



# 最高エネルギー宇宙線

## 目次

- 最高エネルギー宇宙線
- TA実験、TAx4実験
- TA実験史上最高エネルギー事象「アマテラス粒子」
- 深層学習ニューラルネットを用いた粒子種推定
- ニューラルネットとは？
- ニューラルネットの「学習」
- (実習) 学習させて「モデル」を作ってみよう



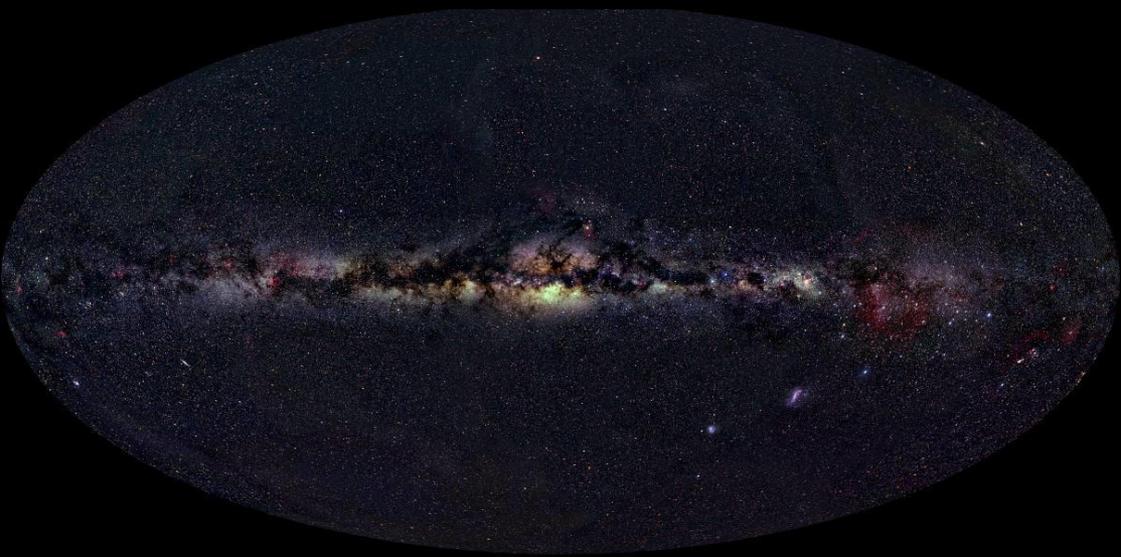
# 宇宙を見る

これは「目に見える光」 = 可視光で見た空  
1eVくらいの粒々（素粒子）の多い／少ない

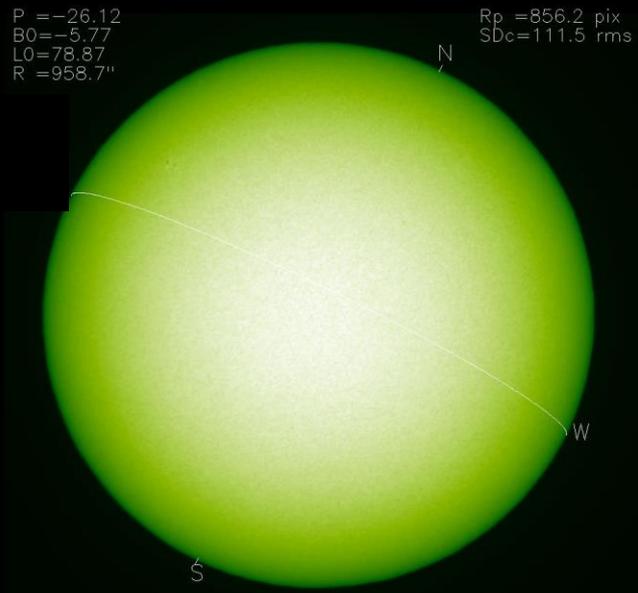


# 可視光 (1eVくらいの粒々) で宇宙を見ると

全天



太陽



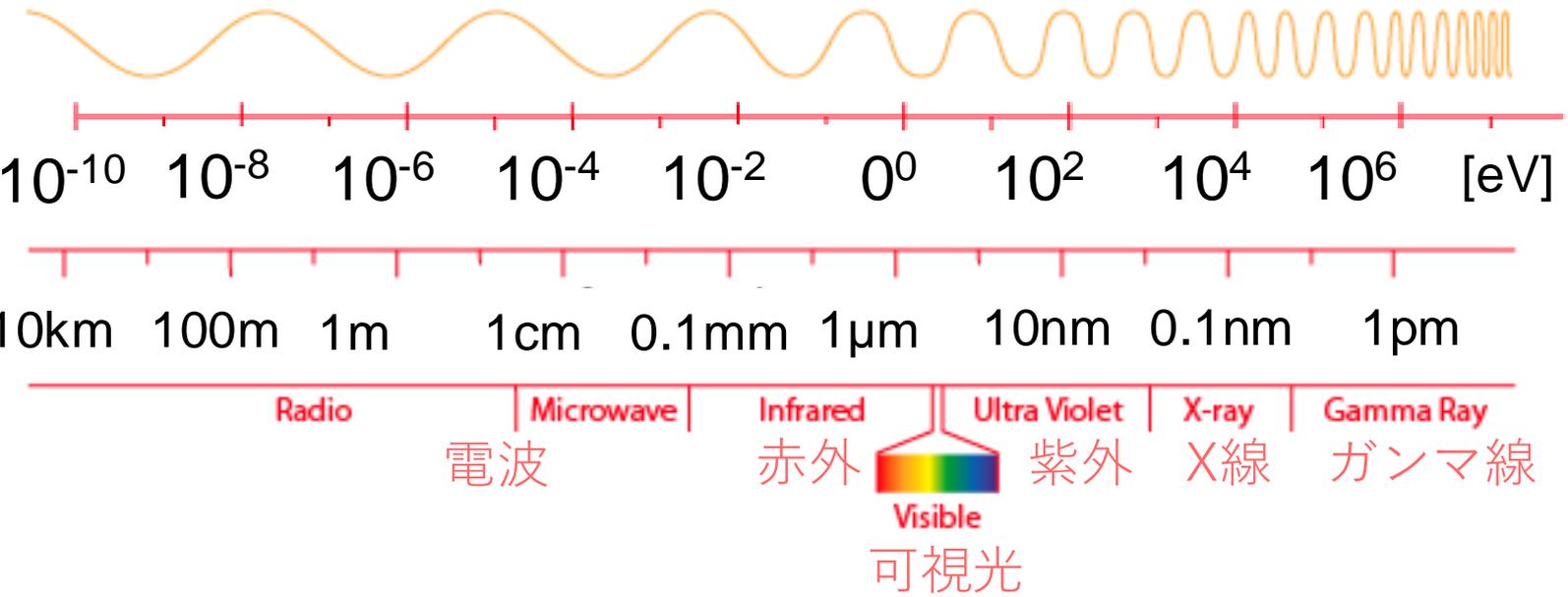
NAOJ, WL 13 Apr 2018, 05:58:27UT

© 2000, Axel Mellinger

M82



# 様々な波長 (エネルギー)



# 電波

NOBEYAMA RADIO HELIOGRAPH 17GHz (R+L)

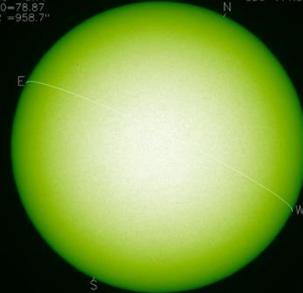


2012-09-19 02:44:35.672

# 可視光

P = -26.12°  
B0 = -5.77°  
L0 = 78.87°  
R = 956.7"

Rp = 856.2 pix  
Sbc = 111.5 rms

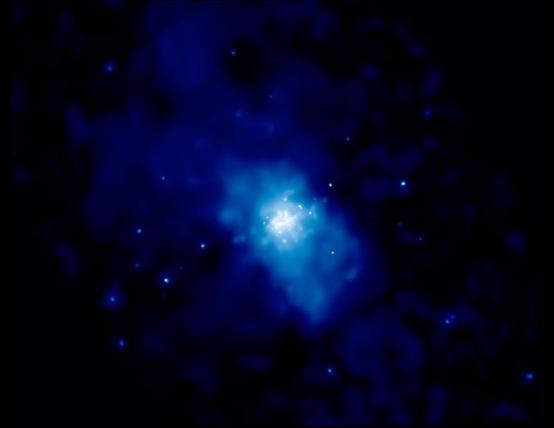
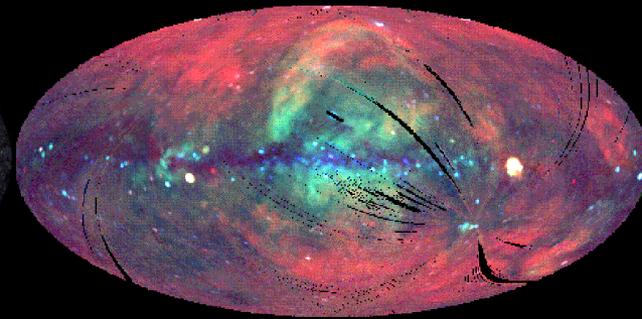
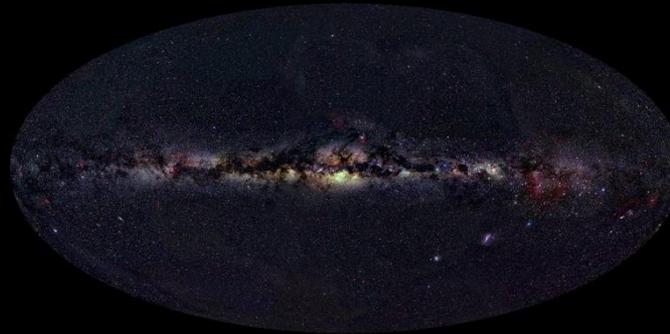
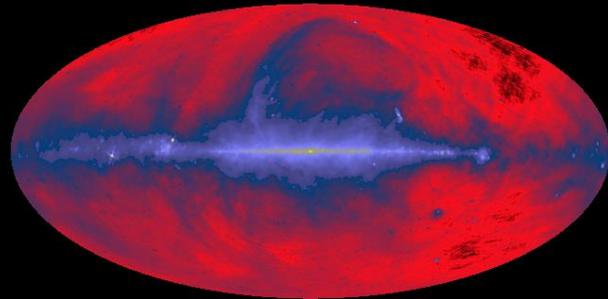


NAOJ, WL 13 Apr 2018, 05:58:27UT

# X線



Roost/ART E-jelly  
2012-03-16T02:10:13.439



# より高いエネルギーでは？

可視光

1eV

X線

$10^3\text{eV}=1\text{keV}$

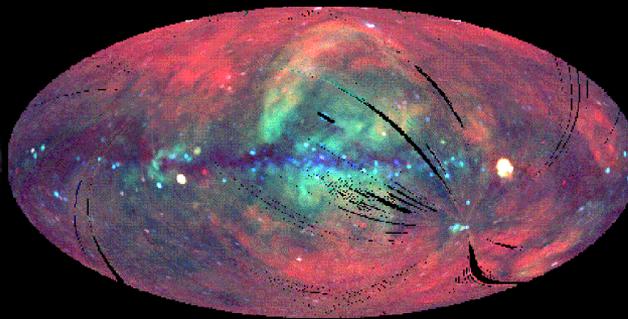
ガンマ線

$10^6\text{eV}=1\text{MeV}$

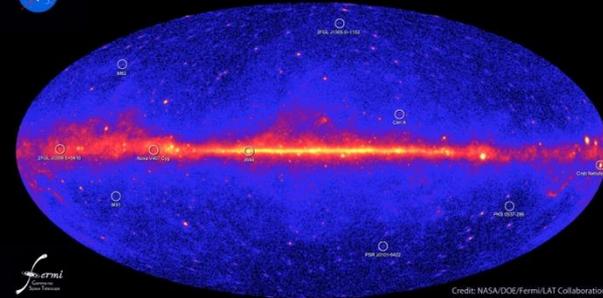
*The Deep Sky*



© 2000, Axel Mellinger



Fermi two-year all-sky map



Credit: NASA/DOE/Fermi/LAT Collaboration

# どれだけ高いエネルギーまで放射されているだろう？

# 最高エネルギー宇宙線

桁でいうと、 $10^{20}$  eVくらい  
=可視光より20桁（20倍ないよ！）大きい  
=100,000,000,000,000,000,000 eV  
=とんでもない高エネルギー粒子

到来頻度は、 $1\text{km}^2$ に100年（！）に1個  
←とても少ない！

「天文学」をやろうと思ったら  
せめて、1年に10個くらいは捕まえたい  
→ $1,000\text{km}^2$ 級の面積の「検出器」が必要

1,000km<sup>2</sup>ってどれくらい？

- ①東大柏キャンパス
- ②柏市
- ③霞ヶ浦
- ④琵琶湖

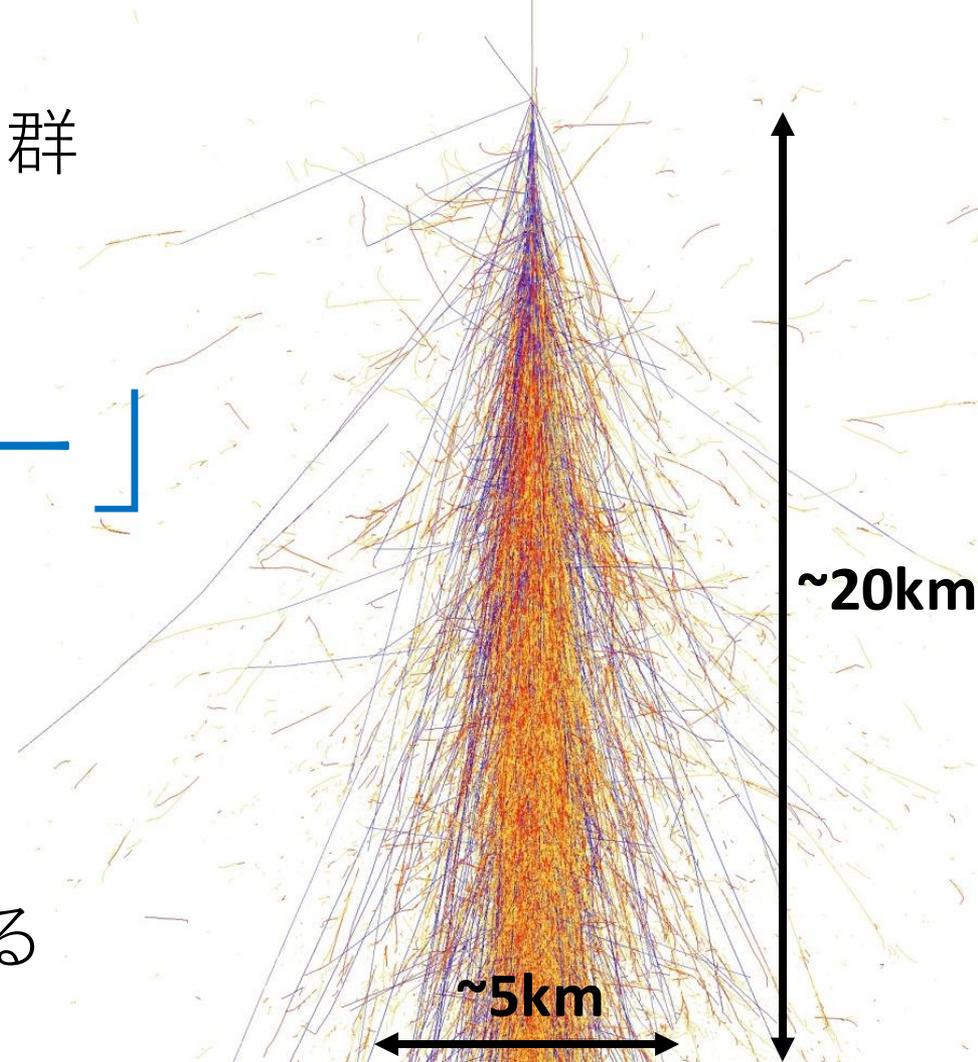
# どうやってつかまえる（見る）？

1個の高エネルギー宇宙線 → 多数の放射線

$10^{20}$  eV → 1,000億個の粒子群

## 「空気シャワー」

大気の底 = 地上に到来する  
これらの粒子たちをとらえる



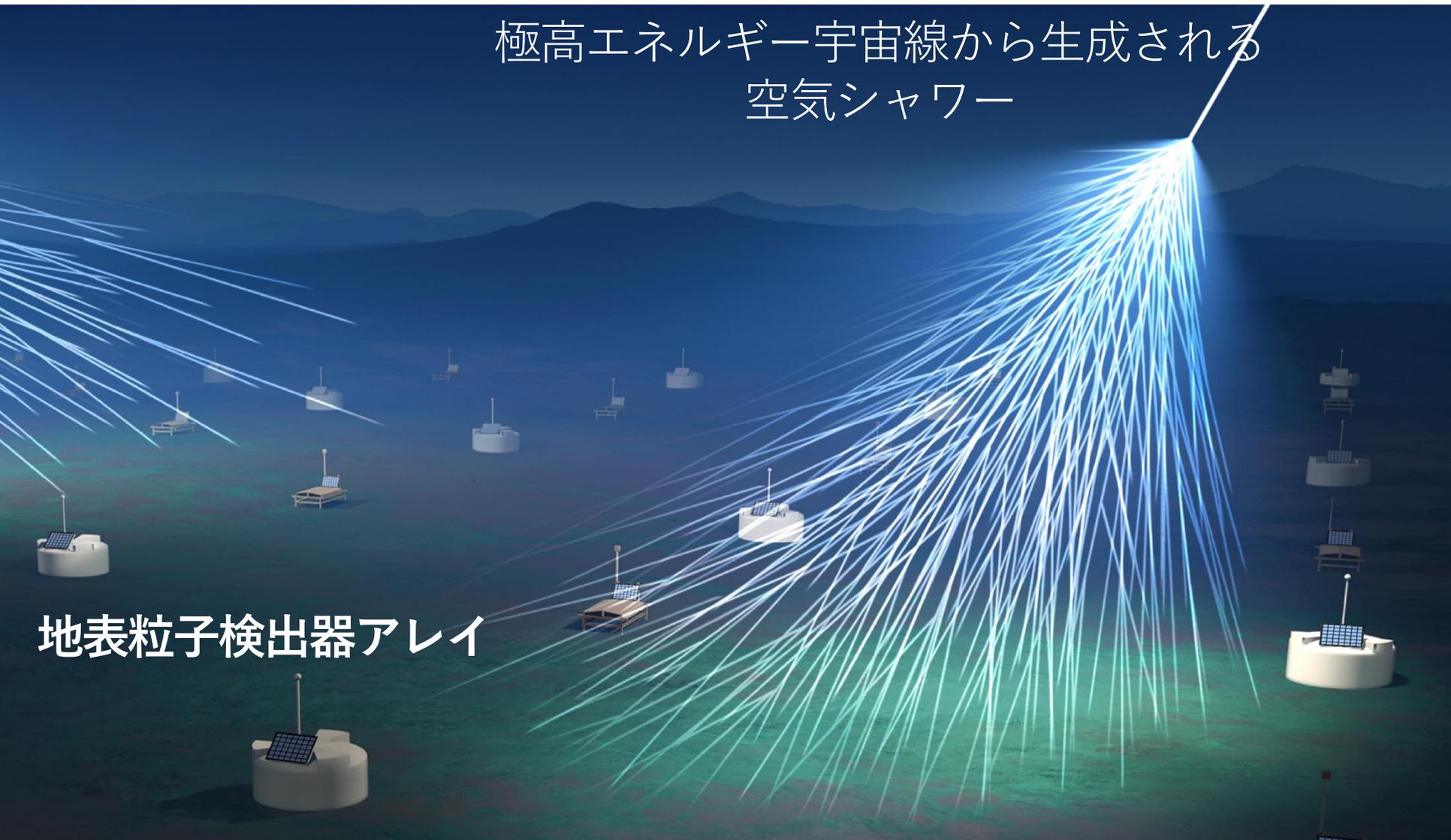
# 空気シャワー（イメージ動画）



動画提供：大阪公立大学/京都大学L-INSIGHT

# 空気シャワーのつかまえ方

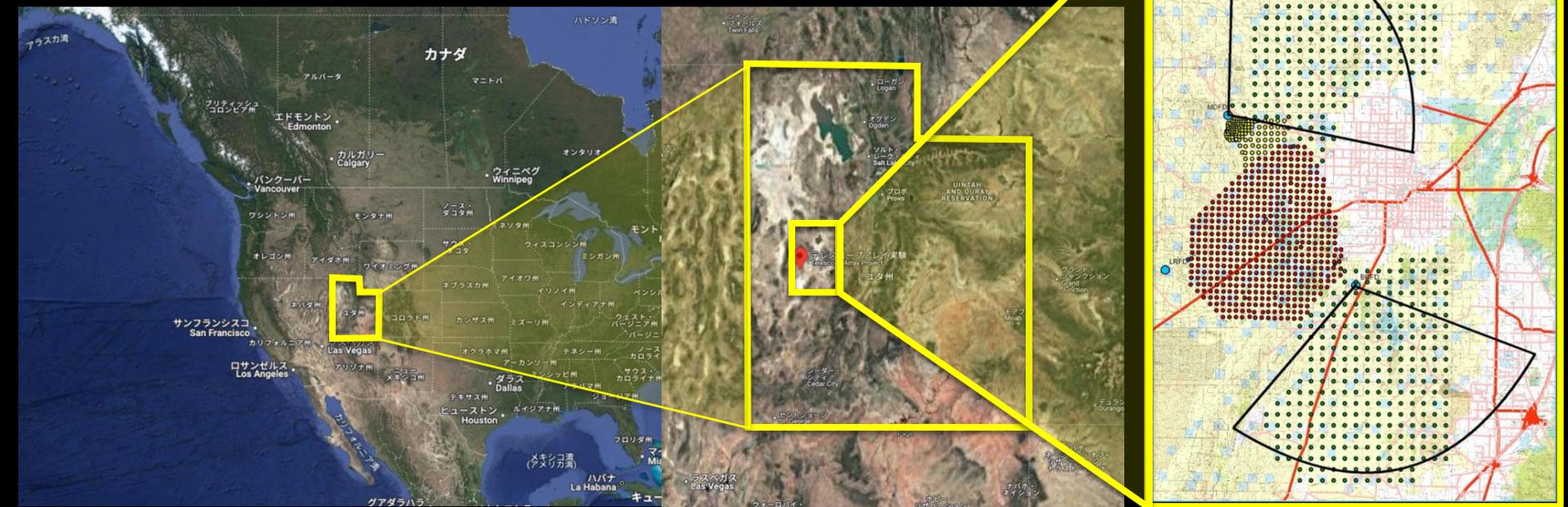
極高エネルギー宇宙線から生成される  
空気シャワー



地表粒子検出器アレイ

# テレスコープアレイ実験 (TA実験)

- 日本、米国、ロシア、韓国、ベルギー、チェコ、スロベニア、ポーランド、台湾
- 35 研究機関、約140人の共同研究者
- 2003年から建設開始、2008年完成
- アメリカ合衆国ユタ州南西部



# テレスコープアレイ実験 (TA実験)

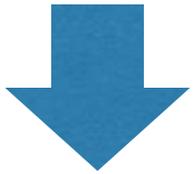
## TA実験:

地表検出器507台

1.2 km間隔

700 km<sup>2</sup>

2008年より



## TAx4実験:

+500台 (現在+267まで)

2.1 km間隔

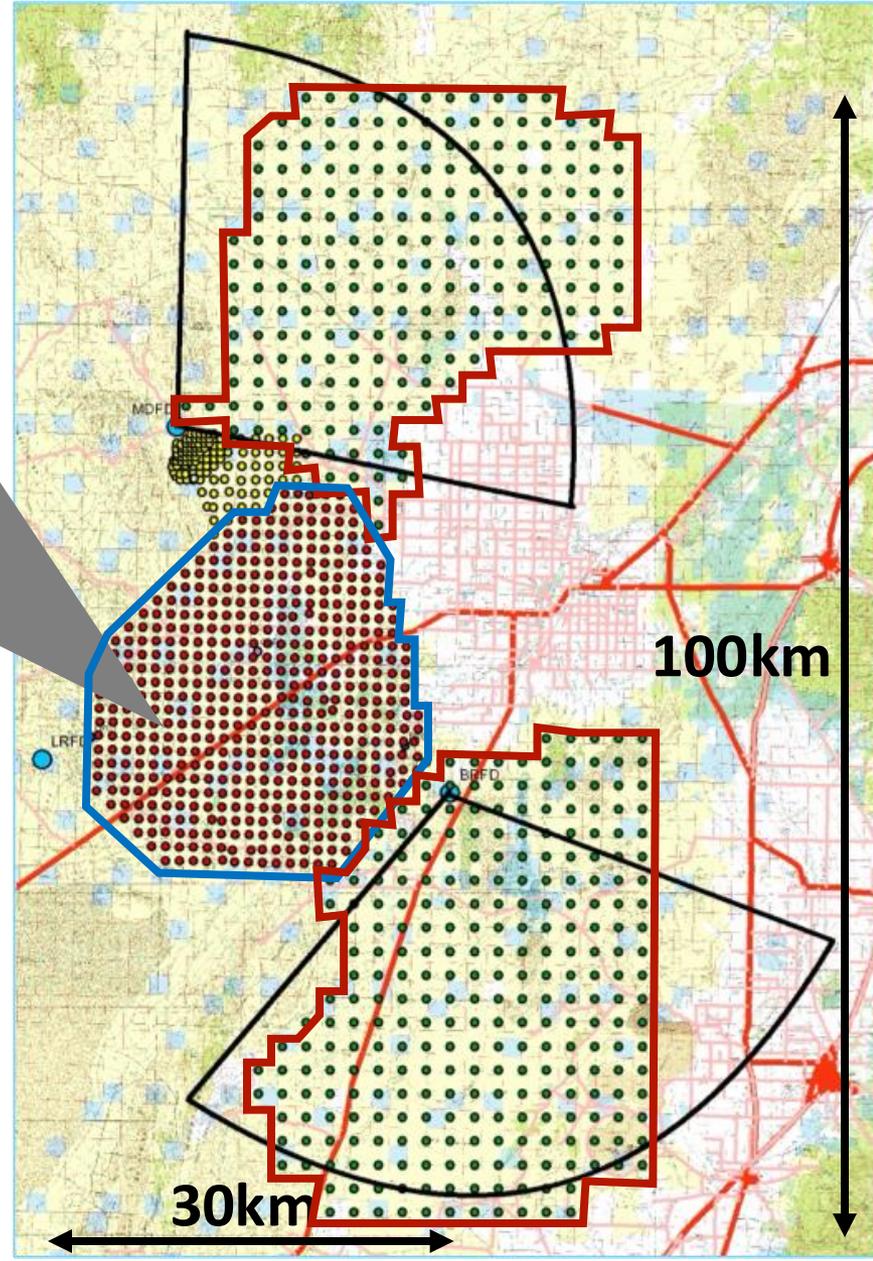
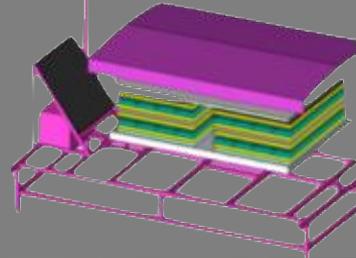
→2,800 km<sup>2</sup>

(現状 1,700 km<sup>2</sup>まで)

2019年より

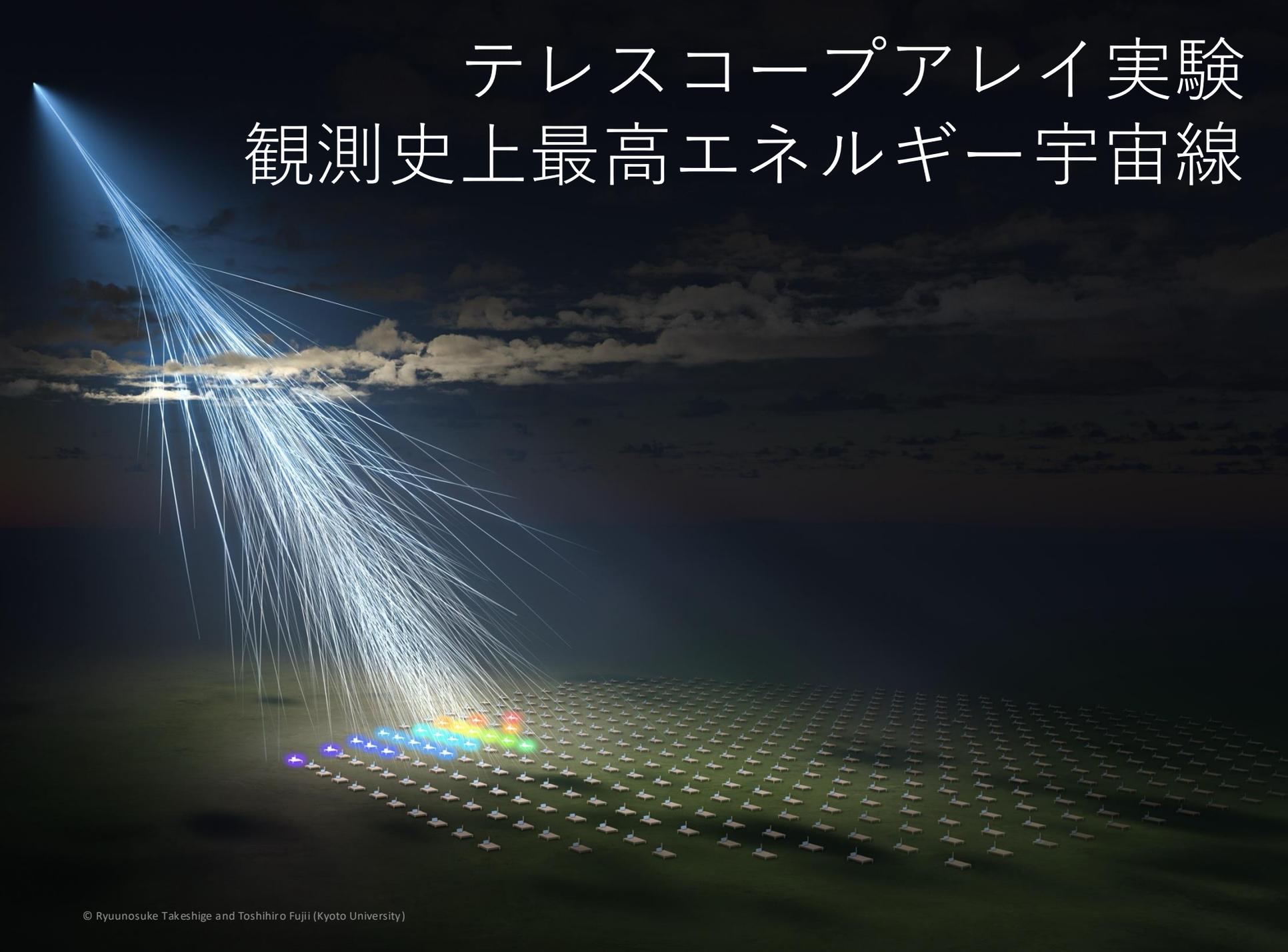
地表検出器

3m<sup>2</sup>、2層、  
プラスチックシンチ

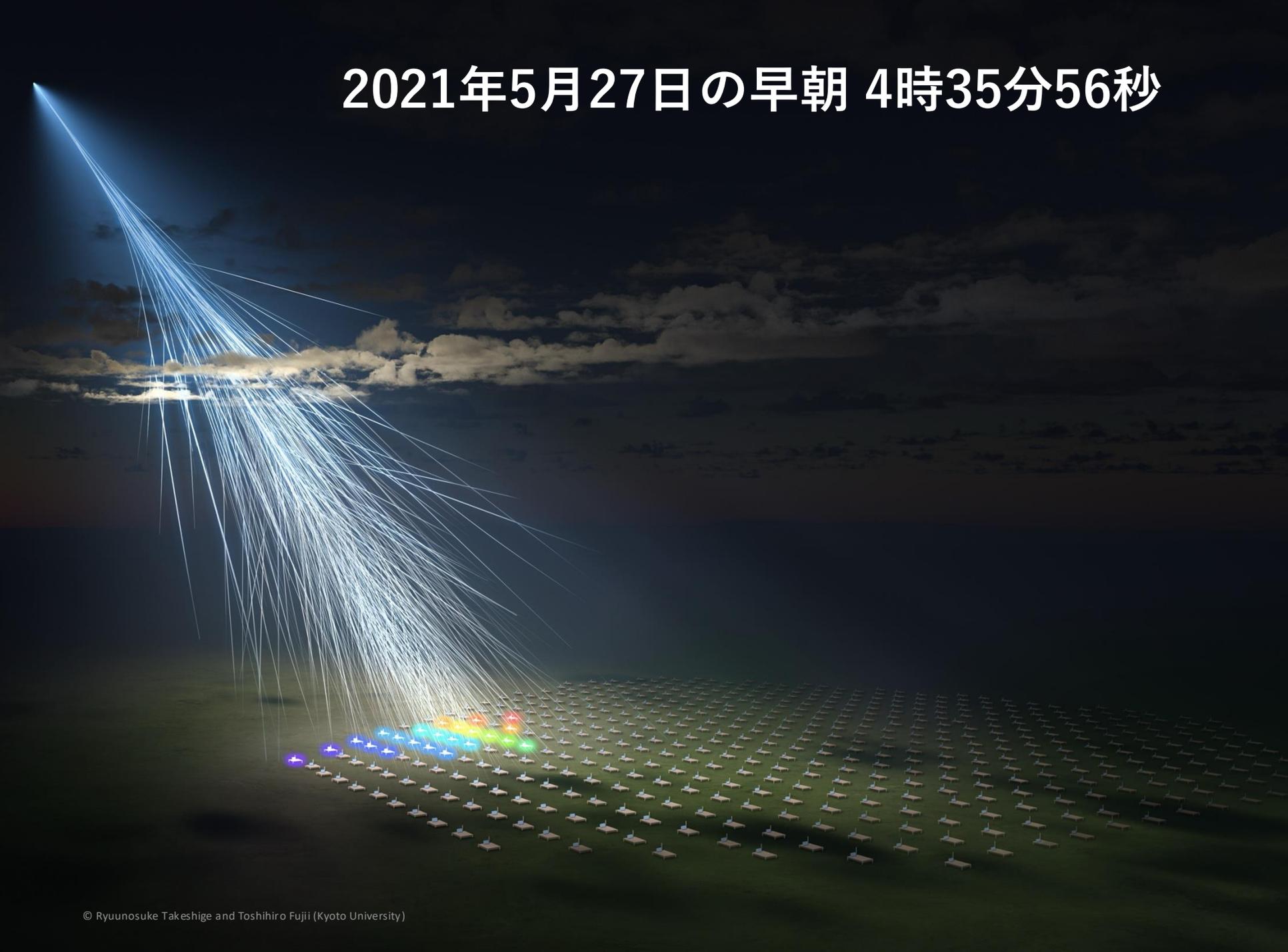




# テレスコープアレイ実験 観測史上最高エネルギー宇宙線



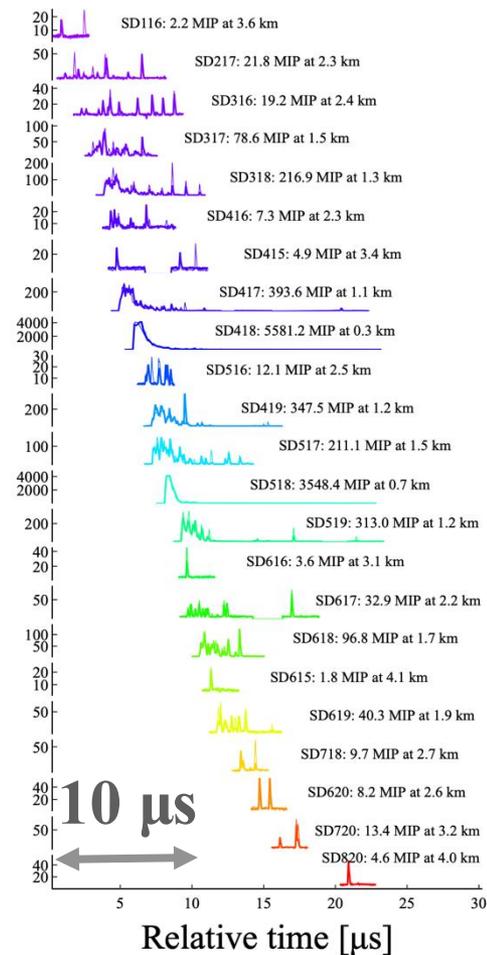
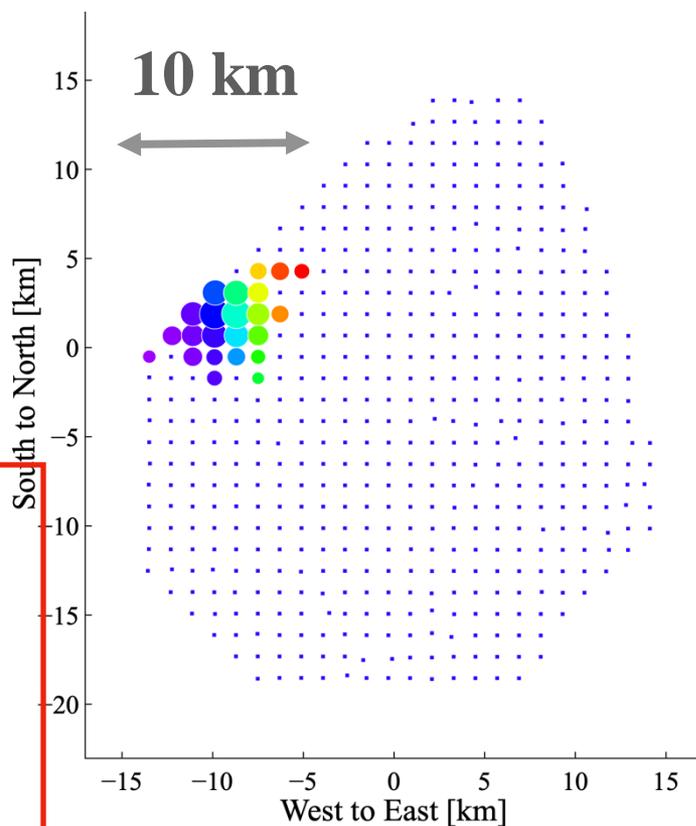
2021年5月27日の早朝 4時35分56秒



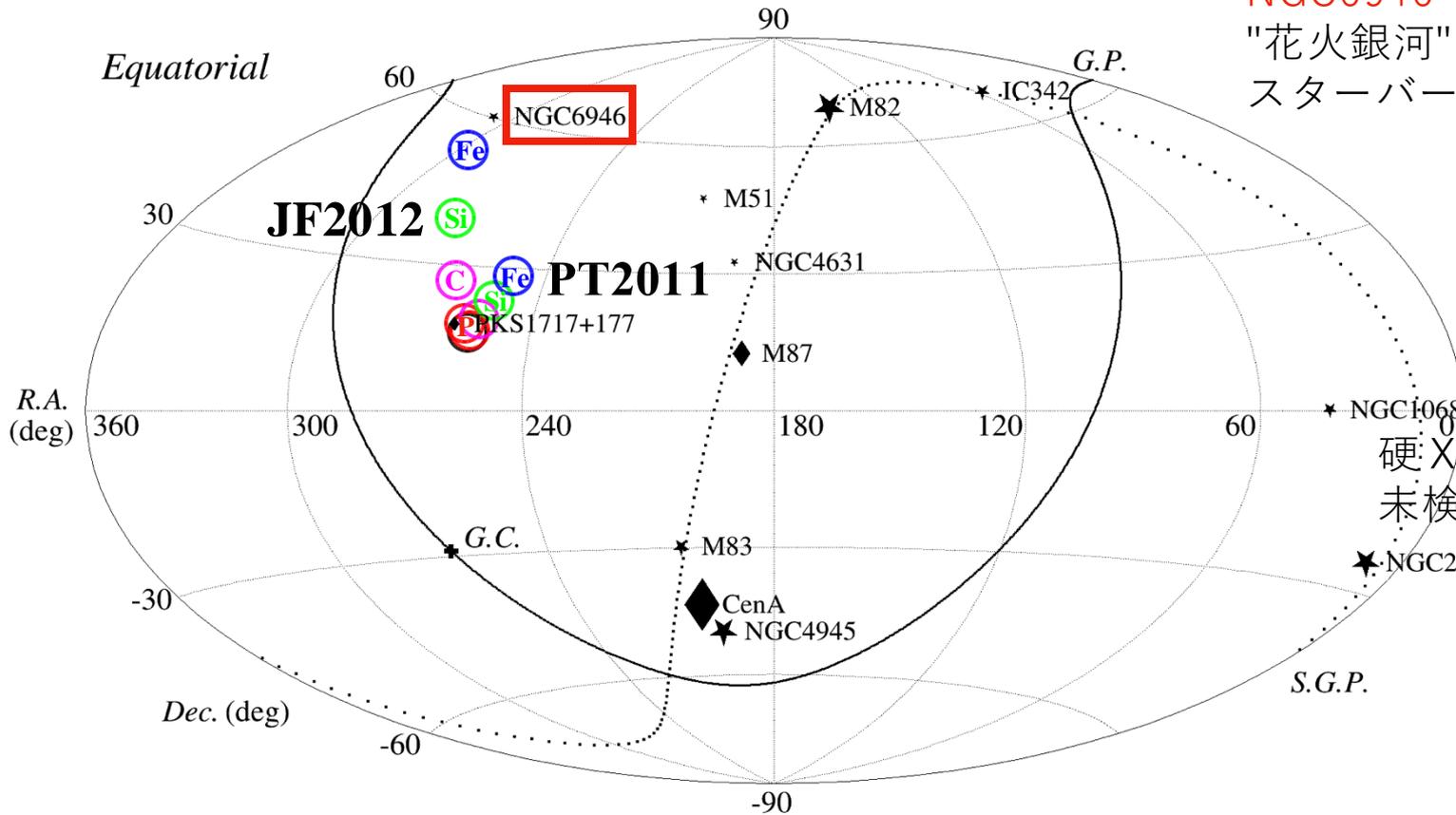
# 2021年5月27日に観測された宇宙線

## 2.44 × 10<sup>20</sup> eV

2008年5月から  
2021年11月の13.5  
年のTAの観測運用  
の中で  
最もエネルギーの  
高い宇宙線



# どの方向から？起源の候補は？



NGC6946 (5.9 Mpc)  
"花火銀河"と呼ばれる  
スターバースト銀河



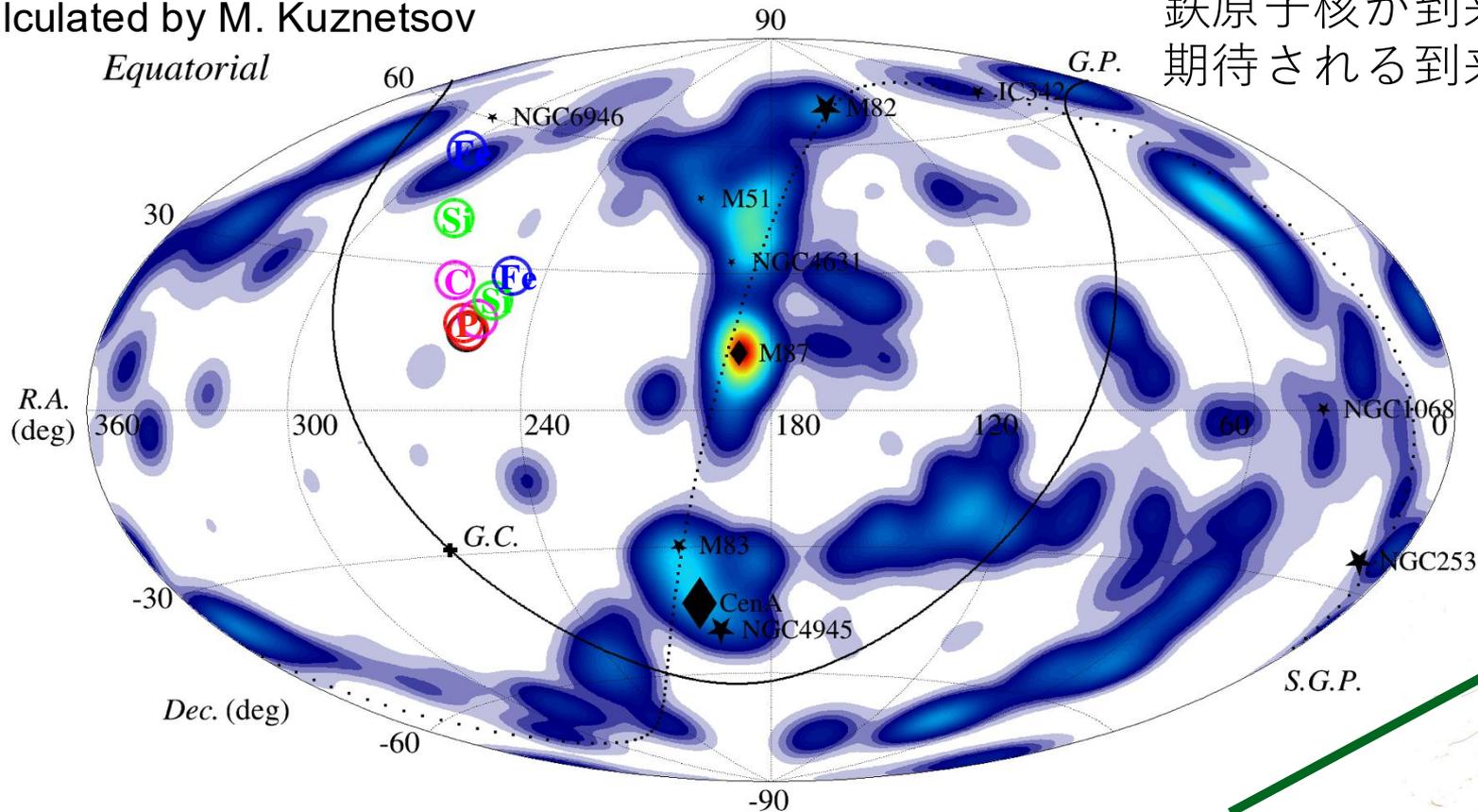
硬X線やガンマ線は  
未検出

PKS 1717+177 (~600 Mpc)  
過去にフレアがある活動銀河核  
GZK限界のため到来できない

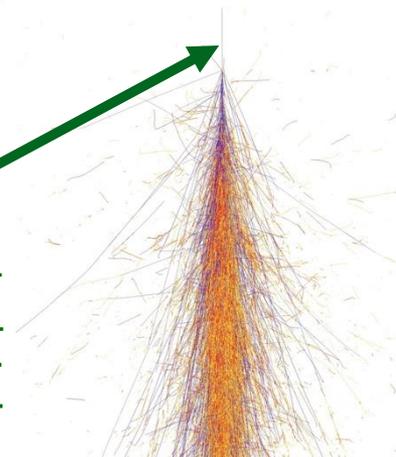
# どの方向から？起源の候補は？

近傍天体から244 EeVの鉄原子核が到来した場合に期待される到来方向分布

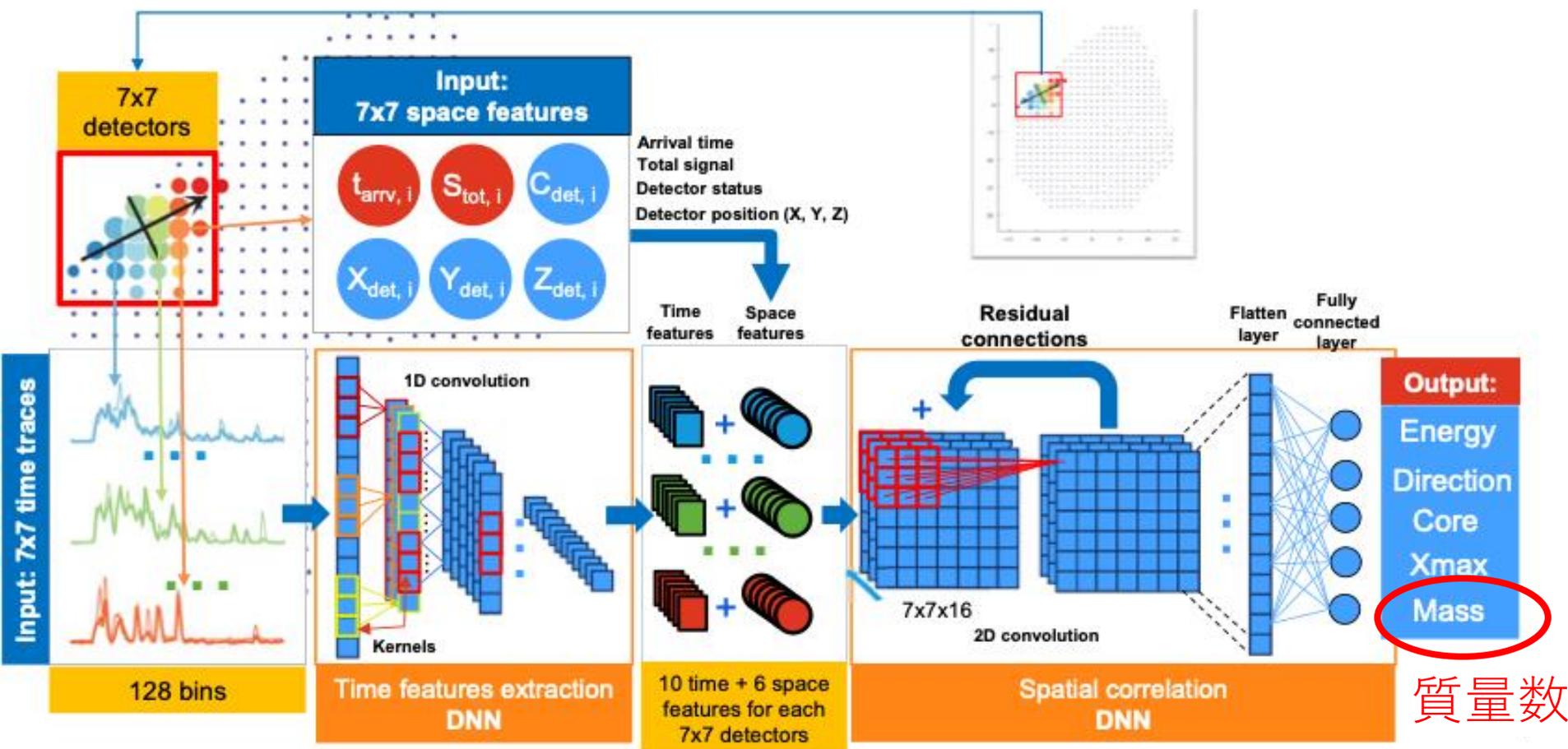
Calculated by M. Kuznetsov  
Equatorial



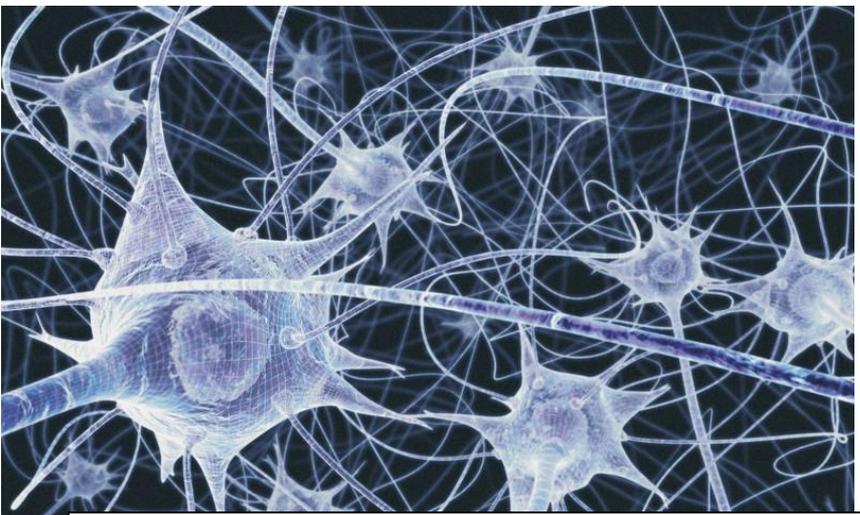
宇宙線の電荷 = 原子核種  
を知ることがとても重要



# 深層ニューラルネットによる 原子核種推定

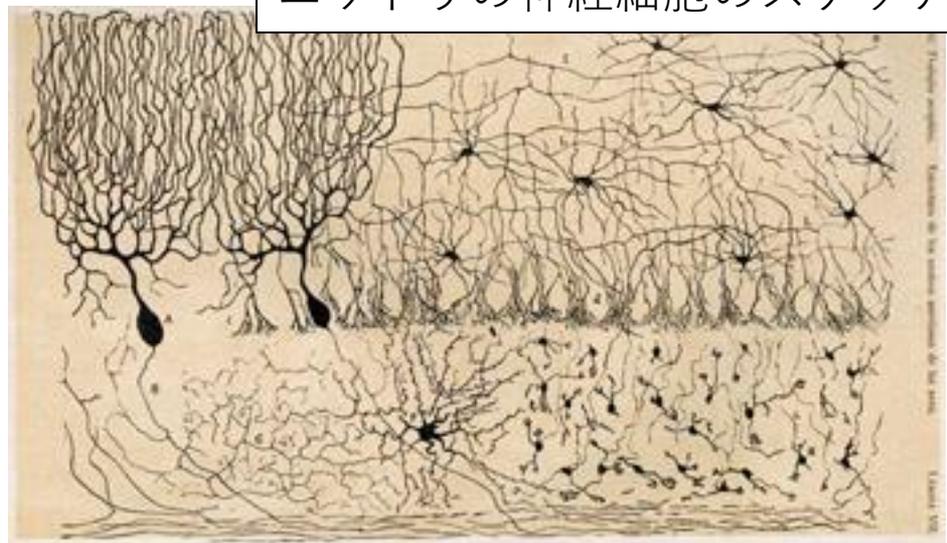


# ニューラルネットワーク



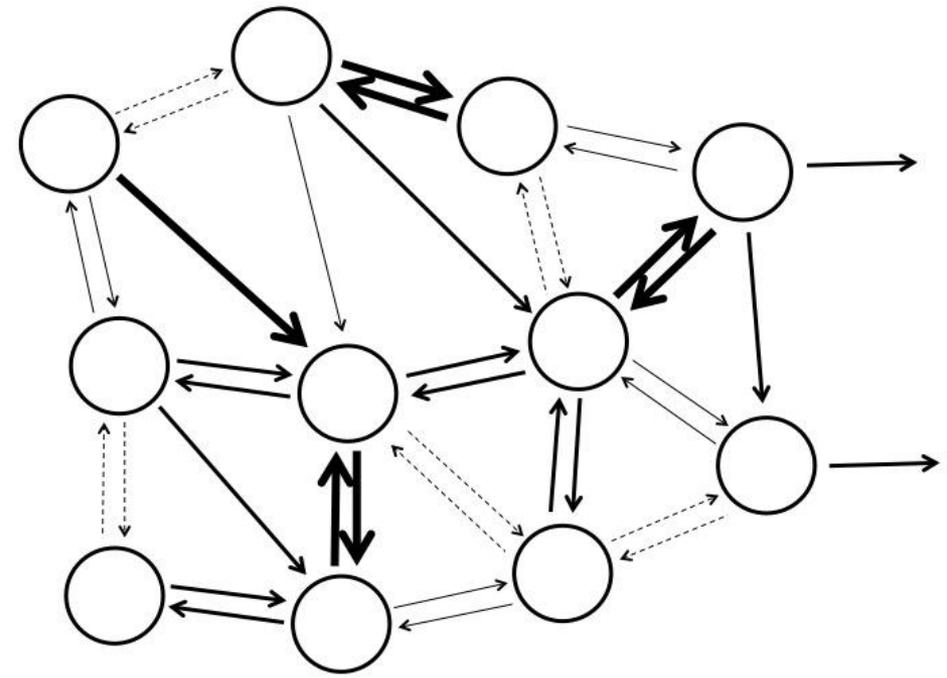
多数の脳神経細胞（ニューロン）が作り上げるネットワークの概念図

ニワトリの神経細胞のスケッチ

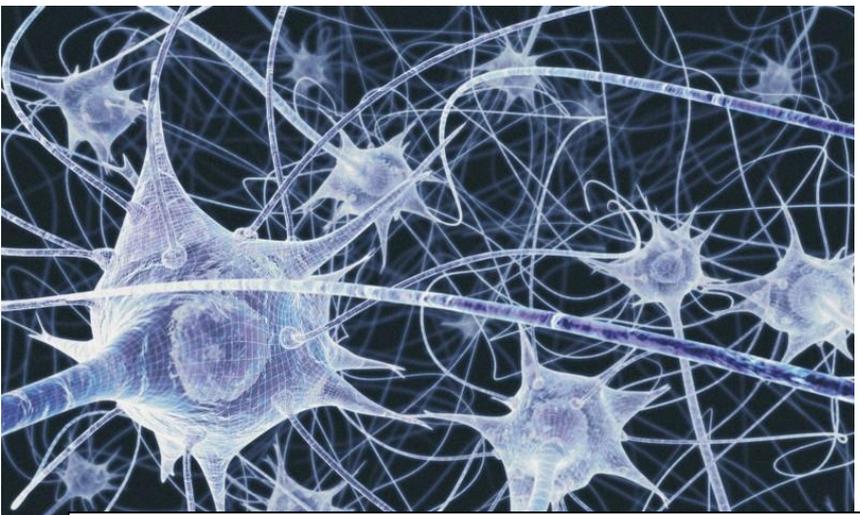


人工ニューラルネットワーク  
(Artificial Neural Network, ANN)  
の概念図

○は情報処理要素（ユニット）  
→は情報の流れ

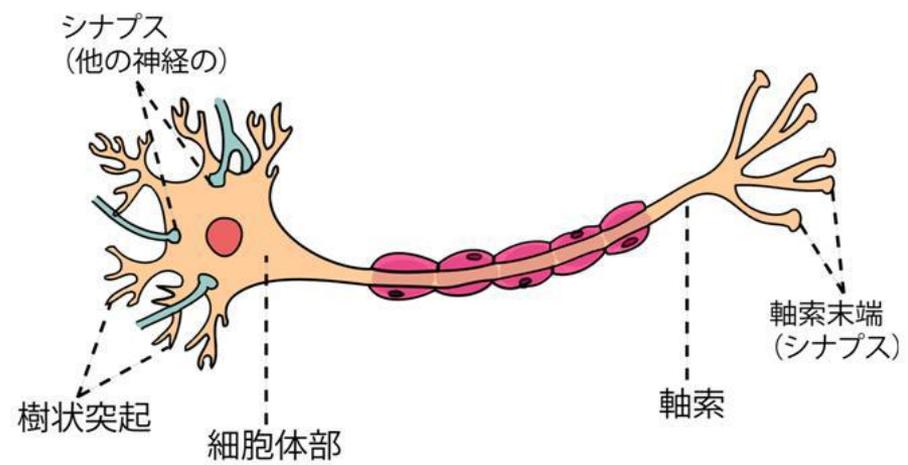


# ニューラルネットワークのユニット



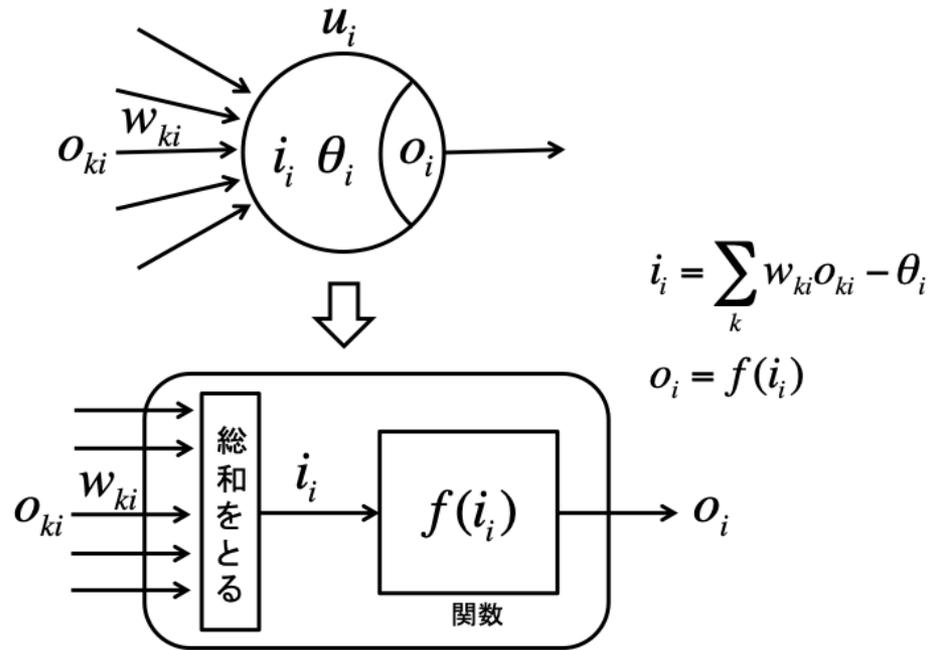
多数の脳神経細胞（ニューロン）が作り上げるネットワークの概念図

### ニューロン（脳の神経細胞）

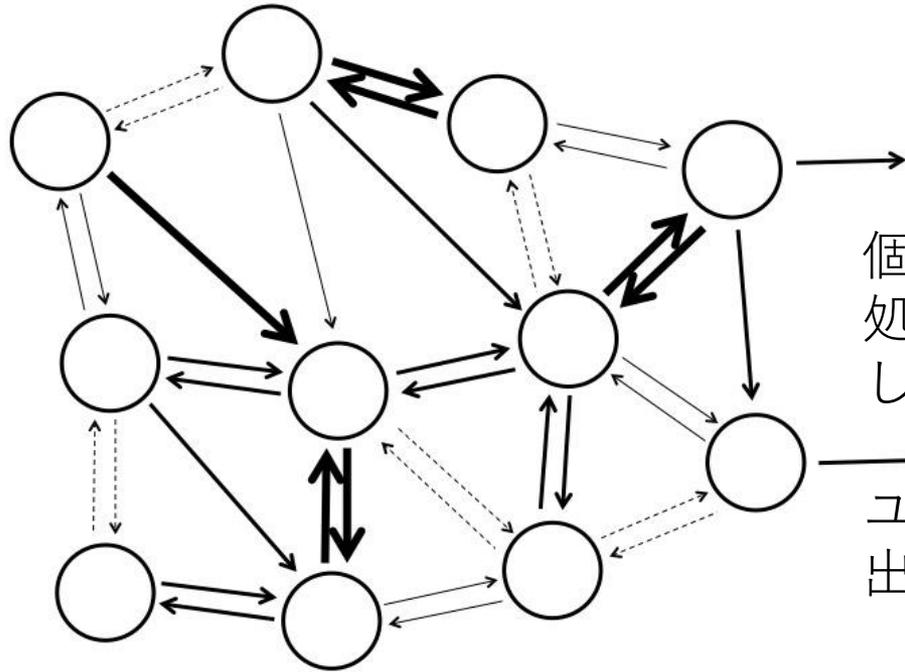


情報処理要素（ユニット）：  
かなり単純で均一な処理（簡単なルールによる状態変化）しかししない

右はユニットの例  
（多入力、1出力）



# ニューラルネットワークによる情報処理



個々の要素ユニットはかなり単純で均一な処理（簡単なルールによる状態変化）  
しかししない

ユニット間には単純な情報（各ユニットの出力についての情報）しか流れない

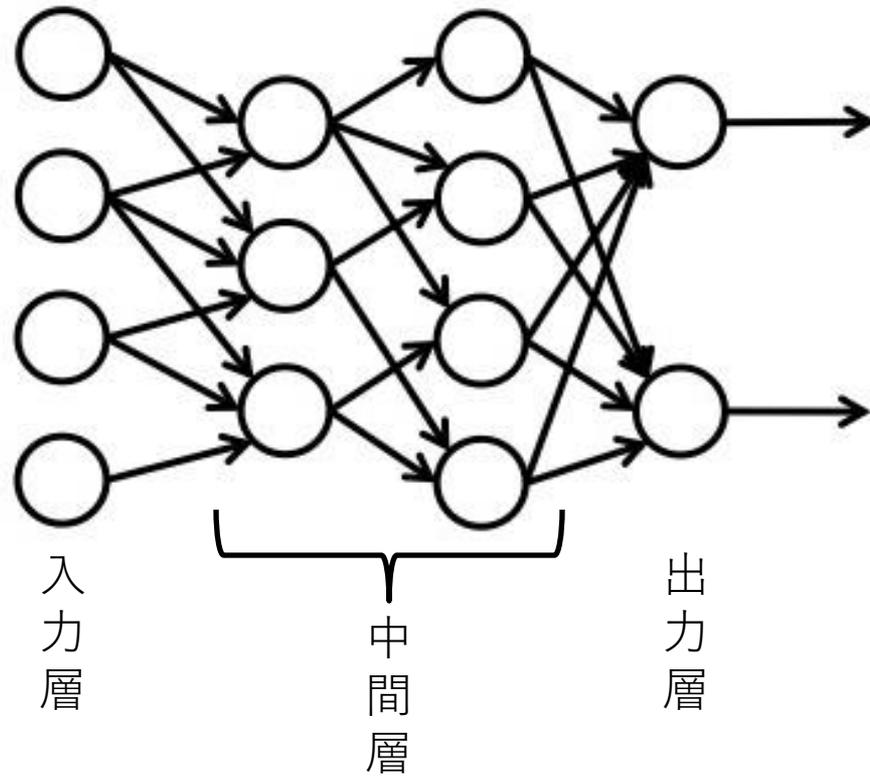
ユニット間の結合の仕方（結合の重み）によってメカニズムの動作を本質的に制御する

それぞれのユニットは原則として非同期的に勝手に動く（分散、無中枢）

# ニューラルネットワークの2つのタイプ①

## 階層的ネットワーク

(層状結合ネットワーク、順伝播型ネットワーク、フィードフォワードネットワーク)

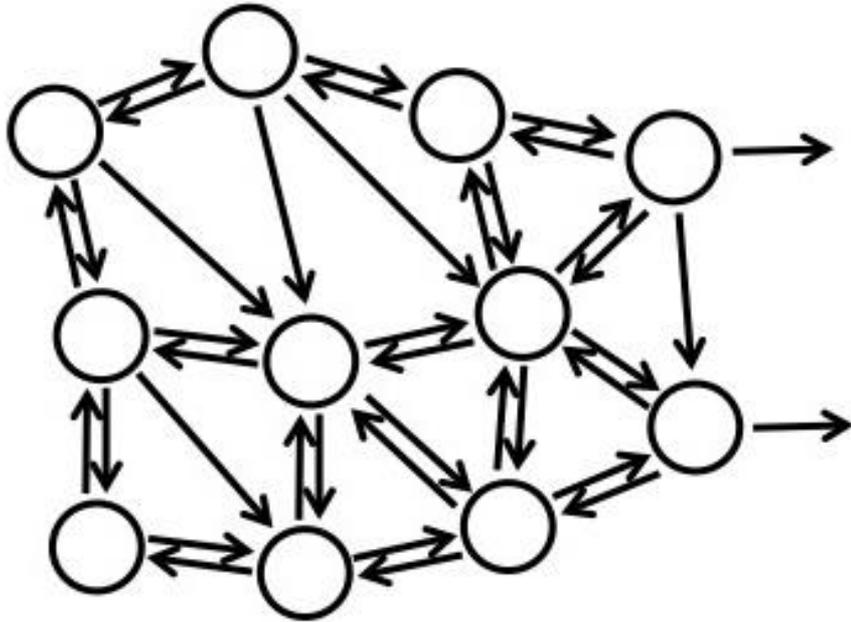


信号は、  
入力層→中間層→出力層  
へと一度流れておしまい

# ニューラルネットワークの2つのタイプ②

## 非階層的ネットワーク

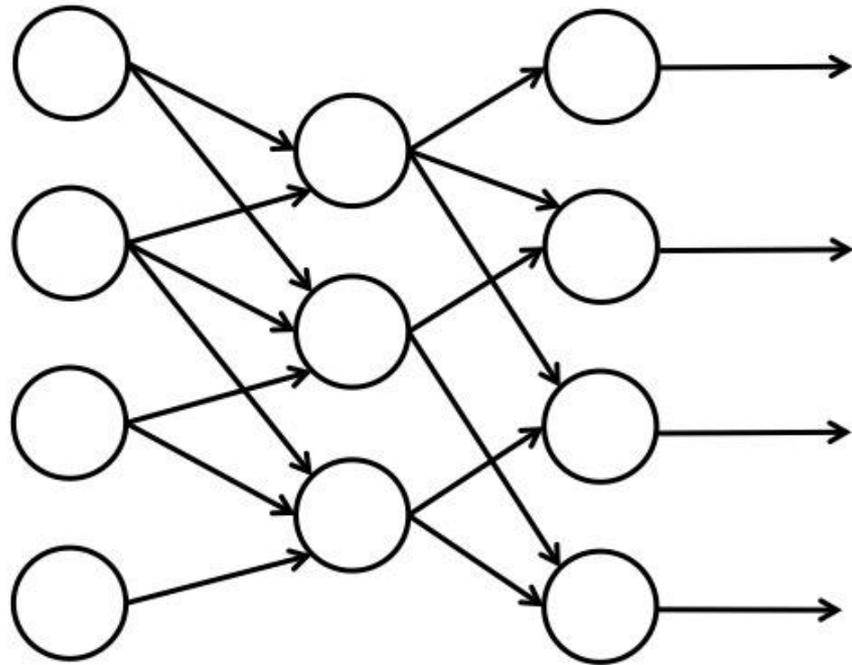
(相互結合ネットワーク、再帰型ネットワーク、フィードバックネットワーク)



任意のユニット間に結合があってよい  
信号はネットワーク内を何度も巡る

「ホップフィールド・ネットワーク」や  
「ボルツマンマシン」と呼ばれるものも  
このタイプ的一种

# 非常に簡単な階層的ネットワーク



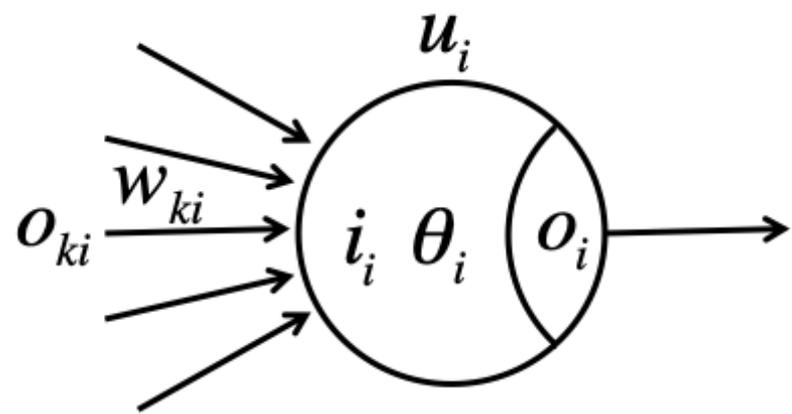
入力層

中間層

出力層

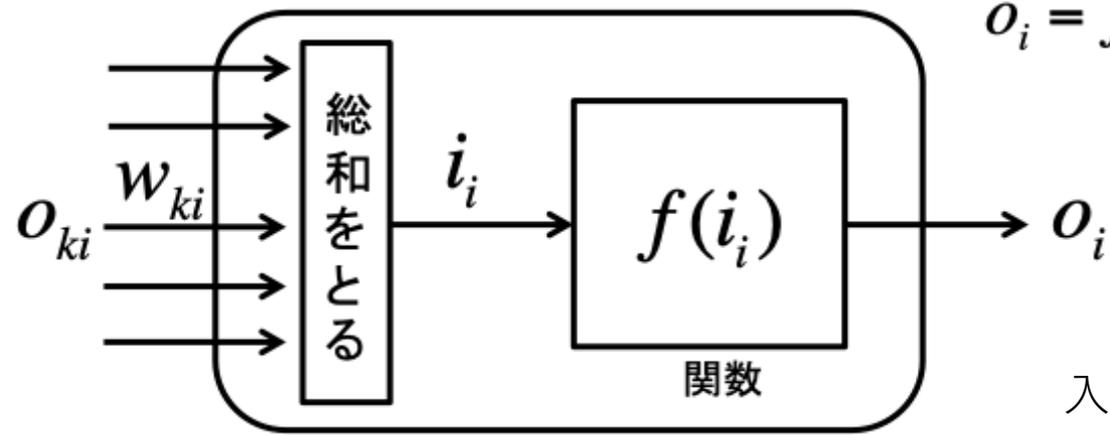
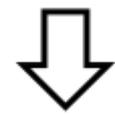
- 入力層、出力層と何層かの中間層  
(オリジナルでは中間層は1層)
- 各層のユニット数は適当
- 中間層と出力層の間の結合だけに学習能力
- 層内結合は無い
- 層間結合は入力→中間→出力へ向けて一方向

# 階層的ネットワークのユニット



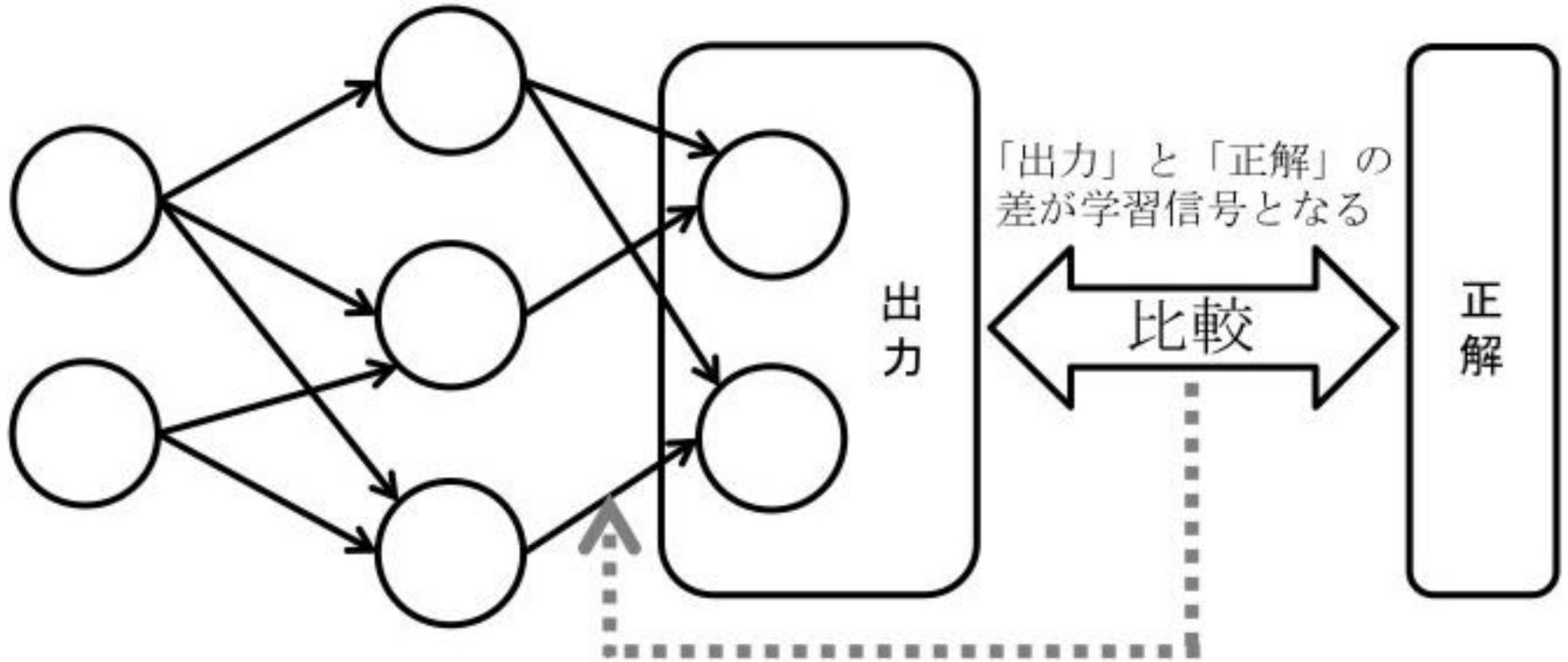
$$i_i = \sum_k w_{ki} o_{ki} - \theta_i$$

$$o_i = f(i_i)$$



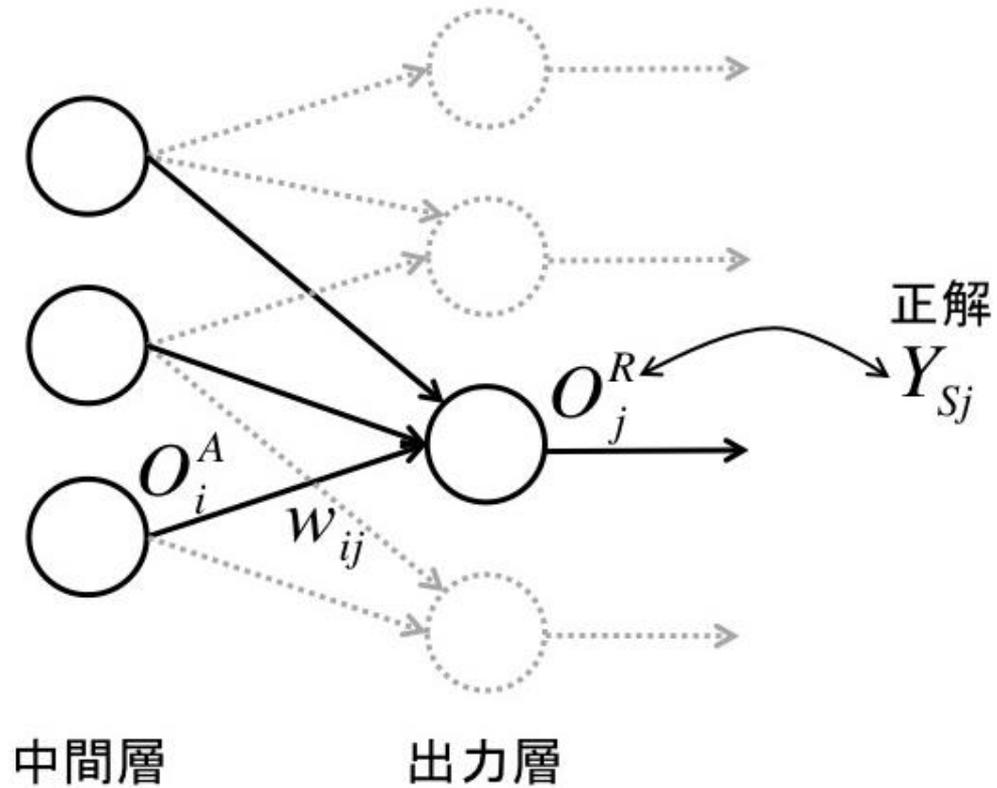
入力層を除く各層のユニットは、前の層のユニットから重み付き入力を受けてその総和を計算し、それに適当な関数  $f$  を作用させたものを出力する

# 学習



パターンを分類させてみて、間違った場合には結合を修正する  
(中間層と出力層の間の結合の強さ = 「重み」を変える)

# 学習

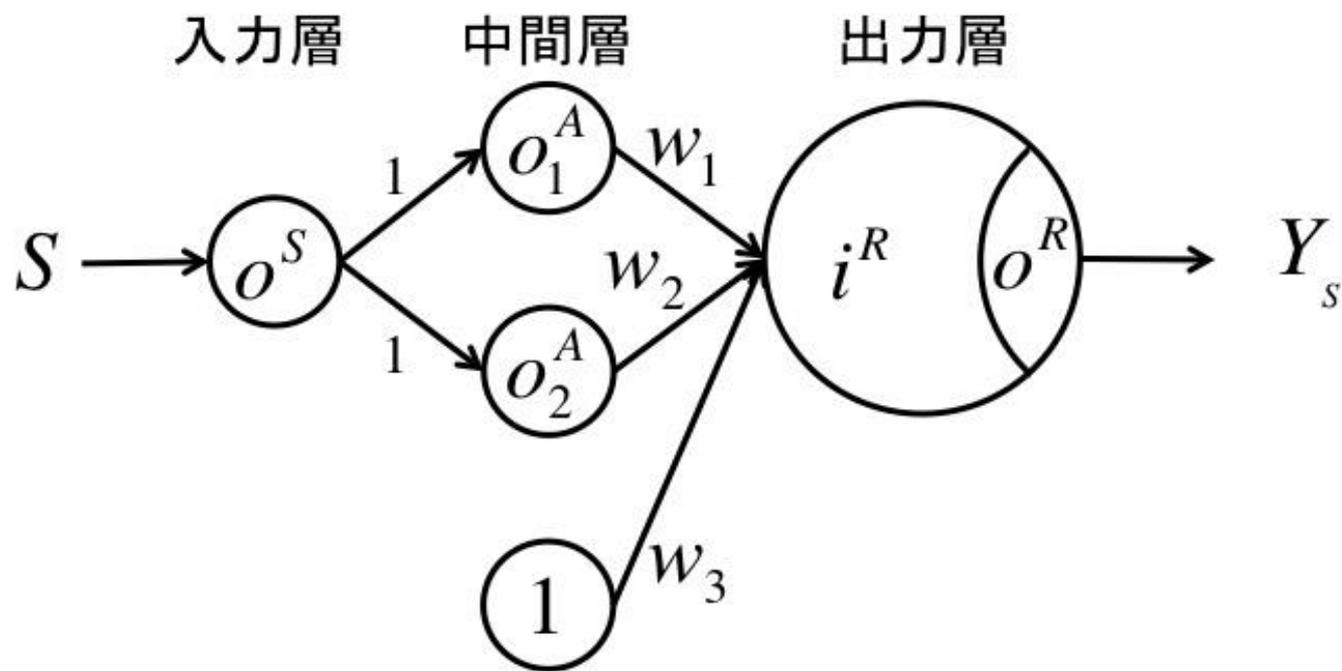


パターンを分類させてみて、間違った場合には結合を修正する  
(中間層と出力層の間の結合の強さ = 「重み」を変える)

$$Dw_{ij} = (Y_{Sj} - O_j^R) \cdot O_i^A$$

$$w_{ij} \rightarrow w_{ij} + Dw_{ij}$$

では、実際にAIを作ってみよう！

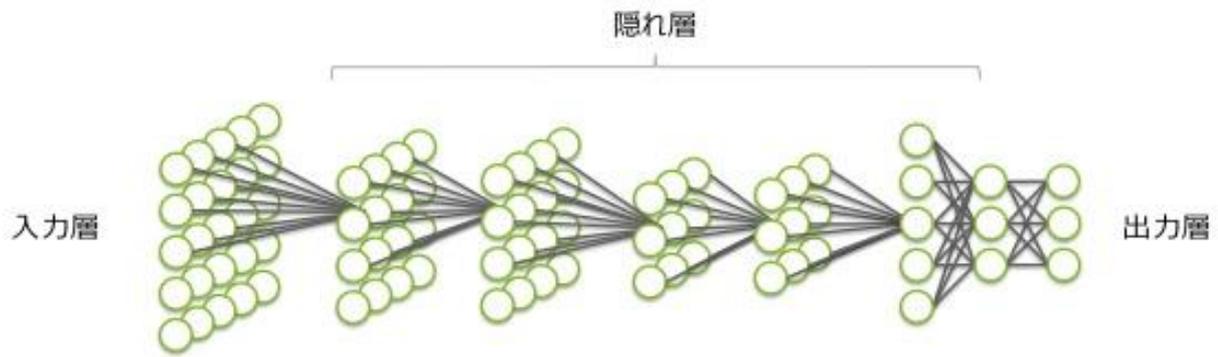


$S$	$Y_s$
0	0
1	1

# ディープラーニング

## ディープラーニングとは

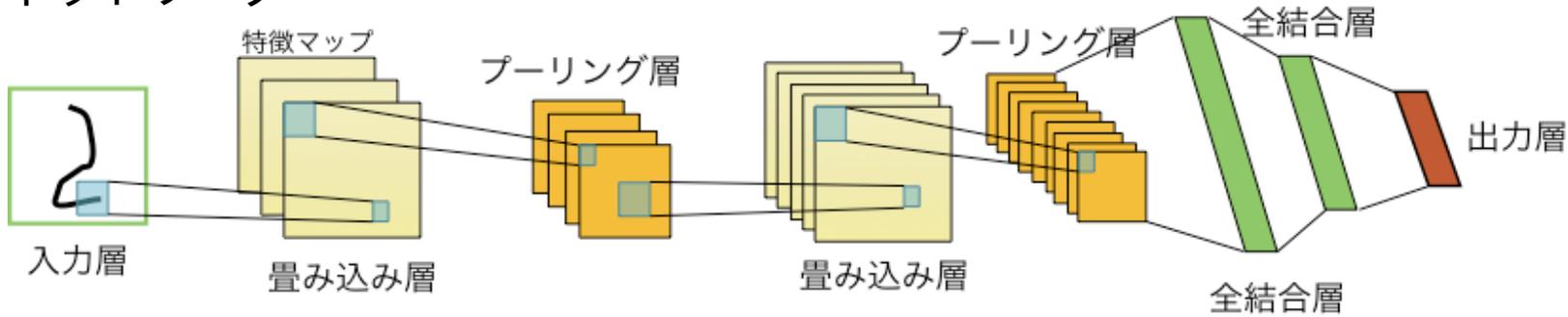
多数の層から構成されるニューラルネットワーク



十分なトレーニングデータを与え学習させることで、  
複雑な問題を解くことができるようになる

<https://www.slideshare.net/NVIDIAJapan/ss-75109746>

## 畳み込みネットワーク



<http://www.dmprof.com/jp/news/2016/6595/>