

Открытие гравитационных волн  
– новый этап  
в исследованиях чёрных дыр

А.М. Черепашук  
ГАИШ МГУ имени М.В.Ломоносова.

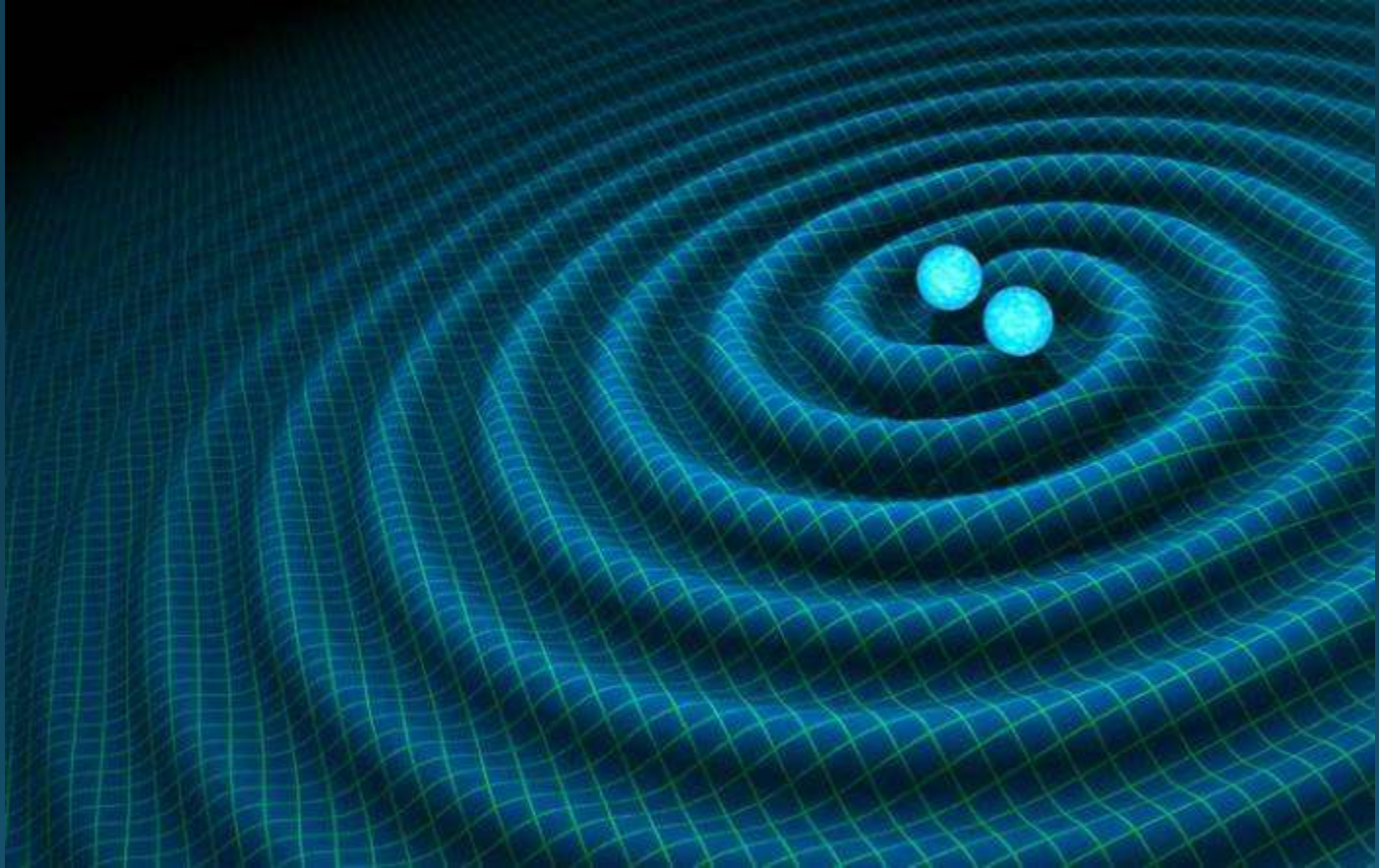
Ученые потратили много времени и сил на то, чтобы освоить принципиально новый канал информации о Вселенной – канал, основанный на регистрации гравитационных волн.

Гравитационные волны были предсказаны Альбертом Эйнштейном в 1916 году, сразу после создания им Общей теории относительности, в которой гравитация описывается как проявление кривизны пространства – времени.

Гравитационные волны – это возмущения гравитационного поля, имеющие характер волн, распространяющихся в вакууме со скоростью света.

Гравитационные волны излучаются телами (массами), движущимися с переменным ускорением (В.Б.Брагинский, 1986).

При слабых возмущениях гравитационного поля гравитационное излучение имеет характер поперечных волн с двумя независимыми компонентами, которые определяют два состояния поляризации волны.



Гравитационные волны переносят энергию и импульс. Воздействуя на тела, они должны вызывать относительное смещение их частей – деформацию тел.

На этом явлении основаны методы обнаружения гравитационных волн.

Из-за относительной малости гравитационной постоянной, гравитационные волны очень трудно обнаружить.

В качестве источников гравитационных волн впервые рассматривались двойные звёзды:

- Звёзды WUMa (Мироновский, 1965).  $P \approx 0^d3 - 0^d6$ ,  $M_{1,2} \approx 1 - 3 M_{\odot}$ .
- Катаклизмические двойные (Крафт, 1962, Пачинский, 1967, Хуан, 1966), IP Peg, U Gem, (~1000 систем).
- Пульсар Халса-Тэйлора PSR1913+16 (1975 г.).  $P = 0^d32$ ,  $e = 0.62$ , 3 п.-к. параметра; J0737-3039AB; PSR1534+12; PSR J0348+0432.
- Слияние нейтронных звёзд и чёрных дыр (Тутуков и Юнгельсон, 1973, Ван ден Хейвел и Хейзе, 1972, Липунов, Постнов, Прохоров, 1997).
- Фон очень длинных гравитационных волн ( $\lambda \gtrsim \text{Mпк}$ ), образующихся на переходных стадиях расширения Вселенной (например, распад скалярного поля и образование частиц в конце инфляционной стадии) был предсказан Л.П.Грищуком в 1974 г., который рассмотрел параметрический механизм усиления гравитационных волн.

С 1992 года международная коллаборация LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) начала работы по созданию детектора гравитационных волн с беспрецедентной чувствительностью.

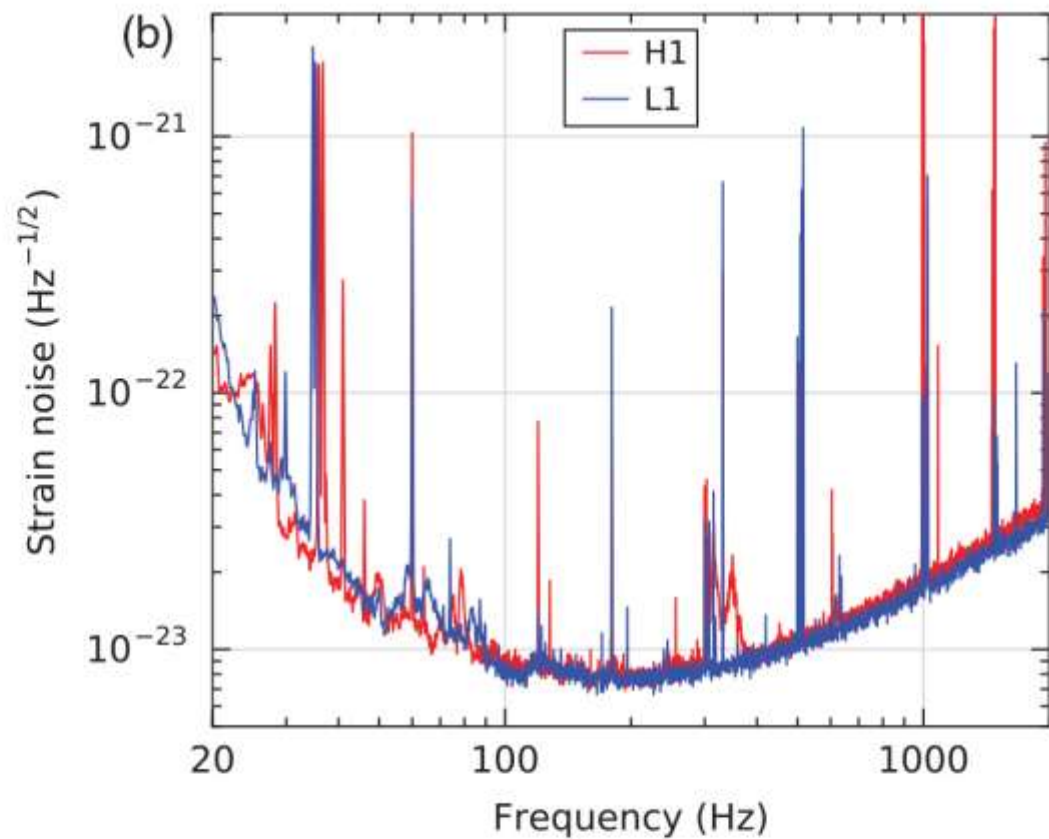
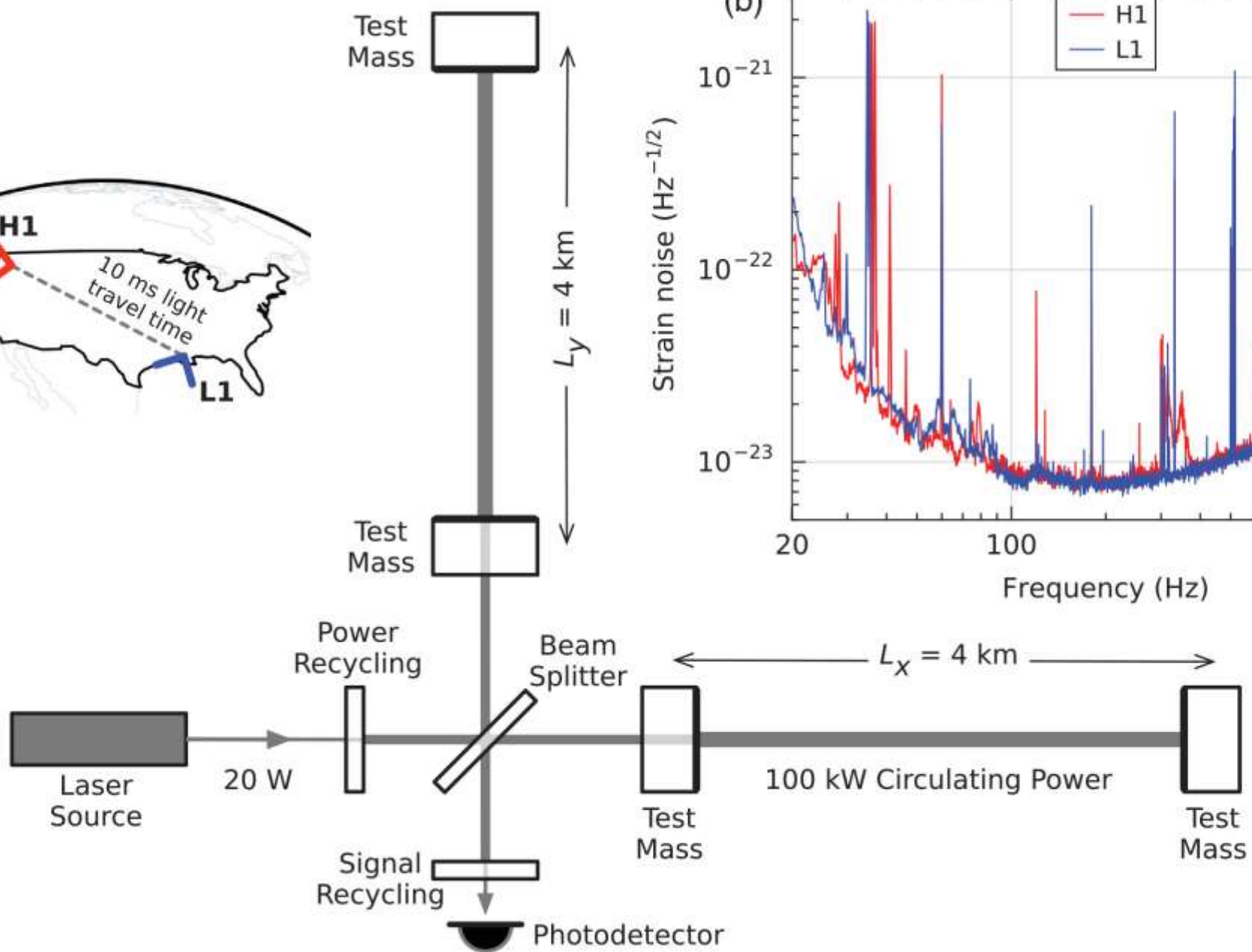
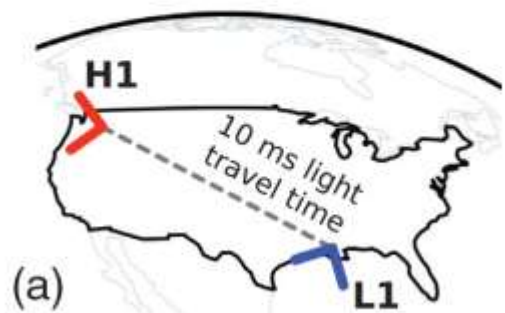
В Коллаборацию LIGO входят более 1000 человек из многих стран. Из них 8 – сотрудники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова – группа, возглавляемая членом-корреспондентом РАН В.Б.Брагинским и группа ученых из института Прикладной физики РАН (Нижний Новгород), руководимая членом-корреспондентом РАН Е.А.Хазановым.

Идея использовать лазерный интерферометр для регистрации гравитационных волн была впервые опубликована российскими учеными М.Е.Герценштейном и В.И.Пустовойтом в 1962 году. В.Л.Гинзбург всегда поддерживал работы М.Е.Герценштейна, В.И.Пустовойта и В.Б.Брагинского.

Инициаторами создания Обсерватории LIGO были американские ученые Kip Thorne, Ronald Driver и Rainer Weiss.

В 2015 году (т.е. почти четверть века спустя после начала работ) тяжелые и многоэтапные работы по созданию LIGO были завершены и увенчались открытием огромного значения для науки.







В коллаборацию LIGO входят более 1000 человек из США и 14 других стран, включая Россию.

Коллаборации LIGO удалось решить сложнейшую и в высшей степени высокотехнологичную задачу – создать два детектора гравитационных волн, которые могут измерять смещения пробных тел – зеркал интерферометра весом в 40 кг, с точностью  $\Delta x \sim 10^{-19}$  м, что на четыре порядка меньше размеров атомного ядра.

Каждая из гравитационно-волновых антенн представляет собой два лазерных интерферометра, размещенных в вакуумных трубах диаметром 1.5 м и длиной в 4 км, расположенных перпендикулярно друг другу. Сейсмические возмущения подавляются на 10 порядков. Зеркала имеют очень высокий коэффициент отражения (99.999%) и очень высокую точность поверхности.

Итоговая длина "плечей" интерферометра  
 $4 \times 300 = 1200$  км.

Приход гравитационной волны вызывает относительные смещения зеркал, которые регистрируются по изменению интерференционной картины.

В антеннах H1 и L1 имеется свыше 1000 систем автоматической подстройки и более 500 контрольных каналов, которые обслуживают свыше 300 специалистов. Годовая эксплуатация LIGO обходится в 30 млн. долларов США. Общая стоимость обсерватории LIGO приближается к 1 млрд. долларов США.

Наблюдения на LIGO начаты с 2002 года. На достигнутом тогда уровне чувствительности авторам не удалось обнаружить гравитационно-волновые сигналы. Публикация в *Nature*, том 406 в 2009 г. С 2010 года начались работы по усовершенствованию LIGO и повышению её чувствительности. Наблюдения на advanced LIGO начались с 2015 года и 14 сентября 2015 года обсерваторией advanced LIGO был зарегистрирован гравитационно-волновой сигнал от слияния ЧД в двойной системе.

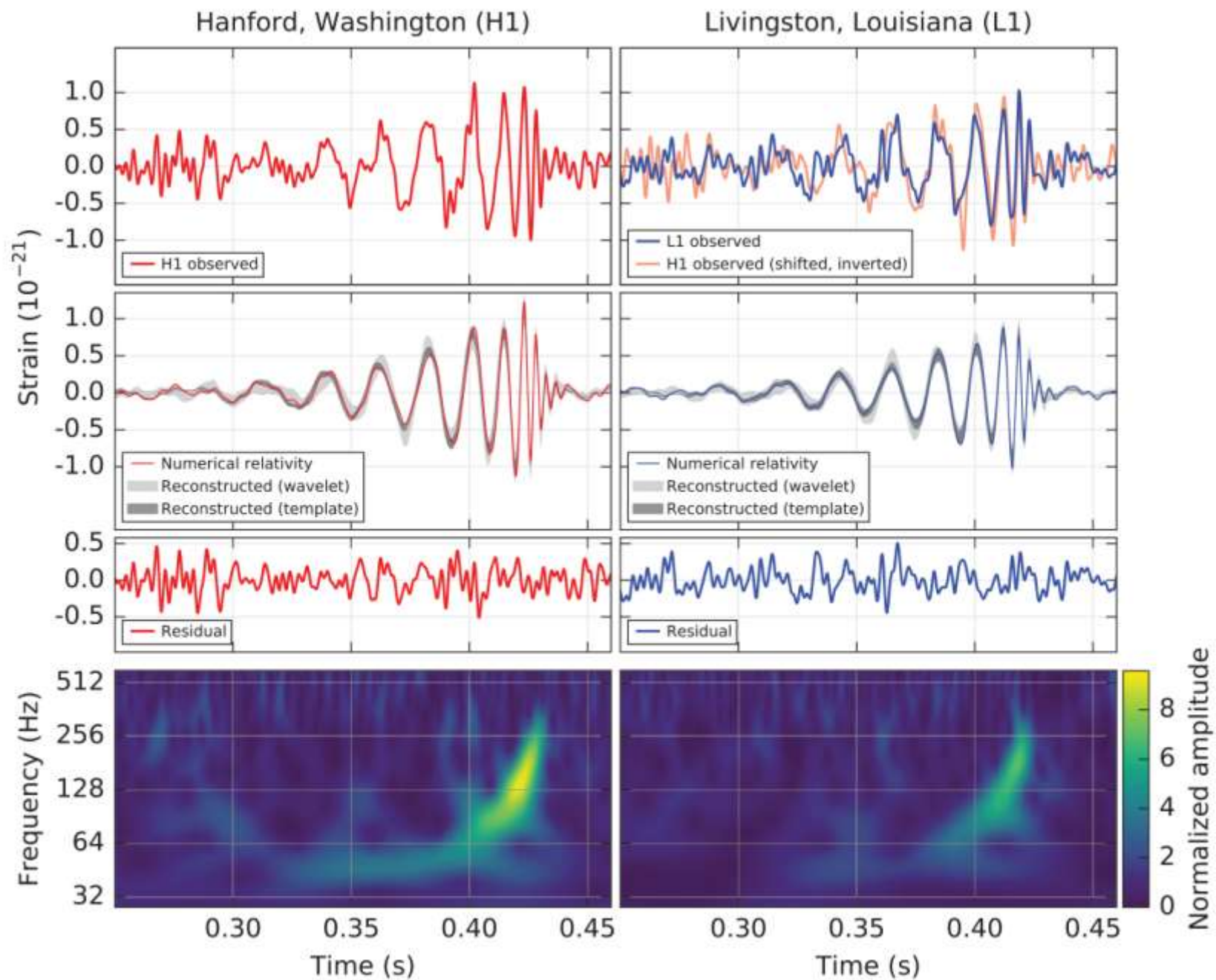
11 февраля 2016 года состоялась пресс-конференция, на которой американскими учеными было объявлено об открытии гравитационных волн от слияния черных дыр в двойной системе, которая получила обозначение LIGO GW150914.

Соответствующая публикация в журнале *Physical Review Letters*, том 116, 2016 вышла на следующий день после интервью, 12 февраля 2016 года.

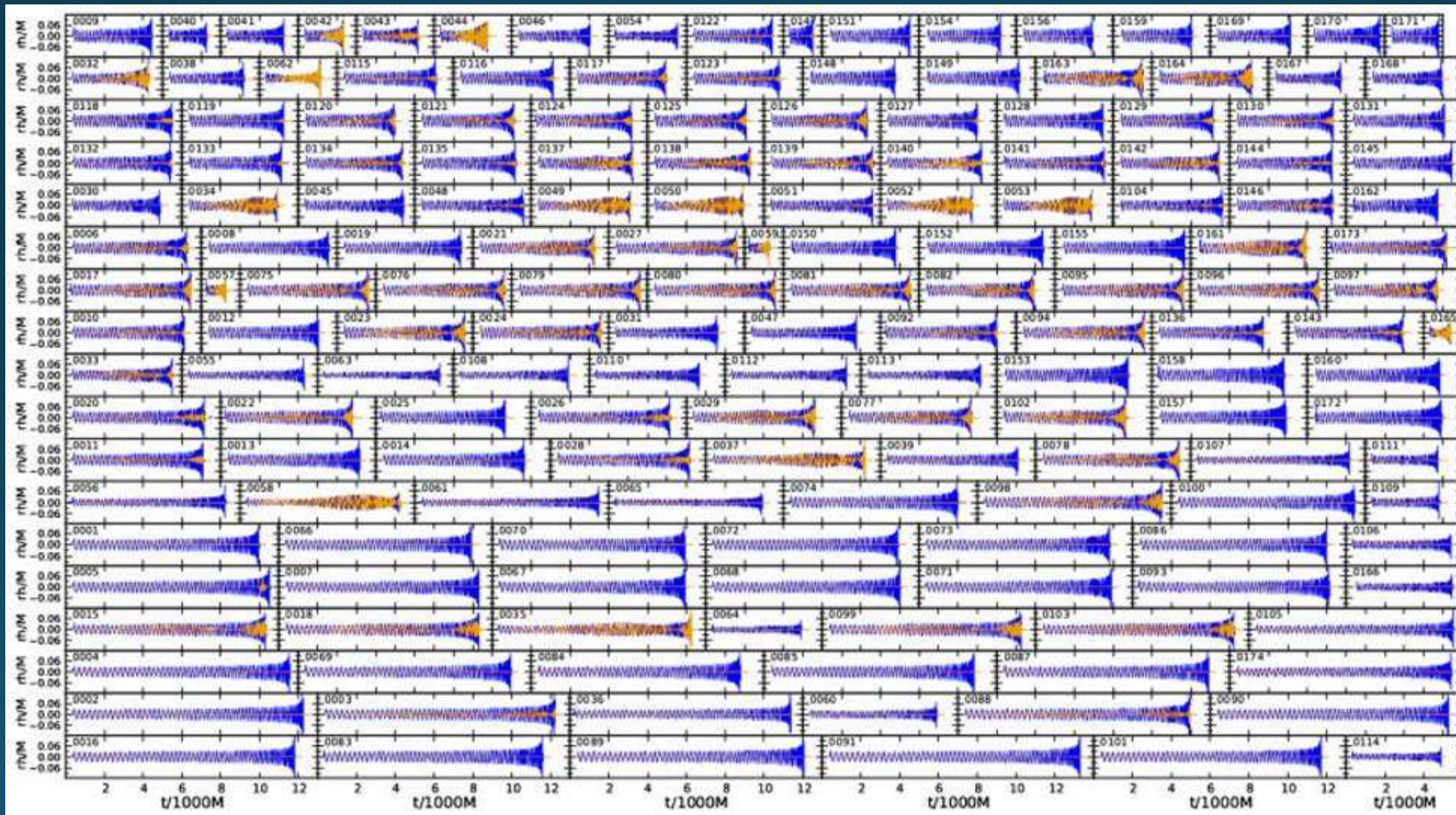
Обсерватория LIGO состоит из двух гравитационно-волновых антенн, разнесенных на расстояние ~3000 км и расположенных на территории США. Одна антенна (H1) расположена в штате Вашингтон в Хэнфорде, другая (L1) в штате Луизиана, в Ливингстоне.

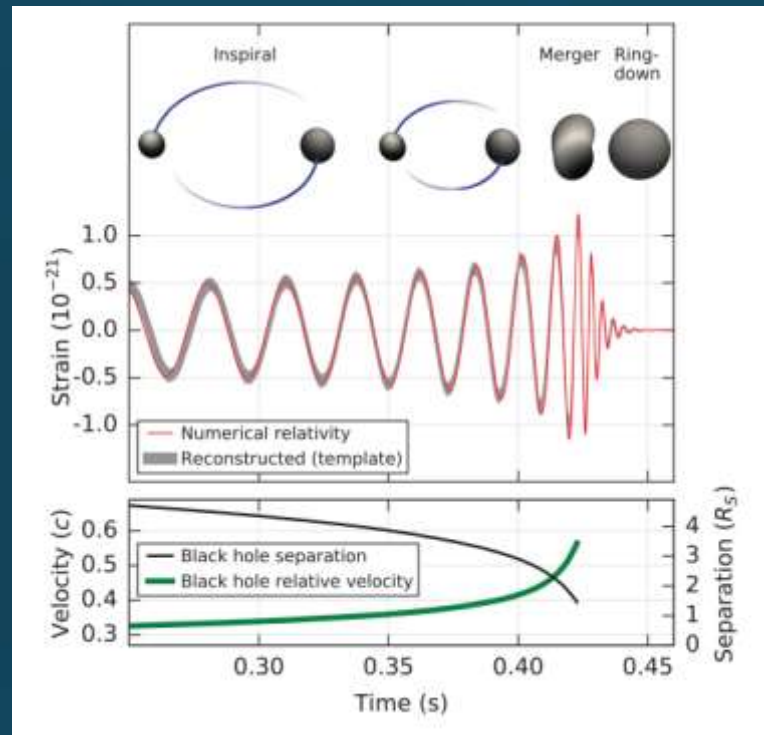
14 сентября 2015 года на обеих антеннах (H1 и L1) был зарегистрирован гравитационно-волновой сигнал LIGO GW150914 продолжительностью около полусекунды. Сигнал представляет собой квазисинусоидальные колебания с уменьшающимся периодом и нарастающей амплитудой с последующим резким затуханием. Наблюдаемый гравитационно-волновой сигнал хорошо описывается теоретической функцией, рассчитанной в рамках ОТО Эйнштейна для модели слияния черных дыр в двойной системе.





Наблюдаемый гравитационно-волновой сигнал хорошо описывается теоретической функцией, рассчитанной в рамках ОТО Эйнштейна для модели слияния чёрных дыр в двойной системе (Шил и Торн, 2014).





$$L = \frac{32}{5} \frac{G^4}{c^5} \frac{m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2)}{a^5}$$

$$\text{Chirp mass: } M = \frac{(m_1 \cdot m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left( \frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right)^{3/5} = 30 M_{\odot}$$

Соответствующие начальные массы черных дыр:

$$36_{-4}^{+5} M_{\odot} \text{ и } 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Результирующая масса черной дыры после слияния  $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$ ,

Ее безразмерный момент вращения  $a_* = \frac{c_j}{GM^2} = 0.67_{-0.07}^{+0.05}$ .

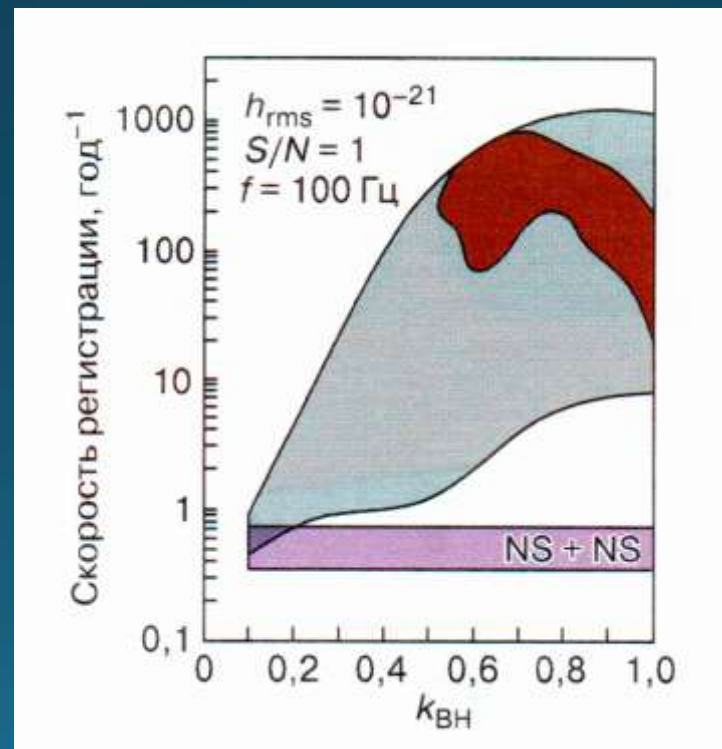
При этом  $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot}$  излучилось в виде гравитационных волн.

Источник расположен на расстоянии  $410_{-180}^{+160}$  мегапарсек от Земли ( $\sim 1.3$  млрд. световых лет). Соответствующее красное смещение  $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$ .

Г.-В. Сигнал пришел сначала на антенну L1 и затем, на  $6.9_{-0.4}^{+0.5}$  миллисекунды позднее был зарегистрирован на антенне H1. Южная небесная полусфера.

Авторы этой замечательной работы (Abbot et al., 2016) делают вывод о том, что их наблюдения демонстрируют существование двойных систем, состоящих из двух черных дыр звездных масс. Они также подчеркивают, что им удалось впервые в мире осуществить прямое детектирование гравитационных волн, а также впервые реализовать наблюдение процесса слияния черных дыр.

Теоретическое предсказание о том, что первые гравитационно-волновые сигналы должны быть зарегистрированы от слияния черных дыр, а не нейтронных звезд, было сделано в 1997 году в ГАИШ профессорами В.М.Липуновым, К.А.Постновым и М.Е.Прохоровым.



Научное значение этого открытия огромно. Открыт новый канал информации, идущей из Космоса, который (наряду с электромагнитным, нейтринным каналами и каналом космических лучей) позволяет наблюдать различные катастрофические явления, происходящие во Вселенной: слияние белых карликов, нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах, взрывы сверхновых звезд, а также, возможно, и такие явления, о которых мы пока не имеем никакого представления (например, явления, связанные с космическими струнами, доменными стенками, кротовыми норами, белыми дырами и т.п.)

Дальнейшее повышение чувствительности гравитационно-волновых детекторов, ввод в строй новых обсерваторий (Adv VIRGO, Италия; KAGRA, Япония; INDIGO, Индия; EINSTEIN TELESCOPE, международный проект), а также создание космических гравитационно-волновых обсерваторий (LISA и др.), позволит наблюдать также различные фоновые излучения гравитационных волн, в том числе, фон очень длинных гравитационных волн ( $\lambda \gtrsim 1$  Мегепарсек), образующихся на переходных стадиях расширения Вселенной (см., например, Л.П.Грищук, 1974).



С открытием гравитационных волн встает на прочный наблюдательный базис новая наука – геометродинамика, которая начала развиваться в конце 1950 – начале 1960 гг. в работах Дж.А.Уилера, К.С.Торна, Я.Б.Зельдовича, И.Д.Новикова и других ученых.

Геометродинамика – это наука, изучающая нелинейную динамику искривленного пространства-времени (см., например, обзор Шила и Торна, УФН, том 184, с.367, 2014). Гравитационно-волновая астрономия дает нам уникальную возможность исследовать не только различные материальные тела (звезды, галактики и т.п.), но и пустое пространство-время, которое можно рассматривать как один из видов материи, свойства которой можно реально исследовать с помощью гравитационно-волновых телескопов.

Массы ЧД в двойной системе LIGO GW150914 были весьма велики: 36 и 29  $M_{\odot}$ .

Возникает вопрос: каковы начальные параметры исходной двойной системы?

Рассмотрим наиболее массивные тесные двойные системы в нашей Галактике (металличность  $z \approx 0.025$ ) и в LMC ( $z \approx 0.01$ ):

- ST1-98 (LMC): O4+O4,  $M_1=45M_{\odot}$ ,  $M_2=45M_{\odot}$ ,
- R136-42 (LMC): O3V + O3V,  $M_1=40.3M_{\odot}$ ,  $M_2=32.6M_{\odot}$ ,
- SK-67105 (LMC): O4f + O6V,  $M_1=47.2M_{\odot}$ ,  $M_2=29.8M_{\odot}$ ,
- R136-38 (LMC): O3V + O6V,  $M_1=56M_{\odot}$ ,  $M_2=30M_{\odot}$ ,
- V729Cyg: O7Iafp + O6-7Ia,  $M_1=47M_{\odot}$ ,  $M_2=13M_{\odot}$ ,
- HDE311884: WN6 + O5V,  $M_{WR}=51M_{\odot}$ ,  $M_o=60M_{\odot}$ ,
- HD193793: WC7 + O4-5,  $M_{WR}=27M_{\odot}$ ,  $M_o=60M_{\odot}$ ,
- HD193928: WN5 + O5V-III,  $M_{WR}=45M_{\odot}$ ,  $M_o=30M_{\odot}$ ,
- WR20a: WN6h + WN6a,  $M_{WNh}=83M_{\odot}$ ,  $M_{WNa}=82M_{\odot}$ ,
- NGC3603-A1: WN6a+WN6,  $M_{WNa}=116M_{\odot}$ ,  $M_{WN6}=89M_{\odot}$ ,

Как видно, в нашей Галактике и других ближайших галактиках встречаются тесные двойные системы с массами компонент  $50 \div 100 M_{\odot}$ , которые могли бы быть предшественниками системы LIGO GW150914. Однако такие массивные системы очень редки.

Массивные ( $M > 30 - 40 M_{\odot}$ ) звёзды в процессе своей ядерной эволюции заметно теряют массу в виде звёздного ветра, что уменьшает вероятность формирования массивных ЧД. Темп потери массы зависит от металличности вещества звезды  $z$ , которая определяет непрозрачность звёздного вещества:

$$\dot{M} \sim z^{0.75} \text{ для } 0.001 \lesssim \frac{z}{z_{\odot}} \lesssim 10.$$

Поэтому наиболее массивные звёзды в двойных системах следует ожидать в галактиках с низкой металличностью.

Вращение звезд может стимулировать звездный ветер.

Наиболее подходящие объекты – водородно-гелиевые звёзды населения II, которые формировались на ранних стадиях эволюции Вселенной.

В 1980-х годах выяснилось, что звёздный ветер массивных O-В звёзд и WR-звёзд имеет клочковатую, облачную структуру (Chereshchuk et al., 1984, Moffat et al., 1988). Поэтому величины  $\dot{M}$ , определённые по тепловому радиоизлучению этих звёзд, завышены в 3-5 раз (Черепашук, 1990).

Уменьшение величин  $\dot{M}$  в 3-5 раз позволяет избавиться от «Эффекта сходимости» и увеличить массу черной дыры.

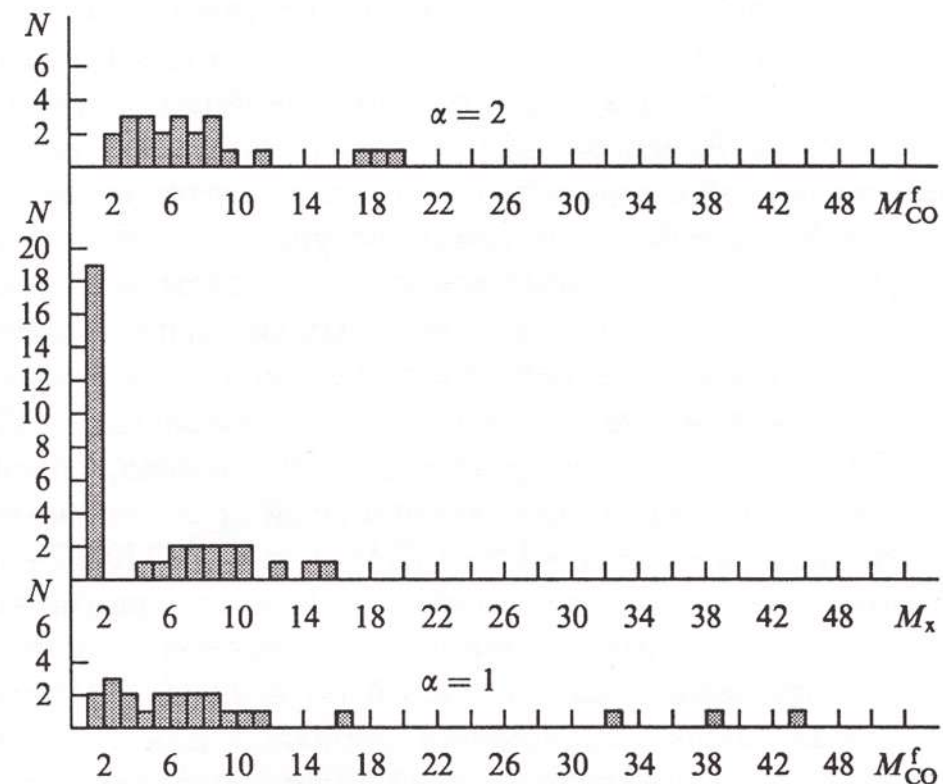


Рис. 30. Гистограммы распределения конечных масс углеродно-кислородных ядер  $M_{CO}^f$  для 23 звезд WR с известными массами (нижний график соответствует случаю  $\alpha=1$  в уравнении  $\dot{M}_{WR} = kM_{WR}^\alpha$ , верхний — случаю  $\alpha=2$ ). В середине показана гистограмма распределения масс  $M_x$  для 34 релятивистских объектов в двойных системах. (Массы  $M_{CO}^f$  и  $M_x$  выражены в единицах  $M_\odot$ .) Высокий пик в диапазоне  $(1-2)M_\odot$  соответствует НЗ. Распределения  $M_{CO}^f$  непрерывны, а распределение  $M_x$  бимодально с провалом в области значений масс  $M_x = (2-4)M_\odot$  (из работ [377, 378]).

26 рентгеновских двойных систем с известными массами ЧД.  
9 – HMXB и 17 – LMBX.

ВН+ВН двойные системы формируются из массивных рентгеновских двойных систем с ЧД, содержащих в качестве оптической звезды-донора вещества, массивную горячую звезду ( $M \approx 5 \div 70 M_{\odot}$ )

Система	Спектр оптической звезды	$P_{\text{orb}}$ , сут	$f_v(m)/M_{\odot}$	$v_{\text{rot}} \sin i$ , км с <sup>-1</sup>	$i$ , град	$q = m_X/m_V$	$m_X/M_{\odot}$	$m_V/M_{\odot}$	$a_*$
Cyg X-1 (V1357Cyg)**	O9.7Iab	5,59983(2)	0,244±0,005	95±6	27,06±0,76	0,77±0,1	14,81±0,98	19,16±1,9	>0,95
LMCX-3**	B3Ve	1,70479(4)	2,29±0,32	130±20	67±3	1,6±0,4	7,6±1,6	5±1	0,3±0,1
LMCX-1**	O(7-9)III	3,90917(5)	0,14±0,05	129,9±2,22	37,0±1,87	0,34±0,07	10,3±1,3	30,6±3,2	0,92 <sup>+0,05</sup> <sub>-0,07</sub>
RX J1826.2-1450 (LS5039)**	O6.5V((f))	3,90603(17) ( $e = 0,35 \pm 0,04$ )	0,0053±0,009	113±8	24,9±2,8	0,16±0,09	3,7±1,1	22,9±3,1	—
SS433**	A7I	13,08211(10)	0,268±0,043	—	78,81±0,06	0,30±0,05	5±1****	15±3****	—
M33X-7**	O(7-8)III	3,453014(20)	0,46±0,08	250±7	74,6±1,0	0,224	15,55±3,20	70,0±6,9	0,84±0,05
IC10X-1**	WNE	1,4554	7,64±1,26	—	~ 90	~1,1	28±5****	26±9****	—
CygX-3**	WN3-7	0,19968462(6)	0,027	—	> 60	—	~ 10****	≤ 70****	—
NGC300X-1**	WN5	1,346(8)	2,6±0,3	—	68±7	~0,87±0,2	17±6****	22±10	—

В маломассивных рентгеновских системах с ЧД оптическими звёздами-донорами вещества являются маломассивные звёзды  $M = 0.3 - 2 M_{\odot}$

		$M_x$	$M_v$	$a_*$						
A0620-00 (V616Mon)***	K5V	0,3230(160(5))	2,72±0,06	83±5	51,0±0,9	16,5±3,0	6,60±0,25	0,40±0,045	0,12±0,19	
GS2023+338 (V404Cyg)***	K0IV	6,4714(1)	6,08±0,06	38,8±1,1	56±4	17,5±1,4	12±2	0,7±0,2	—	
GRS1124-68 (GU Mus)***	K(2-4)V	0,432606(3)	3,01±0,15	106±13	54±2	6,8±2	7,3±0,8	1,0±0,2	—	
GS2000+25 (QZ Vul)***	K5V	0,3440915(9)	5,01±0,12	86±8	64±1,3	24±5	7,5±0,3	0,3±0,1	—	
GRO J1655-40 (XN Sco1 1994)***	F5IV	2,6219(2)	2,73±0,09	93±3	70,2±1,2	2,5±0,1	6,3±0,3	2,5±0,2	0,7±0,1	
H1705-250 (V2107 Oph)***	K5V	0,5222(44)	4,86±0,13	≤ 79	> 60	> 18,9	7,0±1,3	0,4±0,1	—	
GRO J0422+32 (V518 Per)***	M2V	0,2121600(2)	1,19±0,02	90±2,5	44±2	10±5	4,3±0,6	0,4±0,1	—	
4U1543-47 (HL Lup)***	A2V	1,116407(3)	0,25±0,01	46±2	20,7±1,5	3,6±0,4	9,4±1,0	2,6±0,3	0,8±0,1	
GRS1009-45 (MM Vel)***	(K6-M)IV	0,285206(2)	3,17±0,12	—	~ 67****	7,2±0,9	4,2±0,6	0,6±0,1	—	
SAX J1819.3-2525 (V4641 Sgr)***	B9III	2,81730(1)	3,13±0,13	98,9±1,5	75±2	2,30±0,08	7,1±0,3	3,1±0,2	—	
XTE J1118+480***	(K7-M)IV	0,169930(4)	6,1±0,3	114±4	81±2	26±3	6,8±0,4	0,3±0,02	—	
GRS1915+105***	KIII	33,5	-9,5±3,0	26±3	66±1	18±1,0	14±4	0,8±0,5	0,975±0,025	
GX339-4 (V821Aql)***	—	1,7557(4)	~ 6,5	—	—	~ 15	9±2	0,6±0,4	—	
XTE J1550-564***	G8IV-K4III	1,5435(5)	6,86±0,71	90±10****	72±5	> 12	9,6±1,2	0,5±0,2	0,34±0,24	
XTE J1859+226***	~G5	0,382(3)	7,4±1,1	—	—	—	9,8±2,2	~ 1	—	
XTE J1650-500***	K4V****	0,3205(7)	2,73±0,56	—	> 50	~ 10****	≤ 7,3 (4,0-7,3)	~ (0,4-0,7)****	—	
GS1354-64*** (BWC(r))	G(0-5)III	2,54451(8)	5,73±0,29	69±8	≤ 79	8,3±3	≥ 7,6	~ 1****	—	

\*  $P_{orb}$  — орбитальный период системы,  $f_1(m)$  — функция масс,  $v_{rot}$  — скорость вращения,  $i$  — угол наклона плоскости орбиты системы к картинной плоскости,  $m_x$  — масса чёрной дыры,  $m_v$  — масса оптической звезды,  $a_*$  — безразмерный параметр вращения чёрной дыры,  $a_* = r_j / (GM^2)$ .

\*\* Стационарная.

\*\*\* Транзитная.

\*\*\*\* Значения параметров, которые нуждаются в подтверждении дальнейшими исследованиями. Ссылки на оригинальные работы приведены в монографии [15].

Конечной стадией эволюции оптических звёзд в таких системах должны быть белые карлики, и в будущем гравитационно-волновой всплеск должен наблюдаться от слияния ЧД с белым карликом.



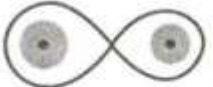

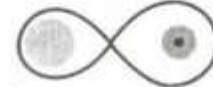
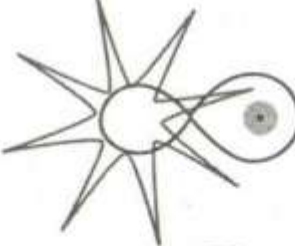






Наиболее массивными рентгеновскими двойными системами (по надёжно определенным массам оптической звезды и чёрной дыры) являются системы

- Cyg X-1 ( $M_{\text{BH}}=14.81M_{\odot}$ ,  $M_{\text{V}}=19.16M_{\odot}$ )
- LMC X-1 ( $M_{\text{BH}}=10.3M_{\odot}$ ,  $M_{\text{V}}=30.6M_{\odot}$ )
- M33 X-7 ( $M_{\text{BH}}=15.55M_{\odot}$ ,  $M_{\text{V}}=70M_{\odot}$ ).

Параметры этих систем «не дотягивают» до параметров LIGOGW150914:  $M_{\text{BH}}=36$  и  $29 M_{\odot}$ .









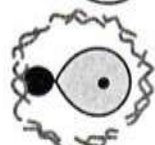
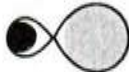



В работах (Абубекеров, Антохина, Богомазов, Черепашук, 2009, Богомазов, 2014) с использованием программы популяционного синтеза тесных двойных систем (машина сценариев, см. Корнилов и Липунов, 1983, Липунов и др. 1996) рассчитаны эволюционные сценарии для систем M33 X-7, IC10 X-1, NGC300 X-1.

Приведём эти сценарии



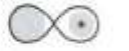



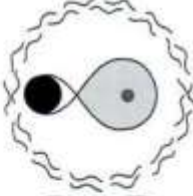

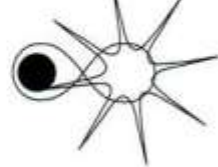


Стадия	$M$		$M$	$a$	$T$
I + I	113,2		41,4	34	0
III + I	108,3		37,8	36	2,4
WR + I	75,0		71,1	22	2,4
SN	52,5		69,6	26	
BH + I	15,8		69,9	46	2,6
SBN + IIIs	15,8		69,3	38	3,2
CE	15,8		64,4	22	3,2
					
TZ	55,3				3,2
BH	55,2				3,3

# M33 X-7

## Nazin and Postnov (1995)

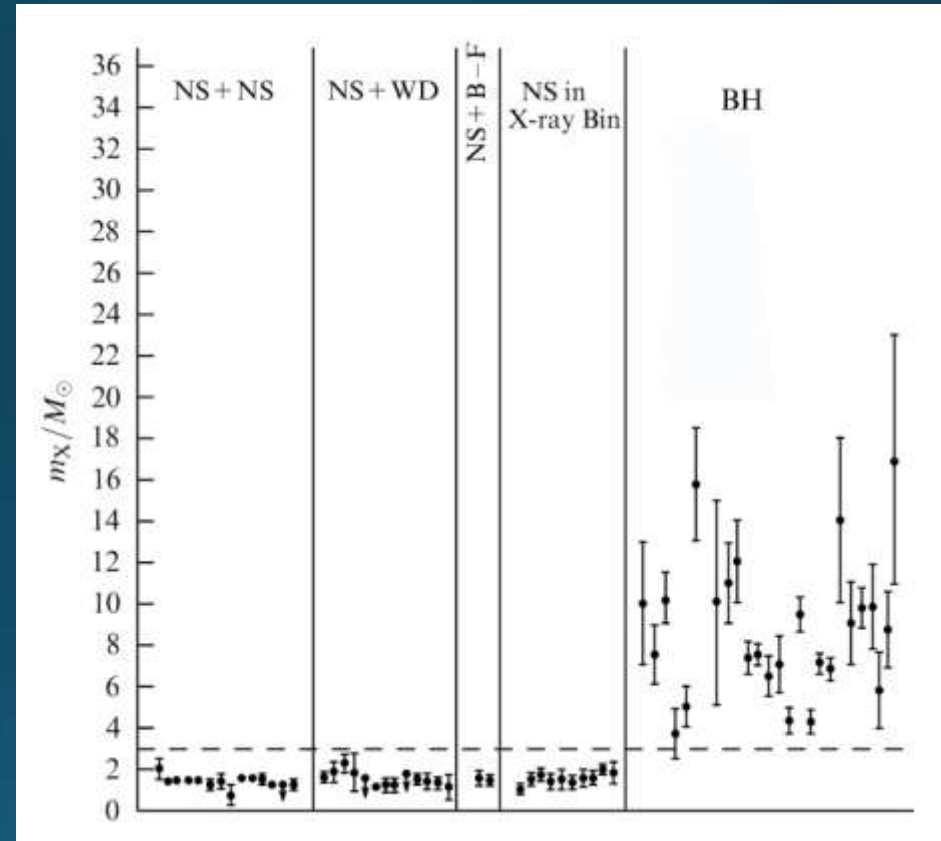
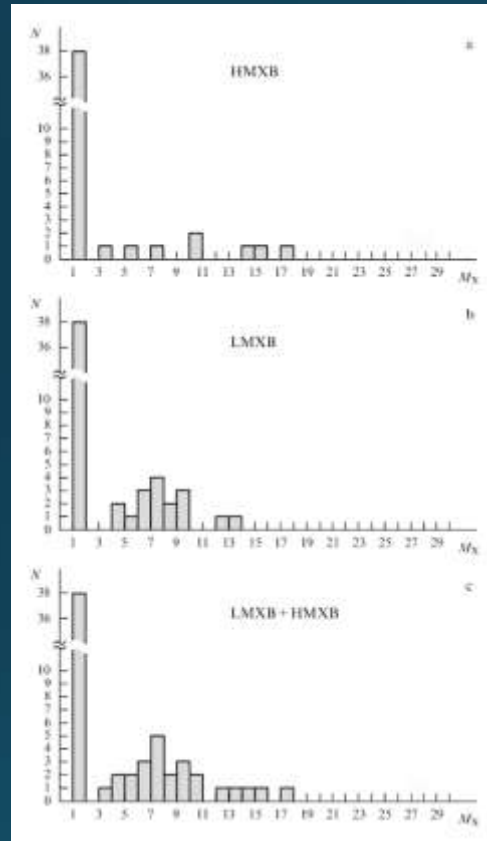
Стадия	$M$		$M$	$a$	$T$
I + I	94,3		56,7	180	0
III + I	92,5		56,2	190	2,5
IIIe + I	60,8		60,8	180	2,5
WR + I	58,1		61,0	180	3,1
SN	52,3		61,0	190	
BH + I	26,1		61,0	270	3,3
BH + II	26,1		60,9	270	3,5
SBN + IIIs	26,1		54,5	270	3,8
CE	26,1		53,0	260	3,8
BH + WR	26,1		31,6	18	3,8
SN	26,1		28,4	19	
BH + BH	26,1		14,2	30	4,1
BH	40,3				4300

# IC10 X-1

Система	$M_1$		$M_2$	$a$	$T$	$e$
I + I	95.92		37.30	130	0	0
III + I	90.60		34.59	140	2.5	0
WR + I, CE	59.52		53.18	85	2.5	0
SN	41.67		53.09	100	2.7	0
BH + I	20.83		53.09	140	2.7	0.3
BH + III	20.83		52.31	140	4.3	0.3
SBH + III	20.83		47.70	110	4.3	0.2
BH + WR	20.83		26.06	4.9	4.3	0
SN	20.84		18.24	5.9	4.6	0
BH + BH	20.84		9.12	8.5	4.6	0.3
BH	29.96				90	

# NGC300X-1

Распределение ЧД по массам в массивных рентгеновских двойных системах (которые эволюционируют как полуразделённые системы) и маломассивных рентгеновских звёздных системах (эволюция с общей оболочкой) существенно различаются.



Число открытых ЧД в двойных системах не возрастает с уменьшением массы ЧД. Число звёзд в Галактике сильно возрастает (как  $M^{-5}$ ) с уменьшением массы звезды.

Это свидетельствует о том, что не только начальная масса родительской звезды определяет массу ЧД.

Во всех 70 случаях, когда релятивистский объект показывает признаки наблюдаемой поверхности (радиопульсар, рентгеновский пульсар, рентгеновский барстер 1-ого типа), его масса не превышает  $3M_{\odot}$ , в полном согласии с ОТО.

В тех же случаях, когда масса релятивистского объекта превышает  $3M_{\odot}$ , он не показывает признаков наблюдаемой поверхности.

Эти факты косвенно свидетельствуют об отсутствии наблюдаемых поверхностей (о наличии горизонта событий) у массивных ( $M > 3M_{\odot}$ ) релятивистских объектов – чёрных дыр.

Наблюдения гравитационно-волновых сигналов от слияния ЧД в двойных системах дают уникальную возможность доказательства горизонтов событий у чёрных дыр, а также возможность исследований в области геометродинамики – нелинейной динамики пустого искривленного пространства-времени.



# Отождествление гравитационно-волнового события LIGO GW150914 с событиями в электромагнитных диапазонах.

Наблюдения, выполненные группой В.М.Липунова в ГАИШ не выявили соответствующего оптического транзиента (использовалась сеть телескопов-роботов МАСТЕР).

Российская глобальная роботизированная сеть МАСТЕР внесла самый крупный вклад в оптический обзор первого гравитационно-волнового события.

IN PREPARATION. TARGET JOURNAL: APJL  
Preprint typeset using L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X style AASTeX6 v. 1.0

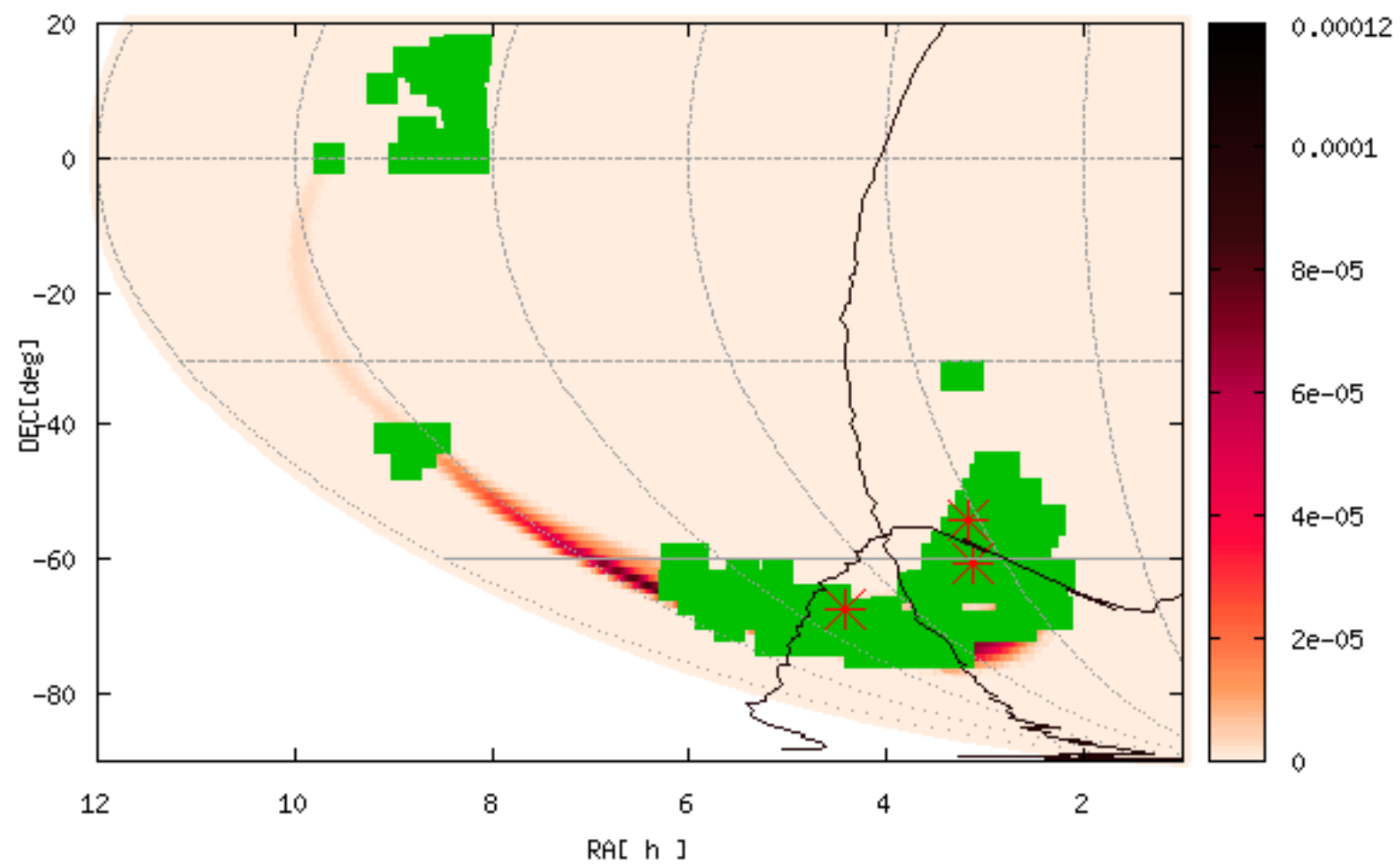
## LOCALIZATION AND BROADBAND FOLLOW-UP OF THE GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT GW150914

B. P. ABBOTT<sup>1</sup>, R. ABBOTT<sup>1</sup>, T. D. ABBOTT<sup>2</sup>, M. R. ABERNATHY<sup>1</sup>, F. ACERNESE<sup>3,4</sup>, K. ACKLEY<sup>5</sup>, C. ADAMS<sup>6</sup>, T. ADAMS<sup>7</sup>,  
P. ADDESSO<sup>3</sup>, R. X. ADHIKARI<sup>1</sup>, V. B. ADYA<sup>8</sup>, C. AFFELDT<sup>8</sup>, M. AGATHOS<sup>9</sup>, K. AGATSUMA<sup>9</sup>, N. AGGARWAL<sup>10</sup>, O. D. AGUIAR<sup>11</sup>,  
L. AIELLO<sup>12,13</sup>, A. AIN<sup>14</sup>, P. AJITH<sup>15</sup>, B. ALLEN<sup>8,16,17</sup>, A. ALLOCCA<sup>18,19</sup>, P. A. ALTIN<sup>20</sup>, S. B. ANDERSON<sup>1</sup>, W. G. ANDERSON<sup>16</sup>,  
K. ARAI<sup>1</sup>, M. C. ARAYA<sup>1</sup>, C. C. ARGENEAU<sup>21</sup>, I. S. ABEEDA<sup>22</sup>, N. ARNAUD<sup>23</sup>, K. G. ARUN<sup>24</sup>, S. ASCENZI<sup>25,13</sup>, G. ASHTON<sup>26</sup>

V. LIPUNOV<sup>336</sup>, E. GORBOVSKOY<sup>336</sup>, N. TYURINA<sup>336</sup>, V. KORNILOV<sup>336</sup>, P. BALANUTSA<sup>336</sup>, A. KUZNETSOV<sup>336</sup>, D. BUCKLEY<sup>337</sup>,  
R. REBOLO<sup>338</sup>, M. SERRA-RICART<sup>338</sup>, G. ISRAELIAN<sup>338</sup>, N. M. BUDNEV<sup>339</sup>, O. GRESS<sup>339</sup>, K. IVANOV<sup>339</sup>, V. POLESHUK<sup>339</sup>,  
A. TLATOV<sup>340</sup>, AND V. YURKOV<sup>341</sup>

The MASTER Collaboration

MASTER NET GW150914 cover map



Космическая гамма-обсерватория ФЕРМИ через 0.4 секунды после события LIGO GW150914 зарегистрировала слабый (на уровне трех сигм) секундн<sup>ый</sup> всплеск жесткого рентгеновского излучения. Соответствующая энергия  $\sim 10^{49}$  эрг, что в  $\sim 10^6$  раз меньше энергии гравитационного излучения.

# Регистрация на ФЕРМИ

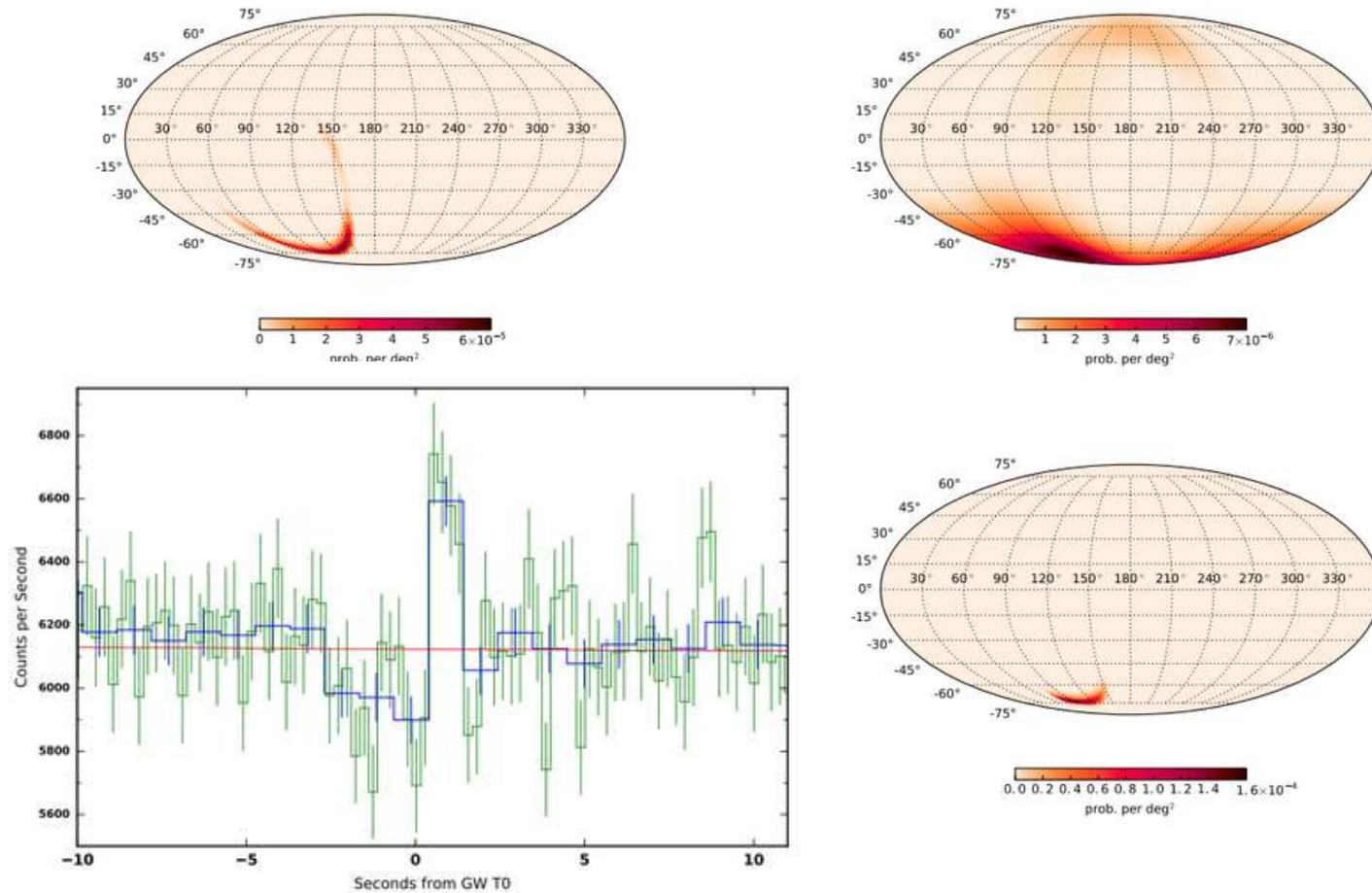


Fig. 8.— The LIGO localization map (top left) can be combined with the GBM localization map for GW150914-GBM (top right) assuming GW150914-GBM is associated with GW event GW150914. The combined map is shown (bottom left) with the sky region that is occulted to *Fermi* removed in the bottom right plot. The constraint from *Fermi* shrinks the 90% confidence region for the LIGO localization from 601 to 199 square degrees.

## Российские гравитационно-волновые проекты:

1. Физфак МГУ (группа В.Б.Брагинского) и ИПФ (Нижний Новгород, группа Е.А.Хазанова) – большой опыт работы в коллаборации LIGO.
2. Проект ОГРАН, рук. В.Н.Руденко (зав. лаб. ГАИШ). Твердотельная Г-В антенна с лазерной системой регистрации. Установлена в штольне Баксанской нейтринной обсерватории. Коллаборация: ГАИШ МГУ, ИЯИ РАН (научн. рук. В.А.Матвеев) и Институт Лазерной физики СО РАН (научн. рук. С.Н.Багаев). Находится в стадии запуска.
3. МГТУ им. Баумана (научн. рук. В.И.Пустовойт) – продвинутые лазерные интерферометры для регистрации ГВ.
4. Сеть телескопов-роботов МАСТЕР в ГАИШ (научн. рук. В.М.Липунов) для оптической идентификации гравитационно-волновых всплесков. Нужно развивать это направление.

Глобальная российская сеть  
телескопов-роботов **МАСТЕР** и  
гравитационно-волновой **LIGO**



