高エネルギー宇宙ニュートリノ：突発天体起源の可能性について

浅野 勝晃
（東工大）

IceCubeによるPeVニュートリノ検出

2イベント

7.8×10^5–5.6×10^6 GeV

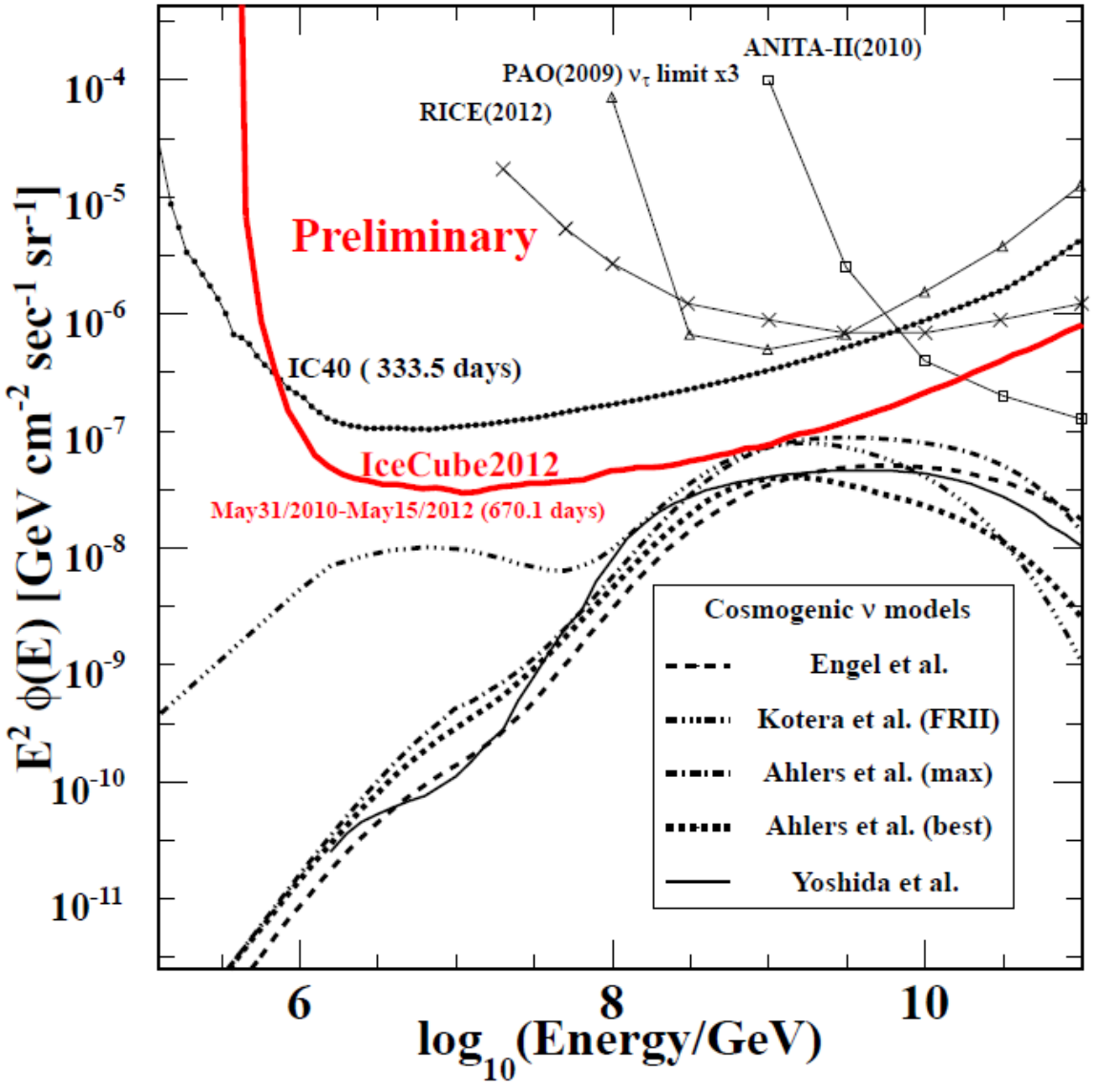
8.9×10^5–8.5×10^6 GeV

当初は最高エネルギー宇宙線起源の10^{18}eV(EeV)程度のニュートリノ検出が期待されていた。

予想を裏切って、10^{15}eV(PeV)のニュートリノが最初に検出された！

ニュートリノ源は？

1. 銀河系内
2. 銀河系外–宇宙線起源
3. 銀河系外–天体起源



Ishihara 2012

ニュートリノ源

銀河系外天体
（活動銀河核など

銀河間空間の
宇宙線

CMB, EBL

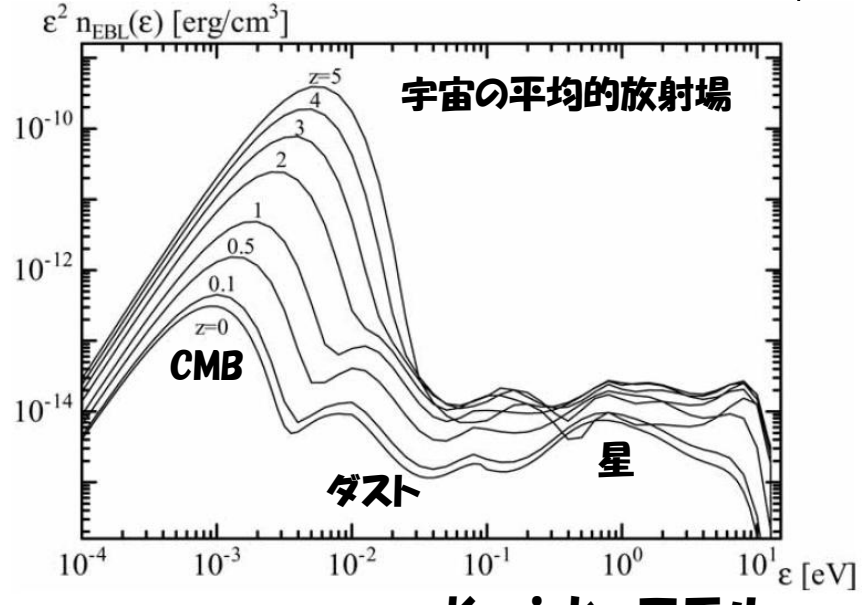
ν

ν

ν

ν

銀河系内天体



Kneiske モデル

宇宙ニュートリノの作り方：光中間子生成

$$p + \gamma \rightarrow p + \pi^0,\ n + \pi^+$$

1 : 2

ε

$\sim 0.2\varepsilon$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

ε_π

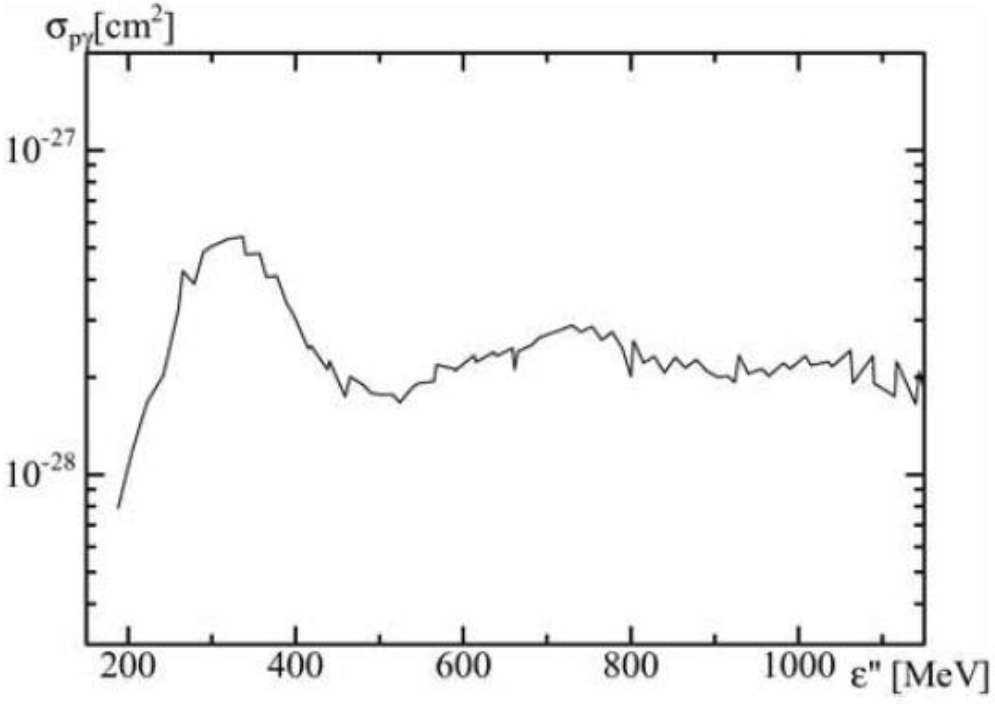
$\varepsilon_\pi(1 - m_\mu / m_\pi) \sim 0.24\varepsilon_\pi$

$0.76\varepsilon_\pi$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

ε_μ

$2 \times \frac{\varepsilon_\mu}{3}$

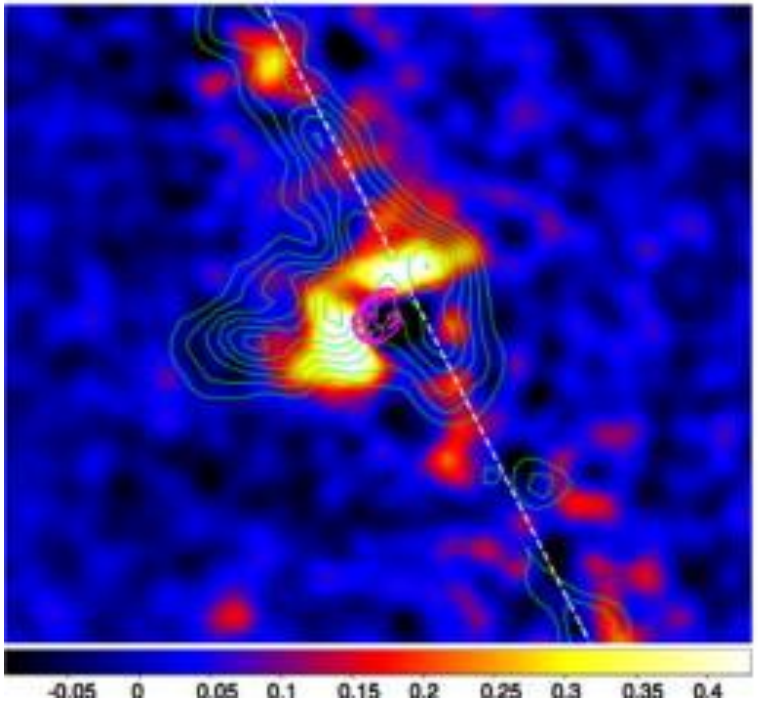


どのニュートリノも親陽子の5%ほどのエネルギーを持つ。
PeVニュートリノの親陽子は20PeVくらい

20PeV陽子のローレンツ因子 2×10^7
陽子静止系で300MeVとなる
光子のエネルギー
300MeV / 2×10^7 = 15eV（紫外線）

宇宙ニュートリノの作り方：pp衝突

超新星残骸 W44 ガンマ線像



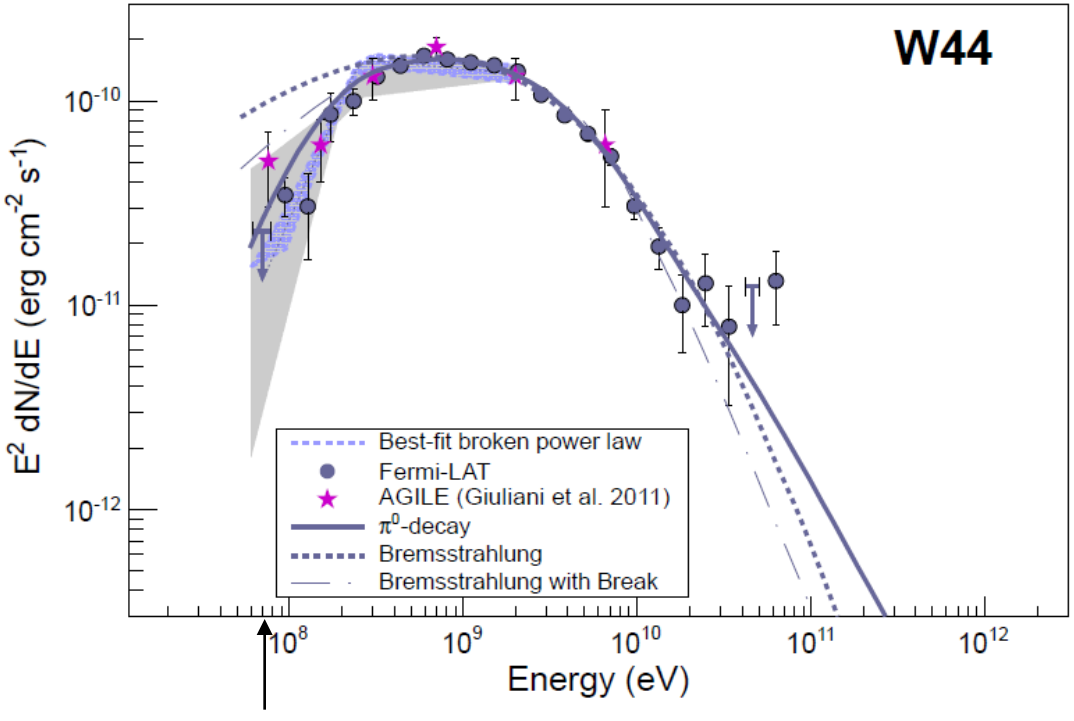
緑の等高線：分子雲由来のCO

宇宙線生成現場の近くに濃いガス雲があれば…

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^0$$
$$\rightarrow p + n + \pi^+$$

$$\sigma_{pp} \cong 0.05\sigma_T$$

ニュートリノもガンマ線と同程度のFlux
しかし、PeVまでガンマ線スペクトルは伸びていない！

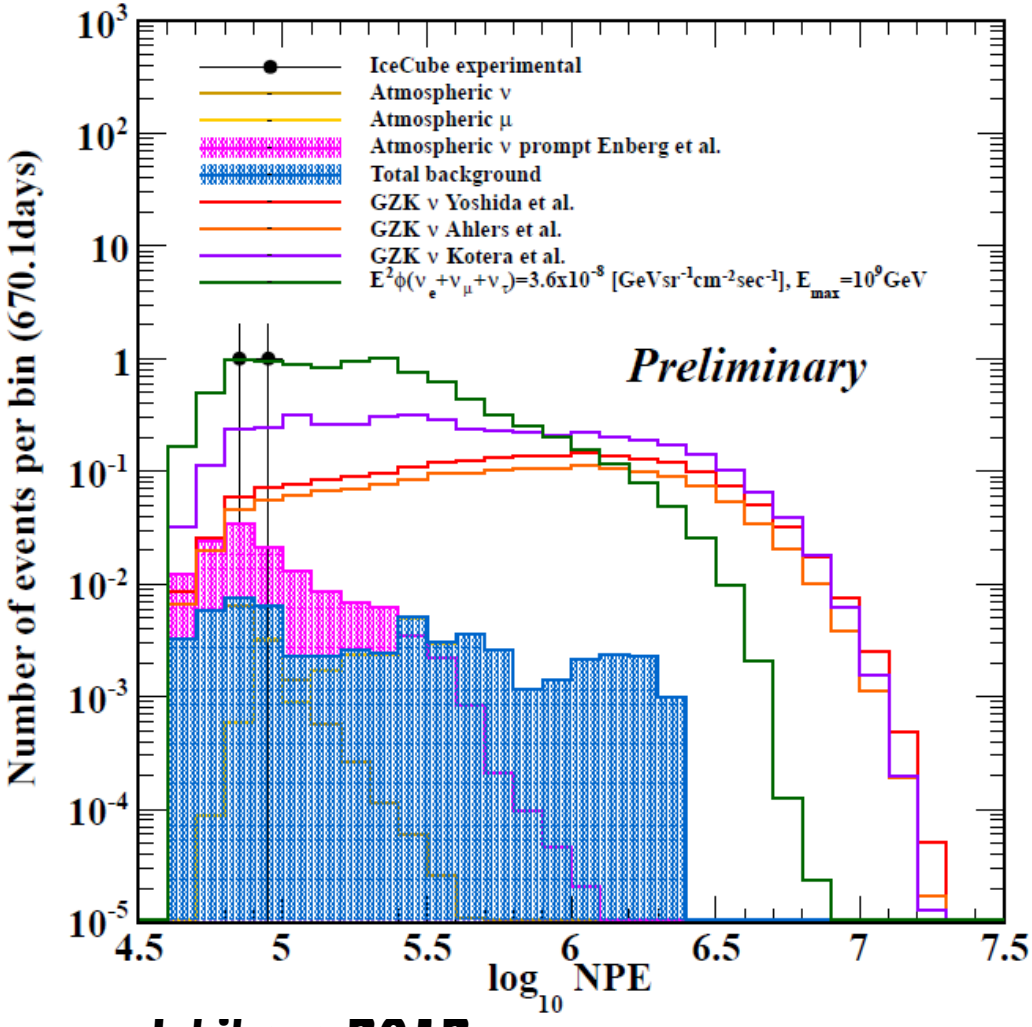


$m_\pi / 2 \sim 70\mathrm{MeV}$

Ackermann+ 2013

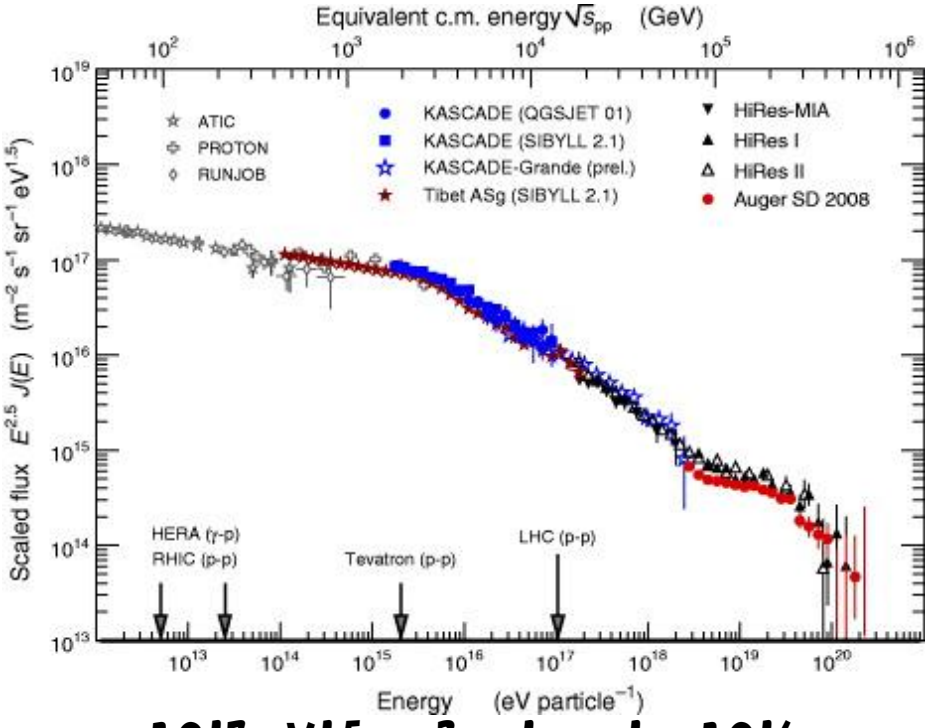
今回の検出が示唆するFluxレベル

$$\varepsilon^2\phi_\nu(\varepsilon) \approx 3.6\times10^{-8}\ \mathrm{GeV\ sr^{-1}\ cm^{-2}\ s^{-1}}$$



Ishihara 2012

太陽近傍の宇宙線Flux



$10^{17}\ \mathrm{eV^{1.5}\ m^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}}$ @10^{16}ev

→$10^{-4}\ \mathrm{GeV\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}}$

単位時間当たりの衝突確率 $n\sigma c \sim 10^{-15}\mathrm{s}^{-1}$

ニュートリノの平均滞在時間

0.3kpc/c～3×10^{10}s

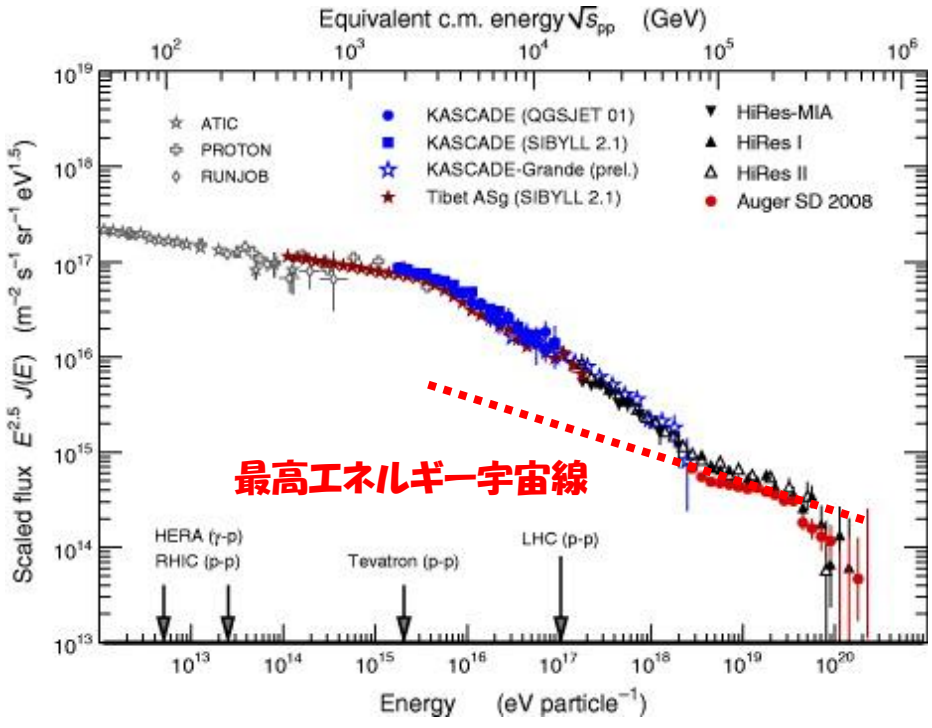
ニュートリノへ行くエネルギーの割合 3個×1/20

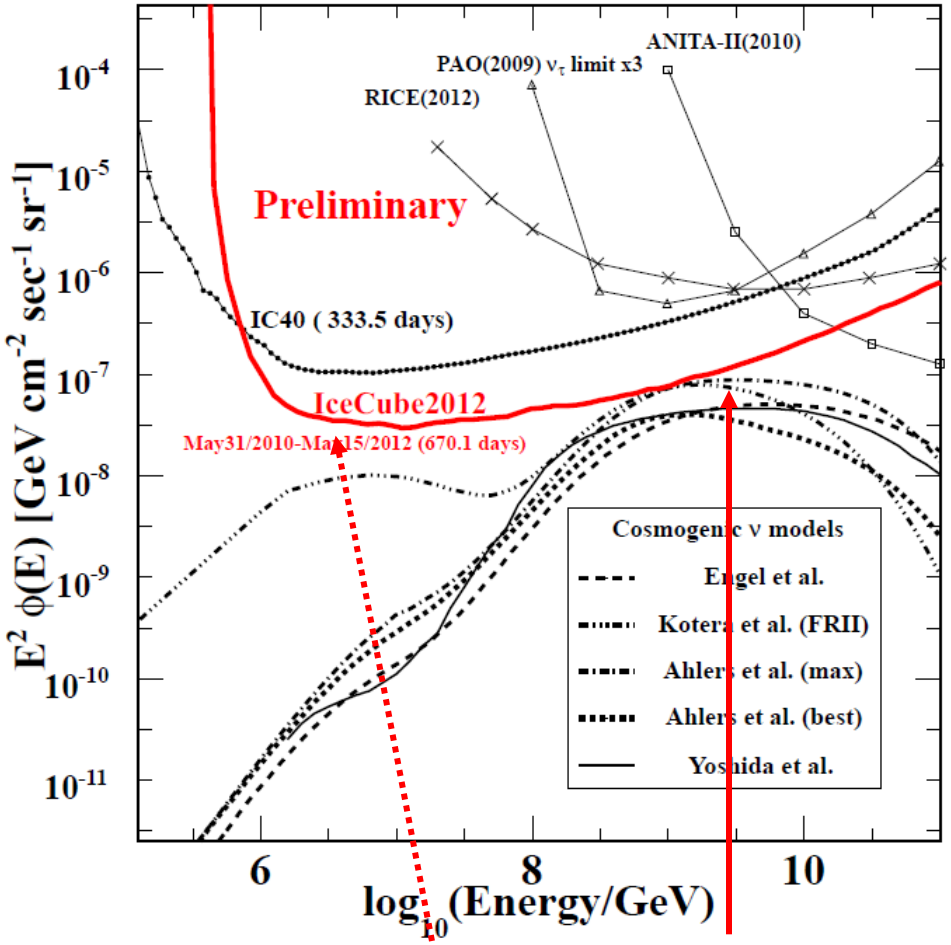
全部掛けると $5\times10^{-10}\ \mathrm{GeV\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}}$

もちろん、銀河系内宇宙線起源というのは駄目

Cosmogenic neutrinos

銀河系外宇宙線起源ニュートリノ





銀河系外起源なので、銀河間空間にも
ほぼ同様の密度で分布していると考えられる。

観測から密度、スペクトルは決まっている。
不定性は、その時間進化。
（昔にたくさん宇宙線を作っていれば、ニュートリノも増える）

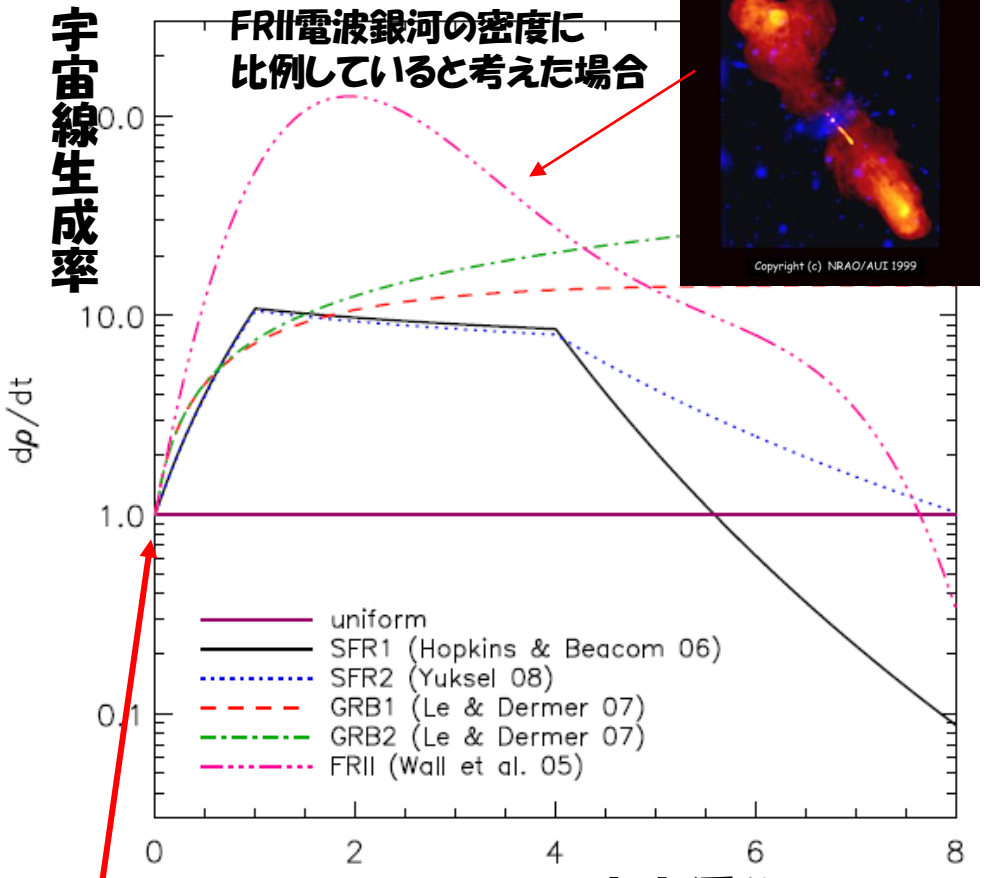
高エネルギー側で検出が無い事から、
モデルに制限⇒不定性はほとんど無い。

最高エネルギー宇宙線だけを考える限り、
PeVニュートリノの検出は難しいはず。

Cosmogenic neutrinos

宇宙線生成率

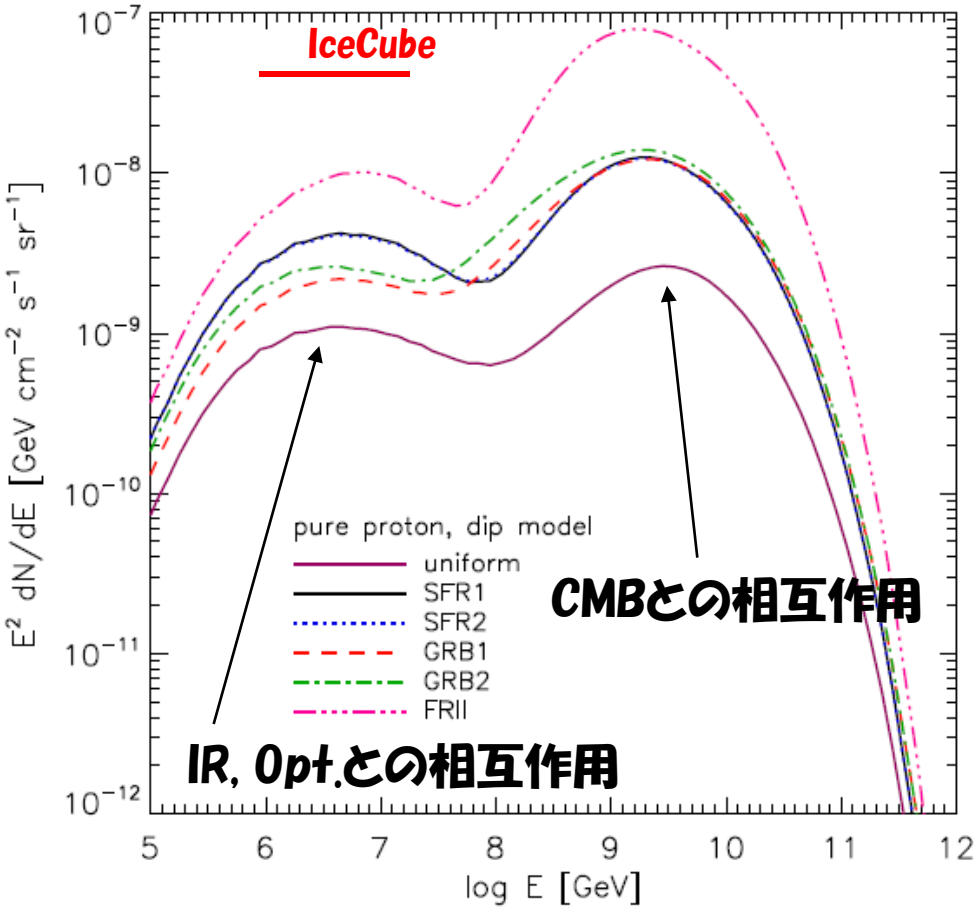
FRII電波銀河の密度に
比例していると考えた場合



赤方偏移

現在の値で
宇宙線生成率を規格化

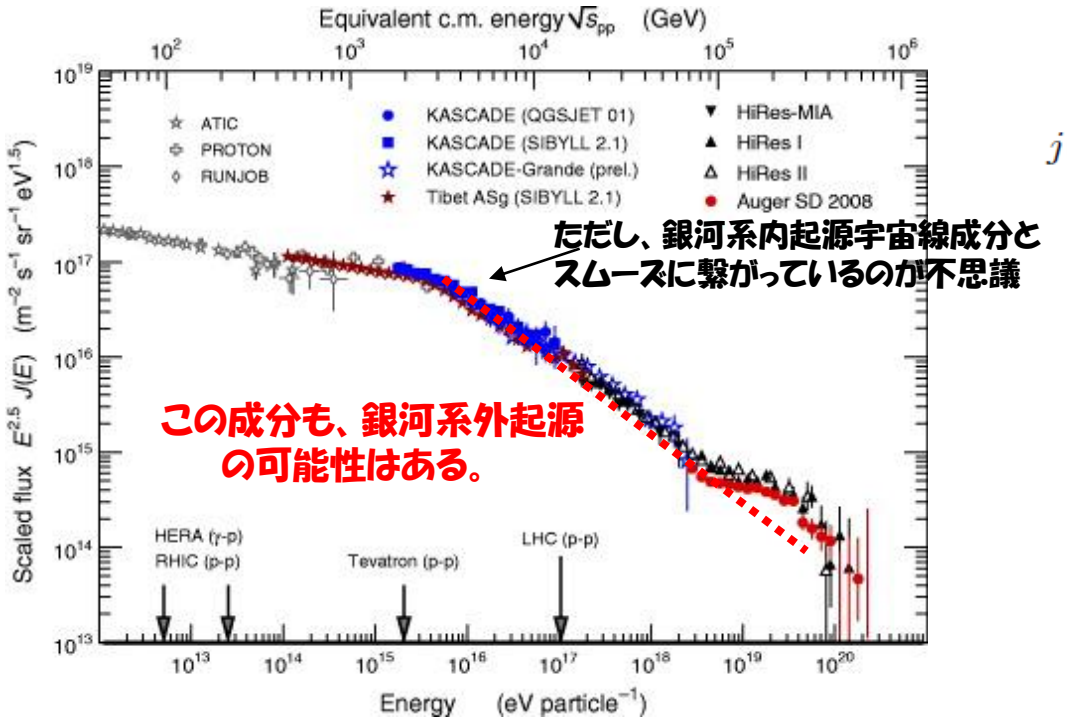
ニュートリノ



Kotera+ 2010

Cosmogenic neutrinos

銀河系外宇宙線起源ニュートリノ



注：銀河系内起源説の方が若干有力

1. 重い原子核（電荷が大きいため）
2. 系内の乱流などによる再加速
3. マグネターなどの特殊な線源

PeV neutrinos from intergalactic interactions of cosmic rays emitted by active galactic nuclei

Oleg E. Kalashev,[1] Alexander Kusenko,[2,3] and Warren Essey[2]

宇宙線スペクトル

$$j(E) \propto E^{-\alpha} \exp(-E/E_{\max}) \exp(-E_{\min}/E)$$

$$\alpha = 2.6, \; E_{\max} = 3 \times 10^{17} \text{ eV}$$

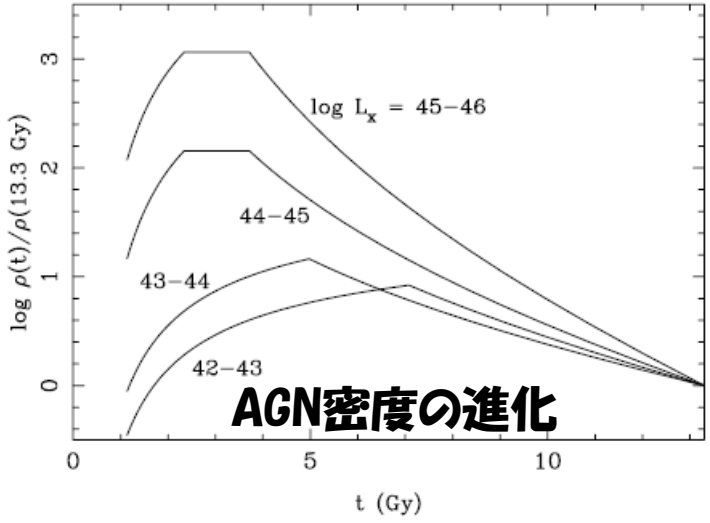
宇宙線源の密度の進化

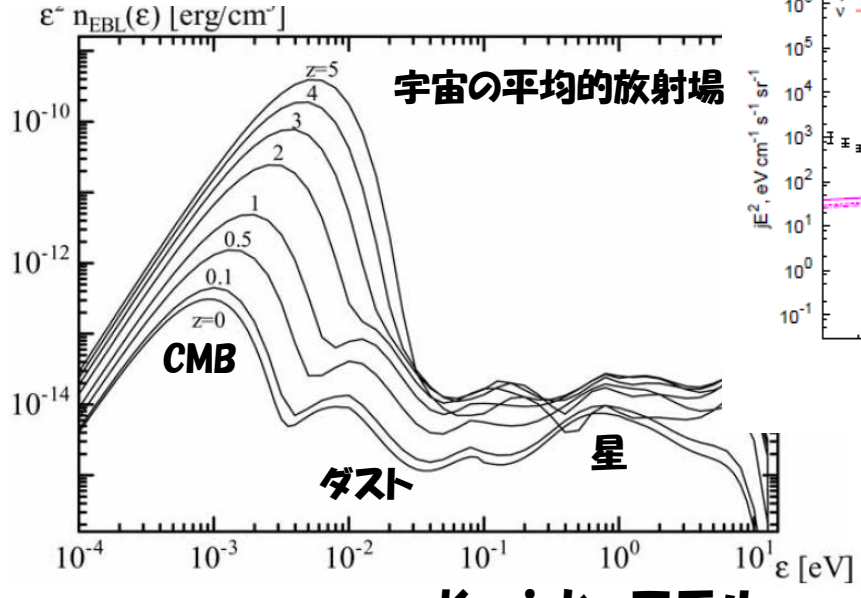
$$\rho(z) = \begin{cases} (1+z)^m, & 0 < z < z_1 \\ (1+z_1)^m, & z_1 < z < z_2 \\ (1+z_1)^m \, 10^{k(z-z_2)}, & z > z_2 \end{cases}$$

L_x, erg/s	$10^{42.5}$	$10^{43.5}$	$10^{44.5}$	$10^{45.5}$
m	4.0 ± 0.7	3.4 ± 0.5	5.0 ± 0.2	7.1 ± 1.0
z_1	0.7	1.2	1.7	1.7
z_2	0.7	1.2	2.7	2.7
k	-0.32	-0.32	-0.43	-0.43
$W_p, 10^{40} \frac{\text{erg}}{\text{s Mpc}^3}$	7.0	6.0	1.3	0.22

Cosmogenic neutrinos

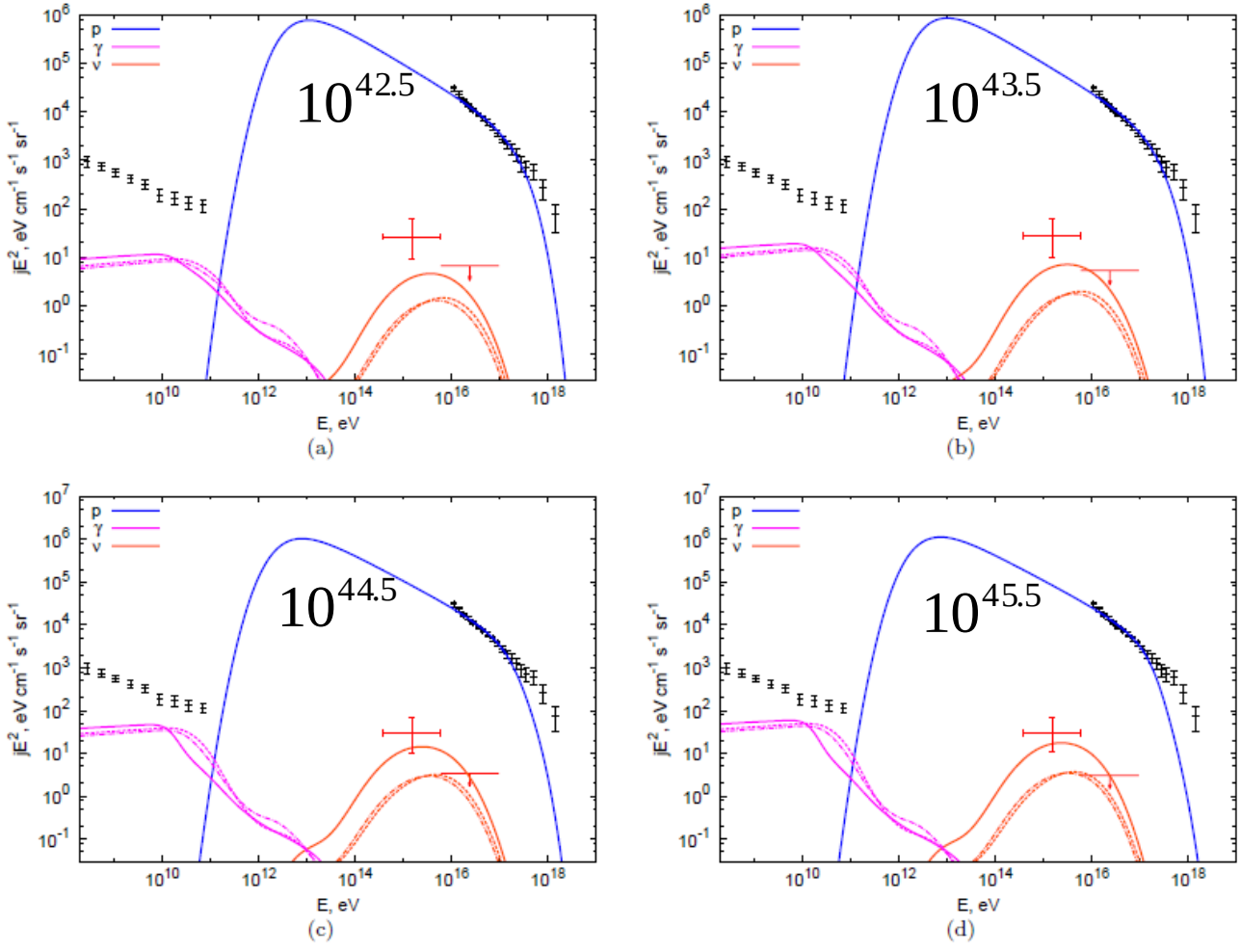
Hasinger+ 2005





Kneiske モデル

可視−紫外線背景放射との相互作用によるニュートリノ



宇宙線源がAGNかどうかは
本質的ではなく、宇宙線生成率の
歴史が重要。

銀河系内起源

銀河系内における支配的な爆発現象は何と言っても超新星爆発

現在の超新星爆発rate　30年に1発：0.03/yr
超新星1発が解放するエネルギー：10^{51} erg

現在の超新星のLuminosity：$L_{\mathrm{SN},0} = 9.5\times10^{41}\mathrm{erg/s}$

銀河の体積 V=2x0.3kpc x π x(10kpc)^2=5.5x10^{66}cm^3
ニュートリノ脱出時間 t～0.3kpc/c

$$ctL_{\mathrm{SN},0}/V/(4\pi) = 1.3\times10^{-5}\mathrm{erg\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}}$$

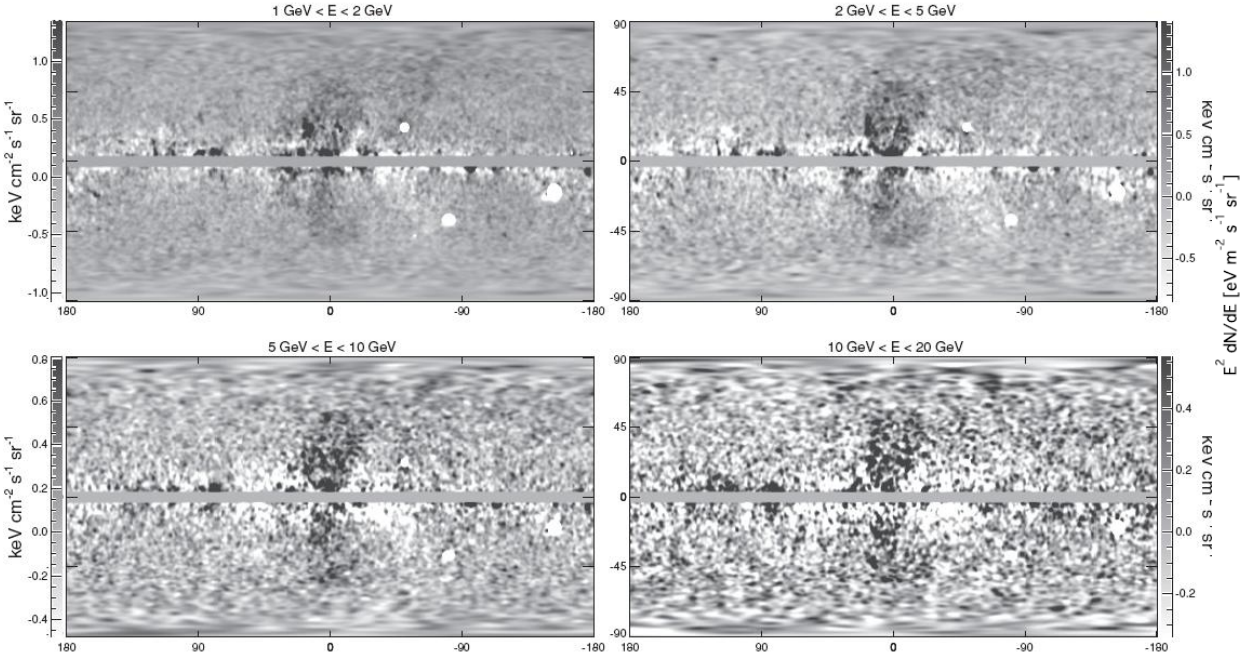
$$= 7.9\times10^{-3}\mathrm{GeV\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}}$$

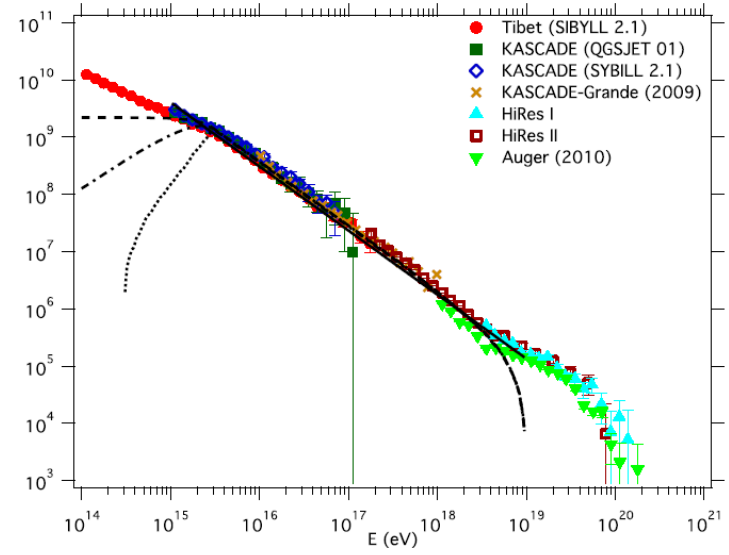
超新星解放エネルギーの4.6x10^{-6}がPeVニュートリノへ行けば良い。

1. 爆発エネルギーの1/10が宇宙線
2. 10^9-10^{17}eVに均等にエネルギー配分されていれば、1/8のエネルギーが10^{16}eV以上
3. ニュートリノのfluxは親粒子の3/20

エネルギー収支としては余裕がある。しかし、普通の超新星のニュートリノ生成効率は悪い。
10PeV以上まで宇宙線を加速することもできない。
超新星残骸よりも稀なイベントで、ニュートリノ放射効率の良い現象。特殊なSN?

Fermi Bubble



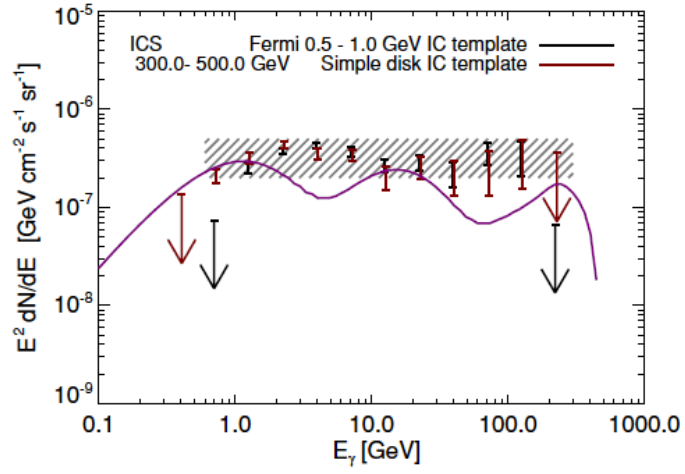


Cheng+ 2012

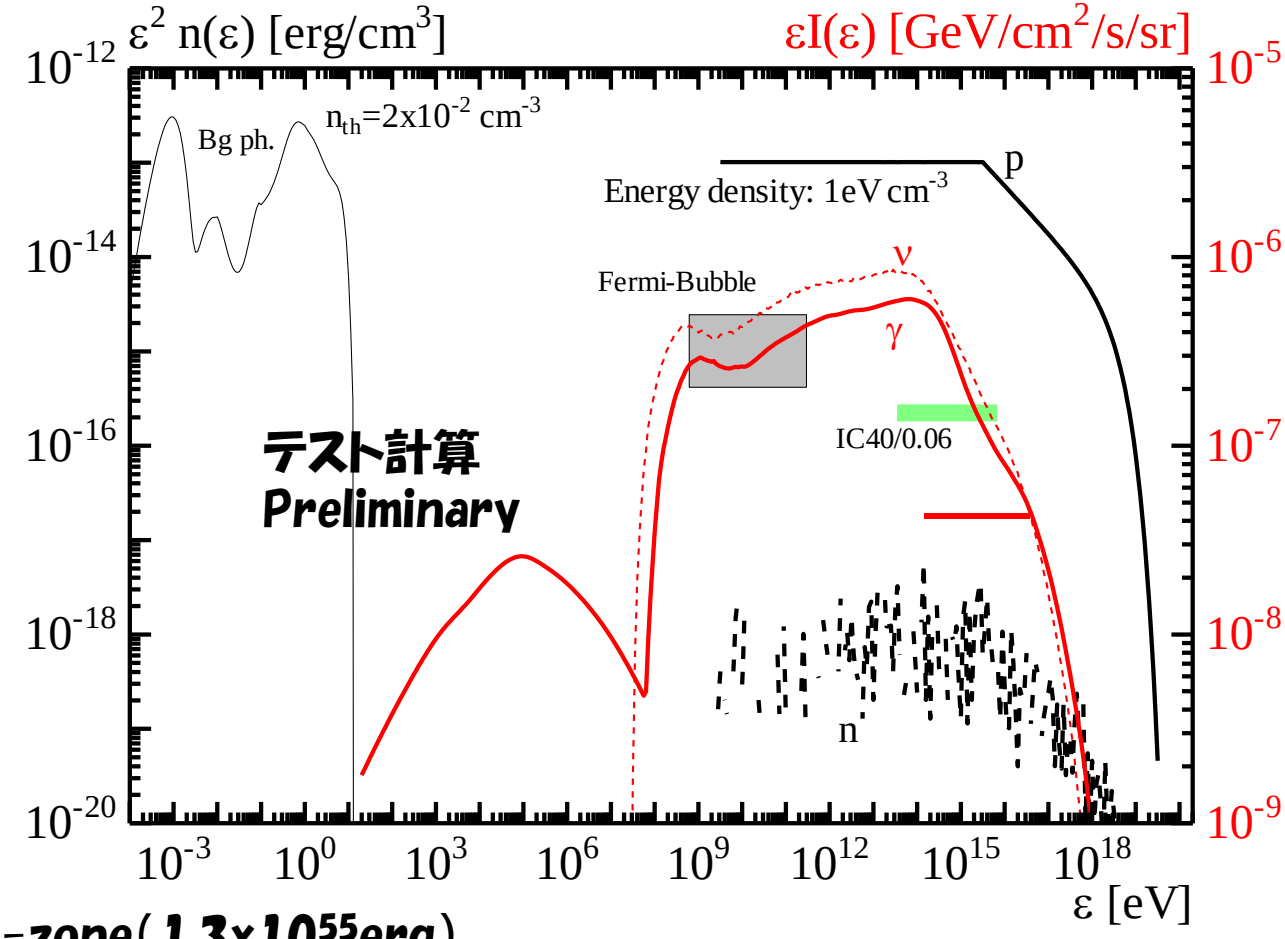
Su+ 2010

ガンマ線そのものに対してハドロンモデルは否定的
（クリアな形、冷却時間の短い電子起源）

高エネルギーまで伸びていれば、pγが効くか？



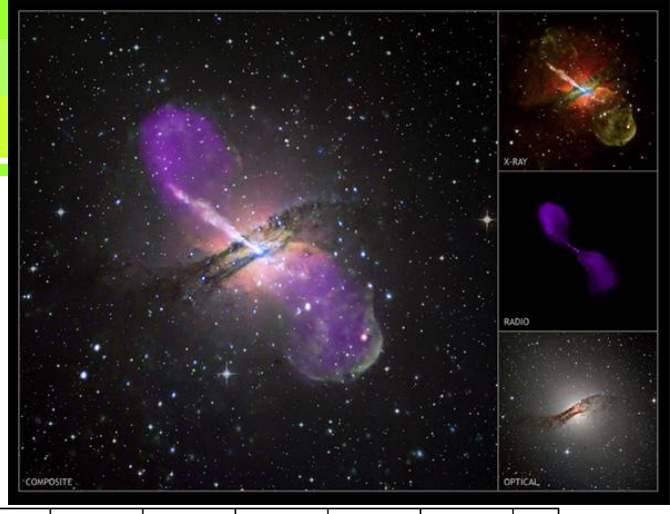
バブルの中でのpp衝突起源ガンマ線・ニュートリノ



4kpcのOne-zone(1.3x10^{55}erg)
ppモデルにより、ガンマ線Fluxを説明できるが(Pi0->2γ、Bethe-Heitler 電子からのSynch.)
ニュートリノが出すぎる。
半径20° のバブルが2つ ->全立体角に占める割合 0.06
3.6×10^{-8}という値は等方飛来を仮定しているが、Bubble起源と考えると局所的に大きな値(?)

系外天体起源ニュートリノ

本当なら歴史上最高
エネルギーの検出



AGNやGRBなどの系外天体で粒子が加速。
光子場が濃いと、光中間子生成をその場で
起こし、天体から直接ニュートリノが飛んでくる。

最高エネルギー宇宙線の加速源を含め、
20PeVまで粒子を加速できる候補天体は
たくさんありそう。

BL LacやFR-I銀河での
最高エネルギー宇宙線加速モデル

Then, one finds that the neutrino flux from an individual source is typically too low to be detected with IceCube. One can also see that the cumulative background flux from high-peaked BL Lac objects is low. The UHECR energy input in the local universe is $\sim 5 \times 10^{43}$ erg Mpc^{-3} yr^{-1} at 10^{19} eV (Murase & Takami 2009), so that assuming that such BL Lac objects and FR-I galaxies are the main UHECR sources, the expected cumulative muon neutrino background flux is estimated to be (Murase & Beacom 2010a)

Murase+ 2012

$$E_\nu^2 \Phi_\nu \sim 10^{-10}\,\mathrm{GeV\,cm^{-2}\,s^{-1}\,sr^{-1}} \times \left(\frac{f_{p\gamma}(20E_\nu)}{10^{-2}}\right) E_{\nu,17.7}^{2-p} f_z, \quad (6)$$

where p is the cosmic-ray spectral index and f_z is a pre-factor coming from the redshift evolution of the sources. Low pho-

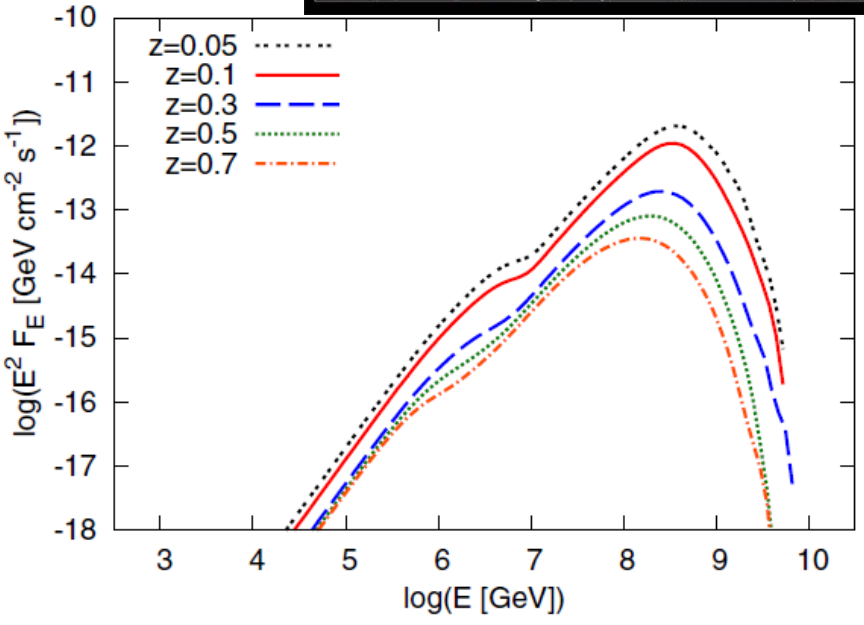
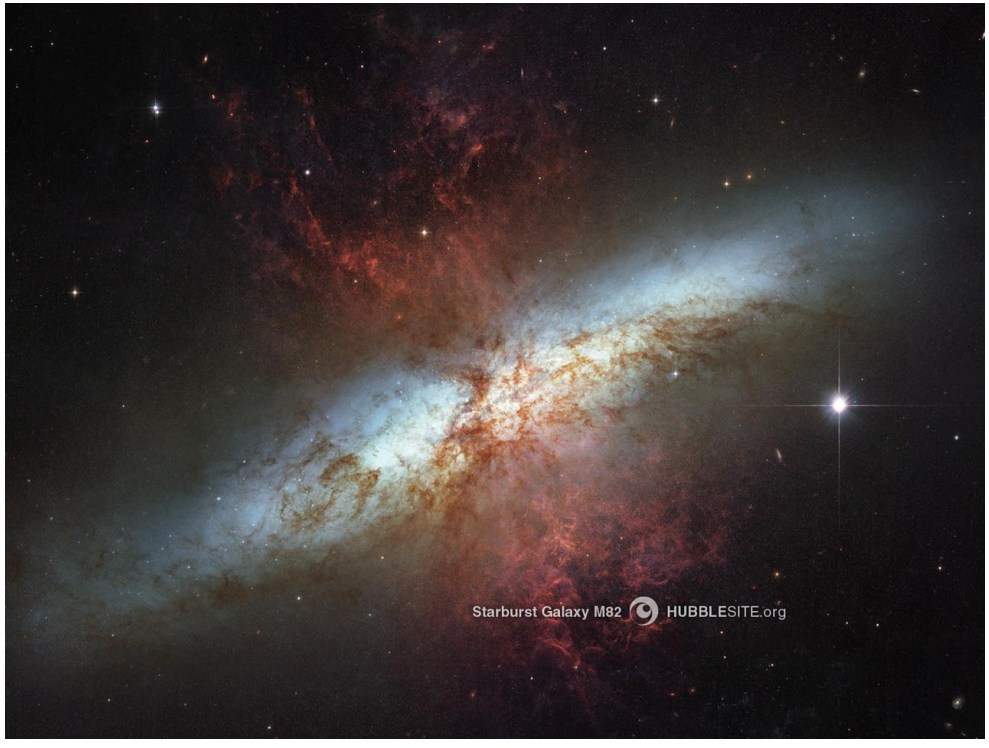


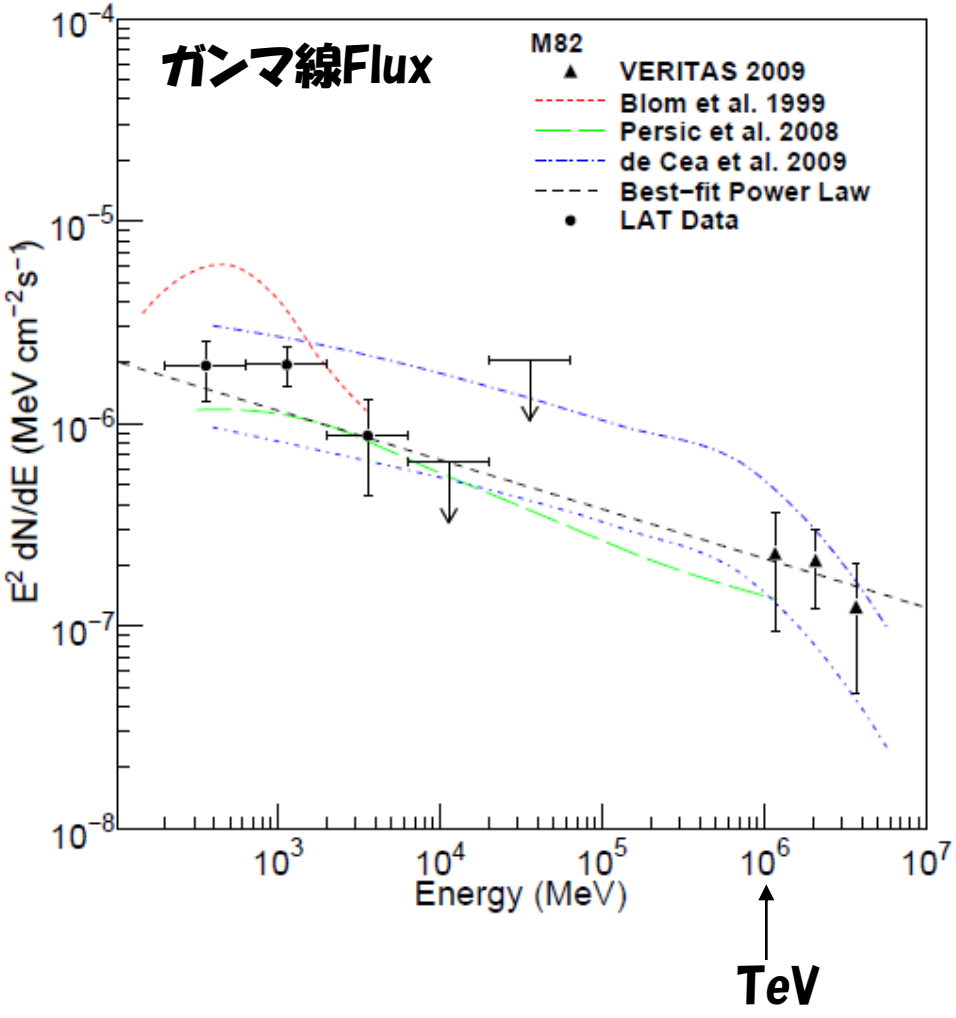
Figure 9. Spectra of UHE proton-induced neutrino emission for various source redshifts. The parameters used here are the same as Figure 7.

AGNでのp-γ反応はそう効率的ではない。
(TeVガンマ線は電子起源放射だと
考えられており、陽子起源ガンマ線の
寄与はそれほど大きくないと考えられている)

Starburst galaxies



Abdo+ 2010



pp衝突起源ガンマ線

PeVまで伸びているかは不明。

Loeb & Waxman 2006

a dynamical time, $\sim (2\ell/v)$

が宇宙線のエネルギー損失時間スケールよりも長くなる条件。

$$\Sigma_{\rm gas} \gtrsim \Sigma_{\rm crit} \equiv \frac{m_p \beta}{\sigma_{\rm pp}} = 3 \times 10^{-2} \beta_{-3} \ {\rm g\ cm^{-2}}$$

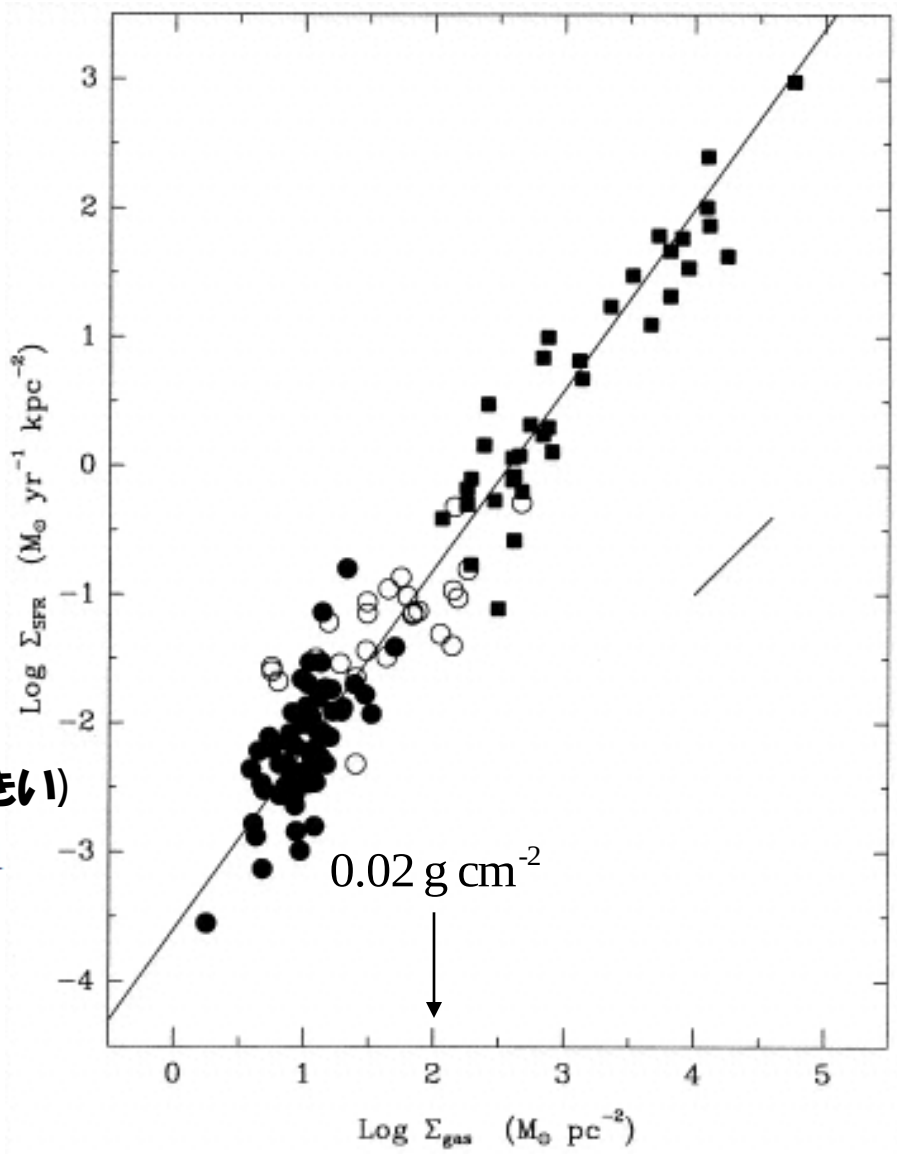
$$\beta = v/c = \beta_{-3}(v/300\ {\rm km\ s^{-1}})$$

$$E_\nu dL/dE_\nu = (1/3)\eta_{p/e} E_e^2 d\dot{N}/dE_e = (2/3)\eta_{p/e}\nu L_\nu$$

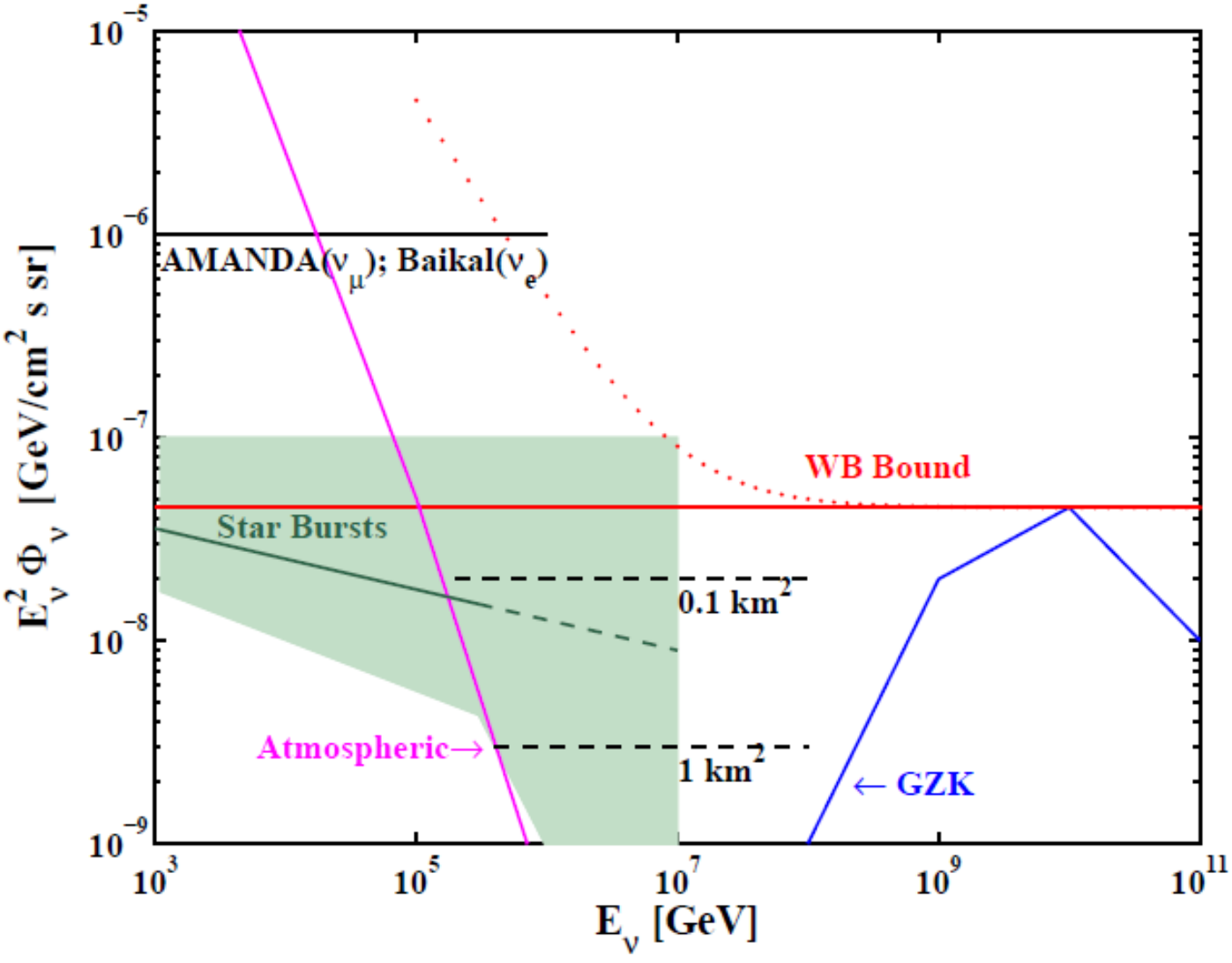
$\eta_{p/e} \approx 6$ **(2次電子の寄与が我々の銀河より大きい)**

$$\nu(dL_\nu/dV)|_{\nu=1.4{\rm GHz}} \approx 10^{43}\ {\rm erg\ Mpc^{-3}\ yr^{-1}}$$

Kennicutt law

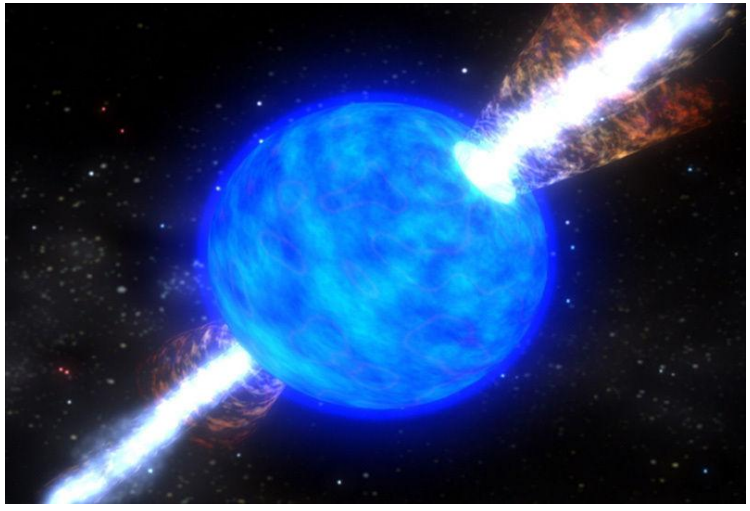


Loeb & Waxman 2006



期待できる！20PeVまで伸びているかが問題に。

ガンマ線バースト

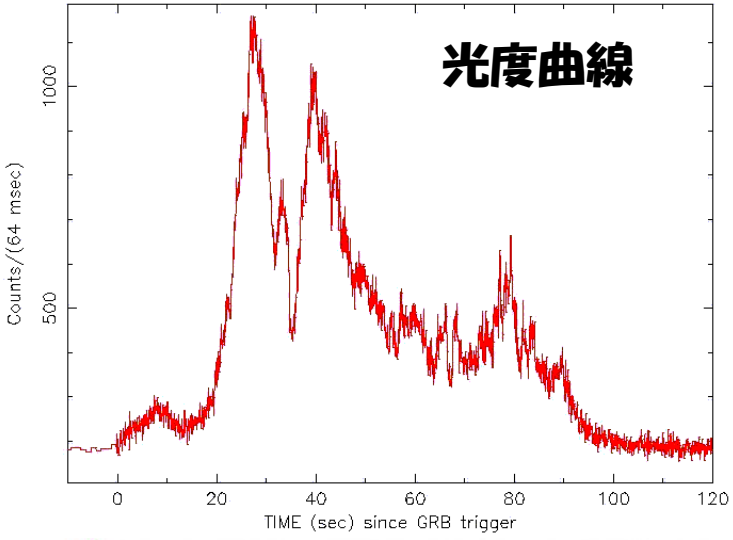


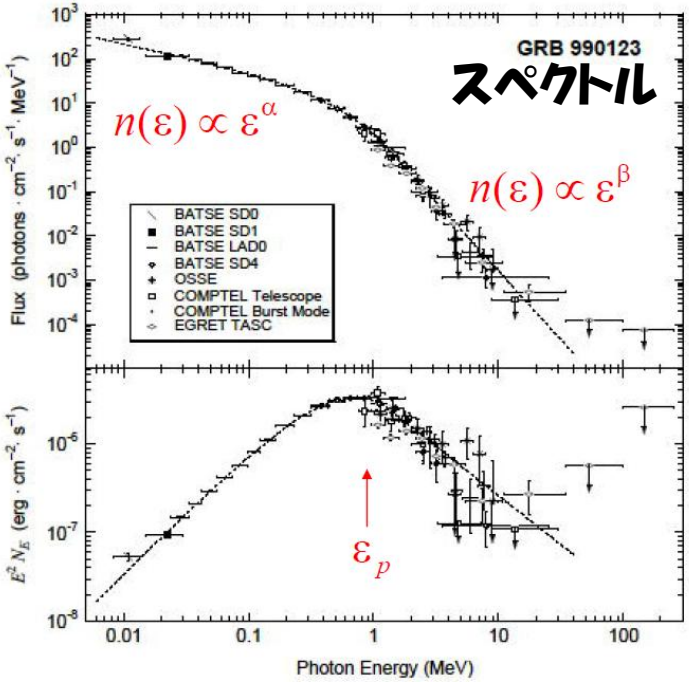
宇宙最大の爆発現象

巨星の死に伴うブラックホール形成
⇒相対論的ジェット
⇒ガンマ線放射

頻度：10^{-10}–10^{-9} $Mpc^{-3}yr^{-1}$
解放エネルギー：10^{52}–10^{54} erg（ガンマ線のみ）
⇒10^{42}–10^{45} erg $Mpc^{-3}yr^{-1}$

陽子が加速されていれば、自分が放っている光子と相互作用し、ニュートリノを放つ。





GRBからのニュートリノ

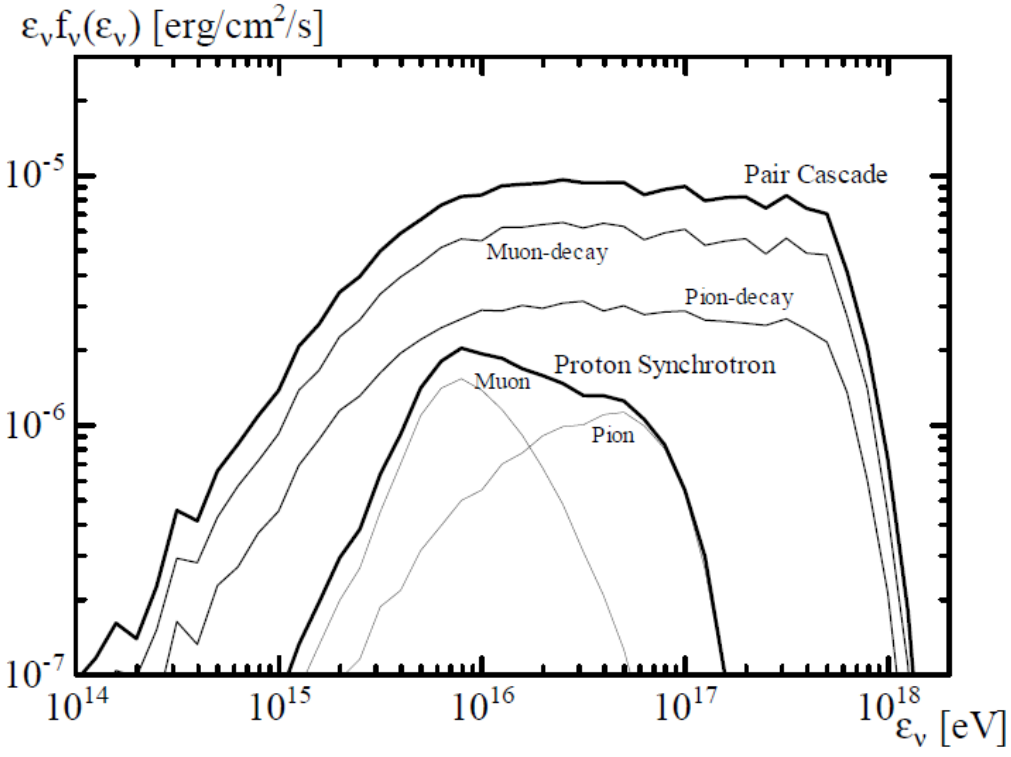
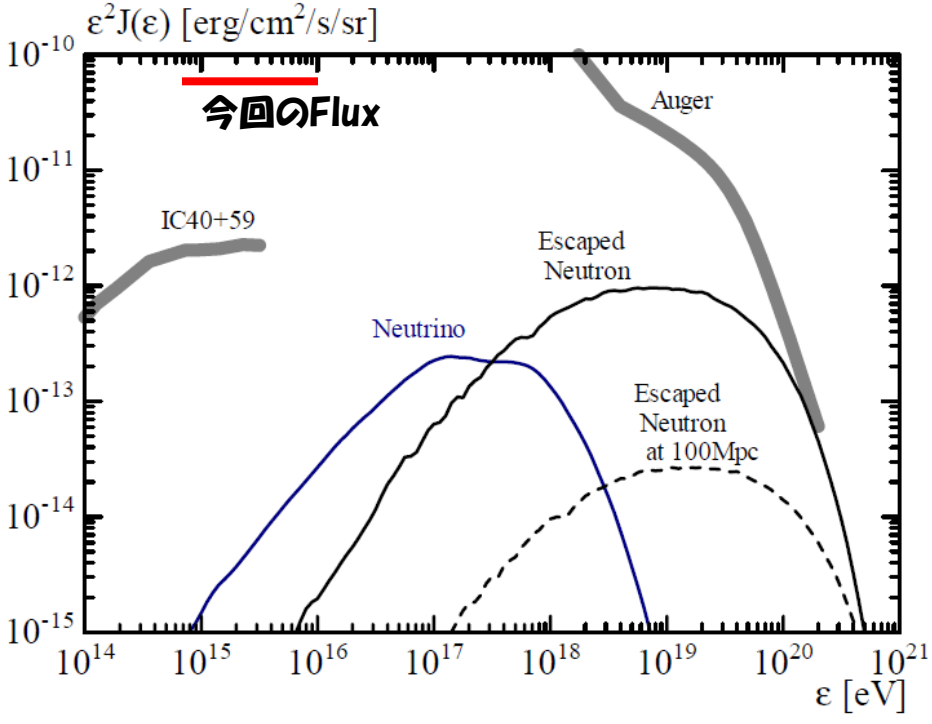


Fig. 4.— Neutrino spectra (black bold curves) for the pair cascade model ($\Gamma = 1500$, $\xi = 1$, $L_p/L_\gamma = 200$, $U_B/U_\gamma = 10^{-3}$, and $R = 10^{14}$ cm) and the proton synchrotron model ($\Gamma = 3000$, $\xi = 10^3$, $L_p/L_\gamma = 300$, $U_B/U_\gamma = 300$, and $R = 10^{14}$ cm). Fine curves denote separately neutrinos from pion decay and muon decay.

GRB090510からのニュートリノ
Asano+ 2009

GRBからのニュートリノ背景放射

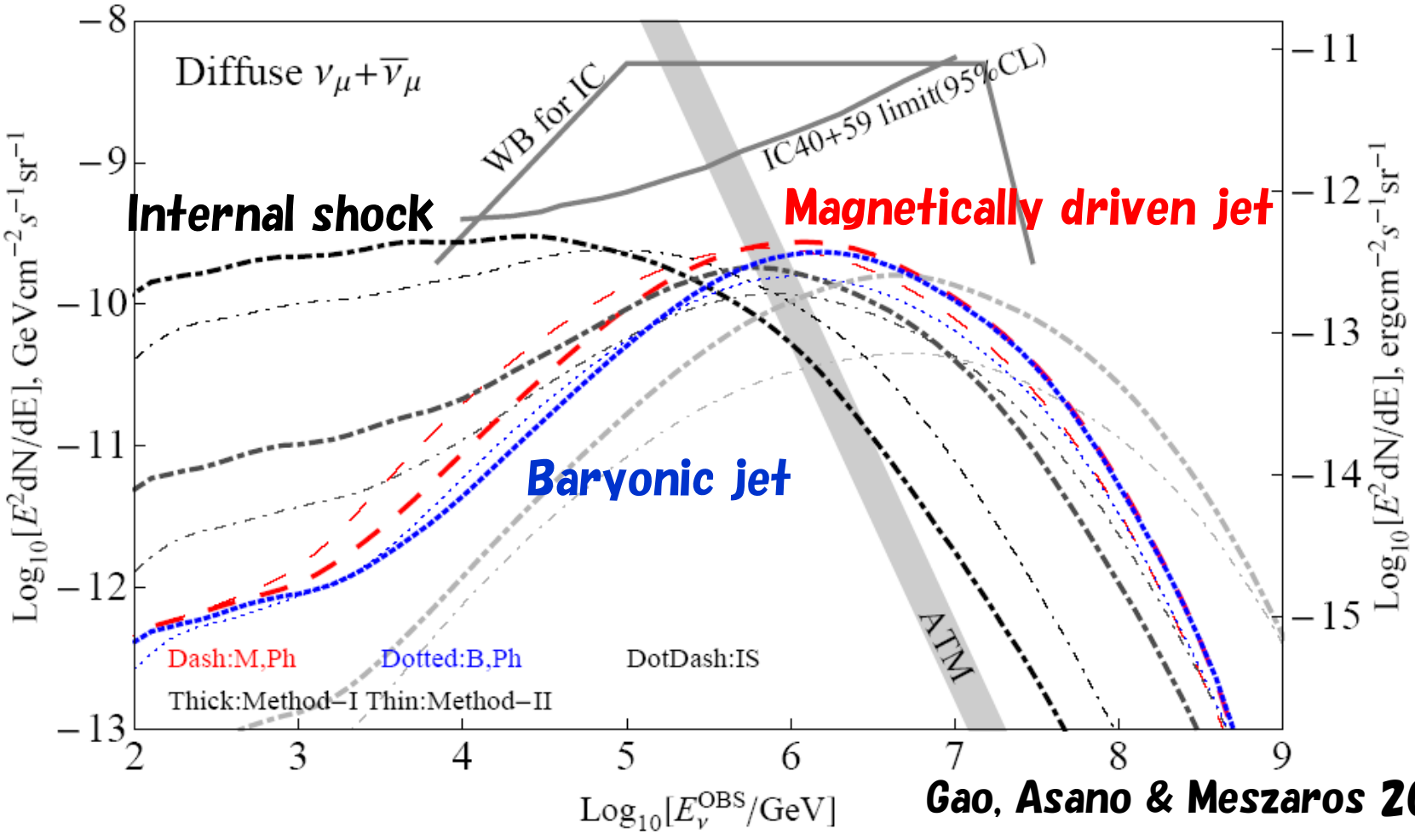


Asano & Meszaros 2012

モデル依存性が大きい。特にジェットのローレンツ因子に依存。
（陽子の量はGeVガンマ線観測と協調する値を採用）

GRBからのニュートリノ：一例

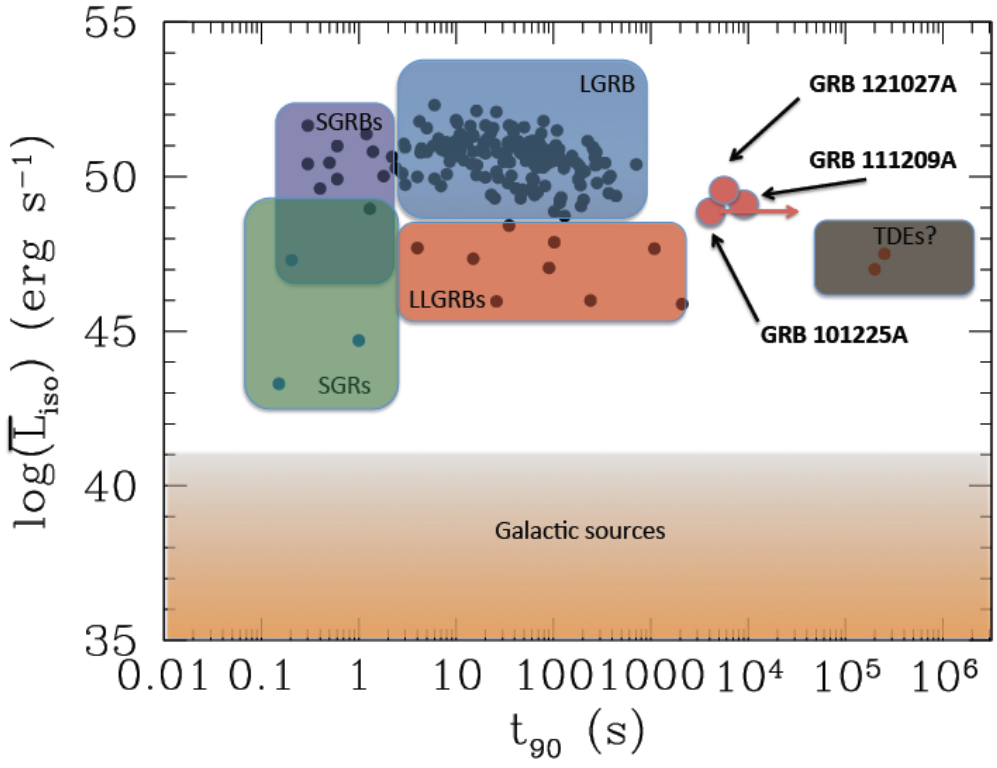
今回のFlux



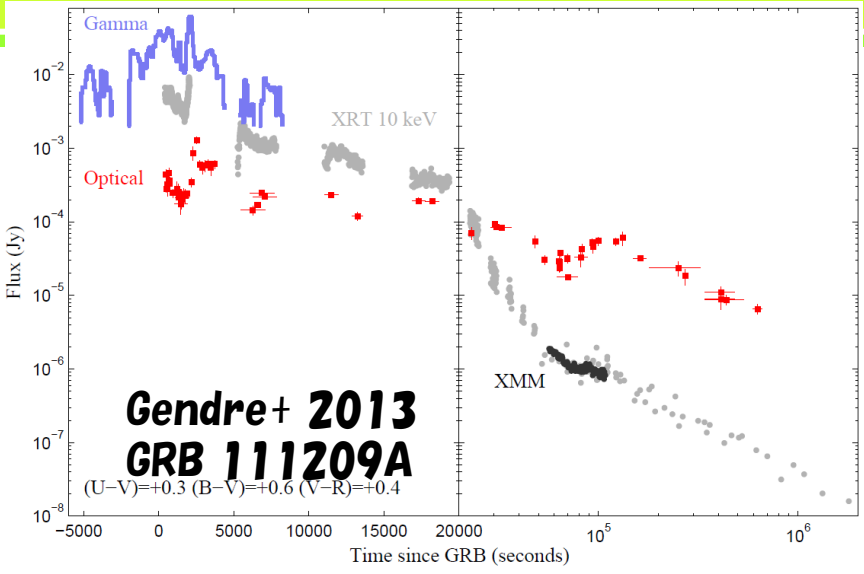
Gao, Asano & Meszaros 2012

たくさんの計算例がある（村瀬氏ら）ので、そちらを参照。
加速陽子の量がガンマ線と同程度だと、ニュートリノは観測値よりも低いフラックス。
GRBと同期していたという話も聞いていない。

GRBにも様々な種族が。



Levan 2013



以下10^{44} erg $Mpc^{-3}yr^{-1}$を1GRBとする。

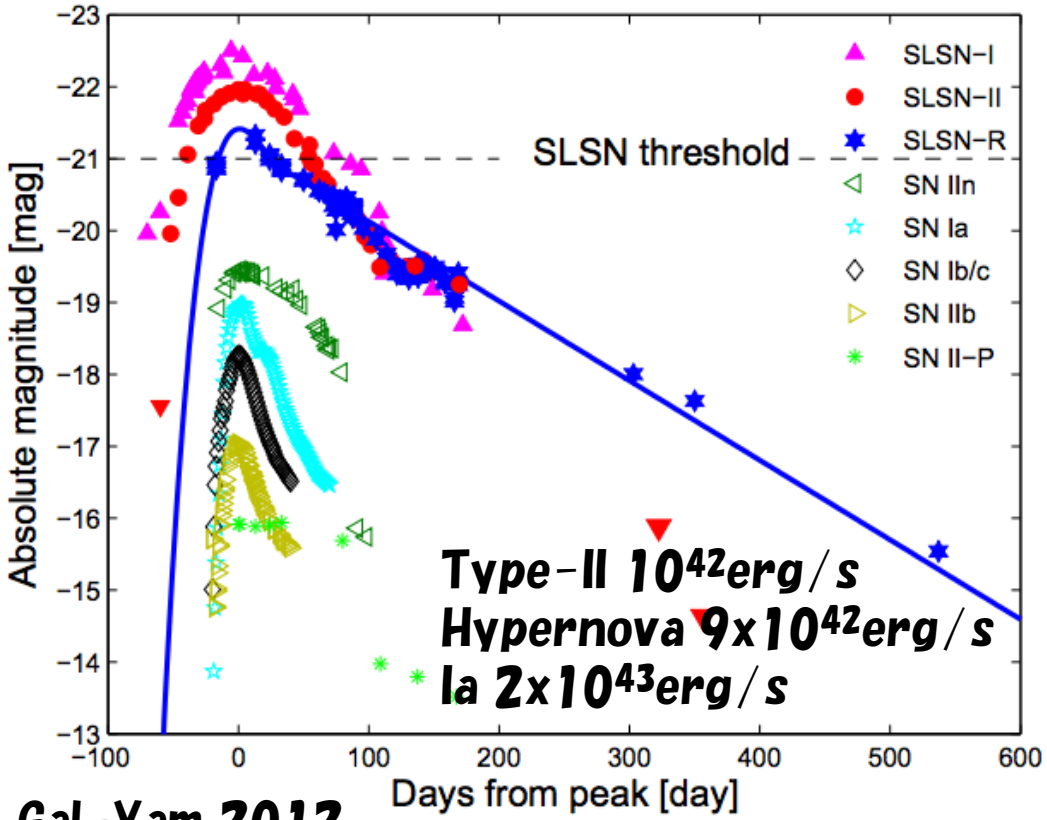
Low-luminosity GRBs
10^{-7}-1.8×10^{-6} $Mpc^{-3}yr^{-1}$
E～10^{49} erg
⇒0.1-1 GRB

Ultra-long duration GRBs
頻度も解放エネルギーもLGRBと同程度
⇒ 0.1-1 GRB

突発天体はGRBだけではない。

Core collapse SN: 10^{-4} $Mpc^{-3}yr^{-1}$
解放エネルギー10^{51}erg⇒1000GRB
ただし20PeVまでの加速は難しい。
ニュートリノ生成効率も悪い。

最近は"普通じゃない"超新星が続々見つかってる。



Gal-Yam 2012

Super luminous SN

> 7×10^{43}erg/s

Supernova	Redshift	Absolute peak (mag)	Radiated energy (ergs)	Reference
SLSN-R				
SN 2007bi	0.1289	−21.35	1 to 2 × 10^{51}	(7)
SN 1999as	0.12	−21.4		(19)
SLSN-II				
CSS100217	0.147	−23.07	1.3 × 10^{52}	(58)
SN 2008fz	0.133	−22.34	1.4 × 10^{51}	(53)
SN 2008am	0.2338	−22.39	2 × 10^{51}	(57)
SN 2008es	0.205	−22.21	1.1 × 10^{51}	(36, 38)
SN 2006gy	0.019	−22.0	2.3 to 2.5 × 10^{51}	(12, 13)
SN 2003ma	0.289	−21.52	4 × 10^{51}	(45)
SN 2006tf	0.074	< −20.7	7 × 10^{50}	(44)
SLSN-I				
SN 2005ap	0.2832	−22.73	1.2 × 10^{51}	(4, 11)
SCP 06F6	1.189	−22.53	1.7 × 10^{51}	(4)
PS1-10ky	0.956	−22.53	0.9 to 1.4 × 10^{51}	(68)
PS1-10awh	0.908	−22.53	0.9 to 1.4 × 10^{51}	(68)
PTF09atu	0.501	−22.03		(4)
PTF09cnd	0.258	−22.03	1.2 × 10^{51}	(4)
SN 2009jh	0.349	−22.03		(4)
SN 2006oz	0.376	−21.53		(69)
SN 2010gx	0.230	−21.23	6 × 10^{50}	(4, 60)

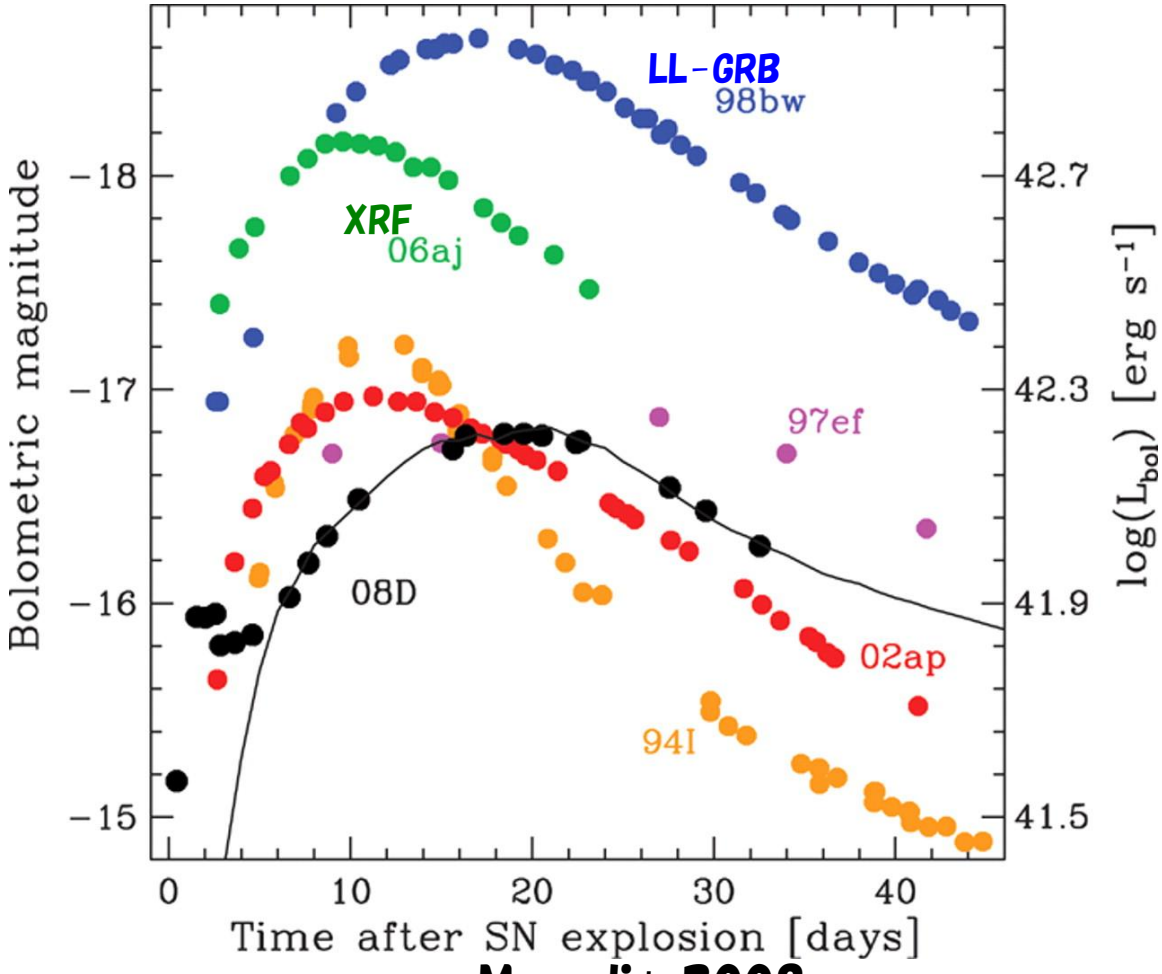
SLSN: 10^{-8} $Mpc^{-3}yr^{-1}$
解放エネルギー10^{52}erg
⇒1GRB

その他の超新星

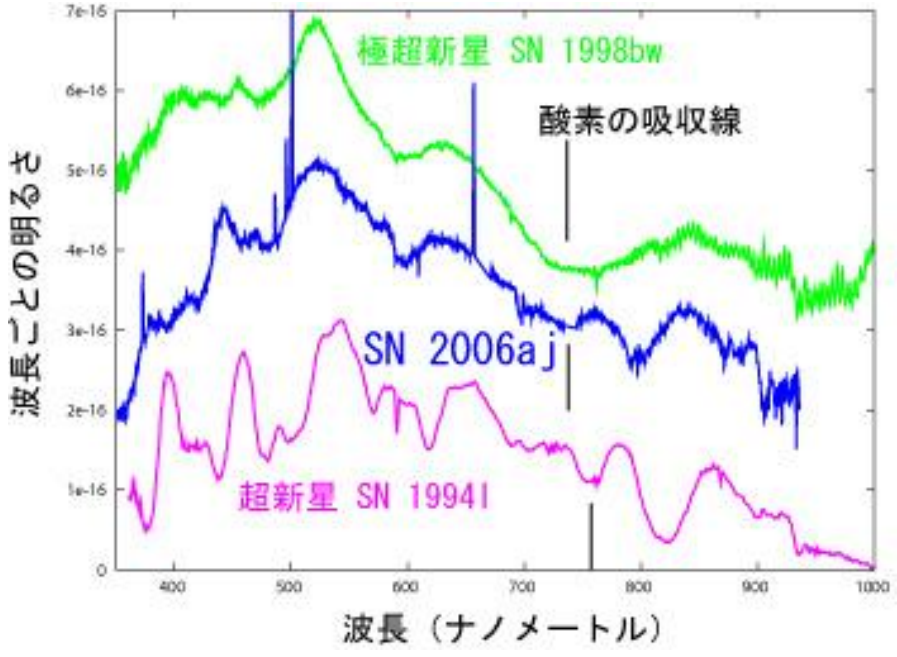
GUETTA & DELLA VALLE 2007

SN Ibc: 2×10^{-5} $Mpc^{-3}yr^{-1}$ 7%がHypernova

10^{52}ergのエネルギーを解放していれば、
～140GRB

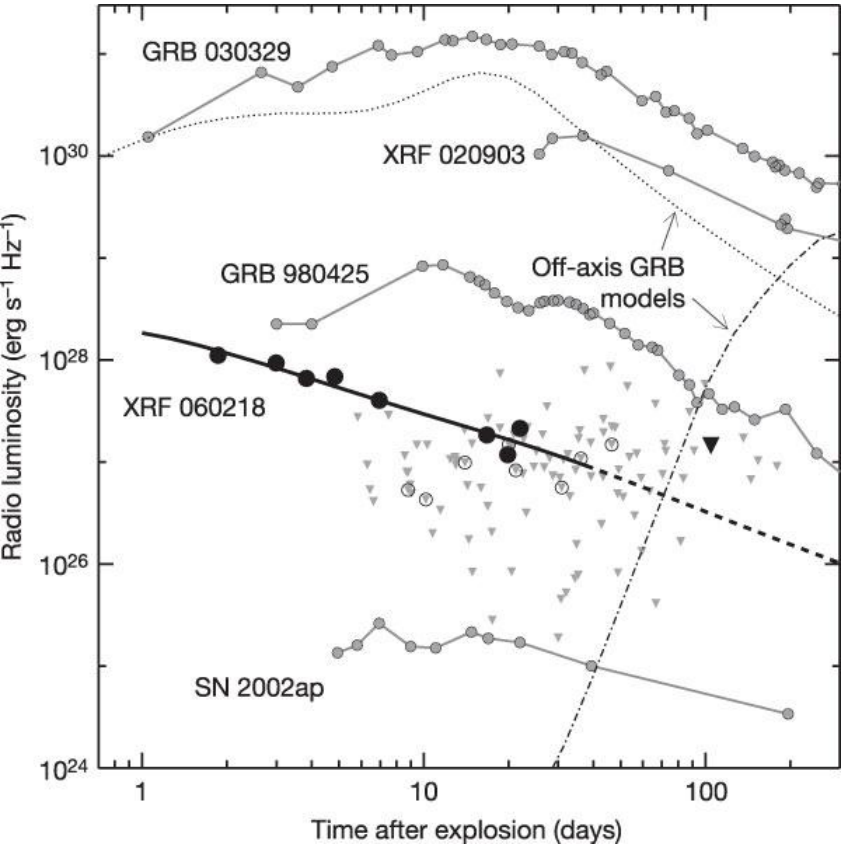


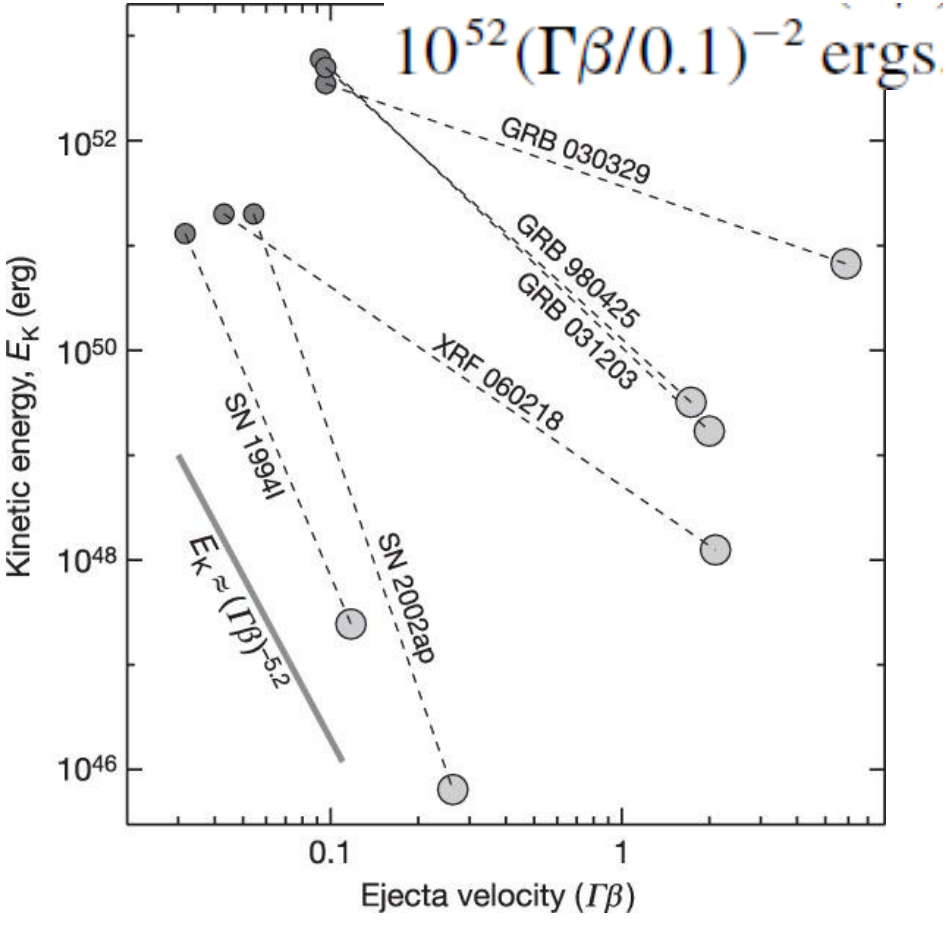
Mazzali+ 2008



Hypernovaの相対論的成分

電波の光度曲線

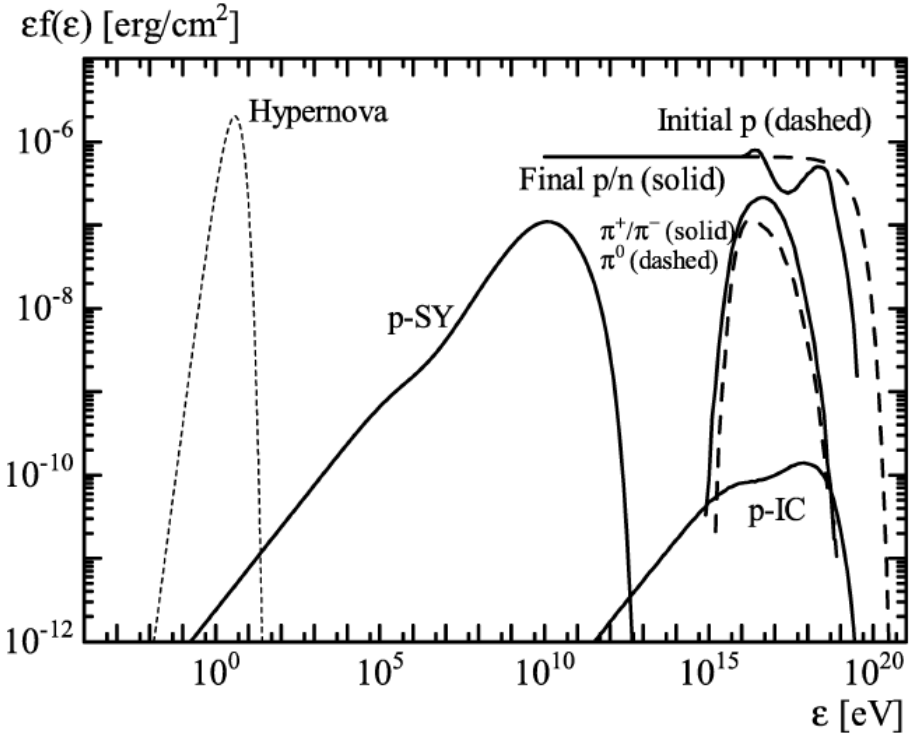


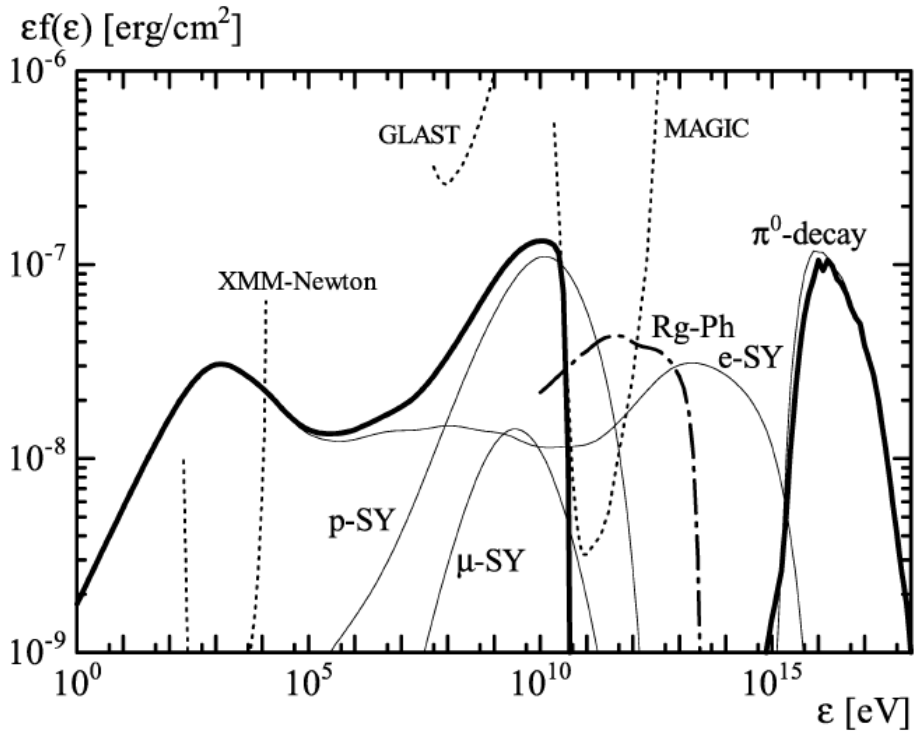


Soderberg+ 2006

Shock加速による高エネルギー陽子と、
超新星からの紫外線の相互作用が期待できる。

Hypernovaからのハドロン起源放射





$$\Gamma\beta = 1$$

$$\rho(r) = 5 \times 10^{11} A_* r^{-2}\ \mathrm{g\ cm^{-1}}$$

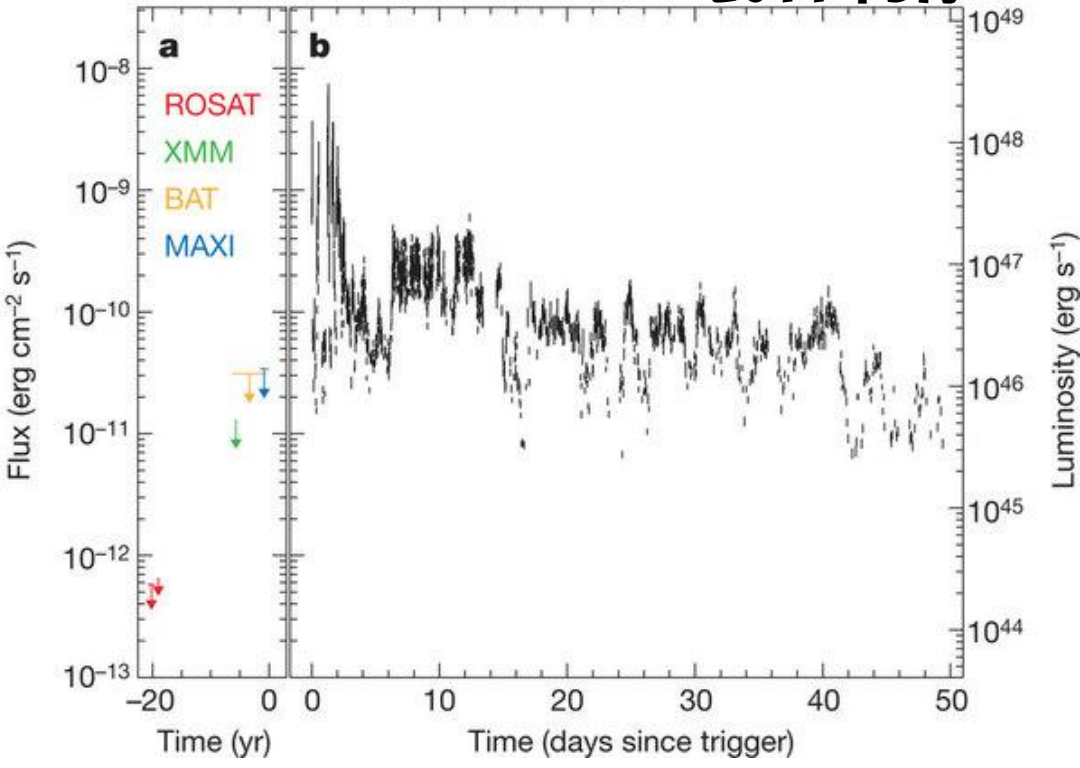
Asano & Meszaros 2008

PeVにピークが来て、期待できるかも

その他の突発現象

潮汐破壊現象

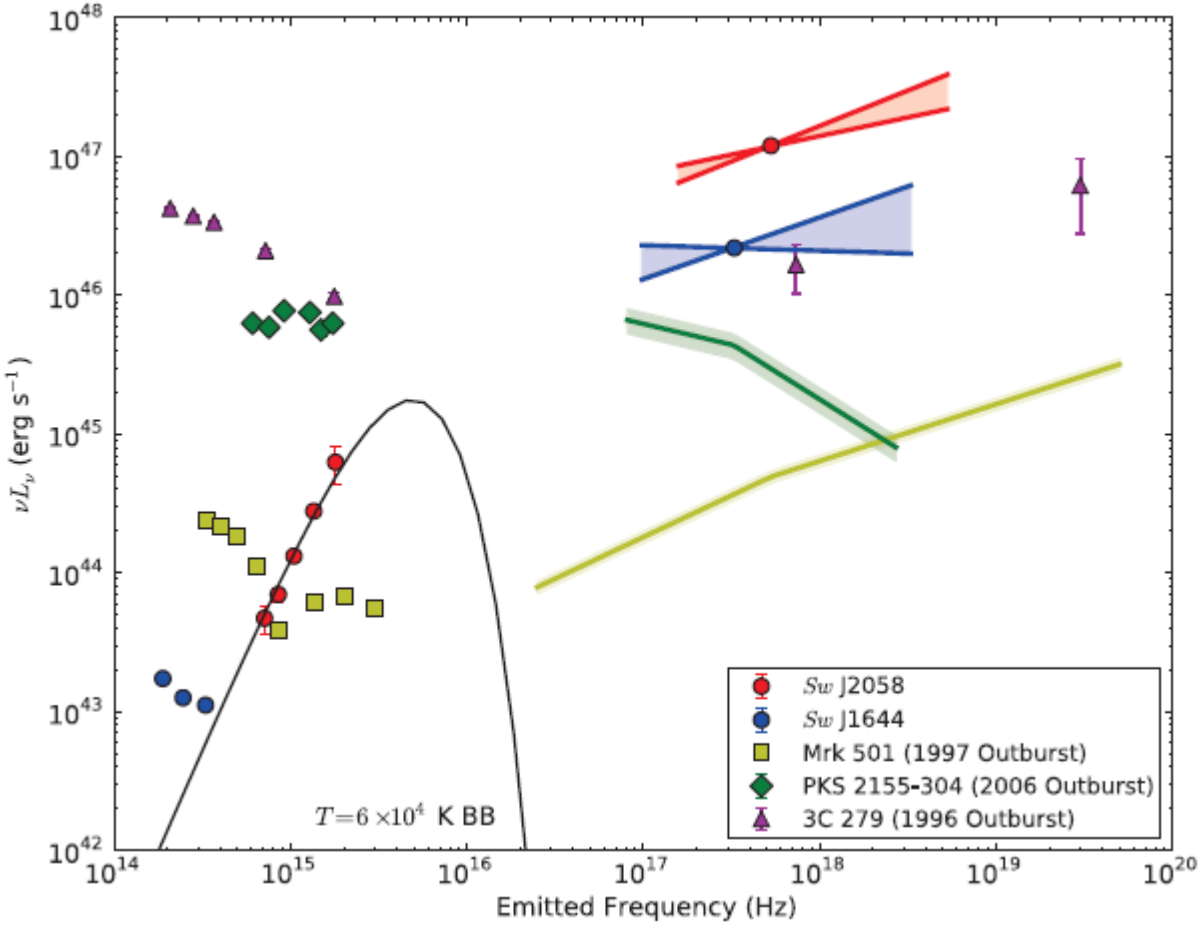
2011年3月



Swift J164449.3+573451

Bloom+ 2011

2例目：Swift J2058.4+0516



E_{iso}～5×10^{53}－10^{54}erg
～10^{-11} $Mpc^{-3}yr^{-1}$

⇒0.1GRB以下

今後も意外な突発天体現象が
発見される可能性がある。

Cenko+ 2012

まとめ

- Cosmogenic説：Kneeより上の宇宙線が銀河系外起源だとすれば可能。
- 銀河系内説
  - 近傍の特異な天体（TeV線源）
  - Fermi bubble
- 銀河系外天体説
  - Starburst galaxy
  - Hypernova
  - GRBを含むその他の突発天体