

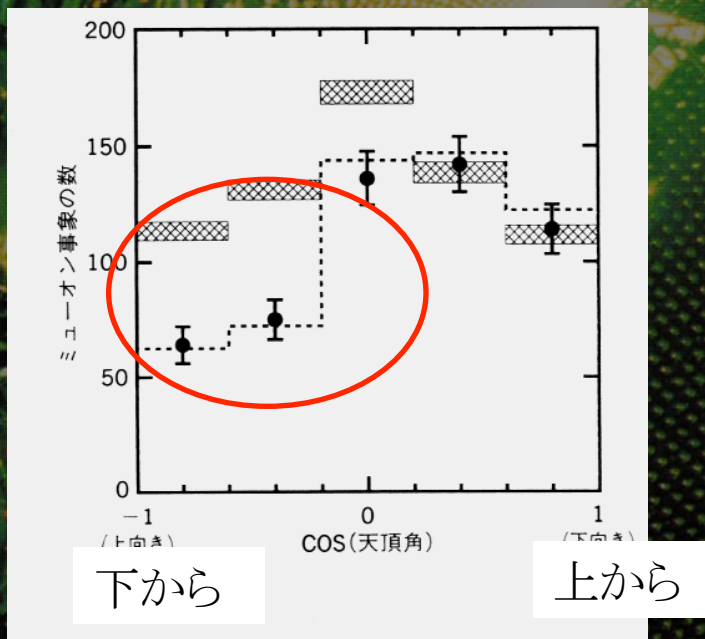
長基線ニュートリノ振動実験 OPERAの成果

佐藤 修

(名古屋大学物理F研)

トリガー

ミューニュートリノ事象の天頂角分布

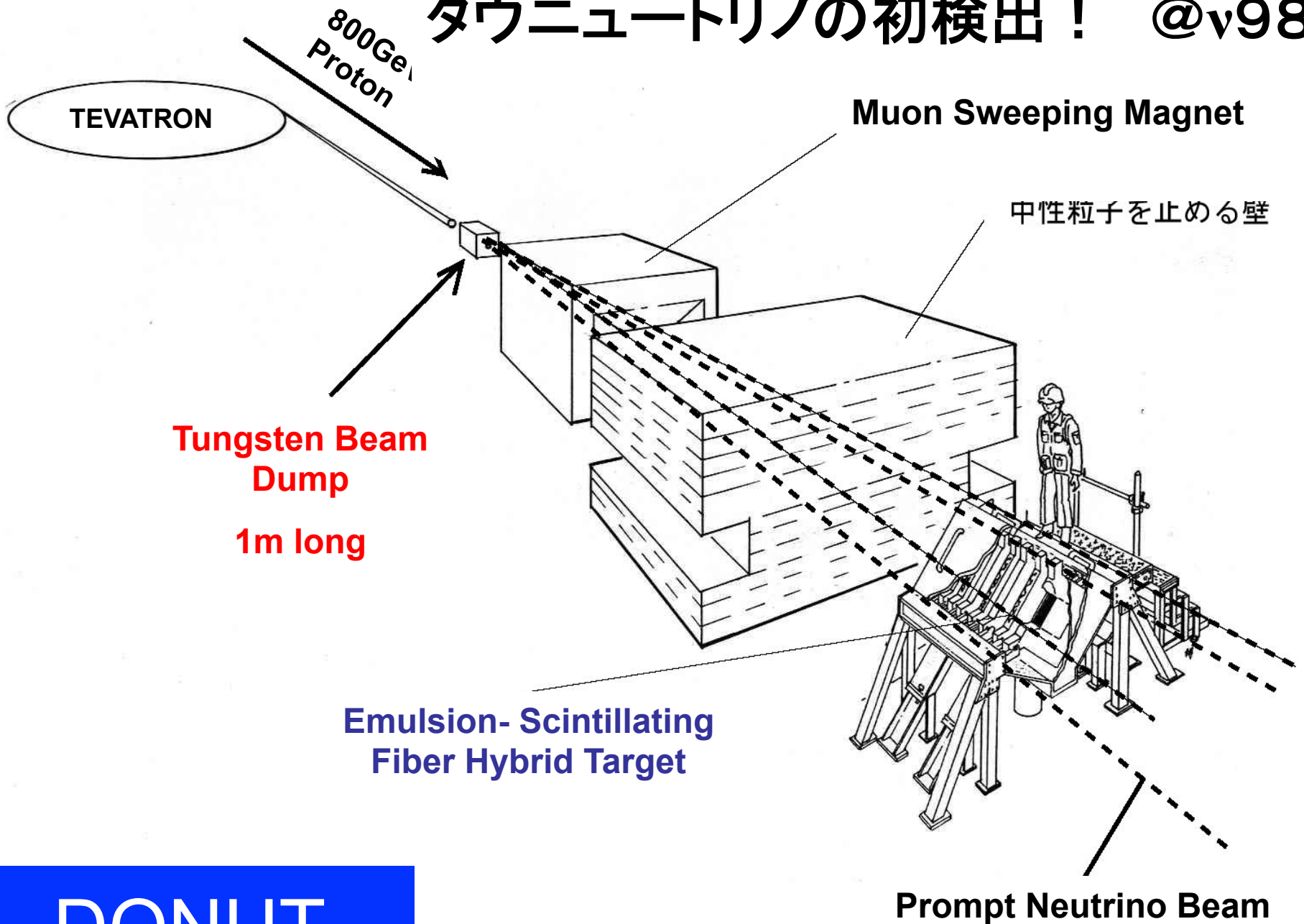


解釈：ミューニュートリノが他のニュートリノへ振動して減少した。

→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

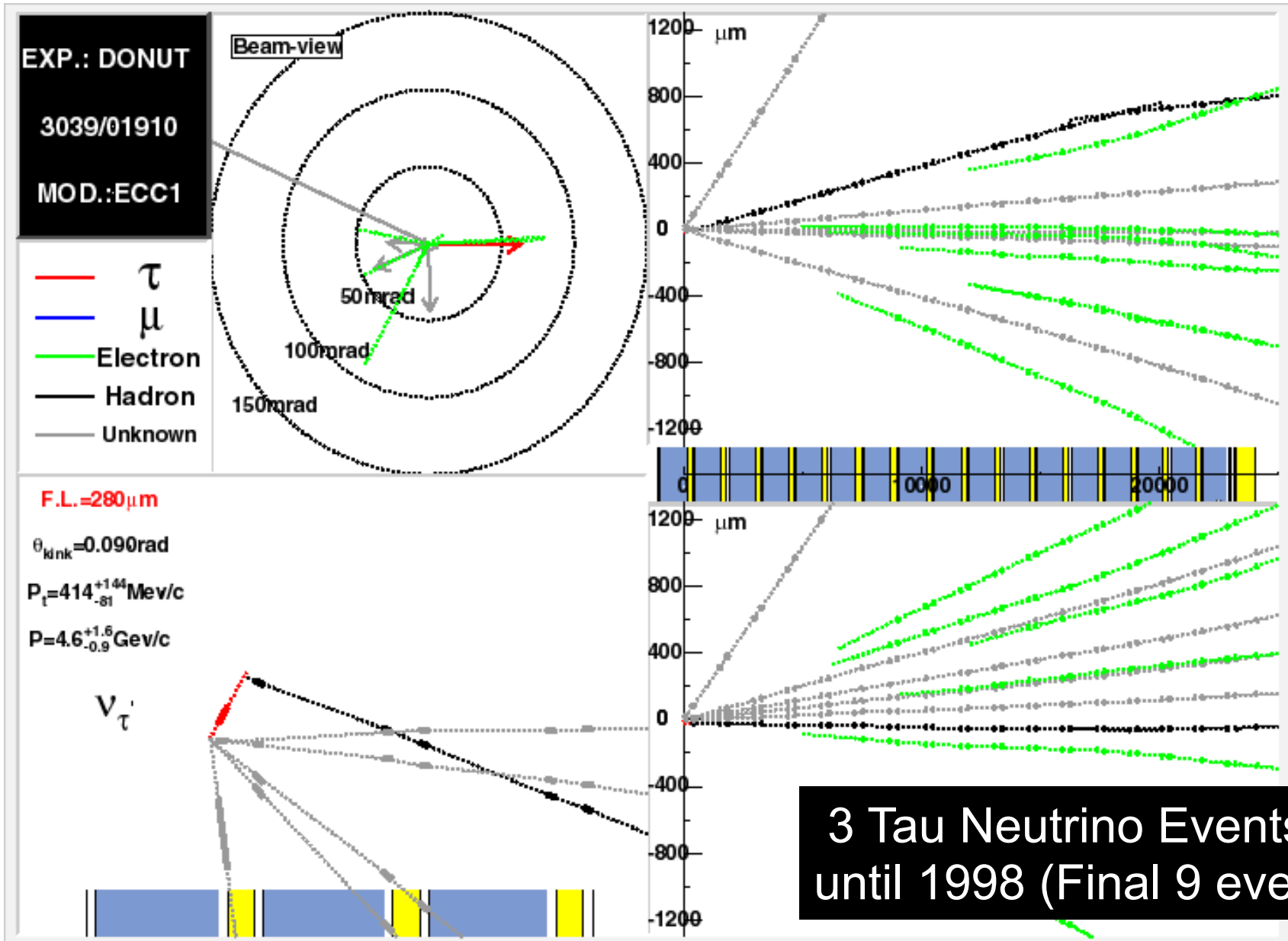
v98(高山)でSKが発表した分布

タウニュートリノの初検出！ @v98



DONUT

タウニュートリノの初検出！ @v98



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：160名，
研究機関 30（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

ULB Brussels



Croatia

IRB Zagreb



France

LAPP Annecy
IPNL Lyon
IPHC Strasbourg



Germany

Hamburg



Israel

Technion Haifa



Italy

Bari
Bologna
LNF Frascati
L'Aquila
LNGS
Naples
Padova
Rome
Salerno



Japan

Aichi edu.
Kobe
Nagoya
Toho
Utsunomiya



Korea

Jinju



Russia

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



Switzerland

Bern
ETH Zurich



Turkey

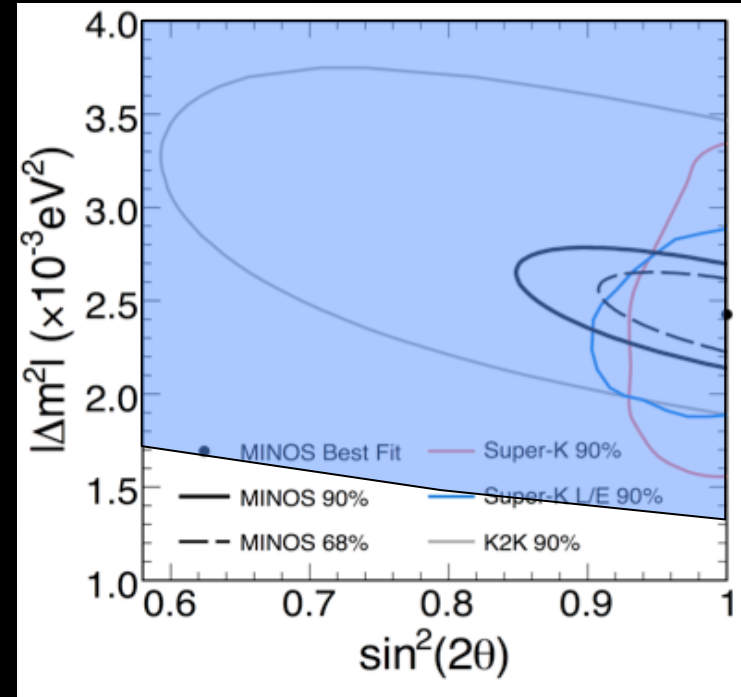
METU Ankara



(11 countries, 30 Institutes, ~160 researchers)

CNGS (Baseline 732 km, $\langle E \nu \rangle 17\text{GeV}$)

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



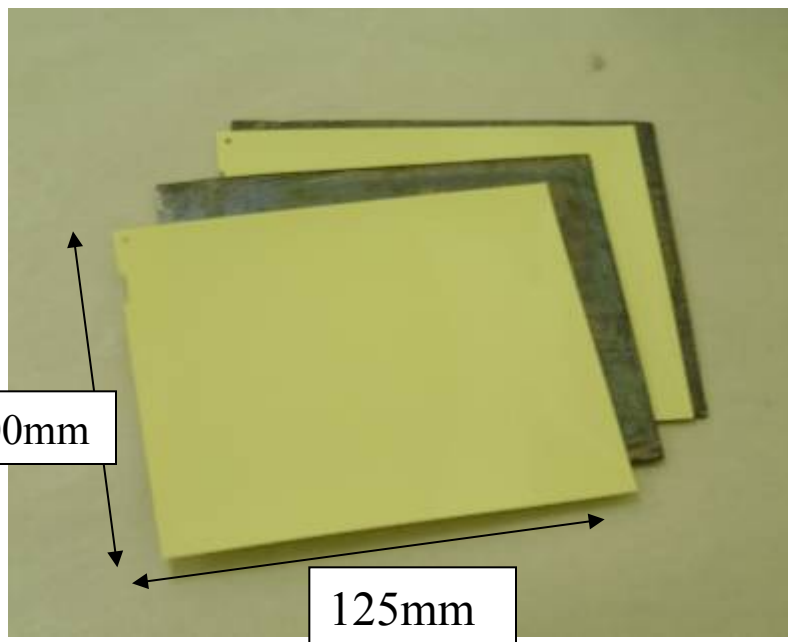
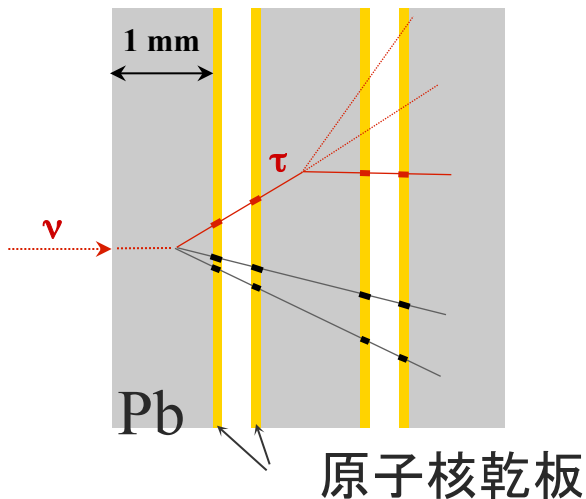
Covers the region indicated by Super-K, K2K & MINOS

For 22.5×10^{19} POT \rightarrow Expected Events 7.6 Signal, 0.8 Background

Ref: New Journal of Physics 14(2012)033017

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

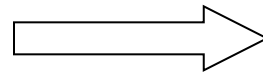
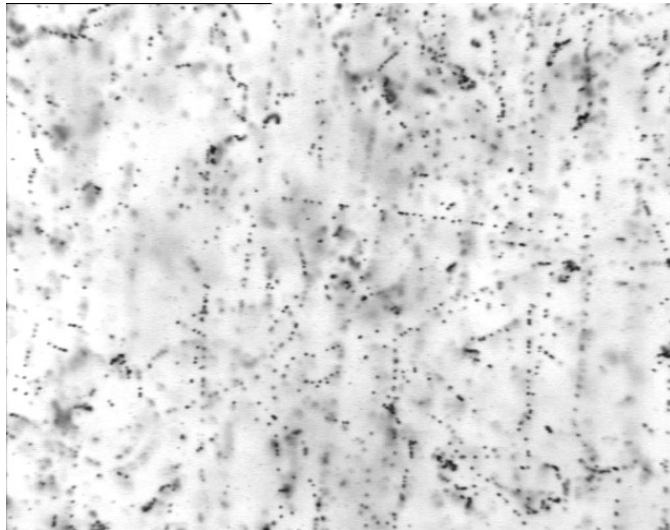
15万個で約1300トンのターゲット

930万枚のフィルム！

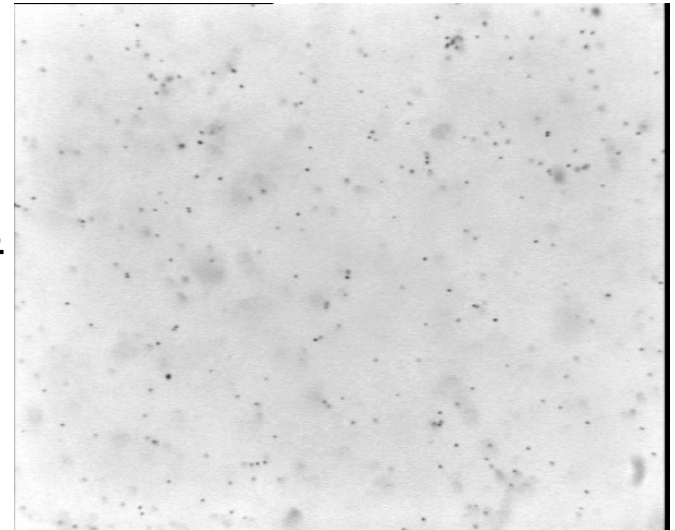
~ DONUT ECC と同構造

名古屋大学のタスク①

フィルムの準備 (リフレッシュ)



リフレッシュ条件
・T= 30°C
・RH > 95%
3日
名古屋の夏!



前

B.G. > 30tracks / mm²

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

Kamioka

岐阜県

福井

福井県

岐阜

土岐市

名古屋

愛知県

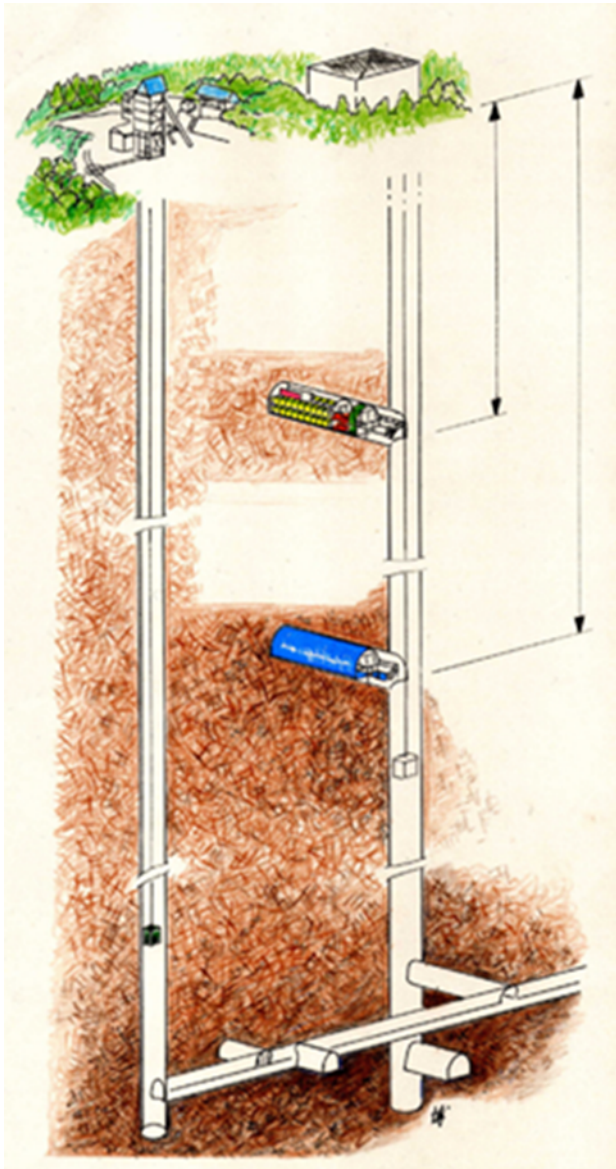
Tokyo

静岡

静岡

Kyoto
Osaka

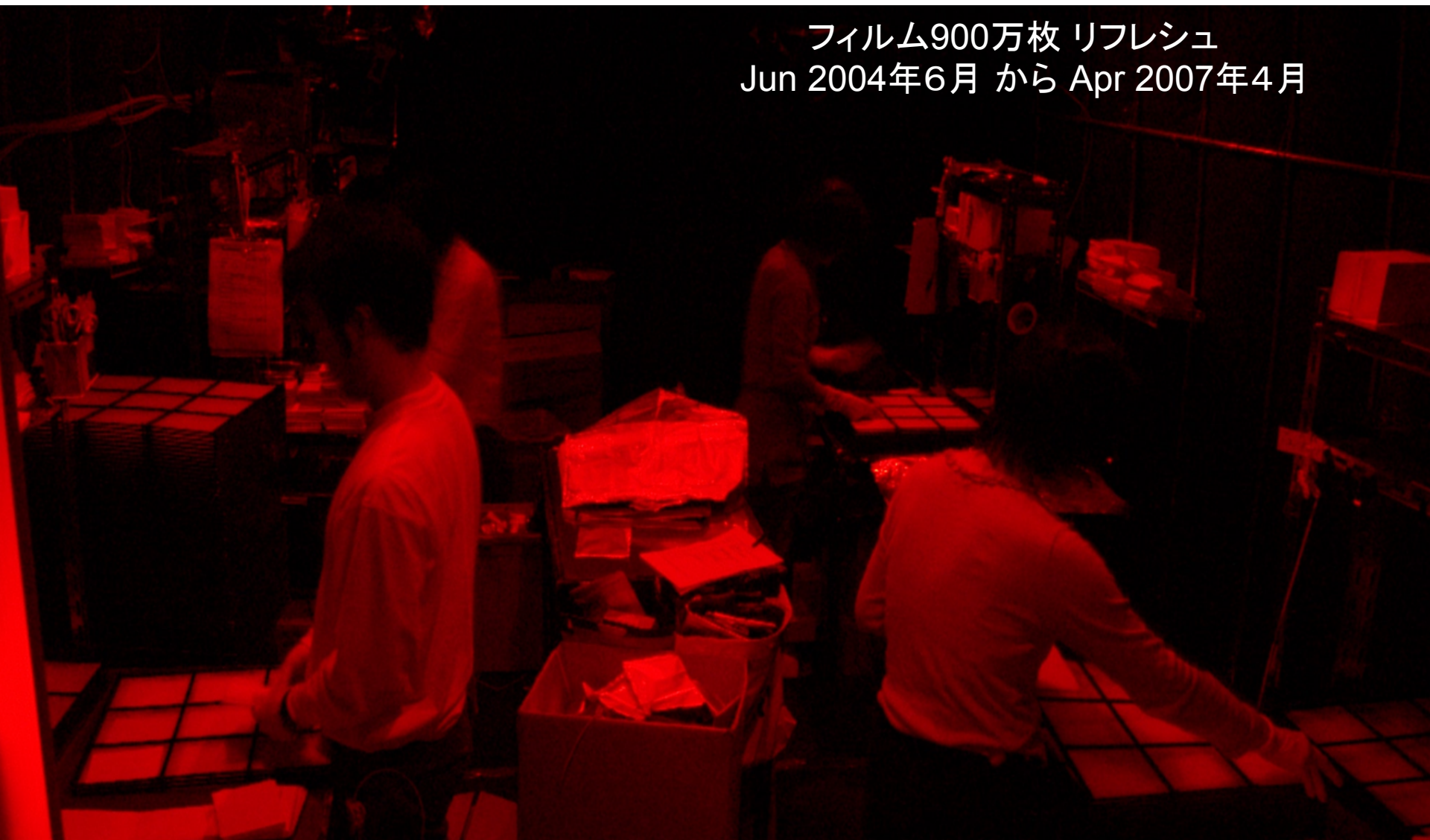
0 20 40 60 80 100 km



岐阜県瑞浪市 東濃鉾山のフィルムリフレッシュ施設 2004年1月

東濃鉾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





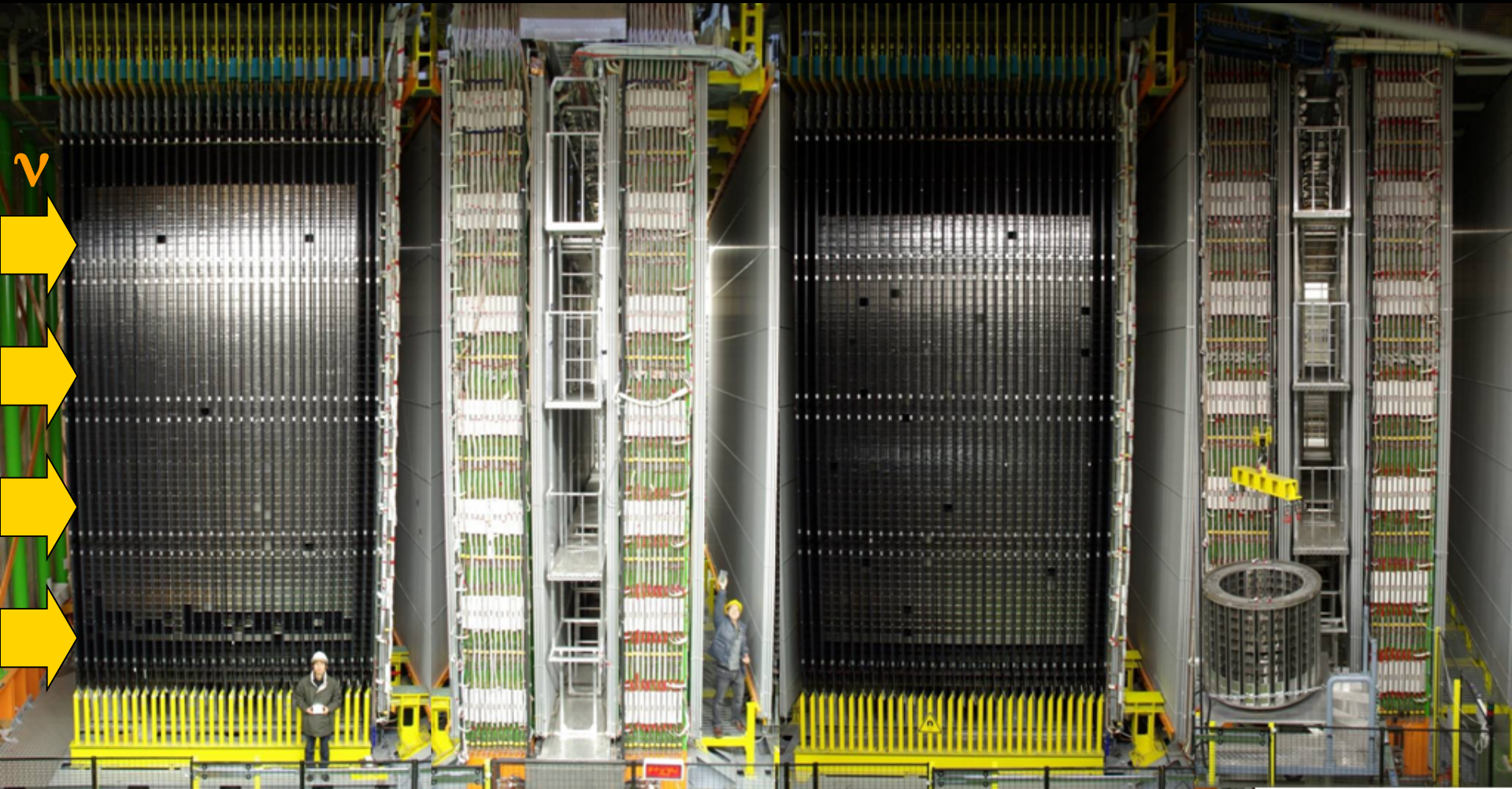
実は、第一便難破の危機をすり抜けた。

船便で名古屋からイタリアへ！



2004年12月26日 初荷を積んだ船が通行するまさにそのとき スマトラ島沖地震：M9.3
死者22万人

OPERA 検出器 @ イタリア グランサツソ 地下1400メートル
2008年ECC充填完了。



15万個の ECC:ニュートリノ反応を写すフィルムカメラ

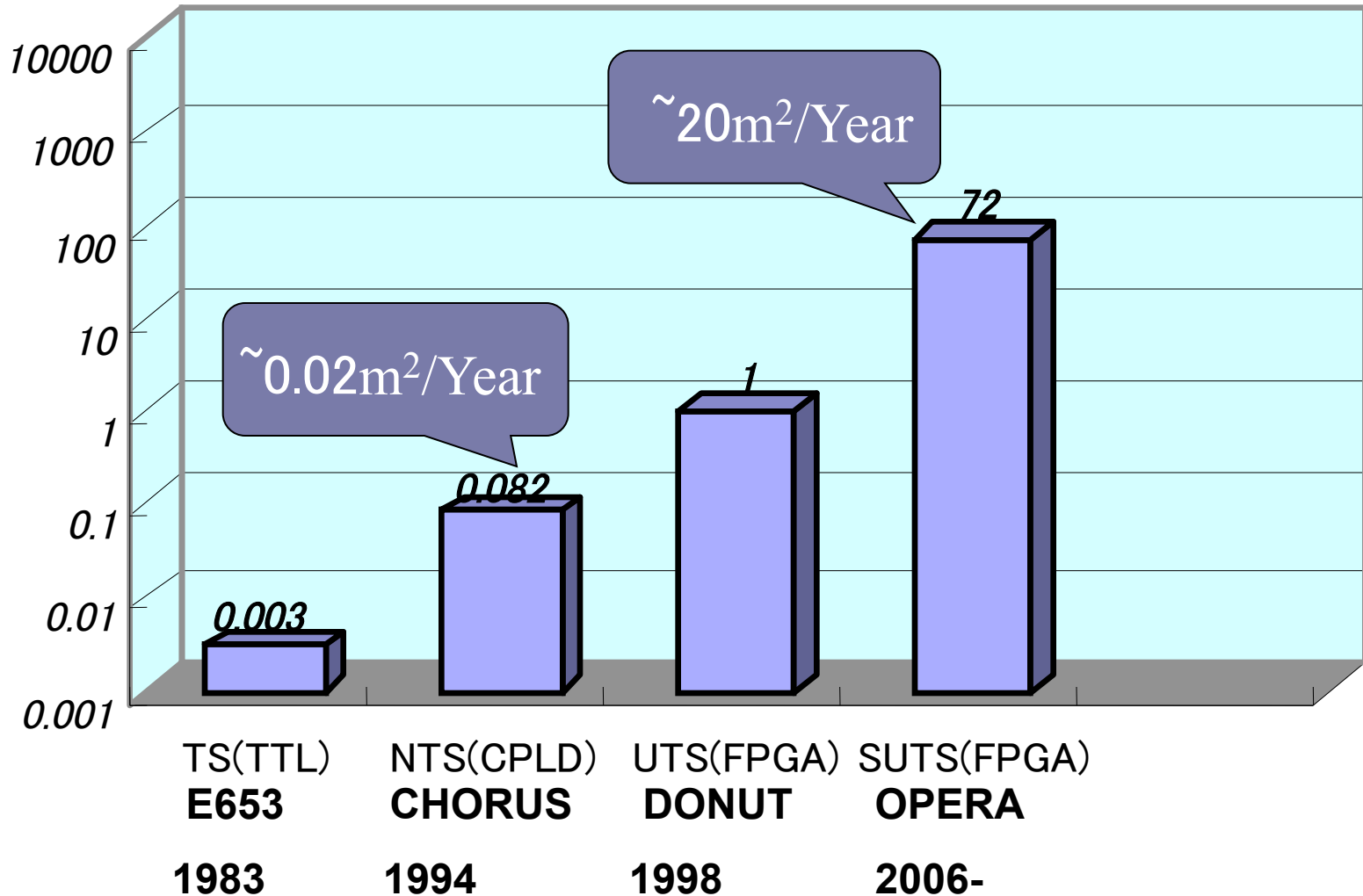
名古屋大学のタスク② スキャン＋崩壊探索

4 hour to scan full area
Of one film 10cmx10cm



DONUT時の70倍の スキャンシステムを実戦配備5台

Speed in cm²/h



Scanning Lab

大学建物の耐震工事のため2008年から
2010年まで東濃鉱山に間借り。



OTERA







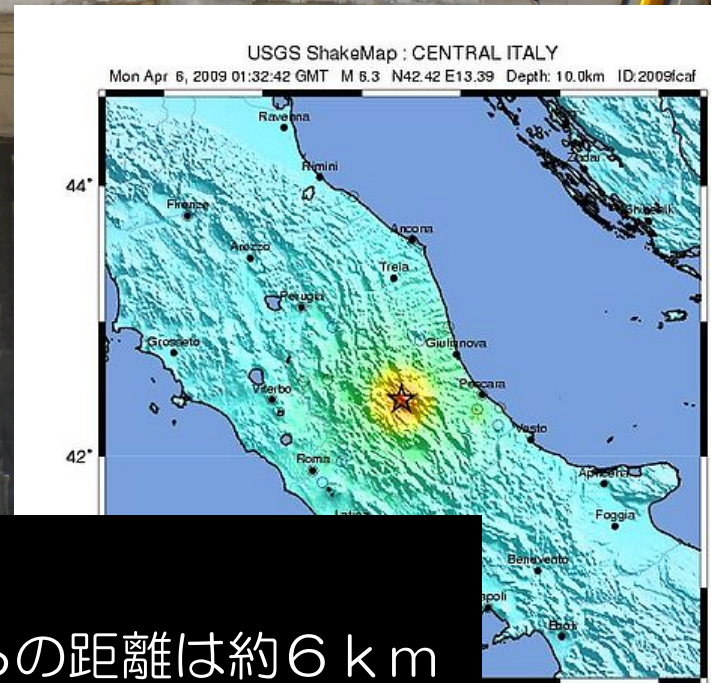
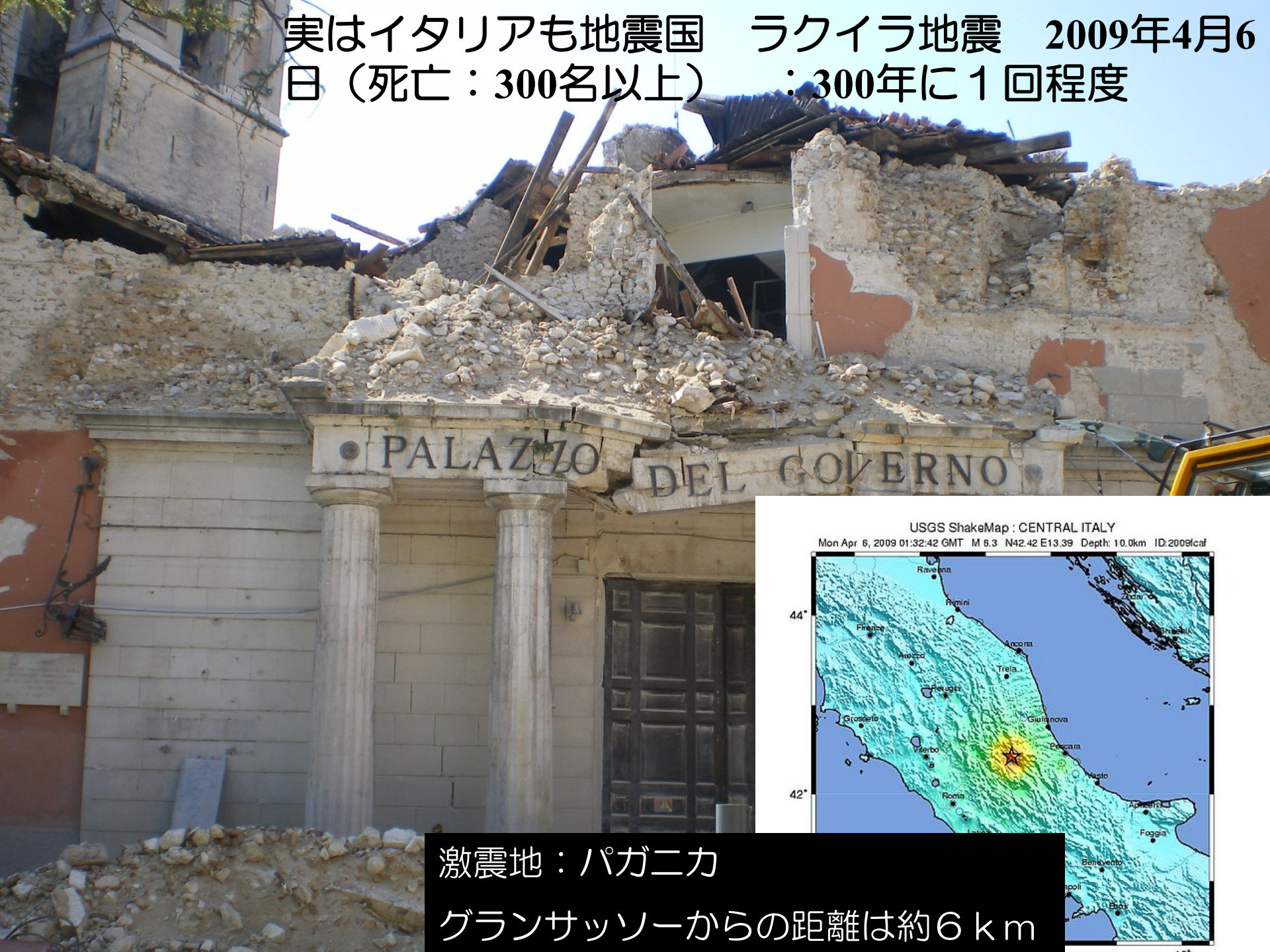


名古屋大学OPERA解析センター @ 東濃鉦山



総勢3名のスタッフ、3名のポスドク、17名の大学院生、2名の4年生

実はイタリアも地震国 ラクイラ地震 2009年4月6日（死亡：300名以上）：300年に1回程度



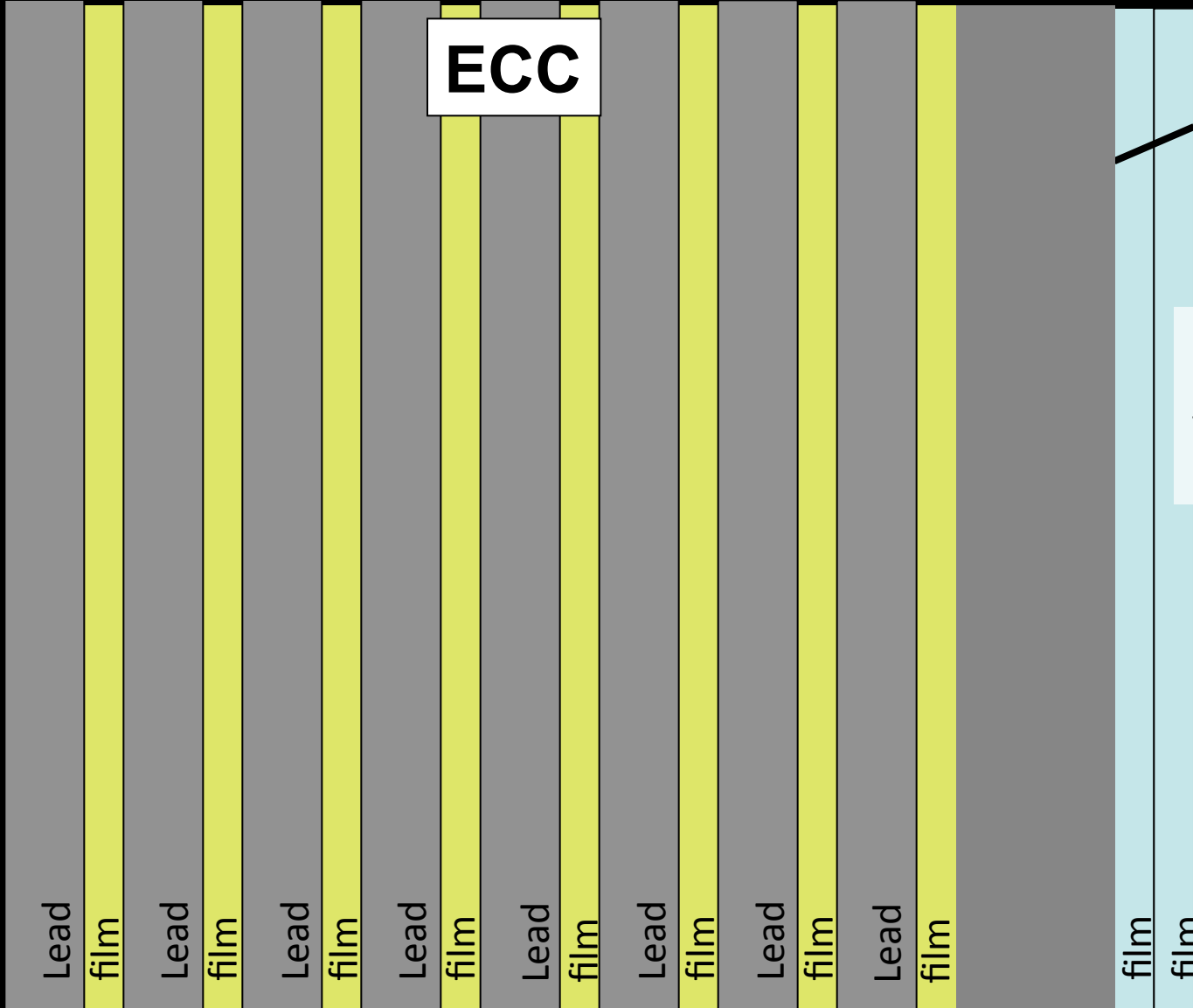
激震地：パガニカ
グランサッソーからの距離は約6 km

2011年度より名古屋大学に帰還。 全顕微鏡ステージ



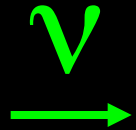
Event Location in the ECC

Changeable Sheet

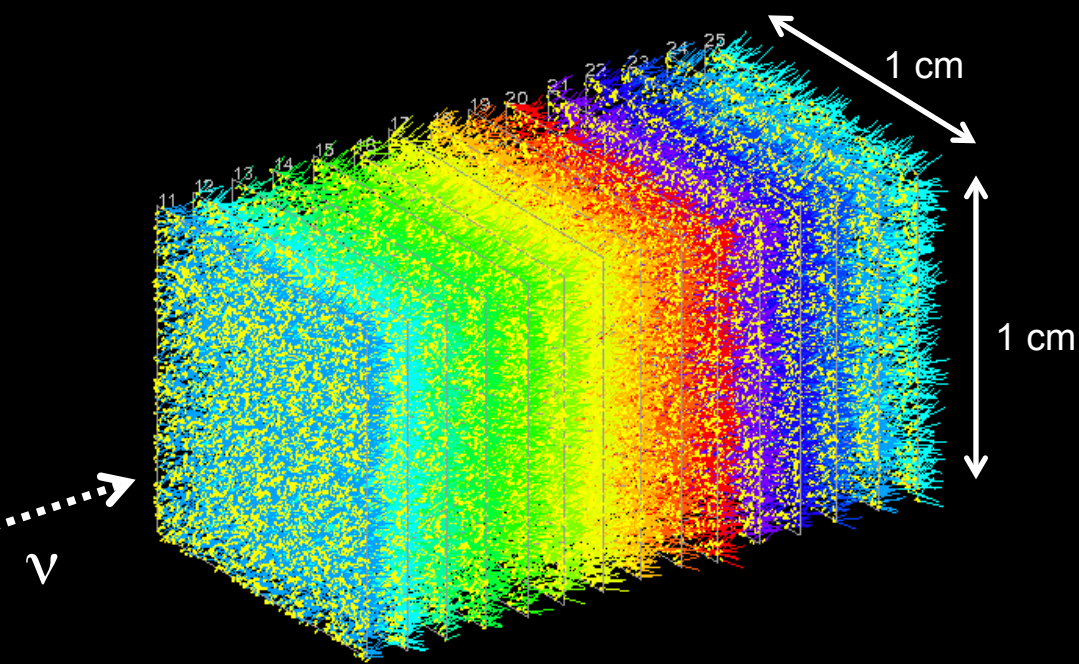


ECC

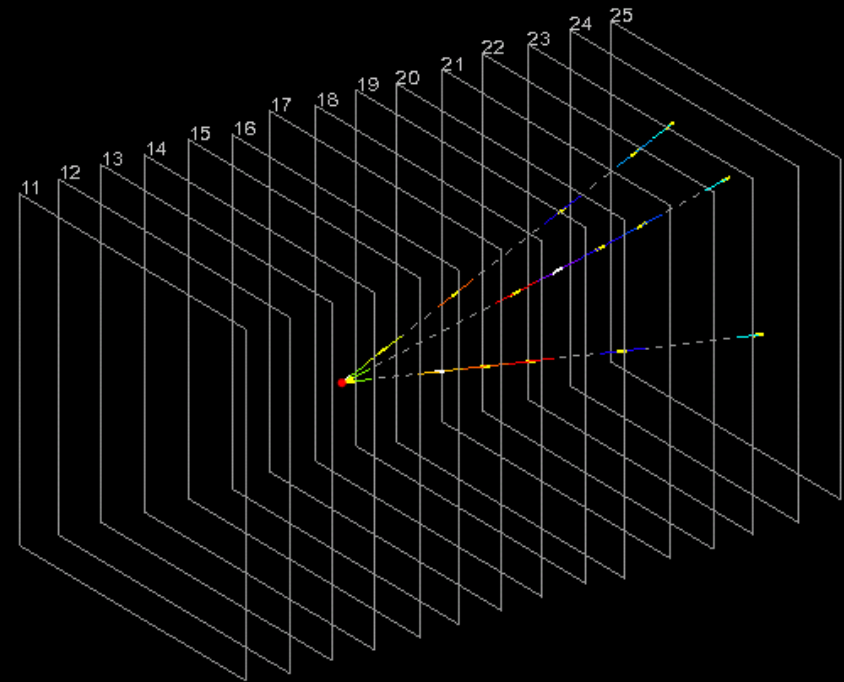
Large Area Scanning
~5cm x 5cm



Interaction Vertex confirmation & Decay search



Cloud of low energy tracks

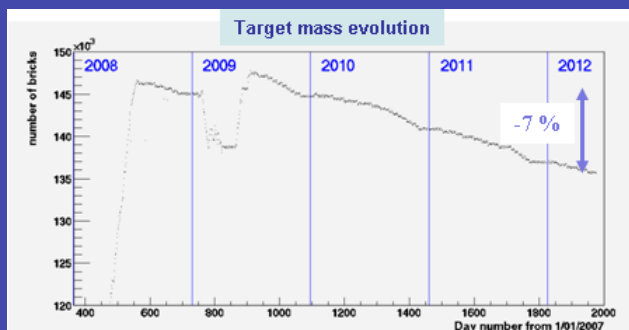
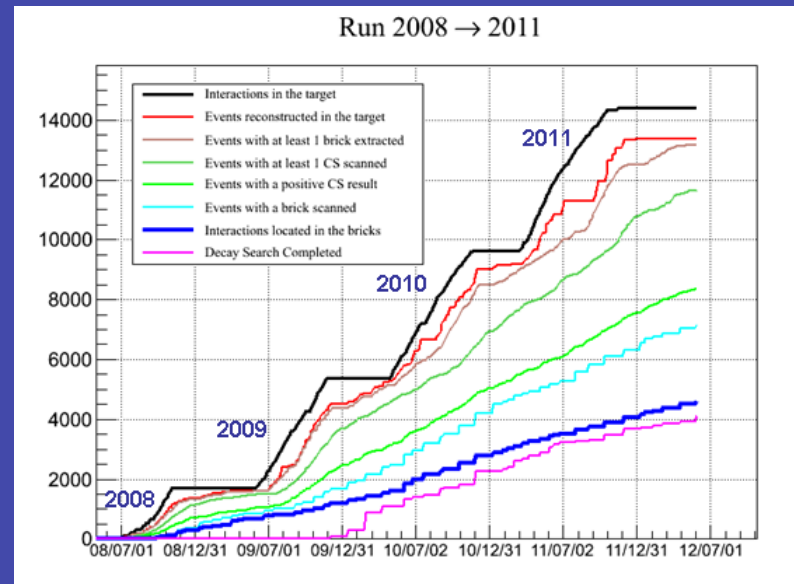


After the selection of high energy tracks connecting across the lead

Status of the experiment

Run	Protons on target	SPS efficiency	In-target events
2008	1.78×10^{19}	61%	1698
2009	3.52×10^{19}	70%	3557
2010	4.04×10^{19}	81%	3912
2011	4.84×10^{19}	78%	4210

Run 2012 in progress.
Foreseen integrated intensity
at the end of the run:
 18.9×10^{19} p.o.t.
(~ 84% of proposal)

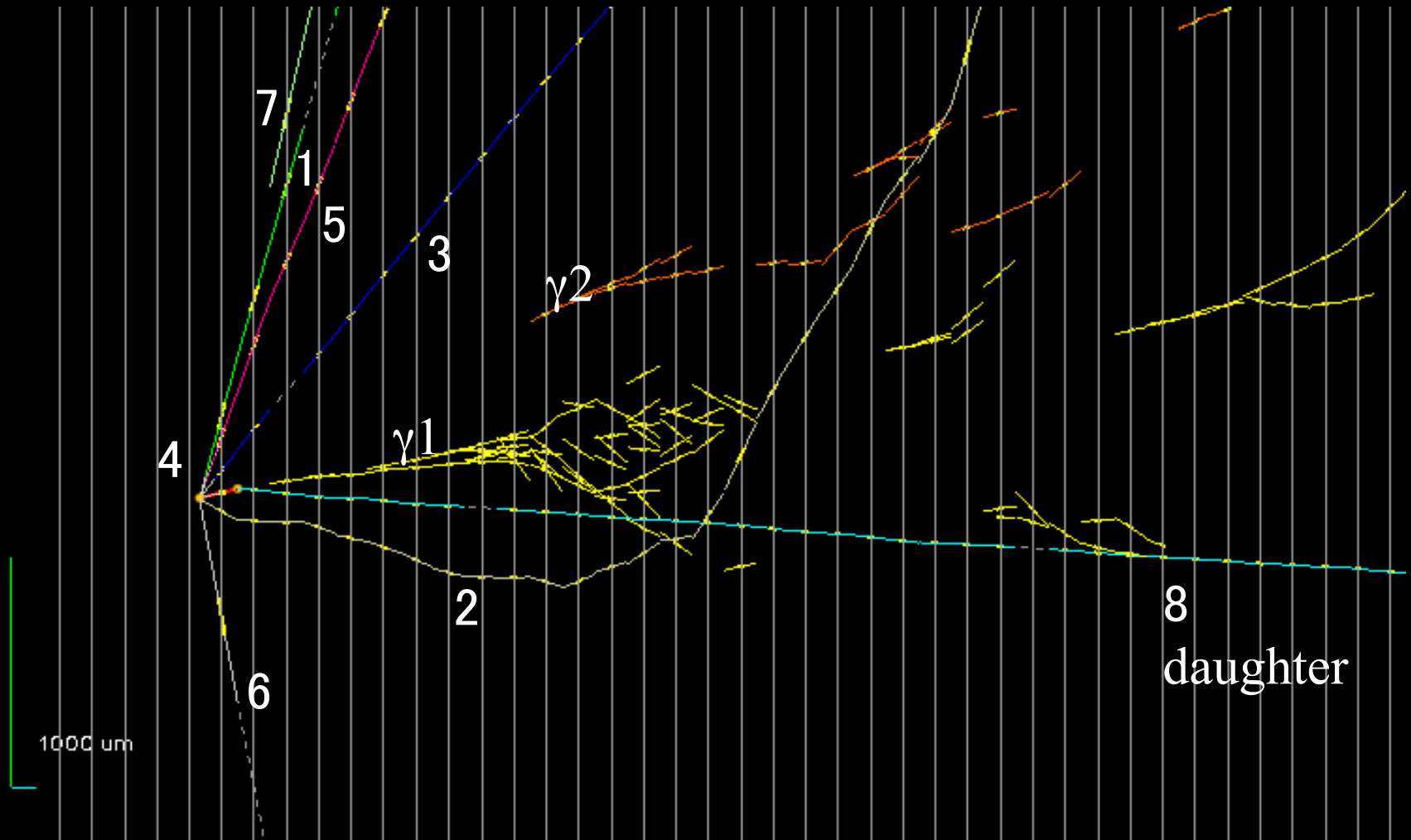


Located neutrino interactions	4611
Fully analysed events	4126
ν_τ candidate events	2

compatible with the expectations
for the analysed sample

1st ν_τ Candidate Event Reported NEUTRINO2010 by Sato

Side view



PL17

PL18

PL19

PL20

PL21

Primary vertex

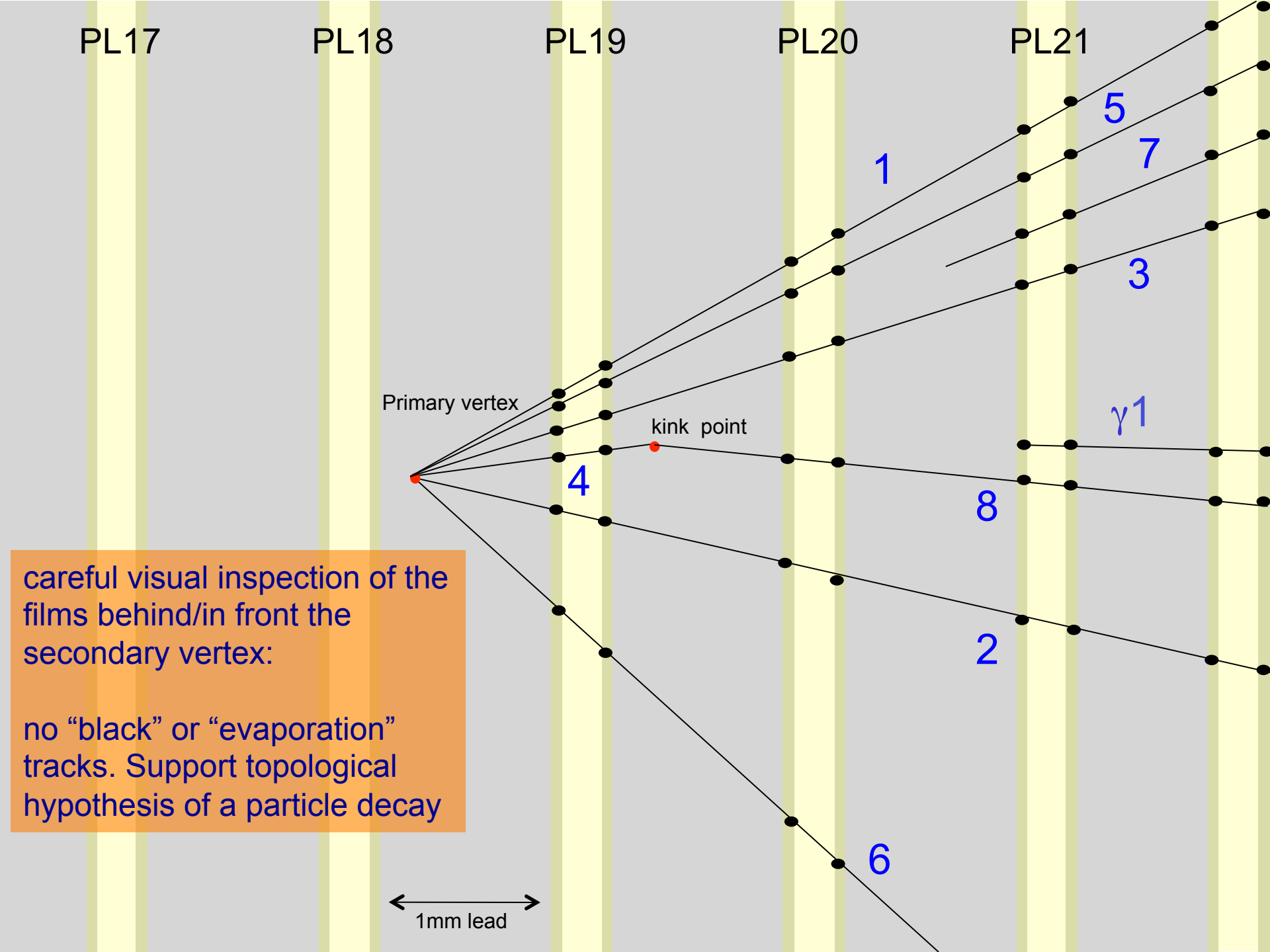
kink point

$\gamma 1$

careful visual inspection of the films behind/in front the secondary vertex:

no "black" or "evaporation" tracks. Support topological hypothesis of a particle decay

← 1mm lead →



A first ν_τ candidate event



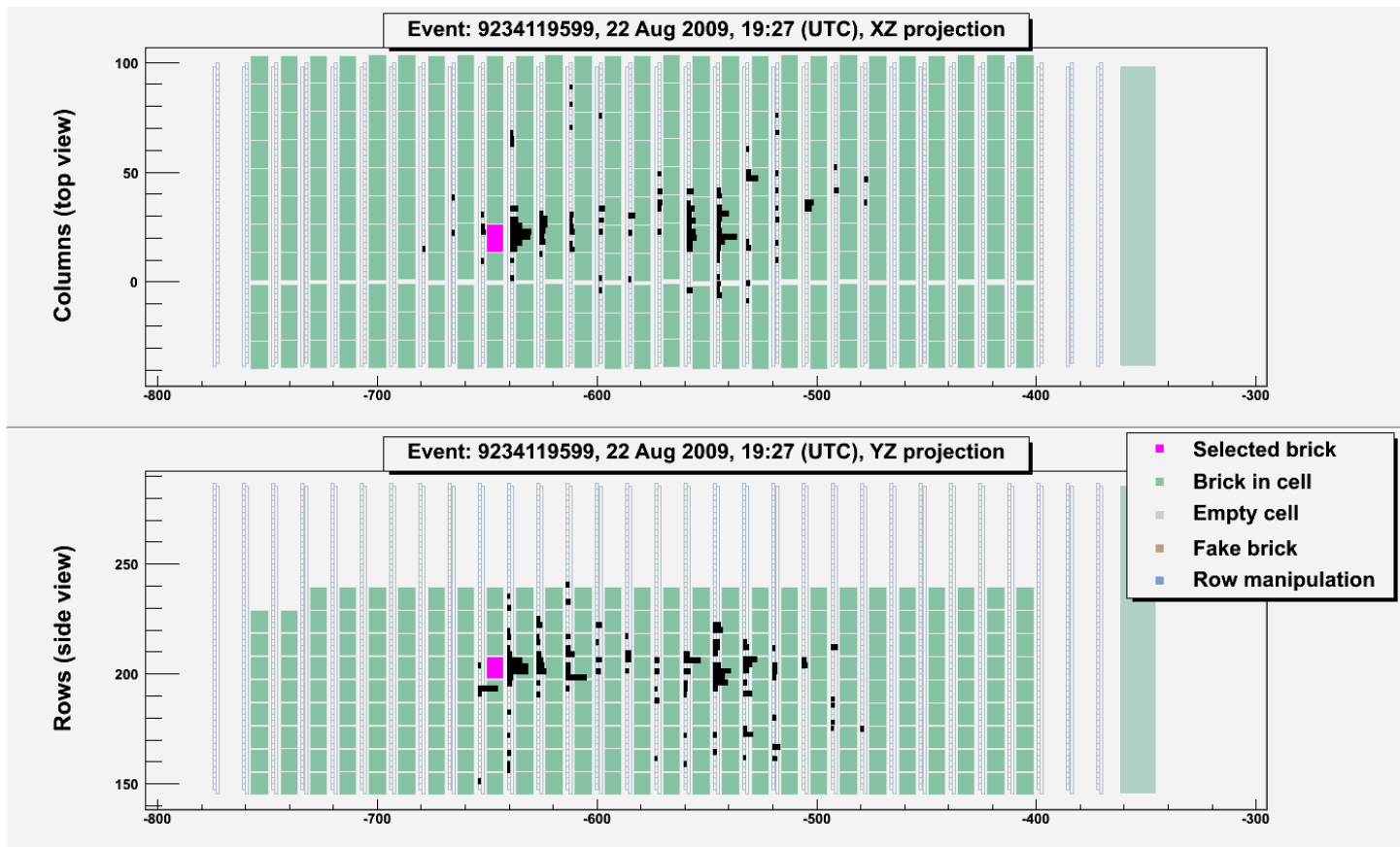
Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

Phys.Lett.B691:138-145,2010

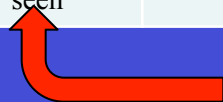


Observation of a first ν_τ candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam



Event tracks' features

TRACK NUMBER	PID	Probability	MEASUREMENT 1			MEASUREMENT 2		
			$\tan \Theta_x$	$\tan \Theta_y$	P (GeV/c)	$\tan \Theta_x$	$\tan \Theta_y$	P (GeV/c)
1	HADRON range in Pb/ em=4.1/1.2cm	Prob(μ) $\approx 10^{-3}$	0.177	0.368	0.77 [0.66,0.93]	0.175	0.357	0,80 [0.65,1.05]
2	PROTON	range, scattering and dE/dx	-0.646	-0.001	0.60 [0.55,0.65]	-0.653	0.001	
3	HADRON	interaction seen	0.105	0.113	2.16 [1.80,2.69]	0.110	0.113	1,71 [1.42,2.15]
4 (PARENT)			-0.023	0.026		-0.030	0.018	
5	HADRON: range in Pb/ em=9.5/2.8cm	Prob(μ) $\approx 10^{-3}$	0.165	0.275	1.33 [1.13,1.61]	0.149	0.259	1,23 [0.98,1.64]
6	HADRON: range in Pb/ emul=1.6/0.5 cm	Prob(μ) $\approx 10^{-3}$				0.334	-0.584	0,36 [0.27,0.54]
7	From a prompt neutral particle		0.430	0.419	0.34 [0.22,0.69]	0.445	0.419	0.58 [0.39,1.16]
8 (DAUGHTER)	HADRON	interaction seen	-0.004	-0.008	12 [9,18]	-0.009	-0.020	



muonless event (favored hypothesis)

ビーム軸から見て
ハドロンシステムと親(τ)のなす角 ϕ

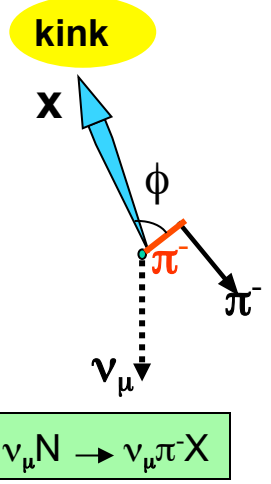
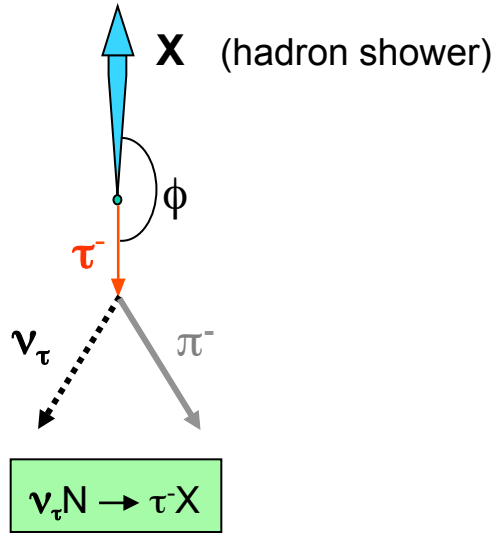
Signal :
 $\phi = 180^\circ$

BG:
small ϕ

シグナル
親とハドロンシステムが反対向き。

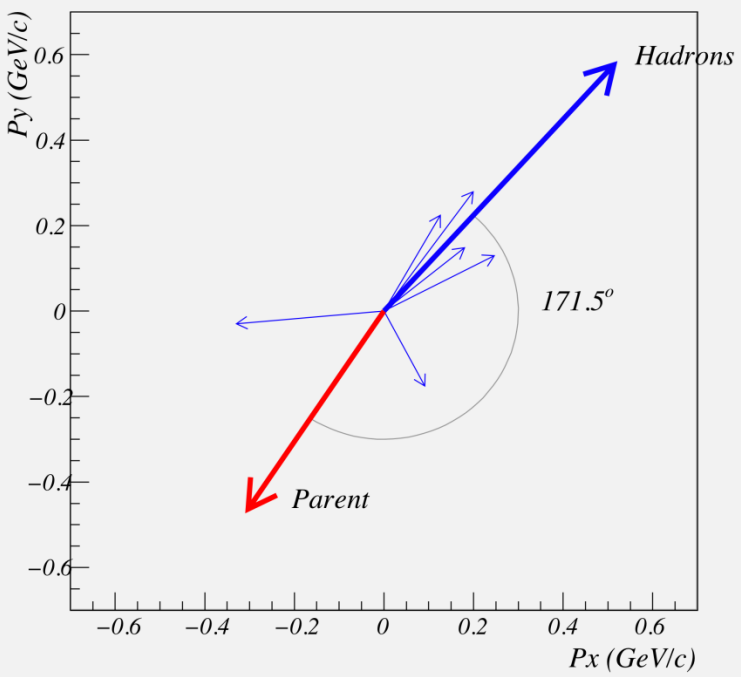
バックグラウンド
もともとハドロンシステムにいた
ハドロンが1本(親)が折れ曲がった
為に(親)とハドロンシステムは同じ方向。

τ -decay

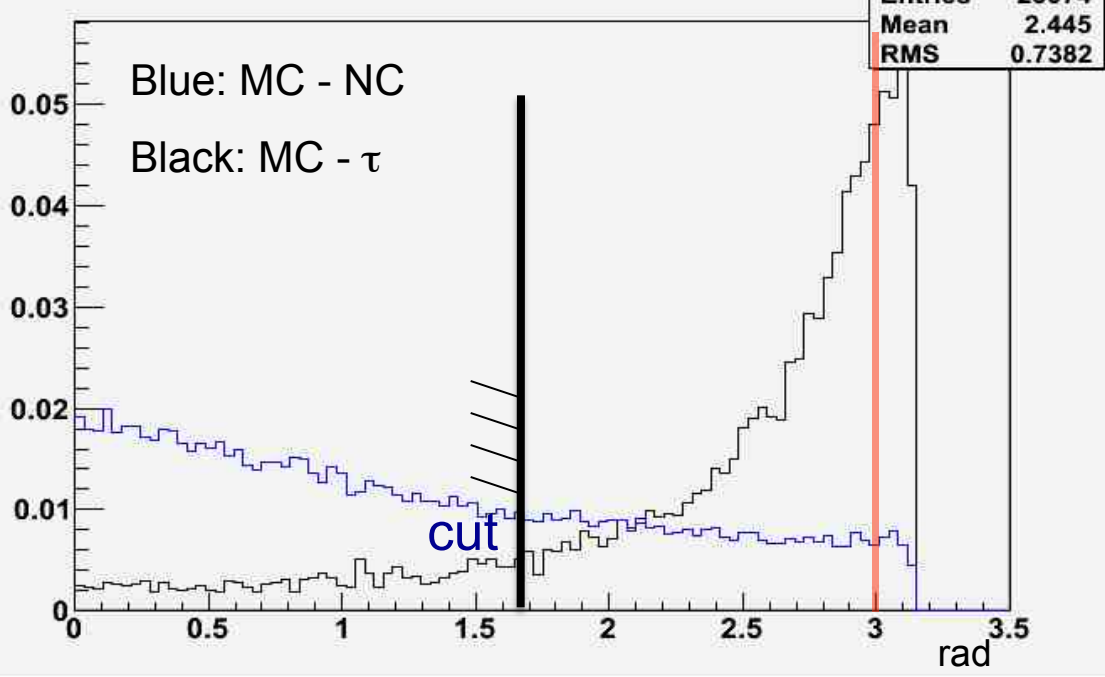


この候補は良い顔つきをしている！

Transverse momentum



Sm + Ang + Pho + Finite - Angle between MTH(All Charged +Pho+ cut) & Had



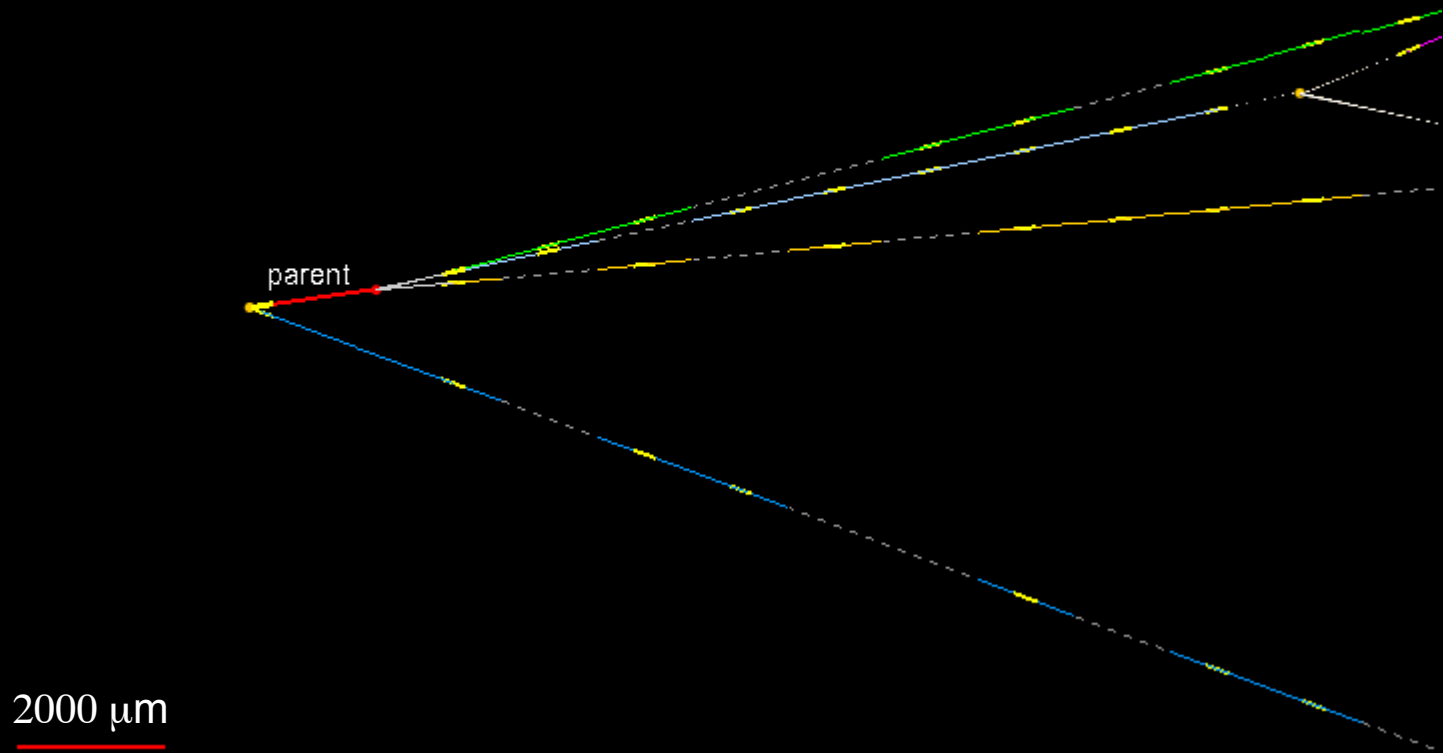
Kinematical variables

Satisfying all selection criteria for hadronic kink → first ν_τ candidate !

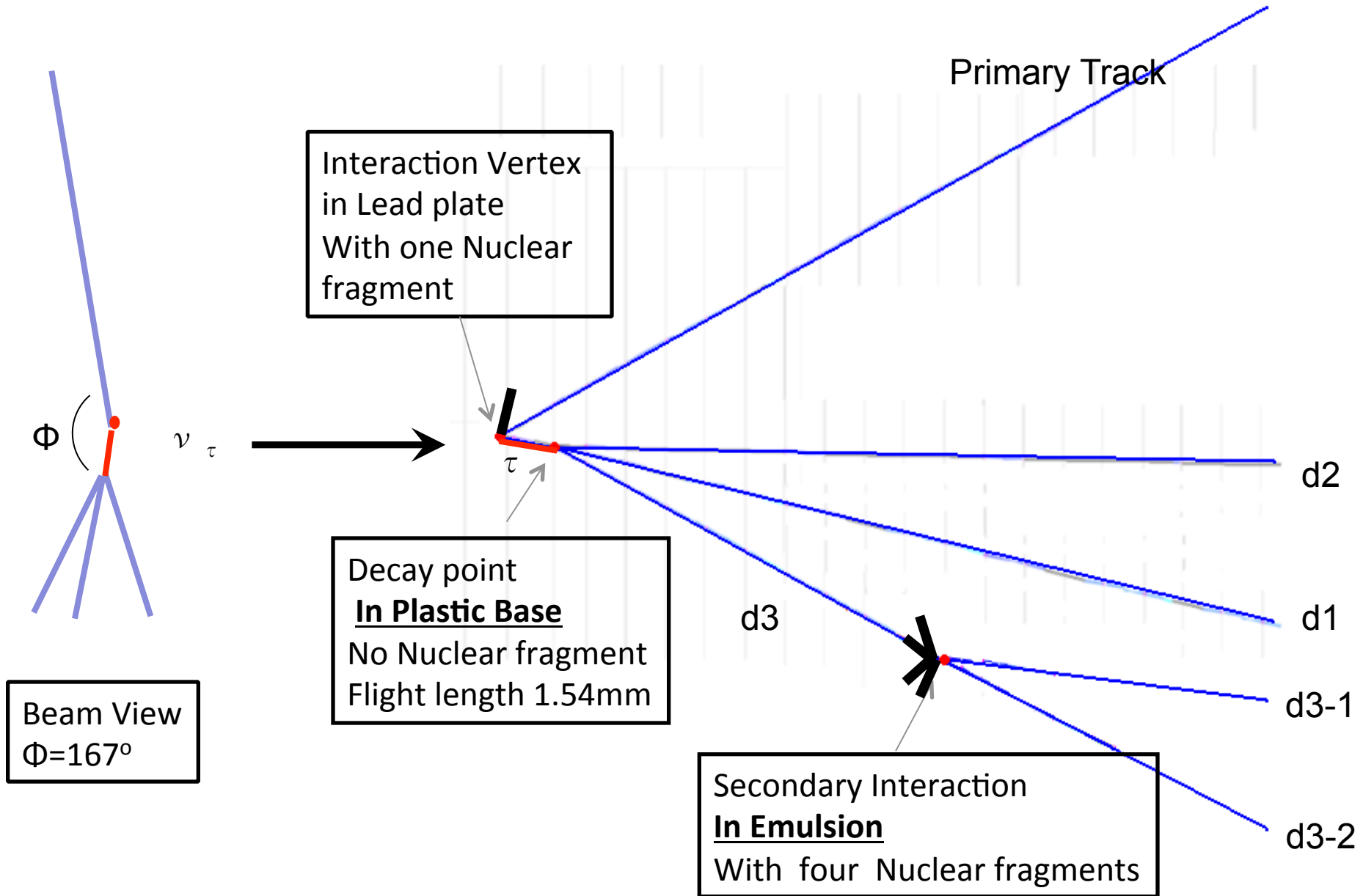
$\gamma 1$ and $\gamma 2$ are both assumed as attached to 2^{nd} vertex

VARIABLE	AVERAGE	Selection criteria
kink (mrad)	41 ± 2	>20
decay length (μm)	1335 ± 35	within 2 lead plates
P daughter (GeV/c)	12^{+6}_{-3}	>2
Pt (MeV/c)	470^{+230}_{-120}	>300 (γ attached)
missing Pt (MeV/c)	570^{+320}_{-170}	<1000
ϕ (deg)	173 ± 2	>90

2nd ν_τ Candidate Event reported NEUTRINO2012 by Nakamura



Schematics of the event



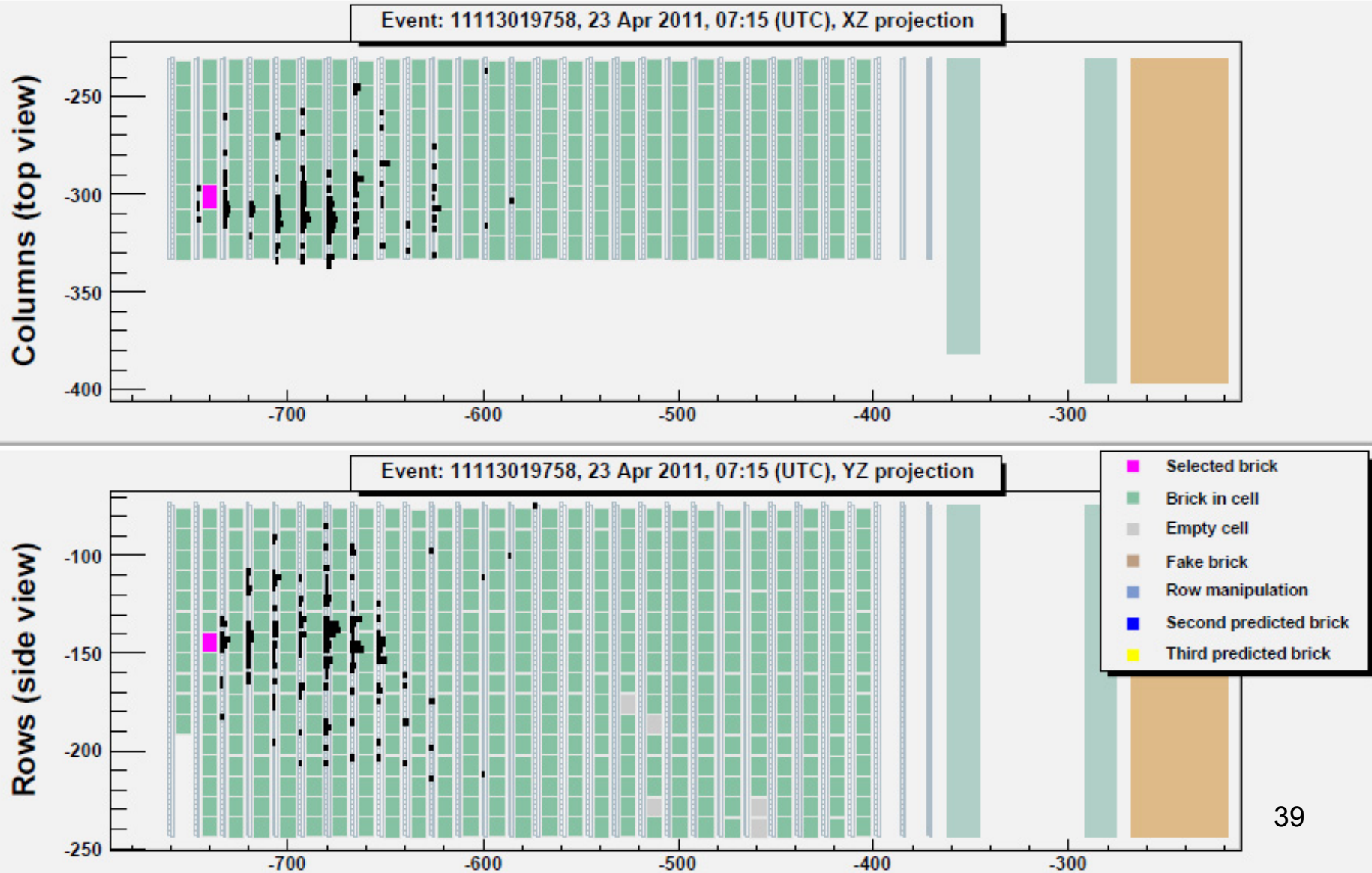
Momentum measurement and particle identification of event tracks

Track#	Momentum (1σ interval) [GeV/c]	Particle ID	Method / Comments
Primary	2.8 (2.1-3.5)	Hadron	<ul style="list-style-type: none"> • Momentum-Range Consistency Check Stops after 2 brick walls. Incompatible with muon (26~44 brick walls)
d1	6.6 (5.2 - 8.6)	Hadron	<ul style="list-style-type: none"> • Momentum-Range Consistency Check
d2	1.3 (1.1 -1.5)	Hadron	<ul style="list-style-type: none"> • Momentum-Range Consistency Check
d3	2.0 (1.4 - 2.9)	Hadron	Interaction in the Brick @ 1.3cm downstream

Independent momentum measurements were carried out in two different labs.

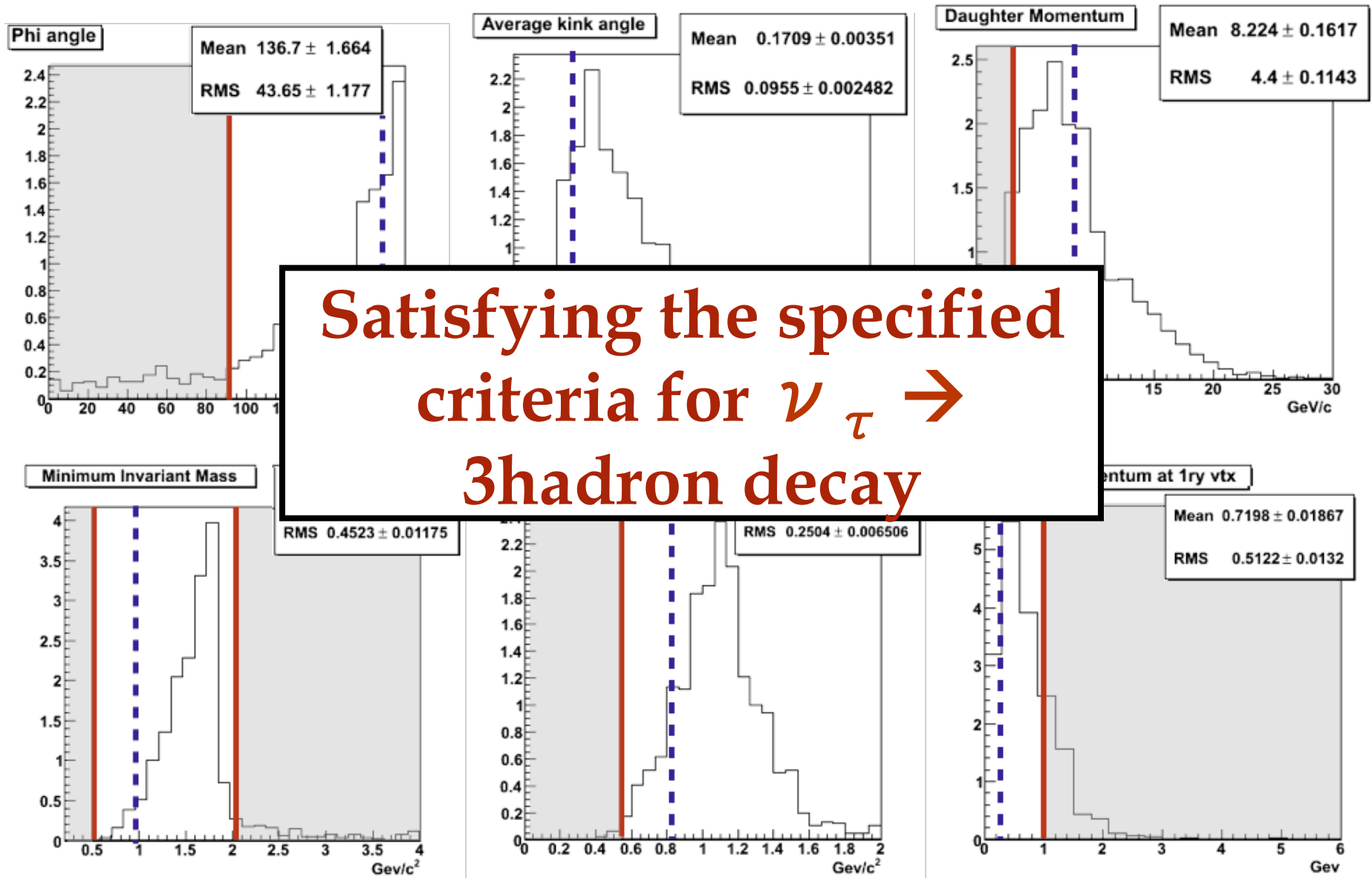
Electronic detector event display

Zoom



Kinematics of the New Candidate Event

candidate
cut



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillation search: summary

Run	Status	Number of analysed events	Expected ν_{τ} events (Preliminary)	Observed ν_{τ} candidate events	Expected BG (Preliminary)
2008 - 2009	Finished	2783		1	
2010 - 2011	Analysis in progress	1343		1	
2012	Started				
Total		4126	2.1	2	0.2

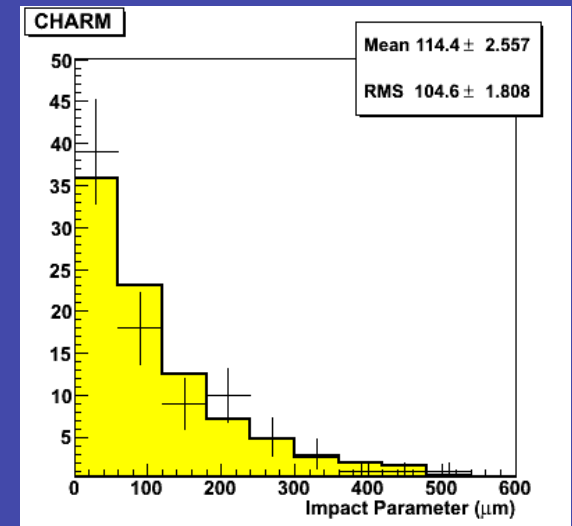
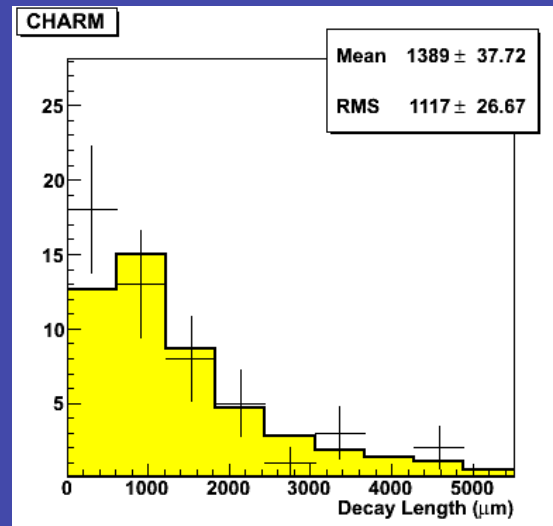
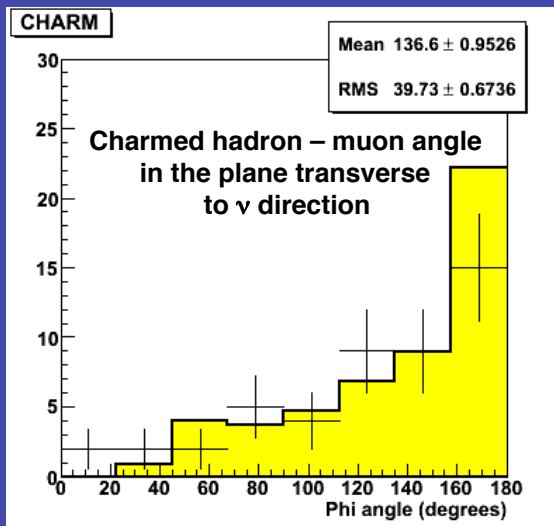
Preliminary

P-value = 1.8%
Significance = 2.1 sigma

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ oscillation search: control sample

Control sample for ν_{τ} detection efficiency:

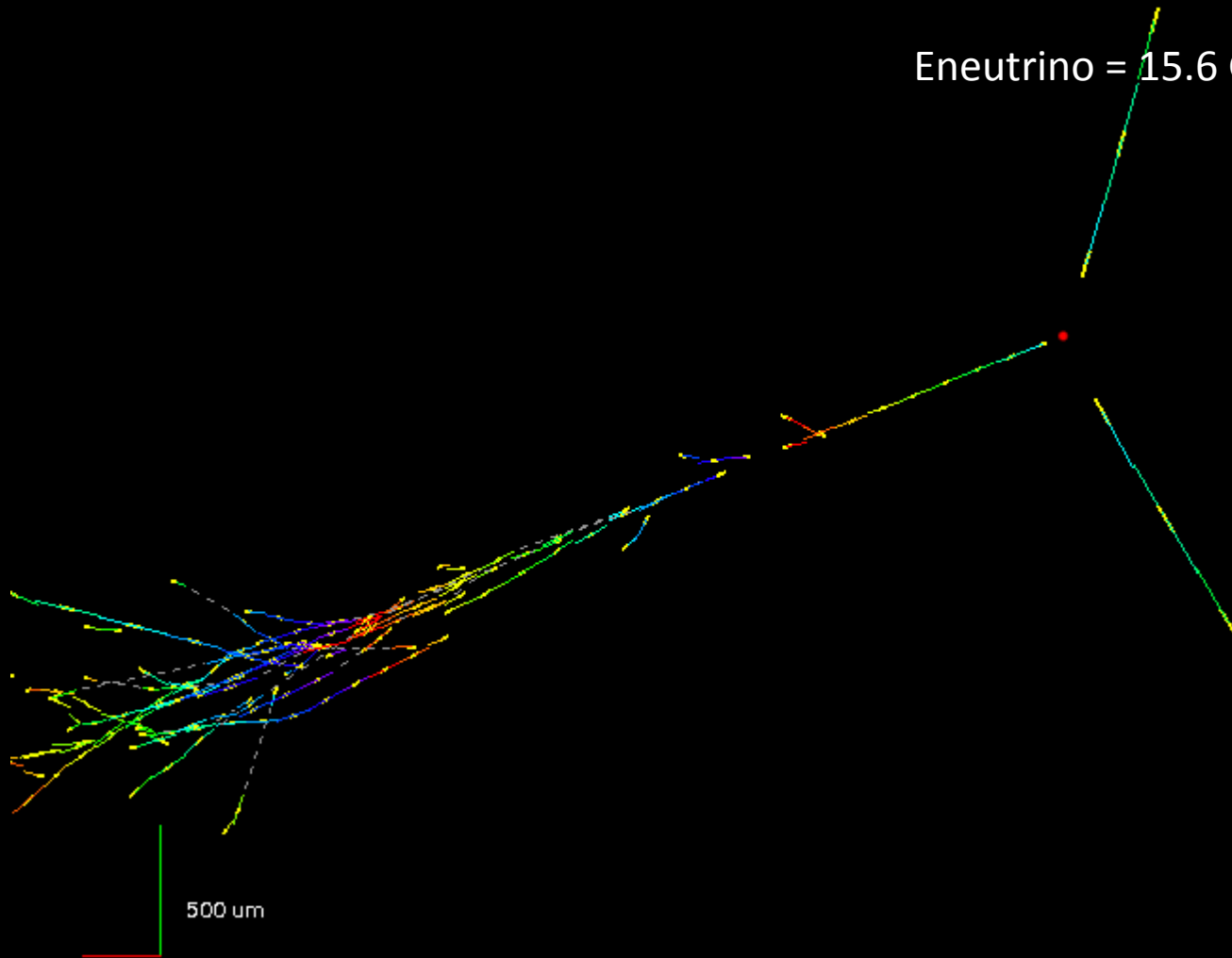
charm production and decay
(flight length and decay topologies
similar to those of the τ lepton)



Expected events: 51 ± 7.5
Observed events: 49

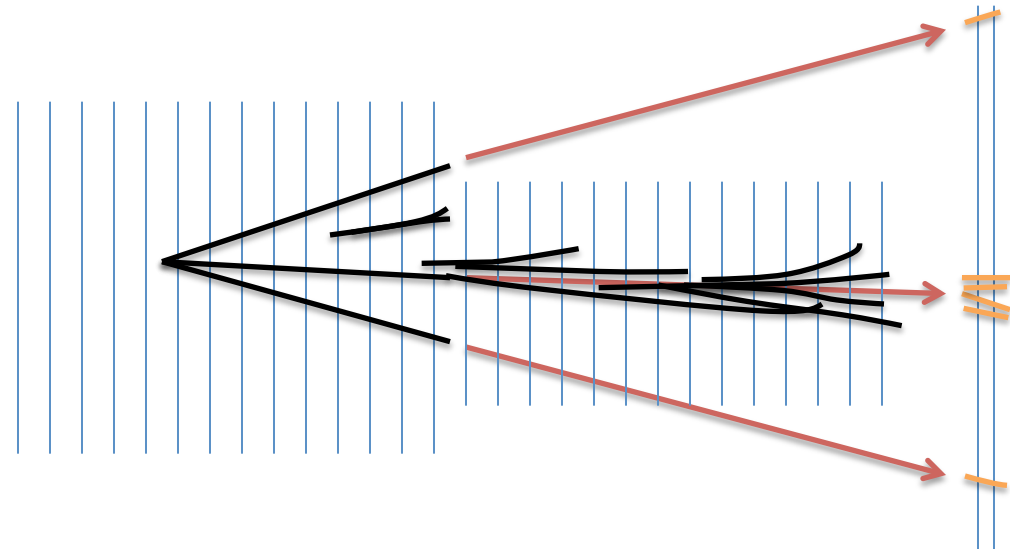
ν_e search

Eneutrino = 15.6 GeV



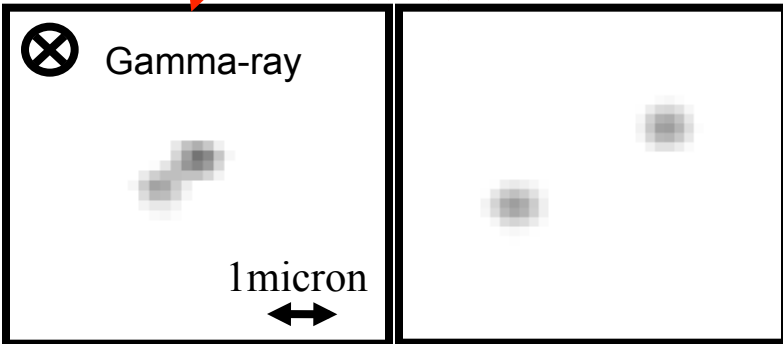
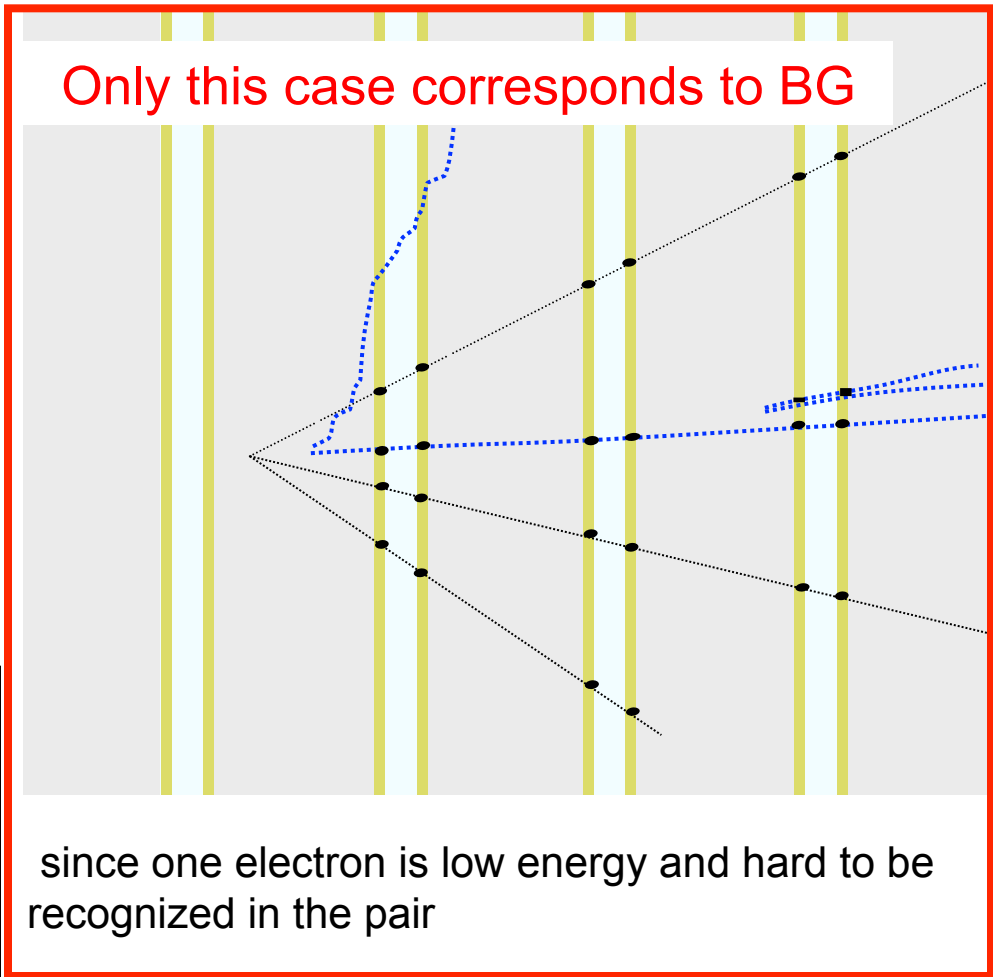
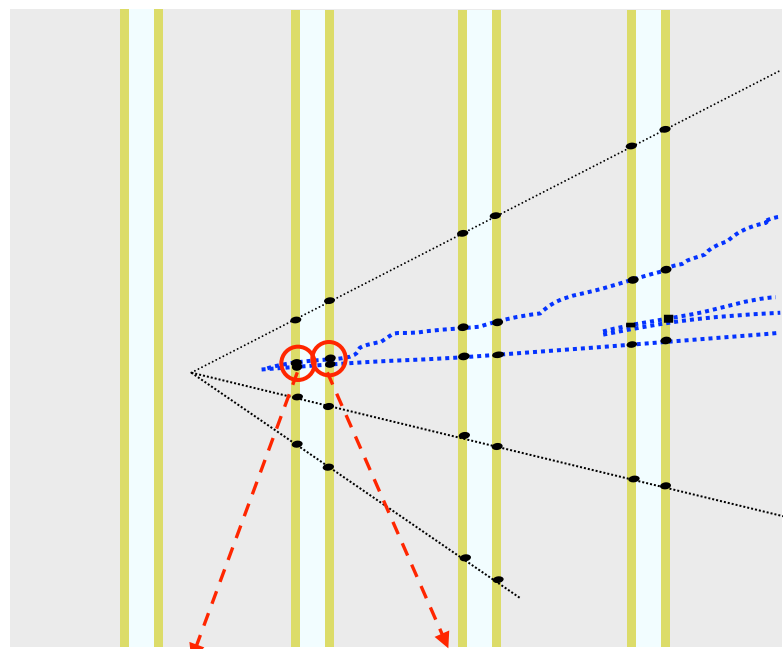
Systematic $\bar{\nu}_e$ search in 2008 and 2009 located events

- Event sample :
 - 505 NC-like events in 2008 and 2009
- For each located event
 - Extrapolate 1ry tracks to CS.
 - Search shower on CS
 - If shower-like tracks are found on CS, open additional volume.



- As a result
 - 96 are selected
 - Total **19** $\bar{\nu}_e$ confirmed

Background from ν_μ NC ($\pi^0 \rightarrow 2\gamma$)

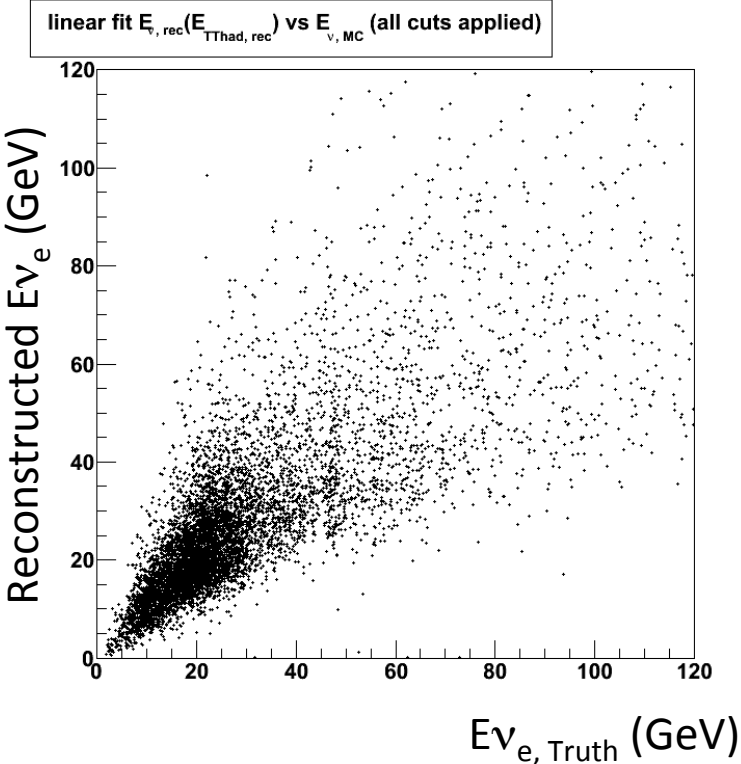
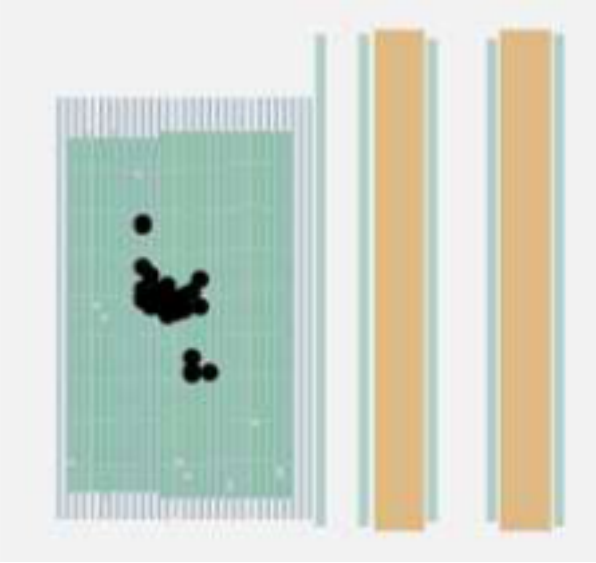


A close-up of an electron pair

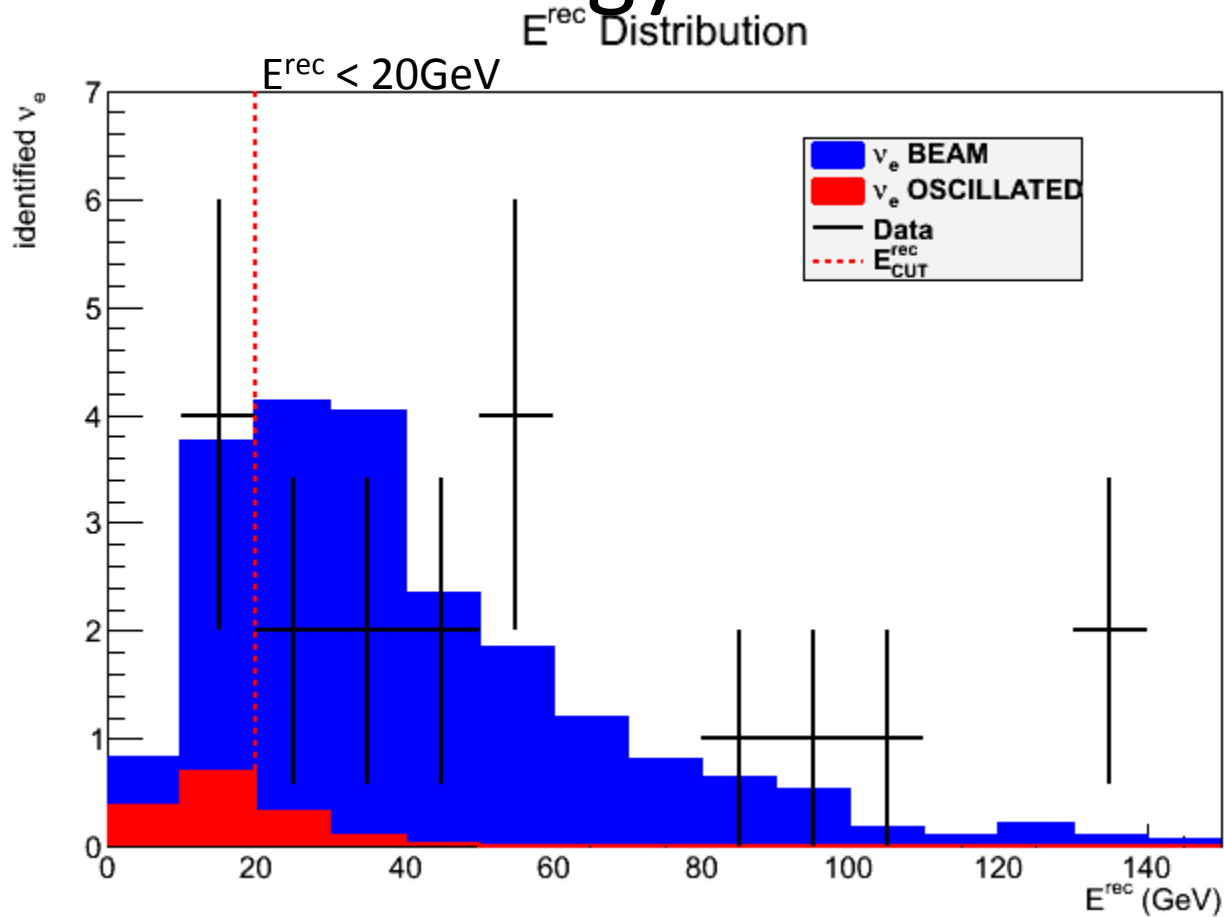
BG in 2008+2009 statistics : **0.16** events

Neutrino energy reconstructed by electronic detectors

Calorimetric energy measurement



Event energy distribution



Expected events: oscillated ν_e 1.5, beam ν_e BG 19.2.

Observed ν_e : 19 events

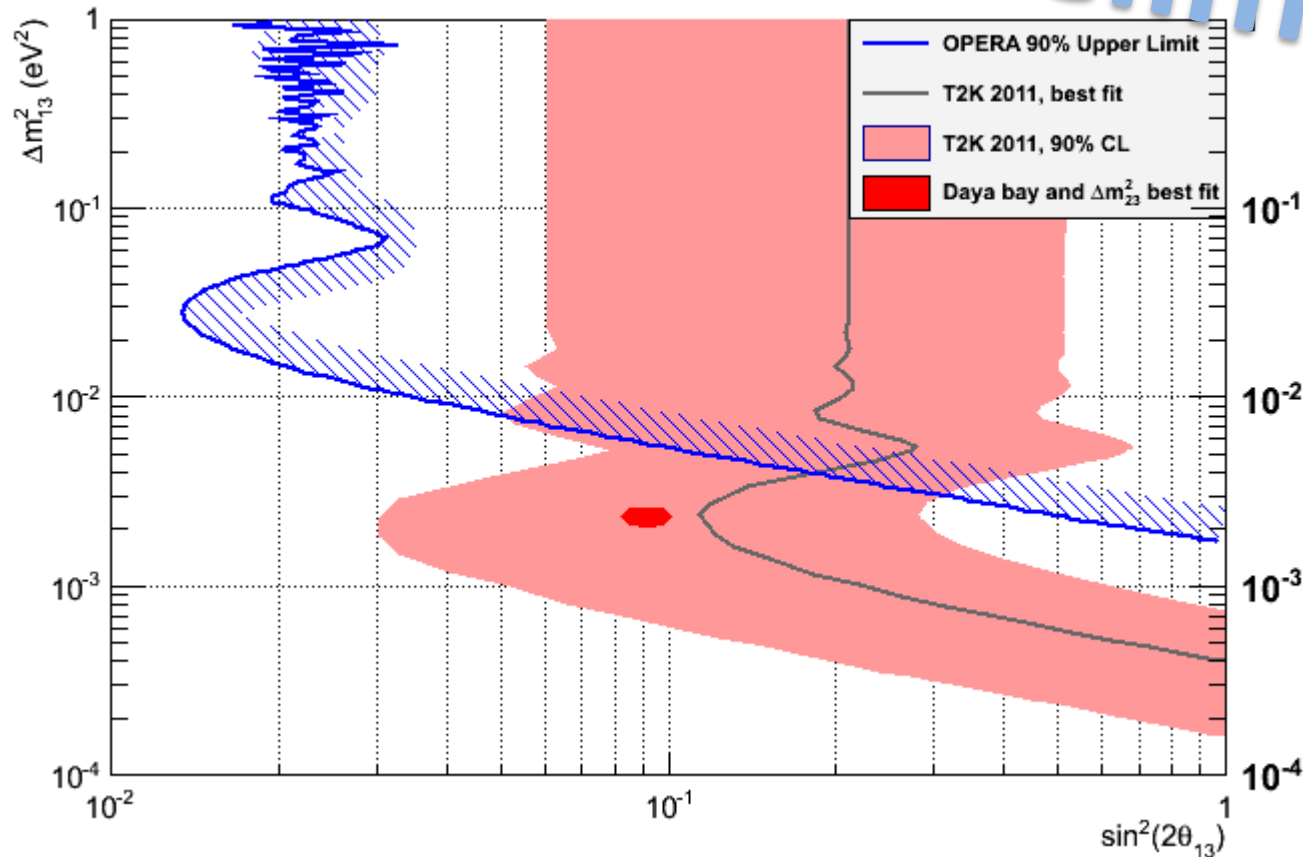
After low-energy selection ($E^{\text{rec}} < 20\text{GeV}$)

Expected events: **oscillated 1.1**, **beam ν_e BG 3.7**

Observed ν_e : **4 events.**

OPERA $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ oscillation result

Preliminary



$$\Delta m_{23}^2 = 2.45 \text{E-}3$$
$$\text{Sin}^2 \theta_{23} = 0.51$$

- 1) Statistics will be Increased x 3
- 2) Improvement of the efficiency

修士論文(14/19)・博士論文(7/13)

2011年度

- ・ 修士論文 ニュートリノ振動実験OPERAにおけるCS解析 (小木曾 康弘)
- ・ 修士論文 ニュートリノ振動実験OPERAにおけるCSでの飛跡選り出し手法の研究 (大村 拓也)

2010年度

- 博士論文 原子核乾板による宇宙ガンマ線観測のための研究開発 (高橋 覚)
- 博士論文 ニュートリノ振動実験 OPERA における ECC のニュートリノ反応解析と振動で出現した $\nu\tau$ 事象 (野々山 芳明)
- 博士論文 暗黒物質の方向性検出に向けた高分解能原子核乾板技術の開発研究 (中 竜大)
- 博士論文 飛跡の精密ナビゲーション手法の開発とニュートリノ振動実験 OPERA への適用 (吉岡 哲平)
- ・ 修士論文 OPERA実験におけるECC中でのニュートリノ反応点の探索 (鈴木 和也)
- ・ 修士論文 ニュートリノ振動実験OPERAにおける核破砕片の基礎研究とその活用 (石黒 勝己)
- ・ 修士論文 OPERA実験における反応点探索の研究 (小柴 信一郎)
- ・ 修士論文 ニュートリノ振動実験OPERAにおけるECC内のガンマ線サーチ (中塚 裕司)

2009年度

- 博士論文 超高速原子核乾板自動飛跡読み取り装置 S-UTS の開発とその基本特性 (森島 邦博)
- 博士論文 原子核乾板の長期間特性 (長縄 直崇)
- 博士論文 $\nu\mu \rightarrow \nu\tau$ 直接検出による $\nu\mu \rightarrow \nu\tau$ ニュートリノ振動実験のニュートリノ反応点検出 (福田 努)
- ・ 修士論文 ニュートリノ振動実験OPERAの解析-2009年度RUN CSの解析- (酒谷 佳紀)

2008年度

- 博士論文 OPERA実験におけるニュートリノ反応点探索の為に超低バックグラウンド・インターフェース検出器の開発と実用 (有賀 昭貴)
- 博士論文 タウニュートリノ荷電カレント反応断面積の測定 (古川 智子)
- 博士論文 写真乾板を用いたMeV電子検出技術の開発 (宮本 成悟)
- ・ 修士論文 宇宙線ミュオンを用いた高炉内部状態の測定 (平 義隆)
- ・ 修士論文 ニュートリノ振動実験OPERAの解析 (北川 暢子)
- ・ 修士論文 OPERA実験におけるリアルタイム大量処理のためのソフトウェアの開発 (駒谷 良輔)

2007年度

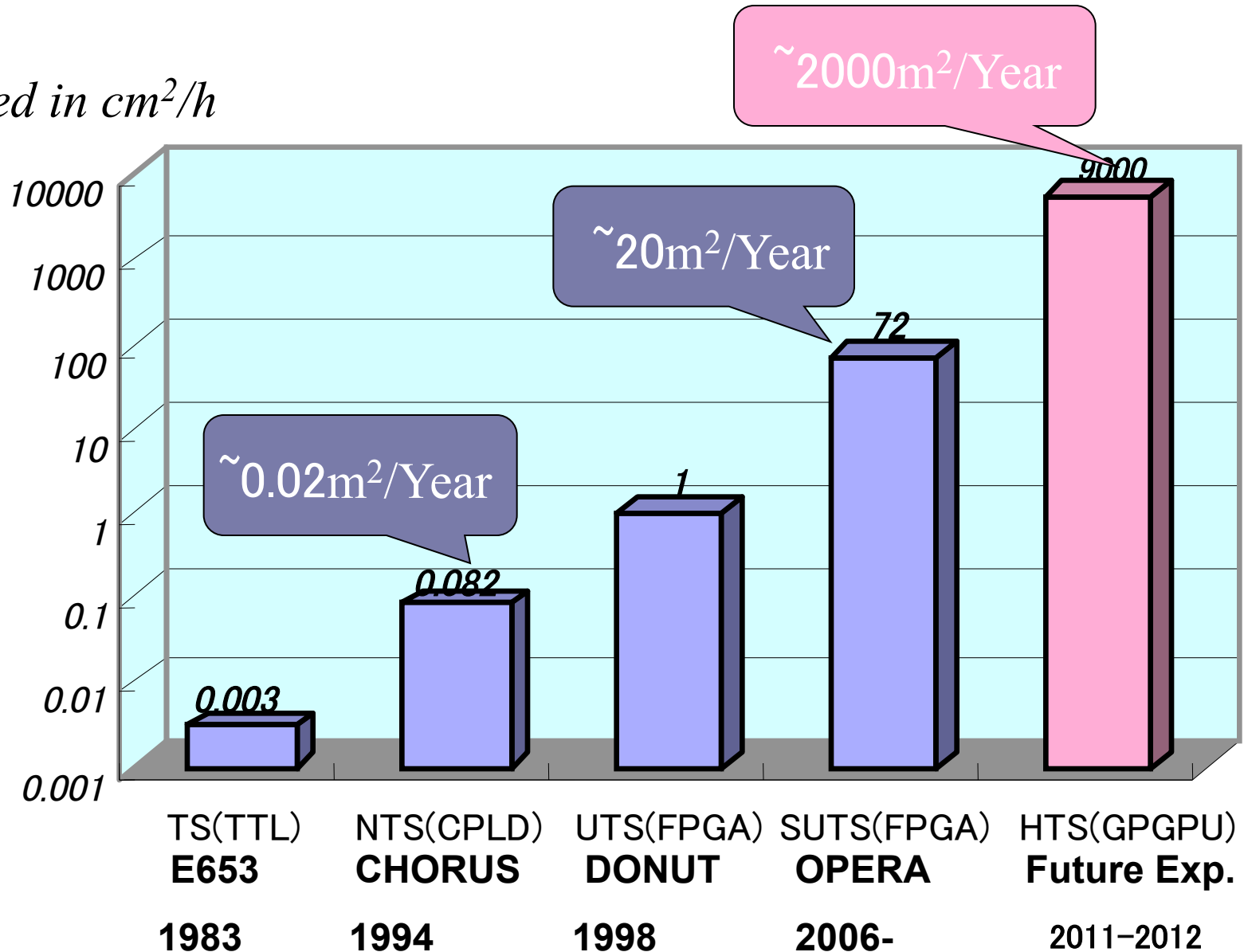
- 博士論文 ダークマター検出の為に超微粒子原子核乳剤の開発研究 (夏目 光教)
- ・ 修士論文 原子核乾板に記録された飛跡の再構成オフライン処理方法の開発 (濱田 要)
- ・ 修士論文 高密度照射原子核乾板自動解析手法の開発 (吉岡 哲平)
- ・ 修士論文 宇宙暗黒物質探索の為に超微粒子原子核乾板における反跳原子核識別の研究開発 (中 竜大)
- ・ 修士論文 長基線ニュートリノ振動実験 OPERA における Changable Sheet での Signal Track の選り出し (吉田 純也)

2006年度

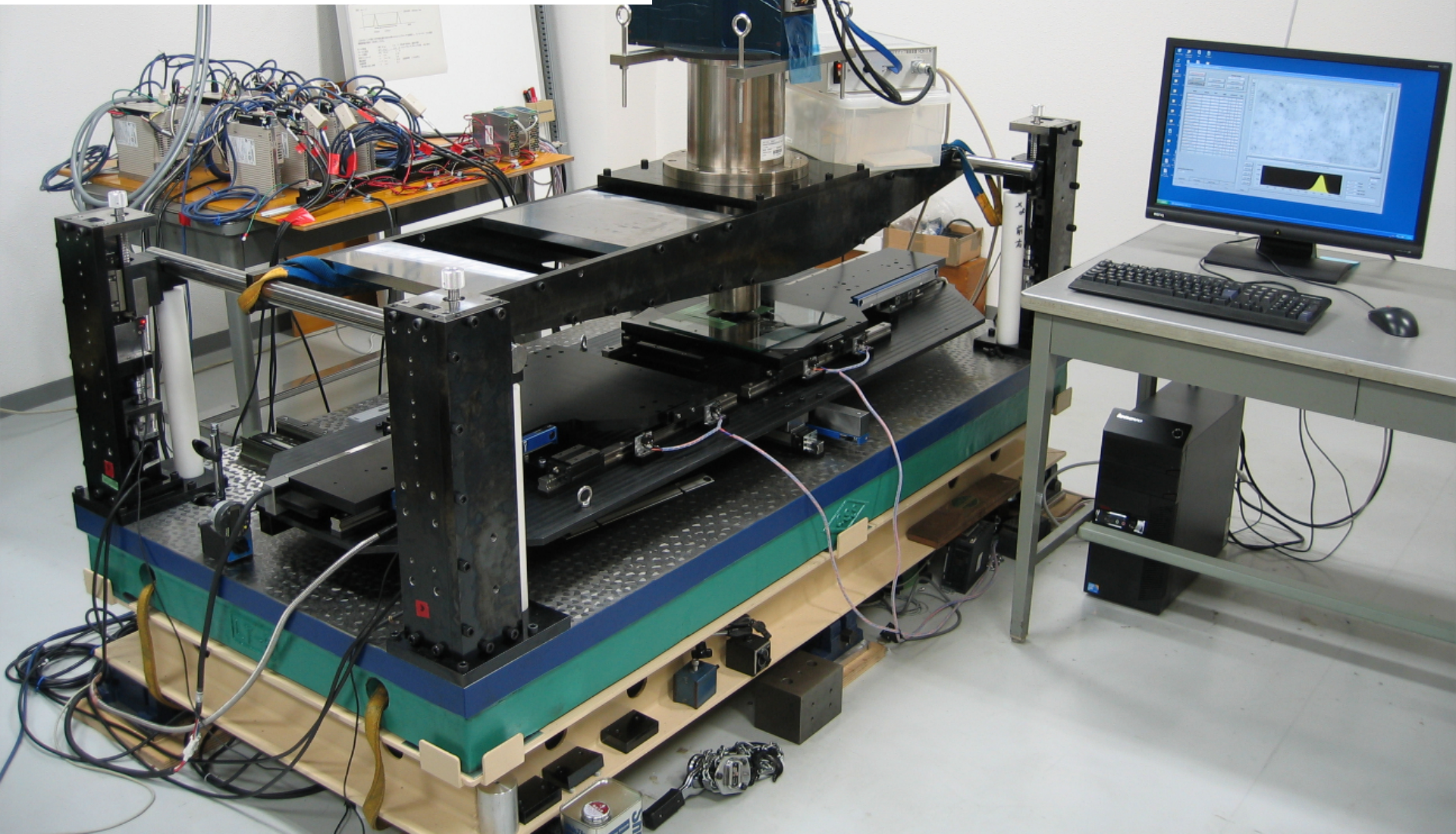
- 博士論文 Momentum measurement of secondary particle by multiple coulomb scattering with Emulsion Cloud Chamber in DONuT experiment (朴 炳渡)
- 博士論文 CHORUS実験におけるチャームペンタクォーク探索 (河田 二郎)
- ・ 修士論文 OPERA実験におけるCS検出器の製造と性能評価 (和山 正志)
- ・ 修士論文 金沈着現像による重粒子線の識別手法の研究 (久保田 寛隆)
- ・ 修士論文 タウニュートリノ荷電カレント反応断面積の測定 (古川 智子)
- ・ 修士論文 OPERA 実験のための Sheet Maker 開発と Plate Changer システムの性能評価 (大矢 聖喜)
- ・ 修士論文 OPERA 実験における X線を用いたアライメント法と照射システムの開発 (座間 裕司)

もっとスキヤニングパワーを！！

Speed in cm^2/h

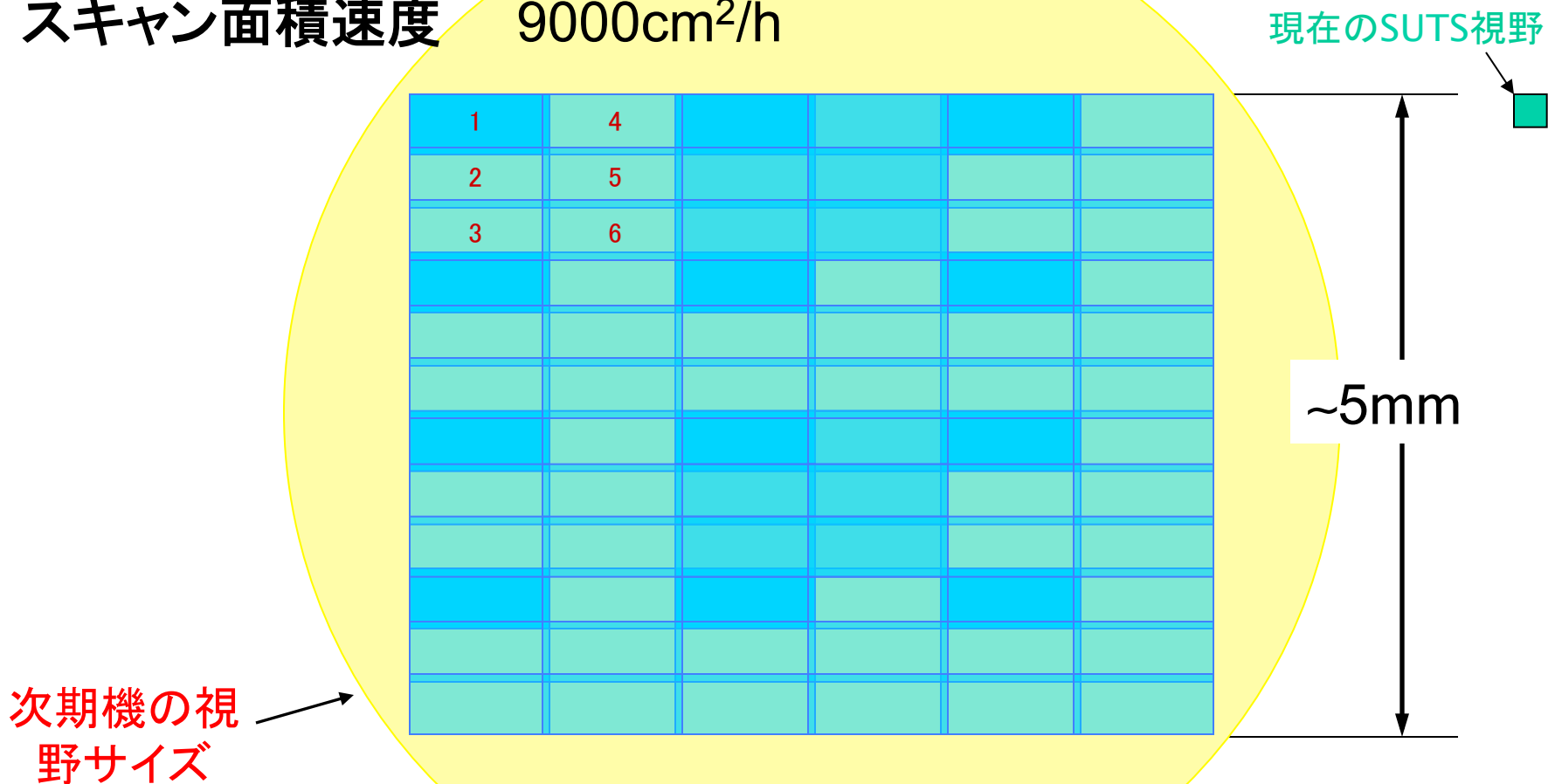


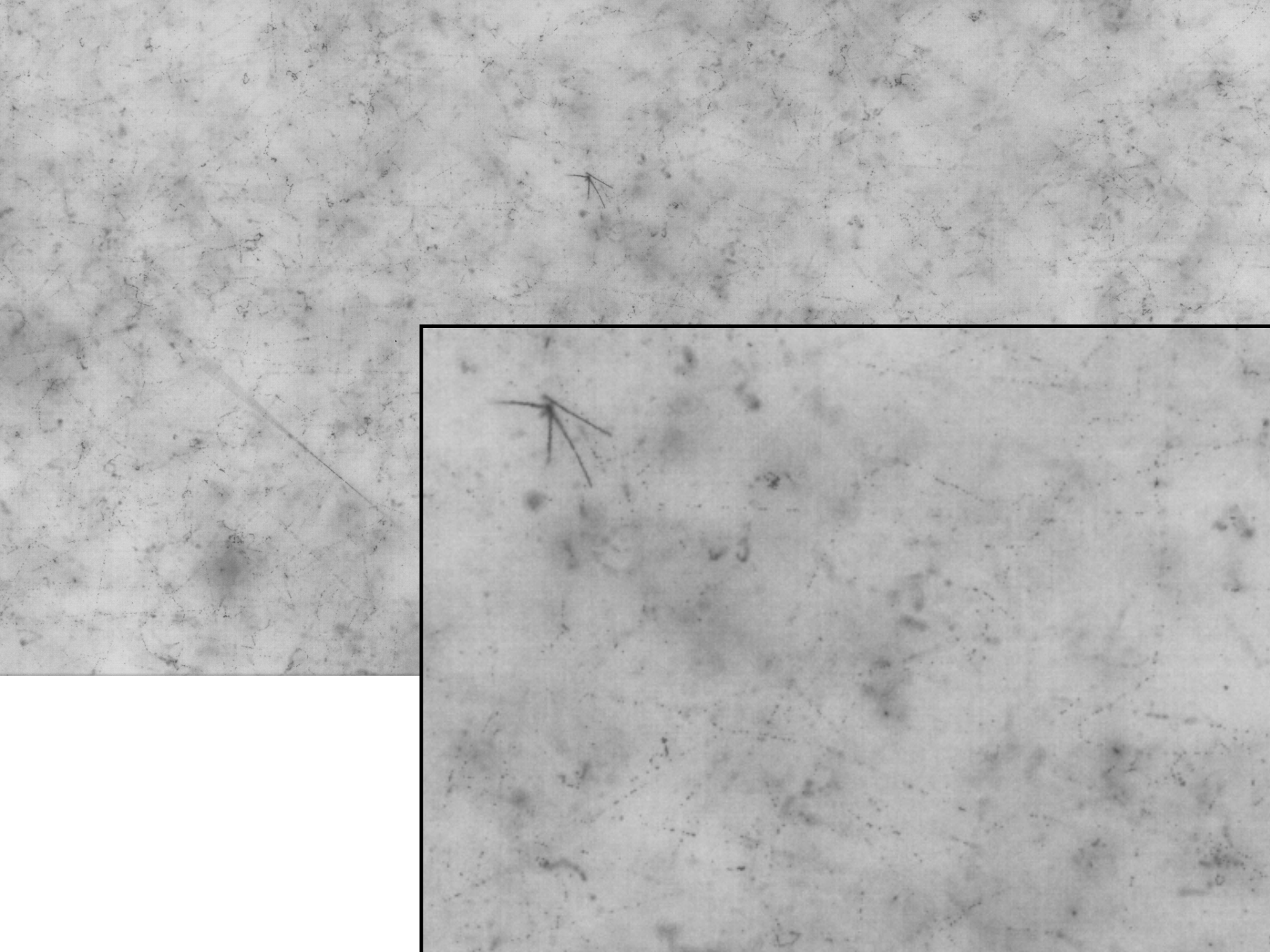
次期主力戦闘機(HTS)
本年度秋から実戦配備予定。
1枚=2.5分でスキャン終了！
現在は4時間かかっている。



巨大レンズによる大視野読み出し！

視野の大きさ $5.1 \times 4.9 \text{ mm}^2$
像面の pixel size $0.45 \mu\text{m}$ (120Mpixel/FOV)
画像読み出し速度 $0.10 \text{ sec} / 16\text{depth} / \text{FOV} \rightarrow > 300\text{fps}$
スキャン面積速度 $9000\text{cm}^2/\text{h}$

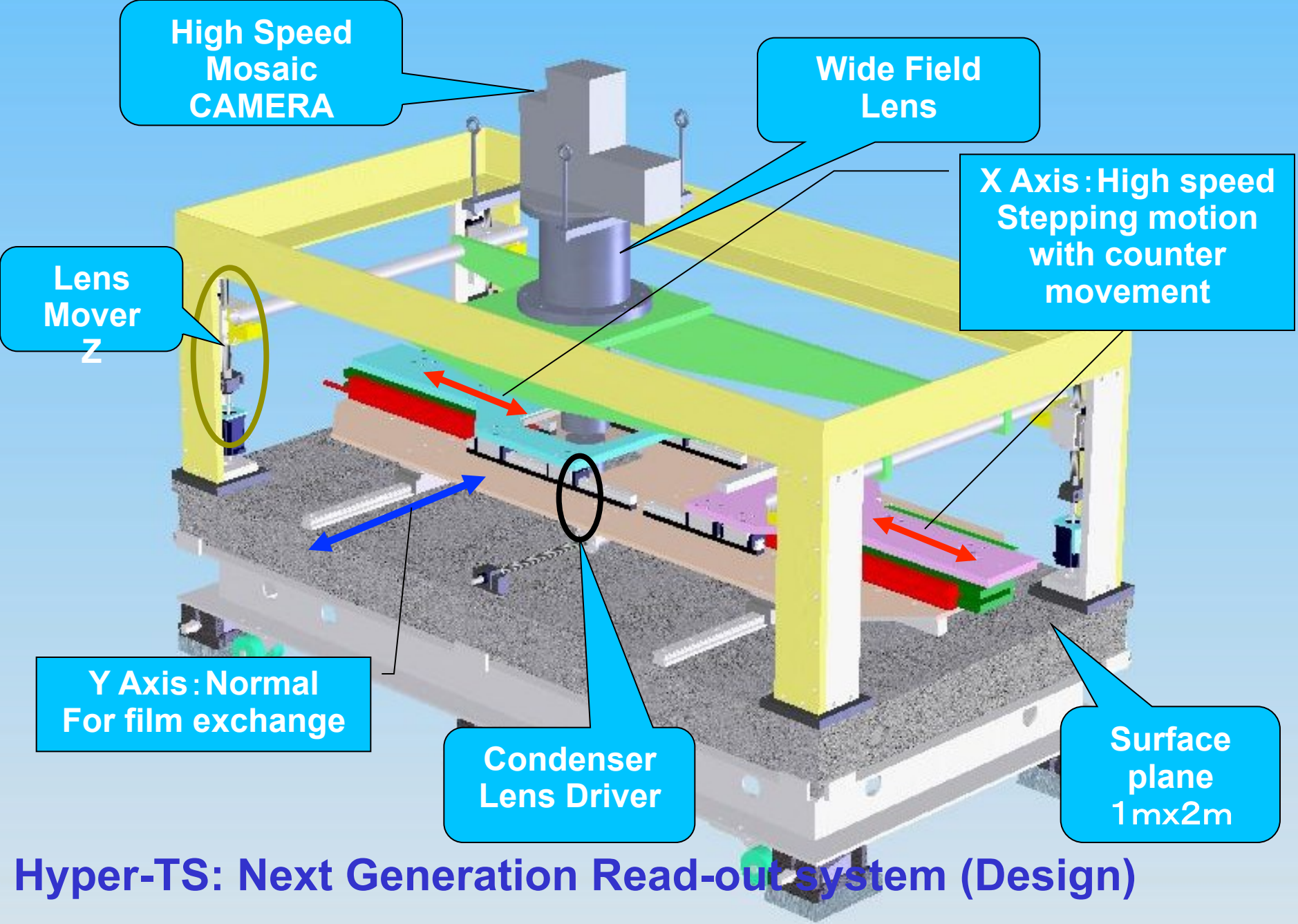




まとめ

- 実験提案理由
タウニュートリノの初検出+ニュートリノ振動(ディスアピアランス)
→ タウニュートリノのアピアランスで検証する。
- 930万枚の写真フィルム製造(富士フィルム)+リフレッシュ(研究室全員)。
史上最大の原子核乾板複合標的を建築。
現在もニュートリノ反応をとらえ続けている。
- 運も味方した。
1) 初出荷フィルム: スマトラ沖地震の津波(難破の危機)をすりぬけた。
2) ラキラ(イタリアグランサツノ近く)の地震でも検出器は無事だった。
- 大学の耐震工事のため東濃鉱山にスキャンルームを構築・運営(2008年度から2010年度)、2011年度より名古屋大学キャンパスにスキャンルームを再構築・運営。
- OPERAで捉えたニュートリノ反応の半数を日本が解析。
切磋琢磨し現在までに日欧で4000反応を解析し2 タウニュートリノを検出。
NEUTRINO2010(佐藤), NEUTRINO2012(中村)で報告。
- また電子ニュートリノアピアランスをとらえるべく解析を始め暫定結果をNEUTRINO2012で報告。
- 来年の春に主テーマのニュートリノ振動にたいする結果を報告すべく推進している。
- 飽くなきスキャンニングパワーの要求が次世代のスキャンマシンを生み続けている。
これ(次世代機)を武器一緒に研究しましょう。

Back Up



Hyper-TS: Next Generation Read-out system (Design)

超高速顕微鏡ステージの構想図

縦1m、横2m、高さ1.5m、重さ1.4トン

ちなみに
使ったフィルム
約930万枚
富士フィルム製

~3000m



富士山

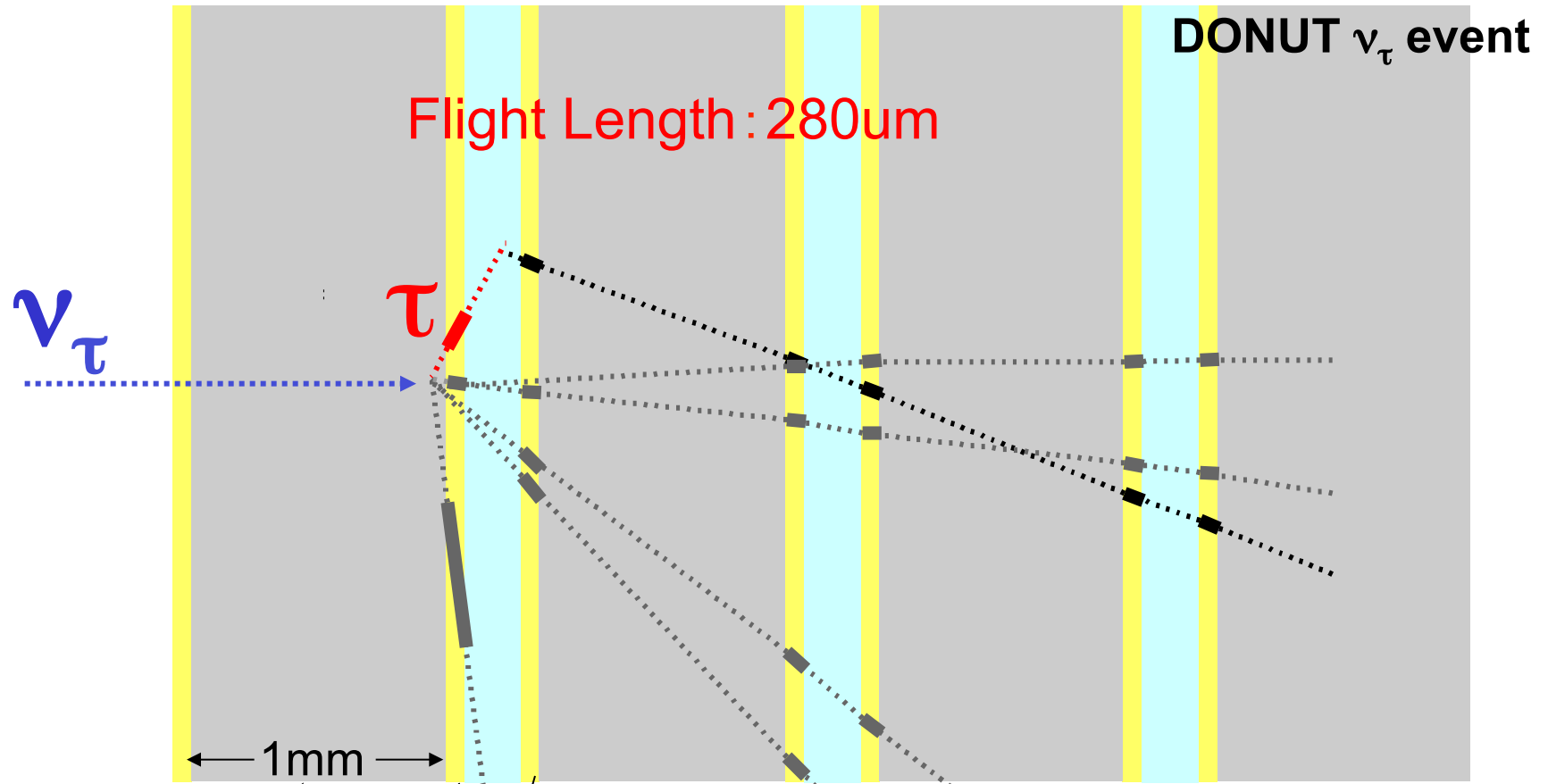


ミューニュートリノ
製造装置



2009/08/18 19:2

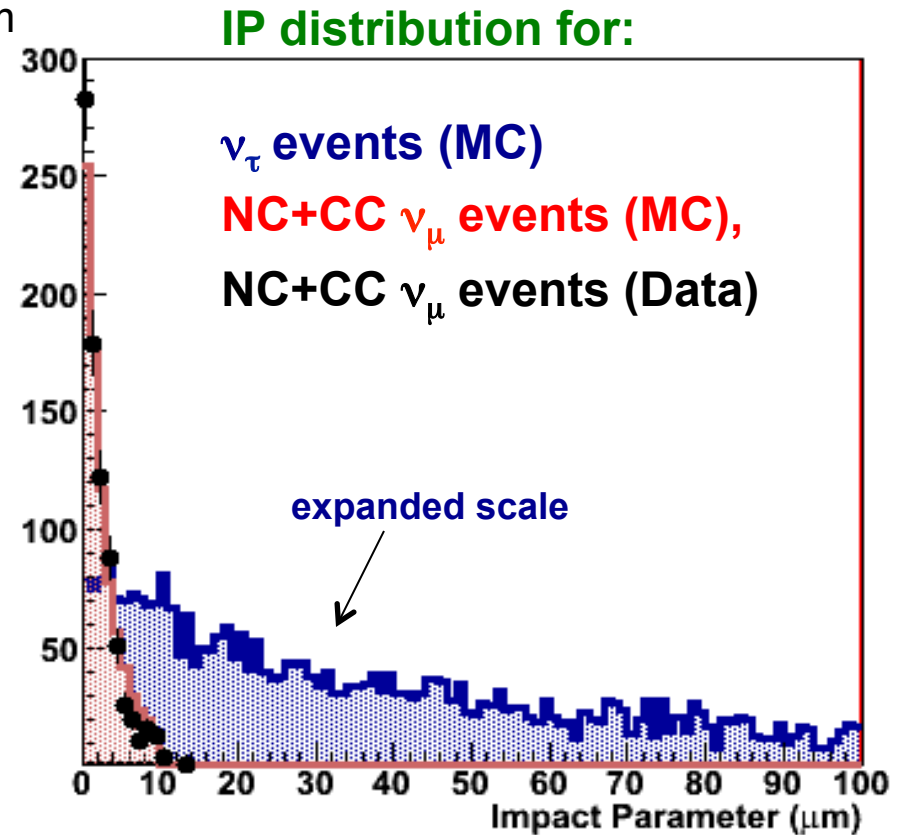
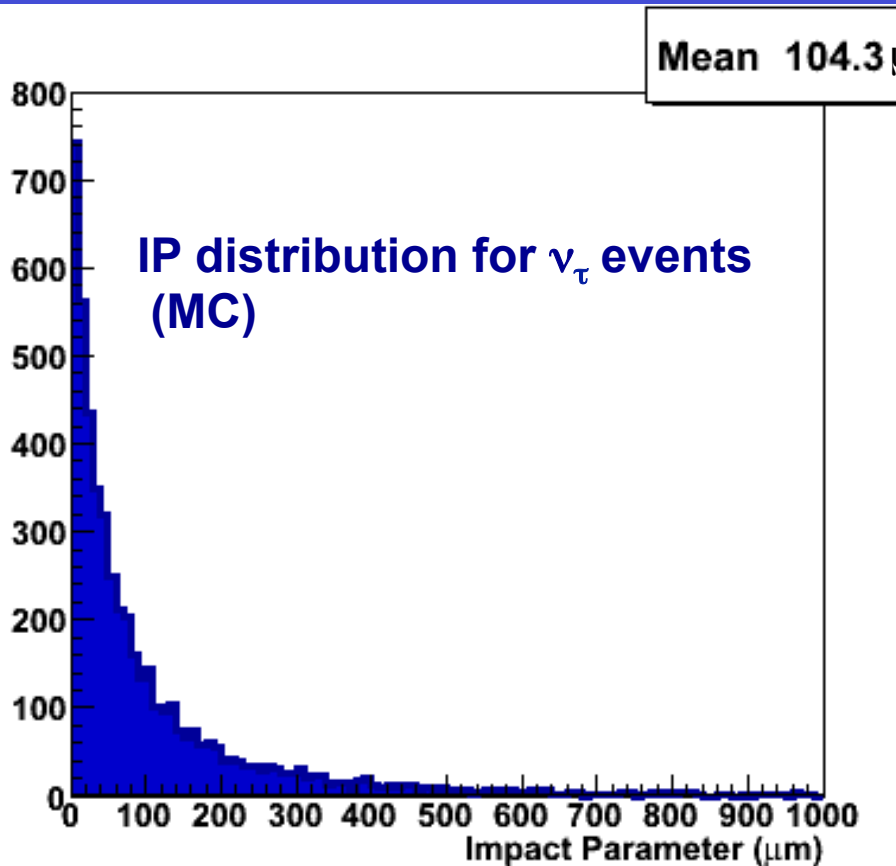
How to detect tau neutrino



(DONUT : Iron 1mm
 OPERA : Lead 1mm)

Kink	$\tau \rightarrow e$	18 %
	$\tau \rightarrow \mu$	17 %
	$\tau \rightarrow h$	49 %
Trident	$\tau \rightarrow 3h (h h h)$	15 %

インパクトパラメータ分布

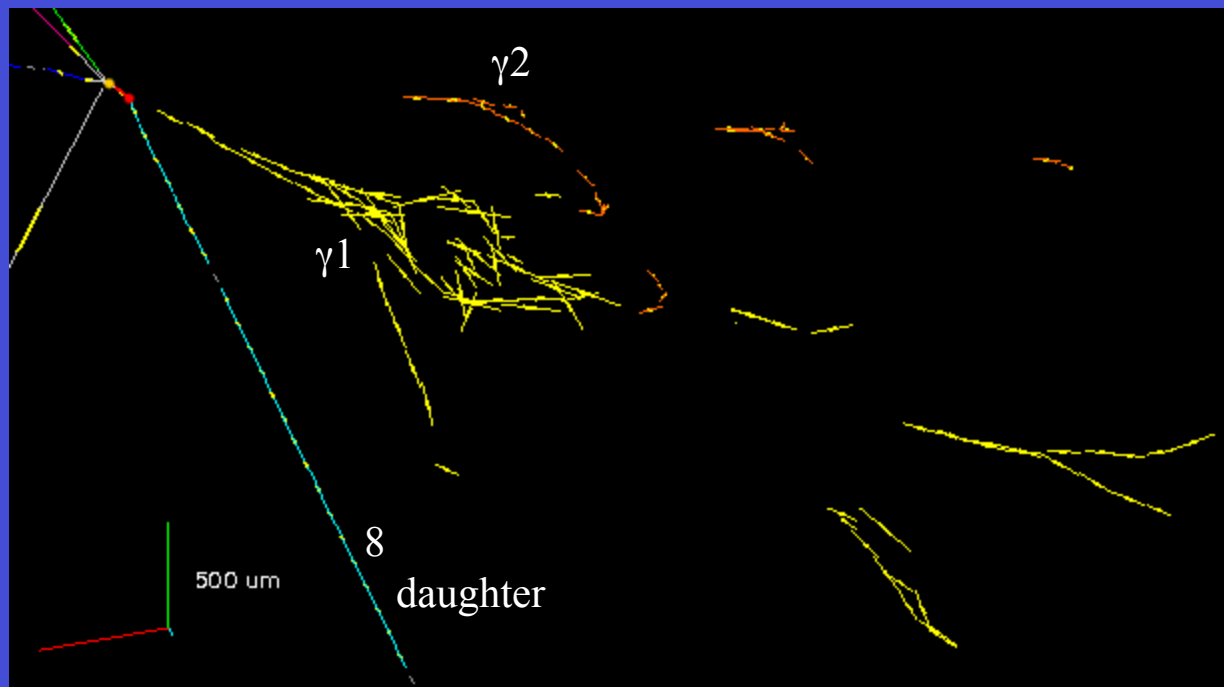


不変質量の計算

- 不変質量は τ 候補になる為の条件には入っていない。
- 2個の γ 線で構成した不変質量は π^0 の質量と無矛盾。
- 娘候補を π^- と仮定して $\pi^- \gamma \gamma$ で構成した不変質量は ρ (770)の質量と無矛盾。
- 今回の崩壊は $\tau \rightarrow \rho (\pi^- \pi^0) \nu_\tau$ と無矛盾(この崩壊様式は τ 崩壊の25%)。

π^0 mass	ρ mass
$120 \pm 20 \pm 35$ MeV	$640^{+125}_{-80}{}^{+100}_{-90}$ MeV

γ detection



反応の下流全て(物質質量 $6.5 X_0$)のフィルムを使った探索の結果2本の γ 線を検出。

	Distance from 2ry vertex (mm)	Energy (GeV)
1 st γ	2.2	$5.6 \pm 1.0 \pm 1.7$
2 nd γ	12.6	$1.2 \pm 0.4 \pm 0.4$

γ 線の由来 vertex 同定



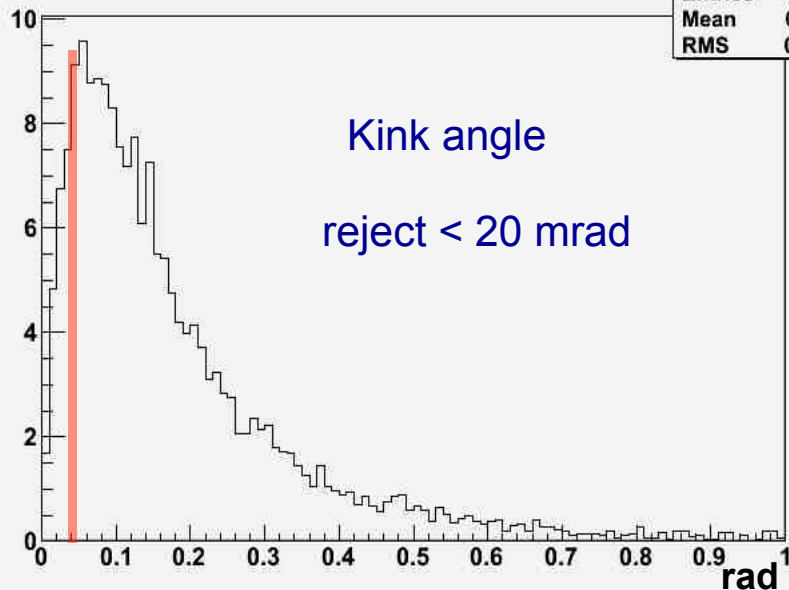
ガンマから延ばした (1σ) 許要値。
2本のガンマはキंक点より来ている。

	Distance from 2ry vertex (mm)	IP to 1ry vertex (μm) <resolution>	IP to 2ry vertex (μm) <resolution>	Prob. of attach. to 1ry vtx*	Prob. of attach. to 2ry vtx*	Attachment hypothesis
1 st γ	2.2	45.0 <11>	7.5 <7>	< 10^{-3} >	0.32	2ry vertex
2 nd γ	12.6	85.6 <56>	22 <50>	0.10	0.82	2ry vertex (favored)

* probability to find an IP larger than the observed one

Kink Angle Weighted(Long)

kinkAngle2L	
Entries	23755
Mean	0.1828
RMS	0.1644

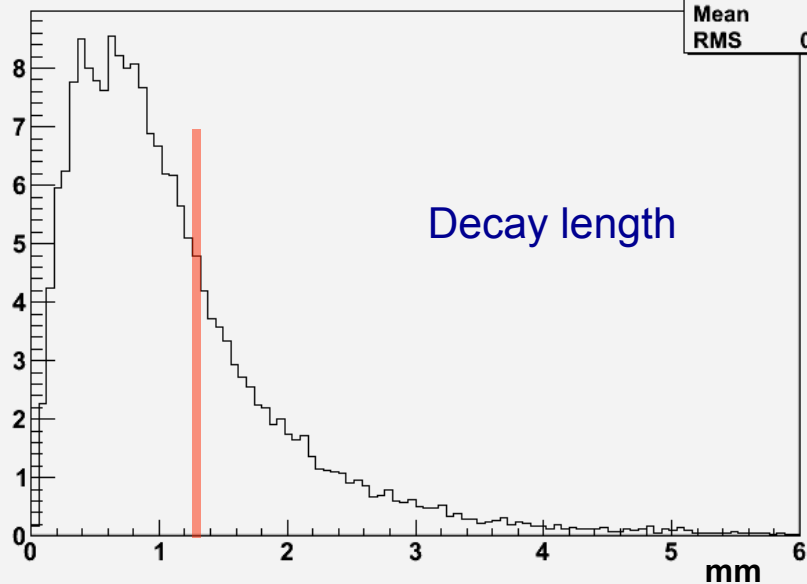


Features of the decay topology

red bands: values for the “interesting” event with uncertainties

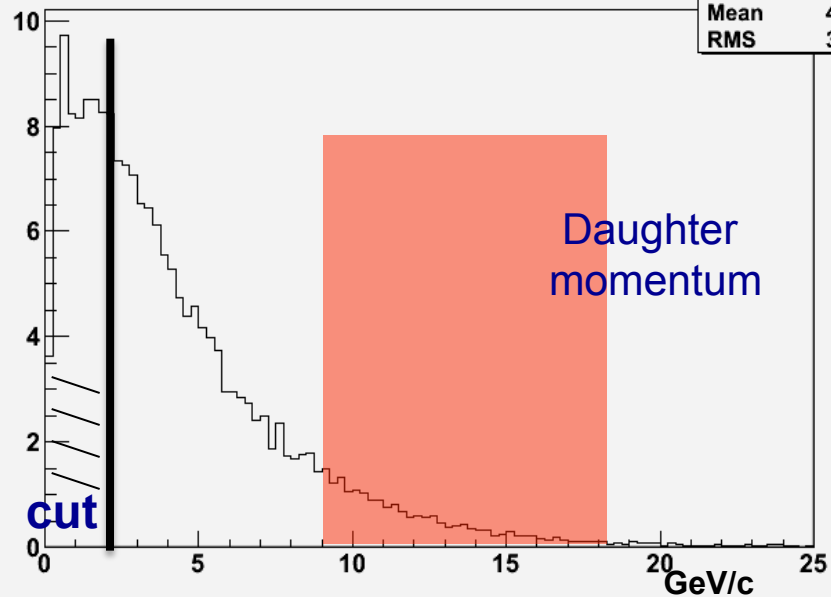
Tau Length for all long decays Weighted

longDecay2	
Entries	23755
Mean	1.123
RMS	0.8665



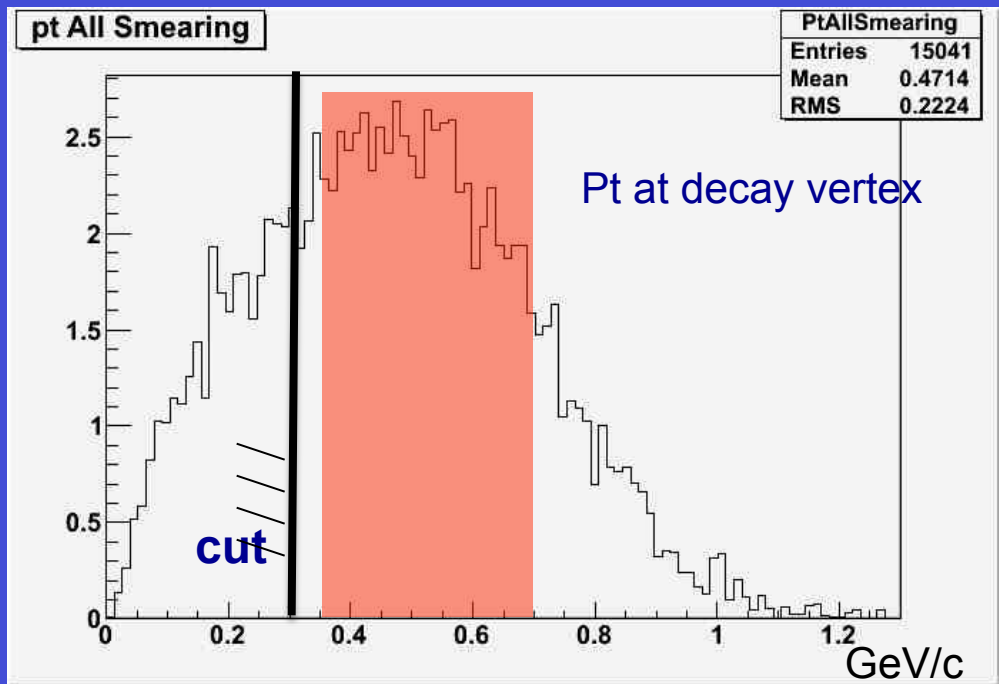
dgh Momentum Weighted(Long)

dghMom2L	
Entries	23755
Mean	4.237
RMS	3.644

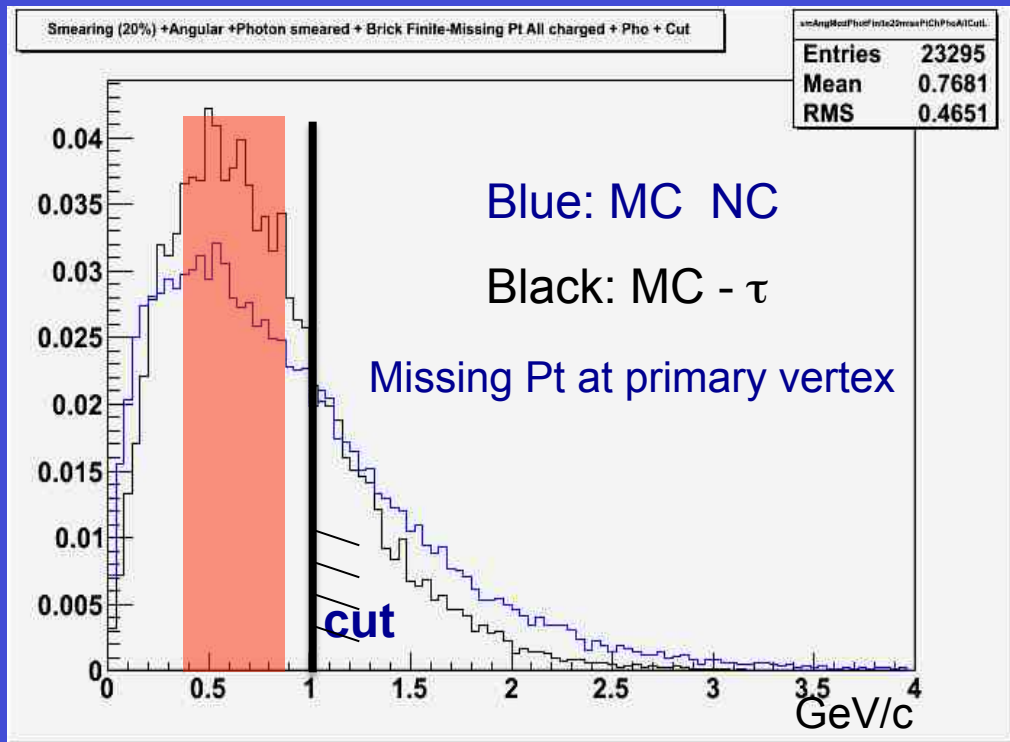


Kinematical cuts to be passed

Reject hadron interactions →

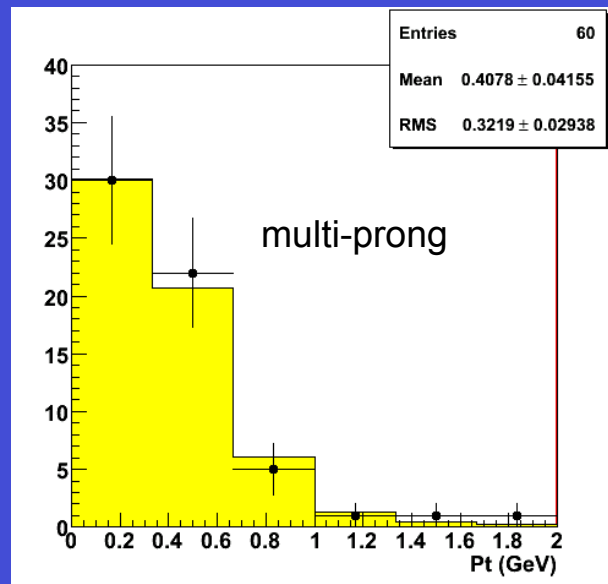
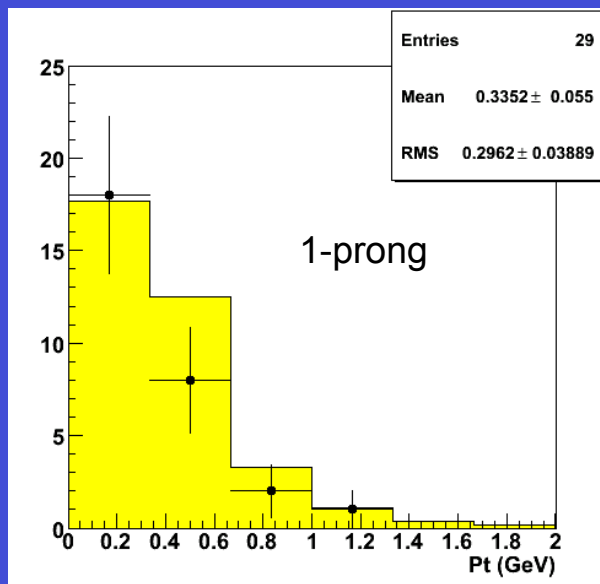
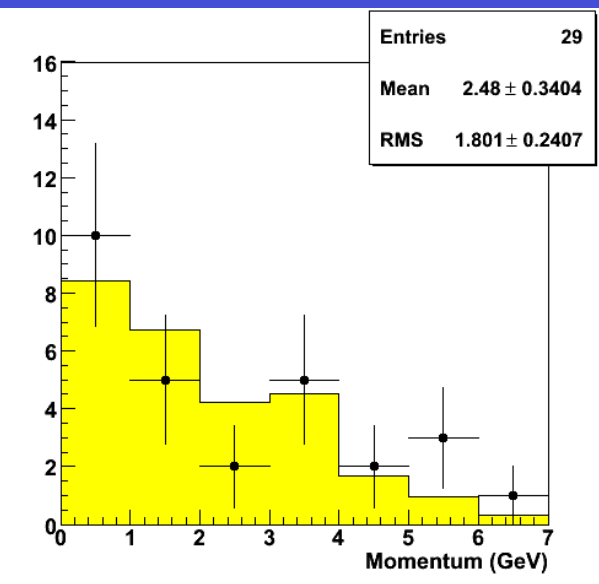
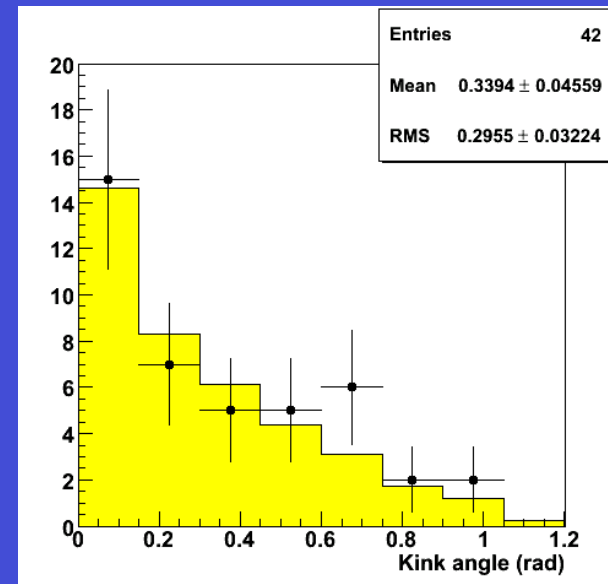
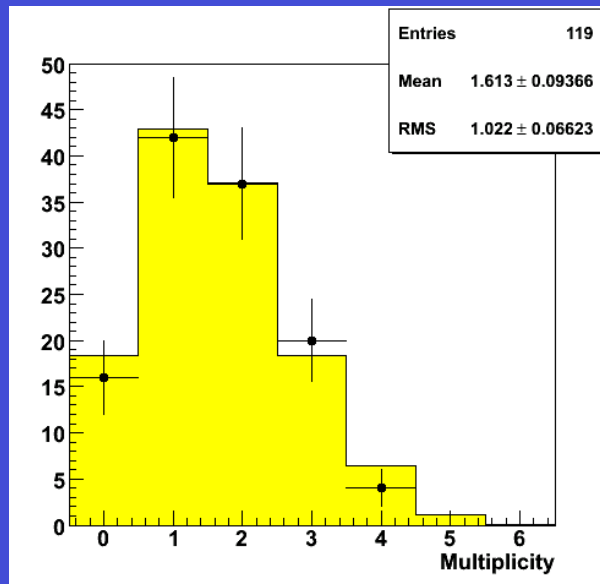
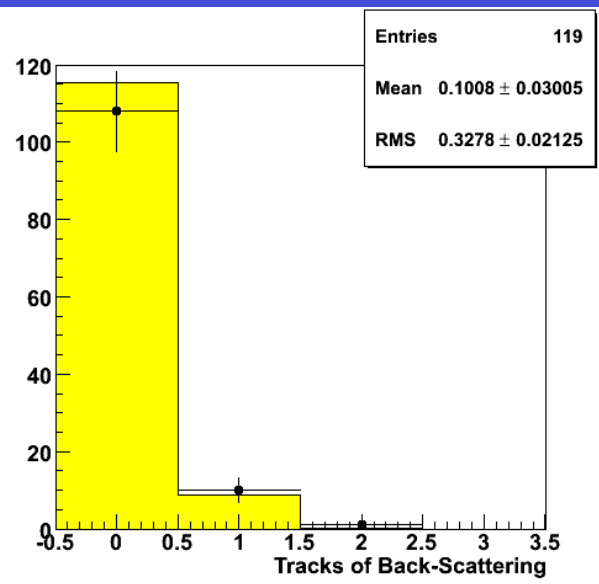


Reject NC events with larger missing Pt (neutrino) →



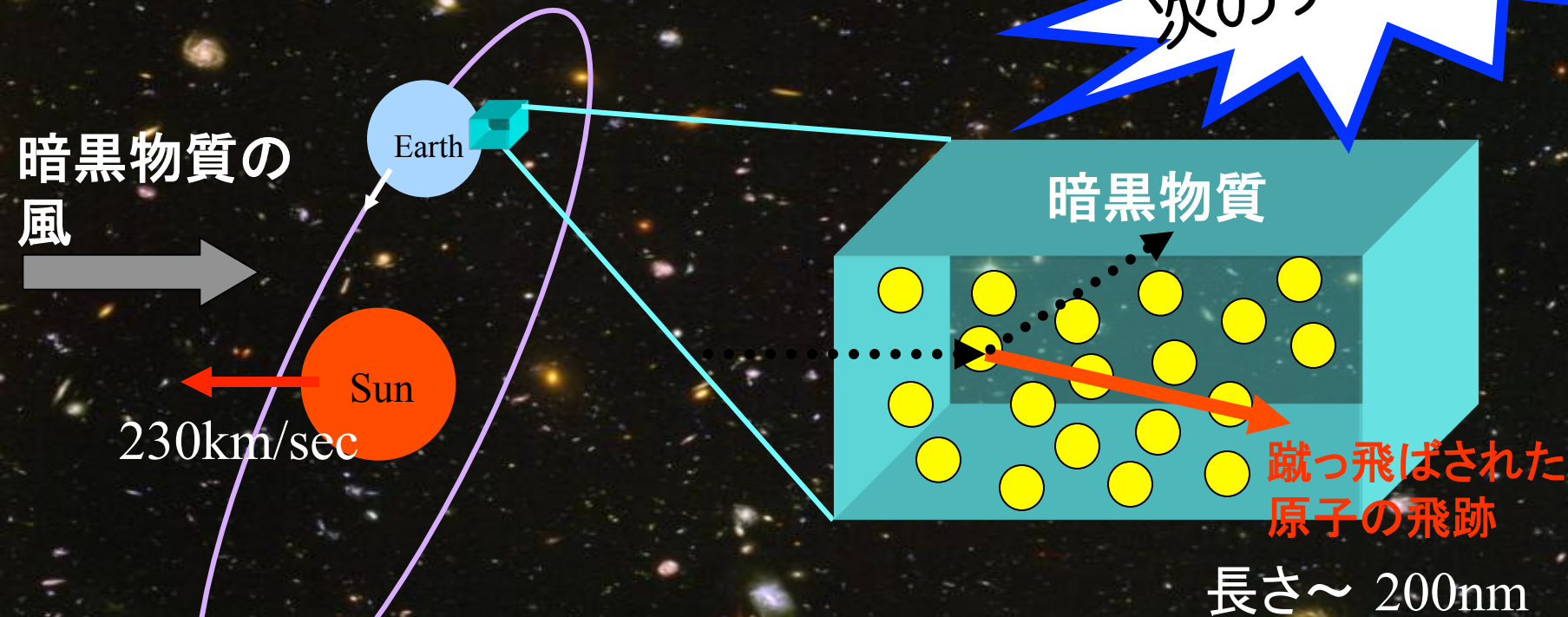
DATAとMC の比較 絶対値と分布の形

4GeV pion ビームテスト τ 探索の約18倍のトラックレングス(20m)



地球をすり抜けてゆく 暗黒物質を原子核乾板で直接検出

次のチャレンジ

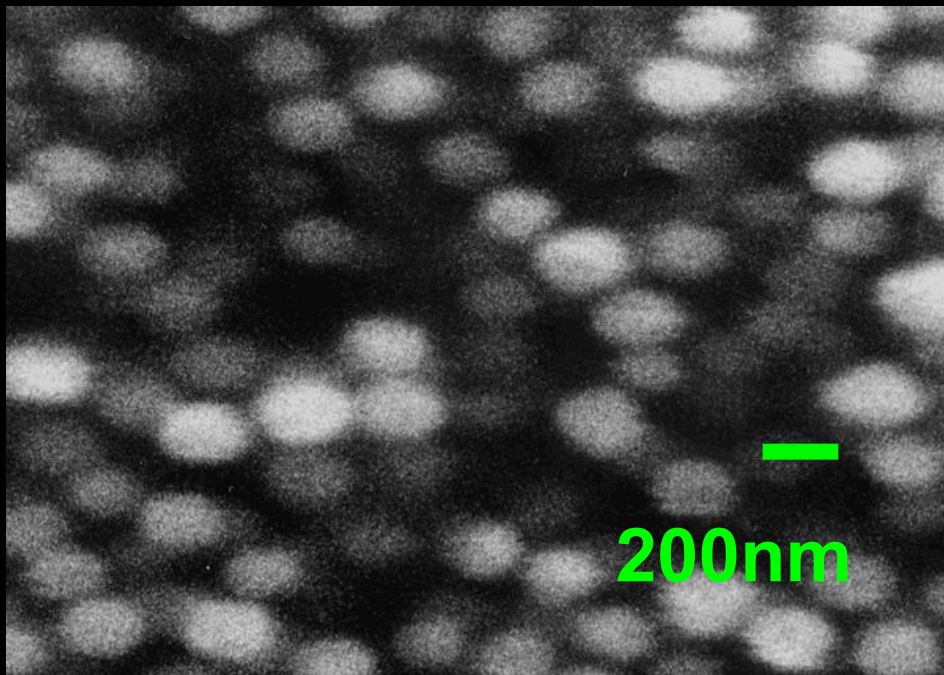


$$V_{\text{recoil}} = 2(V_{\text{sun}} + V_{\text{WIMP}})$$
$$= 100 \sim 1000 \text{ km/sec}$$

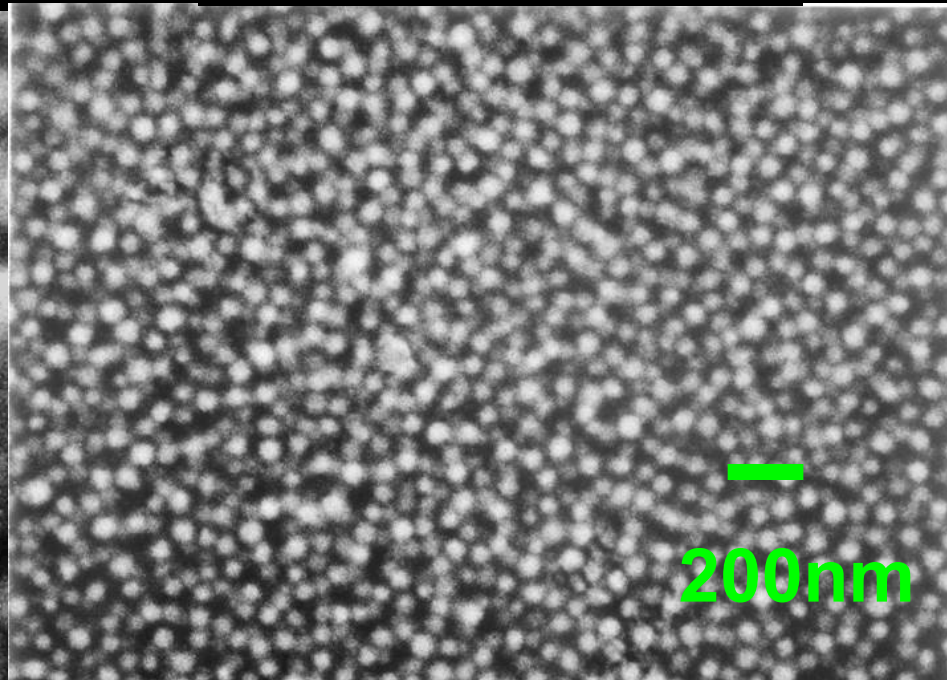
Fine Grain Nuclear Emulsion

OPERA Gel

Fine Grain Gel



200nm



200nm

Crystal Size 200nm

40nm

Test exposure of 600keV Kr ions

Optical Microscope Image

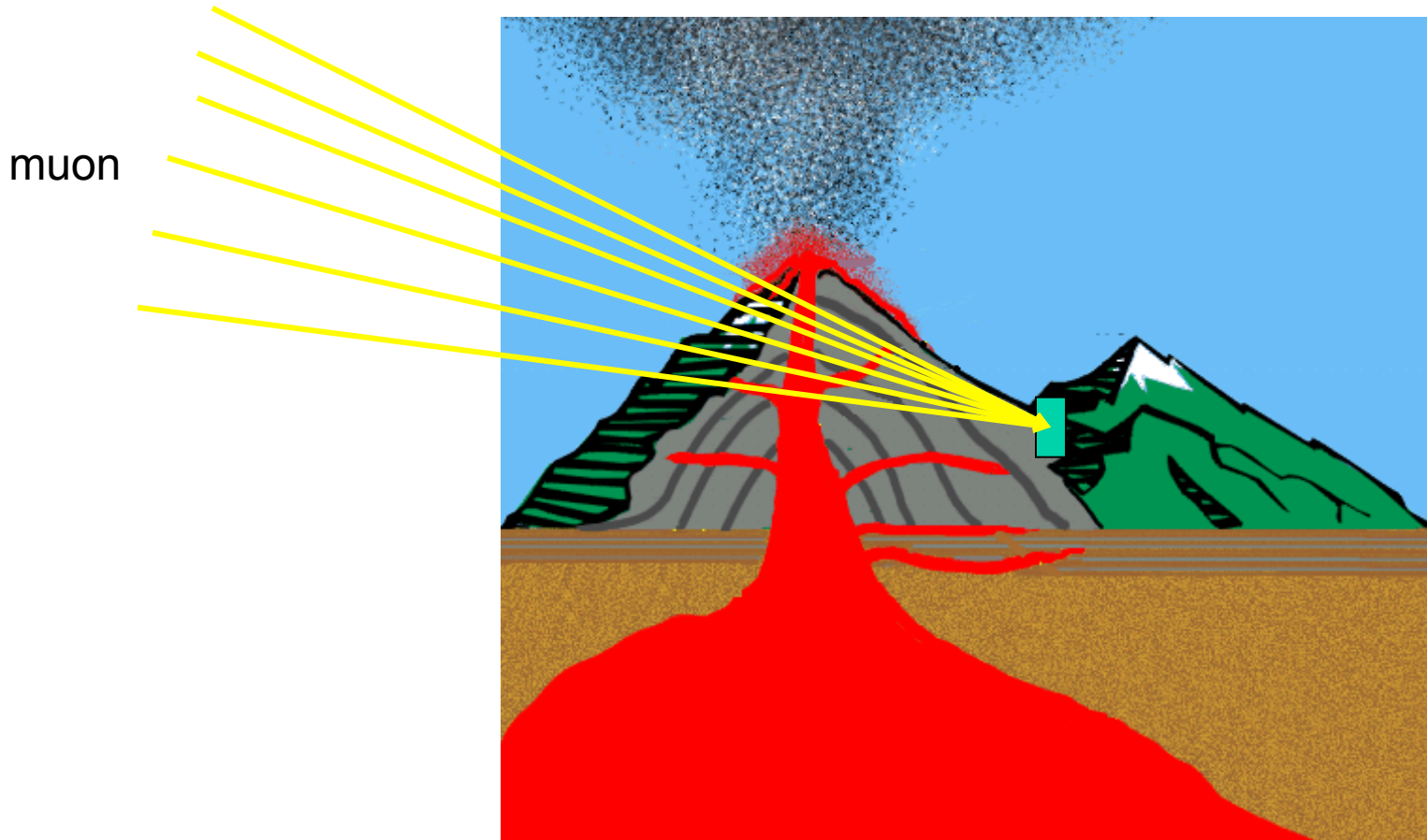


2 μ m

After expansion treatment

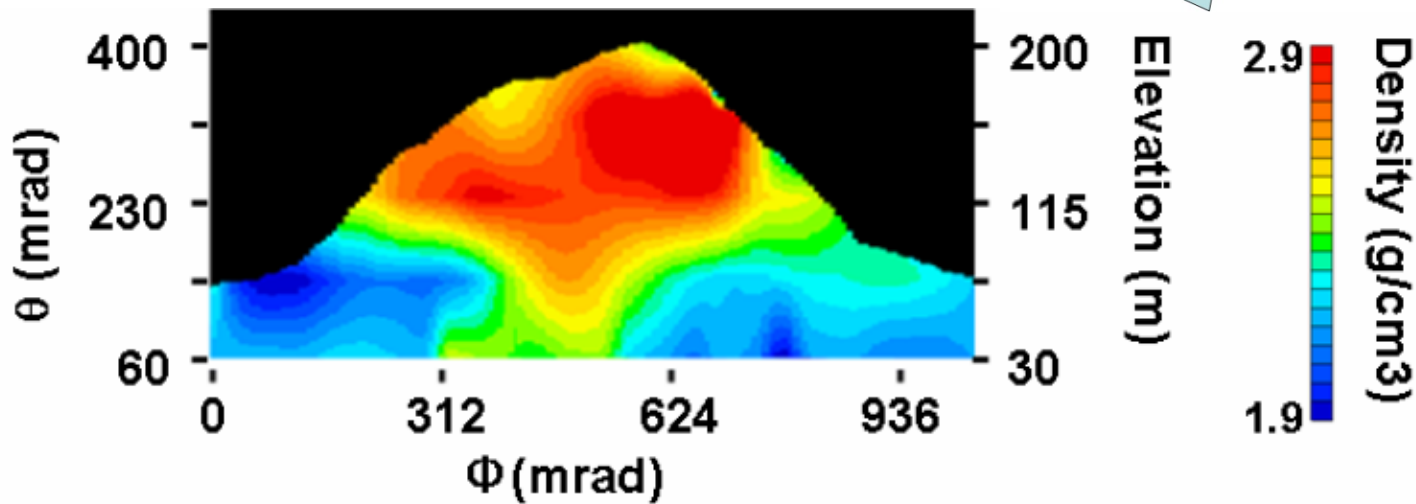
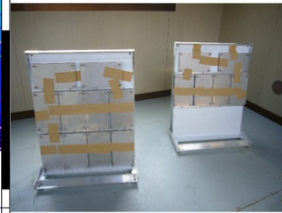
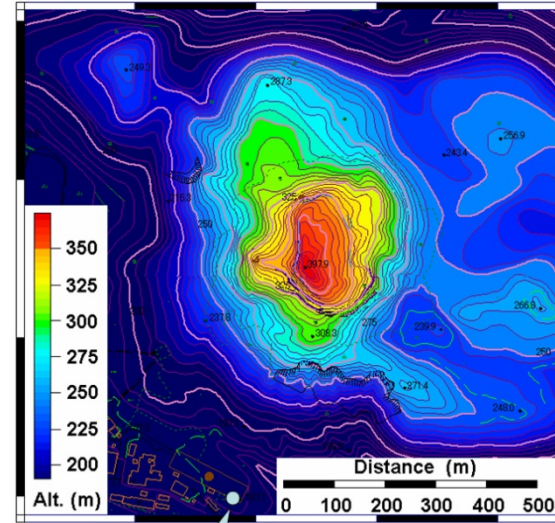
誰もやったことの無い技術を持っていると
こんな話も舞い込む。

火山の透視

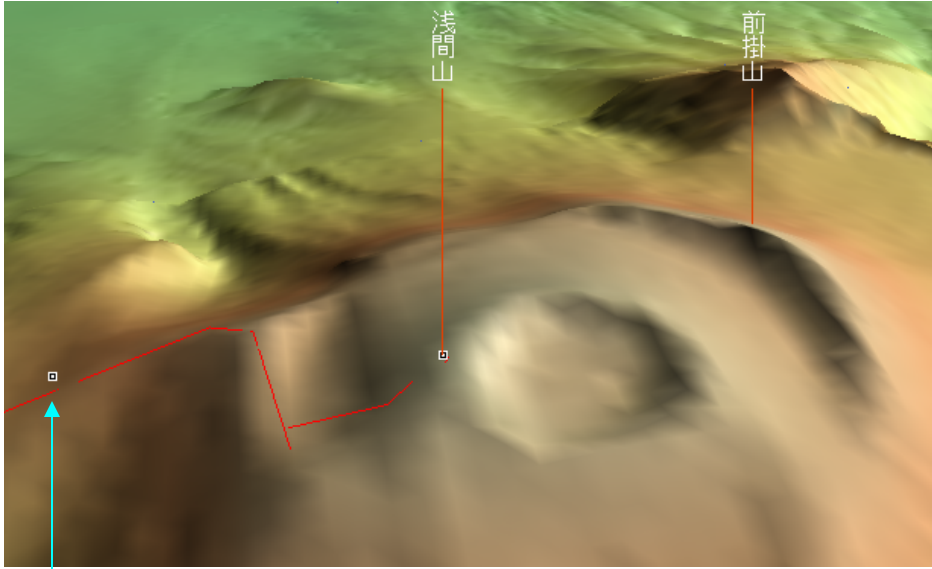


世界初の成果

昭和新山



結果



ECC Muon Detector

