

Диффузный Галактический фон гамма-излучения

- Формируется при взаимодействии КЛ (ядер и e^-e^+ высоких энергий) с межзвездным газом, излучением, и магнитным полем.
- Дает информацию о происхождении и распространении КЛ и свойствах межзвездной среды в Галактике
- Сами КЛ являются важным источником нагрева и ионизации межзвездной среды, а также возможно играют значительную роль в регулировании процесса звездообразования и эволюции галактик.

Основные процессы:

- Адронные взаимодействия
- Обратное комптоновское рассеяние оптического, инфракрасного межзвездного и фонового микроволнового излучения на релятивистских электронах
- Тормозное излучение релятивистских электронов, взаимодействующих с межзвездным газом

intergalactic space

HALO

reacceleration

energy loss
decay

Secondary: ^{10}Be , $^{10,11}\text{B}$... Fe..

Secondary: e^+ $\bar{p}$

cosmic-ray sources: p, He .. Ni, e^-

synchrotron

B-field

gas

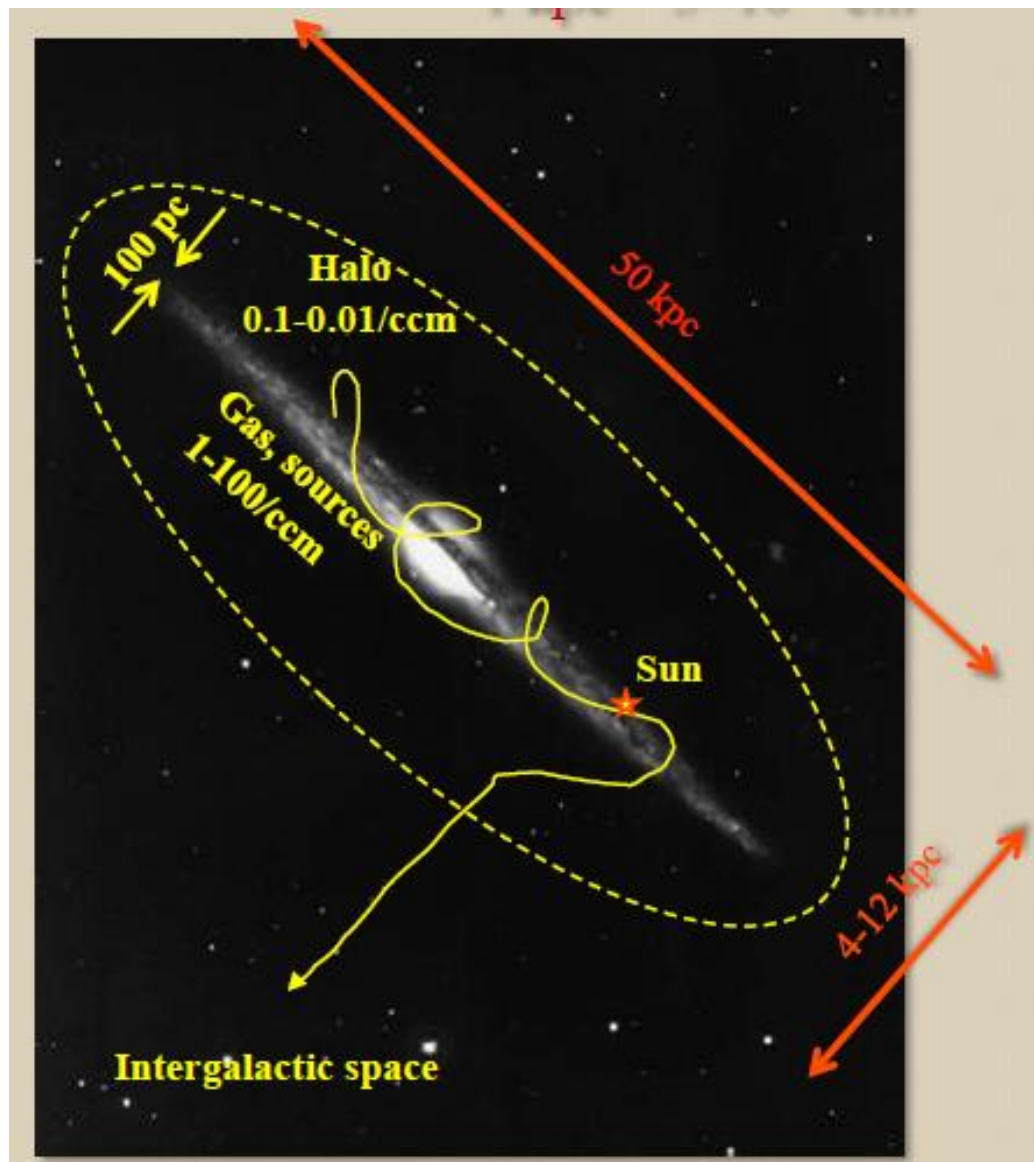
ISRF

bremsstrahlung
inverse Compton

γ - rays

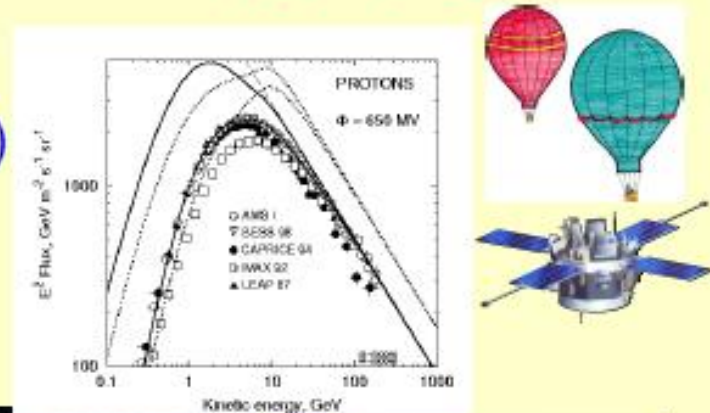
π^0



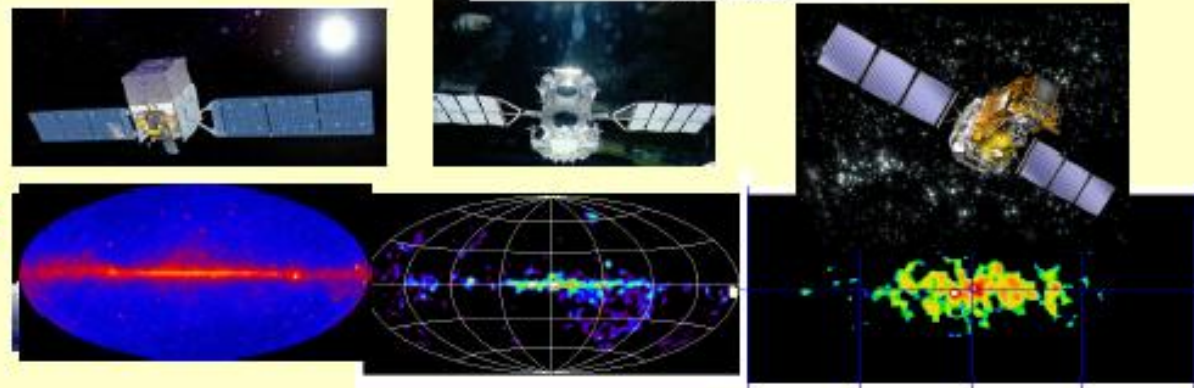


The **goal** : use *all* types of data in self-consistent way to test models of cosmic-ray propagation.

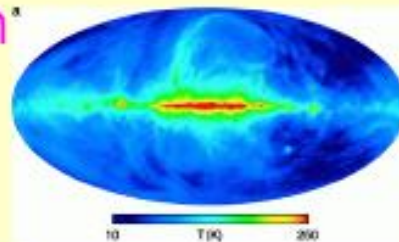
Observed *directly, near Sun*:
primary spectra (p, He ... Fe; e^-)
secondary/primary (B/C etc)
secondary e^+ , antiprotons...



Observed
from whole
Galaxy:
 γ - rays



synchrotron^{*}



Моделирование (GALPROP)

<http://galprop.stanford.edu/>

Рассчитывает распространение заряженных частиц в Галактике и диффузное излучения, генерируемое при распространении

- Задать источники ГКЛ
- Задать спектр инжектируемых ГКЛ
- Задать распределение газа в Галактике: HI (атомарный водород – по линии 21 см)

H₂(молекулярный водород – по линии CO 2.6 мм)

HII (ионизованный водород, несколько % от атомарного газа, но вносит вклад на больших широтах)

- Задать межзвездное радиационное поле
- Задать размер области удержания КЛ (гало)

- Потери энергии e и e^+ : синхротронные, обратные комптоновские (тормозные, ионизационные, кулоновские)

Результат GALPROP:

- Распределение КЛ
- Карта распределения интенсивности синхротронного и гамма-излучения

Transport Equations ~ 90 (no. of CR species)

$$\frac{\partial \psi(\vec{r}, p, t)}{\partial t} = q(\vec{r}, p) \text{ sources (SNR, nuclear reactions...)}$$

diffusion

$$+ \vec{\nabla} \cdot [D_{xx} \vec{\nabla} \psi - \vec{V} \psi]$$

diffusive reacceleration
(diffusion in the momentum space)

$$+ \frac{\partial}{\partial p} \left[p^2 D_{pp} \frac{\partial}{\partial p} \frac{\psi}{p^2} \right]$$

convection
(Galactic wind)

E-loss

$$- \frac{\partial}{\partial p} \left[\frac{dp}{dt} \psi - \frac{1}{3} p \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \psi \right]$$

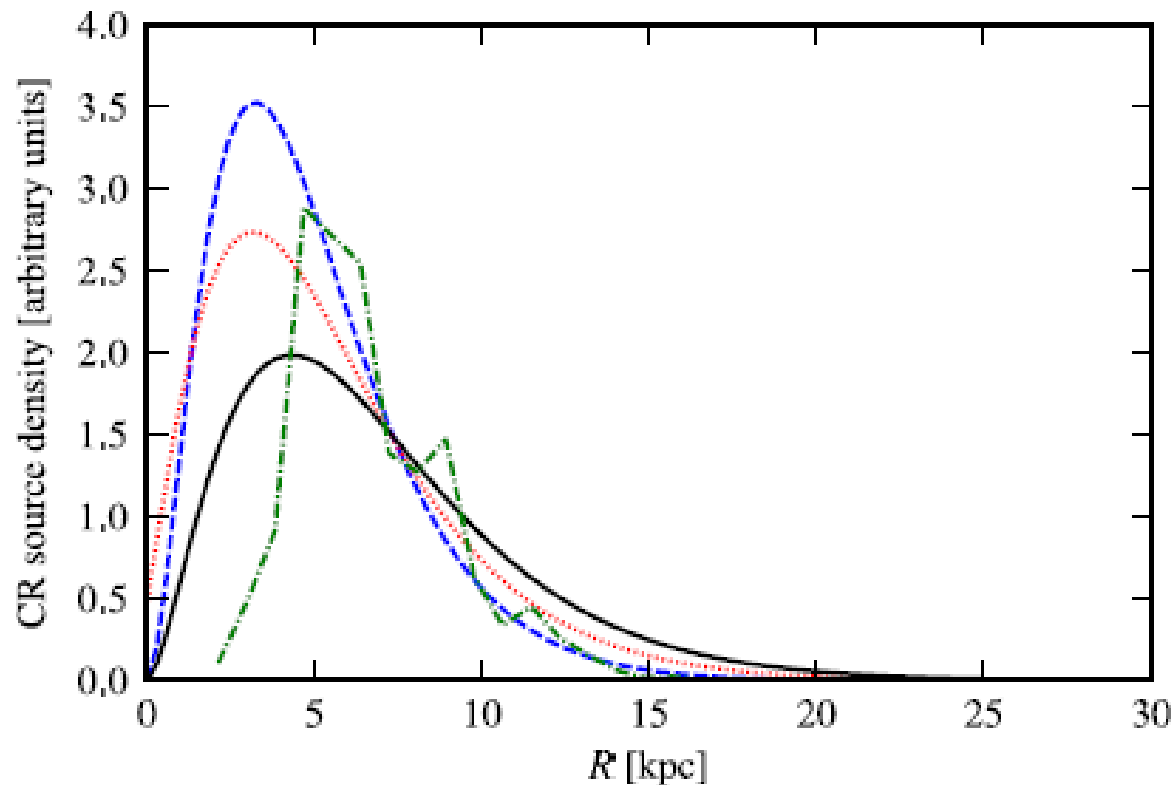
fragmentation

$$- \frac{\psi}{\tau_f} - \frac{\psi}{\tau_d} \text{ radioactive decay}$$

+ boundary conditions

$\psi(r, p, t)$ – density
per total momentum

Источники ГКЛ



Пространственное
распределение –
берется распределение
пульсаров

Figure 1. CR source density at $z = 0$ in arbitrary units as a function of Galactocentric radius. Solid black curve: SNRs (Case & Bhattacharya 1998). Dashed blue curve: pulsars (Lorimer et al. 2006). Dotted red curve: pulsars (Yusifov & Küçük 2004). Dash-dotted green curve: OB stars (Bronfman et al. 2000). While the units are arbitrary, the relative normalizations of the curves in the figure match those found in the *GALPROP* models used in this analysis. The CR flux of the models is normalized to the observed CR flux at the solar circle after propagation. The normalization is done at 100 GeV and is therefore unaffected by modulation.

Спектр инжектируемых КЛ

- В пространстве импульсов – степень с изломами (разные параметры для первичных p и e^-)
- Параметры выбираются так, чтобы воспроизводились наблюдаемые спектры КЛ
- Электроны: $\Gamma=1.6$ ($E < 4$ ГэВ), $\Gamma=2.5$ ($4\text{ГэВ} < E < 2\text{ТэВ}$), $\Gamma=5$ ($E > 2$ ТэВ) – характерные значения

Галактические космические лучи

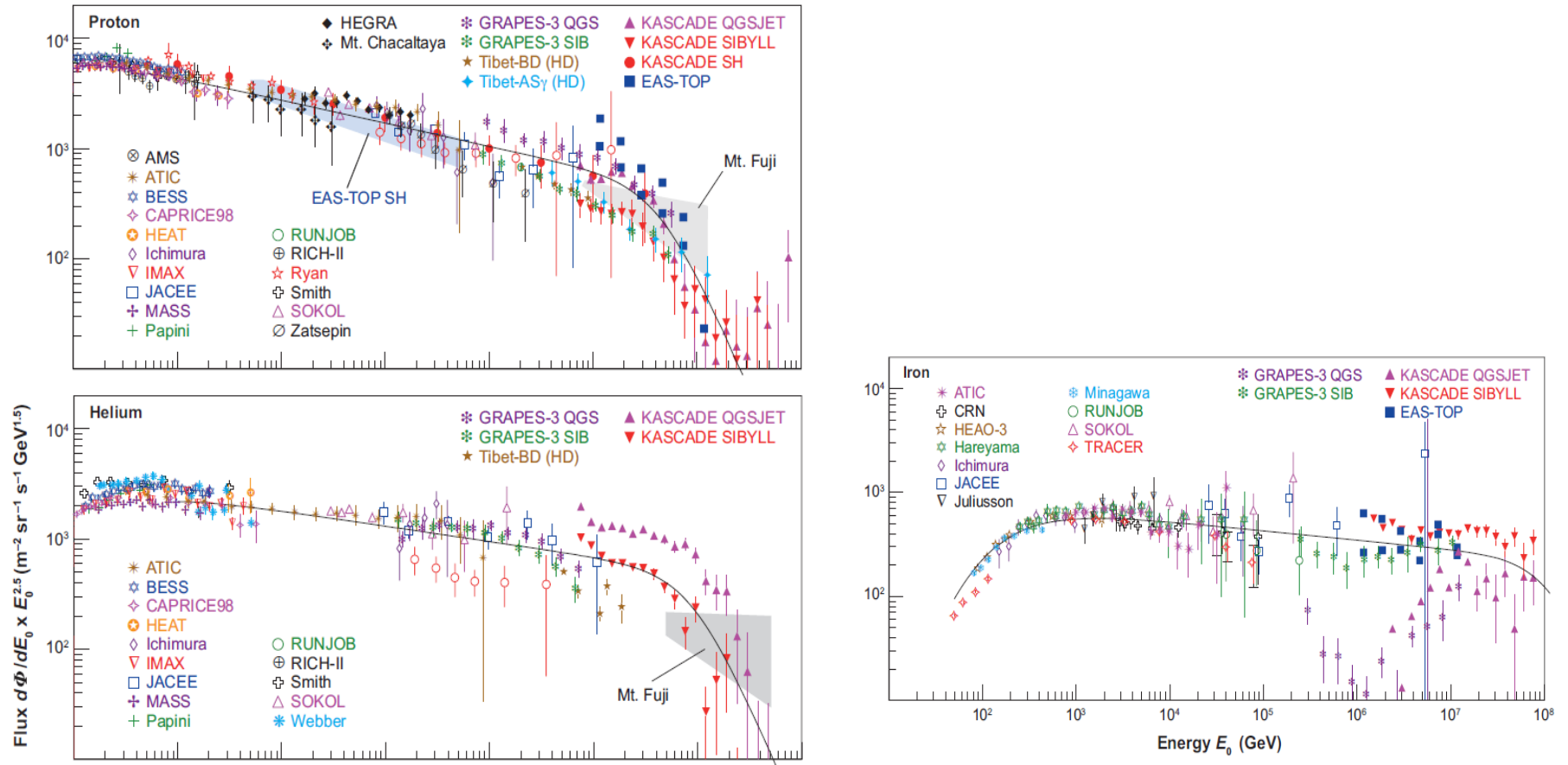


Figure 1

Compilation of spectral data 10^{10} – 10^{17} eV for proton, helium, and iron, combining balloon, satellite, and ground-based measurements. Figure adapted with permission from Reference 18 and G. Hörandel (private communication).

Спектр e^-

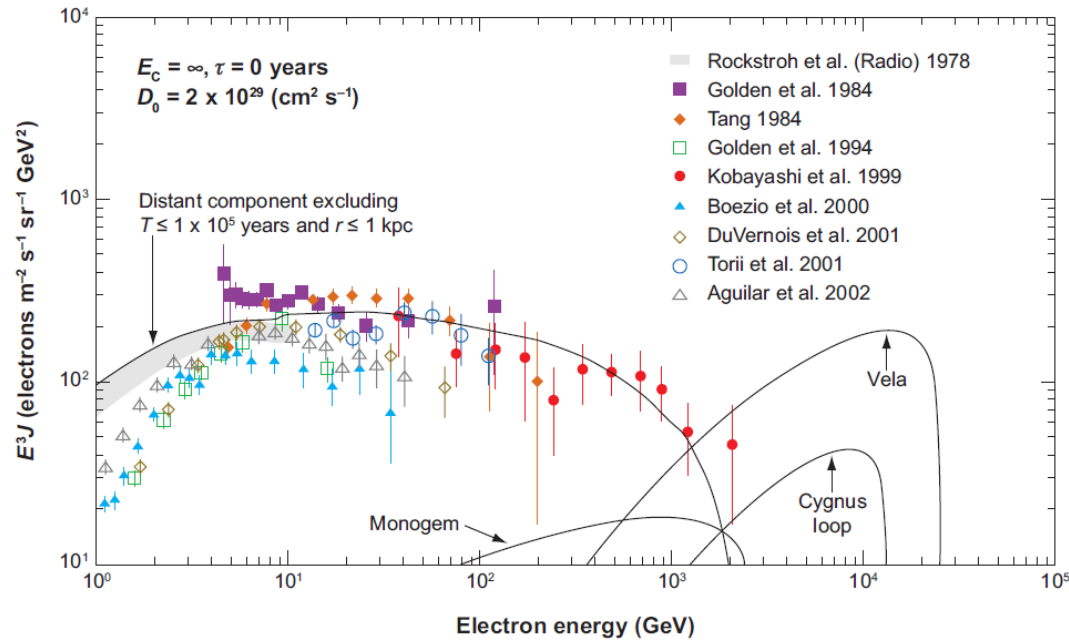
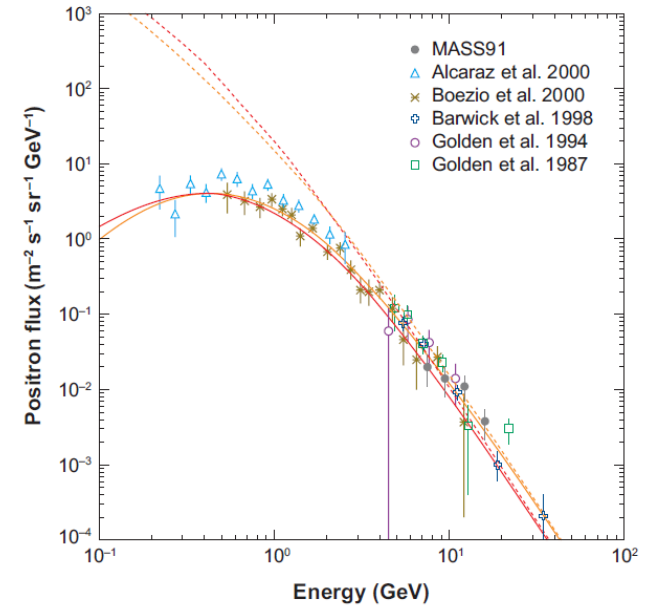


Figure 4

Measurements of the electron spectrum, including AMS01, CAPRICE94, HEAT, and SANRIKU, compared with possible contributions of distant sources and local supernova remnants. Figure adapted from Reference 37 with permission from the American Astronomical Society.



Спектр e^- по данным Fermi-LAT (7 ГэВ – 1 ТэВ)

- Степень с показателем $\simeq 3.08$

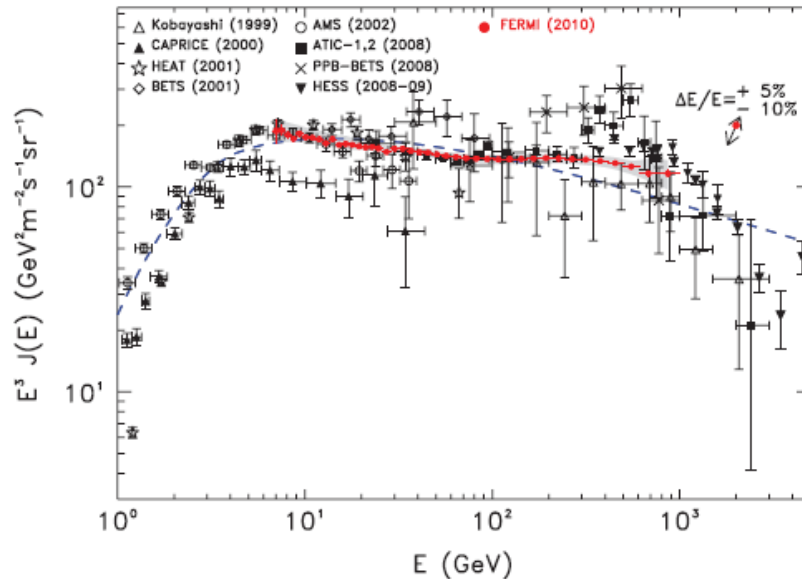


FIG. 21 (color). Cosmic-ray electron spectrum as measured by Fermi LAT for 1 yr of observations—shown by filled circles, along with other recent high-energy results. The LE spectrum is used to extend the HE analysis at low energy. Systematic errors are shown by the gray band. The range of the spectrum rigid shift implied by a shift of the absolute energy is shown by the arrow in the upper right corner. Dashed line shows the model based on pre-Fermi results [32]. Data from other experiments are: Kobayashi [45], CAPRICE [33], HEAT [46], BETS [47], AMS [19], ATIC [7], PPB-BETS [8], and HESS. [9,10]. Note that the AMS and CAPRICE data are for e^- only.

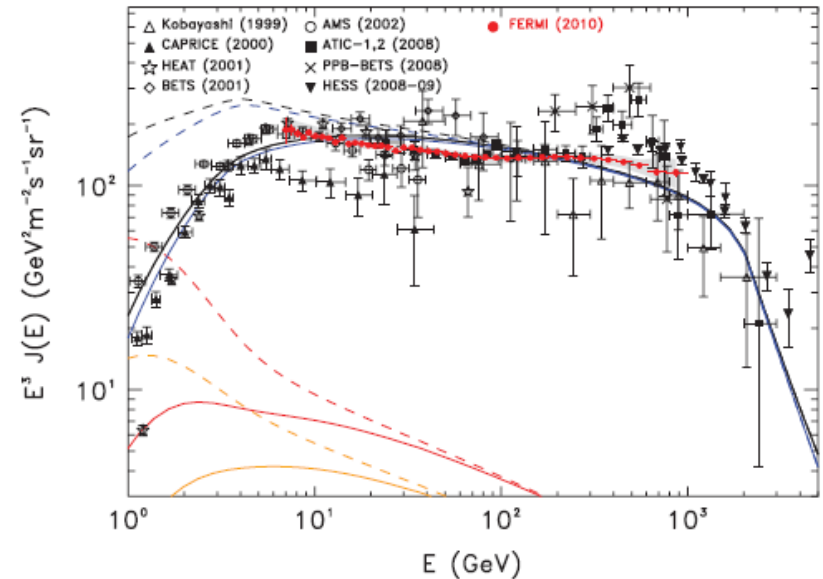


FIG. 22 (color). The $e^+ + e^-$ spectrum computed with the conventional GALPROP model [36] (shown by solid black line) is compared with the Fermi LAT (red filled circles) and other experimental data. This model adopts an injection spectral index $\Gamma = 1.6/2.5$ below/above 4 GeV, and a steepening $\Gamma = 5$ above 2 TeV. Blue lines show e^- spectrum only. The solar modulation was treated using the force-field approximation with $\Phi = 550$ MV. The dashed/solid lines show the before modulation/modulated spectra. Secondary e^+ (red lines) and e^- (orange lines) are calculated using the formalism from [12].

ISRF (interstellar radiation field)

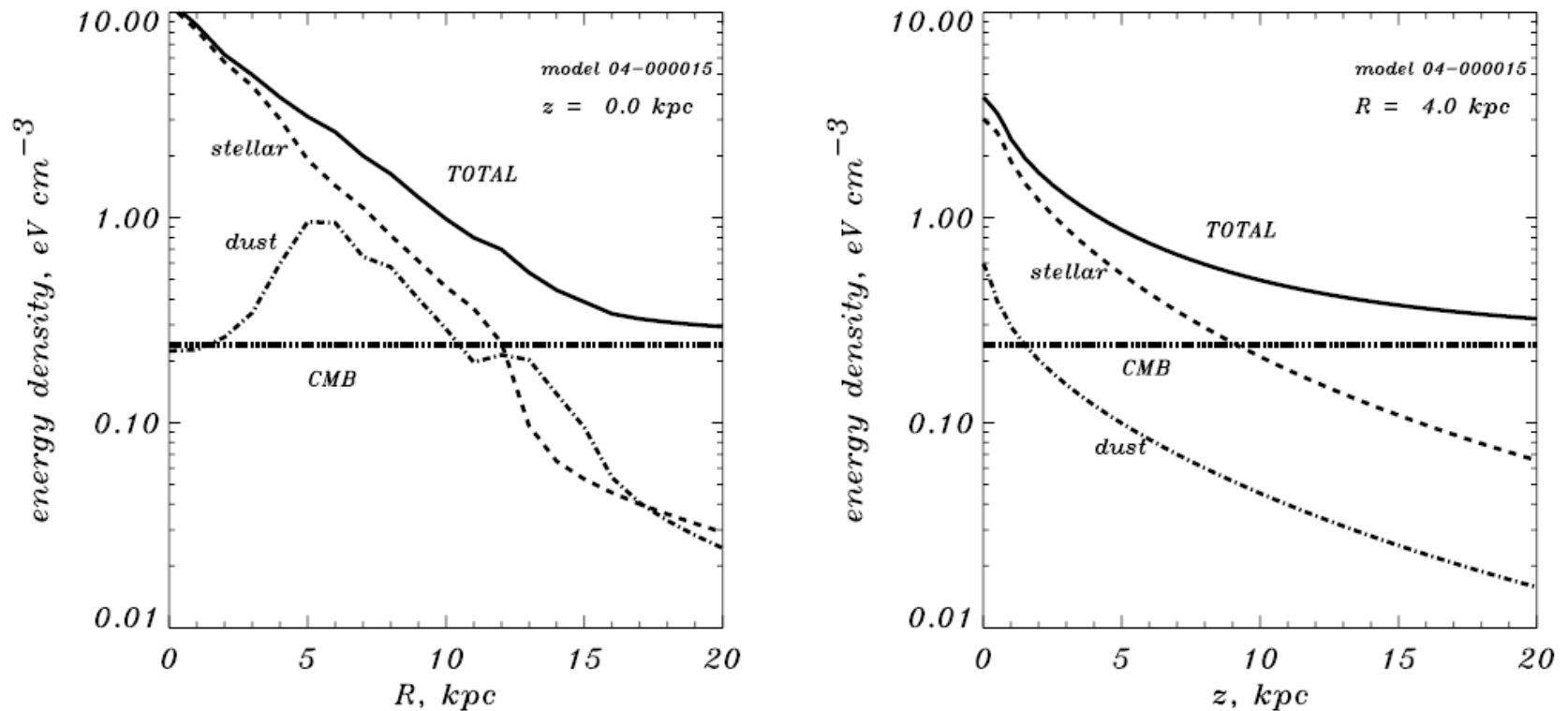


FIG. 1.—ISRF energy density as function of R at $z = 0$ (left), and of z at $R = 4 \text{ kpc}$ (right). Shown are the contributions of stars (dashed line), dust (dash-dotted line), CMB (dash-three-dotted line), and total (solid line).

ISRF – излучение звезд + рассеяние, поглощение, переизлучение фотонов пылью межзвездного вещества ($\sim 20\%$ излучения звезд перерабатывается пылью и излучается в ИК)

Магнитное поле

- Регулярное $\cong 2$ мкГс в диске и $\cong 2$ мкГс тороидальное поле в гало (определяется по мере вращения радиоизлучения от внегалактических источников)
- Случайное $B_{\text{ran}} = B_0 \exp[-(R - R_{\text{Sun}})/R_B - |z|/z_B]$ – параметры определяются по распределению синхротронного излучения на 408 МГц; $B_0 \cong 7.5$ мкГс; $R_B \sim 8$ кпк, $z_B \sim 1$ кпк

Fermi-LAT

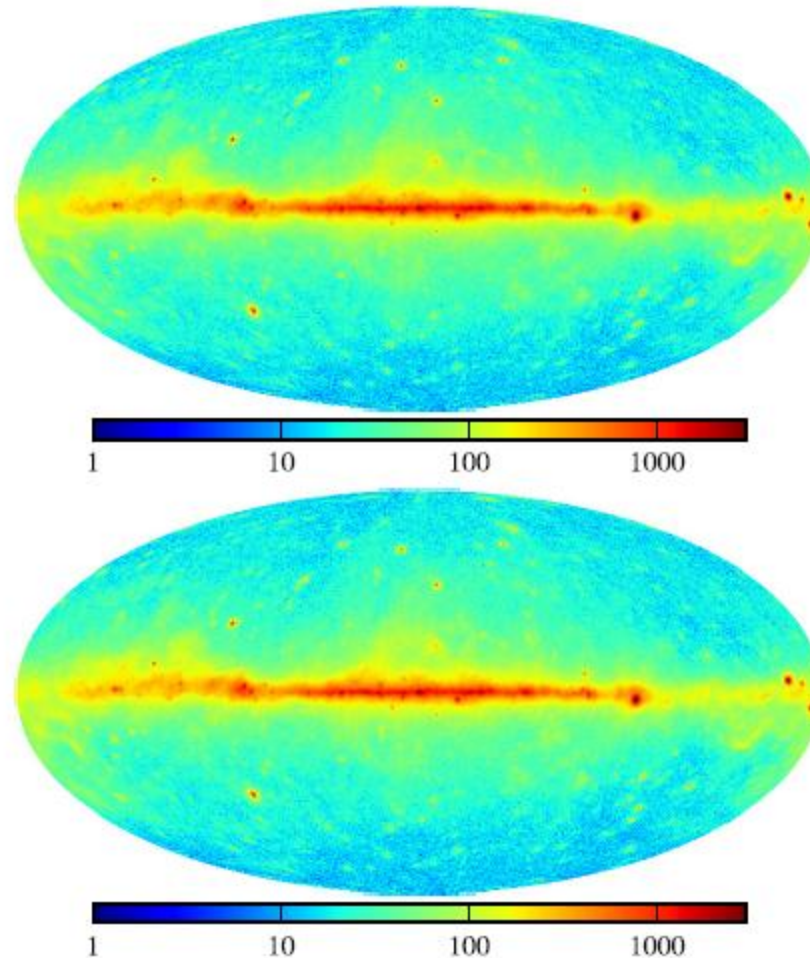


Figure 5. Upper panel: observed *Fermi*-LAT counts in the energy range 200 MeV–100 GeV used in this paper. Lower panel: predicted counts for model $\bar{s}S^Z 4^R 20^T 150^C 5$ in the same energy range. To improve contrast we have used a logarithmic scale and clipped the counts/pixel scale at 3000. The maps are in Galactic coordinates in Mollweide projection with longitudes increasing to the left and the Galactic center in the middle.

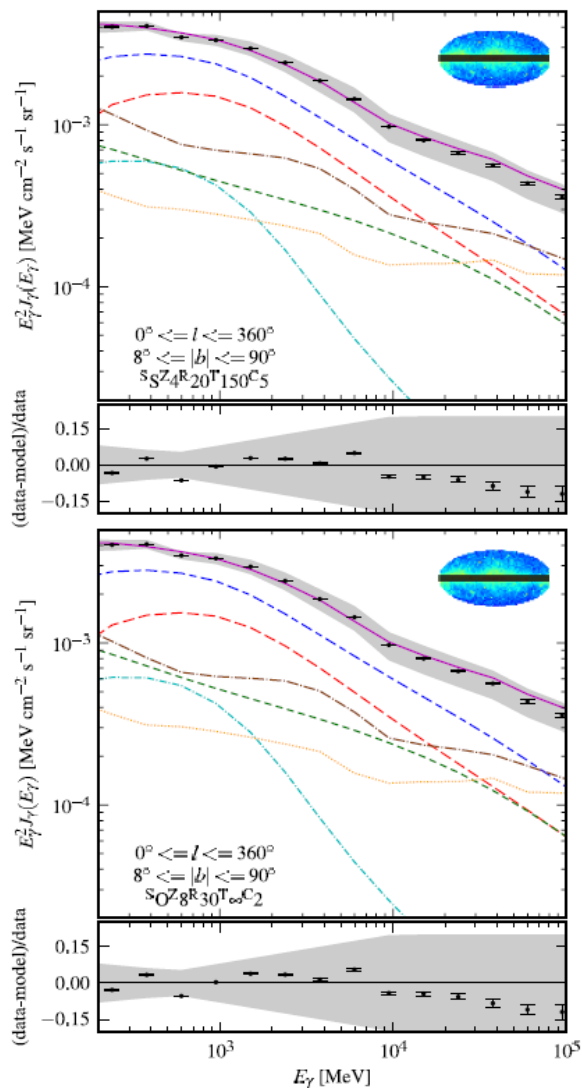


Figure 12. Spectra extracted from the local region for model $S SZ 4 R 20 T 150 C 5$ (top) and model $S O Z 8 R 30 T \infty C 2$ (bottom) along with the isotropic background (brown, long-dash-dotted) and the detected sources (orange, dotted). The models are split into the three basic emission components: π^0 -decay (red, long-dashed), IC (green, dashed), and bremsstrahlung (cyan, dash-dotted). All components have been scaled with parameters found from the γ -ray fits. Also shown is the total DGE (blue, long-dash-dotted) and total emission including detected sources and isotropic background (magenta, solid). The *Fermi*-LAT data are shown as points and the error bars represent the statistical errors only that are in many cases smaller than the point size. The gray region represents the systematic error in the *Fermi*-LAT effective area. The inset sky map in the top right corner shows the *Fermi*-LAT counts in the region plotted. Bottom panel shows the fractional residual (data – model)/data.

- Красный – распад π^0
- Зеленый – обратное комптоновское рассеяние
- Голубой – тормозное излучение
- Синий – сумма компонент
- Коричневый – изотропный фон
- Оранжевый – дискретные источники
- Фиолетовый – полная сумма

Средние галактические широты

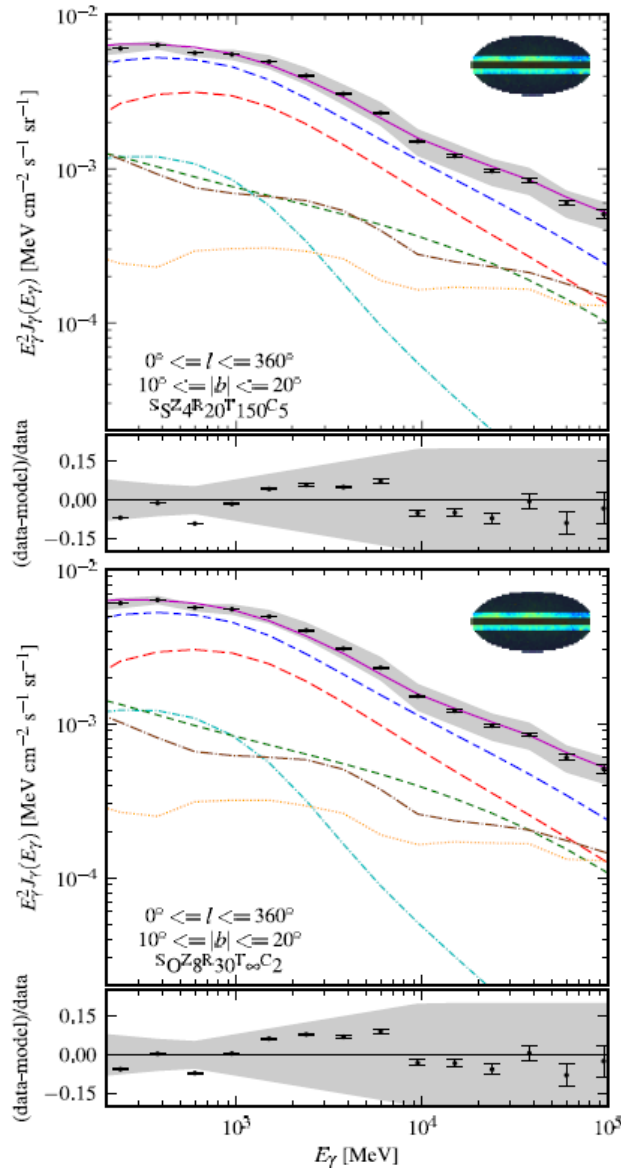


Figure 14. Spectra of the low intermediate latitude region for model $S^Z_4R_{20}T_{150}C_5$ (top) and model $S^O_Z_8R_{30}T_{\infty}C_2$ (bottom). This region was also used by Abdo et al. (2009a). See Figure 12 for legend.

- Красный – распад π^0
- Зеленый – обратное комптоновское рассеяние
- Голубой – тормозное излучение
- Синий – сумма компонент
- Коричневый – изотропный фон
- Оранжевый – дискретные источники
- Фиолетовый – полная сумма

Внутрний регион Галактики

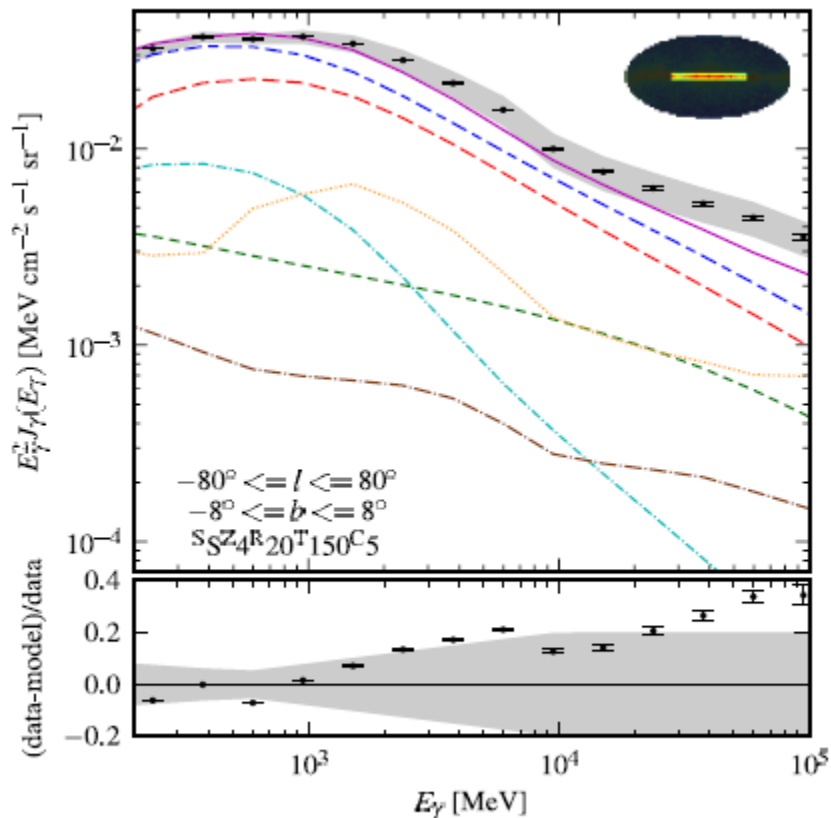


Figure 15. Spectra extracted from the inner Galaxy region for model $S_S^Z_4R_20T_150C_5$. See Figure 12 for legend.

- Красный – распад π^0
- Зеленый – обратное комптоновское рассеяние
- Голубой – тормозное излучение
- Синий – сумма компонент
- Коричневый – изотропный фон
- Оранжевый – дискретные источники
- Фиолетовый – полная сумма

Распределение по широте (внешняя часть Галактики)

- Красный – H I
- Голубой – H₂
- Розовый – H II
- Зеленый - IC
- Синий – сумма компонент
- Коричневый – изотропная компонента
- Оранжевый – дискретные источники
- Фиолетовый – полная сумма

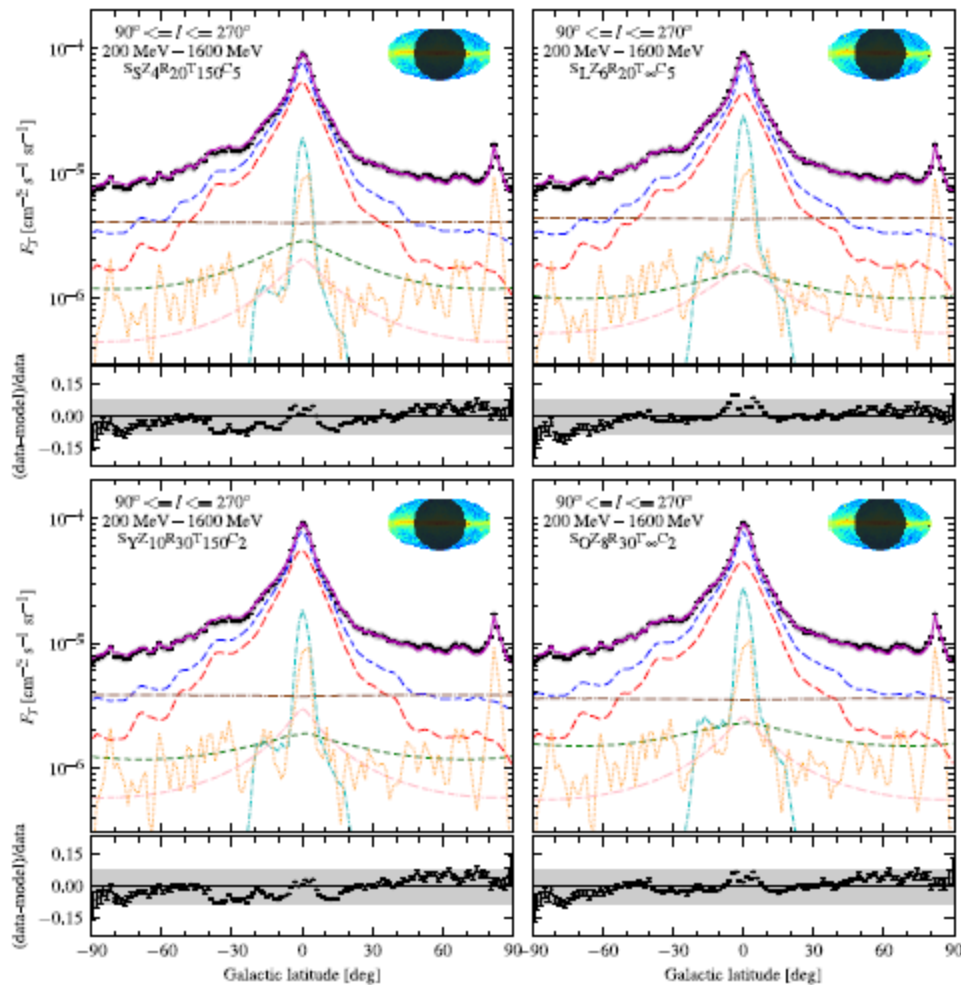


Figure 18. Latitude profile showing the outer Galaxy in the energy range 200 MeV–1.6 GeV. Shown are profiles for models $S^S_Z 4^R 20^T 150^C 5$ (top left), $S^S_L 6^R 20^T 00^C 5$ (top right), $S^S_Y 2^R 10^R 30^T 150^C 2$ (bottom left), and $S^S_O 8^R 30^T 00^C 2$ (bottom right). The DGE model is split into the three different gas components: H I (red, long-dashed), H₂ (cyan, dash-dotted), and H II (pink, long-dash-dash-dotted), and also IC (green, dashed). Also shown are the isotropic component (brown, long-dash-dotted), the detected sources (orange, dotted), total DGE (blue, long-dash-dotted), and total model (magenta, solid). *Fermi*-LAT data are shown as points with statistical error bars and the systematic uncertainty in the effective area is shown as a gray band. Due to the evenness of the sky exposure of the *Fermi*-LAT, the systematic error is not expected to be position dependent, only global normalization for the profile. The inset sky map in the top right corner shows the *Fermi*-LAT counts in the region plotted. The bottom panel shows fractional residuals (data – model)/data.

(A color version of this figure is available in the online journal.)

Распределение по широте (внутренняя часть Галактики)

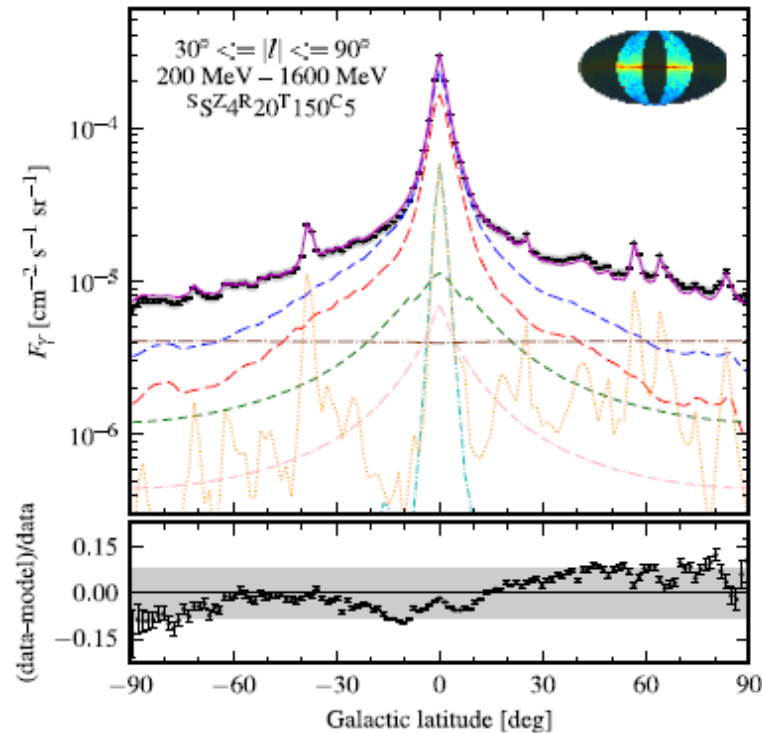
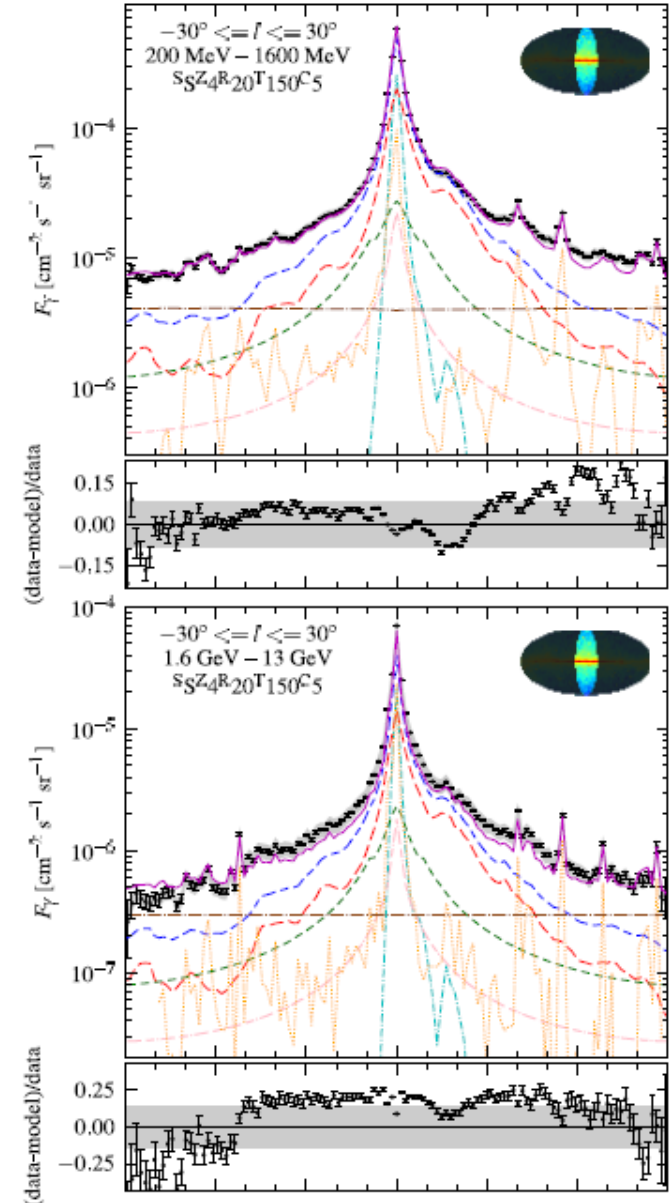


Figure 19. Latitude profile for model $S SZ4R20T150C5$ showing the inner Galaxy without the inner $\pm 30^\circ$ about the Galactic center for 200 MeV–1.6 GeV. See Figure 18 for legend.



Распределение по долготе

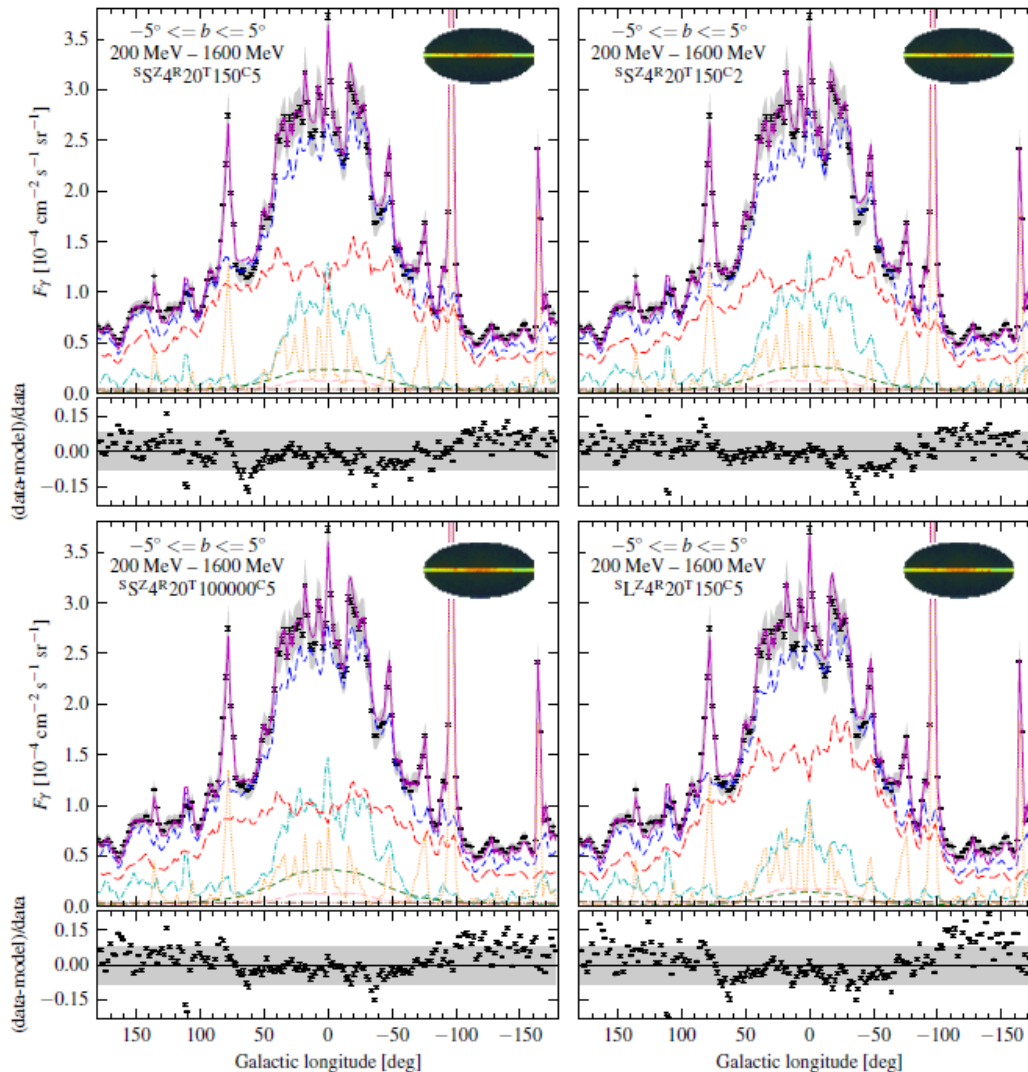


Figure 21. Longitude profile showing the Galactic plane in the energy range 200 MeV–1.6 GeV. Shown are profiles for model $S^{SZ4^R20^T150^C5}$ (top left), $S^{SZ4^R20^T150^C2}$ (top right), $S^{SZ4^R20^T100000^C5}$ (bottom left), and $S^{LZ4^R20^T150^C5}$ (bottom right). See Figure 18 for legend.

(A color version of this figure is available in the online journal.)

Многоволновой спектр Галактики

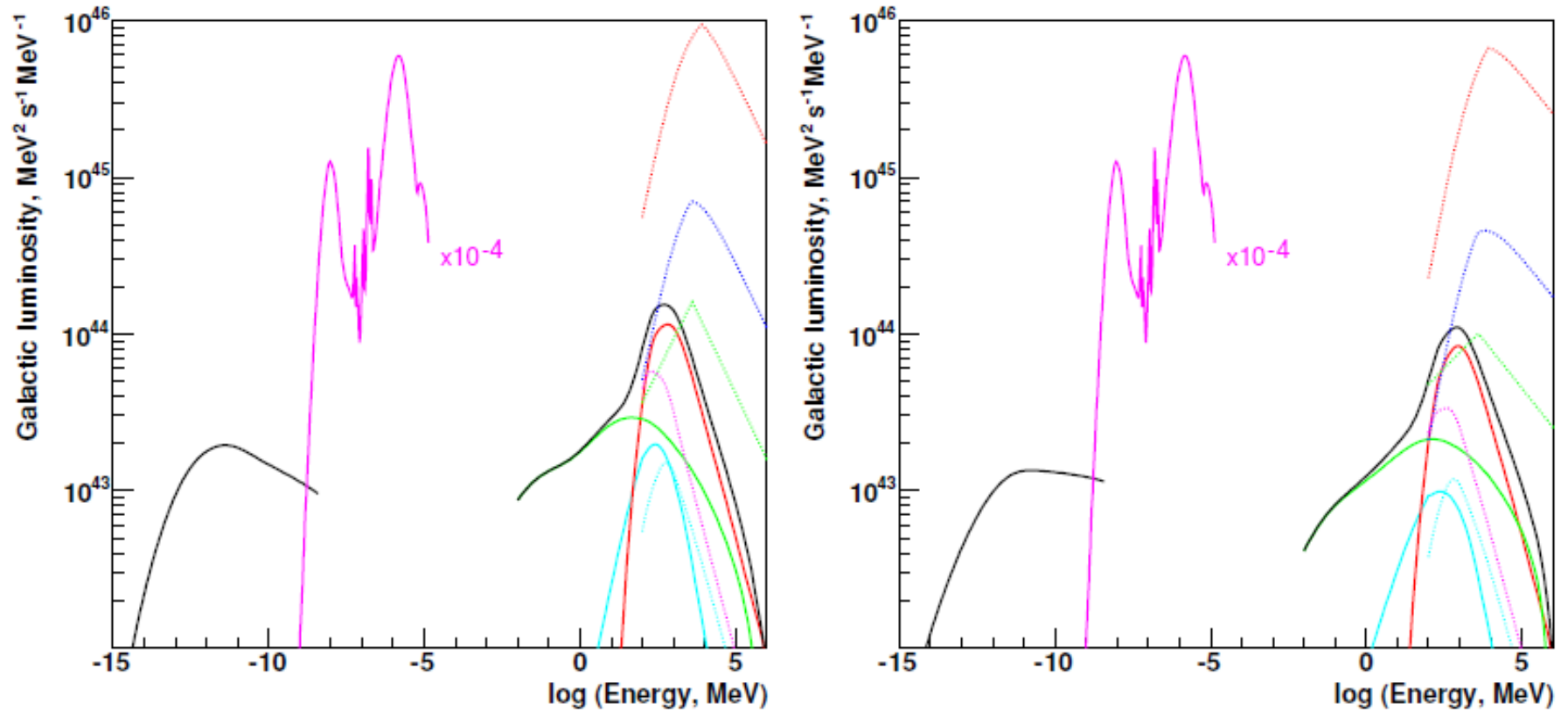


Figure 1. Global CR-induced luminosity spectra of the MW for DR propagation model (left panel) and PD propagation model (right panel) with $z_h = 4$ kpc. Line styles: ISRF, including optical and infrared scaled by a factor 10^{-4} (magenta solid), and components for model 2 are cosmic rays (dotted lines), protons (red), helium (blue), primary electrons (green), secondary electrons (cyan), and secondary positrons (magenta); CR-induced diffuse emissions (solid lines), IC (green), bremsstrahlung (cyan), π^0 -decay (red), synchrotron (black, the left side of figure), and total (black, the right side of figure).

Энергетический бюджет Галактики

- Светимость звезд Галактики
 $\sim 3\text{--}7 \times 10^{10} L_{\text{Sun}}$
 $(\sim 1\text{--}3 \times 10^{44} \text{ эрг/с})$
- SNe rate:
 $(1.9 \pm 1.1)/100 \text{ лет}$
- Энергия в КЛ на одну SN:
 $(0.3\text{--}1) \times 10^{50} \text{ эрг}$
 $(\sim 5\text{--}10\%)$

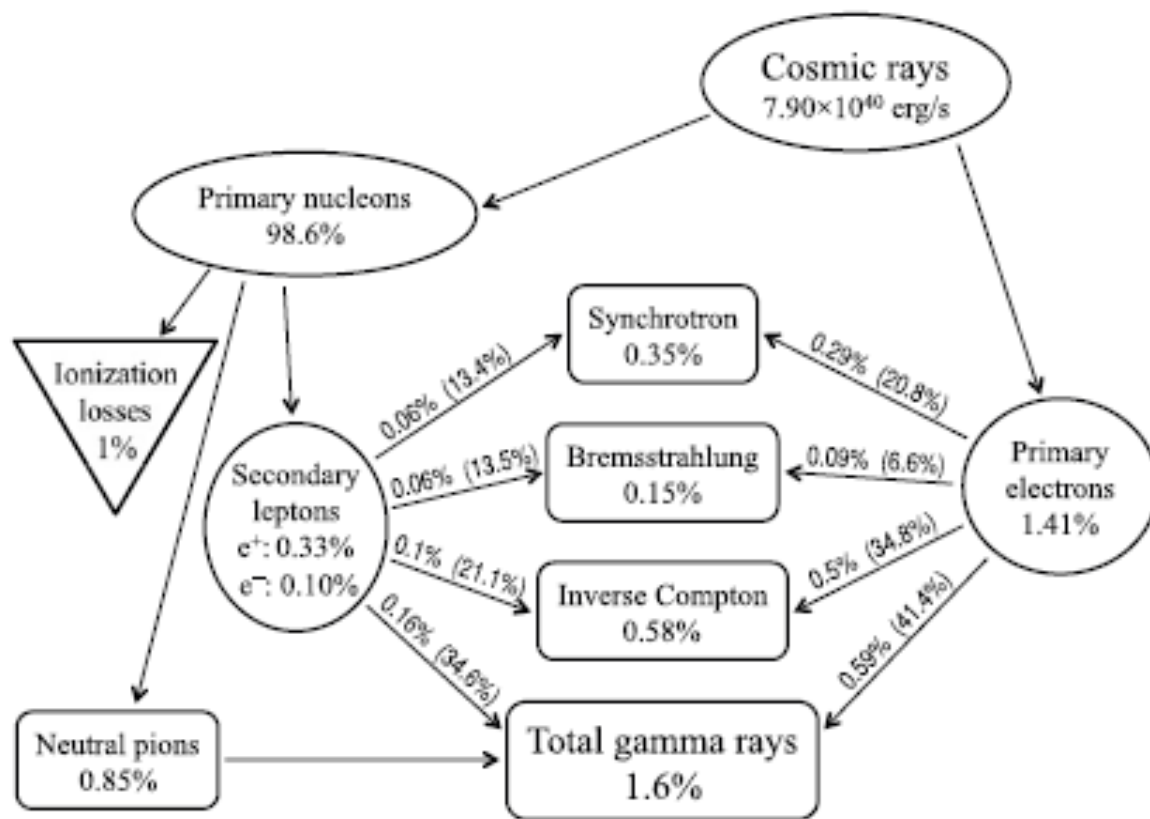


Figure 2. Luminosity budget of the MW for DR propagation model with $z_h = 4 \text{ kpc}$. The percentage figures are shown with respect to the total injected luminosity in CRs, $7.9 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$. The percentages in brackets show the values relative to the luminosity of their respective lepton populations (primary electrons, secondary electrons/positrons).

Итоги

- Основной вклад вносит распад π_0
- Вклад IC растет с ростом энергии
- Тормозное излучение вносит заметный вклад в область $< \sim 3$ ГэВ
- Наблюдается избыток в области ГэВ особенно во внутренней части Галактики: дискретные источники? (если пульсары, то не могут вносить значимый вклад в область $> \sim 10$ ГэВ) свежие источники КЛ с более жестким спектров во внутренних областях Галактики? Неточности в определении спектра КЛ по локальным измерениям?

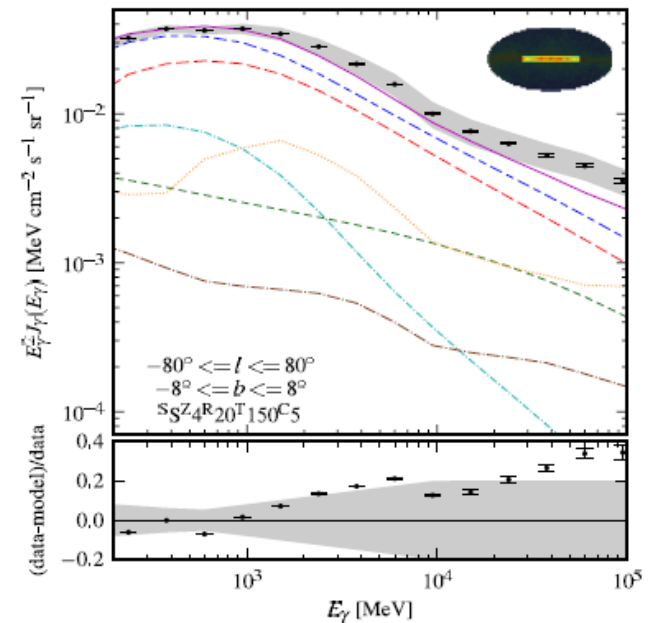
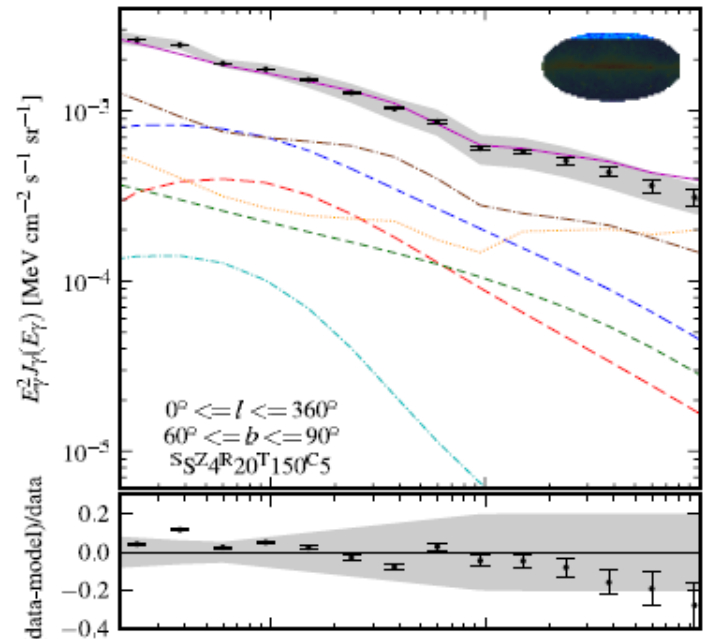


Figure 15. Spectra extracted from the inner Galaxy region for model $SSZ4R20T150C5$. See Figure 12 for legend.



Активные ядра галактик AGNs (active galactic nuclei)

- Что такое AGNs?
- Основные свойства AGNs
- Источник энергии AGNs
- Типы AGNs

AGNs с точки зрения наблюдений

- Объекты, которые с одной стороны выглядят как галактики, а с другой стороны кажутся звездными – показывают необычные спектры с сильными эмиссионными линиями, огромной светимостью и часто мощными джетами (струями) вещества из их центра
- Спектры очень сильно отличаются от звездных
- Сильное изменение яркости на масштабах ~месяца, т.е. $R \sim ct \sim 0.1$ св. года – очень компактная область излучения!

Основные принципы. I

- Все типы AGNs проявление одного и того же физического феномена: **аккреции вещества на центральную сверхмассивную черную дыру (SMBH)**
 $M \sim 10^9 M_{\text{Sun}}$
- Есть аккреция: AGN
- Нет аккреции: спящий AGN, галактика выглядит нормальной
- Т.е. AGN это временное состояние с коротким рабочим циклом
- Все галактики должны быть AGN в какой-то момент своей эволюции
- Взаимодействие/слияние галактик может быть триггером к аккреции на SMBH и породить AGN

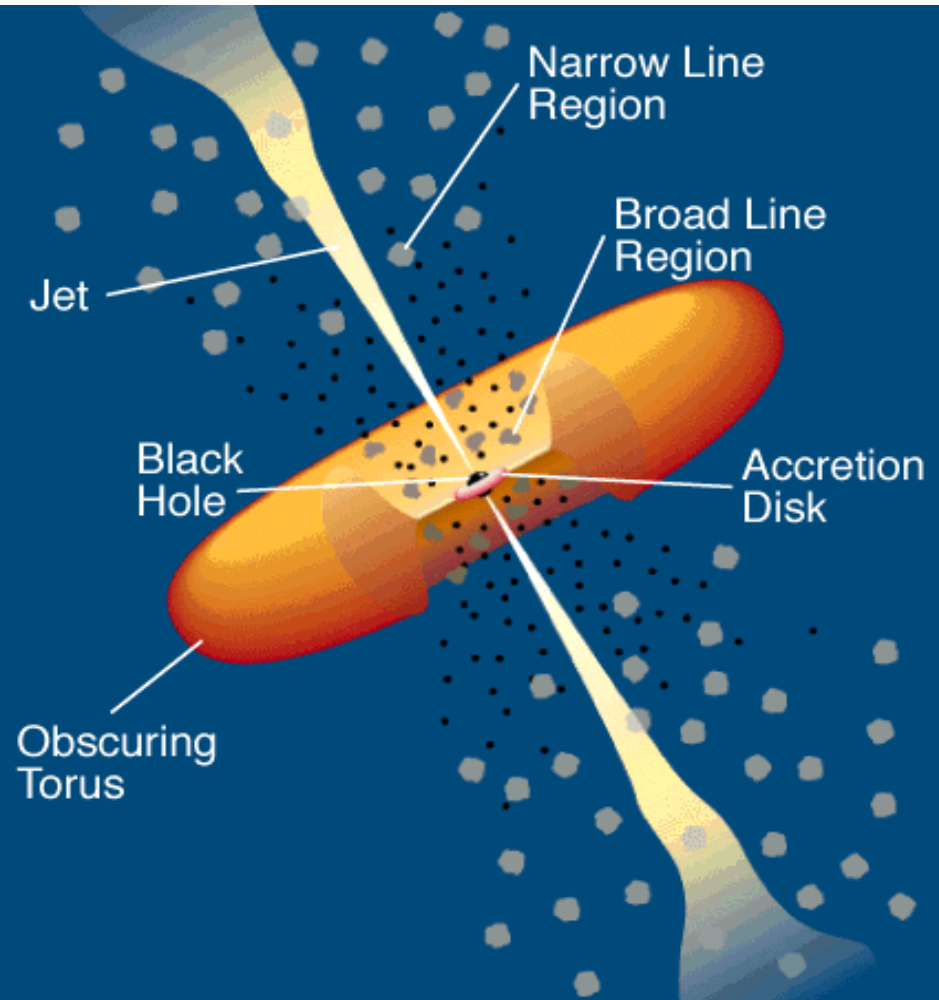
Основные принципы. II

- Все различные типы AGNs:
 - Liners (low-ionization nuclear emission-line region)
 - Сейфертовские галактики типа I и II
 - Радиогалактики
 - Квазары

различаются лишь комбинацией двух основных явлений:

- Темпом аккреции на SMBH: светимостью
- Ориентацией галактики/AGN по отношению к наблюдателя

Структура AGN



У всех AGNs есть:

1. SMBH
2. Аккреционный диск
3. Затеняющий тор
4. Область формирования узких эм. линий
5. Область формирования широких эм. линий
6. Джет

Численные параметры AGNs

- Светимость $L \sim 10^{42} - 10^{48}$ эрг/с
- Размер $\ll 1$ пс
- $M_{\text{SMBH}} \sim 10^6 - 10^9 M_{\text{Sun}}$
- Эддингтоновская светимость

$$F_{\text{rad}} = F_{\text{grav}}$$

$$L_{\text{Edd}} \sim 1.3 \times 10^{38} (M/M_{\text{Sun}}) \text{ эрг/с}$$

Сейфертовские галактики

- Одна из двух самых многочисленных групп AGNs наряду с квазарами
- ~10% всех галактик
- Спиральные галактики с очень ярким звездоподобным центром (ядром)
- Светимость ядра сравнима со светимостью всех остальных звезд галактики
- Очень яркие в инфракрасном диапазоне
- В спектре видны сильные эмиссионные линии



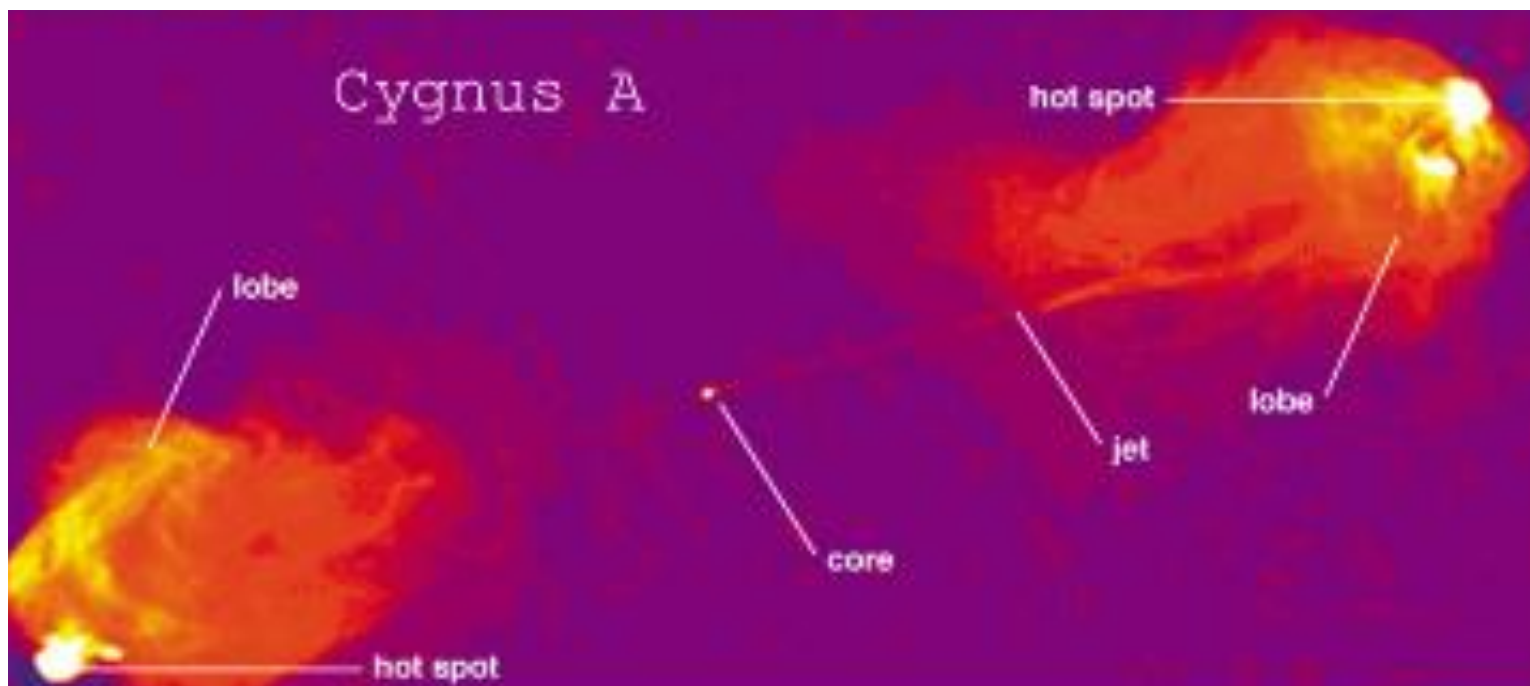
NGC 1068 (Messier 77)

Квазары (QSO)

- В начале 1960х Мартин Шмидт идентифицировал радиоисточник 3C 273 со слабой голубой звездой
 - спектр «звезды» показывал эмиссионные линии
 - Длины волн этих линий не соответствовали ни одному известному элементу
- Шмидт понял, что это линии водорода, сильно сдвинутые в красную сторону
- Quasi-stellar radio sources = quasars
- В отличии от сейфертовских галактик светимость ярда в QSOs в >100 раз выше светимости всех звезд галактики (т.е. саму галактику трудно увидеть)
- Светимость QSOs в среднем выше, чем светимость Сейфертовских галактик

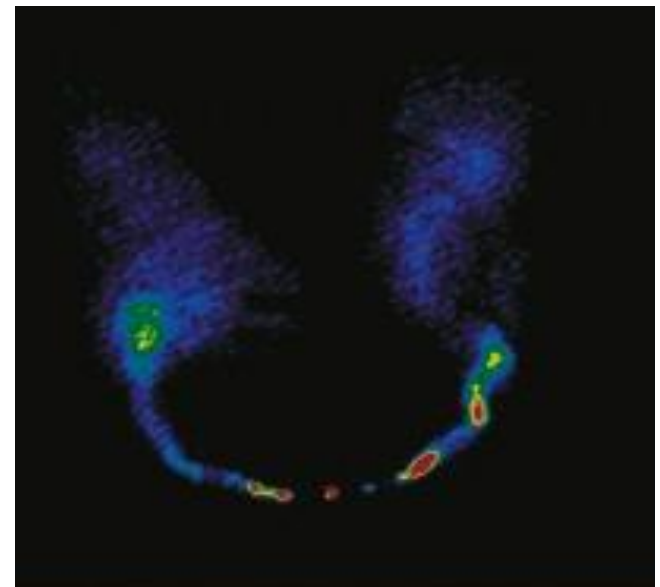
Радиогалактики

- Сильно излучают в радиодиапазоне
- Радиоизлучение приходит из лобов (lobes) с разных сторон галактики, а не из самой галактики



Радиогалактики

- Виден джет
- Часто сама галактика является эллиптической (на картинке джет из M87 – 1.5 кпк, HST)
- Формы лобов бывают разными – в данном примере (NGC 1265) загнуты назад из-за движения галактики в межгалактической среде



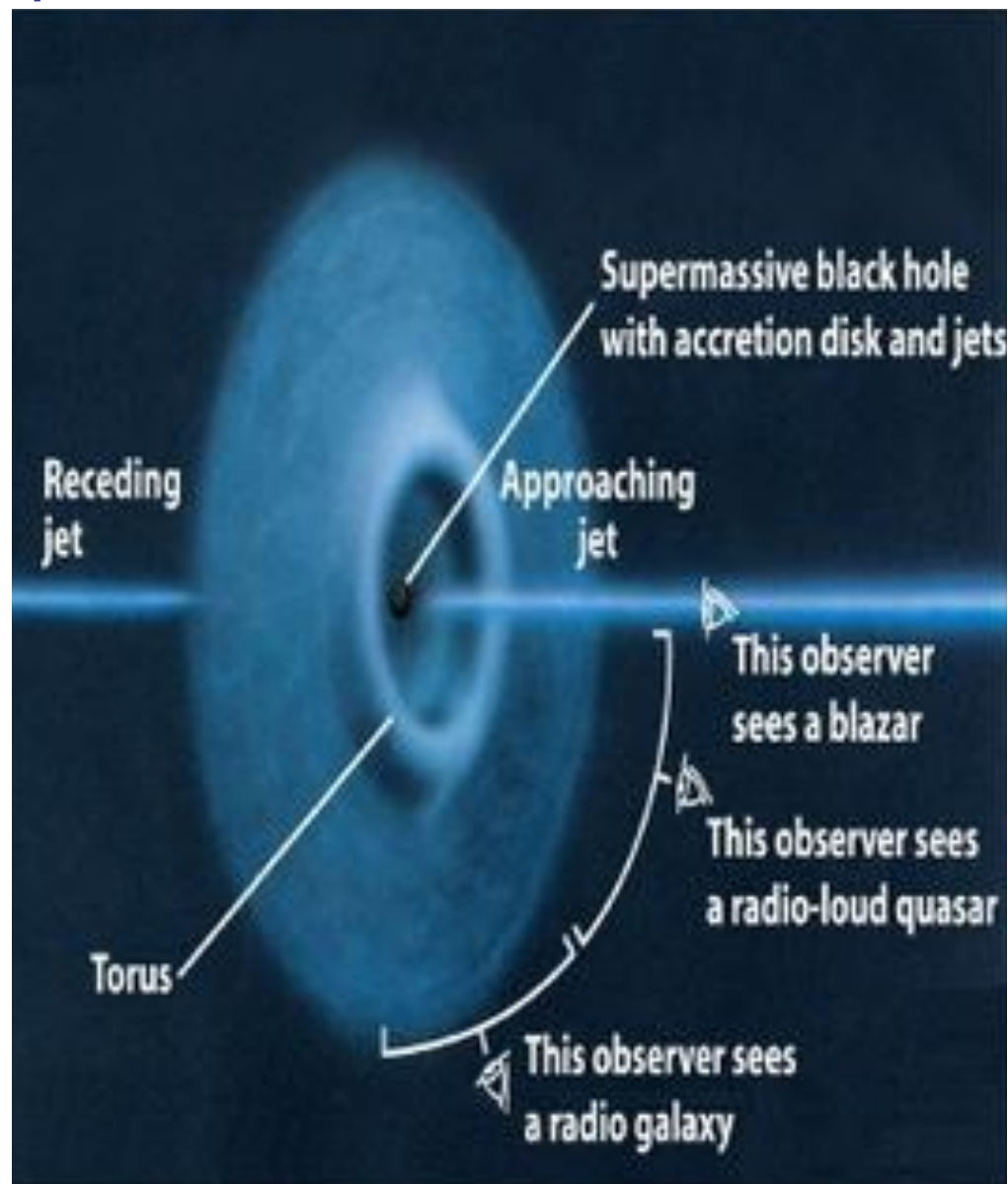
Блазары

- Тип AGN, включающий в себя объекты типа BL Lac и FSRQ (flat spectrum radio quasars)
- Демонстрируют быструю переменность (дни и меньше)
- Яркие гамма-источники
- Релятивистский джет (струи) направлен на нас.
- Все, кроме самых ярких, излучают основную часть электромагнитной энергии в области гамма-диапазона.
- Самые многочисленные внегалактические объекты, зарегистрированные LAT и наземными гамма-телескопами

BL Lacertae

- По имени BL Lac (BL Ящерицы) – сначала был принят за переменную звезду (блеск меняется от $m = 14$ до $m = 17$)
- Позже идентифицирован с ярким переменным радиоисточником и слабой галактикой на $z = 0.069$
- В спектре отсутствуют широкие эмиссионные линии, видные в спектрах квазаров

Унификация типов AGNs

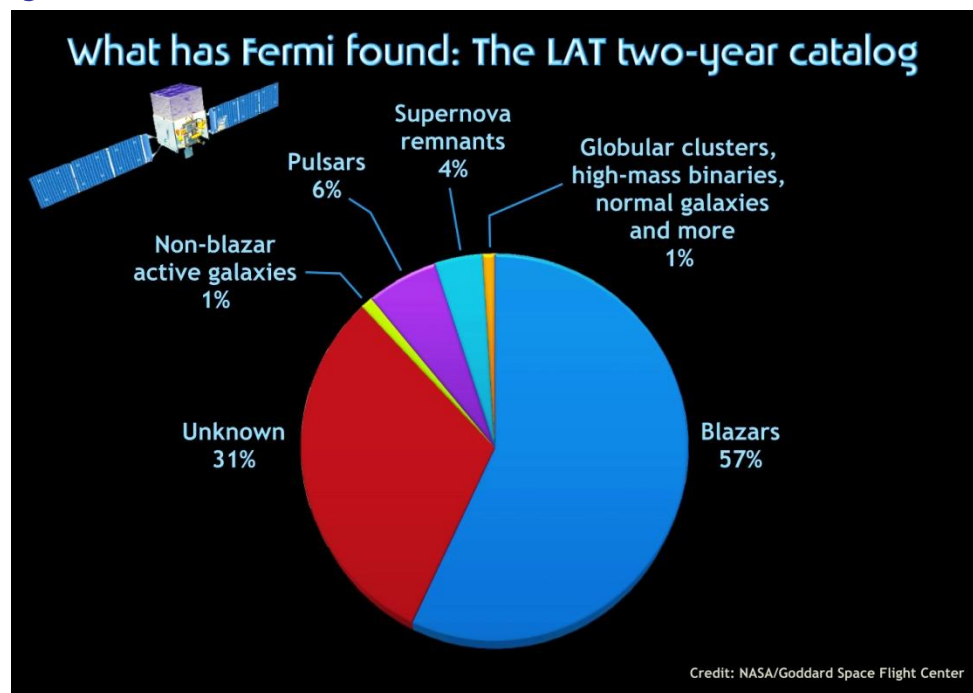


Внегалактические источники гамма-излучения

2ой LAT каталог

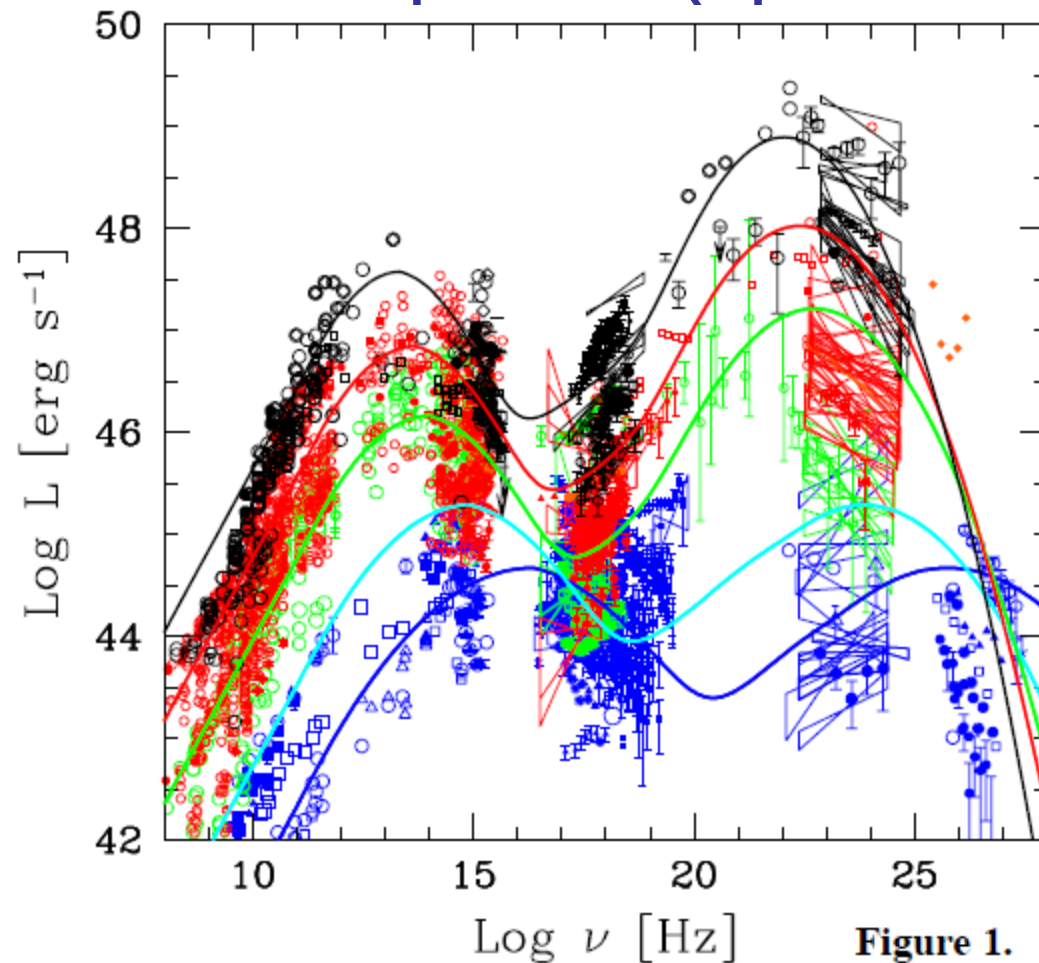
886 AGNs:
395 BL Lac
310 FSRQ
157 кандидатов в
блазары
8 misaligned AGNs
4 NLSF1
10 AGNs других типов
2 starburst galaxies

Т.е. > 95% блазары



За исключением двух starburst galaxies (NGC 253 и M82)
все внегалактические источники
зарегистрированные на ТэВ-ных энергиях
- AGNs:
4 радио-галактики и 44 блазара (ноябрь 2011).

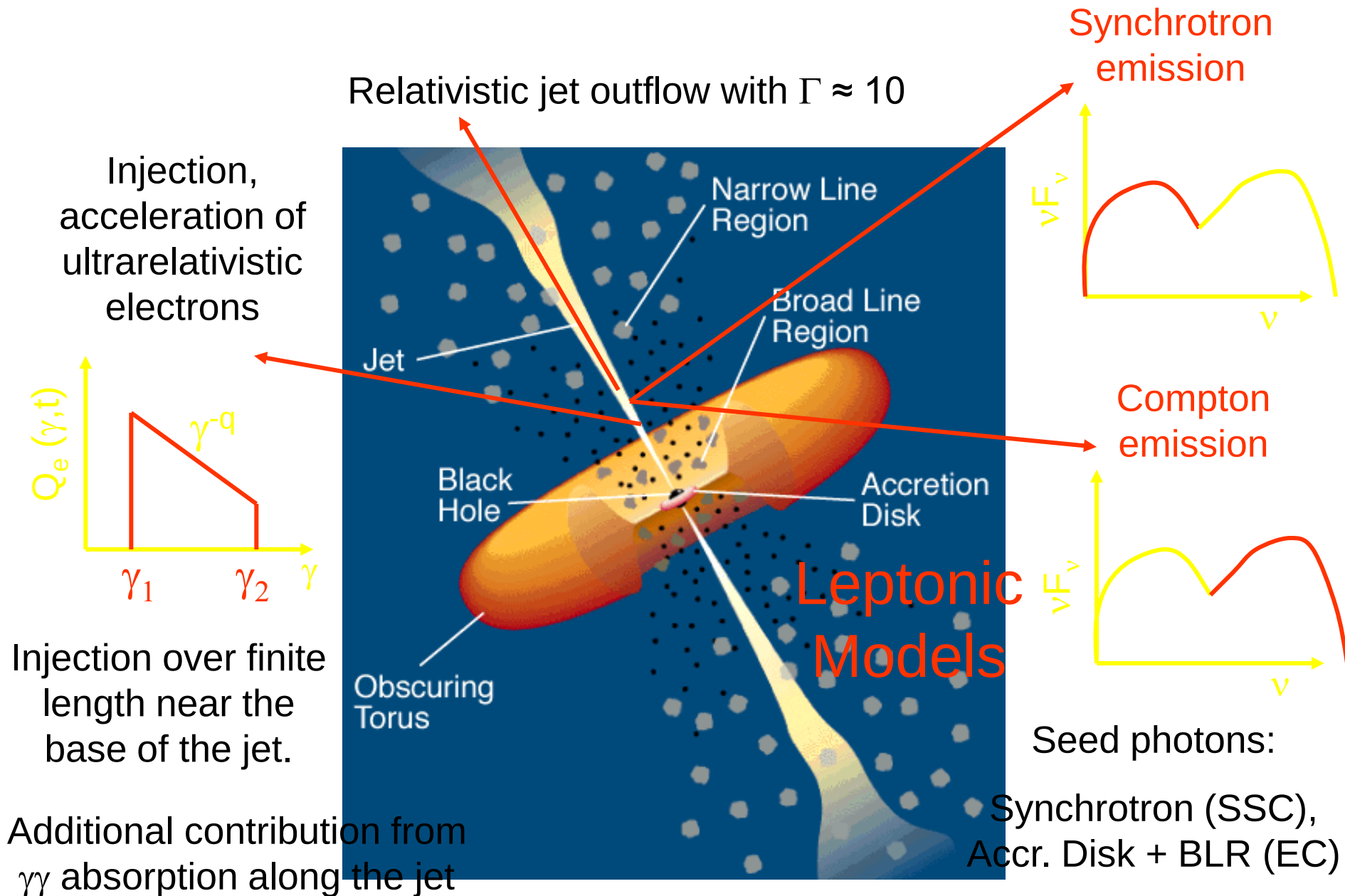
Блазар SED (spectral energy distribution)



$$1 \text{ Гц} \rightarrow 4 \times 10^{-15} \text{ эВ}$$

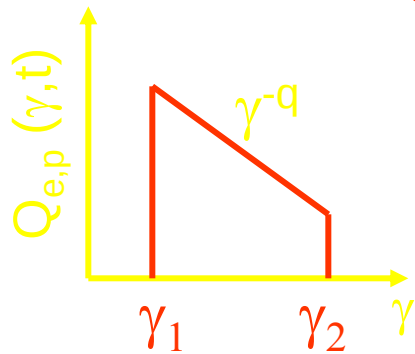
Figure 1. All blazar SED detected in the first three months of operations divided according to their luminosity in the LAT band (0.1–100 GeV): $\log L_\gamma < 45.5$ (blue); $45.5 < \log L_\gamma < 46.5$ (green); $46.5 < \log L_\gamma < 47.5$ (red); $\log L_\gamma > 48$ (black). Solid lines are the phenomenological models in [26], that divided the blazars according to their *radio* luminosity, assumed to be a good tracer of the bolometric one. Luminosities in erg s^{-1} .

Blazar Models

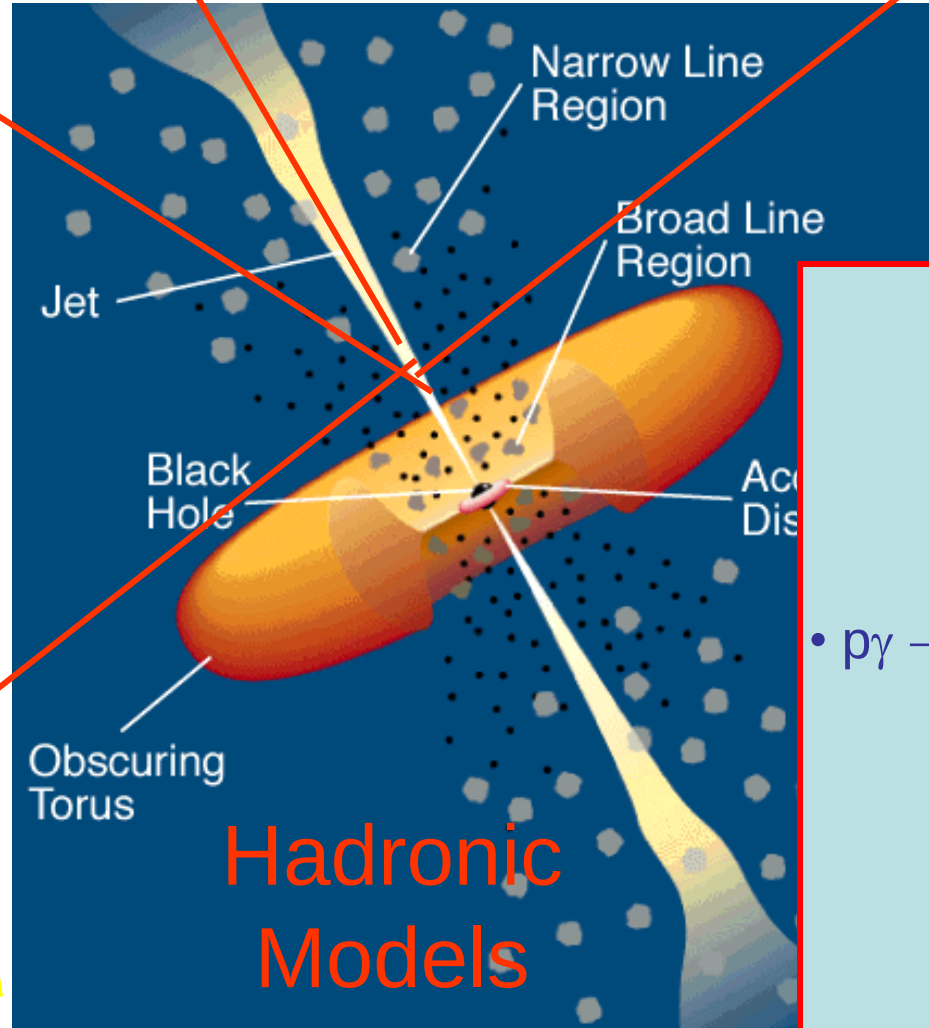


Blazar Models

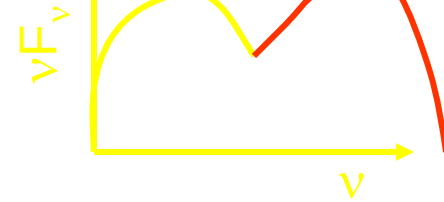
Injection,
acceleration of
ultrarelativistic
electrons **and**
protons



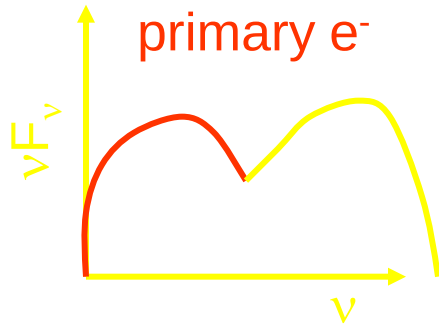
Relativistic jet outflow with $\Gamma \approx 10$



Proton-
induced
radiation
mechanisms:



Synchrotron
emission of
primary e^-



- Proton synchrotron
- $p\gamma \rightarrow p\pi^0$
 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
- $p\gamma \rightarrow n\pi^+$; $\pi^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$
 $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu$
→ secondary μ^- ,
e-synchrotron
- Cascades ...

Spectral modeling results along the Blazar Sequence: Leptonic Models

Low magnetic fields
(~ 0.1 G);

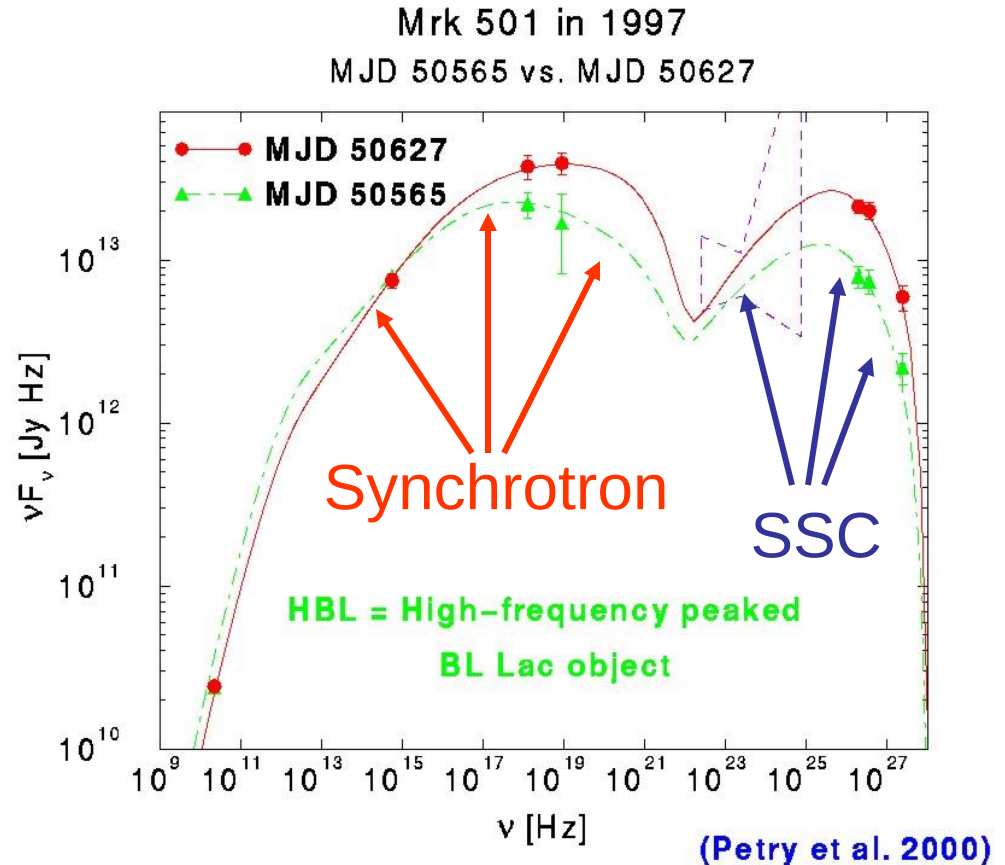
High electron
energies (up to TeV);

Large bulk Lorentz
factors ($\Gamma > 10$)



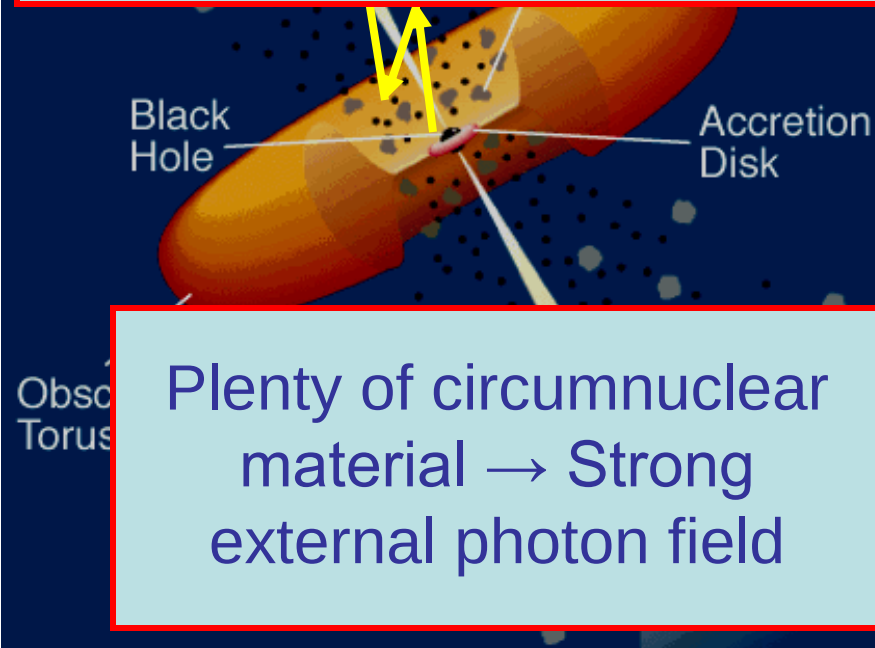
No dense
circumnuclear material
→ No strong external
photon field

High-frequency peaked
BL Lac (HBL):

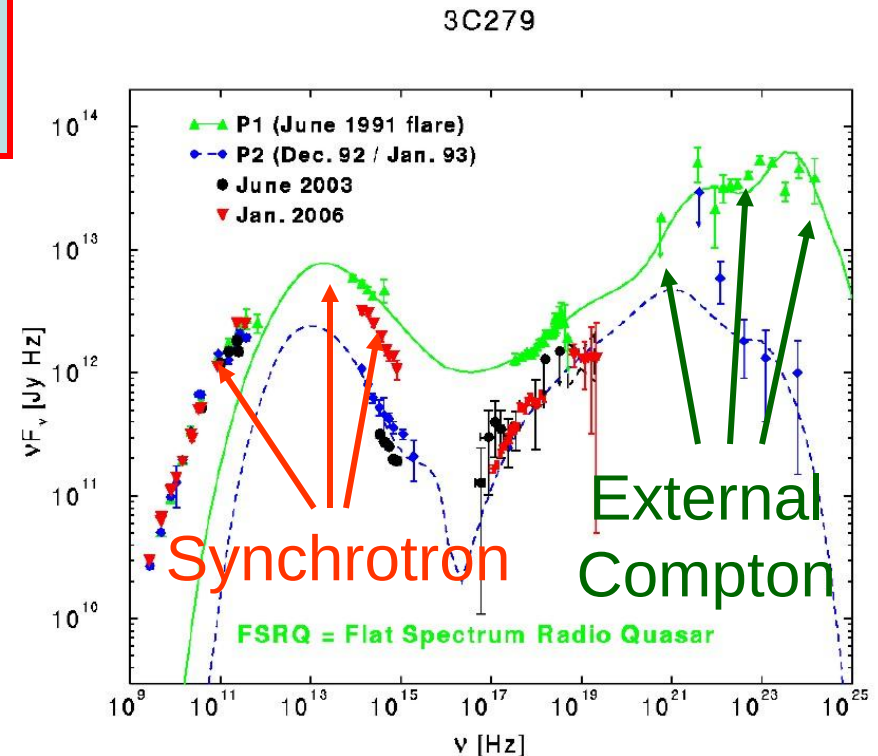


Spectral modeling results along the Blazar Sequence: Leptonic Models

High magnetic fields ($\sim$ a few G);
Lower electron energies (up to GeV);
Lower bulk Lorentz factors ($\Gamma \sim 10$)



Radio Quasar (FSRQ)



Modeling of 3C66A in 2003-2004

Time-dependent broadband SED

Model parameters:

$$D = \Gamma = 24$$

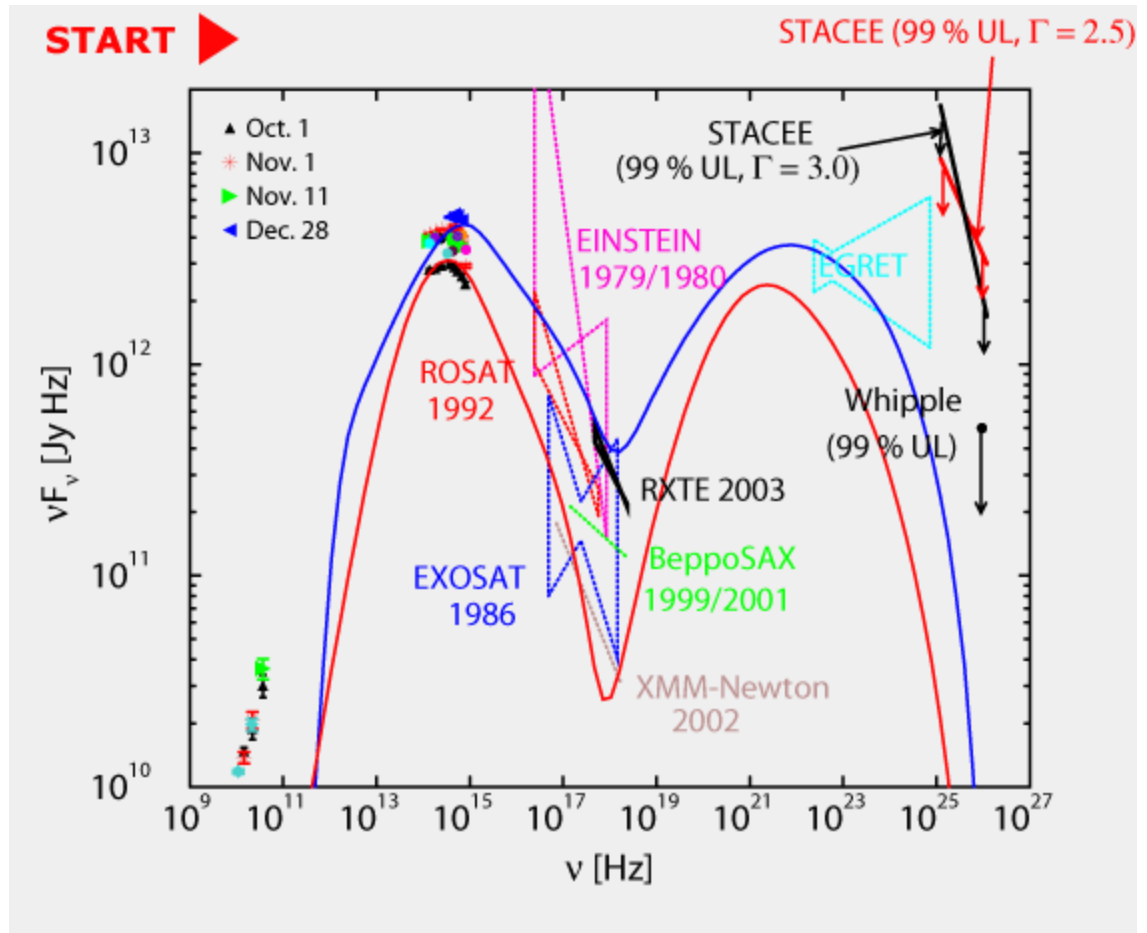
$$R_B = 3.6 \cdot 10^{15} \text{ cm}$$

$$B = 2.4 \text{ G}$$

$$q = 3.1 \rightarrow 2.4$$

$$\gamma_2 = 3.0 \cdot 10^4 \rightarrow 4.5 \cdot 10^4$$

$$L_{\text{inj}} = 2.7 \cdot 10^{41} \text{ erg/s} \rightarrow 7.0 \cdot 10^{41} \text{ erg/s}$$



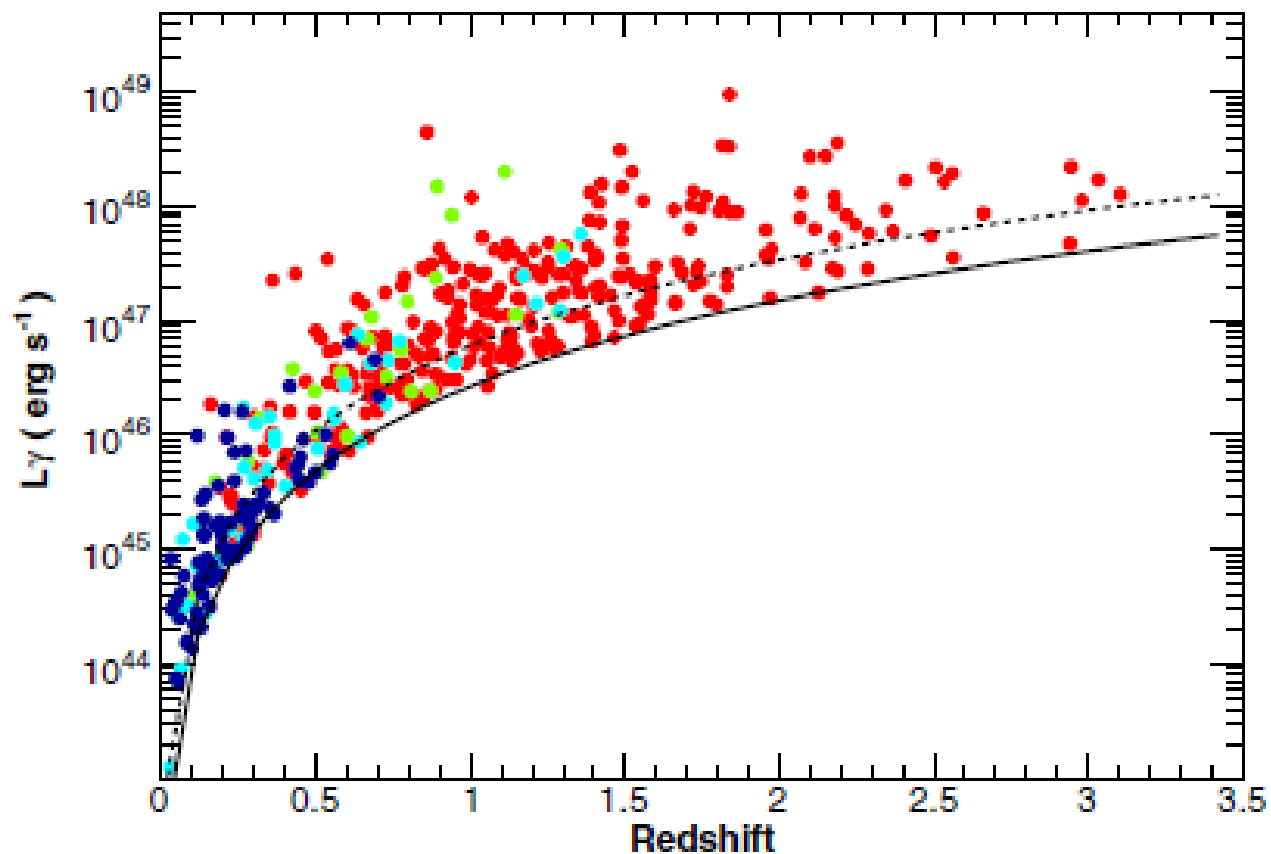


Figure 36. Gamma-ray luminosity vs. redshift. Red: FSRQs, blue: BL Lac objects. The solid (dashed) curve represents the approximate detection limit for $\Gamma = 1.8$ ($\Gamma = 2.2$).

Итоги

- BL Lac – относительно малая гамма-светимость; FSQR – высокая гамма-светимость. Возможно объясняется разницей в режиме аккреции: от радиационно неэффективного к радиационно эффективному аккр. диску при светимости диска $\sim 1\% L_{\text{edd}}$
- В большинстве джетов излучение основной доли энергии происходит в одной области на расстоянии $\sim 10^3 R_g$
- В самых ярких квазарах пик SED приходится на «красную» область спектра, что позволяет видеть излучение аккреционного диска. По светимости и частотному пику можно определить $\dot{M}$ и $d\dot{M}/dt$. При этом оказывается, что энергия джета и светимость диска коррелируют, т.е. джет и аккреция взаимосвязаны. Однако часто энергетика джета выше, чем светимость диска, т.е. аккреция не может быть единственным источником энергии джета. Возможно аккреция усиливает магнитное поле вблизи грав. радиуса и это поле потом извлекает энергию вращения ЧД.

Итоги (окончание)

- Т.к. блазары обладают очень высокой яркостью, то могут быть видны на больших z . Это дает возможность измерять массы ЧД на больших z и изучать их эволюцию во времени

Over half the bright sources seen with LAT appear to be associated with Active Galactic Nuclei (AGN)

- Power comes from material falling toward a supermassive black hole
- Some of this energy fuels a jet of high-energy particles that travel at nearly the speed of light

How black holes, which pull things in, can produce jets, which shoot material away, is still not fully understood. It is probably related to rotation and magnetic fields.