

Кинематика радиоструй SS 433

Александр Панфёров, Николай Кузьяев

Тольяттинский госуниверситет

E-mail: panfS@yandex.ru, kol2160@mail.ru

Abstract

Прецессия струй SS 433 обуславливает искаженное релятивизмом характерное изображение спирали струй в радиодиапазоне на масштабах секунды дуги. Кинематика следа струй на небесной плоскости расходится до 10% с предписанием модели струй с регулярными скоростью и прецессионным вращением, которому следуют оптические струи. Знание кинематики радиоструй, с учётом этих расхождений, необходимо для понимания эволюции струй и их взаимодействия со средой. По данным радионаблюдений мы определяем функциональный вид зависимости вектора ускорения струи от времени.

Данные

Струи SS 433, прототипа микроквазаров, являются наиболее изученными. По канонической кинематической модели, основывающейся главным образом на данных по оптическим струям (т.е. до расстояний от источника $\sim 10^{15}$ см), отдельные выбросы в прецессирующих струях движутся прямолинейно и равномерно. Эта модель лежит в основании тех или иных физических моделей струй и кинематической оценки расстояния до SS 433 (напр., Blundell & Bowler, 2004, ApJ, 616, L159). Однако наблюдения указывают на отклонение радиоструй от кинематической модели до 10% (Crossley и др., 2002, BAAS, 34, 1225; Schillemat и др., 2004, BAAS, 36, 1515), в частности на систематический сдвиг по фазе прецессии (Stirling и др., 2004, MNRAS, 354, 1239; Paragi, 2009, частное сообщение) – очевидно, что оптические и радиоструи несколько различаются по кинематике. Существующие в литературе моделирования изображений радиоструй на расстояниях от источника 10^{16} - 10^{17} см являются скорее демонстрационными (напр. Hjellming & Johnston, 1981, ApJ, 246, L141), не обосновывающими применимость канонической кинематической модели к радиоструям, согласно которой скорость струй $v_j = 0.26c$ и расстояние до объекта $D = 5.5$ кпк, с соответствующей точностью.

Из поляризационных наблюдений следует (Roberts и др., 2010, ApJ, 719, 1918), что магнитное поле ориентировано вдоль канала прецессирующих радиоструй, а не вдоль вектора локальной скорости в струях, и сторона струй по направлению прецессионного вращения является более яркой.

Данные наблюдений Stirling и др. (MNRAS, 337, 657, 2002) по собственным движениям узлов струй свидетельствуют о существенно меньшем расстоянии до SS 433, $\sim D = 4.5$ кпк.

Модель

Торможение и снос прецессирующих струй должны быть при движении сквозь мощный ветер от сверхкритического аккреционного диска, $\sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{г}$. По модели Begelman и др. (2006, MNRAS, 370, 399) этот ветер способен даже передавать своё нутационное и прецессионное вращения струям вблизи источника. В работе Панфёрова (2014, A&A, 562, A130) разработана соответствующая модель динамики струй.

Прецессирующая струя (Рис.1) представляет собой не независимые сгустки, а скорее непрерывный поток в виде вращающейся спирали, локальная скорость которой направлена вдоль образующей прецессионного конуса.

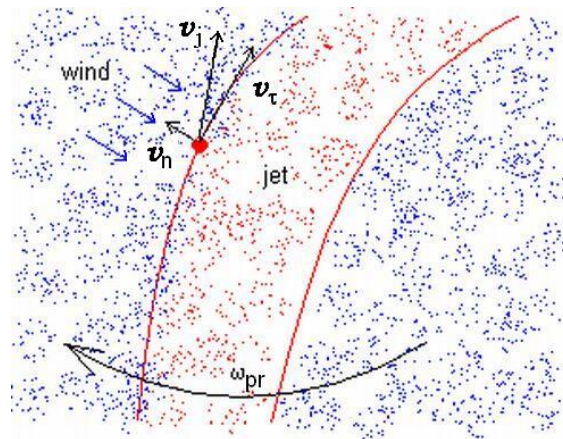


Figure 1: Схема прецессирующей струи. В покоящейся относительно источника среде давление налетающего газа определяется компонентой скорости струи, нормальной к её поверхности.

На поверхности спирали струи, движущейся сквозь медленный ветер, образуется ударная волна. Давление в струе оценивается по яркости синхротронного радиоизлучения. Данные о распределении яркости и ориентации магнитного поля позволяют предположить, что передний фронт боковой поверхности струи испытывает существенное влияние напора налетающего газа, поэтому его динамическое давление и давление в струе должны быть примерно равны.

Решение динамической задачи о движении каждого достаточно малого отрезка струи, независимого от других, под влиянием динамического давления ветра даёт кинематику струи в целом (Рис. 2).

Эта модель позволяет избавиться от дихотомии расстояния до SS 433, определяемого по радиоструям на малых и больших масштабах. С другой стороны, модель удачно взаимосвязывает микро- и мега-физические параметры (излучения и динамики струй).

Однако, модель подстраивалась под единичное, хотя и высокклассное, изображение, т.о. к струям, не разрешённым во времени. Поэтому мы попытались применить эту модель динамики струй к наблюдениям Stirling и др. (MNRAS, 337, 657), которые имеют к тому же лучшее разрешение, хотя, в свою очередь, существенно меньший пространственный масштаб. Исследовалась модель ускорения малого отрезка струи вида (Панфёрова, 2014, A&A, 562, A130):

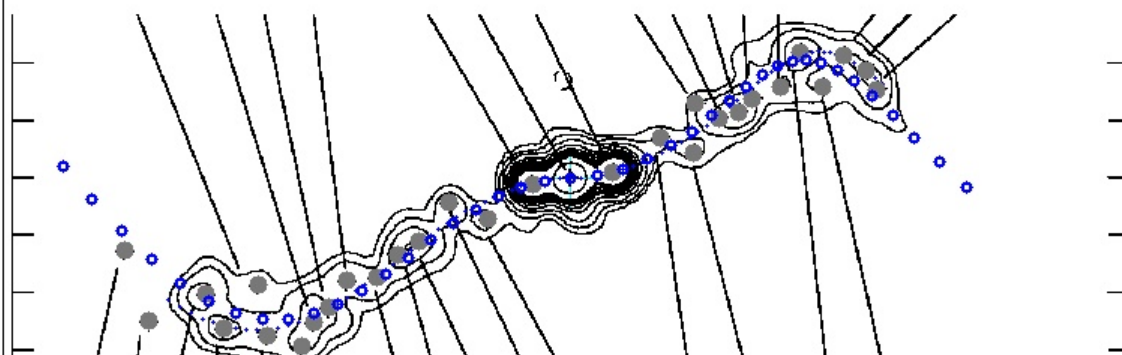
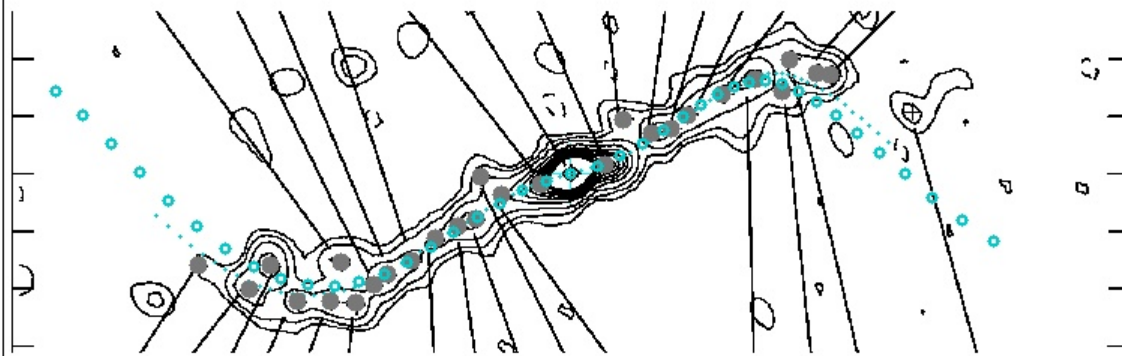
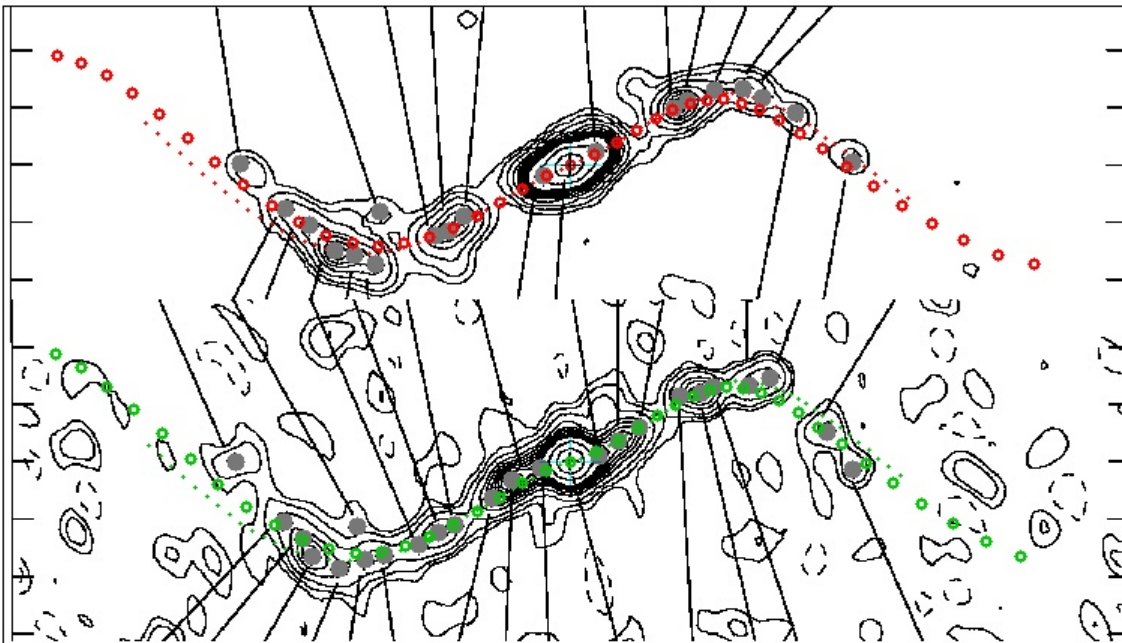
$$\vec{a} = -a_0 \frac{\exp(-r/r_0)}{r^p} \vec{e}_n, \quad (1)$$

где \vec{e}_n – единичный вектор скорости поверхности струи относительно среды, r – расстояние от SS 433, a_0 , r_0 и p – свободные параметры. Ещё одним свободным параметром является начало зоны ускорения (замедления) струй.

Результат

На Рис. 2 модельные следы струй показаны для наблюдений Stirling и др. (MNRAS, 337, 657), для начальной скорости $v_j = 0.258$ с и расстояния $D = 4.8$ кпк. Сдвиг изображений по вертикали пропорционален дате наблюдений (7, 12, 22 декабря и 4 января, сверху вниз), координаты – прямое восхождение и склонение, в единицах 0'1 (одинаковых по обеим осям). Серые кружки – узлы, отождествлённые Stirling и др. (MNRAS, 337, 657). Линии цветных точек – след струй по стандартной кинематической модели, цветные полые кружки – след по динамической модели для некоторого выбора параметров. Кружки следуют через 5 дней. Длина струи 100 дней.

Ни одна из моделей не даёт удовлетворительного приближения. Поиск оптимальных параметров динамической модели, минимизируя невязки для узлов на изображениях в целом, в ручном режиме, оказался не эффективным. К тому же противоположные струи не вполне симметричны (а модели симметричны). Учитывая, что имеется некоторая стохастичность в кинематике, более адекватным было бы исследование модели по отдельным узлам.



R, G, B