

Гамма-всплески, массивные сверхновые и глобальное звездообразование на больших красных смещениях

Курс лекций, прочитанный во время Летней (7-ая) школа современной астрофизики «Наблюдательная и теоретическая космология», проходившей с 14 по 27 августа 2011 г. в САО РАН.

Презентация курса доступна в Интернете по ссылке:
http://sed.sao.ru/~vo/cosmo_school/presentations/Sokolov_paper.pdf

Абстракт. Курс лекций представляет собой краткий обзор и обсуждение постановки некоторых наблюдательных задач по гамма-всплескам (GRB), их родительским галактикам и звездообразованию на малых и больших красных смещениях. В настоящее время главный вопрос в исследовании родительских галактик гамма-всплесков формулируется так: есть ли сходство или разница между ними и типичными галактиками? Обсуждается прямая связь между «длинными» гамма-всплесками и взрывами массивных звезд, гамма-всплески и некоторые загадки массивных сверхновых. О наблюдательных космологических тестах, не зависящих от модели: темп гамма-всплесков и темп звездообразования на больших красных смещениях.

Введение

О современном ожидаемом максимуме в истории звездообразования во Вселенной.

Общие понятия современной теории развития вселенной Λ CDM представлены на Рис. 1а.

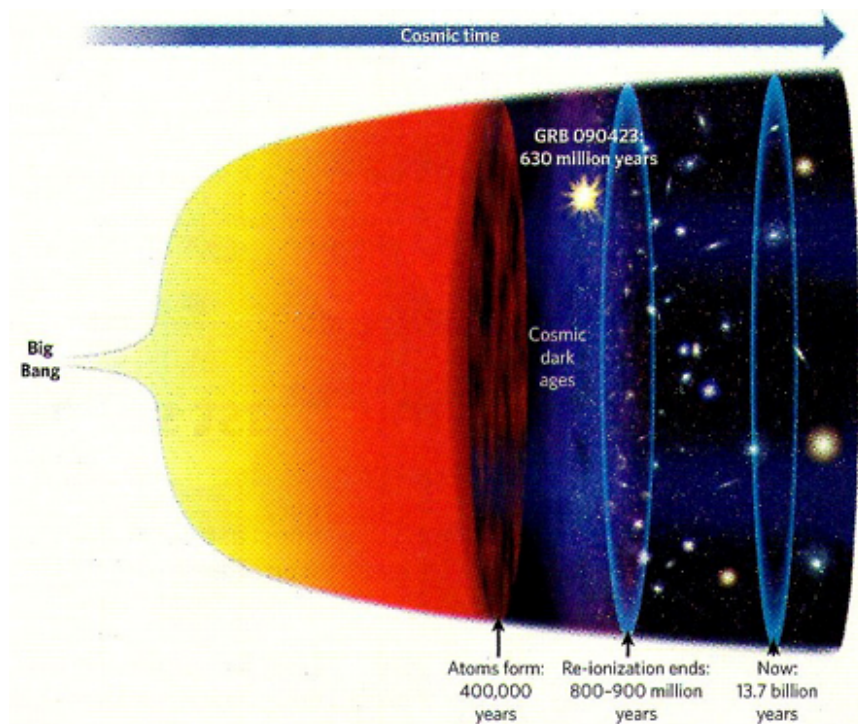


Рис. 1а. Предсказания теории LCDM. Рисунок из статьи Bing Zhang, Nature 461, p.1222

Согласно этим представлениям, в истории звездообразования должен наблюдаться некоторый максимум, как это показано на Рис. 2а.

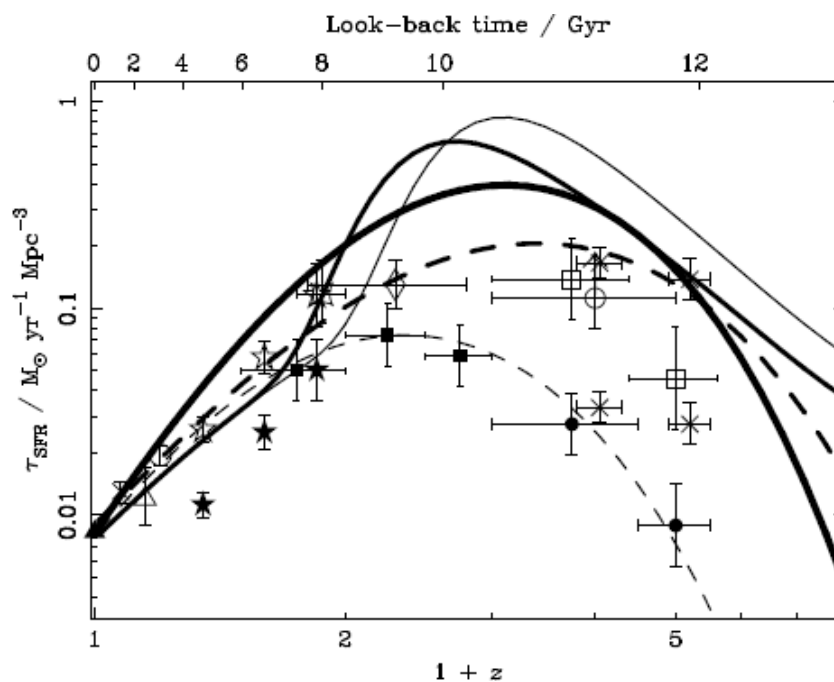


Рис. 2а. Современные (2000 г.) представления о темпе звездообразования во Вселенной. Из статьи A.W. Blain and Priyamvada Natarajan: MNRAS (2000), 312, L39

Как вписываются в эту картину новые объекты, обнаруженные в 1967 г. со спутника VELA, – гамма-всплески? Они представляют собой короткие (длительностью ~0.01-100 сек.)

вспышки гамма-излучения (в основном в диапазоне sub-MeV) с огромным выходом электромагнитной энергии до $\sim 10^{51}$ - 10^{54} эрг. Их быстрая временная переменность ($\delta T < 10$ msec) означает, что это компактные объекты размером менее $c\delta T < 3000$ km. Согласно данным со спутников BATSE+KONUS, гамма-всплески распределены изотропно по небесной сфере, что говорит об их космологическом происхождении. По своей длительности они делятся на две группы: короткие (~ 0.2 s, таких 25%) и длинные (~ 30 s, около 75%). Компоненты гамма-всплесков наблюдаются и на других длинах волн: рентген, ультрафиолет, оптика, инфракрасный, радио. На Рис. 3а приведены примеры кривых блеска и типичный спектр.

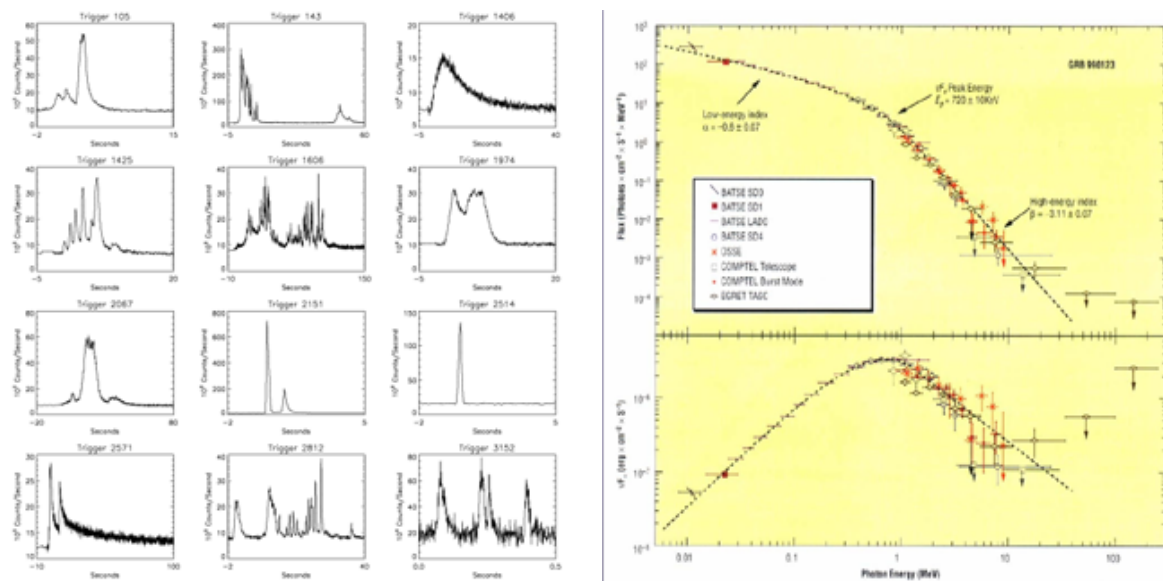


Рис. 3а. Примеры кривых блеска и типичный спектр гамма-всплеска.

Было запущено много спутников (например, русские спутники Венера-11, Венера-12, Прогноз-6, Прогноз-9, Конус, Гранат, американские Pioneer–Venus Orbiter и SolarMaximum Mission, и другие...), на борту которых находилась аппаратура, предназначенная для обнаружения гамма-всплесков. А еще раньше (~ 1964 г.) их наблюдали на спутниках-шпионах серии «Космос» (См. «Физика космоса. Малая энциклопедия» (1986 год) стр. 206, статья «Гамма-всплески», где утверждается, гамма-всплески связаны с нейтронными звездами в Галактике...)

В 1991 г. был запущен спутник GRO/BATSE. Его характеристики: охвачена вся небесная сфера, временное разрешение до 1 миллисек., точность локализации до $\sim 1^\circ$, проводился наземный анализ. Карта распределения гамма-всплесков, составленная по данным с этого спутника, представлена на Рис. 4а.

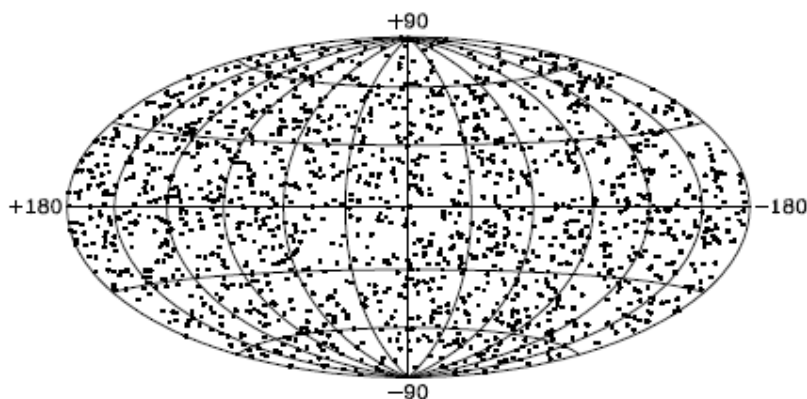


Рис. 4а. Распределение 1637 гамма-всплесков, обнаруженных со спутника BATSE с апреля 1991 г. по август 1996 г.

С момента первого оптического отождествления гамма-всплесков (GRBs) (Costa et al. 1997; van Paradijs et al. 1997), они стали новым направлением в изучении Вселенной на больших красных смещениях. В частности, 23 апреля 2009 красное смещение, измеренное для объекта GRB090423, оказалось рекордным: $z = 8.2$ ((Tanvir et al. 2009; Salvaterra et al. 2009), см. также (Cucchiara et al. 2011) о фотометрическом красном смещении $z \sim 9.4$ for GRB 090429B).

Общее состояние проблемы GRB и прогресс в этой области с 1997 по 2011 гг. можно сформулировать так: 1) гамма-всплески относятся к самым далеким наблюдаемым объектам с измеримым красным смещением во Вселенной; 2) гамма-всплески связаны со звездообразованием в далеких (и очень далеких) галактиках; 3) гамма-всплески и их послесвечения позволяют увидеть самые далекие взрывы массивных звезд в конце их эволюции; 4) это подтверждено для длинных всплесков, но, скорее всего, короткие GRB также связаны с какими-то очень старыми компактными объектами, образовавшимися в ходе эволюции массивных звезд.

Цель лекций – обзор и обсуждение некоторых актуальных наблюдательных задач, связанных с гамма-всплесками. План лекций: в Разделе 2 речь идет об оптическом отождествлении – первые родительские галактики GRB и темп (массивного) звездообразования (SFR) на малых красных смещениях, металличность родительских галактик GRB, и вопрос есть ли сходство и различия между родительскими галактиками GRB обычными галактиками поля на более далеких красных смещениях. Прямая связь между длинными гамма-всплесками и взрывами массивных звезд, а также некоторые загадки массивных сверхновых (CCSNe) представлены в Разделе 3. Раздел 4 посвящен обсуждению SFR и темпу GRB (GRBR) на больших красных смещениях: существует ли резкое падение темпа звездообразования при $z \sim 10$? В конце этого раздела содержатся некоторые выводы об исследовании родительских галактик GRB,

связи между GRBs и CCSNe, и новых космологических тестах (о тестах GRBs-CCSNe) на больших красных смещениях.

2. Оптическое отождествление: первые родительские галактики GRB и массивное звездообразование.

Первое рентгеновское и оптическое послесвечение наблюдали (Costa et al. 1997) и (van Paradijs et al. 1997) для объекта GRB 970228 на итало-голландском спутнике BeppoSAX (Boella et al. 1997), благодаря быстрому и точному позиционированию гамма-всплеска, которое стало доступно через комбинацию возможностей монитора гамма-всплесков и широкоугольной камеры на борту этого знаменитого спутника. Оптические наблюдения следующего оптического остатка GRB970508 были продолжены на 6-метровом телескопе САО РАН в стандартных полосах BVR_{cl} в октябре-декабре 1997 г. и в январе 1998 г. Результаты BVR_{cl} -фотометрии оптического послесвечения GRB970508 и трех близких галактик были представлены в работе Zharikov et al. (1998). Последующие многополосные наблюдения гамма-всплесков подтвердили, что значительная часть длинных GRB ассоциируется с коллапсом короткоживущих массивных ($\sim 30M_{\odot}$) звезд (Hogg et al. 1999; Bloom et al. 2001). В системе координат ультрафиолетовой части спектра галактик со звездообразованием видны области массивного звездообразования. Оказалось, что это свет массивных звезд в родительских галактиках GRB (Sokolov et al. 1999).

Быстрая локализация со спутника BeppoSAX и оперативные наземные оптические наблюдения с измерением красных смещений GRB показали связь гамма-всплесков с далекими галактиками, расположенными в точке слабеющего транзиента. Это было по сути дела *первой стадией оптического отождествления* с галактиками с массивным звездообразованием – объектами с более-менее понятными свойствами в отличие от свойств излучения оптического послесвечения GRB, которые до сих пор не ясны. Именно с изучения этих объектов (широкополосная фотометрия и спектроскопия родительских галактик GRB, статистика наблюдаемых фотометрических и спектроскопических свойств, и т.п.) началась в 1998 г. астрономия гамма-всплесков на 6-метровом телескопе. В то время исследователей, изучающих этот аспект (см. Рис.1) оптических компонент GRB, главным образом интересовал вопрос, *отличаются ли родительские галактики гамма-всплесков от галактик поля*. В то время были идеи, что такие уникальные объекты как гамма-всплески могут быть связаны с какими-то необычными (уникальными) объектами типа квазаров или чего-то подобного.

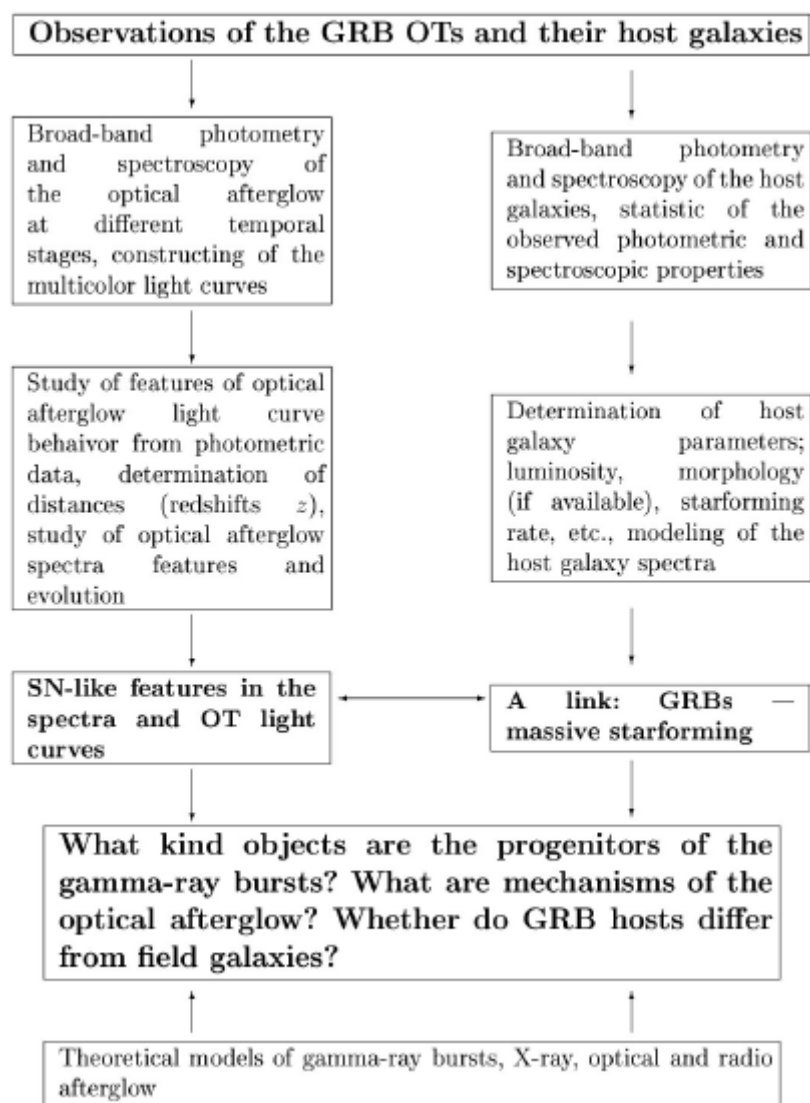


Рис.1. Астрономия гамма-всплесков на 6-метровом телескопе, начиная с 1998 г.

Изучение физических свойств родительских галактик (Sokolov et al. 1999) позволяет определить их отличие от обычных галактик (в таких же CCD-полях, как для GRB979598) с массивным звездообразованием, что дает нам ключ к пониманию условий, при которых прародитель гамма-всплеска образуется, эволюционирует и разрушается. Но самые далекие родительские галактики зачастую можно наблюдать только фотометрически. В этом случае такие физические свойства, как темп звездообразования, законы внутреннего поглощения, возраст, массу и металличность, можно оценить только с помощью синтетического моделирования (Sokolov et al. 2001a) спектрального распределения энергии (SED). В случае родительской галактики GRB980703 ($z = 0.9662$) наблюдаемый дефицит в В-полосе (см. Рис.2) можно объяснить избытком поглощения около $2200\text{\AA}$, что типично для такого закона поглощения, как в галактике Млечный Путь. Недавно было подтверждено (Zafar et al. 2011) поглощение около $2200\text{\AA}$ для родительских галактик гамма-всплесков с *более далекими красными смещениями*: например, послесвечение GRB 070802 ($z = 2.4541$) (было получено

на VLT/FORS2) и оптический спектр послесвечения GRB 080607 ($z = 3.0368$) (было получено на телескопе Кек). Полоса поглощения $2175\text{\AA}$ ясно видна в оптических спектрах послесвечений (см., например, Рис. A.2 в статье (Zafar et al. 2011)).

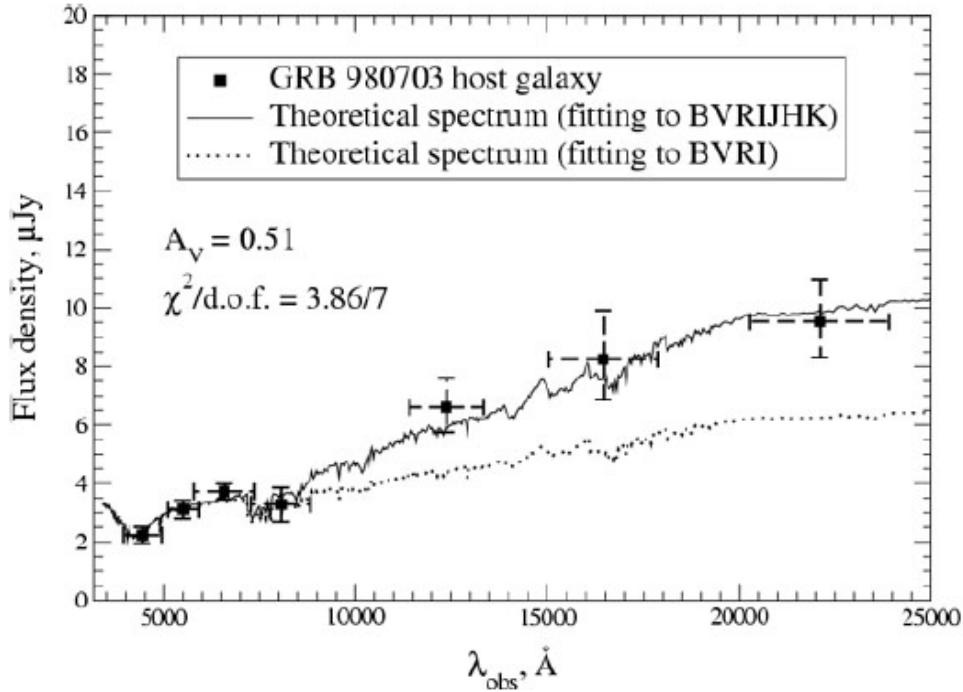


Рис.2. Моделирование синтетического спектра: сравнение смоделированных и наблюдаемых потоков в фильтрах B , V , R_c , I , J , H , K для родительской галактики GRB980703 ($z = 0.9662$). Если гамма-всплески ассоциируются с активным звездообразованием, тогда можно ожидать, что на свет их родительских галактик влияет внутреннее поглощение (Sokolov et al. 2001a).

Таблица 1.

Host	Scenario	Metallicity	Total mass	Age	A_V	Observed SFR*	Corrected SFR
GRB 970508	instant.burst	$0.1Z_{\odot}$	$3.48 \cdot 10^8$	160Myr	1.6	$\geq 1.4M_{\odot}yr^{-1}$	$14M_{\odot}yr^{-1}$
GRB 980703	exp.decreasing	$Z_{\odot}$	$3.72 \cdot 10^{10}$	6 Gyr	0.64	$\geq 10M_{\odot}yr^{-1}$	$20M_{\odot}yr^{-1}$

* The SFR was recomputed following cosmology with $H_0 = 60km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}$, $\Omega_M = 0.3$ and $\Omega_{\Lambda} = 0.7$

Так, в двух случаях (см. Таблицу 1) чисто галактических спектров – GRB970508 ($M_{Brest} = -18.62$) и GRB980703 ($M_{Brest} = -21.27$) – мы выполнили теоретическое моделирование распределения энергии спектрального континуума этих родительских галактик с использованием спектров и нашей BVR_cI_c фотометрии (Sokolov et al. 2001a). Эти два примера показывают, что фотометрическое спектральное BVR_cI_c -распределение хорошо описывает спектральные континуумы родительских галактик. Более того, в случае отсутствия самого спектра родительской галактики широкополосная фотометрия является единственным способом изучения спектрального распределения энергии для этих очень далеких слабых галактик с интегральной величиной $25\text{--}26^m$ и слабее (см. Рис. 3). Фактически, аналогичный способ широкополосной подгонки SED (и определения красного смещения, светимости, звездной массы, возраста, металличности и других параметров)

широко используется при исследовании очень далеких и слабых (28-ой величины) галактик с привлечением результатов широкополосной фотометрии в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне. Например, лучшие подгонки моделей звездной популяции при $z \sim 7$ показаны в статье «Эволюция галактик на $z = 7 - 8$ по IRAC наблюдениям DEEP/WIDE-AREA WFC3/IR ERS и ULTRADEEP WFC3/IR HUDF» (см. Fig.1 в (Labbé et al. 2009)).

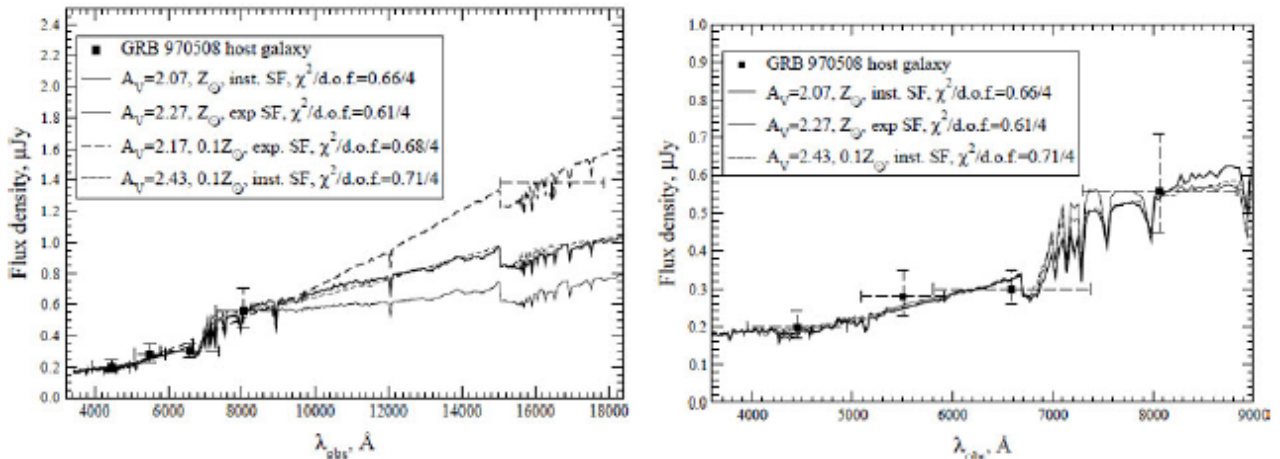


Рис.3. Лучшая подгонка для модели спектрального распределения энергии (SED) к BVR_cI_c -фотометрии родительской галактики GRB970508 ($z = 0.8349$) в предположении закона поглощения Кальцетти. На рисунке показана также Н-полоса HST/NICMOS (слева). Наблюдаемые длины волн даны в работе (Sokolov et al. 2001a).

Суммируя результаты моделирования родительских галактик гамма-всплесков (Sokolov et al. 2001a,b), можно сделать следующие выводы: (I) Широкополосные спектры родительских галактик гамма-всплесков хорошо подгоняются SED-ами галактик с локальным звездообразованием. (II) Ультрафиолетовая часть SED-ов родительских галактик гамма-всплесков хорошо описывается теоретическими моделями с *молодым взрывом* звездообразования. Более того, для $z \sim 1$ мы фактически наблюдаем в оптике только области звездообразования в родительских галактиках GRB, поскольку они доминируют в ультрафиолетовой спектральной части системы отсчета. (III) При моделировании спектрального распределения энергии родительских галактик гамма-всплесков важно учитывать эффекты *внутреннего поглощения*. (IV) Родительские галактики гамма-всплесков похожи на обычные галактики на таком же красном смещении.

Таким образом, мы сделали вывод, что длинные гамма-всплески, по-видимому, тесно связаны с активным массивным звездообразованием в их родительских галактиках. Следует отметить, что темп звездообразования в родительских галактиках вряд ли сильно выше, чем в галактиках на похожих красных смещениях ($z \gtrsim 1$). На таком красном смещении средний темп звездообразования равен $\sim 20 - 60 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ (см. также Blain et al.(2000)). Поэтому мы

делаем вывод, что родительские галактики гамма-всплесков, по-видимому, похожи на галактики поля на том же красном смещении (Sokolov et al. 2001a,b). В настоящее время имеется независимое подтверждение в статье Savaglio et al.(2006): гамма-всплески действительно отождествляются с обычными галактиками. В статье используется общедоступный архив родительских галактик гамма-всплесков, содержащий наблюдательные величины 32 родительских галактик GRB, т.е. около половины общего числа гамма-всплесков с красным смещением, известных к январю 2006 г. Авторы представляют некоторый предварительный статистический анализ выборки, т.е. полную звездную массу, металличность и темп звездообразования родительских галактик. Полная звездная масса и металличность подвыборки из 7 родительских галактик с $0.4 < z < 1$ согласуется с зависимостью масса-металличность, найденной для нормальных галактик со звездообразованием в том же интервале красных смещений.

В более поздней работе ((Savaglio et al. 2008) и ссылки там) сформулированы более определенные выводы, но для родительских галактик GRB *с более далеким красным смещением*: нет никаких четких признаков того, что родительские галактики гамма-всплесков относятся к какой-то особой популяции. Их свойства аналогичны ожидаемым свойства для нормальных галактик со звездообразованием, от локальной до более далекой вселенной. Металличность, измеренная по линиям поглощения в УФ в холодной среде родительских галактик гамма-всплесков при $z > 2$ (GRB-DLAs), лежит в аналогичном диапазоне. Комбинируя это с результатами для родительских галактик GRB с $z < 1$, мы видим, что нет никакой существенной эволюции металличности родительских галактик GRB в интервале $0 < z < 6$. Итог статьи Savaglio et al.(2008) следующий: родительские галактики гамма-всплесков не должны быть какими-то особенными галактиками только потому, что в них произошел гамма-всплеск, а являются обычными *слабыми* (самыми многочисленными) галактиками со звездообразованием, обнаруживаемыми на любом красном смещении.

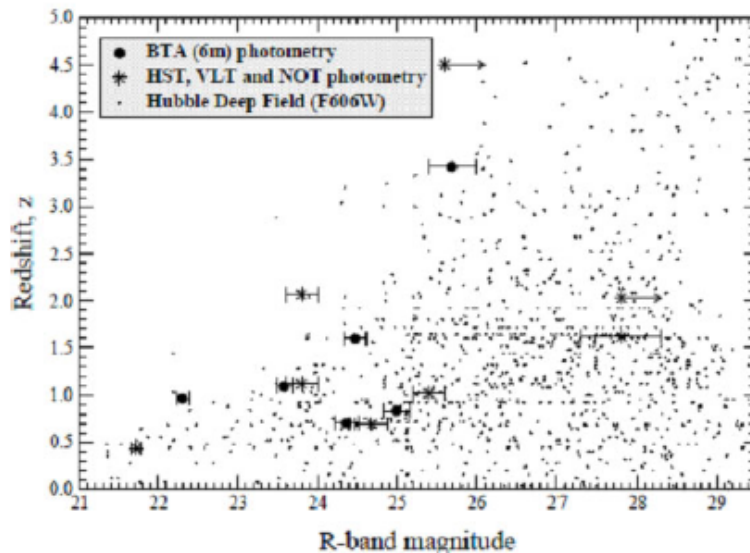


Рис.4. Соотношение между наблюдаемой величиной в фильтре R и спектроскопическим красным смещением для первых 12 родительских галактик гамма-всплесков. R-величины, полученные на БТА (из статьи Sokolov et al. 2001a), отмечены кружками, а звездочками обозначены результаты других авторов. Показано также распределение «HDF F606W-величина – фотометрическое красное смещение». Использовался каталог F606W-величин и фотометрических красных смещений из статьи Fernández et al. (1999).

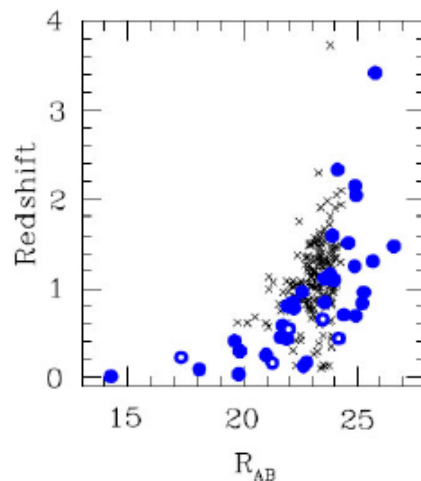


Рис.5. Зависимость наблюдаемой величины от красного смещения из статьи Savaglio et al. (2008) для родительских галактик гамма-всплесков (заполненные кружки) и галактик поля из Глубокого Обзора Gemini (крестики, Abraham et al. (2004)). Заполненными кружками с белой точкой обозначены родительские галактики коротких гамма-всплесков.

И снова о металличности и родительских галактиках гамма-всплесков (Mannucci et al. 2011): В последнее время многие исследования были направлены на поиск сходства и различия между популяцией родительских галактик гамма-всплесков и популяцией нормальных галактик поля (см., например, Fynbo et al.(2008). В частности, в таких исследованиях сравнивается наблюдаемое соотношение масса – металличность (или светимость – металличность) двух популяций. Из анализа полной выборки известных родительских галактик гамма-всплесков Savaglio et al. (2009) снова сделали вывод, что нет четких

признаков того, что родительские галактики относятся к какой-то особой популяции. Их свойства являются ожидаемыми для обычных галактик со звездообразованием от локальной до самой далекой вселенной. Mannucci et al. (2011) сравнили свойства металличности выборки из 17 родительских галактик с тем, что ожидается для локальной популяции поля. В частности, они обнаружили, что родительские галактики гамма-всплесков подчиняются Фундаментальному Соотношению Металличности (FMR), обнаруженному в работе Mannucci et al. (2010a). Этот факт означает, что родительские галактики гамма-всплесков не отличаются существенно от популяции типичных галактик. Характерно низкая, субсолнечная металличность, обнаруженная во многих последних исследованиях (например, Savaglio et al. 2009, Levesque et al. 2010 и ссылки там), не обязательно означает, что гамма-всплески происходят в особых, низкометаллических галактиках, и что существует прямая связь между низкой металличностью и гамма-всплесками. Низкая металличность наблюдаемых родительских галактик длинных гамма-всплесков является следствием окружающей среды высокого звездообразования. Похоже, что темп звездообразования есть основной параметр для генерации события гамма-всплеска (Campisi et al. 2011).

3. Прямая связь между длинными гамма-всплесками и массивными звездами (GRB – CCSN)

Таким образом, из сказанного выше следует, что многие факты свидетельствуют, что длинные ($\sim 1\text{ s} - 100\text{ s}$) гамма-всплески связаны с коллапсом массивных звезд, который происходит в областях активного звездообразования, погруженных в плотные облака пыли и газа. Но уже сейчас можно с уверенностью говорить о прямой связи между гамма-всплесками и массивными звездами-прародителями массивных сверхновых. Отождествление GRB980425 с CCSN SN1998bw (Galama et al. 1998) считается первым. Соответственно, еще одним направлением (наряду с исследованием родительских галактик) стало наблюдение таинственных оптических транзиентов (OTs), связанных с гамма-всплесками (Sokolov et al. 1998; Zharikov et al. 1999). С самого начала основной целью таких наблюдений было (см. Рис.1) изучение фотометрических характеристик в кривых блеска оптического послесвечения гамма-всплеска, связанных со сверхновой-подложкой (Sokolov et al. 2001c).

С одной стороны, как было сказано выше, с наблюдательной точки зрения картина связи GRB/CCSN была уже косвенно подтверждена (например, Frail et al. 2002, Sokolov et al. 2001a) тем фактом, что все родительские галактики гамма-всплесков являются галактиками со звездообразованием, а в некоторых случаях даже со вспышкой звездообразования. С другой стороны, некоторые гамма-всплески действительно показали появление и

выполаживание поздних оптических послесвечений, что было интерпретировано как появление кривой блеска базовой сверхновой (Zeh et al. 2004). Ключевым открытием явилось фотометрическое доказательство позднего «горба» во всех послесвечениях с красным смещением $z < 0.7$ (включая гамма-всплески GRB 030329 и GRB031203 со спектроскопически подтвержденной связью GRB/CCSN, см. ниже).

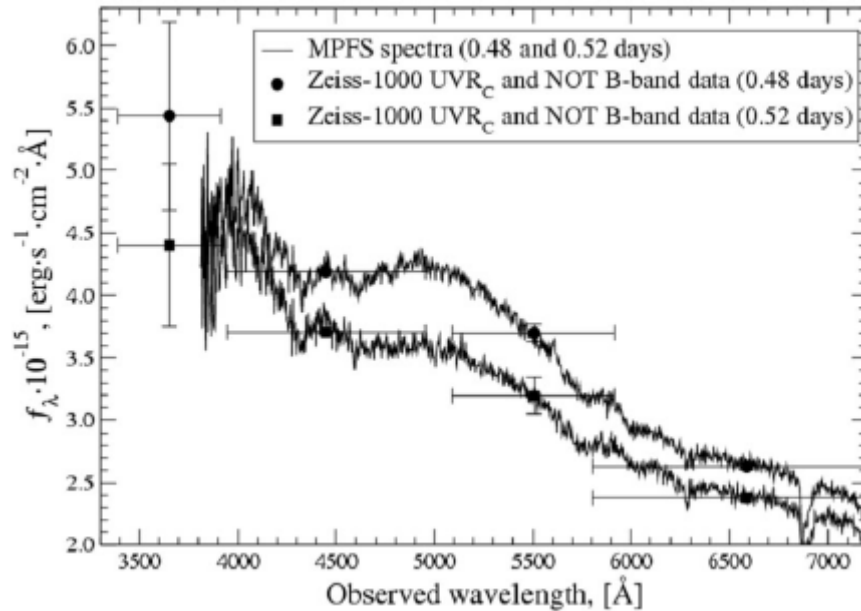


Рис. 6. Ранняя спектроскопия послесвечения GRB030329, полученная на 6-метровом телескопе (MPFS/BTA) и фотометрия на Zeiss-1000 & NOT (из Sokolov et al. 2003; Kurt et al. 2005).

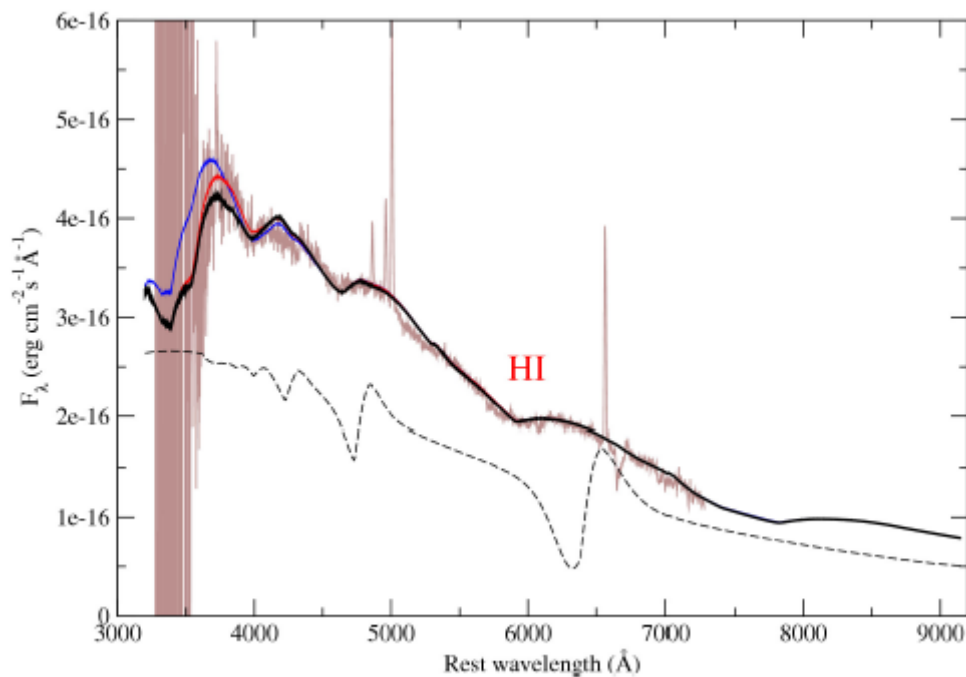


Рис. 7. Спектр SN 2006aj в системе отсчета длин волн, полученный на БТА через 2.55 суток после XRF/GRB 060218 (Sonbas et al. 2008). Подгонка синтетическим спектром (код SYNOW, Branch et al. 2001; Elmhamdi et al. 2006) со скоростью фотосферы (V_{phot}), всех элементов и их ионов, равной 33000 км/сек, показана плавными линиями, которые отличаются только в синей части спектра при $\lambda <$

4000Å. H α обозначает H α PCyг профиль при $V_{phot} = 33000$ км/сек. Модельный спектр для скорости фотосферы 8000 км/сек показан пунктирной линией как пример H α PCyг профиля.

Для более далеких красных смещений данные обычно недостаточно качественные или сверхновая просто слишком слабая, чтобы искать такую особенность в поздних кривых блеска послесвечения. (Кроме того, поярчение в поздних оптических послесвечениях для больших z нужно наблюдать уже в ближнем инфракрасном диапазоне). Этот дополнительный свет хорошо моделируется SN-компонентой с максимумом через $(1+z)$ (15...20) дней после вспышки. Это, вместе со спектральным подтверждением света от сверхновой в послесвечении гамма-всплесков GRB021211, GRB030329 и GRB031203, еще больше поддерживают точку зрения, что в действительности все длинные гамма-всплески показывают «горб» сверхновой в своих поздних оптических послесвечениях. Тот факт, что сильный поздний горб был также обнаружен для рентгеновской вспышки XRF030723 (Fynbo et al. 2004) и для XRF 020903 (со спектроскопическим подтверждением света базовой сверхновой (Soderberg et al. 2005), может указывать на то, что этот вывод верен также для рентгеновских вспышек. Таким образом, систематическое исследование послесвечений гамма-всплесков с таким подходом наводит на мысль, что все длинные гамма-всплески ассоциируются со сверхновыми (Zeh et al. 2004). В настоящее время спектроскопически подтверждена связь для следующих пар объектов: GRB 980425/SN 1998bw ($z = 0.0085$), GRB 030329/SN 2003dh ($z = 0.1687$), GRB 031203/SN 2003lw ($z=0.1055$), GRB/XRF 60218/SN2006aj ($z = 0.0335$), GRB 100316D/SN2010bh ($z = 0.059$) (см. также обзор Hjorth et al.(2011) и ссылки там). Кроме того, в этот список можно включить такие объекты как XRF 080109/SN2008D ($z = 0.0065$, см. ниже). На рис. 6-9 показаны результаты спектроскопических наблюдений некоторых объектов из этого списка на 6-метровом телескопе.

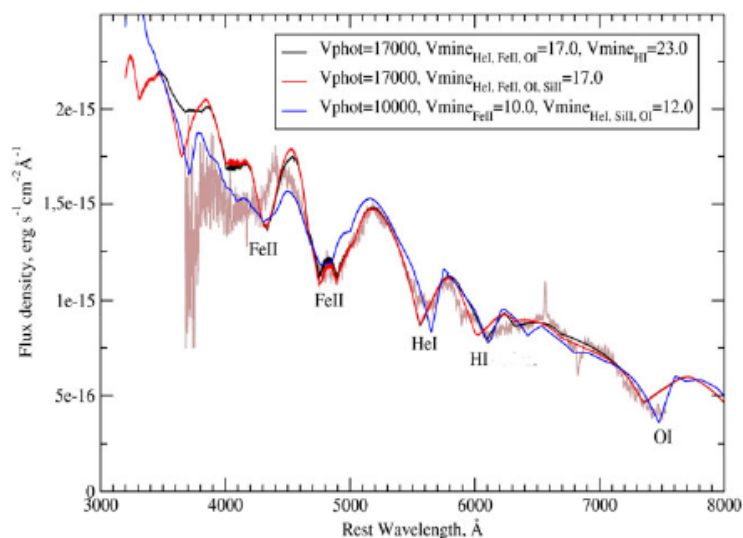


Рис. 8. Спектр XRF080109/SN 2008D (из статьи Moskvitin et al. 2010). Физические условия в оболочке этой сверхновой были промоделированы кодом SYNOW (Branch et al. 2002).

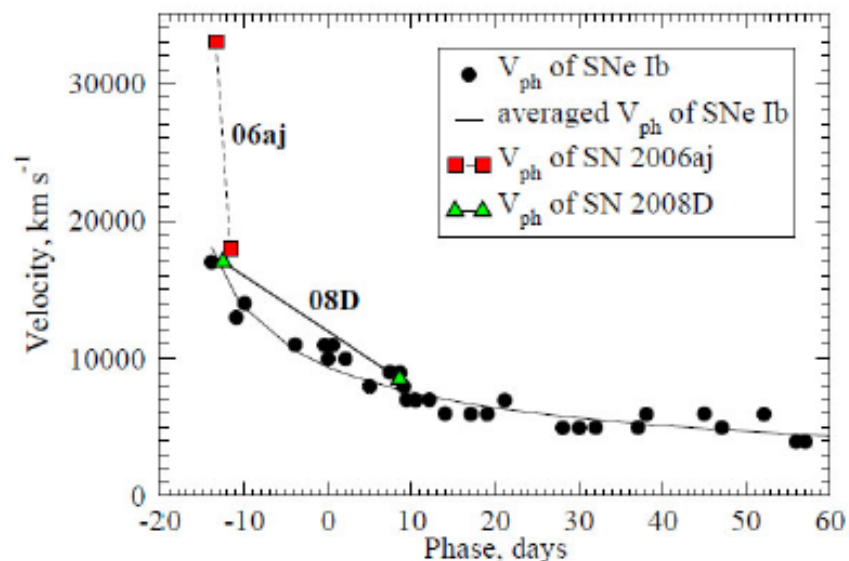


Рис. 9. Скорость фотосферы, полученная по линиям FeII, в функции времени после максимума блеска. Линией обозначена подгонка данных степенным законом за исключением SN1998dt на 32 днях (открытый кружок) (см. Рис. 22 в статье Branch et al. 2002). Квадратами (SN2008D) и ромбами (SN 2006aj) обозначены скорости фотосферы, полученные по нашим спектрам (Moskvitin et al. 2010).

Таким образом, длинные гамма-всплески могут быть началом взрыва CCSN, а гамма-всплеск является сигналом, который позволяет поймать сверхновую в самом начале взрыва. По крайней мере, кажется, что чем ближе гамма-всплеск, тем больше спектроскопических признаков сверхновой у него наблюдается. Хотя явление гамма-всплеска необычно, но источник-объект (сверхновая) не очень уникален (это похоже на ситуацию с родительскими галактиками гамма-всплесков, см. выше). Популярная концепция связи между длинными гамма-всплесками и массивными сверхновыми показана на Рис.10. Узкий луч гамма-излучения (гамма-всплеск) наблюдается вдоль оси взрыва сверхновой, а ближе к экваториальной плоскости мы можем наблюдать в основном только изотропное рентгеновское излучение, связанное с эффектом прорыва ударной волны. Это может объяснить, почему самые близкие сверхновые не показывают никаких гамма-всплесков, хотя они показывают мощный и короткий рентгеновский всплеск (как в случае XRF 080109/SN2008D). Вероятность попадания в узкий луч гамма-квантов падает по мере роста гамма-фактора Лоренца (рисунок из статьи Woosley et al. 2006).

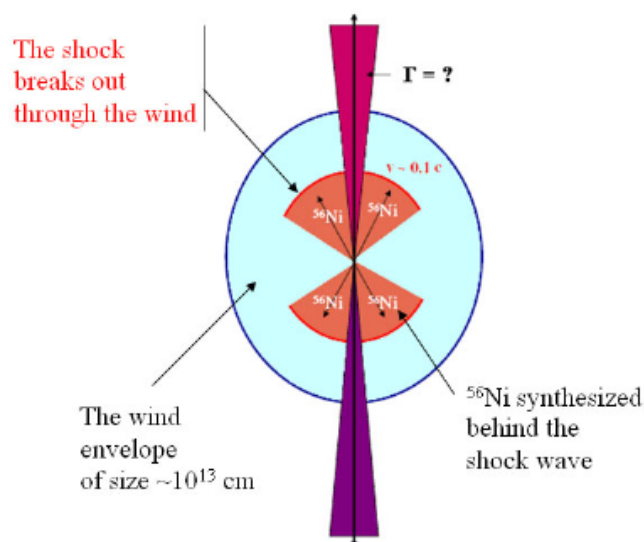


Рис.10. Схематическая модель асимметричного взрыва прародителя GRB/SN.

Дополнительную информацию о загадках массивных сверхновых и связях GRB-CCSN см. в статье Hjorth et al. (2011), хотя пока не ясно, является ли механизм, генерирующий гамма-всплеск, ответственным и за взрыв звезды. Может быть, сильно несферичный взрыв является характерной особенностью массивных сверхновых всех типов (Leonard et al. 2006). Изучение других спектроскопических подтвержденных пар GRB (XRF) – SN в будущих наблюдениях очень важно для понимания природы связи между ними, природы гамма-всплеска и, в конечном итоге, самого механизма взрыва массивной сверхновой. В контексте сказанного выше о родительских галактиках гамма-всплесков, накопление информации о связи GRB-SN можно считать вторым результатом отождествления гамма-всплесков. Сейчас длинные гамма-всплески отождествляются с (возможно) обычными массивными сверхновыми. Таким образом, мы имеем *массивное* звездообразование в родительских галактиках GRB и взрывы *массивных* звезд CCSN/GRB. Вопрос о том, какие объекты являются прародителями гамма-всплесков (см. Рис. 1) становится особенно важным на очень больших красных смещениях $z > 10$.

4. Темп гамма-всплесков и темп звездообразования на больших красных смещениях. Выводы.

Таким образом, длинные гамма-всплески являются взрывами, ассоциированными с коллапсом короткоживущих массивных звезд ($\sim 30 M_{\odot}$) с максимумом излучения на энергиях sub-MeV, где поглощение пылью не играет роли. Тогда потоки от этих событий

можно обнаружить, в конечном счете, *на любом красном смещении*. Темп гибели массивных короткоживущих звезд (CCSNe rate) похож на темп их образования (SFR). Если темп массивного звездообразования прямо пропорционален темпу образования гамма-всплесков ($SFR \sim GRBR$), тогда темп гамма-всплесков (GRBR) можно использовать как потенциальный индикатор массивного звездообразования (SFR) в далекой вселенной (Ramirez et al. 2000). Если $GRBR \sim SFR$ вплоть до больших красных смещений, то возникает вопрос: действительно ли наблюдается быстрое падение SFR при $z > 4$, как должно быть в космологических моделях? Есть ли какая-нибудь разница между GRBR и SFR за $z \sim 4$? Ниже приводятся некоторые комментарии по темпу звездообразования (SFR) в галактиках с большим красным смещением (см. Раздел 2) и по гамма-всплескам, которые служат теперь мощным датчиком темпа звездообразования на самых больших красных смещениях.

Действительно, поскольку длинные гамма-всплески ассоциируются с массивными звездами, а значит, с областями звездообразования, они (гамма-всплески) могут подойти для изучения плотности SFR. Объект GRB090423 на $z = 8.2$ (см. также Cucchiara et al.(2011) о фотометрическом красном смещении $z \sim 9.4$ для GRB090429B) еще больше расширил интервал красных смещений, на которых можно оценить эволюцию SFR в таком режиме, который раньше никогда не исследовался. Kistler et al. (2009) сравнили SFR, полученные по гамма-всплескам, для разных выборок галактик поля. В основе работы лежит идея о том, что темп гамма-всплесков в галактиках пропорционален темпу звездообразования, и это соотношение не меняется с красным смещением. Нормировка плотности GRB SFR делается через значение плотности SFR на малом красном смещении, для которого сделана оценка GRBR (Ramirez et al. 2000).

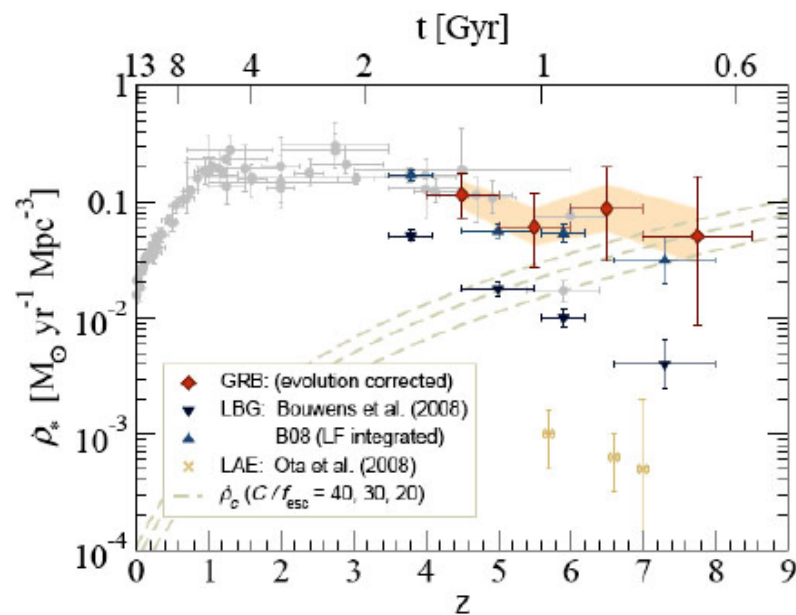


Рис. 11. Плотность звездообразования из статьи Kistler et al. (2009). Светлыми кружками обозначены данные из работы Hopkins et al. (2006). Крестики – Lyman- α эмиттеры (LAE). Треугольники

вершиной вверх и вниз обозначают Lyman-break галактики (LBGs) для двух функций УФ светимости. Темп звездообразования, полученный по гамма-всплескам (красные ромбы) показывает *сильный вклад от малых галактик*, который обычно не учитывают для функции светимости LBG.

Темп звездообразования остается высоким (см. Рис. 11) по крайней мере до красных смещений около 8 (Kistler et al. 2009). Авторы работы также не видят никаких признаков сильного максимума SFR по z . Согласие с прямыми наблюдениями, скорректированное для галактик ниже порога обнаружения, говорит о том, что оценки на основе GRB включают в себя большую часть звездообразования на больших z вплоть до слабых галактик. При $z = 8$ плотность GRB SFR согласуется с измерениями LBG после учета невидимых галактик на слабом конце функции УФ-светимости. Это означает, что не все галактики со звездообразованием на этих красных смещениях в настоящее время учитываются в глубоких обзорах. Гамма-всплески вносят вклад в звездообразование от малых галактик – *типичной родительской галактикой гамма-всплеска на большом красном смещении может быть малая галактика со звездообразованием*. Yan et al. (2009) пришли к аналогичным заключениям в своем независимом исследовании плотности SFR на больших красных смещениях с учетом *большого числа галактик низкой светимости* (вплоть до $M = 15.0$ mag.). Может, действительно нет никакого крутого падения SFR до $z \sim 10$. В любом случае, эти результаты уже влияют на выбор космологических параметров и моделей звездообразования в CDM-теории (Choi et al. 2009, 2011).

Некоторые выводы:

1. Основные заключения, вытекающие из исследования родительских галактик гамма-всплесков (фактически, это первый результат оптического отождествления гамма-всплесков в 2001 г. с уже известными объектами) таковы: гамма-всплески отождествляются с обычными (или самыми многочисленными во вселенной на любом красном смещении) галактиками вплоть до зв. вел. ~ 28 и более. Родительские галактики не должны быть какими-то особыми галактиками только потому, что в них произошло событие гамма-всплеска. Это обычные слабые галактики со звездообразованием (наиболее многочисленные), наблюдаемые на любом красном смещении. Они ничем не отличаются от других галактик с близкими красными смещениями: ни по цвету, ни по спектру, ни по массивному звездообразованию, ни по металличности. Это означает, что они являются обычными галактиками со звездообразованием («обычными» для своих красных смещений), составляющими основу всех глубоких обзоров (Bloom et al. 2001; Djorgovski et al. 2001; Frail et al. 2002; Sokolov et al. 2001a; Savaglio et al. 2006, 2008, 2009, Mannucci et al. 2011).

2. Второй результат идентификации гамма-всплесков: сейчас длинные гамма-всплески отождествляются с (возможно) обычными массивными сверхновыми (CCSNe). Таким образом, мы имеем *массивное* звездообразование в родительских галактиках GRB и взрывы *массивных* звезд – CCSN/GRB. Изучение различий между *близкими* сверхновыми, отождествляемыми с гамма-всплесками, и *далекими* сверхновыми, которые нужно отождествить с GRB, может стать дополнительным наблюдательным космологическим тестом. Можно задать вопрос, аналогичный вопросу, заданному в 2001 году о родительских галактиках: отличаются ли сверхновые с GRB от обычных (локальных) сверхновых? Вообще говоря, на каких красных смещениях массивные сверхновые сильно отличаются от локальных массивных сверхновых?
3. Основные выводы по эволюции для больших красных смещений (если $\text{GRBR} \sim \text{SFR} \sim \text{CCSN rate}$): сами гамма-всплески и их родительские галактики уже считаются зондом для изучения процессов звездообразования на космологических расстояниях до $z \sim 10$ и более. Поскольку вселенная прозрачна в гамма-лучах вплоть до $z \sim 10$ и более, в результате изучения гамма-всплесков и их родительских галактик появилось новое направление наблюдательной космологии. Независимо от конкретных моделей явления GRB, сейчас можно сказать, что, наблюдая гамма-всплески, мы наблюдаем сверхновые, которые, вероятно, всегда связаны с *релятивистским коллапсом* массивных звездных ядер в очень далеких галактиках. При каких красных смещениях z (> 10 -50?) гамма-всплески и массивные сверхновые уже не наблюдаются? Сейчас это может быть основным космологическим GRB-CCSN тестом.

Ссылки

- Abraham R. G., Glazebrook K., McCarthy P. J. et al. 2004, AJ, 127, 2455
 Blain A. W. & Natarajan P., 2000, MNRAS, 312, L39 (arXiv:astro-ph/9911468), see Figure 1.
 Bloom J.S., Djorgovski S. G., Kulkarni S. R., 2001, ApJ, 554, 678
 Boella G. et al., 1997, A&AS, 122, 299
 Branch D., Baron E., Jeffery D. J., 2001, as a Chapter in "Supernovae and Gamma-Ray Bursters" in Lecture Notes in Physics (Springer-Verlag), ed. K. W. Weiler., vol. 598, p.47-75 (arXiv:astro-ph/0111573)
 Branch, D. et al. 2002, ApJ, 566, 1005
 Campisi M. A. et al. 2011, arXiv:astro-ph/1105.1378v1, submitted MNRAS
 Choi J., Nagamine K., 2009, arXiv:astro-ph/0909.5425 (Effects of cosmological parameters and star formation models on the cosmic star formation history in LambdaCDM cosmological simulations.)
 Choi J., Nagamine K., 2011, 4. arXiv:astro-ph/1101.5656 (On the inconsistency between the estimates of cosmic star formation rate and stellar mass density of high redshift galaxies.)
 Costa E. et al., 1997, Nature, 387, 783
 Cucchiara A., Levan A. J., Fox D. B et al., 2011, arXiv:astro-ph/1105.4915

- Djorgovski S. G., Kulkarni S. R., Bloom J. S., et al. 2001, invited review in proc. "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era: 2nd Workshop", eds. Costa E. et al., ESO Astrophysics Symposia, Berlin: Springer Verlag, p. 218 (arXiv:astro-ph/0107535)
- Elmhamdi A. et al., 2006, A&A, 450, 305 (arXiv:astro-ph/0512572)
- Fernández-Soto A., Lanzetta, K.M., Yahil, A., 1999, ApJ., 513, 34
- Frail, D. A. et al. 2002, ApJ, 565, 829
- Fynbo L. P. U., et al. 2008, ApJ, 683, 321
- Fynbo, J. U. P. et al. 2004, ApJ, 609, 962
- Galama, T.J., Groot, P.J., van Paradijs, J., et al. 1998, ApJ., 497, L13
- Hjorth J., Bloom J. S., 2011, arXiv:astro-ph/1104.2274v1
- Hogg, D. W., Fruchter, A. S., 1999, ApJ, 520, 54
- Hopkins A. M., Beacom J. F., 2006, ApJ, 651, 142
- Kistler, M. D. et al, 2009, ApJ, 705, L104
- Kurt V. G. et al., 2005, Nuovo Cim., C28, 521 (arXiv:astro-ph/0505535)
- Labbée I., González V., Bouwens R. J., et al., 2009, astro-ph/arXiv:0911.1356v5
- Leonard D. C., Filippenko A. V. et al., 2006, arXiv:astro-ph/0603297
- Levesque E M. et al., 2010, AJ, 140, 1557
- Mannucci F. et al., 2010, MNRAS, 408, 2115
- Mannucci F, Salvaterra R., Campisi M. A., 2010, arXiv:astro-ph/1011.4506, MNRAS, in press
- Mannucci F., Salvaterra R., Campisi M. A., 2011, arXiv:astro-ph/1011.4506v2, MNRAS, in press
- Moskvitin et al., 2010, Astrophys. Bull., 65, 132 (arXiv:astro-ph 1004.2633)
- Ramirez-Ruiz E, Fenimore E. E. & Trentham N., 2000, arXiv:astro-ph/0010588, talk given at the CAPP2000 Conference on Cosmology and Particle Physics, Verbier, Switzerland, eds. J. Garcia-Bellido, R. Durrer and M. Shaposhnikov, (AIP,2001)
- Salvaterra R. et al., 2009, Nature, 461, 1258
- Savaglio S., Glazebrook K., Le Borgne D., 2006, arXiv:astro-ph/0601528v2
- Savaglio S., Glazebrook K., Le Borgne D., 2008, arXiv:astro-ph/0803.2718v3
- Savaglio S., Glazebrook K., and Le Borgne D., 2009, ApJ, 691, 182
- Soderberg, A. M. et al. 2005, ApJ, 627, 877 (arXiv:astro-ph/0502553)
- Sokolov V.V., Kopylov A.I., Zharikov S.V., et al., 1998, A&A, 334, 117
- Sokolov V.V., Zharikov S.V., Baryshev Yu.V. et al., 1999, A&A, 344, 43
- Sokolov V.V., Fatkhullin T., Castro-Tirado A.J., et al., 2001a, A&A, 372, 438
- Sokolov V. V. et al., 2001b, Bull. Spec. Astrophys. Obs., 51, 48-50
- Sokolov V., 2001c, in Proc. "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era: 2nd Workshop", eds.
- Costa E. et al., ESO Astrophysics Symposia, Berlin: Springer Verlag, p. 136 (arXiv:astro-ph/0102492)
- Sokolov V. V. et al., 2003, Bull. Spec. Astrophys. Obs. 56, 5-14 (arXiv:astro-ph/0312359)
- Sonbas et al., 2008, Astrophys. Bull., 63, 228 (arXiv:astro-ph 0805.2657)
- Tanvir N. et al., 2009, Nature, 461, 1254
- van Paradijs J. et al., 1997, Nature, 386, 686
- Woosley S., Heger A., 2006, AIP Conf.Proc., 836, 398-407 (arXiv:astro-ph/0604131)
- Yan H. et al., 2009, arXiv:astro-ph/0910.0077v1, v2 and v3
- Zafar T. et al., 2011, arXiv: astro-ph/1102.1469v2, Fig.A.2
- Zeh A., Klose S., Hartmann D. H., 2004, arXiv:astro-ph/0503311, in Proc of the 22nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics at Stanford. Stanford California, Dec. 13-17, 2004. ed. Chen P, et al.
- Zharikov S V., Sokolov V. V., and Baryshev Yu. V., 1998, A&A, 337, 356
- Zharikov S. V. and Sokolov V. V., 1999, A&ASS, 138, 485