

機械学習を用いた スーパーカミオカンデ大気ニュートリノ 事象選別手法の研究

東京理科大学 松本 遼

目次

- 研究背景
 - ニュートリノ
 - スーパーカミオカンデ
 - 大気ニュートリノとニュートリノ振動
- 目的
- 手法
 - Deep Neural Network
 - 入力する変数
 - 手法の詳細
- 結果
- まとめと展望

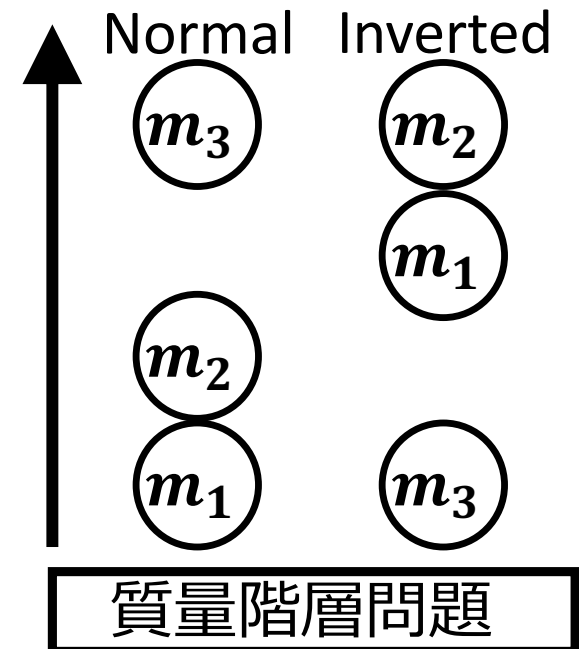
研究背景 - ニュートリノ

- 弱い相互作用により相互作用する電荷ゼロの素粒子。
- 3世代 ν_e, ν_μ, ν_τ 存在することが確認されている。
- 3つの質量状態 ν_1, ν_2, ν_3 が存在し、3世代が混ざり合っている。

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix} \quad (U \text{ is a unitary matrix})$$

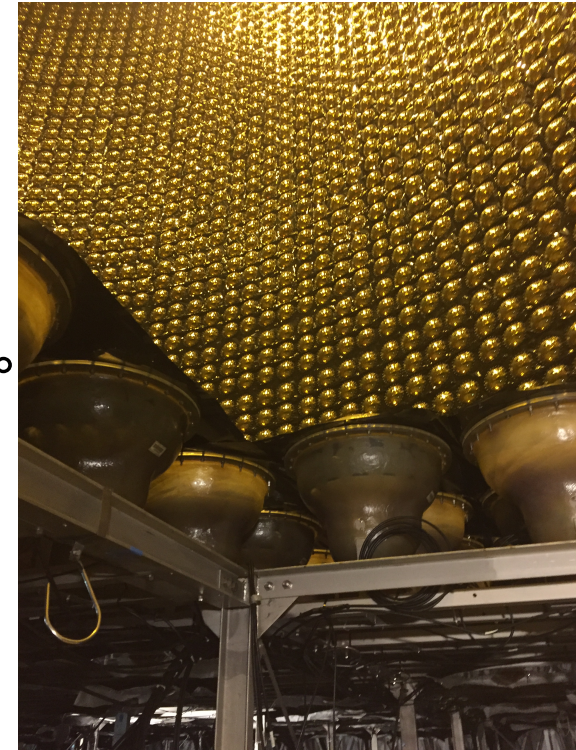
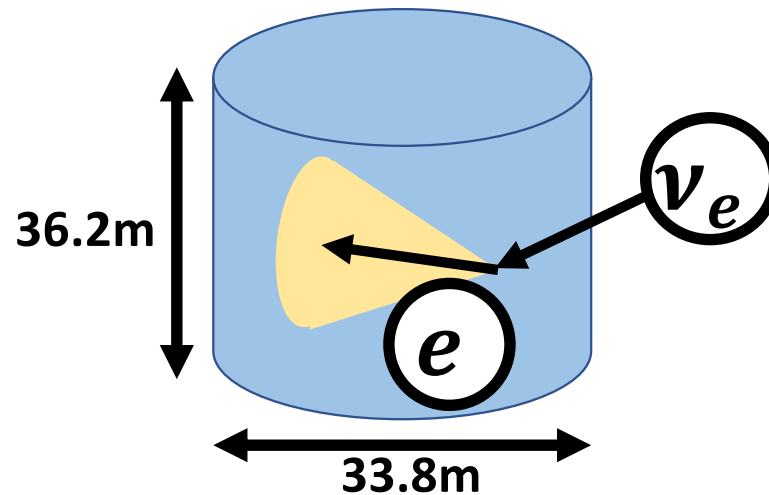
⇒ ニュートリノ振動

- 質量の大きさの順序はまだ決定されていない(階層問題)。

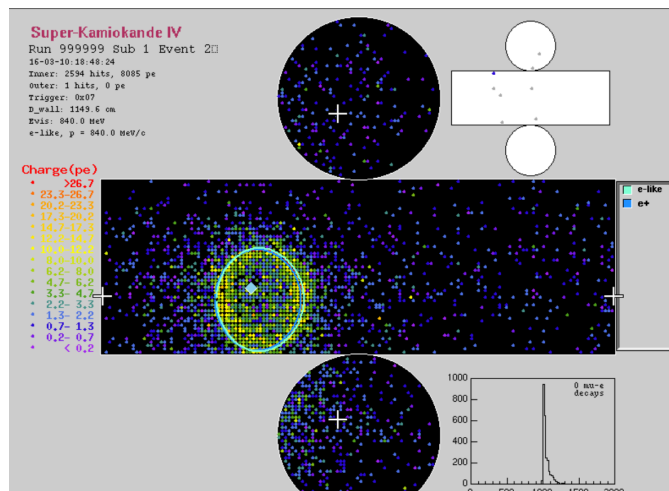


研究背景 -スーパーカミオカンデ

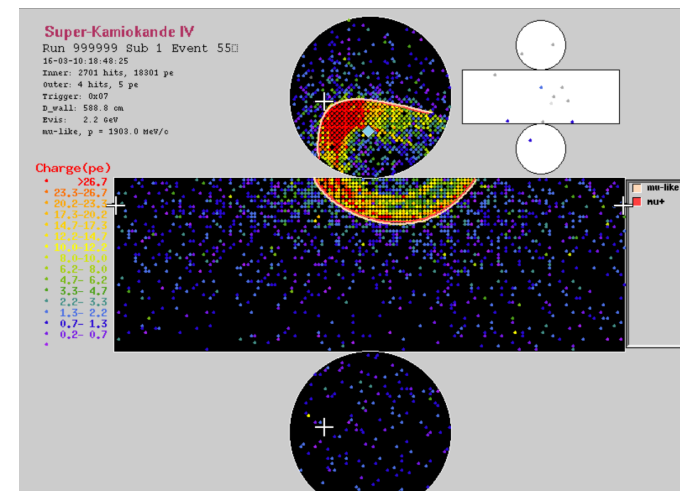
- スーパーカミオカンデは、巨大水チェレンコフ検出器である。
- ニュートリノがタンク内の原子核と衝突することで、荷電レプトン(e, μ, τ)に変化し、チェレンコフ光を放出する。
- 壁には光電子増倍管が取り付けられており、これによってチェレンコフ光を検出する。



研究背景 –スーパーカミオカンデ



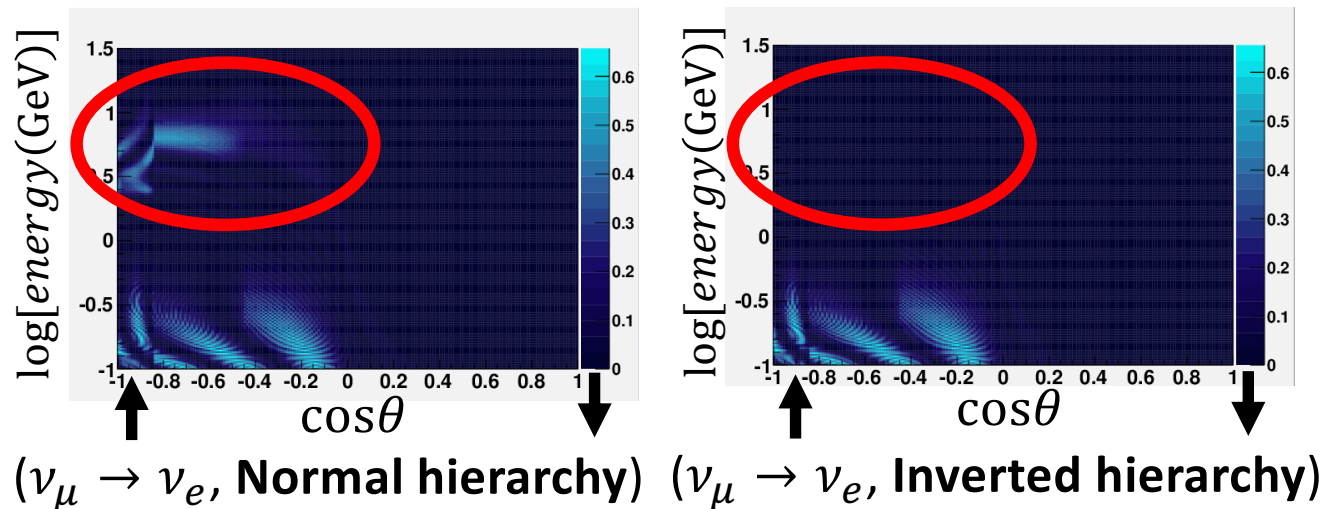
e -like



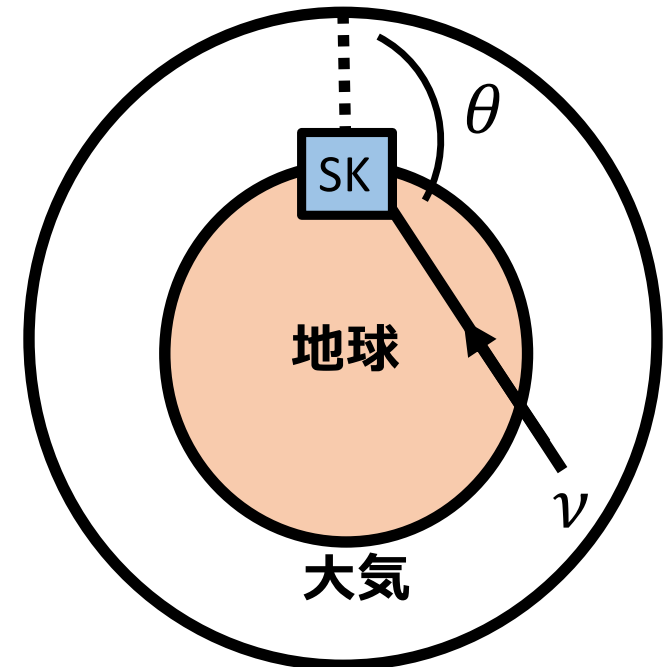
μ -like

- μ は e よりも質量が大きく、チェレンコフリングの輪郭が明瞭に見える。
- e は電磁シャワーを起こすため、リングがぼやけて見える。

研究背景 - 大気ニュートリノとニュートリノ振動

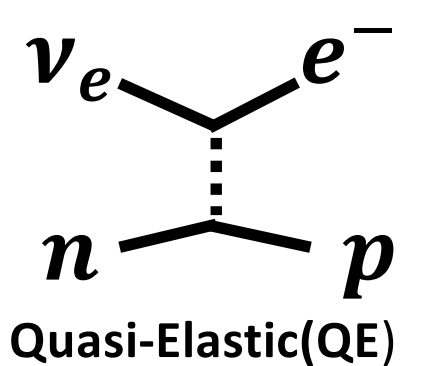


ニュートリノ振動確率

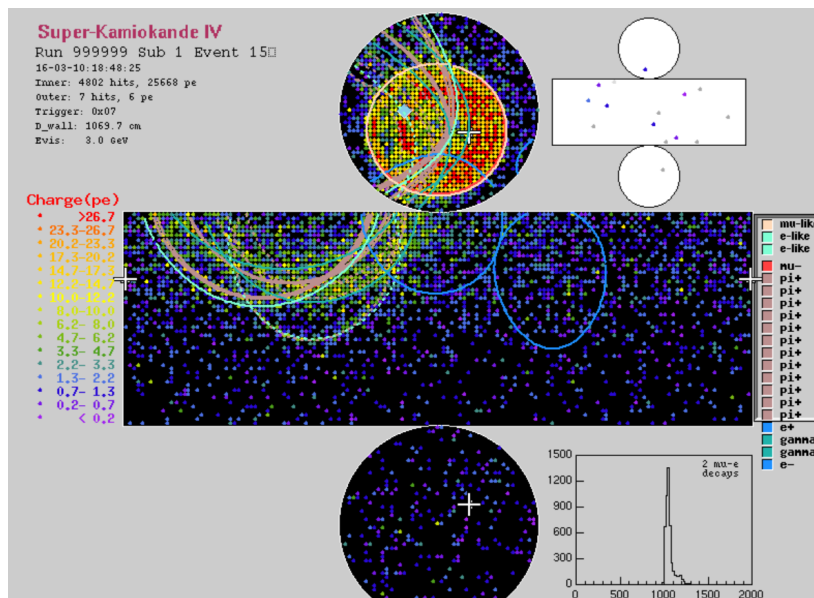
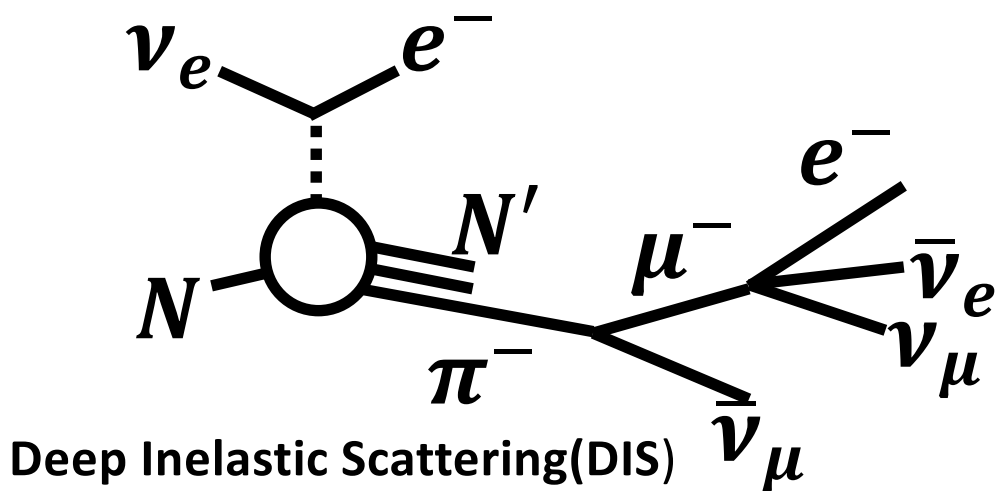


- 宇宙線が大気と衝突し、ハドロンが生成され、それが崩壊し大気ニュートリノが生成される。
- ニュートリノは長距離走行すると、確率的にフレーバーが変化する(ニュートリノ振動)。
- 高エネルギー領域において、大気ニュートリノの振動確率に**質量階層性の違い**が現れる。

研究背景 – 高エネルギー領域でのニュートリノ反応



- 高エネルギー領域でのニュートリノ反応はDISが主要なものとなる。
- DISではハドロンなどによるチェレンコフリングが複数観測される。
- 粒子の崩壊により発生する電子をdecay electronと呼ぶ。



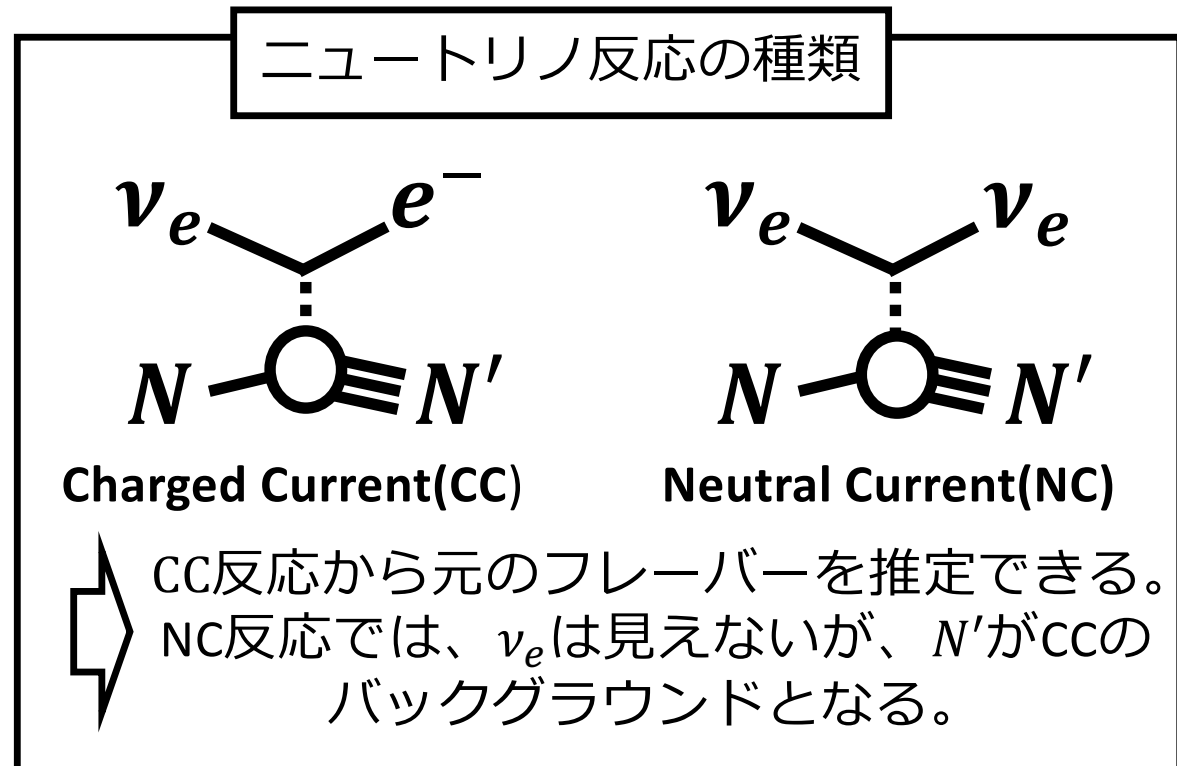
目的

現在、高エネルギー・複数リングのイベントは

- CC ν_e
- CC $\bar{\nu}_e$
- CC ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$
- NC

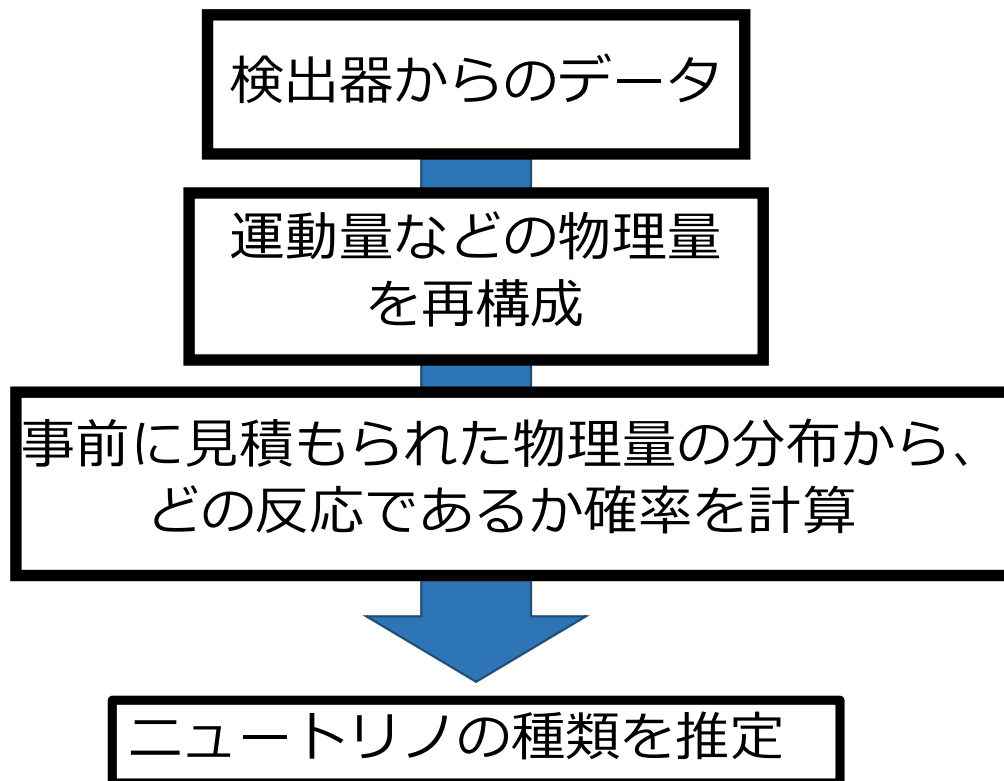
の4つに分類されている。

この分類の精度を向上させることが今回の研究の目的である。

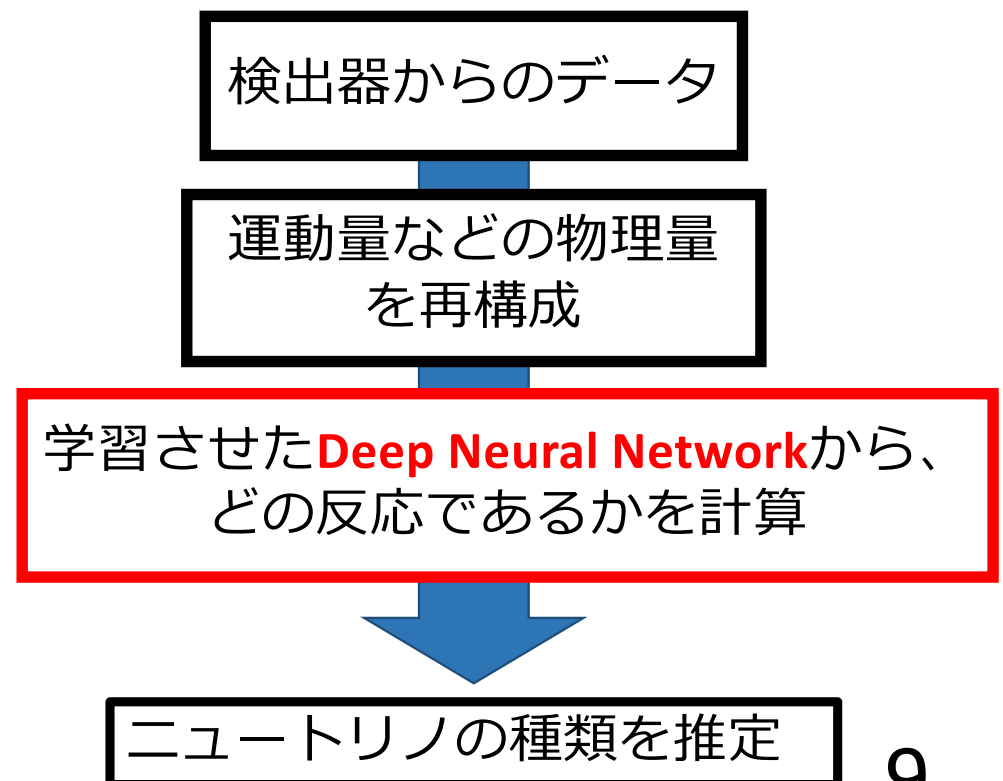


手法 - 推定までの流れ

(SK)

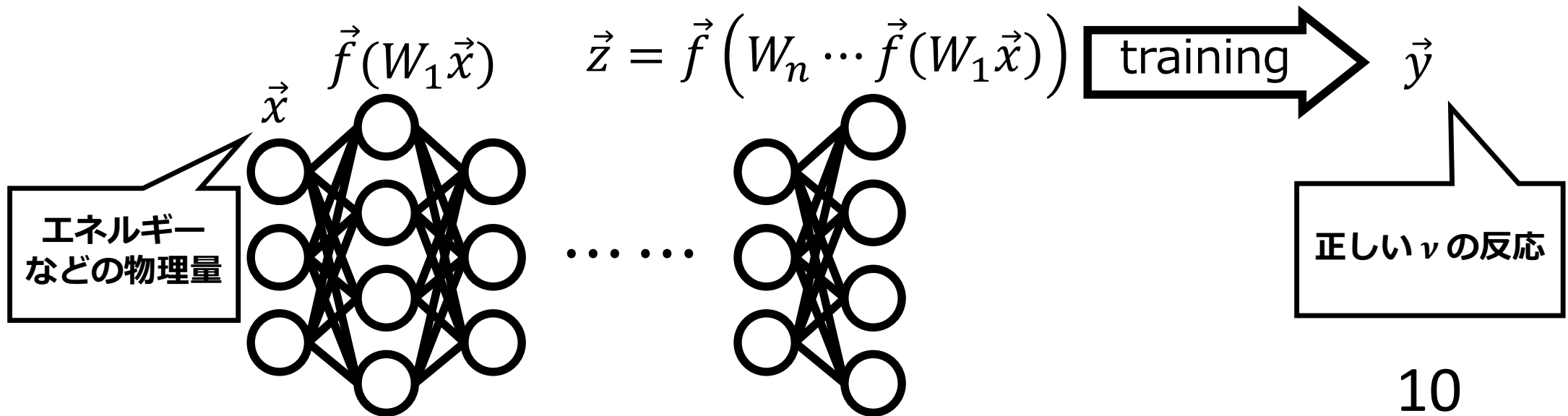


(new)



手法 – Deep Neural Network(DNN)による反応の推定

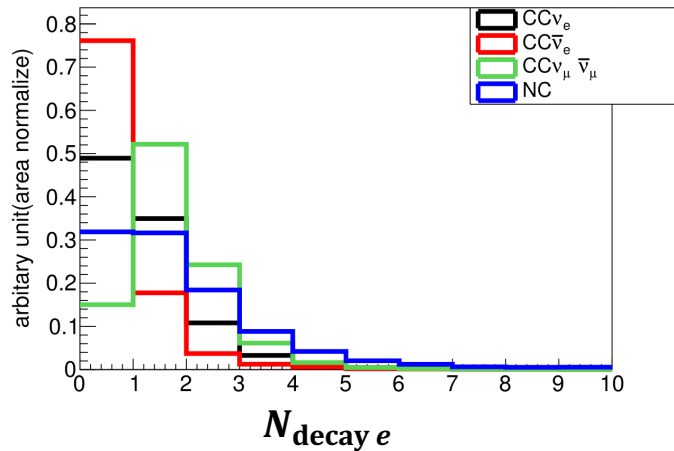
- 入力データ \vec{x} に行列 W をかけ、非線形関数 f を作用させて、を繰り返して層の深い非線形関数 \vec{z} を作成。
- それと正解ラベル \vec{y} との間の差が最小になるような W を計算する。



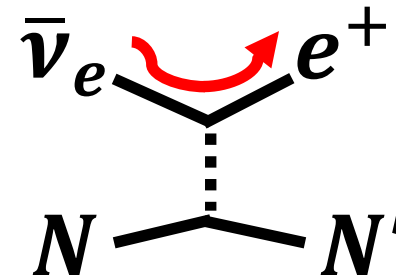
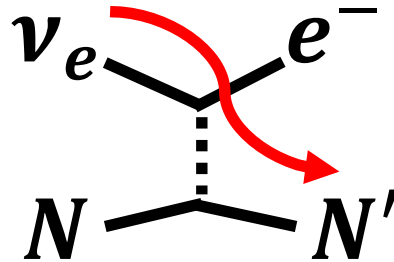
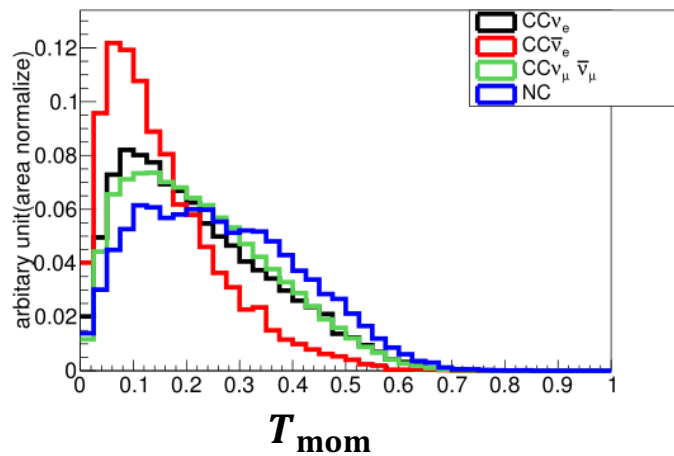
手法 - 入力する変数について

Name	Definition
N_{ring}	リングの数
E_{vis}	PMTの全ての電荷から見積もられたエネルギー
T_{mom}	横向き運動量の和
F_{mom}	最もエネルギーの高いリングの運動量 / E_{vis}
$N_{\text{decay } e}$	decay electron(粒子崩壊に伴い発生する電子)の数
$L_{\text{decay } e}$	decay electronの発生点と、イベントの発生点との間の距離
PID	リングを作った粒子が e と μ のどちらに近いかを表した値

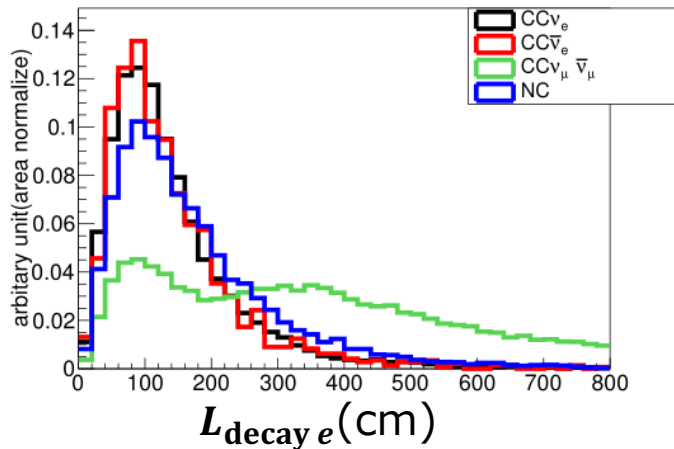
手法 - 入力する変数について



- $\bar{\nu}_e$ は ν_e よりも反応時の運動量移行が小さく、ハドロン
のエネルギーは相対的に減少し、decay electron
の数も減少する。
- また、そのため $\bar{\nu}_e$ の横向き運動量も比較的小さい。



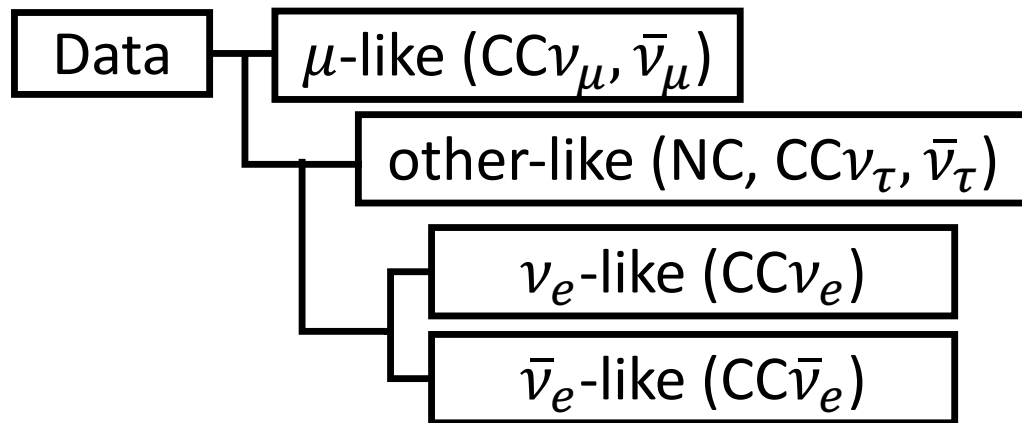
手法 - 入力する変数について



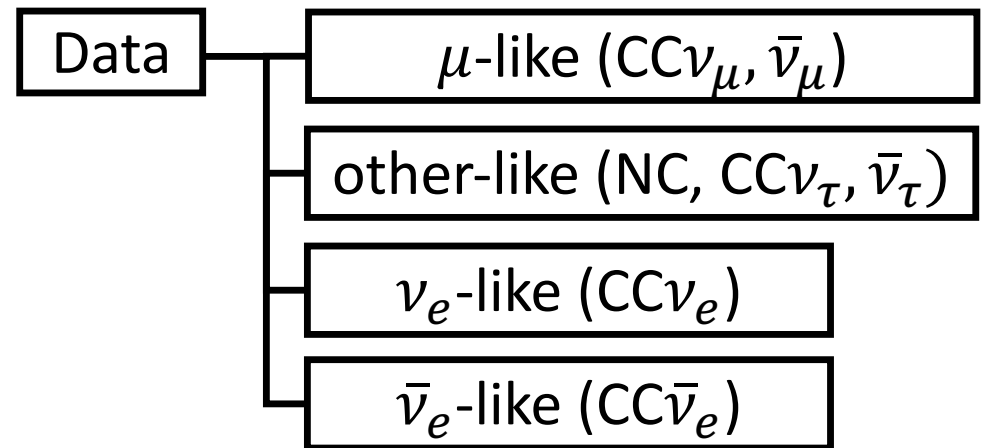
- **CC ν_μ** は ν_μ のCC反応により生成される運動量の大きい μ が飛行後にdecay electronに崩壊するため、大きな $L_{\text{decay } e}$ をもつ。
- 小さな $L_{\text{decay } e}$ はハドロンの崩壊により生成される μ による decay electron によるものである。

手法 – 推定の詳細

(SK)



(new)



- Trainingデータとして300年分のシミュレーションを用いる。
- SKの解析と同じ変数を用いて分類を行う。
- 性能は、100年分のシミュレーションを用いて以下の量により評価する。

efficiency = イベントを正しく選別できた割合

contamination = 選別されたイベント中の不正解の割合

結果 – 分類の詳細

Current SK method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	3322	632	1366	1227	1341
$\bar{\nu}_e$ -like	3324	1685	435	951	806
μ -like	443	79	22246	865	363
Others	2846	302	4667	3171	2898

New method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	4298	640	1837	2076	1267
$\bar{\nu}_e$ -like	3702	1847	733	958	794
μ -like	465	35	23936	1003	601
Others	1470	176	2208	2177	2746

結果 – 分類の詳細

Current SK method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	3322	632	1366	1227	1341
$\bar{\nu}_e$ -like	3324	1685	435	951	806
μ -like	443	79	22246	865	363
Others	2846	302	4667	3171	2898

New method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	4298	640	1837	2076	1267
$\bar{\nu}_e$ -like	3702	1847	733	958	794
μ -like	465	35	23936	1003	601
Others	1470	176	2208	2177	2746

ν_e efficiency = $\frac{\text{red box}}{\text{blue box}} = 33.4\%(\text{SK}), 43.3\%(\text{new})$
 $CC\nu_e$ が others に分類される数が減少している。

結果 – 分類の詳細

Current SK method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	3322	632	1366	1227	1341
$\bar{\nu}_e$ -like	3324	1685	435	951	806
μ -like	443	79	22246	865	363
Others	2846	302	4667	3171	2898

New method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	4298	640	1837	2076	1267
$\bar{\nu}_e$ -like	3702	1847	733	958	794
μ -like	465	35	23936	1003	601
Others	1470	176	2208	2177	2746

ν_e contamination = 632 / 3322 = 57.9%(SK), 57.5%(new)

NC が ν_e -like に分類される数が増加しているが、 ν_e が ν_e -like に分類される数も増加しているため、contaminationは同程度となっている。

結果 – 分類の詳細

Current SK method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	3322	632	1366	1227	1341
$\bar{\nu}_e$ -like	3324	1685	435	951	806
μ -like	443	79	22246	865	363
Others	2846	302	4667	3171	2898

New method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	4298	640	1837	2076	1267
$\bar{\nu}_e$ -like	3702	1847	733	958	794
μ -like	465	35	23936	1003	601
Others	1470	176	2208	2177	2746

e -like efficiency = $\frac{\text{red box}}{\text{blue box}} = 70.9\%(\text{SK}), 83.0\%(\text{new})$

結果 – 分類の詳細

Current SK method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	3322	632	1366	1227	1341
$\bar{\nu}_e$ -like	3324	1685	435	951	806
μ -like	443	79	22246	865	363
Others	2846	302	4667	3171	2898

New method

	$CC\nu_e$	$CC\bar{\nu}_e$	$CC\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	NC	$CC\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$
ν_e -like	4298	640	1837	2076	1267
$\bar{\nu}_e$ -like	3702	1847	733	958	794
μ -like	465	35	23936	1003	601
Others	1470	176	2208	2177	2746

ν_e contamination = 632 / 1573 = 40.6%(SK), 42.2(%)

結果 – efficiency と contamination

Current SK method

	Efficiency(%)	Contamination(%)
ν_e -like	33.4	57.9
$\bar{\nu}_e$ -like	62.5	76.6
μ -like	77.5	7.3
Others	51.0	77.2
e -like	70.9	40.6

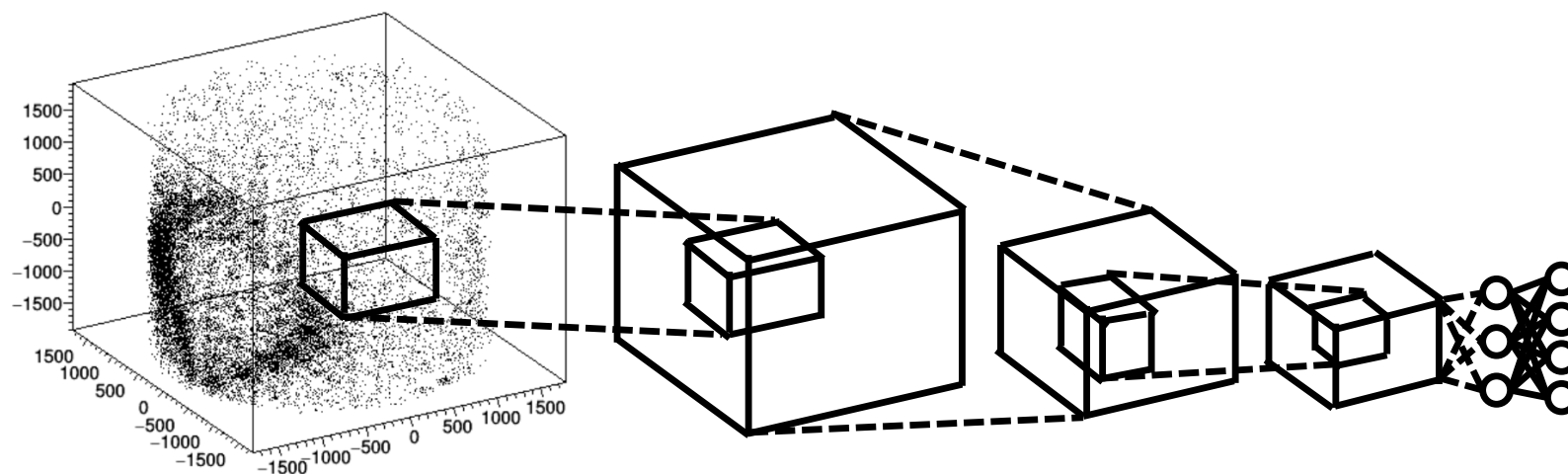
New method

	Efficiency(%)	Contamination(%)
ν_e -like	43.3	57.5
$\bar{\nu}_e$ -like	68.5	77.0
μ -like	83.4	8.1
Others	35.0	75.2
e -like	83.0	42.2

- 特に e -likeや μ -likeにおいてefficiencyの増加がみられる。

PMTヒット分布からの事象再構成

- Convolutional Neural Network (CNN)を用いてPMTのヒット画像から反応を識別する方法も現在計算中。



まとめ

- ニュートリノに質量が存在することはニュートリノ振動の観測により発見されたが、その質量の順序についてはまだ明らかになっていない。
- 質量階層問題解決のため、大気ニュートリノの高エネルギー多リング事象の測定が重要である。
- Deep neural network を用いたニュートリノ反応の識別を行った。

展望

- モンテカルロシミュレーションとデータを比較し、系統不確かさを見積もる。

preliminary

backup

23