

論文内容の要旨

論文題目：Measurement of Direct Photon Emission in $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ Decay
($K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ 崩壊中の光子直接放射過程の測定)

氏名 常見俊直

$K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ 崩壊中の直接光子放射過程 (DE 成分) は、低エネルギー領域での中間子のハドロン相互作用に関して有用な情報を与える。

DE 成分は、QED の放射補正である $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ 崩壊中の innerbremsstrahlung (IB 成分) に比べて数%しか存在しないことが分かっている。しかし、IB 成分と DE 成分は運動学的に分離することが可能である。DE 成分はさらに「magnetic transition」と「electric transition」の2つからなるとする理論がある。この magnetic transition の大きさについて、理論的には、「reducible amplitude」や「direct anomalous amplitude」など多くの可能性が示唆されており、実験的に決定することが不可欠である。

$K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ の崩壊幅 (Γ) は、 W と呼ばれる項を用いると容易に表現することができる。 W は、 $W^2 \equiv \frac{(p \cdot q)(p_+ \cdot q)}{m_\pi^2 + m_K^2}$ というように定義される。ここで、 p 、 p_+ と q は、それぞれ K^+ 、 π^+ 、 γ の 4 元運動量である。また m_π と m_K は、 π^+ と K^+ の質量である。この W を用いて、 $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ の崩壊幅は IB 成分の大きさを括りだすと次のように書ける。

$$\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial T_+ \partial W} = \frac{\partial^2 \Gamma_{IB}}{\partial T_+ \partial W} \left(1 + 2 \frac{m_{\pi^+}^2}{m_K} \operatorname{Re} \left(\frac{E}{eA} \right) W^2 + \frac{m_{\pi^+}^4}{m_K^2} \left(\left| \frac{E}{eA} \right|^2 + \left| \frac{M}{eA} \right|^2 \right) W^4 \right), \quad (1)$$

T_+ は π^+ の K^+ 静止系の運動エネルギー、 A は $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ の崩壊幅である。 E と M は $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ 中の DE 成分の「electric transition」と「magnetic transition」の大きさである。 W によって、IB 成分と他の成分の大きさが異なることが分かる。括弧内の一番左の項は、IB 成分の大きさである。2 番目の項は、DE 成分が electric transition を持つときのみ現れる Interference と呼ばれる効果 (INT 成分) である。また 3 番目の項は DE 成分である。以上、3 つの IB 成分、

DE 成分、INT 成分は W によって大きさが異なるので、 W を用いることで実験的に分離することが可能である。

ところで、 K^+ の静止系では、 W は次のように書くことができる。

$$W^2 = \frac{E_\gamma^2 \times (E_{\pi^+} - P_{\pi^+} \times \cos \theta_{\pi^+\gamma})}{m_{K^+} \times m_{\pi^+}^2}. \quad (2)$$

ここで、 E_γ 、 E_{π^+} 、 P_{π^+} 、 $\cos \theta_{\pi^+\gamma}$ は、それぞれ、光子のエネルギー、 π^+ のエネルギー、 π^+ の運動量、 π^+ と光子のなす角度である。これら全ての値は、本研究で用いた BNL-E787 検出器で測定することができる。

BNL-E787 検出器は、アメリカ合衆国にあるブルックヘブン国立研究所の陽子加速器 AGS の静止 K^+ 実験用の K^+ ビームラインに設置されている。陽子は 3.4 秒周期で、1.3 秒の間ビームラインにもたらされる。白金の production target により K 中間子が生成され、1 スピルあたり 10^7 個の K^+ が $710 \text{ MeV}/c$ の運動量をもって BNL-E787 検出器に到達する。 K^+ は、BeO でできた degrader により減速され、シンチレーションファイバーからなる target で静止した後、崩壊する。

$K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ 中の π^0 はすぐに 2 つの光子に崩壊するので、検出器ではひとつの π^+ と 3 つの光子を捕らえることになる。 π^+ は、target を円筒状に囲むドリフトチェンバーで運動量を測定され、さらに外側を囲むプラスチックシンチレータからなる Range Stack で range とエネルギーが測定される。また、BNL-E787 検出器は、全立体角が photon 検出器で覆われている。photon 検出器は、円筒形の Barrel photon detector (BL) と、ビームラインのそばにある EndCap (EC) とからなる。本研究ではより大きな立体角を持つ BL のみを用いて、photon のエネルギーと位置の測定を行い、EC に反応があったイベントは除外した。BL は鉛とシンチレータからなるカロリメータであり、photon エネルギーの約 30% がシンチレータ中で測定される。

次にイベント選択である。 π^+ の運動量の上限 $133 \text{ MeV}/c$ をもつ $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$ 崩壊と運動量 $205 \text{ MeV}/c$ の $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ 崩壊を避けるため、 π^+ の運動量領域は、 $140 \text{ MeV}/c < P_\pi < 180 \text{ MeV}/c$ を用いた。BNL-E787 検出器では、 π^+ についてはエネルギーと運動量、photon については、エネルギーと位置の測定による方向を測定することが可能である。 π^+ と photon のこれら測定量について、エネルギー保存則や運動量保存則などの運動学的制限を用いることで、イベントを選択する。それぞれの測定量の分解能で重みをつけることによって、保存則をどれだけ満たしているかを計算する。運動学的制限からのずれを計算し、仮に $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0\gamma$ イベントであった場合に、分解能の影響でそのずれが何%の確率で起こりうるかを計算する。本研究では、10%未満の確率であるイベントは除外した。以上が、主なイベント選択手段である。

モンテカルロシミュレーションにより IB 成分と DE 成分のイベントを生成した。生成したイベントに対して実験データに課したのと同様なイベント選択を行った。実験データ及びモンテカルロシミュレーションによる W スペクトルを図 1 に示す。

実験データの W スペクトラムを最もよく再現する IB 成分と DE 成分の混合比を求めた。最適な混同比での W スペクトラムを図 2 に示す。IB 成分の分岐比に QED による理論計算を仮定し、求めた IB 成分と DE 成分の混合比から、DE 成分の分岐比を計算した。DE 成分の分岐比は、 $BR(DE) = (3.5 \pm 0.6(stat)_{-0.8}^{+0.6}(sys)) \times 10^{-6}$ という結果を得た。BNL-E787 実験で以前行われた結果と結合することにより、 $BR(DE) = (3.9 \pm 0.5(stat)_{-0.8}^{+0.6}(sys)) \times 10^{-6}$ という結果を得た。これは式 1 の $|M| = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{-7}$ に相当する。DE 成分は「reducible amplitude」のみであるとすると理論によれば、 $|M| = 1.8 \times 10^{-7}$ であり、今回得られた結果はよく一致している。

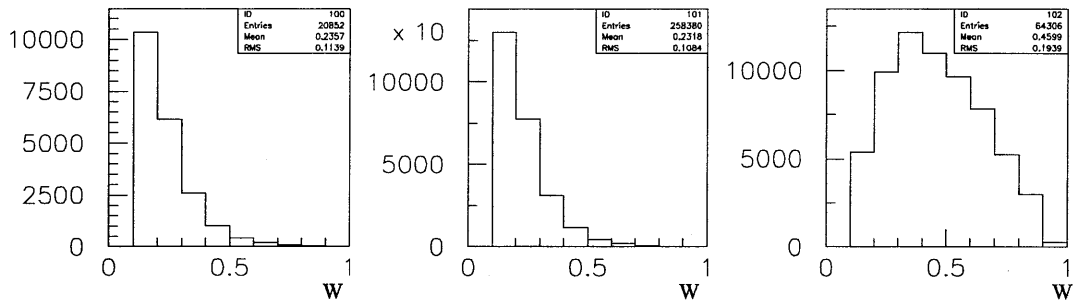


図 1: W スペクトラム。実験データ (左)、モンテカルロシミュレーションによる IB 成分 (中央)、DE 成分 (右)

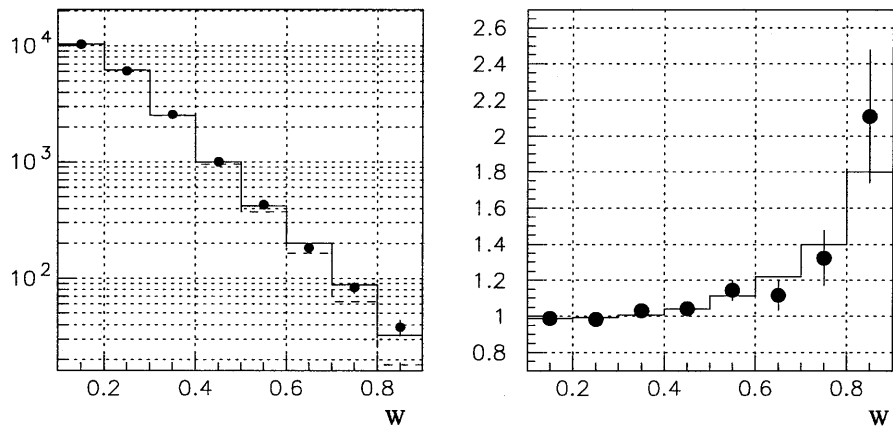


図 2: 左図は W スペクトラム。点は実験データ。実線はモンテカルロシミュレーションによる IB 成分と DE 成分で fit を行った結果。点線は、モンテカルロシミュレーションによる IB 成分のみでの fit の結果。右図は IB 成分でスペクトラムを正規化した場合。点は実験データであり、実線はモンテカルロシミュレーションによる IB 成分と DE 成分での fit の結果。