

ABSTRACT

Within the Standard Model, the tree-level couplings of photon and Z^0 boson to quarks are flavour-conserving. Flavour-changing couplings are, however, generated at higher orders in the weak interactions. This comes as a direct consequence of the inter-familiar mixing of quark flavours by W bosons. Such flavour-changing couplings, the so-called electroweak penguins, have attracted considerable attention due to their importance in the consideration of the rare flavour-changing decay processes. They are also considered as the main source of direct CP violation effects. Moreover, the rarity of flavour-changing process also provides a probe into the finer details of Standard Model.

Early calculations of electroweak penguin were largely confined to computing the vertex functions at zero momentum transfer as an approximation. General calculation that takes into account of non-zero momentum transfer and the absorptive parts of the vertex function was scarce. However such calculation for photo-penguin had been presented by Chia. The similar general vertex function for Z -penguin, however, is still lacking. A more thorough investigation of electroweak penguins, within the framework of SM, requires a supplementing calculation of the Z -penguin. This project is conducted just exactly for this purpose: the calculation of flavour-changing Z -penguin at vanishing momentum transfer.

In this project, the loop-induced flavour-changing vertex function of the $Zq_1\bar{q}_2$ vertex is computed within the context of the $SU(2)\times U(1)$ Standard Model in 't Hooft-Feynman gauge, without ignoring the invariant mass of the virtual Z boson. A simple renormalization procedure is used to renormalize the vertex function, in which the counter term is calculated as the on-shell amplitude of the one-particle reducible self-energy diagrams. The renormalized vertex function so obtained exhibits absorptive behaviour due to integration over the internal momentum of W propagator and internal j quark. The form factors in the vertex function are evaluated numerically.

With the form factors of the $Zq_1\bar{q}_2$ vertex known, we proceed to estimate the decay rates and decay rate asymmetries in flavour-changing transitions of quarks with emission of virtual Z boson, $q_1 \rightarrow q_2 Z^*$. We also estimate the decay rates and decay rate asymmetries of the flavour-changing decay of Z^0 boson: $Z^0 \rightarrow q_2\bar{q}_1$. Both types of flavour-changing transitions are dependent on the KM matrix elements. We find that the transitions involving $Z^0 \rightarrow \bar{d}s, \bar{s}d$ and $s \rightarrow dZ^*$ display strong dependence on the KM matrix elements $|\lambda_c|^2$.

Since Z -penguin processes are second order effect, the decay rates and the asymmetry parameters are found to be small, as expected. For $b \rightarrow sZ^*$, the asymmetry parameter is of the order 10^{-5} . For $s \rightarrow dZ^*$ the asymmetry parameter is of order 10^{-7} to 10^{-4} , depending on the value $|\lambda_c|^2$. The decay rates for $s \rightarrow dZ^*$, $b \rightarrow sZ^*$ and $b \rightarrow dZ^*$ are very small, being of the order 10^{-12} , 10^{-9} and 10^{-11} GeV respectively.

The decay rate for $Z^0 \rightarrow b\bar{d}$ is estimated to be $\sim 10^{-9}$ GeV. For $Z^0 \rightarrow b\bar{s}$, the decay rate is estimated to be $\sim 10^{-8}$ GeV, whereas for $Z^0 \rightarrow s\bar{d}$ the decay rate varies from $\sim 3.5 \times 10^{-12}$ to $\sim 2 \times 10^{-8}$ GeV, depend on the value of $|\lambda_c|^2$. For $Z^0 \rightarrow b\bar{s}$, $a \sim 8.9 \times 10^{-6}$. For $Z^0 \rightarrow s\bar{d}$ and $Z^0 \rightarrow b\bar{d}$, the asymmetry parameters may be larger, $a \sim 10^{-3}$ and $a \sim 10^{-4}$, because of the smallness of the corresponding decay rates.

ABSTRAK

Dalam *Standard Model (SM)*, gandingan foton dan boson Z^0 kepada kuark-kuark pada paras pokok adalah citarasa-terabadi. Walau bagaimanapun, gandingan citarasa-tertukar didapati terjana pada tertib yang lebih tinggi dalam interaksi lemah. Ini merupakan akibat langsung daripada perkacukan citarasa kuark antara famili oleh boson-boson W . Gandingan citarasa-tertukar sedemikian, yang dikenali sebagai penguin eletrolemah, telah banyak menarik perhatian memandangkan kepentingannya dalam proses-proses pereputan citarasa-tertukar nadir. Proses-proses ini juga dianggap sebagai punca utama kesan percanggahan CP langsung. Tambahan pula, kenadiran proses-proses citarasa-tertukar ini juga membekalkan suatu penduga untuk menghalusi butir-butir SM yang lebih terperinci.

Kebanyakan penghitungan awal ke atas penguin elektrolemah adalah terbatas kepada pengkomputasian fungsi verteks pada momentum terpindah sifar sebagai suatu penghampiran. Penghitungan secara am yang mengambil kira momentum terpindah bukan sifar serta bahagian absorptifnya jarang didapati. Walau bagaimanapun, penghitungan sedemikian untuk foto-penguin telah dipersembahkan oleh Chia, sedangkan fungsi verteks am yang secocok untuk Z -penguin masih ketiadaan. Lantaran itu, penyiasatan penguin-penguin elektrolemah yang lebih menyeluruh dalam rangka kerja SM menanti-nantikan satu komplimentasi daripada penghitungan ke atas Z -penguin. Projek ini dilaksanakan sebaik-baiknya untuk tujuan sedemikian: penghitungan Z -penguin tertukar citarasa pada momentum terpindah sifar.

Dalam projek ini, fungsi verteks citarasa-tertukar bagi verteks $Zq_1\bar{q}_2$ yang gelung-teraruh dikomputasikan dalam konteks *Standard Model* $SU(2)\times U(1)$ dalam geji 't Hooft-Feynman, tanpa mengabaikan jisim invarian bagi Z maya. Satu prosedur renormalisasi yang mudah digunakan untuk merenormalkan fungsi verteks, di mana sebutan *counter* dihitungkan sebagai amplitud pada-petala (*on-shell amplitude*) bagi gambarajah-gambarajah tenaga-

sendiri satu-zarah terturunkan. Fungsi verteks terenormalkan sedemikian mempamerkan kelakuan absorptif kerana mengamiri momentum dalaman bagi propagator W dan kuark j dalaman. Kelakuan faktor-faktor bentuk dalam fungsi verteks ini dinilai secara berangka.

Dengan verteks $Zq_1\bar{q}_2$ diketahui, kami kemudiannya melangkah untuk menganggarkan kadar reputan dan simetri kadar reputan dalam peralihan citarasa-tertukar kuark dengan pemancaran boson Z maya, $q_1 \rightarrow q_2 Z^*$. Kami juga menganggarkan kadar reputan dan asimetri kadar reputan untuk pereputan citarasa-tertukar $Z^0: Z^0 \rightarrow q_2\bar{q}_1$. Kedua-dua jenis peralihan citarasa-tertukar ini adalah bersandar kepada masukan-masukan matriks KM. Kami dapati bahawa peralihan yang melibatkan $Z^0 \rightarrow \bar{d}s, \bar{s}d$ dan $s \rightarrow dZ^*$ memaparkan persandaran yang kuat ke atas masukan matriks KM $|\lambda_c|^2$.

Oleh kerana proses-proses Z -penguin adalah kesan tertib kedua, kadar reputan dan asimetri kadar reputan yang didapati adalah kecil, sebagaimana yang dijangkakan. Untuk $b \rightarrow sZ^*$, parameter asimetrinya adalah dalam tertib ke 10^{-5} . Untuk $s \rightarrow dZ^*$, parameter asimetrinya adalah dalam tertib 10^{-7} hingga 10^{-4} bergantung kepada nilai $|\lambda_c|^2$. Kadar reputan untuk $s \rightarrow dZ^*$, $b \rightarrow sZ^*$ dan $b \rightarrow dZ^*$ adalah amat kecil, berada dalam tertib $\sim 10^{-12}$, $\sim 10^{-9}$ dan $\sim 10^{-11}$ GeV masing-masing.

Kadar reputan untuk $Z^0 \rightarrow b\bar{d}$ adalah dianggarkan sebagai berada dalam tertib $\sim 10^{-9}$ GeV. Untuk $Z^0 \rightarrow b\bar{s}$, kadar reputan dianggarkan sebagai $\sim 10^{-8}$ manakala untuk $Z^0 \rightarrow s\bar{d}$, kadar reputannya berubah dari $\sim 3.5 \times 10^{-12}$ hingga $\sim 2 \times 10^{-8}$ GeV, bergantung kepada nilai $|\lambda_c|^2$. Untuk $Z^0 \rightarrow b\bar{s}$, $a \sim 8.9 \times 10^{-6}$. Untuk $Z^0 \rightarrow s\bar{d}$ dan $Z^0 \rightarrow b\bar{d}$, parameter asimetrinya boleh menjadi lebih besar, $a \sim 10^{-3}$ dan $a \sim 10^{-4}$, memandangkan kekecilan kadar reputan yang berkaitan.