

# Поиск нейтрино от подтверждённых гравитационно-волновых событий LIGO/Virgo

Унатлоков И.Б. и коллаборация БПСТ

Институт ядерных исследований РАН

*37 Всероссийская конференция по космическим лучам*

*Москва, 2022*

# Gravitational Wave Transient Catalogs

## **GWTC-1 (11 событий)**

GW150914

GW151012

GW151226

GW170104

GW170608

GW170729

GW170809

GW170814

GW170817

GW170818

GW170823

# Gravitational Wave Transient Catalogs

## GWTC-2 + GWTC-2.1 (47 событий)

GW190403_051519	GW190521_074359	GW190814
GW190408_181802	GW190527_092055	GW190828_063405
GW190412	GW190602_175927	GW190828_065509
GW190413_052954	GW190620_030421	GW190909_114149
GW190413_134308	GW190630_185205	GW190910_112807
GW190421_213856	GW190701_203306	GW190915_235702
GW190424_180648	GW190706_222641	GW190916_200658
GW190425	GW190707_093326	GW190917_114630
GW190426_152155	GW190708_232457	GW190924_021846
GW190426_190642	GW190719_215514	GW190925_232845
GW190503_185404	GW190720_000836	GW190926_050336
GW190512_180714	GW190725_174728	GW190929_012149
GW190513_205428	GW190727_060333	GW190930_133541
GW190514_065416	GW190728_064510	
GW190517_055101	GW190731_140936	
GW190519_153544	GW190803_022701	
GW190521	GW190805_211137	

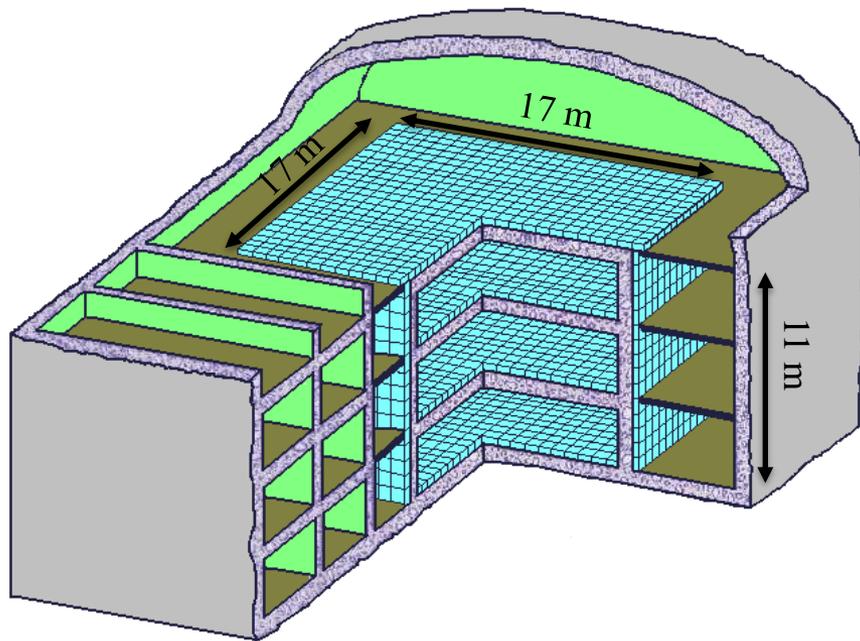
# Gravitational Wave Transient Catalogs

## **GWTC-3 (35 событий)**

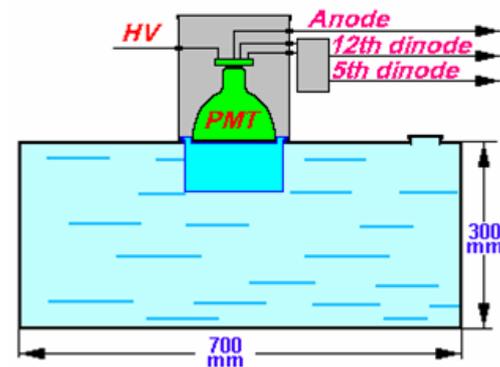
GW191103_012549	GW200202_154313
GW191105_143521	GW200208_130117
GW191109_010717	GW200208_222617
GW191113_071753	GW200209_085452
GW191126_115259	GW200210_092254
GW191127_050227	GW200216_220804
GW191129_134029	GW200219_094415
GW191204_110529	GW200220_061928
GW191204_171526	GW200220_124850
GW191215_223052	GW200224_222234
GW191216_213338	GW200225_060421
GW191219_163120	GW200302_015811
GW191222_033537	GW200306_093714
GW191230_180458	GW200308_173609
GW200112_155838	GW200311_115853
GW200115_042309	GW200316_215756
GW200128_022011	GW200322_091133
GW200129_065458	

# Баксанский Подземный Сцинтилляционный Телескоп

БПСТ



Счетчик БПСТ



Мюонные нейтрино могут взаимодействовать с веществом вокруг БПСТ, рождая мюоны:  $\nu_{\mu} + N \rightarrow \mu + X$

- Сцинтиллятор  $C_n H_{2n+2}$  ( $n \approx 9$ ).
- Общая масса сцинтиллятора 330 т.
- Всего 3180 счетчиков.
- Глубина  $h_{\text{eff}} = 850 \text{ г/см}^2$ .
- Угловое разрешение  $\approx 1.6^\circ$ .

Так как с при зенитных углах  $> 100^\circ$  отсутствует фон, мюоны с этих направлений являются результатом взаимодействия мюонных нейтрино с веществом под установкой. С учетом угла рождения мюона относительно направления нейтрино, и многократного рассеяния мюона при его прохождении от точки рождения до установки, суммарная неопределенность в направлении нейтрино составляет  $\approx 5^\circ$

Разделение направлений прихода мюонов между верхней и нижней полусферой проводится с помощью времяпролетной методики.

# Анализ события



# Поиск совпадений

1. Поиск нейтринных событий в диапазоне  $\pm 500$  с\* от момента гравитационно-волнового события.
2. Проверка того, что область локализации гравитационно-волнового события хотя бы частично лежит в поле зрения БПСТ.
3. Если локализация гравитационно-волнового события и поле зрения не пересекаются – обработка завершена. Если пересечение есть – производится поиск нейтринных событий в области пересечения. Если нейтрино обнаружены – совпадение есть.
4. Если нейтринные события отсутствуют, производится расчет максимальных и минимальных ограничений на интегральные потоки мюонных нейтрино и антинейтрино внутри области пересечения поля зрения БПСТ и локализации гравитационно-волнового события.

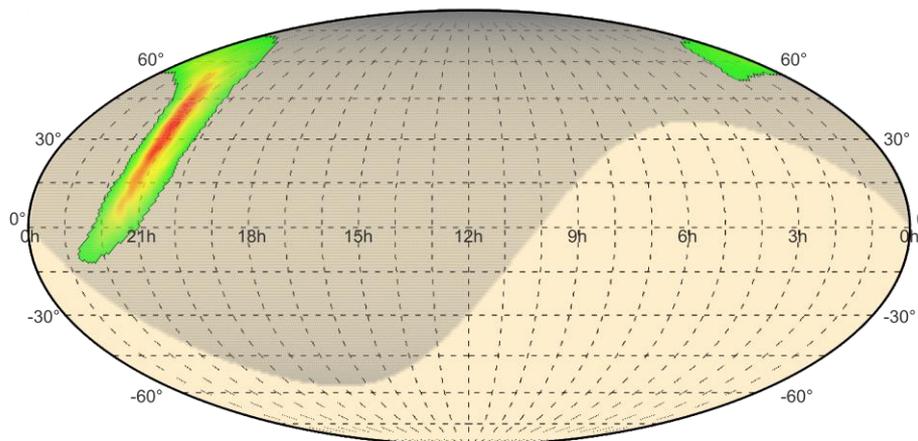
\* Bounding the time delay between high-energy neutrinos and gravitational-wave transients from gamma-ray bursts. *Astropart. Phys.*, 35, 1, 2011; arXiv:1101.4669

# Поле зрения БПСТ

Локализация источника гравитационно-волнового события сверяется с полем зрения БПСТ.

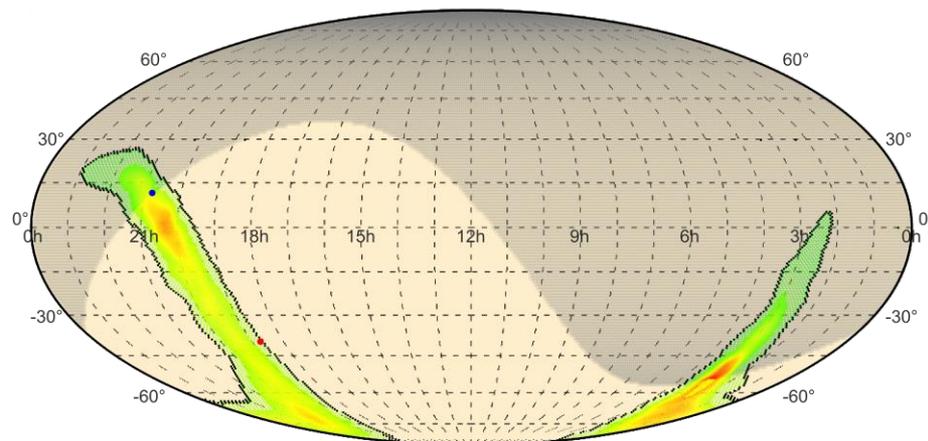
Пересечения нет

GW190930\_133541

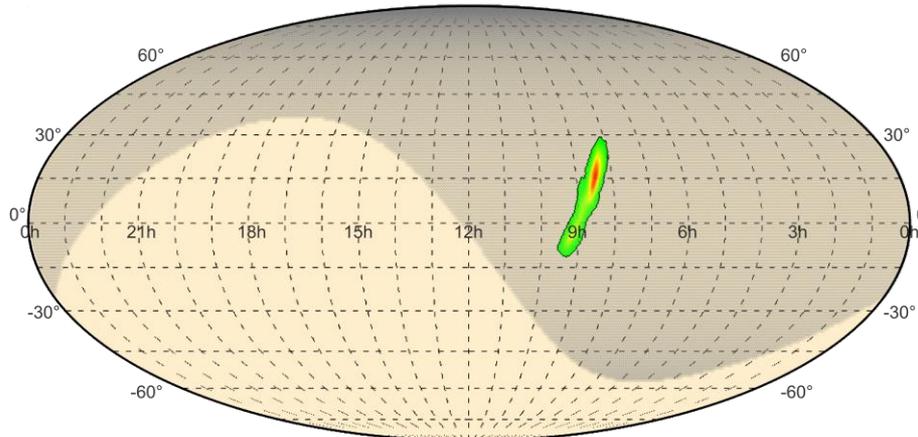


Пересечение есть

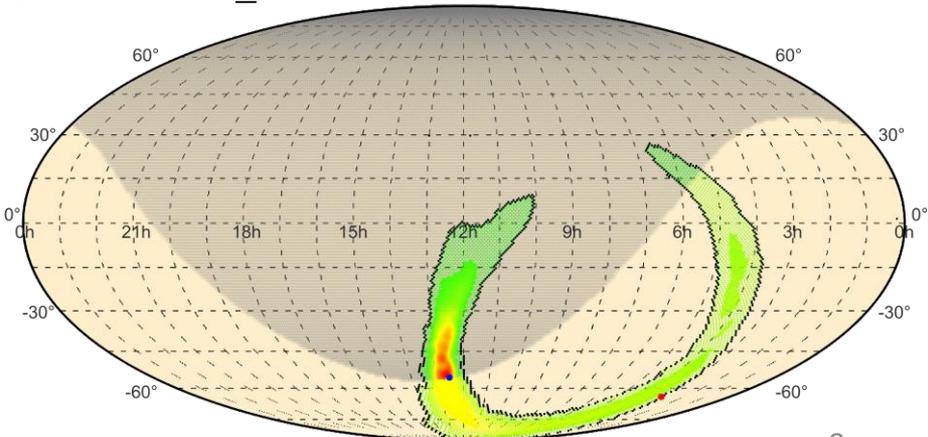
GW190527\_092055



GW190924\_021846

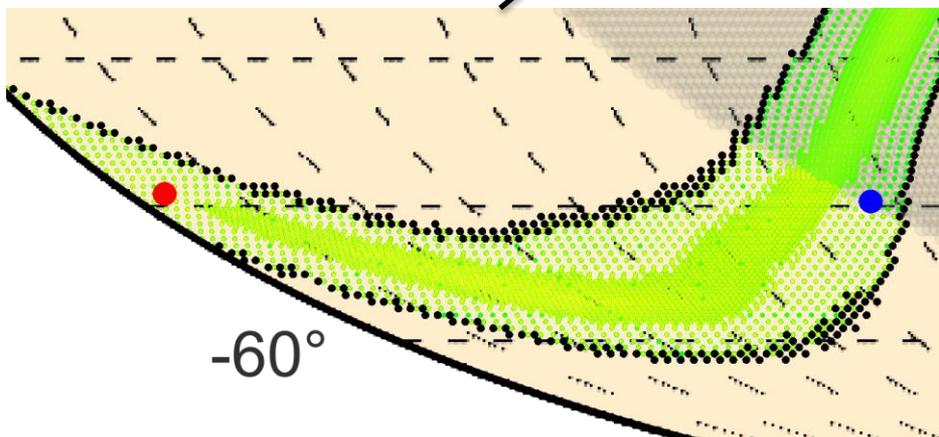
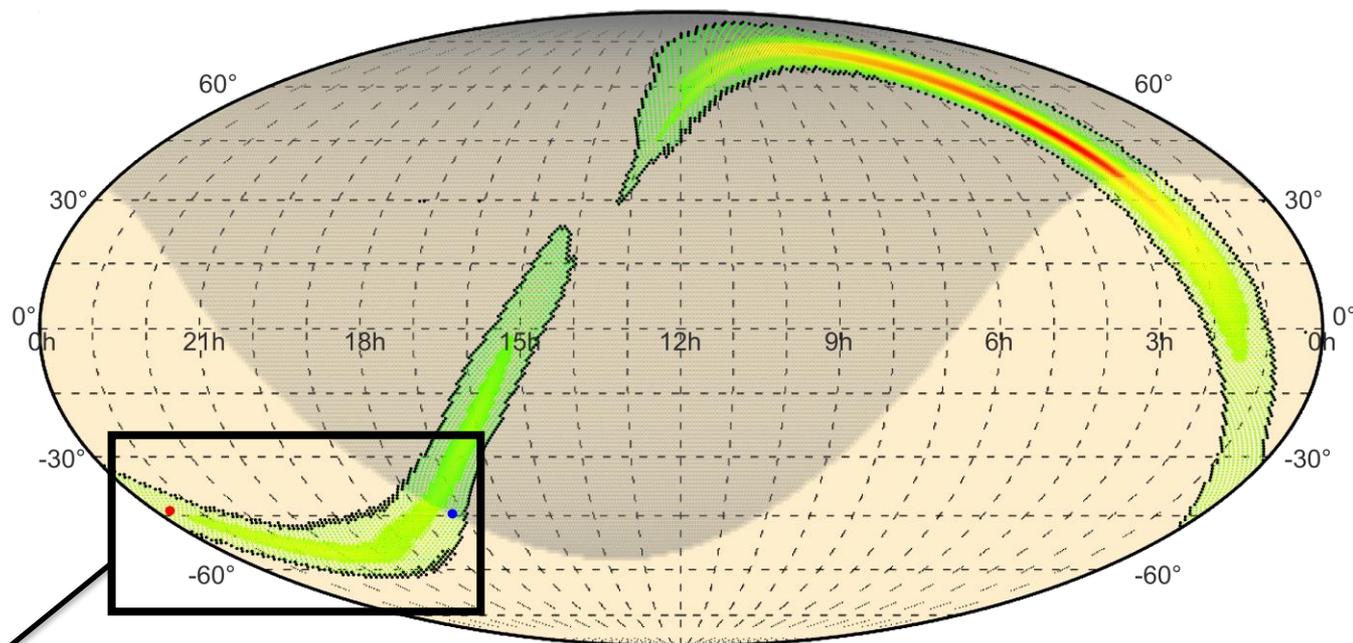


GW190731\_140936



# Поиск точек, в которых площадь БПСТ имеет максимальное и минимальное значения

Локализация события GW190909\_114149,  $S_{\min} = 74.78 \text{ м}^2$ ,  $S_{\max} = 215.91 \text{ м}^2$



# Обработка данных

## Ограничения на потоки

$$S_{eff}(E_\nu, \theta, \phi) = \sigma_{\nu N}(E_\nu) \cdot N_N$$

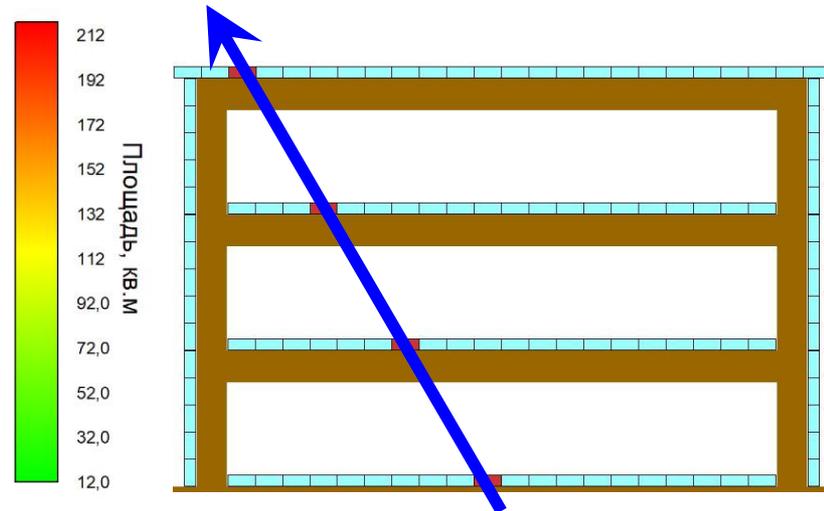
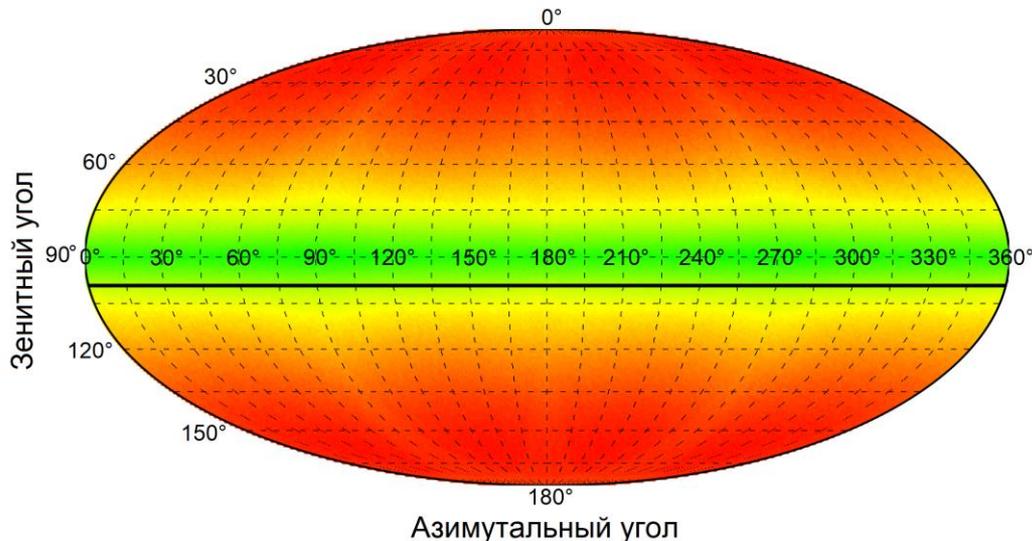
$$I(E_\nu, \theta, \phi) = \frac{n_{90}}{S_{eff}(E_\nu, \theta, \phi)}$$

$$n_{90} = 2.3$$

$$I_{lim} = \frac{n_{90}}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} I(E_\nu) S_{eff}(E_\nu) dE_\nu}$$

$$F_{lim} = \frac{n_{90} \int_{E_2}^{E_1} I(E_\nu) E_\nu dE_\nu}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} I(E_\nu) S_{eff}(E_\nu) dE_\nu}$$

Площадь телескопа в зависимости от зенитного, азимутального углов, для условий отбора нейтрино - пересечения 3 и более плоскостей



$$S_{Tmin} = 72 \text{ м}^2$$
$$S_{Tmax} = 217 \text{ м}^2$$

# Ограничения на потоки (GWTC-1)

Событие	Мюонные нейтрино		Мюонные антинейтрино	
	$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$	$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$	$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$	$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$
GW150914	190	91.9	374.2	181.1
GW151012	255.3	88.3	502.8	173.9
GW151226	257.4	90	507	177.3
GW170104	250.2	89.7	492.8	176.7
GW170608	240.3	122.8	473.3	241.9
GW170729	254.8	97.3	502	191.7
GW170809	179.5	101.4	353.5	199.7
GW170814	112.1	95.4	220.7	187.9
<b>GW170817</b>	57.3		113.0	
GW170818				
GW170823	254.6	92	501.6	181.2

**GW170817** – вместе с гравитационной волной были зарегистрированы гамма-всплеск и оптическое излучение, координаты известны.

*Поиск на БПСТ мюонных нейтрино от гравитационно-волнового события GW170817, Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 7, с. 418 – 421*

# Ограничения на потоки (GWТС-2)

Событие	Мюонные нейтрино		Мюонные антинейтрино	
	$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$	$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$	$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$	$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$
GW190408_181802	250.5	108.6	493.4	213.8
GW190412	237	111	466.8	218.7
GW190413_052954	246.1	104.3	484.7	205.5
GW190413_134308	248.3	113.4	489	223.3
GW190421_213856	240.1	89.9	473	177
GW190424_180648	261	88.4	514.1	174.2
GW190425	257.4	90.2	507	177.7
GW190426_152155	243.3	97.2	479.2	191.4
GW190503_185404	172.7	99.1	340.1	195.1
GW190512_180714	244.7	112.4	482	221.4
GW190513_205428	250.5	112.8	493.4	222.1
GW190514_065416	250.2	90.1	492.8	177.4
GW190517_055101	241.1	90	474.8	177.3
GW190519_153544	261	97.3	514.1	191.7
GW190521	254.8	127.8	502	251.8
GW190521_074359	247	89.5	486.5	176.2
GW190527_092055	239.4	88.8	471.5	175
GW190602_175927	238.7	89.4	470.2	176.1
GW190620_030421	255.3	121.2	502.8	238.7
GW190630_185205	238.5	117.4	469.7	231.2

# Ограничения на потоки (GWTC-2)

Событие	Мюонные нейтрино		Мюонные антинейтрино	
	$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$	$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$	$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$	$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$
GW190701_203306	135.9	112.4	267.7	221.4
GW190706_222641	263.9	125.2	519.8	246.7
GW190707_093326	253.4	88.5	499.1	174.3
GW190708_232457	255.3	93	502.8	183.2
GW190719_215514	253.1	90.4	498.5	178.1
GW190720_000836	250.6	116	493.6	228.5
GW190727_060333	238.5	115	469.9	226.6
GW190728_064510	245.4	121.6	483.4	239.4
GW190731_140936	235.7	88.1	464.3	173.5
GW190803_022701	240.3	155.1	473.3	305.6
GW190814				
GW190828_063405	255.7	163.6	503.6	322.2
GW190828_065509	254.8	130.4	502	256.8
GW190909_114149	253.4	87.8	499.1	172.9
GW190910_112807	255.7	98.2	503.6	193.4
GW190915_235702	240.3	137.1	473.3	270
GW190924_021846				
GW190929_012149	263.9	94.5	519.8	186.2
GW190930_133541				

# Ограничения на потоки (GWTC-2.1)

Событие	Мюонные нейтрино						Мюонные антинейтрино					
	$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$			$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$			$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$			$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GW190403_051519	253.9	253.9	253.9	90.1	91.6	91.6	500.1	500.1	500.1	177.5	180.4	180.4
GW190426_190642	228.9	228.9	235.7	88.8	88.8	89	450.8	450.8	464.3	175	175	175.4
GW190725_174728	240.3	245.7	240.3	92.8	92.5	92.5	473.3	483.9	473.3	182.8	182.3	182.3
GW190805_211137	249.4	249.4	249.4	92	93.6	93.9	491.2	491.2	491.2	181.1	184.4	184.9
GW190916_200658	255.3	255.3	256.8	90.2	88.8	88.3	502.8	502.8	505.7	177.7	174.9	173.9
GW190917_114630	261	261	261	89.4	89.4	90.7	514.1	514.1	514.1	176.1	176.1	178.7
GW190925_232845	208.9	215.9	186.7	89.7	89.7	89.4	411.5	425.2	367.7	176.6	176.6	176
GW190926_050336	254.8	254.8	254.8	93.8	93.8	95	502	502	502	184.8	184.8	187.2

- 1 – SEOBNRv4PHM
- 2 – PrecessingSpinIMRHM
- 3 – IMRPhenomXPHM

# Ограничения на потоки (GWTC-3)

Событие	Мюонные нейтрино						Мюонные антинейтрино					
	$F_{max}, \text{cm}^{-2}$			$F_{min}, \text{cm}^{-2}$			$F_{max}, \text{cm}^{-2}$			$F_{min}, \text{cm}^{-2}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GW191103_012549	240.3	240.3	237.8	94.6	94.6	95.4	473.3	473.3	468.4	186.3	186.3	187.9
GW191105_143521	253.9	253.9	253.9	115.8	110.8	109.4	500.1	500.1	500.1	228	218.1	215.5
GW191109_010717	253.9	253.9	246.3	89	90.2	90.2	500.1	500.1	485.1	175.3	177.6	177.6
GW191113_071753	255.3	255.3	255.3	94.9	95.8	97.1	502.8	502.8	502.8	187	188.7	191.3
GW191126_115259	254.6	254.6	254.6	92.5	91.5	93.2	501.6	501.6	501.6	182.2	180.3	183.6
GW191127_050227	250.2	242.8	231.7	97.4	100.4	100.4	492.8	478.2	456.4	191.8	197.7	197.7
GW191129_134029	250.6	250.6	250.2	122.6	97.8	97.8	493.6	493.6	492.8	241.4	192.5	192.5
GW191204_110529	255.3	255.3	241.5	88.1	87.9	87.9	502.8	502.8	475.8	173.5	173.1	173.1
GW191204_171526	238.1	238.1	238.1	98	97.1	97.3	469	469	469	193	191.3	191.7
GW191215_223052	251.6	251.4	250.2	125.4	112.6	110.6	495.6	495.2	492.8	247	221.7	217.9
GW191216_213338	250.2	250.2	250.2	97.5	97.5	104	492.8	492.8	492.8	192.1	192.1	204.8
GW191219_163120	263.9	263.9	*263.9 **263.9	100.1	102.1	*98 **102.1	519.8	519.8	*519.8 **519.8	197.1	201.1	*193.1 **201.1
GW191222_033537	254.8	254.8	250.3	89.1	89.4	89.4	502	502	493	175.5	176	176
GW191230_180458	251.9	251.4	253.9	130.3	118.5	114.5	496.2	495.2	500.1	256.6	233.5	225.5
GW200112_155838	246	234.1	237.5	99.3	102.9	101.5	484.5	461.1	467.9	195.5	202.8	199.9
GW200115_042309	233.7	234.8	*181.5 **238.5	90	90	*90 **90	460.2	462.5	*357.6 **469.7	177.3	177.3	*177.3 **177.3
GW200128_022011	257.4	257.4	257.4	88.4	88.6	89.1	507	507	507	174.2	174.4	175.5

1 – SEOBNRv4PHM

2 – Mixed

3 – IMRPhenomXPHM (\*LowSpin, \*\*HighSpin)

# Ограничения на потоки (GWTC-3)

Событие	Мюонные нейтрино						Мюонные антинейтрино					
	$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$			$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$			$F_{\max}$ , $\text{cm}^{-2}$			$F_{\min}$ , $\text{cm}^{-2}$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
GW200129_065458												
GW200202_154313												
GW200208_130117	104.8	104.8	103.5	93.9	93.9	93.9	206.3	206.3	203.9	185	185	185
GW200208_222617	257.4	257.4	257.4	101.3	96.3	96	507	507	507	199.5	189.6	189.1
GW200209_085452	228.6	228.6	228.6	121.3	93.1	93.1	450.3	450.3	450.3	238.9	183.4	183.4
GW200210_092254	251.6	251.6	251.6	94.1	94.3	94.3	495.6	495.6	495.6	185.4	185.7	185.7
GW200216_220804	235.9	235.9	235.9	102	102.1	102.1	464.6	464.6	464.6	201	201.1	201.1
GW200219_094415	245.7	250.4	249.4	148	137.1	115	483.9	493.2	491.2	291.5	270.1	226.5
GW200220_061928	233.1	239.8	239.8	89	88.8	88.8	459.2	472.2	472.2	175.4	174.9	175
GW200220_124850	255.3	255.3	253.4	88.4	88.5	87.4	502.8	502.8	499.1	174.1	174.3	172.2
GW200224_222234												
GW200225_060421	225.9	225.9	225.9	139.4	102.6	101.3	445	445	445	274.6	202	199.4
GW200302_015811	255.7	255.7	255.7	110	107.9	102.7	503.6	503.6	503.6	216.7	212.6	202.3
GW200306_093714	240.3	240.3	240.3	98.5	98.5	98.4	473.3	473.3	473.3	194	194	193.8
GW200308_173609	257.4	257.4	257.4	88.4	88.1	88	507	507	507	174.2	173.5	173.3
GW200311_115853												
GW200316_215756		117.7	118.2		105.8	105.8		231.9	232.8		208.4	208.4
GW200322_091133	253.4	250.2	250.2	87.3	87.3	87.3	499.1	492.8	492.8	171.9	171.9	171.9

# Заключение

- Проведён поиск нейтринных совпадений для подтверждённых гравитационно-волновых событий. Совпадений не обнаружено.
- Произведён расчет ограничений на потоки для мюонных нейтрино и антинейтрино.

**Спасибо за внимание!**