

О GPS И CSS-РАДИОИСТОЧНИКАХ

В.Г.МАЛУМЯН

Поступила 27 мая 2009

Принята к печати 17 сентября 2009

Обсуждаются спектральные и кинематические свойства и методы определения возрастов GPS и CSS-радиоисточников. Приведенные в работе данные не свидетельствуют в пользу механизма аккреции пыли или молекулярного газа на массивные черные дыры, расположенные в центральных частях радиогалактик этих классов как источника их активности. Природа GPS и CSS-объектов до конца не выяснена. Для выявления истинной природы источников этого класса необходимы дальнейшие тщательные исследования в оптическом, радио и других диапазонах спектра.

Ключевые слова: *радиогалактики; аккреция; пыль; молекулярный газ; черные дыры*

1. *Введение.* Согласно данным, приведенным в литературе, количество GPS (Gigahertz peaked spectrum) и CSS (Compact steep spectrum) радиоисточников составляет 20-30% от общего числа обнаруженных до настоящего времени радиоисточников [1-11].

GPS-источники, как показывает само название, имеют максимум (завал) в области частот $\nu \geq 1$ ГГц в спектрах радиоизлучения [1-11]. Их линейные размеры не превышают 1 кпк, расположены они в центральных областях (там где рождаются узкие оптические эмиссионные спектральные линии) отождествляемых с ними галактик. CSS-объекты - компактные (линейные размеры не превышают 10-15 кпк) радиоисточники с крутыми спектрами радиоизлучения [1-11]. Название CSS в некоторой степени условное, потому что у подавляющего большинства радиоисточников в области высоких частот спектры также крутые ($S \sim \nu^{-\alpha}$, где S - спектральная плотность потока на частоте ν , α - спектральный индекс радиоизлучения, обычно $\alpha = 0.7 - 0.8$). По-видимому, название CSS обусловлено тем, что до их обнаружения были известны только компактные радиоисточники с плоским спектром ($\alpha \leq 0.5$) и обнаружение компактных источников с крутым спектром ($\alpha > 0.5$) было неожиданностью. CSS-источники расположены в пределах отождествляемых с ними оптических галактик [2,12]. В спектрах некоторых CSS-источников также наблюдаются завалы, но на гораздо более низких частотах, чем у GPS-объектов - в области $\nu < 0.1$ ГГц.

Некоторые исследователи вышеупомянутые два класса радиоисточников объединяют в класс CSO (Compact symmetric object) объектов, так как наблюдения, выполненные с радиотелескопами высокой разрешающей силы, указывают на более или менее симметричную структуру GPS и CSS-источников. Они, как и большинство остальных радиоисточников, обычно состоят из двух компонентов примерно симметрично расположенных относительно центрального компонента, считающегося ядром галактики. Иногда они соединены между собой выбросами или другими образованиями [13].

Выполненные в последние годы детальные исследования природы GPS-объектов указывают, что, по всей вероятности, в ходе эволюции, расширяясь, они превращаются в CSS-объекты. Последние в свою очередь превращаются в обычные радиоисточники классов FR1 или FR2, или промежуточного класса по классификации Фанароффа и Рилли [3-5,14]. Предположение о том, что GPS и CSS-источники расположены в областях с очень высокой плотностью межгалактической среды, которая препятствует их расширению и поэтому они не достигают больших размеров, как обычные радиогалактики, не подтвердилось [1-11].

Таким образом, GPS и CSS-источники считаются молодыми, недавно образовавшимися объектами, начальной фазой обычных (нормальных) радиогалактик и квазаров.

История обнаружения GPS и CSS-объектов изложена в [15-17].

2. Спектры радиоизлучения GPS-объектов. Как известно, радиоизлучение космических объектов носит нетепловой характер. Оно обусловлено синхротронным механизмом. Спектры подавляющего большинства радиоисточников имеют степенной характер. У многих объектов в спектрах радиоизлучения наблюдаются завалы (максимумы). На частотах меньших частоты максимума ν_m вид спектра радиоизлучения зависит от механизма, которым обусловлен завал. Исследуя спектр в области частот $\nu < \nu_m$, можно выяснить причину завала. Но это легко можно сделать для однородных источников, имеющих простую структуру. На практике часто очень трудно однозначно установить механизм завала, так как, как правило, радиоисточники имеют сложную неоднородную структуру.

Механизмам завала в спектрах GPS-объектов посвящено много работ [1-11,18] и наиболее вероятным из них считается синхротронное самопоглощение. Не исключается также, что в некоторых источниках этого класса причиной завала может быть тепловое поглощение, обусловленное присутствием ионизованного газа в самом источнике или проектирующейся на него областью ионизованного водорода [19]. В случае синхротронного самопоглощения у однородного источника на частотах $\nu < \nu_m$ спектр имеет вид $S \sim \nu^{5/2}$.

Полагая, что завал в спектре обусловлен синхротронным самопогло-

щением, можно вычислить угловой размер источника θ [20]

$$\theta \sim S_m^{1/2} v_m^{-5/4} H^{1/4} (1+z)^{1/4}, \quad (1)$$

где S_m - спектральная плотность потока на частоте v_m , H - напряженность магнитного поля, z - красное смещение источника.

На то, что наиболее вероятным механизмом завала в спектре GPS-источников является синхротронная реабсорбция, указывают также измерения их угловых размеров с помощью радиоинтерферометров с сверхдлинными базами [10]. Они хорошо согласуются с вычисленными на основании теории синхротронного излучения по формуле (1) размерами [1-11]. Доказательством в пользу синхротронного самопоглощения можно считать также выявление эмпирической связи $v_m \sim L^{-0.65}$ (L - линейный размер источника), которая вытекает из теории.

3. *Спектральные возрасты GPS и CSS-источников.* В ходе эволюции радиоисточников их спектры радиоизлучения в силу различных причин претерпевают изменения [21-23]. Релятивистские электроны, ответственные за радиоизлучение, теряют энергию. Причинами потерь является ионизация среды, потери на обратный комптон-эффект, если пространственная плотность низкочастотных фотонов в источнике или в его окрестности значительна. Электроны могут потерять энергию и из-за расширения источника и т.д. [21-23]. Как показывают расчеты, самыми существенными являются потери на синхротронное излучение и на обратный комптон-эффект, если мы имеем дело с яркими компактными источниками. Обычно потерями на ионизацию среды и на свободно-связанные переходы можно пренебречь [21-23].

Потери энергии E релятивистских электронов на синхротронное излучение и на обратный комптон-эффект пропорциональны квадрату их энергии [22,23],

$$dE/dT \sim -(\zeta_s + \zeta_c) E^2, \quad (2)$$

где $\zeta_s \sim H^2$ и характеризует потери на синхротронное излучение, а $\zeta_c \sim u_{rad}$ характеризует потери на обратный комптон-эффект, u_{rad} - плотность энергии низкочастотных фотонов. Для простоты рассмотрим случай только синхротронных потерь. В этом случае имеем $dE/dt \sim -H^2 E^2$, а время жизни электронов с энергией E , $T \sim E/H^2 E^2 = H^{-2} E^{-1}$. Отсюда следует, что чем выше энергия электрона, тем быстрее он ее теряет. Электроны высоких энергий в основном излучают на высоких частотах $\nu \sim eH/mc(E/mc^2)^2$, где e и m - заряд и масса покоя электрона, c - скорость света в вакууме [22].

Из-за потерь энергии релятивистскими электронами на синхротронное излучение, начиная с частот, которые соответствуют наибольшим потерям энергии электронов, наклон спектра излучения увеличивается. Если

первоначальный спектр имел вид $S \sim \nu^{-\alpha}$, то вследствие синхротронных потерь, начиная с частоты ν_b , спектральный индекс радиоизлучения увеличивается. Наклон спектра на частотах $\nu < \nu_b$ остается прежним, а на частотах $\nu > \nu_b$ он увеличивается. Если инжекция излучающих релятивистских электронов происходит непрерывно, то в интервале частот $\nu > \nu_b$ $S \sim \nu^{-\beta}$, где $\beta = \alpha + 0.5$. Если же инжекция электронов прекратилась в какой-то момент, то изменение наклона спектра на частотах $\nu > \nu_b$ носит более сложный характер [21-23].

Таким образом, определив частоту перелома ν_b в высокочастотной части спектра радиоизлучения объектов, можно измерить возраст релятивистских электронов, ответственных за радиоизлучение [24,25]

$$T \sim H^{-1.5} \nu_b^{-0.5} (1+z)^{-0.5}. \quad (3)$$

При выводе (3) предполагается, что величина магнитного поля H постоянна, и что потерями на обратный комптон - эффект и обусловленные расширением источника, по сравнению с синхротронными, можно пренебречь.

Определенные описанным выше методом возрасты GPS-источников лежат в интервале от нескольких сот до нескольких тысяч лет [24-27]. Например, возраст GPS-источника 0108+388 - 300-400 лет. Возрасты CSS-источников не превышают несколько десятков тысяч лет [24-27].

4. Кинематические возрасты GPS и CSS-радиоисточников.

Методы современной радиоастрономии позволяют с помощью интерференционных радиотелескопов со сверхдлинными базами выполнять наблюдения с очень высокой разрешающей способностью. Наблюдения одних и тех же источников этими инструментами через определенный интервал времени показали, что отдельные компоненты многих радиоисточников переместились относительно положения, занимаемого ими прежде [27-29]. За сравнительно короткий промежуток времени было обнаружено много таких объектов с переменной структурой. Как правило, расстояние между компонентами источников увеличивается. Возникают новые компоненты, старые исчезают. Оказалось, что у некоторых источников, главным образом у квазаров, наблюдается разлет компонентов со "сверхсветовыми" скоростями, достигающими в несколько десятков раз больше скорости света в вакууме. В этом ничего необычного нет. Наиболее естественное объяснение наблюдаемых "сверхсветовых" скоростей заключается в следующем. Если движение компонента происходит с релятивистской скоростью и под малым углом к лучу зрения; то по причине конечности скорости света и потому, что мы наблюдаем проекцию этого движения на небесной сфере, нам покажется, что оно происходит со скоростью, превосходящей скорость света [23]. Наблюдательный факт разлета компонентов радиоисточников с релятивистскими скоростями, по нашему мнению, является весомым аргументом в пользу гипотезы В.А.Амбарцумяна о сверхплотных

телах, из которых возникают космические объекты [30].

Собственные движения были обнаружены и у многих GPS и CSS-объектов. За редкими исключениями у них "сверхсветовые" скорости не наблюдаются. Скорости разлета компонентов не превышают $0.4c-0.5c$ [27-29]. Наиболее часто встречающиеся скорости собственных движений у GPS и CSS-источников заключены в пределах $0.1c-0.2c$. Принимая, что разлет компонентов происходит с постоянной скоростью, можно вычислить возраст объекта. Определенные таким образом возрасты называются кинематическими (или динамическими) в отличие от спектральных возрастов.

До настоящего времени выполнено много наблюдений GPS и CSS-источников с целью определения их кинематических возрастов. Они хорошо согласуются со спектральными возрастами. Кинематические возрасты GPS-источников также находятся в пределах от нескольких сот до нескольких тысяч лет. Разность в возрастах, измеренных двумя вышеуказанными разными способами, не превышает двух раз [27-29]. Спектральные и кинематические возрасты обычных радиоисточников порядка нескольких десятков миллионов лет [23].

5. *GPS и CSS-радиоисточники и гипотеза черных дыр.* В настоящее время широкое распространение получила гипотеза черных дыр, согласно которой активность радиогалактик и квазаров (а также обычных галактик) обусловлена аккрецией вещества на массивные черные дыры, расположенные в их центральных частях. В качестве аккрецирующего вещества рассматриваются, главным образом, пыль или молекулярный газ [31].

Основой для принятия вышеуказанной концепции послужили два обстоятельства.

Объяснение гигантской мощности излучения радиогалактик и квазизвездных источников (мощность только их радиоизлучения достигает 10^{47} эрг s^{-1} и выше) термоядерными реакциями наталкивается на непреодолимые трудности. При аккреции вещества освобождаемая гравитационная энергия гораздо выше, чем при термоядерных реакциях. Например, при термоядерной реакции в 1 г вещества может освободиться примерно до 10^{18} эрг энергии, между тем, при аккреции этого количества вещества на нейтронную звезду с массой $1 M_{\odot}$ и радиусом 10 км может освободиться энергия до 10^{20} эрг. Понятно, что при аккреции 1 г вещества на черную дыру с массой $10^6 + 10^9 M_{\odot}$ освобождаемая энергия гораздо больше. Таким образом, по сравнению с термоядерными реакциями аккреция вещества на массивные черные дыры является несравненно более эффективным механизмом энерговыделения.

Второй причиной, послужившей основанием для распространения гипотезы черных дыр, является наблюдательный факт обнаружения в центральных областях многих радиогалактик широких полос пыли, которые в большинстве случаев имеют форму диска и расположены перпендикулярно плоскости

галактик. Например, такая широкая полоса пыли наблюдается в ближайшей радиогалактике Центавр-А (NGC 5128). Согласно [32-36], среди радиогалактик объекты, содержащие большое количество пыли, встречаются примерно в два раза чаще, чем среди галактик не имеющих сильного радиоизлучения. Согласно [32-36], распределение и количество пыли в объектах классов FR1 и FR2 не одинаково. В источниках класса FR1 пыль сосредоточена в дисках, обладающих малыми линейными размерами, а в объектах класса FR2 она может быть сосредоточена как в дисках, так и иметь клочковатое или волокнистое распределение. Пыли в них значительно больше, чем в источниках класса FR1.

Обнаружение пыли, концентрированной в центральных областях радиогалактик дало основание для предположения, что аккреция этой пыли на расположенную в ядре радиогалактики черную дыру и является источником мощного излучения. То, что объекты класса FR2 являются более мощными радиоисточниками по сравнению с FR1, объясняется тем, что у первых темп аккреции выше. Считается, что темп аккреции в наиболее мощных квазизвездных объектах свыше $1M_{\odot}$, а в нормальных галактиках - $0.01M_{\odot}$ в год [37].

В центральных областях радиогалактик с помощью радиоастрономических наблюдений обнаружено также большое количество молекулярного газа в форме дисков или колец [38-40].

Если аккрецирующим веществом является пыль или молекулярный газ, то, по-видимому, мощным излучением должны обладать объекты, уже прошедшие определенный этап эволюции. Согласно общепринятой модели, входящие в галактики звезды первого поколения возникают путем сгущения газа. В конце своего эволюционного пути они взрываются и выбрасывают образовавшиеся в их недрах вследствие термоядерных реакций тяжелые элементы и молекулярный газ в межзвездное пространство. Из этого вещества впоследствии образуется пыль и звезды последующих поколений. Для образования черной дыры (тем более с массой $10^6 + 10^9 M_{\odot}$) также требуется время, и, по всей вероятности, весьма длительное. Из вышеизложенного следует, что недавно образовавшиеся галактики, находящиеся в самом начале эволюционного пути, не могут обладать мощным излучением, так как в них пока нет ни черной дыры, ни необходимого для аккреции на нее вещества.

Как мы видели, кинематические и спектральные возрасты GPS-источников не превышают несколько тысяч или даже несколько сот лет, между тем они обладают мощным радиоизлучением (10^{45} эрг s^{-1} и выше), не говоря об излучении в более коротковолновом диапазоне спектра.

Таким образом, вышеизложенные факты о природе GPS и CSS-объектов свидетельствуют не в пользу аккреции на черные дыры как источника излучения и активности молодых, образовавшихся сравнительно недавно

радиогалактик. Есть точка зрения, что активность в радиогалактиках носит рекуррентный характер [41]. В этом случае в GPS и CSS-источниках должны быть обнаружены следы прежних периодов активности. У большинства источников данных типов такие следы не обнаружены [1-11].

6. *Заключение.* Приведенные в настоящей работе данные не свидетельствуют в пользу механизма аккреции вещества на черные дыры, расположенные в ядерных областях радиогалактик, как источника их активности. GPS и CSS-объекты в силу их молодости вряд ли содержат необходимое количество пыли или молекулярного газа для аккреции на массивную черную дыру. Если на самом деле возраст GPS-источников не превышает несколько тысяч лет, то очень трудно представить, что за столь короткий промежуток времени образовалась бы черная дыра с массой $10^6 + 10^9 M_{\odot}$. Приходится допустить, что "черная дыра" существовала уже до возникновения GPS и CSS-объектов. Другими словами приходится допускать, что вышеуказанные типы радиоисточников возникли из объекта, принимаемого за "черную дыру".

Природа отождествляемых с GPS и CSS-радиоисточниками оптических объектов (радиогалактик и квазаров) до конца не выяснена. Некоторые GPS-источники отождествлены с ярчайшими членами скоплений галактик. В некоторых из них наблюдаются "холодные течения" (cooling flow). Зависимость видимая величина - красное смещение (диаграмма Хаббла) отождествляемых с GPS-источниками галактик также близка к таковой для ярчайших членов скоплений галактик. Но, в отличие от последних, GPS-объекты, за редкими исключениями, не обладают заметным рентгеновским излучением [42]. GPS и CSS-радиоисточники иногда отождествляются со старыми гигантскими эллиптическими галактиками [1,8,43].

Для выявления истинной природы GPS и CSS-радиоисточников необходимы дальнейшие детальные исследования в радио, оптическом и других диапазонах спектра.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна,
Армения, e-mail: malumian@freenet.am

ON GPS AND CSS RADIO SOURCES

V.H.Malumian

The spectral and kinematical properties and methods of measurements of ages of GPS and CSS radio sources are discussed. The data presented in article do not witnessed in favour of accretion of dust or molecular gas on massive black holes located in central parts of the radio galaxies of these classes as sources of their activity. The real nature of GPS and CSS sources is not clear. It is necessary to carry out detailed investigations in the radio, optical and other ranges of spectra in order to make completely clear the real nature of objects of these classes.

Key words: *radio galaxies:accretion:dust:molecular gas:black holes*

ЛИТЕРАТУРА

1. C.P.O'Dea, Publ. Astron. Soc. Pacif., **110**, 493, 1998.
2. C.P.O'Dea, S.A.Baum, Astron. J., **113**, 148, 1997.
3. W.H. De Vries, C.P.O'Dea, S.A.Baum, E.Pertman, Astrophys. J., **503**, 156, 1998.
4. W.H. De Vries, C.P.O'Dea, E.Pertman, S.A.Baum, Astrophys. J., **503**, 138, 1998.
5. I.Snellen, R.T.Schilizzi, A.G. De Bruyn et. al., Astron. Astrophys., **131**, 435, 1998.
6. A.Marecki, H.Falcke, J.Neizgoda et. al., Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **135**, 273, 1999.
7. W.H. De Vries, C.P.O'Dea, S.A.Baum, P.D.Barthel, Astrophys. J., **526**, 27, 1999.
8. I.Snellen, M.G.Bremer, R.T.Schilizzi et. al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **279**, 1294, 1996.
9. I.Snellen, R.T.Schilizzi, G.K.Miley et. al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **319**, 445, 2000.
10. M.L.Lister, ASP Conference Series, **300**, 71, 2003.
11. I.Snellen, M.D.Lehnert, N.M.Bremer, T.T.Schilizzi, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **337**, 981, 2002.
12. I.Snellen, R.T.Schilizzi, M.N.Bremer et. al., Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **301**, 985, 1998.
13. G.B.Taylor, J.M.Marr, T.J.Pearson et. al., Astrophys. J., **541**, 112, 2000.
14. B.L.Fanaroff, J.M.Riley, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **167**, 31, 1974.
15. K.I.Kellermann, Publ. Astron. Soc. Australia, **19**, 77, 2002.
16. Г.Б.Шоломицкий, Астрон. ж., **42**, 673, 1965.
17. Г.Б.Шоломицкий, Астрон. Цирк., N 359, 1, 1966.
18. K.M.Blundell, S.Rawlings, Astron. J., **119**, 1111, 2000.

19. *J.M.Marr, G.B.Taylor, F.Crowford*, *Astrophys. J.*, **550**, 160, 2001.
20. *V.I.Slish*, *Nature*, 199, 682, 1963.
21. *Н.С.Кардашев*, *Астрон. ж.*, **39**, 393, 1962.
22. *А.Пахольчик*, *Радиоастрофизика*, изд. М., Мир, 1973.
23. *А.Пахольчик*, *Радиогалактики*, Изд. М., Мир, 1980.
24. *M.Murgia*, *Publ. Astron. Soc. Australia*, **20**, 19, 2003.
25. *M.Murgia, C.Fanti, R.Fanti et. al.*, *Astron. Astrophys.*, **345**, 769, 1999.
26. *I.Snellen, K.H.Mack, R.T.Schilizzi, W.Tschager*, *Publ. Astron. Soc. Australia*, **20**, 38, 2003.
27. *A.G.Polatidis, J.F.Conway*, *Publ. Astron. Soc. Australia*, **20**, 69, 2003.
28. *W.Tschager, R.T.Schilizzi, H.Rotering et. al.*, *Astron. Astrophys.*, **360**, 887, 2000.
29. *G.B.Taylor, J.M.Marr, T.J.Pearson, A.Readhead*, *Astrophys. J.*, **541**, 112, 2000.
30. *В.А.Амбарцумян*, *Научные труды*, Т.2, Ереван, Изд. АН Арм. ССР, 1960.
31. *D.Lynden-Bell*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **279**, 389, 1996.
32. *G.A.Verdoes Kleijn, S.A.Baum, T. De Zevu, C.P.O'Dea*, *Astron. J.*, **118**, 2592, 1992.
33. *R. Van Dokkum, M.Franx*, *Astron. J.*, **110**, 2027, 1995.
34. *B.Sparcs, S.A.Baum, I.Biretta, F.D.Machetto*, *Astrophys. J.*, **542**, 667, 2000.
35. *S. De Koff, P.Best, S.A.Baum*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **129**, 33, 2000.
36. *H.D.Tran, Z.Tsvetanov, H.C.Ford*, *Astron. J.*, **121**, 2928, 2001.
37. *P.Martini, R.W.Pogg*, *Astron. J.*, **118**, 2646, 1999.
38. *A.Tomito, K.Aoki, M.Watabane et. al.*, *Astron. J.*, **120**, 123, 2000.
39. *J.Lim, S.Leon, F.Combes, Dinh-V-Trung*, *Astrophys. J.*, **545**, L93, 2000.
40. *A.S.Evans, J.M.Mazarella, J.A.Surace et. al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **159**, 197, 2005.
41. *A.Marecki, P.D.Barthel, A.Polatidis, J.Owsianik*, *Publ. Astron. Soc. Australia*, **20**, 16, 2003.
42. *C.P.O'Dea, W.H. De Vries, D.M.Worral et. al.*, *Astron. J.*, **119**, 478, 2000.
43. *I.Snellen, R.T.Schilizzi, M.N.Bremer et. al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **301**, 985, 1998.