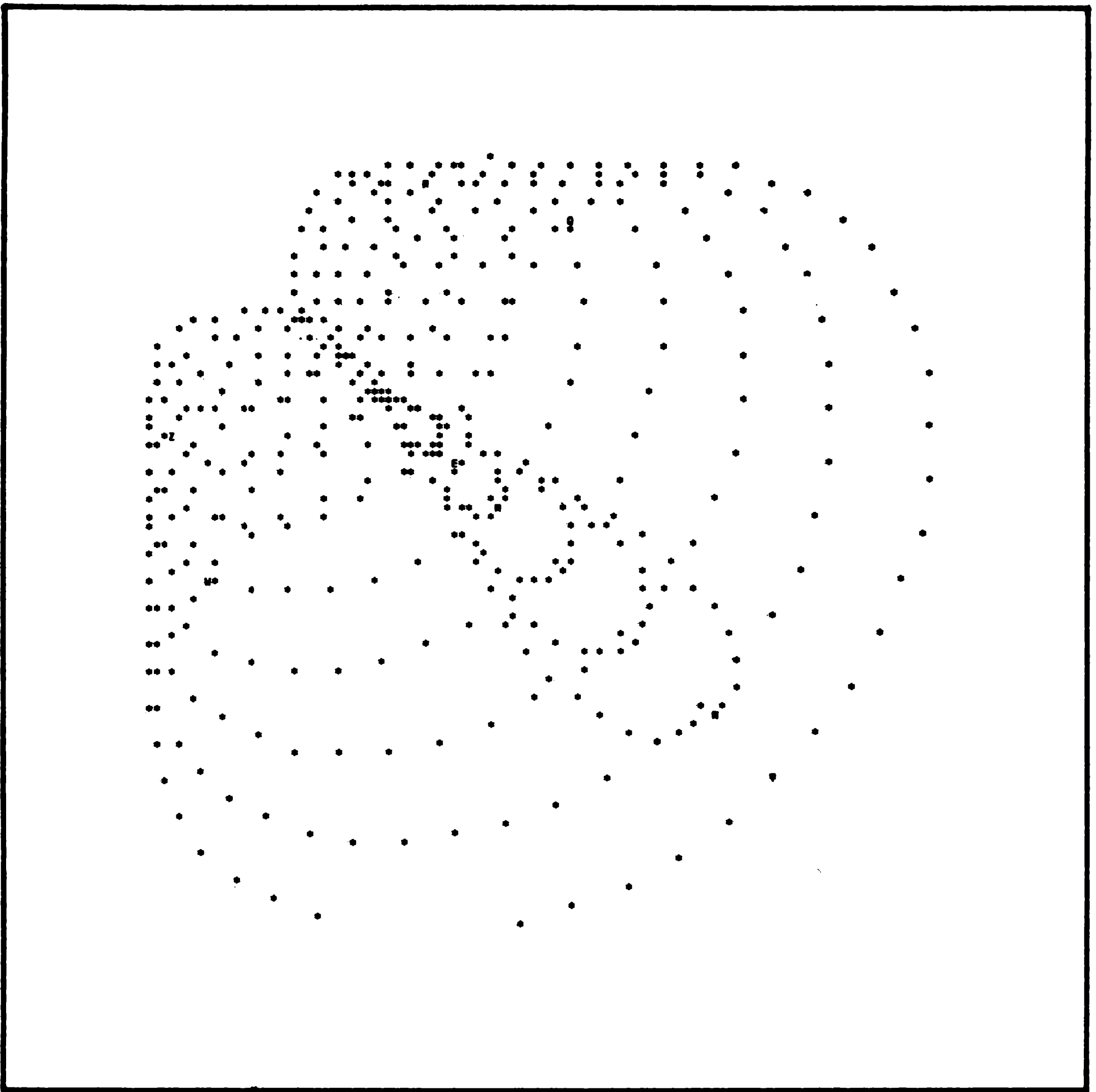
RC 8



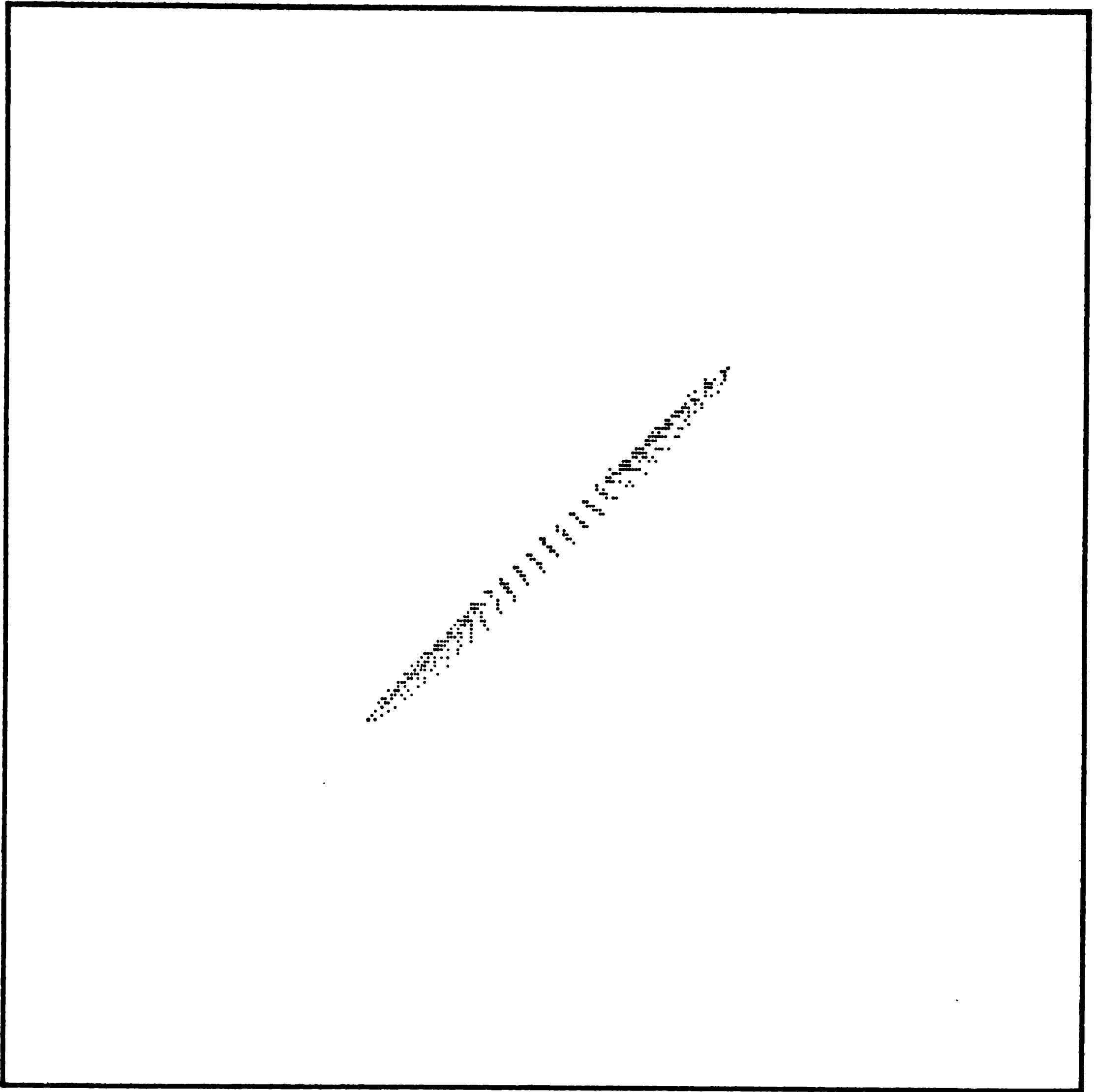
CA 9



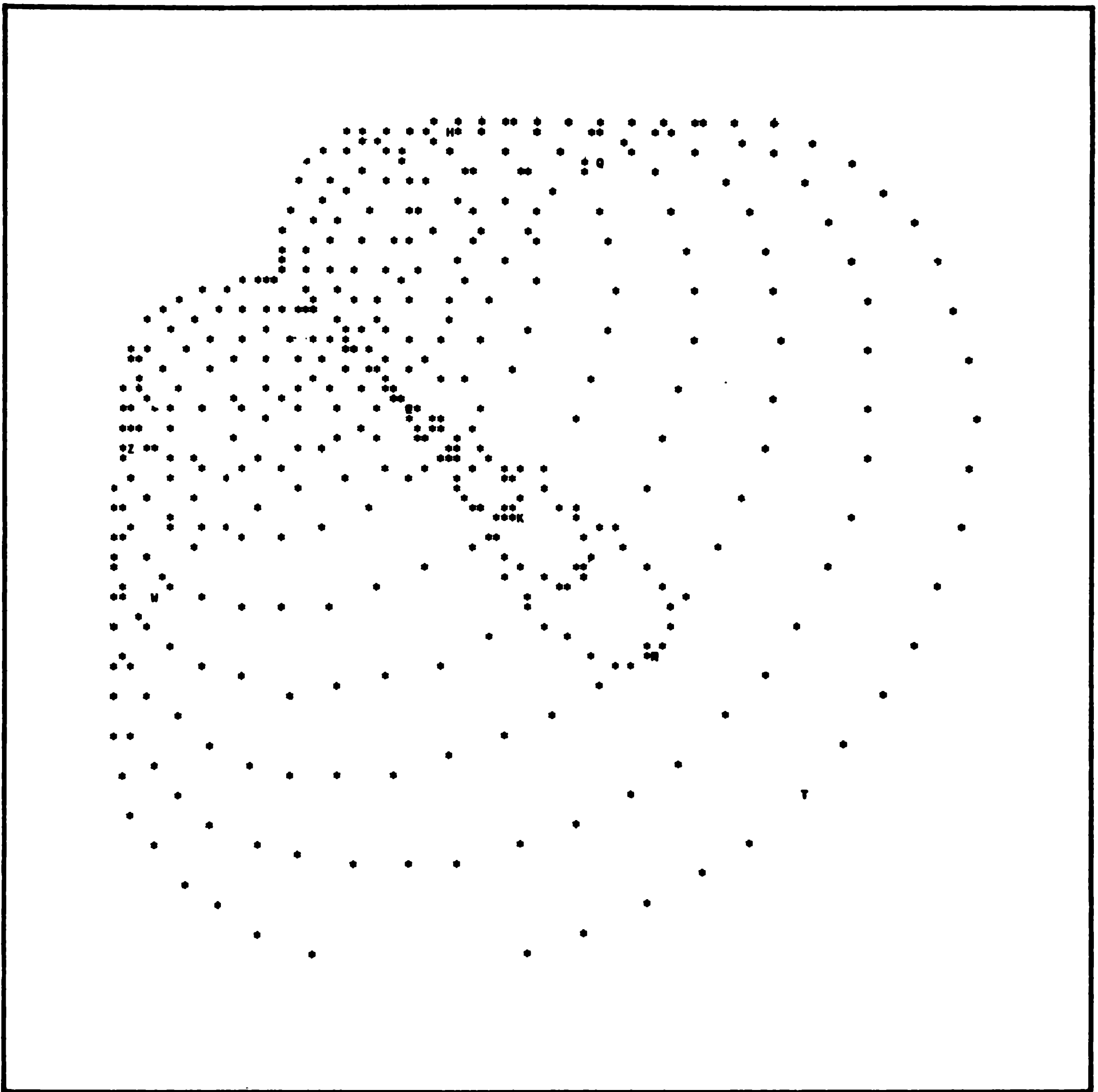
RC 9



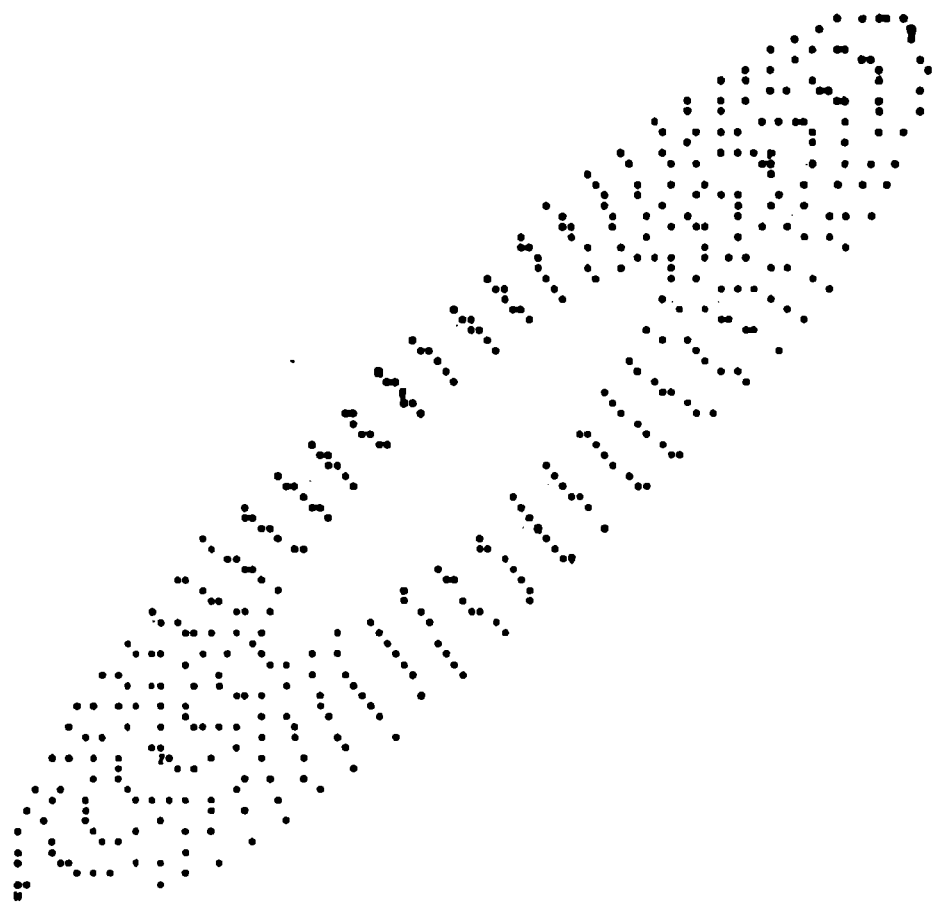
CA 10



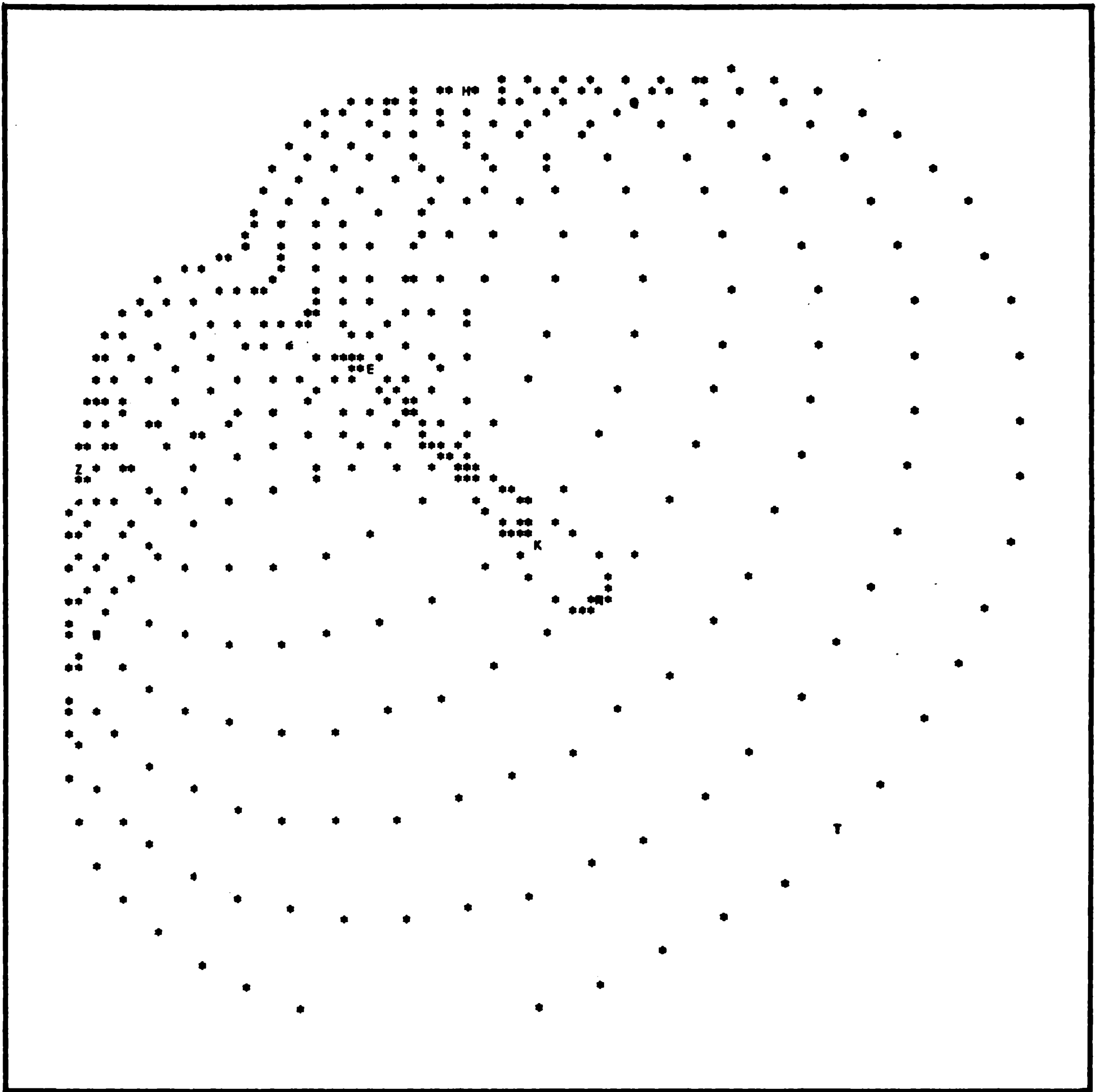
RC 10



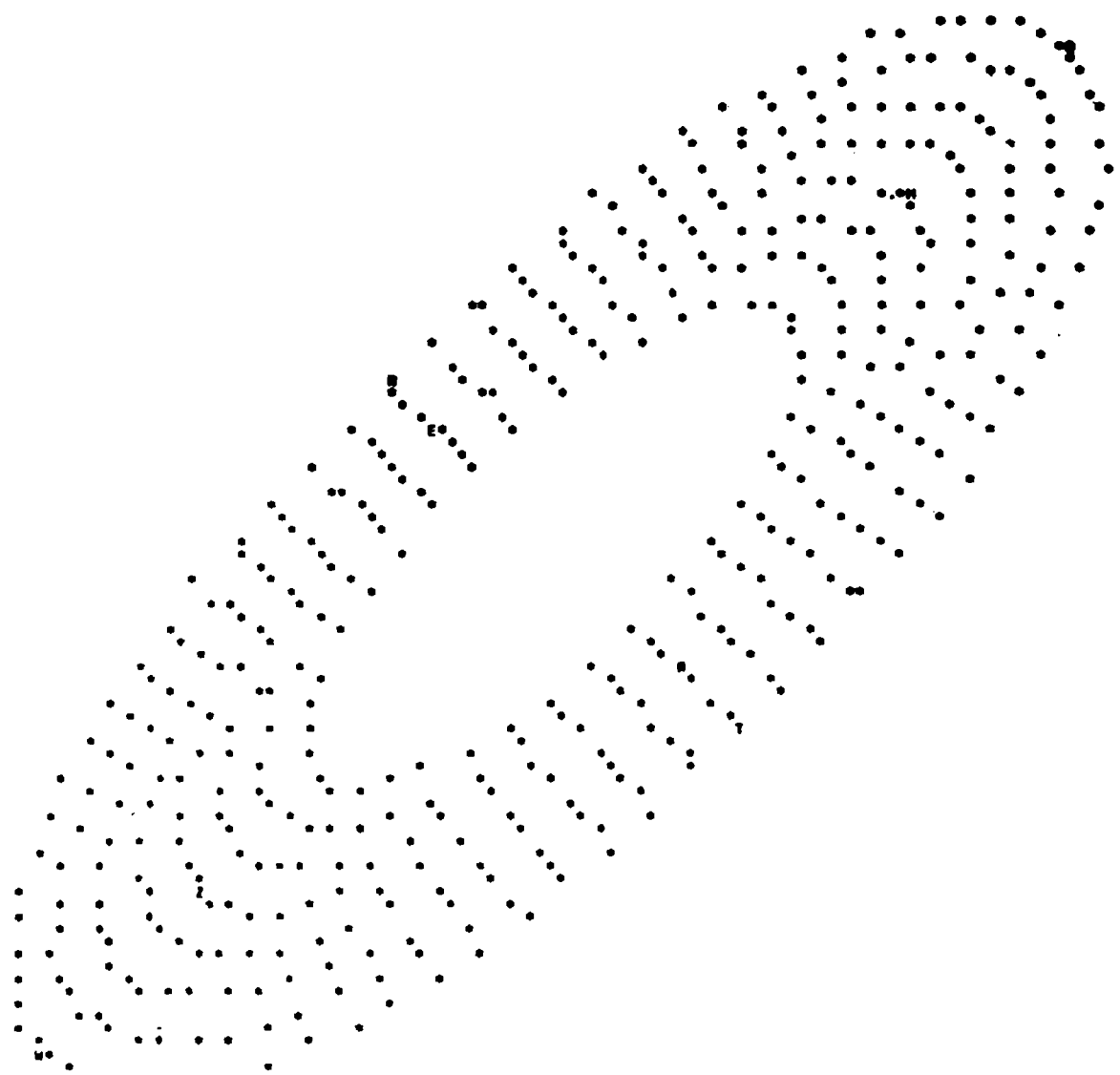
CA 11



RC11



CA 12



RC 12

3 – DESCENTRADO Y/O DESCOLIMACION DEL SECUNDARIO

En los gráficos 13 (R, M, T) al 16 (R, M, T) se examina el efecto de un descentrado, manteniendo los ejes paralelos. El efecto de este error es la aparición de una coma de magnitud constante en todo el campo, paralela al vector desplazamiento Δ .

La magnitud es proporcional a Δ y el factor depende del sistema óptico. Es mayor para el Ritchey—Chretien (Ver apéndice).

La coma de descentrado se combina de modo diferente para diversos puntos del campo con las aberraciones del sistema, pues éstas son simétricas respecto del eje.

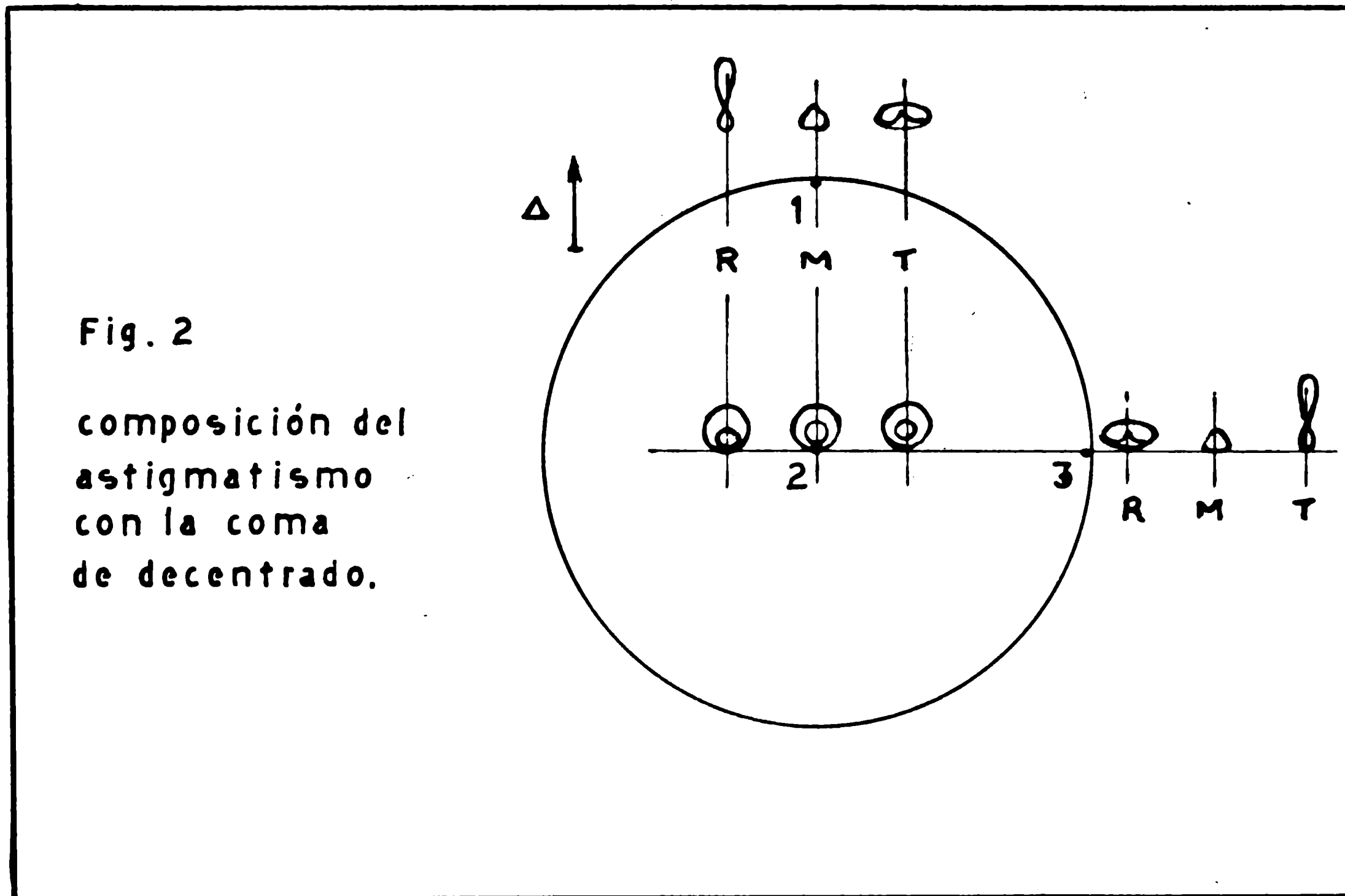


Fig. 2
composición del astigmatismo con la coma de descentrado.

Es suficiente estudiar el aspecto en los puntos 1, 2 y 3 de un plano de enfoque, y pasar éste por la imagen radial (R), media (M) y tangencial (T), Fig. 2.

Para $\Delta = 0$, esto corresponde a los gráficos RC 6, RC 8 y RC 10, que deben incluirse en la serie.

Los valores de Δ estudiados son, en mm:
0 0,1 0,25 0,5 1

- Como guía en la interpretación de los gráficos, se observa que:
- Considerando el punto 1.
En el plano R la coma se combina longitudinalmente con la línea astigmática.
En el plano T, se combina transversalmente.
 - En el punto 3 la secuencia es inversa, y entonces valen los mismos gráficos en tal orden.
- Resulta que imágenes estelares en la periferia del campo aparecen diferentes para

cada acimut, y las posiciones se invierten al pasar por los planos astigmáticos. Esto puede sugerir un método para la detección del error.

La dispersión de la imagen, para $\Delta=0,1$ mm, es despreciable, pero no en los demás casos, aún considerando la turbulencia atmosférica (A. Behr, 1973).

La imagen en el centro, punto 2 y gráficos 17 a 20, corresponde a una coma pura fuera de foco debido a la curvatura de campo, que hace que el foco paraxial se forme detrás.

La distribución de intersecciones para una coma pura, a suficiente distancia del foco, es una imagen de la pupila con la zona central desplazada.

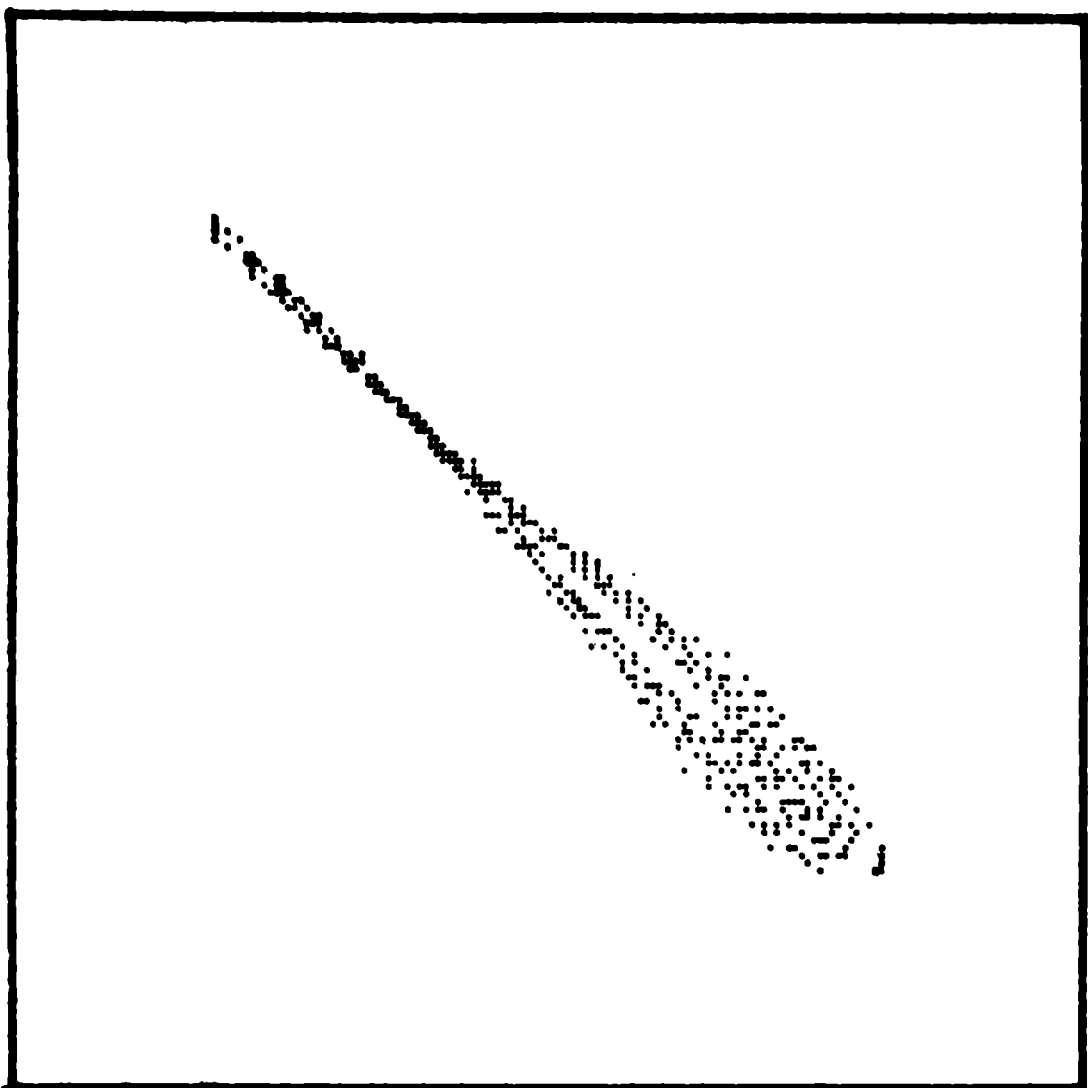
En un telescopio de dos espejos el centro está oscurecido por el secundario y proporciona un borde neto que puede medirse sobre una fotografía, y de allí deducir el correspondiente desplazamiento del espejo (R. Wilson y F. Franza, 1979).

De los gráficos se puede estimar el valor óptimo del desenfoque para esta técnica. Si es muy grande, el desplazamiento relativo de la sombra es insuficiente, y si es pequeño, la forma de la imagen se complica. Los gráficos 17 a 20 corresponden a un desenfoque de 1,96 mm (plano M), y todos los valores de Δ .

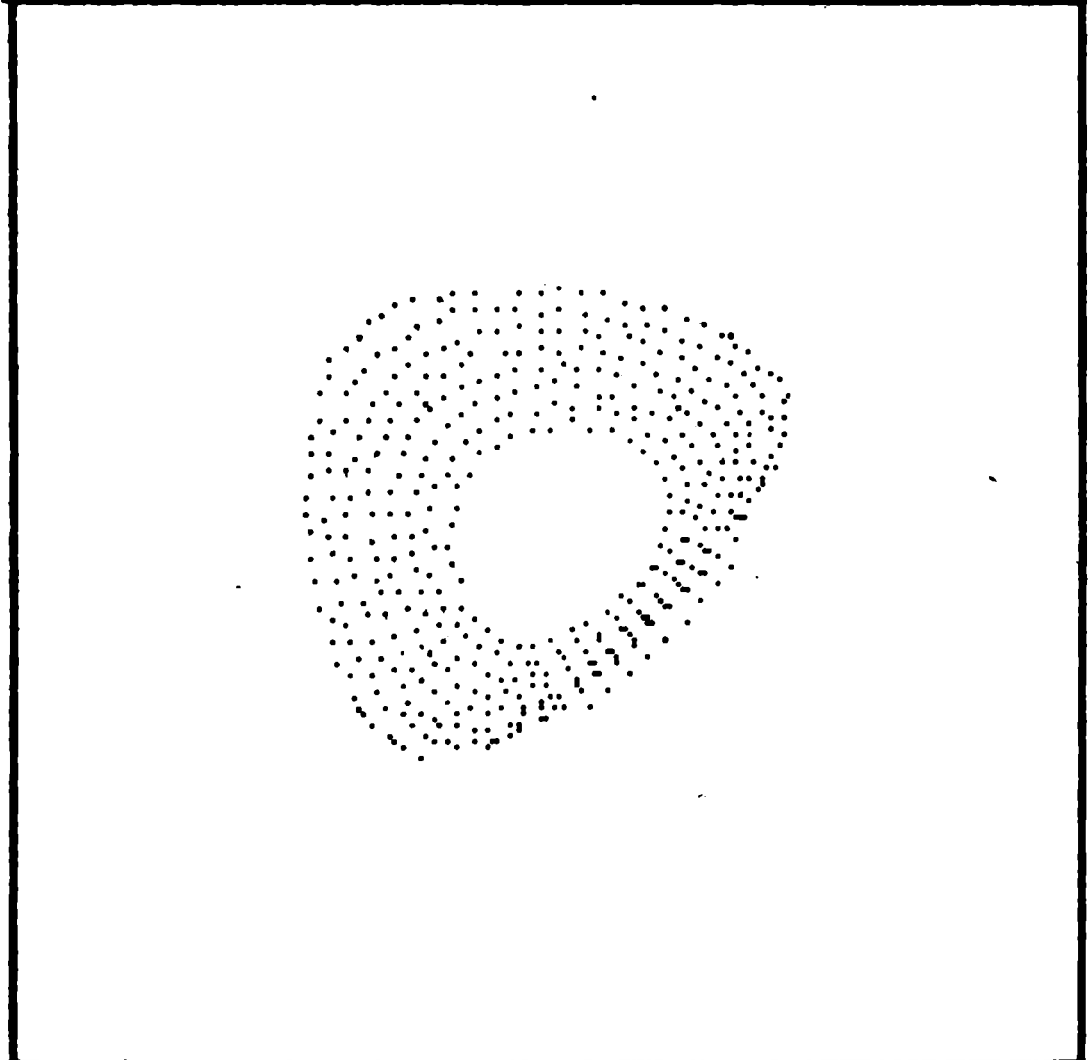
La falta de colimación del secundario produce un efecto similar al descentrado. También es proporcional al ángulo rotado ϵ por el espejo, pero el factor es el mismo para ambos telescopios.

Por último, en los diagramas 21 y 22, se puede ver la imagen comática pura sobre el eje y en el foco, correspondiente a $\Delta = 1$ mm, y cortada por un borde opaco según dos direcciones perpendiculares.

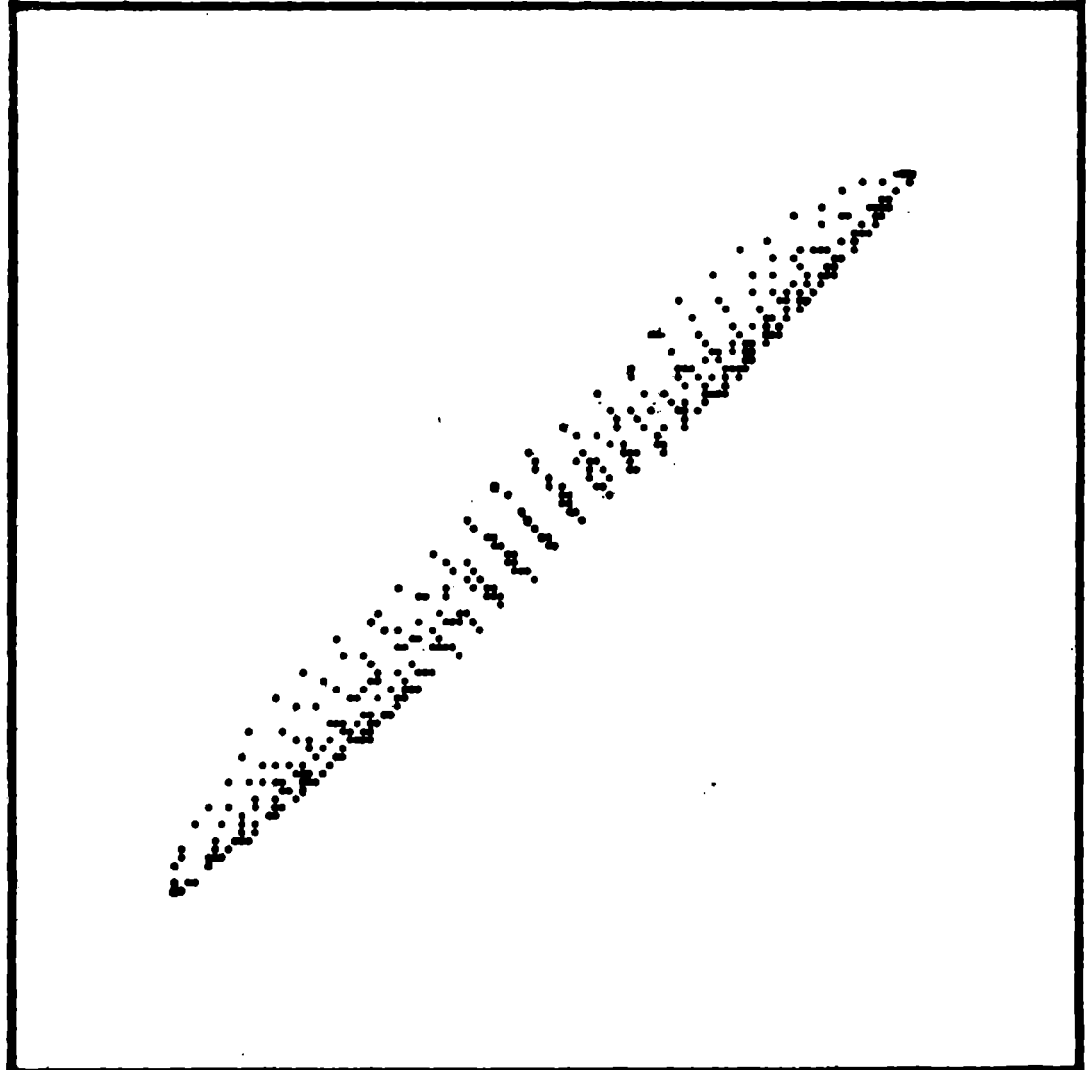
Junto a cada imagen comática, está la pupila, obviamente no a la misma escala que el resto de las figuras. Los rayos eliminados por el borde son las conocidas sombras de Foucault. Su distribución depende del tipo y monto de la aberración y de la posición del borde opaco. Es un método alternativo para la detección del error.



13 R



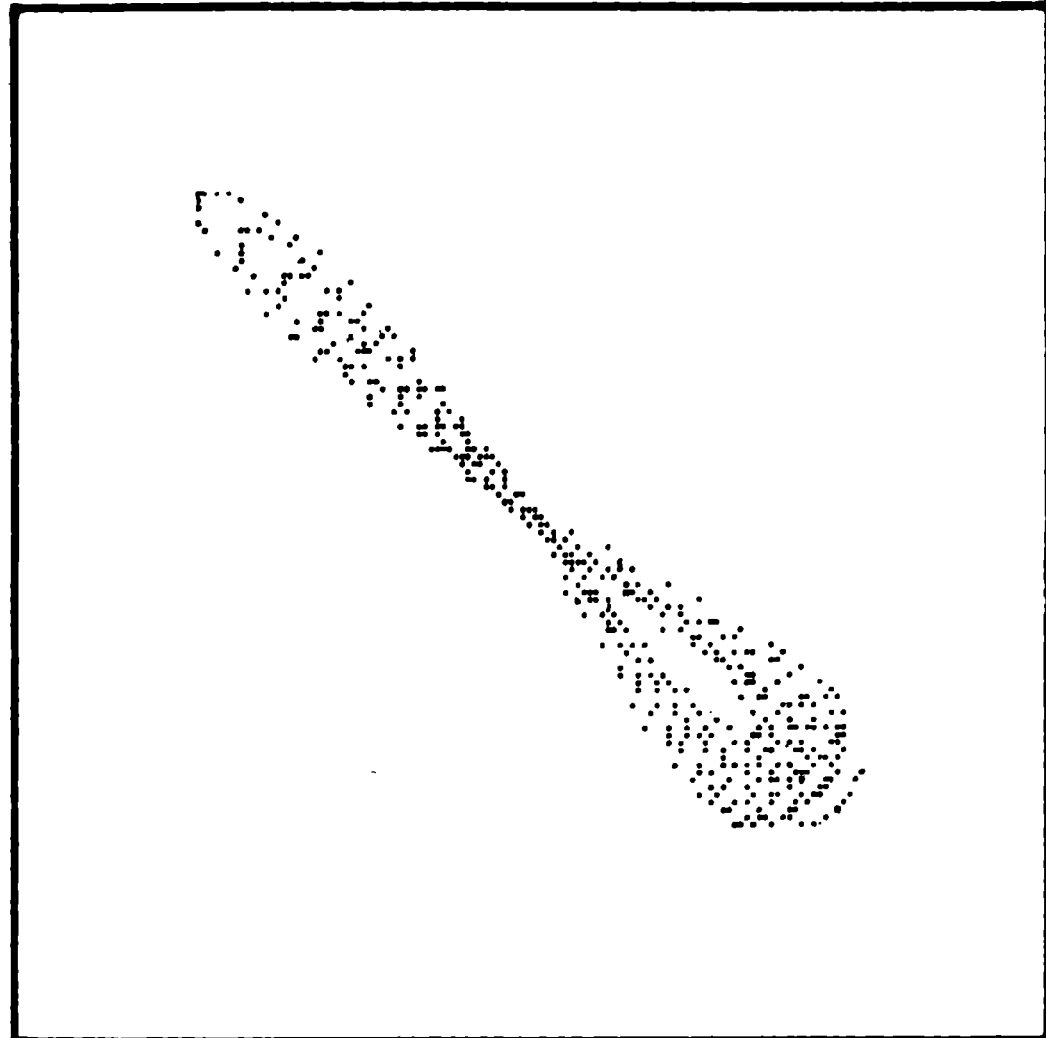
13 M



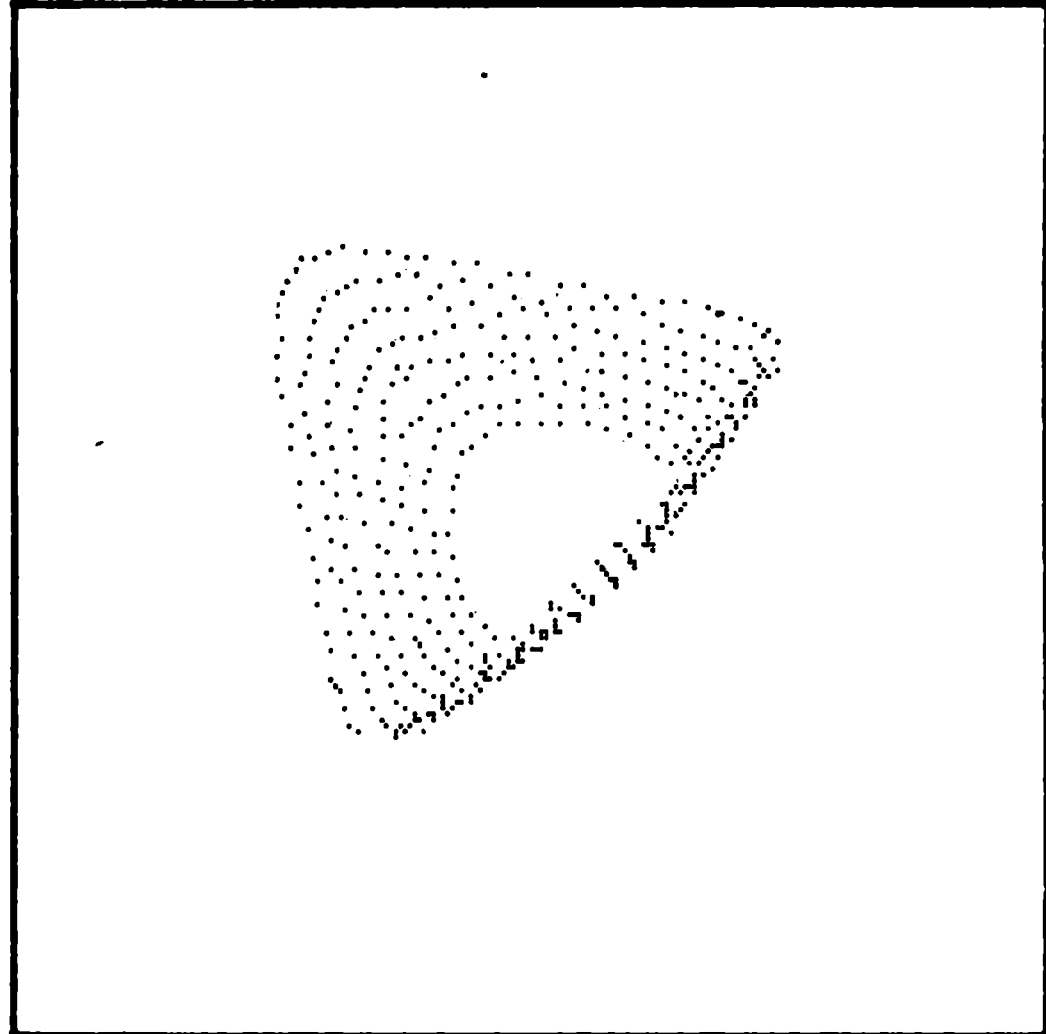
13 T

$\Delta = 0,1 \text{ mm}$

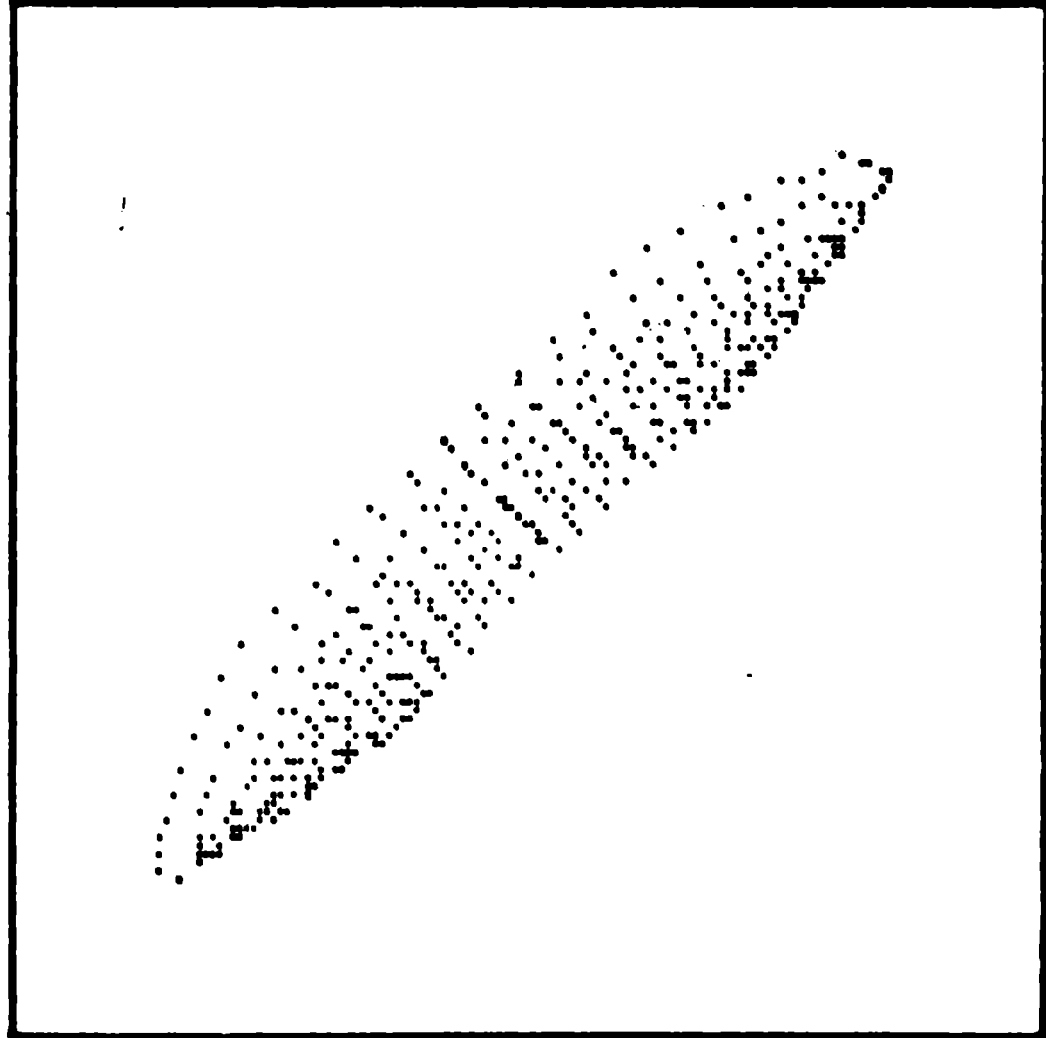
14 R



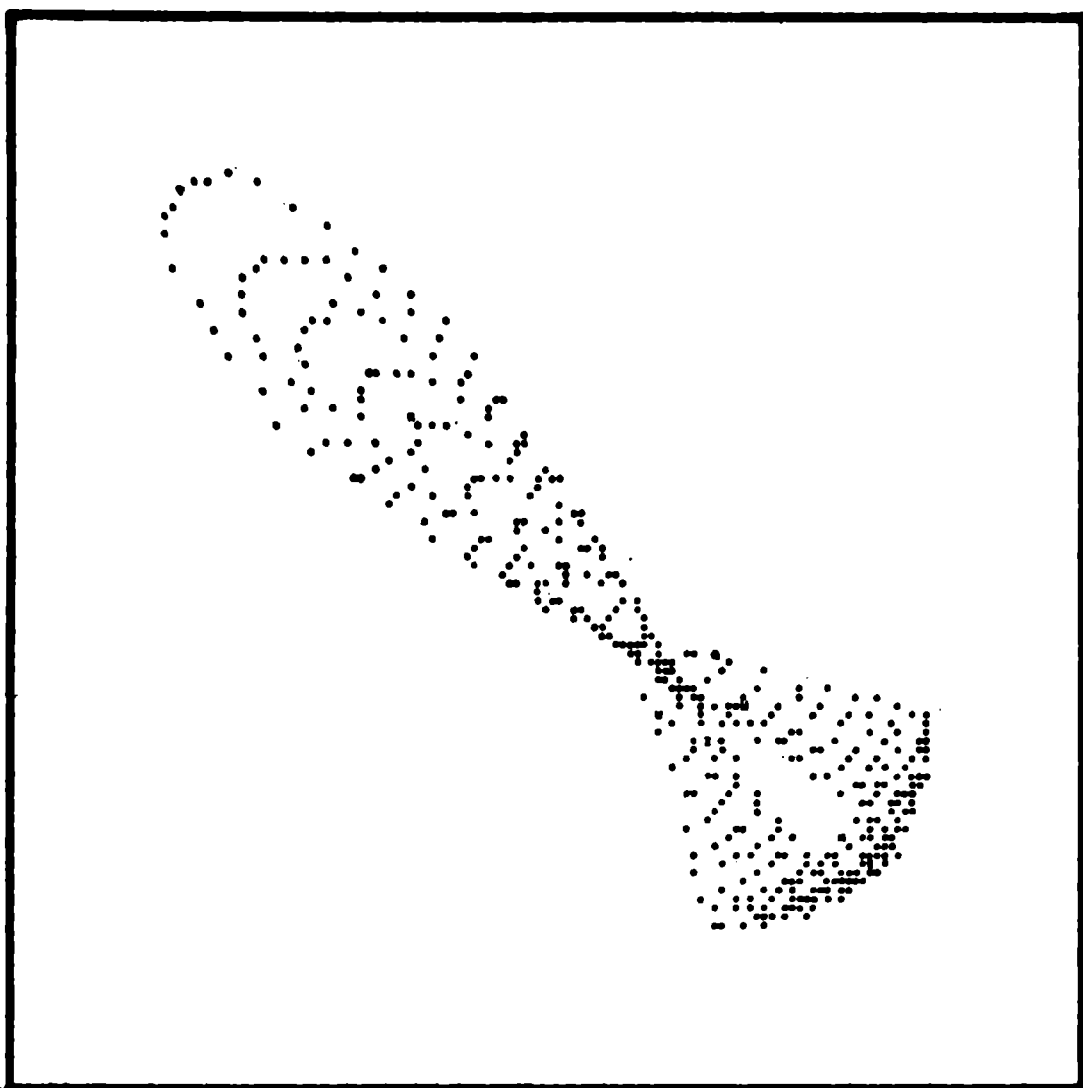
14 M



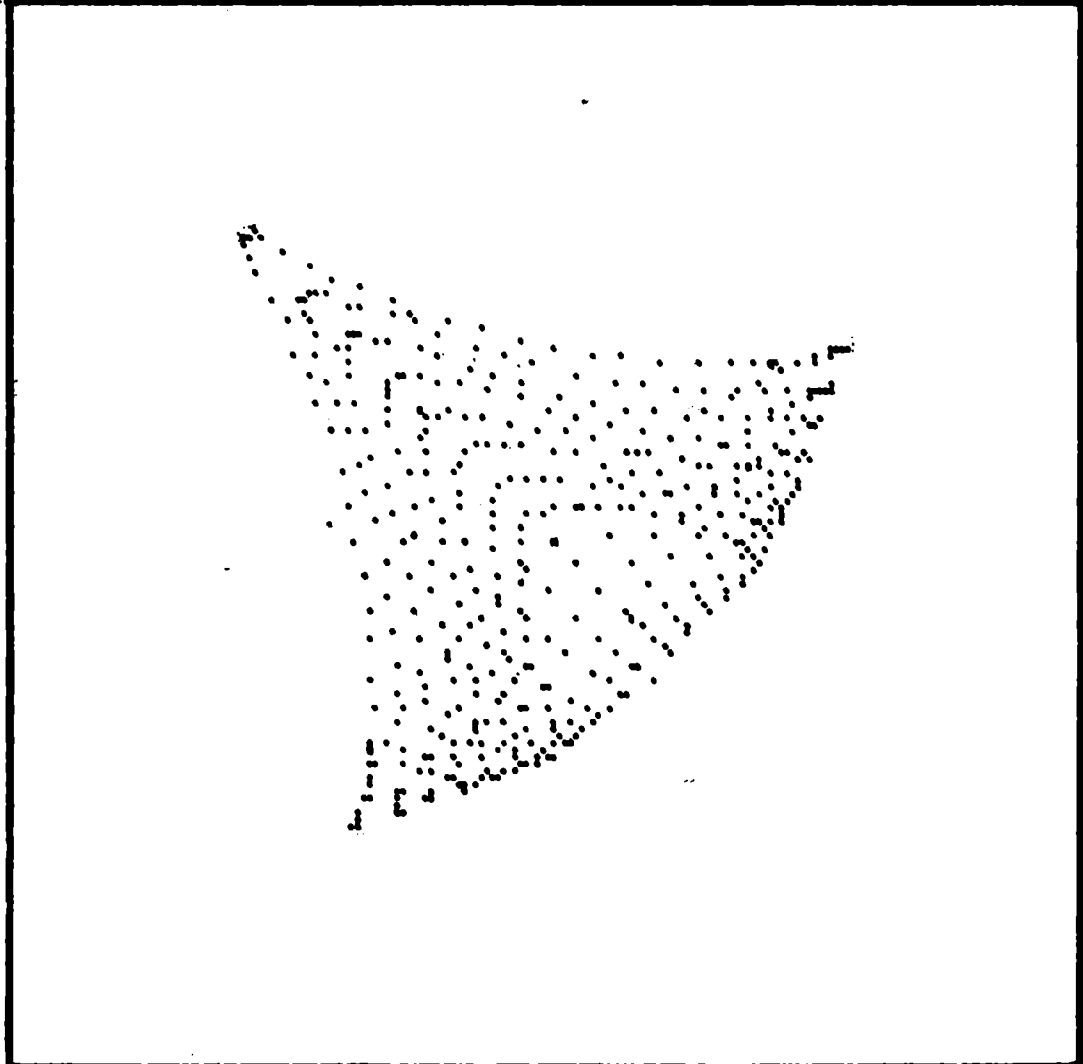
14 T



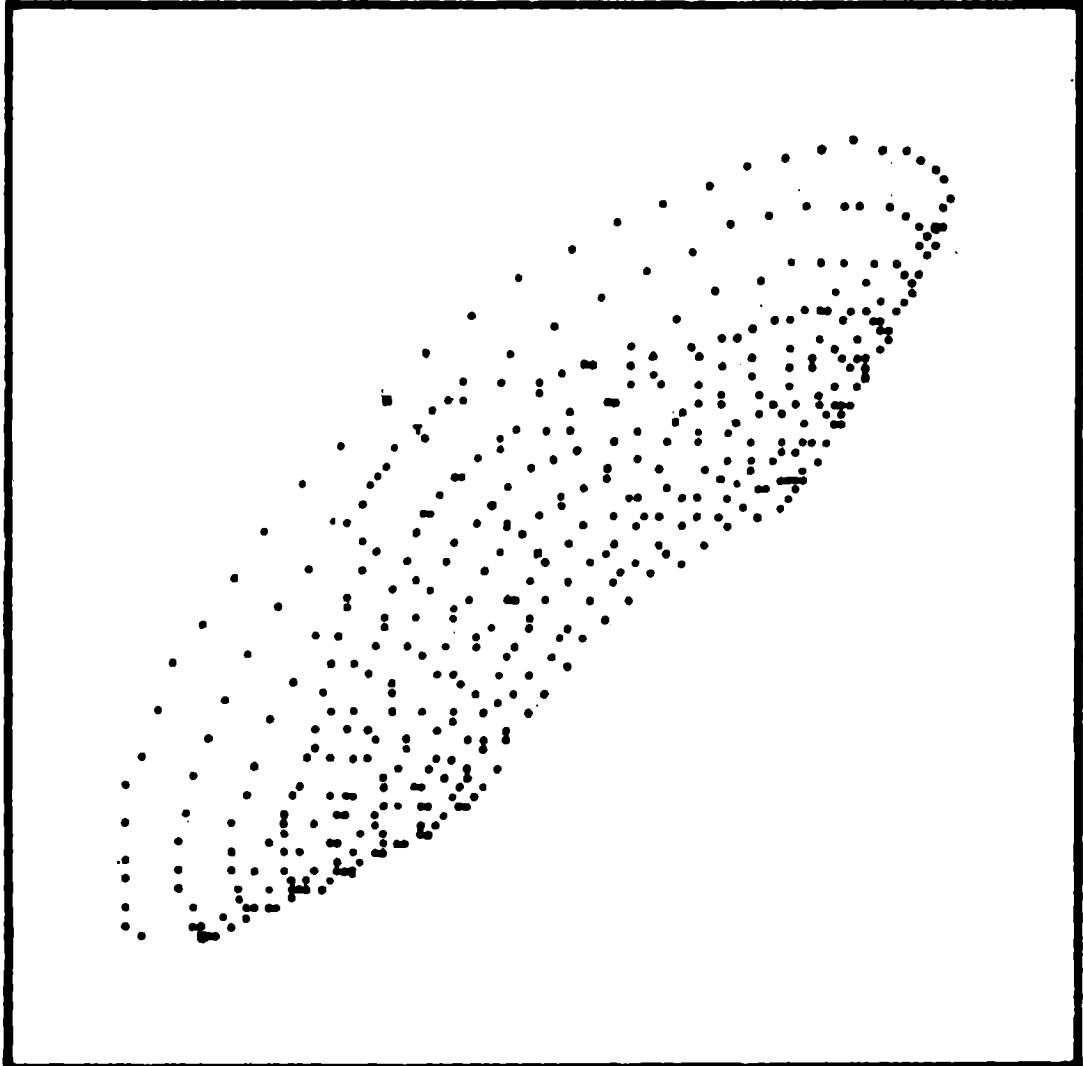
$\Delta = 0,25 \text{ mm}$



15 R



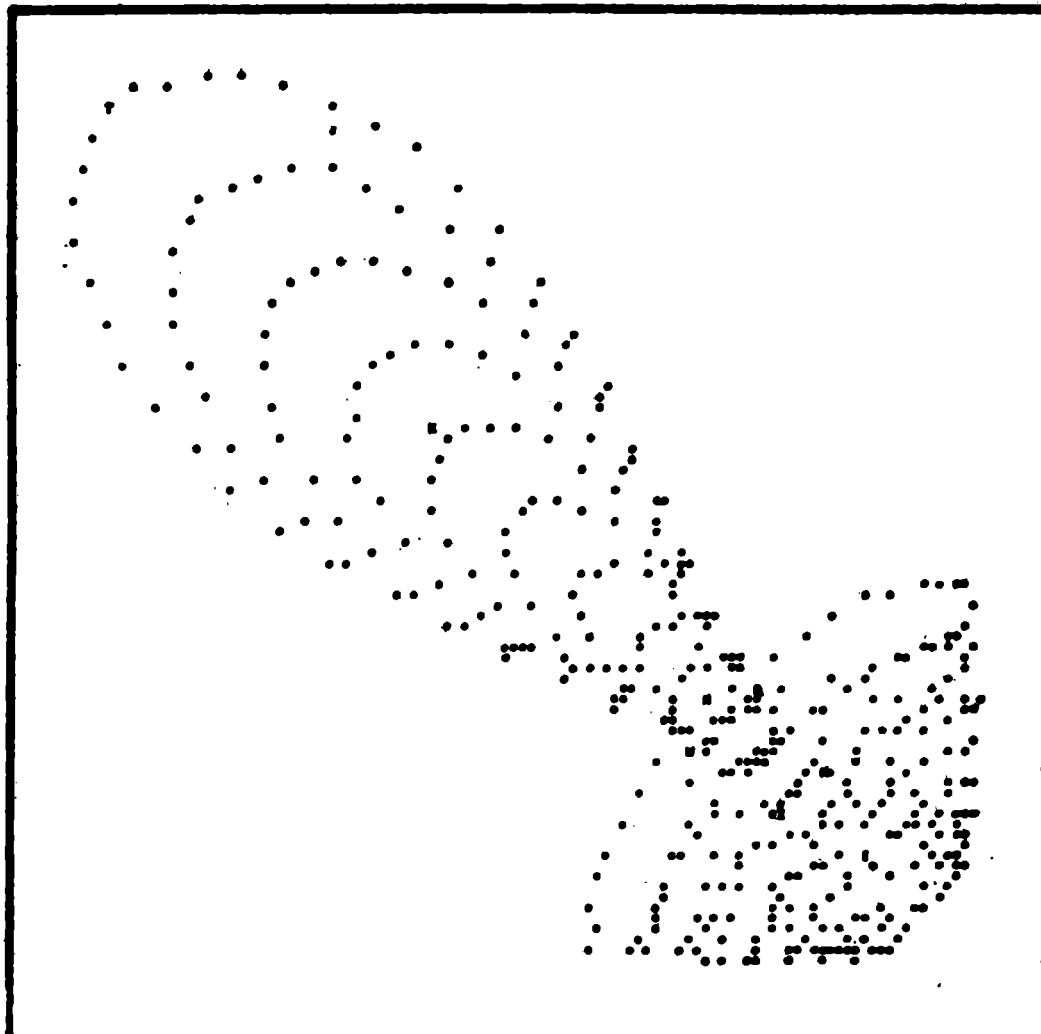
15 M



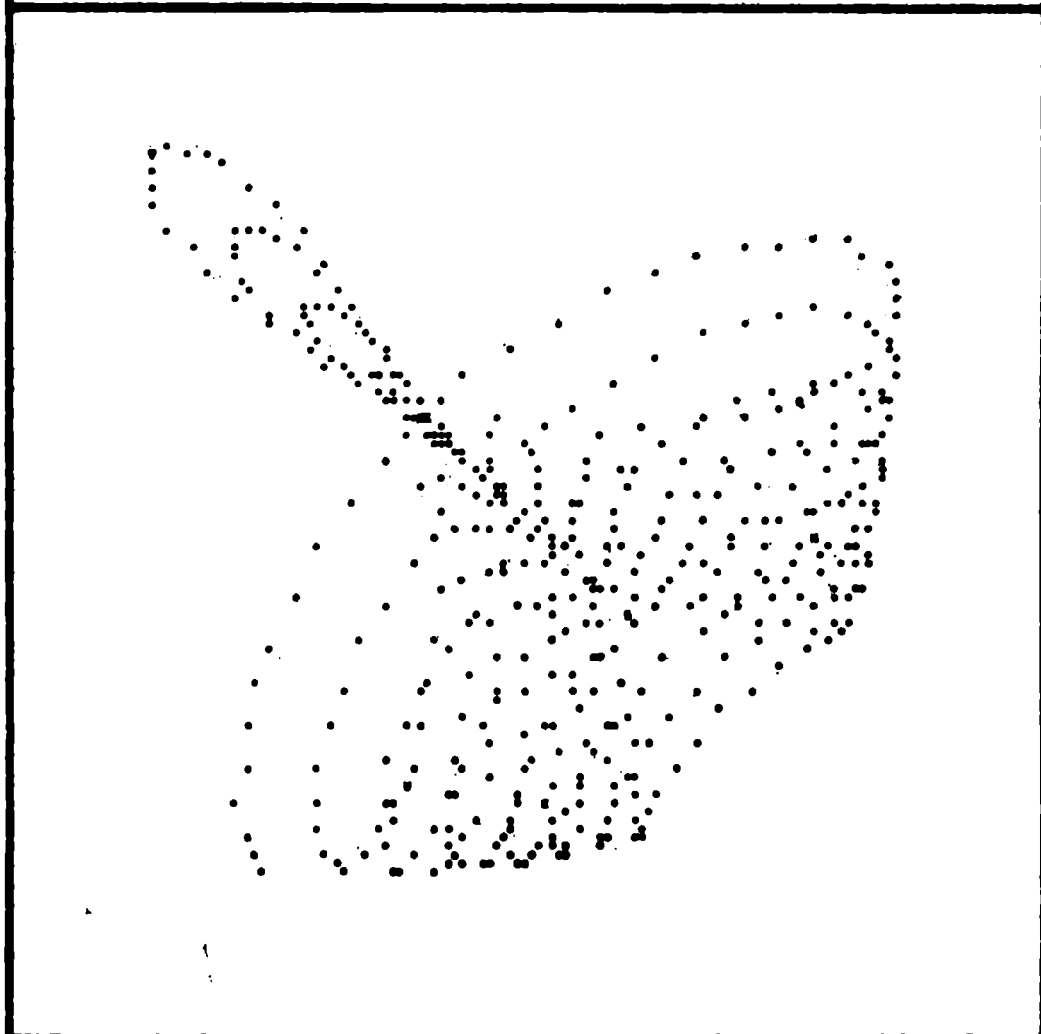
15 T

$\Delta = 0,5\text{mm} \bullet$

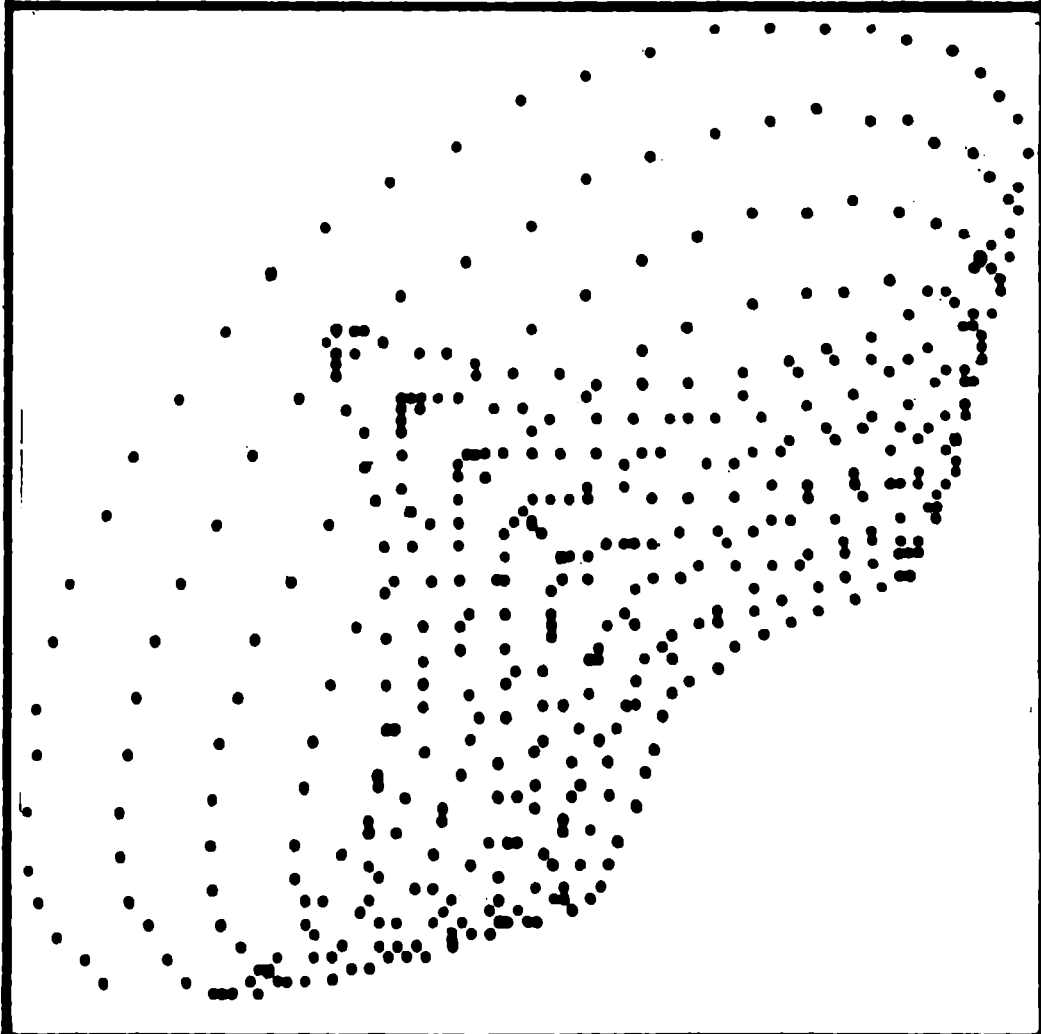
16 R



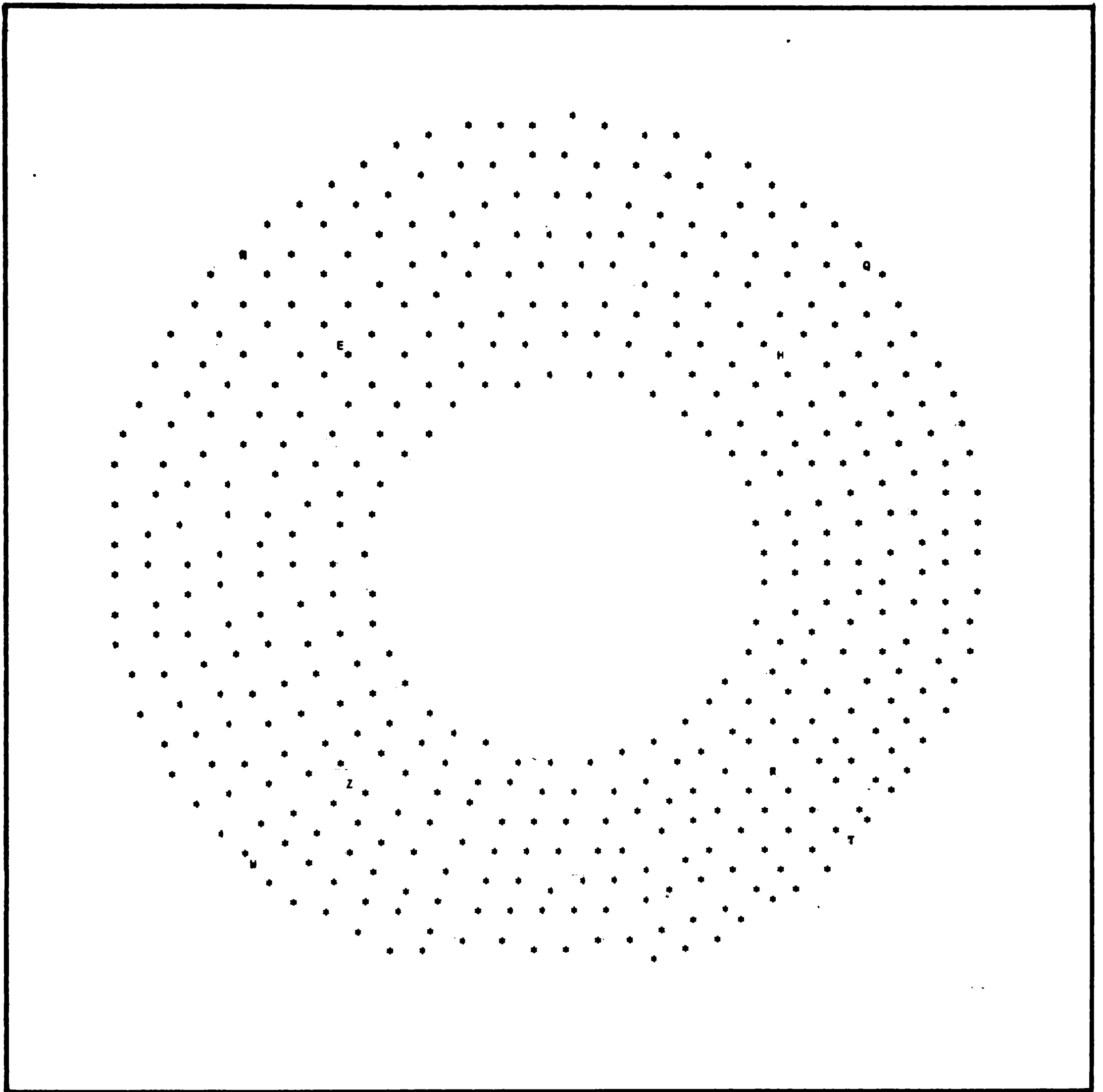
16 M



16 T

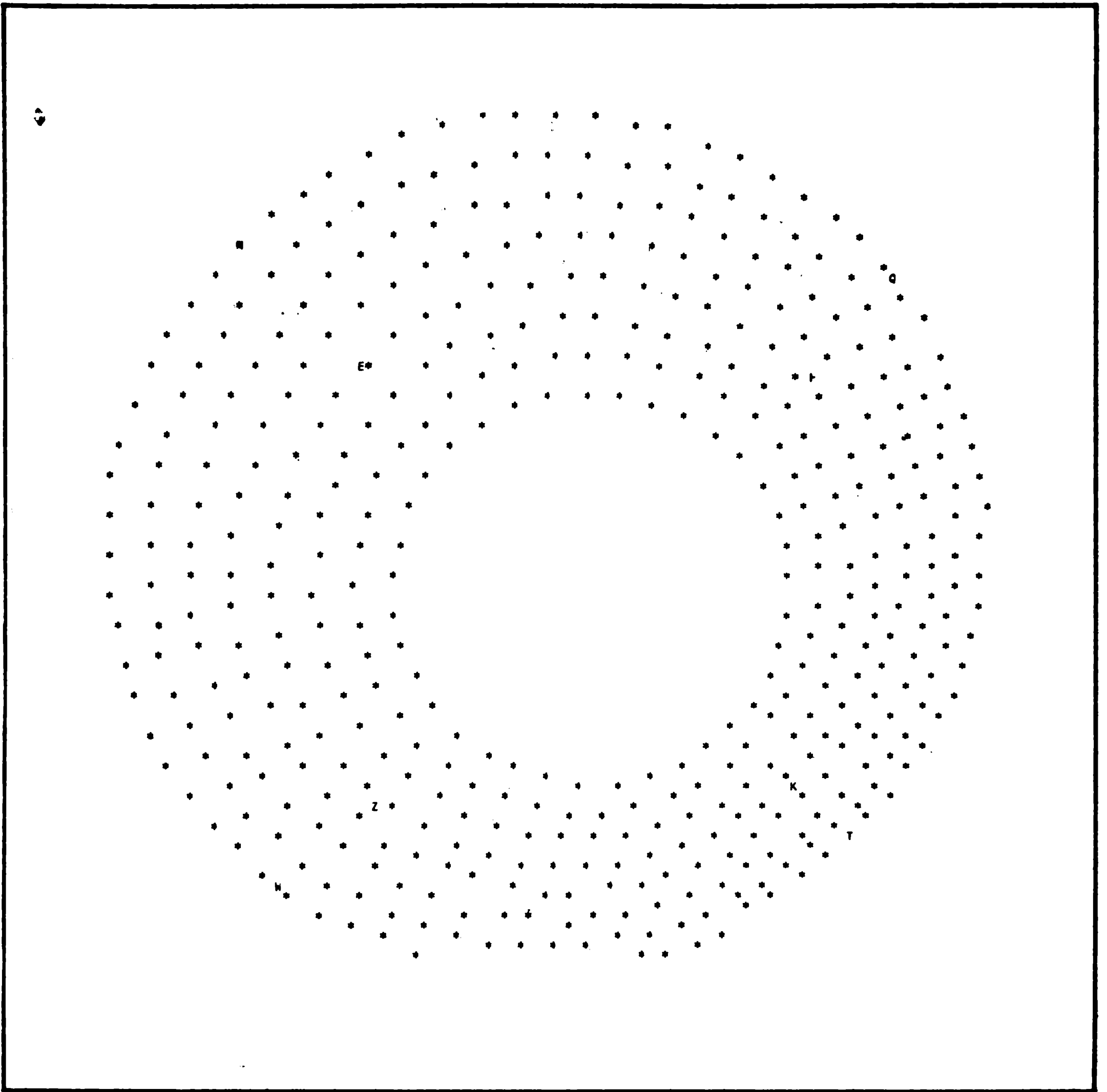


$\Delta = 1 \text{ mm}$



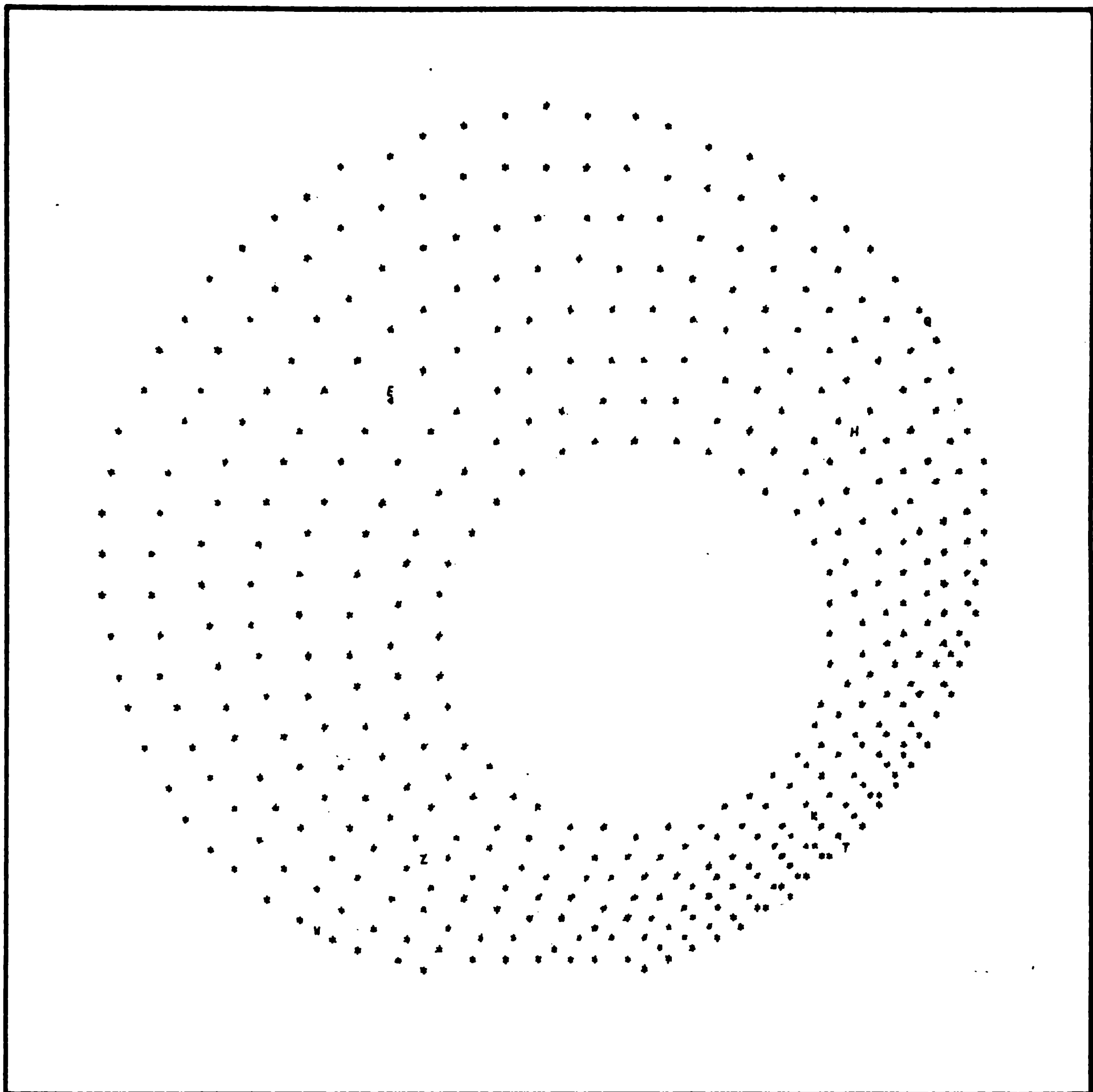
$\Delta = 0,1\text{mm}$

17



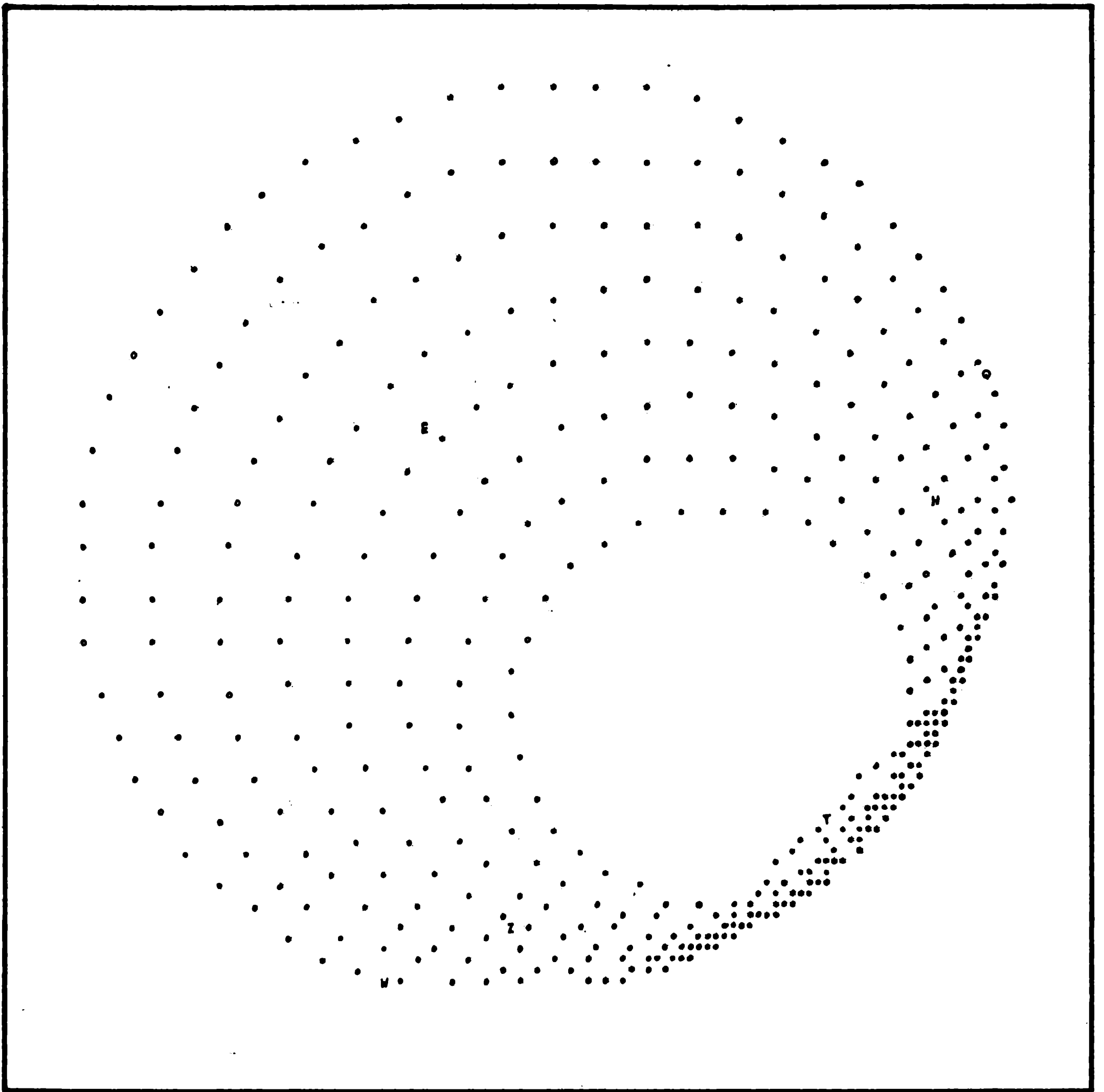
18

$\Delta = 0,25 \text{ mm}$



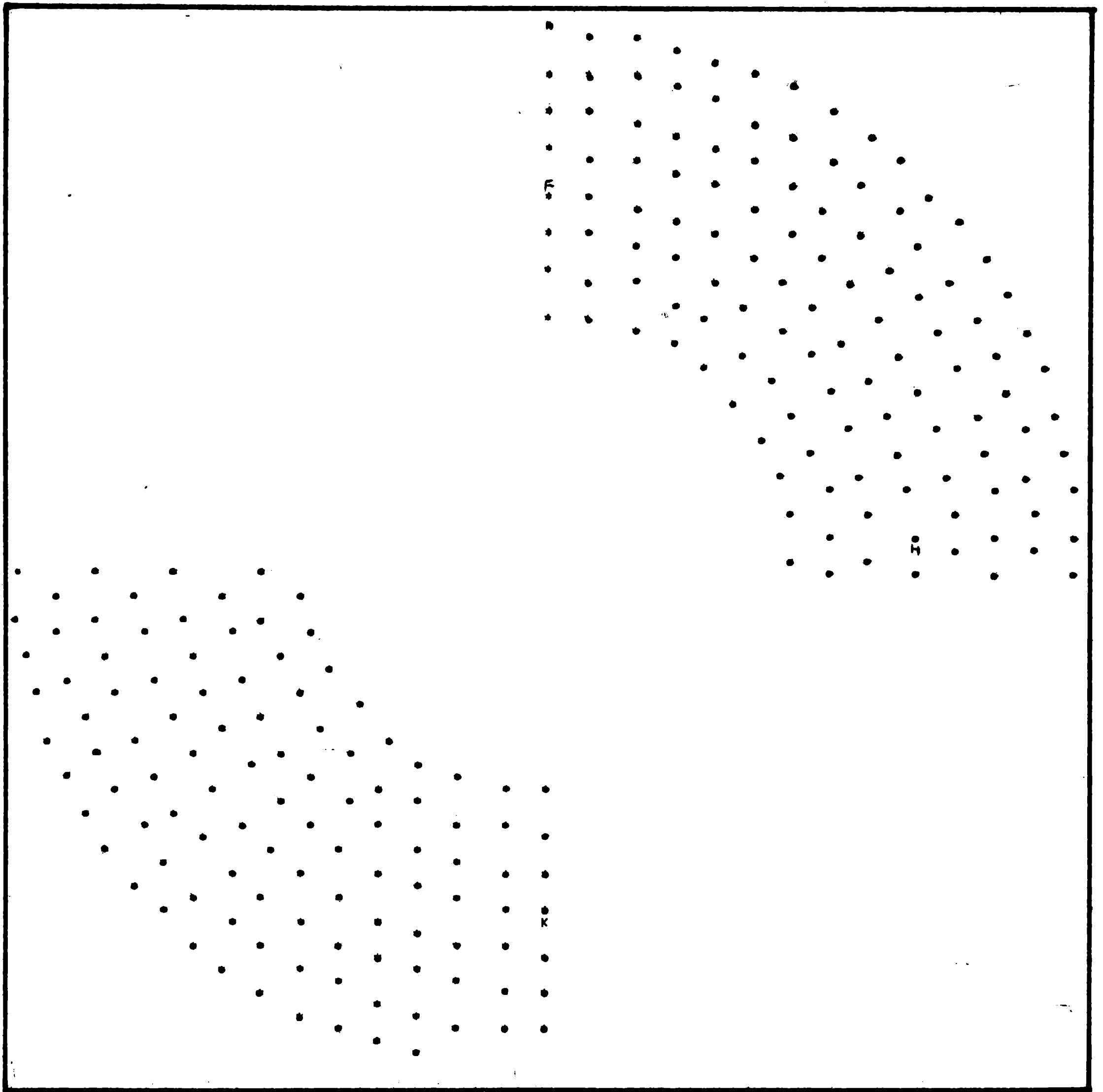
$\Delta = 0,5\text{mm}$

19

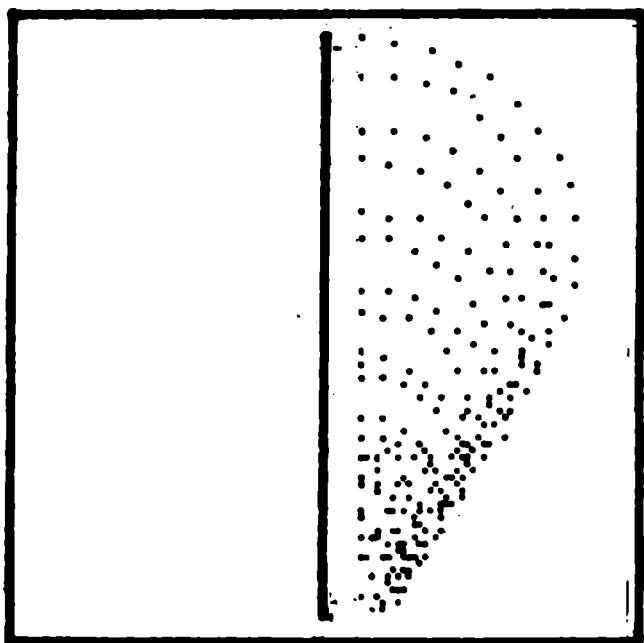


20

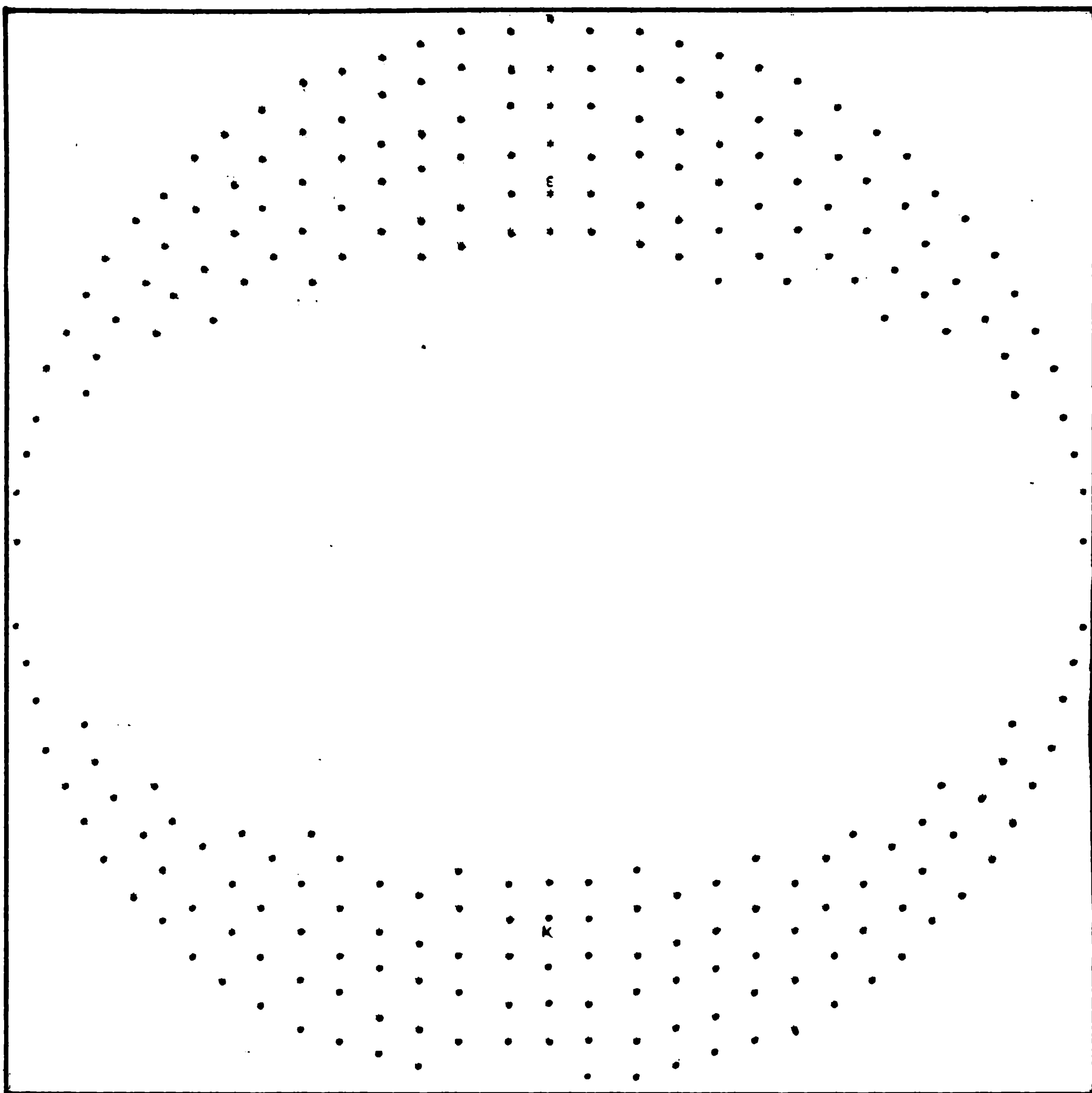
$\Delta = 1 \text{ mm}$



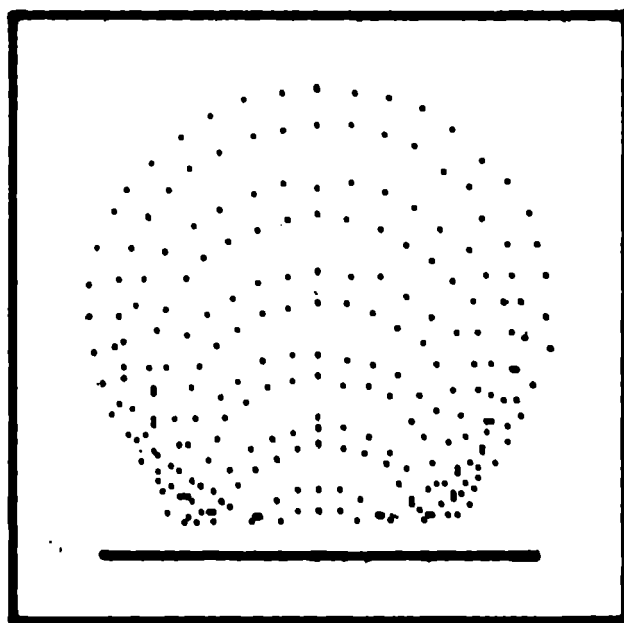
21



43



22



44

4 – DESPLAZAMIENTO AXIAL DEL SECUNDARIO

Si la distancia d entre espejos difiere de la correcta, hay un efecto de primer orden, que es un corrimiento del foco, y también se introducen aberraciones.

La coma y la aberración esférica dejan de ser nulas, y varían en forma aproximadamente lineal con d . Los diagramas 23 (R, M, T) al 28 (R, M, T) muestran el aspecto de la imagen en el borde de un semicampo de 15 arcmin. Se consideraron excursiones del espejo en ambos sentidos.

La distancia correcta es $d = 4,051$ m. Las distancias estudiadas fueron:

4,041 4,045 IN 4,049 4,051 4,053 4,057 4,061

Los diagramas correspondientes a $d = 4,051$ m son los mismos RC 6 (R), RC 8 (M) y RC 10 (T) que sirven de punto de partida para error cero, y deben intercalarse en la serie.

Para determinar los planos de enfoque más definidos, se tuvo en cuenta la aberración esférica y la curvatura de campo.

En la figura 3 están graficadas la coma, astigmatismo y aberración esférica en función de d para el Ritchey–Chretien y para el Cassegrain, en el borde del campo.

Las cantidades DMC y DMA son los diámetros, en arcseg sobre el campo, de los discos de mínima confusión por aberración esférica y el disco mínimo astigmático, respectivamente. COMA es la extensión máxima de la imagen comática.

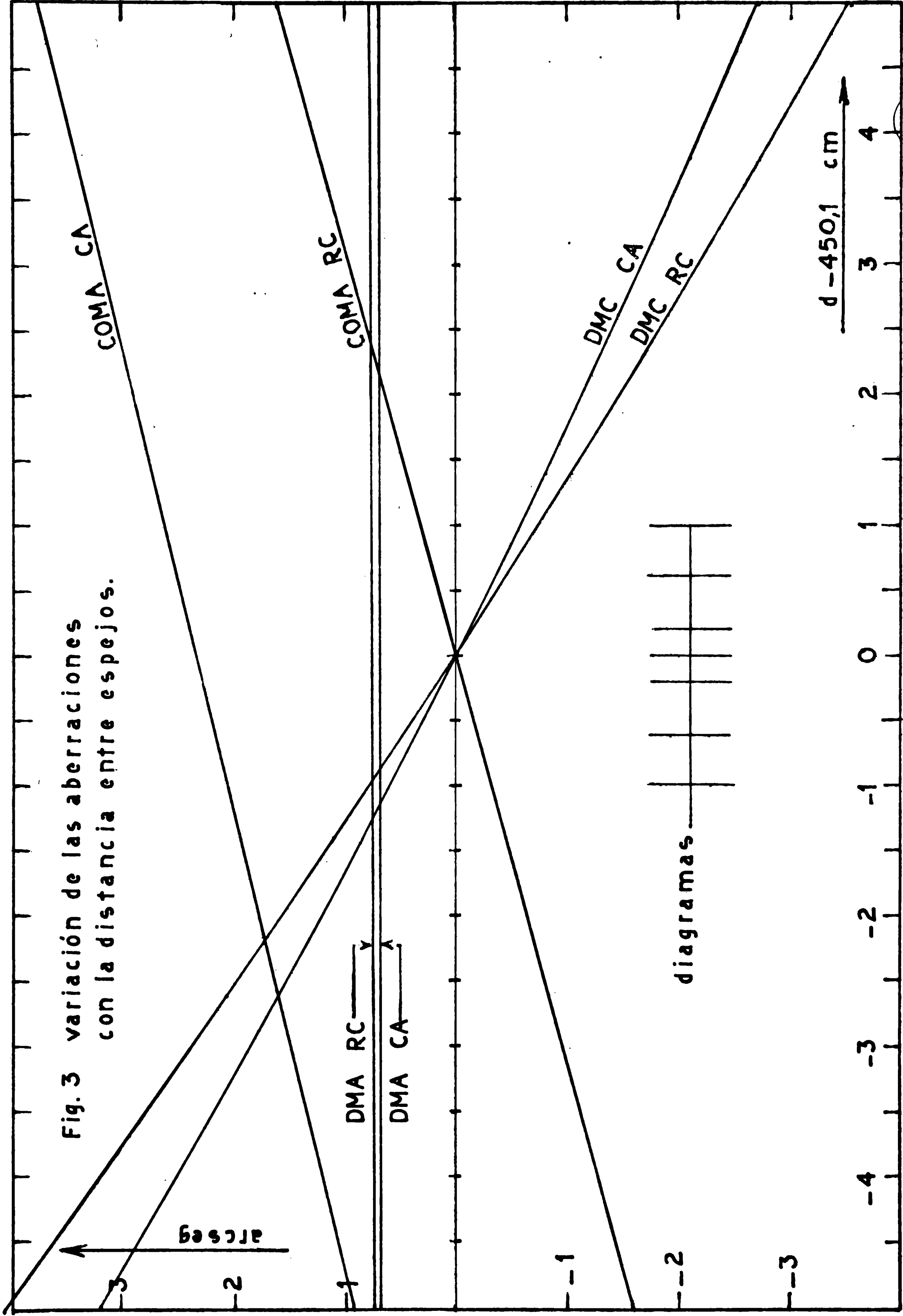
Valores positivos de DMC sólo implican que los rayos marginales cruzan el eje antes que los paraxiales, y respecto de COMA, que la punta se dirige al eje.

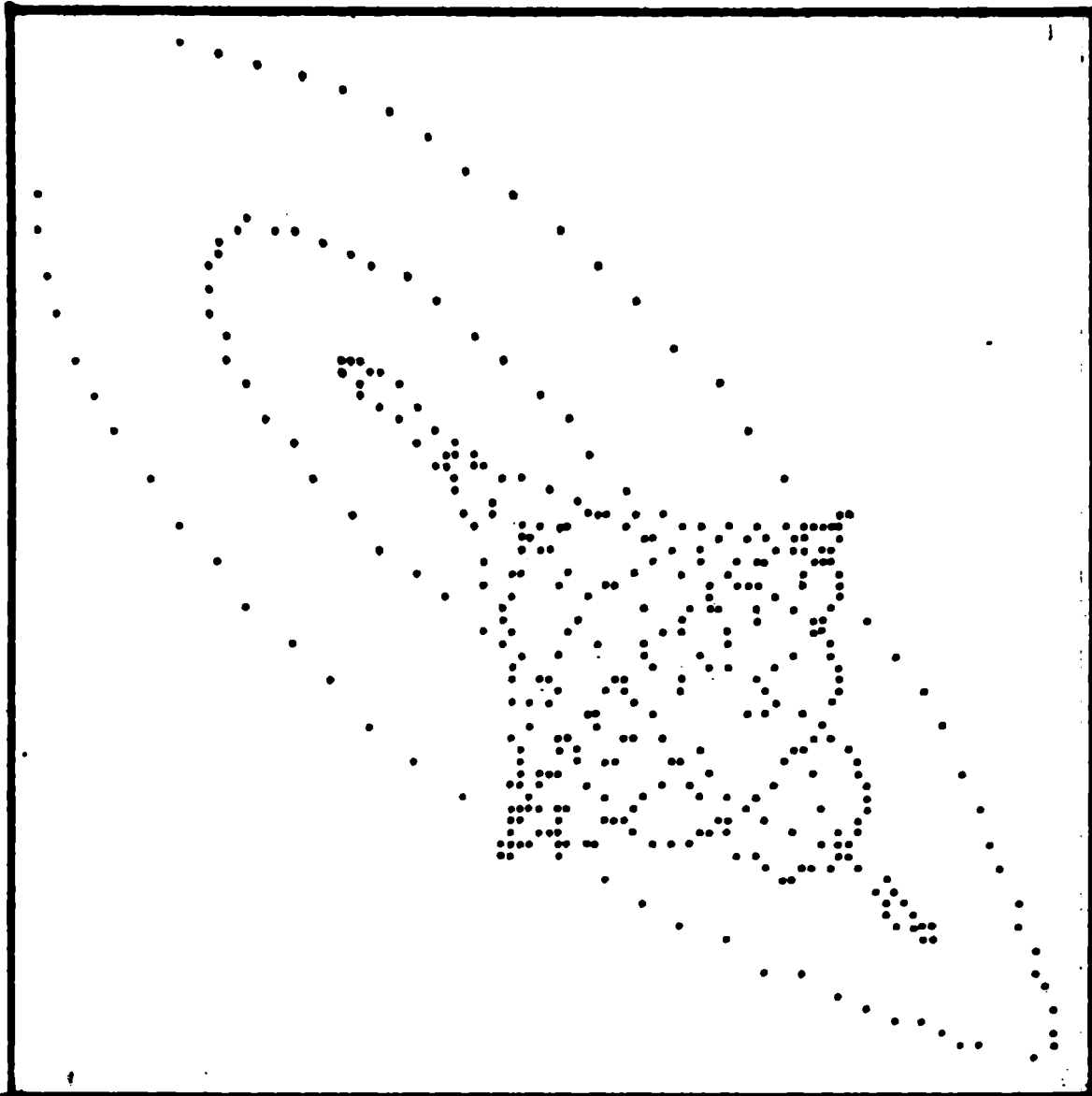
El signo no indica que las magnitudes se sumen o se resten.

La predicción del aspecto de la imagen a partir de los valores de las funciones en la figura 3 es, por lo general, incierta cuando hay muchas aberraciones de magnitud similar.

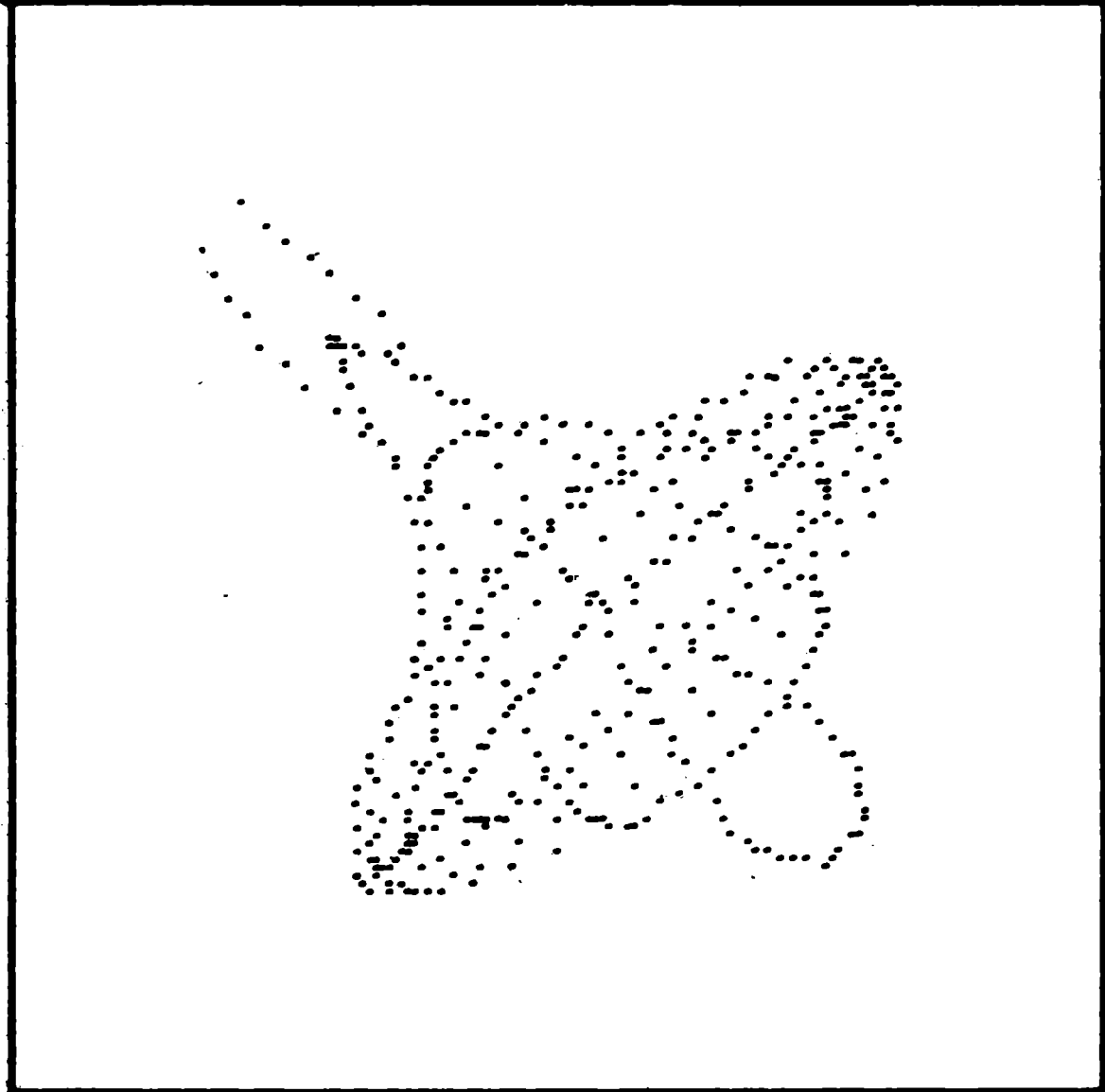
Se puede verificar, por ejemplo, la relación $1 \sim 3$ entre la aberración total en el mejor foco (gráficos RC 8 y CA 8).

Fig. 3 variación de las aberraciones con la distancia entre espejos.

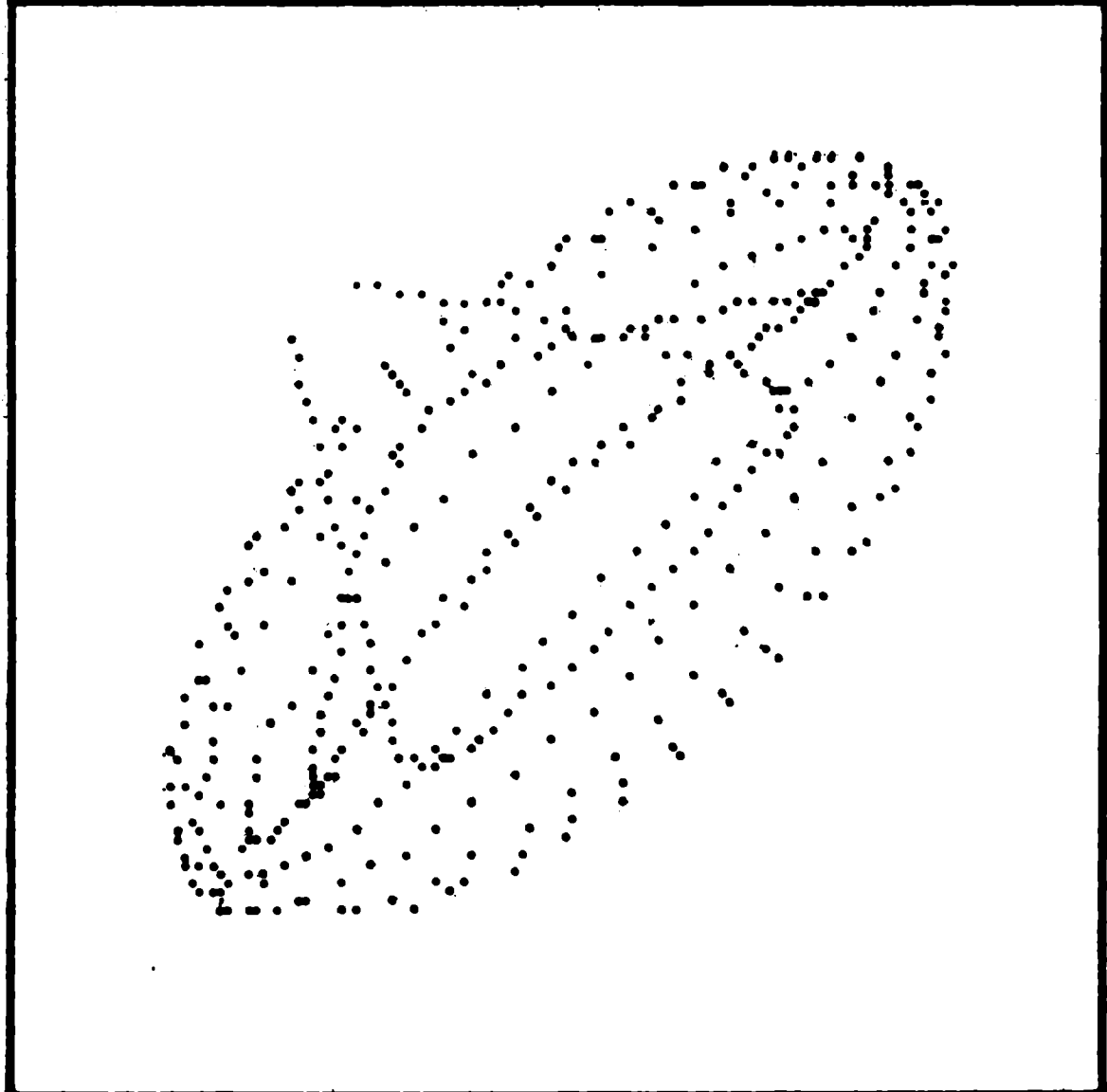




23 R



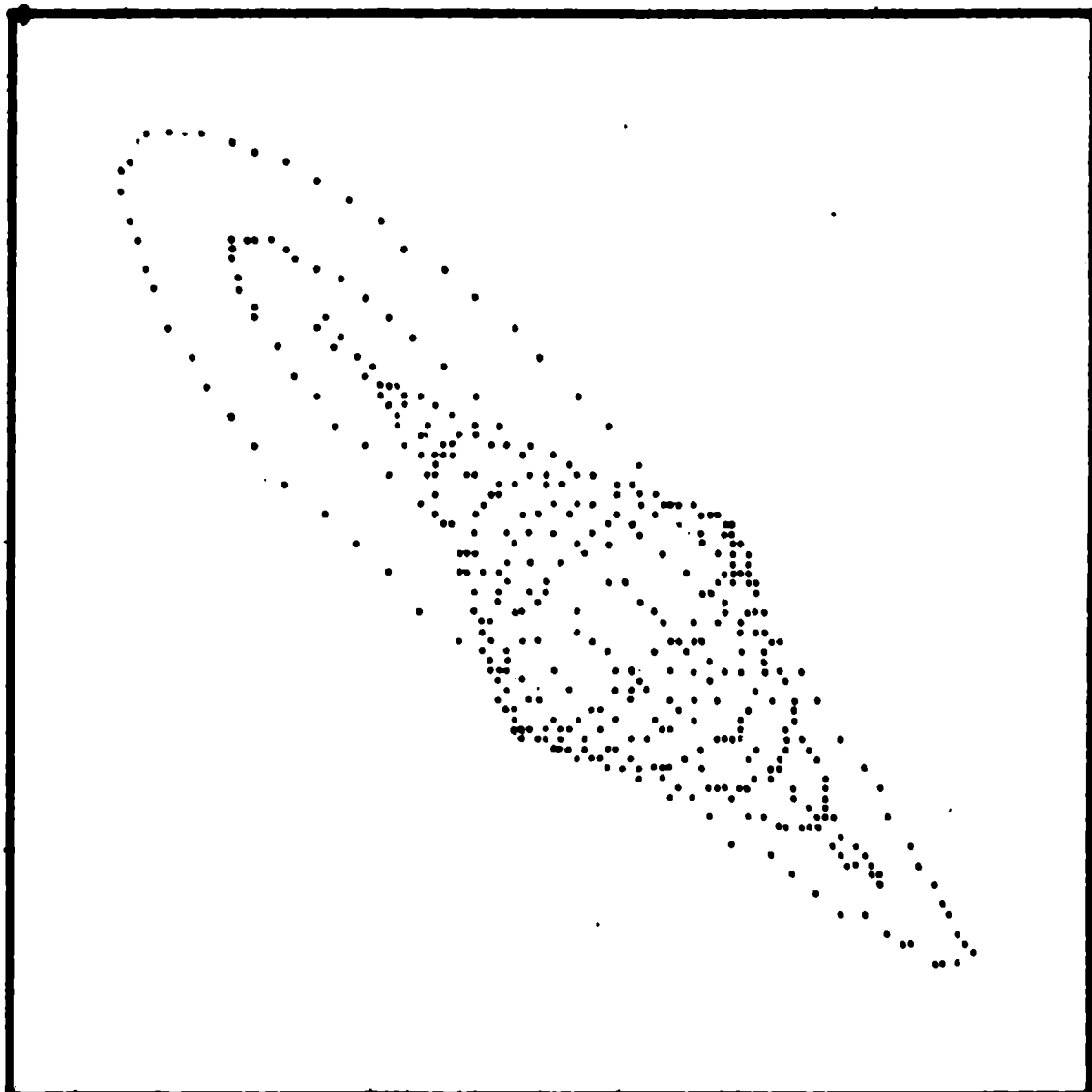
23 M



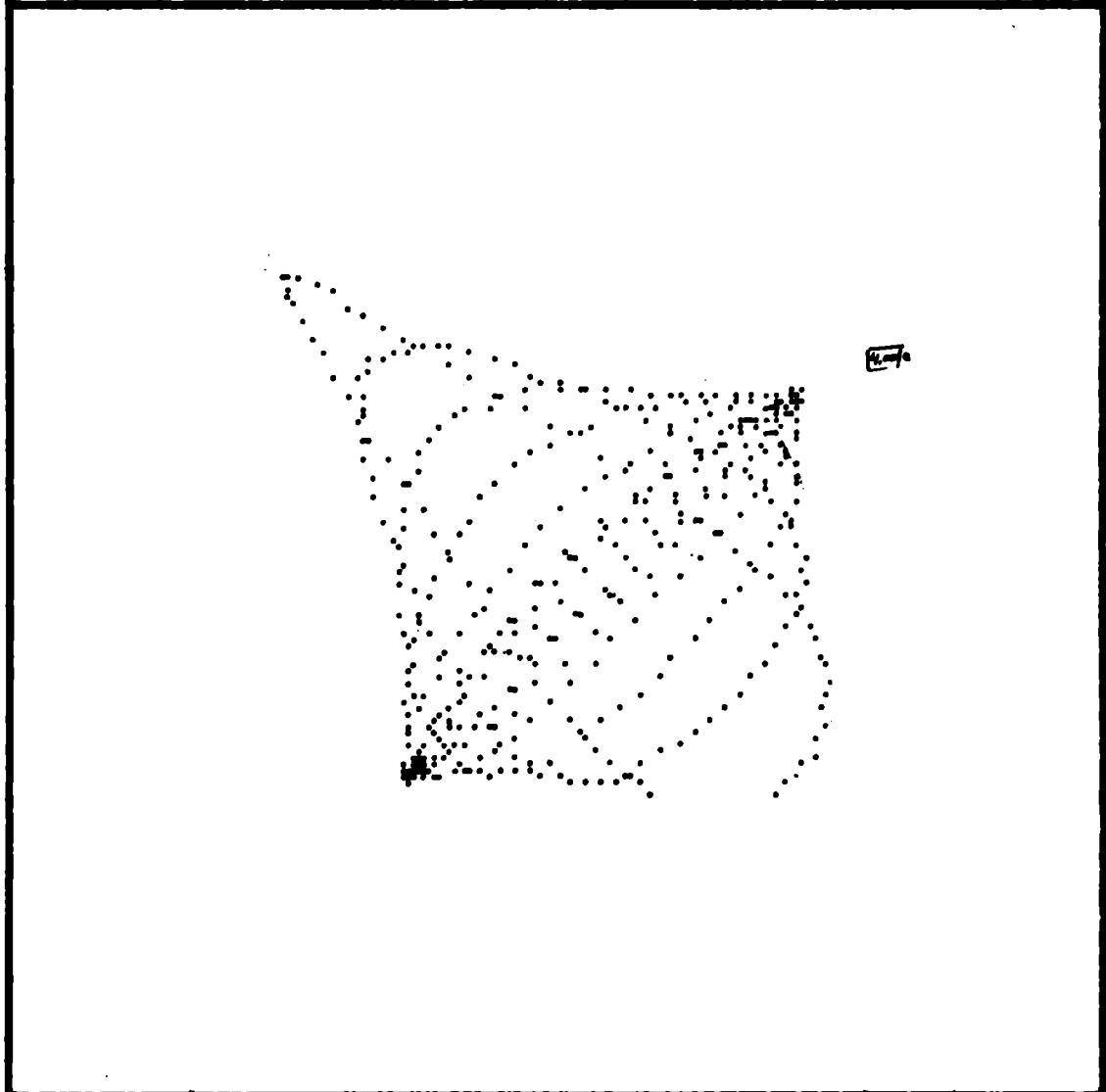
23 T

d = 4,041m

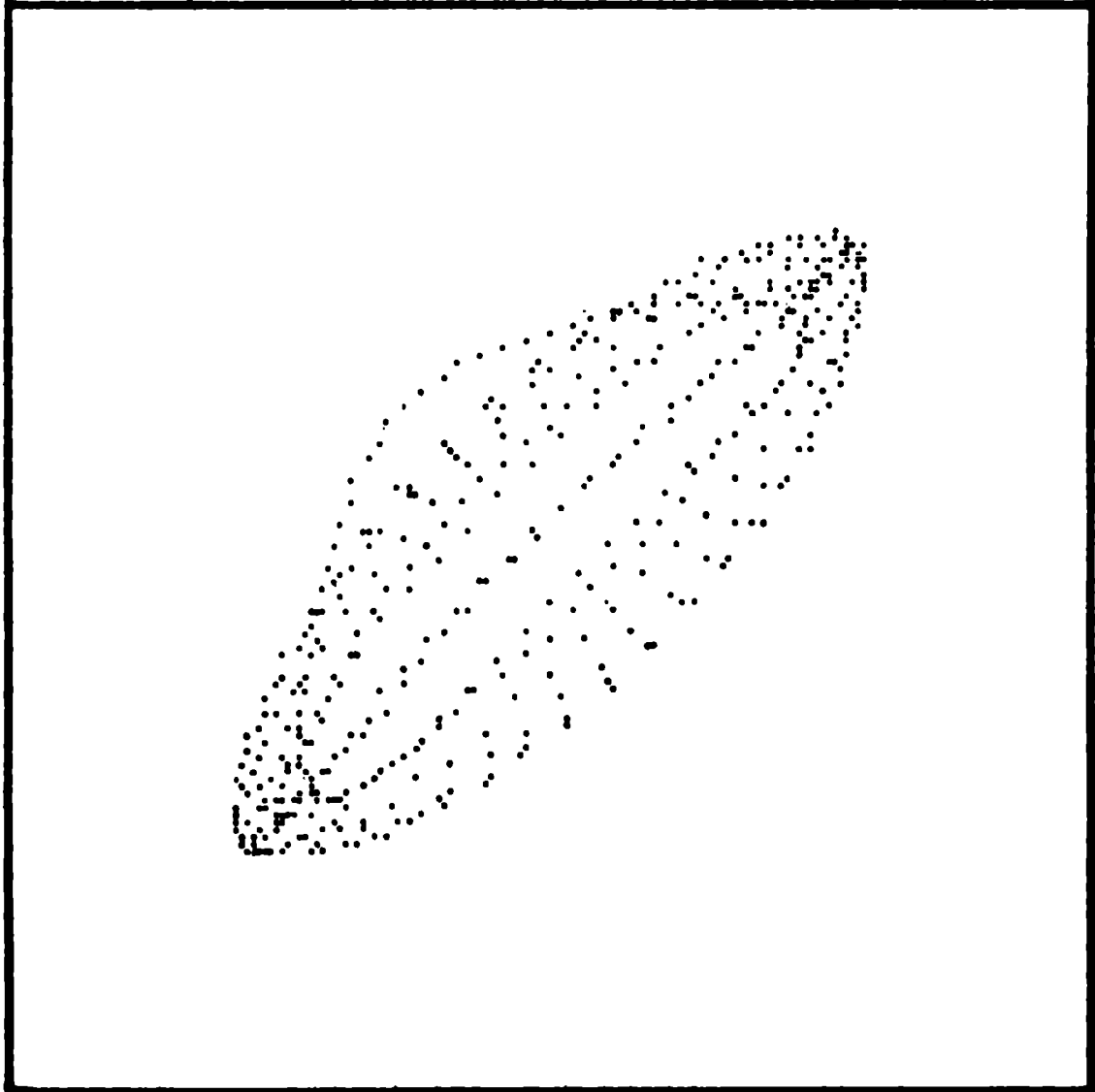
24 R



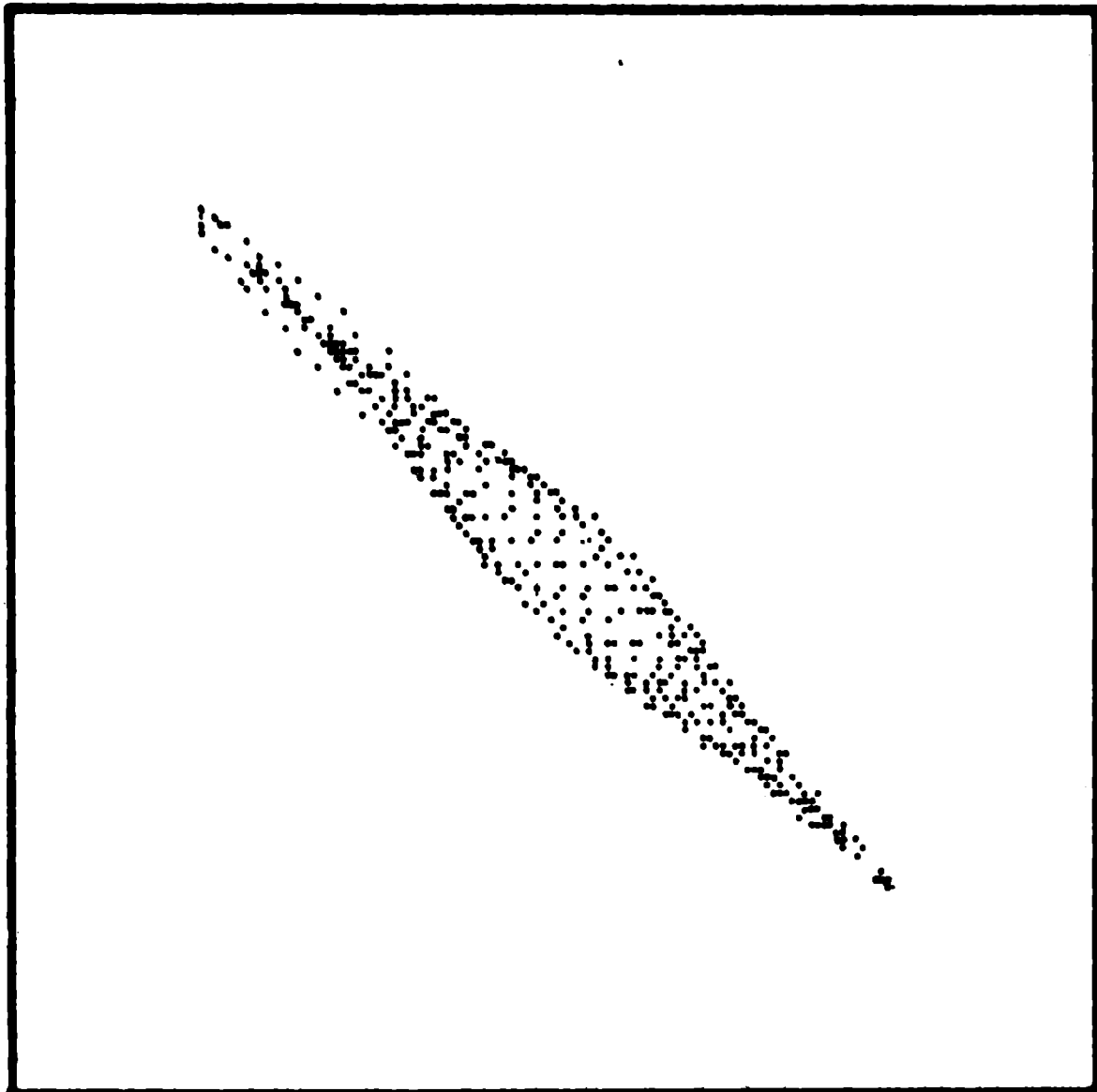
24 M



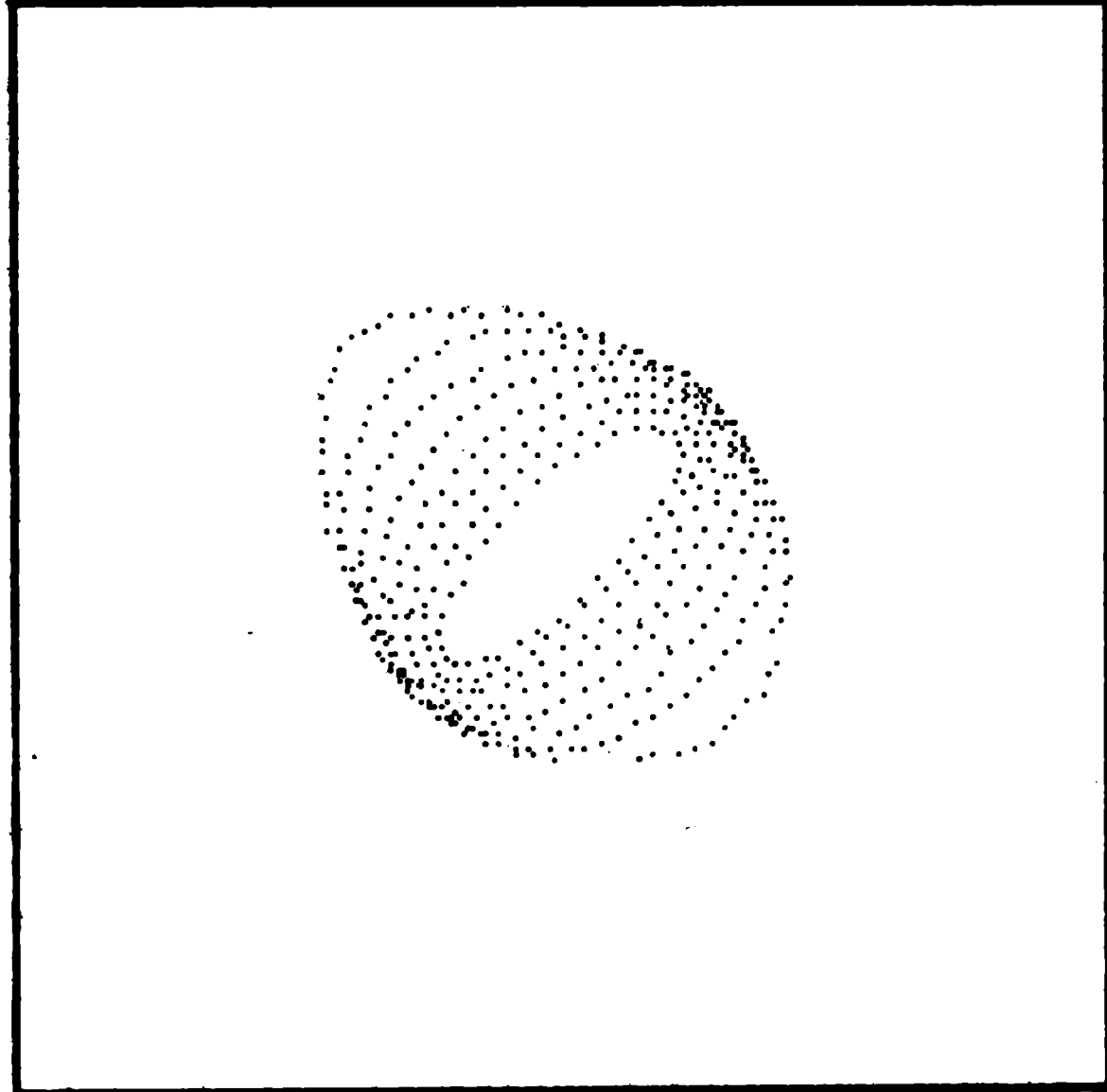
24 T



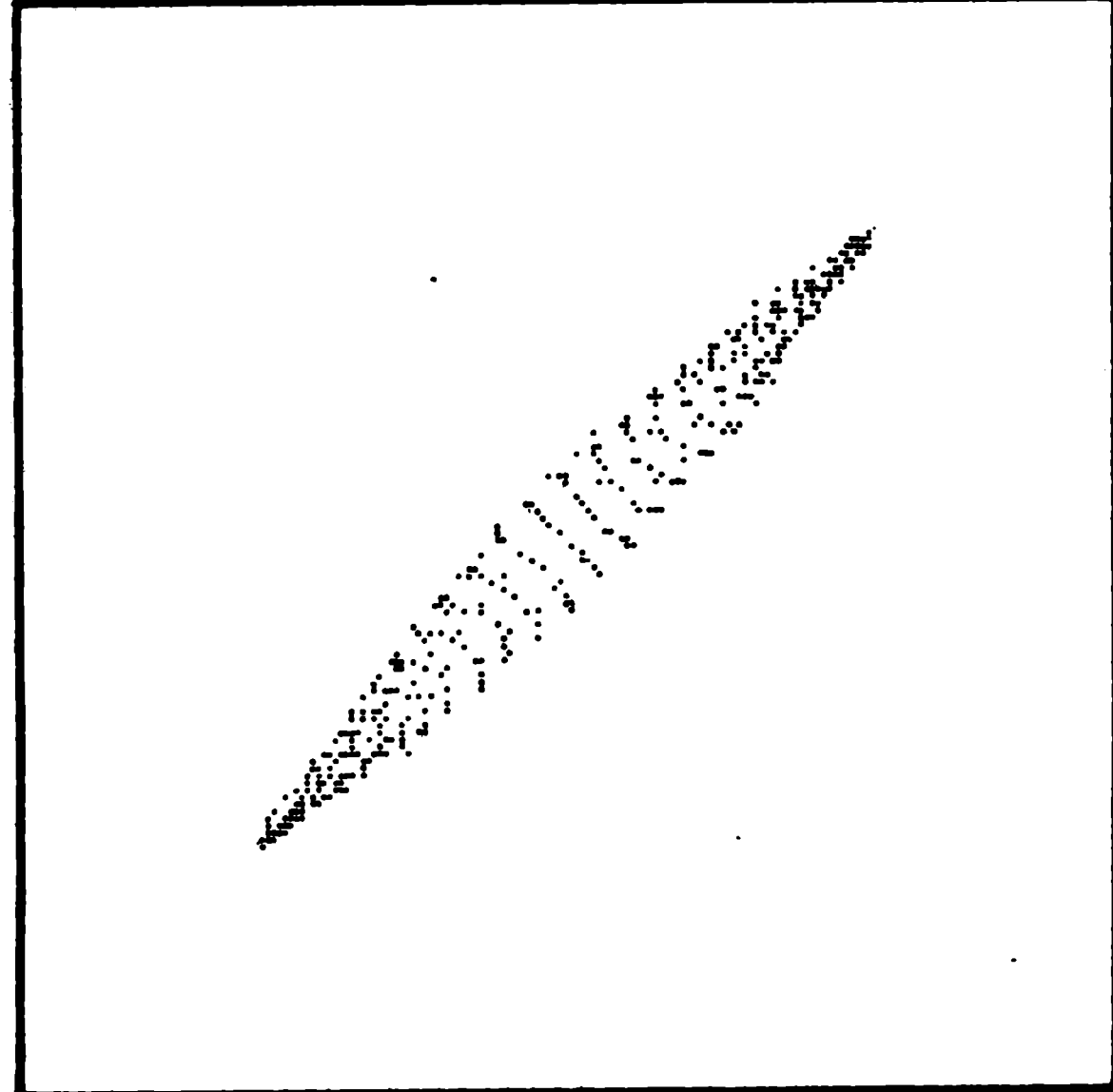
d = 4,045 m



25 R



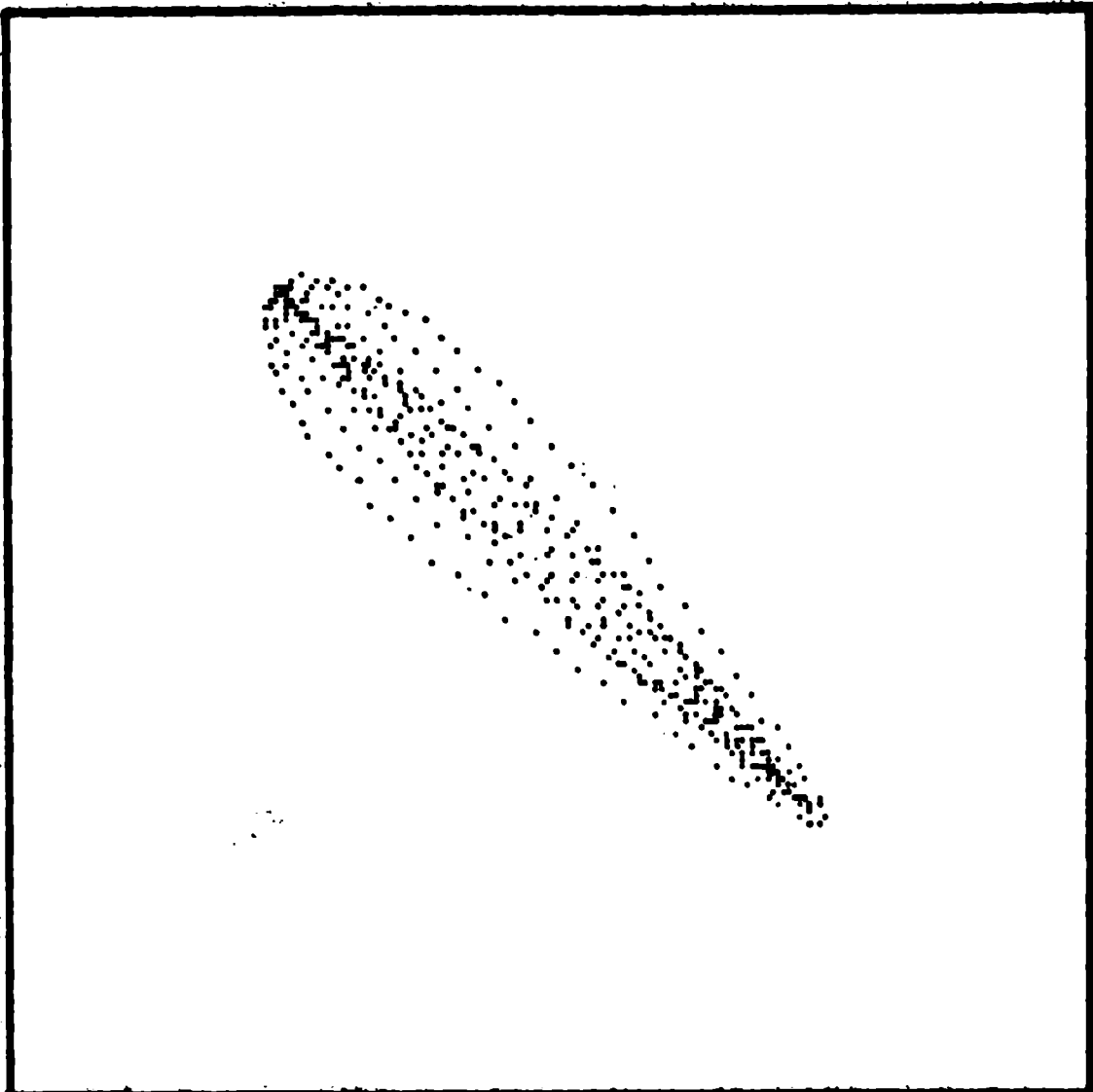
25 M



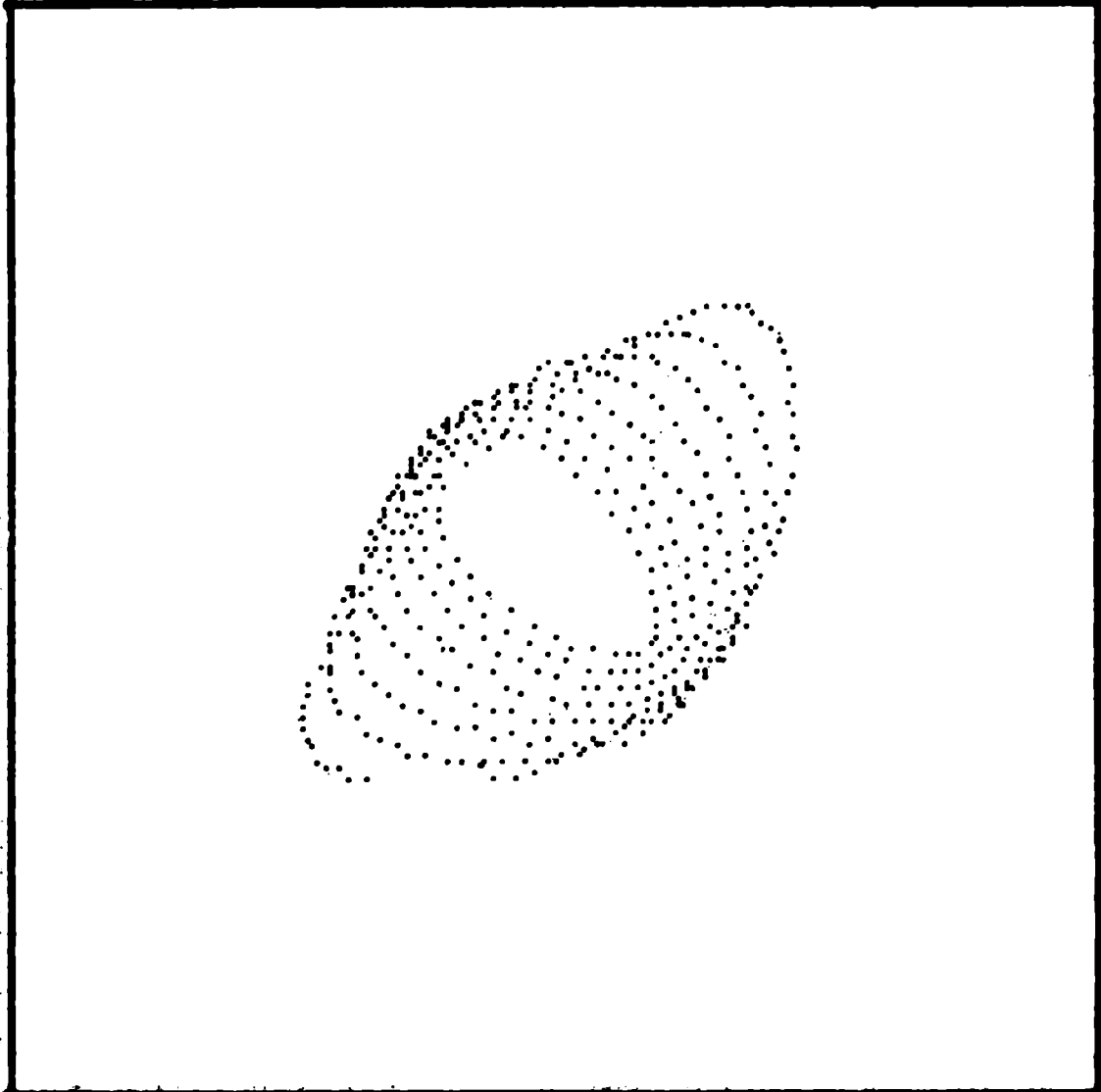
25 T

$d = 4,049m$

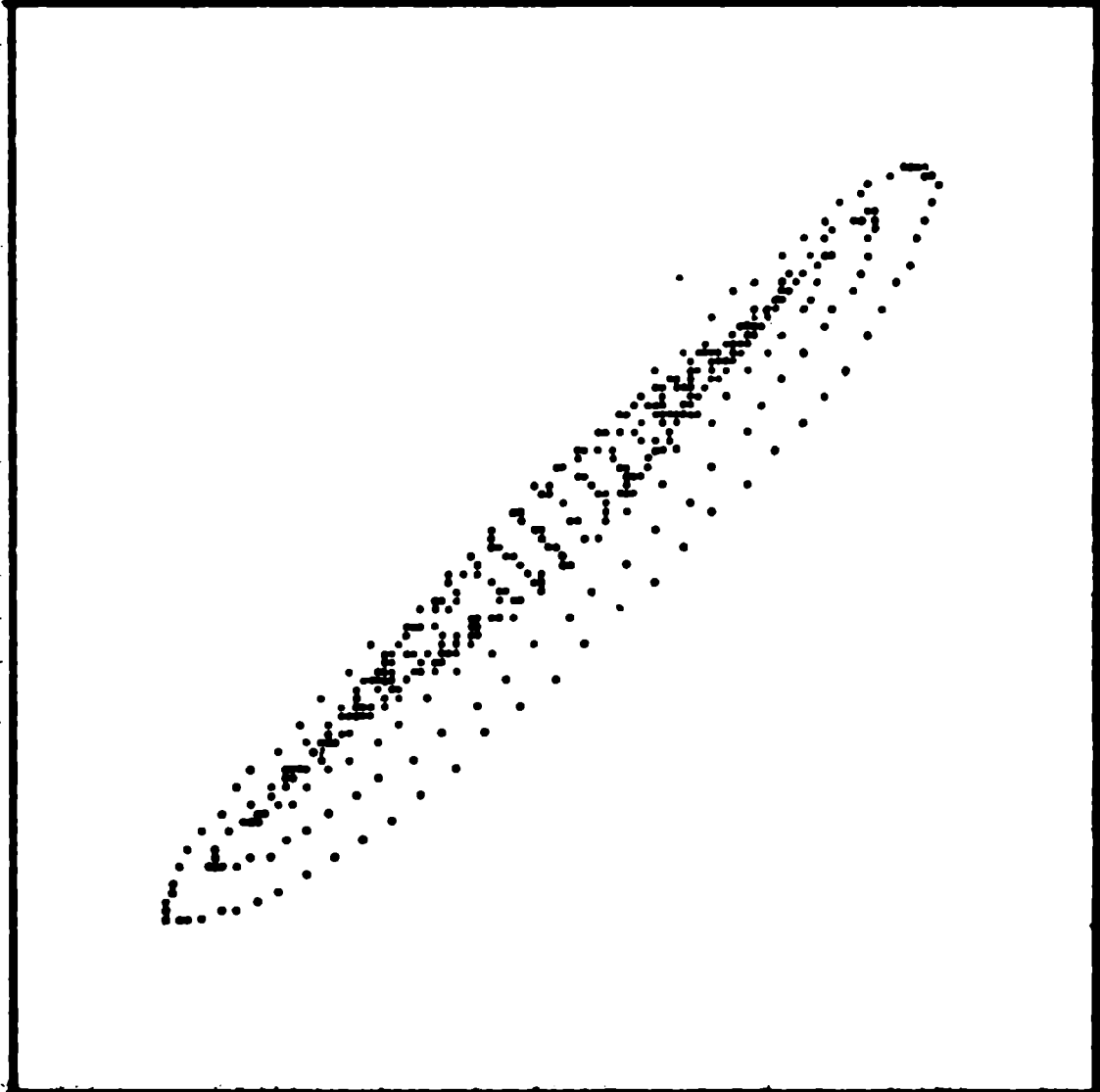
26R



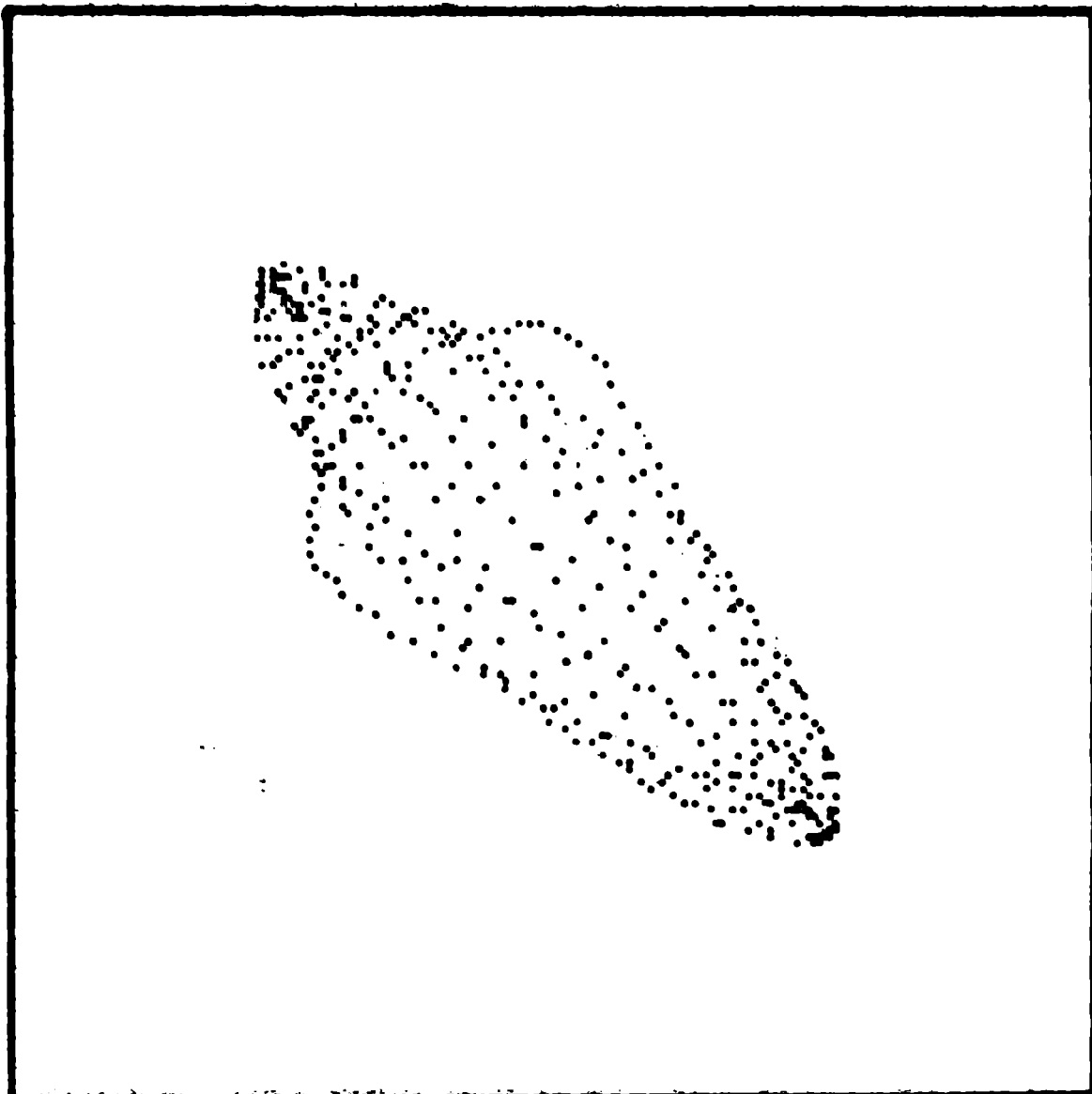
26M



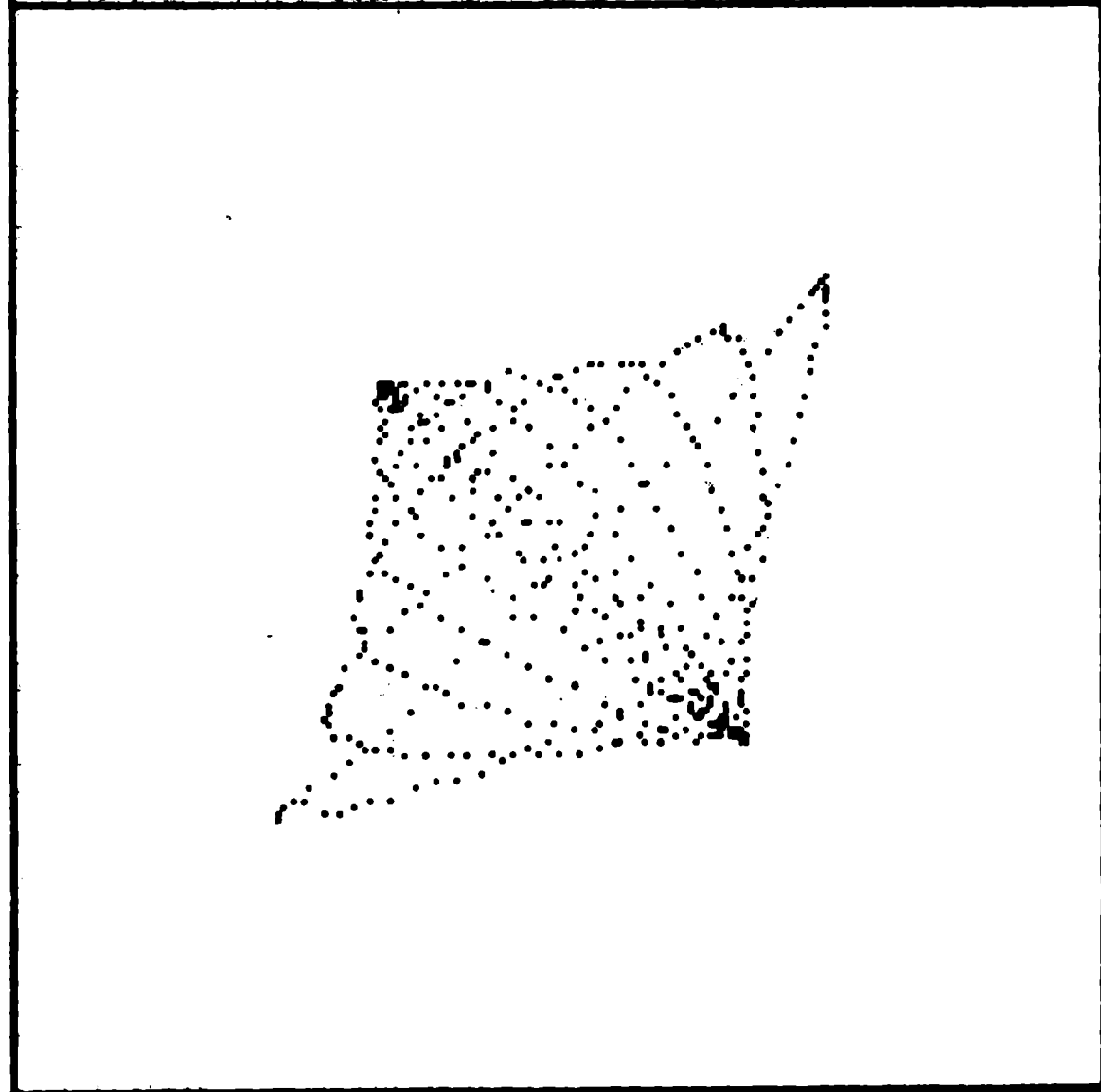
26J



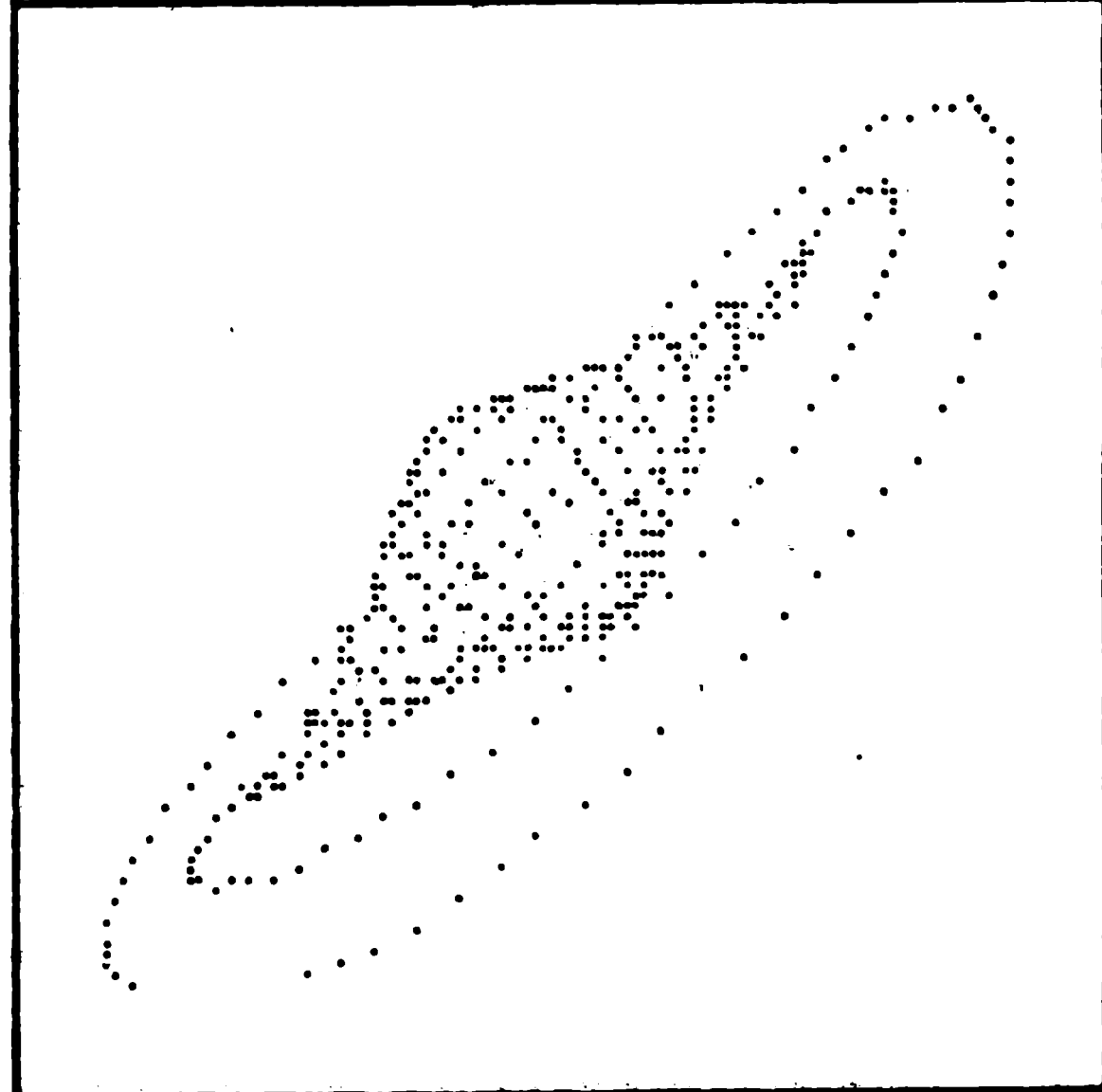
d = 4,053m



27R

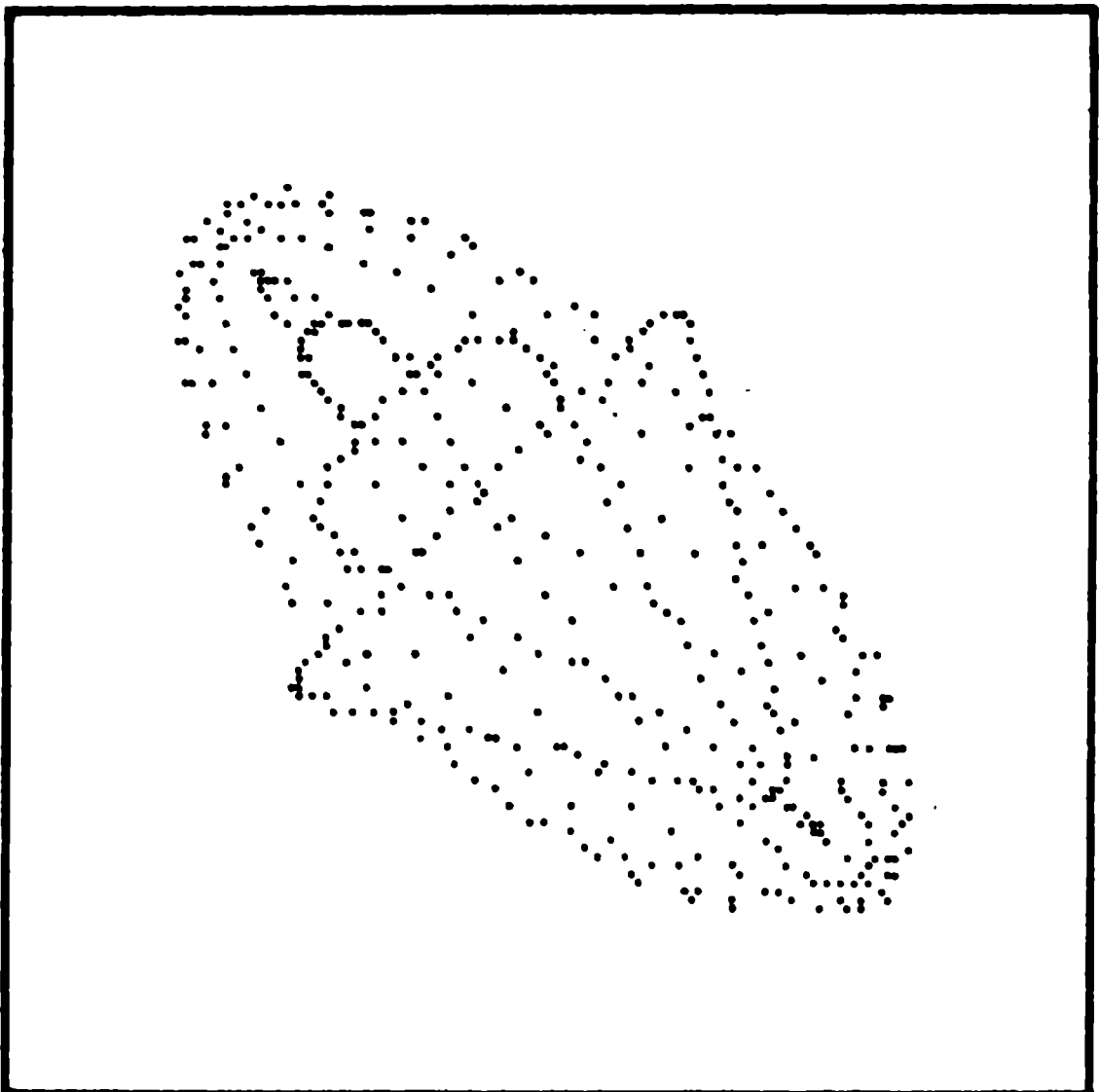


27M

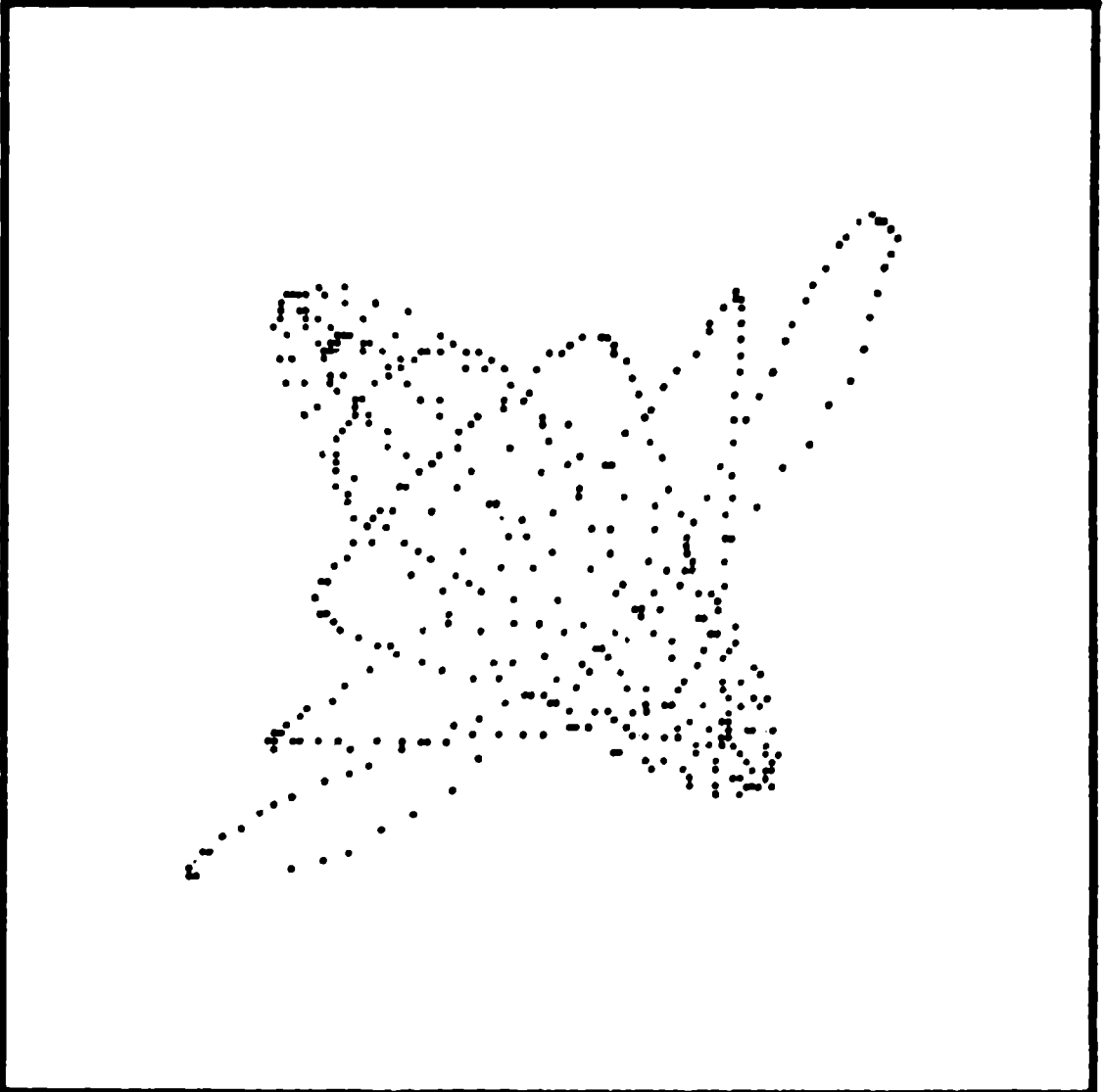


27T

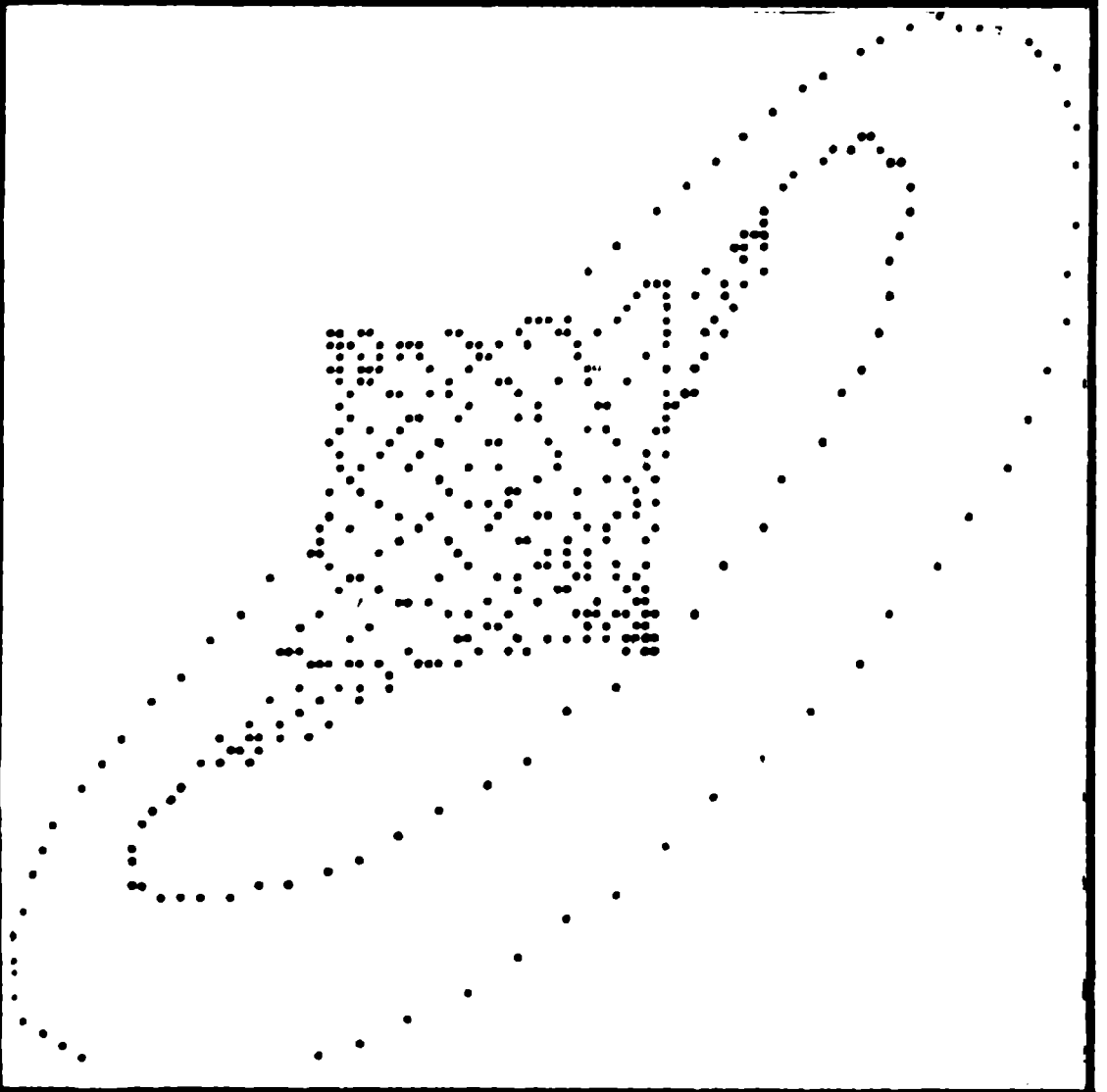
$d = 4,057\text{ m}$



28R



28M



28T

d = 4,061 m

5 – CURVATURA DE CAMPO

El enfoque de todos los puntos del campo sobre la placa fotográfica puede hacerse:

- Curvando la placa por medios mecánicos.
- Aplanando el campo mediante sistemas ópticos adicionales.

El último método tiene la ventaja de eliminar también el astigmatismo.

Si por alguna razón es preferible el primero, o ambos alternativamente, la curvatura que debe imprimirse a la placa también puede ser objeto de un análisis de tolerancias.

Se trata de curvar la placa lo menos posible sin perder resolución.

Lo más usual es imprimir una curvatura igual a la de la superficie donde se forma el DMA, intermedio entre las imágenes astigmáticas.

Pero el criterio de diseño del telescopio es limitar el campo cuando en el borde, el valor de DMA sea apenas menor que la dispersión por factores ajenos a la óptica geométrica (seeing, vibraciones, difracción).

Sobre el eje la dispersión geométrica es cero, y la imagen de todos modos no es perfecta.

Si se corre hacia adelante el centro de la placa una cantidad ΔX , de modo que haya una dispersión por desenfoque igual a DMA en el borde; la curvatura resultante es menor.

Puede demostrarse que la curvatura de esta "superficie mejor práctica", es igual a la de la imagen radial, y que sobre ella la calidad de la imagen es uniforme.

En función de los coeficientes de aberración C y D (Ver apéndice), resulta:

Curvatura de las superficies focales:

$$\text{tangencial} \quad \frac{1}{P_T} = 4C + 2D$$

$$\text{mejor geométrica} \quad \frac{1}{P_M} = 2C + 2D$$

$$\text{radial} \quad \frac{1}{P_R} = 2D$$

Diámetro del disco mínimo astigmático

$$\text{DMA} = 2C Y_1 f \phi^2$$

Longitud de la línea focal astigmática:

$$L = 2\text{DMA}$$

donde

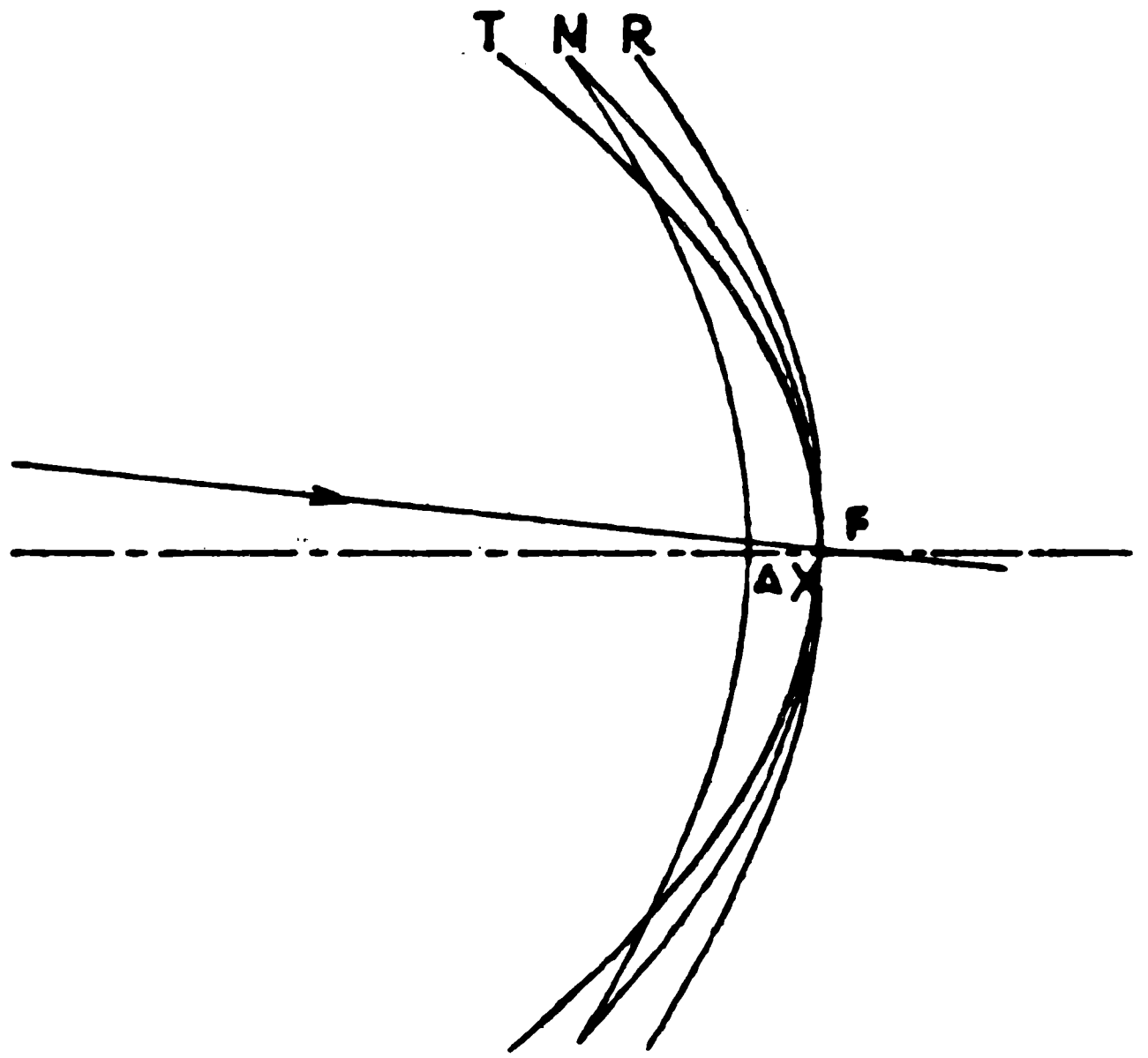
$$Y_1 = \text{radio de la pupila}$$

$$\phi = \text{semiángulo de campo}$$

$$f = \text{distancia focal equivalente}$$

A una distancia ΔX antes del foco (fig. 4), los rayos marginales están distribuidos

Fig. 4
superficie
mejor práctica.



en un círculo de diámetro.

$$\delta = \frac{2 Y_1}{f} \Delta X$$

Haciendo $\delta = \text{DMA}_B = \text{DMA}$ en el borde:

$$\Delta X = C (\phi_B f)^2 = C h_B^2 \quad (1)$$

Sea origen de coordenadas en F y ρ el radio de curvatura de la superficie mejor práctica. La intersección con la mejor geométrica en el borde está dada por:

$$\frac{h_B^2}{2 P_M} = \frac{h_B^2}{2 P_M'} + \Delta X / \frac{1}{P_M'} = \frac{1}{P_M} - 2C = 2D = \frac{1}{P_R} \quad (2)$$

Las (1) y (2) definen la superficie mejor práctica. No es una definición empírica y vale para cualquier sistema óptico aplanático.

La ordenada h_T de intersección con la superficie tangencial está dada por:

$$\frac{h_T^2}{2 P_T} = \frac{h_T^2}{2 P_M'} + C h_B^2$$

$$(2C + D) h_T^2 = D h_T^2 + C h_B^2$$

$$h_T = \frac{h_B}{\sqrt{2}}$$

En este punto, la imagen es una línea astigmática tangencial de longitud

$$L = 2 \text{DMA}_T = 4 C Y_1 \phi_T f = \text{DMA}_B$$

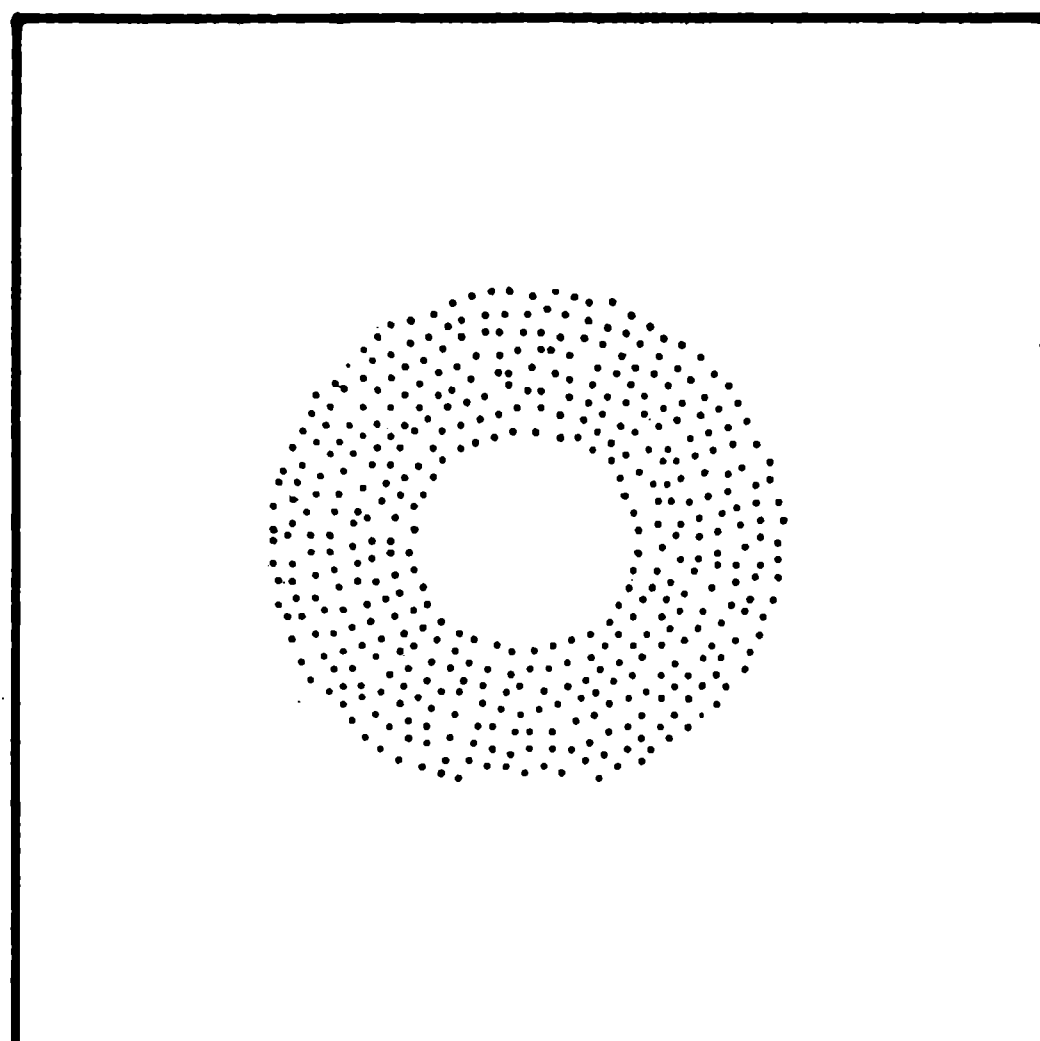
Conclusión: sobre esta superficie, la dispersión máxima de la imagen es constante. En el centro y borde es un círculo, y en la zona 0,707 es una línea tangencial de longitud igual al diámetro del círculo.

En el caso actual los valores son:

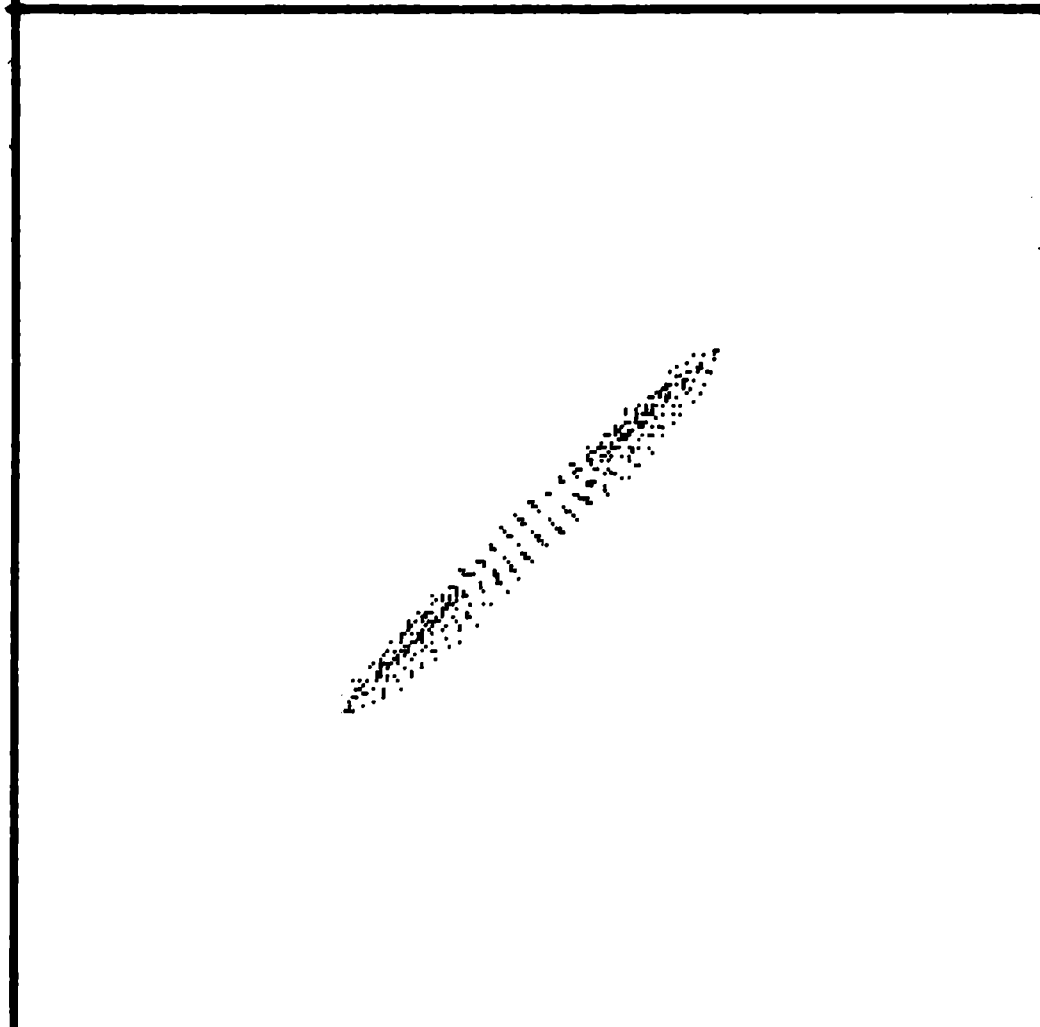
$$\begin{aligned} P_T &= 1,244 \text{ m} & \Delta X &= 561 \text{ } \mu\text{m} \\ P_M &= 1,595 \text{ m} & \text{DMA} &= 66 \text{ } \mu\text{m} \\ P_R = P_M' &= 2,224 \text{ m} \end{aligned}$$

La relajación en la especificación de la curvatura puede ser de interés en el diseño y/o uso de un telescopio.

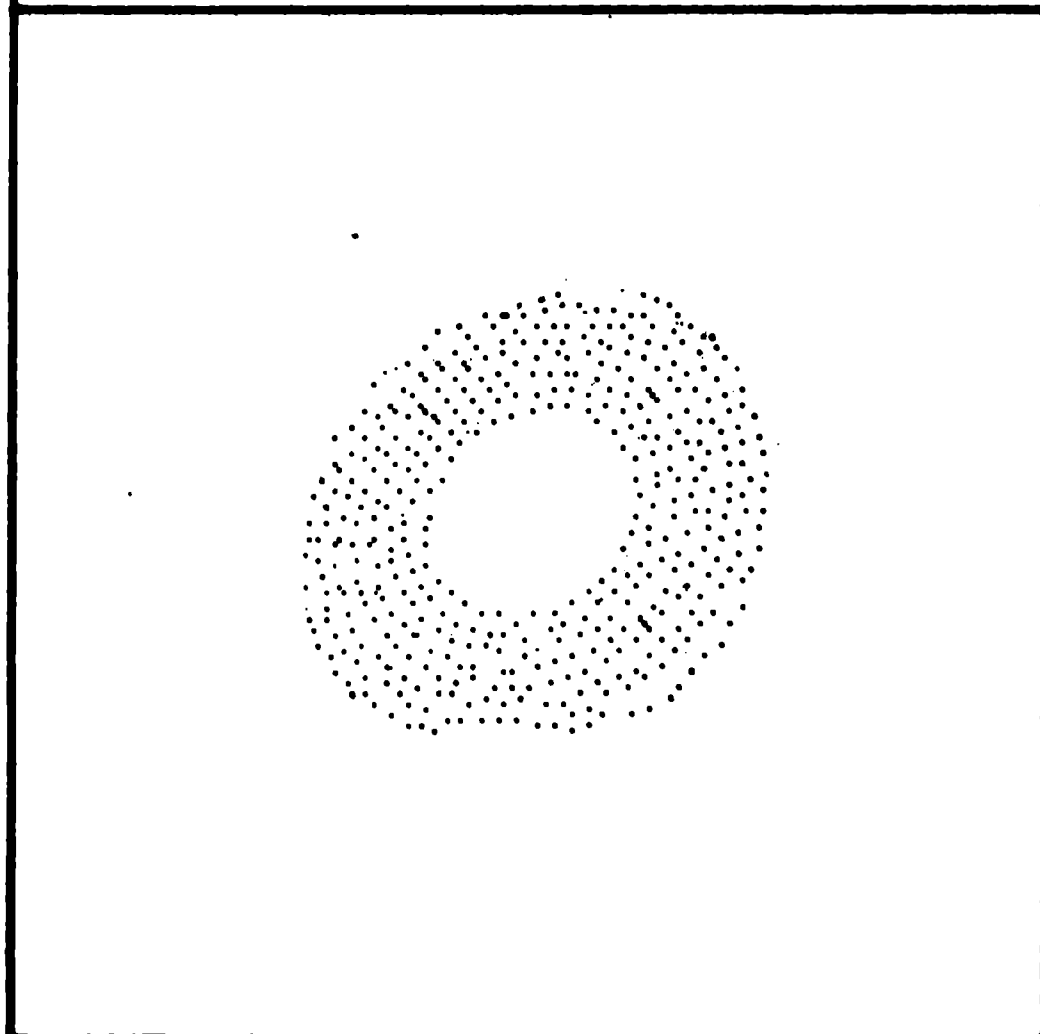
IMAGENES EN LA SUPERFICIE MEJOR PRACTICA



$$\phi = 0^\circ$$



$$\phi = 0,177^\circ$$



$$\phi = 0,25^\circ$$

APENDICE

Para producir los gráficos de la figura 3 se utilizó un análisis con fórmulas de 3º orden tomadas de un trabajo de revisión (Gascoigne, 1973).

Por razones de claridad e ilustración se reproducirán aquí.

Dados los parámetros constructivos de un telescopio de 2 espejos:

f_1 (f_2) = distancia focal del primario (secundario), positiva si es cóncavo.

b_1 (b_2) = constante cónica del primario (secundario).

d = distancia entre espejos.

Y_1 = radio del primario, supuesto pupila.

ϕ = semiángulo de campo.

$f = \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \right)^{-1}$ = distancia focal equivalente.

Cantidades intermedias:

$$A = \frac{1}{8} \left[b_2 + \left(\frac{f + f_1}{f - f_1} \right)^2 \right] \times \left(1 - \frac{f_1}{f} \right)^3$$

$$B = \frac{1}{f_1^4} \left[\frac{1}{8} (1 + b_1) f_1 - A (f_1 - d) \right]$$

$$F = \frac{1}{4f^2} + A \frac{d}{f^2}$$

$$C = \frac{1}{(f_1 - d)} \times \left[\frac{f_1 (f_1 - d)}{2 f^2} - A \left(\frac{d}{f_1} \right)^2 \right]$$

$$D = C - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \right)$$

Resultan parámetros de la imagen:

$$DMC = \frac{1}{2} B Y_1^3$$

$$COMA = 3F Y_1 \phi$$

$$DMA = 2C Y_1 \phi$$

El programa mencionado antes está basado en esta referencia y maneja los siguientes datos:

Entrada

$$d, f_1, f_2, b_1, b_2, Y_1, \phi$$

Salida

$$f, e, Y_2, \text{DMC}, \text{COMA}, \text{DMA}, P_T, P_M, P_R$$

e = distancia vértice del primario – plano focal paraxial.

Y_2 = radio del secundario para admitir un semicampo ϕ sin víñeteo.

Está disponible, con explicaciones adicionales, enviando una tarjeta magnética en blanco a uno de estos lugares:

- Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp)
Casilla de Correo 124
1900 La Plata, Argentina
- Laboratorio de Óptica, Observatorio Astronómico
Paseo del Bosque
1900 La Plata, Argentina

Para la determinación de la coma por desajustes, valen las fórmulas:

$$\text{COMA}_\Delta = \frac{3 Y_1^2}{8 f^3} (\gamma - 1)^2 \left[b_2 (\gamma - 1) - (\gamma + 1) \right] \Delta$$

$$\text{COMA}_\epsilon = \frac{3 Y_1^2}{4 f^3} (\gamma + 1) (\gamma - 1)^2 f_2 \epsilon$$

$$\text{donde } \gamma = \frac{f}{f_1}$$

En el caso actual, los coeficientes son:

$$\begin{aligned} \text{COMA}_\Delta &= -1,061 \Delta \quad (\text{RC}) \\ &\quad -0,928 \Delta \quad (\text{CA}) \end{aligned}$$

$$\text{COMA}_\epsilon = -24,9 \epsilon$$

Δ en mm, ϵ en grados, COMA en arcseg.

AGRADECIMIENTOS

Al autor le es grato destacar la imprescindible cooperación del profesional de computación Eduardo I. Lazzati en la preparación del programa general..

REFERENCIAS

- D. H. Schulte. Applied Optics, V. 2, Nº 2, p. 141 (1963)**
- A. Behr. Astronomy and Astrophysics, V. 28, Nº 3, p. 355 (1973)**
- R. Wilson y F. Franza. The Messenger, Nº 16, marzo, p. 12 (1979)**
- S. C. B. Gascoigne. Applied Optics, V. 12, No 7, p. 1419 (1973)**

S U M M A R Y:

The imagery of a Ritchey - Chretien telescope is analyzed under the headings:

- Comparison with that of a Cassegrain of equal dimensions.**
- Influence of the mounting errors.**
- Definition of the most adequate focal surface.**

It was taken as example for the study the 2,15m. telescope of.

El Leoncito, Provincia de San Juan, Argentina.

IMPRESA DE LA UNIVERSIDAD