

北京谱仪 BESIII 精确测量 $Y(4260)$ 粒子*

刘智青[†]

(美因茨约翰尼斯·古滕堡大学 德国美因茨 55128)

2017-02-15 收到

[†] email: liuz@uni-mainz.de

DOI: 10.7693/wl20170404

Precise measurement of the $Y(4260)$ particle at the Beijing spectrometer BESIII

LIU Zhi-Qing[†]

(Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz 55128, Germany)

摘要 利用北京谱仪 BESIII 实验采集的约 9 fb^{-1} 数据样本, BESIII 测量了 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 过程的产生截面, 并对在该过程中观测到的 $Y(4260)$ 粒子的质量和宽度做了目前世界上最精确的测量。BESIII 的测量给出 $Y(4260)$ 粒子的质量在 $4.22 \text{ GeV}/c^2$ 左右, 比之前的测量偏低; 宽度约 44 MeV , 比之前的测量窄很多。相比之前的实验, BESIII 对 $Y(4260)$ 粒子参数的精确测量给解释该粒子的理论模型提供了更强的约束。另外, BESIII 实验在 $4.32 \text{ GeV}/c^2$ 附近还观测到一个新粒子信号, 信号显著性为 7.6σ 。新粒子的质量和宽度和之前观测到的 $Y(4360)$ 粒子的质量和宽度在误差范围内吻合, 有可能是同一个粒子。

关键词 BESIII 实验, 夸克, 强子, 奇特态粒子, $Y(4260)$, 质量, 宽度

Abstract Using 9 fb^{-1} data collected with the BESIII spectrometer at the Beijing Electron Positron Collider II storage ring, the production cross section of the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ process was measured. We observed the $Y(4260)$ resonance and measured its parameters with the best precision to date in the world. Our measurement shows that the mass of $Y(4260)$ is around $4.22 \text{ GeV}/c^2$ and its width is about 44 MeV , which are lower and much narrower, respectively, than previous measurements. BESIII's precise measurement sets a tighter constraint on the interpretation of the $Y(4260)$ internal structure models compared with previous experiments. In addition, BESIII also observed a new resonance near $4.32 \text{ GeV}/c^2$, with a statistical significance of 7.6σ . The mass and width of this resonance agree with the $Y(4360)$ state within experimental error.

Keywords BESIII experiment, quark, hadron, exotic particles, $Y(4260)$, mass, width

2005 年, 位于美国斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 的 BABAR 国际合作组实验宣布发现一个新的粒子—— $Y(4260)$ ^[1]。该粒子的发现引起了物理学家的极大兴趣。粒子物理学家们认为, $Y(4260)$ 粒子很可能是一个新型的奇特态强子。美国《发现》期刊将其评为 2005 年世界前 100 的重大科学故事。为什么 $Y(4260)$ 粒子格外引起人们

的关注? 究竟什么又是奇特态强子? 这一切都要从粒子物理学讲起。

粒子物理学是一门专门研究自然界物质基本结构的科学。人们知道, 自然界的物质都是由更基本的、看不见摸不着的微观原子、分子(尺寸为埃米量级, 即 10^{-10} m) 构成。1897 年, 英国科学家汤姆逊第一次从实验上观测到了电子的存在, 敲开了人类研究微观世界的大门。1911 年, 英国

* 欧盟第七构架项目资助的玛丽·居里学者(批准号: 627240)

科学家卢瑟福的 α 粒子散射实验，第一次证实了原子的核式结构模型，即微观原子都是由位于中心的原子核(尺寸为费米量级，即 10^{-15} m)和核外电子构成。这其中，原子核的质量占据了整个原子质量的99%以上，而电子的质量却非常微小。那么原子核和电子就是自然界的最基本粒子吗？它们还有没有进一步的内部结构呢？粒子物理学的研究表明，电子是基本粒子之一，目前人们还没有发现电子存在任何结构的迹象；但是原子核却是有内部结构的，它由带电的质子和不带电荷的中子构成。而质子和中子也不是基本粒子，它们还有内部结构——是由夸克构成的。

夸克是自然界的最基本的粒子之一，目前还没有发现夸克存在进一步内部结构的任何证据。夸克总共分成6种，分别是上夸克(u)，下夸克(d)，粲夸克(c)，奇夸克(s)，顶夸克(t)和底夸克(b)——通常称为味道。另外，每味夸克还带3种不同的颜色(红、绿、蓝)。夸克与夸克之间通过一种相互作用很强、短程的力——强相互作用力束缚起来，就可以构成质子和中子，进而构成原子和丰富多彩的物质世界。除了质子和中子之外，夸克当然还可以构成其他的粒子，例如 π 介子、K介子等。所有由夸克通过强作用力束缚起来形成的粒子都叫做强子。那么夸克组成强子的时候，有没有规律可循呢？20世纪60年代，美国物理学家盖尔曼和茨威格在对强子进行分类的时候，找到了灵感，提出了著名的夸克模型^[2]。夸克模型指出，自然界的强子都是由3个夸克组成

(称为重子)或者由正反夸克对组成(称为介子)的色单态粒子。由于夸克模型可以很好地归类当时实验上观测到的几乎所有的强子，因而被人们广为接受。

有没有一种强子，其结构超出夸克模型的预言呢？几十年来，粒子物理学家们一直在寻找该问题的答案。从理论上讲，夸克模型仅仅是一个模型，它没有包含强相互作用的动力学。强子正是夸克通过强相互作用束缚起来的体系。描述强相互作用最有效的理论是量子色动力学(QCD)。在QCD的理论框架下，夸克形成强子时不受夸克模型的限制，既可以有重子和介子，也可以存在其他形式的强子，如多个夸克构成的多夸克态、夸克和传播强相互作用的媒介粒子——胶子形成的夸克胶子混杂态、甚至纯粹由胶子构成的胶子球等。除了重子和介子以外，其他的新型强子我们称之为奇特态强子。自夸克模型提出以来，实验物理学家们一直致力于寻找奇特态强子的实验证据。直到近年来，在粲夸克偶素质量区才发现了它们存在的迹象。

粲夸克偶素是由一对正反粲夸克对构成的介子，其质量约为 $3\text{--}4\text{ GeV}/c^2$ 。由于构成粲偶素的正反粲夸克本身质量较重(约 $1.2\text{--}1.5\text{ GeV}/c^2$)，因此粲夸克在粲偶素内部的运动能量较低，运动速度较慢，在某种程度上可以类比于经典运动学系统。受此启发，美国物理学家E.Eichten等提出了著名的势模型^[3]，即构成粲偶素的正反粲夸克对用相互作用势 $V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + br$ 来描述。有了相互作用势，通过求解薛定谔方程即可得到所有的粲偶素能级和其对应的波函数。实验上，自1974年发现第一个粲偶素粒子 J/ψ 以来^[4]，粲偶素的研究取得了很大进展。众多粲偶素被一一发现，并且其性质和势模型的预言符合得相当不错。图1显示了目前实验上得到的典型粲偶素能谱图^[5]。得益于正负电子对撞机实验的发展，矢量态(自旋宇称量子数 $J^{PC}=1^{-}$)粲偶素的研究最为成熟，总共发现了6个，分别是 J/ψ ， $\psi(2S)$ ， $\psi(3770)$ ， $\psi(4040)$ ， $\psi(4160)$ 和 $\psi(4415)$ 。

2005年，美国斯坦福的BABAR实验采用了

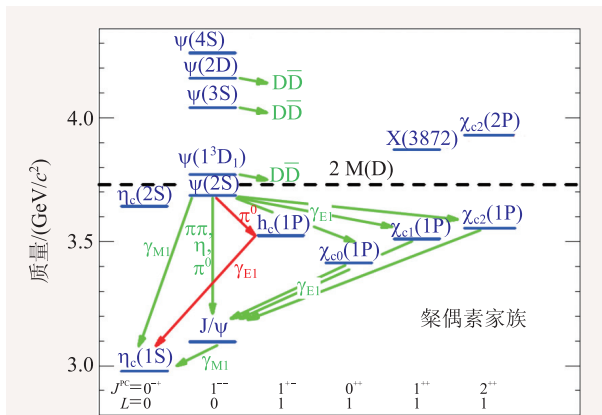


图1 实验上得到的粲偶素能谱图

初态辐射的方法, 在 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 的反应过程中, 观测到了新共振态粒子 $Y(4260)^{[1]}$, 并测得其质量约为 $4.26 \text{ GeV}/c^2$, 宽度约为 $50\text{—}90 \text{ MeV}$ 。该发现随后立即被日本 KEK 的 Belle 实验和美国康奈尔大学的 CLEO 实验采用相同的方法所证实^[6]。由于 $Y(4260)$ 粒子是在初态辐射这一独特的过程中观测到的, 因此实验上我们可以确定其自旋宇称量子数为 $J^{PC}=1^-$, 即矢量态粒子。 $Y(4260)$ 粒子质量位于粲偶素质量区, 因此它内部应该含有正反粲夸克对。然而对比矢量态的粲偶素能谱, 却很难将 $Y(4260)$ 粒子纳入粲偶素的范围。首先, $Y(4260)$ 粒子的质量和势模型的预言不一致, 在粲偶素能谱图上找不到其合适的位置; 其次, $Y(4260)$ 粒子的性质和位于该质量附近的粲偶素性质差别极大, 它倾向于衰变成粲偶素末态(例如 J/ψ), 而不是 D 介子(及其激发态)末态。反观该质量区附近的粲偶素, 如 $\psi(4040)$, $\psi(4160)$ 和 $\psi(4415)$, 皆倾向于衰变成 D 介子(及其激发态)末态, 并且和势模型的预期一致。

鉴于将 $Y(4260)$ 归为粲偶素的种种困难, 粒子物理学家们提出, $Y(4260)$ 粒子内部除了含有正反粲夸克对以外, 还含有其他成分, 即 $Y(4260)$ 是一个奇特态的强子。新发现的 $Y(4260)$ 粒子是奇特态粒子的这一想法, 立刻引起了人们的极大关注。粒子物理学家们纷纷对 $Y(4260)$ 的内部结构进行了解释, 提出了以下若干典型观点。

(1) 夸克胶子混杂态——正反粲夸克对和胶子一起形成的束缚体系。流管模型曾预言, 最轻的含正反粲夸克对的夸克胶子混杂态粒子质量位于 $4.2 \text{ GeV}/c^2$ 附近^[8], 这和 $Y(4260)$ 粒子的质量非常接近。最近, 格点 QCD 理论对夸克胶子混杂态做过计算^[9], 得出矢量态混杂态粒子的质量为 $4285 \pm 14 \text{ MeV}/c^2$, 也和 $Y(4260)$ 粒子的质量在误差范围内吻合。

(2) 四夸克态——四个夸克通过强相互作用紧密束缚起来的强子态。为了便于计算四夸克态粒子质量, 四夸克态模型将两个夸克捆绑在一起, 形成双夸克(diquark)。正反双夸克即可形成四夸克态系统。该模型计算出了一系列可能的四夸克

态粒子的质量^[10], 其中有若干候选者和 $Y(4260)$ 粒子的质量吻合。四夸克态预言, $Y(4260)$ 粒子应该主要衰变到 $D\bar{D}$ 末态。

(3) 强子分子态——由两个普通强子通过残余的核力形成的松散束缚体系。 $Y(4260)$ 粒子的质量恰好位于一系列强子对的质量阈值附近, 比如 $f_0(980)J/\psi$ 、 $D_s^+D_s^{*-}$ 、 $\bar{D}D_1$ 和 $D_0\bar{D}^*$, 它有可能是这些强子对形成的强子分子态。最近北京谱仪(BESIII)实验在 $Y(4260)$ 粒子的疑似衰变中发现了带电奇特态粒子 $Z_c(3900)^{[11]}$, 被认为是支持 $Y(4260)$ 为 $\bar{D}D_1$ 分子态的证据^[12]。

(4) 强粲偶素——由一个粲偶素作内核, 被轻强子物质包围形成的束缚体系。由于目前 $Y(4260)$ 粒子只在 $\pi^+\pi^- J/\psi$ 衰变中观测到了, 美国明尼苏达大学的 M.B. Voloshin 教授提出了强粲偶素的观点。强粲偶素的一个典型特征就是, 它倾向于衰变到其带有的粲偶素内核末态。因此, 该观点能够自然地解释为什么没有观测到 $Y(4260)$ 粒子的其他衰变模式。

目前对 $Y(4260)$ 粒子解释的各种观点难分伯仲, 很大一方面原因源于实验对 $Y(4260)$ 粒子的质量、宽度和衰变模式的测量精度不高, 因此很难对上述各种解释提供强有力的甄别判据。运行于北京正负电子对撞机(BEPC II)上的北京谱仪 BESIII 实验, 其设计目标为 τ -粲工厂, 即通过正负电子对撞来产生大量的 τ 轻子和粲夸克。自 2013 年首次在正负电子质心系能量 4 GeV 以上运行以来, BESIII 实验已经在 $Y(4260)$ 粒子的质量峰附近 19 个能量点采集了积分亮度约 8.2 fb^{-1} 的数据样本(简称 XYZ 数据)。另外, BESIII 还在正负电子质心系能量 $3.8\text{—}4.6 \text{ GeV}$ 之间约 103 个不同的能量点做了低亮度扫描, 共采集了积分亮度约 0.8 fb^{-1} 的数据样本(简称扫描数据)。BESIII 的高亮度数据样本给精确测量 $Y(4260)$ 粒子的参数提供了机遇。

2016 年, 利用 BESIII 实验总共采集的约 9 fb^{-1} 的数据样本, 我们系统地分析了 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 过程, 并测量了其随着正负电子质心系能量变化的产生截面^[13]。相较于 BABAR 实验的初态辐射方

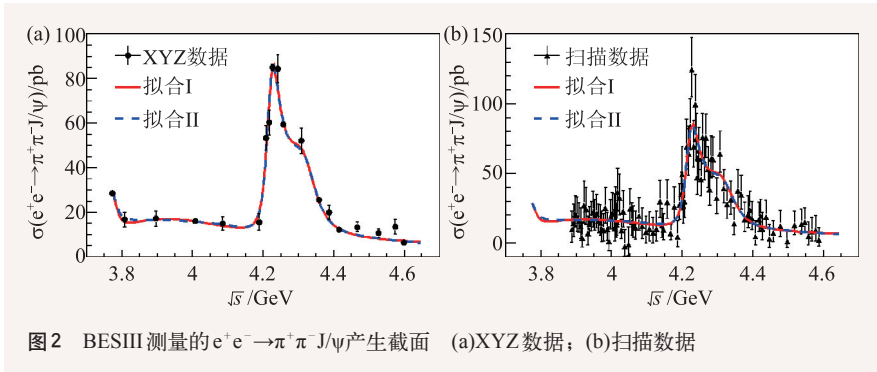


图2 BESIII测量的 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 产生截面 (a)XYZ数据; (b)扫描数据

法, BESIII实验是基于正负电子直接碰撞的扫描实验。正负电子直接碰撞有三个明显的优势: 信号探测效率高(BESIII比BABAR, Belle提高了约5倍); 背景和噪声简单易于控制; 扫描能量点的分辨高(约0.8 MeV), 能够对Y(4260)提供更精细的测量。图2显示了BESIII实验测量得到的随正负电子质心系能量(\sqrt{s})变化的 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 产生截面。可以明显地看到在4.2 GeV处有一个很大的一个共振峰——Y(4260)粒子。另外, 在4.3 GeV处还可以看到有一个小的肩膀存在, 这在以前的实验中(BABAR, Belle, CLEO)没有观察到。

为了有效地提取Y(4260)粒子的质量、宽度等参数, 需要对随正负电子质心系能量变化的 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 截面(图2)做拟合。目前描述该截面的理论参数化模型主要包括早期BABAR实验采用的单个Breit—Wigner函数或者是Breit—Wigner函数和指数衰减函数的非相干叠加和Belle实验采用的双Breit—Wigner函数相干叠加。BESIII一开始也尝试了采用这些理论参数化模型拟合数据, 但发现它们都不能描述数据, 而且BESIII的数据在 5.4σ 置信度水平下(即它们为真的概率小于 6.6×10^{-8})可以排除掉这些理论参数化模型。

基于在BESIII数据4.3 GeV附近观测到的小肩膀可能是一个新共振态粒子这一事实, BESIII实验创新性地发展了两种可能的理论参数化模型, 分别是三个Breit—Wigner函数的相干叠加和两个Breit—Wigner函数加上指数衰减函数的相干叠加。BESIII采用的这两种理论模型都能够很好地描述数据, 图2中的红色实线和蓝色虚线分别代表了它们的最后拟合结果, 可以看到它们的差别

非常微小。通过拟合实验数据, BESIII测量出Y(4260)粒子的质量为 $4222.0 \pm 3.1 \pm 1.4 \text{ MeV}/c^2$, 宽度为 $44.1 \pm 4.3 \pm 2.0 \text{ MeV}$, 是目前世界上对Y(4260)粒子的最高精度测量。另外我们注意到, BESIII测量的质量中心值在4.22 GeV附近, 比之前实验的测量值(4.26 GeV)略小;

宽度中心值在44 MeV左右, 比之前实验的测量(120 MeV)小很多。

除了Y(4260)粒子, BESIII还观测到一个新的共振态粒子信号, 测得其质量为 $4320.0 \pm 10.4 \pm 7.0 \text{ MeV}/c^2$, 宽度为 $101.4^{+25.3}_{-19.7} \pm 10.2 \text{ MeV}$, 统计显著性大于 7.6σ (即来自背景涨落形成假信号的概率小于 1.6×10^{-14})。该信号系第一次在 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 过程中观测到, 其质量和宽度和先前在 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \psi(2S)$ 过程中发现的另一个Y(4360)粒子^[14]在误差范围内可以吻合。如果该信号就是Y(4360)粒子信号, 那么我们第一次在实验上观测到了Y(4360)粒子的新衰变模式。另外, 新信号的出现也在某种程度上解释了为什么BESIII的Y(4260)粒子测量宽度比之前小很多, 原因就是之前的实验测量精度都不高, 导致将这一新粒子信号混入到了Y(4260)粒子当中。

BESIII精确测量Y(4260)粒子的参数, 对解析该奇特态粒子的内部结构提供了新的启示。首先, BESIII测量得到的Y(4260)粒子质量位于4.22 GeV附近, 和最近BESIII实验在 $e^+e^- \rightarrow \omega\chi_{c0}$ 过程和 $\pi^+\pi^- h_c$ 过程中看到的共振结构在误差范围内一致^[15], 这强烈暗示我们Y(4260)粒子存在至少3个不同的衰变模式(分别是 $\pi^+\pi^- J/\psi$, $\omega\chi_{c0}$, $\pi^+\pi^- h_c$)。这显然和把Y(4260)解释成强粲偶素的观点矛盾, 因为强粲偶素模型预期Y(4260)主要衰变到其内核粲偶素 J/ψ 末态。即便认为在内核中有两个以上的粲偶素, 强粲偶素模型的解释似乎也很牵强。其次, BESIII的测量将Y(4260)粒子的质量精确地定位在4.22 GeV附近, 这比之前格点QCD理论的计算值低, 并且差别超过 4.3σ 之多。

这暗示我们, $Y(4260)$ 粒子可能不是混杂态粒子, 至少不是目前格点 QCD 理论计算得到的混杂态粒子。再者, BESIII 实验目前观测到了 $Y(4260)$ 粒子的多种可能衰变模式, 但是依然没有观测到四夸克态模型预言的 $D\bar{D}$ 介子末态衰变, 因而 $Y(4260)$ 粒子是四夸克态的解释还有待进一步的检验。最后, BESIII 测量 $Y(4260)$ 粒子的质量比之前的测量低了将近 40 MeV。如果将 $Y(4260)$ 粒子解释成强子分子态, 这意味着之前模型中考虑的强子对之间的束缚能量需要很大的修正。强子分子态模型需要进一步更新模型参数, 以更好地预言强子分子态的性质, 从而检验 $Y(4260)$ 粒子的本质。

尽管目前对 $Y(4260)$ 粒子的内部结构依然没有确切统一的解释, 然而我们相信在不久的将来, 人们对奇特态强子的理解有望进一步深入。目前, BESIII 实验继续运行在 τ - 粲能区以采集更多的数据样本。最近, BESIII 国际合作组提出了所谓的高亮度扫描取数计划。该计划打算在 3.8—4.6 GeV 之间, 以每隔 10 MeV 的能量间隔采集约 500 pb^{-1} 积分亮度的数据样本, 并于 2017 年上半年完成计划的一部分。预计该计划将来全部得以实现, 则 BESIII 实验对矢量态及其他奇特态强子的测量精度将进一步大幅提高。BESIII 最终将解开 $Y(4260)$ 粒子的内部结构之谜。

参考文献

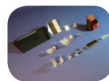
- [1] BABAR Collaboration, Aubert B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95:142001
- [2] Gell-Mann M. Physics Letters, 1964, 8:214
- [3] Eichten E *et al.* Phys. Rev. D, 1980, 21: 203; Rev. Mod. Phys., 2008, 80: 1161; Eichten E, Quigg C. Phys. Rev. D, 1995, 52: 1726
- [4] Aubert J J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1404; Augustin J E *et al.* Phys. Rev. Lett., 1974, 33: 1406
- [5] Particle Data Group, Olive K A *et al.* Chin. Phys. C, 2014, 38: 090001
- [6] CLEO Collaboration, He Q *et al.* Phys. Rev. D, 2006, 74: 091104; Belle Collaboration, Yuan C Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 99: 182004
- [7] Mo X H *et al.* Phys. Lett. B, 2006, 640: 182
- [8] Barnes T, Close F E, Swanson E S. Phys. Rev. D, 1995, 52: 5242
- [9] Hadron Spectrum Collaboration, Liu L *et al.* J. High Energy Phys., 2012, 07: 126
- [10] Maiani L *et al.* Phys. Rev. D, 2005, 72: 031502; Ebert D, Faustov R N, Galkin V O. Eur. Phys. J. C, 2008, 58: 399
- [11] BESIII Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252001; Belle Collaboration, Liu Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252002; 刘智青, 沈成平, 苑长征. 物理, 2013, 42: 720
- [12] Wang Q, Hanhart C, Zhao Q. Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 132003
- [13] BESIII Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 092001
- [14] BABAR Collaboration, Aubert B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 212001; Belle Collaboration, Wang X L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 99: 142002
- [15] BESIII Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 114: 092003; Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 092002

标准光学元件库存--- 供您随时选用

总量多达10万片,
超过700个品种规格的透镜,
棱镜, 反射镜, 窗口,
滤光片等常用光学器件;
涵盖紫外, 可见,
近红外,
红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



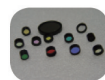
可见光学元件



红外元件



颜色滤光片



窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co., Ltd

地址: 北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段
电话: 010-88096218/88096099 传真: 010-88096216
邮箱: optics@goldway.com.cn

第十四届全国超导学术研讨会

由国家超导技术联合研究开发中心发起和主办的全国超导学术研讨会, 是我国超导界规模最大的系列学术会议, 其目的旨在交流我国超导物理研究和技术开发领域的最新成果, 促进我国超导事业的进一步发展。

2017年8月20日至23日会议于天津大学北洋校区举行。

会议网站: <http://ncsc2017.tju.edu.cn>。

会议邮箱: sc2017@tju.edu.cn。

欢迎相关研究人员参会! 欢迎相关材料, 设备, 仪器供应商参展!