

CORRECCIONES RADIATIVAS A LA POLARIZACIÓN DEL MUÓN EN LOS DECAIMIENTOS SEMILEPTÓNICOS DE KAONES NEUTROS.

J. Vieyra¹, M. Neri¹, A. Hernández-Galeana¹ ¹Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN. jvieyra.phys@gmail.com



RESUMEN

En este trabajo se presentan evaluaciones numéricas de las componentes del vector de polarización P del muón en los decaimientos semileptónicos de kaones neutros donde el muón saliente está polarizado.

Introducción

La invariancia CPT es una ley de conservación absoluta, sin embargo existen procesos como el de interacciones débiles que violan la simetría CP. En 1964 se descubre experimentalmente que el decaimiento de un kaón neutro K_L^0 a dos piones, viola la simetría CP por lo que necesariamente este proceso no es invariante bajo inversión temporal T. La evidencia de esta violación se puede buscar en la componente transversal del vector de polarización del muón saliente [1]. En este trabajo serán evaluadas numéricamente las componentes de dicho vector incluyendo Correcciones Radiativas virtuales y bremsstrahlung.

ESTUDIO A ORDEN CERO

El proceso a estudiar es el decaimiento semileptónico del kaón neutro

$$K^{0}(p_{1}) \to \pi^{-}(p_{2}) + \mu^{+}(l) + \nu_{\mu}(p_{\nu}).$$
 (1)

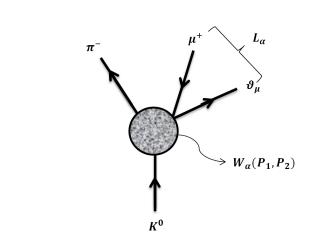


Figura 1. Diagrama de Feynman.

Para este proceso la amplitud está dada por la siguiente expresión

$$M_0 = C_K \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{us} \underbrace{f_+ [2p_{1\alpha} - (1 - \xi)q_\alpha]}_{W_\alpha} \underbrace{\bar{u}_\nu \mathcal{O}_\alpha \nu_\mu}_{L_\alpha}, \tag{2}$$

con $\xi = f_-/f_+$, $q_\alpha = (p_1 - p_2)_\alpha$ y $\mathcal{O}_\alpha = \gamma_\alpha (1 + \gamma_5)$. Para conocer la polarización del muón emitido se introduce el operador de proyección de espín.

$$\sum(s) = \frac{1 - \gamma^5 \sharp}{2},\tag{3}$$

y se aplica a la función de onda del muón, esto es

$$\nu_{\mu} \to \sum (s) \nu_{\mu}. \tag{4}$$

Posteriormente se calcula el módulo al cuadrado de la amplitud y se suma sobre todos los espines en el estado final, en este caso resulta lo siguiente

$$\sum_{s} |M_0|^2 = \frac{1}{2} \left[\sum_{s} |M_0'|^2 - \sum_{s} |M_0^{(s)}|^2 \right]. \tag{5}$$

En (5), el término $\sum_{s} |M'_0|^2$ ya se consideró en el trabajo [2], así que trataremos sólo con el término $\sum_{s} |M_0^{(s)}|^2$.

Este contiene productos del tipo $s \cdot a$, que se expresan en el marco de referencia del kaón como

$$s \cdot a = \hat{s}_R \cdot \left[\frac{1}{m} \left(a_0 - \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{l}}{E + m} \right) - \mathbf{a} \right],$$
 (6)

donde \hat{s}_{B} es el vector de espín del muón visto desde su marco propio de referencia. En general $s \cdot s = s_0^2 - \mathbf{s} \cdot \mathbf{s} = -1 \, \mathbf{y} \, s \cdot l = 0.$

Empleando $\sum_{s} |M_0^{(s)}|^2$ en la regla de oro de Fermi se obtiene que a orden cero la gráfica de Dalitz es $d\Gamma'_0(E, E_2) = a'_0 d\Omega'$, con

$$a_0' = 2M_1 E E_{\nu}^0 - M_1^2 (E_{2m} - E_2) - m^2 E_{\nu}^0 \text{Re}(1 - \xi) + \frac{1}{4} m^2 (E_{2m} - E_2) 1 - \xi^2$$
(7)

y el espacio fase $d\Omega' = \frac{C_k^2 G_F^2 V_{us}^2 f_+^2}{4 - 3}$. La polarización se define como

$$\mathbf{P}_0 = \frac{\mathbf{a}_0^{(s)}}{a'},\tag{8}$$

donde

$$\mathbf{a}_0^{(s)} = \Lambda_{L0}\hat{\epsilon}_L + \Lambda_{N0}\hat{\epsilon}_N + \Lambda_{T0}\hat{\epsilon}_T \tag{9}$$

$$\Lambda_{L0} = M_1 \left[lE_{\nu}^0 - E(l + p_2 y_0) \right] + m^2 (l + p_2 y_0) \operatorname{Re}(1 - \xi)$$

$$- \frac{m^2}{4M_1} 1 - \xi^2 \left[lE_{\nu}^0 + E(l + p_2 y_0) \right]$$
(10)

$$\Lambda_{N0} = -mp_2\sqrt{1 - y_0} \left[M_1 - E\text{Re}(1 - \xi) + \frac{m^2}{4M_1} 1 - \xi^2 \right]$$
 (11)

$$\Lambda_{T0} = m p_2 l \sqrt{1 - y_0} \operatorname{Im}(\xi) \tag{12}$$

La base ortonormal $\hat{\epsilon}_L$, $\hat{\epsilon}_N$ y $\hat{\epsilon}_T$ se definen como

$$\hat{\epsilon}_L = \frac{1}{|\mathbf{l}|}, \quad \hat{\epsilon}_T = \frac{\mathbf{p}_2 \times \mathbf{l}}{|\mathbf{p}_2 \times \mathbf{l}|}, \quad \hat{\epsilon}_N = \hat{\epsilon}_L \times \hat{\epsilon}_T.$$
 (13)

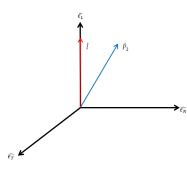


Figura 2. Base Ortonormal

De (9) podemos reescribir al vector de polarización como $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}_L \hat{\epsilon}_L + \mathbf{P}_N \hat{\epsilon}_N + \mathbf{P}_T \hat{\epsilon}_T$, con $\mathbf{P}_X = \frac{\Lambda_X}{\sigma'} \hat{\epsilon}_X$, X = L, T, N, las polarizaciones longitudinal (\mathbf{P}_L) , normal (\mathbf{P}_N) y transversal (\mathbf{P}_T) , respectivamente. De esta manera, la razón diferencial de decaimiento se escribe como $d\Gamma_0 = \frac{1}{2} d\Gamma_0' (1 + \hat{s}_R \cdot \mathbf{P}_0)$

CORRECCIONES RADIATIVAS VIRTUALES

Las Correcciones Radiativas (CR) virtuales surgen con la emisión de un fotón virtual por parte de las partículas cargadas o por el vértice de interacción. La amplitud de transición virtual es la siguiente [2]

$$M_V = M_0 \left[1 + \frac{\alpha}{2\pi} \Phi_n \right] - \frac{\alpha}{2\pi} M_{p_2} \Phi'_n,$$
 (14)

$$M_{p_2} = \frac{1}{m} \frac{G}{\sqrt{2}} W_{\alpha} \bar{u}_{\nu} p_2 \mathcal{O}_{\alpha} \nu_{\mu},$$
 (15)

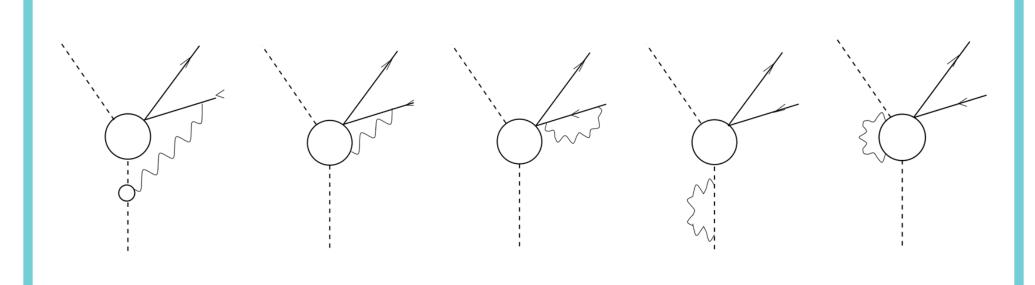


Figura 3. Diagramas de Feynman para Correcciones Radiativas Virtuales.

las expresiones de las funciones Φ_n y Φ'_n pueden consultarse en [2]. De esta manera es posible escribir la gráfica de Dalitz total (dependiente de spin) para las correcciones radiativas virtuales como sigue

$$d\Gamma_{V}^{(s)} = d\Omega' \hat{s}_{R} \cdot \left[\left(1 + \frac{\alpha}{\pi} Re(\Phi_{n}) \right) \mathbf{a}_{0}^{(s)} + \frac{\alpha}{\pi} Re(\Phi'_{n}) \mathbf{a}_{V}^{(s)} \right], \quad (16)$$

donde $\mathbf{a}_0^{(s)}$ se define en (9) y

$$\mathbf{a}_{V}^{(s)} = \frac{EE_{2} - lp_{2}y_{0}}{m^{2}} \mathbf{a}_{0}^{(s)} - \left[\frac{lE_{2} - p_{2}Ey_{0}}{m^{2}} a_{0}' \right] \hat{\epsilon}_{L} + \left[\frac{p_{2}}{m} \sqrt{1 - y_{0}^{2}} a_{0}' \right] \hat{\epsilon}_{N}.$$
(17)

Es importante mencionar que en la expresión (16) se ha removido la divergencia infrarroja contenida en Φ_n , la cual tiene la siguiente forma:

$$2\left[\frac{1}{\beta'}\operatorname{arctanh}(\beta') - 1\right]\ln\frac{\lambda}{m} \tag{18}$$

dicha divergencia se cancela con un término que surge en las CR Bremsstrahlung.

CORRECCIONES RADIATIVAS BREMSSTRAHLUNG

Las CR Bremsstrahlung se introducen cuando se considera la emisión de un fotón real, el proceso a estudiar es el siguiente

$$K^{0}(p_{1}) \to \pi^{-}(p_{2}) + \mu^{+}(l) + \nu_{\mu}(p_{\nu}) + \gamma(k),$$
 (19)

el fotón tiene cuadrimomento (ω, \mathbf{k}) .

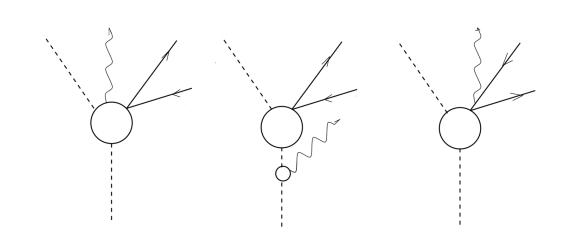


Figura 4. Diagramas de Feynman para Correcciones Radiativas Bremsstrahlung.

De acuerdo con el teorema de Low [3], la amplitud de transición Bremsstrahlung se escribe como la siguiente sumatoria

$$M_B = \sum_{i=1}^{4} M_{B_i} \tag{20}$$

Las expresiones de los M_{B_i} pueden consultarse en [2]. De todas las contribuciones a la gráfica de Dalitz, se tiene un interés especial en la expresión proveniente de $|M_{B_1}|^2$

$$\frac{d\Gamma_{B1}}{dEdE_{2}} = \frac{\alpha}{\pi} d\Omega' \left\{ I_{0n} \left(\vec{a}_{0}^{(s)} \cdot \hat{s}_{R} \right) + \frac{lp_{2}}{4\pi} \int_{-1}^{y_{0}} dy \int d\Omega_{k} \frac{\omega}{D} \left(\vec{a}_{B1} \cdot \hat{s}_{R} \right) \right\}$$
(21)

pues I_{0N} encierra el término que contiene la parte divergente infrarroja:

$$2\left[\frac{1}{\beta'}\operatorname{arctanh}(\beta') - 1\right]\ln\frac{m}{\lambda},\tag{22}$$

que es el negativo de (18). Por lo tanto la expresión

$$d\Omega' \left\{ \frac{\alpha}{\pi} \left(\operatorname{Re}(\phi_n) + I_{0n} \right) \left(\mathbf{a}_0^{(s)} \cdot \hat{s}_R \right) \right\}$$
 (23)

es finito.

con

POLARIZACIÓN CON CORRECCIONES RADIATIVAS

Se define la polarización total de la siguiente manera:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_{RC},\tag{24}$$

donde \mathbf{P} y \mathbf{P}_{RC} tienen la siguiente forma

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{a}_0^{(s)} + (\alpha/\pi)\mathbf{a}^{(s)}}{a_0' + (\alpha/\pi)a}$$
(25)

$$\mathbf{P}_{RC} = \frac{\alpha}{\pi} \frac{\mathbf{a}_0^{(s)} - a\mathbf{P}_0}{a_0' + (\alpha/\pi)a} = P_{LRC}\hat{\epsilon}_L + P_{TRC}\hat{\epsilon}_T + P_{NRC}\hat{\epsilon}_N \quad (26)$$

$$\mathbf{a}^{(s)} = (\operatorname{Re}(\phi_n) + I_{0n})\mathbf{a}_0^{(s)} + \operatorname{Re}(\phi'_n)\mathbf{a}_V^{(s)} + \mathbf{a}_B^{(s)}$$
(27)

$$a = (\text{Re}(\phi_n) + I_{0n})a'_0 + \text{Re}(\phi'_n)a'_V + a'_B$$
 (28)

EVALUACIONES NUMÉRICAS

La contribución que se hace en este trabajo es calcular cada término de la expresión (27), respecto a la ecuación (28) ya se había calculado en [2].

La magnitud del vector de polarización del muón tiene la siguiente forma

$$|\mathbf{P}| = \sqrt{(P_{L0} + P_{LRC})^2 + (P_{T0} + P_{TRC})^2 + (P_{N0} + P_{NRC})^2}$$

La dirección de las polarizaciones dependerá del parámetro ξ :

$$\xi(q^2) = \frac{M_1^2 - M_2^2}{M_2^2} \frac{\lambda_0 - \lambda_+}{1 + \lambda_+ \frac{q^2}{M_2^2}} = \xi(0) \left[\frac{1}{1 + \lambda_+ \frac{q^2}{M_2^2}} \right]^{-1}$$
(30)

 $con \lambda_{+} = 2.97 \times 10^{-2}, \lambda_{0} = 1.95 \times 10^{-2}, M_{1} = 497.611 Mev, M_{2} =$ 139,570Mev, m = 105,6583745Mev y $Im(\xi) = -0,006, [4]$.

En las siguientes tablas se presentan las evaluaciones numéricas para cada una de las cantidades antes mencionadas.

E2\E	0.112398	0.125877	0.139356	0.152835	0.166314	0.179793	0.193272	0.206752	0.220231	0.23371
(A)										
0.251282						-0.000168407	0.000113509	0.000866421	0.002386500	0.00674442
0.239523		-0.000425147	-0.000872033	-0.000854405	-0.000490180	0.000182495	0.001196750	0.002706420	0.005248010	0.01243600
0.227764	-0.000691265	-0.001523100	-0.001616860	-0.001254270	-0.000555951	0.000448664	0.001813450	0.003738910	0.006905960	0.01589740
0.216005	-0.000773332	-0.001984890	-0.002056220	-0.001544640	-0.000650894	0.000572376	0.002181180	0.004402840	0.008013180	0.01727630
.204246	0.001045420	-0.001825230	-0.002265990	-0.001778240	-0.000787496	0.000582577	0.002368240	0.004804090	0.008705040	0.0051723
.192487		-0.000649834	-0.002155020	-0.001938430	-0.000961621	0.000488568	0.002393420	0.004968440	0.008974480	
.180727			-0.001469510	-0.001973610	-0.001172630	0.000279752	0.002243610	0.004872150	0.008656350	
.168968				-0.001839630	-0.001459560	-0.000098433	0.001857450	0.004419120	0.007090370	
.157209					-0.002158010	-0.000871226	0.001041470	0.003328120		
).14545						-0.003347770	-0.000893724	0.000757668		
(B)										
.251282						0.0000211851	0.0000372381	0.0000458593	0.0000450015	0.0000218
239523		0.0000261660	0.0000627918	0.0000858727	0.0000998173	0.0001057220	0.0001031920	0.0000900666	0.0000601163	-0.0000092
227764	0.0000363008	0.0000790766	0.0001055950	0.0001212390	0.0001273120	0.0001238900	0.0001098430	0.0000820775	0.0000331360	-0.0000510
.216005	0.0000314312	0.0000719823	0.0000983836	0.0001123510	0.0001148200	0.0001058340	0.0000842091	0.0000468685	-0.0000122155	-0.0000715
.204246	-0.0000104173	0.0000243146	0.0000536173	0.0000694292	0.0000717013	0.0000606185	0.0000354022	-0.0000060074	-0.0000648317	-0.0000173
.192487		-0.0000488736	-0.0000231858	-0.0000037105	0.0000017733	-0.0000074082	-0.0000313664	-0.0000699016	-0.0001143670	
.180727			-0.0001265570	-0.0001057230	-0.0000933192	-0.0000953377	-0.0001114210	-0.0001373240	-0.0001456010	
168968				-0.0002353090	-0.0002123320	-0.0001994280	-0.0001975710	-0.0001954440	-0.0001277810	
157209					-0.0003498700	-0.0003092790	-0.0002720100	-0.0002133660		
.14545						-0.0003683110	-0.0002609600	-0.0000834640		
(C)										
251282						0.000071783	0.000077855	0.000056607	-0.000032122	-0.0004915
.239523		0.000118386	0.000186296	0.000187205	0.000147433	0.000078393	-0.000022090	-0.000176279	-0.000470832	-0.0015585
.227764	0.000449147	0.000687153	0.000613016	0.000460258	0.000285476	0.000099349	-0.000109052	-0.000378065	-0.000837161	-0.0024706
216005	0.001523840	0.001561300	0.001208770	0.000831820	0.000484830	0.000162815	-0.000161352	-0.000545699	-0.001164570	-0.003338
.204246	0.001476750	0.002551260	0.001942710	0.001301380	0.000749193	0.000269801	-0.000183233	-0.000691009	-0.001478560	-0.0021349
.192487		0.003082740	0.002742460	0.001859110	0.001075940	0.000415581	-0.000183281	-0.000827704	-0.001801500	
.180727			0.003215640	0.002431640	0.001439550	0.000582519	-0.000179296	-0.000976598	-0.002153420	
.168968				0.002641120	0.001729560	0.000713232	-0.000214248	-0.001176000	-0.002490390	
157209					0.001479270	0.000618522	-0.000400881	-0.001491710		
).14545						-0.000213482	-0.000962454	-0.001599140		

Tabla 1. Valores de la corrección radiativa a las componentes de la polarización del muón. Las entradas corresponden a: (a) P_{LRC} , (b) P_{TRC} (c) P_{NRC} . Las energías E y E_2 están

E2\E	0.112398	0.125877	0.139356	0.152835	0.166314	0.179793	0.193272	0.206752	0.220231	0.23371
(A)										
0.251282						-0.0002076720	-0.0003141440	-0.0004327670	-0.0006261770	-0.0012215500
0.239523		-0.0002419340	-0.0003841710	-0.0004691160	-0.0005450320	-0.0006310980	-0.0007458240	-0.0009224420	-0.0012579200	-0.0024263100
0.227764	-0.0003539800	-0.0005682790	-0.0006702990	-0.0007490180	-0.0008317880	-0.0009364960	-0.0010854200	-0.0013234300	-0.0017889000	-0.0035535300
0.216005	-0.0005611210	-0.0008257360	-0.0009402100	-0.0010264600	-0.0011203300	-0.0012441000	-0.0014255300	-0.0017219200	-0.0023165300	-0.004747400
0.204246	-0.0004466050	-0.0010559500	-0.0012227600	-0.0013260400	-0.0014325300	-0.0015743000	-0.0017864200	-0.0021401500	-0.0028705600	-0.0031701500
0.192487		-0.0011318100	-0.0015027200	-0.0016522200	-0.0017775000	-0.0019373800	-0.0021789600	-0.0025903100	-0.0034661500	
0.180727			-0.0016598200	-0.0019845200	-0.0021552700	-0.0023386000	-0.0026097000	-0.0030787300	-0.0040916100	
0.168968				-0.0021766800	-0.0025318100	-0.0027681200	-0.0030735500	-0.0035932800	-0.0045499700	
0.157209					-0.0026447900	-0.0031332600	-0.0035056500	-0.0040168200		
0.14545						-0.0024892800	-0.0033532200	-0.0030861900		
(B)										
0.251282						0.996688000	0.994701000	0.993362000	0.991165000	0.976868000
0.239523		0.971114000	0.957791000	0.959717000	0.963683000	0.967077000	0.969043000	0.968463000	0.960946000	0.893674000
0.227764	0.766690000	0.819036000	0.867664000	0.898407000	0.918001000	0.930252000	0.936675000	0.936263000	0.919918000	0.743453000
0.216005	0.219567000	0.605447000	0.746367000	0.818219000	0.859318000	0.883362000	0.895419000	0.894593000	0.863959000	0.416370000
0.204246	-0.692247000	0.282373000	0.573841000	0.708713000	0.781273000	0.821921000	0.841519000	0.839316000	0.784627000	-0.781137000
0.192487		-0.264249000	0.308707000	0.550234000	0.672551000	0.738187000	0.768511000	0.763089000	0.664818000	
0.180727			-0.151259000	0.300504000	0.510822000	0.617619000	0.664439000	0.651846000	0.464655000	
0.168968				-0.151012000	0.245124000	0.429448000	0.504637000	0.475106000	0.065473900	
0.157209					-0.272070000	0.095101600	0.228613000	0.152064000		
0.14545						-0.663064000	-0.361534000	-0.624266000		
(C)										
0.251282						-0.079288900	-0.103963000	-0.122321000	-0.149369000	-0.242537000
0.239523		-0.236778000	-0.284389000	-0.277880000	-0.265154000	-0.255098000	-0.251508000	-0.259460000	-0.294426000	-0.473305000
0.227764	-0.640747000	-0.570889000	-0.493720000	-0.436135000	-0.394990000	-0.367900000	-0.354991000	-0.361222000	-0.408265000	-0.687620000
0.216005	-0.973905000	-0.792824000	-0.662024000	-0.571868000	-0.509830000	-0.469524000	-0.449581000	-0.455832000	-0.517696000	-0.919707
0.204246	-0.719201000	-0.956234000	-0.815448000	-0.702404000	-0.622420000	-0.570084000	-0.543908000	-0.551372000	-0.631796000	-0.620786000
0.192487		-0.961582000	-0.947742000	-0.831882000	-0.738076000	-0.674635000	-0.642719000	-0.652652000	-0.756256000	
0.180727			-0.985552000	-0.950757000	-0.857546000	-0.786055000	-0.749371000	-0.763241000	-0.891829000	
0.168968				-0.986234000	-0.967423000	-0.902309000	-0.864534000	-0.883305000	-1.000760000	
0.157209					-0.961485000	-0.994803000	-0.974145000	-0.990335000		
0.14545						-0.751845000	-0.933786000	-0.782429000		

Tabla 2. Valores de las componentes de la polarización del muón con correcciones radiativas. Las entradas corresponden a: (a) P_{TRC} , (b) P_{LRC} (c) P_{NRC} . Las energías E y E_2 están dadas en GeV.

E2\E	0.112398	0.125877	0.139356	0.152835	0.166314	0.179793	0.193272	0.206752	0.220231	0.23371
0.251282						0.999827	1.000110	1.000850	1.002370	1.006670
0.239523		0.999559	0.999111	0.999127	0.999488	1.000160	1.001170	1.002660	1.005170	1.011790
0.227764	0.999181	0.998356	0.998290	0.998670	0.999377	1.000380	1.001740	1.003630	1.006680	1.013560
0.216005	0.998341	0.997550	0.997656	0.998256	0.999194	1.000430	1.002030	1.004190	1.007520	1.010600
0.204246	0.998210	0.997027	0.997100	0.997817	0.998918	1.000330	1.002100	1.004430	1.007790	0.997392
0.192487		0.997187	0.996711	0.997373	0.998557	1.000090	1.001980	1.004360	1.007400	
0.180727			0.997021	0.997070	0.998159	0.999725	1.001650	1.003970	1.006090	
0.168968				0.997634	0.997948	0.999318	1.001150	1.003210	1.003150	
0.157209					0.999120	0.999285	1.000650	1.002060		
0.14545						1.002340	1.001210	1.000810		

Tabla 3. Magnitud del vector de Polarización del Muón.

Posteriormente se efectúa la integración sobre las energías del muón E y del pión E_2 para calcular las componentes del vector de polarización del muón.

	SIN	CR
	CORRECCIONES	
LONGITUDINAL	0.704774	0.700838
TRANSVERSAL	-0.00127695	-0.00125627
ΝΟΡΜΔΙ	-0.543819	-0.545387

Tabla 4. Componentes del vector de Polarización del Muón.

CONCLUSIONES

En este trabajo se hace un análisis de los decaimientos semileptónicos de kaones neutros, con el objetivo de estudiar la violación de la simetría T, la cual se puede observar a partir de la componente transversal de la polarización del muón saliente en el decaimiento y que está relacionada con $Im(\xi)$, que se incluye en la amplitud de transición del proceso. Se realiza una evaluación numérica de las componentes del vector de polarización en varios puntos de la gráfica de Dalitz, considerando correcciones radiativas, algo importante es que los resultados alcanzados dependen de la parametrización de los factores de forma empleados, es decir, valores distintos de f_{\perp} y f_{\perp} podrían conducir a otros escenarios. Finalmente se hace la integración en las energías del muón y del pión para obtener los valores numéricos de cada una de las componentes del vector de polarización y se comparan los casos sin correcciones y con correcciones. Es importante mencionar que si bien el valor de la componente transversal con correcciones radiativas $P_T = -0.00125627$ es pequeño, es distinto de cero y está dentro del valor reportado en la literatura [5], [6].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Instituto Politécnico Nacional. Un agradecimiento muy especial al profesor Alfonso Martínez Valdés (1949-2021).

REFERENCIAS

[1] J.J. Sakurai, Phys. Rev. 109, 980 (1958).

[2] M. Neri, A. Martínez, C. Juárez-León, J.J. Torres y Rubén Flores-Mendieta, Phys. Rev. D 92, 074022 (2015).

[3] F. Low, Phys. Rev. 110, 974 (1958).

[4] C. Patrignani et al., (Particle Data Group), Chin. Phys. C 40, 10001 (2016). [5] Michael J. Longo, Kenneth K. Young y Jerome A. Helland, Muon Polarization in $K_{\mu 3}^0$ Decay,

Phys. Rev. 181, 1808 (1969).

[6] W. M. Morse, L. B. Leipuner y R. C. Larsen, Search for the violation of time-reversal invariance in $K_{\mu,3}^0$ decays, Phys. Rev. D 21, 1750 (1980).