

Observed Event Excess in
the MiniBooNE Search for
 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ Oscillations

2010年7月13日

中野浩至

目次

はじめに

予備知識

概要

この実験について

結果の詳細

はじめに

1995年、**LSND**という、
 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ を $\bar{\nu}_e$ の観測で調べる実験において
 $\Delta m^2 \sim 0.1 - 100 \text{ eV}^2$ 領域での $\bar{\nu}_e$ への **振動を観測！**
との論文を出した。

この確認のため **MiniBooNE** 実験が行われたが、
2009年7月の論文では、この領域で観測 **できなかった**
と報告

しかし！

再び **MiniBooNE**、2010年7月8日のこの報告では、
LSNDの結果を **肯定する結果を報告** ← この論文

何がおもしろいのか？

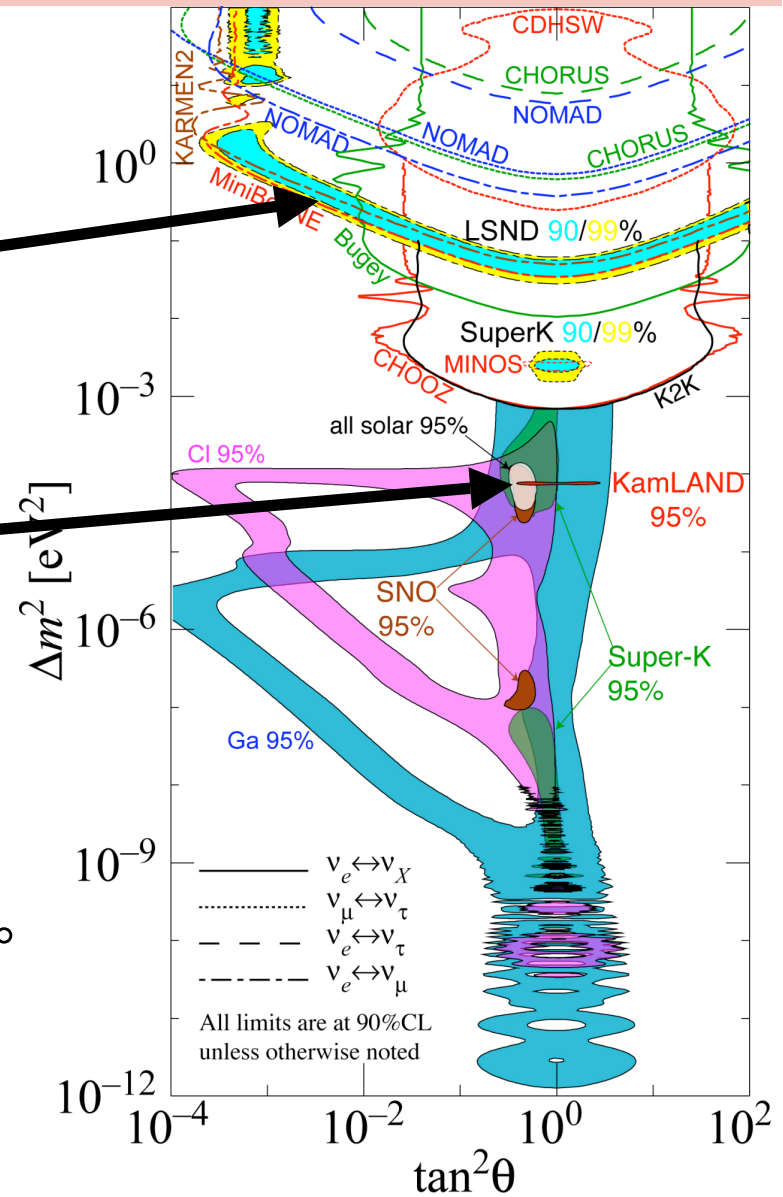
ν_e と ν_μ の質量の二乗差
 Δm^2 が異なる。

LSNDで主張
 1 - 0.1 の領域

KamLAND、
 Solar (SNO, SK, Ga, Cl, ...etc)
 $\sim 10^{-4}$ の領域

2つの領域が肯定されるのは**変だ**。

CP, CPTの破れや
 Sterile neutrino の可能性？



予備知識

2世代振動の確率

$$\sin^2(2\Theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E}\right)$$

Θ : 混合角
 Δm^2 : 質量の2乗差
 L : 飛行距離
 E : ニュートリノの
エネルギー

振動前のニュートリノの数を測って、
ニュートリノの減少を見るのが、disappearance実験

振動後のニュートリノの数を測って、
ニュートリノの増加を見るのが、appearance実験

今回は
こっち

ニュートリノ実験の方法

disappearance実験

$\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ を見たい場合

ν_α を飛ばして、 ν_α を観測する。

あらかじめ、ニュートリノ振動が起こらなかった場合に観測されるであろうシグナル量を見積もって、その量からの減少分を調べる。

appearance実験

$\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ を見たい場合

ν_α を飛ばして、 ν_β を観測する。

あらかじめ、ニュートリノ振動が起こらなかった場合に観測されるであろうシグナル量を見積もって、その量からの増加分を調べる。

概要(1): LSND実験

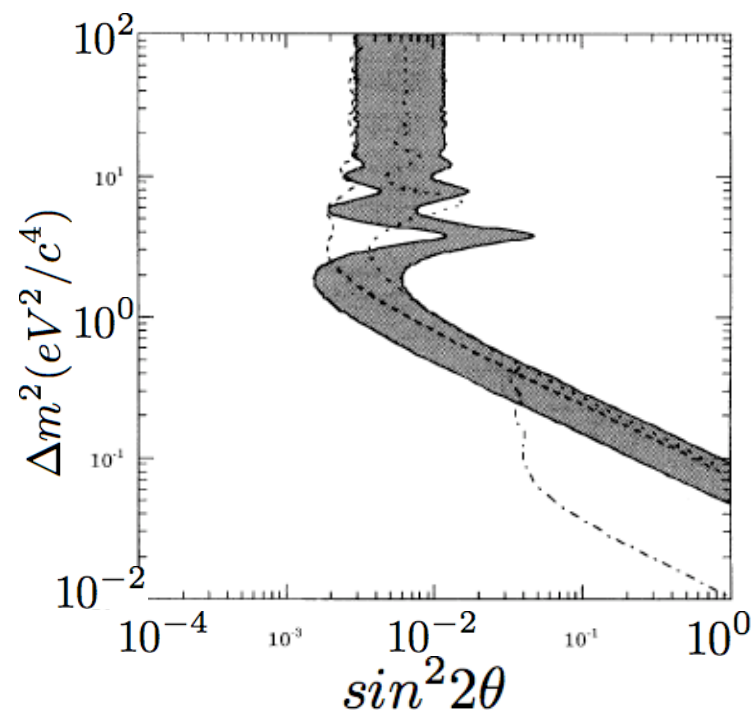
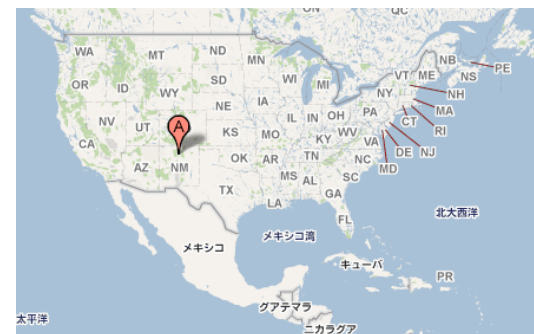
Los Alamos Meson Physics Facilityにて、

$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の appearance 実験

ビームから作った $\bar{\nu}_\mu$ をシンチレーターに打ち込む。見積もられたBGよりも、 $\bar{\nu}_e$ の観測量が多ければ、 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ であると考えられる。

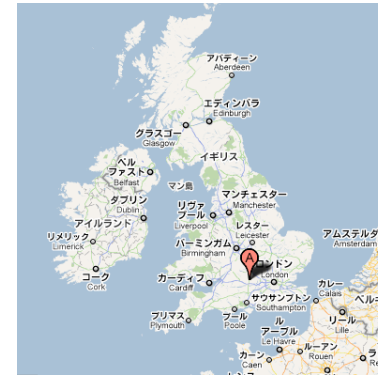
LSND実験が行われ、

3.8 σ の $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ イベント観測に成功



概要(2): KARMEN実験

Rutherford Appleton Laboratoryにて、**KARMEN実験**が追実験として行われた。



この実験では、 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$

らしきイベントは**観測されなかった**。

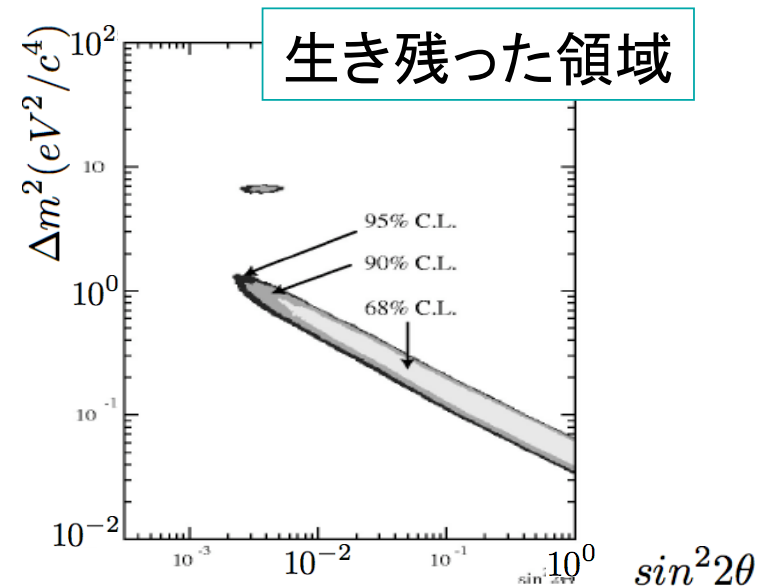
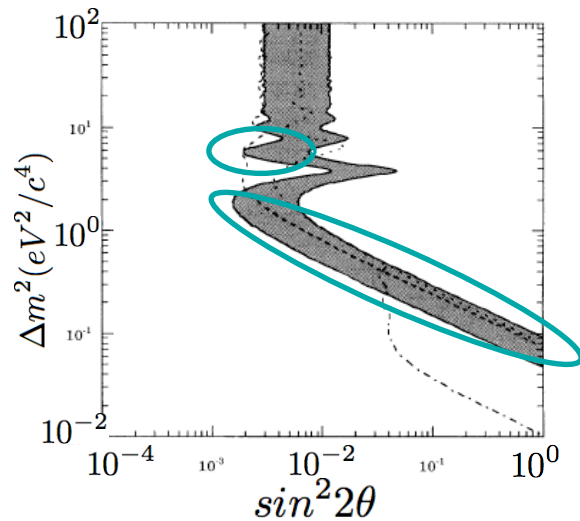


FIG. 9. Regions of various confidence for the combined analysis assuming statistical compatibility of KARMEN 2 and LSND.

概要(3):MiniBoone実験の目的

陰になっている部分が
生き残っている部分
(Limit線の左下が生き残る)

これをMiniBooNEが確認する。
(線はイベントが観測されなかった場合
ここまでexcludeできるという予想)

the results described here. Figure 10 shows the intended sensitivity of a new experiment, MiniBooNE at Fermilab [29], which is under construction and will independently cross-check the LSND evidence.

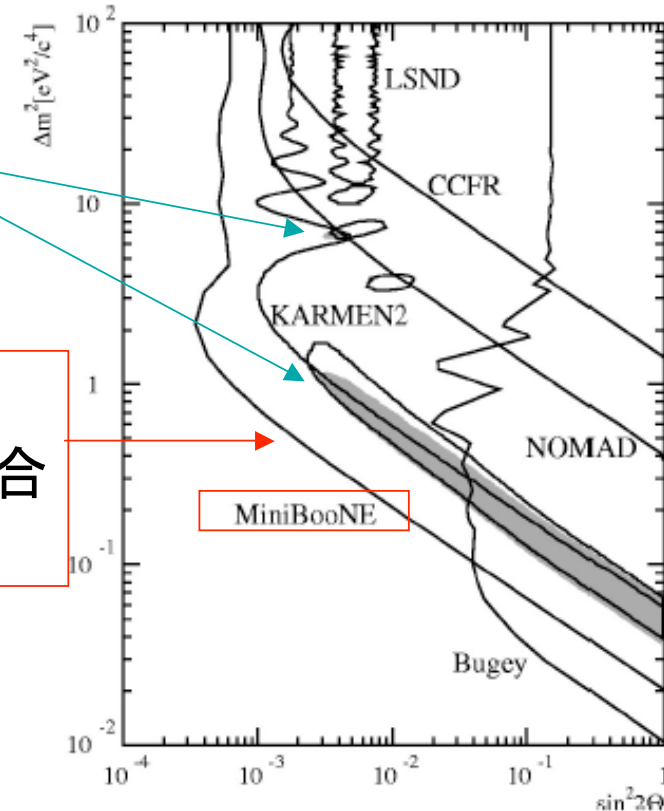


FIG. 10. Parameter regions deduced in this work (gray area) compared with existing limits of experiments (Bugey $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_x$ [26], CCFR $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ [27] and NOMAD $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ [28]) and the envisaged sensitivity of the MiniBooNE experiment (with final single horn design [29]).

概要(4):MiniBoone結果 2009年

シグナルは見られなかった。

200–475 MeV	
Event sample	$\bar{\nu}_e$ analysis (3.39×10^{20} POT)
Data	61
Background	61.5 ± 11.7
Excess	-0.5 ± 11.7 (-0.04σ)
475–1250 MeV	
Data	61
Background	57.8 ± 10.0
Excess	3.2 ± 10.0 (0.3σ)

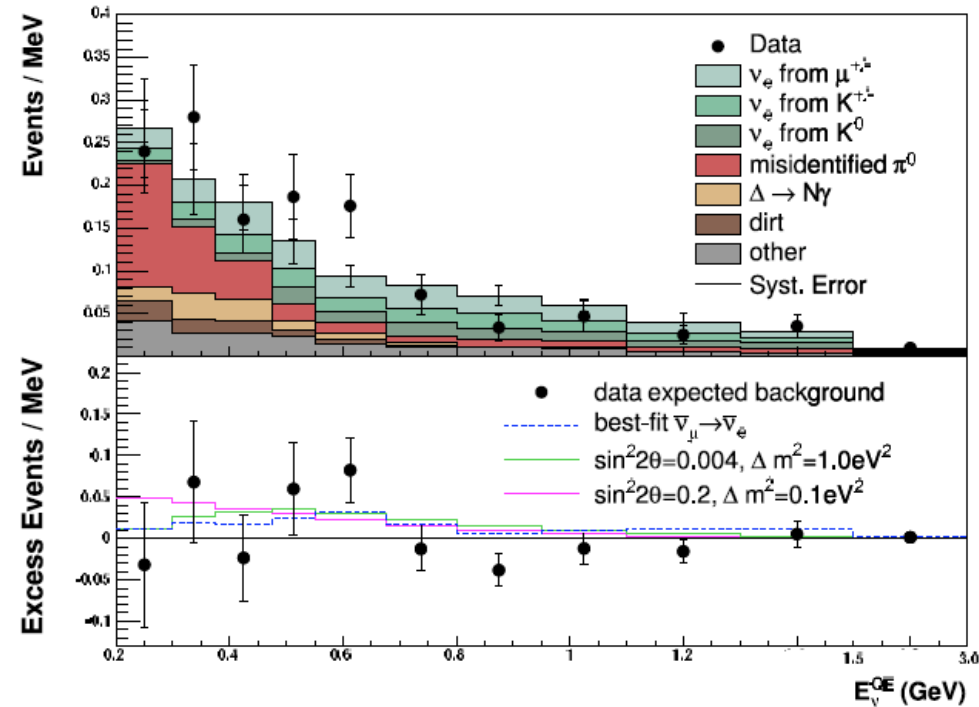
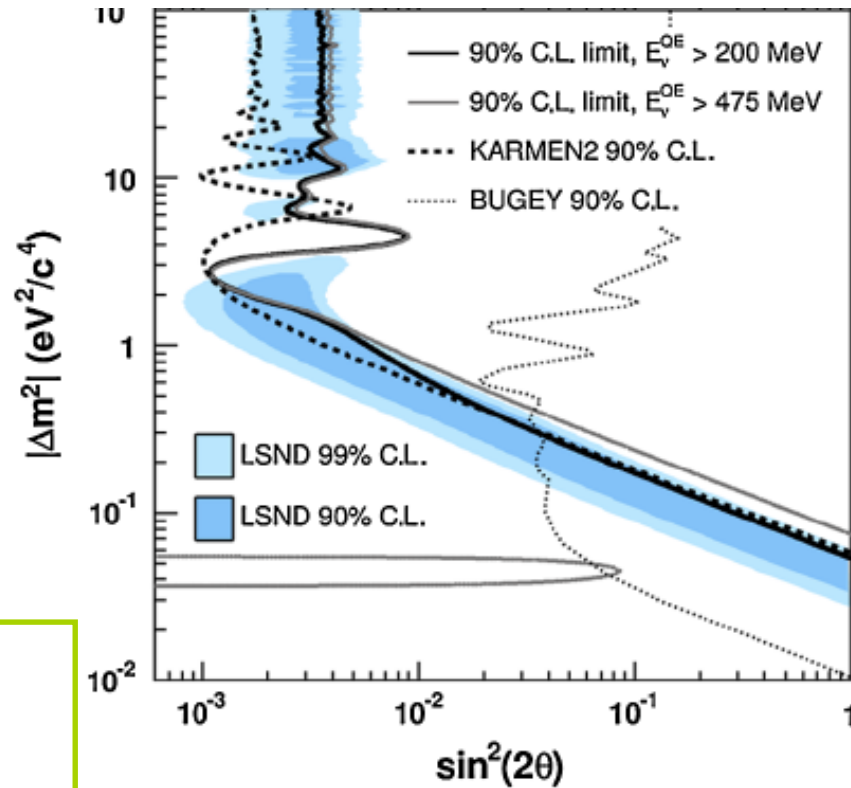


FIG. 1 (color online). Top: The E_{ν}^{QE} distribution for $\bar{\nu}_e$ CCQE data (points with statistical errors) and background (histogram with unconstrained systematic errors). Bottom: The event excess as a function of E_{ν}^{QE} . Also shown are the expectations from the best oscillation fit and from neutrino oscillation parameters in the LSND allowed region. The error bars include both statistical and systematic errors.

概要(5):MiniBoone結果 2009年

実線がMiniBooNEで
excludeした領域。



このままイベントは見つからず
LSNDの領域が全てexclude
されてしまうのか、
それともMiniBooNEでも
イベントが観測されるのか？

2010年の結果へ ↓

概要(6):MiniBoone結果 2010年

再び、
1.7倍の陽子ビームに相当する
データ量で解析した。

シグナルが見られた!

TABLE II: The number of data, fitted background, and excess events in the $\bar{\nu}_e$ analysis for different E_ν^{QE} ranges. The uncertainties include both statistical and constrained systematic errors.

E_ν^{QE} Range	Data	Background	Excess
200 – 475 MeV	119	$100.5 \pm 10.0 \pm 10.2$	18.5 ± 14.3
475 – 675 MeV	64	$38.3 \pm 6.2 \pm 3.7$	25.7 ± 7.2
475 – 1250 MeV	120	$99.1 \pm 10.0 \pm 9.8$	20.9 ± 14.0
475 – 3000 MeV	158	$133.3 \pm 11.5 \pm 13.8$	24.7 ± 18.0
200 – 3000 MeV	277	$233.8 \pm 15.3 \pm 16.5$	43.2 ± 22.5

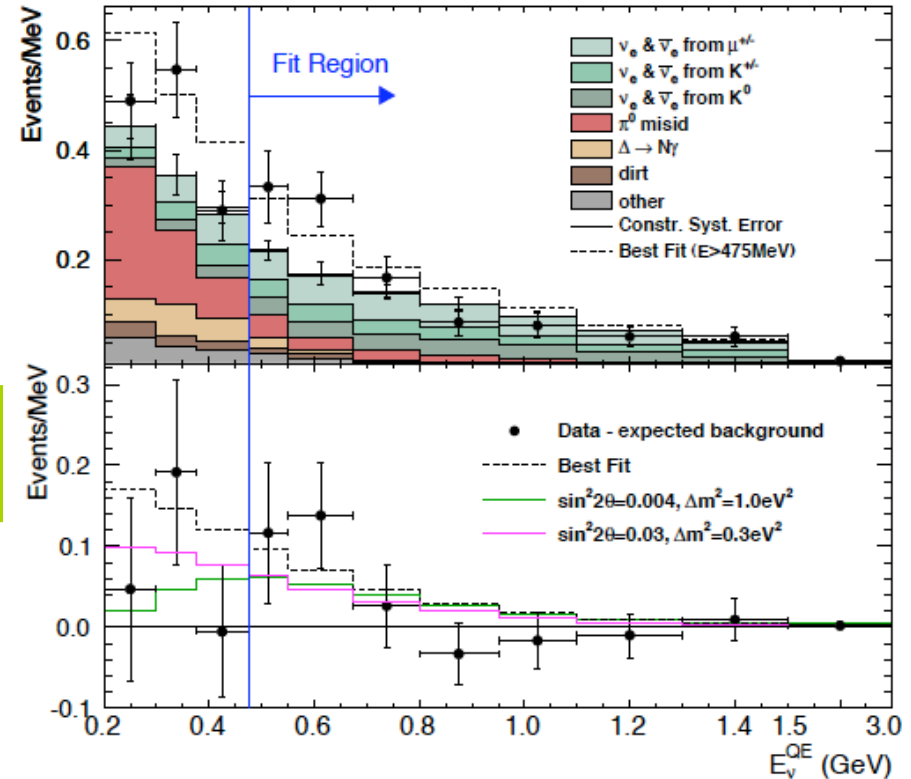
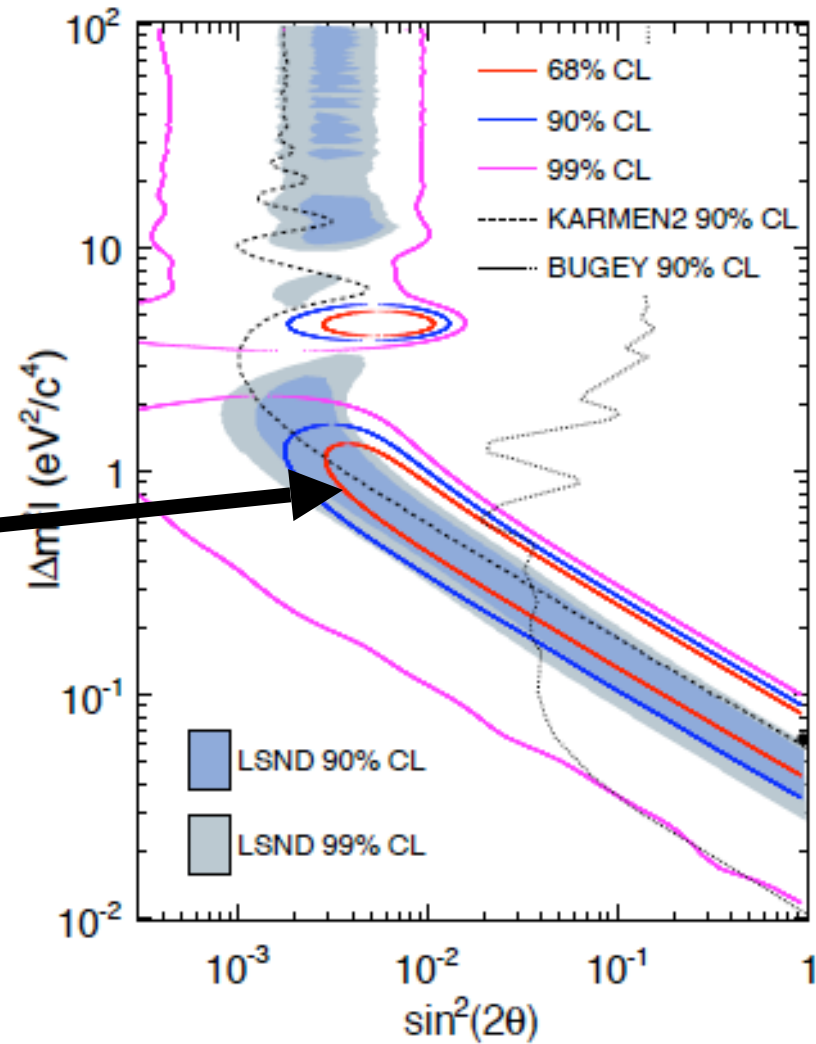


FIG. 1: Top: The E_ν^{QE} distribution for $\bar{\nu}_e$ CCQE data (points with statistical errors) and background (histogram with systematic errors). Bottom: The event excess as a function of E_ν^{QE} . Also shown are the expectations from the best oscillation fit with $E_\nu^{QE} > 475$ MeV, $(\Delta m^2, \sin^2 2\theta) = (0.064 \text{ eV}^2, 0.96)$, where the fit is extrapolated below 475 MeV, and from two other oscillation parameter sets in the allowed region. No correction has been made for the low-energy excess of events seen in neutrino mode below 475 MeV.

概要(7):MiniBoone結果 2010年

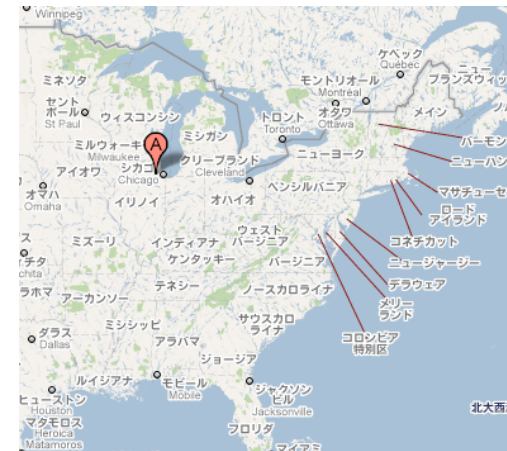
実線が今回のMiniBooNEで決めた領域。

LSNDの結果を
 Δm^2 が1から0.1の範囲で
肯定!



MiniBooNEについて

Fermilabにある、
加速器を用いた、ニュートリノ実験。



調べたい領域は Δm^2 が $1 \sim 0.1$ [eV^2]
の領域。

$$\sin^2(2\Theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{E}\right)$$

より、 L [m] / E [MeV] ~ 1 となるように
 L, E を選択

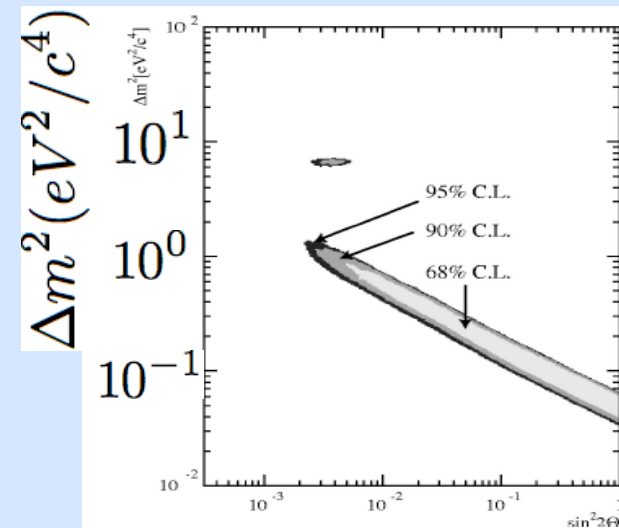
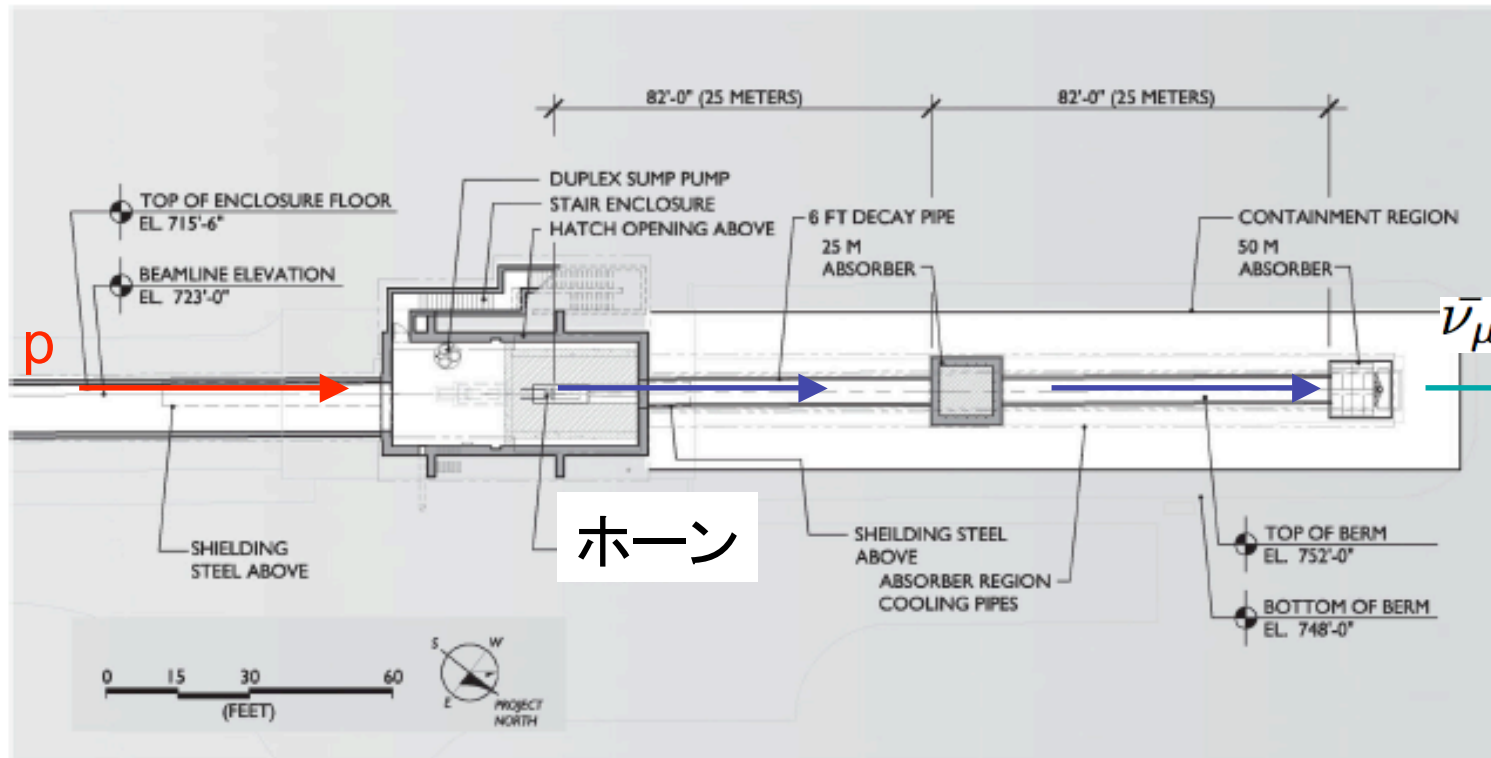


FIG. 9. Regions of various confidence for the combined analysis assuming statistical compatibility of KARMEN 2 and LSND.

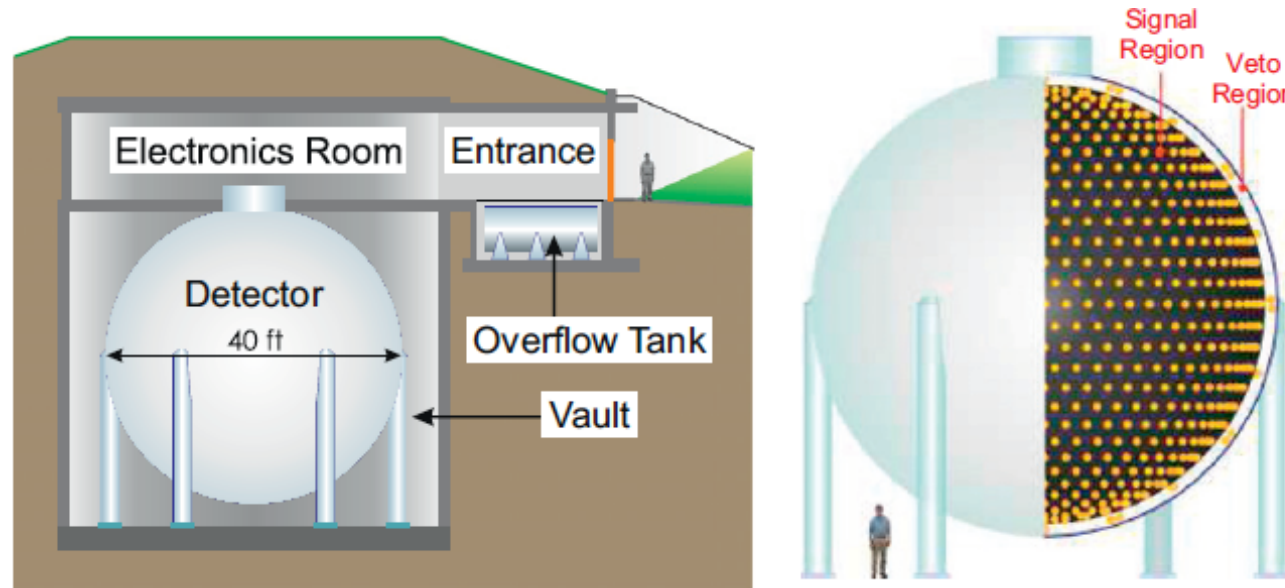
ビームラインについて



運動エネルギー 8GeV の p を Be ターゲットにぶつけ、最終的に $\bar{\nu}_\mu$ を作る。(今回の結果は $5.66E20$ p に相当)

平均エネルギー 600 MeV の $\bar{\nu}_\mu$ を、およそ540m先の検出器に飛ばす

検出器について



半径 6.1m (5m fiducial)

Target から 541m の位置

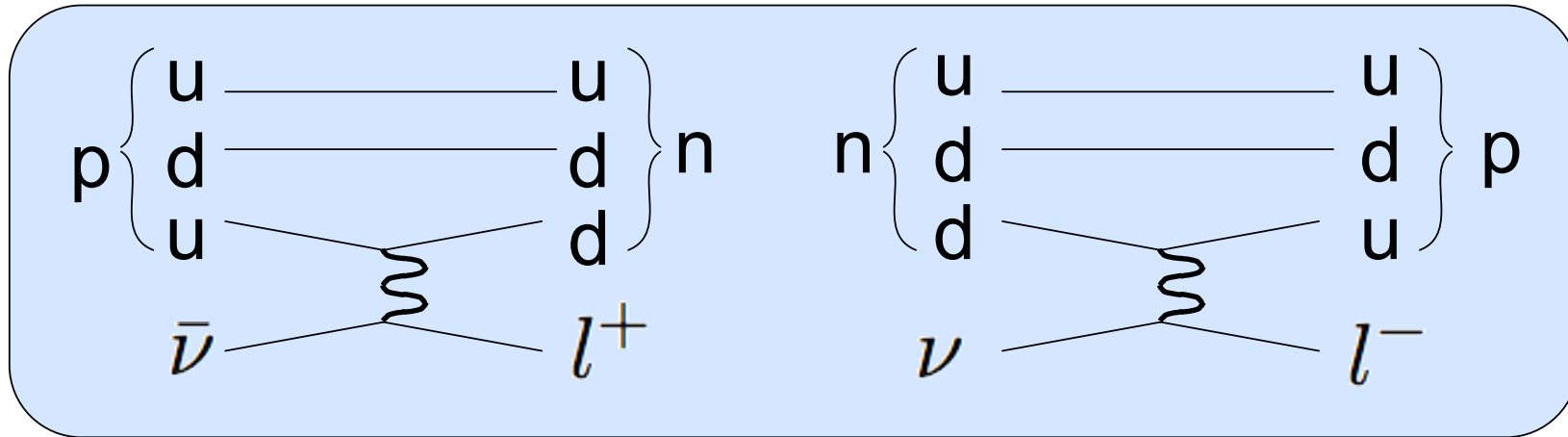
1520個のPMT (LSNDより + 新品 330)

1280 が内向き。 240 が外向き (veto用)

無機油(CH_2) 818ton

検出方法

Charged-current quasi-elastic (CCQE) を用いる



これによって生じたレプトンのチェレンコフ光を見る。

$e^\pm \rightarrow$ ぼやっとした輪っかの形

$\mu^\pm \rightarrow$ きれいな輪っかの形

Q,なぜ違う?

ν_e と $\bar{\nu}_e$ 、 ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ は区別ができない。

Background の見積もり

各エネルギー領域で
BGの量が見積もられた。

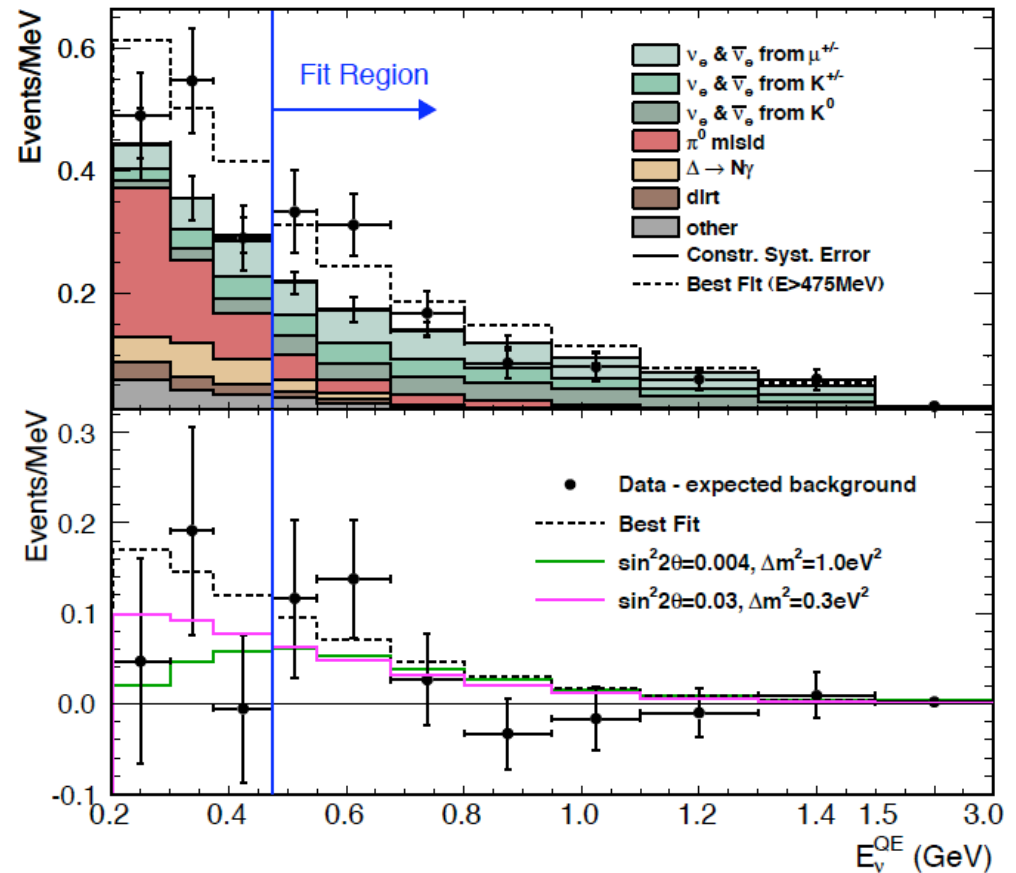
Process	200 – 475 MeV	475 – 1250 MeV
$\bar{\nu}_\mu$ CCQE	4.3	2.0
NC π^0	41.6	12.6
NC $\Delta \rightarrow N\gamma$	12.4	3.4
External Events	6.2	2.6
Other $\bar{\nu}_\mu$	7.1	4.2
$\bar{\nu}_e$ from μ^\pm Decay	13.5	31.4
$\bar{\nu}_e$ from K^\pm Decay	8.2	18.6
$\bar{\nu}_e$ from K_L^0 Decay	5.1	21.2
Other $\bar{\nu}_e$	1.3	2.1
Total Background	99.5	98.1
0.26% $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	9.1	29.1

この値を超えれば、
ニュートリノ振動を
観測したことになる。

データとの比較

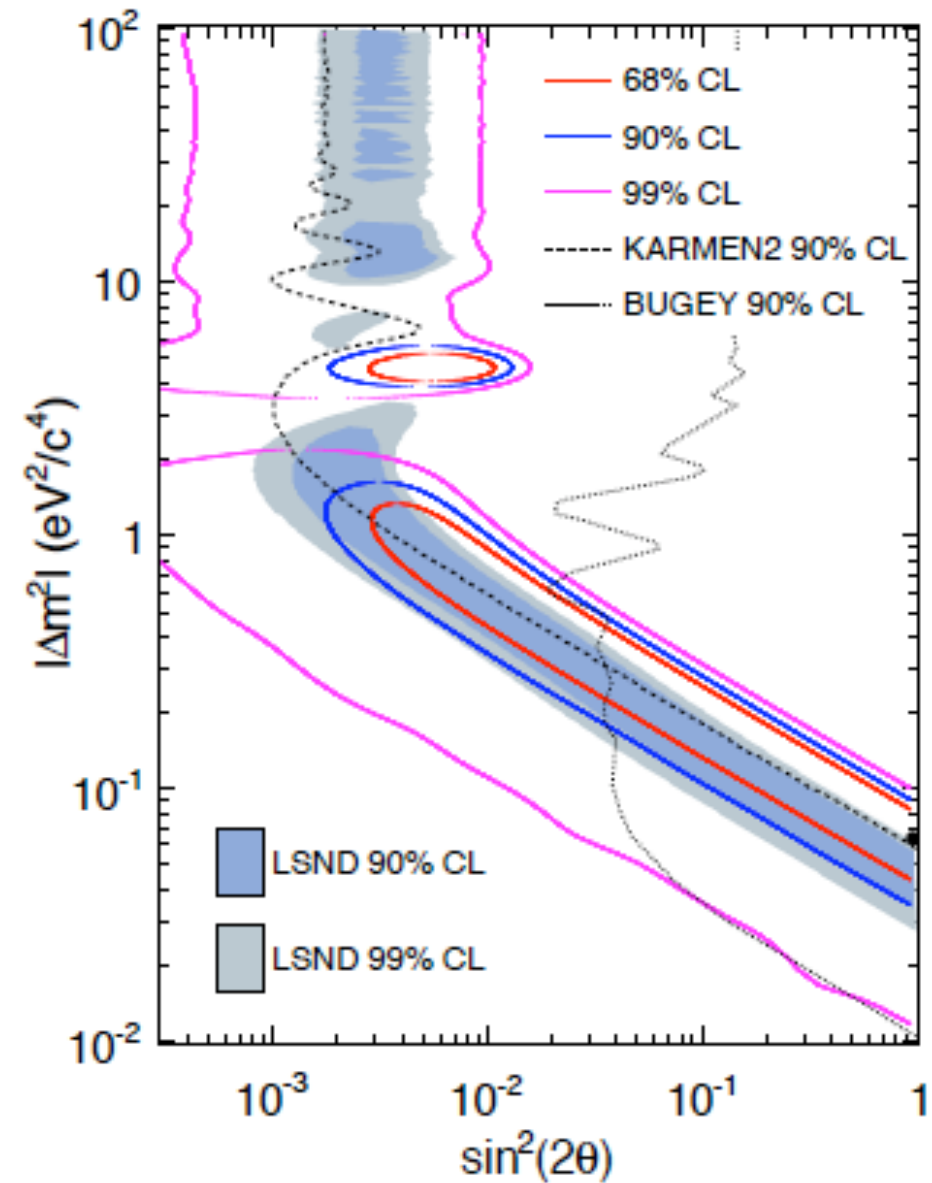
ニュートリノのエネルギーごとのBG数の予想量とデータの値の比較。

低エネルギー領域での多い分に関してはFitに含めていない。
(説明できていない。)



結果

LSNDの結果を
 Δm^2 が1から0.1の範囲で
肯定!



まとめ

KamLAND実験やSNO実験、SK等、多くの実験で $\Delta m^2 \sim 10^{-4}$ [eV²], 大きな混合角の領域が支持されている中、

LSND実験に続き、**MiniBooNE実験**も、5.66E20 POTで、 Δm^2 が 1 から 0.1 [eV²]の領域を支持する事となった。

なぜ、2つの領域？

今回の結果での、低エネルギー領域の余剰分は説明できていない。

どのような理由で？



CP, CPTの破れや
Sterile neutrinoの可能性？ 今後が気になる。

Possible Scenarios

(ニュートリノ振動の枠組みの中では)

- “Sterile” ニュートリノとの振動 + CP-violation

- CPの破れは混合行列の複素位相

- (Effective) CPT-violation

- Δm^2 が ν と anti- ν で違う

ν_μ /anti- ν_μ 消失を測定することによって
 これらのモデルを検証可能

