

## HUBS 理论研究

在近几十年中，人类对宇宙的认识有了突飞猛进的发展。基于对宇宙微波背景辐射，Ia 型超新星以及宇宙大尺度结构的观测和研究，我们不仅巩固了基于标准模型的宇宙学框架，而且可以对宇宙中的质量和能量组份给出精确的限制。在这个宇宙模型中，现时宇宙中能量/质量密度中的大约  $3/4$  来自暗能量，而剩下的  $1/4$  来自物质。物质成分中，80%以上来自暗物质，而只有大约 17%来自我们所熟悉的重子物质。这些物质/能量内容联同标准模型确定了宇宙的整体几何结构以及演化。不仅如此，基于微波背景辐射，星系在大尺度上的分布，我们还可以推测宇宙中密度涨落的性质。这不仅可以用来检验关于早期宇宙的模型（例如**暴涨**模型），也为我们研究宇宙中结构的形成及星系形成提供了初始条件。

宇宙中的结构形成是初始的密度涨落被引力不稳定性放大驱使的，通过理论模型及计算机数值模拟，我们知道宇宙中主要物质成分（暗物质）的分布呈现网状结构。在这种宇宙网络（Cosmic Web），部分物质于网络的高密度节点上以**暗晕**的形式存在；另外一些则存在于联结网络节点的线状或面状结构中；而低密度的“空洞”则由这些结构所区隔。

虽然现代宇宙学可以对宇宙中的大尺度结构进行很成功的描述和解释，关于宇宙结构形成还存在着很多悬而未决的问题。这些问题大部分集中在较小尺度上。在这些尺度上，结构形成不仅涉及引力作用，而且受暗物质的性质以及其他物质过程的影响。一个很好的例子是星系形成及活动星系核形成中所伴随的反馈效应。理论上，这种反馈效应的存在是不可避免的，但是我们还不清楚这些效应如何影响宇宙中的物质分布及结构形成。因此，我们需要对宇宙物质，特别是重子物质的分布及状态进行细致的观测研究，才能对这些不确定的过程进行**限制**。

从现有的观测中，我们知道现在宇宙中大约 10-15%的重子物质包含在恒星及星际介质中，还有大约 15-20%在星系团和群的热气体晕中。因此，还有近 2/3 的重子物质还存在于“遗失”状态。这些“遗失”的重子在哪里？它们存在的形式如何？它们与星系的关系如何？这些问题的研究不仅让我们检验当今宇宙中重子成份与微波背景辐射观测以及宇宙核合成理论预言的自洽性，更重要的，它们还包含关于星系和黑洞形成及演化的重要信息。

理论研究及数值模拟表明，宇宙中相当大部分的重子物质可能存在于温度介于  $10^5$ - $10^6$ K 间，一种称为温热星系际介质 ( Warm Hot Intergalactic media; WHIM ) 中。这种介质分布于宇宙网络中的线状结构以及结点外围。由于介质的温度及密度都相对较低，它们很难用现有的 X-射线望远镜所探测。由于这种介质处在高度电离状态，它们也不能用通常的 21CM 发射以及氢原子的吸收来探测。因此，寻找新的探测途径至关重要。利用微波背景上 Sunyaev-Zeldovich (SZ)效应以及高电离态金属离子的吸收已经探测到 WHIM 的存在。但是这些方法各有缺陷。比如，吸收线观测只能在背景源的视线方向上进行，而不能提供气体的三维分布。SZ 效应通常很弱，因此不能提供有关 WHIM 的精细信息。HUBS 在此领域将起关键作用，它所具有的大视场和对  $10^5$ - $10^6$  气体的灵敏度将为研究宇宙中重子物质的状态和分布，以及星系与星系间的关系提供前所未有的数据。

## 1. 遗失重子问题

如上所述，现在宇宙中的大约 2/3 的重子物质仍在“遗失”状态，HUBS 的一个重要目标便是寻找和证认这些遗失重子，研究它们的分布以及状态。为了有效地解释 HUBS 的观测结果，我们需要发展与观测配套的理论模型。一个有效的途径是利用数值模拟以及由此定标的经验模型来建立模拟样本，通过分析建立在

不同模型上的模拟样本,我们可以预言模拟宇宙中重子物质的分布以及它对模型假设依赖,从而预言遗失重子物质可能的分布及状态。这种预言不仅为设计 HUBS 观测提供依据,也为未来解释观测数据打下基础。

## 2. 宇宙网络结构中的引力加热

理论模型和数值模拟发现,在 Cosmic Web 的形成过程中,重子气体先是随着暗物质一起聚集到网络的结点和纤维线状结构上。由于气体压强的存在,重子气流在网络结构中汇集时会产生激波,从而将气体加热。存在于星系团中的 X-射线热气体就是有这种由引力塌缩而引发的微波加热而产生的。这种加热原则上也存在于宇宙网络的其他部分,例如纤维线状及面状结构中。因此,整个宇宙网络上都有热气体的存在,而这种其他的密度及温度则反映局部结构的形成过程。这种引力塌缩所引发的加热可能是形成 WHIGM 的重要原因之一,但是由于气体可以冷却并受到非引力作用的影响,这种加热机制的有效性还存在着很大的不确定性。如果冷却足够有效,在纤维状结构上的气体可能不会被有效加热,而是部分以冷流的形式存在。

这种不确定性对我们理解星系在 Cosmic Web 中的形成造成很大影响,因为我们不能确定星系中的气体物质到底是通过冷流吸收还是热流吸收而获得的。显然,HUBS 对 Cosmic Web 中不同结构中气体的观测将会在此领域起到关键作用。HUBS 不仅可能观测 Cosmic Web 中气体的分布,还可以测量气体的温度。

为了利用 HUBS 数据来有效地限制理论,建立有效的模型必不可少。如上所述,我们可以通过数值模拟的方法来建立模拟样本。这里一个有效的途径是利用约束性模拟(见 XX)来预言在 Cosmic Web 中不同成份的重要性,并研究气

体性质与结构形成历史及周边环境的关系。

### 3. 星系形成中的反馈问题

在星系的形成和演化过程中,由超新星爆发以及超大质量黑洞的吸积所产生的巨大能量释放不仅可以将星系中的气体抛出,还可能改变星系周边介质 (CGM),甚至星系际介质 (IGM) 的分布及状态。这种抛出也可以将星系中的由恒星演化而产生的金属元素携到 CGM 和 IGM 中,以改变它们的化学成份。

由于星系的增加和演化是靠从 CGM 和 IGM 中吸积重子物质来维持的,反馈效应会对后续的星系演化产生深远的影响。因此,对反馈过程的研究是星系形成中最重要的问题之一。但是,由于反馈发生在恒星和活动星系核的尺度,许多相关的过程还不能通过第一原理来进行处理,现有理论中存在着很大的不确定性。这种不确定性导致许多不同的模型和处理方法并存。

如前所述,反馈过程的一个结果是导致星系周边介质和星系际介质状态和分布的改变。因此,HUBS 对 CGM 和 IGM 的观测将为研究反馈机制提供前所未有的数据。由于反馈源于星系,一个有效的研究反馈效应的方法是研究不同温度和金属丰富度的气体与不同星系分部间的关系。例如,在强 AGN 反馈模型中,由 AGN 加热的气体可以被抛射到离星系很远的区域,而在仅由超新星爆发而产生的反馈中,热气体可能只存在于星系的周边。因此,与此相关的理论研究将致力于**刻化**星系与热气体在空间分布上的关系。

### 4. 约束性模拟

约束性模拟指的是利用观测到的星系分布来再构建初始条件,并用所构建的初始条件来模拟宇宙中的结构的形成和演化。由于这种模拟基于由观测所构建的初始条件,它们所产生的结果与所观测到的 Cosmic Web 高度相似。利用这种

初始条件所得到的气体模拟 ,不仅能让我们直接研究模拟中气体相对于真实宇宙中星系的分布 , 而且可以预言在不同模型中气体在可观测 Cosmic Web 中的行为。通过实现 HUBS 的科学目标至关重要 , 它不仅可以帮助 HUBS 优化观测天区的选择 , 也为未来利用 HUBS 数据来研究 Cosmic Web 中的气体分布及状态提供有效的途径。

利用现有的大范围星系红移巡天 ,如上所述的初始条件再构造已经可能实现。这种初始条件与不同的星系形成模拟相结合可以产生系列的约束性模拟来与观测结果比较以限制星系形成中的物理过程。