$\psi(2S) \to \gamma\eta'$及$\gamma\eta$ 辐射衰变过程的研究*

BES 合作组

摘要 利用在北京正负对撞机上北京谱仪采集的$3.79 \times 10^6 \psi(2S)$事例研究了$\psi(2S)$ 辐射衰变为矢量-赝标量末态的过程。首次测得$\psi(2S) \to \gamma\eta'$衰变分支比为$(1.59 \pm 0.32 \pm 0.21) \times 10^{-4}$ 并定出$\psi(2S) \to \gamma\eta$的新的分支比上限为0.9×10^{-4}(90%置信度)。发现$\psi(2S) \to \gamma\eta'$相对于J/ψ相应衰变分支比的比值明显压制，违反了微扰QCD理论预期的"15%规则"。与广义受阻M1跃迁模型估算值相比，$\psi(2S) \to \gamma\eta'$ 衰变分支比测量值高出一个数量级以上。

关键词 $\psi(2S)$ 辐射衰变 分支比 压制

1 引言

粲夸克偶素(以下简称粲偶素)，作为正反粲夸克组成的束缚态，是研究强相互作用最简单的系统之一，但是人们对其衰变性质的认识至今仍旧是很不充分的。按照最低阶的微扰量子色动力学理论(PQCD)[1]，J/ψ或$\psi(2S)$衰变到三个胶子(ggg)以及轻子对的分宽度均正比于零点波函数的平方值。假定胶子的强子化过程在$\psi(2S)$能量处与在J/ψ能量处相同，则$\psi(2S)$相对于J/ψ强子衰变率之比应满足

$$\frac{B(\psi(2S) \to h)}{B(J/\psi \to h)} = \frac{B(\psi(2S) \to ggg)}{B(J/\psi \to ggg)} = \frac{B(\psi(2S) \to e^+e^-)}{B(J/\psi \to e^+e^-)} = (14.6 \pm 2.2)\% \quad (1)$$

*国家自然科学基金资助；中国科学院重大基础研究项目

称为"15%规则"；式中h为非粲强子末态，$\psi(2S)$与J/ψ的e^+e^- 衰变分支比采用了1996 年粒子数据表[2]给出的数值[1]。MARK II 合作组首先测量并比较了$\psi(2S)$与J/ψ的若干强子衰变率[3]，发现在大部分衰变末态满足以上规则的情况下存在两个例外，即$\psi(2S)$衰变中矢量-赝标量介子(VP) 末态$\rho\pi$和$K^\star\bar{K}+c.c.$相对于J/ψ的对应衰变道明显压制。这个反常现象文献上通常称为$\rho\pi$疑难。最近BES合作组观察到$\psi(2S)$衰变到矢量-张量介子(VT)末态ωf_2，ρa_2和$K^{\star 0}\bar{K}_2^{\star 0}+c.c.$ 相对于J/ψ 的对应衰变道也表现出类似的反常压制行为[4][5]，这一发现为粲偶素的理论与实验研究提出了新的课题。

根据最低阶PQCD理论[1]，J/ψ或$\psi(2S)$ 衰变到光子和两胶子(γgg)的分宽度也应正比于零点波函数的平方值，因此$\psi(2S)$ 相对于J/ψ的辐射衰变率之比应当和强衰变的情况一样满足15%关系。在观察到$\psi(2S)$强衰变中反常表现的情况下，进一步开展有关$\psi(2S)$辐射衰变的研究，首先考察VP和VT末态的情况(光子看作矢量粒子)，无疑是有意义的。

最近CLEO实验报导了在B介子衰变$B\to\eta' X_s$(X_s为包含一个奇异夸克的强子系统)中η'单举产生分支比异常大的观察结果[6]。在目前提出的解释方案中，除了基于新物理的考虑外，也有较为常规的解释方案，例如：η' 介子通过QCD轴矢反常与胶子强耦合导致η'固有粲成分的出现，η'与η_c之间的混合遂使$B\to\eta' X_s$得以经过通常树图水平的$b\to c$ 衰变进行[7]。这种$\eta'-\eta_c(2S)$混合先已被建议作为OZI禁戒的粲偶素辐射衰变如$\psi(2S)\to\gamma\eta$及$\gamma\eta'$过程的主要机制，由此预言$\psi(2S)\to\gamma\eta'$的衰变分支之比为$(1.9\pm 0.8)\times 10^{-4}$[8]。与此相反，用来解释$\rho\pi$疑难的广义受阻M1跃迁模型[9]，基于单粒子基态与径向激发态之间不发生混合的假设，则给出了小一个数量级的衰变分支比预期值。从实验上测量这个衰变分支比的确切数值将有助于对$\psi(2S)$衰变的各种可能机制作出判别。

量子数为$J^{PC}=1^{--}$的任意粲偶素$\psi(nS)$的$\gamma\eta'$及$\gamma\eta$衰变率之比R，在扣除相空间因子后，写作

$$R=\frac{B(\psi(nS)\to\gamma\eta')}{B(\psi(nS)\to\gamma\eta)}(\frac{p_\eta}{p_{\eta'}})^3, \tag{2}$$

预期应相当于赝标量八重态及单态介子$\eta-\eta'$混合角θ_p[10]，更普遍地应与同时计及$\eta-\eta'$混合和SU(3)破裂效应的胶子矩阵元相关[11]，而与径向量子数n无关(式中$p_\eta(p_{\eta'})$表示$\psi(nS)$ 静止系中$\eta(\eta')$的动量)。利用J/ψ分支比测量数据[2]定得$\eta-\eta'$的混合角为$|\theta_p|=22^\circ\pm 1^\circ\pm 4^\circ$(第一项误差为实验误差，第二项为理论误差)。这个结果与通过其它过程测定的数值[12]是一致的。$\psi(2S)\to\gamma\eta'$及$\gamma\eta$衰变分支比测量结果提供了对式(2)的关系进行一致性

[1]我们原先[4]采用了1992年粒子数据表的数值，得到比值为$(14\pm 2)\%$，曾称作"14%规则"。

检验的途径。

与J/ψ情况形成鲜明对照的是，$\psi(2S)$辐射衰变为非粲介子的实验数据至今还很缺乏；收入粒子数据表的仅有少数衰变道的分支比上限测量结果，其中VP道$\psi(2S) \to \gamma\eta'$ 分支比上限的数据是早于70年代间测得的，而$\psi(2S) \to \gamma\eta$则未曾见有正式数据发表。本文报导北京谱仪关于$\psi(2S)$辐射衰变的观测结果：首次确定了$\psi(2S) \to \gamma\eta'$ 衰变道的分支比，还给出了$\psi(2S) \to \gamma\eta$衰变道新的分支比上限，并就这些结果的物理含义进行了讨论。

2 事例选择与分析

分析基于北京谱仪[13]1993年至1995年期间在北京正负电子对撞机上获取的$\psi(2S)$数据样本, 合计$(3.79\pm0.01\pm0.31)\times10^6$ $\psi(2S)$事例数。$\psi(2S) \to \gamma\eta'$ 测量是通过$\psi(2S) \to \gamma\eta'$，$\eta' \to \gamma\rho^0$，$\rho^0 \to \pi^+\pi^-$和$\psi(2S) \to \gamma\eta'$，$\eta' \to \pi^+\pi^-\eta$, $\eta \to \gamma\gamma$两个衰变链进行的, 分别对应于$\pi^+\pi^-\gamma\gamma$和$\pi^+\pi^-\gamma\gamma\gamma$末态; $\psi(2S) \to \gamma\eta$测量是通过$\psi(2S) \to \gamma\eta$, $\eta \to \pi^+\pi^-\pi^0$,$\pi^0 \to \gamma\gamma$衰变链进行的, 对应于$\pi^+\pi^-\gamma\gamma\gamma$末态。

在分析中挑选包含一对总电荷为零的好带电径迹以及至少2个或3个中性径迹的事例。要求带电径迹很好地拟合于原点在对撞点附近的螺旋线，其横动量大于$80MeV/c$。要求作为光子候选者的中性径迹在桶部簇射计数器中至少在两层内有三次击中并具有大于$60MeV$的沉积能量。同时要求带电径迹及候选光子的径迹在实验室系中的极角θ限为$|cos\theta| < 0.8$。还利用桶部簇射计数器中高能簇射的能量信息以及μ计数器中的击中信息分别证认并去除电子和μ子事例。

以下分别进一步叙述$\psi(2S) \to \gamma\eta'$及$\psi(2S) \to \gamma\eta$的分析情况。

2.1 $\psi(2S) \to \gamma\eta'$

在采用$\eta' \to \gamma\rho$模式进行分析时，要求一对电性相反的径迹，其张角小于130°，以及至少2个候选光子, 它们离开最近的带电径迹10°以上。对于所包含的两带电径迹的总能量小于$2.1GeV$ 的事例，按照$\psi(2S) \to \pi^+\pi^-\gamma\gamma$的假设作四动量约束的运动学拟合，并要求拟合的$\chi^2$值小于15。选取$M_{\pi^+\pi^-}$在$\rho$的质量上下$0.15GeV$范围以内以及两光子之间张角大于$110^\circ$的事例作$\pi^+\pi^-\gamma$不变质量谱，如图1所示。在相当于$\eta'(958)$ 质量处见到窄峰。图中曲线系采用固定质量

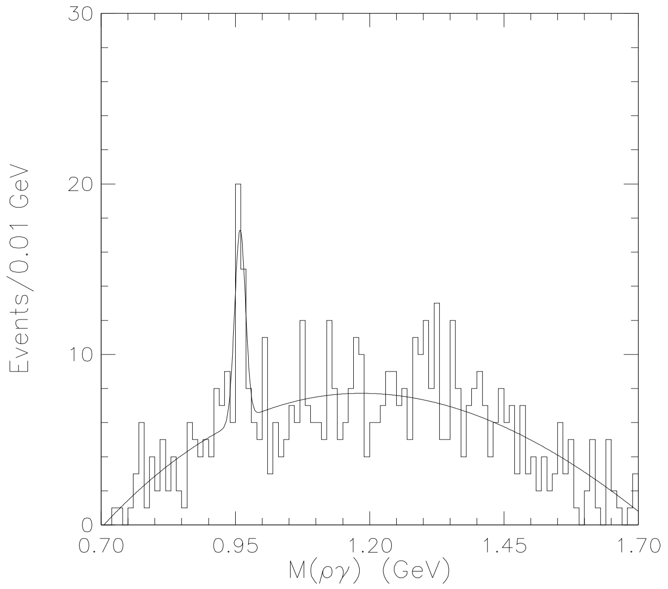

Figure 1: $\psi(2S) \to \pi^+\pi^-\gamma\gamma$末态中的$\pi^+\pi^-\gamma$不变质量谱. 图中曲线为本底+$\eta'$拟合结果.

为$M = 0.958GeV$的高斯分布加上三次多项式本底函数拟合的结果。峰的宽度与由$Monte\ \ Carlo$模拟给出$\eta\prime$的质量分辨相当，显示了$\eta\prime$的窄共振态($\Gamma \sim 0.2MeV$)性质。峰上事例数为28.1 ± 7.2个。考虑到级联衰变$\psi(2S) \to$中性粒子$+J/\psi$，$J/\psi \to \gamma\eta\prime$或$\pi^0\rho^0$可能在$\eta\prime$质量处造成假峰，采用$Monte\ \ Carlo$模拟估计了由此产生的本底计数为$1.4 \pm 0.5$个。

为了确定探测效率，按照$\psi(2S) \to \gamma\eta\prime$ 衰变呈$1 + cos^2\theta$角分布以及$\eta\prime \to \gamma\rho$衰变与螺旋度守恒$\rho \to \pi^+\pi^-$衰变呈均匀相空间分布产生事例，对其在探测器中的表现进行$Monte\ \ Carlo$模拟。由此得出效率$\epsilon_{\gamma\rho} = 0.17 \pm 0.02$，此处误差包括$Monte\ \ Carlo$事例样本的统计性和模拟程序的不确定性。于是，根据$\eta\prime$峰上净事例数，$\psi(2S)$事例总数及探测效率计算得到$\psi(2S) \to \gamma\eta\prime$ 衰变分支比为

$$B(\psi(2S) \to \gamma\eta\prime) = (1.36 \pm 0.37 \pm 0.20) \times 10^{-4} \qquad (3)$$

计算时采用了粒子数据表[2]给出的$\eta\prime \to \gamma\rho^0$衰变分支比值。式中误差依次为统计误差及系统误差，后者主要来自$\psi(2S)$事例数，探测效率以及$\eta' \to \gamma\rho^0$衰变分支比的不确定性。

在采用$\eta\prime \to \pi^+\pi^-\eta$模式进行分析时，要求一对具有相反电荷的带电径迹，其张角小于$70°$，以及至少3个候选光子，它们离开最近的带电径迹大于$5°$。对于所包含的两带电径迹的总能量小于$1.2GeV$的事例，按照$\psi(2S) \to \pi^+\pi^-\gamma\gamma\gamma$的假设作四动量约束的运动学拟合，并要求$\chi^2 < 12$。将$M_{\gamma\gamma}$在$M_{\eta\prime} \pm 0.03GeV$范围内的光子对证认为候选$\eta$介子。选取$M_{\pi^+\pi^-} < 0.42GeV$的事例作$\pi^+\pi^-\eta$不变质量分布，如图2所示。在相应于$\eta\prime(958)$ 质量处，

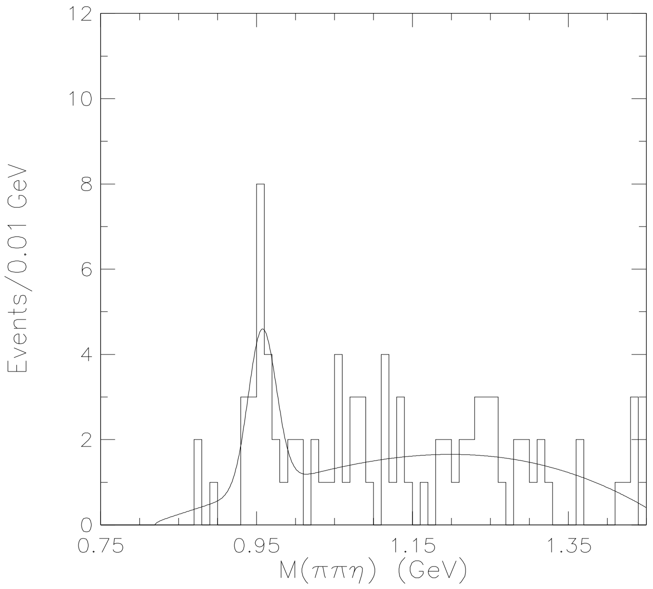

Figure 2: $\psi(2S) \to \pi^+\pi^-\gamma\gamma\gamma$末态中的$\pi^+\pi^-\eta$不变质量谱. 图中曲线为本底+$\eta'$拟合结果.

用质量固定为$M = 0.958GeV$的高斯分布加上多项式本底函数拟合得到一个小峰，相应事例数为16.8 ± 4.9个(拟合时限定$M = 2M_\pi + M_\eta$阈值以下事例数为0)。另从$\psi(2S) \to J/\psi$的级联衰变采用$Monte\ \ Carlo$模拟估算本底事例为0.35 ± 0.03个。$Monte\ \ Carlo$模拟还确定探测效率为$\epsilon_{\pi^+\pi^-\eta} = 0.13 \pm 0.02$，采用粒子数据表[2]给出的$\eta\prime \to \pi^+\pi^-\eta$, $\eta \to \gamma\gamma$级联衰变乘积分支比值，得到$\psi(2S) \to \gamma\eta\prime$ 衰变分支比为

$$B(\psi(2S) \to \gamma\eta\prime) = (2.00 \pm 0.59 \pm 0.29) \times 10^{-4} \tag{4}$$

比较(3)式与(4)式可以见到，两种$\eta\prime$衰变模式测得的$\psi(2S) \to \gamma\eta\prime$ 衰变分支比值在误差范围内是一致的。合并两个结果给出

$$B(\psi(2S) \to \gamma\eta\prime) = (1.54 \pm 0.31 \pm 0.20) \times 10^{-4} \tag{5}$$

式中误差依次为统计误差及系统误差。

2.2 $\psi(2S) \to \gamma\eta$

分析采用了$\eta \to \pi^+\pi^-\pi^0$衰变模式，因而与上述$\eta\prime \to \pi^+\pi^-\eta$，$\eta \to \gamma\gamma$具有相同末态$\psi(2S) \to \pi^+\pi^-\gamma\gamma\gamma$。为此，要求一对电性相反的径迹，其总能量小于$1.7GeV$，以及至少3个候选光子，它们与最近的带电径迹之间的夹角大于$5°$。所选事例按照$\psi(2S) \to \pi^+\pi^-\gamma\gamma\gamma$的假设作四动量约束的运动学拟

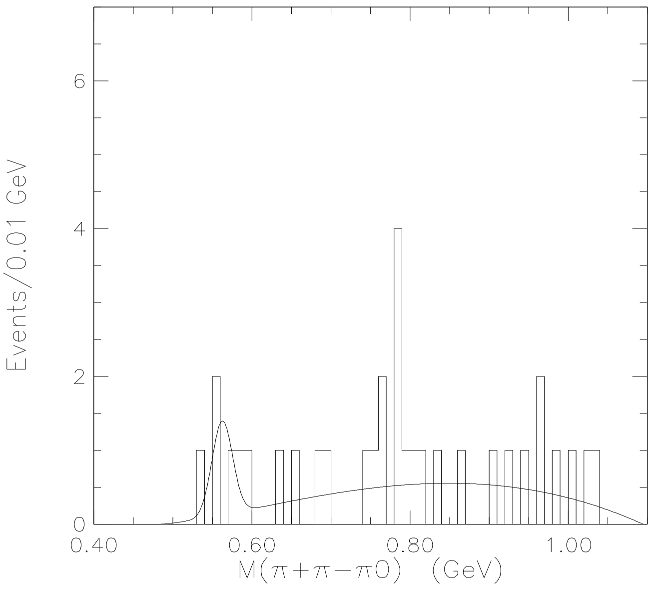

Figure 3: $\psi(2S) \to \pi^+\pi^-\gamma\gamma\gamma$末态中的$\pi^+\pi^-\pi^0$不变质量谱. 图中曲线为本底+$\eta$拟合结果.

合，并要求$\chi^2 < 12$。将$M_{\gamma\gamma}$满足$M_{\pi^0} \pm 0.025GeV$的光子对证认为候选π^0光子。选取$M_{\pi^+\pi^-} < 0.42GeV$的事例作$\pi^+\pi^-\pi^0$不变质量分布，得到图3. 从图可以看到在相应于$\eta(547)$及$\omega(780)$的质量处有显著性不大的增强。用$M = 0.547GeV$的高斯分布加上多项式本底函数(计及$M = 2M_{\pi^\pm} + M_{\pi^0}$处阈并排除$\omega^0$质量区)拟合得到相应于$\eta$的事例数为$4.1 \pm 2.4$个。$Monte\ Carlo$模拟确定探测效率为$0.09 \pm 0.01$。如上所得的$\psi(2S) \to \gamma\eta$信号具有大约$2\sigma$的显著性。在90%置信水平上，4.1个事例相应为小于7.2个事例，因而给出$\psi(2S) \to \gamma\eta$衰变分支比上限为

$$B(\psi(2S) \to \gamma\eta) < 0.9 \times 10^{-4},\ (90\%\ \ C.L.) \tag{6}$$

如果将这4.1个事例看成η介子的真实信号，计及$\eta \to \pi^+\pi^-\pi^0$的衰变分支比[2]，则得到$\psi(2S) \to \gamma\eta$衰变分支比为

$$B(\psi(2S) \to \gamma\eta) = (0.53 \pm 0.31 \pm 0.08) \times 10^{-4} \tag{7}$$

式中误差依次为统计误差及系统误差。

3 结果讨论

表 1列出了本文测量得到的$\psi(2S) \to \gamma\eta'$及$\gamma\eta$ 衰变分支比结果。表中同时列举粒子数据表[2]给出的J/ψ对应衰变分支比数据以及$\psi(2S)$与J/ψ相应衰变分

Table 1: $\psi(2S) \to \gamma\eta'$及$\gamma\eta$衰变分支比测量结果与J/ψ相应数据的比较

衰变道	$B(\psi(2S))$, $\times 10^{-4}$	$B(J/\psi)$, $\times 10^{-3}$	$B(\psi(2S))/B(J/\psi)$, %
$\gamma\eta'$	$1.54 \pm 0.31 \pm 0.20$	4.31 ± 0.30	3.6 ± 0.9
$\gamma\eta$	< 0.9 (90%CL)	0.86 ± 0.08	< 10

支比的比值。

由表可见，本工作确定地观察到了$\psi(2S)$辐射衰变道$\gamma\eta'$，首次给出了分支比值；另一个辐射衰变道$\gamma\eta$则露出显著性不大的迹象，本文按照保守的处理给出了90%置信度下的分支比上限值。$\psi(2S) \to \gamma\eta'$分支比值与粒子数据表[2]长期采用的分支比上限1.1×10^{-3}(90%CL)相比，降低了将近一个数量级。注意到$\psi(2S)$辐射衰变中的VP模式$\gamma\eta'$与$\psi(2S)$强衰变中的VP模式如$\rho\pi$和$K^*\overline{K} + c.c.$等同样表现出了压制行为，但压制程度明显不同。

$\psi(2S) \to \gamma\eta'$衰变分支比的测量结果还对已有两种理论计算方案作出检验。如本文引言中提到的，解释$\rho\pi$疑难的广义受阻$M1$跃迁模型基于单粒子基态与径向激发态之间不发生混合的假设，将$\psi(2S) \to \gamma\eta'$过程与受阻M1跃迁$\psi(2S) \to \gamma\eta_c$联系起来，预言$B(\psi(2S) \to \gamma\eta')/B(J/\psi \to \gamma\eta') = 0.002$，此值小于本文测量结果达一个数量级以上。与此相对照，文献[8]的计算考虑了$\eta' - \eta_c(2S)$ 混合的重要贡献，得到与本文测量数值有着较好一致的结果(参看引言部分)。

至于$\psi(2S) \to \gamma\eta$，本工作对其衰变分支比的测量灵敏度看来尚未达到足以判别这个衰变道的表现是否反常的程度，有必要采集更大数据样本继续开展研究。但是，$J/\psi \to \gamma\eta$相对于$J/\psi \to \gamma\eta'$ 衰变的压制表现[14]看来在$\psi(2S)$的情况下是同样存在的。利用本文给出的$\psi(2S) \to \gamma\eta'$以及$\gamma\eta$的分支比数据估算混合角$\mid \theta_p \mid = 28^\circ{}^{+7^\circ}_{-10^\circ}$，在误差范围内与$J/\psi$相应分支比数据测量混合角所得的结果是一致的。

感谢北京正负电子对撞机以及高能物理研究所计算中心工作人员的支持与帮助。感谢赵光达教授的讨论和何泽慧先生对工作的关心。

References

[1] Appelquist T., Politzer H.D. Phys. Rev. Lett., 1975, 34:43;
Appelquist T., et al. Phys. Rev. Lett., 1975, 34:363;
Chanowitz M. Phys. Rev., 1975, D12:918;

Brodsky S.J. et al. Phys. Lett., 1978, 73B:203;
Koller K., Walsh T. Nucl. Phys., 1978, B140:449.

[2] Particle Data Group. Phys. Rev., 1996, D54:1.

[3] Franklin M.E.B. et al. Phys. Rev. Lett., 1983, 51:11.

[4] Bai J. Z. et al. (BES Collaboration). High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1995, 19(1):93.
(白景之等(BES合作组), 高能物理与核物理, 1995, 19(1):93)

[5] Bai J. Z. et al. (BES Collaboration). High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1997, 21(1):89.
(白景之等(BES合作组), 高能物理与核物理, 1997, 21(1):89)

[6] Kim P. (CLEO Collaboration). Talk at FCNC 97, Feb. 1997, Santa Monica, Colifornia.

[7] Yuan F., Chao K-T. Phys. Rev., 1997, D56:2495;
Halpern I., Zhitnitsky A. Phys. Rev. 1997, D56:7247; Phys. Rev. Lett., 1998, 80:438;
Shuryak E., Zhitnitsky A. Phys. Rev., 1997, D57:2001.

[8] Chao K-T. Nucl. Phys. 1989, B317:597; Nucl. Phys. 1990, B335:101.

[9] Pinsky S.S. Phys. Lett., 1990, B236:479.

[10] Cahn R.N., Chanowitz M.S. Phys. Lett., 1975, B59:277;
Walsh T.F. Lett. Nuovo Cimento, 1975, 14:290;
Fritzsch H., Jachson J.D. Phys. Lett., 1997, B66:365.

[11] Chao K-T. Phys. Rev. 1989, D39:1353.

[12] Gilman F.J., Kauffman R., Phys. Rev., 1987, D36:2761.

[13] Bai J. Z. et al. (BES Collaboration). Nucl. Instr. Meth., 1994, A344:319.

[14] Bloom E.D., Peck C.W. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1983, 33:143.

Radiative decays of the $\psi(2S)$ into $\gamma\eta'$ and $\gamma\eta$

BES Collaboration

Abstract Radiative decays of the $\psi(2S)$ into $\gamma\eta'$ and $\gamma\eta$ have been studied with a data sample of 3.79×10^6 $\psi(2S)$ events produced by the BES experiment at the BEPC e^+e^- storage ring. The branching fraction for $\psi(2S) \to \gamma\eta'$ is for the first time measured to be $(1.59 \pm 0.32 \pm 0.21) \times 10^{-4}$; a new upper limit on $\psi(2S) \to \gamma\eta$ is set to be 0.9×10^{-4} (90% $C.L.$). The $\psi(2S) \to \gamma\eta'$ result is found to be more than an order of magnitude above the prediction of Pinsky model which relates the process to the hindered $M1$ decays. The ratio of $\psi(2S)$ to J/ψ branching fractions for $\gamma\eta'$ is significantly lower than the $PQCD$ expection.

Key words $\psi(2S)$, radiative decay, branching fraction, suppression