

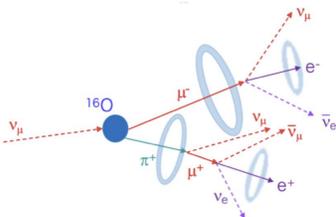
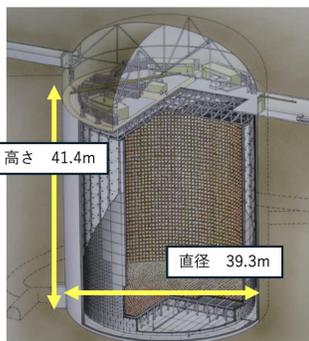
# スーパーカミオカンデ検出器シミュレーションにおけるパイオン反応モデルの研究

2025年2月16日 31th ICEPPシンポジウム ポスター発表  
 岡山大学大学院 環境生命自然科学研究科 素粒子物理学研究室 濱口紘希

## イントロダクション

### スーパーカミオカンデ(SK)

- 岐阜県飛騨市の地下1,000mにある水チェレンコフ検出器
- ニュートリノが水中の粒子と反応し、荷電粒子が発するチェレンコフ光を捉えることで検出
- パイ中間子(pion)はニュートリノ反応やハドロン相互作用で生成し、原子核内で相互作用を起こす
- この反応により、出射粒子の種類・数・運動が変わり、ニュートリノ事象の再構成精度に影響
- 正確なpion反応の記述がニュートリノ事象再構成精度向上に不可欠



## Pion 原子核散乱シミュレーション過程

PWIA: Plane wave impulse approximation

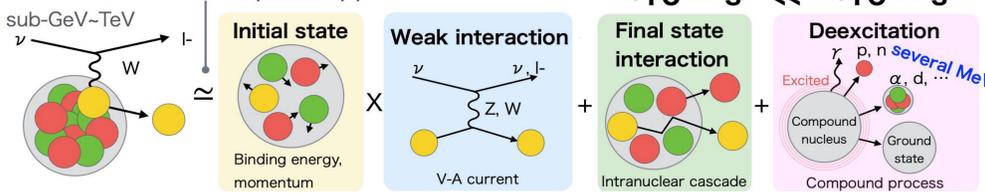


Figure by S.Abe

- 素粒子原子核反応は実際には複合的なプロセス
- 最終状態相互作用(FSI)ではpionを含む多種の粒子が生成
- 核内カスケードモデルはFSIをモデル化する手法の一つ

- SK検出器シミュレーションでは複数のpion相互作用モデルが使用可能

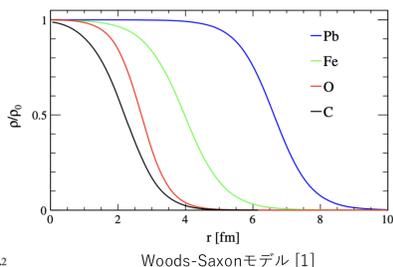
**NEUT**: 現在検出器シミュレーションで一般的に使われている  
**INCL**: Geant4に実装されたモデル pionの再散乱や吸収の詳細な記述が可能

## モデル比較

### NEUT

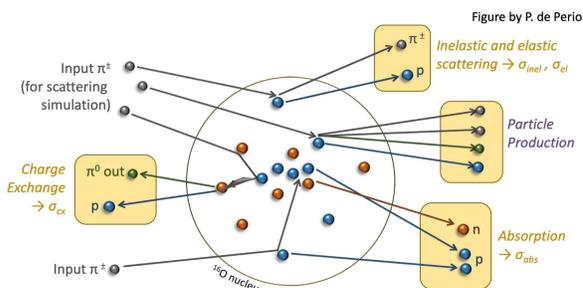
- 粒子は有限ステップごとに伝播 → 平均自由行程を使って反応したかを判定
- カスケード停止 → 粒子が吸収、原子核を抜けたら停止
- 核密度分布: **Woods-Saxonモデル**

$$\lambda = \frac{1}{\rho\sigma}$$



$$\frac{\rho(r)}{\rho_0} = \frac{1 + w \frac{r^2}{a^2}}{1 + \exp(\frac{r-c}{a})}$$

- 核運動量分布: local Fermi gasモデル
- 粒子は原子核からのポテンシャルのみを感じる



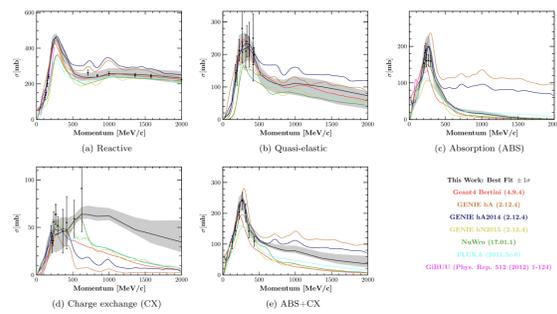
### π 中間子反応チャネル

- 低運動量π弾性散乱
- 低運動量π荷電交換
- π中間子吸収
- 高運動量π弾性散乱
- 高運動量π荷電交換
- 高運動量π非弾性散乱 (π中間子生成)

- NEUTは6つのpion反応を考えている。
- デルタ共鳴領域とそれ以上の領域で相互作用確率の計算方法が異なる

- 各相互作用確率を調整するスケーリングパラメータを導入(FSIパラメータ)

Parameter	Best fit ± 1σ
f <sub>QE</sub>	1.07 ± 0.31
f <sub>ABS</sub>	1.40 ± 0.43
f <sub>CX</sub>	0.70 ± 0.30
f <sub>INEL</sub>	1.00 ± 1.10
f <sub>QEH</sub>	1.82 ± 0.86



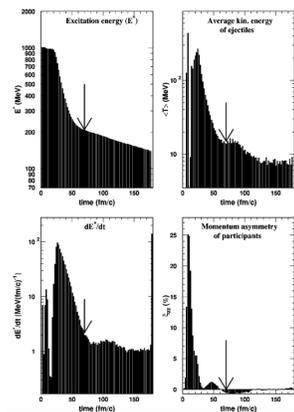
π<sup>-</sup>-12Cの段面積データとモデルの比較 [1]

### INCL

- 衝突判定 → 粒子同士の最小相対距離が√σ/π以下のとき衝突 → パウリ原理から許されるとき衝突を許可
- 核密度分布: **Woods-Saxonモデル**
- 時間情報を用いてカスケード停止 → 物理量が急激に変化する時間を決定

$$t_{stop} = t_0 \left( \frac{A_{target}}{208} \right)^{0.16}$$

- 時間発展も考えている → 反応論は時間発展プロセスであるため有用
- 原子核の状態を保持している → 脱励起過程への接続が可能

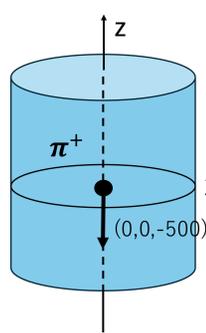


陽子と鉛の衝突シミュレーションにおける各物理量 [2]

## 検証結果

### 手法

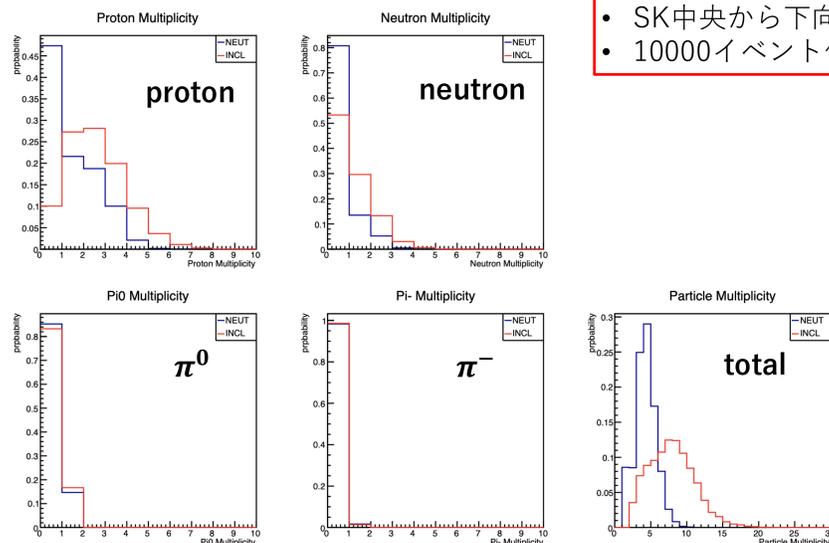
- SK検出器シミュレーション(SKG4)を使用
- 異なるpionモデル(NEUT, INCL)を用いて、SKG4での生成二次粒子数・エネルギーを比較
- Pionを検出器に打ち込むシミュレーションを作成
- NEUTモデルはpion運動量500MeV以下が対象
- Pion相互作用で生成された粒子に注目するため親粒子がpionであるものを選択する



### 入射条件

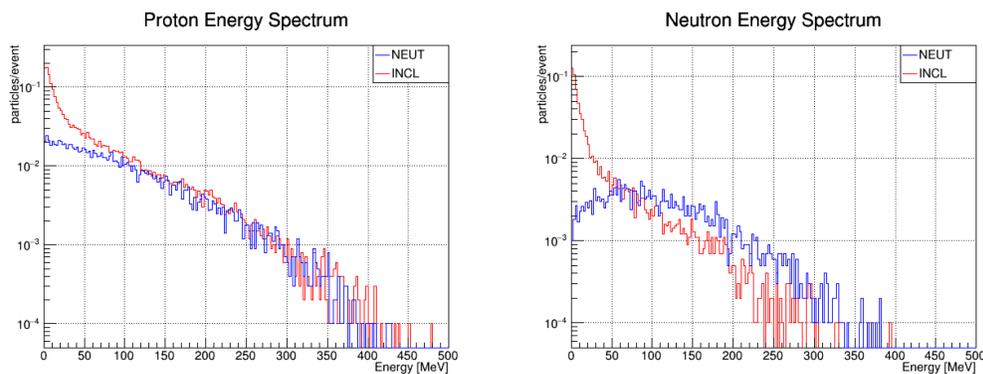
- モノクロpion+を入射
- Pion運動量 500MeV
- SK中央から下向き
- 10000イベント作成

### 生成二次粒子数(多重度)



- NEUTとINCLで陽子、中性子多重度分布にモデルによる違いがみられる
- 荷電交換によりπ<sup>0</sup>が生成、π<sup>-</sup>はほとんど発生していない

## エネルギー分布



- 低エネルギー領域でNEUTとINCLの分布に明確な差が見られる → 蒸発過程の取り扱いの違いが起因していると考えられる
- 高エネルギー領域は分布が類似している

## まとめ

- Pionの核内相互作用は、ニュートリノ検出や原子核反応の理解に重要
- NEUTとINCLの比較により、エネルギー分布や生成粒子分布に違いが見られた
- 違いの原因を特定し、新たな物理的理解を得るためにさらなる調査が必要

### References

- [1] E.S. Pinzon Guerra et al., Phys. Rev. D 99, 052007 (2019)
- [2] A. Boudard, J. Cugnon, S. Leray, and C. Volant, Phys. Rev. C 66, 044615 (2002)