

1. 这个过程的末态是什么？

首先，我们需要明确整个衰变链的最终可探测粒子（即末态）。

初级衰变： $\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi$ 。

中间粒子衰变：两个 π^0 都会发生衰变： $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 。

因此，两个 π^0 共产生 4 个光子（ γ ）。 J/ψ 是共振态，它也会衰变。在实验中，为了重建 J/ψ ，通常会选择一个具有较高分支比且易于探测的衰变道，例如： $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ （轻子对，干净，背景低） $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ （轻子对，干净，背景低） $J/\psi \rightarrow$ 强子（如 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 等，分支比大但背景复杂）

结论：4 个光子 + 一对正负轻子（ e^+e^- 或 $\mu^+\mu^-$ ）。

2. 在粒子物理实验中，测量某特定过程 $A \rightarrow B$ 的分支比（Branching Ratio, B ），通常使用以下基本公式： $B(\psi(2S) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi) = N_{\text{signal}} / N_{\psi(2S)} \times \epsilon \times B_{\text{decay chains}}$ 其中各符号含义如下：

N_{signal} ：经过事例选择后，该过程的信号事例数（即拟合得到的净信号数）。

$N_{\psi(2S)}$ ：采集到的 $\psi(2S)$ 的总产生数（通常由积分亮度 L 和产生截面 σ 得出，即 $N = L \times \sigma$ ）。

ϵ ：探测器和触发对该完整末态的总探测效率（包括几何接受度、重建效率、选择效率等）。 $B_{\text{decay chains}}$ ：末态粒子进一步衰变的已知分支比的乘积。对于本过程： $B_{\text{decay chains}} = B(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)^2 \times B(J/\psi \rightarrow l^+l^-)$ （由于 $B(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \approx 98.8\%$ ，通常接近 1，但需计入）。在实际报告中，我们测量的是包含 J/ψ 特定衰变道的“有效分支比”，若要得到纯强子衰变的分支比，需除以 J/ψ 到该轻子对的分支比。

3. (1) 基础粒子重建 光子（ γ ）选择：在电磁量能器（ECAL）中寻找没有关联带电径迹的簇射。要求能量高于阈值（如 >50 MeV），并施加簇射形状要求以抑制噪声。带电轻子（ $e^\pm, \mu^\pm$ ）选择：通过径迹探测器找到带电粒子径迹。电子：径迹与 ECAL 簇射能量匹配（ $E/p \approx 1$ ），且有特定的电离能损（ dE/dx ）或穿越辐射特征。缪子：径迹穿透至缪子探测器，或在量能器中沉积能量很少。

(2) 中间粒子重建与约束 π^0 重建：从 4 个光子中两两组合，寻找 invariant mass（不变质量） $m_{\gamma\gamma}$ 接近 π^0 质量（135 MeV）的组合。由于有 4 个光子，有 3 种配对方式。通常选择使两个 $m_{\gamma\gamma}$ 同时最接近 m_{π^0} 的配对。可以施加质量窗口约束（如 $110 \text{ MeV} < m_{\gamma\gamma} < 150 \text{ MeV}$ ）。 J/ψ 重建：利用选定的 e^+e^- 或 $\mu^+\mu^-$ 对，计算其不变质量 $m_{l^+l^-}$ ，要求落在 J/ψ 质量（3.097 GeV）附近（如 ± 30 MeV 窗口）。

(3) 整体运动学约束 $\psi(2S)$ 质量约束：将两个重建的 π^0 和 J/ψ 的四动量相加，计算总不变质量 $M_{\text{total}} = m(\pi^0 \pi^0 J/\psi)$ 。由于 $\psi(2S)$ 是在对撞中产生的共振态（如在 e^+e^- 对撞机上直接扫描产生），总能量已知，要求 M_{total} 与 $\psi(2S)$ 质量（3.686 GeV）一致。能量动量守恒：在 e^+e^- 对撞中，可以施加四动量约束拟合（Kinematic Fit），提高分辨率并进一步压低背景。

(4) 背景抑制 排除其他已知过程 (如连续谱 $e+e\rightarrow\text{hadrons}$ 或辐射返回过程)。要求事例中除了选定的 4 个光子和 2 个轻子外, 没有额外的带电径迹或高能光子 (AI)