

提名 2018 年度国家自然科学奖公示

项目名称：经典与量子引力若干问题数学研究

提名专家姓名、工作单位、职称和学科专业：田刚、北京大学、教授、微分几何

专家提名意见：

引力量子化是物理学的基本问题之一。项目完成人与人合作建立形变量子化非交换微分几何和非交换引力的数学理论、提出非交换量子爱因斯坦场方程并找到真空精确解。特别地，发现与时间无关、不可蒸发的量子黑洞解，说明该量子化数学模型可以避免著名物理学家 Hawking 关于半经典量子黑洞要蒸发而导致信息熵不守恒问题。项目完成人在该工作中的贡献是最本质的。

广义相对论正能量猜想是指正质量密度时宇宙总能量应为正。该猜想是广义相对论自洽性的验证，有着基本的重要性。

零宇宙常数时，Schoen-Yau 证明了正能量猜想，后来 Witten 用另外方法重新证明。这是 Yau、Witten 获得菲尔兹奖的重要工作之一。项目完成人证明正角动量密度时宇宙总能量为正的 Kerr 约束，并证明类光无穷远的渐近双曲流形正能量定理以及给出局部能量、动量和质量新定义并证明相应的正能量定理。

1998 年天文观测证实宇宙常数为正，项目完成人与人合作给出此情形正能量定理及 Kerr 约束的正确表述及数学证明。这些结果结合最新的天文观测数据，得出宇宙总能量为正的重要结论。在该工作中，项目完成人起着主要的作用。

项目完成人研究工作原创性强，成果系统、完整，被国际权威学术刊物评为亮点工作，得到包括菲尔兹、沃尔夫奖获得者 Yau、Schoen 等国际同行的引用和实质性评价。

提名该项目为国家自然科学奖 2 等奖。

三、项目简介

该项目主要应用微分几何方法研究引力形变量子化与量子黑洞以及广义相对论正能量定理，属微分几何研究领域。共有三个发现点，其重要性各有侧重。

(1) **非交换微分几何与量子黑洞**：1975年霍金用物理方法推导得出引力半经典量子化下 Schwarzschild 黑洞最终被蒸发的著名结论。该结论推出量子力学信息熵不守恒，导致严重物理后果，引起了极大争议。反对一方包括美国科学院院士、斯坦福大学物理系 Susskind 教授等。项目完成人与人合作建立形变量子化下数学上严格的微分几何理论、提出非交换量子爱因斯坦场方程；在数学上严格证明平面波的形变量子化是场方程的真空精确解，论文和实验发现光线弯曲、证实爱因斯坦广义相对论的英国科学家爱丁顿的经典相对论专著一起被一国际同行列为场方程精确解文献；发现 Schwarzschild 黑洞的形变量子化是与时间无关的量子黑洞，在数学上说明量子黑洞一般不蒸发，避免了信息熵不守恒问题。相关论文发表于英国物理学会的引力国际权威杂志 *Classical and Quantum Gravity*，并被评为 2008/2009 年度亮点文章之一。

(2) **正宇宙常数正能量定理**：1998年科学家发现宇宙加速膨胀，确认宇宙常数为正。2011年该发现被授予诺贝尔物理学奖。项目完成人与人合作证明当宇宙体积增长率不超过某一上界时正宇宙常数正能量定理成立，同时也证明了此情形能量角动量之间的 Kerr 约束成立，并与人合作构造一批宇宙体积增长率在某些区域超过该上界时负总能量的例子，从而证明宇宙体积增长率的条件是充分必要的，彻底研究清楚正宇宙常数正能量定理。美国《数学评论》指出项目完成人等引入一个变换过程并证出正宇宙常数正能量定理。

(3) **零宇宙常数能量不等式**：渐近平坦流形总能量不小于总动量的正能量猜想被 Schoen-Yau 证明，后来 Witten 给出新的证明，这是 Yau 和 Witten 获菲尔兹奖重要工作之一。项目完成人证明渐近平坦流形总能量不小于总角动量的 Kerr 约束、渐近双曲流形正能量定理以及给出宇宙有限区域的能量、动量和质量新定义并证明相应量的正能量定理。菲尔兹奖和沃尔夫奖获得者 Yau 评价项目完成人证明定义角动量并证明能量角动量不等式。美国科学院院士、国际数学家大会两次 1 小时报告人、沃尔夫奖获得者 Schoen 关于相对论中已解决的重要数学工作的演讲中提到的第一个研究工作是他们证明的正能量定理、第二个研究工作是项目完成人证明的 Kerr 约束。美国《数学评论》评价项目完成人给出拟局部质量一个具更好行为新的旋量定义。

该项目 8 篇代表性论文 SCI 他引 56 次。部分论文发表在 *Communications in Mathematical Physics*、*Nuclear Physics B*、*Classical and Quantum Gravity* 和 *The European Physical Journal C* 等数学物理领域国际权威杂志上。

五、客观评价

1. 关于第 1 个发现点

在联合国教科文组织 UNESCO 资助的 The 7th International Spring School and Workshop “Quantum Field Theory & Hamiltonian Systems”，物理学家在其中一个讲座中指出[代表性论文 1]提出非交换引力的一个几何方法，并在[代表性论文 3]等文章中进一步发展了这一理论 (A geometrical approach to noncommutative gravity, ..., has been proposed in [14] (for further developments, see [15, 16])). 参见附件[其他评价 2]。

物理学家指出[代表性论文 1]给出非交换空间引力理论最新形式 (latest versions)。参见附件[代表性引文 1]。

瑞典皇家科学院刊物《Physics Scripta》上发表的一篇论文中，将[代表性论文 2]和广义相对论爱因斯坦场方程精确解的经典文献并列，其引用的 5 篇文献中第一篇是 1919 年 5 月 29 日观察日全食发现太阳的引力使光线弯曲、证实爱因斯坦广义相对论的英国科学家爱丁顿教授在 1924 年由剑桥大学出版社出版的专著，第 5 篇是[代表性论文 2]。参见附件[代表性引文 2]。

英国物理学会出版的引力国际权威杂志 Classical and Quantum Gravity 将关于 Schwarzschild 黑洞形变量子化论文[代表性论文 3]评为 2008 年 7 月至 2009 年 6 月间的年度亮点文章之一。参见附件[其他评价 1]。

2013 年发表在影响因子 5.331 的 The European Physical Journal C 的一篇论文指出非交换黑洞以前在 2 篇文献中被研究过 (Noncommutative black hole... have been considered previously in the literature [21, 23]), 其中文献[21]是题目为“NONCOMMUTATIVE BLACK HOLES, THE FINAL APPEAL TO QUANTUM GRAVITY: A REVIEW” (doi:10.1142/S0217751X09043353) 的一篇综述文章，综述了到文章最后修改日期 2008 年 11 月 24 日之前非交换黑洞的研究状况，文献[23]是 2008 年 11 月 25 日投稿、发表于 2009 年的[代表性论文 3]。参见附件[代表性引文 3]。

2. 关于第 2 个发现点

美国《数学评论》指出正能量定理是广义相对论最显著 (most remarkable) 的数学结果之一，但原来的结果无法应用到正宇宙常数，[代表性论文 4]引入一个变换过程并证出正宇宙常数正能量定理 (The positive mass theorem is one of the most remarkable mathematical results in general relativity... It has been proven for the case that the cosmological constant Λ is zero. Current astronomical observations suggest that $\Lambda > 0$ and this is not consistent with the usual concept of asymptotic flatness. Thus the conventional positive mass theorem is not applicable to this situation. In this paper the authors introduce a procedure for transforming data with a positive cosmological constant into data which are asymptotically

flat. This leads to a positive mass theorem for certain data with $\Lambda > 0$). 参见附件[其他评价 3]。

论文主要结果被物理学家发表在2012年Classical and Quantum Gravity的论文中应用,用以研究正宇宙常数字宙相空间的性质 (Using the results of [15] (particularly theorem 4.2) it can be shown that ... Our phase space thus has precisely one point in common with that of either [13] or [15])). 参见附件[代表性引文4]。

3. 关于第 3 个发现点

美国科学院院士、国际数学家大会两次 1 小时报告人、沃尔夫奖获得者 Schoen 曾在 2010 年一次国际大会上综述了相对论中已解决的重要数学工作, 其中第一个是他和 Yau 证明的正能量定理,第二个是[代表性论文 6]证明的 Kerr 约束。参见附件[其他评价 4]。Schoen 等 2011 年发表在 Commun Math Phys 的论文中也指出[代表性论文 6]定义角动量密度并在和其相关的能量条件下证明了能量角动量不等式 (The paper by X. Zhang [17] proves such an inequality under an energy condition involving his definition of angular momentum density), 参见附件[代表性引文 5]。

菲尔兹奖、沃尔夫奖获得者 Yau 在综述文章中指出[代表性论文 6]定义角动量并证明了能量角动量不等式 (proved that $M \geq |j|$ where j is certain angular momentum he defined.)。参见附件[其他评价 5]。

Wang-Yau指出[代表性论文7]等证明了更复杂的渐近双曲正能量定理; 论文的一些研究方法被Wang-Yau在其论文中应用 (This argument is adapted by several authors [14, 1, 24, 7, 8, 26] to study the mass and rigidity of asymptotically hyperbolic manifolds. The formulation of the positive mass theorem for asymptotically hyperbolic manifolds is more complicated than the asymptotically flat case... they can be found by a calculation similar to the one in [26])). 参见附件[代表性引文6]。

著名几何学家 Brendle 等 2014 年发表在 Communications on Pure and Applied Mathematics 的论文中指出渐近双曲流形的质量在[代表性论文7]及其他论文中已经被研究过 (the total mass for asymptotically hyperbolic manifolds has been considered by many authors; see, e. g., [1, 6, 7, 20, 26, 27])). 参见附件[代表性引文7]。

美国《数学评论》指出[代表性论文 8]给出拟局部质量一个新的、具更好行为的旋量定义 (The paper under review proposes a new, spinorial definition of the quasi-local mass which seems to be better behaved...). 参见附件[其他评价 6]。

法国数学家在发表于 Commun Math Phys 上的文章中跟随[代表性论文 8]的研究思想进行后续研究 (The idea here, following [30] and [23])). 参见附件[代表性引文 8]。

六、代表性论文专著目录（不超过 8 篇）

序号	论文专著名称/ 刊名/ 作者	影响 因子	年卷页 码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	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	论文署 名单位 是否包 含国外 单位
1	Riemannian Geometry of Noncommutative Surfaces/Journal of Mathematical Physics/M. Chaichian, A. Tureanu, R. Zhang, X. Zhang	1.077	2008 年 49 卷 073511	2008 年07 月31 日			张晓	8	8	是
2	Exact solutions of noncommutative vacuum Einstein field equations and plane- fronted gravitational waves/The European Physical Journal	5.331	2009 年 64 卷 439-444 页	2009 年12 月31 日			王 鼎, 张晓	4	4	是
3	Quantum deformations of Schwarzschild and Schwarzschild-de Sitter spacetimes/Classical and Quantum Gravity/D. Wang, R. Zhang,	3.119	2009年 26卷 085014	2009 年04 月21 日			王 鼎, 张晓	7	7	是
4	Positive mass theorems for asymptotically de Sitter spacetimes/Nuclear Physics B/M. Luo, N. Xie, X. Zhang	3.678	2010年 825卷 98-118 页	2010 年1 月21 日	张 晓		罗民 兴, 谢纳 庆, 张晓	5	5	否


5	Spacelike hypersurfaces with negative total energy in de Sitter spacetime/Journal of Mathematical Physics/Z.Liang,	1.077	2012年 53卷 022502	2012 年02 月03 日			梁卓 宾, 张晓	2	2	否
6	Angular momentum and positive mass theorem/Communications in Mathematical Physics/X.Zhang	2.500	1999年 206卷 137-155 页	1999 年09 月30 日			张晓	8	8	否
7	A definition of total energy-momenta and the positive mass theorem on asymptotically hyperbolic 3-manifolds I/Communications in Mathematical	2.500	2004年 249卷 529-548 页	2004 年08 月31 日			张晓	20	20	否
8	On a quasi-local mass/Classical and Quantum Gravity/X.Zhang	3.678	2009年 26卷 245018	2009 年12 月21 日			张晓	2	2	否
合 计								56	56	

补充说明（视情填写）：

文章 1-8 所发表的杂志没有第一作者概念；文章 1-3，5-8 所发表的杂志没有通讯作者概念。

承诺：上述论文专著用于提名国家自然科学基金的情况，已征得未列入项目主要完成人的作者的同意。知识产权归国内所有，且不存在争议。

第一完成人签名



八、主要完成人情况表

姓名	张晓	性别	男	排名	1	国籍	中国
出生年月	1965年04月		出生地	江苏	民族	汉	
身份证号			归国人员	是	归国时间	1996年06月01日	
技术职称	正高级		最高学历	研究生	最高学位	博士	
毕业学校	香港中文大学		毕业时间	1996年02月03日	所学专业	基础数学	
电子邮箱	xzhang@amss.ac.cn		办公电话	010-82541521	移动电话		
通讯地址	北京市海淀区中关村东路55号				邮政编码	100190	
工作单位	中国科学院数学与系统科学研究院				行政职务	无	
二级单位	数学研究所				党派	群众	
完成单位	中国科学院数学与系统科学研究院				所在地	北京	
					单位性质	公益型研究单位	
参加本项目的起止时间		自1998年01月01日至2012年02月03日					
<p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>项目1-3发现点主要贡献者，即建立形变量子化非交换微分几何及非交换量子引力理论，提出非交换量子爱因斯坦场方程并发现场方程的真空精确解与时间无关、不可蒸发的量子黑洞解；证明正宇宙常数正能量定理；证明零宇宙常数Kerr约束、渐近双曲流形正能量定理及给出拟局部量的新定义并证明相关的正能量定理。8篇代表性论文作者。占本人工作总量90%以上。</p>							
曾获国家科技奖励情况：无							