

O experimento de oscilação de neutrinos no reator de Angra dos Reis

P. C. de Holanda, E. Kemp, O. L. G. Peres

*Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Unicamp
13083-970, Campinas, São Paulo, Brasil
e-mail: holanda@ifi.unicamp.br; kemp@ifi.unicamp.br; orlando@ifi.unicamp.br*

Resumo

Apresentamos aqui o status e os planos do projeto ANGRA, um novo experimento de oscilação de neutrinos em reatores, proposto para ser montado no complexo nuclear de Angra dos Reis. Este experimento destina-se a medir o ângulo θ_{13} , o último dos três ângulos de mistura no setor de neutrinos ainda sem uma medida positiva. Propõe-se neste projeto um experimento de multi-deteção com alta sensibilidade, capaz de atingir uma sensibilidade na detecção de desaparecimento de anti-neutrinos da ordem de $\sin^2 2\theta_{13} = 0.006$ em três anos de funcionamento, combinando uma alta luminosidade, baixo ruído em raios cósmicos e um controle cuidadoso dos erros sistemáticos. Planeja-se também explorar a possibilidade de usar a detecção de neutrinos para fins de salvaguarda e não-proliferação de armas nucleares.

1 Introdução

Reatores nucleares têm um papel importante na física de neutrinos. De fato, os neutrinos foram detectados pela primeira vez 50 anos atrás por Reines e Cowan [1] usando o fluxo de $\bar{\nu}_e$ (anti-neutrinos do elétron) proveniente de um reator nuclear, através da observação de interação de neutrinos pelo decaimento beta inverso,

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad . \quad (1)$$

Recentemente, o experimento KamLAND [2], também usando neutrinos provenientes de reatores nucleares, observou um sinal claro de oscilação de neutrinos, estabelecendo o efeito Mikheyev-Smirnov-Wolvenstein (MSW) [3] como mecanismo que explica o problema dos neutrinos solares.

Esta oscilação de neutrinos consiste em uma conversão de sabor de neutrinos induzida por diferenças nos valores das massas das diferentes famílias de neutrinos, juntamente com um ângulo de mistura não nulo que relaciona a base de massa com a base de interação. Neutrinos são criados e detectados como auto-estados de interação, em três famílias: neutrinos eletrônicos, muônicos e tauônicos, que correspondem a interações com elétrons, múons e taus, respectivamente. Porém durante sua evolução, conversões de sabor podem ocorrer entre as três famílias.

Apesar dos progressos feitos em física de neutrinos na última década [4], ainda há parâmetros desconhecidos que são necessários para uma descrição completa do fenômeno de oscilação de neutrinos: o ângulo de mistura θ_{13} , a fase de violação CP δ e o sinal da diferença de massa ao quadrado

Δm_{31}^2 , que é positiva (negativa) para uma hierarquia normal (invertida).

Existe um consenso de que a medida de θ_{13} é o passo mais importante na direção de um progresso no campo. De fato, θ_{13} controla o acesso experimental aos outros dois parâmetros desconhecidos. Se θ_{13} for não nulo e relativamente grande, abre-se a possibilidade de medir-se δ pela observação de violação de CP no setor leptônico e determinar a hierarquia de massa.

Descrevemos aqui as principais características do experimento de Angra [5], um projeto que visa observar o desaparecimento¹ de antineutrinos no complexo nuclear de Angra dos Reis. O experimento consiste na obtenção de medidas, com grande precisão, do espectro de energia do fluxo de antineutrinos a duas distâncias diferentes do núcleo do reator: uma a partir de um detector próximo (chamado a partir daqui de ND, de “Near Detector”) localizado a ~ 300 m do reator, fornecendo o espectro de referência, não afetado pela oscilação de neutrinos; e outra a partir de um detector localizado a uma distância específica, tipicamente ~ 1.5 km (FD, de “Far Detector”), para observar as distorções espectrais induzidas pelas oscilações. Portanto, os parâmetros de mistura dos neutrinos podem ser inferidos pela diferença entre as formas do espectro nos ND e FD.

2 Angra dos Reis: principais características do reator nuclear

Angra dos Reis está localizada a 150 km ao sul da cidade do Rio de Janeiro. O complexo nuclear de Angra tem dois

¹O termo “desaparecimento” se refere a um sabor de neutrino se convertendo em outro.

reatores em operação (Angra I e Angra II) e um terceiro em processo de aprovação (Angra III, semelhante a Angra II). A empresa estatal Eletronuclear é responsável pela gerência e operação comercial da planta. A potência comercial dos reatores são de 2 GW e 4 GW para Angra I e Angra II, com tempos úteis de funcionamento de 83% e 90%, respectivamente. A topologia do terreno, formado por uma montanha de granito, é a grande vantagem do local. Mostramos na Fig. 1 o mapa topográfico do complexo onde a posição dos três detectores está indicada. A aproximadamente 1.5 km do reator Angra II, há um morro chamado “Morro do Frade”, que é o pico mais alto da região (700m), fornecendo uma blindagem de ~ 2000 metros de água equivalente.

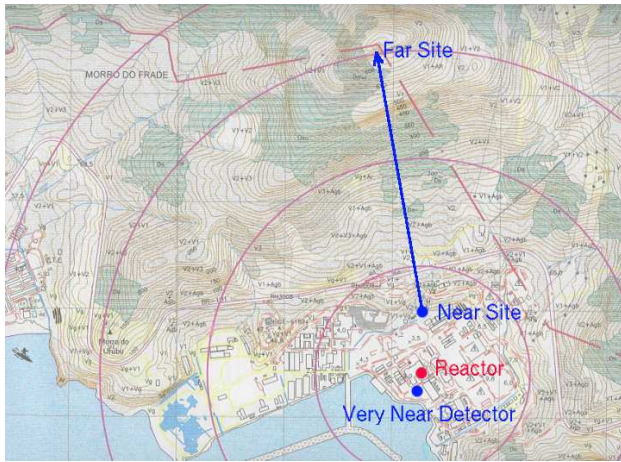


Figura 1: Mapa da Usina Nuclear de Angra dos Reis, com as posições dos detectores VND, ND e FD. A linha tracejada indica o local do túnel a ser escavado para o acesso ao detector que se propõe que seja localizado logo embaixo do pico do Morro Pico do Frade. Os círculos concêntricos indicam a distância do reator de Angra II em passos de 500 metros.

Na Fig. 2 apresentamos o fluxo esperado de múons em função da profundidade. Como podemos ver, a localização do FD tem uma blindagem comparável àquelas de laboratórios dedicados a experimentos subterrâneos, Kamioka e Gran Sasso, respectivamente no Japão e na Itália. Portanto uma redução substancial de ruído induzido por raios cósmicos pode ser obtido pela construção de uma área experimental acessível por túneis horizontais, de custo muito menor que poços verticais, necessários em terrenos planos.

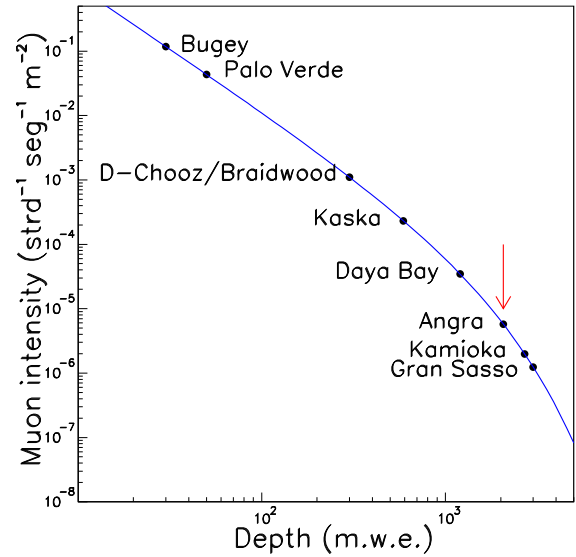


Figura 2: A curva acima nos mostra a predição do fluxo de múons subterrâneos extrapolado dos dados de LVD [6]. Os pontos representam medidas feitas por diferentes experimentos de neutrinos de reatores. A flecha indica o valor correspondente ao local do detector FD de Angra dos Reis.

Como um primeiro passo do experimento, planeja-se montar um detector pequeno, a uma distância de $L \sim 60 - 70$ m, que será usado para medir o fluxo inicial de neutrinos no ponto de produção, assim como o espectro de referência, ambos praticamente não afetados por oscilações. Este detector pode ser útil também para questões de salvaguarda e não-proliferação de armas nucleares. Além disso, um detector muito próximo do núcleo radioativo (VND, de “Very Near Detector”) irá funcionar como um protótipo para testar conceitos e elementos dos detectores maiores ND e FD, e para a realização de verificações gerais.

3 Probabilidade de oscilação

Desprezando termos de segunda ordem, a probabilidade de sobrevivência de antineutrinos eletrônicos $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$ no vácuo é descrita por:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \sim 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \right) \quad (2)$$

onde L é a distância de propagação. O fluxo inicial de antineutrinos eletrônicos deverá portanto ser multiplicado por $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$ para o cálculo da taxa de detecção destes neutrinos.

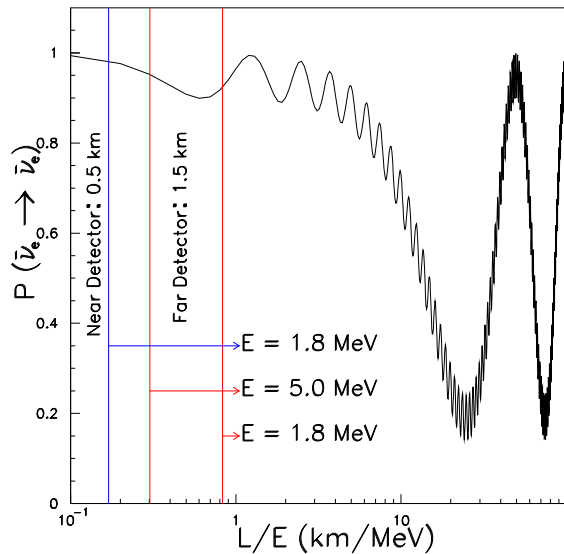


Figura 3: Probabilidade de sobrevivência $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$ como função da razão L/E (Km/MeV). As linhas verticais representam algumas energias típicas de neutrinos.

Tomando valores típicos para a energia dos neutrinos de reatores ($E \sim 3 - 5$ MeV), o primeiro mínimo da probabilidade de sobrevivência, *i.e.*, o ponto de máxima conversão de sabor pode ser obtido em $L \sim 1.5$ km, coincidindo com a proposta de localização do FD.

Mostramos na Fig. 3 um gráfico com a probabilidade de sobrevivência em função de L/E , onde os limites relevantes para Angra são representados por linhas verticais. Aqui a probabilidade foi calculada assumindo $\sin^2 2\theta_{13} = 0.05$, e usando os pontos de melhor ajuste para os parâmetros de experimentos envolvendo neutrinos solares, atmosféricos, de reatores e aceleradores, $\Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, $\sin^2 \theta_{12} = 0.31$, $\Delta m_{31}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ e $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$ [2, 7, 8, 9, 10].

A partir deste gráfico é claro que para ambos os detectores próximos (VND e ND), os efeitos de oscilação são desprezíveis ($P \sim 1$), enquanto o primeiro mínimo na probabilidade acontece no FD para uma energia $E \sim 2 - 5$ MeV. Ressaltamos que o terceiro termo na Eq.(2) é desprezível para esta configuração, considerando $L \sim 1.5$ km, o que explica porque podemos tomar medidas limpas de θ_{13} sem

sofrer das ambiguidades de outros parâmetros de mistura e livre de efeitos de matéria.

4 O experimento

O experimento de oscilação de neutrinos em Angra será composto por dois detectores de neutrinos que devem operar na configuração ND/FD, como explicado na Seção 2. O terceiro detector, o VND, é planejado para ser construído como protótipo. Adicionalmente, o VND irá funcionar como parte de um programa de desenvolvimento de técnicas não-intrusivas de monitoramento nuclear, dentro do esforço promovido pela Agência Internacional de Energia Atômica para o desenvolvimento de ferramentas de alta tecnologia para verificação de salvaguardas em não-proliferação de armas nucleares. O VND (1 ton), ND (50 ton) e FD (500 ton) terão um desenho muito semelhante, adaptados apenas para acomodar as modificações técnicas decorrentes da mudança de escala nas dimensões. O desenho básico é mostrado na Figura 4. O detector completo é baseado em dois sistemas complementares: O *detector de antineutrinos* e o *veto de múons*, descritos sucintamente nas próximas seções. Para detalhes em experimentos de neutrinos com reatores, veja [11].

4.1 O detector de anti-neutrinos

O detector de antineutrinos, é baseado em uma configuração típica, denominada de *monolítica*, que tem sido adotada por diversos experimentos de neutrinos, como Double-CHOOZ, KamLAND e Borexino [2, 12, 13]. A configuração monolítica consiste em três volumes concêntricos, conectados opticamente, onde cada um apresenta uma diferente funcionalidade: i) o *alvo* de antineutrinos - o volume mais interno, preenchido com cintilador líquido dopado com gadolínio, que apresenta grande eficiência na identificação de eventos do decaimento β -inverso, devido à grande secção de choque para a captura dos neutrons secundários; ii) o *coletor de gamas (gamma-catcher)* - volume intermediário, preenchido com cintilador líquido comum, cuja função é aumentar a região efetiva para detecção dos gamas de captura originados no alvo, aumentando a capacidade de identificação dos secundários das interações de neutrinos e, conseqüentemente, o volume fiducial do alvo; iii) o *amortecedor não-cintilante* - o volume mais externo, preenchido com óleo mineral, cuja função é absorver a radioatividade do ambiente, ou mesmo aquela gerada nos componentes externos do aparato.

As fotomultiplicadoras (PMT), que são os sensores da luz produzida pelas interações das partículas no cintilador,

são instaladas na parede externa do amortecedor, ocupando aproximadamente 15% da superfície disponível. Elas apontam para o interior, com os eixos orientados para o centro do alvo, de forma a aumentar a uniformidade na coleta de luz. O cintilador líquido, tem como base um solvente orgânico do tipo C_nH_{2n+2} , $\langle n \rangle = 9,8$, adicionado de ativadores e deslocadores de comprimento de onda, como PPO e POPOP. A abundância de hidrogênio neste tipo de composto, garante um grande número de prótons livres, que constituem a partícula-alvo para o principal canal de interação dos $\bar{\nu}_e$, o já citado decaimento β -inverso (Eq.(1)).

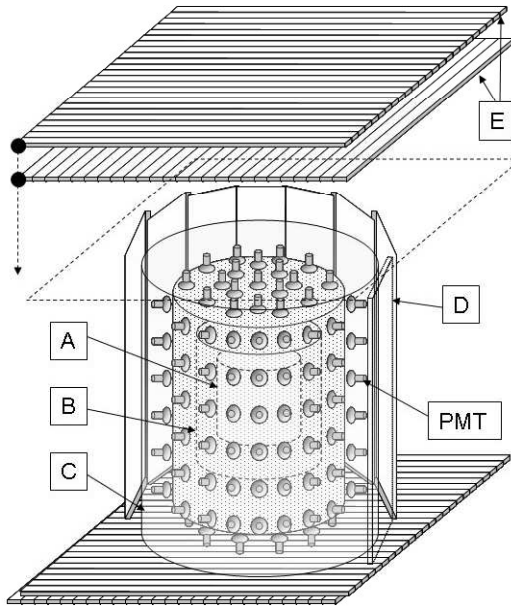


Figura 4: Esquema do detector mostrando todos subsistemas, A) alvo, B) coletor de gamas e C) o amortecedor não-cintilante.

Os três volumes são preenchidos com líquidos que apresentam as mesmas propriedades ópticas, que garante a uniformidade na coleta de luz. A assinatura dos $\bar{\nu}_e$ é fornecida pela detecção em coincidência temporal das partículas secundárias do decaimento β -inverso: e^+ , n . O pósitron fornece o sinal de ativação (*prompt-signal*), e a detecção, em atraso temporal, dos gamas gerados na captura do nêutron fornece o segundo sinal de assinatura do evento. A detecção dos gamas precisa ocorrer em uma “janela” de tempo cuja duração típica é de $3\tau < \Delta t < 5\tau$, onde τ é o tempo médio de captura do nêutron. O poder de rejeição do ruído pode ser consideravelmente melhorado com a redução da “janela” de tempo para pulsos coincidentes. A secção de choque para captura de nêutrons é aumentada em um fator de até $10^4 - 10^5$ pela dopagem do cintilador líquido com

gadolínio, em uma concentração de 0,1 - 0,5%, resultando em tempos de captura no intervalo $15\mu s < \tau < 50\mu s$, um fator ~ 5 menor que o tempo de captura médio no cintilador comum, não-dopado [14]. A energia do neutrino está relacionada à energia do pósitron por $E_\nu = E_{e^+} + \Delta m_{np}$, i.e. a energia do pósitron mais a diferença de massa nêutron-próton (Δm_{np}). Lembramos ao leitor que a energia visível é $E_{vis} = E_{e^+} + E_\gamma$, que tem contribuição adicional dos gamas de aniquilação do pósitron.

4.2 O veto de múons

O veto de múons é um sistema mais externo de detectores feitos de cintilador plástico, que envolve completamente o detector de neutrinos. Todas as placas de cintilador têm PMTs acopladas em sua extremidade operando em coincidência rápida de sinais, disparados por múons da radiação cósmica que atravessam o aparato. Os múons podem produzir nêutrons de espalação, tanto nos componentes do detector, como no material circundante. Estes nêutrons de fundo podem ser capturados no alvo, produzindo gamas em coincidência com o sinal do múon, ou outro sinal espúrio qualquer, produzindo uma assinatura de um falso evento. Assim, depois de um sinal de *trigger* vindo do sistema de veto, a leitura do sistema de aquisição é suprimida no caso de imediato reconhecimento de um evento induzido por múon, ou então, identificado para uma análise mais acurada do fundo, realizada *a posteriori*. Uma rejeição substancial nos níveis de ruído pode ser alcançada com uma cobertura adequada do detector, como planejada para as salas experimentais que abrigarão o ND e o FD. o VND está planejado para operar pelo menos algumas dezenas de metros no subterrâneo, e com alguma proteção extra, feita por paredes espessas de algum material denso (ferro ou concreto, por exemplo).

5 Metas Experimentais

Na Tabela I, listamos estimativas preliminares para as taxas diárias de eventos de sinal e ruído, admitindo alvos com massas $M = 1, 50$ e 500 toneladas e distâncias $L = 50, 300$ e 1500 m para o VND, ND e FD, respectivamente.

Detector	VND	ND	FD
Sinal	1800	2500	1000
Muons (Hz)	150	30	0.3
^9Li	44	$\lesssim 20$	~ 2

Tabela 1: Número esperado de eventos por dia para o experimento de Angra. O sinal e o ruído devido a ^9Li são em eventos por dia.

Baseado nas taxas de eventos esperados nos ND e FD, calculamos a sensibilidade para $\sin^2 2\theta_{13}$ em função da luminosidade integrada, com 90% de nível de confiança. Os resultados podem ser vistos na Fig. 5. Adotamos o valor $\Delta m_{13}^2 = 2,5 \times 10^{-3} eV^2$. OS cálculos foram realizados por minimização da função de χ^2 construída para levar em conta quatro tipos possíveis de erros sistemáticos σ_{ij} , ver referência [15], cujos valores adotados são mostrados na figura. Os subscritos D(d) correspondem a erros relacionados(não relacionados) entre os detectores, e B(b) erros relacionados(não relacionados) entre os intervalos de energia medidos em diferentes detectores. Como podemos ver, um limite de $\sin^2 2\theta_{13} = 0,006$ com 90% de nível de confiança pode ser alcançado com três anos de medidas desde que tenhamos um grande controle sobre os erros sistemáticos. Na Fig. 6 mostramos a sensibilidade esperada, agora no espaço de parâmetros de oscilação Δm_{13}^2 e $\sin^2 2\theta_{13}$, para três anos de medidas e admitindo os mesmos erros sistemáticos do caso da Fig. 5.

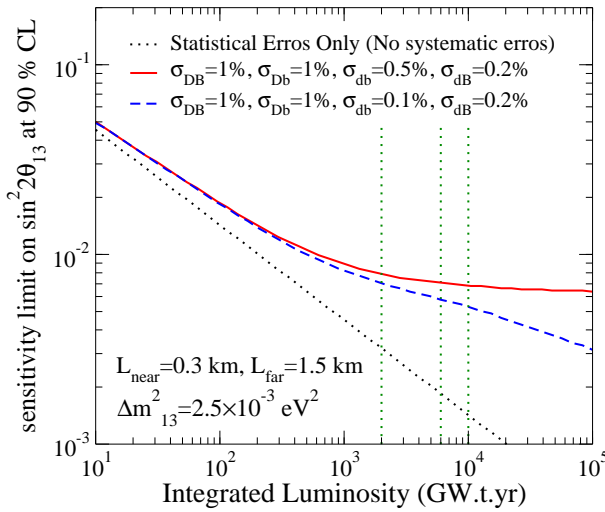


Figura 5: Limites possíveis como função da exposição integrada. As linhas verticais representam 1, 3 e 5 anos de medidas.

5.1 O detector de grande proximidade - VND

Atualmente, o VND encontra-se em fase de desenvolvimento, e deverá servir como protótipo para testes da técnica e de componentes dos detectores de maior escala (ND e FD), bem como ferramenta de pesquisa para identificação e controle de erros sistemáticos. O VND também será utilizado como monitor da atividade nuclear, que resulta em duas aplicações: i) controle cruzado, em tempo real, da

potência térmica liberada pelo reator; e ii) desenvolvimento de ferramentas para verificação das salvaguardas em não-proliferação de armas nucleares.

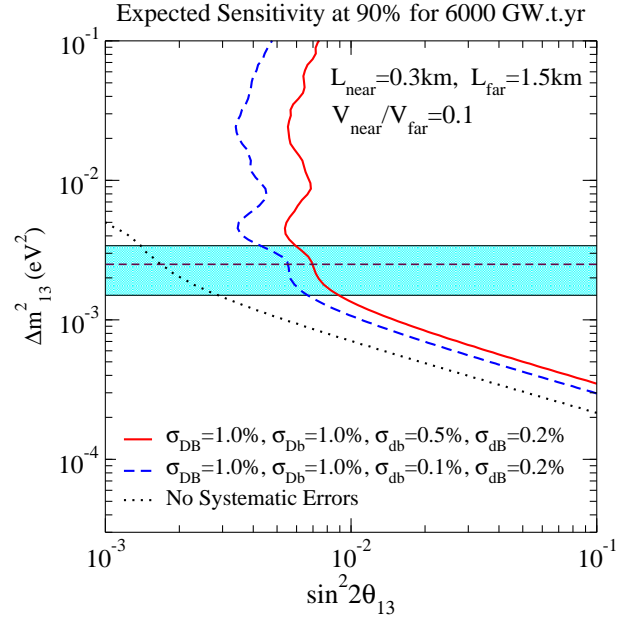


Figura 6: Curva a 90 % de nível de confiança no espaço de parâmetros Δm_{31}^2 e $\sin^2 2\theta_{13}$ para 3 anos de tomada de dados, assumindo os mesmos erros sistemáticos como na Fig. 5. A área hachurada é a região permitida para Δm_{31}^2 dos dados de neutrinos atmosféricos

De fato, o número de antineutrinos detectados n_ν apresenta uma dependência com a potência W liberada pelo reator de acordo com a relação

$$n_\nu = \gamma \frac{W N_H}{R^2}, \quad (3)$$

onde N_H é o número de átomos de hidrogênio no volume fiducial, R é a distância do reator ao detector e γ é uma constante que engloba as contribuições para a potência liberada por todos os isótopos radioativos presentes no combustível: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu e ^{241}Pu [16].

Estudos recentes demonstraram a factibilidade do uso da emissão de antineutrinos de reatores como indicador em tempo real da atividades nuclear. Um protótipo de um detector com esse escopo está operando no reator de San Onofre (E.U.A.) [18] e um experimento precedente foi realizado no reator de Rovno (Ucrânia) [16]. Trabalhos teóricos recentes mostram que um detector de anitneutrinos com grande resolução em energia pode ser capaz de estabelecer não só a

potência térmica do reator mas, também, decompor o espectro medido e determinar as frações isotópicas dos elementos presentes no combustível [19], que mudam com o passar do tempo devido às reações termonucleares. É possível alcançar uma precisão percentual de algumas unidades, mesmo sem conhecimento prévio da composição inicial do combustível, devido às diferenças entre os espectros energéticos dos neutrinos emitidos pelos isótopos mais comuns, citados acima, presentes na composição do combustível nuclear. Na Figura 7 mostramos um gráfico com os espectros de neutrinos destes isótopos.

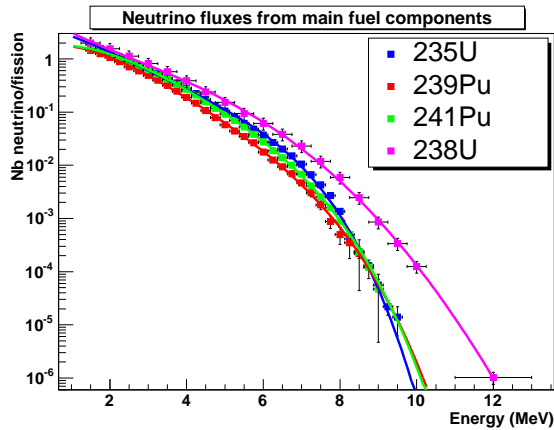


Figura 7: Espectro medido de antineutrinos dos componentes principais do combustível nuclear, da Ref. [17].

Em um estudo conjunto com engenheiros da Eletronuclear, determinou-se um ponto distante $\sim 66m$ do núcleo do reator, como possível localização para as instalações do VND. Nessa distância são esperados cerca de 1000 eventos/dia para um detector com alvo de 1 tonelada.

6 Perspectivas e Conclusões

Apresentamos o *status* e planos para o experimento de oscilações de neutrinos a ser realizado nas instalações do complexo nuclear de Angra dos Reis, no Brasil. O experimento se propõe a alcançar uma sensibilidade para o desaparecimento de antineutrinos tão pequena quanto $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0,006$, através de medidas da distorção espectral provocadas pela oscilação de neutrinos. Como primeira etapa, estamos desenvolvendo um protótipo em pequena escala para o detector, que deve ser instalado bem próximo ao reator ($L \sim 60 - 70m$), e deverá também funcionar como monitor da atividade nuclear. Este último aspecto,

tem como finalidades a determinação precisa da potência liberada pelo reator, que pode ser empregada para aumento da eficiência e segurança na geração de energia elétrica, bem como fornecer novas tecnologias e ferramentas para verificação de salvaguardas de não-proliferação, visto que é possível a determinação em tempo real, e de forma independente, da composição isotópica do combustível nuclear. No momento estão sendo desenvolvidas simulações numéricas por métodos de Monte Carlo para auxiliar no desenho e projeto das dimensões e disposição dos componentes do detector e, adicionalmente, estudos detalhados da eletrônica de processamento inicial e aquisição de dados.

Em recente reunião com engenheiros da Eletronuclear, estabelecemos um cronograma para início das operações no sítio de Angra que envolve três fases distintas:

1) Instalação de um laboratório para operação e manutenção de detectores de prova, próximo à estrutura de contenção do reator. Nessa fase pretendemos iniciar as atividades experimentais, estabelecendo a infraestrutura necessária (redes elétricas e de comunicação de dados) para realizarmos as primeiras medidas no local, como o fluxo de múons, utilizando detectores instalados na superfície, e medidas de radioatividade do ambiente. Também pretende-se, nessa fase, iniciarmos a prospecção geológica para determinação de condições estruturais do terreno, bem como obtermos amostras de material da profundidade onde planeja-se instalar a sala experimental subterrânea para que possamos caracterizar a radioatividade esperada nesse local.

2) Operação de um detector de neutrinos na superfície. Nessa fase pretende-se iniciar as primeiras medidas efetivas com neutrinos, usando uma versão simplificada do detector: um tanque de $1,0 \times 1,5 \times 1,0m^3$ com apenas três PMTs instaladas na face superior, preenchido com cintilador dopado com gadolínio. O detector deve operar em conjunto com uma versão também simplificada do veto de múons. Nessa fase esperamos medir a relação entre a taxa observada de neutrinos e a potência térmica do reator, mesmo que sujeitos à imprecisão provocada pelo ruído induzido pelo fluxo intenso de múons na superfície.

3) Instalação e operação do protótipo na sala subterrânea. Essa fase é a mais delicada, porém esperamos que a Fase 2 forneça a experiência e subsídios técnicos suficientes para que possamos instalar e operar o VND em sua configuração final, na sua localização definitiva, já provida de cobertura suficiente para blindarmos o detector contra a radiação cósmica. A blindagem suprime fortemente o ruído, melhorando a qualidade do sinal, quando finalmente, pretendemos alcançar os resultados científicos esperados para o VND.

Durante a evolução das três fases acima, pretendemos

iniciar as discussões com os engenheiros da Eletronuclear visando os projetos de construção civil (túneis e poços) necessários à instalação do ND e do FD, bem como dar continuidade aos resultados obtidos com o protótipo visando consolidar a versão definitiva dos projetos para o ND e o FD.

7 Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao Diretor Presidente da Eletronuclear, Almirante Othon Luiz Pinheiro da Silva, bem como os engenheiros Ilson Soares, José Felipe B. Pastana e José Eduardo B. Costa Matos, pelo apoio às nossas atividades no complexo de Angra. Também agradecemos a FAEPEX-UNICAMP, CNPq, FAPESP e LAMPADIA pelo apoio.

8 A colaboração

A seguir, listamos os membros da colaboração Angra- ν : J.C. Anjos, A.F. Barbosa, J. Magnin, A. Schilhtz, R.C. Shellard (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - BR); A. Bernstein (Lawrence Livermore National Laboratory - E.U.A.); N. Bowden (Sandia National Laboratories - E.U.A.); M. Aglietta, W. Fulgione (Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario - IT); M.M. Guzzo, P.C. de Holanda, E. Kemp, O.L.G. Peres (Universidade Estadual de Campinas - BR); H. Nunokawa (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - BR); D. Reyna (Argonne National Laboratory - E.U.A.); R. Zukanovich Funchal (Universidade de São Paulo - BR)

Referências

- [1] F. Reines and C. L. Cowan, *Nature*, 178, 446 (1956); *Phys. Rev.* 92, 830 (1953); *ibid.* 113, 273 (1959); C. L. Cowan *et al.*, *Science* 124, 103 (1956).
- [2] K. Eguchi *et al.* [KamLAND Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* 90, 021802 (2003); T. Araki *et al.* [KamLAND Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* 94, 081801 (2005).
- [3] L. Wolfenstein, *Phys. Rev. D* 17, 2369 (1978). S. P. Mikheyev and A. Yu. Smirnov, *Yad. Fiz.* 42, 1441 (1985) [*Sov. J. Nucl. Phys.* 42, 913 (1985)]; *Nuovo Cim. C* 9, 17 (1986).
- [4] M. C. Gonzalez-Garcia and Y. Nir, *Rev. Mod. Phys.* 75, 345 (2003); S. Pakvasa and J. W. F. Valle, *Proc. Indian*

- Natl. Sci. Acad.* 70A, 189 (2004); R. N. Mohapatra *et al.*, arXiv:hep-ph/0510213.
- [5] J. C. Anjos *et al.*, *Nucl. Phys. B Proc. Suppl.*, 155, 231 (2006).
- [6] M. Aglietta *et al.*, [LVD Collaboration], *Phys. Rev. D* 58, 092005 (1998).
- [7] B. Aharmim *et al.* [SNO Collaboration], *Phys. Rev. C* 72, 055502 (2005).
- [8] Y. Fukuda *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* 81, 1562 (1998).
- [9] K2K Collaboration, M. H. Ahn *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 90, 041801 (2003); E. Aliu *et al.* *Phys. Rev. Lett.* 94, 081802 (2005); M. H. Ahn *et al.*, arXiv:hep-ex/0606032.
- [10] MINOS Collaboration, D. G. Michael *et al.*, [MINOS Collaboration], arXiv:hep-ex/0607088.
- [11] K. Anderson *et al.*, arXiv:hep-ex/0402041; See also talks at Fourth Workshop on Future Low Energy Experiments, Hotel do Frade, Angra dos Reis (RJ), Brazil, Feb. 23-25 2005. Talks available at <http://www.ifi.unicamp.br/lenews05>.
- [12] F. Ardellier *et al.*, [Double-Chooz Collaboration], "Letter of intent for Double-CHOOZ: A search for the mixing angle θ_{13} ", arXiv: hep-ex/045032.
- [13] H.O. Back *et al.*, [Borexino Collaboration], *Phys. Lett. B* 563, 35 (2003).
- [14] E. Kemp, PhD thesis, UNICAMP (2000).
- [15] H. Minakata and H. Sugiyama, *Phys. Lett. B* 580, 216 (2004).
- [16] Yu. V. Klimov *et al.*, *Atomic Energy*, 73, 123 (1994).
- [17] K. Schreckenbach *et al.*, *Phys. Lett. B* 160, 325 (1985); A. A. Hahn *et al.*, *Phys. Lett. B* 218, 365 (1989).
- [18] A. Bernstein, Y. F. Wang, G. Gratta and T. West, *J. Appl. Phys.* 91 4762, (2002).
- [19] P. Huber and T. Schwetz, *Phys. Rev. D* 70, 053011 (2004).