

III. AGN и микроквазары (μ QSO).

- μ QSO как миниатюрная модель AGN.**

В последние годы появилась интересная возможность подойти к проблеме смены состояний в AGN с неожиданной стороны. Дело в том, что больше 10 лет назад были открыты активные двойные звездные системы, состоящие из звезды–донора, компактного объекта (нейтронная звезда или черная дыра (BH)) и аккреционного диска, которые по некоторым своим свойствам напоминают активные ядра в миниатюре [94-98]. Естественно, что у этих объектов, получивших название «микроквазары» (μ QSO), энергетические, линейные и временные масштабы должны отличаться в меньшую сторону – по сравнению с AGN – в отношении

$$M_{BH}/m_* \approx 10^{6-9} M_{\odot} / 10 M_{\odot} \approx 10^5 - 10^8 \text{ раз.}$$

К настоящему времени таких систем обнаружено всего около дюжины и несколько десятков кандидатов (**таблица 1**) – они характеризуются появлением, время от времени, радиовыбросов, движущихся с околосветовыми и даже «сверхсветовыми» проекционными скоростями, которые впервые были обнаружены у радиоквазаров. (Эти результаты были получены по VLBI- данным, что и послужило основанием для их названия).

Таблица 1. Список кандидатов в двойные рентгеновские звездные системы с черными дырами (из работы J. Ziolkowski, astro-ph/0307307).
Красным выделены 10 систем, у которых обнаружены радиовыбросы, т.е. «микроквазары».

Название источника	P_{orb}	Оптический спектр	Другие названия	X-R	C тип	M_{BH}/M_{\odot}	Ссылки
Cyg X-1	5 ^d 6	O9.7 Iab	HDE 226868(O)	pers	μ Q	16 \pm 5	
LMC X-3	1 ^d 70	B3 V		pers		6 \div 9	
LMC X-1	4 ^d 22	O7-9 III		pers		4 \div 10	
SS 433	13 ^d 1	~A I	V1343 Aql (O)	pers	μ Q	11 \pm 5	
GX 339-4	14 ^h 8	F8-G2 III	V821 Ara(O)	RT			1,2,3
3U 0042+32	11 ^d 6	G?		T			4

XTE J0421+560		B[e]I	CI Cam (O)	T	μ Q?		5,6
GRO J0422+32	5 ^h 09	M2V	V518 Per(O) XRN Per 1992	T		3.6÷5.0	
A 0620-00	7 ^h 75	K4 V	V616 Mon (O) Mon X-1 XN Mon 1975	RT		11±2	
GRS 1009–45	6 ^h 96	K8 V	MM Vel (O)	T		4.4÷4.7	
XTE J1118+480	4 ^h 1	K7-M0 V	MM Vel (O)	T		6.0÷7.7	
GS 1124–684	10 ^h 4	K0-5 V	GU Mus (O)	T		7.0±0.6	
GS 1354–645		+	BW Cir (O) Cen X-2?	T			7
A 1524–617		+	KZ TrA (O) TrA X-1	RT			7
4U 1543–475	1 ^d 12	A2 V	IL Lup (O)	RT		8.4÷10.4	
XTE J1550–564	1 ^d 55	G8 IV-K4 III	V381 Nor (O)	RT	μ Q	9.7÷11.6	
4U 1630–472		+(IR)	Nor X-1	RT			4,7,8
XTE J1650–500	0 ^d 212	G-K		T	μ Q		9,10
GRO J1655–40	2 ^d 62	F3-6 IV	V1033 Sco (O) XN Sco 1994	RT	μ Q	6.3±0.3	
H 1705–250	12 ^h 5	K5 V	V2107 Oph (O) XN Oph 1977	T		5.7÷7.9	
XTE J1709–267				T			11
GRO J1719–24		M0-5 V	V2293 Oph (O) XN Oph 1993	T			3,12
XTE J1720–318				T			13
K 1730–31				T			12
GRS 1737–31				T			12
GRS 1739–278		≥ F5 V		T			3,14
1E 1740.7–2942	12 ^d 73			pers	μ Q		
H 1741–322				T			1
H 1743–32				T			12
SLX 1746–331				T			12
XTE J1748–288				T	μ Q		17
4U 1755–338	4 ^h 4	+	V4134 Sgr (O)	pers			12
XTE J1755–324				T			18
GRS 1758–258	18 ^d 45			pers	μ Q		12,16, 17
SAX J1806–246				T			19,20
XTE J1806–246				T			21
XTE J1819	2 ^d 817	B9 III	V4641 Sgr (O)	T	μ Q	6.8÷7.4	
RX J1826.2–1450	4 ^d 117	O6.5 Vf	LS 5039 (O)	pers	μ Q		22,23
EXO 1846–0312				T			12
XTE J1856+053				T			14
XTE J1859+226	9 ^h 16	~G 5	V404 Vul (O)	T		8÷10	

XTE J1901+014				RT			24
XTE J1908+094		+(IR)		RT			25
GRS 1915+105	33 ^d 5	K-M III	V1487 Aql (O) XN Aql 1992	RT	μQ	14±4	
4U 1918+146				T			4
4U 1957+115	9 ^h 3	+	V1408 Aql (O)	pers			12
GS 2000+251	8 ^h 3	K5 V	QZ Vul (O) XN Vul 1988	T		7.1±7.8	
XTE J2012+381				T			26,27
GS 2023+338	6 ^d 46	K0 IV	V404 Cyg (O)	RT		10.0÷13.4	
2S 2318+62				T	μQ		28

Примечания:

P_{orb} – орбитальный период,

X-R – XR переменность,

+ – - есть оптический объект, но спектр не получен,

IR – оптический объект виден лишь в ИК диапазоне,

T – временный источник,

RT – рекуррентный временный источник,

pers – постоянный источник,

μQ – микроквазар (тесные рентгеновские двойные звездные системы с релятивистскими радиовыбросами).

Если механизмы излучения у AGN и μQSO схожи (а для этого, в рамках парадигмы «jet-disk symbiosis» [100,101], есть некоторые основания, на что уже обращалось внимание в ряде работ, например, [102-105]), то, изучая особенности быстрой (тысячи секунд) смены состояний в μQSO, можно будет делать выводы и о гораздо более медленных (десятки и сотни лет) процессах в AGN. Правда, не надо забывать, что излучение от аккрецирующих звездных ВН наблюдается в рентгеновском диапазоне, а от массивных ВН – в оптике и УФ, т.к. средняя температура диска связана с $M_{\text{ВН}}$ соотношением

$$T_d = 2 \times 10^7 (M_{\text{ВН}}/M_{\odot})^{-1/4} \text{ K.}$$

Рассмотрим более подробно ситуацию со сменой состояний в микроквазарах.

- **Разные состояния у μ QSO.**

Данные мониторинга наиболее ярких в рентгеновском диапазоне μ QSO показали, что их кривые блеска в разные моменты времени можно представить в виде нескольких характерных состояний, не очень регулярно переходящих друг в друга. В ряде работ (например, [106-111]) выделяются несколько характерных состояний:

- (C) low/hard (LS-состояние), в котором преобладает нетепловой компонент ($\alpha_x=1.6$) со слабой (несколько %) тепловой добавкой от диска ($kT < 1$ кэВ), сильная переменность (30–50%) и квазипериодические осцилляции (QPO) с $\nu_{QPO} < 1$ Гц;
- (A) промежуточное (IS-состояние), в котором нетепловой спектр становится более крутым ($\alpha_x=2.5$) и $\nu_{QPO} \approx 1-10$ Гц;
- (A) very high (VHS-состояние) с преобладанием теплового компонента ($kT=1$ кэВ) при ослаблении и укрупнении нетеплового ($\alpha_x=2.5$); состояние похоже на IS, но с большим темпом аккреции, чем в IS;
- (B) high/soft (HS-состояние), в котором преобладает тепловой компонент ($kT \approx 1$ кэВ), а нетепловой еще боольше ослабевает ($\alpha_x > 2.5$).

Из известных на сегодня μ QSO лучше других исследован самый яркий из них GRS 1915+105, открытый в 1992 г. на рентгеновском спутнике «GRANAT». У этого объекта также наблюдаются разные состояния [110,111], напоминающие выше описанные (см. также таблицу 2 из работы [110], которые можно представить на двуцветной рентгеновской диаграмме HR1-HR2:

- состояние B (типа HS): $HR_1 > 1$, $HR_2 < 0.1$,
- состояние C (типа LS): $HR_1 \sim 1$, $HR_2 > 0.1$
- состояние A (типа VHS/IS): $HR_1 < 1.1$, $HR_2 < 0.1$

(Следует отметить, что полного соответствия между свойствами состояний A,B,C и HS, LS, VHS/IS не проматривается (см., например, [111]).

Кроме этого, кривые блеска GRS 1915+105 описываются, согласно [108], 12-ю разными классами (обозначаются разными греческими буквами), в рамках которых изменяются эволюционные свойства и относительная продолжительность состояний A, B, C.

Эти состояния на двухцветной рентгеновской диаграмме HR_1 – HR_2 ($HR_1 = (I_{5 \text{ кеВ}} - I_{13 \text{ кеВ}}) / (I_{2 \text{ кеВ}} - I_{5 \text{ кеВ}})$, $HR_2 = (I_{13 \text{ кеВ}} - I_{60 \text{ кеВ}}) / (I_{2 \text{ кеВ}} - I_{5 \text{ кеВ}})$) расположены в разных местах (рис. 13 [117]), и переходы между этими состояниями носят квазициклический характер с продолжительностью цикла ~ 1000 сек.

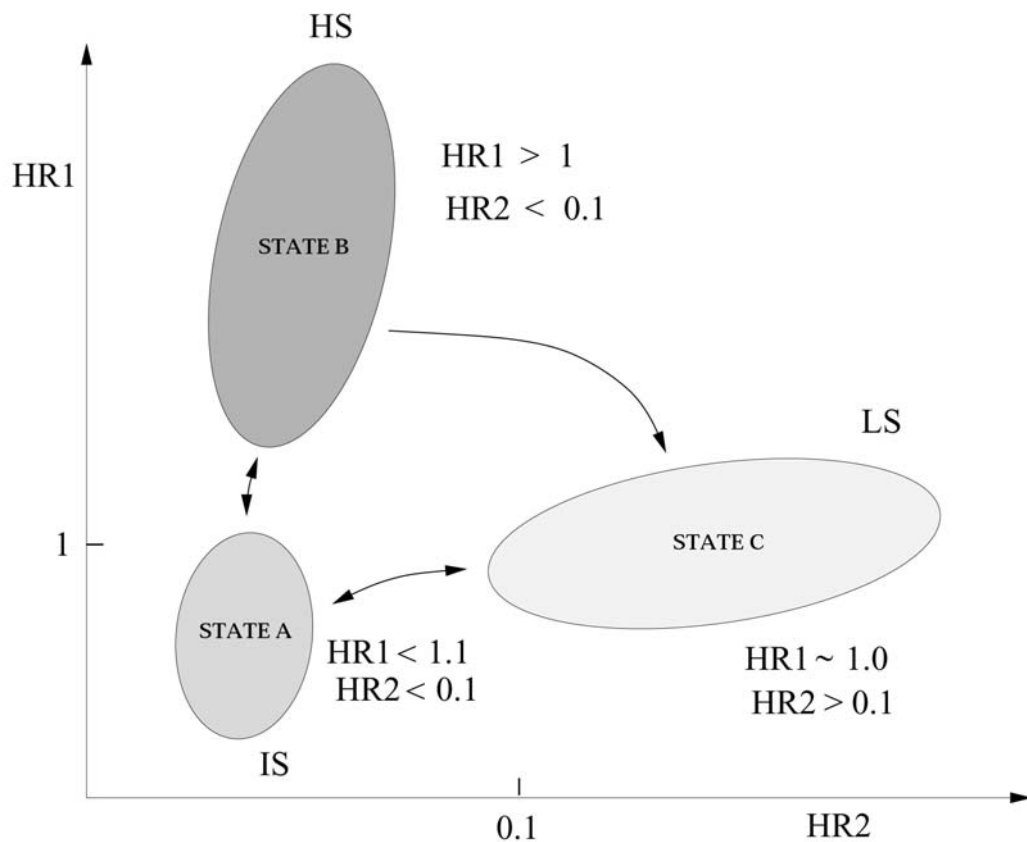


Рис. 13. Положение разных состояний (A,B,C) μ QSO GRS1915+105 на двухцветной рентгеновской диаграмме HR_1 - HR_2 и переходы между состояниями (из работы [117]).

Но время от времени объект GRS 1915+105 может на продолжительное время оставаться в каком-то одном состоянии. Общепринятой модели такого поведения объекта пока нет, и разные авторы придерживаются на этот счет разных точек зрения (например [112-115]).

Одна из них связана с предположением, что определяющую роль играют изменения темпа аккреции. Мы уже отмечали, что при $dm/dt < (dm/dt)_{\text{крит}} \approx 0.01(dm/dt)_{\text{Эдд}}$ изменяется характер аккреции. Это приводит к перегреву внутренних частей диска и их выдуванию давлением излучения. При этом на рентгеновской кривой блеска (**рис. 14** [115]) появляются сильные флуктуации мягкого рентгена, и объект резко переходит из состояния «В» (HS) в состояние «С» (LS).

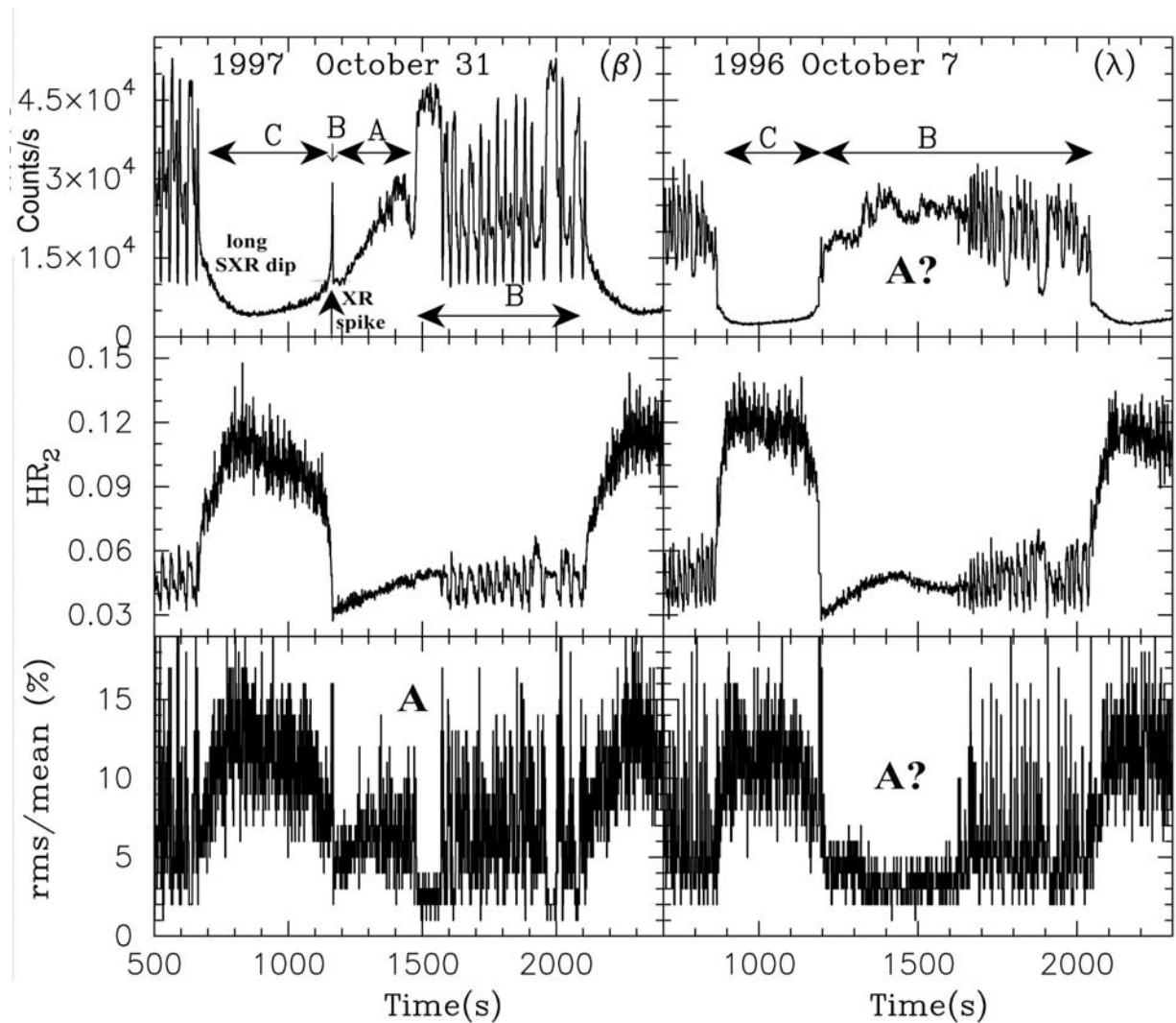


Рис. 14. Рентгеновская кривая блеска μ QSO GRS1915+105 (из работы [115]). В фазе «класса β » во время «long SXR dip» («плато» - состояние A) возникает радиоизлучение. Если в этом состоянии наблюдается «XR spike», то вслед за ним наблюдается сильный радиовыброс.

Согласно данным работы [115], заметное радио и ИК излучение и формирование релятивистских выбросов в GRS 1915+105 происходит лишь в тех случаях, когда почти сразу после возникновения состояния «В» (HS) оно прерывается глубоким провалом (long soft dip), который получил обозначение «состояние А». Из **рис. 14** видно, что состояния «С» (LS) и «А» разделяют относительно узкий рентгеновский spike, после которого сразу происходит радиовыброс. В остальной части состояния «С» не наблюдается заметных флуктуаций светимостей ни в XR, ни в радио, ни в ИК – это спокойная фаза длительностью около 10 минут. В конце состояния «В» наблюдаются сильные флуктуации мягкого XR, связанные с появлением коротких «soft dips». Вслед за этими «dips» появляются слабые радиовспышки (время распада около минуты), которые сливаются в квазинепрерывный «baby-jet». В случае, если состояние «А» отсутствует, заметного радиоизлучения не наблюдается и рентгеновские осцилляции в состоянии «В» слабы.

- **Возможные причины изменения состояний у μ QSO.**

Необычные свойства и их изменение со временем у μ QSO и некоторых других активных звездных систем не только с ВН, но и с нейтронными звездами (Cyg X-1, Cyg X-3, Sco X-1) поставили перед астрофизиками ряд сложных проблем, которые требуют разработки адекватных моделей этих объектов и разнятся предположениями относительно строения аккреционных дисков. Одна из таких моделей предполагает, что система состоит из холодного, геометрически тонкого и оптически толстого диска с однородной горячей короной над ним (например, [116,117]), а другая – что система состоит из холодного же диска с горячим ветром от него и коллимированным выбросом из центральной области, состоящей из радиационно доминированной плазмы. Последняя модель, возможно, применима и к системам со сверхмассивными ВН в ядрах галактик (например, [118-120]).

Разный вид зависимости $L_T(L_x)$ для AGN и звездных систем объясняется просто тем, что зависимость квазитеплого излучения L_x от аккреционного диска линейна по $M_{ВН}$, а зависимость нетеплового излучения

L_r – нелинейна по M_{BH} [121]. Однако оказывается, что и AGN, и активные звездные системы могут удовлетворять одной, но более сложной зависимости, которую авторы [122] называют «фундаментальной плоскостью» (для вириализованных звездных систем «фундаментальная плоскость» представляет собой зависимость между тремя величинами: светимостью, размером и дисперсией скоростей членов системы (например, [123]). Эта зависимость записывается в виде (см. также **рис. 15**):

$$\log L_r = 0.6 \log L_x + 0.78 \log (M_{BH}/M_\odot) + 7.33.$$

Правда, сильные радиоисточники на эту «плоскость» ложатся не слишком хорошо, что, по-видимому, говорит о «неравновесном» магнитном поле в них и необходимости учета эффектов магнитогидродинамики.

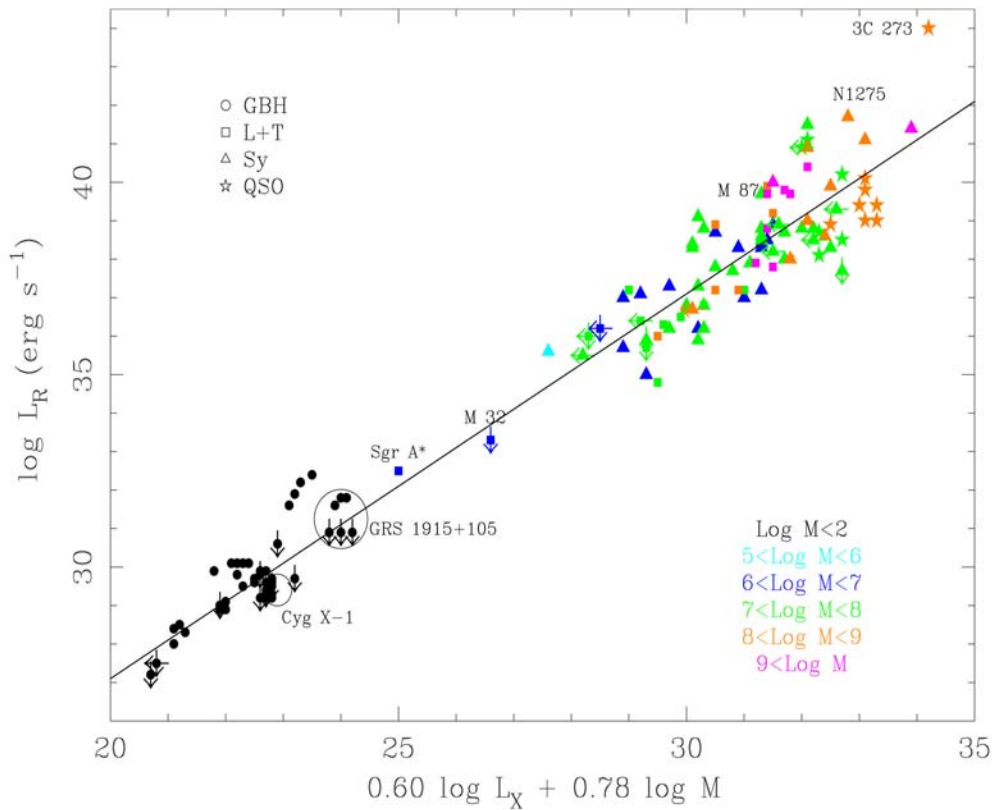


Рис. 15. «Фундаментальная плоскость» для активных систем [122], связывающая радиосветимость (L_R), светимость в рентгене (L_X) и массу черной дыры (M_{BH}). Активные звездные системы и активные ядра галактик удовлетворяют одной и той же зависимости в координатах $L_R - (0.6 \log L_X + 0.78 \log M_{BH}/M_\odot)$.

Хотя полной теории, описывающей весь комплекс процессов вблизи аккрецирующей черной дыры пока не существует, однако из всего перечисленного выше можно сделать вывод о единой природе формирования выбросов релятивистских частиц из систем с черными дырами разных масс - от звездных до сверхмассивных.

В заключение перечислим некоторые наблюдательные особенности AGN, которые, на наш взгляд, можно рассматривать как масштабированные соответствующим образом аналоги особенностей, характерных для звездных систем типа μ QSO.