

Introduction

小汐由介
(岡山大学)

第32回ニュートリノ研究会

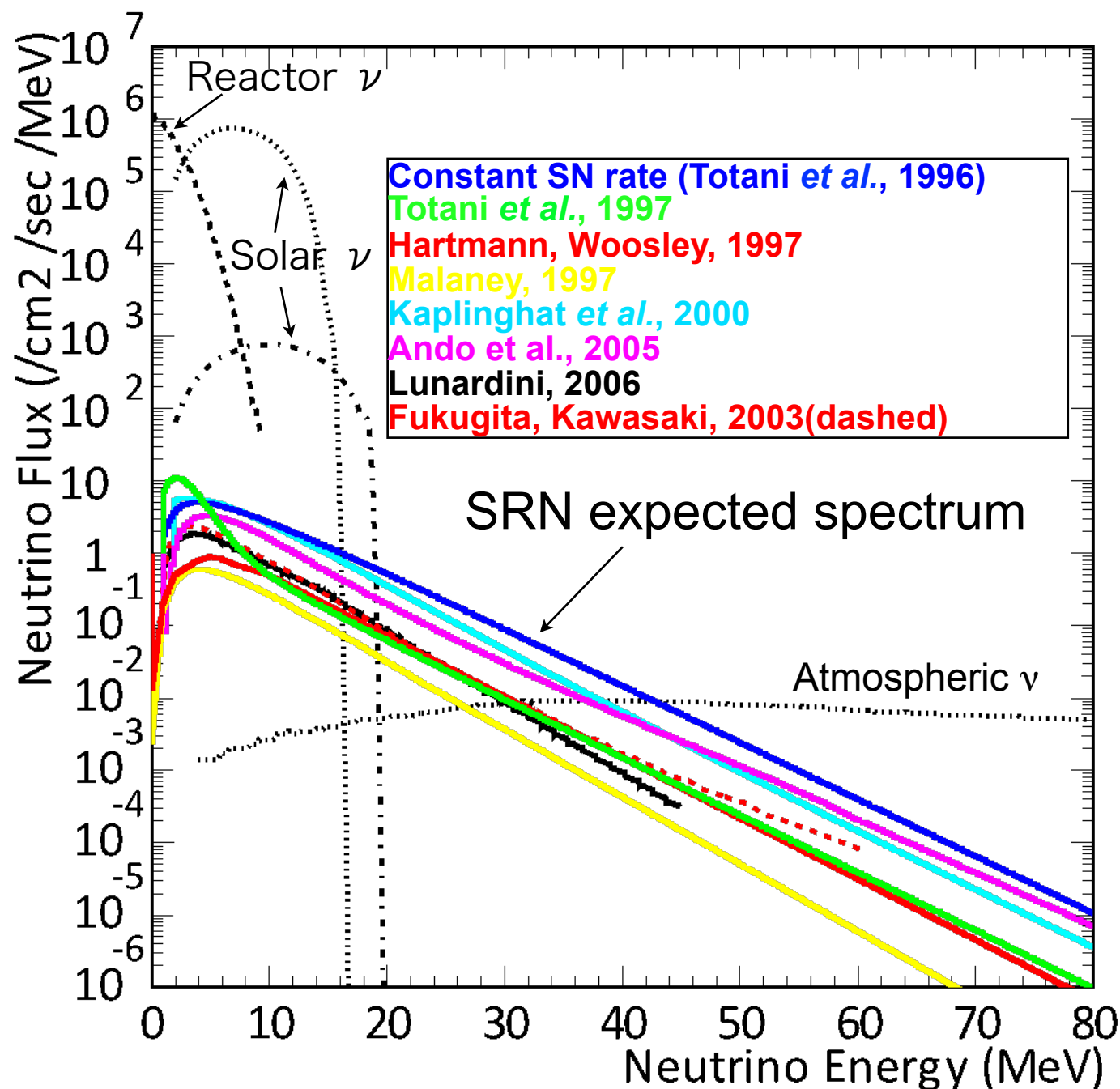
2019年3月23日

東京大学宇宙線研究所

超新星背景ニュートリノ（歴史）

- 最初に指摘されたのは1960年代
- 1980年代になって計算がなされた
- Kamiokande で初めて観測による上限値がつけられた（1988年）
- SKでの観測（2003年, 2012年）
- Ando and Sato（2004年）の理論予測
- 現在では詳細な理論計算がされている。

超新星背景ニュートリノ探索



- ・約10秒間バースト的に発生する超新星爆発ニュートリノと異なり、常に漂っているフラックスの小さい信号の探索になる。したがってバックグラウンド事象との識別が鍵となる。
- ・等方的に発生することから、水チェレンコフ検出器での太陽ニュートリノ弾性散乱事象との区別には、方向情報が使える。
- ・液体シンチレータ検出器の場合は、同時遅延計測手法が太陽ニュートリノとの区別に使える。

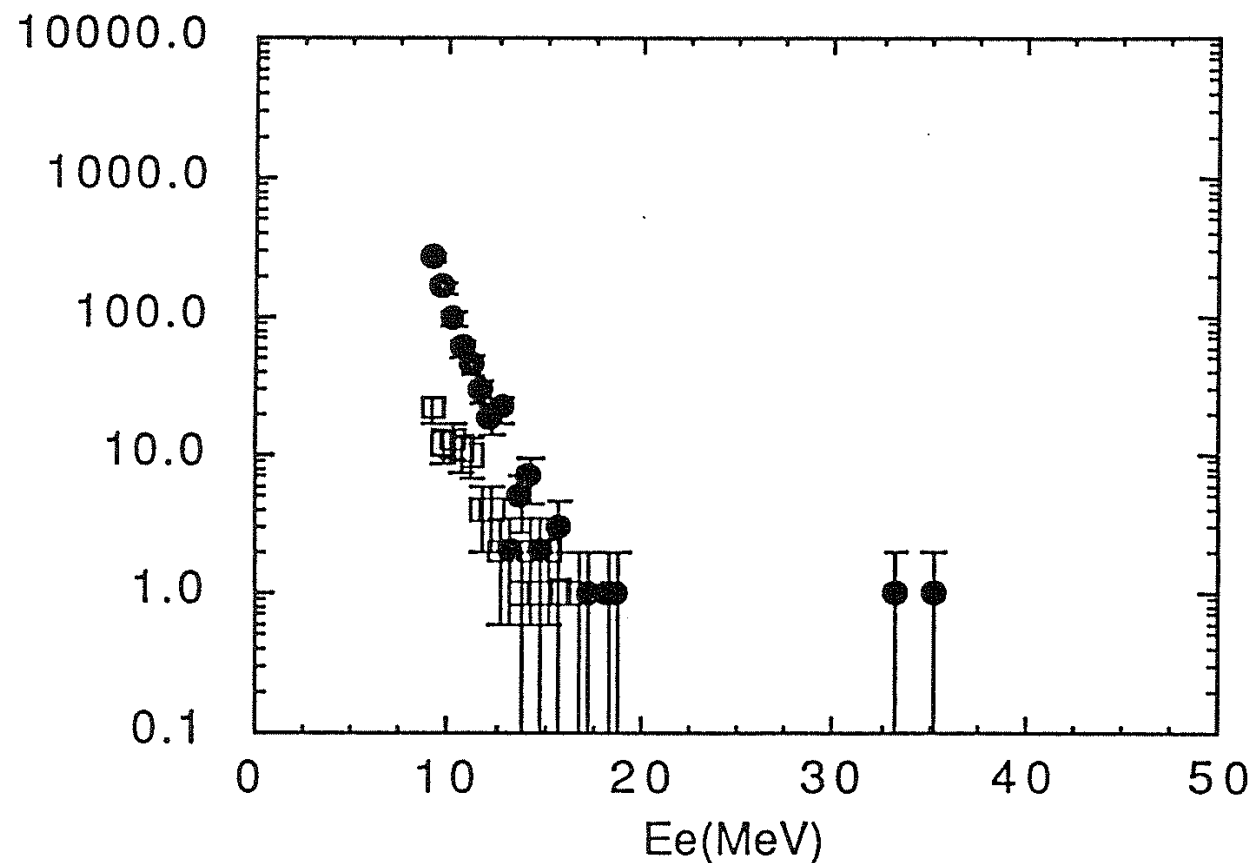
超新星背景ニュートリノ探索

| 実験 | 発表年 | 検出器タイプ | 有効体積 | 測定日数 | エネルギー 領域 |
|------------|------|----------|--------------|---------------|-----------------|
| Kamiokande | 1988 | 水 | 680 ton | 1040 days | 20~50 MeV |
| LSD | 1992 | 液体シンチレータ | 90 ton | 847.3 days | 20~50 MeV |
| Super-K | 2003 | 水 | 22500 ton | 1496 | 18~34 |
| | 2012 | | | 2853 | 16~100 |
| SNO | 2006 | 重水 | 770 ton | 306.4 days | 21~35 MeV |
| (Borexino) | 2011 | 液体シンチレータ | 270 ton | 736 days | 1.8~17.8 MeV |
| KamLAND | 2012 | 液体シンチレータ | 700 ton | 2343 days | 8.3~31.8 MeV |

Kamiokande (1988)

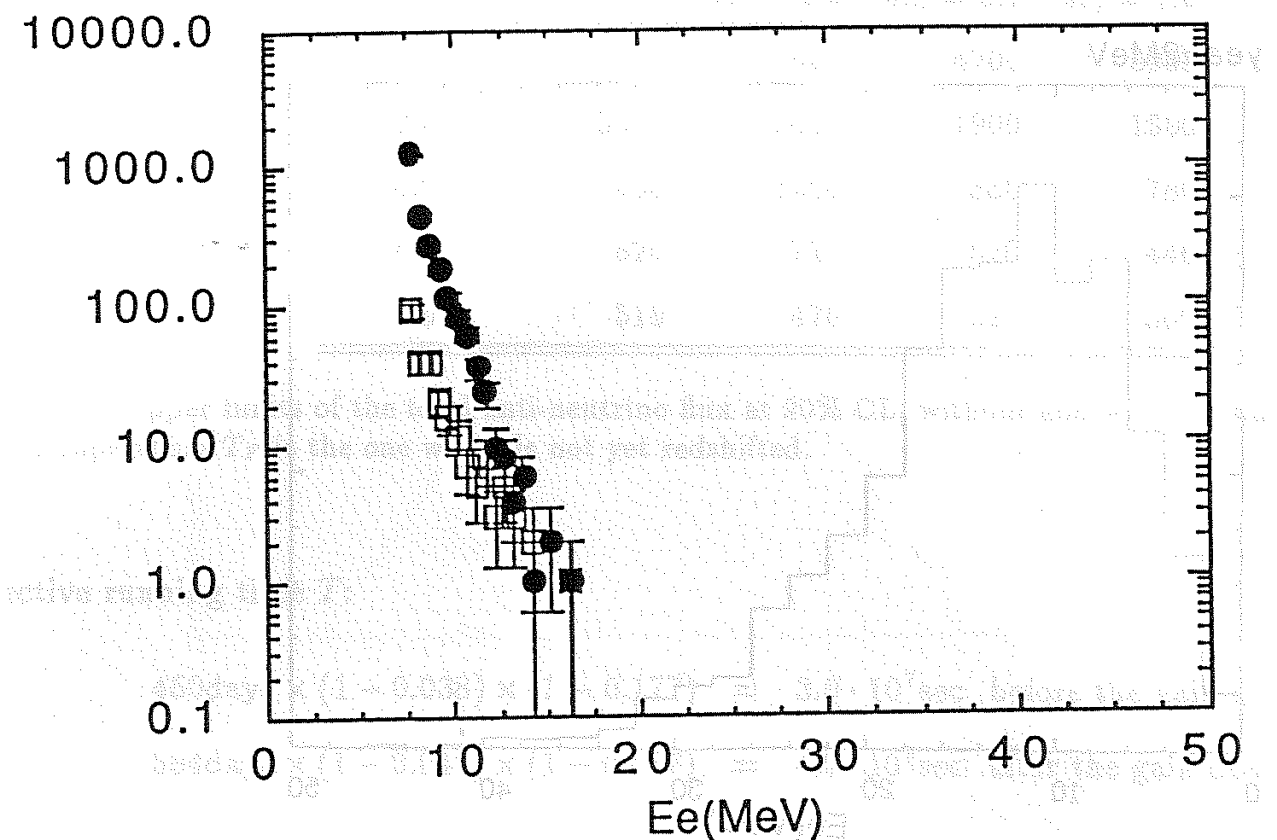
Jan.1987~Jun.1988

Events/450days/0.5MeV



Jun.1988~Apr.1990
(gain x 2)

Events/594days/0.5MeV



予測されるバックグラウンド事象 (decay-e from invisible muon)

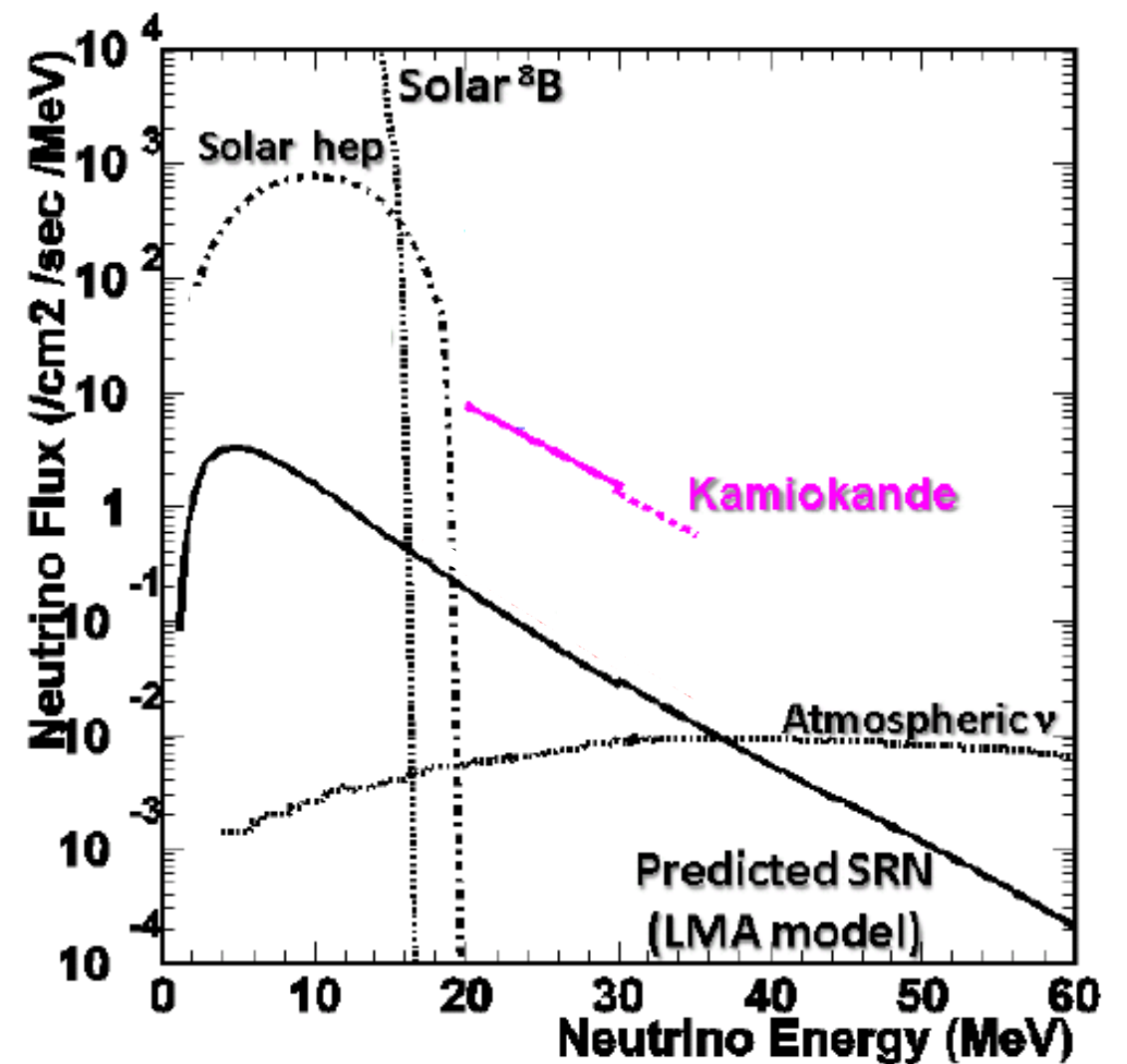
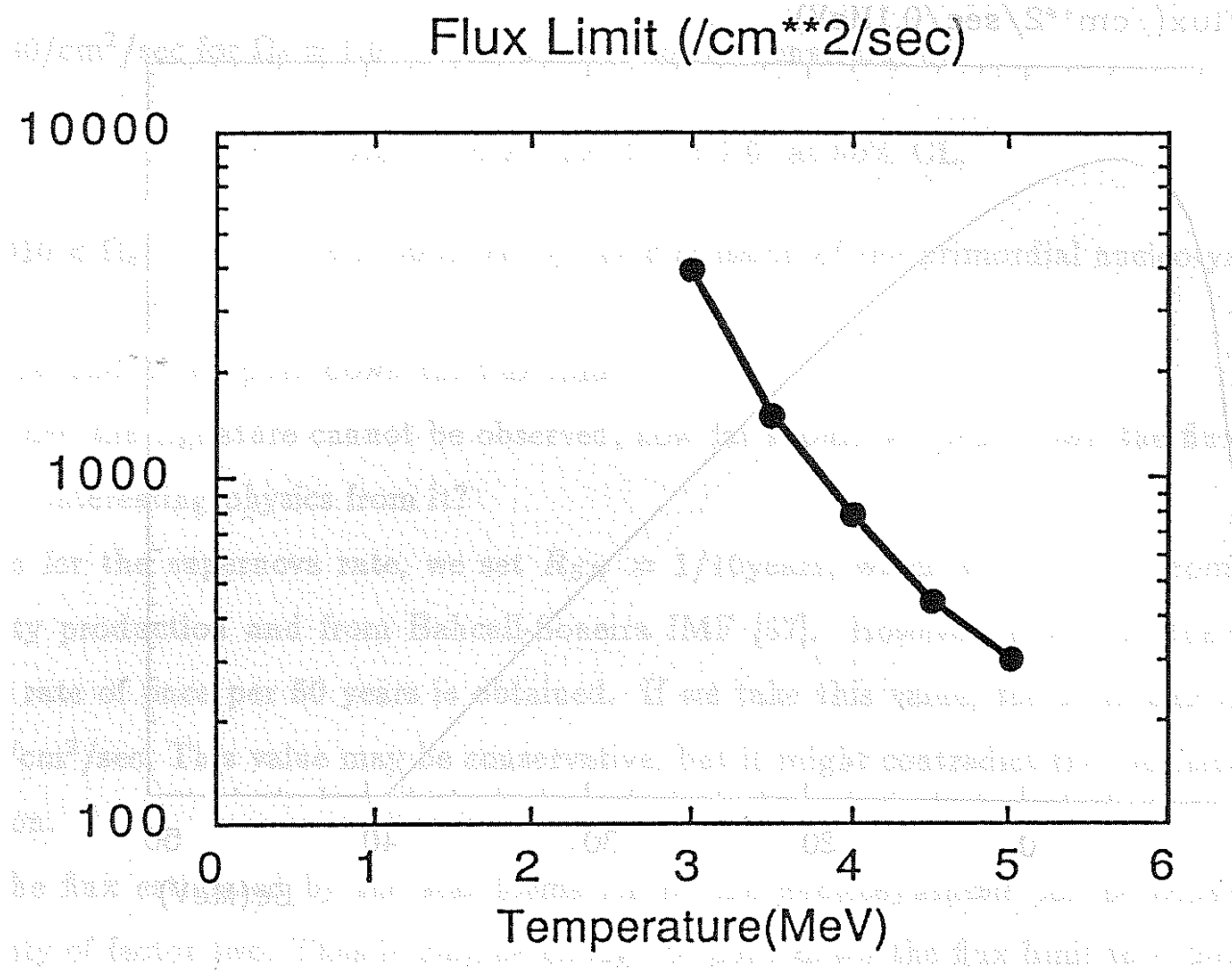
1.6 事象

1.3 事象

Kamiokande (1988)

フラックス(単位面積・単位時間あたりの数) の上限値

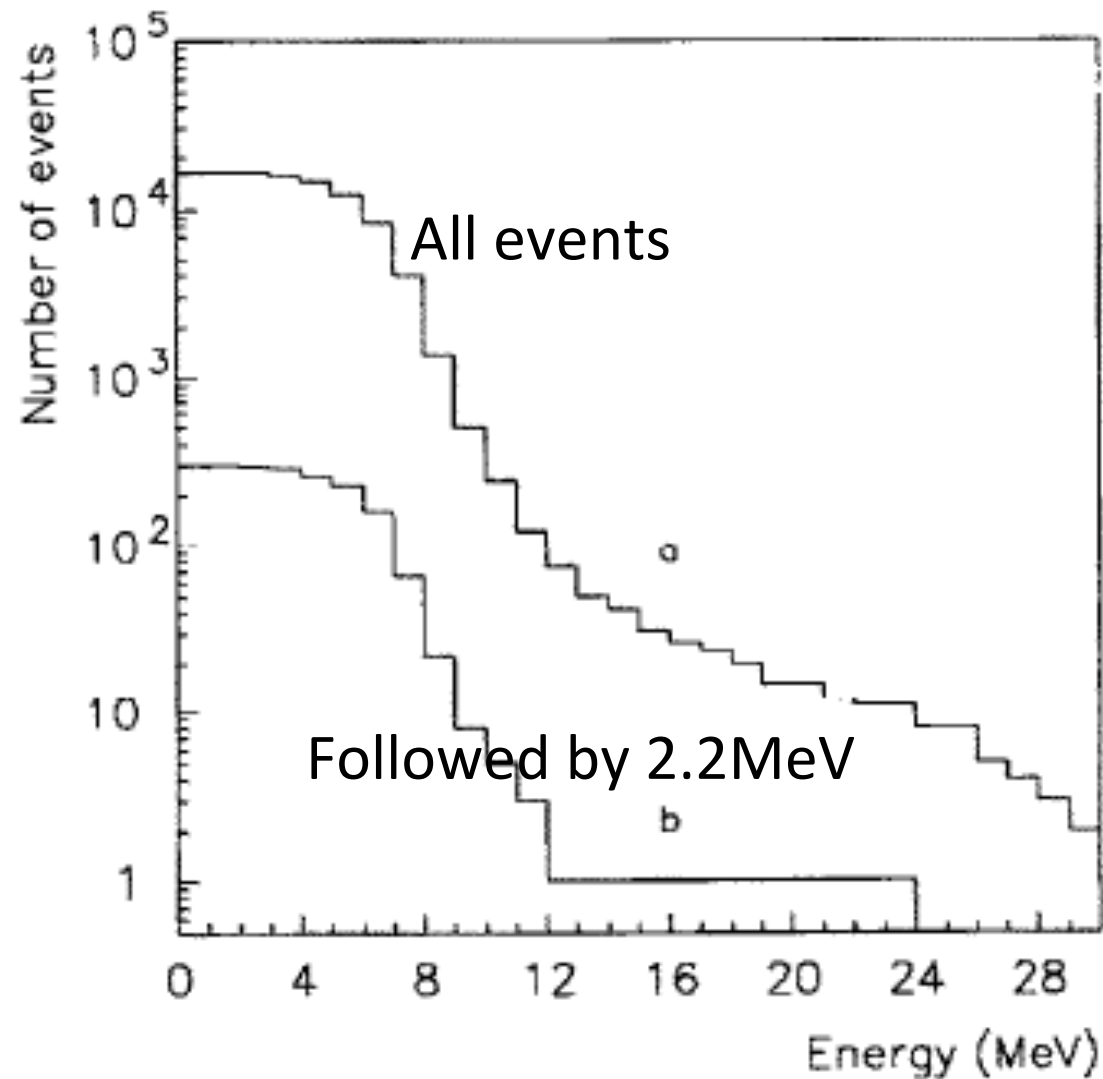
$$F_\nu < \frac{n_p}{T N_p \epsilon \sigma} \quad 780/\text{cm}^2/\text{sec} \text{ at } 90\% \text{C.L. for } T=4\text{MeV}$$



LSD (1992)

同時遅延計測を用いた逆ベータ崩壊事象の探索

フラックスの上限値



12<E<30MeV で1つの候補事象
バックグラウンド期待値は 1.6

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{\nu}_e) &< 9.0 \times 10^4 \bar{\nu}_e \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}, & 9 \leq E_\nu \leq 50 \text{ MeV}, \\ \Phi(\bar{\nu}_e) &< 8.2 \times 10^3 \bar{\nu}_e \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}, & 20 \leq E_\nu \leq 50 \text{ MeV}, \\ \Phi(\nu_e) &< 6.8 \times 10^3 \nu_e \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}, & 25 \leq E_\nu \leq 50 \text{ MeV}, \\ \Phi(\nu_{\mu+\tau}) &< 3.0 \times 10^7 \nu_{\mu+\tau} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}, & 20 \leq E_\nu \leq 100 \text{ MeV}, \\ \Phi(\bar{\nu}_{\mu+\tau}) &< 3.3 \times 10^7 \bar{\nu}_{\mu+\tau} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}, & 20 \leq E_\nu \leq 100 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

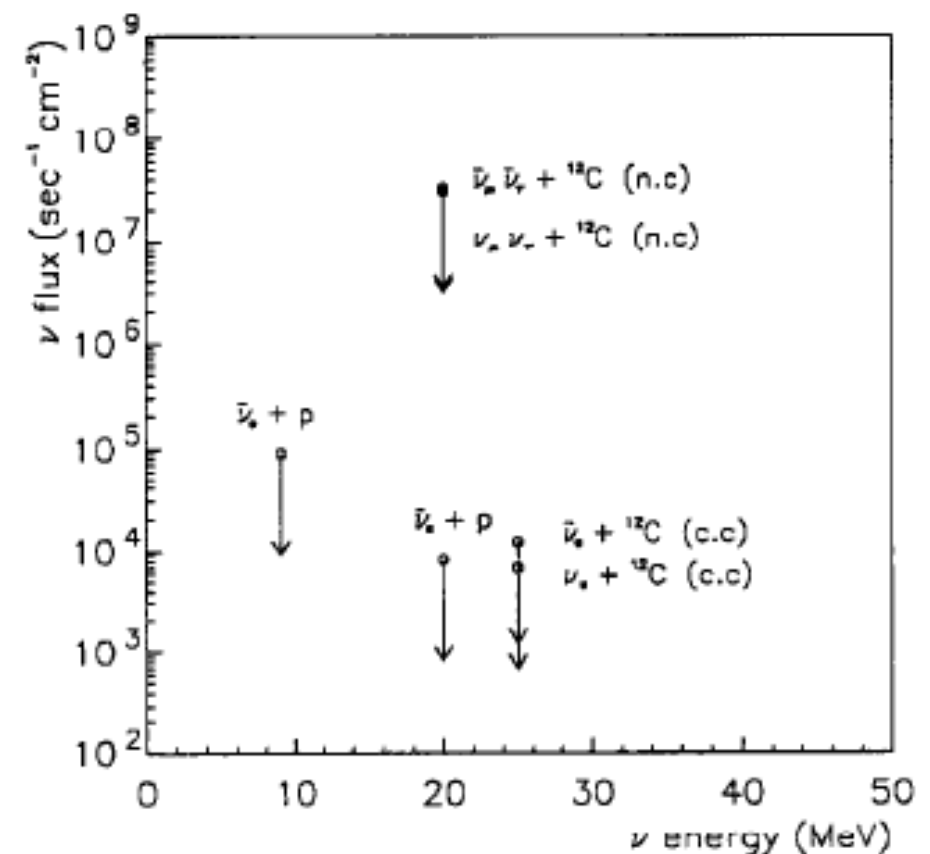
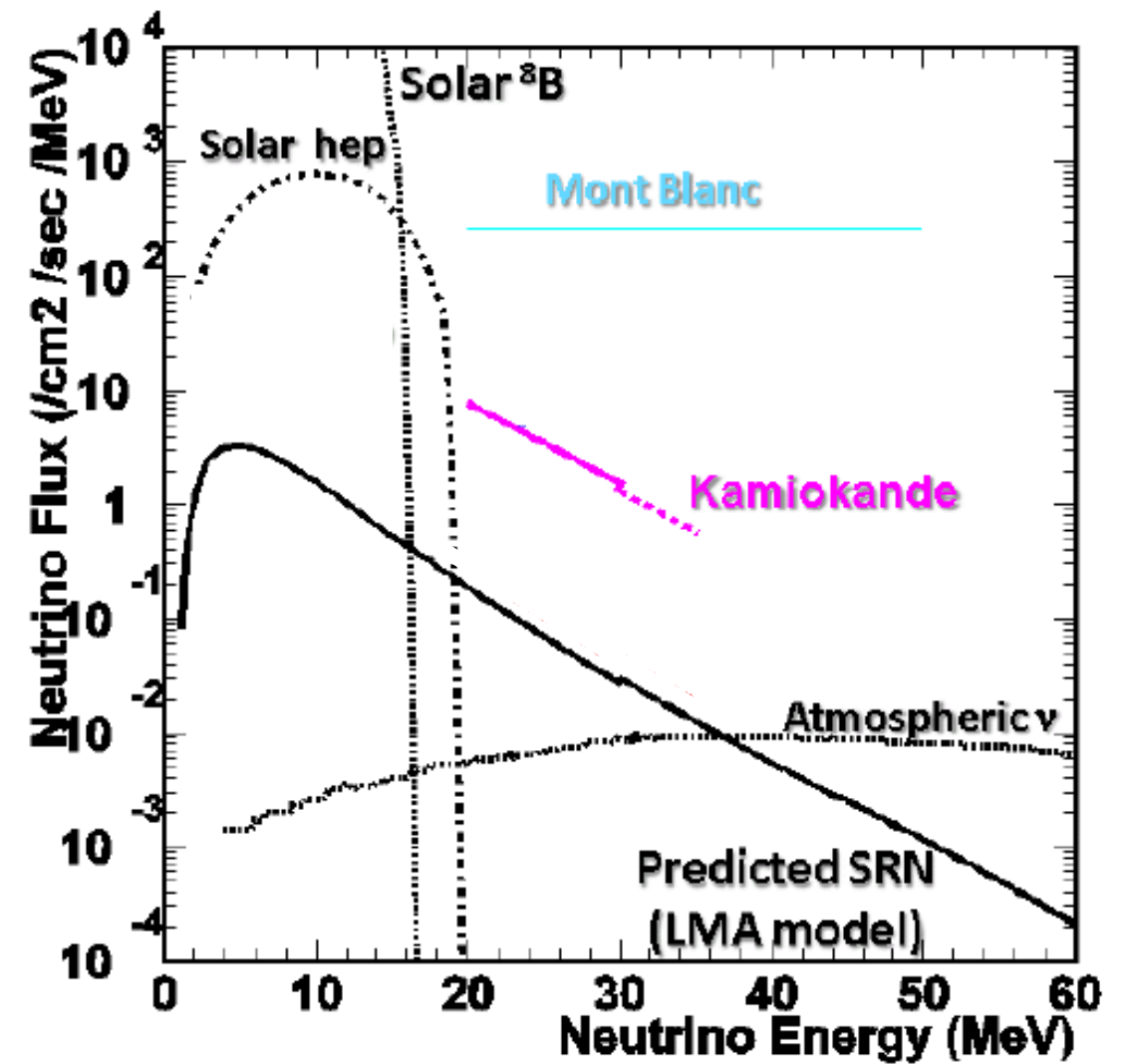
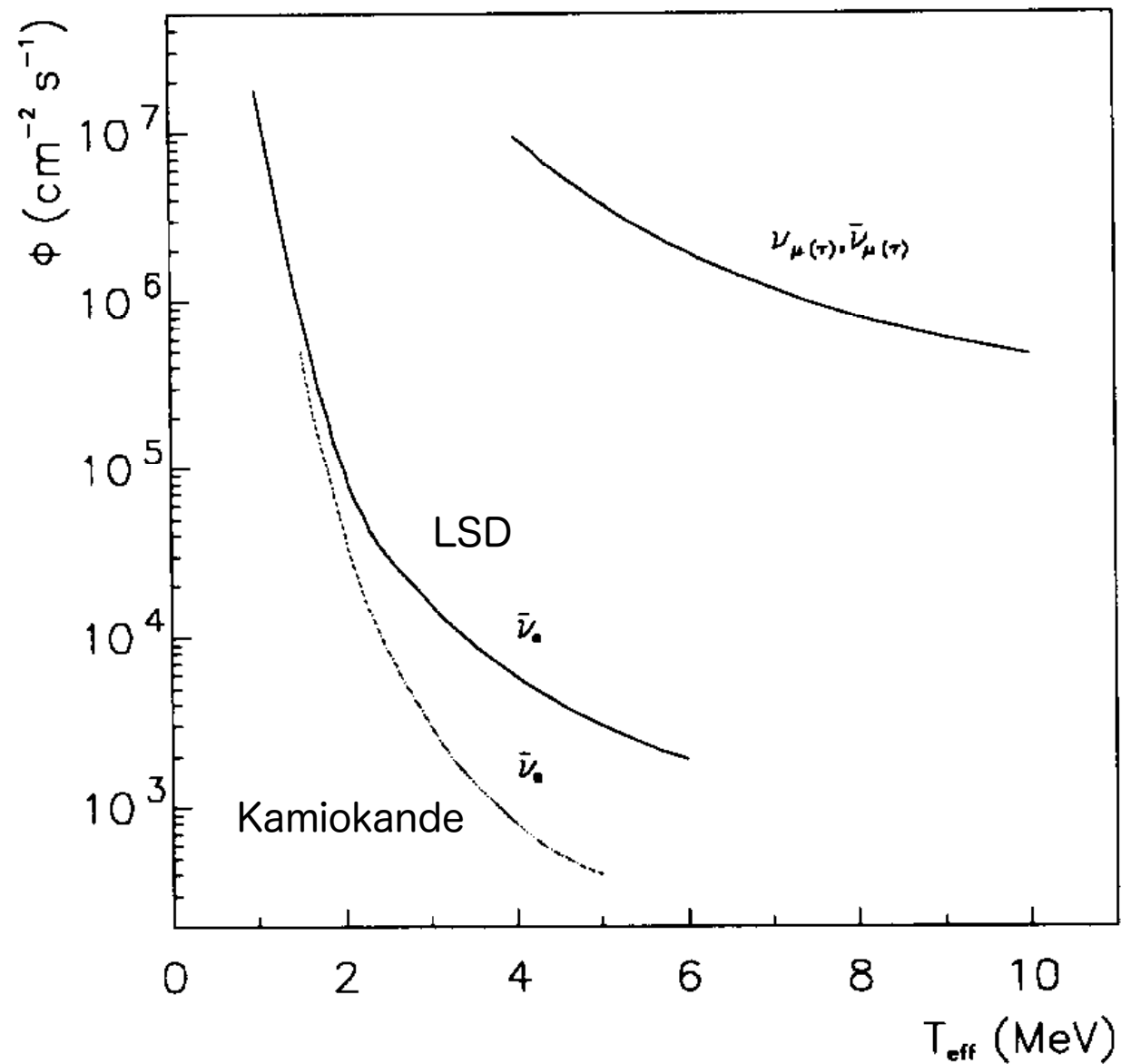


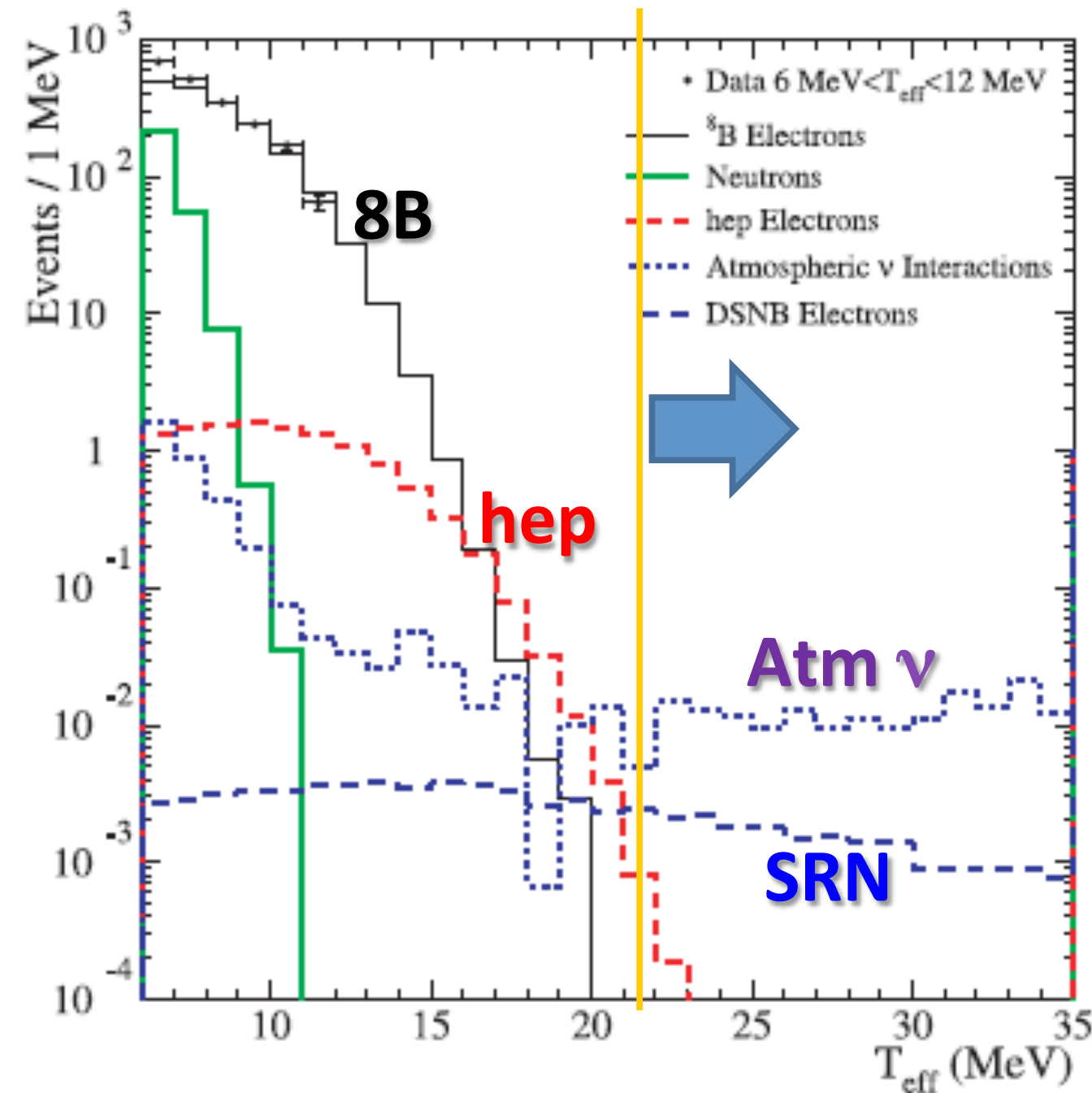
Fig. 8. Upper limits to the integral fluxes of neutrinos of different flavours.

LSD (1992)

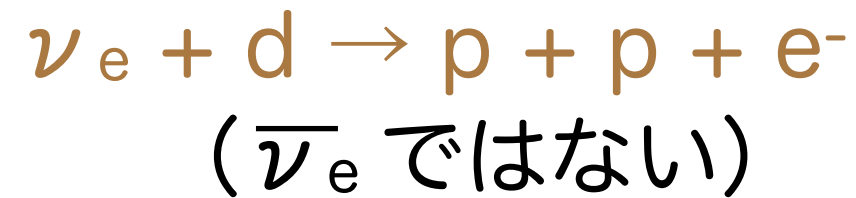
フラックスの上限値



SNO (2006)



荷電カレント反応 (CC) を探索



フラックスの上限値

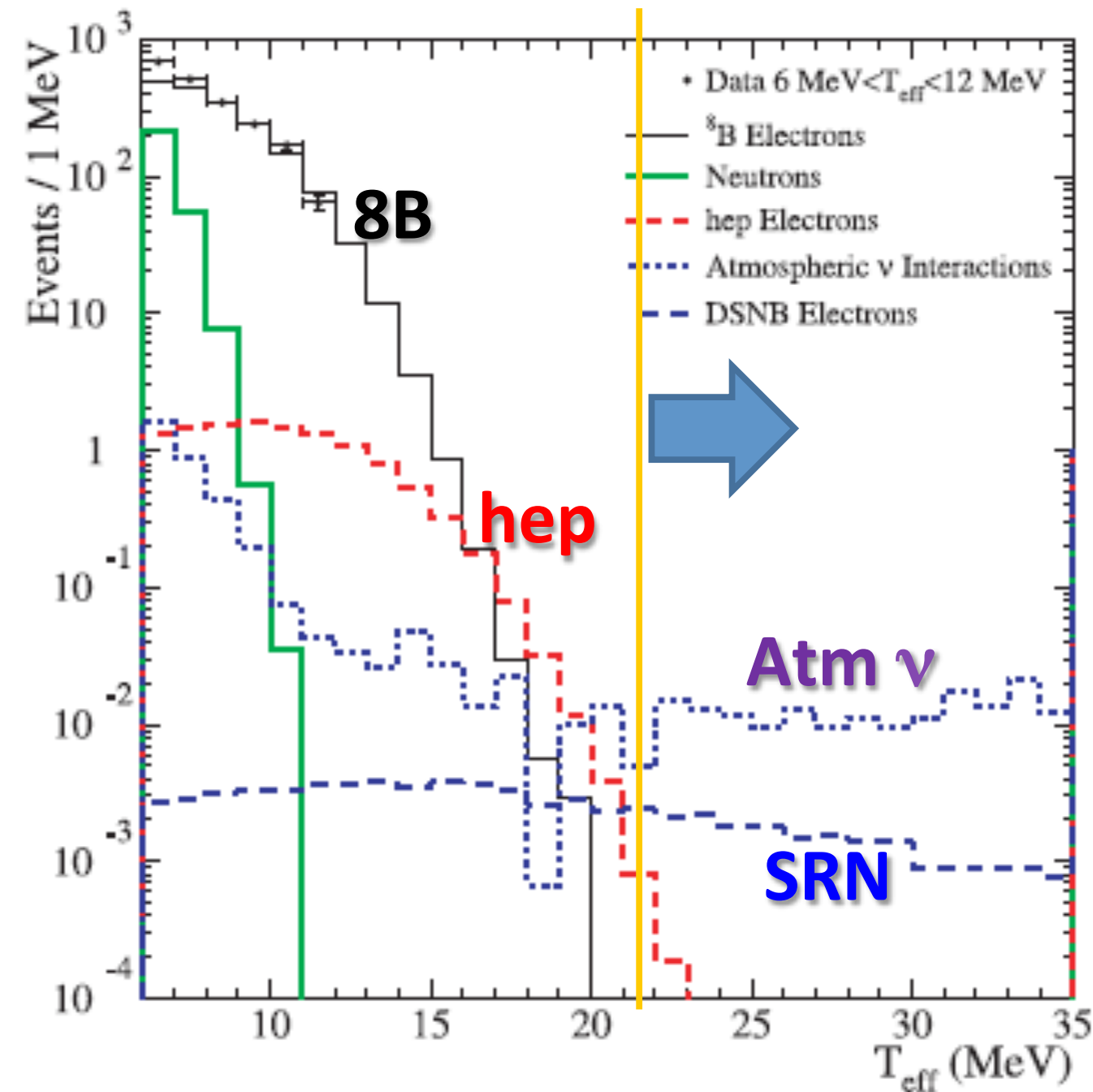
DSNB FLUX PREDICTIONS AND LIMITS

| MODEL | INTEGRAL FLUX ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) | | FLUX $22.9 \text{ MeV} < E_\nu < 36.9 \text{ MeV}$ ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) | |
|---------------------------|---|-------------------|--|-------------|
| | Prediction | Upper Limit | Prediction | Upper Limit |
| Beacom & Strigari (2006) | | | | |
| $T = 4 \text{ MeV}$ | 21.1 | 1.1×10^4 | 0.19 | 93 |
| $T = 6 \text{ MeV}$ | 14.1 | 1.5×10^3 | 0.66 | 72 |
| $T = 8 \text{ MeV}$ | 10.5 | 6.0×10^2 | 1.08 | 61 |
| Ando & Sato (2003) | | | | |
| NOR-L | 28.5 | 1.3×10^3 | 1.49 | 69 |
| NOR-S-INV | 34.9 | 2.3×10^3 | 1.06 | 70 |

NOTE.—This table shows the 90% CL upper limits on the ν_e component of the DSNB flux and model predictions for different models from Beacom & Strigari (2006) and Ando & Sato (2003).

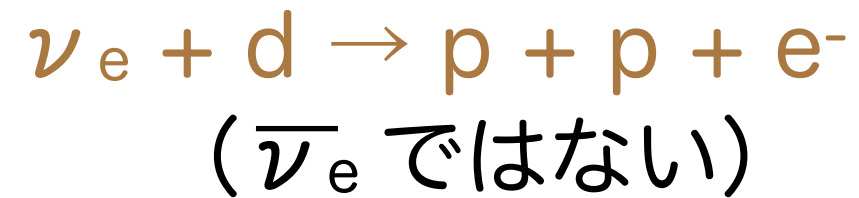
21 < E < 35 MeV に事象は無し。
バックグラウンド期待値
(大気ニュートリノ) は 0.18 ± 0.04

SNO (2006)

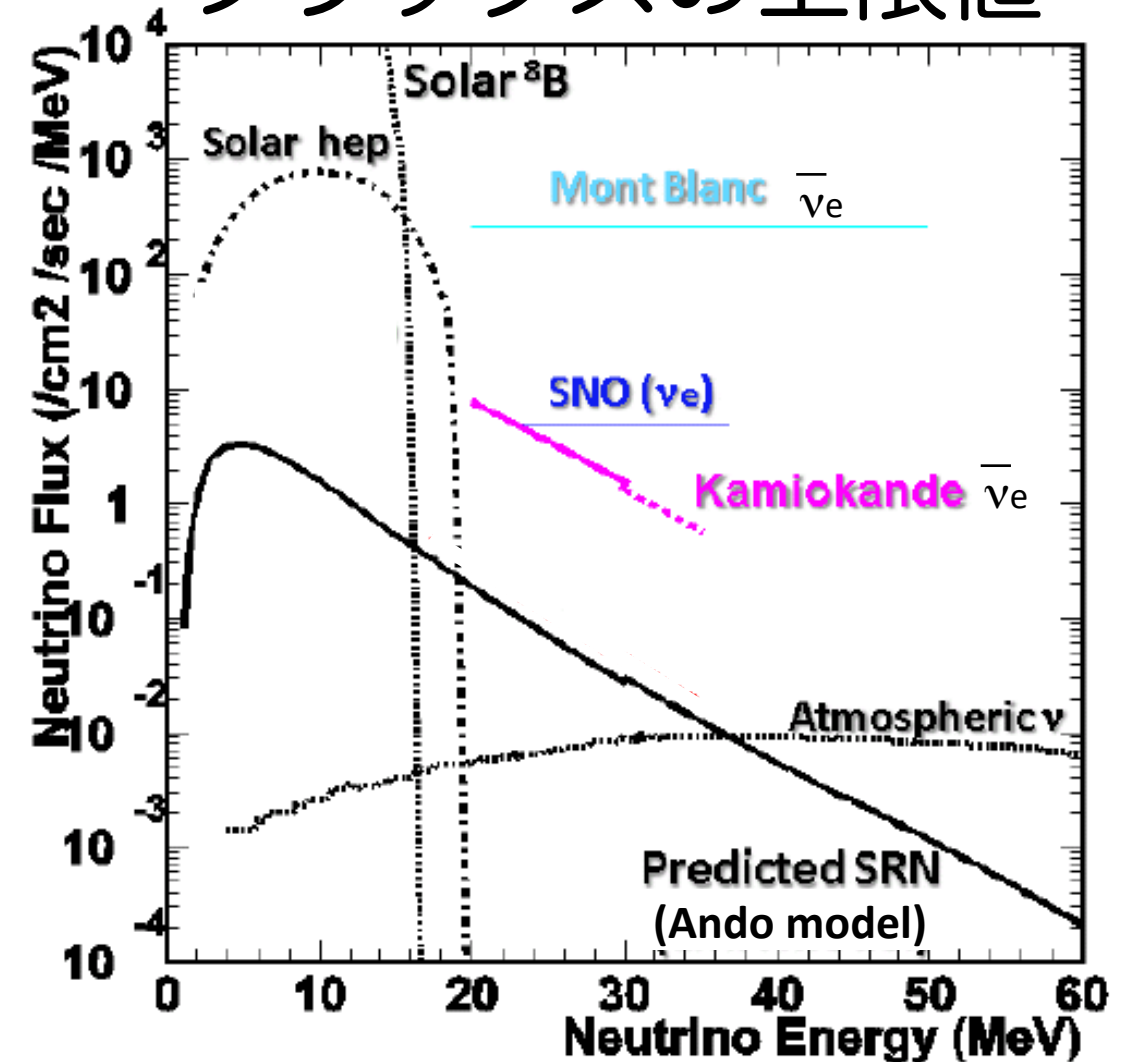


21 < E < 35 MeV に事象は無し。
バックグラウンド期待値
(大気ニュートリノ) は 0.18 ± 0.04

荷電カレント反応 (CC) を探索



フラックスの上限値



SNO (2004)

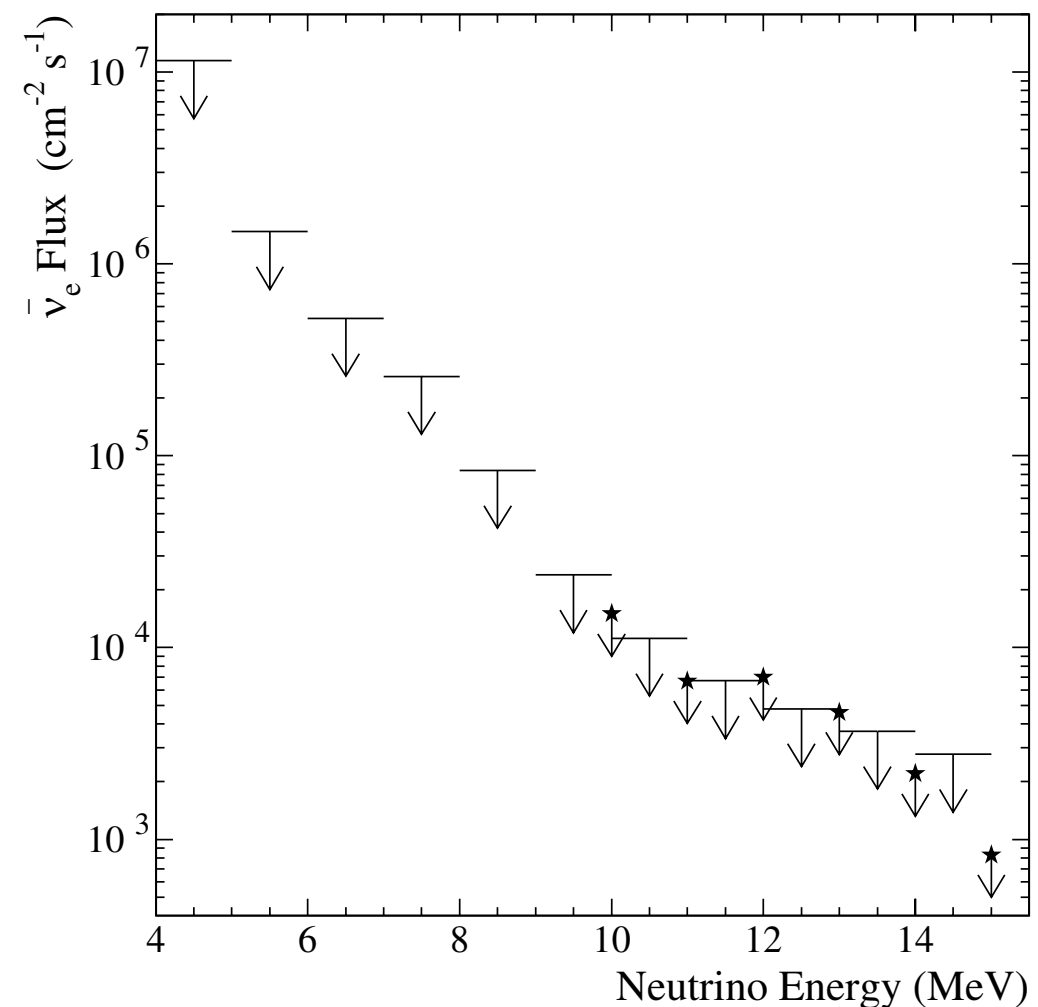
(あえて) 反電子ニュートリノの探索



2つの中性子が付随する荷電粒子の探索すると2つの候補事象

| $\bar{\nu}_e$ background | |
|---|------------------------|
| Type of $\bar{\nu}_e$ | expected coincidences |
| Atmospheric | 0.07 ± 0.01 |
| Reactor | 0.019 ± 0.002 |
| Diffuse supernovae | ≤ 0.005 |
| Geo-antineutrinos | 0.0 |
| Total $\bar{\nu}_e$'s background | 0.09 ± 0.01 |
| Non- $\bar{\nu}_e$ background | |
| Process | expected coincidences |
| Atmospheric ν | $1.46^{+0.49}_{-0.45}$ |
| ^{238}U spontaneous fission in detector media | <0.79 |
| Accidental coincidences | $0.13^{+0.06}_{-0.04}$ |
| $^x\text{O}(n, \gamma)^{x+1}\text{O}$, where $x = 17, 18$ | <0.05 |
| Instrumental contamination (95% C.L.) | <0.027 |
| $^{13}\text{C}(\alpha, ne^+e^-)^{16}\text{O}$ (90% C.L.) | $<1.7 \times 10^{-3}$ |
| Intrinsic: | |
| $^{214}\text{Bi}:\beta - \gamma$ decay | 7.6×10^{-5} |
| $^{210}\text{Tl}:\beta - n$ decay | $\approx 10^{-8}$ |
| $^{208}\text{Tl}:\beta - \gamma$ decay | 8.7×10^{-4} |
| $\gamma \rightarrow \text{Compton } e^- + \text{photo-disintegration } n$ | $<8 \times 10^{-4}$ |
| Total non- $\bar{\nu}_e$ background | $1.59^{+0.93}_{-0.45}$ |
| Total background | $1.68^{+0.93}_{-0.45}$ |

反電子ニュートリノの上限値
(超新星背景ニュートリノに限らず)



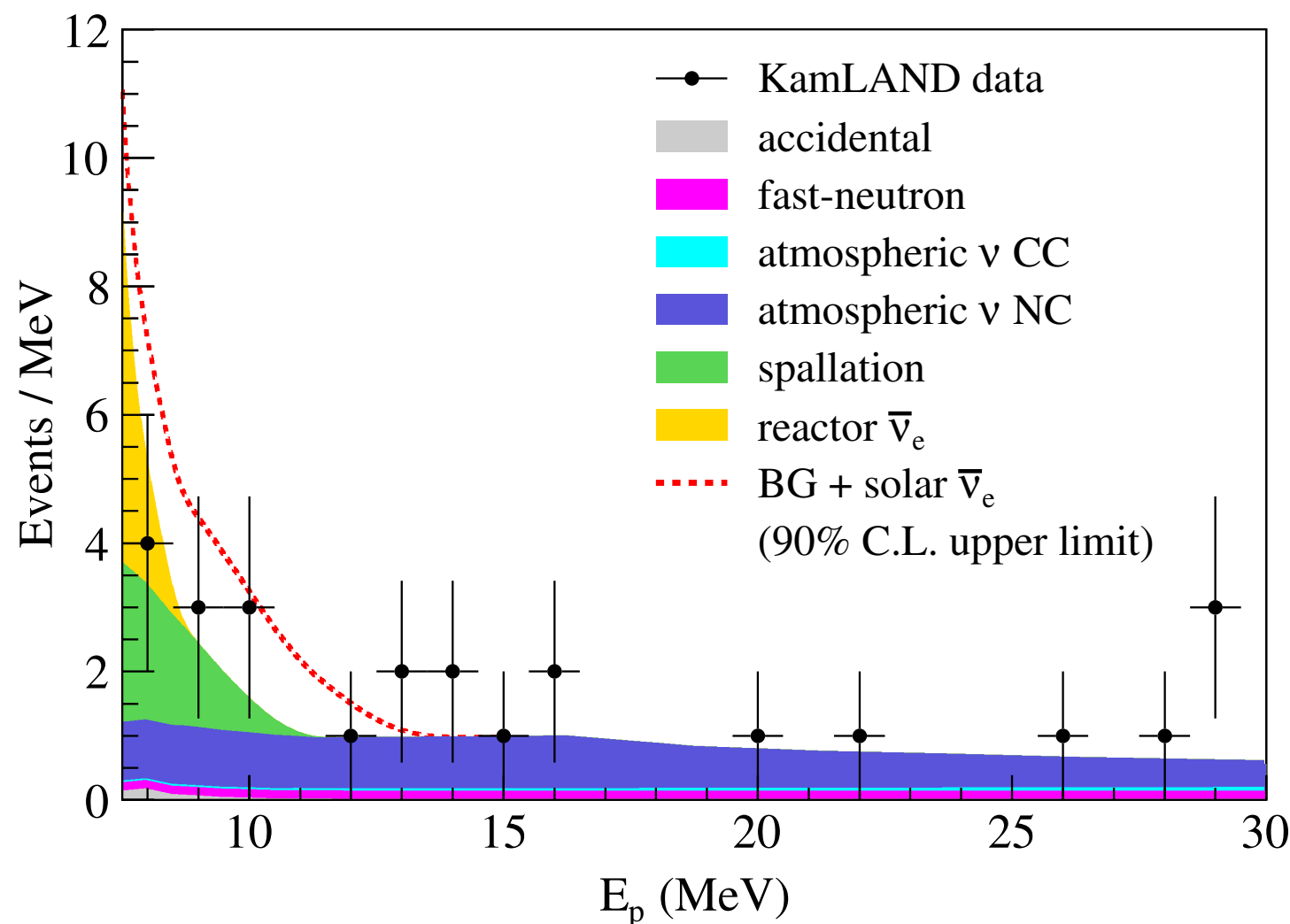
バックグラウンド期待値は 1.77

KamLAND (2012)

同時遅延計測を用いた逆ベータ崩壊事象の探索

8.3~31.8MeVのエネルギー領域で25個の候補事象

主なバックグラウンドは荷電粒子と中性子を発生する事象



大気ニュートリノ (CC)

| Reaction | Number of Events | Number of Untagged Events |
|--|------------------|---------------------------|
| $\bar{\nu}_{\mu} + p \rightarrow \mu^{+} + n$ | 2.1 | 0.5 |
| $\bar{\nu}_{\mu} + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^{+} + n + {}^{11}\text{B}$ | 0.7 | 0.2 |
| $\nu_{\mu} + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^{-} + n + {}^{11}\text{N}$ | 0.4 | 0.1 |
| $\bar{\nu}_{\mu} + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^{+} + n + {}^{11}\text{B} + \gamma$ | 0.4 | 0.08 |
| $\bar{\nu}_{\mu} + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^{+} + n + {}^7\text{Li} + \alpha$ | 0.4 | 0.08 |
| $\bar{\nu}_{\mu} + {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^{+} + 2n + {}^{10}\text{B}$ | 0.02 | 0.005 |
| Total | 4.0 ± 0.9 | 0.9 ± 0.2 |

大気ニュートリノ (NC)

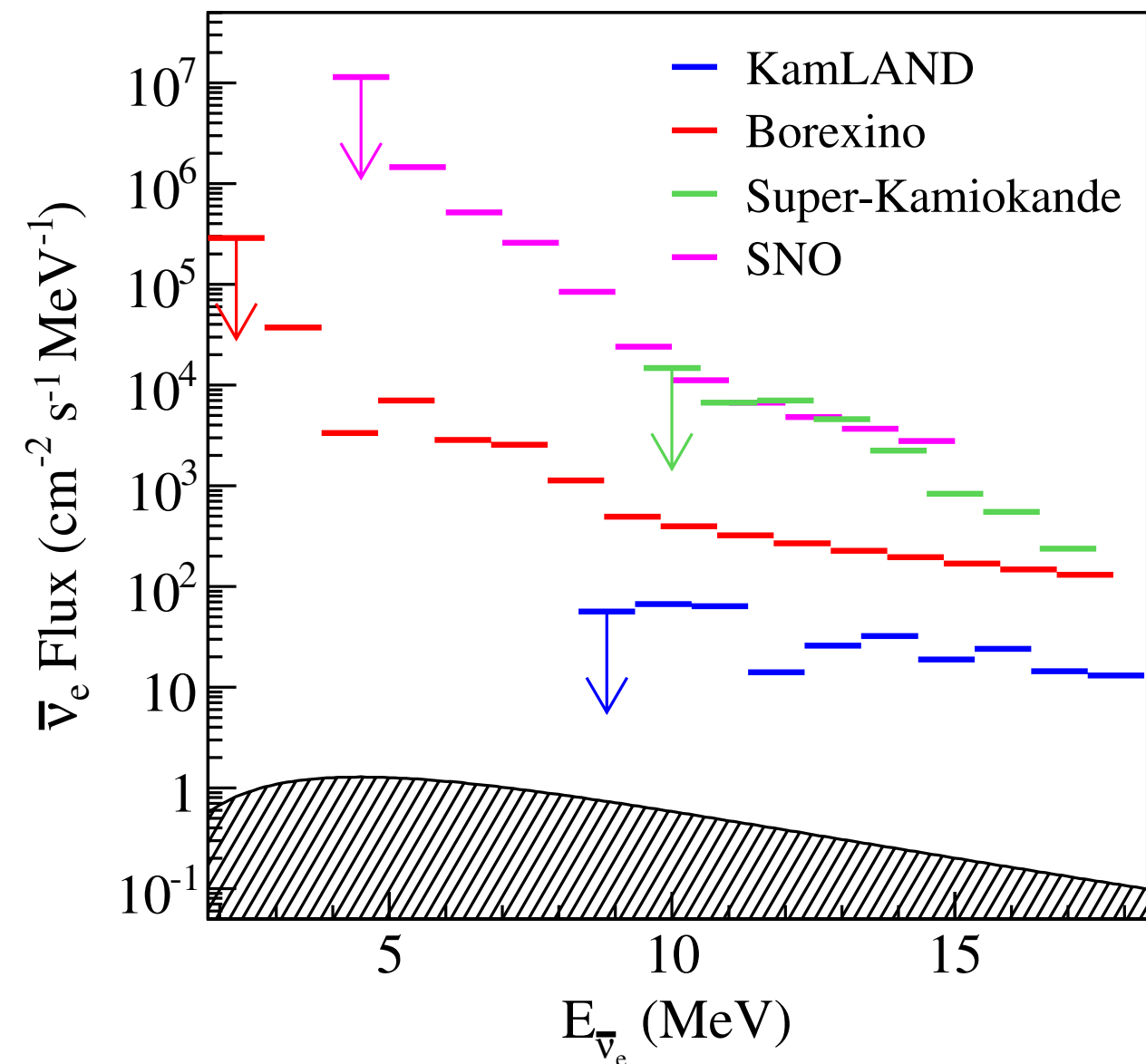
| Reaction | Number of Events |
|--|------------------|
| $\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + n + {}^{11}\text{C} + \gamma$ | 13.2 |
| $\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + n + {}^{10}\text{B} + p$ | 1.4 |
| $\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + n + {}^6\text{Li} + \alpha + p$ | 1.4 |
| $\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + n + {}^9\text{Be} + 2p$ | 0.3 |
| $\nu(\bar{\nu}) + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu(\bar{\nu}) + 2n + {}^{10}\text{C}$ | 0.1 |
| Total | 16.4 ± 4.7 |

バックグラウンド期待値は 26.9 ± 5.7

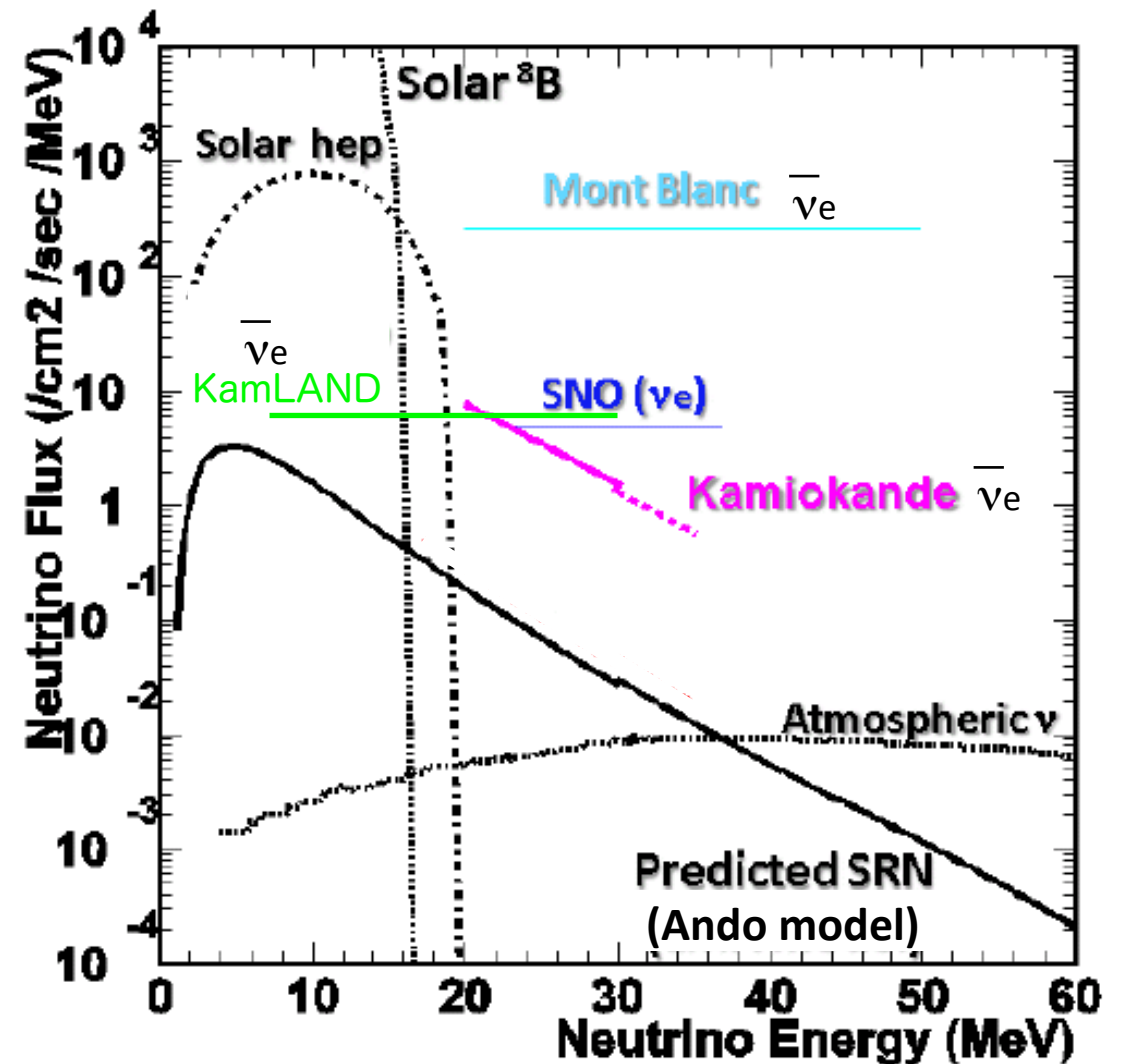
KamLAND (2012)

同時遅延計測を用いた逆ベータ崩壊事象の探索

反電子ニュートリノの上限値
(超新星背景ニュートリノに限らず)



フラックスの上限値
 $139/\text{cm}^2/\text{sec}$ at 90%C.L.

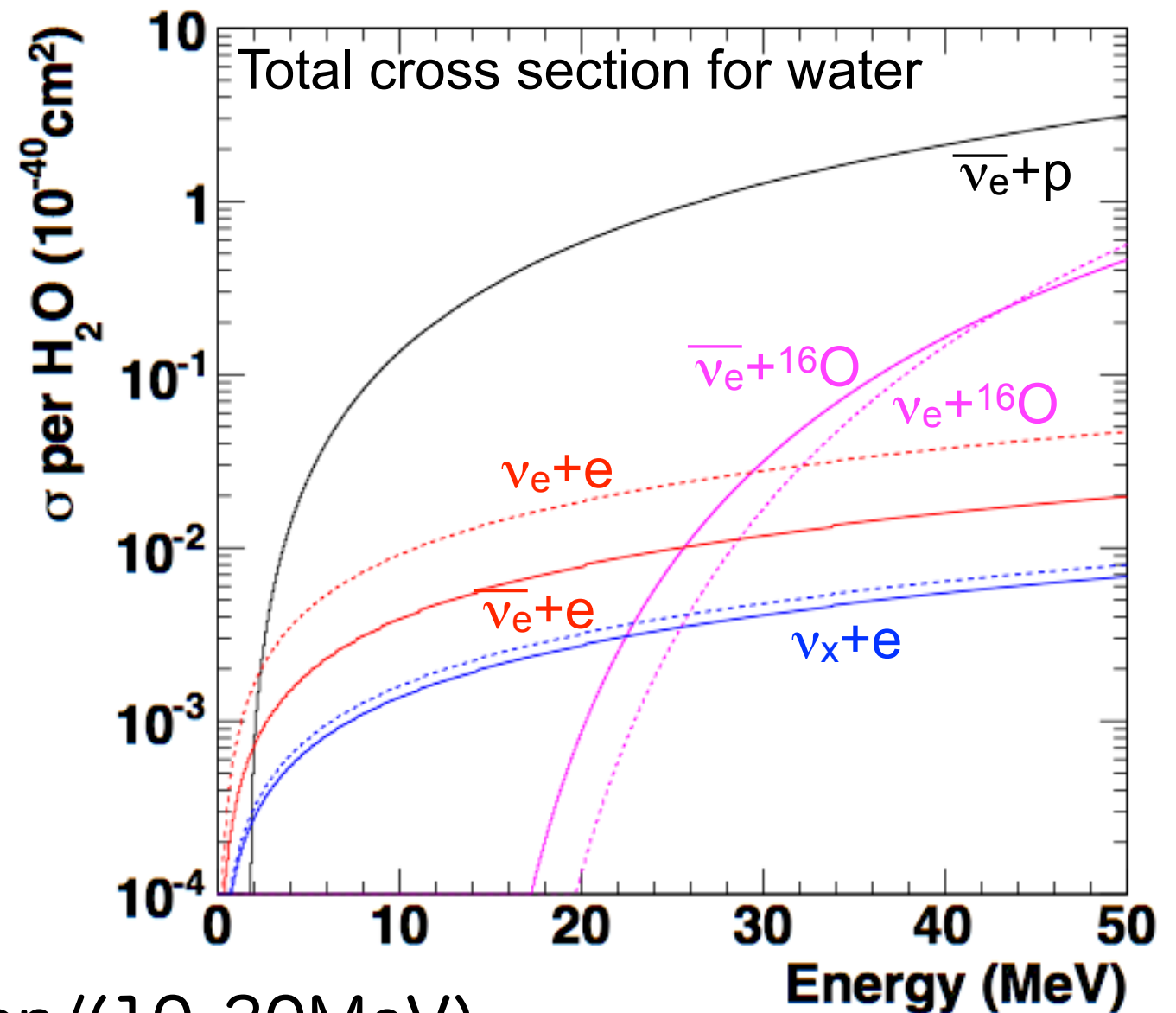
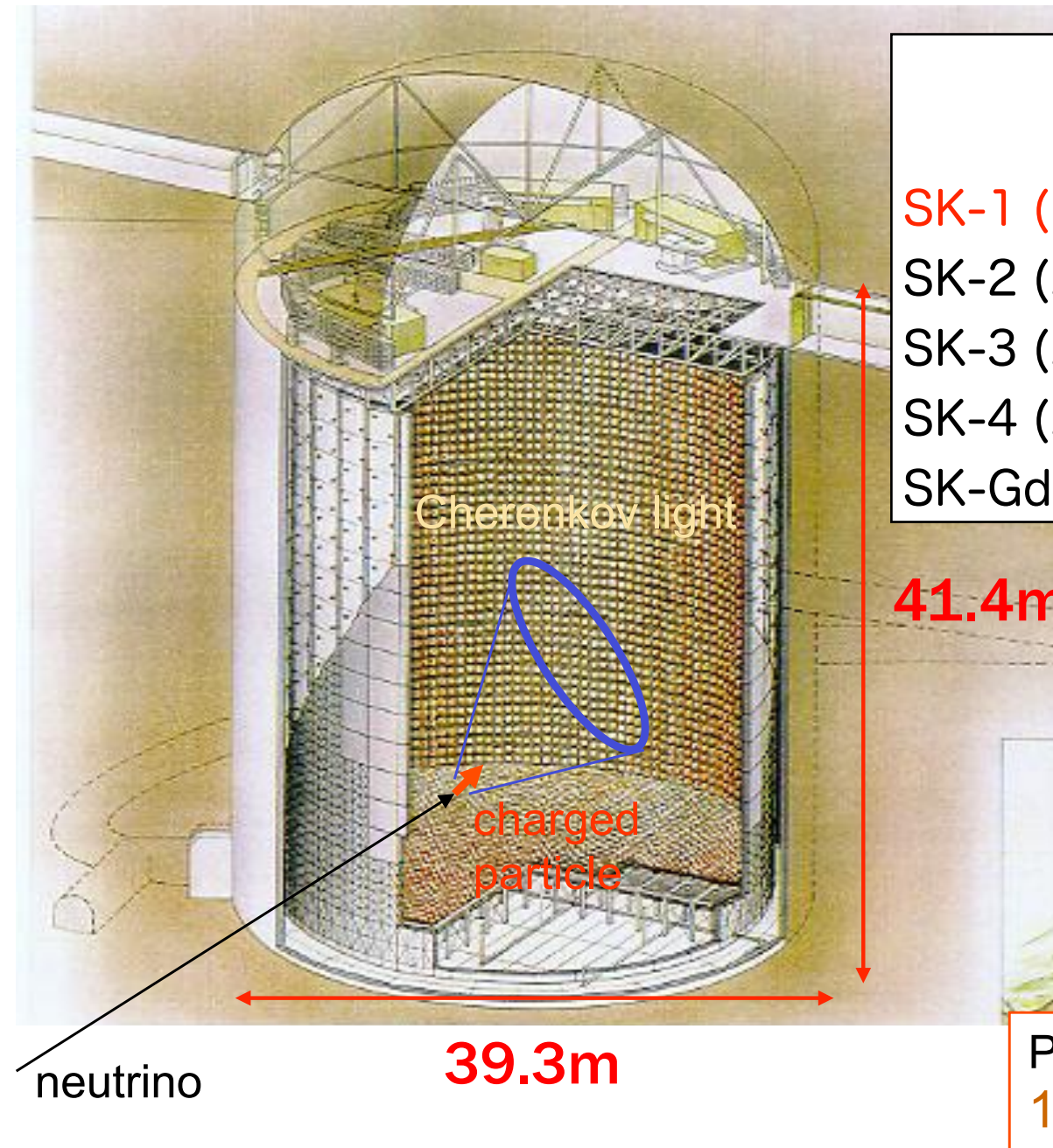


スーパーカミオカンデ

発見されたのか？

SK (2003)

5万トン水チェレンコフ検出器（大容量は大きなアドバンテージ）

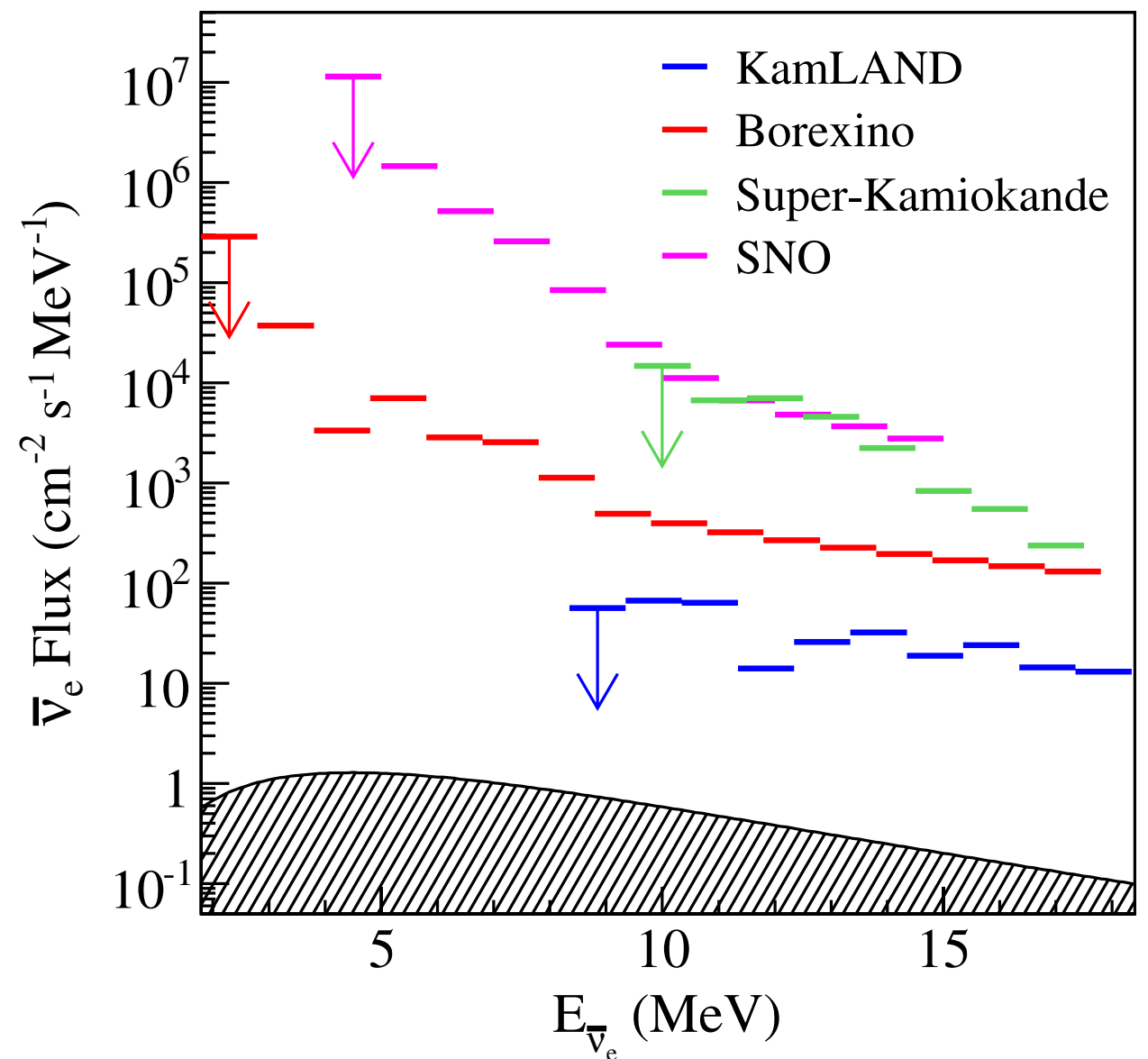
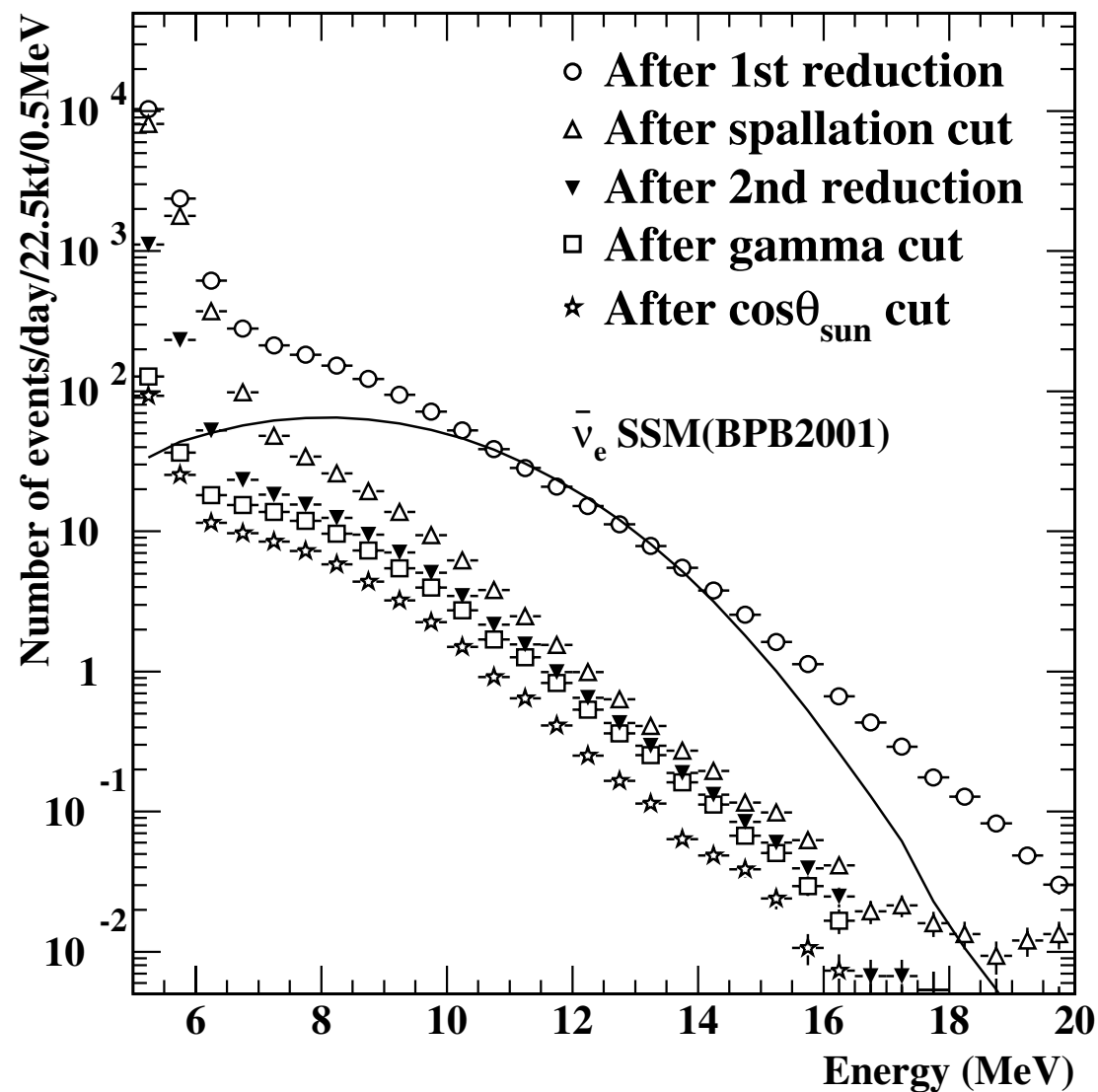


期待されるSRN信号の数

1.3~6.7 events/year/22.5kton/(10-30MeV)

SK (2003)

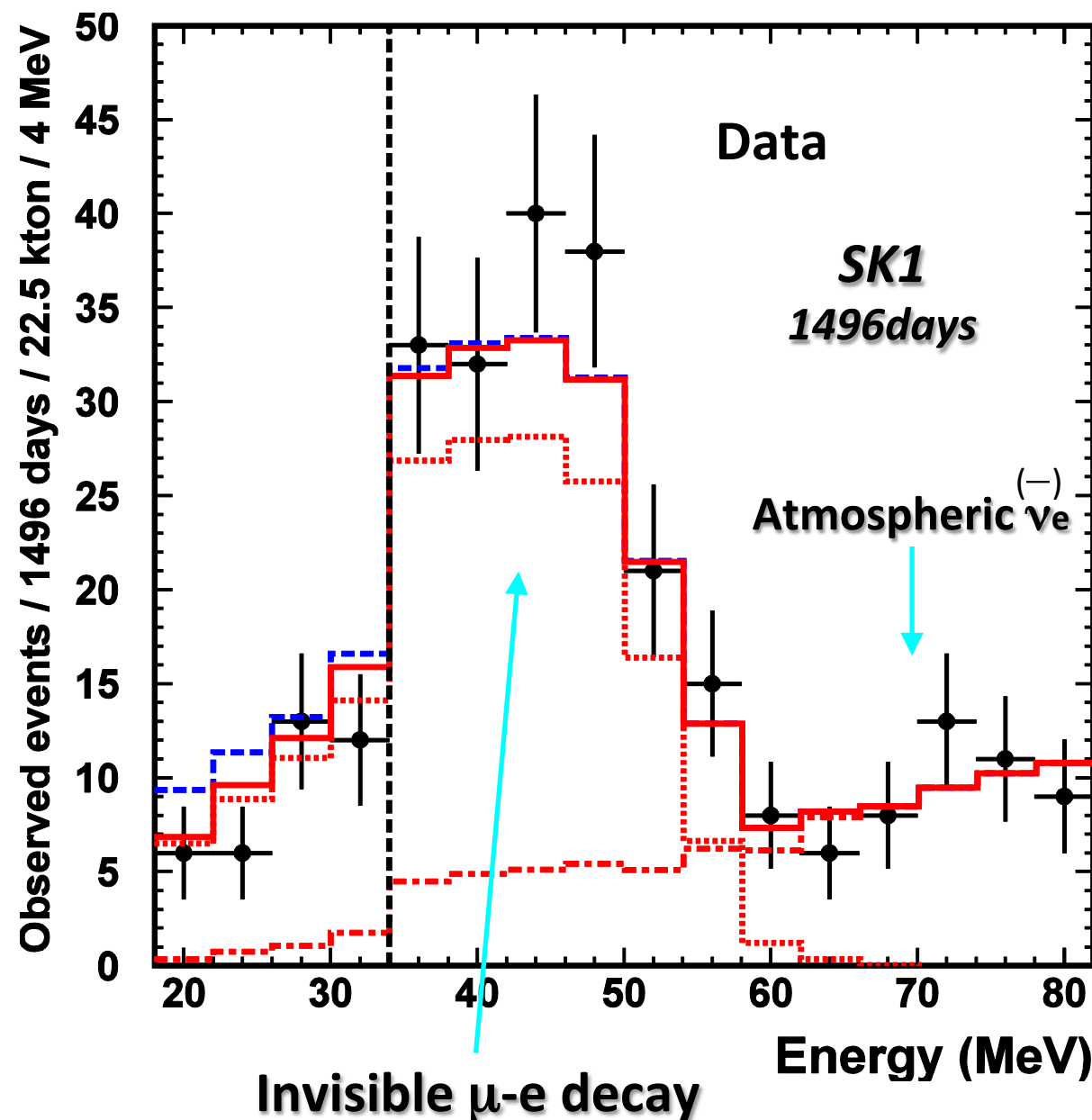
しかし遅延同時計測が使えないのでバックグラウンドが多く残り、
反電子ニュートリノそのものに対する感度はなかなか高くない



残った事象から太陽ニュートリノや落とし
きれなかった spallation 事象を差っ引く

SK (2003)

超新星背景ニュートリノ探索ではバックグラウンドがほとんどないところまでエネルギー閾値をあげ(18MeV)、さらにエネルギースペクトル情報を使うことで探索感度を向上させる



$$\chi^2 = \sum_i \frac{[N_{data}(i) - (\alpha \times N_{relic}(i) + \beta \times N_{\nu_e}(i) + \gamma \times N_{\nu_\mu}(i))]^2}{\sigma_{data}^2 + \sigma_{MC}^2 + \sigma_{systematic}^2}$$

$N_{data}(i)$: real Data spectrum

$N_{relic}(i)$: SRN MC spectrum

$N_{\nu_e}(i)$: atmospheric ν_e spectrum

$N_{\nu_\mu}(i)$: atmospheric ν_μ spectrum

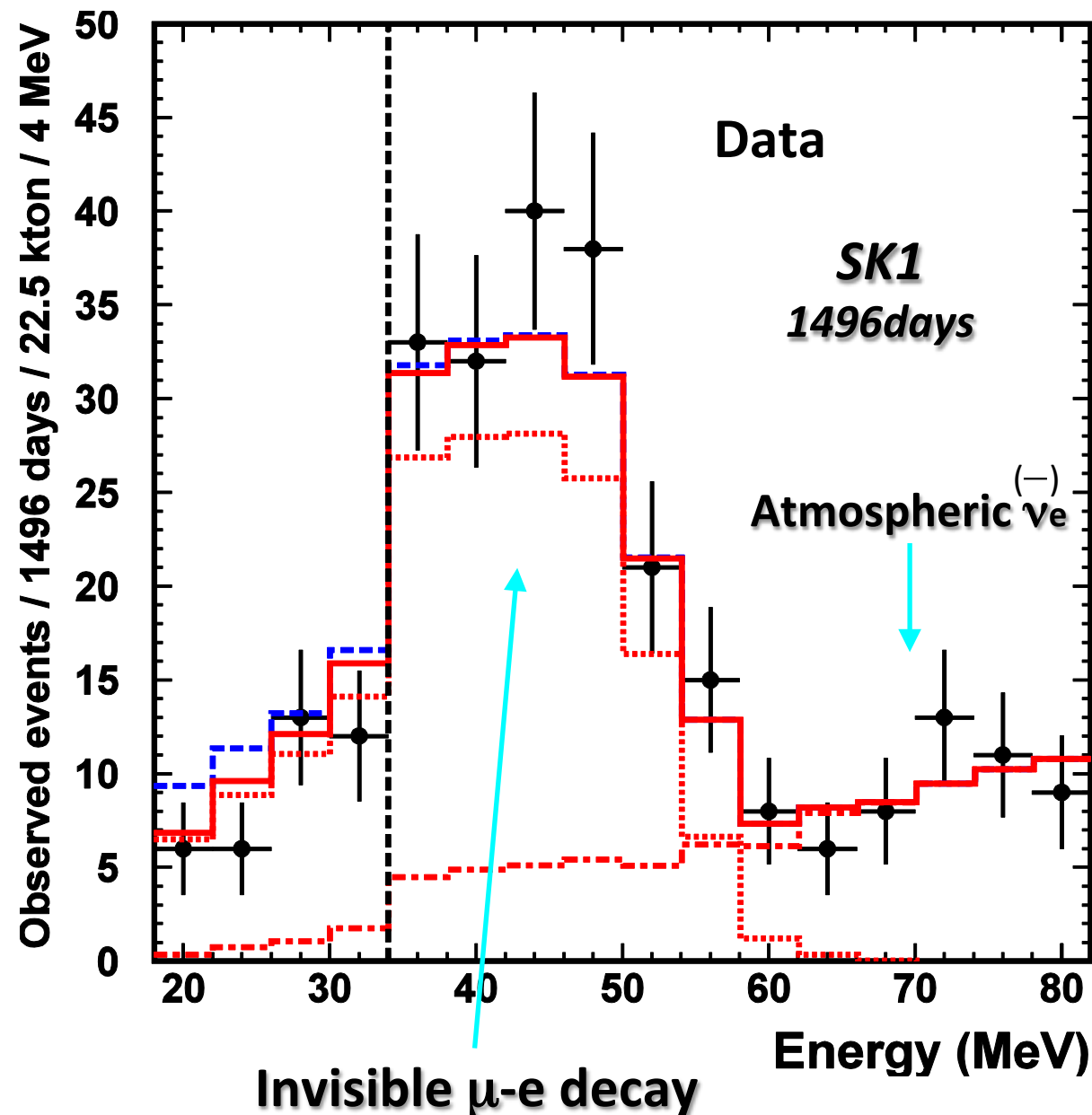
フラックスの上限値

1.2/cm²/sec at 90%C.L.

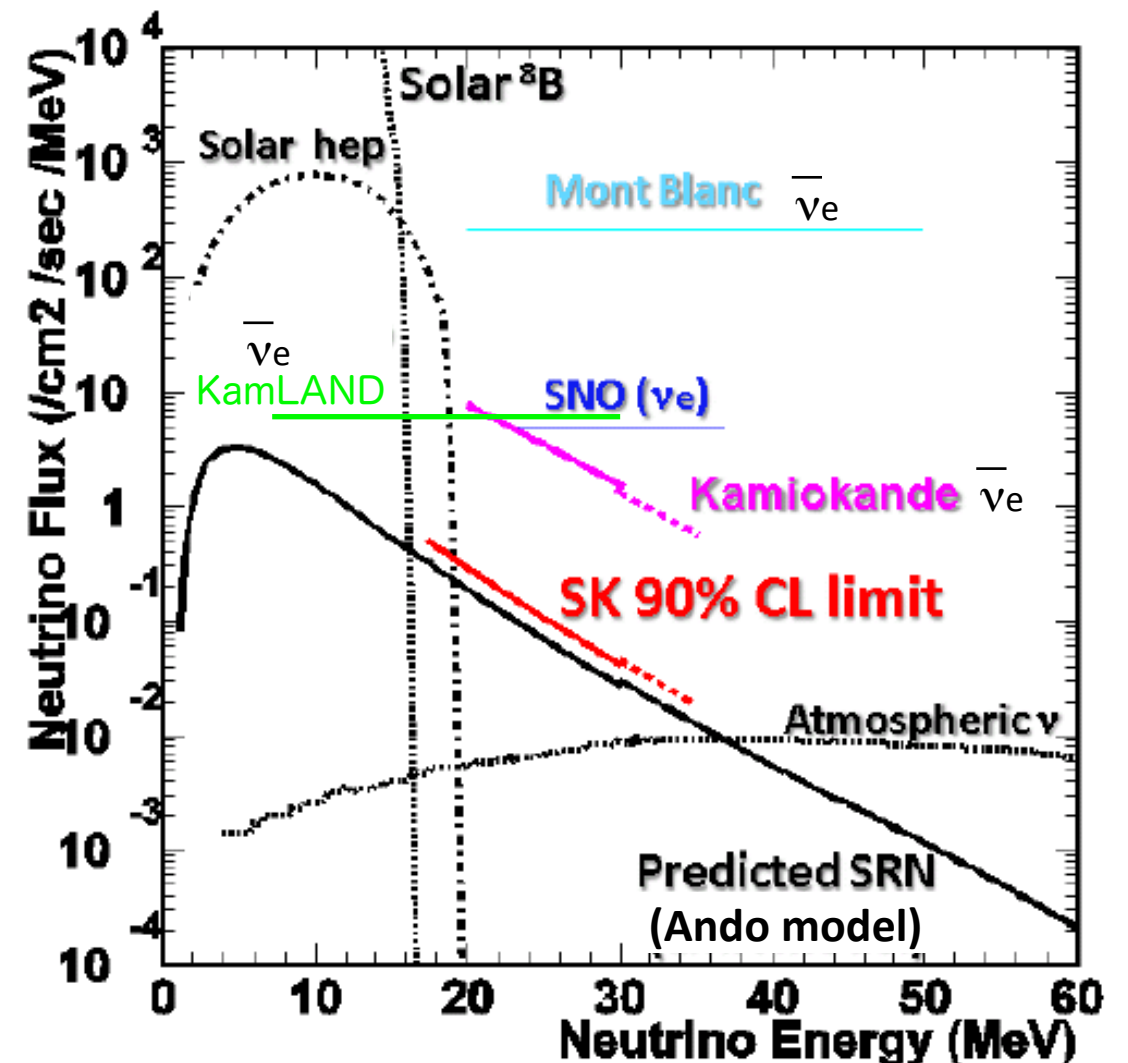
(>19.3MeV)

SK (2003)

超新星背景ニュートリノ探索ではバックグラウンドがほとんどないところまでエネルギー閾値をあげ(18MeV)、さらにエネルギースペクトル情報を使うことで探索感度を向上させる



フラックスの上限値
1.2/cm²/sec at 90%C.L.

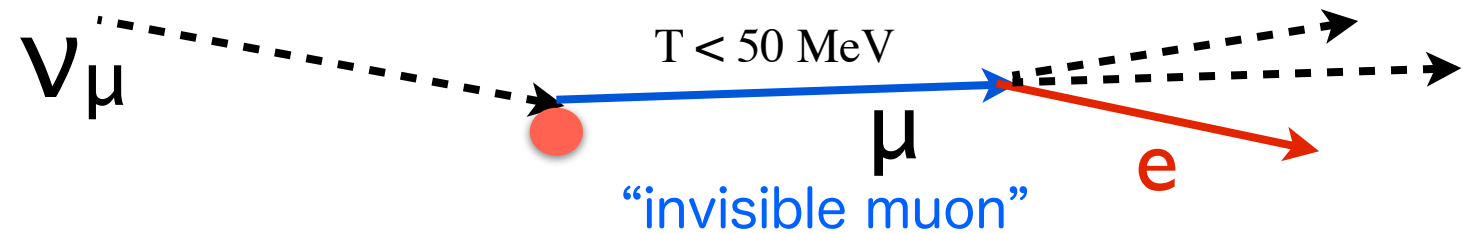


SK (2012)

バックグラウンドについて、もう少し。。

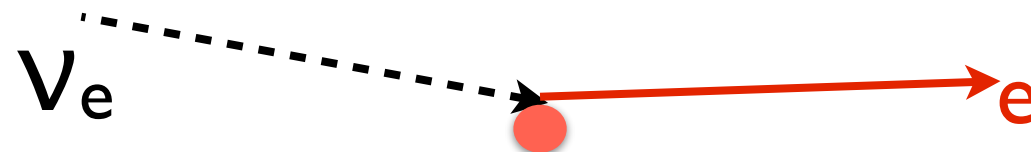
Decay electron

“atm. muon neutrinos”



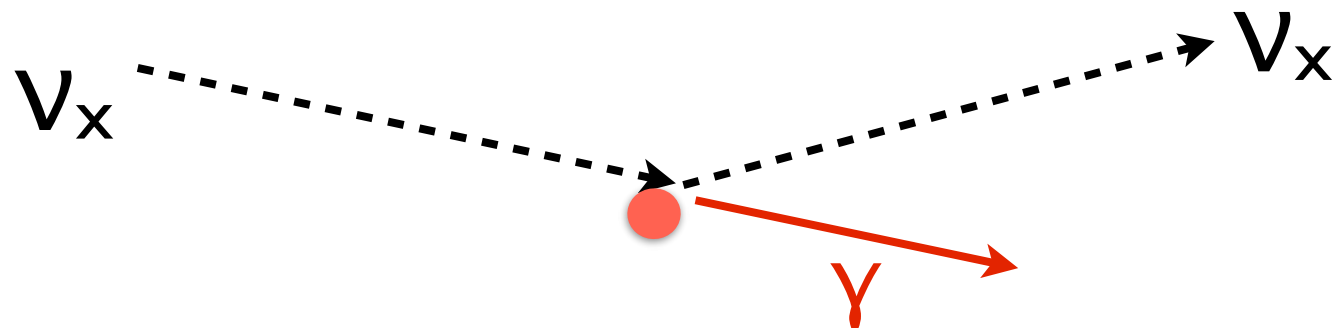
ν_e CC

“atm. electron neutrinos”



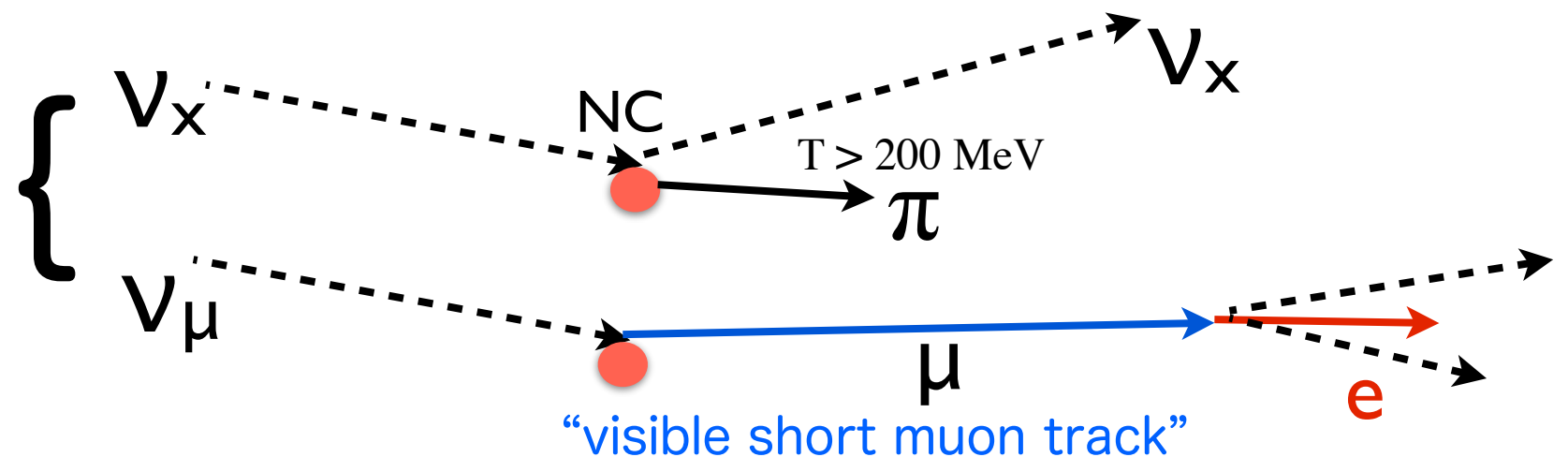
NC Elastic

“atmospheric”



μ/π

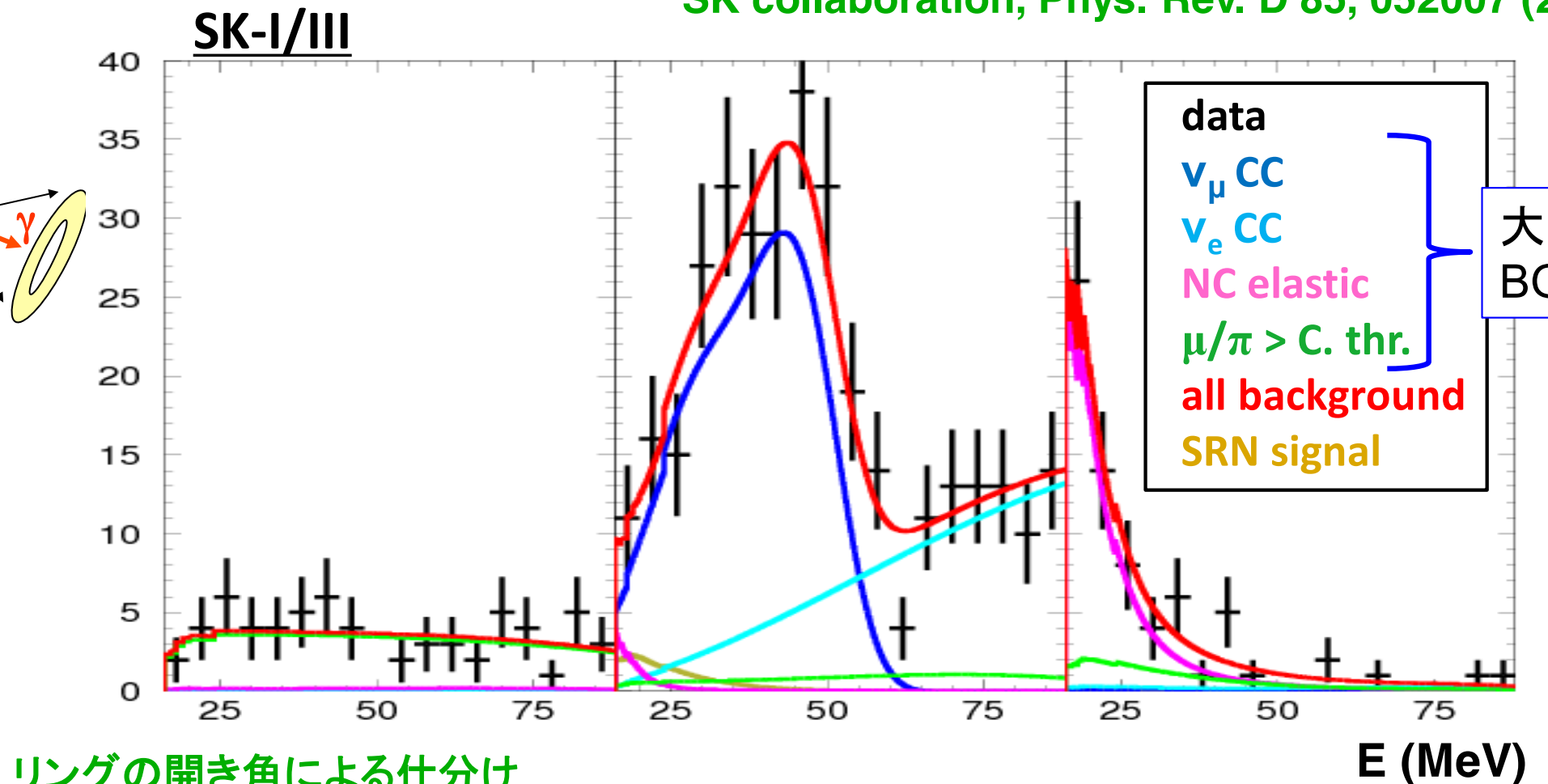
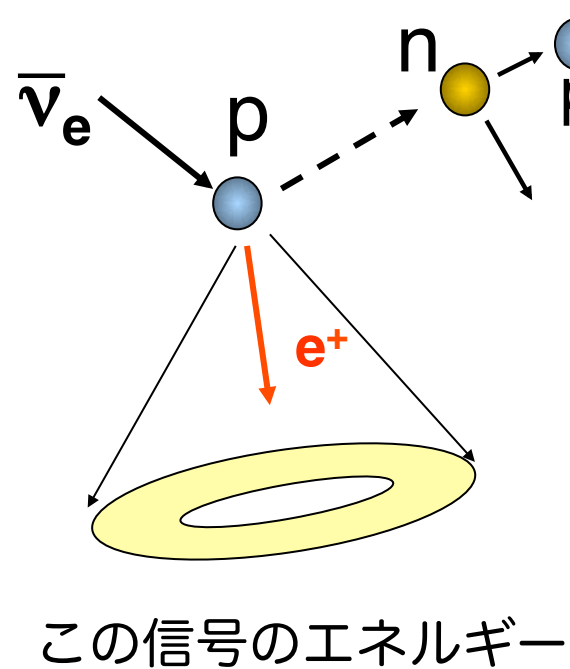
“ μ/π production from atm. neutrinos”



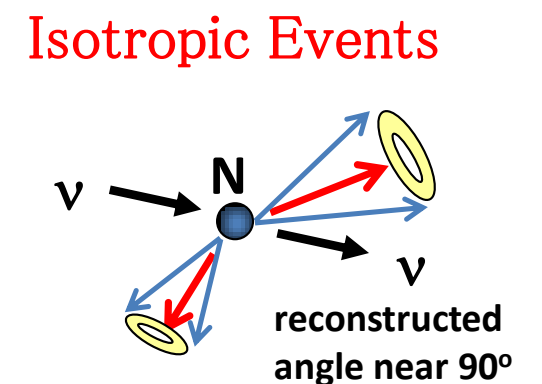
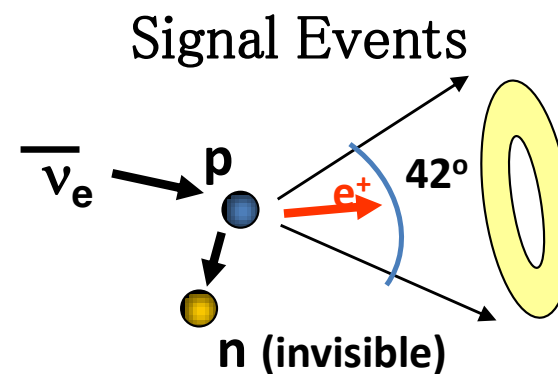
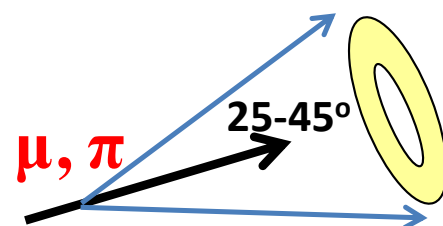
SK (2012)

解析手法の向上によりバックグラウンドを効果的に除去

SK collaboration, Phys. Rev. D 85, 052007 (2012)

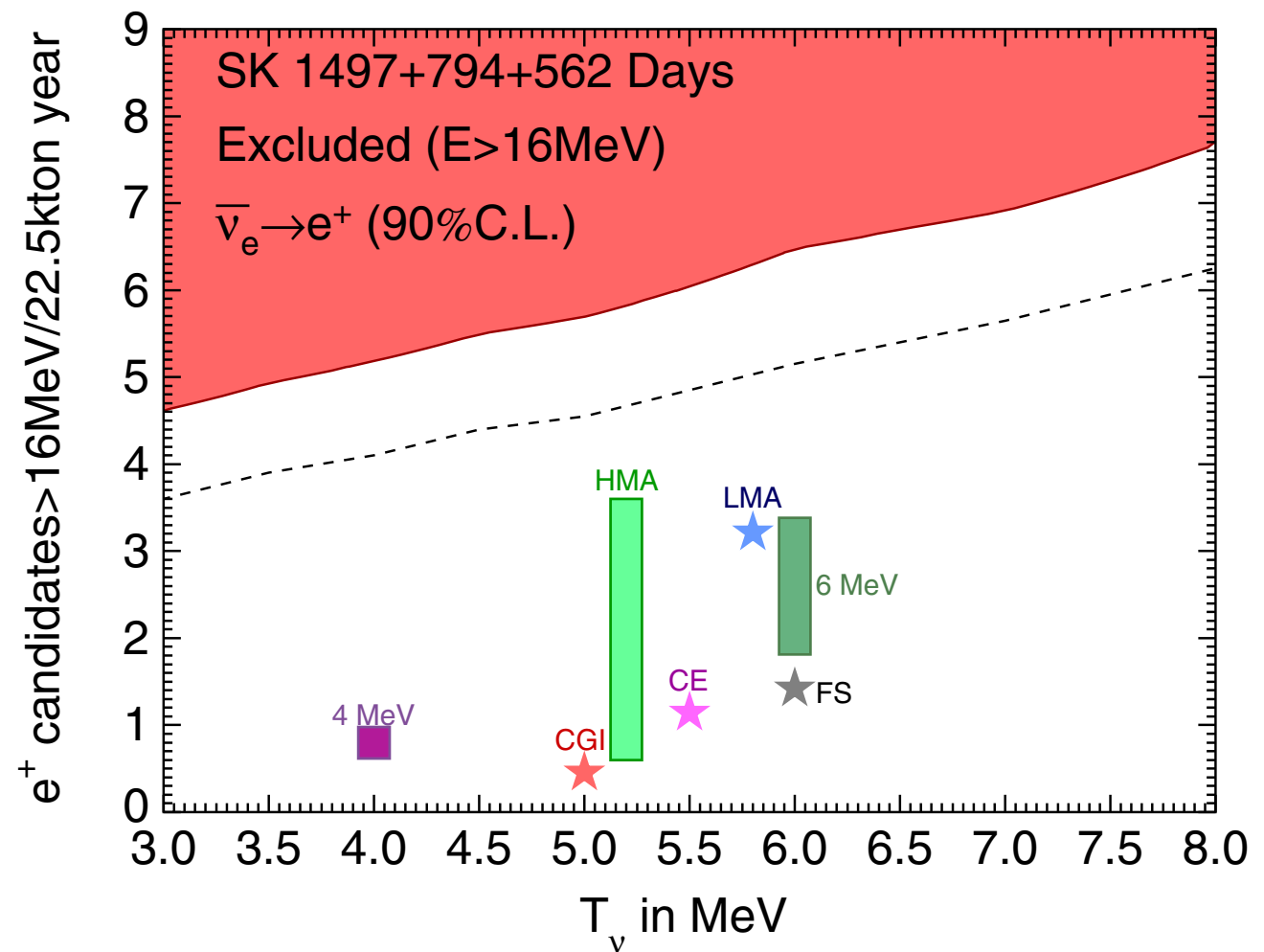
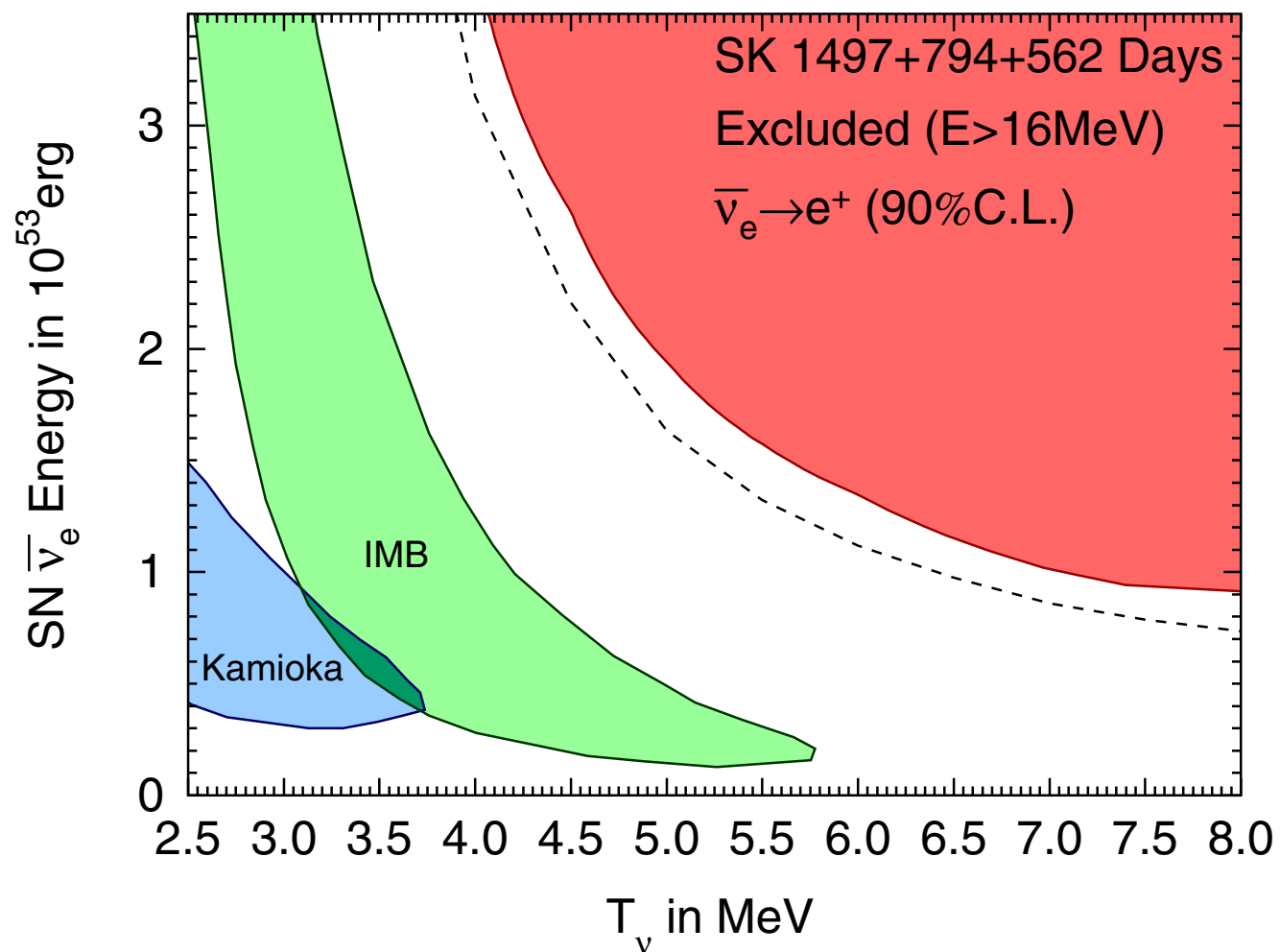


リングの開き角による仕分け
 Low angle events



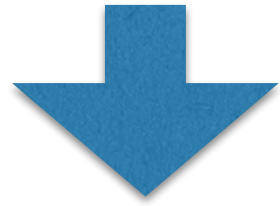
SK (2012)

超新星背景ニュートリノのフラックス上限値

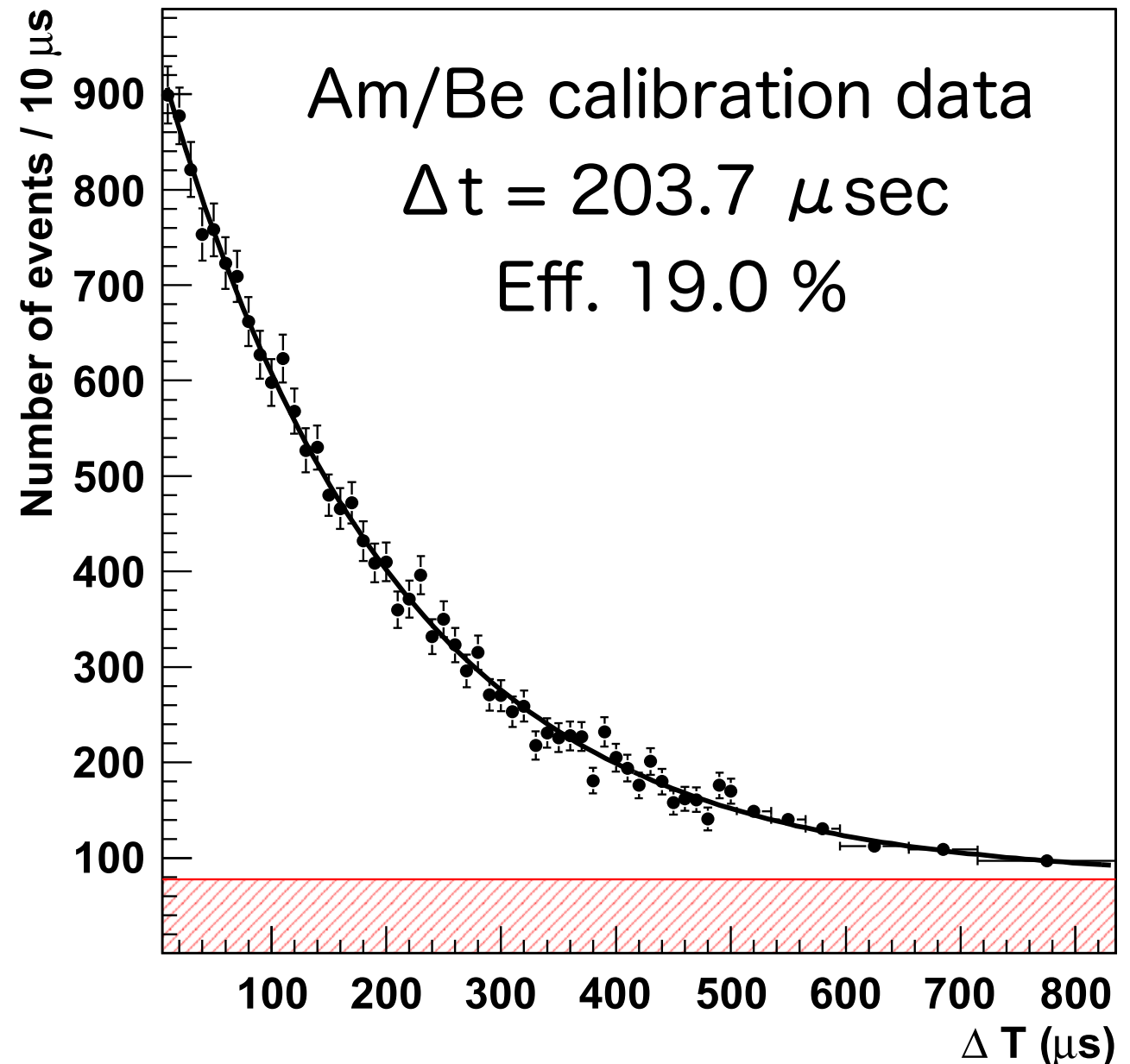
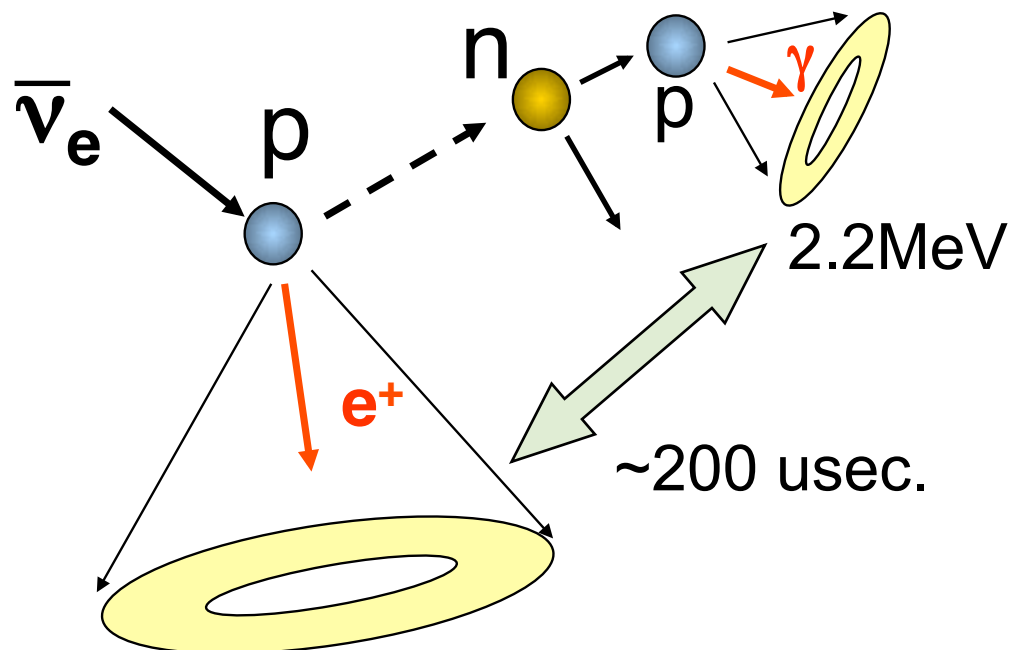


SK (2015)

しかし遅延同時計測が使えないのでバックグラウンドが多く残り、
反電子ニュートリノそのものに対する感度はなかなか高くない

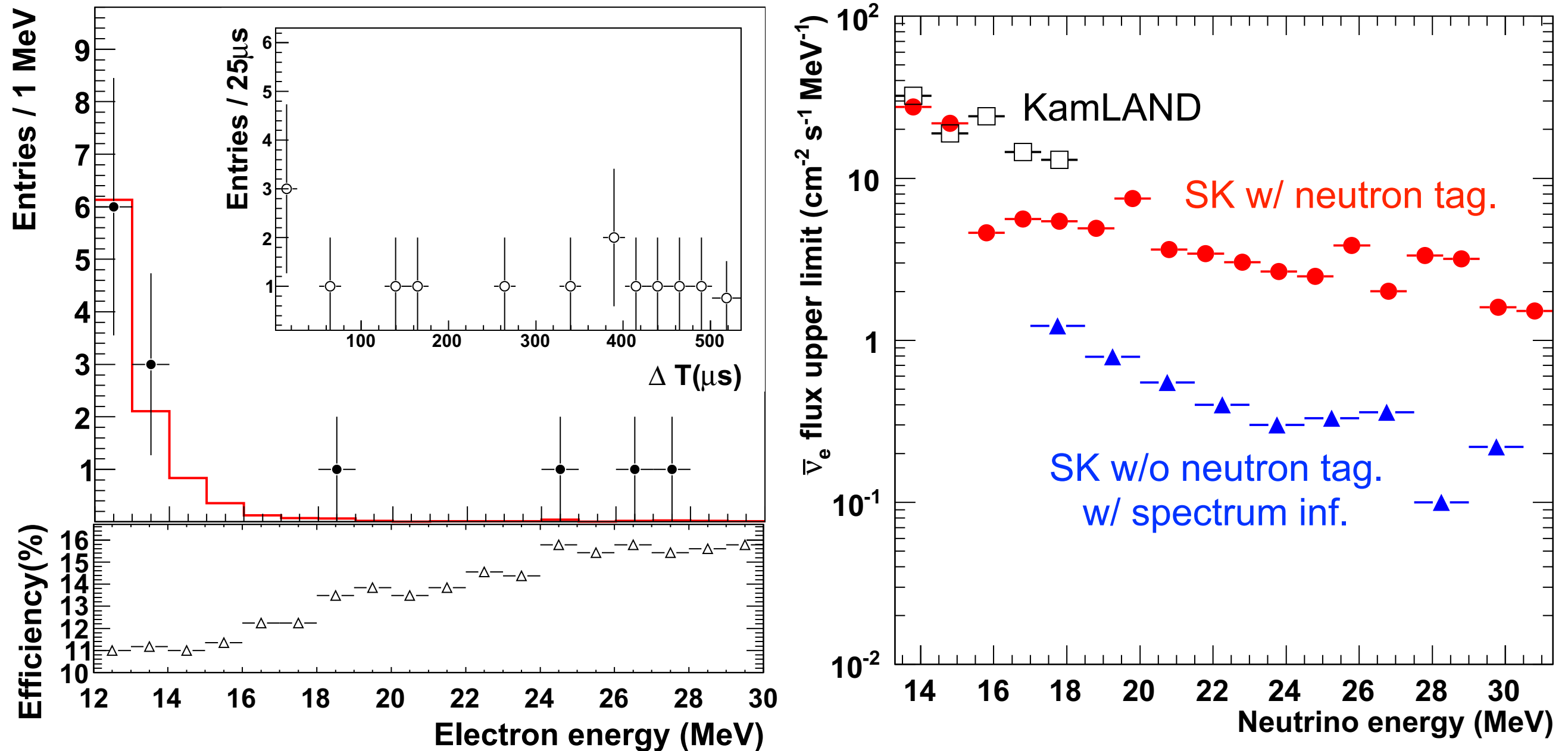


SK-4 からは電子回路の改良により
検出効率は高くないが (~20%)
同時遅延計測もできるようになった



SK (2015)

同時遅延計測を使った反電子ニュートリノフラックスの上限値



まとめ

超新星背景ニュートリノの発見には至っていないが
理論予測値には近づいている