

Многопоточковый портрет космической паутины

Н. Рамачандра и С.Шандарин (США)

Реферат подготовил М.Х. Шульман (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv:1412.7768v1 [astro-ph.CO] 24 Dec 2014

Multi-stream portrait of the Cosmic web

Nesar S. Ramachandra (nesar@ku.edu), Sergei F. Shandarin (sergei@ku.edu)

Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045

30 December 2014

В данной статье сообщается о результатах исследования мультипоточкового (multi-stream) окружения гало темной материи в космологических моделях задачи N-тел в парадигме Λ CDM. Полное динамическое состояние может быть описано в трехмерном подпространстве шестимерного фазового пространства – ячеистой структуры темной материи. В данном исследовании использовалось лагранжево субпредставление $\mathbf{x}=\mathbf{x}(\mathbf{q},t)$ (где \mathbf{x} и \mathbf{q} являются, соответственно, эйлеровыми и лагранжевыми координатами), которое динамически эквивалентно ячеистой структуре темной материи, но более удобно для численного анализа. Это удобство имеет два аспекта. Во-первых, \mathbf{x} является однозначной функцией \mathbf{q} на любом этапе, включая сильно нелинейные из них, тогда как фазовое пространство структуры в любом множестве трех из шести координатных осей этим свойством не обладает. Во-вторых, сохранение лагранжева субпредставления не требует дополнительного пространства для лагранжевых координат, если однородное модельное состояние представлено однородной трехмерной сеткой.

Проблема объективной идентификации и количественного описания анизотропной структуры распределения галактик в пространстве возникла после первых свидетельств их существования (см. обзор Oort 1983 и указанные там ссылки). Первая теоретическая модель, предсказывающая высокоанизотропные концентрации в распределении масс, связанные с существованием и нелинейными этапами гравитационной неустойчивости, известна как приближение Зельдовича (Zeldovich Approximation – ZA) (Zel'dovich 1970, см. также Shandarin & Zeldovich 1989). ZA предсказала образование 'блинов', известных также на современном жаргоне как стенки. Более позднее развитие модели в работах Arnold, Shandarin & Zeldovich (1982) позволило предсказать образование нитей наряду с блинами. В работах Klypin & Shandarin (1983) и Shandarin & Klypin (1984) было показано, что нити действительно возникают при моделировании космологической задачи N тел в трехмерном пространстве. Однако не удалось идентифицировать блины. Как существование нитей, соединяющих компактные образования материи, так и отсутствие блинов, было подтверждено в работе Frenk, White и Davis (1983). Озадаченность отсутствием блинов отразилась в работе Klypin & Shandarin (1983) в виде предположения, что причиной отрицательного результата стало недостаточное разрешение по массам при моделировании. Это было однозначно подтверждено недавними моделированиями задачи N тел с использованием более совершенной численной методологии вычисления поля плотностей по координатам частиц (Shandarin,

Habib & Heitmann 2012 и Abel, Hahn & Kaehler 2012). Klypin & Shandarin (1983) также подчеркивали, что большинство нитей образуют 'единую трехмерную паутинообразную структуру'¹.

Хотя четыре архетипических элемента космической паутины (войды, стенки/блины, нити и гало) были предсказаны в ZA и подтверждены моделированием космологической задачи N тел, их идентификация и количественное описание остается предметом дискуссий (см., например, Colberg et al. 2008, Elahi et al. 2013, Knebe et al. 2013, Hofmann et al. 2014). Гало темной материи являются, вероятно, простейшими для идентификации объектами при моделировании задачи N тел. Они также надежно ассоциируются с наблюдаемыми объектами типа галактик и их скоплений. Но даже и в этом случае в работе Knebe et al. (2013) ссылаются на большинство из тридцати гало, обнаруженных после 2000 года. Идентификация нитей и блинов/стенок является еще более противоречивой как при моделировании задачи N тел, так и при составлении галактических каталогов. Например, даже при оценке глобальных параметров паутины при моделировании, таких, как доля объема и массы в войдах, стенках/блинах, нитях и гало, получают сильно различающиеся результаты. В частности, оценки доли объема войдов варьируются в диапазоне от 13 до 86% (Cautun et al. 2014, Falck & Neyrink 2014, Forero-Romero et al. 2009, Hahn et al. 2007, Aragon-Calvo, van de Weygaert & Jones 2010). Подобные оценки для стенок/блинов, нитей и гало составляют, соответственно, 5 – 56%, 2 – 26% и 0.1 – 1%. Оценки для содержания масс также варьируются в широком диапазоне.

Большие различия в оценках доли объема и массы, полученных различными группами, не кажутся неожиданными, если учесть значительные различия в определениях элементов космической паутины и в численных методах, используемых при получении оценок. Не пытаясь представить исчерпывающий обзор всех определений и методов, используемых для количественного морфологического анализа паутины, коротко опишем несколько подходов с целью проиллюстрировать, насколько они могут быть непохожими. Некоторые группы исследуют морфологию паутины, используя лишь координаты модельных частиц, тогда как другие учитывают также и скорости. Полезно преобразовать данные, представляющие частицы, к представлению поля на сетке, что позволяет использовать множество математических методов, недоступных в представлении наборов отдельных частиц. Этот шаг может быть осуществлен множеством способов, некоторые из которых просты (SIS), другие более сложны (SPH), либо с помощью разбиения метод Вороного и Делоне на многогранники (Delaunay Tessellation Field Estimator – DTFE) (van de Weygaert & Schaap 2009, Cautun 2014). Сам по себе этот выбор приводит к различным результатам при исследованию паутины.

Однако был разработан новый метод, названный discrete persistent structure extractor – DisPerSE (Sousbie 2011, Sousbie, Pichon & Kawahara 2011), позволяющий идентифицировать гало и другие компоненты паутины, непосредственно отталкиваясь от частиц. Этот метод может быть применен, например, к каталогу галактик. Например, в работе (Sousbie, Pichon & Kawahara 2011) он применен к SDSS-каталогу и извлек из него нити, доступные онлайн.

Соответствующее преимущество метод, основанных на координатах частиц как таковых и полей плотности, состоит в их применимости к каталогам, основанным на красных смещениях. Однако такие каталоги типа SDSS и 2dF дают только две угловые координаты и расстояние в пространстве красных смещений. Моделирование космологической задачи N тел для темной материи

¹ Термин 'космическая паутина' был предложен в работе Bond, Kofman & Pogosyan (1996).

дает полную динамическую информацию в шестимерном фазовом пространстве. Эта дополнительная информация дает гораздо больше возможностей для понимания космической паутины.

Темная материя занимает трехмерное подпространство в шестимерном фазовом пространстве, поскольку она является холодной. Следовательно, в большинстве вычислений можно пренебречь тремя измерениями. В линейном режиме субпредставление темной материи является однозначной функцией эйлеровых координат, что означает, что в каждой точке движение темной материи описывается одним потоком (stream) во всех отношениях. Так как возмущения плотности в темной материи растут во времени, число потоков скачкообразно возрастает до трех, затем до пяти и более, оставаясь, однако, нечетным в генерических точках. Соответствующие части субпредставления трехмерной темной материи испытывают сложные перегибы в шестимерном фазовом пространстве.

Области с мульти-потоками образуют паутину, тогда как области с единственным потоком образуют войды (Shandarin 2011, Shandarin, Habib & Heitmann 2012, Abel, Hahn & Kaehler 2012). Первые области с тремя потоками подобны блинам в ЗА. Они быстро растут и сливаются в сложную трехмерную структуру: нити, образующие паутину, проявляют себя как пересечение блинов, а гало возникают при взаимопересечении нитей. В более поздние времена различные части паутины, участвующие в движении крупномасштабной структуры, перекрываются, что еще более увеличивает сложность паутины

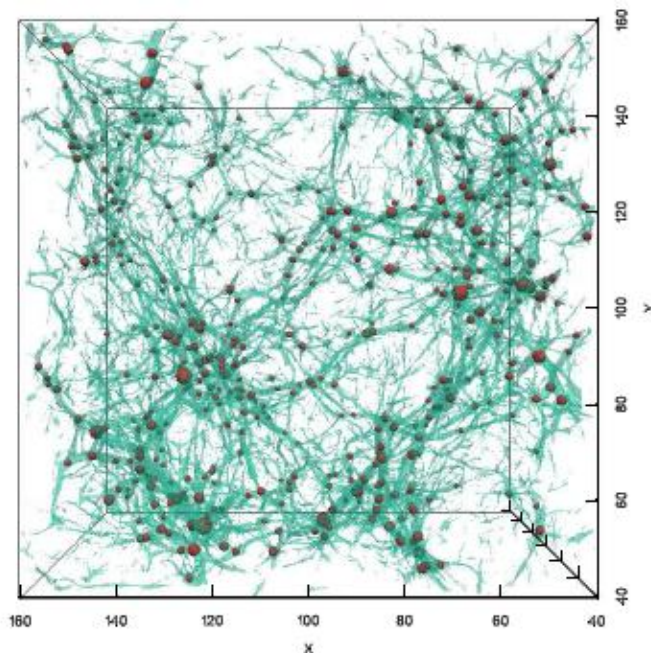
Использование полной шестимерной информации позволяет генерировать новые поля, которые предоставляют дополнительную полезную информацию об эволюции и морфологии паутины. Один из аспектов – это однопотокое поле в эйлеровом пространстве, на чем авторы и фокусируются далее. Другой пример – это “шлепающие” поля в лагранжевом пространстве. В космологическом контексте это было впервые использовано в ЗА. Vogelsberger & White (2011) использовали это при исследовании мультипотокковой структуры галактических размеров гало. Shandarin & Medvedev (2014) применили это для идентификации субгало в гало темной материи. Сходная, хотя в чем-то более упрощенная реализация этой идеи была выявлена в методе ORIGAMI, использованном для анализа паутины (Falck, Neyrink & Szalay 2012, Falck & Neyrink 2014). Хотя эти методы не могут быть использованы непосредственно для наблюдательных данных, поскольку начальное состояние не известно, они обеспечивают более глубокое понимание нелинейной кластеризации бесстолкновительной темной материи и демонстрируют новые свойства паутины.

Авторы не обсуждают в своей статье соотношение между мультипотокковыми полями и полями плотности, потому что это подробно обсуждалось в предшествующих публикациях (Shandarin, Habib & Heitmann 2012 и Abel, Hahn & Kaehler 2012).

С целью рассчитать мультипотокковое поле будет использована схема мозаичной структуры, описанная в работе Shandarin, Habib & Heitmann (2012); она кратко кратко обсуждается в разделе 3. Используя эту методологию на примере некоторого прямоугольного объема, авторы обсуждают глобальное поведение числа потоков в космической паутине (раздел 4). Эта методология может быть также использована для нахождения мультипотокковых полей в меньших эйлеровых объемах с очень высоким разрешением. В разделе 5 исследуется локальное поведение мультипотокков в областях вокруг гало, используя технику “friends-of-friends” (FOF).

Были использованные данные космологического моделирования Gadget-2 (Springel 2005) для прямоугольного объема с размером $100 h^{-1}$ Мпк и $200 h^{-1}$ Мпк с

128³, 256³ и 512³ ячеек сетки. Каждая ячейка соответствовала от 10⁹ до 10¹² масс Солнца. Начальные условия и космологические параметры были совместимы с планковской космологией. Был использован лагранжев объем, и выполнено 3D отображение на соответствующие эволюционирующие модели. Кроме того, для локального мультипоточкового анализа вокруг гало был использован каталог гало для каждого из моделируемых объемов. Гало детектировались с использованием метода FOF, где объектами были более 20 частиц на расстоянии связующих длин $b=0.2$.



Космологическая паутинообразная структура в большом объеме (100 h^{-1} Мпк и 128³ частиц). Области с 17 или более потоками (голубой цвет) образуют нитеобразную структуру. Гало определяют методом FOF (красный цвет), они вплетены в пересечения нитей.

Главные результаты исследования могут быть подытожены следующим образом. В разрешении, установленном при моделировании, т.е. без учета дополнительного сглаживания, космическая паутина представляет собой иерархическую структуру: каждое гало погружено в нитеобразную структуру паутины с пересечением нитей, а каждая нить вплетена в тканеподобную стенку космической паутины с переплетением стенок. Локально гало представляют собой области с наибольшим числом потоков, число потоков в соседних нитях больше, чем в соседних стенках, а стенки представляют собой области, где число потоков больше или равно трем. Войды (пустоты структуры) определяются исключительно локальным условием однопоточковости. Оболочки потоков вокруг гало являются тонкими, и ближайшая область войда обычно составляет около полутора радиусов FOF гало.

Ссылки

- Abel T., Hahn O., Kaehler R., 2012, MNRAS, 427, 61
- Aragon-Calvo M. A., van de Weygaert R., Jones B. J. T., 2010, MNRAS, 408, 2163
- Arnold V. I., Shandarin S. F., Zeldovich Y. B., 1982, Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, 20, 111
- Bond J. R., Kofman L., Pogosyan D., 1996, Nature, 380, 603
- Cautun M., van de Weygaert R., Jones B. J. T., Frenk C. S., 2014, MNRAS, 441, 2923
- Colberg J. M. et al., 2008, MNRAS, 387, 933
- Elahi P. J. et al., 2013, MNRAS, 433, 1537
- Falck B., Neyrinck M. C., 2014, ArXiv e-prints
- Falck B. L., Neyrinck M. C., Szalay A. S., 2012, ApJ, 754, 126

Forero-Romero J. E., Hoffman Y., Gottlober S., Klypin A., Yepes G., 2009, MNRAS, 396, 1815
Frenk C. S., White S. D. M., Davis M., 1983, ApJ, 271, 417
Hahn O., Carollo C. M., Porciani C., Dekel A., 2007, MNRAS, 381, 41
Hoffmann K. et al., 2014, MNRAS, 442, 1197
Klypin A. A., Shandarin S. F., 1983, MNRAS, 204, 891
Knebe A. et al., 2013, MNRAS, 435, 1618
Oort J. H., 1983, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 21, 373
Shandarin S., Habib S., Heitmann K., 2012, Phys. Rev. D, 85, 083005
Shandarin S., Zeldovich Y., 1989, Rev. Mod. Phys., 61, 185
Shandarin S. F., 2011, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 5, 15
Shandarin S. F., Klypin A. A., 1984, Soviet Astronomy, 28, 491
Shandarin S. F., Medvedev M. V., 2014, ArXiv e-prints
Sousbie T., 2011, MNRAS, 414, 350
Sousbie T., Pichon C., Kawahara H., 2011, MNRAS, 414, 384
Springel V., 2005, MNRAS, 364, 1105
van de Weygaert R., Schaap W., 2009, in Lecture Notes in Physics, Vol. 665, Data Analysis in Cosmology, Martinez V. J., Saar E., Martinez-Gonzalez E., Pons-Borderia M.-J., eds., Berlin Springer Verlag, pp. 291-413
Vogelsberger M., White S. D. M., 2011, MNRAS, 413, 1419
Zel'dovich Y. B., 1970, A&A, 5, 84