

天文学におけるデータ科学的方法

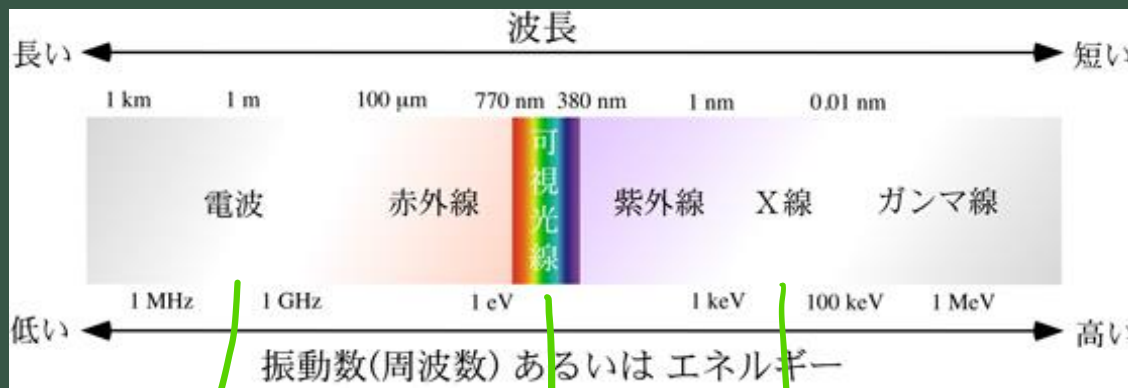
2018年2月16日

統計数理研究所

池田 思朗

① 天文学

- ① 天体と宇宙に関する科学
- ① 自然科学として最も早く、古代から発達した。
- ① 様々な波長の光（電磁波）によって天体を観測



水沢VLBI



すばる



Chandra

② データ科学

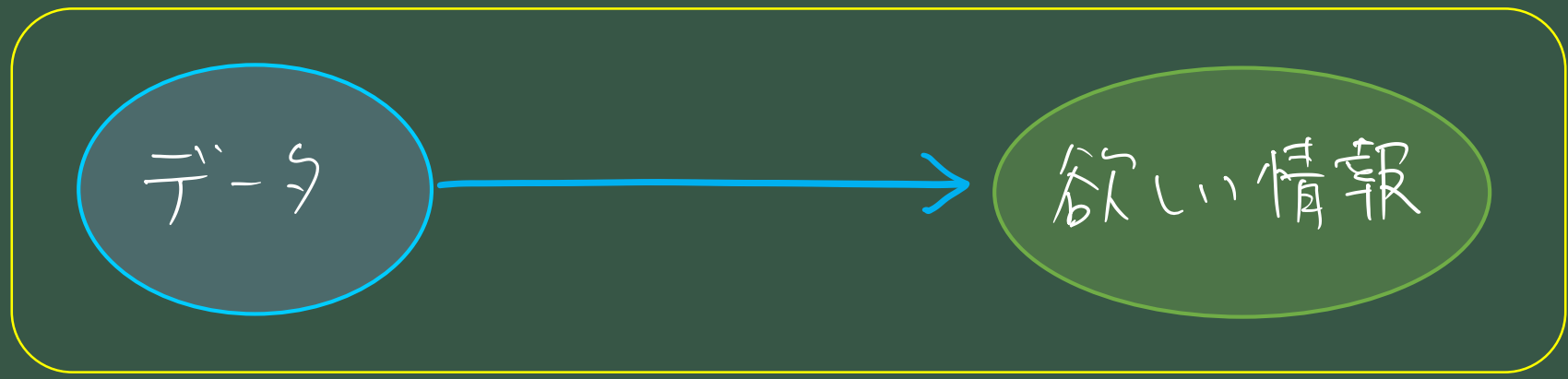
① 科学：対象に対する知を深め広める。

自然科学 社会科学 データ科学

② データ科学：統計学・機械学習・信号処理

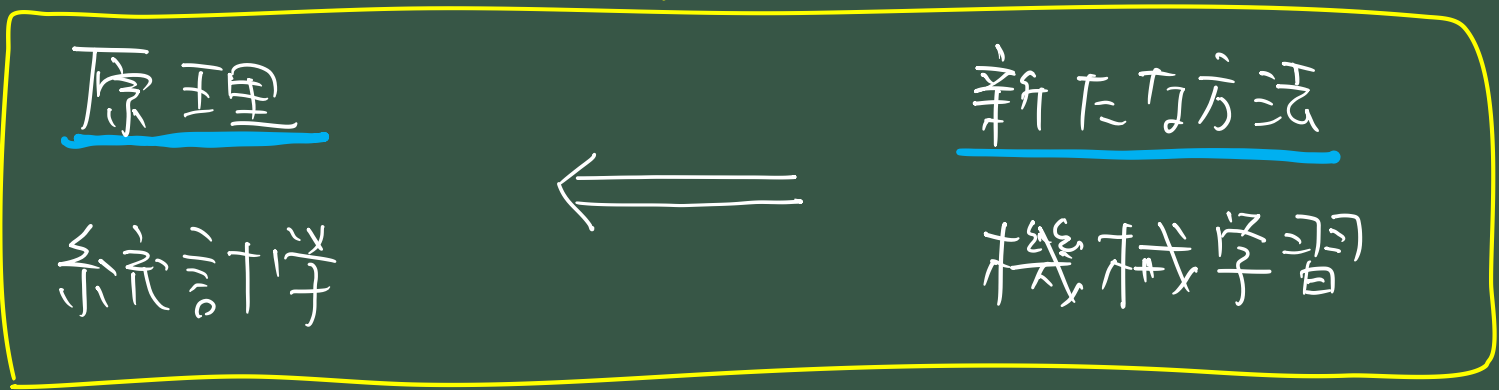
データからどのように情報を取り出すのかを
研究し、データの解析に役立てる。方法論の研究。

データ科学

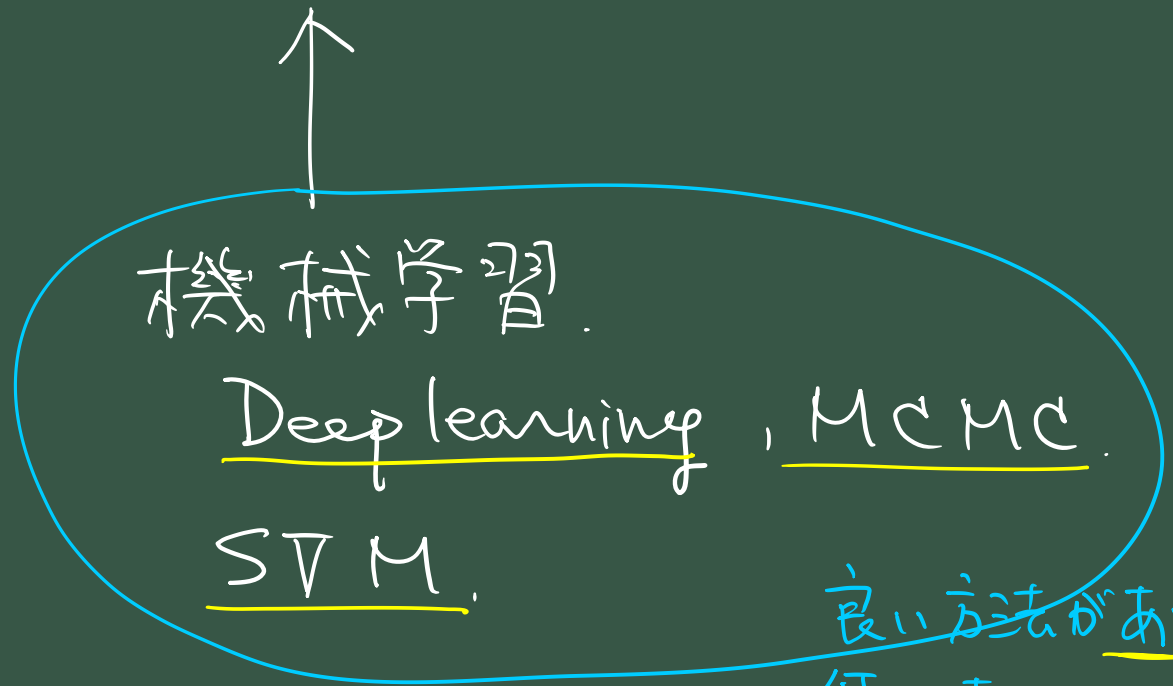
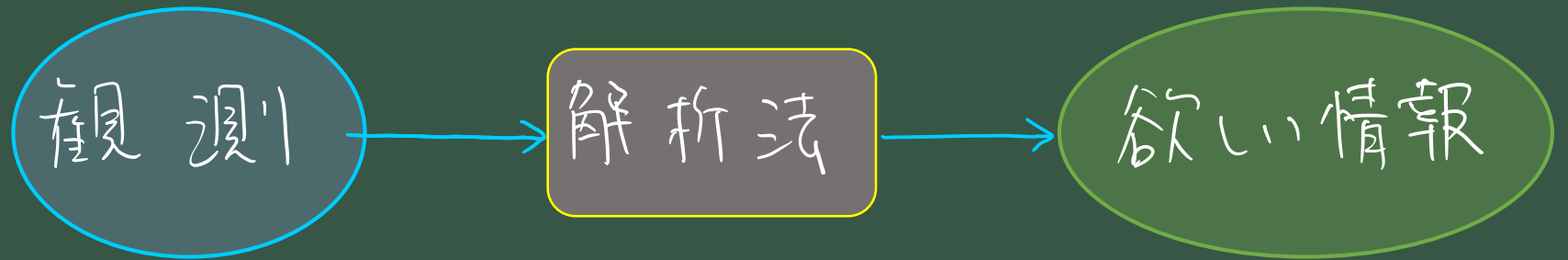


方法論を作る

データ科学

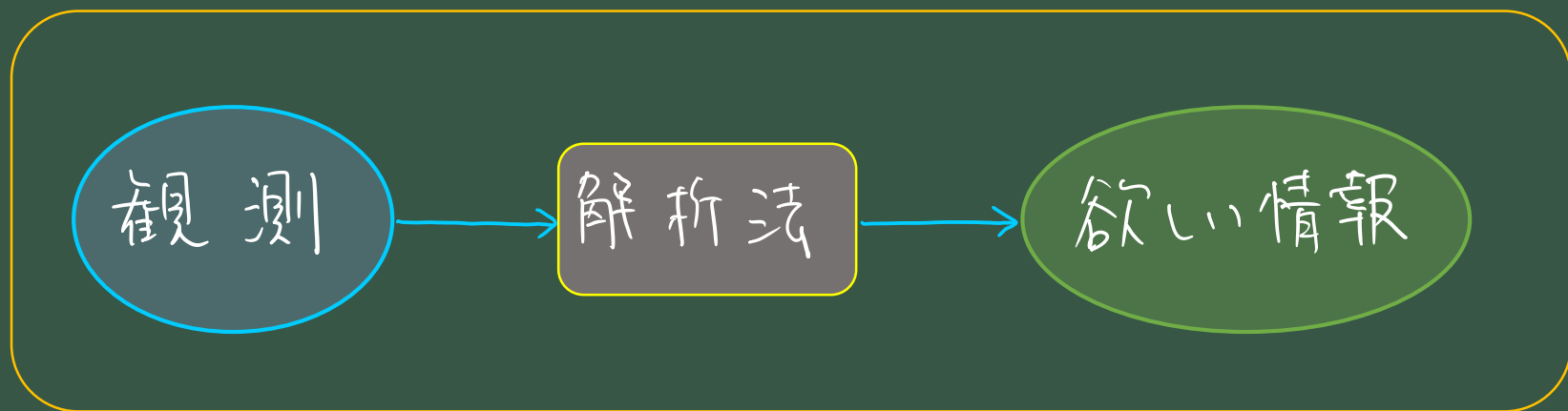


Q データ科学への期待？



良い方法があるはず
使いたい。 ?

② データ科学との取り組み方. 共同で新たな方法を開発する.

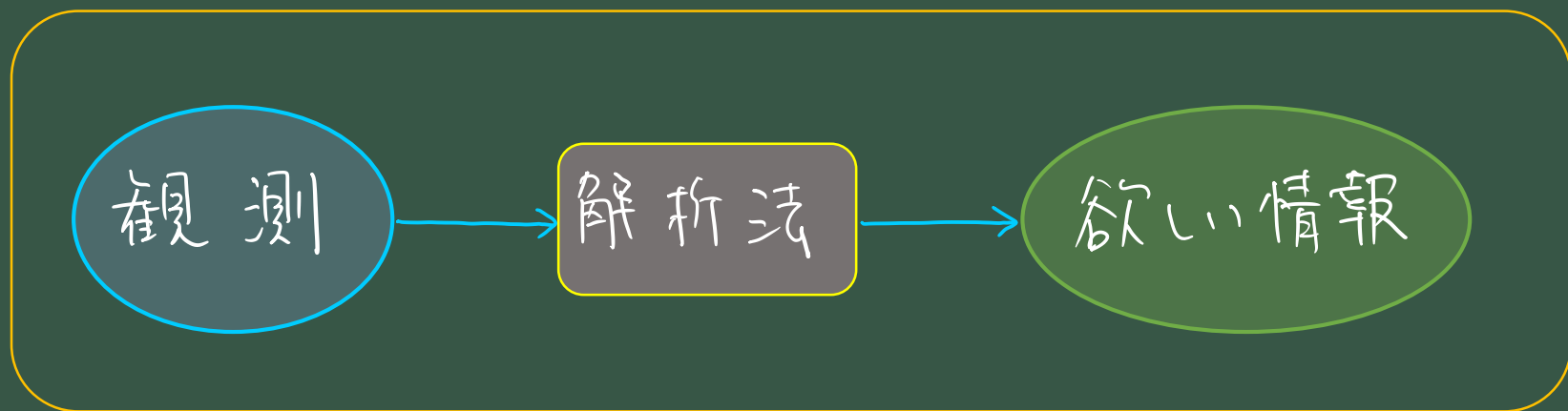


全ての段階を 統計・データ科学の専門家と議論すべき.

成功例 : システムバクオロジー

BCI, BMI (脳に関する技術)

① データ科学との取り組み方. 共同で新たな方法を開発する.



全ての段階を統計・データ科学の専門家と議論すべき.

- × ここだけ 機械学習で解決できるは”...
- × 既存法を全ての点で改善できるか?
- × 実は こういう問題 もあって....

① 天文学からデータ科学への期待

① ビッグデータへの対応：処理の自動化

観測の大規模化
センサーの高性能化

→ データサイズが増加

② 計測限界の向上

雑音の多いデータ

少ない情報から多くを推定

① 天文学からデータ科学への期待

② ビッグデータへの対応：処理の自動化

すばるHSCにおけるIa型超新星の発見

③ 計測限界の向上

Event Horizon Telescope による Black Hole 撮像

① Event Horizon Telescope

事象の地平線



ブラックホール

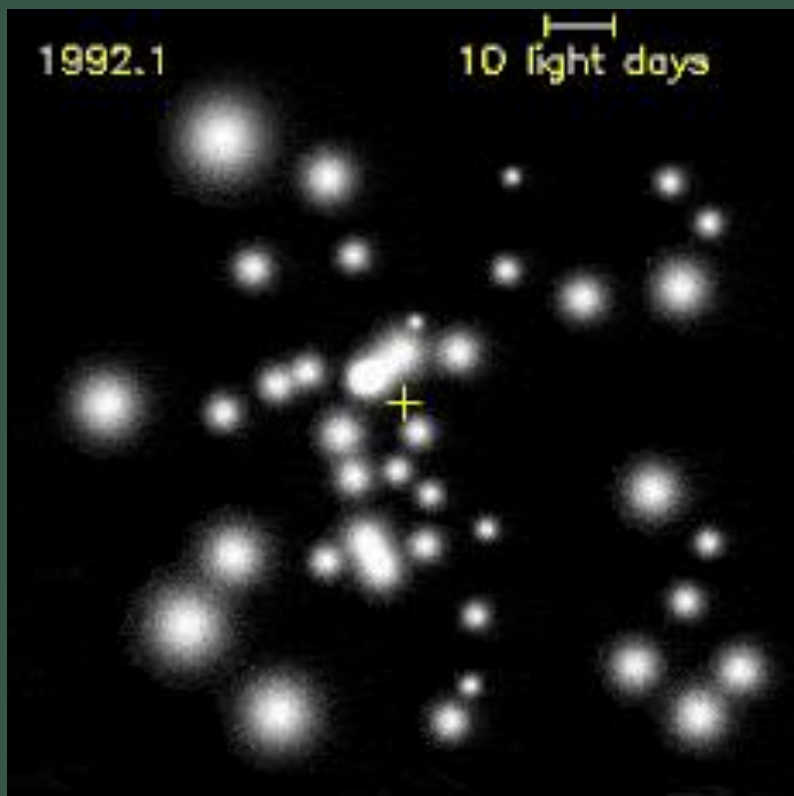
ブラックホールを見る望遠鏡を作りたい。



NASA/JPL-Caltech

想像図。

⑥ いと座 A*



Credit: A. Eckart (U. Koeln) & R. Genzel (MPE-Garching), SHARP I,
NTT, La Silla Obs., ESO
<https://www.universetoday.com/133511/>

質量：太陽の 400万倍。

距離：25,000光年

視半径：10 μ 秒角。

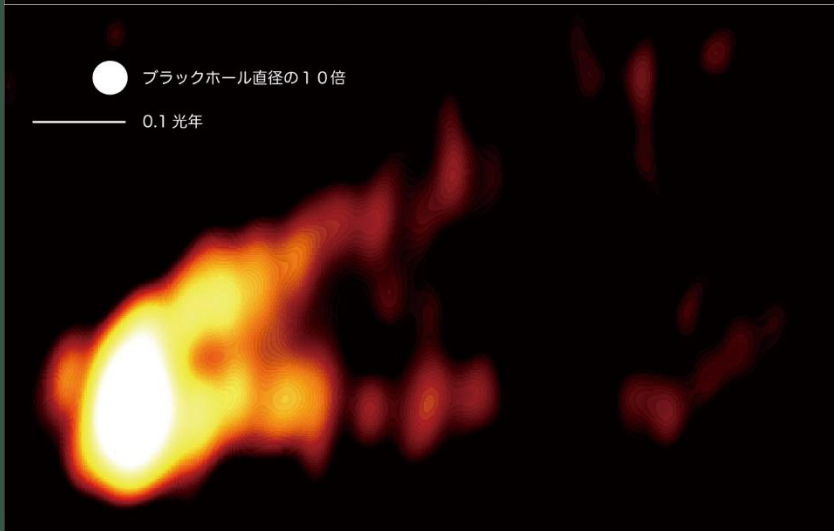
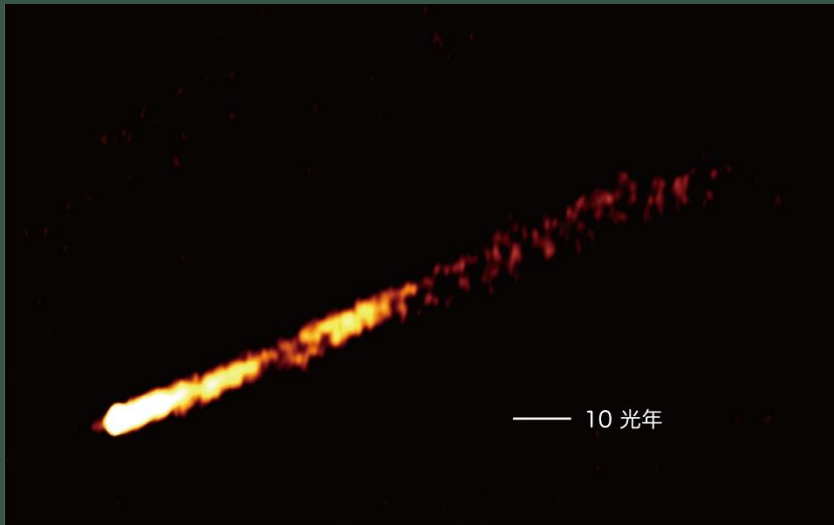
強力な 電波光源。

この銀河の中心 にありブラックホール。

ジェットが観測されておらず”。

ブラックホールシャドウ (黒い穴) が
見えると期待されている。

⑥ M87



質量：太陽の30~60億倍

距離：5000万光年

視半径：4~8 μ秒角

強いジェットが観測されて
いる。電波干渉計で撮影さ
れている。

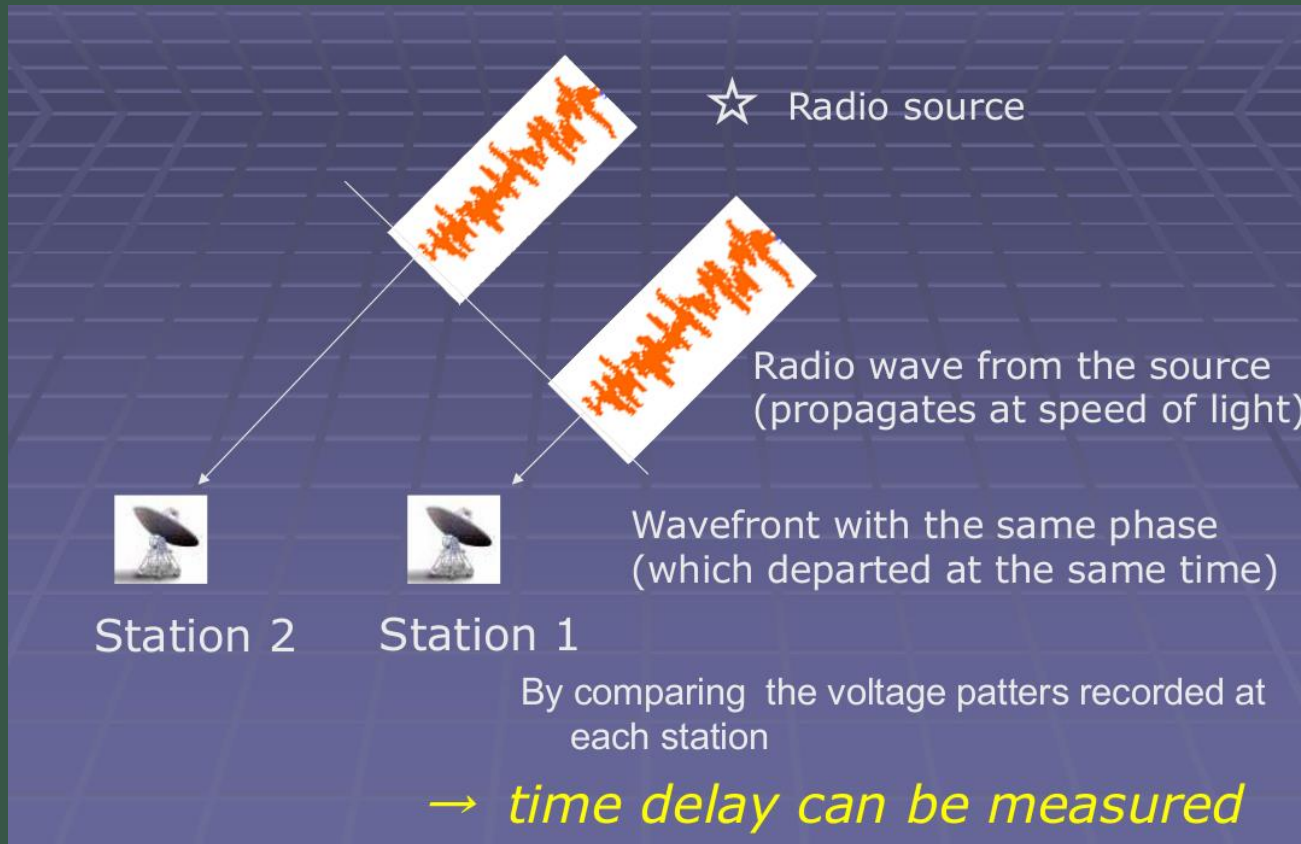
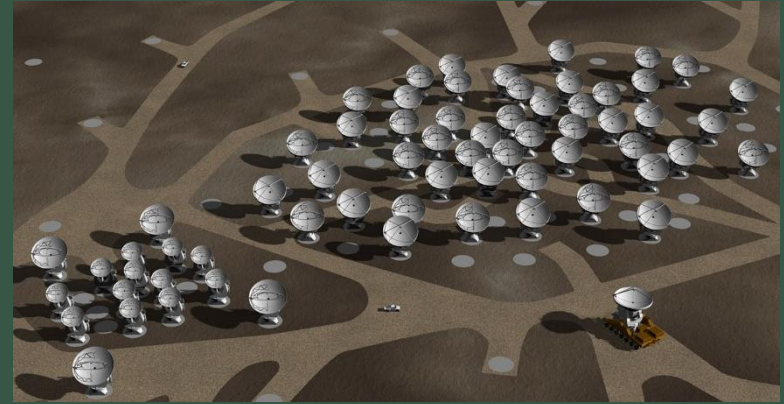
ジェットの根元の構造を見たい。

国立天文台

<http://www2.nao.ac.jp/~m87blackhole/>

① 電波干渉計

- ① 複数のアンテナで天体を観測
- ② 同じ波長の電波を記録する
- ③ 後で相関処理を行う



ALMA

アンテナの間隔
が遠い



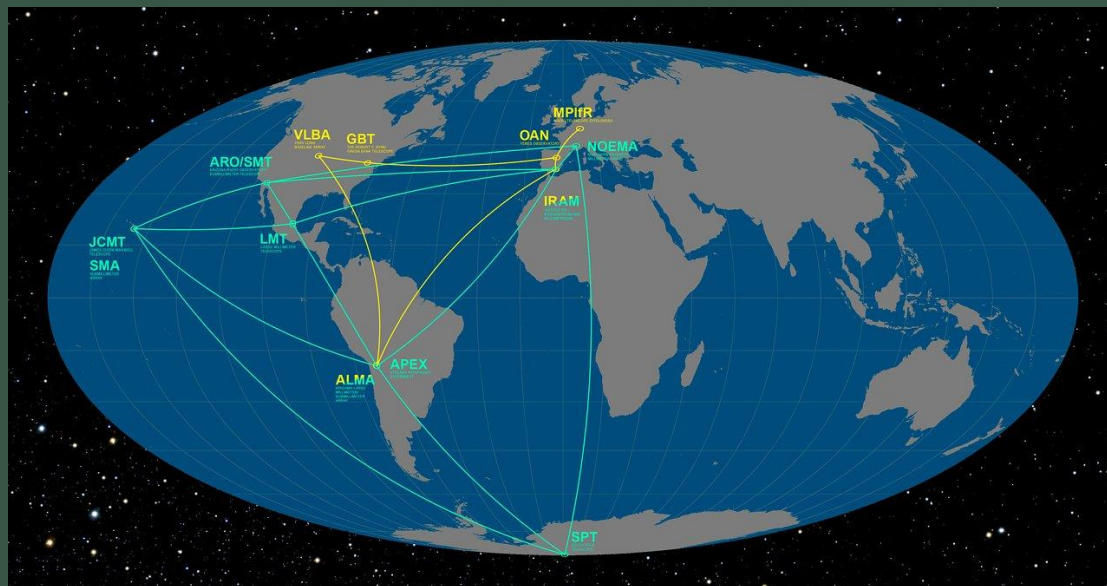
角度分解能が良い

① Event Horizon Telescope (EHT)

世界最大の望遠鏡 … 最も良い角度分散能をもつ



courtesy D. Psaltis and A. Broderick



<https://www.eso.org/public/images/ann17015a>

2017年の観測のターゲット

いて座 A* と M87

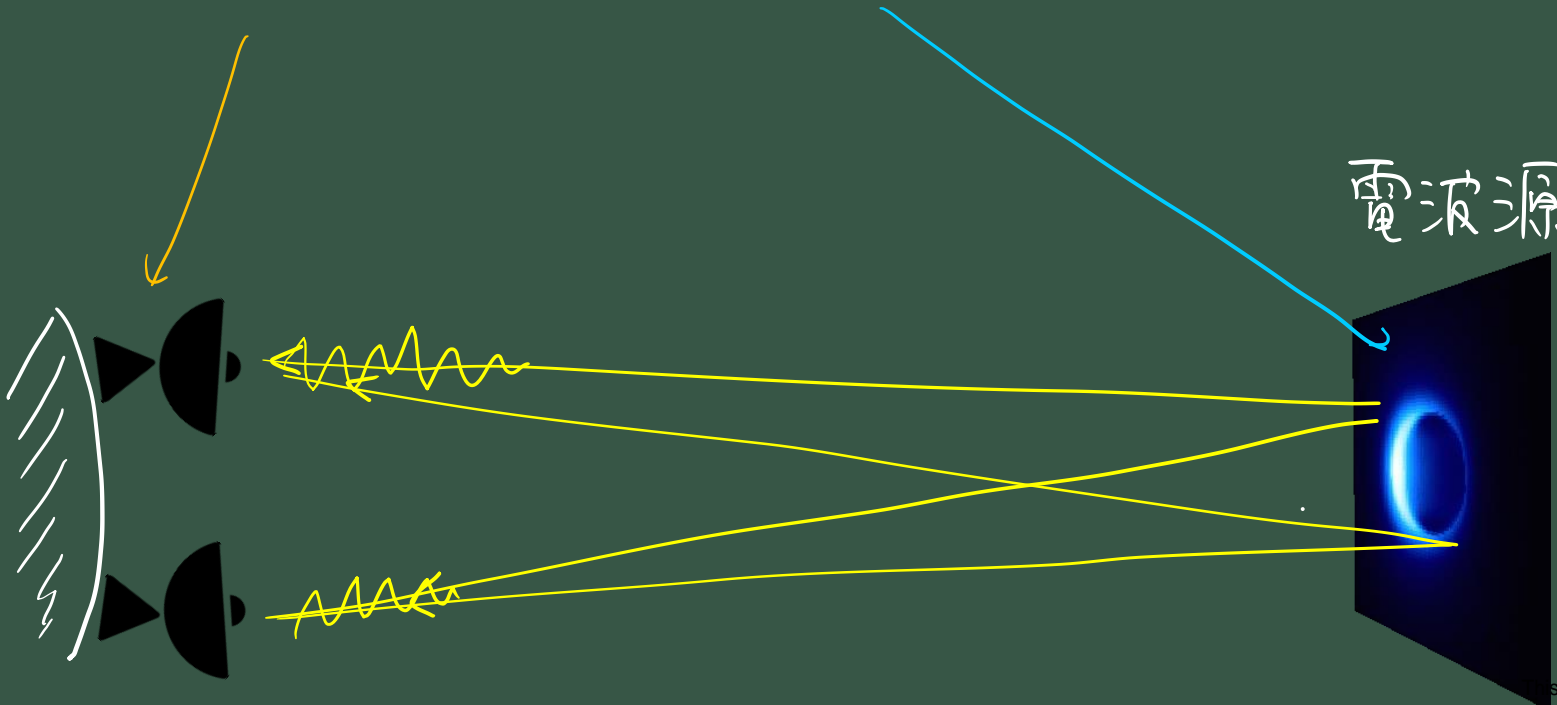
② 電波干渉計の観測

2次元フーリエ変換の関係

$$\underline{V(u, v)} = \iint \underline{I(x, y)} e^{-i(ux + vy)} dx dy$$

↑
観測量

↑
天球上の画像



① 電波干渉計

- ① 観測で得らぬ量は画像の2次元フーリエ変換にあたる量
- ② $u-v$ 面上の観測点は画像の点数より少ない

観測

$u-v$ 平面

大きさ位相

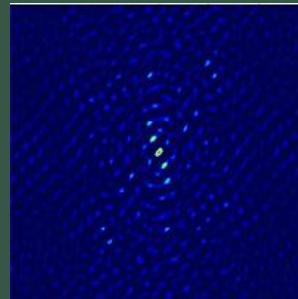
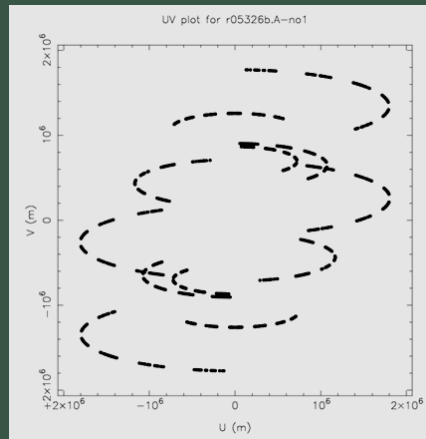
フーリエ変換



画像

$x-y$ 平面

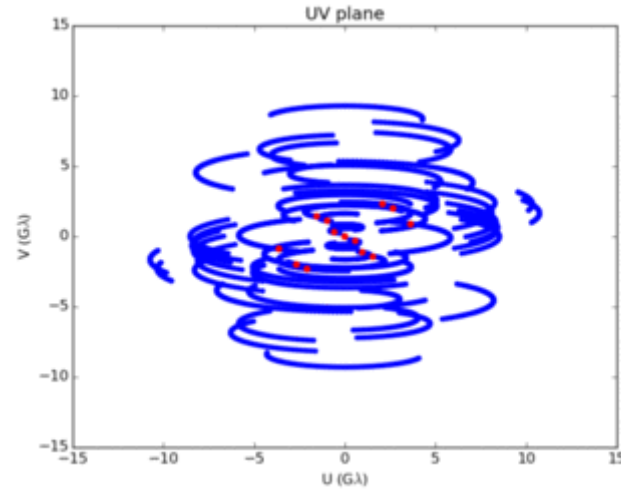
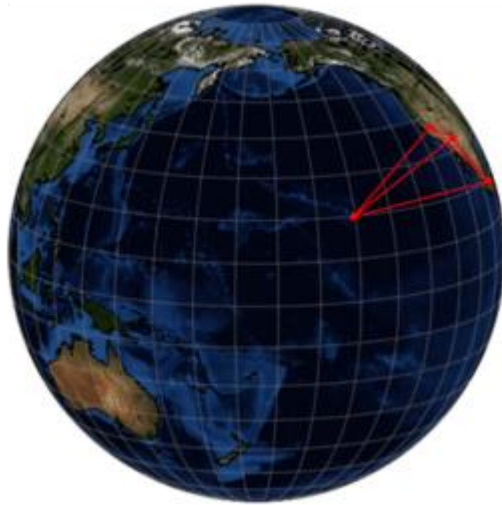
大きさのみ。(正の実数)



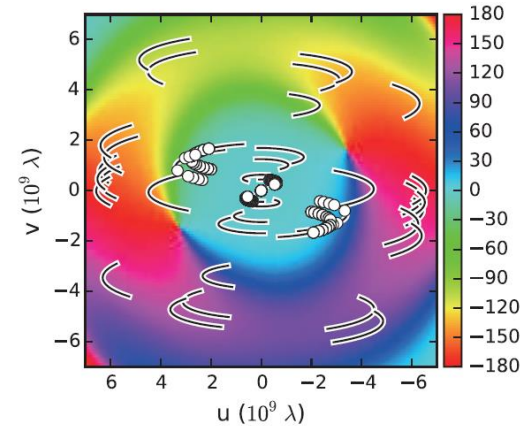
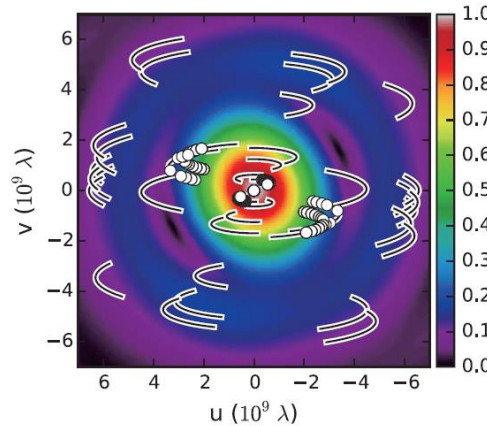
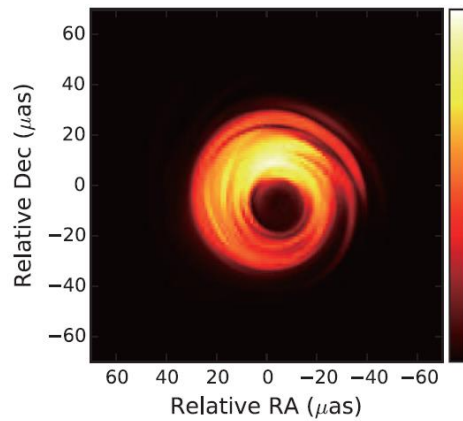
psf



① M87 の観測に対する望遠鏡の配置と期待される観測



L. Vertatschitsch, <https://www.cfa.harvard.edu/~lvertats/>



Akiyama et al., ApJ 807 (2), 150

① 電波干渉計の観測

$$\begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \vdots \\ \zeta_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ & F & \\ & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{bmatrix}$$

$$\underline{\zeta} = \underline{F} \underline{\alpha}$$

フーリエ変換は線型変換

$$\underline{M} < \underline{N}$$

→ 観測点の方が少ない。逆問題
解は決まらずにどっちが良いか不定

① 解を求める: スパースモデリング.

$$\min_{\alpha} \frac{1}{2} \|y - F\alpha\|_2^2 + \lambda \|\alpha\|_1$$

$\sum_i |\alpha_i|$

← 決定数

subj. to $\alpha_i \geq 0, (i=1, \dots, N)$

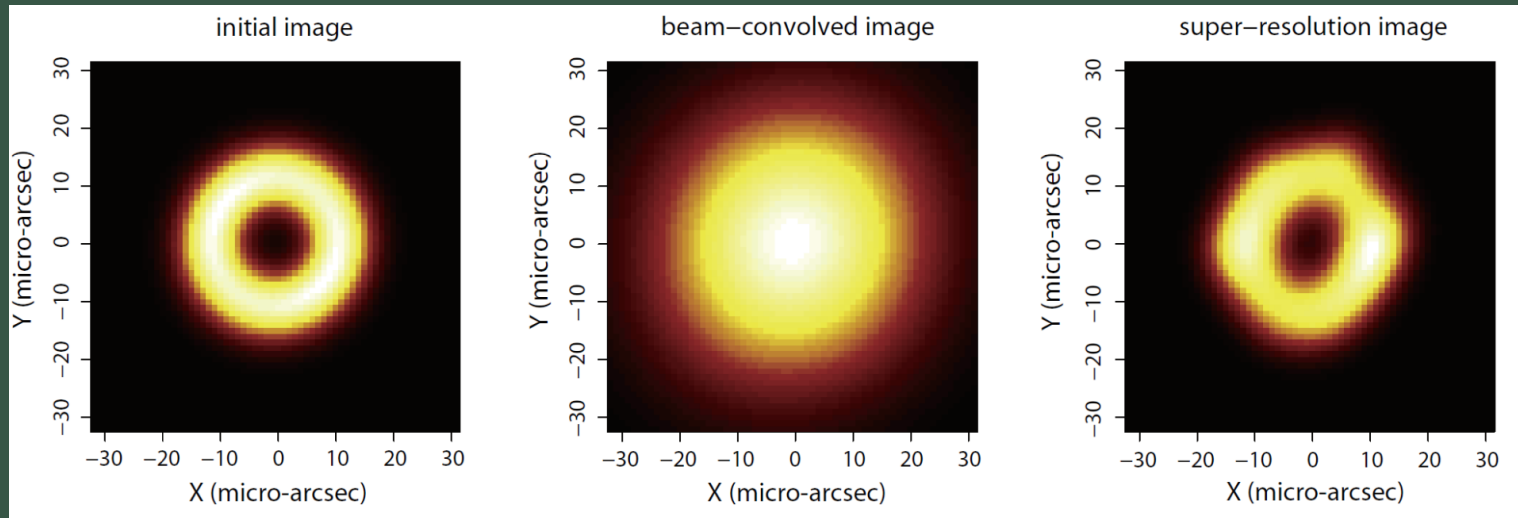
- ① 0が多い (スパースな解) を求める方法.
- ① 1996年に Tibshirani が 提案 (LASSO)
- ① λ を大きくすると 0 が多く (スパースに) なる.
- ① データから λ を決定する には 交差検証法 を用いる
- ① アルゴリズム, プログラム, 実装 を行う.

④ ブラックホールシャドウとスパースモデリング

モデル

既存法

スパースモデリング



Honma, Akiyama, Uemura, Ikeda, PASJ, 2014

- ④ 求めたい画像がスパースならうまく行く.
- ④ 画像の解像度をどのように設定するか依存.

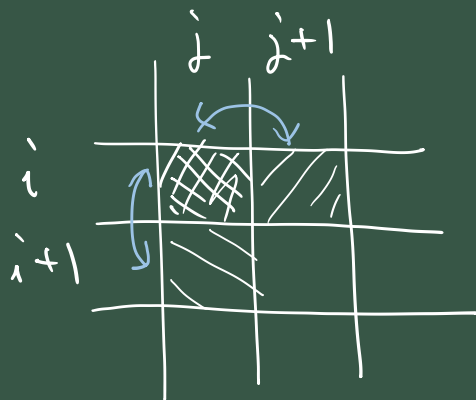
② スパースモデリングの方法 2

$$\min_{\alpha} \frac{1}{2} \|y - F\alpha\|_2^2 + \lambda_1 \|\alpha\|_1 + \lambda_2 \text{TsqV}(\alpha)$$

$$\text{subj. to } \alpha_i \geq 0 \quad (i=1, \dots, N)$$

② Total squared Variation

$$\text{TsqV}(\alpha) = \sum_{i,j} \left\{ (\alpha_{i,j} - \alpha_{i+1,j})^2 + (\alpha_{i,j} - \alpha_{i,j+1})^2 \right\}$$

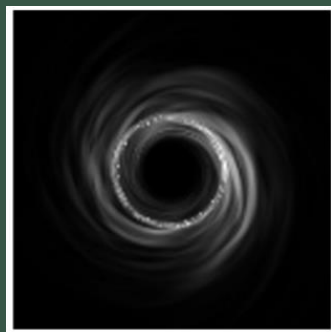
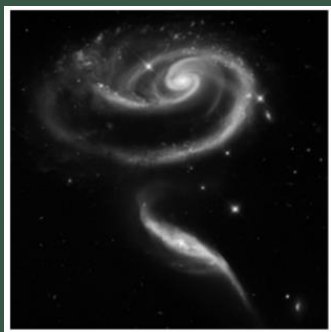
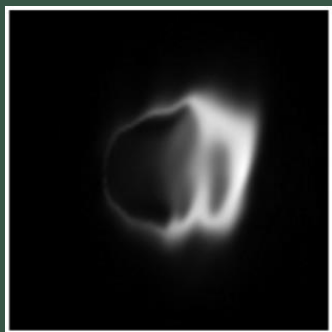


② 滑らかな画像

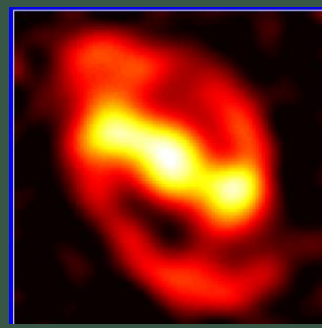
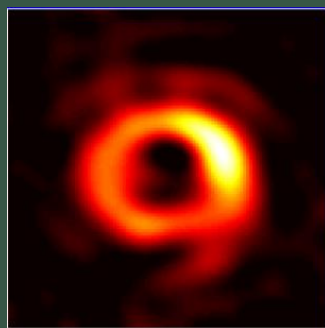
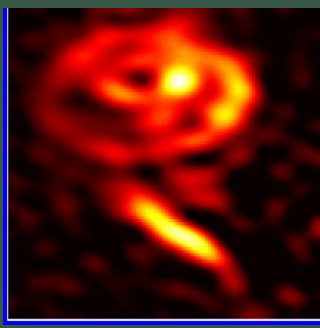
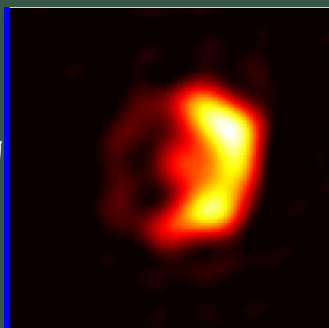
② ロ-ハースフィルタ-

@ Image Challenge (MIT)

model

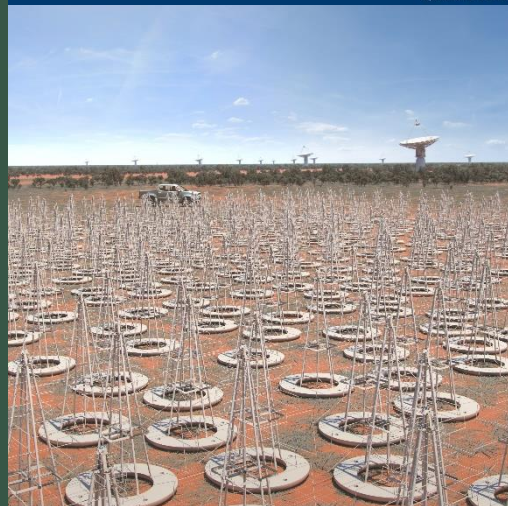


$L1 + s_{\text{fTV}}$



どんな絵でも撮像できるようにアルゴリズムを開発.

④ 次世代の電波干渉計 Square Kilometer Array (SKA)



<http://www.ska.gov.au>

<https://skatelescope.org>

1 Exabyte / Day のデータ
を生む。 新たな処理法、
アルゴリズム、 ハードウェアの開発
が必要。



This document is provided by JAXA.

① まとめ

- ① これからの天文学では データ科学の最新の方法 を必要としている。

ビッグデータへの対応

計測限界を高める。

- ② 宇宙の理解のためにも、データ科学との協力を 進める必要がある。