

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC

VÀ CÔNG NGHỆ

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

oOo



Trần Văn Ngọc

KIỂM CHỨNG BẤT BIẾN CP VÀ CPT BẰNG CÁC PHÉP ĐO  
DAO ĐỘNG NEUTRINO TẠI THÍ NGHIỆM T2K

Tóm tắt luận án Tiến sĩ Vật lý

Chuyên ngành: Vật lý lý thuyết và Vật lý toán

Mã số: 9440103

Hà Nội, 2023

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Nguyễn Thị Hồng Vân, Viện Vật lý, Viện hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học 2: GS. TS. Tsuyoshi Nakaya, Đại học Kyoto, Nhật Bản

Phản biện 1: GS. TS. Nguyễn Văn Đỗ, Trường Đại học Duy Tân

Phản biện 2: TS. Lê Đức Ninh, Đại học Phenikaa

Phản biện 3: PGS. TS. Phan Hồng Liên, Học viện kỹ thuật quân sự

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 9 giờ 00', ngày 20 tháng 07 năm 2023

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

# Mở đầu

Các đối xứng rời rạc bao gồm phép liên hợp điện tích C, nghịch đảo không gian P, và nghịch đảo thời gian T, đóng vai trò quan trọng trong Vật lý hạt cơ bản. Nghiên cứu tính bảo toàn hay vi phạm các đối xứng này có thể là chìa khoá mở nhiều cánh cửa bí mật của vũ trụ. Do đó việc kiểm chứng tính bất biến của chúng, trong đó có đối xứng CP và CPT có vai trò rất quan trọng. Sự vi phạm đối xứng CP trong phần lepton có thể góp phần giải thích cho sự bất đối xứng vật chất - phản vật chất của vũ trụ. Nếu đối xứng CPT bị vi phạm, hệ quả đối với vật lý cơ bản là rất lớn. Vi phạm đối xứng CPT cũng có thể giải thích được sự bất đối xứng vật chất - phản vật chất trong vũ trụ.

Luận án này khảo sát hiện trạng và viễn cảnh kiểm chứng các bất biến CP và CPT dựa vào phân tích dữ liệu từ thí nghiệm T2K và độ nhạy từ sự kết hợp phân tích số liệu các thí nghiệm T2K-II, NO $\nu$ A mở rộng (ký hiệu NO $\nu$ A-II), và JUNO. Ngoài phần mở đầu và kết luận, luận án gồm ba chương chính. Chương 1 giới thiệu tổng quan về dao động neutrino và các thí nghiệm liên quan. Chương 2 trình bày các phép đo tại INGRID, máy dò gần của T2K, bao gồm đo cấu hình chùm tia neutrino và tỉ lệ sự kiện. Trong chương 3, chúng tôi sẽ trình bày nội dung chính của luận án về kiểm chứng bất biến CP và CPT tại thí nghiệm T2K và kết hợp T2K-II, NO $\nu$ A-II, và JUNO.

# Chương 1. Dao động neutrino và các thí nghiệm liên quan

## 1.1 Dao động neutrino

Dao động neutrino là một hiện tượng cơ học lượng tử trong đó một loại neutrino có thể biến đổi hay dao động thành các loại khác trong quá trình chuyển động.

### 1.1.1 Lịch sử neutrino

Năm 1930, W. Pauli đề xuất giả thiết về hạt neutrino để giải thích vấn đề phổ liên tục của phân rã beta. Hạt neutrino electron được phát hiện bởi Clyde Cowan, Frederick Reines và các cộng sự. Năm 1962, Leon M. Lederman, Melvin Schwartz và Jack Steinberger phát hiện ra neutrino muon. Neutrino tau được phát hiện vào năm 2000 bởi thí nghiệm DONUT.

### 1.1.2 Neutrino trong Mô hình chuẩn

Trong Mô hình chuẩn (SM) chỉ tồn tại neutrino tay trái và phản neutrino tay phải. Chúng là các hạt không khối lượng và chỉ tham gia tương tác yếu.

### 1.1.3 Khối lượng neutrino và Cơ chế seesaw

Cơ chế seesaw cho phép tạo ra các số hạng khối lượng cho neutrino, trong đó có một trạng thái neutrino nhẹ  $|m_\nu| \approx \frac{m_D^2}{M}$  và một trạng thái neutrino nặng  $m_N \approx M$ .

### 1.1.4 Dao động neutrino trong chân không

Các trạng thái neutrino vị liên hệ với các trạng thái riêng khối

lượng qua một ma trận  $3 \times 3$  unita

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle, \quad (1.1)$$

Xác suất dao động được xác định như sau

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re} [U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right) + 2 \sum_{i>j} \text{Im} [U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \sin \left( \frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L \right) \quad (1.2)$$

trong đó  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ . Lấy liên hợp phức công thức trên ta thu được công thức cho phản neutrino. Xác suất sống sót cho vị  $\alpha$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\alpha) = 1 - 4 \sum_{i>j} |U_{\alpha i}|^2 |U_{\alpha j}|^2 \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right). \quad (1.3)$$

### 1.1.5 Dao động neutrino trong vật chất

Công thức tổng quát

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \approx \delta_{\alpha\beta} \left\{ 1 - 4 |U_{\alpha 3}|^2 \sin^2 \Delta_{31} \left[ 1 - \frac{2a}{\Delta m_{31}^2} (|U_{13}|^2 - \delta_{\alpha 1}) \right] - \frac{ax}{E} |U_{\alpha 3}|^2 |U_{13}|^2 \sin 2\Delta_{31} \right\} + 4 \sin^2 \Delta_{31} |U_{\beta 3}|^2 |U_{\alpha 3}|^2 \left[ 1 - 2 \frac{a}{\Delta m_{31}^2} (2|U_{13}|^2 - \delta_{\alpha 1} - \delta_{\beta 1}) \right] - 8 \Delta_{21} \sin^2 \Delta_{31} \text{Im}(U_{\beta 3}^* U_{\alpha 3} U_{\beta 2} U_{\alpha 2}^*) + 4 \Delta_{21} \sin 2\Delta_{31} \text{Re}(U_{\beta 3}^* U_{\alpha 3} U_{\beta 2} U_{\alpha 2}^*) + \frac{ax}{E} \sin 2\Delta_{31} (|U_{13}|^2 \delta_{\alpha 1} \delta_{\beta 1} + |U_{\beta 3}|^2 |U_{\alpha 3}|^2 (2|U_{13}|^2 - \delta_{\alpha 1} - \delta_{\beta 1})). \quad (1.4)$$

Đối với phản neutrino,  $P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$  có thể thu được bằng cách lấy liên hợp phức của tích các phần tử ma trận PMNS và đổi dấu  $a \rightarrow -a$  trong công thức Eq.(1.4). Các số hạng chứa  $a$  thể hiện cho ảnh hưởng của vật chất lên quá trình dao động của neutrino.

## 1.2 Giới thiệu tổng quan các thí nghiệm liên quan

### 1.2.1 Thí nghiệm T2K

T2K là một thí nghiệm dao động neutrino dựa trên máy gia tốc, lệch trục và có đường cơ sở dài ở Nhật Bản. Chùm neutrino muon và phản neutrino muon được tạo thành tại máy gia tốc J-PARC. T2K có ba máy dò gần, bao gồm máy dò đồng trục INGRID, lệch trục ND280, và WAGASCI BabyMIND. Máy dò xa Super-K được đặt cách bia 295km, là một máy dò chứa 50 kiloton nước tinh khiết. Máy dò Super-K có thể thu được tín hiệu của tương tác neutrino với hạt nhân bia (nước tinh khiết) nhờ vào thu tín hiệu của hạt lepton đi kèm (muon hoặc electron). Super-K có thể phân biệt rất tốt neutrino muon và neutrino electron. T2K-II là kế hoạch của T2K hoạt động đến năm 2027 với tổng số số liệu thống kê  $20 \times 10^{21}$  POT, cho phép T2K xác nhận sự vi phạm đối xứng CP ở mức  $3\sigma$  hoặc hơn nếu  $\delta_{CP}$  gần giá trị  $-\pi/2$ .

### 1.2.2 Thí nghiệm NOvA

NOvA cũng là một thí nghiệm về dao động neutrino dùng máy gia tốc có đường cơ sở dài. Thí nghiệm NOvA được xây dựng ở Mỹ, dùng kỹ thuật lệch trục và nguyên lý hoạt động tương tự như T2K. NOvA có kế hoạch hoạt động đến năm 2024, ở đây chúng tôi ký hiệu là NOvA mở rộng hoặc NOvA-II.

### 1.2.3 Thí nghiệm JUNO

JUNO là một thí nghiệm dùng lò phản ứng hạt nhân để nghiên cứu dao động neutrino. JUNO có đường cơ sở trung bình và được xây dựng tại Trung Quốc. Thông lượng phản neutrino electron được sinh ra từ các phản ứng hạt nhân của các lò phản ứng.

# Chương 2. Đo đạc tại INGRID - máy dò gần đồng trục của T2K

## 2.1 Tiên đoán thông lượng neutrino

So với khi không có dòng điện, các ống điện từ hình sừng dùng để tập trung các hạt tích điện (pion và kaon) của T2K hoạt động với dòng 250 kA có thể giúp thông lượng neutrino tăng lên từ 13 đến 14 lần tại đỉnh năng lượng. Trong khi đó nếu hoạt động tại 320 kA có thể tăng lên từ 14 đến 15 lần.

## 2.2 Đo tỉ lệ sự kiện

### Mô phỏng tương tác neutrino bởi phần mềm NEUT

NEUT là một phần mềm mô phỏng Monte Carlo, mô tả tương tác của neutrino với hạt nhân và các nucleon ở vùng năng lượng từ vài chục MeV đến vài trăm TeV.

### 2.2.1 Tiêu chí chọn tín hiệu

Chúng tôi phỏng theo các tiêu chí của INGRID, bao gồm:

1. Phân cụm dựa trên thời gian.
2. Chọn số mặt phẳng động liên tục.
3. Phục dựng vết hai chiều.
4. Phục dựng vết ba chiều.
5. Xác định đỉnh tương tác.
6. Cắt dựa trên thời gian của chùm tia.
7. Cắt dựa trên lớp chắn phía trước.
8. Cắt dựa trên thể tích tương tác.

	Data [/ $10^{14}$ POT]	MC [/ $10^{14}$ POT]	Data/MC [/ $10^{14}$ POT]
run1	$1.710 \pm 0.002(\text{stat.}) \pm 0.015(\text{sys.})$	1.748	$0.978 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.009(\text{sys.})$
run2	$1.746 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.016(\text{sys.})$	1.748	$0.999 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.009(\text{sys.})$
run3c	$1.739 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.016(\text{sys.})$	1.748	$0.995 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.009(\text{sys.})$
run8a	$1.700 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.015(\text{sys.})$	1.748	$0.973 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.009(\text{sys.})$
run8b	$1.702 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.015(\text{sys.})$	1.748	$0.974 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.009(\text{sys.})$
run8c	$1.699 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.015(\text{sys.})$	1.748	$0.972 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.009(\text{sys.})$
run9	$1.697 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.015(\text{sys.})$	1.748	$0.971 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.009(\text{sys.})$
run10	$1.694 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.015(\text{sys.})$	1.748	$0.969 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.009(\text{sys.})$

Bảng 2.1: So sánh tỉ lệ sự kiện giữa mô phỏng và dữ liệu cho kênh neutrino (FHC) khi T2K hoạt động ở +250kA.

	Data [/ $10^{14}$ POT]	MC [/ $10^{14}$ POT]	Data/MC [/ $10^{14}$ POT]
run5	$0.560 \pm 0.0010(\text{stat.}) \pm 0.0094(\text{sys.})$	0.565	$0.991 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.017(\text{sys.})$
run6	$0.554 \pm 0.0004(\text{stat.}) \pm 0.0093(\text{sys.})$	0.565	$0.981 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.017(\text{sys.})$
run7	$0.555 \pm 0.0004(\text{stat.}) \pm 0.0093(\text{sys.})$	0.565	$0.982 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.017(\text{sys.})$

Bảng 2.2: So sánh tỉ lệ sự kiện giữa mô phỏng và dữ liệu cho kênh phản neutrino (RHC) khi T2K hoạt động ở -250kA.

## 2.2.2 Sai số hệ thống

Sai số hệ thống không bao gồm sai số của thông lượng và tương tác neutrino. Tổng sai số hệ thống là 0.91% đối với kênh neutrino và 1.67% đối với kênh phản neutrino.

## 2.2.3 Tỉ lệ sự kiện tại INGRID

Bảng 2.1 và 2.2 tổng kết so sánh kết quả mô phỏng và đo đạc tại INGRID.

## 2.3 Đo cấu hình chùm tia neutrino

Các đo đạc tại T2K run 10 cho thấy hướng của neutrino ổn



	Horizontal center [cm]	Vertical center [cm]
FHC 250kA	$2.33 \pm 0.89$	$-0.24 \pm 0.99$
FHC 320kA	$2.53 \pm 0.67$	$-1.27 \pm 0.72$
RHC 250kA	$2.93 \pm 0.96$	$-0.56 \pm 1.65$
RHC 320kA	$1.94 \pm 1.11$	$-0.49 \pm 1.19$

Bảng 2.3: Vị trí tâm chùm tia mô phỏng neutrino tại INGRID.

định ở mức cho phép trong vòng 1 mrad:

$$\bar{\theta}_H = -0.055 \pm 0.013(\text{stat.}) \pm 0.096(\text{sys.}) \text{ mrad}, \quad (2.1)$$

$$\bar{\theta}_V = 0.085 \pm 0.014(\text{stat.}) \pm 0.106(\text{sys.}) \text{ mrad}. \quad (2.2)$$

Tỉ số giữa dữ liệu và mô phỏng khi T2K hoạt động ở mức 250 kA:

$$W(\text{Data/MC})_H = 1.016 \pm 0.004(\text{stat.}), \quad (2.3)$$

$$W(\text{Data/MC})_V = 1.009 \pm 0.004(\text{stat.}). \quad (2.4)$$

Tâm chùm tia của các module ngang và dọc đối với kênh neutrino và phản neutrino được cho ở Bảng 2.3. Bảng 2.4 cho ta biết thông tin về độ rộng chùm tia mô phỏng tại INGRID. Độ lệch của chùm tia so với tâm được cho như ở Bảng 2.5. Các đo đạc về tỉ lệ sự kiện, hướng neutrino và độ rộng chùm tia phù hợp rất tốt với kết quả mô phỏng.

## 2.4 Kết luận

Kết quả so sánh cho thấy sự phù hợp rất tốt giữa mô phỏng và dữ liệu thực. Khi hoạt động tại 320 kA, tỉ lệ sự kiện dự đoán là  $2.209 [ /10^{14} \text{ POT}]$  và  $0.664 [ /10^{14} \text{ POT}]$  cho neutrino và phản neutrino. Hướng của chùm tia của kênh neutrino là  $0.091 \pm 0.024$  mrad cho module ngang và  $-0.046 \pm 0.026$  mrad cho module dọc. Đối với kênh phản neutrino tương ứng là  $0.070 \pm 0.040$  mrad và  $-0.018 \pm 0.044$  mrad.

	Horizontal width [cm]	Vertical width [cm]
FHC 250kA	$430.162 \pm 1.429$	$454.508 \pm 1.682$
FHC 320kA	$388.378 \pm 0.962$	$399.982 \pm 1.088$
RHC 250kA	$451.607 \pm 2.444$	$483.255 \pm 3.033$
RHC 320kA	$408.151 \pm 1.680$	$423.141 \pm 1.906$

Bảng 2.4: Độ rộng chùm tia mô phỏng tại INGRID.

	Horizontal center [mrad]	Vertical center [mrad]
FHC 250kA	$0.084 \pm 0.032$	$-0.009 \pm 0.036$
FHC 320kA	$0.091 \pm 0.024$	$-0.046 \pm 0.026$
RHC 250kA	$0.106 \pm 0.035$	$-0.020 \pm 0.060$
RHC 320kA	$0.070 \pm 0.040$	$-0.018 \pm 0.044$

Bảng 2.5: Hướng mô phỏng của chùm tia neutrino tại INGRID.

# Chương 3. Kiểm chứng bất biến CP và CPT bằng các phép đo dao động neutrino tại T2K

## 3.1 Đối xứng C, P, và T

### 3.1.1 Phép liên hợp điện tích C

Phép liên hợp điện tích biến đổi hạt thành phản hạt và ngược lại

$$C|p\rangle = |\bar{p}\rangle, \quad (3.1)$$

trong đó  $|p\rangle$  và  $|\bar{p}\rangle$  thể hiện cho trạng thái của hạt và phản hạt.

### 3.1.2 Phép nghịch đảo không gian P

Phép nghịch đảo không gian đổi dấu của các tọa độ không gian

$$(t, x, y, z) \rightarrow (t, -x, -y, -z). \quad (3.2)$$

### 3.1.3 Phép nghịch đảo thời gian T

Phép nghịch đảo thời gian đổi dấu của thời gian

$$(t, x, y, z) \rightarrow (-t, x, y, z). \quad (3.3)$$

## 3.2 Kiểm chứng bất biến CP bằng các phép đo dao động neutrino

### 3.2.1 Vi phạm đối xứng CP trong dao động neutrino

Sự khác nhau giữa xác suất dao động của neutrino và phản

Parameters	NO	IO
$\delta_{CP}$ (T2K only)	$-2.14^{+0.90}_{-0.69}$	$-1.26^{+0.61}_{-0.69}$
$\delta_{CP}$ (T2K+reactor)	$-1.89^{+0.70}_{-0.58}$	$-1.38^{+0.48}_{-0.55}$

Bảng 3.1: Giá trị trung bình và  $\pm 1\sigma$  của  $\delta_{CP}$  đo được bởi T2K và T2K+reactor. Khoảng  $\pm 1\sigma$  tương ứng với  $\Delta\chi^2 \leq 1$ .

neutrino chỉ dấu cho sự vi phạm CP trong phần lepton

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{CP} &= P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \\ &= 16c_{12}s_{12}c_{13}^2s_{13}c_{23}s_{23} \sin \delta_{CP} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Trong phương trình (3.4), đại lượng đặc trưng cho độ lớn vi phạm CP độc lập với mọi cách tham số hoá các tham số, bất biến Jarlskog  $J$ , có biểu thức

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i>j} \text{Im} [U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \\ &= c_{12}s_{12}c_{13}^2s_{13}c_{23}s_{23} \sin \delta_{CP}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

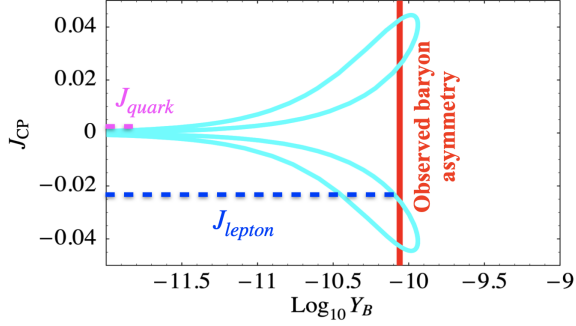
Trong phần quark, bất biến Jarlskog đo được là

$$J_{quark} = 3.18 \pm 0.15 \times 10^{-5}. \quad (3.6)$$

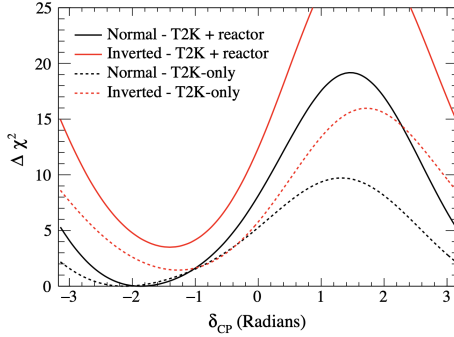
Trong phần lepton, với các tham số đo được hiện tại

$$J_{lepton} \approx -2.25 \times 10^{-2}. \quad (3.7)$$

Từ Hình 3.1 chúng ta có thể thấy rằng vi phạm CP trong phần quark quá nhỏ để giải thích sự bất đối xứng vật chất - phản vật chất của vũ trụ, trong khi đó ở phần lepton thì độ lớn vi phạm CP đủ lớn để giải thích điều này.



Hình 3.1: Bất biến Jarlskog đối với bất đối xứng baryon  $\delta_{CP} = [0, 2\pi]$  (đường màu xanh lam). Vùng màu đỏ thể hiện vùng  $2\sigma$  bất đối xứng baryon. Đường màu xanh da trời thể hiện giá trị bất biến Jarlskog trong phần lepton.



Hình 3.2: Phân bố của hàm  $\Delta\chi^2$  theo  $\delta_{CP}$ . Hình được lấy từ phân tích số liệu của T2K.

Value of $\sin^2 \theta_{23}$	0.43	0.50	0.60
Fraction of <i>true</i> $\delta_{CP}$ values (%), NH	61.6	54.6	53.3
Fraction of <i>true</i> $\delta_{CP}$ values (%), IH	61.7	57.2	54.2

Bảng 3.2: Vùng giá trị khả dĩ của  $\delta_{CP}$  có thể bị loại trừ tại mức  $3\sigma$ .

### 3.2.2 Kiểm chứng bất biến CP với thí nghiệm T2K

Năm 2021, T2K cập nhật kết quả phân tích số liệu của mình với  $3.13 \times 10^{21}$  POT. Hình 3.2 thể hiện sự phân bố của hàm  $\Delta\chi^2$  theo  $\delta_{CP}$ , với sự ràng buộc và không có ràng buộc từ thí nghiệm lò phản ứng hạt nhân, cho cả hai trường hợp trật tự khối lượng neutrino. Giá trị trung bình đo được và  $1\sigma$  của  $\delta_{CP}$  được tổng hợp trong Bảng 3.1.

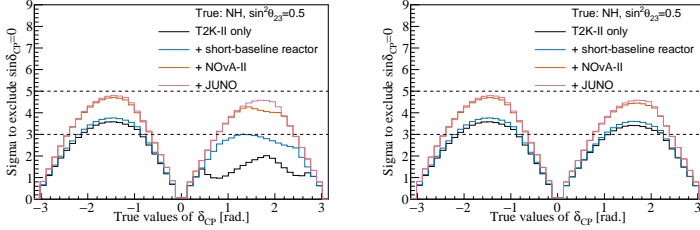
### 3.2.3 Kiểm chứng bất biến CP với sự kết hợp của các thí nghiệm T2K-II, NO $\nu$ A-II, và JUNO

#### Mô phỏng GLOBES cho các thí nghiệm T2K-II, NO $\nu$ A-II, và JUNO

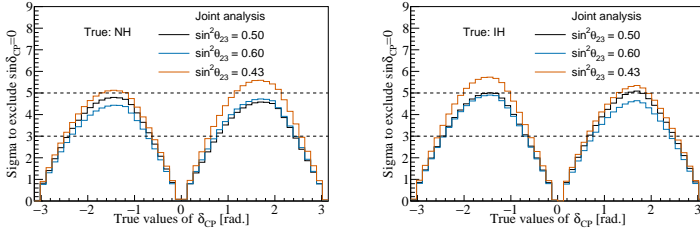
Chúng tôi dùng phần mềm GLOBES để mô phỏng các thí nghiệm. Chúng tôi cung cấp cho GLOBES các thông tin về thiết lập máy dò cũng như thông tin về nguồn neutrino, tương tác của neutrino với hạt nhân, ... Sau đó chúng tôi có thể thu được các thông tin về xác suất dao động, tỉ lệ sự kiện quan sát được ở máy dò, hoặc thông tin về giá trị của  $\Delta\chi^2$ .

#### Độ nhạy với vi phạm CP

Hình 3.3 thể hiện độ nhạy đối với vi phạm CP theo các giá trị của  $\delta_{CP}$ . Với giá trị  $\delta_{CP}$  gần  $-\pi/2$ , độ nhạy khi kết hợp ba thí nghiệm có thể đạt đến gần  $5\sigma$  C.L. Hình 3.4 thể hiện độ nhạy vi phạm đối xứng CP theo  $\delta_{CP}$  với các giá trị khác nhau của  $\theta_{23}$ . Bảng 3.2 thể hiện vùng giá trị khả dĩ của  $\delta_{CP}$  tại đó có thể phá vỡ bảo toàn CP tại  $3\sigma$  C.L.



Hình 3.3: Độ nhạy đối với vi phạm CP theo các giá trị của  $\delta_{CP}$ , giả sử giả thiết đúng là *Normal* MH và  $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$ . Hình trái (phải) cho trường hợp phân bậc khối lượng neutrino chưa biết (đã biết).



Hình 3.4: Độ nhạy của vi phạm CP như là một hàm của  $\delta_{CP}$  khi kết hợp các thí nghiệm với các giá trị khác nhau của  $\sin^2 \theta_{23}$  (0.43, 0.5, 0.6). Hình trái (phải) cho trường hợp *normal* (*inverted*) MH. Giả sử MH là chưa biết.

## 3.3 Kiểm chứng bất biến CPT bằng các phép đo dao động neutrino

### 3.3.1 Vi phạm đối xứng CPT trong dao động neutrino

Định lý CPT nhấn mạnh rằng tất cả các tương tác được mô tả bởi lý thuyết trường lượng tử bất biến Lorentz, địa phương, và unita đều bất biến dưới phép biến đổi CPT.

Xác suất dao động biến đổi dưới phép biến đổi CPT như sau

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \xrightarrow{CPT} P(\bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha).$$

Bất đối xứng CPT được tính bằng

$$\mathcal{A}_{\alpha\beta}^{CPT} = P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) - P(\bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha). \quad (3.8)$$

T2K và NO $\nu$ A tập trung nghiên cứu bốn kênh, gồm hai kênh xuất hiện ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ ), và hai kênh biến mất ( $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ ). T2K và NO $\nu$ A tự mình có thể kiểm chứng bất biến CPT bởi các kênh biến mất của chúng thông qua các bất đối xứng:  $\mathcal{A}_{\mu\mu}^{CPT}(\sin^2 \theta_{23})$  và  $\mathcal{A}_{\mu\mu}^{CPT}(\Delta m_{31}^2)$ .

### 3.3.2 Mô phỏng BLoBES cho cho các thí nghiệm T2K-II, NO $\nu$ A-II, và JUNO

Phần mềm GLoBES được cập nhật để bao gồm các tham số dao động của phản neutrino. Các thiết lập cho T2K-II, NO $\nu$ A-II, và JUNO cơ bản giống như ở phần trước. Đối với T2K-II và NO $\nu$ A-II, chúng tôi chỉ sử dụng kênh biến mất. Ngoài ra các thông tin về số liệu thống kê, thông lượng neutrino của thí nghiệm T2K-II; công suất nhiệt và hiệu chuẩn năng lượng của JUNO cũng được cập nhật. Chúng tôi nghiên cứu độ nhạy của các thí nghiệm để loại trừ khả năng bảo toàn



CPT theo  $|\delta(X)| = |X - \overline{X}|$ . Giá trị  $\chi^2$  của các thí nghiệm đơn lẻ được tính toán cho  $X$  và  $\overline{X}$ , trong đó  $X$  có thể là  $\sin^2 \theta_{23}$  hoặc  $\Delta m_{31}^2$ . Ý nghĩa thống kê được tính bằng căn bậc hai của giá trị cực tiểu của tổng  $\Delta\chi^2$ .

### 3.3.3 Kiểm chứng bất biến CPT tại thí nghiệm T2K

Kết quả mô phỏng GLoBES sử dụng  $3.13 \times 10^{21}$  POT. Hình 3.5 thể hiện khả năng loại trừ giả thiết bảo toàn CPT với  $\delta(\Delta m_{31}^2)$  (hình trái) và  $\delta(\sin^2 \theta_{23})$  (hình phải). Kết quả cho thấy với số liệu hiện tại của T2K không phát hiện được dấu hiệu nào của sự vi phạm đối xứng CPT. Giá trị ràng buộc của sự vi phạm CPT tại  $3\sigma$  được tổng kết ở biểu thức 3.9

$$|\delta(\Delta m_{31}^2)| < 6.35 \times 10^{-4} eV^2, \quad (3.9)$$

$$|\delta(\sin^2 \theta_{23})| < 0.19.$$

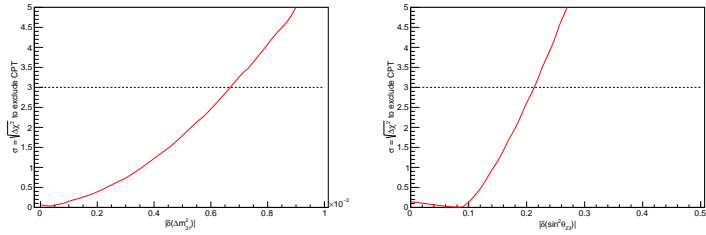
### 3.3.4 Kiểm chứng bất biến CPT với sự kết hợp các thí nghiệm T2K-II, NO $\nu$ A-II, và JUNO

#### Ràng buộc vi phạm CPT

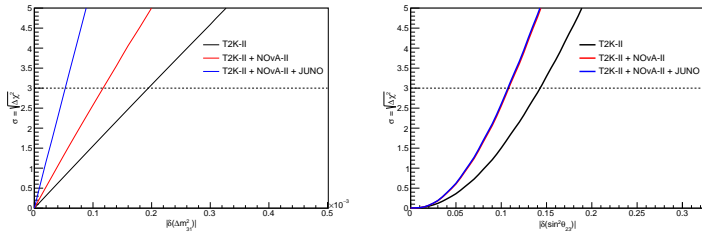
Ràng buộc sự vi phạm CPT tại  $3\sigma$  như một hàm của  $|\delta(\Delta m_{31}^2)|$  (hình trái) và  $\delta(\sin^2 \theta_{23})$  (hình phải) thể hiện ở Hình 3.6 và tổng kết ở Bảng 3.3.

#### Độ nhạy đối với sự vi phạm CPT

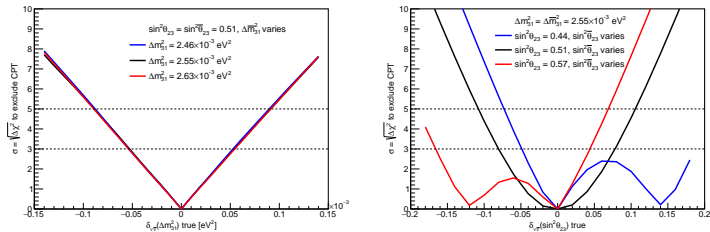
Các kết quả về độ nhạy của các thí nghiệm đối với sự vi phạm đối xứng CPT được thể hiện trong Hình 3.7 trái. Nếu  $|\delta(\Delta m_{31}^2)| > 5.4 \times 10^{-5} eV^2$ , kết hợp phân tích dữ liệu từ cả ba thí nghiệm có thể loại trừ khả năng bảo toàn CPT tại mức  $3\sigma$  C. L. Với các đo đạc hiện tại của T2K, ta thấy  $|\delta(\Delta m_{31}^2)| = 3 \times 10^{-5} eV^2$ . Như vậy từ hình vẽ ta có thể thấy kết hợp phân tích từ ba thí nghiệm có thể loại trừ giả thiết bảo toàn CPT ở mức  $1.7\sigma$ . Nếu giá trị đo được của NO $\nu$ A là đúng,



Hình 3.5: Khả năng loại trừ bảo toàn CPT với  $\delta(\Delta m_{31}^2)$  (hình trái) và  $\delta(\sin^2 \theta_{23})$  (hình phải) được tính toán với dữ liệu T2K  $3.13 \times 10^{21}$  POT.



Hình 3.6: Ràng buộc của sự vi phạm CPT tại  $3\sigma$  với  $|\delta(\Delta m_{31}^2)|$  (hình trái) và  $\delta(\sin^2 \theta_{23})$  (hình phải). Các đường màu đen, đỏ, và xanh lần lượt tương ứng với các thí nghiệm T2K-II, T2K-II +  $\text{NO}\nu\text{A-II}$ , và T2K-II +  $\text{NO}\nu\text{A-II}$  + JUNO.



Hình 3.7: Độ nhạy đối với sự vi phạm CPT như các hàm của  $\Delta m_{31}^2$  (hình trái) và  $\sin^2 \theta_{23}$  (hình phải).

Experiments	3 $\sigma$ C. L. upper limits	
	$ \delta_{\nu\bar{\nu}}(\Delta m_{31}^2) $	$ \delta_{\nu\bar{\nu}}(\sin^2 \theta_{23}) $
T2K-II	$2.0 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$	0.14
T2K-II+NO $\nu$ A-II	$1.2 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$	0.10
T2K-II+NO $\nu$ A-II+JUNO	$5.3 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	0.10

Bảng 3.3: Ràng buộc của sự vi phạm CPT tại  $3\sigma$  với  $|\delta(\Delta m_{31}^2)|$  và  $\delta(\sin^2 \theta_{23})$  cho các thí nghiệm T2K-II, T2K-II + NO $\nu$ A-II, và T2K-II + NO $\nu$ A-II + JUNO.

	$\Delta m_{31}^2$	3 $\sigma$ excluded range of $ \delta(\Delta m_{31}^2) $	3 $\sigma$ excluded range of $ \delta(\sin^2 \theta_{23}) $
$2.46 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	$\geq 5.36 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	0.44	$\geq 0.187$
$2.55 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	$\geq 5.39 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	0.51	$\geq 0.080$
$2.63 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	$\geq 5.46 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$	0.57	$\geq 0.166$

Bảng 3.4: Sự phụ thuộc của độ nhạy vào các giá trị thực của tham số đầu vào. Cột hai và bốn là các giá trị đầu vào. Cột ba và năm là vùng  $3\sigma$  C. L. của  $|\delta(\Delta m_{31}^2)|$  và  $|\delta(\sin^2 \theta_{23})|$  để loại trừ giả thiết bảo toàn CPT.

sự hợp lực của T2K-II, NO $\nu$ A-II, và JUNO có thể phát hiện vi phạm CPT ở mức  $4\sigma$  C. L.

Đối với trường hợp góc trộn  $\theta_{23}$ , kết quả được thể hiện ở Hình 3.7 phải. Ta thấy độ nhạy phụ thuộc khá nhiều vào giá trị thực của  $\sin^2 \theta_{23}$  và  $\sin^2 \bar{\theta}_{23}$ . Nếu các đo đạc của T2K là đúng, dữ liệu kết hợp từ cả ba thí nghiệm có thể loại trừ bất biến CPT ở mức  $3\sigma$  C. L. Cho trường hợp của NO $\nu$ A độ tin cậy có thể tăng lên ở mức  $4\sigma$  C. L.

## Kết luận

Các nghiên cứu của chúng tôi ở Chương 2 chỉ ra rằng tỉ lệ sự kiện, hướng của chùm neutrino, và độ rộng chùm tia ổn định và phù hợp rất tốt với các kết quả mô phỏng. Chúng tôi cũng trình bày các tiên đoán tại máy dò INGRID khi T2K hoạt động ở mức dòng điện 320 kA.

Trong Chương 3 chúng tôi trình bày các nghiên cứu về sự vi phạm đối xứng CP và CPT tại thí nghiệm T2K. Kết quả phân tích số liệu cho thấy T2K loại trừ khả năng bảo toàn CP ở mức 90%. Số liệu đo đặc pha vi phạm  $\delta_{CP}$  là  $-2.14_{-0.69}^{+0.90}$  trong trường hợp khối lượng neutrino phân bậc thuận và  $-1.26_{-0.69}^{+0.61}$  trong trường hợp phân bậc ngược. Nếu T2K-II kết hợp với NO $\nu$ A-II và JUNO, độ tin cậy để loại bỏ giả thiết bảo toàn CP có thể ở mức  $5\sigma$  C. L.

Số liệu hiện tại của T2K phù hợp với giả thiết bảo toàn CPT. Sự kết hợp ba thí nghiệm T2K-II, NO $\nu$ A-II, và JUNO có thể tăng độ nhạy và sự ràng buộc lên vi phạm CPT. Nếu các kết quả đo đặc hiện tại của T2K (NO $\nu$ A) đối với  $(\Delta m_{31}^2, \Delta \bar{m}_{31}^2)$  và  $(\theta_{23}, \bar{\theta}_{23})$  vẫn là *đúng* cho đến năm 2027, thì kết hợp phân tích từ ba thí nghiệm có thể loại trừ bảo toàn CPT ở mức  $1.7\sigma$  ( $4\sigma$ ) và  $3\sigma$  ( $4.6\sigma$ ) C. L. Sự hợp sức của T2K-II, NO $\nu$ A-II, và JUNO có thể làm tăng ràng buộc lên vi phạm CPT với  $|\delta(\Delta m_{31}^2)|$  ở giá trị  $5.3 \times 10^{-5} eV^2$  tại  $3\sigma$  C. L.

# Danh mục các công trình đã công bố

## Danh mục các công trình đã công bố được sử dụng cho việc bảo vệ luận án

1. T. V. Ngoc, S. Cao, N. T. Hong Van, and P. T. Quyen. *Stringent constraint on CPT violation with a combined analysis of T2K-II, NO $\nu$ A extension, and JUNO*. Phys. Rev. D, 107 016013, 2023.
2. S. Cao, A. Nath, T. V. Ngoc, Ng. K. Francis, N. T. Hong Van, and P. T. Quyen. *Physics potential of the combined sensitivity of T2K-II, NO $\nu$ A extension, and JUNO*. Phys. Rev. D, 103 11 112010, 2021.

## Danh mục các công trình đã công bố khác

1. S. Cao, N. T. Hong Van, T. V. Ngoc, and P. T. Quyen. *Neutrino Mass Spectrum: Present Indication and Future Prospect*. Symmetry, 14 1, 2022.
2. T. V. Ngoc, S. Cao, N. T. Hong Van. *Combined Sensitivity of T2K-II and NO $\nu$ A Experiments to CP Violation in Lepton Sector*. Commun. in Phys., 28 4, 337, 2018.
3. S. Cao, T. V. Ngoc, N. T. Hong Van, and P. T. Quyen. *Practical use of reactor anti-neutrinos for nuclear safeguard in Vietnam*. Accepted to publish on Commun. in Phys., [arXiv:2209.03541].
4. N. H. Duy Thanh, N. V. Chi Lan, S. Cao, T. V. Ngoc, N. Khoa, N. T. H. Van, and P. T. Quyen. *Multi-pixel photon counter for*

*operating a tabletop cosmic ray detector under loosely controlled conditions.* Dalat University Journal of Science, 13 1, 16-29, 2022.

5. T. V. Ngoc *et. al.* [T2K collaboration]. *T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using  $3.13 \times 10^{21}$  protons on target.* Phys. Rev. D, 103 1, L011101, 2021.
6. T. V. Ngoc *et. al.* [T2K collaboration]. *Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with  $3.13 \times 10^{21}$  protons on target.* Phys. Rev. D, 103 11, 112008, 2021.
7. T. V. Ngoc *et. al.* [T2K collaboration]. *Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations.* Nature, 580 7803, 339-344, 2020. Nature, 583 7814, E16, 2020 (erratum).