

春の合同一般講演会「はるかなる銀河と宇宙の謎」

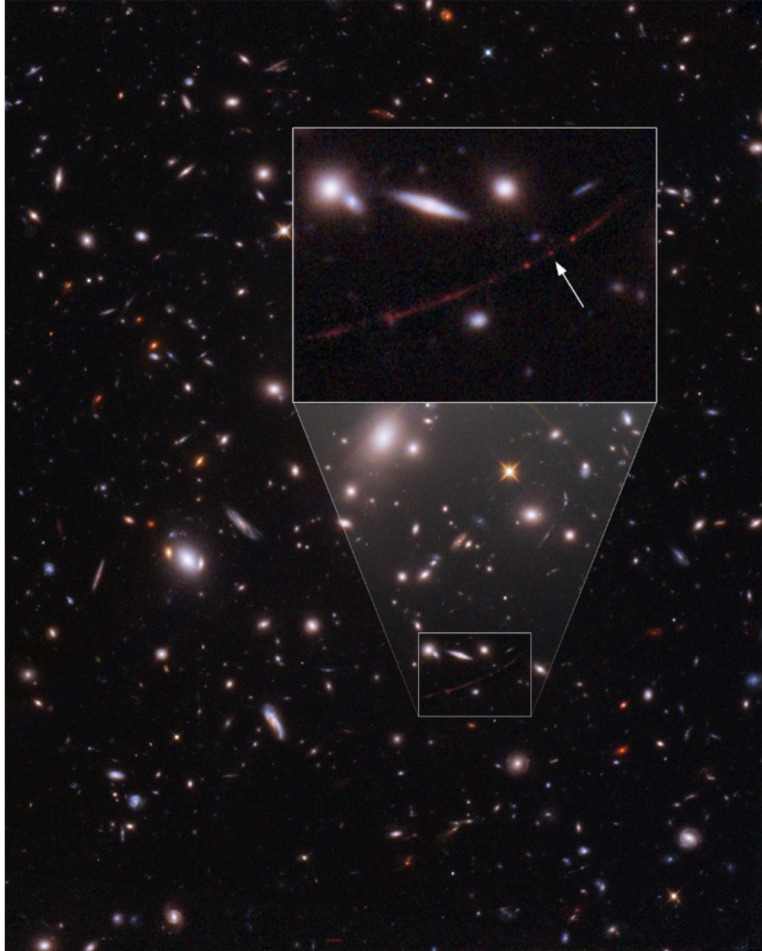
最大の望遠鏡と 最速のコンピュータで 宇宙の謎に迫る

吉田直紀

東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構
理学系研究科物理学専攻

最も遠くの星

NASA/ESA/ B. Welch et al.



自然が作り出した
重力の「レンズ」
大量の物質ダークマター

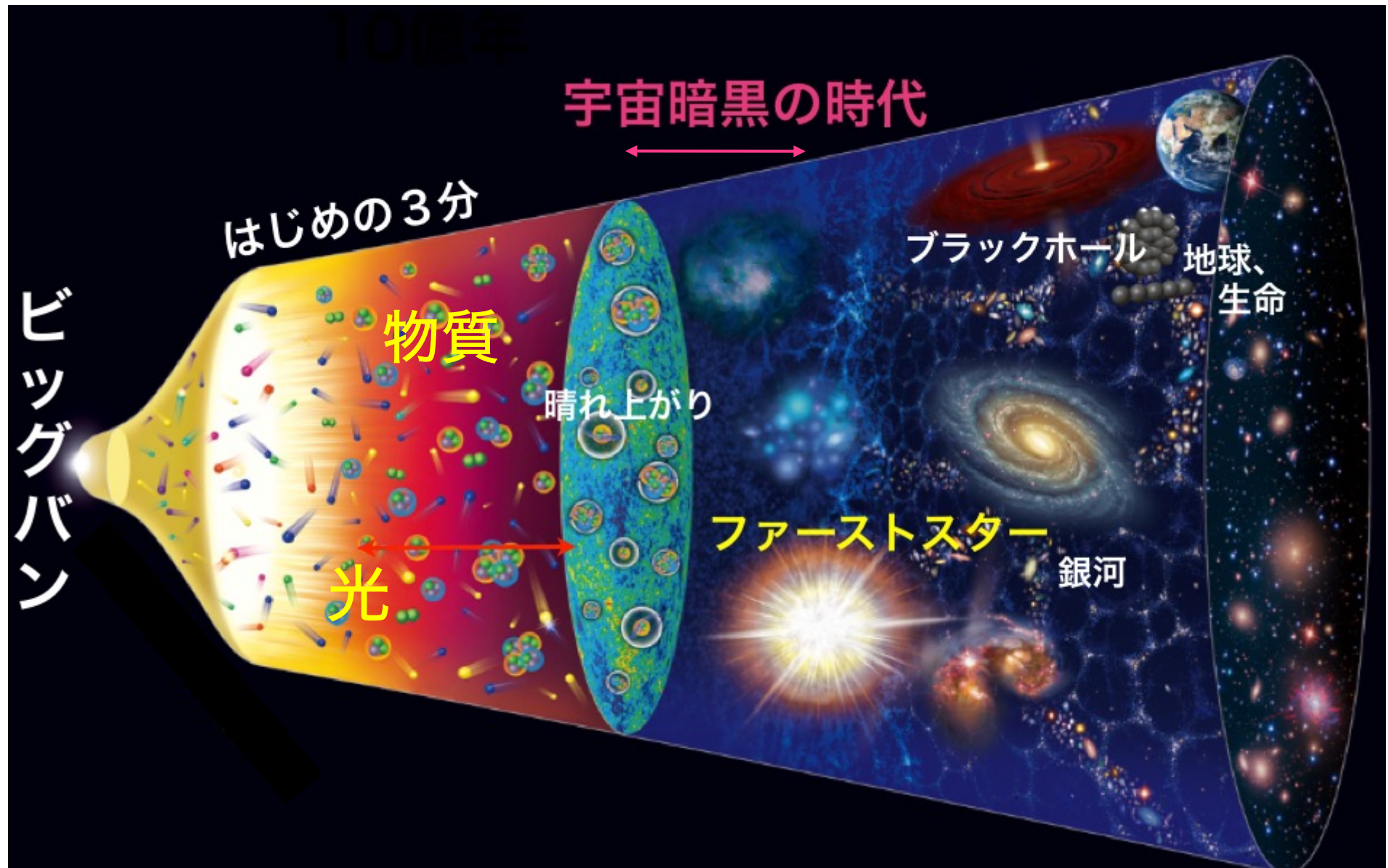
129 億光年離れた明けの明星
「エアレンデル」
太陽の50倍以上! の質量

宇宙年齢9億年の頃に
生まれた大質量星を**直接観測**



宇宙の歴史

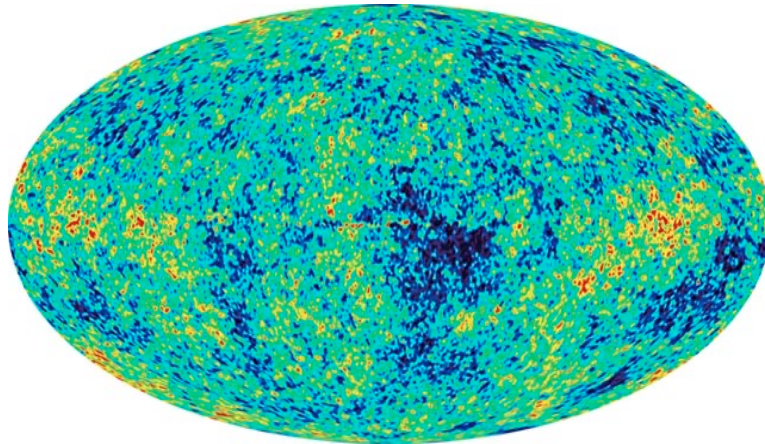
138億年
(現在)



はじめは薄いガスがゆらゆらと
ただよっていただけだった...

重力による宇宙の構造形成

宇宙初期の物質分布



homogeneous universe

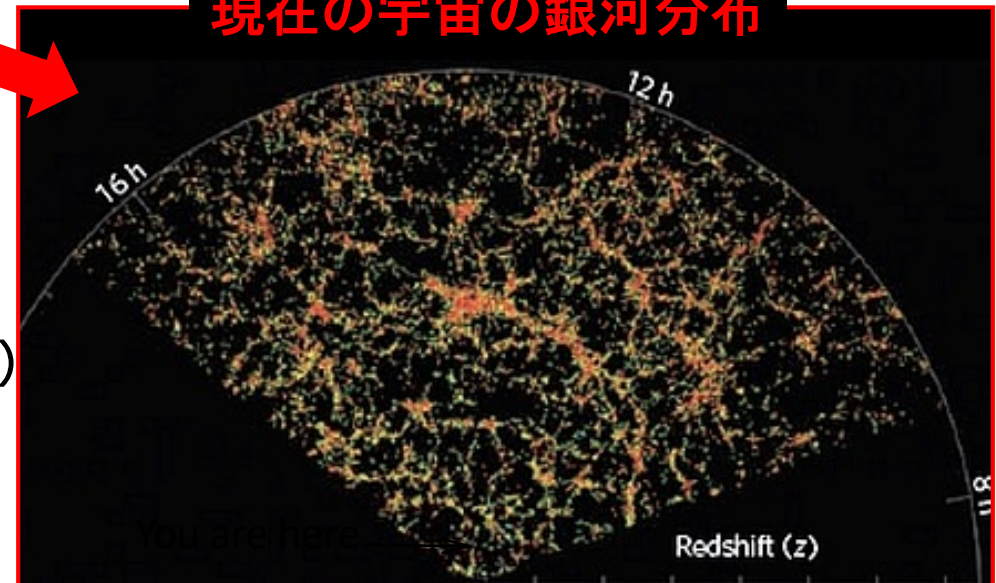
©ESA and the Planck Collaboration

しかし、初期宇宙の物質密度揺らぎはとても小さかった
(深さ100メートルの湖で1mmのさざ波)

現在の宇宙を形作るには
ダークマターの働きが必要

標準理論モデル：宇宙初期に生成されたわずかな密度揺らぎ、ビッグバンのさざ波をもとにして、重力により大規模構造は作られた。

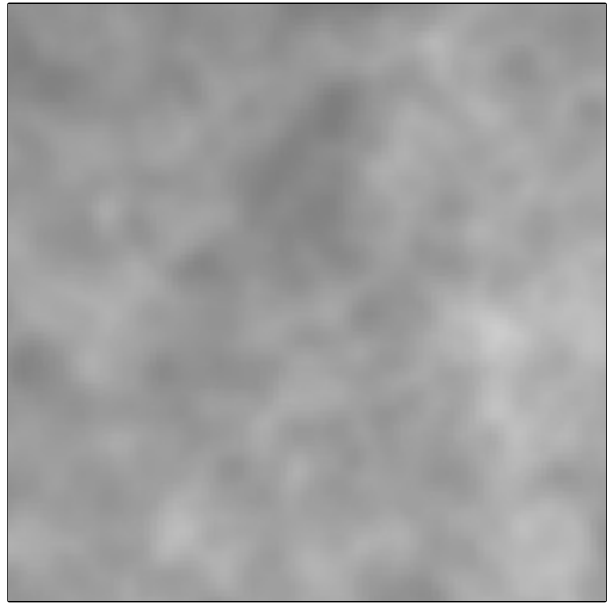
現在の宇宙の銀河分布



©Sloan Digital Sky Survey

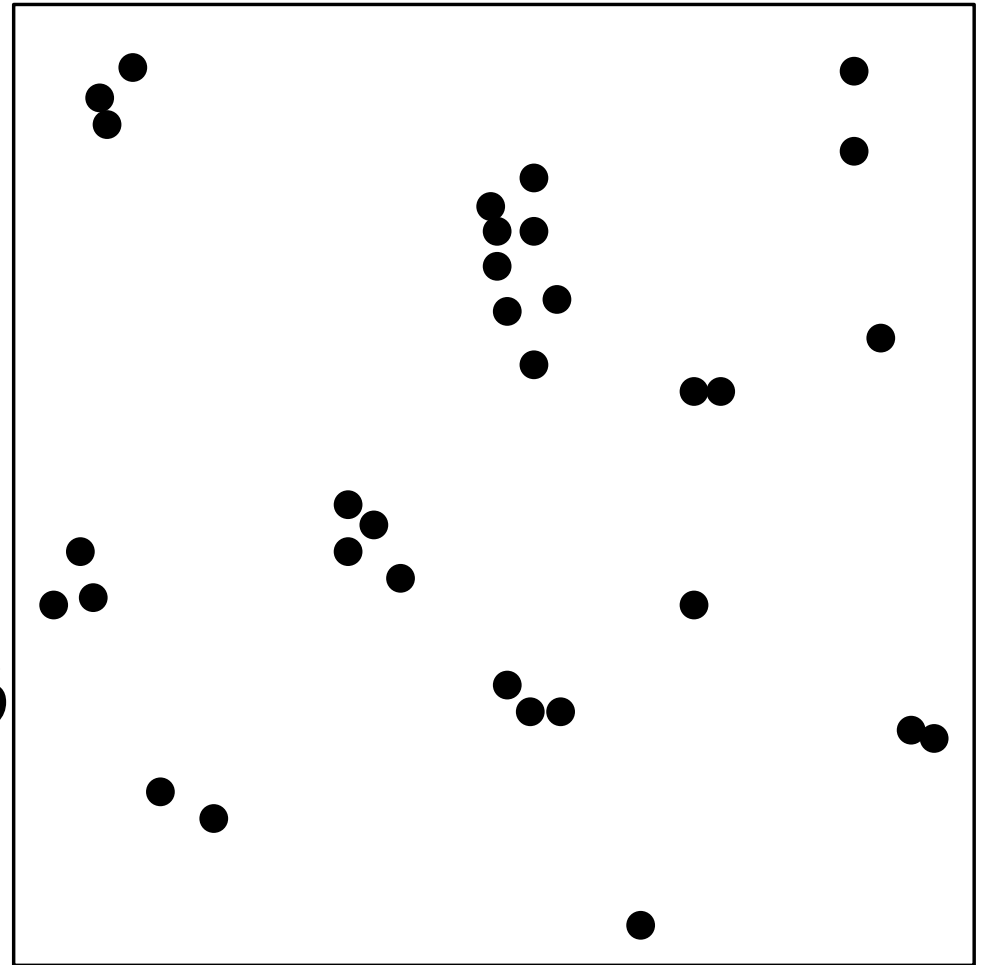
宇宙の進化をコンピュータで表す

初期宇宙の物質分布



“つぶつぶ”の散らばりで表現

→
重力
で
引き合う



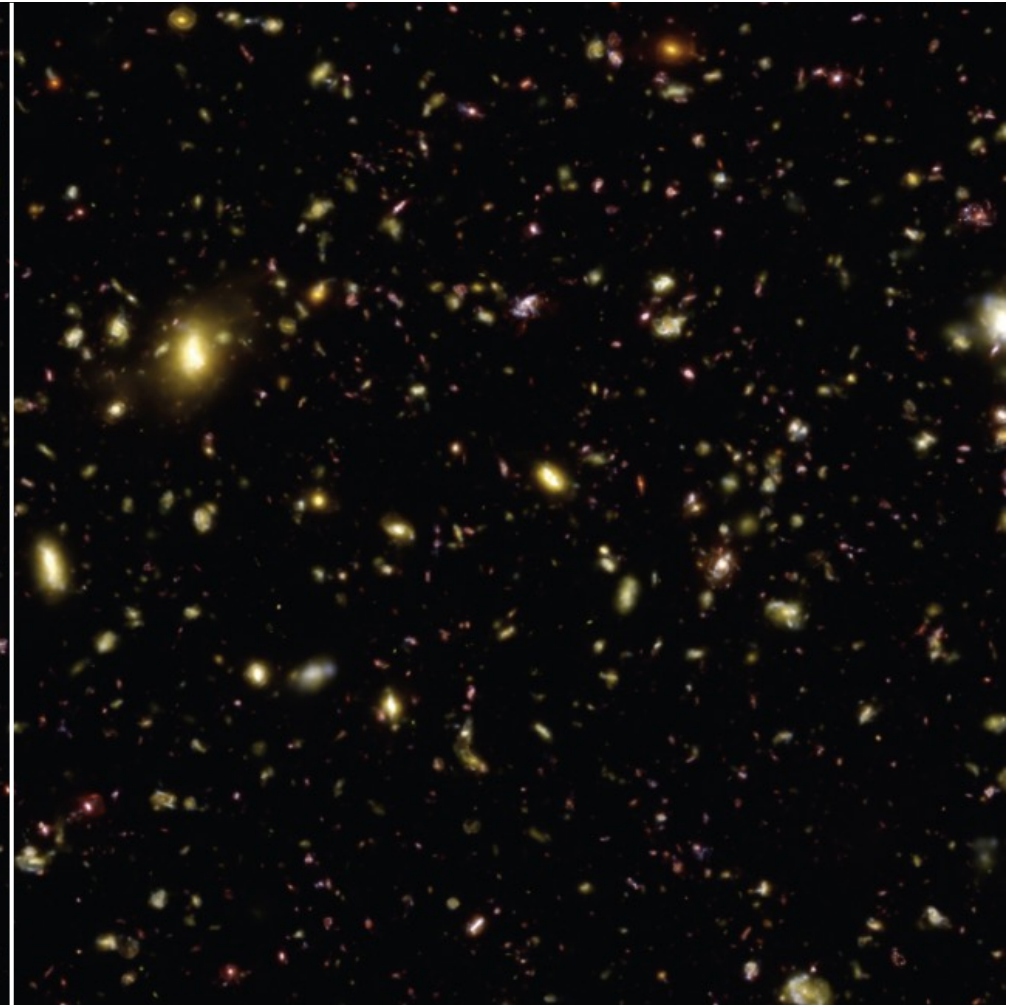
宇宙のシミュレーション：これまでにできたこと

ダークマターの重力に加えて星間ガスの運動、星生成、超新星爆発などを取り入れたコンピューターモデル

©Illustris Project

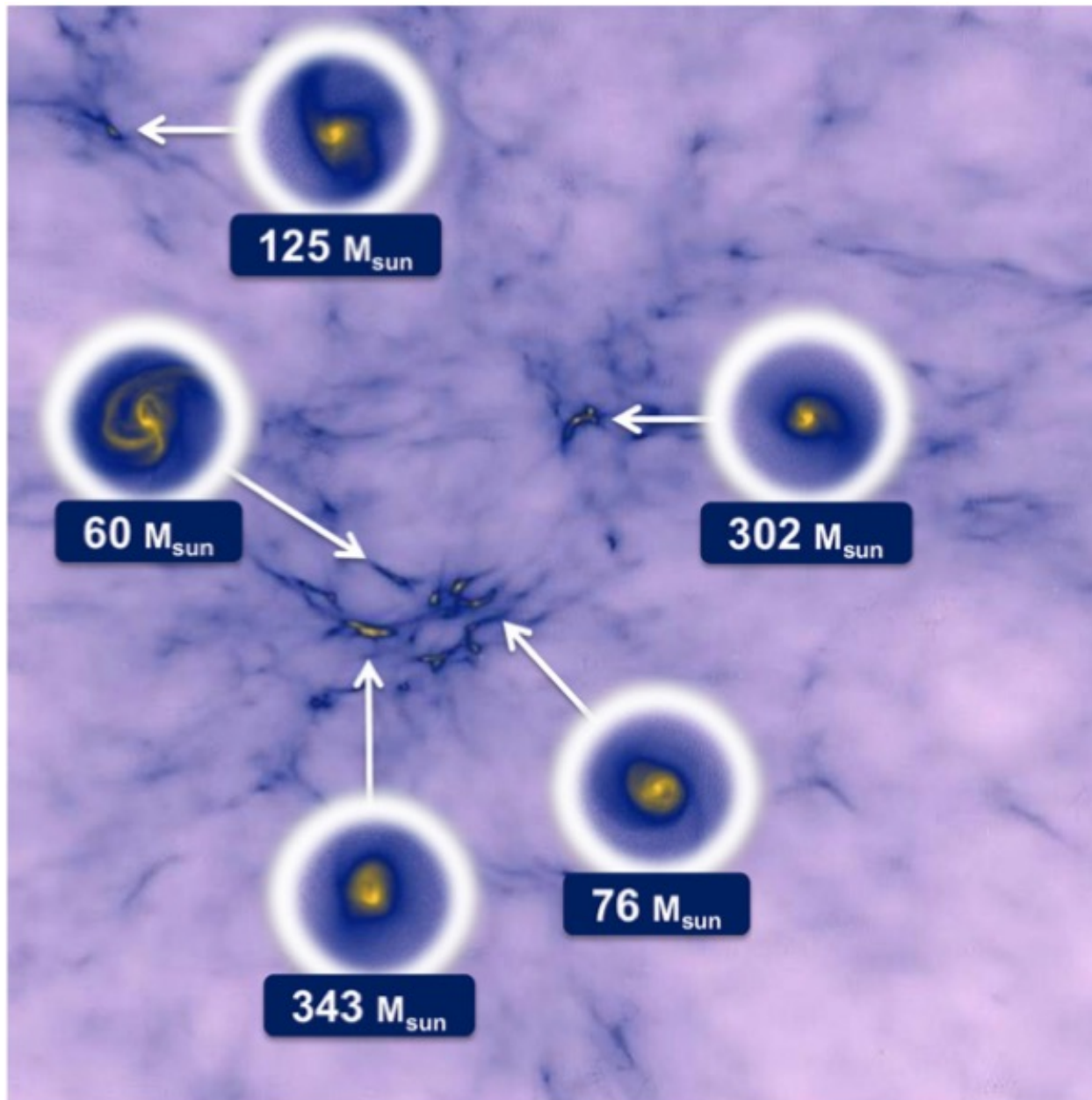


ハッブル望遠鏡の画像



コンピューターシミュレーションの画像

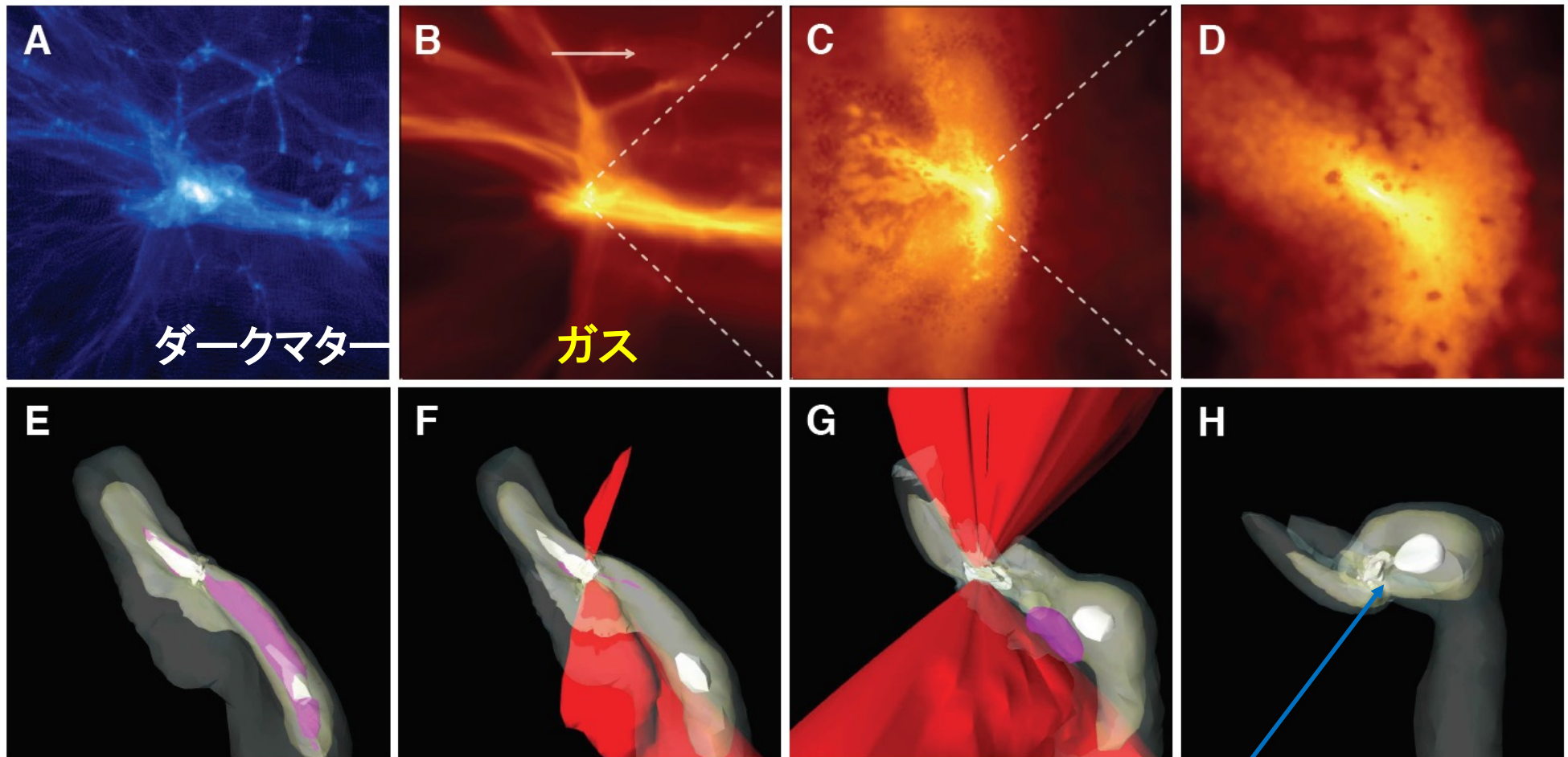
ファーストスター



広い宇宙の中では、
宇宙創生後 1億年-3億年
の頃にかけて
ファーストスターがぽつぽつ
と生まれる

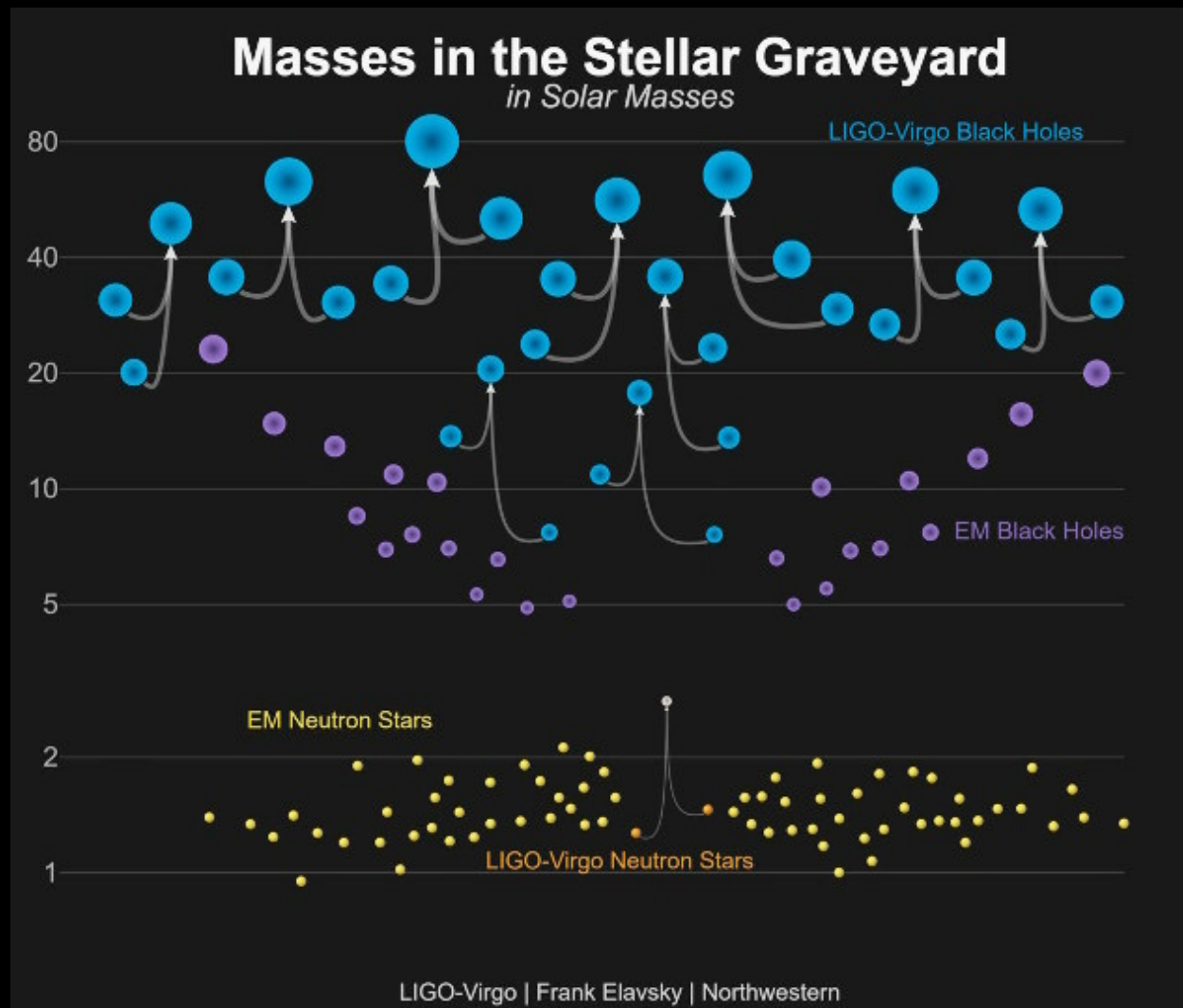
東京大学 平野信吾
さんによるシミュレーション

巨大ブラックホールの起源か？



中心部には太陽の3万倍以上も重い
ブラックホールができる！

重力波望遠鏡LIGOで見つけた たくさんの重いブラックホール



ところで最近...ノーベル賞は空から降ってくる

2011年 ノーベル物理学賞

遠方超新星の観測による宇宙の加速度的膨張の発見

2015年 ノーベル物理学賞

ニュートリノ振動の発見とニュートリノ質量

2016年 ノーベル物理学賞

ブラックホールからの重力波の検出

2019年 ノーベル物理学賞

宇宙論と太陽系外惑星

2020年 ノーベル物理学賞

銀河中心ブラックホール

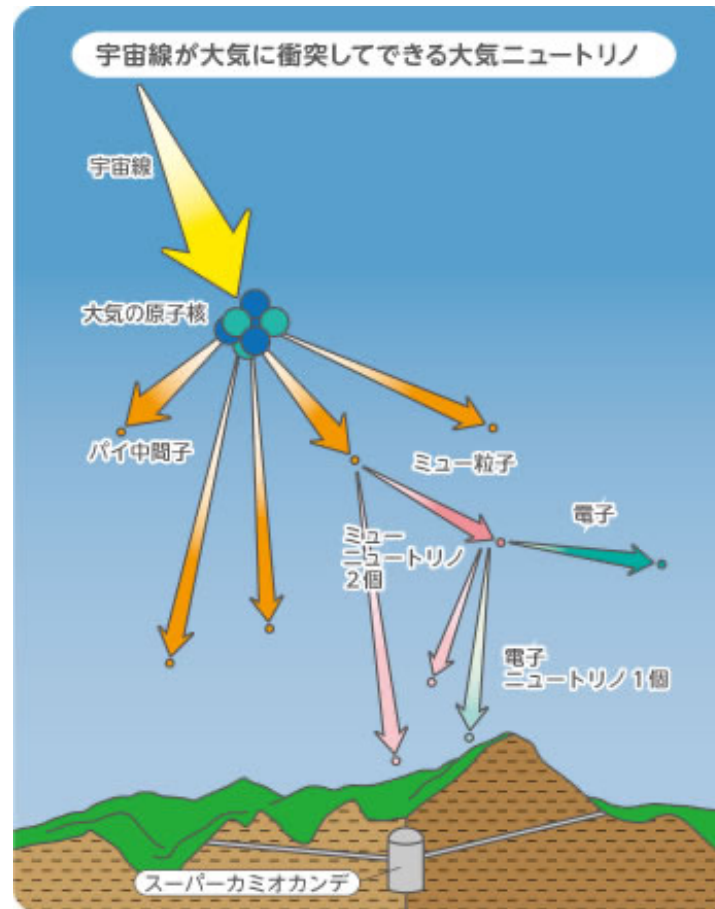
2015年 ノーベル物理学賞



Ill. N. Elmehed. © Nobel Media AB 2015.

Takaaki Kajita

Prize share: 1/2



©戸塚洋二ニュートリノ博物館

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald *"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"*

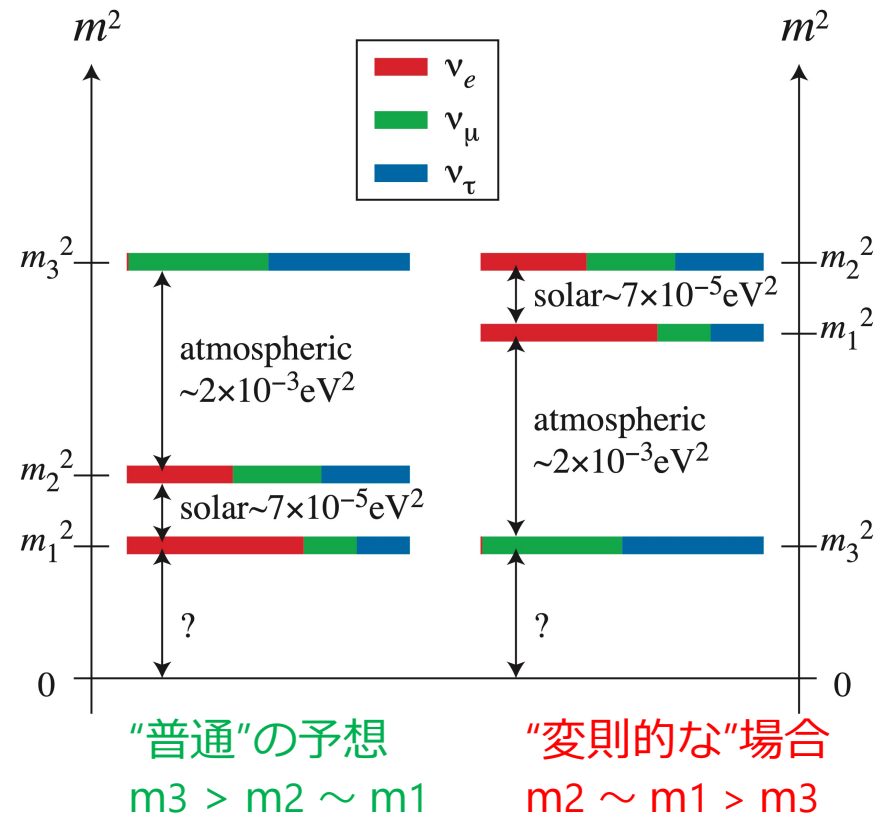
ニュートリノ: 何も欲しがらない粒子

Neutrinos ... they have zero charge, zero size, and possibly zero mass.

電荷をもっていない。サイズも一番小さい。質量も**ほとんど**ない。

ニュートリノ振動実験により
3種のニュートリノは質量「差」
を持つことが分かった。

そのわずかな質量が極めて重要
だが、どれくらい「軽い」か
わかっていない。

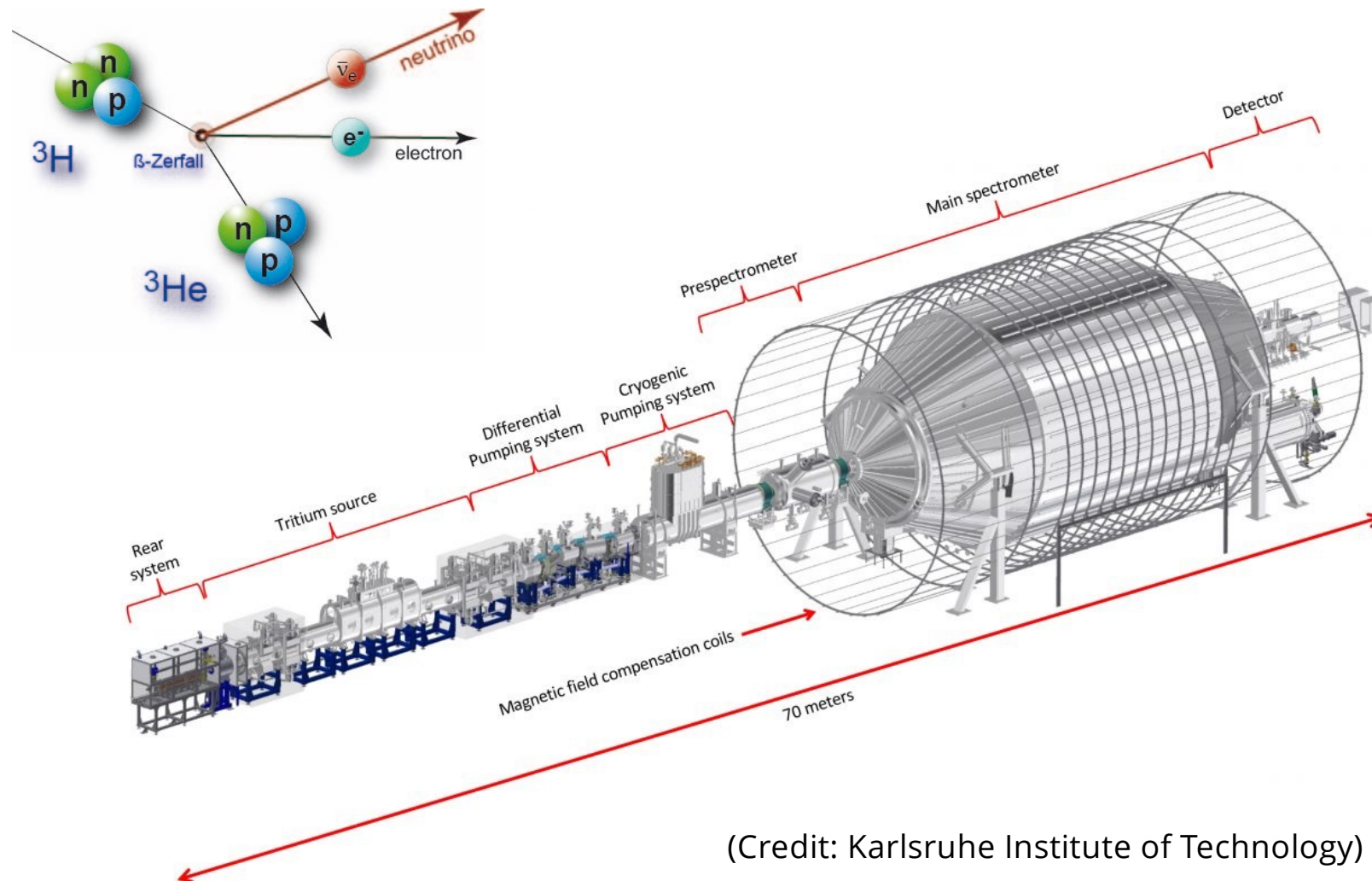


幽霊のような粒子



冥王星までの距離のそのまた50倍も遠くまで重い鉛を埋め尽くすとする。
それでも太陽から放たれるニュートリノの半分はすり抜けていってしまう。

ニュートリノの質量を測る KATRIN 実験



ニュートリノの質量を測る!

地上実験

$m_{\nu e} < 1.1 \text{ eV}$
KATRIN 実験 (2019)

将来展望

0.2 eV Katrin 2023
0.04 eV Project 8 Phase IV

宇宙の観測

$\Sigma m < 0.12 \text{ eV}$
Planck 衛星による観測

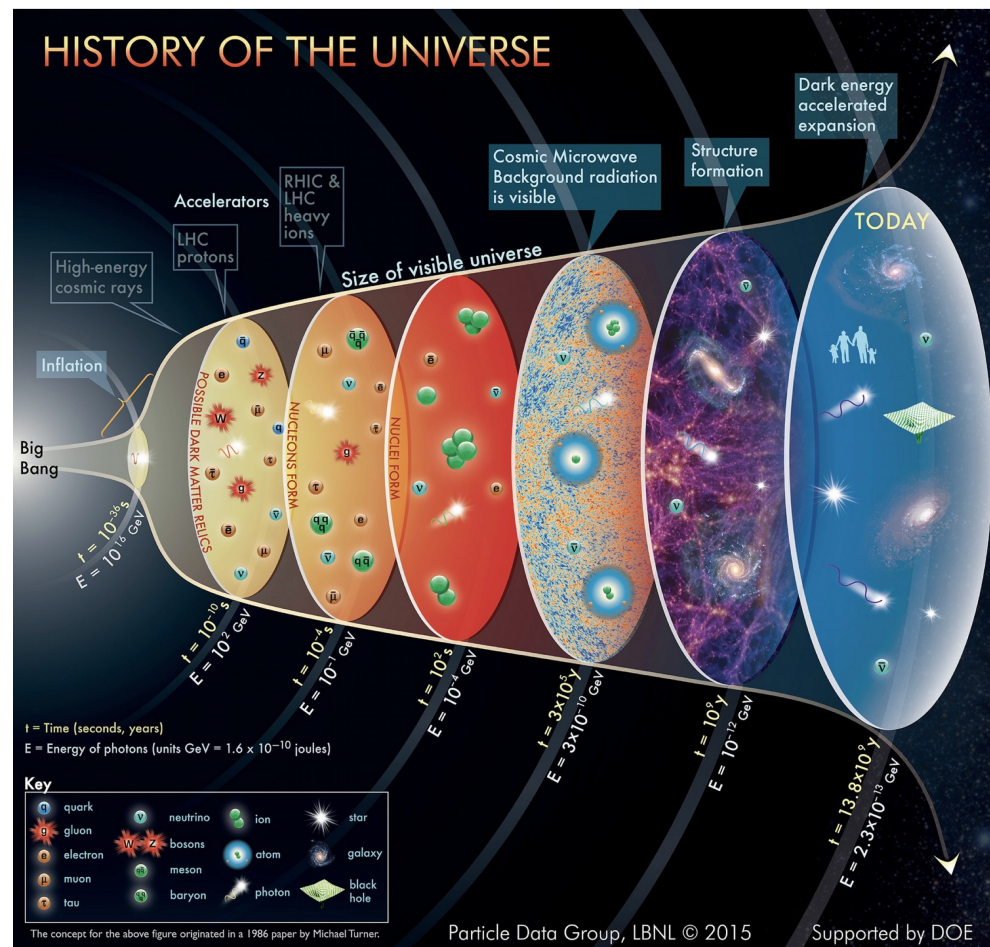
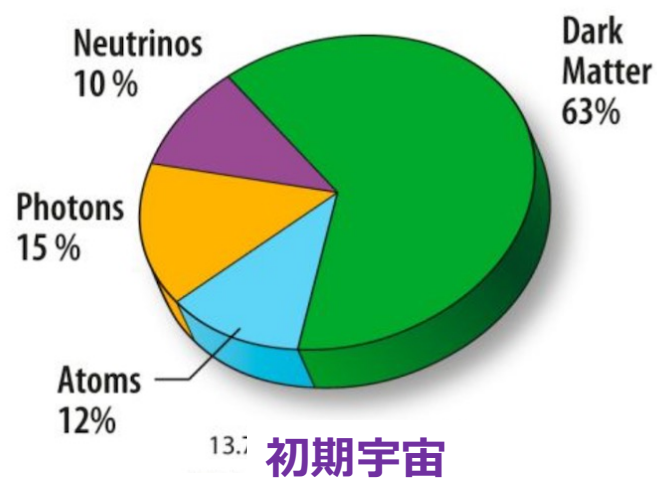
将来観測

0.03 eV (宇宙の物質分布から)

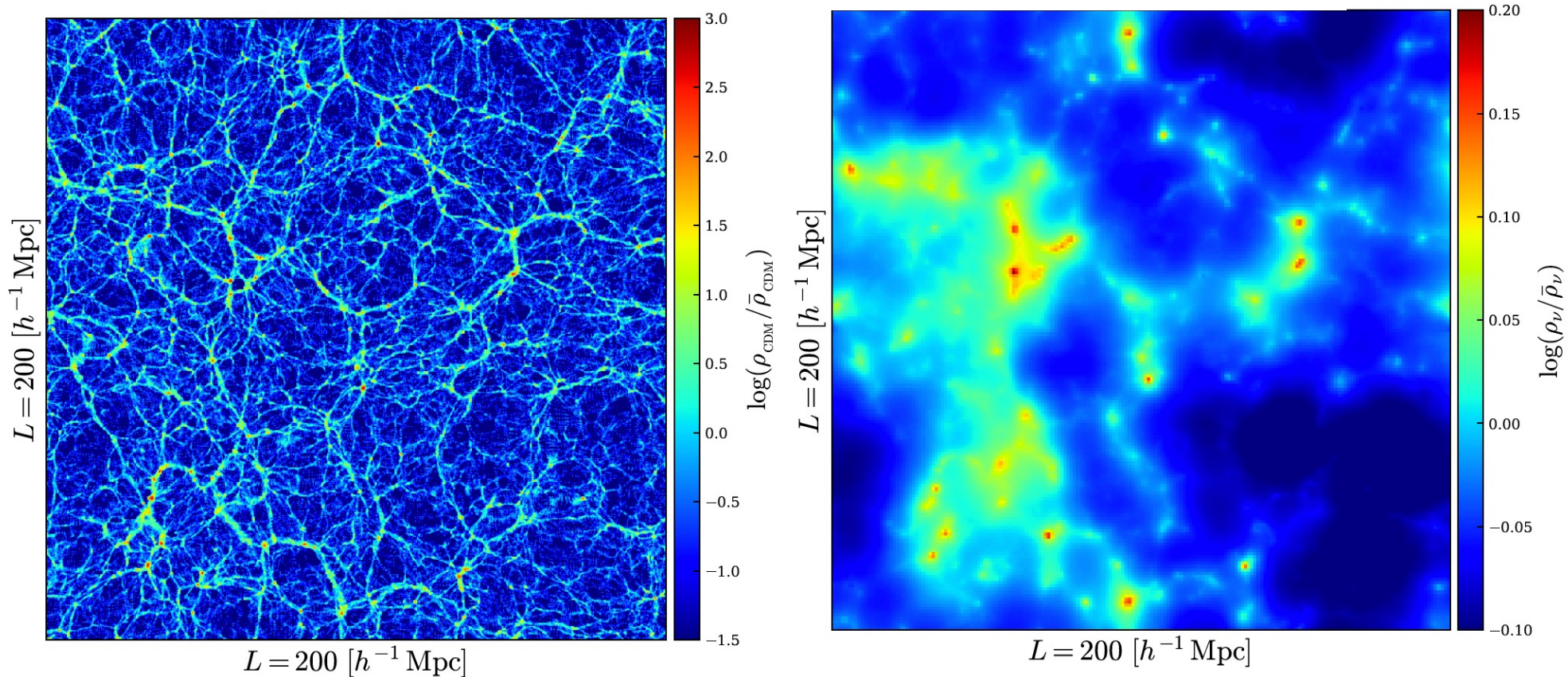
宇宙背景ニュートリノ：ビッグバンの名残

$$T_\nu = \left(\frac{4}{11} \right)^{1/3} T_\gamma$$

$$n_{\nu+\bar{\nu}} = 112 \text{ cm}^{-3}$$



宇宙のダークマター（左）とニュートリノ（右）



コンピュータシミュレーションで再現された宇宙の物質分布

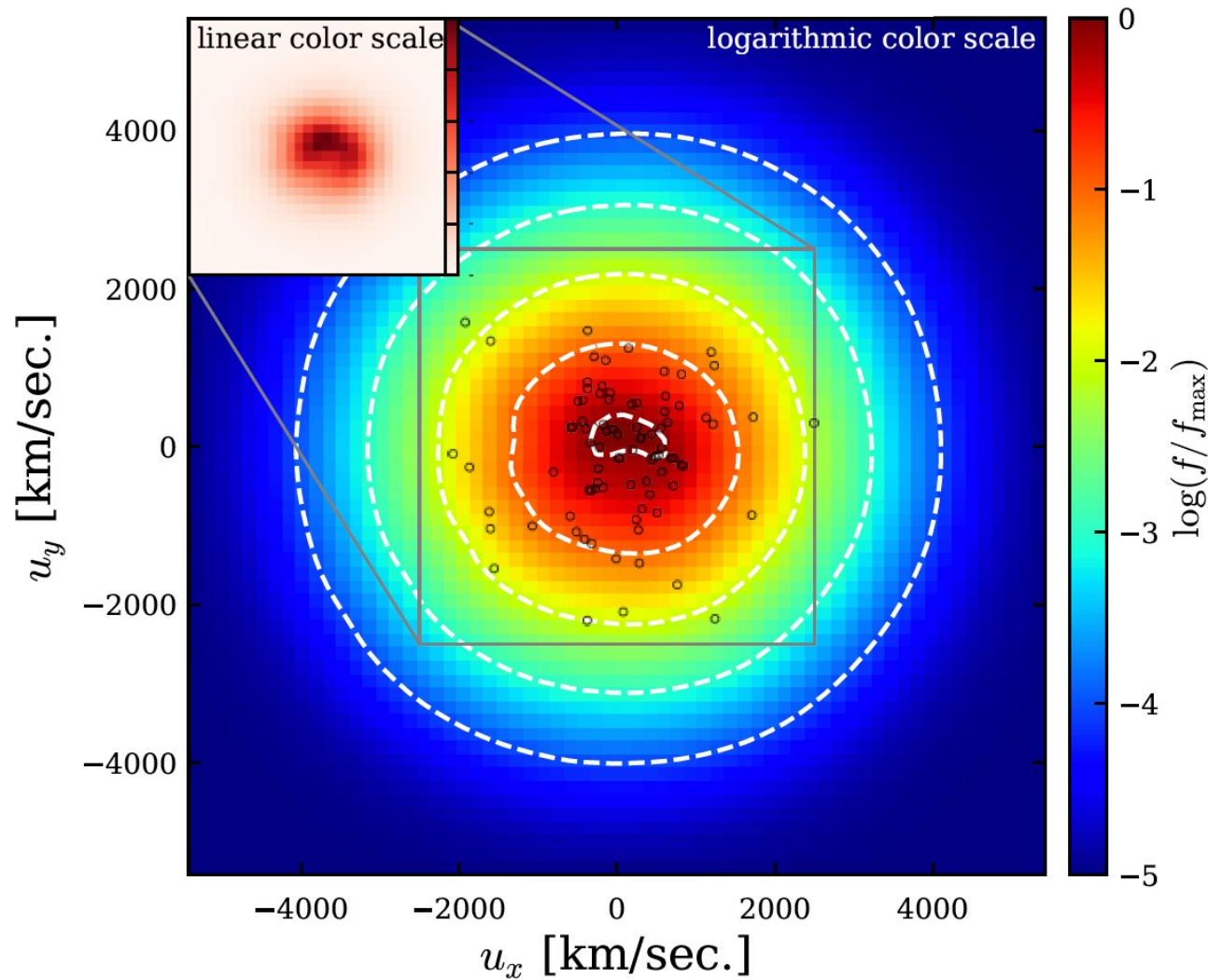
ニュートリノの運動と分布を表す数式

ボルツマン方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}} - \nabla \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{v}} = 0$$

ある初期状態（初期分布）からはじめたときの
速度分布関数 $f(x, y, z, u, v, w)$ の時間変化
をあらわす方程式. 6次元空間の運動方程式

ニュートリノの速度の分布



空間3次元+速度空間3次元の時間発展(+1次元)は
まともに計算できないとされていた...

問題:「富岳」が全力で計算しているとき、
1日にどのくらい電気を使う？

- A 4人家族の家の10年分
- B 4人家族の家の100年分
- C 4人家族の家の1000年分



スパヤン

7月16日から3日間 借り切ってみた

707万個のCPUが一斉にうごいているときの様子

```
Windows PowerShell  x  Ubuntu  +  v  -  □  x

# Number of particles : 1011901
FIX_ASSIGN (CPU) :: 1.7220e+00 [sec] (Wall) :: 1.4350e-01 [sec]
UPDATE_EXPANSION (CPU) :: 9.7864e-03 [sec] (Wall) :: 8.1444e-04 [sec]
# Update expansion to += 5.111467e-02

# ---- update_skirt ----
# Number of particles to the upper rank x : 15948
# Number of particles to the lower rank x : 14759
# Number of particles to the upper rank y : 16512
# Number of particles to the lower rank y : 16155
# Number of particles to the rank x+ y+ : 237
# Number of particles to the rank x+ y- : 273
# Number of particles to the rank x- y+ : 270
# Number of particles to the rank x- y- : 243
# Receiving 14254 particles from the lower rank x
# Receiving 15142 particles from the upper rank x
# Receiving 15613 particles from the lower rank y
# Receiving 15701 particles from the upper rank y
# Receiving 213 particles from rank x- y-
# Receiving 242 particles from rank x+ y-
# Receiving 250 particles from rank x- y+
# Receiving 239 particles from rank x+ y+
UPDATE_SKIRT (CPU) :: 3.5350e-01 [sec] (Wall) :: 2.9458e-02 [sec]

708 708 4.933e-02 1.023e-04 7.385880e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.496717e+00 3.659359e+03
709 709 4.943e-02 1.026e-04 7.374278e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.526428e+00 3.665885e+03
710 710 4.954e-02 1.029e-04 7.362681e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 1.008964e+01 3.675975e+03
711 711 4.964e-02 1.032e-04 7.351094e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.504014e+00 3.682479e+03
712 712 4.974e-02 1.034e-04 7.339513e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.521916e+00 3.689001e+03
713 713 4.985e-02 1.037e-04 7.327939e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.537977e+00 3.695539e+03
714 714 4.995e-02 1.040e-04 7.316373e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.521391e+00 3.702061e+03
715 715 5.006e-02 1.043e-04 7.304814e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.512252e+00 3.708573e+03
716 716 5.016e-02 1.046e-04 7.293262e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.526324e+00 3.715099e+03
717 717 5.026e-02 1.049e-04 7.281719e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.521263e+00 3.721620e+03
718 718 5.037e-02 1.052e-04 7.270190e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.519279e+00 3.728140e+03
719 719 5.048e-02 1.055e-04 7.258662e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.508524e+00 3.734648e+03
720 720 5.058e-02 1.058e-04 7.247141e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.499754e+00 3.741148e+03
721 721 5.069e-02 1.061e-04 7.235636e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.510244e+00 3.747658e+03
722 722 5.079e-02 1.064e-04 7.224131e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.501794e+00 3.754160e+03
723 723 5.090e-02 1.067e-04 7.212642e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.530538e+00 3.760690e+03
724 724 5.101e-02 1.070e-04 7.201152e+00 1.114740e-03 3.564961e-02 3.676435e-02 6.513966e+00 3.767204e+03

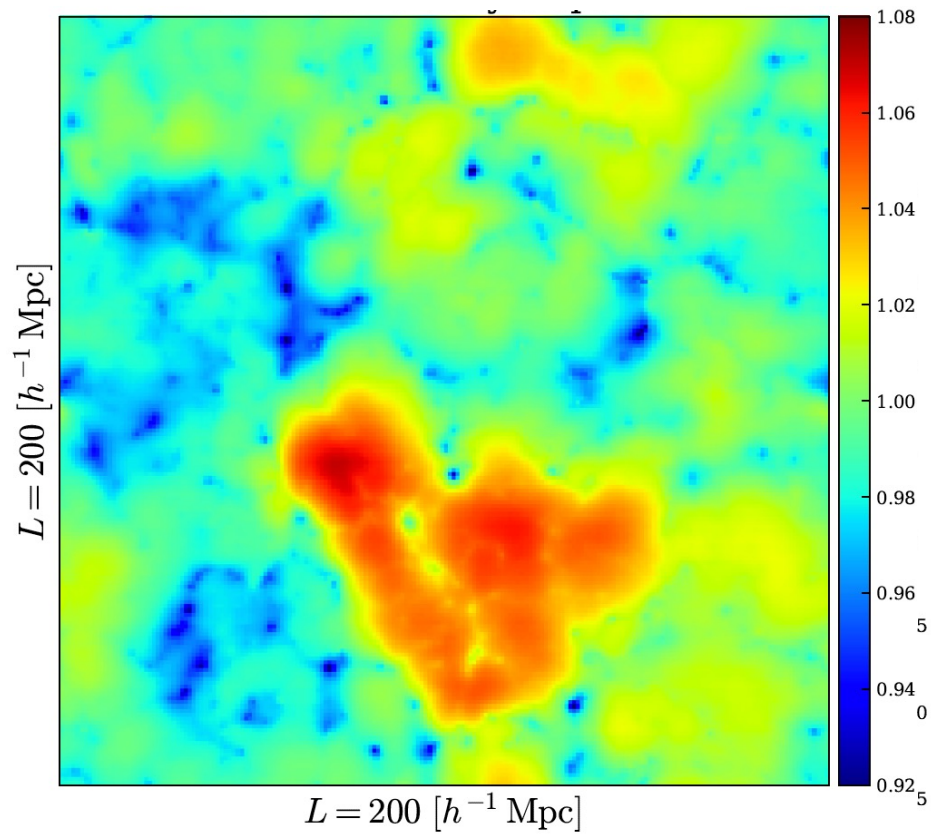
0:gorilla 1:zsh 2:ssh 3:fugaku-hpci 4:fugaku-hpci 5:fugaku-hpci 6:zsh 7:zsh 0.00 0.00 0.00 1/560 8749
```

富岳全系シミュレーション 400兆個の格子点上で計算

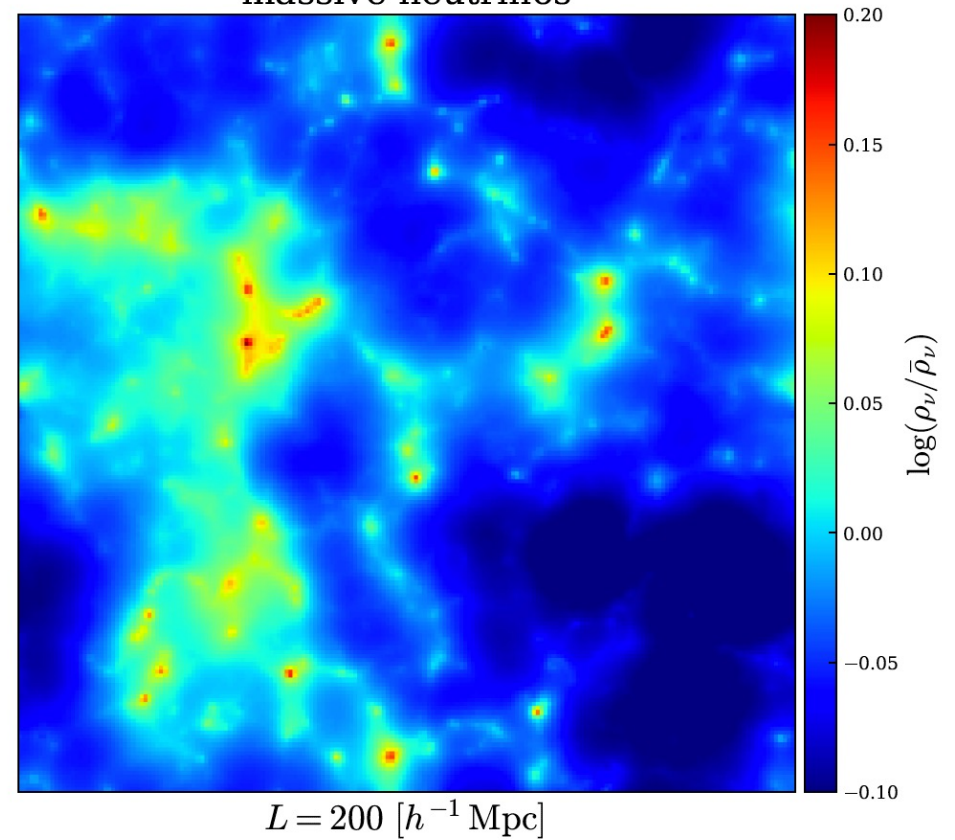
ダークマターに引き寄せられるニュートリノ

ニュートリノの“温度”

高エネルギーのニュートリノはどこにあるのか



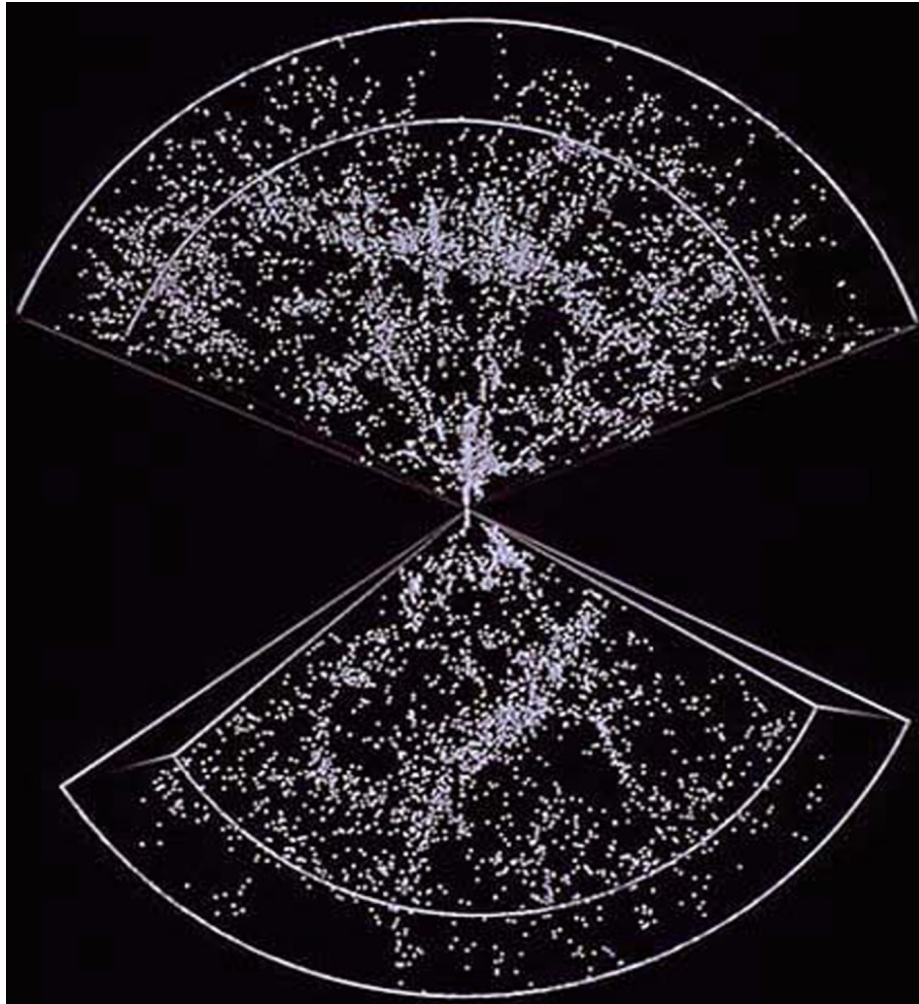
massive neutrinos



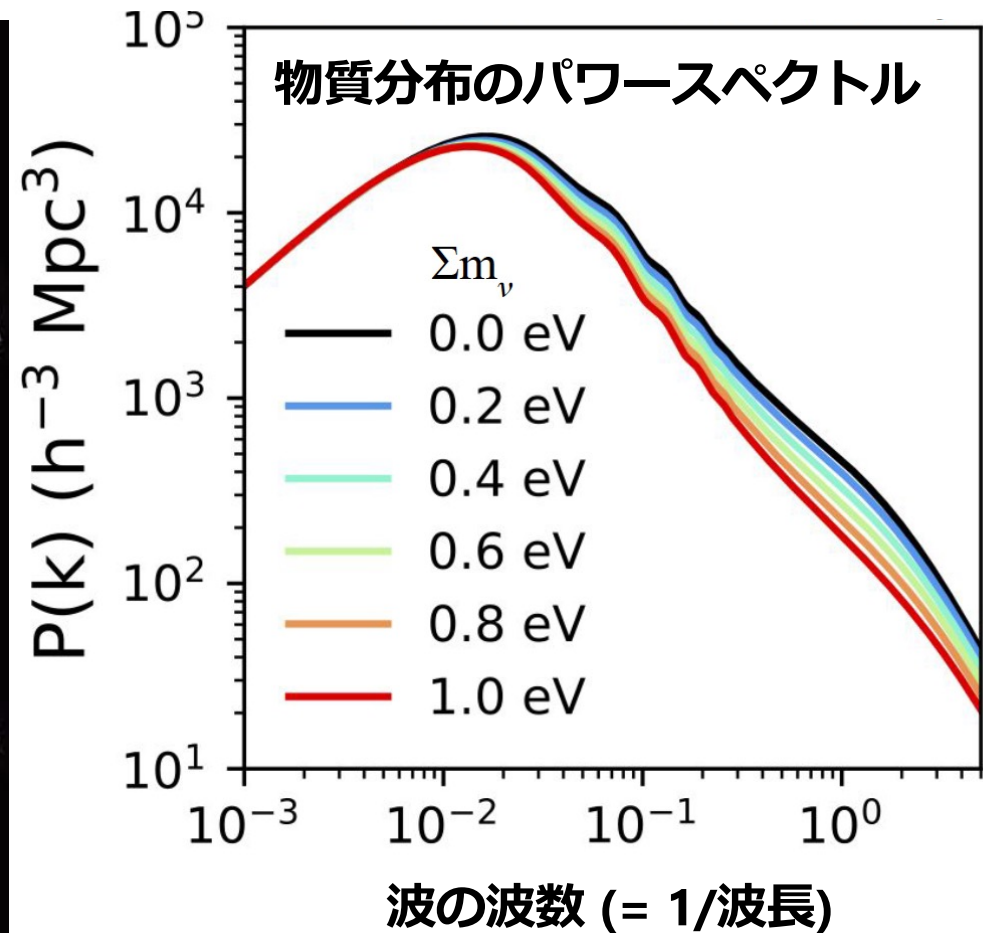
富岳で行った最大のシミュレーション
(京都大学 田中賢さん提供)

宇宙の地図をつくる

ニュートリノが宇宙の構造におよぼす影響



©Sloan Digital Sky Survey



ニュートリノがたくさんいる場所では
銀河の分布が滑らかになる

まとめ

何もなかった宇宙にたくさんの星や銀河が生まれた

130億年以上前にも星や銀河が存在した

宇宙にはブラックホールがたくさんある

どこから来たのだろうか

宇宙はニュートリノで満たされている

スーパーコンピュータで解き明かす宇宙の構造