

6

Experimentos de Futuros Aceleradores de Grandes Comprimentos

Os experimentos de aceleradores T2K, NO ν A e Fábrica de neutrinos formam uma nova geração de experimentos de grandes comprimentos. Eles vão utilizar feixes intensos de neutrinos com energias de dezenas de GeV com o principal objetivo de resolver os parâmetros de oscilação em aberto já mencionado e também sondar nova física, como NSI. E aqui nesta tese daremos destaque ao T2K(e a sua variação, T2KK) e Fábrica de neutrinos que são relevantes para este trabalho.

6.1 T2K

O Tokai To Kamioka, T2K (101) no Japão, (o sucessor do K2K), está sendo preparado no Japão, e receberá um feixe de neutrinos vindo do acelerador 50 GeV PS do Japan-Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) que está a uma distância de 295Km do SK.

O experimento T2K é dividido em duas fases: a fase I tem a previsão de começar a tomar dados em 2009 e tem os objetivos de medir o aparecimento do canal de oscilação $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ e dar medidas mais precisas dos parâmetros de oscilação θ_{23} e Δm_{32}^2 , usando o canal $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$.

A fase II, consiste num aperfeiçoamento da fase I, onde a potência do feixe será aumentada de 0,75MW para 4,0MW e a construção de um detetor 24 vezes maior que o SK, o Hyper-Kamiokande (HK)(101), com massa fiducial para 0,54Mton. Nesta fase, o objetivo é estudar a fase de violação CP, δ , no setor de léptons pela assimetria entre os canais de aparecimentos ν_e e $\bar{\nu}_e$. Para que haja a fase II, é preciso que o HK seja aprovado e depois de aprovado, espera-se que levará de 7 a 10 anos para ser construído. Então podemos estimar que a fase II do T2K se iniciará a tomar dados nos anos de 2020 (101, 102).

O feixe de prótons é extraído do 50 GeV PS do J-PARC (101) que fica no JAERI (Instituto de Pesquisa de Energia Atômica do Japão), em Tokai e consiste num conjunto de aceleradores de alta intensidade de prótons como mostra a Fig. 6.1. Esses aceleradores são três; um acelerador linear de prótons

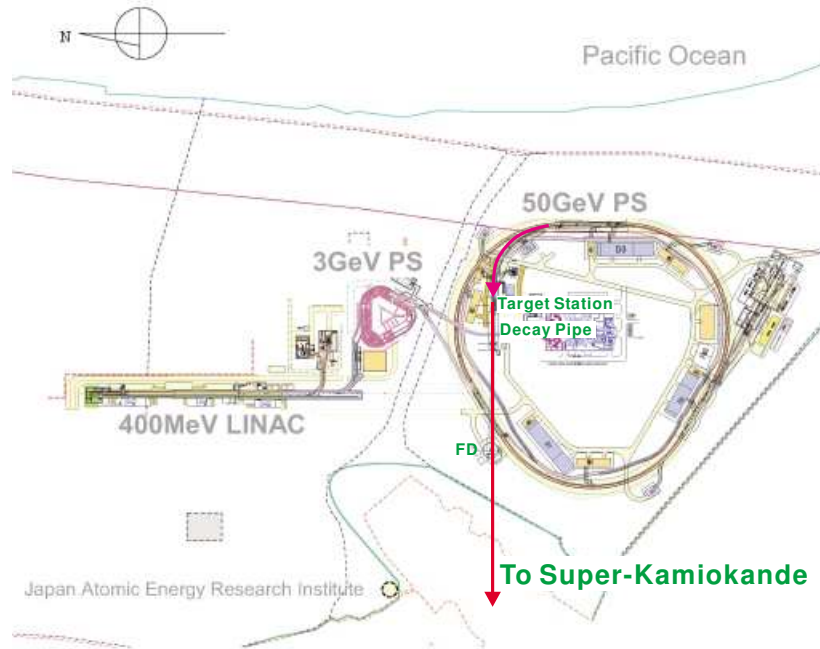


Figura 6.1: O layout do J-PARC que é composto por 3 aceleradores: o LINAC, 3GeV PS e o 50GeV PS. Adaptado da Ref. (101).

a 400MeV, o LINAC, depois um síncrotron de prótons com energia de 3 GeV, que é o 3GeV PS cuja frequência oscilação é de 25Hz e por último o anel principal onde os prótons atingem uma energia de 50GeV, o 50 GeV PS. A construção desses aceleradores começou em 2001 e terminou no ano passado, mas ainda estão em testes. A potência deste feixe é de 0,75MW nesta fase e o feixe de prótons é 50 vezes mais intenso que o 12 GeV PS no KEK, que foi usado no K2K.

O funcionamento do J-PARC pode ser descrita resumidamente como: os prótons produzidos no LINAC são encurvados no 3 GeV PS onde encontram um alvo onde há a produção de píons que são focalizados por um forno magnético e decaem em múons e em ν_μ e depois são acelerados no 50 GeV PS.

O perfil do feixe de múons é monitorado e o perfil do feixe de neutrinos e o seu espectro são medidos pelo DP, que está a 280m do alvo. Já na fase II, haverá mais um DP que estará localizado a 2km do alvo para reduzir os erros sistemáticos(102) . Na fase I, existem 2 DP, um está no eixo do feixe, que chamamos de *on-axis* e o outro fora do eixo, *off-axis*. O DP *on-axis* mede diretamente o perfil e a direção do feixe, enquanto que o DP *off-axis* mede o fluxo e o espectro dos neutrinos muônico e eletrônico. O feixe *off-axis* de neutrinos permite ajustar a energia média do neutrino entre 0.5 a 0.9 GeV, pois o pico dos múons consiste com o pico do feixe, enquanto o pico no espectro

dos neutrinos é deslocado por poucos graus do feixe.

O DR já está construído, que é o SK, embora, cerca de 47% foi reconstruído devido a um acidente com as fotomultiplicadoras¹ que ficam embaixo do tanque com aproximadamente 50kton de água em 2002.

6.2 NO ν A

O Nu Main Injector Off-Axis ν_e Appearance Experiment, NO ν A (103) é um experimento futuro de oscilação que utiliza o investimento no acelerador linear, NuMI, pela construção de um detetor de segunda geração, no Fermilab, que terá o objetivo primário de investigar o canal de oscilação $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, com aproximadamente um sensibilidade de 10 vezes mais do que no MINOS. Isso será possível pelo aperfeiçoamento de 3 parâmetros no desenho dos detetores do MINOS para otimizá-lo na detecção de neutrinos eletrônicos:

- Aumentar a massa do detetor remoto DR de 5.4 ktoneladas (do MINOS) para 30ktoneladas para o NO ν A.
- É desenhado um detetor que é otimizado para a identificação dos eventos dos neutrinos eletrônicos e muônicos.
- A posição do detetor não está diretamente na linha do feixe do NUMI, como o MINOS está, mas 12km fora do eixo, isto é, *off-axis*. Isso possibilitará a detecção de mais eventos de neutrinos num alcance de energia na qual a oscilação toma lugar, com o menor número de ruídos.

Se um sinal de aparecimento de neutrinos eletrônico for detetado, o NO ν A pode correr para um feixe de antineutrino para tentar medir as massas dos neutrinos, o que se espera com isso resolver o problema de hierarquia de massa. Entretanto, a sensibilidade do NO ν A pode ser controlada através do controle da intensidade do feixe do NuMI, pela criação de um dispositivo chamado de Proton Drive Fermilab (PDF).

O experimento NO ν A corresponde o segundo dos três passos no programa do Fermilab de medir os 3 parâmetros ainda desconhecidos, o ângulo de mistura θ_{13} , a hierarquia de massa correta e a fase de violação CP δ , sendo que para este último será necessária a construção de um novo detetor adicional para medir o segundo máximo de oscilação ou combinando as medidas com outro experimento de comprimentos diferentes, como por exemplo o T2K.

¹Essas fotomultiplicadoras tem a finalidade de detectar a luz de Čerenkov gerada pela interação dos neutrinos eletrônico vindo da oscilação dos neutrinos muônico com a água produzindo elétrons.

Analogamente ao MINOS, o NO ν A tem dois detetores, um próximo (DP) que é pequeno, e outro longe, que é chamado de remoto (DR) e que possuem estruturas idênticas. O DP será construído próximo ao Fermilab (cerca de 12m do centro do NuMI), enquanto que o DR está 810km deste, próximo do rio Ash, na divisa dos Estados Unidos (Estado do Minnesota) com o Canadá. O papel importante deste experimento é fazer previsões entre as taxas de eventos esperados e de seus espectros de energia com a ausência de oscilações. A diferença dos eventos observados entre os detetores pode ser atribuída a oscilações.

A previsão de construção do DR é fevereiro de 2010 e funcionará com capacidade total a partir de 2011.

6.3 Fábricas de Neutrinos

Fábrica de neutrinos é o nome técnico dado aos experimentos que utilizam intensos feixes de neutrinos não convencionais gerados por aceleradores que distam de grandes distâncias do alvo (detetores). Esse tipo de experimento tem como objetivos melhorar as precisões dos parâmetros de oscilações, como os ângulos de mistura, hierarquia de massa, e a fase de violação CP.

Uma colisão de múons (104) é a mais atraente opção para a nova geração de aceleradores leptônicos. Entre as principais características que diferenciam estes tipos de aceleradores se comparados com os convencionais (anéis de colisão de hádrons ou aceleradores do tipo e^+e^-), podemos destacar:

- Como a massa do múons é 207 vezes maior do que a massa do elétron, as perdas radiativas são menores para um aceleradores de múons circular comparado com um elétron equivalente. Essas perdas radiativas são inversamente proporcionais à m^4 , onde m é a massa do lépton;
- devido a esse fato, um anel de colisão de múons deve ter um anel de armazenamento muito menor, e isso permite atingir energias muito maiores que as obtidas por um anel equivalente com elétrons;
- estas pequenas perdas radioativas, também, produzam uma pequena variação na energia do feixe, permitindo medidas precisas das massas.

O anéis de armazenamento de múons vem sido discutidos desde 1960 (105) e suas possíveis aplicações em física de neutrinos começaram a ser consideradas em 1980 (106). Entretanto, anéis de armazenamento com uma quantidade de múons suficiente para fornecer feixe de neutrinos de alta intensidade somente foram abordados recentemente no contexto de anéis de colisão de múons (107).

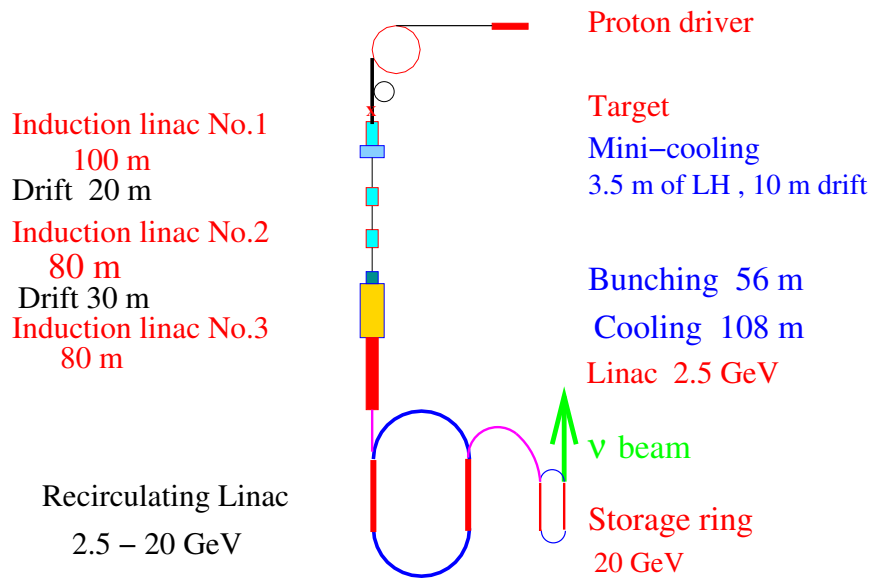


Figura 6.2: Esquema da fábrica de neutrinos. Adaptado da Ref.(107).

Os principais componentes de uma fábrica de neutrinos, esquematizados na Fig. 6.2, incluem:

- Um acelerador de prótons de energia moderada (menor de 50GeV) e potência média entre 1MW a 4MW;
- um alvo e sistema de captura de píons que pode ser idêntico ao exigido para um anel de colisão de múons; um sistema de rápida aceleração dos múons através de dois aceleradores, o LINAC;
- um anél de armazenamento de múons que permite dar uma exploração completa das oscilações para vários valores de L/E_ν .

Em nosso caso, é de importância conhecermos as propriedades e características dos feixes de neutrinos produzidos, já que estas serão as principais informações que usaremos em nossos estudos fenomenológicos. Por isso faremos uma descrição das características destes feixes.

Fontes de neutrinos a partir de decaimento dos múons oferecem amplas vantagens em relação aos feixes de neutrinos convencionais baseado no decaimento dos píons, entre os quais podemos destacar (108):

- 1 - a composição e o espectro do feixe são conhecidos, sendo determinados pela carga, momento e polarização dos múons armazenados;
- 2 - os dois neutrinos no feixe têm helicidades opostas e, portanto pode-se estudar conversões de aparecimento sem ruídos intrínsecos do feixe;

3 -os neutrinos têm espectros de energia muito mais estreitos que os obtidos pelos feixes convencionais de espectro de banda larga. Assim, o feixe de uma fábrica de neutrinos pode ser considerado com sendo um feixe de banda estreita. Isso implica que em fábrica de neutrinos temos melhores estatísticas do que os feixes convencionais.

Estes feixes produzem uma mistura bem definida dos tipos de neutrinos:

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (50\% \text{ de } \nu_\mu \text{ e } 50\% \text{ de } \bar{\nu}_e) \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (50\% \text{ de } \nu_e \text{ e } 50\% \text{ de } \bar{\nu}_\mu)\end{aligned}\quad (6-1)$$

Na fábrica de neutrinos, pode-se estudar independentemente os seguintes canais de transição de sabor:

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ &\hookrightarrow \nu_e \rightarrow e^-, \\ &\hookrightarrow \nu_\mu \rightarrow \mu^-, \\ &\hookrightarrow \nu_\tau \rightarrow \tau^-, \\ &\hookrightarrow \bar{\nu}_e \rightarrow e^+, \\ &\hookrightarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow \mu^+, \\ &\hookrightarrow \bar{\nu}_\tau \rightarrow \tau^+, \end{aligned}\quad (6-2)$$

e mais 6 processos conjugados de cargas iniciados pelos decaimento de μ^+ .

De acordo com a partícula identificada, os 4 principais tipos de eventos nos decaimentos de múons que podem ocorrer são os seguintes:

I. **múons de mesmo sinal:** O múon detetado tem carga de mesmo sinal dos que circulam no interior do anel. Eles se originam a partir de:

- (a) eventos de CC ν_μ que não sofrem mudança de sabor;
- (b) eventos de CC, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ e, posteriormente, decaimento de $\tau^- \rightarrow \mu^-$;
- (c) decaimento hadrônico por correntes neutras.

II. **múons de sinais trocados:** o múon detetado tem carga de sinal oposto que aqueles que circulam no interior do anel produzidos por conversão de sabor de neutrinos, desde que não haja nenhuma componente no feixe que possa originá-los. Estes múons podem aparecer dos seguintes processos:

- (a) conversão de sabor tipo $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$;
- (b) conversão de sabor tipo $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ e decaimento $\tau^+ \rightarrow \mu^+$;
- (c) decaimentos hadrônicos por correntes neutras.

III. **elétrons:** são eventos produzidos por interação de CC dos neutrinos. Os seguintes processos podem dar origem a estes eventos:

- (a) $\bar{\nu}_e$ que não sofreram conversão de sabor;
- (b) ν_e após conversão de sabor tipo $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$;
- (c) $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ ou $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ com decaimentos $\tau^\pm \rightarrow e^\pm$.

IV. **sem léptons:** eventos correspondendo a interação por CN ou por CC produzindo ν_τ seguidos por decaimentos hadrônicos do τ^\pm . Estes podem ser produzidos a partir de:

- (a) processos de NC;
- (b) $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau$ ou $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ com decaimentos $\tau^\pm \rightarrow$ hádrons.

A identificação de múons através de medidas de carga e do momento fornece uma distinção entre os eventos de CC de ν_μ e $\bar{\nu}_\mu$. A identificação dos eventos de CC em ν_τ requer uma medida precisa do estado final de todas as partículas. Tais classes de eventos contêm informações direta das probabilidades de conversão de sabor.

Na fábrica de neutrinos temos dois estágios chamados de estudo I e II. No primeiro estágio, o estudo I, a performance se caracteriza em termos de número de decaimentos de múons apontado para um detetor situado a 3000km do anel de armazenamento de múons, espera-se ter 2×10^{19} decaimentos e a potência de 1 MW (Mega-Watts) com energia de 50 GeV. No segundo estágio, sua potência é de 4MW e espera-se um número de decaimentos de 4×10^{19} e energia de 20GeV. A energia no estudo II é menor do que no estudo I, no entanto o seu feixe é mais intenso.

A construção da fábrica de neutrinos está prevista para 2025 e começará a tomar dados a partir de 2035.