

# **Detectando Neutrinos Solares para formar uma imagem do Sol**

Arley Kahuê Valeriano da Silva<sup>1</sup> e Pedro Cunha de Holanda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instituto Principia*, <sup>2</sup>*Instituto de Física Gleb Wataghin - Unicamp*

Nesse trabalho, temos como objetivo enxergar o sol por meio de neutrinos. É comum relacionar imagens ou fotos diretamente à captura da luz, e justamente a estranheza de pensar em neutrinos como alternativa para obter retrato de astros como o sol, criou a curiosidade que motivou este trabalho. Dessa forma, ao longo do caminho será apresentado o Super-Kamiokande, experimento de onde retiraremos dados para a formação da imagem do sol a partir da captura de neutrinos. Assim, espero conseguir, como escritor deste trabalho, tornar este assunto interessante ao meu querido leitor da mesma que me é.

## I. NEUTRINOS

Em meados de 1930, radiação era o tema da vez no âmbito científico, onde investigações sobre o decaimento beta, processo em que acreditava-se ocorrer a transformação de um nêutron em próton com a liberação de um elétron, apresentava um absurdo, a energia não se conservava no processo, a energia final no sistema era menor que a inicial, em outras palavras havia energia simplesmente sumindo, observação essa que quebrava um dos princípios da natureza, a fundamental conservação de energia. Assim, Wolfgang Pauli, considerado o pai do neutrino, propôs a existência de uma partícula eletricamente neutra, e de massa ínfima, caracterizando uma partícula difícil de se detectar, assim explicando que a energia que sumiu, na verdade estava presente em uma partícula que basicamente era um fantasma, o qual posteriormente foi nomeado como neutrino, o herói desse trabalho. Dessa forma, o decaimento beta passou a ser explicado com auxílio da antipartícula do neutrino, onde além da liberação do elétron, havia também a do antineutrino eletrônico, essa última palavra se refere ao sabor do antineutrino, será explicada em outro momento). Duas décadas depois, o neutrino foi observado pela primeira vez por meio de uma das suas raras interações com a matéria. Talvez você esteja se perguntando como que essa interação aconteceu considerando as características dessa partícula: o neutrino é capaz de interagir com a matéria por meio da força fraca, interação essa que é pelo menos 1000 vezes mais fraca que a elétrica, e a força gravitacional, mas por se tratar de uma partícula muito leve, essa força acaba se tornando bem fraca, explicando assim, o porquê da partícula fantasma ser capaz de viajar longas distâncias sem interagir com a matéria, tornando-a uma boa mensageira de informações. Após intensos estudos e experimentos, os pesquisadores, apesar de não conseguirem descobrir a massa do neutrino, encontraram um limite superior de 1 eV que é aproximada-

mente  $1.8 \times 10^{-36}$  kg, observe como esse valor caracteriza uma massa minúscula, explicando assim, como o neutrino consegue atingir aproximadamente a velocidade da luz.

Sabores, é estranho pensar em uma partícula possuir um sabor, mas se necessário, interprete isso como o tipo de neutrino. Antes de explicar os sabores do neutrino, gostaria de mencionar o Problema dos Neutrinos Solares de maneira simples e breve. Próximo do ano 1960, houve um experimento cujo nome em inglês é Homestake Experiment - que ironicamente traduz para experimento caseiro - ele tinha como objetivo detectar neutrinos solares para verificar o modelo teórico, porém o fluxo detectado era de apenas um terço do esperado teoricamente. Essa discrepância foi resolvida em torno do ano 2002, quando aceitou-se a existência de três sabores de neutrino: eletrônicos, muônicos e tauônicos. O sol é capaz de produzir apenas neutrinos eletrônicos, por esse motivo o Homestake estava ajustado para detectar esse sabor, porém (talvez essa seja a parte mais estranha disso) neutrinos são uma combinação linear destes estados, os três *eigenstates* (acho a palavra em inglês mais elegante que sua tradução), isso permite o neutrino oscilar entre os sabores, assim apesar de um neutrino nascer puramente eletrônico, ele pode oscilar seu sabor, assim esquivando-se de detectores de neutrinos eletrônicos.

## II. INTERAÇÃO NEUTRINO-ELÉTRON

Agora que trabalhamos a nossa familiaridade inicial com o neutrino, podemos tratar da interação usada para detectar os neutrinos no Super-Kamiokande. A interação Neutrino-Elétron que abordaremos é a elástica, ou seja não criação ou destruição de partícula, assim sendo não há conversão de massa em energia e vice-versa. Logo, modela-se como uma colisão relativística semelhante à colisão de bola de bilhar. Porém, a natureza da interação do neutrino, a força fraca, trás algumas complicações maiores, estas relacionadas à física de partículas, por exemplos a partícula mensageira, mas para não trazer uma inundação de informação vou me limitar às expressões e ideias que modelam o fenômeno deste tópico. A primeira ideia que abordaremos é uma área transversal que reflete a probabilidade da reação ocorrer. Talvez essa frase não tenha deixado muito claro, mas podemos interpretar essa área como uma região onde neutrino possui maior probabilidade de colidir com o elétron, afinal estamos falando de partículas, coisas que não possuem dimensões, dessa forma a essa área é modelada por probabilidade, indo de encontro à intuição natural de pensar em uma região onde a colisão possui uma chance de 1 e outra de 0.

$$\frac{d\sigma}{dT_e}(Ev, Te) = \frac{\sigma_0}{m_e} \left[ g_1^2 + g_2^2 \left(1 - \frac{T_e}{E_v}\right)^2 - g_1 g_2 \frac{m_e T_e^2}{E_v} \right] \quad (1)$$

Essa é a primeira expressão que precisamos compreender, parece que ela está simplesmente jogada no meio do texto, mas agora vamos à explicação de como ela nasceu. Essa igualdade reflete a variação da secção transversal de acordo com a energia cinética do elétron. Os fatores  $g_1$  e  $g_2$  são decididos pelo sabor do neutrino. De forma simples, as constantes de  $g_1$  e  $g_2$  possuem valores fixos para cada sabor diferente, no nosso caso, faremos uso dos

valores do sabor eletrônico, pois este é característico do fenômeno que estamos investigando, os neutrinos liberados pelo sol. Além disso,  $E_\nu$  e  $m_e$  estes representam a energia do neutrino antes da colisão e a massa do elétron, respectivamente. Para explicar o  $\sigma_0$ , vamos voltar alguns passos e enxergar como essa expressão veio à vida.

$$\sigma = G_F^2 s \quad (2)$$

Para que pudéssemos entender a natureza dessa expressão, teríamos que visitar um ambiente que pessoalmente considero desconfortável, chamado de lagrangiana, então para manter este texto brilhante, vamos evitar este passo, assim nos mantendo pessoas felizes. Essa pequena igualdade é a fonte da anterior-se você já assistiu o desenho de monstros que evoluem, digamos que seja a primeira forma do monstro - onde o fator  $G_F^2$  é uma constante obtida experimentalmente, enquanto  $s$  é uma das 3 invariantes de Mandelstam, que por definição  $s = (p_{v_i} + p_{e_i})^2 = (p_{v_f} + p_{e_f})^2$ . No referencial do laboratório, sendo este tal que a velocidade inicial do elétron é nula, encontra-se, ao desprezar a massa do neutrino,  $s = 2m_e E_\nu$ , e então, após extensas contas, obtêm-se a expressão da derivada  $\frac{d\sigma}{dT_e}$ , onde  $\sigma_0 = \frac{2G_F^2 m_e^2}{\pi} \approx 88.06 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$ .

Uma outra igualdade imprescindível, desenvolve-se a partir da conservação da energia e do momento linear relativístico, esse representando a dependência da energia cinética do elétron com o ângulo, nomeado de  $\theta$ , com o qual a velocidade do elétron faz com o eixo da colisão, definido pela direção da velocidade inicial do neutrino.

$$T_e = \frac{2m_e E_v^2 \cos^2 \theta}{(m_e + E_v)^2 - E_v^2 \cos^2 \theta} \quad (3)$$

Dessa forma, podemos fazer uma mudança de variável na função  $\frac{d\sigma}{dT_e}$  para obtermos uma distribuição com uma expressão maiorzinha que também será importante, esse seria a segunda evolução do mostrinho.

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \sigma_0 \frac{4E_v^2 (m_e + E_v)^2 \cos\theta}{[(m_e + E_v)^2 - E_v^2 \cos^2 \theta]^2} \left[ g_1^2 + g_2^2 \left( 1 - \frac{2m_e E_v \cos^2 \theta}{(m_e + E_v)^2 - E_v^2 \cos^2 \theta} \right)^2 - g_1 g_2 \frac{2m_e^2 \cos^2 \theta}{(m_e + E_v)^2 - E_v^2 \cos^2 \theta} \right] \quad (4)$$

Na seção V, onde construiremos a imagem do sol, será necessária conseguirmos uma distribuição do fluxo de neutrinos no espaço, talvez o motivo não se faça claro, mas no caminho desse texto será iluminado, por agora, apresento-lhe as expressões das distribuições de evento com o ângulo  $\theta$  e a energia cinética do elétron  $T_e$ .

$$\frac{dN}{dT_e} = \int dE_v \phi(E_v) \frac{d\sigma(E_v, \cos\theta)}{dT_e} \quad (5)$$

$$\frac{dN}{d\cos\theta} = \int dE_v \phi(E_v) \frac{d\sigma(E_v, \cos\theta)}{d\cos\theta} \quad (6)$$

Para compreendermos tais expressões, faremos uma análise dimensional, por simplicidade. O fluxo que futuramente faremos uso, é expresso em unidades de  $\frac{\text{numero}}{\text{tempo.area.energia}}$ , representando quantos neutrinos atravessaram uma área, em um certo intervalo de tempo e determinada energia, porém o tempo não se faz necessário para o nosso objetivo, pois observar a distribuição do fluxo de neutrinos no espaço não torna o tempo um bom protagonista, assim um bom exercício é substituir o  $\phi$  pela sua unidade nas expressões, retirando o tempo, e conferir a veracidade das igualdades por meio disso.

### III. EFEITO CHERENKOV

Enquanto preparava a seção que apresenta nosso querido Super-Kamiokande, decide que seria prudente abrir um espaço para falar sobre o efeito que nos permite detectar o elétron que colidiu com o neutrino. Dessa forma, este espaço provavelmente não será tão grande quanto os outros, mas sua importância não será menor por isso.

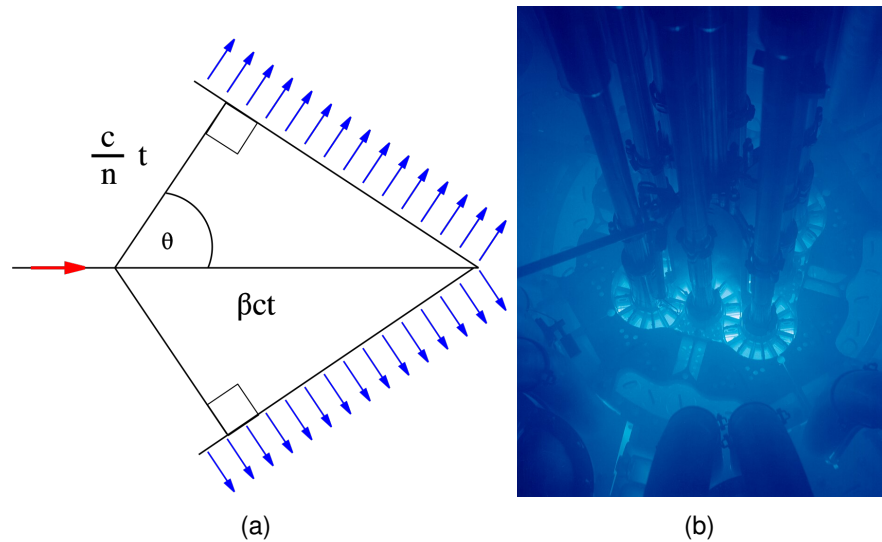
Pretenciosamente, imaginemo-nos submersos em águas calmas, e na distância enxergamos uma partícula carregada, digamos que um elétron, movimentando-se a uma velocidade maior que  $2,2 \times 10^8 m/s$ , que coincidentemente é a velocidade da luz na água, nesse caso ocorre o efeito Cherenkov, nomeado de tal forma em homenagem ao físico soviético Pavel Cherenkov, basicamente acontece a emissão da radiação Cherenkov se propagando em um formato que lembra um anel, sendo modelado de forma semelhante ao estrondo sônico, fenômeno esse que ocorre quando um objeto se move com velocidade maior que a do som no meio. No caso do efeito Cherenkov, ao invés de ouvir-se um estrondo, vê-se uma luz azulada, a qual é nomeada de radiação Cherenkov. Essa é a explicação do brilho azul característico de um reator nuclear submerso em água (Fig.1(ii)). As imagens da Figura 1 devem ajudar a visualizar o que está acontecendo com o nosso amigo elétron.

Observar a imagem à esquerda (Fig. 1(i)), onde  $\beta = \frac{v_p}{c}$ , nos permite descrever o ângulo representado em função da velocidade da partícula, da luz no vácuo e do índice de refração do meio.

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} \quad (7)$$

Observe que esse  $\theta$  presente nesse capítulo do efeito Cherenkov é diferente do que foi





**Figura 1:** (a) Ilustração do efeito Cherenkov, o elétron se encontra na ponta à direita. (b) Núcleo do Reator de Teste Avançado no Laboratório Nacional de Idaho.

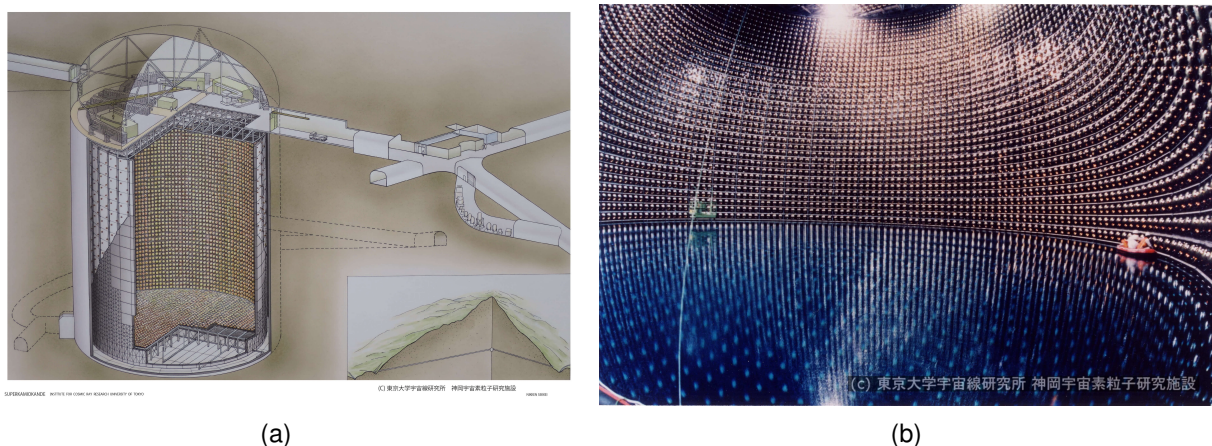
apresentado na seção II. Considerando-se  $\alpha$  o ângulo de abertura do cone formado pela radiação cherenkov:

$$\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1}{n\beta} \quad (8)$$

Com essa explicação, tenho como objetivo criar uma intuição em tu, querido leitor: ao observarmos o cone da radiação Cherenkov, podemos descobrir a direção em que a partícula carregada propaga, vejamos, finalmente, como esse efeito mostra sua importância no SK.

#### IV. SUPER-KAMIOKANDE

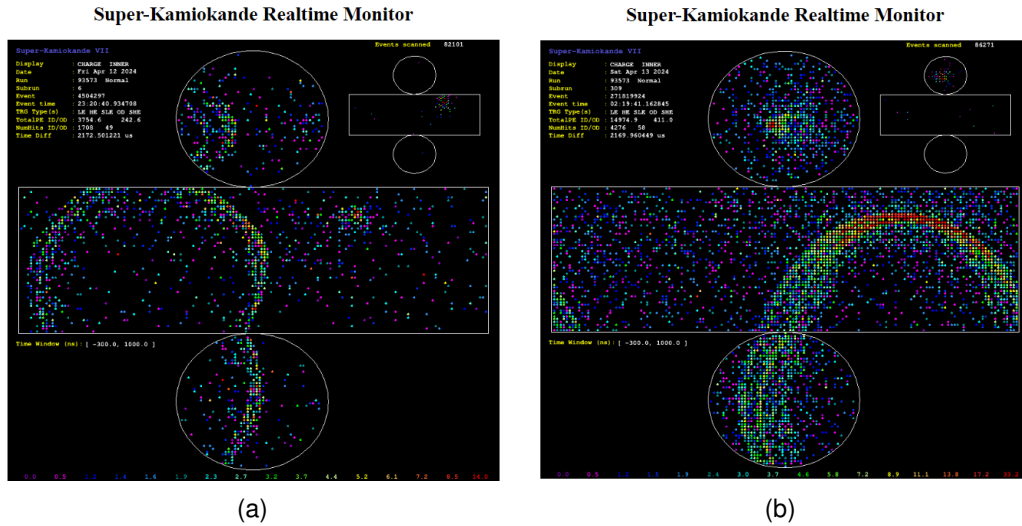
Super-Kamiokande é o nome de um observatório de neutrinos (ora que surpresa) localizado no Japão, sua estrutura encontra-se a 1000m de profundidade, de geometria cilíndrica, com 39m de diâmetro e 41m de altura



**Figura 2:** (a) Ilustração do SK. (b) Fotografia do SK sendo preenchido de água. Fonte: <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/sk/experience/gallery/>

Em sua parede, o SK possui sensores de luzes com 50cm de diâmetro, sensíveis o suficiente para detectar uma lanterna ligada na lua. Dessa forma, são capazes de detectar a radiação Cherenkov emitida pelos elétrons que colidiram com os neutrinos. Em suma, quando o SK está preenchido de água, totalizando cerca de 50000 toneladas, neutrinos colidem com um elétron, como explicado na seção anterior, ocorre o efeito Cherenkov que é detectado pelos sensores presentes no SK, resultando em imagens como as presentes na Figura 3.

Em um dia, cerca de 30 neutrinos são detectados no SK, a princípio pode parecer um número considerável, contrariando a minha afirmação de a interação Neutrino-Elétron ocorrer raramente, mas gostaria de adicionar uma informação que deve convencer-lhe disso: a cada segundo, centenas de trilhares de neutrinos vindos do sol atravessam nossos corpos, imagine então o número de neutrinos solares que passam pelo SK em um segundo con-



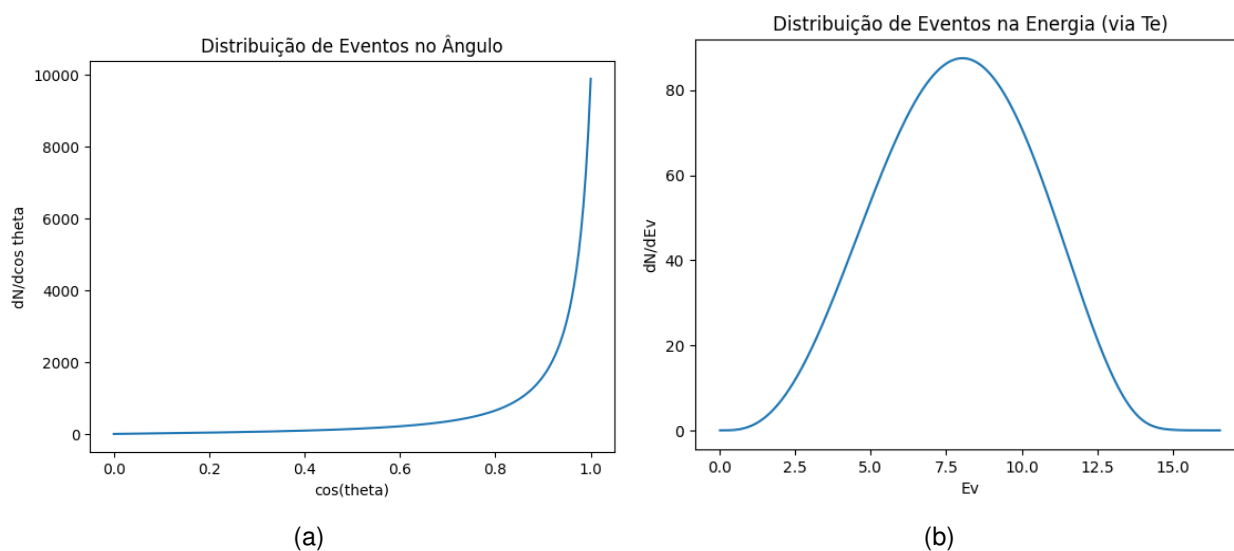
**Figura 3:** O site oficial do SK permite acesso a uma transmissão ao vivo das detecções dos sensores, gravei estas imagens enquanto vigiava este site (pura diversão, recomendo!). Fonte: <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/realtimemonitor/>

siderando as dimensões dele. Agora que sabemos como funciona a detecção do neutrino experimentalmente, vamos para a parte final, onde construímos a imagem do sol de maneira interessante.

## V. IMAGEM DO SOL

No site do SK, é possível acessar uma lista, tal que seria um eufemismo chama-la de extensa, com dados da detecção de inúmeros neutrinos solares. Dessarte, torna-se possível aliar o modelo teórico, presente na seção II, com os dados obtidos pelo no querido SK para construirmos uma imagem do sol.

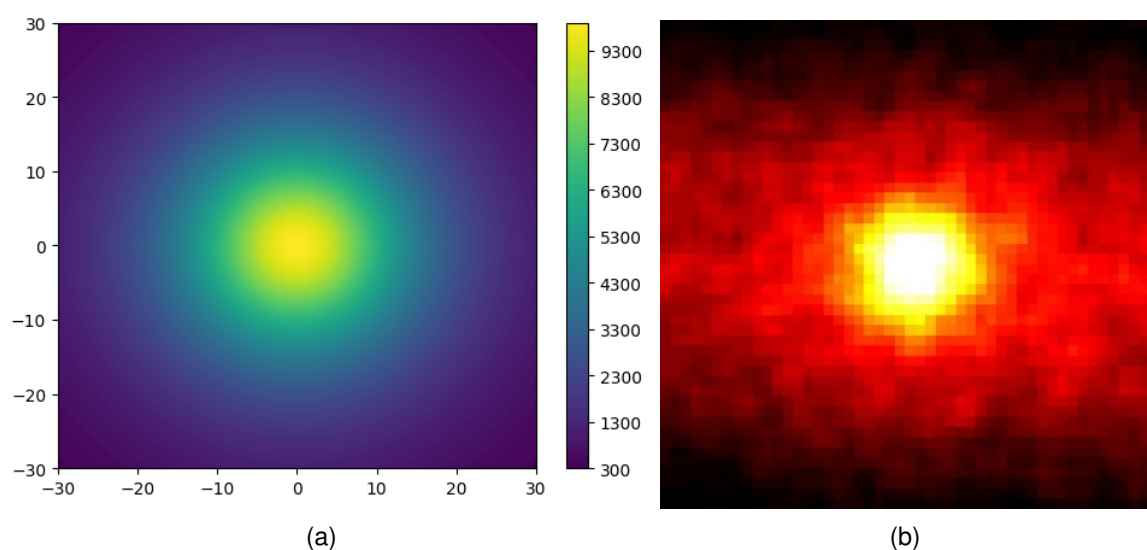
A priori, faz-se necessário entender a ideia do que está por vir. A fotografia do sol por meio de neutrinos, é um mapa que representa a intensidade do fluxo de neutrinos ao longo desse. De maneira mais simples e lúdica: vamos pintar de cores mais quentes regiões onde muitos neutrinos são criados, de cores mais frias para o caso contrário. Fixada essa ideia, basta descobriremos como se distribui o fluxo de neutrinos no espaço, para tal, visitaremos as expressões (5) e (6), presentes na seção II, e então plotaremos ambos usando valores de  $E_\nu$  que foram detectados pelo SK, os quais se fazem presentes na lista de dados de neutrinos solares.



**Figura 4:** (a) Distribuição dos eventos no ângulo. (b) Distribuição dos eventos no  $E_\nu$ .

As distribuições nos permite interpretar que existe valores para o ângulo e a energia do

neutrino mais prováveis, mas o resultado mais interessante para o mapeamento é observar que a colisão mais provável é aquela em que o elétron move-se no mesmo sentido em que o neutrino inicialmente movia, logo a distribuição de elétrons que colidiram e foram detectados pelo SK é, com boa aproximação, a distribuição do fluxo de neutrinos no céu, de tal forma que para formar a imagem do sol, basta plotar em uma plano os dados do SK que indicam os locais onde as colisões são mais frequentes, representado pela variação da cor. Resultando, assim, senhoras e senhores, na figura 5(i) :



**Figura 5:** (a) Imagem final do sol. (b) Imagem do sol montada pelo SK.

## VI. CONCLUSÃO

Fascinante, né? Com isso, gostaria de concluir afirmando que há detalhes que omiti com dor no coração, visando escrever um paper com cerca de 10 páginas... Como deves ter concluído, ainda assim não foi uma estratégia muito eficiente. Caso esteja interessado em conhecer mais sobre o neutrino, em especial a sua história, recomendo o primeiro livro presente nas referências bibliográficas [1].

- 
- [1] Spaceship Neutrino, Christine Sutton
  - [2] Compreendendo a oscilação dos neutrinos, Gustavo do A. Valdivieso e Marcelo M. Guzzo
  - [3] Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Carlo Giunti and Chung W. Kim
  - [4] Guia sobre o SK: <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/sk/about/5min/>
  - [5] Site do SK: <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/sk/>
  - [6] Site do monitor de tempo real do SK: <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/realtimemonitor/>