

思考题

分析换成测量 $\psi(2S) \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi$ 的分支比

1. 这个过程的末态是什么？

$\psi(2S) \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi$ 与常见的 $\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 类似，区别在于末态强子由带电 π 介子换成了中性 π 介子。由于 π^0 几乎全部通过 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 道衰变（分支比约 98.8%），两个 π^0 会给出 4 个光子，因此该过程本身不能被探测器识别为 $\pi^0\pi^0 J/\psi$ ，而是要通过其衰变产物来重建。

J/ψ 通常选取轻子对末态进行重建，即 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 或 $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ ，这两个道分支比较大、本底干净、探测效率高，便于事例选择与信号提取。因此实验上真正观测到的末态是：

$$\psi(2S) \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi \rightarrow (\gamma\gamma)(\gamma\gamma)(e^+e^- \text{ 或 } \mu^+\mu^-)$$

即 4 个光子加一对正负轻子（ e^+e^- 或 $\mu^+\mu^-$ ）。分析时一般会分别对 e^+e^- 和 $\mu^+\mu^-$ 两个子道单独进行事例选择、效率刻度与信号拟合，最后再合并两个道的结果以提高统计量。

2. 分支比的计算公式？

设总的 $\psi(2S)$ 事例数为 $N_{\psi(2S)}$ ，选择效率（含探测器接受度、重建效率、事例选择效率等，通常由 MC 刻度得到）为 ε ，信号区扣除本底后得到的信号事例数为 N_{sig} ，则由

$$N_{sig} = N_{\psi(2S)} \times BR(\psi(2S) \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi) \times [BR(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)]^2 \times BR(J/\psi \rightarrow l^+l^-) \times \varepsilon$$

可以反解出待测分支比：

$$BR(\psi(2S) \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi) = \frac{N_{sig}}{N_{\psi(2S)} \times [BR(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)]^2 \times BR(J/\psi \rightarrow l^+l^-) \times \varepsilon}$$

其中 $[BR(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)]^2$ 是因为末态有两个 π^0 各自独立地经 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 衰变； $BR(J/\psi \rightarrow l^+l^-)$ 是所选 J/ψ 衰变道（ e^+e^- 或 $\mu^+\mu^-$ ）的分支比，作为已知的世界平均值代入； $N_{\psi(2S)}$ 通常由 $\psi(2S)$ 总事例数刻度样本（如利用 $\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$, $J/\psi \rightarrow l^+l^-$ 等参考道，或直接由产生截面与积分亮度给出）确定。

若 e^+e^- 和 $\mu^+\mu^-$ 两个子道分别得到 $N_{sig,i}$ 和 ε_i ，也可以先分别计算再按统计权重合并，或者写成联合公式：

$$BR = \frac{\sum_i N_{sig,i}}{\sum_i \left\{ N_{\psi(2S)} \times [BR(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)]^2 \times BR(J/\psi \rightarrow l^+ l^-, i) \times \varepsilon_i \right\}}$$

信号事例数 N_{sig} 一般通过对 $\pi^0\pi^0$ 系统的不变质量谱（或经运动学拟合后的相关分布）进行信号加本底的联合拟合、扣除本底后得到，而不是直接用选出的事例总数，以避免组合本底、辐射本底等的污染。

3. 事例选择？

事例选择大致按以下几步进行：

（1）带电径迹要求：要求事例中有且只有两条来自主顶点附近、满足角度接受度（如 $|\cos\theta| < 0.93$ ）的带电径迹，电荷相反，作为轻子对候选；利用能量-动量比 E/p 、飞行时间 dE/dx 、 μ 子探测器信息等粒子鉴别手段，将其识别为 e^+e^- 对或 $\mu^+\mu^-$ 对，分别归入相应子道。

（2）光子选择：要求中性簇团不与任何带电径迹关联，能量与角度满足桶部/端盖区域的阈值要求（如桶部 $|\cos\theta| < 0.8$ 、能量大于 25 MeV，端盖 $0.86 < |\cos\theta| < 0.92$ 、能量大于 50 MeV），并施加合理的时间窗口（如 $0 \leq t \leq 700$ ns）以压低电子学噪声和随机符合本底；要求事例中至少有 4 个满足上述条件的好光子。

（3） π^0 重建：对所有光子两两组合，计算不变质量 $m(\gamma\gamma)$ ，先用质量窗口（如 115~150 MeV/ c^2 附近）挑出候选 π^0 对；若一个事例中光子数多于 4 个、可组合出不止一对 π^0 候选，则通过运动学拟合的 χ^2 最小化（如约束两组 $\gamma\gamma$ 不变质量同时逼近 π^0 标称质量）来选取最优的配对组合：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^2 \frac{[m(\gamma\gamma)_i - m_{\pi^0}]^2}{\sigma_i^2}$$

（4）运动学拟合：对入选的 $\pi^0\pi^0 l^+ l^-$ 末态施加四动量守恒的运动学拟合（4C 拟合，用 $\psi(2S)$ 初态的总能量-动量作为约束），要求拟合的 χ^2 小于给定阈值（如 $\chi^2_{4C} < 60$ ），以改善分辨率、抑制不满足运动学约束的本底事例，并利用拟合后的动量重新计算相关不变质量分布。

（5）信号区与本底排除：在 J/ψ 质量窗口（ $l^+ l^-$ 不变质量落在 J/ψ 标称质量附近，如 3.05~3.15 GeV/ c^2 ）内选取事例；同时需要针对可能的本底道进行专门排除，例如 $\psi(2S) \rightarrow \gamma\chi_{cJ}$ 、 $\psi(2S) \rightarrow \gamma\gamma J/\psi$ 、含虚假光子的组合本底、以及 $\psi(2S) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ 等末态被误判为中性道的情形，通常通过在 $\pi^0\pi^0$ 不变质量谱上做边带扣除，或者对可能的本底道做专门的 MC 研究来估计并扣除其贡献。