

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1954

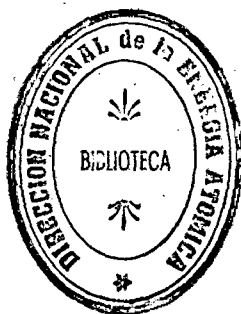
09.54.04

Laboratorio SEPARACION DE ISOTOPOS

(Trabajo Monográfico Nº 1)

ESTUDIO DE UNA FUENTE DE IONES PARA EL SEPARADOR
ELECTROMAGNETICO DE ISOTOPOS, QUE CONSTRUYE LA

C.N.E.A.



por M. J. SAMET BAND



Este estudio, resumen de las exposiciones realizadas en el seminario de Física Experimental los días 21 y 28 de julio, 11 y 18 de agosto de 1954, ha sido corregido y discutido por el Dr. M.R. Ghiglione.-

Las modernas técnicas de separación de isótopos a partir de las mezclas que constituyen los elementos naturales, permiten obtenerlas en cantidades y purezas tales que satisfacen las exigencias de los investigadores, y han traído como consecuencia un rápido aumento de la literatura científica y técnica sobre sus aplicaciones.-

Más de medio millar de informes publicados en los últimos diez años ponen de relieve su creciente demanda en los más diversos sectores científicos.- Ejemplos de su uso, serían, entre muchos otros:

- a).- La producción de isótopos radioactivos de alta actividad específica, con los que se establecen claramente sus masas y se estudian sus actividades y esquemas de desintegración.-
- b).- Estudio del metabolismo de las proteínas, ácidos grasos y sustancias minerales en animales y vegetales, de la fotosíntesis clorofílica, del metabolismo de las bacterias.- Para ello se usan tanto los isótopos estables como los radioactivos.-
- c).- Para la curación de enfermedades mediante radioisótopos como el I^{131} , P^{32} , Co^{60} , Au^{198} , etc.-
- d).- Los isótopos estables y radiactivos se emplean como indicadores en metalurgia, estudios de fricción y lubricaciones; en la fabricación de vidrio y cerámica, en la industria del petróleo, etc.-
- e).- En medición de secciones eficaces de absorción y difracción de neutrones.-
- f).- En detección de neutrones.-
- g).- En estudios de estructura hiperfina y spins nucleares, momentos magnéticos nucleares, desplazamientos de líneas de diferentes isótopos en el espectro.-
- h).- En estudios de radiactividad de isótopos naturales.-
- i).- Emisión de fotoneutrones y fotoprotones.-

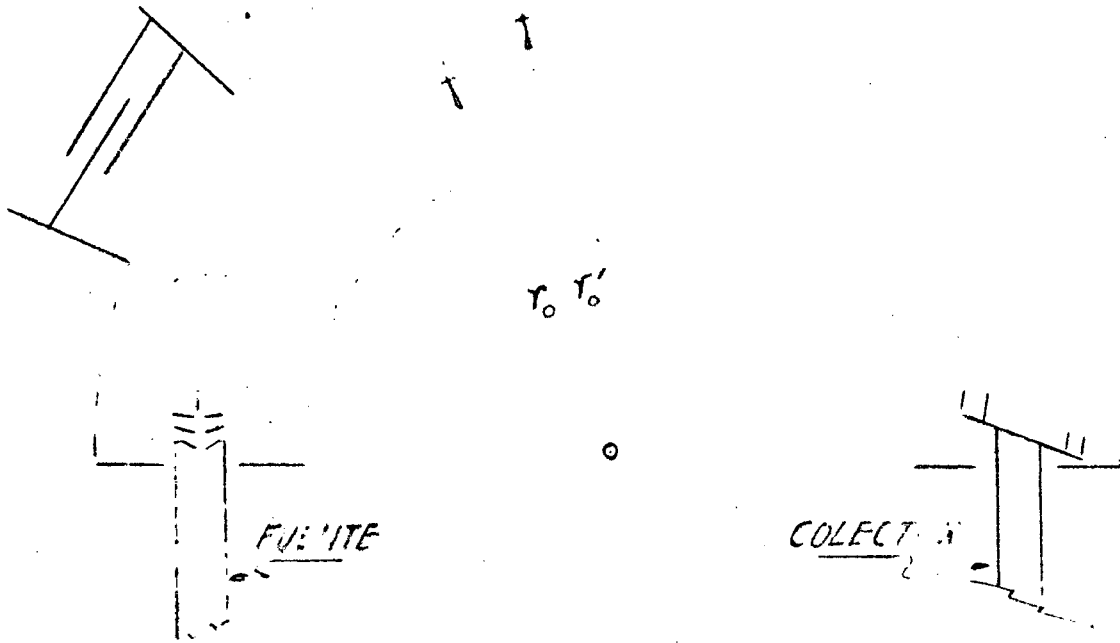
El método más apropiado para obtener gran variedad de isótopos, y que permite una separación completa, es el electromagnético (1).-

En la C.N.E.A. se está construyendo actualmente un separador electromagnético de 180°.- El principio en que se basa su funcionamiento es análogo al del espectrómetro de masa: se produce un haz de iones

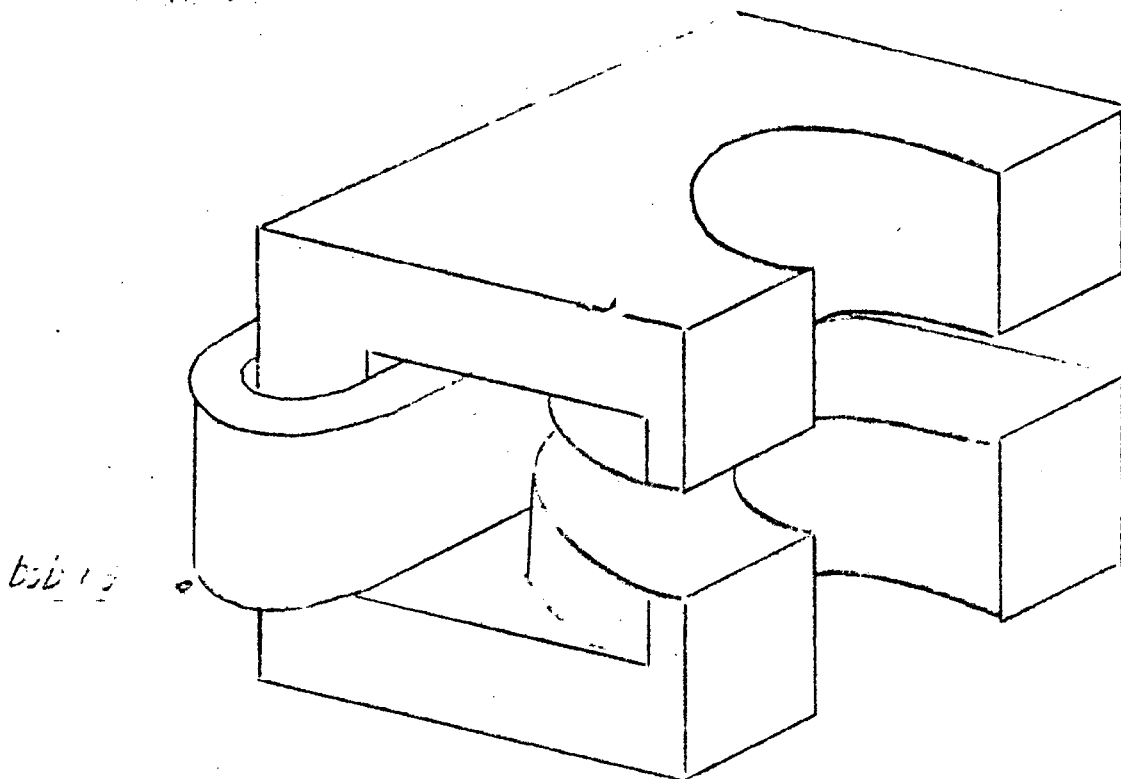
TRAYECTORIAS DE LOS IONES

figura

1



E. E. MAGNAN



del material a separar, acelerados mediante un campo eléctrico y luego deflectados en un campo magnético, donde describen órbitas cuyos radios de curvatura dependerán de su masa.- Si hay presentes iones de distintas masas, el haz principal dará origen a otros tantos haces (fig. 1).- Estos se recogen en colectores apropiados.-

En el separador en construcción los iones describen órbitas de 180°.- Se sabe que en un campo uniforme el radio de curvatura está dado por la expresión:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2 M V}{q}} \quad (1)$$

donde:

M = masa del ión

q = carga del ión

V = tensión de aceleración

B = campo magnético.-

Con el objeto de enfocar haces de abertura finita no se emplea un campo uniforme, sino el propuesto por Beiduk-Konopinski (6), cuya forma está dada por la expresión (fig. 3):

$$B_z(r,0) = B_0 \left(1 - \frac{3}{4} \gamma^2 + \frac{7}{8} \gamma^3 - \frac{9}{16} \gamma^4 + \frac{51}{320} \gamma^5 \dots \right) \quad (2)$$

donde $B_z(r,0)$ = campo en el plano medio de simetría, y

$$\gamma = \frac{r - r_0}{r_0}, \quad r_0 \text{ es el radio medio.-}$$

Este campo magnético se obtiene entre las piezas polares de un electroimán (fig. 2) construido con chapas de hierro, con una altura de 1,8 m., largo 2,5 m., ancho 2,2 m.- El peso total es de 55 toneladas.- La bobina está constituida por un tubo hueco de aluminio por cuyo interior pasa el agua de refrigeración, siendo la potencia máxima disponible para su excitación de 33 K Watt, con una corriente de hasta 150 amper.-

La intensidad del campo magnético puede variarse desde unos 300 a 4000 gauss, con una estabilidad en el punto de trabajo de 1:5000, pues variaciones mayores del campo harían desplazarse las imágenes for

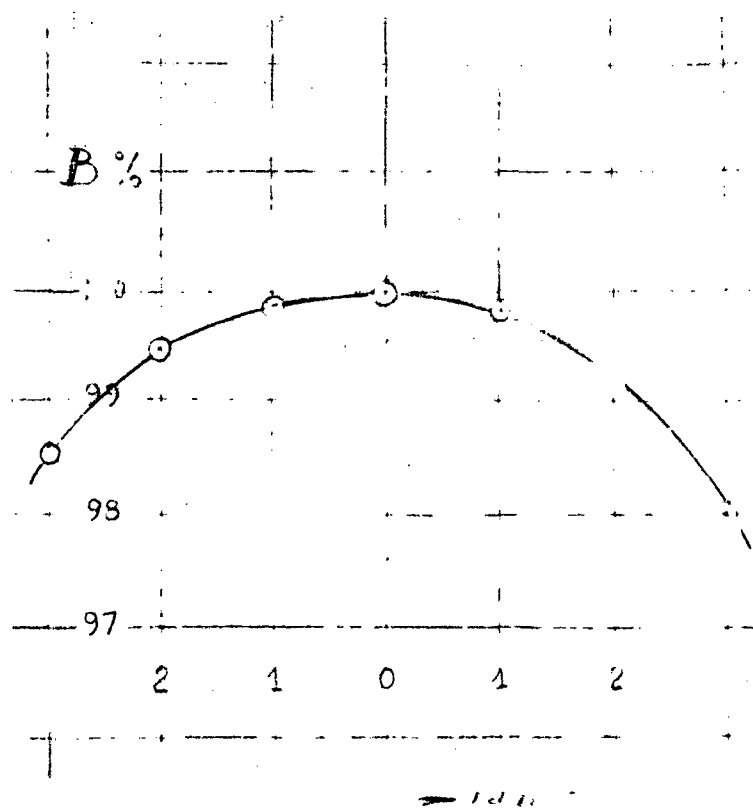


Diagram showing the position of the structure relative to the ground level.

fig

1

madras por los haces sobre el colector, con gran detrimento de la pureza de los isotopos recogidos.-

El espacio por el que circulan los iones está cerrado lateralmente por placas de bronce que, con las piezas polares, forman un recinto estanco, en el que se hace un vacío del orden de 10^{-5} mm Hg.-

En su interior el haz forma una lámina semicircular de un radio de 100 cm. y 10 cm. de altura.-

La tensión aceleradora puede variar entre 15 KV y 40 KV, con una estabilidad de 1: 2500.-

El poder separador definido por la ecuación:

$$P.S. = \left(\frac{M}{\Delta M} \right)_{\text{máx.}} = \frac{r_0}{S} \quad (3)$$

$$(S = 2.4r)$$

donde S es el andro de la imagen, valdrá en nuestro caso: P.S. = 170, para un $r_0 = 102$ cm., y un $S = 0.6$ cm.-

El peso de los isotopos recogidos será de varias decenas de miligramos por jornada de trabajo, con intensidades de corriente iónica del orden de las decenas de miliamperes.-

Los dos factores importantes que inciden sobre el rendimiento en un separador electromagnético son: 1º) la divergencia del haz iónico debida a la carga espacial, y 2º) la eficiencia de la fuente de iones.-

DIVERGENCIA POR CARGA ESPACIAL:

El haz de iones diverge debido a la repulsión mutua electrostática entre sus componentes, y esto hace que el enfoque sea imperfecto, de modo que disminuye la eficacia del separador.- Cuando en los Estados Unidos se comenzaron los preparativos para separar U-235 del uranio natural mediante calutrones, se temió que ese fenómeno impediría su obtención en cantidades mayores de un microgramo.- Pero se comprobó que felizmente queda muy disminuido, debido a que los iones de alta energía (decenas de K Volts) ionizan al gas residual de la cámara de vacío, y los electrones así liberados quedan atrapados en el interior del haz, disminuyendo de esta forma la carga espacial positiva.-

(4)

Del estudio de este fenómeno resulta que:

El pasaje de iones rápidos A^+ a través del gas B da lugar esencialmente a tres tipos de colisiones inelásticas:

- a).- $A^+ + B \rightarrow A + B^+$ cambio de carga
- b).- $A^+ + B \rightarrow A^* + B^*$ excitación
- c).- $A^+ + B \rightarrow A^+ + B^+ + e$ ionización

Los electrones producidos en el proceso c) permanecen en el haz dirigiéndose hacia su centro, y solo pueden moverse axialmente.- La distribución del potencial debido a las cargas positivas del haz se muestra en la fig. 4.- Además el campo magnético hace que los electrones se desplacen describiendo en general curvas cicloidales, como vemos en la fig. 5.- Al acercarse a uno de los extremos, pueden escapar, para impedirlo es conveniente colocar en cada extremo del haz una grilla a tensión negativa, de modo que sobre los electrones actúe una fuerza que los rechaza hacia el interior, pudiendo así recorrer el haz varias veces.-

La velocidad media del electrón en dirección axial es:

$$V_e = \frac{E}{H} \cdot 10^8 \text{ Volt/cm. gauss}$$

E = campo eléctrico en dirección normal al eje del haz.-

En un haz no neutralizado E puede ser del orden de los miles de volt/cm.- Pero si el haz está parcialmente neutralizado se puede tomar $E \approx 10$ volt/cm.- Por lo tanto en un campo de 4000 gauss es $V \approx 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{cm}}{\text{seg.}}$
 Un ión de masa 235 tiene una velocidad del orden de $10^7 \frac{\text{cm.}}{\text{seg.}}$ para $V = 20$ K Volt.- Por lo tanto los electrones son lentos respecto de los iones, lo que los hace más efectivos para la compensación de la carga espacial.-

LA FUENTE DE IONES:

El material a separar se halla generalmente en estado sólido.-

La fuente de iones tiene por finalidad:

- a).- Vaporizar el material.-
- b).- Ionizar sus moléculas.-
- c).- Acelerar a los iones así formados hasta adquirir energías ///

del orden de las decenas de KeV.-

La eficiencia de la fuente de iones es muy importante para un buen rendimiento del separador.- Esta debe satisfacer las siguientes exigencias:

- 1).- Suministrar corrientes iónicas del orden de los miliamperos.-
- 2).- Funcionar con baja tensión de vapor ($\sim 10^{-3}$ mm.).-
- 3).- Producir iones monocinéticos.-
- 4).- Debe ser aplicable a la separación de isotopos del mayor número de elementos posibles.-
- 5).- En la corriente producida debe predominar un tipo de iones, preferiblemente atómicos.-
- 6).- La corriente extraída debe estar libre de fluctuaciones rápidas.-

Consideremos estas condiciones más en detalle:

La condición 1) es indispensable para obtener la producción de isotopos programada.-

La 2) es importante porque equivale a un bajo consumo del material utilizado, y permite además el mantenimiento de un buen vacío en la cámara de deflexión magnética, con lo que disminuye la absorción de iones en el gas residual.- Debido a las colisiones, cuya principal consecuencia es un simple intercambio de carga, no todos los iones llegan al colector.- Las consideraciones que siguen dan una idea de la magnitud de tal efecto:

Sea " λ " la longitud total del camino desde la fuente al colector, y " λ " el camino libre medio para colisiones con cambio de carga, resulta que la corriente i_c del colector es:

$$i_c = i_f \cdot e^{-\lambda/\lambda} \quad (4)$$

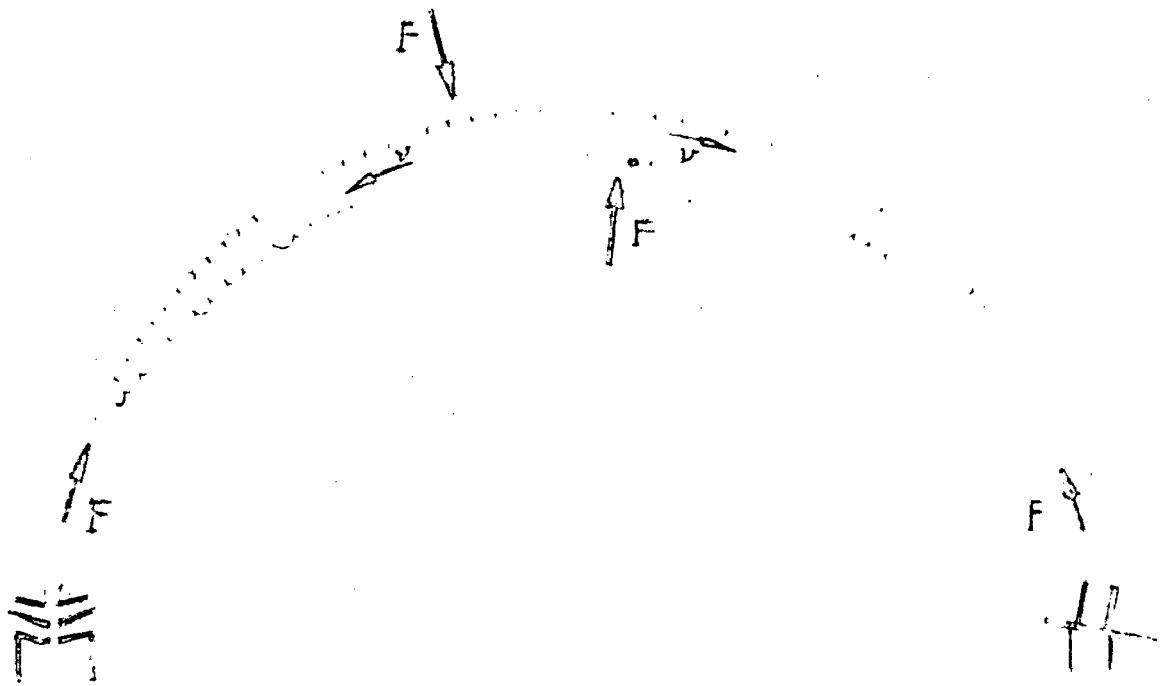
donde: i_f = corriente iónica extraída de la fuente.-

λ es inversamente proporcional a la sección eficaz para este proceso, que es grande cuando el gas residual de la cámara es de la misma naturaleza que los iones.- En este caso intervienen fenómenos de resonancia, caracterizados por un gran valor de la sección eficaz.- Hay escasez de datos experimentales.- Para el He^+ de 15 KeV, resulta:

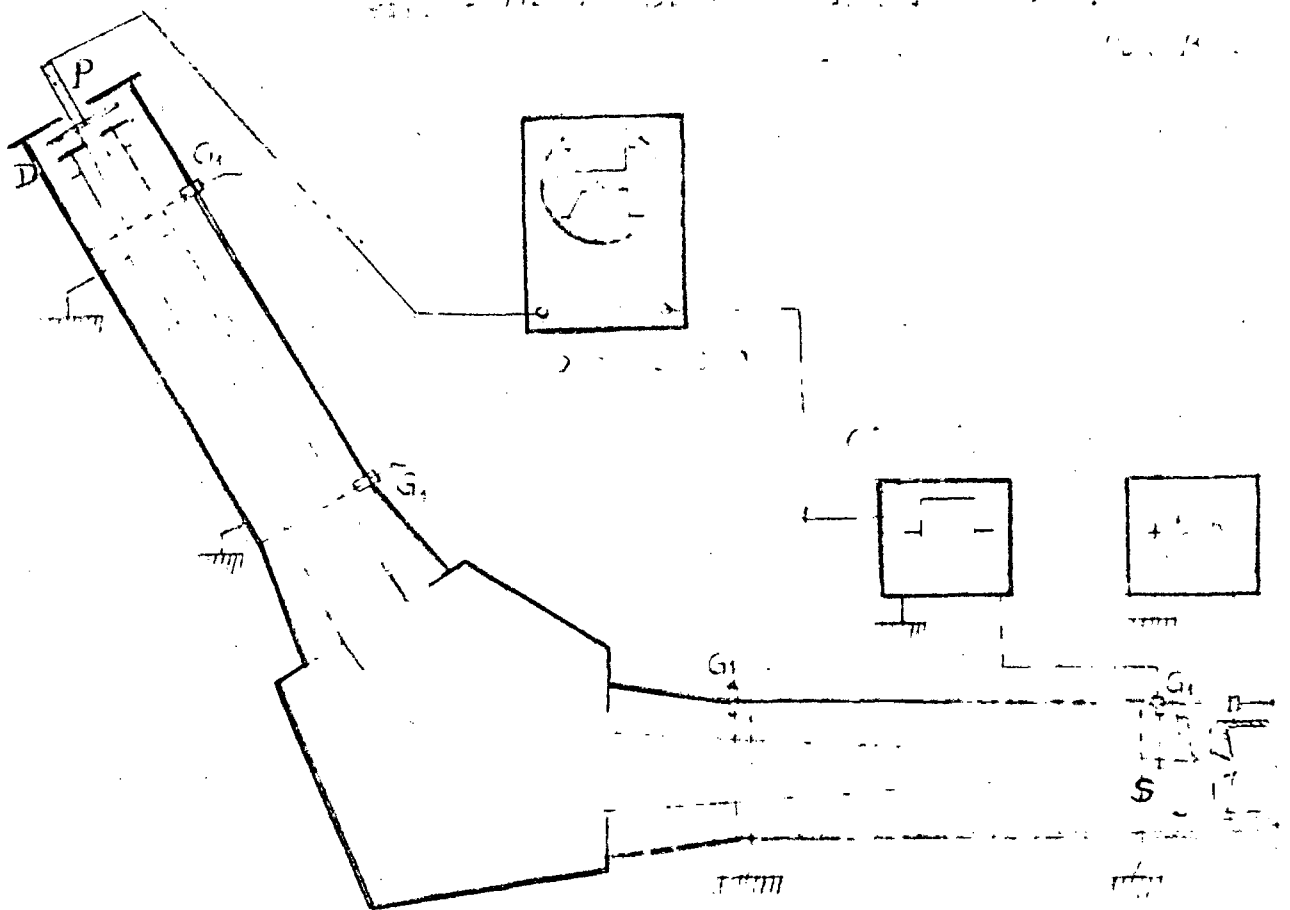
$$\sigma_i = 8 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2 \text{ .-}$$

///

THEORY OF THE ...



THEORY OF THE ...



A una presión de $4 \cdot 10^{-5}$ mm. esto corresponde a un camino libre de $\lambda = 9$ metros.- Para nuestro separador resulta, de (4):

$$i_c = i_f \cdot e^{-\frac{300}{900}} = 0,71 \quad i_f$$

De modo que se pierde un 30% de los iones por colisiones con las moléculas del gas residual.- Se ve la conveniencia de que la presión se mantenga baja en la cámara de deflexión magnética.-

De acuerdo a la condición 3) los iones deben ser monocinéticos, en lo posible, si se pretende un buen enfoque.- La dispersión máxima de energía permisible está dada por la expresión:

$$\Delta V(V_0 H_s) = 2 \frac{V \Delta r}{r} \quad (5)$$

La aberración Δs debida a una variación ΔV de la energía vale:

$$\Delta s = 2 \Delta r = \frac{\Delta V}{V} r$$

Suponiendo: $V = 30$ KV, $r_0 = 102$ cm., $\Delta s = 0,04$ cm.

resulta: $V \leq 12$ Volt

Por lo tanto la máxima dispersión de energía permisible es del orden de los 10 á 15 eV.-

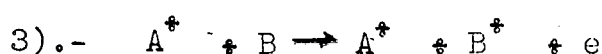
5).- Si el material a separar está formado por moléculas complejas, aparecen varios tipos de iones.- Si uno de esos tipos predomina fuertemente sobre los otros, la pérdida de iones de otras masas no será necesario.- Es preferible la separación de iones atómicos, pues para masas mayores se requiere un poder separador mayor.-

6).- El haz iónico debe estar libre de fluctuaciones rápidas: al circular cierta corriente de iones, se van librando electrones hasta que, al cabo de un cierto tiempo que llamamos τ , neutralizan la carga espacial. Si la intensidad del haz fluctúa con períodos del orden de τ o menores, no llegan a formarse suficientes electrones, y por lo tanto el haz diverge.- Es entonces importante conocer el tiempo τ . - Lo podemos determinar en base a las siguientes consideraciones:

Durante el período que precede a la neutralización las pérdidas de electrones se deben esencialmente a recombinaciones, lo cual aumenta τ . En éstas intervienen dos procesos:

- 1).- $A^+ + e \rightarrow A + h\nu$ (recombinación radiativa)
- 2).- $X\gamma^+ + e \rightarrow X^+ + \gamma^+$ (recombinación disociativa)

La 2) tiene un rol preponderante, salvo en ausencia total de iones moleculares. Teniendo en cuenta los procesos 1) y 2), además del proceso de ionización



se obtiene la velocidad de formación de electrones lentos:

$$\frac{dn_-}{dt} = N_0 \bar{v}_b J - \alpha n_- n_+ - \beta n_- m_+ \quad (8)$$

J = densidad iones n_+

n_+ = concentración de iones rápidos

n_- = " " electrones lentos

m_+ = " " iones lentos

N_0 = " " moléculas neutras

α, β = coeficientes de recombinación

$\bar{v}_b$ = sección eficaz para el proceso 3)

Con (8) se puede calcular τ , Siendo α y β pequeños, se pueden despreciar los términos correspondientes. Para que la concentración de electrones sea igual a la concentración de iones rápidos, se necesita un tiempo:

$$\tau = \frac{n_-}{\frac{dn_-}{dt}} = \frac{\frac{J}{V}}{N_0 \bar{v}_b J} = \frac{1}{N_0 \bar{v}_b} \left(\frac{M}{2 \text{ eV}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Así, para el U^{235} , a una presión de vapor de $3 \cdot 10^{-5}$ mm., resulta un tiempo:

$$\tau = \frac{1}{10^{12} \cdot 5 \cdot 10^{-15} \cdot 1,3 \cdot 10^7} = 15 \mu \text{ seg.}$$

Para el Zn^{64} , a una presión de 10^{-5} mm.,

DETERMINATION

τ

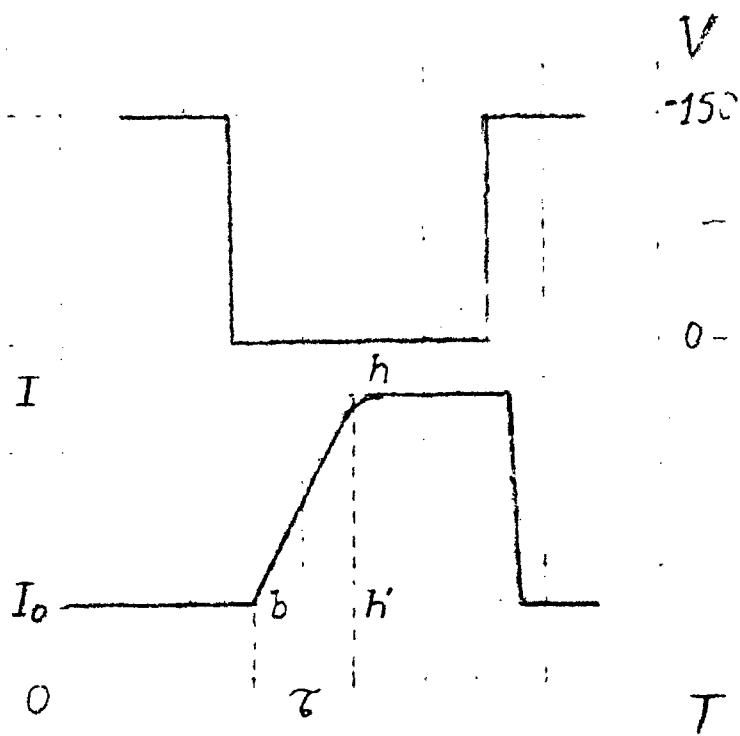


fig. 1a

τ
ms
6"

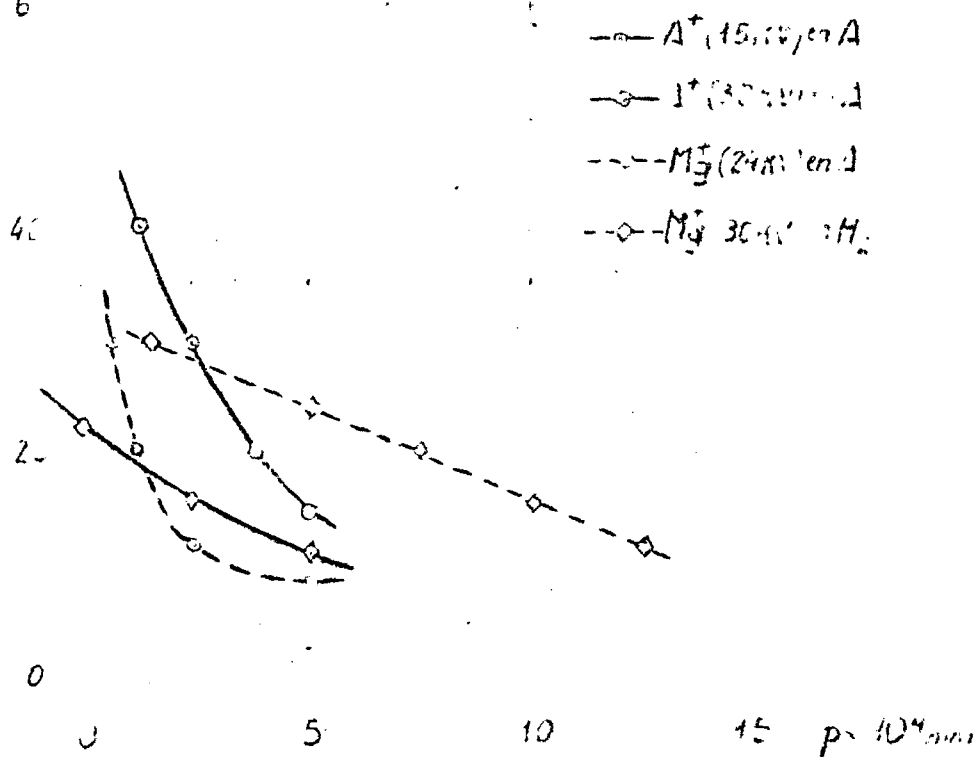


fig. 3

ВРАЩЕНИЕ ДЕ τ . ФУНКЦИИ p И V

$$\tau = \frac{1}{3 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-16} \cdot 6 \cdot 10^6} = 5000 \text{ } \mu \text{ seg.}$$

Para medir τ , y estudiar los factores que pueden modificar su magnitud, R. Bernas (4) realizó experiencias con su separador de 60° (fig. 6).-

El haz de iones que sale de la ranura s de la fuente es defle^{cto}do por el campo magnético en P, y recogido en el colector C.- Si se aplica a las grillas G_1 una tensión negativa de 150 Volt, los electrones liberados por el haz no pueden escapar por sus extremos, y son efectivos para la anulación de la carga espacial.- Si las grillas no tienen tensión, el haz diverge, y una parte importante es interceptada por el ~~diagrama~~ ^{diagrama} D.- La tensión de G_1 es suministrada por un oscilador de onda cuadrada, que proporciona pulsos de una duración variable entre 150 y 10.000 μ seg., a una frecuencia de 50 ciclos.- Un osciloscopio de doble haz permite la observación simultánea de los pulsos del generador y de la variación de la corriente que llega al colector (fig, 7).- La porción b h' es el tiempo de neutralización τ .- Variando la intensidad del haz entre 1 y 10 mA no se ha observado una variación de τ .-

Al aumentar la presión del gas en el recinto, disminuye τ .- Se comprueba además que τ depende de la naturaleza del gas residual (fig. 8).-

CONCLUSIONES:

De esta experiencia resulta que una presión residual elevada no es condición indispensable para mantener la estabilidad del haz.- Si el espacio recorrido por éste es rigurosamente equipotencial, la presión puede ser tan pequeña como se quiera, pues las moléculas ionizadas son expulsadas del haz, se neutralizan sobre las paredes y pueden dar lugar a nuevos choques ionizantes.-

ELECCION DEL TIPO DE FUENTE DE IONES A UTILIZARSE EN EL SEPARADOR:

Examinemos los distintos tipos de fuentes de iones usuales para ver la que más se adaptaría a las condiciones que acabamos de discutir.-

1).- Fuente de rayos canales:

La fuente de Oliphant-Rutherford, está constituida por dos electrodos concéntricos, siendo el exterior el cátodo, que termina en un plano perforado (fig. 9).- La diferencia de tensión es de 20 KV á 50 KV.- La corriente de descarga es de unos 20 mA, y la corriente extraída de 1 mA.- Consume una potencia de 2 K Watt.- La presión es de 10^{-2} mm. El 30% a 50% de los iones son atómicos en el caso del H^+ y D^+ .- La vida de la fuente es larga pues no posee filamento.-

Pero no todos los iones son monocinéticos, ya que no son formados en la misma región de descarga, y por lo tanto sufren distintas aceleraciones antes de abandonar la fuente.- No cumple por lo tanto la condición 3).-

Además la eficiencia, es decir el cociente entre cantidad de iones extraídos y de material empleado, es sumamente baja.-

2).- Fuentes de arco:

Consisten esencialmente en un ánodo que está a 100 ó 200 Volt respecto de un cátodo incandescente que produce un haz de electrones.- Estos ionizan al gas que está entre los electrodos.- Los iones formados son extraídos de la fuente a través de una abertura mediante electrodos negativos y acelerados.- La descarga tiene las características de una columna negativa a una presión de 0.1 á 0.01 mm. Hg.-

Debido a la baja tensión y la alta densidad iónica del plasma (usualmente varios órdenes de magnitud mayor que la densidad iónica en una descarga gaseosa), la capa sobre el cátodo, a través de la cual se produce prácticamente toda la caída catódica del potencial, es generalmente de poco espesor, mucho menor que el camino libre medio de los electrones en el gas, de modo que muy pocos iones son producidos en ella.- Prácticamente todos se forman en el plasma, por electrones acelerados a energías que corresponden a toda la caída de potencial catódica, de modo que la dispersión energética de los iones es muy pequeña.-

Existen varios tipos de fuentes de arco:

a).- Fuente de arco capilar:

En la figura 11 se elustra la fuente de Tuve-Dahl-Hagstad.-

El capilar C tiene unos milímetros de diámetro.- En sus extremos

///

Figura 1. De 1952.
1952

1952 1952 1952 1952 1952
1952 1952 1952 1952 1952

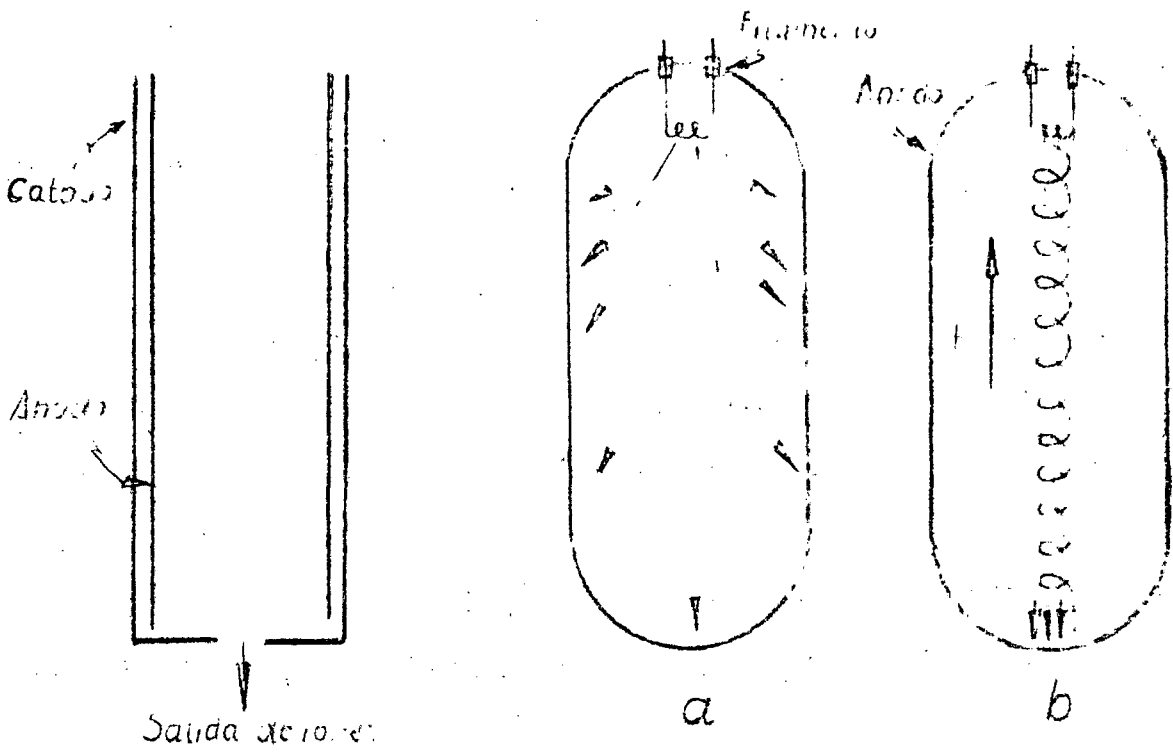
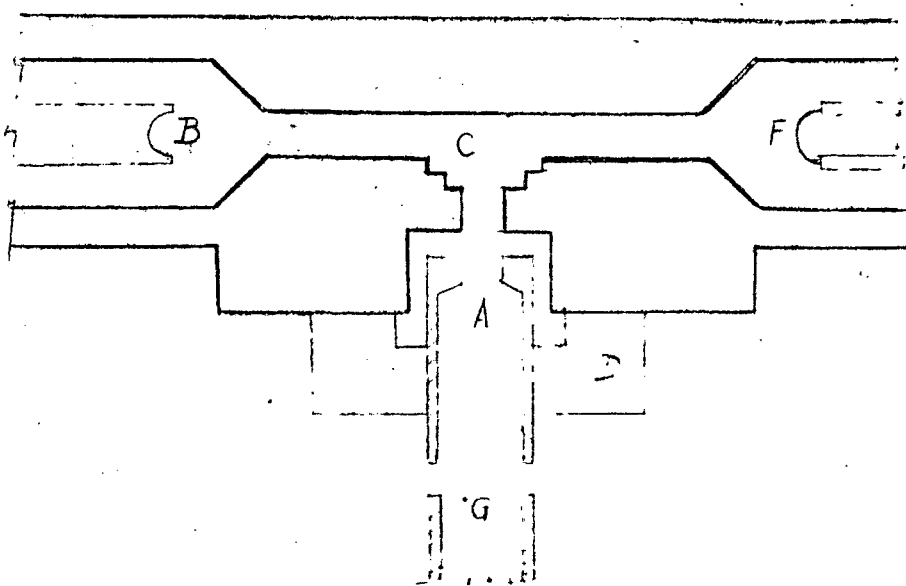


Figura 2

1952



FUENTE DE IONES CÍCLICA

Figura 3

se encuentran el ánodo y el filamento.- Los electrones pasan por su interior ionizando al gas.- Los iones así producidos pasan a través del orificio A, extraídos por un potencial negativo aplicado al electrodo E, y enfocados mediante el electrodo G.-

Se obtienen corrientes de varios mA.- La proporción de iones monoatómicos es de 15 á 25%.- El consumo de potencia es bajo.- Los iones son prácticamente monocinéticos.- Pero el arco capilar es inestable y difícil de iniciar.- Además es muy sensible a impurezas, lo cual es un inconveniente pues es necesario introducir en la fuente gran variedad de sustancias a separar.- El enfoque es dificultoso y necesita lentes complicadas.-

b).- Fuente de arco con campo magnético longitudinal:

Si se aplica un campo magnético uniforme del orden de los centenares de gauss a lo largo del eje de la fuente (línea que une el filamento con el ánodo), el haz de electrones es colimado, aumentando así la producción de iones (fig. 10 a y b).-

Hay dos tipos principales:

b₁).- Fuente a electrones oscilantes:

El camino libre medio de los electrones a presión de trabajo de la fuente es del orden de la distancia filamento-ánodo, de modo que cada electrón realiza a lo sumo una colisión lográndose así que los iones sean monocinéticos.-

En las fuentes de tiro oscilante los electrones encuentran al fin de su recorrido un electrodo negativo que los refleja, aumentando de ese modo su probabilidad de ionización.-

FUENTE DE FINK 25111

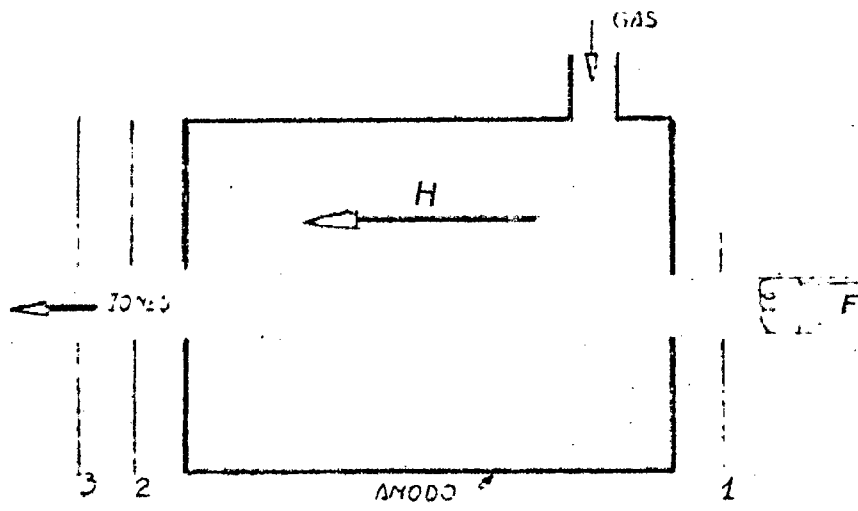
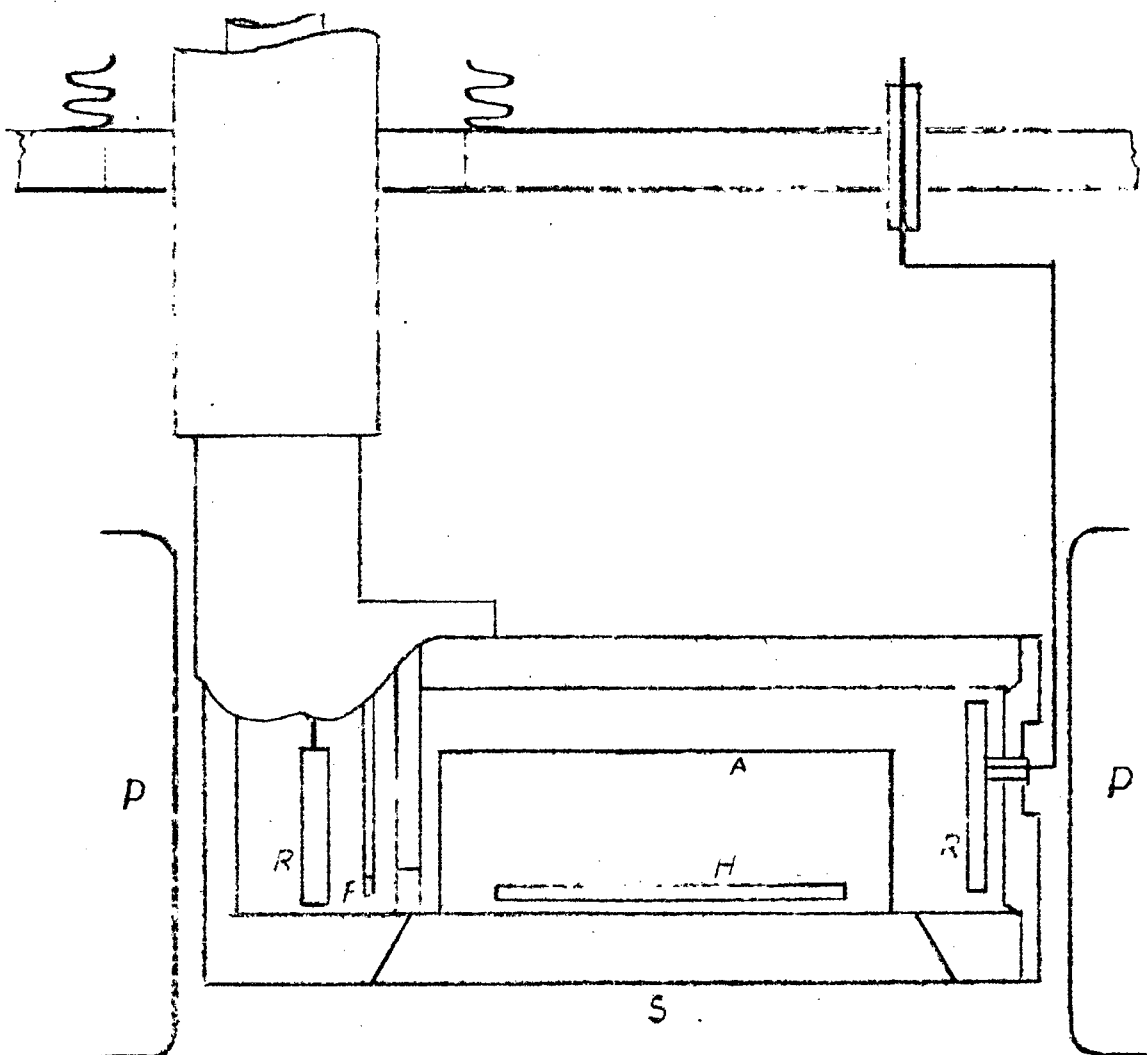


figura
12

FUENTE DE ELECTRONES OSCILANTES



figura

Fuente de Finkelstein: (fig. 12)

Los electrones del filamento son acelerados a través del orificio del electrodo 1, y entran a la cámara C que contiene al gas.- El electrodo 2 tiene un potencial negativo para extraer los iones del arco, y reflejar los electrones.- Estos se mueven en un sentido y luego en contrario, describiendo helicoides en el campo magnético, hasta que sufren una colisión inelástica, siendo finalmente colectados por el electrodo 1 o por las paredes de C.-

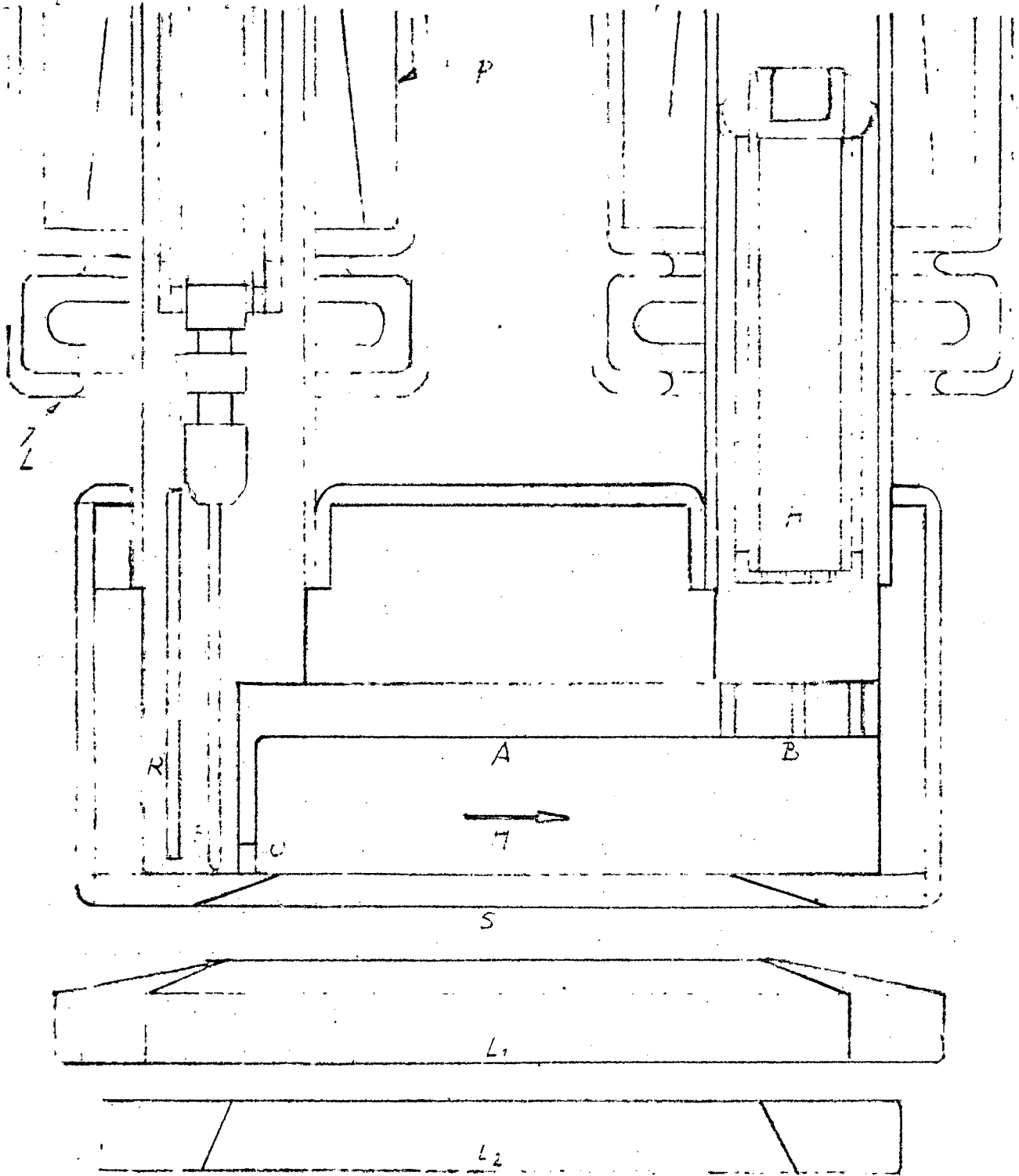
La presión de trabajo es de $6 \cdot 10^{-4}$ mm.- Por debajo de $2 \cdot 10^{-4}$ el arco es inestable.-

La eficiencia es alta: cerca del 100% de los atomados es ionizado.- Se obtienen corrientes de H^+ de 150 mA en períodos cortos, y 75 mA en promedio en períodos de larga duración.- El consumo de potencia es de varios centenares de watt.- Los iones son monocinéticos.- Pero en el separador de 180° la fuente de iones debe estar en el interior del campo magnético del electroimán principal, que es normal a la dirección de la corriente iónica, de modo que no es posible hacer una extracción axial de iones, sino una extracción radial.- Para utilizar la fuente de Finkelstein habría que colocarla fuera del campo, y enfocar el haz por medio de lentes sobre la posición del objeto.- En el sistema de enfoque se perdería buena parte de los iones.-

Fuente con extracción radial:

En las fuentes de Heil y Ardenne (fig. 13), los electrones emitidos por el filamento son acelerados hacia el interior de una cavidad en forma de paralelepípedo que forma el ánodo, cuyo interior es equitriangular.- Después de atravesarla, son reflejados por un electrodo negativo y oscilan hasta que realizan colisiones con el gas.- La extracción

Fig. 1. 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104. 105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112. 113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120. 121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128. 129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136. 137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144. 145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152. 153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168. 169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176. 177. 178. 179. 180. 181. 182. 183. 184. 185. 186. 187. 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 198. 199. 200. 201. 202. 203. 204. 205. 206. 207. 208. 209. 210. 211. 212. 213. 214. 215. 216. 217. 218. 219. 220. 221. 222. 223. 224. 225. 226. 227. 228. 229. 230. 231. 232. 233. 234. 235. 236. 237. 238. 239. 240. 241. 242. 243. 244. 245. 246. 247. 248. 249. 250. 251. 252. 253. 254. 255. 256. 257. 258. 259. 260. 261. 262. 263. 264. 265. 266. 267. 268. 269. 270. 271. 272. 273. 274. 275. 276. 277. 278. 279. 280. 281. 282. 283. 284. 285. 286. 287. 288. 289. 290. 291. 292. 293. 294. 295. 296. 297. 298. 299. 300. 301. 302. 303. 304. 305. 306. 307. 308. 309. 310. 311. 312. 313. 314. 315. 316. 317. 318. 319. 320. 321. 322. 323. 324. 325. 326. 327. 328. 329. 330. 331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350. 351. 352. 353. 354. 355. 356. 357. 358. 359. 360. 361. 362. 363. 364. 365. 366. 367. 368. 369. 370. 371. 372. 373. 374. 375. 376. 377. 378. 379. 380. 381. 382. 383. 384. 385. 386. 387. 388. 389. 390. 391. 392. 393. 394. 395. 396. 397. 398. 399. 400. 401. 402. 403. 404. 405. 406. 407. 408. 409. 410. 411. 412. 413. 414. 415. 416. 417. 418. 419. 420. 421. 422. 423. 424. 425. 426. 427. 428. 429. 430. 431. 432. 433. 434. 435. 436. 437. 438. 439. 440. 441. 442. 443. 444. 445. 446. 447. 448. 449. 450. 451. 452. 453. 454. 455. 456. 457. 458. 459. 460. 461. 462. 463. 464. 465. 466. 467. 468. 469. 470. 471. 472. 473. 474. 475. 476. 477. 478. 479. 480. 481. 482. 483. 484. 485. 486. 487. 488. 489. 490. 491. 492. 493. 494. 495. 496. 497. 498. 499. 500. 501. 502. 503. 504. 505. 506. 507. 508. 509. 510. 511. 512. 513. 514. 515. 516. 517. 518. 519. 520. 521. 522. 523. 524. 525. 526. 527. 528. 529. 530. 531. 532. 533. 534. 535. 536. 537. 538. 539. 540. 541. 542. 543. 544. 545. 546. 547. 548. 549. 550. 551. 552. 553. 554. 555. 556. 557. 558. 559. 560. 561. 562. 563. 564. 565. 566. 567. 568. 569. 570. 571. 572. 573. 574. 575. 576. 577. 578. 579. 580. 581. 582. 583. 584. 585. 586. 587. 588. 589. 590. 591. 592. 593. 594. 595. 596. 597. 598. 599. 600. 601. 602. 603. 604. 605. 606. 607. 608. 609. 610. 611. 612. 613. 614. 615. 616. 617. 618. 619. 620. 621. 622. 623. 624. 625. 626. 627. 628. 629. 630. 631. 632. 633. 634. 635. 636. 637. 638. 639. 640. 641. 642. 643. 644. 645. 646. 647. 648. 649. 650. 651. 652. 653. 654. 655. 656. 657. 658. 659. 660. 661. 662. 663. 664. 665. 666. 667. 668. 669. 670. 671. 672. 673. 674. 675. 676. 677. 678. 679. 680. 681. 682. 683. 684. 685. 686. 687. 688. 689. 690. 691. 692. 693. 694. 695. 696. 697. 698. 699. 700. 701. 702. 703. 704. 705. 706. 707. 708. 709. 710. 711. 712. 713. 714. 715. 716. 717. 718. 719. 720. 721. 722. 723. 724. 725. 726. 727. 728. 729. 730. 731. 732. 733. 734. 735. 736. 737. 738. 739. 740. 741. 742. 743. 744. 745. 746. 747. 748. 749. 750. 751. 752. 753. 754. 755. 756. 757. 758. 759. 760. 761. 762. 763. 764. 765. 766. 767. 768. 769. 770. 771. 772. 773. 774. 775. 776. 777. 778. 779. 780. 781. 782. 783. 784. 785. 786. 787. 788. 789. 790. 791. 792. 793. 794. 795. 796. 797. 798. 799. 800. 801. 802. 803. 804. 805. 806. 807. 808. 809. 810. 811. 812. 813. 814. 815. 816. 817. 818. 819. 820. 821. 822. 823. 824. 825. 826. 827. 828. 829. 830. 831. 832. 833. 834. 835. 836. 837. 838. 839. 840. 841. 842. 843. 844. 845. 846. 847. 848. 849. 850. 851. 852. 853. 854. 855. 856. 857. 858. 859. 860. 861. 862. 863. 864. 865. 866. 867. 868. 869. 870. 871. 872. 873. 874. 875. 876. 877. 878. 879. 880. 881. 882. 883. 884. 885. 886. 887. 888. 889. 890. 891. 892. 893. 894. 895. 896. 897. 898. 899. 900. 901. 902. 903. 904. 905. 906. 907. 908. 909. 910. 911. 912. 913. 914. 915. 916. 917. 918. 919. 920. 921. 922. 923. 924. 925. 926. 927. 928. 929. 930. 931. 932. 933. 934. 935. 936. 937. 938. 939. 940. 941. 942. 943. 944. 945. 946. 947. 948. 949. 950. 951. 952. 953. 954. 955. 956. 957. 958. 959. 960. 961. 962. 963. 964. 965. 966. 967. 968. 969. 970. 971. 972. 973. 974. 975. 976. 977. 978. 979. 980. 981. 982. 983. 984. 985. 986. 987. 988. 989. 990. 991. 992. 993. 994. 995. 996. 997. 998. 999. 1000.



de iones es radial, a través de una ranura de la caja.-

La eficiencia es del orden del 75%. - La corriente es de 100 mA. - El consumo de potencia es muy bajo. - La dispersión de energías es de 0.1 Volt. - La presión es de $3 \cdot 10^{-4}$ mm. Hg. -

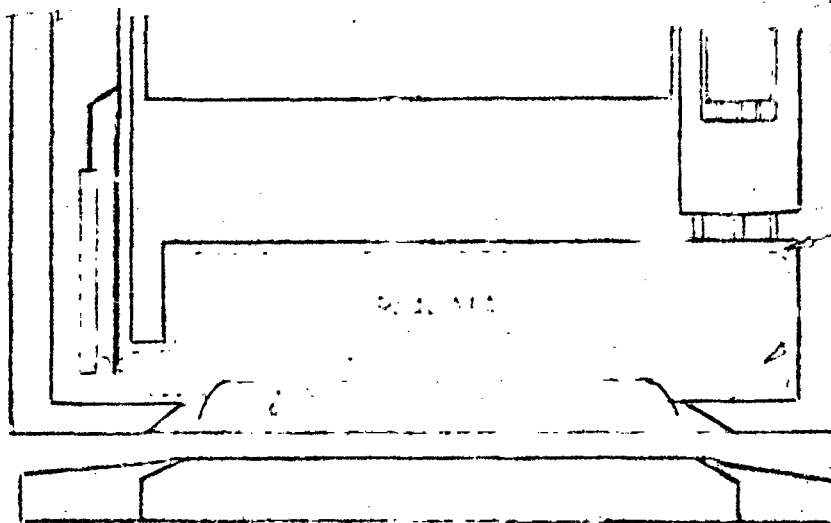
Este tipo de fuente parece el más ventajoso pero durante su funcionamiento, aparecen en el plasma oscilaciones de alta frecuencia, del orden del tiempo τ de anulación de la carga espacial, lo que hace que el haz de iones diverja y, a pesar de la elevada corriente de salida, se recojan muy pocos iones en el colector. - Del estudio del funcionamiento de las fuentes de arco, que se realiza en las páginas siguientes, resulta que se pueden modificar las condiciones de trabajo en forma de eliminar estas oscilaciones de alta frecuencia, a costa de la disminución de la corriente de salida y de la eficiencia de la fuente en una magnitud que no llegaría a hacer desventajoso su empleo. -

b₂). - Fuente de arco a electrones no oscilantes: (fig. 14)

Es del mismo tipo que de Heil o Ardenne, pero sin el reflector R, de modo que los electrones hacen un solo recorrido en la caja, con lo que la eficiencia es mucho menor (10%). - La corriente varía entre 10-35 mA. - La presión es del orden de $2 \cdot 10^{-3}$ mm. -

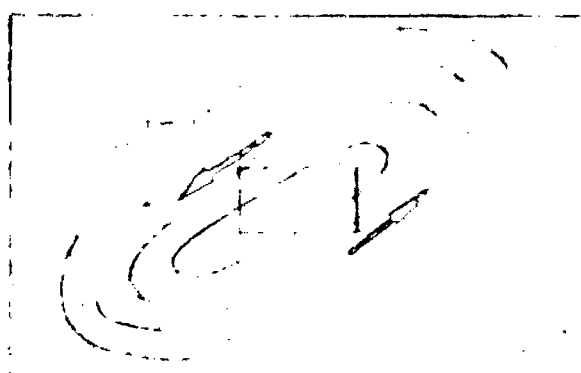
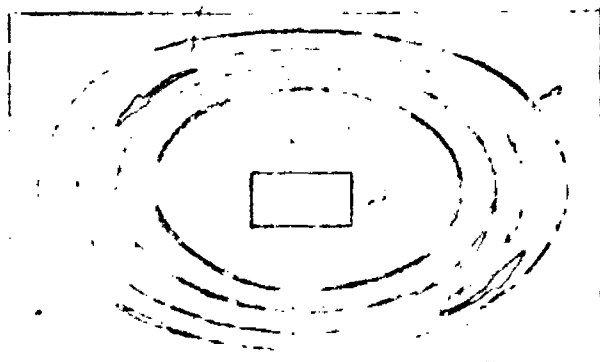
CONCLUSIONES:

De la comparación entre los diversos tipos de fuentes de iones resulta que las que cumplen las condiciones requeridas para el separador electromagnético son las fuentes de arco con campo magnético axial y extracción radial de los iones. - Evidentemente la fuente de electrones oscilantes tiene la mayor salida de iones, con una gran eficiencia de ionización, y baja presión de vapor. - Ha sido utilizada por Kistemaker-Zilver Schoon en su separador de 180º, pero éstos comprobaron que si bien la corriente extraída era alta (100 mA), la corriente en el colector era muy baja (0,5 mA), lo mismo que el poder separador



NEGATIVE

COLUMBIA
ELECTRIC



y 4000 gauss, según el material a separar.- De esta manera los electrones primarios son concentrados en un haz de diámetro igual al de la ranura colimadora, describiendo helicoides, radios de aproximadamente 1 mm. para 300 gauss y 0.1 mm. para 4000 gauss.-

Proceso de formación de los iones:

A la presión de trabajo de la fuente ($\sim 10^{-3}$ mm.), el camino libre medio de los electrones es del orden de 10 a 50 cm., y como la longitud máxima de la caja anódica es de 10 cm., la probabilidad de que un electrón ionice dos moléculas sucesivamente es muy baja, lo que asegura que los iones formados son monocinéticos.-

El carácter de la descarga es por lo tanto el de una columna negativa, que se extiende a lo largo del haz de electrones (fig. 15).-

La velocidad de producción de los iones, depende de la intensidad de la corriente del arco, presión y sección eficaz para la ionización.- Una primera aproximación, válida, para corrientes de arco pequeñas, está expresada por la ecuación:

$$V = J_e \bar{V}_i N_0 \ell \quad (10)$$

J_e = densidad de corriente del arco

$\bar{V}_i$ = sección eficaz a la ionización

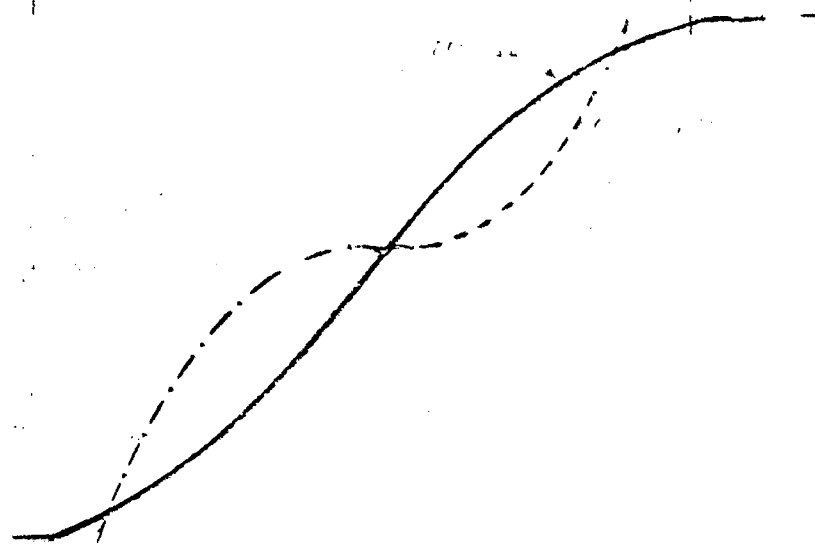
N_0 = densidad de moléculas neutras

ℓ = camino de los electrones en el arco.-

El valor de $\bar{V}_i$ depende de la tensión, es decir, de la energía de los electrones: llega a un máximo aproximadamente 4 veces el potencial de ionización V_i (fig. 18), y luego disminuye lentamente.- La forma de la curva es similar para la mayoría de los gases, pero los valores numéricos de $\bar{V}_i$ varían ampliamente.- Para el argón es $\bar{V}_i = 4 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$.- Para el UCL_4 es $\bar{V}_i = 5 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$.- Faltan datos para



DATE	DESCRIPTION	AMOUNT	CHECK NO.	BANK	REMARKS
10/1/19	10/1/19	10/1/19	10/1/19	10/1/19	10/1/19
10/2/19	10/2/19	10/2/19	10/2/19	10/2/19	10/2/19
10/3/19	10/3/19	10/3/19	10/3/19	10/3/19	10/3/19
10/4/19	10/4/19	10/4/19	10/4/19	10/4/19	10/4/19
10/5/19	10/5/19	10/5/19	10/5/19	10/5/19	10/5/19
10/6/19	10/6/19	10/6/19	10/6/19	10/6/19	10/6/19
10/7/19	10/7/19	10/7/19	10/7/19	10/7/19	10/7/19
10/8/19	10/8/19	10/8/19	10/8/19	10/8/19	10/8/19
10/9/19	10/9/19	10/9/19	10/9/19	10/9/19	10/9/19
10/10/19	10/10/19	10/10/19	10/10/19	10/10/19	10/10/19
10/11/19	10/11/19	10/11/19	10/11/19	10/11/19	10/11/19
10/12/19	10/12/19	10/12/19	10/12/19	10/12/19	10/12/19
10/13/19	10/13/19	10/13/19	10/13/19	10/13/19	10/13/19
10/14/19	10/14/19	10/14/19	10/14/19	10/14/19	10/14/19
10/15/19	10/15/19	10/15/19	10/15/19	10/15/19	10/15/19
10/16/19	10/16/19	10/16/19	10/16/19	10/16/19	10/16/19
10/17/19	10/17/19	10/17/19	10/17/19	10/17/19	10/17/19
10/18/19	10/18/19	10/18/19	10/18/19	10/18/19	10/18/19
10/19/19	10/19/19	10/19/19	10/19/19	10/19/19	10/19/19
10/20/19	10/20/19	10/20/19	10/20/19	10/20/19	10/20/19
10/21/19	10/21/19	10/21/19	10/21/19	10/21/19	10/21/19
10/22/19	10/22/19	10/22/19	10/22/19	10/22/19	10/22/19
10/23/19	10/23/19	10/23/19	10/23/19	10/23/19	10/23/19
10/24/19	10/24/19	10/24/19	10/24/19	10/24/19	10/24/19
10/25/19	10/25/19	10/25/19	10/25/19	10/25/19	10/25/19
10/26/19	10/26/19	10/26/19	10/26/19	10/26/19	10/26/19
10/27/19	10/27/19	10/27/19	10/27/19	10/27/19	10/27/19
10/28/19	10/28/19	10/28/19	10/28/19	10/28/19	10/28/19
10/29/19	10/29/19	10/29/19	10/29/19	10/29/19	10/29/19
10/30/19	10/30/19	10/30/19	10/30/19	10/30/19	10/30/19
10/31/19	10/31/19	10/31/19	10/31/19	10/31/19	10/31/19



muchos elementos.-

Los electrones secundarios liberados en el proceso tienen energías apreciables que aumentan con la tensión del arco.- Por ejemplo: en el H_2 , a una tensión de 100 v., la energía media es de 15 v., pero para 150 v. se obtienen energías de hasta 30 v.-

Estas energías se distribuyen rápidamente entre los electrones del plasma, que la disipan en procesos de ionización y excitación.- Así una parte considerable (un tercio) de toda la ionización proviene de los electrones del plasma, que obtienen su energía de los secundarios.-

Generalmente las corrientes de arco son tan intensas que la fracción ionizada deja de ser pequeña, dejando de valer así la ecuación anterior.- Hill y Aller (2), pág. 166, obtuvieron la expresión:

$$V = \frac{N_0 V_N}{4} P \quad (11)$$

donde V_N es la velocidad de las moléculas neutras al atravesar la columna de electrones primarios.- La probabilidad P de que se ionicen estas moléculas es:

$$P = 1 - e^{-J_e V_i T}$$

siendo T el tiempo durante el cual la molécula permanece en la columna: $T = \frac{l}{V_N}$, (l es la longitud del camino recorrido en ésta).-

Los iones y electrones secundarios forman alrededor de la columna de electrones primarios una zona luminosa denominada plasma (fig. 15) A su través el campo eléctrico es débil y prácticamente constante; por lo tanto su conductividad debe ser alta, y la densidad de carga espacial baja.-

///

El plasma contiene muchos electrones por unidad de volumen, y casi tantos iones positivos.- En la mayoría de las descargas la concentración de iones y electrones es del orden de 10^{12} iones o electrones por cm^3 , siendo la de moléculas neutras $10^{14}/\text{cm}^3$.- Por lo tanto, cuando se mueven a través del plasma, los iones y electrones tienen más frecuentemente colisiones con moléculas que entre sí.- Aunque se produjera este último caso, rara vez se recombinarían, pues no se cumplen las condiciones mecánicas para una unión.- Cuando chocan, como la masa del ión es mucho mayor, su velocidad prácticamente no varía.- De modo que el electrón, que tiene velocidad mucho mayor, debe perder la mayor parte de su energía cinética para que haya recombinación.- Puede hacerlo por emisión de radiación, un espectro continuo, cuyo rango de frecuencias corresponde al rango de velocidades de los electrones en la descarga.- Este espectro se observa en la luminosidad del plasma, pero es mucho menos intenso que el espectro de excitación; por lo tanto las recombinaciones en el plasma son poco frecuentes.-

Los iones y electrones llegan a las paredes del ánodo difundiéndose a través del plasma y entregan allí su energía cinética, por lo cual pueden recombinarse libremente sobre ellas.- La velocidad de recombinación depende de la geometría de la caja anódica: si los electrodos son pequeños y distantes, la descarga tendrá un plasma de gran área, y muchos iones y electrones desaparecerán por segundo por difusión y recombinación en las paredes.-

Características de la descarga en torno al filamento:

Alrededor del filamento incandescentes hay una carga espacial negativa, cuya densidad determina la corriente emitida por éste.- Junto al borde de esta zona, los iones forman otra de carga positiva, que limita de la misma manera la corriente de iones hacia el cátodo.-

Ambas zonas constituyen una doble capa que forma una vaina oscura alrededor del filamento.- Para estudiar la limitación de corriente introducida por este espacio oscuro catódico, consideramos la distribución del potencial y densi-

de carga espacial alrededor del filamento (fig. 19).- Sobre éste la intensidad de campo eléctrico es nula, lo mismo que en el límite del plasma.- Como no hay líneas de fuerza que entren o salgan de la doble capa, debe hacer igual número de electrones e iones en ésta, siendo la distribución la indicada en la figura, pues los electrones se concentran

cerca del filamento por desplazarse allí con mínima velocidad, y similarmente los iones en el límite del plasma.-

Vamos a deducir la relación entre la densidad de corriente iónica J_+ , y de corriente electrónica J_e :

Sean n_+ densidad de iones

n_e " " electrones

V potencial negativo; $V = 0$ en el límite del plasma; $V = V$ sobre el filamento

m_e masa del electrón

m_+ " " ión.-

Por la ecuación de Poisson:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = 4\pi e (n_+ - n_e) \quad (12)$$

Además:

$$n_+ = J_+ \sqrt{\frac{m_+}{2eV}}$$

$$n_e = J_e \sqrt{\frac{m_e}{2e(V_1 - V)}}$$

Por lo tanto:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} = 4\pi \sqrt{\frac{e}{2}} \left(J_+ \sqrt{\frac{m_+}{V}} - J_e \sqrt{\frac{m_e}{V_1 - V}} \right)$$

Multiplicando por $\frac{\partial V}{\partial X}$, e integrando:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 = 4\pi \sqrt{\frac{e}{2}} J_+ \sqrt{m_+} + 2 \frac{\partial V^{\frac{1}{2}}}{\partial X} - 4\pi \frac{e}{2} J_e \sqrt{m_e} 2 \frac{\partial}{\partial X} (V_1 - V)^{\frac{1}{2}}$$

$$(V_1 - V)^{\frac{1}{2}}$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 = 16\pi \sqrt{\frac{e}{2}} (J_+ \sqrt{m_+} + \sqrt{V} + J_e \sqrt{m_e} \sqrt{V_1 - V} + C_1) \quad (13)$$

En el límite del plasma, es $V = 0$, $\frac{\partial V}{\partial X} = 0$, luego $C_1 = -\sqrt{V_1}$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 = 16\pi \sqrt{\frac{e}{2}} \left[J_e \sqrt{m_e} + J_+ \sqrt{m_+} + \sqrt{V} + J_e \sqrt{m_e} (\sqrt{V_1 - V} - \sqrt{V_1}) \right]$$

$$\text{luego } J_e \sqrt{m_e} (\sqrt{V_1} - \sqrt{V_1 - V}) = J_+ \sqrt{m_+} + \sqrt{V} - \frac{\left(\frac{\partial V}{\partial X} \right)^2}{16\pi \sqrt{\frac{e}{2}}}$$

Si V_0^1 es el campo en la superficie del filamento, reemplazando:

$$\frac{\partial V}{\partial X} = V_0^1, \quad V = V_1, \quad \text{resulta:}$$

$$J_e = J_+ \sqrt{\frac{m_+}{m_e}} - \frac{(V_0^1)^2}{16\pi \sqrt{m_e V_1}} \sqrt{\frac{2}{e}}$$

Para que J_e sea máximo, debe ser $V_0^1 = 0$ sobre el filamento.- Resulta así:

$$\frac{J_e}{J_+} \leq \sqrt{\frac{m_+}{m_e}}$$

De la experiencia resulta:

$$\frac{J_e}{J_+} \leq \sqrt{\frac{m_+}{m_e}} \quad \frac{1}{3} \leq \sqrt{\frac{m_+}{m_e}} \leq \frac{2}{3} \quad (14)$$

///

Para obtener el ancho de la doble capa, se resuelve (13) para $\frac{dX}{dV}$, e integra sobre V.-

$$\frac{dX}{dV} = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \left(\frac{2}{e} \right)^{\frac{1}{4}} \left[J + \sqrt{m + V} + J_e \sqrt{m_e} (\sqrt{V_1 - V} - \sqrt{V_1}) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$X = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \left(\frac{2}{e} \right)^{\frac{1}{4}} \int_0^{V_1} \frac{dV}{\left[J + \sqrt{m + V} + J_e \sqrt{m_e} (\sqrt{V_1 - V} - \sqrt{V_1}) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

Integrando (16), pág.91 del (2), resulta:

$$X = \frac{\sqrt{\beta} V^{\frac{3}{4}}}{\left(9\pi \sqrt{\frac{m}{2e}} \right)^{\frac{1}{2}} J + \frac{1}{2}} \quad (17)$$

Siendo β un factor que puede variar entre 1 y 1,36.- En el caso típico se obtuvo una corriente iónica de $J + = 10 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$, para 100 V., de modo que el espesor de la doble capa era:

$X = 3 \cdot 10^{-2} \beta$ cm.- En los casos corrientes es $X < 1 \text{ mm.}$ -

Aproximadamente en el punto medio de esta doble capa, la carga espacial positiva que transporta la pequeña corriente iónica neutraliza a la carga espacial negativa que transporta la corriente electrónica mucho mayor.- Esto ocurre porque los iones se mueven con mucho mayor lentitud que los electrones, de modo que si un cierto volumen es atravesado por un ión por segundo, mientras éste se encuentre en él será capaz de neutralizar varios electrones que lo atravesasen sucesivamente.- La ecuación (14) expresa que un ión puede neutralizar la carga de

$\gamma \sqrt{\frac{m+}{m_e}}$ electrones.- Por lo tanto la máxima corriente de electrones que se puede extraer del filamento debe cumplir la condición

$$J_e = \gamma \frac{m+}{m_e} J + \quad (14)$$

Para cuando un cierto J_e , es $J +$ menor que el dado por (14), el arco se hace "ruidoso", es decir, tiene oscilaciones de frecuencias elevadas, y puede llegar a extinguirse.- Pero el valor de $J +$ depende de la velocidad de generación de iones, y ésta es proporcional a la presión.- Por lo tanto hay una presión mínima, por debajo de la cual el arco no funciona apropiadamente porque muy pocos iones alcanzan la doble capa
///

y no queda satisfecha la ecuación (14).- Hay dos factores que determinan esa presión mínima:

1º).- El número de iones generados.-

2º).- La fracción de esos iones que alcanzan la doble capa del filamento.-

Todo proceso que aumenta 1) ó 2) disminuirá la presión requerida para una operación estable, lo cual tiene ventajas obvias.- El factor 1) ya ha sido estudiado (pág. 45).- Hemos visto que la velocidad de producción de iones está dado por:

$$V = \frac{N_0 V_N}{4} P (J)$$

Estudiemos ahora el factor 2).- Para ello es necesario conocer los factores que rigen el movimiento de los iones en el interior de la fuente.-

Difusión de los iones:

El movimiento de los iones y electrones queda limitado transversalmente a la dirección del arco por la presencia del campo magnético, lo cual influye en el valor de la densidad iónica media en la columna del arco.-

Como el radio de Larmor es del orden de 0.01 mm. para los electrones secundarios, parecería que éstos no pueden abandonar la columna del arco a menos que lleven a cabo colisiones que los desplacen lateralmente.- Sin embargo los cálculos muestran que las colisiones son insuficientes para explicar la velocidad con lo que los electrones se difunden hacia las paredes.- Hay que añadir otra causa de movimiento: EL perpendicular a los campos magnéticos y eléctrico.- El campo eléctrico presente en el plasma es del orden de 3 V/cm., de modo que con un campo magnético de 3000 gauss, resulta:

$$V = \frac{10^8 E \frac{\text{volt}}{\text{cm.}}}{H \text{ gauss}} = 10^5 \frac{\text{cm}}{\text{seg.}}$$

en la dirección normal a la columna de arco.- Los electrones tienen en el plasma energías medias de 2 a 3 V., de modo que su velocidad en la dirección del campo magnético es del orden de 10^8 cm/seg.- Por lo tanto la velocidad electrónica media normal al campo reduce unas mil ve

ces, a un valor comparable al de los iones positivos con unos pocos volts de energía cinética.-

La distribución del campo eléctrico en el plasma no es uniforme.- En general hay dos posibles distribuciones de potencial.- En una de éstas (fig. 16) los equipotenciales rodean la columna de electrones primarios, y en la otra (fig. 17) la atraviesan.-

Los electrones se desplazan en movimientos cicloidales en ángulo recto a los campos eléctrico y magnético en el plasma.- Por lo tanto la dirección de desplazamiento es a lo largo de un equipotencial.- Si éste rodea a la columna primaria, como en la fig. 16, el desplazamiento resulta una circulación continua de electrones sin acercarlos más a las paredes laterales.- Pero si los equipotenciales atraviesan la columna primaria, esto llevará al electrón más cerca de una pared.- Puede ocurrir que se desplace luego nuevamente hacia la columna primaria, pero mientras tanto las colisiones pueden causar que cruce la capa negativa y sea recogido por la pared.- Además, la velocidad de los electrones en la dirección axial es, como hemos visto, de 10^8 cm/seg., y como el largo de la caja es de 10 cm., cada 10^{-7} seg. llegan a uno de los extremos de la caja, de modo que si tienen suficiente energía, pueden atravesarla capa negativa y ser recolectados, en mucho mayor número que sobre las paredes laterales.-

De los equipotenciales de la fig. 17, resulta una distribución asimétrica del plasma, pues los electrones tienden a abandonar la colum

na primaria en las direcciones que indican las flechas.-

En un estudio del comportamiento dinámico del plasma en un campo magnético, se ha encontrado que todo sistema de flujo en el plasma que tiene dirección definida en cada punto, es inestable.- Si, por ejemplo, una pequeña oscilación del plasma puede aparecer al azar, se demostró que crecerá en amplitud con el tiempo, estando limitada solo cuando la amplitud se hace tan grande que la suposición inicial de oscilaciones pequeñas deja de valer.- Este fenómeno es similar al del flujo turbulento en fluidos, que aparece cuando ciertas condiciones comprendiendo los números de Reynolds son excedidas.-

Un plasma en un campo magnético está siempre en un estado de flujo turbulento, lo que produce un campo eléctrico que fluctúa rápidamente en cada punto, (se han medido fluctuaciones de algunos volts en tiempos que varían entre 1μ seg a 1 m. seg.) y esto causa un desplazamiento de electrones cuya magnitud y dirección tienen correspondientes fluctuaciones rápidas.- El efecto neto es producir un desplazamiento estático de los electrones, que equivale a una forma de difusión.- También se desplazan los iones en estos campos, pero menos, por el mayor radio de sus órbitas.- En realidad puede aparecer ambos tipos de distribución de potenciales.- El de la fig. 16 está asociado con mayor turbulencia mediante la que los electrones pueden atravesar el campo magnético y llegar a las paredes.- Los potenciales de este tipo son inestables, y tienden a descargarse originando oscilaciones del plasma alrededor del filamento.-

En realidad ambas distribuciones de potencial son inestables, pero más lo que es la de la fig. 16.- Ambas aparecen en la fuente de arco; normalmente hay una mezcla de drenaje por difusión estática (fig. 17) y difusión oscilatoria (fig. 16).- Si el arco puede funcionar en el estado de difusión estática, tiende a hacerlo, pero si el aporte de iones al filamento es insuficiente, puede pasar al otro estado, donde las oscilaciones son las únicas que causan movimiento normalmente al campo.-

En cuanto a los iones, tienen radios de Larmor del orden de 0.2 cm.- Como en general las paredes están a distancias mayores, los iones solo pueden llegar a ellas por una combinación de difusión estática y oscilaciones.-

Utilizando los conocimientos precedentes, puede darse un cuadro general del estado interno del arco.-

Los electrones e iones se producen en la columna del arco y deben difundir ya sea hacia el tope o fondo, o a las paredes laterales.- La difusión en la dirección transversal al campo magnético es llevada a cabo estáticamente por drenaje, en el caso de campos eléctricos cuyos equipotenciales pasen a través de la columna del arco, y dinámicamente por oscilaciones autoexcitadas del plasma, que producen en promedio una difusión al azar.- A lo largo del campo magnético iones y electrones se mueven libremente, y los iones ganan una energía cinética igual a la mitad de la de los electrones, hasta llegar al borde de la capa negativa que cubre las paredes.- Los electrones son repelidos por ésta de manera que solo aquellos con energía cinética elevada pueden ser colectados.-

La disminución de la densidad iónica con la distancia a la columna de arco es determinada por la competencia entre la difusión que los aleja y movimientos de retroceso de los iones.- Cuanto más rápida sea la difusión normal al campo, más lejos irán los iones antes de ser recogidos en el tope o fondo.- La variación de la difusión sigue una luz aproximadamente exponencial.-

Consideremos una capa elemental de plasma paralela a la columna del arco, de ancho unitario, de longitud igual a la longitud del arco, l , y espesor dx .- Esta capa elemental gana y pierde iones y electrones de la siguiente manera:

1º).- Gana debido a la corriente de desplazamiento de iones $j(x)$ en el contorno x .-

2º).- Pierde por la corriente $j(x + \frac{l}{2})$ en el contorno en $x + \frac{l}{2}$.

3º).- Pierde iones y electrones por difusión a las paredes del tope y fondo del arco.-

Ganancia neta de electrones por corrientes de desplazamiento:

$$- \frac{dj_e}{dx} \int_0^l dx$$

Pérdida neta de electrones por difusión a los extremos:

$$\chi n_e \int_0^l dx$$

Suponiendo que la velocidad de difusión es proporcional a la densidad electrónica n_e , resulta:

///

$$\frac{dj_e}{dx} = - \frac{\gamma}{\beta} n_e \quad (18)$$

Similarmente:

$$\frac{dj_+}{dx} = - \frac{\beta}{\gamma} n_+ \quad (19)$$

Las expresiones j_e y j_+ pueden escribirse en función de los coeficientes de difusión D_e , D_+ , y las movilidades K_e , K_+ , donde:

$$K_e = \frac{D_e e}{k T_e}, \text{ etc.}$$

$$j_e = - D_e \frac{dn_e}{dx} + \frac{D_e e}{k T_e} n_e \frac{dV}{dx} \quad (20)$$

$$j_+ = - D_+ \frac{dn_+}{dx} - \frac{D_+ e}{k T_+} n_+ \frac{dV}{dx} \quad (21)$$

Así, las (18) y (19) se hacen:

$$D_+ \frac{d^2 n_+}{dx^2} + \frac{D_+ e}{k T_+} \frac{d}{dx} \left(n_+ \frac{dV}{dx} \right) = \beta \frac{n_+}{\gamma} \quad (22)$$

$$D_e \frac{d^2 n_e}{dx^2} - \frac{D_e e}{k T_e} \frac{d}{dx} \left(n_e \frac{dV}{dx} \right) = \frac{\gamma}{\beta} \frac{n_e}{\gamma} \quad (23)$$

Si hay neutralización por carga espacial, $n_+ \approx n_e$ y $\frac{dV}{dx}$ puede ser eliminada entre estas ecuaciones, dando:

$$\frac{d^2 n_+}{dx^2} = \beta \frac{T_+ D_e + T_e D_+}{D_+ D_e (T_+ + T_e)} n_+$$

$$n_+ = A e^{\eta x} + B e^{-\eta x}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\beta T_+ D_e + T_e D_+}{D_e D_+ (T_e + T_+)}} \quad (24)$$

Si las paredes están suficientemente lejos de la columna de ar-

co, se puede despreciar el primer término, y queda entonces:

$$n_+ = n_0 e^{-\eta x} \quad (25)$$

Generalizando:

$$n = n_0 e^{-\frac{x}{d}} \quad (26)$$

n_0 = densidad en el borde de la columna de arco

d = distancia para que $\frac{n}{n_0} = \frac{1}{e}$, que queda determinada por la

ecuación:

$$d = \sqrt{\frac{(T_e + T_+)}{\frac{\chi T_+}{D_+} + \frac{\chi T_e}{D_e}}} \quad (27)$$

Al aumentar el campo magnético, D_e decrece, de modo que:

$$\frac{\chi T_e}{D_e} \gg \frac{\chi T_+}{D_+}$$

y la (27) se transforma en:

$$d = \sqrt{\left(1 + \frac{T_+}{T_e}\right) \frac{D_e}{\chi}} \quad (28)$$

La (28) muestra que d , distancia en que n cae al valor $\frac{1}{e}$, aumenta proporcionalmente a la raíz cuadrada del coeficiente de difusión D_e de los electrones a través del campo.- Al aumentar χ , o sea la velocidad de colección en las paredes del tope y fondo, disminuye d .

La velocidad con que los iones abandonan la columna del arco, de T_e (temperatura de los electrones), de L (longitud del arco) y de d (distancia para que $n = \frac{1}{e}$).- Resulta ser (Guthrie-Walking, pág. 99):

$$V_L = 4 n_0 \frac{d}{L} = \frac{K T_e}{m} \quad (29)$$

Para obtener el balance iónico que nos permita predecir la corriente de iones positivos al filamento, igualamos la velocidad con que son producidos en éste, menos el número de iones que van al tope y fondo.-

La velocidad con que son producidos está dada por (11):

$$V = \frac{N_0 V_N}{4} P(J)$$

que multiplicamos por 2 porque el gas neutro entra a la columna por ambos lados, es decir:

$$V = \frac{N_0 V_N}{2} P(J) \quad (30)$$

La velocidad con que los iones alcanzan el tope y fondo del arco es, por unidad de área.-

$$J_{\pm} = n_0 \sqrt{\frac{KTe}{m+}} \quad (31)$$

Para hallar la pérdida total de iones en tope y fondo, debe multiplicarse (31) por el doble del área de la ranura colimadora, a través de la cual pasa el haz de electrones.- La profundidad de la ranura es t , y la longitud del arco L , por lo tanto la pérdida por unidad de voltaje es:

$$L = 2 n_0 \sqrt{\frac{KTe}{m+}} \frac{t}{L} \quad (32)$$

Igualando $V = L$ a V_L :

$$4 n_0 \frac{d}{L} \sqrt{\frac{KTe}{m+}} = \frac{N_0 V_N}{2} P(J) = 2 n_0 \sqrt{\frac{KTe}{m+}} \frac{t}{L}$$

Despejando n_0

$$n_0 = \frac{N_0 V_N}{8} \frac{P(J)}{\sqrt{\frac{KTe}{m+}}} \left(\frac{L}{d + \frac{t}{2}} \right) \quad (33)$$

Como puede verse el valor de n_0 (densidad de iones en el borde de la columna de arco), es proporcional a la densidad del gas N_0 y a la probabilidad de ionización $P(J)$.- La relación:

$$\frac{V_N}{\sqrt{\frac{KTe}{m+}}}$$

es la relación entre velocidad de neutros a velocidad de iones con energía igual a $\frac{1}{2}$ de la temperatura de los electrones.- Su aparición indica que la densidad iónica disminuye porque los iones se mueven fuera de la columna más rápidamente que los neutros.-

El cociente $\frac{d}{d + \frac{t}{2}}$ expresa que la moción iónica transversal al campo magnético es frenada.- El factor $\frac{t}{2} + d$ indica que n_0 no es muy afectada por variaciones en el espesor de la ranura colimada hasta que $\frac{t}{2} = d$.- En el argón se halló experimentalmente que esto ocurre para $t = 1,8$ cm.-

Una vez hallada la densidad iónica (33), se obtiene la densidad de corriente al filamento multiplicando n_0 por la velocidad iónica en el borde de la capa, $V = \sqrt{\frac{K T_e}{m}}$

$$J_+ = n_0 \sqrt{\frac{K T_e}{m}} \frac{N_0 V_N}{8} P(J) \frac{d}{d + \frac{t}{2}} \quad (34)$$

Para obtener la corriente positiva total hay que multiplicar J_+ por el área de la ranura colimadora $t \cdot f$.- En esta forma es posible conocer la corriente positiva hacia el filamento en función de cantidades conocidas, y por lo tanto determinar cual es la presión mínima con que puede funcionar el arco en forma estable.-

Presión mínima para operar el arco:

Hemos visto que la densidad de corriente J_+ debe cumplir la condición (14):

$$J_+ \geq \sqrt{\frac{m_e}{m}} \frac{J_e}{\gamma}$$

Reemplazando J_+ en base a las consideraciones anteriores, resulta:

$$\frac{N_0 V_N}{8} \frac{d t f}{d + \frac{t}{2}} P(J_e) \geq \frac{J_e}{\gamma} \sqrt{\frac{m_e}{m}}$$

f = largo del filamento

luego:

$$P(J_e) \geq \frac{8(d + \frac{t}{2})}{\gamma N_0 V_N t f} \sqrt{\frac{m_e}{m}} J_e$$

es decir:

$$P(Je) \gtrless K Je \quad (35)$$

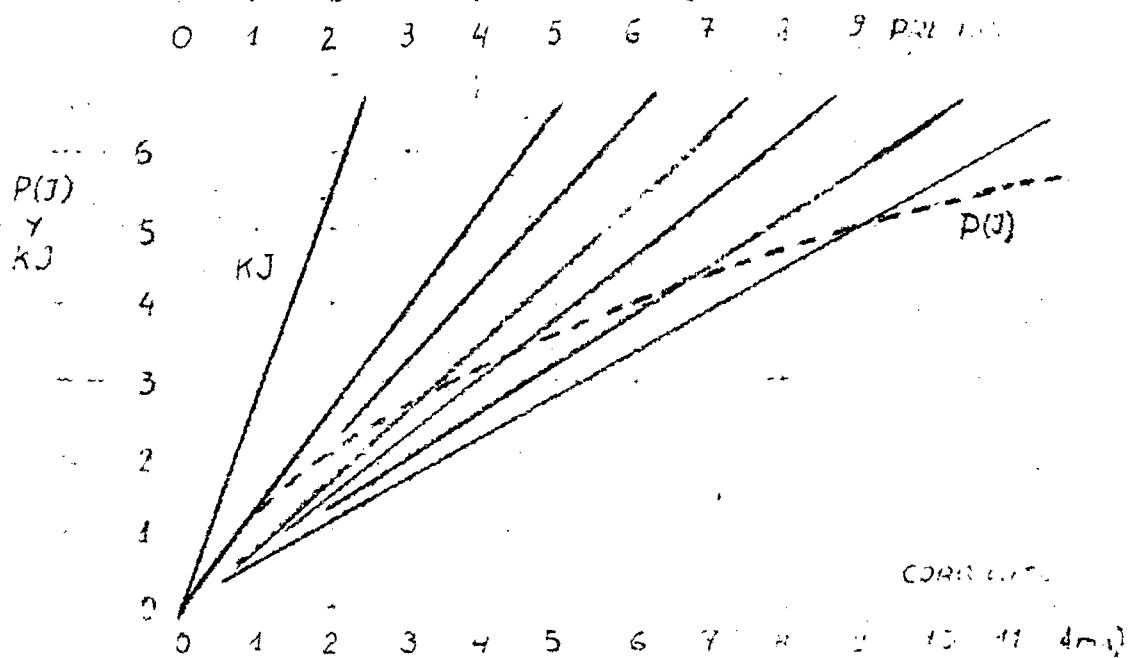
Por lo tanto el arco no operará a menos que sea $P(J) \gtrless K Je$.-

Se han confeccionado gráficos (Guthrie-Walking, pág. 102) que facilitan el manejo de la fuente (fig. 20).- En la figura, cuando $P(J)$ está sobre $K J$, el arco puede funcionar.- Las condiciones límites se

encuentran donde se cortan ambas curvas.- Estas se calculan conociendo las características de la fuente.-

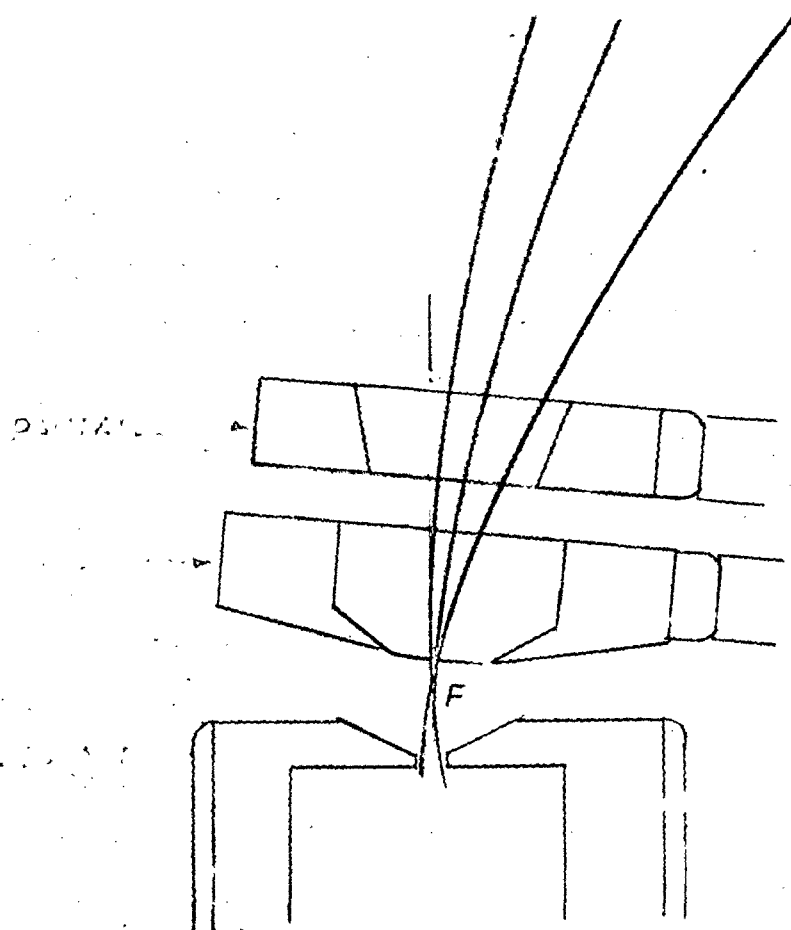
Las líneas $K(J)$ están trazadas para un intervalo de presiones indicado sobre el gráfico.- Si $P(J)$ está sobre la línea recta que corresponde a una presión dada, el arco es estable.- Si la presión está debajo del valor crítico, el arco no se mantiene, puede fluctuar hasta llegar al estado menos estable, de la fig. 16, donde disminuye la velocidad de difusión, y por lo tanto los coeficientes De , lo que significa una disminución de K .- Como disminuye la pendiente de K , puede ocurrir que corte a la curva $P(J)$, y por lo tanto que el arco se estabilice.- La ganancia que se obtiene por tal cambio de estado puede permitir una posterior reducción de presión en un 30-40%.- Muchas veces tal reajuste del estado interno del arco puede conducir a oscilaciones.- La razón es que esta presión crítica se calcula para un arco uniforme estacionario.- Si no lo es, el arco se puede mantener solo si la entrega de iones es adecuada en la región de ionización más débil.- Así, cerca

VARIAÇÃO DE $P(J)$ Y $H(J)$ EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA
DE INÍCIO



f. 20

FORA DO ALTO DA LÂMINA DE CORTA



de la presión crítica el arco comenzará a extinguirse si hay una débil fluctuación en la densidad iónica.- Antes de extinguirse, puede saltar a un estado de menor difusión y por lo tanto mantenerse.- En ese proceso de pasar a otro estado, se crea una oscilación del plasma, cuya inercia transformará una deficiencia local de iones en un exceso en el siguiente semiperíodo de oscilación.- Cuando se trabaja cerca de la presión crítica, este exceso temporario que resulta de las oscilaciones cerca del filamento puede ser suficientemente grande como para permitir saltar nuevamente al estado normal durante un corto tiempo.- Pero cuando retrocede la ola del plasma, el arco pasa al estado anterior.- Así es como se crean y mantienen las oscilaciones del arco.-

Efecto de la penetración del potencial de extracción en el plasma:

Hemos estudiado hasta ahora la presión mínima para un arco con paredes lo suficientemente alejadas de la columna.-

Mientras las paredes estén a distancia mayor que d (28), extraen tan poca corriente que no afectan apreciablemente la estabilidad del arco.- Si se las acerca, comienzan a extraer iones.- En particular, si un menisco de potencial negativo elevado es llevado muy cerca de la columna de arco, como es nuestro caso, el movimiento de iones hacia el menisco se hace más rápido que hacia la pared lateral, pues el campo eléctrico del plasma entre columna y menisco es inversamente proporcional a la distancia entre ambos.- Una investigación cuidadosa (2) ha demostrado que la fracción de iones que abandona la columna en dirección al menisco puede ser elevada a 80%-90% en esta forma.- Pero la presión mínima de operación se eleva tanto que no resulta práctico acercarlo mucho.-

Se puede calcular en forma aproximada este efecto:

Sea f la fracción de iones que abandona la columna de arco en dirección al menisco.- Si las paredes están a distancia mayor que d , esta fracción es aproximadamente $\frac{1}{2}$, pues la misma corriente fluye en ambos sentidos.

Las experiencias realizadas en fuente de arco demuestran que la relación entre la corriente que fluye a la pared posterior J_p y la densidad iónica n_c en la columna, no depende de la posición del menisco:

$$J_p = c n_c$$

Si la producción total de iones es R , entonces con un menisco distante, $\frac{R}{2}$ fluye hacia la pared posterior.- Al acercar el menisco, la fracción que va a la pared posterior disminuye en $1 - f$, y la densidad n_+ disminuye.- Por lo tanto:

$$\frac{n_+}{n_{0+}} = \frac{J \div b}{J \div b_0}$$

n_{0+} , $J \div b_0$ para menisco distante.-

Como
$$\frac{J \div b}{J \div b_0} = 2(1 - f)$$

resulta:

$$\frac{n_+}{n_{0+}} = 2(1 - f)$$

Si $f > \frac{1}{2}$, disminuye la densidad iónica y por lo tanto aumenta la presión mínima, al acercar el menisco, esto es:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2(1 - f)} \quad (36)$$

Es evidente que no hay ventaja en aumentar f a más de $\frac{1}{2}$.- Si f fuera $\frac{3}{4}$,

$$\frac{P}{P_0} = 2$$

de modo que la presión mínima sería duplicada, para un aumento en la salida de iones del 50%.-

Cuando el arco trabaja cerca de la presión mínima, se extinguirá si el voltaje acelerador es aumentado como para traer el menisco muy cerca de la columna.- En ese caso se puede aumentar la tensión del arco, aumentando por consiguiente la ionización por electrones secundarios.-

Conclusiones acerca del funcionamiento de la fuente:

El estudio precedente nos permite conocer las condiciones necesarias para un funcionamiento estable de la fuente, y además prever modificaciones que mejoren su rendimiento, lo cual es de importancia básica en el separador.-

Se puede elevar la eficiencia de la fuente disminuyendo su presión de operación.- Esto se logra:

1ª).- Aumentando el número de iones liberados por cada electrón.-

2ª).- Aumentando la fracción de iones que llegan al filamento.-

1ª).- Se puede lograr utilizando el electrodo reflector, que hace oscilar los electrones primarios.- El radio de la trayectoria helicoidal de estos electrones oscilantes en el campo magnético es ≈ 0.2 mm.- Si pierden energía por colisiones, disminuye el radio.- De modo que es difícil que los electrones primarios alcancen las paredes laterales.- Pero se ha comprobado que si se va aumentando la presión de vapor, la descarga pasa bruscamente a un nuevo estado, denominado superestado, que se caracteriza por el gran aumento de la corriente electrónica a las paredes laterales (varios amperes).- Se observan al mismo tiempo intensas oscilaciones de alta frecuencia, que se supone cumplen la función de aumentar los radios de las trayectorias electrónicas hasta permitir que lleguen a las paredes laterales.-

La corriente de iones extraída de este tipo de fuente es muy grande: 100-150 mA.- El rendimiento es también elevado: un 70-80% de las moléculas son ionizadas.-

Pero las fuertes oscilaciones perturban la neutralización de la carga espacial en la cámara de vacío, reduciendo mucho el poder separador, como han comprobado Kistemaker-Zilver Schoon.- Sin embargo, R. Bernas utiliza una fuente de electrones oscilantes en su separador.- De la corriente de iones que obtiene, de valor medio 10 mA, se puede deducir que la descarga no se halla en el superestado.- De esta manera, impide la aparición de las oscilaciones, sacrificando corriente de salida.- La eficiencia de su fuente es de 33% para el argón, y 25% para el plomo.-

La fuente de arco sin reflector que utilizaron definitivamente Kistemaker-Zilver Schoon tiene una eficiencia del 11% para el zinc, con una corriente media de 20 mA.-

Dada la importancia que tiene el aumento de la eficiencia de la fuente, se prevé en el proyecto que se está realizando la posibilidad de utilizar electrones oscilantes.- Si su empleo no resultara satisfactorio, bastará con poner el reflector a tensión anódica para tener la fuente convencional.-

Otra manera de aumentar la producción de iones es elevando la tensión del arco, pues así los electrones secundarios juegan un papel más importante en la ionización.- Deben tenerse en cuenta los factores contrarios, como ser la disminución de la sección eficaz.-

Se puede aumentar la fracción de iones que llegan al filamento rodeándolo con un recipiente estanco con una ranura colimadora profunda.- Con dimensiones apropiadas es posible mantener una alta presión cerca del filamento y otra baja fuera.- Así habría un arco auxiliar, capaz de funcionar a presión independiente de la del arco principal.-

Se puede además utilizar un filamento de gran sección, que permite que lo alcancen gran número de iones.- Al duplicar la sección, la presión disminuye a la mitad, con alguna disminución de la fracción de iones que alcanza el menisco de extracción.- Pero, como hemos visto, no es práctico hacer el filamento de espesor mayor que la distancia característica d de caída exponencial de la densidad iónica.-

También aumenta la fracción de iones que llegan al filamento al aumentar el campo magnético.-

Si se utiliza el ánodo reflector, debe recordarse que también éste está rodeado por una doble capa como la del filamento, de modo que puede hacerse inestable si lo alcanzan demasiado pocos iones.- Como un electrón se mantiene en la capa del reflector doble tiempo que en la del filamento, se necesita doble número de iones para que la descarga sea estable en esa zona.-

Otra manera de aumentar la corriente de iones extraída es elevando el potencial de extracción, lo que trae como consecuencia la disminución de la distancia menisco-columna de arco, que ya hemos estudiado.-

Extracción y aceleración de los iones:

La ranura de salida de la fuente tiene una superficie de 4×100 mm.- A una distancia de aproximadamente 10 mm. se encuentra la lente de extracción, que tiene una tensión de -10 KV. como máximo, que sumados a la tensión positiva de la fuente permite acelerar a los iones hasta 50 KV.-

Tanto la ranura de salida como el electrodo extractor tienen forma de V, con ángulos respecto a la normal a las caras de 42° y 67°

respectivamente (fig. 21) de modo que forman una lente electrostática

de Pierce, que corrige la divergencia del haz debida a la carga espacial durante la aceleración.-

A una distancia aproximada de 10 mm. del electrodo negativo hay un segundo electrodo conectado a tierra.-

Este sistema tiene las siguientes ventajas:

1º).- El electrodo negativo forma un espejo para los electrones que se encuentran en el haz de iones compensando su carga espacial, de modo que los fuerzan a mantenerse en el haz.-

2º).- La posición del plano focal F desde el que parecen emerger los iones depende, entre otros factores, de la tensión del electrodo negativo.- De modo que se puede realizar el enfoque variando este potencial

3º).- La lente realiza un leve enfoque axial del haz reduciendo así las pérdidas de iones a la base y tope de la cámara de vacío.-

Elección del material de carga para la fuente de iones:

Cuando se elige un material apropiado de carga para la fuente, hay varios requisitos que cumplir:

Presión de vapor adecuada, simplicidad de estructura molecular, estabilidad del compuesto, ausencia de agua de cristalización.- Si el elemento mismo tiene una tensión de vapor favorable se usa generalmente como material de carga.-

Los materiales más utilizados son las sales halogenadas.- Cuando las moléculas son complejas, aparecen varios tipos de iones.- Si

uno de ellos predomina fuertemente sobre los otros, la pérdida de iones de otras masas no es muy serio.- Se han realizado investigaciones sobre la formación de iones H^+ y H_2^+ , de las que resulta que aumenta la proporción de H_2^+ al disminuir la presión, voltaje del arco y temperatura de la fuente.- Esto nos dá un ejemplo de los muchos factores que influyen en la formación de un tipo determinado de iones.- Para cada elemento a separar es indispensable la investigación de las condiciones de presión, temperatura y corriente.-

Se ha comprobado que para el argón, helio, hezafluoruro de azufre, la presión mínima para una operación estable depende de la sección eficaz $\bar{V}_1$ de esas moléculas.- Faltan valores de $\bar{V}_1$ para muchos elementos, de modo que también se podrían realizar investigaciones en ese sentido.-

Un ejemplo interesante de los tipos de iones que se pueden formar lo constituyen el uranio: se han realizado mediciones utilizando UCL_4 y UF_6 , en la Universidad de Colombia(2).

Los resultados son los que se indican:

Material: UCL_4

Iones recogidos en el colector:

UCL_4^+ , UCL_3^+ , UCL_2^+ , UCL^+ , U^+ , CL^+ , CL_2^+ , UCL_4^{++} , UCL_3^{++} , UCL_2^{++} , UCL^{++} , U^{++}

Intensidad relativa de los haces de iones en función de la energía de los electrones primarios.-

Ión	Energía de los electrones				Tensión de ionización
	25eV	50eV	100eV	200eV	Volts
UCL_4^+	13.5	13.2	14	12.9	11,5
UCL_3^+	100	100	100	100	12.5
UCL_2^+	47	38	30	26	15.3
UCL^+	26	40	40	31	18.6
U^+	0	28	37	31	24.7
CL^+	0	40	84	91	23.0
CL_2^+	0	0.9	1.8	1.4	24.0
UCL_4^{++}	0.5	1.1	2.0	1.1	22.0
UCL_3^{++}	0	1.6	3.5	1.9	27.4
UCL_2^{++}	0.5	4.2	13.8	9.3	25.0
UCL^{++}	0.1	4.7	17.9	11.5	33.0
U^{++}	1.5	4.2	16.6	11.7	37.0

///

Material: UF_6

Iones recogidos:

UF_5^+ , UF_4^+ , UF_3^+ , UF_2^+ , UF^+ , U^+ , UF_5^{++} , UF_4^{++} , UF_3^{++} , UF_2^{++} , UF^{++} , U^{++}

Influencia de la presión en la intensidad relativa de los haces de iones de UF_6 .

Intensidad relativa

Ión	A $3 \cdot 10^{-4}$ mm	A 1.4×10^{-3} mm
UF_5^+	100	100
UF_4^+	30	43
UF_3^+	23	24
UF_2^+	20	16
UF^+	14	8.5
U^+	10	5.2
UF_5^{++}	--	0.6
UF_4^{++}	3.7	1.0
UF_3^{++}	4.1	1.0
UF_2^{++}	4.1	1.2
UF^{++}	6.2	1.5
U^{++}	4.2	1.8

Estos resultados indican la importancia de un estudio previo de las condiciones en que se efectuará la ionización, de modo de hacer mínimas las pérdidas debidas a la formación de iones que no se pueden recoger en el colector.- Un método satisfactorio es el de introducir una muestra del material a separar en un espectrómetro de masa, y determinar la corriente de cada tipo de ión formado, en función de su masa.-

BIBLIOGRAFIA

- 1º).- C.J.ZILVERSCHOON-~~THESIS~~- Amsterdam 1954.-
- 2º).- BOHM-BURHOP-MASSESY- The characteristics of electrical discharges in magnetic fields- Nat. Nuclear Energy.Series, 1-5-1949-N.York
- 3º).- R.BERNAS, J.SAWOUY- Journ. de Phys. et Rad 15, 273, 1954.-
- 4º) R. BERNAS, L. KALVSZINER, J.DRUAUX.- Journ. de Phys et Rad 15, 273, 1954.-
- 5º).- R.FWLER, G.GIBSON.- Phys.Rev. 46, 1075, 1934.-
- 6º).- L.LANGER y C. COOK.- Rev. of Sc.Instr, 19, 257, 1948.-
- 7º).- M.HOUYAUX- J.DUJARDIN.- Nucleonics, 5, 6, 7, 1949.-
- 8º).- A.FINKELSTEIN, Rev. of Sc. Instr. 11, 94, 1940.-
- 9º).- M. ARDENNE.- Z. für Phys. 121, 236, 1943.-
- 10º).- J. KISTEMAKER- D.DEKKER- Physica 16, 209, 1950.-
- 11º).- VELNSTR- MILATZ.- Physica 16, 528, 1950.-
- 12º).- J.PIERCE, J. of Appl. Phys. 11, 548, 1940.-
- 13º).- C.P.KEIM.- Ann. Rev. Nuclear Sc. 263, 1952.-

