

$\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi$ 衰变物理分析

本文结合 BESIII 对撞实验数据处理与误差分析方法，对 $\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi$ 衰变过程开展物理分析。结合粒子衰变规律与探测器响应特性，依次开展衰变末态结构分析、分支比公式推导、误差传递计算与事例筛选方案设计，分析依据高能实验数据处理规范。

一、衰变末态层级结构分析

对撞实验中，粒子衰变的观测信号并非单纯由理论衰变模式决定，而是由母粒子原生衰变机制、中间粒子次级衰变过程与探测器探测特性共同耦合形成。为精准区分理论拓扑与实验观测的差异，可从原生衰变、次级衰变、实验可观测末态三个维度，逐层剖析该衰变的粒子组成与演化特征。

$\psi(2S)$ 粒子可发生三体强衰变，直接生成两个中性 π^0 介子与一个 J/ψ 介子，其原生衰变过程为：

$$\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi$$

该三体衰变构成事例的核心运动学拓扑，决定了末态粒子的运动学分布，是粒子重建、运动学拟合与信号提取的基础。中性 π^0 介子无法被探测器直接重建，实验中需依靠其主要次级衰变道进行间接探测。 π^0 介子主要以双光子模式衰变，衰变分支比接近 100%，对应衰变过程为 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 。

两个 π^0 介子的次级衰变过程相互独立，完整衰变演化链可表示为：

$$\psi(2S) \rightarrow (\pi_1^0 \rightarrow \gamma_1 \gamma_2) (\pi_2^0 \rightarrow \gamma_3 \gamma_4) J/\psi$$

经次级衰变演化后，双 π^0 系统最终转化为四光子末态。实验中通过拟合双光子系统的不变质量重建 π^0 候选粒子，对应的双光子不变质量公式为：

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2E_{\gamma 1} E_{\gamma 2} (1 - \cos \theta_{\gamma\gamma})$$

J/ψ 介子同样无法被探测器直接识别，其强子衰变道末态复杂、本底干扰较强，不适用于高精度测量。相比之下， J/ψ 轻子对衰变道拓扑简单、本底较低，是实验中重建 J/ψ 的常用途径。因此本分析仅采用两类末态拓扑： $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$ 对应的 $e^+ e^- + 4\gamma$ 末态与 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 对应的 $\mu^+ \mu^- + 4\gamma$ 末态。

数据分析方式分为遍举分析与半单举分析。遍举分析严格约束末态粒子种类、数目与拓扑，可有效抑制随机本底，适用于分支比精确测量；半单举分析对末态约束较弱，本底难以定量扣除，仅适用于定性研究。

二、衰变分支比计算与误差传递分析

衰变分支比用于描述粒子各衰变道的相对概率，定义为目标衰变事例数占母粒子总衰变事例数的比例。实验测量中，探测效率有限、次级衰变存在概率损耗、各类本底会污染信号样本，原始事例计数无法直接用于物理计算，需依次开展本底扣除、效率修正与次级分支修正，得到真实的分支比结果。

高能对撞实验中，粒子衰变分支比的通用计算形式为：

$$\mathcal{B}(X \rightarrow f) = \frac{N_{\text{sig}}}{\varepsilon_{\text{tot}} N_X}, N_{\text{sig}} = N_{\text{obs}} - N_{\text{bkg}}$$

式中， N_{obs} 为筛选得到的原始事例数，包含信号与本底成分； N_{bkg} 为非目标物理过程与随机组合产生的本底事例数，可通过边带拟合、拓扑甄别与蒙特卡洛模拟定量扣除； N_{sig} 为本底扣除后的纯净信号事例数； ε_{tot} 为事例整体探测与选择效率； N_X 为实验累积的母粒子总事例数，用于物理量的绝对归一化标定。

$\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi$ 衰变包含两级次级衰变过程，即双 π^0 的双光子衰变与 J/ψ 的轻子对衰变。实验仅能探测最终末态粒子，无法观测中间态过程，因此需要引入对应次级衰变分支比修正，否则测量结果将存在系统性偏差。根据独立概率相乘原则，可推导得到该衰变道完整的分支比计算式。

$$\mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi) = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{bkg}}}{\varepsilon_{\text{sel}} \cdot \mathcal{B}_{\pi^0 \rightarrow 2\gamma}^2 \cdot \mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \ell^+ \ell^-} \cdot N_{\psi(2S)}}$$

式中， ε_{sel} 为事例综合选择效率，涵盖几何接收、径迹重建、粒子鉴别、光子探测与 π^0 重建等环节，各环节相互独立，满足概率乘积关系。蒙特卡洛模拟与真实探测器响应存在偏差，需利用实验控制样本完成数据与模拟的效率修正。

$\mathcal{B}_{\pi^0 \rightarrow 2\gamma}$ 为单 π^0 介子双光子衰变的标准分支比，两个 π^0 衰变相互独立，故采用平方项修正概率损耗； $\mathcal{B}_{J/\psi \rightarrow \ell^+ \ell^-}$ 为 J/ψ 轻子对衰变分支比，用于补偿中间态衰变的观测概率损失； $N_{\psi(2S)}$ 为 $\psi(2S)$ 共振态总事例数，是分支比绝对标定的核心基准。

误差分析严格遵循独立误差平方叠加原理，结合分支比函数的误差传递关系，推导得到分支比相对不确定度的计算式：

$$\frac{\delta \mathcal{B}}{\mathcal{B}} = \sqrt{\left(\frac{\delta N_{\text{sig}}}{N_{\text{sig}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon_{\text{sel}}}{\varepsilon_{\text{sel}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta N_{\psi(2S)}}{N_{\psi(2S)}}\right)^2}$$

实验测量总误差包含统计误差、系统误差与归一化误差。统计误差来源于事例计数的泊松涨落，满足 $\delta N_{\text{sig}} = \sqrt{N_{\text{obs}} + N_{\text{bkg}}}$ ，是测量统计不确定度的主要

来源；系统误差由探测器刻度、数据模拟差异、筛选条件、拟合方式等因素引入，需逐项评估量化；归一化误差来自母粒子总事例数标定，在相对测量中可近似抵消。高精度分析中可进一步考虑误差关联，引入协方差矩阵完善误差计算。

三、事例筛选与本底抑制策略

事例筛选旨在保留有效信号事例并压制本底干扰，提升测量信噪比。本文依据物理驱动、简洁切割与信噪比最优的原则，建立“轻子信号预选—光子候选筛选—中性介子重建—运动学约束优化—本底定量扣除”的逐层筛选流程。

分析中首先筛选 J/ψ 轻子对信号，利用其清晰的拓扑特征抑制随机本底。对撞有效事例集中于对撞中心区域，设置顶点约束 $|V_z| < 10\text{cm}$ 、 $|V_r| < 1\text{cm}$ ，剔除宇宙线与束流杂质事例。结合 BESIII 探测器特性，选取中心探测区域 $|\cos \theta| < 0.8$ ，规避端盖区域探测性能不足带来的偏差。

目标衰变末态仅包含一对正负轻子，据此严格约束事例仅存在两条正负带电径迹，可彻底排除 $\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 等多径迹本底过程。在粒子鉴别环节，高动量轻子与强子的能量动量比分布无重叠，可通过 E/p 参数实现精准区分：缪子在量能器中能量沉积极低，满足 $E/p < 0.26$ ；电子能量可在量能器中完全沉积，满足 $E/p > 0.8$ 。

J/ψ 两体衰变产生的正负轻子近似背靠背出射，据此设置轻子对夹角约束 $\cos \theta_{\ell^+\ell^-} < -0.95$ ，剔除随机配对假信号。结合两类轻子道的质量谱差异设置质量窗口：缪子道选取 $3.09 \sim 3.20\text{GeV}/c^2$ ；电子道受末态辐射影响质量谱低能端展宽，将质量下限放宽至 $2.70\text{GeV}/c^2$ ，保证信号完整收录。

完成带电信号筛选后，对光子候选事例进行筛选，为 π^0 重建提供有效样本。分析仅保留无带电径迹匹配的孤立光子，剔除粒子辐射与能量泄漏造成的假光子；设置 $E_\gamma > 30\text{MeV}$ 阈值，压低低能噪声与散射本底；结合簇射形态排除非电磁簇射事例。根据目标衰变拓扑，仅保留含四个合格孤立光子的事例。

对四光子进行全排列两两组合，计算双光子不变质量，将质量处于 $0.120 \sim 0.150\text{GeV}/c^2$ 区间的光子对作为 π^0 候选。匹配双 π^0 衰变拓扑，仅保留两组相互独立、无重叠的光子对，剔除辐射光子参与的错误配对，提升重建质量。

为进一步抑制随机组合本底，分析采用六约束运动学拟合方法。结合对撞过程四动量守恒的四项约束与两个 π^0 标称质量约束，构建六维运动学约束，修正粒子四动量并压缩事例相空间。通过拟合卡方值筛选有效事例，保留 $\chi^2_{\text{cc}} <$

60 的事例用于后续分析。

针对不同类型剩余本底采用分类扣除方案：连续本底采用边带拟合方法，结合 $S - \frac{A}{2} + \frac{B}{4}$ 公式进行定量扣除；对 $\psi(2S) \rightarrow \eta J/\psi$ 等相似拓扑的共振本底，通过蒙特卡洛拓扑分析进行甄别剔除；带电道本底可通过径迹多重数切割完全去除。

分析中将 $FOM = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_{bkg}}}$ 作为优化指标，对各筛选阈值进行寻优，平衡探测效率与事例纯度。通过分步效率统计、数据-模拟修正与系统参数扫描，量化各类系统误差，完成效率校正与误差评定。

四、分析总结

本文对测量 $\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi$ 衰变分支比进行物理分析，梳理了从理论衰变拓扑到实验观测末态的物理过程。该衰变末态仅含中性介子与轻子对，拓扑结构简单，与带电 π 衰变道区分清晰，适合开展分支比测量研究。

推导的分支比公式，引入了次级衰变分支修正与探测器效率修正，弥补了中间态粒子不可观测带来的概率偏差。误差分析依据高能实验误差传递规则，区分统计误差与系统误差来源，完成不确定度计算。

本文构建的事例筛选流程层级明确，切割条件均基于信号拓扑与本底分布特征设定，可在保留有效信号的同时压制主要本底。分析流程依据 BESIII 实验数据处理规范，可用于该衰变道的分支比测量分析。