ТОМОГРАФИЯ В АСТРОФИЗИКЕ

Н. Г. Бочкарев[1,2]

[1] *Международная общественная организация "Астрономическое общество"*

[2] *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга*
Университетский просп. 13, 119992 Москва, Россия
e-mail: boch@sai.msu.ru

В последнее время термин "томография" стал широко использоваться в астрофизике. Чаще всего под этим словом подразумевается доплеровская спектральная томография тесных двойных звездных систем типа катаклизмических переменных (CVs) и рентгеновских двойных (XRBs). Исследуются аккреционные потоки и диски, а также форма оптических компонентов. Тот же термин все чаще и чаще используется для широкого класса других методов исследований, например, для обозначения реверберационного картирования (эхолокации) активных галактических ядер (AGN). В настоящее время термин томография стал применяться при исследовании линии 21 см атомарного водорода в межзвездной и межгалактической средах, галактических магнитных полей и даже при изучении внутреннего строения Солнца и Земли, просвечиваемых потоками нейтрино. В общем случае томографией можно назвать процесс восстановления распределения изучаемых характеристик объекта исследования вдоль одной из пространственных координат, для которой такое распределение не следует непосредственно из наблюдений. В астрономической практике чаще всего восстановлению подвергается распределение вдоль луча зрения. В данной статье основное внимание сосредоточено на спектральной томографии двойных звезд и AGN.

ASTROPHYSICAL TOMOGRAPHY, by Bochkarev N. G. – Lately, the notion "tomography" became widely used in astrophysics. By tomography is most often meant the Doppler spectral tomography of close binaries: both cataclysmic and X-ray binaries (research of accretion beams and disks as well as shapes of optical components). The same term is more and more often applied to a wide class of other methods of investigation, *e. g.*, it is often substituted for the term "AGN reverberation mapping". Presently, the term tomography is used in investigations of the H I 21 cm line in the interstellar and intergalactic media, galactic magnetic fields, and even in the exploration of the internal structure of the Sun and the Earth through neutrino flow, *etc.* Broadly speaking the tomography means the restoration of a searched object characteristics distribution along a space coordinate for which the allocation does not directly follow from observations. In the astronomical practice the most frequently used restoration is the determination of a distribution along the sight line. This paper focuses mostly on the spectral tomography of binary stars and active galactic nuclei.

ВВЕДЕНИЕ

Понятие томографии прочно вошло в нашу жизнь в связи с широким распространением медицинских томографов. С их помощью удается из совокупности двумерных изображений объекта исследования восстанавливать его трехмерную структуру.

В широком смысле томография есть метод восстановления изображений, который успешно применяется в различных областях, далеко выходящих за пределы медицины. Томографией обычно называют процесс восстановления распределения изучаемых характеристик объекта исследования вдоль одной из пространственных координат, для которой оно не следует непосредственно из наблюдений. В астрономической практике чаще всего восстановлению подвергается распределение вдоль луча зрения.

В астрономической литературе термин "томография", по-видимому, впервые появился в 1987 г. [1] в связи в проблемой выяснения геометрических и фотометрических характеристик пятен на звездах по периодическому изменению профилей спектральных линий в процессе осевого вращения звезды. На следующий год его применили к случаю восстановления геометрических параметров тесных двойных систем (ТДС) звезд по периодической составляющей вариаций профилей наблюдаемых спектральных линий. В последние годы термин приобрел популярность и стал применяться в крайне разнообразных случаях.

Восстановление изображений – это одна из типичных задач астрономии, поскольку многие астрономические объекты настолько далеки от нас, что методом бинокулярного зрения или параллакса определить расстояние до них не удается, т. е. распределение вдоль луча зрения подлежит восстановлению. Для многих объектов (прежде всего для большинства звезд, в том числе двойных и более высокой кратности) угловая протяженность их на небесной сфере столь мала, что они наблюдаются как точечные. В этом случае восстановлению в идеале подлежит структура объекта вдоль всех трех пространственных координат.

Таким образом, томографией в широком смысле этого слова можно назвать все методы определения шкалы расстояний во Вселенной, которые не поддаются изучению методом параллаксов. Чаще всего восстановить картину происходящего помогает детальный спектральный анализ. Классическими примерами последних являются определение космологических расстояний по красному смещению и восстановление пространственного распределения различных объектов в Галактике методом кинематических расстояний.

Восстановление структуры возможно также в тех случаях, когда при периодически повторяющихся движениях структурные элементы объекта исследования изменяют свои лучевые скорости, а профили спектральных линий испытывают периодические изменения формы. В этом случае, используя модель движения, можно восстановить структуру объекта. Такой метод называют доплеровской томографией в широком смысле (доплеровская томография в узком смысле описана в следующем разделе статьи).

Термин томография стал применяться все шире и шире не только в связи с изучением перечисленных выше классов объектов, но, например, и для исследования оболочек долгопериодических переменных звезд типа Миры Кита [2], планетарных туманностей [3], квазаров [4]; магнитных полей на поверхности белых карликов [5], на Солнце (по потоку нейтрино) [6] и в Галактике [7]; нейтрального компонента межгалактической среды при больших красных смещениях по линии 21 см H I [8]; скоплений галактик и скрытой массы с помощью слабого линзирования [9, 10] и т. д. В работах [11, 12] исследуется возможность использования изотропного потока космических нейтрино в диапазоне энергий от 10 до 10 000 ТэВ для изучения внутренней структуры Земли. Это может стать независимым по отношению к применяемым сейчас сейсмическим методам изучения внутреннего строения нашей планеты с помощью частиц, пронизывающих ее насквозь.

ДОПЛЕРОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ

Хотя термин томография стал модным и применяется в различных областях астрономии (см. введение), наибольшее количество публикаций посвящено доплеровскому картированию ТДС. При этом для каждой из изучаемых спектральных линий на плоскости орбитальная фаза – лучевая скорость строится распределение интенсивности в данной линии. С использованием кинематической и геометрической модели системы эти данные переводятся в двумерное изображение объекта на плоскости лучевых скоростей V_x – V_y (томографическая карта) и далее – в пространственное распределение яркости излучения рассматриваемой линии (собственно доплеровская томограмма).

Доплеровская томография применяется для детального изучения аккреционных дисков в CVs [13, 14] и ТДС типа Алголя [15]. Она очень полезна при исследовании структуры поверхности диска, если он наблюдается под достаточно большим углом. Подобная техника недавно стала применяться для изучения разделенных двойных и других кратных систем [16, 17], включая кандидаты в черные дыры [18, 19].

Количество публикаций этого типа быстро растет. Если за первые шесть лет (1988–1993 гг.) применения доплеровской томографии к изучению двойных звезд было опубликовано только 10 статей, то с 1994 по 2000 гг. количество реферируемых публикаций на эту тему составляло от 9 до 19 в год [20]. Согласно [20] к сентябрю 2000 г. в рецензируемых журналах были опубликованы доплеровские карты 64 CVs и рентгеновских новых как в спокойных состояниях, так и во время вспышек. Чаще всего измерения выполнялись для линии водорода H_β. Во многих случаях они сопровождались наблюдениями в H_α и H_γ, и линиях He I и He II. Реже использовались спектральные линии C I, Na I, Mg I, Mg II, Ca II и УФ-линии C III, Si IV, N V.

В этих работах обычно применялся метод анализа наблюдательных данных (восстановления изображений), который использует набор модельных предположений, ставший стандартным. С этим набором предположений обычно связывают термин доплеровская томография в узком смысле слова. Главными среди модельных предположений являются следующие:

1. Все точки системы видны в любой момент времени.

2. Поток от любой точки, фиксированной во вращающейся системе координат, является постоянным.

3. Все движения параллельны орбитальной плоскости.

4. Все векторы скорости вращаются вместе с двойной системой.

5. Собственную ширину профилей линии в каждой точке можно считать пренебрежимо малой.

6. Все движения в системе считаются круговыми.

В рамках этих довольно общих приближений алгоритм восстановления распределения излучения в картинной плоскости по наблюдательным данным оказывается достаточно прост [20] и надежен в использовании. При этом для сглаживания шумов в доплеровских изображениях для регуляризации решения используется как метод максимума энтропии, так и FBP-метод (filtered back-projection) [20].

Поскольку доплеровская томография имеет дело с лучевыми скоростями, то результатом первого шага анализа является томографическая карта, т. е. поле скоростей в орбитальной плоскости системы. На построенных изображениях поля скоростей внешние края изображения соответствуют наибольшим скоростям движения, а внутренние – наименьшим. Таким образом, изображение аккреционного диска представляется как бы "вывернутым наизнанку": внешние части доплеровского изображения соответствуют внутреннему ободку кольца в диске, ответственному за излучение в рассматриваемой спектральной линии. И наоборот: внешней границе зоны свечения диска в этой линии соответствует внутренняя граница ее изображения на доплеровской карте. Подобные изображения часто встречаются в статьях.

Важнейшими результатами доплеровской томографии стали:

1. Обнаружение спиральных ударных волн в аккреционных дисках в CVs ([21] для карликовой новой IP Peg); получены также свидетельства существования таких волн в дисках SS Cyg, V336 Pup, EX Dra.

2. Изучение струй в полярах [22].

5. Изучение горячих пятен в карликовых новых.

4. Изучение вторичного компонента: найдена эмиссия от быстровращающихся красных карликов.

5. Отсутствие следов дисков во многих новоподобных системах.

6. Выявление струйных потоков, вытекающих из систем [23].

Перспективы доплеровской томографии связаны прежде всего с переходом от наблюдений очень короткопериодических систем, когда в одну наблюдательную ночь на одном инструменте удается провести измерения для полного орбитального цикла, к более долгопериодическим системам. В этом случае одной из важных проблем является исключение систематических ошибок, вызываемых прерыванием наблюдений от одной ночи к другой, а также с переходом от одного телескопа к другому. Меньшие лучевые скорости в долгопериодических системах требуют более высокого спектрального разрешения. Возможности метода ограничиваются тепловым уширением спектральной линии (от единиц до десятков км/с).

Принципиально новые возможности для анализа структуры и кинематики ТДС открывает сопоставление с наблюдениями результатов гидродинамического моделирования газовых течений в них [24].

Переход к более высокому спектральному разрешению предполагает одновременно уменьшение продолжительности экспозиции с тем, чтобы за время экспозиции лучевые скорости всех элементов объекта изучения изменились меньше величины, соответствующей спектральному разрешению. Одновременное требование увеличения спектрального разрешения и сокращения экспозиции с очевидностью приводит к необходимости использования самых больших телескопов (класса 6–10 м). Поэтому для 2-м телескопа на пике Терскол следует выбирать наиболее яркие объекты [25].

ТОМОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ РОША

Томография поверхности Роша [26, 27] аналогична доплеровской томографии, но использует более реалистичную для XRB модель системы. Предполагается, что оптический компонент заполняет свою полость Роша, соответствующую синхронному вращению и круговой орбите. Каждый элемент поверхности такой звезды формирует свой собственный профиль спектральной линии. Разные точки поверхности имеют разные собственные профили. Модельный профиль спектральной линии определяется интегрированием по видимой части поверхности звезды профилей линии, образуемых в каждой точке поверхности звезды с учетом факторов проекции, потемнения к краю, затмений, если они имеются, и доплеровских сдвигов, соответствующих радиальной скорости каждого элемента поверхности в рассматриваемой фазе орбитального периода. Таким образом, рассчитывается расширенный вращением профиль изучаемой спектральной линии для каждой фазы орбитального периода. В нашей стране опыт таких работ имеет группа А. М. Черепащука [24].

Эта более сложная модель, с одной стороны, может дать более реалистичные результаты, но с другой стороны – оказывается более требовательной к качеству наблюдательного материала, а также к алгоритмам, используемым для анализа наблюдательных данных. Анализ наблюдений – это решение обратной задачи, которая, вообще говоря, некорректна и требует применения методов регуляризации. Обычно используемый метод максимума энтропии имеют очень медленную сходимость итераций [28]. При этом велика опасность получения артефактов, для устранения которых требуется очень высокое качество наблюдательного материала. Из модельных расчетов видно, что если задать однородное распределение интенсивности по всей поверхности звезды с единственным пятном, покрывающим 0.8 процентов от ее поверхности, и ввести в численном эксперименте шумы на уровне 10 % сигнала, то при восстановлении изображения получатся светлые и темные пятна, покрывающие всю поверхность звезды [29].

Итак, при применении метода томографии поверхности Роша надо выполнять специальные численные тесты для определения влияния статистической погрешности наблюдательных данных и влияния погрешностей, которые могут возникнуть при реализации конкретного метода решения обратной задачи.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

В данном разделе кратко рассмотрена проблема мониторинга активных ядер галактик (AGN) с целью эхокартирования. В настоящее время проводится большое количество различных программ мониторинга AGN [30]. Одна из этих программ – мониторинг с целью эхокартирования по существу является методом спектральной томографии [4]. В этом году исполнилось 20 лет с момента создания теоретической базой метода [31, 32]. В течение последних 14 лет более 100 астрономов из 55 обсерваторий 35 стран ведут наблюдения по указанной программе [33]. Причиной того, почему предпринимается столько усилий, является уникальность возможности восстановления геометрии и кинематики газа в самых внутренних частях AGN, в которых происходит основная часть энерговыделения.

Метод основан на том, что излучающий широкие линии газ нагревается и ионизуется в основном рентгеновским излучением (РИ), возникающим в самых центральных частях AGN вблизи сверхмассивной черной дыры. Поток РИ непостоянен, и переменность носит вспышечный характер. Вспышка РИ изменяет температуру и эмиссионную способность газа. В результате по среде бежит волна возмущения, которая для наблюдателя будет проявляться в изменениях профилей спектральных линий.

Проиллюстрируем качественные возможности метода: если первыми на вспышку РИ отреагируют высокоскоростные крылья профиля линии, то это означает, что высокоскоростной газ сосредоточен в наиболее внутренних частях “центральной машины” AGN. Если бы изменения были видны только в одном из двух крыльев, то это указывало бы на преобладание радиальных движений. Случаи падения и разлета газа можно различить по тому, в каком из двух крыльев возникает переменность. Задержка изменений интенсивности линий относительно континуума позволяет получить абсолютные размеры области, излучающей в рассматриваемой спектральной линии.

Таким образом, имеется принципиальная возможность по переменности профилей спектральных линий восстановить структуру излучающей области в рамках той или иной кинематической модели и сделать выбор между моделями. Как видно, это полностью подходит под понятие спектральной томографии как метода восстановления структуры вдоль еще по одного (дополнительного) пространственного измерения.

Описанным методом подробно исследовано около 10 объектов. В последнее время он стал широко применяться для определений масс центральных тел AGN (оценены массы для более чем 100 объектов).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 00-02-16272а и ФЦНТП “Приоритеты науки и техники России 2002–2006 гг.”.

[1] *Vogt S. S., Penrod G. D., Hatzes A. P.* Doppler images of rotating stars using maximum entropy image reconstruction // Astrophys. J.–1987.–**321**, N 2.–P. 496–515.

[2] *Alvarez R., Jorissen A., Plez B., et al.* Envelope tomography of long-period variable stars III. Line-doubling frequency among Mira stars // Astron. and Astrophys.–2001.–**379**.–P. 305–322; astro-ph/0109259.

[3] *Sabbadin F., Cappellaro E., Benetti S., et al.* Tomography of the low excitation planetary nabula NGC40 // Astron. and Astrophys.–2000.–**355**.–P. 688–698.

[4] *Horne K., Korista K. T., Goad M. R.* Quasar tomography: unification of echo mapping and photoionisation models // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–2002.–in press; astro-ph/0210539.

[5] *Euchner F., Jordan S., Beuermann K., et al.* Zeeman tomography of magnetic white dwarfs. I. Reconstruction of the field geometry from synthetic spectra // Astron. and Astrophys.–2002.–**390**.–P. 633–647.

[6] *Pulido J.* Possible tomography of the Sun's magnetic field with solar neutrinos // Phys. Rev. D.–1998.–**57**, N 12.–P. 7108–7119.

[7] *Stepanov R., Frick P., Shukurov A., Sokoloff D.* Wavelet tomography of the Galactic magnetic field. I. The method // Astron. and Astrophys.–2002.–**391**.–P. 361–368; astro-ph/0112507.

[8] *Di Matteo T., Perna R., Abel T., Rees M. J.* Radio Foregrounds for the 21cm Tomography of the Neutral Intergalactic Medium at High Redshifts // Astrophys. J.–2002.–**564**, N 2.–P. 576–580; astro-ph/0109241.

[9] *Wittman D., Margoniner V. E., Tyson J. A., et al.* Weak lensing discovery and tomography of a cluster at $z = 0.68$ // Astrophys. J. Lett.–2002.–in press; astro-ph/0210120.

[10] *Hu W.* Dark energy and matter evolution from lensing tomography // Phys. Rev. D.–2002.–**66**, N 8.–id. 083515.

[11] *Jain P., Ralston J. P., Frichter G. M.* Neutrino absorption tomography of the Earth's interior using isotropic ultra-high energy flux // Astropart. Phys.–1999.–**12**, N 3.–P. 193–198.

[12] *Lindner M., Ohlsson T., Tomas R., Winter W.* Tomography of the Earth's core using supernova neutrinos // 2002.–hep-ph/0207238.

[13] *Marsh T. R., Horne K.* Images of accretion discs. II Doppler tomography // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–1988.–**235**.–P. 269–286.

[14] *Kaitchuck R. H., Schlegel E. M., Honeycutt R. K., et al.* An atlas of Doppler emission-line tomography of cataclysmic variable stars // Astrophys. J. Suppl. Ser.–1994.–**93**, N 2.–P. 519–530.

[15] *Albright G. E., Richards M. T.* Doppler tomography of accretion discs in Algol binaries // Astrophys. J.–1996.–**459**, N 2.–P. L99.

[16] *Simon K. P., Sturm E.* Disentangling of composite spectra // Astron. and Astrophys.–1994.–**281**, N 1.–P. 286–291.

[17] *Hadrava P.* Orbital elements of multiple spectroscopic stars // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.–1995.–**114**.–P. 393.

[18] *Sowers J. W., Gies D. R., Bagnuolo W. G., Jr., et al.* Tomographic analysis on H_α profiles in HDE226868 / Cygnus X–1 // Astrophys. J.–1998.–**506**.–P. 424–430.

[19] *Torres M. A. P., Casares J., Martinez-Pais I. G., Charles P. A.* Rotational broadening and Doppler tomography of the quiescent X-ray nova Centaurus X-4 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–2002.–**334**, N 1.–P. 233–240.

[20] *Marsh T. R.* Doppler tomography // Astrotomography, indirect imaging methods in observational astronomy: Proceedings of the Astro-tomography workshop, Brussels / Eds H. M. J. Boffin, D. Steeghs, J. Cuypers.–Lecture Notes in Physics: Springer-Verlag, 2001.–**573**.–P. 1; astro-ph/0011020.

[21] *Steeghs D., Harlaftis E. T., Horne K.* Spiral structure in the accretion disc of the binary IP Pegasi // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–1997.–**290**, N 2.–P. L28–L32.

[22] *Schwope A. D., Catalan M. S., Beuermann K., et al.* Multi-epoch Doppler tomography and polarimetry of QQ Vul // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–2000.–**313**, N 3.–P. 533–546.

[23] *Hynes R. I., Charles P. A., Haswell C. A., et al.* Doppler tomography of XTE J2123–058 and other neutron star LMXBs // Astrotomography, indirect imaging methods in observational Astronomy: Proceedings of the Astro-tomography workshop, Brussels / Eds H. M. J. Boffin, D. Steeghs, J. Cuypers.–Lecture Notes in Physics: Springer-Verlag, 2001.–**573**.–P. 378; astro-ph/0008145.

[24] *Кузнецов О. А., Бисикало Д. В., Боярчук А. А. и др.* Синтетические доплеровские томограммы газовых потоков в двойной системе IP Peg // Астрон. журн.–2001.–**78**, № 1.–С. 997–1007.

[25] *Карицкая Е. А.* Оптическая доплеровская томография как метод исследования рентгеновской двойной Лебедь X–1 // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.–2003.–№ 4.–С. 230–233.

[26] *Rutten R. G. M., Dhillon V. S.* Roche tomography: imaging the stars in interacting binaries // Astron. and Astrophys.–1994.–**288**.–P. 773–781.

[27] *Rutten R. G. M., Dhillon V. S.* Roche tomography of the cool star in IP Peg // Cataclysmic variables and related objects / Eds A. Evans, J. H. Wood.–Dordrecht: Kluwer, 1996.–P. 21.

[28] *Dhillon V. S., Watson C. A.* Imaging the secondary stars in cataclysmic variables // Astrotomography, indirect imaging methods in observational Astronomy: Proceedings of the Astro-tomography workshop, Brussels / Eds H. M. J. Boffin, D. Steeghs, J. Cuypers.–Lecture Notes in Physics: Springer-Verlag, 2001.–**573**.–P. 94.

[29] *Watson C. A., Dhillon V. S.* Roche tomography of cataclysmic variables – I. Artefacts and techniques // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–2001.–**326**, N 1.–P. 67–77.

[30] *Бочкарев Н. Г.* Спектральный и фотометрический мониторинг AGN с целью эхокартирования: прошлое, настоящее, будущее // Nasiraddin Tusi and modern astronomy / Eds E. S. Babayev, A. S. Guliev.–Baku: Poligraf-Servis, 2002.–P. 70–112.

[31] *Blandford R. D., McKee C. F.* Reverberation mapping of the emission line regions of Seyfert galaxies and quasars // Astrophys. J.–1982.–**255**.–P. 419–439.

[32] *Бочкарев Н. Г., Антохин И. И.* Возможность быстрых изменений профилей эмиссионных линий в спектрах активных ядер галактик и квазаров // Астрон. циркуляр.–1982.–№ 1238.–С. 1–5.

[33] *Peterson B. M., Berlind P., Bertram R., Bischoff K. Bochkarev N. G., et al.* Steps toward determination of the size and structure of the broad line region in active galactic nuclei. XVI. A thirteen-year study of spectral variability in NGC 5548 // Astrophys. J.–2002.–in press; astro-ph/0208064v1.