

ニュートリノ物理のための中性子・酸素原子核反応 によるガンマ線測定に向けた研究 実験に向けたシミュレーション

22nd ICEPPシンポジウム

3/1

岡山大学 永田寛貴



目次

- 研究背景
- Geant3 , Geant4 , PHITSシミュレーション
 - 水ターゲットからの放出ガンマ線比較
- RCNP E400 パラサイト実験
 - 解析結果報告
- PHITSを用いた水と中性子の散乱シミュレーション
- まとめと今後

研究背景

研究背景

T2K実験では、ニュートリノと酸素原子核との中性カレント準弾性散乱反応(NCQE)による反応断面積 $\langle \sigma_{NCQE} \rangle$ が測られている。

$$\langle \sigma_{NCQE} \rangle = 1.55 \times 10^{-38} \pm 0.395(stat.)_{-0.33}^{+0.65}(sys.) cm^2$$

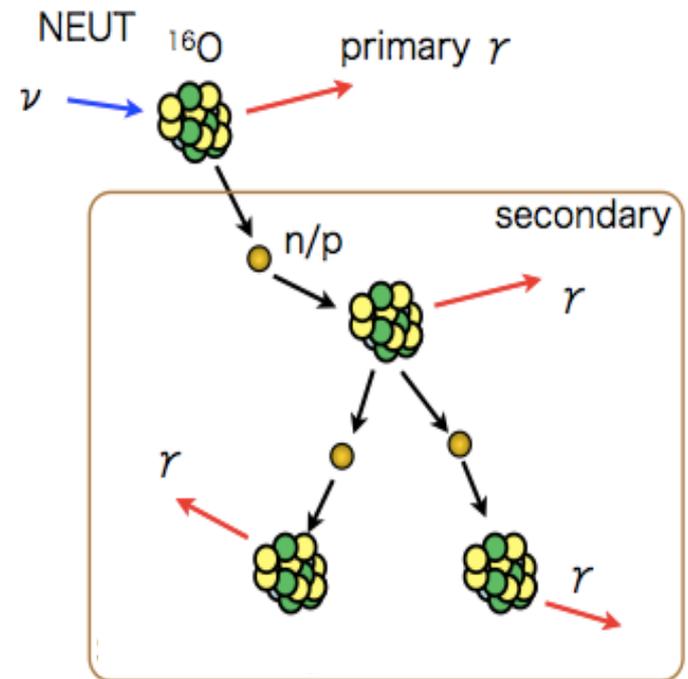
Physical Review D 90, 072012 (2014)

今後、統計をためて統計誤差は小さくできるが系統誤差が支配的になる。



系統誤差の主な原因は、二次ガンマ線の放出

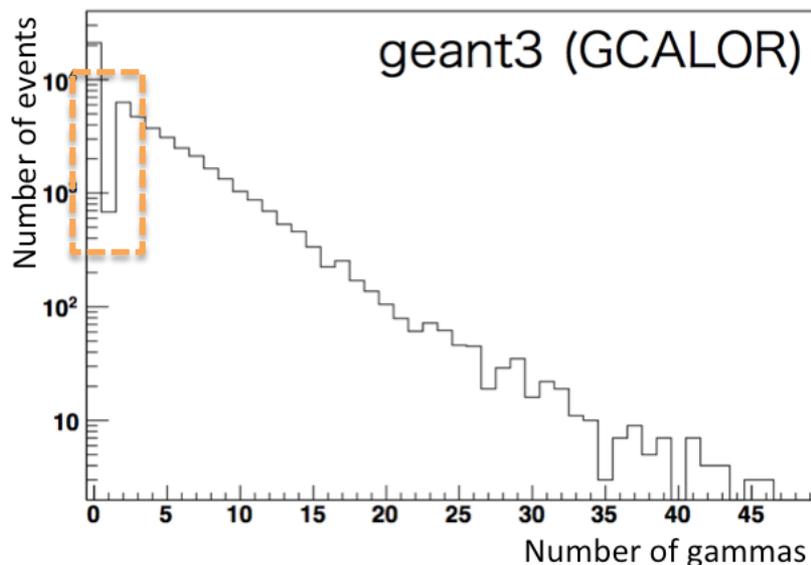
この二次ガンマ線のエネルギー，数，方向などを正確に測ることができれば、系統誤差を減らすことができる。



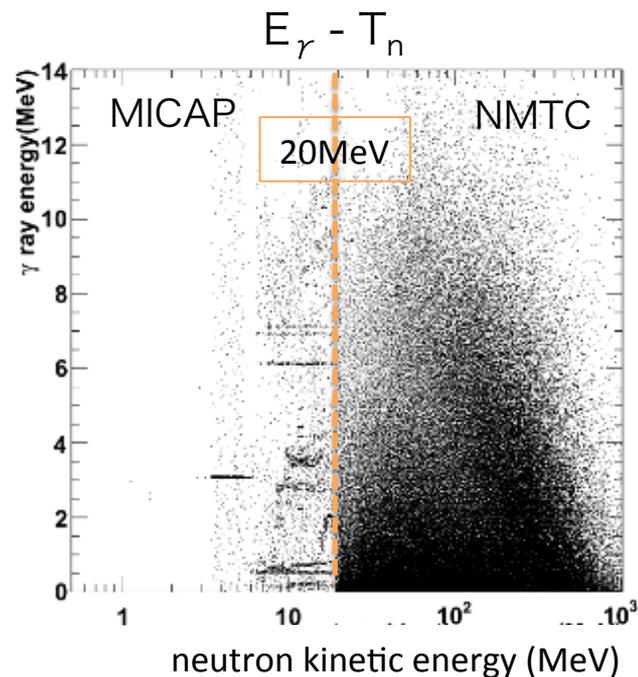
T2K-SK シミュレーション

T2K実験のSKシミュレーションでは、Geant3が使われている。

中性子起源のガンマ線の数



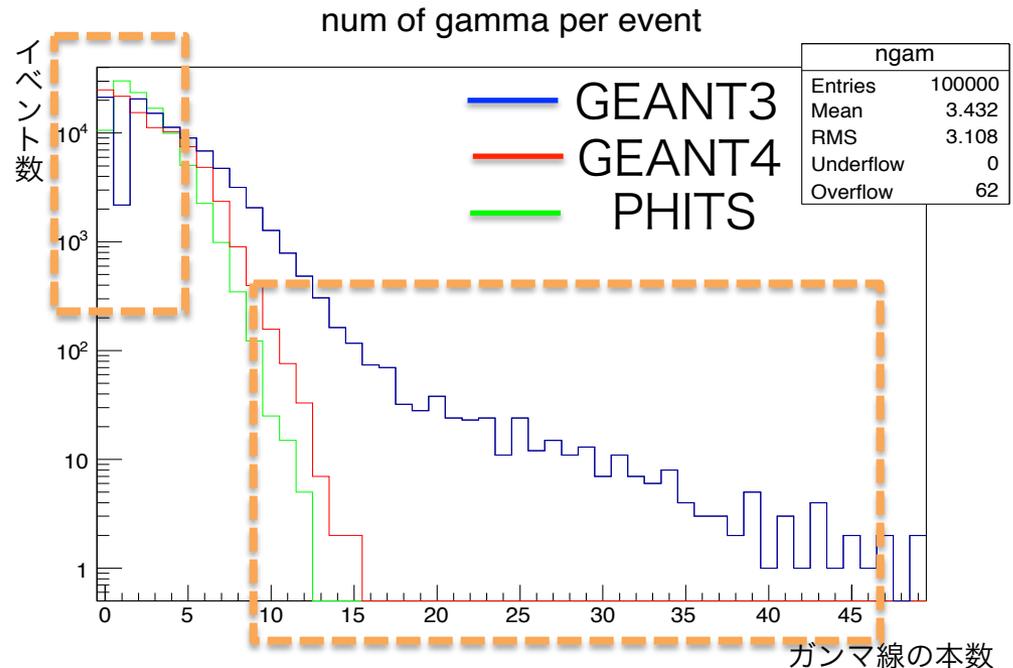
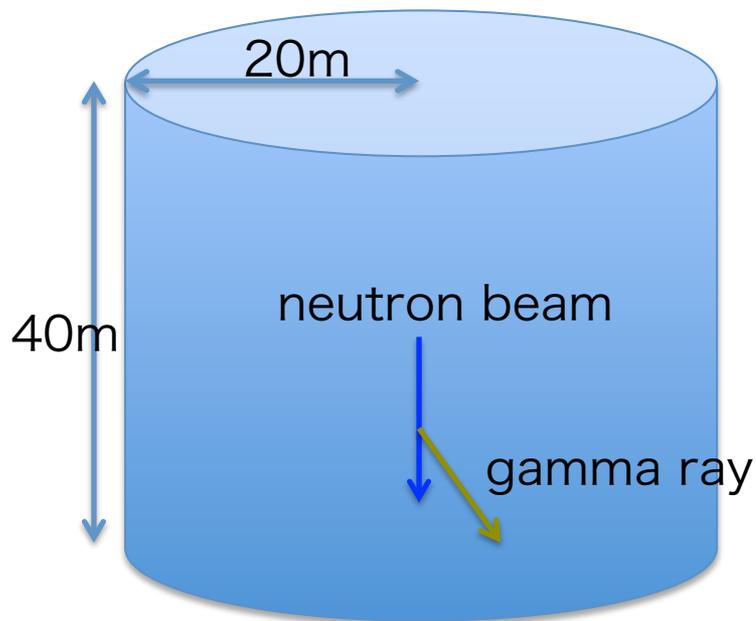
ガンマ線を一本だけ出す
イベントが極端に少ない。



20MeV付近に
モデルの境界ができています。

Geant3, Geant4, PHITS シミュレーション

各シミュレーションでの ガンマ線の本数の比較

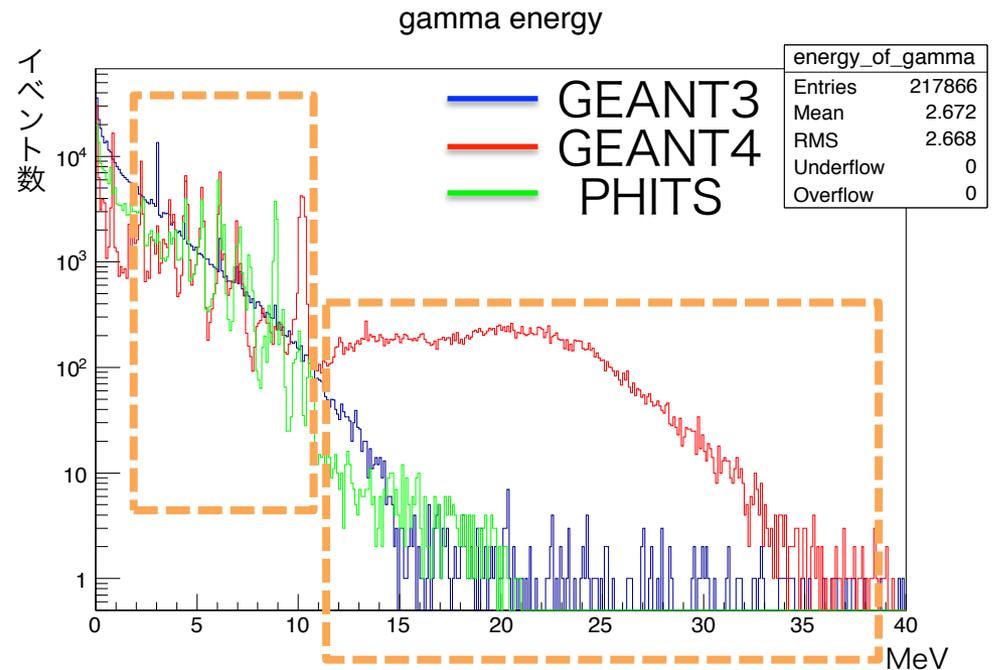
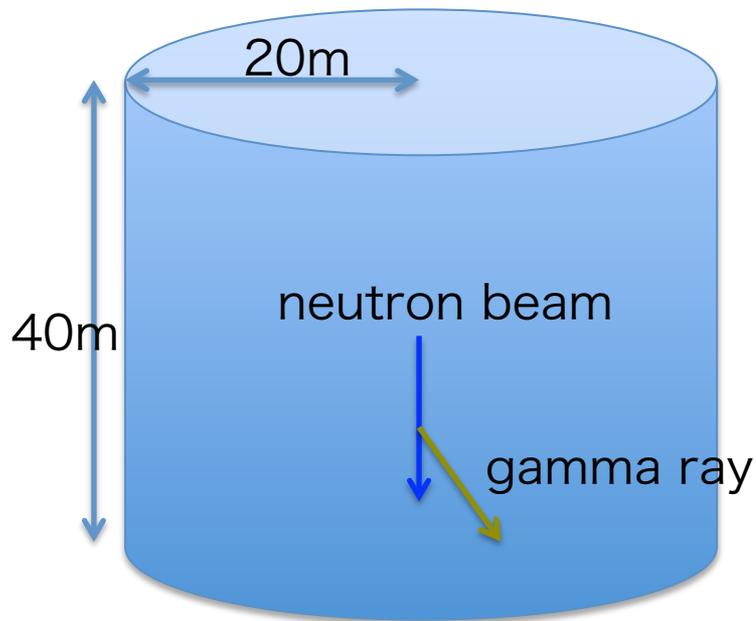


水タンクの中から中性子ビームを入射し、1eventで何本のガンマ線が発生したかをGeant3,Geant4,PHITSで数え上げる。

Geant3では、ガンマ線を1本だけ出すイベントが極端に少ない。
Geant4,PHITSでは、そのような特徴は見受けられない。

また、一度に15本以上ガンマ線を放出するイベントにも、大きな違いがある。

各シミュレーションでの ガンマ線のエネルギー



発生したガンマ線のエネルギーは、
Geant4,PHITSでは、原子核の脱励起による特徴的なピークが現れている。

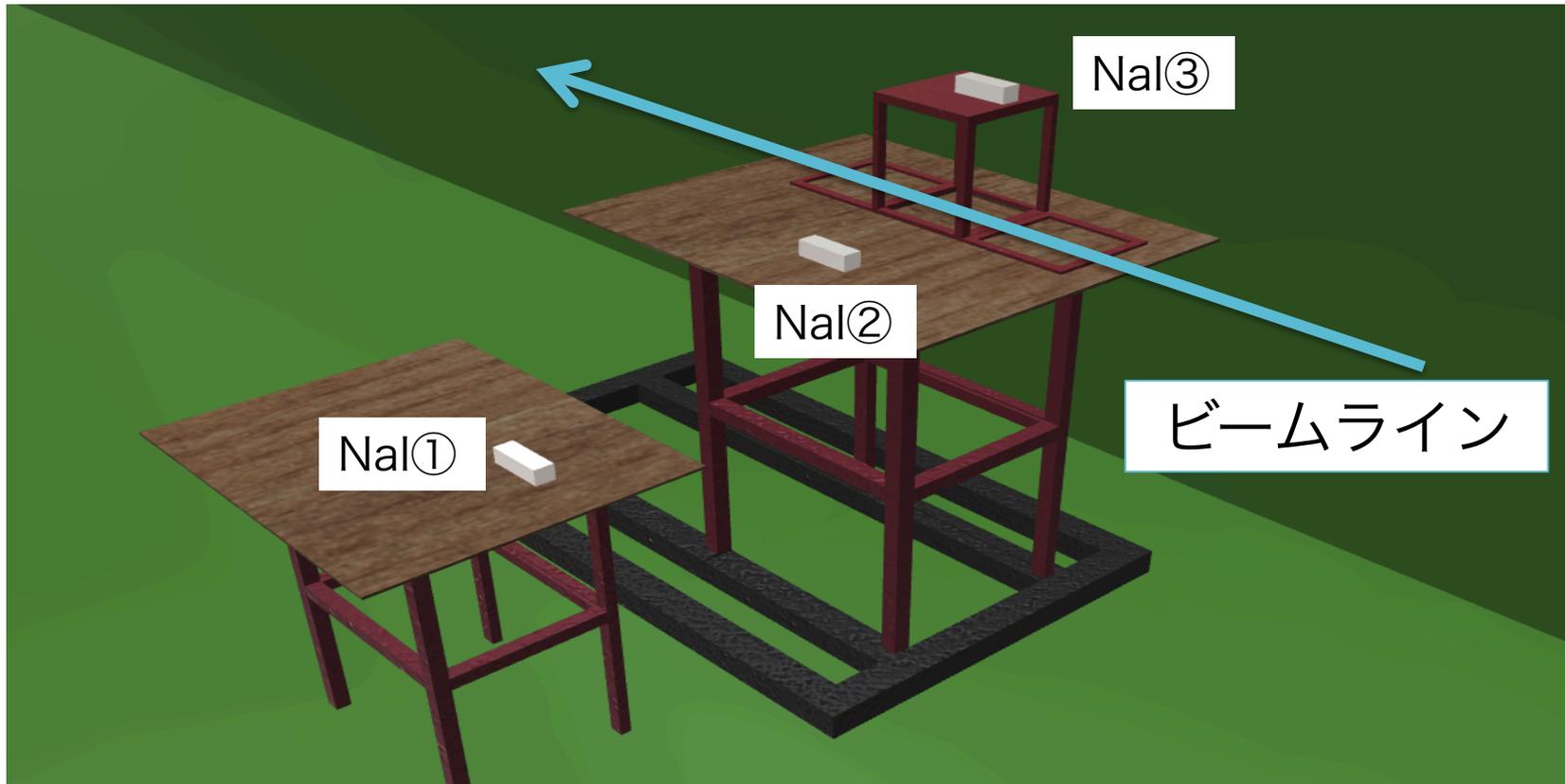
Geant3とGeant4,PHITSでは、10MeV以上のイベントに大きな差が
存在している。

E400 パラサイト実験 @RCNP

今回の実験

- 目的
 - パラサイト実験(E400 2015/6/16-18)
 - ビーム発生中にビームと同期したToFトンネル内環境バックグラウンドと中性子によるイベントを測定。
- 入射ビーム
 - 重陽子ビームを様々なターゲットに照射し、発生した中性子を使用
- キャリブレーションデータ
 - ^{60}Co , ^{241}Am /Beで取得。
- 測定
 - ビーム軸からの距離を変え、様々な状況でデータを取得した。
 - ADC, TDCを用いてエネルギー、時間の両データを取得した。

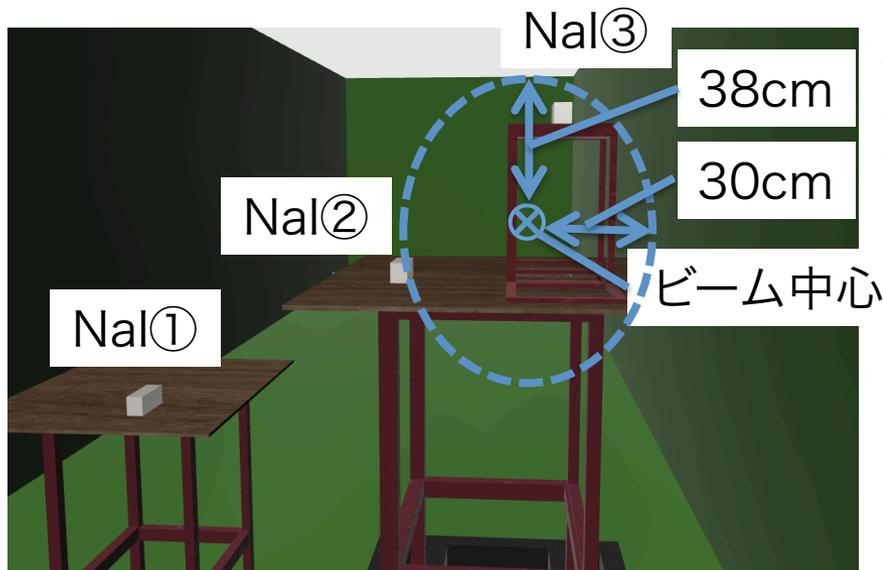
今回の実験におけるセットアップ



コリメータから38m地点に実験装置を置いた。

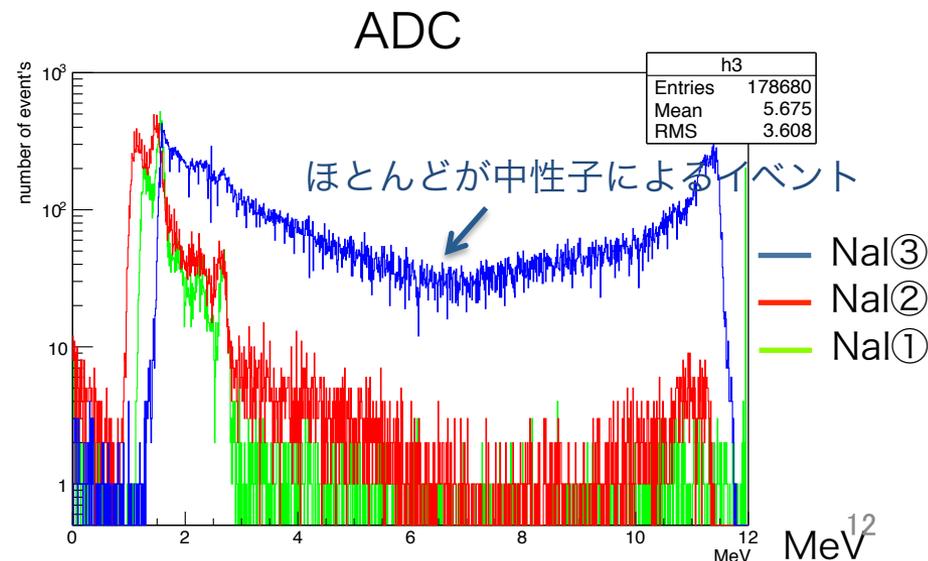
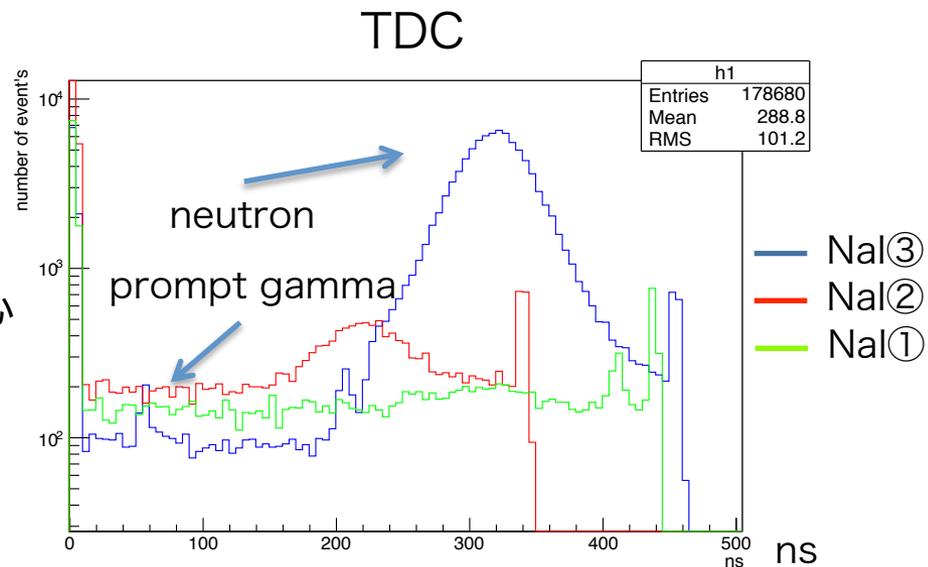
ビームラインから異なる距離で3箇所にNaIシンチレータを設置。

ビームからの距離の比較

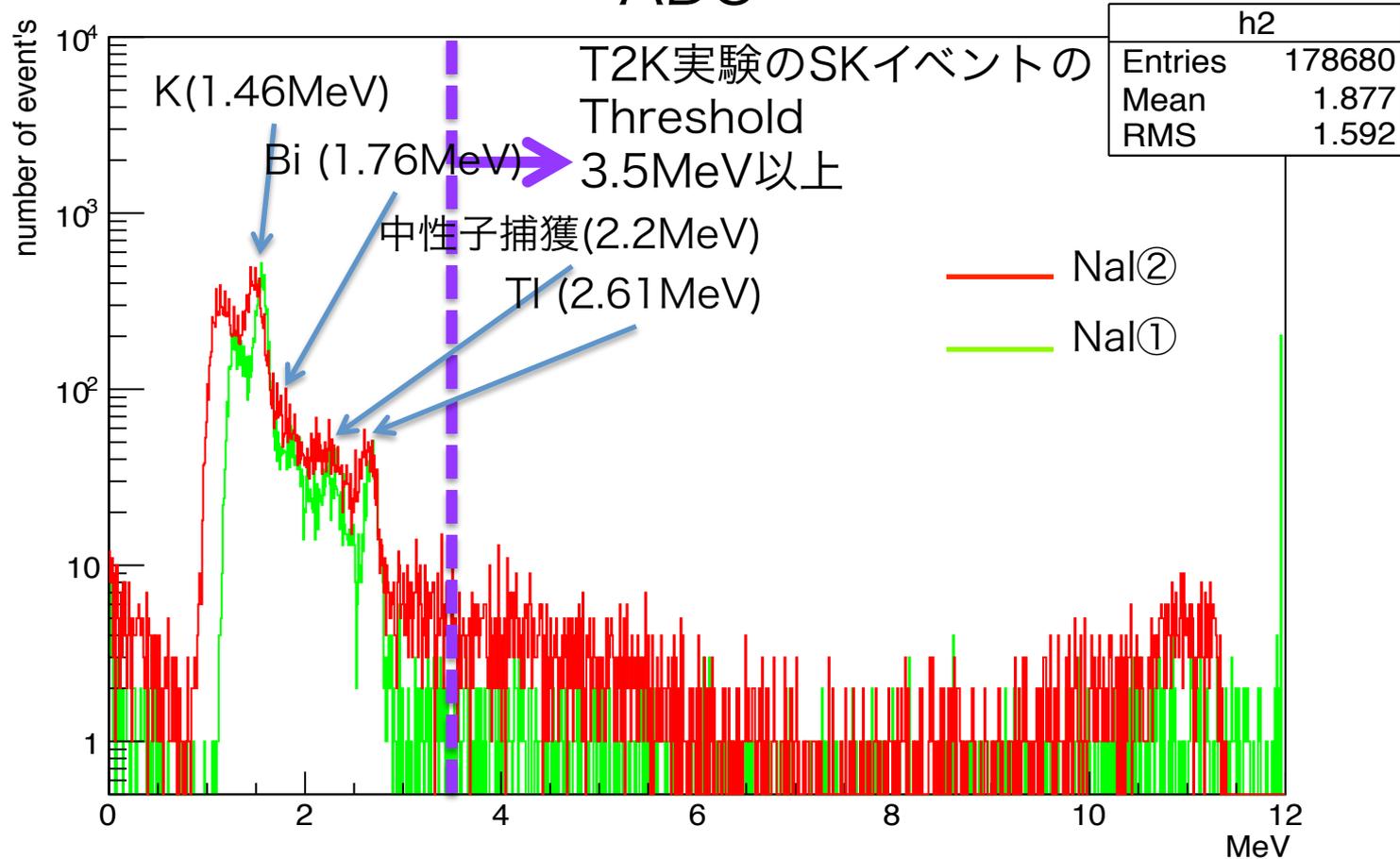


RCNPのビームは距離に応じた広がりを持つため38mの地点では、図のような広がりを持つ。

TDCのToF信号より、中性子のエネルギーは、約80MeVとなった。



ADC



予想されているイベントに比べ、
3.5MeV以上のイベントは
おおよそ1%程度である。

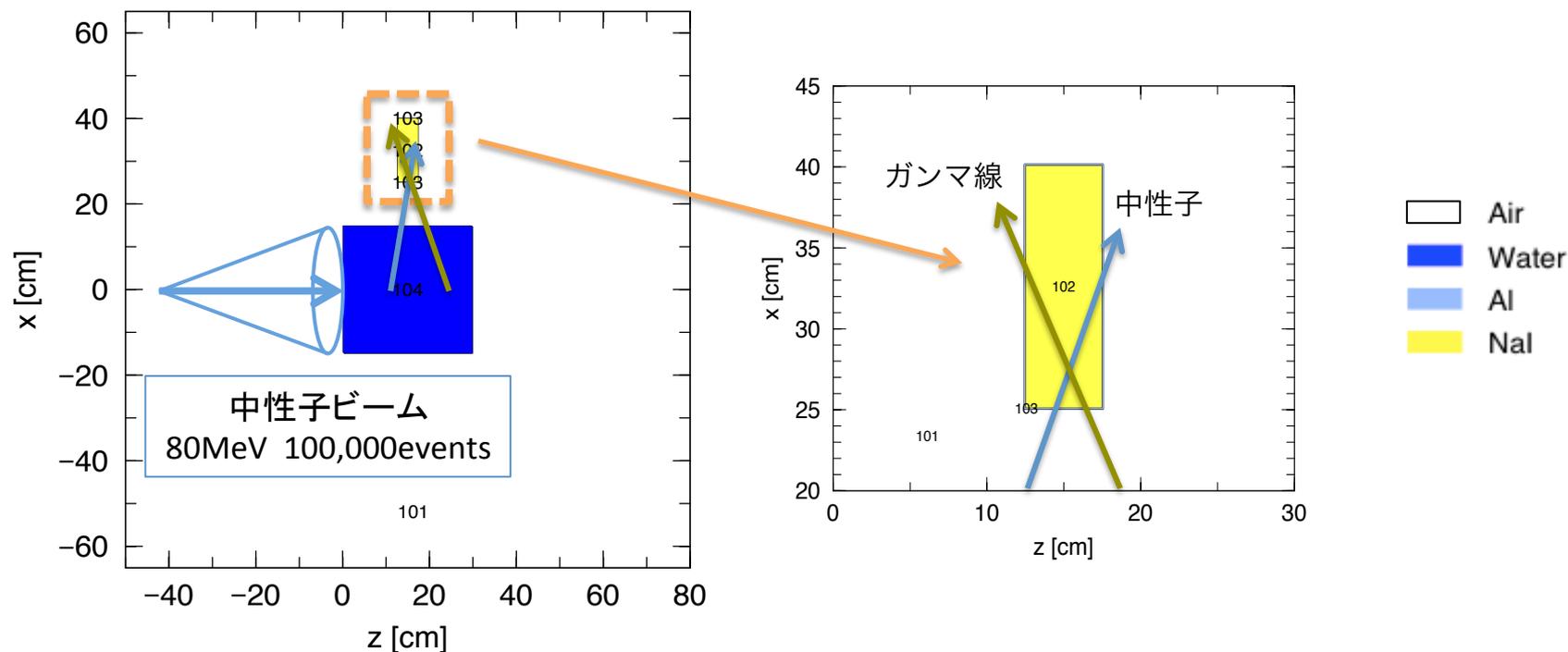


バックグラウンドは
十分に低いと考えられる。

PHITSを用いた 水と中性子の散乱シミュレーション

PHITSを用いた水と中性子の 散乱シミュレーション

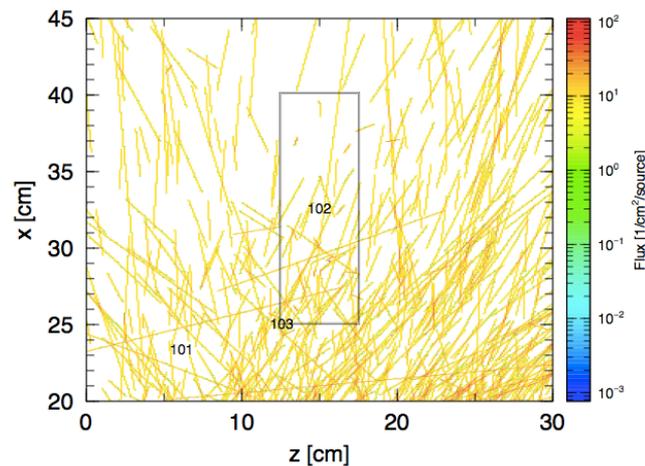
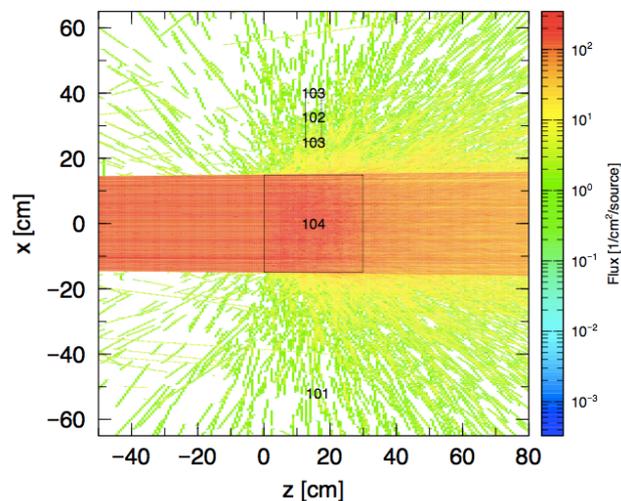
水ターゲットにRCNPと同じ広がりを持った80MeVの中性子ビームを入射する。



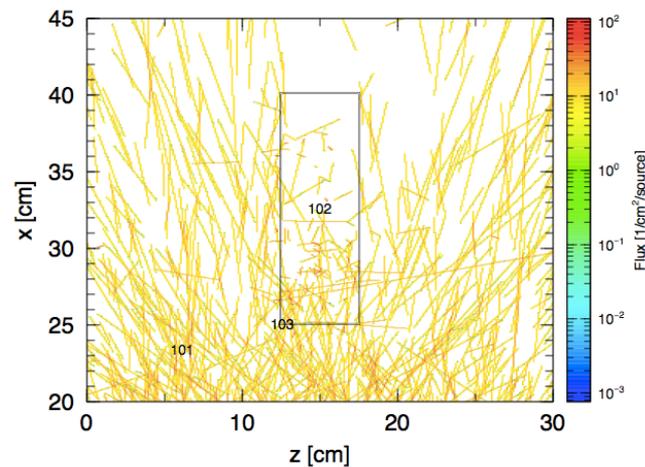
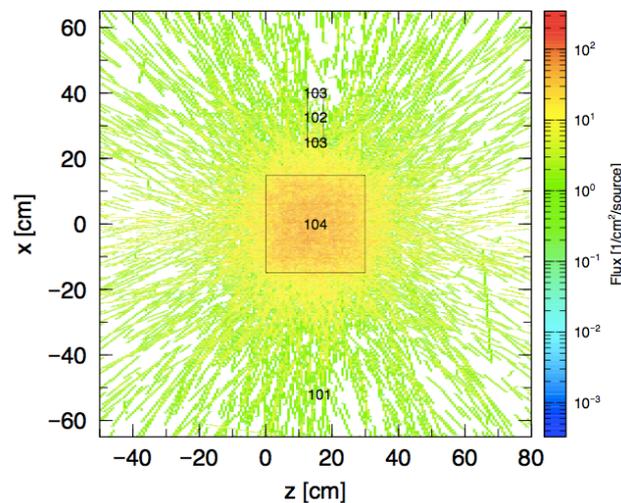
水ターゲットから発生する中性子とガンマ線が
10cm離れたNaIシンチレータ(5cm x 5cm x 15cm)に入射した数を数える。

PHITSを用いた水と中性子の 散乱シミュレーション

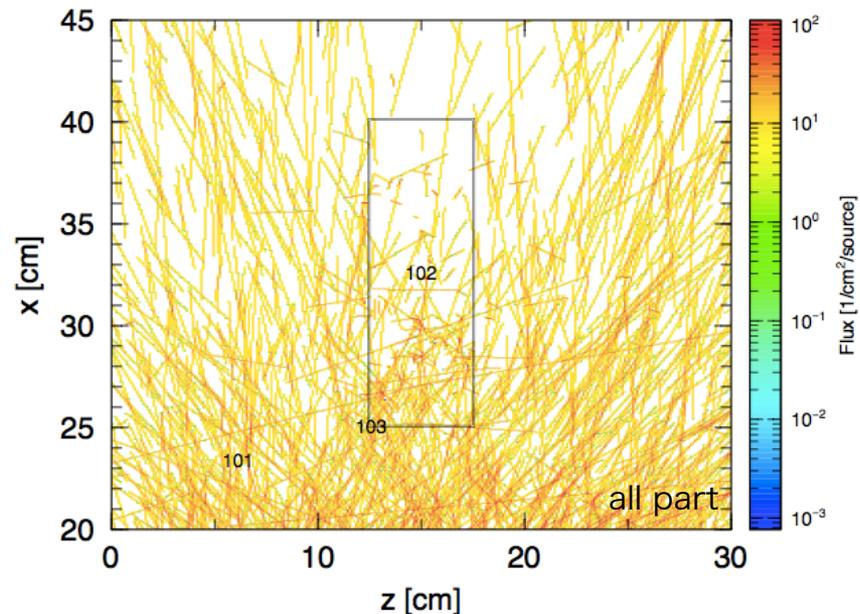
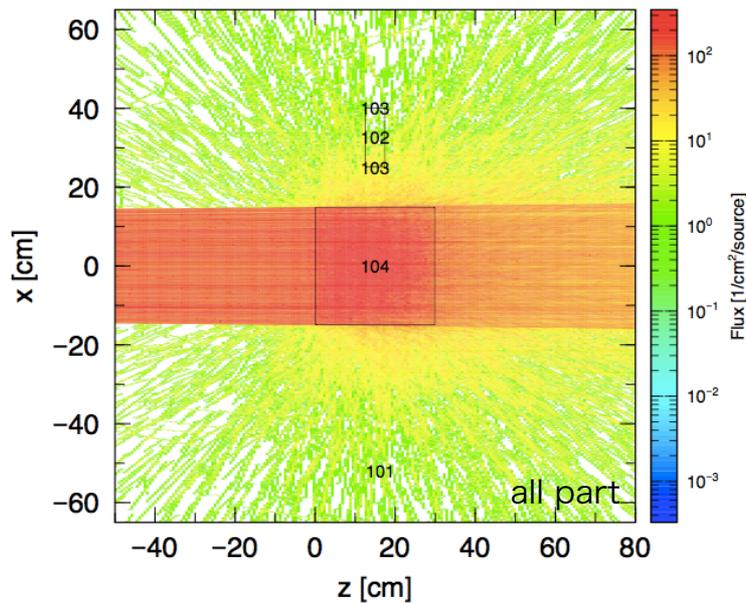
中性子



ガンマ線



PHITSを用いた水と中性子の 散乱シミュレーション



	中性子	ガンマ線
# of events	145	195

NaIシンチレータに入射したイベントの内、約40%が中性子によるイベントであった。



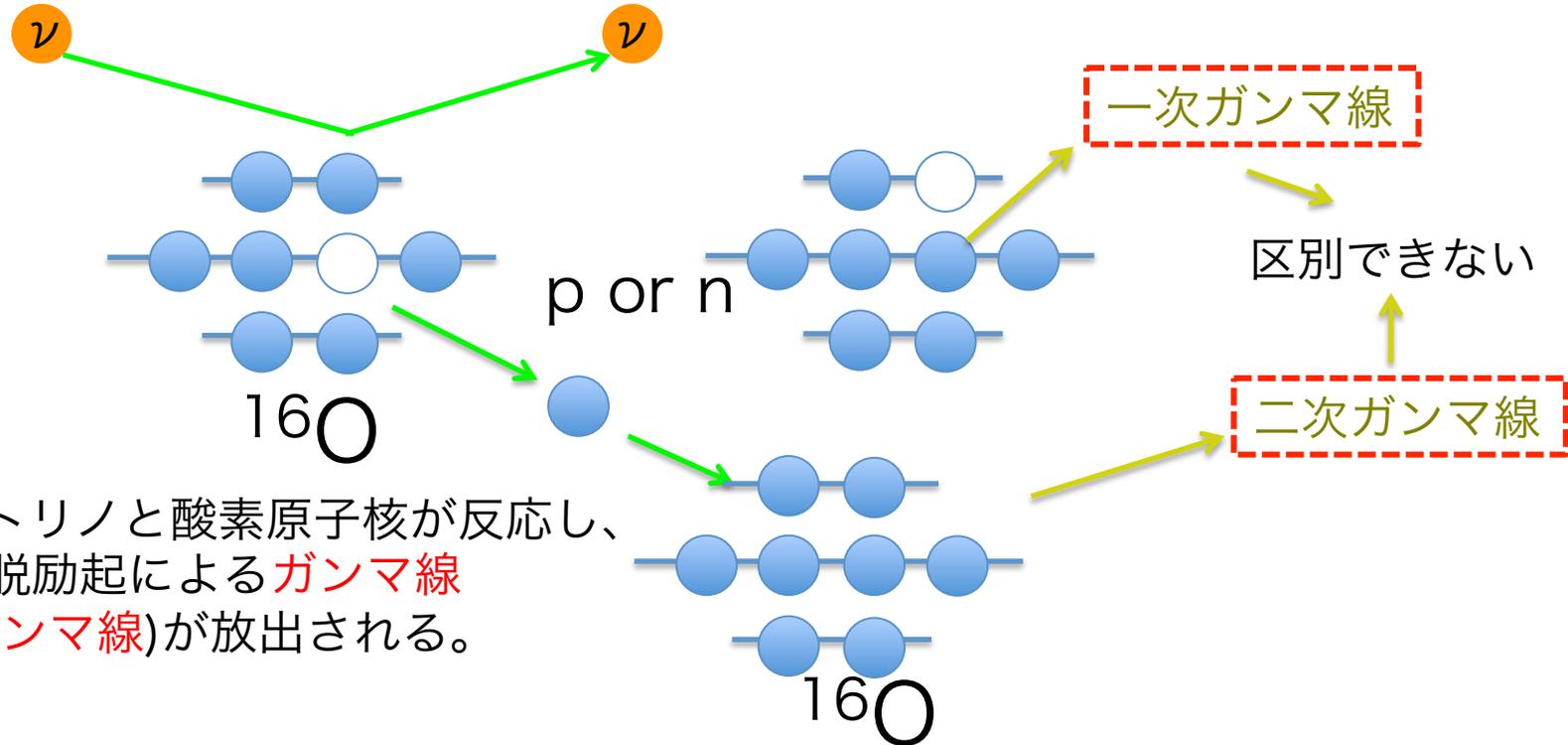
中性子とガンマ線由来のイベントを区別して測定する必要がある。

まとめと今後

- Geant3, Geant4, PHITSでのシミュレーションには、現在それぞれに相違が見られる。
- RCNPでの測定により、ビーム軸から離れた位置では、バックグラウンドは1%程度である。
- 水ターゲットに中性子ビームを入射した場合、広範囲にわたって中性子が散乱し、検出器に入射する。
- 検出に関して、ガンマ線由来のイベントと中性子由来のイベントを分ける必要がある。
→ 芦田さんの発表で…

バックアップ

二次ガンマ線



ニュートリノと酸素原子核が反応し、核子と脱励起によるガンマ線(一次ガンマ線)が放出される。

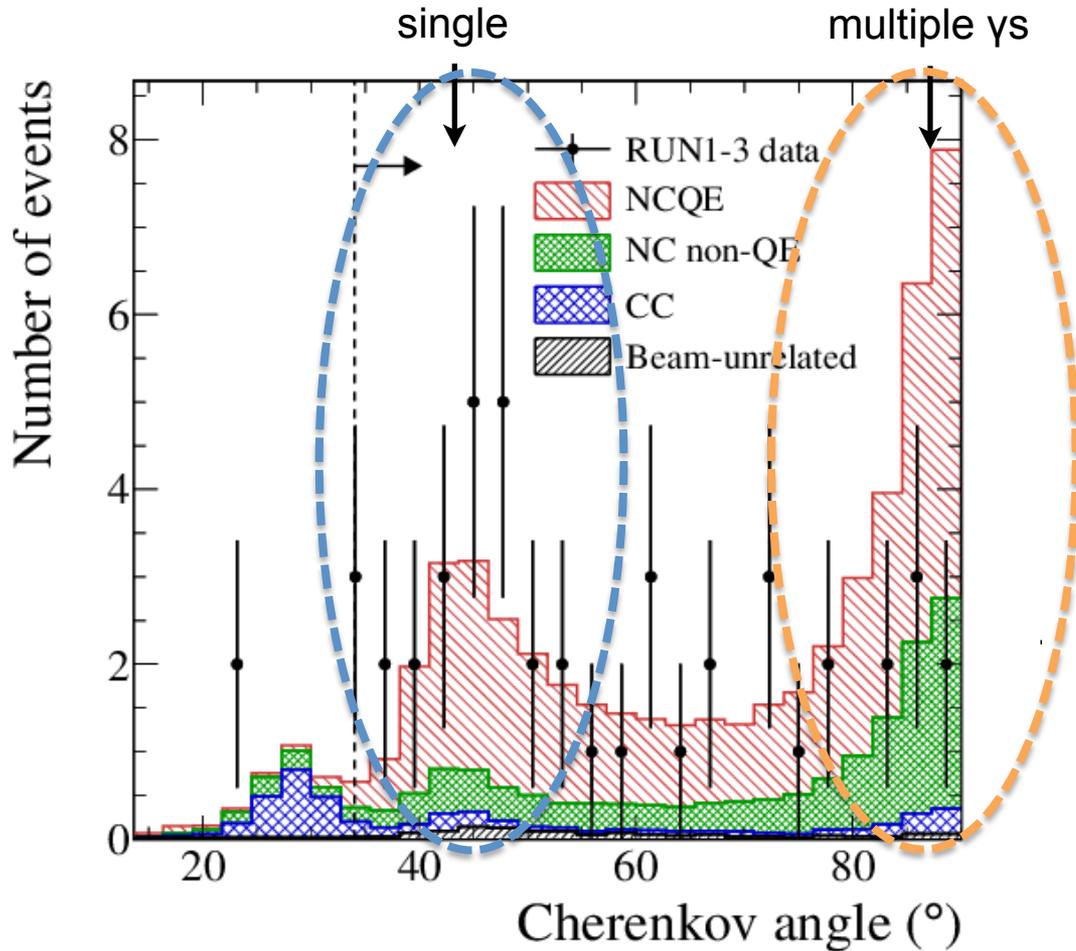
はじき出された核子が他の酸素原子核と反応し、ガンマ線(二次ガンマ線)を放出する。

この二次ガンマ線が系統誤差の主要な要因になっている。



この二次ガンマ線を正確に計測することで、系統誤差を減らすことができる。

シミュレーションと観測データ



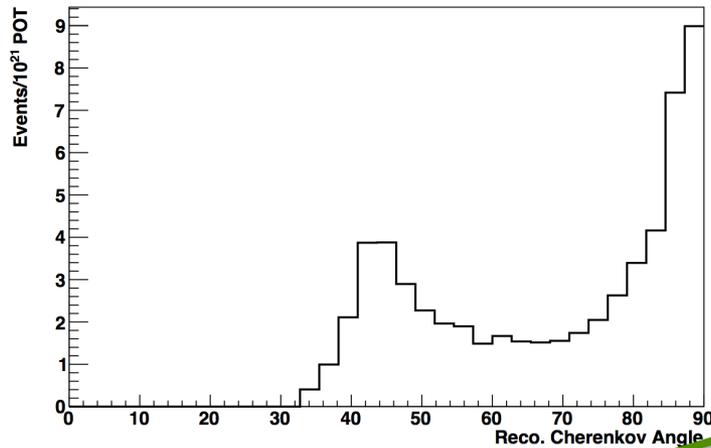
MCのシミュレーションと
実際の観測データが
チェレンコフ光の角度が
大きいところで一致していない



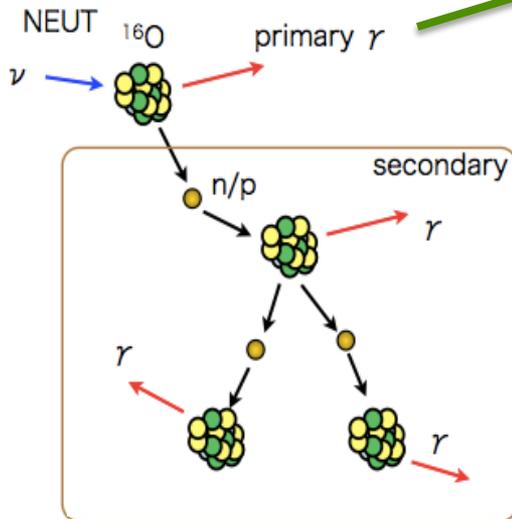
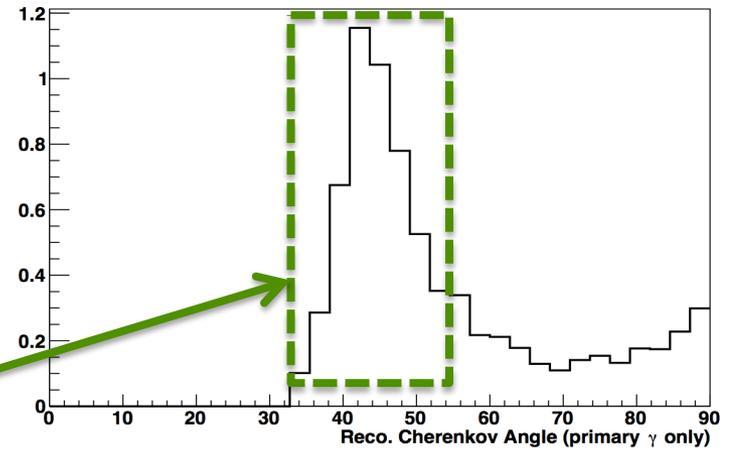
MCシミュレーションに
問題があるのでは？

チェレンコフ光の放出角度

全イベント

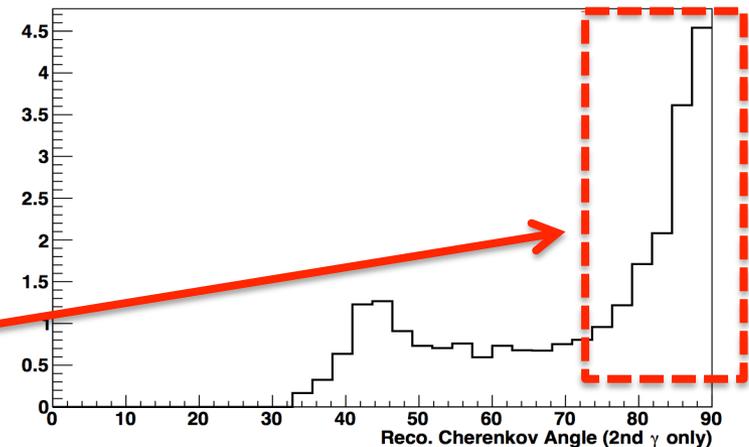


一次ガンマ線



2次ガンマ線は
複数出るので
大角度になりやすい。

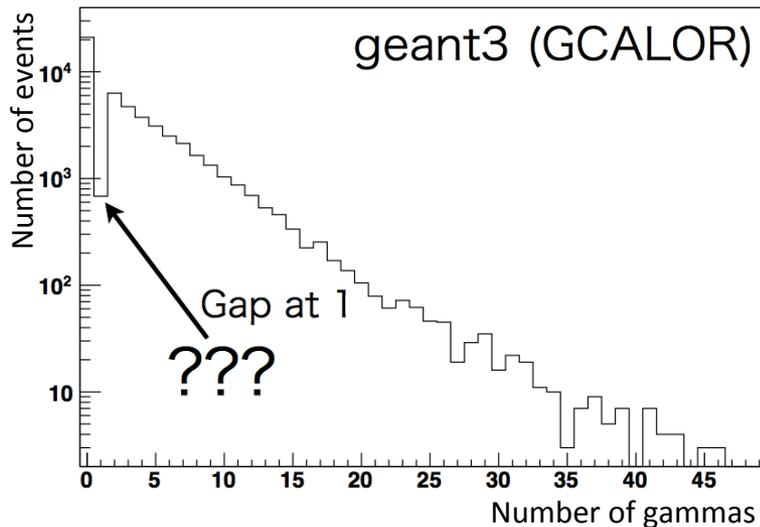
二次ガンマ線



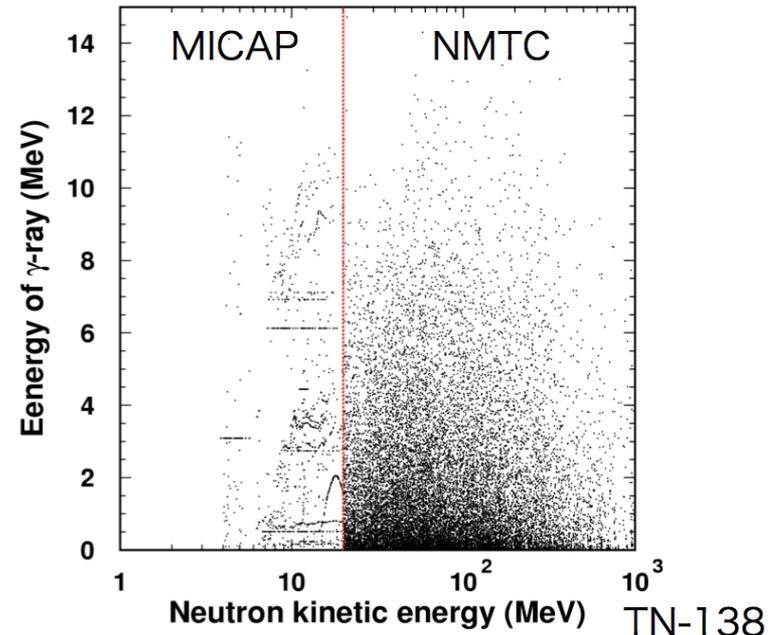
シミュレーション

T2K実験のSKシミュレーションでは、Geant3が使われている。

中性子起源のガンマ線の数

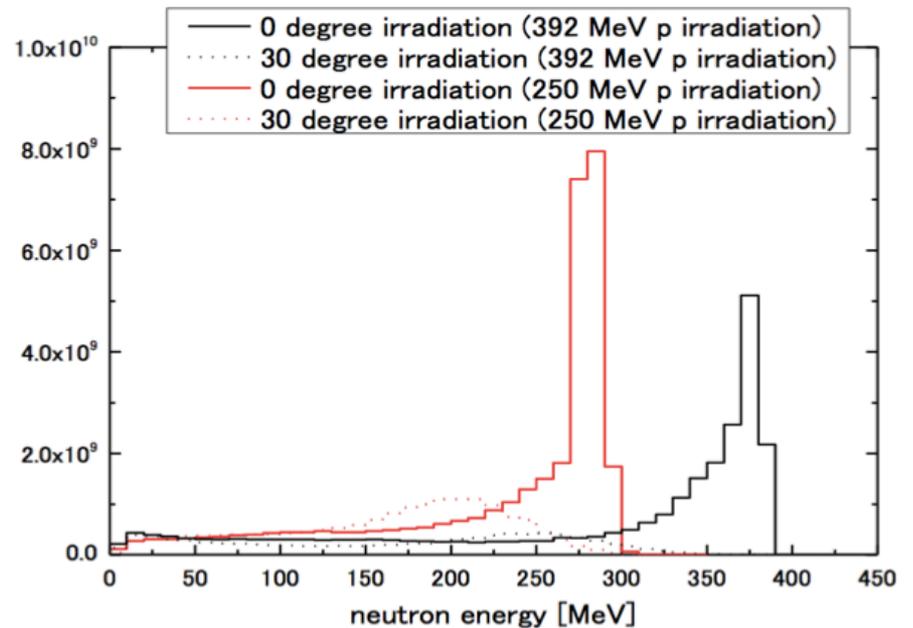
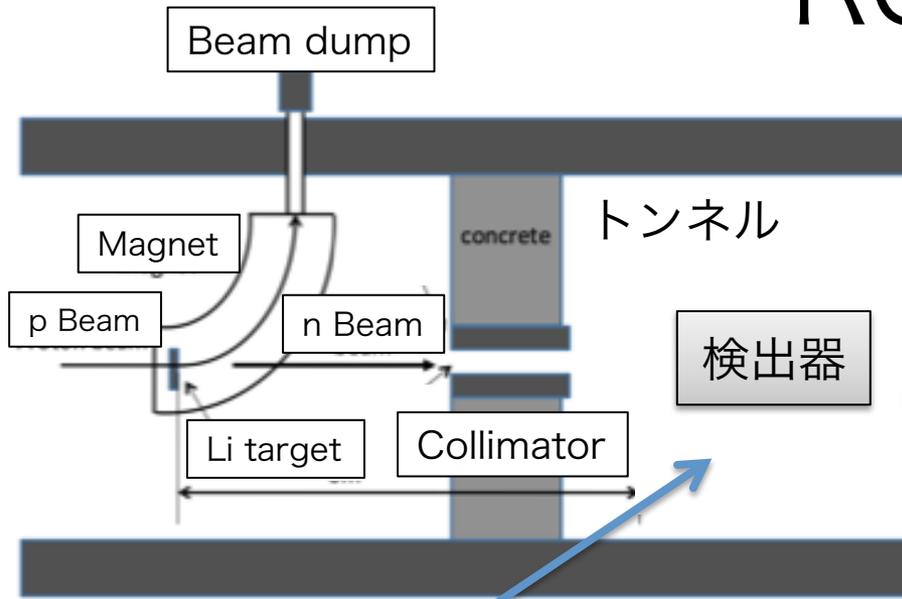


ガンマ線を一本だけ出すイベントが
極端に少ない。



20MeV付近にモデルの境界が
できている。

大阪大学核物理研究センター RCNP



中性子ビームのエネルギー

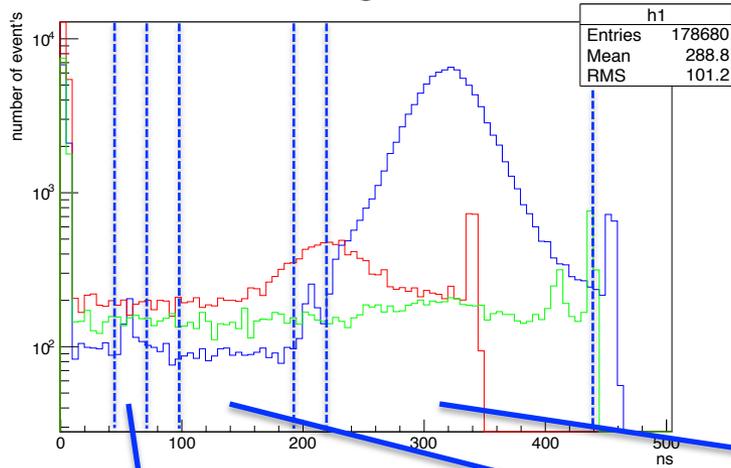
ほぼ単色のエネルギーの
中性子ビームを生成・照射できる。



RCNP ToFトンネル内

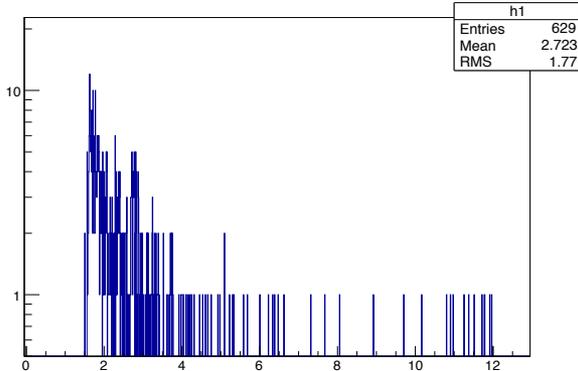
TDC Neutron Cut (0°)

0°

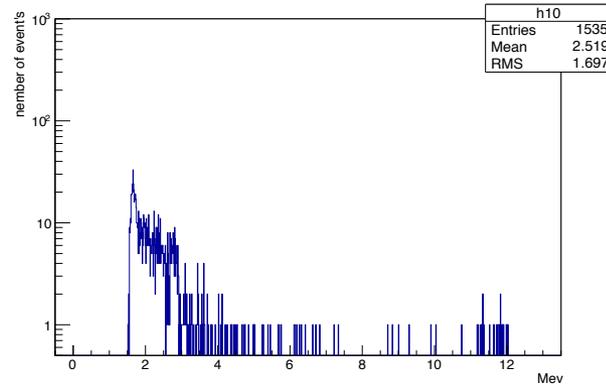


NaI7505(最もビームにあたっているもの)
のTDCを用いたon/off beamカット
off beam は100ns~180nsを使用。
neutron は220ns~440nsを使用。
prompt gamma は50ns~80nsを使用。

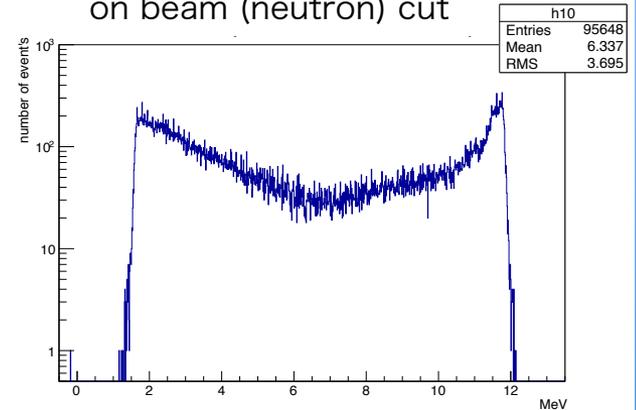
on beam (p-gamma) cut



off beam cut



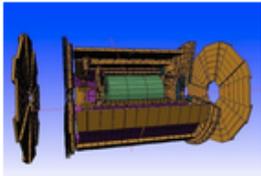
on beam (neutron) cut



Geant

CERNやKEKなど世界中で開発
陽子、電子、中性子、ガンマ線、 μ 粒子などが物質中で
シミュレートする大規模ソフトウェア

応用例



高エネルギー物理



宇宙・放射科学

放射線治療機器など…

使用モデル

Geant3 : GCALOR

Geant4 : QGSP_BIC_HP

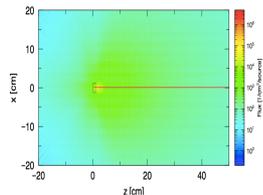
ユーザー自身が、
様々な物理モデルを選択し
組み合わせることで、
多種多様な計算を行なう。

PHITS

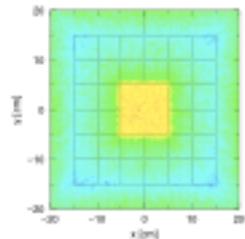
Particle and Heavy Ion Transport code System

日本原子力研究開発機構(JAEA)で開発
任意の体系中における様々な放射線の挙動を、核反応モデルや
核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コード

応用例



加速器遮蔽設計



宇宙・地球惑星科学

放射線治療&防護研究 etc...

使用モデル

核内カスケード模型

INCL4.6

蒸発模型

GEM

核データライブラリ

JENDL-4.0

他にも粒子、エネルギーにより
様々なモデルあり

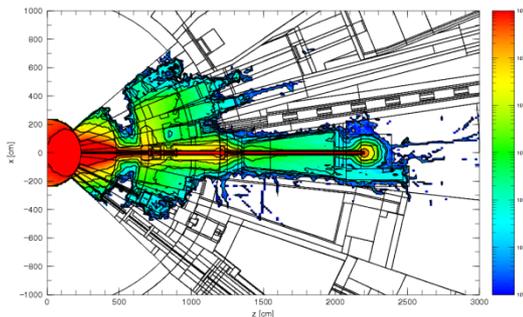
PHITSの概要

Particle and Heavy Ion Transport code System

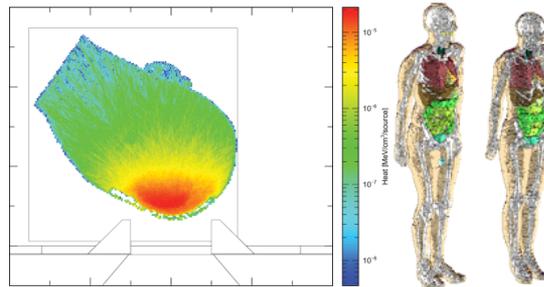
PHITSとは？

任意の体系中における様々な放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コード

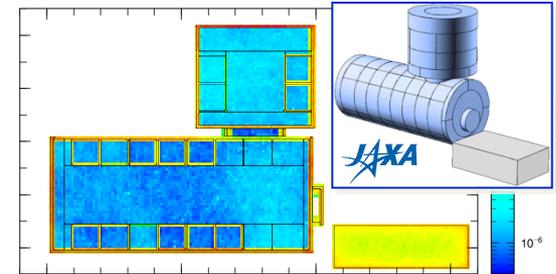
適用例



加速器遮へい設計



放射線治療 & 防護研究



宇宙・地球惑星科学

入手方法

- PHITS講習会に参加する
- RISTの原子力コードセンターに依頼する(国内ユーザー, 手数料13,176円)
- OECD/NEA DatabankもしくはRSICCに依頼する(国外ユーザー)

PHITSコードの導入モデル

	中性子	陽子・ π 粒子 (その他の核子)	重イオン	μ 粒子	電子・ 陽電子	光子	
	200 GeV		100 GeV/n	100 GeV	100 GeV	100 GeV	
高 ↑ エネルギー ↓ 低	核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM		量子分子 動力学模型	仮想光子 核反応 JAM/ JQMD	原子 データ ライブラリ EEDL / ITS3.0 / EPDL97	原子 データ ライブラリ JENDL-4. 0 / EPDL97	光 核反応 JAM/ JQMD + GEM + JENDL
	<u>核内カスケード模型 INCL4.6</u>		JQMD + 蒸発模型 GEM	+ GEM	or	or	2 MeV
	20 MeV		10 MeV/n	200 MeV			
	核データ ライブラリ <u>JENDL-4.0</u> 10 ⁻⁵ eV	1 MeV	電離損失 SPAR or ATIMA		EGS5 1 keV	EGS5 1 keV	

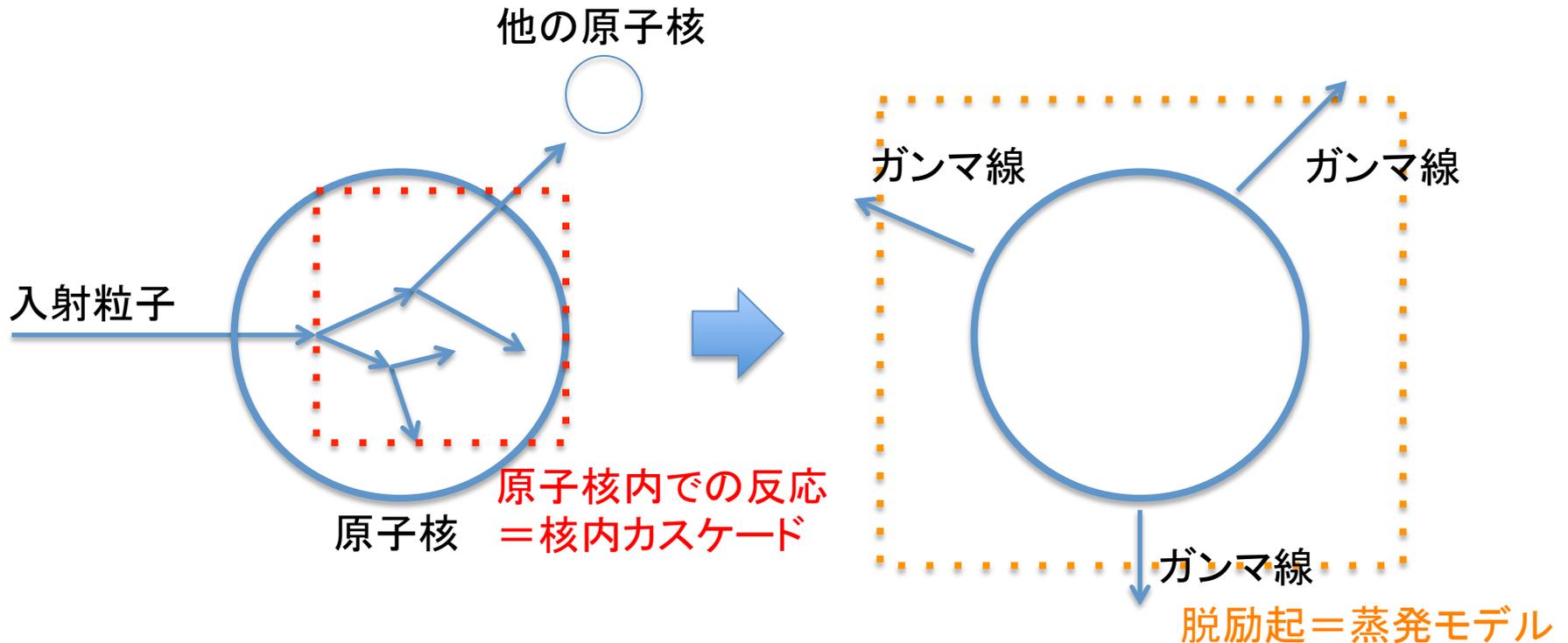
→ イベントジェネレータモード:

核反応による2次粒子を特定可能!

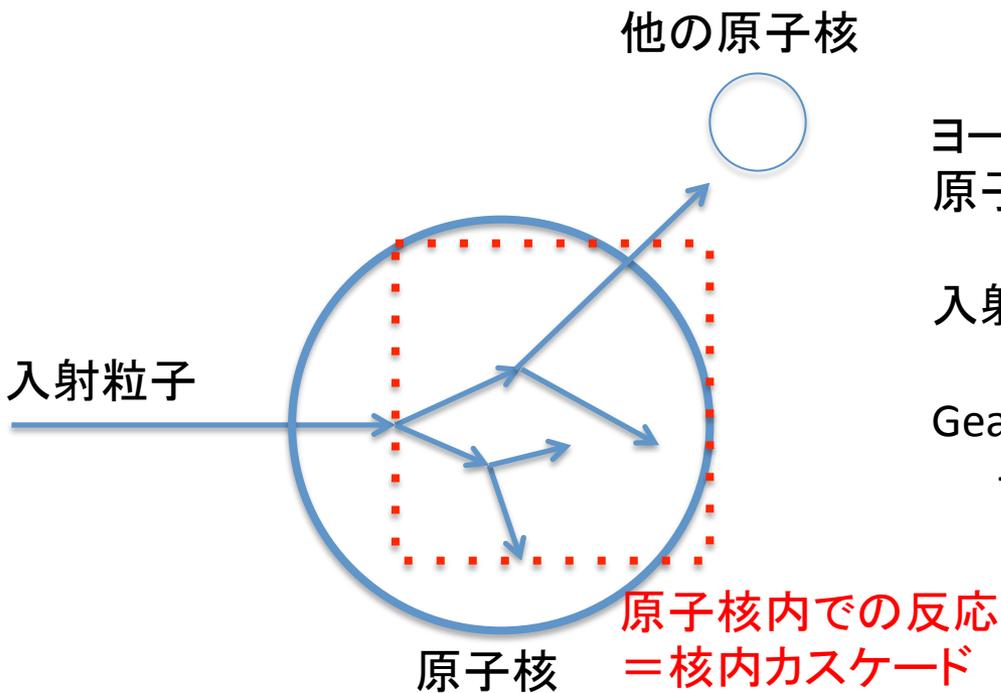
PHITSに組み込まれた物理モデルとその適用エネルギー範囲*

物理モデルについて

PHITS, Geant4ともに、核反応は核内カスケードモデルと蒸発モデルで構成されている



核内カスケードモデル INCL4.6



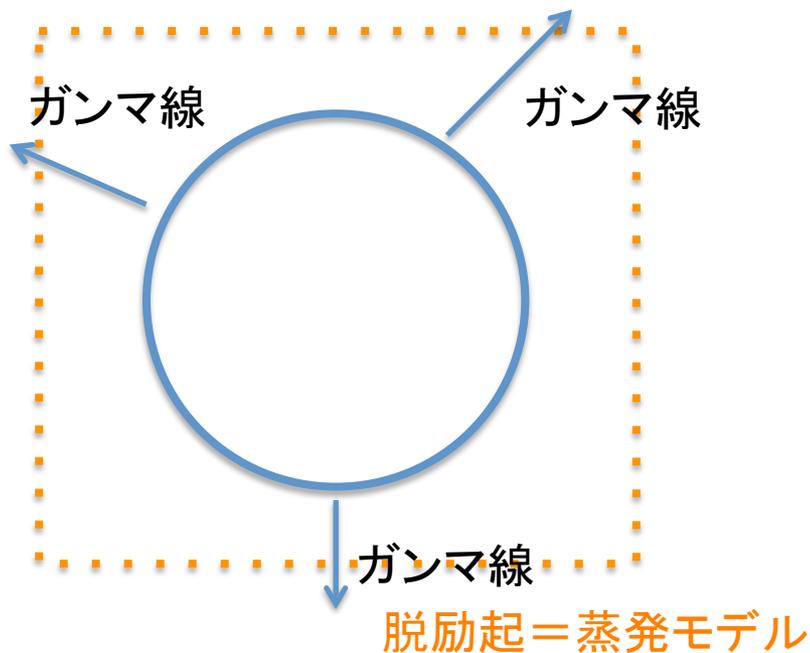
ヨーロッパで開発されている
原子核内でのカスケード反応のモデル。

入射粒子のエネルギーは数十MeV～数GeV。

Geant4にも同様のモデルがある。
→INCL++がある。

蒸発モデル

GEM(Generalized Evaporation Model)



JAEAで開発されている蒸発モデル。

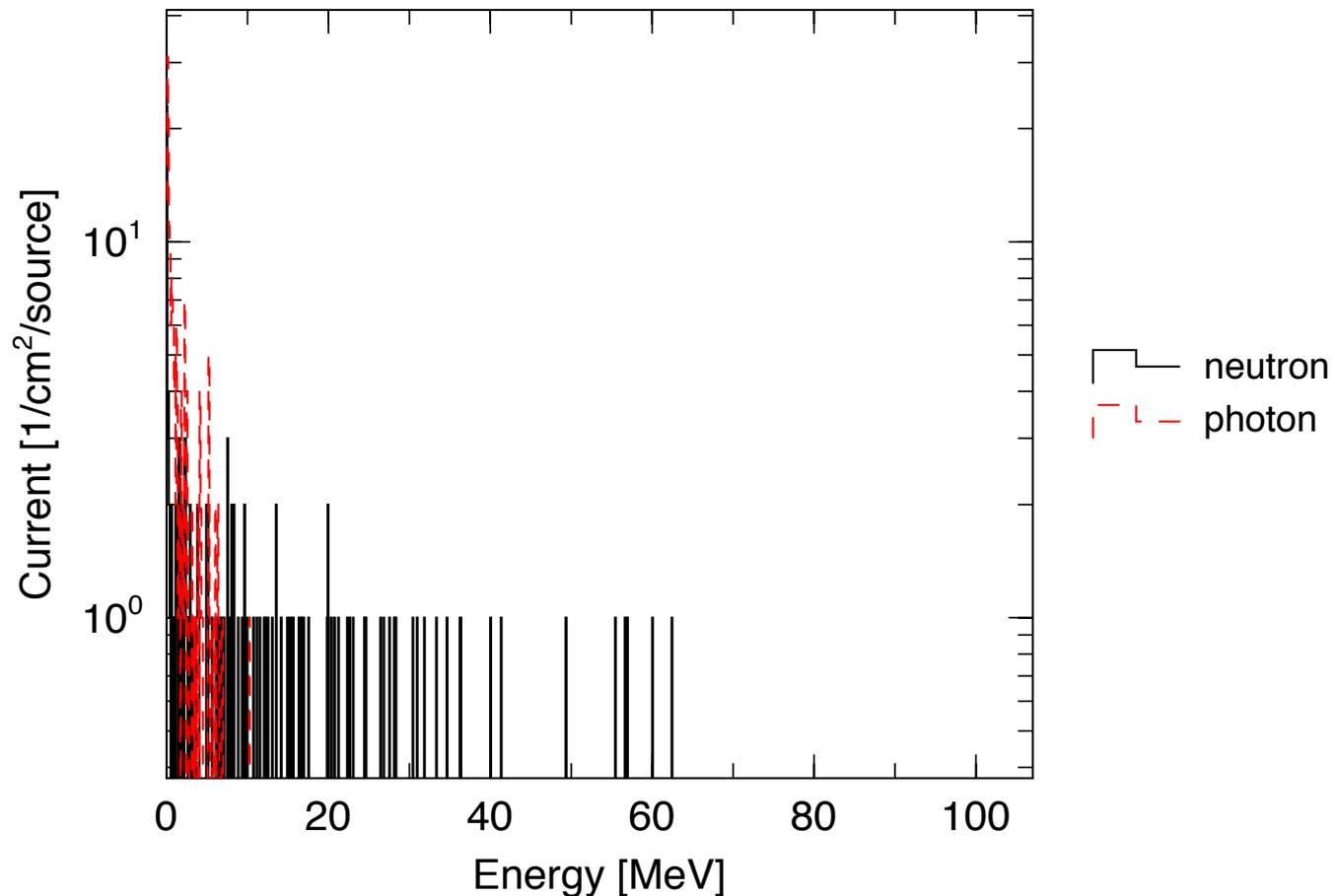
核データライブラリ JENDL-4

- JAEAで開発されている日本独自の汎用標準核データライブラリ。

収録核種数	406核種
入射中性子 エネルギー範囲	10^{-5} ~20MeV

PHITSを用いた水と中性子の 散乱シミュレーション

NaIシンチレータに入射した中性子、ガンマ線のエネルギー分布



PHITSを用いた水と中性子の 散乱シミュレーション

NaIシンチレータでのdeposit energy

