



**La ricerca delle oscillazioni
di neutrini con un fascio “off axis”**

Corso di
Fisica Nucleare e Subnucleare II

Silvia Mariani

25 maggio 2010



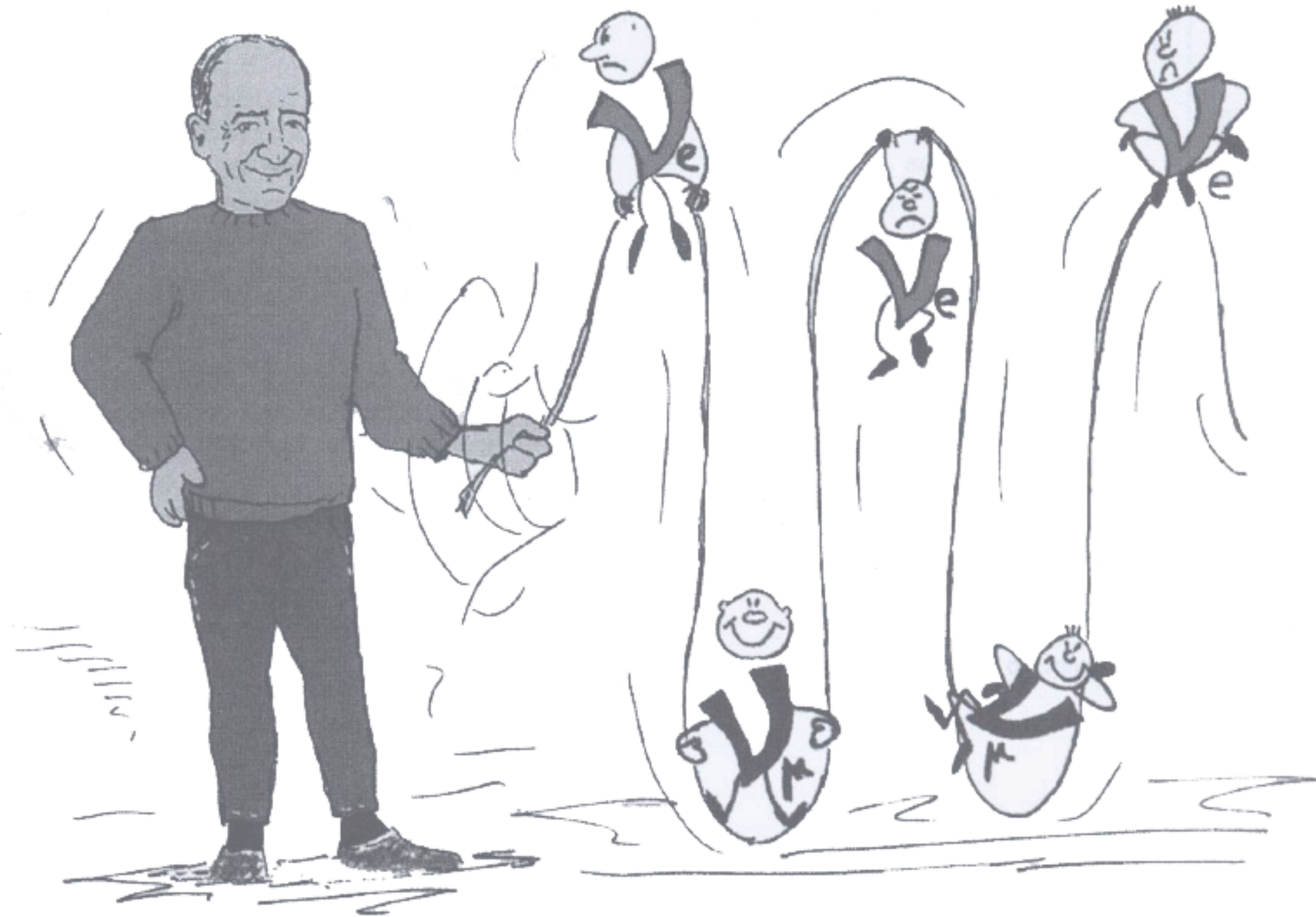
ASPETTO TEORICO

- mixing;
- probabilità di oscillazione.

ASPETTO SPERIMENTALE

- Studio transizioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$;
- T2K;
- SuperKamiokande;
- metodo del fascio *off axis*;
- ottimizzazione del fascio;
- sommario.

CONCLUSIONI



MIXING

L'IDEA

1957 \longrightarrow Pontecorvo ipotizza un'analogia tra leptoni ed adroni:

- ADRONI: $K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$
- LEPTONI: ??

COS'È

Fenomeno quantistico: un ν creato con un determinato sapore (ν_e, ν_μ, ν_τ), si osserva successivamente avere un altro sapore.

\longrightarrow **MASSA** e **MIXING** dei ν possono essere misurati osservando l'**OSCILLAZIONE**

OSCILLAZIONE

Autostati di sapore diversi da quelli di massa dell'Hamiltoniana: $|\nu_f\rangle \neq |\nu_i\rangle$ $\begin{matrix} f = e, \mu, \tau \\ i = 1, 2, 3 \end{matrix}$

$$|\nu_f\rangle = \sum_i U_{fi} |\nu_i\rangle \quad |\nu_i\rangle \rightarrow \text{base completa di autostati in cui } H \text{ è diagonale}$$

$U_{fi} \longrightarrow$ Matrice unitaria di mixing **MNSP**, analoga alla matrice di mixing dei quark (matrice **CKM**).

$$U_{fi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ν atmosferici
SK, K2K, MINOS

CHOOZ

ν solari
Solar, KamLand

MATRICE di MIXING MNSP

(Maki - Nakagawa - Sakata - Pontecorvo)

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}, \quad s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

θ_{ij} → angolo di mixing: parametrizza le 3 possibili rotazioni del ν

δ → fase che tiene conto della violazione di CP

Dove:

$$\Delta m_{12}^2 \simeq 7.7 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} \simeq 34.5^\circ$$

$$\Delta m_{23}^2 \simeq 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{23} \simeq 45^\circ$$

Misurati per ν SOLARI

Misurati per ν ATMOSFERICI

SCOPO ESPERIMENTI ATTUALI

- Determinare θ_{13} o migliorarne le stime
- Determinare δ

→ Per misurare θ_{13} si studiano le oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (dipendenti da tale parametro) al Δm atmosferico

PROBABILITÀ DI OSCILLAZIONE

$|\nu_f\rangle \rightarrow$ combinazione lineare di autostati con masse diverse: **NON HANNO MASSA DEFINITA.**

Se si considerano solo due famiglie di ν , si ha

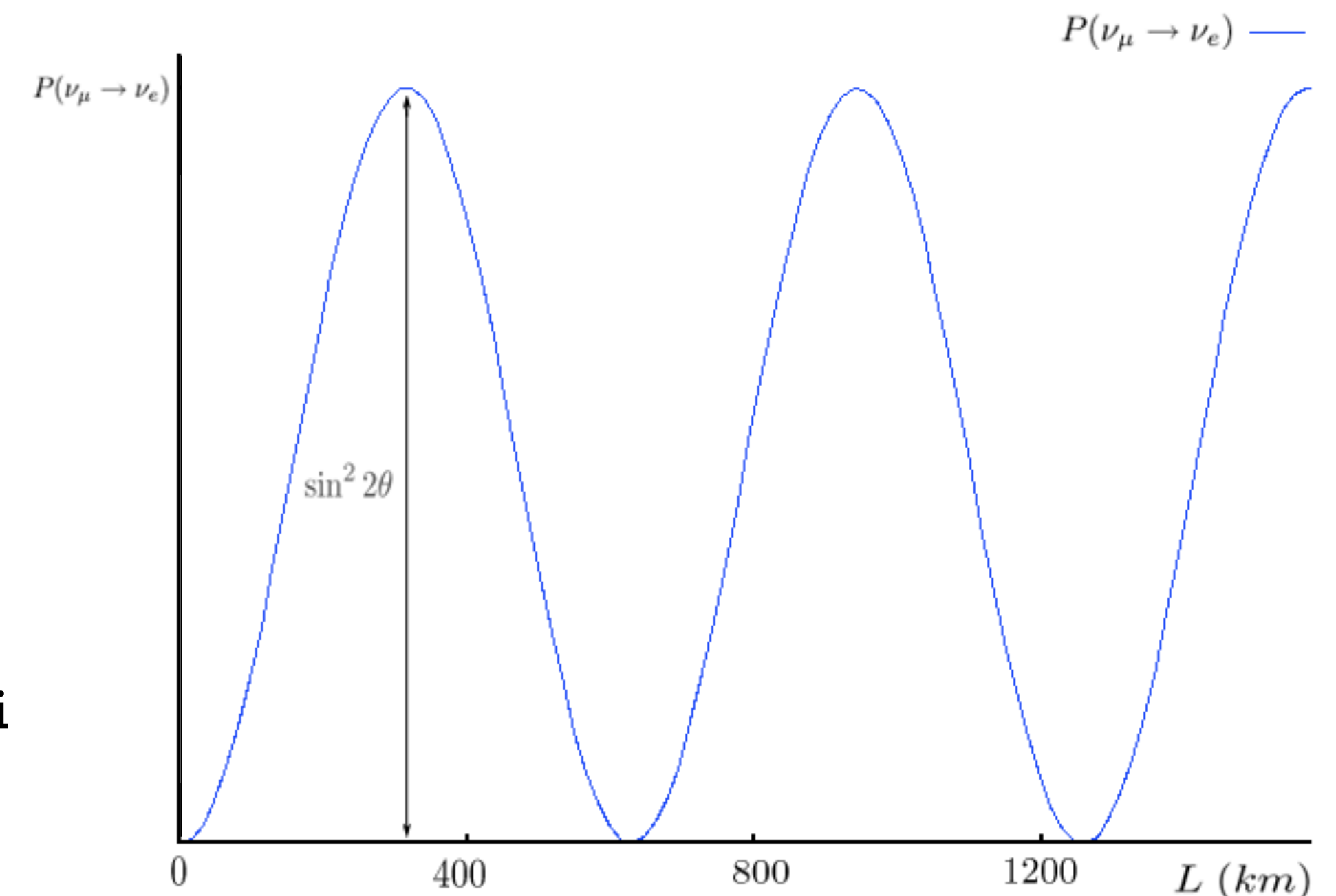
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{aligned} \nu_e &= \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta \\ \nu_\mu &= -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta \end{aligned}$$

Considerando ad esempio ν_μ , dopo un tempo t si avrà: $|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin \theta e^{-\frac{iE_1 t}{\hbar}} |\nu_1\rangle + \cos \theta e^{-\frac{iE_2 t}{\hbar}} |\nu_2\rangle$

La probabilità di transizione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ è data da:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e; t) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E} \right)$$

- Δm^2 : differenza del quadrato delle masse degli stati di base coinvolti nell'oscillazione, in eV^2
 - L : distanza percorsa da ν_μ in km
 - E : energia di ν_μ in GeV
 - θ : angolo di mixing
- } $\frac{L}{E}$ dipende dalle condizioni sperimentali



Nel caso di tre famiglie leptoniche:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \simeq \sin^2 2\theta_{21} \sin^2 \Delta_{21} - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{31}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \Delta_{31}$$

con $\Delta_{ij} = 1.27 \Delta m_{ij}^2 L/E_\nu$

ASIMMETRIA di CP

$$A_{CP} = \frac{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)}{P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) + P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)} \simeq \frac{\Delta m_{12}^2 \sin^2 2\theta_{12}}{4E_\nu \sin^2 \theta_{12}} \sin \delta$$

RISULTATI

- $\sin^2 2\theta_{13} < 0.1 \rightarrow$ unico mixing non misurato
- $\delta \rightarrow$ sconosciuto (misurabile solo se $\theta_{13} \neq 0$).
- $\theta_{12} \simeq 34.5^\circ$
- $\theta_{23} \simeq 45^\circ$
- $\Delta m_{12}^2 \simeq 7.7 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$
- $\Delta m_{23}^2 \simeq 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$
- $\Delta m_{31}^2 \simeq \Delta m_{23}^2$

STUDIO TRANSIZIONI $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

$\theta_{13} \rightarrow$ **GRANDE INTERESSE: scoprire se $\theta_{13} \neq 0$.**

Si può misurare agli acceleratori osservando la transizione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ al Δm_{ATM} . Dato un fascio di ν_μ , con un rivelatore a distanza L si cercano interazioni con e^- nello stato finale. La frequenza delle interazioni dà la probabilità di oscillazione $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(1.27 \Delta m_{13}^2 \frac{L}{E})$.

RICHIESTE: poiché σ_ν piccola e $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ piccola in quanto $\theta_{13} < 10.6^\circ$, servono:

- fascio di grande intensità;
- apparato di grande massa.

Massima probabilità per $\frac{1.27 \Delta m_{13}^2 L}{E} \rightarrow \pi/2$.

Al $\Delta m_{23}^2 = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ massima sensibilità per $\frac{L}{E} \simeq 4 \cdot 10^2 \frac{\text{Km}}{\text{GeV}}$.

ESPERIMENTI per STUDIO νN

\rightarrow rivelatore in asse con il tunnel di decadimento e molto vicino ad esso per massimizzare l'intensità dei ν incidenti.

ESPERIMENTI per le OSCILLAZIONI dei ν

$\rightarrow E_\nu \simeq 1 \text{ GeV}$, $L \simeq 300 \div 800 \text{ Km}$ (*long baseline*), rivelatore *off axis*.

ENERGIA DI ν INCIDENTI SU DETECTORFascio *ON AXIS*

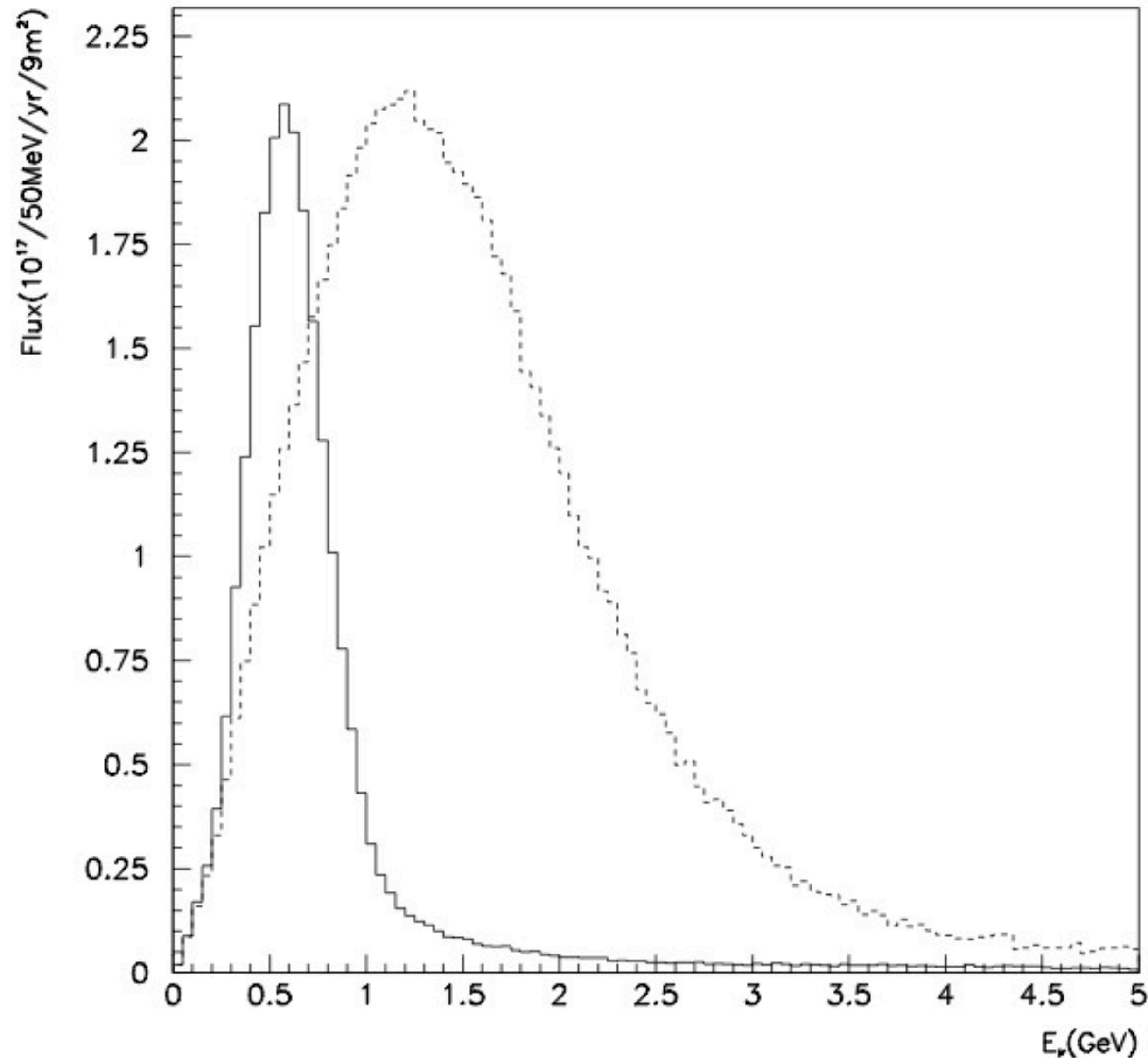
- alta intensità del fascio;
- larga distribuzione.

Fascio *OFF AXIS*

- minore intensità del fascio;
- distribuzione piccata per determinati valori di E_ν .



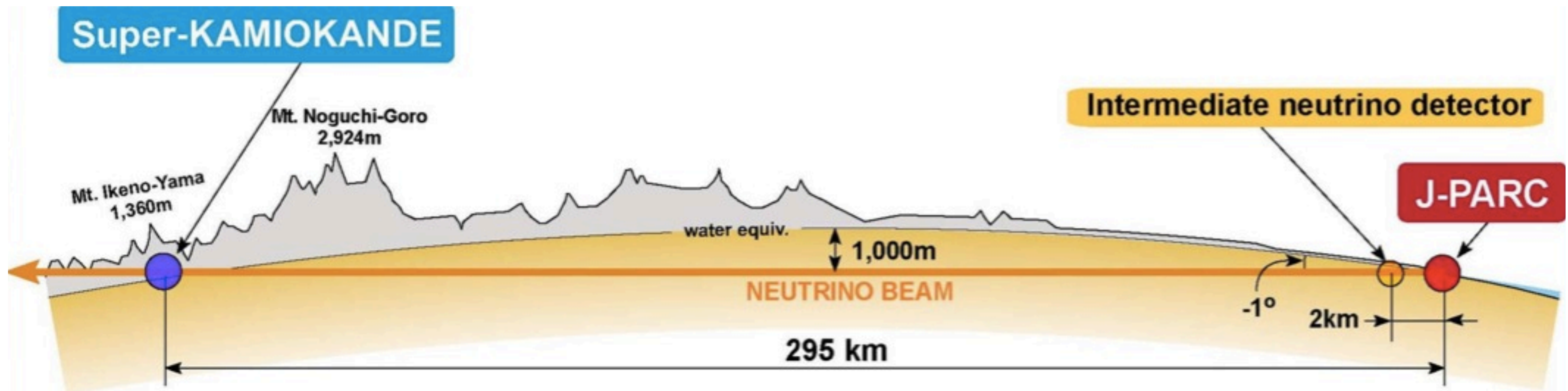
Il metodo del fascio *off axis* permette di massimizzare il flusso all'energia a cui è supposta l'oscillazione, per massimizzare la sensibilità.



T2K

Esempio di esperimento per misurare θ_{13} .

Tokai to Kamioka, Giappone. Esperimento a *long baseline*, sfrutta il metodo del fascio *off axis*.

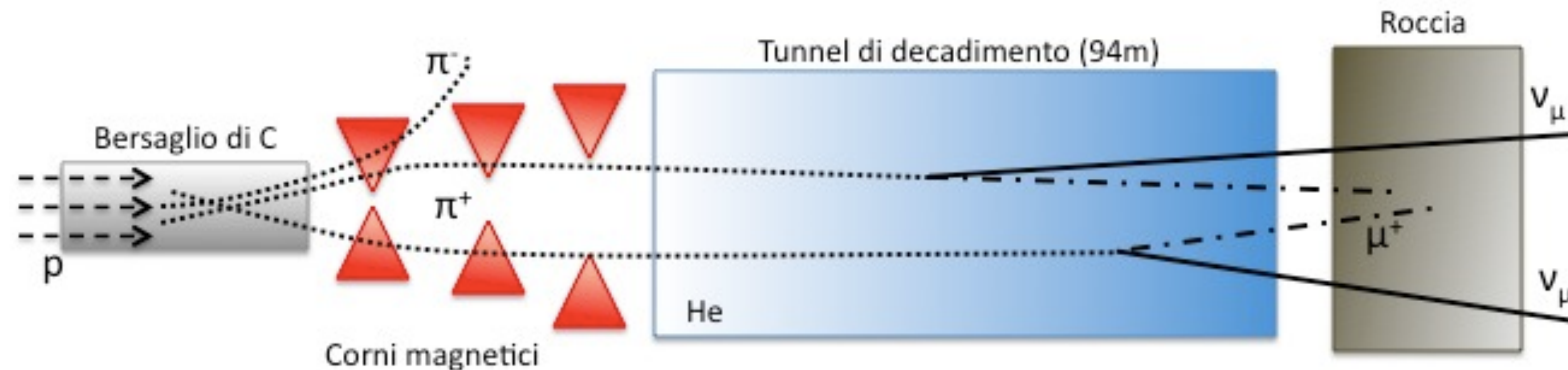
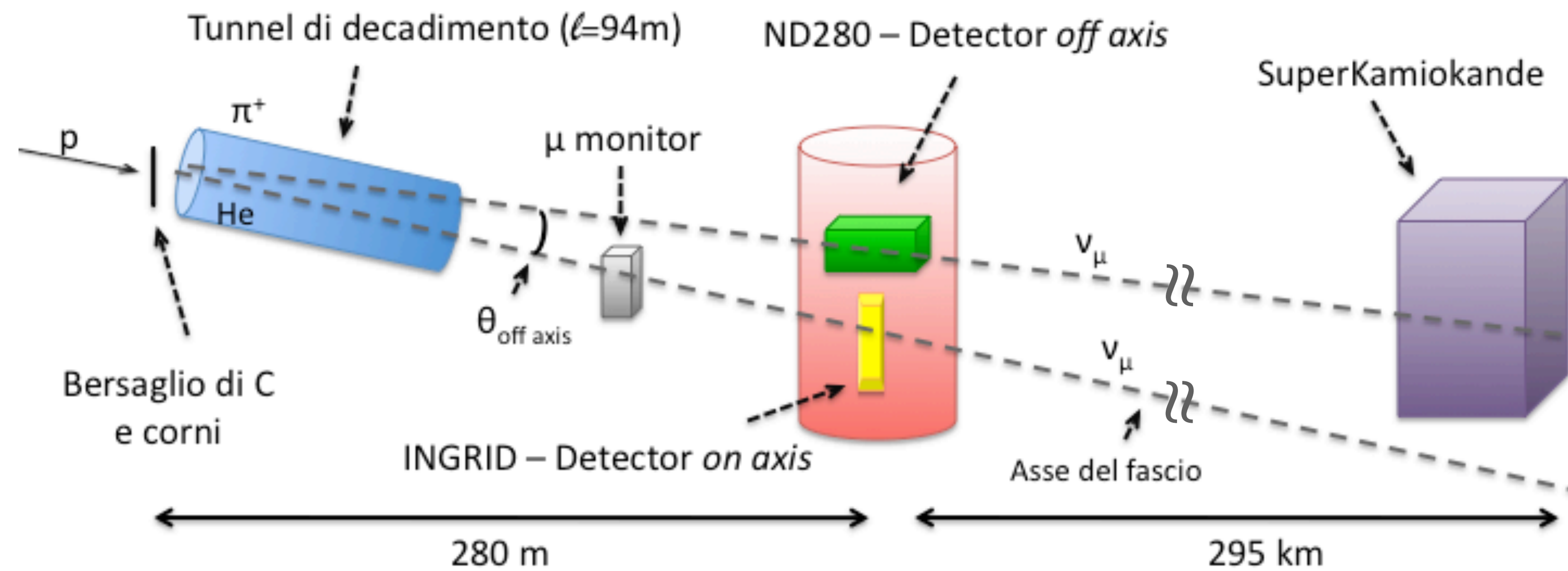


- Intenso fascio di ν_μ e ricerca di ν_e a 295 Km;
- fascio: nuovo PS JPARC;
- rivelatori: ND \rightarrow monitor beam;
FD \rightarrow SuperKamiokande ($V=50$ kt).

CREAZIONE DEL FASCIO DI ν_μ

- $\theta_{off\ axis} = 2.5^\circ$, energia piccata a $E_\nu = 0.7\ GeV$;
- protoni di $E_p = 40\ GeV$ colpiscono il bersaglio di C, producendo π e K ($3.3 \cdot 10^{14}$ p/pulse, pulse di $5.2\ \mu s$ con frequenza di $3.5\ s$);
- 3 corni magnetici focalizzano π^+ e K^+ nella direzione voluta;
- π^+ e K^+ decadono in μ^+ e ν_μ ;
- i μ^+ vengono fermati, mentre i ν_μ proseguono.

→ FASCIO DI T2K: $\sim 95\% \nu_\mu$
 $4\% \bar{\nu}_\mu$
 $1\% \nu_e, \bar{\nu}_e$

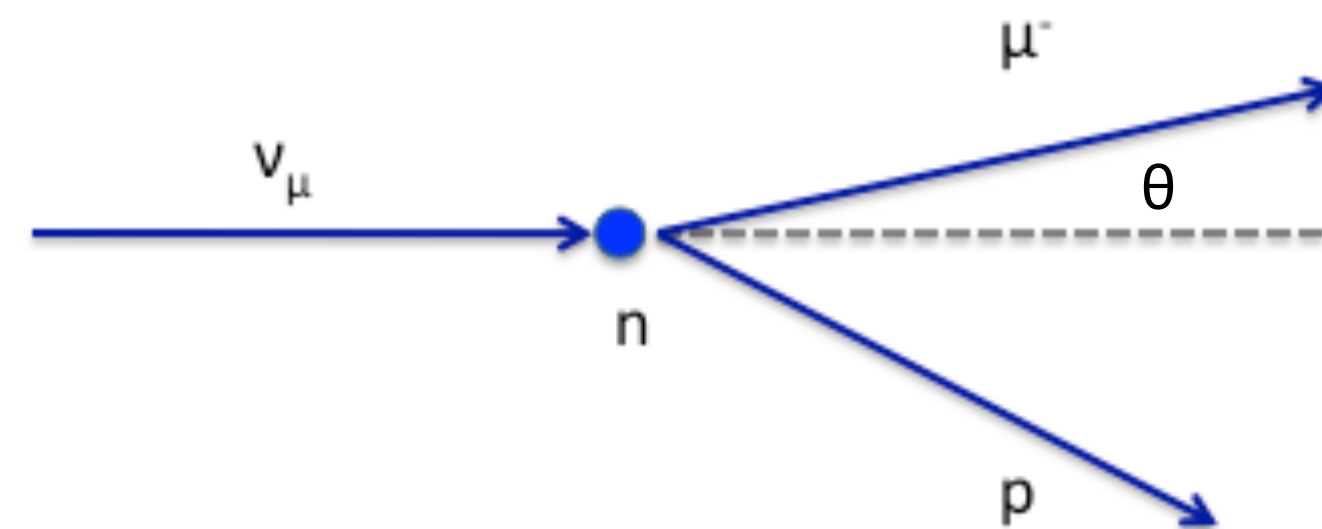


RICERCA DI ν_e A DISTANZA L

Se avviene l'oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ si osservano interazioni di ν_e nello stato finale.

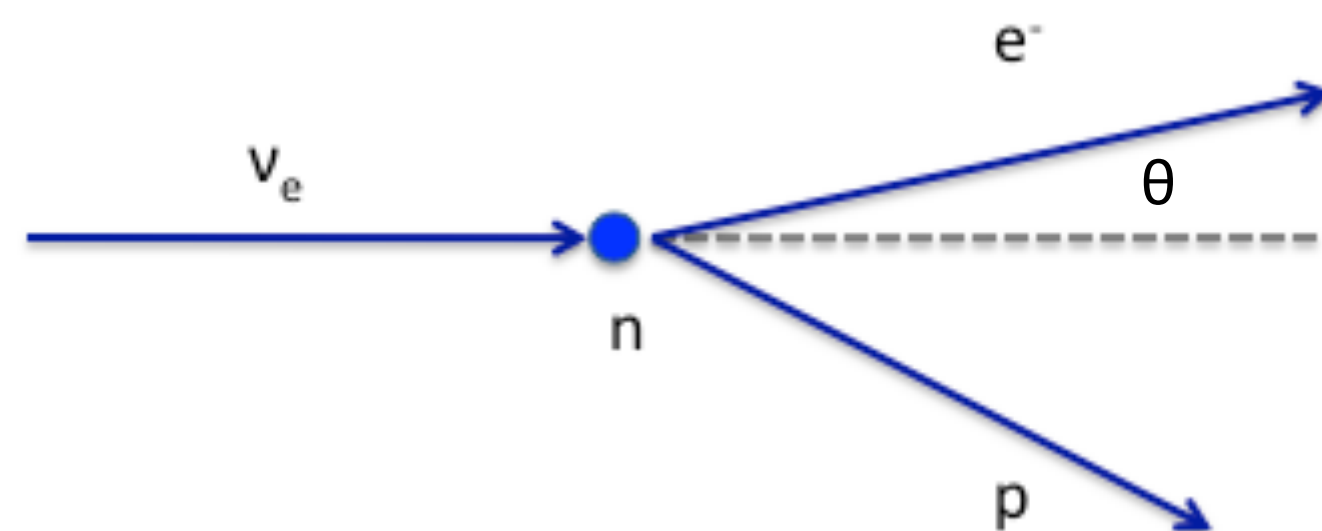
$\nu_l + n \rightarrow p + l^- \rightarrow l^-$ e ν_l hanno lo stesso sapore. Si può avere:

$$\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$$



→ misura sparizione di μ^-

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$



→ misura apparizione di e^-

SUPERKAMIOKANDE

1996

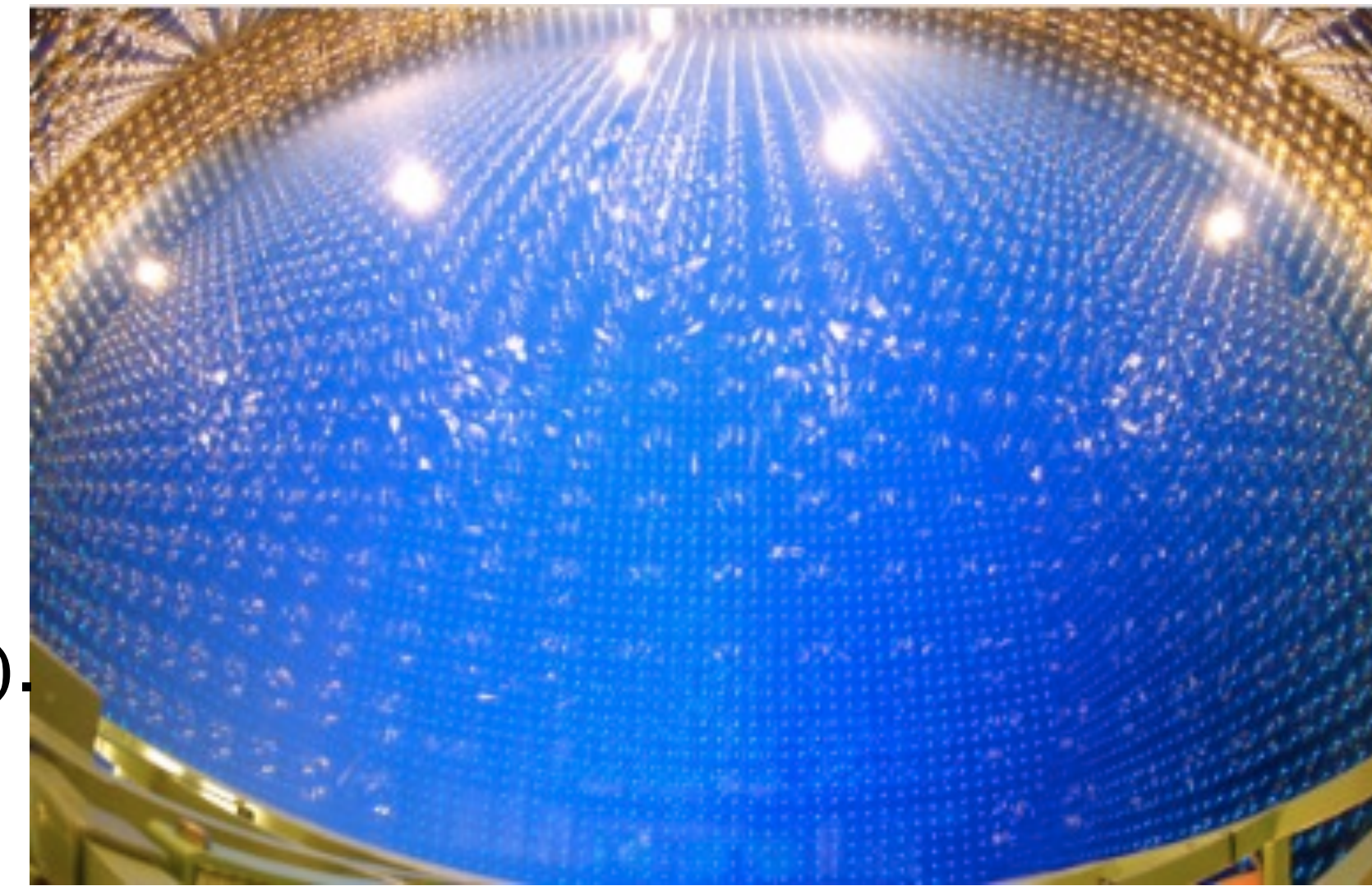
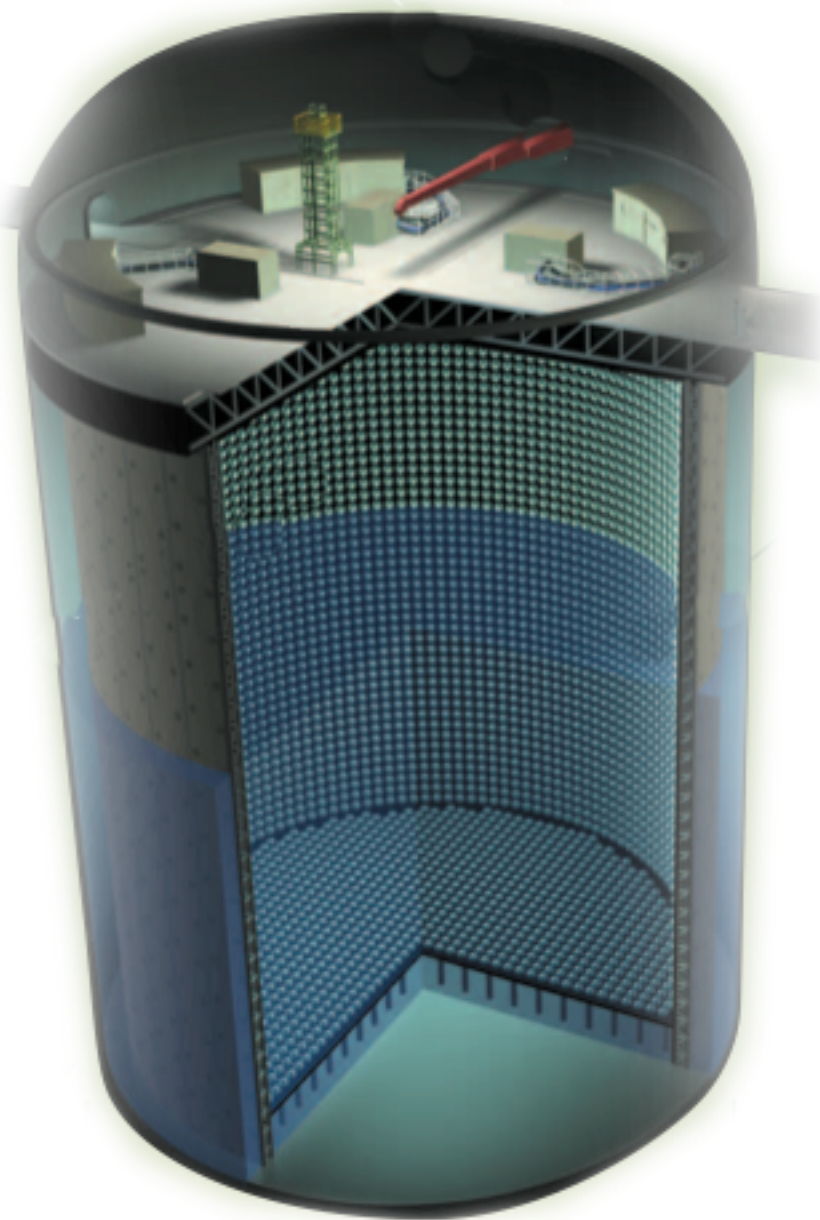
Far detector: **SK III/IV**. Si trova 1000 m sotto terra, nel giacimento minerario di Kamioka, Giappone.

$V=50$ kt di H_2O pura ($FV=22.5$ kt), rivelatore Cherenkov.

SK III



- **Rivelatore esterno:** 2.6 m di spessore;
18 kt di volume;
1885 PMT.
- **Rivelatore interno:** 33.8 m di diametro;
34.2 m di altezza;
32 kt di volume;
11.146 PMT (40.4% di copertura).



SK III

SK IV



elettronica & DAQ

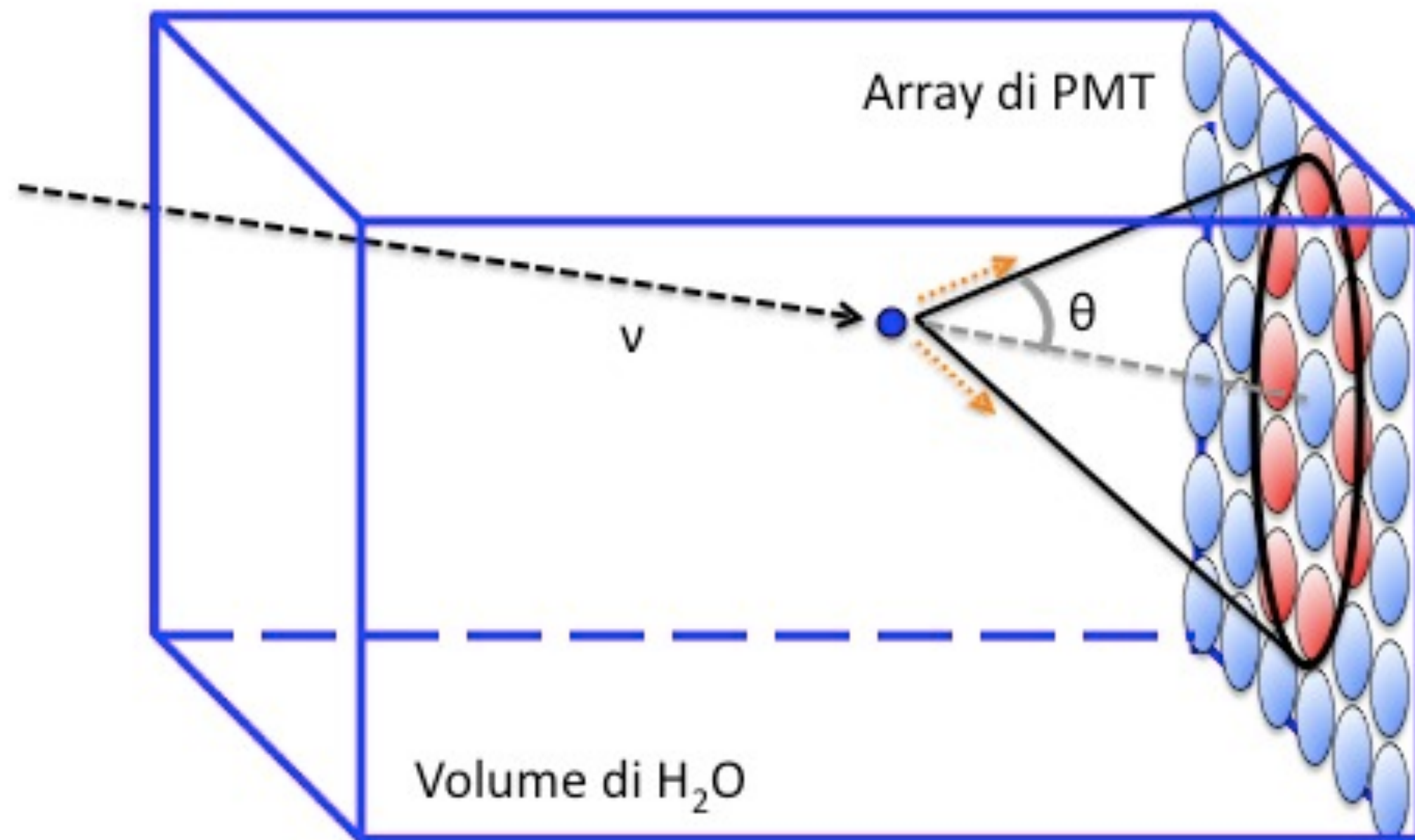


~ 10 ν_μ per giorno attesi in
condizioni di massima potenza
del fascio

Le reazioni da identificare sono:

- $\nu_\mu N \rightarrow \mu^- N'$ → N' non osservabile
- $\nu_e N \rightarrow e^- N'$ → N' non osservabile
- $\nu_\tau N \rightarrow \tau^- N'$ → non possibile: energia insufficiente per la produzione del τ

EFFETTO CHERENKOV



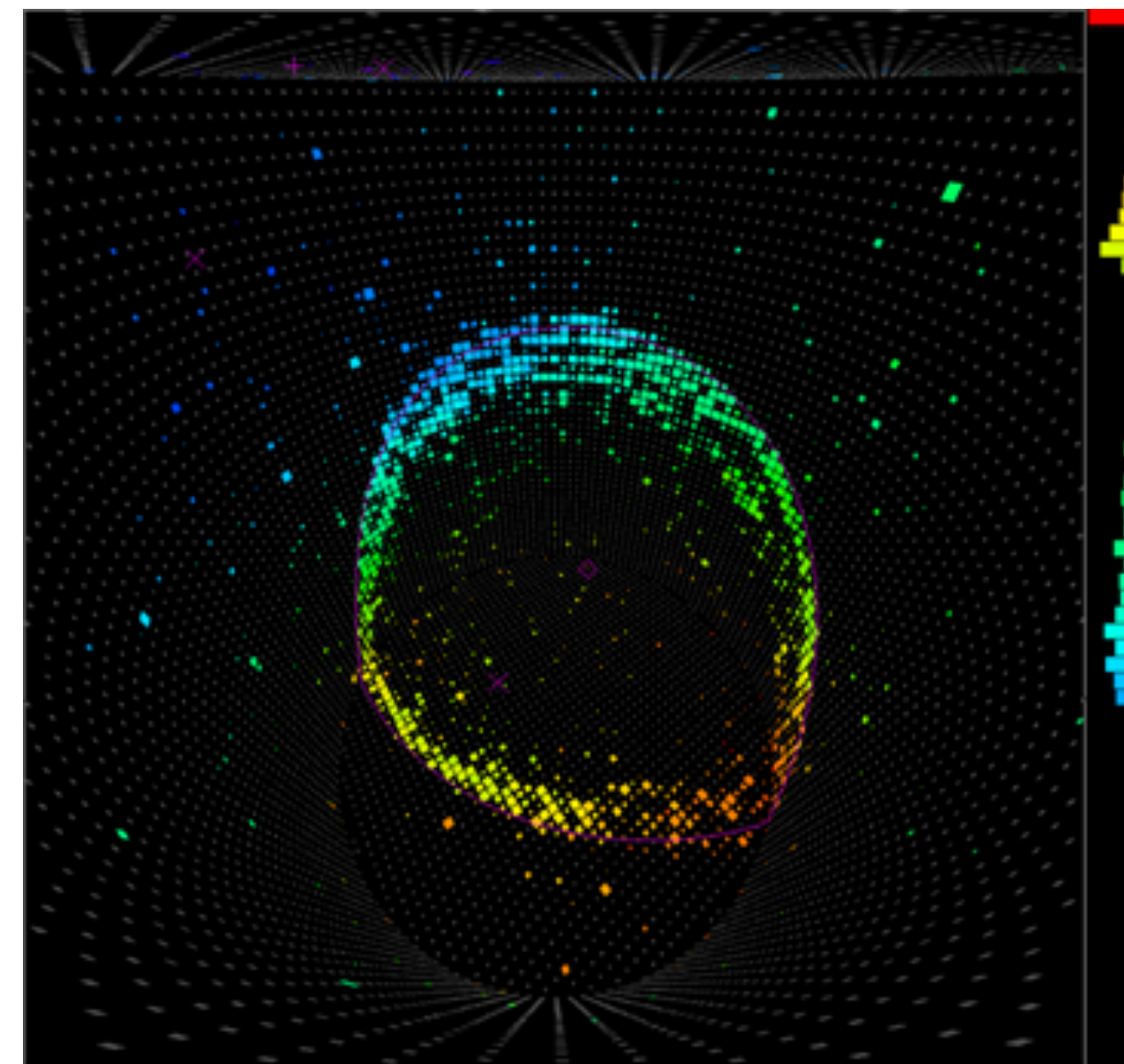
Emissione di luce per $v_{\text{part}} > c/n$ ($n_{H_2O}=1.33$),
rivelata dai PMT.

(Energie di soglia: $E_e=0.768 \text{ MeV}$, $E_\mu=158.7 \text{ MeV}$)

ANELLI DI LUCE CHERENKOV

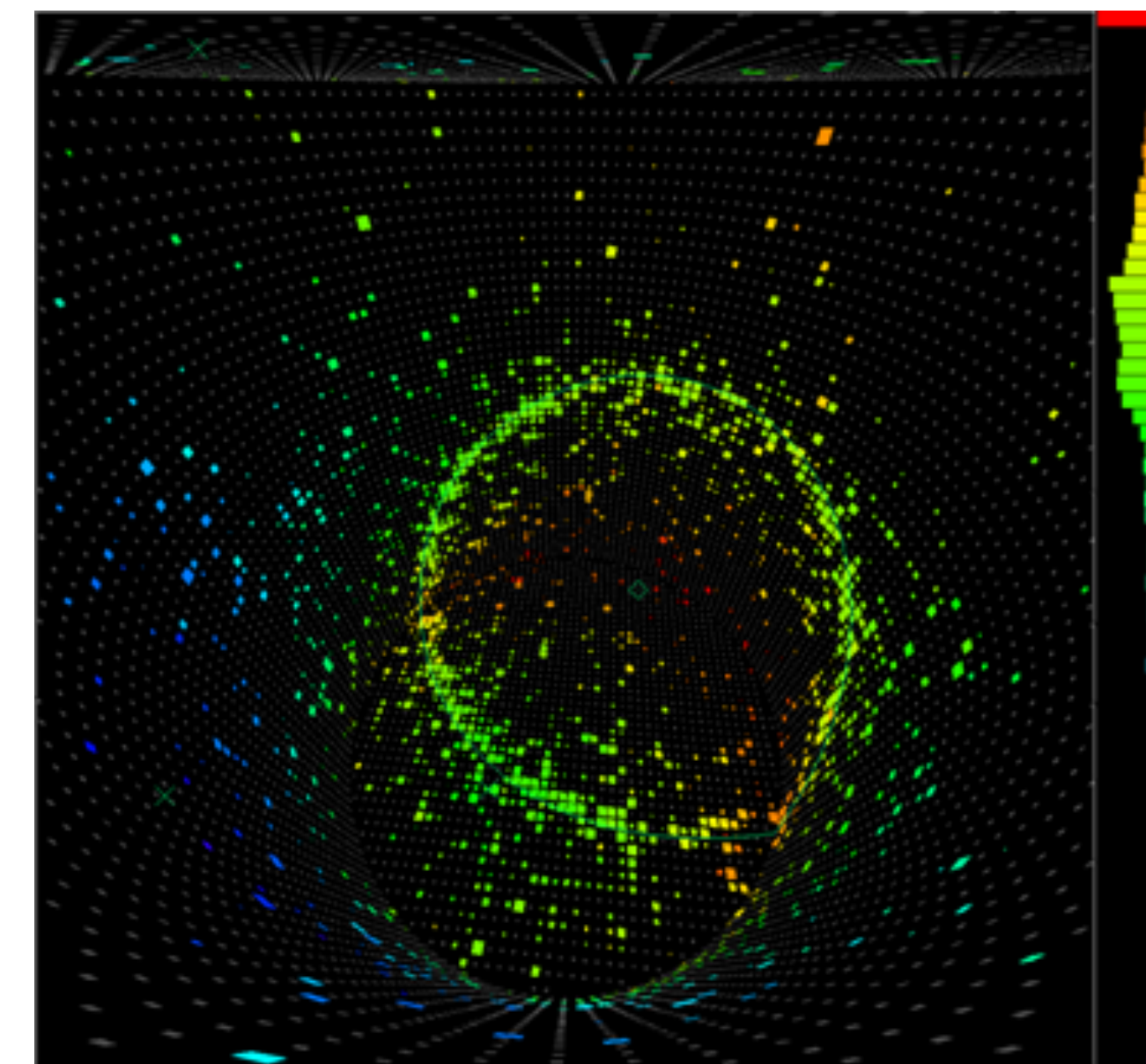
μ da ν_μ

Anello *sharp*



e da ν_e

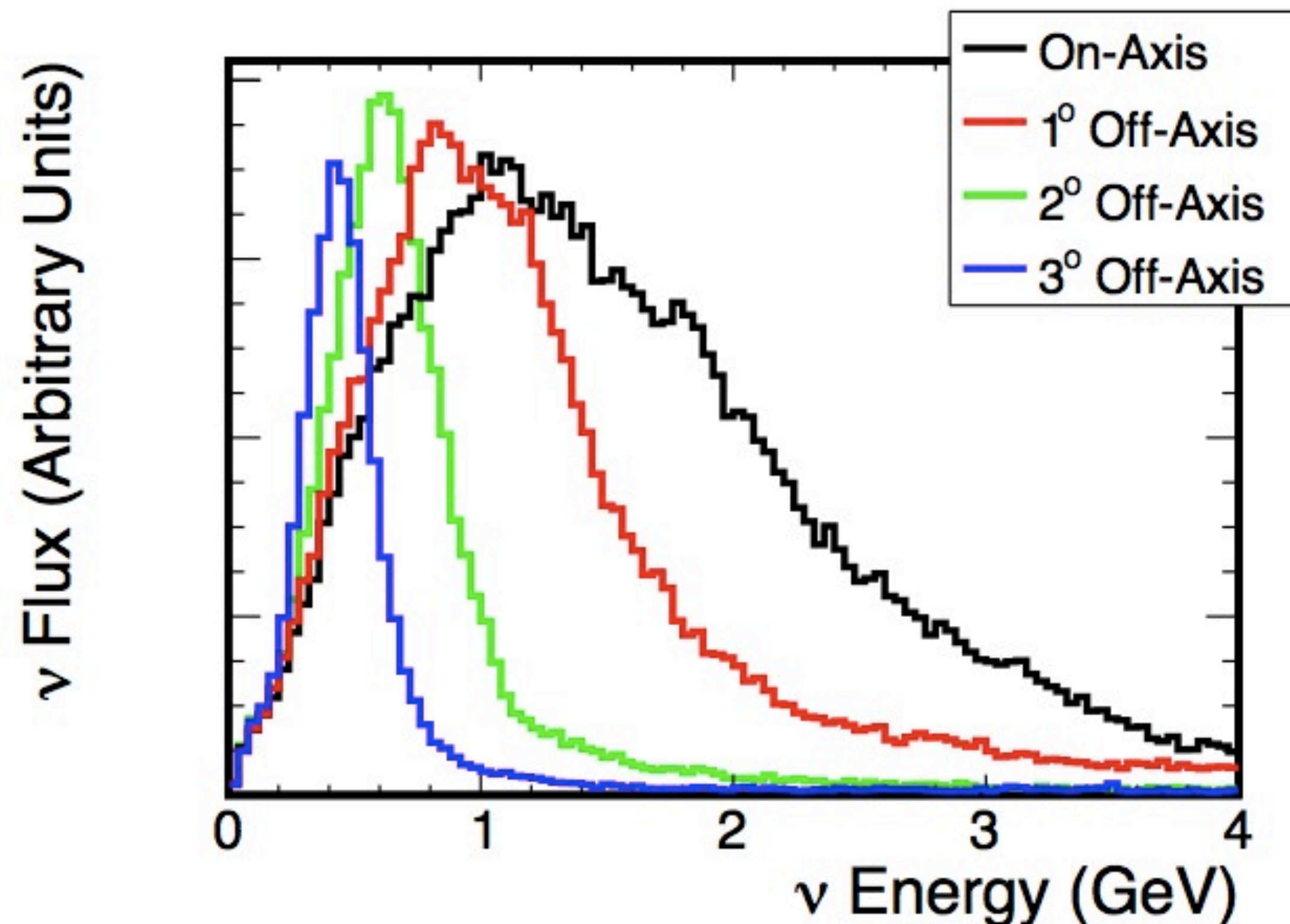
Anello *fuzzy*
(shower elettromagnetica)



OTTIMIZZAZIONE DEL FASCIO

Si è già detto che al $\Delta m_{23}^2 = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ si ha massima sensibilità per $\frac{L}{E} \simeq 4 \cdot 10^2 \frac{\text{Km}}{\text{GeV}}$.

L (*baseline*) negli esperimenti è un parametro fissato, dunque è essenziale avere la più alta intensità possibile di ν incidenti all'energia voluta. Per questo il rivelatore è posizionato di qualche grado fuori dall'asse dei neutrini ($\theta_{\text{off axis}}$).



Per T2K

$L=295 \text{ Km};$

$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e)_{MAX}$ con $E_{\nu}=0.7 \text{ GeV};$

$\Delta m_{23}^2=2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2;$

Massima probabilità di interazione a $E_{\nu}=0.7 \text{ GeV}$ ottenuta con la tecnica *off axis*.

TECNICHE DI SIMULAZIONE

Tramite un Monte Carlo è possibile simulare il fascio in esame e trovare l'angolo $\theta_{off\ axis}$ che massimizzi la sensibilità dell'esperimento. Il MC che permette di fare ciò è molto complicato (~10.000 righe di codice), ma è possibile riprodurne uno più semplice ed approssimato, che metta in luce il significato del fascio *off axis*.

COS'È

La simulazione MC permette di realizzare copie pseudocasuali del fenomeno in esame, tenendo conto del peso probabilistico di ciascuna di esse, cercando di considerare tutti i parametri che possano influenzare il fenomeno stesso.

REALIZZAZIONE

- Si utilizza lo spettro di energia dei π noto da altri esperimenti per generare il fascio di ν . $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$ è un decadimento a due corpi di una particella a spin nullo, per cui la distribuzione angolare è uniforme e l'impulso del ν nel sistema di riferimento del π è fissato dalla formula

$$p_\nu^* = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{m_\mu^2} \simeq 0.03 \text{ GeV}$$

- Il decadimento è simulato tramite le seguenti equazioni

$$\begin{aligned} p_x^* &= p_\nu^* \sin \theta \cos \phi \\ p_y^* &= p_\nu^* \sin \theta \sin \phi \\ p_z^* &= p_\nu^* \cos \theta \end{aligned}$$

con $\cos \theta \in [-1, 1]$
 $\phi \in [0, 2\pi]$ \longrightarrow **generazione casuale**
 (nessuna direzione di decadimento preferita).

Scegliendo il riferimento cartesiano lungo l'asse z (direzione dei π e del tunnel di decadimento), tramite le trasformazioni di Lorentz si ricavano energia ed impulso del ν nel sistema di riferimento del laboratorio:

$$\begin{aligned} E_\nu &= \gamma(E_\nu^* + \beta p_z^*) \\ p_x &= p_x^* \\ p_y &= p_y^* \\ p_z &= \gamma(\beta E_\nu^* + p_z^*) \end{aligned} \quad \begin{aligned} \gamma &= \frac{E_\pi}{m_\pi} \\ \beta &= \frac{p_\pi}{E_\pi} \end{aligned}$$

RISULTATI

- L'intensità ha un picco per $\theta=0^\circ$, come ci si aspettava, con una altrettanto attesa diminuzione in funzione di θ ;
- tutti gli eventi risultano contenuti nel cono di apertura il cui raggio corrisponde ad un angolo di 12° .

→ Gli eventi contenuti nel cono hanno
 $\theta=(0\pm 12)^\circ$

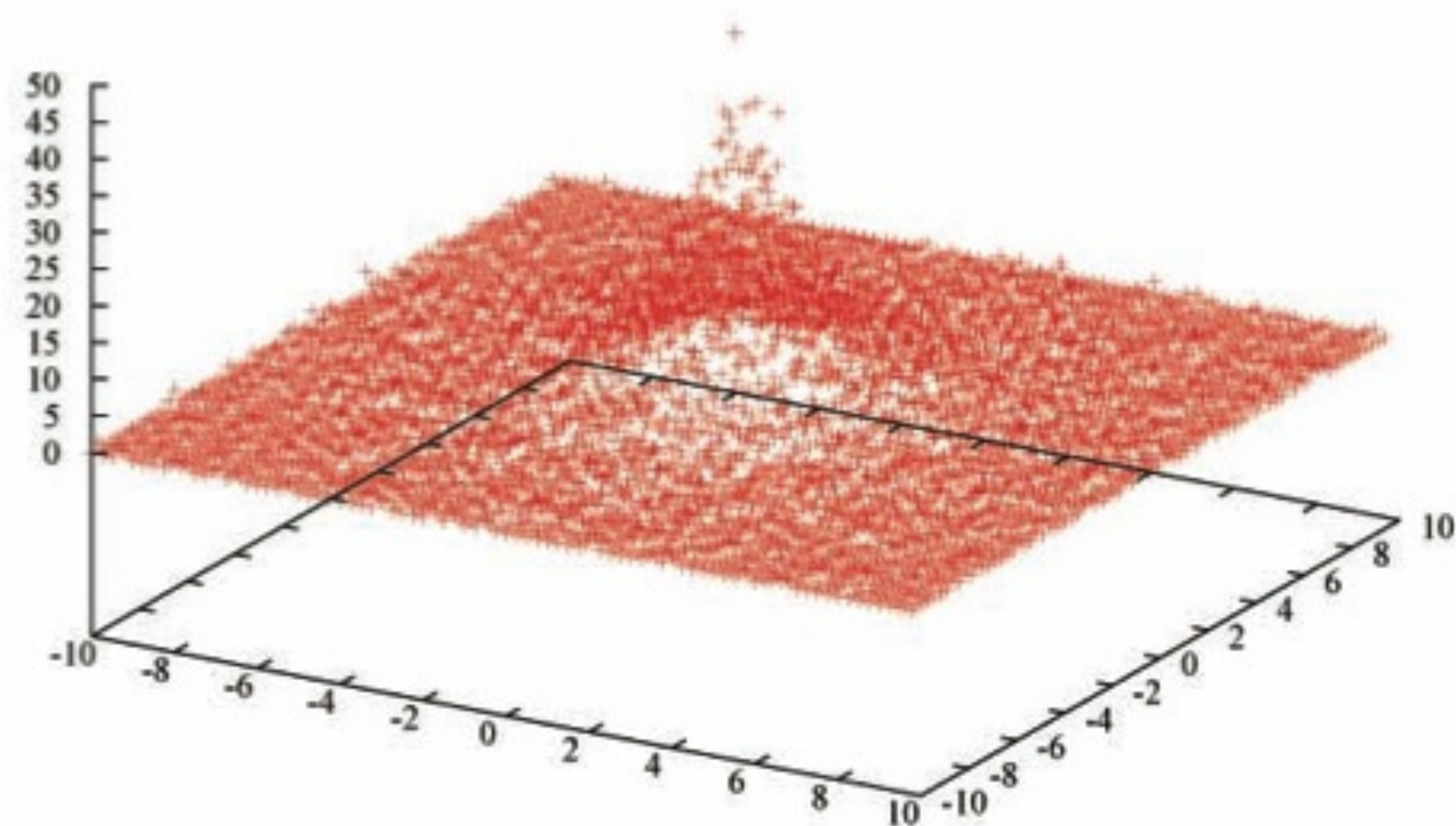


Grafico 3D:

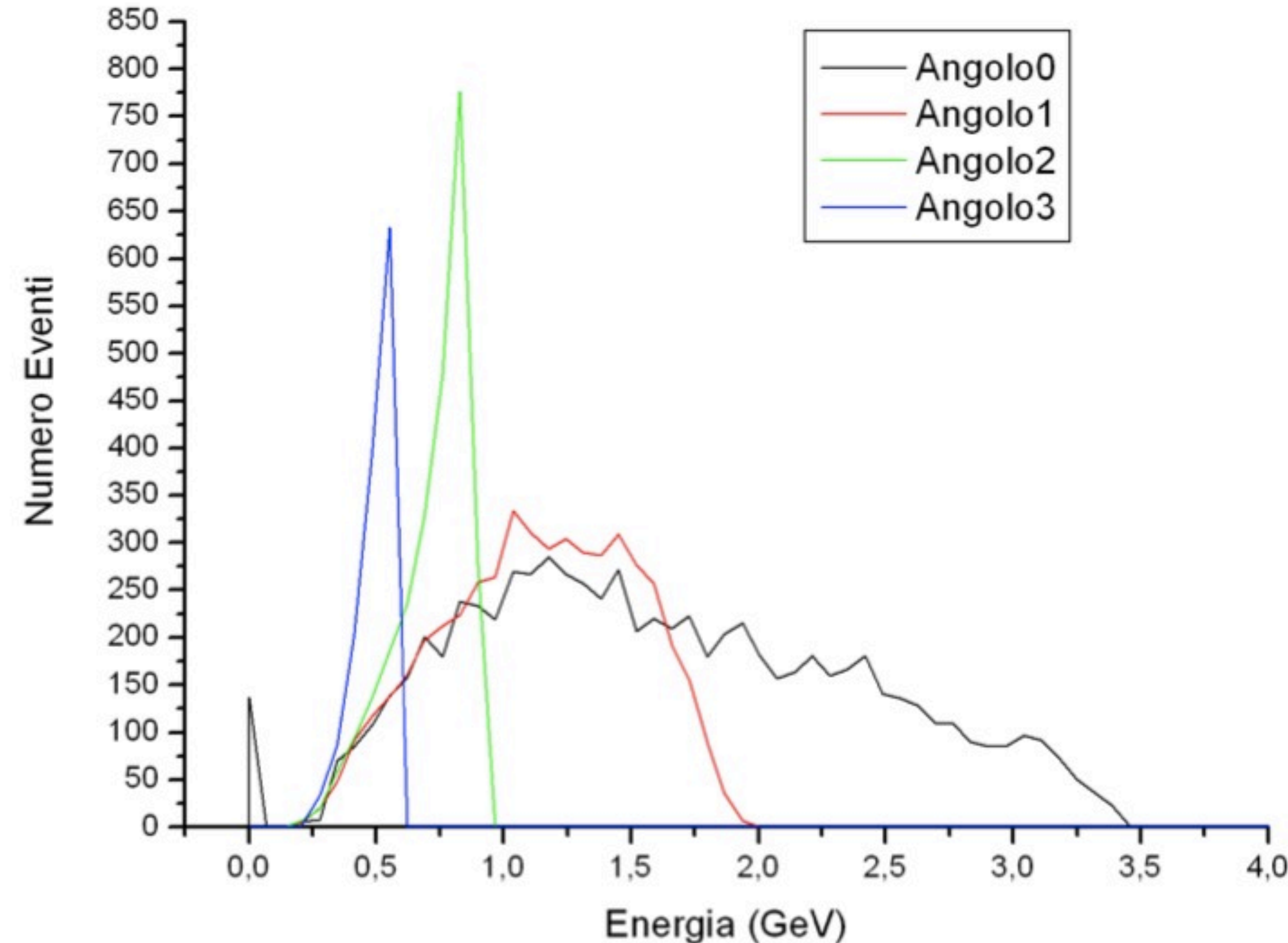
numero di eventi vs punto di impatto
 su un piano xy ($20 \times 20 \text{ m}^2$) posto a 10 m dall'origine ed
 ortogonale alla direzione del ν ; 13.315 eventi.

RISULTATI

- Lo spettro di energia di ν incidenti su un bersaglio ($4 \times 4 \text{ m}^2$) centrato in $x=(0,17,34,51)\text{m}$, ossia di ν che colpiscono superfici uguali ma a $\theta=0^\circ, 1^\circ, 2^\circ$ e 3° , è:

Osservazioni

- La curva si stringe al variare di θ ed il picco si sposta per valori più bassi di E_ν ;
- per oscillazioni con $E_\nu=0.8 \text{ GeV}$, conviene porre il rivelatore a $\theta=2^\circ$: integrale totale più basso (846 eventi vs 2489 per $\theta=0^\circ$), ma intensità superiore per $\theta=2^\circ$;
- risultato della simulazione qualitativamente simile ai conti dettagliati esistenti in letteratura.



Per $\theta_{off\ axis}=2^\circ$, $E_\nu=0.7 \text{ GeV}$ \longrightarrow Scelta di T2K

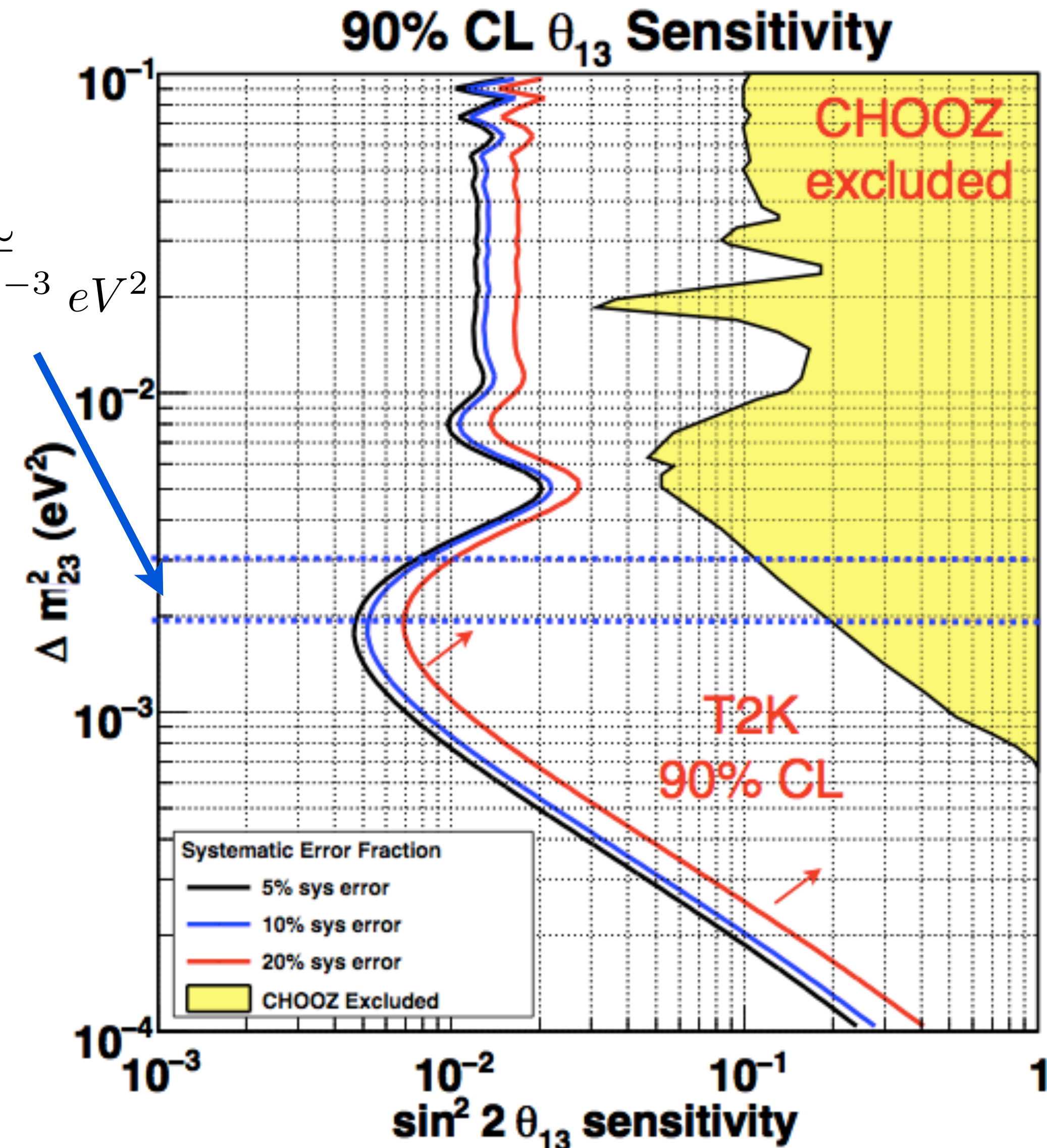
SOMMARIO

T2K prevede 5 anni di data taking con $5 \cdot 10^{21}$ POT.
 Sono attese ~ 10.000 interazioni in SK.

$$\Delta m^2 \simeq 1.9 \div 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

Parametri	ν_μ CC b/g	NC b/g	beam ν_e b/g	ν_e signal
$\Delta m^2_{13} = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$	0.4	9.7	15	143

In base alle attuali stime di Δm^2 , T2K dovrebbe essere sensibile ad un valore di $\sin^2 2\theta_{13}$ fino a 10^{-2} , con un CL del 90%, migliorando di un fattore 10 i risultati precedenti.



CONCLUSIONI

- T2K attualmente in presa dati, alla ricerca di elettroni per verificare che $\theta_{13} \neq 0$;
- utilizzata la tecnica del fascio off axis;
- attualmente: $\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$;
- per la misura di θ_{13} si utilizzano anche esperimenti con $\bar{\nu}_e$ da reattore: double-Chooz (Francia);
Daya Bay (Cina);
- è in costruzione un rivelatore simile a T2K, NO ν A, al FermiLab;
- prossima generazione: misura di δ_{CP} se $\theta_{13} \neq 0$.

Appendice

CARATTERISTICHE DEI NEUTRINI

● FAMIGLIE: $\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$ + antiparticelle

● NUMERO LEPTONICO: $\left. \begin{array}{l} L=+1 \text{ per i leptoni} \\ L=-1 \text{ per gli antileptoni} \end{array} \right\} \underline{\text{CONSERVATO}}$

● MASSA: da misure indirette si ha $m_{\nu_e} < 2 \text{ eV}/c^2$
 $m_{\nu_\mu} < 2.7 \cdot 10^5 \text{ eV}/c^2$
 $m_{\nu_\tau} < 3.1 \cdot 10^7 \text{ eV}/c^2$

● INTERAZIONE: solo debole

APPROFONDIMENTO TEORICO

Nel sdr di riposo di ν_i vale $i\hbar \frac{\partial}{\partial \tau_i} |\nu_i(\tau_i)\rangle = m_i c^2 |\nu_i(\tau_i)\rangle$, la cui soluzione è $|\nu_i(\tau_i)\rangle = e^{-\frac{m_i c^2 \tau_i}{\hbar}} |\nu_i(0)\rangle$.

Ma ν_1 e ν_2 hanno masse diverse, quindi si propagano in modo differente. Infatti, andando a misurare lo stato a distanza L dal punto di decadimento, non si ha più uno stato "puro", ma si ha una combinazione lineare di ν_1 e ν_2 .

Nel sdr del laboratorio ν_i ha energia E_i e impulso p , da cui $\frac{m_i c^2 \tau_i}{\hbar} = \frac{E_i t - p c L}{\hbar}$ (t : distanza che ν_i impiega a percorrere L).

$E_i = \sqrt{c^2 p^2 + m_i^2 c^4} \simeq c p + \frac{m_i^2 c^4}{2 c p} \simeq E + \frac{m_i^2 c^4}{2 E}$, per cui, dopo un tempo t : $|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin \theta e^{-\frac{i E_1 t}{\hbar}} |\nu_1\rangle + \cos \theta e^{-\frac{i E_2 t}{\hbar}} |\nu_2\rangle$

La probabilità di oscillazione è data da: $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{(E_2 - E_1)t}{2\hbar}$.

Notiamo che $\frac{(E_2 - E_1)t}{2\hbar} = \frac{(m_2^2 - m_1^2)c^4 t}{4E\hbar} = \frac{\Delta m^2 c^3 L}{4E\hbar} = 1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}$, per cui possiamo riscrivere l'espressione della probabilità nel modo seguente:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e; t) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E} \right)$$

COME SI STUDIANO LE OSCILLAZIONI?

Esistono due metodi:

- **APPARIZIONE** $P(\nu_A \rightarrow \nu_B)$ → studio della presenza di ν di famiglia leptonica diversa da quella del fascio originario:
 - si utilizza un rivelatore a distanza L dalla sorgente di ν di un determinato sapore;
 - è richiesta precisione nella conoscenza della *purezza* del fascio di ν .
- **SPARIZIONE** $P(\nu_A \nrightarrow \nu_A)$ → studio della diminuzione di ν di una determinata famiglia leptonica:
 - è richiesta precisione nella conoscenza del fascio di ν (*intensità e distribuzione di E_ν*) che può essere rivelato con un *Near Detector* (**ND**);
 - si calcola la frazione di ν scomparsi, noto il valore di aspettazione:

$$P(\nu_A \nrightarrow \nu_A) = \frac{N_{asp}^A - N_{oss}^A}{N_{asp}^A}$$

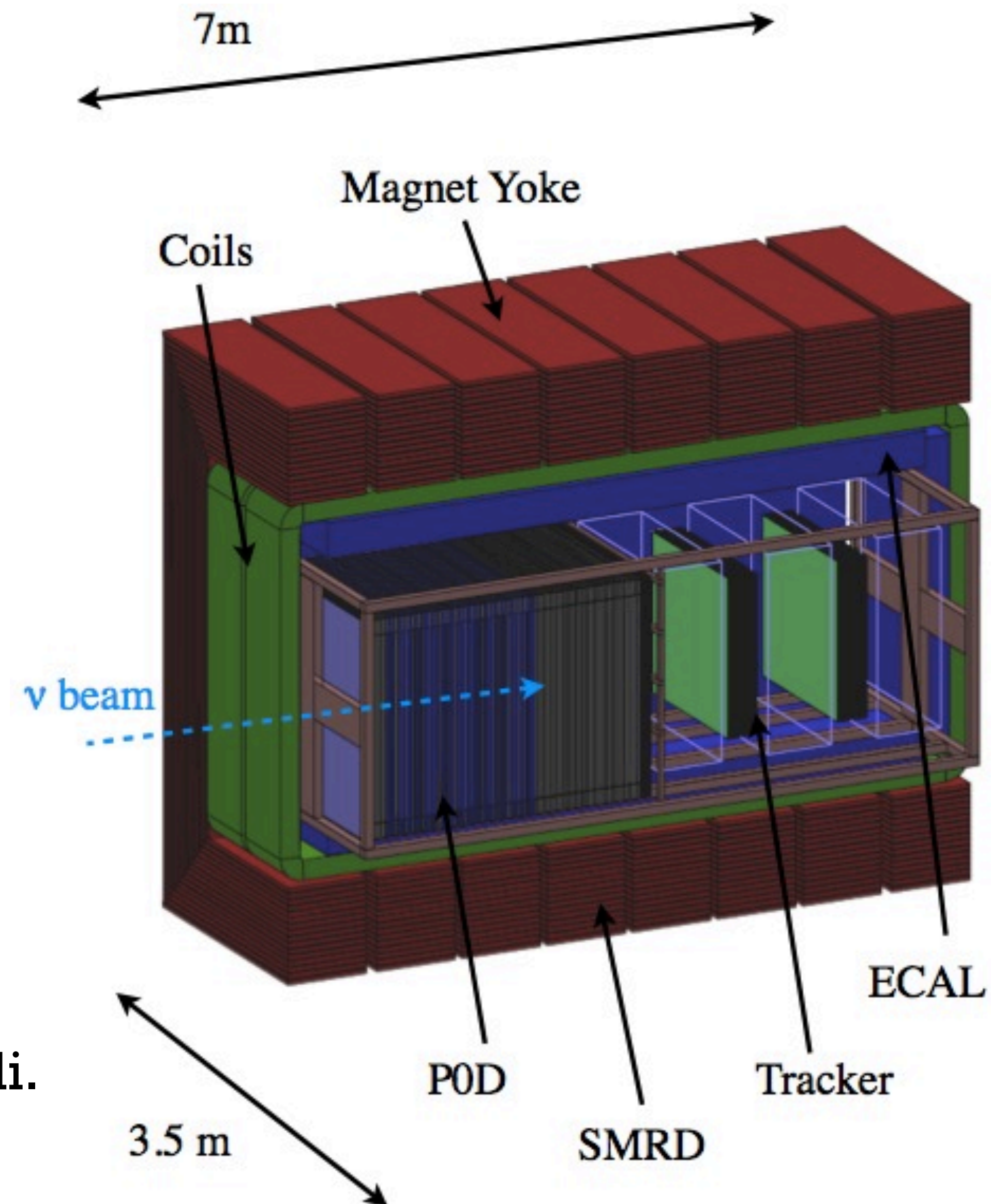
J-PARC



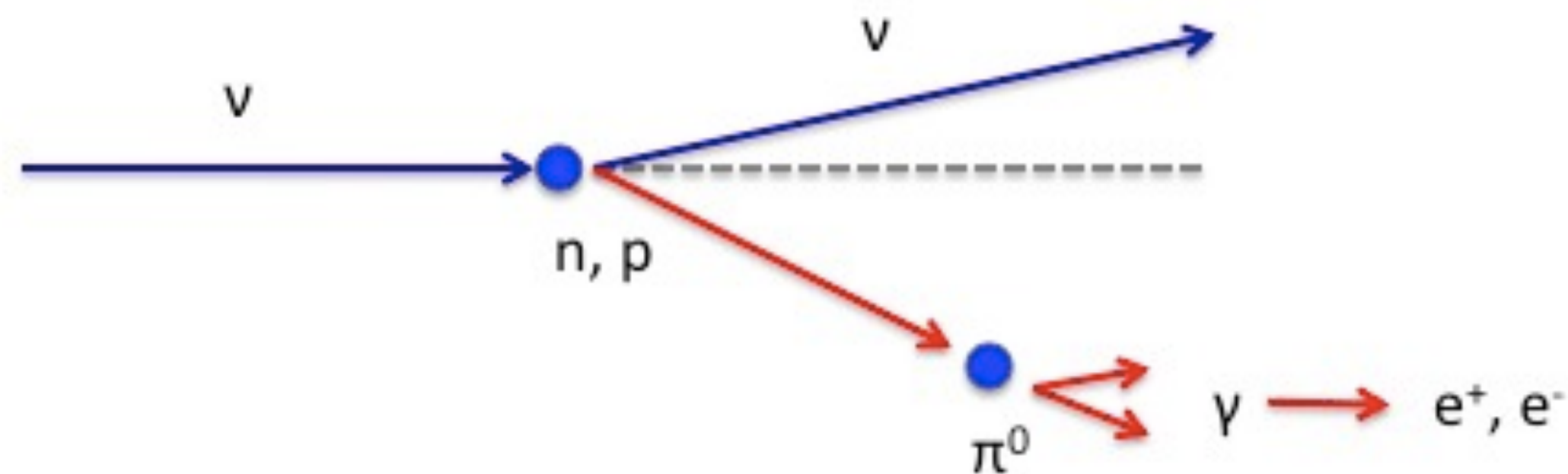
ND280

→ Misura il flusso di ν_μ e ν_e verso SK.

- Magnete di UA1;
- ~ 10.000 interazione da ν per giorno;
- TRAKER: distingue e e μ ;
usa la curvatura della traccia per determinare l'impulso;
- Pi-Zero Detector;
- ECAL: rivela i γ che non hanno interagito nel resto del detector;
- Side Muon Range Detector: misura l'impulso dei μ laterali.



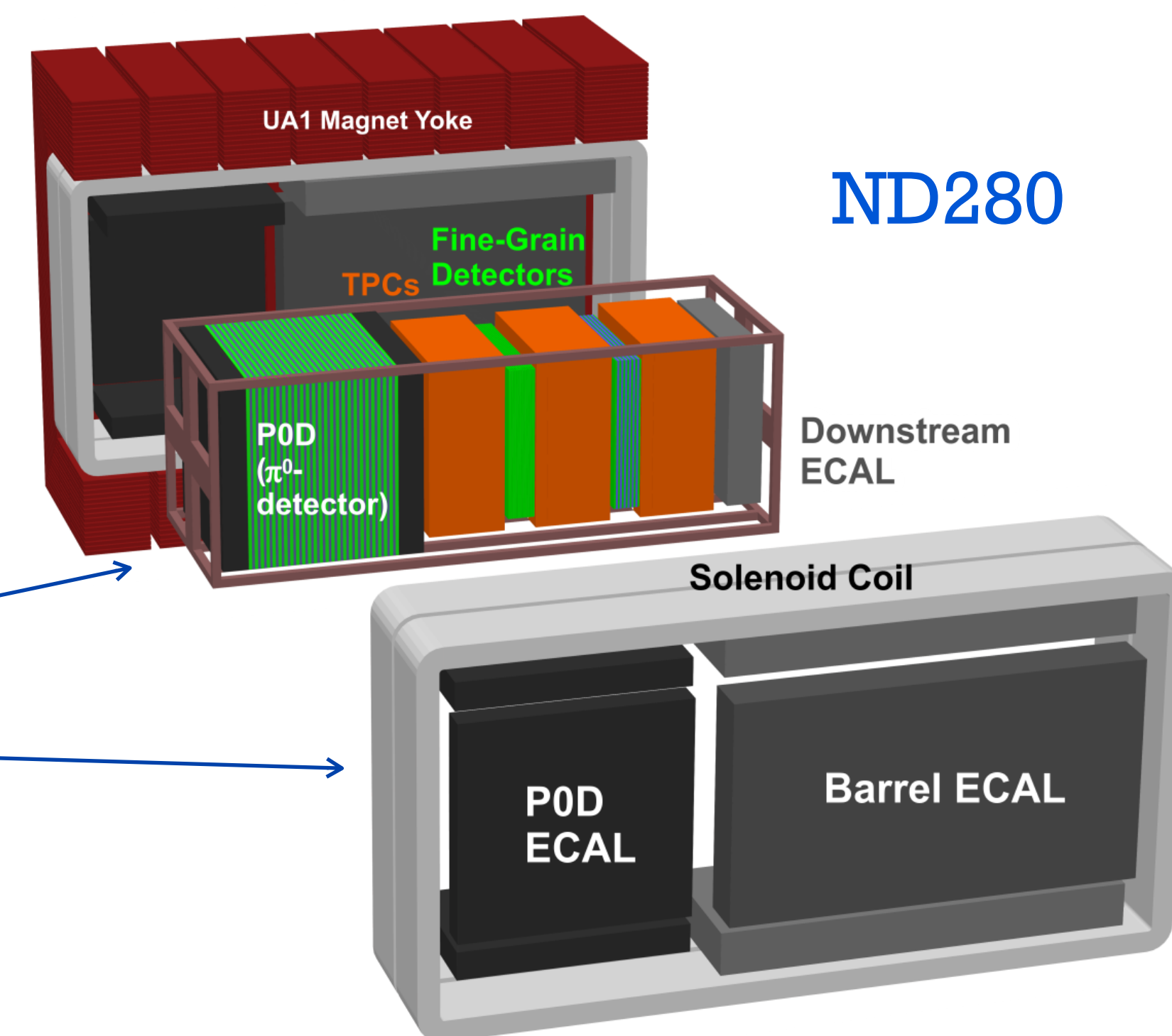
FONDO



- Produzione di π^0 ;
- contaminazione intrinseca del fascio originario.

STIMA DEL FONDO

- Simulazione Monte Carlo;
- confronto con gli eventi rivelati da P0D;
- effetto Cherenkov;
- osservazione di e nel ND.



POD

- Realizzato per ottenere misure ad alta statistica relativa agli sciami elettromagnetiche;
- FV=1.7 t di acqua;
- $\sim 17 \cdot 10^3$ in acqua per fasci di 10^{21} protoni in un anno;
- ampia statistica per migliorare le simulazioni Monte Carlo.

