



Обнаружение протяженных гало в гамма-диапазоне вокруг близких массивных спиральных галактик .

М.С. Пширков^{1,2}, Б.А. Низамов¹

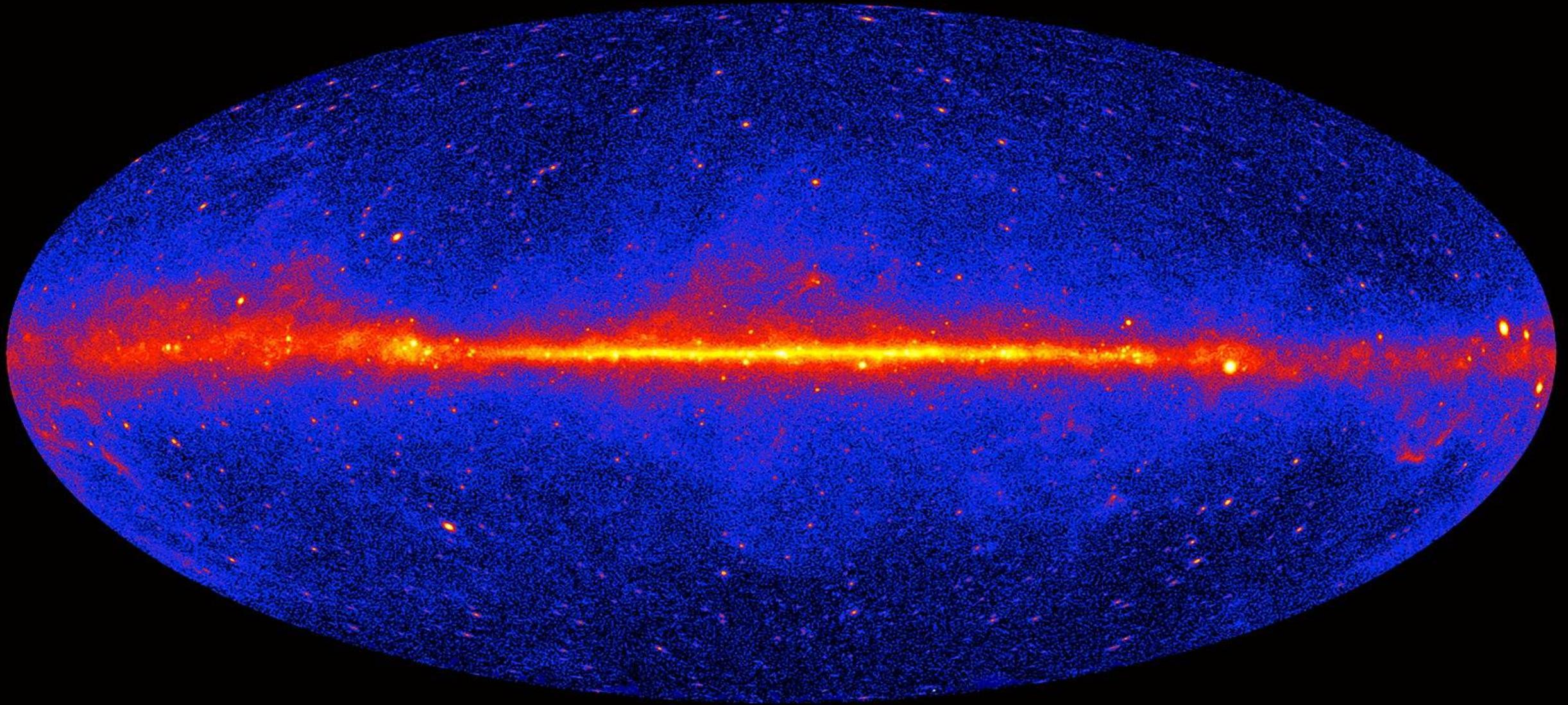
¹ ГАИШ МГУ

² ИЯИ РАН

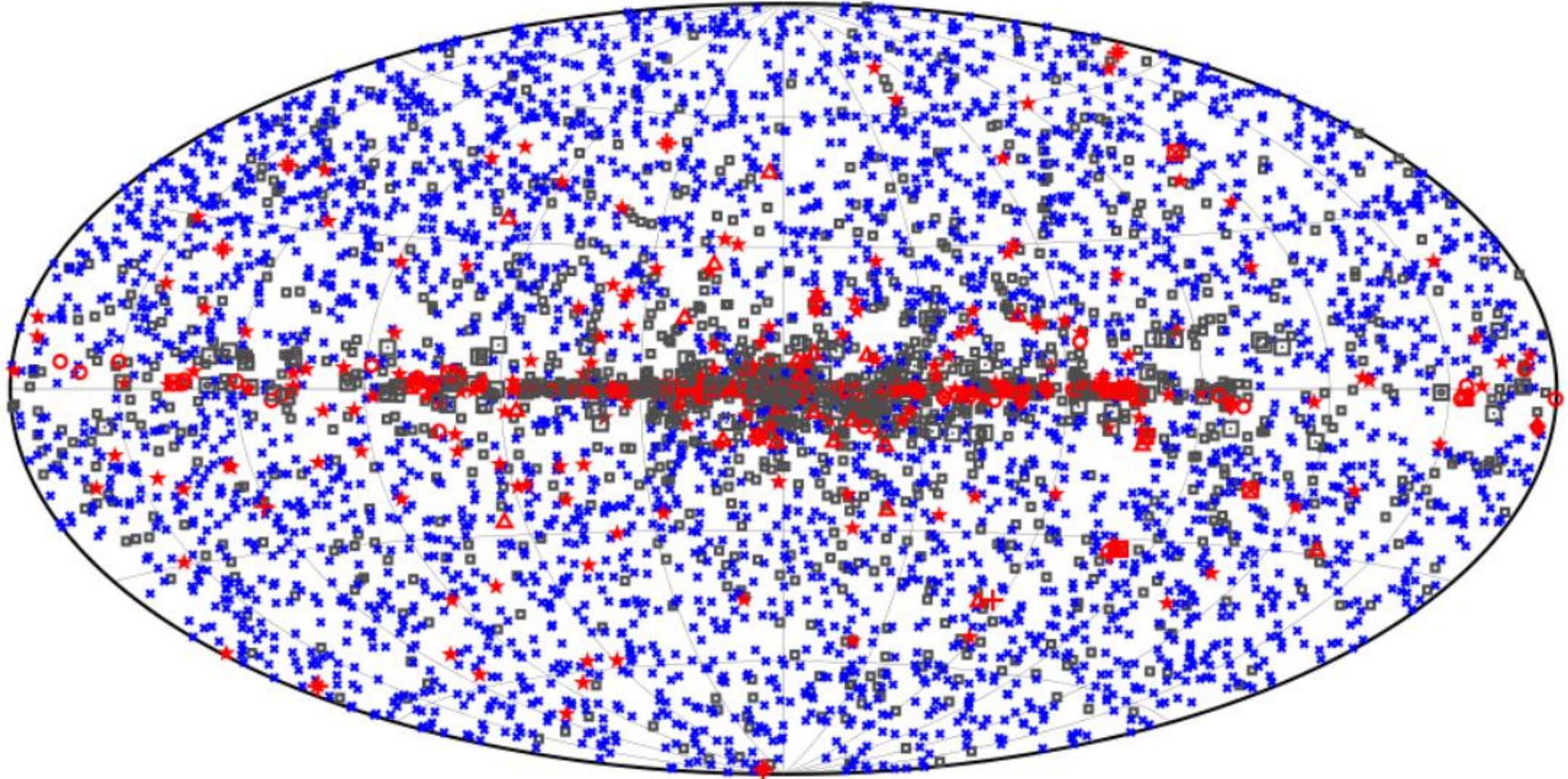
Сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН, посвящённая 70-летию В.А. Рубакова

17 февраля 2025

Fermi LAT: γ -небо



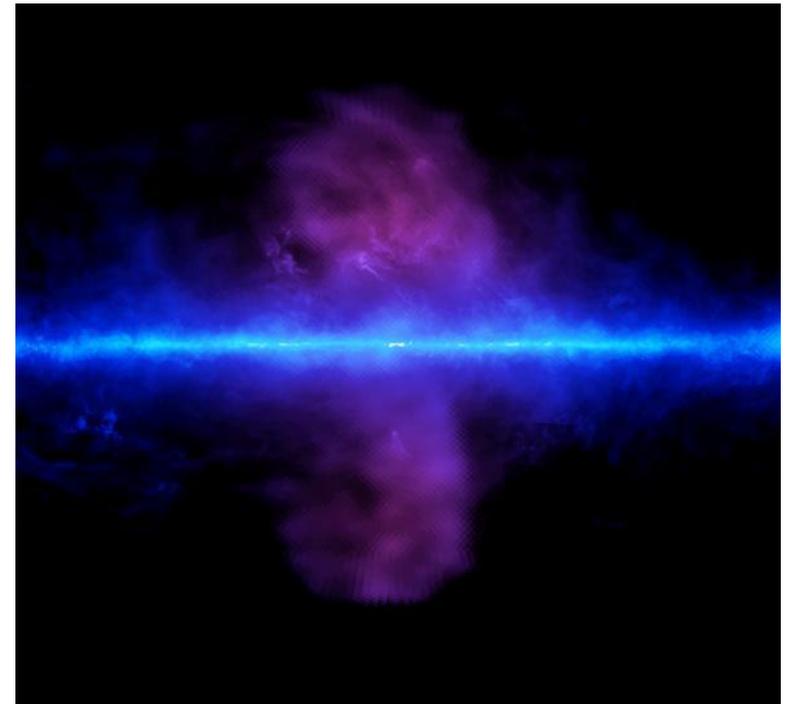
Fermi LAT: γ -небо - источники



□ No association	▣ Possible association with SNR or PWN	× AGN
★ Pulsar	△ Globular cluster	★ Starburst Galaxy
⊠ Binary	+ Galaxy	○ SNR
★ Star-forming region	□ Unclassified source	◆ PWN
		★ Nova

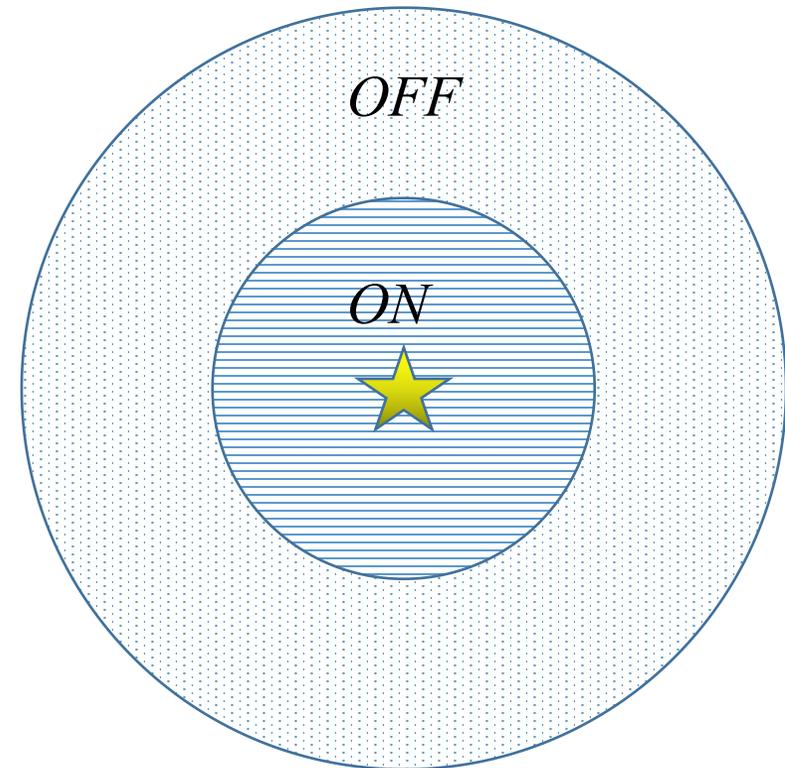
Протяженные гамма-источники

- Практически все ВГ источники точечные.
- источники вокруг галактик:
 - КЛ, убегающие из галактики, взаимодействуют с газовым гало. Могут задерживаться на космологические времена в окрестностях (*Crocker&Aharonian, 2011; Feldmann et al, 2013*).
 - Аннигиляция/распад частиц тёмной материи
- Обнаружены у Млечного Пути (FB) и M31
(*MP, Vasiliev, Postnov, 2016; Karwin et al, 2019*)



Протяженные гамма-источники

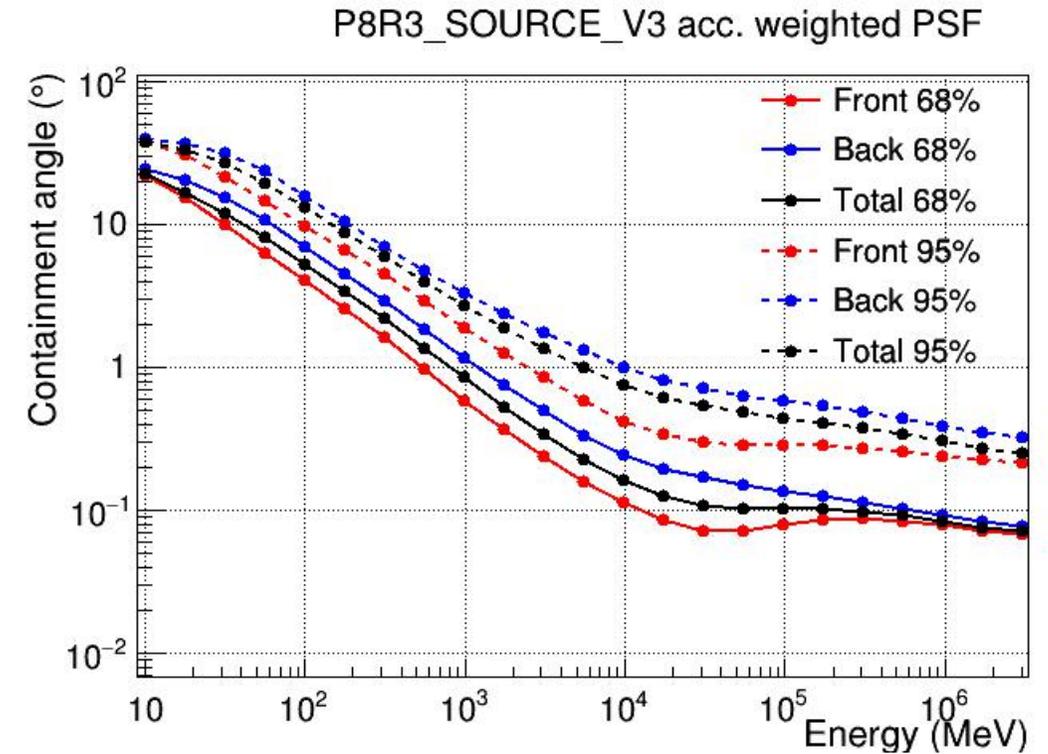
- МЗ1: светимость в диапазоне 10^{38} - 10^{39} эрг/с
- Идея -- искать сигнал от *совокупности* близких галактик, с массами, сравнимыми с массами Млечного Пути
- Метод -- апертурная фотометрия:
 - сигнал из круга R_{ON}
 - сравниваем с ожиданием из региона оценки фона -- кольца с радиусами R_{OFF} и R_{ON}
 - $R_{\text{OFF}}=2R_{\text{ON}}$.
 - Ожидания ($N_{\text{OFF}}/3$) vs наблюдения (N_{ON})



- Данные: 16 лет наблюдений (2008-2024) Fermi LAT, $E > 1$ ГэВ
- Изначальный каталог галактик *Ohlson et al 2024*, 15424 ближе 50 Мпк
- Наложенные ограничения:
 - $5 \text{ Мпк} < D < 15 \text{ Мпк}$ (ближе слишком протяженный, дальше --проседаем по потоку)
 - $M_{*,\text{min}} = 10^{10} M_{\odot}$
- Всего 87 источников
- Подавляем фон (иначе метод не работает): а) $|b| > 20^{\circ}$; б) нет источников 4FGL-DR4 ближе 3PSF_{68}

Анализ

- Сильная зависимость $PSF(E)$
- Слишком большая E -- мало выкидываем целей, но анализ слабее из-за маленькой фотонной статистики
- Слишком маленькая E , например, 1 ГэВ -- вообще не останется целей
- Компромисс -- 2 ГэВ, $R_{ON}=PSF=0.5^\circ$
- Остаётся 22 галактики, 16 поздних типов, 6 -- ранних



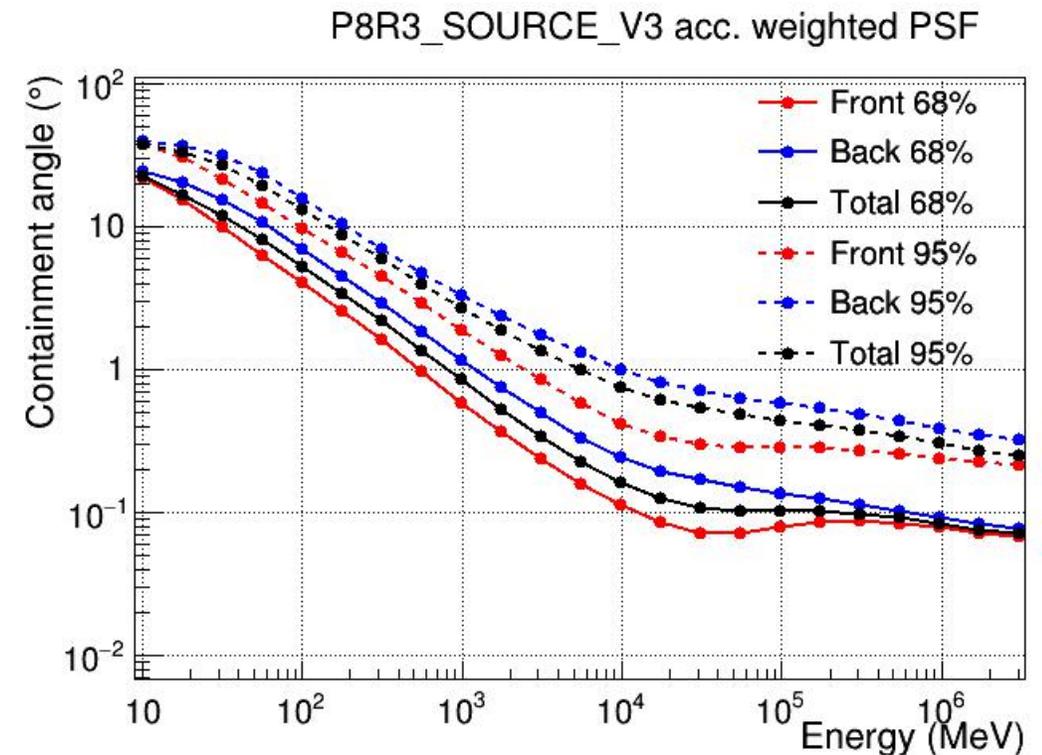
- Статистика по 22 галактикам, $E > 2$ ГэВ
- Выборка галактик поздних типов:

#	Name	$l, ^\circ$	$b, ^\circ$	D, Mpc	$\log M/M_\odot$
1	NGC0628	138.617	-45.705	10.19	10.128 ± 0.136
2	NGC0660	141.607	-47.347	11.57	10.098 ± 0.331
3	NGC1291	247.524	-57.042	9.08	10.707 ± 0.136
4	NGC1433	255.691	-51.195	9.04	10.070 ± 0.201
5	NGC1512	248.668	-48.166	11.63	10.172 ± 0.160
6	NGC1532	233.168	-46.584	14.26	10.528 ± 0.600
7	NGC2903	208.710	44.540	8.87	10.404 ± 0.136
8	NGC3368	234.435	57.010	10.42	10.523 ± 0.136
9	NGC3877	150.719	65.956	14.63	10.096 ± 0.476
10	NGC4192	265.434	74.960	12.68	10.371 ± 0.136
11	NGC4666	299.538	62.368	14.70	10.298 ± 0.136
12	NGC4818	305.212	54.323	11.04	10.008 ± 0.530
13	NGC5248	335.929	68.751	13.75	10.264 ± 0.606
14	NGC7331	93.722	-20.724	12.62	10.724 ± 0.327
15	NGC7814	106.410	-45.175	14.40	10.520 ± 0.136
16	PGC032861	245.103	55.513	14.45	12.827 ± 0.502

- Статистика по 22 галактикам, $E > 2$ ГэВ

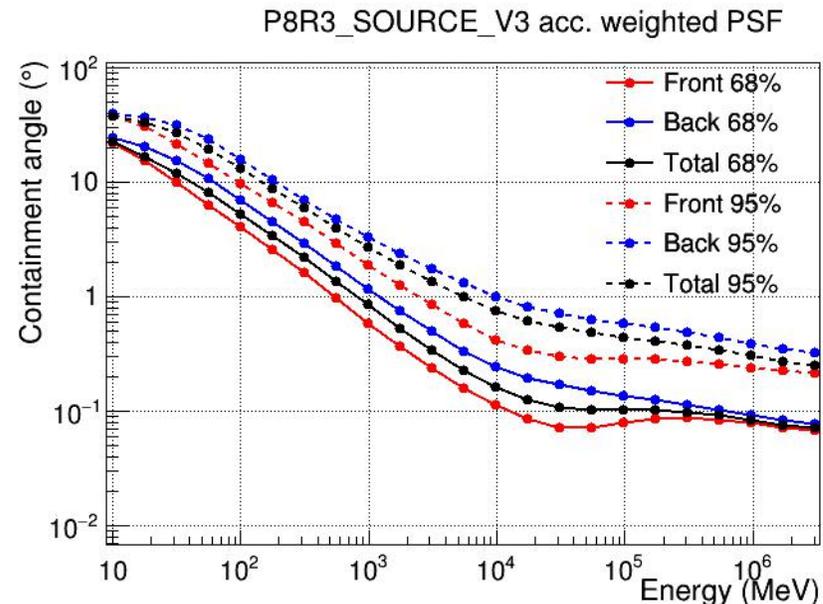
	EXP	OBS	p-val
Все галактики	1719	1890	2.7×10^{-5}
Ранних типов (6 штук)	533	500	--
Поздних типов (16 штук)	1186	1390	4.8×10^{-9}

- Не является ли это статистической флуктуацией?
- Можем ли мы что-то сказать о пространственной протяженности источника? Пока понятно, что $r < 150$ кпк (0.5° на 15 Мпк), то есть практически любой источник подходит
- Можно проверить на более высоких энергиях, хотя тесты очевидно не будут независимыми.
- На более высоких энергиях расстояния до источников 4FGL в единицах PSF будут ещё выше



Ожидания:

1. Если стат. флуктуация (или размер источника сравним с 0.5°), то для любой энергии и любого углового разрешения максимальная значимость будет достигаться тоже на $R_{ON}=0.5^\circ$
2. Если точечный источник, то она будет на $R_{ON}(E)=PSF(E)$



- Также используем front-conversion (примерно 50% от всех фотонов), для увеличения углового разрешения

Energies	PSF ₆₈ , °
2 GeV	0.50
2 GeV front	0.34
3 GeV	0.36
3 GeV front	0.25
5 GeV	0.25
5 GeV front	0.17
10 GeV	0.17
30 GeV	0.11

Результаты

- Для разных энергий и типов конверсии (front/total)
- Жирным шрифтом выделен $R_{\text{ON}}(E)=\text{PSF}(E)$
- OBS/EXP, p-val

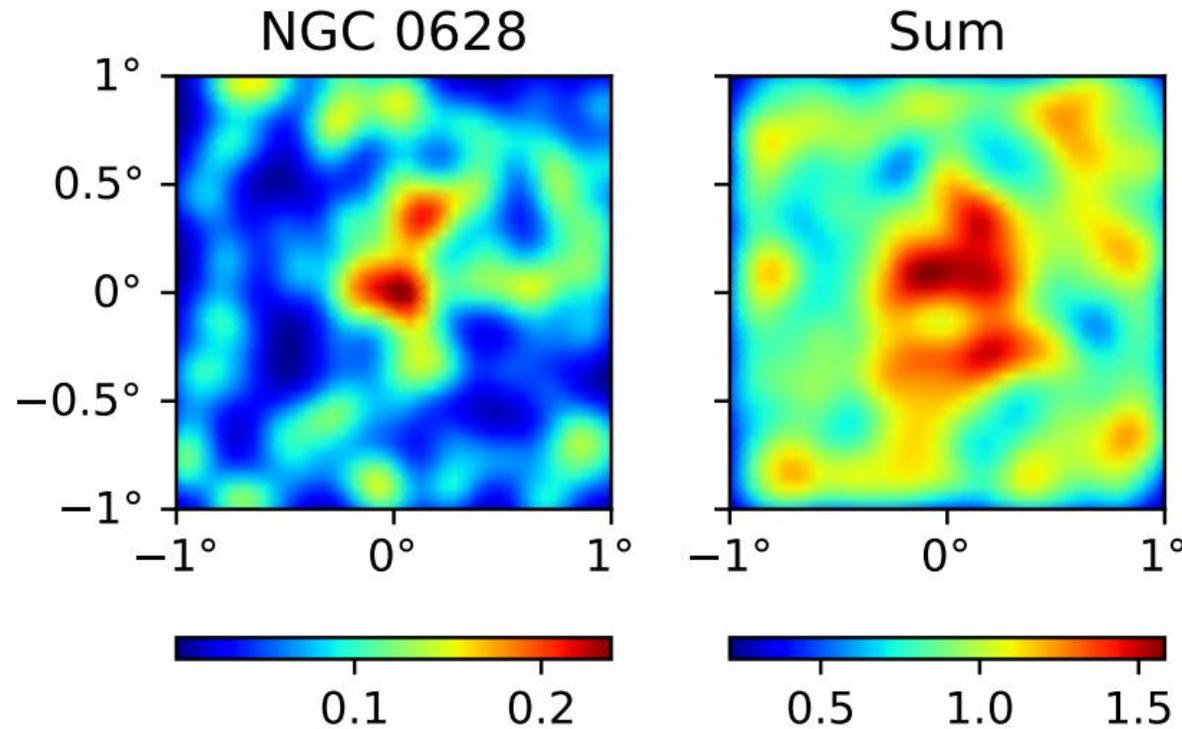
	$\sim 0.25^\circ$	$\sim 0.35^\circ$	$\sim 0.5^\circ$
2 GeV	-	723/588 4.2×10^{-8}	1390/1186, 4.8×10^{-9}
2 GeV front	-	355/280, 9.2×10^{-6}	750/605, 7.8×10^{-9}
3 GeV	-	441/335, 2.1×10^{-8}	912/767, 2.0×10^{-7}
3 GeV front	102/91, 0.16	263/171, 6.0×10^{-11}	430/322, 8.2×10^{-9}
5 GeV	102/92, 0.16	238/168, 2.8×10^{-7}	378/318, 6.2×10^{-4}
5 GeV front	63/52, 0.07	112/70, 2.3×10^{-6}	221/170, 1.0×10^{-4}
10 GeV	43/34, 0.09	80/47, 9.4×10^{-6}	147/122, 0.26
30 GeV	-	12/12, 0.53	36/32, 0.016

Результаты: морфология

- Не похоже на флуктуацию.
- Но не похоже и на точечный источник! Максимум значимости с ростом E сначала при всё меньших R_{ON} , а потом наступает насыщение на $R_{\text{ON}}=0.3^\circ$ (если $\text{PSF} \leq 0.3^\circ$, $E > 3$ ГэВ).
- Протяженный источник размером $\sim 70\text{-}80$ кпк

Результаты: морфология

- Сумма всех отсчётов для $E > 3$ ГэВ, front-converted



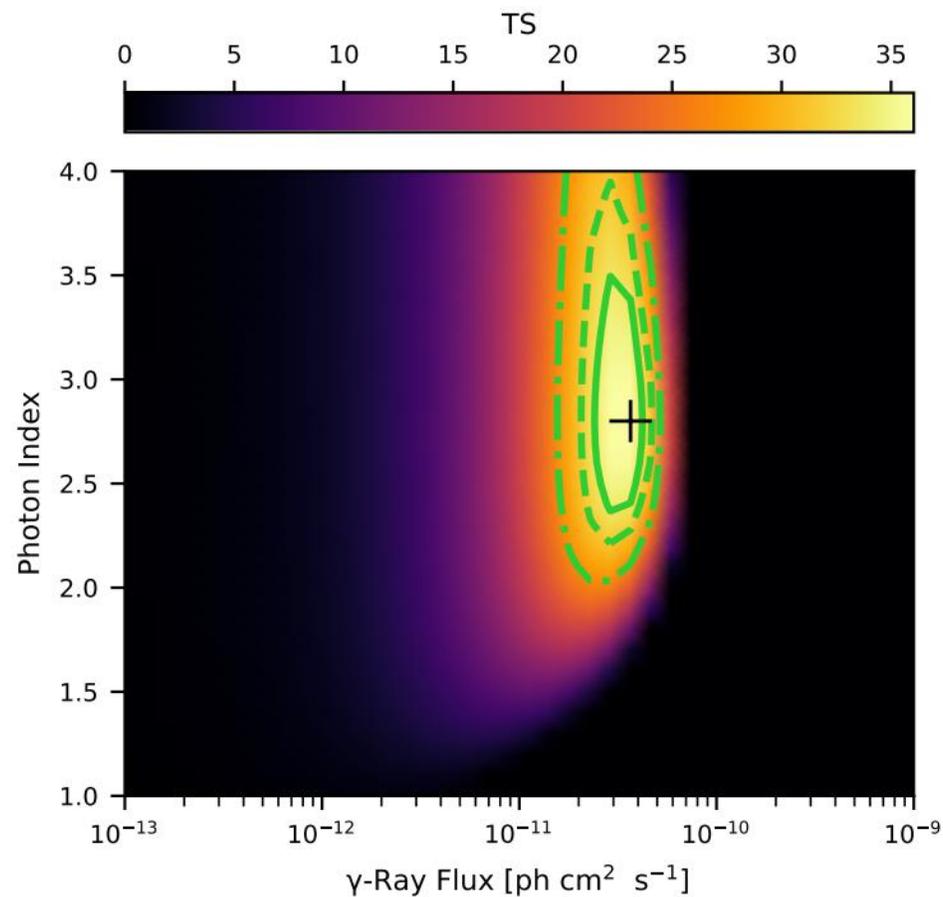
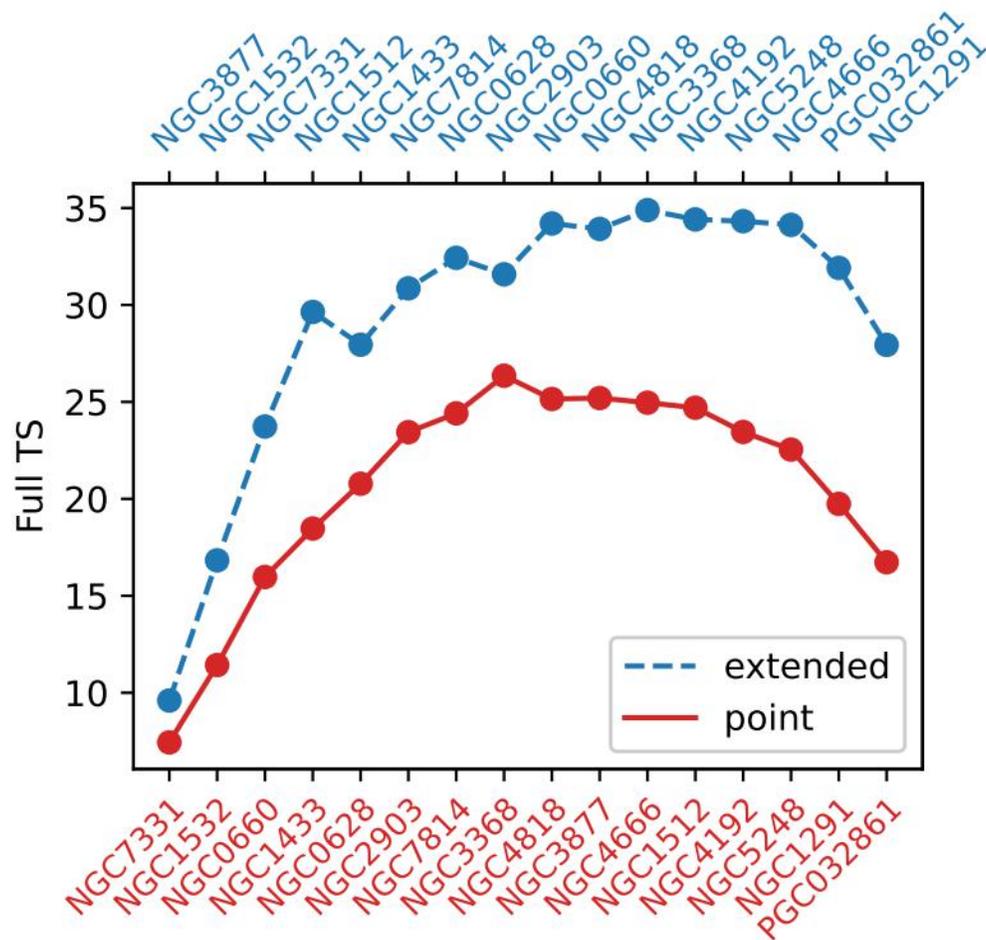
- NGC0628 -- наибольший инд. сигнал, $p\text{-val} \sim 10^{-3}$
- Это для *всех* отсчётов, без предварительного вычитания фона!
- Избыток выглядит несимметричным.

Стандартный анализ Fermi

- Метод максимального правдоподобия
- *FERMI_STACKING*: <https://fermi-stacking-analysis.readthedocs.io/en/latest>
- Поиск в этом наборе источников:
 - считаем, что все источники идентичны по потоку F и спектральному индексу α .
 - добавляем в модель по координатам галактик источники (точечный или диск радиусом 0.3°)
 - перебор на сетке F - α с целью поиска параметров, максимизирующих значимость (TS)
 - Анализ на $E > 2$ ГэВ

Стандартный анализ Fermi

- Даже на такой низкой энергии протяженный шаблон выглядит лучше.
- Некоторые галактики дают вклад ≤ 0 , что понятно

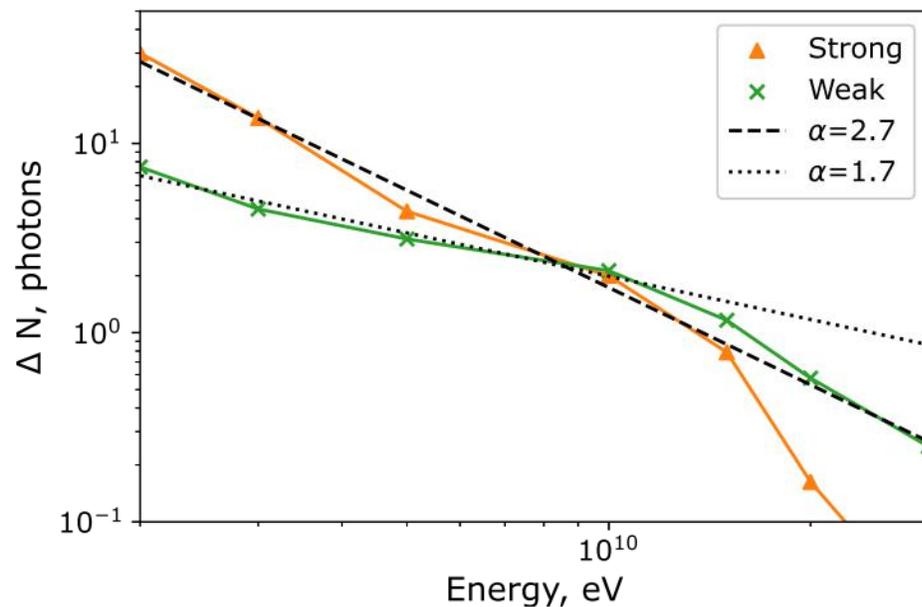
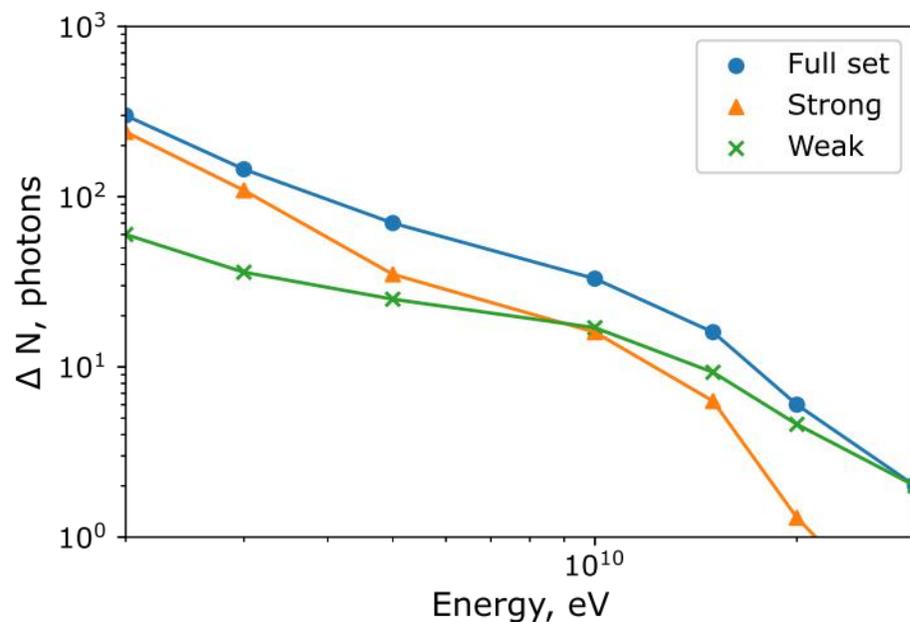


Энергетика и спектр

- На $E > 2$ ГэВ лишь 8 галактик ощутимо вкладывают в общую значимость (NGC0628, NGC0660, NGC1512, NGC1532, NGC3368, NGC3877, NGC7331, NGC7814)
- Разбиваем набор на «сильные» и «слабые» и повторяем апертурный анализ отдельно. Может вторые --это просто шум?
- На 2 ГэВ первые дают гораздо более сильный сигнал: 785/625, $p\text{-val} = 4.1 \times 10^{-10}$, «слабые» же 605/562, $p\text{-val} = 3.6 \times 10^{-2}$
- Картина не так проста уже на 5 ГэВ: 126/91, $p\text{-val} = 3.0 \times 10^{-4}$ и 112/78, $p\text{-val} = 1.4 \times 10^{-4}$, меняются местами.
- Источники не идентичны: у них разная энергетика и разный спектр, «слабые» гораздо жёстче.

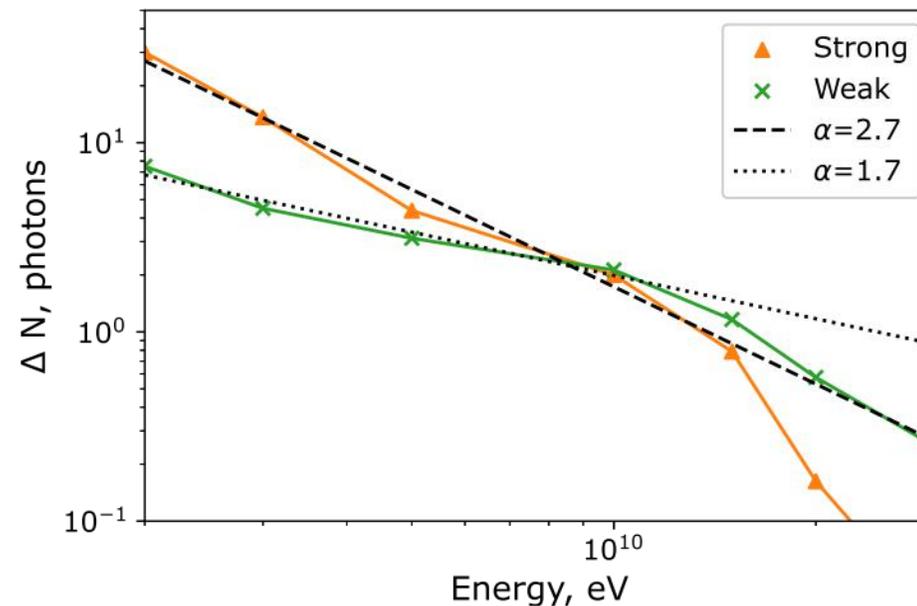
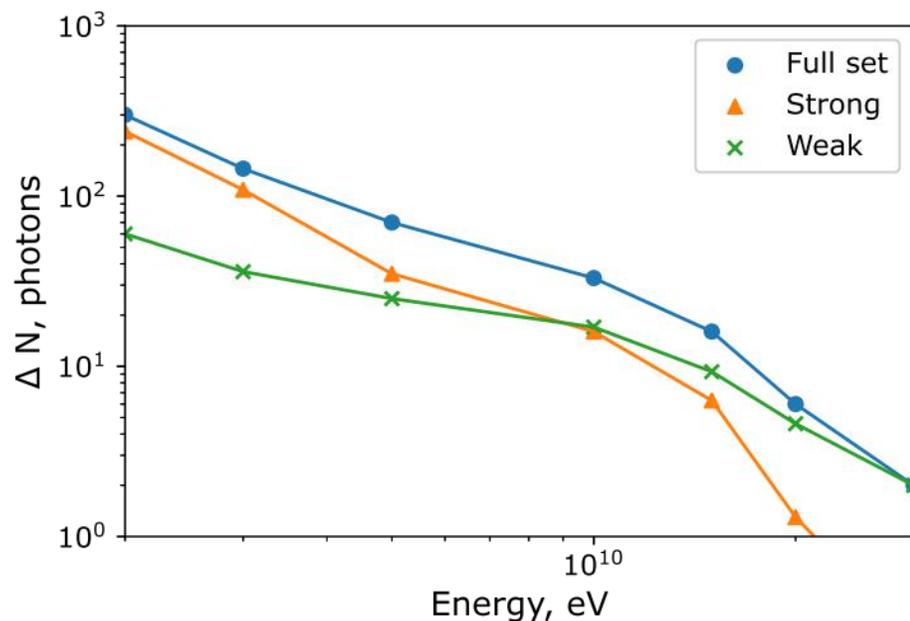
Энергетика и спектр

- Очень грубая оценка -- для круга радиусом 0.3° берём количество избыточных фотонов (выше фона) на разных энергиях и пытаемся построить спектр



- $\alpha=2.7$ (1.7) для «сильных» («слабых») источников
- Совпадает с результатами *FERMI_STACKING*: $2.8^{+0.6}_{-0.4}$ и $1.7^{+1.1}_{-0.5}$

Энергетика и спектр



- Отсутствие сигнала на 30 ГэВ говорит о значительном смягчении/обрезании где-то в интервале 10-30 ГэВ
- Можно оценить среднюю светимость галактик в обоих наборах:
 $L_{\text{strong}} \sim 5.6 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ и $L_{\text{weak}} \sim 2.3 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$
для $D=15$ Мпк и экспозиции Fermi LAT $\mathcal{E} = 8 \times 10^{11} \text{ cm}^2 \text{ s}$

Происхождение

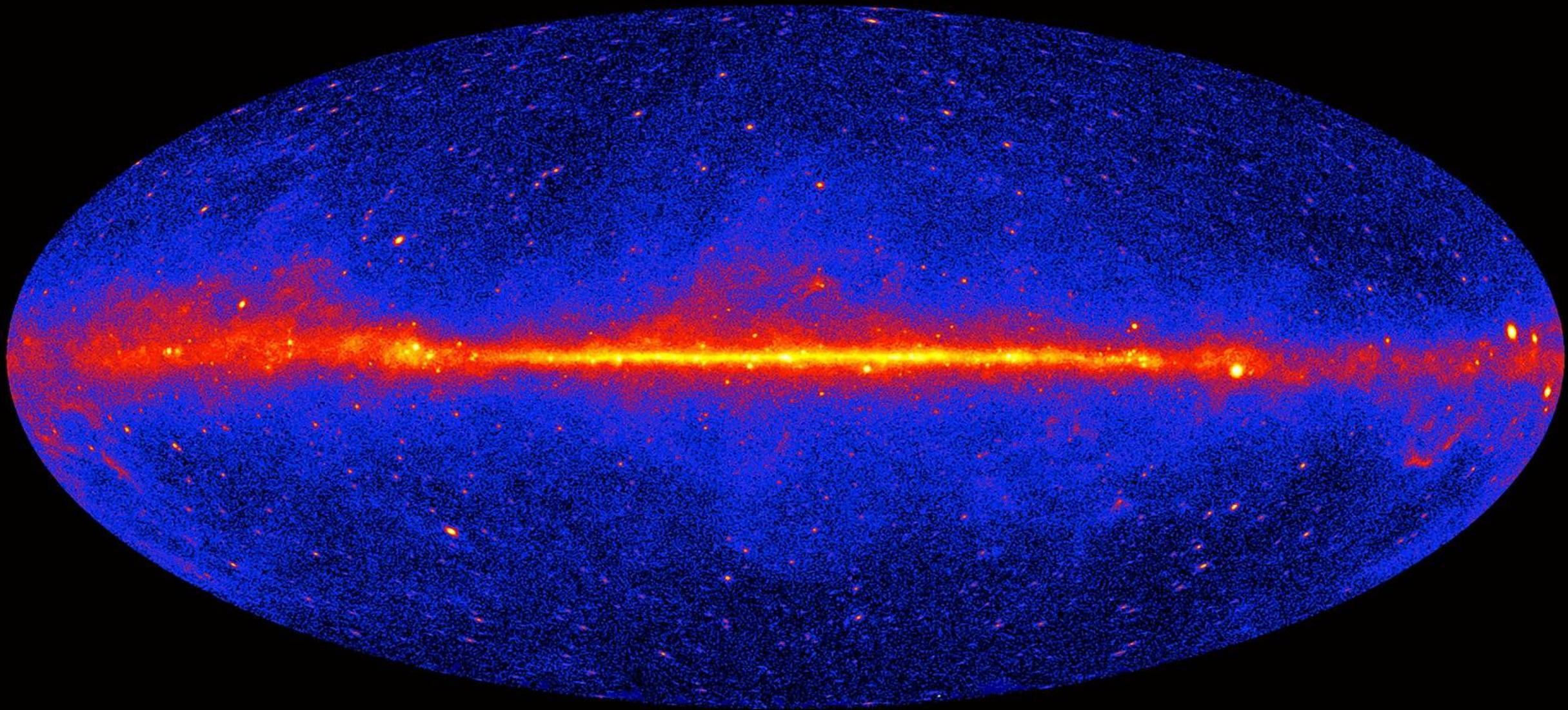
- Вряд ли может возникнуть в моделях аннигиляции/распада ТМ:
 - указания на сложную морфологию
 - нет сигнала от галактик ранних типов
 - нет сигнала от менее массивных галактик 10^9 - $10^{10} M_{\odot}$
- Вероятно связана с предшествующей активностью галактик -- АЯГ или вспышка звездообразования
- Возраст гамма-гало, может ли быть космологическим?
Морфология скорее против.

Заключение

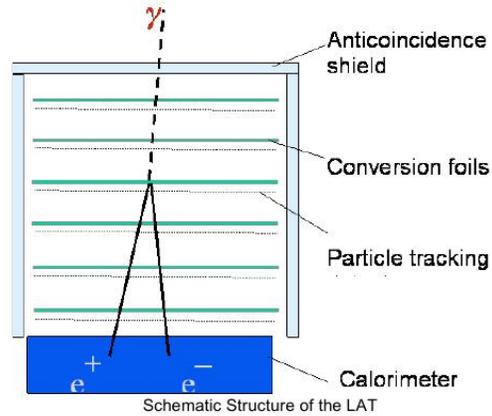
- В диапазоне высоких энергий был обнаружен слабый сигнал от близких ($D < 15$ Мпк) массивных галактик поздних типов с максимальной стат. значимостью $p\text{-val} = 6 \times 10^{-11}$
- Совместен с сигналом от протяженного источника размером 0.3° (~ 80 кпк на этом расстоянии)
- Популяция неоднородна: у более ярких галактик спектр мягкий, $\alpha = 2.7$, более слабые обладают жестким спектром $\alpha = 1.7$. После 10 ГэВ в спектре происходит обрезание.
- [arXiv:2410.02066](https://arxiv.org/abs/2410.02066)

Благодарю за внимание!

Fermi LAT: γ -ray sky



Fermi LAT



12 front layers 3% rad. length (W)

4 back layers 18% rad. length

FoV 2.4 sr

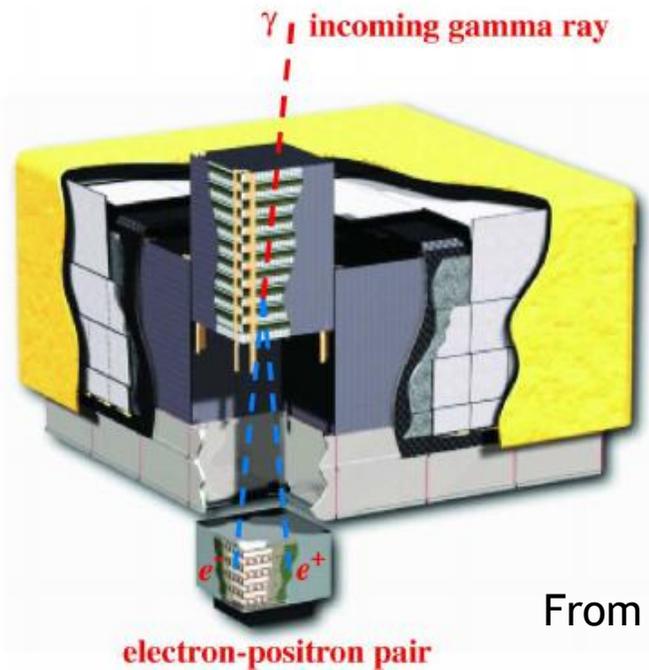
~0.9 m² effective area

Orbit : H~550 km, T~95 min

Data since 04.08.2008

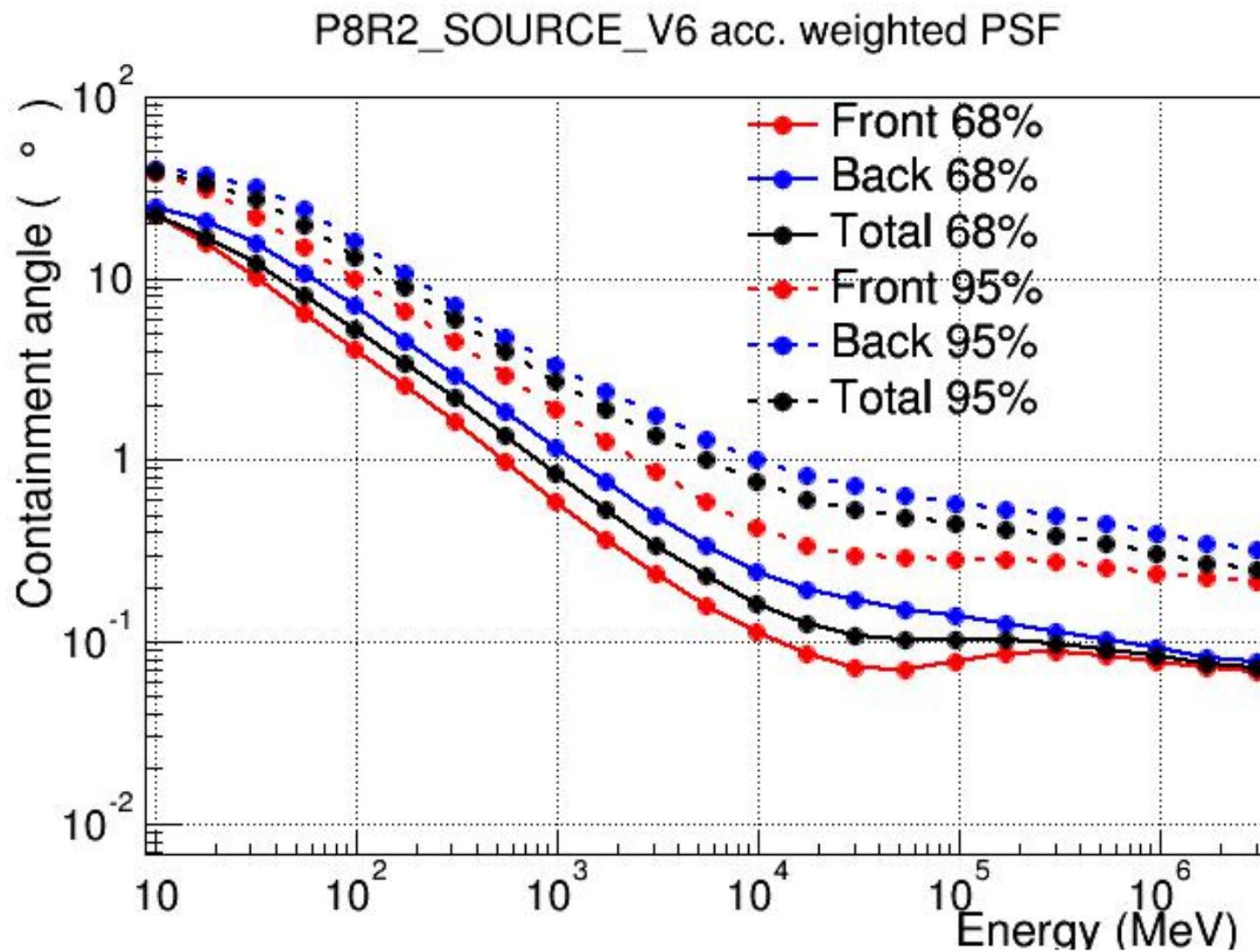
<http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/>

>6x10⁸ events (SOURCE class) in 10 years of observations



From Atwood et al, 2009

Fermi LAT: point spread function (PSF)



Fermi LAT: effective area

