

OPERA実験による タウニュートリノ出現観測

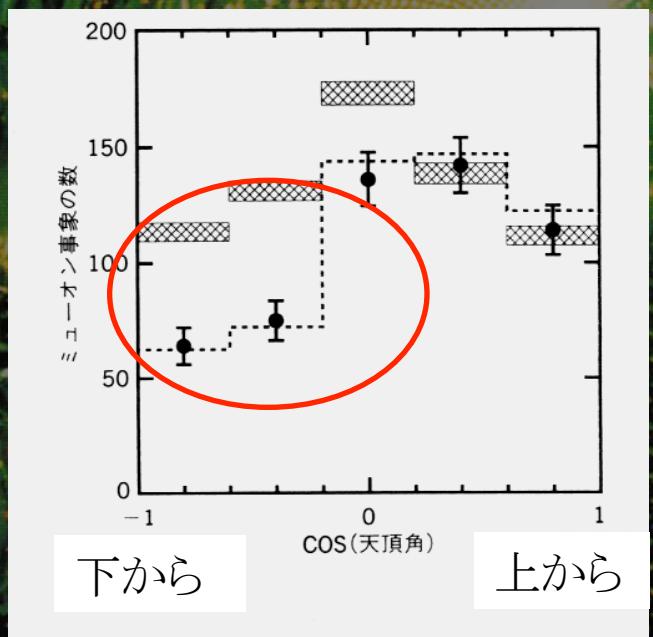
佐藤 修 (名古屋大)

OPERA Collaboration

2016年2月20日
第29回 ニュートリノ研究会

OPERA実験のトリガー

ミュニニュートリノ事象の天頂角分布



下から

上から

v98(高山)で発表された分布

解釈：ミュニニュートリノが
他のニュートリノへ振動して減少した。

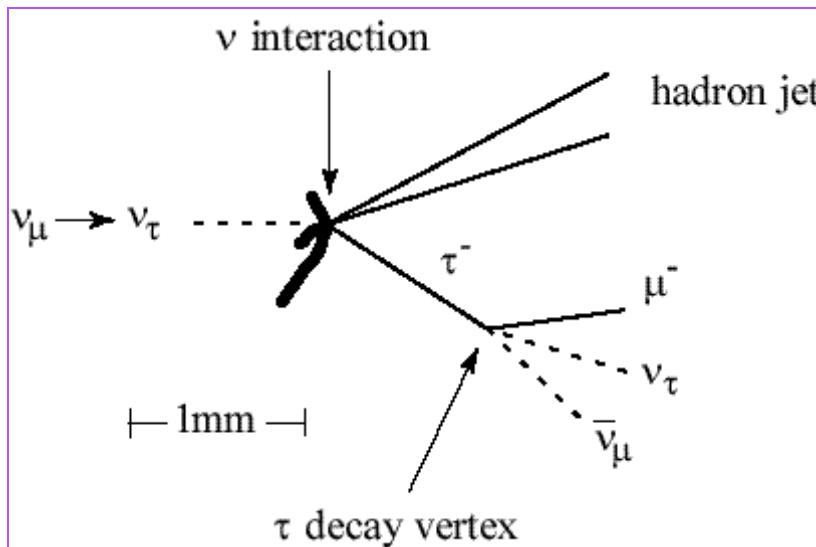
→タウニュートリノが有力な候補
原子核乾板を用いた実験でのみ確認可能



CHORUS search for ν_τ appearance

ニュートリノが暗黒物質の正体なら($\Delta m^2 \sim 100\text{eV}^2$)出現する。

Direct observation of τ decay in emulsion



τ signature = kink

負電荷

τ decay mode BR

$\tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu$ 18%

$\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau n(\pi^0)$ 50%

$\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e$ 18%

need very high spatial resolution



tracking by emulsion

CHORUS detector

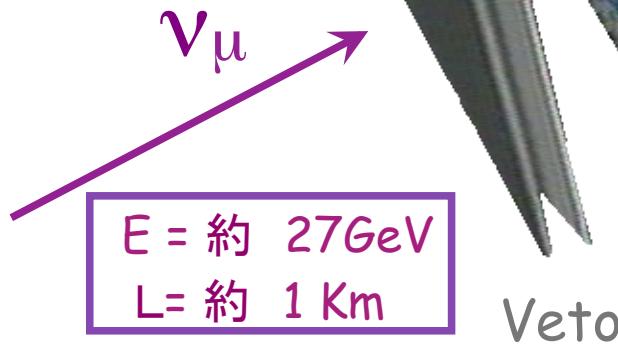
Active target

原子核乾板標的(770kg)

シンチレイションファイバートラッカー

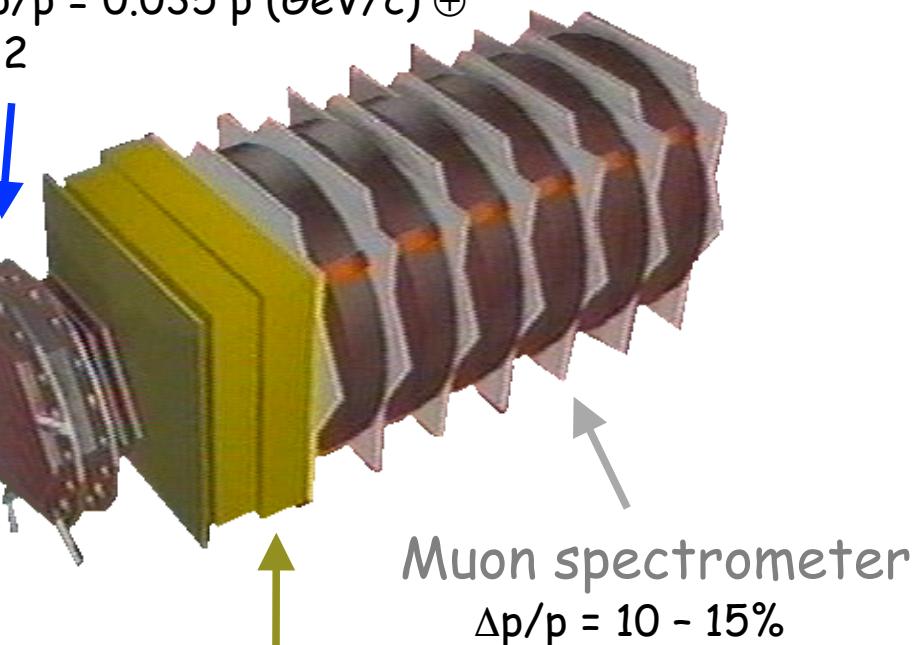
CERN SPS

94年から97年まで
ビーム照射



Air-core magnet

$$\Delta p/p = 0.035 \text{ p (GeV/c)} \oplus 0.22$$



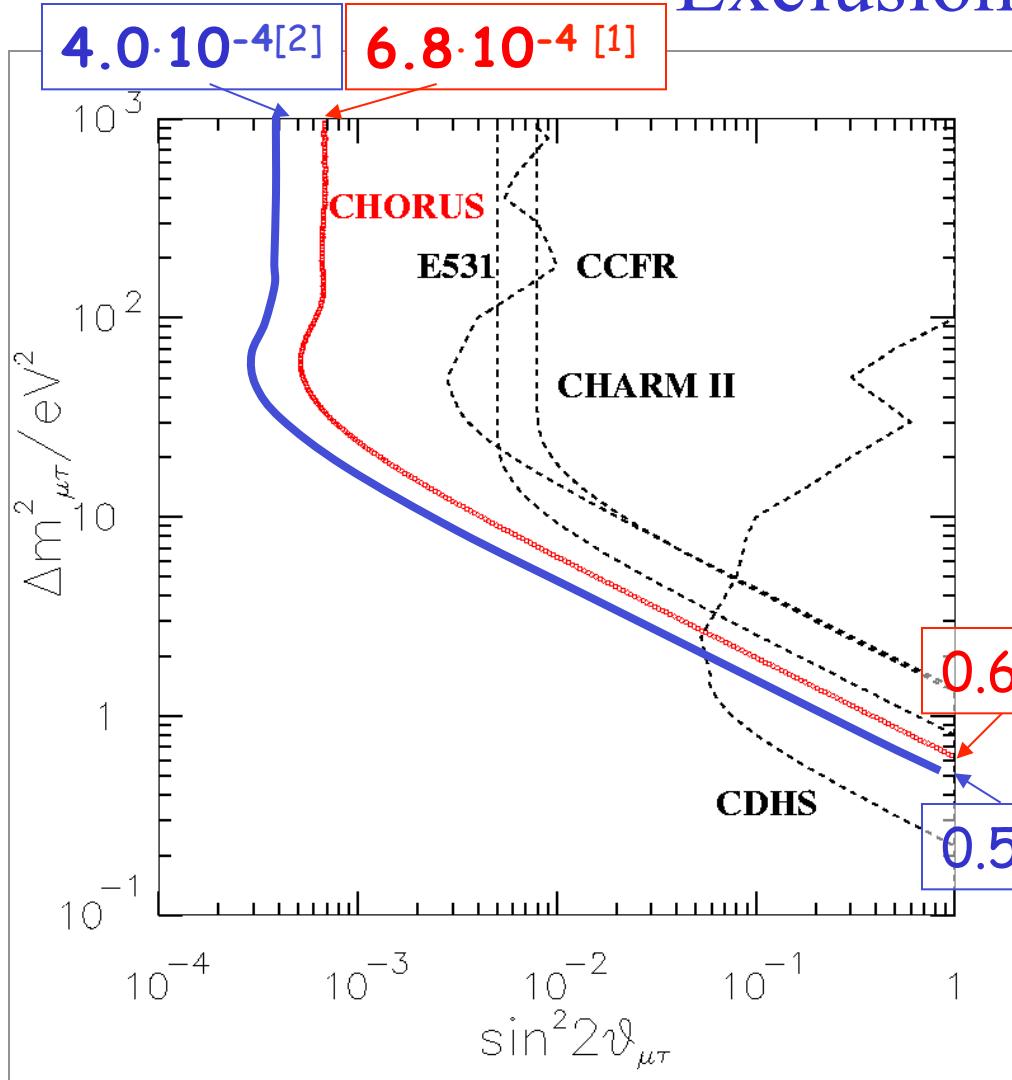
Calorimeter

$$\begin{aligned}\Delta E/E &= 32 \% / \sqrt{E} \text{ (hadrons)} \\ &= 14 \% / \sqrt{E} \text{ (electrons)} \\ \Delta\theta_h &= 60 \text{ mrad @ 10 GeV}\end{aligned}$$



16万反応で検証したが ν_τ 出現なし。

Exclusion Plot



at 90% CL [1]

$P_{\mu\tau} < 3.4 \cdot 10^{-4}$
Or, for large Δm^2

$$\sin^2 2\theta_{\mu\tau} < 6.8 \cdot 10^{-4}$$

at 90% CL [2]

$P_{\mu\tau} = 2.0 \cdot 10^{-4}$
Or, for large Δm^2

$$\sin^2 2\theta_{\mu\tau} < 4.0 \cdot 10^{-4}$$

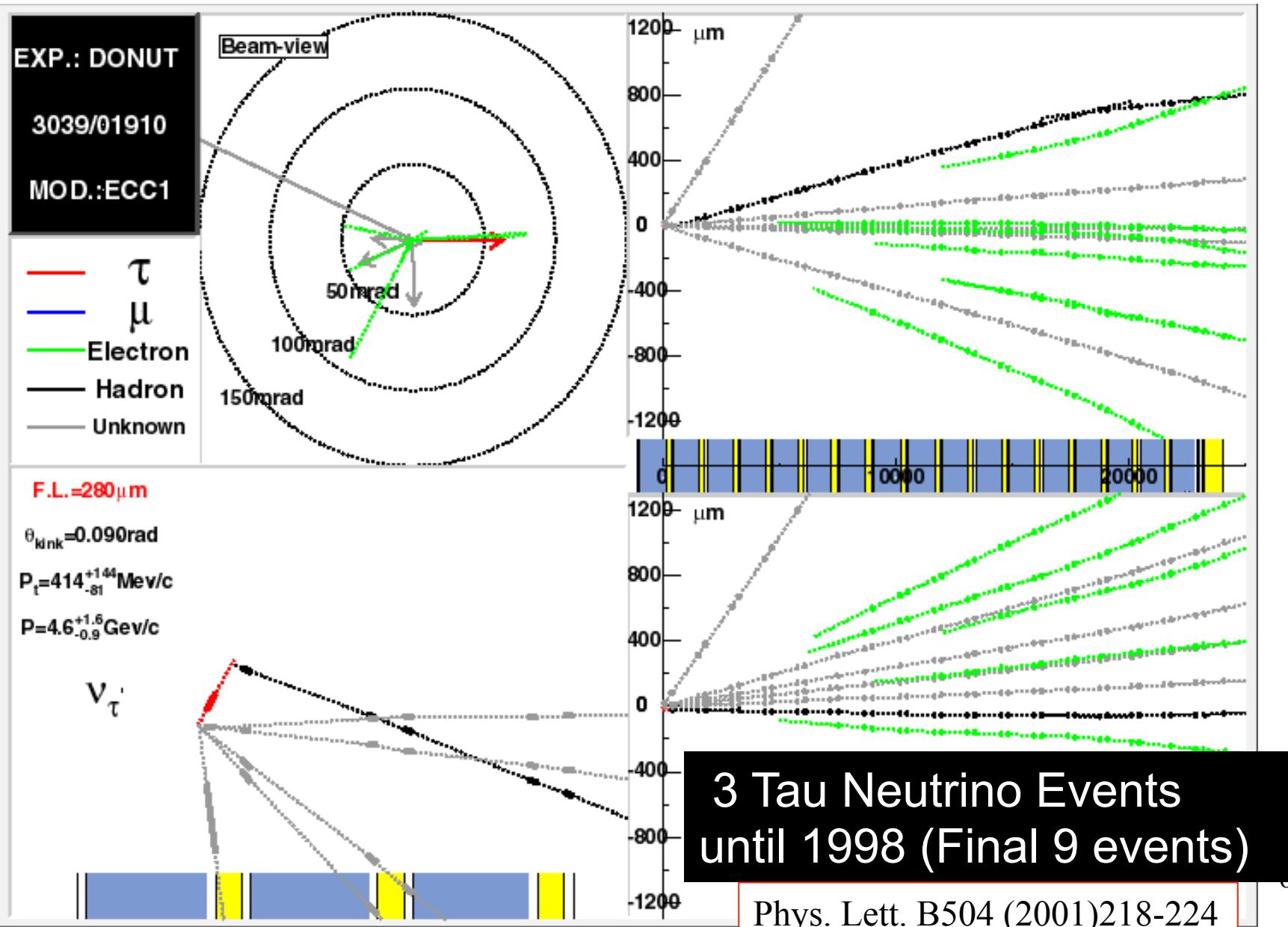
Phys.Lett B497:8–22,2001

Comparable with NOMAD
 $\sin^2 2\theta_{\mu\tau} < 4.0 \cdot 10^{-4}$

[1] T.Junk, NIM A434 (1999) 435

[2] G.J.Feldman and R.D. Cousins, Phys.Rev. D57 (1998) 3873

タウニュートリノの初検出！ @ν98



OPERA

名大F研主導の
原子核乾板実験

タウニュートリノ出現を
つかまえる

日欧共同研究：
研究者：140名，
研究機関 28（11カ国）

名古屋大学（丹羽）発案の実験。

2006年 8月：最初のニュートリノ

2008年照射分より本格稼動



OPERA Collaboration

Belgium
IIHE-ULB Brussels



Croatia
IRB Zagreb



France
LAPP Annecy
IPHC Strasbourg



Germany
Hamburg



Israel
Technion Haifa



Italy
Bari
Bologna
Frascati
L'Aquila,
LNGS
Naples
Padova
Rome
Salerno



Russia
INR RAS Moscow
LPI RAS Moscow
ITEP Moscow
SINP MSU Moscow
JINR Dubna



Japan
Aichi
Toho
Kobe
Nagoya
Nihon
Utsunomiya



Switzerland
Bern



Turkey
METU, Ankara



Korea
Jinju



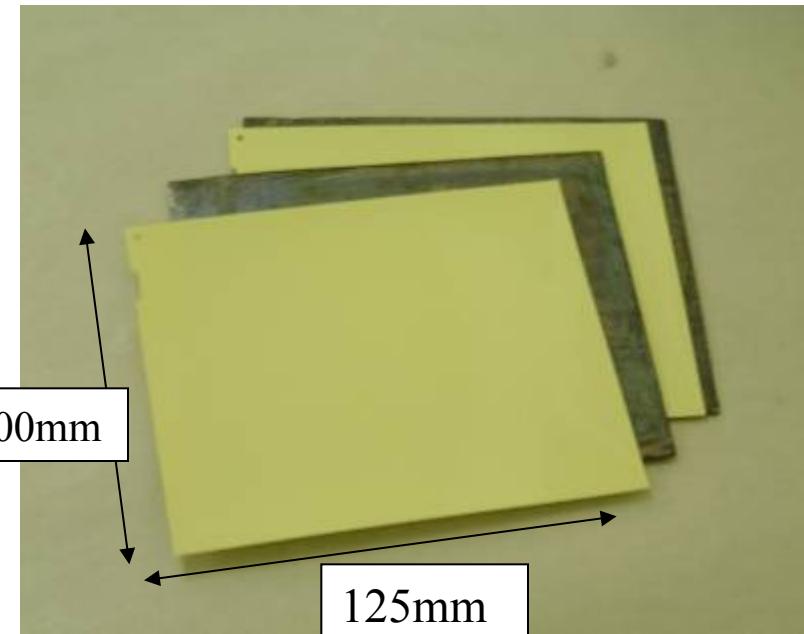
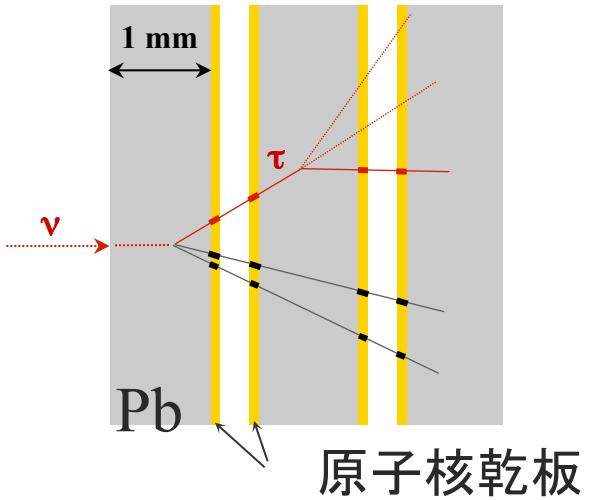
140 physicists,
28 institutions
in 11 countries

タウアピアランス検証実験設計 要求スペック

- ・ タウニュートリノの同定能力。 (DONUTで証明済み)
- ・ 純度の高いミュニュートリノビーム 97%
ニュートリノビーム生成時にタウニュートリノの混入なし
- ・ 高エネルギーのミュニュートリノビーム 平均17GeV
振動後のタウニュートリノが反応しタウを生成に必要 (3.5GeV以上)
- ・ タウニュートリノ候補数10個程度に設計 @大気ニュートリノパラメータ
長距離にすることで振動確率をあげる。 730km (1.7%)
強力なニュートリノビーム
大量のニュートリノ標的。 1000-2000トン級

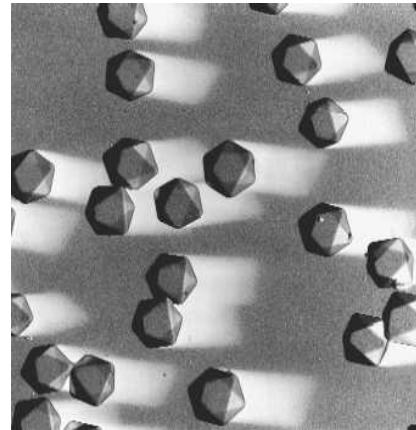
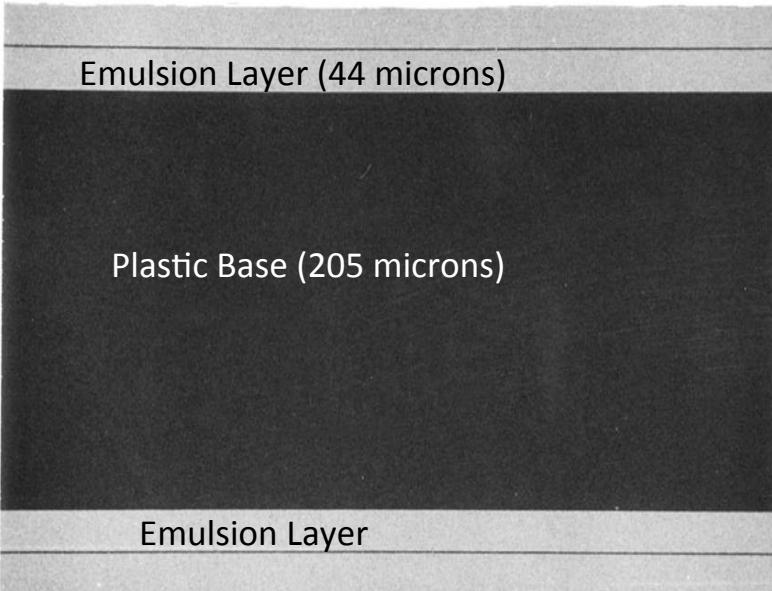
OPERA ECC ニュートリノ反応を写すカメラ

鉛板(1mm) / 原子核乾板 (OPERA film) サンドイッチ

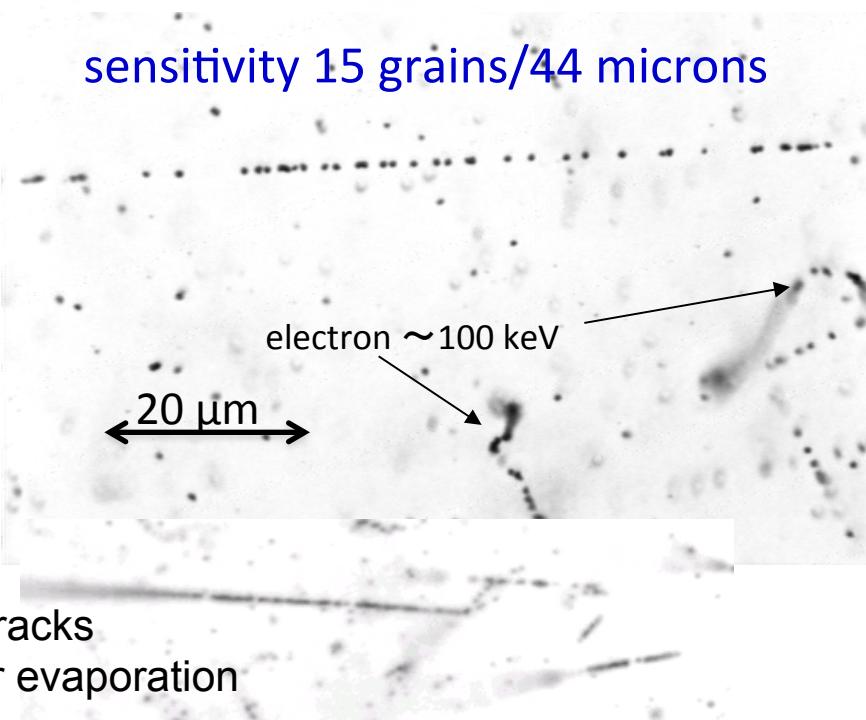


56 鉛板+ 57 フィルム 約8キロ
15万個で約1200トンのターゲット
930万枚のフィルム！

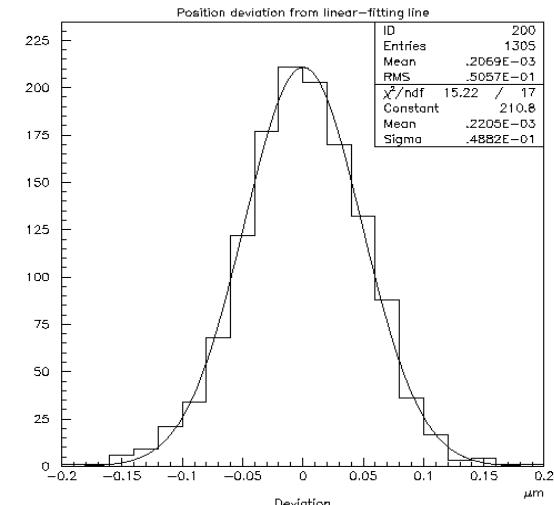
OPERA フィルム FUJI FILM社製



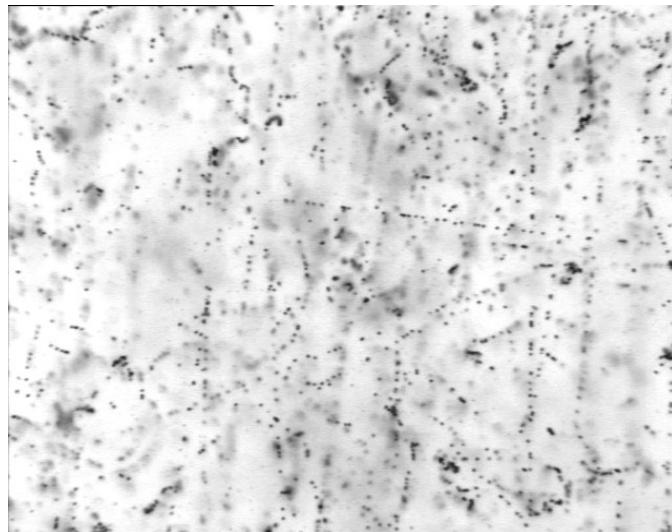
basic detector: AgBr crystal,
size = 0.2 micron
detection eff.= 0.16/crystal
 10^{13} “detectors” per film



intrinsic resolution: 50 nm
deviation from linear-fit line. (2D)

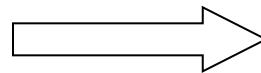


リフレッシュ

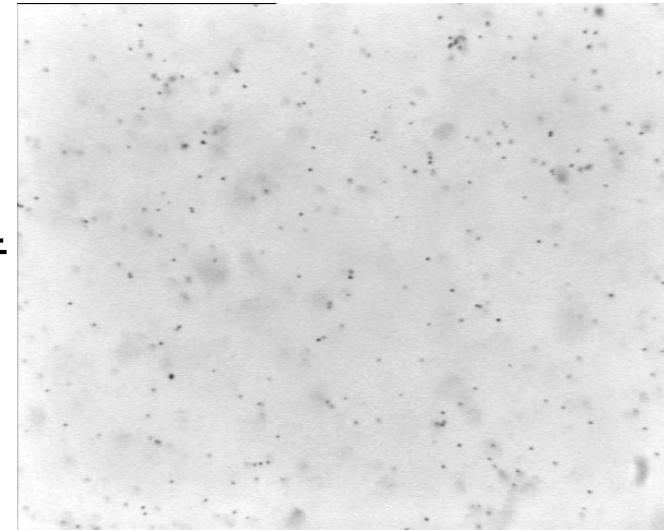


前

B.G. > **30tracks / mm²**



リフレッシュ条件
・T= 30°C
・RH >95%
3 日
名古屋の夏 !



後

B.G. < **1tracks / mm²**

使用前に記録された不要な飛跡を
~98% 消去

東濃鉱山リフレッシュ工場
製作:名大(金工室+大学院生)

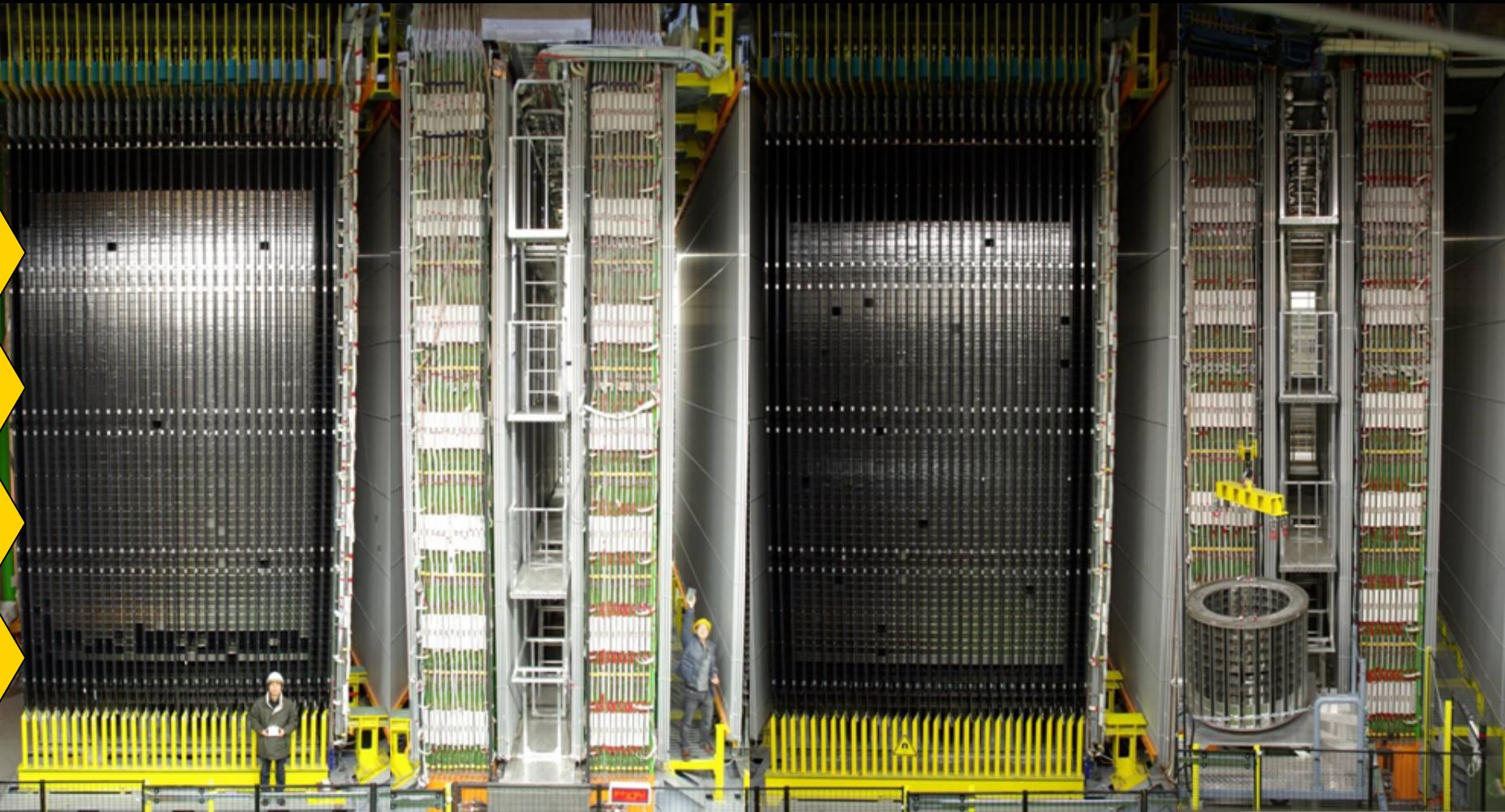
フィルム900万枚 リフレッシュ

Jun 2004年6月 から Apr 2007年4月



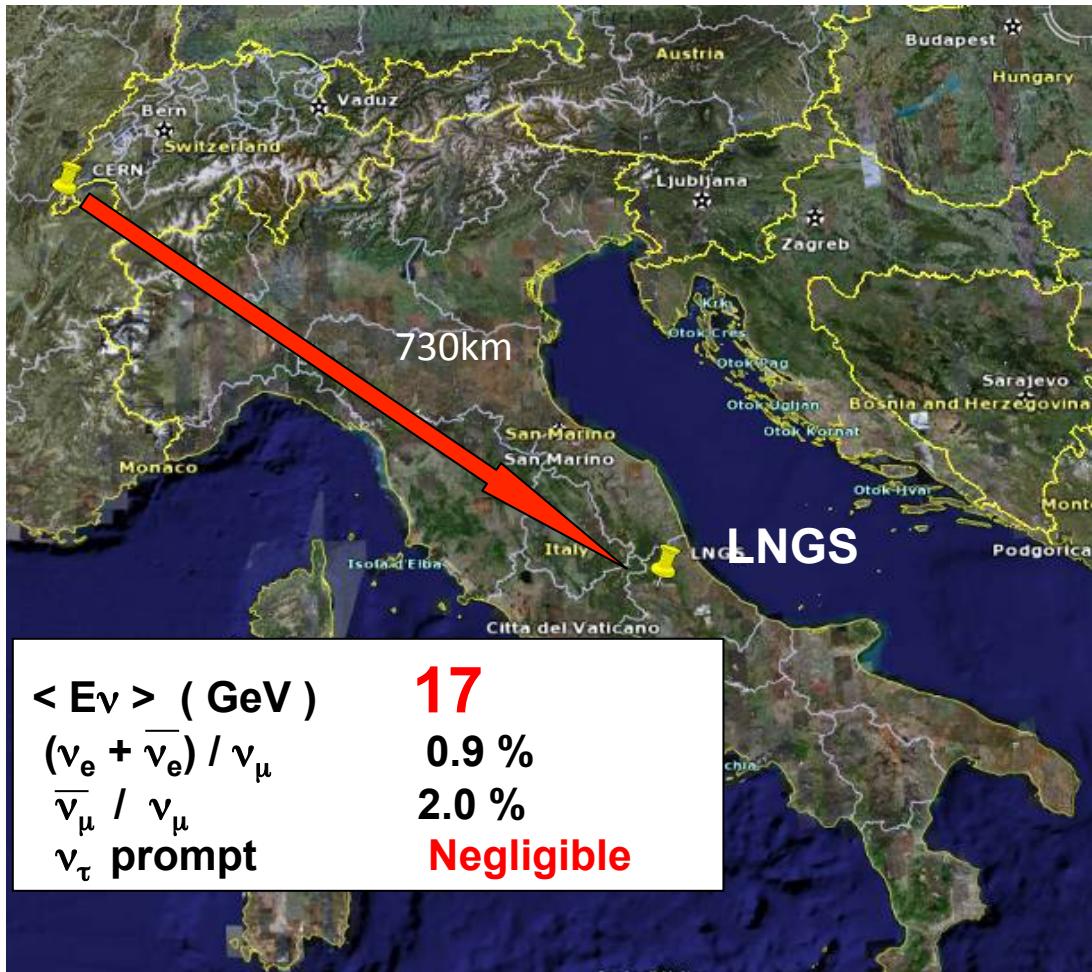
OPERA 検出器 @ イタリア グランサッソ

ν



15万個の ECC: ニュートリノ反応を写すフィルムカメラ

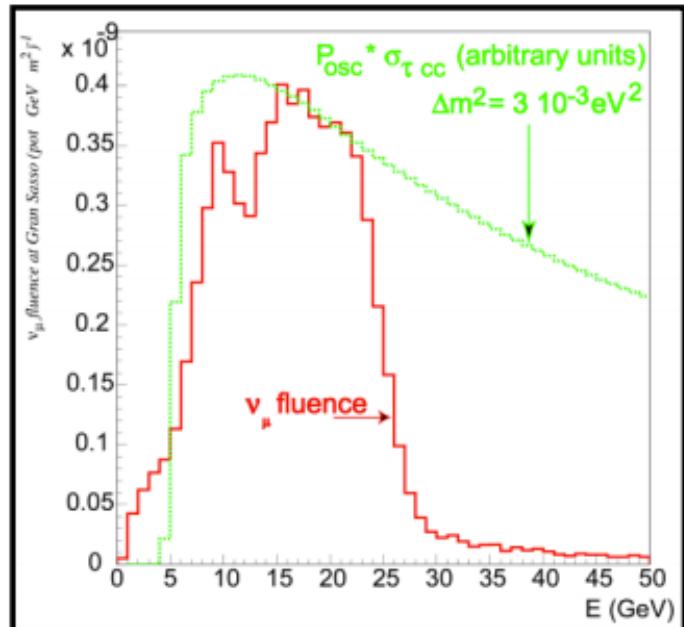
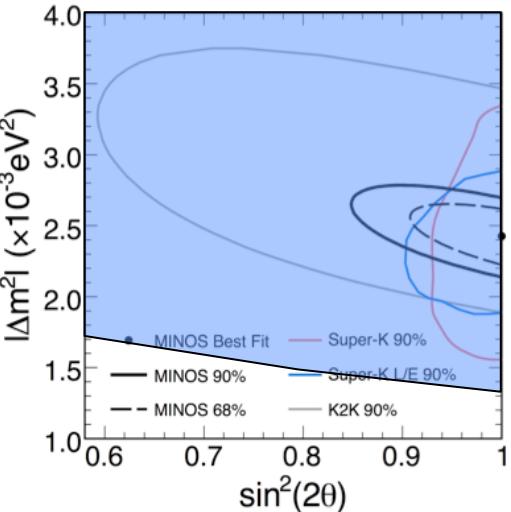
CNGS Beam



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \sim \sin^2(2\theta_{23}) \cdot \sin^2\left(1.27 \cdot \Delta m_{23}^2 \cdot \frac{L}{E}\right) \sim 1.7\%$$

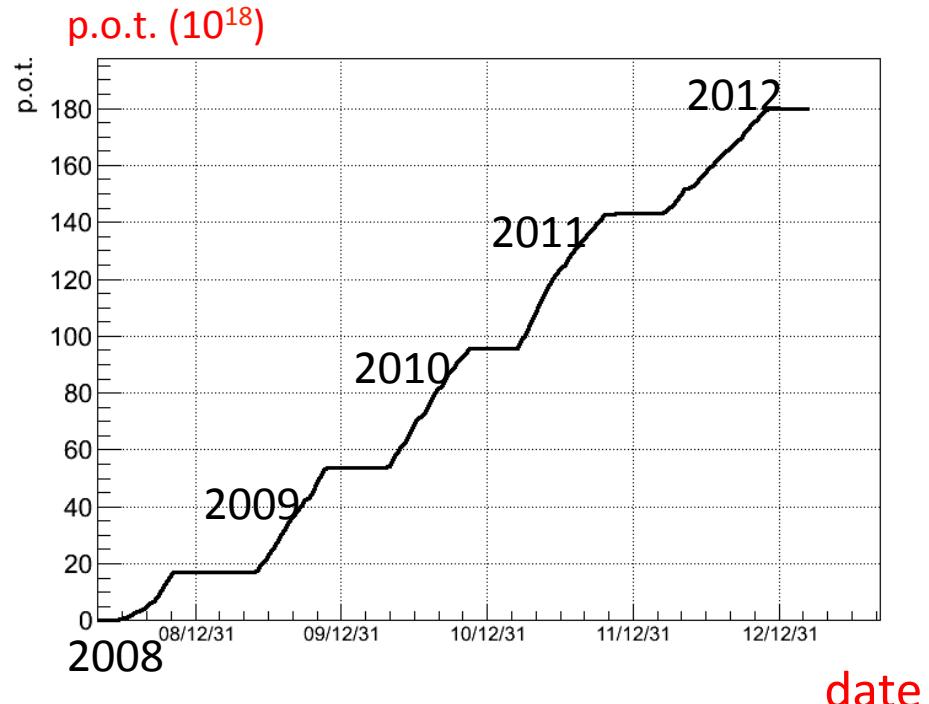
$$\sin^2 2\theta_{23} = 1.0, \quad \Delta m_{23}^2 = (2.43 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Covers the region indicated by Super-K, K2K & MINOS



Final performances of the CNGS beam after five years (2008 ÷ 2012) of data taking

Year	Beam days	P.O.T. (10^{19})
2008	123	1.74
2009	155	3.53
2010	187	4.09
2011	243	4.75
2012	257	3.86
Total	965	17.97



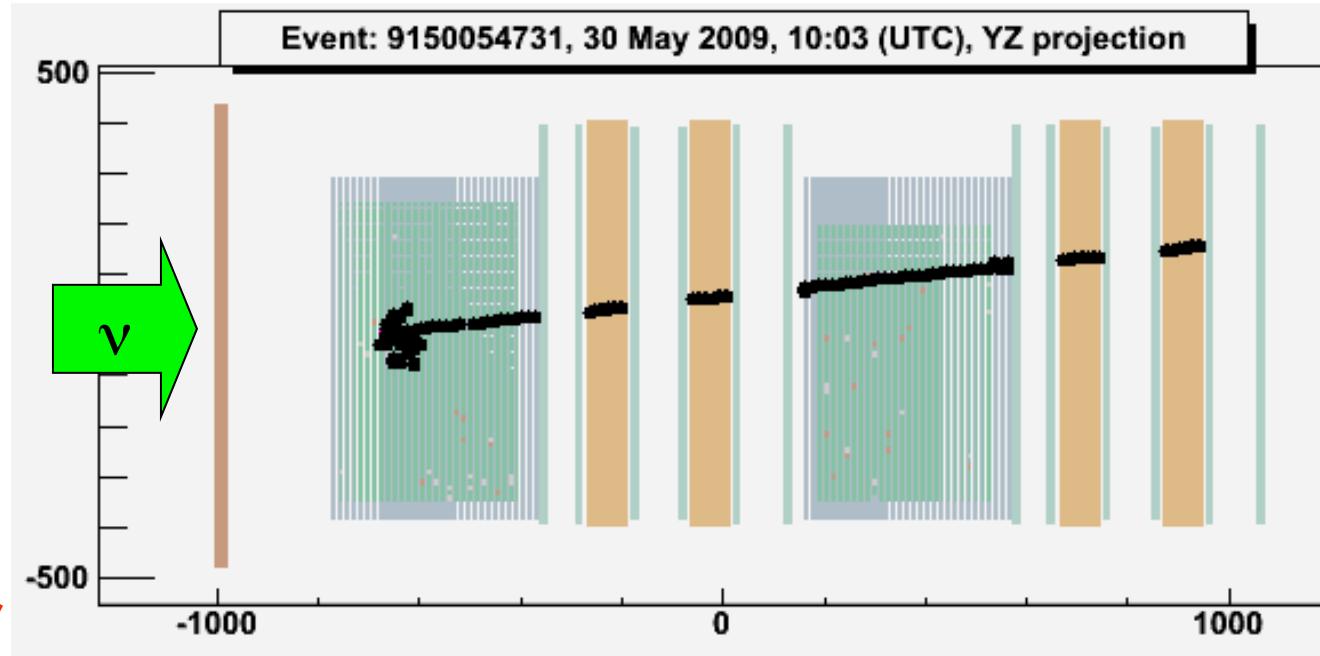
Overall **80%** of the proposal value (22.5)

OPERA-CNGS roadmap

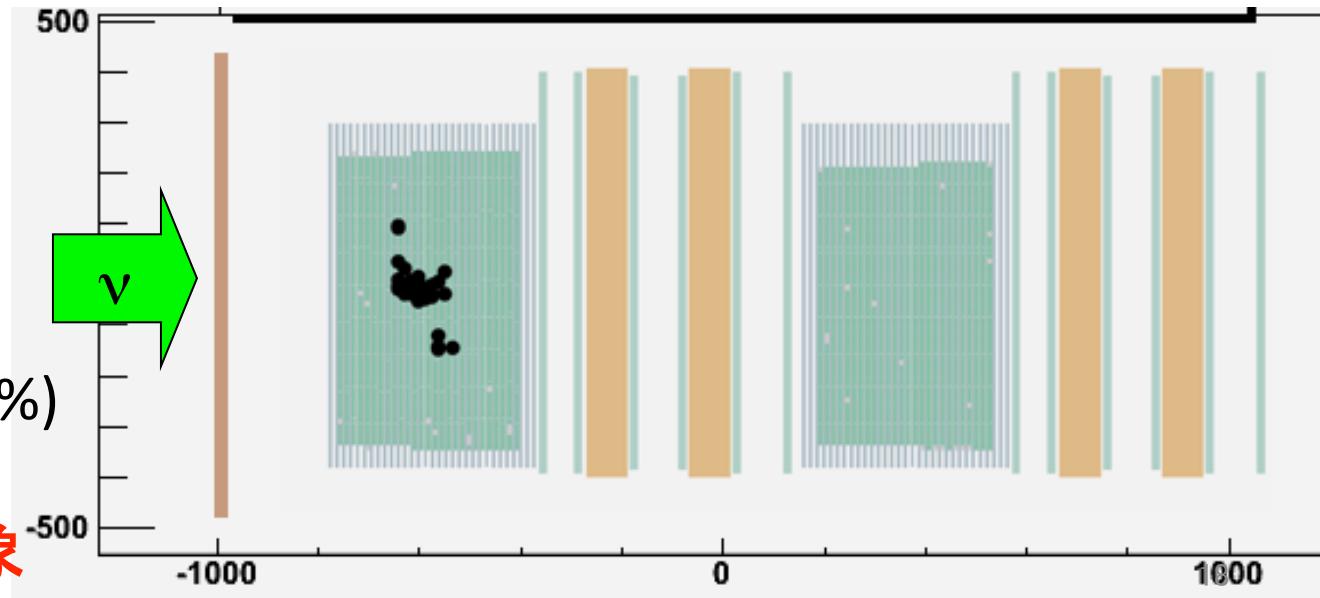


With μ Define: 1 μ event ν_μ CC ν_τ CC, $\tau \rightarrow \mu$ (17.4%)

$P\mu < 15\text{GeV}/c$ が
 $\nu_\mu \diamond \nu_\tau$ 振動解析対象

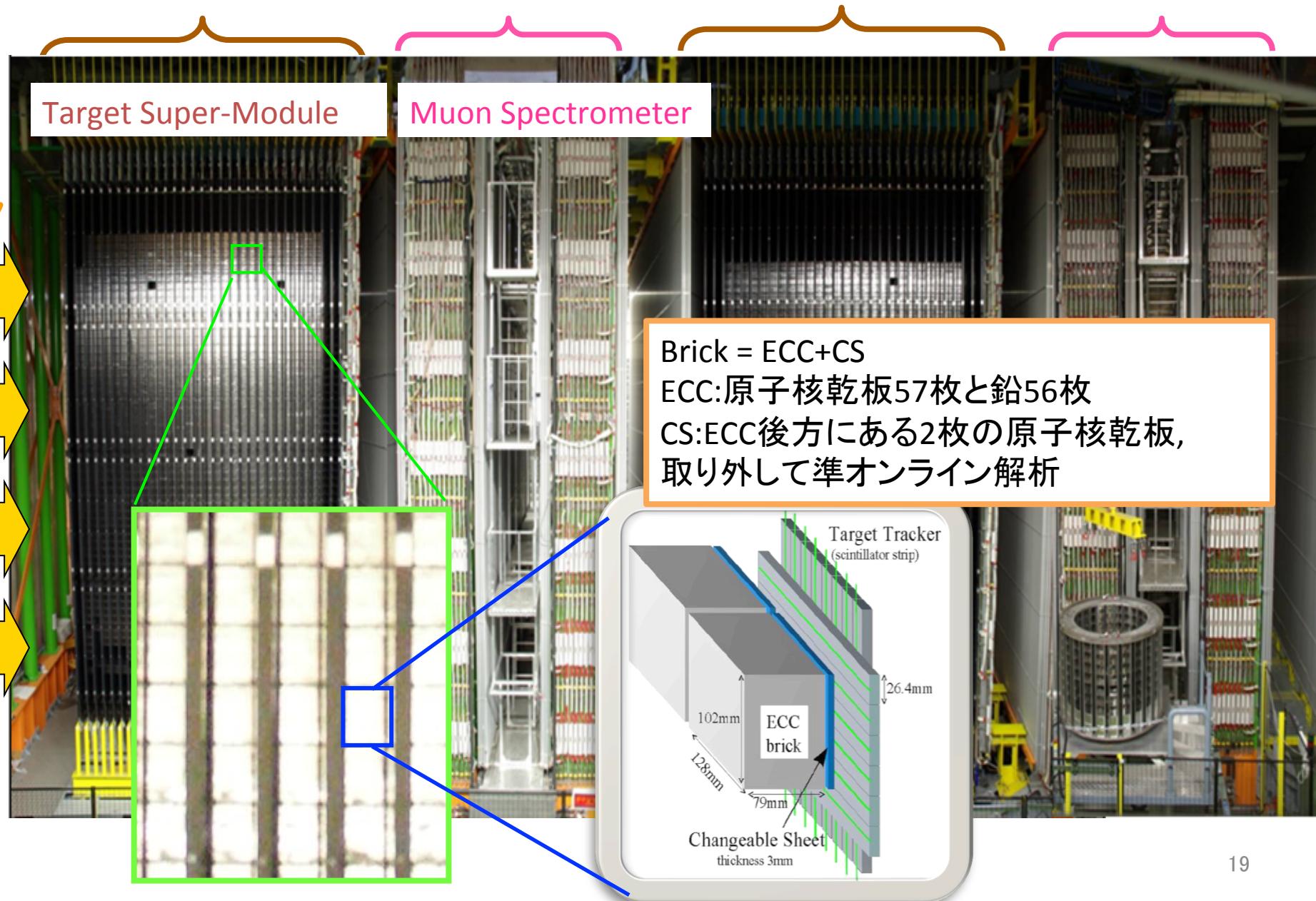
Without μ Define: 0 μ event ν NC ν_τ CC, $\tau \rightarrow e$ (17.4%) ν_τ CC, $\tau \rightarrow h, 3h$ (17.4%) ν_e CC

$\nu_\mu \diamond \nu_\tau$ 振動解析対象

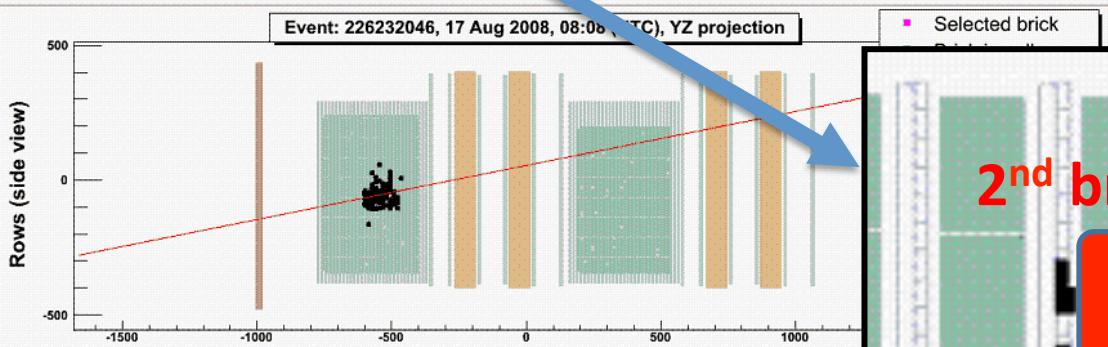
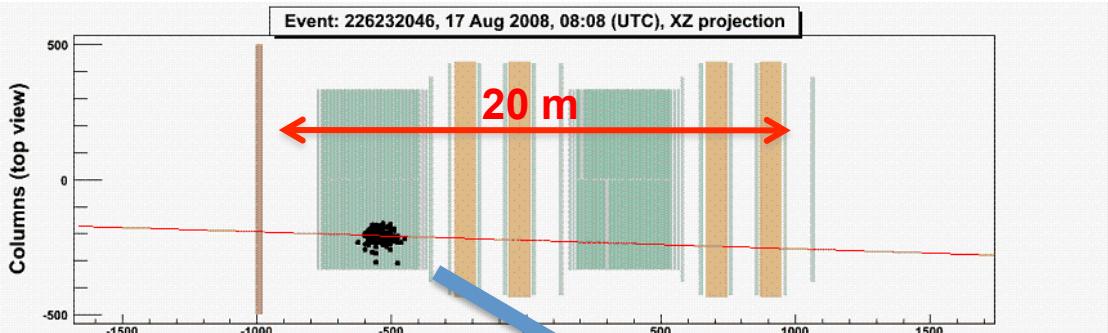


Target Mass ~1.2kton

Underground@GranSasso, ~1400m



解析対象ECC

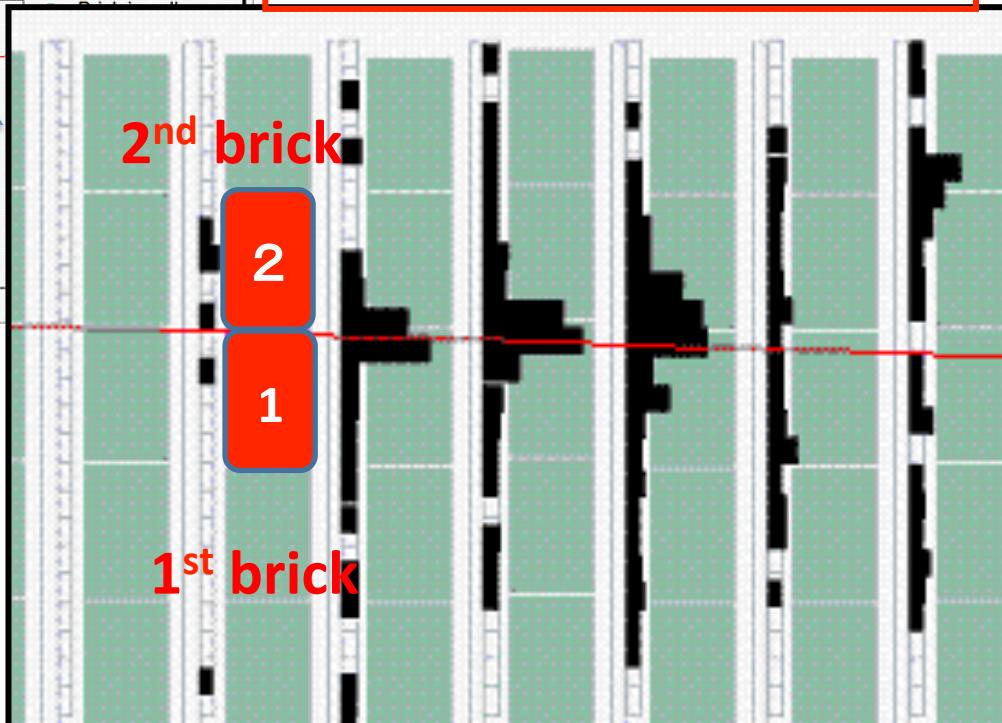


TT hitで予測されるニュートリノ反応点を含む確率の高いECCから順番に1個ずつ取り出す。

まずCSのみを解析しニュートリノ反応からの飛跡が写っていたらECCを現像して解析。

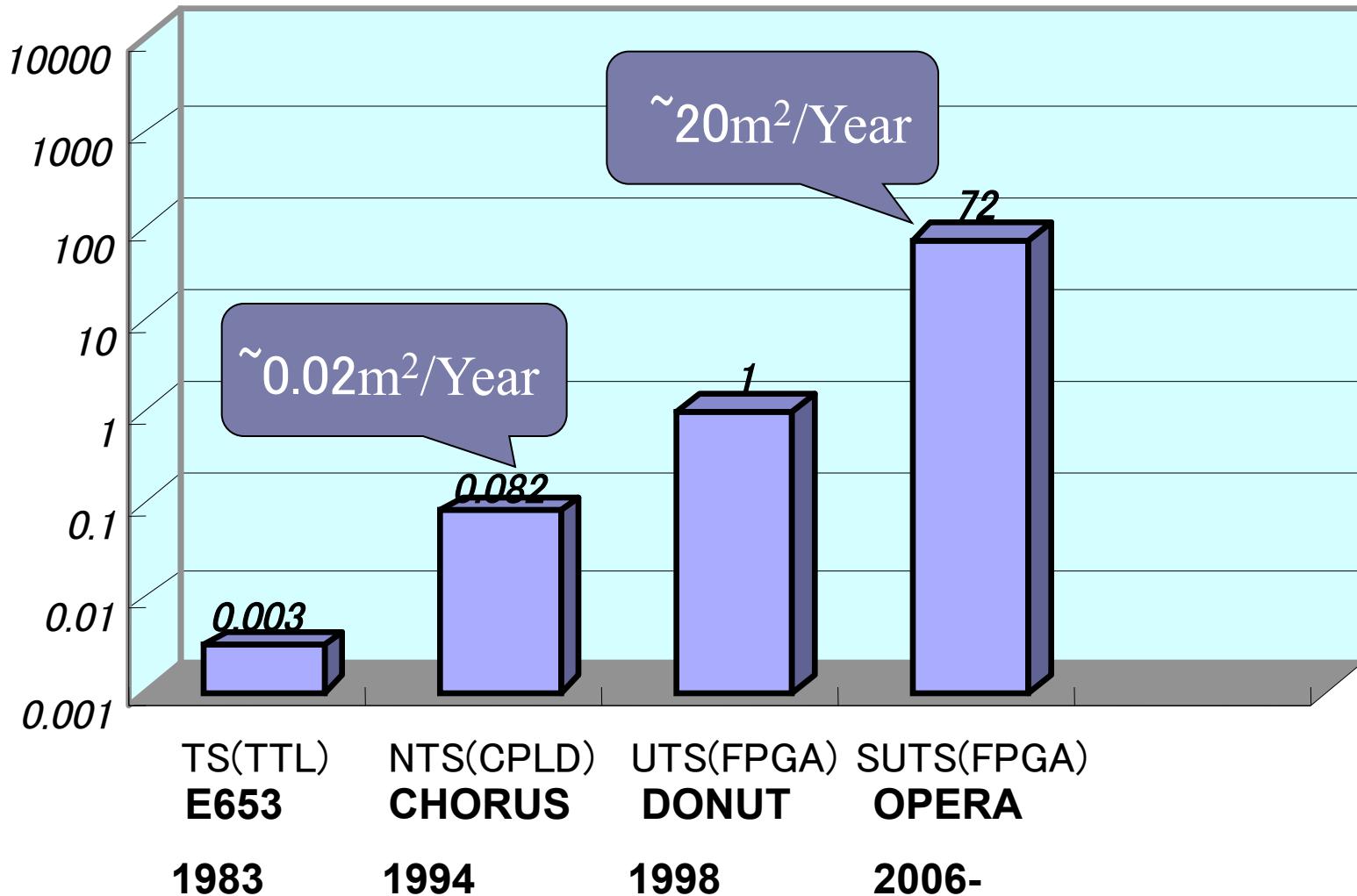
1個目のCSで飛跡がなかったら次のECCを取り出して解析

解析対象: all 1st + 2nd ECCs
総計 5408反応でタウ崩壊探索完了。

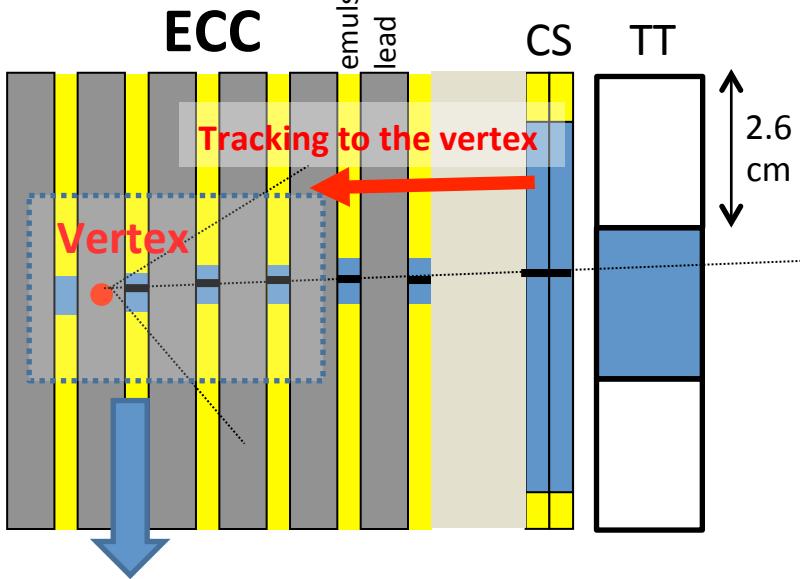


DONUT時の70倍の スキャンシステムを5台配備

Speed in cm²/h



Vertex Location



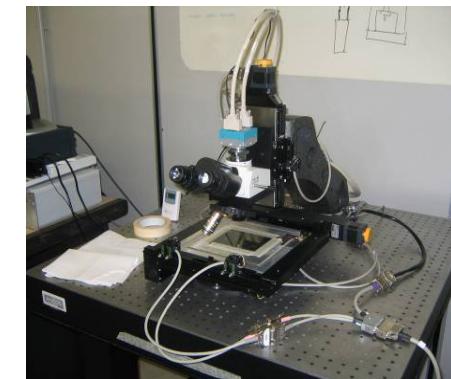
Scanning system

Japan (S-UTS)



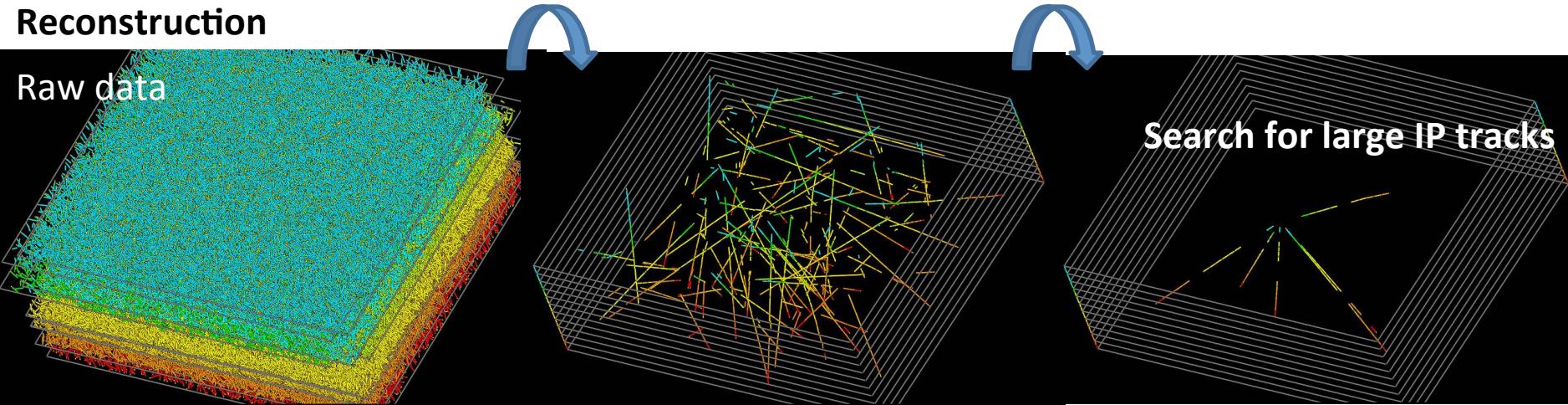
Scanning speed :
75cm²/h x 5 system

Europe (ESS)



20cm²/h x 10 system

Reconstruction



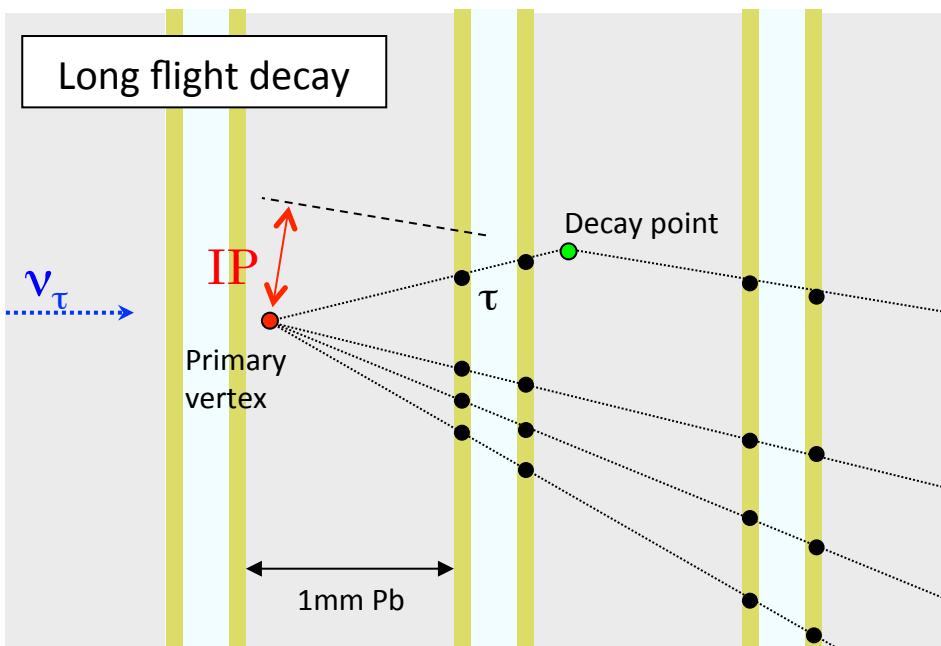
All track candidates
1cm² × 10 plate volume scan

Tracks remaining after taking
4 layers' coincidence

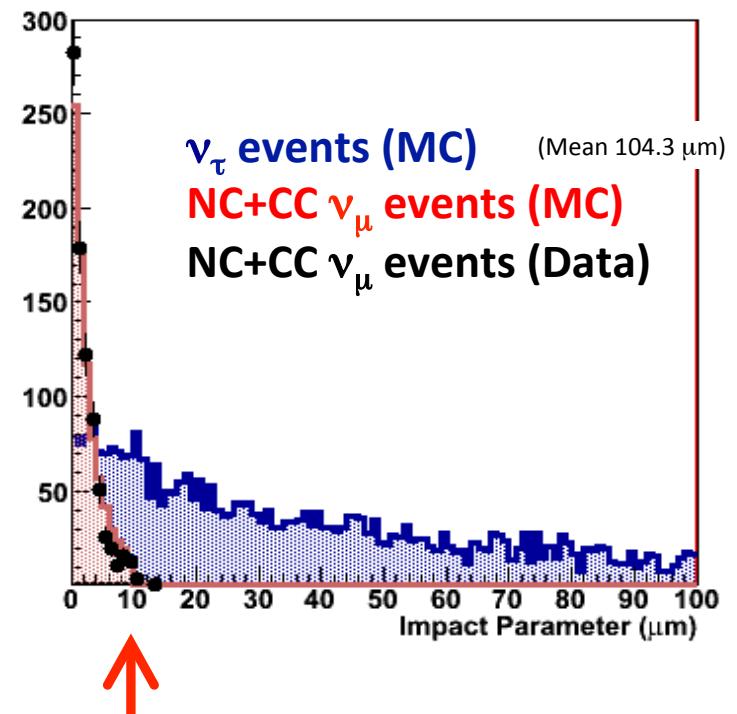
After rejection of tracks
penetrating the volume

τ Decay mode

ν_τ CC Detection

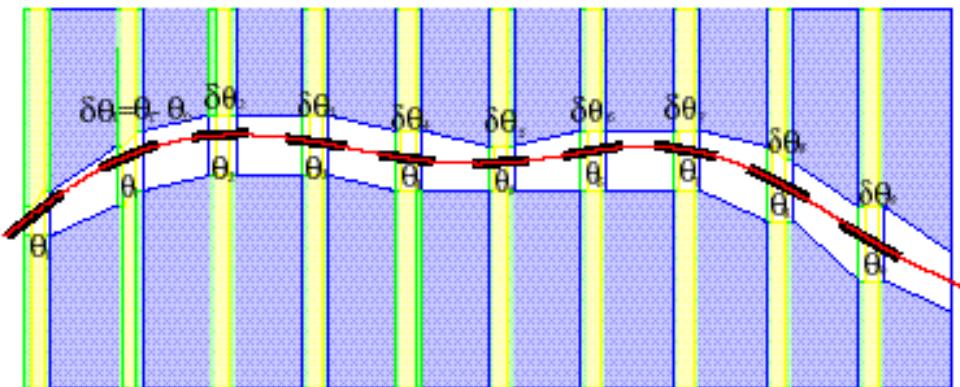


Kink	$\tau^- \rightarrow \mu^-$	17.7 %
	$\tau^- \rightarrow e^-$	17.8 %
	$\tau^- \rightarrow h^-$	49.5 %
Trident	$\tau^- \rightarrow h^- h^- h^+$	15.0 %

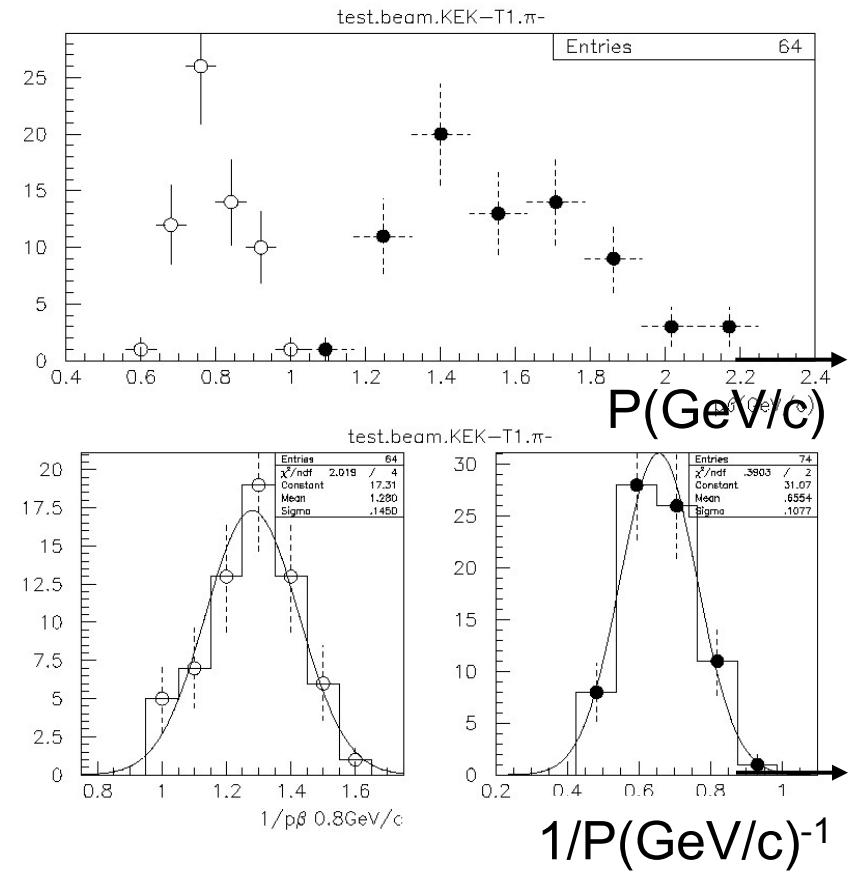


運動量測定 : multiple coulomb scatteringの測定

[Angle Method]



$$P\beta = \frac{13.6 \text{ (MeV/c)}}{\delta\theta} \sqrt{\frac{X}{X_0}}$$



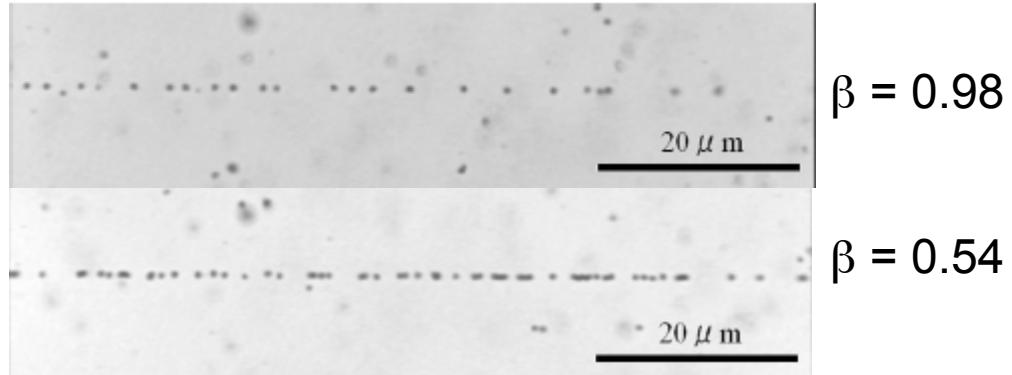
0.8GeV/c pion : $P = 0.79(\text{GeV}/c)$, $dP/P = 11\%$

1.5GeV/c pion : $P = 1.53(\text{GeV}/c)$, $dP/P = 16\%$

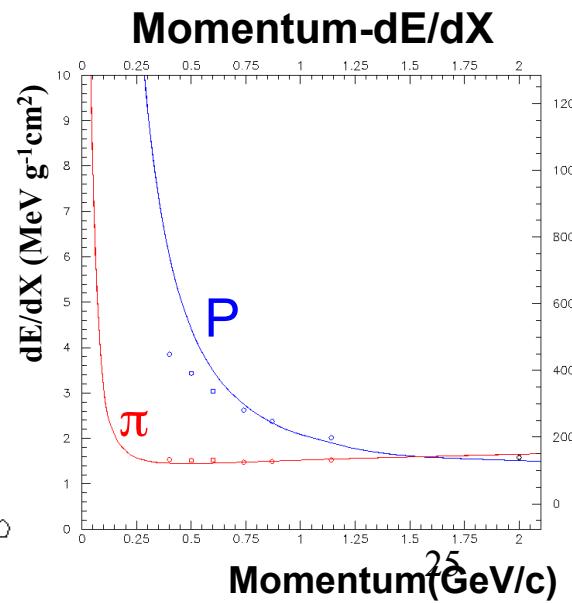
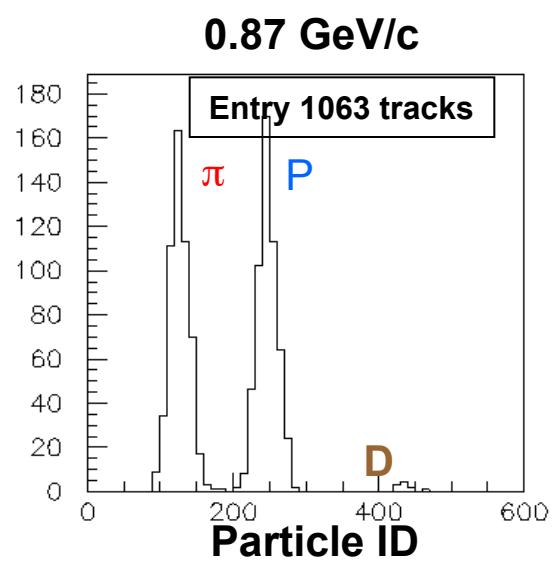
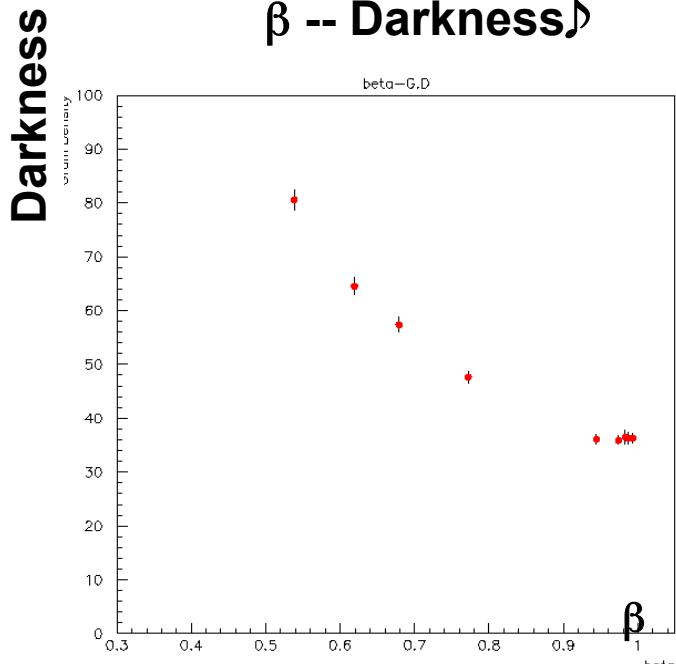
粒子同定

単位長さあたりのエネルギー損失 dE/dX
は飛跡の「濃さ」としてはかれる。
→ β が測れる。

運動量と組み合わせる事で粒子同定可能。

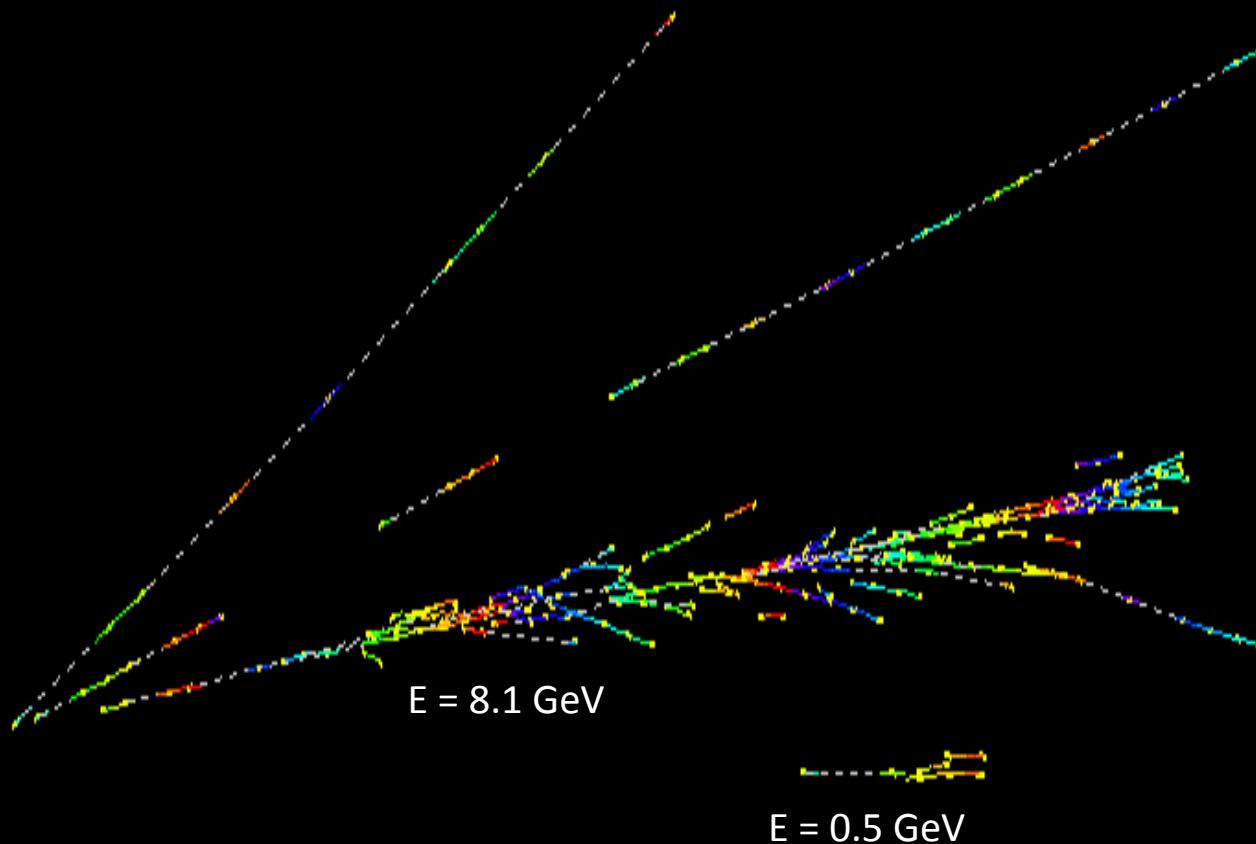


β -- Darkness♪



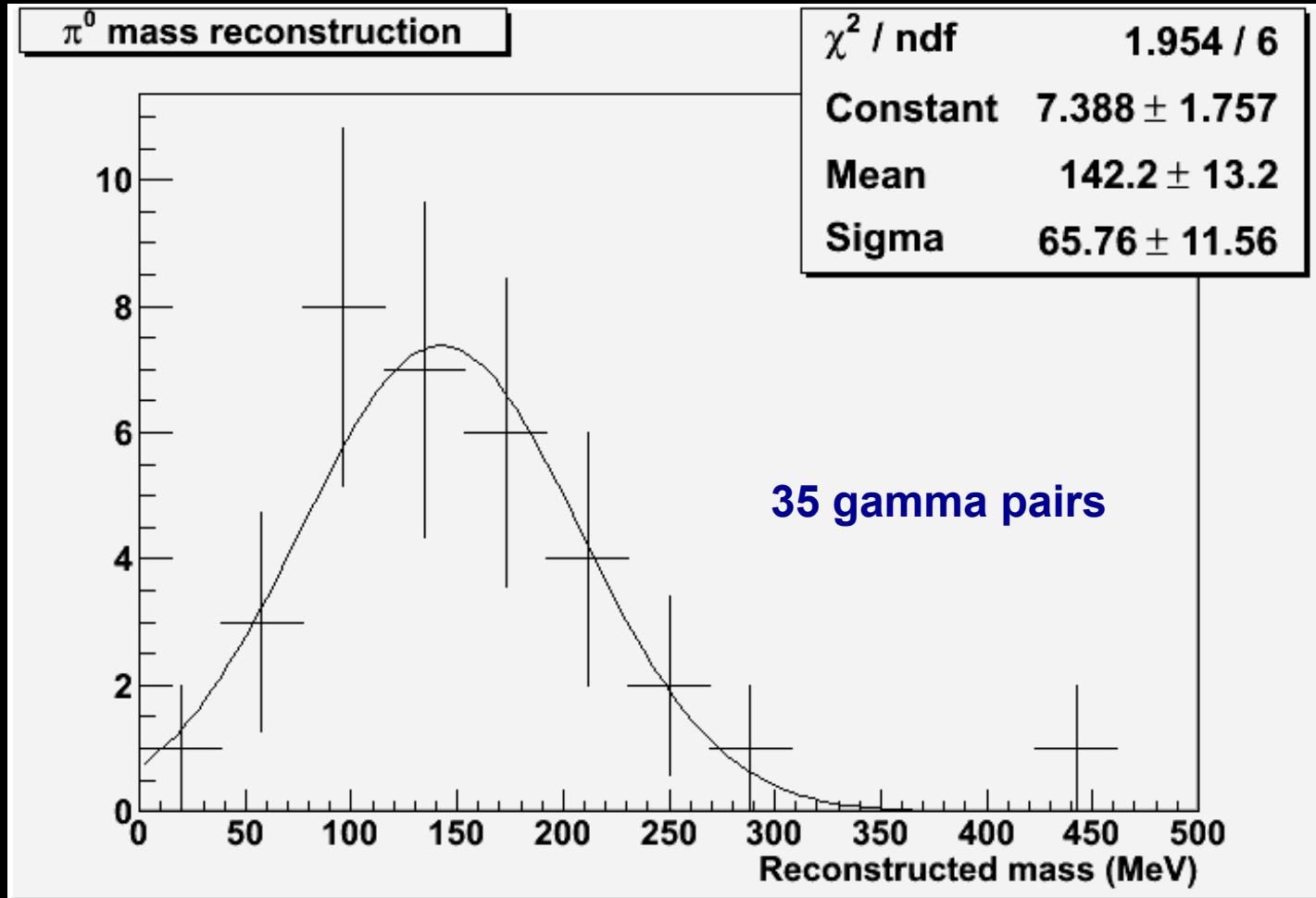
電子同定：電子シャワー 2個の γ 線が放出されている例。

この 2γ での不変質量 ~ 160 MeV



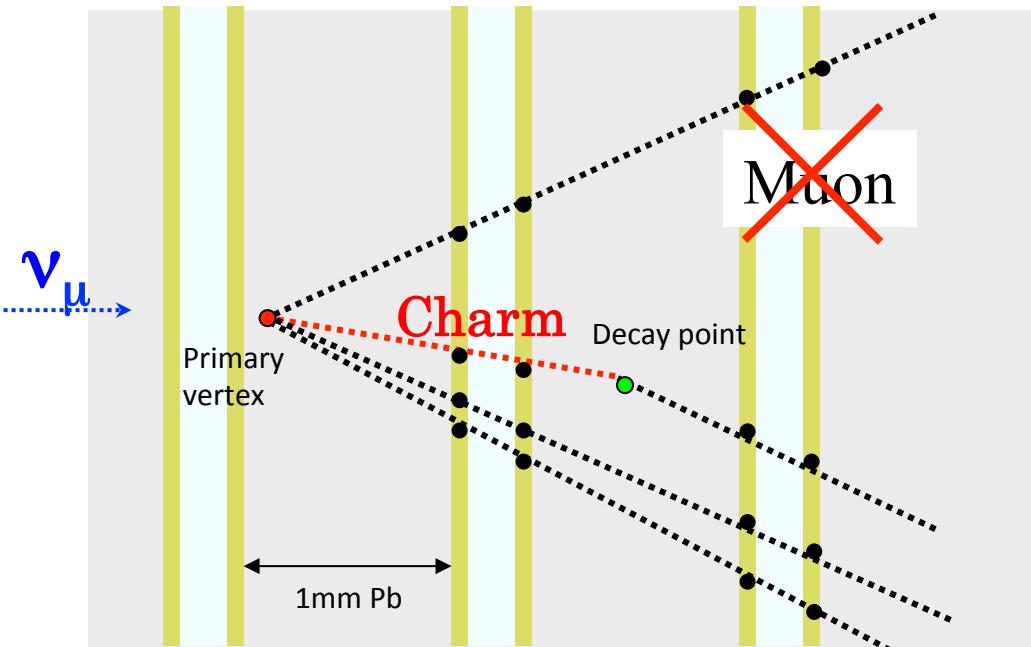
電磁シャワーの測定：
シャワーの発展の形 + MCSの運動量測定。

π^0 mass resolution (OPERA data)

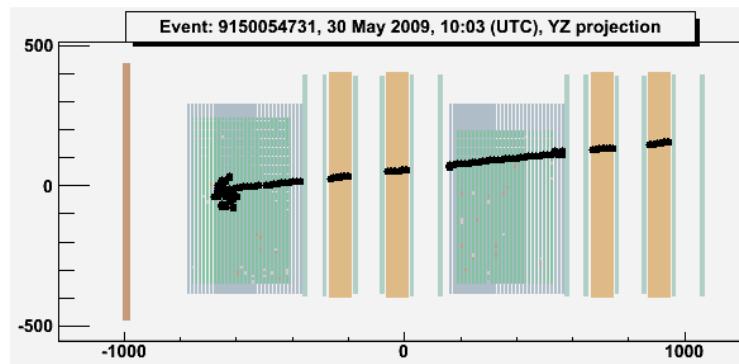


1 σ mass resolution: $\sim 45\%$

背景事象(1)チャーム付反応

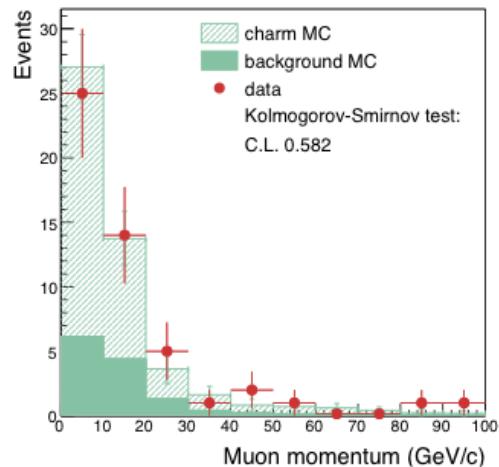
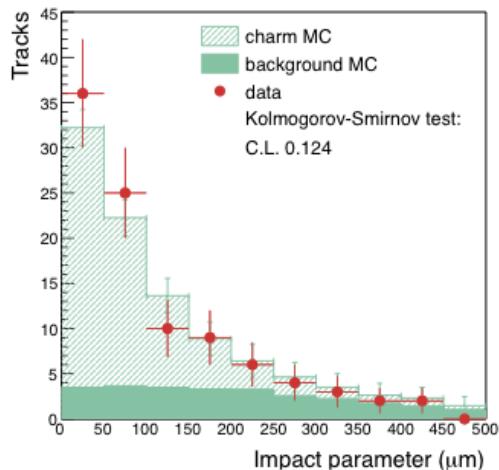
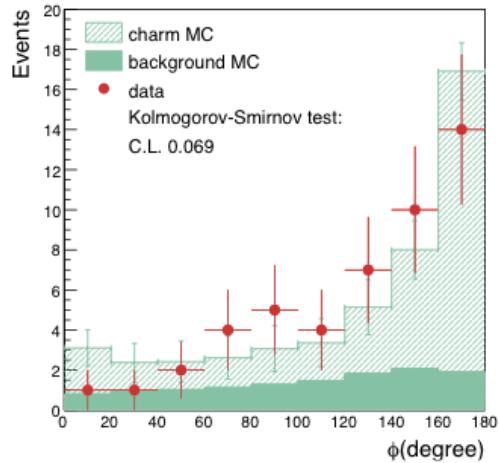
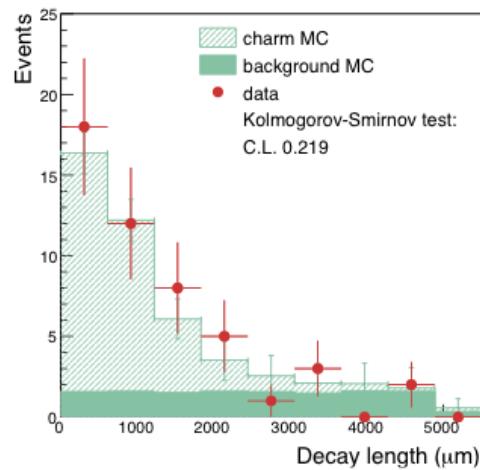


Nu_mu CC チャーム付反応
約5%
さらに
Muon の同定ができない場合。
X約3%。
さらにタウのセレクション条件をクリアー



Efficiency control sample

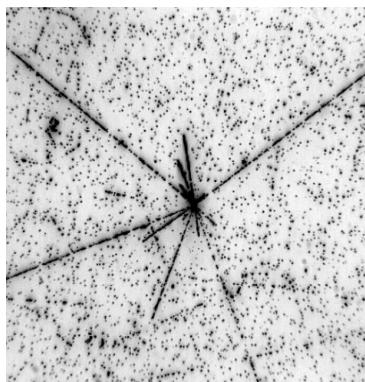
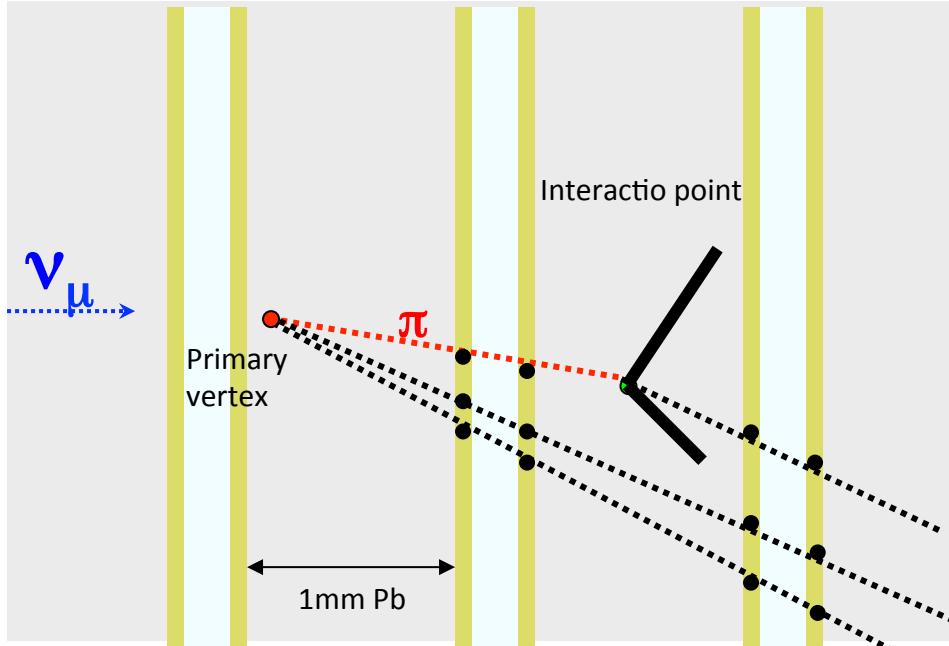
- Charm decay has similar topology as tau decay
 - Muon attached to the interaction point
 $\nu\mu + n \rightarrow \mu + D + p + (\text{anything})$



	charm	back-ground	expected	data
1 prong	21 ± 2	9 ± 3	30 ± 4	19
2 prong	14 ± 1	4 ± 1	18 ± 2	22
3 prong	4 ± 1	1.0 ± 0.3	5 ± 1	5
4 prong	0.9 ± 0.2	-	0.9 ± 0.2	4
All	40 ± 3	14 ± 3	54 ± 4	50

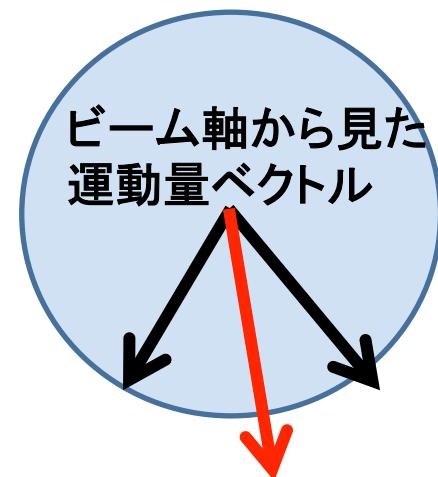
Good agreement between data and MC
 Eur. Phys. J. C (2014) 74: 2986

背景事象(2)ハドロン2次反応

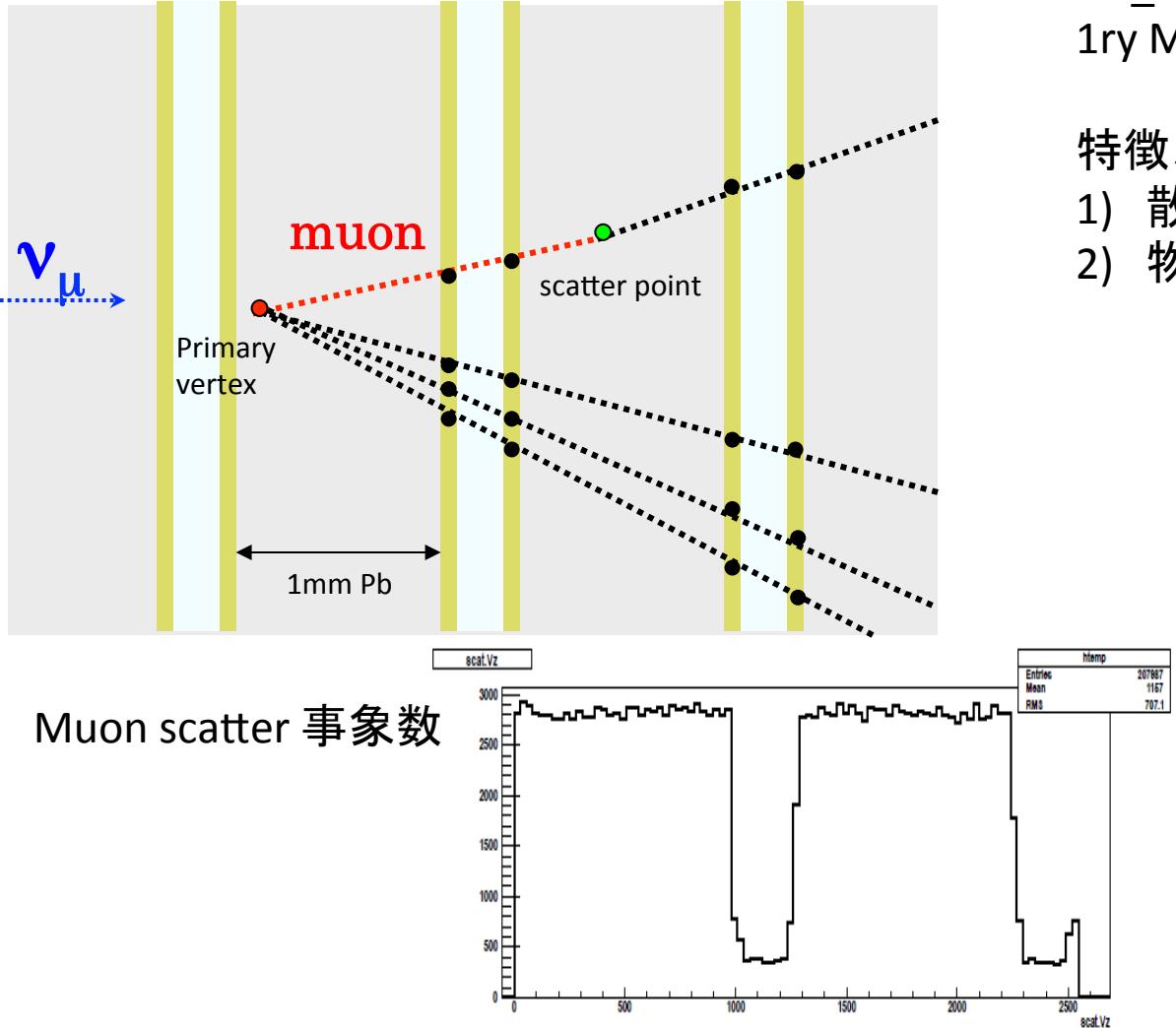


Nu_mu NC 反応
ハドロンの2次反応
かつ崩壊のように見える。
- 原子核の破碎粒子未検出

特徴。
折れ曲がりの横向き運動量が小さい。
NC 反応
pi とそれ以外の粒子が同方向。



背景事象(3) muonの散乱



Nu_mu CC

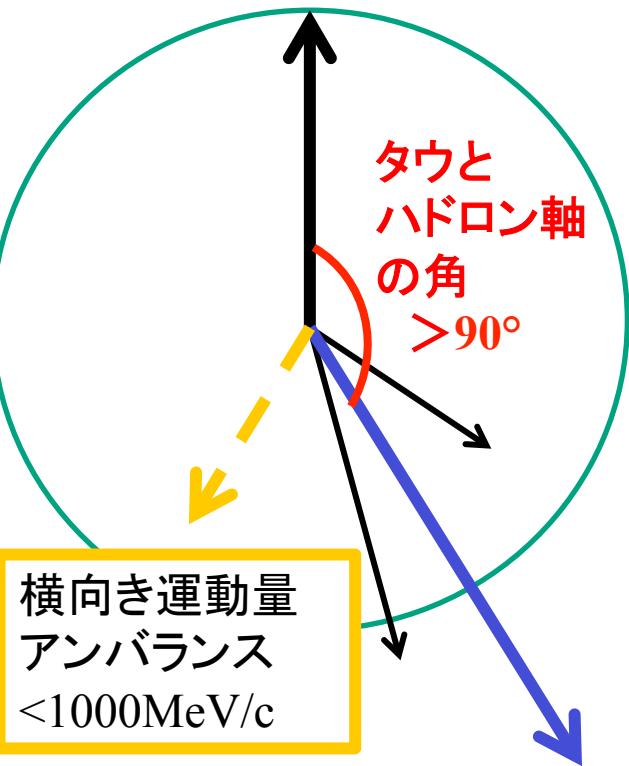
1ry Muon のラザホード散乱。

特徴、

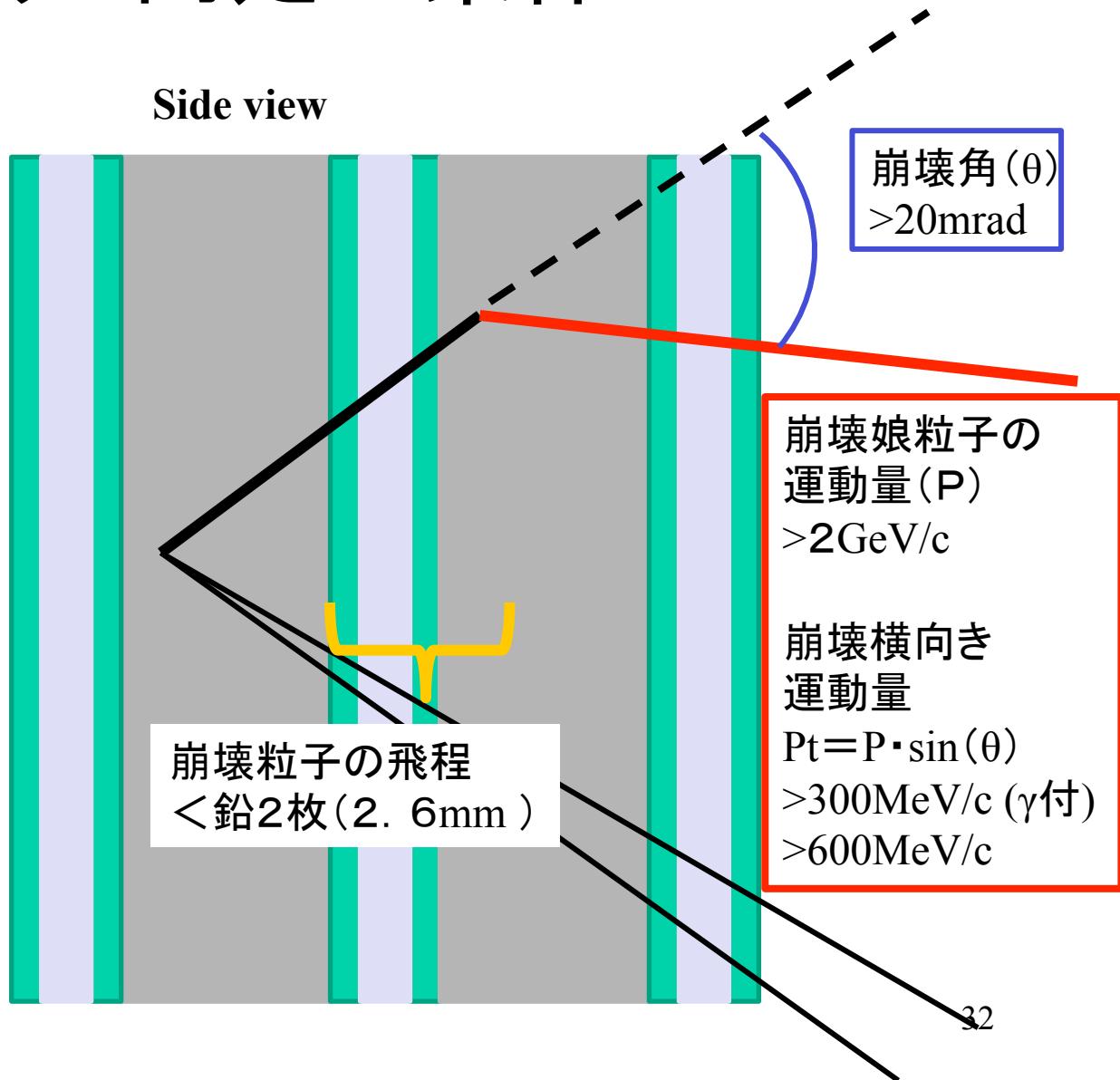
- 1) 散乱の横向き運動量が小さい。
- 2) 物質の量(クオーク)に比例。

タウニュートリノ同定の条件

ビーム軸から見た図
運動量空間



Side view



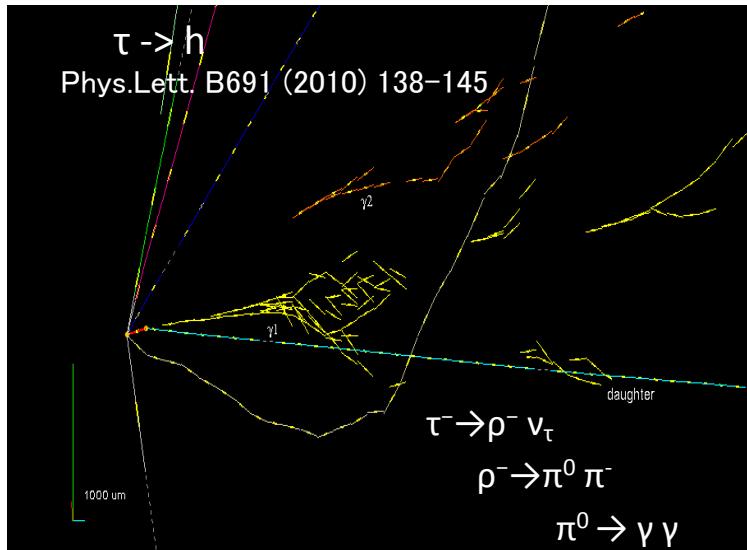
運動力学的カット:

- 折れ曲がり角度
- 崩壊PT
- 崩壊娘粒子の運動量
- τ レプトンのフライトレンジス
- 1ry vertexのビーム軸垂直方向でのmissing PT
- 1ry vertexのビーム軸垂直方向での τ レプトンとハドロン軸のなす角度

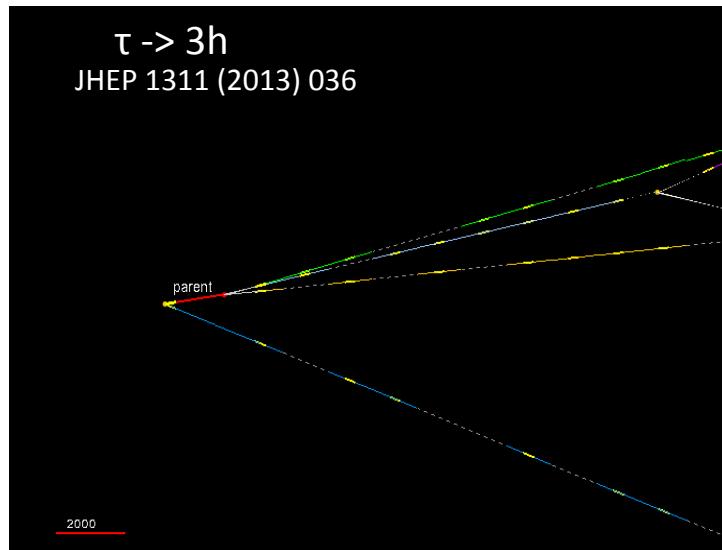
variable	$\tau \rightarrow 1h$	$\tau \rightarrow 3h$	$\tau \rightarrow \mu$	$\tau \rightarrow e$
lepton-tag	No μ or e at the primary vertex			
z_{dec} (μm)	[44, 2600]	< 2600	[44, 2600]	< 2600
p_T^{miss} (GeV/c)	< 1*	< 1*	/	/
ϕ_{lH} (rad)	> $\pi/2$ *	> $\pi/2$ *	/	/
$p_T^{2\text{ry}}$ (GeV/c)	> 0.6(0.3)*	/	> 0.25	> 0.1
$p^{2\text{ry}}$ (GeV/c)	> 2	> 3	> 1 and < 15	> 1 and < 15
θ_{kink} (mrad)	> 20	< 500	> 20	> 20
m, m_{min} (GeV/c^2)	/	> 0.5 and < 2	/	/

4 tau neutrino events

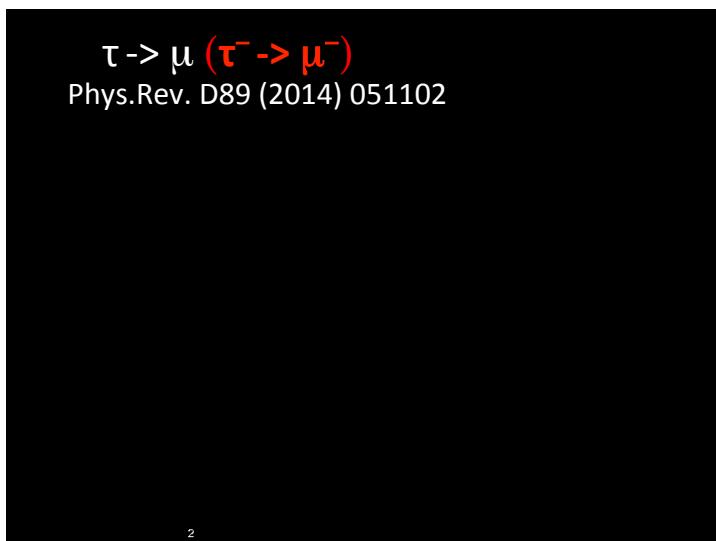
1st $\nu\tau$



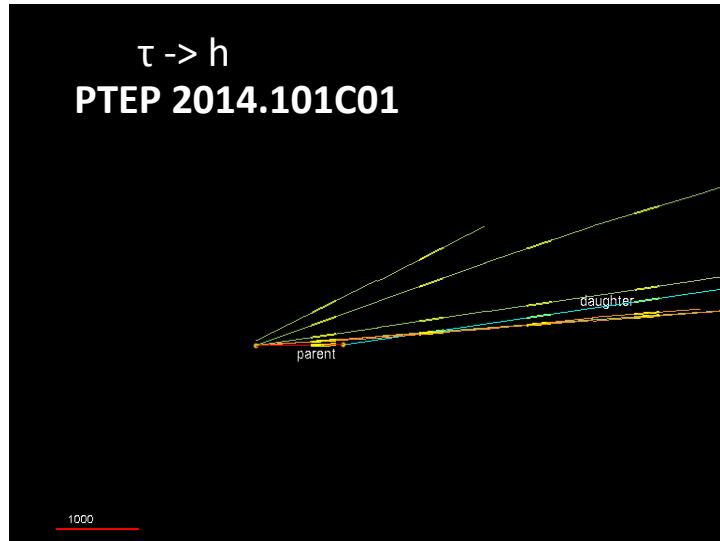
2nd $\nu\tau$



3rd $\nu\tau$



4th $\nu\tau$



Previous paper by 4 events published Oct 2014

PTEP

Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 101C01 (10 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptu132

Letter

Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment

OPERA Collaboration

N. Agafonova¹, A. Aleksandrov², A. Anokhina³, S. Aoki⁴, A. Ariga⁵, T. Ariga^{5,*},
T. Asada⁶, D. Bender⁷, A. Bertolin⁸, C. Bozza⁹, R. Brugnera^{8,10}, A. Buonaura^{2,11},

^{1,2}Dipartimento di Fisica dell'Università di Milano-Bicocca, I-20126 Milano, Italy

^{3,5}IHE, Université Libre de Bruxelles, B-1050 Brussels, Belgium

*E-mail: tomoko.ariga@lhep.unibe.ch, nakatsuka@flab.phys.nagoya-u.ac.jp

Received July 14, 2014; Revised August 23, 2014; Accepted August 23, 2014; Published October 27, 2014

4.2 σ

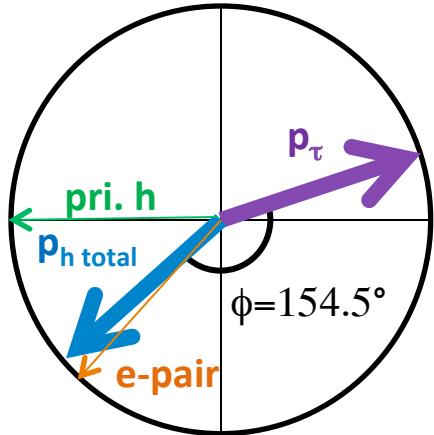
The OPERA experiment is searching for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations in appearance mode, i.e., via the direct detection of τ leptons in ν_τ charged-current interactions. The evidence of $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance has been previously reported with three ν_τ candidate events using a sub-sample of data from the 2008–2012 runs. We report here a fourth ν_τ candidate event, with the τ decaying into a hadron, found after adding the 2012 run events without any muon in the final state to the data sample. Given the number of analyzed events and the low background, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations are established with a significance of 4.2σ .

P-value = 1.24×10^{-5}

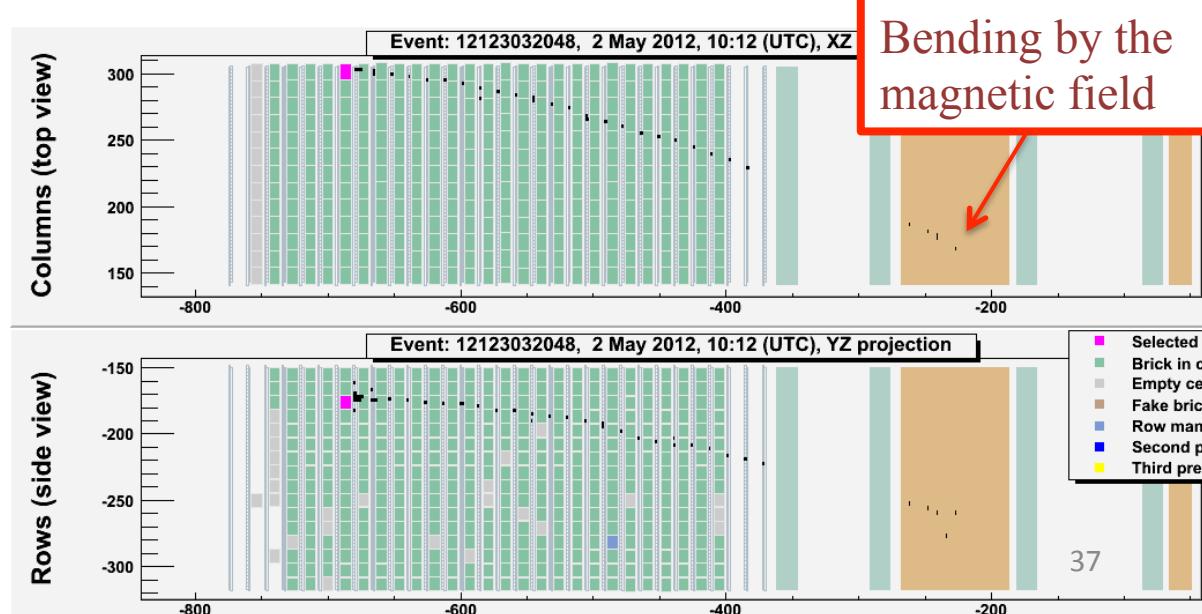
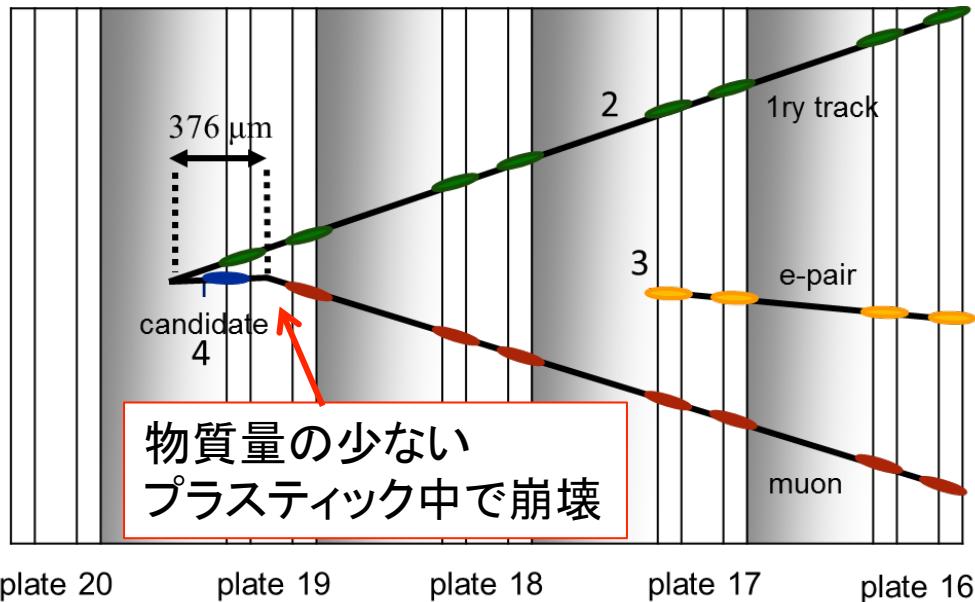
第3タウニュートリノ 候補

第3タウニュートリノ 候補

ν beam transverse plane

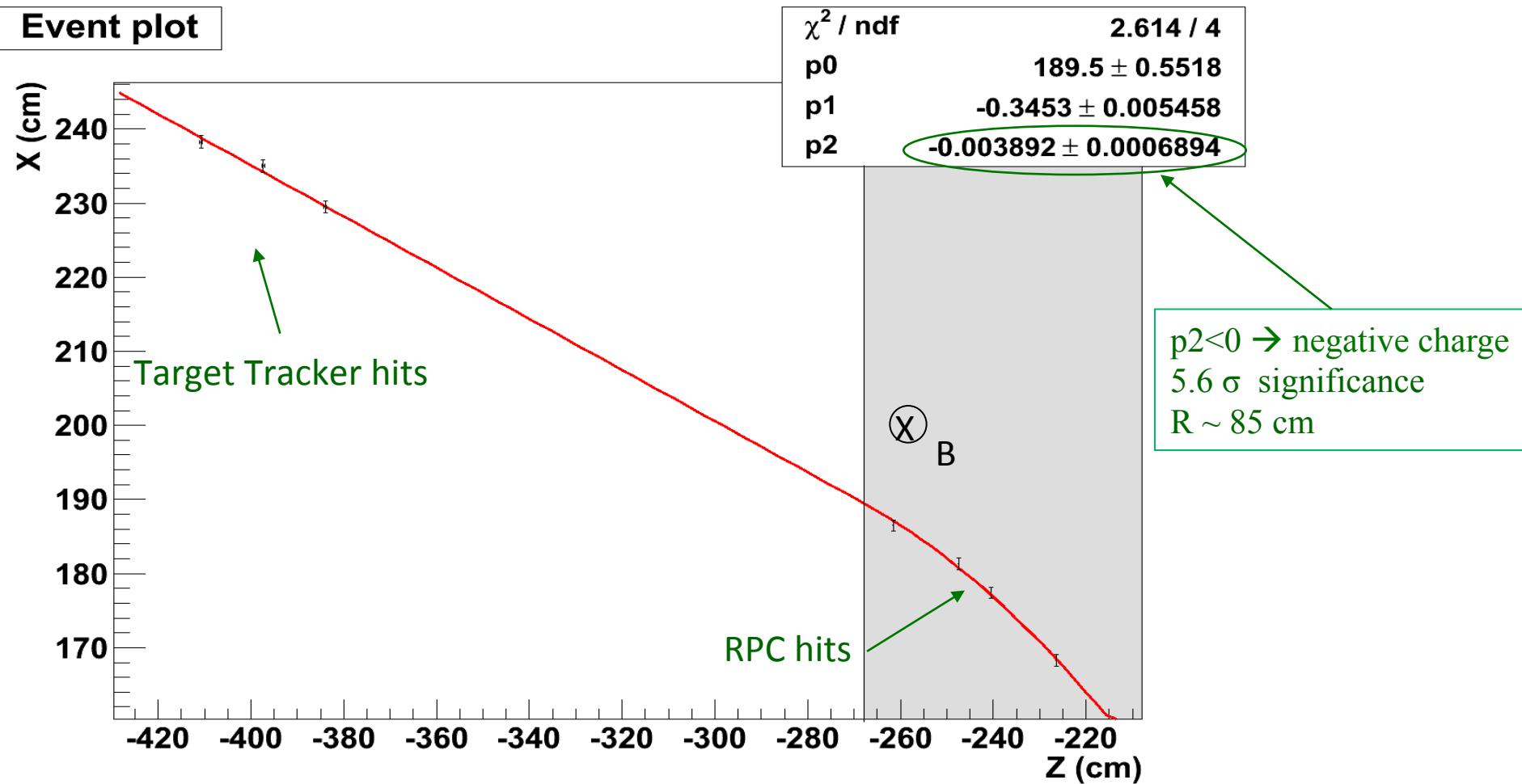


Kink Angle (mrad)	245±5
Decay Length (μm)	376±10
P (Gev/c)	2.8±0.2
Decay Pt (Mev/c)	690±50
Phi Angle (degrees)	154.5±1.5



Muon charge and momentum reconstruction

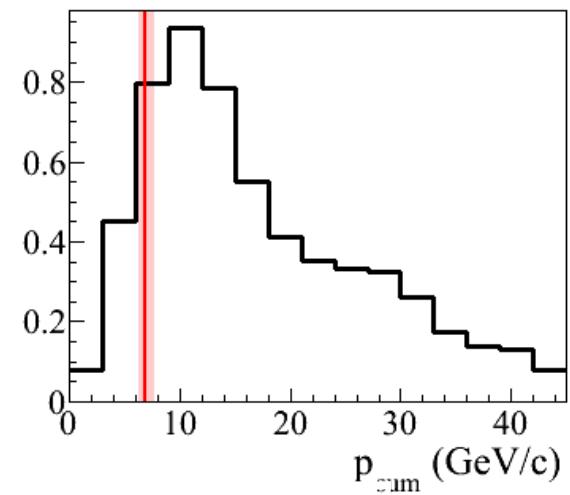
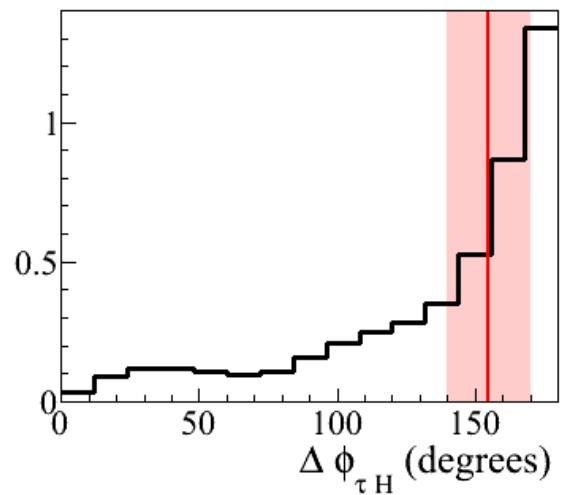
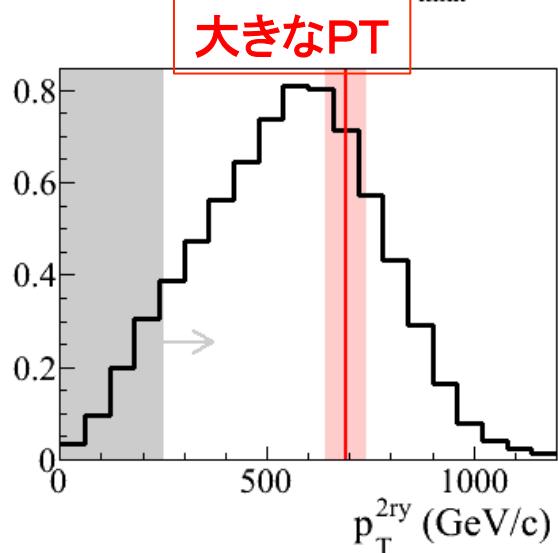
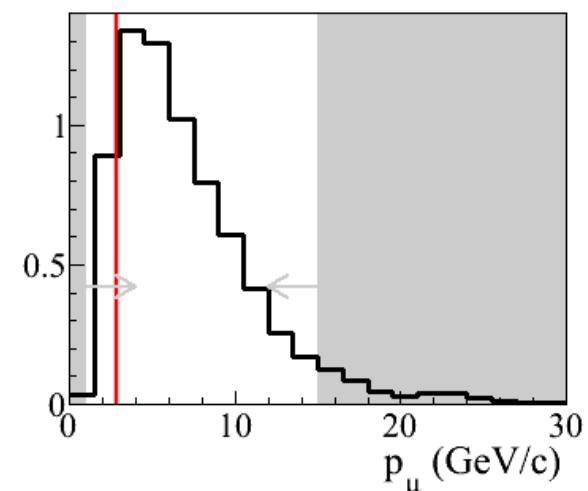
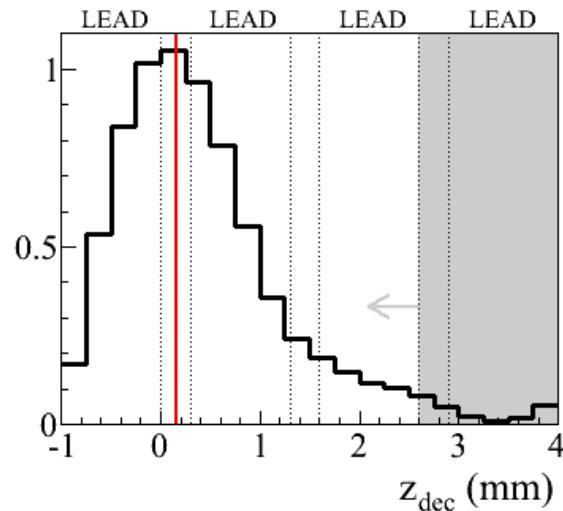
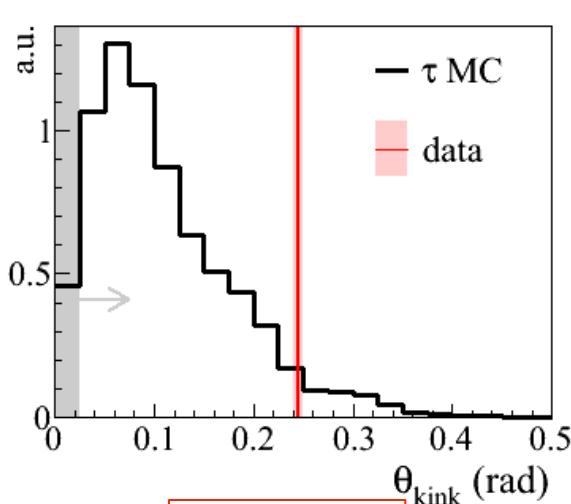
Parabolic fit with p2 as quadratic term coefficient in the magnetized region
Linear fit in the non-magnetized region



The negative muon charge rules out charm background!

Kinematical variables. All cuts passed: $\tau \rightarrow \mu$ candidate

PHYSICAL REVIEW D 89 (2014) 051102(R)



Kink angle (mrad)

245 ± 5

decay length (μm)

376 ± 10

$P\mu$ (GeV/c)

2.8 ± 0.2

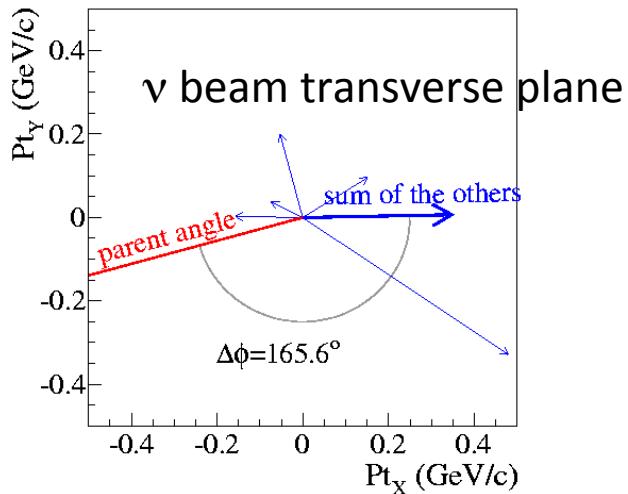
Pt (MeV/c)

690 ± 50

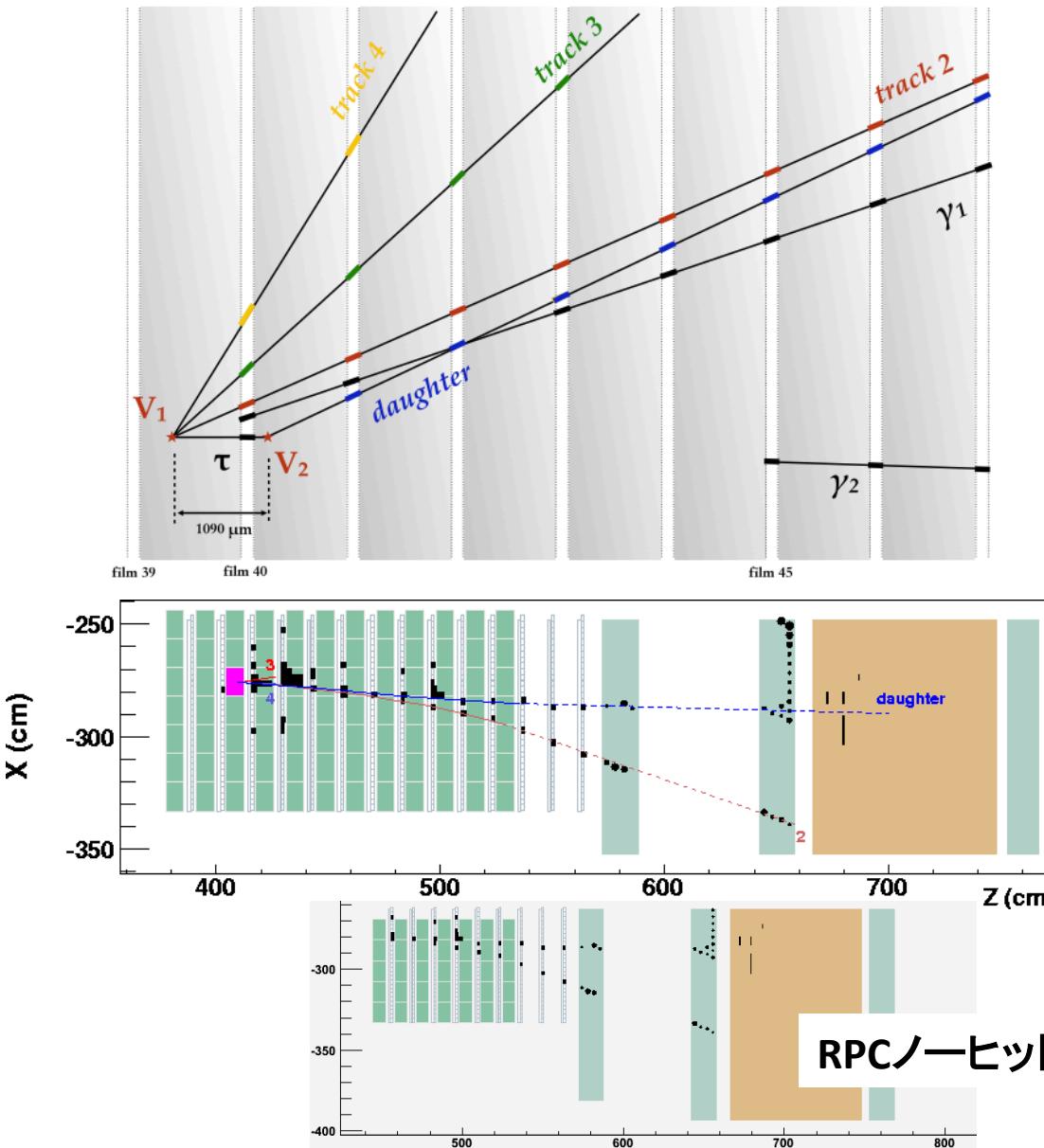
ϕ (degrees)

154.5 ± 1.5

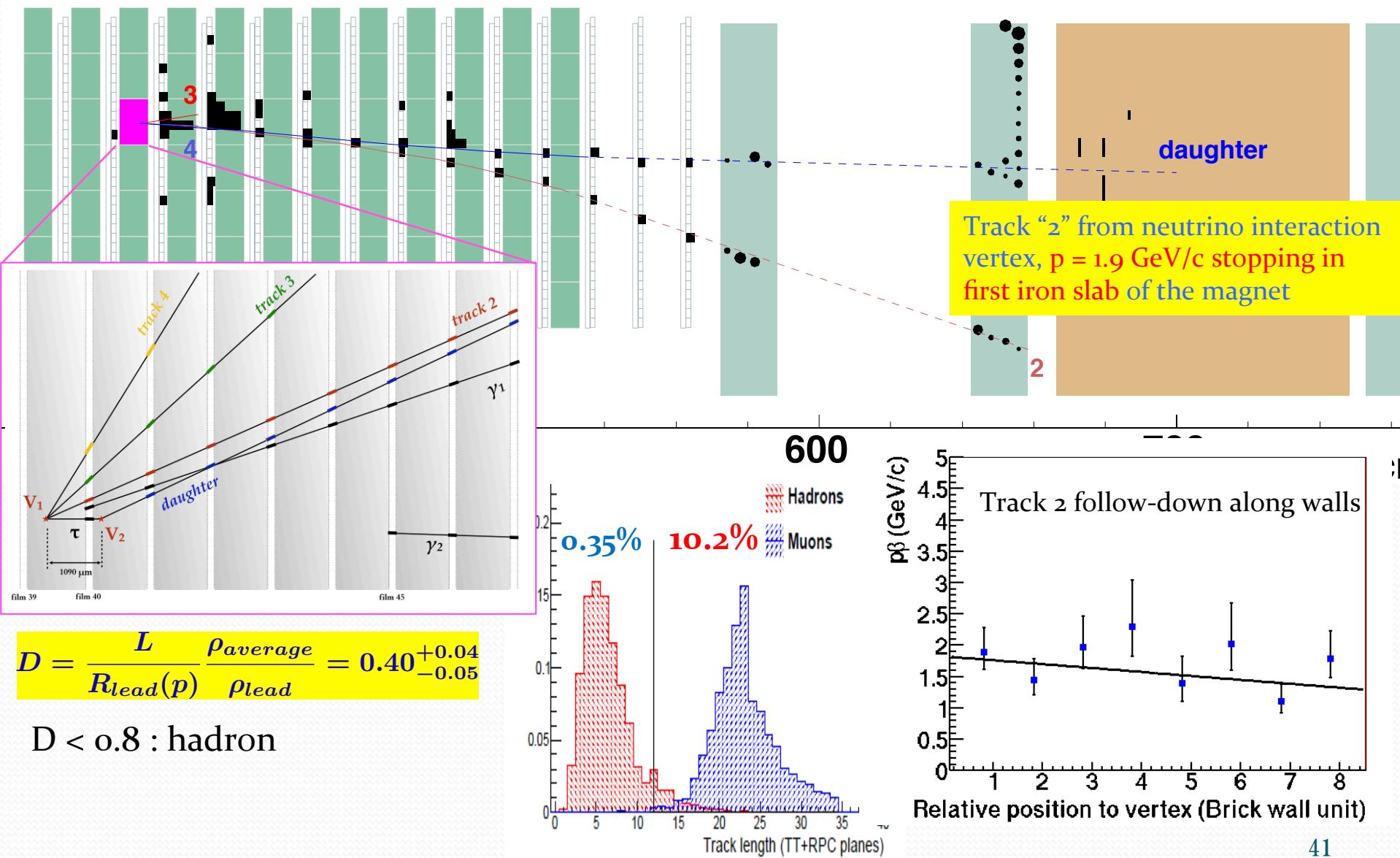
第4タウニュートリノ 候補



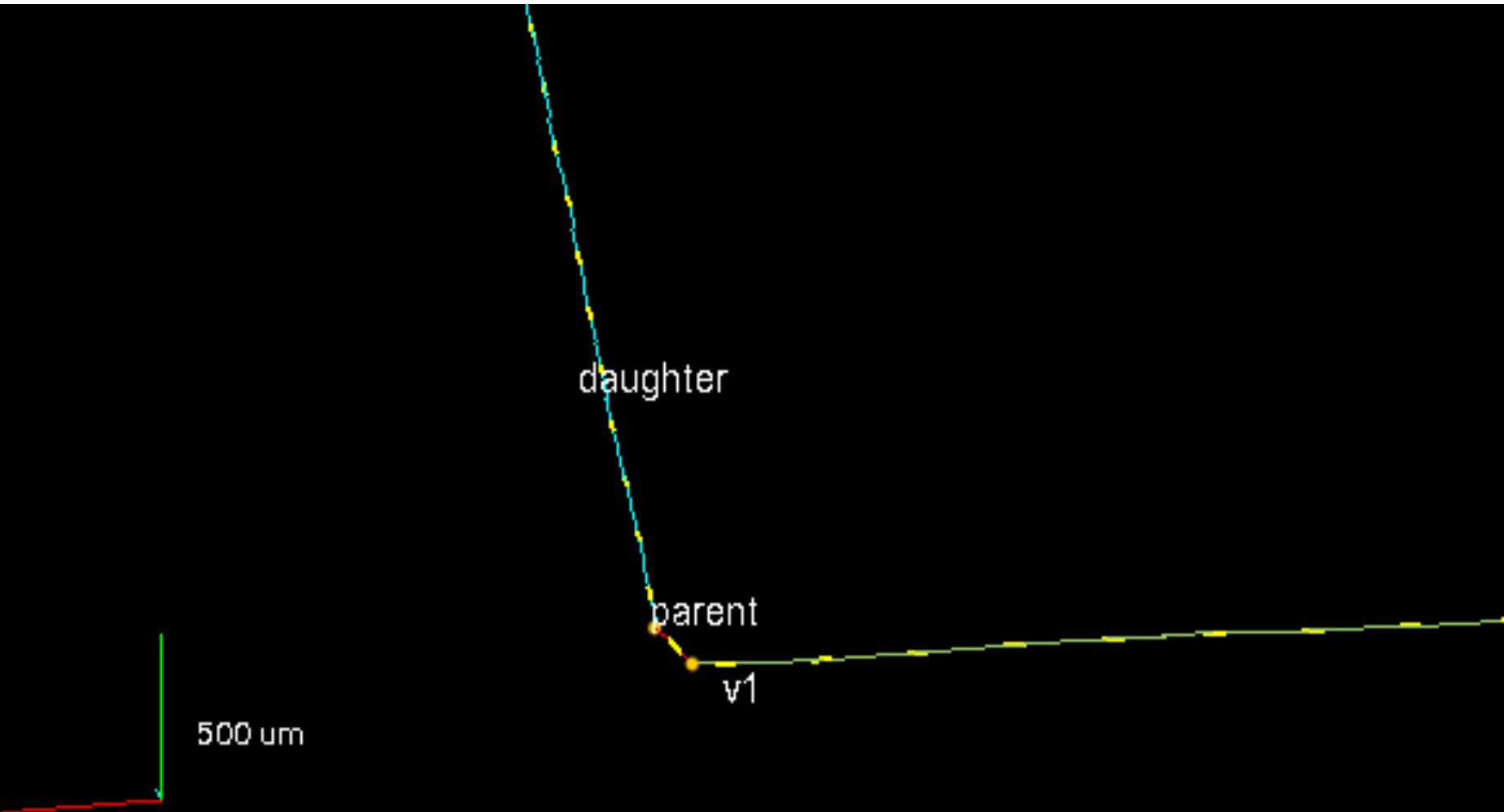
	Values	Selection
$P_{\text{daughter}} (\text{GeV}/\text{c})$	$6.0^{+2.2}_{-1.2}$	> 2
Kink P_t (GeV/c)	$0.82^{+0.30}_{-0.16}$	> 0.6
P_t at 1ry (GeV/c)	$0.55^{+0.30}_{-0.20}$	< 1.0
Phi (degrees)	166^{+2}_{-31}	> 90
Kink angle (mrad)	137 ± 4	> 20
Decay position (μm)	1090 ± 30	< 2600



複数Brickによる粒子同定($\mu?$ hadron?)

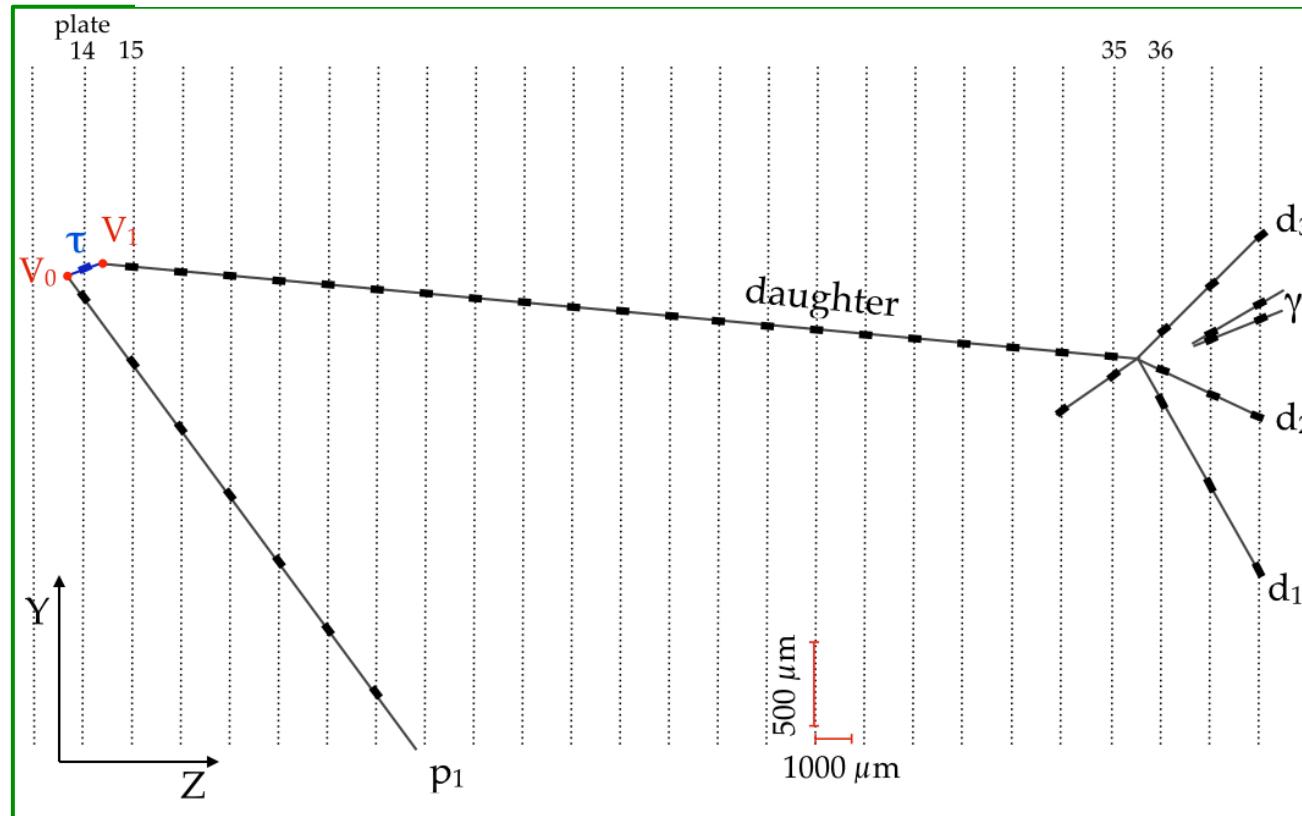
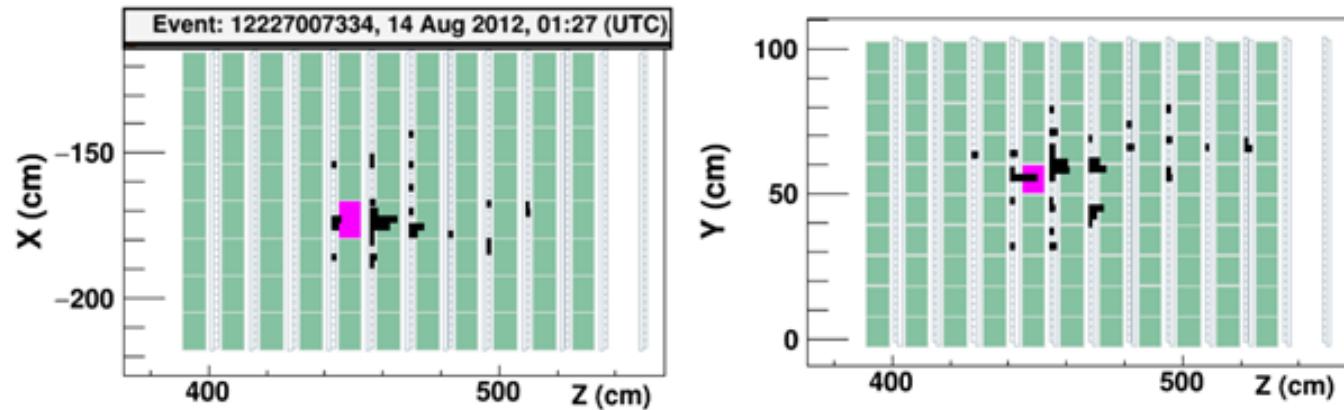


第5 タウニュートリノ 候補

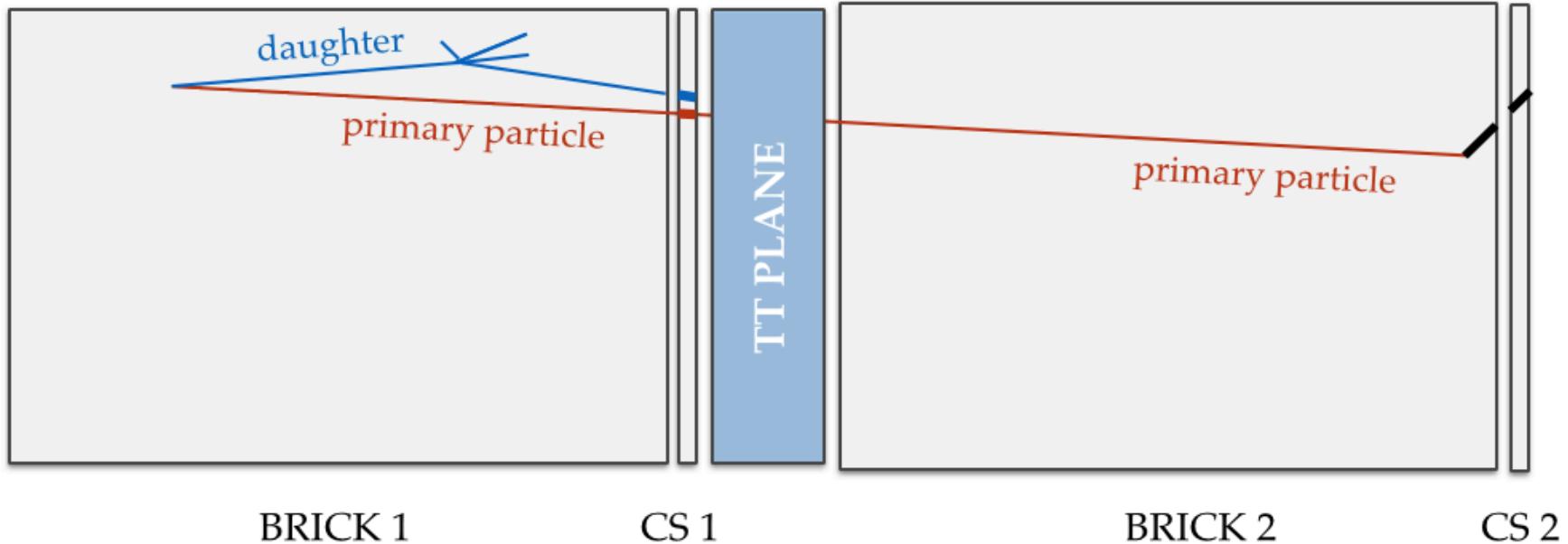


第5タウニュートリノ反応事象

TThit(赤が反応点を含むBrick)



1次粒子の粒子同定

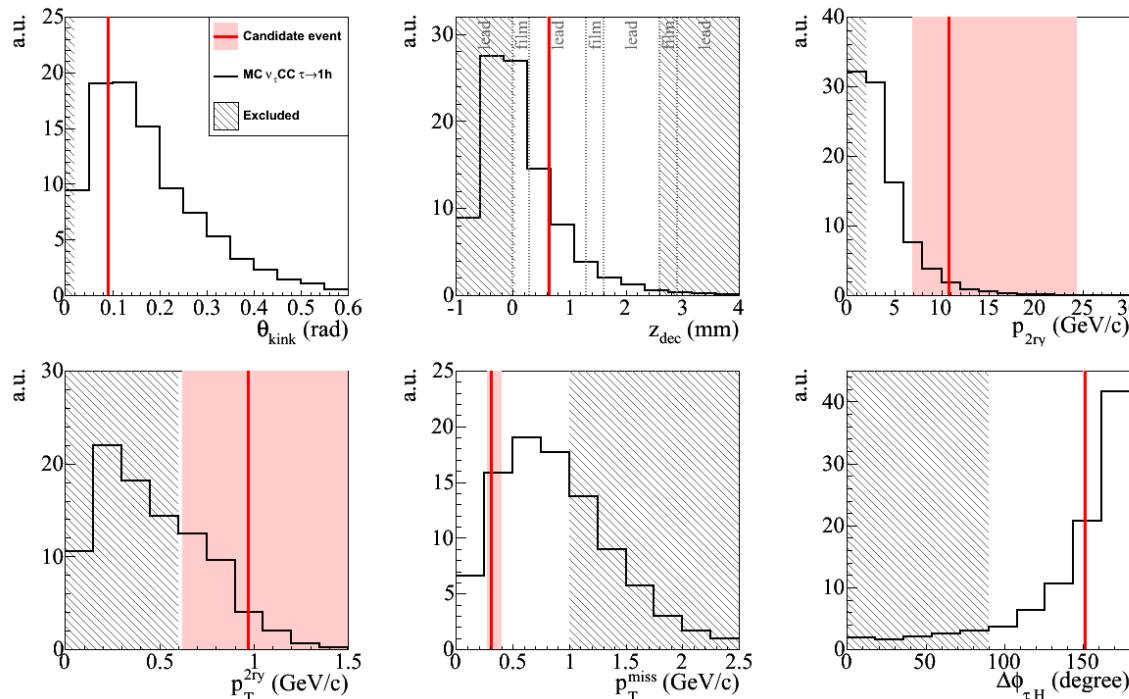
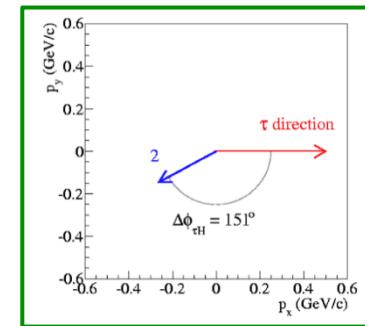


- ・ τ 粒子のパートナーとして荷電粒子1本が存在
- ・飛跡を顕微鏡ステージで追い下げるフィルム98枚下流($19X_0$)でハドロン反応に行き着いた。→1次粒子はハドロンである。

THE FIFTH ν_τ CANDIDATE

Kinematical variables

Parameter	Measured value	Selection Criteria
$\Delta\phi_{\tau H}$ (o)	151 ± 1	>90
p_T^{miss} (GeV/c)	0.3 ± 0.1	<1
θ_{kink} (mrad)	90 ± 2	>20
z_{dec} (μm)	634 ± 30	[44, 2600] (Flight length $960 \pm 30 \mu m$)
p_{2ry} (GeV/c)	11^{+14}_{-4}	>2
p_T^{2ry} (GeV/c)	$1.0^{+1.2}_{-0.4}$	>0.6 (no γ attached)

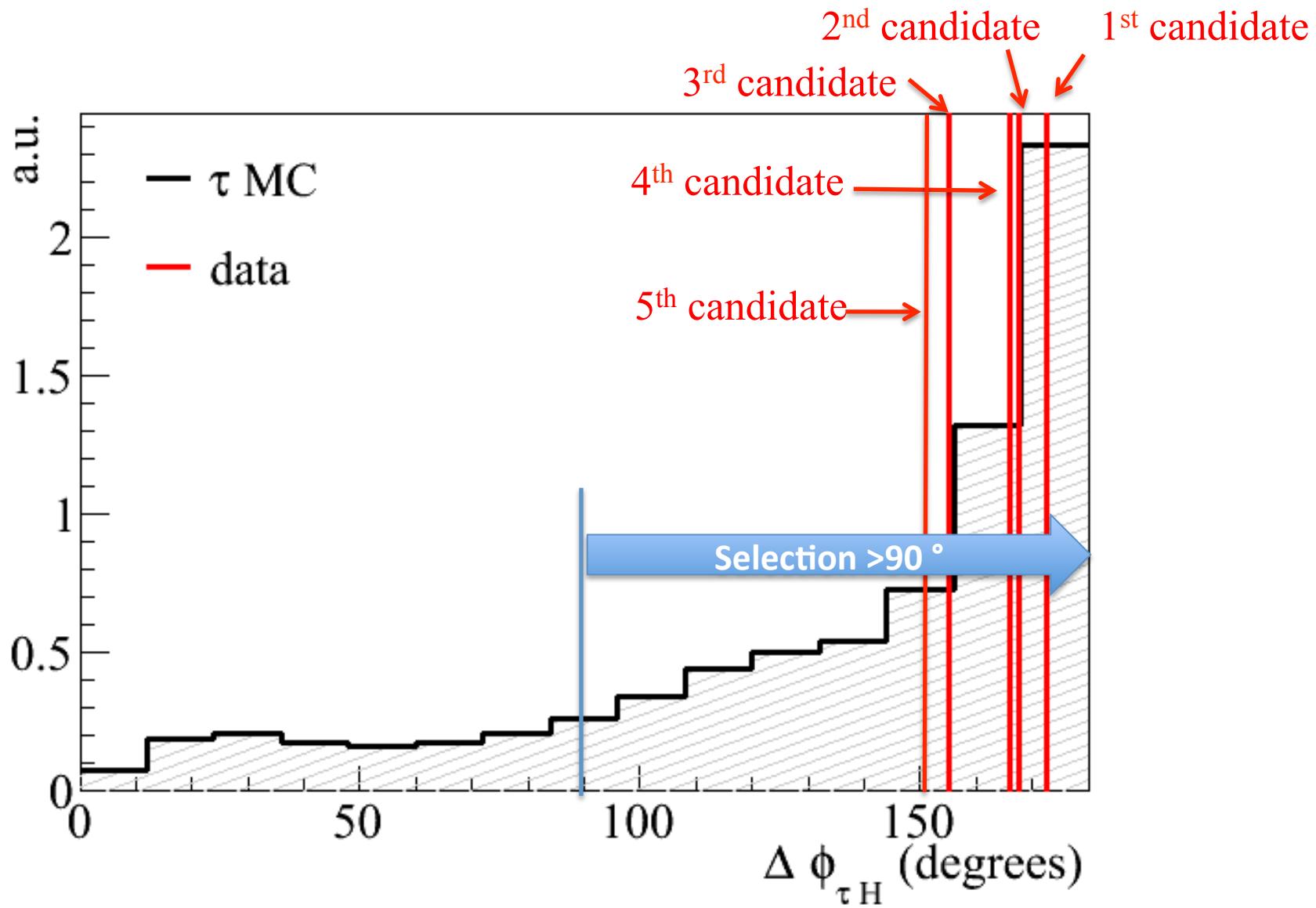


第5イベントは全運動力学的カットに合格し、
タウニュートリノ反応と同定された。

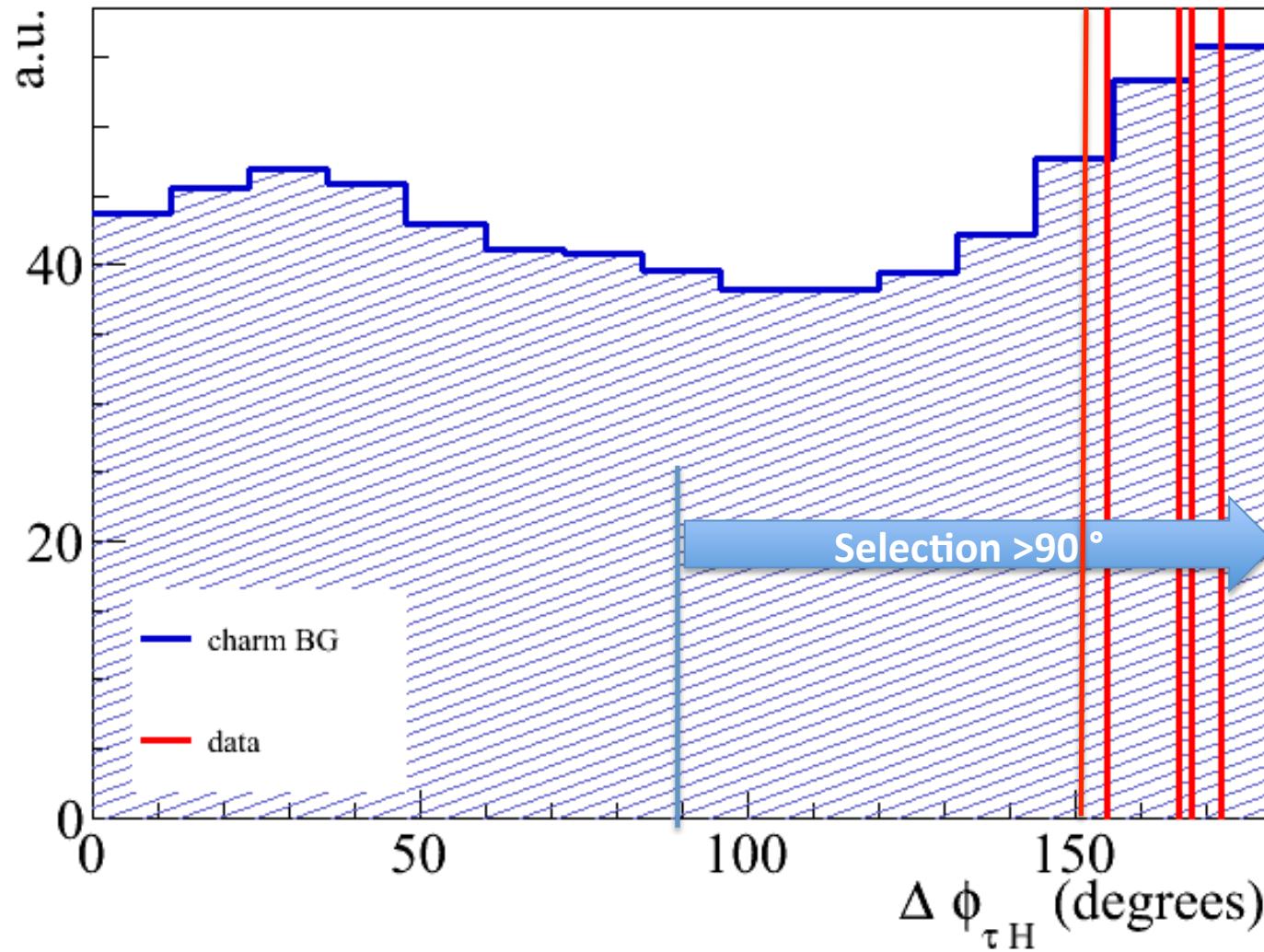
5 ν_τ 反応候補の特徴

候補	Decay channel	Branch	特徴	意味するところ
1	$\tau \rightarrow h$	γ 付 25%	$\tau \rightarrow \rho + \nu_\tau$ 2体崩壊 $\rho \rightarrow \pi + \pi^0$	背景事象少ない。
2	$\tau \rightarrow 3h$	15%	プラスティック中で崩壊	ハドロン2次反応しない。
3	$\tau \rightarrow \mu$	17%	μ^- に崩壊 プラスティック中で崩壊 大きな崩壊 P_T	背景事象少ないchannel μ の散乱しない。 }
4	$\tau \rightarrow h$	γ なし 12%	大きな崩壊 P_T $\tau \rightarrow \pi + \nu_\tau$ 2体崩壊	背景事象少ない。
5	$\tau \rightarrow h$	γ なし 12%	大きな崩壊 P_T $\tau \rightarrow \pi + \nu_\tau$ 2体崩壊	背景事象少ない。

Phi distribution of 4 tau neutrino candidates

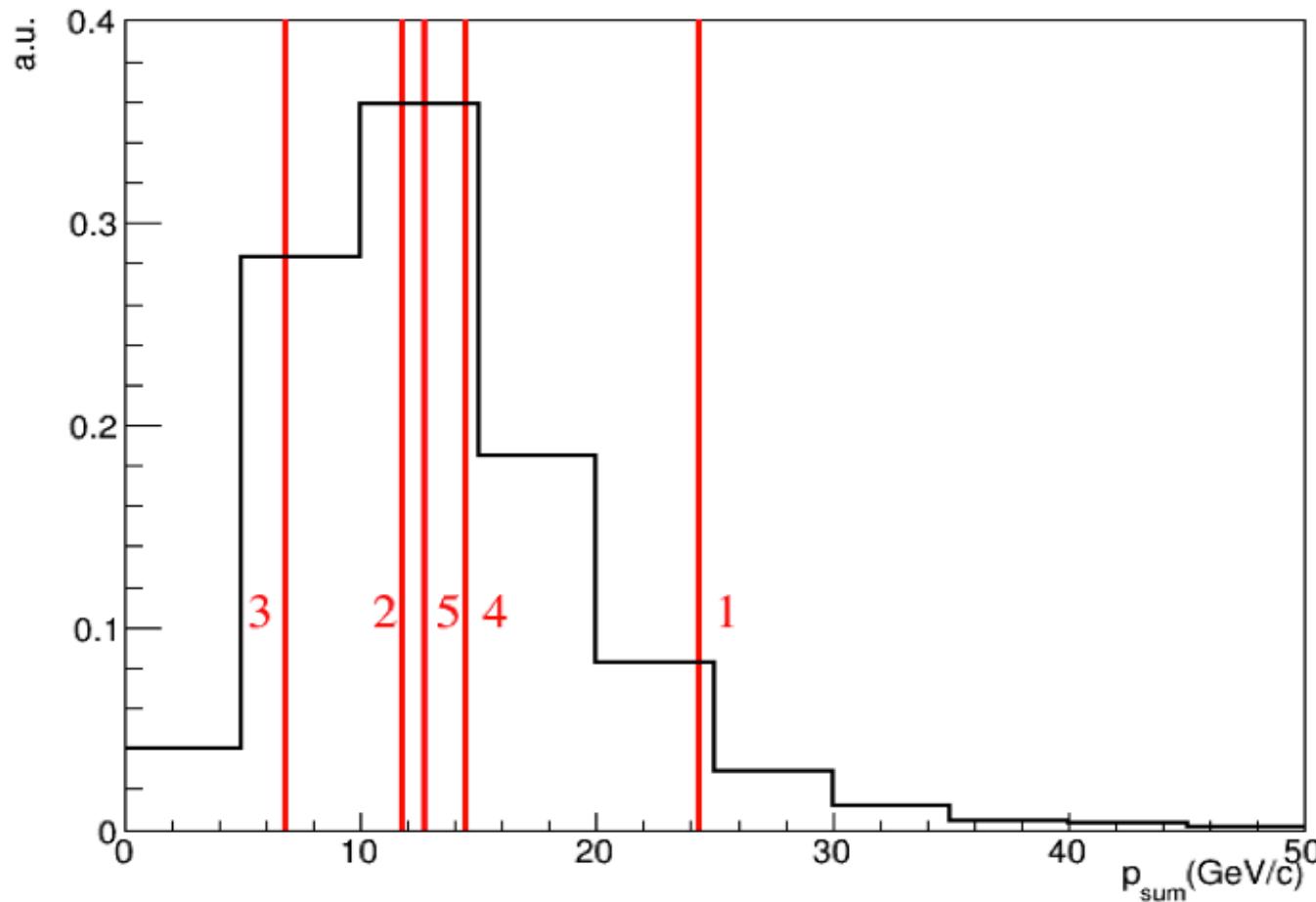


Phi distribution on Charm BG MC



VISIBLE ENERGY OF ALL THE CANDIDATES

Sum of the momenta of charged particles and γ 's measured in emulsion



STATISTICAL CONSIDERATIONS

Channel	Expected background				Expected signal	Observed
	Charm	Had. re-interac.	Large μ -scat.	Total		
$\tau \rightarrow 1h$	0.017 ± 0.003	0.022 ± 0.006	—	0.04 ± 0.01	0.52 ± 0.10	3
$\tau \rightarrow 3h$	0.17 ± 0.03	0.003 ± 0.001	—	0.17 ± 0.03	0.73 ± 0.14	1
$\tau \rightarrow \mu$	0.004 ± 0.001	—	0.0002 ± 0.0001	0.004 ± 0.001	0.61 ± 0.12	1
$\tau \rightarrow e$	0.03 ± 0.01	—	—	0.03 ± 0.01	0.78 ± 0.16	0
Total	0.22 ± 0.04	0.02 ± 0.01	0.0002 ± 0.0001	0.25 ± 0.05	2.64 ± 0.53	5

背景事象期待値0.25反応 に対し、5タウニュートリノ反応を検出

有意性の見積もり：崩壊モードごとの背景事象期待値を反映したFisher的方法

- ・ニュートリノ振動確率を0とした偽実験を多数回走らせ各崩壊モードでシグナル領域の事象数をカウントし、p-valueを求める。
- ・p-valueは見積もった背景事象数からポアソン分布を仮定して求める
- ・ p^* を各モードのp-valueの積で定義し、実際のOPERA実験の p^* を超えるものが現れる頻度を調べる

→背景事象で説明できる確率は 1.1×10^{-7} (5.1σ significance)

New paper with 5 events have just been published 18Sep!

PRL 115, 121802 (2015)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
18 SEPTEMBER 2015



Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment

N. Agafonova,¹ A. Aleksandrov,² A. Anokhina,³ S. Aoki,⁴ A. Ariga,⁵ T. Ariga,⁵ D. Bender,⁶ A. Bertolin,⁷ I. Bodnarchuk,⁸ C. Bozza,⁹ R. Brugnera,^{7,10} A. Buonaura,^{2,11} S. Buontempo,² B. Büttner,¹² M. Chernyavsky,¹³ A. Chukanov,⁸ L. Consiglio,² N. D'Ambrosio,¹⁴ G. De Lellis,^{2,11} M. De Serio,^{15,16} P. Del Amo Sanchez,¹⁷ A. Di Crescenzo,² D. Di Ferdinando,¹⁸

N.
F.
A.
K.

PRL 115, 121802 (2015)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week en
18 SEPTEMBER

³¹Dipartimento di Fisica dell'Università di Milano-Bicocca, I-20126 Milano, Italy

³²IHE, Université Libre de Bruxelles, B-1050 Brussels, Belgium

(Received 7 July 2015; published 17 September 2015)

K.
L.
W.
S.
P.

The OPERA experiment was designed to search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations in appearance mode, i.e., by detecting the τ leptons produced in charged current ν_τ interaction. The experiment took data from 2008 to 2012 in the CERN Neutrinos to Gran Sasso beam. The observation of the $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance, achieved with four candidate events in a subsample of the data, was previously reported. In this Letter, a fifth ν_τ candidate event, found in an enlarged data sample, is described. Together with a further reduction of the expected background, the candidate events detected so far allow us to assess the discovery of $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillations in appearance mode with a significance larger than 5σ .

5.10

DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.121802

P_value= 1.1×10^{-7}

PACS numbers: 14.60.Pq

Introduction.—Neutrino flavor transitions due to quantum mechanical mixing between neutrino flavors (ν_e , ν_μ , ν_τ) and mass eigenstates (ν_1 , ν_2 , ν_3) were proposed more

(POT) resulted in 19 505 neutrino interactions in the fiducial volume.

The topology of the neutrino interactions is



Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2015

NEUTRINO OSCILLATIONS

compiled by the Class for Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences

on-neutrinos are decay and

only muon-
4].

CRO [55] and
S [58] and T2K

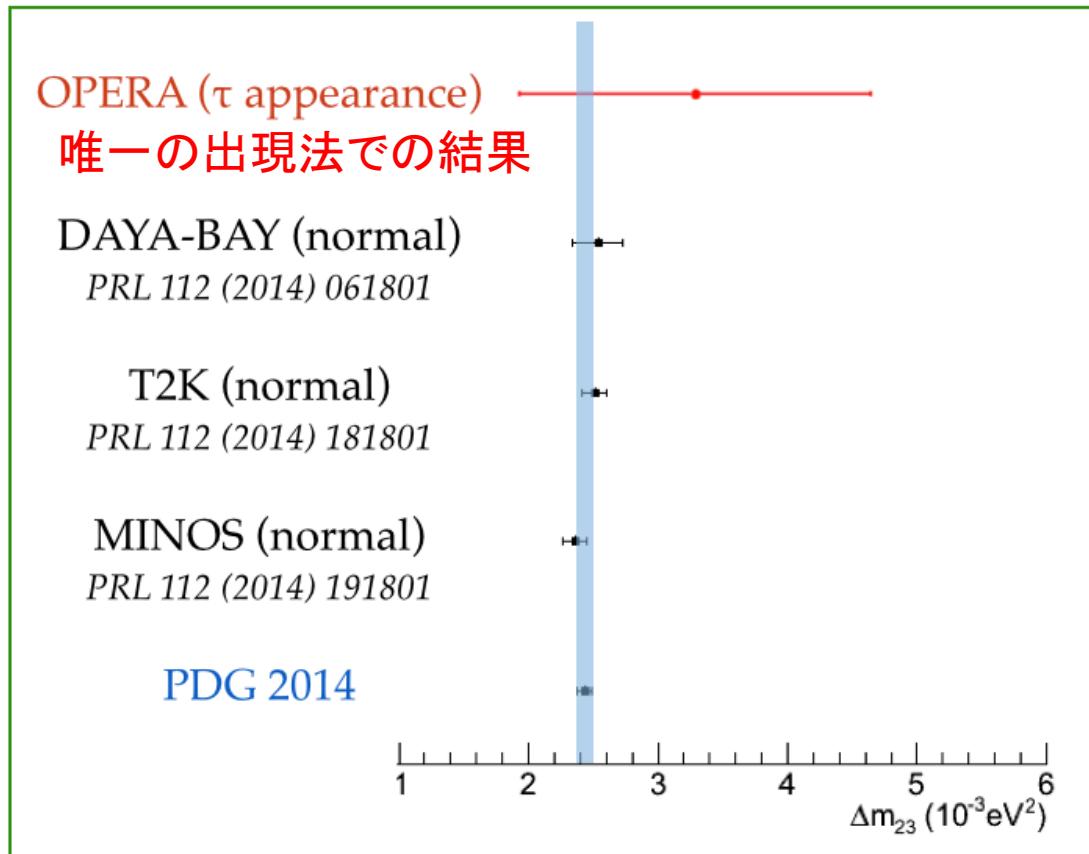
[59] and more recently also by the large neutrino telescopes ANTARES [60] and IceCube [61]. Appearance of tau-neutrinos in a muon-neutrino beam has been demonstrated on an event-by-event basis by the OPERA experiment in Gran Sasso, with a neutrino beam from CERN [62].

Theory of neutrino oscillations

Neutrino flavour conversion is fundamentally a quantum mechanical effect. The discovery of

Δm_{23}^2 測定値と他実験との比較

90% C.L. intervals on Δm_{23}^2 by Feldman & Cousins method
[2.0 – 4.7] $\times 10^{-3}$ eV² (full mixingを仮定)



タウアピアランスで求めた Δm^2_{23} の精度向上

- OPERAは 5σ の信頼性でタウニュートリノの出現観測を達成した。
- OPERAは、タウアピアランス出現の解析での Δm^2_{23} の値を初報告
初報告 4タウ反応観測時
 - PTEP [1.8, 5.0] $\times 10^{-3}$ eV² (90%CL, F&C)
- 現在 5タウ反応観測
 - PRL [2.0, 4.7] $\times 10^{-3}$ eV² (90%CL, F&C)
- 今まで、タウニュートリノ出現観測をゼロ背景事象(0.25個)で言い切るため、厳しいタウ選別のカットだった。

Δm^2_{23} の精度を上げるには少数(1程度)の背景事象の混入を許しても観測タウニュートリノ反応の統計数を向上させた方が有利である。

今までの選別カットでタウニュートリノ反応候補から落ちた、カット境界線近傍の約20反応を観測量の整理、多変数の運動力学的観測量を使った新カットでの解析を行っている。

今年度内のpreliminaryな結果報告を目指している。

まとめ

- OPERA実験はSKの大気ニュートリノ振動の結果を受け、 $\nu\mu \rightarrow \nu\tau$ であることを
タウニュートリノの出現を直接捉えることで検証すべく立案された。
- 総重量**1250トン**の原子核乾板ECC標的に対し2008年～2012年までの5年間で
プロポーザルの**80%**のニュートリノ照射を完了した。
- 5408ニュートリノ反応に対しタウ粒子崩壊探索をECC中で行い、**5例の** ν_τ **反応**を検出。
5例の候補が背景事象のみで説明できる確率(p_value)は **1.1×10^{-7}** となり、
タウニュートリノ出現の観測を信頼性 5.1σ (Discovery レベル)で報告した。
この結果は2015年9月18にPRL誌に掲載された(PRL 115,121802(2015))。
梶田さんのノーベル賞受賞の裏づけ証拠になった。
(Science Background on the Nobel Prize in Physics 2015 @ Press Release Oct 6 2015)。
- タウニュートリノ出現事象を用いて ΔM^2_{23} の値を報告。
精度はタウニュートリノ候補数の統計誤差に支配されている。
背景事象数を上げすぎない範囲でタウニュートリノ候補の選別カットを緩め、
 ΔM^2_{23} の精度向上に対し最適なカットを採用し結果をまとめる。

今後の展望

- OPERAでは粒子同定(ハドロン、電子、 μ)を原子核乾板の情報から得ている。
つまり ν_μ CC, ν_e CC, ν_τ CC, ν NC の同定ができる。
また運動量を原子核乾板解析から得ている。

この技術を発展させて

- ニュートリノ反応の断面積、生成粒子の不定性の理解を進める(T60実験)。
- 人類が、イベント毎に同定したタウニュートリノ反応は DONUT(9個), OPERA(5個)の計14個しかない。
- タウニュートリノ反応断面積測定実験を大統計
1770(正 ν_τ CC)、900(反 ν_τ CC)反応で行う(SHiP実験)。