支持多年以来，轻核（deuteron(), triton, 3He, , 4He）及其反粒子因其在理解物质与反物质的对称性、反物质的相互作用和高能重离子碰撞中相变过程中扮演着关键角色而备受研究者们关注。相对论重离子碰撞中所创造的高温高密环境有利于轻核及其反粒子的产生。在相对论重离子对撞机(RHIC) [1-5]和大型强子对撞机(LHC) [6-11]上，实验组在不同碰撞能量（7.7 GeV-5.02 TeV）不同系统（p+p，A+A）中均已探测到轻核及其反粒子。这些实验结果有利于人们了解轻核的结构，多重奇异超核及其反粒子的稳定性以及强相互作用物质的相图结构。比如：对hypernuclei（超核，由核子和超子组成）的发现提供一个研究超子－重子（YN）和超子－超子（YY）相互作用的实验手段，而其中YN相互作用在中子星结构中起着重要作用[12, 13]。另外，由中科院上海应用物理研究所马余刚研究员与美国布鲁克海文实验室唐爱洪研究员领衔的STAR实验小组在RHIC上利用 Hanbury-Brown-Twiss (HBT)干涉效应首次直接测量到反质子－反质子间的相互作用力，开启了反物质研究的新篇章，也是研究更复杂反核结构的基础[14]。基于文献调研[15-24]和我们近期的理论工作[25-28]，我们发现： 轻核及其反粒子是弱束缚核系统，其形成对冻结（freeze-out）时的温度和核子的相空间分布非常敏感。在量子色动力学（QCD）临界点附近，守恒量涨落（fluctuation）明显，比如：重子数，电荷和奇异数[22]。轻核由核子组成，核子密度涨落必然会映射到轻核的末态观测量中，故轻核可以作为研究火球演化最后阶段和QCD相图的灵敏探针。但到目前为止，实验结果虽然很多，但还没有一个完整的理论对轻核的形成及其相关性质作出全面的分析和解释。**基于以上研究现状，我们提出此申请，拟用重组合模型研究不同碰撞能量不同系统中各类轻核及其反粒子的产生，研究其发射源信息和末态观测量的涨落行为，为实验上证实QCD临界点（QCP）的存在和精确定位QCP提供理论支持。**具体阐述如下：

在理论上，研究高能重离子碰撞中轻核及其反粒子产生机制的方法主要有两种：（1）热统计模型[15, 16]；（2）重组合模型[17-21, 25-28]。这两个模型均假设热密物质中的轻核和其他粒子一样，达到热学和化学平衡。因此，轻核可以提供关于核子密度和核子关联的信息。轻核的束缚能很小（()～2.2 MeV，3He～7.7 MeV），当碰撞系统温度很高时不能形成，所以普遍认为轻核是在动力学冻结(kinetic freeze-out)时通过核子重组合产生。重组合模型是研究轻核产生的一种有效理论方法。在一些简化的重组合模型中，轻核的能量谱被简单的处理为核子的能量分布之积，再乘以由实验测得的重组合参数 (coalescence parameter),

,

其中,并假设质子和中子具有相同的分布。是核子重组合的概率，与局域核子密度有关，可由实验直接测量。但这样的处理方法过于简化，并不能定量的描述轻核的产额[9]。在更严谨的重组合模型中[25-28]，轻核的产额依赖于轻核的Wigner相空间密度和组分核子冻结时相空间分布，

.

假设强子化是在极短的时间内完成的，可以利用sudden approximation方法,由组分核子的波函数得到轻核的波函数。核子的相空间分布可根据研究的需要采用不同的模型得到，比如激波(blast wave)模型，多相输运(AMPT)模型，逐事件相对论粘滞性流体力学（iEBE-VISHNU）模型，等等。如果是超核，还需要粒子的相空间分布。

对于中能重离子碰撞，重组合模型也同样适用。比如：在陈列文等人的工作中[29]，组分核子的相空间分布由考虑了同位旋依赖的Boltzmann- Uehling-Uhlenbeck（IBUU）输运模型得到，该研究发现轻核的产量强烈地依赖于核对称能密度。近年来，低能重离子碰撞中轻核的产生也得到了不同实验组的关注[4, 30, 31]。但到目前为止，还没有理论组对该能区展开系统的研究。由于低能核子密度很高，核子化学势不能简单的近似为0，因此，低能区轻核的形成机制是否与中高能区相同，这是一个值得研究的有趣课题。

由此可见，重组合模型是研究重离子碰撞中末态粒子产生的重要机制之一，虽然强子和轻核分别由夸克和核子组合形成，但基本思想是一致的。在夸克重组合模型中，一个非常重要的特征就是能非常有效的处理中间横动量粒子的产生。而热部分子在解释实验观测现象时起到重要作用，比如：椭圆流中组分夸克数量标度，喷注结构的改变，各种粒子的cronin效应等等。最成功之处是解释了Au+Au中心碰撞中的质子与介子之比（）。致力于重组合模型研究的理论小组主要有三个：Duke，Texas A&M/Budapest 和Oregon[32-34]。三个小组的基本思想是一致的：标准的Wigner计算，不过其中涉及到部分子不同。Duke小组采用六维的相空间，用Wigner 函数表示热部分子(thermal parton)的相空间分布[32]； Texas A&M/Budapest小组允许热部分子和喷注部分子(jet parton)相结合，利用Monte Carlo方法模拟重离子碰撞[33]；Oregon 小组的模型中有两类部分子：热部分子和簇射部分子(shower parton) [34]。热部分子分布由拟合低横动量区的横动量谱得到，而簇射部分子由minijet演化而来，其分布则由碎裂函数决定。**在已发表的工作中[35-39]，申请者和美国Oregon大学的Rudolph C. Hwa教授合作，利用夸克重组合模型讨论了LHC能区Pb+Pb碰撞和RHIC能区Au+Au碰撞中强子的产生，ridge等相关问题。**但到目前为止，这两类部分子分布都不是由部分子蒙特卡罗(MC)模拟产生的，更无法考虑逐事件中部分子的涨落。在Kyongchol Han和Che-Ming Ko的工作[40]中，利用PYTHIA产生e++e-碰撞中的两喷注事件产生部分子簇射 (parton shower)， 胶子非微扰地衰变到夸克-反夸克对，形成重组合模型需要的簇射部分子。但这仅是一个初步的尝试，还需要更深入物理考虑和程序改进。比如：在现有的模型中，对于夸克－反夸克对，当不变质量很小时形成介子，而当质量很大时，形成强子团（hadron cluster）再通过相空间衰变为多个pi介子。对于三（反）夸克，也采用相似的处理方法。但在严格意义上，所有particle data book中的强子都应该包含在内。也就是说，只有不变质量大于particle data book中所列强子的那些夸克－反夸克或者三（反）夸克才能被当作强子团，并按照一定的统计几率衰变到稳定强子。**因此，改进重组合模型是本项目的首要研究内容。**

**我们已对轻核及其反粒子的形成开展了前期工作**[25-28]**。**申请者和美国Texas A&M 大学的Che-Ming Ko教授利用AMPT模型得到的核子相空间分布作为重组合模型的输入，研究了LHC能区Pb+Pb碰撞中（超）轻核及其反粒子的产生[26]。在AMPT模型中夸克强子化过程基于一个非常粗糙的空间夸克重组合机制。即先让相邻的夸克组合成介子，剩余的夸克再形成重子，即使某些夸克在空间上相隔很远也会被强行组合，这显然是不合理。因此，定量上并不能描述核子和（超）轻核的横动量谱、椭圆流和重组合参数。在最新版的AMPT模型中，Zi-Wei Lin及其合作者已经修改了夸克重组合机制，组合没有先后之分，按照一定的几率分别形成介子和重子[41]。修改后的AMPT模型能描述高能重离子碰撞中强子的产额。另外，AMPT模型假设部分子在光锥顶部产生，比如：垂直于纵向轴（longitudinal axis）或者束流方向（beam direction）的薄盘。此假设对于RHIC最高能量和LHC上的碰撞系统是合理的，但对于低能碰撞，比如在RHIC上BES（beam energy scan）能区（7.7-200 GeV），初始部分子分布应该在纵向轴方向延展。这些都是AMPT模型急需改进之处。

除此之外，基于激波模型的重组合模型可以很好地描述Au+Au和Pb+Pb碰撞中不同中心度下轻核的横动量谱和椭圆流[27, 28]。 激波模型具有与流体力学模型相似的冻结位形(configuration)，但包含了十个可调参数。所以此模型只是一个toy model，预言能力很低，而且为了描述轻核的椭圆流，还加入了一个空间－动量关联函数。由此可见，轻核的形成对动力学冻结时核子的相空间分布很敏感，而核子的分布又强烈的依赖于QGP和强子火球的动力学演化。在描述相对论重离子碰撞的标准模型中，热化后的热密系统由流体力学描述，紧接着再由强子散射模型模拟强子的演化。因此，在已发表的工作[25]中，我们采用由2+1维粘滞流体力学模型[42, 43]和UrQMD强子散射模型[44, 45]组成的逐事件相对论粘滞性流体力学（iEBE-VISHNU）模型[46]得到核子相空间分布，再利用重组合模型计算Au+Au碰撞和Pb+Pb碰撞中，不同中心度下deuteron和triton的横动量谱和椭圆流。对于deuteron模型计算和实验结果符合很好，而对于triton，理论计算的产额比实验测量小一倍，这是目前理论模型不能解释之处，也是本项目需要解决的问题之一。这些工作都是我们研究轻核产生机制的初步尝试，也是本申请项目的工作基础。

项目申请负责人已从事高能重离子碰撞唯象理论研究十余年，分别和该领域的知名专家Rudolph C.Hwa和Che-Ming Ko教授合作，利用重组合模型研究了RHIC和LHC能区重离子碰撞中粒子产生机制，发表SCI文章十余篇，在这一领域积累了一定的经验。**本项目****旨在得到一个能描述不同碰撞能量不同系统中轻核形成的理论模型，是该申请项目的一个重要研究内容，希望得到一些创新型的结果，帮助人们理解轻核的形成和QCD相图结构。**