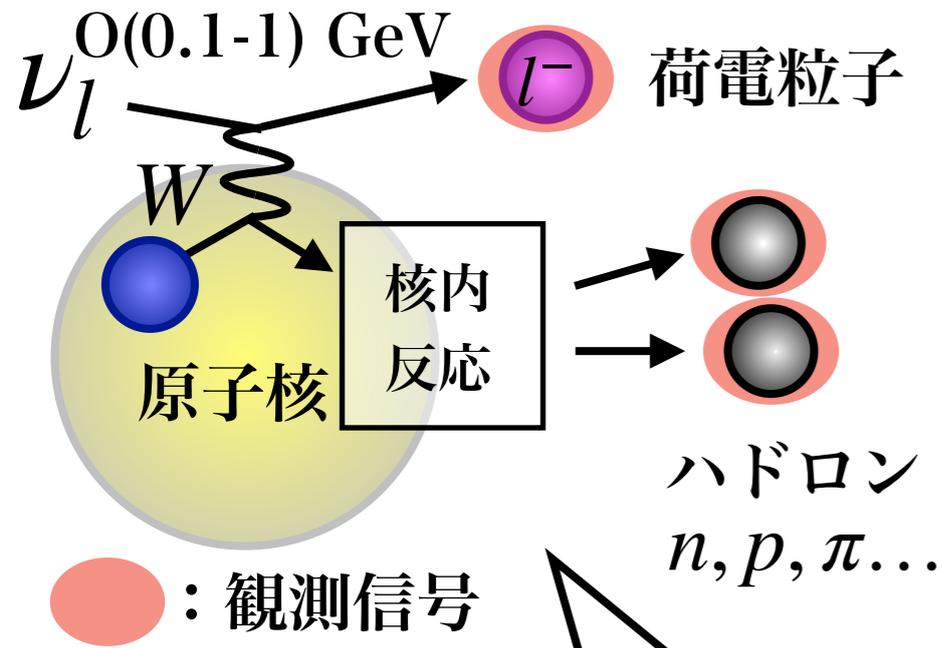


ニュートリノ反応研究に向けた 残留原子核の利用

-
- 1) ニュートリノ反応と残留原子核
 - 2) 残留原子核観測とKamLAND検出器
 - 3) 大気ニュートリノ+KamLANDでどの程度観測されるかをMCで予測
 - 4) まとめと展望
-

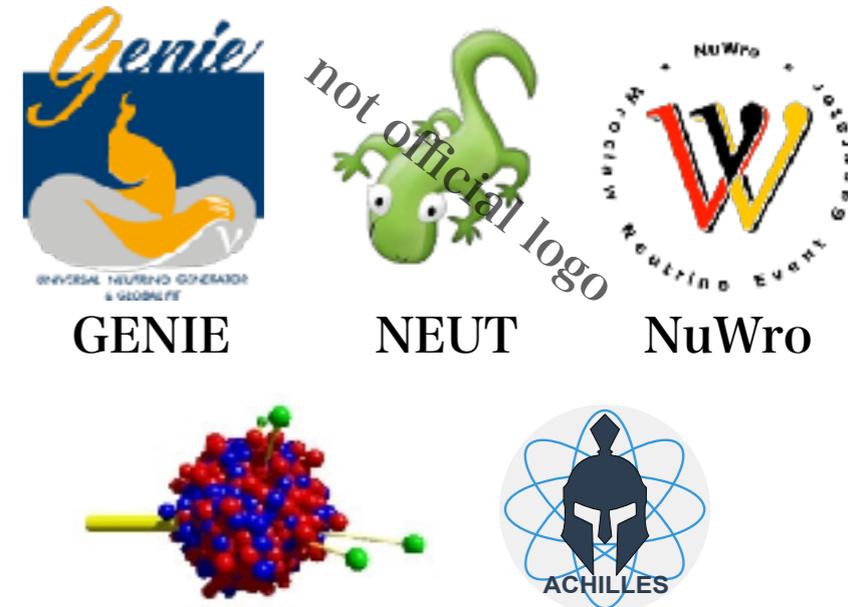
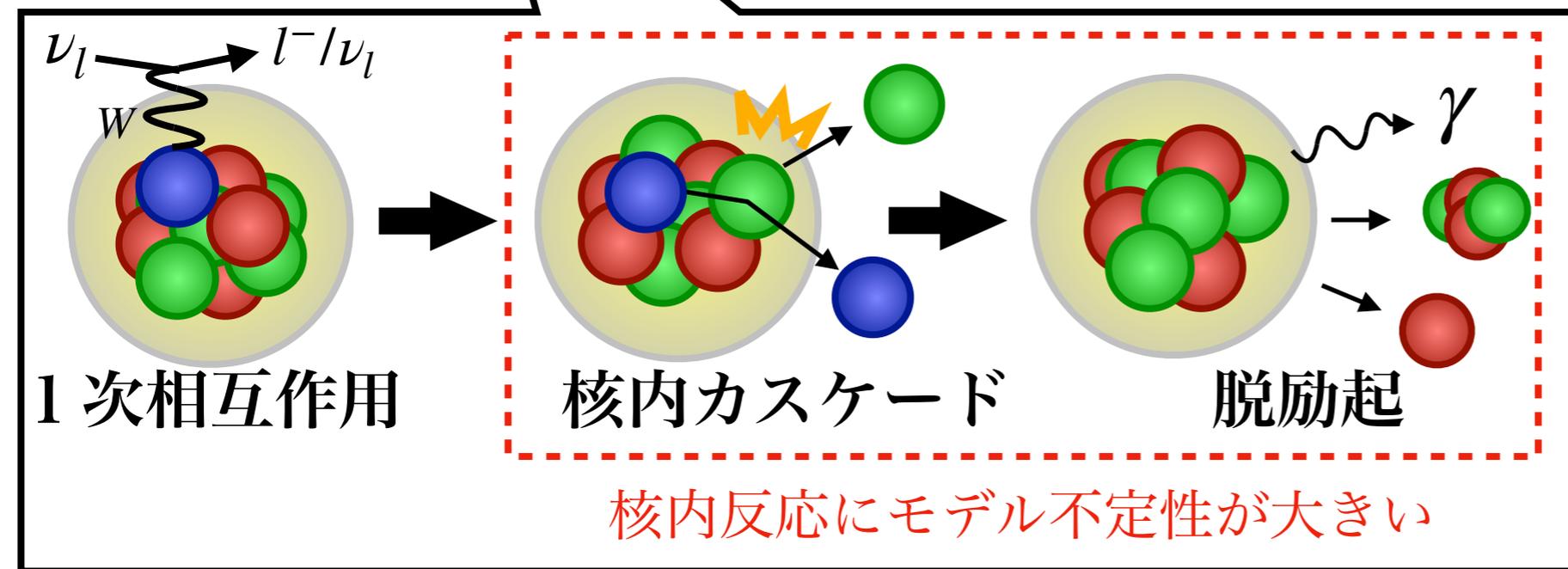
江田智弘 東北大学ニュートリノ科学研究センター

第二回学術変革「地下稀事象」若手研究会 2026年3月5日（木）



- ▶ ニュートリノは標的原子核との反応から間接的に観測
 - 検出粒子の運動学情報からニュートリノを再構成
 - 反応機構を適切に理解しないと測定の実験誤差に繋がる
- ▶ 次世代の検出器の大統計量化により、ニュートリノ反応の理解に対する重要性が高まっている
 - CP対称性の破れの検証、宇宙背景ニュートリノ (DSNB) 探索 など

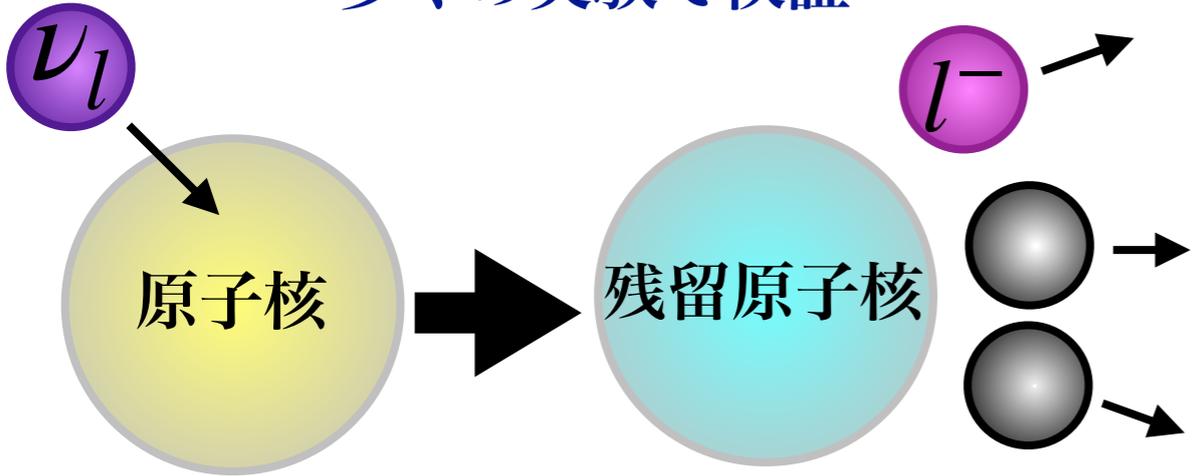
複雑な機構



ニュートリノ反応シミュレータ

- ▶ ニュートリノ反応の記述にはモデル依存が大きいことが現状 (特に核内での反応)
 - 終状態の粒子の種類や数に特徴差が現れる

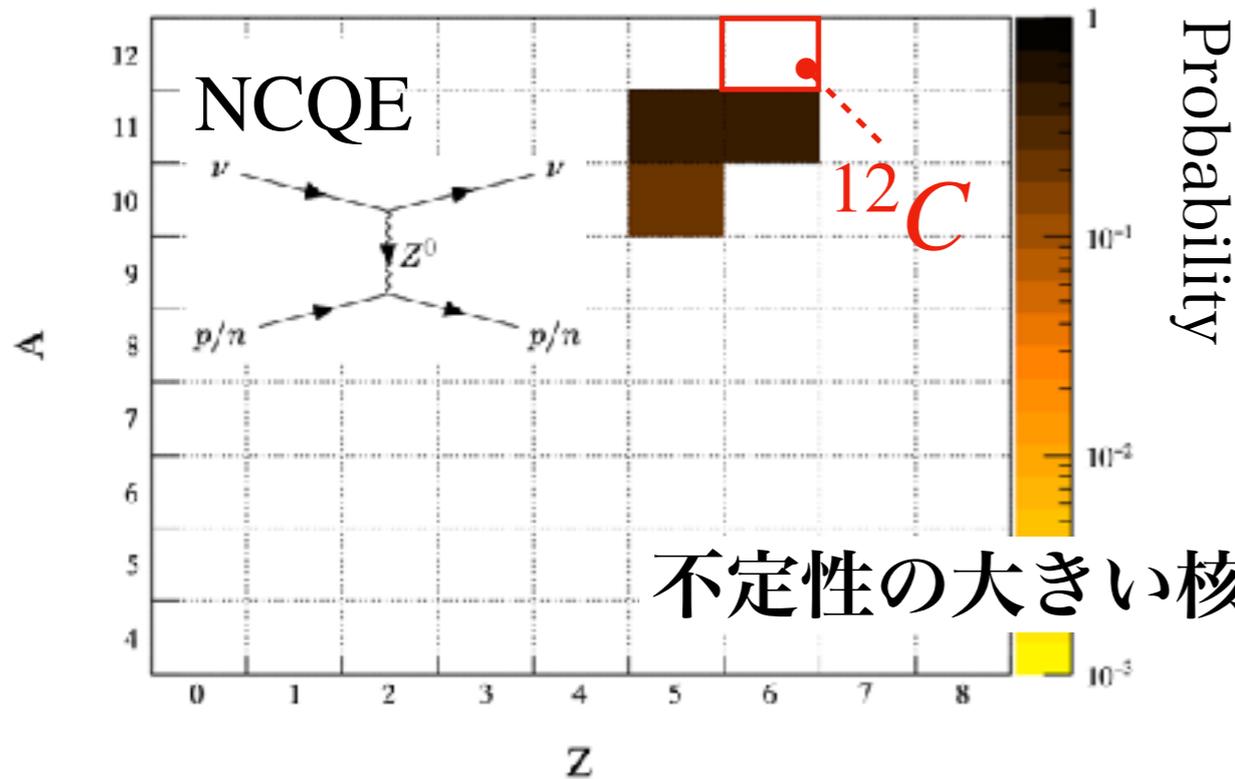
$\nu + N \rightarrow \bar{l} + \text{hadrons} + \text{残留原子核}(Z, A)$ 実験的な検証が不十分 (sub-GeV領域)
 多くの実験で検証



- ▶ 残留原子核はニュートリノと反応した原子核の終状態
- 実験的な測定例がほとんどない (sub-GeV領域)
- 核外へ放出された粒子の種類や数を記録
- モデル検証の新しいパラメータになりうる

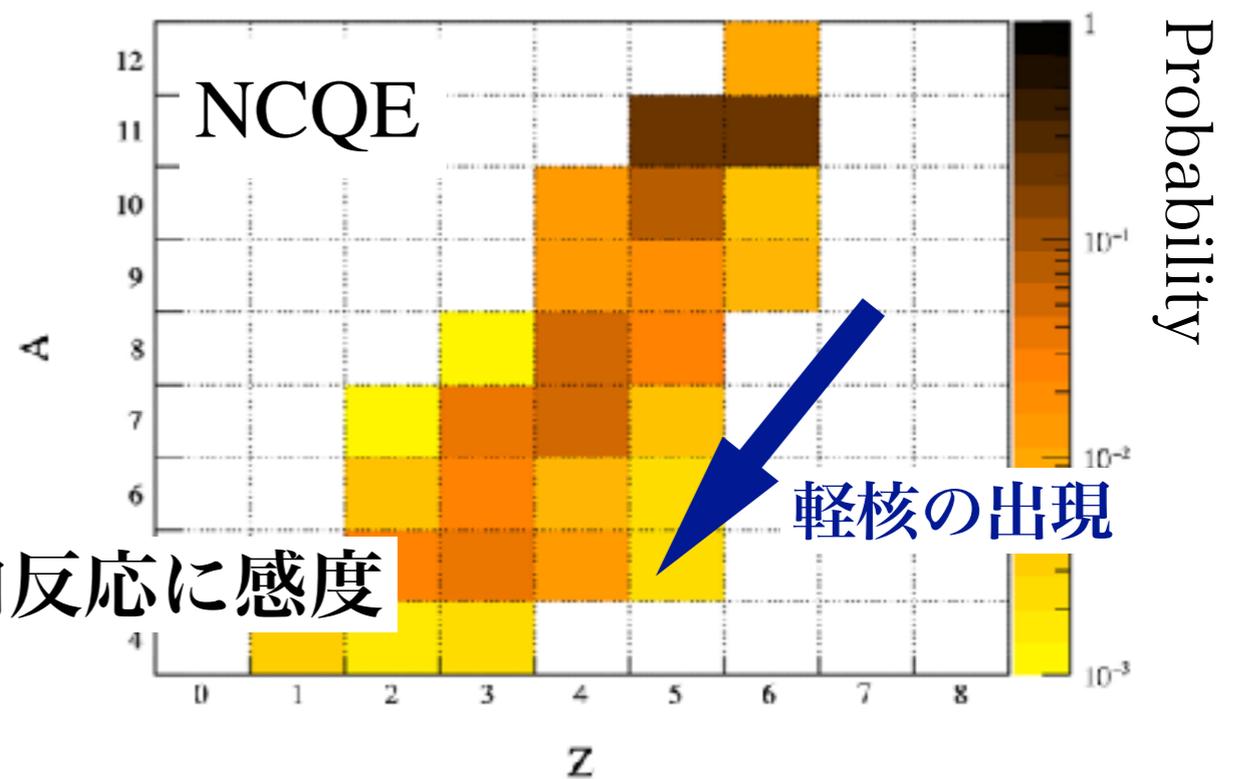
標的核を炭素原子核とした場合の残留核分布 (MC)

核内カスケード & 脱励起なし

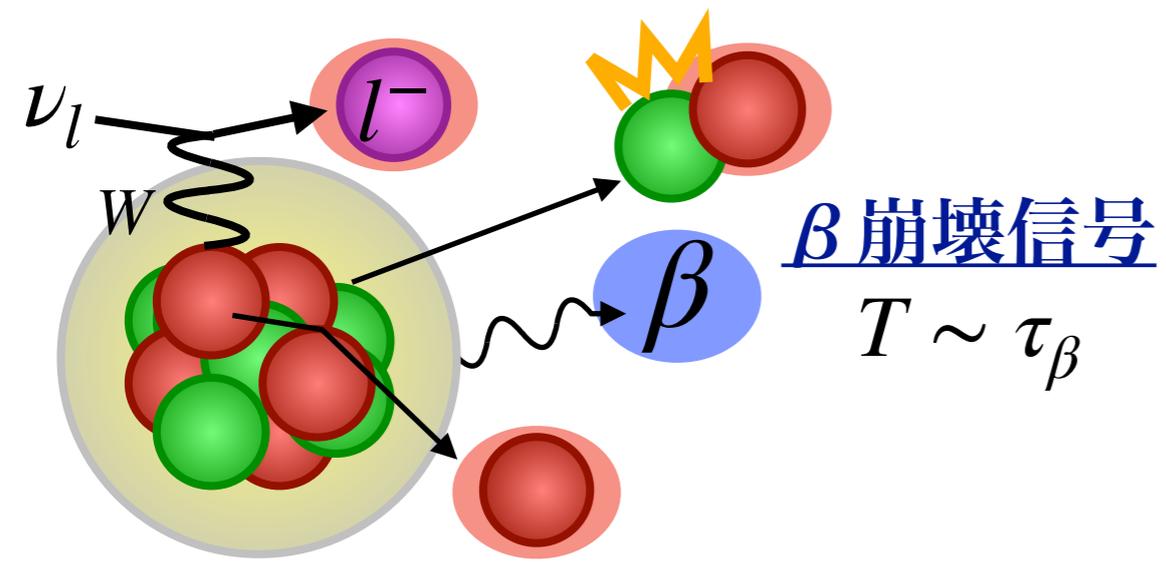


不定性の大きい核内反応に感度

核内カスケード & 脱励起あり



ν 反応由来の即時的な信号

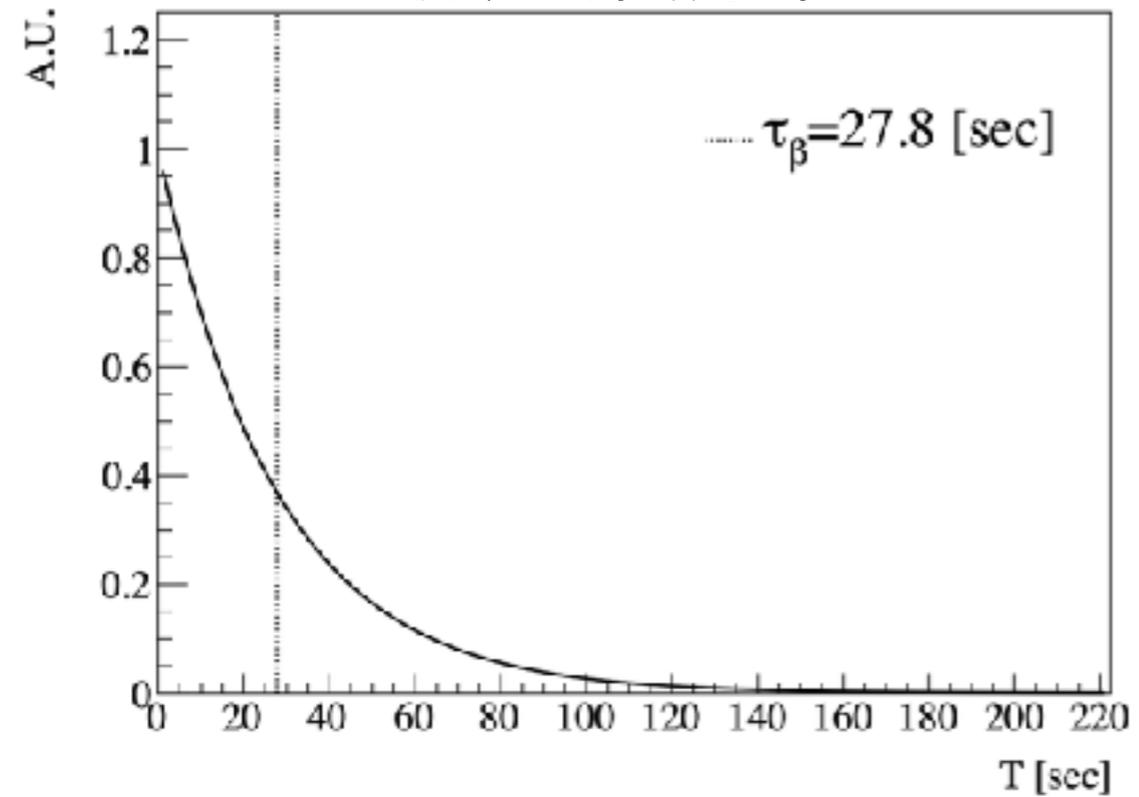


β 崩壊信号の観測 & 主要な背景事象

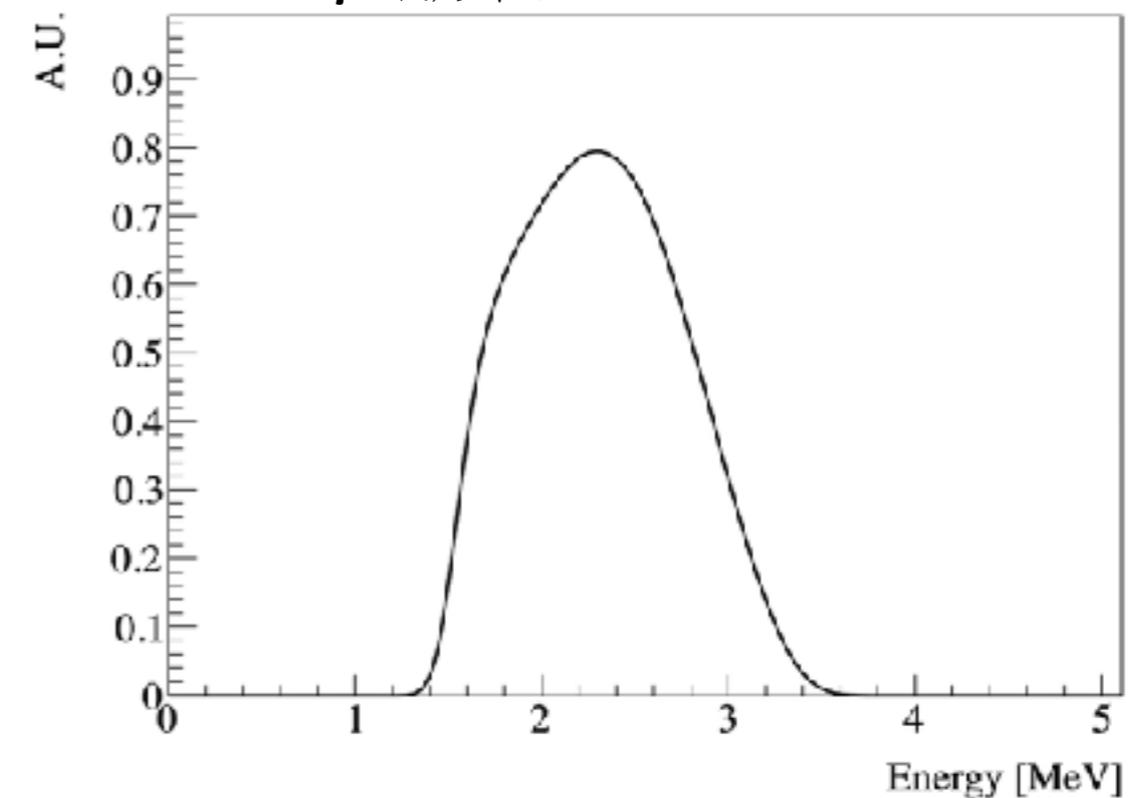
- ▶ β 崩壊の時間・空間・エネルギーに関する特徴的な構造を利用
 - 先発事象との遅延同時計測
 - 先発事象のvertexとの空間相関
 - β 崩壊スペクトル
- ▶ 宇宙線ミュオンによる核破砕生成物が主要な背景事象

例) ^{10}C

崩壊時間分布

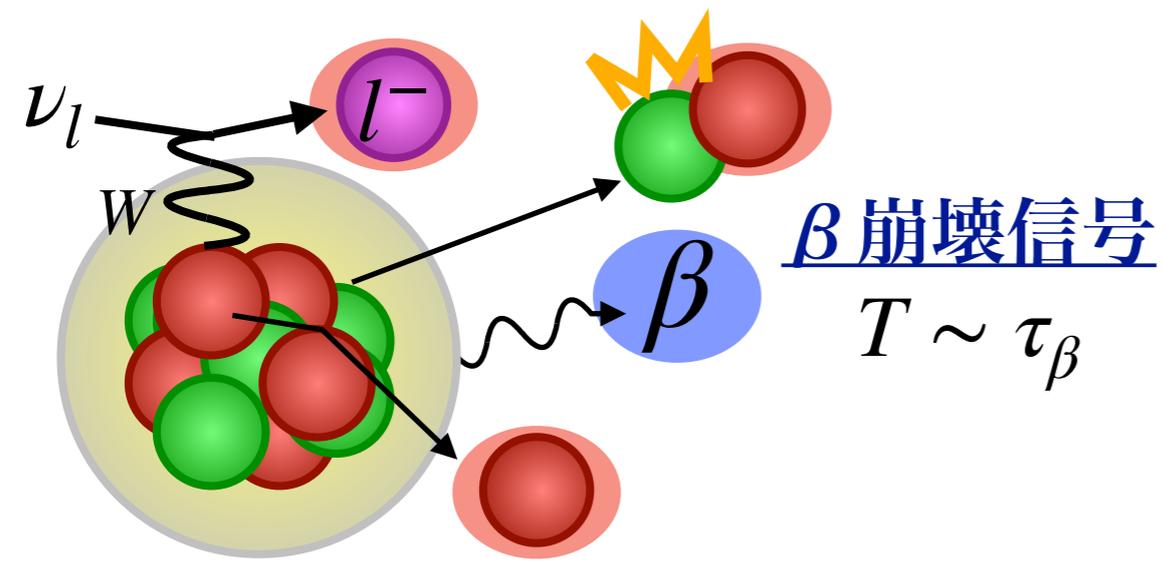


β 崩壊スペクトル



残留原子核観測の信号と背景事象

ν 反応由来の即時的な信号



β崩壊信号の観測 & 主要な背景事象

- ▶ β崩壊の 時間・空間・エネルギー に関する特徴的な構造を利用
 - 先発事象との遅延同時計測
 - 先発事象のvertexとの空間相関
 - β崩壊スペクトル
- ▶ 宇宙線ミュオンによる核破碎生成物が主要な背景事象

炭素標的の残留原子核タグ候補

	Lifetime in KamLAND LS	Radiation energy (MeV)
^{12}B	29.1 ms	13.4 (β^-)
^{12}N	15.9 ms	17.3 (β^+)
^8Li	1.21 s	16.0 ($\beta^- \alpha$)
^8B	1.11 s	18.0 ($\beta^+ \alpha$)
^9C	182.5 ms	16.5 (β^+)
^8He	171.7 ms	10.7 ($\beta^- \gamma n$)
^9Li	257.2 ms	13.6 ($\beta^- \gamma n$)
^{11}C	29.4 min	1.98 (β^+)
^{10}C	27.8 s	3.65 ($\beta^+ \gamma$)
^{11}Be	19.9 s	11.5 (β^-)
^6He	1.16 s	3.51 (β^-)

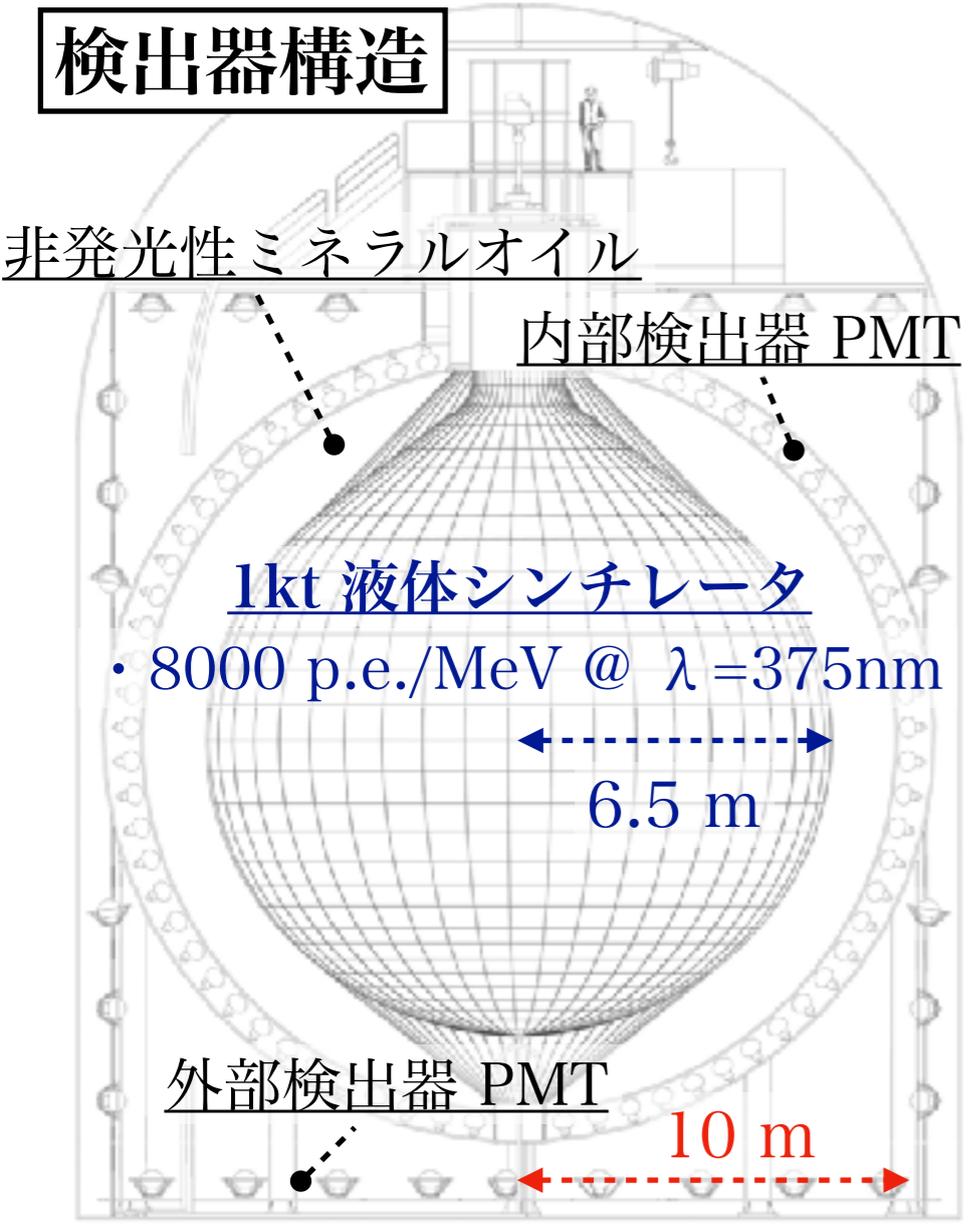
残留原子核観測への必要要件

遅延同時計測の時間窓がO(0.1-100) [sec]スケールであるため、宇宙線ミュオンの遮蔽が必須

低エネルギー事象に対する高い事象再構成精度が不可欠(空間相関・エネルギー選定に影響)

運転期間：2002年 - 2024年

検出器構造



1kt 液体シンチレータ

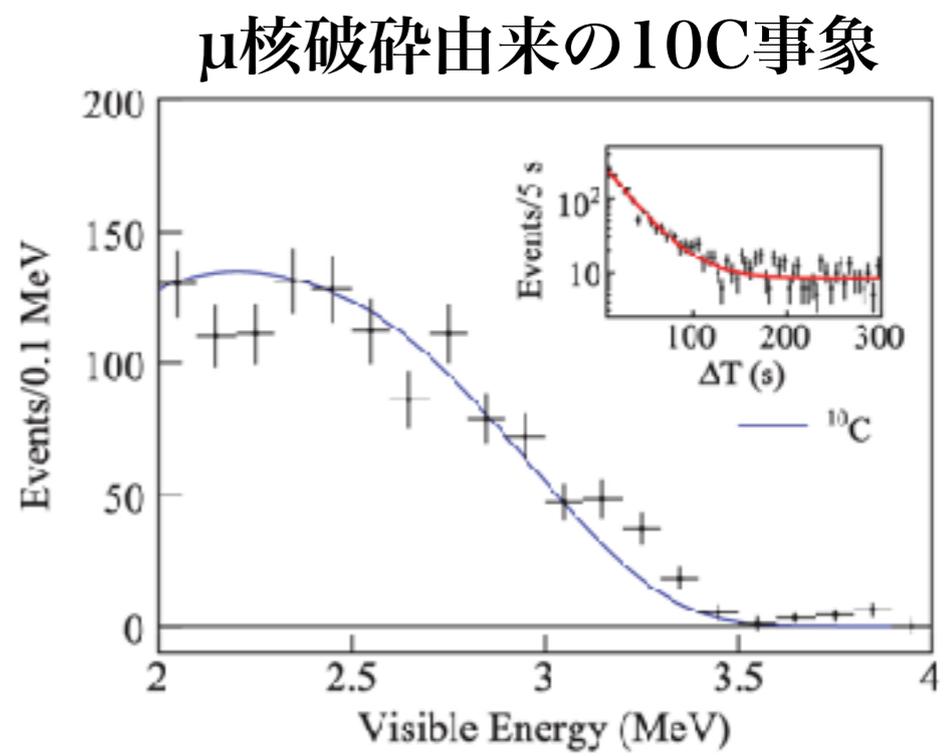
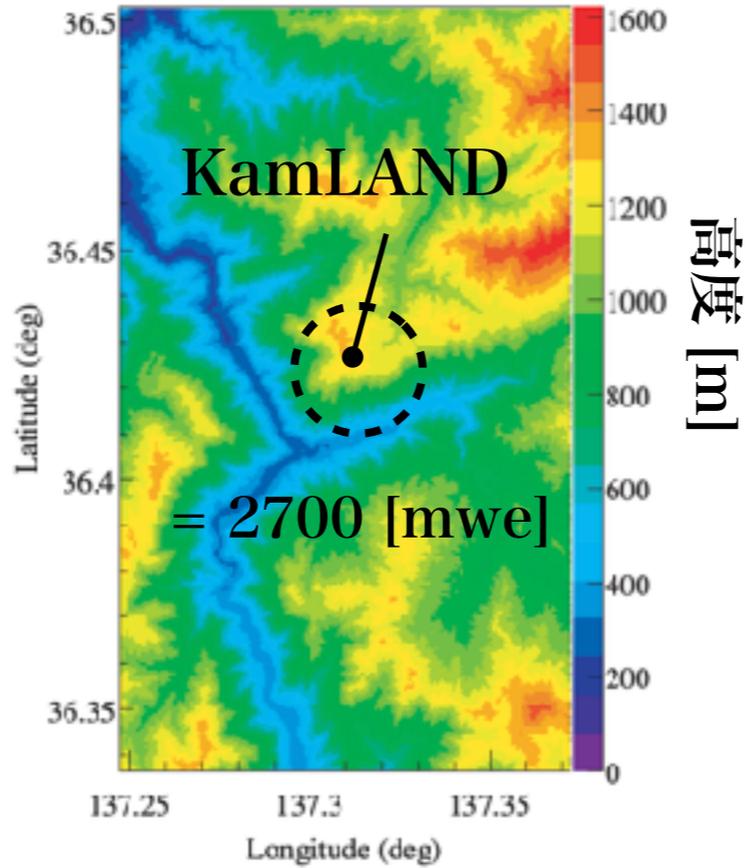
• 8000 p.e./MeV @ $\lambda = 375\text{nm}$

外部検出器 (OD)

- 水チェレンコフ検出器
- 宇宙線ミュオンの除去に利用

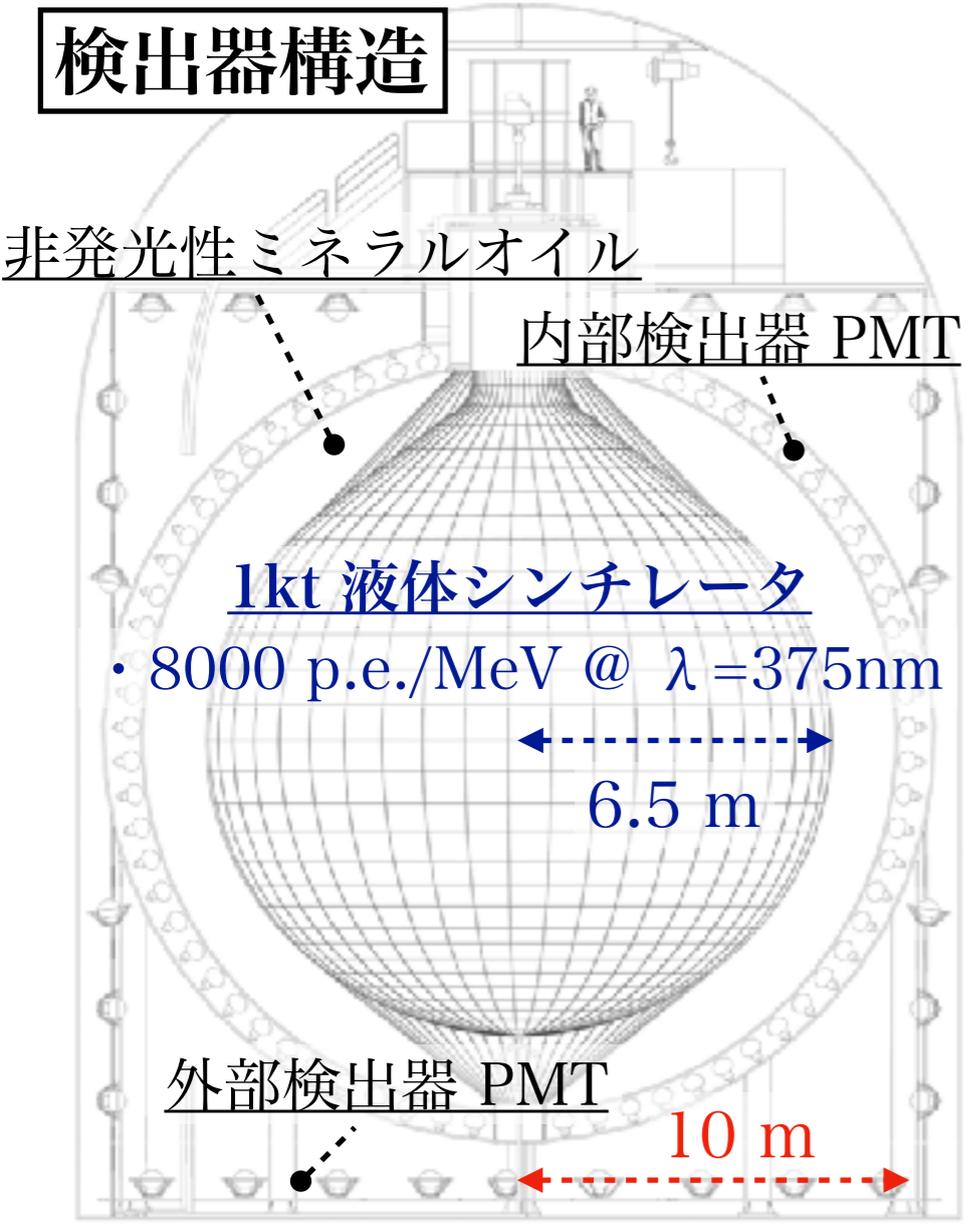
KamLANDの残留核検出における強み

- ① 宇宙線 μ フラックスが地上の10万分の1
- ② 低エネルギー事象への高い事象再構成精度
 - Vertex resolution : $13 \text{ cm}/\sqrt{E} \text{ [MeV]}$
 - Energy resolution : $7\%/\sqrt{E} \text{ [MeV]}$
- ③ 確立した残留原子核同定手法
 - 宇宙線 μ 由来の核破砕反応で生じた β 崩壊核種
 - β 崩壊信号の検出器応答が既知
 - ν 由来信号の検証データに用いることが可能



運転期間：2002年 - 2024年

検出器構造

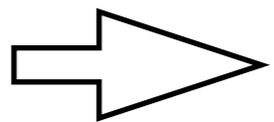
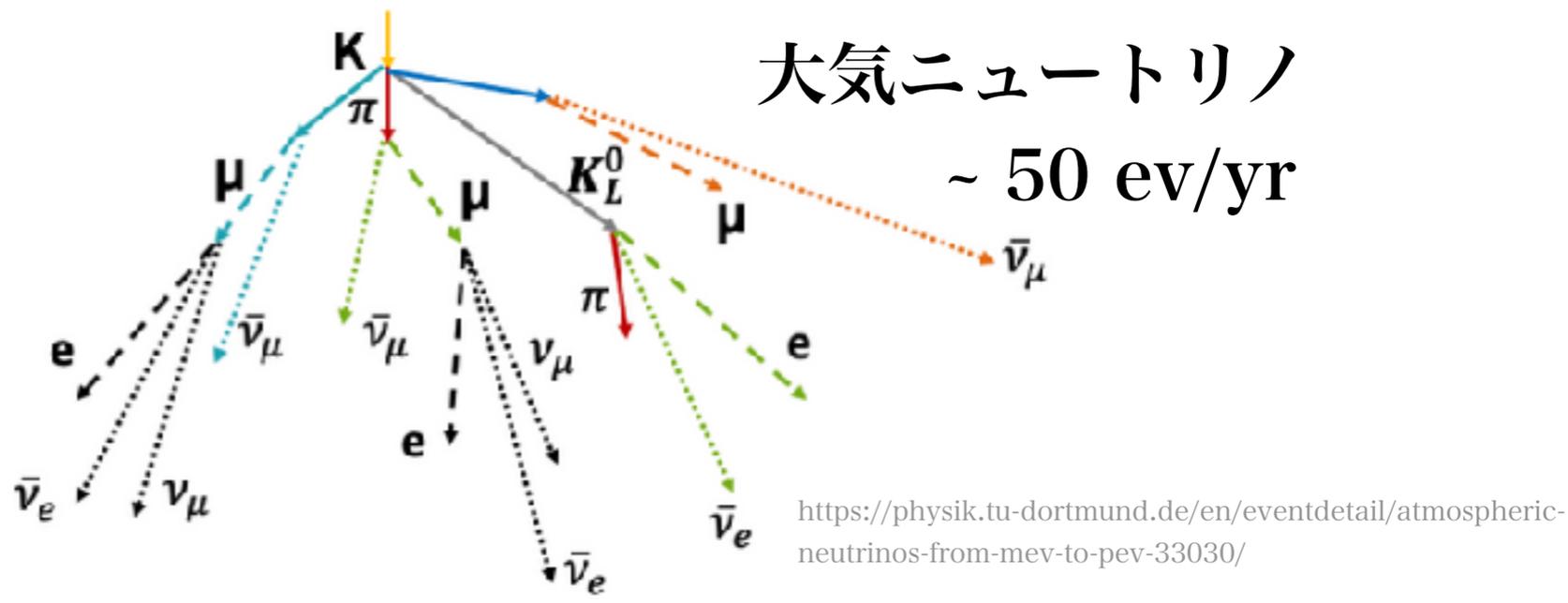


外部検出器 (OD)

- 水チェレンコフ検出器
- 宇宙線ミュオンの除去に利用

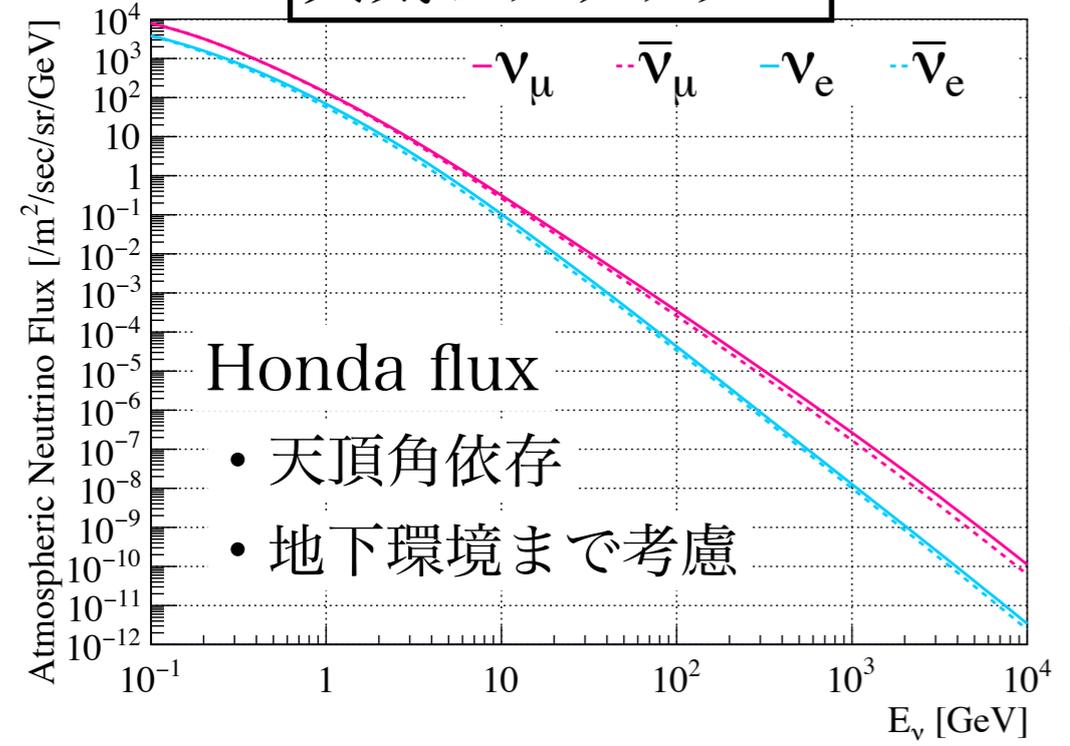
KamLANDの残留核検出における強み

- ① 宇宙線 μ フラックスが地上の10万分の1
- ② 低エネルギー事象への高い事象再構成精度
 - Vertex resolution : 13 cm/ \sqrt{E} [MeV]
 - Energy resolution : 7%/ \sqrt{E} [MeV]
- ③ 確立した残留原子核同定手法
 - 宇宙線 μ 由来の核破砕反応で生じた β 崩壊核種
 - β 崩壊構造の検出器応答が既知
 - ν 由来信号の検証データに用いることが可能



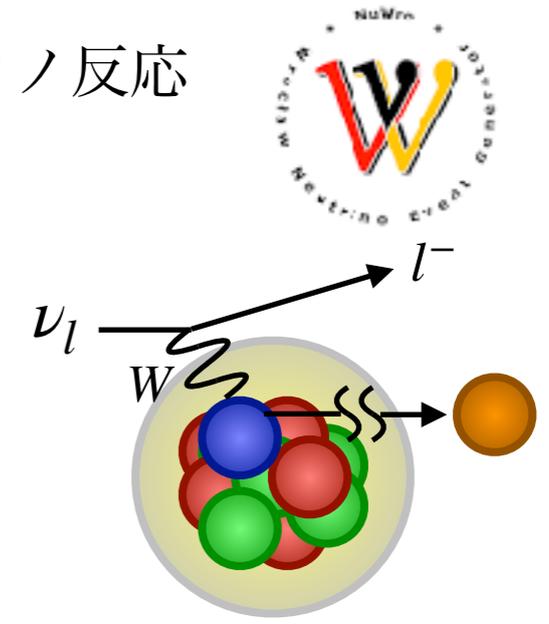
統計量のある 大気ニュートリノ がソース

大気νフラックス

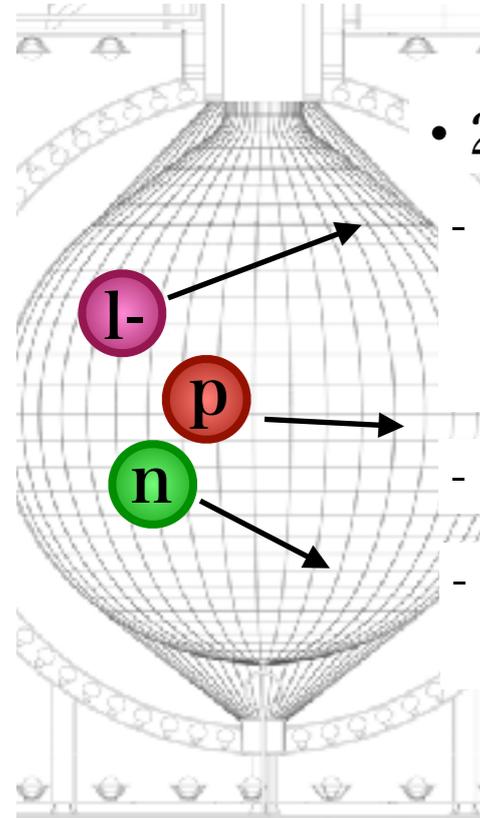


ν反応シミュレーション (NuWro+NucDeEx)

- NuWro : ニュートリノ反応
- NucDeEx : 脱励起
- 次スライドで説明



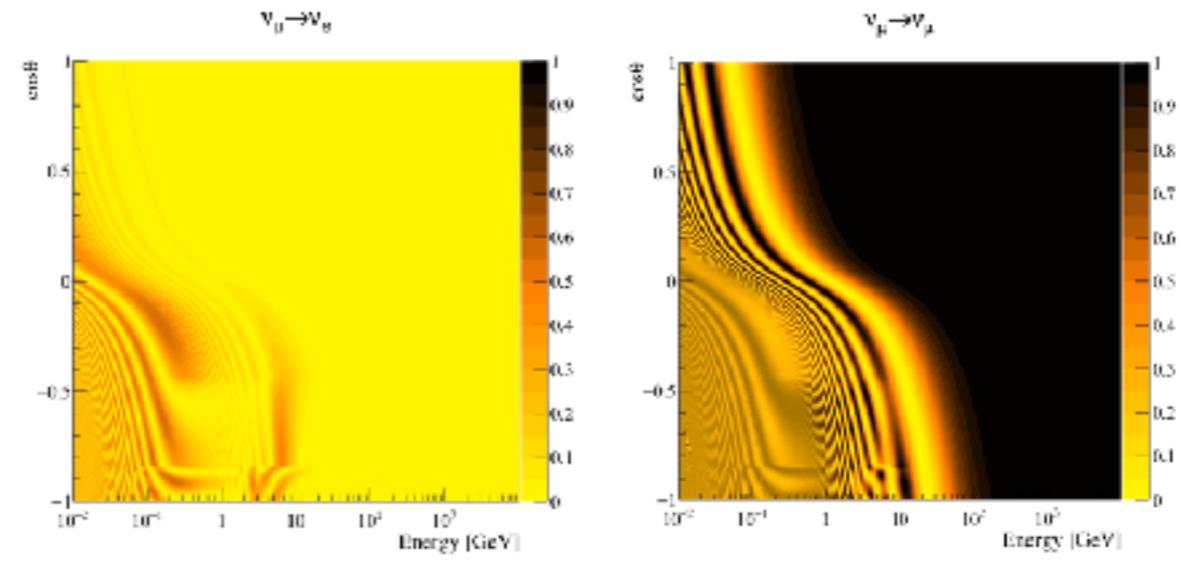
検出器シミュレーション (Geant4-based)

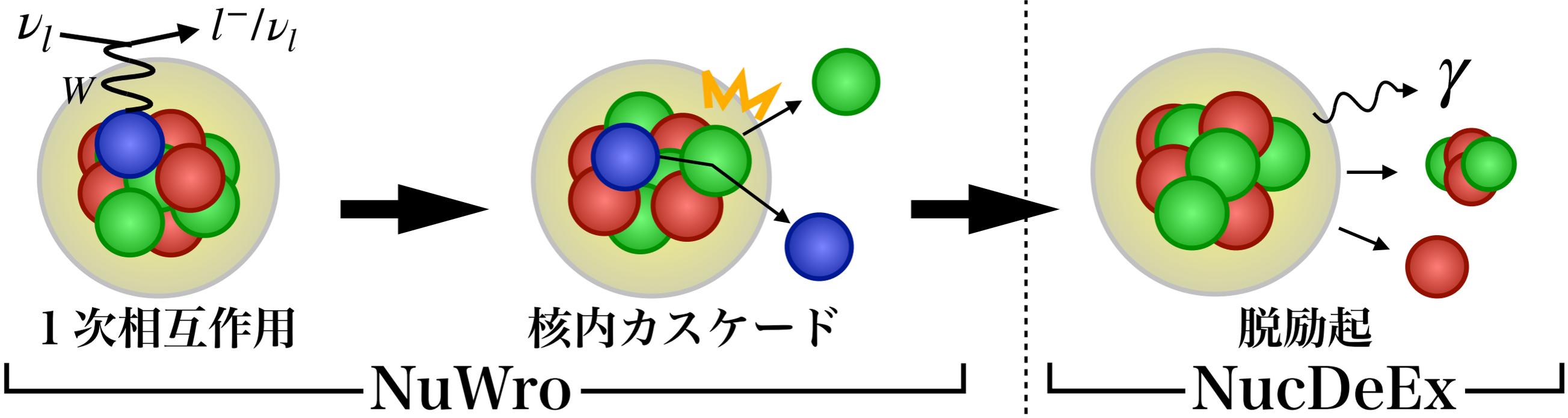


- 2003 - 2018年
- 高エネルギー事象に対してのチューニングが完了している期間を使用
- livetime : 11.2年
- 検出器改修期間は除外
 - ▶ LS純化作業など

事象選定 & スケーリング

- 実データと同条件で事象選定 (p.10)
- 反応断面積&フラックスから期待事象数を計算
- ニュートリノ振動効果

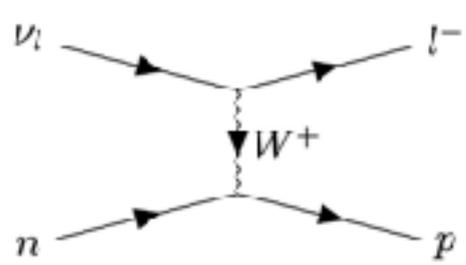




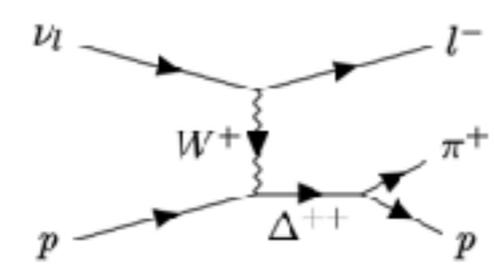
- MeV-GeVで主要な反応を考慮
- 荷電カレント(CC)と中性カレント(NC)を合わせて10種類

• QE反応のみ実装

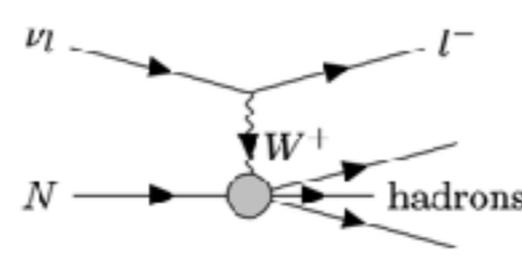
- 励起エネルギーは1次相互作用後の状態から計算



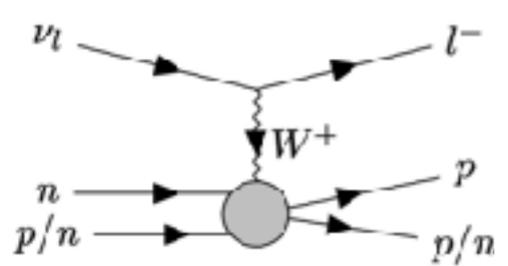
準弾性反応 (QE)
sub-GeVで主要



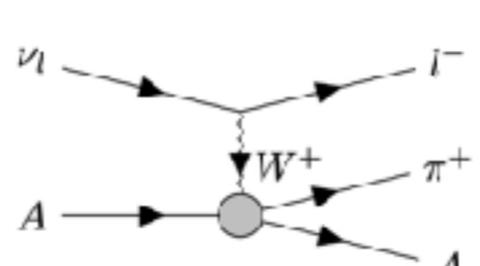
1π生成反応 (RES)
O(1)GeVで主要



深部非弾性反応 (DIS)
O(10)GeVで主要

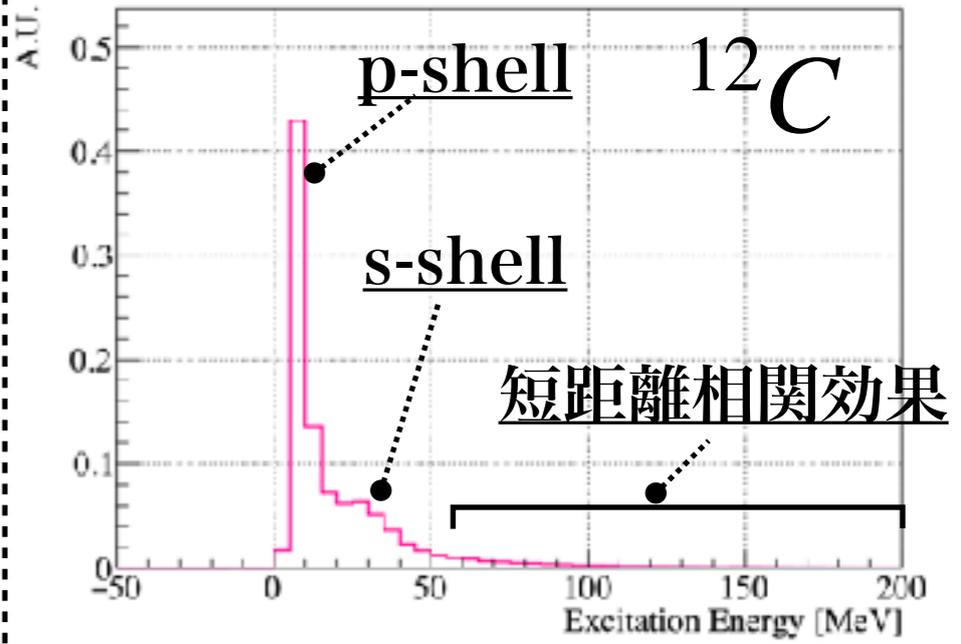


中間子交換反応 (MEC/2p2h)



コヒーレント反応 (COH)

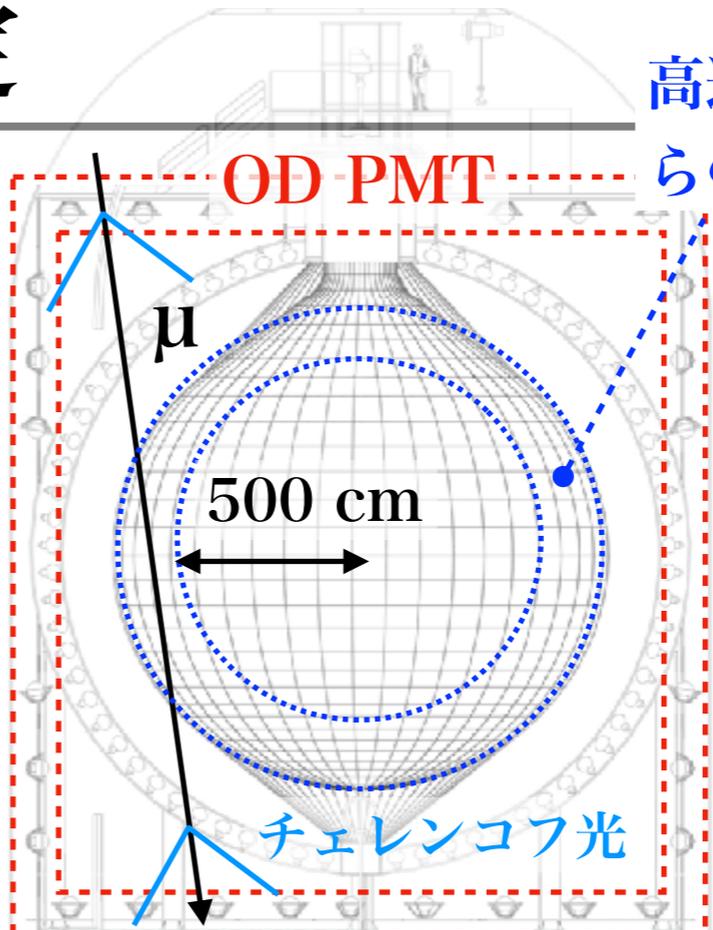
励起エネルギー分布



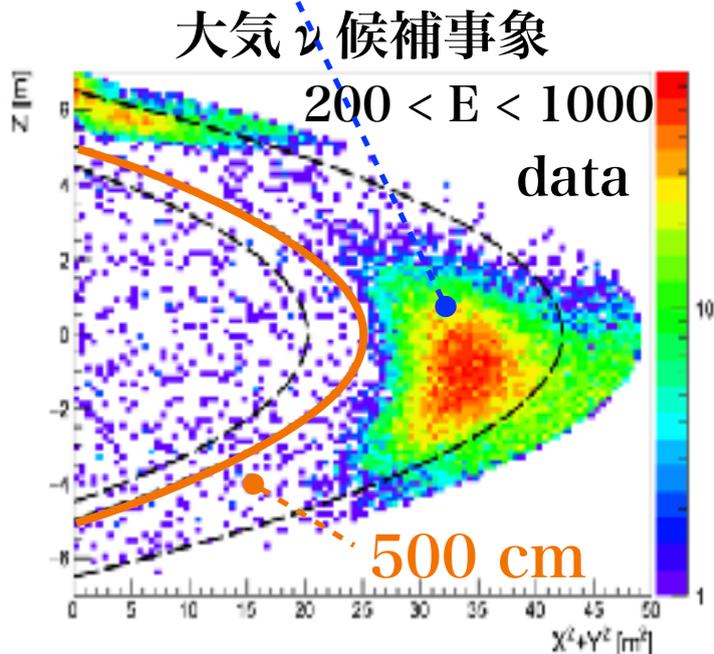
選定条件 (実データ解析と同条件)

- $50 < E < 1000 \text{ MeV}$
- $R < 500 \text{ cm}$
- OD PMT cut

高速中性子や宇宙線 μ の低減が目的

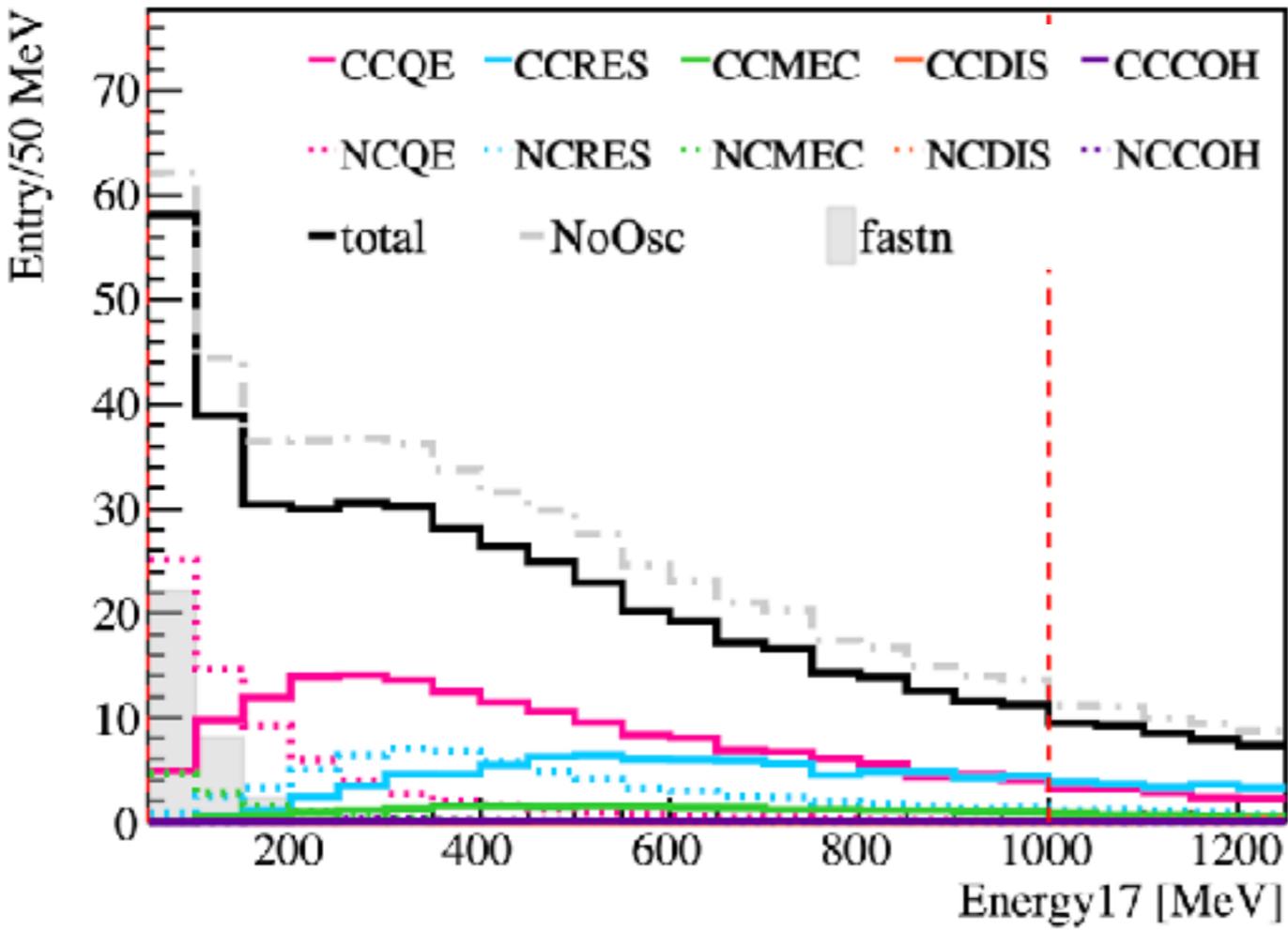


高速中性子や死角からの宇宙線 μ が多い



adopted from S.Abe's PhD. thesis

エネルギー分布 (MC)

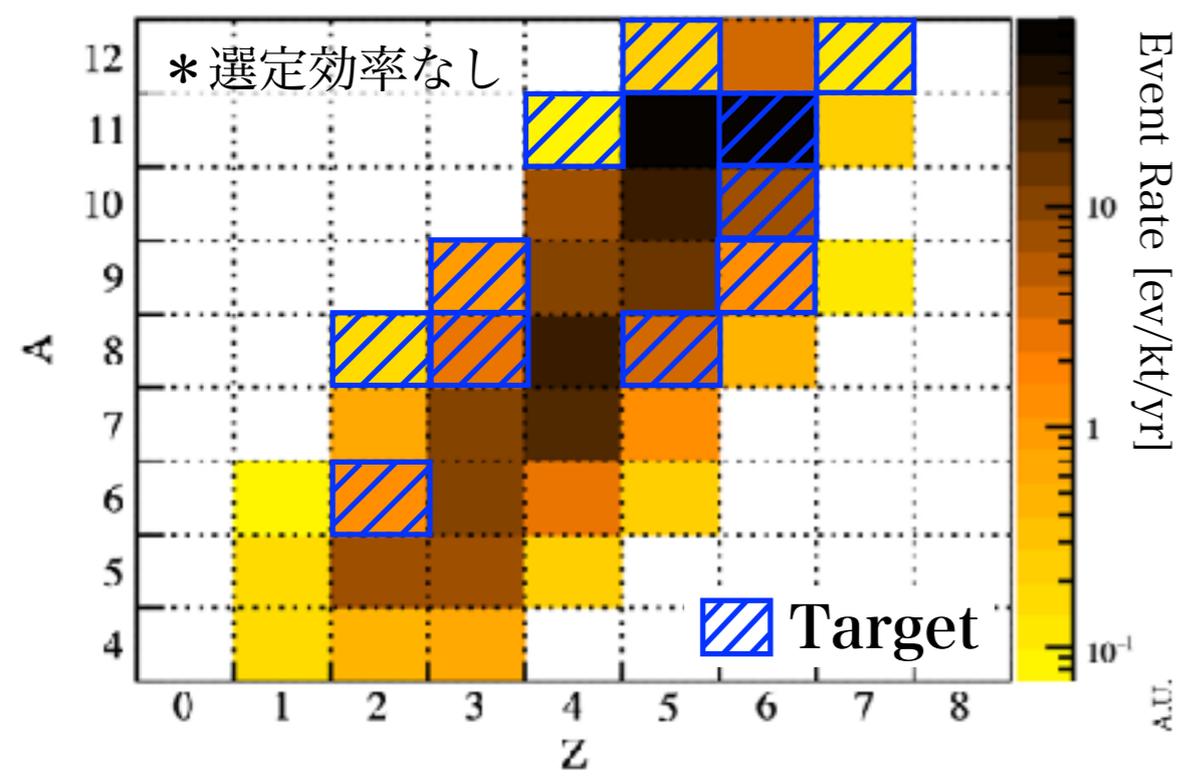


Expected : 458 events (BG : 34)

Exposure : 4.6 [kt \cdot yr] (2003 - 2018)

- ▶ 背景事象として高速中性子を考慮
 - ODPMT・半径カットでは除ききれないため
- ▶ QE, RESがメインの寄与
 - QE : 52.0% (CC : 36.5%, NC : 15.5%)
 - RES : 32.3% (CC : 17.9%, NC : 14.4%)
 - MEC : 7.4% (CC : 4.8%, NC : 2.6%)
 - Others (fast-n+COH+DIS) : 8.3%

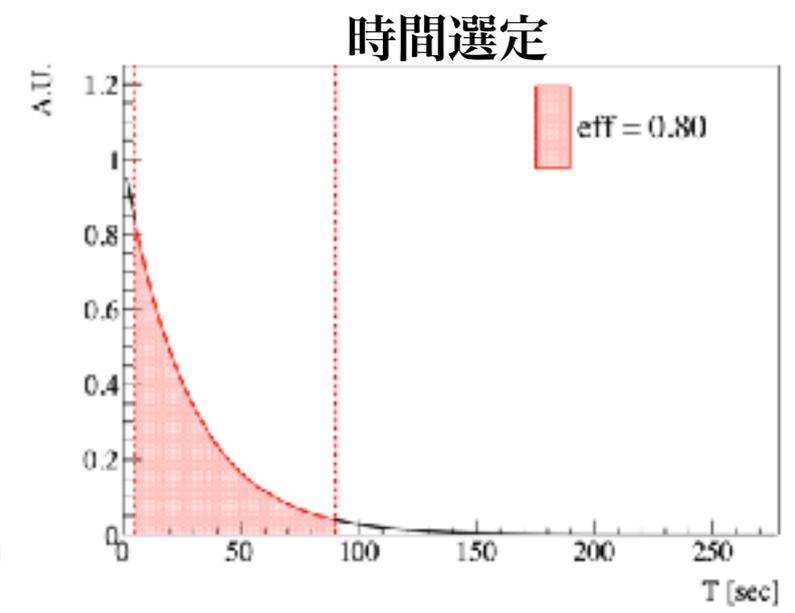
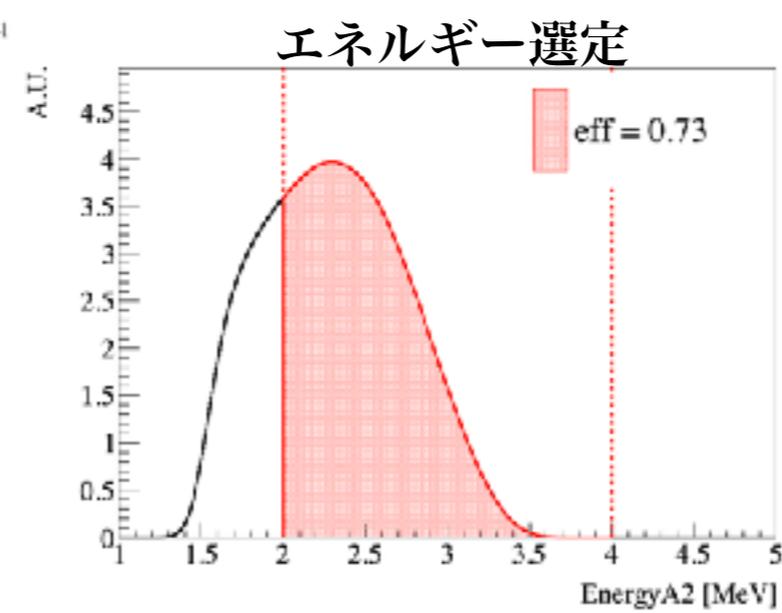
大気ニュートリノMCに伴う残留核の分布



選定条件 (例: 10C) (BGに推定に使用)

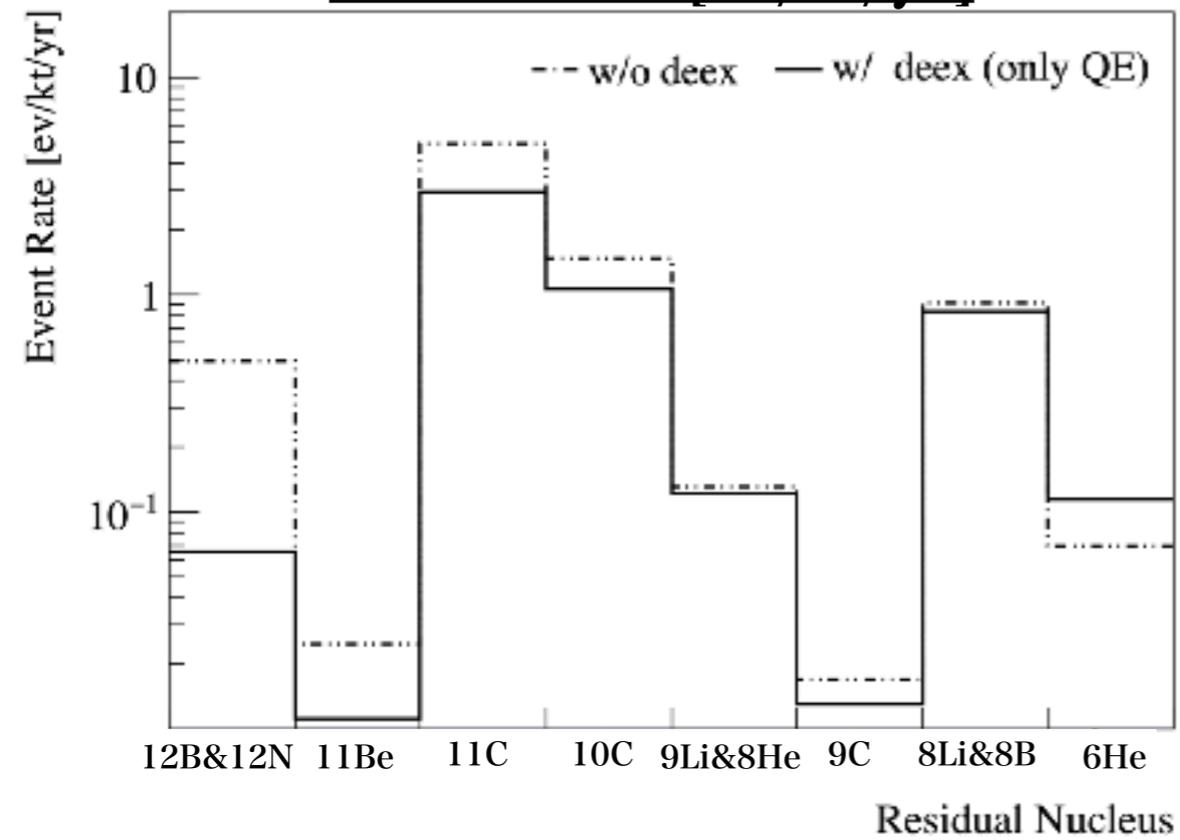
- $2 < E < 4 \text{ MeV}$ (環境 γ 線を考慮)
- $R < 450 \text{ cm}$ (オフタイム)
- $5 < dT < 90 \text{ [sec]}$ ($5 < dT < 105 \text{ [min]}$)
- $dR < 150 \text{ [cm]}$ (選定効率100%を仮定)
- no muon 2ms before

- 12B & 12N
- 11Be
- 11C
- 10C
- 9C
- 9Li & 8He
- 8Li & 8B
- 6He



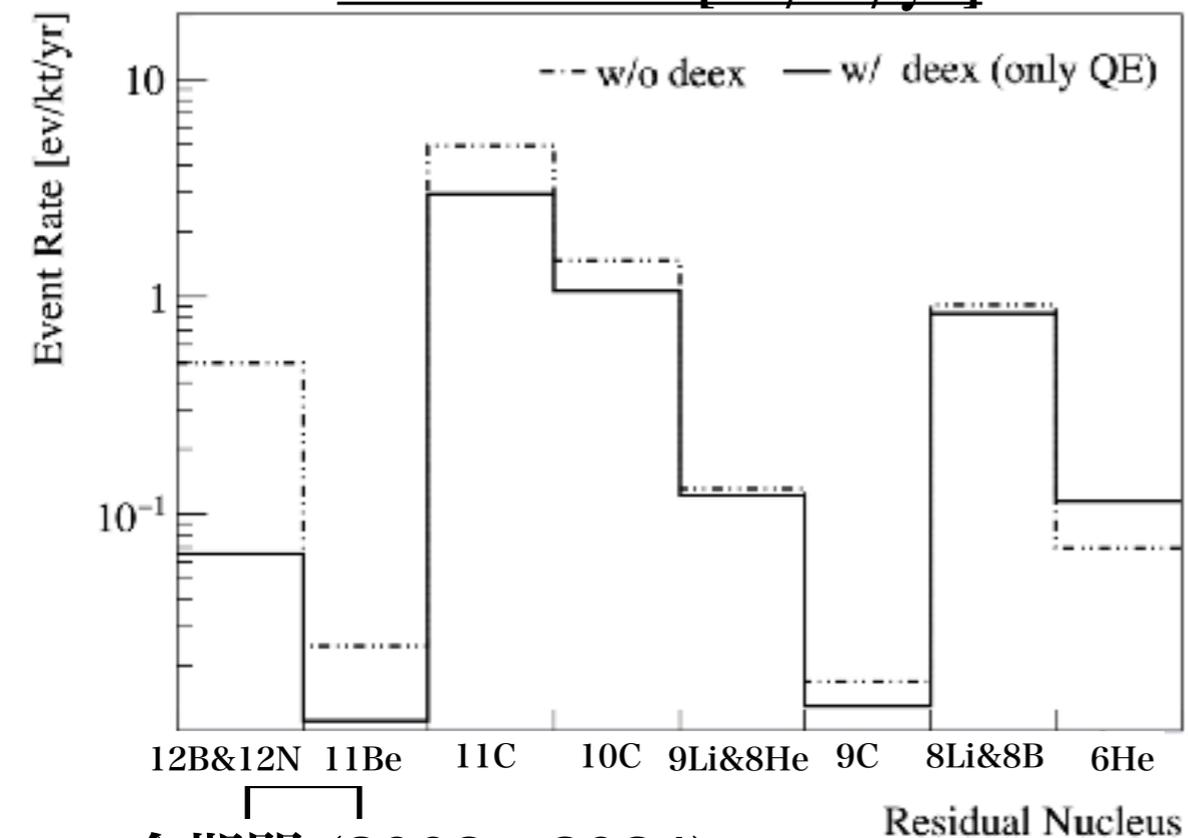
- ▶ 事象選定で残った大気 ν 事象の終状態の核種分布を抽出
- ▶ β 崩壊の選定ウィンドウによる選定効率 \cdot exposure [kt \cdot yr]を考慮してevent rateを計算
- ▶ KamLAND全期間のexposureでスケールして全期間における事象数の予測を行う
- ▶ accidental BGを実データのオフタイムウィンドウを用いて推定

Event Rate [ev/kt/yr]



- ▶ 脱励起による軽核 ($A \leq 8$) への再分配が顕著
 - RESやMECの脱励起効果を含めると軽核の出現数が増加する可能性がある

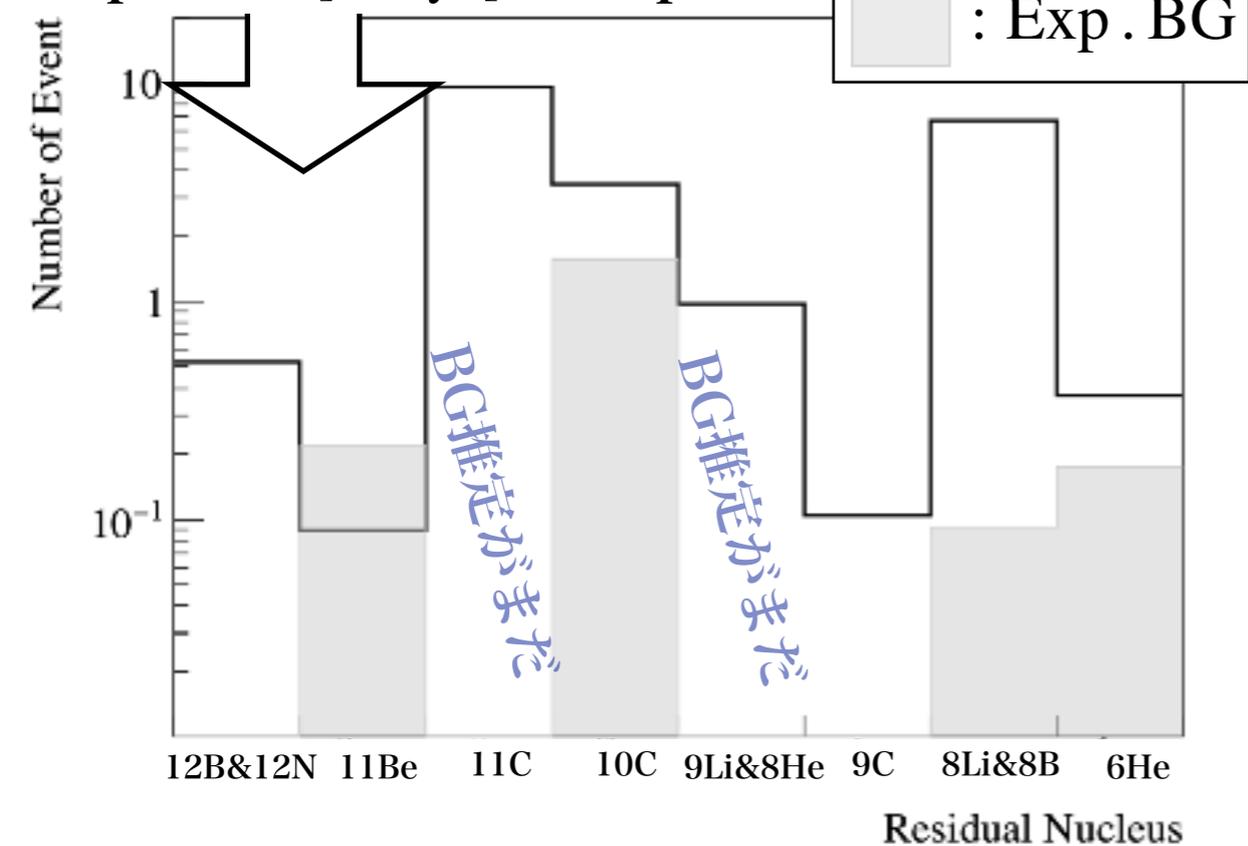
Event Rate [ev/kt/yr]



- ▶ 脱励起による軽核 ($A \leq 8$) への再分配が顕著
 - RESやMECの脱励起効果を含めると軽核の出現数が増加する可能性がある
- ▶ 11C, 9Li+8HeはBG推定がまだのためMCの値のみ
- ▶ KamLAND全データ期間においては合計十数事象程度が期待される
 - 信号優勢の核種に着目して現状の ν 反応モデルに対する検証は可能
 - MCのモデル依存も含めた変化量を見積もることが今後の課題

全期間 (2003 - 2024)

exposure [kt·yr] & Exp.BG



	Exposure	#ev (MC)	Exp. BG
12B+12N	8.0	0.52	$(1.6 \pm 0.2)E-03$
11Be	8.0	0.09	0.22 ± 0.04
11C	3.3	9.60	-
10C	3.3	3.45	1.56 ± 0.15
9Li+8He	8.0	0.97	-
9C	8.0	0.10	$(2.0 \pm 1.2)E-04$
8Li+8B	8.0	6.71	0.09 ± 0.01
6He	3.3	0.37	0.17 ± 0.01

□ : S/N比が大きい核種

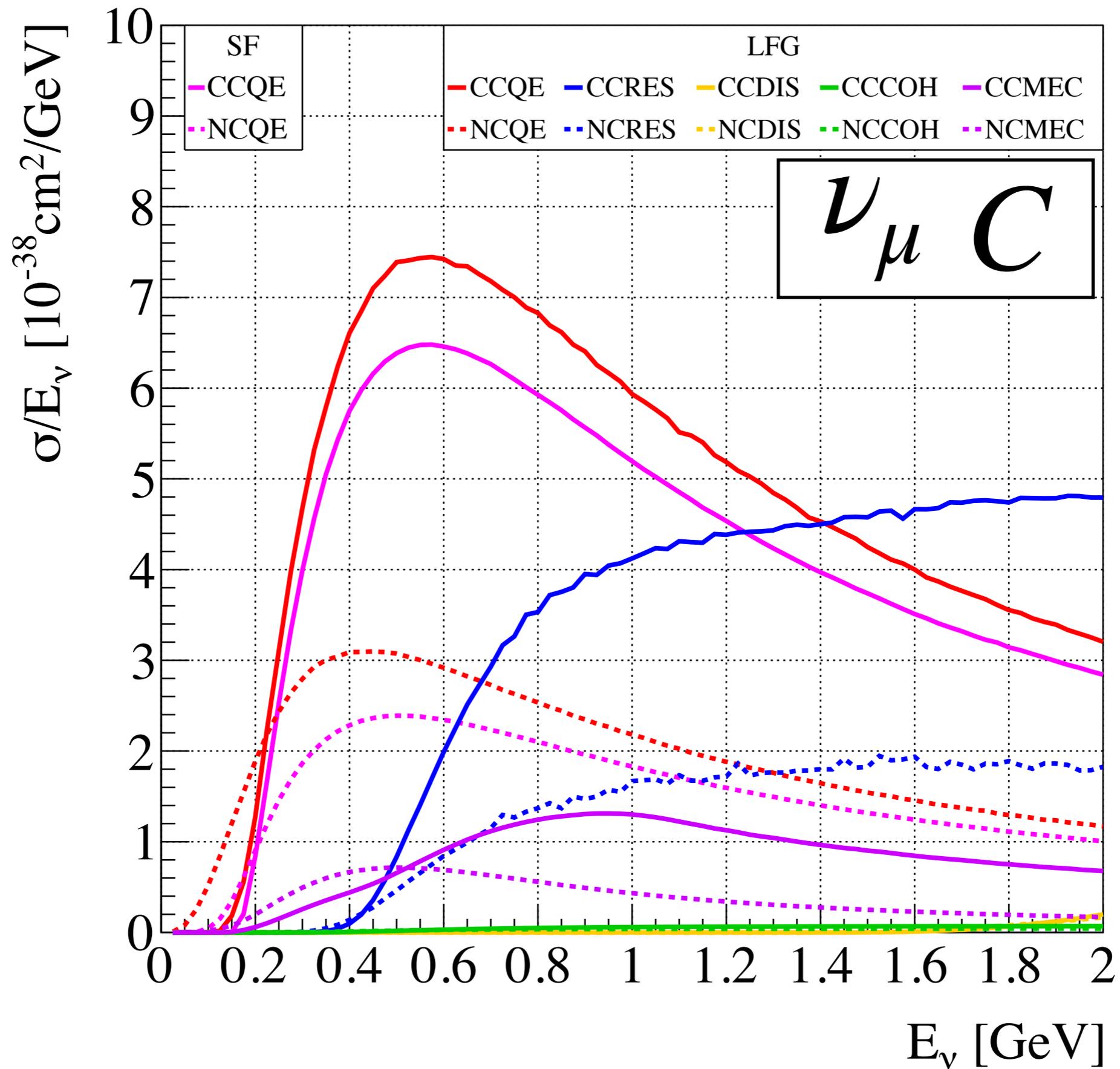
まとめ

- ▶ 残留原子核分布はニュートリノ反応における核内応答に感度を持つ新しいパラメータとなる可能性を持つ
 - sub-GeVスケールの反応に対する実験的な検証が不十分という状況
- ▶ 観測には低宇宙線ミュオンレートと低エネルギー事象への高い再構成事象精度が重要
- ▶ KamLANDの全期間で大気ニュートリノ由来の残留原子核がどのスケールで観測できるかをMCを用いて評価
- ▶ 合計十数事象程度の観測が期待 (NuWro + NucDeEx)
 - S/N比が大きい核種に着目してモデル評価

今後の展望

- ▶ ニュートリノ反応や脱励起反応のモデル依存による残留核分布への変化を確認
 - NEUT, GENIE : ν MC G4PreCompound : 脱励起MC
- ▶ ニュートリノに相関を持った信号（原子核との荷電交換反応）による残留核分布への変化スケールを評価
- ▶ 宇宙線 μ の核破碎反応を用いて β 崩壊反応の信号モデルを構築
 - 大気ニュートリノ事象後の候補信号に対して最尤法で信号らしさを評価

Back Up



	時間相関	空間相関 [cm]	エネルギー [MeV]	再構成位置 [cm]
12B & 12N	$2 < dT \text{ [ms]} < 200$	$dR < 150$	$5 < E < 20$	$R < 600$
11Be	$8 < dT \text{ [s]} < 60$	$dR < 150$	$5 < E < 16$	$R < 600$
11C	-	-	-	-
10C	$5 < dT \text{ [s]} < 90$	$dR < 150$	$2 < E < 4$	$R < 450$
9Li & 8He	-	-	-	-
9C	$200 < dT \text{ [ms]} < 600$	$dR < 150$	$10 < E < 25$	$R < 600$
8Li & 8B	$0.6 < dT \text{ [s]} < 10$	$dR < 150$	$4 < E < 20$	$R < 600$
6He	$0.002 < dT \text{ [s]} < 4.5$	$dR < 150$	$2 < E < 4$	$R < 450$