


■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし: 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2013, 村山齊

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2013, Hitoshi Murayama

宇宙になぜ 我々が存在するのか

学術俯瞰講義 2013年4月22日

村山齊 カブリ数物連携宇宙研究機構

UC Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory

学術祭

主 題 科 目 ／ テ ー マ 講 義 2 単 位 1、2 年 生 対 象

物質の神秘

—その生い立ちから私たちの未来まで—

コーディネータ:小島憲道(教養学部)

ナビゲータ:永田 敬(教養学部)



宇宙になぜ我々が存在するのか

村山 斉(国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構)

- | | | |
|-----|------|------|
| 第1回 | 4/8 | 宇宙誕生 |
| 第2回 | 4/15 | 物質誕生 |
| 第3回 | 4/22 | 銀河誕生 |



物質科学とはじめ

家 泰弘(物性研究所)

- | | | |
|-----|------|-----------------------|
| 第4回 | 5/7 | 現代社会と物質科学、原子・分子・物質の構造 |
| 第5回 | 5/13 | 物質の個性(物性)はどこから生まれるか |
| 第6回 | 5/20 | 奇妙な量子の世界 |



現代社会と物質



- | | | | |
|------|------|---------------------------|--------------------|
| 第7回 | 5/27 | 金属の科学と材料としての応用 | 小関敏彦(工学部) |
| 第8回 | 6/3 | アクアマテリアル—持続性社会実現のための我々の挑戦 | 相田卓三(工学部) |
| 第9回 | 6/10 | 半導体量子ドット—電子や光子を操るナノの世界 | 荒川泰彦(生産技術研究所) |
| 第10回 | 6/17 | 放射線のリスクと防護の科学 | 飯本武志(環境安全本部) |
| 第11回 | 6/24 | チューインガムの物理 | 土井正男(豊田理化学研究所) |
| 第12回 | 7/1 | 光機能性材料の科学—化学に基づく新医療技術の創出 | 浦野泰照(医学部) |
| 第13回 | 7/8 | 物質科学が拓く新エネルギーとサステナビリティの未来 | 瀬川浩司(先端科学技術研究センター) |

駒場 キャンパス 21 KOMCEE 月 曜日 2 時限 (10:40-12:10)
 レクチャーホール

<http://www.gfk.c.u-tokyo.ac.jp/>



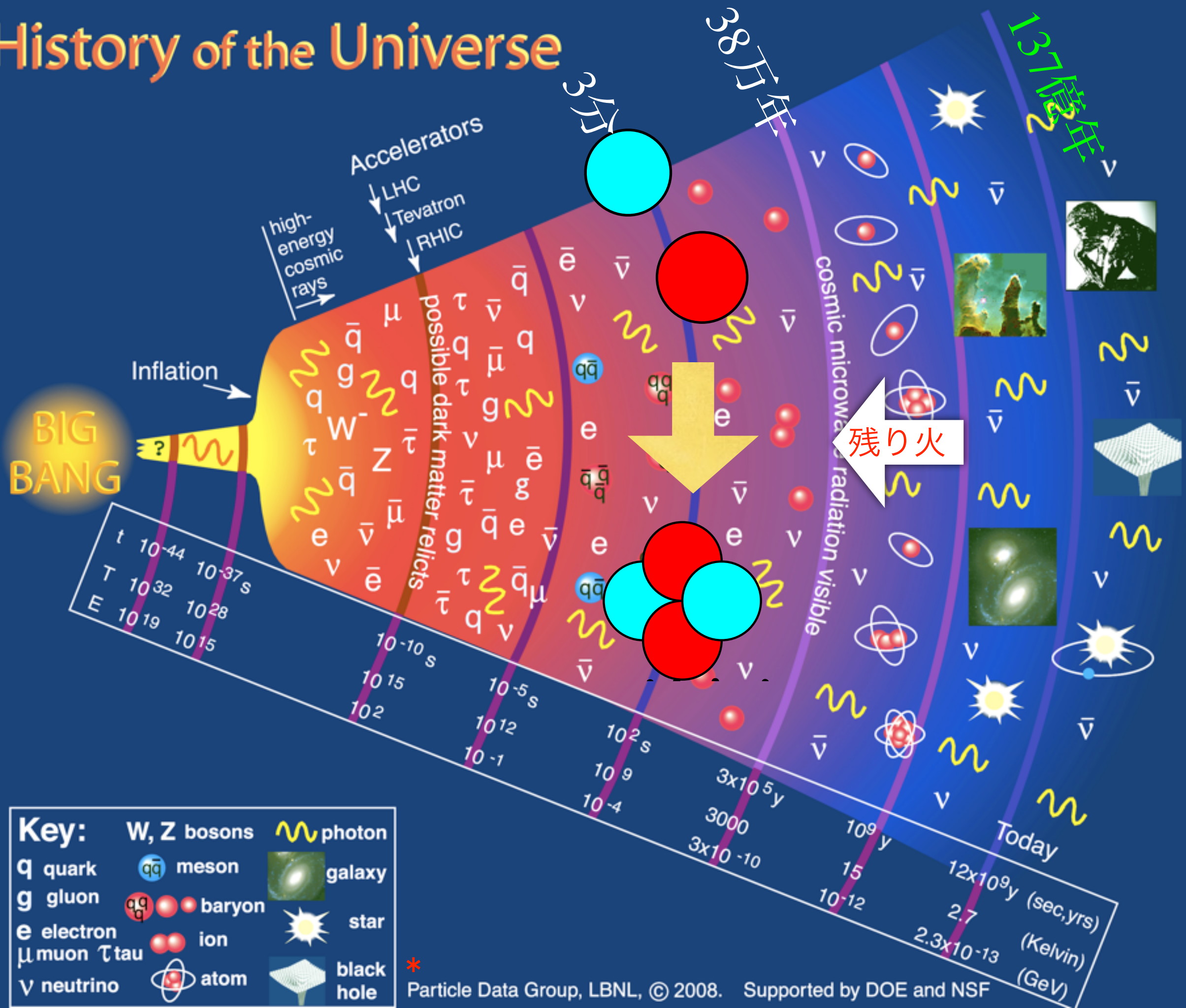
あらすじ

- ✓ 宇宙の誕生
- ✓ 物質の誕生
- 銀河の誕生

第二回

- 宇宙の始まりは水素とヘリウムだけ
- 他の元素は星の中で合成
- 超新星でばらまいて第二・三世代へ
- 原子ができるには電子をゆっくりに
- 電子を押さえ込むのはヒッグス粒子
- 宇宙に凍り付いている

History of the Universe



ビッグバン直後は

Periodic table by DePiep, from
Wikimedia Commons
(2013/10/03) CC BY-SA 3.0
[http://commons.wikimedia.org/
wiki/File:Periodic_table_
%28polyatomic%29.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_table_%28polyatomic%29.svg)

水素とヘリウムだけ

Group→	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
↓Period																				
1	1 H																	2 He		
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
6	55 Cs	56 Ba				72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra				104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

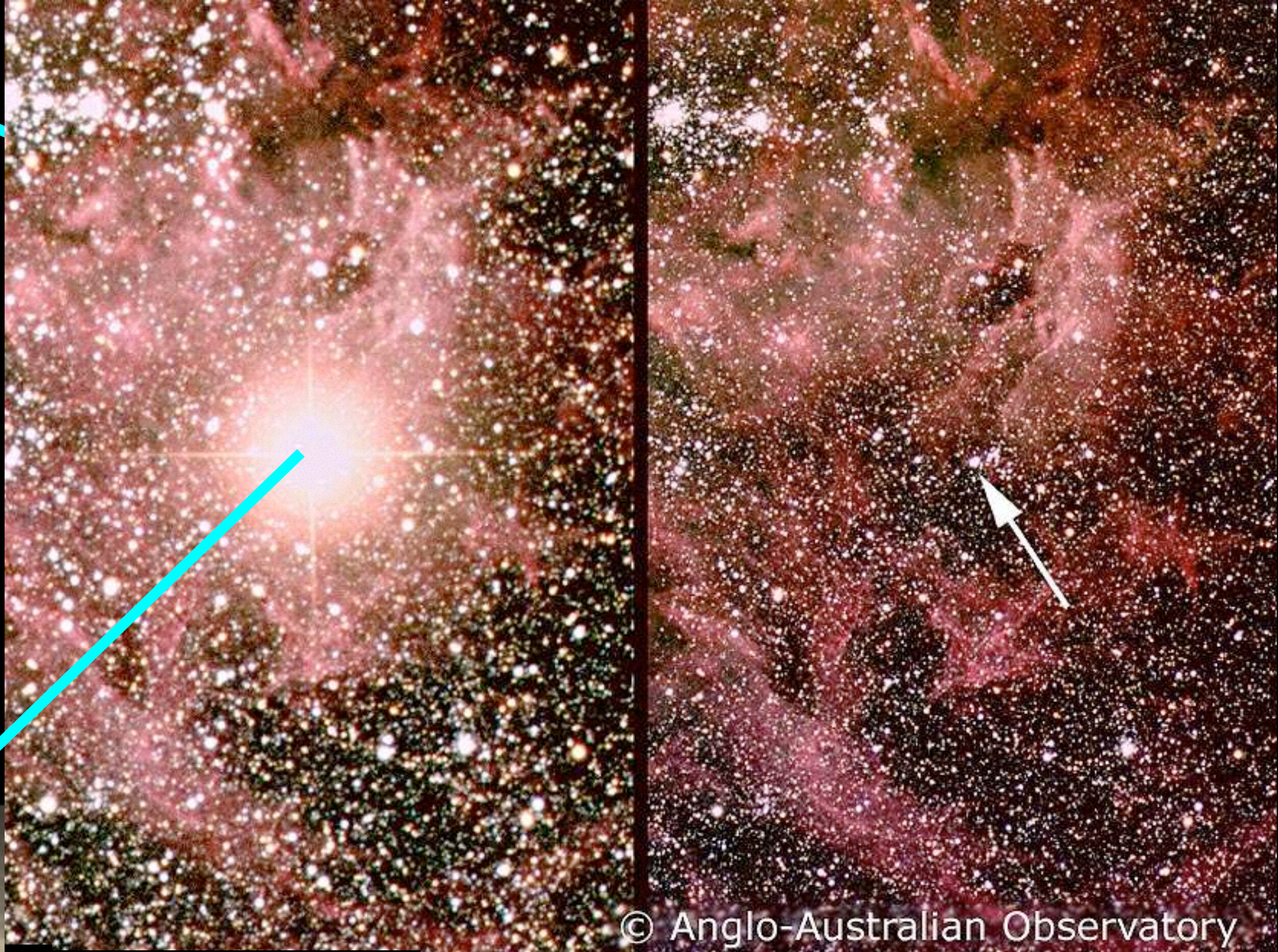
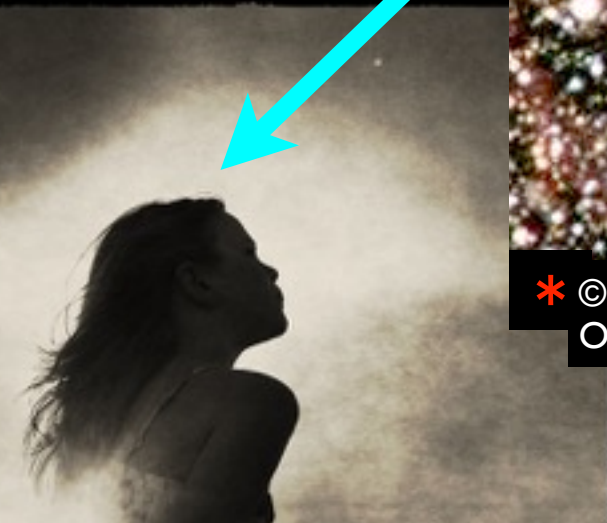
星の中で組み立てた

星の中で組み立てた

Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

水素
ヘリウム

炭素
窒素
酸素
鉄

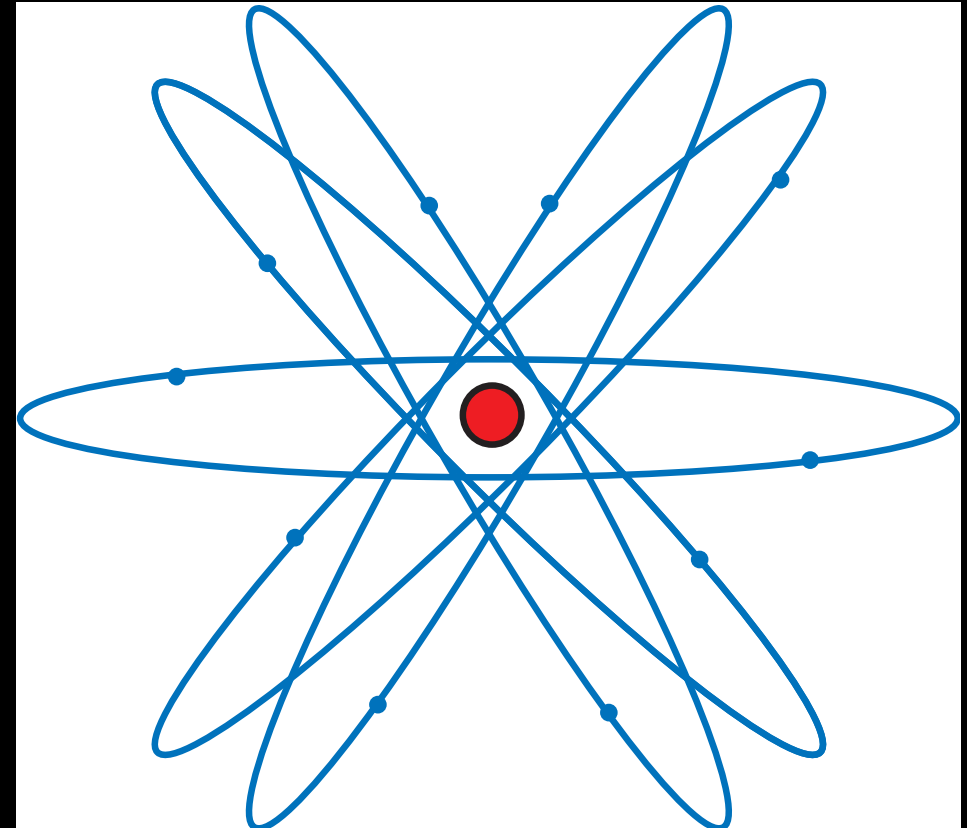


© Anglo-Australian Observatory

* ©1989-2010, Australian Astronomical
Observatory, photograph by David Malin

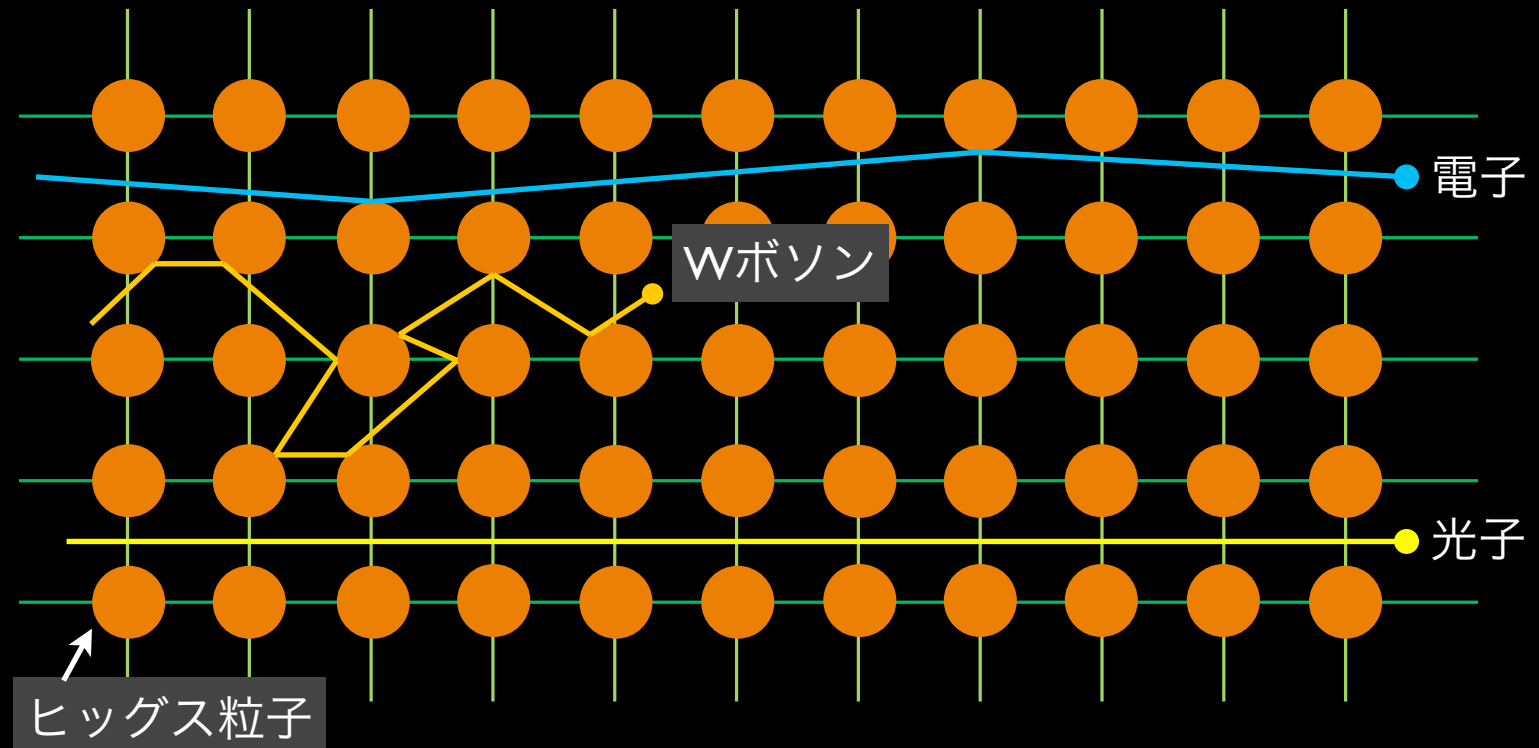
私たちは星屑

宇宙に満ちるヒッグス粒子



- ヒッグス場が宇宙に満ちる
- 全ての素粒子を光速から遅らす
- でないと原子は存在できない!
- 宇宙に秩序を作った
- これも私たちの存在がかかる
- 一体なんだ??

まだ調べ始めたばかり



Credit: UN Women/David Snyder,
from flickr (2013/10/22)
CC BY-NC-ND 2.0
[http://www.flickr.com/photos/
unwomen/6918966309/](http://www.flickr.com/photos/unwomen/6918966309/)



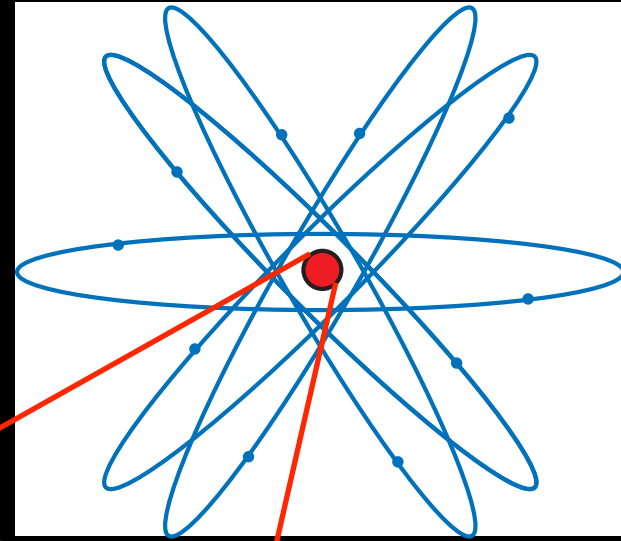
Credit: Matluba Mukhamedova/World
Bank, from flickr (2013/10/22)
CC BY-NC-ND 2.0
[http://www.flickr.com/photos/
worldbank/8205946057/](http://www.flickr.com/photos/worldbank/8205946057/)



原子 原子核 電子



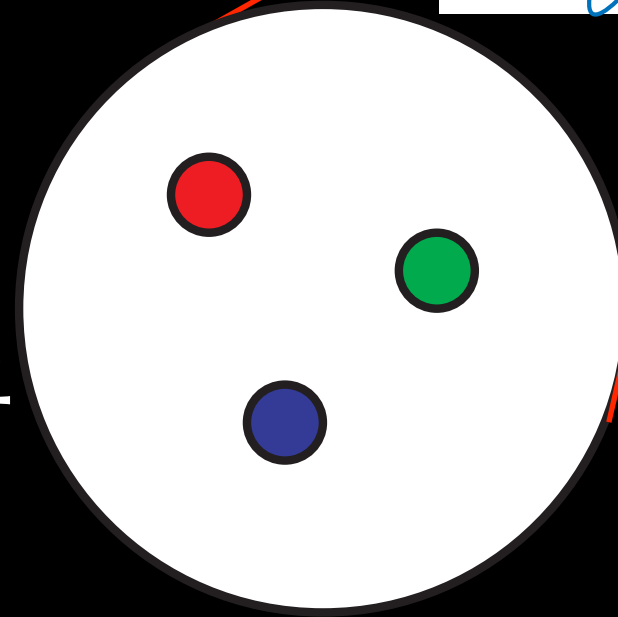
$$E=mc^2$$



* Credit: Bill Branson, NIH

- 止まってもエネルギーがある。なぜ？
- 陽子、中性子の中でクォークは 10^{-24} 秒に一回ぐるぐる回る
- この運動が陽子、中性子のエネルギー＝質量のもと
- でも「点」の電子は？
- 質量がある＝光速で飛べない

陽子
中性子



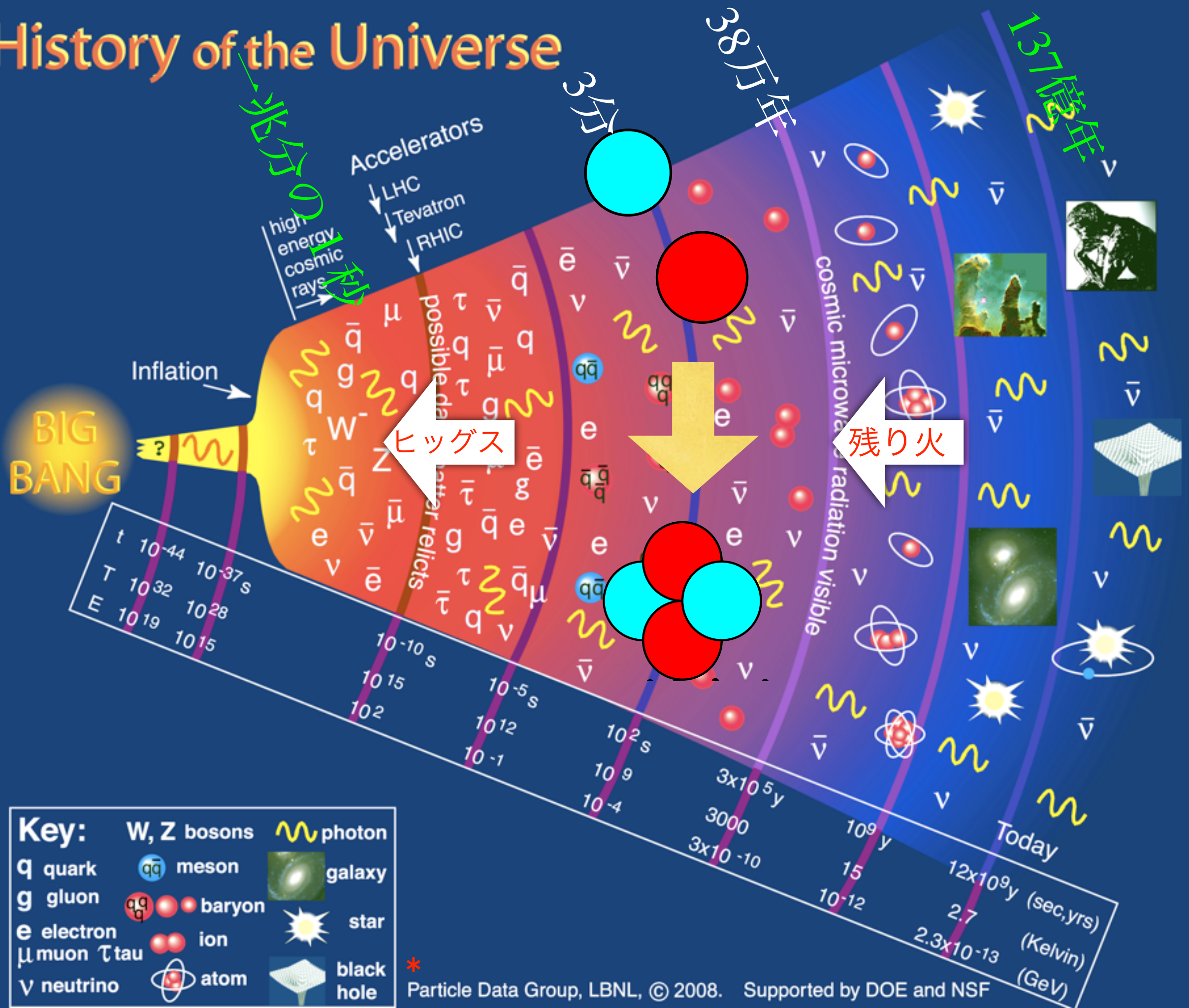
Murray Gell-Mann
1969 Nobel

Photo by Michael Wuertenberg. Copyright by
World Economic Forum/swiss-image.ch

CC BY-NC-SA 2.0

[http://www.flickr.com/photos/
worldeconomicforum/6775574677/](http://www.flickr.com/photos/worldeconomicforum/6775574677/)

History of the Universe

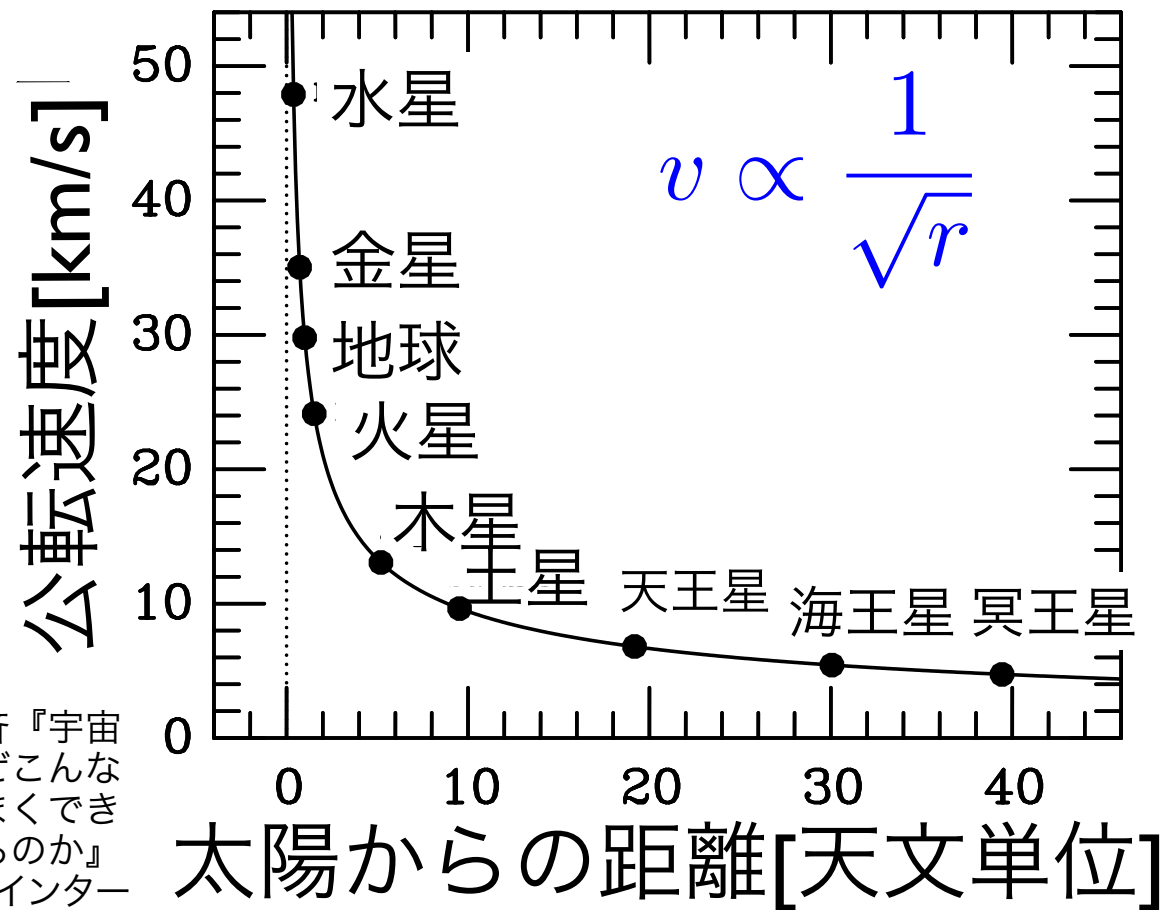


第三回 銀河誕生

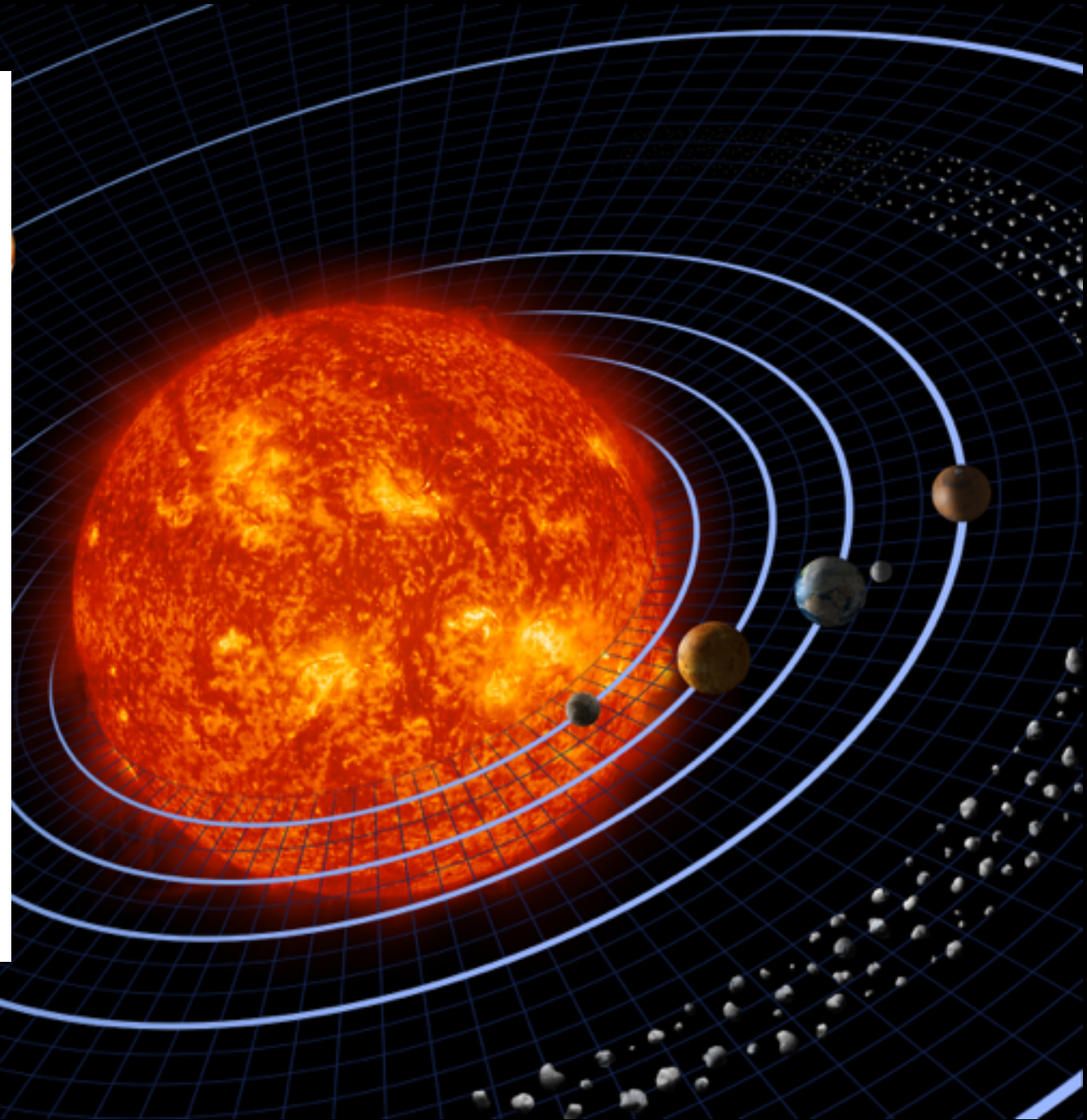
- 正体不明の暗黒物質が銀河を作った
 - しかし 10^{-5} の「むら」が必要
- 宇宙を引き延ばしたインフレーション
 - 量子揺らぎが「むら」のもと
- (暗黒エネルギーが宇宙膨張を加速)

銀河誕生

太陽系



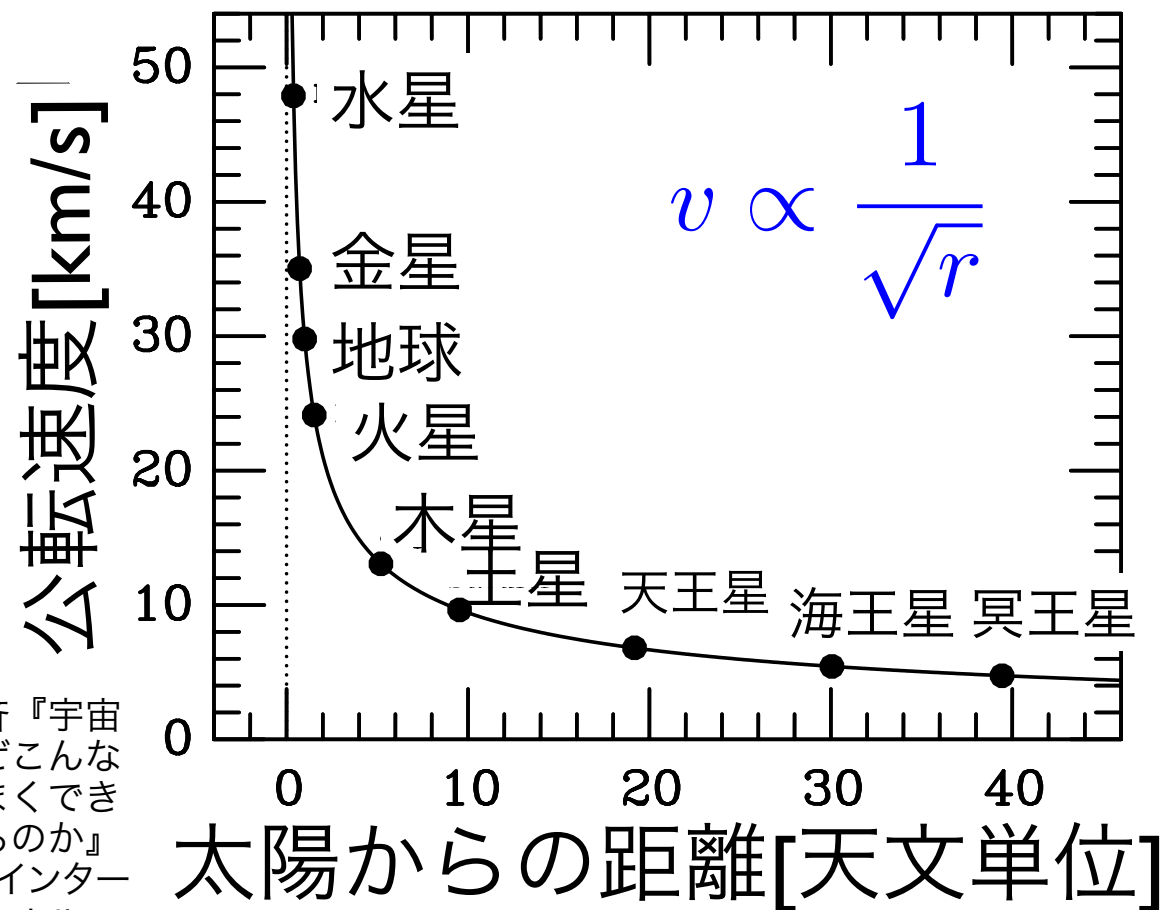
* 村山齊『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』集英社インターナショナル、2012年、p.23



* Credit: NASA/JPL

地球は毎秒30キロの速さで回っている

高校の数学・物理



* 村山齊『宇宙はなぜこんなにうまくできているのか』集英社インターナショナル、2012年、p.23

$$F = \frac{GM_{\odot}m}{r^2}$$

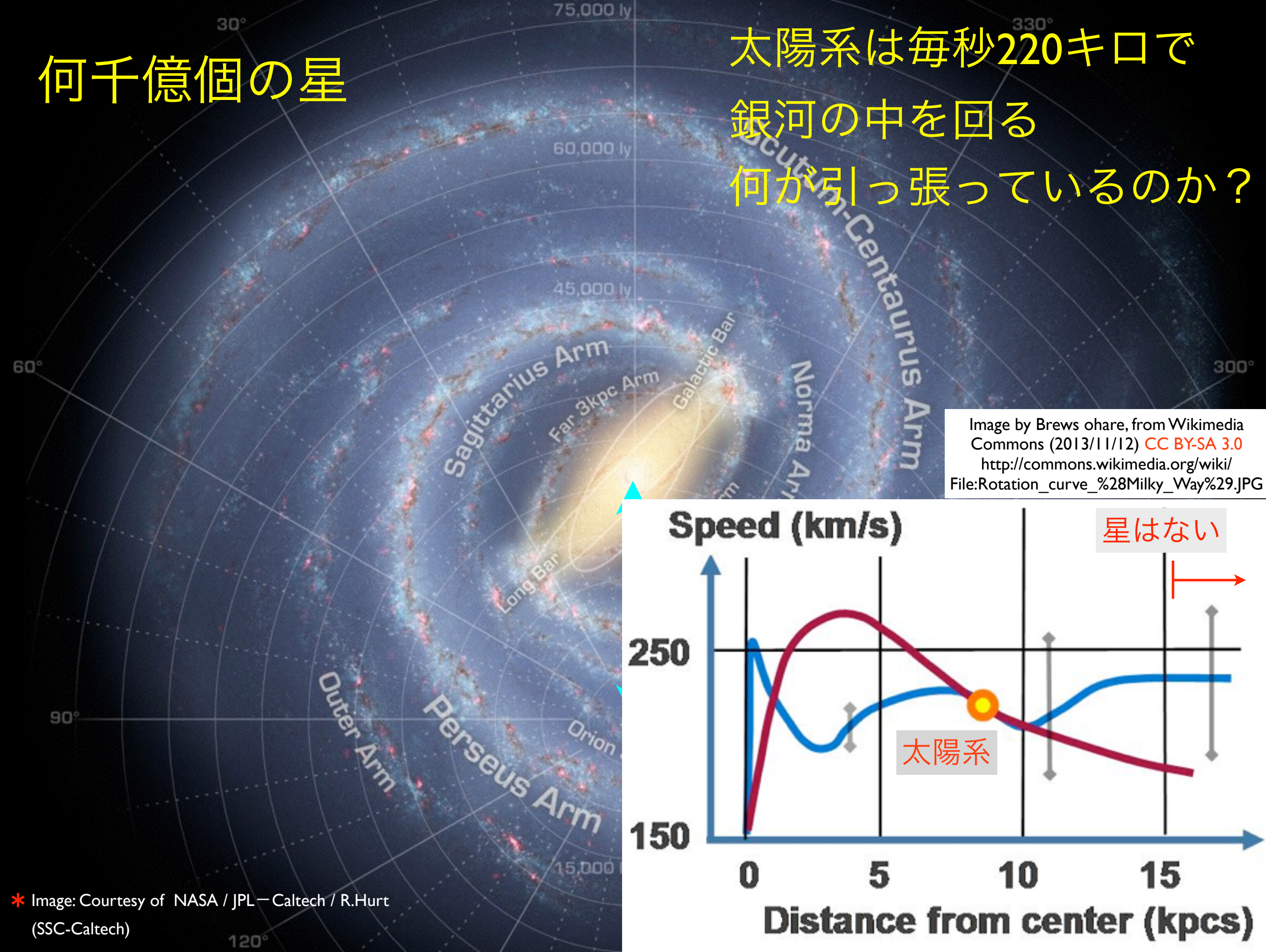
$$ma = m \frac{v^2}{r}$$

$$\frac{GM_{\odot}m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r}} \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

何千億個の星

太陽系は毎秒220キロで
銀河の中を回る
何が引っ張っているのか？



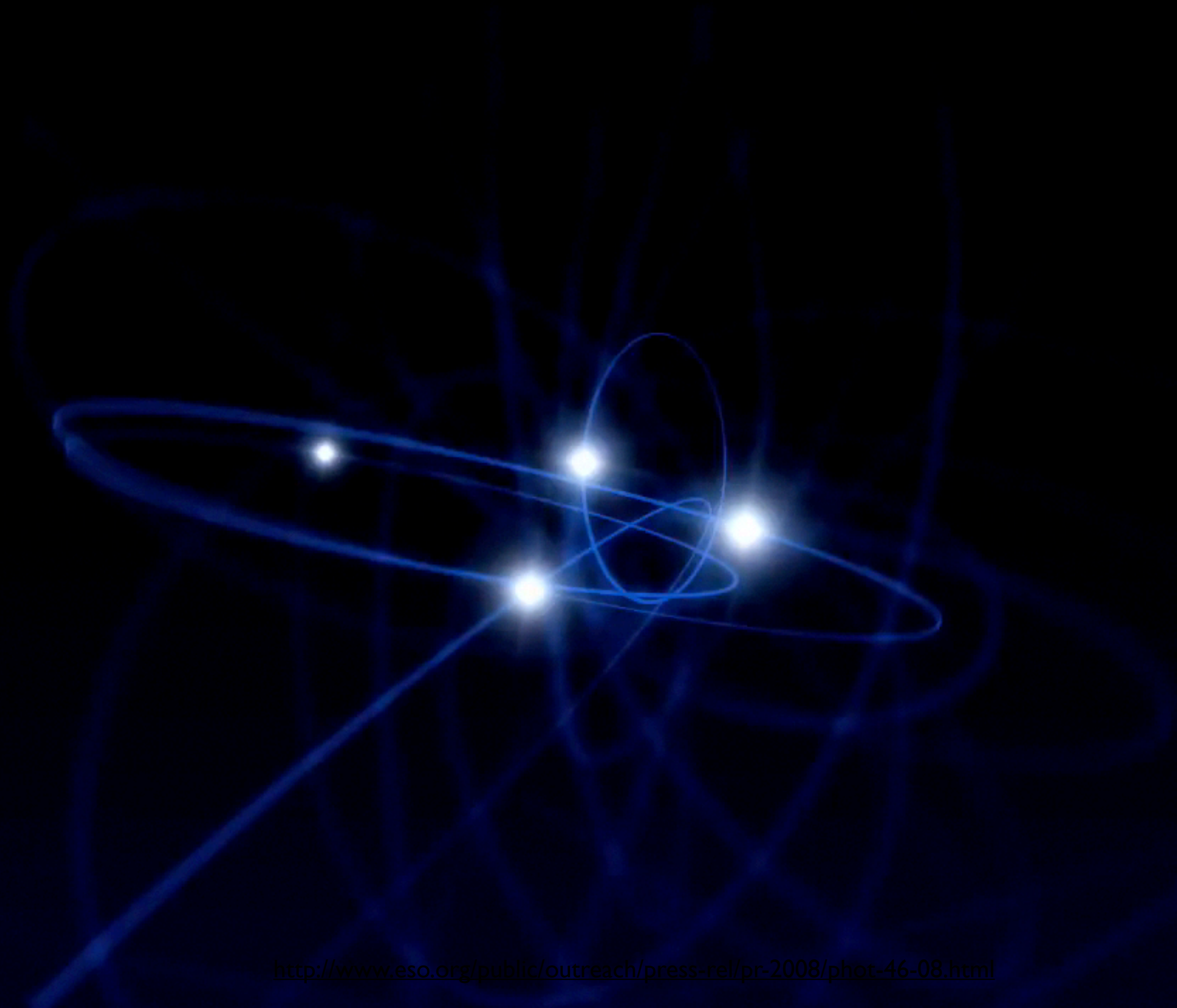
天の川銀河の中心



Credit: ESO/S. Gillessen and B. Gilli

CC BY 3.0

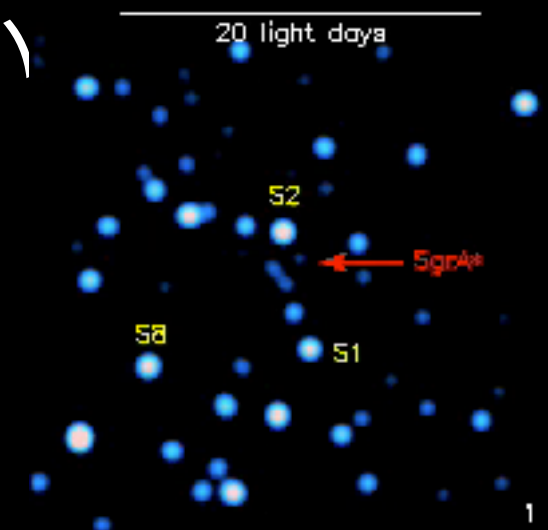
<http://www.eso.org/public/videos/eso0846i/>

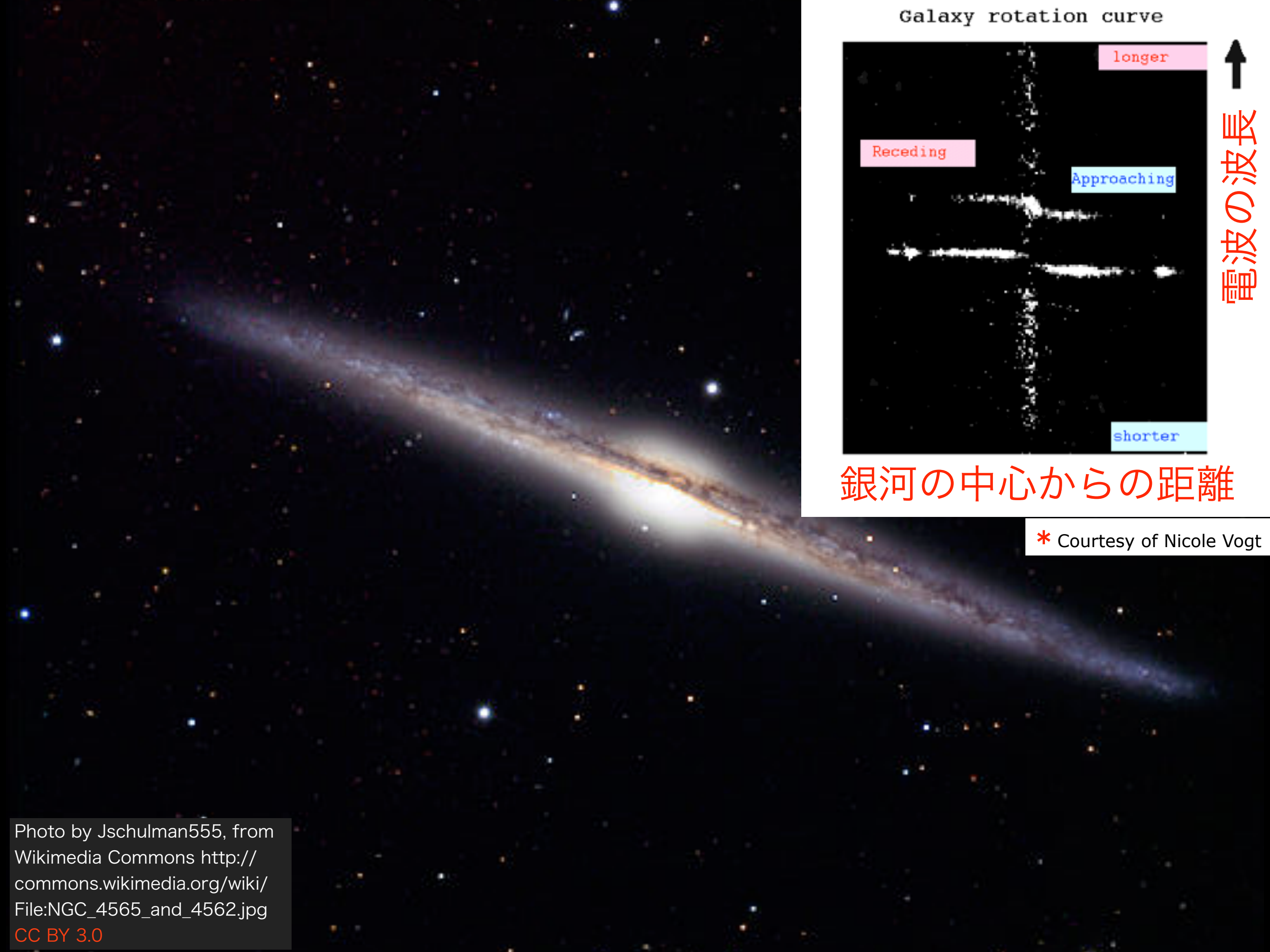


ブラックホール

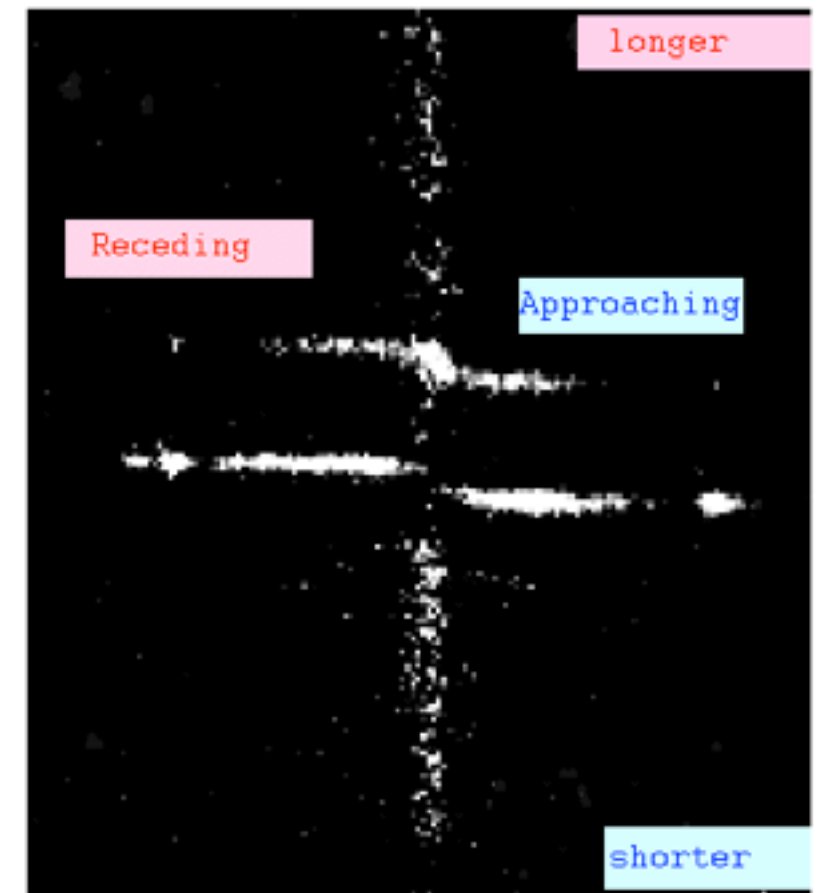
- 天の川銀河の中心には太陽の400万倍の
重さの巨大ブラックホール
- もっと重いブラックホールも沢山
- 周りの物質を文字通り呑み込む
- 断末魔の叫びで光を出す
- しかし何千億個の星程重くはない
- 太陽系をつなぎ止めるには不足

Reinhard
Genzel





Galaxy rotation curve



銀河の中心からの距離

* Courtesy of Nicole Vogt



Vera
Rubin
1960代

* Photo source:
AIP Emilio Segre
Visual Archives,
Rubin Collection

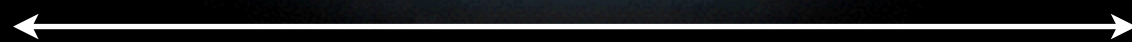
銀河の本当の姿

10万光年

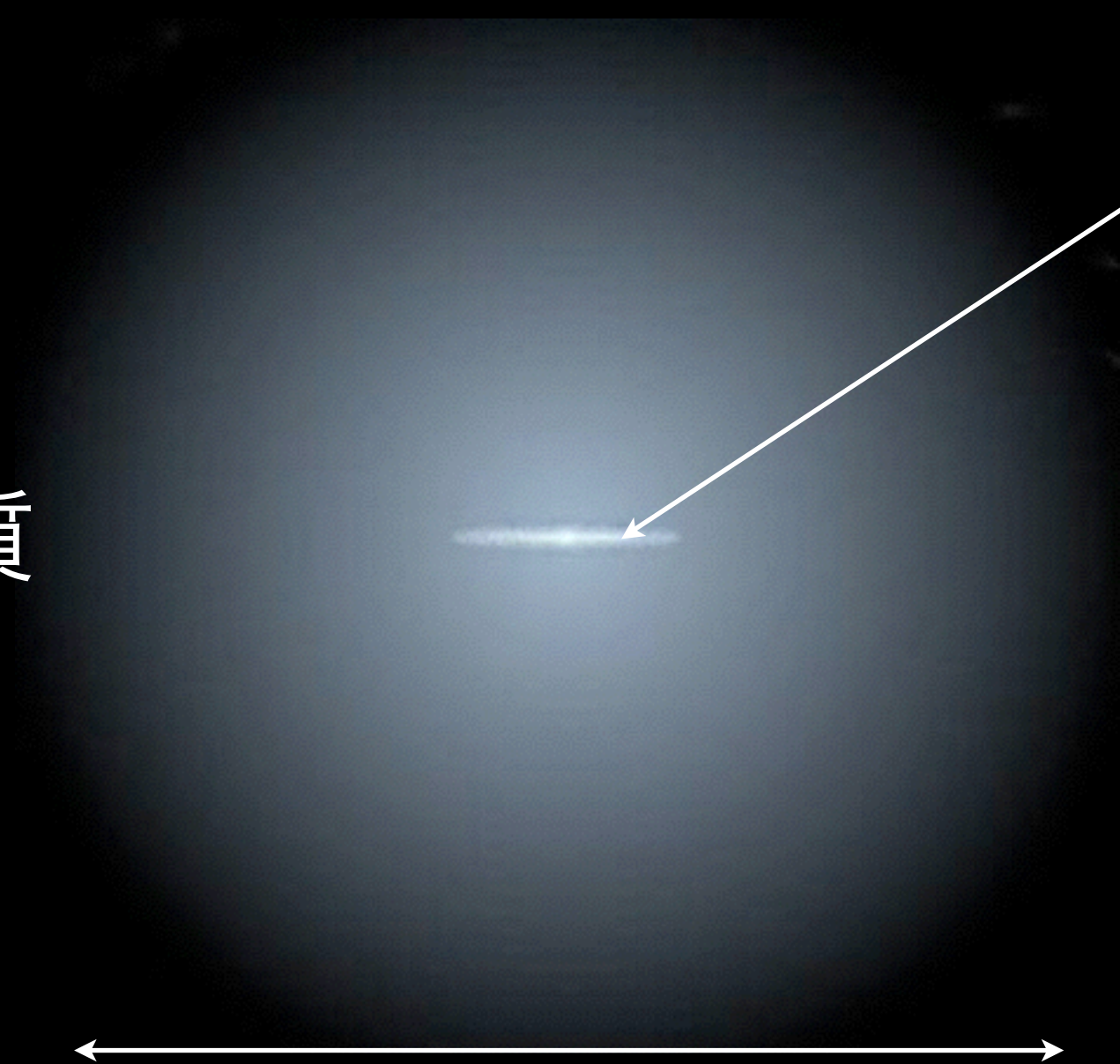


星

暗黒物質



>100万光年



銀河団

Abell 2218
21億光年

*
Photo by NASA, Andrew
Fruchter and the ERO Team
(STScI)

見えない暗黒物質を見る

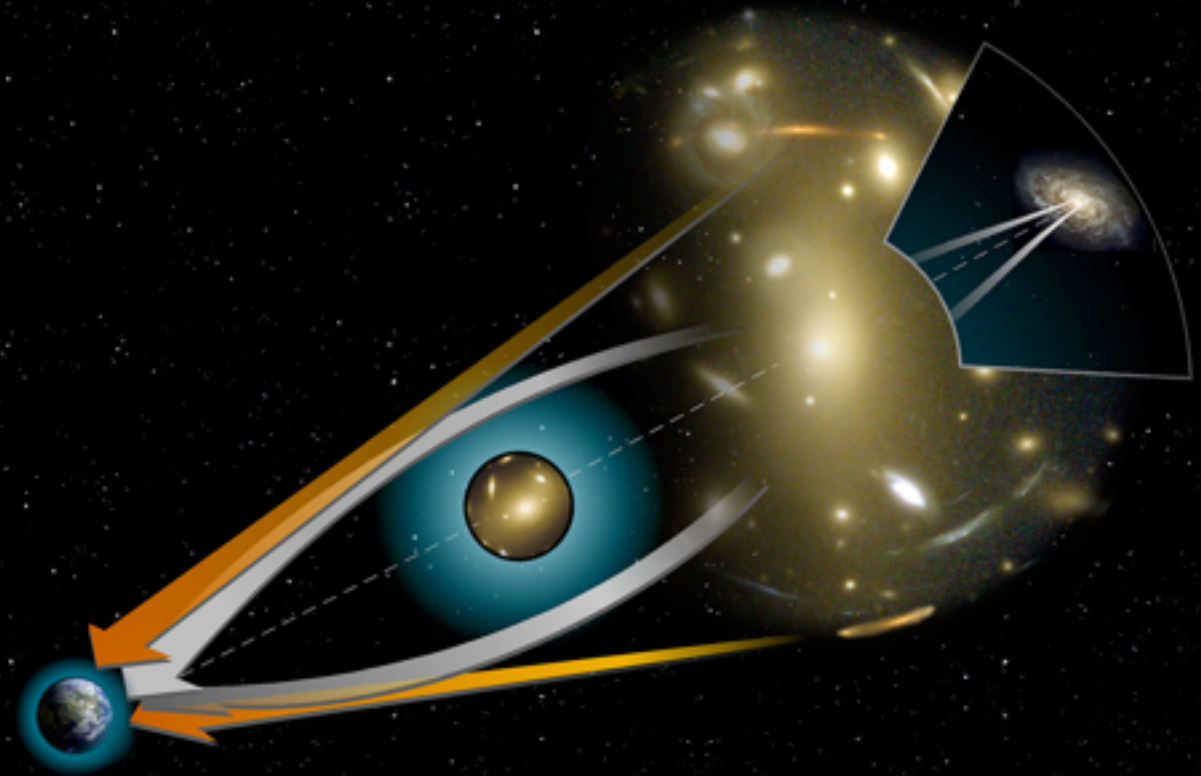


* Credit: NASA and STScI

* 高田昌広氏
(カブリ数物) 提供

宇宙の物質の80%以上は原子でない！

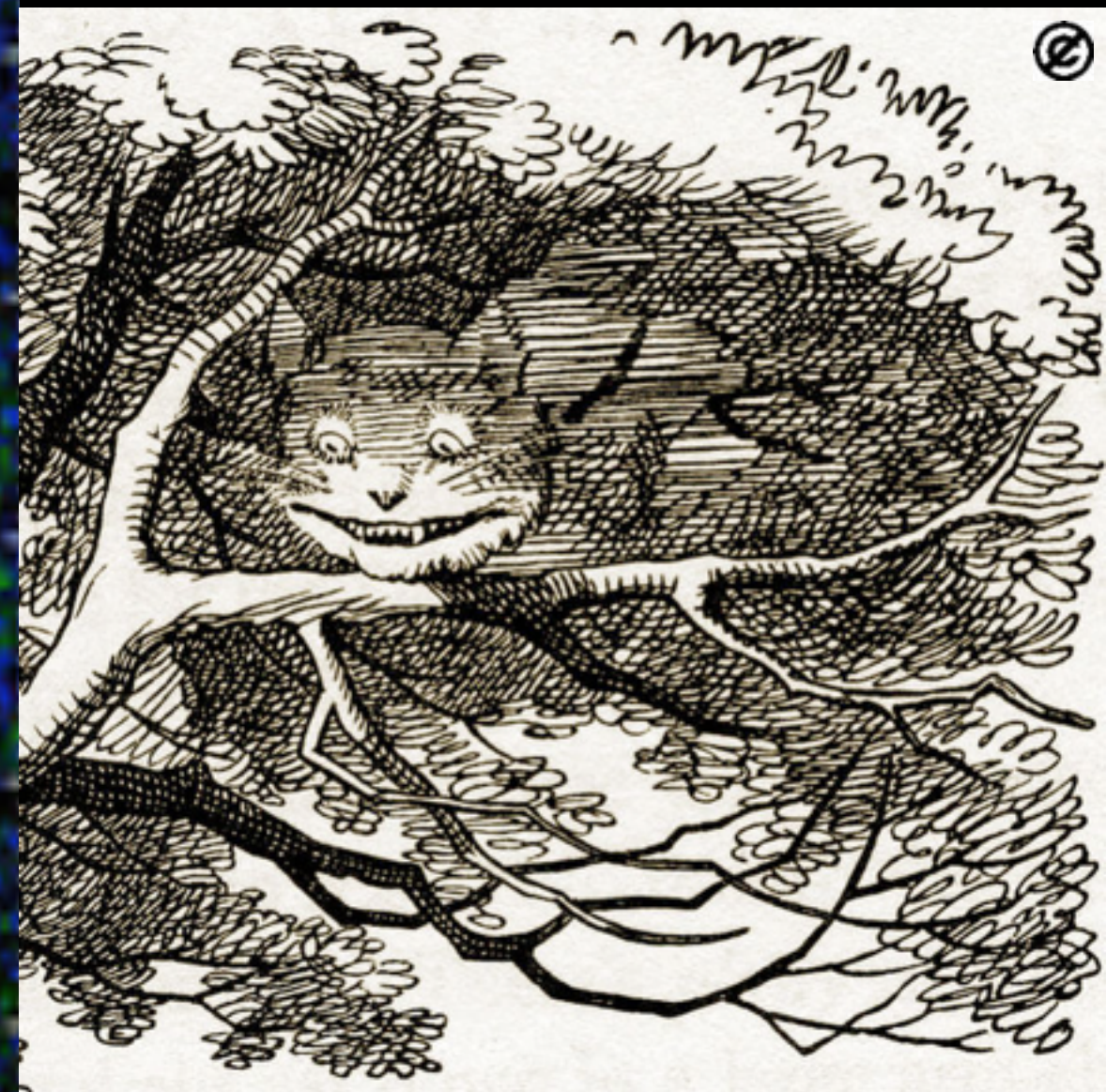
見えない暗黒物質を見る



* Credit: NASA and STScI

* 高田昌広氏
(カブリ数物) 提供

宇宙の物質の80%以上は原子でない！



* V. Belokurov, N.W. Evans, P.C. Hewett, A. Moiseev, R.G. McMahon, S.F. Sanchez, L.J. King (2009) Two new large-separation gravitational lenses from SDSS, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol.392 (no.1):104-112, p.107 Fig.4

チェシャ猫

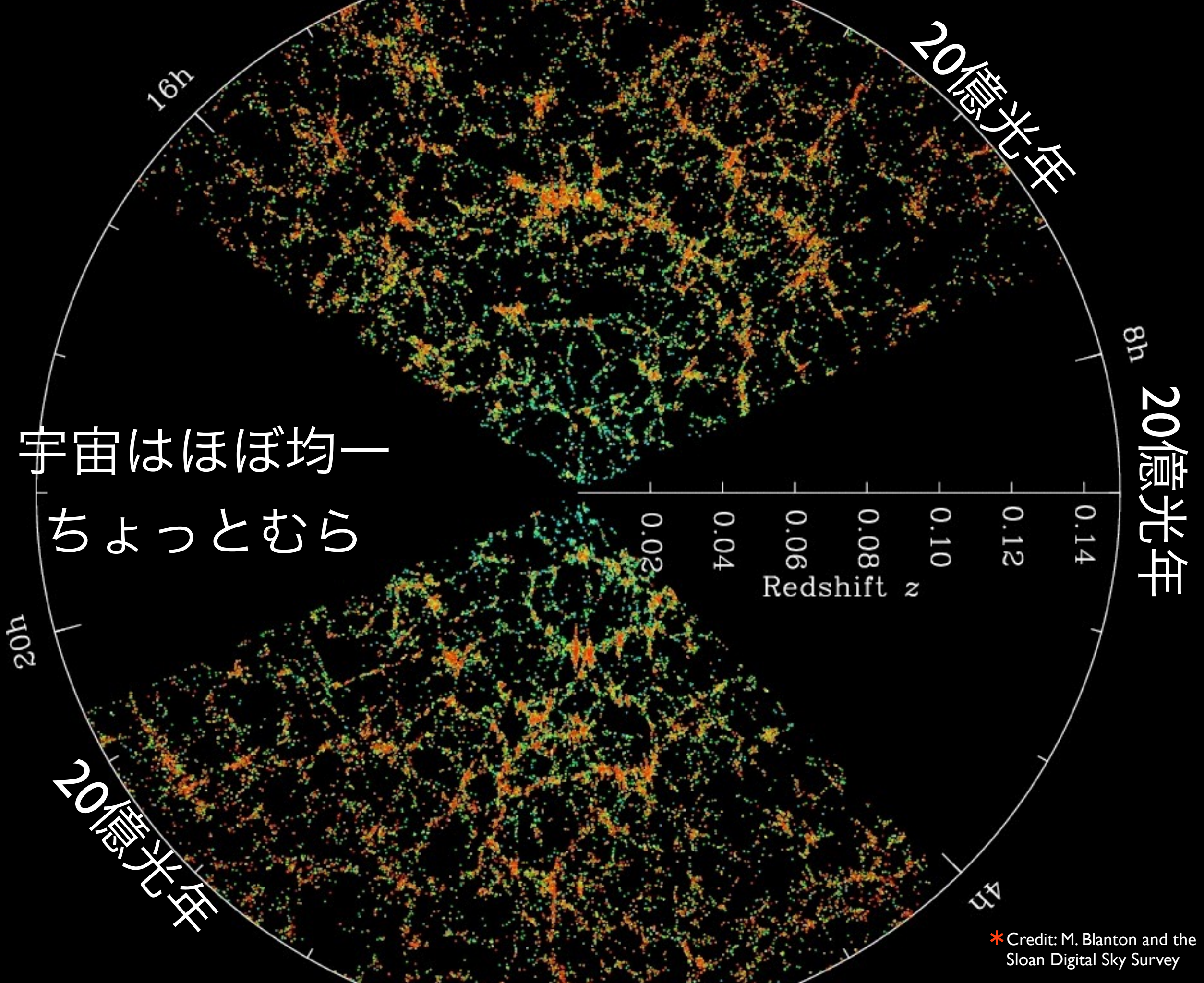
ここにいなくて正解



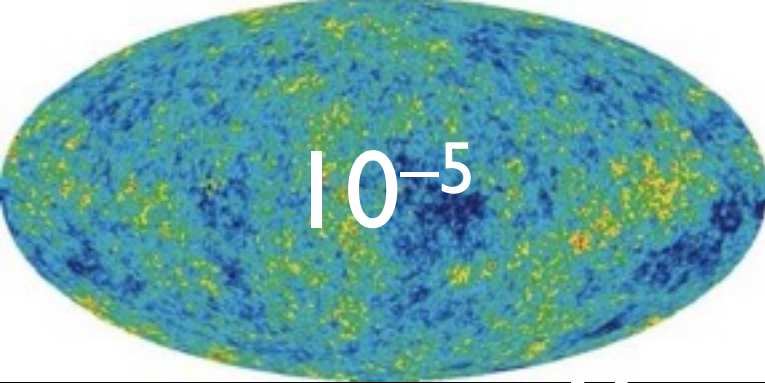
毎秒4500 kmで銀河団が衝突

地球から40億光年

* Credit: John Wise (Georgia Tech), Marusa Bradac (UC, Davis)



* Credit: M. Blanton and the Sloan Digital Sky Survey



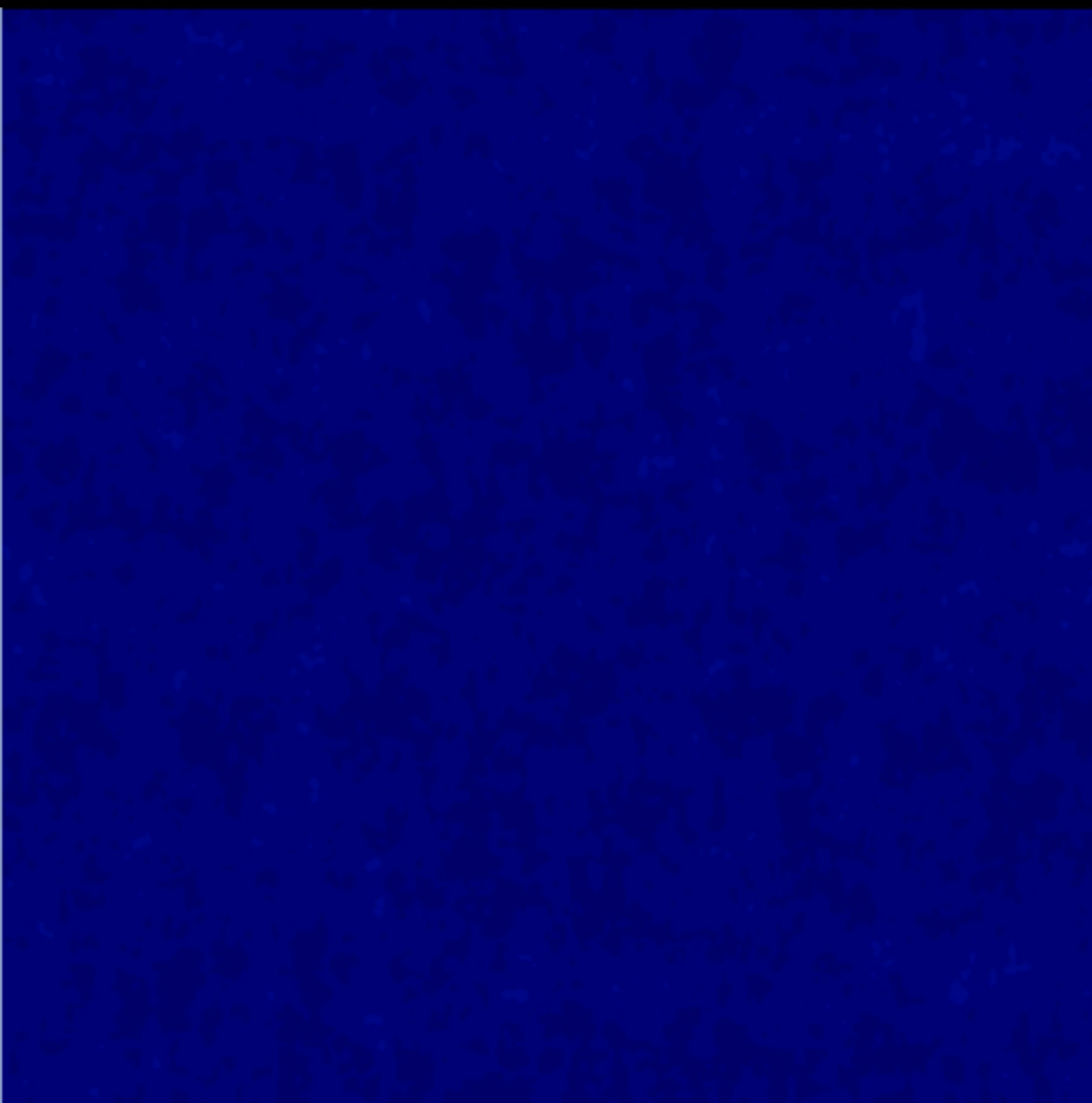
* Credit: NASA /
WMAP Science Team

暗黒物質は

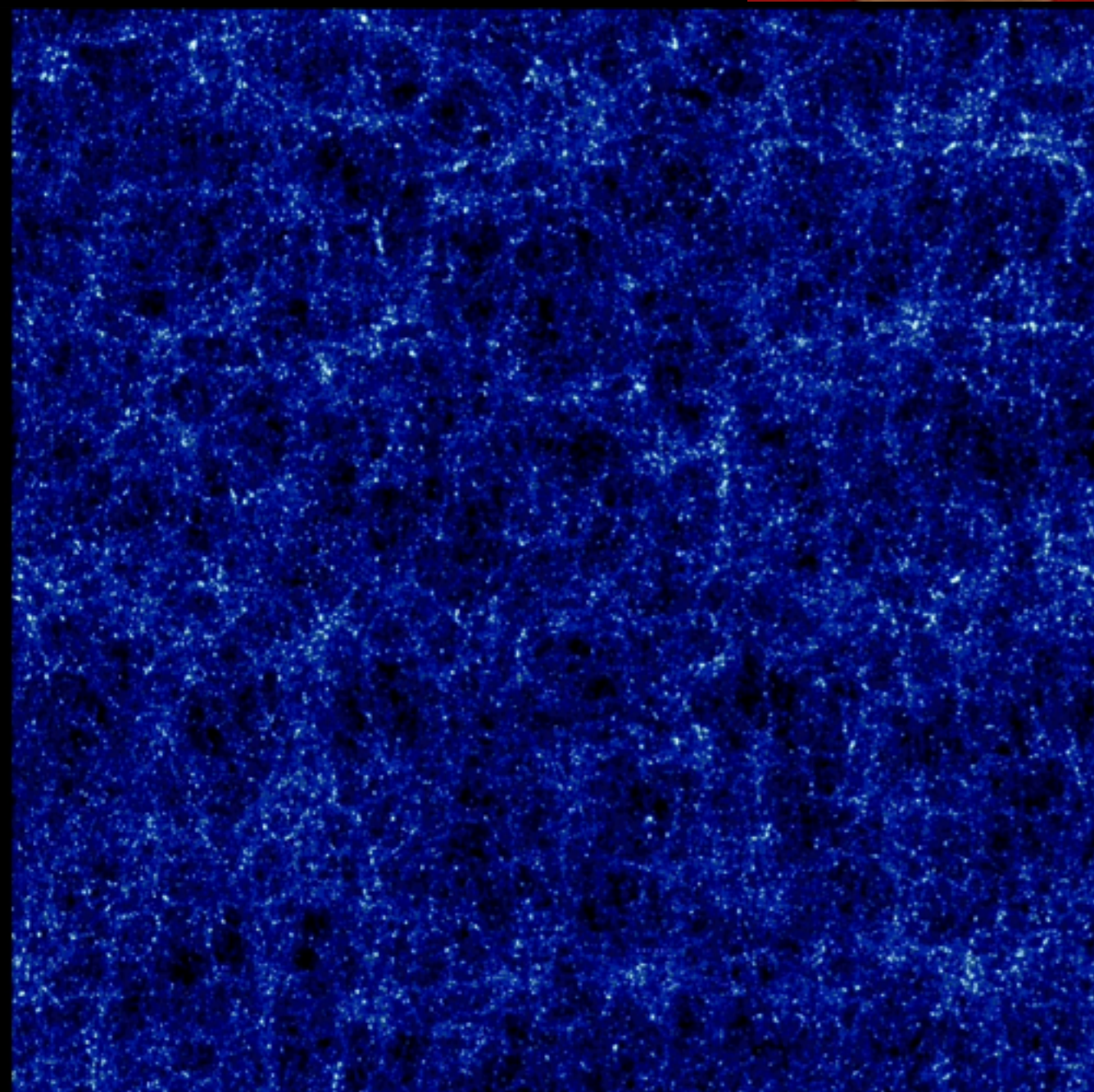
* 提供：カブリ数物
連携宇宙研究機構



生き別れの生みの親



暗黒物質なし



暗黒物質あり

* 吉田直紀氏
(東京大学) 提供

マーチング・バンドでビッグ・バンを再現

* video courtesy of UC Berkeley



かすかな音を聞く

微妙なニュアンス
は聞こえない

騒音を遮断！



Photo by Fred Hsu,
from Wikimedia
Commons
(2013/11/14)
CC BY-SA 3.0
[http://
commons.wikimedia
.org/wiki/
File:San_Francisco_
Broadway_Columbu
s.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:San_Francisco_Broadway_Columbus.jpg)



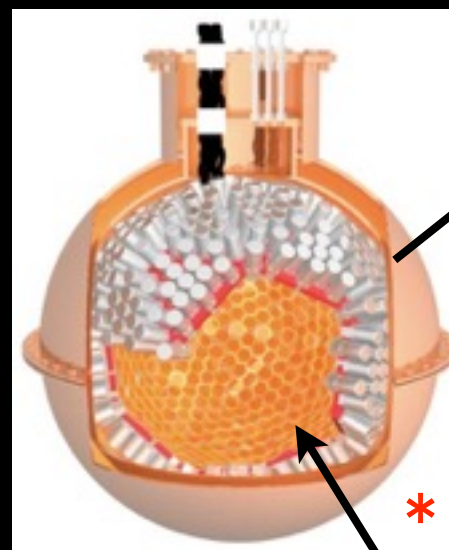
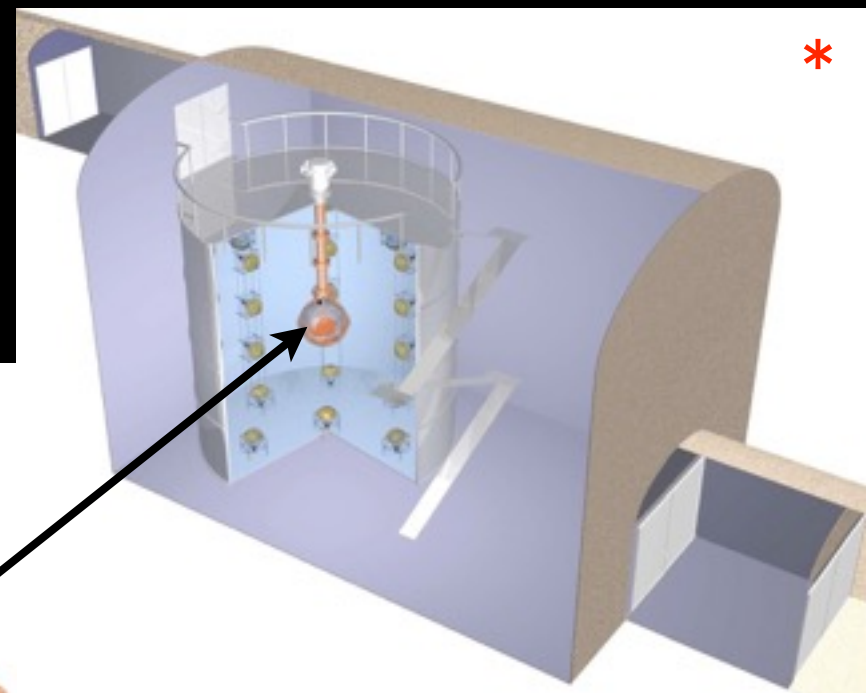
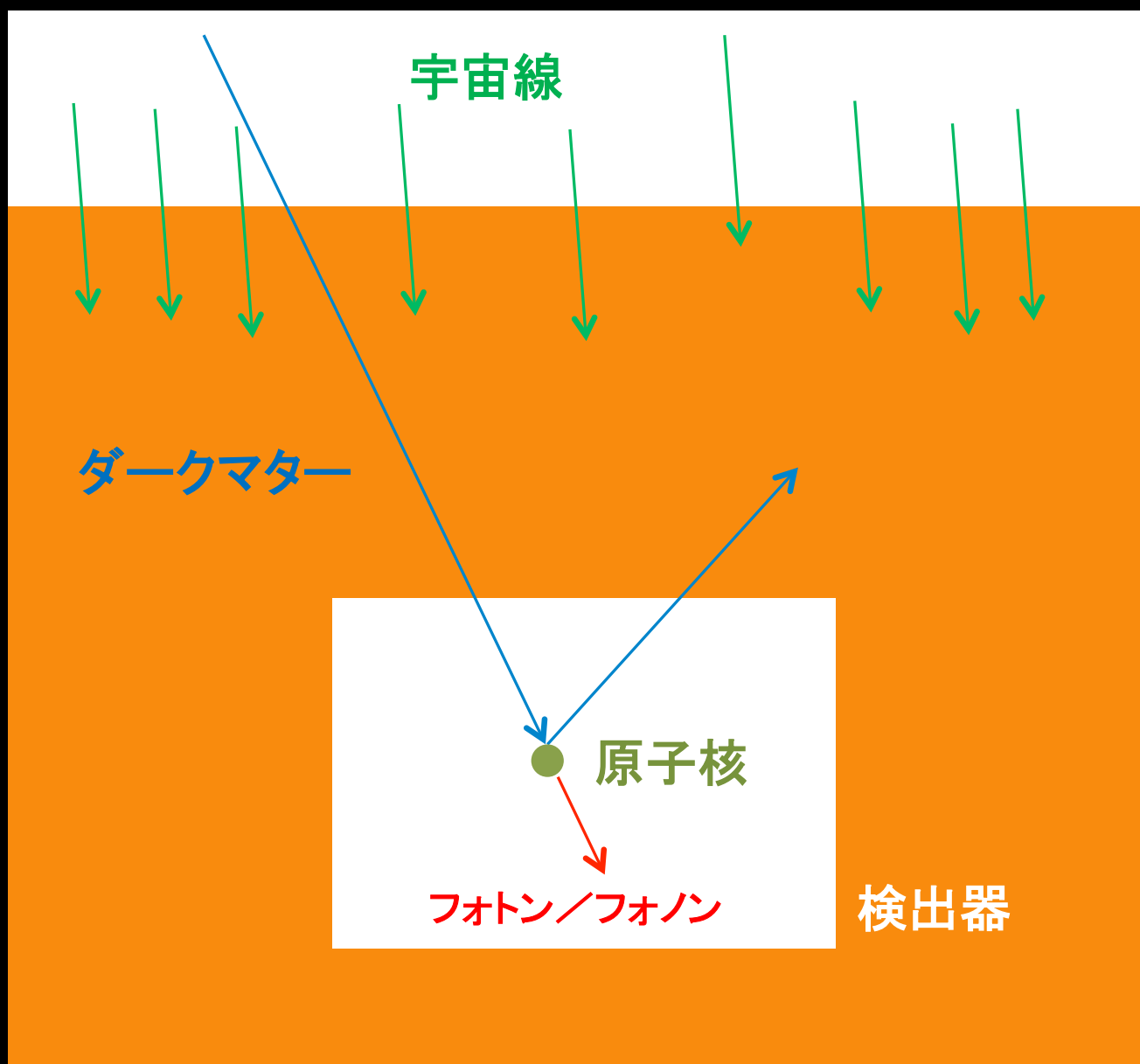
Photo by
Nickolai
Kashirin, from
flickr
(2013/11/14)
CC BY 2.0
[http://
www.flickr.com
/photos/
nkashirin/
5325053378/](http://www.flickr.com/photos/nkashirin/5325053378/)

暗黒物質のかすかな音を聞くには
静かなところ＝地下へ行く

暗黒物質を捕まえる

液体キセノン

800kg



提供：東京大学宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設



装置完成！

来月データを
取り始める予定



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

神岡宇宙素粒子研究施設 (c) 東京大学宇宙線研究所





* Maximilien Brice, © CERN

LHC実験

* © CERN

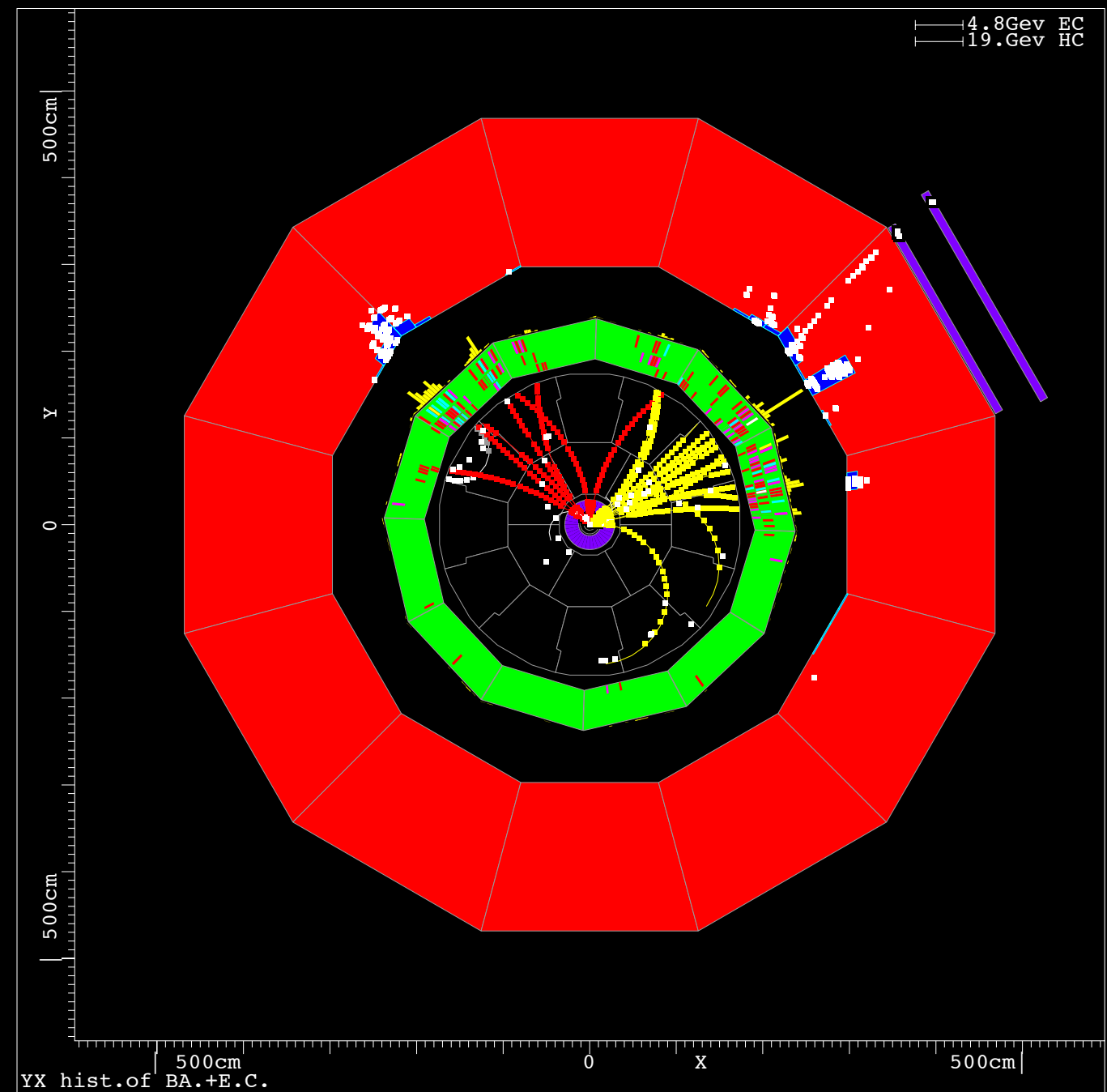


ビッグバンをやり直そう

見えないものを どうやって見つける？

* © CERN

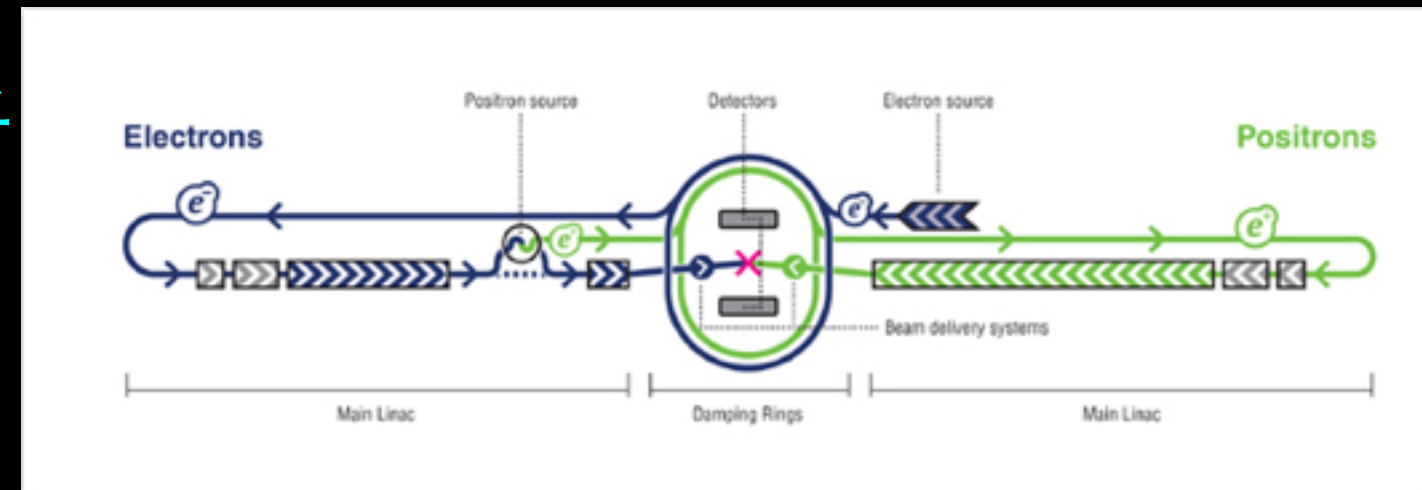
- 実験室でビッグバンのようなエネルギーを出して暗黒物質をつくってやろう
 - 何か^が逃げている証拠を探す
- ⇒暗黒物質か!?



リニアークライダー

* Graphic courtesy of ILC / form one visual communication

- 電子と反物質の陽電子をぶつける
- とんでもないハイテク
- ビームを15km加速
- ビームをナノメートルまで小さくして、ちゃんとぶつける
- 暗黒物質の性質を精密に測る



International Linear Collider (ILC)



* Source: DESY Hamburg



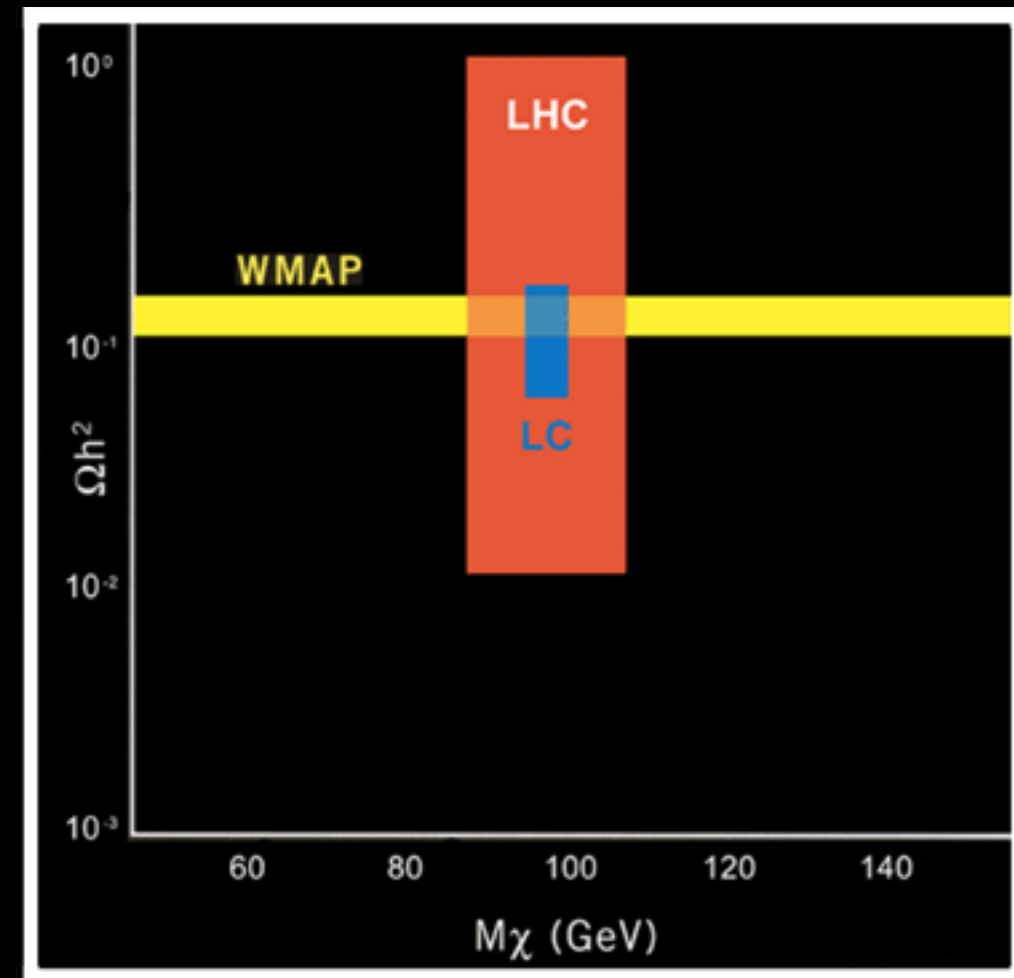
* Illustrated by Rey.Hori

夢

- 宇宙の観測
- 探す実験
- 作る実験
- 全部つじつまが合って初めて

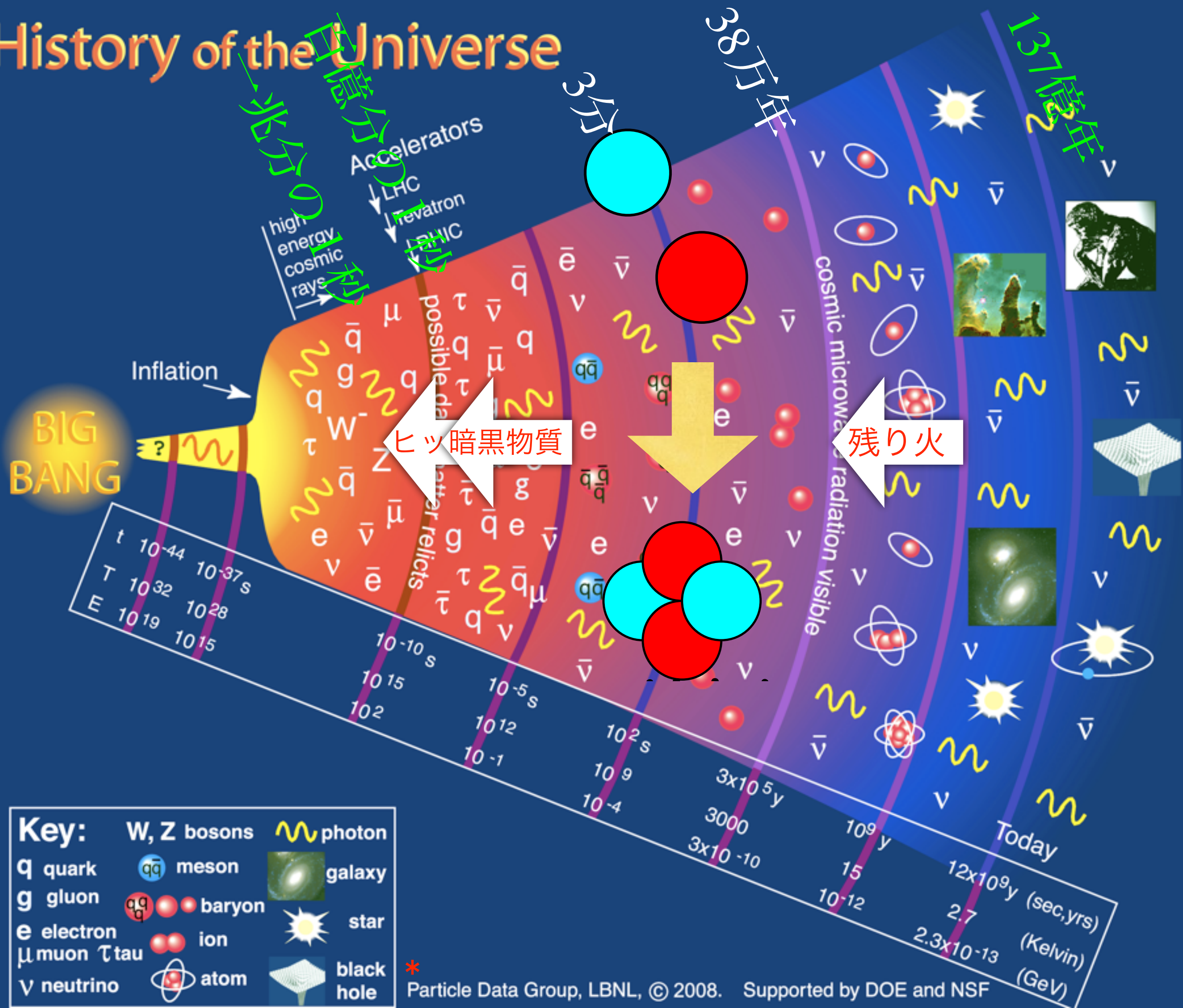
⇒ 暗黒物質が何かわかる

⇒ 宇宙ができて百億分の一秒のころのことがわかる



* Credit: Andreas Birkedal

History of the Universe



History of the Universe

Guth

佐藤

Photo of Alan Guth: Adapted from a photo by Betsy Devine, from flickr (2013/11/21)

CC BY-NC-SA 2.0

<http://www.flickr.com/photos/betsythedevine/2123046495/>

写真出典 [佐藤] : 東京大学
2005年度学術俯瞰講義ポスター

BIG BANG

ヒッ暗黒物質

残り火

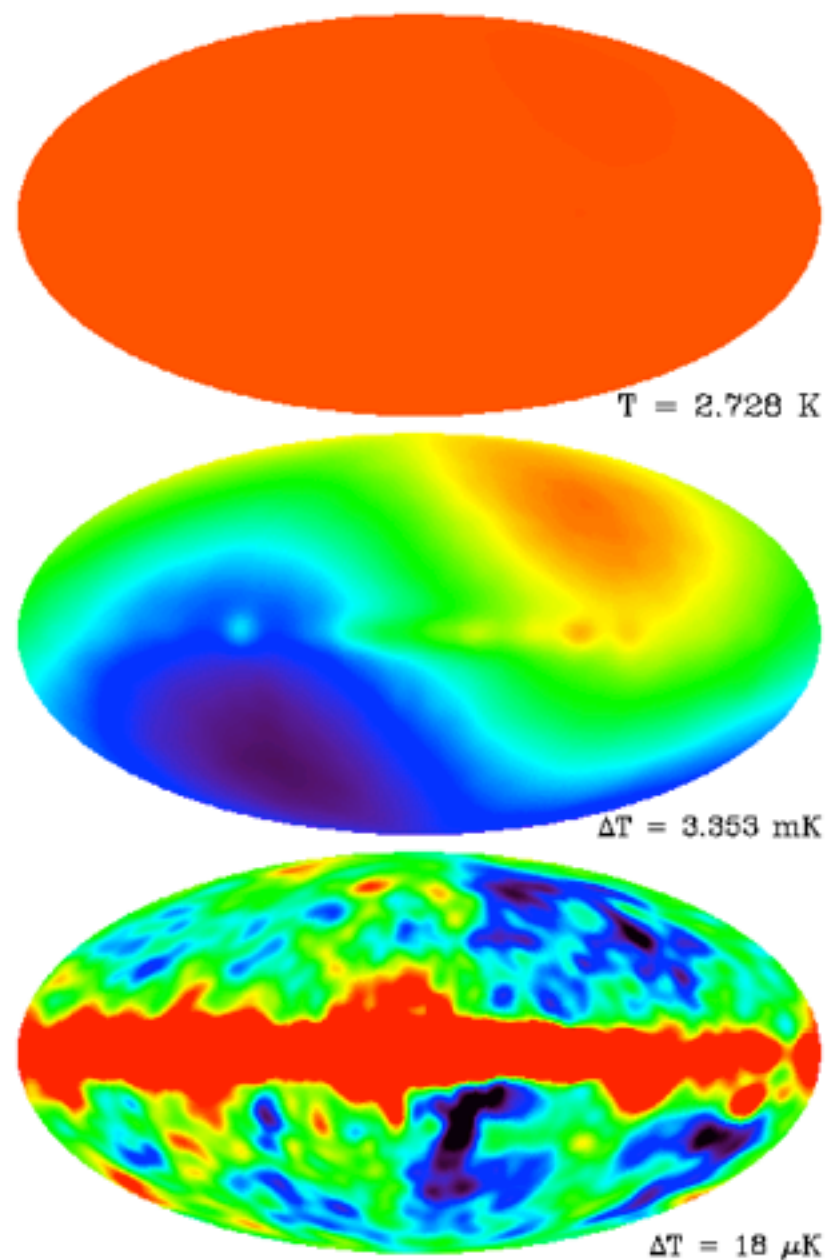
Key:	W, Z bosons	photon
q quark	meson	galaxy
g gluon	baryon	star
e electron	ion	black hole
μ muon τ tau	atom	
ν neutrino		

*

Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF

インフレーション

どうしてどちらを 向いても同じ温度？



- 地球の反対側の二つの離島を発見
- なぜか同じ言葉
- 同じ言葉どころか同じ方言：10万分の1の違いしかない
- この二つの民族は同じところから来たに違いない



Adapted from a
photo by Betsy
Devine, from
flickr (2013/11/21)
CC BY-NC-SA
2.0
[http://
www.flickr.com/
photos/
betsythedevine/
2123046495/](http://www.flickr.com/photos/betsythedevine/2123046495/)



* 出典：東京大学2005
年度学術俯瞰講義ポ
スター

インフレーション

- 宇宙は最初は物凄く小さかった
- 宇宙のどの部分も皆コミュニケーションをとっていた
- しかしその小さい宇宙はきっとしわくちゃ、とても小さい
- 全宇宙が原子よりもずっと小さい！
- どうやって平ら、滑らかで大きく？

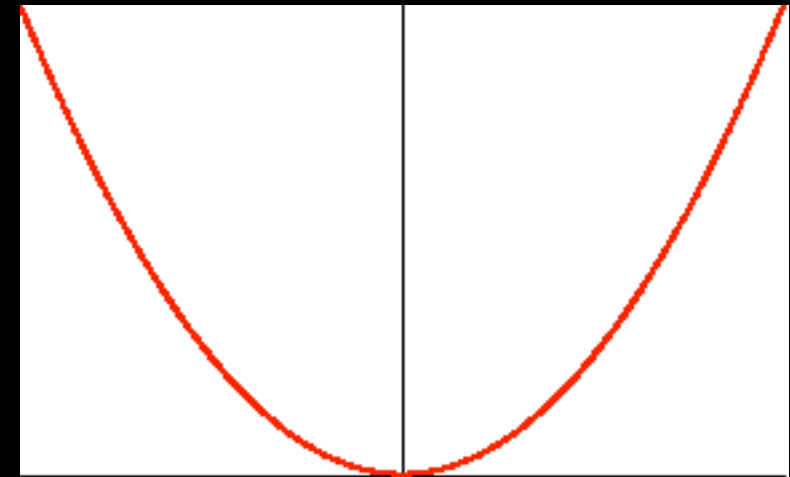




インフレーション

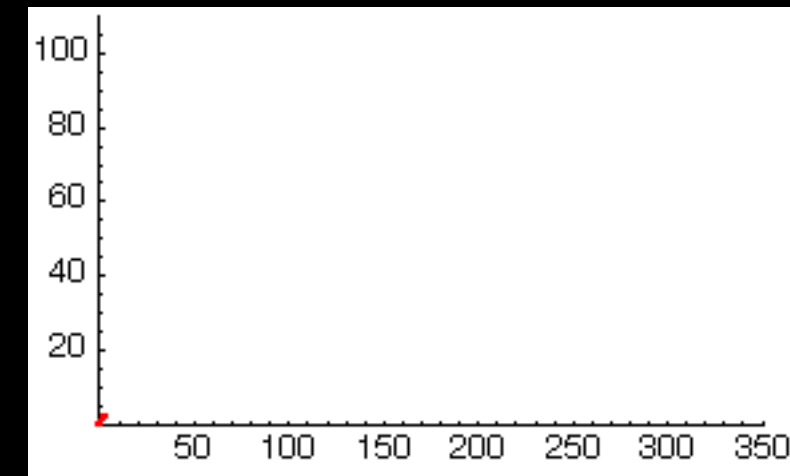
- 坂の途中から始まる粒子
- ゆっくり転がり落ちる
- 落ちている間は位置エネルギーが大きい
- 無尽蔵のエネルギー！
- そのエネルギーが宇宙膨張をどんどん加速
- 宇宙を物凄く大きくする
- 億 億 億 億 億 億 倍に！
- 引っ張ってしわを伸ばす

坂



粒子

やれやれの宇宙

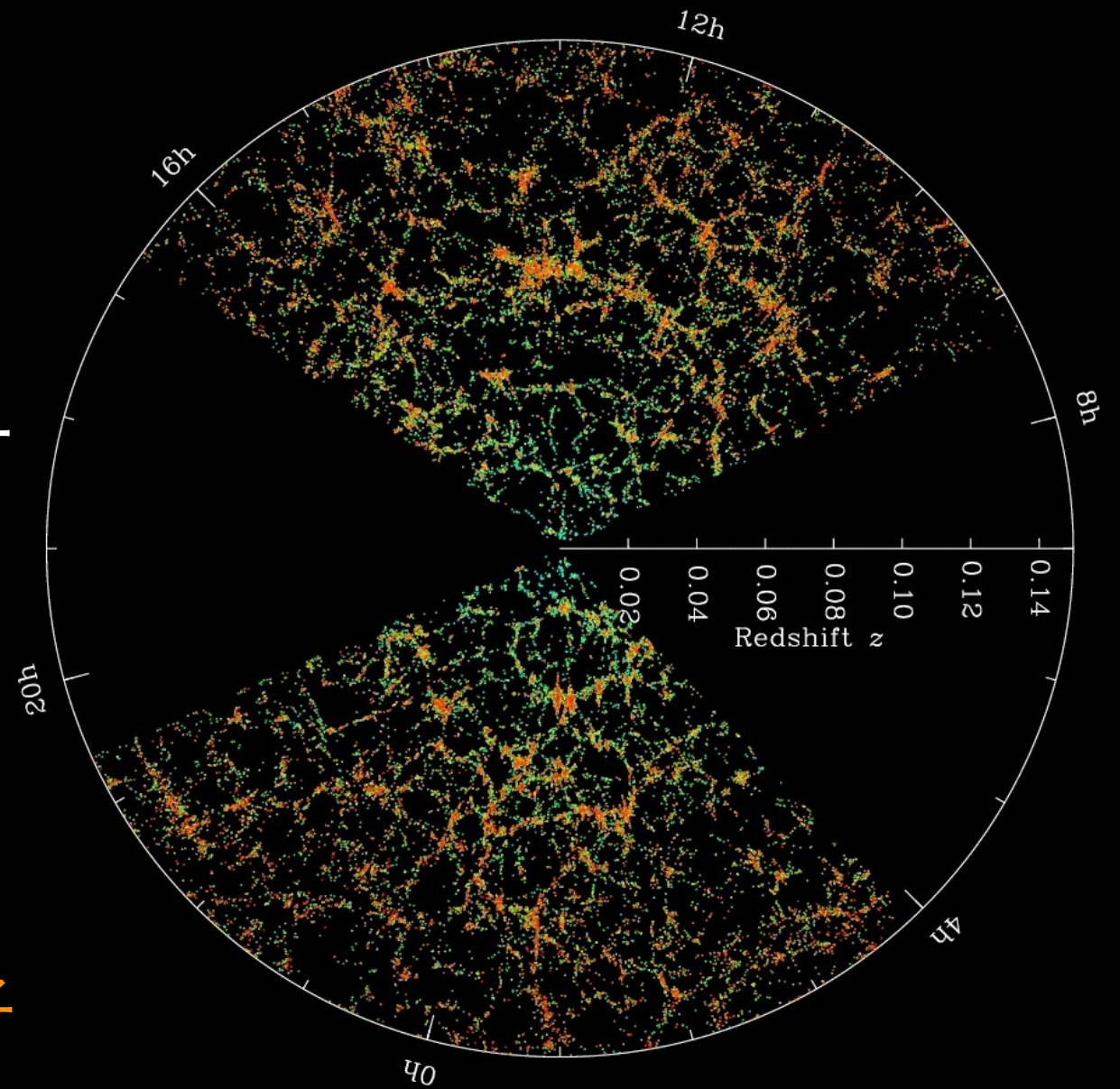


時間



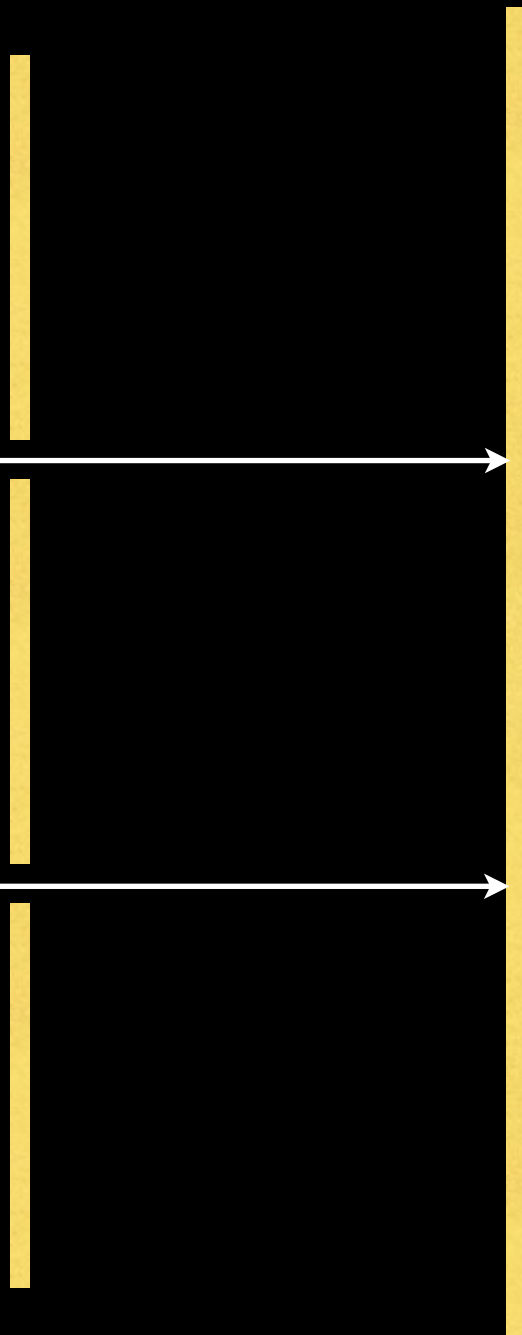
インフレーションの問題？

- インフレーションで
平ら、均一、等方に
- 対称的な宇宙
- 空っぽで冷たい
- インフレーションのエネルギー
を熱にかえる「ビッグバン」
- でもどうやってむら、そして
銀河、星ができた？
- 対称性を破らないといけない！
- 小さい宇宙ではミクロの素粒子
の法則：量子力学を使う



* Credit: M. Blanton and the Sloan Digital Sky Survey

粒は波



外村彰

* 提供：株式会社
日立製作所中央研究所

量子力学

- 不確定性関係
- 一回一回の結果は予言できない
- 粒子は波、波は粒子
- そして波は小さいところに押し込めると激しく揺らぐ

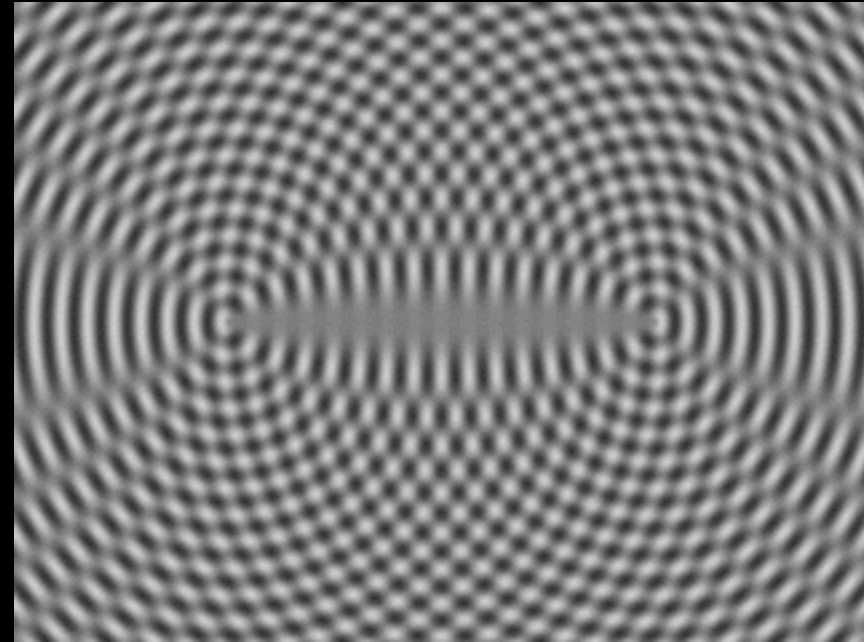
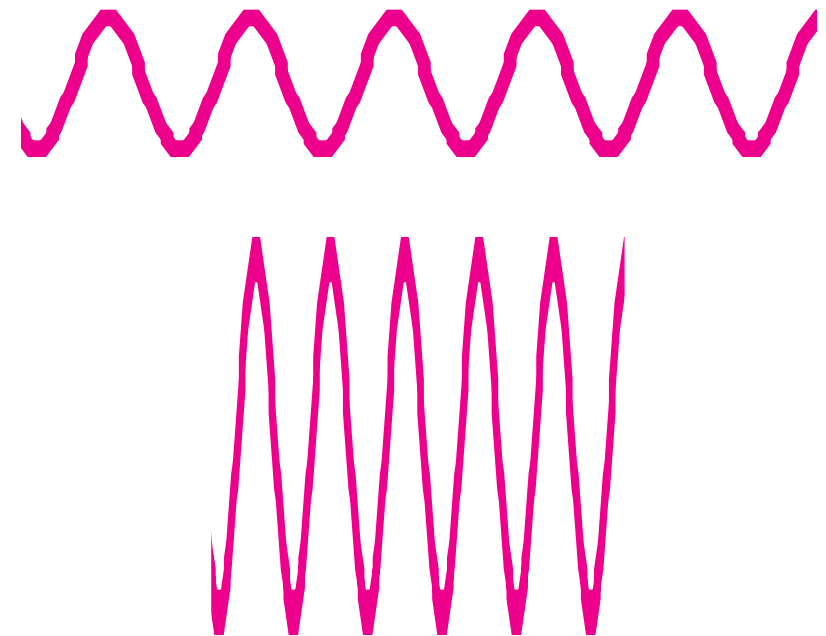


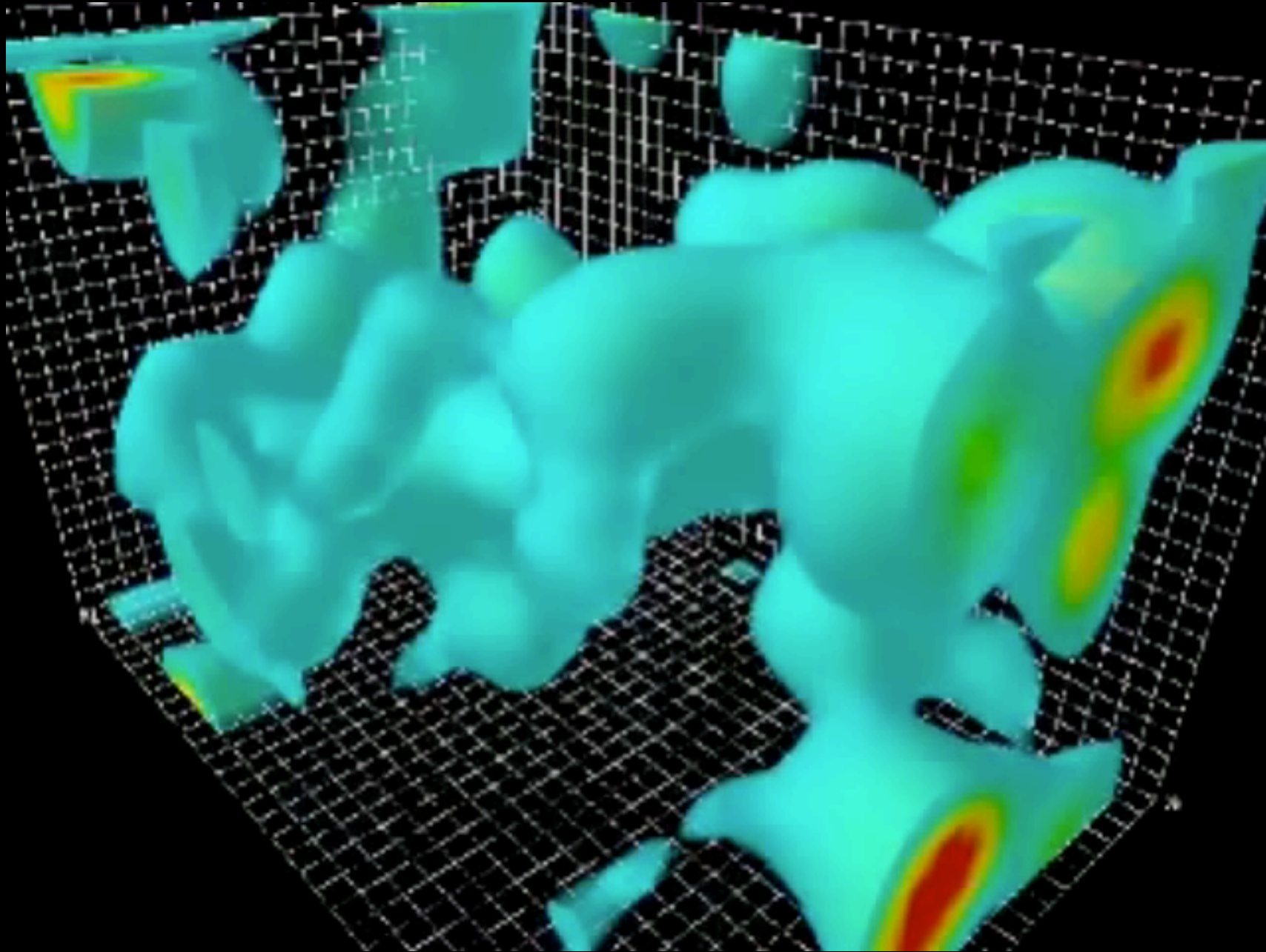
Photo by AndreaPersephone/Guanaco, from
Wikimedia Commons (2013/11/26) [CC BY-SA 3.0](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Interf.png)
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Interf.png>



量子ゆらぎ

- ミクロ世界の不確定性関係
- エネルギーの保存を破ってもいい
- 見つかる前に返さない
- 沢山借りる程早く返さないといけない
- 粒子と反粒子のペアを作る
- $\Delta E = 2mc^2$ 、 $\Delta t = \hbar / \Delta E$
- この時間の間に消滅させる

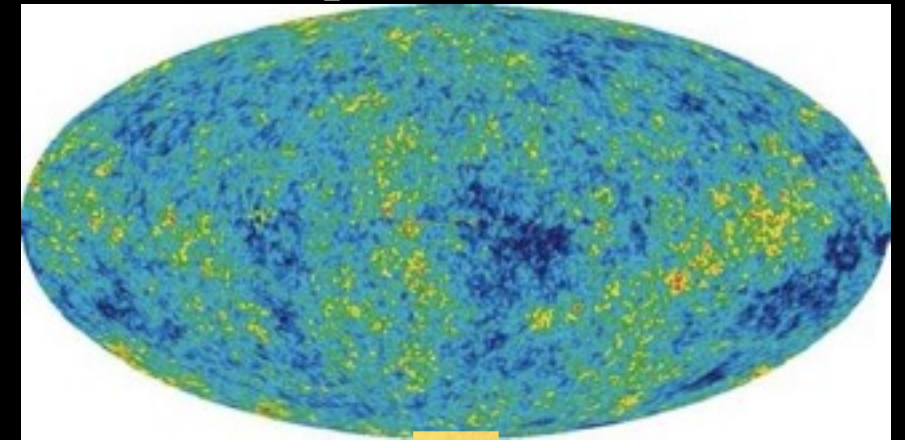
活発な真空



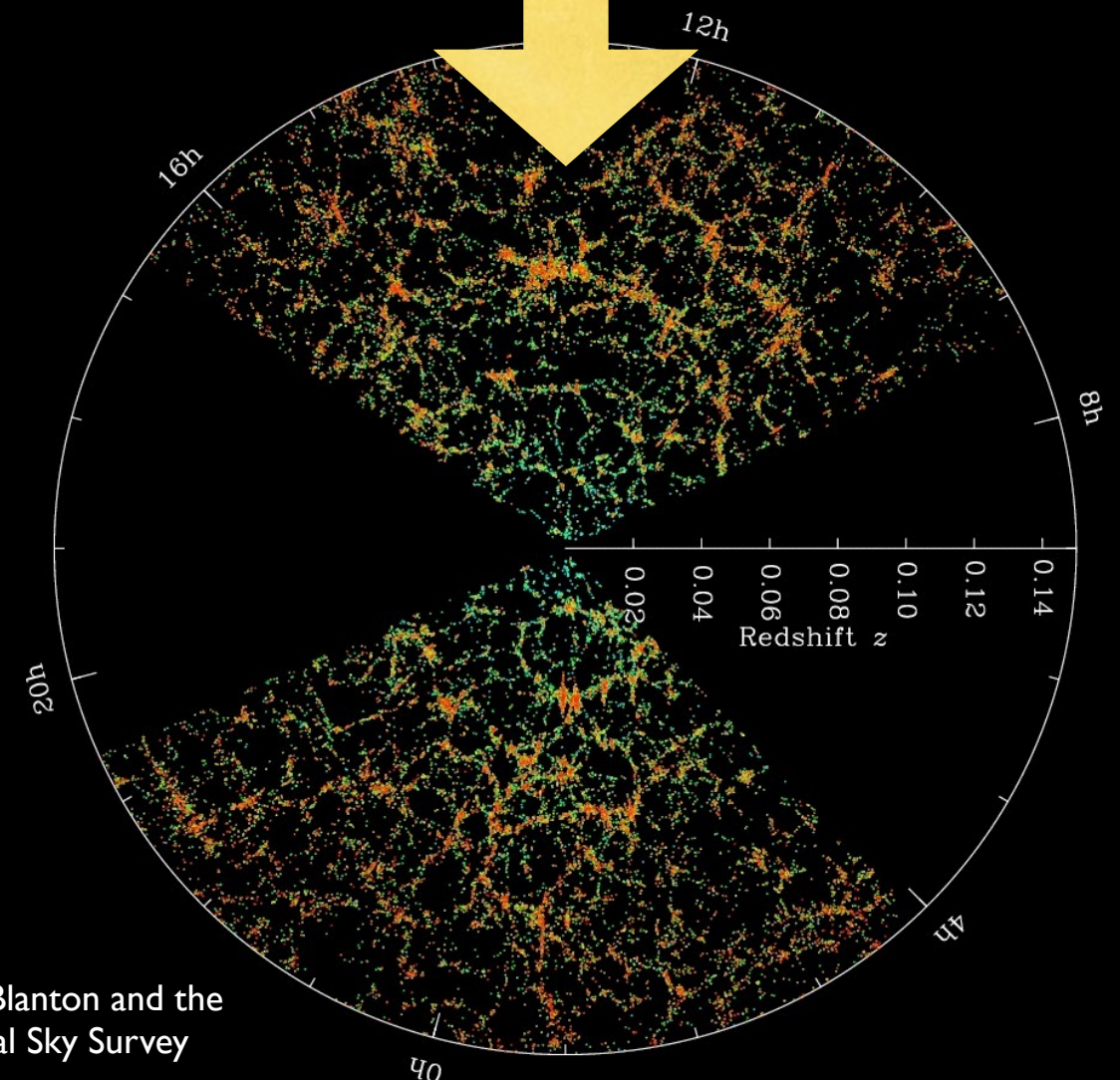
* Animation courtesy of Derek Leinweber,
CSSM, University of Adelaide
[http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/
staff/leinweber/VisualQCD/Nobel/index.html](http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/Nobel/index.html)

インフレーション

* Credit: NASA /
WMAP Science Team



- 宇宙が生まれてすぐミクロな大きさからマクロな大きさまで引き延ばされた
- そのときに不確定性関係でゆらぎができる
- ゆらぎも宇宙規模に引き延ばされる
- 100mの海に1mmのさざ波



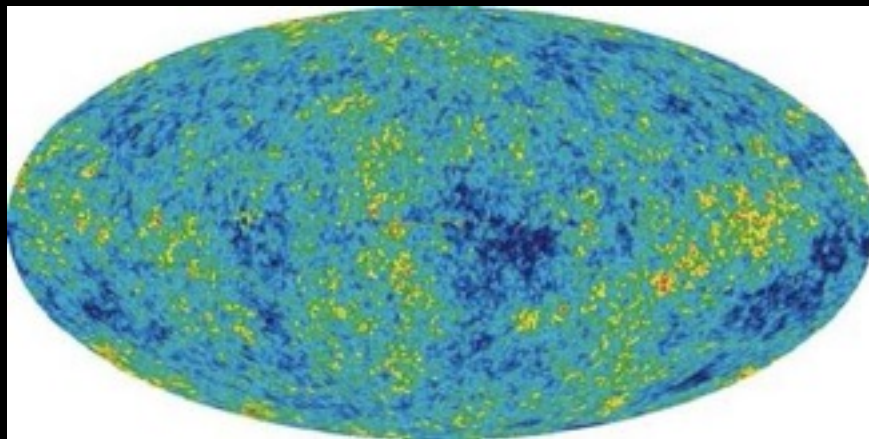
* Credit: M. Blanton and the
Sloan Digital Sky Survey



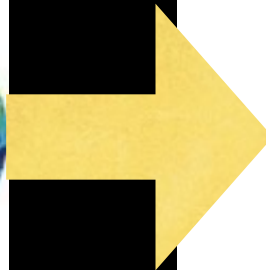
Photo by bram, from
flickr (2013/11/26)
CC BY-NC-ND 2.0
[www.flickr.com/photos/
bramapp/407809452/](http://www.flickr.com/photos/bramapp/407809452/)

インフレーションの 強まる証拠

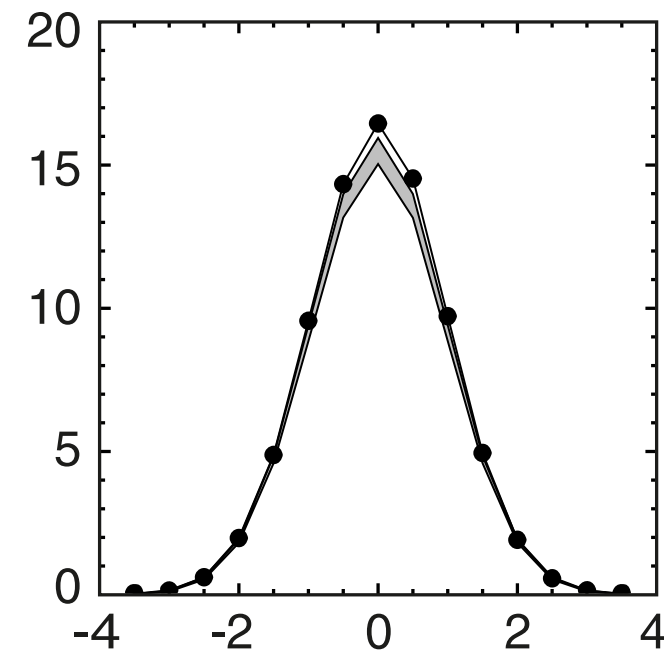
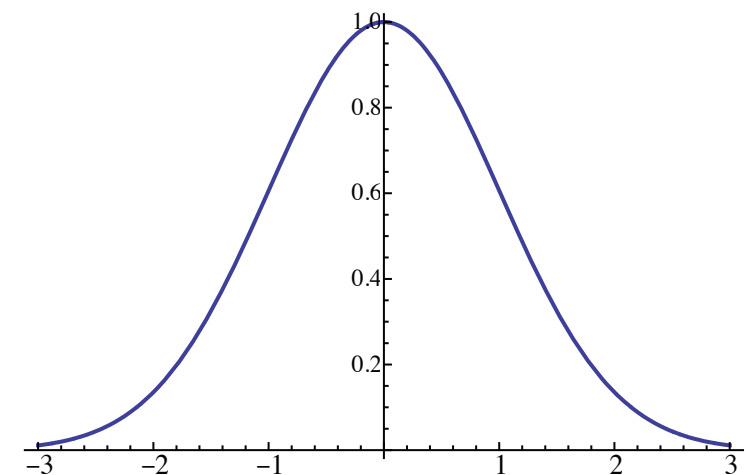
- 素粒子の量子揺らぎで
むらが出来たのなら、
むらはきれいな正規分
布のはず
- 確かに！



* Credit: NASA /
WMAP Science Team

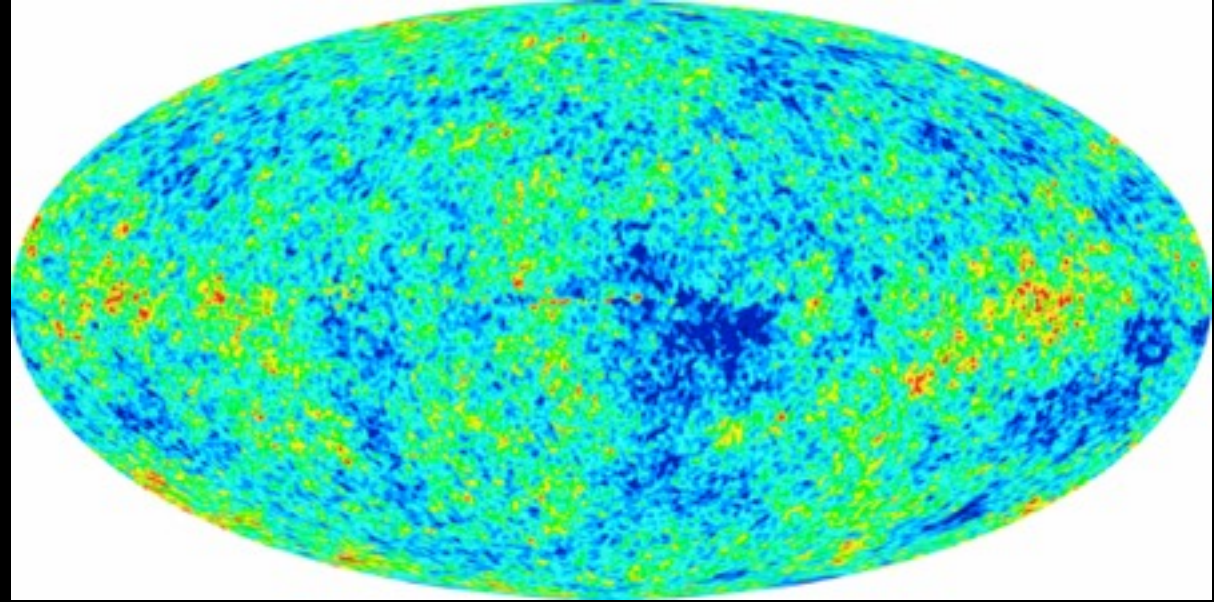


救の世つらばい



温度差

宇宙の果て

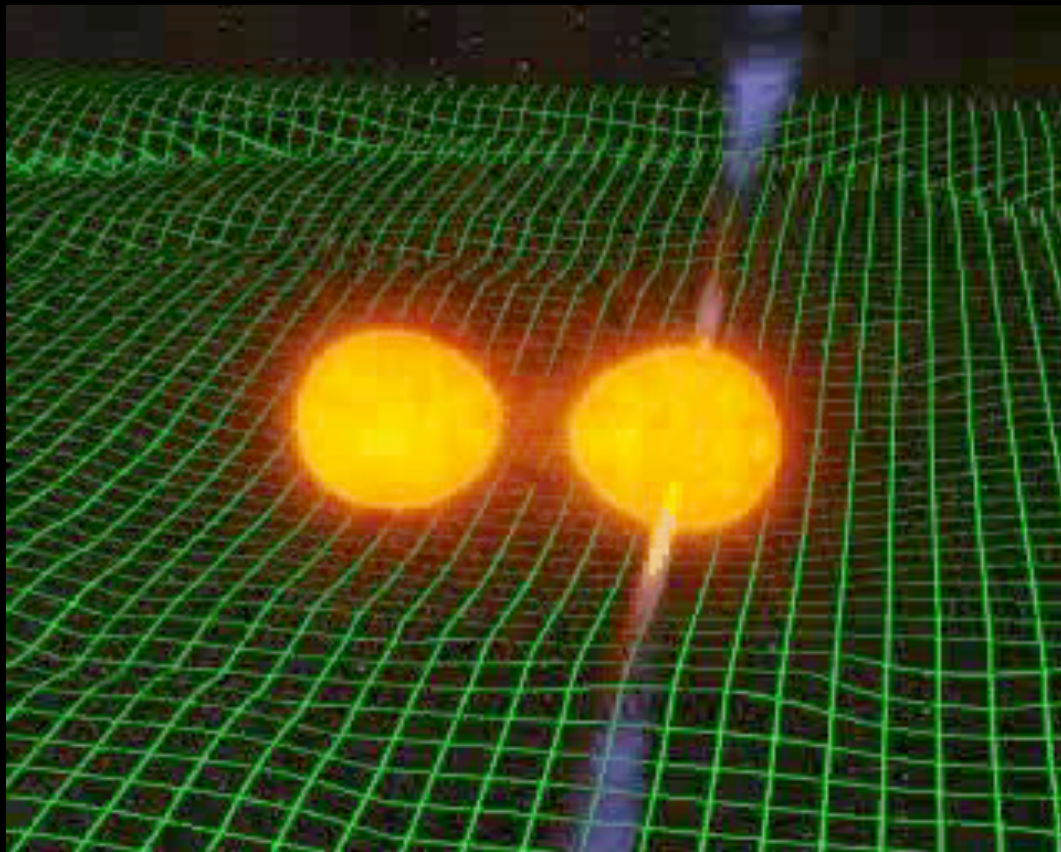


* Credit: NASA /
WMAP Science Team

- 138億光年向こうの壁
- 「果ての向こう」は光は届かない
- でも宇宙の始まりを知りたい！
- なんとか「見れ」ないか??
- 三つの手段
 - 加速器で宇宙を「作る」
 - 地下にもぐる
 - 重力波を探す

重力波

- アインシュタイン：空間は生きている



* Credit: John Rowe Animation
www.JohnRowe.org

著作権の都合上

ここに挿入されていた画像を削除しました

Image from "Black hole twins spew gravitational waves" by
Colin Stuart, Physicsworld.com (Apr 11, 2010)
<http://physicsworld.com/cws/article/news/2010/apr/11/black-hole-twins-spew-gravitational-waves>

インフレーションを 直接見る

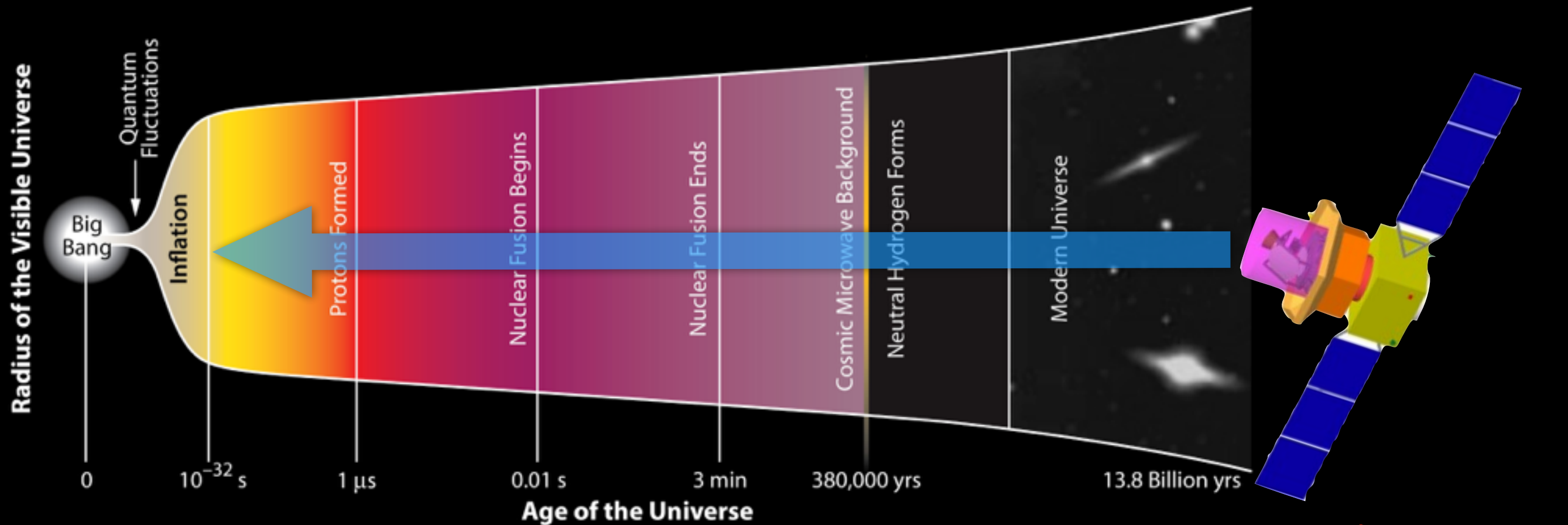
- インフレーション中は素粒子の揺らぎだけでなく、空間の揺らぎもおきた
- 重力波！
- 重力波が宇宙の残り火の電波に影響
- これを見ればインフレーションの時期が見える！

PolarBear

* Credit: KEK/CMB



LiteBIRD



* Image Credit:
[History of Universe]
BICEP2 Collaboration;
[spacecraft] LiteBIRDB
ワーキンググループ

計画中

Planck の1000倍の感度で
インフレーションを直接「見る」

History of the Universe

加速器

40万年

137億年

BIG BANG

Inflation

重力波! ヒッグス物質!

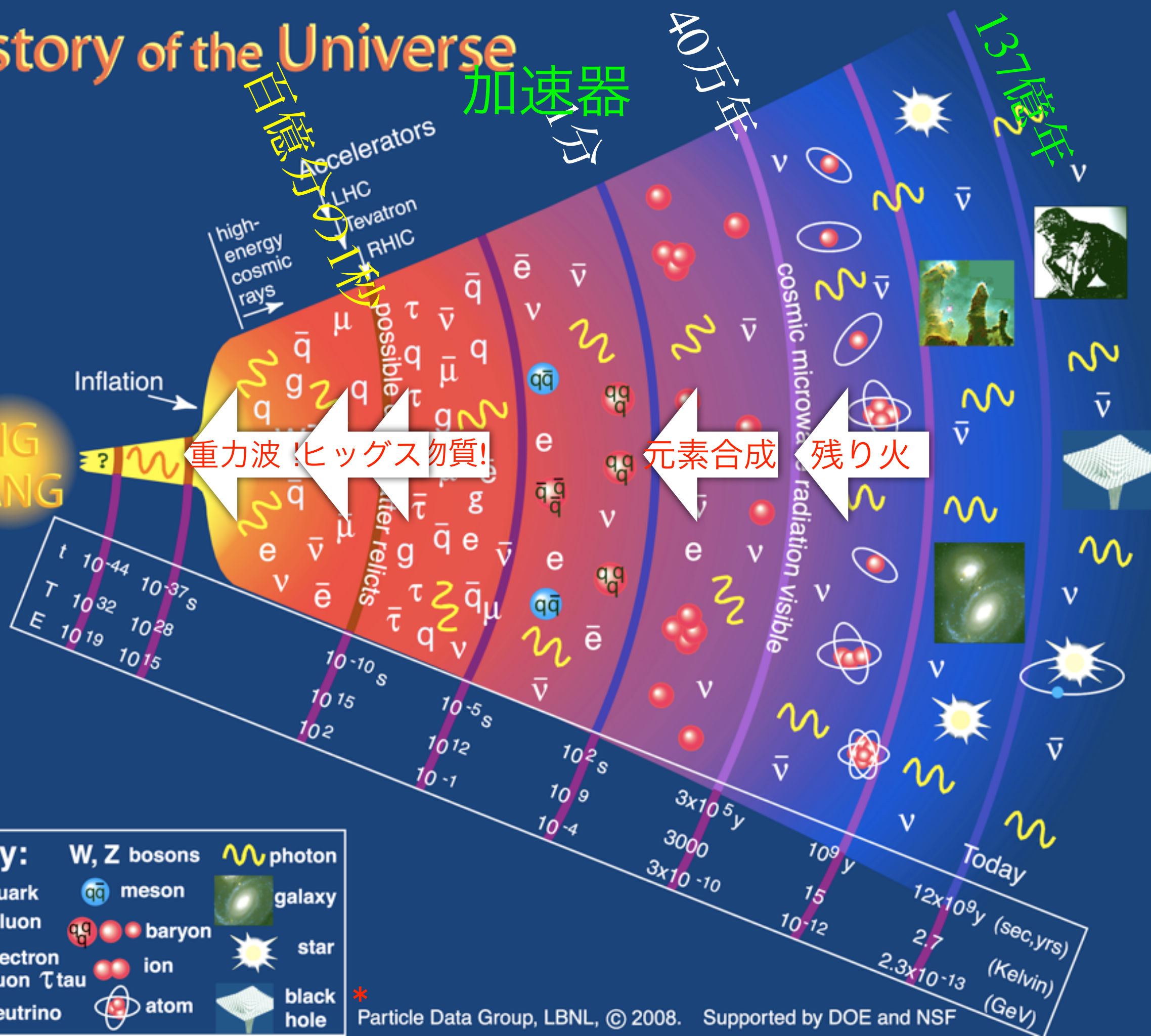
元素合成

残り火

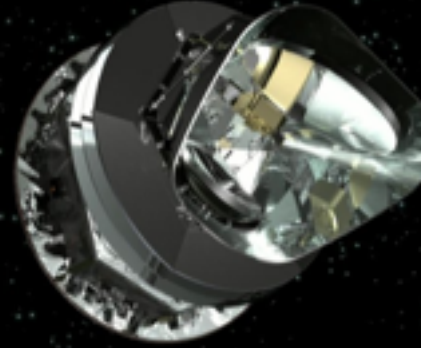
Key:	W, Z bosons	photon
q quark	meson	galaxy
g gluon	baryon	star
e electron	ion	black hole
μ muon τ tau		
ν neutrino	atom	

*

Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF



エネルギーの内訳



* Credit: ESA/
NASA/JPL-Caltech

宇宙の95%は未知！

- 星と銀河はたったの ~0.5%
- ニュートリノ ~0.1–0.7%
- 普通の物質（原子） 4.9%
- 暗黒物質 27%
- 暗黒エネルギー 68%
- 反物質 0%



- 星と銀河
- ニュートリノ
- 原子
- 暗黒物質
- 暗黒エネルギー



* Credit: KEK