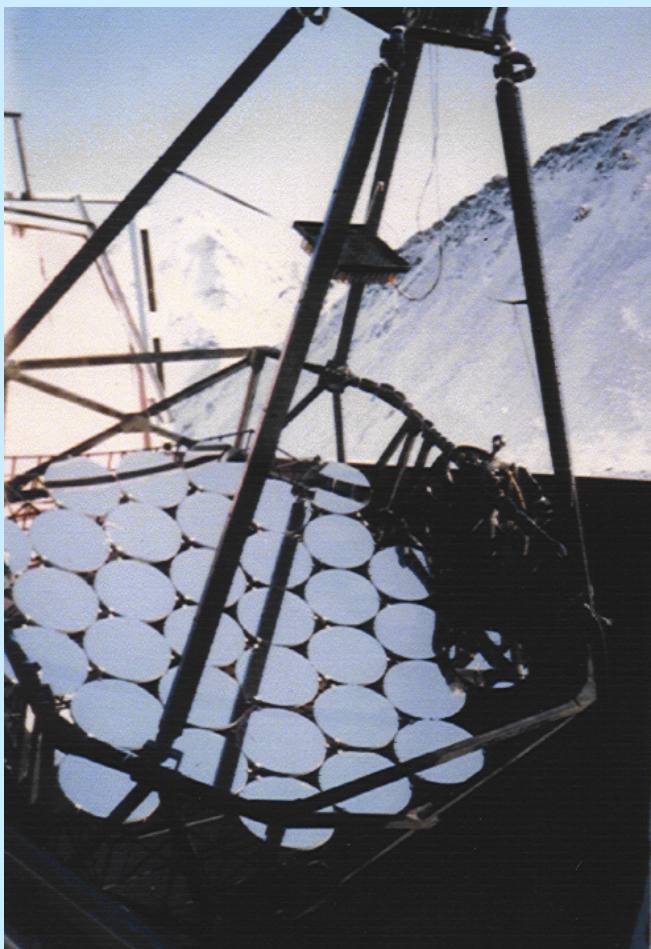




**Изучение внегалактического фонового
излучения в наблюдениях
далёких Активных Галактических Ядер
при сверхвысоких энергиях**

В.Г. Синицина, В.Ю. Синицина

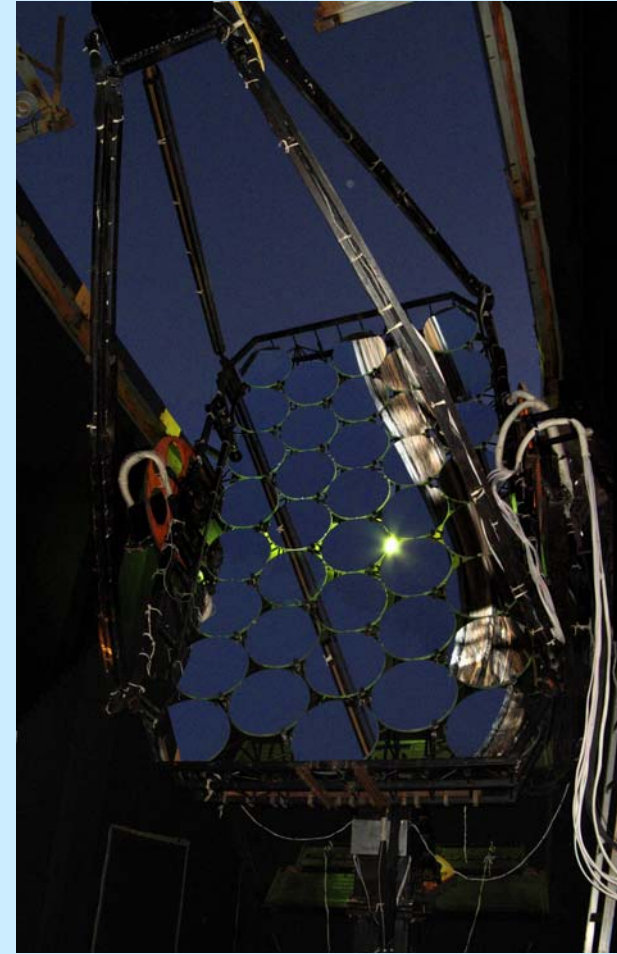
Физический институт им. П.Н. Лебедева



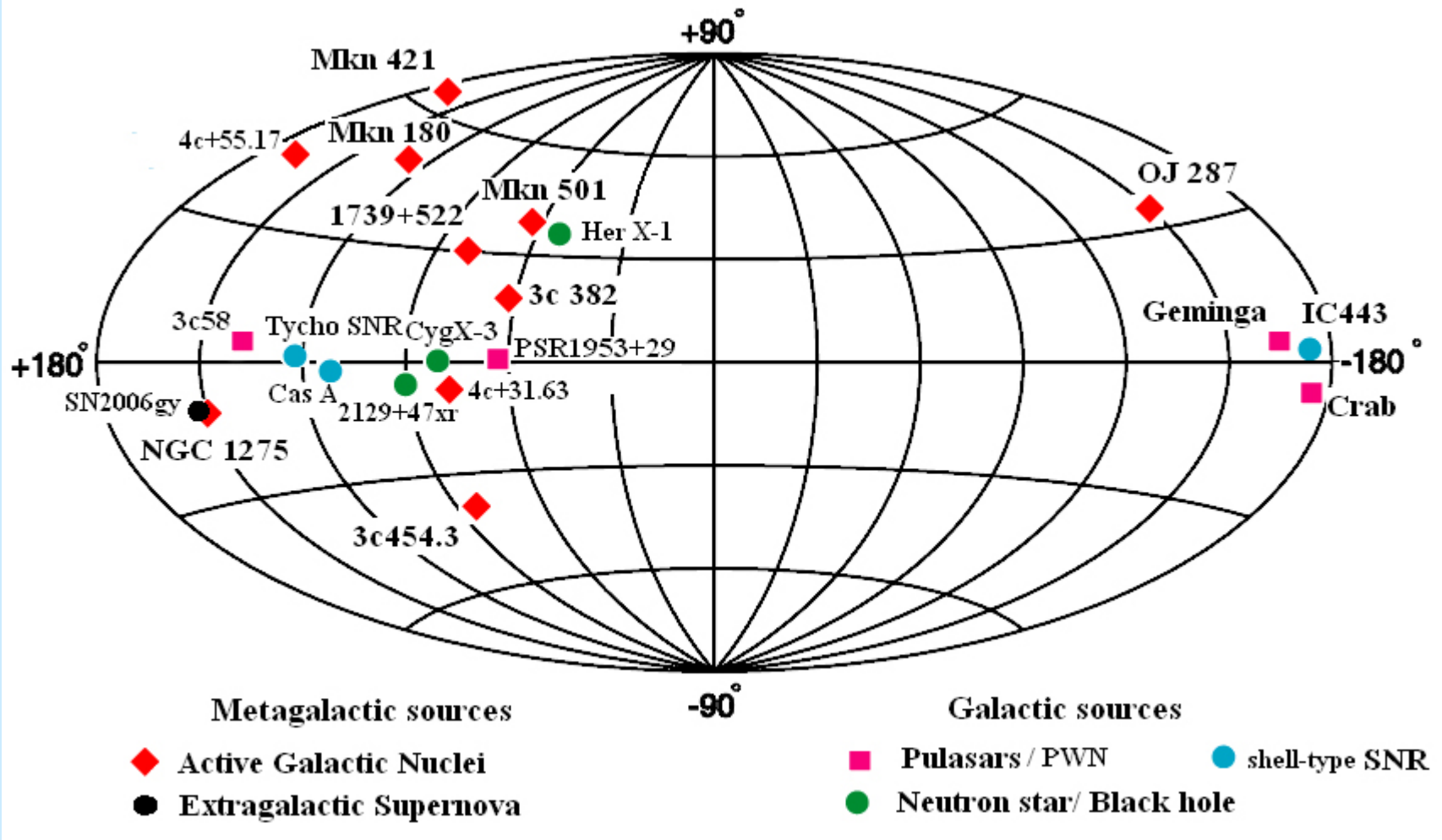


Very high energy gamma-ray emission of metagalactic sources

На телескопах ШАЛОН проводится исследование скоплений галактик, природы ядер галактик и космических источников с экстремальным энерговыделением, а также изучение межзвездной и межгалактической среды по наблюдениям внегалактических объектов при сверхвысоких энергиях 800 ГэВ – 100 ТэВ. Наблюдения активных галактических ядер необходимы и для изучения межгалактического фонового излучения. В настоящее время на телескопах ШАЛОН исследуются источники с красным смещением от $z=0.0179$ до $z=1.375$.



SHALON sky-map catalogue of γ -quantum sources 800 GeV – 100TeV (2013)



SHALON catalogue of metagalactic γ -quantum sources 800 GeV – 100TeV (2013)

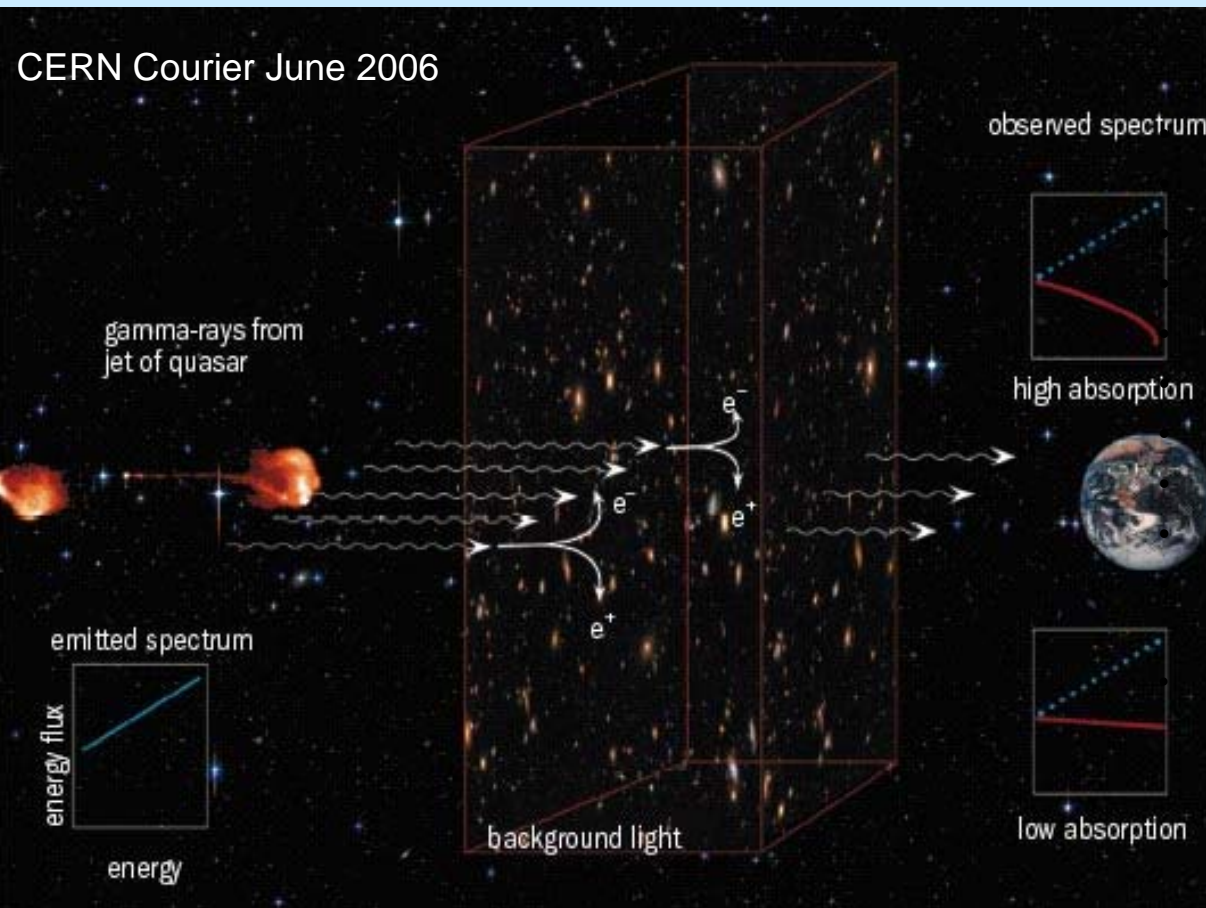
Source	Source type	Observed Flux, $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Distance		Detected** by SHALON	Detected at high energies Experiment/year	Detected at very high energies Experiment/year
			<i>Mpc</i>	<i>z</i>			
* NGC 1275	Seyfert Galaxy	$(0.78\pm 0.05) \times 10^{-12}$	71	0.0179	1997 ³	FermiLAT/2009 ³¹	MAGIC/2012 ³²
* SN2006 gy	Extragalactic Supernova	$(3.71\pm 0.65) \times 10^{-12}$	73	0.019	2007 ⁹	–	–
Mkn 421	BLLac	$(0.63\pm 0.05) \times 10^{-12}$	124	0.031	1995 ¹	EGRET/1992 ³⁵	Whipple/1992 ³³
Mkn 501	BLLac	$(0.86\pm 0.06) \times 10^{-12}$	135	0.034	1997 ^{1a}	EGRET/1999 ³⁷	Whipple/1996 ³⁴
Mkn 180	BLLac	$(0.65\pm 0.09) \times 10^{-12}$	173	0.046	2009 ¹⁰	FermiLAT/2009 ³⁹	MAGIC/2006 ³⁸
* 3c382	Radio Galaxy	$(0.95\pm 0.20) \times 10^{-12}$	230	0.058	2010 ¹¹	(<i>FermiLAT UL</i>) ⁴⁰	–
* 4c+31.63	FSRQ	$(0.72\pm 0.22) \times 10^{-12}$	1509	0.295	2013	FermiLAT/2010 ⁴⁷	–
* OJ 287	BLLac	$(0.26\pm 0.07) \times 10^{-12}$	1576	0.306	2005 ⁸ (<i>UL</i>) 2010 ¹¹	FermiLAT/2009 ⁴¹	(<i>MAGIC / 2009 UL</i>) ⁴²
* 3c454.3	FSRQ	$(0.43\pm 0.07) \times 10^{-12}$	5489	0.859	2000 ⁶	FermiLAT/2009 ⁴⁴	(<i>MAGIC / 2009 UL</i>) ⁴⁵
* 4c+55.17	FSRQ	$(0.91\pm 0.25) \times 10^{-12}$	5785	0.896	2013	FermiLAT/2011 ⁴³	–
*1739+522 (4c+51.37)	FSRQ	$(0.49\pm 0.05) \times 10^{-12}$	9913	1.375	2000 ⁶	FermiLAT/2010 ⁴⁶	–



МЕТАГАЛАКТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ГАММА-КВАНТОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1-100ТэВ

Наблюдения активных галактических ядер также может использоваться для изучения фонового излучения. Фоновое излучение состоит из излучения галактик, звёзд и горячей пыли, производимого за всю историю Вселенной. Его спектр содержит информацию о скорости формирования звёзд и галактик на ранних стадиях развития Вселенной. ТэВ-ные фотоны от далёких источников взаимодействуют, в основном, с инфракрасным фоном фотонов путём резонансного процесса $\gamma + \gamma \rightarrow e^+e^-$. Затем, всё ещё релятивистские, электроны сами могут излучать гамма-кванты меньших энергий, чем первичный, и.т.д., В результате, первичный спектр источника становится искаженным в зависимости от спектра фонового излучения. Таким образом, жёсткие спектры наблюдаемых АГЯ с красным смещением 1.6 – 1.8 позволят определить поглощение на межгалактическом фоновом излучении (EBL) в видимой – инфракрасной области энергий.

CERN Courier June 2006



За период с 1992-2014 гг. наблюдались 11 метagalacticких источников:

NGC 1275	$z = 0.0179$;
SN 2006gy	$z = 0.019$;
Mkn 421	$z = 0.031$;
Mkn 501	$z = 0.034$;
Mkn 180	$z = 0.046$;
3c382	$z = 0.0578$;
4c+31.63	$z = 0.295$
OJ 287	$z = 0.306$;
3c454.3	$z = 0.859$;
4c+55.17	$z = 0.896$
1739+522	$z = 1.375$;

Существование далёких источников в ТэВ-ном диапазоне энергий говорит о том, что Вселенная более прозрачна для гамма-квантов сверхвысоких энергий, чем это предполагалось ранее, на основании прямых измерений и модельных предсказаний EBL.

Extragalactic Background Light

На телескопах ШАЛОН исследуются источники с красным смещением от $z=0.0179$ до $z=1.375$. Среди них такие известные и яркие блазары как Mkn 421 ($z=0.031$), Mkn 501 ($z=0.034$), Mkn 180 ($z=0.045$) и далёкие, яркие FSRQ - радио квазары с плоскими спектрами 3c454.3 ($z=0.859$), 1739+522 ($z=1.375$), чьи спектры при сверхвысоких энергиях известны из наблюдений ШАЛОН вплоть до 20 – 40 ТэВ. Как видно из приведённых данных, полученные энергетические спектры гамма-квантов далёких и близких источников во всём диапазоне энергий хорошо описывается степенным законом с экспоненциальным обрезанием :

$F(> E) \sim E^{-\gamma} \times \exp(-E/E_{\text{cutoff}})$ с показателем степенной функции

$\gamma \sim 1.55$ для Mkn 421 и Mkn 501;

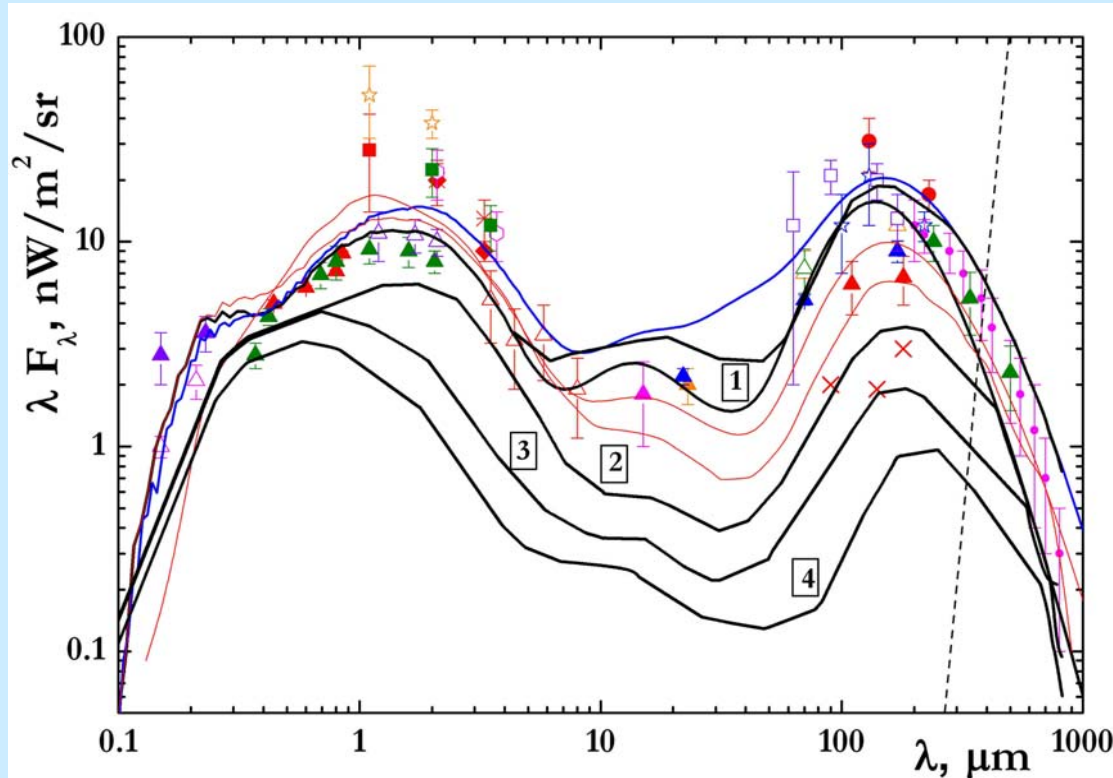
$\gamma \sim 0.6$ для 3c454.3 и 1739+522.

Значение E_{cutoff} имеет величину 11 ± 2 TeV для Mkn421, Mkn 501 и 7 ± 2 TeV для далёких источников.

Table Parameters for spectrum fitting in form of $F(> E) \sim E^{-\gamma} \times \exp(-E/E_{\text{cutoff}})$

Source	z	γ	E_{cutoff} TeV
NGC 1275	0.0179	2.18 ± 0.12	32.5 ± 7.5
SN2006 gy	0.019	3.10 ± 0.30	4.4 ± 1.9
Mkn 421	0.031	1.51 ± 0.18	10.2 ± 3.1
Mkn 501	0.034	1.48 ± 0.15	11.1 ± 3.0
Mkn 180	0.046	1.84 ± 0.15	7.3 ± 2.2
OJ287	0.306	1.14 ± 0.11	9.5 ± 1.2
3c454.3	0.859	0.52 ± 0.12	6.2 ± 1.0
1739+522	1.375	0.50 ± 0.18	6.1 ± 1.2

Extragalactic Background Light



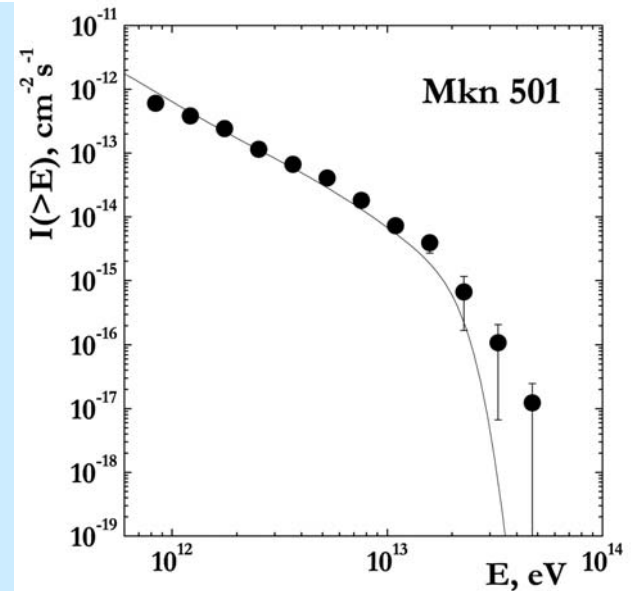
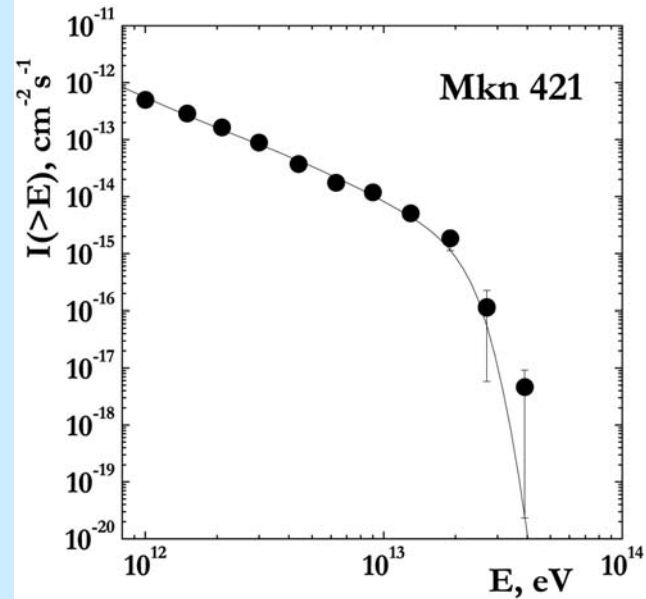
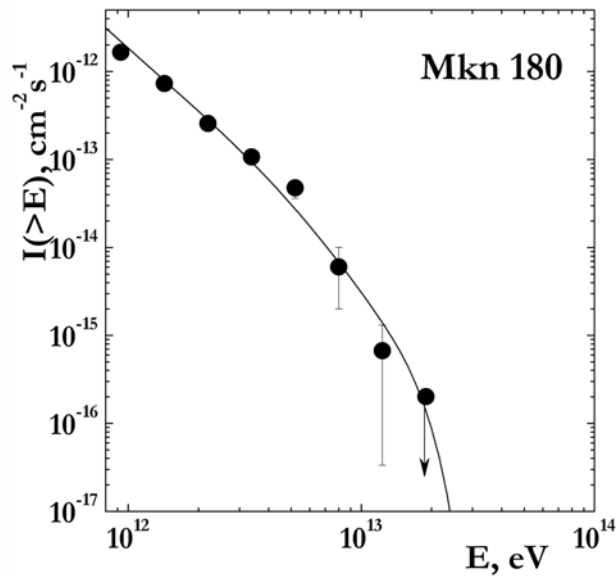
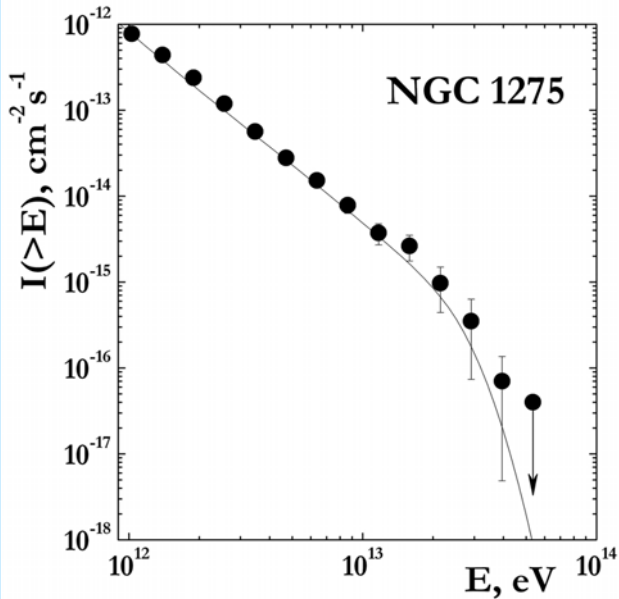
Спектральное энергетическое распределение внегалактического фонового излучения (EBL): модели [Stecker et. al, 2006, Kneiske et. al 2004], экспериментальные данные [R.C. Gilmore, et al., ArXiv:1104.0671]; **1** – усреднённый спектр EBL из best-fit model и Low-SFR model, а также восстановленный спектр EBL из наблюдений **ШАЛОН**: NGC1275, Mkn421, Mkn501 и Mkn180; спектры EBL восстановленные из наблюдений **ШАЛОН**: **2** – OJ 287 ($z=0.306$); **3** – 3c454.3 ($z=0.859$), 4c+55.17 ($z=0.896$); **4** – 1739+522 ($z=1.375$).

В эксперименте **ШАЛОН**, при энергиях 800 ГэВ – 100 ТэВ, проведены наблюдения Активных Галактических Ядер (АГЯ), находящихся на различных расстояниях с красными смещениями от 0.0179 до 1.375 [6, 7, 10, 13, 16, 19].

Обнаружение источников ТэВ-ого гамма-излучения с большими красными смещениями, свидетельствует о том, что внегалактическое фоновое излучение имеет меньшую среднюю плотность фотонов (см. Рис.), и, следовательно, скорость формирования первых звезд была значительно ниже, чем предполагалось ранее. Также, возможная интерпретация наблюдаемого излучения сверхвысоких энергий от далёких АГЯ, в перерассеянии первичных ТэВ-ых фотонов на частицах тёмной материи, так называемых WISP – слабо взаимодействующих лёгких частицах, кандидатами в которые служат аксионоподобные частицы. .

Extragalactic Background Light

The measured spectra for NGC1275, Mkn 180, Mkn 421, and Mkn 501 (black points)
together with spectra attenuated by EBL (lines)

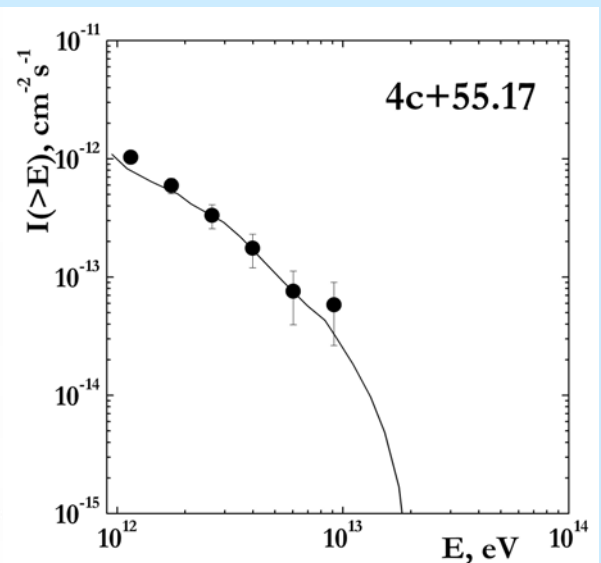
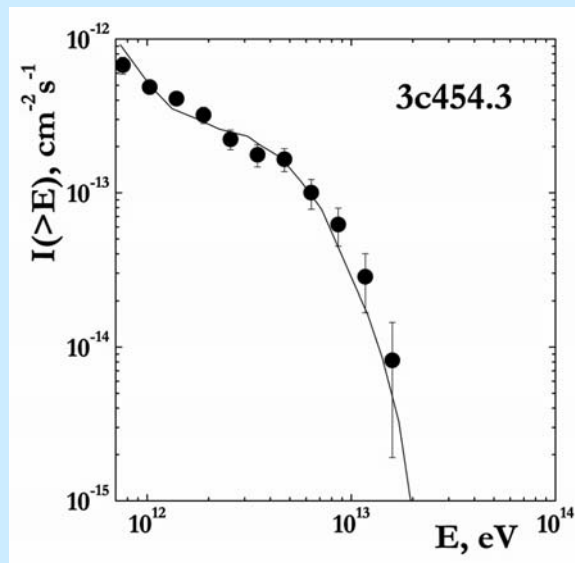
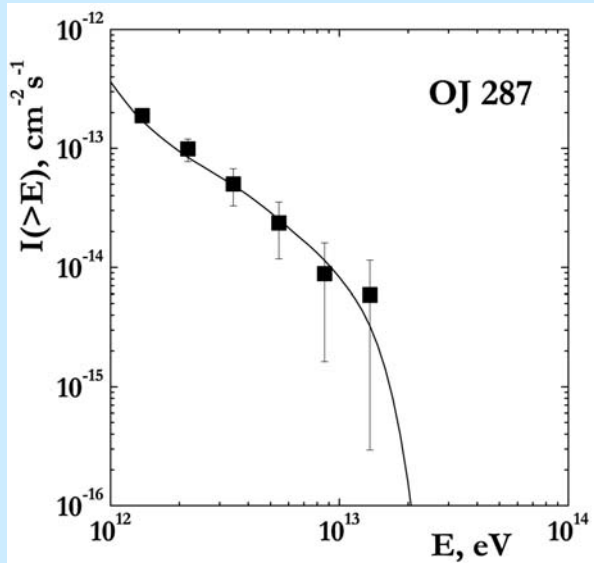


Интегральные спектры гамма-квантов ($E > 0.8\text{TэВ}$) от NGC 1275, Mkn 180, Mkn 421 and Mkn 501 (чёрные точки) вместе со спектрами (линии), получающимися в результате взаимодействия испускаемых источниками гамма-квантов с внегалактическим фоновым излучением, имеющем формы 1 (см. спектр EBL), в предположении простого степенного спектра гамма-излучения внутри источника:

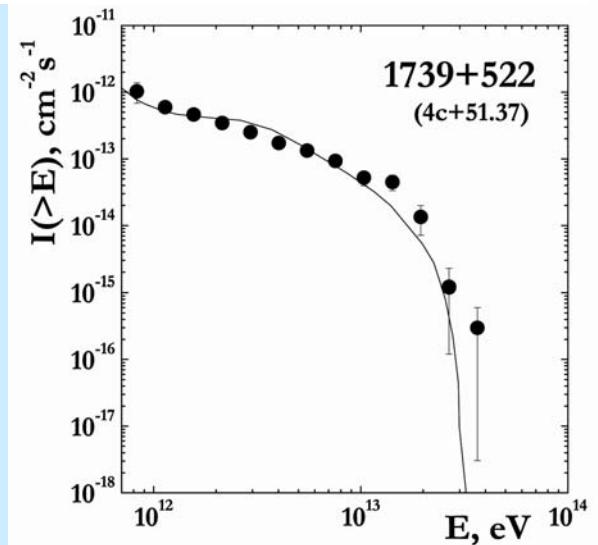
с показателем $\gamma = 1.5$ для Mkn 421 и Mkn 501,
 $\gamma = 1.8$ для Mkn 180 и $\gamma = 2.18$ для NGC 1275
(взято из области энергий при которой $\tau < 1$)

Extragalactic Background Light

The measured spectra for OJ287, 3c454.4, 4c+55.17 and 1739+522 (black points) together with spectra attenuated by EBL (lines)



Интегральные спектры гамма-квантов ($E > 0.8\text{TэВ}$) от OJ287, 3c454.3, 4c+55.17 и 1739+522 (чёрные точки) вместе со спектрами (линии), получающимися в результате взаимодействия испускаемых источниками гамма-квантов с внегалактическим фоновым излучением, имеющем формы **2** – для OJ287, **3** – для 3c454.3 и 4c+55.17; **4** – для 1739+522 (см. спектр EBL), в предположении простого степенного спектра гамма-излучения внутри источника:
с показателем $\gamma = 0.9 \div 1.2$.



Заключение

Для изучения внегалактического фонового излучения необходимо иметь информацию о спектрах большого количества метагалактических источниках гамма-излучения сверхвысоких энергий находящихся на космологических расстояниях соответствующих различным красным смещениям. В эксперименте ШАЛОН, при энергиях 800 ГэВ – 100 ТэВ, проведены наблюдения Активных Галактических Ядер (АГЯ), находящихся на различных расстояниях с красными смещениями от 0.0179 до 1.375, а именно: NGC1275 ($z=0.0179$), Mkn421 ($z=0.031$), Mkn501 ($z=0.034$), Mkn180 ($z=0.046$), 3c382 ($z=0.0578$), 4c+31.63 ($z=0.295$), OJ 287 ($z=0.306$), 3c454.3 ($z=0.859$), 4c+55.17 ($z=0.896$), 1739+522 ($z=1.375$). Обнаружение источников ТэВ-ого гамма-излучения с большими красными смещениями, свидетельствует о том, что внегалактическое фоновое излучение имеет меньшую среднюю плотность фотонов, и, следовательно, скорость формирования первых звезд была значительно ниже, чем предполагалось ранее. Также, возможная интерпретация наблюдаемого излучения сверхвысоких энергий от далёких АГЯ, в перерассеянии первичных ТэВ-ых фотонов на частицах тёмной материи, так называемых WISP – слабозаимодействующих лёгких частицах, кандидатами в которые служат аксионоподобные частицы.

