

光子-中性子結合確率母関数方程式に基づいた Feynman- α 法の理論式導出

Theoretical Derivation of Feynman- α Method based on
Photon-Neutron Coupling Probability Generating Function Equations

*遠藤 知弘¹, 山本 章夫¹

¹名古屋大学

ガンマ線検出数の炉雑音測定結果から即発中性子減衰定数 α の推定が可能かどうか考察するため、光子-中性子を結合した確率母関数方程式に基づいて Feynman- α 法の理論式を導出した。

キーワード：即発中性子減衰定数、ガンマ線、炉雑音、確率母関数、Feynman- α 法、PHITS

1. 緒言 未臨界定常状態において測定された中性子検出数の時間的揺らぎ(炉雑音)を測定し、Feynman- α 法等の炉雑音解析により、体系の未臨界度に関連した動的パラメータである即発中性子減衰定数 α を測定することができる。一方、原子炉内には中性子だけでなく、核分裂連鎖反応に起因したガンマ線も飛び交っている。ガンマ線検出数の炉雑音を分析することで即発中性子減衰定数 α を推定できる可能性はあるものの、①どのガンマ線を測定すべきなのか、②分析に用いるフィッティング式について検討の余地があると考えられる。そこで本研究では、光子-中性子を結合した確率母関数方程式に基づいて Feynman- α 法の理論式導出を試みた。

2. 理論 一点炉近似を仮定する。体系内に1個の光子あるいは1個の中性子を投入した際に、検出時間幅 T の間にガンマ線検出反応(光電効果、コンプトン散乱、電子対反応)が C 回起こる確率 $P_\gamma(C), P_n(C)$ について、それらの確率母関数 $G_\gamma(Z), G_n(Z)$ が従う随伴方程式を立てる。 $G_\gamma(Z), G_n(Z)$ の解析解を利用して、無限の過去から定常ガンマ線源および中性子源(崩壊時にガンマ線も同時に発生)が存在すると仮定することで、ガンマ線検出数の分散対平均比 $Y(T) \equiv (\text{分散}/\text{平均}) - 1$ が従う理論式を以下のように導出することができる。

$$Y(T) = Y_\infty \left(1 - \frac{1 - \exp(-\alpha T)}{\alpha T} \right) + Y_{BG}, \quad Y_\infty \equiv \frac{S_n \{ (q) (\varepsilon_{f \rightarrow 2n} \varepsilon_{sfc \rightarrow \gamma} + 2 \varepsilon_{sf \rightarrow n\gamma}) + (q-1) \varepsilon_{sfc \rightarrow \gamma} + 2(qr_n) \} \varepsilon_{sfc \rightarrow \gamma} \varepsilon_d}{S_\gamma(r_\gamma) + S_n(r_n) + S_n(q) \varepsilon_{sfc \rightarrow \gamma}}$$

$$Y_{BG} \equiv \left\{ \frac{S_n(r_n(r_n-1)) + S_\gamma(r_\gamma(r_\gamma-1)) + S_n(q) \varepsilon_{sfc \rightarrow 2\gamma}}{S_\gamma(r_\gamma) + S_n(r_n) + S_n(q) \varepsilon_{sfc \rightarrow \gamma}} + 2 \left(\frac{\lambda_{p,\gamma}}{\lambda_{c,\gamma} - \lambda_{p,\gamma}} + \frac{2\lambda_{p,\gamma} p_{p \rightarrow d} + \lambda_{s,\gamma} p_{s \rightarrow d}}{\lambda_{p,\gamma} p_{p \rightarrow d} + \lambda_{s,\gamma} p_{s \rightarrow d} + \lambda_{c,\gamma} p_{c \rightarrow d}} \right) \right\} \varepsilon_d$$

$\lambda_{x,\gamma}$: 単位時間あたりの光電効果($x = c$)、コンプトン散乱($x = s$)、電子対生成($x = p$)反応確率、

$p_{x \rightarrow d}$: 1回の光子-原子反応($x = c, s, p$)あたりの光子検出確率、 ε_d : 光子検出効率、

$\varepsilon_{sfc \rightarrow \gamma}$: 中性子核反応による光子放出効率、 $\varepsilon_{sfc \rightarrow 2\gamma}$: 中性子核反応による光子対放出効率、

$\varepsilon_{f \rightarrow 2n}$: 核分裂反応による中性子対放出効率、 $\varepsilon_{sf \rightarrow n\gamma}$: 中性子核反応による中性子-光子対放出効率、

S_i : ガンマ線源($i = \gamma$)または中性子線源($i = n$)の線源強度、 q : 中性子源1崩壊あたりの放出中性子数、

r_i : ガンマ線($i = \gamma$)または中性子($i = n$)の線源1崩壊あたりの放出光子数

3. 仮想数値実験 PHITS3.20 を用いて、ポアソン中性子源が一様に存在する UO_2F_2 水溶液から成る半径 20 cm の球体系($k_{\text{eff}} \approx 0.78$, $\frac{\beta_{\text{eff}} - \rho}{\Lambda} \approx 3060$ [1/s])を構築し、0.5–20 MeV 範囲のガンマ線によるコンプトン散乱回数の時系列データを求め、bootstrap 法を適用することで $Y(T)$ を評価した。図1で示したように、得られた $Y(T)$ は従来の関数形にバックグラウンド成分 Y_{BG} が追加された形であり、導出した理論式をフィッティングすることで $\alpha = 3046 \pm 25$ [1/s]と推定できた。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費(19K05328)の助成による。

* Tomohiro Endo¹, Akio Yamamoto¹

¹ Nagoya University

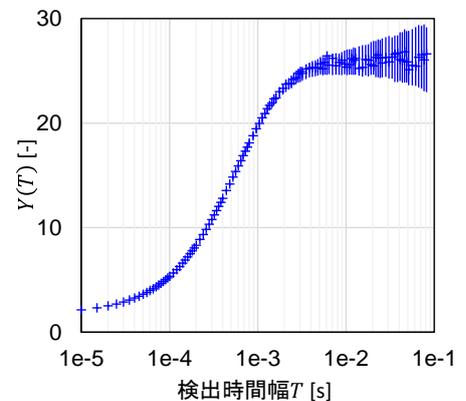


図1 コンプトン散乱回数の $Y(T)$