

The $X(3872)$ and charmonia spectroscopy

T. J. Burns

INFN, Roma

Elba, 2010

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	$4^3S_1?$
$X(3872)$	$2^{-+?}$		$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$		$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	$4^3S_1?$
$X(3872)$	$2^{-+?}$		$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$		$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

A few years ago

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	$4^3S_1?$
$X(3872)$	$2^{-+?}$		$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$		$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

1. $B \rightarrow K + c\bar{c}$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	$4^3S_1?$
$X(3872)$	$2^{-+?}$		$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$		$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

2. $e^+e^- \rightarrow J/\psi + c\bar{c}$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	$4^3S_1?$
$X(3872)$	$2^{-+?}$		$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$		$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

3. $(e^+e^-)_{ISR} \rightarrow c\bar{c}$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	$4^3S_1?$
$X(3872)$	$2^{-+?}$		$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$		$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

4. $\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	$4^3S_1?$
$X(3872)$	$2^{-+?}$		$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$		$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

So what's so difficult about all of these states?

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	$4^3S_1?$
$X(3872)$	$2^{-+?}$		$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$		$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

The $X(3872)$ has all of these problems

Production and decays

- ▶ $B \rightarrow KX(3872)$ Belle, BaBar
- ▶ $p\bar{p} \rightarrow X(3872) + \text{all}$ CDF, D0
- ▶ $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$
- ▶ $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-\pi^0$
- ▶ $X(3875) \rightarrow D^{0*}\bar{D}^0 + c.c.$
- ▶ $X(3872) \rightarrow J/\psi\gamma$
- ▶ $X(3872) \rightarrow \psi(2S)\gamma$
- ▶ Charge conjugation = +1
- ▶ $J^{PC} = 1^{++}$ or 2^{-+}

Isospin violation and mass

Isospin violation

$$\frac{\Gamma(X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-\pi^0)}{\Gamma(X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-)} = 1.0 \pm 0.4 \pm 0.3$$

Mass

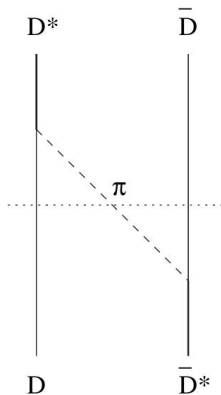
$$\text{Mass of the } X(3872) = 3872.3 \pm 0.8 \text{ MeV}$$

$$\text{Mass of } D^{0*}\bar{D}^0 = 3871.81 \pm 0.36 \text{ MeV}$$

A molecular state?

A weakly bound molecular state in S-wave (1^{++})

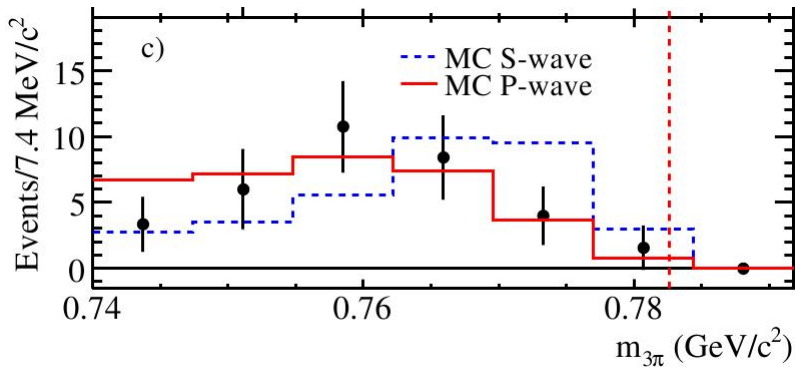
$$|X(3872)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|D^0 \bar{D}^{0*}\rangle - |D^{0*} \bar{D}^0\rangle \right)$$



Isospin violation

$$|c\bar{c}u\bar{u}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|c\bar{c} \frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}\rangle + |c\bar{c} \frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}\rangle \right)$$

A new BaBar analysis of $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-\pi^0$



Suggests that $X(3872)$ is a 2^{-+} state!

Implications of the new analysis

Molecular interpretation

- ▶ 2^{-+} state of $D^{0*}\overline{D^0} + c.c.$ requires a P-wave
- ▶ partner states with 0^{-+} and the manifestly J^{PC} -exotic 1^{-+} state
- ▶ a more deeply bound S-wave 1^{++} molecule
- ▶ ...or S-wave 2^{-+} bound state would require D_2D or D_1D^*

Tetraquark interpretation is also in big trouble

Could it be none other than a 1^1D_2 charmonium?

$X(3872)$ as 1^1D_2 : isospin violation

Isospin violation by rescattering

$$X(3872) \rightarrow D^{0*}\bar{D}^0 + c.c. \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(J/\psi\rho + J/\psi\omega)$$

Above threshold:

- ▶ strong decay with \approx zero momentum
- ▶ Quasi elastic scattering:

$$J/\psi\rho = 3872.41\text{MeV}$$

$$J/\psi\omega = 3879.57\text{MeV}.$$

... with strong wavefunction overlap.

Below threshold

- ▶ coupling to virtual pairs with strong enhancement due to propagator

In any case there is some hint of “open-flavour” effect.

$X(3872)$ as 1^1D_2 : mass

Potential models predict a 1^1D_2 some $50 \div 100\text{MeV}$ lighter, but:

- ▶ this is not universal; Fulcher 1991 predicted $M(1^1D_2) = 3872\text{MeV}$!
- ▶ one expects models to fail due to coupling to loops
- ▶ many otherwise standard charmonia above $D\bar{D}$ threshold also disagree with models

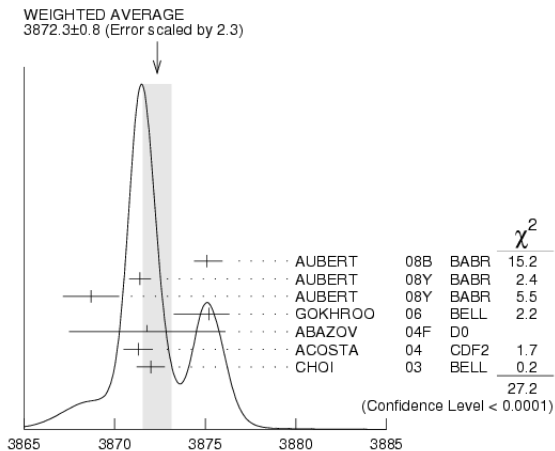
The splitting between the $X(3872)$ and the 1^3D_1 state $\psi(3770)$ is larger than expected, but:

- ▶ loop effects *increase* the $1^1D_2 - 1^3D_1$ splittings
- ▶ the $|\psi(3770)\rangle = |1^3D_1\rangle \oplus |2^3S_1\rangle$
- ▶ the $|\psi(2S)\rangle = |2^3S_1\rangle \oplus |1^3D_1\rangle$, which helps explain the large $X(3872) \rightarrow \psi(2S)\gamma$

A 1^3D_2 partner

- ▶ A 1^1D_2 state (2^{-+}) has a 1^3D_2 partner (2^{--})
- ▶ Models predict mass within a few MeV.
- ▶ Could it be the $X(3875)$?

A 1^3D_2 partner: the X(3875)?



A 1^3D_2 partner: the $X(3875)$?

- ▶ The lighter $X(3872) \rightarrow J/\psi\rho, J/\psi\omega, J/\psi\gamma$ thus $C = +1$
- ▶ The heavier $X(3875) \rightarrow D^0\bar{D}^0\pi$ thus $C = +1$ or $C = -1$
- ▶ Expect dominance of $D^0\bar{D}^0\pi$ modes.
- ▶ Expect very small $J/\psi\eta$, experimentally $< 0.6 \times \Gamma(J/\psi\pi^+\pi^-)$.
- ▶ Predict $\Gamma(X(3875) \rightarrow \eta_c\gamma) \approx \Gamma(X(3872) \rightarrow J/\psi\gamma)$.
- ▶ Predict (Eichten/Lane/Quigg, Barnes/Godfrey):

$$\Gamma(1^3D_2 \rightarrow \chi_{c2}\gamma) = 50 - 90keV$$

$$\Gamma(1^3D_2 \rightarrow \chi_{c1}\gamma) = 200 - 350keV$$

and experimentally there is an upper limit on $\chi_{c1}\gamma$.

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

These states fit nicely with potential models...

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

So do these, but only if we take account of loops due to nearby thresholds.

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

The first state above threshold; an admixture, which implies...

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+}?$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

a connection between these two states.

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

$$\gamma\gamma \rightarrow \chi'_{c2} \rightarrow D\bar{D}$$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

$B \rightarrow KY(3940),$

$Y(3940) \rightarrow J/\psi\omega$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

$\gamma\gamma \rightarrow X(3915) \rightarrow J/\psi\omega$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

$Y(3940) \rightarrow J/\psi\omega$ $D^*\bar{D}^*$ molecule?

$Y(4140) \rightarrow J/\psi\phi$ $D_s^*\bar{D}_s^*$ molecule?

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

$Y(3940) \rightarrow D^*\bar{D} \rightarrow J/\psi\omega$

$Y(4140) \rightarrow D_s^*\bar{D}_s \rightarrow J/\psi\phi$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

$e^+e^- \rightarrow J/\psi X(3940),$

$X(3940) \rightarrow D\bar{D}^* \text{ (not } D\bar{D}\text{)}$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	Y(3940)	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	Y(4008)	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	Y(4140)	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	X(4160)	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	Y(4260)	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	Y(4350)	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
X(3872)	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	Y(4630)	1^{--}	
X(3875)	$?^{??}$	$1^3D_2?$	Y(4660)	1^{--}	
X(3915)	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
X(3940)	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

Other states produced in the same experiment

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+}?$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

Mass is lighter than expected, especially compared to $\psi(4040)$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	3^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	3^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	3^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	3^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	3^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$3^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

$$e^+e^-_{ISR} \rightarrow Y \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$$

$$e^+e^-_{ISR} \rightarrow Y \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^-$$

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

The long-sought hybrid meson?

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

or a pair of deeply bound molecules?

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

$Y(4630) \rightarrow \Lambda_c^+ \Lambda_c^-$ a tetraquark?

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

$B \rightarrow KZ,$

$Z \rightarrow c\bar{c} + \pi^\pm$

States with CHARGE!

The spectrum

η_c	0^{-+}	1^1S_0	$Y(3940)$	$?^{?+}$	$2^3P_1?$
J/ψ	1^{--}	1^3S_1	$Y(4008)$	1^{--}	
χ_0	0^{++}	1^3P_0	$\psi(4040)$	1^{--}	$3^3S_1?$
χ_1	1^{++}	1^3P_1	$Y(4140)$	$?^{?+}$	
h_c	1^{+-}	1^1P_1	$X(4160)$	$0^{?+}$	
χ_2	2^{++}	1^3P_2	$\psi(4160)$	1^{--}	$2^3D_1?$
$\eta_c(2S)$	0^{-+}	2^1S_0	$Y(4260)$	1^{--}	
$\psi(2S)$	1^{--}	2^3S_1	$Y(4350)$	1^{--}	
$\psi(3770)$	1^{--}	1^3D_1	$\psi(4415)$	1^{--}	4^3S_1
$X(3872)$	$2^{-+?}$	$1^1D_2?$	$Y(4630)$	1^{--}	
$X(3875)$	$?^{??}$	$1^3D_2?$	$Y(4660)$	1^{--}	
$X(3915)$	$?^{++}$		$Z_1^\pm(4050)$	$?^{??}$	
$\chi'_{c2}(3930)$	2^{++}	$2^3P_2?$	$Z_2^\pm(4250)$	$?^{??}$	
$X(3940)$	$0^{?+}$	$3^1S_0?$	$Z^\pm(4430)$	$?^{??}$	

All of these states have been seen on one experiment only.

Conclusions and TO-DOs

Experiment

- ▶ confirm all of these states
- ▶ limits on charmed-meson pairs
- ▶ data for all modes, including radiative

Theory

- ▶ the case of the $X(3872)$ might be a golden opportunity.
- ▶ the $X(3872)$, and several otherwise ordinary states above threshold, do not agree with potential model predictions.
- ▶ this should be no surprise, but can we explain the masses?
- ▶ what mechanism is driving the large closed-flavour modes?