

機械学習を用いた重力崩壊型超新星爆発の方向決定

横浜国立大学 B4 堀口 大輔

背景・目的

重力崩壊型超新星爆発

- ・ 太陽の8倍以上の質量を持つ恒星が起こす超新星爆発
- ・ 短時間に莫大な数のニュートリノを放出
- ・ 超新星ニュートリノはSKの水タンク内の物質と相互作用

表1. 超新星ニュートリノに起こる相互作用

ニュートリノと物質の反応	反応の割合
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ (逆ベータ崩壊)	90 %
$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ (電子散乱)	1.5 %
$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$ (電子散乱)	1 %
$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ (電子散乱)	1 %
その他	7 %

ニュートリノ反応について

- ・ 逆ベータ崩壊、その他で出る荷電粒子は方向感度を持たない
- ・ **電子散乱による電子は超新星爆発の方向と相関をもつ**



図1. 超新星ニュートリノによる電子散乱

目的

全イベントの約3%を占める電子散乱による電子を機械学習を使って検出し、超新星爆発の方向を特定する

試験データの作成

試験データ

- ・ 超新星ニュートリノ反応の観測により得られる分布
- ・ 全ベクトルの97% (紫) : 単位球面上に一様分布
→ 方向感度のないニュートリノ反応
- ・ 3% (黄) : 単位球面上に指定された超新星爆発の方向に密集
→ 超新星爆発の方向を示す電子散乱

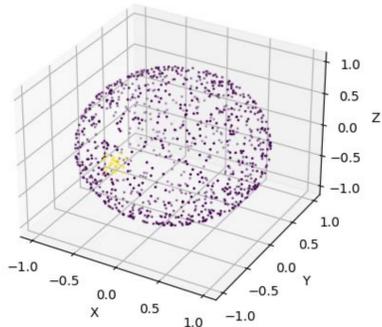
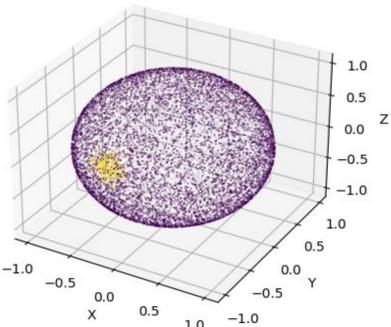


図2. 作成した分布 (ベクトル数: 10000) 図3. 作成した分布 (ベクトル数: 1000)

DBSCAN

DBSCAN

- ・ 学習データをグループに分類する機械学習
- ・ 高密度領域の抽出が得意 → **本研究にマッチ**
- ・ 二つのパラメータが存在 (eps, min_samples)

DBSCANのアルゴリズム

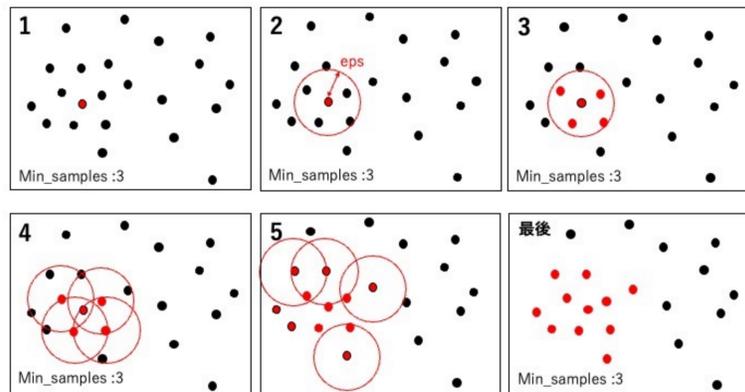


図4. DBSCANのアルゴリズム

方法

2つの学習パターンとDBSCANが扱う距離

- ① 三次元座標 (x, y, z) をもつデータ
扱う距離 → ユークリッド距離
- ② ①を二次元座標 $(\cos \theta, \phi)$ に変えたデータ
扱う距離 → 大円距離

$$\Delta \sigma = \arccos(\sin \phi_1 \sin \phi_2 + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \Delta \lambda)$$

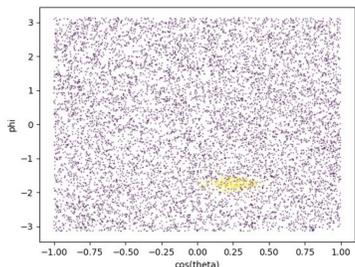


図5. 図2を二次元に変換した分布

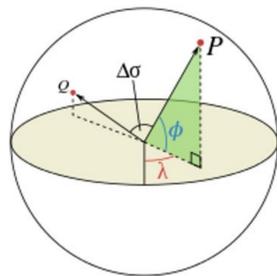


図6. 大円距離のイメージ図 [1]

超新星爆発の方向の再構成

1. データ①,②からDBSCANで電子散乱 (黄) を検出
2. 電子散乱と分類されたベクトルの平均位置を三次元上で計算
3. 平均ベクトルを正規化 → **再構成した超新星爆発の方向**

再構成した方向と実際の方向の比較法

コサイン類似度

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{\|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\|}$$

- ・ 値が1に近いほど二つのベクトル \mathbf{a}, \mathbf{b} は類似

データを10セット作り、①と②のそれぞれにDBSCANで再構成した方向と実際の方向のコサイン類似度を求め、平均を計算

結果

方向決定の精度と解析時間

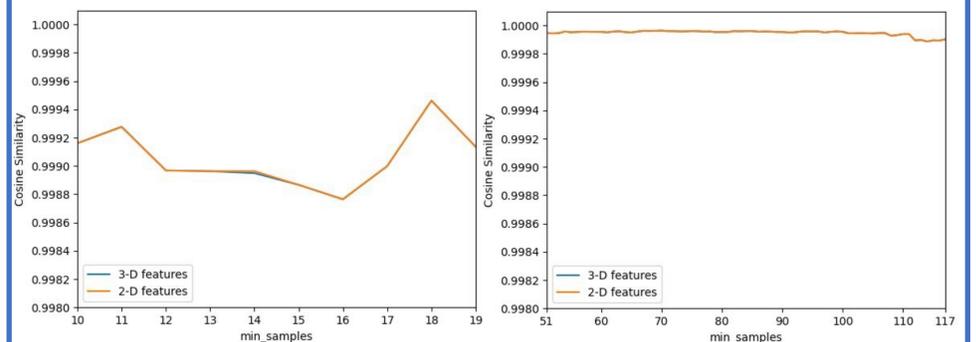


図7. 方向決定の精度(ベクトル数:1000) 図8. 方向決定の精度(ベクトル数:10000)

表2. 一つのデータに対する解析時間

ベクトル数	二次元データ	三次元データ
1000	80.7ms	3.1ms
10000	2.2s	54ms

- ・ eps = 0.1, min_samplesが上記の範囲で電子散乱が検出
- ・ **超新星爆発の方向を精度よく特定**
- ・ 二次元データの精度と三次元データの精度は完全に一致
- ・ 三次元データの方が解析時間は圧倒的に速い

まとめ・展望

- ・ DBSCANを使って超新星爆発の方向を正確に特定できた
- ・ データ内のベクトルの次元で処理速度が大きく変化
- ・ ベクトル数に対する適切なパラメータ設定を今後は行う

参考文献

[1] Wikipedia. "大円距離". <https://ja.wikipedia.org/wiki/大円距離>