

Oscilações de neutrino no referencial de repouso II

Relatório final

Aluno: Melissa Mendes Silva -
m118166x(arroba)xdac.unicamp.br

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moraes Guzzo -
<http://portal.ifi.unicamp.br/pessoas/corpo-docente/341-80>



Introdução

O presente relatório visa descrever em detalhes o andamento da pesquisa de iniciação científica desde o envio do relatório final da disciplina de F590 [1] até o presente momento, demonstrando resultados alcançados, dificuldades encontradas no percurso e conclusões parciais, notando que o estudo ainda não foi concluído, tendo duração de um ano.

Resultados atingidos

Tendo encontrado as seguintes expressões para $\Delta E'$ e t' ,

$$\Delta E' = E2' - E1' = m2 \left[\left(\frac{v2-v1}{1-v2*v1} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} - m1 \quad (1)$$

$$t' = (1 - v1^2)^{-\frac{1}{2}}(t - v1 * x) \quad (2)$$

Substituiu-se em:

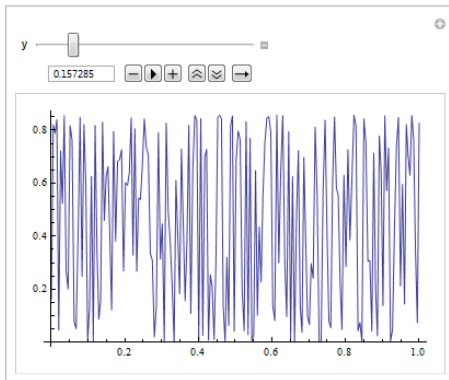
$$P_{\nu_e(t) \rightarrow \nu_\mu} = 1 - P_{\nu_e(t) \rightarrow \nu_e} = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(\frac{t' \Delta E'}{2} \right) \quad (3)$$

E graficou-se $P_{\nu_e(t) \rightarrow \nu_\mu}$ x $v1$ com o software Wolfram Mathematica© 9.0 Student Edition, estimando um valor de x , t , $m1$ e $m2$ e com a ferramenta “Manipulate” para o valor da velocidade do neutrino 2 ($v2$), uma vez que não temos acesso ao valor de velocidade $v2$ ou $v1$ experimentalmente.

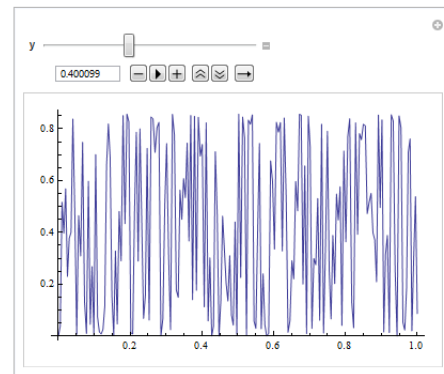
As estimativas de $m1$ e $m2$ foram feitas da seguinte forma: sabendo, de [2], que $m < 2eV$ e que $\Delta m_{21}^2 = (7,5 \pm 0,2) 10^{-5} eV^2$ (4), onde $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$, supôs-se primeiramente que $m_2 = 2 eV$ e a partir de (4), encontrou-se m_1 . Em seguida, fez-se o contrário, supondo $m_1 = 2 eV$, encontrou-se, a partir de (4), m_2 . Obviamente, não se sabe se m descrita por [2] é mesmo m_2 ou m_1 , todavia, esse método de estimativa é o melhor que pode ser feito com os dados experimentais atuais.

Alguns exemplos de gráficos encontrados podem ser vistos abaixo, onde $v1$ (eixo das abscissas) vai de zero a um pois estamos usando o sistema natural de unidades, onde $c=1$. Y representa o valor de $v2$, que também vai de zero a um, pelo mesmo argumento.

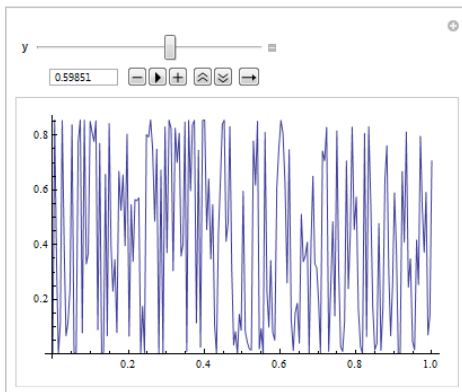
```
Manipulate[Plot[(0.857 Sin[(0.5 (1 - v^2)^-0.5]) ((10^10 (1 - v^2) (y, 0, 1])
```



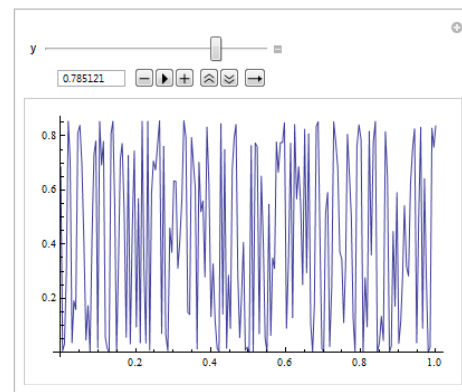
```
Manipulate[Plot[(0.857 Sin[(0.5 (1 - v^2)^-0.5]) ((10^10 (1 - v^2) (y, 0, 1])
```



```
Manipulate[Plot[(0.857 Sin[(0.5 (1 - v^2)^-0.5]) ((10^10 (1 - v^2) (y, 0, 1])
```



```
Manipulate[Plot[(0.857 Sin[(0.5 (1 - v^2)^-0.5]) ((10^10 (1 - v^2) (y, 0, 1])
```



```
Manipulate[Plot[(0.857 Sin[(0.5 (1 - v^2)^-0.5]) ((10^10 (1 - v^2) (y, 0, 1])
```

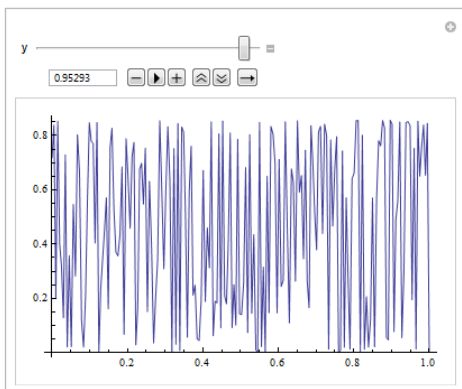


Figura 1: exemplos de gráficos obtidos onde a ordenada é a probabilidade de conversão e a abscissa, a velocidade v_1 .

Pode-se notar que o comportamento não é o esperado, pois o que de fato esperávamos é que o gráfico continuasse a apresentar um comportamento oscilatório exatamente como o encontrado para a oscilação do referencial do laboratório –

conforme figura 2 - mas com a mudança da frequência das oscilações, uma vez que a única modificação proposta para esse projeto foi a mudança de referencial. Poderia-se argumentar que talvez fosse possível encontrar mudanças na amplitude das oscilações ao mudar de referencial, todavia, partimos da hipótese de que a matriz de mistura – parâmetro responsável por essa grandeza – permaneceria invariante.

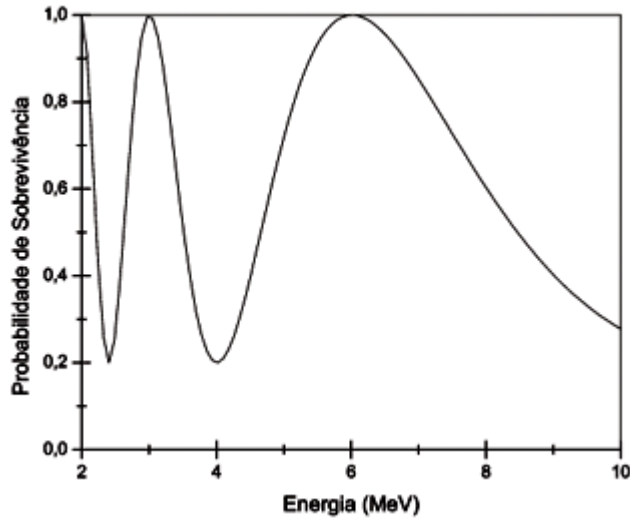


Figura 2: gráfico da probabilidade de sobrevivência pela energia para o experimento de Kamland [3]

Portanto, foi necessário reanalisar a maneira que os cálculos foram feitos, para checar se de fato essa seria a expressão encontrada. O que se notou foi que a expressão para o cálculo do momento utilizada estava inconsistente com o caráter relativístico da partícula, pois utilizamos que $p2' = m2 * u2 = m2 * \frac{v2-v1}{1-v2*v1}$, quando na verdade, $p2' = \gamma m2 u2$, para valer a relação de dispersão $E2' = \sqrt{p2'^2 + m2^2}$.

Assim sendo, refez-se todas as contas corrigindo os valores de momento e, portanto, de energia encontrados e chegou-se nas novas expressões:

$$u_1 = 0 \Rightarrow p_1' = 0 \Rightarrow E_1' = m_1$$

$$u_2 = \frac{v_2 - v_1}{1 - v_2 v_1} \Rightarrow p_2' = \frac{m_2(v_2 - v_1)}{\sqrt{(v_1^2 - 1)(v_2^2 - 1)}} \Rightarrow E_2' = \frac{m_2(v_1 v_2 - 1)}{\sqrt{(v_1^2 - 1)(v_2^2 - 1)}}$$

Portanto,

$$\Delta E' = \frac{m_2(v_1 v_2 - 1)}{\sqrt{(v_1^2 - 1)(v_2^2 - 1)}} - m_1 \quad (5)$$

$$e t' = (1 - v_1^2)^{-\frac{1}{2}}(t - v_1 x) \quad (6)$$

Pode-se mostrar ainda que, para os casos limites temos:

$$v_2 \gg v_1 : \Delta E' = m_2 [1 - v_2^2]^{-1/2} - m_1$$

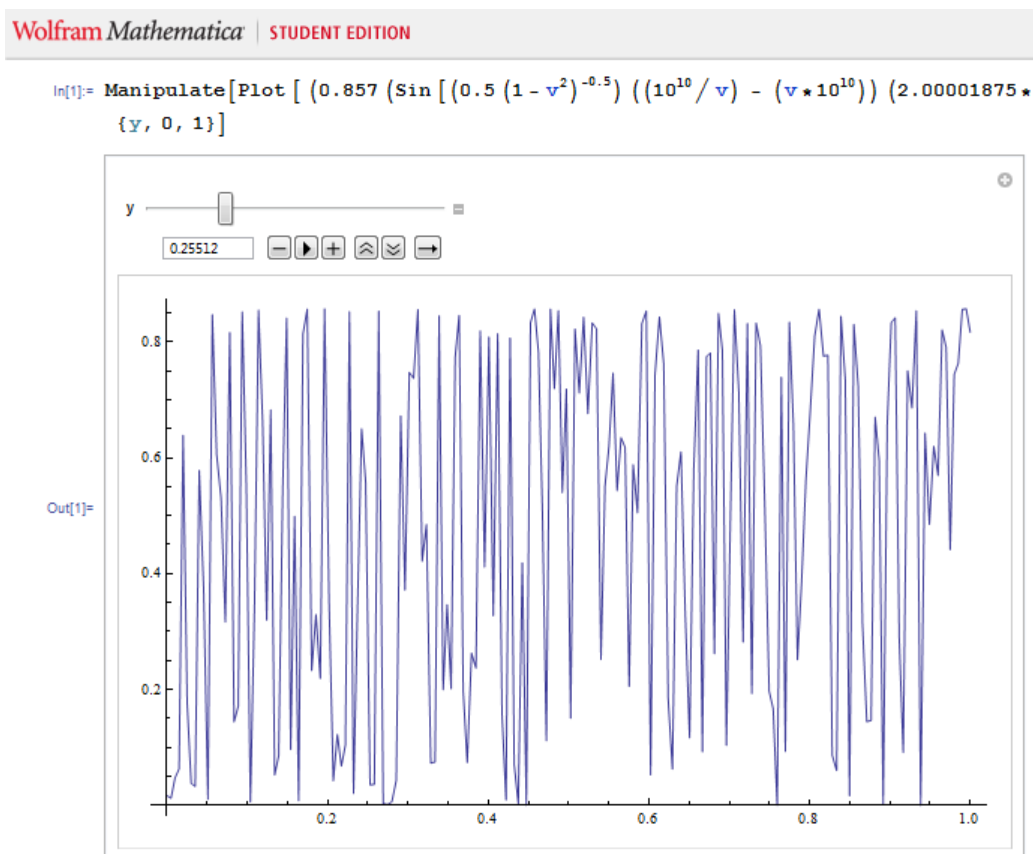
$$v_1 \gg v_2 : \Delta E' = m_2 [1 - v_1^2]^{-1/2} - m_1$$

$$v_2 \sim v_1 : \Delta E' = m_2 - m_1$$

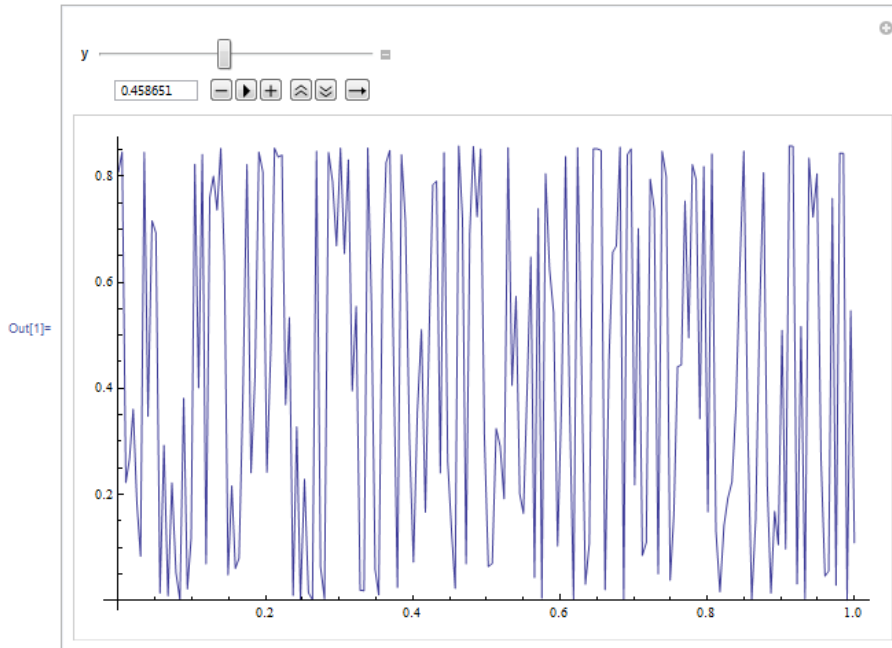
Também, para facilitar ao plotar o novo gráfico, podemos considerar que o sistema de coordenadas escolhido consistia em V1 na origem ($x=0$) em $t=0$. Assim, podemos dizer que $x = t v_1$, pois conforme já comentou-se em [1], apenas analisamos um *boost* de velocidade na direção de x .

Portanto, substituiu-se (5) e (6) na expressão (3) e graficou-se novamente de probabilidade por v_1 . Cabe comentar que escolheu-se $x = 10$ km, a distância fonte-detector no experimento de Double-Chooz, com neutrinos de acelerador.

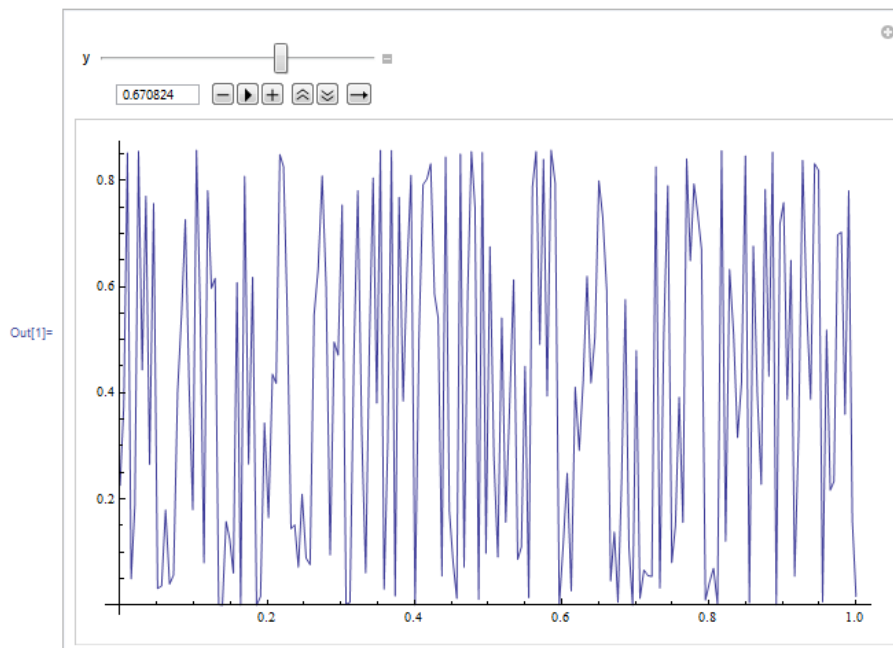
Alguns exemplos de gráficos encontrados podem ser vistos abaixo.



```
In[1]:= Manipulate[Plot[(0.857 (Sin[(0.5 (1 - v^2)^-0.5]) ((10^10/v) - (v*10^10)) (2.00001875*
{y, 0, 1})]
```



```
In[1]:= Manipulate[Plot[(0.857 (Sin[(0.5 (1 - v^2)^-0.5]) ((10^10/v) - (v*10^10)) (2.00001875*
{y, 0, 1})]
```



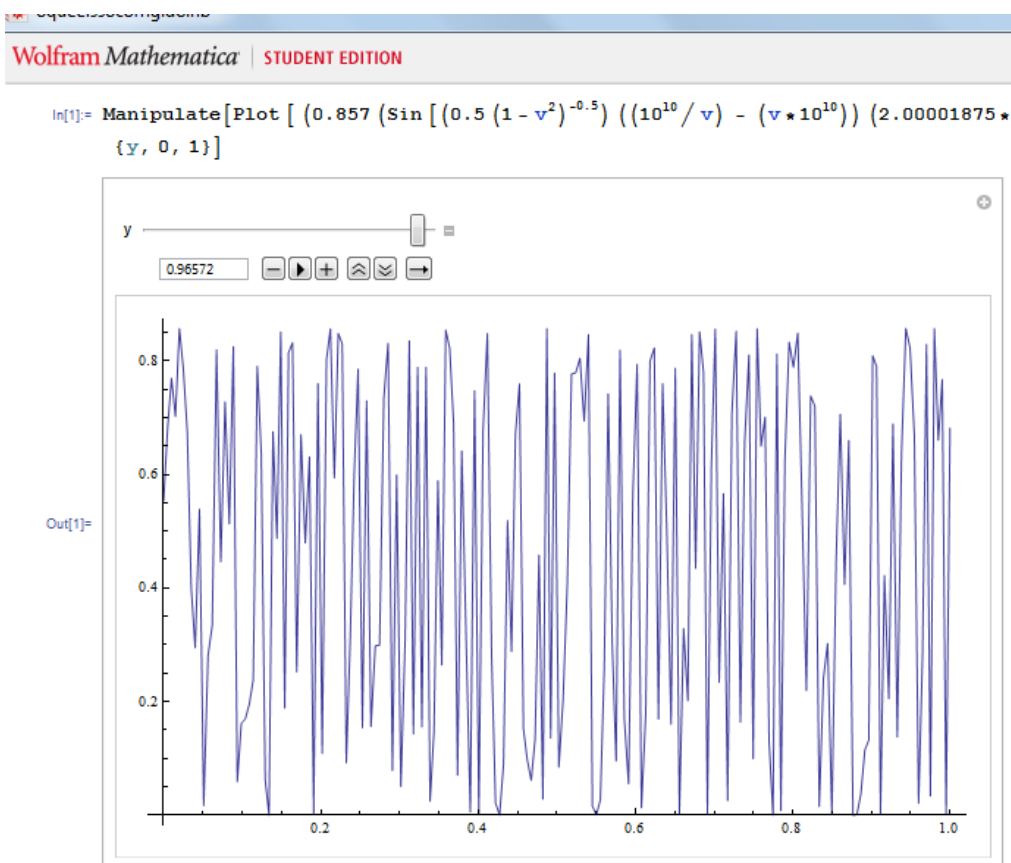


Figura 3: gráficos de probabilidade por velocidade v_1 , para as novas expressões

Pode-se ver que novamente o comportamento não é o esperado, mas dessa vez certamente o cálculo está correto, de onde podemos concluir que ou o formalismo de ondas planas realmente não é o mais adequado para tratar esse problema, ou alguma sutileza do fenômeno nos escapa à compreensão. Para resolver esse dilema, estudar-se-à o fenômeno de oscilação em outro referencial com o formalismo de pacotes de onda em breve.

Conclusão

Encontrou-se, finalmente, as expressões que descrevem corretamente o fenômeno em um referencial alternativo, então, pode-se dizer que a pergunta que pretendíamos responder foi respondida. É interessante complementar esse estudo para o formalismo de pacotes de onda, em especial para checar a validade das expressões encontradas e trazer mais sentido físico às contas realizadas, de forma a possibilitar uma interpretação física adequada.

Ainda assim, conforme esperado, há invariância de probabilidade. Isto é, para outro referencial inercial - conforme o tratado nesse estudo - os neutrinos continuam oscilando. Essa conclusão poderia ser imediata matematicamente (visto que

probabilidade é um escalar), mas não o é fisicamente. Nesse sentido, espera-se que o estudo tenha sido esclarecedor.

É evidente que devido ao fato de que erros foram encontrados e devidamente corrigidos, alguns dos nossos objetivos de curto prazo não puderam ser cumpridos, mas espera-se que eles sejam atingidos em breve, respeitando o tempo de duração do projeto. Assim, os próximos objetivos continuam sendo estudar o formalismo de pacotes de onda e repetir toda a análise feita aqui, além de comparar com trabalhos semelhantes. Caso haja tempo, pode-se propor um experimento para conferir a validade das expressões encontradas.

Referências

[1] Relatório final do projeto Oscilação de Neutrinos em referencial de repouso da disciplina F590
http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F530_F590_F690_F895/F530_F590_F690_F895_2013_sem1/MelissaM-Guzzo_RF1_F590.pdf

[2] Particle Data Group <http://pdg.lbl.gov/2013/tables/rpp2013-sum-leptons.pdf>, acessado em 10/11/13 às 18h15

[3] Compreendendo a oscilação dos neutrinos, Gustavo do A. Valdivieso; Marcelo M. Guzzo. Rev. Bras. Ens. Fís.; acessado em 10/11/13 às 21h06
http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172005000400002&script=sci_arttext

[4] Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics. Giunti, C.

[5] Neutrinos in Physics and Astrophysics. Kim, C.; Pevsner, A.

Meu orientador concorda com o expressado nesse relatório final e deu a seguinte opinião:

A Melissa desenvolveu com dedicação e competência o seu projeto de Iniciação Científica. Os resultados apresentados, embora ainda não definitivos, são interessantes e alvo de muitas discussões entre nós.

Comentários recebidos durante o evento e discussões posteriores com meu orientador:

Durante o evento de apresentação de painel, muitas pessoas estiveram presentes e se mostraram interessadas na pesquisa realizada. Todavia, para a maioria dos casos, física de neutrinos não era sua área de especialidade, o que fez com que não houvesse comentários que solucionassem algumas dúvidas pendentes.

Após o evento, reuni-me com meu orientador e depois de muita discussão, chegamos à conclusão de que o cálculo das equações de probabilidade para o novo referencial está correto. Dessa forma, também concluímos que é possível que o software Wolfram Mathematica© 9.0 Student Edition não esteja utilizando pontos suficientes da função para graficá-la, e que devido à rapidez das oscilações, o comportamento do seno ao quadrado não esteja sendo reproduzido em totalidade.

Todavia, esse fenômeno é de importância secundária, visto que os objetivos da primeira parte do projeto foram concluídos com êxito. Assim, meu orientador recomenda que passemos a estudar o formalismo de pacotes de onda na dedução de probabilidade de oscilações.