

推荐 2016 年国家自然科学奖公示

项目名称：Bc 介子物理（理论）

推荐单位：中国科学院理论物理研究所

主要完成人：张肇西（中国科学院理论物理研究所）、陈裕启（中国科学院理论物理研究所）、吴兴刚（重庆大学）、王国利（哈尔滨工业大学）、王建雄（中国科学院高能物理研究所）

单位推荐意见：

该项目系统研究了粒子物理标准模型中非常重要的 Bc 介子，解决了 Bc 介子的产生问题，指出了‘单举产生 Bc 介子’是产生 Bc 介子的最有利方式和其中的非微扰效应可‘因子化’到 Bc 介子波函数的原点值，从而利用量子色动力学理论可信地计算出这一产生方式的截面。理论上正确地计算出了具有普适性的从重夸克到双重味介子的‘碎裂函数’，展示了这类‘碎裂函数’的可计算性和正确计算方法。该项目系统计算了 Bc 介子主要衰变道的分支比，总结出 Bc 介子寿命相对长和难产生等特点，提出了着重在高能强子对撞机中，通过观测末态含 J/Psi 介子衰变道和利用顶点探测器发现 Bc 介子的建议。1998 年国际上的 CDF 组正是通过测量 Bc 介子衰变到 J/Psi 介子过程首次观测到 Bc 介子，并被后来国际上的 LHCb 和 CMS 等实验组所证实。迄今各实验组已积累许多 Bc 介子数据，但数据都与该项目预言在误差范围内一致。该项目还完成了高效、实用的蒙特卡罗程序 (BCVEGPY) 撰写，已广为国际上的实验组采用。该项目已把相关经验推广到双重味重子的研究。

总之，该项目的突破和创新，推动了理论的发展外，并对实验发现和观测 Bc 介子上起了重要作用，是取得了具有重要科学价值的基础研究成果。我们推荐该项目为国家自然科学奖二等奖。

项目简介：

Bc 介子是粒子物理标准模型中唯一可能的由两种不同‘重味道’夸克生成的双重味介子。它可用来同时研究两种重味道，其组分之间主要是交换胶子，而不能湮灭到胶子、光子。它在标准模型中占据独特地位。在本项目之前，它一直没有被实验发现。为此，本项目做出多项理论创新和突破，推动了相关理论研究，并对实验发现和观测 Bc 介子做出了明确的预言，在 Bc 介子的发现和后续实验研究中起到了重要作用。20 篇主要论文的 SCI 总引用数 939 次，他引用数 595 次；8 篇代表性论文他引用 354 次。早期成果曾由张肇西等代表项目获得了 1996 年中国科学院自然科学一等奖和 1999 年中国物理学会吴有训物理奖等。

本项目率先解决了 Bc 介子产生问题。指出了‘单举产生 Bc 介子’是产生这一介子的最有利机制，并将其中的非微扰效应‘因子化’为介子波函数原点值，从而应用量子色动力学的微扰论可信地计算出了这一方式产生 Bc 介子（包括其激发态和反粒子）的截面；同时，理论上正确地计算出了极其重要的从重夸克到双重味介子的‘碎裂函数’，完成了双重味介子‘碎裂函数’可计算性的证明。这一突破在国际上一时兴起了计算各种双重味强子碎裂函数的热潮。本项目还总结出了‘在大型正负电子对撞机（LEP）上只有在 Z-玻色子共振峰处“还有些机会观测到 Bc 介子”；要能产生足够多供实验观测的 Bc 介子，只能在世界上的 TEVATRON 和 LHC 高能强子对撞机处’的明确结论；为实验分析数据的需要和实验与理论的定量比较，对产生 Bc 介子的理论计算的不确定性进行了定量研究；撰写的理论强产生 Bc 介子的蒙特卡罗计算机程序(BCVEGPY 及升级版),有创新，模拟效率高、实用，已被在 TEVATRON 和 LHC 上研究 Bc 介子的实验组广为采用。本项目利用在 Bc 介子研究中取得的经验，已推广到有关联，实验尚未发现的双重味重子 Ξ_{cc} , Ξ_{bc} 和 Ξ_{bb} 的研究上等。

本项目正确估算了 Bc 介子的寿命，系统地计算了其衰变道的分支比，总结出 Bc 介子寿命相对长，其中末态含 J/ψ 介子等的衰变道的分支比大等，建议实验通过观测末态含 J/ψ 介子等的衰变道，利用顶点探测器发现 Bc 介子。对于产物中含 J/ψ 介子之类的双重味介子衰变道，Bc 和 J/ψ 的内部组分的运动虽是非相对论性的，而二者的质量差大，衰变产物 J/ψ 等可获得相对论性大反冲，我们特意发展了‘洛伦兹协变的瞬时近似’的贝特-萨皮特方程等一套方法，成功地使所计算的跃迁矩阵元‘固有’地计入了大反冲效应，收到了良好效果。

在包括产生、寿命和衰变的完整预言下，1998 年 CDF 实验组在 TEVATRON 上首次观测到 Bc 介子，并被 LHC 上的 LHCb、CMS 等组证实。如今实验已经积累了不少 Bc 介子数据，都与本项目理论预言（实验误差和理论不确定性内）一致。

客观评价：

本项目对 Bc 介子的产生、衰变和寿命进行了系统研究。8 篇代表性论文，SCI 总引数 517 次，他引数 354 次；20 篇主要论文的 SCI 总引数 939 次，他引数 595 次。前期成果以张肇西等为代表，曾获 1996 年中国科学院自然科学一等奖和 1999 年中国物理学会吴有训物理奖。

● 研究的领先性和突破性得到国际承认：

本项目早在 1991-1992 年在国际上首次演示了正确的双重味介子碎裂函数的计算方法，表明了各种双重味强子碎裂函数的理论可计算性，国际上一时兴起了计算各种双重味强子碎裂函数的热潮。从热潮论文的引用中，不难看到

本项目论文比其他作者的类似论文发表的时间都早。认识到‘单举产生方式’是产生 Bc 介子的最有利机制，本项目率先正确应用 pQCD 因子化定理计算出了 Bc 介子及其激发态在正、负电子对撞机以及强子对撞机上的总截面和微分截面，这一产生机制在后续工作中得以深化。这提出最有利的产生机制的论文被国际多个理论组多次引用。本项目基于它对 Bc 介子及其激发态的产生做出了明确的预言，而且初步得到实验的支持。开展了 Bc 介子衰变的研究，估算出 Bc 介子的寿命为 0.4ps，目前的实验平均值为 0.452 ± 0.033 ps，预言在误差范围内与实验一致。本项目提出的解决 Bc 介子衰变产物具有‘相对论性’大反冲效应的方案被多个理论组作为重要解决相应问题的方案之一多次被引用，被认真与其它方案进行比较，系统计算了一百多个 Bc 介子衰变道的衰变分宽度（分支比），实验开始检验它们了。由于我们创新和突破，被夸克偶素工作组（QWG）邀请参加国际合作，执笔撰写 Bc 介子物理总结性文章的有关章节。其中执笔撰写的综述文章《Heavy quarkonium physics》-QWG, arXiv:0412158, 发表在 2004 年欧洲核子中心黄皮书 2005-05, 已被引 731 次；综述文章《Heavy quarkonium: progress, puzzles, and opportunities》发表在 Eur. Phys. J. C71(2011)1534, 已被引 885 次。

- **在实验发现 Bc 介子, 弥补标准模型之前未观测到 Bc 介子的缺憾上起的作用:**

1998 年美国的 Tevatron 强子对撞机上的 CDF 国际合作组发现了 Bc 介子，在发表的实验论文中作为理论基础引用了本项目的 3 篇论文。

- **成果在国际高能物理 Bc 介子的实验研究上所起的被肯定的作用:**

上世纪九十年代 LEP 上的三个实验组：OPAL、DELPHI 和 ALEPH，都尝试在 Z-玻色子共振峰上寻找 Bc 介子。只因实验的积分亮度不够，没能做出发现 Bc 介子的结论，但他们都将我们的关于 Bc 介子产生及衰变的工作作为理论基础，完成相关的数据分析。CDF 组在发现 Bc 介子的后续研究中多次引用本项目理论成果，并于 06 年后开始采用 BCVEGPY 程序生成的数据作为基础完成相关数值模拟分析，并在他们的论文中特别致谢。欧洲核子中心大型强子对撞机上的 CMS 国际合作组将本项目 Bc 介子理论成果作为基础文献加以引用，认真检验了 BCVEGPY 程序完成数值模拟。通过测试和详细对比国际上多个产生子程序，CMS 组指出“BCVEGPY 程序与 PYTHIA 程序结果是一致的”（表明 BCVEGPY 程序的正确性），“为节约 CPU 运行时间，决定采用 BCVEGPY 程序来模拟产生 Bc 介子”（表明 BCVEGPY 程序的高效率性）的结论，促进了 BCVEGPY 程序被广泛采用。欧洲核子中心大型强子对撞机上的 LHCb 探测器是当今国际上最好的实验研究 Bc 介子的平台，LHCb 国际合作组已完成了多

项 Bc 介子产生、衰变、寿命、质量的观测。在他们发表的论文中均将我们的理论成果作为基础文献加以引用，并将我们撰写的 BCVEGPY 程序作为基础，完成 Bc 介子实验的数值模拟分析必备程序，如在 LHCb 组的发表论文中，多次提到“采用专用程序 BCVEGPY 模拟产生 Bc 介子”或“BCVEGPY 模拟结果很好的描述了观测数据”。

代表性论文专著目录：

序号	论文专著名称/ 刊名/ 作者	影响因子 (2014)	年卷页 码	发表时间 年月 日	通讯 作者	第一 作者	国内 作者	SCI 他 引 次 数	他引 总次数	是否 国内 完成
1	PRODUCTION OF Bc OR (Bc) OVER-BAR MESONS ASSOCIATED WITH TWO HEAVY-QUARK JETS IN Z(0) DECAY & Erratum /Phys. Rev. D/ 张肇西， 陈裕启	4.643	1992年 46卷 3845页	1992 年11 月1 日	张肇 西	张肇 西	张肇 西，陈 裕启	102	104	是
2	Decays OF THE B(C)-MESON /Phys. Rev. D/ 张肇西， 陈裕启	4.643	1994年 49卷 3399页	1994 年4 月1 日	张肇 西	张肇 西	张肇 西，陈 裕启	124	129	是
3	HADRONIC PRODUCTION OF THE B(C) MESON AT TEV ENERGIES /Phys. Rev. D/ 张肇西，陈裕启	4.643	1993年 48卷 4086页	1993 年11 月1 日	张肇 西	张肇 西	张肇 西，陈 裕启	63	64	是

4	Uncertainties in estimating B-c hadronic production and comparisons of the production at TEVATRON and LHC /Eur. Phys. J. C/ 张肇西, 吴兴刚	5.084	2004年 38卷 267页	2004 年12 月	张肇西	张肇西	张肇西, 吴兴刚	23	26	是
5	BCVEGPY2.0: An upgraded version of the generator BCVEGPY with the addition of hadroproduction of the P-wave B-c states /Comput. Phys. Commun. / 张肇西, 王建雄, 吴兴刚	3.112	2006年 174卷 241页	2006 年2 月1 日	张肇西	张肇西	张肇西, 王建雄, 吴兴刚	8	8	是
6	Hadronic production of the P-wave excited B-c states (B-cJ, L=1(*)) /Phys. Rev. D/ 张肇西, 王建雄, 吴兴刚	4.643	2004年 70卷 文献号: 114019	2004 年12 月	张肇西	张肇西	张肇西, 王建雄, 吴兴刚	12	12	是
7	Decays of the meson B-c to a P-wave charmonium state $\chi(c)$ or $h(c)$ /Phsy. Rev. D/ 张肇西, 陈裕启, 王国利, 宗红石	4.643	2002年 65卷 文献号: 014017	2002 年1 月1 日	张肇西	张肇西	张肇西, 陈裕启, 王国利, 宗红石	20	21	是
8	Spectrum for heavy quarkonia and mixture of the relevant wave functions within the framework of Bethe-Salpeter equation /SCIENCE CHINA-PHYSICS MECHANICS & ASTRONOMY/ 张肇西, 王国利	1.143	2010年 53卷 2005页	2010 年11 月	张肇西	张肇西	张肇西, 王国利	2	2	是
合 计								354	366	

主要完成人情况：

1.姓名：张肇西

技术职称：研究员

工作单位：中国科学院理论物理研究所

个人排名：1

曾获国家奖情况：无

对本项目主要贡献：提出、主持并参与具体实施《Bc 介子物理（理论）》这一项目的研究，推动国际实验组应用和检验项目取得的成果等。

2.姓名：陈裕启

技术职称：研究员

工作单位：中国科学院理论物理研究所

个人排名：2

曾获国家奖情况：无

对本项目主要贡献：完成 Bc 介子产生、碎裂函数计算及衰变的研究工作等。

3.姓名：吴兴刚

技术职称：教授

工作单位：重庆大学

个人排名：3

曾获国家奖情况：无

对本项目主要贡献：完成 Bc 介子强产生机制的系统分析工作，产生子程序 BCVEGPY 的设计、撰写等。

4.姓名：王国利

技术职称：教授

工作单位：哈尔滨工业大学

个人排名：4

曾获国家奖情况：无

对本项目主要贡献：发展基于瞬时贝特-萨皮特方程计算 Bc 介子衰变的理论公式，应用到 Bc 介子衰变的研究等。

5.姓名：王建雄

技术职称：研究员

工作单位：中国科学院高能物理研究所

个人排名：5

曾获国家奖情况：无

对本项目主要贡献：计算机自动化程序计算双重味介子，激发态及重子的产生过程等。

完成人合作关系说明：

第一完成人张肇西从 1989 年起提出课题到项目结束，主持了并全程参与了项目所涉及到的各项研究工作。是 8 篇（全部）代表性论文的通讯作者和 16 篇

主要论文的主要作者。

第二完成人陈裕启作为第一完成人的博士生从 1990 年起接触课题，参与完成了该课题的多项创新性理论研究工作。是 4 篇代表性论文[1, 2, 3, 7]和 7 篇主要论文[1, 2, 3, 7, 9, 15]的主要作者、[13]的唯一作者。

第三完成人吴兴刚从 1999 年起在第一完成人的建议下选择课题部分内容作为硕士毕业课题；而后作为第一完成人的博士生从事 Bc 介子产生性质方向的研究工作。是 3 篇代表性论文[4, 5, 6]和 10 篇主要论文[4, 5, 6, 10, 11, 12, 14, 19, 20]的主要作者、[18]的唯一作者。

第四完成人王国利作为第一完成人的博士生于 1996 年开始接触课题至项目结束，主要从事 Bc 介子衰变性质方向的系统计算与分析。是 2 篇代表性论文[7, 8]和 4 篇主要论文[7, 8]的主要作者、[16, 17]的唯一作者。

第五完成人王建雄从 2002 年起接触该课题至项目结束，利用开发的自动化计算系统 FDC 实现 Bc 介子高激发态等双重味粒子的自动化计算。是 2 篇代表性论文[5, 6]和 7 篇主要论文[5, 6, 11, 12, 14, 19, 20]的主要作者。