

# スーパーカミオカンデにおける 重力波由来のニュートリノ探索

WENJIE MA

小汐由介, 原田将之, 酒井聖矢, 奥村公宏, 毛受弘彰, 伊藤好孝, 南野彰宏, GIANMARIA COLLAZUOL, MATHIEU LAMOUREUX, NATALY OSPINAESCOBAR, LINYAN WAN, 他SUPER-KAMIOKANDE COLLABORATION

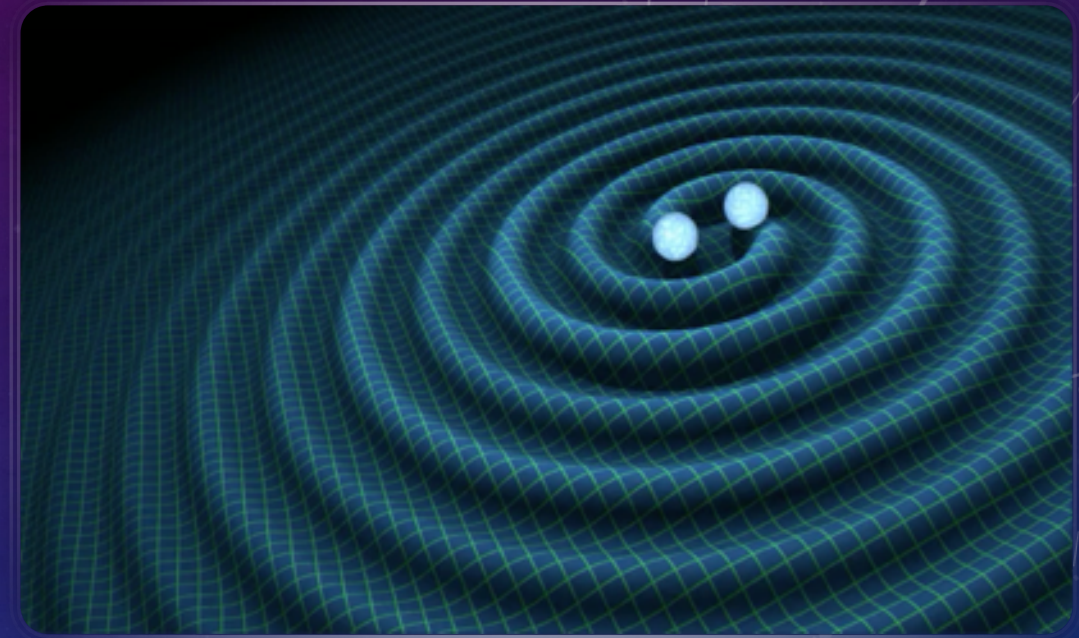
岡山大理, 東大宇宙線研, 名大ISEE, 横浜国立大, INFN PADOVA, BOSTON UNIV.

# 目次

- 重力波探査
- 中性子星合体由来のニュートリノ
- モチベーション
- スーパーカミオカンデにおけるデータ解析
- 結果
- まとめ

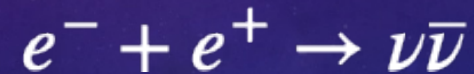
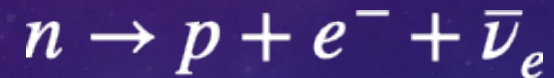
# 重力波観測

- 重力波とは、一般相対性理論で予言されていた時空のゆらぎである
- 2015年に初めてLIGO検出器で観測された
- 2017年に初めての中性子星合体由来の重力波信号が観測された(GW170817)
- 2019年4月にアップグレードして観測再開した(O3)
- 2020年4月にO3が終了。O3では56個の重力波信号が観測された

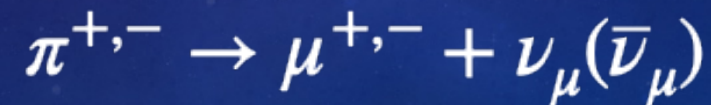
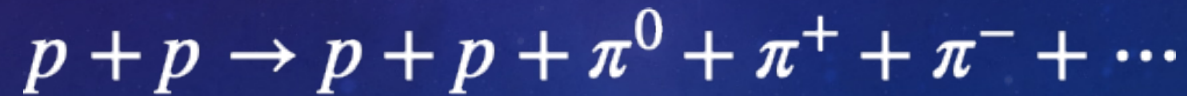


# 中性子星合体由来のニュートリノ

- 中性子星が衝突すると、高温の状態になる。中性子の崩壊により、陽子と電子と低エネルギーニュートリノが生成されることが考えられている



- 陽子と陽子が衝突し、高エネルギーニュートリノも生成されることが考えられている



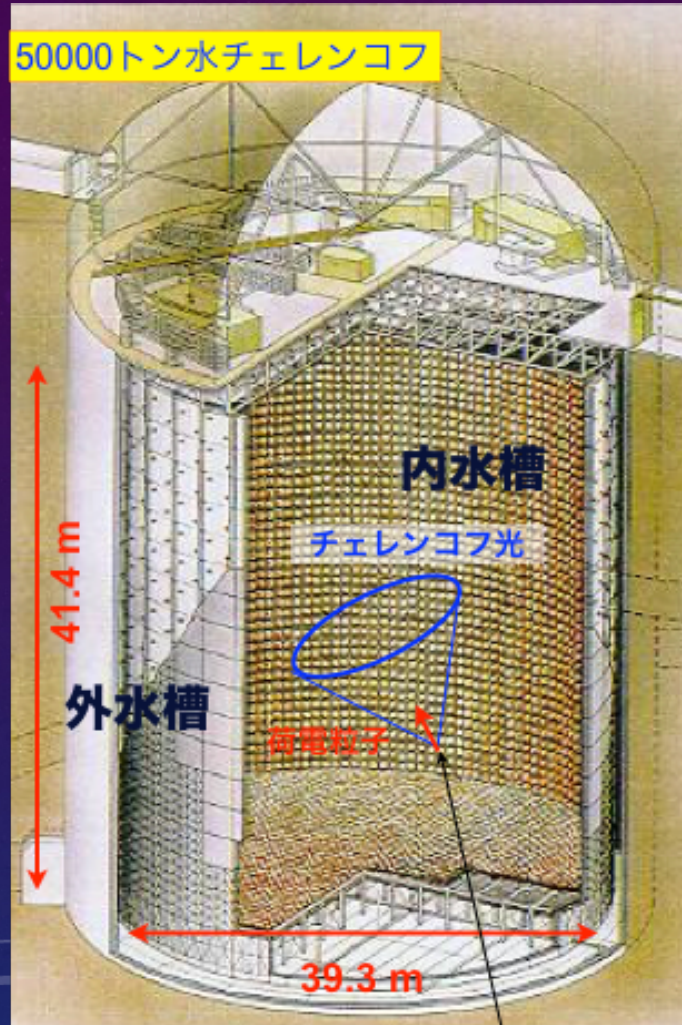
# モチベーション

- 中性子星合体過程を理解するためには、合体由来のニュートリノの探索が重要となる
- ニュートリノ探索(SK, Ice Cubeなど):  
先行研究 GW150914, GW151226<sub>[1]</sub> (O1), GW170817<sub>[2]</sub> (O2)  
→有意なニュートリノ信号は見つからなかった
- LIGO は 2017 年9月から 2 年間のアップグレードを経て、2019年4月に観測が再開された (O3)。アップグレードにより感度が向上し、56個の重力波が観測された
- 今回はスーパーカミオカンデにおいてO3全ての重力波信号を使って解析した結果を発表する

[1] Search for Neutrinos in Super-Kamiokande associated with Gravitational Wave Events GW150914 and GW151226, The Super-Kamiokande Collaboration, *Astrophys. J. L.* 830, 1 (2016)

[2]. Search for Neutrinos in Super-Kamiokande associated with the GW170817 neutron-star merger', K.Abe et. al., *Astrophys. J. Lett.* 857, L4 (2018)

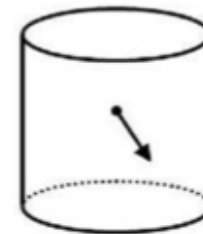
# スーパーカミオカンデ(SK)におけるデータ解析



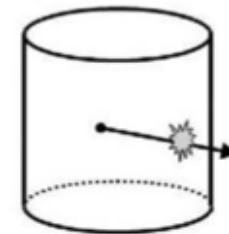
ニュートリノ

- 地下1000 mに建設された水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置
- 低エネルギー(3.5 MeV-100 MeV)と高エネルギー(100 MeV-)に分けて解析
- 重力波信号の到達時間と距離などの情報はLIGOのデータベースから取得
- O3の期間(2019年4月(S190408an)から2020年4月(S200316bj))で観測された56個のGW信号の内、46個のGW信号がSKで観測可能
- 探索時間は重力波が観測された時刻 $\pm 500$  s
- SKはリアルタイムではなくオフラインデータを使って解析

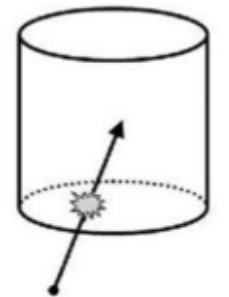
Fully Contained (FC) events



Partially Contained (PC) events



Upward-going stopping  $\mu$



# 高エネルギーデータ解析結果

sample	Observed	Expected background	Poisson p-value(%)
FC	6	5.06	39.48
PC	0	0.33	100.00
UPMU	2	0.74	16.98

Poisson分布でP-Valueを計算した

$$P(k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}$$

kはイベント数、λはバックグラウンド

P-value = 1 - P(0) - ..... - P(x-1)

結論: 有意な信号は見つからなかった

# 信頼度の計算

信号の有意度を確認するため、Poisson分布以外に二つの方法( $\Lambda$ 法と $\chi^2$ 法,方向とエネルギーと距離に依存)でp-Valueを計算した。

Name	Type	$d_{GW}$ [Mpc]	Obs.events ( $\Delta t$ )	$p_{\Lambda}$ (%)	$p_{\chi^2}$ (%)
S190426c	BNS(49.3%)	376.7	UPMU(+279s)	100.0	46.9
S190513bm	BBH(94.3%)	1987.0	FC(-183s)	5.6	15.6
S190602aq	BBH(99.0%)	797.3	FC(-287s)	2.8	1.5
S190728q	BBH(95.4%)	873.8	FC(+103s)	11.9	26.7
S190814bv	NSBH(99.8%)	267.4	FC(+249s)	48.1	58.2
S190924h	MG(100.0%)	547.9	FC(+412s)	47.8	78.1
S191213g	BNS(76.8%)	200.9	FC(+289s)	14.5	11.0
S200316bj	MG(99.6%)	1178.0	UPMU(-366s)	52.4	99.8



# フルエンズリミット (高エネルギー)

$$\Phi_{up}^{s,f}(\theta) = \frac{N_{90}}{\int_{E_{min}}^{E_{max}} dE_{\nu} A_{eff}^{s,f}(E_{\nu}, \theta) \lambda(E_{\nu})}$$

$A_{eff}^{s,f}$  は天頂に依存する有効面積

$N_{90}$  はPoisson分布で計算した90%信頼度

例: S190412m, エネルギースペクトルは $E^{-2}$ を仮定している。

Sample	Range[GeV]	Flavor	Min 90% GW[cm <sup>-2</sup> ]	Max 90% GW[cm <sup>-2</sup> ]
FC	$E_{min} = 0.1$ $E_{max} = 10$	$\nu_{\mu}$	$5.3 \times 10^4$	$5.4 \times 10^4$
		$\nu_e$	$3.9 \times 10^4$	$4.0 \times 10^4$
		$\bar{\nu}_{\mu}$	$1.5 \times 10^5$	$1.6 \times 10^5$
		$\bar{\nu}_e$	$1.0 \times 10^5$	$1.1 \times 10^5$
PC	$E_{min} = 0.1$ $E_{max} = 100$	$\nu_{\mu}$	$1.1 \times 10^5$	$1.1 \times 10^5$
		$\nu_e$	$8.1 \times 10^5$	$9.8 \times 10^5$
		$\bar{\nu}_{\mu}$	$1.8 \times 10^5$	$1.9 \times 10^5$
		$\bar{\nu}_e$	$2.1 \times 10^6$	$2.5 \times 10^6$
UPMU	$E_{min} = 1.6$ $E_{max} = 10^5$	$\nu_{\mu}$	$2.0 \times 10^1$	$2.3 \times 10^1$
		$\bar{\nu}_{\mu}$	$2.3 \times 10^1$	$2.8 \times 10^1$

# 低エネルギーの結果

低エネルギー(3.5MeV-100MeV)も46個のSKデータを用いて探索した

結果:

Observed event in SK	GW event	Expected Bkg	N90	Poisson P-value
0	24	0.729	2.30	100%
1	10		3.39	51.76%
2	8		4.65	16.60%
3	4		5.96	3.78%

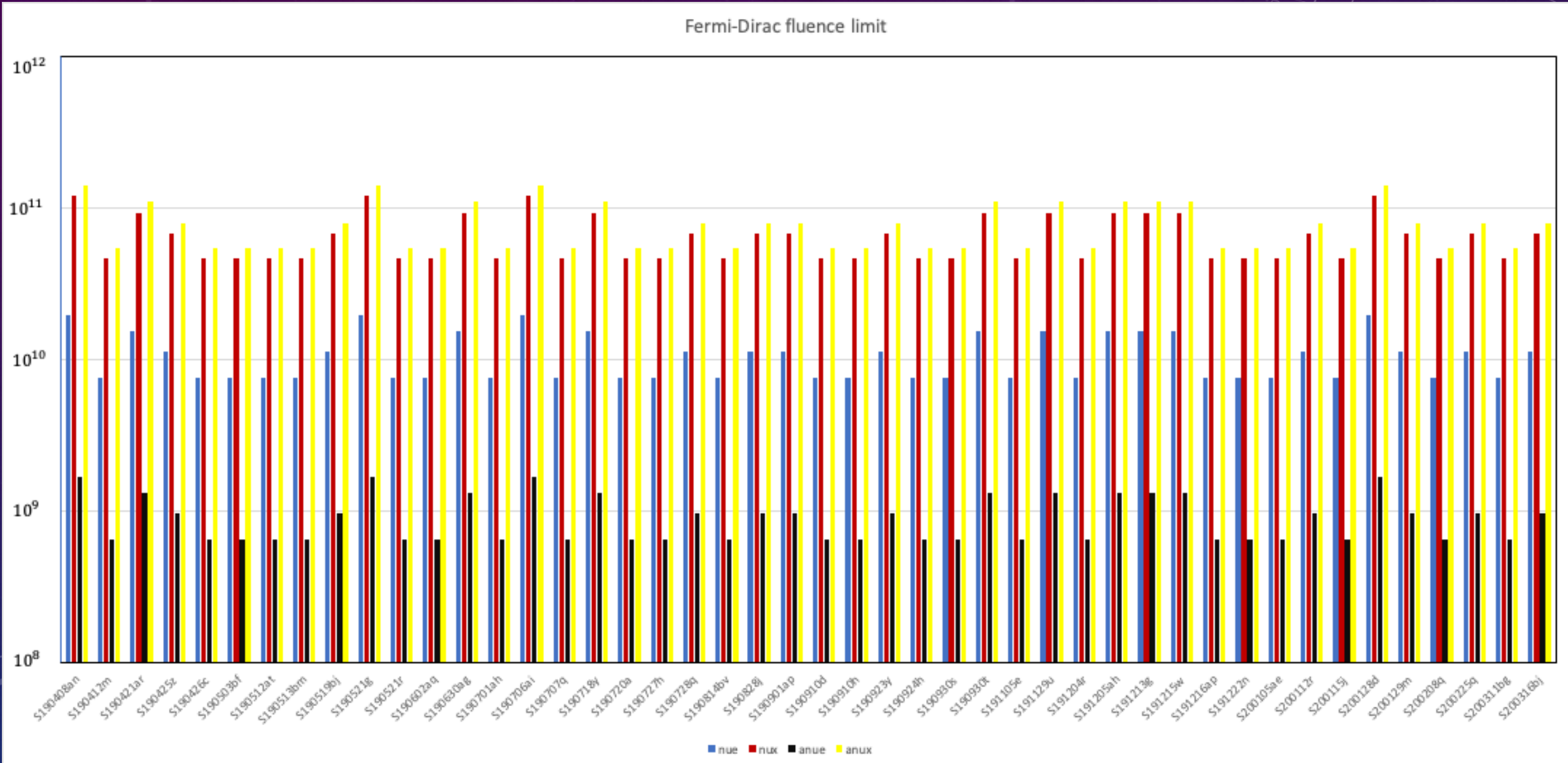
結論: 有意な信号は見つからなかった

## フルエンズリミット(低エネルギー)

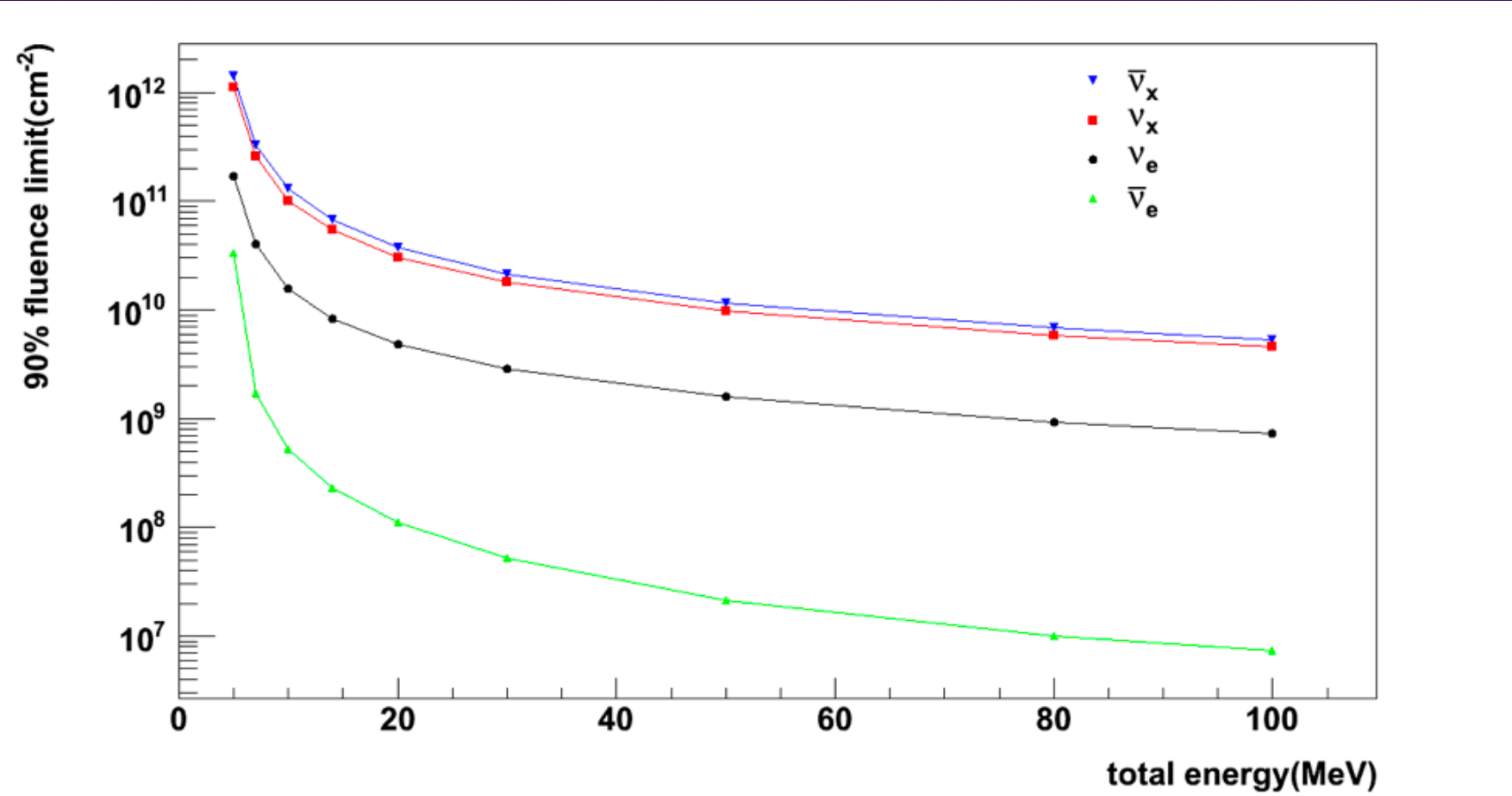
$$\Phi = \frac{N_{90}}{N_T \int dE_\nu \lambda(E_\nu) \sigma(E_\nu) R(E_\nu, E_{vis}) \epsilon(E_{vis})}$$

- $N_T$ は、ニュートリノ相互作用に関連するターゲット陽子数。
- $\sigma$ は、すべての相互作用の反応断面積。
- $\epsilon$ は検出効率。
- $R$ は、電子または陽電子エネルギー( $E_e$ )をSK( $E_{vis}$ )の運動エネルギーに変換する応答関数。応答関数と検出効率( $\epsilon$ )は、SK検出器のモンテカルロシミュレーションを使用して計算される。
- 低エネルギーの $\lambda$ は三つのスペクトルを仮定している。  
-Fermi-Dirac(FD), Flat,  $\lambda(E)=\delta(E-E')$

# フルエンスリミット (低エネルギー)



# フルエンスリミット(低エネルギー)



例:  $N_{obs} = 1$

$$\lambda(E) = \delta(E - E')$$

# まとめ

- 重力波信号からのニュートリノの探索は重要である
- 2019年4月からLIGOのO3が始まり、2020年4月までに56個の重力波信号が観測された
- SKで46個のGW信号を用いて、ニュートリノ探索を行った
- 有意な信号は見つからなかった
- ニュートリノのフルエンスリミットを計算した
- 論文は準備中
- O4に向けては、特にリアルタイムでの解析手法の準備を進めている

BACK UP

## 90%信頼度上限(90%C.L.)

- 観測結果が $3\sigma$ 未満の場合、ニュートリノの事象数に対しての90%C.L.(N90)を計算する。

$$\int_{N_{bg}}^{N_{bg}+N_{90}} dx \text{Poisson}(N_{obs}, x) = 0.9 \int_{N_{bg}}^{\infty} dx \text{Poisson}(N_{obs}, x)$$

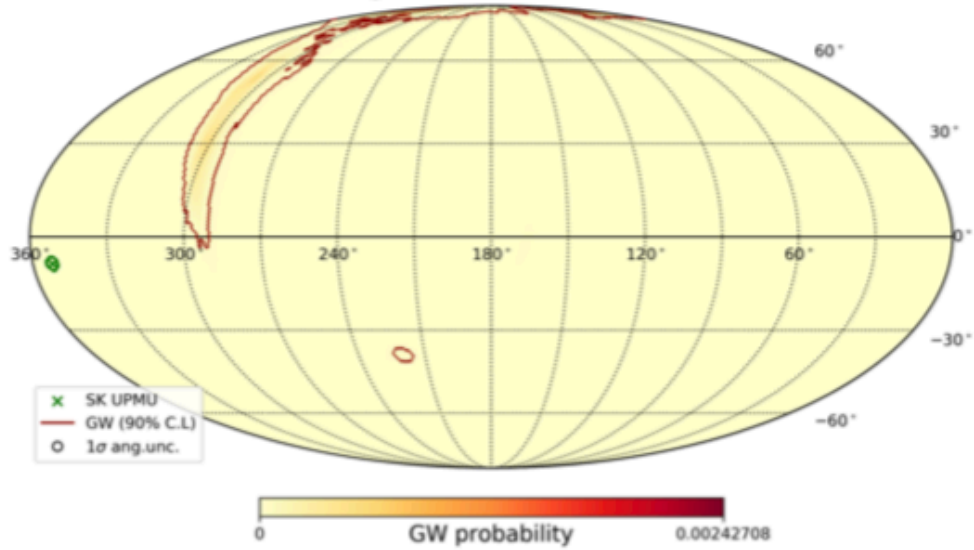
例えば、事象数は0、バックグラウンドは0.729の時のN90は2.3。

N90により、フルエンス[ $/\text{cm}^2$ ]( $1\text{cm}^2$ あたりの事象数)とフラックス[ $/\text{s}/\text{cm}^2$ ]( $1\text{cm}^2, 1\text{s}$ あたりの事象数)の上限値を計算できる。

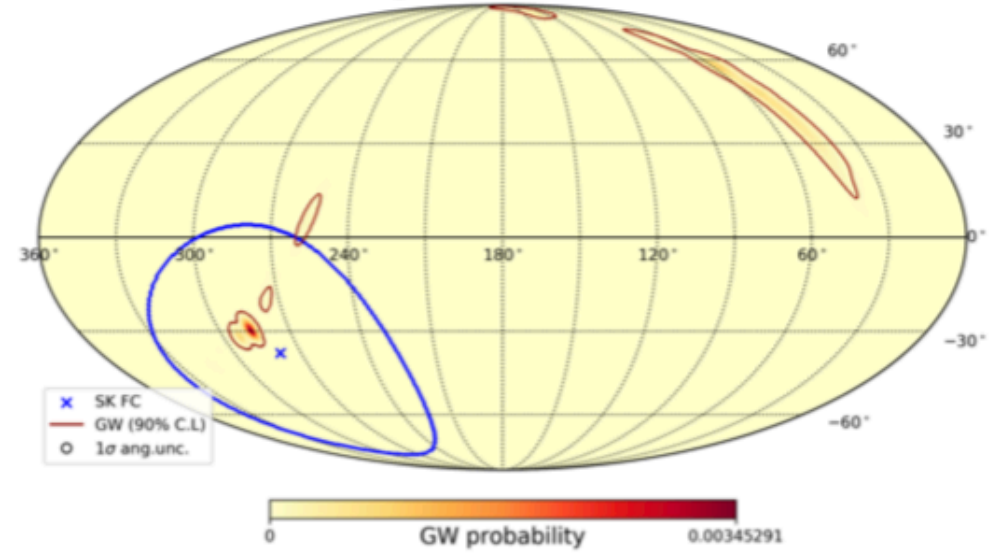


# SKY MAP

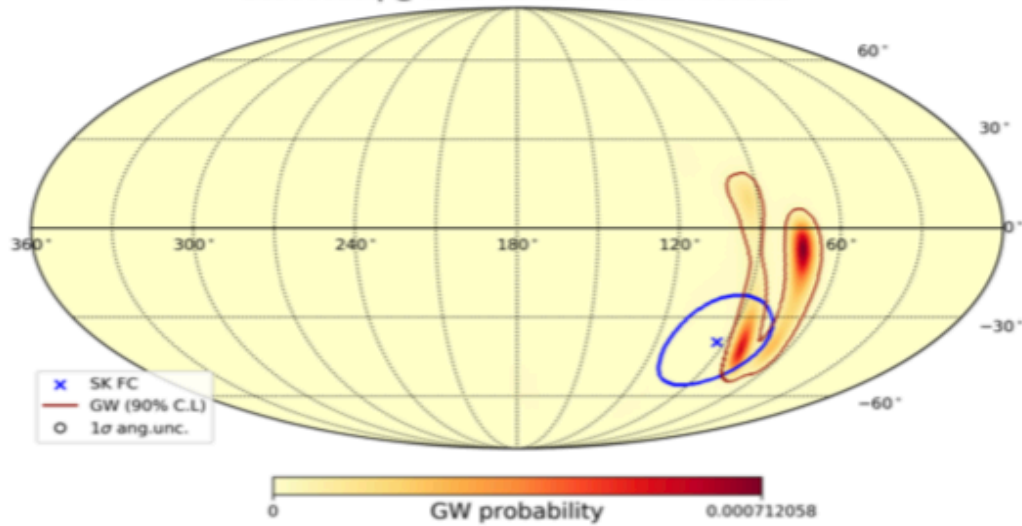
S190426c @ 2019-04-26 15:21:55.336540



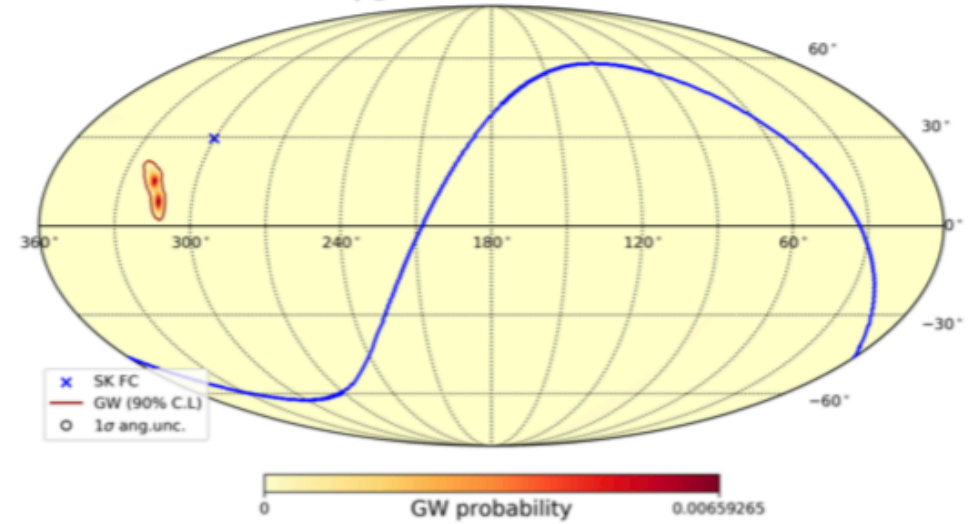
S190513bm @ 2019-05-13 20:54:28.747089



S190602aq @ 2019-06-02 17:59:27.089355

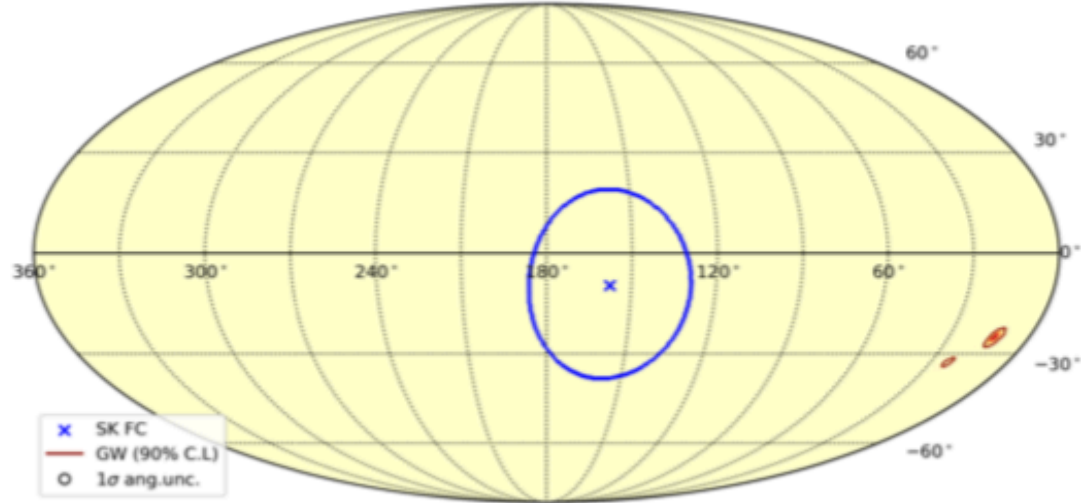


S190728q @ 2019-07-28 06:45:10.529205

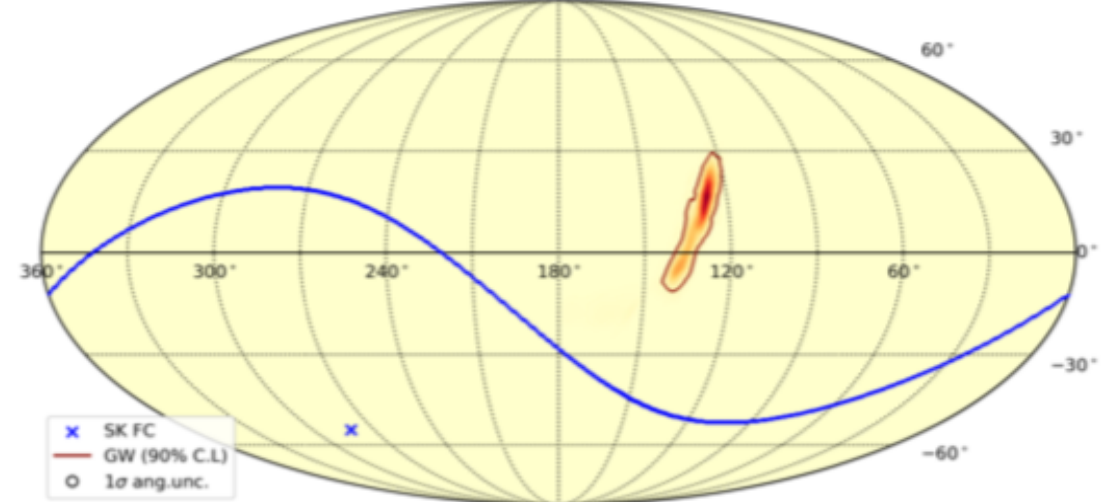


# SKY MAP

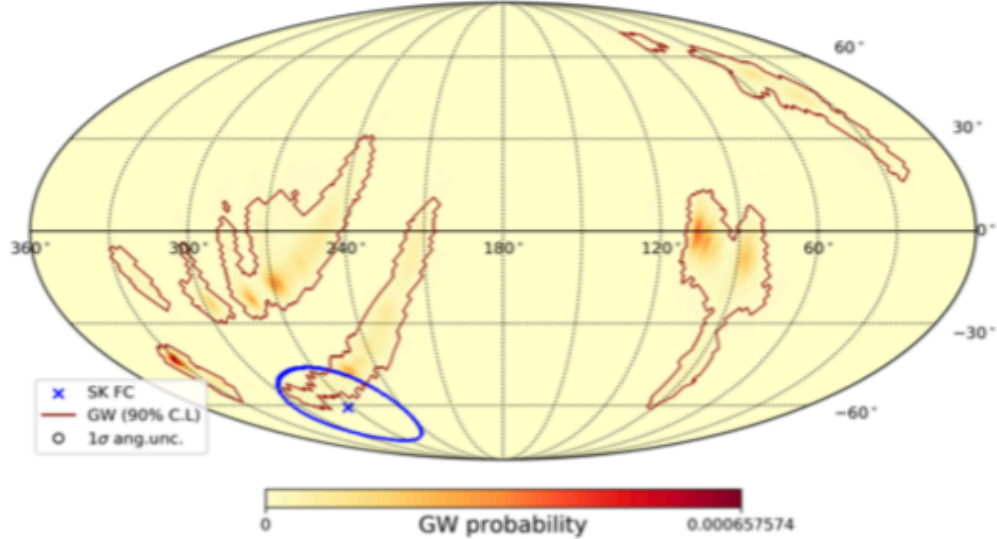
S190814bv @ 2019-08-14 21:10:39.012957



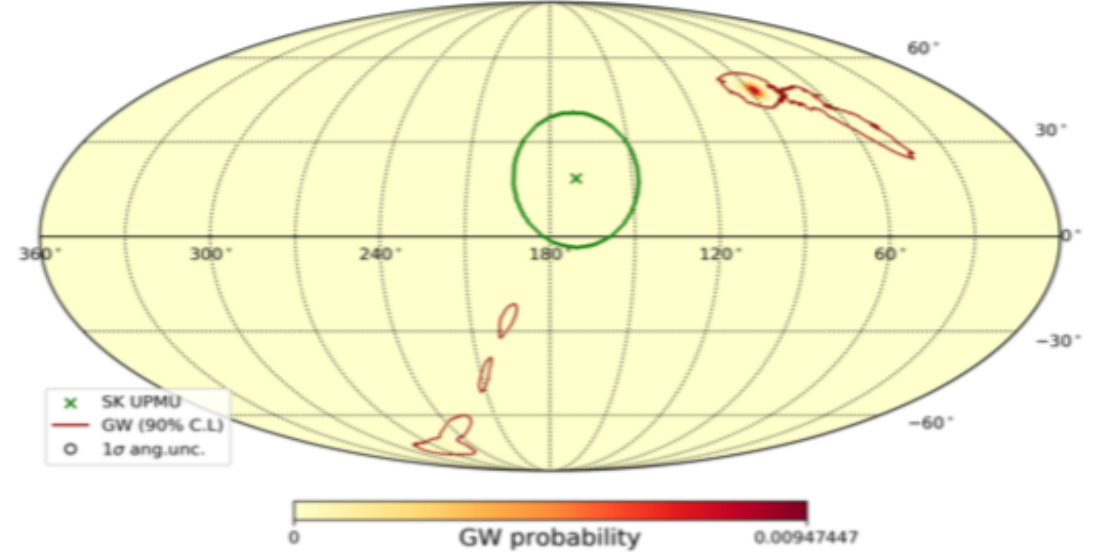
S190924h @ 2019-09-24 02:18:46.846654



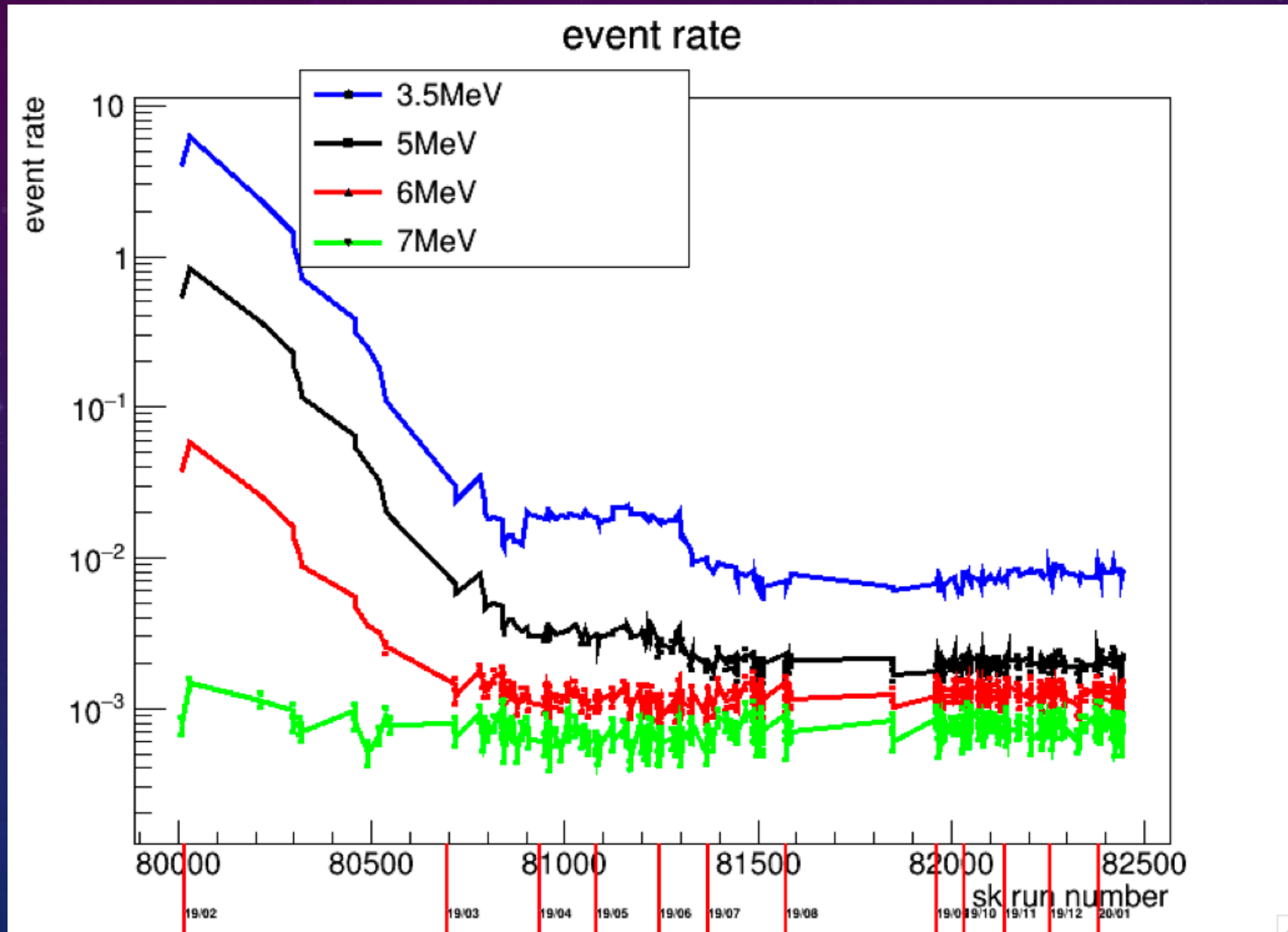
S191213g @ 2019-12-13 04:34:08.142224

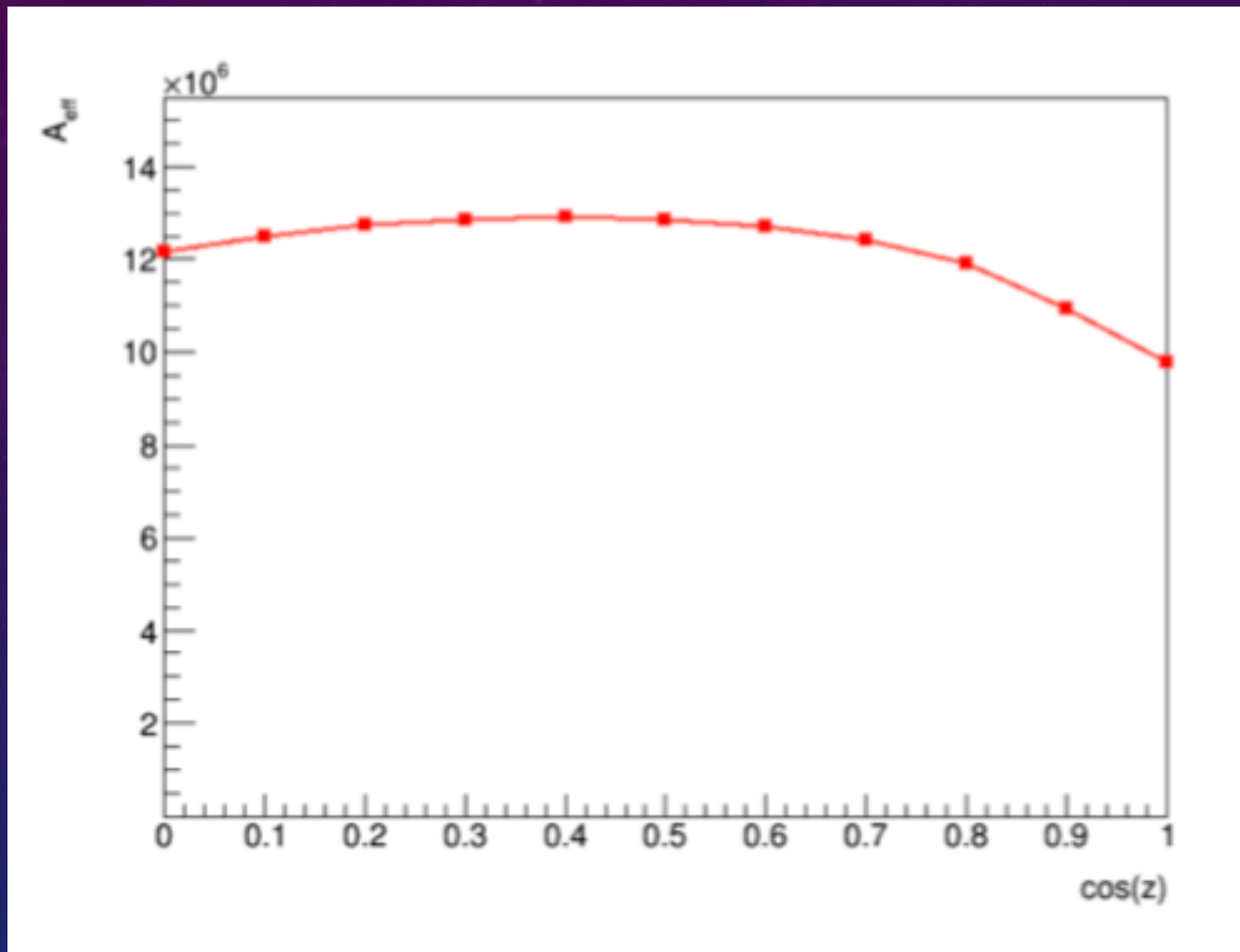


S200316bj @ 2020-03-16 21:57:56.157221



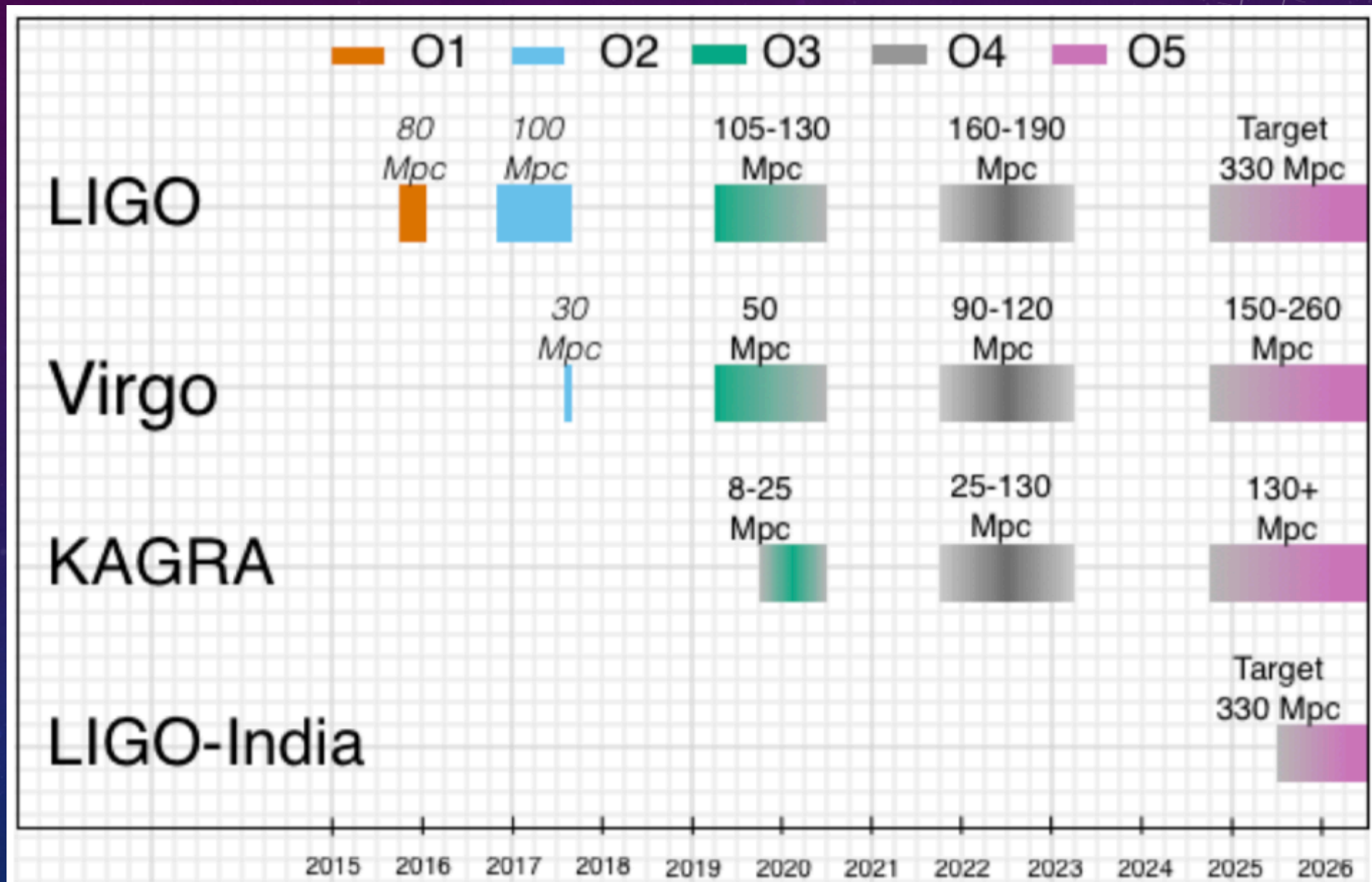
# LOWE BKG EVENT RATE



$A_{eff}$ 

天頂角に依存するエフェクトエリア

# LIGO PHASE



# フルエンスリミット(低エネルギー)

Observed	FD $\nu_e$	FD $\nu_x$	FD $\bar{\nu}_e$	FD $\bar{\nu}_x$	Flat $\nu_e$	Flat $\nu_x$	Flat $\bar{\nu}_e$	Flat $\bar{\nu}_x$
0	$7.62 \times 10^9$	$4.62 \times 10^{10}$	$6.57 \times 10^8$	$5.43 \times 10^{10}$	$8.08 \times 10^9$	$4.88 \times 10^{10}$	$7.36 \times 10^8$	$5.73 \times 10^{10}$
1	$1.12 \times 10^{10}$	$6.79 \times 10^{10}$	$9.66 \times 10^8$	$7.62 \times 10^{10}$	$1.19 \times 10^{10}$	$7.18 \times 10^{10}$	$1.08 \times 10^9$	$8.43 \times 10^{10}$
2	$1.54 \times 10^{10}$	$9.32 \times 10^{10}$	$1.33 \times 10^9$	$1.10 \times 10^{11}$	$1.63 \times 10^{10}$	$9.85 \times 10^{10}$	$1.49 \times 10^9$	$1.16 \times 10^{11}$
3	$1.98 \times 10^{10}$	$1.20 \times 10^{11}$	$1.70 \times 10^9$	$1.40 \times 10^{11}$	$2.09 \times 10^{10}$	$1.26 \times 10^{11}$	$1.90 \times 10^9$	$1.48 \times 10^{11}$

# 低エネルギーの結果

S190915ak		BBH	19/09/16 08:57:02	1557.2				
S190923y	82013	NSBH	19/09/23 21:55:59	438.1	Normal	1	0.729	3.388
S190924h	82014	MassGap	19/09/24 11:18:46	513.9	Normal	0	0.729	2.303
S190930s	82034	MassGap	19/09/30 22:35:41	708.9	Normal	0	0.729	2.303
S190930t	82034	NSBH	19/09/30 23:34:07	108.5	Normal	2	0.729	4.65
S191105e	82146	BBH	19/11/05 23:35:21	1167.5	Normal	0	0.729	2.303
S191109d		BBH	19/11/09 10:07:17	1810.1				
S191129u	82254	BBH	19/11/29 22:40:29	742.4	Normal	2	0.729	4.65
S191204r	82263	BBH	19/12/05 02:15:26	677.5	Normal	0	0.729	2.303
S191205ah	82265	NSBH	19/12/06 06:52:08	385.0	Normal	2	0.729	4.65
S191213g	82287	BNS	19/12/13 13:34:08	200.9	Normal	2	0.729	4.65
S191215w	82292	BBH	19/12/16 07:30:52	1769.6	Normal	2	0.729	4.65
S191216ap	82293	BBH	19/12/17 06:33:38	375.9	Normal	0	0.729	2.303
S191222n	82335	BBH	19/12/22 12:35:37	2518.1	Normal	0	0.729	2.303
S200105ae	82387	TERRES	20/01/06 01:24:26	282.8	Normal	0	0.729	2.303
S200112r	82424	BBH	20/01/13 00:58:38	1136.3	Normal	1	0.729	3.388
S200114f		Unmodeled	20/01/14 11:08:18					
S200115j	82435	MassGap	20/01/15 13:23:09	340.2	Normal	0	0.729	2.303
S200128d	82469	BBH	20/01/28 11:20:11	4031.1	Normal	3	0.729	5.963
S200129m	82472	BBH	20/01/29 15:54:58	908.4	Normal	1	0.729	3.388
S200208q	82482	BBH	20/02/08 22:01:17	2142.0	Normal	0	0.729	2.303
S200213t		BNS	20/02/13 13:10:40	200.9				
S200219ac		BBH	20/02/19 18:44:15	3533.1				
S200224ca		BBH	20/02/25 07:22:34	1575.0				
S200225q	82530	BBH	20/02/25 15:04:21	994.9	Normal	1	0.729	3.388
S200302c		BBH	20/03/02 10:58:11	1820.1				
S200311bg	82573	BBH	20/03/11 20:58:53	1114.6	Normal	0	0.729	2.303
S200316bj	82582	MassGap	20/03/17 06:57:56	1178.0	Normal	1	0.729	3.388

# フルエンスリミット(低エネルギー)

Fermi-dirac

Flat

Name	$FL\nu_e$ (FD)	$FL\nu_x$ (FD)	$FL\bar{\nu}_e$ (FD)	$FL\bar{\nu}_x$ (FD)	$FL\nu_e$ (Flat)	$FL\nu_x$ (Flat)	$FL\bar{\nu}_e$ (Flat)	$FL\bar{\nu}_x$ (Flat)
S190408an	2.0E+10	1.2E+11	1.7E+09	1.4E+11	2.1E+10	1.3E+11	1.9E+09	1.5E+11
S190412m	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190421ar	1.5E+10	9.3E+10	1.3E+09	1.1E+11	1.6E+10	9.8E+10	1.5E+09	1.2E+11
S190425z	1.1E+10	6.8E+10	9.7E+08	8.0E+10	1.2E+10	7.2E+10	1.1E+09	8.4E+10
S190426c	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190503bf	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190510g								
S190512at	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190513bm	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190517h								
S190519bj	1.1E+10	6.8E+10	9.7E+08	8.0E+10	1.2E+10	7.2E+10	1.1E+09	8.4E+10
S190521g	2.0E+10	1.2E+11	1.7E+09	1.4E+11	2.1E+10	1.3E+11	1.9E+09	1.5E+11
S190521r	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190602aq	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190630ag	1.5E+10	9.3E+10	1.3E+09	1.1E+11	1.6E+10	9.8E+10	1.5E+09	1.2E+11
S190701ah	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190706ai	2.0E+10	1.2E+11	1.7E+09	1.4E+11	2.1E+10	1.3E+11	1.9E+09	1.5E+11
S190707q	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190718y	1.5E+10	9.3E+10	1.3E+09	1.1E+11	1.6E+10	9.8E+10	1.5E+09	1.2E+11
S190720a	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190727h	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190728q	1.1E+10	6.8E+10	9.7E+08	8.0E+10	1.2E+10	7.2E+10	1.1E+09	8.4E+10
S190814bv	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190828j								
S190828l								
S190901ap	1.1E+10	6.8E+10	9.7E+08	8.0E+10	1.2E+10	7.2E+10	1.1E+09	8.4E+10
S190910d	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10
S190910h	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10



# フルエンスリミット(低エネルギー)

Fermi-dirac

Flat

S190915ak									
S190923y	1.1E+10	6.8E+10	9.7E+08	8.0E+10	1.2E+10	7.2E+10	1.1E+09	8.4E+10	
S190924h	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S190930s	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S190930t	1.5E+10	9.3E+10	1.3E+09	1.1E+11	1.6E+10	9.8E+10	1.5E+09	1.2E+11	
S191105e	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S191109d									
S191129u	1.5E+10	9.3E+10	1.3E+09	1.1E+11	1.6E+10	9.8E+10	1.5E+09	1.2E+11	
S191204r	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S191205ah	1.5E+10	9.3E+10	1.3E+09	1.1E+11	1.6E+10	9.8E+10	1.5E+09	1.2E+11	
S191213g	1.5E+10	9.3E+10	1.3E+09	1.1E+11	1.6E+10	9.8E+10	1.5E+09	1.2E+11	
S191215w	1.5E+10	9.3E+10	1.3E+09	1.1E+11	1.6E+10	9.8E+10	1.5E+09	1.2E+11	
S191216ap	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S191222n	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S200105ae	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S200112r	1.1E+10	6.8E+10	9.7E+08	8.0E+10	1.2E+10	7.2E+10	1.1E+09	8.4E+10	
S200114f									
S200115j	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S200128d	2.0E+10	1.2E+11	1.7E+09	1.4E+11	2.1E+10	1.3E+11	1.9E+09	1.5E+11	
S200129m	1.1E+10	6.8E+10	9.7E+08	8.0E+10	1.2E+10	7.2E+10	1.1E+09	8.4E+10	
S200208q	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S200213t									
S200219ac									
S200224ca									
S200225q	1.1E+10	6.8E+10	9.7E+08	8.0E+10	1.2E+10	7.2E+10	1.1E+09	8.4E+10	
S200302c									
S200311bg	7.6E+09	4.6E+10	6.6E+08	5.4E+10	8.1E+09	4.9E+10	7.4E+08	5.7E+10	
S200316bj	1.1E+10	6.8E+10	9.7E+08	8.0E+10	1.2E+10	7.2E+10	1.1E+09	8.4E+10	

# 信頼度の計算

λ法(方法I) [arXiv:1908.07706]

$$\mathcal{L}^{(k)}(n_S^k, \gamma, \vec{x}_S) = \frac{e^{-(n_S^k + n_B^k)} (n_S^k + n_B^k)^{N^k}}{(N^k)!} \prod_{i=1}^N \frac{n_S^k S_i^{(k)} + n_B^k B_i^k}{n_S^k + n_B^k}$$

$$\Lambda(\vec{x}_S) = \sum_{\text{sample } k} 2 \ln \left[ \frac{\mathcal{L}^{(k)}(n_S^k = \widehat{n}_S^k, \gamma = \widehat{\gamma}, \vec{x}_S)}{\mathcal{L}^{(k)}(n_S^k = 0, \vec{x}_S)} \right]$$

$$TS = \max_{\text{sky}} [\Lambda(\vec{x}_S)]$$

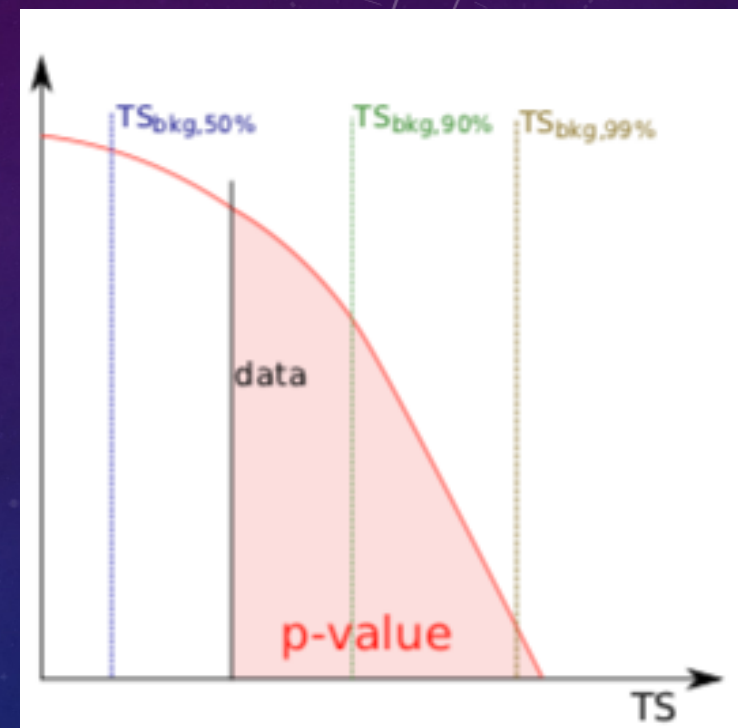
χ<sup>2</sup>法(方法II) [arXiv:1112.1140]

$$\mathcal{L} = \int \frac{S_{GW}(\vec{x}_S) \prod_j S_v^j(\vec{x}_S)}{B_{GW}(\vec{x}_S) \prod_j B_v^j(\vec{x}_S)} d\vec{x}_S, p_{\text{sky}} = \int_{\mathcal{L}_{\text{data}}} P_{\text{bkg}}(\mathcal{L}) d\mathcal{L}, p_v^{(j)} = \int_{E_v}^{\infty} P_{\text{bkg}}(E_v') dE_v'$$

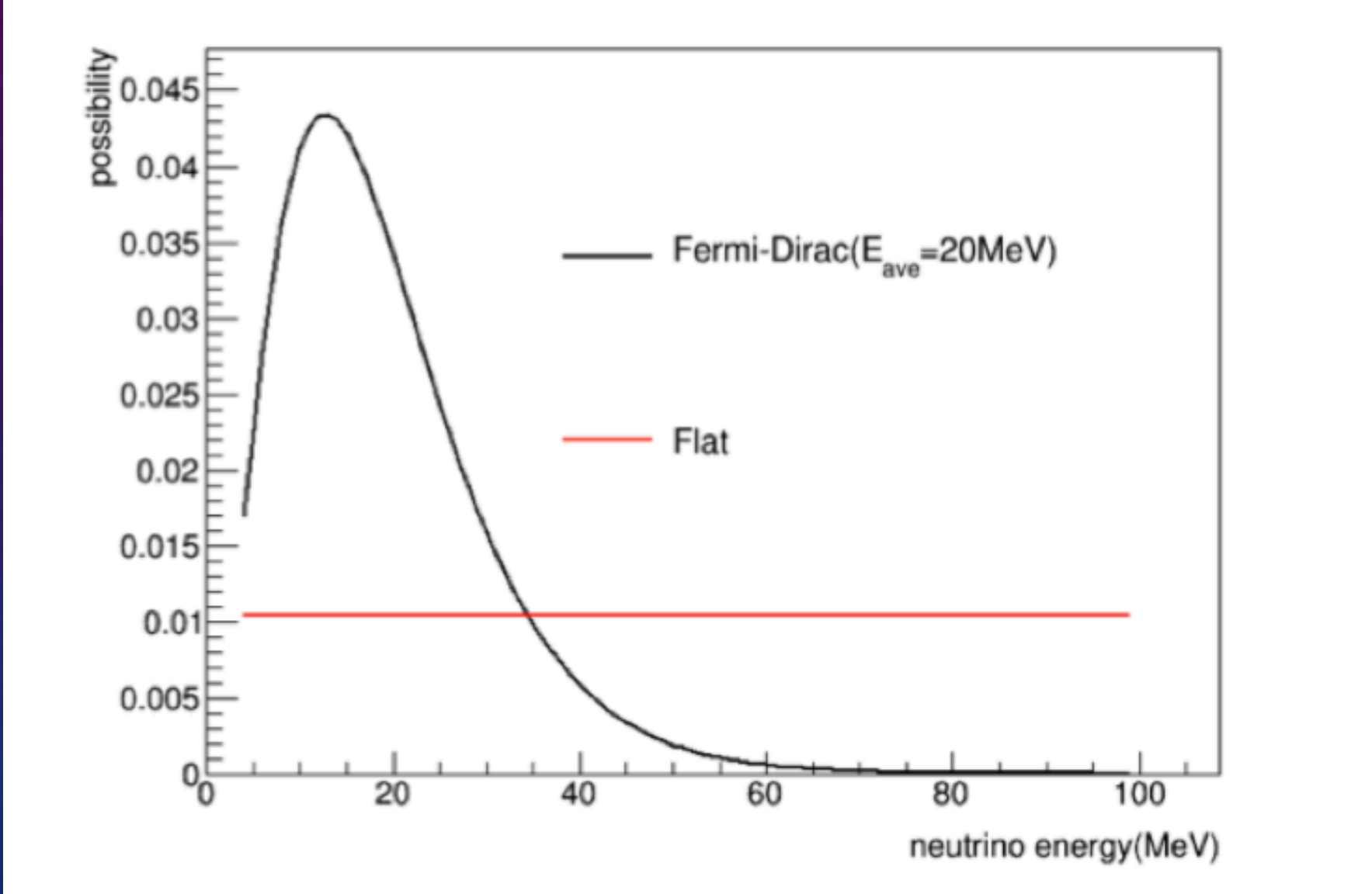
$$TS = \chi^2 = -2 \ln [p_{\text{sky}} \times \prod_j p_v^{(j)} \times (1 - \sum_{i=0}^{N-2} \text{Poisson}(i, \sum n_B^k))] ]$$

TSバックグラウンド配布:  $P_{\text{bkg}}(TS)$  background toys  
を使用して取得する

$$\text{P-value } : p = \int_{TS_{\text{data}}}^{\infty} P_{\text{bkg}}(TS) dTS$$



# Fermi-Dirac 分布( $E_{ave}=20\text{MeV}$ )



# BNS, BBH, MG

O1:2015.09.12-2016.01.19

O2:2016.11.30-2017.08.25

O3:2019.04.01 -2020.03.27(Originally to 04.30 and stop Because CoVID-19)

