

TRABAJO FIN DE GRADO



---

Mesones  $K$ : Extrañeza,  
Interacción Débil y Violación CP

---

*Autor:*

Carmen Sánchez Pérez

*Tutores:*

J. A. Caballero Carretero

G. D. Megías Vázquez

3 de abril de 2021



*En agradecimiento:*

*A mis amigos, los que viven fuera y los de aquí,  
en especial a Noelia Martín Zorrero y a Ana Valadés Alcaraz,  
mis dos hermanas de distinta sangre, por apoyarme y enseñarme tanto,  
incluso en la distancia y tras tantos años.*

*A mi pareja y compañero de vida, Aythami Sosa Alemán,  
por todo su amor y por no dejar que tire nunca la toalla.*

*A mi familia, sobretodo a mis padres, Cati Pérez y Andrés Sánchez;  
y a mis hermanos, Belén y Pedro, por animarme y creer en mí siempre.*

# Índice general

Índice de figuras	v
Resumen/Abstract	vi
Objetivos y metodología	1
1. Introducción	2
2. Extrañeza	4
2.1. Extrañeza en el Modelo de Quarks . . . . .	9
2.2. Extrañeza en partículas «no extrañas» . . . . .	12
3. Interacción Débil	14
3.1. Formalismo de la Interacción Débil . . . . .	14
3.2. Decaimiento de mesones $K$ cargados . . . . .	14
4. Violación CP	15
Apéndice A	16
A.1. Transformaciones de Lorentz . . . . .	16
A.2. Cuadrivectores y notación covariante . . . . .	16
A.3. Ecuación de Dirac. Matrices y spinores de Dirac . . . . .	16
Bibliografía	17

# Índice de figuras

2.1. Fotografía 1 de la primera detección de los mesones $K$	5
2.2. Fotografía 2 de la primera detección de los mesones $K$	5
2.3. Fotografía de Powell mostrando una trayectoria “kink”	6
2.4. Octete de mesones	10
2.5. Estructura interna del protón	13

# Resumen

Este documento se presenta como un estudio en detalle de lo que se conoce en Física de Partículas como mesones  $K$  o kaones. La fama de los mesones  $K$  radica en que fueron las primeras partículas en las cuales se detectó un comportamiento muy inusual: los mesones  $K$  se forman gracias a la Interacción Fuerte, pero decaen por Interacción Débil. Por este motivo, se denominaron partículas extrañas y supuso la introducción de un nuevo número cuántico, la extrañeza  $S$ . Además, dado que decaen por interacción débil, pueden presentar violación de la simetría CP y, por tanto, oscilaciones de sabor. A pesar de que hoy en día también se han observado estos fenómenos en otras partículas, los mesones  $K$  siguen actualmente jugando un papel muy importante y útil para estudiar las interacciones fundamentales.

# Abstract

This document presents itself as thorough study of what is known in Particle Physics as  $K$ -mesons or Kaons.  $K$ -mesons renown lies in the fact that they were the first particles in which a very unusual behaviour was detected:  $K$ -mesons are formed thanks to the Strong Interaction but decay by means of the Weak Interaction. For this reason, they were named strange particles and it led to the introduction of a new quantum number, the Strangeness  $S$ . Moreover, since  $K$ -mesons decay by Weak Interaction, they can present CP-symmetry violation and therefore, flavor oscillations. In spite of this phenomena been observed in other particles today,  $K$ -mesons still play an important and useful role in the study of Fundamentals Interactions nowadays.

# Objetivos y metodología

La propuesta de este Trabajo de Fin de Grado surge de la gran motivación que supuso en la asignatura de Física Nuclear y Partículas la realización de un proyecto en grupo conocido como “Adopta una Partícula” en el cuál se escogió el mesón  $K$  como partícula adoptada. Para nuestra sorpresa, esta partícula resultó ser de lo más fascinante.

Desde su descubrimiento, el mesón  $K$  ha constituido un rol fundamental en la Física de Partículas. No sólo fueron las primeras partículas extrañas que se detectaron, sino que ello supuso una revolución total para la Física moderna: fueron los responsables de la introducción de la Extrañeza como nuevo número cuántico y ha servido de inspiración para sentar las bases del Modelo de Quarks y el hallazgo de cuatro de los seis quarks conocidos.

La teoría de Quarks ha tenido numerosas consecuencias de suma importancia en el estudio de las Interacciones Fundamentales y el Modelo Estándar. Gracias a ello ha sido posible predecir las posibles causas de violaciones de simetría, la existencia de nuevos quarks presentes en nuevas partículas y oscilaciones de sabor. Todo ello nos permite acercarnos un poco más a la comprensión de la física de cortas distancias y el mundo microscópico.

Por lo tanto, este trabajo pretende dar a conocer los mesones  $K$  en profundidad y detallar todas estas implicaciones que su descubrimiento ha traído consigo, con el objetivo de concentrar toda esa información en un único documento, facilitando el trabajo de los divulgadores e investigadores de este campo de la Física que necesiten o, simplemente, quieran conocer más acerca de estas partículas extrañas tan útiles y curiosas.

Para tal fin, tras unas breves pinceladas sobre el contexto histórico, comenzaremos con un estudio en tono cualitativo de la Extrañeza y la definición de mesón  $K$  en el Modelo de Quarks, seguido de un desarrollo más cuantitativo de la Interacción Débil, dónde haremos uso de su formalismo general. Finalmente, relacionaremos todo lo anterior con la violación de simetría CP y proporcionaremos algunos aspectos más actuales dónde se trabaja con mesones  $K$ .

# 1 Introducción

El período entre 1940-1950 fue clave para el desarrollo de la Física de Partículas debido a los numerosos descubrimientos que se llevaron a cabo. Yukawa había propuesto hace unos años atrás la existencia de una partícula portadora de la Interacción Fuerte, cuya masa estuviera entre la del protón y la del electrón y denominada por este motivo mesón (middle weight). [3]

En los años posteriores, los científicos no cesaron de realizar experimentos en las cámaras de niebla tratando de identificar la partícula de Yukawa. Primero se descubrió en 1936 el muón  $\mu$ , una partícula cuya masa coincidía con la descrita por Yukawa pero que fue descartada al comprobar que su sección eficaz no era la propia de la Interacción Fuerte. En 1947, el grupo de investigación de Powell descubrió el mesón  $\pi$  o pión, y esta vez la partícula sí coincidía con las predicciones de Yukawa. Sin embargo, este no fue el único descubrimiento realizado en 1947.

Los físicos británicos Rochester y Butler, se hallaban también ese año realizando experimentos en una cámara de niebla cuando observaron unos rastros inusuales en ella que tenían forma de  $V$  invertida. Este hecho supuso la primera observación de los mesones  $K$ . Decidieron repetir el experimento en los pirineos franceses, detectando decenas de estas nuevas partículas. En 1949, el grupo de Powell logró también observar un rastro parecido que indicaba la presencia de esta nueva partícula, que luego decaía en tres piones.

Con el paso del tiempo, las técnicas de detección de partículas mejoraron enormemente y durante la copiosa producción de estas partículas  $V$  en los experimentos, se observó, entre otros curiosos fenómenos, que a pesar de que la Interacción Fuerte era la responsable de su formación, su larga vida indicaba que su desintegración se producía mediante Interacción Débil. Esta junto a otras características inusuales, hizo que estas partículas se ganaran el sobrenombre de extrañas. Desde entonces, se han detectado otras partículas extrañas tales como los bariones  $\Sigma$  y  $\Lambda^0$ . [1]

Los científicos de la época propusieron varias teorías, pero finalmente se concluyó que era necesario introducir un nuevo número cuántico para darle explicación a este suceso: la extrañeza o strangeness  $S$ .



Así pues, podemos concluir que los mesones  $K$  son hadrones de tipo mesón; 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.

Actualmente se conocen 4 tipos de mesones  $K$  distintos: las partículas  $K^+$  y  $K^0$  con sus respectivas antipartículas  $K^-$  y  $\overline{K^0}$ . La siguiente tabla muestra un resumen de sus propiedades:

Partícula	$K^+$	$K^-$	$K^0$	$\overline{K^0}$
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
3 <sup>a</sup> componente del Isoespín $I_3$	1/2	-1/2	-1/2	1/2
Momento angular y paridad $J^\pi$	$0^-$	$0^-$	$0^-$	$0^-$
Nº Bariónico $B$	0	0	0	0
Extrañeza $S$	1	-1	1	-1
spin $s$	0	0	0	0

Tabla 1.1: Propiedades y números cuánticos relevantes de los Mesones  $K$ .<sup>1</sup>

En los siguientes capítulos se detallan, en mayor profundidad, la propiedad de la extrañeza así como los decaimientos de los distintos mesones  $K$  por Interacción Débil y sus repercusiones en la violación de simetría CP.

---

<sup>1</sup>Propiedades extraídas de [8], [2].

## 2 Extrañeza

Como se comentó anteriormente, los físicos británicos George Rochester y Clifford Butler, se hallaban tomando fotografías en una cámara de niebla en 1947, tratando de detectar partículas generadas por los rayos cósmicos al impactar sobre las moléculas de la atmósfera, cuando detectaron dos rastros en forma de  $V$  invertida nunca observados hasta entonces, que sólo podían ser explicados por el decaimiento de una partícula neutra con masa entre 700 y 1600 veces mayor a la del electrón.

En aquella época, ante la ausencia de aceleradores de partículas potentes, la búsqueda de partículas se realizaba estudiando los rayos cósmicos. Estos rayos no son más que radiación de alta energía procedente del espacio exterior. Cuando estos inciden en las distintas capas de la atmósfera producen una serie de reacciones en cadena que da lugar a una cascada de partículas. Además, a mayor altitud, mayor es el flujo de rayos cósmicos que nos llegan, lo que facilita que un mayor número de partículas llegue al detector. Por este motivo, Rochester y Butler decidieron realizar nuevamente el experimento en los Pirineos Franceses, concretamente en el Observatorio *Pic Du Midi*, y esta vez consiguieron detectar decenas de estas nuevas partículas. En un principio se las denominó partículas  $V$  pero posteriormente pasaron a identificarse como mesones  $K$  o kaones. [3]

Para entender cómo lograron detectar los mesones  $K$  por primera vez, hay que entender el funcionamiento de las cámaras de niebla. En estos dispositivos son entornos cerrados donde se llevaba a cabo el estudio de los rayos cósmicos: las partículas que componen los rayos atraviesan un volumen con vapor de agua sobresaturado contenido en dicho recinto cerrado. Las partículas con carga eléctrica producen una cierta ionización de aire provocando la condensación del vapor de agua a lo largo de la trayectoria. Al situar la cámara de niebla en campos eléctricos y magnéticos, y estudiando las curvaturas de las trayectorias es posible obtener la carga eléctrica, la energía y la masa de las partículas. Asimismo, como muchas partículas decaen en otras por ser inestables, estudiando la longitud de las trazas que dejan las partículas al decaer en la cámara de niebla, se puede deducir su vida media. [2]

En diciembre de 1947, se publicaron en la revista *Nature* dos de las numerosas fotografías que habían tomado Rochester y Butler, las cuales podemos observar a continuación:

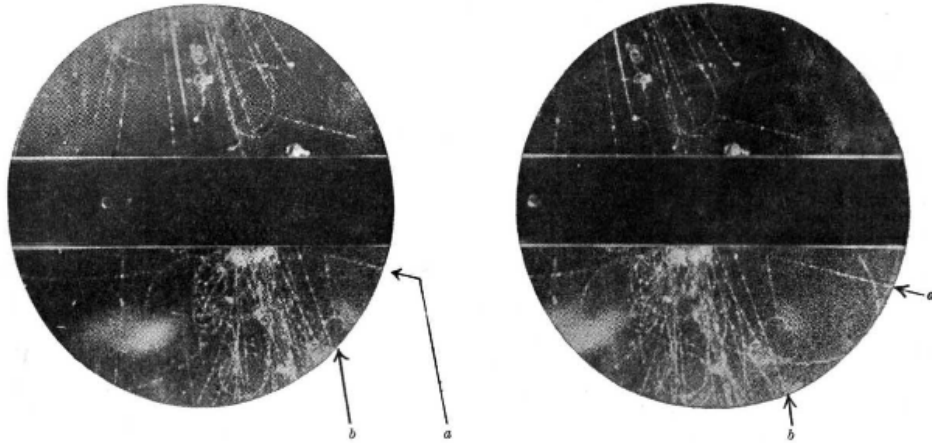


Figura 2.1: Primera fotografía estereoscópica publicada en la revista *Nature*. [7]

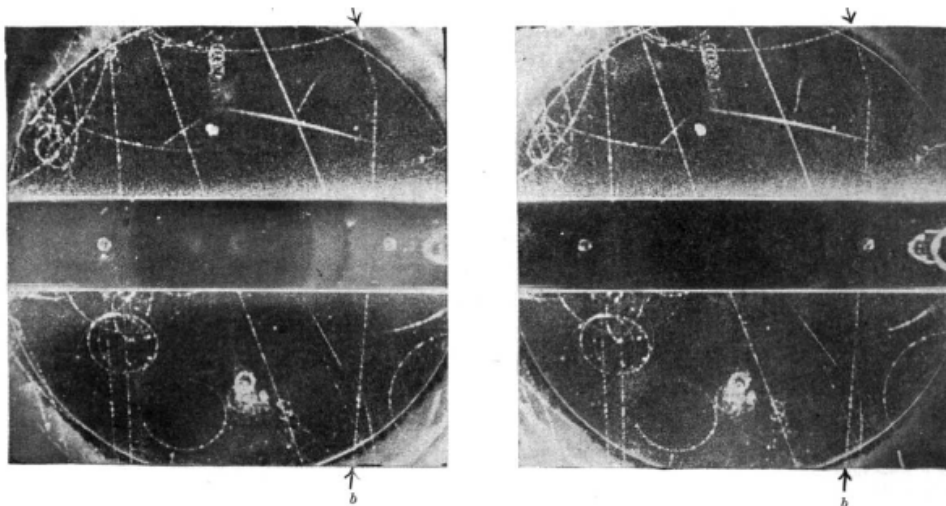


Figura 2.2: Segunda fotografía estereoscópica publicada en la revista *Nature*. [7]

En la figura 2.1, 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 2.2 muestra un proceso similar pero esa vez, se produce una nueva partícula cargada (por entonces partícula- $\tau$ ) que decae en otras dos partículas más ligeras, una cargada y la otra neutra, apreciándose una desviación o “kink” en las trayectorias.

Años más tarde se comprobó que la primera fotografía 2.1 correspondía al proceso  $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$  y la segunda fotografía (2.2) a la reacción  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ .

El comienzo de los años 50 trajo consigo técnicas innovadoras de detección de partículas, como la cámara de burbujas, detectores de emulsión nuclear muy precisos y nuevos aceleradores más potentes. Estos nuevos dispositivos demostraron un gran avance tecnológico al permitir la producción casi en masa de las partículas descubiertas en la década anterior.

De hecho, los mesones  $K$  habían quedado un poco en el olvido durante los dos años posteriores a su descubrimiento hasta que en 1950 otros célebres físicos de partículas como Powell, empezaron a publicar trabajos donde también se apreciaban los trazos en forma de  $V$  y las desviaciones, que evidenciaban la presencia de las partículas  $V$  y  $\tau$ , respectivamente. Coincidían con Rochester y Butler en que estos eventos representaban el decaimiento espontáneo de partículas neutras y cargadas, desconocidas hasta entonces.



Figura 2.3: Fotografía publicada por el grupo de Powell en la revista *Nature*. [3]

El proceso descubierto por Powell en 2.3 mostraba como  $K^+$  entrando desde arriba decae en el punto A en tres piones cargados, dos positivos y uno negativo. El  $\pi^-$  provoca seguidamente una desintegración en B. El proceso descrito era:  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ .

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  $\tau^+$ . Esto es debido a que los procesos de 2.1 y 2.3 tenían estados finales con distinta paridad y por eso se pensaba que debía tratarse de partículas diferentes.

$\theta^0$  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. [3]

En los años siguientes empezaron a clasificar las partículas  $V$  y  $\tau$  en función de la masa. Así, se determinó que los mesones  $K$  correspondían a aquellas partículas con masa intermedia entre el pión y el protón, mientras que aquellas con masas intermedias entre el neutrón y el deuterón pasarían a conocerse como hiperones.

Volviendo al inicio de los años 50, fue también entonces cuando empezaron hacerse notar los fenómenos inusuales que presentaban estas partículas y que fueron los responsables de que se las bautizara como partículas extrañas, pues nunca se habían manifestado en otras partículas. Las partículas extrañas incluyen no sólo los mesones  $K$ , sino también los hiperones  $\Lambda$ ,  $\Sigma$  y cascada  $\Xi$ , entre otros. Pero para lo que nos concierne en este documento, vamos a centrar nuestro estudio en los kaones.

La primera característica extraña, mencionada ya antes varias veces, es el hecho de que estas partículas, a pesar de producirse por interacción fuerte de forma muy numerosa, tenían vidas medias relativamente largas, por lo que se sospechaba que decaían mediante interacción débil. El otro suceso curioso es el de producción asociada, que consiste en que las partículas extrañas sólo se producen por pares.

Tras muchos intentos fallidos de dar explicación a estos hechos, el físico holandés-estadounidense Abraham Pais sugirió, en 1952, que las partículas elementales debían tener una nueva propiedad o regla de selección, a la que denominó “Regla par-impar”. Esta regla de selección debía de cumplirse siempre para la Interacción Fuerte y la Electromagnética, pero podía violarse en la Interacción Débil. A grandes rasgos, la regla consistía en asignar el número 0 a las partículas “antiguas” ( $\pi$ , nucleones,  $\gamma$ , leptones) y el número 1 a las partículas “nuevas”  $K$  y  $\Lambda$  (el resto de las partículas todavía se desconocían). Dado cualquier proceso, se suman los números asignados de las partículas en el estado inicial y luego las del estado final. En la interacción fuerte y electromagnética, el número total inicial y final deben ser ambos pares o ambos impares, mientras que, en la interacción débil, uno debe ser par y el otro impar. Esta propiedad también daba respuesta a por qué las partículas extrañas debían producirse en pares. [6]

La evidencia experimental de la idea de Pais vino de la mano de Murray Gell-Mann y Kazuhiko Nishijima en 1953. Por un lado, indicaban que la “Regla par-impar” debía

ser una consecuencia directa de la independencia de carga de las partículas  $V$ , que indicaba que la carga de estas partículas podía encontrarse en tres estados: neutro, positivo y negativo. Por otro lado, Gell-Mann propuso asignar un número entero de Isospín  $I$  a los hiperones y un semientero a los mesones  $K$ . Nakano y Nishijima también hicieron esta misma propuesta casi paralelamente. Dependiendo de si el isospín  $I$  y su tercera componente  $I_3$  se conservan o no, podrá llevarse acabo la producción de partículas mediante Interacción Fuerte. [4]

En 1955, Nishijima planteó, a partir de sus observaciones experimentales, que los mesones  $K$  se podían organizar en dobletes de carga y, por tanto, podían obtenerse partículas  $K$  con carga conjugada.  $K^+$  y  $K^0$  formaban un doblete de carga con  $I = 1/2$  e  $I_3 = 1/2$  y  $-1/2$  respectivamente y, además, ambas partículas podían definirse como funciones de onda complejas. Ello permitía establecer el doblete conjugado de sus antipartículas  $K^-$  y  $\bar{K}^0$ , con  $I_3 = -1/2$  y  $1/2$  respectivamente, relacionados entre sí mediante el operador conjugación de carga. Gell-Mann también llegó a conclusiones similares en 1956. Profundizaremos en mayor medida sobre este tema en los próximos capítulos. [5]

Por otro lado, se comprobó que en todas las interacciones antes descritas se conservaba el número bariónico  $B$ .<sup>1</sup> Asimismo, desarrollando toda esta teoría de la invariancia de carga para las partículas  $V$  y para incluir la propiedad sugerida por Pais, se introdujo un nuevo número cuántico al que Gell-Mann denominó *extrañeza* o *Strangeness*  $S$  (Nishijima lo denotaba como carga- $\eta$ ). Asignaron  $S = 1$  al doblete de partículas de mesones  $K$  y  $S = -1$  para el doblete de sus antipartículas. Este nuevo número cuántico resultaba útil para relacionar la carga con  $I_3$  en partículas elementales, llegándose a una expresión conocida como la *Fórmula de Gell-Mann-Nishijima*:

$$Q = I_3 + \frac{B + S}{2} = I_3 + \frac{Y}{2} \quad (2.1)$$

Siendo  $Y$  la *hipercarga*, definida como  $Y = B + S$  en un principio.

El teorema de Conservación de la Extrañeza se formuló a partir de las evidencias experimentales:  $S$  debía conservarse en las Interacciones Fuerte y Electromagnética, pero podía ser violada en procesos ocurridos por Interacción Débil, tal y como había sugerido Pais con su *Regla par-impar*.

---

<sup>1</sup>Las teorías de Unificación afirman que el protón  $p$  tiene vida finita aunque muy larga. Si decae, lo haría en un  $e^+$  y en un  $\pi^0$ , violándose la conservación de  $B$ .

## 2.1. Extrañeza en el Modelo de Quarks

Como hemos visto, el concepto de extrañeza se introdujo por motivos puramente fenomenológicos, gracias a las observaciones experimentales. Sin embargo, a través del Modelo de Quarks, la extrañeza obtiene su base teórica.

A principios de la década de los 60, y tras el descubrimiento de muchas partículas “elementales” se hizo necesario poner cierto orden haciendo uso de las simetrías. Las simetrías son útiles porque permiten clasificar de forma ordenada las partículas en función de sus propiedades. La rama de las matemáticas encargada de tratar con simetrías es la teoría de grupos. El isospín viene descrito por el grupo  $SU(2)$ , pero el descubrimiento de las partículas extrañas hizo necesario extender el concepto de isospín a una simetría superior.

Así pues, Gell-Mann y Ne’eman observaron que los valores de isospín y la hipercarga de los hadrones estaban relacionados entre sí, tal que los hadrones (mesones y bariones) aparecían en grupos, con el mismo espín y paridad y masas similares, denominados singletes (una partícula), octetes (ocho partículas) y decupletes (diez partículas). Esta clasificación recibió el nombre de *The Eightfold Way* o *El Camino Óctuple*, concordaba con la estructura del grupo de simetría interna  $SU(3)$  si fundamentaban las transformaciones en la independencia de carga de la interacción fuerte (isospín) y en la conservación de la extrañeza.<sup>[2]</sup> Las diversas representaciones del  $SU(3)$ , no sólo permitían la clasificación de las partículas en función de sus números cuánticos, sino que además, predecían la existencia de nuevas partículas aún por descubrir.

Pero entonces, ¿por qué los hadrones se organizaban en estructuras con formas tan curiosas? La respuesta a esta pregunta se obtuvo en 1964, cuando Gell-Mann y Zweig, plantearon la posibilidad de que estas partículas, que en un principio se creían elementales, podrían presentar una estructura interna más compleja, pues habían observado ciertas propiedades en ellas que así lo sugerían. Gell-Mann bautizó a estos entes más fundamentales que constituían las partículas como *quarks*.<sup>[3]</sup> El quark presentaba tres estados internos o “sabores”, llamados  $u$  (*up*),  $d$  (*down*) y  $s$  (*strange*), cada uno con un determinado valor de carga y extrañeza. Además, indicó que para cada quark  $q$ , existía su correspondiente antiquark  $\bar{q}$  con números cuánticos aditivos opuestos. En la siguiente tabla se puede observar un resumen de sus propiedades:

Quark ( $q$ )	Espín $s$	Carga $Q$	$I$	$I_3$	$S$	$B$	$Y$
Up ( $u$ )	1/2	+2/3	1/2	+1/2	0	1/3	1/3
Down ( $d$ )	1/2	-1/3	1/2	-1/2	0	1/3	1/3
Strange ( $s$ )	1/2	-1/3	0	0	-1	1/3	-2/3

Tabla 2.1: Números cuánticos de los quarks. [2]

Así nació el *Modelo de Quarks*, el cuál establecía que los bariones (antibariones) se componían de un conjunto de tres quarks (antiquarks) mientras que los mesones estaban formados por un quark y un antiquark. El *The Eightfold Way* sólo era una consecuencia de las simetrías de sabor de los quarks, matemáticamente expresada mediante la simetría del grupo  $SU(3)$ . Las diferentes combinaciones de sabor daban lugar a las distintas partículas y sus propiedades.

En concreto, los mesones  $K$  se representaban junto a los piones en un hexágono con que los clasifica según sus números cuánticos de carga  $Q$  y extrañeza  $S$ , formando un octete pseudo-escalar.<sup>2</sup> Dicho octete está formado por el triplete de los piones y los dos dupletes de las partículas  $K$  y sus antipartículas, aunando así todos los mesones ligeros en un mismo grupo. Para formar el octete de mesones, en cada vértice del hexágono se sitúa una partícula y en el centro del mismo se sitúan el pión neutro y el mesón  $\eta$ . En la siguiente figura se puede ver la representación de este octete:

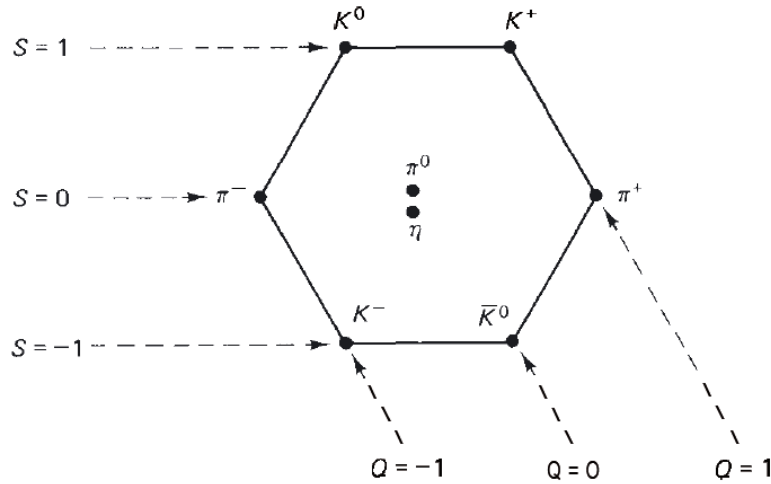


Figura 2.4: Octete de mesones. [3]

Este octete muchas veces aparece representado como un nonete para incluir las nueve posibles combinaciones de  $q$  y  $\bar{q}$ , al incluir el singlete de la partícula  $\eta'$ .

<sup>2</sup>Pseudo-escalar indica que los mesones tienen momento angular 0 y paridad negativa ( $J^\pi = 0^-$ ).



Por lo tanto, todas aquellas partículas en cuya composición estuviera presente el quark  $s$ , como en los kaones, presentaban un valor de extrañeza no nulo y podían considerarse partículas extrañas. La composición de quarks de los mesones  $K$  es la siguiente:

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

Tabla 2.2: Composición de quarks de los mesones  $K$ . [2]

Conociendo esta composición y los números cuánticos de los quarks de la tabla 2.1, se obtienen fácilmente las propiedades de los mesones  $K$  mostradas en la tabla 1.1.

Lo más destacable de los quarks es que son partículas fermiónicas, es decir tienen espín  $1/2$ . Sin embargo, la existencia de los bariones requiere la agrupación de tres quarks y esto, en un principio, parece contradecir el *Principio de Exclusión de Pauli*. Para resolver esta paradoja, Greenberg introdujo el concepto de color: además de los tres sabores de quarks, estos también presentan tres colores  $r$  (*red*),  $b$  (*blue*) y  $g$  (*green*). Planteó que los bariones simplemente se forman con quarks de distinto color. Por lo tanto, ya no serían exactamente iguales y no se violaría el Principio de Pauli.[3] Además, a pesar de que los quarks son los constituyentes más fundamentales de la materia, no se han encontrado evidencias de la existencia de quarks aislados, es lo que conoce como confinamiento.[6]

Con los años se han descubierto otros sabores de quarks, los llamados quarks pesados  $c$  (*charm*),  $t$  (*top*) y  $b$  (*bottom*). Esto ha requerido utilizar simetrías de orden superior al  $SU(3)$  y modificar la definición de la hipercarga  $Y$  para incluir estos nuevos sabores y poder clasificar las nuevas partículas descubiertas adecuadamente.

Gracias al Modelo de Quarks es posible describir la interacción entre partículas como interacciones entre los quarks que las componen. Los mesones  $K$  se originan por la Interacción Fuerte. En esta interacción se producen intercambios de quarks entre los hadrones o se crean/aniquilan parejas quark-antiquark. La responsable de la interacción fuerte entre los quarks es su carga de color y la partícula portadora es el gluón. Los quarks modifican su color al absorber o emitir un gluón pero no modifican su sabor (simetría de isospín). Las combinaciones antisimétricas de quarks frente al intercambio de

color se atraen y las simétricas se repelen. Los gluones a su vez también tienen carga de color y pueden interactuar entre sí, lo que resulta en un aumento de la interacción fuerte con la distancia entre quarks y su confinamiento.[2] Por otro lado, los mesones  $K$  decaen mediante la Interacción Débil. Estos procesos se pueden describir utilizando diagramas de Feynmann donde se aprecia el cambio de sabor de los quarks, que puede resultar o no en un cambio de extrañeza, dependiendo de qué quarks se crean y se aniquilan. Como este fenómeno es de suma importancia para los mesones  $K$ , dedicaremos el siguiente capítulo a tratar el tema de la Interacción Débil y la desintegración de estas partículas en detalle.

## 2.2. Extrañeza en partículas «no extrañas»

Para finalizar este capítulo sobre la extrañeza, hay que mencionar que, si bien, en un primer momento, la composición más elemental de ciertos hadrones parece estar constituida únicamente por hasta tres sabores de quarks diferentes, estudios recientes han descubierto ciertas partículas que parecen presentar una estructura interna más compleja, que contienen toda una amplia variedad de sabores de quarks, antiquarks y gluones, pero de forma “escondida”. Así lo manifiesta Ross D. Young en su artículo de la revista *Nature* [9], donde se centra en explicar la extrañeza del protón, una partícula considerada originalmente como no extraña.

La composición de quarks del protón es  $uud$ , sin embargo, los otros cuatro sabores también pueden estar ocultos en su estructura y afectar a sus propiedades, sobre todo a la distribución de carga y a la magnetización. El sabor oculto dominante en el protón se espera que sea  $s$ , pues tras  $u$  y  $d$ , es el quark más ligero. De la *cromodinámica cuántica* o  $QCD$  (teoría que describe las interacciones entre quarks y gluones), se sabe que la cantidad neta de extrañeza debe ser siempre 0, así cada vez que se crea un quark, también se crea un antiquark  $\bar{s}$ , sólo que  $\bar{s}$  aparece un poco más lejos del centro del protón con respecto a  $s$ , y esta asimetría afecta a su distribución de carga total. Además, la presencia de los quarks extraños en el protón hace que se incremente levemente su momento magnético, debido a la circulación neta de carga eléctrica negativa alrededor del eje de polarización del protón[9] (ilustrada en la siguiente figura mediante la flecha de color rojo). Así lo han demostrado las simulaciones experimentales llevadas a cabo en el campo de la QCD.

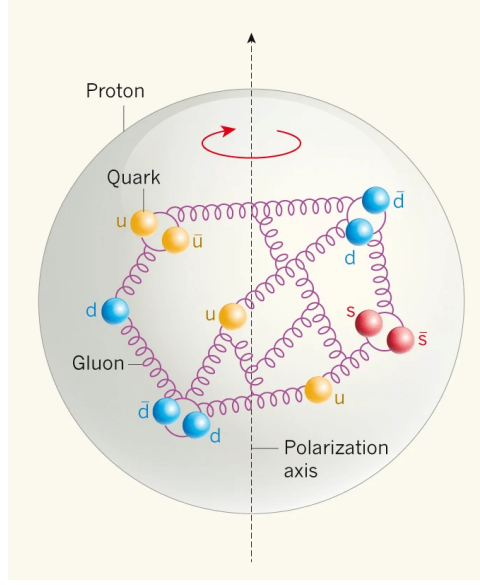


Figura 2.5: Estructura interna de quarks del protón. [9]

En la figura 2.5, además de la composición fundamental del protón constituida por dos quarks  $u$  y un quark  $d$ , también pueden apreciarse como continuamente se están creado y destruyendo mesones (parejas  $q\bar{q}$ ) en su interior. En concreto se observa una pareja  $u\bar{u}$ , dos parejas  $d\bar{d}$  y una pareja  $s\bar{s}$ , pero también puede presentar otras parejas de sabores.

El hallazgo del quark  $s$  en el protón arroja luz, principalmente, sobre dos investigaciones actuales. La primera tiene que ver con la  $Q_{weak}$  o *carga débil* del protón, la cual mide la interacción débil entre el protón y el electrón y tiene como objetivo buscar una posible estructura interna de los quarks. El otro estudio que se beneficia del descubrimiento de la extrañeza y otros sabores ocultos en el protón, tiene que ver con la búsqueda de la materia oscura en el Universo.

## 3 Interacción Débil

Como se comentó anteriormente

### 3.1. Formalismo de la Interacción Débil

### 3.2. Decaimiento de mesones $K$ cargados

## 4 Violación CP

Como se comentó anteriormente

# Apéndice A

## A.1. Transformaciones de Lorentz

Las *Transformaciones de Lorentz* (LT) son las expresiones matemáticas encargadas de relacionar un suceso observado desde dos sistemas de referencia distintos, en base a los postulados de la Teoría de Relatividad Especial. Son las siguientes:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{t - xv/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1)$$

Denotando  $\beta = v/c$  y  $\gamma = \sqrt{1 - v^2/c^2}$ , reescribimos las LT como:

$$x' = \gamma(x - \beta ct) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \gamma\left(t - \frac{\beta x}{c}\right) \quad (2)$$

## A.2. Cuadrivectores y notación covariante

Los cuadrivectores o tetra vectores

## A.3. Ecuación de Dirac. Matrices y spinores de Dirac

# Bibliografía

- [1] William A. Bardeen. Kaons - A micro-physics laboratory - "Will you still need me when I'm 64?" (the beatles). *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 197:128–135, 2012.
- [2] Departamento de FAMN and Universidad de Sevilla. Apuntes, notas y material didáctico de la asignatura de Física Nuclear y de Partículas, 2020.
- [3] D. J. Griffiths. *Introduction to Elementary Particles*. Mörlenbach: Wiley-VCH, 1 edition, 2008.
- [4] Tadao Nakano and Kazuhiko Nishijima. Charge Independence for V-particles. *Progress of Theoretical Physics*, 10(5):581–582, 1953.
- [5] Kazuhiko Nishijima. Charge Independence Theory of V Particles. *Progress of Theoretical Physics*, 13(3):285–304, 1955.
- [6] Abraham Pais. *Inward Bound: of Matter and Forces in the Physical World*. Oxford University Press, New York, 1986.
- [7] G. D. Rochester and C. C. Butler. Evidence for the existence of new unstable elementary particles. *Nature*, 160(4077):855–857, dec 1947.
- [8] M. Tanabashi et al. Particle Data Group. *Phys. Rev.*, D 98, 0300:22–35, 2018.
- [9] Ross D. Young. Strangeness in the proton. *Nature*, 544(7651):419–420, 2017.