



# Luz de Cintilação em Argônio Líquido

F. Marinho  
email: [franciole@ita.br](mailto:franciole@ita.br)

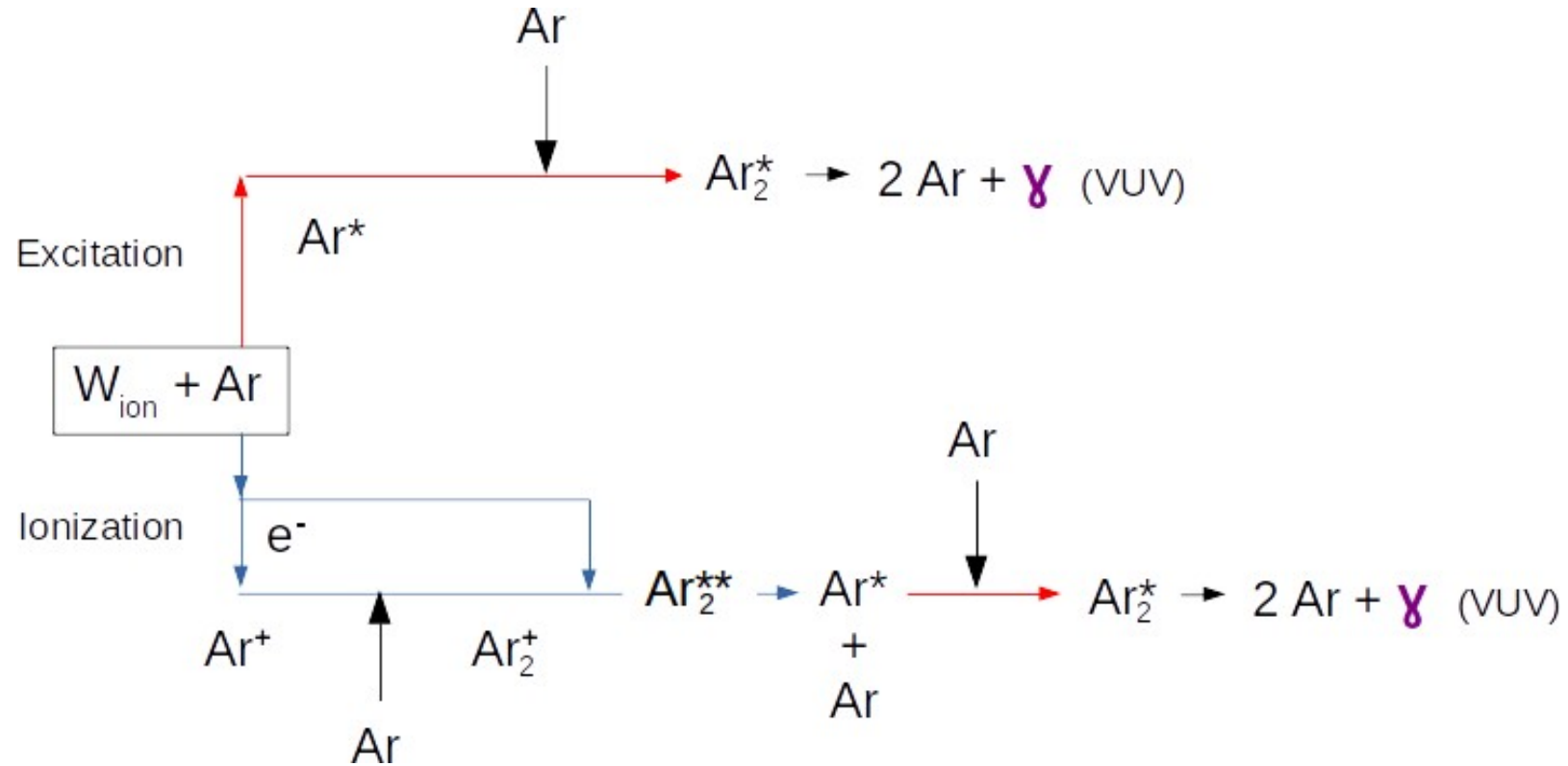
Conteúdo adaptado dos slides de P. Green apresentados no DUNE LArSoft workshop 2025

EBN – UTFPR – 08 de Agosto de 2025

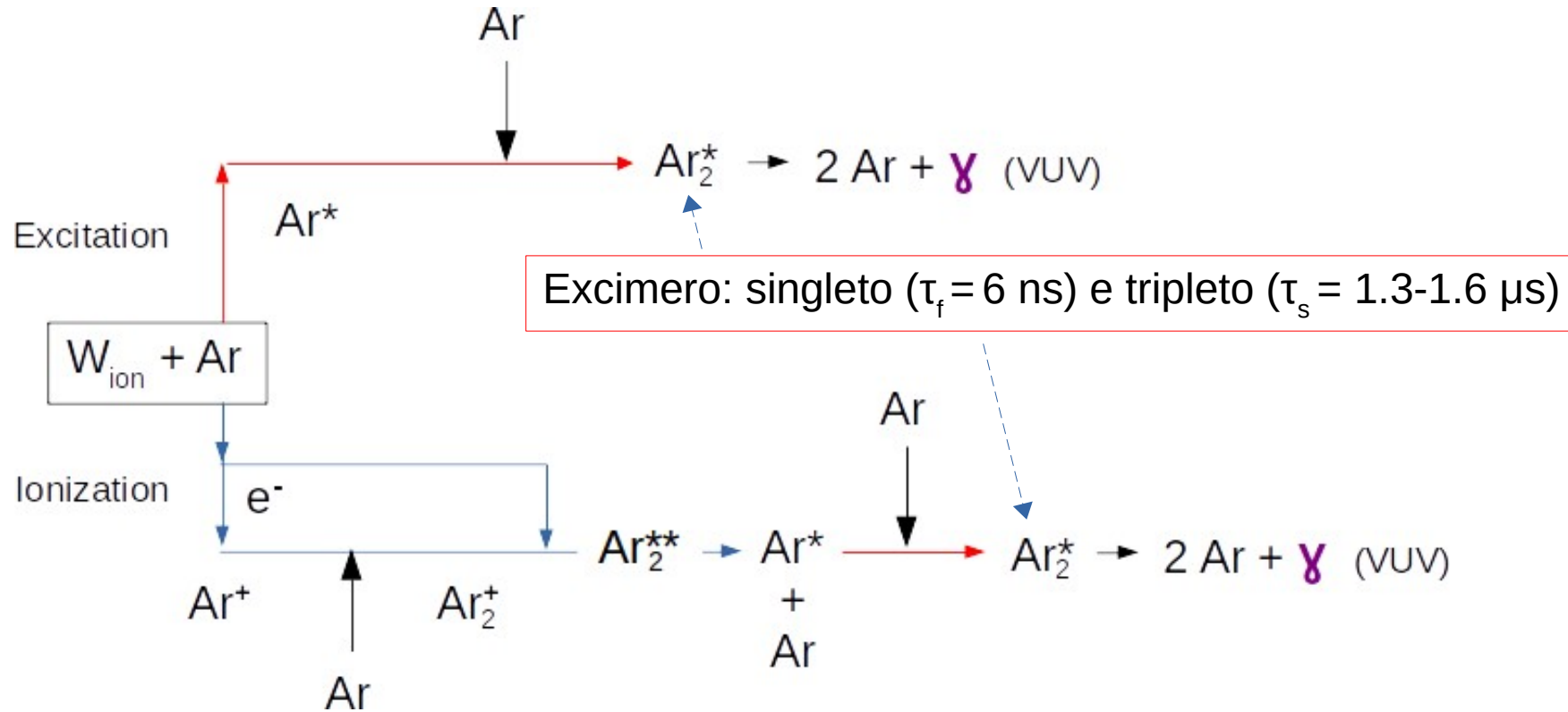
# Resumo

- Noções gerais de simulação de luz de cintilação em LArTPCs
- Produção, propagação, detecção e reconstrução
- Realizar exemplos práticos no tutorial

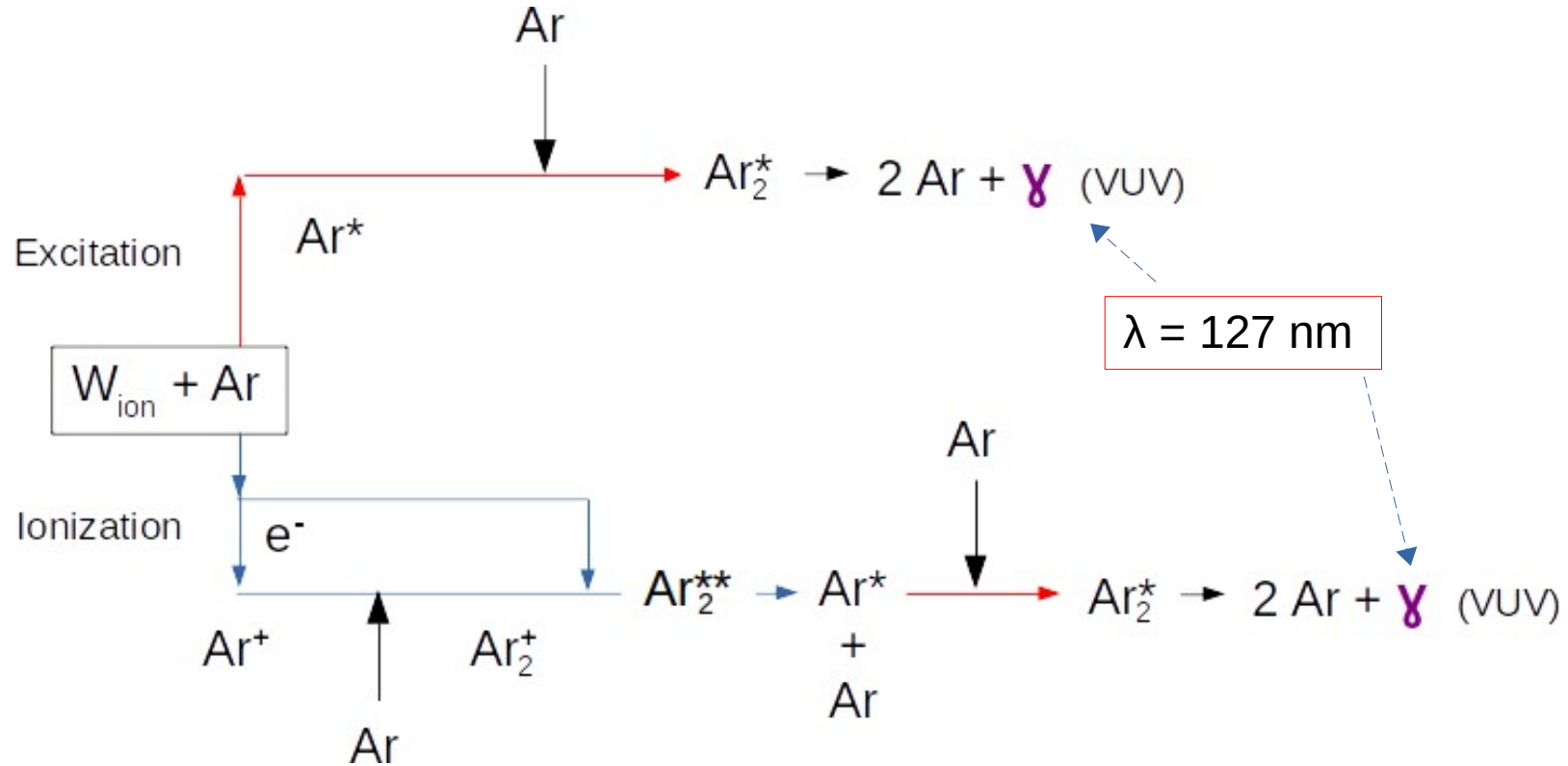
# Mecanismo de Cintilação no LAr



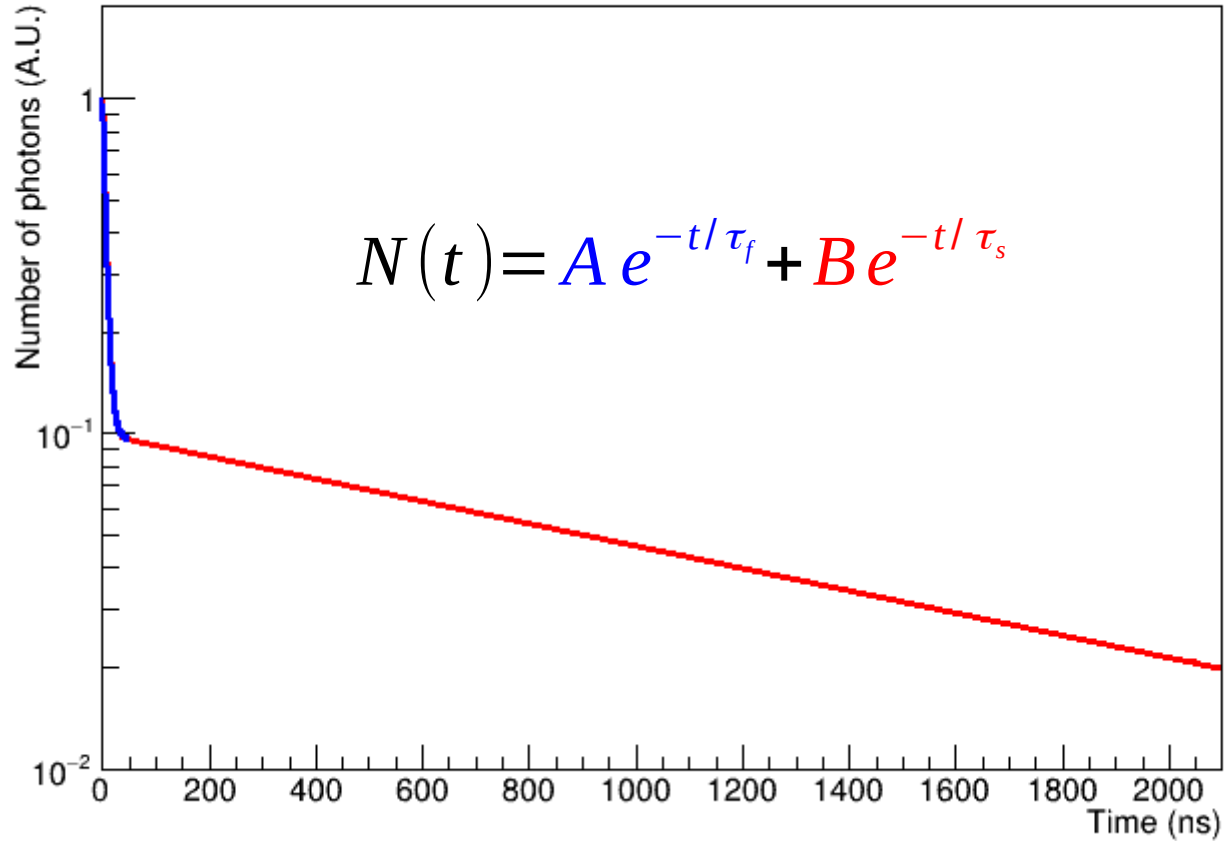
# Mecanismo de Cintilação no LAr



# Mecanismo de Cintilação no LAr



# Cintilação: perfil temporal



# Cintilação: fótons/energia depositada

Número de fótons produzido por unidade de energia depositada em LAr:

Determinado por  $\frac{dE}{dx}$ , tipo da partícula e campo elétrico  $\mathcal{E}$  aplicado ao meio.

Exemplos:

$$L_\gamma \sim 4 \times 10^4 \text{ fótons/MeV, para elétrons e } \mathcal{E} = 0 \text{ V/cm}$$

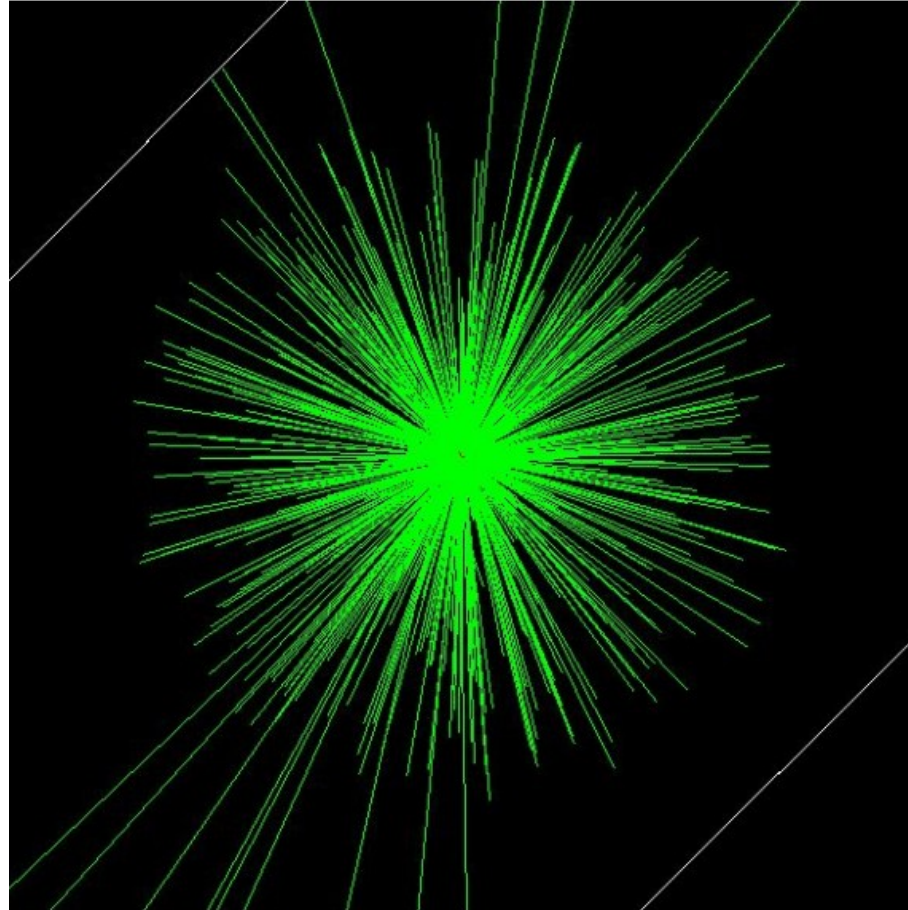
$$L_\gamma \sim 2.5 \times 10^4 \text{ fótons/MeV, para elétrons e } \mathcal{E} = 500 \text{ V/cm}$$

$$L_\gamma \sim 1.7 \times 10^4 \text{ fótons/MeV, para alfas e } \mathcal{E} = 500 \text{ V/cm}$$

# Cintilação: emissão isotrópica

Número de fótons produzido por unidade de energia depositada em LAr:

Determinado por  $dE/dx$ , tipo da partícula e campo elétrico  $\mathcal{E}$  aplicado ao meio.



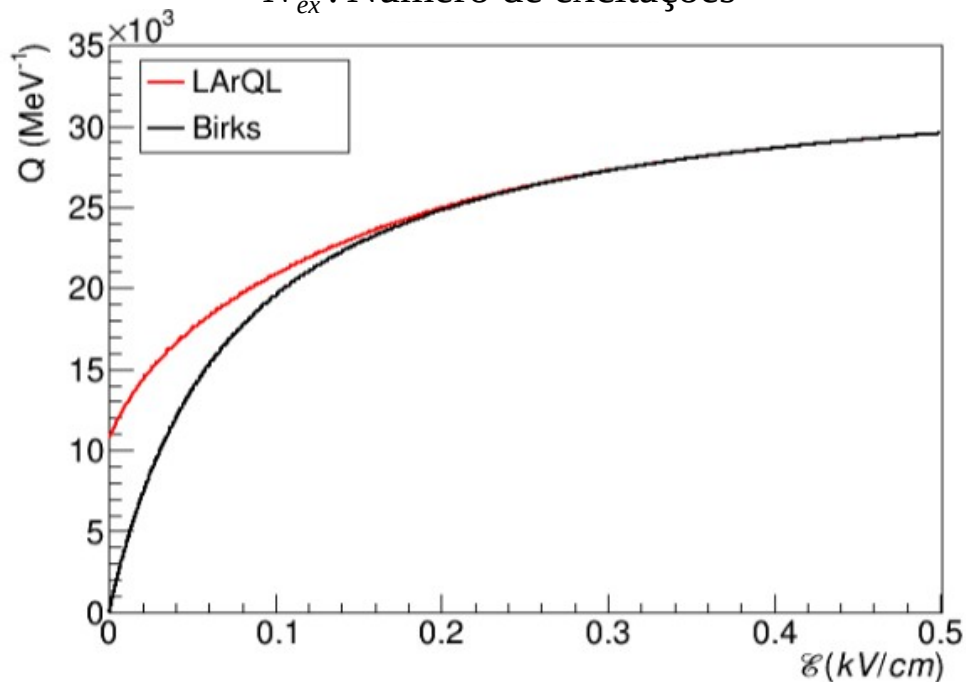
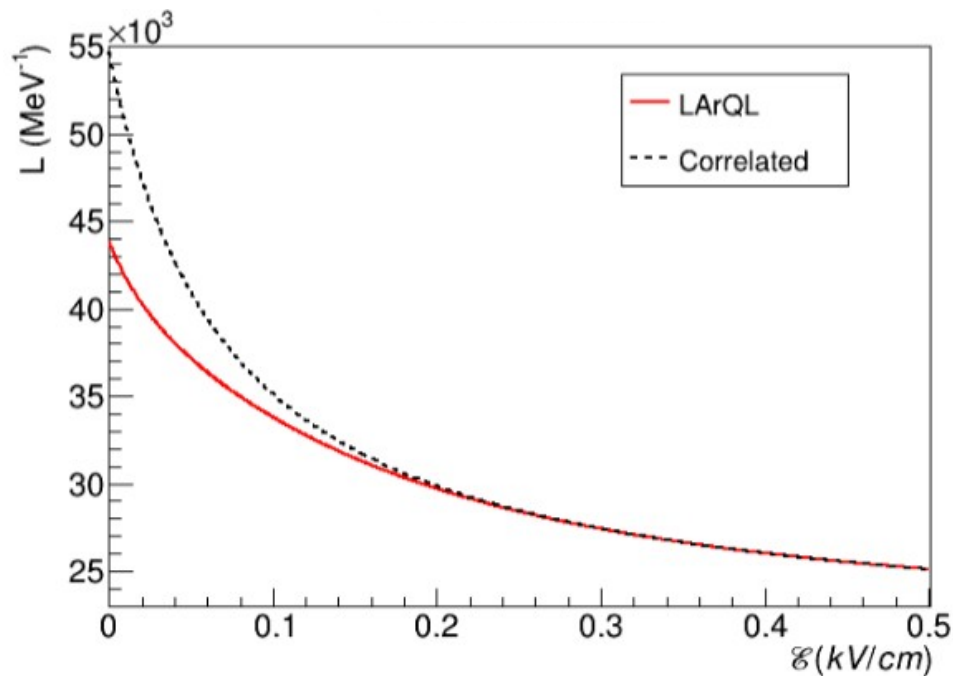


# Correlação entre Carga e Luz

$$N_i + N_{ex} = Q(dE/dx, \mathcal{E}) + L(dE/dx, \mathcal{E})$$

$N_i$ : Número de ionizações

$N_{ex}$ : Número de excitações

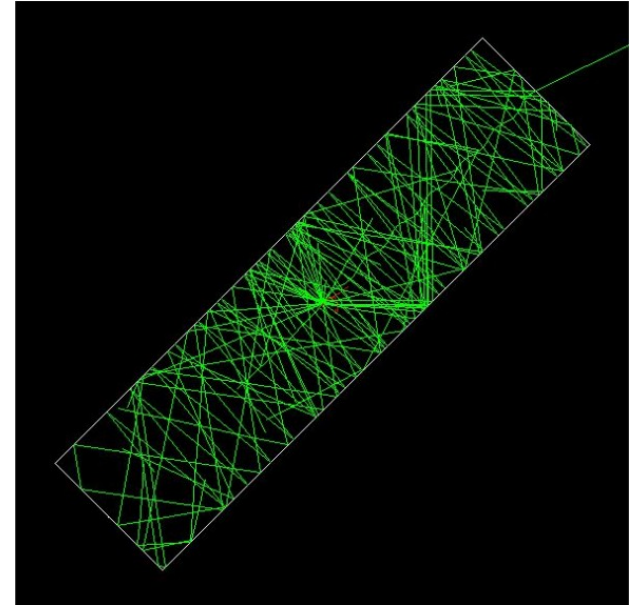
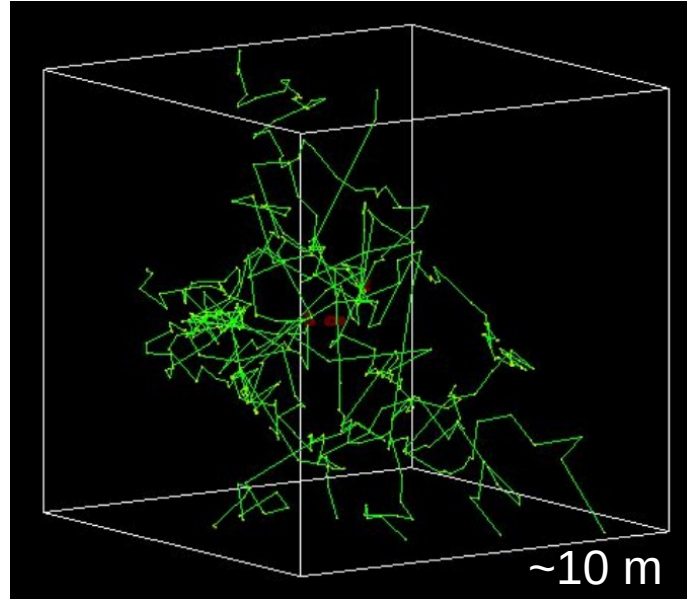
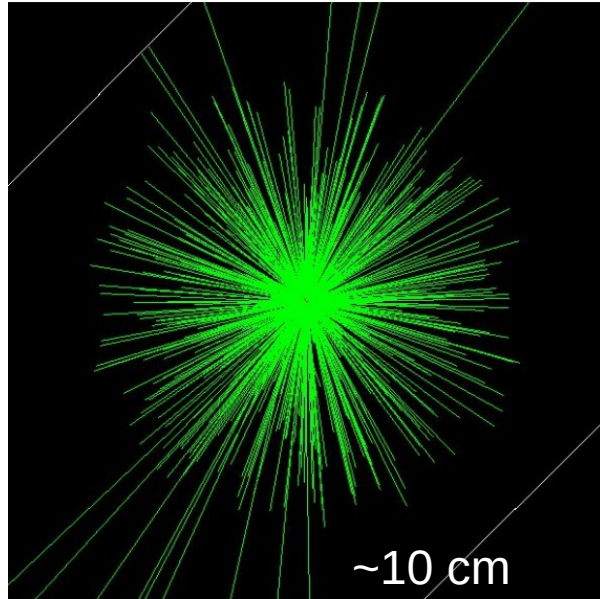


$$\frac{dE}{dx} = 2.1 \text{ MeV/cm}$$

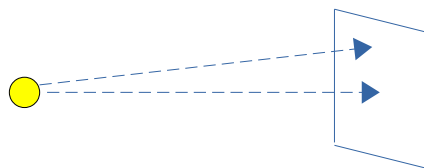
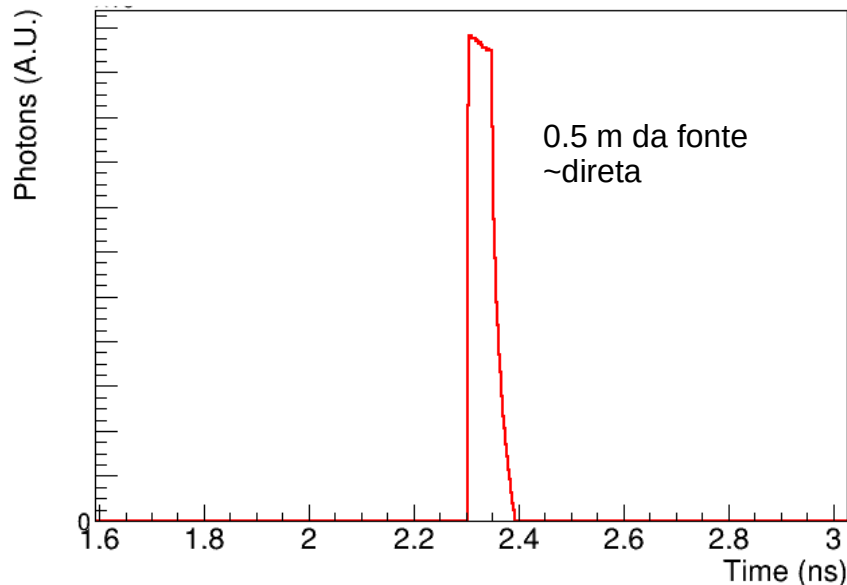
# Propagação da Luz de Cintilação

- Argônio líquido é transparente à passagem da sua luz de cintilação
  - Emissão proveniente da transição de um dímero
  - Energia inferior ao primeiro estado excitado do átomo de Ar
- Interações elásticas (Rayleigh) de LAr VUV com átomos de Ar ao longo da trajetória
  - Comprimento de espalhamento:  $\lambda_{RS} = 99.1 \pm 2.3 \text{ cm}$
- Impurezas em LAr podem causar absorção ocasionando redução da fração de fótons que chegam aos detectores
- Condições de contorno/Geometria: Refletividades, etc.

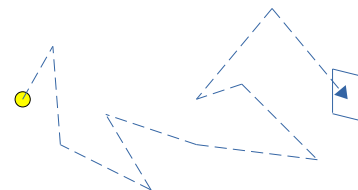
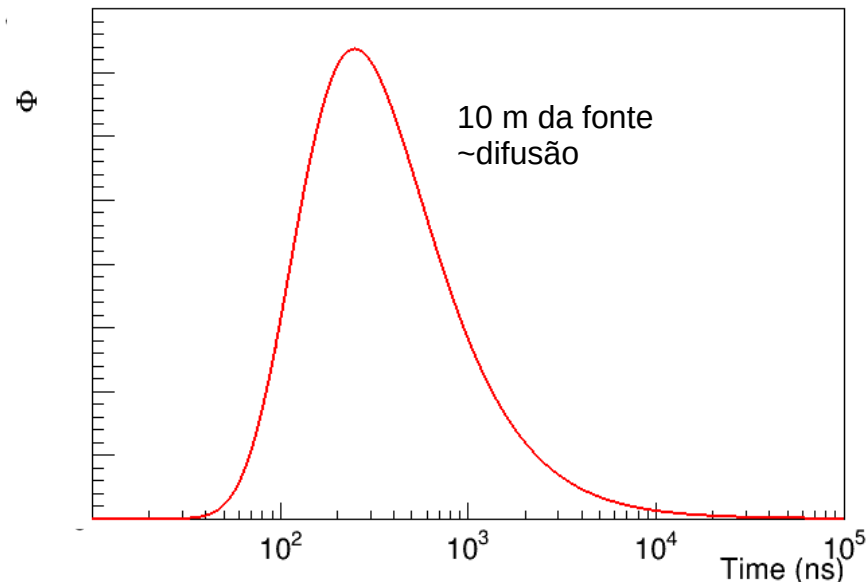
# Propagação da Luz de Cintilação



# Propagação da Luz: Características temporais

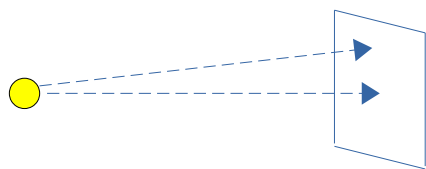
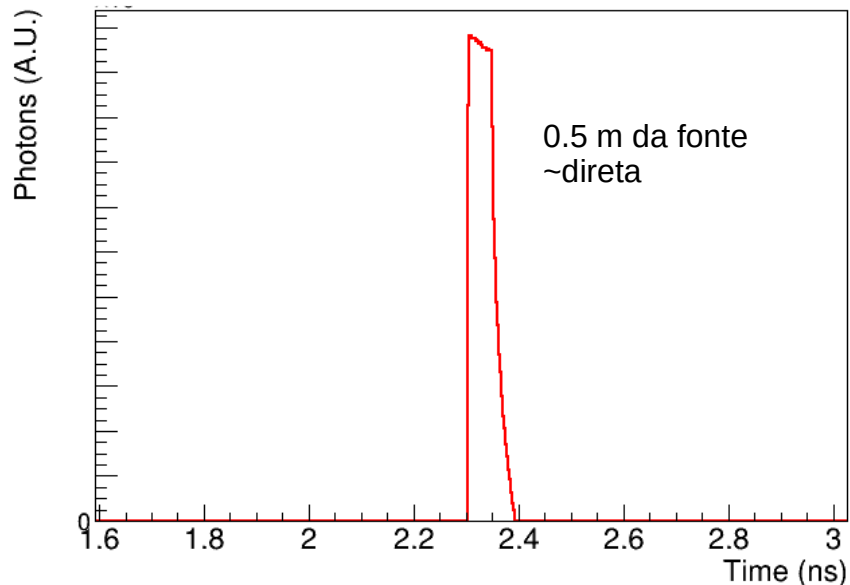


sensor: 10x10 cm<sup>2</sup>

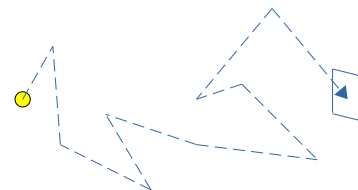
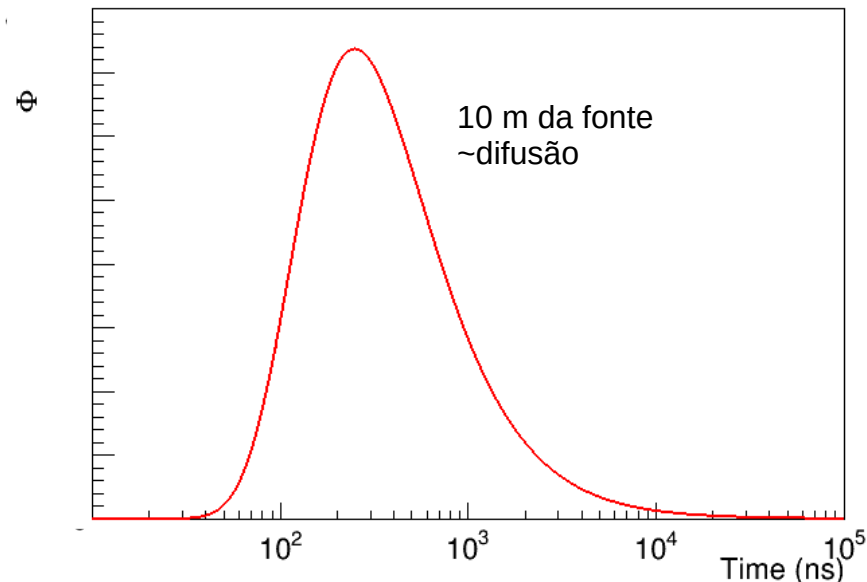


sensor: 10x10 cm<sup>2</sup>

# Propagação da Luz: Características temporais



sensor:  $10 \times 10 \text{ cm}^2$



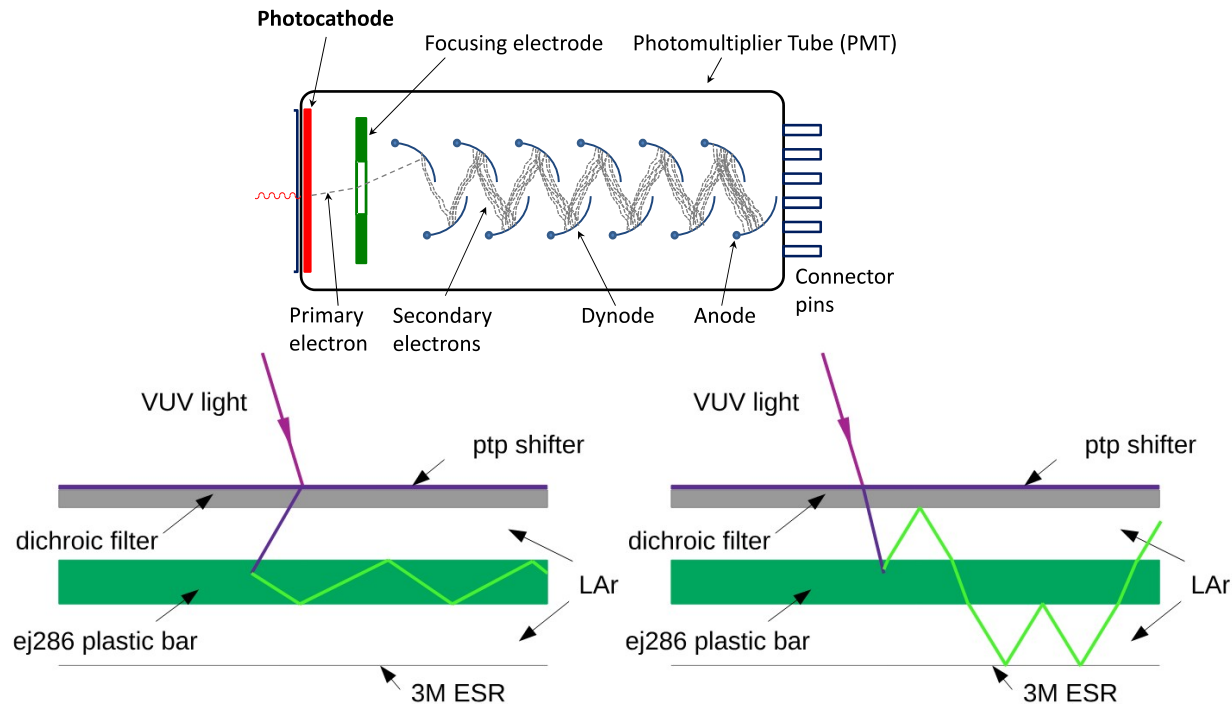
sensor:  $10 \times 10 \text{ cm}^2$

# Detecção de Luz VUV: Wavelength shifter

**Desafio:** Fotodetectores com baixa eficiência de detecção nessa região do espectro

(Luz VUV absorvida diretamente pelos materiais)

**Solução:** Empregar estágio intermediário com wavelength shifters (pTP, TPB, etc)

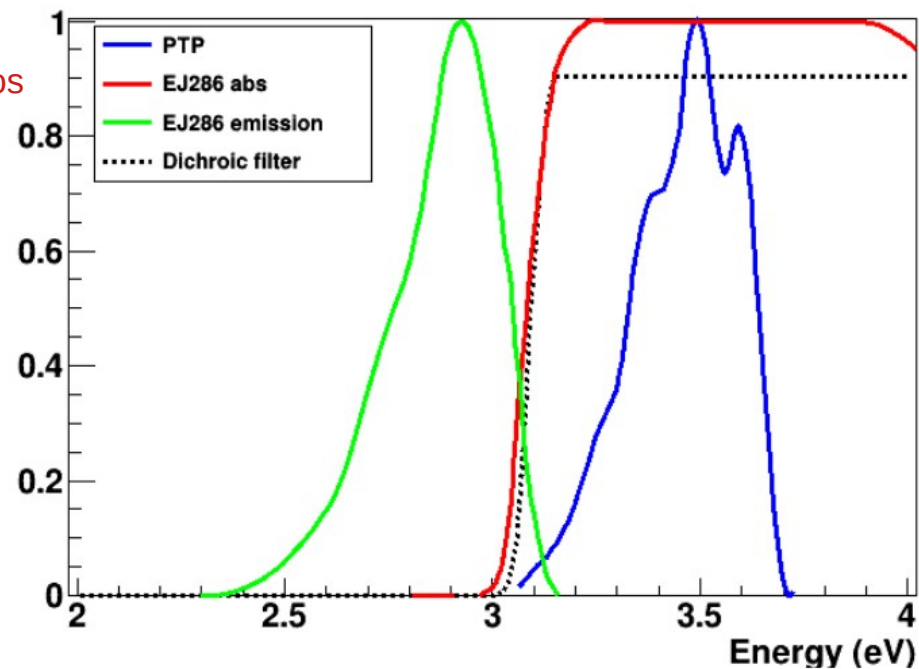
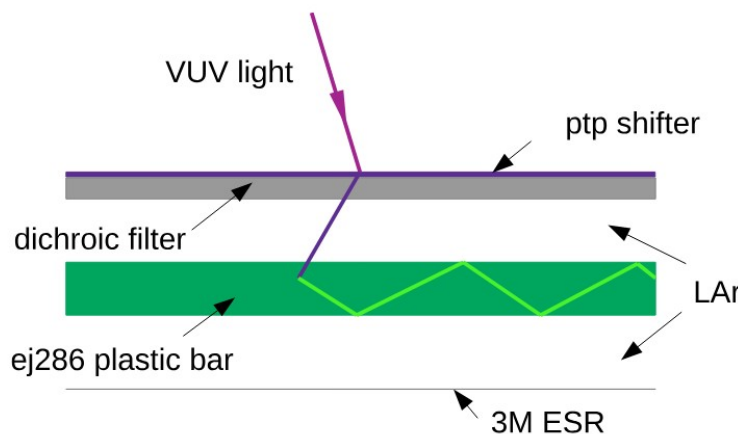


# Detecção de Luz VUV: Wavelength shifter

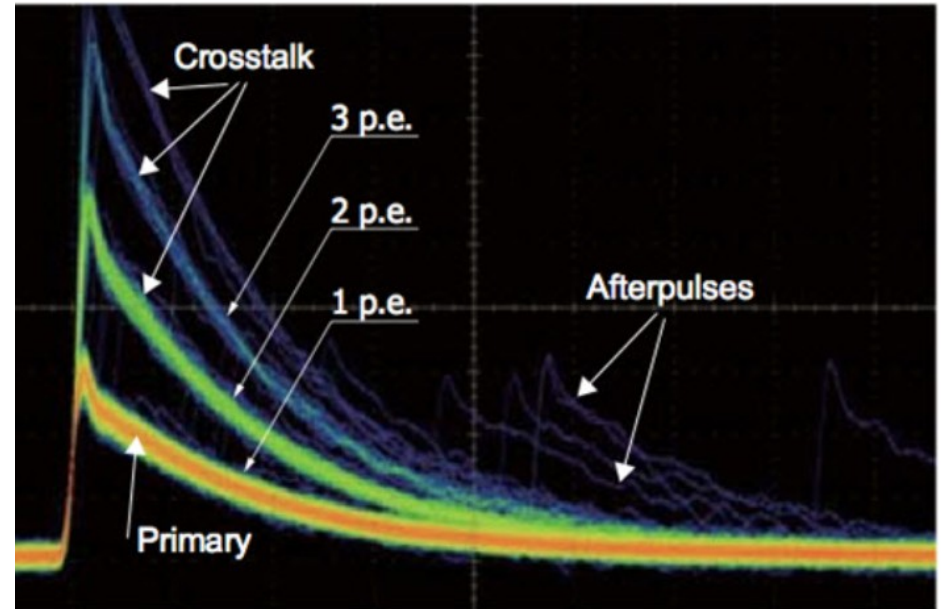
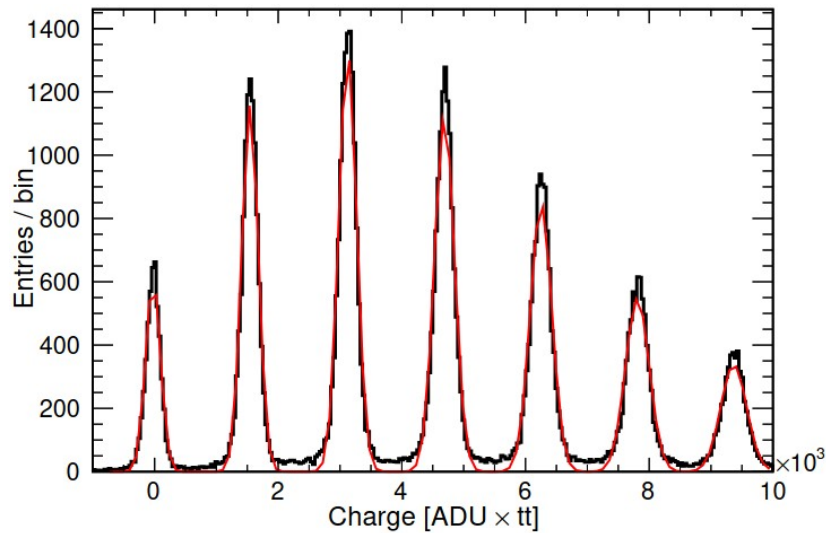
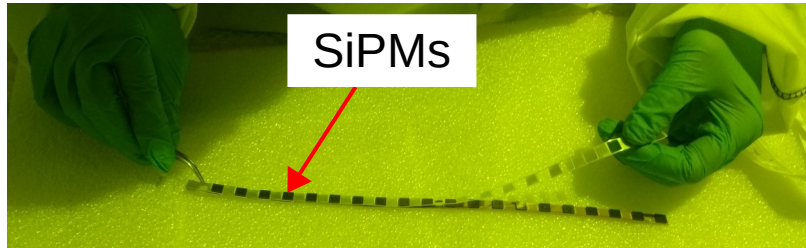
**Desafio:** Fotodetectores com baixa eficiência de detecção nessa região do espectro  
(Luz VUV absorvida diretamente pelos materiais)

**Solução:** Empregar estágio intermediário com wavelength shifters (pTP, TPB, etc)

- Emissões ~isotrópicas: 50% de luz
- Resposta rápida (ns) mas com componente lenta em alguns casos

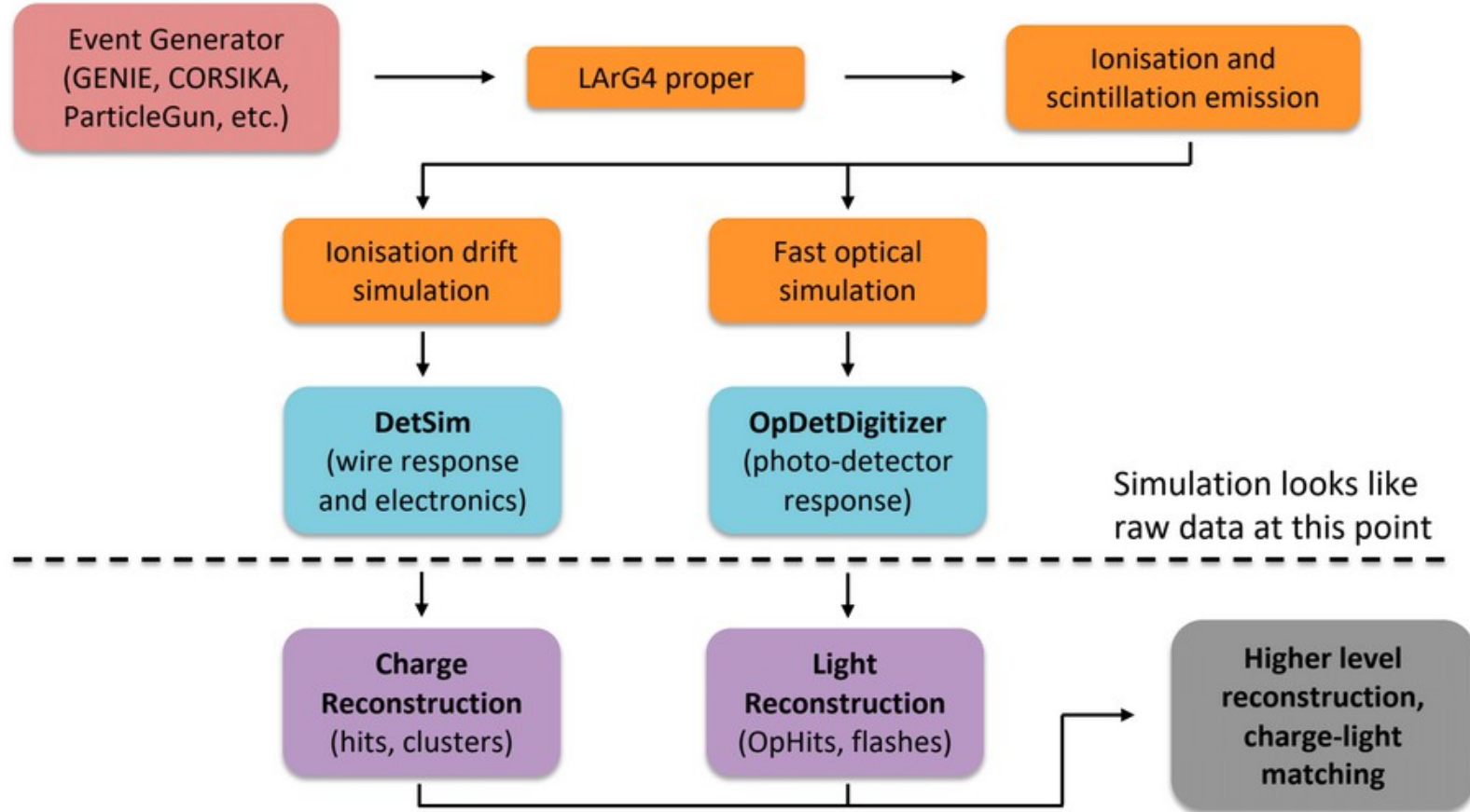


# Detecção de Luz VUV: Fotoelétron





# Simulação

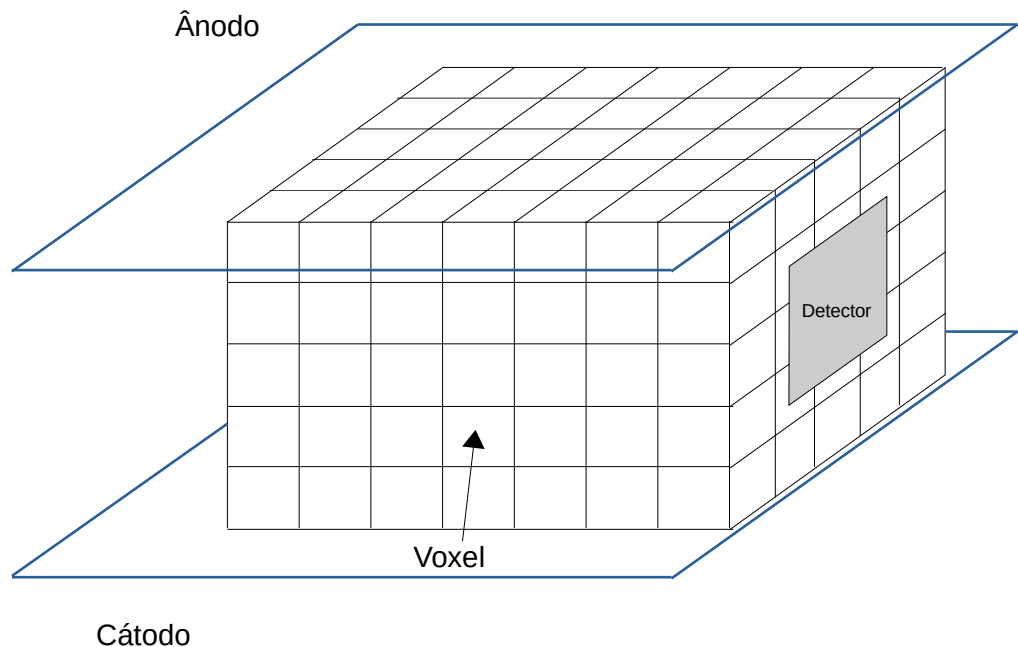


# Simulação: Luz de Cintilação

## Modos de simulação da propagação da luz distintos

- Simulação ótica completa:
  - Trajetória dos fótons realizada até atingir sensor (ou absorvido).
  - Todas as características óticas dos materiais consideradas
    - LAr: Índice de refração, espalhamento Rayleigh, absorção
    - Refletividade das paredes do criostato, ânodo, cátodo, field cage, etc
- Requer muito tempo processamento/produção de eventos desafiadora
- Simulação ótica rápida
  - Dependente de base de dados proveniente da simulação completa
  - Não há atualização de propriedades óticas
- Três métodos empregados: optical library, semi-analítico, redes neurais

# Simulação: Luz de Cintilação



**Optical library:** Mapa de visibilidades para cada sensor de acordo com posição no LAr.

**Visibilidade:** Fração dos fótons provenientes de um ponto/fonte que atinge um dado sensor.

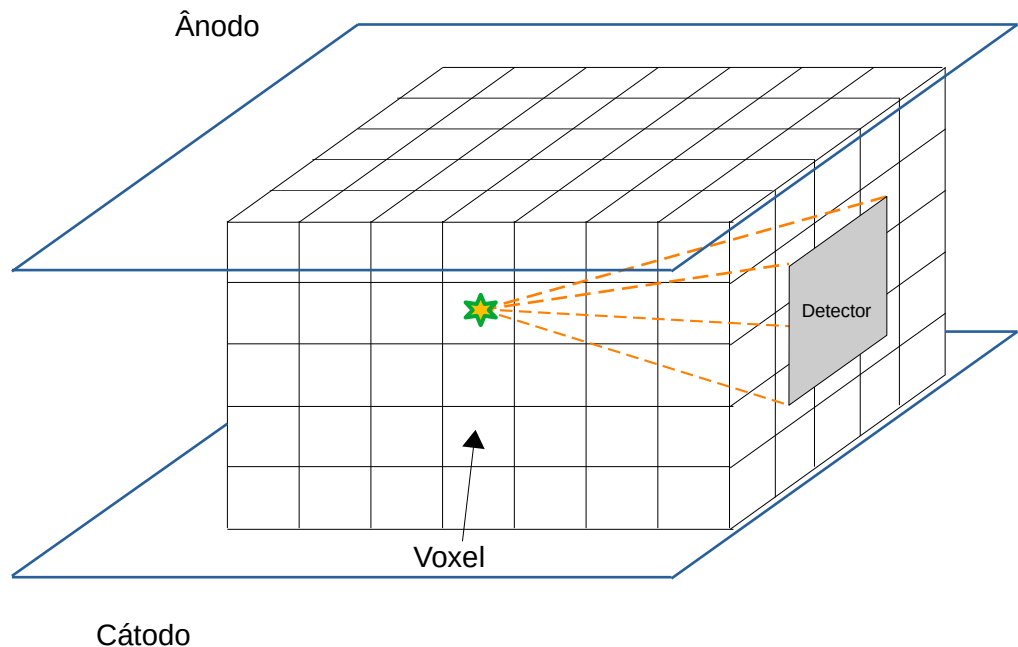
$$N_{\text{fótons}} = \frac{dE}{dx} \times \Delta x \times LY \times \text{Visibilidade}$$

Dimensões dos voxels relevantes em pequenas distâncias

Tamanho "proporcional" ao número de detectores, voxels e volume do LAr. (Memória e Disco)

Proibitivo para experimentos de grandes volumes (DUNE)

# Simulação: Luz de Cintilação



Optical library: Mapa de visibilidades para cada sensor de acordo com posição no LAr.

Visibilidade: Fração dos fótons provenientes de um ponto/fonte que atinge um dado sensor.

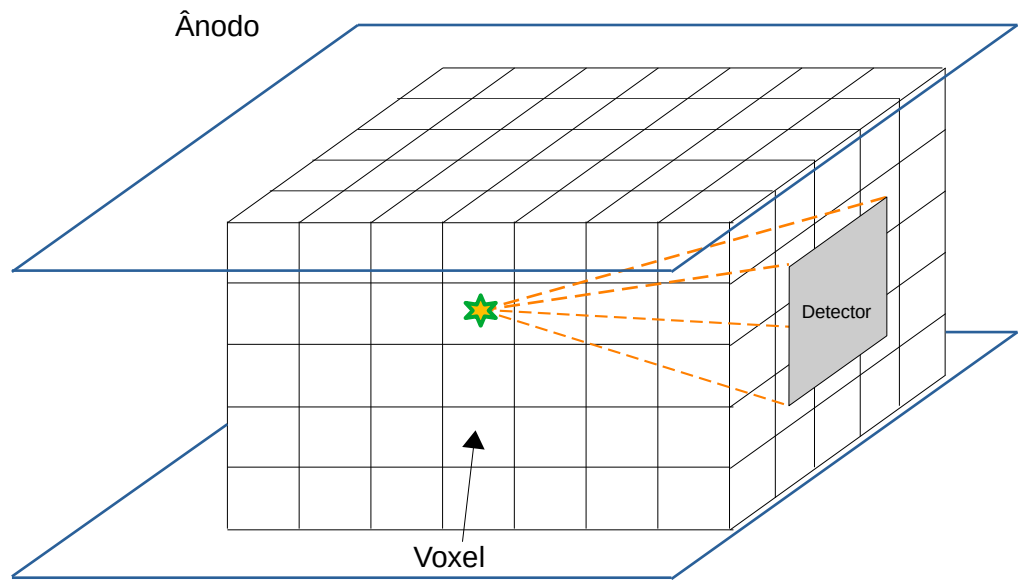
$$N_{\text{fótons}} = \frac{dE}{dx} \times \Delta x \times LY \times \text{Visibilidade}$$

Dimensões dos voxels relevantes em pequenas distâncias

Tamanho “proporcional” ao número de detectores, voxels e volume do LAr. (Memória e Disco)

Proibitivo para experimentos de grandes volumes (DUNE)

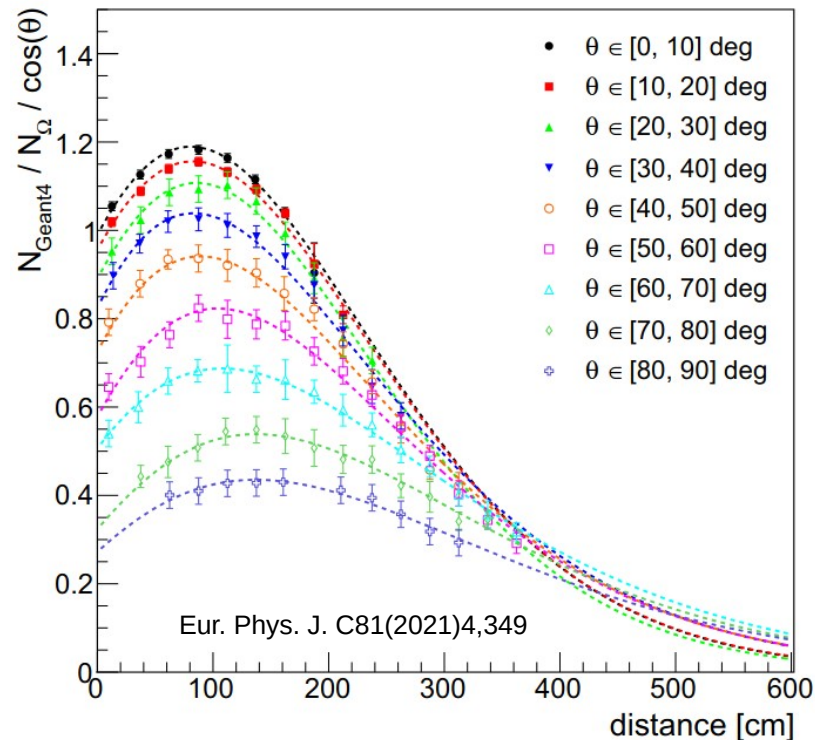
# Simulação: Luz de Cintilação



Cátodo

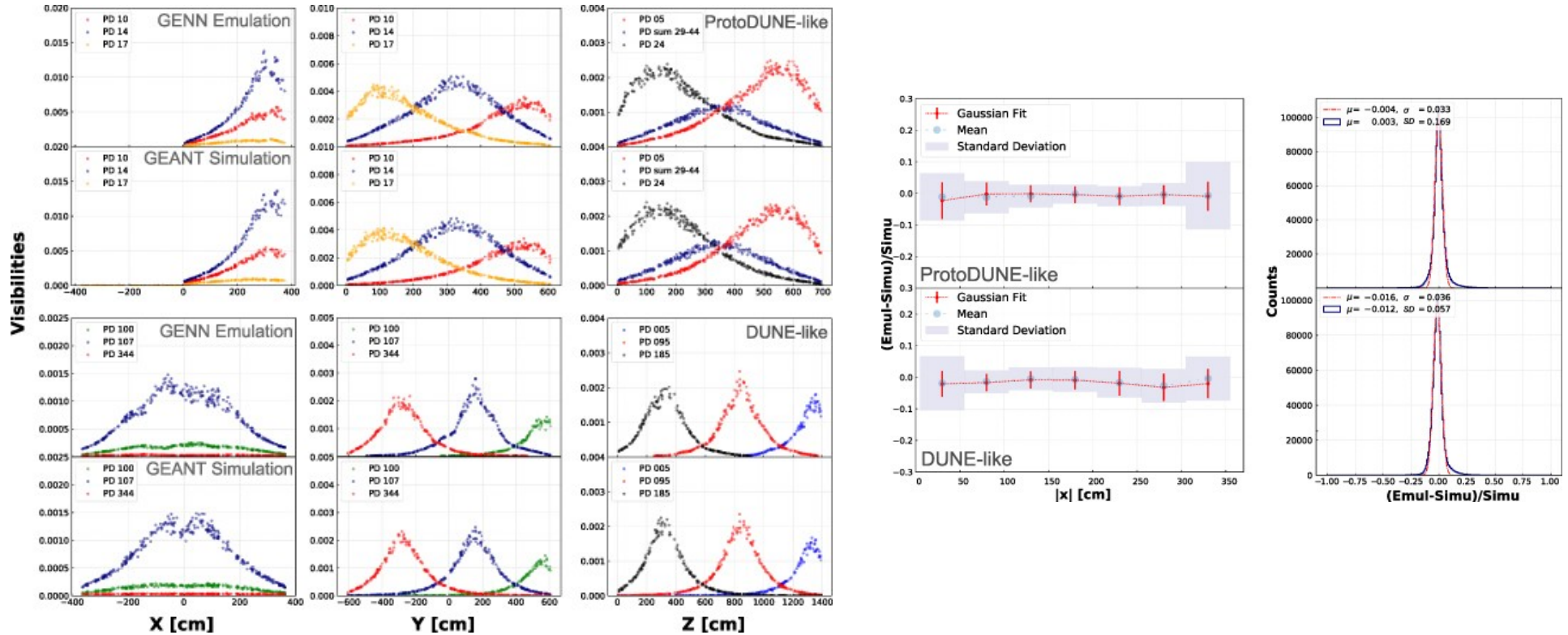
$$N_{\Omega} = \frac{dE}{dx} \times \Delta x \times LY \times \frac{\Omega}{4\pi} e^{-\frac{d}{\lambda}}$$

Modelo semi-analítico:



# Simulação: Luz de Cintilação

Modelo de rede neural generativa (GENN):



# Propriedades óticas no LArSoft: Cintilação

`lardataalg / lardataalg / DetectorInfo / larproperties.fcl`

```
# Optical properties
# Fast and slow scintillation emission spectra, from [J Chem Phys vol 91 (1989) 1469]
FastScintEnergies:  [ 7.2,  7.9,  8.3,  8.6,  8.9,  9.1,  9.3,  9.6,  9.7,  9.8, 10, 10.2, 10.3, 10.6, 11, 11.6, 11.9]
SlowScintEnergies:  [ 7.2,  7.9,  8.3,  8.6,  8.9,  9.1,  9.3,  9.6,  9.7,  9.8, 10, 10.2, 10.3, 10.6, 11, 11.6, 11.9]
FastScintSpectrum:  [ 0.0,  0.04, 0.12, 0.27, 0.44, 0.62, 0.80, 0.91, 0.92, 0.85, 0.70, 0.50, 0.31, 0.13, 0.04, 0.01, 0.0]
SlowScintSpectrum:  [ 0.0,  0.04, 0.12, 0.27, 0.44, 0.62, 0.80, 0.91, 0.92, 0.85, 0.70, 0.50, 0.31, 0.13, 0.04, 0.01, 0.0]
```

```
ScintFastTimeConst:  6.      # fast scintillation time constant (ns)
ScintSlowTimeConst:  1590.   # slow scintillation time constant (ns)
ScintBirksConstant:  0.069   # birks constant for LAr (1/MeV cm)
ScintYield:          24000.  # total scintillation yield (ph/Mev)
```

# Propriedades óticas no LArSoft: Cintilação

`larsim / larsim / IonizationScintillation / ISCalcCorrelated.cxx`

```
if (energy_deposit >= fWion) num_ions = energy_deposit / fWion;  
double num_quanta = energy_deposit / fwph;
```

$$N_i + N_{ex}$$

```
// using this recombination, calculate number energy_deposit of ionization electrons  
if (num_ions > 0.)  
    num_electrons =  
        (fUseBinomialFlucts) ? fBinomialGen.fire(num_ions, recomb) : (num_ions * recomb);
```

$$Q_{Birks} = \frac{A_B/W_{ion}}{1 + \frac{k_B}{\rho_{LAr}} \cdot \frac{1}{\mathcal{E}} \cdot \frac{dE}{dx}}$$

```
// calculate scintillation photons  
double num_photons = (num_quanta - num_electrons) * fScintPreScale;
```



# Propriedades óticas no LArSoft: Cintilação

[larsim](#) / [larsim](#) / [IonizationScintillation](#) / [ISCalcCorrelated.cxx](#)

```
if (energy_deposit >= fWion) num_ions = energy_deposit / fWion;  
double num_quanta = energy_deposit / fwph;
```

$$N_i + N_{ex}$$

```
// using this recombination, calculate number energy_deposit of ionization electrons  
if (num_ions > 0.)  
    num_electrons =  
        (fUseBinomialFlucts) ? fBinomialGen.fire(num_ions, recomb) : (num_ions * recomb);
```

$$\begin{aligned} Q_{LArQL} &= Q_{Birks} + Q_{ee} \\ &= \frac{A_B/W_{ion}}{1 + \frac{k_B}{\rho_{LAr}} \cdot \frac{1}{\mathcal{E}} \cdot \frac{dE}{dx}} + \chi_0 (dE/dx) \cdot f_{corr}(\mathcal{E}, dE/dx) \cdot Q_\infty \end{aligned}$$

```
// calculate scintillation photons  
double num_photons = (num_quanta - num_electrons) * fScintPreScale;
```

# Propriedades óticas no LArSoft: Cintilação

`lardataalg / lardataalg / DetectorInfo / larproperties.fcl`

```
# Scintillation yields and fast/slow ratios per particle type
MuonScintYield:          24000
MuonScintYieldRatio:    0.23
PionScintYield:         24000
PionScintYieldRatio:    0.23
ElectronScintYield:     20000
ElectronScintYieldRatio: 0.27
KaonScintYield:         24000
KaonScintYieldRatio:    0.23
ProtonScintYield:       19200
ProtonScintYieldRatio:  0.29
AlphaScintYield:        16800
AlphaScintYieldRatio:   0.56
```

# Propriedades óticas no LArSoft: Propagação

lardataalg / lardataalg / DetectorInfo / larproperties.fcl

```
# Refractive index as a function of energy (eV) from arXiv:2002.09346
RIndexEnergies: [ 1.18626, 1.68626, 2.18626, 2.68626, 3.18626, 3.68626, 4.18626, 4.68626, 5.18626, 5.68626,
6.18626, 6.68626, 7.18626, 7.68626, 8.18626, 8.68626, 9.18626, 9.68626, 10.1863, 10.6863, 11.1863 ]
RIndexSpectrum: [ 1.24664, 1.2205, 1.22694, 1.22932, 1.23124, 1.23322, 1.23545, 1.23806, 1.24116, 1.24489,
1.24942, 1.25499, 1.26197, 1.2709, 1.28263, 1.29865, 1.32169, 1.35747, 1.42039, 1.56011, 2.16626 ]

# absorption length as function of energy
AbsLengthEnergies: [ 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ]
AbsLengthSpectrum: [ 8000., 8000., 8000., 8000., 8000., 2000., 2000., 2000.]

# Rayleigh scattering length (cm) @ 90K as a function of energy (eV) from arXiv:2002.09346

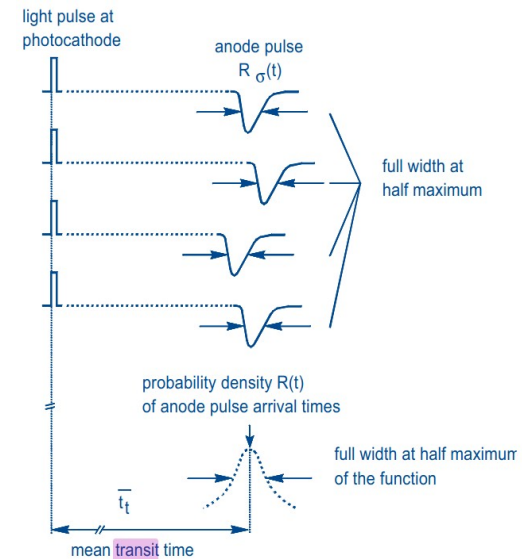
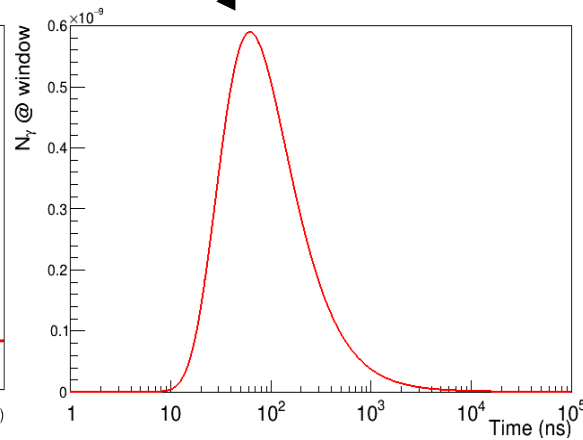
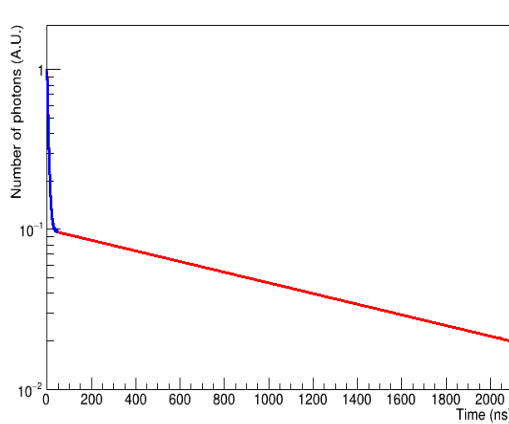
RayleighEnergies: [ 1.18626, 1.68626, 2.18626, 2.68626, 3.18626, 3.68626, 4.18626, 4.68626, 5.18626,
5.68626, 6.18626, 6.68626, 7.18626, 7.68626, 8.18626, 8.68626, 9.18626, 9.68626, 10.1863, 10.6863, 11.1863 ]
RayleighSpectrum: [ 1200800, 390747, 128633, 54969.1, 27191.8, 14853.7, 8716.9, 5397.42, 3481.37, 2316.51,
1577.63, 1092.02, 763.045, 534.232, 371.335, 252.942, 165.38, 99.9003, 51.2653, 17.495, 0.964341 ]
```

# Detecção no LArSoft: Estrutura Temporal

duneopdet / duneopdet / PhotonPropagation / opticalsimparameterisations\_dune.fcl

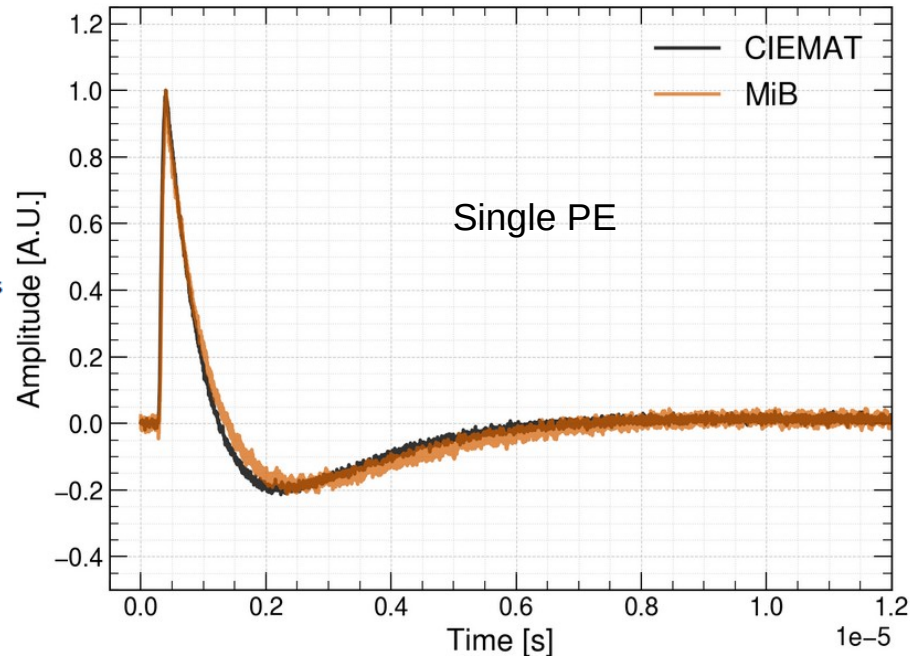
Para cada fóton emitido o tempo total de detecção será:

$$t_{\gamma} = t_{\text{cintilação}} + t_{\text{propagação}} + t_{\text{WLS}} + t_{\text{colecção/transit}}$$



# Detecção no LArSoft: Sinal Eletrônico

```
VoltageToADC:      151.5    # Converting mV to ADC counts (counts in 1 mV)
LineNoiseRMS:     2.6      # Pedestal RMS in ADC counts, likely an underestimate
DarkNoiseRate:    10.0     # In Hz, Ranges 2-50 depending on Vbias
CrossTalk:        0.20     # Probability of producing 2 PE for 1 incident photon
# Afterpulsing:    0.006   # Afterpulsing is not yet simulated
Pedestal:         1500     # in ADC counts
DefaultSimWindow: true    # Use -1*drift window as the start time and
                          # the TPC readout window end time as the end time
FullWaveformOutput: false # Output full waveform. Be careful with this option:
                          # setting it to "true" can result in large output files
TimeBegin:        0        # In us (not used if DefaultSimWindow is set to true)
TimeEnd:          1600     # In us (not used if DefaultSimWindow is set to true)
PreTrigger:       100     # In ticks
ReadoutWindow:    1000    # In ticks
algo_threshold:   @local::standard_algo_sspleadingedge
Padding:          100     # In ticks
PulseLength:      5.2     # In ticks
PeakTime:         0.028   # In ticks
MaxAmplitude:    0.0594   # * VoltageToADC = 9 ADC/PE
FrontTime:        0.013   # In ticks
BackTime:         0.386   # In ticks
```



# Reconstrução

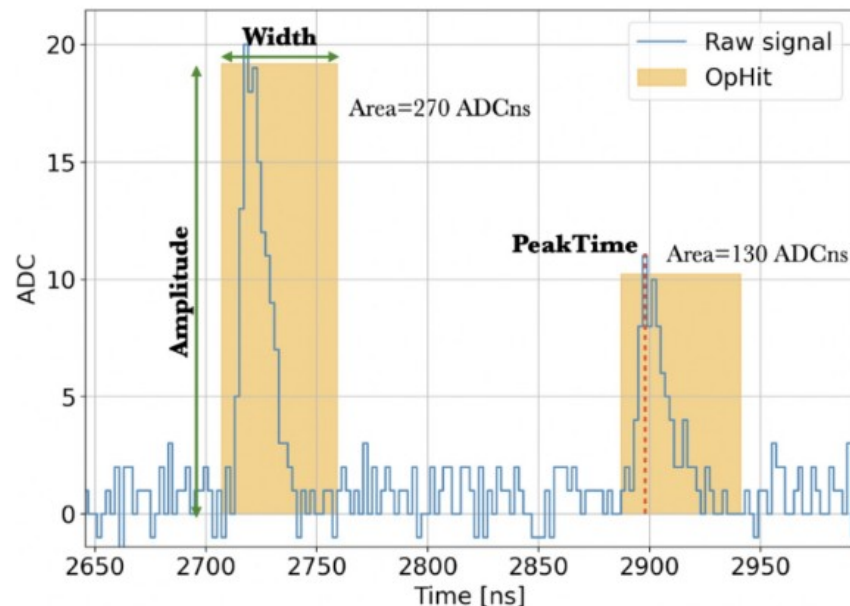
Objetos físicos obtidos através do processamento das formas de onda.

- Optical Hits
- Optical Flashes
- Flash Match: Exemplo de combinação TPC+PDS

# Reconstrução: Optical Hits

lardataobj / lardataobj / RecoBase / OpHit.h

- Objetos que armazenam pulsos de luz no LArSoft identificados ao longo da waveforms
- Pulsos selecionados com a amplitude passando acima de um limiar
- Tempo associado ao objeto de acordo com a chegada do primeiro fóton
- Quantidade utilizada para agrupamento de hits em conjuntos específicos



```
private:  
    int fOpChannel;  
    unsigned short fFrame;  
    double fPeakTime;  
    double fPeakTimeAbs;  
    double fStartTime;  
    double fRiseTime;  
    double fWidth;  
    double fArea;  
    double fAmplitude;  
    double fPE;  
    double fFastToTotal;
```

# Reconstrução: Optical Flashes

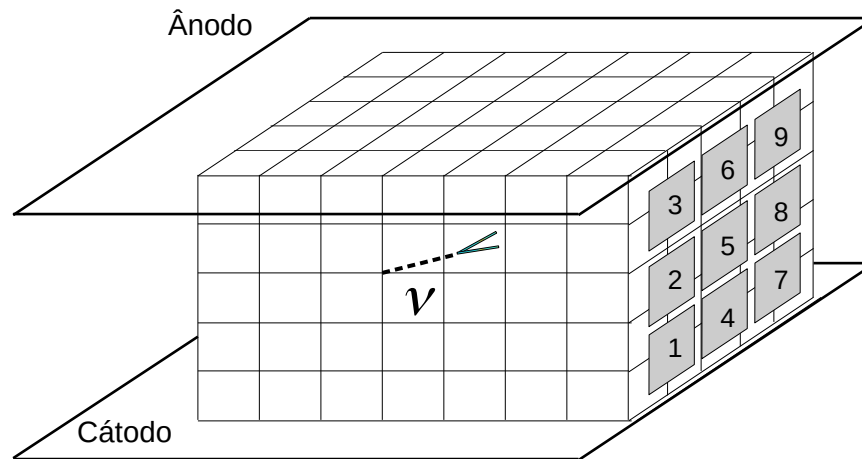
- Objetos formados como um conjunto de OpHits selecionados por coincidência temporal
- Localização da região de interação através das informações dos Hits associados com o Flash e as posições dos respectivos sensores.

```
private:
    double fTime{0.0};    ///< Time on @ref DetectorClocksHardwareTrigger "trigger time scale" [us]
    double fTimeWidth;   ///< Width of the flash in time [us]
    double fAbsTime;     ///< Time by PMT readout clock
    unsigned int fFrame; ///< Frame number
    std::vector<double> fPEperOpDet; ///< Number of PE on each PMT
    std::vector<double> fWireCenters; ///< Geometric center in each view
    std::vector<double> fWireWidths;  ///< Geometric width in each view
    double fXCenter{NoCenter};        ///< Estimated center in x [cm]
    double fXWidth{NoCenter};         ///< Estimated width in x [cm]
    double fYCenter;                  ///< Geometric center in y [cm]
    double fYWidth;                   ///< Geometric width in y [cm]
    double fZCenter;                  ///< Geometric center in z [cm]
    double fZWidth;                   ///< Geometric width in z [cm]
    double fFastToTotal;              ///< Fast to total light ratio
    bool fInBeamFrame;                ///< Is this in the beam frame?
    int fOnBeamTime;                  ///< Is this in time with beam?
```



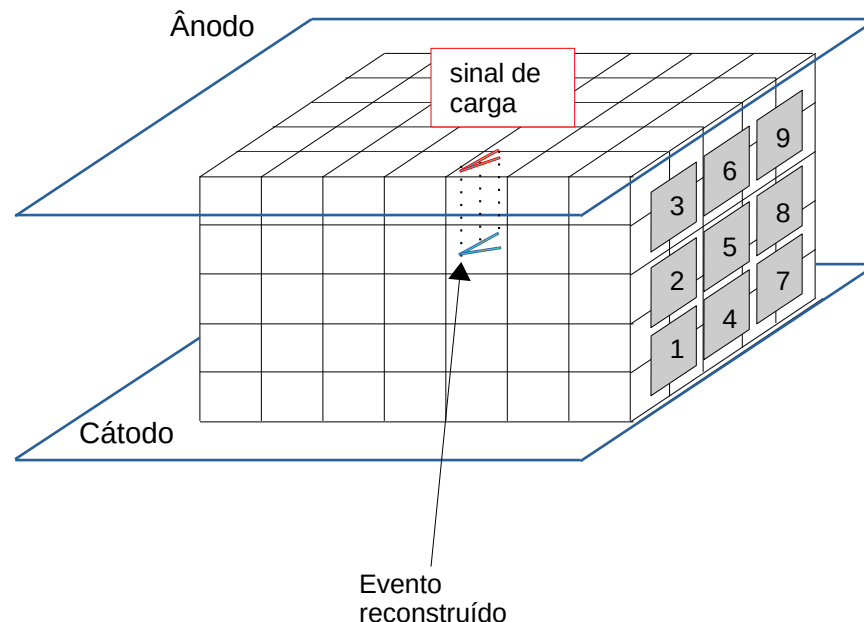
# Reconstrução: Flash Matching

- Objetivo: Encontrar os respectivos *OpFlashes* reconstruídos e *TPC objects* associados aos mesmos depósitos de energia (ou segmentos de trajetória)
- Permite a determinação do tempo  $T_0$  de interação
- Possibilita distinção entre eventos de interações de neutrinos e outras fontes (cósmicos)
- Algoritmo de matching:
  - Número de PEs/detector estimados (pontos 3D de trajetória reconstruídos)
  - Comparação com Flashes reconstruídos



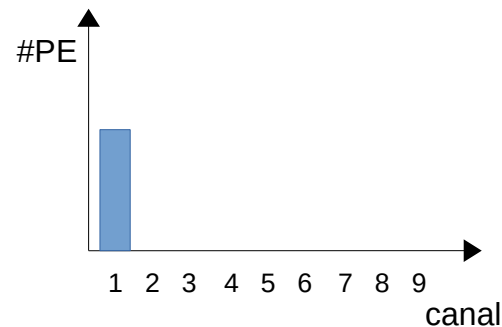
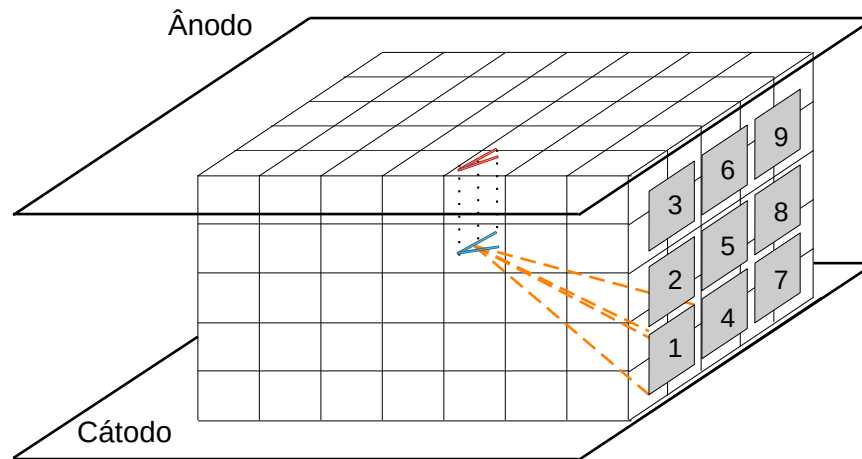
# Reconstrução: Flash Matching

- Objetivo: Encontrar os respectivos *OpFlashes* reconstruídos e *TPC objects* associados aos mesmos depósitos de energia (ou segmentos de trajetória)
- Permite a determinação do tempo  $T_0$  de interação
- Possibilita distinção entre eventos de interações de neutrinos e outras fontes (cósmicos)
- Algoritmo de matching:
  - Número de PEs/detector estimados (pontos 3D de trajetória reconstruídos)
  - Comparação com Flashes reconstruídos



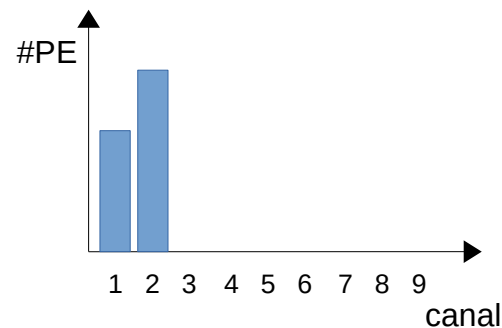
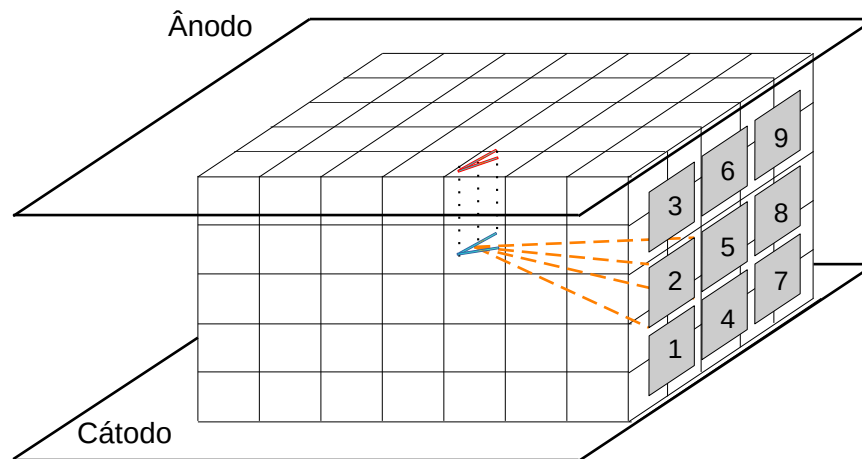
# Reconstrução: Flash Matching

- Objetivo: Encontrar os respectivos *OpFlashes* reconstruídos e *TPC objects* associados aos mesmos depósitos de energia (ou segmentos de trajetória)
- Permite a determinação do tempo  $T_0$  de interação
- Possibilita distinção entre eventos de interações de neutrinos e outras fontes (cósmicos)
- Algoritmo de matching:
  - Número de PEs/detector estimados (pontos 3D de trajetória reconstruídos)
  - Comparação com Flashes reconstruídos



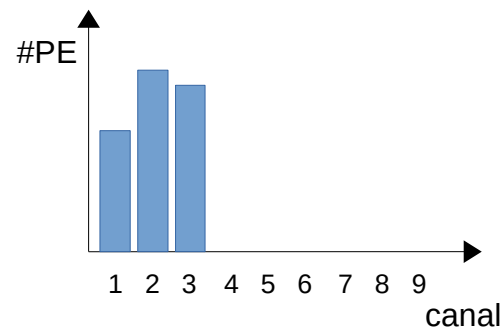
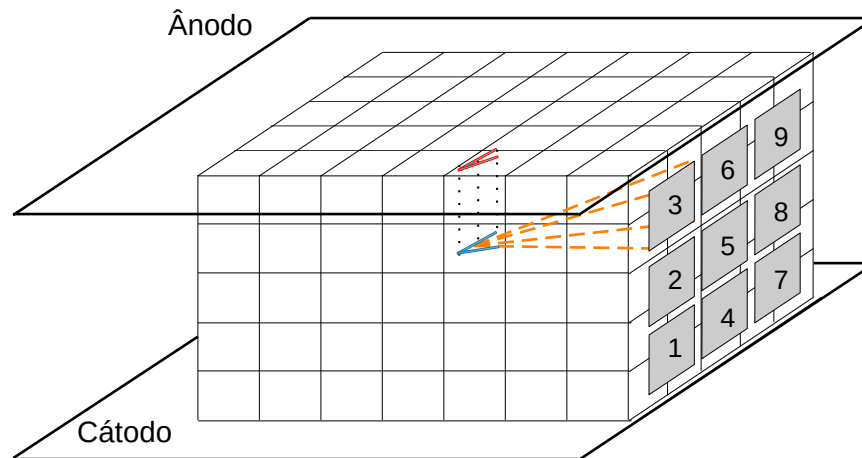
# Reconstrução: Flash Matching

- Objetivo: Encontrar os respectivos *OpFlashes* reconstruídos e *TPC objects* associados aos mesmos depósitos de energia (ou segmentos de trajetória)
- Permite a determinação do tempo  $T_0$  de interação
- Possibilita distinção entre eventos de interações de neutrinos e outras fontes (cósmicos)
- Algoritmo de matching:
  - Número de PEs/detector estimados (pontos 3D de trajetória reconstruídos)
  - Comparação com Flashes reconstruídos



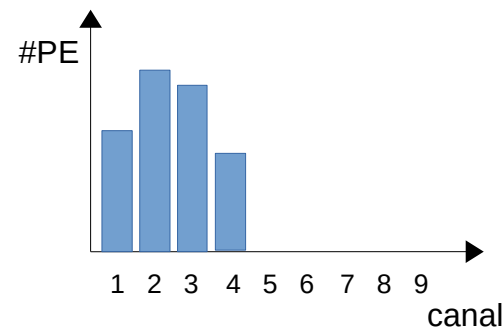
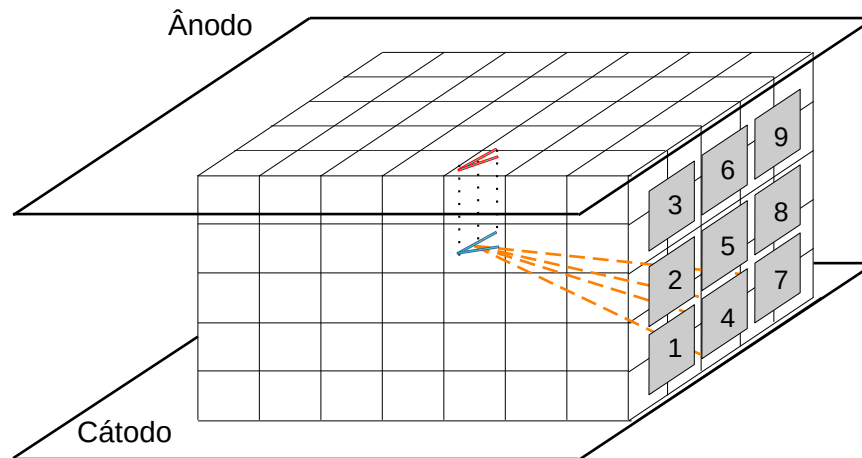
# Reconstrução: Flash Matching

- Objetivo: Encontrar os respectivos *OpFlashes* reconstruídos e *TPC objects* associados aos mesmos depósitos de energia (ou segmentos de trajetória)
- Permite a determinação do tempo  $T_0$  de interação
- Possibilita distinção entre eventos de interações de neutrinos e outras fontes (cósmicos)
- Algoritmo de matching:
  - Número de PEs/detector estimados (pontos 3D de trajetória reconstruídos)
  - Comparação com Flashes reconstruídos



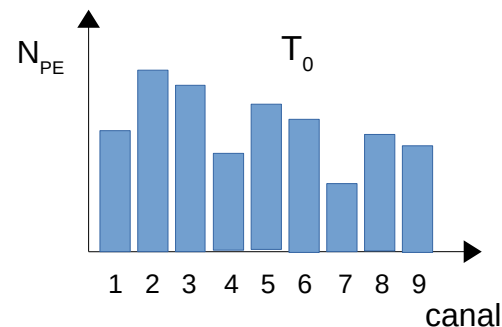
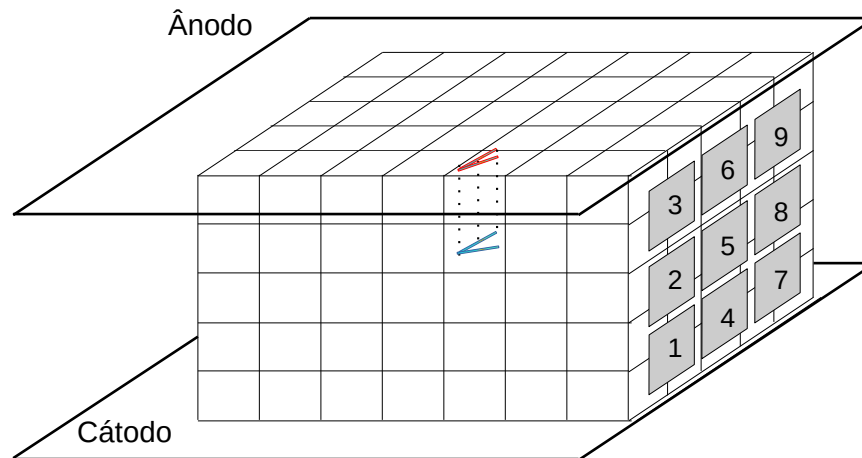
# Reconstrução: Flash Matching

- Objetivo: Encontrar os respectivos *OpFlashes* reconstruídos e *TPC objects* associados aos mesmos depósitos de energia (ou segmentos de trajetória)
- Permite a determinação do tempo  $T_0$  de interação
- Possibilita distinção entre eventos de interações de neutrinos e outras fontes (cósmicos)
- Algoritmo de matching:
  - Número de PEs/detector estimados (pontos 3D de trajetória reconstruídos)
  - Comparação com Flashes reconstruídos



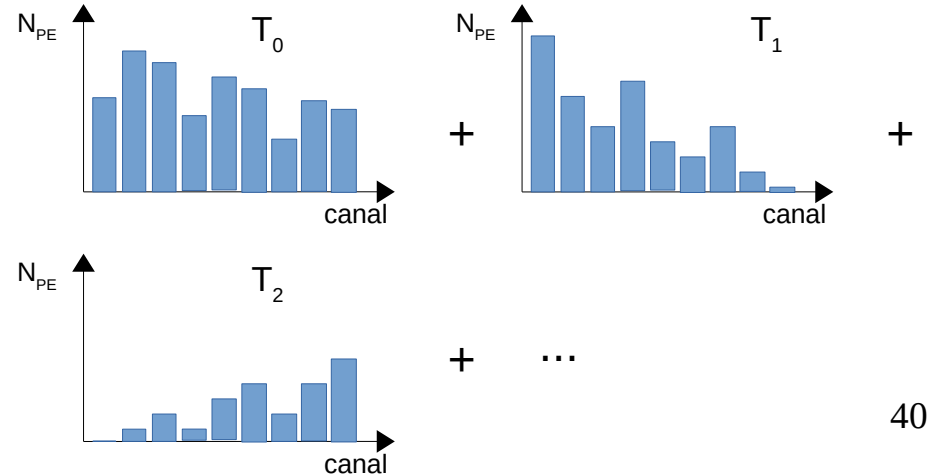
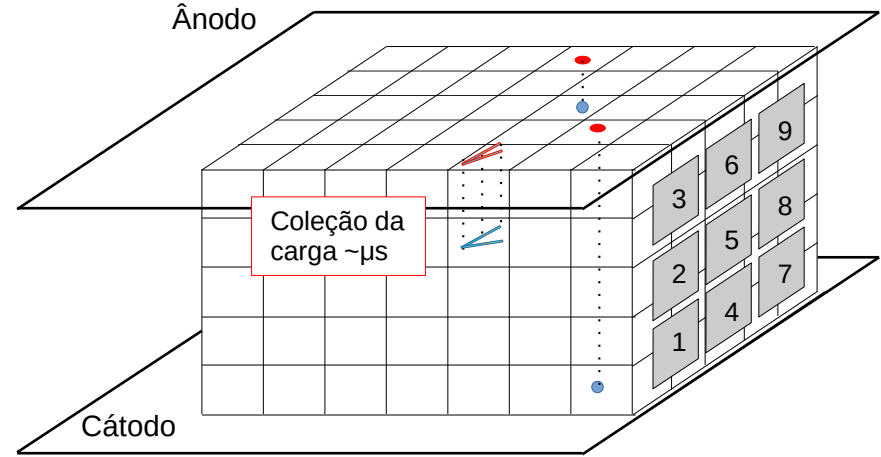
# Reconstrução: Flash Matching

- Objetivo: Encontrar os respectivos *OpFlashes* reconstruídos e *TPC objects* associados aos mesmos depósitos de energia (ou segmentos de trajetória)
- Permite a determinação do tempo  $T_0$  de interação
- Possibilita distinção entre eventos de interações de neutrinos e outras fontes (cósmicos)
- Algoritmo de matching:
  - Número de PEs/detector estimados (pontos 3D de trajetória reconstruídos)
  - Comparação com Flashes reconstruídos



# Reconstrução: Flash Matching

- Objetivo: Encontrar os respectivos *OpFlashes* reconstruídos e *TPC objects* associados aos mesmos depósitos de energia (ou segmentos de trajetória)
- Permite a determinação do tempo  $T_0$  de interação
- Possibilita distinção entre eventos de interações de neutrinos e outras fontes (cósmicos)
- Algoritmo de matching:
  - Número de PEs/detector estimados (pontos 3D de trajetória reconstruídos)
  - Comparação com Flashes reconstruídos





# Reconstrução: Flash Matching

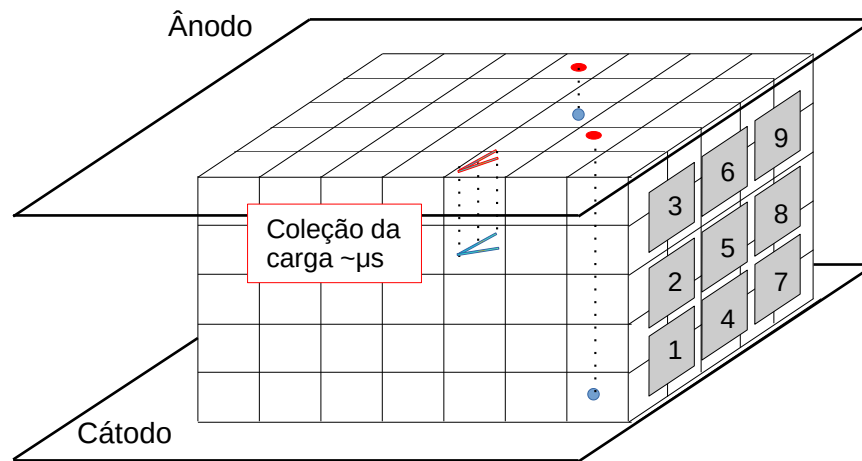
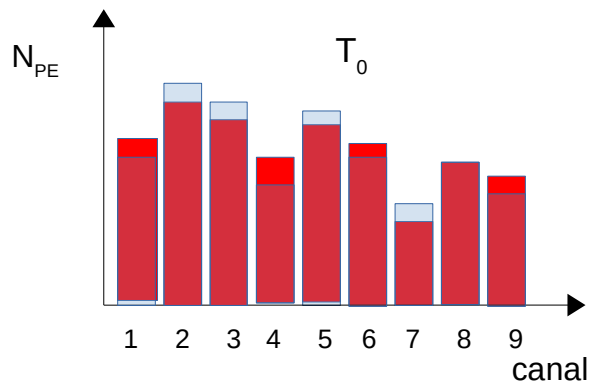
- Estimativa através dos depósitos 3D de carga:

$$\langle N_{\text{fótons}}^{\text{canal}} \rangle = \frac{dE}{dx} \times \Delta x \times LY \times \text{Vis}_{(x_{\text{rec}}^Q, y_{\text{rec}}^Q, z_{\text{rec}}^Q)}^{\text{canal}}$$

Logo:

$$\langle N_{PE}^{\text{canal}} \rangle = \langle N_{\text{fótons}}^{\text{canal}} \rangle \times \epsilon_{\text{detecção}}$$

O OpFlash é selecionado por comparação de acordo com critério estatístico satisfatório:



# Reconstrução: Flash Matching

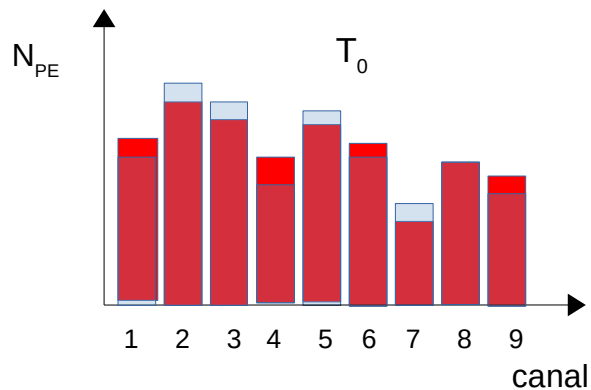
- Estimativa através dos depósitos 3D de carga:

$$\langle N_{\text{fótons}}^{\text{canal}} \rangle = \frac{dE}{dx} \times \Delta x \times LY \times \text{Vis}_{(x_{\text{rec}}^Q, y_{\text{rec}}^Q, z_{\text{rec}}^Q)}^{\text{canal}}$$

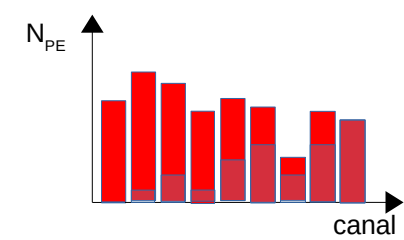
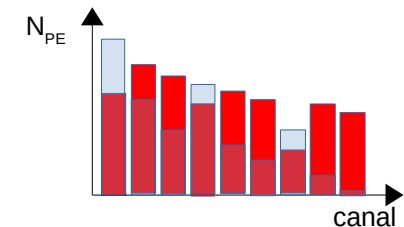
Logo:

$$\langle N_{PE}^{\text{canal}} \rangle = \langle N_{\text{fótons}}^{\text{canal}} \rangle \times \epsilon_{\text{detecção}}$$

O OpFlash é selecionado por comparação:



Casos discrepantes



# Reconstrução: Flash Matching

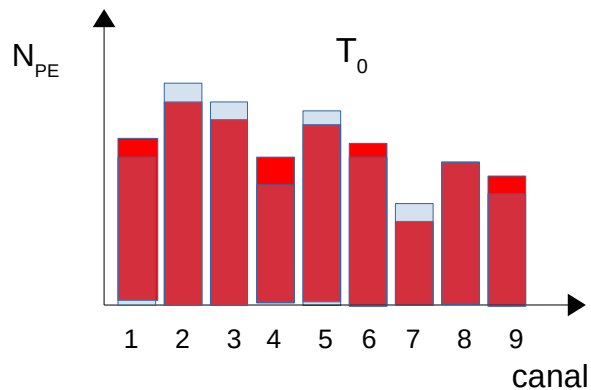
- Estimativa através dos depósitos 3D de carga:

$$\langle N_{\text{fótons}}^{\text{canal}} \rangle = \frac{dE}{dx} \times \Delta x \times LY \times \text{Vis}_{(x_{\text{rec}}^Q, y_{\text{rec}}^Q, z_{\text{rec}}^Q)}^{\text{canal}}$$

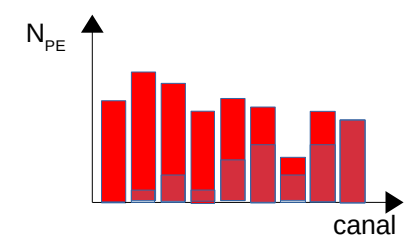
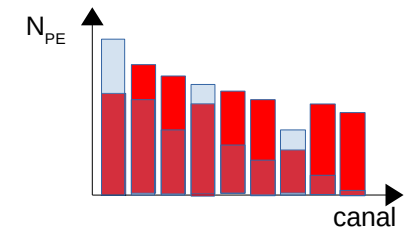
Logo:

$$\langle N_{PE}^{\text{canal}} \rangle = \langle N_{\text{fótons}}^{\text{canal}} \rangle \times \epsilon_{\text{detecção}}$$

O OpFlash é selecionado por comparação:



Casos discrepantes



# Conclusões

- Breve introdução aos aspectos principais associados à cintilação em LArTPC
- Etapas importantes: produção, propagação, detecção e reconstrução
- Próximo: Executar etapas de simulação e verificar saídas