

# Kaones

## **Adopta a una partícula**

Alejandro Zurita Caballero

Carmen Sánchez Pérez

Física Nuclear y de Partículas

Curso 2019/2020

# ÍNDICE

1. Introducción .....	2
2. Descubrimiento .....	2
3. Propiedades .....	5
4. Obtención .....	6
4.1 Sección eficaz .....	7
5. Desintegración .....	8
5.1 Decaimiento de $K^0$ y $\overline{K}^0$ .....	8
5.1.1 Caso del decaimiento de $K_S$ .....	8
5.1.2 Caso del decaimiento de $K_L$ .....	9
5.2 Decaimiento de $K^+$ y $K^-$ .....	9
6. Representación en el modelo de Quarks .....	9
7. Oscilaciones de Kaones. Violación de CP .....	10
7.1 Kaón mezcla neutra .....	11
7.2 Mezcla .....	12
7.3 Oscilaciones y violación de CP .....	12
7.3.1 CP violación a través de mezcla única .....	12
8. Kaones en la actualidad .....	14
8.1 Experimento NA62 del CERN .....	14
Referencias .....	17

## 1. Introducción

En 1947, George Rochester y Clifford Butler, dos físicos británicos, se hallaban tomando varias fotografías a una cámara de niebla, tratando de detectar partículas generadas por los rayos cósmicos al impactar sobre las moléculas de la atmósfera, cuando observaron un par de rastros inusuales en ella. Esas marcas desconocidas solo podían ser explicadas por el decaimiento de una partícula neutra con masa 1000 veces mayor que la del electrón. Decidieron repetir el experimento en los pirineos franceses, donde el flujo del rayo cósmico es mayor debido al aumento de altitud, lo que facilita que las partículas lleguen al detector.

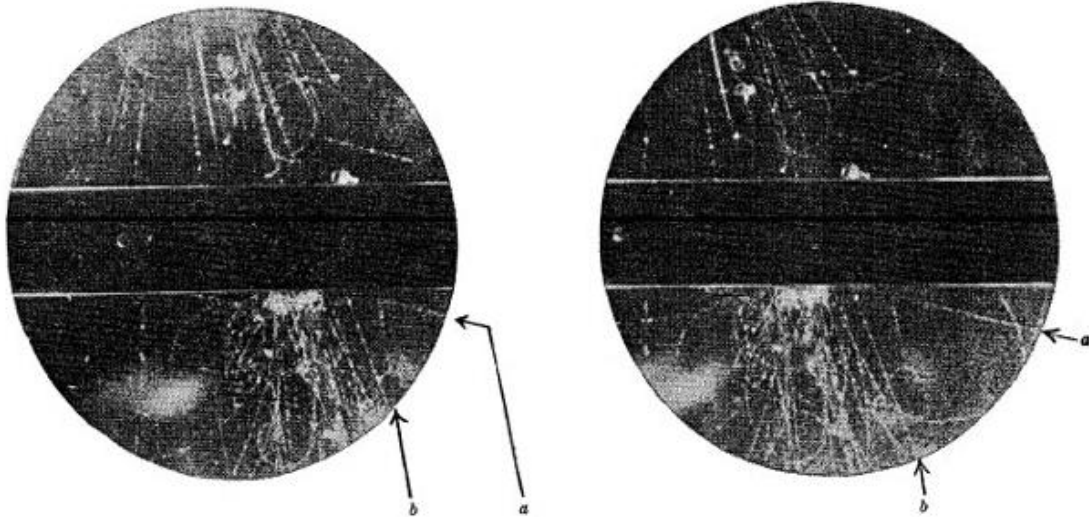
Gracias a ello, consiguieron reproducir el experimento detectando decenas de estas nuevas partículas. Concluyeron que la partícula en decaimiento se trataba de un nuevo tipo de mesón, al que posteriormente se denominó mesón-K, de ahí que también se la conozca como kaón. Se predijo, además, que los mesones existían fugazmente en el núcleo para explicar por qué los nucleones con carga similar se unían. El kaón tenía propiedades inusuales, lo que supuso que los científicos de la época la bautizaran con el sobrenombre de ‘extraña’.



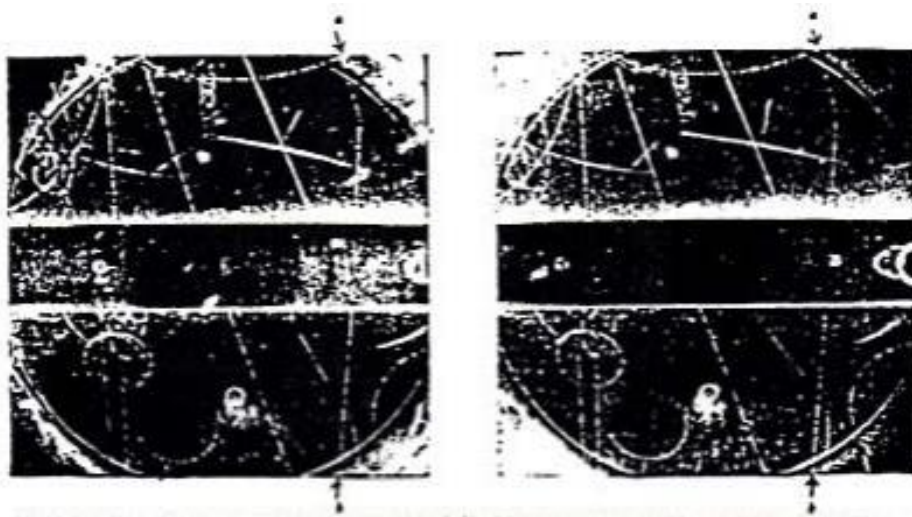
*Fig. 1: G. D. Rochester (izquierda) y C. C. Butler (derecha).*

## 2. Descubrimiento

Como hemos visto anteriormente, la primera detección de los kaones se observó en 1947, por los físicos británicos Rochester y Butler. En diciembre de ese mismo año, se hicieron públicas en la revista *Nature* dos de las numerosas fotografías tomadas de la cámara de niebla, que se muestran a continuación, en la figura 2 y la figura 3.



*Fig. 2: Fotografías estereoscópicas publicadas de Rochester y Butler con resolución mejorada. La dirección del campo magnético es tal que una partícula positiva que desciende se desvía en sentido antihorario.*



*Fig. 3: Segunda fotografía estereoscópica publicada de Rochester y Butler originales*

En la figura 2, se observa como las partículas de rayos cósmicos entran por la parte superior izquierda y colisionan contra la placa de plomo, produciendo una partícula neutra, cuya presencia se hace evidente al decaer en otras partículas cargadas más ligeras, formando una “V” invertida en la parte inferior derecha, señalada mediante las marcas a y b. La figura 3 muestra un proceso similar pero esa vez, se produce una nueva partícula cargada que decae en otras dos partículas más ligeras, una cargada y la otra neutra.

Para entender las fotografías en mayor de detalle, la figura 4 muestra en su izquierda un esquema del primer proceso. A su izquierda puede verse una de las fotografías del segundo proceso con mejor resolución:

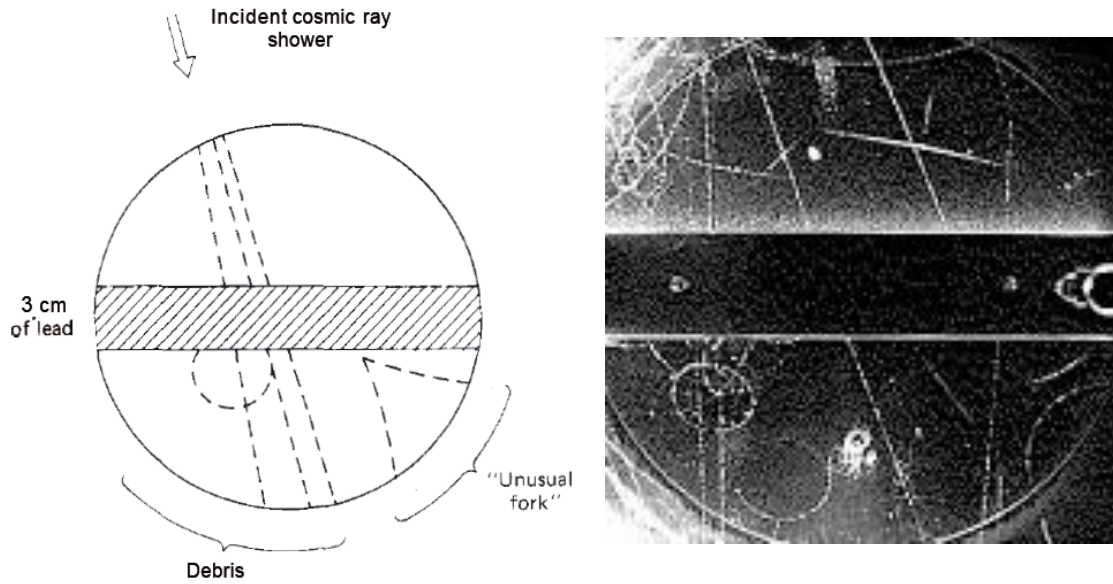


Fig. 4: Esquema del proceso observado en la figura 2 (izquierda), proceso observado en la figura 3 con mayor resolución (derecha).

Tras un análisis detallado posterior se comprobó que la primera fotografía (figura 2) correspondía al proceso  $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$  y la segunda fotografía (figura 3) a la reacción  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ .

Un experimento similar al anterior, llevado a cabo por el físico británico Cecil Powell, dio lugar al descubrimiento de otro proceso de decaimiento de una partícula extraña cargada en tres partículas cargadas más ligeras, el cual resultó ser:  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ . Powell publicó en 1950 en la *Rep. Prog. Phys.* 13, 384., la fotografía de la figura 5, en la que se observa el proceso descrito anteriormente del kaón positivo en tres piones cargados.



Fig. 5: C. F. Powell (izquierda).  $K^+$  entrando desde arriba decae en el punto A en tres piones cargados, dos positivos y uno negativo. El  $\pi^-$  provoca seguidamente una desintegración nuclear en el punto B (derecha)

Sin embargo, la partícula  $K^0$  primero fue conocida como  $V^0$  y luego como  $\theta^0$  antes de renombrarse finalmente como  $K^0$  mientras que la partícula  $K^+$  se denominó en un principio como  $\tau^+$ .

$\theta^0$  y  $\tau^+$  no se identificaron como distintas versiones de una misma partícula hasta 1956, cuando se resolvió el conocido *enigma*  $\tau$ - $\theta$  al descubrir la violación de la paridad en la interacción débil, de la cual hablaremos más adelante.

Tras estas dos primeras detecciones de los kaones ha habido numerosas más para estudiar sus propiedades. Entre los experimentos más recientes se encuentra el NA62 del CERN, del cual hablaremos más adelante.

### 3. Propiedades

En una sección anterior, se comentaba que los kaones son hadrones de tipo mesón, lo cual quiere decir que son partículas bosónicas que sienten la interacción fuerte y se caracterizan por tener espín entero (nulo en este caso) y número bariónico nulo (por ser mesones). Se consideran partículas “estables” porque, generalmente, decaen en hadrones más ligeros mediante interacción débil en lugar de por interacción fuerte o electromagnética y tienen vidas medias relativamente largas.

Este hecho, sumado a que los experimentos realizados en la cámara de niebla indicaban que estas partículas se producían con secciones eficaces típicas de la interacción fuerte, eran las características inusuales de los kaones a las que nos referíamos anteriormente. Esta aparente paradoja, en la que estas partículas “extrañas” sentían la interacción fuerte cuando eran producidas, pero decaían mediante interacción débil, traía de cabeza a los científicos de la época.

Tras numerosas observaciones del fenómeno, se concluyó que las partículas extrañas aparecían por parejas y la paradoja se solventó introduciendo un número cuántico nuevo: la extrañeza  $S$ , que debía conservarse para la interacción fuerte y la electromagnética pero que podía ser violado por la interacción débil.

Actualmente se conocen 4 tipos de kaones distintos: las partículas  $K^+$  y  $K^0$  con sus respectivas antipartículas  $K^-$  y  $\bar{K}^0$ . Sus propiedades han sido obtenidas de las referencias [1], [2], [3] y se han recopilado en la siguiente Tabla 1:

Partícula	$K^+$	$K^-$	$K^0$	$\bar{K}^0$
Carga $Q$	1	-1	0	0
Masa ( $MeV/c^2$ )	493.677	493.677	497.611	497.611
Isospín $I$	1/2	1/2	1/2	1/2
3ª componente del isospín $I_3$	1/2	-1/2	-1/2	1/2
Momento angular y paridad $J^\pi$	$0^-$	$0^-$	$0^-$	$0^-$
N.º Bariónico $B$	0	0	0	0
Extrañeza $S$	1	-1	1	-1
Espín $s$	0	0	0	0

Tabla 1: Propiedades y números cuánticos relevantes de los kaones.

## 4. Obtención

Las partículas extrañas, como ya hemos comentado anteriormente, se producen por interacción fuerte, pero decaen lentamente por interacción débil. Tras muchos intentos fallidos de dar explicación a este inusual fenómeno, el físico holandés-estadounidense Abraham Pais sugirió, en 1952, que las partículas elementales debían caracterizarse por un nuevo tipo de número cuántico. Este nuevo número cuántico tomaba valores pares para partículas normales como nucleones y piones y valores impares para las partículas extrañas. Además, el esquema de Pais concluía que las partículas extrañas debían producirse en pares, esto es lo que se conoce como producción asociada. La evidencia experimental de la idea de Pais vino de la mano de Murray Gell-Mann y Kazuhiko Nishijima en 1953, y denominaron a esa nueva propiedad de Pais extrañeza (*strangeness*), que se conservaba en la interacción fuerte y electromagnética, pero podía no conservarse en la interacción débil.

Un ejemplo en el que se produzcan dos partículas extrañas es el caso de la colisión de un pión y un protón. De hecho, este es el proceso de desintegración en el que Rochester y Butler descubrieron el kaón neutro que luego, a su vez, decaía en dos piones cargados, generando la característica marca V en la cámara de niebla.



Fig. 6: A. Pais (izquierda), M. Gell-Mann (centro) y K. Nishijima (derecha).

Los rayos cósmicos de alta energía contienen protones, los cuales, al incidir en la placa de plomo dentro de la cámara de niebla, producen piones. Si uno de estos protones lograba interactuar con uno de los piones producidos, se daba el proceso de colisión  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$ , generando un kaón neutro. Este proceso puede describirse mediante el siguiente Diagrama de Feynmann:

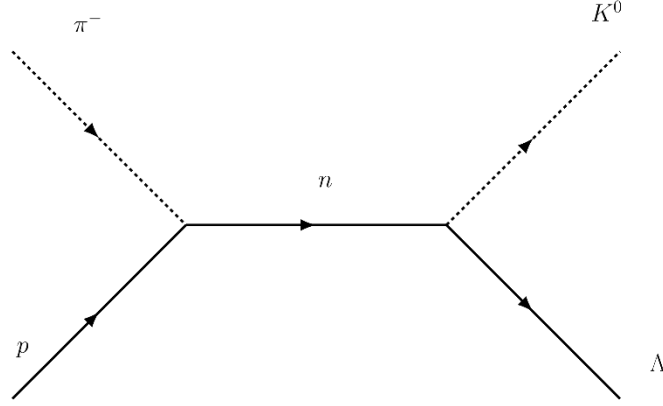


Fig. 7: Diagrama de Feynmann para  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$ . Se ha incluido la partícula virtual o el propagador de la interacción, que en este caso es el  $n$ . Recordemos que este proceso ocurre mediante interacción fuerte, dando lugar a un kaón neutro.

#### 4.1 Sección eficaz

Teóricamente, la sección eficaz de este tipo de procesos  $A + B \rightarrow C + D$  viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{k_f}{k_i} \frac{V^2}{(2\pi)^2 (\hbar c)^4} |\langle f|H|i \rangle|^2 \frac{E_A E_B E_C E_D}{E^2}$$

Donde  $k_i$  y  $k_f$  son los momentos lineales inicial y final en el centro de momentos (COM) y  $E_A, E_B, E_C, E_D$  son las energías relativistas. Además,  $\langle f|H|i \rangle$  es el elemento de matriz con  $H$  el hamiltoniano de la interacción fuerte en nuestro caso y  $|i \rangle = |\pi^- p \rangle$  y  $|f \rangle = |K^0 \Lambda \rangle$ .

Los resultados experimentales obtenidos para la sección eficaz de  $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$  para distintos valores de energías iniciales y ángulos pueden consultarse en la referencia [14], pero general, el rango se encuentra entre 120 y 290  $\mu b$  para energías entre 1,4 y 2,3 GeV. Recordemos que 1 microbarn corresponde a 0,001  $fm^2$ .

Con las herramientas adquiridas durante el curso, nosotros mismo podemos comprobar estos valores de la sección eficaz haciendo uso de la expresión teórica anterior y considerando que inicialmente el protón se encuentra en reposo mientras que el pión tiene una energía cinética distinta de 0.

Dado que  $M_{\pi^-} = 139.57 \text{ MeV}/c^2$ ,  $M_p = 938.27 \text{ MeV}/c^2$ ,  $M_\Lambda = 1115.683 \text{ MeV}/c^2$  y  $M_{K^0} = 497.614 \text{ MeV}/c^2$ , calculamos la energía cinética mínima para que se produzca el proceso:

$$|T_{min}| = [M_{\pi^-} + M_p - (M_\Lambda + M_{K^0})]c^2 = 535.457 \text{ MeV}$$



Por lo que  $E_A = M_p c^2$ ,  $E_B = M_{\pi^-} c^2 + T_{min}$ ,  $E_C = M_{\Lambda} c^2$  y  $E_D = M_{K^0} c^2$  con  $E = E_A + E_B = E_C + E_D = 1613.297 \text{ MeV}$ .

Sustituyendo estos valores en la expresión de la sección eficaz y considerando un volumen arbitrario  $V = 1 \text{ fm}^3$  y un valor representativo para el elemento de matriz de la interacción fuerte  $\langle f|H|i \rangle = 100 \text{ MeV}$ , tal y como se estudió en teoría, se obtiene:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 0.0227 \text{ fm}^2 \rightarrow \sigma = 0.286 \text{ fm}^2 = 286 \mu\text{b}$$

Donde hemos considerado un valor del ángulo sólido  $\Omega = 4\pi$ . Nuestro valor teórico de la sección eficaz, aunque alto, se encuentra dentro del rango de valores de sección eficaz experimentales. Para un estudio más preciso se tendría que haber tenido en cuenta el ángulo de incidencia y dispersión de cada partícula, así como calcular con todo detalle el elemento de matriz y la densidad de estados de la reacción. Sin embargo, aun habiendo utilizado aproximaciones para todos estos elementos, hemos obtenido un valor dentro de lo esperado.

## 5. Desintegración

Como se ha mencionado anteriormente existen 4 tipos de kaones, a continuación, para hablar de sus modos de decaimiento y que partículas se forman, o qué sucede, vamos a separar por una parte el kaón  $K^0$  y su antipartícula y el kaón  $K^+$  y su antipartícula.

### 5.1 Decaimiento de $K^0$ y $\bar{K}^0$

Aunque la producción de ambas partículas se debe a la interacción fuerte, a la hora de producirse un decaimiento se debe a la interacción débil. Una vez creados es mejor determinarlos como superposiciones de dos estados propios débiles cuya vida media es muy diferente.

Tenemos así kaón neutro de vida larga o  $K_L$  (“K-long”) que normalmente decae en tres piones, tipo  $\pi^0 \pi^0 \pi^0$  o bien  $\pi^+ \pi^- \pi^0$ .

Del mismo modo tenemos el kaón neutro de vida corta o  $K_S$  (“K-short”) decae principalmente en dos piones tipo  $\pi^0 \pi^0$  o bien  $\pi^+ \pi^-$ .

Los modos de desintegración determinan las vidas medias, para el caso de tres piones el decaimiento es más lento.

#### 5.1.1 Caso del decaimiento de $K_S$

Tanto los piones como los kaones poseen que  $J^P = 0^-$ , para que se dé el decaimiento se debería cumplir que  $l = 0$  para que se conserve el momento angular.

$$K^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0, \pi^+ \pi^-$$

La paridad del estado final se define como  $P(\pi^0 \pi^0) = (-1)^l P(\pi^0) P(\pi^0) = 1 \cdot (-1) \cdot (-1) = 1$ , se puede aplicar un razonamiento similar en el otro caso ( $\pi^+ \pi^-$ ).

La paridad C para el pión neutro es +1, luego C la transforma en el mismo y para  $\pi^+\pi^-$  es equivalente a intercambiarlas. Por lo tanto, tenemos que  $CP(\pi^0\pi^0) = +1$  y  $CP(\pi^+\pi^-) = +1$

### 5.1.2 Caso del decaimiento de $K_L$

En el caso del decaimiento  $K_L$  la cosa se complica ya que ahora tenemos tres partículas, por lo que, de forma resumida, el momento angular total será el acoplamiento del momento de una partícula, con el momento relativo de un subsistema formado por las otras dos. Con todo esto y con argumentos similares a los anteriores se llega a que la paridad C para el estado de los tres piones es de +1, P=-1 y CP=-1.

### 5.2 Decaimiento de $K^+$ y $K^-$

Para este caso los modos de desintegración principales son más sencillos que en el caso anterior ya que no se es necesaria realizar una subdivisión. Por consiguiente, los kaones  $K^+$  decaerán en unas partículas determinadas y su antipartícula, en las antipartículas correspondientes, por lo tanto, se tiene que:

Partícula	Decae en:	Partícula	Decae en:
$K^+$	$\mu^+\nu_\mu$	$K^-$	$\mu^-\bar{\nu}_\mu$
	$\pi^+\pi^0$		$\pi^-\pi^0$
	$\pi^+\pi^+\pi^-$		$\pi^+\pi^-\pi^-$
	$\pi^+\pi^0\pi^0$		$\pi^-\pi^0\pi^0$
	$\pi^0e^+\nu_e$		$\pi^0e^-\bar{\nu}_e$
	$\pi^0\mu^+\nu_\mu$		$\pi^0\mu^-\bar{\nu}_\mu$

Tabla 2: Diferentes decaimientos de los kaones positivo y negativo.

Si se hace una ligera comprobación todos estos procesos son posibles, se conservan los números cuánticos pertinentes, tales como el número bariónico B, la carga Q etc. No ocurre esto con la extrañeza, ya que al ser procesos debidos a la interacción débil le extrañeza S no tiene por qué conservarse.

## 6. Representación en el modelo de Quarks

Al ser mesones, en el modelo de quarks se representan como un sistema de quark-antiquark, cada uno de los Kaones se puede representar como:

Kaones	Quarks
$K^+$	$u\bar{s}$
$K^-$	$s\bar{u}$
$K^0$	$d\bar{s}$
$\bar{K}^0$	$s\bar{d}$

Tabla 3: Distribución en el modelo de quarks de los diferentes kaones.

Además, si consideramos sus valores de la extrañeza y la carga y realizamos una representación de ellos podemos definir el octete de mesones.

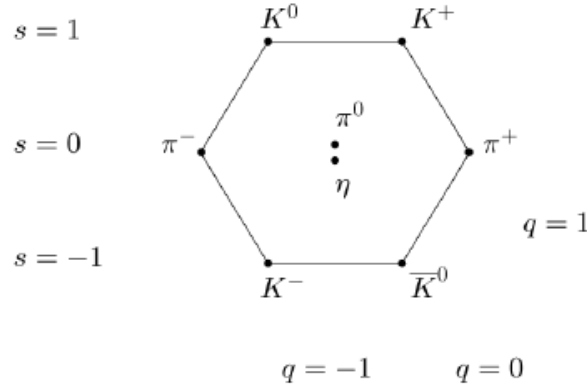


Fig. 8: Octete de mesones donde se observan kaones, piones y la partícula  $\eta$ .

## 7. Oscilaciones de Kaones. Violación de CP

Tras la realización de diferentes experimentos se encontró algo inusual, la desintegración por diferentes mesones extraños cargados nos daba lo siguiente:

$$\theta^+ \rightarrow \pi^0 + \pi^+$$

$$\Gamma^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

Como podemos comprobar ambos procesos a priori son posibles y como resultado se obtiene que las dos partículas que decaen a diferente número de mesones eran la misma partícula. La conservación de carga y de número cuánticos a priori no nos daba más información, por lo que se pensó en la conservación de las simetrías como una alternativa para determinar que estaba ocurriendo.

La paridad intrínseca de un pión es  $P=-1$ , al ser un número cuántico multiplicativo, los dos estados finales poseen diferente paridad ( $P_1=1$ ,  $P_2=-1$  respectivamente). Con estos resultados se pensaba que los dos estados iniciales deben también tener diferentes paridades, y por lo tanto serían dos partículas distintas. Sin embargo, tras realizar mediciones cada vez más precisas, no se encontraron diferencias entre las masas y los tiempos de vida de cada uno de ellos, en principio se pensaba que hablábamos de la misma partícula.

Este tipo de paradoja recibe el nombre del rompecabezas  $\Gamma - \theta$ , durante muchos años se trató como una incógnita y no se conocía demasiado de él, no obstante, gracias a la resolución de la violación de la paridad se pudo resolver este rompecabezas. Los mesones decaen a través de interacciones débiles, la paridad no se conserva, y las desintegraciones decaen en una misma partícula  $K^+$ .

Se pensó que, a pesar de que el principio de conservación de la paridad se violaba, la simetría CP se iba a mantener constante (más tarde se demostró que no ocurre esto y que la simetría CP también es violada).

Conforme se iban realizando comprobaciones experimentales para corroborar las suposiciones iniciales no surgieron aclaraciones, más bien nos encontramos con nuevos

términos y aparentemente nuevas situaciones que no hacían más que complicar y dificultar el estudio de la conservación de la simetría CP. A continuación, vamos a definir algunos conceptos y vamos a determinar cómo se llegó a esta conclusión de violación de la simetría CP.

### 7.1 Kaón mezcla neutra

Se llegó a la conclusión de que debe haber diferentes kaones neutros, los cuales se diferencian por su extrañeza, la pregunta entonces era la forma de establecer la presencia de estos dos mesones. La solución utiliza el fenómeno llamado oscilaciones de partículas neutras, por este fenómeno dos tipos de mesones pueden convertirse el uno en otro a través de las interacciones débiles, que causan la descomposición en piones.

Estas oscilaciones se investigaron por primera vez por Murray Gell-Mann y Abraham Pais. Ambos consideraron la evolución temporal CP invariante de estados con extrañeza opuesta. Si damos una notación matricial a este fenómeno:

$$\psi(t) = U(t)\psi(0) = e^{iHt} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} M & \Delta \\ \Delta & M \end{pmatrix}$$

Donde  $\psi$  se corresponde con un estado cuántico del sistema especificado por las amplitudes de cada uno de los estados de la base. Los elementos M del H se deben a la interacción fuerte que conserva la extrañeza. Los elementos de la diagonal deben ser iguales, ya que la partícula y la antipartícula tienen masas iguales en ausencia de interacción débil. Los elementos que no están en la diagonal mezclan partículas de extrañeza opuesta, se deben por lo tanto a interacción débil, la simetría CP les obligaría por lo tanto a ser real.

La consecuencia de que la matriz H debe ser real es que las probabilidades de esos estados oscilarán. Sin embargo, si cualquier parte de la matriz fuese imaginaria, al estar prohibida por la simetría CP, parte de la combinación actual disminuirá con el tiempo.

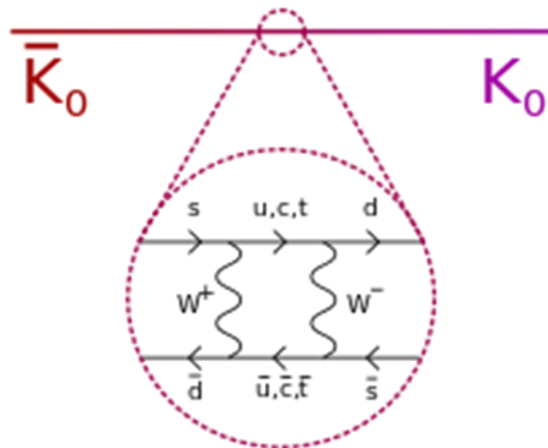


Fig. 9: En la imagen vemos dos mesones K neutros diferentes, ambos poseen diferente extrañeza, pueden convertir de uno a otro a través de las interacciones débiles, ya que no se conserva la extrañeza.

## 7.2 Mezcla

Como se mencionó previamente al diagonalizar la matriz podemos obtener los estados propios, estos a su vez nos van a dar los autovectores (vectores propios). Si llamamos  $K_1$  a la suma de los dos estados y  $K_2$  a la diferencia, ambos son estados propios de CP con valores opuestos,  $CP(K_1) = 1$  y  $CP(K_2) = -1$ . Como el estado final de dos piones posee  $CP=1$  solo el  $K_1$  puede decaer de esta forma, lo mismo ocurre con  $K_2$ , solo puede decaer en 3 piones puesto que  $CP=-1$ .

A su vez la masa de  $K_2$  es un poco mayor, no mucho, que la suma de las masas de los tres piones, eso implica que se avanza muy lentamente, haciendo una estimación podemos decir que unas 600 veces más lento que  $K_1$  en dos piones.

En resumen, a través de la diagonalización del H hemos obtenido dos valores propios para esos estados,  $K_1$  y  $K_2$ , sabemos que esos estados van a ser una combinación de los autoestados propios y van a poseer simetrías CP diferentes.

Leon Lederman y sus colaboradores en 1956 fueron los que observaron este fenómeno denominado como el establecimiento de la existencia de los dos débiles estados propios de los kaones neutros. Estos estados propios son los denominados anteriormente como K-long y K-short ( $K_L = K_2$  y  $K_S = K_1$ ).



*Fig. 10: Leon Lederman quien observó el fenómeno del establecimiento de la existencia de los dos estados propios débiles de los kaones neutros.*

## 7.3 Oscilaciones y violación de CP

Una vez que hemos introducido estos términos podemos hablar de la violación CP.

### 7.3.1 CP violación a través de mezcla única

El llamado kaón de larga vida, cuya simetría  $CP=-1$ , decae en dos piones donde el valor de  $CP = (-1) \cdot (-1) = 1$ . Se viola por lo tanto la conservación de CP.  $|K^0\rangle$  y siendo los estados propios de extrañeza (con valores de +1 y -1 respectivamente), los estados propios de energía son  $|\bar{K}^0\rangle$ :

$$|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$$

$$|K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$$

A partir de la idea anterior de la conservación de CP (simetría), se espera lo siguiente:

- Como tienen valor propio de CP=1, pueden decaer a dos piones o, con una adecuada elección del momento angular, a tres piones.
- $|K_2^0\rangle$  que posee un valor propio de CP=-1, puede decaer solo en tres piones y nunca en dos.

El experimento de 1964 mostró que, contrariamente a lo que se cabría esperar, podría decaer en dos piones. Esto implica que un kaón KL (de larga vida) no puede ser un autoestado de CP, sino que debe contener una mezcla, por lo tanto, ya no puede ser un estado propio de CP. Del mismo modo ocurre con el kaón KS (de corta vida), se predice, por tanto, que lo que tenemos es una mezcla.

Es decir, podemos deducir que:

$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}}(|K_2^0\rangle + \varepsilon|K_1^0\rangle)$$

$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}}(|K_1^0\rangle - \varepsilon|K_2^0\rangle)$$

Donde  $\varepsilon$  es una cantidad compleja y es una medida de salida de la invariancia CP, experimentalmente se obtuvo que su módulo  $|\varepsilon| = (2,228 \pm 0,011) \cdot 10^{-3}$ .

Ahora bien, con las condiciones de:

$$(|P_L\rangle = (p|P\rangle + q|\bar{P}\rangle) \text{ y } |P_H\rangle = (p|P\rangle - q|\bar{P}\rangle)$$

$$\left|\frac{q}{p}\right| \neq 1$$

$$\frac{q}{p} = \frac{1-\varepsilon}{1+\varepsilon}$$

Podemos deducir conjuntamente que

$$|K_1^0\rangle|K_2^0\rangle|K^0\rangle|\bar{K}^0\rangle m_{K_L^0} > m_{K_S^0}$$

Por lo tanto:

$$|K_L^0\rangle = (p|K^0\rangle - q|\bar{K}^0\rangle)$$

$$|K_S^0\rangle = (p|K^0\rangle + q|\bar{K}^0\rangle)$$

Con todo esto deducimos que, si se satisface lo anterior y hay una mezcla entre los estados propio, con una vida larga y un estado de corta duración que cumple:

$$|\varepsilon| \neq 0|K^0\rangle|\bar{K}^0\rangle$$

En resumen, al tratar de verificar los resultados se encontraron desintegraciones de un kaón L ( $K_L$ ) daba lugar a la aparición de dos piones, algo que no podría darse ya la paridad de este sistema de dos piones es de  $CP=1$ , mientras que la del kaón es de  $CP=-1$ . Se observó una violación de la paridad.

Resultó entonces que, aunque los kaones  $K_L$  y  $K_S$  son estados propios se cumple que:

$$K_L = K_2 + \varepsilon K_1$$

$$K_S = K_1 + \varepsilon K_2$$

Donde  $\varepsilon$  es el valor mencionado anteriormente, esto se traduce como que en ocasiones el kaón largo decae como un  $K_1$  con  $CP=1$ , y del mismo modo ocurre con el kaón corto que puede decaer como  $CP=-1$ . Esto es lo que se conoce como una violación de la simetría CP (es una violación indirecta de CP debido a la mezcla del kaón neutro y su antipartícula).

## 8. Kaones en la actualidad

Tal y como adelantábamos anteriormente, entre los experimentos más recientes con kaones se encuentra el NA62 del CERN, el cual ha mostrado indicios de la existencia de un decaimiento extraño de los kaones, nunca detectado con exactitud anteriormente, que podría permitir comprobar la consistencia del Modelo Estándar. Se sabe que las partículas producidas son kaones porque su masa está entre la del muon y la del nucleón y tienen extraña unidad.

### 8.1 Experimento NA62 del CERN

El objetivo principal de este experimento es estudiar los decaimientos *raros* de los kaones. Comprender estos decaimientos tan peculiares supondría la verificación de algunas de las predicciones que el Modelo Estándar hace sobre las interacciones a corta distancia y como los quarks *top* decaen. En concreto, el NA62 mide la tasa de desintegración de un kaón cargado en un pión cargado y en una pareja neutrino-antineutrino:  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu\bar{\nu}$ . La probabilidad de que ocurra este proceso de decaimiento es aproximadamente de una en diez mil millones ( $10^{10}$ ), de ahí que se denomine decaimiento raro.

El Modelo Estándar predice, de hecho, con una incertidumbre de menos del 10%, que el kaón decaerá por ese proceso concreto una vez entre  $10^{10}$ . Medir con precisión este decaimiento supondría una clara manifestación de la física más allá del Modelo Estándar. El 27 de marzo de 2018, el grupo de investigación del NA62 informó sobre un acontecimiento candidato para que se produzca esta desintegración extraña usando una nueva técnica de decaimiento *en vuelo*. Este nuevo enfoque en vuelo tiene ventajas porque proporciona mucho más espacio para la detección y además de limitar el ruido de fondo.



Fig. 11: Experimento NA62 en la zona norte del CERN.

Para buscar las desintegraciones raras del kaón, el equipo del NA62 primero comienza enriqueciendo los rayos de kaones bombardeando un objetivo de berilio en reposo con protones de alta energía del SPS (super sincrotrón de protones). La colisión crea un haz de casi mil millones de partículas por segundo, de las cuales, sólo el 6% son kaones. Luego los kaones son identificados por un contador de partículas Cherenkov (CEDAR) y antes de que entren en un tanque de vacío, se miden sus coordenadas y sus momentos usando un detector de píxeles de Silicio con resolución de 100 picosegundos (GTK). Otros detectores dentro del tanque buscan partículas en decaimiento: un espectrómetro magnético (STRAW) mide las trazas cargadas de las desintegraciones de kaón y un detector Cherenkov (RICH) de imágenes en anillo le dice al equipo la naturaleza de cada partícula en desintegración. Un gran sistema de detectores de fotones y muones rechaza los decaimientos no deseados.

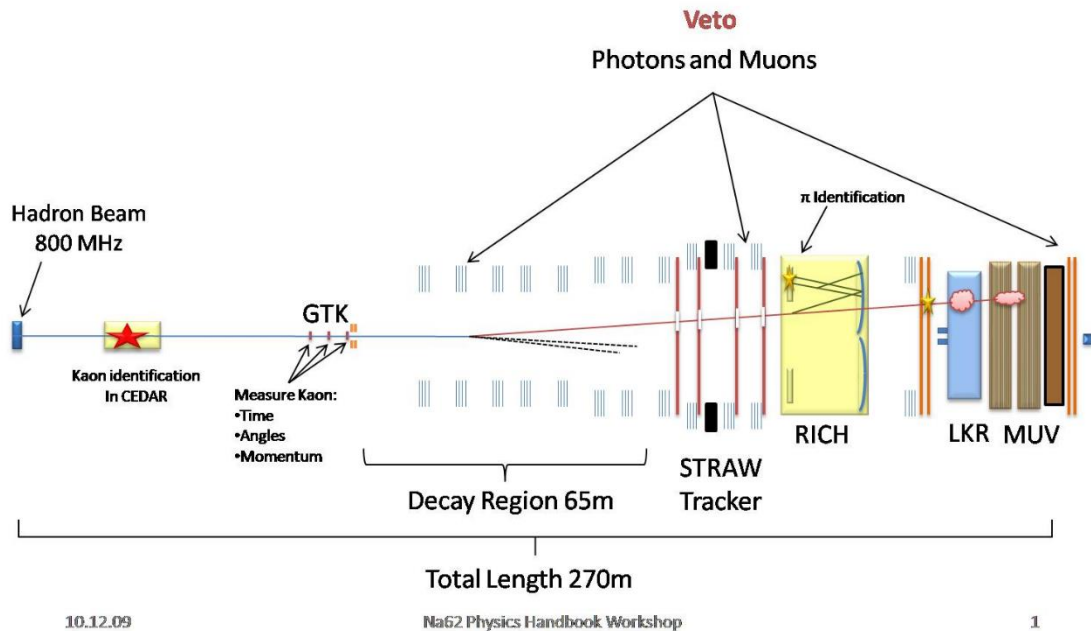


Fig. 12: Experimento NA62 en la zona norte del CERN.



En dos años de toma de datos, se espera que el experimento detecte alrededor de 80 desintegraciones candidatas si la predicción del Modelo Estándar para la tasa de desintegraciones de kaones cargados es correcta. Estos datos permitirán al equipo NA62 determinar el valor de una cantidad llamada  $|V_{td}|$ , que define la probabilidad de que los quarks *top* decaigan a quarks *bottom*. Comprender con precisión las relaciones entre los quarks es una forma bastante precisa de verificar la consistencia del Modelo Estándar. Actualmente, el experimento está a la espera de la publicación de sus resultados, pero puede verse un borrador de los mismo en la referencia [13].

## Referencias

- [1] J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR D86, 010001 (2012) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)
- [2] M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 98, 030001 (2018) and 2019 update (December 6, 2019 12:03).
- [3] Apuntes, notas y material didáctico de la asignatura de FNP
- [4] ROCHESTER Dr., G., BUTLER Dr., C. Evidence for the Existence of New Unstable Elementary Particles. *Nature* **160**, 855–857 (1947). <https://doi.org/10.1038/160855a0>
- [5] “Clifford Butler and George Rochester Discover the Kaon, First Strange Particle | Timeline.Web.Cern.Ch.” *Timeline.Web.Cern.Ch*, [timeline.web.cern.ch/clifford-butler-and-george-rochester-discover-kaon-first-strange-particle](http://timeline.web.cern.ch/clifford-butler-and-george-rochester-discover-kaon-first-strange-particle).
- [6] Wikipedia Contributors. “Kaon.” Wikipedia, Wikimedia Foundation, 27 June 2019, [en.wikipedia.org/wiki/Kaon](http://en.wikipedia.org/wiki/Kaon)
- [7] Griffiths, David. *Introduction to Elementary Particles*. Google Books, John Wiley & Sons, 26 Sept. 2008.
- [8] Lallena, Antonio M. *Grandes Experimentos de La Física: Cuatro Hitos de La Ciencia*. Google Books, RBA Libros, 14 Mar. 2019.
- [9] Lopes, Ana. “CERN Experiment Sees Hints of a Rare Kaon Decay.” *CERN*, 27 Mar. 2018, [home.cern/news/news/experiments/cern-experiment-sees-hints-rare-kaon-decay](http://home.cern/news/news/experiments/cern-experiment-sees-hints-rare-kaon-decay).
- [10] Nave, R. “Kaons and Other Strange Mesons.” *Hyperphysics.Phy-Astr.Gsu.Edu*, [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/kaon.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/kaon.html).
- [11] Prokhorov, Aleksander. “George Rochester.” *Physics World*, 10 Jan. 2002, [physicsworld.com/a/george-rochester/](http://physicsworld.com/a/george-rochester/).
- [12] Webmaster, EP Department. “CERN-PH-NA62.” *Na62.Web.Cern.Ch*, [na62.web.cern.ch/DetectorBeam/Overview.html](http://na62.web.cern.ch/DetectorBeam/Overview.html).
- [13] *2020 NA62 Status Report to the CERN SPSC*. 22 Mar. 2020. <https://na62.web.cern.ch/Documents/SPSC-SR-266.pdf>
- [14] Saxon, D.H. , Baker, R.D. , Bell, Kenneth Watson , Blissett, J.A. , Bloodworth, I.J. , Broome, T.A. , Hart, J.C. , Lintern, A.L. , Magon, V.K. , Mallery, M.L. ( 1980). The Reaction  $\pi^-p \rightarrow K^0 \Lambda^0 \pi^-p \rightarrow K^0 \Lambda^0$  Up to 2375-{MeV}/cc: New Results and Analysis. HEPData. <https://doi.org/10.17182/hepdata.34549>
- [15] Gómez-Esteban, Pedro. “Esas Maravillosas Partículas - El Kaón - El Tamiz.” *Eltamiz.Com*, 26 Aug. 2007, [eltamiz.com/2007/08/26/esas-maravillosas-particulas-el-kaon/](http://eltamiz.com/2007/08/26/esas-maravillosas-particulas-el-kaon/)
- [16] Pretty Much Physics. “Kaons & CP Violation | Particle Physics.” YouTube, 2 July 2017, [www.youtube.com/watch?v=6KmihEWwG9c](http://www.youtube.com/watch?v=6KmihEWwG9c)
- [17] Waltari, Harri. University of Helsinki & Helsinki Institute of Physics University of Southampton & Rutherford Appleton Laboratory. *Kaon Physics... or an Introduction to Flavor Oscillations and CP Violation*. Otoño 2018.
- [18] Bauer, Gerry. “In Hot Pursuit of CP Violation.” *CERN Courier*, 27 May 1999, [cerncourier.com/a/in-hot-pursuit-of-cp-violation/](http://cerncourier.com/a/in-hot-pursuit-of-cp-violation/)