

スーパーカミオカンデにおける
ガンマ線バースト由来の
ニュートリノ探索

素粒子物理学研究室

41430218 原田 将之

2020年2月17日

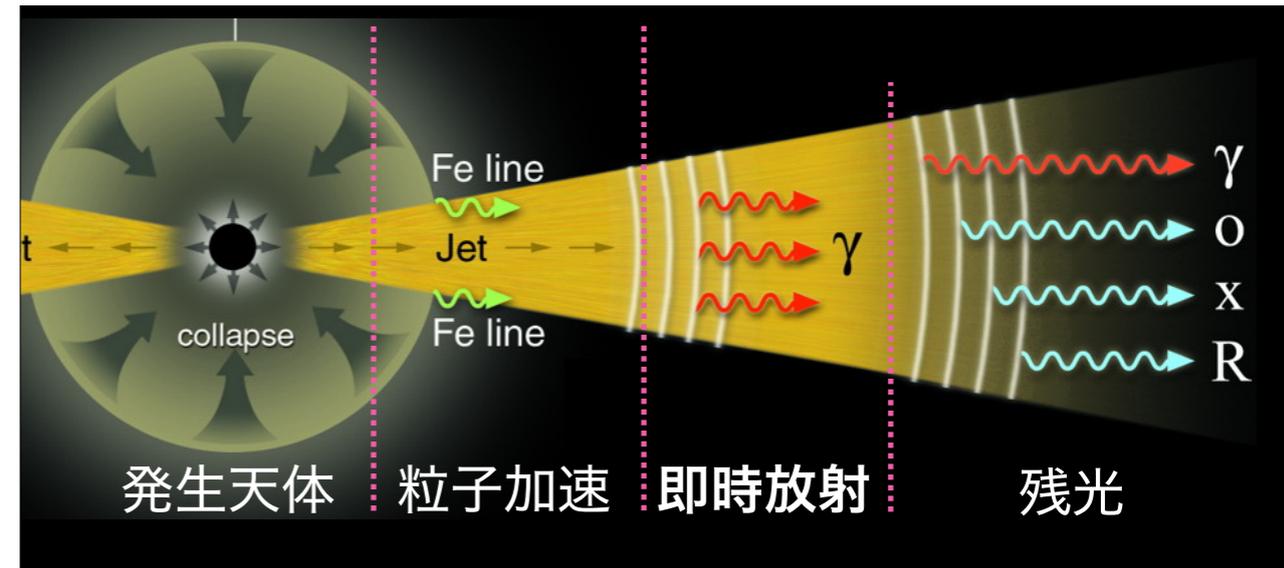
目次

1. ガンマ線バースト (GRB)
 - ・ GRBニュートリノ
2. スーパーカミオカンデ (SK) について
 - ・ SKにおける高エネルギーデータ
3. SKにおけるガンマ線バーストニュートリノ探索
 - ・ ニュートリノ信号の足し合わせによる探索
4. 考察
5. まとめ

ガンマ線バースト (GRB)

GRBとは。。。。

- ▶ 数秒程度で $\sim 10^{54}$ ergのエネルギー(太陽の一生分)の光子が観測される突発現象
- ▶ 大質量星の超新星爆発や中性子星連星合体との関連が示唆されている



P.Meszáros, *Science*, 291,79 (2001)

- ▶ 1967年に発見されて以降、1日一個以上が観測されている
- ▶ 荷電粒子からのシンクロトロン放射や π^0 の崩壊でガンマ線を放出→即時放射として観測される
- ▶ 即時放射の後、様々な波長帯で約1日の残光が観測される
- ▶ 光度の時間変化や光子放出の継続時間 T が多様 ($10^{-3} \text{ s} < T < 10^4 \text{ s}$)

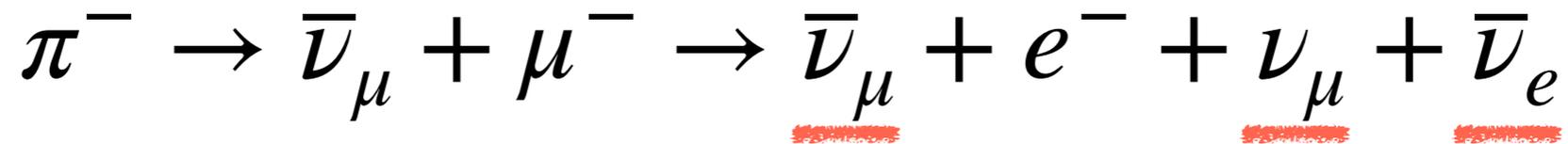
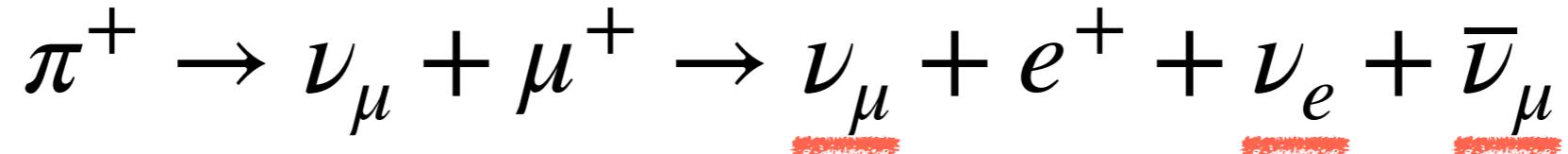
ジェットの加速や光子生成機構に多くの理論モデルが存在



光学観測と連携したニュートリノ観測が重要である

GRBニュートリノ

- パイ中間子の崩壊ではニュートリノが生成される



- 親粒子のエネルギースペクトルからニュートリノスペクトルが予想されている。

- ①：加速陽子によるpγ反応モデル



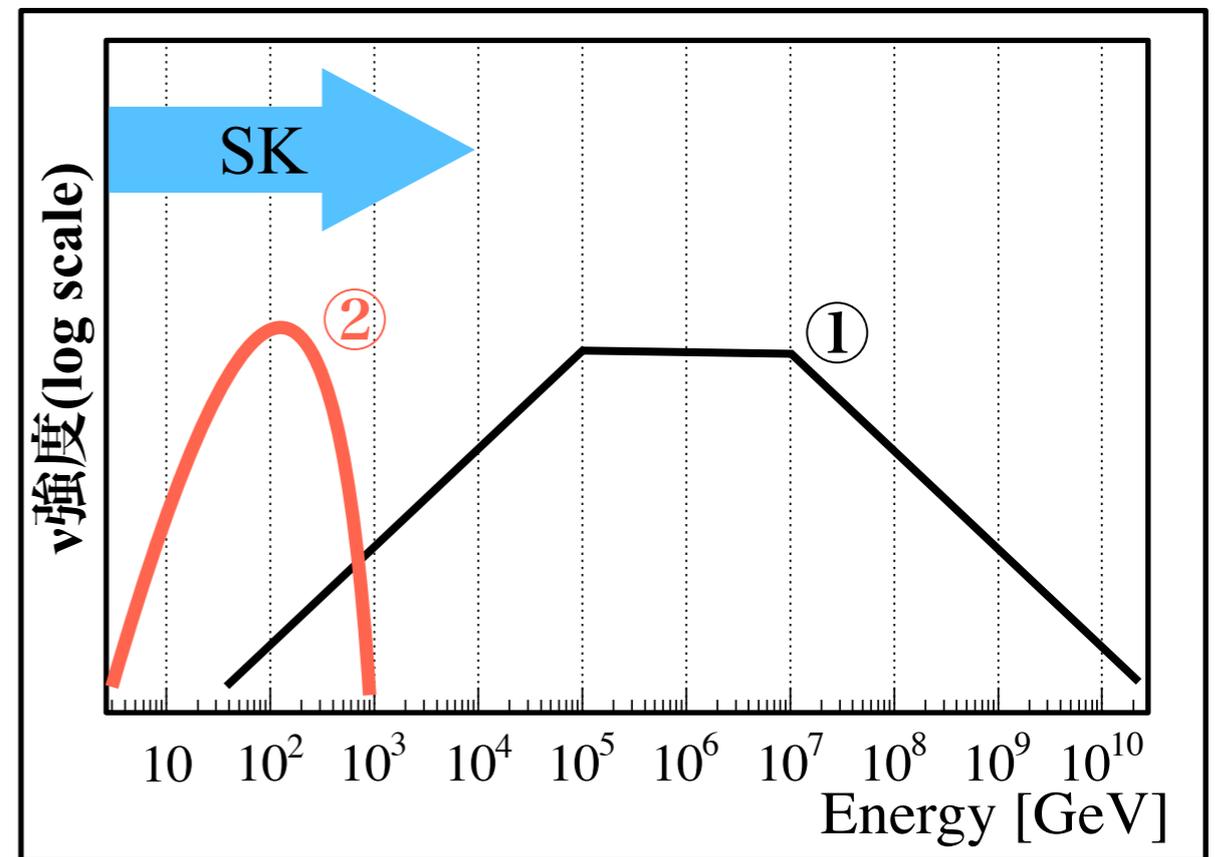
100 TeV付近にピーク

- ②：非弾性衝突による核子反応モデル



100 GeV付近にピーク

ニュートリノ観測からモデルを検証できる



スーパーカミオカンデ (SK)

★世界最大の水チェレンコフ型ニュートリノ検出器

✓岐阜県神岡鉱山地下1000 mに建設

✓50 ktonの超純水

✓内水槽ID・外水槽ODを使った事象識別



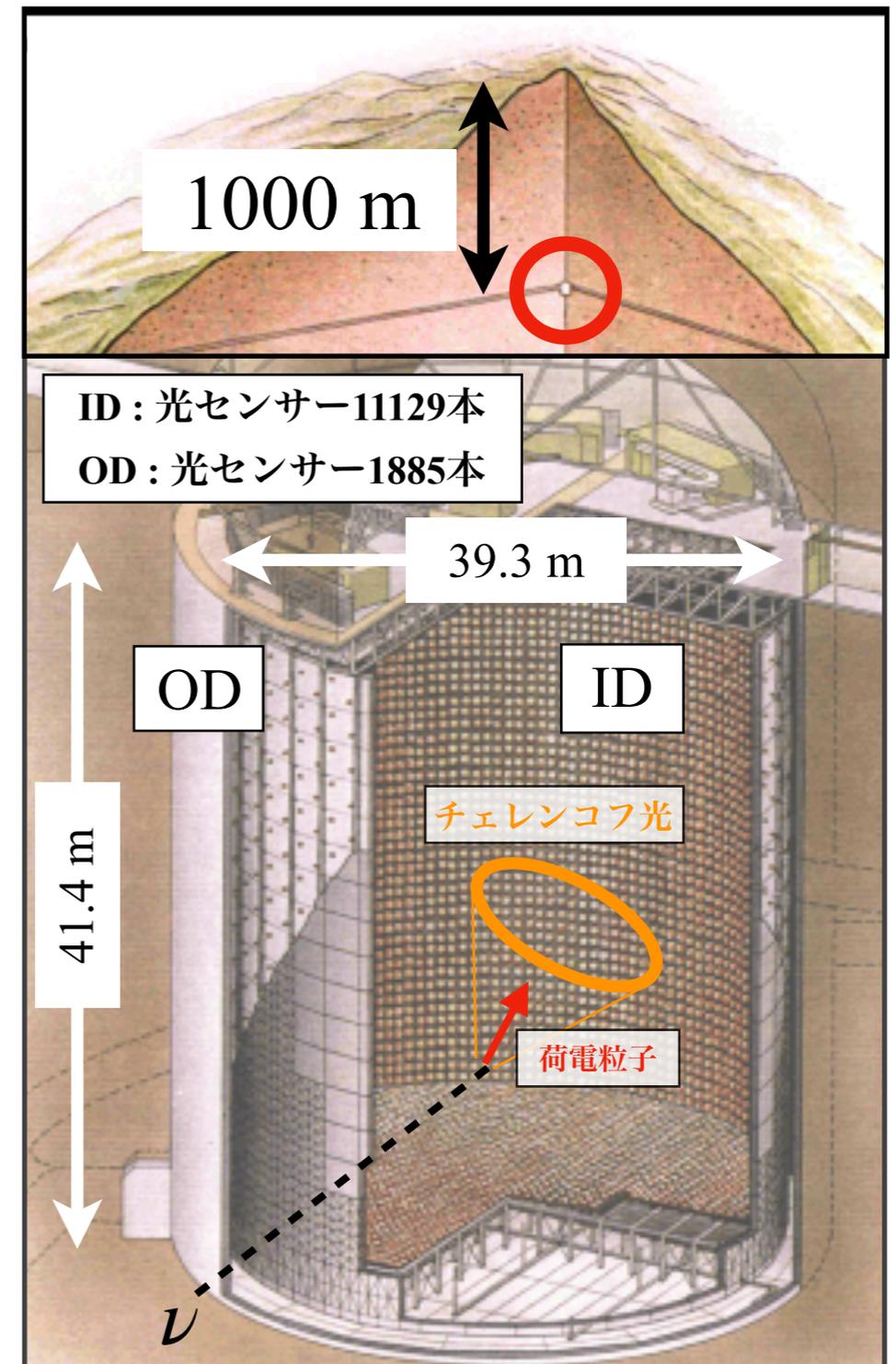
宇宙線ミュオンなどのバックグラウンドを低減した
ニュートリノ観測

本研究で用いたデータ

- 観測期間：1996年4月~2018年2月
- 測定時間：(Livetime)5924.4 日
- SK稼働中に望遠鏡が観測したGRB：3864 個
- エネルギー領域：1 GeV ~ 10 TeV



バックグラウンドは
大気ニュートリノ事象



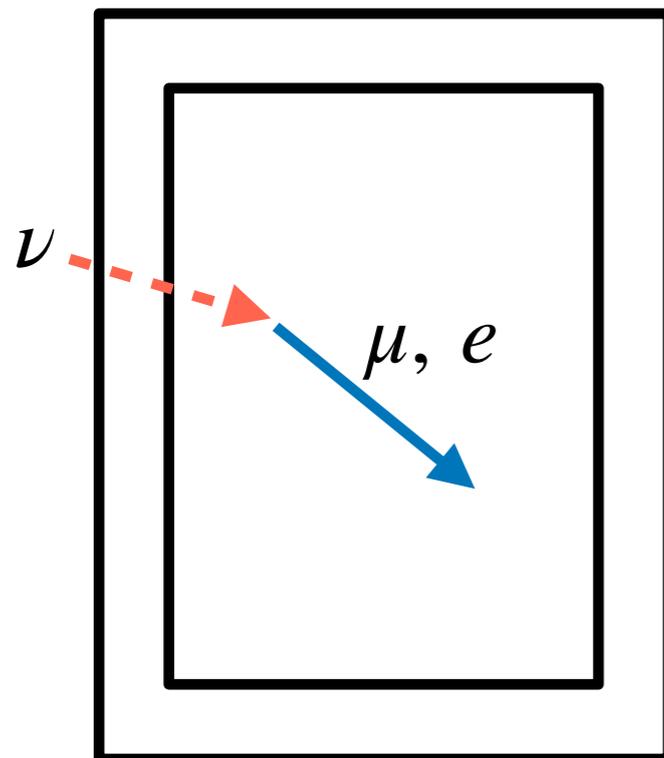
スーパーカミオカンデ 公式ページ

(<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/library/image.html>)

高エネルギーデータ

SKの高エネルギーニュートリノ事象は大きく3種類に分類される

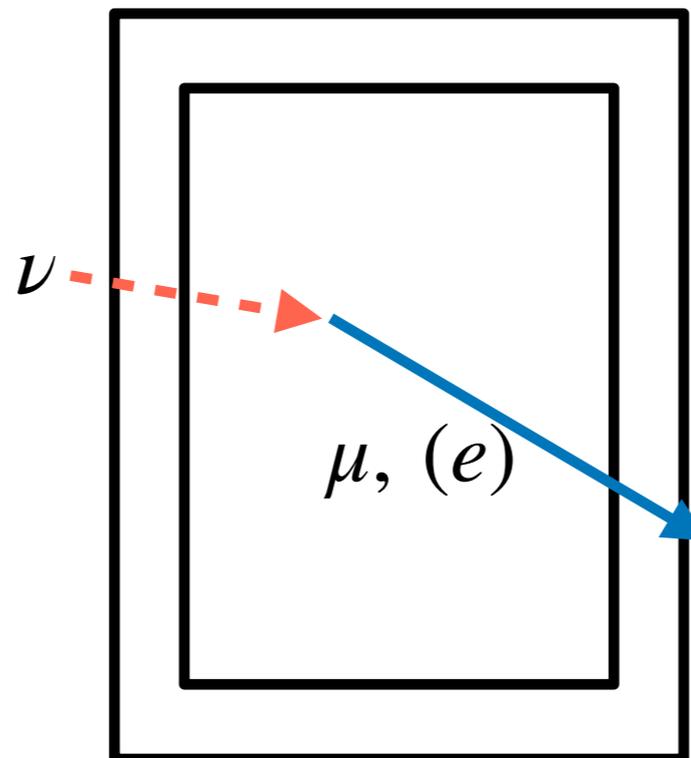
Fully-Contained
(FC)



100 MeV ~ 10 GeV

ID内で荷電粒子生成
→ODに到達しない

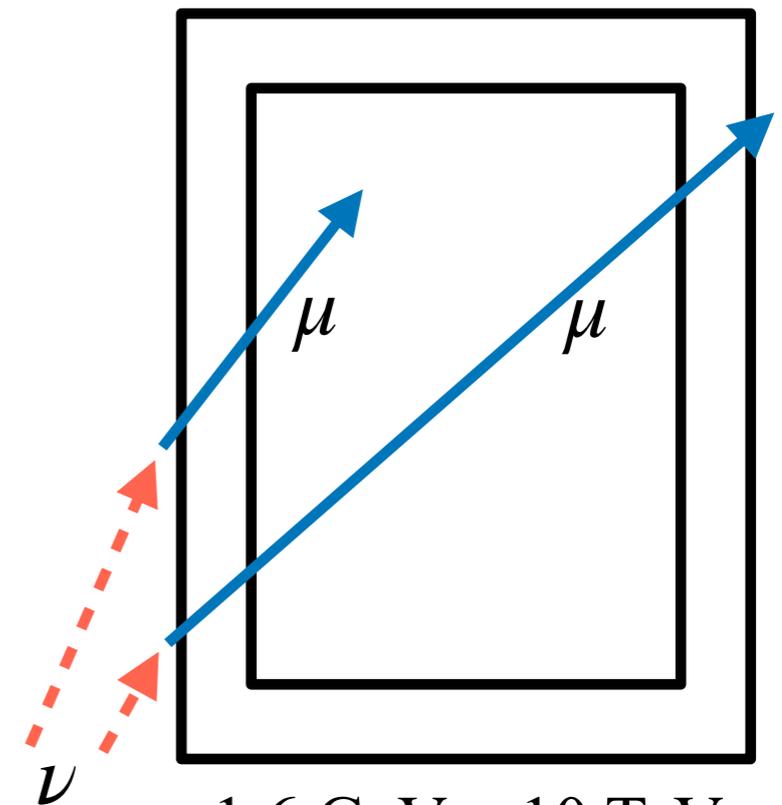
Partially-Contained
(PC)



1 GeV ~ 100 GeV

ID内で荷電粒子生成
→ODに到達

Upward-going Muon
(UPMU)



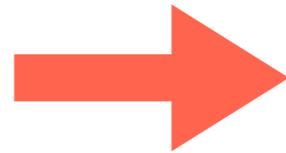
1.6 GeV ~ 10 TeV

地球の裏から飛来したνが
岩盤で反応

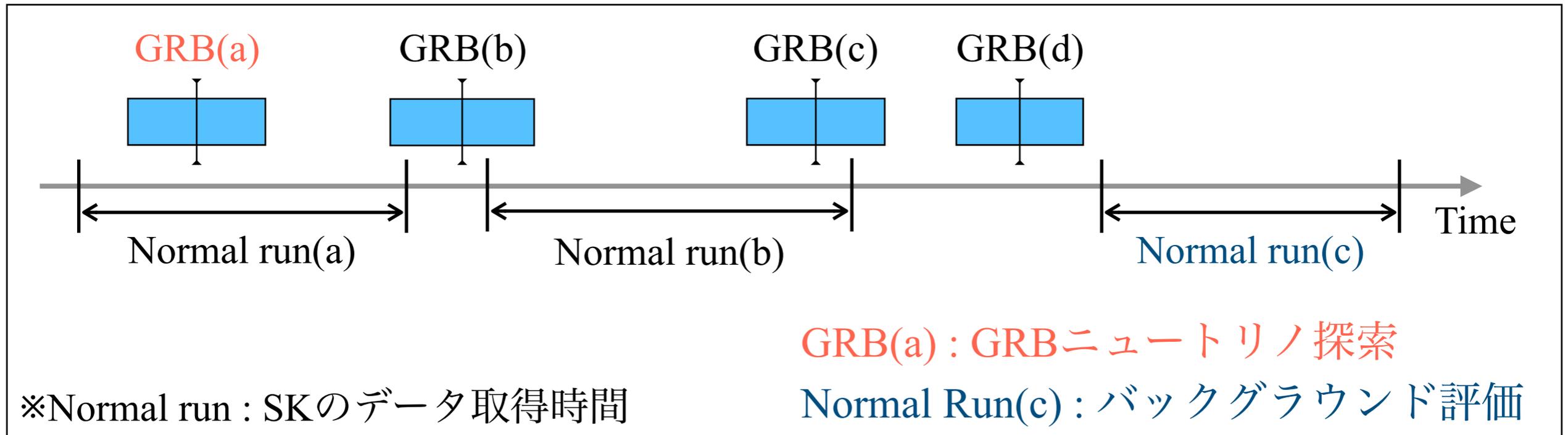
GRBニュートリノノ探索

GRBニュートリノ探索

GRBニュートリノ探索



GRB発生時間の周囲(Time Window)の事象数がBG期待値より有意(3σ 以上)に大きいのか？



2通りの探索手法

1. 単一GRBでの探索

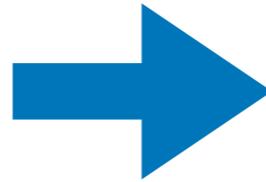
→ ガンマ線放出継続時間を使って、探索時間を制限してバックグラウンド削減

2. 全GRBからの ν 信号を足し上げて探索

→ ニュートリノ信号の合計を用いてBGからの超過を探索

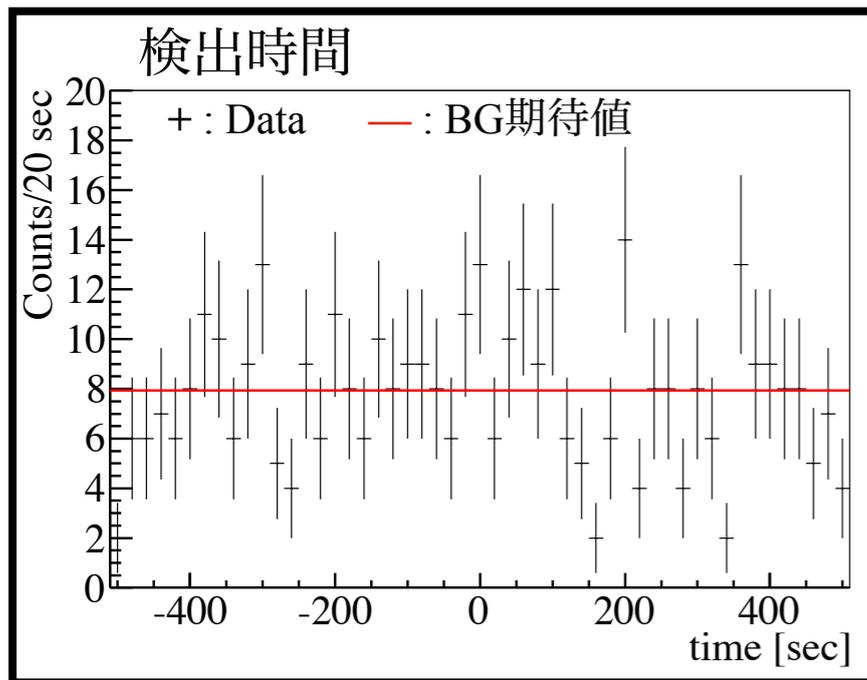
ニュートリノ信号の足し合わせでの探索

- ▶ GRB発生時間±500 sをTime windowに設定
- ▶ 3737個のGRBの足し合わせで探索
- ▶ BGは大気ニュートリノを仮定

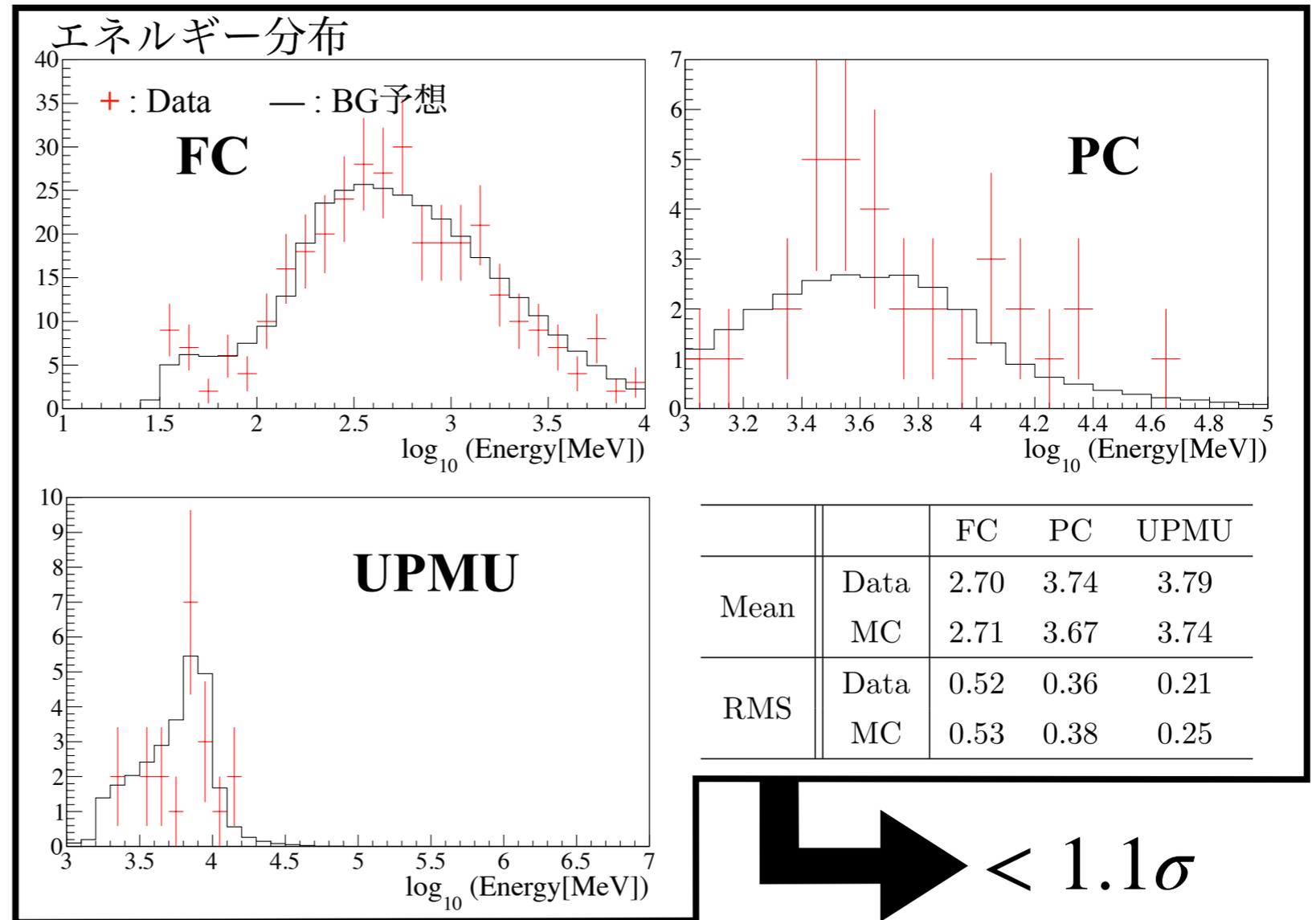


観測事象数	Data	MC
FC	339±18.4	349.1
PC	33±5.8	27.3
UPMU	20 ± 4.4	28.6

< 1.0σ



< 1.4σ

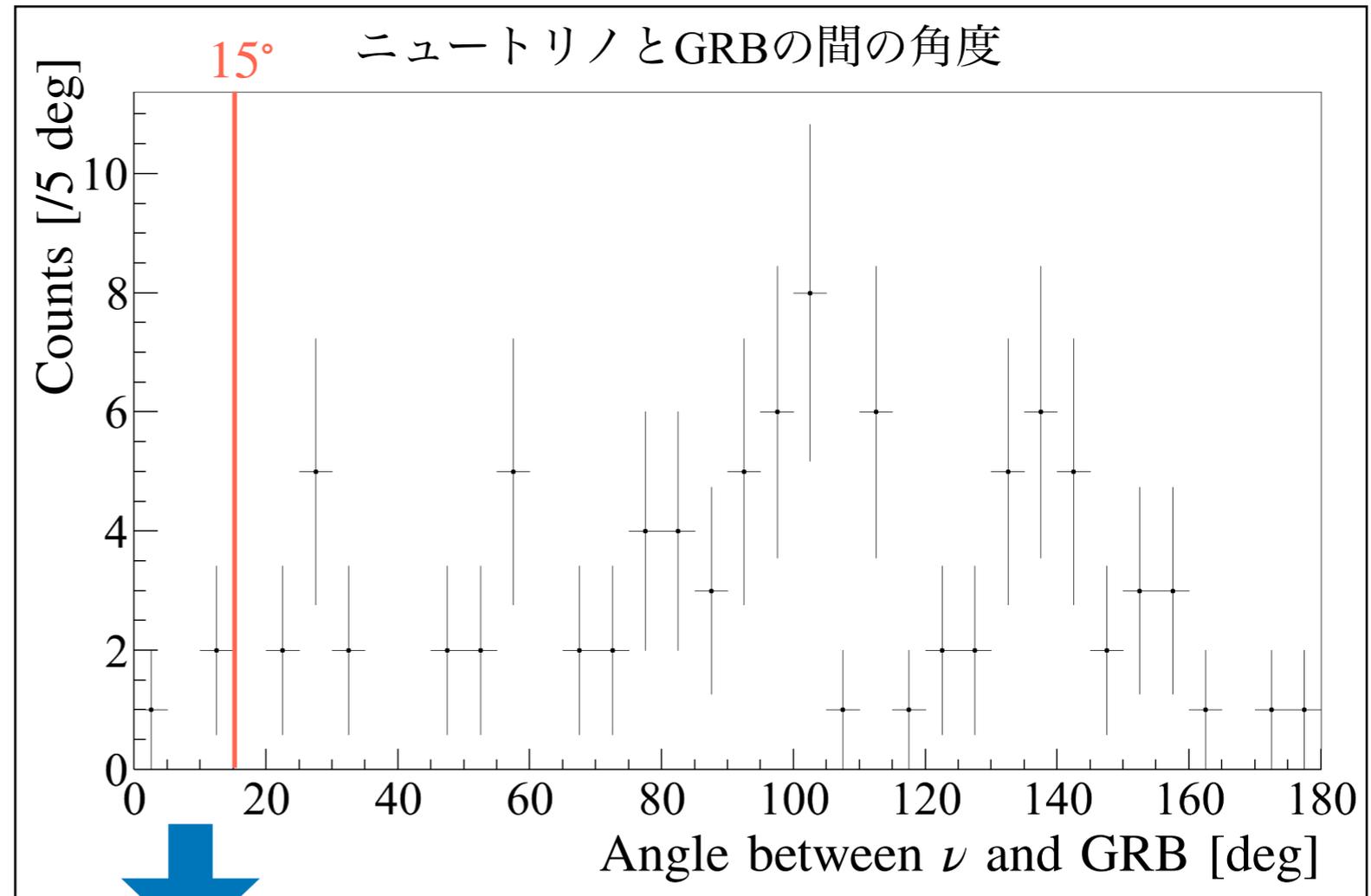
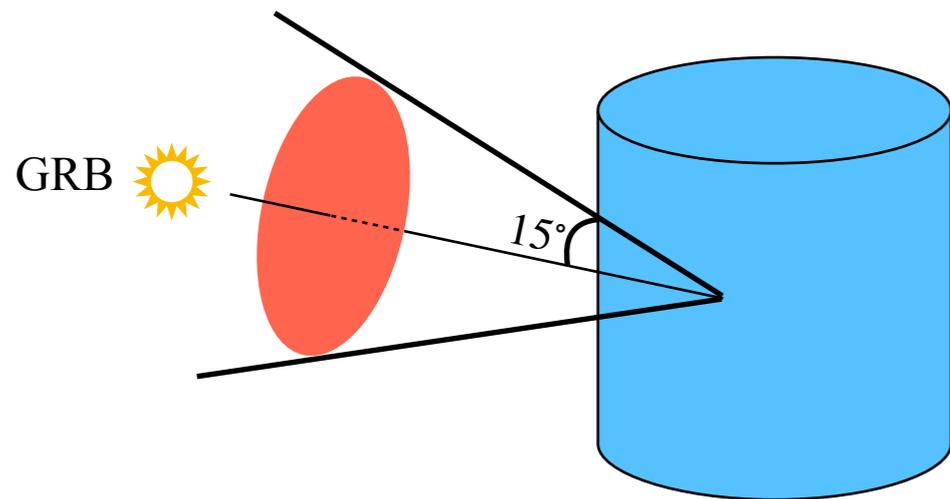


< 1.1σ

それぞれの検証でBGからの有意な超過は見られなかった

ν -GRB 方向相関

ニュートリノとGRBの成す角に
15°以内の制限をかけた
 BGを削減した



	FC	PC	UPMU
Data	2 ± 1.4	0	1 ± 1
BG	0.77	0.48	0.76

0.9 σ 以内でBGと無矛盾

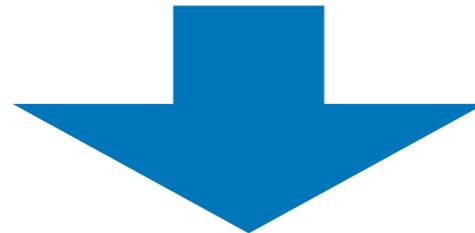
探索結果からの考察

ニュートリノ探索結果

	BGからの超過
イベント数	$<1.0 \sigma$
観測時間	$<1.4 \sigma$
エネルギー分布	$<1.1 \sigma$
角度制限	$<0.9 \sigma$

GRBニュートリノ観測には 3σ 以上を要求する

→BGからの有意な超過は得られなかった



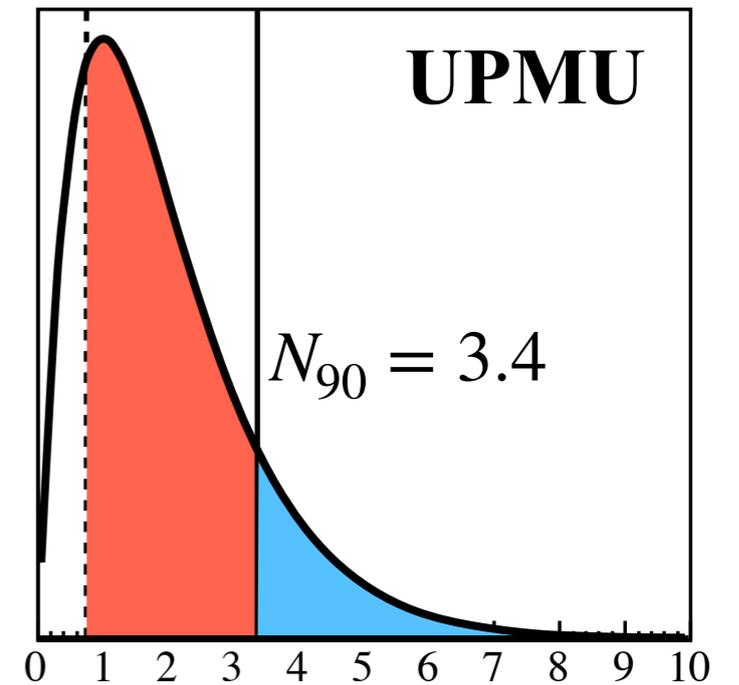
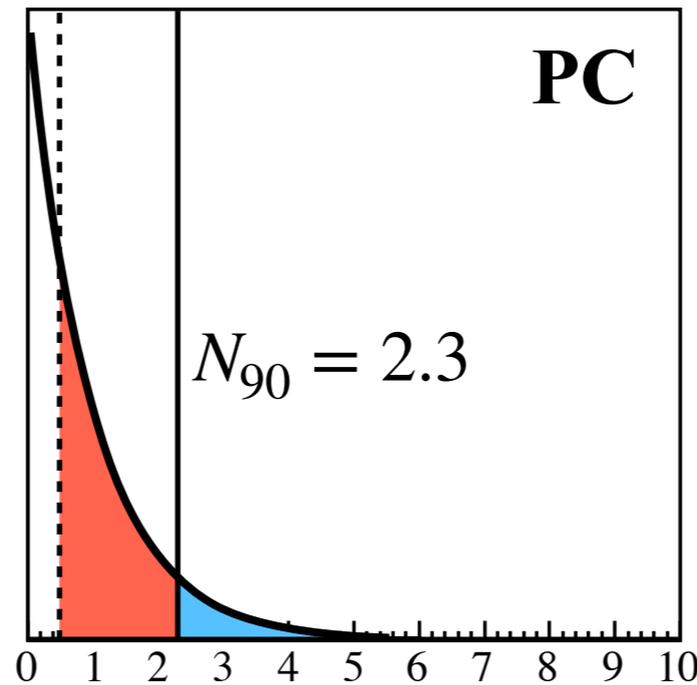
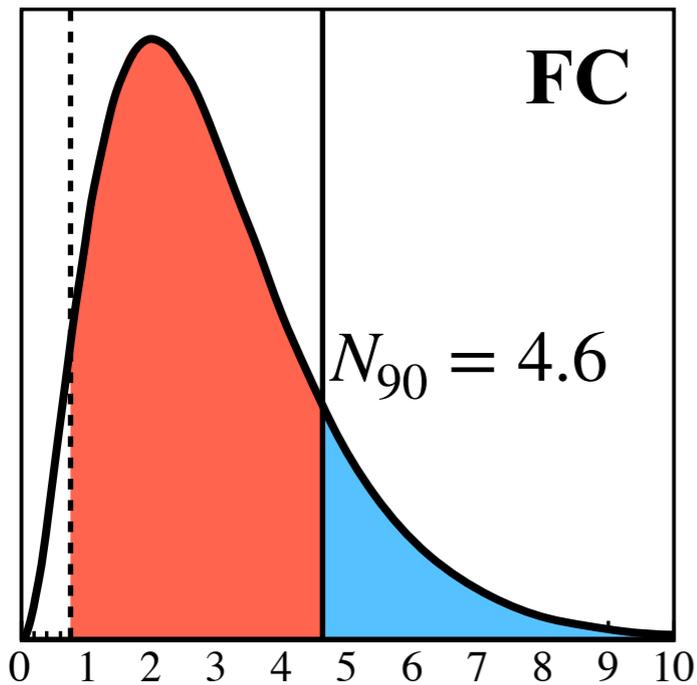
今回の結果からモデルに制限を与えることができる

90%信頼度上限(90%C.L.)

観測結果から、GRBニュートリノの事象数に対しての
90%C.L.(N_{90})を計算する

FC	PC	UPMU
2 ± 1.4	0	1 ± 1
0.77	0.48	0.76

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



フルエンス [$/\text{cm}^2$] (1 cm^2 あたりの事象数)

フラックス [$/\text{s}/\text{cm}^2$] (1 cm^2 , 1 sあたりの事象数)

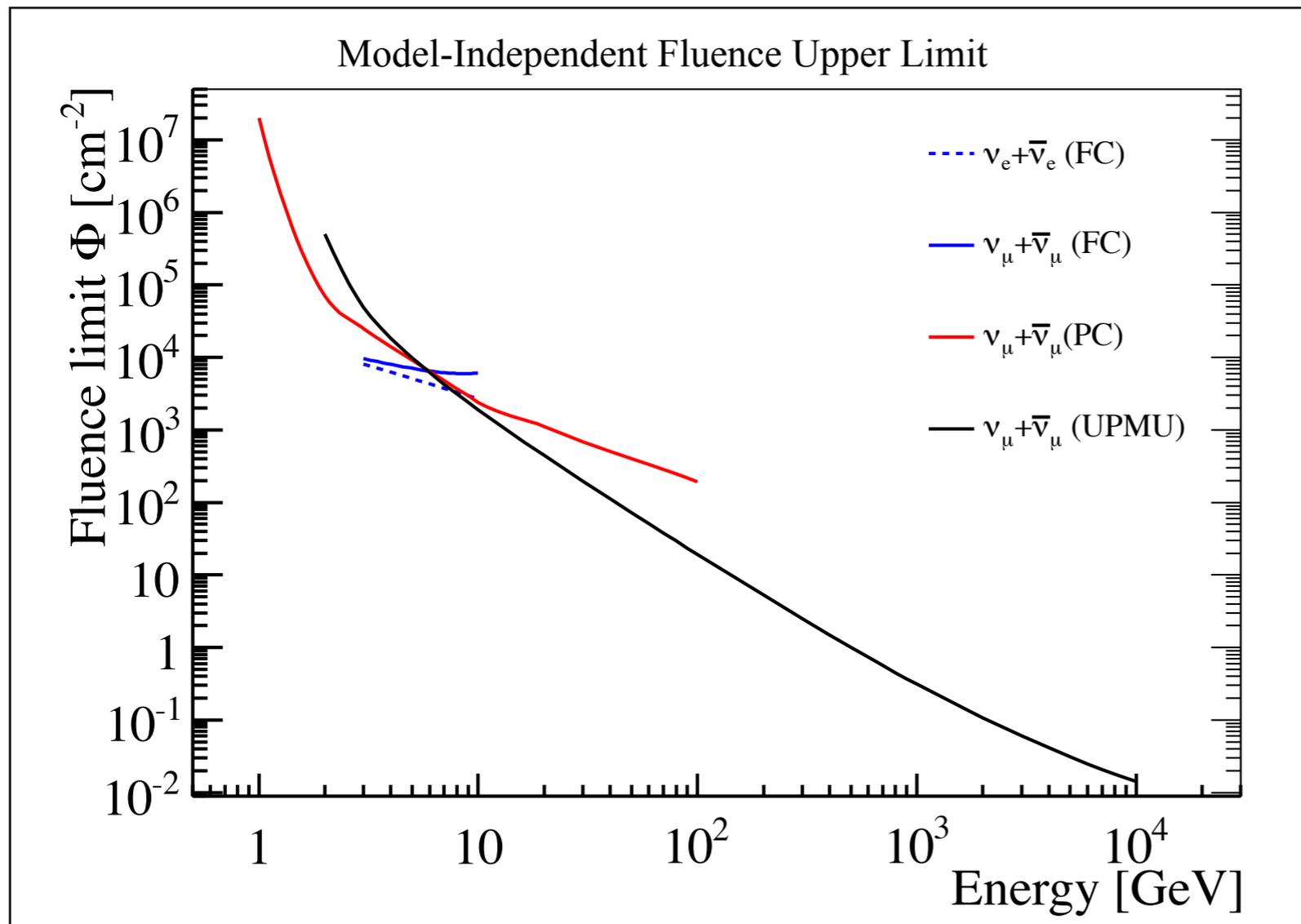
} の上限値を計算できる

フルエンス上限値

ニュートリノモデルに依存しないフルエンス Φ について計算する

$$\Phi(E_\nu)[\text{cm}^{-2}] = \frac{N_{90}}{N_T \times \sigma(E_\nu) \times \varepsilon(E_\nu)}$$

N_{90} ← 事象数の90%上限値
 $N_T \times \sigma(E_\nu) \times \varepsilon(E_\nu)$ ← ターゲット数×断面積×検出効率



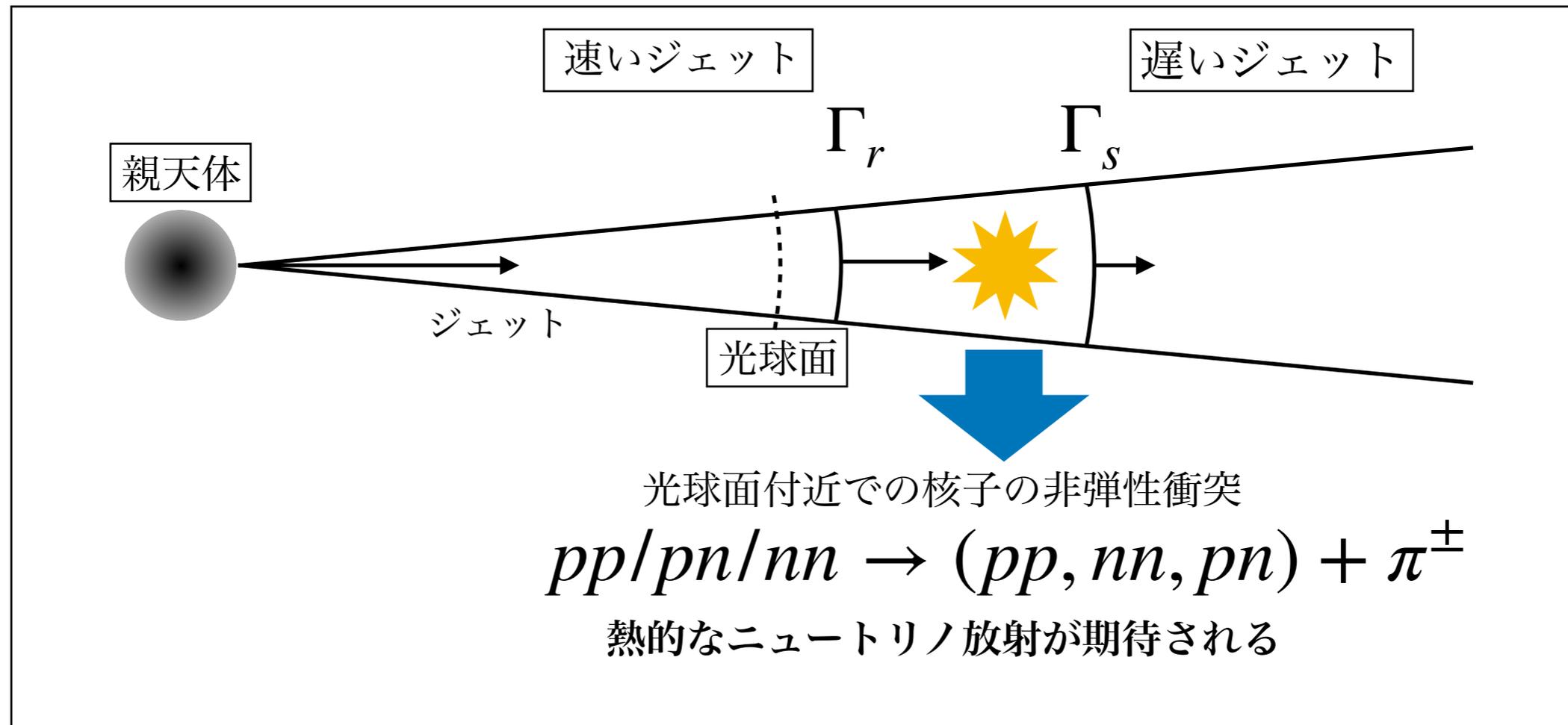
モデルに依存した数密度
 $\lambda(E_\nu)$ を仮定

モデル依存フルエンス F

$$F = \left[\int \frac{\lambda(E_\nu)}{\Phi(E_\nu)} \right]^{-1}$$

理論モデルと
比較することができる

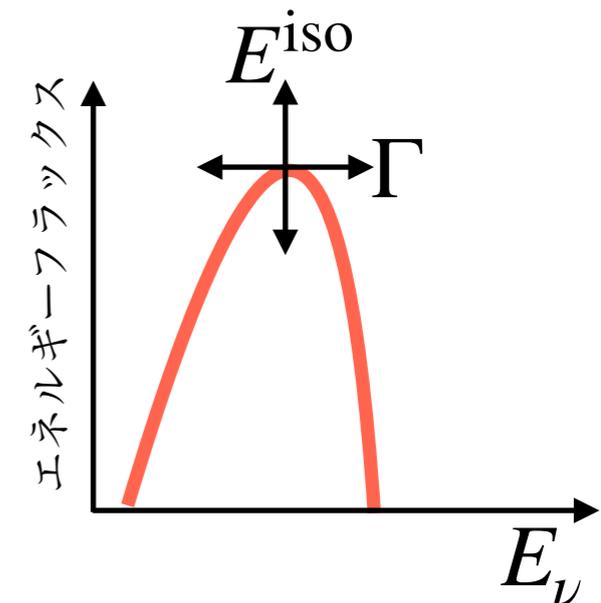
核子反応モデル



モデルパラメータ

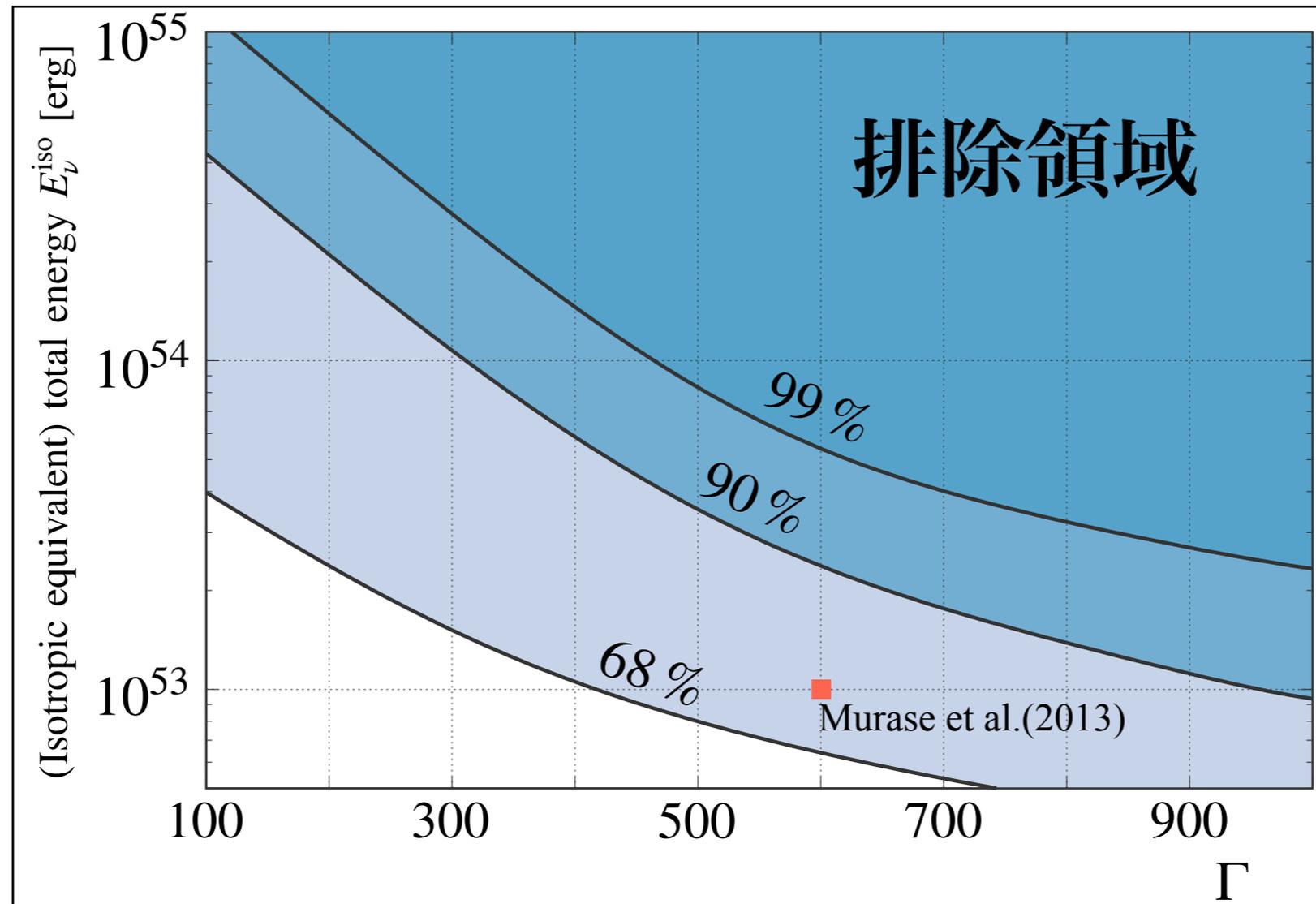
- 衝突面でのローレンツ因子 Γ
- ニュートリノ総放出エネルギー E_ν^{iso}

を設定して スペクトルの数値計算 が行われている



核子反応モデルのパラメータ

SKの感度領域でフルエンスをエネルギー積分することで、GRBのローレンツ因子 Γ と総放出エネルギーのパラメータについて上限値を計算した



パラメータ空間の上限値を世界で初めて設定し、
このモデルの典型値($\Gamma=600, E_v^{\text{iso}}=10^{53}$)を68%信頼度で除外した

まとめ

* ニュートリノはGRBの粒子放出機構の解明に重要である。

SKを使って、大気ニュートリノ事象をバックグラウンドに想定し、GRBニュートリノを探索した。

→有意な信号は得られなかった

90%C.L.上限を計算し、世界初のパラメータ制限を行い、モデルの典型値を68%で除外した。

時間・方向情報の相関を使って、よりBGを削減し、感度を向上させることが可能。

修士・博士での研究

SKでは来年度から中性子信号を検出する新実験(SK-Gd)が始まる

修士での研究

- 「ハイパーカミオカンデにおける中性子同定効率の評価」
- 「SK-Gd実験における新たな検出器シミュレーションの開発」
- 「SKの検出器校正実験データの解析」
- 「SK-Gdのための環境希土類元素測定」
- 「SKにおけるGRB由来のニュートリノ探索」

研究業績

- 論文：7本 (KMI Proceedings、Neutel Proceedings、ICRC Proceedings、TAUP Proceedings、PTEP(2019)[†]、ApJ(2019)[†]、ApJL(2019)[†]) ^{†Co-author}
- 国際学会発表：5回 (SneGWv2018, KMI2019, Neutel2019, ICRC2019, TAUP2019)
- 国内学会発表：5回 (JPS 3回, Flavor Physics workshop2018(ポスター賞), 新学術地下素核研究会)

博士からの研究

研究テーマ：「SK-Gdでの超新星背景ニュートリノ探索」

ありがとう
ございました



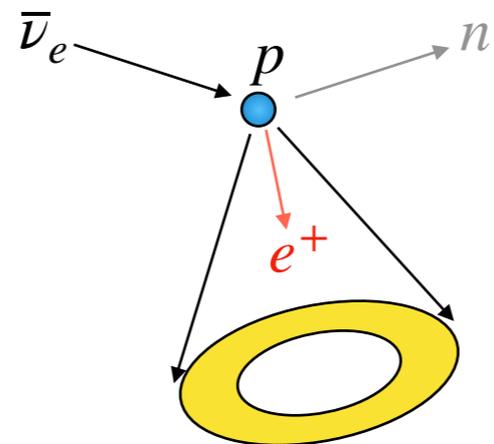
BACK UP

スーパーカミオカンデ (SK)

- 水チェレンコフ型ニュートリノ検出器
 - ▶ 神岡鉱山地下1000 mに建設、50 ktonの超純水

ID(光センサー11129本) : 事象観測

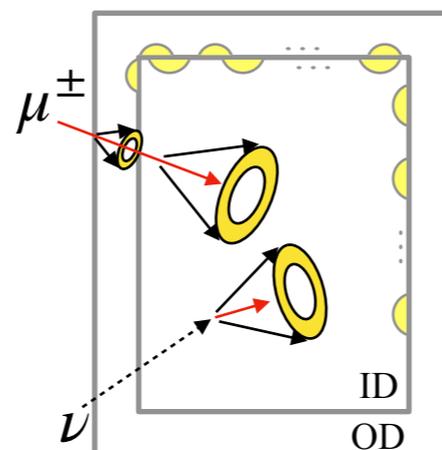
ν 反応で生成された荷電粒子の
チェレンコフ放射
→光センサーで検出、
荷電粒子の情報を再構成



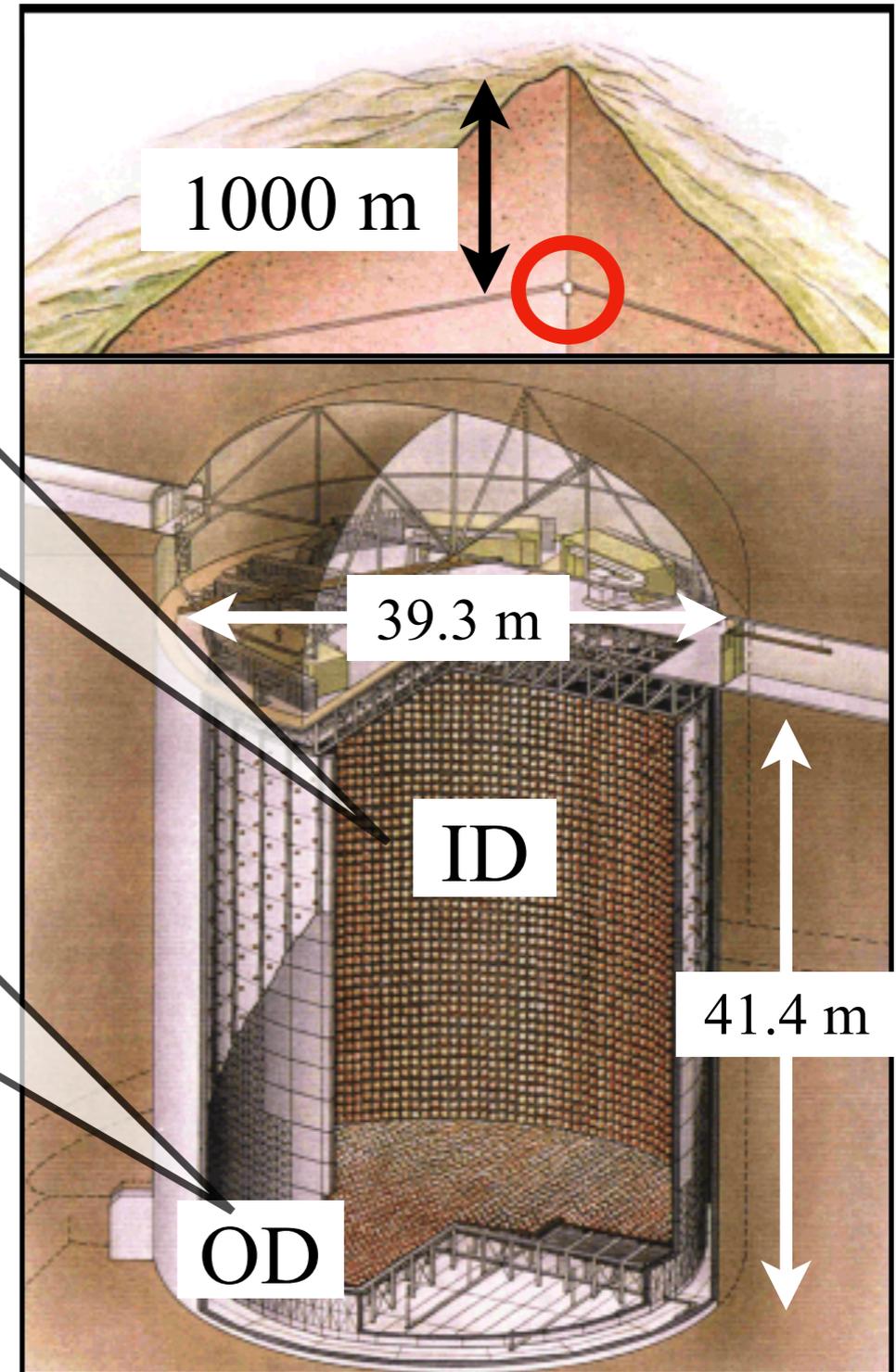
例 : $\bar{\nu}_e$ の逆ベータ崩壊

OD(光センサー1885本) : VETO

宇宙線ミュオンなどの背景事象は
ODでもチェレンコフ放射
→ミュオンVETOなど、
事象識別に用いられる



宇宙線ミュオンなどのバックグラウンドを低減した
ニュートリノ観測



スーパーカミオカンデ公式ページ

(<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/library/image.html>)

大気ニュートリノノBGの評価

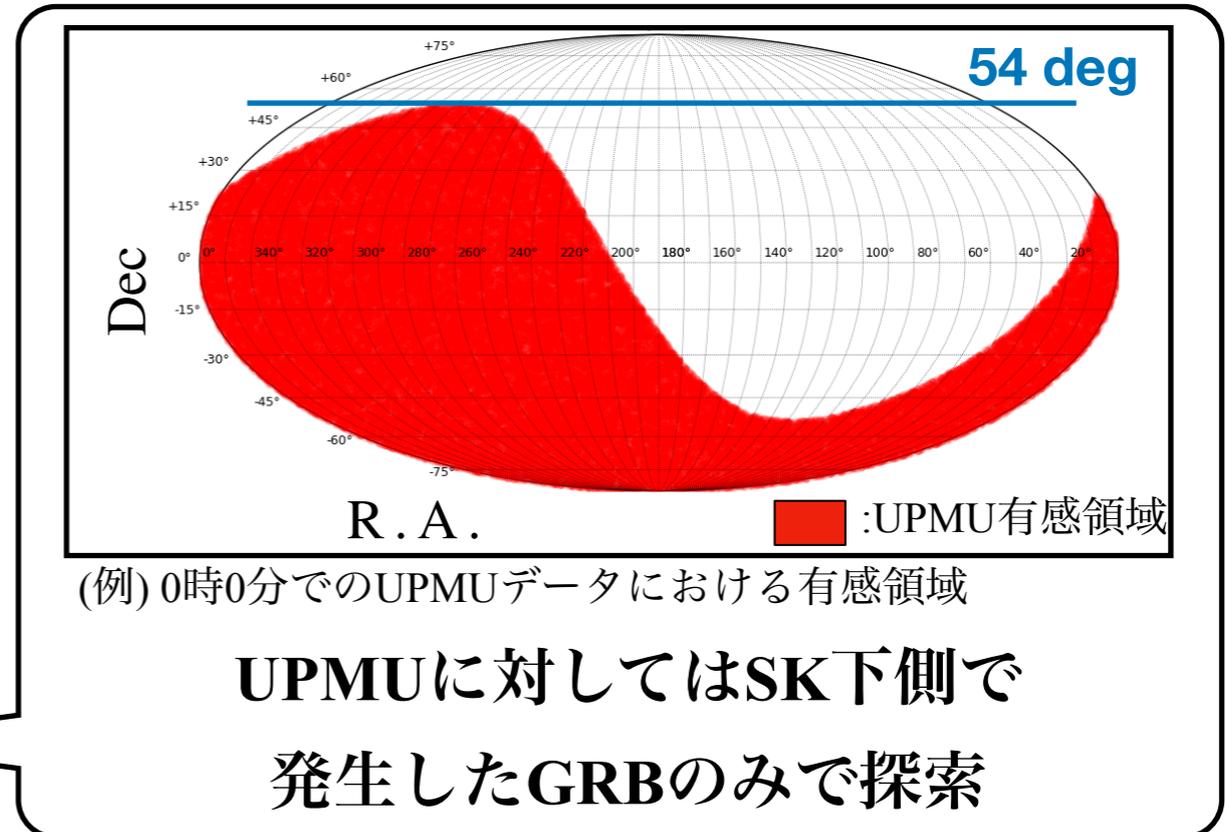
Time windowを設定してバックグラウンドを削減する

Time Windowの定義

$$\left\{ \begin{array}{ll} -3 \times 2.0 \text{ s} \sim 4 \times 2.0 \text{ s} & (T_{100} < 2.0 \text{ s}) \\ -3T_{100} \text{ s} \sim 4T_{100} \text{ s} & (2.0 \text{ s} \leq T_{100} \leq 50.0 \text{ s}) \\ -3 \times 50.0 \text{ s} \sim 4 \times 50.0 \text{ s} & (50.0 \text{ s} < T_{100}) \end{array} \right.$$



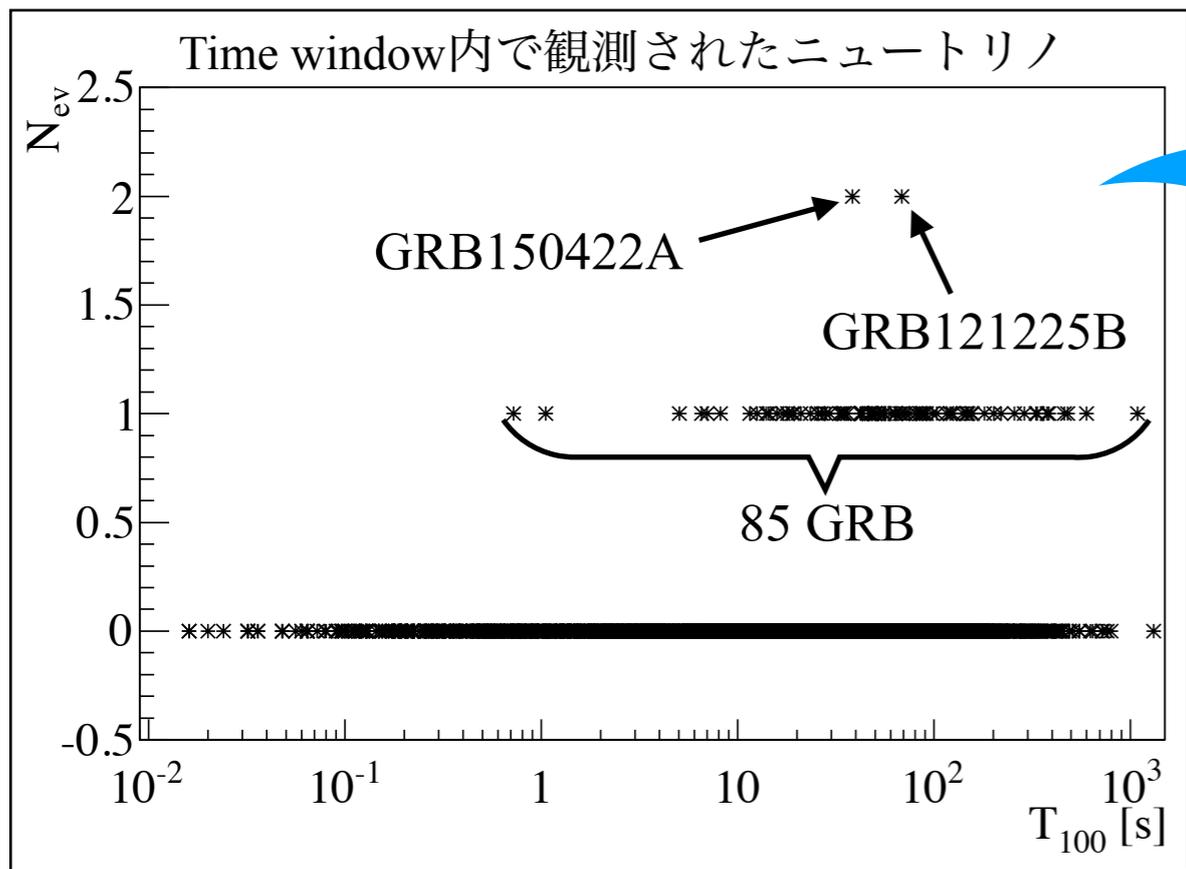
	FC・PC	UPMU
探索GRB数	3473	1602



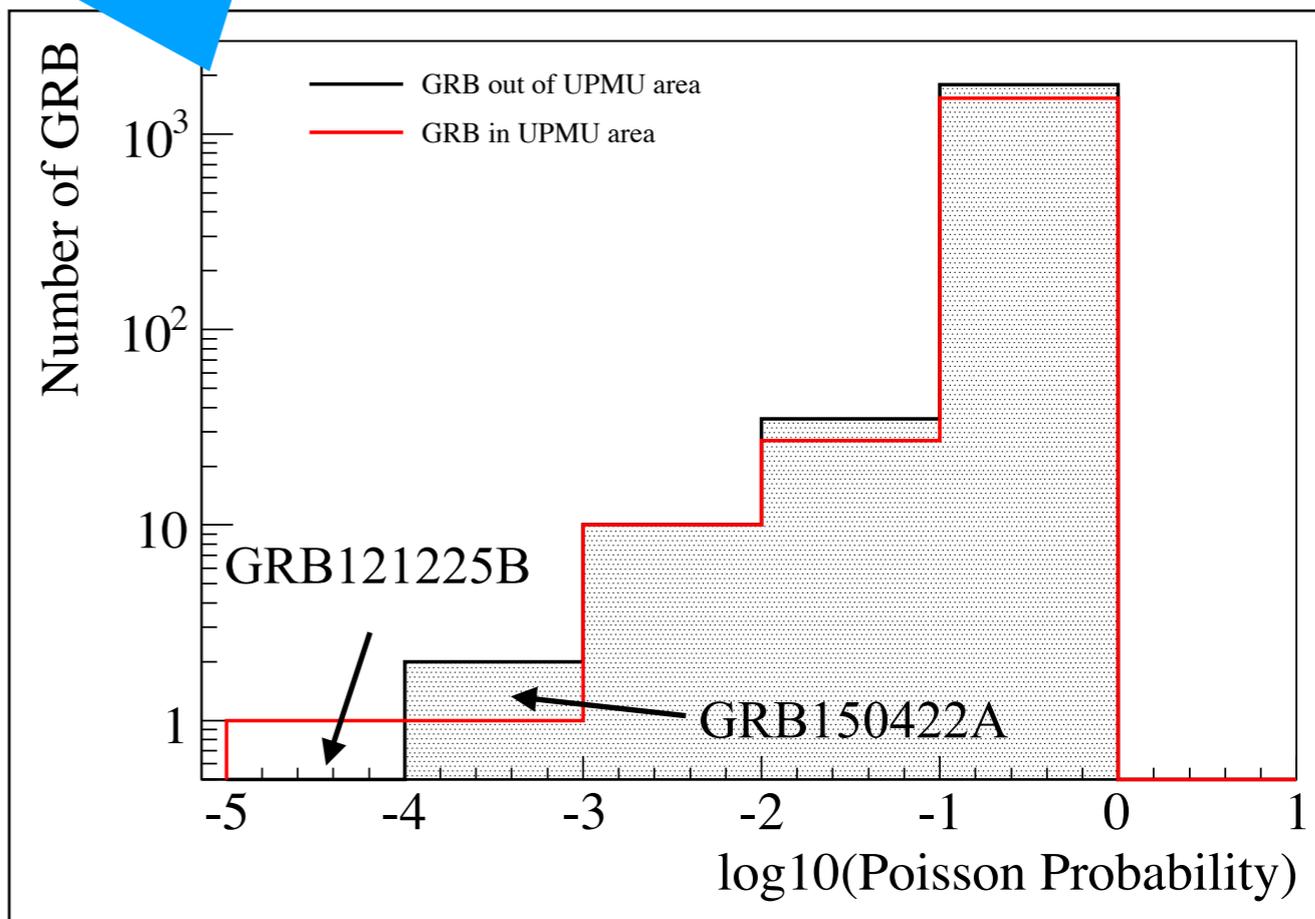
イベントレート [$\times 10^{-5} / \text{sec}$]	Data	MC
FC	9.44 ± 0.05	9.43
PC	0.72 ± 0.02	0.74
UPMU	1.60 ± 0.04	1.57

バックグラウンド(BG)レートはMCと 1σ 以内で無矛盾

結果



期待値 λ のポアソン分布で
 $X=k$ 回事象が起こる確率 $P(X = k, \lambda) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$
 $P(N_{FC}, Bkg_{FC}) \times P(N_{PC}, Bkg_{PC}) \times P(N_{UPMU}, Bkg_{UPMU})$



Time windowとBGレートから
 バックグラウンド由来である確率を計算

低確率であったGRBについて
 妥当性を検証する

$P < 0.001$: 2(2) Event
 $P < 0.0001$: 0(1) Event

()内はUPMU GRB

数値計算を用いた検定

BGでの確率の再現率を数値計算で求める

それぞれのGRBで、BGレートから事象数を擬似的に計算(Toy MC)

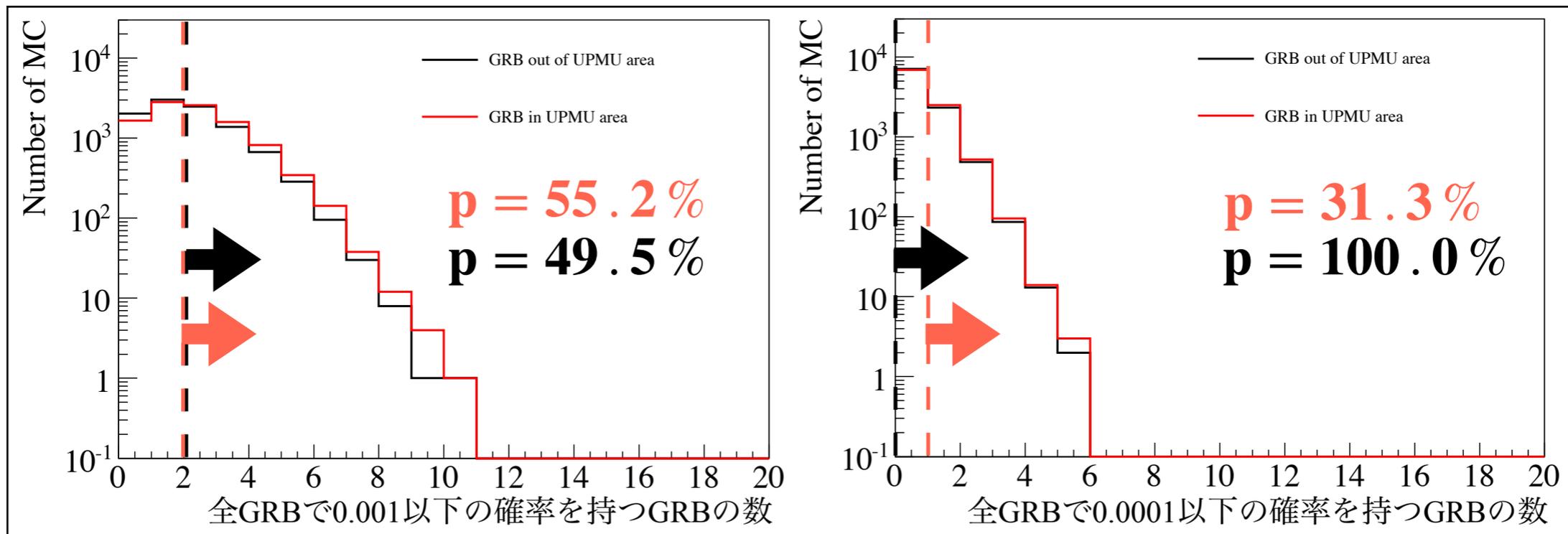


全GRB(3473個)の確率分布を1セットとして、セット中の低確率のGRBを数える



10000セットのToy MCで低確率事象分布と実観測を比較

$$\text{割合 } p = \frac{\text{実観測より多い低確率GRBを持つセット数}}{\text{Toy MCの数(10000 セット)}} \quad (p < 0.05 \text{ でBGを棄却})$$



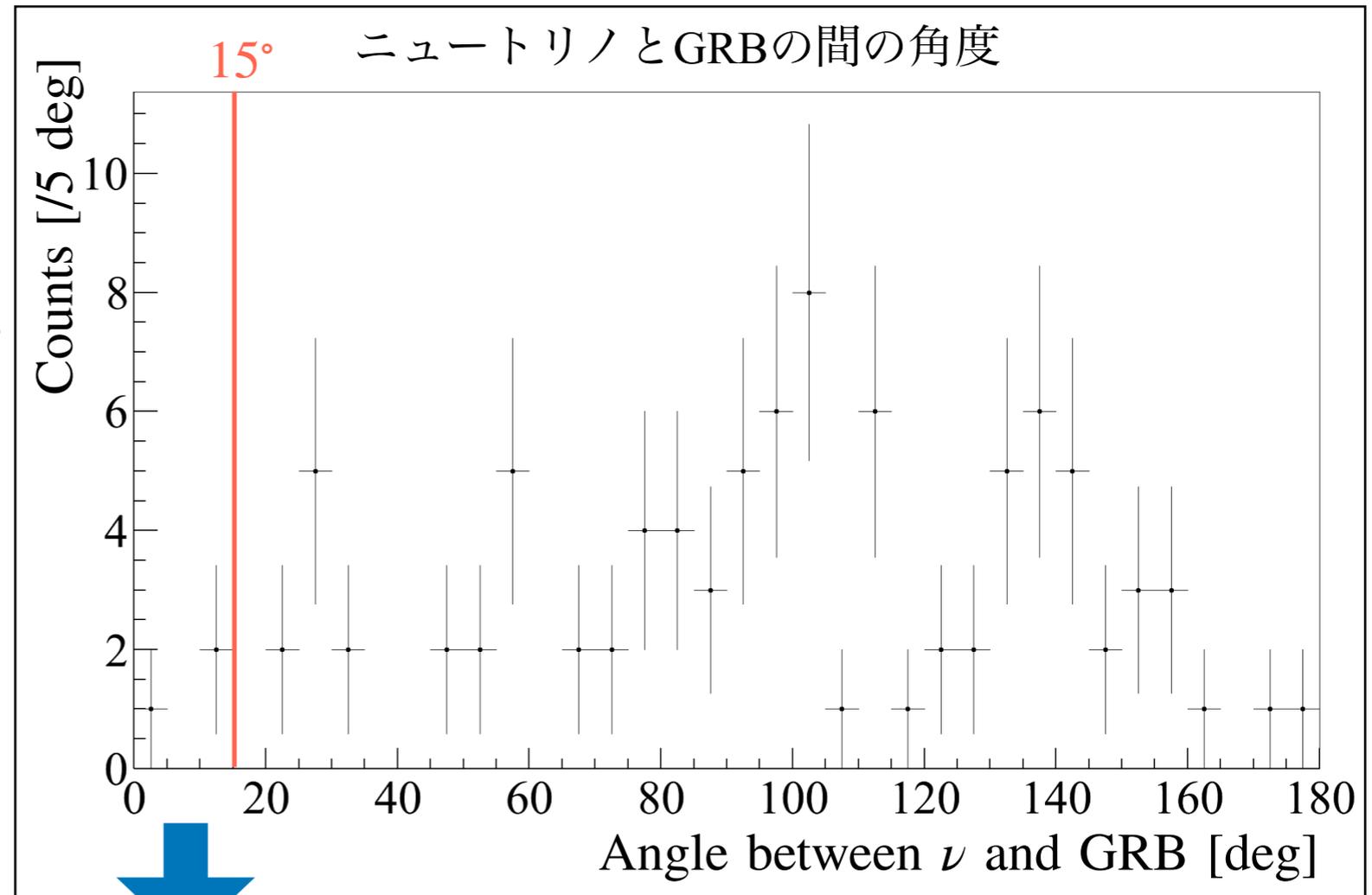
バックグラウンド起因を否定できなかった

ν -GRB 方向相関

ニュートリノとGRBの成す角に
15°以内の制限をかける

その際に方向再構成の角度分解能
が15°以内になるような
エネルギー閾値を設定した

1 σ C.L. Energy Threshold	
FC	2.3 GeV
PC	1.0 GeV
UPMU	1.6 GeV

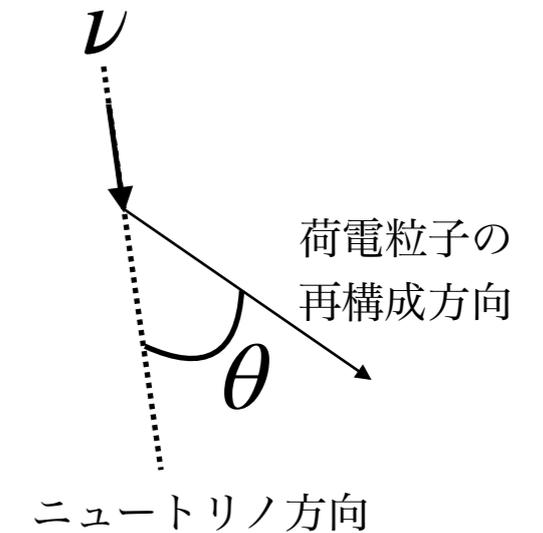
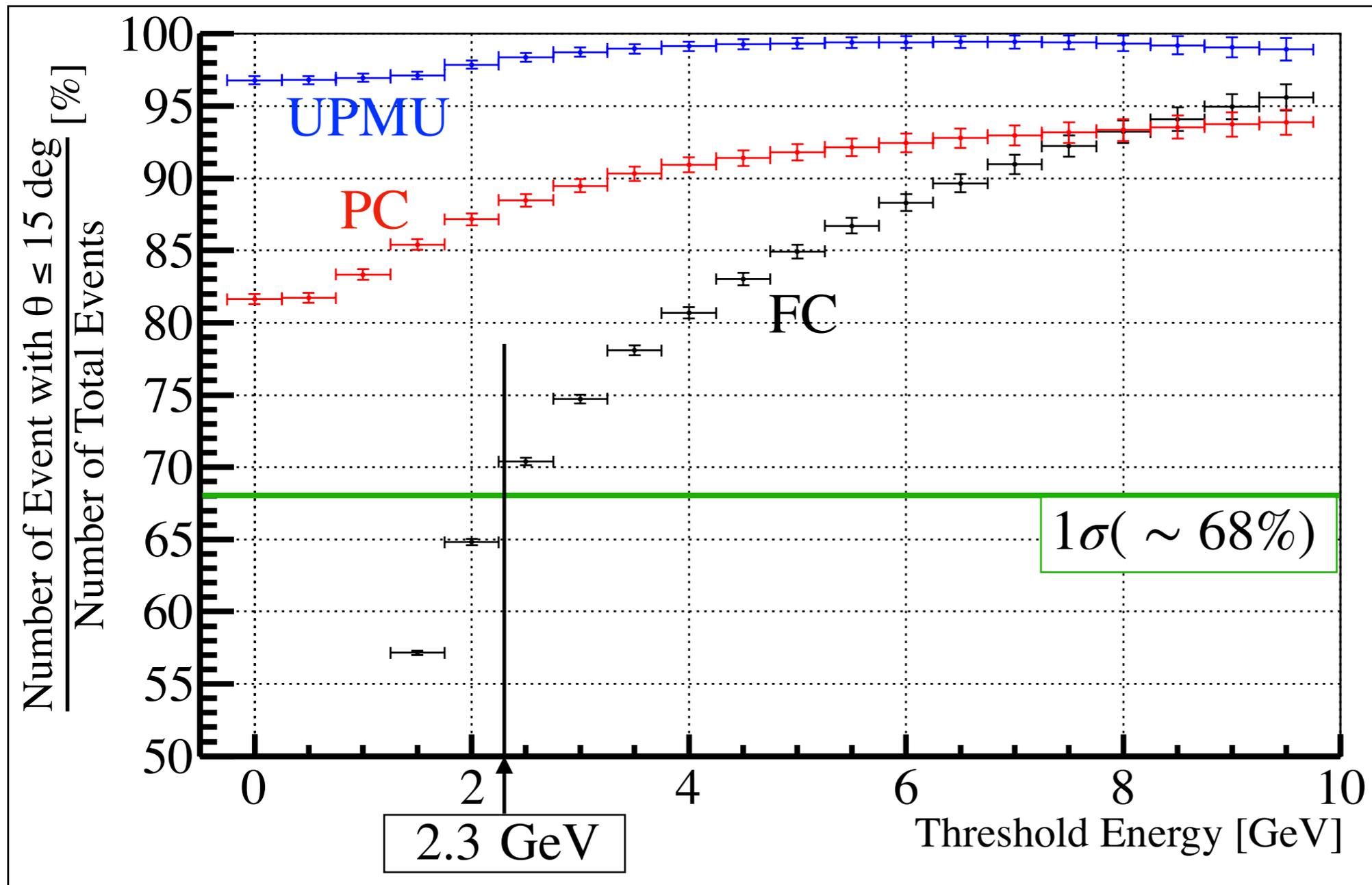


	FC	PC	UPMU
Data	2 ± 1.4	0	1 ± 1
BG	0.77	0.48	0.76

0.9 σ 以内でBGと無矛盾

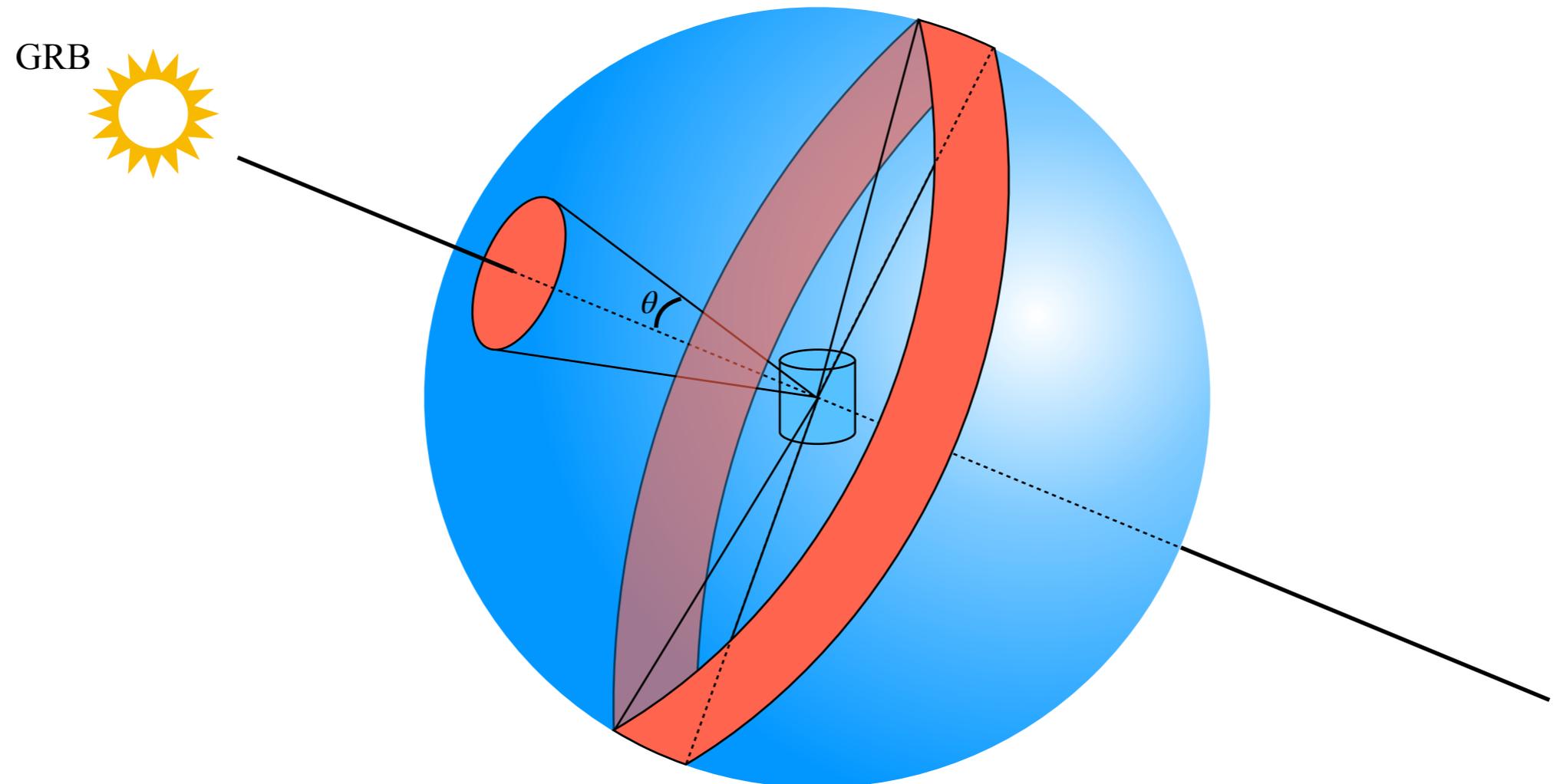
角度分解能評価

再構成方向と真のニュートリノ方向のなす角が 15° 以内となる
エネルギー閾値を求める



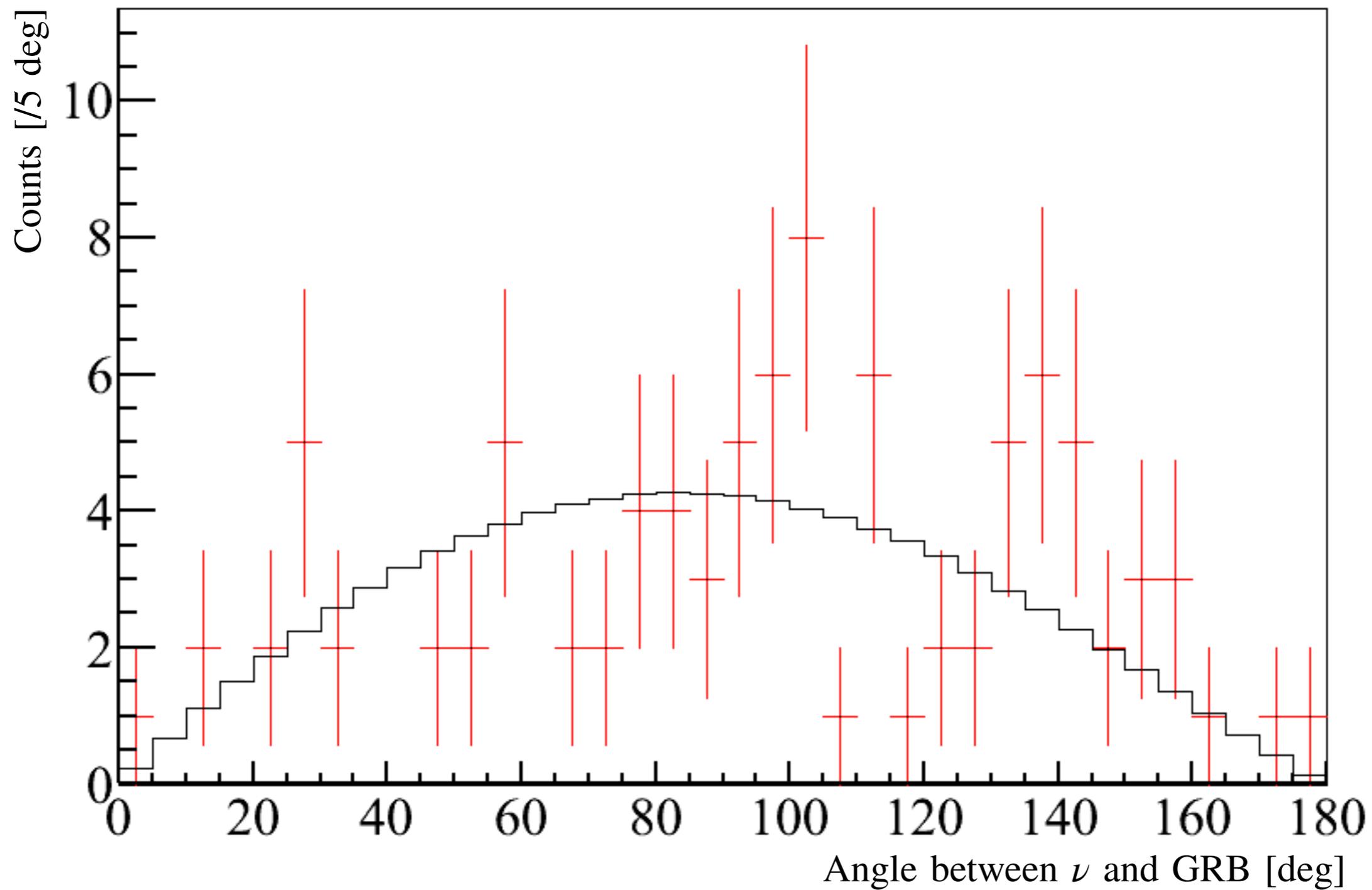
1 σ C.L. Energy Threshold	
FC	2.3 GeV
PC	1.0 GeV
UPMU	1.6 GeV

ν -GRB 方向相関



θ : 1binに含まれる角度

角度分布



GRBニュートリノ探索まとめ

1. 単一GRBニュートリノ探索

Probability	UPMU-GRB	non UPMU-GRB
<0.001	55.2%	49.5%
<0.0001	31.3%	100%

2. スタック解析でのニュートリノ探索

イベント数	1.0 σ
観測時間	1.4 σ
エネルギー分布	1.1 σ
角度	0.9 σ

有意なニュートリノ事象は観測されなかった

フルエンス上限値

ニュートリノスペクトルに依存しないフルエンス Φ (1cm²あたりの事象数)について計算する

$$\Phi_{FC}^{\nu_x+\bar{\nu}_x}(E_\nu) = \frac{N_{90}^{FC}}{N_T \int_{2.3 \text{ GeV}}^{10 \text{ GeV}} dE'_\nu \left(\sigma_{\nu_x}(E'_\nu)\varepsilon_{\nu_x}(E'_\nu) + \sigma_{\bar{\nu}_x}(E'_\nu)\varepsilon_{\bar{\nu}_x}(E'_\nu) \right) \delta(E_\nu - E'_\nu)}$$

$$\Phi_{PC}^{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu}(E_\nu) = \frac{N_{90}^{PC}}{N_T \int_{1.0 \text{ GeV}}^{100 \text{ GeV}} dE'_\nu \left(\sigma_{\nu_\mu}(E'_\nu)\varepsilon_{\nu_\mu}(E'_\nu) + \sigma_{\bar{\nu}_\mu}(E'_\nu)\varepsilon_{\bar{\nu}_\mu}(E'_\nu) \right) \delta(E_\nu - E'_\nu)}$$

$$\Phi_{UPMU}^{\nu_\mu+\bar{\nu}_\mu}(E_\nu) = \frac{N_{90}^{UPMU}}{A_{\text{eff}}(z) \int_{1.6 \text{ GeV}}^{10.0 \text{ TeV}} dE'_\nu \left(P_{\nu_\mu}(E'_\nu)S_{\nu_\mu}(z, E'_\nu) + P_{\bar{\nu}_\mu}(E'_\nu)S_{\bar{\nu}_\mu}(z, E'_\nu) \right) \delta(E_\nu - E'_\nu)}$$

σ_ν : Cross section[cm²]

N_T : Number of targetNuclei

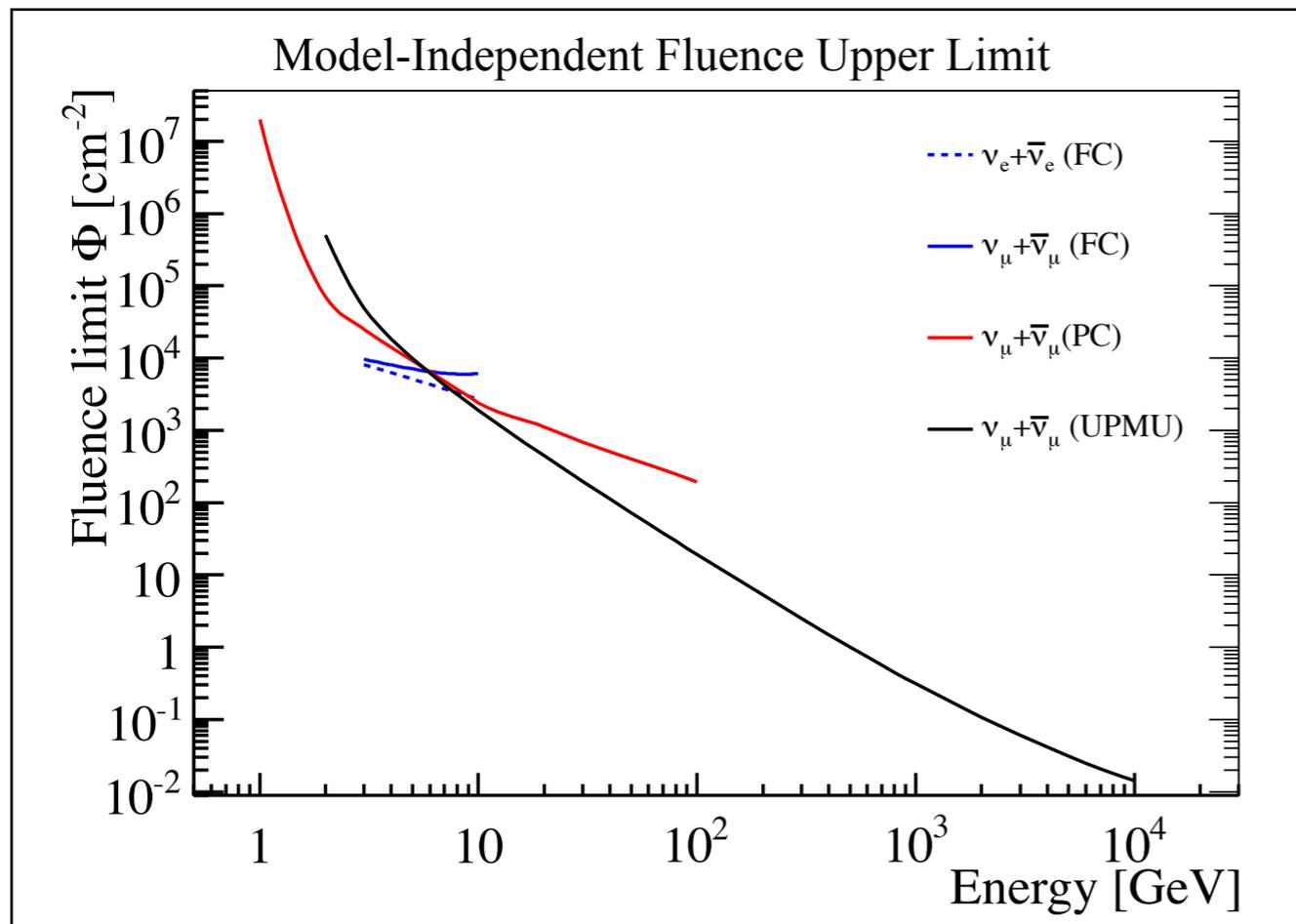
ε : Detection Efficiency

λ : Number density of neutrinos[/MeV](= $\delta(E_\nu)$)

A_{eff} : Effective area[cm²]

P : μ production probability from ν interaction

S : Neutrino Shadowing effect by the Earth



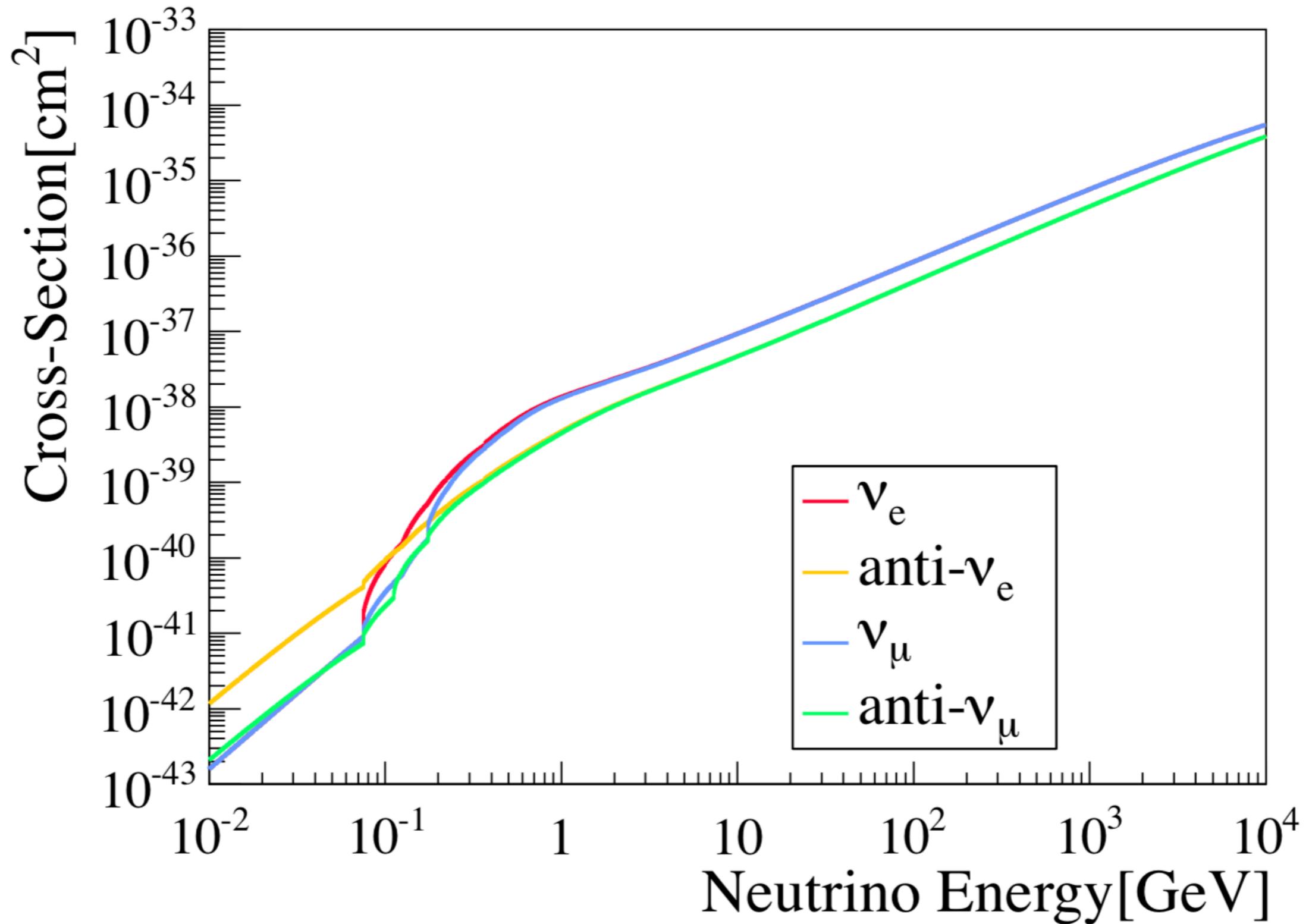
モデルを仮定してエネルギー積分



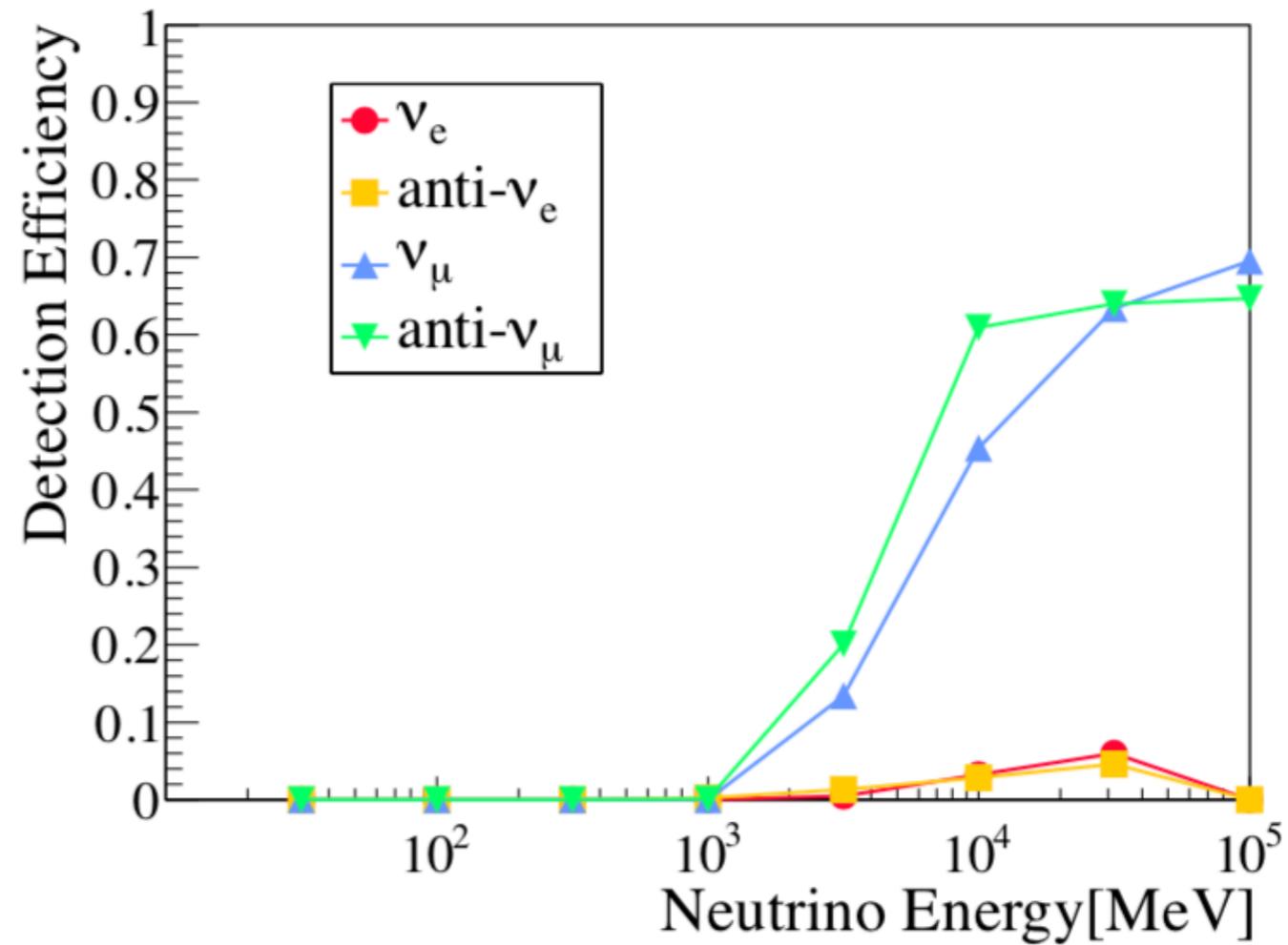
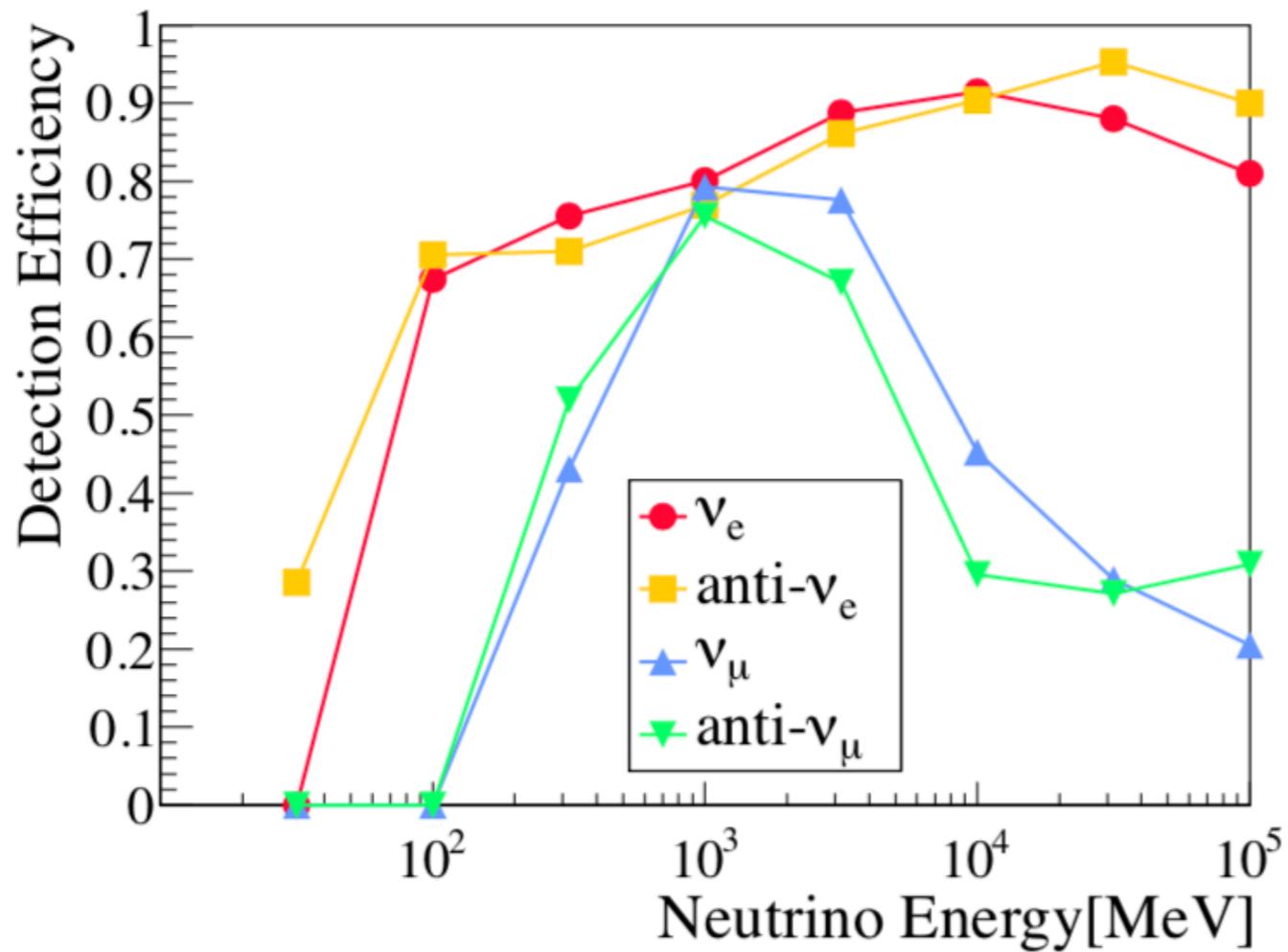
$$F = \left[\int \frac{\lambda(E_\nu)}{\Phi(E_\nu)} \right]^{-1}$$

様々なモデルと比較することができる

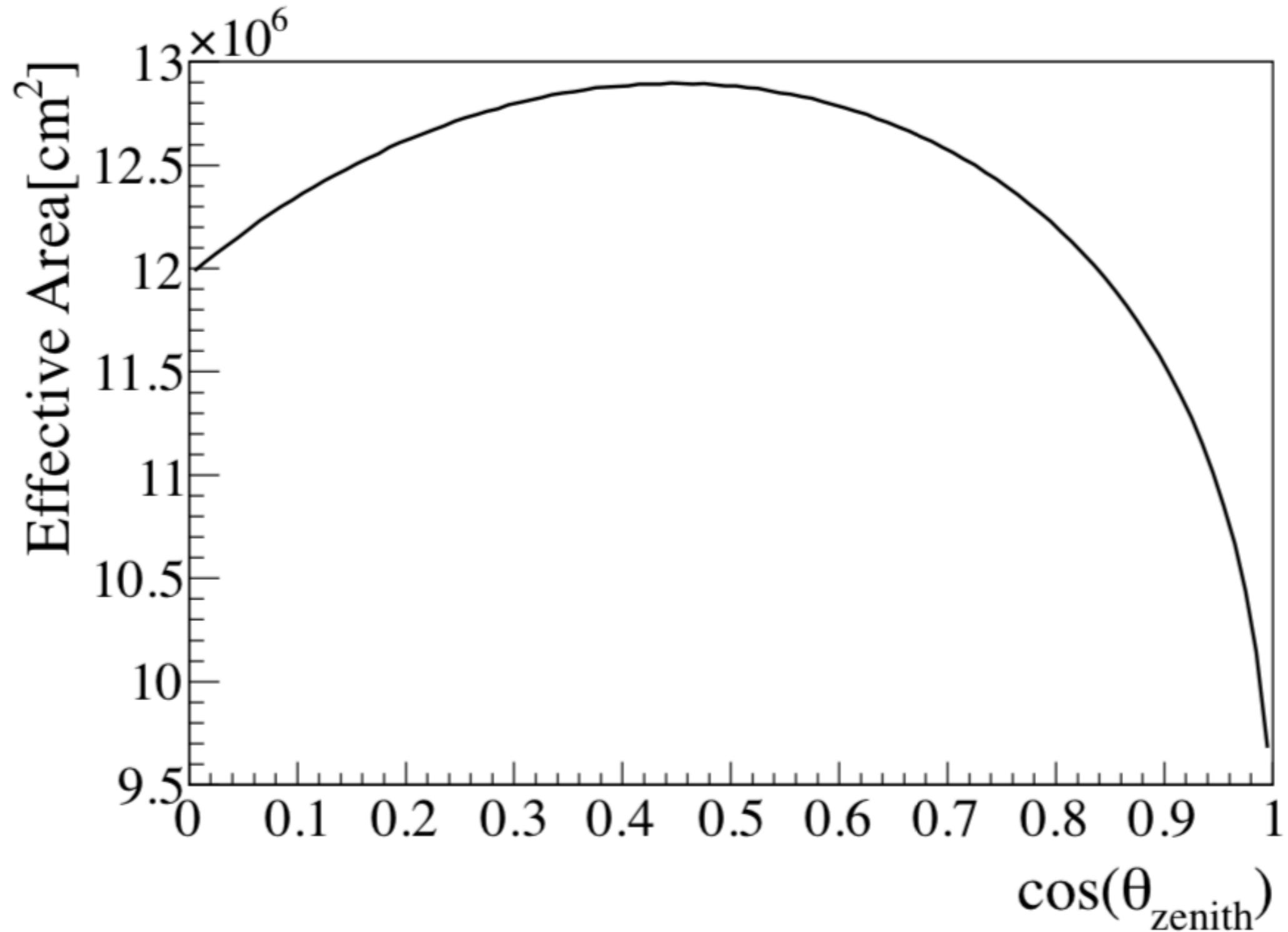
ニュートリノ反応断面積



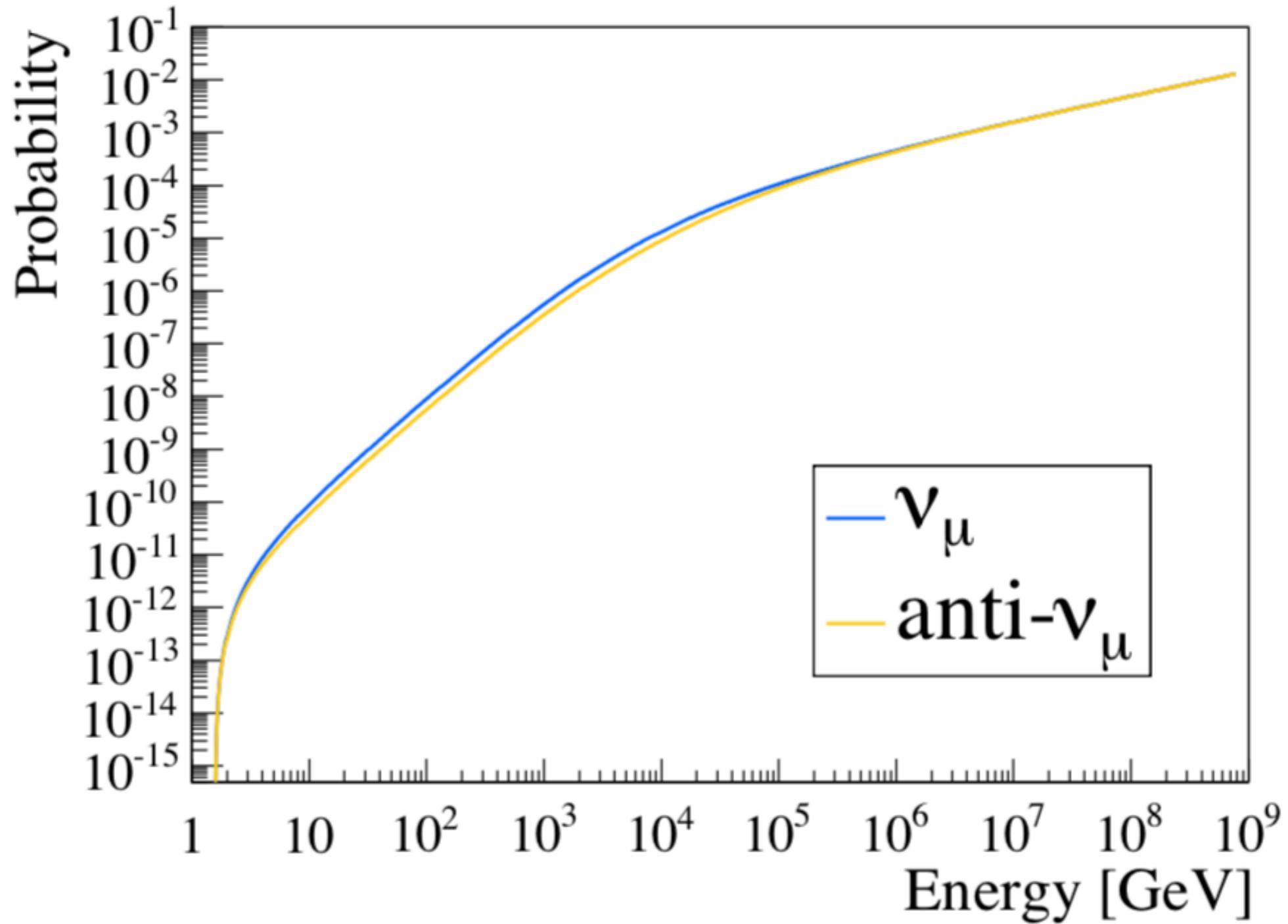
荷電粒子の検出効率



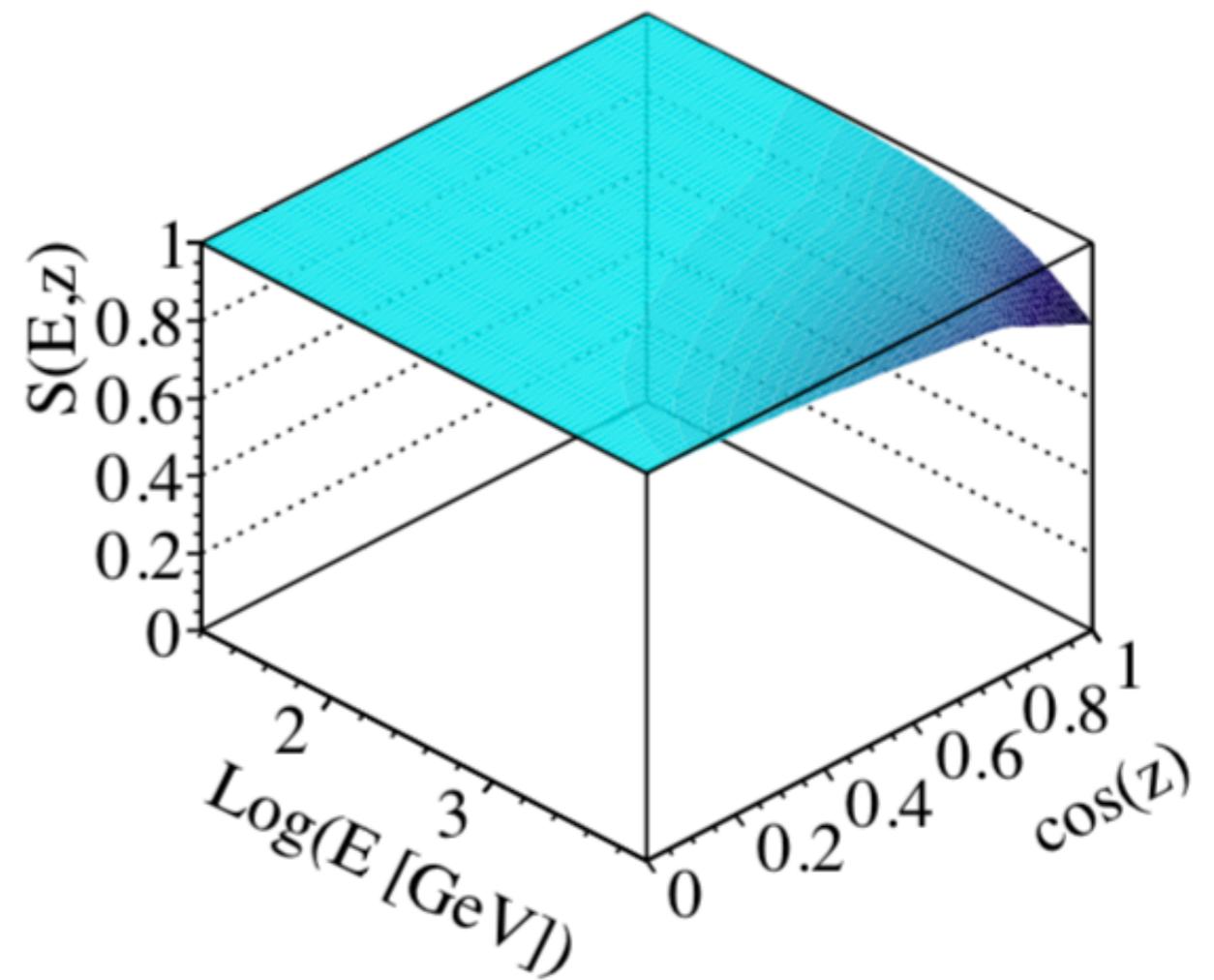
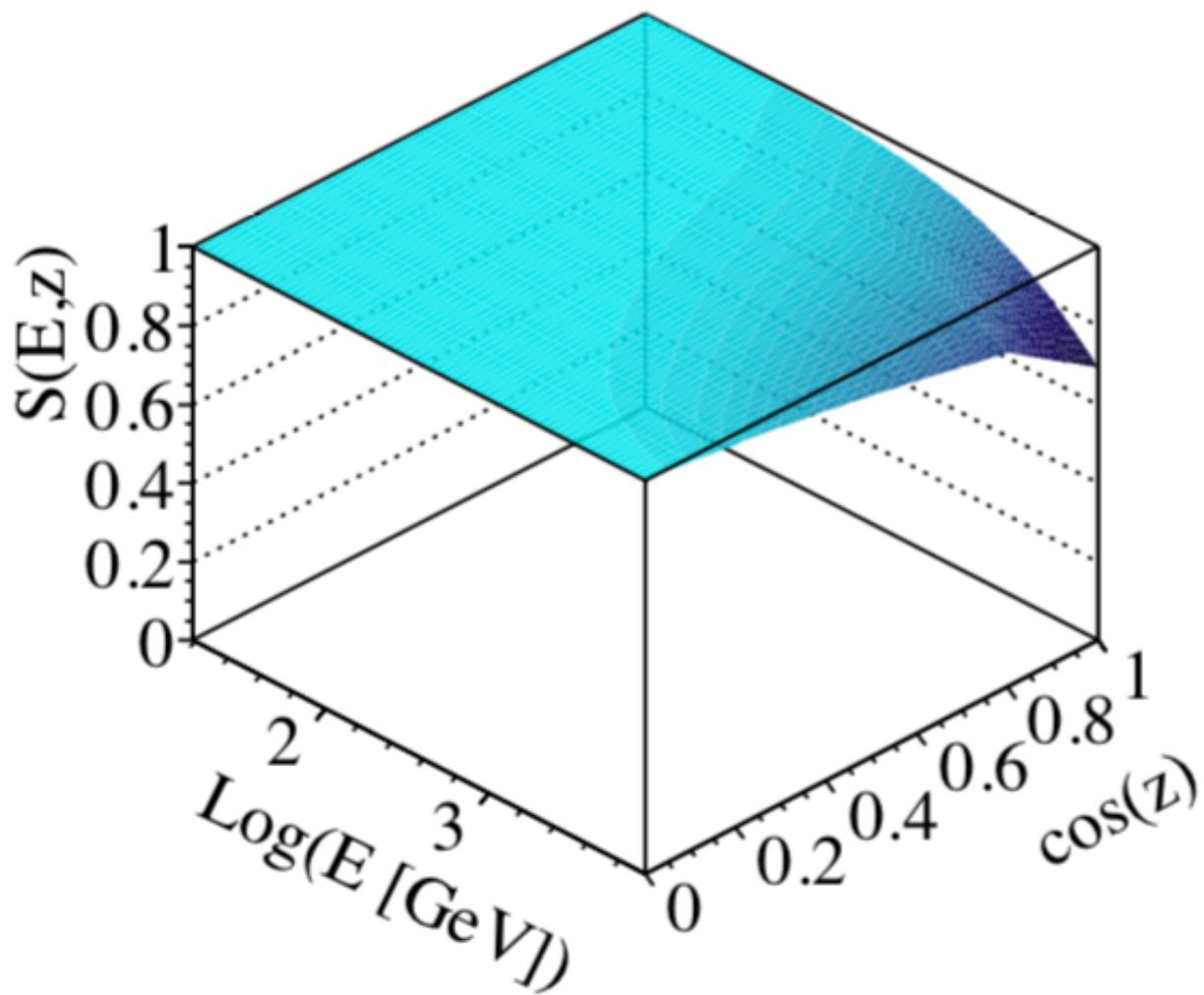
SKの有効面積



ミューオン生成確率



地球のニュートリノ遮蔽効果

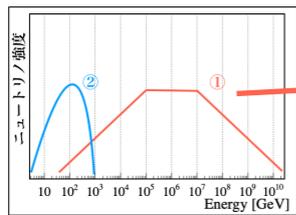


pγ反応モデル

①: 加速陽子によるpγ反応モデル
 $p\gamma \rightarrow n\pi^+$

②: 非弾性散乱によるpn反応モデル
 $pn \rightarrow (pp, nn) + \pi^\pm$

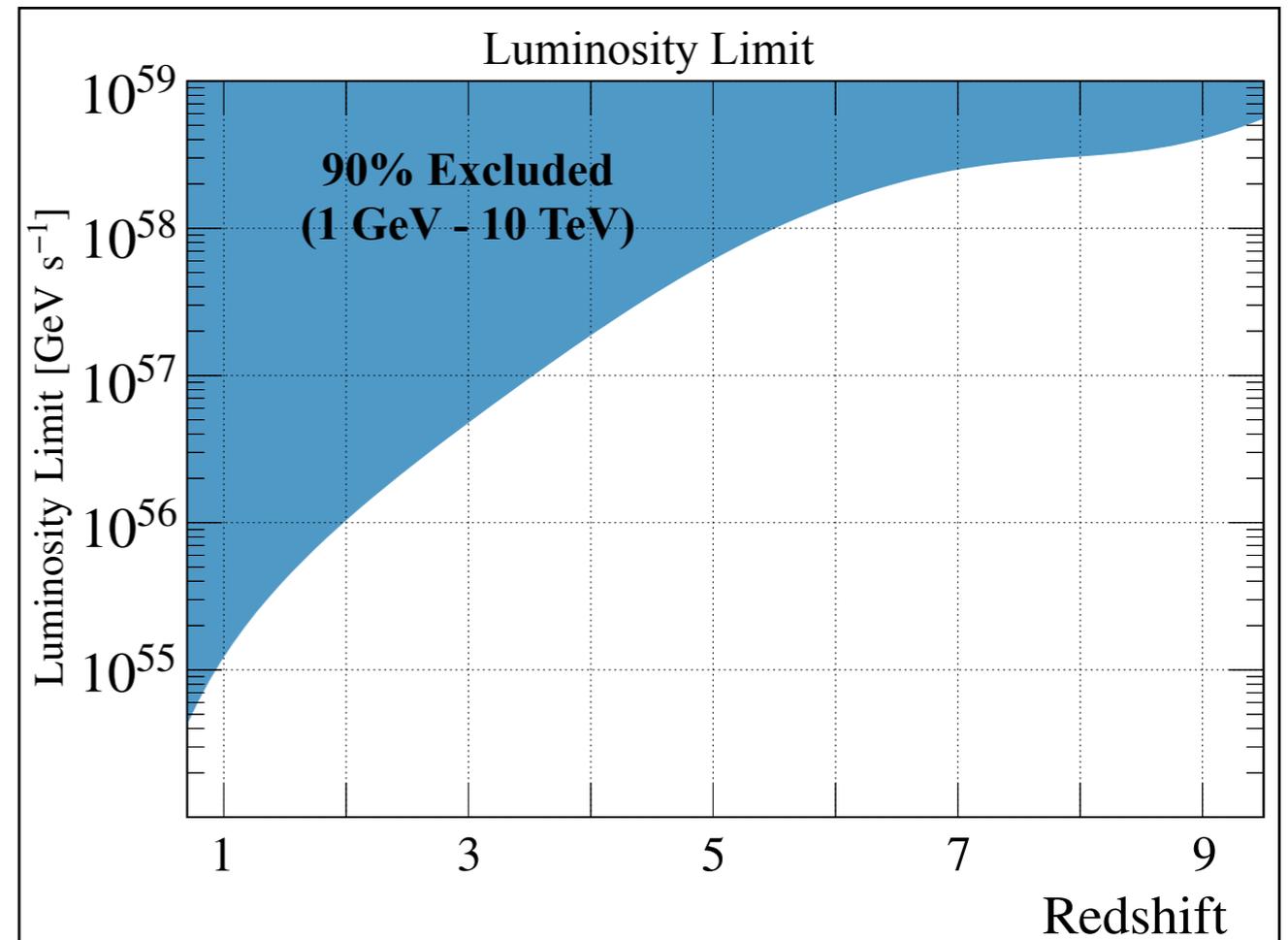
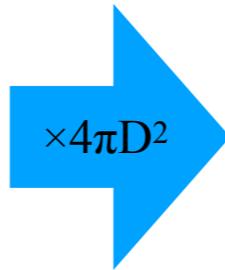
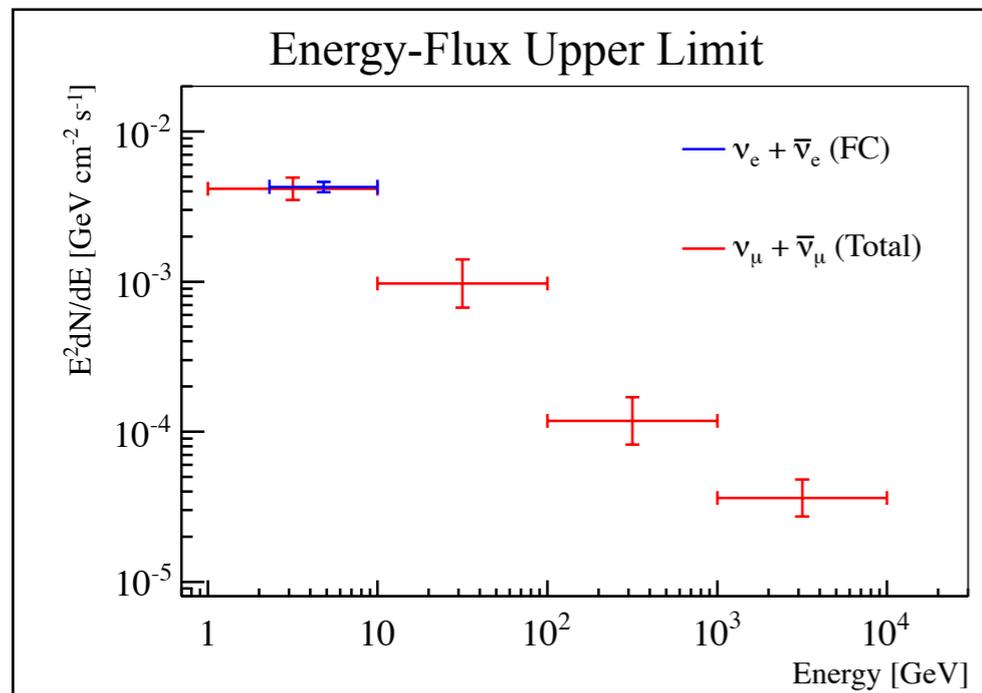
ニュートリノ観測からモデルを制限できる



p.4

pγ反応モデル($E^{-1} \sim E^{-2}$ の冪乗スペクトル)での

1 GRBに対するエネルギー・フラックス、光度上限値を計算



pγモデルで1 GeV領域に上限値を設定することに成功した

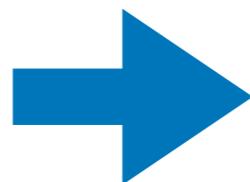


理論モデルは100 TeVで 10^{-9} にピーク

これまでのGRBについて、赤方偏移に対する光度上限を設定した

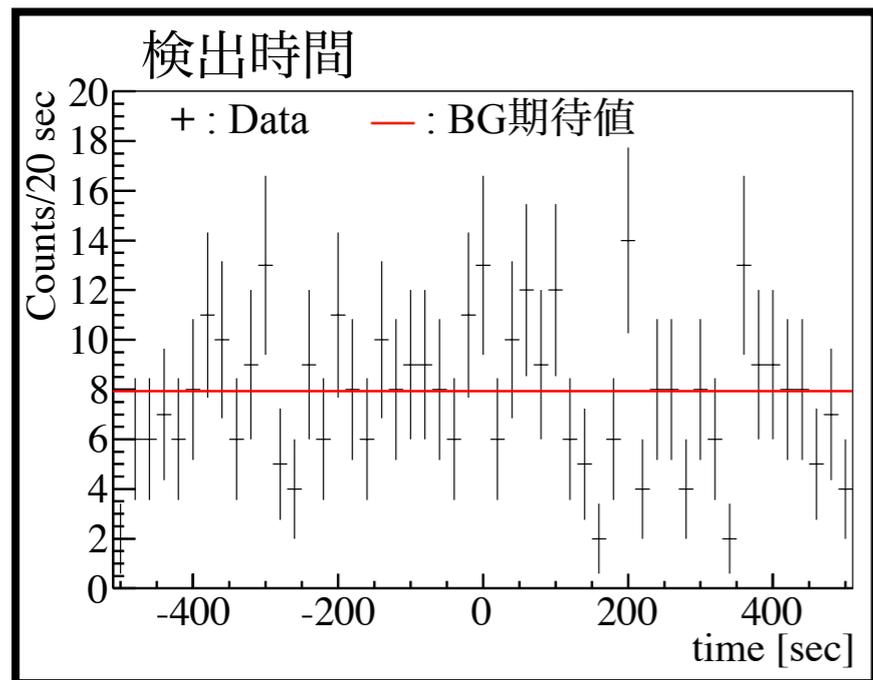
ニュートリノ信号の足し合わせでの探索

- ▶ 時間±500 sをTime windowに設定
- ▶ 3737個のGRBの足し合わせで探索
- ▶ BGは大気ニュートリノ

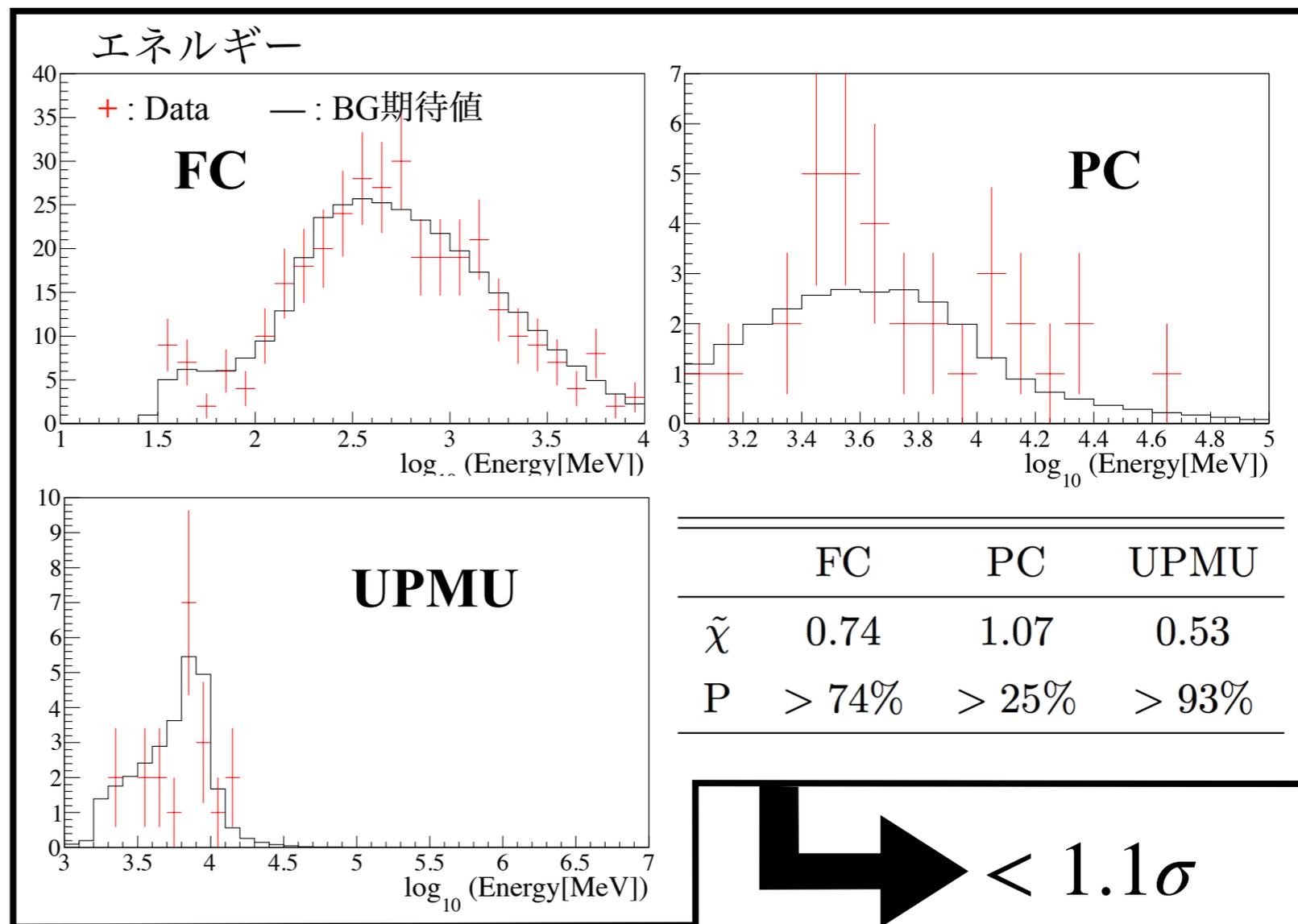


観測事象数	Data	MC
FC	339±18.4	349.1
PC	33±5.8	27.3
UPMU	20 ± 4.4	28.6

↓
< 1.0σ



↓
< 1.4σ



	FC	PC	UPMU
$\tilde{\chi}$	0.74	1.07	0.53
P	> 74%	> 25%	> 93%

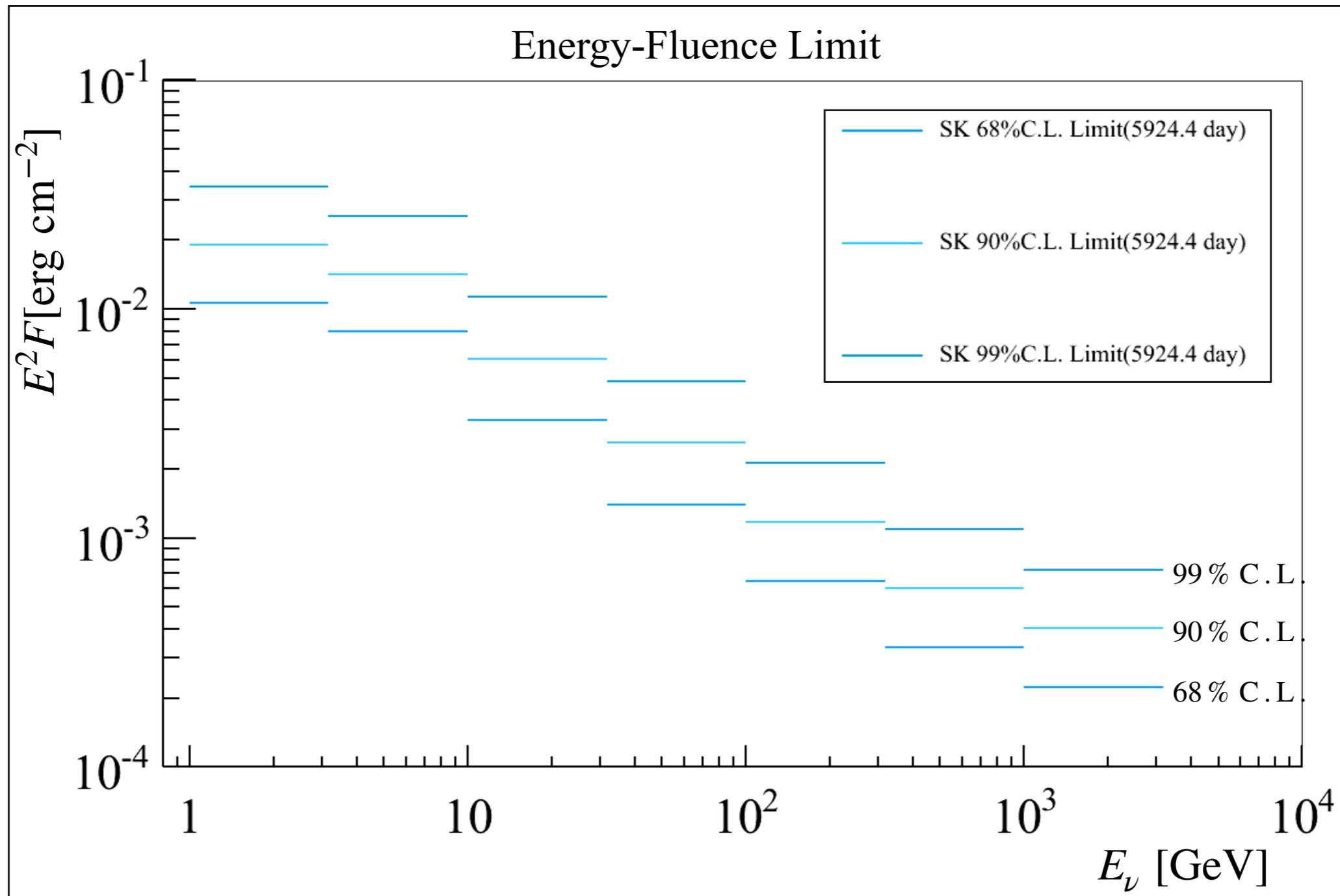
↘
< 1.1σ

足し合わせでの探索でBGからの有意な超過は見られなかった

核子反応モデル

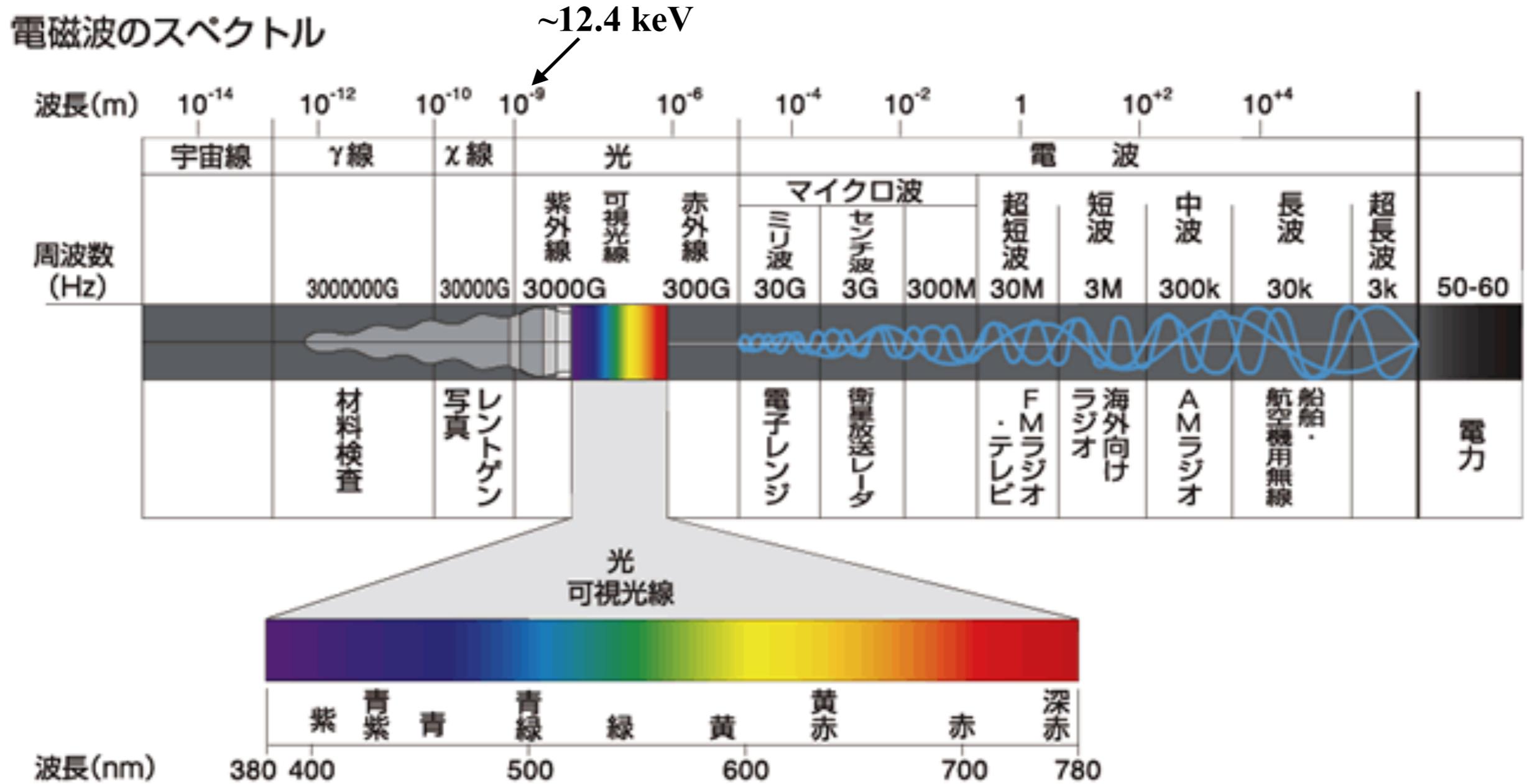
核子反応モデルについてフルエンスFを計算

→E²をかけてエネルギーフルエンス上限値を計算した



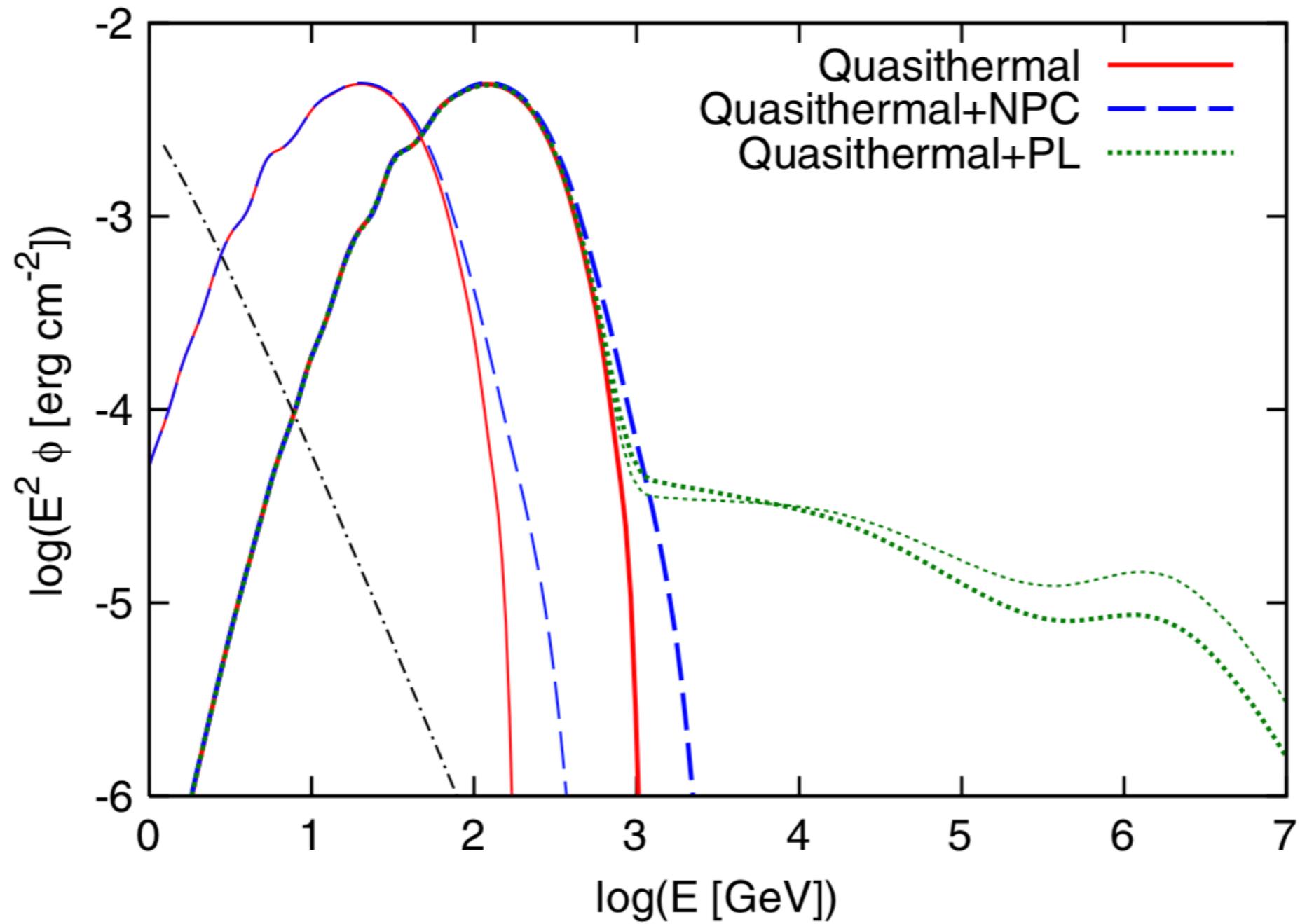
光子の波長

電磁波のスペクトル



<https://www.sugatsune.co.jp/technology/illumi-1.php>

核子反応モデル



$\Gamma=600, E_{\text{iso}} = 10^{53}$