

科学目标：星系际介质和失踪的重子

一、星系际介质和宇宙大尺度的网状结构

在过去三十年中，由标准的宇宙学常数加冷暗物质模型框架下构建的星系形成演化理论取得了极大的成功，它很好的解释了很多观测上的结果。在这个模型下，大尺度结构呈等级式成团演化(hierarchical structure formation),在成团(clustering)的每一个阶段，暗物质会首先塌缩形成晕 (halo) 结构，被暗物质晕引力势场所约束的气体会随后收缩，冷却，形成星系，恒星等结构。

目前星系形成和演化理论最重要的预言之一就是宇宙大尺度的网状结构 (cosmic web): 在这个预言下，宇宙的大尺度结构物质分布类似于一张巨大的蜘蛛网，在节点处存在由从成千上万个星系所构成的星系团；而连接这些节点的则是一些纤维状结构，在这些纤维状结构里是大量的星系、星系群，以及分布在星系之间的星系际介质。

星系际介质包括大量的、还未被吸积进星系的气体成分，其最主要的构成是氢元素，包括中性氢和电离氢。在高红移的宇宙，星系空间温度较低，有大量的中性氢存在，在观测上构成在类星体光谱上所看到的莱曼森林线 (Ly α forest)。在低红移，由于星系形成的激波加热，大部分中心氢被电离，形成以电离氢为主的气体。

在星系际介质内同时存在微量的重元素。这些元素一般认为是在星系内恒星形

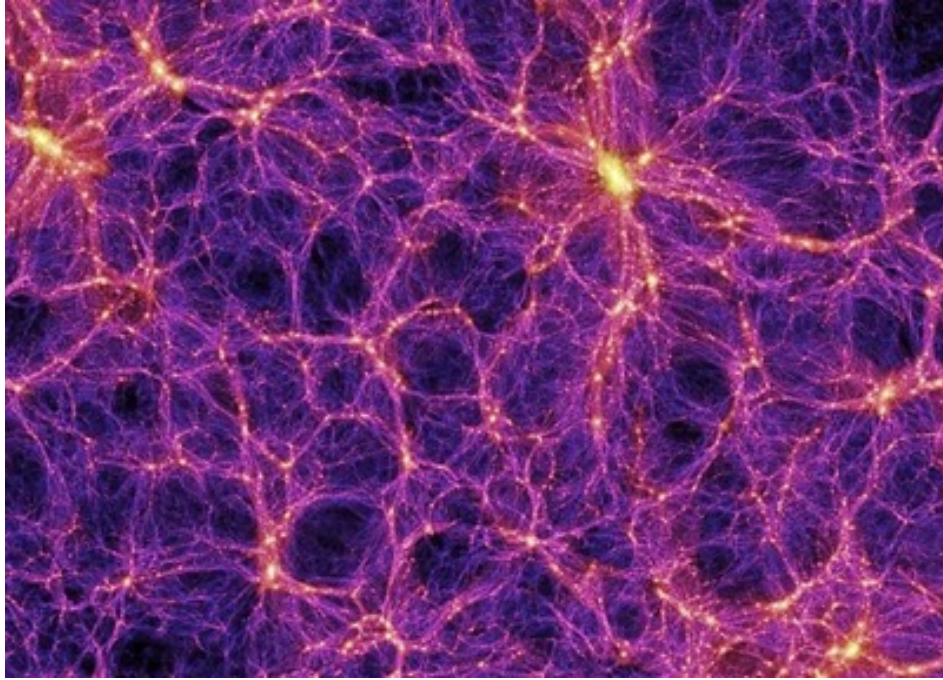
成过程，通过超新星爆炸、星系大尺度星风等反馈过程从星系内进入星系际空间。

这些微量元素成为探测星系际介质的重要工具。

除了少部分组成星系和星系团介质的重子，绝大多数宇宙中的重子存在于星系际介质中。星系际介质追踪了冷暗物质的大尺度结构，是形成星系、恒星、行星，乃至所有生命体的最原始材料。在早期宇宙中，星系际介质是比较均匀地分布；随着时间的演化，逐渐形成大尺度结构的“宇宙网”。

“宇宙网”和星系群体中大尺度结构的增长持续到现在。星系际介质和星系内物质和能量的交换是双向的。一方面，星系吸积星系际介质；另一方面，由超新星驱动的激波和星系风又改变周围星系际介质的成分和结构。这些源自星系内的外流可以阻止物质降落到星系中，因此调节着新的恒星的形成(Birnboim & Dekel 2003; Keres et al. 2005)。

从对“宇宙网”的观测入手，去理解“宇宙网”是如何形成，如何随时间变化，以及它们如何和星系联系在一起。这对我们深入理解星系和宇宙是如何演化至关重要。



图一：数值模拟显示的宇宙蜘蛛网状结构。宇宙的大尺度结构物质分布类似于一张巨大的蜘蛛网，在节点处存在由从成千上万个星系所构成的星系团，而连接这些节点的则是一些纤维状结构，在这些纤维状结构里是大量的星系、星系群，以及分布在星系之间的星系际介质。

二、失踪的重子问题

随着最新观测的发展，上述标准模型面临着一系列严重的挑战。其中最重要的问题之一就是“重子缺失 (the missing baryons)”问题。

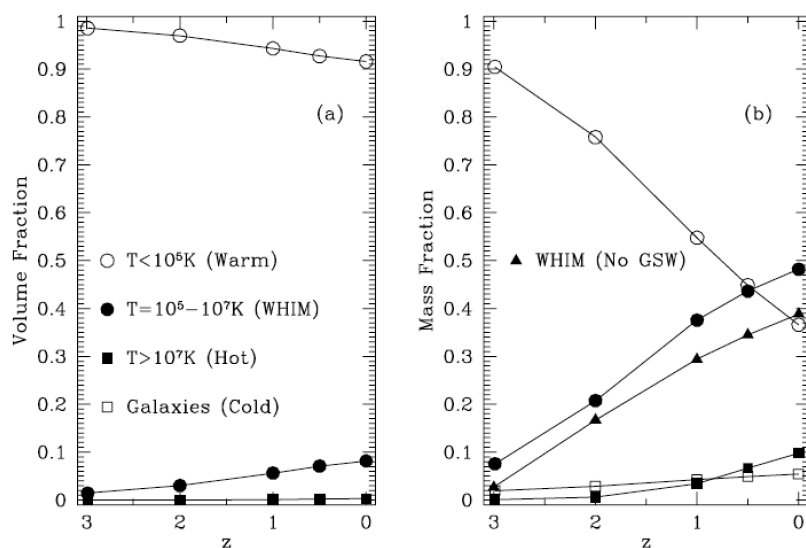
随着精确宇宙学的发展，利用宇宙微波背景人们已经可以较为精确地测量宇宙组成的各个成分。最新的普朗克卫星观测结果表明，在目前的宇宙密度参数里，暗能量 (Ω_Λ) 约占 70%，暗物质 (Ω_M) 约占 25%，剩余的 5% 则由重子物质 (Ω_B) 所组成 (Planck Collaboration 2015)。值得注意的是这 5% 的重子物质是目前我们在观测上能直接测量的宇宙组成。而另外有两个独立的观测证据也给出较为一致的结

果，表明早期宇宙里重子物质的组成约占 5% 左右。这两个观测一是在高红移（红移大于 3）处所观测到的类星体莱曼 α 森林线，另一为宇宙早期对化学元素核合成的研究。

然而，在二十世纪九十年代，人们意识到，如果把本地宇宙（local universe）所有能观测到的普通物质加在一起，其总量只有 5% 的一半。这些普通物质包括恒星、星际介质（interstellar medium，含氢原子和氢分子气体）、星系团际热气体（intracluster medium）、星系际（intergalactic medium）的中性氢（Fukugita et al 1998；Cen & Ostriker 1999）。如果重子不会改变成其他非重子物质，那么在宇宙从高红移到低红移的演化过程中，大量的重子去哪儿了？这个问题，被称为“重子缺失”问题。

三、寻找失踪的重子问题

在随后的宇宙大尺度数值模拟中，人们很快意识到，重子物质根据其温度和密度的不同，大约可以分为四类：（1）低温（小于 10^4 - 10^5 度）、高密度的重子物质，主要以恒星的形式存在；（2）低温（小于 10^4 度）、低密度的重子物质，以星系际介质里的中性氢为主；（3）高温（高于 10^7 度），主要以星系团际热气体的形式存在；（4）温热气体（warm-hot，温度在 10^5 - 10^7 度之间）。观测上主要是未能发现第四类重子物质，即温热气体。由于这部分物质主要存在于星系际介质里，因此有称为温热星系际介质（warm-hot intergalactic medium，简称为 WHIM）（参见图一，以及 Dave et al 2001 等）。



图二：数值模拟显示的各类重子成分随红移的演化。左图显示的是体积百分比，右图显示的是质量百分比。可以看到随着红移的降低，温热星系际介质的成分有着显著的增加。(Cen & Ostriker 2006)

数值模拟显示 WHIM 是稀薄的，密度大约是宇宙平均密度的 10-100 倍(当前平均重子密度 $\langle n_b \rangle = 2 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$), 温度在 $10^5 - 10^7 \text{ K}$, 具有不均匀的金属丰度($0.003 - 1.0 Z_{\odot}$, Cen & Ostriker 2006)。当然 WHIM 与温度、密度和金属丰度的关系是会严重受到星系反馈的影响。正如 Paerels et al. (2010) 所总结的那样，WHIM 的性质是相当复杂的，它的弛豫时标甚至可以超过宇宙年龄，它的电离可能处于非平衡状态，那些在激波上的电子和离子能量不均衡，而且它是热不稳定的。所有这些特性使得 WHIM 的测量变得相当困难，极其需要多波段的诊断。

四、现有的观测及存在的问题

从二十世纪初至今，为解决重子缺失问题，在观测上人们主要致力于发现温热星系际介质。对于温度位于 10^5 - 10^6 度之间的气体，其主要的光谱特征在紫外波段；而对于温度高于 10^6 度，其光谱特征主要是在 X 射线波段。因此，人们主要利用空间的紫外卫星（比如 FUSE 和哈勃望远镜）和 X 射线卫星（比如 Chandra 和 XMM-Newton 卫星）来展开这方面的研究探测，主要的探测方式是利用位于温热星系际介质内高度电离的金属元素在背景活动类星体光谱上所产生的吸收线系统。

利用最新的紫外观测，特别是哈勃望远镜上高灵敏度的宇宙起源光谱仪，人们在遥远类星体的光谱上发现大量温热气体的示踪元素，比如氢的莱曼 α 吸收线，以及 OVI（五次电离的氧元素）吸收线。这些示踪元素所揭示的重子物质大约占缺失重子的一半左右。另外一半的缺失重子可能由于其温度较高，只能在 X 射线波段探测。近年来利用 Chandra 和 XMM-Newton X 射线卫星在一些视线方向上有关于星系际介质吸收的报道（比如 Fang et al 2011），然而全面探测到剩余的缺失重子还有赖于今后更灵敏的 X 射线望远镜。

现在对 WHIM 最直接的观测证据来自对低红移的类星体的 OVI 的紫外吸收线探测（如 Howk et al. 2009）和对 OVII 和 OVIII 的 X 射线（来自 X 射线空间望远镜）吸收线（如 Tripp et al. 2000; Dandorth & Shull 2005; Buote et al. 2009; Nicastro et al. 2010; Fang et al. 2010）。然而 X 射线吸收线研究仅仅限于大约 10 个背景源，并且对这些源的解释模棱两可。Nicastro et al.（2008）综合了所有测量，显示在低红移处（ $z < 2$ ），缺失重子问题依然是比较严峻，并且让人难以理解。Shull et al.（2011）

利用来自 COS 的新数据进一步对吸收线的研究依然表明在当前宇宙中至少有 30% 的重子仍然不知所踪。

对 WHIM 的研究仅仅是吸收线的研究是远远不够的，我们还需要测量它的发射线，必须对发射线成图才能和吸收线一起得到比较确切的密度、线性尺度等物理性质。发射线的好处在于可以对这些热气体的分布成图。探测并对比较致密的 WHIM 的 OVI、OVII 和 OVIII 发射线成图可以严格检验数值模拟中的物理模型。然而，数值模拟显示，一般 WHIM 密度非常低，低于现有小型探测器探测极限的很多量级。只有在星系邻近区域 WHIM 才可能被小型探测器所探测(如 Furlanetto et al. 2004)。